



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

**Χρήση Αεροφυλακίου σε Αεριοστροβιλικές Μονάδες
για Ρύθμιση Συχνότητας και Αποθήκευση Ενέργειας
σε Ηλεκτρικά Συστήματα με Μεγάλη Αιολική
Διείσδυση – Εφαρμογή στο Αυτόνομο Σύστημα της
Ρόδου**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ιωάννης Γ. Κανδηλώρος

Επιβλέπων : Κωνσταντίνος Δ. Βουρνάς
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Νοέμβριος 2012



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

**Χρήση Αεροφυλακίου σε Αεριοστροβιλικές Μονάδες
για Ρύθμιση Συχνότητας και Αποθήκευση Ενέργειας
σε Ηλεκτρικά Συστήματα με Μεγάλη Αιολική
Διείσδυση – Εφαρμογή στο Αυτόνομο Σύστημα της
Ρόδου**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ιωάννης Γ. Κανδηλώρος

Επιβλέπων : Κωνσταντίνος Δ. Βουρνάς
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 2^η Νοεμβρίου 2012

.....
Κ. Βουρνάς
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Γ. Κορρές
Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Π. Γεωργιλάκης
Λέκτορας Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Νοέμβριος 2012

.....
Ιωάννης Γ. Κανδηλώρος
Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Ιωάννης Γ. Κανδηλώρος, 2012
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Περίληψη

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη της χρήσης αεροφυλακίου μικρής και μεγάλης κλίμακας σε αεριοστροβιλικές μονάδες, με στόχο τη ρύθμιση συχνότητας και αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας αντίστοιχα, σε συστήματα με μεγάλη αιολική διείσδυση.

Συγκεκριμένα, αναπτύχθηκε ένα μοντέλο αεροφυλακίου μικρής κλίμακας σε περιβάλλον Matlab/Simulink το οποίο ενσωματώθηκε στο μοντέλο μιας αεριοστροβιλικής μονάδας, με στόχο τη μεταβατική αύξηση της παραγόμενης ισχύος σε περιπτώσεις διαταραχών με την έγχυση πεπιεσμένου αέρα στο θάλαμο καύσης. Αφού περιγράφηκε το μοντέλο του αεριοστροβίλου με αεροφυλάκιο με διαφορικές εξισώσεις, συναρτήσεις μεταφοράς και μπλοκ διαγράμματα, αναλύθηκε ο τρόπος ελέγχου του αεροφυλακίου και εξηγήθηκε ο τρόπος υλοποίησής του στο περιβάλλον του Simulink. Ακολούθως, επιλέχθηκαν οι κατάλληλες τιμές των παραμέτρων λειτουργίας και προσομοιώθηκε το σύστημα αεριοστροβίλου-αεροφυλάκιο, θεωρώντας απομονωμένη λειτουργία γεννήτριας. Για το σκοπό αυτό θεωρήθηκαν διάφορες διαταραχές του ηλεκτρικού φορτίου, προκειμένου να αναδειχθούν τα πλεονεκτήματα της ένταξης του αεροφυλακίου στην αεριοστροβιλική μονάδα. Διαπιστώθηκε ότι το αεροφυλάκιο βελτιώνει σημαντικά την πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας και συνεισφέρει στη διατήρηση της ευστάθειας, αυξάνοντας την ικανότητα παραγωγής ισχύος, βελτιώνοντας τη μεταβατική απόκριση του αεριοστροβίλου και προσφέροντας στρεφόμενη εφεδρεία στο σύστημα.

Στη συνέχεια, αναπτύξαμε σε περιβάλλον Simulink του Matlab ένα μοντέλο συστήματος αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας υπό μορφή πεπιεσμένου αέρα το οποίο συνδυάστηκε με το μοντέλο μιας αεριοστροβιλικής μονάδας (Gas-Turbine Compressed Air Energy Storage), κατάλληλο για μελέτες ευστάθειας. Αφού περιγράφηκαν οι διατάξεις ελέγχου του μοντέλου GT-CAES με συναρτήσεις μεταφοράς και μπλοκ διαγράμματα, έγινε αναφορά στον τρόπο υλοποίησής του στο Simulink. Η παρούσα διπλωματική εργασία εστιάζει στην απόκριση του συστήματος σε περιπτώσεις διαταραχών του φορτίου ή της παραγωγής, και εξετάζει τον τρόπο με τον οποίο η αποθήκευση ενέργειας με πεπιεσμένο αέρα μπορεί να συνεισφέρει στην πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας και στη διατήρηση της ευστάθειας.

Στην πρώτη εφαρμογή το αεροφυλάκιο χρησιμεύει ως μέθοδος μεταβατικής αύξησης της παραγωγής ισχύος των αεριοστροβιλικών μονάδων σε περιπτώσεις διαταραχών, ενώ στη δεύτερη περίπτωση αποσκοπεί στην αποθήκευση μέρους της αιολικής ενέργειας σε συστήματα με αυξημένη αιολική διείσδυση.

Τέλος, τα μοντέλα των δύο μονάδων που αναπτύχθηκαν ενσωματώνονται στο αυτόνομο σύστημα της Ρόδου, όπου θεωρείται αυξημένη διείσδυση αιολικής ενέργειας στην ηλεκτροπαραγωγή, για διάφορα σενάρια παραγωγής-κατανάλωσης των συμβατικών μονάδων και των φορτίων αντίστοιχα. Ως διαταραχή επιλέχθηκε η απώλεια ενός σταθμού παραγωγής μια δεδομένη χρονική στιγμή. Η προσομοίωση του τροποποιημένου συστήματος της Ρόδου γίνεται με το λογισμικό πακέτο προσομοίωσης WHSSP (Wind-Hybrid System Simulation Package), το οποίο υλοποιείται σε περιβάλλον MATLAB/Simulink. Διαπιστώθηκε ότι με τη χρήση αεροφυλακίου ως μέθοδος μεταβατικής ενίσχυσης της παραγωγής του αεριοστροβίλου, αποφεύγονται οι αποκοπές φορτίων και βελτιώνεται σημαντικά η μεταβατική απόκριση του συστήματος της Ρόδου στην εξεταζόμενη διαταραχή. Στη συνέχεια εξετάστηκε η ένταξη στο σύστημα της Ρόδου του υβριδικού συστήματος GT-CAES σε

συνθήκες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, και προέκυψε ότι με τη χρήση του αεροφυλακίου μεγάλης κλίμακας επιτυγχάνεται ικανοποιητική απόκριση στην εξεταζόμενη διαταραχή, παρόμοια με αυτή μιας συμβατικής αεριοστροβλικής μονάδας ίδιας ονομαστικής ισχύος, με σημαντικά χαμηλότερη κατανάλωση καυσίμου και εκπομπές CO₂. Ακολούθως, προσομοιώθηκε το αυτόνομο σύστημα της Ρόδου σε συνθήκες πολύ μεγάλης αιολικής διείσδυσης, με τη μονάδα GT-CAES να αποθηκεύει αιολική ενέργεια με την έγχυση πεπιεσμένου αέρα στο αεροφυλάκιο. Διαπιστώθηκε ότι η δυνατότητα απόρριψης του φορτίου του ανεξάρτητου συμπιεστή επιτυγχάνει τη διατήρηση της ευστάθειας του συστήματος και την αποφυγή αποκοπής φορτίων στην εξεταζόμενη διαταραχή, προσφέροντας τη δυνατότητα παράλληλα της πλήρους απορρόφησης της αιολικής ισχύος.

Λέξεις Κλειδιά

Αεριοστροβλική μονάδα, αεροφυλάκιο, αποθήκευση ενέργειας, αιολικά πάρκα, ανεμογεννήτριες, ρύθμιση συχνότητας, ευστάθεια συστήματος, αιολική διείσδυση, συμπιεστής, στρόβιλος, θάλαμος καύσης, αυτόνομο σύστημα, αποκοπή φορτίων, αιχμή φορτίου, πεπιεσμένος αέρας, διαταραχή, κινητήρας, γεννήτρια, ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, συμβατικές μονάδες

Abstract

The scope of this diploma thesis is to study the integration of small-scale and large-scale air chambers into gas turbine units, for frequency regulation and energy storage respectively, in systems with high wind penetration.

In particular, a small-scale air-chamber model was developed in the Simulink environment of Matlab which was incorporated into the model of a gas turbine unit, in order to increase the power output of the modified gas turbine unit in cases of electric system disturbances, by injecting additional compressed air into the combustion chamber. Having described the model of the gas turbine unit with air-chamber with differential equations, transfer functions and block diagrams, the control system of air-chamber was designed and implemented in Simulink environment. Subsequently, the appropriate values of operating parameters were chosen and the modified unit was simulated, considering generator autonomous operation. For this purpose, rapid load changes were assumed, in order to highlight the advantages of the air reservoir integration into the gas turbine unit. It is concluded that air-chamber significantly improves the primary frequency regulation and contributes to the maintenance of stability, increasing unit's power capacity and providing system with extra spinning reserve.

Following this, a system model for energy storage in the form of compressed air was developed in the Matlab Simulink environment, which was combined with the model of a gas turbine unit (Gas-Turbine Compressed Air Energy Storage), suitable for stability studies. Having described the control system and the operation of the GT-CAES model with transfer functions and block diagrams, reference was made about the way of its implementation in Simulink. This thesis focuses on system response to rapid load changes or generation failures, and examines how energy storage with compressed air may contribute to primary frequency regulation and maintain frequency stability.

In the first application, the air-chamber serves as a transient gas turbine power increase method (power boost) in case of disturbances, while in the second case aims at wind energy storage in systems with increased wind penetration.

Finally, the models of the two units developed were integrated into Rhodes autonomous system, assuming increased wind energy penetration, for different production-consumption scenarios of conventional units and loads respectively. The loss of a power plant was chosen as system disturbance. The simulation of the modified system of Rhodes is conducted by WHSSP software simulation package (Wind-Hybrid System Simulation Package), which is implemented in the environment of MATLAB/Simulink. It was found that using an air-chamber as a method for transient boost of the gas turbine power production, load shedding is avoided and transient response of the modified Rhodes system is significantly improved. Subsequently, the integration into the Rhodes electrical system of the hybrid GT-CAES unit, under conditions of electricity generation, was studied. It was shown that the use of large-scale air-chamber for power generation satisfactorily contributes to frequency regulation, with response similar to that of a conventional gas turbine unit of the same nominal power, with significantly lower fuel consumption and CO₂ emissions. Finally, Rhodes electrical system was simulated under very high wind penetration conditions, using GT-CAES plant to store wind energy by injecting compressed air into the air chamber. It was found that the ability to disconnect the independent compressor motor, reinforces the stability of the system and

prevents from load shedding for the examined disturbance, while offering the possibility of full absorption of wind power.

Key Words

Gas-Turbine unit, air chamber, energy storage, wind parks, wind turbines, frequency regulation, system stability, wind energy penetration, compressor, turbine, autonomous system, load shedding, load peak, compressed air, CAES, disturbance, motor, generator, renewable energy sources, conventional units

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε υπό την επίβλεψη του καθηγητή κ. Κ. Δ. Βουρνά, καθηγητή της σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, τον οποίο και ευχαριστώ θερμά για την βοήθεια και τις συμβουλές του. Η στενή συνεργασία που είχαμε, οι πολύωρες συναντήσεις και το ενδιαφέρον που έδειξε για το αντικείμενο της διπλωματικής αυτής εργασίας συνέβαλαν καθοριστικά στο αποτέλεσμα. Επίσης τον ευχαριστώ για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε, την τυπικότητά του καθώς και για την κατανόησή του σε διάφορα θέματα που προέκυψαν κατά τη συγγραφή της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Τέλος, ευχαριστώ τον πατέρα μου Γιώργο, τη μητέρα μου Σεβαστή και τον αδερφό μου Παντελή, για τη συμπαράσταση, κατανόηση και στήριξή τους σε όλη αυτήν την προσπάθεια.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

| | |
|--|-----------|
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 : Εισαγωγή..... | 17 |
| 1.1 Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας..... | 17 |
| 1.2 Ευστάθεια Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας..... | 18 |
| 1.3 Ρύθμιση φορτίου – συχνότητας..... | 21 |
| 1.3.1 Γενικά..... | 21 |
| 1.3.2 Ρύθμιση συχνότητας..... | 22 |
| 1.3.3 Πρωτεύουσα ρύθμιση και στατισμός..... | 22 |
| 1.3.4 Δευτερεύουσα ρύθμιση..... | 23 |
| 1.3.5 Ρύθμιση συχνότητας σε αυτόνομο σύστημα..... | 24 |
| 1.4 Διείσδυση αιολικής ενέργειας στην ηλεκτροπαραγωγή..... | 25 |
| 1.4.1 Γενικά για Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας..... | 25 |
| 1.4.2 Προκλήσεις από τη διείσδυση της αιολικής ενέργειας..... | 26 |
| 1.5 Αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας..... | 31 |
| 1.5.1 Αναγκαιότητα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας..... | 31 |
| 1.5.2 Μέθοδοι αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας..... | 35 |
| 1.5.3 Σύγκριση μεθόδων αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας..... | 40 |
| 1.6 Επισκόπηση βιβλιογραφίας..... | 43 |
| 1.7 Αντικείμενο, σκοπός και δομή της διπλωματικής εργασίας..... | 44 |
| | |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 : Υπολογιστικό περιβάλλον WHSSP..... | 47 |
| 2.1 Περιγραφή προγράμματος WHSSP..... | 47 |
| 2.1.1 Γενικά..... | 47 |
| 2.1.2 Αλγεβρικές εξισώσεις του δικτύου..... | 48 |
| 2.1.3 Δομή διατάξεων ΣΗΕ και επίλυση δικτύου..... | 54 |
| 2.2 Σύγχρονη μηχανή..... | 57 |
| 2.2.1 Λειτουργία σύγχρονων μηχανών..... | 57 |
| 2.2.2 Μετασχηματισμός Park για τη σύγχρονη μηχανή..... | 59 |
| 2.2.3 Εξισώσεις κίνησης δρομέα..... | 60 |
| 2.2.4 Μοντέλο 4 ^{ης} τάξης της σύγχρονης μηχανής..... | 61 |
| 2.2.5 Σύγχρονη μηχανή σε περιβάλλον WHSSP..... | 65 |
| 2.3 Μηχανή επαγωγής..... | 67 |
| 2.3.1 Λειτουργία μηχανών επαγωγής..... | 67 |
| 2.3.2 Μετασχηματισμός Park για την ασύγχρονη μηχανή..... | 68 |
| 2.3.3 Μοντέλο 3 ^{ης} τάξης της ασύγχρονης μηχανής..... | 69 |
| 2.3.4 Μηχανικό φορτίο της ασύγχρονης μηχανής..... | 71 |
| 2.3.5 Μηχανή επαγωγής σε περιβάλλον WHSSP..... | 72 |
| 2.4 Ανεμογεννήτρια σταθερών στροφών με ασύγχρονη γεννήτρια βραχυκυκλωμένου δρομέα – Τύπου A..... | 73 |
| 2.4.1 Γενικά..... | 73 |
| 2.4.2 Μηχανικό μέρος..... | 74 |
| 2.4.3 Αεροδυναμικό μέρος..... | 76 |

| | | |
|-------|--|----|
| 2.4.4 | Ανεμογεννήτρια Τύπου Α σε περιβάλλον WHSSP..... | 77 |
| 2.5 | Ανεμογεννήτρια μεταβλητών στροφών με ασύγχρονη γεννήτρια διπλής τροφοδότησης (ΑΓΔΤ) - Τύπου Γ..... | 78 |
| 2.5.1 | Γενικά..... | 78 |
| 2.5.2 | Έλεγχος Ανεμογεννήτριας Τύπου Γ..... | 79 |
| 2.5.3 | Ανεμογεννήτρια Τύπου Γ σε περιβάλλον WHSSP..... | 81 |
| 2.6 | Ανεμογεννήτρια μεταβλητών στροφών με πλήρη μετατροπέα ισχύος - Τύπου Δ..... | 82 |
| 2.6.1 | Γενικά..... | 82 |
| 2.6.2 | Έλεγχος Ανεμογεννήτριας Τύπου Δ..... | 84 |
| 2.6.3 | Ανεμογεννήτρια Τύπου Δ σε περιβάλλον WHSSP..... | 86 |
| 2.7 | Ατμοηλεκτρική μονάδα..... | 87 |
| 2.7.1 | Ατμοπαραγωγός..... | 87 |
| 2.7.2 | Στρόβιλος ατμού..... | 88 |
| 2.7.3 | Ρυθμιστής στροφών..... | 90 |
| 2.7.4 | Ατμοστρόβιλος-ρυθμιστής στροφών σε περιβάλλον WHSSP..... | 91 |
| 2.8 | Νηξελοηλεκτρικός σταθμός..... | 92 |
| 2.8.1 | Περιγραφή μοντέλου..... | 92 |
| 2.8.2 | Νηξελομηχανή σε περιβάλλον WHSSP..... | 93 |
| 2.9 | Αυτόματος ρυθμιστής τάσης..... | 93 |
| 2.9.1 | Γενικά..... | 93 |
| 2.9.2 | Αυτόματος ρυθμιστής τάσης σε περιβάλλον WHSSP..... | 96 |

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 : Αποθήκευση και παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με τη μορφή πεπιεσμένου αέρα.....97

| | | |
|---------|--|-----|
| 3.1 | Περιγραφή συστήματος αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας με πεπιεσμένο αέρα (CAES)..... | 97 |
| 3.1.1 | Γενικά..... | 97 |
| 3.1.2 | Συμπύεση..... | 101 |
| 3.1.3 | Εκτόνωση..... | 101 |
| 3.1.4 | Εξομάλυνση ισχύος αιολικών πάρκων – Ρύθμιση φορτίου..... | 102 |
| 3.2 | Πλεονεκτήματα συστημάτων CAES..... | 103 |
| 3.2.1 | Γενικά..... | 103 |
| 3.2.2 | Μείωση κατανάλωσης νερού..... | 105 |
| 3.2.3 | Μείωση εκπομπών CO ₂ | 106 |
| 3.2.4 | Ρυθμός απόκρισης..... | 106 |
| 3.2.5 | Βελτίωση ποιότητας συστήματος μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας..... | 106 |
| 3.3 | Τύποι συστημάτων CAES..... | 107 |
| 3.3.1 | Γενικά..... | 107 |
| 3.3.2 | Συστήματα CAES πρώτης γενιάς..... | 107 |
| 3.3.3 | Συστήματα CAES δεύτερης γενιάς..... | 110 |
| 3.3.3.1 | CAES συνδυασμένου κύκλου..... | 111 |
| 3.3.3.2 | CAES με κύκλο έγχυσης ατμού..... | 112 |
| 3.3.3.3 | CAES με ύγρανση..... | 112 |
| 3.3.3.4 | CAES με ανεξάρτητη λειτουργία συμπιεστών και στροβίλων..... | 113 |
| 3.3.3.5 | CAES με αεριοστροβλική μονάδα - έγχυση αέρα (CAES – Air Injection (AI))..... | 115 |

| | |
|---|-----|
| 3.3.3.6 CAES με αεριοστροβλική μονάδα και ανεξάρτητο στρόβιλο αέρος (CAES - Expander)..... | 117 |
| 3.3.3.7 CAES με αεριοστροβλική μονάδα και ανεξάρτητο στρόβιλο αέρος υψηλής πίεσης - έγχυση αέρα (CAES – AI & HP Expander)..... | 118 |
| 3.3.3.8 CAES με αεριοστροβλική μονάδα και ανεξάρτητο στρόβιλο αέρος υψηλής και χαμηλής πίεσης - έγχυση αέρα (CAES – AI & HP-LP Expander)... | 120 |
| 3.3.3.9 CAES με αεριοστροβλική μονάδα και ανεξάρτητο στρόβιλο αέρος – ψύξη εισόδου (CAES – IC & Expander)..... | 122 |
| 3.3.4 Συστήματα CAES τρίτης γενιάς..... | 123 |
| 3.3.5 Σύγκριση διαφορετικών υλοποιήσεων συστημάτων CAES..... | 126 |
| 3.4 Εγκαταστάσεις αποθήκευσης του πεπιεσμένου αέρα..... | 128 |
| 3.4.1 Υπέργεια συστήματα αποθήκευσης του πεπιεσμένου αέρα..... | 129 |
| 3.4.2 Υπόγεια συστήματα αποθήκευσης του πεπιεσμένου αέρα..... | 130 |
| 3.5 Υφιστάμενες και υπό κατασκευή μονάδες CAES..... | 132 |
| 3.5.1 Μονάδα CAES στο Huntorf (Γερμανία)..... | 132 |
| 3.5.2 Μονάδα CAES στο McIntosh (Η.Π.Α.)..... | 135 |
| 3.5.3 Μονάδα CAES στην Iowa (Η.Π.Α.)..... | 136 |
| 3.5.4 Μονάδα CAES στο Norton (Η.Π.Α.)..... | 137 |
| 3.5.5 Μονάδα CAES στην περιοχή Matagorda (Η.Π.Α.)..... | 137 |
| 3.5.6 Συμπεράσματα από την έως τώρα λειτουργία των μονάδων CAES..... | 139 |
| 3.5.7 Συστήματα CAES στην αγορά ηλεκτρικής ενέργειας..... | 140 |

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 : Μοντέλο αεριοστροβίλου με ενσωματωμένο αεροφυλάκιο...143

| | |
|---|-----|
| 4.1 Θερμοδυναμικές εξισώσεις μοντέλου αεριοστροβίλου-αεροφυλακίου..... | 143 |
| 4.1.1 Παράσταση αεριοστροβίλου και αεροφυλακίου..... | 143 |
| 4.1.2 Συμπιεστής..... | 146 |
| 4.1.3 Θάλαμος καύσης..... | 149 |
| 4.1.4 Στρόβιλος..... | 150 |
| 4.1.5 Αεροφυλάκιο - Δικλείδα αέρα..... | 151 |
| 4.1.6 Προσδιορισμός σημείου λειτουργίας..... | 151 |
| 4.2 Διατάξεις ελέγχου και συναρτήσεις μεταφοράς μοντέλου αεριοστροβίλου-αεροφυλακίου..... | 154 |
| 4.2.1 Γενικά..... | 154 |
| 4.2.2 Εξισώσεις ενεργειακής μετατροπής..... | 157 |
| 4.2.3 Δυναμική συμπεριφορά αεριοστροβίλου..... | 157 |
| 4.2.4 Μηχανικό μοντέλο γεννήτριας..... | 158 |
| 4.2.5 Ρυθμιστής στροφών..... | 159 |
| 4.2.6 Μετρητής θερμοκρασίας..... | 162 |
| 4.2.7 Έλεγχος υπερθέρμανσης..... | 163 |
| 4.2.8 Έλεγχος καυσίμου..... | 165 |
| 4.2.9 Έλεγχος της ροής του αέρα (οδηγία πτερύγια εισόδου)..... | 166 |
| 4.2.10 Έλεγχος αεροφυλακίου..... | 168 |
| 4.3 Υλοποίηση του ελέγχου αεροφυλακίου στο Simulink..... | 176 |
| 4.3.1 Έλεγχος συχνότητας..... | 176 |
| 4.3.2 Έλεγχος ισχύος..... | 185 |

| | |
|---|------------|
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 : Προσομοίωση λειτουργίας αεριοστροβίλου με αεροφυλάκιο σε σύστημα γεννήτριας-απομονωμένου φορτίου..... | 191 |
| 5.1 Δεδομένα και επιλογή παραμέτρων..... | 191 |
| 5.2 Αρχικοποίηση μοντέλου..... | 194 |
| 5.3 Προσομοίωση λειτουργίας και σχολιασμός αποκρίσεων..... | 199 |
| 5.3.1 Βηματική αύξηση του φορτίου στο 100%..... | 199 |
| 5.3.2 Μεταβατική αύξηση του φορτίου στο 120%..... | 210 |
| 5.3.3 Βηματική αύξηση του φορτίου στο 105%..... | 222 |
| | |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 : Υβριδικό μοντέλο αποθήκευσης και παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με τη μορφή πεπιεσμένου αέρα..... | 229 |
| 6.1 Περιγραφή μοντέλου GT-CAES..... | 229 |
| 6.1.1 Δομή και λειτουργία μονάδας GT-CAES..... | 229 |
| 6.1.2 Αεροφυλάκιο (CH)..... | 232 |
| 6.1.3 Ανεξάρτητος συμπιεστής (C_{cs})..... | 234 |
| 6.1.4 Διατάξεις ελέγχου ανεξάρτητου συμπιεστή C_{cs} | 234 |
| 6.1.5 Ανεξάρτητος στρόβιλος (T_{cs})..... | 237 |
| 6.1.6 Διατάξεις ελέγχου ανεξάρτητου στροβίλου T_{cs} | 239 |
| 6.1.7 Εναλλάκτης θερμότητας (E)..... | 240 |
| 6.1.8 Αεριοστροβιλική μονάδα (GT) – ηλεκτρικές μηχανές (G_1, G_2, M)..... | 243 |
| 6.1.9 Ολοκληρωμένο μοντέλο μονάδας GT-CAES..... | 245 |
| 6.2 Παράσταση μοντέλου GT-CAES στο Simulink..... | 247 |
| 6.2.1 Υλοποίηση μοντέλου..... | 247 |
| | |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 : Αεριοστροβίλος με αεροφυλάκιο - Μονάδα GT-CAES στο αυτόνομο σύστημα της Ρόδου..... | 251 |
| 7.1 Περιγραφή του αυτόνομου συστήματος της Ρόδου..... | 251 |
| 7.2 Προσομοίωση του αυτόνομου συστήματος της Ρόδου – Αεριοστροβιλική μονάδα με αεροφυλάκιο..... | 266 |
| 7.2.1 Περιγραφή Σεναρίου..... | 266 |
| 7.2.2 Αποτελέσματα προσομοίωσης..... | 267 |
| 7.3 Προσομοίωση του αυτόνομου συστήματος της Ρόδου – Μονάδα GT-CAES σε κατάσταση παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας..... | 289 |
| 7.3.1 Περιγραφή Σεναρίου..... | 289 |
| 7.3.2 Αποτελέσματα προσομοίωσης..... | 293 |
| 7.4 Προσομοίωση του αυτόνομου συστήματος της Ρόδου – Μονάδα GT-CAES σε κατάσταση αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας..... | 303 |
| 7.4.1 Περιγραφή Σεναρίου..... | 303 |
| 7.4.2 Αποτελέσματα προσομοίωσης..... | 307 |
| 7.4.3 Απόκριση του συστήματος της Ρόδου χωρίς αποθήκευση αιολικής ενέργειας...317 | |

| | |
|--|------------|
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 : Συμπεράσματα και προοπτικές..... | 321 |
| 8.1 Ανασκόπηση διπλωματικής εργασίας..... | 321 |
| 8.2 Συμπεράσματα..... | 322 |
| 8.2.1 Αεριοστροβιλική μονάδα με ενσωματωμένο αεροφυλάκιο..... | 322 |
| 8.2.2 Μονάδα παραγωγής και αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας με τη χρήση πεπιεσμένου αέρα..... | 325 |
| 8.3 Προοπτικές για περαιτέρω έρευνα..... | 326 |
| 8.3.1 Αεριοστροβιλική μονάδα με ενσωματωμένο αεροφυλάκιο..... | 326 |
| 8.3.2 Μονάδα παραγωγής και αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας με τη χρήση πεπιεσμένου αέρα..... | 327 |
| Βιβλιογραφία..... | 329 |

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Εισαγωγή

1.1 Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας

Το μεγάλο πλεονέκτημα του ηλεκτρισμού, το οποίο οδήγησε τόσο γρήγορα στην ευρεία χρήση του, είναι ότι αποτελεί μια καθαρή στη χρήση της μορφή ενέργειας, της οποίας η μεταφορά και η διανομή είναι εύκολη και με σχετικά μικρές απώλειες. Ταυτόχρονα το γεγονός της ταχείας ανάπτυξης ηλεκτρικών συσκευών και ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού που καλύπτει το σύνολο σχεδόν των παραγωγικών και οικιακών αναγκών, είχε ως αποτέλεσμα την ραγδαία αύξηση της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας [4].

Ως σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας (Σ.Η.Ε.) ορίζεται το σύνολο των εγκαταστάσεων και μέσων που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή, μεταφορά και διανομή ενέργειας στους καταναλωτές. Προκειμένου να λειτουργεί ορθά το σύστημα, οφείλει να παρέχει ηλεκτρική ενέργεια όπου και όταν υπάρχει ζήτηση, με τα ελάχιστα δυνατά κόστη. Η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια πρέπει να ακολουθεί ορισμένες ποιοτικές προδιαγραφές: α) σταθερή συχνότητα, β) σταθερή τάση και γ) υψηλή αξιοπιστία τροφοδοτήσεως.

Το σύστημα παραγωγής περιλαμβάνει τους σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και τους υποσταθμούς ανυψώσεως της τάσης για την μεταφορά της. Στη φάση της παραγωγής πραγματοποιείται η μετατροπή μιας πρωτογενούς μορφής ενέργειας σε μηχανική και στη συνέχεια σε ηλεκτρική μέσω των γεννητριών. Οι πιο σημαντικοί σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας είναι οι θερμοηλεκτρικοί, όπου η ενέργεια παράγεται μετά από καύση ορυκτών καυσίμων (άνθρακας, λιγνίτης, πετρέλαιο, φυσικό αέριο), οι υδροηλεκτρικοί όπου η ενέργεια προέρχεται από τη ροή ή την πτώση υδάτων, οι πυρηνικοί όπου συμβαίνει πυρηνική σχάση (ουράνιο, θόριο, πλουτόνιο) και οι σταθμοί ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπου γίνεται εκμετάλλευση του ανέμου, των θαλασσιών κυμάτων, του ήλιου, της γεωθεμίας, της βιομάζας κτλ.

Το σύστημα μεταφοράς περιλαμβάνει τα δίκτυα των γραμμών υψηλής τάσης, τους υποσταθμούς ζεύξεως των δικτύων, τους υποσταθμούς μετασχηματισμού μεταξύ των διαφόρων επιπέδων τάσεως του δικτύου και τους υποσταθμούς υποβιβασμού της τάσεως σε μέση τάση. Η μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας πραγματοποιείται σε υψηλές τάσεις, διότι συνεπάγεται μικρότερες ηλεκτρικές απώλειες και επομένως πιο οικονομική λειτουργία. Αναλόγως της απόστασης και της μεταφερόμενης ισχύος χρησιμοποιούνται διάφορα επίπεδα τάσεων κατά το στάδιο της μεταφοράς. Ενδεικτικά αναφέρουμε τις τιμές : 66 kV, 110 kV, 132 kV, 150 kV, 220 kV (υψηλές τάσεις), 275 kV, 345 kV, 400 kV, 500 kV (υπερυψηλές τάσεις), 750 kV και πειραματικά 1100 kV και 1500 kV (εξαιρετικά υψηλές τάσεις). Σε ορισμένες περιπτώσεις χρησιμοποιείται και συνεχές ρεύμα υψηλής τάσης, επειδή παρουσιάζει κάποια πλεονεκτήματα, κυρίως στη μεταφορά μέσω υποβρύχιων καλωδίων. Τα δίκτυα μεταφοράς οργανώνονται κατά κανόνα σε βροχοειδή διάταξη, ώστε να δημιουργούνται περισσότεροι συνδυασμοί διαδρομών της ενέργειας και να επιτυγχάνεται καλύτερη οικονομία λειτουργίας. Σημειώνεται ότι στο σύστημα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας ανήκουν επίσης και οι εξωτερικές διασυνδέσεις του συστήματος με γειτονικά Σ.Η.Ε.

Τα δίκτυα διανομής περιλαμβάνουν τις γραμμές μέσης και χαμηλής τάσης, μέσω των οποίων η ηλεκτρική ενέργεια φτάνει στους τελικούς καταναλωτές, καθώς και τους υποσταθμούς υποβιβασμού ΜΤ/ΧΤ. Τα δίκτυα διανομής μπορεί να είναι υπόγεια (π.χ. σε πυκνοκατοικημένα αστικά κέντρα) ή εναέρια. Η διάταξή τους είναι συνήθως βροχοειδής, αλλά λειτουργούν ακτινικά.

Παρά τις διαφορές στο μέγεθος, κυρίως, των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας, υπάρχουν κάποια κοινά χαρακτηριστικά μεταξύ τους. Συγκεκριμένα, η πλειοψηφία των ΣΗΕ είναι τριφασικά εναλλασσόμενου ρεύματος και συχνότητας 50 ή 60 Hz (για τα ελληνικά και γενικότερα τα ευρωπαϊκά 50 Hz), σε εξαιρετικές, όμως, περιπτώσεις είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί και συνεχές ρεύμα στη μεταφορά, όπως αναφέρθηκε. Η τάση των ζυγών του συστήματος παραμένει σταθερή στην κανονική λειτουργία, οι γραμμές μεταφοράς και οι γραμμές διανομής μέσης τάσης έχουν τρεις αγωγούς φάσεων, ενώ οι γραμμές διανομής χαμηλής τάσης έχουν επιπλέον ουδέτερο αγωγό (ωστόσο υπάρχουν και μονοφασικές γραμμές χαμηλής τάσης δύο αγωγών).

Ένα ΣΗΕ από άποψη έκτασης, μπορεί να είναι Εθνικό, Περιφερειακό ή Ιδιωτικό και αναλόγως του αν υπάρχει δυνατότητα διασύνδεσής του με μεγαλύτερο δίκτυο, το σύστημα αυτό μπορεί να είναι διασυνδεδεμένο ή αυτόνομο. Ο λόγος που επιδιώκεται να υπάρχει διασύνδεση είναι γιατί αυτό εξασφαλίζει σταθερότητα στην τάση και τη συχνότητα του δικτύου. Σε περιπτώσεις όπου η διασύνδεση δεν είναι εφικτή, έχουμε τα αυτόνομα δίκτυα, τα οποία είναι πιο επιρρεπή σε απότομες μεταβολές του φορτίου. Τέτοια συστήματα συναντώνται ευρέως σε ελληνικά νησιά όπου δεν υπάρχει η δυνατότητα διασύνδεσης στο Εθνικό δίκτυο. Για να υπάρχει αξιοπιστία στην απόκριση ενός τέτοιου δικτύου οι επιμέρους διατάξεις του πρέπει να ανταποκρίνονται αποτελεσματικά στις μεταβολές του φορτίου.

Η διαρκής αύξηση των ενεργειακών αναγκών και η συνακόλουθη αύξηση των ηλεκτρικών φορτίων έχουν σαν αποτέλεσμα την απαίτηση όλο και μεγαλύτερης μεταφοράς ηλεκτρικής ισχύος μέσω των ηλεκτρικών δικτύων. Ωστόσο, η επέκταση των δικτύων μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, ώστε να καλυφθούν οι αυξανόμενες ανάγκες των κέντρων κατανάλωσης, καθίσταται ολοένα και δυσκολότερη τα τελευταία χρόνια είτε λόγω περιβαλλοντικών (κυρίως στον ανεπτυγμένο κόσμο), είτε λόγω οικονομικών (στον αναπτυσσόμενο κόσμο) περιορισμών. Επομένως, η διαρκής αύξηση της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας, ειδικά στα αστικά και βιομηχανικά κέντρα, επιβάλλει την εντατικότερη χρήση των διαθέσιμων δικτύων μεταφοράς, με αποτέλεσμα τη λειτουργία του συστήματος ολοένα και πιο κοντά στο όριο της ικανότητας μεταφοράς [18]. Το πρόβλημα αυτό δύναται να επιλυθεί σε έναν βαθμό, με την αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας σε περιόδους χαμηλής ζήτησης και την επιστροφή της στο δίκτυο σε περιόδους αιχμής του φορτίου. Κατ' αυτόν τον τρόπο η ροή ισχύος στις γραμμές μεταφοράς γίνεται πιο ομαλή με μικρότερες διακυμάνσεις.

1.2 Ευστάθεια Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας

Η ευστάθεια είναι μια βασική ιδιότητα που πρέπει να χαρακτηρίζει τη λειτουργία ενός ΣΗΕ. Το σύστημα χαρακτηρίζεται ευσταθές όταν, αφού υποστεί κάποια διαταραχή, τείνει να επανέλθει σε μόνιμη κατάσταση λειτουργίας κοντά στην αρχική. Αντίθετα, χαρακτηρίζεται ως ασταθές όταν υφιστάμενο κάποια διαταραχή δεν επανέρχεται σε μόνιμη κατάσταση. Τα ΣΗΕ είναι δυναμικά μη γραμμικά συστήματα τα οποία υφίστανται συνεχώς πολλές μικρές ή

μεγάλες διαταραχές που οφείλονται στη διαρκώς μεταβαλλόμενη ζήτηση φορτίων, σε πιθανές βλάβες του δικτύου ή των γεννητριών, σε βραχυκυκλώματα και άλλα σφάλματα. Η δυναμική και μη γραμμική συμπεριφορά των ΣΗΕ προέρχεται από το γεγονός ότι αποτελούνται από ένα μεγάλο αριθμό στοιχείων με τέτοιο χαρακτήρα (γεννήτριες, κινητήρες) αλλά και πολλά ανόμοια είδη φορτίων. Οι προκύπτουσες διαταραχές έχουν διάρκεια που μπορεί να κυμαίνεται από χιλιοστά του δευτερολέπτου μέχρι και μερικά λεπτά και χωρίζονται στις εξής κατηγορίες [55]:

- Ηλεκτρομαγνητικά μεταβατικά φαινόμενα, που διαρκούν από μερικά μικροδευτερόλεπτα έως μερικά χιλιοστά του δευτερολέπτου (π.χ. υπερτάσεις χειρισμών, τάσεις αποκατάστασης, κ.α.)
- Ηλεκτρομηχανικά μεταβατικά φαινόμενα, τα οποία διαρκούν από μερικά δέκατα του δευτερολέπτου μέχρι μερικά δευτερόλεπτα (απόκριση συστήματος μετά από μικρές και μεγάλες διαταραχές, απώλεια συγχρονισμού κ.α.)
- Ενεργειακά μεταβατικά φαινόμενα, που διαρκούν μέχρι μερικά πρώτα λεπτά (αυτόματη ρύθμιση φορτίου – συχνότητας, μεταβολές παραγόμενης ισχύος κ.α.)
- Μεταβατικά φαινόμενα που οφείλονται σε διακριτές ρυθμίσεις τάσης και μηχανισμούς αποκατάστασης φορτίου, και η διάρκειά τους είναι επίσης έως μερικά λεπτά (Σύστημα Αλλαγής Τάσης υπό Φορτίο, ζεύξη - απόζευξη στατών πυκνωτών κ.α.).

Τα φαινόμενα που απασχολούν τις μελέτες ευστάθειας σε ένα ΣΗΕ είναι οι τρεις τελευταίες κατηγορίες. Διακρίνονται τα εξής είδη ευστάθειας [56]:

- ❖ Η *ευστάθεια μονίμου καταστάσεως ή σημείου λειτουργίας* που σχετίζεται με την ευστάθεια ενός σημείου ισορροπίας και αφορά την απόκριση του συστήματος σε αργές και βαθμιαίες (μικρές) διαταραχές. Επίσης ονομάζεται *στατική ευστάθεια ή ευστάθεια μικρών διαταραχών*.
- ❖ Η *μεταβατική ευστάθεια ή ευστάθεια μεγάλων διαταραχών* που αναφέρεται στην απόκριση του συστήματος σε μεγάλες (σοβαρές) και απότομες διαταραχές (συνήθεις διαταραχές αυτού του τύπου είναι και τα βραχυκυκλώματα). Η μεταβατική ευστάθεια εξετάζει αν ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας είναι σε θέση να επανέρθει σε κανονική λειτουργία μετά από μια συγκεκριμένη μεγάλη διαταραχή και άρα εξαρτάται από το μέγεθος και το είδος της διαταραχής.

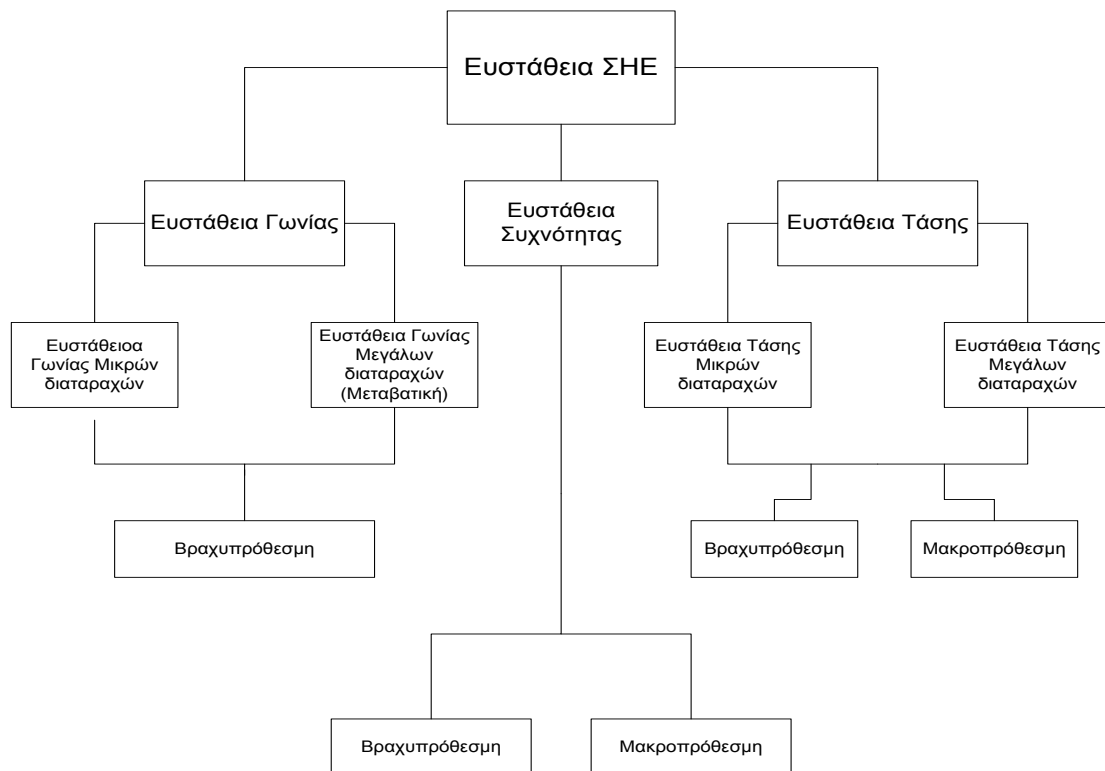
Επίσης μπορούμε να κατηγοριοποιήσουμε τα φαινόμενα ευστάθειας σε ένα ΣΗΕ ανάλογα με την φύση των εμπλεκόμενων φαινομένων. Έτσι διακρίνουμε τις παρακάτω κατηγορίες ευστάθειας [18],[56]:

- Η *ευστάθεια γωνίας δρομέα* αναφέρεται στην ικανότητα ενός συνόλου συνδεδεμένων σύγχρονων μηχανών να παραμένουν σε συγχρονισμό μετά από την υποβολή τους σε κάποια διαταραχή. Η ευστάθεια αυτού του είδους εξαρτάται από την ικανότητα κάθε σύγχρονης μηχανής να διατηρεί ή να αποκαθιστά την ισορροπία μεταξύ της αναπτυσσόμενης ηλεκτρομαγνητικής και της μηχανικής ροπής εισόδου. Αστάθεια εμφανίζεται στη μορφή μη αποσβεννόμενων ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων (στατική αστάθεια) ή μονότονης επιτάχυνσης του δρομέα που οδηγεί σε απώλεια συγχρονισμού (μεταβατική αστάθεια). Το χρονικό πλαίσιο της ευστάθειας γωνίας είναι αυτό των

ηλεκτρομηχανικών φαινομένων, με διάρκεια μερικών δευτερολέπτων, και άρα τα φαινόμενα αστάθειας γωνίας κατατάσσονται στη βραχυπρόθεσμη χρονική κλίμακα.

- Η *ευστάθεια συχνότητας* αντιστοιχεί στην ικανότητα του συστήματος να διατηρεί την ηλεκτρική συχνότητα του δικτύου κοντά στην ονομαστική τιμή μετά από μια σοβαρή διαταραχή. Ειδικότερα, η ευστάθεια συχνότητας εξαρτάται από την ικανότητα του συστήματος να διατηρεί ή να επαναφέρει το ισοζύγιο μεταξύ παραγωγής και ζήτησης με τη μικρότερη δυνατή απόρριψη παραγωγής ή φορτίου. Στην περίπτωση αυτή, μία πιθανή αστάθεια εκδηλώνεται με τη μορφή συνεχών μεταβολών στην τιμή της συχνότητας, οι οποίες μπορεί να οδηγήσουν στη διαδοχική αποκοπή μονάδων παραγωγής και φορτίων μέχρι την ολική σβέση του συστήματος.
- Η *ευστάθεια τάσεως* αναφέρεται στην ικανότητα ενός συστήματος να διατηρεί ικανοποιητικές τάσεις σε όλους τους ζυγούς μετά από μια διαταραχή. Αστάθεια τάσης προκαλείται από την αδυναμία του συστήματος να τροφοδοτήσει την απαιτούμενη ισχύ στα φορτία.

Στο Σχήμα 1.1 συνοψίζονται τα διαφορετικά είδη ευστάθειας των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας [57] ως προς το είδος (ευστάθεια γωνίας-συχνότητας-τάσεως), το μέγεθος (ευστάθεια μικρών-μεγάλων διαταραχών) και τη χρονική διάρκεια (βραχυπρόθεσμη-μακροπρόθεσμη) της εξεταζόμενης διαταραχής.



Σχήμα 1.1 : Κατηγοριοποίηση Ευστάθειας ΣΗΕ

1.3 Ρύθμιση φορτίου - συχνότητας

1.3.1 Γενικά

Η ρύθμιση συχνότητας σ' ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας συνίσταται στη συνεχή προσαρμογή της παραγόμενης ισχύος ανάλογα με το φορτίο του συστήματος. Η ανισορροπία μεταξύ παραγωγής και κατανάλωσης προκαλεί διακυμάνσεις στην ηλεκτρική συχνότητα του δικτύου.

Κατά την λειτουργία μιας γεννήτριας οι ροπές που ασκούνται στο δρομέα της είναι η ηλεκτρομαγνητική ροπή, οι τριβές καθώς και η μηχανική ροπή που κινεί την γεννήτρια. Η ηλεκτρομαγνητική ροπή οφείλεται στο ηλεκτρικό φορτίο το οποίο τροφοδοτεί η γεννήτρια ενώ η μηχανική ροπή προέρχεται από μια διάταξη στροβίλων. Μια αύξηση της ζήτησης ισχύος αυξάνει την τιμή της ηλεκτρομαγνητικής ροπής, με αποτέλεσμα ο δρομέας να επιβραδύνεται και ακολούθως να μειώνεται η συχνότητα περιστροφής. Αντίστροφα αν η ζητούμενη ηλεκτρική ισχύς μειωθεί, τότε ελαττώνεται η τιμή της ηλεκτρομαγνητικής ροπής και κατά συνέπεια ο δρομέας επιταχύνεται και η συχνότητα αυξάνει.

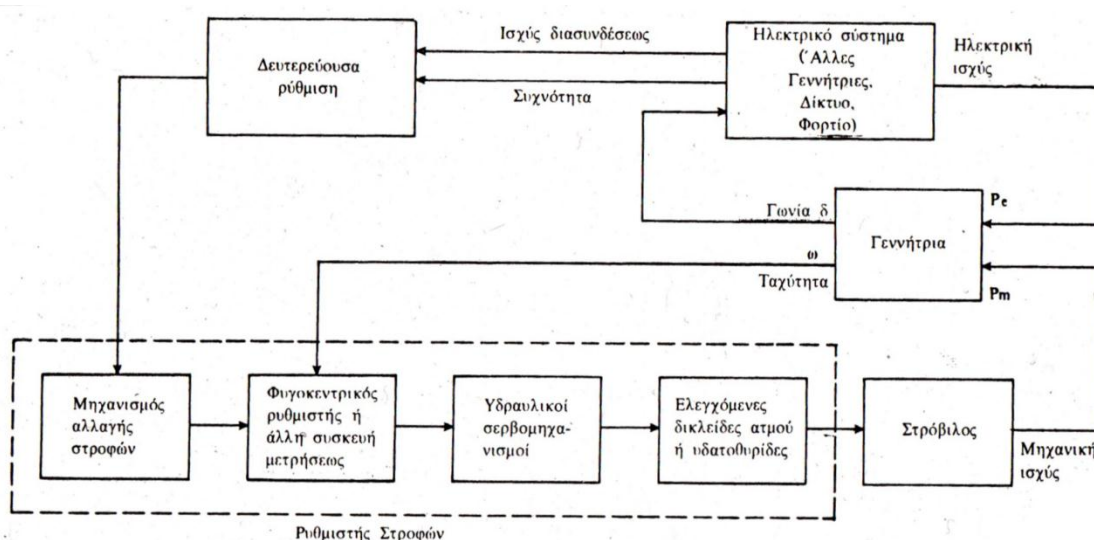
Το γεγονός αυτό αποτελεί ένα από τα βασικά προβλήματα που παρουσιάζονται στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας καθώς η διατήρηση της συχνότητας στην ονομαστική τιμή με μικρές διακυμάνσεις αποτελεί ένα κρίσιμο παράγοντα για την ομαλή λειτουργία του συστήματος. Εκτός της αναγκαιότητας της διατήρησης σταθερής συχνότητας προκειμένου οι συσκευές που είναι συνδεδεμένες στο δίκτυο να λειτουργούν αξιόπιστα, οι μονάδες παραγωγής διαθέτουν μια σειρά από προστασίες σε πιθανές μεταβολές της συχνότητας. Σε μια διαταραχή της συχνότητας οι μονάδες παραγωγής είναι δυνατόν (ανάλογα και με τις προστασίες τους) να τεθούν εκτός δικτύου. Για παράδειγμα σε μια σημαντική βύθιση της συχνότητας είναι δυνατόν να ενεργοποιηθούν οι προστασίες υποσυχνότητας κάποιων γεννητριών με αποτέλεσμα να αποσυνδεθούν από το δίκτυο. Στην περίπτωση αυτή θα μειωθεί η τιμή της συνολικά παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος οδηγώντας σε περαιτέρω πτώση της συχνότητας, με τελικό αποτέλεσμα (αν δεν υπάρξει παρέμβαση στο φορτίο) καθώς συνεχώς θα βγαίνουν γεννήτριες εκτός δικτύου να έχουμε κατάρρευση της συχνότητας και να τεθεί το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας εκτός λειτουργίας. Για την αποφυγή τέτοιων καταστάσεων κάθε σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας διαθέτει στρεφόμενη εφεδρεία, δηλαδή γεννήτριες οι οποίες λειτουργούν αλλά δεν παράγουν την μέγιστη ισχύ, προκειμένου να είναι δυνατή, σε μικρό χρόνο, η αύξηση της παραγωγής ισχύος ώστε να καλυφθούν διαταραχές στην ζήτηση ή βλάβες σε άλλες γεννήτριες. Εκτός όμως της στρεφόμενης εφεδρείας η διατήρηση της συχνότητας στα επιθυμητά επίπεδα είναι δυνατή με επεμβάσεις στο φορτίο, όταν η στρεφόμενη εφεδρεία δεν αρκεί. Αυτό γίνεται με αποκοπές φορτίου οι οποίες περιορίζουν το συνολικό φορτίο του συστήματος και μειώνουν την απόκλιση μεταξύ κατανάλωσης και παραγωγής ισχύος.

Εκτός όμως από την καλή λειτουργία του συστήματος, ο έλεγχός της συχνότητας αποκτά ιδιαίτερη σημασία σε σχέση με την οικονομική λειτουργία του. Αυτό γιατί έχει ιδιαίτερη σημασία ποιες μονάδες θα αποτελούν μονάδες βάσης, μονάδες δηλαδή που παράγουν το μεγαλύτερο ποσοστό της ζήτησης και ποιες θα αποτελούν ρυθμίζουσες μονάδες, δηλαδή μονάδες που θα καλύπτουν τις αιχμές του φορτίου. Συνήθως ως μονάδες βάσης λειτουργούν μονάδες με υψηλούς βαθμούς απόδοσης, ενώ ως ρυθμίζουσες μονάδες λειτουργούν αυτές με υψηλό ρυθμό ανάληψης φορτίου, δηλαδή αυτές που μπορούν με σχετικά γρήγορο ρυθμό να μεταβάλουν την παραγωγή τους. Η ένταξη μονάδων σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας είναι αρκετά σύνθετο πρόβλημα, το οποίο όμως μπορεί να βελτιστοποιήσει οικονομικά την λειτουργία του. Στα σύγχρονα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας η ένταξη των μονάδων καθορίζεται από τη λειτουργία της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας.

1.3.2 Ρύθμιση συχνότητας

Η ρύθμιση συχνότητας βασίζεται σε κάποιο σύστημα ελέγχου το οποίο ανιχνεύει μεταβολές στην τιμή της συχνότητας, και δίνει το κατάλληλο σήμα προκειμένου η παραγόμενη μηχανική ισχύς του στροβίλου να ακολουθεί την ηλεκτρική ισχύ της γεννήτριας. Στο Σχήμα 1.2 παρουσιάζονται οι διατάξεις που συμμετέχουν στην ρύθμιση της συχνότητας, καθώς και η σύνδεση μεταξύ τους [11].

Για τον σκοπό αυτό εφαρμόζονται δυο στάδια ελέγχου. Το πρώτο ονομάζεται πρωτεύουσα ρύθμιση και αφορά διαδικασίες που προσαρμόζουν βραχυχρόνια την ισχύ της μονάδας στις μεταβολές ισχύος του δικτύου. Πρόκειται για έναν τοπικό, αποκεντρωμένο έλεγχο, έναν έλεγχο δηλαδή που δεν γίνεται κεντρικά στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας αλλά σε κάθε μονάδα παραγωγής ξεχωριστά. Βασικό ρόλο στην πρωτεύουσα ρύθμιση έχει ο ρυθμιστής στροφών. Η διάταξη αυτή εξασφαλίζει την εξισορρόπηση της μηχανικής ισχύος του στροβίλου και του ηλεκτρικού φορτίου σε κάθε χρονική στιγμή, σταθεροποιώντας κατ' αυτόν τον τρόπο την συχνότητα. Σαν είσοδο έχει την τιμή της συχνότητας περιστροφής και με βάση αυτήν αυξομειώνει την ισχύ που παράγει ο στρόβιλος. Ωστόσο, επειδή ο ρυθμιστής στροφών αφήνει μόνιμα σφάλματα στην συχνότητα εισάγεται και η δευτερεύουσα ρύθμιση. Ο έλεγχος αυτός ρυθμίζει τις μακροχρόνιες μεταβολές της συχνότητας, δηλαδή αντισταθμίζει τα μόνιμα σφάλματα που προκύπτουν από τον πρωτεύουσα ρύθμιση.



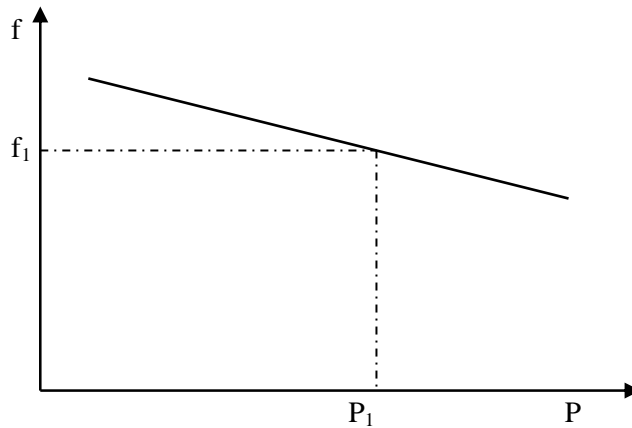
Σχήμα 1.2 : Μπλοκ διάγραμμα ρύθμισης συχνότητας

1.3.3 Πρωτεύουσα ρύθμιση και στατισμός

Ο ρυθμιστής στροφών όπως αναφέρθηκε και παραπάνω συμμετέχει στη διαδικασία της πρωτεύουσας ρύθμισης. Σε έναν ρυθμιστή στροφών ατμοηλεκτρικού σταθμού για παράδειγμα ελέγχεται η παραγόμενη ισχύς μέσω ελέγχου του ανοίγματος βαλβίδας που καθορίζει την ροή ατμού προς τον στρόβιλο. Οι δυνάμεις που απαιτούνται για να μεταβληθεί το άνοιγμα της βαλβίδας είναι ισχυρές λόγω της πίεσης λειτουργίας. Για τον λόγο αυτό χρησιμοποιούνται συνήθως υδραυλικοί ενισχυτές. Αντίστοιχα σε έναν ρυθμιστή στροφών υδροηλεκτρικού σταθμού ο έλεγχος της παραγόμενης ισχύς γίνεται μέσω του ανοίγματος των υδατοθυρίδων που καθορίζουν την παροχή νερού προς τον στρόβιλο. Σε ένα σταθμό παραγωγής με νηζελογεννήτριες ο ρυθμιστής στροφών καθορίζει το άνοιγμα της βαλβίδας για τη ροή του καυσίμου (ντήζελ) στο θάλαμο καύσης. Ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του, ο

κάθε ρυθμιστής στροφών διέπεται από κάποιες χρονικές σταθερές που διέπουν τη λειτουργία του και υποδηλώνουν το πόσο γρήγορα μπορεί να αυξηθεί η μηχανικής ισχύς.

Όπως έχει αναφερθεί, ο ρυθμιστής στροφών παρότι διορθώνει την συχνότητα λειτουργίας της γεννήτριας αφήνει μόνιμα σφάλματα για κάθε μεταβολή της ισχύος. Έτσι προκύπτει και το διάγραμμα φορτίου-συχνότητας το οποίο με δεδομένη μια ταχύτητα αναφοράς αντιστοιχίζει κάθε τιμή της παραγόμενης ισχύος σε μια τιμή συχνότητας. Αυτή η τιμή αναφέρεται στην μόνιμη κατάσταση μετά την επίδραση του ρυθμιστή στροφών. Στο Σχήμα 1.3 παρουσιάζεται μια τυπική χαρακτηριστική καμπύλη φορτίου συχνότητας.



Σχήμα 1.3 : Χαρακτηριστική φορτίου-συχνότητας

Η αρνητική κλίση της χαρακτηριστικής καμπύλης φορτίου-συχνότητας ονομάζεται στατισμός και συμβολίζεται με R . Η σχέση υπολογισμού του στατισμού μιας μονάδας είναι η ακόλουθη :

$$R = -\frac{\Delta f}{\Delta P} \quad (1.1)$$

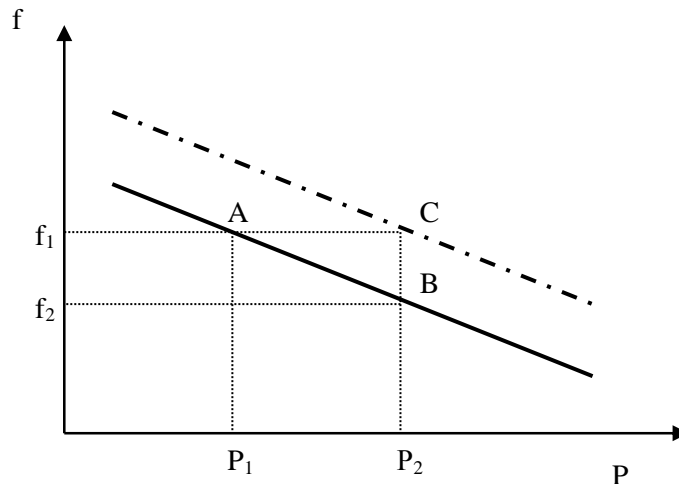
όπου Δf το μόνιμο σφάλμα συχνότητας (%) και ΔP η μεταβολή της παραγόμενης ισχύος (%). Ουσιαστικά αυτό που εκφράζει ο στατισμός, είναι το ποσοστό επί της εκατό της μόνιμης μεταβολής της συχνότητας λειτουργίας για μεταβολή του φορτίου ίση με την ονομαστική ισχύ της γεννήτριας. Η μεταβολή αυτή στην συχνότητα στην μόνιμη κατάσταση οφείλεται στο ότι ο ρυθμιστής στροφών αφήνει πάντοτε ένα μόνιμο σφάλμα συχνότητας όταν παρουσιάζεται μεταβολή του φορτίου. Στο σημείο αυτό είναι σημαντικό να ξεκαθαρίσουμε ότι η χαρακτηριστική φορτίου-συχνότητας αναφέρεται στην μόνιμη κατάσταση μετά την πρωτεύουσα και πριν την δευτερεύουσα ρύθμιση. Μετά και την δευτερεύουσα ρύθμιση η χαρακτηριστική φορτίου-συχνότητας μετατοπίζεται και η τιμή της συχνότητας επιστρέφει στην ονομαστική της τιμή, αποκαθιστώντας το μόνιμο σφάλμα του ελεγκτή στροφών.

Με βάση το στατισμό διαφοροποιούνται οι μονάδες μέσα στο σύστημα. Για παράδειγμα αν μια μονάδα έχει μικρό στατισμό σε μια μικρή μεταβολή της συχνότητας μεταβάλλει σημαντικά το φορτίο της γι' αυτό και αυτές οι μονάδες αποτελούν ρυθμιζουσες μονάδες. Αντίθετα, μια μονάδα με μεγάλο στατισμό στην αντίστοιχη μεταβολή της συχνότητας θα μεταβάλλει πολύ λιγότερο την παραγωγή της σε σχέση με την προηγούμενη μονάδα.

1.3.4 Δευτερεύουσα ρύθμιση

Η δευτερεύουσα ρύθμιση πραγματοποιείται από τον μηχανισμό αλλαγής στροφών, ο οποίος μεταθέτει κατάλληλα την χαρακτηριστική φορτίου-συχνότητας προσαρμόζοντας με αυτόν τον τρόπο την παραγόμενη ισχύ των επιμέρους γεννητριών του συστήματος. Αν για

παράδειγμα σε μια γεννήτρια με την χαρακτηριστική AB του Σχήματος 1.4 μεταβληθεί το φορτίο από P_1 σε P_2 , τότε μετά την πρωτεύουσα ρύθμιση η συχνότητα θα σταθεροποιηθεί στη νέα τιμή f_2 (σημείο B). Η δευτερεύουσα ρύθμιση λοιπόν θα μεταβάλλει τη θέση της χαρακτηριστικής, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1.4, οπότε η γεννήτρια θα παράγει την ζητούμενη ισχύ P_2 στην ονομαστική συχνότητα f_1 (σημείο C).



Σχήμα 1.4 : Μετατόπιση χαρακτηριστικής φορτίου συχνότητας με δευτερεύουσα ρύθμιση

1.3.5 Ρύθμιση συχνότητας σε αυτόνομο σύστημα

Στα αυτόνομα συστήματα το πρόβλημα της ρύθμισης της συχνότητας είναι εντονότερο. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό είναι ότι λόγω της έλλειψης διασύνδεσης με κάποιο ισχυρότερο σύστημα δεν μπορεί να βασιστεί σε αυτό ώστε να εξασφαλίσει ευκολότερα το ισοζύγιο ενέργειας και να ελέγξει τη συχνότητα. Επίσης επειδή πρόκειται συνήθως για μικρά ΣΗΕ που εξυπηρετούν τις ανάγκες νησιών, υπάρχει και το θέμα της περιορισμένης στρεφόμενης εφεδρείας σε σχέση με το ηπειρωτικό σύστημα λόγω του περιορισμένου πλήθους των μονάδων παραγωγής. Έτσι μετά από μια σοβαρή διαταραχή, όπως η απώλεια κάποιας μονάδας παραγωγής, πρέπει να βασιστεί εξολοκλήρου στη δυνατότητα των εναπομενουσών μονάδων παραγωγής να αντισταθμίσουν τη διαφορά που προέκυψε στην παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια. Η δυνατότητα ελέγχου της συχνότητας σε επίπεδο πρωτεύουσας ρύθμισης εξαρτάται από τον στατισμό και τη στρεφόμενη εφεδρεία των μονάδων αυτών που καλούνται να καλύψουν τη χαμένη παραγωγή. Να σημειωθεί εδώ ότι στην περίπτωση ενός αυτόνομου δικτύου, η συχνότητα του συστήματος λαμβάνεται ως ο σταθμισμένος μέσος όρος των ανά μονάδα γωνιακών ταχυτήτων των σύγχρονων γεννητριών (NG το πλήθος), δηλαδή [44] :

$$\omega_{sys} = \frac{\sum_{i=1}^{NG} H_i \omega_i}{\sum_{i=1}^{NG} H_i} \quad (1.2)$$

Λόγω των χρονικών σταθερών που διέπουν τη λειτουργία των ρυθμιστών στροφών υπάρχει μία καθυστέρηση μέχρι να δοθεί η εντολή για αύξηση της παραγόμενης μηχανικής ισχύς των γεννητριών. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μεταβατική βύθιση της συχνότητας κατά τα πρώτα δευτερόλεπτα μετά από μια τέτοια διαταραχή. Είναι σημαντικό η βύθιση αυτή να μην ξεπερνά κάποια προκαθορισμένα όρια που θα οδηγήσουν σε αναγκαστική ενεργοποίηση

των διατάξεων προστασίας υποσυχνότητας των διαφόρων συνιστωσών του συστήματος. Όπως προαναφέρθηκε, σε περιπτώσεις σοβαρής διαταραχής η βύθιση μπορεί να είναι τέτοια που να οδηγήσει στη διαδοχική αποκοπή μονάδων παραγωγής και φορτίων μέχρι και στην ολική σβέση του συστήματος. Τα χαρακτηριστικά της μεταβατικής αυτής βύθισης εξαρτώνται κυρίως από τη δυναμική των σύγχρονων γεννητριών που παραμένουν συνδεδεμένες στο αυτόνομο σύστημα. Συγκεκριμένα, αμέσως μετά από τη διαταραχή, η δυναμική της συχνότητας του συστήματος κυριαρχείται από την απόκριση αδρανείας των συμβατικών μονάδων. Δηλαδή στο κατά πόσο η συσσωρευμένη κινητική ενέργεια στους άξονές τους μπορεί να συμβάλλει στον περιορισμό του αρχικού ρυθμού πτώσης της συχνότητας. Όσο μεγαλύτερη είναι η συνολική αδράνεια του συστήματος, που πρακτικά είναι το άθροισμα των αδρανειών των γεννητριών, τόσο περιορίζεται και η μεταβατική βύθιση αφού είναι μικρότερη η επιβράδυνση στις γωνιακές ταχύτητες των δρομέων τους, από τις οποίες προκύπτει και η συχνότητα του συστήματος.

1.4 Διείσδυση αιολικής ενέργειας στην ηλεκτροπαραγωγή

1.4.1 Γενικά για Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται έντονη στροφή στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας που προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές (ΑΠΕ). Οι ολοένα αυξανόμενες ενεργειακές ανάγκες και η λογική της αειφόρου ανάπτυξης συνετέλεσαν στο να γίνει κοινή συνείδηση η ανάγκη αποτελεσματικότερης αξιοποίησης των προσφερόμενων από τη φύση ενεργειακών πόρων [44]. Αυτό επιβάλλεται καταρχήν από το γεγονός ότι οι ορυκτές πρώτες ύλες, που χρησιμοποιούν για καύσιμο οι συμβατικοί σταθμοί παραγωγής, δεν διατίθενται σε ανεξάντλητες ποσότητες. Παράλληλα η εκτεταμένη χρήση τους συμβάλλει στην επιδείνωση των περιβαλλοντικών προβλημάτων. Συγκεκριμένα, η λειτουργία των συμβατικών μονάδων παραγωγής συνδέεται με την εκπομπή αέριων ρύπων όπως το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) αλλά και τα οξείδια του θείου (SO_x) και του αζώτου (NO_x). Η αύξηση της συγκέντρωσης των αερίων αυτών έχει ως συνέπεια την δημιουργία και διατήρηση του λεγομένου φαινομένου του θερμοκηπίου. Στο φαινόμενο αυτό οφείλονται αρκετές από τις σύγχρονες δυσμενείς κλιματικές αλλαγές, όπως για παράδειγμα η αύξηση της θερμοκρασίας στη επιφάνεια τη γης, το λιώσιμο των πάγων στους πόλους κτλ. Επίσης, τα οξείδια του αζώτου και του θείου προκαλούν φωτοχημική ρύπανση και νέφος κυρίως στα αστικά κέντρα, αλλά και όξινη βροχή που καταστρέφει τα δάση.

Η γενικότερη στροφή προς τις ΑΠΕ ενισχύθηκε από τα μέσα του 1990 μετά την υπογραφή του πρωτοκόλλου του Κιότο. Σε αυτό κατοχυρώθηκε και νομικά η λήψη μέτρων στο πλαίσιο μιας παγκόσμιας προσπάθειας για τη μείωση των εκπεμπόμενων ρύπων. Συγκεκριμένα, για την Ευρωπαϊκή Ένωση έχει τεθεί ως στόχος να μειώσει τις εκπομπές αέριων ρύπων κατά 20%, μέχρι το 2020, σε σχέση με τα επίπεδα του 1990. Σύμφωνα με τα παραπάνω, γίνεται επιτακτικότερη η ανάγκη για την εκμετάλλευση εναλλακτικών πηγών ενέργειας, λιγότερο επιζήμιων προς το περιβάλλον, αλλά και για την εξεύρεση τρόπων εξοικονόμησης ενέργειας. Με τον όρο ΑΠΕ αναφερόμαστε γενικά σε μορφές ενέργειας που προέρχονται από διάφορες φυσικές διαδικασίες όπως η ηλιακή ακτινοβολία, ο άνεμος, η κίνηση του νερού, η γεωθερμία και άλλες. Αναλυτικότερα, τα κυριότερα είδη των ΑΠΕ είναι τα ακόλουθα [20]:

- Αιολική Ενέργεια
- Ηλιακή ενέργεια
- Υδροηλεκτρική Ενέργεια
- Ενέργεια από Βιομάζα
- Γεωθερμική Ενέργεια
- Ενέργεια από θαλάσσια κύματα
- Κυψέλες καυσίμου

Τα πλεονεκτήματα της ένταξης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι τα εξής :

- Είναι πολύ φιλικές προς το περιβάλλον, έχοντας ουσιαστικά μηδενικά κατάλοιπα και απόβλητα.
- Δεν πρόκειται να εξαντληθούν ποτέ, σε αντίθεση με τα ορυκτά καύσιμα.
- Μπορούν να βοηθήσουν την ενεργειακή αυτάρκεια μικρών και αναπτυσσόμενων χωρών.
- Ο εξοπλισμός είναι απλός στην κατασκευή και τη συντήρηση συγκριτικά με τις συμβατικές μονάδες παραγωγής, και έχει μεγάλο χρόνο ζωής.
- Επιδοτούνται από τις περισσότερες κυβερνήσεις.

Ωστόσο, η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ συνοδεύεται και κάποια αρνητικά αποτελέσματα :

- Έχουν μικρό συντελεστή απόδοσης. Γι' αυτό το λόγο μέχρι τώρα χρησιμοποιούνται σαν συμπληρωματικές πηγές ενέργειας.
- Το μέγεθος και η απόδοση της αιολικής, υδροηλεκτρικής και ηλιακής ενέργειας εξαρτάται από την εποχή του έτους αλλά και από το γεωγραφικό πλάτος και το κλίμα της περιοχής στην οποία εγκαθίστανται.
- Για τις αιολικές μηχανές υπάρχει η άποψη ότι δεν είναι κομψές από αισθητική άποψη κι ότι προκαλούν θόρυβο και θανάτους πουλιών. Με την εξέλιξη όμως της τεχνολογίας τους και την προσεκτικότερη επιλογή χώρων εγκατάστασης (π.χ. σε πλατφόρμες στην ανοιχτή θάλασσα) αυτά τα προβλήματα έχουν σχεδόν λυθεί.
- Για τα υδροηλεκτρικά έργα λέγεται ότι προκαλούν έκλυση μεθανίου από την αποσύνθεση των φυτών που βρίσκονται κάτω απ' το νερό κι έτσι συντελούν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου

1.4.2 Προκλήσεις από τη διείσδυση της αιολικής ενέργειας

Παρά τα τεράστια βήματα προόδου που έχουν γίνει από τα μέσα του προηγούμενου αιώνα στην εκμετάλλευση των ΑΠΕ, μόνο η εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας (κινητική ενέργεια του ανέμου) παρουσιάζει κόστος συγκρίσιμο με αυτό των συμβατικών μονάδων. Σήμερα η αιολική ενέργεια αποτελεί την ευρύτερα αξιοποιούμενη από τις ΑΠΕ μιας και εκτός του ότι το κόστος παραγωγής είναι μικρότερο σε σχέση με τις υπόλοιπες, είναι δυνατό πλέον να παράγονται και σχετικά μεγάλες ποσότητες ισχύος σε αιολικά πάρκα, λόγω της συνεχούς τεχνολογικής εξέλιξης στο πεδίο αυτό. Ωστόσο, η διείσδυση της αιολικής παραγωγής στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας δημιουργεί νέες προκλήσεις στο

σχεδιασμό, στη λειτουργία και στον έλεγχο του ηλεκτρικού συστήματος, είτε βραχυπρόθεσμα είτε μακροπρόθεσμα [34]. Αυτό οφείλεται στα φυσικά χαρακτηριστικά των αιολικών πάρκων, τα οποία διαφέρουν από τις συμβατικές μονάδες παραγωγής. Συγκεκριμένα, η αιολική ενέργεια είναι διαθέσιμη όταν υπάρχει άνεμος, και το επίπεδο παραγωγής ισχύος εξαρτάται από την ταχύτητα του ανέμου. Έτσι, η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τα αιολικά πάρκα είναι μια μη απόλυτα ελεγχόμενη διαδικασία. Επιπλέον, οι συμβατικές μονάδες παραγωγής (αεριοστρόβιλοι, ατμοηλεκτρικοί σταθμοί, μονάδες συνδυασμένου κύκλου) αναλαμβάνουν να προσαρμόσουν την παραγωγή τους σύμφωνα με την μεταβαλλόμενη ζήτηση, με αποτέλεσμα η κυμαινόμενη παραγωγή των αιολικών να προσδίδει μεγαλύτερη πολυπλοκότητα στη διαχείριση του ηλεκτρικού συστήματος. Το πρόβλημα επιδεινώνεται όσο το επίπεδο διείσδυσης της αιολικής ενέργειας στην ηλεκτρική παραγωγή αυξάνει. Επομένως πρέπει να επανεξεταστεί ο τρόπος κατανομής της παραγόμενης ισχύος στις συμβατικές μονάδες, με σκοπό τη μεγαλύτερη ευελιξία της παραγωγής. Επίσης, κρίνεται αναγκαία η διατήρηση επιπλέον στρεφόμενης εφεδρείας ώστε να εξασφαλίζεται η λειτουργική αξιοπιστία και ασφάλεια του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας.

Συνοψίζοντας, η διαρκής αύξηση της διείσδυσης της αιολικής ενέργειας στην ηλεκτροπαραγωγή επηρεάζει τόσο την τεχνική λειτουργία του συστήματος όσο και την ανάπτυξή του με την πάροδο του χρόνου. Το σημαντικότερο συμπέρασμα που εξάγεται είναι ότι, για να αντιμετωπιστεί η μεταβλητότητα του ανέμου, οι υπόλοιπες μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας πρέπει να λειτουργούν πιο ευέλικτα ώστε να διατηρηθεί η αξιοπιστία του συστήματος.

Το υψηλό επίπεδο διείσδυσης της αιολικής παραγωγής εισάγει διάφορες προκλήσεις στη λειτουργία του ηλεκτρικού δικτύου [36], σχετικά με :

- Ρύθμιση της τάσεως και της συχνότητας
- Σταθεροποίηση της ηλεκτρικής ισχύος
- Εξασφάλιση ποιότητας της ηλεκτρικής ισχύος
- Αδιάλειπτη λειτουργία σε συνθήκες βύθισης τάσης (Low Voltage Ride Through)
- Αξιοπιστία, ασφάλεια και ευστάθεια του συστήματος
- Αξιόπιστη τροφοδότηση του φορτίου
- Πρόβλεψη αιολικής ισχύος
- Οικονομικά στοιχεία της λειτουργίας του δικτύου
- Προσαρμογή σε νέους κώδικες λειτουργίας του δικτύου
- Νέες απαιτήσεις ως προς την ασφάλεια και την προστασία του δικτύου, του εξοπλισμού και των καταναλωτών
- Μελέτη και αντιμετώπιση των δυναμικών φαινομένων που λαμβάνουν χώρα στο δίκτυο, λόγω της χρήσης ηλεκτρονικών ισχύος (αντιστροφείς) σε μεγάλα αιολικά πάρκα

Παρότι η αιολική ενέργεια υπερτερεί έναντι των άλλων ανανεώσιμων πηγών, η αυξημένη διείσδυση της αιολικής παραγωγής, όπως αναφέρθηκε, δημιουργεί προβλήματα στη λειτουργία και διαχείριση του ηλεκτρικού συστήματος. Παρακάτω αναλύονται τα σημαντικότερα θέματα και προβλήματα σχετικά με την αιολική παραγωγή ενέργειας [36] :

1) Μεταβλητότητα του ανέμου

Η ταχύτητα του ανέμου ως γνωστόν δεν είναι σταθερή, αλλά μεταβάλλεται διαρκώς με αποτέλεσμα την αντίστοιχη μεταβολή της παραγόμενης ισχύος από τα αιολικά πάρκα. Σε ένα σύστημα όπου η διεύθυνση της αιολικής παραγωγής είναι μεγάλη, η μεταβαλλόμενη ταχύτητα του ανέμου επιδρά αρνητικά στη δυναμική απόκριση του ηλεκτρικού δικτύου. Αυτό οφείλεται στο ότι η παραγωγή ισχύος από τις ανεμογεννήτριες προσαρμόζεται με βάση την ταχύτητα του ανέμου, και όχι σύμφωνα με τις απαιτήσεις του φορτίου. Έτσι οι συμβατικές μονάδες παραγωγής καλούνται να καλύψουν ολοένα και μεγαλύτερες αποκλίσεις της ισχύος από τα επίπεδα που ορίζει το φορτίο κάθε χρονική στιγμή. Το γεγονός αυτό γίνεται εύκολα αντιληπτό αν εξετάσουμε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας όπου ο άνεμος μειώνεται απότομα κάποια χρονική στιγμή και ταυτόχρονα το ηλεκτρικό φορτίο αυξάνει, ή συμβαίνει το αντίστροφο.

2) Αδράνεια συστήματος – Ρύθμιση συχνότητας

Όταν στο ηλεκτρικό δίκτυο είναι συνδεδεμένος μεγάλος αριθμός ανεμογεννητριών, οι απότομες μεταβολές του ανέμου σε μικρά χρονικά διαστήματα, προκαλούν αποκλίσεις της ηλεκτρικής συχνότητας από την ονομαστική της τιμή. Για να διασφαλιστεί η αξιοπιστία και η ευστάθεια του ηλεκτρικού συστήματος, η ηλεκτρική συχνότητα πρέπει να ελέγχεται υπό οποιεσδήποτε συνθήκες. Ο έλεγχος αυτός γίνεται από τις συμβατικές μονάδες παραγωγής με σύγχρονες γεννήτριες. Η αδράνεια των σύγχρονων γεννητριών των μονάδων αυτών διαδραματίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην διατήρηση της ευστάθειας του συστήματος, στην περίπτωση κάποιου μεταβατικού φαινομένου. Οποιαδήποτε διαφορά μεταξύ παραγόμενης και καταναλισκόμενης ηλεκτρικής ισχύος θα προκαλέσει μεταβολή της ταχύτητας περιστροφής των σύγχρονων γεννητριών, οδηγώντας στην αντίστοιχη μεταβολή της ηλεκτρικής συχνότητας του δικτύου. Όσο μεγαλύτερη είναι η αδράνεια των γεννητριών τόσο μικρότερη θα είναι η απόκλιση της συχνότητας από την ονομαστική της τιμή, στην περίπτωση όπου διαταραχθεί το ισοζύγιο ισχύος. Η διαφορετική δυναμική συμπεριφορά και η μικρή αδρανειακή απόκριση των ανεμογεννητριών μεταβλητών στροφών συγκριτικά με τις συμβατικές σύγχρονες γεννήτριες είναι ένα ακόμη πρόβλημα που επιδρά αρνητικά στην ομαλή λειτουργία του δικτύου.

3) Αδιάλειπτη λειτουργία σε συνθήκες βύθισης τάσης (Low Voltage Ride Through)

Κατά τη διάρκεια μεταβατικών φαινομένων, όπως απώλεια κάποιας μονάδας παραγωγής, απότομη αύξηση του φορτίου ή κάποιο βραχυκύκλωμα, εμφανίζεται το φαινόμενο της απότομης πτώσης της τάσης κάτω από την ονομαστική της τιμή. Οι μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας οφείλουν να μπορούν να παραμένουν συνδεδεμένες στο δίκτυο παράγοντας ηλεκτρική ισχύ, υπό οποιαδήποτε διαταραχή. Μέχρι πριν λίγα χρόνια, όταν η διεύθυνση της αιολικής παραγωγής ήταν μικρή, οι ανεμογεννήτριες αποσυνδέονταν από το σύστημα σε περιπτώσεις βύθισης της τάσης κάτω από το 80-90% της ονομαστικής της τιμής. Κάτι τέτοιο συνέβαινε κυρίως για λόγους προστασίας των διατάξεών τους και ιδιαίτερα των ηλεκτρονικών ισχύος στις ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών. Επίσης, η αποσύνδεση ήταν ενδεδειγμένη για την αποφυγή ανεπιθύμητων καταστάσεων όπως η τροφοδότηση ηλεκτρικών νησίδων που μπορεί να σχηματιστούν μετά την εκκαθάριση κάποιου σφάλματος. Καθώς η αιολική ενέργεια αναπτύσσεται κατά τρόπο πρωτοφανή σε αρκετά συστήματα, έγινε γρήγορα κατανοητό ότι αυτή η συμπεριφορά έθετε ένα όριο στην αιολική διεύθυνση, καθώς ένα βραχυκύκλωμα οδηγούσε σε απώλεια όλο και μεγαλύτερης αιολικής παραγωγής. Η απώλεια αυτή είναι ικανή να προκαλέσει σημαντικό έλλειμμα ανάμεσα στην παραγωγή και την κατανάλωση ενεργού ισχύος. Εγκυμονεί λοιπόν ο κίνδυνος

οι συμβατικές μονάδες παραγωγής να αδυνατούν να αναπληρώσουν εγκαίρως το έλλειμμα αυτό. Ως συνέπεια οι γεννήτριες μπορεί να επιβραδυνθούν με τέτοιο ρυθμό ώστε η συχνότητα του συστήματος να μειωθεί σε επικίνδυνα χαμηλές τιμές για την ευσταθή λειτουργία του συστήματος.

Προκειμένου λοιπόν να συνεχιστεί η αύξηση της αιολικής διείσδυσης, μια από τις βασικότερες απαιτήσεις από τα αιολικά πάρκα στους σχετικούς κώδικες είναι η δυνατότητα αδιάλειπτης λειτουργίας σε βυθίσεις τάσης, γνωστή και ως Low Voltage Ride Through (LVRT) Capability [44]. Τα αιολικά πάρκα οφείλουν να παρέχουν επαρκή ενεργό και άεργο ισχύ για τη ρύθμιση της συχνότητας και της τάσεως, αμέσως μετά την εμφάνιση κάποιας διαταραχής. Οι διαχειριστές του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας κάποιων χωρών (όπως Γερμανία, Δανία, Ισπανία και Βραζιλία) έχουν θεσμοθετήσει ειδικούς κώδικες σύνδεσης των αιολικών πάρκων στο δίκτυο αναφορικά με τον έλεγχο της ενεργού και αέργου ισχύος, την απόκριση συχνότητας, και την ικανότητα αδιάλειπτης παροχής ισχύος σε περιπτώσεις διαταραχών.

4) Ταχείες μεταβολές της ισχύος λόγω της διακυμάνσεως του ανέμου

Όπως αναφέρθηκε, οι ταχείες μεταβολές του ανέμου προκαλούν αντίστοιχες απότομες μεταβολές της παραγόμενης ισχύος των αιολικών πάρκων, με αποτέλεσμα τις επακόλουθες διακυμάνσεις της ηλεκτρικής συχνότητας. Η ρύθμιση συχνότητας στις περισσότερες χώρες γίνεται, μεταξύ των άλλων, με αεριοστρόβιλους. Οι αεριοστρόβιλοι χαρακτηρίζονται από υψηλό κόστος λειτουργίας και μικρή απόδοση, παράγοντας μεγάλες ποσότητες οξειδίων του αζώτου (NO_x) όταν μεταβάλλουν γρήγορα την παραγωγή τους [36], και όπως θα δούμε εμφανίζουν προβλήματα στη ρύθμιση συχνότητας (υπερθέρμανση, επιδείνωση λειτουργίας σε περιπτώσεις υποσυχνότητας).

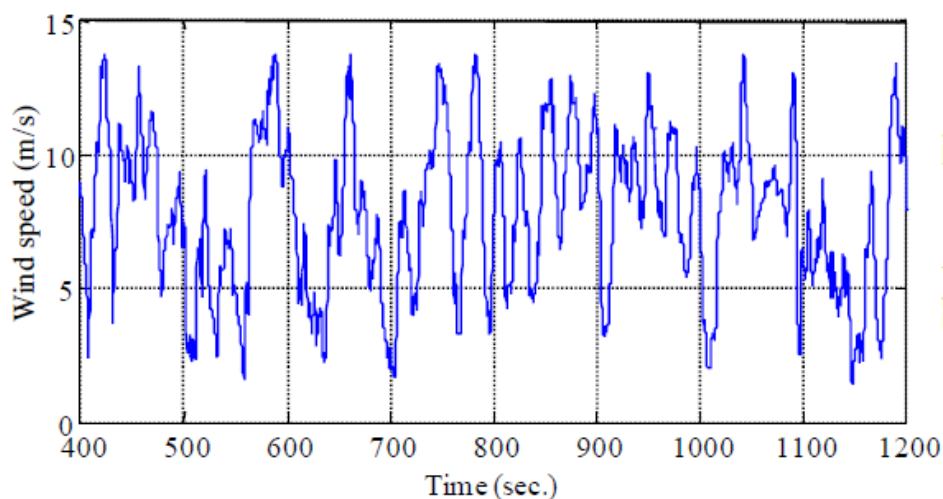
5) Υπερφόρτωση των γραμμών μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας

Λόγω του αυξανόμενου αριθμού των διασυνδέσεων, της ηλεκτρικής παραγωγής και κατανάλωσης, η ροή ηλεκτρικής ισχύος δύναται να προκαλέσει την υπερφόρτωση κάποιων γραμμών μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Το πρόβλημα αυτό μπορεί να αντιμετωπιστεί με την αναβάθμιση των γραμμών μεταφοράς ή με την καλύτερη κατανομή της παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος στις συνδεδεμένες μονάδες. Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ έχει αυξηθεί σημαντικά τα τελευταία χρόνια, σε αντίθεση με τον αριθμό των γραμμών μεταφοράς ο οποίος έχει αυξηθεί ελάχιστα έως καθόλου. Καθώς το επίπεδο διείσδυσης της αιολικής παραγωγής αυξάνει, το φαινόμενο της υπερφόρτωσης των γραμμών μεταφοράς εμφανίζεται ολοένα και συχνότερα. Το γεγονός αυτό είναι ακόμη ένα πρόβλημα που πρέπει να αντιμετωπιστεί, για την εξασφάλιση της ασφάλειας και αξιοπιστίας του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας.

6) Ποιότητα ισχύος για ανεμογεννήτριες συνδεδεμένες στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας

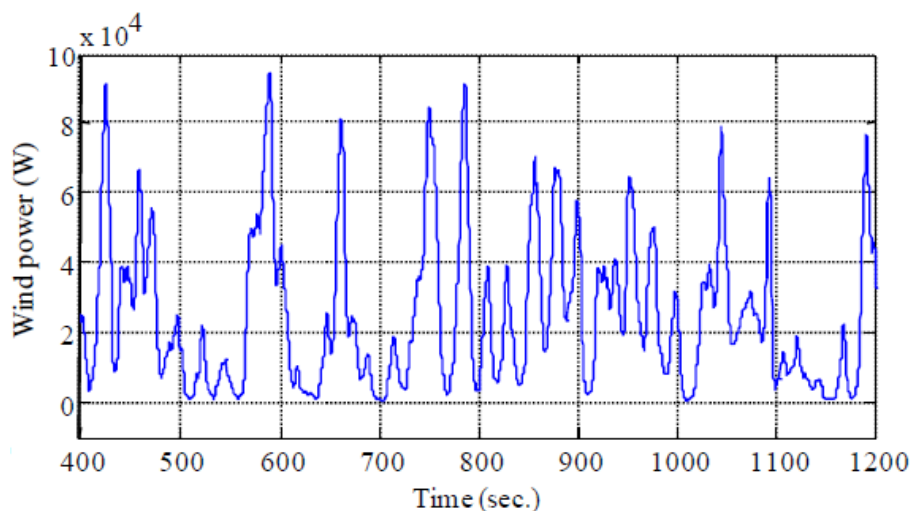
Στα σύγχρονα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας η ποιότητα ισχύος είναι αρκετά υψηλή. Ωστόσο, η διαρκής σύνδεση ανεμογεννητριών με ηλεκτρονικά ισχύος (αντιστροφείς) στο ηλεκτρικό δίκτυο έχει αρχίσει να επηρεάζει αρνητικά την ποιότητα της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος. Αυτό συμβαίνει διότι οι ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών που συνδέονται στο δίκτυο με αντιστροφέα ισχύος, εισάγουν διάφορες αρμονικές καθιστώντας την ισχύ που παράγουν χαμηλής ποιότητας.

Τα σημαντικότερα προβλήματα που σχετίζονται με την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από αιολικά πάρκα έχουν να κάνουν με την τυχαιότητα του ανέμου και τις επακόλουθες συνέπειές της. Η μεταβλητότητα αυτή του ανέμου γίνεται εμφανής στο Σχήμα 1.5 όπου φαίνεται μια τυπική καμπύλη της ταχύτητας του ανέμου [36]. Παρατηρείται ότι σε κλίμακα δευτερολέπτων η ταχύτητα του ανέμου μεταβάλλεται σημαντικά. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, οι διακυμάνσεις αυτές οδηγούν σε απότομες μεταβολές της ισχύος των αιολικών πάρκων. Στο Σχήμα 1.6 απεικονίζεται η παραγόμενη ισχύς του αιολικού πάρκου στο οποίο αναφέρεται η χρονοσειρά του ανέμου του Σχήματος 1.5.



Σχήμα 1.5 : Τυπική χρονοσειρά ανέμου

Επιβεβαιώνεται λοιπόν με βάση το Σχήμα 1.6 ότι, η ισχύς που παράγουν τα αιολικά πάρκα και εγχέεται στο δίκτυο μεταβάλλεται σημαντικά σε μικρό χρονικό διάστημα, γεγονός που επηρεάζει τη δυναμική συμπεριφορά του ηλεκτρικού συστήματος, δυσχεραίνοντας τη ρύθμιση συχνότητας. Τις μεταβολές αυτές της ισχύος καλούνται να τις απορροφήσουν οι υπόλοιπες μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, ώστε να διατηρηθεί το ισοζύγιο της συνολικά παραγόμενης και καταναλισκόμενης ισχύος. Όσο αυξάνει η διείσδυση της αιολικής παραγωγής, το πρόβλημα της μεταβλητότητας της παραγόμενης ισχύος γίνεται ακόμα μεγαλύτερο. Για το λόγο αυτό έχουν θεσπιστεί όρια διείσδυσης από τους διαχειριστές του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, εντός των οποίων δύναται να αντιμετωπιστεί επιτυχώς οποιαδήποτε διαταραχή του ανέμου [20]. Όσο η παραγωγή των αιολικών είναι εντός των προκαθορισμένων ορίων, η αιολική παραγωγή ισχύος απορροφάται στο σύνολό της από το ηλεκτρικό δίκτυο. Αν η παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος από τα αιολικά πάρκα ξεπεράσει τα προκαθορισμένα όρια, τότε η περίσσεια ισχύος απορρίπτεται από το ηλεκτρικό δίκτυο και απορροφάται το μέγιστο ποσοστό της που ορίζει το όριο διείσδυσης. Οι περιορισμοί διείσδυσης οδηγούν συχνά στην απόρριψη μέρους της αιολικής ισχύος και αποτελούν τροχοπέδη στην περαιτέρω αύξηση του αριθμού των αιολικών πάρκων που συνδέονται στο δίκτυο. Το φαινόμενο αυτό δύναται να αντιμετωπιστεί με τη χρήση μεθόδων αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγουν οι ανεμογεννήτριες και απορρίπτεται από το δίκτυο, όπως αναλύεται στην επόμενη ενότητα.



Σχήμα 1.6 : Τυπική παραγόμενη ισχύς ενός αιολικού πάρκου

1.5 Αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας

1.5.1 Αναγκαιότητα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας

Η αυξανόμενη διείσδυση της αιολικής ενέργειας στα ηλεκτρικά δίκτυα έχει αρχίσει να αλλάζει τον τρόπο λειτουργίας και διαχείρισης του ηλεκτρικού συστήματος. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι πλέον μεγάλο μέρος της παραγόμενης ισχύος είναι απρόβλεπτο, εξαρτώμενο από τις μεταβολές του ανέμου. Η επίδραση που έχει η μεταβλητότητα της αιολικής παραγωγής στη λειτουργία του συστήματος εξαρτάται από το επίπεδο διείσδυσης, από το μέγεθος του ηλεκτρικού δικτύου και από την διαθέσιμη ισχύ των υπόλοιπων ευέλικτων μονάδων παραγωγής όπως υδροηλεκτρικοί σταθμοί, αεριοστρόβιλοι και σταθμοί συνδυασμένου κύκλου [33]. Το πρόβλημα της διακυμάνσεως της παραγόμενης ισχύος επιδεινώνεται όσο αυξάνει το επίπεδο διείσδυσης της αιολικής ισχύος και όταν οι ευέλικτες μονάδες παραγωγής αντικαθίστανται από μονάδες με χαμηλό ρυθμό ανάληψης φορτίου, όπως οι λιγνιτικές μονάδες ή οι πυρηνικοί σταθμοί.

Για να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα, οι διαχειριστές των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας, οι παραγωγοί και οι κυβερνήσεις, επενδύουν στην ενίσχυση του δικτύου μεταφοράς. Αυτό επιτυγχάνεται με την εξωτερική διασύνδεση των επιμέρους συστημάτων, γεγονός που ενισχύει το δίκτυο και μειώνει την επίδραση της μεταβλητότητας της αιολικής παραγωγής. Μία ακόμη ευεργετική λύση συνιστούν τα 'έξυπνα δίκτυα' (smart grids), τα οποία διαθέτουν δυνατότητα ελέγχου της ζήτησης και την ικανότητα συλλογής και επεξεργασίας μεγάλου όγκου πληροφοριών σχετικά με τα χαρακτηριστικά της ζητούμενης ισχύος. Τέλος, ο απλούστερος και αποτελεσματικότερος τρόπος αντιμετώπισης της μεταβλητότητας της παραγόμενης ισχύος των αιολικών είναι με την αποθήκευση ενέργειας.

Η αποθήκευση ενέργειας μπορεί να γίνει σε διάφορες μορφές και με ποικίλες διατάξεις, οι οποίες θα αναφερθούν στη συνέχεια. Οι διατάξεις οι οποίες αποθηκεύουν ενέργεια δύνανται να δράσουν είτε ως καταναλωτής ισχύος στην περίπτωση όπου η περίσσεια ισχύος αποθηκεύεται σε αυτές, είτε ως παραγωγός όταν η ισχύς απελευθερώνεται από αυτές και

εγγέεται στο δίκτυο. Ένα ακόμη πλεονέκτημα της αποθήκευσης ενέργειας είναι ότι παρέχει βοηθητικές υπηρεσίες στη λειτουργία του συστήματος και συμβάλλει στην ευστάθεια και στην ποιότητα της ηλεκτρικής παροχής στους καταναλωτές. Επίσης, με τη χρήση μεθόδων αποθήκευσης βελτιστοποιείται η υποδομή του δικτύου και ελαχιστοποιούνται οι απαιτούμενες επενδύσεις για την ενίσχυσή του.

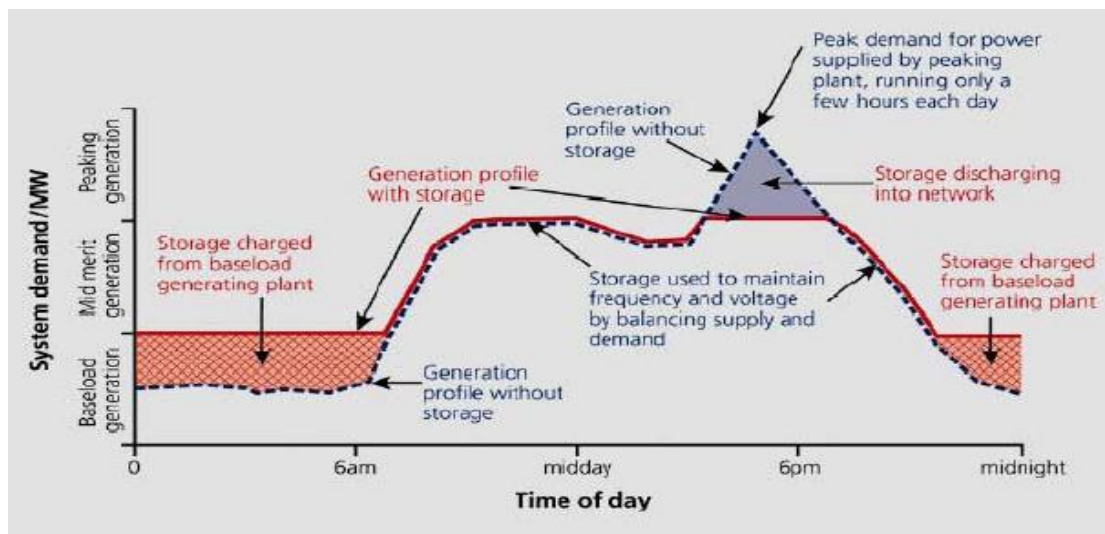
Τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα της χρήσης μεθόδων αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας είναι τα εξής [35] :

- Μείωση των λειτουργικών εξόδων και του κεφαλαίου εγκατάστασης νέων συμβατικών μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας
- Αύξηση της παραγωγής από ΑΠΕ
- Βελτιστοποίηση της χρήσης του υπάρχοντος δικτύου μεταφοράς και διανομής και ελαχιστοποίηση των εξόδων για την ενίσχυσή του
- Λειτουργία σε αυτόνομες εφαρμογές, όπως ως συσκευές αδιάλειπτης παροχής ισχύος (UPS)
- Παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος με τρόπο φιλικό προς το περιβάλλον
- Βελτίωση της ευελιξίας και της αξιοπιστίας του συστήματος, με την εξασφάλιση εφεδρείας ηλεκτρικής ισχύος.

Στα σύγχρονα συστήματα, η συνολική εγκατεστημένη ισχύς των μονάδων παραγωγής που είναι συνδεδεμένες στο δίκτυο οφείλει να υπερβαίνει την αναμενόμενη αιχμή του φορτίου, με σκοπό την εξασφάλιση της αξιοπιστίας του συστήματος. Η ύπαρξη διατάξεων αποθήκευσης δίνει μεγαλύτερη ευελιξία, αφού ένα ποσοστό της αιχμής που καλυπτόταν από τις συμβατικές μονάδες θα τροφοδοτείται από τα συστήματα αποθήκευσης. Έτσι, δίνεται η δυνατότητα αποσύνδεσης κάποιων συμβατικών μονάδων, μειώνοντας σημαντικά το κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, διατηρώντας την αξιοπιστία της τροφοδότησης του φορτίου σε υψηλά επίπεδα. Η υποστήριξη της παραγωγής με την αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας δίνει τη δυνατότητα μείωσης της εγκατεστημένης ισχύος ενός συμβατικού σταθμού έως και 40 % [43]. Το γεγονός αυτό οδηγεί σε μειωμένες εκπομπές ρύπων και αποδοτικότερη λειτουργία των συμβατικών μονάδων, δεδομένου ότι η ηλεκτρική ισχύς των μονάδων αυτών θα σημειώνει πολύ μικρότερες μεταβολές. Οι διακυμάνσεις δηλαδή των φορτίων και της αιολικής παραγωγής μπορούν να απορροφηθούν από τις διατάξεις αποθήκευσης σε ένα βαθμό, με τους συμβατικούς σταθμούς να διατηρούν σε γενικές γραμμές ένα σταθερό προφίλ παραγωγής.

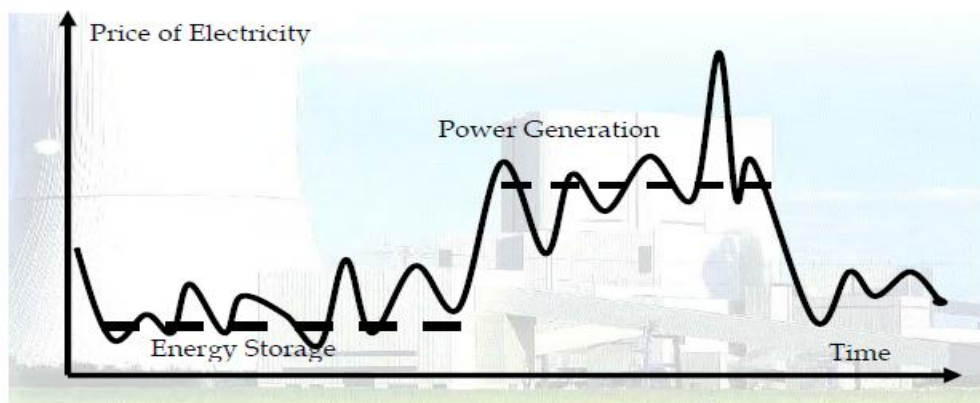
Στο Σχήμα 1.7 φαίνεται πώς η αποθήκευση της ενέργειας λειτουργεί ως εξομάλυνση της παραγωγής ισχύος των συμβατικών μονάδων παραγωγής, μια τυπική μέρα του έτους [35]. Η διακεκομμένη γραμμή αντιστοιχεί στην ισχύ του φορτίου στη διάρκεια της ημέρας, η οποία ταυτίζεται με την παραγόμενη ηλεκτρική ισχύ των συμβατικών μονάδων στην περίπτωση απουσίας της αποθήκευσης ενέργειας. Αντίθετα, η συνεχής γραμμή αντιστοιχεί στην παραγωγή των συμβατικών μονάδων, όταν στη λειτουργία του συστήματος ενσωματώνονται διατάξεις αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας. Παρατηρούμε ότι με τη χρήση μεθόδων αποθήκευσης, το εύρος λειτουργίας των συμβατικών μονάδων περιορίζεται σημαντικά, οδηγώντας στην οικονομικότερη λειτουργία τους. Έτσι, στην περίπτωση που το φορτίο του συστήματος μειωθεί σημαντικά, πράγμα που συμβαίνει συνήθως τις νυχτερινές ώρες, οι συμβατικοί σταθμοί παραγωγής παράγουν ισχύ που υπερβαίνει το φορτίο, η περίσσεια της οποίας αποθηκεύεται για μεταγενέστερη χρήση. Έτσι ο βαθμός απόδοσής τους διατηρείται σε υψηλά επίπεδα. Τις απογευματινές ώρες όπου το φορτίο σημειώνει την αιχμή της ημέρας,

αντί να ενταχθεί επιπλέον μονάδα παραγωγής που συνεπάγεται σημαντικό κόστος, η επιπλέον ισχύς που απαιτεί το φορτίο παρέχεται από την εκφόρτιση της διάταξης όπου είχε αποθηκευτεί προηγουμένως η ηλεκτρική ενέργεια.



Σχήμα 1.7 : Καμπύλη ζήτησης και παραγωγής ισχύος

Εκτός από τα οικονομικά οφέλη που σχετίζονται με την αποδοτικότερη λειτουργία των συμβατικών μονάδων, οικονομικά κίνητρα προκύπτουν και από τη διαχείριση του συστήματος αποθήκευσης της ενέργειας. Συγκεκριμένα, τις ώρες χαμηλού φορτίου ο διαχειριστής του συστήματος επιβάλλει χαμηλές τιμές, ως κίνητρο για την αύξηση της κατανάλωσης και τη διατήρηση της παραγωγής των συμβατικών μονάδων σε αποδοτικά επίπεδα. Αντίθετα, τις ώρες όπου το φορτίο του συστήματος αυξάνει σημαντικά, ο διαχειριστής επιβάλλει υψηλές τιμές ώστε οι παραγωγοί να αποζημιωθούν για την ένταξη περαιτέρω μονάδων στο σύστημα. Το γεγονός αυτό μπορεί να εκμεταλλευθεί από τον παραγωγό που διαθέτει σύστημα αποθήκευσης, αγοράζοντας και αποθηκεύοντας ηλεκτρική ενέργεια τις ώρες χαμηλού φορτίου, και επιστρέφοντάς την στο δίκτυο τις απογευματινές ώρες όπου η τιμή είναι υψηλή, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1.8 [43].



Σχήμα 1.8: Τιμή ηλεκτρικής ισχύος στη διάρκεια της ημέρας

Το σύνολο των εφαρμογών των αποθηκευτικών διατάξεων σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας συνοψίζεται παρακάτω [45] :

- **Load Leveling:** Είναι η αποθήκευση φθηνής πλεονάζουσας ενέργειας που παράγεται από τις μονάδες βάσης κατά τις περιόδους εκτός αιχμής και η χρησιμοποίησή της σε περιόδους αιχμής φορτίου, αντί της χρήσης των ακριβών μονάδων. Η εφαρμογή αυτή αφορά το στάδιο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.
- **Transmission Voltage Regulation:** Είναι η διατήρηση της τιμής της τάσης μέσα σε συγκεκριμένα προκαθορισμένα όρια διακύμανσης, τόσο κατά τη μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας όσο και στα σημεία του φορτίου. Αφορά το στάδιο μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας.
- **Power Quality Improvement:** Διακρίνεται σε μικρής διάρκειας βελτίωση ποιότητας ισχύος η οποία σχετίζεται με την εξομάλυνση απότομων βυθίσεων και αιχμών τάσης, για χρονικό διάστημα από μερικά δευτερόλεπτα μέχρι μερικά λεπτά για απαιτήσεις ισχύος $< 1\text{MW}$, και σε μεγάλης διάρκειας βελτίωση ποιότητας η οποία σχετίζεται με ότι και η προηγούμενη, αλλά για απαιτήσεις ισχύος $> 1\text{MW}$ για χρονική διάρκεια 1 - 2 ώρες.
- **Spinning Reserve:** Ονομάζεται και στρεφόμενη εφεδρεία. Είναι η διατήρηση μέρους της παραγωγής ισχύος από τις μονάδες και η παροχή της σε έκτακτες χρονικές στιγμές (π.χ. λόγω βλάβης μιας γεννήτριας), προκειμένου να συνεχιστεί η αδιάλειπτη παροχή ισχύος στους πελάτες μιας ηλεκτρικής εταιρίας. Η εφαρμογή αυτή απαιτεί αποθήκευση ισχύος της τάξης των 10 - 100 MW για χρονικό διάστημα < 30 λεπτών.
- **Black - start:** Είναι η ικανότητα ενός σταθμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας να τεθεί σε λειτουργία μετά από την πλήρη αποκοπή του από το δίκτυο λόγω κάποιου σφάλματος. Μερικές μονάδες παραγωγής (όπως για παράδειγμα οι πυρηνικές μονάδες) απαιτούν μια ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας για να επανεκκινηθούν μετά από ένα σφάλμα. Η απαιτούμενη αυτή ενέργεια για την επανεκκίνηση της θα δίνεται πλέον από την αποθηκευμένη.
- **Transmission & Distribution System Stability:** Αφορά τη διατήρηση της ευστάθειας του συστήματος μεταφοράς και διανομής και την αποτροπή της κατάρρευσης του. Για την εφαρμογή αυτή απαιτείται ισχύς $> 100\text{MW}$ για χρονική διάρκεια μερικών δευτερολέπτων.
- **Frequency Control:** Είναι ο έλεγχος για τη διατήρηση της συχνότητας στην ονομαστική της τιμή.
- **Generation Capacity Deferral:** Είναι η αναβολή της αύξησης της συνολικά εγκατεστημένης ισχύος των μονάδων παραγωγής, με την τροφοδότηση της αιχμής του φορτίου από διατάξεις αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας. Η εφαρμογή αυτή απαιτεί 10 – 100 MW για 2 - 4 ώρες.
- **Transmission & Distribution Facility Deferral:** Είναι η αναβολή της εγκατάστασης νέων γραμμών μεταφοράς και διανομής, τροφοδοτώντας την αιχμή φορτίου μέσω μη υπερφορτωμένων γραμμών από αποθηκευτικές διατάξεις ηλεκτρικής ενέργειας.
- **Renewable Energy Management:** Χρήση αποθηκευμένης ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές για κάλυψη της ζήτησης.
- Απόσβεση ταλαντώσεων στις σύγχρονες γεννήτριες μετά από σφάλμα.
- Εξομάλυνση της μεταβλητότητας της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος από τα αιολικά πάρκα

Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας, οι οποίες αναλύονται στην παράγραφο που ακολουθεί.

1.5.2 Μέθοδοι αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας

Η ηλεκτρική ενέργεια μπορεί να μετατραπεί σε διάφορες μορφές και με τη χρήση ποικίλων διατάξεων, οι σημαντικότερες εκ των οποίων παρουσιάζονται παρακάτω [36]:

A) Ηλεκτρικοί συσσωρευτές

Οι ηλεκτρικοί συσσωρευτές ή μπαταρίες είναι μία ή περισσότερες ηλεκτροχημικές κυψέλες που μετατρέπουν τη χημική ενέργεια σε ηλεκτρική. Οι μπαταρίες είναι οι πιο ευρέως διαδεδομένες συσκευές αποθήκευσης, λόγω του ότι είναι φορητά μέσα που μπορούν να μετακινηθούν και να εγκατασταθούν οπουδήποτε. Η χρήση των μπαταριών μολύβδου - οξέος χρονολογείται από τα μέσα του 18^{ου} αιώνα. Παρότι το είδος αυτό των συσσωρευτών διαθέτει μικρή ενεργειακή πυκνότητα και περιορισμένο αριθμό κύκλων φόρτισης – εκφόρτισης, εξακολουθεί να είναι η επικρατέστερη τεχνολογία μπαταριών σε εφαρμογές χαμηλού κόστους (όπως μπαταρίες αυτοκινήτου, εφαρμογές αδιάλειπτης παροχής ισχύος). Πρόσφατες μελέτες στρέφονται στην αντικατάσταση του μολύβδου με ελαφρότερα υλικά όπως ο άνθρακας, με σκοπό την αύξηση του επιπέδου παραγωγής ισχύος καθώς και της πυκνότητας ενέργειας που αποθηκεύεται.

Οι μπαταρίες λιθίου – ιόντος (Li - ion) διαθέτουν μεγαλύτερη πυκνότητα ενέργειας, καθώς και μικρότερο ποσοστό εκφόρτισης σε συνθήκες εκτός λειτουργίας. Ωστόσο, το κόστος αυτού του είδους των συσσωρευτών είναι αρκετά υψηλό έναντι των μπαταριών μολύβδου – οξέος, και χρησιμοποιείται σε εφαρμογές όπως κινητά τηλέφωνα, φωτογραφικές μηχανές και λάμπες. Οι συσσωρευτές λιθίου - ιόντος αναμένεται να διεισδύσουν περισσότερο στην αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας λόγω της υψηλής ενεργειακής πυκνότητας που διαθέτουν, και μελετάται να χρησιμοποιηθούν σε εφαρμογές όπως ηλεκτρικά αυτοκίνητα ή για την εξομάλυνση της μεταβλητότητας της αιολικής παραγωγής.

Οι μπαταρίες νικελίου – καδμίου (NiCd) έχουν υψηλότερη ενεργειακή πυκνότητα και μεγαλύτερη διάρκεια ζωής από τις μπαταρίες μολύβδου – οξέος, αλλά είναι κατώτερης ποιότητας από τους συσσωρευτές τύπου λιθίου – ιόντος και του νικελίου υβριδίου μετάλλου (NiMH). Τα μειονεκτήματα των μπαταριών NiCd έναντι των NiMH είναι η μικρότερη διάρκεια ζωής, η τοξικότητα του καδμίου, η χαμηλότερη ενεργειακή πυκνότητα, η επίπεδη καμπύλη εκφόρτισης, και ο αρνητικός θερμοκρασιακός συντελεστής.

Οι συσσωρευτές NiMH έχουν πλέον επικρατήσει αντί των NiCd λόγω των προαναφερθέντων πλεονεκτημάτων. Ωστόσο, η λειτουργία τους συνεπάγεται και κάποια αρνητικά αποτελέσματα όπως ο υψηλός ρυθμός εκφόρτισης σε συνθήκες εκτός λειτουργίας.

Οι μπαταρίες θειούχου νατρίου (NaS) υπερτερούν κατά πολύ έναντι των συσσωρευτών μολύβδου – οξέος, διαθέτοντας πλεονεκτήματα όπως υψηλή πυκνότητα ισχύος και ενέργειας, υψηλή απόδοση, σταθερή θερμοκρασία λειτουργίας και μεγάλη ασφάλεια. Οι μπαταρίες αυτές κατασκευάζονται σχετικά με μικρό κόστος με αποτέλεσμα να συνιστούν την καλύτερη επιλογή για μαζική παραγωγή συσσωρευτών. Οι μπαταρίες NaS μπορούν να χρησιμοποιηθούν στο ηλεκτρικό δίκτυο αποθηκεύοντας ενέργεια στις περιόδους χαμηλής ζήτησης και επιστρέφοντάς την στο δίκτυο στις αιχμές του φορτίου. Επίσης δύναται να χρησιμοποιηθούν ως διατάξεις άμεσης παραγωγής ισχύος στην περίπτωση κάποιας διαταραχής στο δίκτυο ή ακόμα και ως διατάξεις αδιάλειπτης παροχής ισχύος σε αυτόνομες εφαρμογές. Παρατηρούμε λοιπόν ότι το είδος αυτό των συσσωρευτών είναι κατάλληλο για την ενσωμάτωση στο δίκτυο, συμβάλλοντας στη βελτίωση της δυναμικής απόκρισής του. Το παραπάνω γεγονός είναι τεράστιας σημασίας για συστήματα όπου η διείσδυση των αιολικών πάρκων είναι μεγάλη, δίνοντας τη δυνατότητα της εξομάλυνσης της μεταβλητότητας της

αιολικής ισχύος με τη διαρκή μεταφορά ηλεκτρικής ισχύος από το δίκτυο προς της μπαταρίες και το αντίστροφο.

Οι συσσωρευτές ροής (flow batteries - FBs) είναι μία νέα υποσχόμενη τεχνολογία, με κύριο χαρακτηριστικό την απόξεση της συνολικής αποθηκευμένης ενέργειας από την ικανότητα παροχής ισχύος. Έτσι δύναται να παραχθούν συσσωρευτές τύπου FBs με δυνατότητα καθορισμού του επιπέδου της ισχύος και της μέγιστης δυνατής ενέργειας προς αποθήκευση, ανεξάρτητα. Το γεγονός αυτό προσδίδει μεγάλη ευελιξία στην επιλογή των τεχνικών χαρακτηριστικών των συσσωρευτών. Έτσι, οι συσσωρευτές αυτού του είδους μπορούν να χρησιμοποιηθούν στο ηλεκτρικό δίκτυο ως συσκευές αποθήκευσης ενέργειας, δεδομένου ότι πλέον η ενέργεια προς αποθήκευση και η ισχύς των συσσωρευτών επιλέγεται έτσι ώστε να προσαρμόζεται στις απαιτήσεις του δικτύου. Τα πλεονεκτήματα των συσσωρευτών αυτών είναι η μεγάλη διάρκεια ζωής, η ευκολία στη συντήρηση, ο μεγάλος ρυθμός φόρτισής τους, η υψηλή πυκνότητα ισχύος και ενέργειας, η ικανότητα πλήρους εκφόρτισης, η χρήση μη διαβρωτικών μετάλλων και η λειτουργία υπό χαμηλή θερμοκρασία. Το κύριο μειονέκτημα της λειτουργίας τους είναι η χρήση μηχανικών κινητών μερών.

B) Υπερπυκνωτής (supercapacitor)

Ο υπερπυκνωτής είναι ένας ηλεκτρικός πυκνωτής διπλού στρώματος. Η αξία του υπερβαίνει σε αρκετές περιπτώσεις την αξία του ηλεκτρολυτικού πυκνωτή ακόμα και κατά χίλιες φορές. Οι μεγαλύτεροι πυκνωτές που κατασκευάζονται διαθέτουν χωρητικότητα έως 5000 farad και ενεργειακή πυκνότητα ύψους 30 Wh / kg. Εξαιτίας της μεγάλης αγωγιμότητας και της μικρής απόστασης των ηλεκτροδίων, οι υπερπυκνωτές εμφανίζουν μικρή διαφορά δυναμικού (συνήθως από 2 έως 3 V). Η διάρκεια ζωής τους είναι αρκετά μεγάλη, λόγω του ότι υπό φυσιολογικές συνθήκες λειτουργίας δεν σημειώνονται χημικές αντιδράσεις στα ηλεκτρόδια. Επίσης διαθέτουν υψηλό συντελεστή απόδοσης, ο οποίος εξαρτάται μόνο από την ωμική αντίσταση των ηλεκτροδίων. Η πυκνότητα ισχύος τους είναι πολύ υψηλή, δεδομένου ότι τα φορτία αποθηκεύονται με φυσικό τρόπο στα ηλεκτρόδια, ενώ αντίθετως η πυκνότητα ενέργειας είναι μικρή λόγω του γεγονότος πως τα ηλεκτρόδια δεν συνοδεύονται από χημικές αντιδράσεις. Η απουσία των χημικών στοιχείων από τους υπερπυκνωτές (που αντίθετα ενυπάρχουν στους ηλεκτρολυτικούς πυκνωτές) συνεπάγεται πως μπορούν να εκφορτιστούν πλήρως, οδηγώντας σε μεγάλες ταλαντώσεις της τάσης καθώς το επίπεδο φόρτισης μεταβάλλεται. Οι υπερπυκνωτές δεν μπορούν να αντικαταστήσουν τις μπαταρίες, λόγω του χάσματος μεταξύ των δύο διατάξεων ως προς την πυκνότητα ενέργειας και του κόστους αγοράς. Ωστόσο, οι υβριδικές διατάξεις συσσωρευτών – υπερπυκνωτών μπορούν να βελτιώσουν την απόδοση της αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας και να αυξήσουν το χρόνο ζωής των μπαταριών. Τα υβριδικά αυτά συστήματα είναι κατάλληλες διατάξεις για την χρήση σε ηλεκτρικά αυτοκίνητα και για εφαρμογές της αιολικής παραγωγής.

Γ) Υπεραγωγίμα πηνία (SMES)

Το υπεραγωγίμο πηνίο είναι μια ηλεκτρομαγνητική διάταξη, όπου η ηλεκτρική ενέργεια αποθηκεύεται στο μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται από την ροή συνεχούς ρεύματος (dc current) σε ένα υπεραγωγίμο τύλιγμα. Το τύλιγμα ψύχεται με υγρό ήλιο σε θερμοκρασίας κάτω της κρίσιμης, για την εμφάνιση του φαινομένου της (σχεδόν) μηδενικής αντίστασης. Τα SMES έχουν πολύ μεγάλη πυκνότητα ηλεκτρικής ισχύος, μεγάλο συντελεστή απόδοσης (άνω του 90 %), και αρκετά μικρή χρονική απόκριση (της τάξεως των ms). Τα υπεραγωγίμα πηνία μπορούν να βρουν εφαρμογή στα ηλεκτρικά δίκτυα με αυξημένη αιολική διείσδυση, βελτιώνοντας σημαντικά την ποιότητα ισχύος.

Δ) Κυψέλες καυσίμου

Οι κυψέλες καυσίμου είναι μικρές δεξαμενές όπου παράγεται και αποθηκεύεται υδρογόνο [35]. Όταν απαιτηθεί, το υδρογόνο μέσω της διαδικασίας της καύσης δύναται να παράγει ηλεκτρική ενέργεια. Το κατάλοιπο της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από κυψέλες καυσίμου είναι καθαρό νερό. Η συγκεκριμένη τεχνολογία είναι από τις πιο φιλικές προς το περιβάλλον και δύναται να αποθηκευθούν μεγάλα ποσά ηλεκτρικής ενέργειας. Το μεγάλο μειονέκτημα είναι η χαμηλή απόδοση, η οποία στη γενική περίπτωση είναι της τάξης του 25%.

Ε) Πεπιεσμένος αέρας (CAES)

Η αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας μέσω πεπιεσμένου αέρα είναι το βασικό αντικείμενο μελέτης της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Η γενική λογική είναι ότι σε περιόδους χαμηλής ζήτησης του φορτίου, καταναλώνεται ισχύς από συστοιχία συμπιεστών οι οποίοι συμπιέζουν αέρα που αποθηκεύεται σε κάποια δεξαμενή. Οι συμπιεστές ευρίσκονται στον ίδιο άξονα με ένα ηλεκτρικό κινητήρα, ο οποίος απορροφά ηλεκτρική ισχύ για την περιστροφή του. Έτσι η ηλεκτρική ενέργεια μετατρέπεται σε δυναμική ενέργεια του αέρα. Σε περιόδους αιχμής του φορτίου, ο πεπιεσμένος αέρας από τη δεξαμενή, αφού προθερμανθεί, εκτονώνεται σε έναν στρόβιλο παράγοντας περιστροφική ισχύ η οποία, με τη γεννήτρια που είναι προσαρτημένη στον ίδιο άξονα, μετατρέπεται σε ηλεκτρική και εγχέεται στο δίκτυο. Η λειτουργία των συστημάτων αποθήκευσης πεπιεσμένου αέρα (CAES) έχει παρόμοια χαρακτηριστικά με τις υδραντλητικές μονάδες, με τυπική εγκατεστημένη ισχύ από 50 – 300 MW [35]. Η πλήρης περιγραφή της λειτουργίας των συστημάτων CAES γίνεται στο Κεφάλαιο 3.

Ζ) Στρεφόμενοι σφόνδυλοι (Flywheel Energy Storage - FES)

Η αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας μέσω στρεφόμενου σφονδύλου επιτυγχάνεται με την επιτάχυνση ενός δρομέα σε μία πολύ υψηλή ταχύτητα, μετατρέποντας την ηλεκτρική ισχύ σε περιστροφική στον εν λόγω άξονα. Όταν απορροφάται ενέργεια από τη διάταξη FES, η ταχύτητα περιστροφής του σφονδύλου αυξάνει ως απόρροια της διατήρησης της ενέργειας. Το αντίθετο συμβαίνει όταν αποδίδεται ενέργεια στο ηλεκτρικό σύστημα από τη διάταξη FES, όπου η ταχύτητα περιστροφής του σφονδύλου μειώνεται. Η συγκεκριμένη υλοποίηση μπορεί να βρει εφαρμογή στην αιολική παραγωγή, όπου με τη χρήση AC-AC μετατροπέα αμφίδρομης ροής ισχύος, η ενσωματωμένη γεννήτρια – κινητήρας στο σφόνδυλο επιταχύνεται και επιβραδύνεται, απορροφώντας της απότομες διακυμάνσεις της αιολικής ισχύος. Η ταχύτητα των στρεφόμενων σφονδύλων κυμαίνεται από 20000 έως 50000 στροφές ανά λεπτό (Σ.Α.Λ.). Οι συγκεκριμένες διατάξεις αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής, υψηλή πυκνότητα ενέργειας (100 – 130 Wh / kg) και ικανότητα για μεγάλη παραγωγή ισχύος. Ο βαθμός απόδοσης των FES φτάνει το 90%. Η ικανότητα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας κυμαίνεται από 3 kWh έως 133 kWh. Η πλήρης φόρτιση των διατάξεων αυτών επέρχεται σε λιγότερο από 15 λεπτά. Η ροή ενέργειας στα συστήματα FES ελέγχεται με την ηλεκτρική μηχανή που είναι προσαρτημένη στον ίδιο άξονα με τον σφόνδυλο, μέσω του αντιστροφέα που προαναφέρθηκε. Η ηλεκτρική μηχανή αυτή είναι συνήθως μια 3φασική γεννήτρια – κινητήρας. Η χρήση των στρεφόμενων σφονδύλων είναι πολύ ευνοϊκή για τη ρύθμιση συχνότητας και την βελτίωση της ποιότητας ισχύος του ηλεκτρικού δικτύου, ειδικά σε περιπτώσεις μεγάλης διείσδυσης της αιολικής παραγωγής, όπως αναφέρθηκε παραπάνω.

Η) Υβριδικά συστήματα

Η επιλογή του κατάλληλου συστήματος αποθήκευσης για μια εφαρμογή εξαρτάται από την ικανότητα αποθήκευσης και παραγωγής ενέργειας και ισχύος, το χρόνο απόκρισης, το βάρος, τον όγκο, και τη θερμοκρασία λειτουργίας της κάθε διάταξης. Συχνά, οι προαναφερθείσες διατάξεις μεμονωμένα δεν ικανοποιούν στο μέγιστο βαθμό τις τεχνικές απαιτήσεις της κάθε εφαρμογής. Μερικές εφαρμογές απαιτούν συνδυασμό των χαρακτηριστικών λειτουργίας των διαφόρων διατάξεων αποθήκευσης, όπως συγκεκριμένη πυκνότητα ισχύος και ενέργειας, καθορισμένο κόστος και χρόνο ζωής. Έτσι προκύπτουν τα υβριδικά συστήματα αποθήκευσης, τα οποία σχηματίζονται από την ηλεκτρική διασύνδεση κάποιων από των διατάξεων που αναφέρθηκαν παραπάνω. Παραδείγματα υβριδικών συστημάτων είναι τα εξής :

- Συσσωρευτές (μεγάλη ικανότητα παραγωγής ενέργειας) σε συνδυασμό με υπερπυκνωτές (μεγάλη ικανότητα παραγωγής ισχύος)
- Συσσωρευτές (μεγάλη ικανότητα παραγωγής ενέργειας) σε συνδυασμό με στρεφόμενους σφονδύλους (μεγάλη ικανότητα παραγωγής ισχύος)
- Συσσωρευτές (μεγάλη ικανότητα παραγωγής ενέργειας) σε συνδυασμό με υπεραγωγία πηνία (μεγάλη ικανότητα παραγωγής ισχύος)
- Κυψέλες καυσίμου (μεγάλη ικανότητα παραγωγής ενέργειας) σε συνδυασμό με συσσωρευτές (μεγάλη ικανότητα παραγωγής ισχύος)
- Πεπιεσμένος αέρας (μεγάλη ικανότητα παραγωγής ενέργειας) σε συνδυασμό με υπερπυκνωτές ή συσσωρευτές (μεγάλη ικανότητα παραγωγής ισχύος)

Θ) Υδροηλεκτρικός σταθμός με αντλησιοταμίευση (PHS)

Οι συμβατικοί υδραντλητικοί σταθμοί αποτελούνται από δύο δεξαμενές, οι οποίες είναι κατασκευασμένες σε υψομετρική διαφορά μεταξύ τους. Κατά τις περιόδους όπου η ζήτηση του φορτίου και η τιμή της ενέργειας είναι χαμηλή, μάζα νερού μεταφέρεται από την κάτω δεξαμενή στην πάνω. Αυτό επιτυγχάνεται με την περιστροφή ηλεκτρικών κινητήρων, όπου η ηλεκτρική ενέργεια που απορροφάται από το δίκτυο μετατρέπεται αρχικά σε κινητική και τέλος σε δυναμική ενέργεια του νερού λόγω της υψομετρικής διαφοράς των δύο δεξαμενών. Αντιθέτως, σε περιόδους αιχμής του φορτίου, μάζα νερού ελευθερώνεται από την άνω δεξαμενή, με αποτέλεσμα να δημιουργείται ροή νερού με υψηλή ταχύτητα η οποία εκτονώνεται σε κάποιον υδροστρόβιλο παράγοντας ηλεκτρική ισχύ. Τα υδροηλεκτρικά εργοστάσια μπορούν να παράγουν ισχύ έως και 1 GW [35] .

Η λειτουργία των υδροηλεκτρικών μονάδων βασίζεται λοιπόν στην κίνηση του νερού λόγω διαφοράς μανομετρικού ύψους μεταξύ των σημείων εισόδου και εξόδου. Για το σκοπό αυτό κατασκευάζεται ένα φράγμα που συγκρατεί την απαιτούμενη ποσότητα νερού στον δημιουργούμενο ταμιευτήρα. Κατά τη διέλευσή του από τον αγωγό πτώσεως, το νερό κινεί έναν στρόβιλο ο οποίος θέτει σε λειτουργία τη γεννήτρια. Η ποσότητα της ηλεκτρικής ισχύος που παράγεται καθορίζεται από αρκετούς παράγοντες. Δύο από τους σημαντικότερους είναι ο όγκος του νερού που ρέει και η διαφορά μανομετρικού ύψους μεταξύ της ελεύθερης επιφάνειας του ταμιευτήρα και του στρόβιλου. Η ηλεκτρική παραγόμενη ισχύς, συγκεκριμένα, είναι ανάλογη των δύο αυτών μεγεθών. Για το λόγο αυτό, μόνο σε περιοχές με σημαντικές βροχοπτώσεις, πλούσιες πηγές και κατάλληλη γεωλογική διαμόρφωση είναι δυνατόν να κατασκευαστούν υδροηλεκτρικά έργα. Συνήθως η ενέργεια που τελικώς παράγεται, χρησιμοποιείται συμπληρωματικά με άλλες συμβατικές πηγές ενέργειας,

καλύπτοντας φορτία αιχμής. Στη χώρα μας η υδροηλεκτρική ενέργεια ικανοποιεί περίπου το 9% των ενεργειακών μας αναγκών σε ηλεκτρισμό.

Τα υδροηλεκτρικά έργα ταξινομούνται σε μεγάλης και μικρής κλίμακας. Τα μικρής κλίμακας υδροηλεκτρικά έργα διαφέρουν σημαντικά από της μεγάλης κλίμακας σε ότι αφορά τις επιπτώσεις τους στο περιβάλλον. Οι μεγάλης κλίμακας υδροηλεκτρικές μονάδες απαιτούν τη δημιουργία φραγμάτων και τεράστιων δεξαμενών με σημαντικές επιπτώσεις στο περιβάλλον. Η κατασκευή φραγμάτων περιορίζει τη μετακίνηση των ψαριών, της άγριας ζωής, και επηρεάζει ολόκληρο το οικοσύστημα καθώς μεταβάλλει ριζικά τη μορφολογία της περιοχής. Αντίθετα, τα μικρής κλίμακας υδροηλεκτρικά εγκαθίστανται δίπλα σε ποτάμια ή κανάλια και η λειτουργία τους παρουσιάζει πολύ μικρότερη περιβαλλοντική όχληση. Για το λόγο αυτό, οι υδροηλεκτρικές μονάδες μικρότερης δυναμικότητας από 30 MW χαρακτηρίζονται ως μικρής κλίμακας υδροηλεκτρικά έργα και συμπεριλαμβάνονται μεταξύ των μονάδων παραγωγής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές. Κατά τη λειτουργία τους, μέρος της ροής ενός ποταμού οδηγείται σε στρόβιλο για την παραγωγή μηχανικής ενέργειας και συνακόλουθα ηλεκτρικής μέσω της γεννήτριας. Η χρησιμοποιούμενη ποσότητα νερού κατόπιν επιστρέφει στο φυσικό ταμειυτήρα ακολουθώντας τη φυσική της ροή.

Τα κύρια πλεονεκτήματα της υδροηλεκτρικής ενέργειας που προέρχεται από μονάδες μικρής και μεγάλης κλίμακας είναι:

- Οι υδροηλεκτρικοί σταθμοί είναι δυνατό να τεθούν σε λειτουργία αμέσως μόλις απαιτηθεί, σε αντίθεση με τους θερμικούς σταθμούς που απαιτούν σημαντικό χρόνο προετοιμασίας
- Είναι μία "καθαρή" και ανανεώσιμη πηγή ενέργειας, με τα προαναφερθέντα συνακόλουθα οφέλη (εξοικονόμηση δαπανών εισαγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, προστασία περιβάλλοντος)
- Μέσω των υδατοταμειυτήρων δίνεται η δυνατότητα να ικανοποιηθούν και άλλες ανάγκες, όπως ύδρευση, άρδευση, ανάσχεση χειμάρρων, δημιουργία υγροτόπων, περιοχών αναψυχής και αθλητισμού

Ως μειονεκτήματα αναφέρονται μόνο αποτελέσματα που σχετίζονται με τη δημιουργία έργων μεγάλης κλίμακας, όπως:

- Το μεγάλο κόστος κατασκευής φραγμάτων και εγκατάστασης εξοπλισμού, καθώς και ο συνήθως μεγάλος χρόνος που απαιτείται για την αποπεράτωση του έργου
- Η έντονη περιβαλλοντική αλλοίωση της περιοχής του έργου (συμπεριλαμβανομένων της γεωμορφολογίας, της πανίδας και της χλωρίδας)

Όσον αφορά την αντλησιοταμίευση, πρέπει να υπάρχει συγκεκριμένη δεξαμενή σε μεγάλο υψόμετρο ώστε να παρέχεται η δυνατότητα αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας με τη μεταφορά υδάτων από χαμηλό υψόμετρο σε μεγαλύτερο. Έτσι τα αρνητικά αποτελέσματα των έργων μεγάλης κλίμακας, όπως η ανάγκη για φράγματα με τις ακόλουθες περιβαλλοντικές επιπτώσεις, ενυπάρχουν και στην περίπτωση που για την αποθήκευση ενέργειας επιλεγθούν τα υδροηλεκτρικά – αντλητικά εργοστάσια. Αυτός είναι και ο βασικότερος λόγος όπου έχει περιοριστεί στο ελάχιστο η κατασκευή νέων υδροηλεκτρικών έργων.

1.5.3 Σύγκριση μεθόδων αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας

Οι Πίνακες 1.1 και 1.2 συνοψίζουν τις διατάξεις και μεθόδους αποθήκευσης που περιγράφηκαν, παρουσιάζοντας τα πλεονεκτήματα, τα μειονεκτήματα, το βαθμό απόδοσης, το πεδίο εφαρμογών, το εκτιμώμενο κόστος και το εύρος τιμών της εγκατεστημένης ισχύος της κάθε τεχνολογίας αποθήκευσης [35]. Στον Πίνακα 1.3 αναφέρεται η τυπική πυκνότητα ενέργειας, πυκνότητα ισχύος και η διάρκεια ζωής των διαφορετικών τεχνολογιών αποθήκευσης [36], [38].

Από τις προαναφερθείσες τεχνολογίες αποθήκευσης, οι μόνες κατάλληλες για αποθήκευση και παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στην κλίμακα ενέργειας και ισχύος του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, για αρκετές ώρες λειτουργίας με χαμηλό κόστος, είναι η αντλησιοταμίευση (PHS) και οι διατάξεις CAES [41]. Τα υπόλοιπα είδη αποθήκευσης, όπως οι υπερπυκνωτές και οι στρεφόμενοι σφόνδυλοι, μπορούν να συνεισφέρουν στην αντιμετώπιση μεταβατικών φαινομένων και στη βελτίωση της ποιότητας ισχύος, αλλά δεν είναι οικονομικά ελκυστικές εφαρμογές για την υποστήριξη της αιολικής παραγωγής και της τροφοδότησης του φορτίου. Κάποια είδη συσσωρευτών νέας τεχνολογίας (όπως συσσωρευτές θειούχου νατρίου και οι οξειδοαναγωγικές μπαταρίες βαναδίου) διαθέτουν την δυνατότητα της εξομάλυνσης της αιολικής ισχύος, ωστόσο η ικανότητα αποθήκευσης ενέργειας και παραγωγής ισχύος (έως 10 MW, με χρόνο μέγιστης παραγωγής ισχύος κάτω των 10 ωρών) υπολείπεται αρκετά από τα συστήματα CAES και PHS, και το κόστος εγκατάστασης είναι υψηλότερο.

Η λειτουργία των υδροηλεκτρικών – αντλητικών μονάδων δεν απαιτεί καύσιμο, και η εμπειρία σε αυτές τις εφαρμογές είναι μεγαλύτερη συγκριτικά με τα συστήματα CAES. Ωστόσο, όπως έχει αναφερθεί, η κατασκευή ενός εργοστασίου PHS απαιτεί την ύπαρξη ταμιευτήρων σε διαφορετικό υψόμετρο, γεγονός που συνεπάγεται μεγάλο κόστος κατασκευής και δυσμενείς περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Αντιθέτως, η αποθήκευση ενέργειας υπό μορφή πεπιεσμένου αέρα μπορεί να γίνει σε διάφορα είδη δεξαμενών, είτε σε επίγειες είτε σε υπόγειες εγκαταστάσεις, προσδίδοντας μεγαλύτερη ευελιξία στην επιλογή τοποθεσίας και στην κατασκευή τους. Συγκεκριμένα, για μικρής κλίμακας εφαρμογές, ο πεπιεσμένος αέρας μπορεί να αποθηκευτεί σε ειδικές σωληνώσεις άνω του εδάφους. Όσο αυξάνει η εγκατεστημένη ισχύς των μονάδων αυτών, τόσο αυξάνει η δυσκολία και το κόστος αποθήκευσης του αέρα σε επίγειες εγκαταστάσεις. Έτσι, για μεγάλης κλίμακας έργα, ο αέρας αποθηκεύεται σε υπόγειες εγκαταστάσεις με κατάλληλη γεωλογική διαμόρφωση, όπως ορυχεία εξόρυξης αλατιού, υπόγεια υδροφόρα στρώματα, εγκαταλελειμμένα ανθρακωρυχεία, και υπόγεια βραχώδη σπήλαια. Η διαθεσιμότητα αυτών των γεωλογικών σχηματισμών είναι αρκετά υψηλότερη από την αντίστοιχη για τις μονάδες αντλησιοταμίευσης, και οι τεχνοοικονομικοί – περιβαλλοντικοί περιορισμοί είναι πολύ λιγότεροι για τα συστήματα CAES. Το γεγονός αυτό δύναται να οδηγήσει στην στροφή της αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας προς τη λογική των μονάδων CAES, αποκομίζοντας ευεργετικά οφέλη για την αύξηση της διείσδυσης της αιολικής ενέργειας στα ηλεκτρικά συστήματα.

Πίνακας 1.1 : Πλεονεκτήματα, μειονεκτήματα και πεδίο εφαρμογής κάθε είδους αποθήκευσης

| Τεχνολογία αποθήκευσης | Πλεονεκτήματα | Μειονεκτήματα | Πεδίο εφαρμογής |
|----------------------------|---|--|---|
| Αντλησιοταμίευση | Μεγάλη ικανότητα παραγωγής ενέργειας και ισχύος, μέτριος χρόνος απόκρισης, μεγάλη διάρκεια ζωής | Εγκατάσταση σε ειδικές γεωλογικές τοποθεσίες, δυσμενείς περιβαλλοντικές επιπτώσεις, μεγάλο κόστος εγκατάστασης, μεγάλος χρόνος κατασκευής | Στρεφόμενη εφεδρεία, ρύθμιση συχνότητας |
| Συσσωρευτές τύπου NaS | Μεγάλη πυκνότητα ενέργειας και ισχύος, μεγάλη ικανότητα παραγωγής ενέργειας και ισχύος, μεγάλη διάρκεια ζωής | Σχετικά υψηλό κόστος εγκατάστασης, θέματα ασφάλειας στη μαζική χρήση τους | Μείωση μεταβλητότητας ισχύος, αδιάλειπτη παροχή ισχύος (UPS), εφαρμογή στο δίκτυο μεταφοράς και διανομής, βελτίωση ποιότητας ισχύος |
| Συσσωρευτές τύπου Li - ion | Μεγάλη πυκνότητα ενέργειας, μικρός χρόνος απόκρισης | Πολύ μικρή διείσδυση στην αγορά ηλεκτρικής ενέργειας λόγω τεχνικών και οικονομικών ζητημάτων | Μείωση μεταβλητότητας ισχύος, αδιάλειπτη παροχή ισχύος (UPS), ηλεκτρικά αυτοκίνητα |
| Στρεφόμενος σφόνδυλος | Μεγάλη ικανότητα παραγωγής ισχύος, μικρός χρόνος απόκρισης, μεγάλη διάρκεια ζωής, μικρό κόστος συντήρησης, ελάχιστες περιβαλλοντικές επιπτώσεις, ταχεία φόρτιση | Μικρή πυκνότητα ενέργειας, μικρή ικανότητα παραγωγής ενέργειας, σημαντικές απώλειες κατά τη λειτουργία, επικινδυνότητα στην περίπτωση βλάβης κατά την περιστροφή | Βελτίωση της ποιότητας ισχύος, υποστήριξη του δικτύου μεταφοράς, ρύθμιση συχνότητας |
| Υπερπυκνωτής | Υψηλός βαθμός απόδοσης, μεγάλη διάρκεια ζωής, ταχεία φόρτιση | Χαμηλή πυκνότητα ενέργειας, λίγες εφαρμογές στα ΣΗΕ, σημαντικό κόστος, ανάγκη για ηλεκτρονικά ισχύος | Βελτίωση της ποιότητας ισχύος, ικανότητα άμεσης παροχής ισχύος, υποστήριξη του δικτύου μεταφοράς |
| CAES | Ικανότητα μεγάλης παραγωγής ενέργειας και ισχύος, μεγάλη διάρκεια ζωής | Περιορισμένες τοποθεσίες εγκατάστασης, ανάγκη για καύσιμο | Στρεφόμενη εφεδρεία, ρύθμιση συχνότητας |
| Κυψέλες υδρογόνου | Ικανότητα μεγάλης παραγωγής ενέργειας και ισχύος | Υψηλό κόστος, μικρός βαθμός απόδοσης | Μείωση μεταβλητότητας ισχύος, στρεφόμενη εφεδρεία |

| | | | |
|------|--|---|---|
| SMES | Ικανότητα πολύ μεγάλης παραγωγής ισχύος, μικρός χρόνος απόκρισης, μεγάλη διάρκεια ζωής | Μικρή πυκνότητα ενέργειας, υψηλό κόστος παραγωγής, πιθανώς επιζήμιο για την υγεία | Βελτίωση ποιότητας ισχύος, εφαρμογή στο δίκτυο μεταφοράς και διανομής |
|------|--|---|---|

Πίνακας 1.2 : Βαθμός απόδοσης, αναμενόμενο κόστος και τυπική ισχύς κάθε είδους αποθήκευσης

| Τεχνολογία αποθήκευσης | Βαθμός απόδοσης | Εκτιμώμενο κόστος | Εγκατεστημένη ισχύς |
|----------------------------|-----------------|----------------------|--|
| Αντλησιοταμίευση | 70 - 85 % | 500 - 1600 \$ / kW | Έως 2,1 GW |
| Συσσωρευτές τύπου NaS | 80 - 90 % | 350 - 1000 \$ / kW | 100 W - 20 MW |
| Συσσωρευτές τύπου Li - ion | 85 - 95 % | 350 - 1000 \$ / kW | 100 W - 20 MW |
| Στρεφόμενος σφόνδυλος | 90 - 95 % | 500 - 6000 \$ / kW | σε κλίμακα kW |
| Υπερπυκνωτής | 90 - 95 % | 250 - 500 \$ / kW | 7 - 10 W (εμπορικές εφαρμογές), 10 - 20 kW (ειδικές εφαρμογές) |
| CAES | 70 - 80 % | 350 - 500 \$ / kW | 25 - 350 MW |
| Κυψέλες υδρογόνου | 45 - 65 % | 350 - 1500 \$ / kW | σε κλίμακα kW |
| SMES | 90 - 95 % | 1000 \$ / kW περίπου | Από 1 - 10 MW (μικρής κλίμακας SMES) έως 10 - 100 MW (μεγάλης κλίμακας SMES) |

Πίνακας 1.3 : Σύγκριση μεθόδων αποθήκευσης ως προς τις πυκνότητες ισχύος και ενέργειας, και ως προς τη διάρκεια ζωής

| Τεχνολογία αποθήκευσης | Πυκνότητα ενέργειας (Wh / kg) | Πυκνότητα ισχύος (W / kg) | Διάρκεια ζωής |
|------------------------|-------------------------------|---------------------------|---|
| Συσσωρευτές | 30 – 200 | 150 – 3000 | 100 - 3000 κύκλοι φόρτισης - εκφόρτισης |
| Στρεφόμενος σφόνδυλος | 100 - 130 | 1000 | άνω των 20.000 κύκλων φόρτισης - εκφόρτισης |
| Αντλησιοταμίευση (PHS) | 0,3 | - | 75 έτη |
| SMES | 30 | Πολύ υψηλή | - |
| CAES | 10 – 30 | - | 40 έτη |
| Υπερπυκνωτής | Χαμηλή | Πολύ υψηλή | 10.000 - 100.000 κύκλοι φόρτισης - εκφόρτισης |

Τα συστήματα CAES μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας σε περιπτώσεις όπου η αιολική παραγωγή είναι μεγάλη, και μέρος της παραγόμενης ισχύος απορρίπτεται, εξαιτίας των περιορισμών διείσδυσης ή λόγω της υπερφόρτωσης των γραμμών μεταφοράς. Η ενέργεια αυτή θα επιστραφεί στο δίκτυο όταν η αιολική παραγωγή μειωθεί σημαντικά ή το φορτίο του συστήματος αυξηθεί, μετριάζοντας κατ' αυτόν τον τρόπο τη διατάραξη του ισοζυγίου μεταξύ παραγόμενης και καταναλισκόμενης ισχύος. Η αντιμετώπιση της μεταβλητότητας του ανέμου και του ηλεκτρικού φορτίου απαιτεί μεγάλη ικανότητα παροχής ισχύος και ενέργειας καθώς και

υψηλό ρυθμό απόκρισης, χαρακτηριστικά τα οποία τα διαθέτουν οι μονάδες CAES. Διάφορες μελέτες έχουν καταλήξει ότι οι γεωλογικές διαμορφώσεις που απαιτεί η εγκατάσταση των συστημάτων αυτών ευρίσκονται σε περιοχές με πλούσιο αιολικό δυναμικό. Το γεγονός αυτό ευνοεί την εγκατάσταση αιολικών πάρκων και μονάδων CAES στην ίδια περιοχή. Η εγκατάσταση των αιολικών πάρκων στην ίδια περιοχή με τις μονάδες CAES προσφέρει τη δυνατότητα της άμεσης απορρόφησης ισχύος στην περίπτωση που αυτή δεν μπορεί να εγχυθεί στο δίκτυο λόγω της υπερφόρτωσης των γραμμών μεταφοράς.

Η χρήση των συστημάτων CAES συμβάλλει στην αύξηση της αιολικής διείσδυσης στην ηλεκτροπαραγωγή και δύναται να μειώσει το κόστος της αιολικής ενέργειας ακόμη και σε χαμηλά επίπεδα διείσδυσης [41]. Τα αιολικά πάρκα σε συνδυασμό με μονάδες αποθήκευσης πεπιεσμένου αέρα θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν ως μονάδες βάσης, δεδομένου ότι η παραγόμενη ισχύς από την υβριδική αυτή εφαρμογή θα είναι σταθερή και θα προσαρμόζεται ανάλογα με τις απαιτήσεις του φορτίου. Οι τυπικοί συντελεστές αξιοποίησης της αιολικής ενέργειας στα περισσότερα ηλεκτρικά συστήματα είναι της τάξης του 30 – 40 %. Με την εγκατάσταση μονάδων CAES το ποσοστό διείσδυσης μπορεί να φτάσει τιμές 80 – 90 % της παραγωγής των συμβατικών μονάδων βάσης.

Συνοψίζοντας, καταλήγουμε ότι τα συστήματα CAES είναι μία πολύ καλή λύση για την αντιμετώπιση της μεταβλητότητας της αιολικής παραγωγής, για την αντιμετώπιση των αιχμών φορτίου, για την παροχή βοηθητικών υπηρεσιών στο δίκτυο όπως ρύθμιση συχνότητας και τάσεως, και υπερτερούν σε σχέση με τις αντλητικές μονάδες όσον αφορά την τοποθεσία, το κόστος, και τους επιβεβλημένους περιορισμούς εγκατάστασης.

1.6 Επισκόπηση βιβλιογραφίας

Όπως προαναφέρθηκε, οι εφαρμογές με προσυμπιεσμένο αέρα σε αεριοστροβιλικούς σταθμούς μπορούν να βελτιώσουν τη ρύθμιση συχνότητας. Στη διπλωματική εργασία [4] περιγράφονται τα μοντέλα του αεριοστροβίλου απλού και διπλού άξονα, τα οποία είναι κατάλληλα για μελέτες ευστάθειας. Επίσης αναπτύσσεται ένα μοντέλο αεροφυλακίου, βασισμένο στην αναφορά [10], το οποίο εντάσσεται στο μοντέλο αεριοστροβίλου απλού άξονα. Τέλος, αναφέρεται η αρχή λειτουργίας των θερμικών στροβιλομηχανών και συγκεκριμένα των αεριοστροβιλικών μονάδων.

Στην εργασία [1] περιγράφεται βελτιωμένο το μοντέλο του αεροφυλακίου που αναπτύχθηκε στη διπλωματική εργασία [4], το οποίο εντάσσεται σε μια αεριοστροβιλική μονάδα, με σκοπό τη βελτίωση της ευστάθειας του αεριοστροβίλου και της ρύθμισης συχνότητας. Συγκεκριμένα, παρατίθενται οι θερμοδυναμικές σχέσεις που μοντελοποιούν το σύστημα αεριοστροβίλος – αεροφυλάκιο, οι βασικές διατάξεις ελέγχου και συναρτήσεις μεταφοράς, και περιγράφεται η υλοποίησή του στο Simulink της Matlab. Τέλος, προσομοιώνεται το μοντέλο σε διαταραχές του ηλεκτρικού φορτίου και εξάγονται θετικά αποτελέσματα της χρήσης του αεροφυλακίου ως διάταξη μεταβατικής ενίσχυσης της παραγωγής του αεριοστροβίλου και βελτίωσης της απόκρισης συχνότητας του συστήματος.

Στη διπλωματική εργασία [11] και στην εργασία [58] παρουσιάζεται το μοντέλο ενός σταθμού συνδυασμένου κύκλου, κατάλληλο για μελέτες ευστάθειας, ενώ στην αναφορά [50] περιγράφονται οι διάφορες μέθοδοι ελέγχου των ατμοστροβίλων. Σημειώνεται ότι τα μοντέλα που αναπτύχθηκαν στις εργασίες [11], [58], [4], [1], βασίζονται στο μοντέλο αεριοστροβίλου/συνδυασμένου κύκλου των εργασιών [6], [7].

Στις διδακτορικές διατριβές [5], [52] αναφέρονται τα μοντέλα και περιγράφεται η αρχή λειτουργίας των ανεμογεννητριών μεταβλητών στροφών. Επίσης, αναλύονται εκτενώς και μοντελοποιούνται μέσω διαγραμμάτων βαθμίδων οι διατάξεις ελέγχου των ανεμογεννητριών

διπλής τροφοδότησης και των ανεμογεννητριών με πλήρη μετατροπέα ισχύος. Στις διπλωματικές εργασίες [30], [44] και στη διδακτορική διατριβή [18] περιγράφονται διάφορες διατάξεις ενός Σ.Η.Ε. μέσω εξισώσεων, συναρτήσεων μεταφοράς και διαγραμμάτων βαθμίδων, καθώς και αναφέρεται ο τρόπος υλοποίησής τους στο περιβάλλον WHSSP, ένα λογισμικό πακέτο το οποίο χρησιμοποιείται για μελέτες ευστάθειας μικρών ή μεσαίων Σ.Η.Ε. που περιλαμβάνουν αιολικά πάρκα και συμβατικές μονάδες παραγωγής.

Οι αναφορές [23] - [28], [31] - [43], [45], [46], [48], [49], [54] αναφέρονται σε μεθόδους αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας. Συγκεκριμένα, αντικείμενο μελέτης των παραπάνω αναφορών είναι η αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας με σκοπό την αντιμετώπιση της μεγάλης αιολικής διείδυσης καθώς και των αιχμών του φορτίου. Η μέθοδος που εξετάζεται ως επί των πλείστων είναι η αποθήκευση ενέργειας με τη μορφή πεπιεσμένου αέρα (CAES), ο οποίος είναι ο βασικός άξονας μελέτης της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

1.7 Αντικείμενο, σκοπός και δομή της διπλωματικής εργασίας

Ο σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ανάπτυξη και η προσομοίωση ενός μοντέλου αεριοστροβίλου με αεροφυλάκιο καθώς και μιας μονάδας αποθήκευσης ενέργειας με πεπιεσμένο αέρα, για μελέτες ευστάθειας. Το μοντέλο του αεριοστροβίλου με αεροφυλάκιο είναι μια βελτιωμένη εκδοχή του αντίστοιχου που περιγράφεται στη διπλωματική εργασία [4]. Συγκεκριμένα, οι βελτιώσεις αναφέρονται στην ακριβέστερη περιγραφή των θερμοδυναμικών εξισώσεων του μοντέλου καθώς και στον τρόπο ελέγχου του αεροφυλακίου. Το μοντέλο της μονάδας αποθήκευσης ενέργειας με πεπιεσμένο αέρα που αναπτύσσεται στην παρούσα διπλωματική εργασία, στηρίζεται στις αναφορές [32], [33], [34], [35], [37], [39], [42], [43], [46], [48], [54], και είναι κατάλληλο για προσομοιώσεις μικρής διάρκειας. Τέλος, τα δύο προαναφερθέντα μοντέλα εντάσσονται σε ένα μικρό αυτόνομο Σ.Η.Ε. που βασίζεται στα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του συστήματος της Ρόδου [44]. Το ηλεκτρικό σύστημα αυτό προσομοιώνεται με τη χρήση του λογισμικού πακέτου WHSSP [18], με σκοπό την εξαγωγή συμπερασμάτων αναφορικά με την ικανότητα ρύθμισης συχνότητας και την απόκριση του συστήματος σε κάποια διαταραχή, σε συνθήκες αυξημένης αιολικής διείδυσης.

Στο Κεφάλαιο 1 έγινε μια εισαγωγή στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας και περιγράφηκε η έννοια της ευστάθειας. Επιπλέον, εξηγήθηκε ο τρόπος ρύθμισης συχνότητας σε ένα Σ.Η.Ε. και αναφέρθηκαν οι βασικότερες διατάξεις που συμμετέχουν σε αυτή. Ακολούθως περιγράφηκαν οι διάφορες μέθοδοι παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές με ιδιαίτερη έμφαση στην ηλεκτροπαραγωγή από αιολική ενέργεια. Επιπλέον, αναφέρθηκαν οι ποικίλες προκλήσεις με τις οποίες έρχονται αντιμέτωποι οι διαχειριστές των σύγχρονων Σ.Η.Ε. και σημειώθηκαν τα διάφορα προβλήματα που πρέπει να επιλυθούν, λόγω της μεγάλης αιολικής διείδυσης και της μεταβλητότητας - στοχαστικότητας του ανέμου. Τέλος, εξηγήθηκε η αναγκαιότητα της αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας για την αντιμετώπιση των αιχμών του φορτίου και της μεγάλης διείδυσης της αιολικής ενέργειας στην ηλεκτροπαραγωγή, και περιγράφηκαν οι μέθοδοι, οι εφαρμογές, και συγκρίθηκαν μεταξύ τους οι διάφορες διατάξεις της αποθήκευσης.

Στο Κεφάλαιο 2 περιγράφεται το υπολογιστικό πακέτο WHSSP. Συγκεκριμένα, επεξηγείται ο τρόπος υλοποίησης του πακέτου προσομοίωσης στο περιβάλλον του MATLAB/Simulink μέσω της περιγραφής της γενική δομής των διατάξεων ΣΗΕ και του μοντέλου επίλυσης των εξισώσεων του δικτύου. Επιπλέον, αναφέρονται οι βασικές διατάξεις του συστήματος της Ρόδου και μοντελοποιούνται μέσω διαφορικών εξισώσεων, συναρτήσεων μεταφοράς και διαγραμμάτων βαθμίδων, και παρουσιάζεται το μοντέλο τους όπως εμφανίζεται στο περιβάλλον WHSSP με τις αντίστοιχες εισόδους και εξόδους.

Στο Κεφάλαιο 3 περιγράφεται η μέθοδος αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας υπό μορφή πεπιεσμένου αέρα (CAES), με βάση τη βιβλιογραφία. Συγκεκριμένα, αναφέρεται η γενική αρχή λειτουργίας και τα βασικά χαρακτηριστικά των μονάδων CAES, η δυνατότητα συνδυασμού τους με αιολικά πάρκα για την εξομάλυνση της μεταβλητότητας της αιολικής ισχύος, και επισημαίνονται τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα από την ένταξη των μονάδων αυτών στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Επιπλέον, παρατίθενται οι διάφοροι τύποι συστημάτων CAES που έχουν προταθεί ή κατασκευαστεί, και συγκρίνονται μεταξύ τους ως προς το κόστος, την απόδοση, την ονομαστική ισχύ και ως προς το μέγεθος της αποθήκης αέρα (αεροφυλάκιο). Ακολούθως, περιγράφονται οι εγκαταστάσεις αποθήκευσης του πεπιεσμένου αέρα και αναφέρονται μερικά οικονομικά στοιχεία, όπως αυτά προκύπτουν από τη βιβλιογραφία. Επίσης, αναφέρονται διάφορα συστήματα CAES, με την παράθεση βασικών χαρακτηριστικών στοιχείων, που είτε έχουν ήδη ενταχθεί σε κάποιο ηλεκτρικό σύστημα, είτε βρίσκονται ακόμα υπό κατασκευή, ή ακόμα η κατασκευή τους είχε ξεκινήσει στο παρελθόν αλλά διακόπηκε εν συνεχεία για διάφορους λόγους. Τέλος, αναλύονται τα συμπεράσματα από την έως τώρα λειτουργία και κατασκευή των μονάδων CAES και περιγράφεται η παρουσία τους στην αγορά ηλεκτρικής ενέργειας.

Στο Κεφάλαιο 4 αναπτύσσεται το μοντέλο αεριοστροβίλου απλού άξονα στο οποίο ενσωματώνεται ένα αεροφυλάκιο, όπως αναφέρθηκε, με σκοπό τη δυνατότητα αύξησης της ισχύος του μεταβατικά. Συγκεκριμένα, παρατίθενται οι θερμοδυναμικές σχέσεις που διέπουν τη λειτουργία του μοντέλου του αεριοστροβίλου με αεροφυλάκιο και περιγράφονται οι βασικές συνιστώσες του, οι διατάξεις ελέγχου και οι αντίστοιχες συναρτήσεις μεταφοράς. Τέλος, καθορίζεται ο τρόπος υλοποίησης του ελέγχου του αεροφυλακίου στο Simulink της Matlab. Σημειώνεται ότι οι θερμοδυναμικές εξισώσεις του αεριοστροβίλου που αναφέρονται στη βιβλιογραφία [4], [6], [11], προσαρμόζονται κατάλληλα ώστε να συμπεριληφθεί η επίδραση του αεροφυλακίου.

Στο Κεφάλαιο 5 προσομοιώνεται η απόκριση του αεριοστροβίλου με ενσωματωμένο αεροφυλάκιο σε διαταραχές του ηλεκτρικού φορτίου, σε σύστημα γεννήτριας - απομονωμένου φορτίου. Η υλοποίηση του μοντέλου του αεριοστροβίλου με αεροφυλάκιο γίνεται στο Simulink της Matlab. Οι προσομοιώσεις λαμβάνουν χώρα εξετάζοντας τη συμπεριφορά του αεριοστροβίλου με ενταγμένο το αεροφυλάκιο, συγκριτικά με την περίπτωση αεριοστροβίλου δίχως αεροφυλάκιο, προκειμένου να φανούν τα πλεονεκτήματα από τη χρήση του. Αρχικά, παρατίθενται τα δεδομένα της λειτουργίας του αεριοστροβίλου με αεροφυλάκιο, και γίνεται η επιλογή τιμών για διάφορες παραμέτρους. Στη συνέχεια εξηγείται ο τρόπος αρχικοποίησης του μοντέλου, και ακολούθως παρουσιάζονται οι προσομοιώσεις και εξάγονται τα αντίστοιχα συμπεράσματα.

Στο Κεφάλαιο 6 αναπτύσσεται ένα υβριδικό μοντέλο συστήματος αποθήκευσης και παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας υπό μορφή πεπιεσμένου αέρα (CAES), το οποίο στηρίζεται σε δεδομένα και αρχές λειτουργίας που αναφέρονται στο Κεφάλαιο 3. Συγκεκριμένα, αναφέρονται οι θερμοδυναμικές σχέσεις που διέπουν τη λειτουργία της μονάδας και παρατίθενται οι αντίστοιχες συναρτήσεις μεταφοράς και διατάξεις ελέγχου των επιμέρους συνιστωσών της. Τέλος, εξηγείται ο τρόπος υλοποίησης του περιγραφόμενου μοντέλου στο Simulink της Matlab.

Στο Κεφάλαιο 7 προσομοιώνεται ένα αυτόνομο σύστημα που βασίζεται στα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του συστήματος της Ρόδου, σε ένα αρχικό σενάριο παραγωγής. Η εξεταζόμενη διαταραχή είναι η αποσύνδεση ενός σταθμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας λόγω σφάλματος, σε συνθήκες υψηλής αιολικής διεύθυνσης. Σκοπός του συγκεκριμένου κεφαλαίου είναι να εξεταστεί η επίδραση της ένταξης στο σύστημα της Ρόδου μιας αεριοστροβιλικής μονάδας με αεροφυλάκιο, καθώς και μιας μονάδας αποθήκευσης και παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με πεπιεσμένο αέρα. Αρχικά παρατίθενται γενικά στοιχεία του αυτόνομου συστήματος της Ρόδου και των διατάξεων που ενυπάρχουν σε αυτό. Στη συνέχεια εξετάζεται η απόκριση του συστήματος στην προαναφερθείσα διαταραχή, όταν σε αυτό ενταχθεί αεριοστροβιλική μονάδα με αεροφυλάκιο. Τέλος, προσομοιώνεται το σύστημα της Ρόδου όταν σε αυτό ενταχθεί μια μονάδα CAES, όμοια με αυτή που αναπτύσσεται στο Κεφάλαιο 6, που λειτουργεί αρχικά σε κατάσταση παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και ακολούθως σε κατάσταση αποθήκευσης.

Η παρούσα διπλωματική εργασία ολοκληρώνεται με το Κεφάλαιο 8, όπου συνοψίζονται τα συμπεράσματα που εξάγονται από τη μελέτη και τις προσομοιώσεις των προηγούμενων κεφαλαίων. Αναφέρονται ακόμα ζητήματα με τα οποία δεν ασχολείται η παρούσα εργασία και μπορούν να αποτελέσουν αντικείμενο μελλοντικής ερευνητικής μελέτης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Υπολογιστικό περιβάλλον WHSSP

Στο Κεφάλαιο αυτό περιγράφεται το λογισμικό πακέτο WHSSP για την προσομοίωση μικρών ή μεσαίων Σ.Η.Ε., που περιλαμβάνουν αιολικά πάρκα και συμβατικές μονάδες παραγωγής. Το συγκεκριμένο πρόγραμμα χρησιμοποιείται στο Κεφάλαιο 7 για την προσομοίωση του αυτόνομου συστήματος της Ρόδου. Στην ενότητα 2.1 αναφέρονται γενικά στοιχεία για τον τρόπο λειτουργίας του προγράμματος. Στις ενότητες 2.2 και 2.3 παρατίθενται οι εξισώσεις της σύγχρονης και της ασύγχρονης μηχανής αντίστοιχα, και αναφέρεται ο τρόπος παράστασής τους στο WHSSP. Στην ενότητα 2.4 περιγράφεται και μοντελοποιείται η ανεμογεννήτρια σταθερών στροφών, στην ενότητα 2.5 αναφέρεται το μοντέλο της ανεμογεννήτριας διπλής τροφοδότησης, ενώ στην ενότητα 2.6 εξηγείται ο τρόπος λειτουργίας και αναφέρονται οι βασικές διατάξεις ελέγχου της ανεμογεννήτριας μεταβλητών στροφών. Τέλος, στις ενότητες 2.7 έως 2.9 περιγράφεται το μοντέλο της ατμοηλεκτρικής μονάδας, του νηξελοηλεκτρικού σταθμού και του αυτόματου ρυθμιστή τάσης, αντίστοιχα.

2.1 Περιγραφή προγράμματος WHSSP

2.1.1 Γενικά

Το λογισμικό πακέτο WHSSP (Wind - Hybrid System Simulation Package), έχει υλοποιηθεί σε περιβάλλον MATLAB-Simulink, στα πλαίσια συνεργασίας του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου και του Πανεπιστημίου Λιέγης [51]. Αναπτύχθηκε στο εργαστήριο Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας του ΕΜΠ στα πλαίσια διδακτορικής διατριβής [18] ως εκπαιδευτικό εργαλείο κατάλληλο για δυναμικές προσομοιώσεις και μελέτες ευστάθειας. Η ανάλυση που ακολουθεί βασίζεται στο [44].

Βασικό πλεονέκτημα του συγκεκριμένου εργαλείου είναι ο εκπαιδευτικός του χαρακτήρας, καθώς αναπτύχθηκε σε περιβάλλον προσιτό στους φοιτητές αλλά παράλληλα ευρέως διαδεδομένο στην επιστήμη του μηχανικού. Επιπροσθέτως χαρακτηρίζεται από ένα φιλικό προς το χρήστη περιβάλλον, εύκολη εξοικείωση χωρίς την απαίτηση ιδιαίτερων προγραμματιστικών γνώσεων αλλά και τη δυνατότητα χρήσης μεγάλης ποικιλίας έτοιμων ρουτινών και συναρτήσεων που ενυπάρχουν στο περιβάλλον της MATLAB.

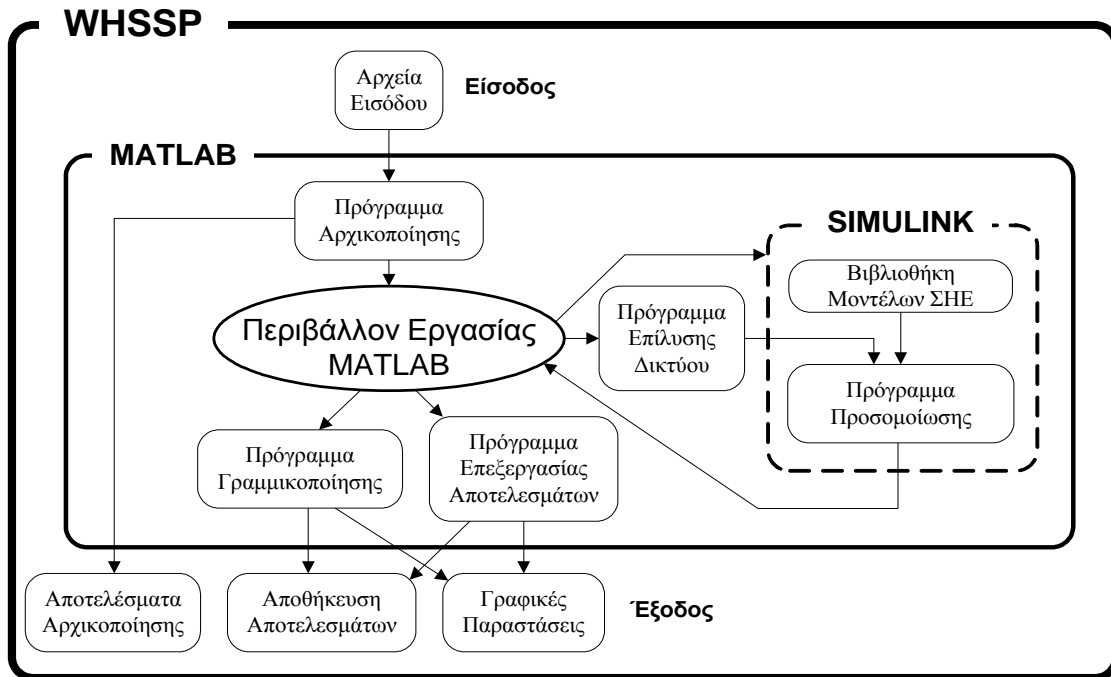
Στο Σχήμα 2.1 διακρίνονται τα βασικά δομικά χαρακτηριστικά του πακέτου, όπως:

- Τα αρχεία εισόδου και εξόδου.
- Το μοντέλο παράστασης του συστήματος σε Simulink.
- Τα προγράμματα αρχικοποίησης, επίλυσης δικτύου, γραμμικοποίησης και επεξεργασίας αποτελεσμάτων σε MATLAB (αρχεία σε μορφή m-file).

Τα αρχεία εισόδου αποτελούνται από πέντε αρχεία κειμένου (της μορφής .dat), στα οποία περιλαμβάνονται τα βασικά δεδομένα περιγραφής του συστήματος που επιθυμεί να εξετάσει ο χρήστης. Έτσι περιέχουν τα δεδομένα των μετασχηματιστών, των γραμμών μεταφοράς, των ζυγών, των σύγχρονων γεννητριών και των μηχανών επαγωγής. Με όλα τα παραπάνω γνωστά, το πρόγραμμα δύναται να επιλύσει το πρόβλημα της ροής φορτίου στο αρχικό σημείο λειτουργίας, αλλά παράλληλα είναι απαραίτητα και για την ανάθεση τιμών στις παραμέτρους των διαφόρων μοντέλων καθώς και την κατάστρωση του πίνακα αγωγιμοτήτων του δικτύου. Τα αρχεία εξόδου μπορεί να είναι αρχεία κειμένου και αρχεία

αποθήκευσης αποτελεσμάτων (της μορφής .dat και αυτά) σχετιζόμενα με τα αποτελέσματα αρχικοποίησης και γραμμικοποίησης ή γραφικές παραστάσεις σημαντικών μεγεθών.

Το πρόγραμμα αρχικοποίησης (initialization.m) επιλύει το πρόβλημα ροής φορτίου για το αρχικό σημείο ισορροπίας και φροντίζει μέσω του περιβάλλοντος εργασίας (Workspace) για την αντιστοίχιση των κατάλληλων τιμών από τα αρχεία εισόδου στο μοντέλο του συστήματος σε Simulink. Ακόμα καθορίζεται σε αυτό το επιθυμητό σενάριο διαταραχών (βραχυκύκλωμα, απώλεια παραγωγής ή φορτίου κλπ.) αλλά και τα χαρακτηριστικά του (σημείο βραχυκύκλωσης, χρόνος εκκαθάρισης σφάλματος, τοπολογία του δικτύου πριν, μετά και κατά τη διάρκεια του σφάλματος). Τέλος ο χρήστης δηλώνει σε αυτό βασικά χαρακτηριστικά του εξεταζόμενου ΣΗΕ, όπως συχνότητα και βάση ισχύος του συστήματος.



Σχήμα 2.1 : Γενική δομή πακέτου WHSSP

Βασικότερη συνιστώσα του WHSSP αποτελεί το μοντέλο αναπαράστασης του συστήματος σε Simulink μέσω της παράστασης στο περιβάλλον αυτό όλων των δυναμικών διατάξεων ενός Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας (σύγχρονες γεννήτριες, μηχανές επαγωγής, ανεμογεννήτριες, φορτία, κ.λπ.). Το περιβάλλον προσομοίωσης Simulink παρέχει στο χρήστη τη δυνατότητα για την ανάπτυξη των επιθυμητών μοντέλων με τη μορφή διαγραμμάτων βαθμίδων σε ένα γραφικό παράθυρο επικοινωνίας (Graphical User Interface).

Οι δυναμικές διατάξεις που προαναφέρθηκαν (γεννήτριες, μηχανές επαγωγής, φορτία, κ.λπ.) καθώς και άλλες διατάξεις ελέγχου (ρυθμιστές στροφών, αυτόματοι ρυθμιστές τάσης, κ.λπ.) μοντελοποιούνται μέσω των αντίστοιχων διαφορικών και αλγεβρικών εξισώσεων που περιγράφουν τη συμπεριφορά τους. Οι εξισώσεις αυτές, σε συνδυασμό με τις αλγεβρικές εξισώσεις του δικτύου, καθορίζουν κάθε χρονική στιγμή την απόκριση του ηλεκτρικού συστήματος.

2.1.2 Αλγεβρικές εξισώσεις του δικτύου

Για την ανάλυση που ακολουθεί, θεωρούμε ένα διασυνδεδεμένο ΣΗΕ με N ζυγούς, G γεννήτριες, M μηχανές επαγωγής και NI ζυγούς διασύνδεσης με εξωτερικά συστήματα (από $N+1$ έως $N+NI$), οι οποίοι ζυγοί θεωρούνται σταθερής τάσης κατά μέτρο και γωνία (άπειροι ζυγοί).

Έστω xy το κοινό ορθογώνιο πλαίσιο αναφοράς στο οποίο ανάγονται τα μεγέθη του στάτη όλων των σύγχρονων γεννητριών του συστήματος και το οποίο θεωρούμε ότι περιστρέφεται με την γωνιακή ταχύτητα του συστήματος ω_{sys} . Το ορθογώνιο αυτό πλαίσιο αναφέρεται και ως σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς. Ο άξονας x του σύγχρονου πλαισίου αναφοράς του συστήματος θεωρείται ότι αποτελεί τον άξονα αναφοράς όλων των γωνιών, ενώ ο άξονας y προπορεύεται κατά 90° . Όσον αφορά την γωνιακή ταχύτητα, αυτή μπορεί να θεωρηθεί σταθερή στην περίπτωση ενός διασυνδεδεμένου συστήματος, ενώ στην περίπτωση ενός αυτόνομου δικτύου αυτή λαμβάνεται ως ο σταθμισμένος μέσος όρος των συχνοτήτων που προκύπτουν από τις σύγχρονες γεννήτριες, δηλαδή:

$$\omega_{sys} = \frac{\sum_{i=1}^G H_i \omega_i}{\sum_{i=1}^G H_i} \quad (2.1)$$

όπου G το πλήθος των σύγχρονων γεννητριών του συστήματος, ω_i η αντίστοιχη ταχύτητα του δρομέα και H_i η ανηγμένη σταθερά αδρανείας της γεννήτριας i [18]. Η μέθοδος αυτή είναι γνωστή ως παράσταση του συστήματος μέσω του θεωρήματος κέντρου αδρανείας (Center Of Inertia, COI) [44].

Θεωρώντας ως \mathbf{v}_N , \mathbf{v}_I τα διανύσματα των προβολών των τάσεων του συστήματος στο xy σύστημα αναφοράς για τους ζυγούς του δικτύου και τους ζυγούς διασύνδεσης αντίστοιχα και \mathbf{i}_N , \mathbf{i}_I τα αντίστοιχα διανύσματα για τα εγχεόμενα ρεύματα, έχουμε τις ακόλουθες σχέσεις:

$$\mathbf{v}_N = \left[\begin{bmatrix} v_{x1} & v_{y1} \end{bmatrix} \cdots \begin{bmatrix} v_{xN} & v_{yN} \end{bmatrix} \right]^T \quad (2.2)$$

και

$$\mathbf{i}_N = \left[\begin{bmatrix} i_{x1} & i_{y1} \end{bmatrix} \cdots \begin{bmatrix} i_{xN} & i_{yN} \end{bmatrix} \right]^T \quad (2.3)$$

Σύμφωνα με τον Νόμο του Ohm, δεδομένων των (2.2) και (2.3), ισχύει η παρακάτω σχέση:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{i}_N \\ \mathbf{i}_I \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_N & \mathbf{Y}_{NI} \\ \mathbf{Y}_{IN} & \mathbf{Y}_I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{v}_N \\ \mathbf{v}_I \end{bmatrix} = \mathbf{0}_{2(N+NI) \times 1} \quad (2.4)$$

όπου:

- \mathbf{Y}_N , \mathbf{Y}_{NI} , \mathbf{Y}_{IN} και \mathbf{Y}_I είναι οι πραγματικοί πίνακες αγωγιμοτήτων διαστάσεων $2N \times 2N$, $2N \times 2NI$, $2NI \times 2N$ και $2NI \times 2NI$ αντίστοιχα.
- $\mathbf{0}_{2(N+NI) \times 1}$ είναι το μηδενικό διάνυσμα διάστασης $2(N+NI) \times 1$.

Ο ισοδύναμος πραγματικός πίνακας αγωγιμοτήτων \mathbf{Y}_N της σχέσης (2.4) αποτελείται από N^2 υποπίνακες \mathbf{y}_{ij} διαστάσεων 2×2 , οι οποίοι έχουν την εξής μορφή:

$$\mathbf{y}_{ij} = \begin{bmatrix} g_{ij} & -b_{ij} \\ b_{ij} & g_{ij} \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

Έτσι με βάση τις σχέσεις (2.2), (2.3), (2.4) και (2.5), το σύνολο των αλγεβρικών εξισώσεων που διέπουν το δίκτυο, στην περίπτωση αυτόνομου δικτύου ($NI=0$), μπορεί να γραφεί και αναλυτικά σε διανυσματική μορφή ως εξής:

$$\begin{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{x1} \\ i_{y1} \\ \vdots \\ i_{xi} \\ i_{yi} \\ \vdots \\ i_{xN} \\ i_{yN} \end{bmatrix} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} g_{11} & -b_{11} \\ b_{11} & g_{11} \end{bmatrix} & \dots & \begin{bmatrix} g_{1i} & -b_{1i} \\ b_{1i} & g_{1i} \end{bmatrix} & \dots & \begin{bmatrix} g_{1N} & -b_{1N} \\ b_{1N} & g_{1N} \end{bmatrix} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \begin{bmatrix} g_{i1} & -b_{i1} \\ b_{i1} & g_{i1} \end{bmatrix} & & \begin{bmatrix} g_{ii} & -b_{ii} \\ b_{ii} & g_{ii} \end{bmatrix} & & \begin{bmatrix} g_{iN} & -b_{iN} \\ b_{iN} & g_{iN} \end{bmatrix} \\ \vdots & & \vdots & \ddots & \vdots \\ \begin{bmatrix} g_{N1} & -b_{N1} \\ b_{N1} & g_{N1} \end{bmatrix} & \dots & \begin{bmatrix} g_{Ni} & -b_{Ni} \\ b_{Ni} & g_{Ni} \end{bmatrix} & \dots & \begin{bmatrix} g_{NN} & -b_{NN} \\ b_{NN} & g_{NN} \end{bmatrix} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{x1} \\ v_{y1} \\ \vdots \\ v_{yi} \\ v_{yi} \\ \vdots \\ v_{xN} \\ v_{yN} \end{bmatrix} \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

Ο ισοδύναμος πραγματικός πίνακας αγωγιμοτήτων στην περίπτωση διασυνδεδεμένου δικτύου με σταθερή τοπολογία, αποτελείται από ένα σταθερό και ένα μεταβαλλόμενο κομμάτι. Το σταθερό κομμάτι, το οποίο υπολογίζεται από το πρόγραμμα αρχικοποίησης (initialization.m), περιλαμβάνει την επίδραση στο δίκτυο α) των γραμμών μεταφοράς και διανομής, β) των μετασχηματιστών με σταθερό (ονομαστικό ή μη) λόγο μετασχηματισμού, γ) των φορτίων σταθερής αγωγιμότητας. Από την άλλη πλευρά, το μεταβαλλόμενο μέρος του πίνακα αγωγιμοτήτων μπορεί να υπολογίζεται σε κάθε χρονική στιγμή προσομοίωσης, λαμβάνοντας υπόψη α) τα δυναμικά αυτορυθμιζόμενα φορτία, β) τους μετασχηματιστές που είναι εξοπλισμένοι με ΣΑΤΥΦ, γ) τους αυτόματους μηχανισμούς ζεύξης-απόζευξης στατών πυκνωτών και δ) τα στατά συστήματα αέργου αντιστάθμισης.

Επειδή το διάνυσμα \mathbf{v}_I των τάσεων στους ζυγούς διασύνδεσης θεωρείται γνωστό διατηρούνται οι πρώτες $2N$ εξισώσεις της σχέσης (2.4), στην περίπτωση διασυνδεδεμένου συστήματος. Οπότε, το άγνωστο $2N \times 1$ διάνυσμα \mathbf{v}_N των N τάσεων του δικτύου θα προκύψει από την επίλυση του συστήματος:

$$\mathbf{i}_N - \mathbf{Y}_N \mathbf{v}_N - \mathbf{Y}_{NI} \mathbf{v}_I = \mathbf{0}_{2N \times 1} \quad (2.7)$$

Προκειμένου να επιλυθεί το σύστημα (2.7), το διάνυσμα \mathbf{i}_N των προβολών των εγχρόμων ρευμάτων πρέπει να εκφραστεί συναρτησί του αγνώστου διανύσματος \mathbf{v}_N των τάσεων.

Στη γενική περίπτωση, η έγχυση ρεύματος σε ένα ζυγό μπορεί να προκύψει από την ταυτόχρονη παρουσία μίας σύγχρονης γεννήτριας, μίας μηχανής επαγωγής και ενός στατικού μη γραμμικού φορτίου, το οποίο δεν περιλαμβάνεται στο συνολικό πίνακα αγωγιμοτήτων.

Επομένως, το διάνυσμα \mathbf{i}_N προκύπτει από το παρακάτω άθροισμα:

$$\mathbf{i}_N = \mathbf{i}_G + \mathbf{i}_M + \mathbf{i}_{NL} \quad (2.8)$$

όπου $\mathbf{i}_G, \mathbf{i}_M, \mathbf{i}_{NL}$, τα αντίστοιχα διανύσματα των προβολών (στο xy πλαίσιο) των εγγεόμενων ρευμάτων εξαιτίας των σύγχρονων γεννητριών, των μηχανών επαγωγής και των στατικών μη γραμμικών φορτίων, αντίστοιχα.

Τα εγγεόμενα ρεύματα στο δίκτυο λόγω των σύγχρονων γεννητριών και των μηχανών επαγωγής δίνονται συναρτήσει της τάσεως από τις σχέσεις [18]:

$$\mathbf{i}_G = \mathbf{Y}_G \mathbf{v}_N + \mathbf{b}_G \quad (2.9)$$

$$\mathbf{i}_M = \mathbf{Y}_M \mathbf{v}_N + \mathbf{b}_M \quad (2.10)$$

ενώ για το εγγεόμενο ρεύμα σε ένα ζυγό i του εξεταζόμενου συστήματος ισχύει αντίστοιχα:

$$i_{G,i} = Y_{G,i} \begin{bmatrix} v_{xi} \\ v_{yi} \end{bmatrix} + b_{G,i} \quad (2.11)$$

$$i_{M,i} = Y_{M,i} \begin{bmatrix} v_{xi} \\ v_{yi} \end{bmatrix} + b_{M,i} \quad (2.12)$$

Οι διδιάστατοι πίνακες $Y_{G,i}$, $Y_{M,i}$ και τα διανύσματα $b_{G,i}$, $b_{M,i}$ εξαρτώνται αποκλειστικά και μόνο από τις παραμέτρους και τις μεταβλητές κατάστασης της γεννήτριας και της μηχανής επαγωγής αντίστοιχα. Με βάση τις σχέσεις (2.11) και (2.12) προκύπτει ότι το διάνυσμα των εγγεόμενων ρευμάτων στο δίκτυο των ηλεκτρικών μηχανών είναι γραμμική συνάρτηση του διανύσματος των προβολών των τερματικών τους τάσεων στο σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς xy του συστήματος. Κάτι τέτοιο όντως ισχύει όταν αμελείται το φαινόμενο του κορεσμού των μαγνητικών κυκλωμάτων, δηλαδή όταν αυτά θεωρούνται γραμμικά, παραδοχή που γίνεται στα πλαίσια του προγράμματος WHSSP.

Στο σημείο αυτό ορίζεται ο τελεστής $\left[\begin{smallmatrix} N \\ \mathbf{diag}(\alpha_i) \\ i=1 \end{smallmatrix} \right]$, ο οποίος δημιουργεί έναν πίνακα (όχι απαραίτητα τετραγωνικό), στον οποίο τα μόνα μη μηδενικά στοιχεία είναι τα στοιχεία της κυρίας διαγωνίου και συγκεκριμένα το στοιχείο (i,i) είναι ίσο με α_i , δηλαδή ισχύει:

$$\left[\begin{smallmatrix} N \\ \mathbf{diag}(\alpha_i) \\ i=1 \end{smallmatrix} \right] = \begin{bmatrix} \alpha_1 & & 0 \\ & \alpha_2 & \\ & & \ddots \\ 0 & & & \alpha_N \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

Το στοιχείο α_i μπορεί να είναι είτε βαθμωτό μέγεθος είτε διάνυσμα ή πίνακας. Εάν οι διαστάσεις του α_i είναι $M_1 \times M_2$, ο πίνακας που ορίζεται από τον παραπάνω τελεστή θα είναι διαστάσεων $NM_1 \times NM_2$.

Έτσι, για τον πίνακα \mathbf{Y}_G διαστάσεων $2N \times 2N$ και το $2N \times 1$ διάνυσμα \mathbf{b}_G ισχύει:

$$\mathbf{Y}_G = \left[\begin{smallmatrix} N \\ \mathbf{diag}(Y_{G,i}) \\ i=1 \end{smallmatrix} \right] \quad \text{και} \quad \mathbf{b}_G = \left[b_{G,1}^T \quad \dots \quad b_{G,N}^T \right]^T \quad (2.14)$$

Σημειώνεται ότι στο εξεταζόμενο δίκτυο των G σύγχρονων γεννητριών, τόσο ο πίνακας \mathbf{Y}_G όσο και το διάνυσμα \mathbf{b}_G αποτελούνται αντίστοιχα από G μη μηδενικούς υποπίνακες $Y_{G,i}$ και G μη μηδενικά υποδιανύσματα $b_{G,i}$.

Αντίστοιχα, για τον πίνακα \mathbf{Y}_M διαστάσεων $2N \times 2N$ και το $2N \times 1$ διάνυσμα \mathbf{b}_M ισχύει:

$$\mathbf{Y}_M = \left[\begin{array}{c} \mathbf{diag}(Y_{M,i}) \\ \vdots \end{array} \right] \text{ και } \mathbf{b}_M = \left[b_{M,1}^T \quad \dots \quad b_{M,N}^T \right]^T \quad (2.15)$$

Επειδή θεωρήθηκε ότι το πλήθος των μηχανών επαγωγής στο εξεταζόμενο ΣΗΕ είναι ίσο με M , τόσο ο πίνακας \mathbf{Y}_M όσο και το διάνυσμα \mathbf{b}_M αποτελούνται αντίστοιχα από M μη μηδενικούς υποπίνακες $Y_{M,i}$ και M μη μηδενικά υποδιανύσματα $b_{M,i}$.

Το διάνυσμα \mathbf{i}_{NL} , των εγχεόμενων ρευμάτων λόγω στατικών μη γραμμικών φορτίων, που δεν περιλαμβάνονται στη μήτρα αγωγιμοτήτων, θα είναι:

$$\mathbf{i}_{NL}(\mathbf{v}_N) = \left[i_{NL,1}^T(v_{x1}, v_{y1}) \quad \dots \quad i_{NL,N}^T(v_{xN}, v_{yN}) \right]^T \quad (2.16)$$

όπου το κάθε υποδιάνυσμα δίνεται από την σχέση:

$$i_{NL,i}(v_{xi}, v_{yi}) = -z_{NL,i} \left[\begin{array}{c} \frac{P_{L_i}(V_i)v_{xi} + Q_{L_i}(V_i)v_{yi}}{v_{xi}^2 + v_{yi}^2} \\ \frac{P_{L_i}(V_i)v_{yi} - Q_{L_i}(V_i)v_{xi}}{v_{xi}^2 + v_{yi}^2} \end{array} \right] \quad (2.17)$$

με $z_{NL,i} = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases}$ ανάλογα με το εάν υπάρχει ή όχι μη γραμμικό φορτίο στο ζυγό i .

Ως V_i ορίζεται το μέτρο της τάσης στον ζυγό i :

$$V_i = \sqrt{v_{xi}^2 + v_{yi}^2} \quad (2.18)$$

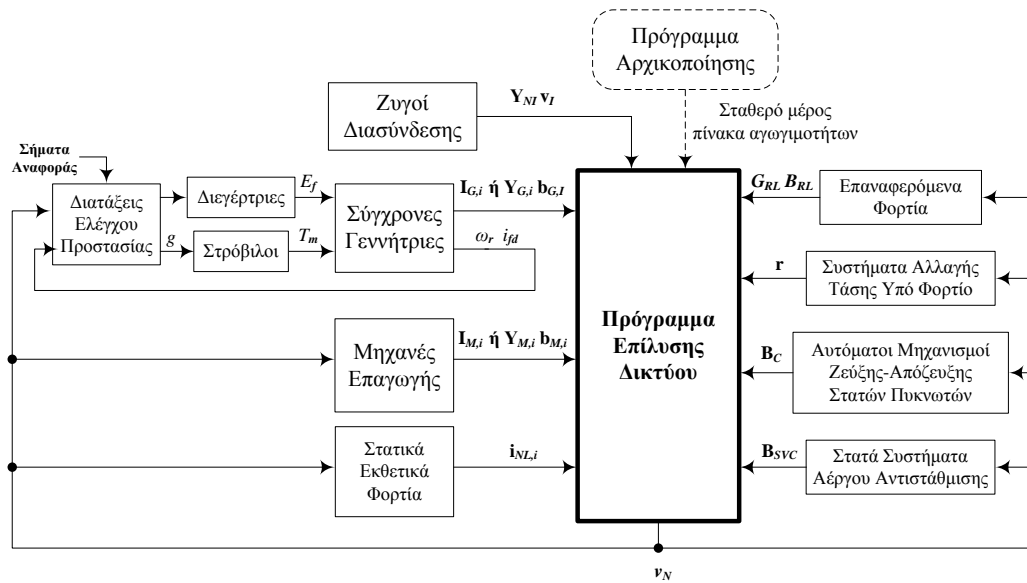
όπου P_L, Q_L οι αντίστοιχες καταναλώσεις του φορτίου σε ενεργό και άεργο ισχύ, οι οποίες είναι μη γραμμικές συναρτήσεις της V_i .

Αντικαθιστώντας τις (2.8), (2.9), (2.10), (2.16) στην (2.7) προκύπτει η ακόλουθη σχέση:

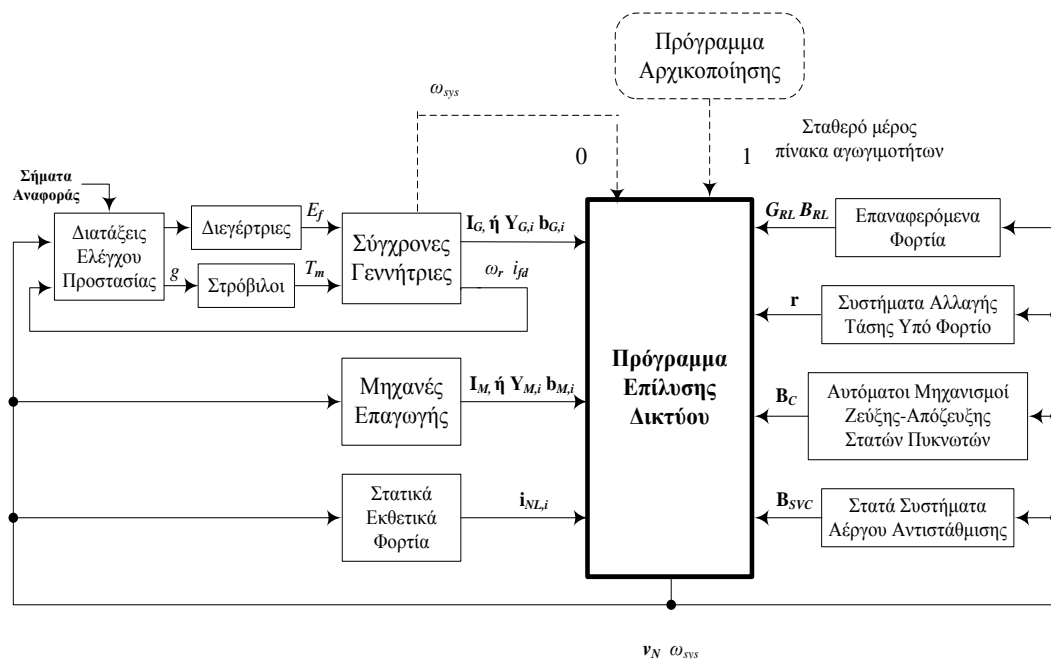
$$\mathbf{Y}_G \mathbf{v}_N + \mathbf{b}_G + \mathbf{Y}_M \mathbf{v}_N + \mathbf{b}_M + \mathbf{i}_{NL}(\mathbf{v}_N) - \mathbf{Y}_N \mathbf{v}_N - \mathbf{Y}_{NI} \mathbf{v}_I = \mathbf{0}_{2N \times 1} \quad (2.19)$$

το οποίο είναι εν γένει ένα μη γραμμικό σύστημα $2N$ αλγεβρικών εξισώσεων και για την επίλυση του οποίου χρησιμοποιείται συνήθως η αριθμητική μέθοδος Newton-Raphson.

Ο αλγόριθμος προσομοίωσης στη γενική του μορφή, για την περίπτωση διασυνδεδεμένου και αυτόνομου δικτύου, παρουσιάζεται στα Σχήματα 2.2 και 2.3 αντίστοιχα [18].



Σχήμα 2.2: Αλγόριθμος προσομοίωσης διασυνδεδεμένου δικτύου



Σχήμα 2.3: Αλγόριθμος προσομοίωσης αυτόνομου δικτύου

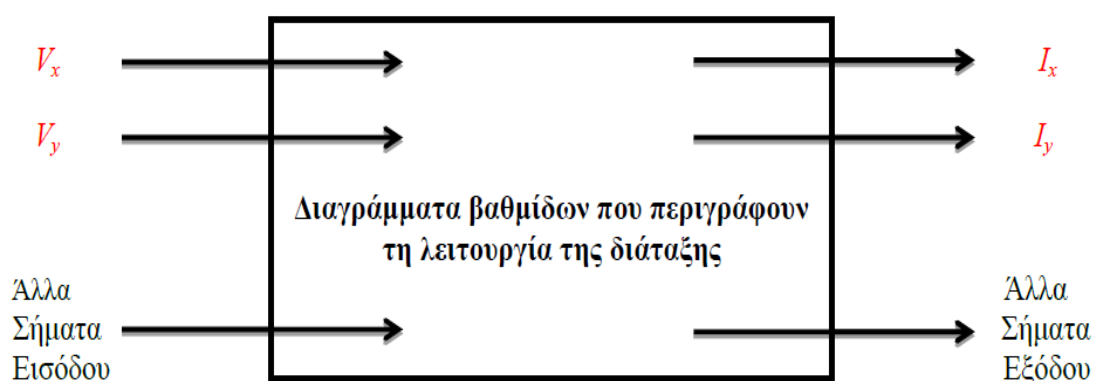
Όπως φαίνεται στα Σχήματα 2.2 και 2.3, υπάρχουν δύο επιλογές για τις εισόδους που λαμβάνει το πρόγραμμα επίλυσης του δικτύου και προέρχονται από τις σύγχρονες γεννήτριες και τις μηχανές επαγωγής. Συγκεκριμένα λαμβάνονται είτε τα εγχεόμενα ρεύματα $i_{G,i}$, $i_{M,i}$ είτε οι δισδιάστατοι πίνακες $Y_{G,i}$, $Y_{M,i}$ και τα διανύσματα $b_{G,i}$, $b_{M,i}$, ανάλογα με τον τρόπο επίλυσης των αλγεβρικών εξισώσεων του δικτύου. Έτσι στην πρώτη περίπτωση η επίλυση γίνεται βάσει της εξίσωσης (2.7), ενώ στη δεύτερη βάσει της σχέσης (2.19).

Στην περίπτωση που μελετάται κάποιο αυτόνομο δίκτυο οι ζυγοί διασύνδεσης απουσιάζουν ($NI=0$). Επίσης στην περίπτωση αυτόνομου δικτύου, ολόκληρη η μήτρα αγωγιμοτήτων μπορεί να υπολογίζεται σε κάθε βήμα της προσομοίωσης (επιλογή 0 στο

Σχήμα 2.3) λόγω του γεγονότος ότι η συχνότητα ω_{sys} του συστήματος δεν παραμένει κατ' ανάγκη σταθερή. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μεταβάλλονται ευθέως ανάλογα οι τιμές των επαγωγικών αντιδράσεων και των χωρητικών αγωγιμοτήτων των επιμέρους διατάξεων. Ωστόσο, προς μείωση του υπολογιστικού κόστους, στην παρούσα διπλωματική επιλέγεται η προσέγγιση της μήτρας αγωγιμοτήτων ως μη επηρεαζόμενη από τυχόν μεταβολές της συχνότητας (επιλογή 1 στο Σχήμα 2.3).

2.1.3 Δομή διατάξεων ΣΗΕ και επίλυση δικτύου

Η γενική δομή των διατάξεων στις οποίες οφείλεται η έγχυση ρεύματος στους ζυγούς (σύγχρονες γεννήτριες, μηχανές επαγωγής, μη γραμμικά φορτία, ανεμογεννήτριες), όπως αυτή αναπτύσσεται στα πλαίσια του WHSSP, αναλύεται στο Σχήμα 2.4.



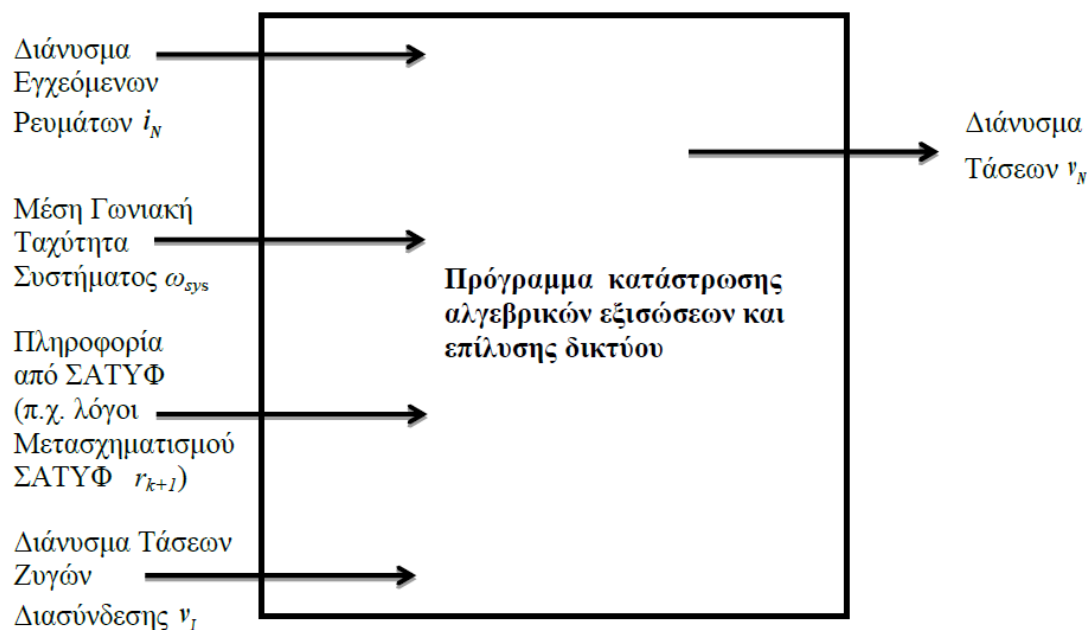
Σχήμα 2.4: Γενικό μοντέλο διατάξεων

Όπως φαίνεται παραπάνω, οι διατάξεις που συνδέονται στο δίκτυο, δέχονται ως είσοδο τις συνιστώσες του διανύσματος της τάσης (V_x , V_y) του ζυγού στον οποίο συνδέονται, εκφρασμένες στο σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς του συστήματος. Επίσης μπορεί να δέχονται και άλλα σήματα εισόδου απαραίτητα για τη λειτουργία τους, όπως σήματα αναφοράς προερχόμενα από άλλες συνεργαζόμενες διατάξεις (π.χ. διεγέρτριες, στρόβιλοι). Το εγχεόμενο ρεύμα (I_x , I_y) αποτελεί την βασική έξοδο, εκφρασμένο κι αυτό στο πλαίσιο αναφοράς του συστήματος. Ταυτόχρονα μπορεί να υπάρχουν και άλλες εξοδοί οι οποίες μπορεί να αφορούν α) σημαντικά μεγέθη που επιθυμεί να προβάλλονται ο χρήστης μέσω κάποιου καταγραφέα (score), β) σήματα αναφοράς που καταλήγουν ως είσοδοι σε άλλες διατάξεις και γ) συνιστώσες (όπως τα διανύσματα b_G , b_M) που σχετίζονται με την επίλυση του δικτύου. Στην περίπτωση διατάξεων ελέγχου (π.χ. ρυθμιστές στροφών, στρόβιλοι, ΣΑΤΥΦ) η δομή απλοποιείται, καθώς αυτές δεν εγχέουν ρεύμα στο δίκτυο.

Η γενική δομή του μοντέλου επίλυσης των αλγεβρικών εξισώσεων της σχέσης (2.7) που διέπουν το δίκτυο, ώστε να προκύψει το διάνυσμα των τάσεων των ζυγών του συστήματος (2.2), δίνεται στο Σχήμα 2.5. Σημειώνεται ότι στην παρούσα διπλωματική εργασία, θεωρούμε ότι το δίκτυο δεν περιλαμβάνει αυτόματους μηχανισμούς ζεύξης-απόζευξης στατών πυκνωτών και στατά συστήματα αέργου αντιστάθμισης.

Για κάθε χρονική στιγμή της προσομοίωσης, το πρόγραμμα επίλυσης του δικτύου δέχεται ως εισόδους τα εγχεόμενα ρεύματα σε κάθε ζυγό \dot{I}_V (ανηγμένα στο σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς), τη γωνιακή ταχύτητα ω_{sys} εφόσον πρόκειται για αυτόνομο ΣΗΕ, αλλά και πληροφορία που σχετίζεται με τη δράση των ΣΑΤΥΦ ώστε να καταστρωθεί το αντίστοιχο μεταβλητό κομμάτι του πίνακα αγωγιμοτήτων. Επίσης λαμβάνει ως είσοδο και το διάνυσμα τάσεων V_l στην περίπτωση διασυνδεδεμένου συστήματος. Εν συνεχεία το πρόγραμμα

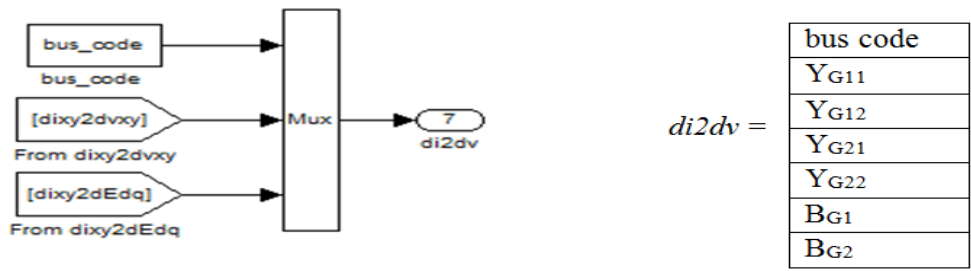
επίλυσης τροφοδοτεί το σύστημα με το νέο διάνυσμα των τάσεων v_N . Με γνωστό πλέον το διάνυσμα αυτό, το σύστημα προχωράει στον υπολογισμό των παραγώγων των μεταβλητών κατάστασης και ακολούθως περνά στο επόμενο βήμα ολοκλήρωσης για να συνεχιστεί η διαδικασία προσομοίωσης. Επισημαίνεται ότι μοντελοποίηση της διαδικασίας επίλυσης μπορεί να διαφοροποιείται στη πράξη ανάλογα με τη μεθοδολογία επίλυσης ή τις παραδοχές που γίνονται για το δίκτυο. Οι διάφορες μέθοδοι επίλυσης του δικτύου αναφέρονται αναλυτικά στο [44]. Για το σκοπό της διπλωματικής αυτής εργασίας, δεδομένου ότι απουσιάζουν τα μη γραμμικά φορτία, η επίλυση του δικτύου γίνεται χωρίς τη χρήση αλγεβρικού βρόχου, μια μέθοδος που αναλύεται παρακάτω.



Σχήμα 2.5: Γενικό μοντέλο επίλυσης

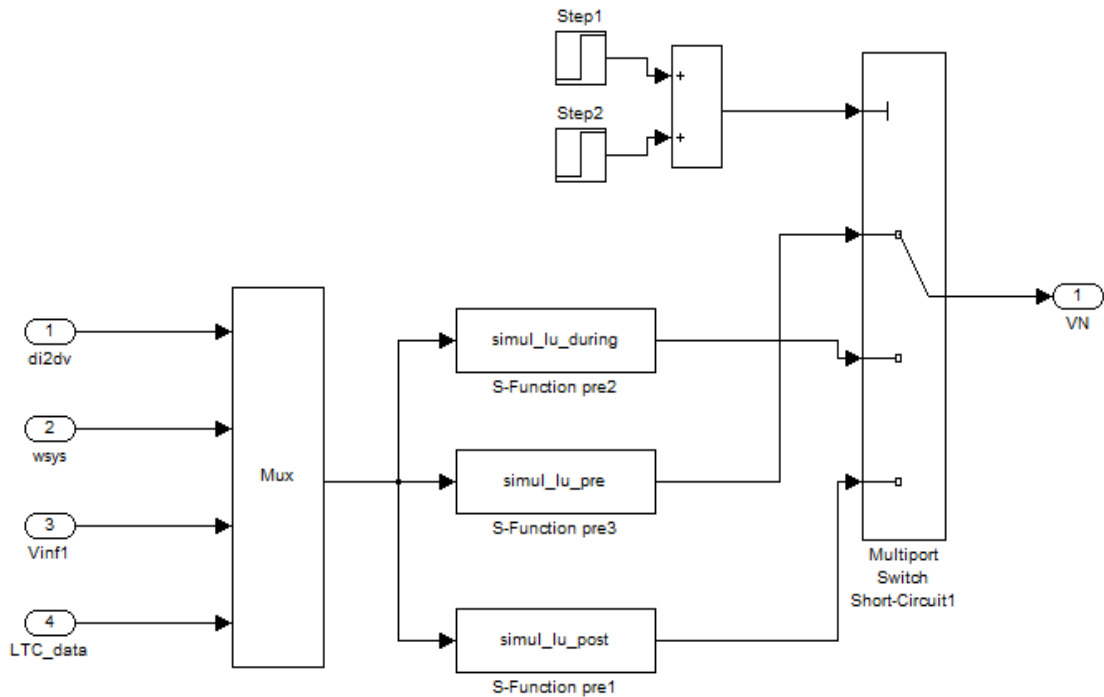
Στη μέθοδο αυτή εκμεταλλευόμαστε το γεγονός πως όταν στο εξεταζόμενο δίκτυο απουσιάζουν τα μη γραμμικά φορτία τότε η μητρική εξίσωση (2.19) γίνεται γραμμική. Φυσικά, για να επιτευχθεί αυτό έχει προηγηθεί η ανάλυση των εγγεόμενων ρευμάτων από τις διάφορες διατάξεις (σύγχρονες γεννήτριες, μηχανές επαγωγής, ανεμογεννήτριες) σε δύο βασικές συνιστώσες. Μία γραμμικώς εξαρτώμενη από την τάση, όπως αυτή προκύπτει από τις εξισώσεις του εκάστοτε υποσυστήματος, και μία που εξαρτάται πλήρως από την τρέχουσα τιμή των μεταβλητών κατάστασης του κάθε υποσυστήματος. Έτσι για παράδειγμα το εγγεόμενο ρεύμα των σύγχρονων γεννητριών και των μηχανών επαγωγής εκφράζεται στη μορφή των σχέσεων (2.11) και (2.12).

Στην έξοδο του κάθε υποσυστήματος λοιπόν, λαμβάνεται ένας δισδιάστατος πίνακας (όπως οι $Y_{G,i}$ και $Y_{M,i}$) που παριστά την γραμμική εξάρτηση του ρεύματος από την τάση και ένα δισδιάστατο διάνυσμα (όπως τα $b_{G,i}$ και $b_{M,i}$) που παριστά τη μη εξαρτώμενη από την τάση έγχυση ρεύματος. Οι έξοδοι της κάθε διάταξης μοντελοποιούνται ως ένα ενιαίο διάνυσμα με έξι συνιστώσες, που εντέλει γίνονται επτά λόγω και του κωδικού αριθμού του ζυγού σύνδεσης της διάταξης (bus code), και συμβολίζεται με την ονομασία $di2dv$. Δίνεται ως χαρακτηριστικό παράδειγμα αυτής της μοντελοποίησης το μπλοκ διάγραμμα που υλοποιεί το συγκεκριμένο διάνυσμα στην περίπτωση της σύγχρονης γεννήτριας, αλλά και ο τρόπος που διατάσσονται τα στοιχεία του διανύσματος, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.6.



Σχήμα 2.6: Διάνυσμα εξόδου $di2dv$

Η συνιστώσα $dixy2dvxy$ παριστά τις παραμέτρους γραμμικής εξάρτησης από την τερματική τάση, και η συνιστώσα $dixy2dEdq$ την έγχυση που οφείλεται στις μεταβλητές κατάστασης και συγκεκριμένα στις μεταβατικές ΗΕΔ ευθέος και εγκάρσιου άξονα για την περίπτωση της σύγχρονης γεννήτριας. Φυσικά, απαραίτητος είναι και ο κωδικός αριθμησης του ζυγού που συνδέεται για την ορθή κατάστρωση των εξισώσεων. Στο Σχήμα 2.7 φαίνεται ο τρόπος υπολογισμού των τάσεων των ζυγών του δικτύου.



Σχήμα 2.7: Υλοποίηση χωρίς αλγεβρικό βρόχο στο Simulink

Το διάνυσμα $di2dv$ του Σχήματος 2.7 περιέχει όλα τα διανύσματα $di2dv$ των επιμέρους διατάξεων που προκαλούν την έγχυση ρεύματος στους ζυγούς του συστήματος και τροφοδοτείται απευθείας στις S-Functions. Αυτές με τη σειρά τους καλούν τις αντίστοιχες εκτελέσιμες συναρτήσεις (.m αρχεία) $simul_lu_pre$, $simul_lu_during$ και $simul_lu_post$. Στις συναρτήσεις αυτές ενημερώνονται τα στοιχεία του πραγματικού πίνακα αγωγιμοτήτων, όπου αυτά μεταβάλλονται, και παράλληλα καταστρώνεται η μητρική εξίσωση (2.19). Φυσικά από αυτή απουσιάζει πλέον ο όρος $i_{NL}(v_N)$ αφού θεωρούμε ότι το εξεταζόμενο δίκτυο δεν περιλαμβάνει μη γραμμικά φορτία.

Οι συναρτήσεις (S-Functions) είναι τρεις, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.7, ώστε να υπάρχει η δυνατότητα προσομοίωσης από το χρήστη κάποιου σφάλματος στο δίκτυο (π.χ. ένα τριφασικό βραχυκύκλωμα). Ως γνωστόν, τέτοια σφάλματα επηρεάζουν την τοπολογία του δικτύου. Έτσι, κατά την διάρκεια της προσομοίωσης γίνεται χρήση της κατάλληλης συνάρτησης, μέσω ενός επιλογέα (multiport switch), για κάθε φάση του σφάλματος. Συγκεκριμένα, η *simul_lu_pre* αντιστοιχεί στην τοπολογία του δικτύου προ σφάλματος, η *simul_lu_during* στην τοπολογία κατά τη διάρκεια και η *simul_lu_post* στην τοπολογία μετά την εκκαθάρισή του.

Για να επιλυθεί η (2.19), γράφεται στη ακόλουθη μορφή:

$$(Y_G + Y_M - Y_N) \mathbf{v}_N = Y_{NI} \mathbf{v}_I - \mathbf{b}_G - \mathbf{b}_M \quad (2.20)$$

όπου αν θέσουμε :

$$Y_{total} = Y_G + Y_M - Y_N \quad (2.21)$$

και

$$B_{total} = Y_{NI} \mathbf{v}_I - \mathbf{b}_G - \mathbf{b}_M \quad (2.22)$$

τελικά καταλήγουμε στο ακόλουθο γραμμικό σύστημα, εκφρασμένο σε μητρική μορφή:

$$Y_{total} \mathbf{v}_N = B_{total} \quad (2.23)$$

Δηλαδή, καταστρώνονται σε κάθε βήμα της προσομοίωσης οι επαυξημένοι πίνακες Y_{total} και B_{total} ώστε να προκύψει το απλό γραμμικό σύστημα της σχέσης (2.23). Σύμφωνα με τη θεωρία της τριγωνικής παραγοντοποίησης, κάθε αντιστρέψιμος πίνακας μπορεί να γραφεί σαν γινόμενο δύο τριγωνικών πινάκων L και U , όπου ο L είναι κάτω τριγωνικός πίνακας και ο U άνω τριγωνικός πίνακας. Σημειώνεται εδώ ότι η τριγωνική παραγοντοποίηση πραγματοποιείται με την τυποποιημένη εντολή της MATLAB *lu* (εξ ου και η ονομασία των S-Functions). Έτσι το σύστημα (2.23) επιλύεται με τριγωνική παραγοντοποίηση του επαυξημένου πίνακα Y_{total} και στη συνέχεια με εφαρμογή της ευθείας και αντιστρόφου αντικαταστάσεως.

Στις ενότητες που ακολουθούν περιγράφονται και μοντελοποιούνται οι διατάξεις που χρησιμοποιούνται στο σύστημα της Ρόδου, το οποίο προσομοιώνεται στο Κεφάλαιο 7, και περιγράφεται ο τρόπος παράστασής τους στο WHSSP.

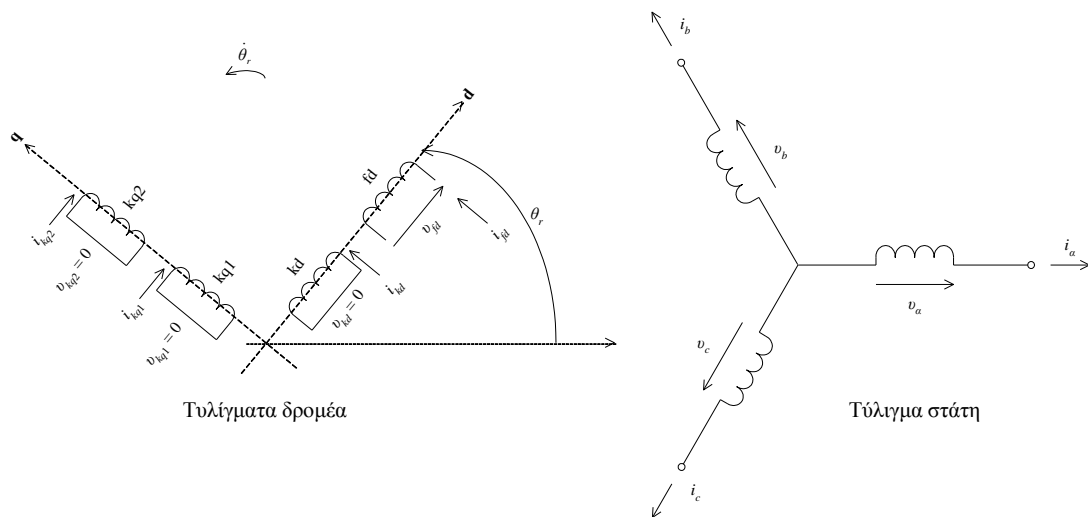
2.2 Σύγχρονη μηχανή

2.2.1 Λειτουργία σύγχρονων μηχανών

Οι σύγχρονες γεννήτριες είναι οι κυριότερες ηλεκτρικές μηχανές για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε μεγάλη κλίμακα. Αποτελούνται από ένα ακίνητο τμήμα που ονομάζεται στάτης, και μια κινητή διάταξη το δρομέα. Ο δρομέας διεγείρεται από πηγή συνεχούς ρεύματος, η οποία καλύπτει μόνο τις απώλειες του τυλίγματος διεγέρσεως. Κατά την περιστροφή του δρομέα παράγεται στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο στο διάκενο της μηχανής [3], με αποτέλεσμα να επάγονται ρεύματα στο στάτη. Τα επαγόμενα ρεύματα στο στάτη, λόγω της τριφασικής συμμετρίας του αντίστοιχου τυλίγματος, παράγουν με τη σειρά τους ένα στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο στο διάκενο, με ταχύτητα ίση με αυτή του δρομέα. Τα στρεφόμενα μαγνητικά πεδία του στάτη και του δρομέα βρίσκονται σε σταθερή γωνιακή

απόκλιση μεταξύ τους, και αλληλεπιδρούν μέσω των αντίστοιχων ηλεκτρομαγνητικών ροπών. Οι ροπές αυτές τείνουν να ευθυγραμμίσουν τα δύο πεδία. Στη μόνιμη κατάσταση, η γωνία μεταξύ των δύο πεδίων διατηρείται σταθερή, μέσω εξωτερικής ροπής που ασκείται στο δρομέα της μηχανής με τη χρήση κάποιου στροβίλου, αντίθετης κατεύθυνσης με την επιβραδύνουσα ηλεκτρομαγνητική ροπή. Σημειώνεται ότι η ονομασία «σύγχρονη μηχανή» οφείλεται στο ότι ο δρομέας περιστρέφεται συγχρόνως με το στρεφόμενο πεδίο του στάτη, σε κοινή ταχύτητα περιστροφής.

Στο Σχήμα 2.8 παριστάνεται σχηματικά μία τριφασική σύγχρονη μηχανή [18]. Το κύκλωμα του στάτη αποτελείται από τα τριφασικά τυλίγματα του τυμπάνου με στιγμιαίες τάσεις v_a, v_b, v_c και στιγμιαία ρεύματα i_a, i_b, i_c αντίστοιχα. Το κύκλωμα του δρομέα περιλαμβάνει το τυλίγμα του πεδίου διέγερσης (fd), καθώς επίσης και τα τυλίγματα αποσβέσεως. Τα τυλίγματα αυτά είναι τοποθετημένα κατά μήκος του ευθέος (d) και του εγκάρσιου μαγνητικού (q) άξονα. Ο ευθύς άξονας συμπίπτει με τον μαγνητικό άξονα του τυλίγματος διεγέρσεως, ενώ ο εγκάρσιος άξονας προπορεύεται κατά 90° . Τα τυλίγματα $kd, kq1$ και $kq2$ είναι τυλίγματα αποσβέσεως, τα οποία παριστάνουν την επίδραση των δινορρευμάτων στις μηχανές με συμπαγή δρομέα, και είναι υπεύθυνα για τη διατήρηση της ευστάθειας των ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων της μηχανής [2]. Στο τυλίγμα του πεδίου διεγέρσεως επιβάλλεται συνεχής τάση (v_{fd}), ενώ τα τυλίγματα αποσβέσεως θεωρούνται βραχυκυκλωμένα.



Σχήμα 2.8: Κυκλωματική παράσταση σύγχρονης μηχανής

Η κίνηση του δρομέα χαρακτηρίζεται από την ηλεκτρική γωνία θ_r ανάμεσα στον ευθύ άξονα του δρομέα και τον άξονα της φάσης a του στάτη, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.8. Αν το πεδίο του δρομέα της μηχανής περιστρέφεται με ηλεκτρική γωνιακή ταχύτητα ω_r (σε ηλεκτρικά r/s), τότε η γωνία θ_r (σε ηλεκτρικά ακτίνια) δίνεται από τη σχέση [18]:

$$\theta_r = \omega_r t + \theta_{r0} \quad (2.24)$$

όπου θ_{r0} είναι μία αυθαίρετη αρχική γωνία (σε ηλεκτρικά ακτίνια). Από την παραπάνω σχέση προκύπτει ότι ο ρυθμός μεταβολής της γωνίας θ_r ισούται με την ηλεκτρική γωνιακή ταχύτητα ω_r , δηλαδή:

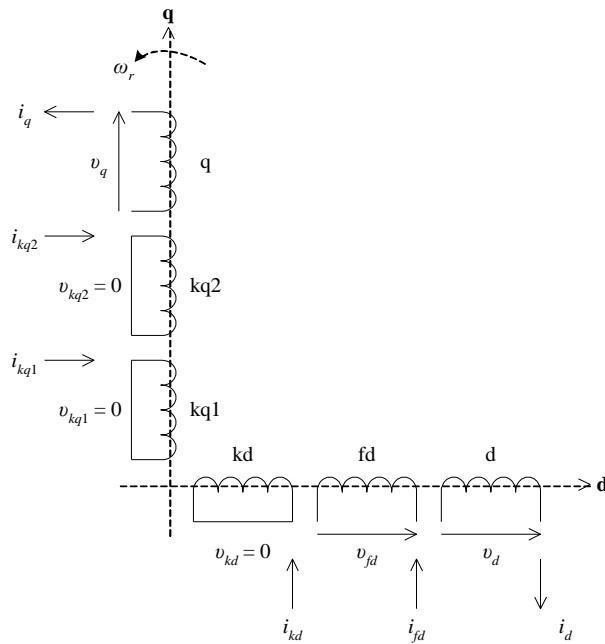
$$\dot{\theta}_r = \omega_r \quad (2.25)$$

2.2.2 Μετασχηματισμός Park για τη σύγχρονη μηχανή

Για την εξαγωγή των εξισώσεων του εξεταζόμενου μοντέλου της σύγχρονης γεννήτριας γίνονται οι ακόλουθες παραδοχές [30]:

- Τα τυλίγματα του στάτη έχουν ημιτονοειδή κατανομή κατά μήκος του διακένου.
- Οι αύλακες του στάτη δεν προκαλούν σημαντική μεταβολή των αυτεπαγωγών και των αλληλεπαγωγών λόγω της θέσης του δρομέα.
- Το φαινόμενο της μαγνητικής υστέρησης αμελείται.
- Η συνεισφορά του μαγνητικού κορεσμού αμελείται.

Ο μετασχηματισμός του Park συνίσταται στην αντικατάσταση των τριών τυλιγμάτων a , b , c του στάτη από τρία υποθετικά (ισοδύναμα) τυλίγματα d , q , 0 [18]. Τα τυλίγματα d , q του στάτη περιστρέφονται μαζί με το δρομέα της μηχανής και βρίσκονται στους ίδιους άξονες με τα αντίστοιχα τυλίγματα του δρομέα (τύλιγμα διεγέρσεως και τυλίγματα αποσβέσεως). Το τρίτο τυίγμα 0 δεν είναι μαγνητικά συζευγμένο με τα άλλα δύο ισοδύναμα τυλίγματα του στάτη και παίζει ρόλο μόνο σε συνθήκες ασύμμετρης φόρτισης της μηχανής. Η σχηματική παράσταση των τυλιγμάτων μίας σύγχρονης μηχανής, μετά την εφαρμογή του μετασχηματισμού του Park, φαίνεται στο Σχήμα 2.9.



Σχήμα 2.9 : Παράσταση τυλιγμάτων σύγχρονης μηχανής μετά το μετασχηματισμό του Park

Οι εξισώσεις του Park για τα τυλίγματα d , q του στάτη, στο πλαίσιο αναφοράς του δρομέα, γράφονται ως εξής [18]:

$$v_d = -r_s i_d - \frac{\omega_r}{\omega_b} \psi_q + \frac{1}{\omega_b} \dot{\psi}_d \quad (2.26)$$

$$v_q = -r_s i_q + \frac{\omega_r}{\omega_b} \psi_d + \frac{1}{\omega_b} \dot{\psi}_q \quad (2.27)$$

όπου:

- v_d, v_q είναι οι τάσεις των τυλιγμάτων d, q του στάτη αντίστοιχα.
- i_d, i_q είναι τα ρεύματα των τυλιγμάτων d, q του στάτη αντίστοιχα.
- ψ_d, ψ_q είναι οι πεπλεγμένες ροές ανά δευτερόλεπτο των τυλιγμάτων d, q του στάτη αντίστοιχα.
- ω_r είναι η ηλεκτρική γωνιακή ταχύτητα (σε ηλεκτρικά r/s) του πεδίου της μηχανής.
- ω_b είναι η ονομαστική ηλεκτρική γωνιακή ταχύτητα (σε ηλεκτρικά r/s) του συστήματος.
- r_s είναι η ωμική αντίσταση του στάτη.

Οι όροι $(\omega_r/\omega_b)\psi_d$ και $(\omega_r/\omega_b)\psi_q$ των παραπάνω σχέσεων, οι οποίοι είναι ανάλογοι της γωνιακής ταχύτητας του διανύσματος της τερματικής τάσης, προκύπτουν από το στρεφόμενο πεδίο και γι' αυτό το λόγο ονομάζονται τάσεις ταχύτητας. Οι όροι $(1/\omega_b)\dot{\psi}_d$ και $(1/\omega_b)\dot{\psi}_q$, οι οποίοι είναι ανάλογοι με το ρυθμό μεταβολής της πεπλεγμένης ροής ανά δευτερόλεπτο, ονομάζονται τάσεις μετασχηματιστή.

Οι εξισώσεις του Park για τα τυλίγματα του δρομέα του Σχήματος 2.9 γράφονται ως εξής [30]:

$$v_{fd} = r_{fd}i_{fd} + \frac{1}{\omega_b}\dot{\psi}_{fd} \quad (2.28)$$

$$0 = r_{kd}i_{kd} + \frac{1}{\omega_b}\dot{\psi}_{kd} \quad (2.29)$$

$$0 = r_{kq1}i_{kq1} + \frac{1}{\omega_b}\dot{\psi}_{kq1} \quad (2.30)$$

$$0 = r_{kq2}i_{kq2} + \frac{1}{\omega_b}\dot{\psi}_{kq2} \quad (2.31)$$

όπου v_{fd} είναι η συνεχής τάση που εφαρμόζεται στα άκρα του τυλίγματος διεγέρσεως, r_{fd} είναι η αντίστασή του, ψ_{fd} η πεπλεγμένη ροή ανά δευτερόλεπτο και i_{fd} το ρεύμα του πεδίου. Οι αντίστοιχοι συμβολισμοί των (2.29), (2.30) και (2.31) αναφέρονται στα υπόλοιπα τυλίγματα του δρομέα.

Σημειώνεται ότι οι (2.26) – (2.31) είναι διατυπωμένες στο ανά μονάδα σύστημα του στάτη, τα βασικά μεγέθη του οποίου είναι η ονομαστική τριφασική ισχύς S_N και η ονομαστική πολική τάση της μηχανής V_N .

2.2.3 Εξισώσεις κίνησης δρομέα

Σε μελέτες ευστάθειας, σε συστήματα πολλών μηχανών, ενδιαφέρει η θέση του πεδίου του δρομέα ως προς έναν κοινό άξονα αναφοράς. Για το λόγο αυτό, ορίζεται η γωνία δ του δρομέα της σύγχρονης μηχανής ως η ηλεκτρική γωνία (σε ηλεκτρικά ακτίνια) μεταξύ του εγκάρσιου μαγνητικού άξονα της μηχανής και ενός άξονα αναφοράς, δηλαδή :

$$\delta = \theta_r - \omega_{sys}t + \frac{\pi}{2} \quad (2.32)$$

όπου $\delta_0 = \pi/2 + \theta_{r0}$ η αρχική τιμή της γωνίας δ , ενώ ω_{sys} είναι η γωνιακή ταχύτητα του άξονα αναφοράς (σε ηλεκτρικά r/s). Παραγωγίζοντας και τα δύο μέλη της (2.32), προκύπτει η παρακάτω σχέση:

$$\dot{\delta} = \dot{\theta}_r - \omega_{sys} \quad (2.33)$$

η οποία λόγω της (2.25), γίνεται:

$$\dot{\delta} = \omega_r - \omega_{sys} \quad (2.34)$$

Η διαφορική εξίσωση επιταχύνσεως του δρομέα της μηχανής δίνεται από την ακόλουθη σχέση [30]:

$$2H \frac{\dot{\omega}_r}{\omega_b} = T_m - T_e - D \left(\frac{\omega_r}{\omega_b} - 1 \right) \quad (2.35)$$

όπου:

- H είναι η ανηγμένη σταθερά αδράνειας σε MWs/MVA.
- ω_r είναι η γωνιακή ταχύτητα του πεδίου του δρομέα σε ηλεκτρικά r/s.
- T_m είναι η ανά μονάδα παραγόμενη από το στρόβιλο μηχανική ροπή.
- T_e είναι η ανά μονάδα ηλεκτρομαγνητική ροπή της γεννήτριας.
- D είναι ο ανά μονάδα συντελεστής απόσβεσης.

2.2.4 Μοντέλο 4^{ης} τάξης της σύγχρονης μηχανής

Το μοντέλο τέταρτης τάξεως περιγράφεται αναλυτικά στο [18], και στηρίζεται στις ακόλουθες επιπλέον παραδοχές :

- Οι τάσεις μετασηματιστή $(1/\omega_b)\dot{\psi}_d$ και $(1/\omega_b)\dot{\psi}_q$ θεωρούνται αμελητέες σε σχέση με τις τάσεις ταχύτητας.
- Στον δρομέα παριστάνονται δύο μόνο τυλίγματα, το τύλιγμα του πεδίου διεγέρσεως (fd) και ένα τύλιγμα αποσβέσεως (kq) στον εγκάρσιο μαγνητικό άξονα. Τα δύο αυτά τυλίγματα θεωρείται ότι δεν είναι μαγνητικά συζευγμένα μεταξύ τους.

Ορίζουμε ως λ_ω το λόγο της ηλεκτρικής γωνιακής ταχύτητας του συστήματος ω_{sys} προς την ονομαστική της τιμή ω_b :

$$\lambda_\omega = \frac{\omega_{sys}}{\omega_b} \quad (2.36)$$

Σύμφωνα με τις παραπάνω παραδοχές, προκύπτουν οι εξής σχέσεις :

$$v_d = -r_s i_d + \lambda_\omega X'_q i_q + \lambda_\omega E'_d \quad (2.37)$$

$$v_q = -r_s i_q - \lambda_\omega X'_d i_d + \lambda_\omega E'_q \quad (2.38)$$

με

$$E'_q = \frac{X_{md}}{X_{fd}} \psi_{fd}$$

$$E'_d = -\frac{X_{mq}}{X_{kq}} \psi_{kq}$$

όπου :

- E'_q η μεταβατική ΗΕΔ κατά τον εγκάρσιο άξονα q και X'_d η μεταβατική αντίδραση κατά τον ευθύ άξονα d .
- E'_d η μεταβατική ΗΕΔ κατά τον ευθύ άξονα και X'_q η μεταβατική αντίδραση κατά τον εγκάρσιο άξονα.

Οι αντιδράσεις X'_d και X'_q δίνονται από τις ακόλουθες σχέσεις :

$$X'_d = X_d - \frac{X_{md}^2}{X_{fd}} \quad (2.39)$$

$$X'_q = X_q - \frac{X_{mq}^2}{X_{kq}} \quad (2.40)$$

όπου:

- X_d, X_q είναι οι σύγχρονες αντιδράσεις κατά τον ευθύ d και τον εγκάρσιο άξονα q αντίστοιχα.
- X_{fd} είναι η επαγωγική αντίδραση του τυλίγματος διεγέρσεως (ανηγμένη στο στάτη).
- X_{kq} είναι η επαγωγική αντίδραση του τυλίγματος αποσβέσεως στον εγκάρσιο άξονα του δρομέα (ανηγμένη στο στάτη).
- X_{md} είναι η αμοιβαία επαγωγική αντίδραση μεταξύ του τυλίγματος διεγέρσεως και του τυλίγματος του άξονα d του στάτη.
- X_{mq} είναι η αμοιβαία επαγωγική αντίδραση μεταξύ του τυλίγματος αποσβέσεως και του τυλίγματος του άξονα q του στάτη.

Οι διαφορικές εξισώσεις των τυλιγμάτων του δρομέα είναι οι εξής :

$$T'_{d0} \dot{E}'_q = E_f - E'_q - (X_d - X'_d) i_d \quad (2.41)$$

$$T'_{q0} \dot{E}'_d = -E'_d + (X_q - X'_q) i_q \quad (2.42)$$

όπου E_f η ΗΕΔ διεγέρσεως, η οποία είναι ανάλογη της συνεχούς τάσεως v_{fd} του πεδίου, και δίνεται από την παρακάτω σχέση :

$$E_f = \frac{X_{md}}{r_{fd}} v_{fd} \quad (2.43)$$

Οι χρονικές σταθερές T'_{d0} και T'_{q0} ονομάζονται μεταβατικές χρονικές σταθερές ανοιχτού κυκλώματος ευθέος (d) και εγκάρσιου (q) άξονα, αντίστοιχα, και προκύπτουν από τις ακόλουθες δύο σχέσεις :

$$T'_{d0} = \frac{X_{fd}}{\omega_b r_{fd}} \quad (2.44)$$

και

$$T'_{q0} = \frac{X_{kq}}{\omega_b r_{kq}} \quad (2.45)$$

Η ηλεκτρομαγνητική ροπή T_e δίνεται από τον παρακάτω τύπο :

$$T_e = E'_d i_d + E'_q i_q + (X'_q - X'_d) i_d i_q \quad (2.46)$$

Η σχέση (2.46) αντικαθίσταται στη διαφορική εξίσωση (2.35) επιτάχυνσης του δρομέα της μηχανής, η οποία παίρνει τελικά την εξής μορφή:

$$2H \frac{\dot{\omega}_r}{\omega_b} = T_m - E'_d i_d - E'_q i_q - (X'_q - X'_d) i_d i_q - D \left(\frac{\omega_r}{\omega_b} - 1 \right) \quad (2.47)$$

Αναφορικά με την ενεργό ισχύ εξόδου της γεννήτριας P_G , υπολογίζεται από τη σχέση:

$$P_G = v_d i_d + v_q i_q \quad (2.48)$$

ενώ η παραγόμενη άεργος ισχύς Q_G προκύπτει ως εξής:

$$Q_G = v_q i_d - v_d i_q \quad (2.49)$$

Σύμφωνα με την παραπάνω ανάλυση, οι τάσεις και τα ρεύματα του στάτη μίας σύγχρονης γεννήτριας ανάγονται σε ένα πλαίσιο αναφοράς dq το οποίο περιστρέφεται με τη γωνιακή ταχύτητα του δρομέα της. Όπως γίνεται αντιληπτό, σε ένα σύστημα με πολλές μηχανές θα υπάρχει ένα τέτοιο πλαίσιο για κάθε μία σύγχρονη γεννήτρια, το οποίο θα περιστρέφεται με την ταχύτητα του δρομέα της. Επομένως στην περίπτωση αυτή, είναι αναγκαίο να οριστεί ένα κοινό ορθογώνιο πλαίσιο αναφοράς, στο οποίο θα αναχθούν τα μεγέθη του στάτη όλων των σύγχρονων γεννητριών. Το κοινό αυτό πλαίσιο θεωρείται ότι περιστρέφεται με τη γωνιακή ταχύτητα του συστήματος ω_{sys} , και αναφέρεται ως σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς xy . Στο Σχήμα 2.10 φαίνονται το σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς xy του συστήματος, καθώς επίσης και το πλαίσιο αναφοράς dq του δρομέα μίας σύγχρονης γεννήτριας. Ο άξονας x του σύγχρονου πλαισίου αναφοράς xy του συστήματος θεωρείται ότι αποτελεί τον άξονα αναφοράς όλων των γωνιών, ενώ ο άξονας y προπορεύεται κατά 90° .

Στο σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς xy , κάθε εναλλασσόμενο μέγεθος μπορεί να παρασταθεί σαν μιγαδικός αριθμός, με πραγματικό και φανταστικό μέρος την τετμημένη και την τεταγμένη του αντίστοιχα [18]. Για παράδειγμα, το ρεύμα του στάτη \hat{I}_s μίας σύγχρονης γεννήτριας γράφεται ως:

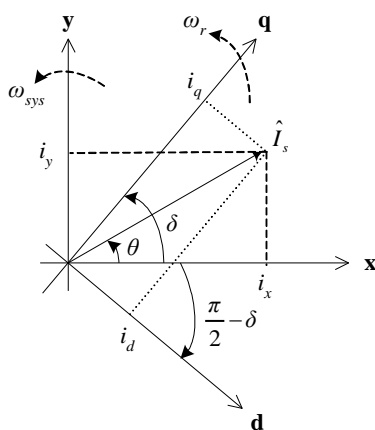
$$\hat{I}_s = i_x + j i_y \quad (2.50)$$

Ο μετασχηματισμός ενός μεγέθους από το πλαίσιο dq της σύγχρονης γεννήτριας στο σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς xy , πραγματοποιείται, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.10,

προσθέτοντας στη φάση του γωνία $\pi/2 - \delta$. Στην περίπτωση του ρεύματος στάτη \hat{I}_s , ο μετασχηματισμός αυτός παριστάνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\begin{bmatrix} i_x \\ i_y \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} \sin \delta & \cos \delta \\ -\cos \delta & \sin \delta \end{bmatrix}}_{\mathbf{T}(\delta)} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} \quad (2.51)$$

όπου ο πίνακας \mathbf{T} ονομάζεται πίνακας μετασχηματισμού και αντιστοιχεί στον στροφέα $e^{-j\left(\frac{\pi}{2}-\delta\right)}$. Αντίστοιχη σχέση ισχύει και για τις προβολές (v_x, v_y, v_d και v_q) της τάσης του στάτη.



Σχήμα 2.10: Ορθογώνια πλαίσια αναφοράς συστήματος και σύγχρονης γεννήτριας

Προκειμένου να εκφραστούν τα μεγέθη του στάτη της γεννήτριας στο σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς xy του συστήματος, γράφονται καταρχήν οι αλγεβρικές εξισώσεις (2.37) και (2.38) του στάτη στην εξής μορφή [18]:

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} r_s & -\lambda_\omega X'_q \\ \lambda_\omega X'_d & r_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \lambda_\omega \begin{bmatrix} E'_d \\ E'_q \end{bmatrix} \quad (2.52)$$

από την οποία χρησιμοποιώντας τον παραπάνω πίνακα μετασχηματισμού \mathbf{T} , προκύπτει:

$$\begin{bmatrix} v_x \\ v_y \end{bmatrix} = \mathbf{T} \begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = - \mathbf{T} \begin{bmatrix} r_s & -\lambda_\omega X'_q \\ \lambda_\omega X'_d & r_s \end{bmatrix} \mathbf{T}^{-1} \begin{bmatrix} i_x \\ i_y \end{bmatrix} + \lambda_\omega \mathbf{T} \begin{bmatrix} E'_d \\ E'_q \end{bmatrix} \quad (2.53)$$

Οι προβολές i_x, i_y του εγχεόμενου ρεύματος της γεννήτριας προς το δίκτυο στο σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς xy του συστήματος, δίνονται από την ακόλουθη σχέση:

$$\begin{bmatrix} i_x \\ i_y \end{bmatrix} = - \frac{1}{r_s^2 + \lambda_\omega^2 X'_d X'_q} \mathbf{T} \begin{bmatrix} r_s & \lambda_\omega X'_q \\ -\lambda_\omega X'_d & r_s \end{bmatrix} \mathbf{T}^{-1} \left\{ \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \end{bmatrix} - \lambda_\omega \mathbf{T} \begin{bmatrix} E'_d \\ E'_q \end{bmatrix} \right\} \quad (2.54)$$

Σημειώνεται ότι ο αντίστροφος του πίνακα μετασχηματισμού \mathbf{T} , ο οποίος αντιστοιχεί στο στροφέα $e^{j\left(\frac{\pi}{2}-\delta\right)}$, είναι ίσος με τον ανάστροφό του, δηλαδή:

$$\mathbf{T}^{-1} = \mathbf{T}' = \begin{bmatrix} \sin \delta & -\cos \delta \\ \cos \delta & \sin \delta \end{bmatrix} \quad (2.55)$$

Η ανά μονάδα τιμή της φαινόμενης ισχύος S_G , η οποία παράγεται από τη σύγχρονη μηχανή δίνεται από τον τύπο:

$$S_G = P_G + jQ_G = \hat{V}_t \hat{I}_s^* \quad (2.56)$$

όπου \hat{V}_t είναι η τερματική της τάση. Αντικαθιστώντας τα μεγέθη του στάτη με την παράστασή τους στο σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς xy του συστήματος, προκύπτει:

$$S_G = (v_x + jv_y)(i_x + ji_y)^* = (v_x i_x + v_y i_y) + j(v_y i_x - v_x i_y) \quad (2.57)$$

δηλαδή ισοδύναμα:

$$P_G = v_x i_x + v_y i_y \quad (2.58)$$

$$Q_G = v_y i_x - v_x i_y \quad (2.59)$$

Σημειώνεται ότι λόγω της αρχής διατήρησης της ενέργειας, οι σχέσεις (2.48) και (2.49) είναι ταυτόσημες με τις (2.58) και (2.59), απλά είναι εκφρασμένες σε διαφορετική μορφή.

2.2.5 Σύγχρονη μηχανή σε περιβάλλον WHSSP

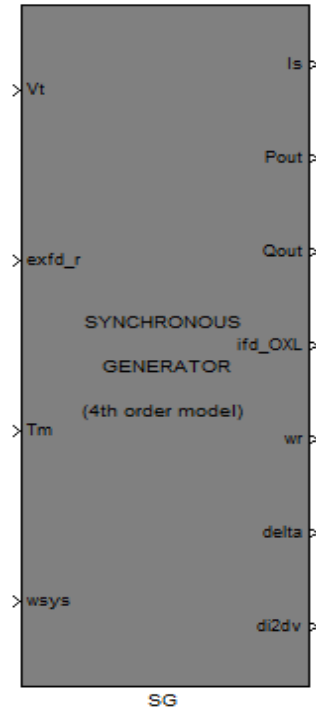
Το μοντέλο της σύγχρονης γεννήτριας βρίσκεται στο αρχείο *Synchronous_Generator* της βιβλιοθήκης του WHSSP και αποτελεί την υλοποίηση μιας συμμετρικής τριφασικής μηχανής που περιγράφεται από τις εξισώσεις του Park, και πρόκειται για μοντέλο τέταρτης τάξης [44]. Το μοντέλο αυτό υλοποιείται σύμφωνα με τις σχέσεις που παρατέθηκαν στην ενότητα 2.2.4, και απεικονίζεται στο Σχήμα 2.11.

Το μπλοκ αυτό δέχεται τέσσερις εισόδους, οι οποίες είναι:

1. το διάνυσμα (v_x, v_y) της τερματικής τάσης της γεννήτριας V_t (αμ) ανηγμένο στο σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς του συστήματος.
2. η τάση του τυλίγματος διέγερσης του δρομέα e_{xfdr} (αμ) στα ονομαστικά μεγέθη της γεννήτριας, που προέρχεται από το μοντέλο του αυτόματου ρυθμιστή τάσης της γεννήτριας.
3. η μηχανική ροπή T_m (αμ) στη βάση του συστήματος, που προέρχεται από το μοντέλο του ρυθμιστή στροφών και στροβίλου της γεννήτριας.
4. η γωνιακή ταχύτητα του σύγχρονου πλαισίου αναφοράς ω_{sys} (αμ), η οποία είναι σταθερή και ίση με τη μονάδα για διασυνδεδεμένο σύστημα ή προκύπτει από τη σχέση (2.1) για αυτόνομο.

Οι έξοδοι του μοντέλου είναι επτά και είναι οι ακόλουθες:

1. το διάνυσμα (i_x, i_y) του εγγεόμενου ρεύματος της γεννήτριας I_s (αμ) στη βάση του συστήματος και ανηγμένο στο σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς .
2. η εγγεόμενη ενεργός ισχύς στην έξοδο P_{out} (αμ) στη βάση του συστήματος.
3. η εγγεόμενη άεργος ισχύς στην έξοδο Q_{out} (αμ) στη βάση του συστήματος.
4. το ρεύμα του πεδίου διέγερσης i_{fd_OXL} (αμ) στα ονομαστικά μεγέθη της γεννήτριας.
5. η γωνιακή ταχύτητα του δρομέα της σύγχρονης γεννήτριας w_r (αμ).
6. η γωνία $delta$ (σε μοίρες) ανάμεσα στο σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς του συστήματος xy και το πλαίσιο της γεννήτριας dq (όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.10).
7. το διάνυσμα $di2dv$ για την επίλυση του δικτύου.



Σχήμα 2.11 : Μπλοκ Σύγχρονης Γεννήτριας

Το διάνυσμα $di2dv$ για την περίπτωση της σύγχρονης μηχανής, είναι το εξής [44]:

$$di2dv = [(bus\ code) \ Y_{G11} \ Y_{G12} \ Y_{G21} \ Y_{G22} \ B_{G1} \ B_{G2} \ J^T] \quad (2.60)$$

όπου

$$Y_G = \begin{bmatrix} Y_{G11} & Y_{G12} \\ Y_{G21} & Y_{G22} \end{bmatrix} = -\frac{I}{r_s^2 + \lambda_\omega^2 X'_d X'_q} T \begin{bmatrix} r_s & \lambda_\omega X'_q \\ -\lambda_\omega X'_d & r_s \end{bmatrix} T^{-1} \quad (2.61)$$

και

$$b_G = \begin{bmatrix} b_{G1} \\ b_{G2} \end{bmatrix} = \frac{\lambda_\omega}{r_s^2 + \lambda_\omega^2 X'_d X'_q} T \begin{bmatrix} r_s & \lambda_\omega X'_q \\ -\lambda_\omega X'_d & r_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E'_d \\ E'_q \end{bmatrix} \quad (2.62)$$

Είναι προφανές ότι οι σχέσεις (2.61) και (2.62) προκύπτουν από την (2.54), λαμβάνοντας υπόψιν τη σχέση (2.11).

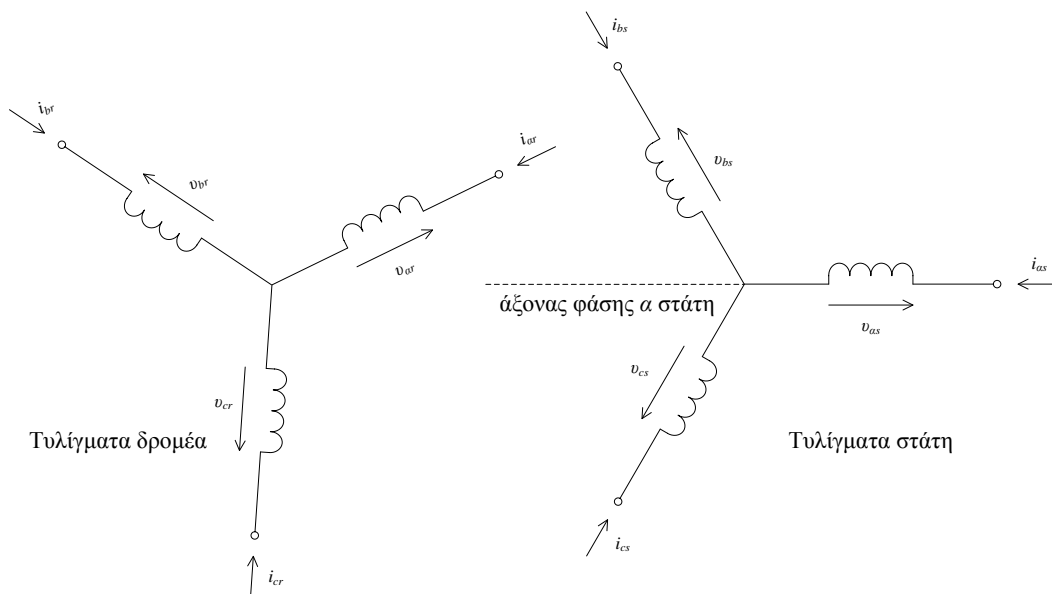
Η αρχικοποίηση της σύγχρονης μηχανής λαμβάνει χώρα στη διαδικασία αρχικοποίησης που καθορίζεται στη μάσκα του μοντέλου, με βάση τις αρχικές συνθήκες και τις τιμές των διαφόρων παραμέτρων.

Τέλος, αξίζει να σημειωθεί πως το μοντέλο 4^{ης} τάξης της σύγχρονης μηχανής που περιγράφηκε στις παραγράφους 2.2.4 και 2.2.5 μπορεί να χρησιμοποιηθεί και ως σύγχρονος ηλεκτρικός κινητήρας. Στην περίπτωση αυτή, η μηχανική ροπή T_m λαμβάνεται αρνητική, υποδηλώνοντας το μηχανικό φορτίο που κινεί ο κινητήρας.

2.3 Μηχανή επαγωγής

2.3.1 Λειτουργία μηχανών επαγωγής

Οι μηχανές επαγωγής ή ασύγχρονες μηχανές χρησιμοποιούνται ευρέως στις μέρες μας κυρίως ως κινητήρες, αλλά και ως γεννήτριες. Η κύρια διαφορά των μηχανών επαγωγής έναντι των σύγχρονων εντοπίζεται στο γεγονός ότι δεν διαθέτουν τύλιγμα διεγέρσεως και επομένως δεν έχουν την ικανότητα να παράγουν την απαιτούμενη άεργο ισχύ για την εγκατάσταση του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου στο διάκενό τους. Στην περίπτωση αυτή, η απαιτούμενη άεργος ισχύς παρέχεται είτε από τις σύγχρονες γεννήτριες του συστήματος είτε από συστοιχίες πυκνωτών, οι οποίες συνδέονται στους ακροδέκτες της μηχανής [18]. Στο Σχήμα 2.12 παριστάνεται η κυκλωματική παράσταση μίας τριφασικής μηχανής επαγωγής.



Σχήμα 2.12: Κυκλωματική παράσταση μηχανής επαγωγής

Ο στάτης της τριφασικής ασύγχρονης μηχανής αποτελείται από τρία όμοια τυλίγματα as , bs , cs (δηλαδή ένα για κάθε φάση), τοποθετημένα σε απόσταση 120 ηλεκτρικών μοιρών το ένα από το άλλο, κατά μήκος της περιφέρειας του διακένου. Όταν τα τυλίγματα αυτά τροφοδοτούνται από ένα συμμετρικό τριφασικό σύστημα ρευμάτων, παράγεται ένα στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο στο διάκενο της μηχανής [18].

Όσον αφορά το κύκλωμα του δρομέα, οι ασύγχρονες μηχανές διαθέτουν ένα τριφασικό κύκλωμα όμοιο με το τύλιγμα του στάτη, του οποίου οι αντίστοιχες φάσεις συμβολίζονται με

ar, br, cr , ή ισοδύναμο τύλιγμα κλωβού. Παρακάτω περιγράφεται η αρχή λειτουργίας της μηχανής επαγωγής στην περίπτωση που τα τυλίγματα του δρομέα είναι βραχυκυκλωμένα.

Τα ρεύματα του στάτη παράγουν ένα στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο στο διάκενο, το οποίο περιστρέφεται με τη σύγχρονη ηλεκτρική γωνιακή ταχύτητα ω_s . Ο δρομέας περιστρέφεται με ηλεκτρική γωνιακή ταχύτητα ω_r . Υποθέτοντας ότι $\omega_r \neq \omega_s$, το τύλιγμα του δρομέα αναπτύσσει ρεύματα εξ επαγωγής στη συχνότητα που αντιστοιχεί στη διαφορά $\omega_s - \omega_r$. Ακολούθως, τα εξ επαγωγής ρεύματα του δρομέα παράγουν ένα νέο στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο στο διάκενο, το οποίο περιστρέφεται με ταχύτητα $\omega_s - \omega_r$ ως προς το δρομέα. Επομένως, τα δύο στρεφόμενα μαγνητικά πεδία στο διάκενο περιστρέφονται με την ίδια ταχύτητα ω_s ως προς το στάτη, με αποτέλεσμα την ανάπτυξη ηλεκτρομαγνητικής ροπής, η οποία τείνει να ευθυγραμμίσει τα δύο αυτά πεδία. Όταν το κύμα ΜΕΔ του δρομέα ακολουθεί το κύμα ΜΕΔ του στάτη, η αναπτυσσόμενη ροπή είναι επιταχύνουσα (λειτουργία κινητήρα). Προφανώς, όταν η ταχύτητα του πεδίου του δρομέα είναι ίση με ω_s , δεν αναπτύσσονται επαγόμενα ρεύματα στο δρομέα, οπότε δεν υπάρχει κύμα ΜΕΔ δρομέα και επομένως δεν αναπτύσσεται ηλεκτρομαγνητική ροπή στο διάκενο [18].

Η ολίσθηση ορίζεται από τον ακόλουθο τύπο [3]:

$$s = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_b} \quad (2.63)$$

όπου ω_b η ονομαστική ηλεκτρική συχνότητα του δικτύου.

Σύμφωνα με την σχέση (2.63), η γωνιακή ταχύτητα $\omega_s - \omega_r$ των επαγόμενων ρευμάτων δρομέα είναι ίση με $s\omega_b$, μέγεθος το οποίο είναι γνωστό σαν συχνότητα ολίσθησης. Σημειώνεται ότι επειδή οι ασύγχρονες μηχανές λειτουργούν τις περισσότερες φορές σαν κινητήρες, θεωρούμε ότι τα ρεύματα των τριών φάσεων as, bs, cs του στάτη είναι θετικά, όταν εισέρχονται στη μηχανή [18].

2.3.2 Μετασχηματισμός Park για την ασύγχρονη μηχανή

Κατά το μετασχηματισμό Park, τόσο το τριφασικό τύλιγμα as, bs, cs του στάτη όσο και το αντίστοιχο ar, br, cr του δρομέα αντικαθίστανται από $d, q, 0$ τυλίγματα, τα οποία περιστρέφονται με την ηλεκτρική γωνιακή ταχύτητα ω_s της τάσεως τροφοδοσίας του στάτη [18]. Τα δύο τυλίγματα d και q είναι ορθογώνια μεταξύ τους και ορίζουν το πλαίσιο αναφοράς dq της μηχανής επαγωγής. Ο άξονας του τυλίγματος d θεωρείται ότι ταυτίζεται με τον άξονα της φάσης as του στάτη, ενώ ο άξονας q προπορεύεται κατά 90° . Το τύλιγμα 0 , όπως και στην περίπτωση των σύγχρονων μηχανών, δεν είναι μαγνητικά συζευγμένο με τα άλλα δύο νέα τυλίγματα και παίζει ρόλο μόνο σε ασύμμετρες συνθήκες φόρτισης.

Για λόγους απλοποίησης των εξισώσεων της μηχανής κάνουμε τις εξής παραδοχές [18]:

- (α) Το φαινόμενο του μαγνητικού κορεσμού αμελείται.
- (β) Η ωμική αντίσταση του δρομέα θεωρείται σταθερή (ανεξάρτητη της συχνότητας ολίσθησης).

Επίσης, σημειώνονται οι εξής παρατηρήσεις αναφορικά με τους συμβολισμούς των μεγεθών:

- Όλα τα μεγέθη αναφέρονται στο πλαίσιο αναφοράς dq του στάτη της μηχανής.
- Οι δείκτες s ή r συμβολίζουν τύλιγμα του στάτη ή του δρομέα αντίστοιχα.

Οι εξισώσεις του Park για τις τάσεις στάτη και δρομέα στο πλαίσιο αναφοράς dq της μηχανής γράφονται ως εξής [18]:

$$v_{ds} = r_s i_{ds} - \frac{\omega_s}{\omega_b} \psi_{qs} + \frac{1}{\omega_b} \dot{\psi}_{ds} \quad (2.64)$$

$$v_{qs} = r_s i_{qs} + \frac{\omega_s}{\omega_b} \psi_{ds} + \frac{1}{\omega_b} \dot{\psi}_{qs} \quad (2.65)$$

$$v_{dr} = r_r i_{dr} - \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_b} \psi_{qr} + \frac{1}{\omega_b} \dot{\psi}_{dr} \quad (2.66)$$

$$v_{qr} = r_r i_{qr} + \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_b} \psi_{dr} + \frac{1}{\omega_b} \dot{\psi}_{qr} \quad (2.67)$$

όπου:

- v_{ds} (v_{dr}) και v_{qs} (v_{qr}) είναι οι ανά μονάδα τάσεις των τυλιγμάτων στάτη (δρομέα) στους δύο άξονες d και q αντίστοιχα.
- i_{ds} (i_{dr}) και i_{qs} (i_{qr}) είναι τα ανά μονάδα ρεύματα στάτη (δρομέα) στους δύο άξονες d και q αντίστοιχα.
- ψ_{ds} (ψ_{dr}) και ψ_{qs} (ψ_{qr}) είναι οι ανά μονάδα πεπλεγμένες ροές ανά δευτερόλεπτο στάτη (δρομέα) στους δύο άξονες d και q αντίστοιχα.
- ω_s και ω_r είναι η ηλεκτρική γωνιακή ταχύτητα του πλαισίου αναφοράς dq και του δρομέα αντίστοιχα σε ηλεκτρικά r/s.
- ω_b είναι η βασική (ονομαστική) ηλεκτρική γωνιακή ταχύτητα του συστήματος σε ηλεκτρικά r/s.
- r_s (r_r) είναι η ανά μονάδα ωμική αντίσταση των τυλιγμάτων στάτη (δρομέα).

Η εξίσωση επιταχύνσεως του δρομέα περιγράφεται από την ακόλουθη σχέση:

$$2H \frac{\dot{\omega}_r}{\omega_b} = T_e - T_m \quad (2.68)$$

όπου:

- H είναι η ανηγμένη σταθερά αδράνειας της μηχανής (σε s).
- T_e και T_m είναι αντίστοιχα η ηλεκτρομαγνητική και η μηχανική ροπή σε ανά μονάδα τιμή, οι οποίες είναι θετικές για λειτουργία κινητήρα.

2.3.3 Μοντέλο 3^{ης} τάξης της ασύγχρονης μηχανής

Στην παράγραφο αυτή, περιγράφεται το μοντέλο τρίτης τάξεως της τριφασικής μηχανής επαγωγής βραχυκυκλωμένου δρομέα. Για την εξαγωγή του μοντέλου, γίνεται η παραδοχή ότι η γωνιακή συχνότητα ω_s των ρευμάτων τροφοδοσίας του στάτη ταυτίζεται με τη γωνιακή συχνότητα ω_{sys} του δικτύου. Επίσης, όπως και στην περίπτωση των σύγχρονων μηχανών, αμελούνται τα ηλεκτρομαγνητικά φαινόμενα του στάτη. Οι ανά μονάδα τιμές όλων των μεγεθών θεωρούνται ανηγμένες στα βασικά μεγέθη του στάτη. Τέλος, δεδομένου ότι ο δρομέας του εξεταζόμενου μοντέλου της μηχανής επαγωγής θεωρείται βραχυκυκλωμένος, οι τάσεις τροφοδοσίας του v_{dr} και v_{qr} είναι μηδέν σε όλο το εύρος της λειτουργίας της μηχανής [18].

Οι ανά μονάδα τάσεις των τυλιγμάτων του στάτη δίνονται από τις ακόλουθες σχέσεις :

$$v_{ds} = r_s i_{ds} - \lambda_\omega X'_s i_{qs} + \lambda_\omega E'_d \quad (2.69)$$

$$v_{qs} = r_s i_{qs} + \lambda_\omega X'_s i_{ds} + \lambda_\omega E'_q \quad (2.70)$$

με

$$E'_q = \frac{X_M}{X_r} \psi_{dr}$$

$$E'_d = -\frac{X_M}{X_r} \psi_{qr}$$

όπου X'_s η μεταβατική αντίδραση της μηχανής, E'_q και E'_d οι μεταβατικές ΗΕΔ της μηχανής κατά τον εγκάρσιο (q) και τον ευθύ (d) άξονα αντίστοιχα, X_M η αντίδραση μαγνητίσεως της μηχανής, X_r η σύγχρονη αντίδραση του δρομέα. Ως λ_ω έχει οριστεί ο λόγος των κυκλικών συχνοτήτων ω_{sys} προς ω_b (2.36).

Η μεταβατική αντίδραση της μηχανής εξάγεται από τον παρακάτω τύπο :

$$X'_s = X_{ss} - \frac{X_M^2}{X_r} \quad (2.71)$$

όπου X_{ss} η σύγχρονη αντίδραση του στάτη.

Οι διαφορικές εξισώσεις των μεταβατικών ΗΕΔ δίνονται από τις ακόλουθες σχέσεις [18]:

$$T'_r \dot{E}'_q = -E'_q + (X_{ss} - X'_s) i_{ds} - (\omega_{sys} - \omega_r) T'_r E'_d \quad (2.72)$$

$$T'_r \dot{E}'_d = -E'_d - (X_{ss} - X'_s) i_{qs} + (\omega_{sys} - \omega_r) T'_r E'_q \quad (2.73)$$

όπου ως T'_r ορίζεται η μεταβατική χρονική σταθερά των τυλιγμάτων του δρομέα, η οποία προκύπτει ως εξής:

$$T'_r = \frac{X_r}{\omega_b r_r} \quad (2.74)$$

Η ανά μονάδα ηλεκτρομαγνητική ροπή T_e δίνεται από τη σχέση [18]:

$$T_e = E'_d i_{ds} + E'_q i_{qs} \quad (2.75)$$

Τέλος, η ηλεκτρομαγνητική ροπή T_e αντικαθίσταται στη διαφορική εξίσωση (2.68) επιταχύνσεως του δρομέα της μηχανής επαγωγής, δηλαδή:

$$2H \frac{\dot{\omega}_r}{\omega_b} = E'_d i_{ds} + E'_q i_{qs} - T_m \quad (2.76)$$

Η εφαρμογή του μετασχηματισμού του Park σε μία ασύγχρονη μηχανή ανάγει τα ρεύματα και τις τάσεις τόσο του στάτη όσο και του δρομέα σε ένα ορθογώνιο πλαίσιο

αναφοράς dq , το οποίο περιστρέφεται με τη γωνιακή συχνότητα ω_{sys} της τάσεως τροφοδοσίας του στάτη. Επομένως, σε ένα σύστημα με πολλές ασύγχρονες μηχανές δεν χρειάζεται να οριστεί ξεχωριστό πλαίσιο αναφοράς για το στάτη κάθε μίας, αλλά εφαρμόζεται ο μετασχηματισμός του Park σε όλες τις μηχανές, θεωρώντας ως κοινό πλαίσιο αναφοράς dq το σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς xy του συστήματος (Σχήμα 2.10).

Οι συνιστώσες v_x και v_y της τάσεως του στάτη μίας μηχανής επαγωγής στο σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς xy του συστήματος είναι ίσες με [18]:

$$\begin{bmatrix} v_x \\ v_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{ds} \\ v_{qs} \end{bmatrix} \quad (2.77)$$

ενώ οι αντίστοιχες συνιστώσες του εγχεόμενου στο δίκτυο ρεύματος στάτη (i_x και i_y) υπολογίζονται από τη σχέση:

$$\begin{bmatrix} i_x \\ i_y \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \end{bmatrix} \quad (2.78)$$

Το πρόσημο μείον στην (2.78) οφείλεται στο γεγονός ότι στο εξεταζόμενο μοντέλο μηχανής επαγωγής, τα ρεύματα του στάτη θεωρούνται θετικά εάν εισέρχονται στη μηχανή.

Οι αλγεβρικές εξισώσεις (2.69) και (2.70) του στάτη εκφράζονται σε μορφή πινάκων ως εξής:

$$\begin{bmatrix} v_{ds} \\ v_{qs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_s & -\lambda_\omega X'_s \\ \lambda_\omega X'_s & r_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \end{bmatrix} + \lambda_\omega \begin{bmatrix} E'_d \\ E'_q \end{bmatrix} \quad (2.79)$$

Αντικαθιστώντας τις (2.77) και (2.78), στη σχέση (2.79) προκύπτει ότι:

$$\begin{bmatrix} v_x \\ v_y \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} r_s & -\lambda_\omega X'_s \\ \lambda_\omega X'_s & r_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_x \\ i_y \end{bmatrix} + \lambda_\omega \begin{bmatrix} E'_d \\ E'_q \end{bmatrix} \quad (2.80)$$

Στο σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς xy , το διάνυσμα του εγχεόμενου ρεύματος μηχανής επαγωγής στο δίκτυο ισούται με:

$$\begin{bmatrix} i_x \\ i_y \end{bmatrix} = - \frac{1}{r_s^2 + \lambda_\omega^2 X_s'^2} \begin{bmatrix} r_s & \lambda_\omega X'_s \\ -\lambda_\omega X'_s & r_s \end{bmatrix} \left\{ \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \end{bmatrix} - \lambda_\omega \begin{bmatrix} E'_d \\ E'_q \end{bmatrix} \right\} \quad (2.81)$$

2.3.4 Μηχανικό φορτίο της ασύγχρονης μηχανής

Η μηχανική ροπή του φορτίου ενός κινητήρα επαγωγής είναι, στη γενική περίπτωση, συνάρτηση των στροφών του κινητήρα. Μία γενική παράσταση του μηχανικού φορτίου δίνεται από την ακόλουθη σχέση [18]:

$$T_m(s) = T_{m0} \left[(1 - \alpha_m) + \alpha_m \left(\frac{\omega_r}{\omega_b} \right)^m \right] \quad (2.82)$$

όπου T_{m0} είναι η μηχανική ροπή του φορτίου στις σύγχρονες στροφές, α_m το ποσοστό του φορτίου που είναι εκθετικής μορφής και m ο εκθέτης του εκθετικού τμήματος του φορτίου. Ειδικές περιπτώσεις μηχανικού φορτίου έχουμε όταν:

- $\alpha_m=0$, οπότε η μηχανική ροπή του φορτίου είναι ανεξάρτητη των στροφών του κινητήρα (φορτίο σταθερής ροπής).
- $\alpha_m=1$ και $m=2$, οπότε η μηχανική ροπή του φορτίου είναι ανάλογη με το τετράγωνο των στροφών του κινητήρα (τετραγωνικό φορτίο).

Στην περίπτωση που η μηχανή επαγωγής λειτουργεί ως γεννήτρια, η μηχανική ροπή έχει αρνητικό πρόσημο.

2.3.5 Μηχανή επαγωγής σε περιβάλλον WHSSP

Το μοντέλο αυτό βρίσκεται στο αρχείο *Induction_Machine* της βιβλιοθήκης του πακέτου WHSSP [44] και αποτελεί την υλοποίηση μιας συμμετρικής τριφασικής μηχανής επαγωγής βραχυκυκλωμένου δρομέα, που περιγράφεται από τις εξισώσεις του Park που παρατέθηκαν στην παράγραφο 2.3.3, και αποτελεί μοντέλο τρίτης τάξης.

Το μπλοκ της μηχανής επαγωγής φαίνεται στο Σχήμα 2.13. Στο μοντέλο αυτό διακρίνουμε τέσσερις εισόδους, οι οποίες είναι:

- το διάνυσμα (v_x, v_y) της τερματικής τάσης της μηχανής επαγωγής (τύλιγμα στάτη) V_s (αμ) ανηγμένο στο σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς του συστήματος, το οποίο εδώ ταυτίζεται με αυτό της μηχανής.
- το διάνυσμα της τάσης του τυλίγματος δρομέα V_r (αμ), το οποίο είναι μηδενικό για την περίπτωση βραχυκυκλωμένου δρομέα.
- η μηχανική ροπή T_m (αμ) στη βάση του συστήματος, η οποία μπορεί να είναι σταθερή για φορτίο σταθερής ροπής ή να προκύπτει συναρτήσει των στροφών (π.χ. τετραγωνικό φορτίο).
- η γωνιακή ταχύτητα του σύγχρονου πλαισίου αναφοράς ω_{sys} (αμ).

Οι πέντε έξοδοι του μοντέλου είναι οι ακόλουθες:

- το διάνυσμα (i_x, i_y) του απορροφούμενου (σύμβαση κινητήρα) ρεύματος της μηχανής I_s (αμ) στη βάση του συστήματος και ανηγμένο στο σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς.
- η απορροφούμενη (σύμβαση κινητήρα) ενεργός ισχύς P_{input} (αμ) στη βάση του συστήματος.
- η απορροφούμενη (σύμβαση κινητήρα) άεργος ισχύς Q_{input} (αμ) στη βάση του συστήματος.
- η γωνιακή ταχύτητα του δρομέα της μηχανής επαγωγής ω_r (αμ).
- το διάνυσμα $di2dv$ για την επίλυση του δικτύου.

Το διάνυσμα $di2dv$ δίνεται από την ακόλουθη σχέση [44]:

$$di2dv = [(bus\ code) \ Y_{M11} \ Y_{M12} \ Y_{M21} \ Y_{M22} \ B_{M1} \ B_{M2}]^T \quad (2.83)$$

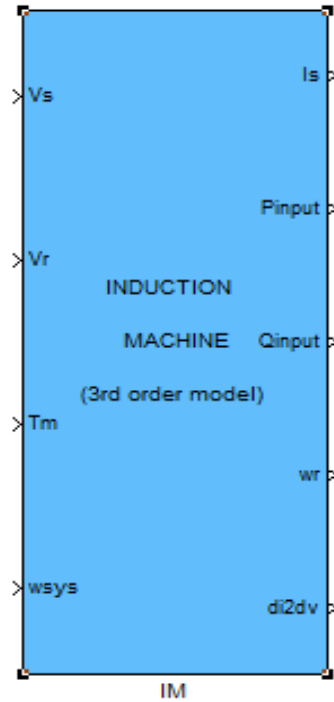
όπου

$$Y_M = \begin{bmatrix} Y_{M11} & Y_{M12} \\ Y_{M21} & Y_{M22} \end{bmatrix} = -\frac{1}{r_s^2 + \lambda_\omega^2 X_s'^2} \begin{bmatrix} r_s & \lambda_\omega X_s' \\ -\lambda_\omega X_s' & r_s \end{bmatrix} \quad (2.84)$$

και

$$b_M = \begin{bmatrix} b_{M1} \\ b_{M2} \end{bmatrix} = \frac{\lambda_\omega}{r_s^2 + \lambda_\omega^2 X_s'^2} \begin{bmatrix} r_s & \lambda_\omega X_s'^2 \\ -\lambda_\omega X_s'^2 & r_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E'_d \\ E'_q \end{bmatrix} \quad (2.85)$$

Οι σχέσεις (2.84) και (2.85) προκύπτουν από την (2.81), λαμβάνοντας υπόψιν τη σχέση (2.12).



Σχήμα 2.13: Μπλοκ Μηχανής Επαγωγής

2.4 Ανεμογεννήτρια σταθερών στροφών με ασύγχρονη γεννήτρια βραχυκυκλωμένου δρομέα – Τύπου Α

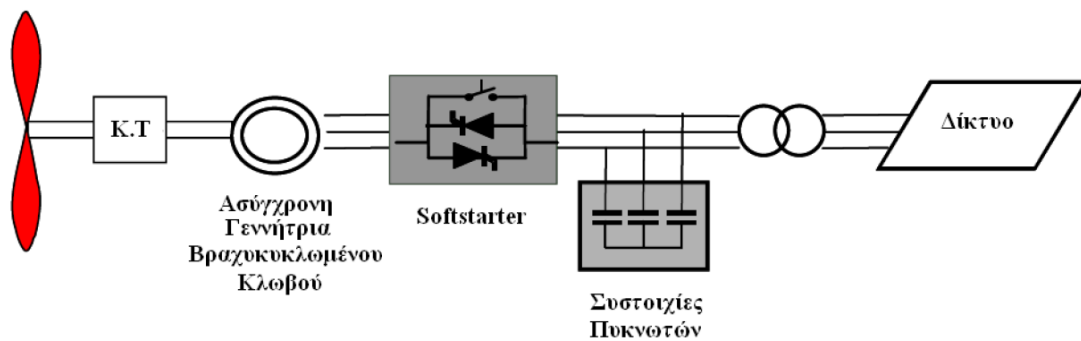
2.4.1 Γενικά

Οι ανεμογεννήτριες Τύπου Α είναι η απλούστερη μορφή ανεμογεννητριών. Ένας δρομέας συνδέεται (μηχανικά) μέσω κιβωτίου ταχυτήτων (ΚΤ) σε ασύγχρονη γεννήτρια τύπου κλωβού, η οποία με τη σειρά της συνδέεται (ηλεκτρικά) μέσω μετασχηματιστή στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Μια συστοιχία πυκνωτών παρέχει την αναγκαία αντιστάθμιση αέργου ισχύος, ενώ η ένταξη των ανεμογεννητριών στο δίκτυο επιτυγχάνεται μέσω ενός εκκινητή ομαλής εκκίνησης (*softstarter*), όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.14 [53].

Η μηχανή επαγωγής, όντας απ' ευθείας και χωρίς τη μεσολάβηση μετατροπέα συνδεδεμένη στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας, λειτουργεί σε σχεδόν σταθερές στροφές στη μόνιμη κατάσταση. Η ολίσθηση ωστόσο επιτρέπει μικρές διακυμάνσεις στην ταχύτητα. Η απόδοση της ανεμογεννήτριας μεγιστοποιείται σε συγκεκριμένη ταχύτητα ανέμου. Η

συγκεκριμένη διαμόρφωση ανεμογεννήτριας διακρίνεται για την απλή σχεδίαση, το χαμηλό κόστος, την αξιοπιστία λειτουργίας και την ανθεκτικότητα, ενώ αντίθετα η ελεγχιμότητά της είναι περιορισμένη. Εξαιτίας του τελευταίου, οι διακυμάνσεις στην ταχύτητα του ανέμου μεταφράζονται σε διακυμάνσεις της μηχανικής ροπής και περαιτέρω της ηλεκτρικής ισχύος που αποδίδεται στο δίκτυο [52]. Αυτές ενδέχεται να προκαλέσουν αντίστοιχες μεταβολές στην τάση στο σημείο σύνδεσης στο δίκτυο, σε περίπτωση ασθενούς δικτύου. Εξαιτίας αυτών των διακυμάνσεων, η απορρόφηση αέργου ισχύος από την ασύγχρονη γεννήτρια είναι κυμαινόμενη, αυξάνοντας τις απώλειες γραμμών και τις μεταβολές στην τάση. Τέλος, η διαμόρφωση της ανεμογεννήτριας σταθερών στροφών εμφανίζει τα εξής βασικά μειονεκτήματα, [52]:

- Δεν υποστηρίζει έλεγχο ταχύτητας, με αποτέλεσμα να παρουσιάζει μειωμένη ενεργειακή απόδοση.
- Δε συμβάλλει στις ρυθμίσεις δικτύου που απαιτούν οι νέοι κώδικες δικτύου από τα αιολικά πάρκα – μη ελέγξιμη κατανάλωση αέργου ισχύος και μειωμένος έλεγχος ποιότητας ισχύος.



Σχήμα 2.14 : Σύνδεση ανεμογεννήτριας τύπου Α στο δίκτυο

Για τους σκοπούς των μελετών ευστάθειας ΣΗΕ, η αναπαράσταση του τύπου αυτού μπορεί να γίνει με χρήση του γνωστού μοντέλου τρίτης τάξης της μηχανής επαγωγής, όπως αυτό παρουσιάστηκε στην παράγραφο 2.3.3. Έτσι, σε ότι έχει να κάνει με το ηλεκτρικό μέρος της ανεμογεννήτριας (με την παραδοχή της οιονεί ημιτονοειδούς κατάστασης) η προσομοίωση του κατ' αυτόν τον τρόπο κρίνεται επαρκής [44].

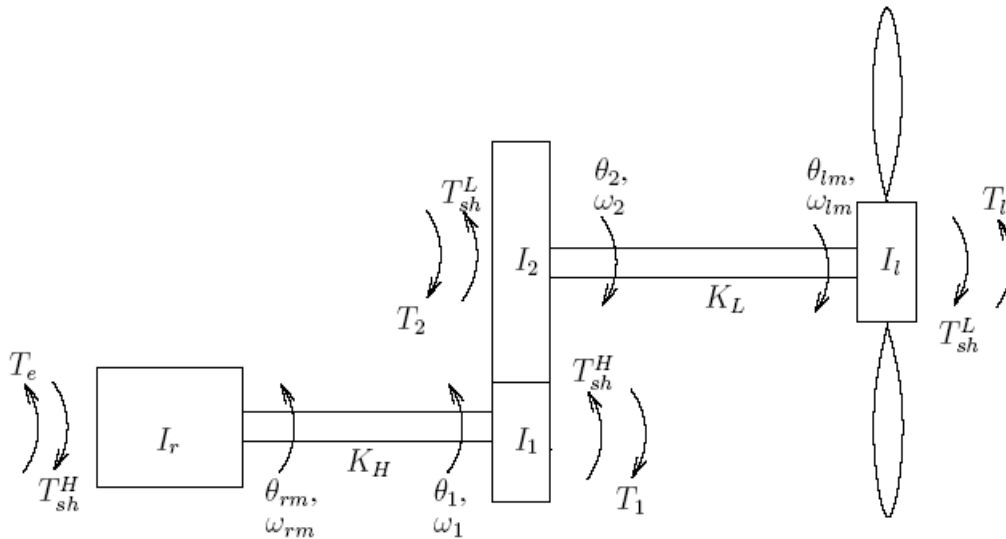
2.4.2 Μηχανικό μέρος

Η διαφοροποίηση σε σχέση με την απλή μηχανή επαγωγής έγκειται στον τρόπο παράστασης του μηχανικού μέρους. Η προσέγγιση που χρησιμοποιείται στις συνήθεις μηχανές επαγωγής είναι αυτή της μίας μάζας, δηλαδή θεωρείται ότι όλες οι περιστρεφόμενες μάζες αντιπροσωπεύονται από μία ισοδύναμη [44]. Η απλοποίηση αυτή δεν ισχύει για τις ανεμογεννήτριες, διότι ο άξονας που συνδέει τον δρομέα της μηχανής επαγωγής με την έλικα δεν είναι απολύτως ανελαστικός. Αυτό οφείλεται στη χρήση του κιβωτίου ταχυτήτων, το οποίο επιβάλλεται καθώς η ταχύτητα της έλικας είναι αρκετά μικρότερη της ταχύτητας του δρομέα της μηχανής επαγωγής. Στην περίπτωση αυτή υπάρχει το αναλυτικό μηχανικό μοντέλο της ανεμογεννήτριας που αποτελείται από 4 μέρη [5]:

- Δρομέας μηχανής επαγωγής
- Δρομέας έλικας κινητήρα (ανεμοκινητήρας)
- Γρανάζι υψηλών στροφών
- Γρανάζι χαμηλών στροφών

Το αντίστοιχο μοντέλο δίνεται στο Σχήμα 2.15 [5]. Με δείκτες 1 και 2 συμβολίζονται αντίστοιχα η πλευρά υψηλής και χαμηλής ταχύτητας του κιβωτίου ταχυτήτων, ενώ οι μηχανικές απώλειες αμελούνται όπως και οι μάζες των αξόνων. Για τα μεγέθη που φαίνονται στο Σχήμα 2.15 έχουμε:

- ω, θ, I , η ταχύτητα περιστροφής (r/s), η γωνία (r) και η ροπή αδράνειας (kgm^2) αντίστοιχα.
- K_H, K_L οι σταθερές ελαστικότητας των πλευρών του άξονα του κιβωτίου ταχυτήτων για τις υψηλές και τις χαμηλές στροφές αντίστοιχα (Nm/r).
- οι δείκτες m, r, l αντιστοιχούν σε μηχανικό μέγεθος, μέγεθος δρομέα μηχανής επαγωγής και δρομέα ανεμοκινητήρα (πτερωτή), αντίστοιχα.
- T_{sh} η ροπή του άξονα (shaft) μετάδοσης της κίνησης (άνω δείκτης H στην πλευρά υψηλών στροφών και L στην πλευρά χαμηλών στροφών), T_e η ηλεκτρική ροπή και T_l η μηχανική ροπή λόγω φορτίου (load), δηλαδή ανέμου, θεωρώντας σύμβαση κινητήρα για τη μηχανή επαγωγής.



Σχήμα 2.15: Μηχανικό μοντέλο ανεμογεννήτριας

Θεωρώντας ότι οι δυο άξονες έχουν μεγάλη σταθερά ελαστικότητας, χωρίς μεγάλη απόκλιση από την πραγματικότητα μπορούμε να καταλήξουμε σε ένα απλοποιημένο μοντέλο δύο μαζών, όπου οι μάζες σε κάθε άξονα θεωρούνται συγκεντρωμένες. Εφόσον οι απώλειες αμελούνται και αφού ανάγουμε τα μεγέθη της πλευράς χαμηλών στροφών σε αυτή των υψηλών στροφών, καταλήγουμε τελικά στις ακόλουθες σχέσεις στο ανά μονάδα σύστημα [44]:

$$2H_r \frac{1}{\omega_b} \cdot \frac{d\omega_r}{dt} = T_e - T_{sh} \quad (2.86)$$

$$2H_l \frac{1}{\omega_b} \cdot \frac{d\omega_l}{dt} = T_{sh} - T_l \quad (2.87)$$

$$T_{sh} = K_{sh} \Delta\theta + D(\omega_r - \omega_l) \cdot \frac{1}{\omega_b} \quad (2.88)$$

όπου :

- H_r η ανηγμένη σταθερά αδράνειας για τον δρομέα της μηχανής επαγωγής και του κιβωτίου ταχυτήτων, που θεωρούνται μια μάζα και αναφέρονται στην πλευρά υψηλών στροφών.
- H_l η ανηγμένη σταθερά αδράνειας του δρομέα του ανεμοκινητήρα (πλευρά χαμηλών στροφών).
- K_{sh} η σταθερά ελαστικότητας του άξονα.
- D ο συντελεστής απόσβεσης και $\Delta\theta$ η γωνία που περιγράφει τη στρέψη του άξονα.
- ω_b (r/s) η ονομαστική γωνιακή ταχύτητα περιστροφής (πλευρά υψηλών στροφών).
- ω_r (r/s), ω_l (r/s), οι γωνιακές ταχύτητες περιστροφής του δρομέα της μηχανής επαγωγής και του δρομέα του ανεμοκινητήρα αντίστοιχα, ανηγμένες στην πλευρά υψηλών ταχυτήτων.
- T_e , T_{sh} , T_l η ηλεκτρομαγνητική ροπή, η ροπή του άξονα μετάδοσης της κίνησης και η ροπή του ανέμου, σε ανά μονάδα τιμές (σύμβαση κινητήρα).

Οι ταχύτητες περιστροφής του δρομέα της μηχανής επαγωγής και του δρομέα του ανεμοκινητήρα συνδέονται με την ακόλουθη σχέση [44]:

$$\Delta\dot{\theta} = \omega_r - \omega_l \quad (2.89)$$

Για την σταθερά ελαστικότητας μπορεί να θεωρηθεί μια τυπική τιμή (π.χ. $K_{sh}=0,3$) ενώ για την αδράνεια του άξονα μια συνήθης πρακτική είναι να θεωρήσουμε ότι είναι μοιρασμένη κατά 1/6 στην πλευρά του δρομέα της μηχανής επαγωγής και κατά 5/6 στην πλευρά του δρομέα του ανεμοκινητήρα.

2.4.3 Αεροδυναμικό μέρος

Η βασική σχέση που εκφράζει την αεροδυναμική ισχύ μιας οποιασδήποτε ανεμογεννήτριας, είναι η ακόλουθη [44]:

$$P_m = \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot C_p(\lambda, \beta) \cdot V_w^3 \quad (2.90)$$

όπου:

- P_m είναι η μηχανική ισχύς στον άξονα του ανεμοκινητήρα (W)
- ρ είναι η πυκνότητα του αέρα (συνήθης τιμή 1.225 kg/ m³)
- A είναι η επιφάνεια που διαγράφει η έλικα (m²)
- V_w είναι η ταχύτητα του ανέμου (m/s)
- C_p είναι ο αεροδυναμικός συντελεστής ισχύος

Ο αεροδυναμικός συντελεστής ισχύος προκύπτει συναρτήσει της γωνιακής ταχύτητας του ανεμοκινητήρα και της ταχύτητας του ανέμου, που συνδέονται μέσω του λόγου ακροπερυγίου λ (tip speed ratio), και βάσει της γωνία βήματος της έλικας β . Συγκεκριμένα για το λ ισχύει:

$$\lambda = \frac{\omega_l \cdot R}{V_w} \quad (2.91)$$

όπου:

- ω_l είναι η ταχύτητα περιστροφής του ανεμοκινητήρα (r/s)
- R είναι η ακτίνα της έλικας (m)

Όσο μεγαλύτερη τιμή έχει ο αεροδυναμικός συντελεστής τόσο μεγαλύτερη είναι και η εκμεταλλεύσιμη αεροδυναμική ισχύς. Τυπικές τιμές του C_p είναι από 0,4 έως 0,5, ενώ το θεωρητικά μέγιστο όριο είναι 0,593 (όριο Betz). Γνωρίζοντας λοιπόν την αεροδυναμική ισχύ P_m και την ταχύτητα περιστροφής του ανεμοκινητήρα ω_l , η αποδιδόμενη μηχανική ροπή T_l στην πτερωτή της A/Γ είναι:

$$T_l = - \frac{P_m}{\omega_l} \quad (2.92)$$

όπου το πρόσημο (-) οφείλεται στη σύμβαση κινητήρα-φορτίου που έχει υποτεθεί.

Για τη μοντελοποίηση αυτή θεωρείται σταθερή γωνία βήματος β ίση με 0, καθώς θεωρούμε ότι ο έλεγχος αεροδυναμικής ισχύος διενεργείται μέσω της λογικής παθητικής απώλειας στήριξης (passive stall) [52], και ότι δεν υπάρχει μεταβλητό βήμα. Δηλαδή τα πτερύγια της ανεμογεννήτριας είναι στερεωμένα στην πλήμνη του δρομέα υπό συγκεκριμένη γωνία που δεν μεταβάλλεται. Επιπροσθέτως είναι αεροδυναμικά σχεδιασμένα κατά τρόπο τέτοιο, ώστε αυξανόμενης της ταχύτητας του ανέμου, το σχήμα του πτερυγίου σταδιακά να ωθεί στην υποχώρηση απέναντι στην τύρβη και τελικά στην απώλεια στήριξης (stall effect). [44].

2.4.4 Ανεμογεννήτρια Τύπου A σε περιβάλλον WHSSP

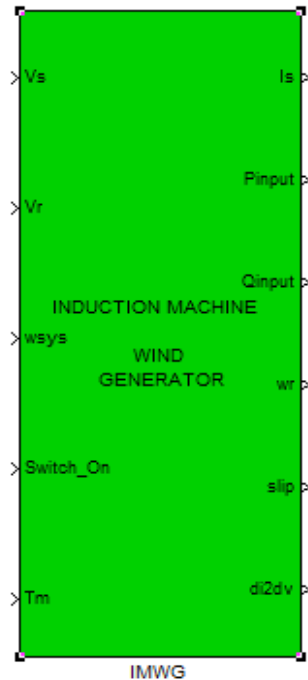
Το μπλοκ της περιγραφόμενης μοντελοποίησης [44], υπάρχει στη βιβλιοθήκη του WHSSP ως *Induction_Machine_Wind_Generator.mdl* και φαίνεται στο Σχήμα 2.16. Στο μοντέλο αυτό διακρίνουμε πέντε εισόδους, οι οποίες είναι:

- το διάνυσμα (v_x, v_y) της τερματικής τάσης της γεννήτριας επαγωγής (τύλιγμα στάτη) V_s (αμ) ανηγμένο στο σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς του συστήματος, το οποίο εδώ ταυτίζεται με αυτό της μηχανής.
- το διάνυσμα της τάσης του τυλίγματος δρομέα V_r (αμ) και το οποίο είναι μηδενικό για την περίπτωση βραχυκυκλωμένου δρομέα (συνηθέστερη διαμόρφωση για ανεμογεννήτρια τύπου A).
- η γωνιακή ταχύτητα του σύγχρονου πλαισίου αναφοράς ω_{sys} (αμ).
- το σήμα *switch on* που αποτελεί ένδειξη για το αν είναι συνδεδεμένη στο δίκτυο η ανεμογεννήτρια και προέρχεται από κάποια διάταξη προστασίας που την αποσυνδέει σε μεγάλες διαταραχές.
- η μηχανική ροπή T_m (αμ) ανηγμένη στη βάση ισχύος του συστήματος, για την περίπτωση που αμελούμε την αεροδυναμική συμπεριφορά.

Οι έξι έξοδοι του μοντέλου είναι οι ακόλουθες:

- το διάνυσμα (i_x, i_y) του απορροφούμενου (σύμβαση κινητήρα) ρεύματος της μηχανής I_s (αμ) στη βάση του συστήματος και ανηγμένο στο σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς.
- η απορροφούμενη (σύμβαση κινητήρα) ενεργός ισχύς P_{input} (αμ) στη βάση του συστήματος.
- η απορροφούμενη (σύμβαση κινητήρα) άεργος ισχύς Q_{input} (αμ) στη βάση του συστήματος.
- η γωνιακή ταχύτητα του δρομέα της ασύγχρονης γεννήτριας ω_r (αμ).
- η τιμή της ολίσθησης *slip* (%).

- το διάνυσμα $di2dv$ για την επίλυση του δικτύου



Σχήμα 2.16: Μπλοκ ανεμογεννήτριας τύπου A

Λόγω του γεγονότος πως το ηλεκτρικό μέρος της ανεμογεννήτριας Τύπου A συνίσταται από μια μηχανή επαγωγής βραχυκυκλωμένου δρομέα, το διάνυσμα $di2dv$ δίνεται ομοίως από τις σχέσεις (2.83), (2.84) και (2.85).

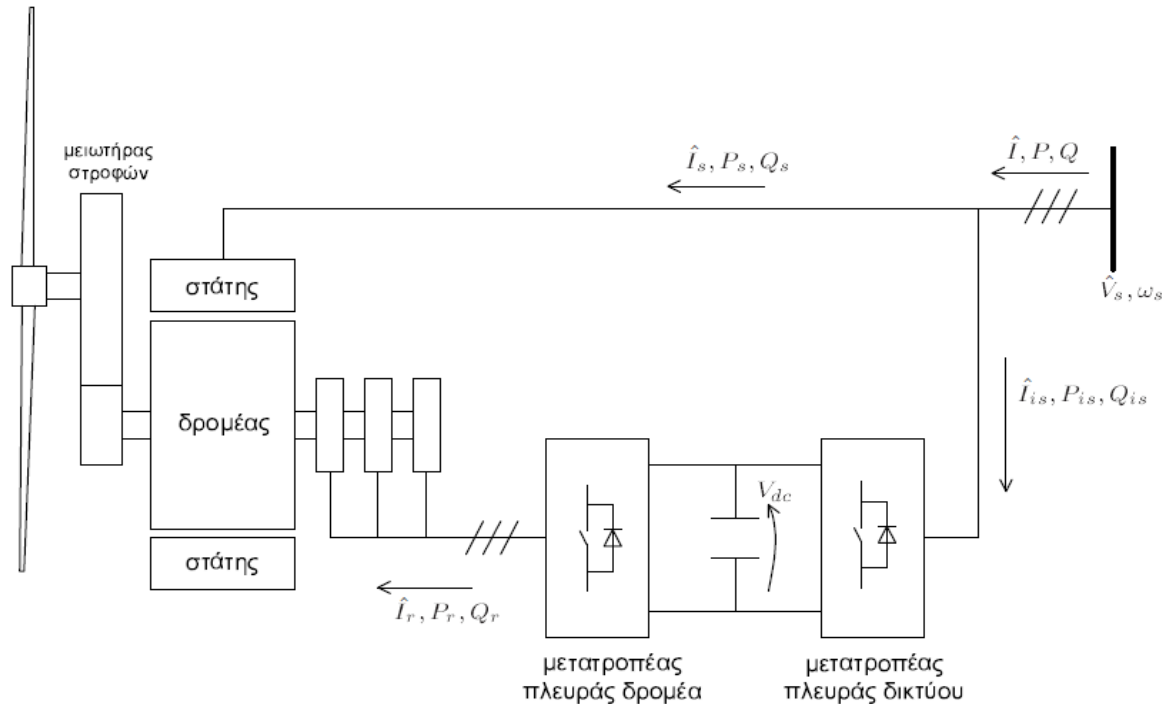
2.5 Ανεμογεννήτρια μεταβλητών στροφών με ασύγχρονη γεννήτρια διπλής τροφοδότησης (ΑΓΔΤ) - Τύπου Γ

2.5.1 Γενικά

Οι Ασύγχρονες Γεννήτριες Διπλής Τροφοδότησης (ΑΓΔΤ - Doubly Fed Asynchronous Generator) αποτελούν τον πιο διαδεδομένο τύπο ανεμογεννητριών που χρησιμοποιείται σήμερα καθώς συνδυάζουν τα πλεονεκτήματα της λειτουργίας μεταβλητών στροφών με το συγκριτικά χαμηλότερο κόστος σε σχέση με τις ανεμογεννήτριες πλήρους μετατροπέα [44]. Η ΑΓΔΤ είναι μία ασύγχρονη μηχανή τυλιγμένου δρομέα της οποίας τόσο ο στάτης όσο και ο δρομέας συνδέονται στο δίκτυο. Ο μεν στάτης απευθείας, όπως στις κλασικές μηχανές επαγωγής, ο δε δρομέας μέσω ψηκτρών και ενός μετατροπέα συχνότητας. Ο μετατροπέας συχνότητας αποτελείται ουσιαστικά από δύο μετατροπείς πηγής τάσης (PWM) οι οποίοι έχουν κοινή DC πλευρά, επιτρέποντας την αντιστάθμιση και έλεγχο της αέργου ισχύος, καθώς και την ομαλή διασύνδεση στο δίκτυο.

Λειτουργώντας το κύκλωμα του δρομέα σε μεταβλητή συχνότητα, επιτυγχάνεται μεταβλητή μηχανική ταχύτητα περιστροφής της πτερωτής, με εύρος ταχύτητας περίπου $\pm 30\%$ γύρω από τη σύγχρονη ταχύτητα [52]. Η συνολικά εγχεόμενη ενεργός ισχύς στο δίκτυο προκύπτει ως άθροισμα της εγχεόμενης απευθείας από τον στάτη και της εγχεόμενης μέσω

του μετατροπέα από το δρομέα [44]. Δεδομένου λοιπόν ότι μόνο ένα ποσοστό της συνολικής ισχύος (περίπου μέχρι το ένα τρίτο αυτής) εγχέεται μέσω του μετατροπέα, αυτός είναι μειωμένης ονομαστικής ισχύος και επομένως και μειωμένου κόστους σε σχέση με ένα μετατροπέα πλήρους ισχύος. Η βασική διάταξη της ΑΓΔΤ φαίνεται στο Σχήμα 2.17 [44], με τους δείκτες s και r να συμβολίζουν μεγέθη στάτη και δρομέα αντίστοιχα. Σημειώνεται ότι ανάμεσα στο μετατροπέα πλευράς δικτύου και τον τερματικό ζυγό της μηχανής υπάρχει και μετασχηματιστής, ο οποίος δεν εμφανίζεται στο Σχήμα 2.17.



Σχήμα 2.17: Βασική διάταξη της ΑΓΔΤ

Το ευρύ φάσμα ταχυτήτων ανέμου στο οποίο λειτουργεί η ΑΓΔΤ, αυξάνει σημαντικά την ενεργειακή απόδοση της διάταξης, γεγονός που αποτελεί και το βασικό πλεονέκτημα σε σχέση με την ανεμογεννήτρια Τύπου Α που παρουσιάστηκε στην ενότητα 2.4. Η ηλεκτρομαγνητική ροπή της γεννήτριας παραμένει σχεδόν σταθερή, σε αντίθεση με μια ανεμογεννήτρια σταθερών στροφών (Τύπος Α), με τρόπο που οι διακυμάνσεις στην ταχύτητα της γεννήτριας να απορροφάνε τις ταχείες μεταβολές στην ταχύτητα του ανέμου [52]. Η δυνατότητα αυτή προσφέρεται χάρη στη λειτουργία του μετατροπέα ισχύος, μειώνοντας τις μηχανικές καταπονήσεις σε μέρη της ανεμογεννήτριας.

Οι ανεμογεννήτριες Τύπου Γ έχουν εξοπλιστεί πλέον με πλήθος λειτουργιών που επιτρέπουν τη συμβολή τους στη ρύθμιση παραμέτρων του δικτύου, όπως απαιτείται από τους διαχειριστές του δικτύου σχετικά με τον έλεγχο ενεργού και αέργου ισχύος, την ταχεία απόκριση σε μεταβατικά και δυναμικά φαινόμενα των δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας στα οποία συνδέονται, τη συμβολή στην εξασφάλιση της ευστάθειας των ΣΗΕ, και βελτιωμένη ποιότητα ισχύος (μειωμένες διακυμάνσεις τάσεις, εξάλειψη αρμονικών χαμηλής τάξης και μειωμένα ρεύματα εκκίνησης και βραχυκύκλωσης) [52].

2.5.2 Έλεγχος Ανεμογεννήτριας Τύπου Γ

Ο συνήθης τρόπος ελέγχου στις ΑΓΔΤ είναι ο διανυσματικός έλεγχος, όπου το πλαίσιο για την εφαρμογή του ελέγχου είναι ευθυγραμμισμένο με την πεπλεγμένη μαγνητική ροή του στάτη, επιτρέποντας έτσι ανεξάρτητο έλεγχο της ενεργού και αέργου ισχύος μέσω της

ρύθμισης των αντίστοιχων συνιστωσών του ρεύματος του δρομέα. Αμελώντας μάλιστα τα μεταβατικά του στάτη και την ωμική αντίστασή του, το πλαίσιο αυτό ταυτίζεται με αυτό της τερματικής τάσης της μηχανής [5].

Ο διανυσματικός έλεγχος (με την παραδοχή της οιονεί ημιτονοειδούς κατάστασης) επιτυγχάνει τελικά την απόζευξη των δύο ρυθμιζόμενων συνιστωσών του ρεύματος του δρομέα. Το γεγονός αυτό απλοποιεί κατά πολύ τον τρόπο προσομοίωσης της λειτουργίας των ΑΓΔΤ για τους σκοπούς των μελετών ευστάθειας αφού δεν χρειάζεται αναλυτική παράσταση της δυναμικής της ασύγχρονης γεννήτριας, των μετατροπέων τάσης και του ενδιάμεσου πυκνωτή, αλλά επαρκούν οι ισοδύναμοι βρόχοι ελέγχου [44].

Μέσω της προσέγγισης αυτής με τους ισοδύναμους βρόχους ελέγχου, το γενικευμένο μοντέλο αναπαράστασης ενός αιολικού πάρκου αποτελούμενο από ΑΓΔΤ, απαρτίζεται από τέσσερα βασικά συστατικά μέρη [44]:

- ✓ Γεννήτρια/Μετατροπέας (Generator/Converter)
- ✓ Έλεγχος Μετατροπέα (Converter Control)
- ✓ Μηχανικό μέρος (Wind Turbine)
- ✓ Έλεγχος Γωνίας Βήματος (Pitch Control)

Το γενικό σύστημα ελέγχου, όπως φαίνεται παραπάνω, χωρίζεται σε δύο μεγάλα υποσυστήματα : το σύστημα ελέγχου γωνίας βήματος πτερυγίων και το σύστημα ελέγχου των μετατροπέων συχνότητας. Ο χρόνος απόκρισης του πρώτου είναι μεγαλύτερος καθώς συνδέεται με την αδράνεια του μηχανικού συστήματος. Ο έλεγχος μετατροπέα αφορά το μετατροπέα στην πλευρά του δρομέα ο οποίος ελέγχει τη γεννήτρια εφαρμόζοντας μεταβλητή τάση στο κύκλωμα του δρομέα, και το μετατροπέα στην πλευρά του δικτύου ο οποίος ρυθμίζει τη συνεχή τάση ανάμεσα στους δύο μετατροπείς και την άεργο ισχύ που ανταλλάσσει με το δίκτυο [52]. Το Σχήμα 2.18 παρουσιάζει τη γενική δομή του μοντέλου και τη σύνδεση των επιμέρους υποσυστημάτων.

Υπάρχουν δύο δυνατότητες ελέγχου της τάσεως/άεργου ισχύος, είτε μέσω ρύθμισης του συντελεστή ισχύος (Power Factor, PF), είτε μέσω ρύθμισης της τάσης (Voltage Control, VC) [44]. Στην περίπτωση ελέγχου τάσης (VC), ρυθμίζεται η τάση σε κάποιο σημείο ενδιαφέροντος με βάση κάποια τάση αναφοράς. Συνήθως το σημείο αυτό είναι το σημείο κοινής σύνδεσης (Point of Common Coupling, PCC) του αιολικού πάρκου με το δίκτυο. Ο έλεγχος της τερματικής τάσης των ανεμογεννητριών είναι επίσης σημαντικός για την επίτευξη καλής απόκρισης της τάσης σε περιπτώσεις τοπικών σφαλμάτων ή άλλων διαταραχών.

Ο έλεγχος στροφών γίνεται με βάση τη μέτρηση της παραγόμενης ενεργού ισχύος P . Η ταχύτητα αναφοράς ω_{ref} προκύπτει από την καμπύλη ελέγχου στροφών, όπου σε κάθε μετρούμενη τιμή P αντιστοιχεί μία ταχύτητα αναφοράς για την οποία μεγιστοποιείται ο αεροδυναμικός συντελεστής ισχύος (στρατηγική MPPT).

Ο ρυθμιστής της γωνίας βήματος (pitch control) είναι ένας αναλογικός-ολοκληρωτικός ελεγκτής με έξοδο την επιθυμητή γωνία βήματος και είσοδο το σφάλμα της ταχύτητας περιστροφής από την ταχύτητα αναφοράς.

Τέλος για το μηχανικό μέρος χρησιμοποιείται κι εδώ, όπως και στην περίπτωση των ανεμογεννητριών τύπου A, το μοντέλο των δύο στρεφόμενων μαζών προς αναπαράσταση της δυναμικής που οφείλεται στο σύστημα μετάδοσης της κίνησης [44].

Η αποδιδόμενη μηχανική ροπή T_l από τον ανεμοκινητήρα υπολογίζεται στη συγκεκριμένη μοντελοποίηση μέσω μιας προσεγγιστικής λογικής, κατάλληλης για μελέτες ευστάθειας [44]. Η λογική αυτή συνδέει την αεροδυναμική ισχύ με τη γωνία βήματος των πτερυγίων, και δεν χρησιμοποιείται ο αναλυτικός τύπος υπολογισμού της αεροδυναμικής ισχύος (2.90). Σημειώνεται ότι στη σύμβαση κινητήρα που ακολουθείται, θεωρούμε ότι η ανεμογεννήτρια απορροφά αρνητική ισχύ.

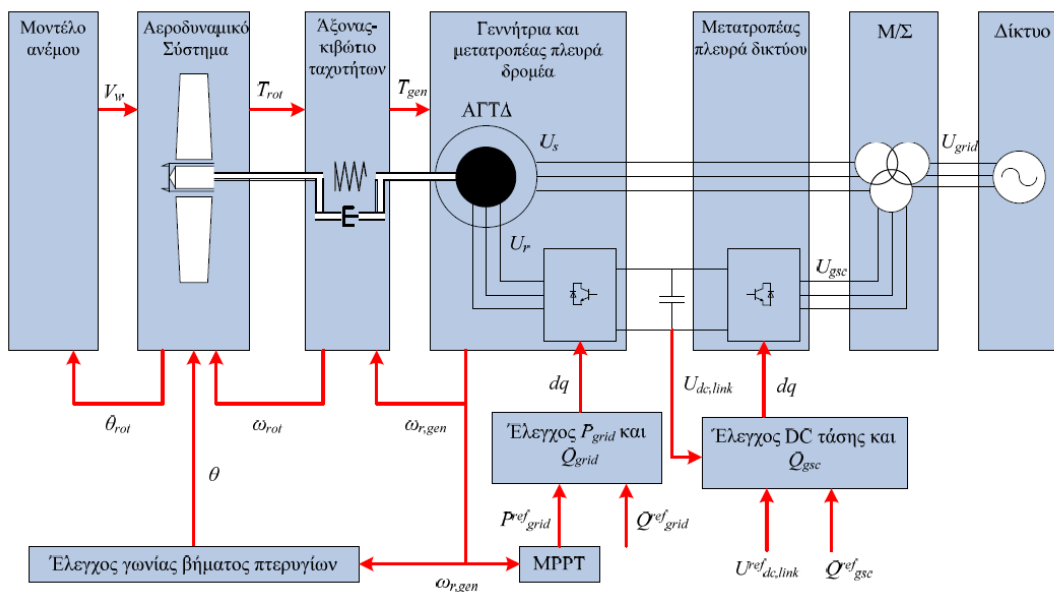
Έτσι για τη μηχανική ισχύ και ροπή αντίστοιχα, ισχύει:

$$P_m = P_0 - (\beta - \beta_0) \cdot \beta \cdot Kaero \quad (2.93)$$

$$T_l = \frac{P_m}{\omega_l} \quad (2.94)$$

όπου :

- P_0 είναι η αρχική ενεργός ισχύς (α.μ. στη βάση της μηχανής)
- β είναι η τρέχουσα γωνία βήματος των πτερυγίων ($^\circ$)
- β_0 είναι η αρχική γωνία βήματος των πτερυγίων ($^\circ$)
- $Kaero$ είναι ο συντελεστής που συνδέει τη γωνία βήματος με τη μηχανική ισχύ



Σχήμα 2.18 : Δομικό διάγραμμα και έλεγχος ΑΓΔΤ

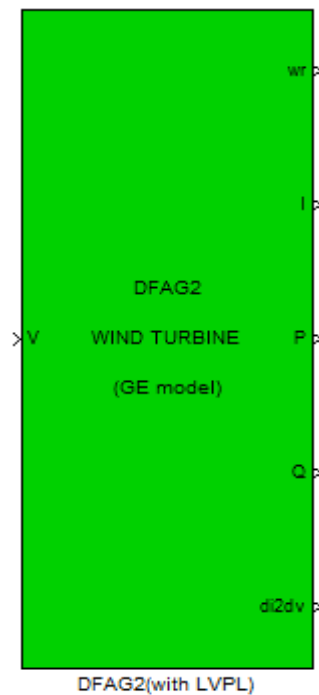
Στα συγγράμματα [5], [44], [52] εξηγείται αναλυτικά ο τρόπος ελέγχου της ΑΓΔΤ και παρατίθενται τα αντίστοιχα διαγράμματα ελέγχου και συναρτήσεις μεταφοράς που την μοντελοποιούν.

2.5.3 Ανεμογεννήτρια Τύπου Γ σε περιβάλλον WHSSP

Το μοντέλο το οποίο αναπτύχθηκε για το περιβάλλον του WHSSP χαρακτηρίζεται από λεπτομερείς βρόχους ελέγχου της ενεργού και αέργου ισχύος, και υπάρχει στη βιβλιοθήκη [44] ως Doubly_Fed_Wind_Turbine2.mdl (Σχήμα 2.19).

Στο μοντέλο που εμφανίζεται στο Σχήμα 2.19 διακρίνουμε μία είσοδο, η οποία είναι το διάνυσμα (v_x, v_y) της θερματικής τάσης της ασύγχρονης γεννήτριας διπλής τροφοδότησης V (α.μ.), ανηγμένο στο σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς του συστήματος. Παράλληλα υπάρχουν πέντε σήματα στην έξοδο που αφορούν:

- τη γωνιακή ταχύτητα w_r (αμ) του δρομέα της μηχανής επαγωγής της ΑΓΔΤ.
- το διάνυσμα (i_x, i_y) του συνολικά απορροφούμενου (σύμβαση κινητήρα) ρεύματος I (αμ) της ΑΓΔΤ στη βάση του συστήματος και ανηγμένο στο σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς.
- την εγχεόμενη (σύμβαση γεννήτριας) ενεργό ισχύ P (αμ) στη βάση του συστήματος.
- την εγχεόμενη (σύμβαση γεννήτριας) άεργο ισχύ Q (αμ) στη βάση του συστήματος.
- το διάνυσμα $di2dn$ για την επίλυση του δικτύου.



Σχήμα 2.19: Μπλοκ ανεμογεννήτριας τύπου Γ

Το διάνυσμα $di2dn$ δίνεται από την ακόλουθη σχέση [44] :

$$di2dn = [(bus\ code) \ 0 \ -1/X_{eq} \ 1/X_{eq} \ 0 \ i_{nl,x} \ i_{nl,y}]^T \quad (2.95)$$

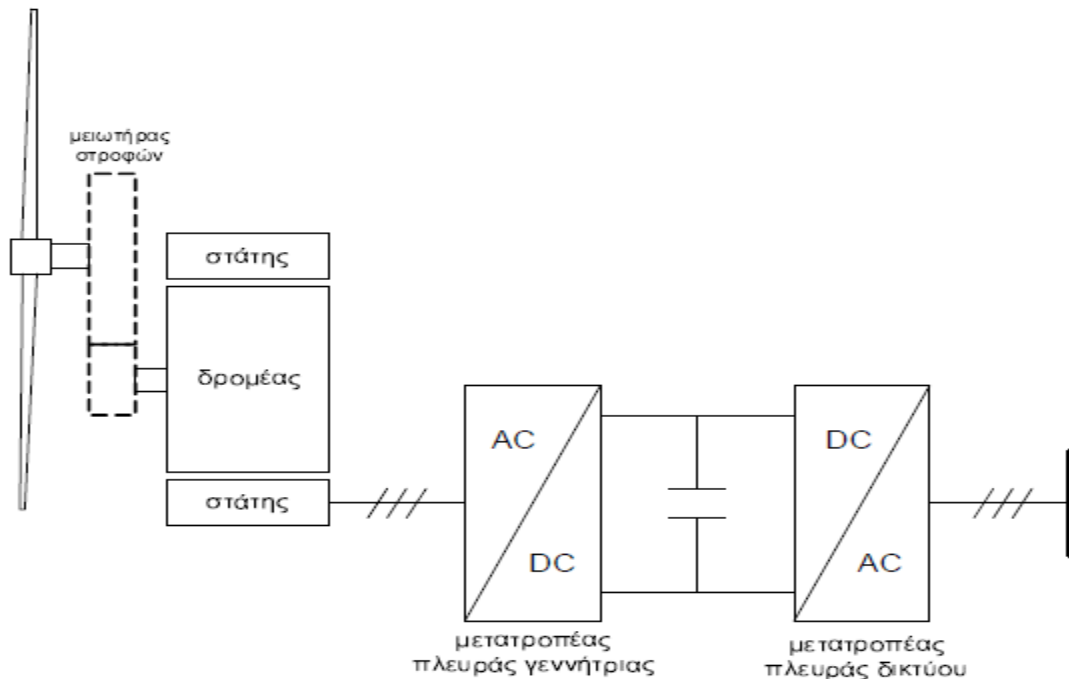
όπου $i_{nl,x}$, $i_{nl,y}$ τα εγχεόμενα ρεύματα, τα οποία δεν εξαρτώνται γραμμικά από την τερματική τάση αλλά προκύπτουν ως συνάρτηση των διαφορών μεταβλητών κατάστασης εσωτερικά του μοντέλου της ΑΓΔΤ. Η επαγωγική αντίδραση X_{eq} αποτελεί την ισοδύναμη αντίδραση Norton που εισάγεται, θεωρώντας την ΑΓΔΤ ως μία ελεγχόμενη πηγή ρεύματος.

2.6 Ανεμογεννήτρια μεταβλητών στροφών με πλήρη μετατροπέα ισχύος - Τύπου Δ

2.6.1 Γενικά

Στις ανεμογεννήτριες με πλήρη μετατροπέα (Full Converter Wind Generators, FCWG), που αποτελούν επίσης μιας ευρέως διαδεδομένη τεχνολογία σήμερα, χρησιμοποιούνται

κυρίως σύγχρονες γεννήτριες για την ηλεκτρομηχανική μετατροπή. Στις ανεμογεννήτριες αυτές ο μετατροπέας ισχύος που παρεμβάλλεται ανάμεσα στη γεννήτρια και το δίκτυο απεμπλέκει πλήρως τη συχνότητα λειτουργίας της γεννήτριας απ' αυτή του δικτύου. Οι σύγχρονες γεννήτριες μπορεί να έχουν τύλιγμα διέγερσης ή να είναι μόνιμων μαγνητών. Σημαντικό πλεονέκτημα των ανεμογεννητριών αυτών είναι η δυνατότητα αποφυγής του κιβωτίου ταχυτήτων μέσω της χρήσης πολυπολικής γεννήτριας, δεδομένου ότι η ταχύτητα περιστροφής είναι ανεξάρτητη της συχνότητας του δικτύου. Παράλληλα απαιτείται κι ένας πλήρης μετατροπέας – σε αντίθεση με τις ΑΓΔΤ – αφού το 100% της παραγόμενης ισχύος περνά απ' αυτόν. Η βασική διάταξη της ανεμογεννήτριας πλήρους μετατροπέα φαίνεται στο Σχήμα 2.20.



Σχήμα 2.20: Βασική διάταξη της ανεμογεννήτριας πλήρους μετατροπέα

Τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα του συγκεκριμένου τύπου ανεμογεννήτριας είναι σε μεγάλο βαθμό όμοια με τα όσα αναφέρονται στον Τύπο Γ και σχετίζονται με τη χρήση μετατροπέα ισχύος. Η λειτουργία μεταβλητών στροφών στον Τύπο Δ είναι προφανώς πιο εκτεταμένη σε σύγκριση με τον Τύπο Γ, αφού δεν υπάρχει κανενός είδους σύνδεση της γεννήτριας με τη συχνότητα του συστήματος. Η προστασία επίσης της γεννήτριας στον Τύπο Δ από μεταβατικά φαινόμενα στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας είναι εγγενώς αυξημένη λόγω παρεμβολής του μετατροπέα, σε αντίθεση με τη γεννήτρια διπλής τροφοδότησης στον Τύπο Γ που είναι έκθετη σε μεταβατικά φαινόμενα λόγω της απ' ευθείας σύνδεσης του στάτη στο δίκτυο. Επιπλέον πλεονεκτήματα του Τύπου Δ σε σχέση με τον Τύπο Γ σχετίζονται με την ενεργειακή απόδοση, αξιοπιστία και θέματα συντήρησης.

Ο μετατροπέας συχνότητας αποτελείται από έναν μετατροπέα EP/ΣΡ (AC/DC) στη πλευρά της γεννήτριας και ένα μετατροπέα ΣΡ/ΕΡ (DC/AC) στην πλευρά δικτύου, οι οποίοι έχουν κοινή DC πλευρά. Στην πλευρά της γεννήτριας μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε ανορθωτής διόδων (συνήθως συνδυάζεται με τύλιγμα διέγερσης) είτε PWM μετατροπέας (οπότε είναι δυνατή και η χρήση γεννήτριας επαγωγής). Στην πλευρά δικτύου χρησιμοποιείται PWM μετατροπέας ο οποίος είναι υπεύθυνος για τη ρύθμιση της ενεργού και άεργου έγχυσης στο δίκτυο. Ανάμεσα στους δύο μετατροπείς μπορεί να παρεμβάλλεται ένας μετατροπέας ΣΡ/ΣΡ (DC/DC), ο οποίος δεν φαίνεται στο Σχήμα 2.20. Και εδώ – όπως στην περίπτωση της ΑΓΔΤ – η γρήγορη απόκριση των μετατροπέων μας επιτρέπει να αγνοήσουμε

τη δυναμική του πυκνωτή για τους σκοπούς των μελετών ευστάθειας, οπότε η ενεργός έγχυση της γεννήτριας θεωρείται ίση με την εγχεόμενη ενεργό ισχύ στο δίκτυο.

2.6.2 Έλεγχος Ανεμογεννήτριας Τύπου Δ

Στο Σχήμα 2.21 παρουσιάζεται το σχήμα ελέγχου της ανεμογεννήτριας Τύπου Δ, που περιλαμβάνει το αεροδυναμικό, το μηχανικό και το ηλεκτρικό σύστημα [52]. Το σύστημα ελέγχου περιλαμβάνει τον ελεγκτή γωνίας βήματος πτερυγίων, το σύστημα διέγερσης, τον έλεγχο του μετατροπέα DC-DC και τον έλεγχο του μετατροπέα στην πλευρά του δικτύου. Τα σήματα CSI^{ref} , $i=1,2,3$, που εμφανίζονται στο σχήμα αναφέρονται σε μεγέθη του συστήματος όπως τάση ακροδεκτών γεννήτριας, συνεχής τάση $U_{dc,link}$ πυκνωτή κ.α., τα οποία ποικίλλουν ανάλογα με το συγκεκριμένο σχήμα ελέγχου που ακολουθείται. Η στρατηγική της Μέγιστης Απολαβής Ισχύος (*Maximum Power Point tracking-MPPT*) που παρέχει το σήμα αναφοράς για την ενεργό ισχύ P_{grid}^{ref} , υλοποιείται είτε στο σύστημα ελέγχου της διέγερσης είτε του μετατροπέα συνεχούς τάσης είτε του μετατροπέα στην πλευρά του δικτύου.

Το μοντέλο το οποίο αναπτύχθηκε για το περιβάλλον του WHSSP είναι κατάλληλο για την αναπαράσταση ενός αιολικού πάρκου αποτελούμενο από ανεμογεννήτριες πλήρους μετατροπέα και ακολουθεί τη λογική της οιονεί ημιτονοειδούς κατάστασης. Δυναμικές που εξελίσσονται σε χρονική κλίμακα αρκετά μικρότερη από αυτή που αφορά την ανάλυση ευστάθειας ΣΗΕ μπορούν να αγνοηθούν (δυναμική DC πυκνωτή, δυναμική των διακοπτικών στοιχείων των ηλεκτρονικών ισχύος). Η διάταξη που μοντελοποιήθηκε στην ουσία συμπεριφέρεται ως προς το δίκτυο σαν μια ελεγχόμενη πηγή ρεύματος. Συνεπώς το μοντέλο αυτό, ανάλογα με το ποιες είναι οι επιθυμητές εγχύσεις ενεργού και αέργου ισχύος, και ανάλογα με την τιμή της τερματικής τάσης, εγγεί στο δίκτυο τα αντίστοιχα ενεργά και άεργα ρεύματα [44]. Έτσι και εδώ έχουμε τη υλοποίηση ενός μοντέλου αναπαράστασης με ισοδύναμους βρόχους ελέγχου το οποίο – ομοίως με την ΑΓΔΤ – απαρτίζεται από τέσσερα βασικά συστατικά μέρη:

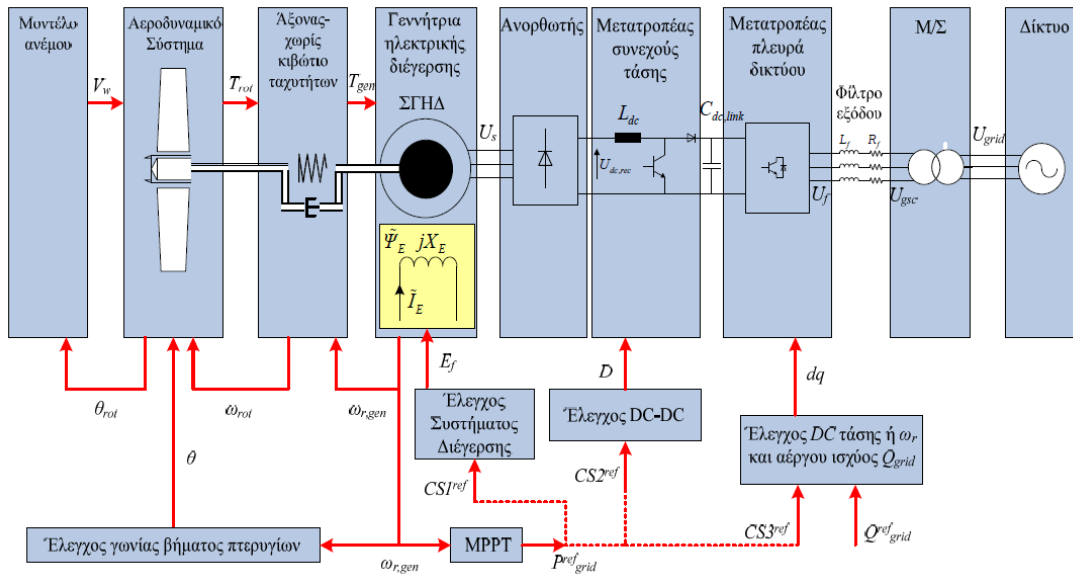
- Γεννήτρια/Μετατροπέας (Generator/Converter)
- Έλεγχος Μετατροπέα (Converter Control)
- Μηχανικό μέρος (Wind Turbine)
- Έλεγχος Γωνίας Βήματος (Pitch Control)

Η απαίτηση για ενεργό και άεργο ισχύ (P_{ref} και Q_{ref} αντίστοιχα) μεταφράζεται απευθείας σε ισοδύναμες εντολές για ενεργό (I_{dref}) και άεργο (I_{qref}) ρεύμα συναρτήσει της τιμής της τερματικής τάσης V_t [44]. Έτσι, εδώ δεν υπάρχει κάποια ισοδύναμη επαγωγική αντίδραση X_{eq} . Ο Έλεγχος Μετατροπέα περιλαμβάνει τον ελεγκτή αέργου ισχύος και τον ελεγκτή ενεργού ισχύος (ελεγκτής στροφών) από τους οποίους προκύπτουν οι εντολές Q_{ref} και P_{ref} αντίστοιχα.

Η εντολή για ενεργό ισχύ P_{ref} προκύπτει μέσω της στρατηγικής μέγιστης απολαβής ισχύος (*Maximum Power Point Tracking, MPPT*) όπως αναφέρθηκε, η οποία βασίζεται στη μετρούμενη ταχύτητα του δρομέα της μηχανής ω_m (ή N_r σε ΣΑΛ). Συγκεκριμένα, για κάθε ταχύτητα ανέμου, υπάρχει μία μοναδική ταχύτητα περιστροφής, για την οποία η αεροδυναμική ισχύς που προκύπτει από τον άνεμο, βάσει της (2.90), γίνεται μέγιστη. Σκοπός του ελέγχου στροφών είναι η διατήρηση σταθερού λόγου ακροπτερυγίου (2.91) στην τιμή που μεγιστοποιείται ο αεροδυναμικός συντελεστής και επομένως και η αεροδυναμική ισχύς.

Για την εντολή έγχυσης αέργου ισχύος Q_{ref} υπάρχουν δύο δυνατότητες ελέγχου, όπως και στην περίπτωση της ΑΓΔΤ. Έτσι αυτή προκύπτει είτε μέσω ρύθμισης του συντελεστή ισχύος (PF), είτε μέσω ρύθμισης της τάσης (Voltage Control) [44]. Κατά το έλεγχο τάσης, ένας αναλογικός-ολοκληρωτικός (PI) ελεγκτής δέχεται ως είσοδο το σφάλμα της μετρούμενης τάσης του ζυγού ρύθμισης από την τάση αναφοράς και στην έξοδό του διαμορφώνει το κατάλληλο σήμα αναφοράς για την άεργο ισχύ. Αντίθετα, κατά την απευθείας ρύθμιση του συντελεστή ισχύος, η Q_{ref} προκύπτει μέσω της σχέσης $Q_{ref}=P_{ref} \tan\varphi$

(συνήθως από 0.95 επαγωγικό έως 0.95 χωρητικό, ανάλογα με τις εκάστοτε συνθήκες του δικτύου). Η ανεμογεννήτρια συνεπώς μπορεί να απορροφά ή να καταναλώνει άεργο ισχύ.

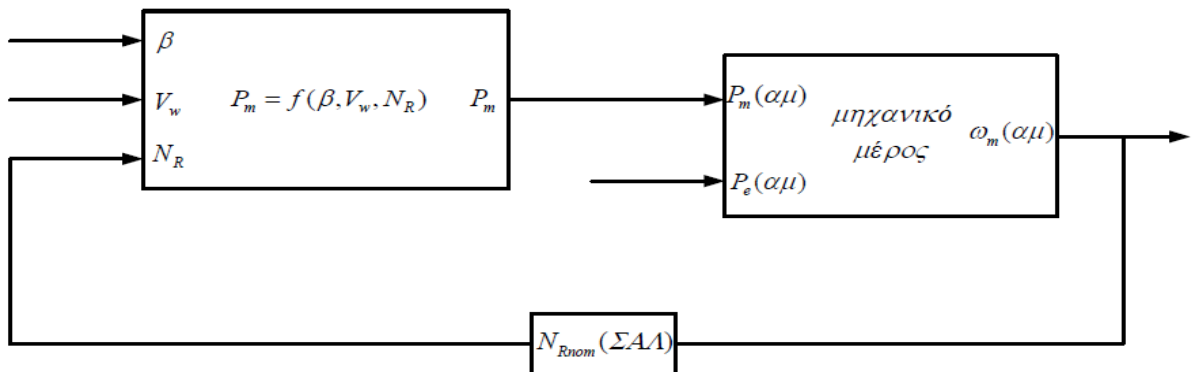


Σχήμα 2.21 : Δομικό διάγραμμα και έλεγχος Α/Γ πλήρους μετατροπέα

Η ανεμογεννήτρια πλήρους μετατροπέα δύναται να παραμένει συνδεδεμένη κατά τη διάρκεια βυθίσεων τάσης και να επαναδιαμορφώνει τις εντολές εγχύσεων σύμφωνα με τις απαιτήσεις του κώδικα του δικτύου. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της λογικής της αδιάλειπτης παροχής ισχύος (LVRT) και του περιορισμού του ενεργού ρεύματος (LVPL) σε συνθήκες βύθισης τάσης [44], [52]. Συνήθως απαιτείται μια ελάχιστη τιμή άεργου έγχυσης προς στήριξη του δικτύου, η οποία βέβαια εξαρτάται και από το επίπεδο της τάσης. Παράλληλα όμως θα πρέπει να τηρούνται και τα αποδεκτά όρια ρευμάτων προς προστασία των ηλεκτρονικών ισχύος.

Όσον αφορά το μηχανικό μέρος, η πολυπολική σύγχρονη γεννήτρια μπορεί να συνδεθεί απευθείας με τον ανεμοκινητήρα, χωρίς δηλαδή τη χρήση ενδιάμεσα κιβωτίου ταχυτήτων. Έτσι μπορούμε να αγνοήσουμε την ελαστικότητα του άξονα και να κάνουμε χρήση της προσέγγισης μίας στρεφόμενης μάζας [44].

Η σύνδεση του αεροδυναμικού μέρους με το μηχανικό φαίνεται στο διάγραμμα βαθμίδων του Σχήματος 2.22. Ουσιαστικά στο αεροδυναμικό μέρος υπολογίζεται η μηχανική (αεροδυναμική) ισχύς P_m συναρτήσεως της ταχύτητας του ανέμου V_w , της γωνίας βήματος πτερυγίων β (που προκύπτει από το ρυθμιστή των πτερυγίων) και των στροφών της ανεμογεννήτριας N_R .



Σχήμα 2.22: Σύνδεση αεροδυναμικού με μηχανικό μέρος

Στα συγγράμματα [44], [52] εξηγείται αναλυτικά ο τρόπος ελέγχου της ανεμογεννήτριας πλήρους μετατροπέα και παρατίθενται τα αντίστοιχα διαγράμματα ελέγχου και συναρτήσεις μεταφοράς που την μοντελοποιούν.

2.6.3 Ανεμογεννήτρια Τύπου Δ σε περιβάλλον WHSSP

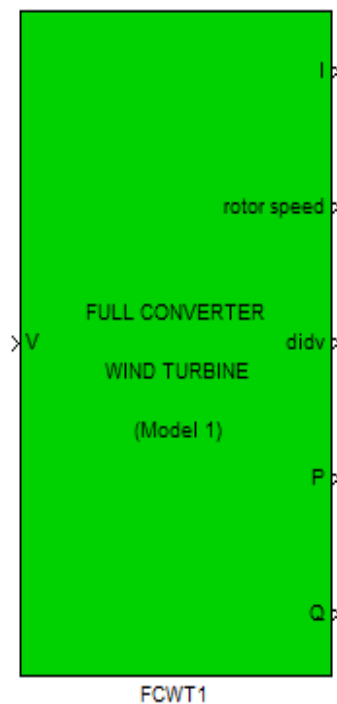
Το χαρακτηριστικό μπλοκ του μοντέλου της ανεμογεννήτριας πλήρους μετατροπέα εμφανίζεται στη βιβλιοθήκη [44] ως Full_Converter_Wind_Turbine1.mdl, και φαίνεται στο Σχήμα 2.23. Το μοντέλο αυτό δέχεται ως είσοδο το διάνυσμα (v_x, v_y) της τερματικής τάσης της ανεμογεννήτριας πλήρους μετατροπέα V (αμ) ανηγμένο στο σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς του συστήματος. Παράλληλα υπάρχουν τα ακόλουθα πέντε σήματα στην έξοδο:

- το διάνυσμα (i_x, i_y) του συνολικά απορροφούμενου (σύμβαση κινητήρα) ρεύματος της ανεμογεννήτριας πλήρους μετατροπέα I (αμ) στη βάση του συστήματος και ανηγμένο στο σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς.
- η γωνιακή ταχύτητα του δρομέα της μηχανής *rotor speed* (ή N_r) σε ΣΑΛ.
- η εγγεόμενη (σύμβαση γεννήτριας) ενεργός ισχύς P (αμ) στη βάση του συστήματος.
- η εγγεόμενη (σύμβαση γεννήτριας) άεργος ισχύς Q (αμ) στη βάση του συστήματος.
- το διάνυσμα $di2dv$ για την επίλυση του δικτύου.

Το διάνυσμα $di2dv$ δίνεται από την ακόλουθη σχέση [44] :

$$di2dv = [(bus\ code)\ 0\ 0\ 0\ 0\ i_x\ i_y]^T \quad (2.96)$$

όπου i_x, i_y τα εγγεόμενα ρεύματα, τα οποία δεν εξαρτώνται γραμμικά από την τερματική τάση αλλά προκύπτουν ως συνάρτηση των διαφόρων μεταβλητών κατάστασης εσωτερικά του μοντέλου.



Σχήμα 2.23: Μπλοκ ανεμογεννήτριας τύπου Δ

2.7 Ατμοηλεκτρική μονάδα

Κύρια τμήματα μίας ατμοηλεκτρικής μονάδας είναι ο ατμοπαραγωγός, ο ατμοστρόβιλος με τον αντίστοιχο ρυθμιστή στροφών, καθώς επίσης και η σύγχρονη γεννήτρια με τις διατάξεις ελέγχου και προστασίας. Η μοντελοποίηση της σύγχρονης γεννήτριας έχει παρουσιαστεί στην ενότητα 2.2.

Στον ατμοπαραγωγό πραγματοποιείται η καύση του ορυκτού καυσίμου και η εκλυόμενη θερμική ενέργεια θερμαίνει νερό για την παραγωγή ατμού υψηλής πίεσης και υψηλής θερμοκρασίας. Ο ατμός αυτός διοχετεύεται στο στρόβιλο όπου και εκτονώνεται, με αποτέλεσμα την απόδοση μηχανικής ισχύος στον άξονα περιστροφής. Ο άξονας κινεί τη σύγχρονη γεννήτρια, η οποία τροφοδοτεί με ηλεκτρική ενέργεια το δίκτυο, στο οποίο είναι συνδεδεμένη. Ο ρυθμιστής στροφών είναι η κύρια διάταξη η οποία ελέγχει και ρυθμίζει την παραγόμενη ισχύ της μονάδας.

Σημειώνεται ότι οι τιμές των μεγεθών που περιγράφονται στη συνέχεια είναι ανηγμένες στο ανά μονάδα σύστημα, του οποίου η βασική ισχύς ισούται με την ονομαστική ισχύ P_{nom} του στρόβιλου (σε MW).

2.7.1 Ατμοπαραγωγός

Η διατήρηση της ομαλής λειτουργίας του ατμοπαραγωγού εξασφαλίζεται με διάφορες διατάξεις ελέγχου, οι οποίες έχουν κύριο σκοπό [18]:

- Τον έλεγχο της καύσης στην εστία, ώστε αφενός να διατηρείται κατά το δυνατόν σταθερή η πίεση του ατμού που εξέρχεται προς το στρόβιλο και αφετέρου να υπάρχουν πάντα βέλτιστες συνθήκες καύσης ρυθμίζοντας κατάλληλα την αναλογία αέρα και καυσίμου. Ο έλεγχος της πίεσης του ατμού βοηθάει στην προσαρμογή του λέβητα στις συνεχώς μεταβαλλόμενες απαιτήσεις του φορτίου. Επίσης, η βέλτιστη αναλογία αέρα και καυσίμου αποτρέπει τη δημιουργία εκρηκτικών ή δηλητηριωδών αερίων, τα οποία προκαλούνται από την περίσσεια καυσίμου. Εκτός αυτού, και η περίσσεια του αέρα είναι ανεπιθύμητη, επειδή διαφεύγοντας από την καπνοδόχο, απάγει ένα σημαντικό ποσό θερμότητας από την εστία, με αποτέλεσμα τη μείωση της απόδοσης του ατμοπαραγωγού.
- Τον έλεγχο της ροής του νερού τροφοδοσίας στο τύμπανο, αφού η πιθανή υπερχειλίση του μπορεί να προκαλέσει διαφυγή σταγονιδίων νερού προς το στρόβιλο, με αποτέλεσμα τη διάβρωση των πτερυγίων του και επομένως επιβάρυνση της μηχανικής φθοράς του. Στην αντίθετη περίπτωση, εάν δηλαδή η στάθμη χαμηλώσει αρκετά, προκαλείται ανεπιθύμητη υπερθέρμανση στις σωληνώσεις.
- Τον έλεγχο της θερμοκρασίας του υπέρθερμου ατμού, ώστε να διατηρείται σταθερή και κατά συνέπεια να αποφεύγεται η θερμική καταπόνηση των μετάλλων του στρόβιλου. Διαταραχές στη θερμοκρασία του ατμού μπορούν να προκληθούν από μεταβολή της ποσότητας του αέρα καύσης, από ανομοιογένειες του καυσίμου (ιδιαίτερα στο λιγνίτη), καθώς επίσης και από μεταβολές της ροής του νερού τροφοδοσίας.

Η πλήρης μοντελοποίηση του ατμοπαραγωγού γίνεται στο [18] όπου παρατίθενται οι διαφορικές εξισώσεις και συναρτήσεις μεταφοράς που διέπουν τη λειτουργία του.

2.7.2 Στρόβιλος ατμού

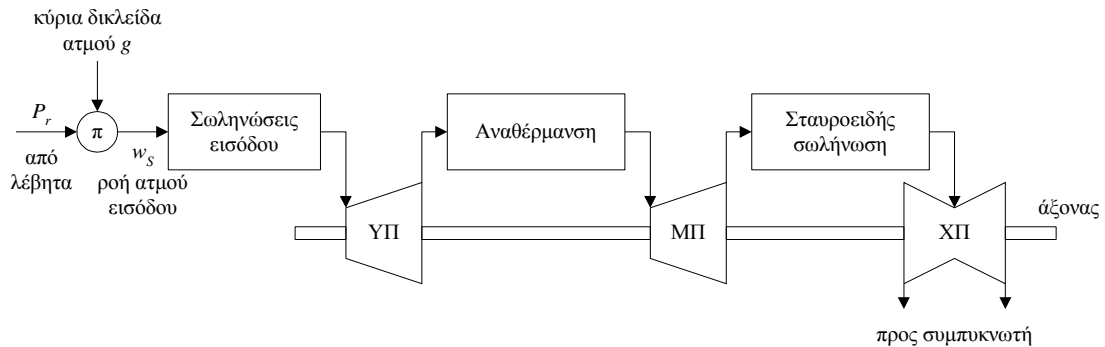
Οι ατμοστρόβιλοι μετατρέπουν την αποθηκευμένη ενέργεια που περιέχεται σε μία ποσότητα ατμού υψηλής πίεσης και υψηλής θερμοκρασίας σε κινητική ενέργεια, μέσω της οποίας κινείται μία σύγχρονη γεννήτρια παράγοντας ηλεκτρική ισχύ.

Μία τυπική διάταξη ατμοστροβίλου αποτελείται συνήθως από τρεις ή περισσότερες βαθμίδες, οι οποίες συνδέονται εν σειρά σε έναν κοινό άξονα. Η ύπαρξη πολλών βαθμίδων επιτρέπει την αναθέρμανση του ατμού στα ενδιάμεσα στάδια μεταξύ των βαθμίδων, ώστε να αυξηθεί η ενθαλπία του και επομένως να βελτιωθεί η συνολική απόδοση του θερμοδυναμικού κύκλου [18]. Το παρόν μοντέλο ατμοστροβίλου περιλαμβάνει τρεις βαθμίδες εκτόνωσης του ατμού, τη βαθμίδα υψηλής πίεσης (ΥΠ), τη βαθμίδα μέσης πίεσης (ΜΠ) και τη βαθμίδα χαμηλής πίεσης (ΧΠ).

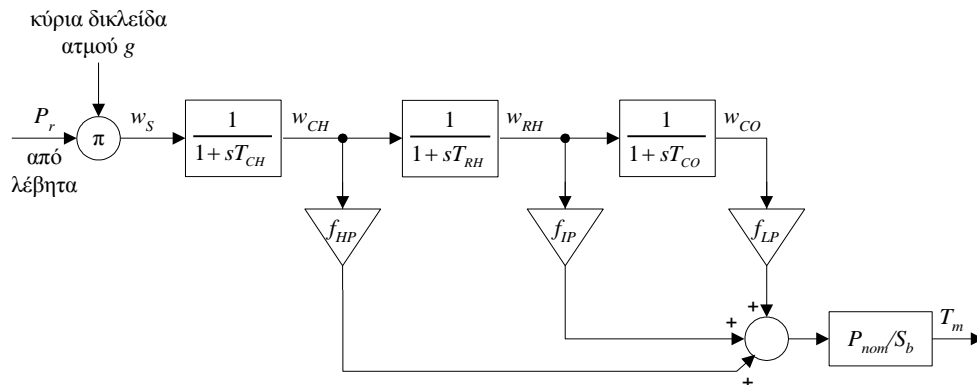
Ο προερχόμενος από το λέβητα υπέρθερμος ατμός διοχετεύεται στη βαθμίδα υψηλής πίεσης. Εκεί ο ατμός εκτονώνεται μερικώς και στη συνέχεια οδηγείται εκ νέου στο λέβητα μέσω της βαθμίδας αναθέρμανσης, ώστε να αυξηθεί η ενθαλπία του. Ακολούθως, ο ατμός εισέρχεται στη βαθμίδα μέσης πίεσης. Στη βαθμίδα αυτή έχουμε νέα εκτόνωση του ατμού και άρα πρόσθετη απόδοση ενέργειας στον άξονα του στροβίλου. Καθώς αναχωρεί από τη βαθμίδα μέσης πίεσης, ο ατμός ρέει στη βαθμίδα χαμηλής πίεσης για την τελική του εκτόνωση. Στη συνέχεια, ο ατμός συμπυκνώνεται σε πίεση μικρότερης της ατμοσφαιρικής, ώστε να διοχετευθεί εκ νέου στο λέβητα για να επαναλάβει το θερμοδυναμικό κύκλο.

Η συνολική ισχύς εξόδου του στροβίλου προέρχεται από το άθροισμα της αποδιδόμενης ισχύος κατά την εκτόνωση του ατμού σε κάθε μία από τις τρεις βαθμίδες [18]. Η ροή ατμού (w_s), η ταχύτητα και η ισχύς του στροβίλου ρυθμίζονται με τον έλεγχο του ανοίγματος (g) της δικλείδας του ρυθμιστή στροφών, σύμφωνα με το σήμα σφάλματος ταχύτητας.

Στο Σχήμα 2.24 φαίνονται το σχηματικό διάγραμμα και το διάγραμμα βαθμίδων του εξεταζόμενου ατμοστροβίλου. Σημειώνεται ότι ως P_r συμβολίζεται η πίεση στη δικλείδα ατμού στην είσοδο του στροβίλου.



(α) Σχηματικό διάγραμμα



(β) Διάγραμμα βαθμίδων

Σχήμα 2.24 : Μοντέλο ατμοστροβίλου τριών βαθμίδων

Η απόκριση της ροής ατμού σε μία μεταβολή του ανοίγματος της δικλείδας ελέγχου του ρυθμιστή στροφών, παρουσιάζει μία χρονική καθυστέρηση T_{CH} λόγω του ατμού που καταλαμβάνει τον όγκο των σωληνώσεων [18]. Η καθυστέρηση αυτή είναι της τάξεως των 0,2 έως 0,3 δευτερολέπτων.

Η βαθμίδα αναθέρμανσης εισάγει μία χρονική καθυστέρηση T_{RH} στη συνολική απόκριση του στροβίλου, η οποία κυμαίνεται μεταξύ των 5 και 10 δευτερολέπτων [18]. Στη συνέχεια, ο ατμός εισέρχεται στη βαθμίδα χαμηλής πίεσης μέσω μιας σταυροειδούς σωληνώσεως, η οποία επιφέρει μία πρόσθετη χρονική καθυστέρηση T_{CO} στο σύστημα, η τιμή της οποίας βρίσκεται κοντά στα 0.5 δευτερόλεπτα [18]. Από τις τάξεις μεγεθών των παραπάνω σταθερών χρόνου, συμπεραίνουμε ότι η μεγαλύτερη χρονική καθυστέρηση στην απόκριση του στροβίλου σχετίζεται με τη βαθμίδα αναθέρμανσης. Επομένως, από τη μία πλευρά η ύπαρξη βαθμίδας αναθέρμανσης αυξάνει τη συνολική απόδοση του ατμοστροβίλου, από την άλλη όμως καθυστερεί σημαντικά τη μεταβατική απόκρισή του.

Από το διάγραμμα βαθμίδων του εξεταζόμενου ατμοστροβίλου, παρατηρούμε ότι κάθε βαθμίδα παριστάνεται με ένα κέρδος f_{HP} (για τη βαθμίδα υψηλής πίεσης), f_{MP} (για τη βαθμίδα μέσης πίεσης) και f_{LP} (για τη βαθμίδα χαμηλής πίεσης), που αντιστοιχεί στο ποσοστό συμμετοχής της στη συνολική ισχύ εξόδου του στροβίλου. Η σχέση που διέπει τις τρεις αυτές σταθερές εκφράζεται από την παρακάτω εξίσωση [18]:

$$f_{HP} + f_{MP} + f_{LP} = 1 \quad (2.97)$$

με τυπικές τιμές $f_{HP} \approx 0.3$, $f_{MP} \approx 0.4$ και $f_{LP} \approx 0.3$.

Η ροή ατμού w_S , η οποία προέρχεται από τον ατμοπαραγωγό, αποτελεί την είσοδο του ατμοστροβίλου, ενώ έξοδος θεωρείται η μηχανική ροπή στον άξονα T_m , η οποία ανάγεται στη βάση ισχύος S_b του συστήματος.

Στο χώρο κατάστασης ο εξεταζόμενος ατμοστροβίλος παρουσιάζει τις εξής τρεις μεταβλητές κατάστασης, που αφορούν τις ροές ατμού (α.μ.) στις διάφορες βαθμίδες :

- Τη ροή ατμού w_{CH} στις σωληνώσεις εισόδου.
- Τη ροή ατμού w_{RH} στη έξοδο της βαθμίδας αναθέρμανσης.
- Τη ροή ατμού w_{CO} στη σταυροειδή σωληνώση που συνδέει τις βαθμίδες μέσης και χαμηλής πίεσης.

Το θεωρούμενο μοντέλο περιγράφεται από το ακόλουθο σύνολο διαφορικών και αλγεβρικών εξισώσεων [18]:

$$\dot{w}_{CH} = -\frac{1}{T_{CH}} w_{CH} + \frac{1}{T_{CH}} w_S \quad (2.98)$$

$$\dot{w}_{RH} = -\frac{1}{T_{RH}} w_{RH} + \frac{1}{T_{RH}} w_{CH} \quad (2.99)$$

$$\dot{w}_{CO} = -\frac{1}{T_{CO}} w_{CO} + \frac{1}{T_{CO}} w_{RH} \quad (2.100)$$

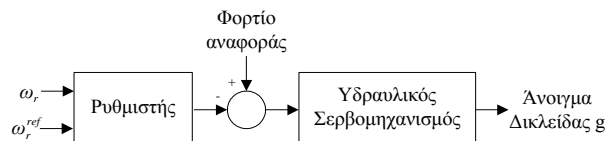
$$T_m = \frac{P_{nom}}{S_b} (f_{HP} w_{CH} + f_{IP} w_{RH} + f_{LP} w_{CO}) \quad (2.101)$$

όπου P_{nom} είναι η ονομαστική ισχύς του στροβίλου σε MW, S_b είναι η βασική ισχύς του συστήματος σε MVA.

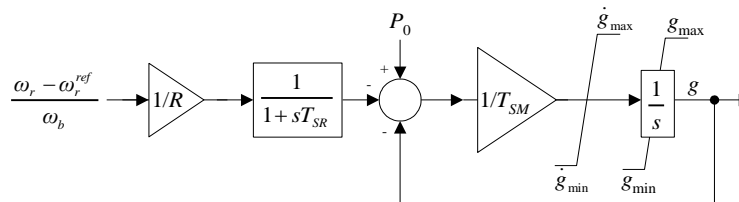
2.7.3 Ρυθμιστής στροφών

Στην παράγραφο αυτή περιγράφεται το μοντέλο ενός μηχανικού-υδραυλικού ρυθμιστή στροφών, το οποίο χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της μηχανικής ισχύος εξόδου ενός ατμοστροβίλου. Η μεταβολή της ταχύτητας περιστροφής μετατρέπεται με τη βοήθεια των κλασσικών περιστρεφόμενων σφαιρών (ή με άλλη μέθοδο) σε μηχανική μετατόπιση, η οποία μέσω ενός συστήματος μοχλών και ενός ή περισσότερων σταδίων ενίσχυσης (υδραυλικής ή άλλης) καταλήγει στο άνοιγμα ή κλείσιμο της δικλείδας ατμού του ατμοστροβίλου.

Στο Σχήμα 2.25 φαίνεται το σχηματικό διάγραμμα και το διάγραμμα βαθμίδων του μηχανικού-υδραυλικού ρυθμιστή στροφών [18]. Τα βασικά στοιχεία της διάταξης είναι ο ρυθμιστής, ο υδραυλικός σερβομηχανισμός δικλείδας και η ελεγχόμενη δικλείδα εισαγωγής του ατμού. Ο ρυθμιστής παριστάνεται με ένα κέρδος $1/R$, όπου R είναι ο μόνιμος στατισμός της ατμοηλεκτρικής μονάδας σε ποσοστό % ανηγμένο στη βάση ισχύος του στροβίλου και με μία συνάρτηση μεταφοράς πρώτης τάξης με μοναδιαίο κέρδος και χρονική σταθερά T_{SR} . Ακολουθώντας, υπάρχει ένας αθροιστής στον οποίο αθροίζονται το σήμα εξόδου του ρυθμιστή και μία ισχύ αναφοράς P_0 . Η ισχύς αυτή είναι η αρχική φόρτιση του στροβίλου. Ο υδραυλικός σερβομηχανισμός, ο οποίος μεταβάλλει το άνοιγμα της ελεγχόμενης δικλείδας, παριστάνεται με έναν ολοκληρωτή με ανατροφοδότηση του ανοίγματος της δικλείδας και δύο περιοριστές. Ο σερβομηχανισμός αυτός εισάγει στην απόκριση του ρυθμιστή στροφών μία χρονική καθυστέρηση T_{SM} , η τιμή της οποίας είναι της τάξεως του δευτερολέπτου [18]. Όσον αφορά τους περιοριστές, ο πρώτος έχει ρόλο να αποφεύγονται οι απότομες μεταβολές του ανοίγματος της δικλείδας του ατμού. Ο δεύτερος περιοριστής περιορίζει το άνοιγμα της δικλείδας αυτής μεταξύ του πλήρους ανοίγματος ($g_{\max}=1.0$) και του πλήρους κλεισίματος ($g_{\min}=0.0$), ή εντός άλλων προκαθορισμένων ορίων ανάλογα με τη δυνατότητα φόρτισης του στροβίλου.



(α) Σχηματικό διάγραμμα



(β) Διάγραμμα βαθμίδων

Σχήμα 2.25 : Μηχανικός-υδραυλικός ρυθμιστής στροφών ατμοστροβίλου

Στο χώρο κατάστασης, το θεωρούμενο μοντέλο του ρυθμιστή στροφών ατμοστροβίλου παρουσιάζει δύο μεταβλητές κατάστασης, τη μεταβλητή x_{SR}^{SU} η οποία σχετίζεται με τον ρυθμιστή, και το άνοιγμα g της κύριας δικλείδας ελέγχου του ατμού, το οποίο είναι ταυτόχρονα και έξοδος της διάταξης. Είσοδοι της διάταξης θεωρούνται το σφάλμα της ταχύτητας $\omega_r - \omega_r^{ref}$ του στροβίλου (σε ηλεκτρικά r/s) και η φόρτιση αναφοράς P_0 .

Αμελώντας τους δύο περιοριστές, ο ρυθμιστής στροφών περιγράφεται από τις παρακάτω εξισώσεις [18]:

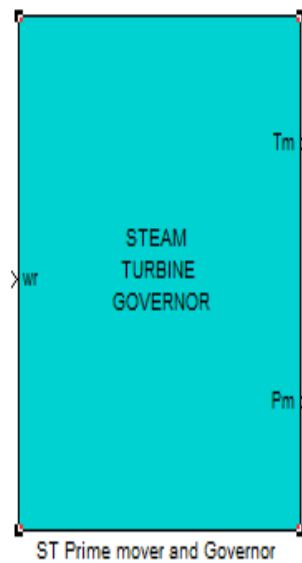
$$\dot{x}_{SR}^{SU} = -\frac{1}{T_{SR}} x_{SR}^{SU} + \frac{1}{T_{SR}} \frac{1}{R} \frac{\omega_r - \omega_r^{ref}}{\omega_b} \quad (2.102)$$

$$\dot{g} = -\frac{1}{T_{SM}} g - \frac{1}{T_{SM}} x_{SR}^{SU} + \frac{1}{T_{SM}} P_0 \quad (2.103)$$

2.7.4 Ατμοστρόβιλος-ρυθμιστής στροφών σε περιβάλλον WHSSP

Κάθε σύγχρονη γεννήτρια συνοδεύεται στο περιβάλλον WHSSP από την κατάλληλη διάταξη που περιγράφει τη λειτουργία του στροβίλου για την απόδοση μηχανικής ροπής στον άξονα της γεννήτριας, αλλά από και τον κατάλληλο ρυθμιστή στροφών. Στη βιβλιοθήκη τα υποσυστήματα αυτά μοντελοποιούνται ως ενοποιημένες μονάδες και ο χρήστης μπορεί να επιλέξει την κατάλληλη από το *SG_Prime_movers_and_Governors*.

Το μοντέλο ατμοστρόβιλου τριών βαθμίδων συνοδευόμενο από ένα κλασσικό μηχανικό-υδραυλικό ρυθμιστή στροφών, υπάρχει στην προαναφερθείσα βιβλιοθήκη, και το χαρακτηριστικό του μπλοκ [44] (*Steam_Turbine_Governor.mdl*) παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.26. Το μπλοκ αυτό δέχεται ως είσοδο τη γωνιακή ταχύτητα του δρομέα της σύγχρονης γεννήτριας w_r (αμ) και αποδίδει στην έξοδο την μηχανική ισχύ P_m (αμ στη βάση του συστήματος) και την μηχανική ροπή T_m (αμ στη βάση του συστήματος), η οποία εισέρχεται ως είσοδος στο μπλοκ της σύγχρονης γεννήτριας.



Σχήμα 2.26: Μπλοκ Ατμοστρόβιλου με Ρυθμιστή στροφών

Στο μοντέλο που χρησιμοποιείται στο περιβάλλον WHSSP, ο ατμοπαραγωγός δεν μοντελοποιείται αναλυτικά, αλλά γίνεται η παραδοχή ότι η πίεση πριν τη δικλείδα ατμού είναι σταθερή και ίση με την ονομαστική ($P_r = 1,0$ ανά μονάδα). Αυτό σημαίνει ότι η ανά μονάδα τιμή του ανοίγματος της δικλείδας ταυτίζεται με την ανά μονάδα τιμή της ροής ατμού που εισέρχεται στην αλυσίδα στροβίλων, δηλαδή ισχύει

$$w_s = g \quad (2.104)$$

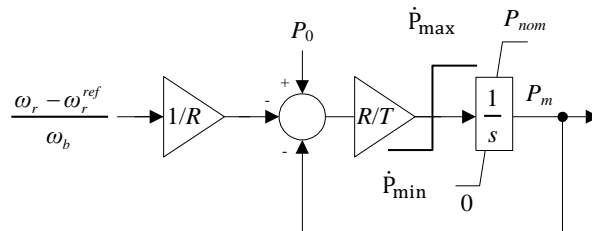
Η θεώρηση ότι η πίεση είναι σταθερή δεν απέχει πολύ από την πραγματικότητα, καθώς τα πρώτα δευτερόλεπτα μετά από κάποια διαταραχή, η μεταβολή της πίεσης είναι πολύ μικρή

[2]. Σημειώνεται επίσης ότι η σταθερά T_{SR} αυτή έχει θεωρηθεί μηδέν, δεδομένου ότι είναι αρκετά μικρότερου μεγέθους συγκριτικά με τη χρονική σταθερά T_{SM} .

2.8 Ντηζελοηλεκτρικός σταθμός

2.8.1 Περιγραφή μοντέλου

Σε αυτόνομα δίκτυα (π.χ. νησιωτικά ΣΗΕ), οι νηζελογεννήτριες χρησιμοποιούνται ευρέως για την υποστήριξη της τοπικής συμβατικής παραγωγής [18]. Επειδή οι νηζελομηχανές χαρακτηρίζονται από σχετικά γρήγορη απόκριση ισχύος, θεωρείται ότι οι μοναδικές σημαντικές χρονικές καθυστερήσεις στη μεταβατική τους απόκριση εισάγονται λόγω του ρυθμιστή στροφών καθώς και εξ' αιτίας του μέγιστου ρυθμού ανάληψης φορτίου. Στο Σχήμα 2.27 απεικονίζεται το διάγραμμα βαθμίδων του μοντέλου της νηζελομηχανής [18].



Σχήμα 2.27: Διάγραμμα βαθμίδων νηζελομηχανής

Στο Σχήμα 2.27 διακρίνεται ο στατισμός R της μονάδας σε ποσοστό % ανηγμένο στη βάση ισχύος (P_{nom}) της μηχανής και η χρονική καθυστέρηση T του ρυθμιστή στροφών. Σημειώνεται ότι τόσο η ισχύς αναφοράς P_0 στην είσοδο της μηχανής όσο και η μηχανική ισχύς εξόδου P_m αναφέρονται σε ανά μονάδα τιμές ανηγμένες στη βάση ισχύος του νηζελοηλεκτρικού σταθμού. Η μεταβατική απόκριση της ισχύος εξόδου του νηζελοηλεκτρικού σταθμού περιγράφεται από την ακόλουθη διαφορική εξίσωση [18]:

$$\dot{P}_m = \frac{R}{T} \left[-P_m - \frac{1}{R} \frac{\omega_r - \omega_r^{ref}}{\omega_b} + P_0 \right] \quad (2.105)$$

Η σχέση (2.105) ισχύει όσο ο ρυθμός μεταβολής της παραγόμενης ισχύος παραμένει εντός των ορίων (\dot{P}_{max} , \dot{P}_{min}). Σε αντίθετη περίπτωση, ο ρυθμός αύξησης/μείωσης της ισχύος εξόδου περιορίζεται σύμφωνα με τα προαναφερθέντα όρια. Σημειώνεται ότι ο μέγιστος ρυθμός αύξησης και μείωσης της παραγόμενης ισχύος ταυτίζεται με το μέγιστο ρυθμό ανοίγματος και κλεισίματος της βαλβίδας καυσίμου.

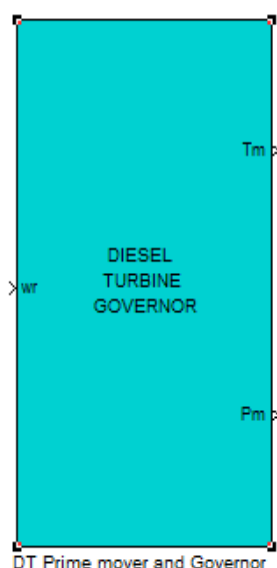
Η μηχανική ροπή σε ανά μονάδα τιμή ανηγμένη στη βάση ισχύος του συστήματος (S_b) δίνεται από τη σχέση:

$$T_m = P_m \frac{P_{nom}}{S_b} \frac{\omega_b}{\omega_r} \quad (2.106)$$

όπου ω_b η γωνιακή ταχύτητα βάσης (r/s), ω_r η γωνιακή ταχύτητα του δρομέα (r/s) της σύγχρονης γεννήτριας που είναι συνδεδεμένη η νηζελομηχανή, και ω_r^{ref} η ονομαστική γωνιακή ταχύτητα (r/s).

2.8.2 Νηζελομηχανή σε περιβάλλον WHSSP

Το μπλοκ της νηζελομηχανής (Diesel_Turbine_Governor.mdl) αναπτύχθηκε στο [18] και φαίνεται στο Σχήμα 2.28 [44]. Επειδή το συγκεκριμένο μοντέλο αποτελεί μια απλοποιημένη εκδοχή, η μόνη μεταβλητή κατάστασης είναι η αποδιδόμενη μηχανική ισχύς P_m (αμ στη βάση ισχύος της νηζελομηχανής), η οποία πρακτικά ταυτίζεται και με το άνοιγμα της δικλείδας καυσίμου. Το μπλοκ αυτό δέχεται ως είσοδο τη γωνιακή ταχύτητα του δρομέα της σύγχρονης γεννήτριας w_r (αμ) και αποδίδει στην έξοδο την μηχανική ισχύ P_m (αμ στη βάση του συστήματος) και την μηχανική ροπή T_m (αμ στη βάση του συστήματος), η οποία εισέρχεται ως είσοδος στο μπλοκ της αντίστοιχης σύγχρονης γεννήτριας.



Σχήμα 2.28: Μπλοκ Νηζελομηχανής

2.9 Αυτόματος ρυθμιστής τάσης

2.9.1 Γενικά

Ο Αυτόματος Ρυθμιστής Τάσης (APT) είναι η διάταξη ελέγχου, η οποία κρατάει σταθερή (ή σχεδόν σταθερή) την τερματική τάση της γεννήτριας. Η γενική διάταξη ενός APT φαίνεται στο Σχήμα 2.29, όπου οι διακεκομμένες γραμμές παριστάνουν βαθμίδες οι οποίες χρησιμοποιούνται προαιρετικά, ενώ οι αριθμημένες συνεχείς γραμμές δείχνουν εναλλακτικές μορφές σχεδίασης της διάταξης [18].

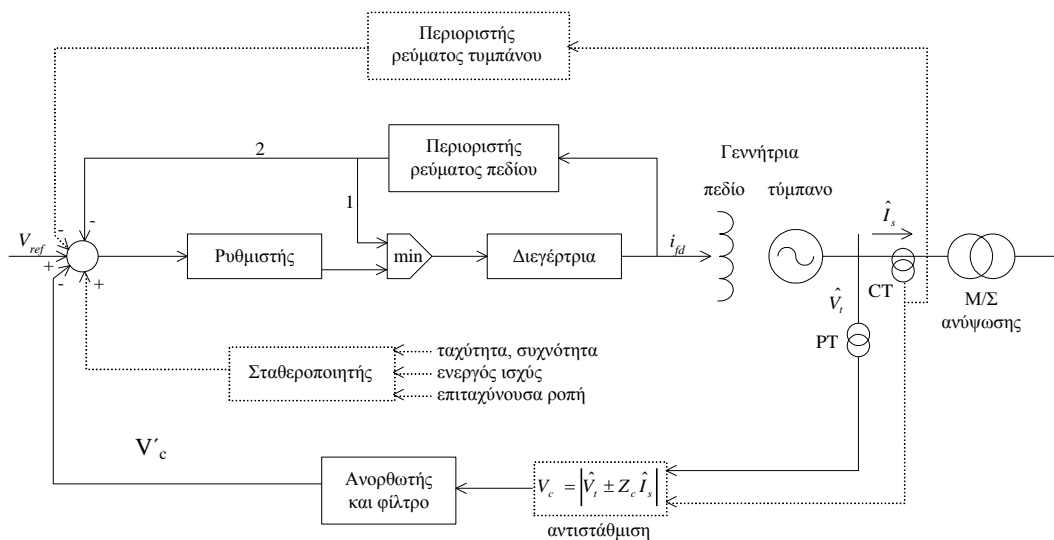
Σύμφωνα με το Σχήμα 2.29, το μέτρο V_t της τερματικής τάσης της γεννήτριας μετράται με τη βοήθεια ενός μετασχηματιστή τάσης (PT) και στη συνέχεια ανορθώνεται ώστε να παραχθεί ένα συνεχές (DC) σήμα V'_c , το οποίο είναι ανάλογο με την ενεργό τιμή της

εναλλασσόμενης (AC) τερματικής τάσης. Σε μερικές περιπτώσεις, το συνεχές αυτό σήμα μπορεί να είναι ανάλογο μίας τάσης V_c διάφορης από την τερματική [18]:

$$V_c = \left| \hat{V}_i \pm Z_c \hat{I}_s \right|$$

όπου η Z_c ονομάζεται σύνθετη αντίσταση αντιστάθμισης, ενώ το εξερχόμενο ρεύμα στάτη \hat{I}_s της σύγχρονης γεννήτριας μετράται με τη βοήθεια ενός μετασχηματιστή έντασης (CT).

Ακολούθως, το συνεχές σήμα V_c συγκρίνεται με μία τάση αναφοράς V_{ref} , η οποία αντιπροσωπεύει το επιθυμητό επίπεδο της τερματικής τάσης. Για τον υπολογισμό της τάσης αναφοράς λαμβάνεται υπόψη η αρχική κατάσταση λειτουργίας της γεννήτριας. Η διαφορά $V_{ref} - V_c$ εισάγεται στην κύρια μονάδα του ρυθμιστή, της οποίας ο ρόλος είναι να αυξήσει την τάση διεγέρσεως της γεννήτριας στην περίπτωση κατά την οποία είτε μειωθεί η τερματική της τάση V_t ή αυξηθεί η τάση αναφοράς V_{ref} , και αντιστρόφως. Συγκεκριμένα, η κύρια μονάδα του ρυθμιστή ενισχύει το παραπάνω σφάλμα και το διαμορφώνει κατάλληλα για να εισαχθεί στο σύστημα διέγερσης. Η διεγέρτρια είναι μία βοηθητική διάταξη η οποία αποδίδει συνεχή τάση στο τύλιγμα του πεδίου της μηχανής.



Σχήμα 2.29 : Γενικό διάγραμμα βαθμίδων Αυτόματου Ρυθμιστή Τάσης

Οι διεγέρτριες κατατάσσονται σε δύο βασικές κατηγορίες [18]:

- Στρεφόμενες διεγέρτριες, στις οποίες η ισχύς διεγέρσεως προέρχεται από μηχανική ισχύ (συνήθως από τον άξονα της μηχανής) μέσω ηλεκτρομηχανικής μετατροπής ενέργειας.
- Διεγέρτριες στατικού τύπου, στις οποίες η ισχύς διεγέρσεως προέρχεται είτε από το ζυγό της σύγχρονης μηχανής ή από ένα βοηθητικό ζυγό μέσω ενός μετασχηματιστή. Η μετατροπή του ρεύματος σε συνεχές γίνεται με ελεγχόμενες ανορθωτικές διατάξεις με θυρίστορ.

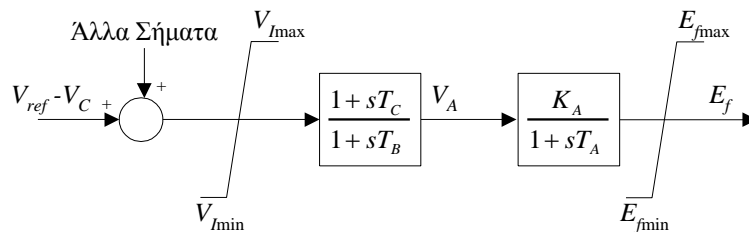
Στον αθροιστή του APT (Σχήμα 2.29) μπορεί να προστεθεί σήμα από τον σταθεροποιητή ισχύος (Power System Stabilizer), ο οποίος αποτελεί μία διάταξη που ενεργοποιείται σε μεταβατικές καταστάσεις και παρέχει πρόσθετη ροπή αποσβέσεως μέσω του συστήματος διέγερσης [2]. Στη μόνιμη κατάσταση ο σταθεροποιητής ισχύος έχει μηδενική έξοδο, αφήνοντας ανεπηρέαστη την τερματική τάση της γεννήτριας.

Επιπρόσθετα, ο APT συνοδεύεται από διάφορα συστήματα προστασίας, όπως [18]:

- Το Σύστημα Προστασίας Υποδιεγέρσεως, το οποίο εμποδίζει τη μείωση του ρεύματος διέγερσης κάτω από ένα όριο (το οποίο αντιστοιχεί σε συνθήκες απορρόφησης άεργου ισχύος) για λόγους ευστάθειας. Το θεωρούμενο σύστημα δεν φαίνεται στο Σχήμα 2.29.
- Τον Περιοριστή Τάσης/Συχνότητας, ο οποίος προστατεύει τη γεννήτρια και το μετασχηματιστή ανύψωσης από την πλεονάζουσα μαγνητική ροή, η οποία μπορεί να προκληθεί από υπερτάσεις ή από χαμηλές συχνότητες. Το σύστημα αυτό επίσης δεν φαίνεται στο Σχήμα 2.29.
- Το Σύστημα Προστασίας Υπερδιεγέρσεως, το οποίο προστατεύει το τύλιγμα πεδίου από υπερθέρμανση σε περιπτώσεις υψηλού ρεύματος διεγέρσεως.
- Τον Περιοριστή Ρεύματος Τυμπάνου, ο οποίος προστατεύει το τύλιγμα του τυμπάνου από υπερεντάσεις.

Στο Σχήμα 2.30 φαίνεται το διάγραμμα βαθμίδων του APT τύπου AC4 κατά IEEE [18]. Το σύστημα διεγέρσεως του εξεταζόμενου APT αποτελείται από μία ελεγχόμενη ανορθωτική διάταξη με θυρίστορ σε συνδεσμολογία γέφυρας, η οποία τροφοδοτείται από μία στρεφόμενη γεννήτρια EP.

Το σήμα εξόδου του αθροιστή του Σχήματος 2.30 εισάγεται στη μονάδα ρύθμισης της τάσεως. Η μονάδα αυτή αποτελείται από ένα φίλτρο μεταπορείας ($T_B > T_C$) και από το ρυθμιστή τάσης. Ο ρυθμιστής τάσης προσεγγίζεται από μία συνάρτηση μεταφοράς πρώτης τάξης με κέρδος K_A και χρονική σταθερά T_A . Η χρονική σταθερά T_A αντιπροσωπεύει την καθυστέρηση της ρύθμισης, καθώς επίσης και τα φίλτρα για τη μέτρηση του σήματος εισόδου. Η σταθερά K_A παριστάνει το συνολικό κέρδος μονίμου καταστάσεως του APT. Οι δύο περιοριστές χρησιμεύουν στον περιορισμό των σημάτων εισόδου και εξόδου του APT. Η τάση διεγέρσεως E_f είναι η έξοδος του APT.



Σχήμα 2.30: Διάγραμμα βαθμίδων APT τύπου AC4 κατά IEEE

Το φίλτρο μεταπορείας αποσκοπεί στη μεταβατική μείωση του συνολικού κέρδους διεγέρσεως στις μέσες συχνότητες, επειδή τα μεγάλα κέρδη διεγέρσεως μπορούν να επηρεάσουν κατά ανεπιθύμητο τρόπο την ευστάθεια του συστήματος [18]. Συγκεκριμένα, ο APT αυτού του τύπου εμφανίζει ένα μεταβατικό κέρδος K_T στις μέσες συχνότητες, το οποίο είναι ίσο με :

$$K_T = \frac{T_C}{T_B} K_A \quad (2.107)$$

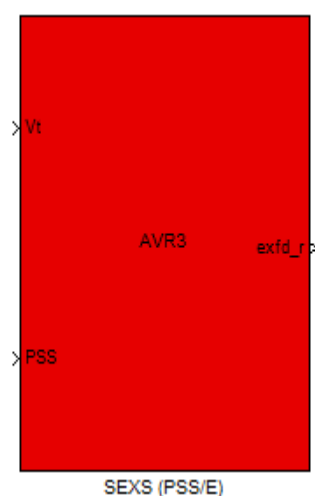
δηλαδή μικρότερο από το κέρδος μονίμου καταστάσεως K_A , εφόσον ισχύει $T_B > T_C$.

2.9.2 Αυτόματος ρυθμιστής τάσης σε περιβάλλον WHSSP

Το μπλοκ του αυτόματου ρυθμιστή τάσης που χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία είναι τύπου AC4 και υπάρχει στη βιβλιοθήκη του WHSSP ως AVR3.mdl [44]. Το μπλοκ αυτό, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.31, δέχεται τις ακόλουθες δύο εισόδους:

- το διάνυσμα της τερματικής τάσης της σύγχρονης γεννήτριας V_t (αμ) και ανηγμένο στο σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς του συστήματος.
- το βοηθητικό σήμα PSS που προέρχεται τον σταθεροποιητή ισχύος (Power System Stabilizer). Στην παρούσα εργασία ωστόσο, ο σταθεροποιητής θεωρείται ανενεργός.

Το μοναδικό σήμα στην έξοδο είναι το $exfd_r$ που αντιστοιχεί στην τάση του κυκλώματος διέγερσης, και τροφοδοτεί την γεννήτρια (α.μ. στα ονομαστικά της μεγέθη).



Σχήμα 2.31: Μπλοκ APT τύπου AC4 κατά IEEE

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Αποθήκευση και παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με τη μορφή πεπιεσμένου αέρα

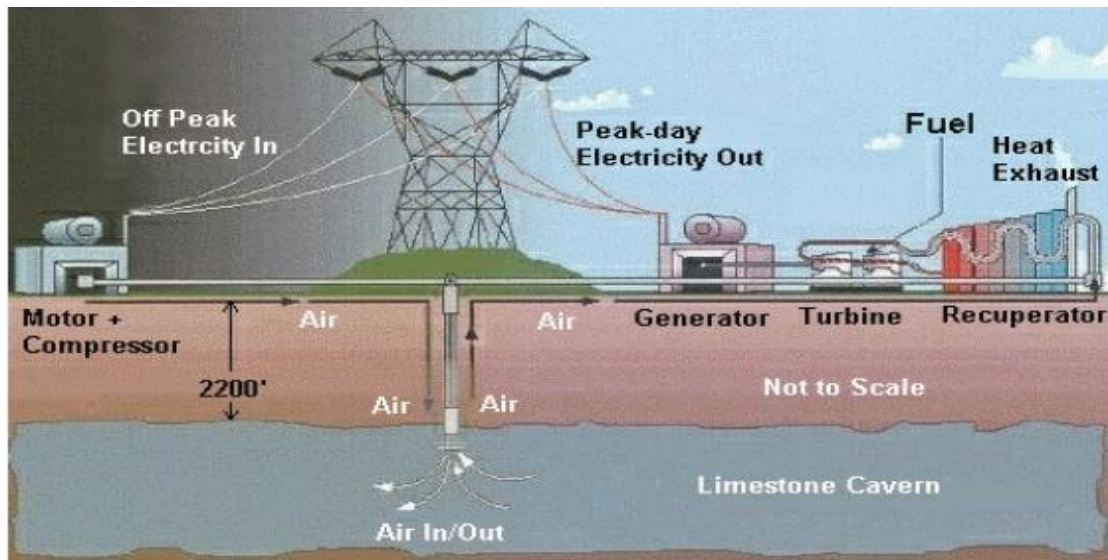
Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται η μέθοδος αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας υπό μορφή πεπιεσμένου αέρα – Compressed Air Energy Storage (CAES). Στην ενότητα 3.1 αναφέρεται η αρχή λειτουργίας μιας μονάδας CAES και η δυνατότητα συνδυασμού της με αιολικά πάρκα. Στην ενότητα 3.2 παρατίθενται τα πλεονεκτήματα από την ένταξη των μονάδων CAES στην ηλεκτροπαραγωγή ενώ στην ενότητα 3.3 αναφέρονται διάφορες παραλλαγές συστημάτων CAES. Τέλος, στην ενότητα 3.4 περιγράφονται οι διάφορες εγκαταστάσεις αποθήκευσης του πεπιεσμένου αέρα και στην ενότητα 3.5 αναλύονται οι μονάδες CAES που έχουν ήδη ενταχθεί στην ηλεκτροπαραγωγή ή η κατασκευή τους αναμένεται να ολοκληρωθεί στο άμεσο μέλλον.

3.1 Περιγραφή συστήματος αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας με πεπιεσμένο αέρα (CAES)

3.1.1 Γενικά

Η γενική ιδέα της αποθήκευσης ενέργειας μέσω πεπιεσμένου αέρα είναι γνωστή εδώ και 40 περίπου χρόνια. Η συστηματική έρευνα στον τομέα αυτό ξεκίνησε τη δεκαετία του 1970 με σκοπό την αντιμετώπιση των αιχμών και τη ρύθμιση του φορτίου [42]. Η πρώτη εφαρμογή της τεχνολογίας CAES έγινε το 1978 στην περιοχή Huntorf της Γερμανίας, όπου κατασκευάστηκε μια μονάδα αποθήκευσης ενέργειας με πεπιεσμένο αέρα, με μέγιστη παραγόμενη ισχύ 290 MW. Ακολούθησε η κατασκευή άλλης μίας μονάδας CAES στην περιοχή McIntosh, Alabama στις Η.Π.Α. με μέγιστη παραγωγή 110 MW. Έκτοτε, αυτές είναι οι μόνες μονάδες CAES όπου έχει ολοκληρωθεί η κατασκευή τους και έχουν ενταχθεί στο ηλεκτρικό σύστημα. Εκτός από τις προαναφερθείσες, έχουν γίνει και άλλες προσπάθειες κατασκευής συστημάτων CAES, η ολοκλήρωση των οποίων είτε απέτυχε είτε αναμένεται στο άμεσο μέλλον. Συστήματα CAES για τα οποία είχε ξεκινήσει η κατασκευή τους και είτε έχει ολοκληρωθεί είτε όχι, περιγράφονται αναλυτικά στην ενότητα 3.5.

Οι μονάδες CAES προσφέρουν τη δυνατότητα της αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας με χαμηλό κόστος, υπό μορφή πεπιεσμένου αέρα που αποθηκεύεται είτε σε επίγειες είτε σε υπόγειες εγκαταστάσεις. Σε περιόδους όπου η τιμή της ενέργειας είναι υψηλή, η αποθηκευμένη δυναμική ενέργεια του αέρα μετατρέπεται ξανά σε ηλεκτρική και εγχέεται στο δίκτυο. Όπως θα φανεί και στην ενότητα 3.3, έχουν προταθεί και σχεδιαστεί συστήματα CAES με κάποιες παραλλαγές. Ωστόσο, η γενική μορφή ενός συστήματος αποθήκευσης ενέργειας με πεπιεσμένο αέρα που συνδέεται στο δίκτυο, είναι αυτή που εμφανίζεται στο Σχήμα 3.1 [42].



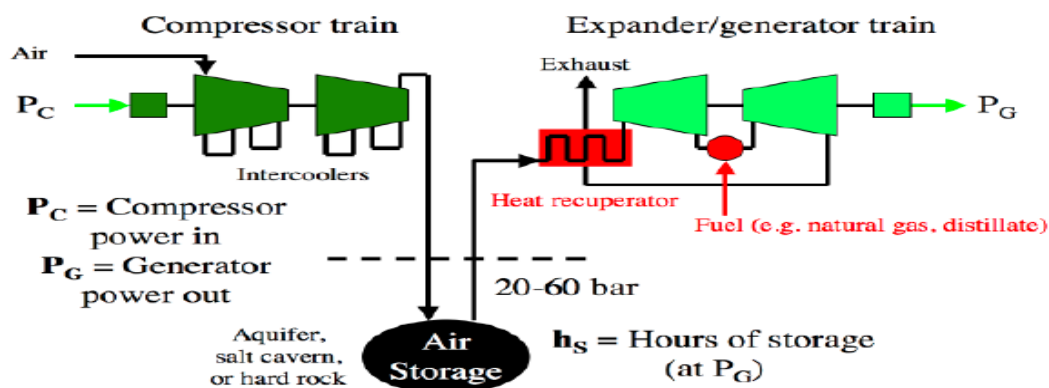
Σχήμα 3.1 : Γενική μορφή μονάδας CAES

Τα δομικά στοιχεία της μονάδας είναι ο συμπιεστής ο οποίος είναι συνδεδεμένος σε κοινό άξονα με έναν ηλεκτρικό κινητήρα, η εγκατάσταση αποθήκευσης του πεπιεσμένου αέρα, ενδιάμεσοι ψύκτες του αέρα (intercoolers), ο στρόβιλος με το θάλαμο καύσης, η ηλεκτρική γεννήτρια προσαρτημένη στον ίδιο άξονα με τον στρόβιλο, και ο ανακομιστής θερμότητας. Η λειτουργία ενός συστήματος CAES περιλαμβάνει τη διαδικασία της συμπίεσης, της αποθήκευσης, και της εκτόνωσης του αέρα. Η μονάδα CAES λειτουργεί παρόμοια όπως ένας αεριοστρόβιλος, με τη διαφορά ότι η φάση της συμπίεσης και της εκτόνωσης λαμβάνουν χώρα ξεχωριστά και σε διαφορετικές χρονικές στιγμές [24]. Στο Σχήμα 3.2 απεικονίζεται η διάταξη μιας μονάδας CAES, όπου φαίνονται ξεκάθαρα τα δομικά στοιχεία της, η ροή ισχύος, και η ροή του εργαζόμενου μέσου (αέρας και καυσαέρια).

Λόγω του γεγονότος πως η απαιτούμενη ισχύς για τη συμπίεση του αέρα παρέχεται χωριστά από το ηλεκτρικό δίκτυο, η μέγιστη ηλεκτρική ισχύς που μπορεί να παράγει μια μονάδα CAES ταυτίζεται με τη μέγιστη ικανότητα ισχύος του στρόβιλου. Αντιθέτως, στις συμβατικές μονάδες των αεριοστρόβιλων, τα 2/3 περίπου της παραγόμενης ισχύος του στρόβιλου κατά την εκτόνωση καταναλώνονται από το συμπιεστή για την συμπίεση του αέρα. Το γεγονός αυτό συνεπάγεται πως στις μονάδες CAES καταναλίσκεται το 1/3 του καυσίμου και εκπέμπεται το 1/3 των ρύπων συγκριτικά με τις αεριοστρόβιλικές μονάδες, για την παραγωγή ίδιας ποσότητας ισχύος. Έτσι η απόδοση των συστημάτων CAES είναι υψηλότερη και το λειτουργικό κόστος χαμηλότερο, συγκριτικά με τις αεριοστρόβιλικές μονάδες. Επίσης, λόγω της απόζευξης του στρόβιλου από τον συμπιεστή, ο στρόβιλος δύναται να παράγει έως και 3 φορές περισσότερη ισχύ συγκριτικά με έναν όμοιο σε μια αεριοστρόβιλική μονάδα.

Τα συστήματα CAES διατηρούν υψηλό συντελεστή απόδοσης και υπό μερικό φορτίο, γεγονός που τα καθιστά για έναν ακόμη λόγο ικανά να ενταχθούν στο ηλεκτρικό σύστημα ενέργειας για τη ρύθμιση της ισχύος των αιολικών πάρκων. Η κατανάλωση καυσίμου σε μερικό φορτίο είναι μικρή συγκριτικά με την αντίστοιχη κατανάλωση ενός συμβατικού σταθμού, δεδομένου ότι ένα μέρος της αποδιδόμενης ενέργειας στο δίκτυο προέρχεται από την αποθηκευμένη υπό μορφή πεπιεσμένου αέρα. Στους συμβατικούς αεριοστρόβιλους, η μεταβολή της παραγόμενης ισχύος γίνεται με την αντίστοιχη ρύθμιση της ροής καυσίμου που εγχέεται στο θάλαμο καύσης, μεταβάλλοντας κατ' αυτόν τον τρόπο τη θερμοκρασία εισόδου

των καυσαερίων στο στρόβιλο. Στις μονάδες CAES, η ρύθμιση της παραγωγής ισχύος γίνεται μεταβάλλοντας τη ροή του αέρα / καυσαερίων, διατηρώντας την θερμοκρασία εισόδου στο στρόβιλο σταθερή [41]. Έτσι, το γεγονός αυτό οδηγεί στην κατανάλωση χαμηλότερης ποσότητας καυσίμου και σε πιο αποδοτική λειτουργία.



Σχήμα 3.2 : Δομή μονάδας CAES

Το σημαντικότερο στοιχείο που επηρεάζει την ειδική κατανάλωση καυσίμου είναι ο ανακομιστής θερμότητας, μέσω του οποίου μέρος της θερμικής ισχύος των καυσαερίων αποδίδεται στον πεπιεσμένο αέρα που εξέρχεται από τη δεξαμενή αποθήκευσης. Η ειδική κατανάλωση θερμότητας για μονάδες CAES που δεν διαθέτουν ανακομιστή θερμότητας είναι τυπικά 5500-6000 kJ/kWh, ενώ αντίθετα μονάδες CAES που περιλαμβάνουν τον εναλλάκτη η ειδική κατανάλωση θερμότητας είναι περίπου 4200-4500 kJ/kWh. Συγκριτικά με τις παραπάνω ενδεικτικές τιμές, οι αεριοστρόβιλοι εμφανίζουν ειδική κατανάλωση θερμότητας περίπου 9500 kJ/kWh. Η μονάδα CAES στο McIntosh σημειώνει ειδική κατανάλωση θερμότητας της τάξης των 4330 kJ/kWh στο πλήρες φορτίο, ενώ στο 20 % του πλήρους φορτίου η αντίστοιχη κατανάλωση είναι 4750 kJ/kWh. Παρατηρούμε ότι τα παραπάνω μεγέθη είναι παρόμοια, σε αντίθεση με τους συμβατικούς σταθμούς όπου η κατανάλωση καυσίμου και η απόδοση μεταβάλλονται σημαντικά συναρτήσει του φορτίου. Επιπλέον, η ικανότητα ανάληψης φορτίου των μονάδων CAES είναι καλύτερη από την αντίστοιχη των αεριοστροβίλων. Συγκεκριμένα, η μονάδα CAES στο McIntosh έχει ρυθμό ανάληψης φορτίου 18 MW/min, 60 % υψηλότερο από τον αντίστοιχο ενός τυπικού αεριοστροβίλου.

Συνοψίζοντας, καταλήγουμε ότι οι μονάδες CAES διαθέτουν εξαιρετική ικανότητα λειτουργίας υπό μερικό φορτίο και ταχεία απόκριση, χαρακτηριστικά τα οποία είναι προαπαιτούμενα για την αποδοτική διαχείριση της μεταβλητότητας της αιολικής παραγωγής. Παρακάτω παρατίθενται κάποια επιπλέον χαρακτηριστικά των μονάδων CAES [24], [41], [42] :

- Για συγκεκριμένη ικανότητα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας (kWh), η πίεση λειτουργίας του στροβίλου και το εύρος διακύμανσης της πίεσης στο αεροφυλάκιο καθορίζουν τον απαιτούμενο όγκο της αποθηκευτικής διάταξης του αέρα. Ενδεικτικά, για ονομαστική πίεση αεροφυλακίου περίπου 80 bar προκύπτει πυκνότητα ενέργειας ίση με 7.5 kWh/m³, ενώ για ονομαστική πίεση αεροφυλακίου ίση με 20 bar προκύπτει πυκνότητα ενέργειας περίπου 2 kWh/m³.
- Η διαδικασία της συμπίεσης περιλαμβάνει πολυβάθμιους συμπιεστές του εμπορίου υψηλής απόδοσης, με ενσωματωμένους ψύκτες. Οι τύποι των συμπιεστών που

προτείνονται για τις εφαρμογές σε συστήματα CAES, είναι είτε περιστροφικοί είτε φυγόκεντροι, ανάλογα με το μέγεθος της ισχύος που πρόκειται να καταναλώνουν και σύμφωνα με την επιθυμητή πίεση λειτουργίας. Υπάρχουν αλυσίδες συμπιεστών μικρής και μεγάλης κλίμακας.

- Το κόστος εγκατάστασης καθορίζεται κυρίως από την μέθοδο της αποθήκευσης του αέρα και από την επιθυμητή ικανότητα αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας (kWh). Οι διαφορετικές μέθοδοι αποθήκευσης του πεπιεσμένου αέρα περιγράφονται αναλυτικά στην ενότητα 3.4.
- Οι κρίσιμότεροι παράγοντες που καθορίζουν την ενεργειακή απόδοση και το λειτουργικό κόστος είναι η διαδικασία της προθέρμανσης του αέρα στον ανακομιστή θερμότητας, και η διαδικασία της εκτόνωσής του στο στρόβιλο.
- Ο τομέας της Έρευνας και Ανάπτυξης (R&D) στις εφαρμογές CAES επικεντρώνεται στη βελτίωση του βαθμού απόδοσης του στρόβιλου.
- Τυπικές τιμές του κόστους εγκατάστασης είναι από 425 \$/kW έως 480 \$/kW και 3 \$/kWh έως 10 \$/kWh, ανάλογα με την εφαρμογή.
- Τυπική απόδοση του κύκλου συμπίεση – αποθήκευση – εκτόνωση αέρα είναι περίπου 64 % για μεγάλες μονάδες CAES.
- Σε κατάσταση παραγωγής ενέργειας (εκτόνωση στον στρόβιλο), μια τυπική μονάδα μπορεί να μεταβεί από μηδενική παραγωγή σε μέγιστη ισχύ εξόδου σε λιγότερο από 10 λεπτά. Σε φυσιολογικές συνθήκες, δύναται να επιτευχθεί αύξηση της παραγόμενης ισχύος από το 10% στο 100% μέσα σε 4 λεπτά, ενώ σε έκτακτες περιπτώσεις ο παραπάνω χρόνος μειώνεται στα 2 λεπτά. Η αύξηση της ισχύος από το 50% στο 100% μπορεί να επιτευχθεί σε λιγότερο από 15 δευτερόλεπτα.
- Σε κατάσταση αποθήκευσης ενέργειας (λειτουργία συμπίεσης), μια τυπική μονάδα μεταβαίνει στο πλήρες φορτίο της σε λιγότερο από 10 λεπτά, ενώ η αύξηση της καταναλισκόμενης ισχύος των συμπιεστών από το 50% στο 100% γίνεται σε λιγότερο από 10 δευτερόλεπτα.
- Μία μονάδα CAES ονομαστικής ισχύος 100 MW χρειάζεται, για την τοποθέτηση των επιμέρους συστημάτων και διατάξεων, χώρο έκτασης περίπου ενός στρέμματος.
- Οι εργασίες συντήρησης του εξοπλισμού μιας μονάδας CAES και τα αντίστοιχα κόστη, είναι παρόμοια με αυτά μιας αεριοστροβλικής μονάδας.
- Το μέγιστο επιτρεπτό εύρος της πίεσης λειτουργίας είναι 11 – 69 bar. Ωστόσο, για τη βέλτιστη αξιοποίηση του υπάρχοντος εξοπλισμού και τη μεγιστοποίηση της απόδοσης, το επιθυμητό εύρος της πίεσης ορίζεται ως 39 – 50 bar. Τα παραπάνω όρια προέκυψαν από εκτεταμένες μελέτες που διεξήχθησαν το 1982 από το Ινστιτούτο Έρευνας Ηλεκτρικής Ενέργειας (EPRI). Με την εξέλιξη της τεχνολογίας αποθήκευσης και τη διαρκή ανάπτυξη των στροβιλοσυμπιεστών, το άνω όριο της πίεσης αυξάνεται με την πάροδο του χρόνου, επιτρέποντας την παραγωγή όλο και μεγαλύτερων ποσοτήτων ισχύος.

Στην συνέχεια περιγράφονται αναλυτικά οι φάσεις της συμπίεσης και της εκτόνωσης του αέρα.

3.1.2 Συμπύεση

Κατά τη συμπύεση εγχέεται αέρας σε μία, μη μονωμένη θερμικά, δεξαμενή. Έτσι ο αέρας αποθηκεύεται σε υψηλή πίεση και σε θερμοκρασία που καθορίζεται από αυτήν του περιβάλλοντος χώρου. Ως γνωστόν, κατά τη διαδικασία της συμπύεσης των αερίων, η θερμοκρασία τους αυξάνει παράγοντας σημαντική ποσότητα θερμότητας. Μεταξύ των βαθμίδων των συμπιεστών και πριν την είσοδο του αέρα στη δεξαμενή παρεμβάλλονται ψύκτες (intercoolers, aftercooler) ώστε να μειωθεί η θερμοκρασία του εγχεόμενου αέρα. Αυτό συμβαίνει διότι, σε κάθε στάδιο συμπιεστή η απόδοση είναι υψηλότερη όσο μικρότερη είναι η θερμοκρασία εισόδου. Επίσης, όταν η θερμοκρασία του αέρα που εγχέεται προσεγγίζει τη θερμοκρασία των τοιχωμάτων του αεροφυλακίου, αυξάνει η συνολική απόδοση της διαδικασίας της συμπύεσης. Τέλος, με την ψύξη του αέρα επιτυγχάνεται μείωση του απαιτούμενου όγκου αποθήκευσης και ελαχιστοποίηση της θερμικής καταπόνησης των τοιχωμάτων της αποθηκευτικής διάταξης.

Κατά τη διαδικασία της συμπύεσης καταναλώνεται ηλεκτρική ισχύς. Η ισχύς αυτή προέρχεται από το ηλεκτρικό δίκτυο. Όπως έχει αναφερθεί, τα συστήματα CAES προτείνονται για την αποθήκευση της αιολικής ενέργειας που απορρίπτεται από το ηλεκτρικό δίκτυο και για την αντιμετώπιση των αιχμών φορτίου. Στην περίπτωση όπου η ενέργεια προς αποθήκευση προέρχεται μόνο από ανανεώσιμη πηγή, όπως από τα αιολικά πάρκα, δεν καταναλώνεται καύσιμο. Υπάρχουν περιπτώσεις όμως, όπου η αιολική ενέργεια ίσως δεν επαρκέσει για την αποθήκευση του απαιτούμενου μεγέθους της ενέργειας που αναμένεται να ζητηθεί κατά την αιχμή του φορτίου. Τότε, στις περιόδους χαμηλής ζήτησης του φορτίου, οι συμβατικοί σταθμοί παράγουν επιπλέον ισχύ η οποία καταναλώνεται από τον συμπιεστή και αποθηκεύεται υπό μορφή πεπιεσμένου αέρα. Στην περίπτωση αυτή η ενέργεια προς αποθήκευση δεν είναι 'ήπιας' μορφής, αφού για την παραγωγή της καταναλώνεται καύσιμο από τις συμβατικές μονάδες.

3.1.3 Εκτόνωση

Κατά την εκτόνωση (παραγωγή ισχύος), ο αέρας εξέρχεται από τη δεξαμενή όπου ήταν αποθηκευμένος και, αφού διέλθει από τον ανακομιστή θερμότητας για την αύξηση της θερμοκρασίας του (και κατ' επέκταση του βαθμού απόδοσης της μονάδας), εισέρχεται στο θάλαμο καύσης όπου γίνεται η ανάμιξη με καύσιμο. Στην συνέχεια, τα καυσαέρια υψηλής θερμοκρασίας και πίεσης που προκύπτουν εκτονώνονται στην αλυσίδα στροβίλων παράγοντας περιστροφική ισχύ, η οποία θα μετατραπεί σε ηλεκτρική με την αντίστοιχη γεννήτρια που περιστρέφεται στον ίδιο άξονα.

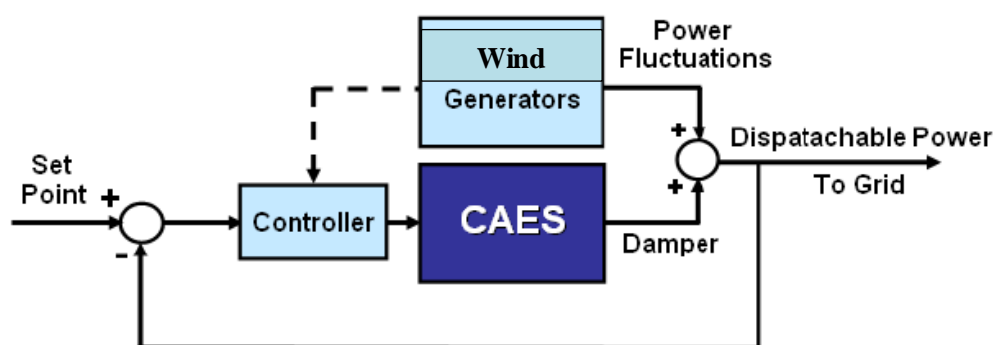
Η χρήση καυσίμου (συνήθως φυσικό αέριο) και του ανακομιστή θερμότητας είναι απαραίτητη για την επίτευξη μεγάλης παραγωγής ισχύος, για λόγους απόδοσης και για τεχνικούς περιορισμούς που υφίστανται. Συγκεκριμένα, αν ο αέρας εισερχόταν στον στρόβιλο στη θερμοκρασία που επικρατεί στο αεροφυλάκιο (πρακτικά ίση με αυτή που υφίσταται στα τοιχώματα), τότε θα χρειαζόταν πολύ μεγαλύτερη ροή αέρα για την επίτευξη ίδιας ποσότητας ισχύος. Το γεγονός αυτό συνεπάγεται την ανάγκη για πολύ υψηλότερες πιέσεις, με αποτέλεσμα η αντίστοιχη απαιτούμενη ονομαστική ισχύς του συμπιεστή και του κινητήρα να ήταν πολλαπλάσια. Επιπλέον, ο βαθμός απόδοσης του κύκλου συμπύεση – αποθήκευση - εκτόνωση θα μειωνόταν περίπου κατά 4 φορές [24]. Εκτός των παραπάνω λόγων που καθιστούν την προθέρμανση του αέρα απαραίτητη πριν αυτός εισέλθει στον

στρόβιλο, η έλλειψη του καυσίμου και του ανακομιστή θερμότητας προκαλεί την εμφάνιση πολύ χαμηλών θερμοκρασιών στην έξοδο του στροβίλου με κίνδυνο τη δημιουργία κρυστάλλων πάγου στα πτερύγιά του. Το φαινόμενο αυτό καθιστά τα πτερύγια ευάλωτα και εύθραυστα, με αποτέλεσμα να εγκυμονεί ο κίνδυνος ρήξης τους, δεδομένων των μεγάλων καταπονήσεων που υφίστανται. Πρέπει να σημειωθεί ότι δεν είναι επιτακτική η ταυτόχρονη χρήση του ανακομιστή θερμότητας και η διαδικασία της καύσης, μιας και η προθέρμανση του αέρα μπορεί να επιτευχθεί με μία από τις δύο μεθόδους. Ωστόσο η συνύπαρξη των δύο δύναται να αυξήσει την ικανότητα παραγωγής ισχύος.

3.1.4 Εξομάλυνση ισχύος αιολικών πάρκων – Ρύθμιση φορτίου

Οι μονάδες CAES παρέχουν τη δυνατότητα εξομάλυνσης της ισχύος που παράγουν τα αιολικά πάρκα. Το γεγονός αυτό μπορεί να επιτευχθεί τόσο σε επίπεδο δευτερολέπτων λόγω της ταχείας απόκρισής τους, όσο και σε διάστημα ωρών εξαιτίας της μεγάλης αποθηκευτικής ικανότητάς τους. Έτσι, ο συνδυασμός των αιολικών πάρκων με μονάδες CAES προσφέρει το πλεονέκτημα της παροχής σταθερής ποσότητας ισχύος, καθώς και τη δυνατότητα παρακολούθησης του ηλεκτρικού φορτίου.

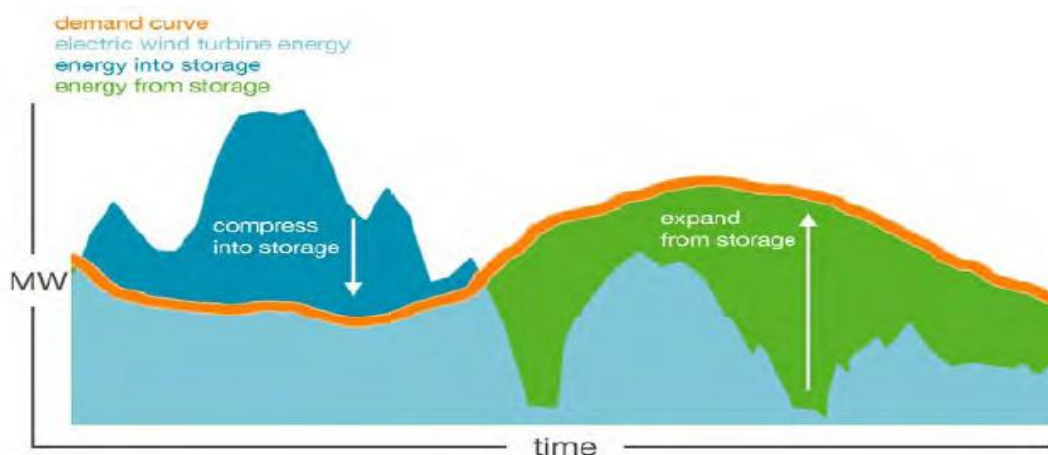
Στο Σχήμα 3.3 [32] φαίνεται ο τρόπος με τον οποίο οι μονάδες CAES μπορούν να συνεισφέρουν στην εξομάλυνση της μεταβλητότητας της αιολικής παραγωγής σε κλίμακα δευτερολέπτων, λειτουργώντας ως απόσβεση των απότομων διακυμάνσεων της ισχύος :



Σχήμα 3.3 : Εξομάλυνση αιολικής ισχύος

Η ισχύς αναφοράς (set point) καθορίζεται από τις ανάγκες ισχύος του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, από τη μέση αναμενόμενη ισχύ των αιολικών πάρκων, και από την διαθέσιμη ικανότητα ισχύος της μονάδας CAES κάθε χρονική στιγμή. Η παραπάνω υβριδική υλοποίηση έχει ως στόχο την σταθεροποίηση της παραγόμενης ισχύος στα επίπεδα που ορίζει το φορτίο, η οποία επιτυγχάνεται μέσω κατάλληλων σημάτων που παράγει ο ελεγκτής (controller) και δέχεται η μονάδα CAES. Έτσι, η στοχαστικότητα του ανέμου και κατ' επέκταση της αιολικής ισχύος αντισταθμίζεται με την κατάλληλη παραγωγή ισχύος από τη μονάδα CAES. Συμπερασματικά, σε περίπτωση απότομης μείωσης του ανέμου αυξάνεται η παραγόμενη ισχύς της διάταξης CAES, ενώ το αντίθετο συμβαίνει σε περίπτωση που η ταχύτητα του ανέμου αυξηθεί. Κατ' αυτόν τον τρόπο, η παραγωγή ισχύος του υβριδικού συστήματος σταθεροποιείται στην επιθυμητή τιμή αναφοράς.

Στο Σχήμα 3.4 απεικονίζεται ο τρόπος παρακολούθησης του ηλεκτρικού φορτίου σε κλίμακα ωρών. Όταν η αιολική ισχύς είναι άνω της ζητούμενης, τότε η περίσσεια χρησιμοποιείται για τη συμπίεση αέρα, ενώ όταν η συνολική ισχύς των ανεμογεννητριών είναι μικρότερη από τη ζήτηση του φορτίου, τότε ο αποθηκευμένος πεπιεσμένος αέρας εκτονώνεται στο στρόβιλο παράγοντας μηχανική, και κατ' επέκταση μέσω της γεννήτριας ηλεκτρική ισχύ που εγχέεται στο δίκτυο. Η συγκεκριμένη εφαρμογή αναφέρεται στην περίπτωση ύπαρξης μιας συμβατικής μονάδας βάσης που παράγει σταθερή ισχύ, με το υβριδικό σύστημα CAES – Αιολικά Πάρκα να αναλαμβάνει τη ρύθμιση φορτίου – συχνότητας απορροφώντας τις διακυμάνσεις ισχύος. Η λογική αυτή επεκτείνεται στην ιδανική περίπτωση όπου οι συμβατικοί σταθμοί παραγωγής έχουν υποκατασταθεί πλήρως από το υβριδικό σύστημα, το οποίο πλέον θα λειτουργεί ταυτόχρονα ως μονάδα βάσης και ως μονάδα ρύθμισης φορτίου και αντιμετώπισης των αιχμών. Σε αυτή την ιδανική κατάσταση, η οποία απέχει αρκετά από τα σημερινά δεδομένα λόγω τεχνοοικονομικών – πολιτικών εμποδίων και λόγω της απουσίας επαρκούς εμπειρίας στον τομέα αυτό, η παραγωγή ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές θα ελαχιστοποιούσε την ανάγκη για καύσιμα και θα εξάλειφε το πρόβλημα εκπομπής ρύπων.



Σχήμα 3.4 : Λειτουργία ρύθμισης φορτίου

3.2 Πλεονεκτήματα συστημάτων CAES

3.2.1 Γενικά

Στην ενότητα αυτή συνοψίζονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα από την ενσωμάτωση των μονάδων CAES στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Όπως θα φανεί και στη συνέχεια, οι θετικές επιδράσεις των συστημάτων CAES στο δίκτυο και τα αξιολογικά λειτουργικά στοιχεία τους, υπερτερούν κατά πολύ έναντι των ελάχιστων μειονεκτημάτων.

Τα βασικά στοιχεία των μονάδων CAES που αναδεικνύουν τα ευεργετικά οφέλη από την ένταξή τους στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι τα εξής [34], [35], [42], [43]:

- Υψηλότερη απόδοση συγκριτικά με μία τυπική αεριοστροβιλική μονάδα.
- Σχεδόν σταθερή ειδική κατανάλωση θερμότητας στο μεγαλύτερο εύρος λειτουργίας.
- Υψηλή παραγόμενη ισχύς υπό δυσμενείς καιρικές συνθήκες (μεγάλη θερμοκρασία περιβάλλοντος), δεδομένου ότι η αρχική θερμοκρασία του αέρα καθορίζεται από τις συνθήκες που επικρατούν στο αεροφυλάκιο.
- Χαμηλές εκπομπές ρύπων συγκριτικά με τους συμβατικούς αεριοστρόβιλους, τις λιγνιτικές μονάδες και τις μονάδες συνδυασμένου κύκλου.
- Υψηλός ρυθμός απόκρισης ισχύος, δεδομένου ότι ο αέρας έχει ήδη συμπιεστεί, σε αντίθεση με τους αεριοστρόβιλους όπου υφίστανται χρονικές καθυστερήσεις για την συμπίεση του αέρα. Ενδεικτικά, ο ρυθμός ανάληψης φορτίου στα συστήματα CAES είναι 2 με 3 φορές μεγαλύτερος από αυτόν στις αεριοστροβιλικές μονάδες.
- Χαμηλότερο κόστος συγκριτικά με άλλες μεθόδους αποθήκευσης, όπως υδροηλεκτρικά - αντλητικά εργοστάσια (PHS) και συσσωρευτές προηγμένης τεχνολογίας.
- Ο συνολικός χρόνος αδειοδότησης και ολοκλήρωσης της κατασκευής είναι σημαντικά μικρότερος (περίπου 3 χρόνια) έναντι των άλλων συμβατικών σταθμών παραγωγής.
- Μικρότερη κατανάλωση καυσίμου συγκριτικά με τους συμβατικούς αεριοστρόβιλους.
- Δυνατότητα μεγάλης εγκατεστημένης ισχύος (άνω των 300 MW).
- Ικανότητα να υπομένει συχνές εκκινήσεις και αποσυνδέσεις από την παραγωγή.
- Δυνατότητα παραγωγής ισχύος σύμφωνα με τις απαιτήσεις του φορτίου, απορροφώντας τη μεταβλητότητα ισχύος των αιολικών πάρκων.
- Επικουρικές υπηρεσίες δικτύου, όπως ρύθμιση συχνότητας, στρεφόμενη εφεδρεία, παραγωγή και κατανάλωση αέργου ισχύος.
- Μεγάλο εύρος εγκατεστημένης ισχύος. Συγκεκριμένα, οι τυπικοί στρόβιλοι του εμπορίου έχουν ονομαστική ισχύ που κυμαίνεται από 10 - 20 MW (κατασκευάστρια εταιρεία Rolls Royce - Alison), 135 MW (κατασκευάστρια εταιρεία Dresser - Rand), έως και 300 - 400 MW (κατασκευάστρια εταιρεία Alstom).
- Δυνατότητα επιλογής κατάλληλου εξοπλισμού ανάλογα με την τοποθεσία εγκατάστασης και το ύψος της επένδυσης, βελτιστοποιώντας κατ' αυτόν τον τρόπο την οικονομική - λειτουργική απόδοση της μονάδας.
- Η λειτουργία των μονάδων CAES και τα τεχνικά θέματα που τη συνοδεύουν είναι πλέον γνωστά, με αποτέλεσμα να υπάρχει πληθώρα προμηθευτών του εξοπλισμού και ατόμων ικανών να τον διαχειριστούν.
- Οι μονάδες CAES έχουν τη δυνατότητα επανεκκίνησης μετά από ολική διακοπή (black start).
- Αποδοτική λειτουργία υπό μερικό φορτίο, σε αντίθεση με τους υπόλοιπους συμβατικούς σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.
- Μείωση συνολικής κατανάλωσης νερού από τις συμβατικές μονάδες.
- Αύξηση της κατανάλωσης ισχύος σε περιόδους χαμηλής ζήτησης φορτίου, μετριάζοντας τις ημερήσιες διακυμάνσεις της συμβατικής παραγωγής ισχύος.
- Αύξηση της κατανάλωσης ισχύος σε περιόδους αυξημένης αιολικής παραγωγής, αξιοποιώντας το αιολικό δυναμικό που υφίσταται και δεν μπορεί να απορροφηθεί από το δίκτυο.
- Αντιμετώπιση των αιχμών οικονομικότερα.
- Η σύνδεση των μονάδων σε κατάλληλα σημεία επιτυγχάνει καλύτερη διαχείριση του υπάρχοντος δικτύου, με την αντιμετώπιση του φαινομένου της υπερφόρτωσης των

γραμμών μεταφοράς. Έτσι αποφεύγεται η ενίσχυση του δικτύου με επιπλέον γραμμές, γεγονός που συνεπάγεται μικρότερο κόστος και περιβαλλοντικά οφέλη.

- Συμβολή στον Έλεγχο Διασύνδεσης [2], οδηγώντας σε πιο ομοιόμορφη κατανομή των ροών ισχύος μεταξύ διαφορετικών περιοχών του δικτύου.
- Σε κατάσταση αποθήκευσης ενέργειας (συμπίεση αέρα), η μονάδα CAES έχει δυνατότητα διπλάσιας στρεφόμενης εφεδρείας. Αυτό συμβαίνει διότι δύναται να μειώσει την καταναλισκόμενη ισχύ του συμπιεστή και ταυτόχρονα να αρχίσει να παράγει ισχύ μέσω της εκτόνωσης αέρα στο στρόβιλο.
- Σταδιακή αποδέσμευση από τη μεταβλητότητα της τιμής του πετρελαίου, του φυσικού αερίου και του άνθρακα, με την αυξανόμενη διείσδυση των αιολικών πάρκων υποστηριζόμενα από μονάδες CAES.
- Καλύτερη διαχείριση της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας.
- Βελτίωση της αξιοπιστίας του ηλεκτρικού δικτύου μεταφοράς και διανομής.

Σε αντίθεση με τα παραπάνω, η λειτουργία και η ανάπτυξη των μονάδων CAES συνοδεύεται και από κάποια μειονεκτήματα [35], [42]. Το κυριότερο αφορά την εγκατάσταση αποθήκευσης του πεπιεσμένου αέρα. Όπως εξηγείται αναλυτικά στην ενότητα 3.4, οι υπόγειες εγκαταστάσεις αποθήκευσης του αέρα απαιτούν συγκεκριμένες τοποθεσίες με ειδικούς γεωλογικούς σχηματισμούς. Ένα ακόμα μειονέκτημα είναι η ανάγκη για φυσικό αέριο, σε αντίθεση με τις υπόλοιπες μεθόδους αποθήκευσης ενέργειας όπου δεν απαιτείται καύσιμο. Υπάρχουν βέβαια και διάφορες υλοποιήσεις των συστημάτων CAES, όπως αναλύεται στην ενότητα 3.3, που δεν χρησιμοποιούν καύσιμο και η προθέρμανση του αέρα επιτυγχάνεται μόνο με τον ανακομιστή θερμότητας ή με κάποια μέθοδο ανάκτησης της θερμότητας που παράγεται κατά τη συμπίεση. Επιπλέον, οι διατάξεις CAES είναι αρκετά ευαίσθητες στις θερμοκρασιακές μεταβολές του αέρα, γεγονός που απαιτεί πρόσθετα μέτρα για την εξασφάλιση της ομαλής λειτουργίας. Τέλος, οι σχεδιαστές των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας δεν είναι εξοικειωμένοι με τις μονάδες CAES και αρκετοί αγνοούν τα παραπάνω ευεργετικά οφέλη, με αποτέλεσμα να στρέφονται στην χρήση των ευρέως διαδεδομένων συμβατικών σταθμών παραγωγής, των οποίων η λειτουργική αξιοπιστία είναι βεβαιωμένη από την πληθώρα των συστημάτων που έχουν χρησιμοποιηθεί.

Στην συνέχεια αναλύονται κάποια από τα παραπάνω πλεονεκτήματα των μονάδων CAES.

3.2.2 Μείωση κατανάλωσης νερού

Τόσο τα αιολικά πάρκα όσο και οι μονάδες CAES για την λειτουργία τους δεν απαιτούν τη χρήση νερού. Οι περισσότεροι συμβατικοί σταθμοί παραγωγής ωστόσο, χρειάζονται μεγάλες ποσότητες νερού για την ψύξη τους. Δεδομένου ότι έχει τεθεί ο στόχος της διείσδυσης της αιολικής παραγωγής στο 20% του φορτίου βάσης έως το 2020 (πρωτόκολλο του Κιότο), η χρήση μεθόδων αποθήκευσης, όπως αυτή των συστημάτων CAES, για την εξομάλυνση της μεταβλητότητας της αιολικής ισχύος, δύναται να μειώσει τη συνολική ετήσια κατανάλωση νερού από τις συμβατικές μονάδες κατά 17% [43]. Το γεγονός αυτό προσφέρει τεράστια περιβαλλοντικά οφέλη, δεδομένου ότι το νερό είναι ένα βασικό αγαθό που δεν πρέπει να κατασπαταλείται. Επίσης, σε κάποιες αναπτυσσόμενες χώρες ίσως υπάρχει λειψυδρία ή στα ευνοϊκά σημεία εγκατάστασης σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας δεν υφίσταται επαρκές δίκτυο ροής νερού για την κάλυψη των αναγκών ψύξεως. Στις

περιοχές αυτές ενισχύονται τα κίνητρα για δημιουργία υβριδικών συστημάτων CAES – Α/Π, όπου το νερό δεν είναι στοιχείο της λειτουργίας τους.

3.2.3 Μείωση εκπομπών CO₂

Οι μονάδες CAES σε συνδυασμό με την αιολική παραγωγή συνεισφέρουν στη μείωση των εκπομπών CO₂, υποκαθιστώντας τμήμα της παραγωγής ισχύος από συμβατικές μονάδες. Ενδεικτικά, οι λιγνιτικές μονάδες εκπέμπουν περίπου 974 τόνους/GWh και οι αεριοστρόβιλοι 464 τόνους/GWh διοξειδίου του άνθρακα [43]. Η ειδική κατανάλωση θερμότητας για μια μονάδα CAES με στρόβιλο καύσεως είναι περίπου 4000 kJ/kWh, ενώ για ένα σταθμό συνδυασμένου κύκλου είναι περίπου 6500 kJ/kWh. Αντιλαμβανόμαστε λοιπόν ότι οι μονάδες CAES χρησιμοποιούν 40% λιγότερο καύσιμο από τους σταθμούς συνδυασμένου κύκλου και 65% λιγότερο από τους συμβατικούς αεριοστρόβιλους. Το γεγονός αυτό συνεπάγεται αντίστοιχες ποσοστιαίες μειώσεις στις εκπομπές αέριων ρύπων. Τα συστήματα CAES ως προς την αρχή λειτουργίας, τα δομικά στοιχεία και τα τεχνικά χαρακτηριστικά (χρόνος ανάληψης φορτίου, είδος καυσίμου), είναι παρεμφερή με τις αεριοστροβιλικές μονάδες. Μέχρι τώρα, σε αυξημένες διεισδύσεις της αιολικής παραγωγής, εντάσσονταν στην παραγωγή αεριοστρόβιλοι προκειμένου να απορροφούν τη μεταβλητότητα της αιολικής ισχύος και να την εξομαλύνουν. Την δυνατότητα αυτή δύναται να την παρέχουν οι μονάδες CAES, αντικαθιστώντας τις αεριοστροβιλικές μονάδες και κατ' επέκταση οδηγώντας στην μείωση των συνολικά εκπεμπόμενων ρύπων από την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

3.2.4 Ρυθμός απόκρισης

Ο υψηλός ρυθμός απόκρισης των μονάδων CAES προσφέρει τη δυνατότητα της άμεσης προσαρμογής της ισχύος και της ρύθμισης συχνότητας. Αυτό επιτυγχάνεται είτε σε κατάσταση παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (εκτόνωση στο στρόβιλο) με την ταχεία ρύθμιση της παραγόμενης ισχύος του στρόβιλου, είτε σε κατάσταση αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας (συμπίεση αέρα) με την ταχεία ρύθμιση της καταναλισκόμενης ισχύος του συμπιεστή. Επιπλέον, όπως έχει αναφερθεί, μια μονάδα CAES μπορεί να μεταβεί από μηδενική παραγωγή στο 100% της ισχύος σε λιγότερο από 10 λεπτά, παρέχοντας τη δυνατότητα της άμεσης εκκίνησης [43].

3.2.5 Βελτίωση ποιότητας συστήματος μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας

Η εγκατάσταση των μονάδων CAES σε τοποθεσίες κοντά σε μεγάλα αιολικά πάρκα δύναται να εξαλείψει το πρόβλημα της υπερφόρτωσης των γραμμών μεταφοράς. Συγκεκριμένα, σε περιόδους όπου η αιολική παραγωγή υπερβαίνει το όριο φόρτισης των γραμμών μεταφοράς τότε μέρος της αποθηκεύεται από το σύστημα CAES, ενώ όταν η ισχύς από τα αιολικά πάρκα μειωθεί και υπάρχει περιθώριο επιπλέον έγχυσης ισχύος στο δίκτυο, τότε η αποθηκευμένη ενέργεια εγχέεται σε αυτό. Επιπλέον, οι σταθμοί CAES έχουν τη δυνατότητα παροχής άεργης υποστήριξης του δικτύου, τόσο σε κατάσταση παραγωγής όσο και σε κατάσταση αποθήκευσης. Επίσης δύναται να λειτουργήσουν και ως σύγχρονοι πυκνωτές, με κατάλληλους συμπλέκτες που αποσυνδέουν το στρόβιλο από τη γεννήτρια ή το

συμπιεστή από τον κινητήρα, με αποτέλεσμα να μπορούν είτε να παράγουν είτε να καταναλώνουν άεργο ισχύ, ανάλογα με τις ανάγκες του ηλεκτρικού δικτύου [43]. Έτσι μια μονάδα CAES αυξάνει την αξιοπιστία του δικτύου μεταφοράς με τη συνεισφορά στη διατήρηση της τάσης στα επιτρεπτά όρια, γεγονός που επιτυγχάνεται από την ικανότητα παραγωγής – κατανάλωσης αέργου ισχύος, όπως αναφέρθηκε. Αυτό είναι πολύ σημαντικό χαρακτηριστικό, δεδομένου ότι συνήθως τα αιολικά πάρκα συνδέονται σε αδύναμα σημεία του ηλεκτρικού δικτύου και ότι οι ανεμογεννήτριες έχουν πολύ μικρή ικανότητα ρύθμισης της αέργου ισχύος.

3.3 Τύποι συστημάτων CAES

3.3.1 Γενικά

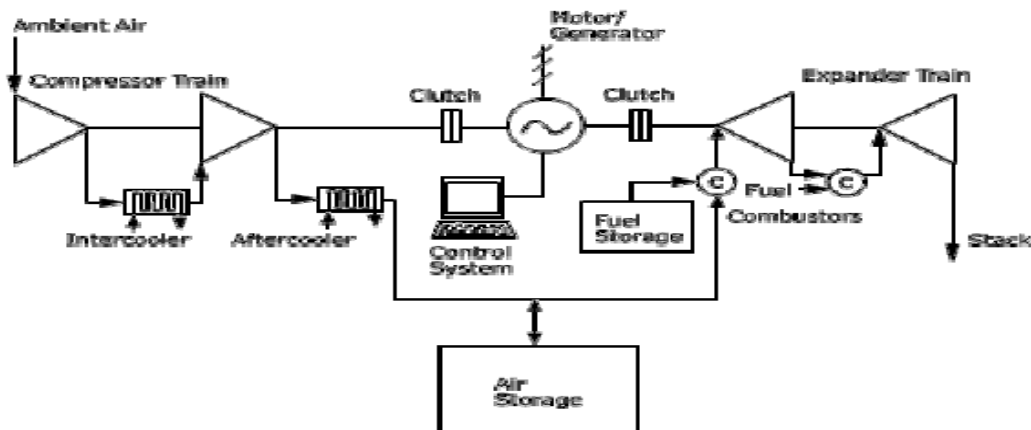
Η γενική δομή μιας μονάδας CAES παρουσιάστηκε στο Σχήμα 3.2, όπου περιγράφηκε πλήρως η αρχή λειτουργίας του συστήματος και αναφέρθηκαν οι βασικές διατάξεις που το συνιστούν, δηλαδή ο συμπιεστής, ο ηλεκτρικός κινητήρας, οι ενδιάμεσοι ψύκτες του αέρα (intercoolers), η εγκατάσταση αποθήκευσης του πεπιεσμένου αέρα, ο στρόβιλος με το θάλαμο καύσης, η ηλεκτρική γεννήτρια, και ο ανακομιστής θερμότητας. Μετά την κατασκευή των δύο μονάδων αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας με πεπιεσμένο αέρα (Huntorf, McIntosh), οι οποίες λειτουργούν επιτυχώς μέχρι σήμερα και θα αναλυθούν εκτενώς στην ενότητα 3.5, έχουν προταθεί διάφορες παραλλαγές συστημάτων CAES που θα περιγραφούν στην ενότητα αυτή.

Τα συστήματα CAES, ανάλογα με την τεχνολογία που διαθέτουν, διακρίνονται σε μονάδες πρώτης, δεύτερης ή τρίτης γενιάς [33]. Τα συστήματα CAES πρώτης γενιάς ή αλλιώς ‘συμβατικά’, είναι τα μόνα τα οποία είναι ενταγμένα στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Τόσο το εργοστάσιο στο Huntorf όσο και στο McIntosh, ανήκουν στα συστήματα πρώτης γενιάς. Τα συστήματα δεύτερης γενιάς βασίζονται σε τροποποιήσεις του εξοπλισμού των μονάδων πρώτης γενιάς. Τα περισσότερα από αυτά τα υβριδικά συστήματα περιλαμβάνουν μια αεριοστροβλική μονάδα, η οποία σε διάφορες περιπτώσεις υφίσταται τεχνικές τροποποιήσεις ως προς τον τρόπο λειτουργίας της. Τέλος, τα συστήματα τρίτης γενιάς είναι τα πλέον τεχνολογικώς εξελιγμένα, δεδομένου ότι δεν χρησιμοποιούν καύσιμο για την προθέρμανση του αέρα, σε κατάσταση παραγωγής ενέργειας. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω κατάλληλης διάταξης, η οποία κατά τη διαδικασία της συμπίεσης του αέρα αποθηκεύει την εκλυόμενη θερμότητα και την αποδίδει στον εξερχόμενο πεπιεσμένο αέρα από το αεροφυλάκιο όταν το σύστημα μεταβεί σε κατάσταση παραγωγής ενέργειας. Στις επόμενες παραγράφους περιγράφονται οι μονάδες CAES ανάλογα με τη γενιά στην οποία ανήκουν.

3.3.2 Συστήματα CAES πρώτης γενιάς

Ένας συμβατικός σταθμός CAES, το διάγραμμα του οποίου παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.5, αποτελείται από τις εξής διατάξεις [42]:

- ❖ Μία γεννήτρια – κινητήρας με συμπλέκτες και στα δύο άκρα του άξονα περιστροφής, έτσι ώστε να υπάρχει η επιλογή μεταξύ της διαδικασίας της συμπίεσης (λειτουργία κινητήρα) και της διαδικασίας της εκτόνωσης (λειτουργία γεννήτριας)
- ❖ Πολυβάθμιοι συμπιεστές με ενδιάμεσους ψύκτες του αέρα (intercoolers) και τελικό ψύκτη (aftercooler), με σκοπό τη μείωση του καταναλισκόμενου έργου του συμπιεστή καθώς και του απαιτούμενου όγκου του αεροφυλακίου
- ❖ Πολυβάθμιοι στρόβιλοι με θαλάμους καύσεως ανάμεσα στις βαθμίδες, με σκοπό την αύξηση της απόδοσης
- ❖ Σύστημα ελέγχου το οποίο αναλαμβάνει τη ρύθμιση της καταναλισκόμενης ισχύος κατά την αποθήκευση ενέργειας (συμπίεση αέρα) και της παραγόμενης ισχύος κατά την εκτόνωση του αέρα στο στρόβιλο, τη μετάβαση από κατάσταση αποθήκευσης ενέργειας (λειτουργία συμπιεστή) σε κατάσταση παραγωγής (λειτουργία στρόβιλου), τη ρύθμιση της παραγόμενης / καταναλισκόμενης αέριου ισχύος της γεννήτριας υπό λειτουργία σύγχρονου πυκνωτή κ.τ.λ.
- ❖ Βοηθητικός εξοπλισμός όπως αποθήκη καυσίμου, σύστημα ψύξεως του στρόβιλου, μηχανικά – ηλεκτρικά συστήματα
- ❖ Υπόγεια ή υπέργεια εγκατάσταση αποθήκευσης του πεπιεσμένου αέρα, με τον αντίστοιχο εξοπλισμό όπως βαλβίδες αέρα, σωληνώσεις κ.τ.λ.



Σχήμα 3.5 : CAES 1^{ης} γενιάς

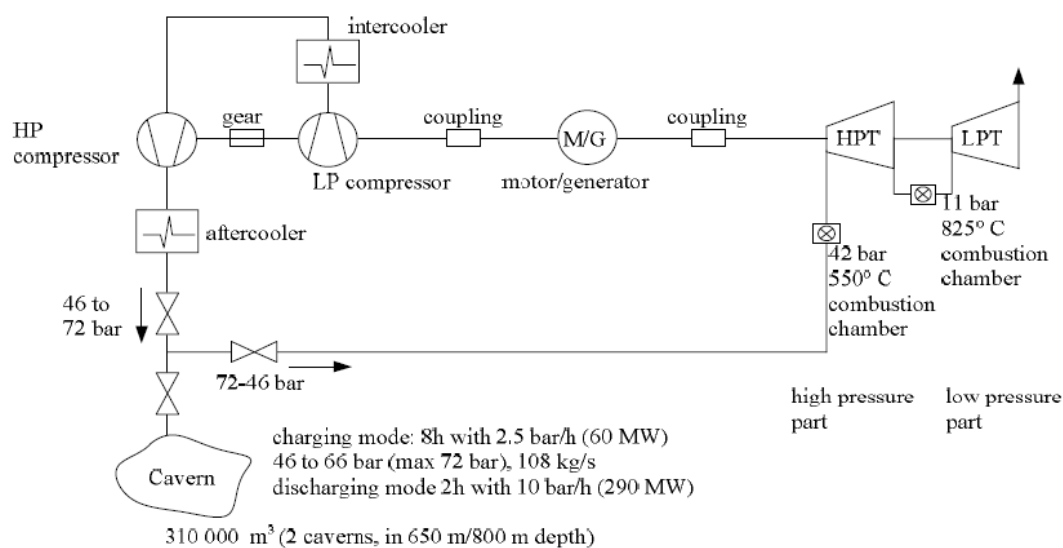
Κατά την αποθήκευση ενέργειας, στον άξονα του κινητήρα είναι συνδεδεμένοι οι συμπιεστές, ενώ αντίθετα η συστοιχία των στρόβιλων έχει αποσυνδεθεί μέσω του αντίστοιχου συμπλέκτη. Κατά την περιστροφή του κοινού άξονα, ο κινητήρας απορροφά ηλεκτρική ισχύ από το δίκτυο, η οποία μετατρέπεται σε περιστροφική και αποδίδεται στους συμπιεστές. Αυτοί καθώς περιστρέφονται συμπιέζουν και εγχέουν αέρα στην αποθηκευτική εγκατάσταση. Σημειώνεται ότι στην έξοδο κάθε βαθμίδας συμπιεστή υπάρχουν ψύκτες οι οποίοι ελαττώνουν τη θερμοκρασία του αέρα που θα εισέλθει στην επόμενη, απορρίπτοντας μέρος της παραγόμενης θερμότητας που συνεπάγεται η συμπίεση του αέρα. Στο τέλος της αλυσίδας των συμπιεστών υπάρχει ένας τελικός ψύκτης που επαναφέρει τη θερμοκρασία του αέρα πλησίον αυτής που επικρατεί στη διάταξη αποθήκευσης.

Αντιθέτως, σε κατάσταση παραγωγής ενέργειας, οι συμπιεστές έχουν αποσυνδεθεί από τον κοινό άξονα και έχει ενσωματωθεί η συστοιχία των στρόβιλων, με τη χρήση των αντίστοιχων συμπλεκτών. Ο κινητήρας πλέον επιτελεί λειτουργία γεννήτριας, δεδομένου ότι αποδίδει ηλεκτρική ισχύ στο δίκτυο. Στην περίπτωση αυτή, ο αέρας εξέρχεται από το

αεροφυλάκιο και αφού αναμιχθεί με καύσιμο στο θάλαμο καύσης αναφλέγεται, και το μίγμα που προκύπτει διέρχεται από την πρώτη βαθμίδα στροβίλου. Στην έξοδο της κάθε βαθμίδας υπάρχει επιπλέον θάλαμος καύσης όπου επιτελείται η ίδια διαδικασία, δηλαδή προσδίδεται θερμότητα στο εργαζόμενο μέσο. Μετά την εκτόνωση στον τελευταίο στρόβιλο της αλυσίδας, ο αέρας εξέρχεται στο περιβάλλον. Έτσι, μέσω των στροβίλων παράγεται η αναγκαία περιστροφική ισχύς για την κίνηση της γεννήτριας. Η συγκεκριμένη υλοποίηση είναι κατάλληλη για την αντιμετώπιση των αιχμών του φορτίου καθώς και για την παροχή στρεφόμενης εφεδρείας. Σημειώνεται ότι το Σχήμα 3.5 αναφέρεται σε δύο βαθμίδες στροβίλων και συμπιεστών.

Το χαρακτηριστικό στοιχείο των συστημάτων αυτών είναι ο κοινός άξονας που συνδέει τη συστοιχία των συμπιεστών και στροβίλων με τον άξονα της γεννήτριας, όπου η δυνατότητα επιλογής μεταξύ συμπίεσης (κατανάλωση ισχύος) και εκτόνωσης (παραγωγή ισχύος) επιτυγχάνεται μέσω των αντίστοιχων συμπλεκτών. Σε αυτή την υλοποίηση παρέχεται η δυνατότητα εκκίνησης των συμπιεστών με την παροχή του απαιτούμενου έργου από τη συστοιχία στροβίλων, δίχως την κατανάλωση ισχύος από το ηλεκτρικό δίκτυο.

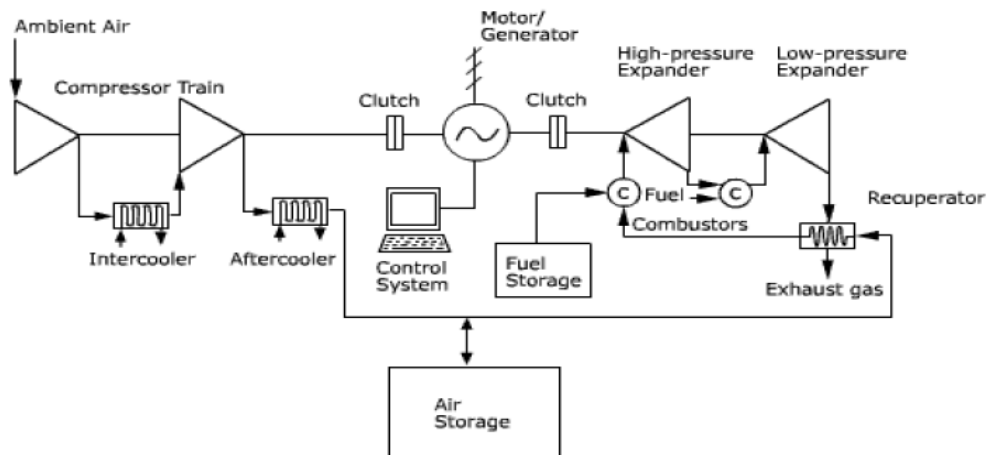
Η μονάδα CAES που είναι εγκατεστημένη στο Huntorf της Γερμανίας έχει την παραπάνω σύνθεση, και χαρακτηρίζεται από σχετικά υψηλή ειδική κατανάλωση θερμότητας (περίπου 5500 Btu/kWh) συγκριτικά με τις πιο σύγχρονες μονάδες CAES. Η διάταξη των συνιστωσών της με τις αντίστοιχες λειτουργικές παραμέτρους απεικονίζεται στο Σχήμα 3.6 [37]:



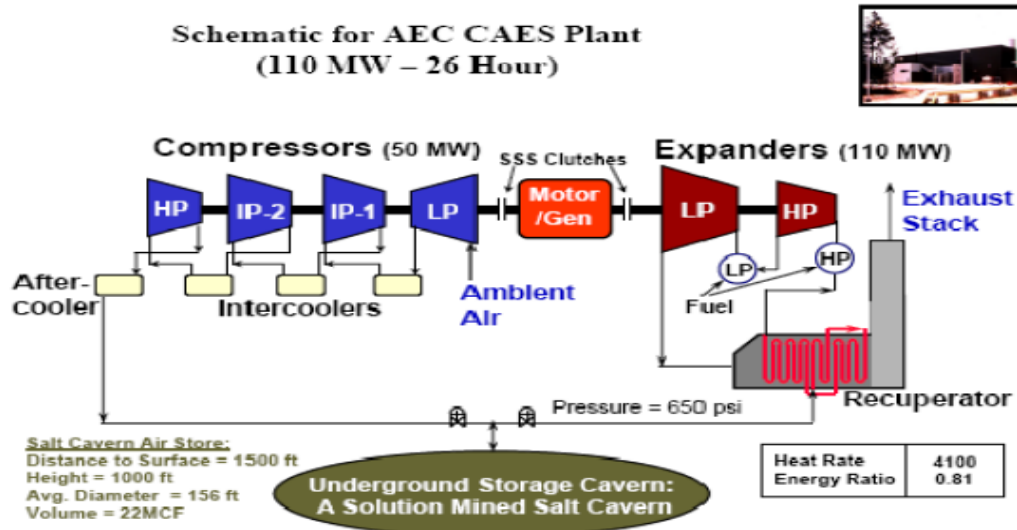
Σχήμα 3.6 : Διάταξη και παράμετροι λειτουργίας μονάδας CAES Huntorf

Ένα παρόμοιο σύστημα CAES με αυτά που παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.5 και στο Σχήμα 3.6, είναι αυτό που περιλαμβάνει ανακομιστή θερμότητας. Ο εναλλάκτης θερμότητας μετατρέπει τη θερμική ενέργεια των καυσαερίων που εξέρχονται από τον στρόβιλο χαμηλής πίεσης σε θερμότητα που αποδίδεται στον αποθηκευμένο αέρα, πριν εισέλθει στο θάλαμο καύσης της πρώτης βαθμίδας στροβίλου. Έτσι μειώνεται η κατανάλωση καυσίμου περίπου κατά 25% συγκριτικά με την υλοποίηση χωρίς ανακομιστή θερμότητας. Το συγκεκριμένο μοντέλο απεικονίζεται στο Σχήμα 3.7, και είναι αυτό το οποίο χρησιμοποιείται στο σταθμό παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στο McIntosh των Η.Π.Α. Η υλοποίηση αυτή ενδείκνυται

για παροχή ισχύος στις αιχμές του φορτίου, καθώς και για τη διαχείριση του φορτίου μέσω παραγωγής ή κατανάλωσης ενέργειας. Δεδομένου λοιπόν ότι η προσθήκη του ανακομιστή θερμότητας ελαττώνει την κατανάλωση καυσίμου, το κόστος παραγωγής ενέργειας είναι χαμηλότερο συγκριτικά με την προηγούμενη περίπτωση. Το απλοποιημένο δομικό διάγραμμα της μονάδας CAES στο McIntosh με τα αντίστοιχα λειτουργικά στοιχεία φαίνεται στο Σχήμα 3.8.



Σχήμα 3.7: CAES 1^{ης} γενιάς με ανακομιδή θερμότητας



Σχήμα 3.8 : Διάταξη και παράμετροι λειτουργίας μονάδας CAES McIntosh

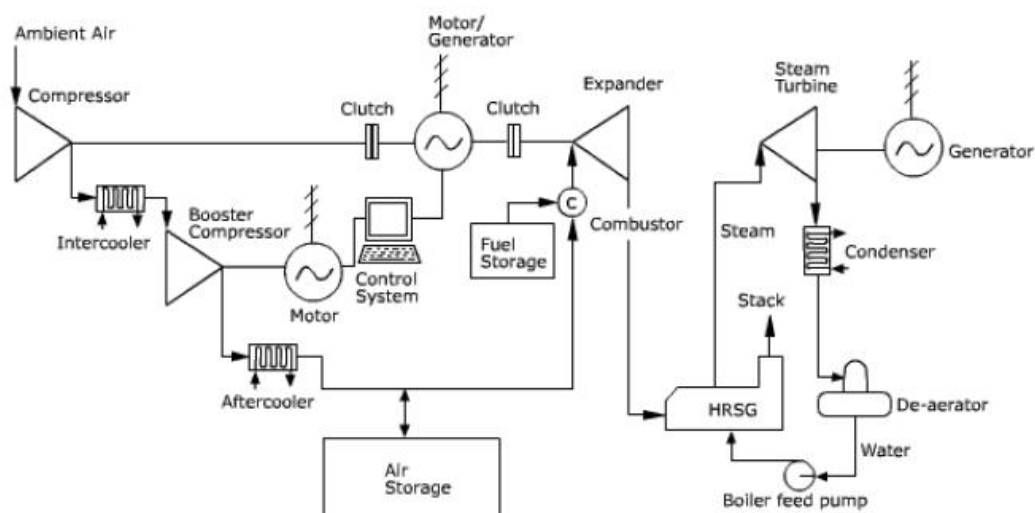
3.3.3 Συστήματα CAES δεύτερης γενιάς

Οι μονάδες CAES δεύτερης γενιάς, όπως αναφέρθηκε, βασίζονται σε τροποποιήσεις των συστημάτων πρώτης γενιάς. Έχουν προταθεί διάφορες παραλλαγές που αποσκοπούν στη βελτίωση του βαθμού απόδοσης, στη μείωση της κατανάλωσης καυσίμου και στην αύξηση

της ισχύος με χαμηλό σχετικά κόστος, δεδομένου ότι η τεχνολογία που χρησιμοποιούν είναι αυτή των υπαρχόντων συστημάτων CAES (Huntorf, McIntosh) καθώς και των συμβατικών ατμοστρόβιλων και αεριοστρόβιλων. Παρακάτω αναλύονται κάποια από αυτά τα συστήματα.

3.3.3.1 CAES συνδυασμένου κύκλου

Μια μονάδα CAES συνδυασμένου κύκλου είναι ένα σύστημα 1^{15} γενιάς όπου έχει προστεθεί ένας λέβητας ανακομιδής θερμότητας, ένα ψυγείο, ένας εξαερωτήρας, μία αντλία νερού και ένας στρόβιλος ατμού, σε συνδυασμό με μία επιπλέον γεννήτρια [42]. Το σύστημα αυτό περιλαμβάνει δηλαδή τις ίδιες διατάξεις ενός συμβατικού σταθμού συνδυασμένου κύκλου, με τη διαφορά ότι ο αεριοστρόβιλος έχει αντικατασταθεί από τη μονάδα CAES, και παριστάνεται διαγραμματικά στο Σχήμα 3.9.



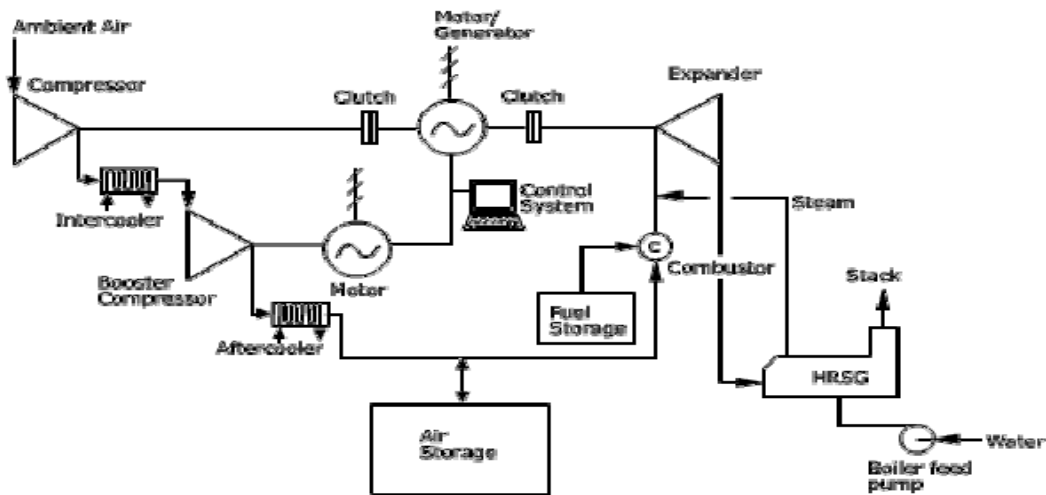
Σχήμα 3.9: Μονάδα CAES συνδυασμένου κύκλου

Τα καυσαέρια υψηλής θερμοκρασίας από την έξοδο του στρόβιλου της μονάδας CAES εισέρχονται στον λέβητα ανακομιδής θερμότητας, όπου μέρος της θερμικής ενέργειας των καυσαερίων αποδίδεται στο νερό που κυκλοφορεί στο λέβητα, για την παραγωγή ατμού. Ο ατμός εκτονώνεται στον στρόβιλο ατμού και έτσι παράγεται επιπλέον ισχύς. Λόγω της αδράνειας του λέβητα, η οποία οφείλεται στην χρονική καθυστέρηση για την παραγωγή ατμού επιθυμητής θερμοκρασίας, η επιπλέον ισχύς που παράγει το υποσύστημα του ατμοστρόβιλου θα φτάσει στη μέγιστη τιμή της μια ώρα περίπου μετά από τη στιγμή που εκκινήσει η μονάδα CAES. Συμπερασματικά, οι μονάδες CAES συνδυασμένου κύκλου είναι κατάλληλες για την αντιμετώπιση αιχμών φορτίου με μεγάλη χρονική διάρκεια, όπου το σύστημα θα διαθέτει τη μέγιστη ικανότητα παραγωγής ισχύος. Για μικρά χρονικά διαστήματα ή για διακοπόμενη λειτουργία η εφαρμογή αυτή δεν είναι κατάλληλη, διότι δεν θα έχει προλάβει να προθερμανθεί ο λέβητας, και κατά συνέπεια η ικανότητα παραγωγής θα υπολείπεται από την ονομαστική ισχύ της μονάδας. Συγκριτικά με τα συστήματα πρώτης γενιάς, η εφαρμογή του συνδυασμένου κύκλου επιτυγχάνει τη μείωση του ειδικού όγκου αποθήκευσης του αέρα (m^3/kWh), δεδομένου ότι πλέον παράγεται περισσότερη ισχύς

εξαιτίας της παρουσίας του ατμοστροβίλου. Το γεγονός αυτό συνεπάγεται την μείωση του κόστους κατασκευής και συντήρησης της αποθηκευτικής διάταξης του αέρα.

3.3.3.2 CAES με κύκλο έγχυσης ατμού

Μια μονάδα CAES με κύκλο έγχυσης ατμού είναι ένα σύστημα 1^{ης} γενιάς στο οποίο έχει προστεθεί ένας λέβητας ανακομιδής θερμότητας και μια αντλία νερού, και απεικονίζεται στο Σχήμα 3.10 [42]. Ο λέβητας αυτός χρησιμοποιείται για την παραγωγή ατμού, ο οποίος δεν θα εκτονωθεί σε κάποιο στρόβιλο ατμού όπως στην υλοποίηση της υποπαραγράφου 3.3.3.1, αλλά θα προστεθεί στη ροή του πεπιεσμένου αέρα που εκτονώνεται στον στρόβιλο της μονάδας CAES. Έτσι, αυξάνει η συνολική ροή του εργαζόμενου μέσου που εκτονώνεται στον στρόβιλο κατά την παραγωγή, με αποτέλεσμα να είναι μεγαλύτερη η παραγόμενη ισχύς συγκριτικά με τα συστήματα πρώτης γενιάς. Κατ' αυτόν τον τρόπο, επιτυγχάνεται η μείωση του ειδικού όγκου αποθήκευσης του αέρα (m^3/kWh), με άμεσο αντίκτυπο τη μείωση του κόστους και του όγκου της αποθήκης αέρα. Όπως και στην εφαρμογή της μονάδας CAES συνδυασμένου κύκλου, η επιπλέον ισχύς που σχετίζεται με τον εγχέομενο ατμό εξαρτάται άμεσα από την ισχύ που παράγεται από την εκτόνωση του πεπιεσμένου αέρα. Συγκεκριμένα, σε υψηλά επίπεδα ισχύος υφίσταται μεγάλη ροή καυσαερίων που εξέρχονται από το στρόβιλο, με αποτέλεσμα η θερμική ισχύς που παραλαμβάνει ο λέβητας ανακομιδής θερμότητας να είναι υψηλή. Έτσι, η θερμοκρασία και η ροή του ατμού που προκύπτει είναι μεγάλη, γεγονός που οδηγεί σε ακόμα υψηλότερη παραγόμενη ισχύ από το υβριδικό σύστημα. Το μειονέκτημα της εφαρμογής αυτής είναι η ανάγκη για απιονισμένο νερό, γεγονός που αυξάνει το κόστος και την περιορίζει τη δυνατότητα υλοποίησής της.



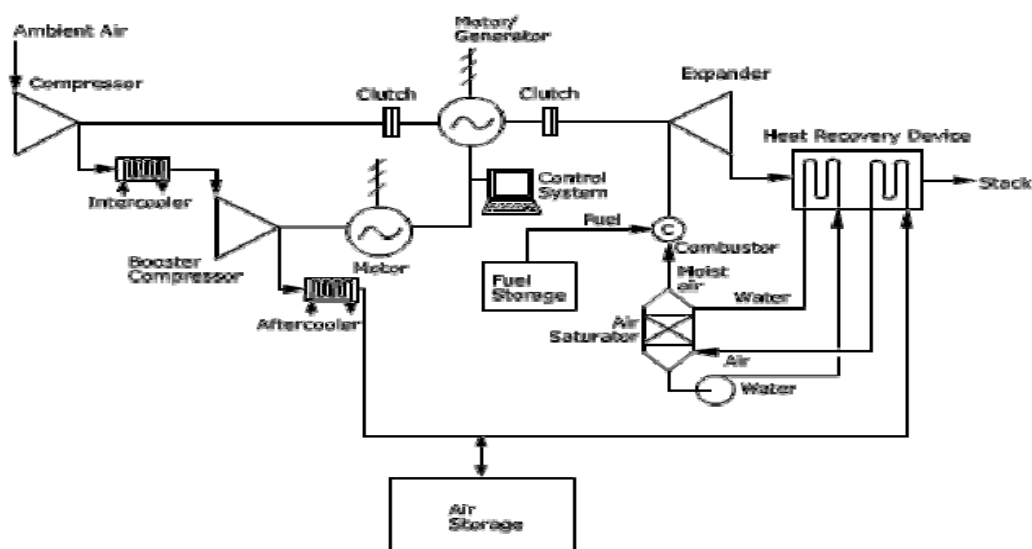
Σχήμα 3.10 : Μονάδα CAES με κύκλο έγχυσης ατμού

3.3.3.3 CAES με ύγρανση

Μια μονάδα CAES με ύγρανση είναι ένα σύστημα 1^{ης} γενιάς στο οποίο έχει προστεθεί ένας υγραντήρας, μια αντλία νερού, ένας εναλλάκτης θερμότητας, και απεικονίζεται στο Σχήμα 3.11 [42]. Ο εναλλάκτης θερμότητας παραλαμβάνει μέρος της θερμότητας των

καυσαερίων και την αποδίδει εν μέρει στον εξερχόμενο αέρα από το αεροφυλάκιο για την προθέρμανσή του, και μερικώς στο νερό που κυκλοφορεί στο σύστημα υγραντήρας – ανακομιστής θερμότητας. Συγκεκριμένα, ο εξερχόμενος αέρας από την αποθηκευτική διάταξη εισέρχεται στον εναλλάκτη και αυξάνει τη θερμοκρασία του. Στη συνέχεια, ο προθερμασμένος αέρας διέρχεται από τον υγραντήρα, όπου λόγω της παρουσίας υδρατμών αυξάνει η υγρασία του. Οι υδρατμοί αυτοί προέρχονται από τη θέρμανση του νερού στον εναλλάκτη θερμότητας σε θερμοκρασίες άνω του σημείου βρασμού, και συσσωρεύονται στον υγραντήρα. Ακολούθως, ο υγρός προθερμασμένος αέρας αναμειγνύεται με καύσιμο στο θάλαμο καύσης και εκτονώνεται στον στρόβιλο. Τέλος, τα εξερχόμενα καυσαέρια διέρχονται από τον εναλλάκτη θερμότητας και ο κύκλος επαναλαμβάνεται.

Λόγω της αύξησης της υγρασίας του αέρα, η παραγόμενη ισχύς είναι αρκετά υψηλότερη, μιας και η ενθαλπία του υγρού αέρα στην είσοδο του στρόβιλου, για δεδομένη θερμοκρασία, είναι πλέον μεγαλύτερη. Έτσι, για συγκεκριμένη ισχύ εξόδου, η ροή του αέρα που απαιτείται είναι μικρότερη. Συμπερασματικά, ο απαιτούμενος όγκος του αεροφυλακίου είναι επίσης μικρότερος, σε αντιδιαστολή με τα συστήματα CAES 1^{ης} γενιάς. Σημειώνεται επίσης ότι η δυναμική απόκριση αυτού του υβριδικού συστήματος είναι καλύτερη από την αντίστοιχη της μονάδας CAES με κύκλο έγχυσης ατμού και της μονάδας CAES συνδυασμένου κύκλου. Τέλος, η εφαρμογή αυτή απαιτεί την χρήση νερού, το οποίο όμως δεν χρειάζεται αφαλάτωση.



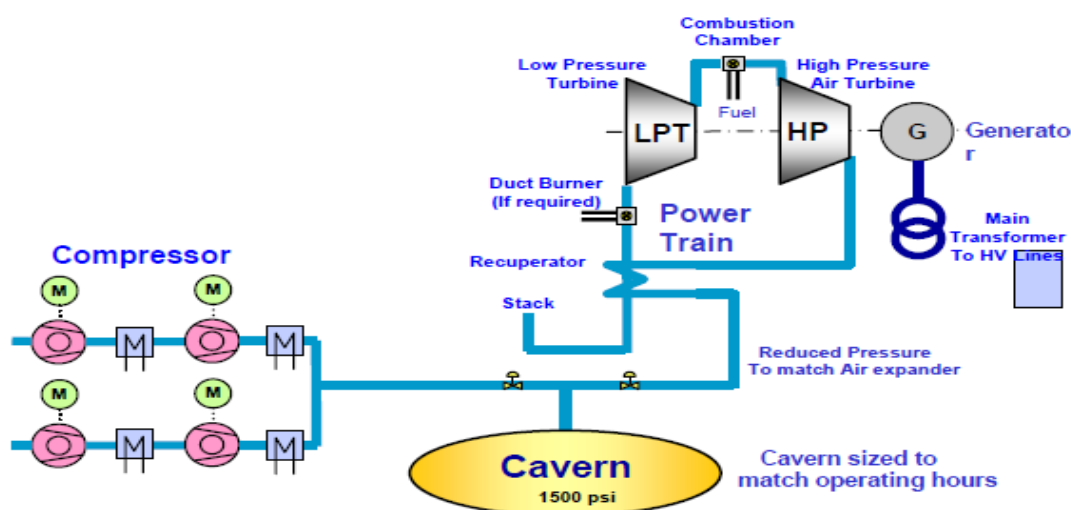
Σχήμα 3.11 : Μονάδα CAES με ύγρανση

3.3.3.4 CAES με ανεξάρτητη λειτουργία συμπιεστών και στρόβιλων

Το κύριο χαρακτηριστικό των μονάδων αυτών συγκριτικά με τα συστήματα 1^{ης} γενιάς είναι η απόζευξη της αλυσίδας των συμπιεστών και στρόβιλων από τον κοινό άξονα περιστροφής, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.12 [43]. Συγκεκριμένα, η συστοιχία των συμπιεστών βρίσκεται στον ίδιο άξονα περιστροφής με έναν κινητήρα, όπου κατά την περίοδο αποθήκευσης ενέργειας τίθεται σε περιστροφή, απορροφώντας ηλεκτρική ισχύ από το δίκτυο και αποθηκεύοντάς την υπό μορφή πεπιεσμένου αέρα σε αεροφυλάκιο.

Σημειώνεται ότι δύναται να υπάρξει παραπάνω από μία συστοιχία συμπιεστών, με σκοπό την δυνατότητα απορρόφησης μεγαλύτερης ποσότητας ισχύος και μεγαλύτερης ευελιξίας ως προς τη ρύθμιση της καταναλισκόμενης ισχύος. Η κάθε συστοιχία συμπιεστών απαιτεί έναν άξονα περιστροφής και έναν ηλεκτρικό κινητήρα, όπου συμπιεστές και κινητήρας είναι προσαρτημένοι στον κοινό άξονα. Η αλυσίδα των στροβίλων βρίσκεται σε ξεχωριστό άξονα από αυτόν της συστοιχίας συμπιεστών, στον οποίο είναι προσαρτημένη επίσης μια γεννήτρια. Έτσι, οι συμπλέκτες δεν είναι απαραίτητοι, δεδομένου ότι η λειτουργία των συμπιεστών και των στροβίλων επιτελείται ανεξάρτητα. Αυτό επιτυγχάνεται λόγω της χρήσης διαφορετικών αξόνων περιστροφής και της παρουσίας δύο ή παραπάνω ηλεκτρικών μηχανών (συνήθως μία γεννήτρια για τους στροβίλους και ένας κινητήρας για τους συμπιεστές). Επίσης, στην πλειοψηφία των εφαρμογών αυτών περιλαμβάνεται ένας ανακομιστής θερμότητας, η λειτουργία του οποίου έχει περιγραφεί προηγουμένως.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, το υβριδικό σύστημα που μελετάται είναι παρόμοιο με τη μονάδα CAES 1^{ης} γενιάς με ανακομιδή θερμότητας (Σχήμα 3.7), με τη διαφορά ότι οι συμπιεστές και οι στροβίλοι είναι πλέον σε ξεχωριστούς άξονες. Το γεγονός αυτό προσδίδει πολύ μεγαλύτερη ευελιξία συγκριτικά με τις συμβατικές μονάδες CAES, αφού πλέον υπάρχει μεγαλύτερη δυνατότητα ρύθμισης φορτίου – συχνότητας και μικρότεροι χρόνοι απόκρισης.



Σχήμα 3.12 : Μονάδα CAES με ανεξάρτητη λειτουργία συμπιεστών και στροβίλων

Στις ακόλουθες υποπαραγράφους αναφέρονται και συγκρίνονται διάφορα είδη CAES 2^{ης} γενιάς, τα οποία περιλαμβάνουν μια συμβατική αεριοστροβιλική μονάδα. Σε αυτά τα υβριδικά συστήματα παρέχονται κάποια τυπικά λειτουργικά χαρακτηριστικά. Όσον αφορά την αποθηκευτική διάταξη του αέρα των ακόλουθων συστημάτων, γίνεται η θεώρηση ότι χρησιμοποιείται υπόγεια εγκατάσταση αποθήκευσης, ίδιας γεωλογικής διαμόρφωσης με την συμβατική μονάδα CAES στο McIntosh των Η.Π.Α [46]. Έτσι, όσον αφορά την αποθήκευση του αέρα, γίνονται οι παρακάτω παραδοχές :

- Η υπόγεια εγκατάσταση αποθήκευσης του αέρα είναι ένα εγκαταλελειμμένο αλατωρυχείο
- Το βάθος της αποθήκης αέρα είναι περίπου 460 m
- Η ελάχιστη πίεση στο αεροφυλάκιο είναι 40 bars
- Η μέγιστη πίεση στο αεροφυλάκιο είναι 90 bars

- Ο όγκος αποθήκευσης του αέρα έχει υπολογιστεί σύμφωνα με την ειδική κατανάλωση αέρα ανά παραγόμενη kWh σε ώρες αιχμής του φορτίου, και το κόστος της αποθήκευσης έχει εκτιμηθεί από το αντίστοιχο κόστος της μονάδας CAES στο McIntosh αναλογικά με τον όγκο αποθήκευσης
- Ο λόγος των ωρών αποθήκευσης προς τις ώρες παραγωγής ενέργειας έχει θεωρηθεί ίσος με 2

Τα λειτουργικά στοιχεία των ακόλουθων μονάδων που εμφανίζονται στα αντίστοιχα σχήματα και πίνακες, έχουν βασιστεί στην απόκριση ενός συμβατικού αεριοστροβίλου. Ο τύπος του αεριοστροβίλου που χρησιμοποιείται είναι ο GE7241-FA, ένας κοινός αεριοστροβίλος που χρησιμοποιείται σε πολλά ηλεκτρικά συστήματα.

3.3.3.5 CAES με αεριοστροβιλική μονάδα - έγχυση αέρα (CAES – Air Injection (AI))

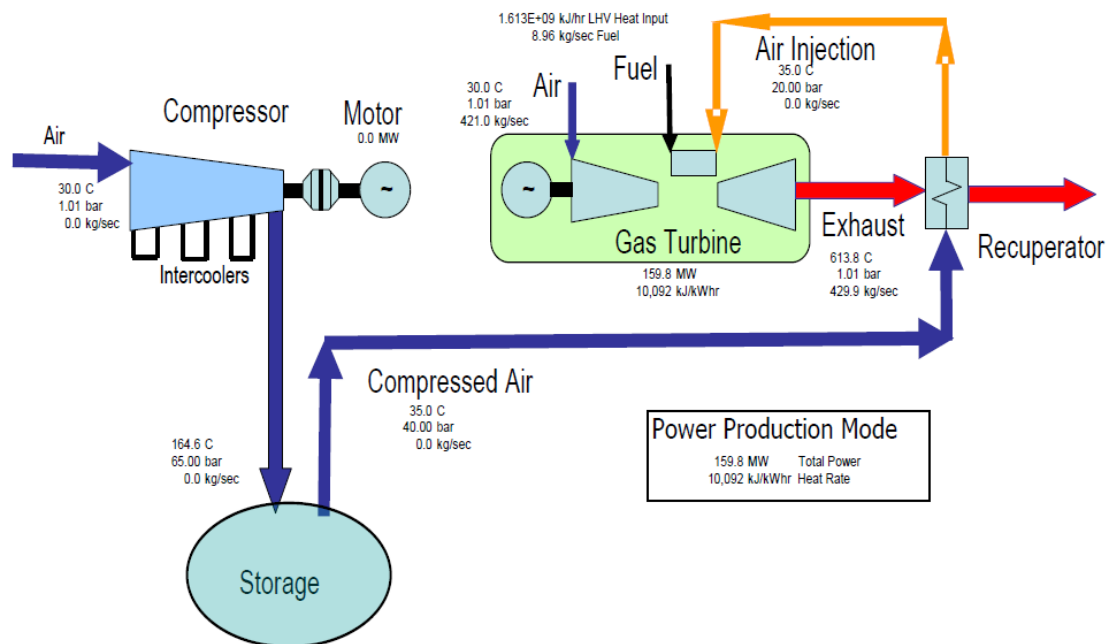
Η συγκεκριμένη εφαρμογή αναφέρεται στην έγχυση πεπιεσμένου αέρα στην είσοδο του θαλάμου καύσης ενός συμβατικού αεριοστροβίλου [43]. Οι βασικές συνιστώσες του συστήματος, είναι οι συστοιχίες των συμπιεστών με τους αντίστοιχους άξονες περιστροφής και ηλεκτρικούς κινητήρες, οι ενδιάμεσοι (intercoolers) και τελικοί ψύκτες (aftercoolers), η αποθήκη του πεπιεσμένου αέρα, οι βαλβίδες ελέγχου της ροής αέρα, μια συμβατική αεριοστροβιλική μονάδα, ένας ανακομιστής θερμότητας και μια ηλεκτρική γεννήτρια. Η λειτουργία της συμπίεσης είναι κοινή με αυτή που περιγράφηκε στην υποπαράγραφο 3.3.3.4, σε αντίθεση με την εκτόνωση η οποία είναι διαφορετική. Σε περιόδους παραγωγής ενέργειας, η αεριοστροβιλική μονάδα έχει δύο καταστάσεις λειτουργίας :

- Αυτόνομη λειτουργία
- Λειτουργία με συμβολή του πεπιεσμένου αέρα

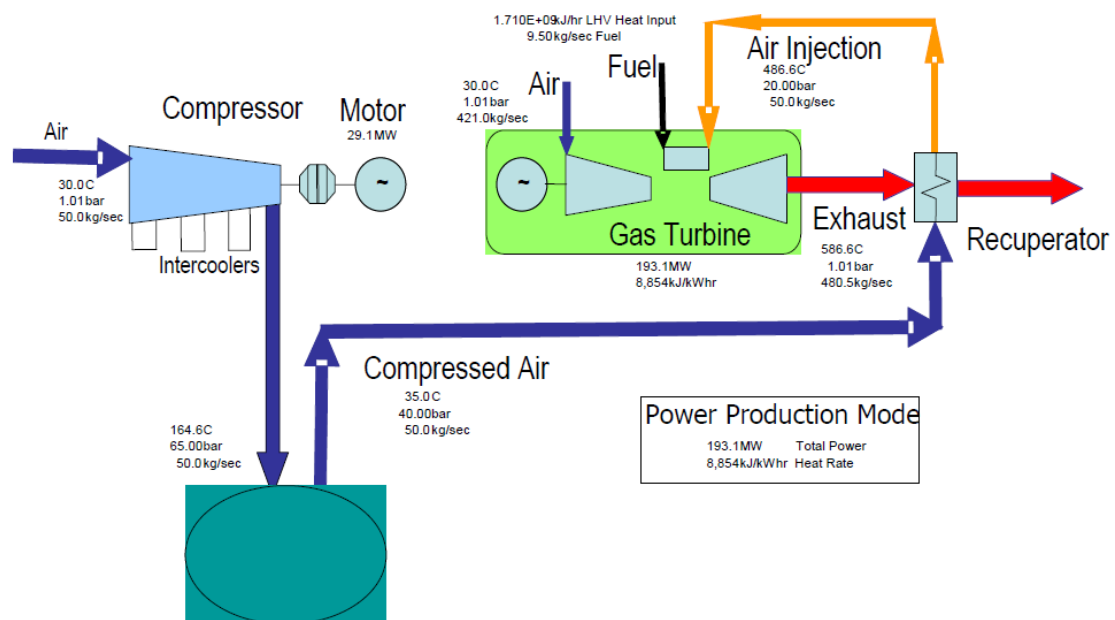
Στην πρώτη κατάσταση λειτουργίας, η βαλβίδα ελέγχου του αέρα προς το θάλαμο καύσης είναι κλειστή, με αποτέλεσμα η αεριοστροβιλική μονάδα να λειτουργεί αυτόνομα με τον τυποποιημένο τρόπο, όπως περιγράφεται στο [11]. Στο Σχήμα 3.13 απεικονίζεται το σύστημα CAES - AI στην πρώτη κατάσταση λειτουργίας, και εμφανίζονται μερικά τυπικά λειτουργικά χαρακτηριστικά, βασισμένα στον αεριοστροβίλο τύπου GE7241-FA.

Στην δεύτερη λειτουργική κατάσταση, η βαλβίδα ελέγχου του αέρα ανοίγει, με αποτέλεσμα να προκύπτει επιπλέον ροή αέρα που εισέρχεται στο θάλαμο καύσης από τη διάταξη αποθήκευσης του πεπιεσμένου αέρα. Έτσι, από το θάλαμο καύσης διέρχονται δύο ρεύματα αέρα, ένα που προκύπτει από την περιστροφική κίνηση του συμβατικού συμπιεστή του αεριοστροβίλου, και ένα από την αποθήκη αέρα. Κατ' αυτόν τον τρόπο αυξάνει η συνολική ροή αέρα που εκτονώνεται στο στροβίλο, οδηγώντας στην αύξηση της παραγόμενης ισχύος. Η επιλογή αυτή ενδείκνυται όταν η αεριοστροβιλική μονάδα λειτουργεί υπό υψηλές θερμοκρασίες περιβάλλοντος όπου η ικανότητα παραγωγής ισχύος είναι περιορισμένη, σε περιπτώσεις μεταβατικών φαινομένων όπως πτώση συχνότητας, καθώς και σε περιπτώσεις όπου το κόστος ένταξης επιπλέον μονάδας παραγωγής είναι υψηλό, δεδομένου ότι οι ανάγκες ισχύος δύναται να καλυφθούν από την υβριδική αυτή εφαρμογή. Αυτό που επιτυγχάνεται με την τροποποίηση του συμβατικού αεριοστροβίλου είναι η αύξηση της ονομαστικής του ισχύος κατά 20% – 25%, λόγω της δυνατότητας αυξημένης ροής αέρα. Στο Σχήμα 3.14 απεικονίζεται το σύστημα CAES - AI στη δεύτερη κατάσταση λειτουργίας,

και εμφανίζονται μερικά τυπικά λειτουργικά χαρακτηριστικά, βασισμένα στον αεριοστρόβιλο τύπου GE7241-FA.



Σχήμα 3.13 : CAES – AI (1^η κατάσταση λειτουργίας)



Σχήμα 3.14 : CAES – AI (2^η κατάσταση λειτουργίας)

Πριν την είσοδο του πεπιεσμένου αέρα στο θάλαμο καύσης, υπάρχει η δυνατότητα τοποθέτησης ενός υγραντήρα, όμοιο με αυτόν που περιγράφηκε στην υποπαράγραφο 3.3.3.3, με σκοπό την αύξηση της υγρασίας του αέρα και κατ' επέκταση της ενθαλπίας του. Έτσι, η

ικανότητα παραγωγής ισχύος θα είναι ακόμα υψηλότερη, και ο απαιτούμενος όγκος του αεροφυλακίου αρκετά μικρότερος. Όπως αναφέρεται στο [43], με την τοποθέτηση του υγραντήρα ο όγκος του αεροφυλακίου δύναται να μειωθεί κατά 30%, ή διατηρώντας τον αρχικώς σχεδιασμένο όγκο, ο χρόνος παροχής πεπιεσμένου αέρα από την αποθηκευτική διάταξη στο θάλαμο καύσης μπορεί να αυξηθεί κατά 30%.

Τέλος, στον Πίνακα 3.1 συνοψίζονται τα ονομαστικά στοιχεία της αεριοστροβιλικής μονάδας τύπου GE7241-FA και της μονάδας CAES – AI, με τη χρήση του ίδιου τύπου αεριοστροβίλου [46]:

Πίνακας 3.1: Ονομαστικά στοιχεία μονάδας CAES-AI και συμβατικού αεριοστροβίλου

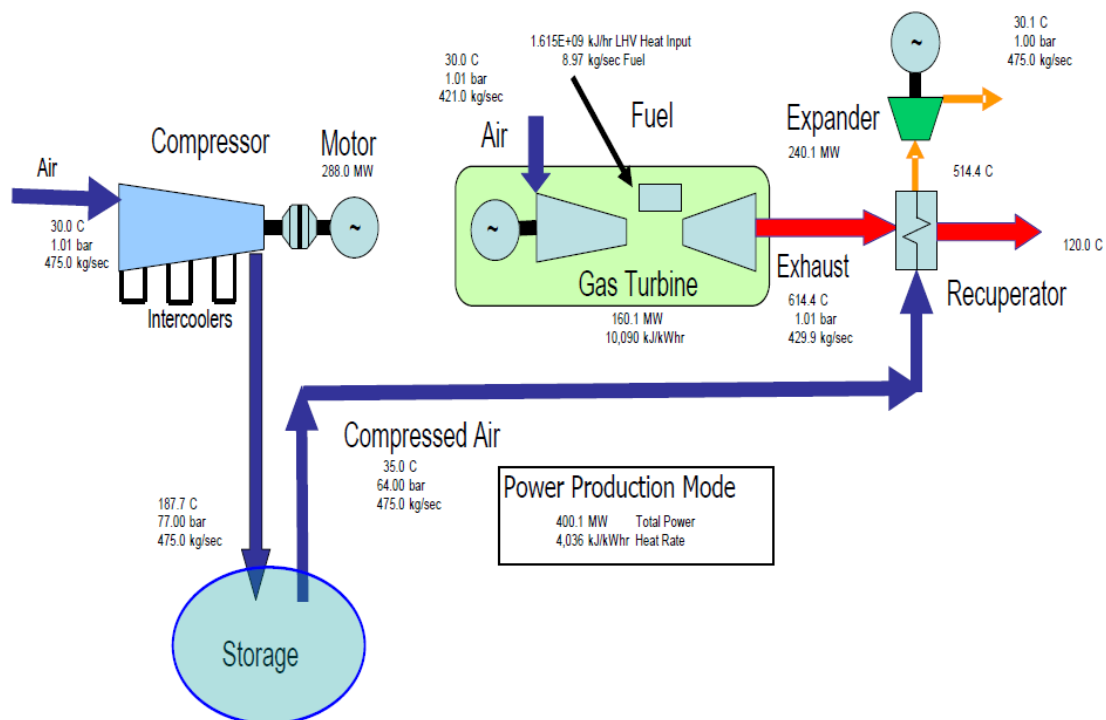
| Χαρακτηριστικό | CAES-AI με αεριοστροβιλική μονάδα τύπου GE7241-FA | Αεριοστρόβιλος τύπου GE7241-FA (σε θερμοκρασία περιβάλλοντος 35 °C) |
|---|--|--|
| Μέγιστη ισχύς αεριοστροβίλου (MW) | 160 | 160 |
| Μέγιστη ισχύς CAES (MW) | 33,1 | - |
| Μέγιστη συνολική ισχύς (MW) | 193,1 | 160 |
| Συνολική ειδική κατανάλωση θερμότητας (Btu/kWh) | 8394 | 10600 |
| Μέγιστη καταναλισκόμενη ισχύς συμπιεστή (MW) | 29,1 | - |

3.3.3.6 CAES με αεριοστροβιλική μονάδα και ανεξάρτητο στρόβιλο αέρος (CAES - Expander)

Το συγκεκριμένο σύστημα είναι παρόμοιο με αυτό ενός συμβατικού σταθμού συνδυασμένου κύκλου, με τη διαφορά ότι το εργαζόμενο μέσο είναι ο αέρας και όχι ο ατμός [25]. Η δομική μορφή του υβριδικού συστήματος είναι όμοια με αυτή στο Σχήμα 3.14, όπου ο αέρας δεν εγχέεται πλέον στο θάλαμο καύσης της συμβατικής αεριοστροβιλικής μονάδας αλλά εκτονώνεται σε χωριστό στρόβιλο, και παριστάνεται στο Σχήμα 3.15. Κατά τη λειτουργία της αποθήκευσης ενέργειας, η συστοιχία των συμπιεστών περιστρέφεται λόγω της περιστροφικής ισχύς που παρέχει ο ηλεκτρικός κινητήρας, ο οποίος είναι προσαρτημένος σε κοινό άξονα με τους συμπιεστές. Έτσι, συμπιέζεται αέρας και εγχέεται στην αντίστοιχη εγκατάσταση αποθήκευσης. Κατά τη λειτουργία της παραγωγής ενέργειας, ο πεπιεσμένος αέρας εξέρχεται από το αεροφυλάκιο μέσω κατάλληλης βαλβίδας ελέγχου, και αφού διέλθει από έναν εναλλάκτη θερμότητας, εκτονώνεται στον στρόβιλο αέρος παράγοντας περιστροφική ισχύ. Η ισχύς αυτή μετατρέπεται σε ηλεκτρική, μέσω της γεννήτριας που είναι προσαρτημένη σε κοινό άξονα με το στρόβιλο, και εγχέεται στο ηλεκτρικό δίκτυο. Ο εναλλάκτης θερμότητας αποδίδει μέρος της θερμικής ενέργειας των καυσαερίων της αεριοστροβιλικής μονάδας, στον πεπιεσμένο αέρα που θα εκτονωθεί στον στρόβιλο. Η λειτουργία του στροβίλου αέρος είναι παρόμοια με αυτή ενός στροβίλου ατμού, δηλαδή η παραγόμενη ισχύς και η ροή του αέρα εξαρτώνται άμεσα από την πίεση που επικρατεί στην είσοδό του [2].

Επίσης, παρατηρούμε ότι η υλοποίηση αυτή μοιάζει αρκετά με την αντίστοιχη στο Σχήμα 3.12. Η ουσιαστική διαφορά είναι ότι στην μονάδα CAES – Expander η θέρμανση του πεπιεσμένου αέρα γίνεται από την ανακομιδή των καυσαερίων της αεριοστροβιλικής μονάδας, χωρίς την ανάγκη για ξεχωριστό θάλαμο καύσης. Αντιθέτως, στη μονάδα CAES

που περιγράφηκε στην υποπαράγραφο 3.3.3.4, είναι επιβεβλημένη η ύπαρξη θαλάμου καύσεως, δεδομένου ότι δεν υπάρχει αεριοστροβλική μονάδα για την παροχή θερμικής ενέργειας στον πεπιεσμένο αέρα. Ωστόσο, και σε αυτήν την περίπτωση χρησιμοποιείται εναλλάκτης θερμότητας, ο οποίος έχει ως είσοδο τα καυσαέρια του στροβίλου αέρος και όχι κάποιας αεριοστροβλικής μονάδας. Το παραπάνω γεγονός συνεπάγεται ότι η μονάδα CAES του Σχήματος 3.12 χρειάζεται καύσιμο για τη λειτουργία της, η οποία συνοδεύεται από εκπομπές ρύπων. Αντίθετα, η μονάδα CAES του Σχήματος 3.15 παράγει 'ήπιας' μορφής ενέργεια, δεδομένου ότι δεν χρησιμοποιείται καύσιμο καθόλου. Έτσι, δεδομένης της λειτουργίας του αεριοστροβίλου, παράγεται η αναγκαία θερμότητα απαλλάσσοντας το σύστημα από την ανάγκη για επιπλέον θάλαμο καύσης και καύσιμο. Συγκεκριμένα, η ειδική κατανάλωση θερμότητας της μονάδας CAES - Expander μπορεί να φτάσει σε αρκετά χαμηλές τιμές έως 3800 Btu/kWh, εν συγκρίσει με τη μονάδα CAES στο McIntosh των Η.Π.Α, όπου η ειδική κατανάλωση θερμότητας είναι περίπου 4200 Btu/kWh.



Σχήμα 3.15 : CAES – Expander

Στον Πίνακα 3.2 συνοψίζονται για λόγους σύγκρισης τα ονομαστικά στοιχεία της αεριοστροβλικής μονάδας τύπου GE7241-FA και της μονάδας CAES – Expander, με αεριοστρόβιλο ίδιου τύπου [46].

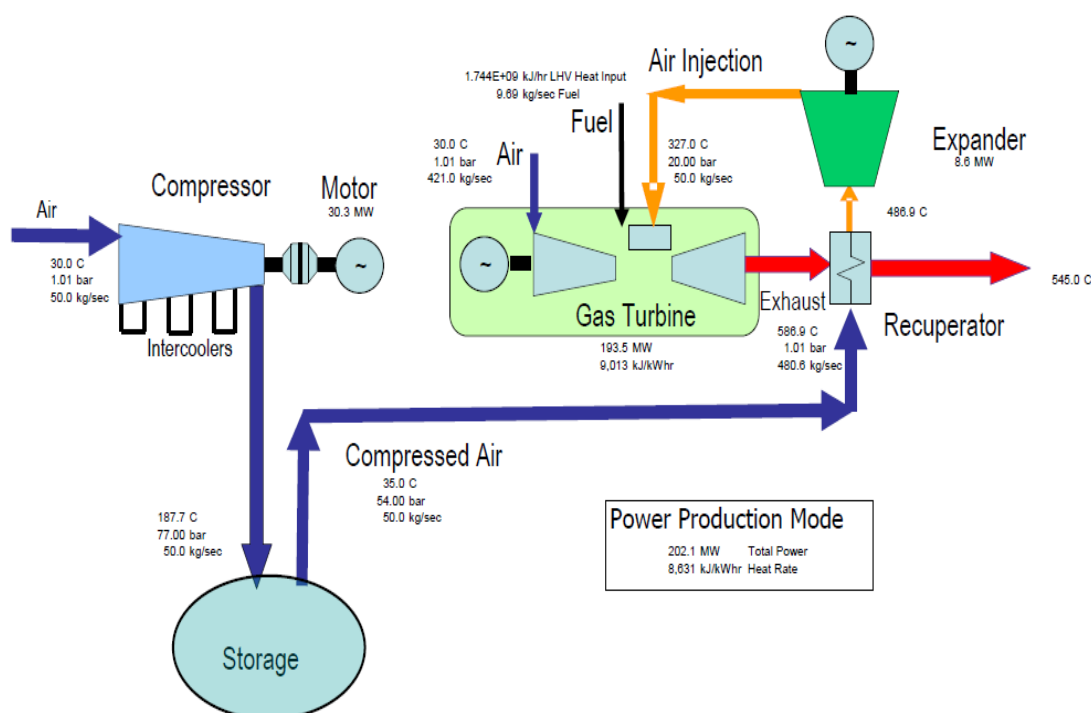
3.3.3.7 CAES με αεριοστροβλική μονάδα και ανεξάρτητο στρόβιλο αέρος υψηλής πίεσης- έγχυση αέρα (CAES – AI & HP Expander)

Η συγκεκριμένη υλοποίηση είναι παρόμοια με το υβριδικό σύστημα CAES – AI του Σχήματος 3.14, με τη διαφορά ότι έχει προστεθεί ένας στρόβιλος υψηλής πίεσης ανάμεσα στον ανακομιστή θερμότητας και στο θάλαμο καύσης [46]. Η μονάδα CAES – AI & HP

Expander απεικονίζεται στο Σχήμα 3.16, όπου εμφανίζονται οι σημαντικότερες λειτουργικές παράμετροι, βασιζόμενες στην αεριοστροβιλική μονάδα τύπου GE7241-FA.

Πίνακας 3.2 : Ονομαστικά στοιχεία μονάδας CAES- Expander και συμβατικού αεριοστρόβιλου

| Χαρακτηριστικό | CAES-Expander με αεριοστροβιλική μονάδα τύπου GE7241-FA | Αεριοστρόβιλος τύπου GE7241-FA (σε θερμοκρασία περιβάλλοντος 35 °C) |
|---|---|---|
| Μέγιστη ισχύς αεριοστρόβιλου (MW) | 159,8 | 160 |
| Μέγιστη ισχύς CAES (MW) | 240,2 | - |
| Μέγιστη συνολική ισχύς (MW) | 400 | 160 |
| Συνολική ειδική κατανάλωση θερμότητας (Btu/kWh) | 3826 | 10600 |
| Μέγιστη καταναλισκόμενη ισχύς συμπίεστη (MW) | 288 | - |



Σχήμα 3.16 : CAES – AI & HP Expander

Σε περιόδους παραγωγής ενέργειας, ο αποθηκευμένος αέρας προθερμαίνεται στον εναλλάκτη θερμότητας και εκτονώνεται στον στρόβιλο υψηλής πίεσης. Σε αντίθεση με το σύστημα CAES – Expander στο Σχήμα 3.15, ο αέρας δεν εξέρχεται από το στρόβιλο σε περιβαλλοντικές συνθήκες πίεσης. Δεδομένου ότι η έξοδος του στρόβιλου είναι ο θάλαμος καύσης, η πίεση εξόδου ταυτίζεται με την πίεση που επικρατεί στο θάλαμο καύσης. Έτσι, η μονάδα CAES – AI & HP Expander εκμεταλλεύεται τη διαφορά πίεσης μεταξύ αεροφυλακίου και θαλάμου καύσης και παράγεται επιπλέον ισχύς στο στρόβιλο υψηλής πίεσης. Μετά την μερική εκτόνωση του πεπιεσμένου αέρα στον ανεξάρτητο αυτό στρόβιλο, ο αέρας εισέρχεται στο θάλαμο καύσης και σε συνδυασμό με τη ροή αέρα του συμβατικού

συμπιεστή, η συνολική ροή εκτονώνεται στον στρόβιλο της αεριοστροβλικής μονάδας. Συμπερασματικά, στην υλοποίηση αυτή συνδυάζονται τα θετικά στοιχεία των μονάδων CAES – Expander και CAES – AI.

Στον Πίνακα 3.3 συνοψίζονται τα ονομαστικά στοιχεία της αεριοστροβλικής μονάδας τύπου GE7241-FA και της μονάδας CAES – AI & HP Expander, με αεριοστρόβιλο ίδιου τύπου [46]:

Πίνακας 3.3 : Ονομαστικά στοιχεία μονάδας CAES – AI & HP Expander και συμβατικού αεριοστροβίλου

| Χαρακτηριστικό | CAES – AI & HP Expander με αεριοστροβλική μονάδα τύπου GE7241-FA | Αεριοστρόβιλος τύπου GE7241-FA (σε θερμοκρασία περιβάλλοντος 35 °C) |
|---|---|--|
| Μέγιστη ισχύς αεριοστροβίλου (MW) | 159,8 | 160 |
| Μέγιστη ισχύς CAES (MW) | 42,3 | - |
| Μέγιστη συνολική ισχύς (MW) | 202,1 | 160 |
| Συνολική ειδική κατανάλωση θερμότητας (Btu/kWh) | 8181 | 10600 |
| Μέγιστη καταναλισκόμενη ισχύς συμπιεστή (MW) | 30,3 | - |

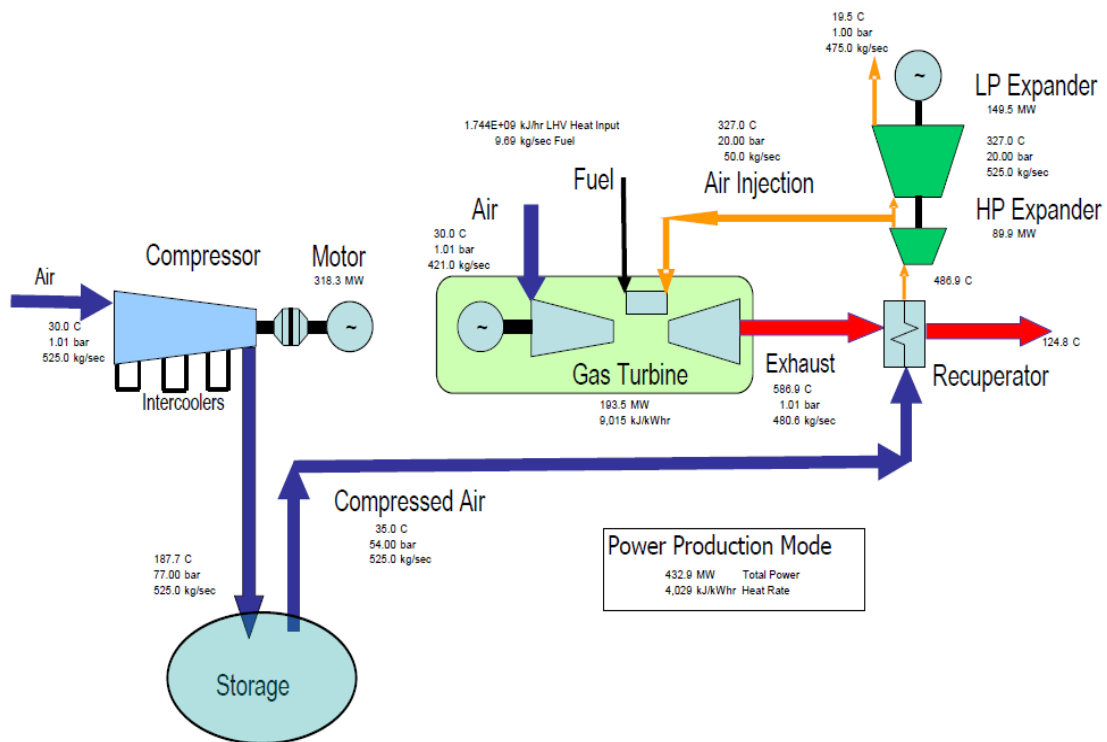
3.3.3.8 CAES με αεριοστροβλική μονάδα και ανεξάρτητο στρόβιλο αέρος υψηλής και χαμηλής πίεσης - έγχυση αέρα (CAES – AI & HP-LP Expander)

Η υλοποίηση αυτή είναι παρόμοια με αυτή που περιγράφηκε στην υποπαράγραφο 3.3.3.7, με τη διαφορά ότι τον στρόβιλο υψηλής πίεσης τον διαδέχεται ένας στρόβιλος χαμηλής πίεσης [46]. Ο αέρας εξερχόμενος από την εγκατάσταση αποθήκευσης, διέρχεται από τον εναλλάκτη θερμότητας και εκτονώνεται στον στρόβιλο υψηλής πίεσης. Στην συνέχεια, ένα μέρος της ροής αέρα εισέρχεται στο θάλαμο καύσης και το υπόλοιπο εκτονώνεται στον στρόβιλο χαμηλής πίεσης.

Η μονάδα CAES – AI & HP-LP Expander συνδυάζει τα θετικά στοιχεία των υβριδικών συστημάτων CAES – AI & HP Expander και CAES – Expander, και απεικονίζεται στο Σχήμα 3.17. Συγκεκριμένα, προσφέρεται η δυνατότητα μεγάλης ροής αέρα, συγκριτικά με την μονάδα CAES – AI & HP Expander η οποία περιορίζεται από το γεγονός πως η εγχεόμενη ροή δεν μπορεί να υπερβεί ένα συγκεκριμένο ποσοστό της ονομαστικής ροής αέρα της αεριοστροβλικής μονάδας. Η αυξημένη ροή αέρα συνεπάγεται και μεγαλύτερη παραγόμενη ισχύ. Επίσης, η μεγαλύτερη ονομαστική ισχύς συγκριτικά με τη μονάδα CAES – Expander αποδίδεται στην απομάστευση αέρα. Συγκεκριμένα, το μέρος της ροής αέρα που θα εισέλθει στο θάλαμο καύσης θα αναμιχθεί με καύσιμο, με αποτέλεσμα η ενθαλπία του να αυξηθεί. Δηλαδή, η ροή αέρα που εγχέεται στο θάλαμο καύσης παράγει μεγαλύτερη ισχύ από την ίδια ροή αν εκτονωθεί στο στρόβιλο χαμηλής πίεσης [25].

Συνοψίζοντας, η συνολική ροή αέρα που εξέρχεται από την αποθηκευτική διάταξη είναι η μεγαλύτερη δυνατή, και εκτονώνεται στο στρόβιλο υψηλής πίεσης. Στη συνέχεια, η μεγαλύτερη ροή που επιτρέπεται εγχέεται στο θάλαμο καύσης, και το υπόλοιπο μέρος εκτονώνεται στο στρόβιλο χαμηλής πίεσης. Παρατηρούμε δηλαδή ότι, η εφαρμογή αυτή

οδηγεί στη βελτιστοποίηση των χρησιμοποιούμενων διατάξεων και στην παραγωγή μεγάλης ποσότητας ισχύος με μικρό λειτουργικό κόστος.



Σχήμα 3.17 : CAES – AI & HP-LP Expander

Στον Πίνακα 3.4 συνοψίζονται τα ονομαστικά στοιχεία της αεριοστροβλικής μονάδας τύπου GE7241-FA και της μονάδας CAES – AI & HP-LP Expander, με αεριοστρόβιλο ίδιου τύπου [46]:

Πίνακας 3.4 : Ονομαστικά στοιχεία μονάδας CAES – AI & HP-LP Expander και συμβατικού αεριοστρόβιλου

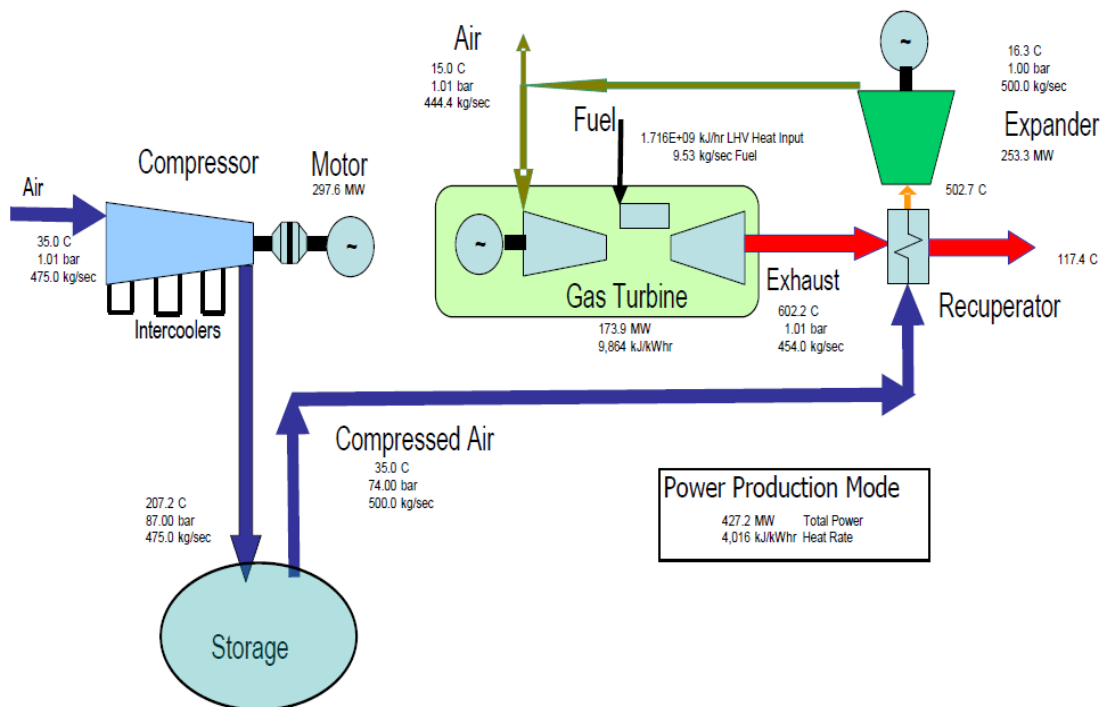
| Χαρακτηριστικό | CAES – AI & HP-LP Expander με αεριοστροβλική μονάδα τύπου GE7241-FA | Αεριοστρόβιλος τύπου GE7241-FA (σε θερμοκρασία περιβάλλοντος 35 °C) |
|---|---|---|
| Μέγιστη ισχύς αεριοστρόβιλου (MW) | 159,8 | 160 |
| Μέγιστη ισχύς CAES (MW) | 273,1 | - |
| Μέγιστη συνολική ισχύς (MW) | 432,9 | 160 |
| Συνολική ειδική κατανάλωση θερμότητας (Btu/kWh) | 3819 | 10600 |
| Μέγιστη καταναλισκόμενη ισχύς συμπιεστή (MW) | 318,3 | - |

3.3.3.9 CAES με αεριοστροβιλική μονάδα και ανεξάρτητο στρόβιλο αέρος – ψύξη εισόδου (CAES – IC & Expander)

Η συγκεκριμένη υλοποίηση είναι παρόμοια με τη μονάδα CAES – AI & HP Expander στο Σχήμα 3.16, με τη διαφορά ότι ο αέρας από την έξοδο του στροβίλου δεν εγγέεται στο θάλαμο καύσης αλλά εισέρχεται στο συμβατικό συμπιεστή του αεριοστροβίλου.

Είναι γνωστό ότι όσο χαμηλότερη είναι η θερμοκρασία περιβάλλοντος τόσο υψηλότερη είναι η απόδοση του συμπιεστή, δεδομένου ότι μειώνεται το καταναλισκόμενο έργο. Κατά συνέπεια, σε περιόδους όπου η θερμοκρασία περιβάλλοντος είναι υψηλή, το έργο του συμπιεστή είναι μεγάλο και επομένως η μέγιστη παραγόμενη ισχύς της αεριοστροβιλικής μονάδας είναι μειωμένη. Σκοπός λοιπόν της εφαρμογής αυτής είναι η μείωση της θερμοκρασίας εισόδου (ψύξη εισόδου - Inlet Chilling) του συμβατικού συμπιεστή, με τη χρήση της μονάδας CAES – IC & Expander που απεικονίζεται στο Σχήμα 3.18 [46].

Ο αποθηκευμένος αέρας αφού προθερμανθεί στον εναλλάκτη θερμότητας εκτονώνεται στον στρόβιλο, και εξέρχεται σε θερμοκρασία μικρότερη από αυτή του περιβάλλοντος. Το γεγονός αυτό επιτυγχάνεται με την κατάλληλη διαστασιολόγηση του στροβίλου όσον αφορά το λόγο πίεσης, καθώς όσο μεγαλύτερος είναι ο λόγος εκτόνωσης τόσο χαμηλότερη είναι η θερμοκρασία εξόδου [2]. Μετά την εκτόνωση, ο αέρας χαμηλής θερμοκρασίας εισέρχεται στην είσοδο του συμβατικού συμπιεστή. Ο υπόλοιπος κύκλος λειτουργίας της μονάδας CAES – IC & Expander είναι γνωστός, καθώς είναι ίδιος με αυτόν που αναφέρεται στο σύστημα CAES – AI & HP Expander.



Σχήμα 3.18 : CAES – IC & Expander

Στον Πίνακα 3.5 συνοψίζονται για λόγους σύγκρισης τα ονομαστικά στοιχεία της αεριοστροβιλικής μονάδας τύπου GE7241-FA και της μονάδας CAES – IC & Expander με αεριοστρόβιλο ίδιου τύπου [46].

Πίνακας 3.5 : Ονομαστικά στοιχεία μονάδας CAES – IC & Expander και συμβατικού αεριοστρόβιλου

| Χαρακτηριστικό | CAES – IC & Expander με αεριοστροβιλική μονάδα τύπου GE7241-FA | Αεριοστρόβιλος τύπου GE7241-FA (σε θερμοκρασία περιβάλλοντος 35 °C) |
|---|--|---|
| Μέγιστη ισχύς αεριοστρόβιλου (MW) | 159,8 | 160 |
| Μέγιστη ισχύς CAES (MW) | 267,4 | - |
| Μέγιστη συνολική ισχύς (MW) | 427,2 | 160 |
| Συνολική ειδική κατανάλωση θερμότητας (Btu/kWh) | 3811 | 10600 |
| Μέγιστη καταναλισκόμενη ισχύς συμπίεστη (MW) | 297,6 | - |

3.3.4 Συστήματα CAES τρίτης γενιάς

Οι μονάδες CAES τρίτης γενιάς είναι τα πιο σύγχρονα συστήματα. Λόγω της πολυπλοκότητάς τους, του υψηλού κόστους και διάφορων τεχνικών ζητημάτων, η παραγωγή των συστημάτων αυτών βρίσκεται ακόμα σε πρώιμο στάδιο. Όπως έχει αναφερθεί, μόνο δύο μονάδες CAES έχουν ενταχθεί στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, στο Huntorf και στο McIntosh, συστήματα που ανήκουν στην πρώτη γενιά. Τα συστήματα δεύτερης γενιάς, παρότι δεν έχουν ενταχθεί ακόμα στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, υπάρχουν κατασκευάστριες εταιρείες (Dresser-Rand, Alstom) που έχουν ξεκινήσει την μαζική παραγωγή τους. Αντίθετα, τα συστήματα 3^{ης} γενιάς βρίσκονται ακόμα σε ερευνητικό στάδιο, με ελάχιστα από αυτά να κυκλοφορούν στην αγορά.

Στις μονάδες 3^{ης} γενιάς υπάγεται το αδιαβατικό σύστημα CAES ή αλλιώς Adiabatic CAES. Η βασική διαφορά συγκριτικά με τα συστήματα της 1^{ης} και 2^{ης} γενιάς είναι η απαλλαγή από την ανάγκη για καύσιμο ή για εξωτερική πηγή θερμότητας (αεριοστρόβιλος με εναλλάκτη). Κατά τη λειτουργία της συμπίεσης του αέρα στην εγκατάσταση αποθήκευσης παράγεται θερμότητα, η οποία αντί να απορριφθεί με τη χρήση ενδιάμεσων (intercoolers) και τελικών (aftercoolers) ψυκτών, αποθηκεύεται σε κατάλληλη διάταξη (Thermal Energy Storage - TES) όπως ηφαιστειακές πέτρες, δεξαμενές λαδιού ή σε υλικά αλλαγής φάσεως [42]. Κατά τη λειτουργία της εκτόνωσης, ο πεπιεσμένος αέρας πριν εισέλθει στο στρόβιλο διέρχεται από τη δεξαμενή θερμότητας όπου και προθερμαίνεται. Η απόδοση των συστημάτων αυτών είναι μεταξύ 60% και 75%, ανάλογα με την τεχνολογία αποθήκευσης της θερμότητας.

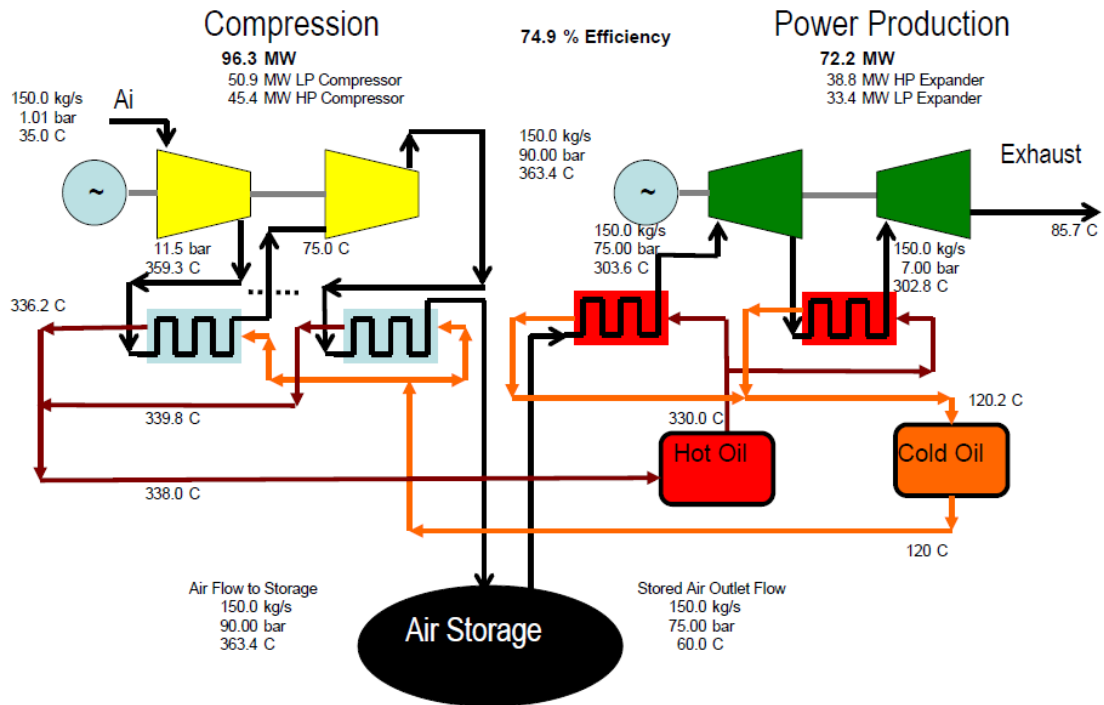
Οι βασικές συνιστώσες ενός συστήματος Adiabatic CAES είναι [46]:

- Συστοιχίες συμπίεστων για τη συμπίεση του αέρα.
- Ένας ενδιάμεσος και ένας τελικός ψύκτης για την προσαρμογή της θερμοκρασίας του αέρα. Σημειώνεται ότι η θερμότητα που απορρίπτεται λόγω των ψυκτών είναι αρκετά μικρή συγκριτικά με αυτή που αποθηκεύεται. Η χρήση τους είναι απαραίτητη για τη βέλτιστη λειτουργία του συστήματος.
- Η διάταξη αποθήκευσης της θερμότητας (συνήθως δεξαμενή λαδιού).
- Το μέσο μεταφοράς της θερμότητας (συνήθως διαθερμικό λάδι).
- Εναλλάκτες θερμότητας, οι οποίοι έχουν ως είσοδο το θερμό ρεύμα αέρα του συμπίεστη και τη ροή του ψυχρού διαθερμικού λαδιού. Έτσι ο θερμός αέρας, μέσω

του εναλλάκτη, αποδίδει τη θερμότητα στο ψυχρό λάδι. Συνεπώς στην έξοδο του εναλλάκτη, ο αέρας έχει ψυχθεί και το λάδι έχει θερμανθεί. Ο αέρας λοιπόν αποθηκεύεται στο αεροφυλάκιο και το λάδι στη θερμή δεξαμενή λαδιού.

- Εναλλάκτες θερμότητας, οι οποίοι έχουν ως είσοδο το ψυχρό ρεύμα αέρα του στρόβιλου από το αεροφυλάκιο, και τη ροή του θερμού διαθερμικού λαδιού. Έτσι ο ψυχρός αέρας, μέσω του εναλλάκτη, απορροφά τη θερμότητα του θερμού λαδιού. Συνεπώς στην έξοδο του εναλλάκτη, ο αέρας έχει θερμανθεί και το λάδι έχει ψυχθεί. Ο αέρας λοιπόν εκτονώνεται στο στρόβιλο και το λάδι αποθηκεύεται στη ψυχρή δεξαμενή λαδιού.
- Συστοιχία στρόβιλων για την παραγωγή ισχύος.
- Ένας ή περισσότεροι ηλεκτρικοί κινητήρες και μία ηλεκτρική γεννήτρια.

Μια τυπική μονάδα Adiabatic CAES με τις παραπάνω συνιστώσες απεικονίζεται στο Σχήμα 3.19, όπου φαίνονται κάποια λειτουργικά χαρακτηριστικά.



Σχήμα 3.19 : Adiabatic CAES

Στον Πίνακα 3.6 συνοψίζονται τα βασικά λειτουργικά στοιχεία της μονάδας του Σχήματος 3.19.

Πίνακας 3.6 : Ονομαστικά στοιχεία μονάδας Adiabatic CAES

| Χαρακτηριστικό | Adiabatic CAES |
|--|----------------|
| Μέγιστη ισχύς CAES (MW) | 72,2 |
| Ειδική κατανάλωση θερμότητας (Btu/kWh) | 0 |
| Μέγιστη καταναλισκόμενη ισχύς συμπιεστή (MW) | 96,3 |

Η βασική προϋπόθεση για να ενταχθούν οι μονάδες αυτές στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι ότι το κόστος σχεδίασης και κατασκευής της διάταξης αποθήκευσης της θερμότητας (TES) πρέπει να αντισταθμίζεται από το οικονομικό όφελος της αποδέσμευσης από τα καύσιμα. Διάφορες μελέτες έχουν δείξει ότι η χρήση των συστημάτων αυτών δικαιολογείται μόνο όταν το κόστος αγοράς του καυσίμου είναι πολύ υψηλό, καθιστώντας τις μονάδες Adiabatic CAES αρκετά ακριβές για εμπορική εκμετάλλευση στην παρούσα φάση [41]. Ωστόσο, οι πιο πρόσφατες μελέτες αναφέρουν ότι με τη διαρκή βελτίωση της τεχνολογίας των διατάξεων TES και του βαθμού απόδοσης συμπιεστών και στροβίλων, καθώς και λόγω των αυξανόμενων προστίμων για τις εκπομπές αέριων ρύπων (Πρωτόκολλο Κιότο) [47], οι μονάδες Adiabatic CAES δύναται να καταστούν οικονομικά βιώσιμες. Ήδη βρίσκεται στο σχεδιασμό ένα σύστημα Adiabatic CAES με σημαντικές προοπτικές επιτυχίας [23]. Τα συστήματα αυτά αναμένεται να εισέλθουν μαζικά στην αγορά στο διάστημα 2015-2020 [37].

Όπως αναφέρθηκε, υπάρχουν κάποια τεχνικά ζητήματα που πρέπει να διευθετηθούν προκειμένου να αυξηθεί η αξιοπιστία και η απόδοση των συστημάτων αυτών, και να μειωθεί το ρίσκο της επένδυσης, πριν ξεκινήσει η μαζική παραγωγή τους. Η τεχνολογία των συμπιεστών πρέπει να βελτιωθεί ώστε να μπορούν να λειτουργούν σε μεταβαλλόμενες πιέσεις και θερμοκρασίες, με μεγάλο βαθμό απόδοσης. Για τους στροβίλους δεν τίθεται κάποιο τεχνικό θέμα, δεδομένου ότι η τεχνολογία που χρησιμοποιείται είναι αυτή των στροβίλων ατμού, οι οποίοι λειτουργούν σε μεταβλητή πίεση και ροή μάζας αέρα. Ωστόσο, ο βαθμός απόδοσης των στροβίλων πρέπει να βελτιωθεί, καθότι σε μερικό φορτίο οι απώλειές τους με τη σημερινή τεχνολογία είναι υψηλές [37]. Η μεγαλύτερη πρόκληση είναι η κατασκευή διάταξης TES με μεγάλη αποθηκευτική ικανότητα (άνω της 1 GWh θερμικής ενέργειας), με μεγάλο ρυθμό απόδοσης θερμότητας στο εργαζόμενο μέσο (άνω του 1 GW θερμικής ισχύος), με ελάχιστες απώλειες θερμότητας, με αντοχή σε μεγάλες πιέσεις, και με μεγάλο εύρος θερμοκρασιών λειτουργίας. Τα σημερινά όρια για την πίεση είναι 200 bar και για τη θερμοκρασία είναι 620 °C. Αφού επιλυθούν τα παραπάνω ζητήματα, τα συστήματα Adiabatic CAES θα είναι μία εφικτή επιλογή στο μέλλον για την αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας.

Τέλος, στην 3^η γενιά των μονάδων CAES ανήκει και το ισόθερμο σύστημα CAES ή αλλιώς Isothermal CAES [24]. Στην υλοποίηση αυτή δεν χρησιμοποιείται καύσιμο ούτε χρειάζεται κάποια εξωτερική πηγή θερμότητας, σε αντίθεση με τα συστήματα 1^{ης} γενιάς όπου το καύσιμο ή ο εναλλάκτης σε συνδυασμό με την αεριοστροβιλική μονάδα είναι απαραίτητα στοιχεία για την διατήρηση των θερμοκρασιών σε επιτρεπτά επίπεδα. Επίσης το Isothermal CAES είναι διαφορετικό από το Adiabatic CAES, δεδομένου ότι στην υλοποίηση αυτή η θερμότητα δεν αποθηκεύεται. Συγκεκριμένα, η συμπίεση και η εκτόνωση του αέρα είναι ισόθερμες διαδικασίες. Κατά τη συμπίεση του αέρα, η εκλυόμενη θερμότητα αποδίδεται στο περιβάλλον, και ο αέρας αποθηκεύεται σε κατάλληλα διαμορφωμένο αεροφυλάκιο. Κατά την εκτόνωση του αέρα, λαμβάνεται θερμότητα από το περιβάλλον, με αποτέλεσμα ο αέρας να διατηρείται πλησίον της θερμοκρασίας περιβάλλοντος. Συνεπώς, το περιβάλλον δρα ως μία εξωτερική πηγή θερμότητας κατά την εκτόνωση του αέρα. Η μονάδα Isothermal CAES είναι το πιο αποδοτικό σύστημα CAES. Η λειτουργία της απαιτεί αργή συμπίεση και εκτόνωση του αέρα. Για το λόγο αυτό δεν μπορεί να εφαρμοστεί σε μεγάλης κλίμακας εφαρμογές.

Η κατασκευάστρια εταιρεία SustainX αναπτύσσει ένα τέτοιο σύστημα με ισόθερμες μεταβολές του αέρα, και απεικονίζεται στο Σχήμα 3.20. Το συγκεκριμένο μοντέλο δεν χρησιμοποιεί καύσιμο και λειτουργεί σε πιέσεις από 0 έως 200 bar. Σύμφωνα με τα τεχνικά χαρακτηριστικά του κατασκευαστή, το Isothermal CAES λειτουργεί σε κλίμακα ισχύος kW, έχει διάρκεια ζωής τουλάχιστον 15000 κύκλους λειτουργίας, και ο αναμενόμενος βαθμός

απόδοσης είναι περίπου 70%. Η αποθήκευση του αέρα γίνεται σε υπέργειες εγκαταστάσεις, χρησιμοποιώντας σωλήνες μεγάλης αντοχής.



Σχήμα 3.20 : Isothermal CAES

3.3.5 Σύγκριση διαφορετικών υλοποιήσεων συστημάτων CAES

Στην παράγραφο αυτή συγκρίνονται ως προς το κόστος και τα λειτουργικά χαρακτηριστικά, κάποιες από τις μονάδες CAES που αναφέρθηκαν στις προηγούμενες παραγράφους. Συγκεκριμένα, στον Πίνακα 3.7 παρουσιάζονται τα στοιχεία που αφορούν την μέγιστη παραγόμενη ισχύ της κάθε μονάδας (MW), την ονομαστική ισχύ του συμπιεστή (MW), την ειδική κατανάλωση θερμότητας (Btu/kWh), τον όγκο της αποθηκευτικής διάταξης του αέρα (σε ανά μονάδα τιμή ως προς τον αποθηκευτικό όγκο του αέρα της μονάδας στο McIntosh), το λόγο αποθηκευόμενης προς παραγόμενης ενέργειας, και το ειδικό κόστος εγκατάστασης (\$/kW) [31]. Σημειώνεται ότι τα δεδομένα που παρατίθενται στον Πίνακα 3.7 είναι θεωρητικά υπολογισμένα σύμφωνα με τα αντίστοιχα των υπάρχοντων μονάδων CAES (Hunterf, McIntosh), καθώς και ότι η αεριοστροβιλική μονάδα που εμπεριέχεται σε κάποια από τα συστήματα είναι τύπου GE7241-FA. Οι μονάδες CAES που συγκρίνονται είναι οι εξής :

- CAES 1^{ης} γενιάς (με ανακομιστή θερμότητας)
- CAES –AI
- CAES – Expander
- CAES – AI & HP Expander
- CAES – AI & HP-LP Expander
- CAES – IC & Expander
- Adiabatic CAES

Παρατηρούμε ότι οι μονάδες CAES - Expander, CAES – IC & Expander, CAES – AI & HP-LP Expander έχουν τη μεγαλύτερη ονομαστική ισχύ συγκριτικά με τις υπόλοιπες. Αυτό οφείλεται στο γεγονός πως υπάρχει η δυνατότητα για αυξημένη ροή αέρα. Επίσης, όπως φαίνεται από την πρώτη και δεύτερη γραμμή του Πίνακα 3.7, όσο μεγαλύτερη είναι η ονομαστική ισχύς της κάθε μονάδας τόσο μεγαλύτερη είναι η ονομαστική ισχύς των συμπιεστών. Αυτό οφείλεται στο ότι η μεγάλη παραγόμενη ισχύς συνεπάγεται και μεγάλη ροή αέρα που εξέρχεται από το αεροφυλάκιο. Κατά συνέπεια, για να διατηρείται η πίεση του αεροφυλακίου στα επιτρεπτά όρια, πρέπει να υπάρχει ένας ανάλογης ισχύος συμπιεστής που να αναπληρώνει τη μάζα αέρα που εγκαταλείπει το αεροφυλάκιο.

Όσον αφορά την ειδική κατανάλωση θερμότητας, παρατηρούμε ότι οι μονάδες CAES-AI και CAES – AI & HP Expander εμφανίζουν τη μεγαλύτερη τιμή. Αυτό εξηγείται από το

γεγονός πως η ροή αέρα που εξέρχεται από το αεροφυλάκιο και εγχέεται στο θάλαμο καύσης της αεριοστροβλικής μονάδας θα αναμιχθεί με καύσιμο για την παραγωγή ισχύος. Συμπερασματικά, αυξημένη ροή αέρα συνεπάγεται και αυξημένη κατανάλωση καυσίμου. Χαρακτηριστική είναι η μηδενική ειδική κατανάλωση θερμότητας στο σύστημα Adiabatic CAES, δεδομένου ότι δεν χρησιμοποιείται καύσιμο καθόλου για την παραγωγή ισχύος.

Στην 4^η γραμμή του Πίνακα 3.7 εμφανίζεται ο σχετικός όγκος του αεροφυλακίου, με όγκο αναφοράς αυτόν της μονάδας CAES στο McIntosh. Τη μεγαλύτερη τιμή την εμφανίζουν τα συστήματα Adiabatic CAES και CAES – AI & HP-LP Expander. Το σύστημα Adiabatic CAES απαιτεί μεγάλο όγκο αποθήκης αέρα, δεδομένου ότι η συμπίεση είναι μια αδιαβατική διαδικασία. Συγκεκριμένα, η θερμοκρασία του αέρα πριν την είσοδό του στην εγκατάσταση αποθήκευσης είναι μεγαλύτερη από αυτή του περιβάλλοντος. Κατά συνέπεια, ο αέρας που συσσωρεύεται στο αεροφυλάκιο είναι μεγαλύτερης θερμοκρασίας συγκριτικά με τα υπόλοιπα συστήματα CAES που μελετώνται. Επομένως, για συγκεκριμένη ικανότητα αποθήκευσης (kg αέρα) και για δεδομένη πίεση, ο όγκος του αεροφυλακίου πρέπει να είναι μεγαλύτερος. Τέλος, το σύστημα CAES – AI & HP-LP Expander απαιτεί μεγάλο όγκο αποθήκευσης του αέρα, δεδομένου ότι έχει τη μεγαλύτερη ονομαστική ισχύ και κατ' επέκταση τη μεγαλύτερη ονομαστική ροή αέρα.

Στην 5^η γραμμή του Πίνακα 3.7 φαίνεται ο λόγος της καταναλισκόμενης ενέργειας του συμπιεστή προς την παραγόμενη ενέργεια της κάθε μονάδας. Στην ουσία είναι ένας δείκτης απόδοσης του κάθε συστήματος, εκφράζοντας την ενέργεια που απορροφά και αποθηκεύει ο συμπιεστής από το ηλεκτρικό δίκτυο για την παραγωγή μίας kWh ηλεκτρικής ενέργειας. Ο λόγος αυτός είναι μικρότερος της μονάδας σε όλες τις εφαρμογές CAES εκτός του αδιαβατικού συστήματος, δεδομένου ότι κατά την παραγωγή ενέργειας καταναλώνεται και καύσιμο. Αντίθετα, στη μονάδα Adiabatic CAES όπου δεν χρησιμοποιείται καύσιμο, ο λόγος αυτός είναι προφανώς άνω της μονάδας. Σημειώνεται ότι ο δείκτης αυτός δεν περιλαμβάνει την επιπλέον ενέργεια (χημικής μορφής) που προσφέρεται από τη χρήση του καυσίμου.

Πίνακας 3.7 : Συγκριτικά στοιχεία διαφορετικών μονάδων CAES

| Χαρακτηριστικό | CAES 1ης γενιάς | CAES-AI | CAES – AI & HP Expander | CAES – AI & HP-LP Expander | CAES-Expander | CAES – IC & Expander | Adiabatic CAES |
|---|-----------------|---------|-------------------------|----------------------------|---------------|----------------------|----------------|
| Μέγιστη ισχύς CAES (MW) | 110 | 193 | 202 | 433 | 400 | 427 | 72 |
| Μέγιστη καταναλισκόμενη ισχύς συμπιεστή (MW) | 81 | 29 | 30 | 318 | 288 | 300 | 96 |
| Συνολική ειδική κατανάλωση θερμότητας (Btu/kWh) | 3967 | 8394 | 8182 | 3819 | 3696 | 3809 | 0 |
| Σχετικός όγκος αποθήκης αέρα | 1 | 1,08 | 0,85 | 1,4 | 1,35 | 1,35 | 1,5 |
| Αποθηκευόμενη Ενέργεια / Παραγόμενη Ενέργεια | 0,8 | 0,85 | 0,69 | 0,73 | 0,69 | 0,7 | 1,3 |
| Ειδικό κόστος εγκατάστασης (\$/kW) | 727 | 327 | 403 | 506 | 507 | 482 | 1000 |

Τέλος, στη τελευταία γραμμή του Πίνακα 3.7 εμφανίζονται τα τυπικά κόστη κατασκευής της κάθε μονάδας (\$/kW). Το μεγαλύτερο κόστος εμφανίζεται για το σύστημα

Adiabatic CAES, καθώς όπως έχει αναφερθεί η τεχνολογία των συστημάτων αυτών βρίσκεται ακόμα σε πρώιμο στάδιο και δεν έχει ξεκινήσει η μαζική παραγωγή τους. Το μικρότερο κόστος σημειώνεται για τη μονάδα CAES – AI, δεδομένου ότι η υλοποίηση αυτή αναφέρεται στην τροποποίηση μιας συμβατικής αεριοστροβλικής μονάδας, χωρίς πολλές απαιτήσεις για επιπλέον εξοπλισμό. Δηλαδή, οι μονάδες CAES – AI & HP Expander, CAES – AI & HP-LP Expander, CAES-Expander και CAES – IC & Expander περιλαμβάνουν ανεξάρτητο στρόβιλο αέρος που συνεπάγεται επιπλέον κόστος, καθώς και μεγάλη εγκατάσταση αποθήκευσης του αέρα.

Στον Πίνακα 3.8 παρουσιάζεται η διάρθρωση του κόστους εγκατάστασης της κάθε μονάδας CAES σε εκατομμύρια \$ [46], δεδομένων των χαρακτηριστικών που εμφανίστηκαν στον Πίνακα 3.7.

Πίνακας 3.8 : Διάρθρωση του κόστους εγκατάστασης των μονάδων CAES (σε εκατομμύρια \$)

| | CAES 1ης γενιάς | CAES- AI | CAES – AI & HP Expander | CAES – AI & HP-LP Expander | CAES- Expander | CAES – IC & Expander | Adiabatic CAES |
|---|----------------------------|-------------|-------------------------------|----------------------------------|-------------------|----------------------------|-------------------|
| Εγκατεστημένη Ισχύς (MW) | 110 | 193 | 202 | 433 | 400 | 427 | 72 |
| ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ | Κόστος (σε εκατομμύρια \$) | | | | | | |
| Αεριοστροβλική μονάδα | - | 38 | 38 | 38 | 38 | 38 | - |
| Συμπιεστής | 9 | 3,2 | 3,4 | 23 | 21 | 22 | 9 |
| Εναλλάκτες θερμότητας | 3,5 | 1,7 | 2,4 | 14 | 13 | 14 | 10,5 |
| Στρόβιλος Υψηλής Πίεσης | 6,4 | - | 2,4 | 16 | 35 | 35 | 8 |
| Στρόβιλος Χαμηλής Πίεσης | 14,9 | - | - | 24 | - | - | 7 |
| Υπόλοιπος εξοπλισμός | 4,7 | 4,2 | 4,3 | 7,5 | 6,5 | 6,5 | 4,2 |
| Συνολικό κόστος εξοπλισμού | 38,5 | 47,1 | 50,5 | 122,5 | 113,5 | 115,5 | 38,7 |
| ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ | Κόστος (σε εκατομμύρια \$) | | | | | | |
| Υλικά | 7 | 1,9 | 2 | 9,2 | 8,5 | 8,6 | 3,1 |
| Εργατικά | 16 | 14 | 14,6 | 39,3 | 36 | 36,4 | 14,7 |
| Εγκατάσταση αποθήκευσης του αέρα | 8 | 3 | 3 | 19 | 18 | 18 | 6 |
| Έμμεσα κόστη | 10,5 | 10,7 | 11,4 | 29 | 26,8 | 27,3 | 9,6 |
| Συνολικό κόστος κατασκευής | 41,5 | 29,6 | 31 | 96,5 | 89,3 | 90,3 | 33,4 |
| Συνολικό κόστος εγκατάστασης | 80 | 76,7 | 81,5 | 219 | 202,8 | 205,8 | 72,1 |

3.4 Εγκαταστάσεις αποθήκευσης του πεπιεσμένου αέρα

Στην ενότητα αυτή αναφέρονται οι διάφορες εγκαταστάσεις για την αποθήκευση του πεπιεσμένου αέρα. Υπάρχουν δύο δυνατότητες ως προς τον τρόπο αποθήκευσης: σε υπέργειες ή σε υπόγειες εγκαταστάσεις [24]. Οι υπόγεια αποθήκευση είναι κατάλληλη για

μονάδες CAES μεγάλης κλίμακας (άνω των 100 kW), ενώ αντίθετα η αποθήκευση σε υπέργειες εγκαταστάσεις συνίσταται για μονάδες μικρής κλίμακας (της τάξης των 10 kW).

3.4.1 Υπέργεια συστήματα αποθήκευσης του πεπιεσμένου αέρα

Στα υπέργεια συστήματα ο αέρας αποθηκεύεται σε κατάλληλους σωλήνες υψηλής αντοχής, όπως αυτοί που απεικονίζονται στο Σχήμα 3.21, παρόμοιους με τους σωλήνες που χρησιμοποιούνται έως και σήμερα για την αποθήκευση του φυσικού αερίου.



Σχήμα 3.21 : Σωλήνες υψηλής πίεσης για την αποθήκευση του αέρα

Το κόστος εγκατάστασης των υπέργειων συστημάτων αποθήκευσης του αέρα είναι αρκετά υψηλό, δεδομένου ότι χρειάζονται πολλοί σωλήνες με μεγάλο όγκο και αντοχή για την κάλυψη των αναγκών αποθήκευσης. Για τον περιορισμό του κόστους, τα υπέργεια συστήματα που κατασκευάζονται έχουν μικρή αποθηκευτική ικανότητα με μέγιστο χρόνο 2-4 ώρες ονομαστικής ροής εκφόρτισης. Η πίεση που επικρατεί στους σωλήνες εξαρτάται από τις απαιτήσεις του στροβίλου ως προς το λόγο πίεσης. Οι τυπικές μονάδες CAES έχουν μέγιστη πίεση λειτουργίας τα 70 bar. Σε περιπτώσεις όπου η ονομαστική πίεση του στροβίλου είναι κάτω από τα 30 bar, τότε μπορούν να χρησιμοποιηθούν συμβατικές δεξαμενές αποθήκευσης προπανίου, μειώνοντας σημαντικά το κόστος αποθήκευσης.

Τα υπέργεια συστήματα αποθήκευσης του πεπιεσμένου αέρα έχουν το πλεονέκτημα ότι μπορούν να εγκατασταθούν σε διάφορες τοποθεσίες, σε αντίθεση με τις υπόγειες εγκαταστάσεις που απαιτούν συγκεκριμένη γεωλογική διαμόρφωση του υπεδάφους [31]. Το κόστος των συστημάτων αυτών υπολογίζεται ότι είναι 5 φορές μεγαλύτερο από το κόστος αποθήκευσης του αέρα σε υπόγειες εγκαταστάσεις όπως σπήλαια άλατος και υπόγεια υδροφόρα στρώματα.

3.4.2 Υπόγεια συστήματα αποθήκευσης του πεπιεσμένου αέρα

Τα υπόγεια συστήματα αποθήκευσης του αέρα αναφέρονται σε συγκεκριμένους γεωλογικούς σχηματισμούς κάτω από το έδαφος, που προέκυψαν είτε με φυσικό είτε με τεχνητό τρόπο, με δυνατότητα συγκράτησης μεγάλων ποσοτήτων αέρα [42]. Τα είδη στα οποία διακρίνονται είναι τα εξής :

- Σπήλαια άλατος που δημιουργούνται από την εξόρυξη αλατιού, με τη χρήση εκσκαφών ή με τη χρήση νερού
- Υπόγεια βραχώδη σπήλαια, τα οποία είτε υπάρχουν ήδη λόγω της εξόρυξης πέτρας στο παρελθόν για βιομηχανικές ανάγκες (χαλίκι, τσιμέντο), είτε κατασκευάζονται από την αρχή καθαρά για χρήση αποθήκευσης του πεπιεσμένου αέρα
- Πορώδεις σχηματισμοί πετρωμάτων (αμμόλιθος, ασβεστόλιθος), όπως υπόγεια υδροφόρα στρώματα, εξαντλημένες πηγές φυσικού αερίου ή κοιτάσματα πετρελαίου
- Εγκαταλελειμμένα ανθρακωρυχεία ή σπήλαια αποθήκευσης φυσικού αερίου

Τα σπήλαια άλατος, όπως αναφέρθηκε, δημιουργούνται με δύο τρόπους. Στην πρώτη περίπτωση το στέρεο αλάτι που βρίσκεται κάτω από το έδαφος εξορύσσεται μέσω εκσκαφέα, ο οποίος θρυμματίζει τη μάζα του αλατιού και την ανασύρει στην επιφάνεια. Η λειτουργία αυτή είναι παρόμοια με τον τρόπο εξόρυξης άνθρακα στα αντίστοιχα ορυχεία. Στην περίπτωση της εξόρυξης αλατιού με τη χρήση νερού, δημιουργείται με τεχνητό τρόπο ένα πηγάδι, στο άκρο του οποίου βρίσκεται ένα υπόγειο στρώμα άλατος. Ανά τακτά χρονικά διαστήματα μέσω του πηγαδιού, εγχέεται νερό στο στρώμα άλατος. Το στέρεο αλάτι με την πάροδο του χρόνου διαλύεται στο νερό, και μόλις επέλθει κορεσμός, το μίγμα νερό-αλάτι αντλείται στην επιφάνεια. Ως κορεσμός ορίζεται η κατάσταση όπου έχει διαλυθεί η μέγιστη δυνατή ποσότητα άλατος. Επαναλαμβάνοντας τη συγκεκριμένη διαδικασία της έγχυσης-άντλησης για αρκετές φορές, επιτυγχάνεται η τεχνητή δημιουργία κοιλότητας επιθυμητού όγκου και σχήματος [24]. Ο χρόνος που απαιτείται για να κατασκευαστεί ένα σπήλαιο άλατος με τον παραπάνω τρόπο είναι περίπου 1,5 με 2 χρόνια. Το μειονέκτημα της μεθόδου είναι η παραγωγή μεγάλων ποσοτήτων άλμης ως κατάλοιπο της διαδικασίας και οι ανάγκες για μεγάλη ποσότητα νερού σε συστηματική βάση.

Τα σπήλαια άλατος είναι μία από τις οικονομικότερες μεθόδους αποθήκευσης του πεπιεσμένου αέρα, υλοποιήσιμες σε σχετικά μικρό χρονικό διάστημα. Δεδομένης της εξόρυξης του άλατος με τη χρήση νερού, ο εξοπλισμός που απαιτείται είναι σημαντικά μικρότερος από τον αντίστοιχο για την κατασκευή ορυχείου (όπως απαιτείται στην πρώτη μέθοδο με τη χρήση εκσκαφέα ή στα βραχώδη σπήλαια). Επίσης, λόγω των ιδιοτήτων του αλατιού, τα σπήλαια αυτά προσφέρουν πολύ καλή μόνωση ελαχιστοποιώντας τη διαρροή του αποθηκευμένου αέρα. Το κόστος κατασκευής ενός σπηλαίου άλατος με τη χρήση νερού είναι περίπου 1\$/kWh ενώ με τη χρήση εκσκαφέα είναι 10\$/kWh [46].

Όσον αφορά τα όρια της πίεσης του σπηλαίου, το επιτρεπόμενο εύρος λειτουργίας είναι από 40 bar έως 100 bar [33]. Οι πιέσεις αυτές αναφέρονται στην κατασκευή σπηλαίου σε βάθος από 650 m έως 1100 m. Η ημερήσια διακύμανση της πίεσης δεν επιτρέπεται να υπερβαίνει τα 20 bar, για την εξασφάλιση της ακεραιότητας του σπηλαίου. Τέλος, όταν πρόκειται να κατασκευαστεί σπήλαιο άλατος με τη χρήση εκσκαφέα, πρέπει να μελετηθεί η απόσταση του σπηλαίου προς κατασκευή από άλλες υπόγειες κοιλότητες ή σπήλαια, καθώς οι μικρές αποστάσεις μεταξύ υπόγειων σπηλαίων δημιουργούν προβλήματα σταθερότητας των εγκαταστάσεων.

Τα υπόγεια βραχώδη σπήλαια είναι η ακριβότερη εγκατάσταση αποθήκευσης του πεπιεσμένου αέρα. Το κόστος διαμόρφωσης ενός ήδη υπάρχοντος σπηλαίου ανέρχεται σε 10\$/kWh [24], ενώ το κόστος κατασκευής ενός σπηλαίου εξολοκλήρου από την αρχή είναι προσεγγιστικά 30\$/kWh [46]. Η υψηλή τιμή που λαμβάνει το κόστος εγκατάστασης οφείλεται στα πολλές εργατοώρες και στον εξειδικευμένο εξοπλισμό που απαιτείται για την κατασκευή [35].

Η μείωση του κόστους μπορεί να επέλθει με την υδραυλική αντιστάθμιση της πίεσης του σπηλαίου, διατηρώντας την πίεση που επικρατεί σε αυτό σταθερή κατά τη λειτουργία της μονάδας CAES. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω ενός ταμιευτήρα νερού που βρίσκεται στην επιφάνεια, όπου μέσω ενός αγωγού συνδέεται το σπήλαιο με τη δεξαμενή νερού [42]. Κατ' αυτόν τον τρόπο, η πίεση που επικρατεί στο σπήλαιο ισούται με την υδροστατική πίεση του νερού στο βυθό του ταμιευτήρα, σε μόνιμη βάση. Έτσι, με την έγχυση αέρα στο σπήλαιο από τους συμπίεστες, αντί να αυξηθεί η πίεση, το ευρισκόμενο νερό στην κοιλότητα εκτοπίζεται προς την επιφάνεια διατηρώντας την πίεση του αποθηκευμένου αέρα σταθερή. Το αντίστροφο συμβαίνει σε περιόδους παραγωγής ενέργειας όπου εξέρχεται αέρας από το σπήλαιο. Με τη διατήρηση της πίεσεως σταθερής, ο απαιτούμενος αποθηκευτικός όγκος δύναται να ελαττωθεί κατά 5 φορές συγκριτικά με την περίπτωση δίχως υδραυλική αντιστάθμιση [35].

Τα εγκαταλελειμμένα σπήλαια αποθήκευσης του φυσικού αερίου είναι μία καλή επιλογή, δεδομένου ότι υπάρχουν ήδη και ότι η χρήση τους ήταν παρόμοια με αυτή που επιδιώκεται. Δηλαδή όσο καιρό ήταν ενεργά, χρησιμοποιούνταν για την αποθήκευση του φυσικού αερίου σε υψηλές πιέσεις. Ωστόσο, πριν την χρήση των σπηλαίων αυτών για την αποθήκευση του πεπιεσμένου αέρα μιας μονάδας CAES, πρέπει να ληφθεί υπόψιν το γεγονός πως η πίεση για εφαρμογές φυσικού αερίου μεταβαλλόταν με πολύ αργό ρυθμό σε μεγάλα χρονικά διαστήματα. Αντίθετα, η χρήση για εφαρμογές CAES συνεπάγεται μεγάλες διακυμάνσεις της πίεσης σε ημερήσια βάση. Συγκεκριμένα, τα σπήλαια που χρησιμοποιούνται για την αποθήκευση φυσικού αερίου συμπληρώνουν από 1 έως 20 κύκλους φόρτισης-εκφόρτισης σε ένα χρόνο, σε αντίθεση με τα σπήλαια αποθήκευσης πεπιεσμένου αέρα, όπου η λειτουργία των μονάδων CAES απαιτεί ημερήσιο κύκλο φόρτισης-εκφόρτισης του σπηλαίου (δηλαδή 365 κύκλους το χρόνο) [28]. Έτσι, πρέπει να εκπονηθεί μια προκαταρκτική μελέτη, ώστε να διαπιστωθεί αν το σπήλαιο που αναμένεται να χρησιμοποιηθεί μπορεί να αντέξει τις κυκλικές μεταβολές τις πίεσης και κατ' επέκταση των δυνάμεων που αναπτύσσονται στα τοιχώματά του, σε χρονικό ορίζοντα άνω των 50 ετών που εκτιμάται ο χρόνος ζωής της μονάδας CAES, με περισσότερους από 20000 κύκλους φόρτισης-εκφόρτισης [24], [28].

Οι πορώδεις σχηματισμοί πετρωμάτων είναι η οικονομικότερη μέθοδος αποθήκευσης του πεπιεσμένου αέρα, με κόστος περίπου 0,10\$/kWh [46]. Επιπλέον, οι μεγάλοι υδροφόροι ορίζοντες ευρίσκονται συνήθως σε περιοχές όπου υπάρχει καλό αιολικό δυναμικό. Τα παραπάνω συνεπάγονται πως η δυνατότητα αποθήκευσης του πεπιεσμένου αέρα σε γεωλογικούς σχηματισμούς του συγκεκριμένου είδους ευνοεί την κατασκευή μονάδων CAES σε τοποθεσίες πλησίον αιολικών πάρκων, με χαμηλό κόστος εγκατάστασης. Η ζώνη αποθήκευσης πρέπει να είναι αρκετά πορώδης ώστε να παρέχεται ο αναγκαίος όγκος αποθήκευσης και η επιθυμητή πίεση λειτουργίας, καθώς και να έχει μεγάλη διαπερατότητα ώστε να επιτυγχάνονται υψηλές τιμές ροής αέρα. Τέλος, πρέπει να εκπονηθεί μια προκαταρκτική μελέτη ώστε να εξεταστεί η μοριακή σύνθεση των πετρωδών σχηματισμών. Το παραπάνω γεγονός είναι απαραίτητο προκειμένου να εξεταστεί αν η αποθήκευση του αέρα στις γεωλογικές αυτές διαμορφώσεις επιφέρει αντιδράσεις οξειδωσης που θα αλλοιώσουν τη σύσταση του [42].

Κατά το σχεδιασμό της εγκατάστασης αποθήκευσης του αέρα μιας μονάδας CAES σε σπήλαιο, πρέπει να ληφθεί υπόψιν το γεγονός πως η θερμοκρασία που επικρατεί στο χώρο αποθήκευσης εξαρτάται από τη θερμική αγωγιμότητα των τοιχωμάτων του σπηλαίου [39]. Συγκεκριμένα, αν ο αέρας που περιέχεται στο σπήλαιο αποθήκευσης έχει μικρότερη θερμοκρασία από αυτήν που επικρατεί στα τοιχώματα, τότε μεταφέρεται θερμότητα από τα τοιχώματα του σπηλαίου προς τον αποθηκευμένο αέρα. Αντιθέτως, αν η θερμοκρασία του πεπιεσμένου αέρα είναι μεγαλύτερη των τοιχωμάτων, τότε μεταφέρεται θερμότητα από τον πεπιεσμένο αέρα στα τοιχώματα του σπηλαίου. Στην πρώτη περίπτωση ο αέρας θερμαίνεται, ενώ στη δεύτερη ο αέρας ψύχεται. Οι διακυμάνσεις της θερμοκρασίας του αέρα επηρεάζουν την αποθηκευτική ικανότητα της μονάδας. Συγκεκριμένα, για ορισμένη πίεση και όγκο του σπηλαίου, αυξημένη θερμοκρασία συνεπάγεται μικρότερη αποθηκευμένη μάζα αέρα, οδηγώντας σε λιγότερες ώρες αυτονομίας της μονάδας CAES. Η προκαταρκτική μελέτη λοιπόν της θερμικής αγωγιμότητας του σπηλαίου είναι βασικός παράγοντας για την ομαλή και αξιόπιστη λειτουργία του συστήματος CAES, καθώς έτσι θα οριστεί ο κατάλληλος όγκος για την εξασφάλιση των απαιτούμενων ωρών αυτονομίας. Το παραπάνω πρέπει να συνοδεύεται από την διαρκή επιδίωξη της εξίσωσης τη θερμοκρασίας του εισερχόμενου αέρα στο σπήλαιο με αυτή των τοιχωμάτων, μέσω κατάλληλων ψυκτών (aftercoolers), ώστε να ελαχιστοποιούνται οι διακυμάνσεις της θερμοκρασίας.

3.5 Υφιστάμενες και υπό κατασκευή μονάδες CAES

Στην ενότητα αυτή περιγράφονται τα συστήματα CAES τα οποία έχουν ολοκληρωθεί και έχουν ενταχθεί στην παραγωγή/αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς και οι μονάδες CAES των οποίων η κατασκευή βρίσκεται ακόμα σε εξέλιξη. Επίσης παρατίθενται τα συμπεράσματα από την κατασκευή και την έως τώρα λειτουργία των υπαρχόντων μονάδων CAES. Στην τελευταία παράγραφο περιγράφεται η αλληλεπίδραση των μονάδων CAES με την αγορά ηλεκτρικής ενέργειας.

Όπως έχει αναφερθεί, οι μόνες μονάδες αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας υπό μορφή πεπιεσμένου αέρα έως τώρα, είναι οι εγκαταστάσεις στο Huntorf της Γερμανίας και στο McIntosh, Alabama των Η.Π.Α. Υπό κατασκευή βρίσκονται οι μονάδες στο Dallas Center στην Iowa, στην περιοχή Norton του Ohio, και στην περιοχή Matagorda στο Texas.

3.5.1 Μονάδα CAES στο Huntorf (Γερμανία)

Η μονάδα στο Huntorf, ονομαστικής ισχύος 290 MW, είναι το πρώτο σύστημα CAES που αναπτύχθηκε, και λειτουργεί επιτυχώς από το 1978, με κατασκευάστρια εταιρεία την ABB [41]. Η εγκατάσταση αποθήκευσης του πεπιεσμένου αέρα συνίσταται από δύο σπήλαια άλατος, συνολικού όγκου 310.000 m³, σχεδιασμένα να λειτουργούν σε πιέσεις από 48 έως 66 bar. Η μονάδα αυτή έχει δυνατότητα μέγιστης παραγωγής ισχύος για χρονικό διάστημα 3-4 ώρες, με την αντίστοιχη μέγιστη ροή πεπιεσμένου αέρα που εκτονώνεται στο στρόβιλο να είναι 417 kg/s [42],[46]. Πέρα από το παραπάνω χρονικό διάστημα, η πίεση που επικρατεί στο σπήλαιο θα έχει ελαττωθεί αρκετά, με αποτέλεσμα να μην επιτυγχάνεται η ονομαστική ισχύς των 290 MW. Σε περιόδους αποθήκευσης ενέργειας, απαιτούνται 12 ώρες για την

πλήρη φόρτιση του σπηλαίου με πεπιεσμένο αέρα, με την αντίστοιχη μέγιστη ροή αέρα των συμπιεστών να είναι 108 kg/s.

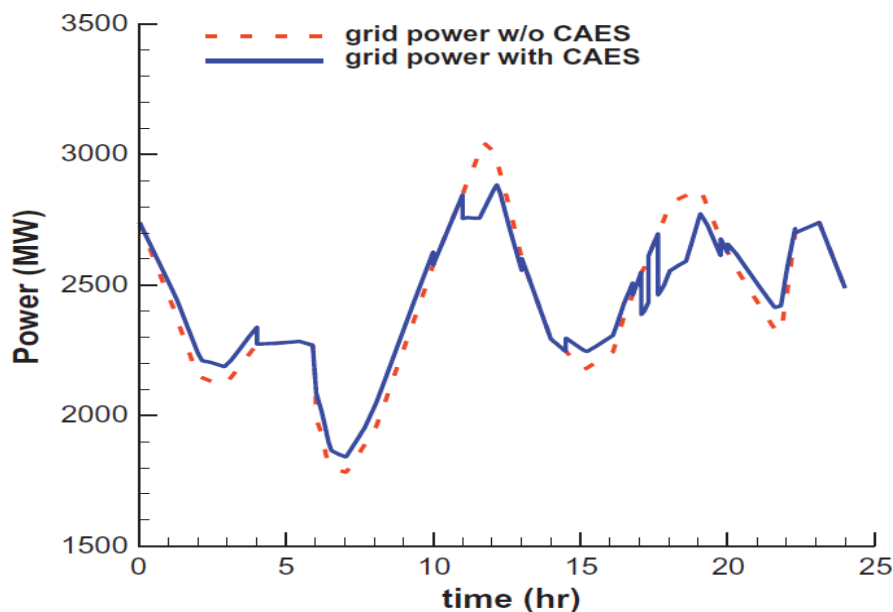
Από το 1978, το ηλεκτρικό δίκτυο έχει απορροφήσει από τη συγκεκριμένη μονάδα CAES περίπου 465 GWh ηλεκτρική ενέργεια [24]. Ο συνολικός βαθμός απόδοσης της μονάδας είναι 41%, η διαθεσιμότητα είναι 90% και η αξιοπιστία της είναι 99%. Οι συνολικές εκκινήσεις που έχει υποστεί είναι πάνω από 8.300. Παρότι ο αρχικός ρόλος της ήταν η παροχή στρεφόμενης εφεδρείας και η παραγωγή ισχύος σε περιόδους αιχμής του φορτίου, με την αυξανόμενη διείσδυση των αιολικών πάρκων στην ηλεκτροπαραγωγή, η μονάδα CAES στο Huntorf αναλαμβάνει πλέον και την εξομάλυνση της αιολικής ισχύος. Στο Σχήμα 3.22 φαίνεται η αεροφωτογραφία της μονάδας.



Σχήμα 3.22 : Αεροφωτογραφία μονάδας CAES στο Huntorf

Το λειτουργικό διάγραμμα της μονάδας έχει παρουσιαστεί στο Σχήμα 3.6, όπου φαίνονται οι παράμετροι λειτουργίας και τα δομικά στοιχεία της (συμπιεστές, στρόβιλοι, σπήλαιο κ.τ.λ.). Λόγω του μεγάλου εύρους πιέσεων, ως στρόβιλος υψηλής πίεσης έχει χρησιμοποιηθεί ένας στρόβιλος ατμού [41]. Επιπλέον, επειδή οι απώλειες θερμότητας είναι μεγάλες σε υψηλές πιέσεις και θερμοκρασίες, η θερμοκρασία εισόδου του πεπιεσμένου αέρα στον στρόβιλο υψηλής πίεσης (HP) δεν υπερβαίνει τους 550 °C, συγκριτικά με τον στρόβιλο χαμηλής πίεσης (LP) όπου η θερμοκρασία εισόδου είναι 825 °C. Τέλος, η μονάδα θα μπορούσε να είχε εξοπλιστεί με έναν εναλλάκτη θερμότητας προκειμένου να αυξηθεί ο βαθμός απόδοσης και να μειωθεί η κατανάλωση καυσίμου. Λόγω όμως του γεγονότος πως η προσθήκη του ανακομιστή θερμότητας θα αύξανε το χρόνο εκκίνησης της μονάδας CAES, ο εναλλάκτης αποκλείστηκε ως μέθοδος βελτίωσης των λειτουργικών χαρακτηριστικών της μονάδας.

Στο Σχήμα 3.23 φαίνεται η επίδραση της ένταξης της μονάδας CAES (Huntorf) στο ηλεκτρικό δίκτυο, στη διάρκεια μιας ημέρας (24 ώρες) [39]. Η συνολική παραγόμενη ισχύ των συμβατικών μονάδων όταν το σύστημα CAES είναι συνδεδεμένο στο ηλεκτρικό δίκτυο παριστάνεται με συνεχή γραμμή, ενώ όταν η μονάδα CAES είναι εκτός λειτουργίας απεικονίζεται με διακεκομμένη γραμμή. Σημειώνεται ότι η διακεκομμένη γραμμή αντιστοιχεί και στην ισχύ του ηλεκτρικού φορτίου. Παρατηρούμε ότι με τη συμβολή της μονάδας CAES αντιμετωπίζονται οι αιχμές του φορτίου, καθιστώντας τη ζήτηση ισχύος από τις συμβατικές μονάδες πιο ομαλή με μικρότερες διακυμάνσεις.



Σχήμα 3.23 : Συνολική παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς συμβατικών μονάδων

Στον Πίνακα 3.9 συνοψίζονται τα λειτουργικά στοιχεία της μονάδας CAES στο Huntorf [39],[41].

Πίνακας 3.9 : Παράμετροι λειτουργίας μονάδας CAES στο Huntorf

| Χαρακτηριστικό | Τιμή | Μονάδα μέτρησης |
|--|--------------|-----------------|
| Στροβίλοι | | |
| Ονομαστική ισχύς στροβίλων | 290 | MW |
| Ονομαστική ροή αέρα στροβίλων | 417 | kg/s |
| Ονομαστική πίεση εισόδου στροβίλου υψηλής πίεσης (HP) | 42 | bar |
| Ονομαστική θερμοκρασία εισόδου στροβίλου υψηλής πίεσης (HP) | 550 | °C |
| Ονομαστική πίεση εισόδου στροβίλου χαμηλής πίεσης (LP) | 11 | bar |
| Ονομαστική θερμοκρασία εισόδου στροβίλου χαμηλής πίεσης (LP) | 825 | °C |
| Καύσιμο | Φυσικό αέριο | - |
| Συμπιεστές | | |
| Ονομαστική ισχύς συμπιεστών | 60 | MW |
| Ονομαστική ροή αέρα συμπιεστών | 108 | kg/s |
| Θερμοκρασία εξόδου του τελικού ψύκτη (aftercooler) | 50 | °C |
| Πίεση εξόδου του τελικού ψύκτη (aftercooler) | 46-72 | bar |
| Σπήλαιο | | |
| Διαθέσιμος όγκος αποθήκευσης του πεπιεσμένου αέρα | 310.000 | m ³ |
| Εύρος της πίεσης λειτουργίας του σπηλαίου | 46-66 | bar |
| Μέγιστη πίεση σπηλαίου | 72 | bar |
| Μέγιστος ρυθμός μεταβολής της πίεσης του σπηλαίου | 10 | bar/h |
| Θερμοκρασία τοιχωμάτων σπηλαίου | ≈ 50 | °C |

3.5.2 Μονάδα CAES στο McIntosh (Η.Π.Α.)

Η μονάδα CAES στο McIntosh, ονομαστικής ισχύος 110 MW, είναι το δεύτερο σύστημα CAES που κατασκευάστηκε παγκοσμίως και το πρώτο που εγκαταστάθηκε στις Η.Π.Α [42]. Η κατασκευάστρια εταιρεία είναι η Dresser-Rand. Η κατασκευή της συγκεκριμένης μονάδας διήρκησε περίπου 30 μήνες και ολοκληρώθηκε την 1^η Ιουνίου 1991. Υπολογίζεται ότι έως σήμερα, το ηλεκτρικό δίκτυο έχει απορροφήσει πάνω από 55 GWh ηλεκτρική ενέργεια από τη μονάδα αυτή [41].

Η συμπίεση του αέρα γίνεται σε 3 βαθμίδες συμπιεστών, μεταξύ των οποίων παρεμβάλλονται ενδιάμεσοι ψύκτες (intercoolers). Ο πεπιεσμένος αέρας αποθηκεύεται σε ένα σπήλαιο άλατος, βάθους 450-750 m, και όγκου 560.000 m³, με δυνατότητα μέγιστης παραγωγής ισχύος (αυτονομίας) για χρονικό διάστημα 26 ωρών [46], [42]. Το εύρος της πίεσης λειτουργίας του σπηλαιίου είναι 45 bar έως 74 bar. Η εκτόνωση του αέρα γίνεται σε δύο βαθμίδες στρόβιλων. Πριν την είσοδο του πεπιεσμένου αέρα στον στρόβιλο υψηλής πίεσης, υπάρχει ένας ανακομιστής θερμότητας που προθερμαίνει τον αέρα. Στην συνέχεια ο αέρας εισέρχεται στο θάλαμο καύσης υψηλής πίεσης και αναφλέγεται με καύσιμο, αυξάνοντας περαιτέρω τη θερμοκρασία του. Αφού εκτονωθούν στον στρόβιλο υψηλής πίεσης, τα καυσαέρια εισέρχονται στο θάλαμο καύσης χαμηλής πίεσης όπου η θερμοκρασία τους αυξάνει ξανά. Τέλος, τα καυσαέρια εκτονώνονται στο στρόβιλο χαμηλής πίεσης και εξέρχονται στην ατμόσφαιρα. Το λειτουργικό διάγραμμα της μονάδας CAES στο McIntosh έχει παρασταθεί στο Σχήμα 3.8, ενώ στο Σχήμα 3.24 εμφανίζεται η αεροφωτογραφία της συγκεκριμένης μονάδας.



Σχήμα 3.24 : Αεροφωτογραφία μονάδας CAES στο McIntosh

Οι θάλαμοι καύσης υψηλής και χαμηλής πίεσης λειτουργούν με φυσικό αέριο ή με πετρέλαιο. Σημειώνεται επίσης ότι η προσθήκη του ανακομιστή θερμότητας ελαττώνει την κατανάλωση καυσίμου κατά 25% σε πλήρες φορτίο, συγκριτικά με τη μονάδα CAES στο

Huntorf όπου δεν υπάρχει εναλλάκτης θερμότητας. Ο βασικός ρόλος της μονάδας CAES στο McIntosh, όπως και στο Huntorf, είναι η παροχή στρεφόμενης εφεδρείας και η παραγωγή ισχύος στις αιχμές του φορτίου [46].

Στον Πίνακα 3.10 συνοψίζονται για λόγους σύγκρισης διάφορα στοιχεία των μονάδων CAES στο McIntosh και στο Huntorf [46].

Πίνακας 3.10: Χαρακτηριστικά στοιχεία μονάδων CAES στο McIntosh και στο Huntorf

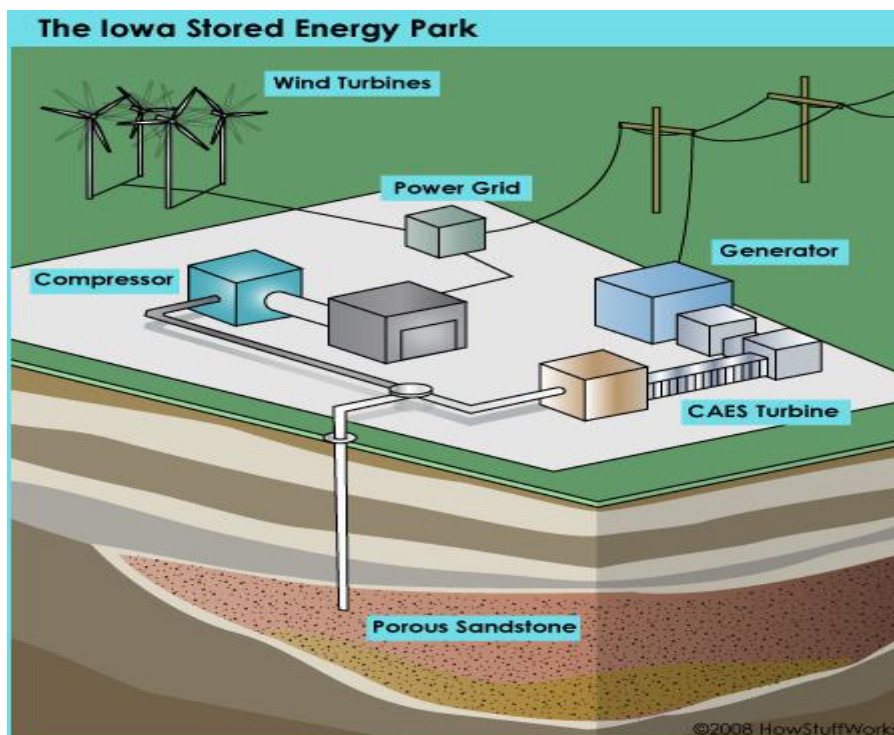
| Χαρακτηριστικό | Huntorf | McIntosh |
|---|---|---|
| Συνολικό κόστος εγκατάστασης | 139.000.000 \$ (480 \$/kW) | 54.100.000 \$ (492 \$/kW) |
| Ολοκλήρωση έργου | Δεκέμβριος του 1978 | Ιούνιος του 1991 |
| Ονομαστική ισχύς | 290 MW | 110 MW |
| Διαθέσιμος όγκος αποθήκευσης του πεπιεσμένου αέρα | 310.000 m ³ | 560.000 m ³ |
| Διάρκεια εκφόρτισης σπηλαιού με μέγιστη ισχύ εξόδου | 3-4 ώρες | 26 ώρες |
| Διαθεσιμότητα μονάδας | 90% | 99% |
| Αξιοπιστία εκκίνησης της μονάδας | 99% | 99% |
| Καταναλισκόμενη ισχύς συμπιεστών / Παραγόμενη ισχύς στροβίλων | 0,82 kW _{in} / kW _{out} | 0,75 kW _{in} / kW _{out} |
| Χρόνος εκκίνησης της μονάδας | 8 λεπτά | 10-12 λεπτά |

3.5.3 Μονάδα CAES στην Iowa (Η.Π.Α)

Στην Iowa βρίσκεται σε εξέλιξη η κατασκευή μιας μονάδας CAES ονομαστικής ισχύος 268 MW. Το έργο ανακοινώθηκε το Δεκέμβρη του 2006 και θα εγκατασταθεί σε μια επιφάνεια 40 στρεμμάτων [41]. Ο πεπιεσμένος αέρας θα αποθηκεύεται σε υπόγεια υδροφόρα στρώματα (αμμόλιθος) που υπάρχουν στην συγκεκριμένη τοποθεσία, σε βάθος 900 m. Η πίεση λειτουργίας της εγκατάστασης αποθήκευσης του αέρα θα υπερβαίνει τα 80 bar [43]. Σε ένα ξεχωριστό υπόγειο υδροφόρο ορίζοντα θα γίνεται η αποθήκευση του φυσικού αερίου, επιτρέποντας την αγορά και αποθήκευση του καυσίμου σε περιόδους όπου οι τιμές είναι χαμηλές. Μέχρι σήμερα έχουν κατασκευαστεί διάφορα πηγάδια προκειμένου να επιβεβαιωθεί η ύπαρξη της υπόγειας γεωλογικής διαμόρφωσης και αναμένονται δοκιμές που θα καθορίσουν τη διαπερατότητα και τον αποθηκευτικό όγκο του υδροφόρου ορίζοντα. Τα αποτελέσματα έως τώρα είναι ενθαρρυντικά. Εκτιμάται ότι η ικανότητα αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας θα είναι αρκετά μεγάλη, με δυνατότητα παροχής ονομαστικής ισχύος (και ονομαστικής ροής αέρα στο στρόβιλο) για περίπου 50 ώρες αυτονομίας [24]. Επιπλέον, σε αντίθεση με την αποθήκευση του αέρα σε σπήλαια, τα υπόγεια υδροφόρα στρώματα διατηρούν σταθερή την πίεση του αέρα, επιτρέποντας την επίτευξη μεγάλου βαθμού απόδοσης.

Η χρήση της μονάδας CAES προορίζεται για την αποθήκευση της αιολικής ενέργειας που παράγεται έως 200 μίλια μακριά από τη θέση εγκατάστασης και θα αφορά αιολική ισχύ από 75 έως 100 MW. Σε περιπτώσεις όπου η αιολική ενέργεια είναι μικρή συγκριτικά με αυτή που απαιτεί η αιχμή του φορτίου, η επιπλέον ενέργεια θα παρέχεται από τις συμβατικές μονάδες σε περιόδους χαμηλής ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας [43]. Αναμένεται ότι με την

εγκατάσταση της μονάδας CAES στην Iowa, η ηλεκτρική ενέργεια προερχόμενη από αιολικά πάρκα θα προσεγγίσει το 20% της συνολικής κατανάλωσης, επιφέροντας κέρδη ύψους 5 εκατομμυρίων \$ ετησίως από την μείωση της εισαγόμενης ενέργειας [24]. Το κόστος κατασκευής της μονάδας ανέρχεται σε 214 εκατομμύρια \$ που αντιστοιχούν σε 800 \$/kW εγκατεστημένης ισχύος [46]. Στο Σχήμα 3.25 φαίνεται το γενικό διάγραμμα της μονάδας.



Σχήμα 3.25 : Διάγραμμα μονάδας CAES στην Iowa

3.5.4 Μονάδα CAES στο Norton (Η.Π.Α)

Μόλις ολοκληρωθεί η κατασκευή, η μονάδα CAES στο Norton θα είναι το μεγαλύτερο σύστημα CAES παγκοσμίως, ονομαστικής ισχύος 800 MW με δυνατότητα επέκτασης στα 2700 MW [41],[42]. Ως εγκατάσταση αποθήκευσης του αέρα προορίζεται ένα εγκαταλελειμμένο ορυχείο ασβεστόλιθου, βάθους 670 m και όγκου 9.500.000 m³, με αναμενόμενη πίεση λειτουργίας από 55 bar έως 110 bar [24],[46]. Στο Σχήμα 3.26 φαίνεται η γενική διαμόρφωση του χώρου εγκατάστασης της μονάδας όταν ολοκληρωθεί η κατασκευή.

3.5.5 Μονάδα CAES στην περιοχή Matagorda (Η.Π.Α)

Στην περιοχή Matagorda στο Texas σχεδιάζεται η κατασκευή μιας μονάδας CAES, ονομαστικής ισχύος 540 MW [42]. Ο εξοπλισμός της μονάδας είναι μια βελτιωμένη έκδοση των διατάξεων που χρησιμοποιούνται στο σύστημα του McIntosh. Συγκεκριμένα, η μονάδα θα αποτελείται από 4 ανεξάρτητες αλυσίδες στροβίλων, ονομαστικής ισχύος 135 MW η κάθε μία. Ο χρόνος μετάβασης από μηδενική παραγωγή ισχύος στο 100% είναι 14 λεπτά σε κανονική λειτουργία, ενώ σε έκτακτες περιπτώσεις μπορεί να μειωθεί στα 7 λεπτά. Επίσης,

υπάρχει δυνατότητα ρύθμισης της παραγόμενης ισχύος από 10 MW (ελάχιστη παραγωγή) έως την ονομαστική τιμή των 540 MW [43]. Η ονομαστική ισχύς των συμπιεστών είναι 300 MW, όπου σε συνδυασμό με την ονομαστική ισχύ των στροβίλων καθιστούν το διαθέσιμο εύρος ρύθμισης της ισχύος ίσο με 840 MW (300 MW μέγιστη καταναλισκόμενη ισχύς – 540 MW μέγιστη παραγόμενη ισχύς).



Σχήμα 3.26 : Μονάδα CAES στο Norton

Η αποθήκευση του αέρα θα γίνεται σε ένα υπάρχον σπήλαιο άλατος, ενώ πληρούνται προδιαγραφές για την αποθήκευση του φυσικού αερίου σε παραπλήσιο χώρο [43]. Η ονομαστική πίεση εισόδου των στροβίλων υψηλής πίεσης είναι περίπου 48 bar και η ονομαστική ροή αέρα είναι 180 kg/s. Σε πλήρες φορτίο η ειδική κατανάλωση θερμότητας εκτιμάται ως 3800 Btu/kWh, ενώ στο 20 % του φορτίου υπολογίζεται ίση με 4100 Btu/kWh. Το συνολικό κόστος της κατασκευής της μονάδας ανέρχεται σε 243 εκατομμύρια \$, που αντιστοιχούν σε 450 \$/kW εγκατεστημένης ισχύος [42]. Όπως αναφέρεται στο [43], η ενσωμάτωση της συγκεκριμένης μονάδας στην ηλεκτροπαραγωγή, σε συνδυασμό με τα αιολικά πάρκα, δύναται να μειώσει το κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας σε 0,05 \$/kWh, όπου το 90% της ηλεκτροπαραγωγής στην περιοχή θα προέρχεται από αιολική ενέργεια.

Στις προηγούμενες παραγράφους περιγράφηκαν οι μονάδες CAES που έχουν κατασκευαστεί και έχουν ενταχθεί στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (Huntorf, McIntosh) και άλλες που η κατασκευή τους βρίσκεται ακόμα σε εξέλιξη (Iowa, Norton, Matagorda). Πέρα από αυτές, στο παρελθόν είχε ξεκινήσει ο σχεδιασμός και η ανάπτυξη και άλλων μονάδων CAES, οι οποίες δεν κατασκευάστηκαν για διάφορους λόγους. Παρακάτω παρατίθενται κάποιες περιπτώσεις μη ολοκληρωμένων συστημάτων CAES [42]:

- Κατά τη Σοβιετική περίοδο, είχε προταθεί η ανάπτυξη ενός συστήματος CAES, ονομαστικής ισχύος 1050 MW, στην περιοχή Donbas της Ρωσίας/Ουκρανίας. Παρότι είχε ξεκινήσει η κατασκευή της υπόγειας εγκατάστασης αποθήκευσης του αέρα

(σπήλαιο άλατος), η κατάρρευση της Σοβιετικής Ένωσης επέφερε την ακύρωση του έργου.

- Το Ισραήλ είχε εξετάσει την ανάπτυξη μιας μονάδας CAES ονομαστικής ισχύος 300 MW, με την αποθήκευση του αέρα να γίνεται σε υπόγεια υδροφόρα στρώματα.
- Το Λουξεμβούργο είχε σχεδιάσει στο παρελθόν την κατασκευή ενός συστήματος CAES ονομαστικής ισχύος 100 MW. Ο αέρας είχε προοριστεί να αποθηκεύεται σε ένα υπόγειο βραχώδη σπήλαιο με υδραυλική αντιστάθμιση, με τη χρήση μιας δεξαμενής νερού ευρισκόμενης στην επιφάνεια.
- Η εταιρεία Soyland Electric Cooperative είχε υπογράψει συμβόλαιο για την κατασκευή μιας μονάδας CAES ονομαστικής ισχύος 220 MW, με εγκατάσταση αποθήκευσης του αέρα ένα υπόγειο βραχώδη σπήλαιο. Ενώ είχαν ολοκληρωθεί οι προκαταρκτικές μελέτες και είχε αγοραστεί ο εξοπλισμός, η κατασκευή του έργου ακυρώθηκε λόγω αλλαγής της διοίκησης της εταιρείας. Κατασκευαστής του εξοπλισμού είχε επιλεγεί η ABB, ενώ η Gibbs & Hill είχε αναλάβει την υλοποίηση του έργου.

3.5.6 Συμπεράσματα από την έως τώρα λειτουργία των μονάδων CAES

Κατά την κατασκευή και την αρχική λειτουργία των μονάδων CAES στο Huntorf και στο McIntosh διεξήχθησαν μελέτες προκειμένου να αναδείξουν διάφορα στοιχεία με πραγματικά δεδομένα, τα οποία είτε ήταν άγνωστα είτε είχαν εξαχθεί θεωρητικά. Παρακάτω παρατίθενται κάποια από αυτά [42]:

- ✓ Οι μονάδες CAES μπορούν να κατασκευαστούν εντός του χρονοδιαγράμματος με πραγματικά κόστη παραπλήσια με τα προβλεπόμενα.
- ✓ Επιβεβαιώθηκε ο αναμενόμενος υψηλός βαθμός απόδοσης, η αξιοπιστία, η διαθεσιμότητα και το χαμηλό λειτουργικό κόστος των μονάδων.
- ✓ Η κατασκευή των υπόγειων εγκαταστάσεων αποθήκευσης του αέρα έγινε με αξιόπιστες μεθόδους και ολοκληρώθηκε εγκαίρως, με κόστος εντός του προϋπολογισμού.
- ✓ Για τη μεγιστοποίηση του κέρδους από τη χρήση των μονάδων CAES, απαιτείται προσεκτικός σχεδιασμός με στόχο τη βελτιστοποίηση των λειτουργικών χαρακτηριστικών των μονάδων. Κάθε μονάδα πρέπει να σχεδιάζεται σύμφωνα με την αναμενόμενη χρήση της, το κόστος καυσίμου, το κόστος αγοράς και πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας, το κόστος εγκατάστασης, τις περιόδους παραγωγής και αποθήκευσης ενέργειας κ.τ.λ.
- ✓ Ο σχεδιασμός του ανακομιστή θερμότητας απαιτεί μεγάλη προσοχή.
- ✓ Οι υπόγειες εγκαταστάσεις αποθήκευσης του πεπιεσμένου αέρα εμφανίζουν μηδαμινή διαρροή αέρα, όπως έχει επιβεβαιωθεί από τη λειτουργία των μονάδων CAES στο Huntorf και στο McIntosh.
- ✓ Οι αμελητέες ποσότητες χλωριούχου νατρίου που περιέχονται στον αποθηκευμένο αέρα στα σπήλαια άλατος, δεν δημιουργούν προβλήματα διάβρωσης του εξοπλισμού (στρόβιλοι, θάλαμοι καύσης).
- ✓ Ένα από τα σημαντικότερα θέματα κατά το σχεδιασμό των μονάδων CAES, είναι η εύρεση της βέλτιστης σύνθεσης των επιμέρους διατάξεων που συνιστούν τις μονάδες αυτές.

- ✓ Οι μονάδες CAES περιλαμβάνουν εξοπλισμό ο οποίος χρησιμοποιείται εδώ και 50 χρόνια στην ηλεκτροπαραγωγή, όπως θάλαμοι καύσης και στρόβιλοι του εμπορίου, γεγονός που απλοποιεί την κατασκευή.

3.5.7 Συστήματα CAES στην αγορά ηλεκτρικής ενέργειας

Τα οικονομικά μεγέθη λειτουργίας των μονάδων CAES, σε αντίθεση με τις συμβατικές μονάδες, εξαρτώνται και από το κόστος αγοράς της ηλεκτρικής ενέργειας για τη συμπίεση του αέρα [33]. Τα έσοδα των μονάδων CAES προέρχονται από την πώληση της ηλεκτρικής ενέργειας. Τα λειτουργικά κόστη συνίστανται από τα έξοδα αγοράς του καυσίμου, από το κόστος αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας, και από τα επιβληθέντα πρόστιμα για εκπομπές αέριων ρύπων. Οι μονάδες CAES έχουν συμφέρον να παράγουν τα χρονικά διαστήματα κατά τα οποία τα έσοδα υπερβαίνουν τα έξοδα, ώστε να προκύπτει κέρδος. Το γεγονός αυτό μπορεί να επιτευχθεί παράγοντας ισχύ σε περιόδους αιχμής του φορτίου, όπου οι τιμές πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας είναι υψηλές. Επίσης, η μεγιστοποίηση του κέρδους μπορεί να επιτευχθεί αγοράζοντας ηλεκτρική ενέργεια τις περιόδους όπου οι τιμές είναι χαμηλές. Η ηλεκτρική ενέργεια που αγοράζεται χρησιμοποιείται για τη συμπίεση του αέρα σε κατάλληλη εγκατάσταση, όπως αυτές που περιγράφηκαν στην ενότητα 3.4 (σπήλαια ως επί των πλείστων). Οι ακριβείς περίοδοι κατά τις οποίες θα αποθηκεύεται αέρας στο σπήλαιο εξαρτώνται από την αγορά ενέργειας στην οποία λειτουργεί το σύστημα CAES. Μία καλή τακτική είναι να συμπίεζεται αέρας το Σαββατοκύριακο, φορτίζοντας πλήρως το σπήλαιο με πεπιεσμένο αέρα, όπου η ζήτηση του φορτίου και η τιμή αγοράς ενέργειας είναι χαμηλή. Τις υπόλοιπες μέρες, ο αποθηκευμένος αέρας εκτονώνεται στους στρόβιλους της μονάδας CAES, τις μεσημεριανές και απογευματινές ώρες (αιχμές φορτίου) παράγοντας ηλεκτρική ενέργεια, ενώ το βράδυ συμπληρώνεται ο αέρας που εγκατέλειψε το σπήλαιο με τη λειτουργία της συμπίεσης, καταναλώνοντας ηλεκτρική ενέργεια (χαμηλή ζήτηση φορτίου). Η παραπάνω στρατηγική ακολουθείται από τους υδραντλητικούς σταθμούς.

Μία άλλη πρακτική για τη μεγιστοποίηση του κέρδους λειτουργίας των μονάδων CAES είναι η σύναψη συμφωνίας για συγκεκριμένη ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας που θα απορροφάται από το σύστημα CAES σε περιόδους χαμηλής ζήτησης του φορτίου. Το γεγονός αυτό θα οδηγήσει σε χαμηλό κόστος αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας, δεδομένου ότι η ζήτηση ενέργειας θα είναι πλήρως καθορισμένη και ποσοτικά και χρονικά.

Τέλος, ο διαχειριστής της μονάδας CAES πρέπει να επιλέξει κατά την κατασκευή του συστήματος μεταξύ συμπιεστών μεγάλης ισχύος και υψηλού κόστους, και συμπιεστών μικρής ισχύος και χαμηλού κόστους. Οι μεγάλοι συμπιεστές προσφέρουν το πλεονέκτημα της φόρτισης του σπηλαίου με πεπιεσμένο αέρα σε μικρό χρονικό διάστημα, αποκομίζοντας οφέλη από τις χαμηλές τιμές της καταναλισκόμενης ενέργειας. Αντιθέτως, οι μικροί συμπιεστές απαιτούν μεγαλύτερο χρονικό διάστημα για την πλήρη φόρτιση του σπηλαίου, αναγκάζοντας το διαχειριστή της μονάδας CAES να αγοράζει ηλεκτρική ενέργεια και σε περιόδους όπου οι τιμές είναι υψηλότερες. Πρέπει δηλαδή να ευρεθεί ο βέλτιστος συνδυασμός που να μεγιστοποιεί το κέρδος του συστήματος CAES, λαμβάνοντας υπόψιν και το κόστος εγκατάστασης.

Πέρα από το άμεσο κέρδος που συνεπάγεται η παραγωγή και πώληση ηλεκτρικής ενέργειας, οικονομικά οφέλη μπορούν να προκύψουν από την παροχή επικουρικών υπηρεσιών στο ηλεκτρικό δίκτυο ή από την συμπαραγωγή θερμότητας. Οι επικουρικές υπηρεσίες είναι διαφόρων ειδών όπως παραγωγή αέργου ισχύος, ρύθμιση τάσεως και συχνότητας, ικανότητα στρεφόμενης εφεδρείας. Η συμπαραγωγή θερμότητας αναφέρεται

στην πώληση της θερμικής ενέργειας που παράγεται κατά τη συμπίεση του αέρα, υπό μορφή ατμού. Λόγω του γεγονότος πως η συμπίεση του αέρα λαμβάνει χώρα κυρίως τις νυκτερινές ώρες, και δεδομένου ότι οι συμβατικές μονάδες Συμπαγωγής Ηλεκτρισμού και Θερμότητας (Σ.Η.Θ.) λειτουργούν και το βράδυ για την παροχή θερμικής ισχύος σε καταναλωτές, η εκλυόμενη θερμότητα κατά τη συμπίεση του αέρα θα μπορούσε να πωληθεί σε κάποιον σταθμό Σ.Η.Θ.

Οι αγορές ηλεκτρικής ενέργειας που ευνοούν τις επενδύσεις σε συστήματα CAES, είναι εκείνες στις οποίες σημειώνονται μεγάλες διακυμάνσεις στην τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας στη διάρκεια της ημέρας. Το παραπάνω δικαιολογείται από το γεγονός πως σε περιόδους χαμηλών τιμών θα αγοράζεται ενέργεια για τη συμπίεση του αέρα, ενώ σε περιόδους υψηλών τιμών θα πωλείται ενέργεια. Η μεταβλητότητα της τιμής της ηλεκτρικής ενέργειας οφείλεται σε διάφορους παράγοντες όπως μεγάλες διακυμάνσεις της ζήτησης, σταθμοί παραγωγής με μικρή ικανότητα ρύθμισης συχνότητας, μεγάλη διείσδυση αιολικής ενέργειας, μεγάλες διακυμάνσεις στην τιμή του καυσίμου (φυσικό αέριο), ή περιορισμοί στο δίκτυο μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας.

Ωστόσο, το παρόν επενδυτικό κλίμα δεν είναι ευοίωνο για την κατασκευή νέων μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, λόγω της αβεβαιότητας που υφίσταται στην αγορά αναφορικά με τις τιμές των ορυκτών καυσίμων, τα αναμενόμενα πρόστιμα για εκπομπές ρύπων, την απελευθέρωση της αγοράς. Έτσι, το ρίσκο της επένδυσης είναι υψηλό για την κατασκευή νέων συμβατικών σταθμών και ακόμα μεγαλύτερο για νέες μονάδες CAES. Οι μονάδες CAES διέπονται από μεγαλύτερο ρίσκο επένδυσης συγκριτικά με τις συμβατικές μονάδες, λόγω του γεγονότος πως τα οικονομικά οφέλη τους εξαρτώνται άμεσα από τις ημερήσιες διακυμάνσεις της τιμής της ηλεκτρικής ενέργειας. Οι ημερήσιες διακυμάνσεις της τιμής είναι δύσκολο έως αδύνατο να προβλεφθούν με ακρίβεια σε όλο το χρονικό ορίζοντα της επένδυσης. Αντίθετα για τις συμβατικές μονάδες, η πρόβλεψη έγκειται στην ημερήσια αναμενόμενη μέση τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας, γεγονός που απλοποιεί τον υπολογισμό του αναμενόμενου κέρδους και του χρόνου απόσβεσης της επένδυσης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Μοντέλο αεριοστροβίλου με ενσωματωμένο αεροφυλάκιο

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται το μοντέλο του αεριοστροβίλου απλού άξονα το οποίο είναι κατάλληλο για μελέτες ευστάθειας των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Στο συγκεκριμένο μοντέλο εντάσσεται ένα αεροφυλάκιο, το οποίο συμβάλλει στην παραγωγή επιπλέον ισχύος μεταβατικά. Συγκεκριμένα, στην ενότητα 4.1 αναπτύσσονται οι θερμοδυναμικές σχέσεις που διέπουν τη λειτουργία του μοντέλου του αεριοστροβίλου με αεροφυλάκιο, στην ενότητα 4.2 περιγράφονται οι βασικές διατάξεις ελέγχου και συναρτήσεις μεταφοράς, ενώ στην ενότητα 4.3 αναφέρεται ο τρόπος υλοποίησης του ελέγχου του αεροφυλακίου στο Simulink. Σημειώνεται ότι οι θερμοδυναμικές εξισώσεις του αεριοστροβίλου προσαρμόζονται έτσι ώστε να συμπεριληφθεί η επίδραση του αεροφυλακίου.

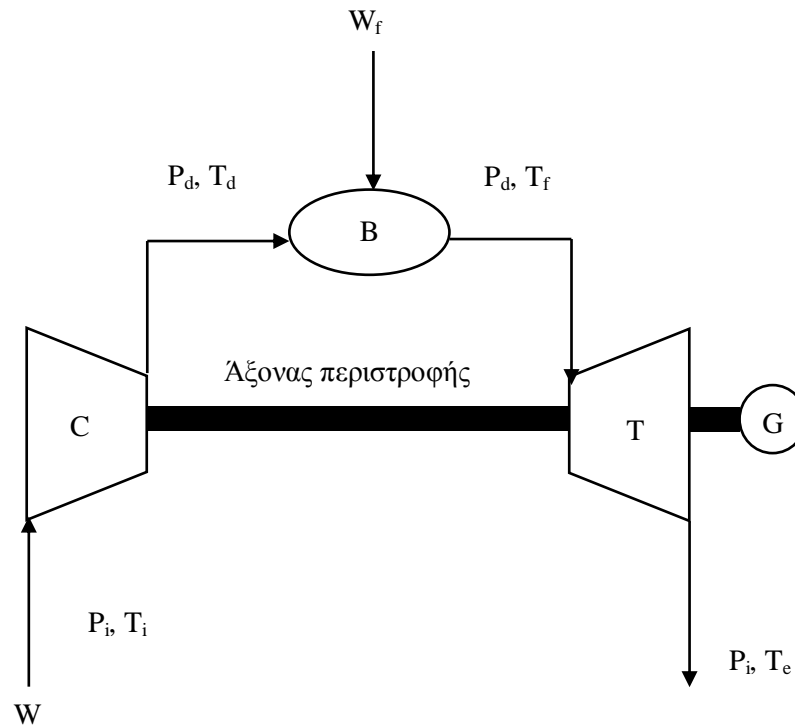
4.1 Θερμοδυναμικές εξισώσεις μοντέλου αεριοστροβίλου-αεροφυλακίου

4.1.1 Παράσταση αεριοστροβίλου και αεροφυλακίου

Ο αεριοστροβίλος ανήκει στην κατηγορία των θερμικών στροβιλομηχανών. Το εργαζόμενο μέσο που χρησιμοποιεί είναι ο αέρας και τα καυσαέρια. Η λειτουργία του περιλαμβάνει τρεις φάσεις [2]:

- 1) Συμπύεση:
Ο αέρας (W) εισέρχεται στο συμπιεστή (C) σε συνθήκες περιβάλλοντος, δηλαδή σε θερμοκρασία T_i και σε πίεση P_i . Ο συμπιεστής συμπιέζει τον αέρα, ανυψώνοντας τη θερμοκρασία του και την πίεσή του σε T_d και P_d αντίστοιχα. Για τη συμπύεση αυτή του αέρα απαιτείται μηχανικό έργο, το οποίο το παρέχει ο στρόβιλος που στρέφεται σε κοινό άξονα.
- 2) Καύση:
Ο αέρας από τον συμπιεστή εισέρχεται στο θάλαμο καύσης (B) απ' όπου προσλαμβάνει θερμότητα από την καύση του καυσίμου (W_f) στον ίδιο χώρο. Σημειώνεται ότι η καύση γίνεται υπό σταθερή πίεση, δηλαδή θεωρείται ισοβαρής.
- 3) Εκτόνωση:
Στην έξοδο του θαλάμου καύσης, η οποία ταυτόχρονα είναι η είσοδος του στροβίλου (T), το μίγμα αέρα-καυσίμου έχει πίεση P_d και θερμοκρασία T_f . Τα καυσαέρια εκτονώνονται στον στρόβιλο, όπου παράγεται το αναγκαίο μηχανικό έργο που απαιτεί ο συμπιεστής, καθώς και το ωφέλιμο έργο που παραλαμβάνει η γεννήτρια (G). Μετά την εκτόνωσή τους, τα καυσαέρια εξέρχονται από τον στρόβιλο σε συνθήκες P_1 και T_e , όσον αφορά την πίεση και τη θερμοκρασία αντίστοιχα.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, αξίζει να παρατηρηθεί ότι τόσο η πίεση εισόδου στο συμπιεστή, όσο και η πίεση εξόδου από το στρόβιλο είναι ίσες με την πίεση του περιβάλλοντος. Επίσης, η πίεση στο θάλαμο καύσης θεωρείται ενιαία και ίση με P_d . Τέλος, αγνοούμε σε όλη τη διάταξη του αεριοστρόβιλου τις απώλειες πίεσης και τη μεταβολή της μάζας του αέρα λόγω ανάμειξης με το καύσιμο. Στο Σχήμα 4.1 φαίνεται η διάταξη του αεριοστρόβιλου όπως περιγράφηκε παραπάνω.



Σχήμα 4.1: Αεριοστρόβιλος απλού άξονα

Στο σημείο αυτό θα ενσωματώσουμε στο μοντέλο του αεριοστρόβιλου τη διάταξη του αεροφυλακίου (CH). Η λειτουργία του αεροφυλακίου περιγράφεται αναλυτικά στην παράγραφο 4.2.10 και στην ενότητα 4.3, και έχει ως στόχο την μεταβατική αύξηση ισχύος του αεριοστρόβιλου σε περιπτώσεις όπου [1]:

- α) ο ρυθμός πτώσης της συχνότητας του συστήματος ξεπεράσει ένα κατώφλι.
- β) η ζητούμενη ισχύς από το ηλεκτρικό δίκτυο υπερβεί την ονομαστική ισχύ του αεριοστρόβιλου.

Σε οποιαδήποτε εκ των παραπάνω δύο περιπτώσεων το αεροφυλάκιο ενεργοποιείται τροφοδοτώντας τον θάλαμο καύσης με πεπιεσμένο αέρα, ο οποίος επιτυγχάνει αύξηση της ισχύος του αεριοστρόβιλου, καθώς και μείωση της θερμοκρασίας εισόδου των καυσαερίων στον στρόβιλο. Οι βασικές παραδοχές που έχουν γίνει είναι οι εξής :

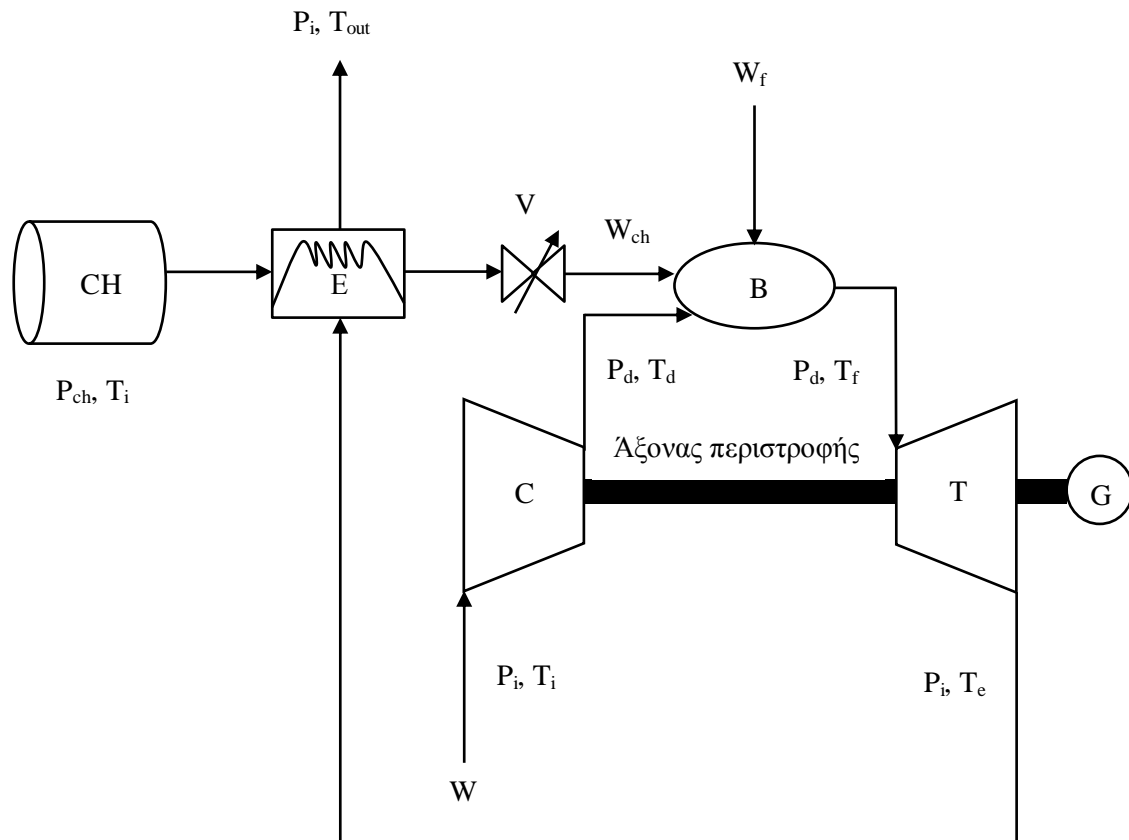
- 1) Η συμπίεση του αέρα στο αεροφυλάκιο γίνεται με έναν ξεχωριστό συμπιεστή, ο οποίος συμπιέζει τον αέρα με μια ισόθερμη μεταβολή, με αποτέλεσμα τελικά στο αεροφυλάκιο να επικρατεί θερμοκρασία περιβάλλοντος. Αυτό γίνεται για τρεις λόγους: Πρώτον, είναι γνωστό ότι στην ισόθερμη μεταβολή το απαιτούμενο έργο για

την συμπίεση είναι μικρότερο από αυτό που απαιτείται για αδιαβατική μεταβολή. Δεύτερον, το απαιτούμενο μέγεθος του αντίστοιχου αεροφυλακίου για τη συμπίεση ίδιας ποσότητας αέρα στην ίδια πίεση, είναι μικρότερο για την ισόθερμη συμπίεση απ' ό,τι για την αδιαβατική. Τέλος, λόγω του ότι το διάστημα που μεσολαβεί μεταξύ δύο διαδοχικών ενεργοποιήσεων του αεροφυλακίου είναι γενικά μεγάλο, δεδομένου ότι χρησιμοποιείται κυρίως σε περιπτώσεις σημαντικών διαταραχών φορτίου ή δικτύου, ακόμα και αδιαβατική να ήταν η αρχική συμπίεση του αέρα, λόγω του μεγάλου χρονικού διαστήματος που μεσολαβεί έως την χρήση του πεπιεσμένου αέρα, η θερμοκρασία στο αεροφυλάκιο δεν θα μπορούσε να διατηρηθεί. Συνεπώς, η θερμοκρασία στο αεροφυλάκιο θεωρείται ίση με την θερμοκρασία περιβάλλοντος, χωρίς μεγάλη απόκλιση από την πραγματικότητα.

- 2) Η πίεση που επικρατεί στο αεροφυλάκιο είναι ελαφρώς μεγαλύτερη από την πίεση που επικρατεί στον θάλαμο καύσης, έτσι ώστε να υφίσταται διαφορά πιέσεως και να δύναται να υπάρξει ροή μάζας από το αεροφυλάκιο προς τον θάλαμο καύσης.
- 3) Η θερμοκρασία του αέρα όταν εγχέεται στον θάλαμο καύσης από το αεροφυλάκιο θεωρείται η ίδια με αυτή του αέρα που προέρχεται από τον συμπιεστή. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω κατάλληλου εναλλάκτη θερμότητας, ο οποίος αποδίδει μέρος της θερμικής ενέργειας των καυσαερίων στον πεπιεσμένο αέρα του αεροφυλακίου. Αυτό είναι απαραίτητο προκειμένου να μην διαταράσσονται οι θερμοδυναμικές ιδιότητες του αέρα που εισέρχεται στον θάλαμο καύσης από την έγχυση του πεπιεσμένου αέρα. Ο εναλλάκτης προθέρμανσης δεν περιλαμβάνεται λεπτομερώς στο μοντέλο, το οποίο απλώς θεωρεί ότι η θερμοκρασία του εγχεόμενου αέρα από το αεροφυλάκιο στο θάλαμο καύσης δεν διαφέρει από αυτήν στην έξοδο του συμπιεστή. Ούτως ή άλλως, η ροή μάζας αέρα από το αεροφυλάκιο είναι της τάξης του 5% της συνολικής ροής που εκτονώνεται στο στρόβιλο. Επομένως, ακόμα και μικρές θερμοκρασιακές διαφορές να υφίστανται μεταξύ των εξόδων του εναλλάκτη και του συμπιεστή, η τελική θερμοκρασία που θα επικρατήσει στο θάλαμο καύσεως θα είναι παρόμοια είτε μοντελοποιηθεί ο εναλλάκτης είτε γίνει η παραπάνω απλοϊκή θεώρηση.
- 4) Η πίεση στο αεροφυλάκιο θεωρείται ανεξάρτητη από την πίεση στο θάλαμο καύσης. Η τελευταία δεν είναι σταθερή διότι η επιπλέον ροή μάζας αέρα από το αεροφυλάκιο, σε συνδυασμό με τη ροή αέρα από τον συμπιεστή, έχει ως αποτέλεσμα ο στρόβιλος να δέχεται υψηλότερη ροή αέρα για εκτόνωση. Έτσι δημιουργείται υψηλότερη πίεση στον θάλαμο καύσης. Με λίγα λόγια, η ροή αέρα από το αεροφυλάκιο αυξάνει την πίεση στον θάλαμο καύσης, λόγω του ότι τώρα πλέον η ροή που θα εκτονωθεί στον στρόβιλο θα είναι μεγαλύτερη.
- 5) Υπάρχει κατάλληλη δικλείδα με μεταβλητό άνοιγμα, η οποία ρυθμίζει την απαιτούμενη ροή αέρα προς τον θάλαμο καύσης, σύμφωνα με τα σήματα ελέγχου που δέχεται και ανάλογα με τη διαφορά πίεσης που υφίσταται στα άκρα της.

Όπως αναφέρθηκε, η πίεση στο αεροφυλάκιο πρέπει να είναι λίγο μεγαλύτερη από την πίεση που επικρατεί στο θάλαμο καύσης, προκειμένου να δύναται να υπάρξει ροή μάζας από την πρώτη διάταξη στη δεύτερη [1]. Έτσι, θεωρούμε ότι η πίεση του αεροφυλακίου είναι P_{ch} , με $P_{ch} > P_d$. Επίσης, η θερμοκρασία του αέρα που περιέχεται σε αυτό είναι ίση με του περιβάλλοντος, δηλαδή T_i . Ωστόσο, η θερμοκρασία του αέρα που εισέρχεται στο θάλαμο καύσης από το συμπιεστή είναι T_d , με $T_d > T_i$. Για να μην διαταραχθούν λοιπόν οι θερμοδυναμικές ιδιότητες του εργαζόμενου μέσου, πριν την είσοδο του πεπιεσμένου αέρα στο θάλαμο καύσης παρεμβάλλεται ο εναλλάκτης θερμότητας (E). Έτσι, η θερμοκρασία του πεπιεσμένου αέρα προσαρμόζεται στα επίπεδα που ορίζει η είσοδος του θαλάμου καύσης,

δηλαδή γίνεται ίση με T_d . Τέλος, η ρύθμιση της ποσότητας του αέρα που εξέρχεται από το αεροφυλάκιο γίνεται μέσω της δικλείδας (V). Στο Σχήμα 4.2 απεικονίζεται η διάταξη του αεροστροβίλου με ενσωματωμένο το αεροφυλάκιο. Στην υλοποίηση αυτή ο θάλαμος καύσης έχει δύο εισόδους. Η μία προέρχεται από το συμπιεστή, ενώ η άλλη προέρχεται από το αεροφυλάκιο. Έτσι όταν η δικλείδα είναι κλειστή, η μόνη ροή αέρα είναι αυτή από το συμπιεστή. Όταν η βαλβίδα ανοίξει, τότε δύο ρεύματα αέρα εισέρχονται στο θάλαμο καύσης.



Σχήμα 4.2: Αεροστρόβιλος απλού άξονα με ενσωματωμένο αεροφυλάκιο

Στις επόμενες παραγράφους αναλύεται η κάθε συνιστώσα του συστήματος αεροστροβίλου - αεροφυλακίου, παραθέτοντας τις αντίστοιχες σχέσεις που μοντελοποιούν την κάθε διάταξη. Σημειώνεται ότι ο εναλλάκτης δεν περιγράφεται στην ανάλυση που ακολουθεί, όπως εξηγήθηκε παραπάνω.

4.1.2 Συμπιεστής

Στην διάταξη του αεροστροβίλου απλού άξονα, ο συμπιεστής και ο στρόβιλος είναι συνδεδεμένοι σε έναν κοινό άξονα, ο οποίος περιστρέφεται με ταχύτητα N_{tot} (σε στροφές ανά λεπτό). Για την ανάλυση που ακολουθεί, θα χρησιμοποιηθεί η ανά μονάδα ταχύτητα περιστροφής N , που ταυτίζεται με τη συχνότητα της γεννήτριας. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, ο αέρας εισέρχεται στο συμπιεστή σε συνθήκες θερμοκρασίας T_i και πίεσης P_i , που αντιστοιχούν στις περιβαλλοντικές συνθήκες του αέρα. Αφού συμπιεστεί ο αέρας, η

πίεση και η θερμοκρασία του αυξάνονται σε τιμές P_d και T_d αντίστοιχα. Έτσι λοιπόν, ο λόγος συμπίεσης P_c θα είναι [2] :

$$P_c = \frac{P_d}{P_i} \quad (4.1)$$

Για ιδανική ισεντροπική μεταβολή προκύπτει [2]:

$$\frac{T_d'}{T_i} = \left(\frac{P_d}{P_i}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} = (P_c)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \quad (4.2)$$

όπου T_d' είναι η ισεντροπική θερμοκρασία εξόδου του συμπιεστή και γ είναι η τιμή του λόγου c_p/c_v του αέρα. Όλες οι θερμοκρασίες είναι σε βαθμούς Kelvin. Λόγω της μη αντιστρεπτής λειτουργίας του συμπιεστή, η συμπίεση δεν είναι ισεντροπική. Για το λόγο αυτό ορίζεται ο εσωτερικός βαθμός απόδοσης n_c του συμπιεστή, σύμφωνα με την παρακάτω σχέση :

$$n_c = \frac{h_d' - h_i}{h_d - h_i} = \frac{T_d' - T_i}{T_d - T_i} \quad (4.3)$$

όπου :

- h_d' η ιδανική ενθαλπία εξόδου του αέρα από τον συμπιεστή
- h_d η πραγματική ενθαλπία εξόδου του αέρα από τον συμπιεστή
- h_i η ενθαλπία εισόδου του αέρα στον συμπιεστή

Στην (4.3) έχει θεωρηθεί ότι η ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερή πίεση c_p είναι σταθερή στην περιοχή θερμοκρασιών λειτουργίας του αεριοστροβίλου.

Από τις σχέσεις (4.2) και (4.3) προκύπτει ότι :

$$T_d = T_i \left[1 + \frac{1}{n_c} (x - 1) \right] \quad (4.4)$$

όπου

$$x = (P_c)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \quad (4.5)$$

Στην είσοδο του συμπιεστή υπάρχουν κατάλληλα διαμορφωμένα πτερύγια με μεταβλητό άνοιγμα, τα οποία μπορούν να ρυθμίσουν την ποσότητα του αέρα που εισέρχεται στο συμπιεστή [11]. Γίνεται η θεώρηση λοιπόν ότι η ροή μάζας αέρα είναι ανάλογη με το άνοιγμα των πτερυγίων. Επίσης, είναι εύκολα κατανοητό ότι το ρεύμα αέρα προκύπτει από την περιστροφική κίνηση του συμπιεστή. Συνεπώς, όταν ο συμπιεστής δεν περιστρέφεται, η ροή αέρα είναι μηδενική. Καθώς αυξάνεται η ταχύτητα περιστροφής, αυξάνει και η μάζα αέρα που εισέρχεται στο συμπιεστή. Συνεπώς, θεωρούμε κατά προσέγγιση ότι η ροή αέρα είναι ανάλογη με την ταχύτητα περιστροφής του άξονα. Στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας η ταχύτητα περιστροφής είναι σταθερή. Σε περιπτώσεις όμως διαταραχών φορτίου, ο άξονας επιταχύνεται ή επιβραδύνεται, με αποτέλεσμα αυτό να επηρεάζει τη ροή αέρα στο συμπιεστή και κατ' επέκταση σε όλο το σύστημα του αεριοστροβίλου.

Έστω W η ανά μονάδα τιμή της ροής αέρα του συμπιεστή. Σύμφωνα με την παραπάνω θεώρηση, προκύπτει η ακόλουθη σχέση [1]:

$$W = g N \quad (4.6)$$

όπου g είναι το ανά μονάδα άνοιγμα των πτερυγίων εισόδου και N η ανά μονάδα ταχύτητα περιστροφής. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, στη μόνιμη κατάσταση η ταχύτητα περιστροφής ισούται με την ονομαστική (1,0 ανά μονάδα). Έτσι, η ροή αέρα είναι συνάρτηση μόνο του ανοίγματος των πτερυγίων. Το άνοιγμα των πτερυγίων καθορίζεται από το φορτίο, όπως θα φανεί και σε επόμενη παράγραφο. Είναι προφανές ότι η μέγιστη τιμή που δύναται να πάρει το άνοιγμα g είναι 1,0 ανά μονάδα, στην περίπτωση δηλαδή όπου τα πτερύγια είναι πλήρως ανοικτά. Η ελάχιστη τιμή του ανοίγματος g καθορίζεται από την ελάχιστη επιτρεπόμενη τιμή της ροής αέρα. Ο δεύτερος περιορισμός ως προς την ελάχιστη τιμή υποδηλώνει το όριο ευστάθειας του συμπιεστή. Δηλαδή, κάτω από το όριο αυτό υπάρχει ο κίνδυνος αστάθειας, μιας και ενδέχεται να εμφανιστεί το φαινόμενο αντιστροφής της ροής μάζας αέρα από την έξοδο του συμπιεστή προς την είσοδο, και να ακολουθήσουν αλλεπάλληλες ταλαντώσεις της πίεσης και της ροής αέρα [29].

Όπως έχει αναφερθεί προηγουμένως, η συνολική ροή μάζας αέρα που εισέρχεται στο θάλαμο καύσης προκύπτει από το άθροισμα των δύο επιμέρους ροών, του συμπιεστή και του αεροφυλακίου. Θεωρώντας ως W_{ch} την ανά μονάδα τιμή της ροής αέρα (ως προς την ονομαστική ροή του αεριοστροβίλου) που εξέρχεται από το αεροφυλάκιο, και W_{tot} την ανά μονάδα συνολική ροή που εισέρχεται στο θάλαμο καύσης και εκτονώνεται στο στρόβιλο, έχουμε :

$$W_{tot} = W + W_{ch} \quad (4.7)$$

Κατά το μεγαλύτερο χρονικό διάστημα της λειτουργίας του αεριοστροβίλου, το αεροφυλάκιο είναι ανενεργό, και η ροή εξ αυτού συνεπώς μηδενική ($W_{ch} = 0$), εκτός από τις περιπτώσεις που αναλύθηκαν παραπάνω.

Σημειώνεται ότι ο λόγος πίεσης του συμπιεστή δεν είναι σταθερός, αλλά εξαρτάται από τη συνολική ροή μάζας αέρα που διέρχεται από το θάλαμο καύσης (W_{tot}). Η πίεση εισόδου του αέρα στο συμπιεστή είναι σταθερή και ίση με αυτή του περιβάλλοντος, όπως έχει αναφερθεί. Η πίεση εξόδου ωστόσο είναι συνάρτηση της μάζας αέρα που εισέρχεται στο θάλαμο καύσης. Μεγαλύτερη ροή συνεπάγεται και μεγαλύτερη συσσώρευση αέρα στο θάλαμο καύσης, με αποτέλεσμα να αυξάνει και η πίεση που επικρατεί σε αυτόν. Αντίθετα, μικρότερη ροή συνεπάγεται λιγότερη συσσώρευση αέρα στο θάλαμο καύσης, γεγονός που οδηγεί στην επικράτηση μικρότερης πίεσης. Παρατηρούμε δηλαδή ότι η πίεση εξόδου του συμπιεστή (η οποία ισούται με την πίεση που επικρατεί στο θάλαμο καύσης) είναι αύξουσα συνάρτηση της ροής μάζας αέρα που διαρρέει τον αεριοστροβίλο. Θεωρείται λοιπόν για λόγους απλότητας ότι η πίεση P_d στον θάλαμο καύσης είναι ανάλογη με τη συνολική ροή αέρα, όπως φαίνεται και στην ακόλουθη σχέση [1]:

$$P_d = P_{d0} W_{tot} \quad (4.8)$$

όπου P_{d0} η ονομαστική πίεση στο θάλαμο καύσης, δηλαδή αυτή που αντιστοιχεί για ονομαστική ροή αέρα ($W_{tot} = 1$).

Σύμφωνα με τις σχέσεις (4.1) και (4.8) προκύπτει ότι :

$$P_c = P_{c0} W_{tot} \quad (4.9)$$

με

$$P_{c0} = \frac{P_{d0}}{P_i} \quad (4.10)$$

όπου P_{c0} ο ονομαστικός λόγος συμπίεσης του συμπιεστή.

Τέλος, η ισχύς (σε kW) που καταναλώνει ο συμπιεστής δίνεται από την παρακάτω σχέση [2]:

$$P_{\text{συμπ}} = \dot{m}(h_d - h_i) = \dot{m} c_p (T_d - T_i) \quad (4.11)$$

με

$$\dot{m} = W\dot{m}_0 \quad (4.12)$$

όπου \dot{m} η ροή αέρα του συμπιεστή σε kg/s, $P_{\text{συμπ}}$ η καταναλισκόμενη ισχύς, και c_p ο συντελεστής θερμοχωρητικότητας υπό σταθερή πίεση σε kJ/kg $^{\circ}$ K. Με \dot{m}_0 συμβολίζεται η ονομαστική ροή αέρα του αεριοστροβίλου. Σύμφωνα με τις σχέσεις (4.11) και (4.12), η ισχύς που απαιτεί ο συμπιεστής εξαρτάται από τη ροή μάζας αέρα που συμπιέζει (W). Ωστόσο, παρατηρούμε ότι στον υπολογισμό της ισχύος υπεισέρχεται και η θερμοκρασία εξόδου του συμπιεστή (T_d), η οποία σύμφωνα με τις σχέσεις (4.4), (4.5), (4.7) και (4.9), περιλαμβάνει και τη ροή μάζας αέρα από το αεροφυλάκιο. Συνεπώς, η έγχυση αέρα από το αεροφυλάκιο (W_{ch}) θα αυξήσει την πίεση που επικρατεί στο θάλαμο καύσης, με αποτέλεσμα να αυξηθεί η θερμοκρασία εξόδου του συμπιεστή και κατ' επέκταση να απαιτείται μεγαλύτερη ισχύς για την συμπίεση της ίδιας ποσότητας αέρα (W). Σημειώνεται και πάλι ότι η θερμοκρασία του αέρα από το αεροφυλάκιο ρυθμίζεται από τον εναλλάκτη ώστε να είναι ίση με T_d .

4.1.3 Θάλαμος καύσης

Ο αέρας προερχόμενος από το συμπιεστή και το αεροφυλάκιο (W_{tot}) εισέρχεται στο θάλαμο καύσης σε συνθήκες T_d και P_d όσον αφορά την θερμοκρασία και την πίεση. Εκεί εγχέεται καύσιμο και αναφλέγεται το μείγμα αέρα-καυσίμου. Έτσι, στην έξοδο του θαλάμου καύσης παράγονται καυσαέρια τα οποία έχουν θερμοκρασία T_f κατά πολύ υψηλότερη από εκείνη του αέρα στην είσοδο. Είναι προφανές ότι όσο μεγαλύτερη είναι η ροή του καυσίμου, τόσο υψηλότερη θα είναι και η θερμοκρασία στην έξοδο του θαλάμου καύσης. Αντίθετα, περισσότερη ροή αέρα στην είσοδο του θαλάμου καύσης, συνεπάγεται κατανομή της προσδιδόμενης θερμότητας σε μεγαλύτερη μάζα αέρα και κατ' επέκταση οδηγεί σε χαμηλότερη θερμοκρασία εξόδου T_f [11]. Αξίζει να σημειωθεί ότι η ροή του καυσίμου είναι πολύ μικρότερη από τη ροή μάζας του αέρα στο θάλαμο καύσης, με αποτέλεσμα να θεωρείται χωρίς σοβαρό υπολογιστικό σφάλμα ότι η ροή εξόδου των καυσαερίων ισούται με τη ροή εισόδου του αέρα. Με λίγα λόγια, γίνεται η παραδοχή ότι η ροή του καυσίμου δεν μεταβάλλει τη συνολική ροή του εργαζόμενου μέσου που εκτονώνεται στον στρόβιλο.

Σύμφωνα με την παραπάνω ανάλυση, προκύπτει η ακόλουθη προσεγγιστική σχέση για τη θερμοκρασία εξόδου T_f των καυσαερίων :

$$T_f = T_d + (T_{f0} - T_{d0}) \frac{W_f}{W_{tot}} \quad (4.13)$$

όπου W_f η ανά μονάδα ροή καυσίμου (ως προς την ονομαστική ροή καυσίμου), T_{d0} και T_{f0} οι ονομαστικές θερμοκρασίες εισόδου και εξόδου του θαλάμου καύσης, δηλαδή οι θερμοκρασίες που προκύπτουν όταν οι ροές W_f και W_{tot} έχουν τις ονομαστικές τους τιμές ($W_f = W_{tot} = 1,0$ ανά μονάδα). Σημειώνεται ξανά εδώ ότι η πίεση που επικρατεί στο θάλαμο καύσης θεωρείται ενιαία και ίση με P_d . Δηλαδή η καύση λαμβάνεται ως μια ισοβαρής μεταβολή.

4.1.4 Στρόβιλος

Η έξοδος του θαλάμου καύσης είναι η είσοδος του στροβίλου. Έτσι, τα καυσαέρια εισέρχονται στον στρόβιλο σε συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας P_d και T_f αντίστοιχα. Τα καυσαέρια εκτονώνονται στο στρόβιλο, παράγοντας το μηχανικό έργο για τη συμπίεση του αέρα στον συμπιεστή και για την κίνηση του άξονα της γεννήτριας που τροφοδοτεί το ηλεκτρικό φορτίο. Μετά την εκτόνωσή τους, τα καυσαέρια εξέρχονται από τον στρόβιλο σε συνθήκες P_i και T_e όσον αφορά την πίεση και τη θερμοκρασία αντίστοιχα.

Ο λόγος εκτόνωσης στον στρόβιλο (P) ισούται με το λόγο συμπίεσης στον συμπιεστή (P_c), δεδομένου ότι η πίεση εξόδου του πρώτου ταυτίζεται με την πίεση εισόδου του δεύτερου (πίεση περιβάλλοντος P_i), όπως επίσης και η πίεση εξόδου του συμπιεστή είναι ίδια με την πίεση εισόδου του στροβίλου (ενιαία πίεση θαλάμου καύσης P_d). Έτσι έχουμε [4]:

$$P_t = \frac{P_d}{P_i} = P_c \quad (4.14)$$

Για ιδανική ισεντροπική μεταβολή προκύπτει ότι [2]:

$$\frac{T_f}{T_e} = (P_t)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} = (P_c)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} = x \quad (4.15)$$

όπου T_e' η ισεντροπική θερμοκρασία εξόδου των καυσαερίων.

Η εκτόνωση όμως δεν είναι αντιστρεπτή. Έτσι ορίζεται ο εσωτερικός βαθμός απόδοσης του στροβίλου n_t ως εξής :

$$n_t = \frac{h_f - h_e}{h_f - h_{e'}} = \frac{T_f - T_e}{T_f - T_e'} \quad (4.16)$$

όπου :

- $h_{e'}$ η ιδανική ενθαλπία εξόδου των καυσαερίων από τον στρόβιλο
- h_e η πραγματική ενθαλπία εξόδου των καυσαερίων από τον στρόβιλο
- h_f η ενθαλπία εισόδου των καυσαερίων στον στρόβιλο
- T_e η πραγματική θερμοκρασία εξόδου των καυσαερίων από το στρόβιλο

Σύμφωνα με τις σχέσεις (4.15) και (4.16) προκύπτει η ακόλουθη σχέση, η οποία καθορίζει την πραγματική θερμοκρασία εξόδου των καυσαερίων από το στρόβιλο [4]:

$$T_e = T_f \left[1 - n_t \left(1 - \frac{1}{x} \right) \right] \quad (4.17)$$

όπου $x = (P_t)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} = (P_c)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}$ όπως προαναφέρθηκε.

Η ισχύς (σε kW) που παράγει ο στρόβιλος είναι :

$$P_{\text{στροβ}} = \dot{m}_{\text{tot}}(h_f - h_e) = \dot{m}_{\text{tot}} c_p (T_f - T_e)$$

με

$$\dot{m}_{\text{tot}} = W_{\text{tot}} \dot{m}_0$$

όπου \dot{m}_{tot} η συνολική ροή αέρα που εκτονώνεται στον στρόβιλο σε kg/s, $P_{\text{στροβ}}$ η παραγόμενη ισχύς του στροβίλου, c_p ο συντελεστής θερμοχωρητικότητας υπό σταθερή πίεση σε kJ/kg^oK, \dot{m}_0 η ονομαστική ροή αέρα του αεριοστροβίλου σε kg/s, και W_{tot} η συνολική ροή αέρα που εκτονώνεται στον στρόβιλο σε ανά μονάδα τιμή.

4.1.5 Αεροφυλάκιο - Δικλείδα αέρα

Το πλήρες μοντέλο του αεροφυλακίου αναπτύσσεται στην παράγραφο 4.2.10, και ο τρόπος ελέγχου του περιγράφεται στην ενότητα 4.3 με τη μορφή διαγραμμάτων βαθμίδων. Εδώ συνοψίζονται οι βασικές εξισώσεις που περιγράφουν την επίδραση του αεροφυλακίου στη λειτουργία του αεριοστροβίλου.

Θεωρώντας ότι η πίεση που επικρατεί στο αεροφυλάκιο είναι p_{ch} σε ανά μονάδα τιμή ως προς την ονομαστική πίεση P_{d0} του θαλάμου καύσης, προκύπτει ότι :

$$P_{ch} = \frac{P_{ch}}{P_{d0}} \quad (4.18)$$

Ορίζοντας ως p_d την ανά μονάδα τιμή της πίεσης στο θάλαμο καύσης, έχουμε :

$$p_d = \frac{P_d}{P_{d0}} \quad (4.19)$$

Η ροή του αέρα W_1 , σε ανά μονάδα τιμή ως προς την ονομαστική ροή του αεριοστροβίλου, που θα προκύψει από το αεροφυλάκιο δίνεται από την ακόλουθη σχέση [1]:

$$W_1 = k(p_{ch} - p_d)$$

όπου k το μεταβλητό άνοιγμα της δικλείδας αέρα σε ανά μονάδα τιμή.

Λόγω της συμπιεστότητας του αέρα, η ανά μονάδα ροή W_{ch} που εισέρχεται στο θάλαμο καύσης δεν μεταβάλλεται ακαριαία [2]. Θεωρώντας ως T_{ch} τη σταθερά χρόνου μεταβολής της εγχεόμενης ροής στο θάλαμο καύσης, προκύπτει η παρακάτω διαφορική εξίσωση :

$$T_{ch} \dot{W}_{ch} = W_1 - W_{ch} = k(p_{ch} - p_d) - W_{ch} \quad (4.20)$$

Το άνοιγμα της δικλείδας αέρα k , καθορίζεται από τις διατάξεις ελέγχου που περιγράφονται διεξοδικά στην παράγραφο 4.2.10. Όσο το αεροφυλάκιο είναι ανενεργό, η δικλείδα είναι κλειστή ($k = 0$), με αποτέλεσμα η ροή του αεροφυλακίου να είναι μηδενική. Όταν το αεροφυλάκιο ενεργοποιηθεί, τότε η δικλείδα ανοίγει, και η ροή μάζας αέρα είναι ανάλογη της διαφοράς πίεσεως μεταξύ αεροφυλακίου και θαλάμου καύσης.

Όσον αφορά την πίεση που επικρατεί στο αεροφυλάκιο, εξαρτάται από τη μάζα αέρα που το έχει εγκαταλείψει, από την αρχική πίεση στην οποία ευρισκόταν καθώς και από τον όγκο του αεροφυλακίου. Έτσι, έχουμε σύμφωνα με την επόμενη διαφορική εξίσωση [1]:

$$T_{cap} \dot{p}_{ch} = -W_{ch} \quad (4.21)$$

όπου T_{cap} σταθερά εξαρτώμενη από τον όγκο του αεροφυλακίου, με αρχική ανά μονάδα πίεση $p_{ch0} = p_{in}$.

4.1.6 Προσδιορισμός σημείου λειτουργίας

Στις προηγούμενες παραγράφους περιγράφηκαν οι διατάξεις οι οποίες συνθέτουν το μοντέλο του αεριοστροβίλου με ενσωματωμένο το αεροφυλάκιο, και δόθηκαν οι απαραίτητες σχέσεις που τις μοντελοποιούν. Η τελική έξοδος του αεριοστροβίλου είναι η μηχανική ισχύς που παράγει. Η καθαρά παραγόμενη ισχύς ισούται με τη διαφορά του έργου που καταναλώνει ο συμπιεστής από το έργο που παράγει ο στρόβιλος. Για συνυπολογίσουμε και τις μηχανικές απώλειες του άξονα περιστροφής, ορίζουμε τον ισοδύναμο μηχανικό βαθμό απόδοσης του

αεριοστροβίλου $\eta_{\text{ΜΣ}}$. Έτσι, η καθαρή μηχανική ισχύς $P_{\text{μηχ}}$ (kW) που παράγει η μονάδα του αεριοστροβίλου και αποδίδεται στη γεννήτρια ισούται με [2]:

$$P_{\text{μηχ}} = \eta_{\text{ΜΣ}} \left(\dot{m}_{\text{tot}} c_p (T_f - T_e) - \dot{m} c_p (T_d - T_i) \right) = \eta_{\text{ΜΣ}} \dot{m}_0 c_p (W_{\text{tot}} (T_f - T_e) - W (T_d - T_i)) \quad (4.22)$$

Σύμφωνα με την εξίσωση (4.22), η ονομαστική ισχύς P_{mN} που παράγει ο αεριοστροβίλος δίνεται από τη σχέση :

$$P_{\text{mN}} = \eta_{\text{ΜΣ}} c_p \dot{m}_0 [T_{f0} - T_{e0} - T_{d0} + T_i] \quad (4.23)$$

όπου ο δείκτης 0 υποδηλώνει ονομαστικά μεγέθη.

Διαιρώντας κατά μέλη τις εξισώσεις (4.22) και (4.23), λαμβάνουμε την ανά μονάδα παραγόμενη μηχανική ισχύ του αεριοστροβίλου P_m :

$$P_m = \frac{P_{\text{μηχ}}}{P_{\text{mN}}} = \frac{W_{\text{tot}} (T_f - T_e) - W (T_d - T_i)}{[T_{f0} - T_{e0} - T_{d0} + T_i]} = K_1 [W_{\text{tot}} (T_f - T_e) - W (T_d - T_i)] \quad (4.24)$$

όπου

$$K_1 = \frac{1}{[T_{f0} - T_{e0} - T_{d0} + T_i]} \quad (4.25)$$

Στη μόνιμη κατάσταση το αεροφυλάκιο είναι ανενεργό, άρα $W_{\text{ch}} = 0$. Συμπερασματικά, η ροή αέρα που εκτονώνεται στον στρόβιλο είναι η ροή αέρα που συμπιέζει ο συμπιεστής, και επομένως ισχύει ότι $W_{\text{tot}} = W$ στους παραπάνω τύπους.

Για τον προσδιορισμό του σημείου λειτουργίας, δηλαδή της αρχικής κατάστασης λειτουργίας του αεριοστροβίλου πριν από κάποια διαταραχή, πρέπει να προσδιορίσουμε το σύνολο των εξισώσεων που δίνουν τις αρχικές συνθήκες του συστήματος. Τα δεδομένα του προβλήματος είναι η πίεση P_i και η θερμοκρασία περιβάλλοντος T_i , οι εσωτερικοί βαθμοί απόδοσης η_c και η_t του συμπιεστή και του στροβίλου αντίστοιχα, η ταχύτητα περιστροφής N (1,0 ανά μονάδα στη μόνιμη κατάσταση), η ονομαστική πίεση στο θάλαμο καύσης P_{d0} απ' όπου προκύπτει και ο ονομαστικός λόγος συμπίεσης P_{c0} σύμφωνα με την (4.10), ο συντελεστής θερμοχωρητικότητας c_p , η ονομαστική ροή μάζας αέρα του αεριοστροβίλου \dot{m}_0 , οι ονομαστικές θερμοκρασίες στην είσοδο (T_{d0}) και έξοδο (T_{f0}) του θαλάμου καύσης και στην έξοδο του στροβίλου (T_{e0}), ο λόγος των θερμοχωρητικοτήτων γ , και ο μηχανικός βαθμός απόδοσης $\eta_{\text{ΜΣ}}$ του αεριοστροβίλου.

Άλλη μία συνθήκη προκύπτει από την κατάσταση ισορροπίας, δηλαδή ότι η ισχύς που παράγει ο αεριοστροβίλος ($P_{\text{μηχ}}$) ισούται με την ισχύ της γεννήτριας (P_e) στη μόνιμη κατάσταση [2]. Το φορτίο θα είναι γνωστή παράμετρος στην αρχική επίλυση. Συνεπώς :

$$P_{\text{μηχ}} = P_e \quad (4.26)$$

Οι εξισώσεις προς επίλυση λοιπόν είναι οι (4.26), (4.22), (4.17), (4.13), (4.9), (4.7), (4.6), (4.5), (4.4) σε συνδυασμό με τις συνθήκες μόνιμης κατάστασης, δηλαδή ότι $W_{\text{ch}} = 0$ και $N=1$. Οι άγνωστοι που προκύπτουν είναι : $P_{\text{μηχ}}$, W_{tot} , W , T_f , T_e , T_d , x , W_f , P_c , g . Συνεπώς

έχουμε 9 εξίσώσεις με 10 αγνώστους. Για να επιλυθεί το πρόβλημα της εύρεσης του αρχικού σημείου λειτουργίας χρειαζόμαστε άλλη μία συνθήκη, η οποία προκύπτει από τον τρόπο λειτουργίας του αεριοστροβίλου. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, υπάρχει δυνατότητα ρύθμισης της ροής μάζας αέρα που συμπιέζει ο συμπιεστής, μέσω της μεταβολής του ανοίγματος g των πτερυγίων εισόδου. Όπως αναφέρεται στο [4], υπάρχουν 3 περιοχές λειτουργίας του αεριοστροβίλου, ανάλογα με το ηλεκτρικό φορτίο το οποίο τροφοδοτείται :

- 1) Στην πρώτη περιοχή, τα πτερύγια είναι πλήρως ανοικτά στη μέγιστη τιμή τους ($g=1$) και η ροή αέρα συνεπώς είναι ονομαστική. Για μεγάλα φορτία, απαιτείται μεγάλη ποσότητα καυσίμου και συνεπώς η θερμοκρασία εξόδου των καυσαερίων από το θάλαμο καύσης είναι επίσης υψηλή. Το γεγονός αυτό είναι επιθυμητό, μιας και όσο μεγαλύτερη είναι η θερμοκρασία των καυσαερίων στην είσοδο του στροβίλου, τόσο πιο αποδοτική είναι η λειτουργία του αεριοστροβίλου. Καθώς το φορτίο μειώνεται, η έγχυση καυσίμου ελαττώνεται επίσης, με αποτέλεσμα για δεδομένη ποσότητα αέρα, η θερμοκρασία στην έξοδο του θαλάμου καύσης να πέφτει σύμφωνα με τη σχέση (4.13). Μετά από κάποιο σημείο, ο θερμοδυναμικός κύκλος του αεριοστροβίλου παύει να είναι αποδοτικός, μιας και η θερμοκρασία T_f είναι πλέον αρκετά χαμηλή συγκριτικά με την ονομαστική που δίνει ο κατασκευαστής. Για να αποφευχθεί το γεγονός αυτό, καθορίζεται μια ελάχιστη τιμή της θερμοκρασίας T_{r1} όπου η απόδοση του κύκλου παραμένει στα επιθυμητά επίπεδα. Έτσι προκύπτει ένα κατώτατο όριο του ηλεκτρικού φορτίου P_{e1} που αντιστοιχεί στην παραπάνω οριακή θερμοκρασία T_{r1} , άνω του οποίου τα πτερύγια είναι πλήρως ανοικτά. Αν το φορτίο είναι χαμηλότερο από το παραπάνω όριο, τότε βρισκόμαστε στη δεύτερη περιοχή λειτουργίας του αεριοστροβίλου. Έτσι, η τελευταία εξίσωση που χρειαζόμαστε και η αντίστοιχη συνθήκη είναι :

$$g = 1 , \quad P_e > P_{e1} \quad (4.27)$$

- 2) Στη δεύτερη περιοχή λειτουργίας επιχειρείται να διατηρηθεί σταθερή η θερμοκρασία των καυσαερίων στην παραπάνω κατώτατη τιμή T_{r1} . Στο όριο μεταξύ των περιοχών 1 και 2, το ηλεκτρικό φορτίο είναι P_{e1} και η θερμοκρασία των καυσαερίων T_{r1} . Για φορτία μικρότερα του ορίου αυτού, καθορίζεται το άνοιγμα των πτερυγίων έτσι ώστε η θερμοκρασία των καυσαερίων να είναι σταθερά $T_f = T_{r1}$. Σημειώνεται ότι υπάρχει μια ελάχιστη τιμή της ροής αέρα W_{min} , κάτω της οποίας υπάρχει ο κίνδυνος αστάθειας. Επομένως, η ρύθμιση των πτερυγίων και κατ' επέκταση της ροής της μάζας αέρα λαμβάνει χώρα έως ότου η ροή μάζας αέρα γίνει ίση με W_{min} . Από εκεί και κάτω, βρισκόμαστε στην 3^η περιοχή λειτουργίας του αεριοστροβίλου. Έτσι, η τελευταία εξίσωση για τον προσδιορισμό του σημείου λειτουργίας και η αντίστοιχη συνθήκη είναι :

$$T_f = T_{r1}, \quad P_{e2} < P_e < P_{e1} \quad (4.28)$$

όπου P_{e2} η ισχύς του φορτίου που αντιστοιχεί στο ελάχιστο επιτρεπόμενο όριο της ροής μάζας αέρα W_{min} .

- 3) Στην τρίτη περιοχή, η ροή αέρα δεν μπορεί να μειωθεί περαιτέρω, συνεπώς παραμένει στην ελάχιστη επιτρεπόμενη τιμή της W_{min} . Είναι προφανές ότι για φορτία

μικρότερα από P_{e2} , η θερμοκρασία των καυσαερίων θα είναι μικρότερη από το όριο T_{r1} , με αποτέλεσμα η απόδοση του θερμοδυναμικού κύκλου να μειώνεται. Συμπερασματικά, στην τρίτη περιοχή, η τελευταία εξίσωση που προσδιορίζει το σημείο λειτουργίας και η αντίστοιχη συνθήκη είναι :

$$W = W_{\min}, \quad P_e < P_{e2} \quad (4.29)$$

Συνοψίζοντας, λαμβάνοντας υπόψιν τις σχέσεις (4.27), (4.28) και (4.29), καταλήγουμε στην παρακάτω σχέση, η οποία είναι η τελική έκφραση της 10^{ns} εξίσωσης που χρειαζόμαστε για τον προσδιορισμό του αρχικού σημείου λειτουργίας του αεριοστροβίλου :

$$\begin{aligned} g &= 1, & P_e &> P_{e1} \\ T_f &= T_{r1}, & P_{e2} &< P_e < P_{e1} \\ W &= W_{\min}, & P_e &< P_{e2} \end{aligned} \quad (4.30)$$

Η οριακή θερμοκρασία T_{r1} και η ελάχιστη ροή μάζας αέρα W_{\min} προσδιορίζονται από τον κατασκευαστή. Η ισχύς P_{e1} , η οποία αποτελεί το όριο της πρώτης περιοχής προσδιορίζεται από την επίλυση των εξισώσεων (4.26), (4.22), (4.17), (4.13), (4.9), (4.7), (4.6), (4.5), (4.4) με τις συνθήκες $g=1$ και $T_f = T_{r1}$ (11 εξισώσεις - 11 άγνωστοι). Η ισχύς P_{e2} , που αποτελεί το όριο μετάβασης από την 2^η στην 3^η περιοχή, προσδιορίζεται από την επίλυση των ίδιων εξισώσεων, με τις συνθήκες $W = W_{\min}$ και $T_f = T_{r1}$ (11 εξισώσεις- 11 άγνωστοι). Συνεπώς, η σχέση (4.30) είναι πλήρως καθορισμένη.

Τέλος, συνδυάζοντας τις προηγούμενες 9 εξισώσεις (4.26), (4.22), (4.17), (4.13), (4.9), (4.7), (4.6), (4.5), (4.4) με την (4.30), προκύπτουν 10 εξισώσεις με 10 αγνώστους, οπότε προσδιορίζεται το αρχικό σημείο λειτουργίας του αεριοστροβίλου για κάθε δεδομένο ηλεκτρικό φορτίο.

4.2 Διατάξεις ελέγχου και συναρτήσεις μεταφοράς μοντέλου αεριοστροβίλου-αεροφυλακίου

4.2.1 Γενικά

Στην προηγούμενη ενότητα παρουσιάστηκαν οι βασικές εξισώσεις που καθορίζουν το μοντέλο του αεριοστροβίλου σε μελέτες ευστάθειας ΣΗΕ. Στις εξισώσεις αυτές ενσωματώθηκε και η επίδραση της ροής μάζας αέρα από την χρήση του αεροφυλακίου. Όπως αναφέρθηκε στην τελευταία παράγραφο της ενότητας 4.1, σε κάθε τιμή P_e του ηλεκτρικού φορτίου της γεννήτριας αντιστοιχεί ένα συγκεκριμένο αρχικό σημείο λειτουργίας.

Στην ενότητα αυτή αναπτύσσονται οι διατάξεις ελέγχου του αεριοστροβίλου, οι οποίες καθορίζουν την έγχυση καυσίμου στο θάλαμο καύσης καθώς και τη ροή αέρα του συμπιεστή και του αεροφυλακίου στη μεταβατική κατάσταση λειτουργίας, και περιγράφονται επίσης οι βασικές συνιστώσες που παριστάνουν τη δυναμική του αεριοστροβίλου. Στο Σχήμα 4.3 παριστάνεται το διάγραμμα λειτουργίας του αεριοστροβίλου. Σημειώνεται ότι όλα τα μεγέθη

τα οποία εμφανίζονται στο συγκεκριμένο σχήμα είναι σε ανά μονάδα τιμές, εκτός της θερμοκρασίας περιβάλλοντος T_i .

Το μπλοκ διάγραμμα 'εξισώσεις ενεργειακής μετατροπής' έχει ως είσοδο την ανά μονάδα ροή καυσίμου W_f , την ανά μονάδα ροή μάζας αέρα εκ του συμπιεστή W , την ανά μονάδα ροή αέρα προερχόμενη από το αεροφυλάκιο W_{ch} και τη θερμοκρασία περιβάλλοντος T_i . Μέσω των εξισώσεων που αναφέρθηκαν στην ενότητα 4.1 προσδιορίζεται η ανά μονάδα παραγόμενη ισχύς P_m από το θερμοδυναμικό σύστημα, η ανά μονάδα τιμή της θερμοκρασίας των καυσαερίων $T_{ep,u}$ και η ανά μονάδα τιμή της πίεσης στο θάλαμο καύσης p_d . Η ισχύς P_m μετατρέπεται σε περιστροφική ισχύ P_{out} μέσω του μπλοκ διαγράμματος 'δυναμική αεριοστροβίλου'.

Στη συνέχεια ακολουθεί το μπλοκ 'αδράνεια γεννήτριας-ρυθμιστής στροφών', όπου μοντελοποιείται η αδράνεια του άξονα περιστροφής και η λειτουργία του ρυθμιστή στροφών. Οι είσοδοι του μοντέλου είναι η ανά μονάδα ηλεκτρική και μηχανική ισχύς ($P_{ep,u}$ και P_{out} αντίστοιχα) καθώς και το σήμα N_{ref} το οποίο καθορίζει την αρχική έγχυση καυσίμου με βάση την αρχικοποίηση του αεριοστροβίλου. Οι έξοδοι του μοντέλου είναι το σήμα ζήτησης καυσίμου του ρυθμιστή στροφών F_c , η ταχύτητα περιστροφής του άξονα N , και ο ρυθμός μεταβολής της ταχύτητας N_r , σε ανά μονάδα τιμές.

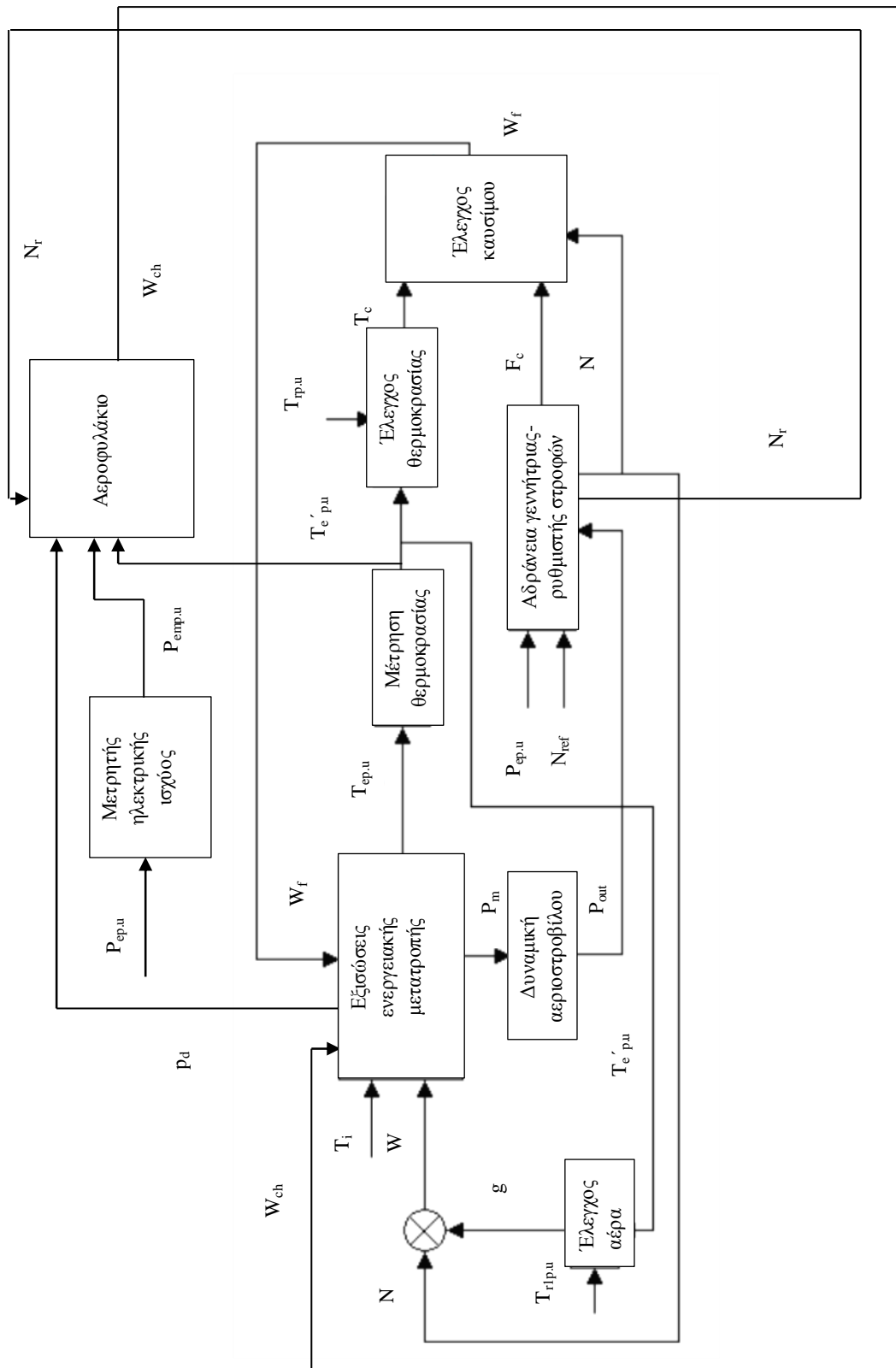
Η ανά μονάδα θερμοκρασία των καυσαερίων $T_{ep,u}$ μετρείται και προκύπτει η μετρούμενη τιμή της $T_{e'p,u}$. Στην συνέχεια, η μετρούμενη θερμοκρασία των καυσαερίων εισέρχεται στο μπλοκ 'έλεγχος θερμοκρασίας', όπου και συγκρίνεται με μια οριακή θερμοκρασία $T_{rp,u}$. Στην έξοδο της διάταξης αυτής προκύπτει το σήμα T_c , το οποίο είναι σήμα περιορισμού για την έγχυση καυσίμου σε ανά μονάδα τιμή.

Ακολουθεί το μπλοκ διάγραμμα 'έλεγχος καυσίμου', στο οποίο εισέρχονται τα σήματα F_c και T_c για την έγχυση καυσίμου, καθώς και η ανά μονάδα ταχύτητα περιστροφής N . Το μικρότερο εκ των F_c και T_c καθορίζει την έξοδο, την πραγματική έγχυση καυσίμου στο θάλαμο καύσης W_f .

Η μετρούμενη θερμοκρασία των καυσαερίων $T_{e'p,u}$ εισέρχεται επίσης στο μπλοκ διάγραμμα 'έλεγχος αέρα', όπου συγκρίνεται με μια θερμοκρασία αναφοράς $T_{r1p,u}$. Η απόκλιση της θερμοκρασίας από το όριο αυτό, καθορίζει το ανά μονάδα άνοιγμα των πτερυγίων g .

Τέλος, η ανά μονάδα ηλεκτρική ισχύς $P_{ep,u}$ μετρείται και προκύπτει το σήμα $P_{emp,u}$. Το σήμα αυτό, μαζί με την ανά μονάδα τιμή του ρυθμού μεταβολής της ταχύτητας N_r , την ανά μονάδα τιμή της μετρούμενης θερμοκρασίας των καυσαερίων $T_{e'p,u}$ και την ανά μονάδα τιμή της πίεσεως στο θάλαμο καύσης p_d , εισέρχονται στη διάταξη του αεροφυλακίου. Η έξοδος της διάταξης αυτής είναι η ανά μονάδα ροή μάζας αέρα W_{ch} που προκύπτει προς το θάλαμο καύσης.

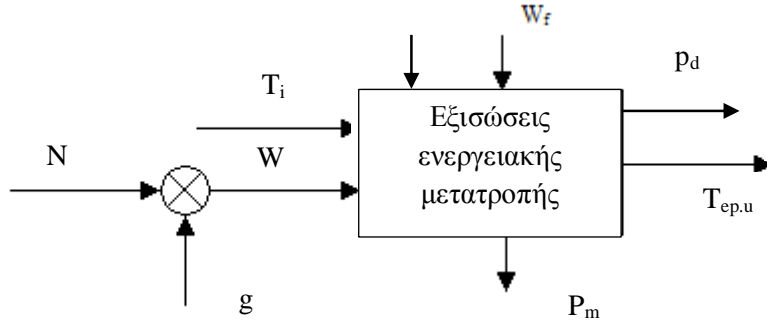
Στις επόμενες παραγράφους περιγράφεται αναλυτικά το κάθε μπλοκ διάγραμμα του μοντέλου του αεριοστροβίλου.



Σχήμα 4.3: Διάγραμμα λειτουργίας αεριοστροβίλου

4.2.2 Εξισώσεις ενεργειακής μετατροπής

Το μπλοκ διάγραμμα του Σχήματος 4.4 είναι υπεύθυνο για τον υπολογισμό σε κάθε χρονική στιγμή της ανά μονάδα τιμής της παραγόμενης ισχύος P_m από το θερμοδυναμικό σύστημα, της ανά μονάδα θερμοκρασίας των καυσαερίων $T_{ep,u}$ και της ανά μονάδα τιμής της πίεσης στο θάλαμο καύσης p_d . Οι είσοδοι της διάταξης είναι οι ανά μονάδα τιμές των ροών αέρα του συμπιεστή W και του αεροφυλακίου W_{ch} , η ανά μονάδα τιμή της έγχυσης καυσίμου W_f και η θερμοκρασία περιβάλλοντος T_i σε °K. Παρατηρούμε ότι τα προαναφερθέντα μεγέθη είναι όλα σε ανά μονάδα τιμές, εκτός της θερμοκρασίας περιβάλλοντος.



Σχήμα 4.4: Θερμοδυναμικές εξισώσεις

Η ανά μονάδα τιμή της πίεσης στο θάλαμο καύσης προκύπτει από τις σχέσεις (4.7), (4.8), και είναι [1]:

$$p_d = W + W_{ch} \quad (4.31)$$

Η ανά μονάδα παραγόμενη ισχύς από το θερμοδυναμικό σύστημα P_m δίνεται από τις σχέσεις (4.4), (4.6), (4.7), (4.13), (4.17), (4.24) και (4.25).

Η σχέση (4.17) προσδιορίζει την θερμοκρασία εξόδου των καυσαερίων από το στρόβιλο σε βαθμούς °K. Για να μετατραπεί λοιπόν η θερμοκρασία T_e σε ανά μονάδα, διαιρείται με την ονομαστική της τιμή T_{e0} . Έτσι έχουμε :

$$T_{ep,u} = \frac{T_f}{T_{e0}} \left[1 - \eta_t \left(1 - \frac{1}{X} \right) \right] \quad (4.32)$$

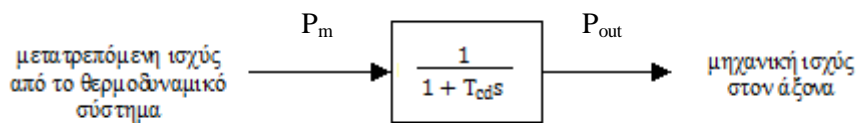
Όλες οι παραπάνω εξισώσεις έχουν ενσωματωθεί στο μπλοκ διάγραμμα του Σχήματος 4.4. Τέλος, ο υπολογισμός της ροής αέρα του συμπιεστή W γίνεται σύμφωνα με τη σχέση (4.6).

Έτσι, σε κάθε δεδομένη χρονική στιγμή της λειτουργίας του αεριοστροβίλου, μέσω των ενεργειακών εξισώσεων προσδιορίζεται η παραγόμενη ισχύς, η θερμοκρασία των καυσαερίων και η πίεση του θαλάμου καύσης, σε ανά μονάδα τιμές.

4.2.3 Δυναμική συμπεριφορά αεριοστροβίλου

Στην προηγούμενη παράγραφο είδαμε τον τρόπο με τον οποίο υπολογίζεται η ανά μονάδα παραγόμενη ισχύς P_m από το θερμοδυναμικό σύστημα. Για κάθε δεδομένη ποσότητα ροής καυσίμου, αέρα από το αεροφυλάκιο και από το συμπιεστή, και για συγκεκριμένη

θερμοκρασία περιβάλλοντος, προκύπτει μέσω αλγεβρικών εξισώσεων η θερμοδυναμικά προσδιοριζόμενη μηχανική ισχύς P_m . Στην περίπτωση που κάποιο από τα μεγέθη εισόδου μεταβληθεί, μεταβάλλεται ακαριαία και η ισχύς αυτή. Στην πραγματικότητα υπάρχει μια χρονική υστέρηση από τη στιγμή που κάποιο από τα προσδιοριστικά μεγέθη της ισχύος μεταβληθεί μέχρι να μεταβληθεί η ισχύς που αποδίδεται στον άξονα περιστροφής [2]. Έτσι, λόγω της κατανομής της ισχύος σε διάφορες βαθμίδες στροβίλων και συμπιεστών, καθώς και λόγω της συμπιεστότητας του αέρα, οποιαδήποτε μεταβολή συντελείται σταδιακά με μια συγκεκριμένη χρονική σταθερά. Η χρονική υστέρηση αυτή εκφράζεται με μια συνάρτηση μεταφοράς 1^{ης} τάξης, η οποία φαίνεται στο Σχήμα 4.5. Η είσοδος της διάταξης είναι η υπολογισμένη ισχύς P_m από τις ενεργειακές εξισώσεις, και η έξοδος είναι η πραγματική ανά μονάδα ισχύς εξόδου P_{out} που αποδίδεται στον άξονα.



Σχήμα 4.5 : Πραγματική αποδιδόμενη ισχύς στον άξονα περιστροφής

Από το Σχήμα 4.5 προκύπτει η ακόλουθη συνάρτηση μεταφοράς, η οποία καθορίζει την πραγματική ανά μονάδα παραγόμενη ισχύ του αεριοστροβίλου [4]:

$$\frac{P_{out}}{P_m} = \frac{1}{1 + T_{cd}s} \quad (4.33)$$

όπου T_{cd} είναι η χρονική σταθερά σε s, η οποία εκφράζει την χρονική υστέρηση μεταβολής της μηχανικής ισχύος όπως αναφέρθηκε.

4.2.4 Μηχανικό μοντέλο γεννήτριας

Στην παράγραφο αυτή μοντελοποιείται η δυναμική του άξονα περιστροφής. Δεδομένου ότι το μοντέλο του αεριοστροβίλου που αναπτύσσουμε αναφέρεται στην απομονωμένη λειτουργία της γεννήτριας που συνδέεται στον εν λόγω άξονα, η ηλεκτρική συχνότητα ταυτίζεται με τη συχνότητα περιστροφής του άξονα [3]. Ως γνωστόν, η παραγόμενη περιστροφική ισχύς του αεριοστροβίλου προκαλεί την επιταχύνουσα ροπή, ενώ η ηλεκτρική ισχύς που αποδίδεται στο φορτίο προκαλεί τη ροπή επιβράδυνσης. Η εξίσωση επιταχύνσεως δίνεται από την ακόλουθη σχέση [2]:

$$P_{out} - P_{ep.u.} = 2HN_r \quad (4.34)$$

όπου P_{out} η πραγματική ανά μονάδα παραγόμενη περιστροφική ισχύς του αεριοστροβίλου, $P_{ep.u.}$ η ανά μονάδα παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς της γεννήτριας, H η ανηγμένη χρονική σταθερά αδρανείας του άξονα σε s, και N_r ο ρυθμός μεταβολής της συχνότητας σε ανά μονάδα τιμή. Στην περίπτωση που η μηχανική ισχύς υπερβαίνει την ηλεκτρική ο άξονας επιταχύνεται, μιας και σύμφωνα με τη σχέση (4.34) ισχύει $N_r > 0$. Αντιθέτως, αν η μηχανική ισχύς υπολείπεται της ηλεκτρικής, ο άξονας επιβραδύνεται αφού είναι $N_r < 0$. Στην

κατάσταση ισορροπίας η ηλεκτρική ισχύς ισούται με τη μηχανική, με αποτέλεσμα η ταχύτητα περιστροφής να είναι σταθερή και ίση με την ονομαστική ($N=1,0$ ανά μονάδα και $N_r=0$).

Λύνοντας την (4.34) ως προς N_r έχουμε :

$$N_r = \frac{P_{out} - P_{ep.u.}}{2H} \quad (4.35)$$

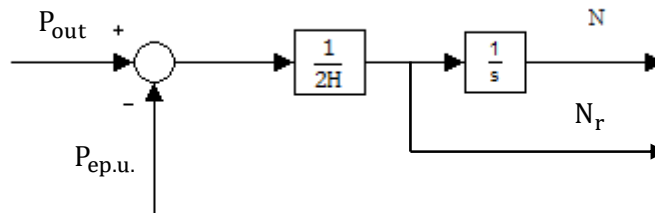
Ισχύει επίσης ότι:

$$N_r = \frac{dN}{dt} \quad (4.36)$$

Αντικαθιστώντας τον τελεστή $\frac{d}{dt}$ με τον τελεστή Laplace s , η σχέση (4.35) γίνεται :

$$N = \frac{P_{out} - P_{ep.u.}}{2Hs} \quad (4.37)$$

Έτσι προκύπτει το Σχήμα 4.6, όπου συναρτήσει της διαφοράς των ισχύων εξάγεται η ταχύτητα περιστροφής του άξονα N και ο ρυθμός μεταβολής της ταχύτητας N_r , σε ανά μονάδα τιμές.



Σχήμα 4.6 :Μηχανικό μοντέλο γεννήτριας

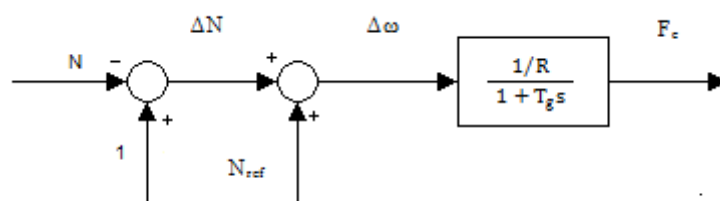
4.2.5 Ρυθμιστής στροφών

Όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη παράγραφο, στην μόνιμη κατάσταση λειτουργίας η μηχανική παραγόμενη ισχύς του αεριοστροβίλου ισούται με την ηλεκτρική ισχύ που αποδίδεται στο φορτίο. Κατ' αυτόν τον τρόπο, η συχνότητα του συστήματος είναι στην ονομαστική της τιμή ($N=1,0$ ανά μονάδα). Σημειώνεται ότι η ταχύτητα περιστροφής του άξονα και η συχνότητα είναι ίσες σε ανά μονάδα μεγέθη. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιείται ενιαίος συμβολισμός N ο οποίος αναφέρεται ταυτόχρονα στην ανά μονάδα τιμή της ταχύτητας περιστροφής του άξονα, στην ανά μονάδα τιμή της συχνότητας περιστροφής και στην ανά μονάδα τιμή της ηλεκτρικής συχνότητας του δικτύου. Η ηλεκτρική συχνότητα ισούται με τη μηχανική, διότι το μοντέλο αυτό του αεριοστροβίλου αναφέρεται σε απομονωμένη λειτουργία, δηλαδή γίνεται η θεώρηση πως η μόνη μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας είναι αυτή του αεριοστροβίλου.

Τα ηλεκτρικά φορτία ως γνωστόν δεν είναι σταθερά αλλά μεταβάλλονται διαρκώς με την πάροδο του χρόνου. Συνεπώς, κάθε μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας πρέπει να έχει τη δυνατότητα να ρυθμίσει την παραγωγή της έτσι ώστε να προσαρμόζεται κάθε φορά στις απαιτήσεις του φορτίου. Το ρόλο αυτό της ρύθμισης της παραγόμενης ισχύος τον διαδραματίζει ο ρυθμιστής στροφών. Στην περίπτωση που το φορτίο μεταβληθεί,

διαταράσσεται το ισοζύγιο ισχύος, και με βάση τη σχέση (4.37) η ταχύτητα μεταβάλλεται. Συγκεκριμένα, εξετάζοντας τη σχέση (4.35), αν το φορτίο αυξηθεί τότε η ηλεκτρική ισχύς υπερβαίνει τη μηχανική με αποτέλεσμα ο άξονας να επιβραδύνεται. Αντίθετα, αν το φορτίο μειωθεί, τότε η ηλεκτρική ισχύς υπολείπεται της μηχανικής, και συνεπώς ο άξονας επιταχύνεται. Η απόκλιση λοιπόν που εμφανίζεται στη συχνότητα από τα ονομαστικά επίπεδα υποδηλώνει την αύξηση ή τη μείωση του φορτίου. Ο ρόλος του ρυθμιστή στροφών είναι να αυξομειώνει την έγχυση καυσίμου ανάλογα με το σφάλμα που εμφανίζεται στη συχνότητα. Συγκεκριμένα, στην περίπτωση που παρατηρηθεί πτώση της συχνότητας, αυτό σημαίνει πως το φορτίο έχει αυξηθεί και κατά συνέπεια πρέπει να αυξηθεί αναλογικά και η έγχυση καυσίμου στο θάλαμο καύσης. Αντίθετα, αν η συχνότητα σημειώσει άνοδο, το γεγονός αυτό υποδηλώνει την μείωση του τροφοδοτούμενου φορτίου, με αποτέλεσμα να πρέπει να μειωθεί το καύσιμο που εγχέεται στο θάλαμο καύσης.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, ο ρυθμιστής στροφών δέχεται το σφάλμα της συχνότητας ως είσοδο, και παράγει στην έξοδό του το κατάλληλο σήμα για την έγχυση καυσίμου. Το διάγραμμα βαθμίδων του ρυθμιστή στροφών απεικονίζεται στο Σχήμα 4.7 [4]:



Σχήμα 4.7: Ρυθμιστής στροφών

Από το Σχήμα 4.7 παρατηρούμε ότι η εντολή για έγχυση καυσίμου F_c (ανά μονάδα τιμή) στο θάλαμο καύσης προκύπτει ως :

$$\frac{RF_c}{\Delta\omega} = \frac{1}{1 + T_g s} \quad (4.38)$$

όπου R ο στατισμός της μονάδας, T_g χρονική σταθερά που εκφράζει τη χρονική καθυστέρηση του ρυθμιστή στροφών, και $\Delta\omega$ το σήμα για την αυξομείωση της έγχυσης καυσίμου. Το σήμα $\Delta\omega$ προκύπτει από την πρόσθεση των σημάτων N_{ref} και ΔN . Το σήμα N_{ref} είναι υπεύθυνο για την έγχυση καυσίμου στο θάλαμο καύσης στην μόνιμη κατάσταση λειτουργίας του αεριοστροβίλου, και προκύπτει από την αρχικοποίηση του μοντέλου. Το σήμα ΔN εκφράζει την απόκλιση της ανά μονάδα συχνότητας N από την ονομαστική της τιμή.

Στην μόνιμη κατάσταση είναι $N=1$ όπως προαναφέρθηκε, και συνεπώς $\Delta N = 0$. Επομένως, από το Σχήμα 4.7 προκύπτει ότι $\Delta\omega = N_{ref}$. Επιπλέον, σε συνθήκες μόνιμης κατάστασης, ο τελεστής Laplace γίνεται $s = 0$. Συμπερασματικά, από τη σχέση (4.38) προκύπτει ότι :

$$F_{c0} = \frac{N_{ref}}{R} \quad (4.39)$$

Επιβεβαιώνεται μέσω της σχέσης (4.39) ότι το σήμα N_{ref} καθορίζει την αρχική έγχυση καυσίμου στο θάλαμο καύσης F_{c0} , σε συνθήκες μόνιμης κατάστασης δηλαδή. Στη μόνιμη

κατάσταση υπάρχει ισορροπία μεταξύ της παραγόμενης και της καταναλισκόμενης ισχύος. Συνεπώς, το σήμα F_{c0} από τη σχέση (4.39) ορίζει την έγχυση καυσίμου εκείνη για την οποία η μηχανική ισχύς που παράγεται είναι ίση με την αρχική ηλεκτρική ισχύ του φορτίου.

Στην περίπτωση αύξησης του ηλεκτρικού φορτίου, παρατηρείται υποσυχνότητα ($N < 1$) με αποτέλεσμα ο όρος $\Delta N = 1 - N$ να είναι θετικός. Έτσι, το σήμα $\Delta\omega$ από την αρχική τιμή του N_{ref} αρχίζει να αυξάνει. Κατά συνέπεια, όπως παρατηρείται από τη σχέση (4.38), θα αρχίσει να αυξάνει και η έγχυση καυσίμου F_c , και μέσω των ενεργειακών εξισώσεων θα αυξηθεί και η παραγόμενη ισχύς. Όσο μεγαλύτερο είναι το σφάλμα της συχνότητας, τόσο μεγαλύτερη θα είναι και η έγχυση καυσίμου στο θάλαμο καύσης.

Ακριβώς το αντίθετο συμβαίνει στην περίπτωση μείωσης του ηλεκτρικού φορτίου, όπου ο όρος $\Delta N = 1 - N$ είναι τώρα αρνητικός, μιας και εμφανίζεται υπερσυχνότητα ($N > 1$). Έτσι, το σήμα $\Delta\omega$ από την αρχική τιμή του N_{ref} αρχίζει να μειώνεται, με αποτέλεσμα να μειώνεται και η έγχυση καυσίμου στο θάλαμο καύσης F_c . Επομένως αρχίζει να ελαττώνεται και η παραγόμενη μηχανική ισχύς, προσπαθώντας να εξισωθεί ξανά με την ηλεκτρική στο νέο σημείο λειτουργίας.

Έτσι, με τη δράση του ρυθμιστή στροφών επιτυγχάνεται η παρακολούθηση του ηλεκτρικού φορτίου με την προσαρμογή της παραγόμενης ισχύος. Κατ' αυτόν τον τρόπο, η συχνότητα διατηρείται στα επιτρεπτά επίπεδα, και το φορτίο τροφοδοτείται αξιόπιστα.

Εδώ αξίζει να εξετάσουμε τι θα συμβεί σε μια μόνιμη μεταβολή του ηλεκτρικού φορτίου. Ας θεωρήσουμε λοιπόν ότι το φορτίο αυξάνεται μόνιμα σε μια νέα τιμή. Τότε, με τη δράση του ρυθμιστή στροφών, θα αυξηθεί και η εντολή F_c για έγχυση καυσίμου στο θάλαμο καύσης. Στο νέο σημείο ισορροπίας, η μηχανική ισχύς που παράγει ο αεριοστρόβιλος θα είναι υψηλότερη από πριν και θα ταυτίζεται με τη νέα ηλεκτρική ισχύ. Δηλαδή, η αύξηση κατά ΔP_e του ηλεκτρικού φορτίου, προκάλεσε τη μόνιμη αύξηση του σήματος F_c κατά ΔF_c . Όπως παρατηρούμε από την εξίσωση (4.38), η αύξηση αυτή του σήματος F_c απαιτεί μεγαλύτερο σήμα $\Delta\omega$. Δεδομένου ότι $\Delta\omega = N_{ref} + \Delta N$, λόγω του ότι το σήμα N_{ref} είναι σταθερά που προέκυψε από την αρχικοποίηση του μοντέλου, η αύξηση του $\Delta\omega$ προέρχεται από τη μείωση του N . Σύμφωνα με την παραπάνω ανάλυση, μια μόνιμη αύξηση του ηλεκτρικού φορτίου οδηγεί σε μόνιμο σφάλμα της συχνότητας κάτω από την ονομαστική της τιμή. Αντίθετα, με την ίδια λογική, μια μόνιμη μείωση του ηλεκτρικού φορτίου θα οδηγήσει τη συχνότητα να ισορροπήσει σε μια τιμή υψηλότερη της ονομαστικής. Το σφάλμα αυτό που προκύπτει οφείλεται λοιπόν στην πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας, για την οποία είναι υπεύθυνος ο ρυθμιστής στροφών.

Η δευτερεύουσα ρύθμιση ως γνωστόν ενεργοποιείται μετά το πέρας της πρωτεύουσας, και σκοπός της είναι η πλήρης επαναφορά της συχνότητας στα ονομαστικά επίπεδα, απαλείφοντας το σφάλμα συχνότητας που προέκυψε από την πρωτεύουσα ρύθμιση [2]. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω του σήματος N_{ref} , το οποίο προκύπτει από το μηχανισμό αλλαγής στροφών. Έτσι, αφού έχει ολοκληρωθεί η πρωτεύουσα ρύθμιση και έχει ξεκινήσει η δευτερεύουσα, το σήμα N_{ref} μεταβάλλεται καταλλήλως για την εξάλειψη του σφάλματος συχνότητας.

Συγκεκριμένα, αν έχει εμφανιστεί μόνιμη υποσυχνότητα, τότε το σήμα N_{ref} αυξάνεται σε μια νέα τιμή. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την παροδική επιτάχυνση του άξονα της γεννήτριας, αφού το σήμα $\Delta\omega$ και κατ' επέκταση η εντολή F_c για έγχυση καυσίμου είναι πλέον υψηλότερη από πριν, με την ηλεκτρική ισχύ να θεωρείται σταθερή. Αφού επιταχυνθεί ο άξονας, το σήμα ΔN αρχίζει να μειώνεται. Μόλις η συχνότητα εξισωθεί με την ονομαστική, το σήμα ΔN έχει πλέον μηδενιστεί, και το σήμα N_{ref} παύει να αυξάνει άλλο. Έτσι, αυτό που έχει επιτευχθεί είναι η ηλεκτρική ισχύς να ταυτίζεται με την μηχανική και η συχνότητα πλέον

να έχει την ονομαστική της τιμή. Σημειώνεται ότι η εντολή F_c για έγχυση καυσίμου θα ισορροπήσει τελικώς στην ίδια τιμή που είχε μετά το πέρας της πρωτεύουσας ρύθμισης. Η παροδική αύξηση δηλαδή της έγχυσης καυσίμου κατά τη διάρκεια της δευτερεύουσας ρύθμισης, προσέφερε την αναγκαία ισχύ για την επιτάχυνση του άξονα περιστροφής, η οποία συσσωρεύτηκε υπό μορφή κινητικής ενέργειας. Με την ίδια λογική εφαρμόζεται η δευτερεύουσα ρύθμιση και στην περίπτωση μόνιμης υπερσυχνότητας.

Όσον αφορά τις προσομοιώσεις που θα ακολουθήσουν στο Κεφάλαιο 5, η δευτερεύουσα ρύθμιση δεν μοντελοποιείται. Δηλαδή ο μηχανισμός αλλαγής στροφών είναι ανενεργός, με αποτέλεσμα σε μόνιμες μεταβολές φορτίου να προκύπτουν μόνιμα σφάλματα στη συχνότητα. Κατά συνέπεια, το σήμα N_{ref} θεωρείται σταθερό στην αρχική τιμή που προκύπτει από την αρχικοποίηση του μοντέλου.

Τέλος, σημειώνεται ότι ο ρυθμιστής στροφών του Σχήματος 4.7 και το μηχανικό μοντέλο γεννήτριας του Σχήματος 4.6 είναι ενσωματωμένα στο μπλοκ διάγραμμα 'αδράνεια γεννήτριας-ρυθμιστής στροφών' στο Σχήμα 4.3.

4.2.6 Μετρητής θερμοκρασίας

Στην προηγούμενη παράγραφο αναλύθηκε πώς προκύπτει το σήμα F_c για την έγχυση καυσίμου στο θάλαμο καύσης. Όπως εξηγήθηκε, όσο μεγαλύτερη είναι η αύξηση του φορτίου τόσο μεγαλύτερη θα είναι και η εντολή έγχυσης καυσίμου. Από τη σχέση (4.13) παρατηρούμε ότι όταν αυξάνει η πραγματική ανά μονάδα ροή καυσίμου W_f αυξάνει αναλογικά και η θερμοκρασία T_f που επικρατεί στην είσοδο του στροβίλου. Ο κατασκευαστής του αεριοστροβίλου έχει ορίσει την ονομαστική θερμοκρασία T_{f0} που αντέχουν τα περύγια του στροβίλου. Αν η θερμοκρασία υπερβεί το όριο του κατασκευαστή για παρατεταμένο χρονικό διάστημα, τότε υπάρχει κίνδυνος καταστροφής των περυσίων. Για το λόγο αυτό πρέπει να υπάρχει μια διάταξη η οποία να προστατεύει τον αεριοστρόβιλο από υπερθέρμανση [4].

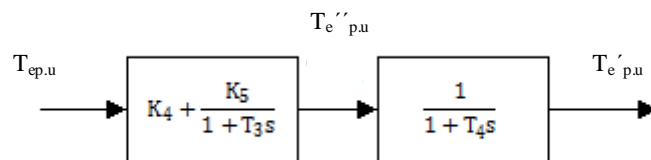
Η λογική είναι να μετράται η θερμοκρασία των καυσαερίων στην είσοδο του στροβίλου, και σε περίπτωση που αυτή υπερβεί για ένα μικρό χρονικό διάστημα την ονομαστική, να δίνεται εντολή για μείωση του καυσίμου που εγχέεται. Λόγω όμως του ότι οι θερμοκρασίες που αναπτύσσονται στην έξοδο του θαλάμου καύσης είναι αρκετά υψηλές, δεν μπορούν να μετρηθούν απ' ευθείας. Εξετάζοντας τη σχέση (4.17) παρατηρούμε ότι η θερμοκρασία T_e των καυσαερίων στην έξοδο του στροβίλου είναι ευθέως ανάλογη με τη θερμοκρασία T_f στην είσοδο. Επομένως, λόγω των χαμηλότερων θερμοκρασιών που επικρατούν στην έξοδο, μετράται η θερμοκρασία T_e και εμμέσως καθορίζεται η θερμοκρασία που υφίσταται στην είσοδο του στροβίλου.

Στην παρούσα παράγραφο περιγράφεται η διάταξη μέτρησης της θερμοκρασίας των καυσαερίων στην έξοδο του στροβίλου και στην επόμενη παράγραφο παρουσιάζεται η διάταξη περιορισμού της έγχυσης καυσίμου σε περίπτωση υπερθέρμανσης. Σημειώνεται λόγω της αναλογικής σχέσης που υφίσταται μεταξύ της θερμοκρασίας εισόδου στο στροβίλο T_f και της θερμοκρασίας στην έξοδο T_e , οι ανά μονάδα τιμές των δύο θερμοκρασιών είναι ίδιες (για συγκεκριμένο λόγο εκτόνωσης P_i).

Η διάταξη μέτρησης της ανά μονάδα τιμής της θερμοκρασίας των καυσαερίων στην έξοδο του στροβίλου $T_{ep,u}$ φαίνεται στο Σχήμα 4.8. Η είσοδος της διάταξης είναι η πραγματική ανά μονάδα θερμοκρασία των καυσαερίων $T_{ep,u}$, όπως προκύπτει από το μπλοκ των θερμοδυναμικών εξισώσεων του Σχήματος 4.4. Το σήμα αυτό εισέρχεται στο πρώτο

διάγραμμα βαθμίδων, η έξοδος του οποίου είναι το σήμα $T_{e''p,u}$. Λόγω των υψηλών θερμοκρασιών που εμφανίζονται στην έξοδο του στροβίλου, ο μετρητής της θερμοκρασίας είναι θερμικά μονωμένος για λόγους προστασίας [11]. Έτσι, ένα ποσοστό (K_4) της μεταβολής της θερμοκρασίας γίνεται αμέσως αντιληπτό από τον μετρητή μέσω του αναλογικού κέρδους K_4 ενώ το υπόλοιπο ποσοστό (K_5) γίνεται με μια χρονική καθυστέρηση T_3 (s) μέσω της αντίστοιχης συνάρτησης μεταφοράς πρώτης τάξης με κέρδος K_5 . Το κέρδος K_4 εκφράζει την θερμότητα που διαπερνά ακαριαία τη μόνωση του αισθητήρα, ενώ το κέρδος K_5 εκφράζει το υπόλοιπο μέρος της θερμότητας που καθυστερεί να αποδοθεί στον αισθητήρα λόγω της μόνωσής του. Είναι προφανές ότι ισχύει $K_4 + K_5 = 1$, δηλαδή στη μόνιμη κατάσταση όπου ο τελεστής Laplace είναι $s = 0$ η ανά μονάδα θερμοκρασία $T_{e''p,u}$ που αντιλαμβάνεται ο αισθητήρας ισούται με την πραγματική $T_{ep,u}$.

Το δεύτερο διάγραμμα βαθμίδων είναι μια συνάρτηση μεταφοράς 1^{ης} τάξης με χρονική σταθερά T_4 . Το μπλοκ αυτό εκφράζει την χρονική καθυστέρηση της απόκρισης του αισθητήρα, δηλαδή τον χρόνο που απαιτείται από τη στιγμή που μεταβληθεί η θερμοκρασία $T_{e''p,u}$ στο σώμα του αισθητήρα έως ότου αντιδράσει παράγοντας την νέα ένδειξη της θερμοκρασίας $T_{e'p,u}$. Η τελική έξοδος αυτού του υποσυστήματος είναι το σήμα $T_{e'p,u}$, το οποίο είναι η μετρούμενη ανά μονάδα θερμοκρασία των καυσαερίων, η ένδειξη δηλαδή του αισθητήρα θερμοκρασίας. Αυτό είναι το σήμα με βάση το οποίο ελέγχεται η υπερθέρμανση μη του στροβίλου.



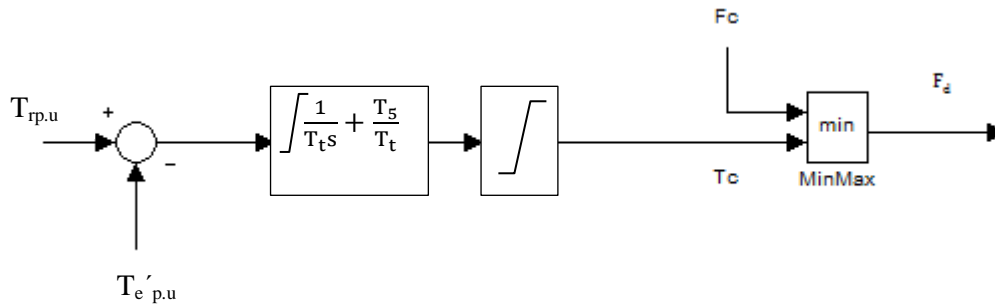
Σχήμα 4.8 : Διάταξη μέτρησης της θερμοκρασίας

4.2.7 Έλεγχος υπερθέρμανσης

Ο έλεγχος υπερθέρμανσης είναι υπεύθυνος για τη διατήρηση της θερμοκρασίας εισόδου των καυσαερίων στον στροβίλο σε επιτρεπτά επίπεδα. Όπως προαναφέρθηκε, σε περίπτωση που η θερμοκρασία αυξηθεί πέρα από την ονομαστική της τιμή για παρατεταμένο χρονικό διάστημα, υπάρχει κίνδυνος φθοράς του στροβίλου. Η ανά μονάδα θερμοκρασία των καυσαερίων στην έξοδο του στροβίλου ταυτίζεται με την ανά μονάδα τιμή της θερμοκρασίας στην είσοδο, όπως εξηγήθηκε στην προηγούμενη παράγραφο. Συνεπώς, ο συγκεκριμένος βρόχος ελέγχου αναλαμβάνει τη διατήρηση της ανά μονάδα τιμής της θερμοκρασίας των καυσαερίων κάτω από ένα προκαθορισμένο όριο $T_{rp,u}$ [4]. Το όριο αυτό είναι ορισμένο από τον κατασκευαστή και έχει τιμή ελαφρώς μεγαλύτερη από την μονάδα.

Όσο η μετρούμενη ανά μονάδα θερμοκρασία των καυσαερίων $T_{e'p,u}$ είναι κάτω του ορίου $T_{rp,u}$, ο έλεγχος υπερθέρμανσης είναι ανενεργός και η έγχυση καυσίμου στο θάλαμο καύσης ακολουθεί τις εντολές του ρυθμιστή στροφών μέσω του σήματος F_c . Αν η θερμοκρασία ξεπεράσει το προαναφερθέν όριο για ένα μικρό χρονικό διάστημα, τότε ο έλεγχος υπερθέρμανσης ενεργοποιείται, θέτοντας εκτός τον ρυθμιστή στροφών, και πλέον η έγχυση καυσίμου περιορίζεται με βάση τις εντολές του βρόχου υπερθέρμανσης. Αν η θερμοκρασία επανέλθει ξανά στα επιτρεπτά επίπεδα, τίθεται εκτός ο έλεγχος υπερθέρμανσης και η έγχυση καυσίμου στο θάλαμο καύσης καθορίζεται πάλι από το ρυθμιστή στροφών. Η

λογική που περιγράφηκε παραπάνω, υλοποιείται στο διάγραμμα βαθμίδων του Σχήματος 4.9 [4]:



Σχήμα 4.9 : Διάταξη ελέγχου υπερθέρμανσης

Η έξοδος F_d του παραπάνω υποσυστήματος είναι η ανά μονάδα τελική εντολή για έγχυση καυσίμου στο θάλαμο καύσης. Αυτό είναι το σήμα που δέχονται οι αντλίες καυσίμου, όπως θα φανεί και στην επόμενη παράγραφο. Το σήμα F_d προκύπτει ως η ελάχιστη τιμή μεταξύ των σημάτων T_c και F_c . Το σήμα F_c είναι η εντολή για έγχυση καυσίμου από το ρυθμιστή στροφών, όπως αναφέρθηκε εκτενώς στην παράγραφο 4.2.5. Το σήμα T_c είναι η εντολή για τον περιορισμό της έγχυσης καυσίμου από τον βρόχο υπερθέρμανσης.

Η μετρούμενη θερμοκρασία των καυσαερίων $T_{e',p,u}$ αφαιρείται από το όριο $T_{rp,u}$. Η διαφορά τους εισέρχεται σε έναν αναλογικό-ολοκληρωτικό ελεγκτή και αφού διέλθει από τον περιοριστή που εμφανίζεται στο Σχήμα 4.9, προκύπτει το σήμα T_c . Ο περιοριστής έχει ως άνω όριο την τιμή T_{cmax} , όπου ισχύει $T_{cmax} > 1$.

Σε φυσιολογικές συνθήκες λειτουργίας του αεριοστροβίλου, η ανά μονάδα μετρούμενη θερμοκρασία των καυσαερίων είναι κάτω του ορίου $T_{rp,u}$, με αποτέλεσμα η διαφορά τους να είναι θετική και το σήμα T_c να έχει την άνω τιμή του περιοριστή. Επίσης, η ζήτηση καυσίμου F_c από το ρυθμιστή στροφών είναι κάτω της ονομαστικής της τιμής, με αποτέλεσμα η ελάχιστη τιμή εκ των T_c και F_c να είναι το δεύτερο σήμα. Κατά συνέπεια, η τελική εντολή για έγχυση καυσίμου στο θάλαμο καύσης F_d ισούται με τη ζήτηση καυσίμου F_c του ρυθμιστή στροφών. Έτσι τον έλεγχο του καυσίμου τον διαδραματίζει ο ρυθμιστής στροφών, και η μηχανική ισχύς προσαρμόζεται ανάλογα με τις απαιτήσεις του φορτίου.

Σε περίπτωση που η έγχυση καυσίμου στο θάλαμο καύσης ξεπεράσει την ονομαστική τιμή, η θερμοκρασία των καυσαερίων αυξάνεται πέρα από τα ονομαστικά επίπεδα, με αποτέλεσμα η μετρούμενη τιμή της να γίνει μεγαλύτερη του ορίου $T_{rp,u}$ ($T_{e',p,u} > T_{rp,u}$). Έτσι, η διαφορά τους γίνεται αρνητική και κατά συνέπεια το σήμα T_c αρχίζει να μειώνεται από την προηγούμενη τιμή του T_{cmax} . Αν η ζήτηση καυσίμου από το ρυθμιστή στροφών δεν επανέλθει σύντομα κάτω από τα ονομαστικά επίπεδα, κάποια στιγμή το σήμα T_c κατερχόμενο θα ξεπεράσει το σήμα F_c του ρυθμιστή. Έτσι πλέον μικρότερη τιμή θα έχει το σήμα T_c του βρόχου υπερθέρμανσης και θα είναι αυτό το οποίο θα περνά στην έξοδο ($F_d = T_c$). Επομένως ο ρυθμιστής στροφών έχει τεθεί εκτός και η έγχυση καυσίμου στο θάλαμο καύσης αρχίζει να μειώνεται, ακολουθώντας το σήμα T_c . Άρα μειώνεται αντίστοιχα και η θερμοκρασία των καυσαερίων στην είσοδο και στην έξοδο του στροβίλου, με αποτέλεσμα να προστατεύεται η διάταξη από υπερθέρμανση.

Όταν η ζήτηση καυσίμου του ρυθμιστή επανέλθει στα φυσιολογικά επίπεδα, τότε το σήμα F_c θα είναι μικρότερο πλέον από το σήμα του βρόχου υπερθέρμανσης T_c , οδηγώντας στην εμφάνιση στην έξοδο της εντολής του ρυθμιστή. Κατ' αυτόν τον τρόπο, ο ρυθμιστής στροφών ελέγχει και πάλι την έγχυση καυσίμου, ακολουθώντας τις απαιτήσεις του φορτίου.

Είναι προφανές ότι στην περίπτωση που ενεργοποιηθεί ο βρόχος υπερθέρμανσης, για την προστασία της διάταξης του στροβίλου θα εγχέεται μικρότερη ποσότητα καυσίμου στο θάλαμο καύσης από αυτή που ορίζει το φορτίο. Συμπερασματικά, η μηχανική ισχύς θα υπολείπεται της ηλεκτρικής και ο άξονας θα επιβραδύνεται. Αν το φορτίο δεν μειωθεί άμεσα, το γεγονός αυτό θα οδηγήσει σε σημαντική πτώση της συχνότητας, με άμεσο αντίκτυπο την αναγκαστική αποκοπή φορτίων. Στο σημείο αυτό έγκειται η αναγκαιότητα της χρήσης του αεροφυλακίου. Σύμφωνα με τη σχέση (4.13), μια μεγάλη αύξηση της ροής καυσίμου W_f θα οδηγήσει σε μεγάλη αύξηση της θερμοκρασίας των καυσαερίων. Η αύξηση αυτή της θερμοκρασίας δύναται να περιοριστεί με την παροχή μεγαλύτερης ποσότητας ροής αέρα W_{tot} , η οποία θα προέρχεται από την ενεργοποίηση του αεροφυλακίου. Έτσι ο βρόχος υπερθέρμανσης θα ενεργοποιηθεί για υψηλότερη τιμή της ροής καυσίμου συγκριτικά με την περίπτωση δίχως αεροφυλάκιο. Επιβεβαιώνεται λοιπόν ότι η χρήση του αεροφυλακίου επιτρέπει ροή καυσίμου W_f άνω της ονομαστικής της τιμής με την επιπλέον έγχυση πεπιεσμένου αέρα στο θάλαμο καύσης, γεγονός που συνεπάγεται μεγαλύτερη παραγόμενη ισχύ μεταβατικά.

Σημειώνεται ότι για το συμβιβασμό με το Σχήμα 4.3, το κομμάτι του Σχήματος 4.9 μέχρι και τον περιοριστή είναι ενσωματωμένο στο μπλοκ 'έλεγχος θερμοκρασίας' με έξοδο το σήμα T_c , ενώ η υλοποίηση της ελάχιστης τιμής (min) γίνεται στο μπλοκ 'έλεγχος καυσίμου', μαζί με τις υπόλοιπες διατάξεις που θα περιγραφούν στην επόμενη παράγραφο.

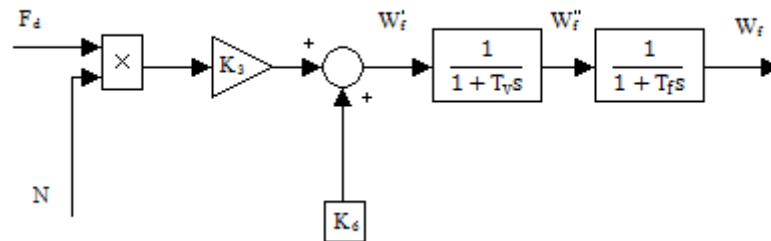
4.2.8 Έλεγχος καυσίμου

Η διάταξη ελέγχου της ροής καυσίμου δέχεται ως είσοδο την τελική εντολή F_d για έγχυση στο θάλαμο καύσης και παράγει στην έξοδό του την πραγματική ροή W_f που εγχέεται. Στο υποσύστημα αυτό μοντελοποιούνται οι αντλίες καυσίμου, και φαίνεται στο Σχήμα 4.10. Οι αντλίες λειτουργούν χρησιμοποιώντας την περιστροφική κίνηση του άξονα του αεριοστροβίλου [4]. Συνεπώς η έγχυση καυσίμου είναι ανάλογη της ανά μονάδα ταχύτητας περιστροφής. Για το λόγο αυτό, το σήμα F_d πολλαπλασιάζεται με τη συχνότητα N λειτουργίας της μονάδας.

Ο αεριοστροβίλος ακόμα και σε κενό φορτίο χρειάζεται μια δεδομένη ποσότητα καυσίμου για την υποστήριξη των επιμέρους συστημάτων, όπως π.χ. φωτισμός εγκατάστασης, συστήματα προστασίας, ψύξη του στροβίλου, απώλειες κενού φορτίου όπως μηχανικές τριβές και καταναλισκόμενο έργο συμπίεστη. Το έργο που απαιτεί ο συμπίεστης είναι η σημαντικότερη δαπανώμενη ισχύς σε κενό φορτίο. Αυτό διότι στο μοντέλο αεριοστροβίλου απλού άξονα, ο στροβίλος και ο συμπίεστης είναι συνδεδεμένοι σε κοινό άξονα περιστροφής. Αυτό σημαίνει πως ο συμπίεστης συμπιέζει αέρα ακόμη και σε κενό φορτίο λειτουργίας, καταναλώνοντας μηχανικό έργο. Ο μόνος τρόπος περιορισμού της καταναλισκόμενης ισχύος του συμπίεστη είναι με τη μείωση του ανοίγματος των πτερυγίων εισόδου του αέρα, που αναλύονται στην επόμενη παράγραφο. Ωστόσο, τα πτερύγια δεν μπορούν να κλείσουν πλήρως, διότι όπως έχει αναφερθεί υπάρχει ο κίνδυνος αστάθειας της μονάδας. Επομένως αυτό που επιτυγχάνεται με τα πτερύγια είναι η μείωση της ροής μάζας που συμπιέζεται, με αποτέλεσμα απλώς να περιορίζεται η καταναλισκόμενη ισχύς δίχως να εκμηδενίζεται. Κατά συνέπεια, ο συμπίεστης ακόμα και σε κενό φορτίο χρειάζεται ισχύ για την περιστροφή του.

Η έξοδος του πολλαπλασιαστή στο Σχήμα 4.10 πολλαπλασιάζεται με ένα αναλογικό κέρδος K_3 και προστίθεται στο προκύπτων σήμα μια σταθερή ποσότητα K_6 . Και τα δύο κέρδη K_3 , K_6 είναι σε ανά μονάδα τιμές, και ισχύει ότι $K_3 + K_6 = 1$. Η σταθερή αυτή ποσότητα K_6

εκφράζει την ανά μονάδα απαιτούμενη έγχυση καυσίμου για την κάλυψη των ιδιοκαταναλώσεων του αεριοστροβίλου που αναφέρθηκαν προηγουμένως. Το κέρδος K_3 είναι το υπόλοιπο ποσοστό της έγχυσης καυσίμου το οποίο αφορά τις μεταβολές των φορτίων. Έτσι, σε συνθήκες κενού φορτίου, το σήμα F_d είναι μηδέν, μιας και ακολουθεί τις εντολές του ρυθμιστή στροφών, με αποτέλεσμα για μηδενικό φορτίο να συνεπάγεται μηδενική έγχυση καυσίμου. Επίσης, σε συνθήκες κενού φορτίου υπάρχει η σταθερή ποσότητα K_6 που καλύπτει τις ανάγκες του αεριοστροβίλου οι οποίες είναι ανεξάρτητες του ηλεκτρικού φορτίου.



Σχήμα 4.10 : Αντλίες καυσίμου

Η έξοδος του αθροιστή στο Σχήμα 4.10 είναι το σήμα W_f' το οποίο εκφράζει τη ροή καυσίμου που πρέπει να εγχυθεί στο θάλαμο καύσης. Το σήμα αυτό εισέρχεται σε μια συνάρτηση μεταφοράς 1^{ns} τάξης με χρονική σταθερά T_v , που εκφράζει τη χρονική καθυστέρηση της μεταβολής της βαλβίδας καυσίμου. Στη συνέχεια ακολουθεί άλλη μία συνάρτηση μεταφοράς 1^{ns} τάξης με χρονική σταθερά T_f , η οποία αντιστοιχεί στη χρονική καθυστέρηση διανομής του καυσίμου στο θάλαμο καύσης, δηλαδή μοντελοποιεί το χρόνο που απαιτείται για να φτάσει το καύσιμο από την δεξαμενή καυσίμου στο θάλαμο λόγω της μικρής απόστασης μεταξύ των δύο αυτών διατάξεων. Τελική έξοδος του συστήματος που περιγράφηκε είναι στο σήμα W_f , το οποίο αφορά την πραγματική ροή καυσίμου που εγχέεται στο θάλαμο καύσης, και είναι αυτό το οποίο χρησιμοποιείται στο μπλοκ των θερμοδυναμικών εξισώσεων του Σχήματος 4.4 για τον υπολογισμό των θερμοκρασιών και της παραγόμενης ισχύος.

4.2.9 Έλεγχος της ροής του αέρα (οδηγιά πτερύγια εισόδου)

Ο έλεγχος της ροής αέρα είναι υπεύθυνος για τη ρύθμιση της ροής μάζας αέρα W που συμπιέζει ο συμπιεστής, μέσω της μεταβολής του ανοίγματος των πτερυγίων g . Ο έλεγχος αυτός αποσκοπεί στην κατά το δυνατόν πιο αποδοτική λειτουργία του αεριοστροβίλου. Αν δεν υπήρχε αυτό το είδος ελέγχου, τα πτερύγια (IGVs) θα ήταν πλήρως ανοιχτά, με αποτέλεσμα η ροή μάζας αέρα να ήταν ονομαστική. Έτσι στα χαμηλά φορτία όπου απαιτείται μικρή ροή καυσίμου, σύμφωνα με τη σχέση (4.13) η θερμοκρασία στην είσοδο του στροβίλου θα ήταν αρκετά χαμηλή. Κατά συνέπεια ο θερμοδυναμικός κύκλος θα είχε κακή απόδοση, μιας και το έργο του συμπιεστή θα ήταν υψηλό, όπως εξάγεται από τη σχέση (4.11), και η λειτουργία του αεριοστροβίλου θα επέφερε πολλές απώλειες. Για το λόγο αυτό, στα χαμηλά φορτία τα πτερύγια μειώνουν το άνοιγμα και η ροή αέρα περιορίζεται, διατηρώντας τη θερμοκρασία εισόδου στο στροβίλο σε υψηλά επίπεδα και το έργο του συμπιεστή σε χαμηλότερα. Έτσι προέκυψαν οι τρεις περιοχές λειτουργίας του

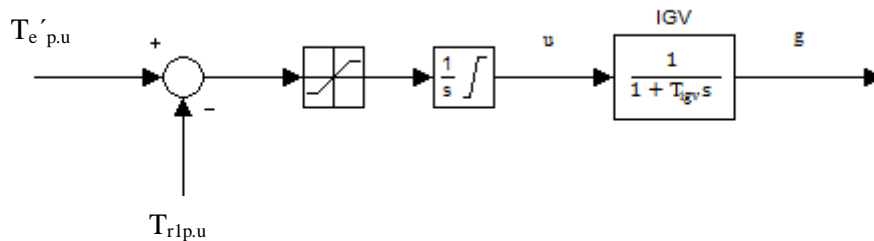
αεριοστροβίλου, που περιγράφηκαν εκτενώς στην παράγραφο 4.1.6, και συγκεντρώνονται στην εξίσωση (4.30). Επειδή η συγκεκριμένη εξίσωση χρησιμοποιεί απόλυτες τιμές θερμοκρασίας και ισχύων, τα μεγέθη αυτά κανονικοποιούνται ως προς την ονομαστική θερμοκρασία T_{f0} στην έξοδο του θαλάμου καύσης και ως προς την ονομαστική παραγωγή του αεριοστροβίλου P_{mN} αντίστοιχα. Έτσι προκύπτει η σχέση :

$$\begin{aligned} g &= 1, & P_{ep,u} &> P_{e1p,u} \\ T_{fp,u} &= T_{r1p,u}, & P_{e2p,u} &< P_{ep,u} < P_{e1p,u} \\ W &= W_{min}, & P_{ep,u} &< P_{e2p,u} \end{aligned} \quad (4.40)$$

Λόγω του γεγονότος πως η θερμοκρασία στην είσοδο του στροβίλου δεν μπορεί να μετρηθεί όπως έχει αναφερθεί, αντί της ανά μονάδας θερμοκρασίας των καυσαερίων στην είσοδο $T_{fp,u}$ χρησιμοποιείται η μετρούμενη ανά μονάδα τιμή της θερμοκρασίας στην έξοδο $T_{e'p,u}$. Επίσης, λόγω της σχέσης (4.6) και δεδομένου ότι στη μόνιμη κατάσταση η ανά μονάδα συχνότητα είναι $N=1$, προκύπτει ότι $W=g$. Συνεπώς η σχέση (4.40) παίρνει την παρακάτω τελική μορφή, που θα υλοποιηθεί με τη μορφή διαγράμματος βαθμίδων :

$$\begin{aligned} g &= 1, & P_{ep,u} &> P_{e1p,u} \\ T_{e'p,u} &= T_{r1p,u}, & P_{e2p,u} &< P_{ep,u} < P_{e1p,u} \\ g &= g_{min}, & P_{ep,u} &< P_{e2p,u} \end{aligned} \quad (4.41)$$

Στο Σχήμα 4.11 παρουσιάζεται η διάταξη ελέγχου των πτερυγίων:



Σχήμα 4.11 : Έλεγχος πτερυγίων εισόδου του αέρα

Η διαφορά της θερμοκρασίας αναφοράς των καυσαερίων $T_{r1p,u}$ από την ανά μονάδα τιμή της μετρούμενης θερμοκρασίας $T_{e'p,u}$ εισέρχεται σε έναν περιοριστή, ο οποίος φροντίζει ο ρυθμός μεταβολής του ανοίγματος των πτερυγίων να μην λαμβάνει μεγάλες τιμές, για να μη διαταράσσεται απότομα η θερμοδυναμική ισορροπία στο θάλαμο καύσης [4]. Το σήμα εξόδου του περιοριστή εισέρχεται σε έναν ολοκληρωτή, η έξοδος του οποίου είναι το σήμα u για το άνοιγμα των πτερυγίων. Η απόκλιση δηλαδή της θερμοκρασίας από την τιμή $T_{r1p,u}$ ολοκληρώνεται, με αποτέλεσμα, όσο η διαφορά των θερμοκρασιών είναι θετική το σήμα u βαίνει αυξανόμενο, ενώ αντίθετα όταν η διαφορά γίνει αρνητική το σήμα αρχίζει να μειώνεται. Ο ολοκληρωτής αυτός εμπεριέχει και έναν δεύτερο περιοριστή, που αναλαμβάνει τη διατήρηση του σήματος για το άνοιγμα των πτερυγίων εντός ορίων. Η μέγιστη τιμή που μπορεί να λάβει το σήμα u είναι 1,0 ανά μονάδα, όπου τα πτερύγια είναι πλήρως ανοιχτά. Αντίθετα, η ελάχιστη τιμή του ανοίγματος είναι ίση με g_{min} , η οποία καθορίζει την μικρότερη επιτρεπτή ροή μάζας αέρα που διέρχεται από το συμπιεστή. Το σήμα u εισέρχεται

σε μια συνάρτηση μεταφοράς $1^{\text{ης}}$ τάξης με σταθερά χρόνου T_{ign} , που μοντελοποιεί την χρονική καθυστέρηση μεταβολής του ανοίγματος των πτερυγίων, λόγω της αδράνειάς τους. Η έξοδος της διάταξης αυτής είναι το τελικό ανά μονάδα άνοιγμα των πτερυγίων g , το οποίο καθορίζει αυτόματα και τη ροή αέρα.

Όσο το φορτίο είναι άνω της οριακής τιμής $P_{e1p,u}$, η θερμοκρασία των καυσαερίων είναι μεγαλύτερη της $T_{r1p,u}$. Επομένως, η διαφορά $T_{e'p,u} - T_{r1p,u}$ είναι διαρκώς θετική, με αποτέλεσμα ο ολοκληρωτής να έχει φτάσει στο άνω όριο του περιοριστή που εμπεριέχει. Έτσι ισχύει ότι $u = 1$ και άρα τα πτερύγια είναι πλήρως ανοιχτά ($g=1$). Όταν το φορτίο μειωθεί κάτω της τιμής $P_{e1p,u}$, η θερμοκρασία των καυσαερίων θα γίνει μικρότερη από τη θερμοκρασία αναφοράς $T_{r1p,u}$. Συνεπώς η διαφορά $T_{e'p,u} - T_{r1p,u}$ θα γίνει αρνητική, οδηγώντας στην μείωση του σήματος u από την αρχική τιμή 1. Συμπερασματικά, τα πτερύγια αρχίζουν να κλείνουν και η ροή αέρα αρχίζει να μειώνεται. Το γεγονός αυτό θα οδηγήσει στην σταδιακή αύξηση της θερμοκρασίας των καυσαερίων. Έτσι με την πάροδο του χρόνου η απόκλιση των θερμοκρασιών $T_{e'p,u}$ και $T_{r1p,u}$ ολοένα θα μικραίνει. Κάποια στιγμή οι δύο θερμοκρασίες θα έχουν εξισωθεί, με αποτέλεσμα το άνοιγμα των πτερυγίων να σταθεροποιηθεί, μιας και η διαφορά στην είσοδο του αντίστοιχου μπλοκ θα είναι μηδενική. Αυτό που επιτυγχάνεται λοιπόν είναι, όσο το φορτίο παραμένει εντός της περιοχής $P_{e2p,u} < P_{ep,u} < P_{e1p,u}$, το άνοιγμα των πτερυγίων και κατ' επέκταση η ροή μάζας αέρα προσαρμόζονται έτσι ώστε η μετρούμενη ανά μονάδα θερμοκρασία των καυσαερίων στην έξοδο $T_{e'p,u}$ να συγκλίνει στην επιθυμητή τιμή $T_{r1p,u}$. Τέλος, αν το φορτίο γίνει μικρότερο από την τιμή $P_{e2p,u}$, ο περιοριστής του ανοίγματος των πτερυγίων έχει φτάσει στο κατώτατο άκρο του g_{min} , και κατά συνέπεια το άνοιγμα των πτερυγίων δεν μπορεί να μειωθεί περαιτέρω. Σε αυτή την περιοχή λειτουργίας δηλαδή, η θερμοκρασία $T_{e'p,u}$ είναι μικρότερη της $T_{r1p,u}$ και τα πτερύγια έχουν κλείσει στον μέγιστο βαθμό που τους επιτρέπεται. Συνοψίζοντας, επιβεβαιώνεται ότι με τη χρήση της διάταξης του Σχήματος 4.11 υλοποιείται πλήρως η εξίσωση (4.41) και καθορίζονται οι 3 περιοχές λειτουργίας του αεριοστροβίλου.

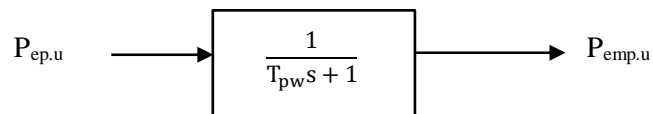
Σημειώνεται ότι ο έλεγχος της ροής αέρα είναι ανεξάρτητος του ελέγχου υπερθέρμανσης. Ο πρώτος ρυθμίζει τη ροή αέρα, και κατ' επέκταση τη θερμοκρασία εισόδου των καυσαερίων στο στρόβιλο, σε όλο το εύρος λειτουργίας όπου η θερμοκρασία είναι κάτω της ονομαστικής. Σε ονομαστική θερμοκρασία λειτουργίας τα πτερύγια είναι πλήρως ανοικτά, με αποτέλεσμα να μην υπάρχει άλλο περιθώριο για αύξηση της ροής αέρα. Συνεπώς, μια μεγάλη αύξηση της ροής καυσίμου θα οδηγήσει σε άνοδο της θερμοκρασίας. Άρα ο έλεγχος της ροής αέρα δεν μπορεί να συνεισφέρει άλλο στη διατήρηση της θερμοκρασίας στα επιτρεπτά επίπεδα, και κατά συνέπεια ενεργοποιείται ο έλεγχος υπερθέρμανσης μειώνοντας τη ροή καυσίμου. Συνοψίζοντας, καταλήγουμε ότι η ρύθμιση της ροής αέρα είναι μια λειτουργία που επιτελείται σε όλο το εύρος της κανονικής λειτουργίας του αεριοστροβίλου ρυθμίζοντας τη θερμοκρασία των καυσαερίων, με τον έλεγχο υπερθέρμανσης να είναι ανενεργός. Αντίθετα, ο έλεγχος υπερθέρμανσης ενεργοποιείται στη χειρίστη περίπτωση που η παραγωγή του αεριοστροβίλου ξεφύγει από τα ονομαστικά επίπεδα.

4.2.10 Έλεγχος αεροφυλακίου

Σκοπός του αεροφυλακίου είναι να τροφοδοτεί το θάλαμο καύσης με πεπιεσμένο αέρα, με στόχο τη μεταβατική αύξηση της μηχανικής παραγόμενης ισχύος του αεριοστροβίλου, καθώς και την πτώση της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στην έξοδο του θαλάμου καύσης [4]. Κατ' αυτόν τον τρόπο αυξάνεται μεταβατικά η προσπίπτουσα ροή αέρα στα πτερύγια του

στροβίλου και κατ' επέκταση καθυστερεί η ενεργοποίηση του βρόχου υπερθέρμανσης. Η λειτουργία του αεροφυλακίου στηρίζεται στις εξισώσεις (4.20) και (4.21) οι οποίες καθορίζουν κάθε χρονική στιγμή τη ροή μάζας αέρα W_{ch} που εγχέεται από το αεροφυλάκιο στο θάλαμο καύσης. Το αεροφυλάκιο ενεργοποιείται είτε όταν η ηλεκτρική ισχύς ξεπεράσει την ονομαστική είτε όταν ο ρυθμός πτώσης της συχνότητας λάβει μεγάλη τιμή. Οποιαδήποτε άλλη χρονική στιγμή το αεροφυλάκιο είναι ανενεργό, και συνεπώς $W_{ch} = 0$.

Στο Σχήμα 4.3 παρατηρούμε ότι η ανά μονάδα ηλεκτρική ισχύς $P_{ep,u}$ εισέρχεται στο μπλοκ 'μετρητής ηλεκτρικής ισχύος' απ' όπου προκύπτει η μετρούμενη τιμή της $P_{emp,u}$. Στην ουσία το μπλοκ αυτό υλοποιεί μια συνάρτηση μεταφοράς 1^{ης} τάξης με σταθερά χρόνου T_{pw} , που μοντελοποιεί τη χρονική καθυστέρηση των φίλτρων μέτρησης, και απεικονίζεται στο Σχήμα 4.12 :



Σχήμα 4.12 : Μετρητής ηλεκτρικής ισχύος

Το μοντέλο του αεροφυλακίου, με τις αντίστοιχες εισόδους και εξόδους, φαίνεται στο Σχήμα 4.13 :



Σχήμα 4.13 : Αεροφυλάκιο

Οι εισόδοι του μοντέλου του αεροφυλακίου είναι η ανά μονάδα τιμή της παραγώγου της συχνότητας (N_r), η ανά μονάδα τιμή της μετρούμενης θερμοκρασίας των καυσαερίων ($T_{e'p,u}$) - η οποία καθορίζει και την τιμή της θερμοκρασίας στην είσοδο του στροβίλου, η ανά μονάδα τιμή της μετρούμενης ηλεκτρικής ισχύος ($P_{emp,u}$), καθώς και η πίεση που επικρατεί στον θάλαμο καύσης σε ανά μονάδα τιμή επίσης (p_d). Ως έξοδο το μοντέλο έχει την ανά μονάδα ροή μάζας αέρα προς τον θάλαμο καύσεως (W_{ch}), η οποία χρησιμοποιείται από το μοντέλο του αεριοστροβίλου για τον υπολογισμό των νέων τιμών της θερμοκρασίας στον στρόβιλο, της παραγώγου της συχνότητας και της πίεσης στον θάλαμο καύσης.

Στην παράγραφο 4.1.5 είδαμε ότι η πίεση του αεροφυλακίου μεταβάλλεται με την εκροή του πεπιεσμένου αέρα από αυτό. Στη συνέχεια εξηγείται αναλυτικά πώς προκύπτει αυτή η εξάρτηση της πίεσης από τη ροή αέρα.

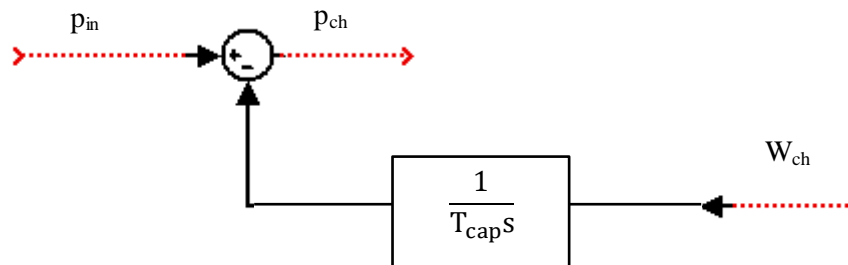
Η αρχική πίεση στο αεροφυλάκιο είναι ίση με αυτήν που προέκυψε από την συμπίεση του αέρα προς αυτό. Βάσει της καταστατικής εξίσωσης των αερίων για τη μάζα αέρα στο αεροφυλάκιο, έχουμε [17]:

$$P_{ch}V = m_{ch}RT \quad (4.42)$$

όπου P_{ch} η πίεση του αεροφυλακίου σε kPa, V ο όγκος του σε m^3 , m_{ch} η μάζα αέρα στο αεροφυλάκιο σε kg, R η σταθερά του αέρα σε $kJ/(kg^{\circ}K)$ και T η θερμοκρασία του σε βαθμούς $^{\circ}K$. Παραγωγίζοντας τη σχέση (4.42), προκύπτει ότι :

$$\frac{dP_{ch}}{dt} = - \frac{RT}{V} \frac{dm_{ch}}{dt} \quad (4.43)$$

Δεδομένου ότι, όπως αναφέραμε, η θερμοκρασία του πεπιεσμένου αέρα θεωρείται σταθερή και ίση με αυτή του περιβάλλοντος, και ο όγκος του αεροφυλακίου είναι συγκεκριμένος, η πίεση σε αυτό είναι ανάλογη της μάζας που περιέχεται. Έτσι, καθώς ροή μάζας αέρα μεταφέρεται από το αεροφυλάκιο προς τον θάλαμο καύσης, η επικρατούσα πίεση στο αεροφυλάκιο μειώνεται, λόγω της μείωσης της μάζας που περιέχεται στο αεροφυλάκιο (4.43). Η λειτουργία αυτή αποτυπώνεται στο βρόχο ανατροφοδότησης του Σχήματος 4.14, όπου η σταθερά T_{cap} ορίζεται στη συνέχεια.



Σχήμα 4.14: Διάταξη υπολογισμού της επικρατούσας πίεσης στο αεροφυλάκιο

Η αρχική πίεση P_{in} προκύπτει από τη σχέση (4.42) για την αρχική μάζα αέρα m_0 στο αεροφυλάκιο, ως:

$$P_{in} = \frac{m_0RT}{V} \quad (4.44)$$

Για να τη μετατρέψουμε την εξίσωση (4.43) σε ανά μονάδα, διαιρούμε και τα δύο μέλη με P_{d0} , την ονομαστική πίεση του θαλάμου καύσης. Έτσι έχουμε :

$$\dot{p}_{ch} = - \frac{RT}{VP_{d0}} \dot{m}_{ch} \quad (4.45)$$

όπου p_{ch} η επικρατούσα πίεση στο αεροφυλάκιο σε ανά μονάδα τιμή.

Τέλος, θα μετατρέψουμε και τη ροή μάζας αέρα \dot{m}_{ch} που εξέρχεται από το αεροφυλάκιο σε ανά μονάδα τιμή W_{ch} :

$$W_{ch} = \frac{\dot{m}_{ch}}{W_0} \quad (4.46)$$

όπου W_0 η ονομαστική ροή αέρα του αεροστροβίλου σε kg/s. Συνδυάζοντας τις σχέσεις (4.45) και (4.46) προκύπτει ότι :

$$\dot{p}_{ch} = -\frac{RTW_0}{VP_{d0}}W_{ch} \quad (4.47)$$

Η σχέση (4.47) υλοποιείται στο διάγραμμα βαθμίδων του Σχήματος 4.14. Η σταθερά T_{cap} ορίζεται ως :

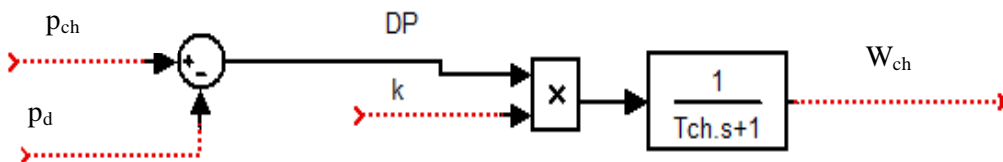
$$T_{cap} = \frac{VP_{d0}}{RTW_0} \quad (4.48)$$

Κατ' αυτόν τον τρόπο, από την εξίσωση (4.47) παράγεται η σχέση (4.21) της παραγράφου 4.1.5 :

$$T_{cap}\dot{p}_{ch} = -W_{ch}$$

Η σχέση (4.21) ορίζει την πίεση του αεροφυλακίου ως μεταβλητή κατάστασης. Σημειώνεται ξανά ότι οι πιέσεις είναι σε ανά μονάδα τιμές ως προς τα βασικά μεγέθη του θαλάμου καύσης, ενώ η ροή μάζας αέρα είναι σε ανά μονάδα τιμή ως προς την ονομαστική ροή αέρα στον αεροστρόβιλο.

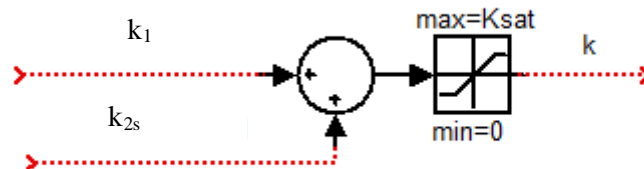
Σύμφωνα με όσα διατυπώνονται στην παράγραφο 4.1.5, το αίτιο ροής μάζας αέρα από το αεροφυλάκιο προς τον θάλαμο καύσης του αεροστροβίλου είναι η διαφορά πίεσης που επικρατεί σε αυτές τις δύο συνιστώσες του συστήματος. Έχει γίνει η θεώρηση ότι η ροή μάζας πεπιεσμένου αέρα είναι ανάλογη με τη διαφορά πίεσης. Επίσης, όπως αναφέρθηκε στην εισαγωγή, υπάρχει δικλείδα αέρα στην έξοδο του αεροφυλακίου, η οποία ρυθμίζει την ροή που εξέρχεται από το αεροφυλάκιο, μέσω του μεταβλητού ανοίγματος k . Το Σχήμα 4.15 δείχνει το μοντέλο που υλοποιεί την παραπάνω περιγραφή. Συγκεκριμένα, όρος DP προκύπτει ως η διαφορά της πίεσεως στο θάλαμο καύσης (p_a) από την πίεση που επικρατεί στο αεροφυλάκιο (p_{ch}). Τα δύο σήματα DP και k πολλαπλασιάζονται, δίνοντας έτσι την ροή που θα προστεθεί στον θάλαμο καύσης. Λόγω της καθυστέρησης που υπεισέρχεται από την στιγμή που θα δοθεί το σήμα ανοίγματος (ή κλεισίματος) της δικλείδας μέχρι να αλλάξει η ροή του αέρα, το προκύπτον σήμα από τον πολλαπλασιασμό των DP και k εισέρχεται σε μια συνάρτηση μεταφοράς πρώτης τάξης, με σταθερά χρόνου T_{ch} . Στην έξοδο αυτής έχουμε την τελική ροή αέρα προς τον θάλαμο καύσης W_{ch} [1].



Σχήμα 4.15 : Υπολογισμός ροής μάζας αέρα που εξέρχεται από το αεροφυλάκιο

Ο αθροιστής που εμφανίζεται στο Σχήμα 4.16, δέχεται δύο σήματα, τα k_1 και k_{2s} , τα οποία καθορίζουν το άνοιγμα της δικλείδας αέρα (k). Το ένα (k_1) προέρχεται από τον έλεγχο της ηλεκτρικής ισχύος, και ενεργοποιείται όπως θα φανεί παρακάτω όταν η μετρούμενη ηλεκτρική ισχύς ($P_{emp,u}$) ξεπεράσει ελαφρώς την ονομαστική ($P_{emp,u} > P_{ecr}$), ενώ το δεύτερο

(k_{2s}) ενεργοποιείται όταν ο ρυθμός πτώσης συχνότητας (N_f) ξεπεράσει ένα κατώτατο κατώφλι ($N_f < -n_{rc}$). Τα δύο αυτά σήματα (k_1 και k_{2s}) είναι ανεξάρτητα μεταξύ τους και δίνουν την αναγκαία εντολή για το άνοιγμα της δικλείδας, και κατ' επέκταση για τη ροή μάζας αέρα προς τον θάλαμο καύσης. Το τελικό σήμα ανοίγματος της δικλείδας, εισέρχεται σε έναν περιοριστή, ο οποίος φροντίζει το σήμα για τη δικλείδα να παραμένει εντός ορίων, δηλαδή μεταξύ του 0 όπου η δικλείδα είναι πλήρως κλειστή και η ροή μάζας αέρα είναι μηδενική, και K_{sat} όπου εκφράζει το μέγιστο άνοιγμα της δικλείδας.



Σχήμα 4.16 : Υπολογισμός τελικού ανοίγματος της δικλείδας (k) ως υπέρθεση των δύο σημάτων προερχόμενα από τον έλεγχο ισχύος (k_1) και συχνότητας (k_{2s})

Το σήμα k_1 είναι υπεύθυνο για τον έλεγχο ισχύος. Συγκεκριμένα, αν η μετρούμενη ανά μονάδα τιμή της ηλεκτρικής ισχύος ($P_{emp.u}$) ξεπεράσει την ονομαστική τιμή της, τότε το αεροφυλάκιο ενεργοποιείται ανοίγοντας τη δικλείδα αέρα [1]. Έτσι επιτυγχάνεται η παραγωγή επιπλέον ισχύος μεταβατικά από τον αεριοστρόβιλο, άνω της ονομαστικής του τιμής. Η συνθήκη λοιπόν ενεργοποίησης του αεροφυλακίου είναι $P_{emp.u} > P_{ecr}$, όπου P_{ecr} τιμή ελαφρώς μεγαλύτερη της μονάδας. Αν δεν υπήρχε αυτό το είδος ελέγχου, σε μια αύξηση της ηλεκτρικής ισχύος άνω της ονομαστικής τιμής, ο ρυθμιστής στροφών θα αποκρινόταν εγχέοντας μεγάλη ποσότητα καυσίμου στο θάλαμο καύσης. Το γεγονός αυτό θα οδηγούσε στην αύξηση της θερμοκρασίας των καυσαερίων πέρα από τα ονομαστικά επίπεδα, με αποτέλεσμα την άμεση ενεργοποίηση του βρόχου υπερθέρμανσης για την προστασία της διάταξης του στροβίλου. Κατά συνέπεια, η έγχυση καυσίμου θα μειωνόταν άμεσα και η συχνότητα θα έπεφτε κατά πολύ, με άμεσο αντίκτυπο την αποκοπή φορτίων. Έτσι, το αεροφυλάκιο δίνει τη δυνατότητα μεταβατικής αύξησης της παραγόμενης ισχύος συγκρατώντας τη συχνότητα σε υψηλά επίπεδα, προστατεύοντας παράλληλα τον αεριοστρόβιλο από υπερφόρτιση.

Όσο η ηλεκτρική ισχύς είναι κάτω του ορίου P_{ecr} , τότε είναι $k_1=0$. Αν για κάποιο λόγο η ισχύς ξεπεράσει το προαναφερθέν όριο, τότε το αεροφυλάκιο ενεργοποιείται ανοίγοντας τη δικλείδα αέρα μέσω της εντολής k_1 . Το συγκεκριμένο σήμα (k_1) καθορίζεται από τη διαφορά της μετρούμενης ηλεκτρικής ισχύος από την ονομαστική, καθώς και από την απόκλιση της θερμοκρασίας των καυσαερίων από τα ονομαστικά επίπεδα. Όσο μεγαλύτερες είναι οι αποκλίσεις της θερμοκρασίας και της ισχύος από τις ονομαστικές τους τιμές, τόσο μεγαλύτερο πρέπει να είναι και το άνοιγμα (k_1). Μεγαλύτερο άνοιγμα της δικλείδας συνεπάγεται μεγαλύτερη παραγόμενη ισχύς και χαμηλότερη θερμοκρασία των καυσαερίων. Έτσι επιτυγχάνεται η προσαρμογή της ισχύος στα επίπεδα που ορίζει το φορτίο, καθώς και επαναφορά της θερμοκρασίας των καυσαερίων σε επιτρεπτές τιμές. Σε περίπτωση λοιπόν ενεργοποίησης του αεροφυλακίου λόγω ζήτησης ισχύος άνω της ονομαστικής τιμής, το σήμα k_1 ορίζεται ως [1]:

$$k_1 = K_p (P_{emp.u} - 1) + T_p (T_{e'p,u} - 1) \quad (4.49)$$

όπου K_p , T_p αναλογικά κέρδη ρύθμισης της ισχύος και της θερμοκρασίας αντίστοιχα. Σύμφωνα με τη σχέση (4.49) το άνοιγμα τη δικλείδας (k_1) είναι ανάλογο της διαφοράς της μετρούμενης ηλεκτρικής ισχύος από την ονομαστική καθώς και ανάλογο με την διαφορά της θερμοκρασίας των καυσαερίων από την ονομαστική της τιμή.

Πρέπει να σημειωθεί πως το αεροφυλάκιο έχει πεπερασμένη χωρητικότητα. Αυτό σημαίνει πως η πίεσή του ελαττώνεται με την πάροδο του χρόνου. Μετά από κάποιο σημείο η πίεσή του θα έχει πέσει τόσο, με αποτέλεσμα να εγκυμονεί ο κίνδυνος αντιστροφής της ροής της μάζας αέρα από το θάλαμο καύσης προς το αεροφυλάκιο. Για να αποφευχθεί το γεγονός αυτό, ορίζεται ένα κατώτατο όριο (e) της επικρατούσας πίεσης στο αεροφυλάκιο, κάτω του οποίου το αεροφυλάκιο τίθεται εκτός. Έτσι λοιπόν το αεροφυλάκιο δύναται να χρησιμοποιηθεί όσο είναι ($p_{ch} > e$). Μόλις η ανά μονάδα τιμή της πίεσεως γίνει μικρότερη από το παραπάνω όριο, το αεροφυλάκιο απενεργοποιείται μόνιμα, έως ότου ξαναγεμίσει με πεπιεσμένο αέρα και η πίεσή του επανέλθει στα επιτρεπτά επίπεδα.

Σύμφωνα με την παραπάνω ανάλυση, το σήμα k_1 ανάλογα με την τιμή της μετρούμενης ηλεκτρικής ισχύος και της θερμοκρασίας των καυσαερίων, καθώς και σύμφωνα με την πίεση στο αεροφυλάκιο, δίνεται από την ακόλουθη σχέση :

$$\left. \begin{array}{l} k_1 = 0, P_{emp.u} < P_{ecr} \\ k_1 = K_p (P_{emp.u} - 1) + T_p (T_{e'p.u} - 1), P_{emp.u} \geq P_{ecr} \\ k_1 = 0, p_{ch} \leq e \end{array} \right\} p_{ch} > e \quad (4.50)$$

Το σήμα k_{2s} είναι υπεύθυνο για τον έλεγχο συχνότητας. Ο ρόλος του είναι να ανοίγει τη δικλείδα σε περίπτωση όπου ο ρυθμός πτώσης συχνότητας N_f ξεπεράσει ένα καθορισμένο όριο ($-n_{rc}$). Η απότομη πτώση της συχνότητας καταδεικνύει την ύπαρξη μιας απότομης αύξησης του ηλεκτρικού φορτίου. Ο αεριοστροβίλος δεν μπορεί να προσαρμόζει ακαριαία την παραγωγή του σύμφωνα με τις απαιτήσεις του φορτίου, διότι ως γνωστόν η λειτουργία του διέπεται από διάφορες χρονικές καθυστερήσεις (π.χ. βαλβίδα καυσίμου, ρυθμιστής στροφών, οδηγία πτερύγια εισόδου, συμπίεστικότητα του αέρα). Έτσι, παρότι κάποια στιγμή η παραγόμενη ισχύς θα εξισωθεί με την ηλεκτρική, λόγω των παραπάνω χρονικών καθυστερήσεων της απόκρισης του αεριοστροβίλου, η συχνότητα θα έχει πέσει κάτω από την ονομαστική της τιμή. Μέσω του αεροφυλακίου λοιπόν, δίνεται η δυνατότητα της άμεσης παροχής πεπιεσμένου αέρα και κατά συνέπεια ταχεία αύξηση της παραγόμενης ισχύος, με αποτέλεσμα η συχνότητα να συγκρατείται σε υψηλότερα επίπεδα. Μόλις διαγνωστεί μεγάλος ρυθμός μείωσης της συχνότητας, το σήμα k_{2s} μεταβαίνει ακαριαία στη μέγιστη τιμή που δύναται να πάρει το άνοιγμα της δικλείδας, δηλαδή γίνεται $k_{2s} = K_{sat}$. Το σήμα παραμένει σε αυτή την τιμή, έως ότου η διαταραχή έχει εξαλειφθεί πλήρως. Μόλις η διαταραχή αντιμετωπιστεί επιτυχώς, τότε το αεροφυλάκιο δεν χρειάζεται πλέον και πρέπει να απενεργοποιηθεί. Για να μην διαταραχθεί απότομα η παραγωγή του αεριοστροβίλου, το σήμα k_{2s} δεν μεταβαίνει ακαριαία στην τιμή 0, αλλά αρχίζει να μειώνεται με σταθερό ρυθμό έως ότου μηδενιστεί. Συγκεκριμένα, με το που δοθεί εντολή απενεργοποίησης του αεροφυλακίου, το σήμα k_{2s} από την αρχική τιμή K_{sat} που είχε αρχίζει να μειώνεται γραμμικά με το χρόνο, για ένα πεπερασμένο χρονικό διάστημα. Έτσι το σήμα k_{2s} δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$k_{2s} = K_{sat} - T_{sat} \cdot t \quad (4.51)$$

όπου K_{sat} το μέγιστο άνοιγμα της δικλείδας και T_{sat} σταθερά που καθορίζει το ρυθμό μείωσης του ανοίγματος της δικλείδας αέρα. Μετά την πάροδο λοιπόν του χρονικού διαστήματος

$\Delta t = K_{sat} / T_{sat}$, το σήμα k_{2s} έχει μεταβεί στην τιμή 0. Από εκεί και έπειτα συνεχίζει να παραμένει σε αυτήν την τιμή έως ότου διαγνωστεί ξανά μεγάλος ρυθμός πτώσης της συχνότητας, οπότε το αεροφυλάκιο θα ενεργοποιηθεί ξανά.

Σε όλη την παραπάνω περιγραφή υλοποιείται παράλληλα ο έλεγχος της πίεσης του αεροφυλακίου. Συγκεκριμένα, αν ισχύει $p_{ch} > e$ τότε το αεροφυλάκιο δύναται να χρησιμοποιηθεί, ειδάλως παραμένει ανενεργό. Σύμφωνα με τα παραπάνω, στο Σχήμα 4.17 απεικονίζεται το λογικό διάγραμμα ελέγχου του σήματος k_{2s} . Όσο ο ρυθμός μεταβολής της συχνότητας είναι μέσα στα επιτρεπτά επίπεδα, τότε το σήμα k_{2s} είναι 0. Όταν ο ρυθμός πέσει κάτω από το όριο ($N_r \leq -n_{rc}$) και υπάρχει επαρκής πίεση στο αεροφυλάκιο ($p_{ch} > e$), τότε το σήμα γίνεται $k_{2s} = K_{sat}$. Όπως φαίνεται από τον βρόχο του Σχήματος 4.17, όσο η διαταραχή υφίσταται και η πίεση στο αεροφυλάκιο είναι άνω του προκαθορισμένου ορίου e , τότε εξακολουθεί να ισχύει ότι $k_{2s} = K_{sat}$. Αν η πίεση p_{ch} μειωθεί αρκετά, τότε το αεροφυλάκιο τίθεται εκτός, και το σήμα k_{2s} μεταβαίνει στο 0. Στην περίπτωση όπου η πίεση είναι στα επιτρεπτά επίπεδα σε όλη τη διάρκεια της διαταραχής ($p_{ch} > e$), τότε το αεροφυλάκιο θα απενεργοποιηθεί μόλις διαγνωστεί η εξάλειψη της διαταραχής, οπότε το σήμα k_{2s} θα δίνεται πλέον από τη σχέση (4.51). Έτσι μεταβαίνει ομαλά στην τιμή 0 και το αεροφυλάκιο τίθεται εκτός.

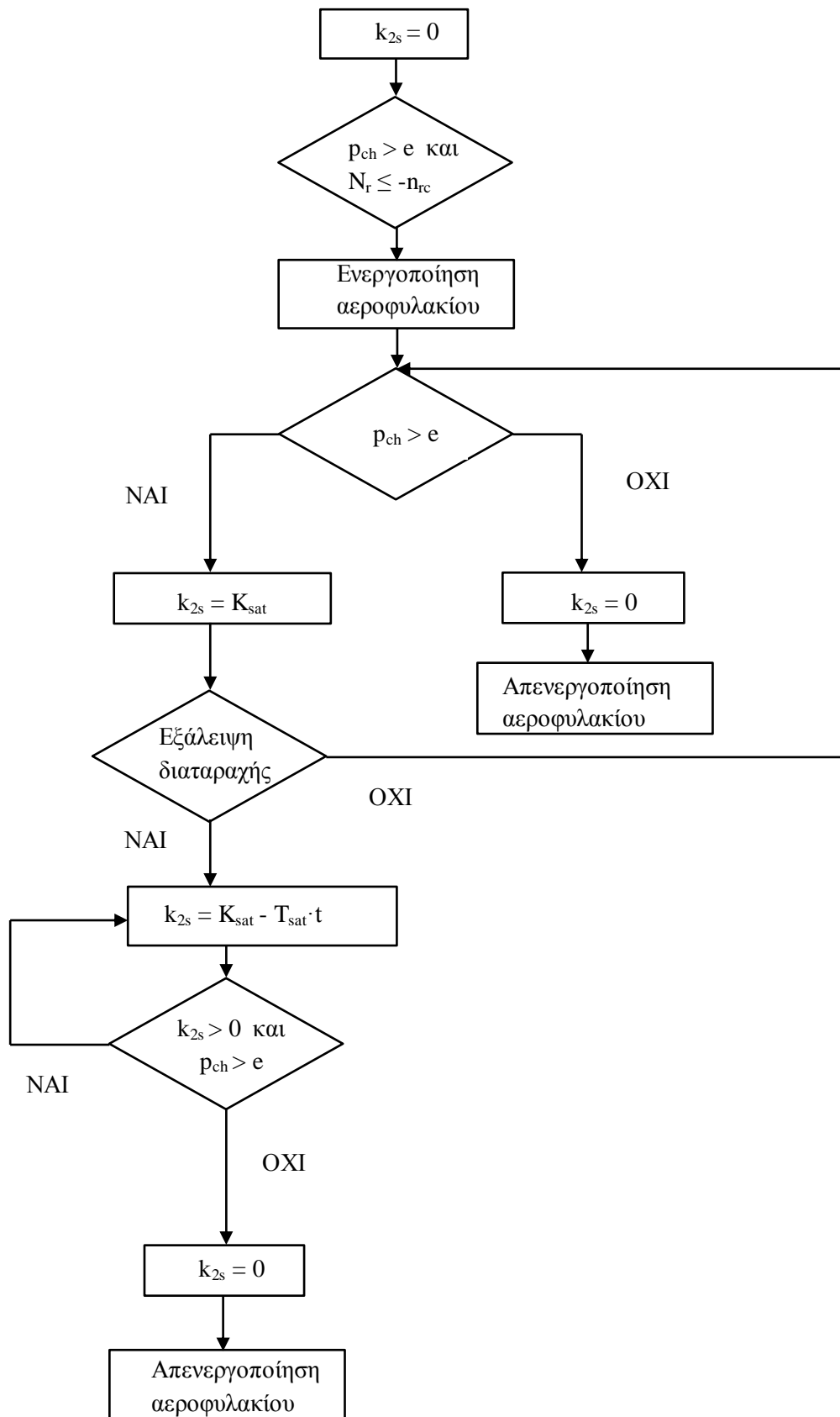
Στις μελέτες ευστάθειας ΣΗΕ, ως συνθήκη μόνιμης κατάστασης εξετάζουμε τη σταθεροποίηση της συχνότητας [2]. Ωστόσο, για λόγους που θα αναφερθούν στην ενότητα 4.3, στην περίπτωση του αεριοστροβίλου με αεροφυλάκιο, η συνθήκη για την εξάλειψη της διαταραχής θεωρείται η σταθεροποίηση της παραγωγού της συχνότητας σε μία μικρή τιμή. Συγκεκριμένα, η πλήρης αντιμετώπιση της διαταραχής θεωρείται ότι έχει επιτευχθεί όταν ο ρυθμός μεταβολής της συχνότητας έχει σταθεροποιηθεί εντός ενός στενού εύρους τιμών για ένα συνεχόμενο χρονικό διάστημα t_{rel} δευτερολέπτων, δηλαδή

$$- N_{rel} < N_r < N_{rel} \text{ για χρονικό διάστημα } t_{rel} \text{ s} \quad (4.52)$$

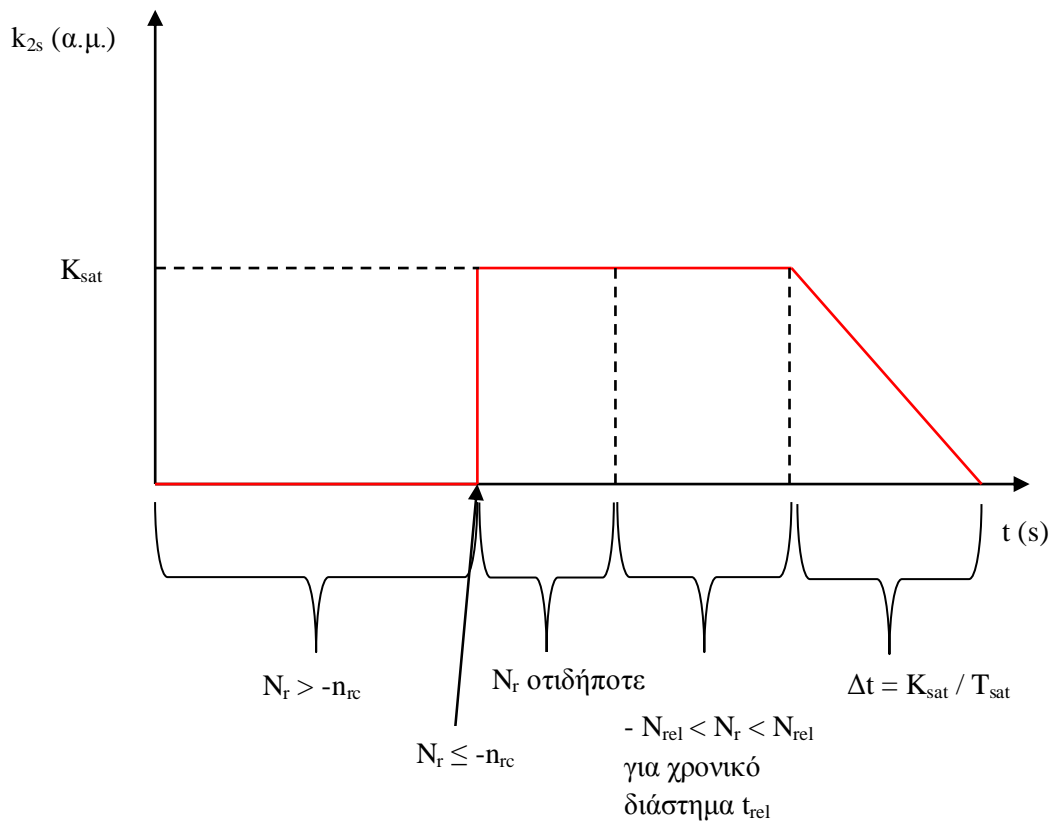
όπου N_{rel} μικρή θετική τιμή. Δηλαδή, δεδομένου ότι το αεροφυλάκιο έχει ενεργοποιηθεί καταγράφεται ο ρυθμός μεταβολής της συχνότητας. Όταν το χρονόμετρο φτάσει την τιμή t_{rel} όπου ο ρυθμός μεταβολής της συχνότητας είναι διαρκώς εντός των παραπάνω ορίων, τότε συνεπάγεται πως η διαταραχή έχει εξαλειφθεί πλήρως και το αεροφυλάκιο πρέπει να απενεργοποιηθεί.

Τέλος, στο Σχήμα 4.18 φαίνεται η μορφή του σήματος k_{2s} ανάλογα με τις τιμές του ρυθμού μεταβολής της συχνότητας.

Στην παρούσα ενότητα περιγράφηκαν όλες οι διατάξεις ελέγχου του αεριοστροβίλου που καθορίζουν την απόκρισή του ανάλογα με το ηλεκτρικό φορτίο. Στην τελευταία παράγραφο αναπτύχθηκε το μοντέλο του αεροφυλακίου το οποίο ενσωματώνεται στη λειτουργία του αεριοστροβίλου και συνεισφέρει στην παραγωγή επιπλέον ισχύος μεταβατικά. Το συγκεκριμένο μοντέλο του αεριοστροβίλου με αεροφυλάκιο αναπτύχθηκε σε περιβάλλον Matlab / Simulink. Όσον αφορά τις εξισώσεις και τις διατάξεις ελέγχου του μοντέλου του αεριοστροβίλου, υλοποιούνται στο Simulink με συναρτήσεις και μπλοκ διαγράμματα ακριβώς όπως αναλύθηκαν στις παραγράφους 4.2.1 έως 4.2.9. Ο έλεγχος του ανοίγματος της δικλείδας αέρα του αεροφυλακίου περιγράφηκε στην παράγραφο 4.2.10 με εξισώσεις και με λογικά διαγράμματα, τα οποία ανάλογα με την τιμή των σημάτων εισόδου του αεροφυλακίου καθορίζουν κάθε στιγμή το τελικό άνοιγμα της δικλείδας αέρα. Η πλήρης υλοποίηση του ελέγχου της δικλείδας με μπλοκ διαγράμματα στο Simulink, αναλύεται εκτενώς στην ενότητα που ακολουθεί.



Σχήμα 4.17 : Λογικό διάγραμμα ελέγχου του σήματος k_{2s}



Σχήμα 4.18 : Μορφή σήματος k_{2s} για το άνοιγμα της δικλείδας

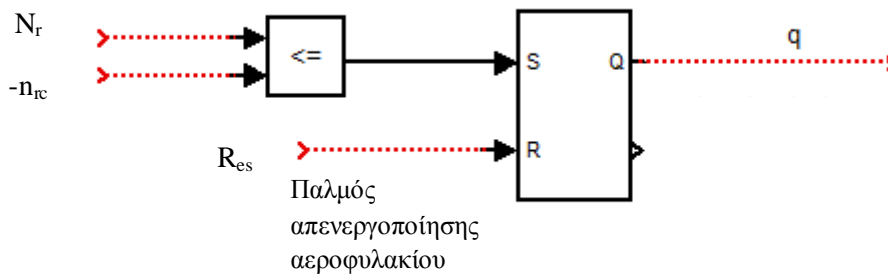
4.3 Υλοποίηση του ελέγχου αεροφυλακίου στο Simulink

Το αεροφυλάκιο ενεργοποιείται όπως σημειώθηκε παραπάνω, είτε λόγω ανίχνευσης ρυθμού πτώσης συχνότητας υψηλής τιμής είτε λόγω μέτρησης της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος που υπερβαίνει την ονομαστική. Αυτές είναι δύο ανεξάρτητες λειτουργίες ελέγχου που εξηγούνται αναλυτικά παρακάτω.

4.3.1 Έλεγχος συχνότητας

Ο έλεγχος συχνότητας ενεργοποιεί το αεροφυλάκιο, όταν ο ρυθμός μεταβολής της συχνότητας (N_r) ξεπεράσει το κατώφλι $-n_{rc}$, συνεισφέροντας στην άμεση παραγωγή ισχύος για τη συγκράτηση της συχνότητας [1]. Η έγχυση αέρα θα σταματήσει μόλις η συχνότητα προσεγγίσει τη μόνιμη κατάσταση μετά τη διαταραχή, δηλαδή όταν ο ρυθμός μεταβολής της συχνότητας παραμείνει εντός ενός στενού εύρους τιμών ($\pm N_{rel}$) για ένα πεπερασμένο χρονικό διάστημα (t_{rel}). Η ενεργοποίηση και η απενεργοποίηση του αεροφυλακίου επιτυγχάνεται μέσω των αντίστοιχων λογικών σημάτων που οδηγούν τις πύλες S και R ενός flip-flop. Η έξοδος του flip-flop είναι το λογικό σήμα Q, το οποίο λαμβάνει την τιμή 0 όταν το

αεροφυλάκιο είναι απενεργοποιημένο, ενώ αντίθετα την τιμή 1 όταν είναι σε κατάσταση λειτουργίας. Στο Σχήμα 4.19 φαίνεται το αντίστοιχο διάγραμμα βαθμίδων :



Σχήμα 4.19: Ενεργοποίηση του αεροφυλακίου εξαιτίας του ρυθμού πτώσης της συχνότητας

Η λειτουργία του flip-flop προσδιορίζεται από το Σχήμα 4.20, που φαίνεται παρακάτω:

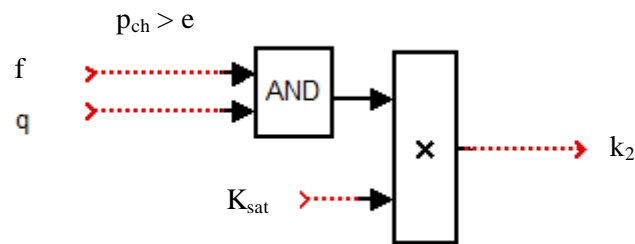
| S | R | Q _n |
|---|---|------------------|
| 0 | 0 | Q _{n-1} |
| 0 | 1 | 0 |
| 1 | 0 | 1 |
| 1 | 1 | 0 |

Σχήμα 4.20 : Σήματα εισόδου - εξόδου του flip-flop

Αρχικώς τα σήματα S, Q, R, είναι 0 και συνεπώς το αεροφυλάκιο είναι απενεργοποιημένο. Όταν ο ρυθμός μεταβολής της συχνότητας N_f γίνει μικρότερος από το όριο $-n_{rc}$, τότε το σήμα S λαμβάνει την τιμή 1, και η έξοδος Q γίνεται επίσης 1. Έτσι το αεροφυλάκιο έχει ενεργοποιηθεί. Όταν, μετά από λίγο χρονικό διάστημα, ο ρυθμός μεταβολής της συχνότητας έχει ξεπεράσει το κατώφλι προς τα πάνω με την δράση του πεπιεσμένου αέρα και του ρυθμιστή στροφών του αεριοστροβίλου, το αεροφυλάκιο θα συνεχίσει να είναι ενεργοποιημένο, όπως φαίνεται και από τον πίνακα λειτουργίας του flip-flop, όπου θα έχει μεταβεί στην κατάσταση $S=0, R=0, Q_n=Q_{n-1}=1$. Από εκεί και έπειτα δηλαδή, για οποιαδήποτε μεταβολή του λογικού σήματος S το αεροφυλάκιο θα συνεχίζει να είναι ενεργοποιημένο. Μόλις το λογικό σήμα R, που καθορίζεται από την εντολή R_{es} , λάβει (στιγμιαία) την τιμή 1, τότε το αεροφυλάκιο απενεργοποιείται δίνοντας ως έξοδο $Q=0$. Η εντολή R_{es} είναι ένας παλμός που πυροδοτείται όταν ο ρυθμός μεταβολής της συχνότητας βρεθεί εντός των ορίων $\pm N_{rel}$ για t_{rel} δευτερόλεπτα, καταδεικνύοντας την εξάλειψη της διαταραχής, η λογική ελέγχου του οποίου θα αναλυθεί εκτενέστερα παρακάτω.

Στο Σχήμα 4.21 φαίνεται πώς το σήμα ενεργοποίησης του αεροφυλακίου καθορίζει το άνοιγμα της δικλείδας αέρα. Ο λογικός τελεστής AND έχει ως είσοδο την εντολή ενεργοποίησης του αεροφυλακίου (q) που προέκυψε από τον έλεγχο συχνότητας μέσω του flip-flop στο Σχήμα 4.19, και το λογικό σήμα f, το οποίο καθορίζει αν η πίεση στο αεροφυλάκιο υπερβαίνει κατά ένα ποσοστό την ονομαστική πίεση του θαλάμου καύσης, όπου θα φανεί σε επόμενη διάταξη η υλοποίησή του. Ο συγκεκριμένος έλεγχος της πίεσης

αεροφυλακίου είναι απαραίτητος, μιας και όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η επιπλέον έγχυση αέρα από το αεροφυλάκιο στο θάλαμο καύσης ανυψώνει την πίεση του δεύτερου, με αποτέλεσμα να δημιουργείται κίνδυνος αντιστροφής της μάζας αέρα από το θάλαμο καύσης προς το αεροφυλάκιο. Έτσι το σήμα f στην ουσία αφήνει ένα περιθώριο ασφαλείας που αποτρέπει το φαινόμενο αυτό. Στη συνέχεια η έξοδος του τελεστή AND καθορίζει την οριστική ενεργοποίηση του αεροφυλακίου δεδομένων των δύο προηγούμενων προϋποθέσεων, η οποία έξοδος πολλαπλασιάζεται με το μέγιστο άνοιγμα της δικλείδας αέρα.



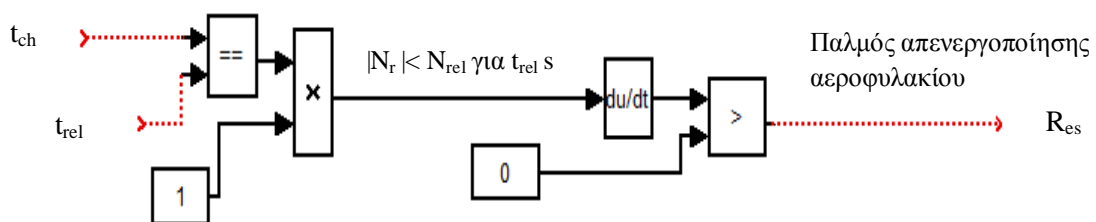
Σχήμα 4.21 : Καθορισμός ανοίγματος δικλείδας αέρα-έλεγχος συχνότητας

Η έξοδος του πολλαπλασιαστή στο Σχήμα 4.21 καθορίζει το άνοιγμα της δικλείδας, το οποίο τελικώς θα έχει δύο καταστάσεις [1]:

- $k_2=0$, όταν ο ρυθμός πτώσης συχνότητας βρίσκεται άνω του ορίου $-n_{rc}$.
- $k_2=K_{sat}$, όταν ο ρυθμός πτώσης συχνότητας παραβιάζεται και υπάρχει επαρκής πίεση στο αεροφυλάκιο.

Με λίγα λόγια ο έλεγχος αποσκοπεί στη μέγιστη δυνατή συνεισφορά του αεροφυλακίου στη ρύθμιση συχνότητας, εφαρμόζοντας το μέγιστο άνοιγμα της δικλείδας αέρα, στην περίπτωση που ο ρυθμός πτώσης συχνότητας παραβιαστεί.

Στο Σχήμα 4.22 φαίνεται το διάγραμμα βαθμίδων που καθορίζει το σήμα R_{es} , το οποίο είναι υπεύθυνο για τη σβέση του αεροφυλακίου, όταν ο ρυθμός μεταβολής της συχνότητας N_r έχει αποκατασταθεί εντός του εύρους $\pm N_{rel}$ για t_{rel} δευτερόλεπτα, ανιχνεύοντας έτσι την επίτευξη μόνιμης κατάστασης.

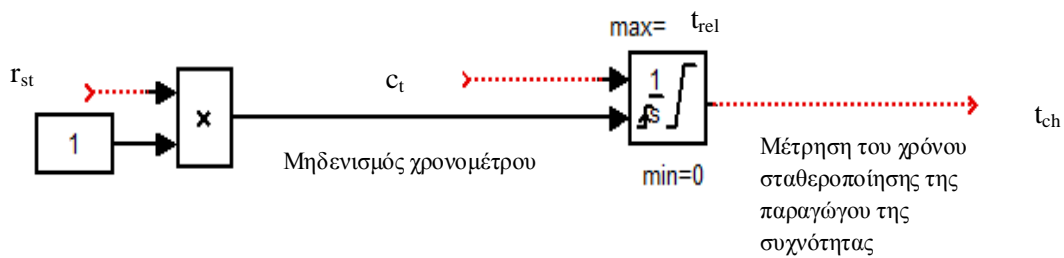


Σχήμα 4.22 : Σήμα απενεργοποίησης αεροφυλακίου

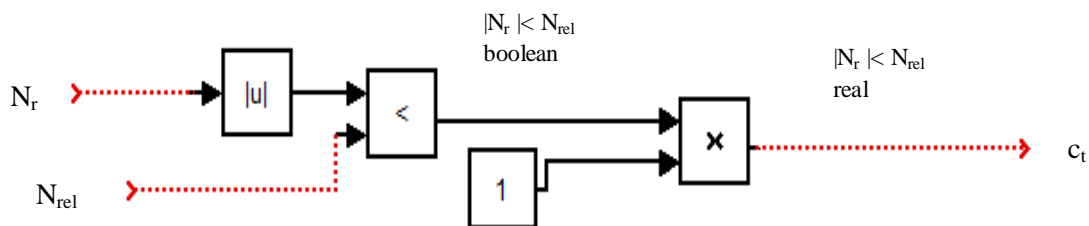
Το σήμα t_{ch} (s) είναι ο χρόνος για τον οποίο η απόλυτη τιμή του ρυθμού μεταβολής της συχνότητας έχει προσεγγίσει μια πολύ χαμηλή τιμή, κάτω του ορίου N_{rel} . Μόλις λοιπόν παρέλθει το απαιτούμενο χρονικό διάστημα των t_{rel} δευτερολέπτων, η έξοδος του τελεστή (=) γίνεται 1, σηματοδοτώντας την πλήρη εξάλειψη της διαταραχής. Το προκύπτων σήμα

πολλαπλασιάζεται με τη μονάδα, προκειμένου να μετατραπεί από λογικό σε πραγματικό. Έτσι λοιπόν, όσο η καταγραφή του χρονομέτρου είναι κάτω των t_{rel} δευτερολέπτων, η έξοδος του παραπάνω πολλαπλασιαστή είναι 0. Μόλις γίνει $t_{ch} = t_{rel}$, τότε το χρονομέτρο σταματάει μόνιμα στην τιμή αυτή, και η έξοδος του πολλαπλασιαστή γίνεται 1. Λόγω του ότι το flip-flop του Σχήματος 4.19 χρειάζεται παλμό για την απενεργοποίηση του αεροφυλακίου τη στιγμή όπου έχει διαγνωστεί η εξάλειψη της διαταραχής, η έξοδος του πολλαπλασιαστή δεν μπορεί να τροφοδοτήσει απ' ευθείας το flip-flop, διότι μετά την διάγνωση της αποκατάστασης της διαταραχής η έξοδος του τελεστή θα είναι μόνιμα 1. Έτσι το σήμα εξόδου του πολλαπλασιαστή παραγωγίζεται και συγκρίνεται με το 0. Κατ' αυτόν τον τρόπο, επιτυγχάνεται την επιθυμητή στιγμή της απενεργοποίησης του αεροφυλακίου, η έξοδος R_{es} του τελεστή (>) να γίνεται στιγμιαία 1, ως αποτέλεσμα της μετάβασης του σήματος εξόδου του πολλαπλασιαστή από την τιμή 0 στην τιμή 1. Όλες τις άλλες χρονικές στιγμές το σήμα R_{es} λαμβάνει την τιμή 0.

Στο Σχήμα 4.23 απεικονίζεται η υλοποίηση του χρονομέτρου. Η έξοδος της διάταξης είναι το σήμα t_{ch} , ο χρόνος δηλαδή για τον οποίο ο ρυθμός μεταβολής της συχνότητας παραμένει εντός του εύρους $\pm N_{rel}$. Η μέτρηση του χρόνου γίνεται με τον παρακάτω ολοκληρωτή, ο οποίος δέχεται δύο εισόδους. Η πρώτη είσοδος είναι το σήμα c_t το οποίο καθορίζει εάν θα πρέπει να μετράται ο χρόνος ή όχι. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.24, η καταγραφή του χρόνου λαμβάνει χώρα όταν ο ρυθμός μεταβολής της συχνότητας βρεθεί εντός ορίων ($\pm N_{rel}$), με το σήμα c_t να μεταβαίνει στην τιμή 1. Σε περίπτωση όπου η παράγωγος της συχνότητας ξεφύγει από τα όρια, η καταγραφή σταματάει, μιας και το σήμα c_t γίνεται μηδέν. Η δεύτερη είσοδος είναι το σήμα r_{st} , πολλαπλασιασμένο με τη μονάδα προκειμένου να πάρει πραγματικές τιμές. Το σήμα r_{st} φροντίζει για την επανεκκίνηση του χρονομέτρου, όταν μεταβαίνει από την τιμή 0 στην τιμή 1. Η μετάβαση αυτή δηλαδή μηδενίζει την καταγραφή του χρονομετρητή. Τέλος, το σήμα εξόδου του ολοκληρωτή (t_{ch}), περιορίζεται μεταξύ των τιμών 0 και t_{rel} .



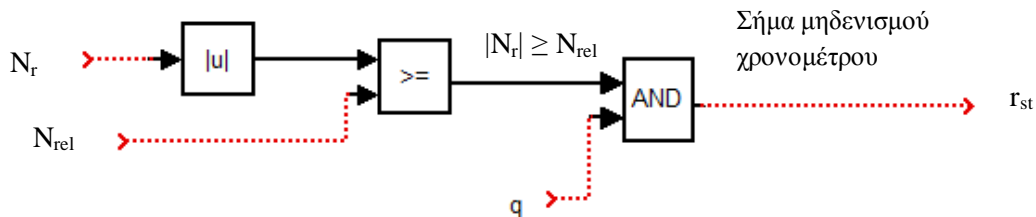
Σχήμα 4.23 : Σήμα καταγραφής του χρόνου ηρεμίας του ρυθμού μεταβολής της συχνότητας



Σχήμα 4.24 : Σήμα ένδειξης της παραμονής του ρυθμού μεταβολής της συχνότητας εντός ορίων

Στο Σχήμα 4.25 καθορίζεται πλήρως το σήμα r_{st} . Γίνεται εύκολα αντιληπτό το γεγονός ότι το σήμα r_{st} μεταβαίνει στην τιμή 1 όταν:

- 1) ενεργοποιηθεί το αεροφυλάκιο προκειμένου να αρχικοποιηθεί το σύστημα μέτρησης. Αυτό συμβαίνει διότι, πριν την ενεργοποίηση του αεροφυλακίου, ο χρονομετρητής είχε αποθηκευμένες στη μνήμη του προηγούμενες καταγραφές του χρόνου. Έτσι, μόλις δοθεί εντολή για άνοιγμα της δικλείδας αέρα από τον έλεγχο συχνότητας, το σήμα r_{st} μεταβαίνει στην τιμή 1, επανεκκινώντας το χρονόμετρο.
- 2) ο ρυθμός μεταβολής της συχνότητας ξεφύγει από τα προκαθορισμένα όρια $\pm N_{rel}$. Η λειτουργία αυτή είναι απαραίτητη για να εξασφαλίσει τη σωστή μέτρηση του χρόνου. Προϋπόθεση για να αποσυνδεθεί το αεροφυλάκιο είναι η παραμονή του ρυθμού μεταβολής της συχνότητας εντός των καθορισμένων ορίων για ένα συνεχόμενο χρονικό διάστημα t_{rel} . Σε περίπτωση όπου, κατά την καταγραφή του χρόνου παραμονής της παραγωγού της συχνότητας εντός ορίων, η παράγωγος ξεφύγει από τα όρια, όπως είδαμε παραπάνω, το χρονόμετρο σταματάει να μετράει. Κρίνεται σκόπιμο λοιπόν, την χρονική στιγμή που θα σταματήσει το χρονόμετρο την καταγραφή, να μηδενιστεί εκ νέου, αναμένοντας την επαναφορά της παραγωγού εντός ορίων, για την μέτρηση του χρόνου παραμονής από την αρχή.



Σχήμα 4.25 : Σήμα μηδενισμού της καταγραφής του χρόνου ηρεμίας του ρυθμού μεταβολής της συχνότητας

Αρχικά, τόσο οι δύο εισοδοί του AND όσο και η έξοδος του είναι 0 (Σχήμα 4.25). Λίγο πριν ενεργοποιηθεί το αεροφυλάκιο, θα είναι $|N_r| > N_{rel}$, αφού προϋπόθεση για την ενεργοποίησή του είναι $N_r = -n_{rc}$, όπου $n_{rc} > N_{rel}$, με αποτέλεσμα η μία είσοδος του AND να είναι 1 και η άλλη προφανώς 0 ($q=0$). Έτσι η έξοδος του είναι 0. Μόλις δοθεί σήμα για έγχυση ροής αέρα, λόγω ελέγχου συχνότητας, το q μεταβαίνει στην κατάσταση 1 και κατ' επέκταση και η έξοδος του τελεστή AND, με αποτέλεσμα να δίνεται ο απαραίτητος παλμός για το μηδενισμό της μέτρησης (1^η περίπτωση-αρχικοποίηση). Το q θα διατηρήσει την τιμή 1 μέχρις ότου το αεροφυλάκιο τελικά θα απενεργοποιηθεί, με αποτέλεσμα τελικά, η έξοδος του τελεστή AND να καθορίζεται πλέον από την τιμή του λογικού σήματος $|N_r| \geq N_{rel}$. Κάποια στιγμή στην συνέχεια, ο ολοκληρωτής στο Σχήμα 4.23 αρχίζει να μετράει το χρόνο όπου ικανοποιείται η συνθήκη $|N_r| < N_{rel}$. Αν ο χρόνος δεν προλάβει να φτάσει το άνω όριο του ολοκληρωτή (t_{rel} s), λόγω παραβίασης της παραπάνω συνθήκης, τότε η πρώτη είσοδος του AND γίνεται 1 και άρα και η έξοδος του (Σχήμα 4.25). Έτσι η μέτρηση σταματάει μιας και το σήμα c_i γίνεται μηδέν (Σχήμα 4.24), και το χρονόμετρο μηδενίζεται αφού το σήμα r_{st} μεταβαίνει από την κατάσταση 0 στην κατάσταση 1 (Σχήμα 4.25). Μόλις ο ρυθμός

μεταβολής της συχνότητας εισέλθει ξανά στα επιτρεπτά επίπεδα, το σήμα c_i αρχίζει πάλι την μέτρηση (Σχήμα 4.24).

Μετά από κάποιο χρονικό διάστημα, η παράγωγος της συχνότητας θα εισέλθει στα επιτρεπτά επίπεδα όπου και θα παραμείνει για τουλάχιστον t_{rel} s (περίοδος ανίχνευσης μόνιμης κατάστασης). Τότε στην έξοδο του τελεστή (=) (Σχήμα 4.22) θα παραχθεί λογικό σήμα με τιμή 1, από την αρχική τιμή 0 που είχε αρχικά. Στη συνέχεια αυτό θα πολλαπλασιαστεί με τη μονάδα προκειμένου το σήμα να μετατραπεί σε πραγματικό αριθμό. Στην ουσία αυτό είναι το κρίσιμο σήμα για την απενεργοποίηση του αεροφυλακίου. Δεδομένου όμως ότι την πύλη του flip-flop που μηδενίζει την έξοδο (Σχήμα 4.19), θέλουμε να την οδηγεί στιγμιαίος παλμός, το παραπάνω σήμα παραγωγίζεται και ελέγχεται με το 0, όπως προαναφέρθηκε. Έτσι αν είναι 0, τότε σημαίνει ότι δεν έχει επιτευχθεί μόνιμη κατάσταση και το αεροφυλάκιο δεν πρέπει να απενεργοποιηθεί. Όταν όμως το λογικό σήμα R_{es} γίνει στιγμιαία 1, τότε η θύρα R του flip-flop (Σχήμα 4.19) δέχεται τον στιγμιαίο παλμό και μηδενίζει την έξοδό του ($q=0$), απενεργοποιώντας τελικά το αεροφυλάκιο. Έτσι, όπως φαίνεται από το Σχήμα 4.21, το άνοιγμα της δικλίδας (k_2) θα μεταβεί ακαριαία στην τιμή 0.

Εδώ πρέπει να εξηγήσουμε το λόγο που ως συνθήκη μόνιμης κατάστασης εξετάζουμε τη σταθεροποίηση της παραγώγου της συχνότητας και όχι τη σταθεροποίηση της συχνότητας. Όταν λάβει χώρα κάποια διαταραχή, παραδείγματος χάριν βηματική αύξηση της ζητούμενης ηλεκτρικής ισχύος, ο ρυθμός πτώσης της συχνότητας θα ξεπεράσει το κατώφλι που έχουμε θέσει ως όριο (θα φανεί και στις προσομοιώσεις στο Κεφάλαιο 5). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την ενεργοποίηση του αεροφυλακίου, και την έγχυση πεπιεσμένου αέρα στο θάλαμο καύσης. Η συχνότητα, μετά από κάποιες ταλαντώσεις, θεωρητικά θα έπρεπε να σταθεροποιηθεί γύρω από μια σταθερή τιμή, δεδομένου ότι ο αεριοστρόβιλος πλέον θα έχει αναλάβει όλο το φορτίο που του ζητείται, μέσω της δράσης του ρυθμιστή στροφών και κατ' επέκταση μέσω της ρύθμισης της μηχανικής ισχύος με την αύξηση του καυσίμου. Έχει θεωρηθεί όμως ότι η ροή μάζας αέρα προς τον θάλαμο καύσης είναι ανάλογη της διαφοράς πίεσεως μεταξύ θαλάμου καύσης και αεροφυλακίου. Επίσης, η πίεση στο αεροφυλάκιο μειώνεται γραμμικά με το ολοκλήρωμα της ροής που εξέρχεται από αυτό, ενώ η πίεση που επικρατεί στο θάλαμο καύσης είναι ανάλογη της συνολικής ροής που εκτονώνεται στον στρόβιλο. Έτσι, συνδυάζοντας τις σχέσεις (4.20), (4.21), (4.31) καταλήγουμε στην εξής σχέση :

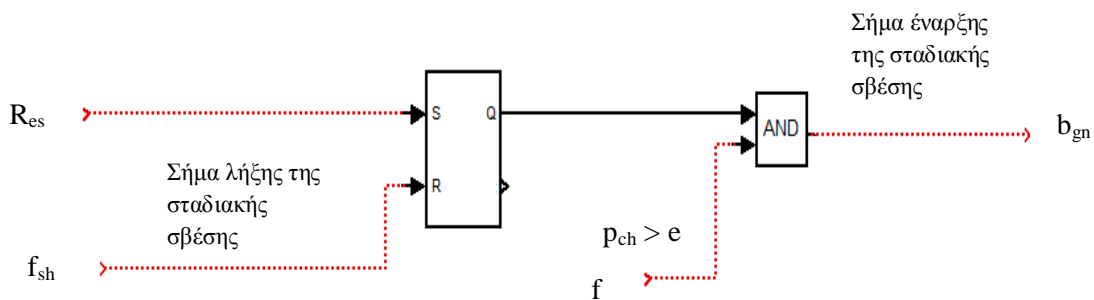
$$W_{ch} = \frac{p_{in} - k \cdot W}{sT_{ch} + 1 + \frac{k}{T_{cap} \cdot s} + k} \quad (4.53)$$

Καθώς ο χρόνος αυξάνει το s μειώνεται, και δεδομένου ότι $T_{ch} \ll T_{cap}$, μειώνεται και η ροή μάζας αέρα προς το θάλαμο καύσης. Έτσι λοιπόν, δεδομένου ότι η μηχανική ισχύς που παράγει ο αεριοστρόβιλος είναι ανάλογη της ροής μάζας αέρα που εκτονώνεται στον στρόβιλο, καθώς μειώνεται η συνιστώσα του πεπιεσμένου αέρα που προέρχεται από το αεροφυλάκιο, μειώνεται και η παραγόμενη μηχανική ισχύς. Αυτό οδηγεί στην διατάραξη εκ νέου του ισοζυγίου ισχύος, με αποτέλεσμα ο άξονας της γεννήτριας να επιβραδύνεται ξανά. Μέχρι ο ρυθμιστής στροφών να αυξήσει τη ροή καυσίμου και κατ' επέκταση τη μηχανική ισχύ, η συχνότητα έχει ισορροπήσει σε ένα χαμηλότερο σημείο. Ο κύκλος αυτός της μείωσης της ροής αέρα από το αεροφυλάκιο, που οδηγεί στην μείωση της μηχανικής ισχύος και στην μείωση της συχνότητας επαναλαμβάνεται συνεχώς, οδηγώντας λοιπόν, αφού έχει παρέλθει η αρχική πρωτεύουσα ρύθμιση, στην μόνιμη κατάσταση όπου ο ρυθμός μεταβολής της συχνότητας να έχει μια μικρή αρνητική τιμή. Γι' αυτό το λόγο ως μόνιμη κατάσταση

θεωρείται αυτή όπου ο ρυθμός μεταβολής της συχνότητας περιορίζεται εντός ενός στενού εύρους τιμών, και όχι αυτή όπου η συχνότητα σταθεροποιείται.

Λόγω του ότι η εντολή απενεργοποίησης του αεροφυλακίου ($R_{es} = 1$) θα διακόψει απότομα τη ροή μάζας αέρα προς το θάλαμο καύσης ($k_2 = 0$), αυτό θα οδηγήσει σε απότομη μείωση της παραγόμενης ισχύος, αφού ο αεριοστρόβιλος δεν θα προλάβει να υποκαταστήσει την μείωση ροής αέρα με έγχυση επιπλέον καυσίμου, για τη συμπλήρωση της απολεσθείσας παραγωγής. Έτσι το γεγονός αυτό θα προκαλέσει απότομη μείωση της συχνότητας κάτω από την αναμενόμενη μόνιμη τιμή της. Για να αποφευχθεί αυτό, υλοποιήθηκε ο παρακάτω έλεγχος, ο οποίος με το που απενεργοποιηθεί το flip-flop στο Σχήμα 4.19, συνεχίζει να δίνει εντολή για τροφοδότηση του θαλάμου καύσης με πεπιεσμένο αέρα, μειώνοντας σταδιακά το άνοιγμα της δικλείδας και οδηγώντας ομαλά στη σβέση του αεροφυλακίου. Έχουμε λοιπόν το Σχήμα 4.26 όπου υλοποιείται ο έλεγχος σταδιακής σβέσης του αεροφυλακίου.

Το flip-flop που απεικονίζεται στο Σχήμα 4.26 έχει ως είσοδο στην πύλη S το σήμα R_{es} . Όπως προαναφέρθηκε στην περιγραφή του Σχήματος 4.22, το σήμα R_{es} λαμβάνει στιγμιαία την τιμή 1, μόλις παρέλθει το απαιτούμενο χρονικό διάστημα των t_{rel} δευτερολέπτων, όπου έχει διαγνωστεί η εξάλειψη της διαταραχής, και το αεροφυλάκιο πρέπει να απενεργοποιηθεί. Οποιαδήποτε άλλη χρονική στιγμή, έχει την τιμή 0. Το σήμα R_{es} είναι δηλαδή ο απαραίτητος παλμός για την απενεργοποίηση του αεροφυλακίου, με την έναρξη της διαδικασίας της σταδιακής σβέσης του. Η έξοδος Q του flip-flop στο Σχήμα 4.26 καθορίζει λοιπόν το σταδιακό κλείσιμο της δικλείδας αέρα. Όσο το σήμα R_{es} είναι 0, τόσο και η έξοδος του παραπάνω flip-flop είναι 0. Μόλις το σήμα R_{es} μεταβεί στιγμιαία στην τιμή 1, τότε το σήμα Q ομοίως λαμβάνει την ίδια τιμή και παραμένει σε αυτήν έως ότου μηδενιστεί μέσω του σήματος f_{sh} που οδηγεί τη θύρα R του flip-flop. Το σήμα Q στην ουσία καθορίζει το διάστημα στο οποίο θα είναι ενεργοποιημένος ο έλεγχος σταδιακής σβέσης του αεροφυλακίου. Η έξοδος αυτή του flip-flop οδηγεί την πρώτη πύλη του λογικού τελεστή AND. Η δεύτερη πύλη οδηγείται από το λογικό σήμα f, το οποίο όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, καθορίζει εάν υπάρχει επαρκής πίεση στο αεροφυλάκιο για την συνέχιση της τροφοδότησης με πεπιεσμένο αέρα. Η έξοδος του τελεστή AND (σήμα b_{gn}) είναι το τελικό σήμα που καθορίζει την ενεργοποίηση ή μη της σταδιακής σβέσης του αεροφυλακίου.

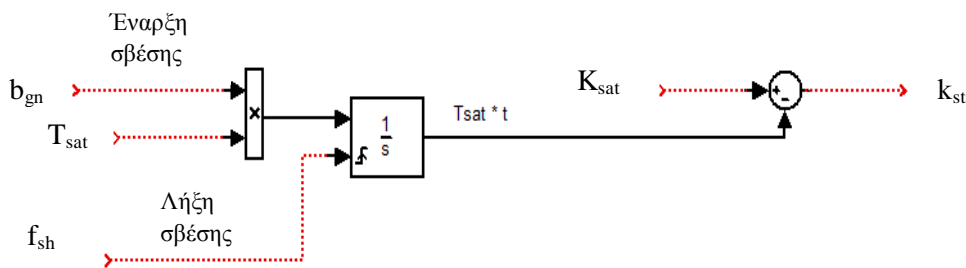


Σχήμα 4.26 : Έναρξη ομαλής σβέσης του αεροφυλακίου

Συνοψίζοντας, καταλήγουμε ότι η σταδιακή σβέση του αεροφυλακίου θα εκκινήσει μόλις δοθεί ο απαραίτητος παλμός μέσω του σήματος R_{es} , και θα ολοκληρωθεί όταν το σήμα f_{sh} θα μεταβεί στιγμιαία στην τιμή 1. Όπως θα φανεί και σε επόμενο σχήμα, το σήμα f_{sh} , που σηματοδοτεί τη λήξη της διαδικασίας της ομαλής σβέσης του αεροφυλακίου, μεταβαίνει

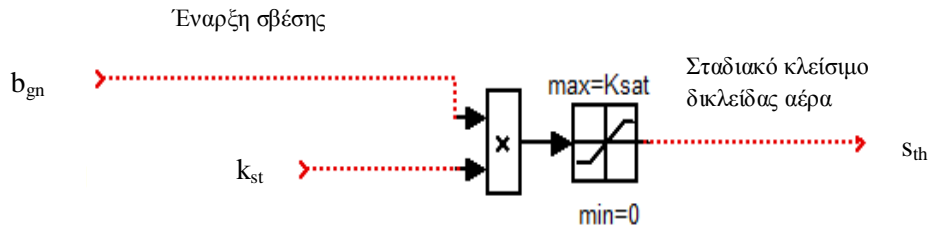
στιγμιαία στην τιμή 1 μετά την πάροδο συγκεκριμένου χρονικού διαστήματος $\Delta t = K_{sat} / T_{sat}$ δευτερολέπτων, όπου K_{sat} το μέγιστο άνοιγμα της δικλείδας αέρα, και T_{sat} χρονική σταθερά.

Στο Σχήμα 4.27 καθορίζεται το άνοιγμα της δικλείδας αέρα k_{st} από τον έλεγχο σταδιακής σβέσης του αεροφυλακίου. Οι είσοδοι του παρακάτω πολλαπλασιαστή είναι το σήμα b_{gn} , που περιγράφηκε στο Σχήμα 4.26, και η σταθερά T_{sat} η οποία καθορίζει το διάστημα όπου ο έλεγχος ομαλής σβέσης θα είναι ενεργός. Συγκεκριμένα, όσο το σήμα b_{gn} είναι στην τιμή 0, η έξοδος του πολλαπλασιαστή θα είναι επίσης 0. Στο ίδιο χρονικό διάστημα λοιπόν, τόσο η είσοδος όσο και η έξοδος του ολοκληρωτή θα είναι ομοίως 0. Συνεπώς, όταν δεν έχει δοθεί εντολή για τη σβέση του αεροφυλακίου, το σήμα k_{st} λαμβάνει την τιμή K_{sat} . Μόλις το σήμα b_{gn} μεταβεί στην τιμή 1 ($R_{es} = 1$ στιγμιαία), τότε η έξοδος του πολλαπλασιαστή γίνεται T_{sat} . Έτσι ο ολοκληρωτής εμφανίζει στην έξοδό του το γινόμενο $T_{sat} \cdot t$, όπου t ο χρόνος μέτρησης από τη στιγμή ενεργοποίησης της ομαλής σβέσης του αεροφυλακίου. Συνεπώς, πλέον το σήμα k_{st} γίνεται $K_{sat} - T_{sat} \cdot t$. Παρατηρούμε ότι δηλαδή μειώνεται γραμμικά με το χρόνο, φτάνοντας στην τιμή 0 την χρονική στιγμή $t = K_{sat} / T_{sat}$. Έτσι επιτυγχάνεται το σταδιακό κλείσιμο της δικλείδας αέρα από την τιμή K_{sat} που είχε αρχικά μέχρι την τιμή 0, σε $\Delta t = K_{sat} / T_{sat}$ δευτερόλεπτα. Το σήμα f_{sh} (στιγμιαίος παλμός) οδηγεί την πύλη μηδενισμού του ολοκληρωτή. Αυτό αποσκοπεί στον μηδενισμό της καταγραφής $T_{sat} \cdot t$ μόλις ολοκληρωθεί η ομαλή σβέση του αεροφυλακίου, για την επανεκκίνηση του χρονομέτρου. Έτσι, πλέον το σήμα b_{gn} έχει μεταβεί στην τιμή 0 και το χρονόμετρο έχει μηδενιστεί, με αποτέλεσμα η έξοδος του ολοκληρωτή να είναι πάλι 0 και το σήμα $k_{st} = K_{sat}$, αναμένοντας επόμενη εντολή ομαλής σβέσης του αεροφυλακίου σε περίπτωση μεταγενέστερης χρήσης του.



Σχήμα 4.27 : Γραμμικά μειούμενο άνοιγμα της δικλείδας αέρα συναρτήσει του χρόνου

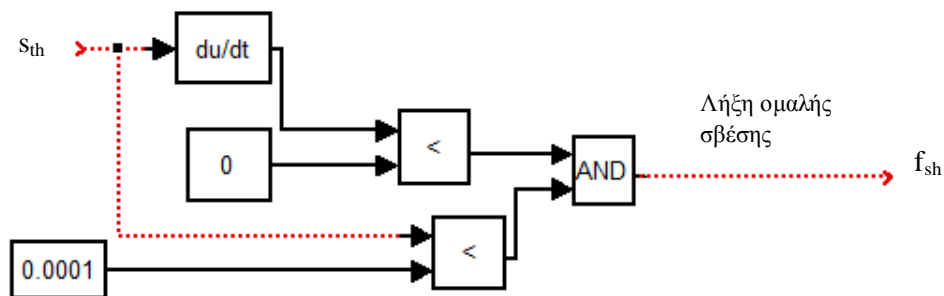
Όπως αναφέρθηκε στο Σχήμα 4.27, όταν ο έλεγχος ομαλής σβέσης του αεροφυλακίου είναι ανενεργός ($b_{gn} = 0$), το σήμα ρύθμισης της δικλείδας είναι $k_{st} = K_{sat}$. Εμείς θα θέλαμε στο διάστημα αυτό το σήμα ρύθμισης της δικλείδας να είναι 0, και να μεταβαίνει στην τιμή K_{sat} όταν ενεργοποιηθεί η σταδιακή σβέση του αεροφυλακίου. Για το σκοπό αυτό, το σήμα k_{st} εισέρχεται στον πολλαπλασιαστή του Σχήματος 4.28. Η άλλη είσοδος του πολλαπλασιαστή είναι το σήμα b_{gn} που καθορίζει την ενεργοποίηση ή μη της σταδιακής σβέσης του αεροφυλακίου. Το αποτέλεσμα του πολλαπλασιασμού των δύο σημάτων εισέρχεται στον γνωστό περιοριστή, ο οποίος φροντίζει το άνοιγμα της δικλείδας να παραμένει εντός των ορίων 0 και K_{sat} . Έτσι, επιτυγχάνεται τη στιγμή της έναρξης της ομαλής σβέσης του αεροφυλακίου ($b_{gn}=1$), η έξοδος του περιοριστή (σήμα s_{th}) να μεταβαίνει ακαριαία στην τιμή K_{sat} . Για το επόμενο χρονικό διάστημα $\Delta t = K_{sat} / T_{sat}$, το σήμα s_{th} μειώνεται γραμμικά με το χρόνο, έως ότου φτάσει τελικά στην τιμή 0. Οποιαδήποτε άλλη χρονική στιγμή, το σήμα αυτό λαμβάνει την τιμή 0, δεδομένου ότι το σήμα b_{gn} είναι επίσης 0.



Σχήμα 4.28 : Ομαλή σβέση του αεροφυλακίου

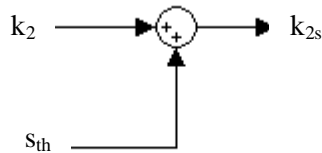
Στο Σχήμα 4.29 απεικονίζεται το σήμα f_{sh} , το οποίο σηματοδοτεί τη λήξη της σταδιακής σβέσης του αεροφυλακίου. Όπως αναφέρθηκε, το σήμα ρύθμισης της δικλείδας μειώνεται γραμμικά με το χρόνο. Είναι επιθυμητό λοιπόν, η ολοκλήρωση του ελέγχου αυτού να γίνεται όταν το σήμα ρύθμισης της δικλείδας (s_{th}) έχει προσεγγίσει την τιμή 0. Έτσι υλοποιείται το παρακάτω διάγραμμα βαθμίδων, όπου όταν το σήμα s_{th} κατερχόμενο ($d(s_{th})/dt < 0$) φτάσει στο 0 (για τεχνικούς λόγους υλοποίησης θεωρήσαμε ως όριο την απειροστή τιμή 0,0001), τότε πρακτικά σημαίνει ότι η ροή έχει μηδενιστεί, και μέσω της εξόδου της πύλης AND (σήμα f_{sh}) δίνεται στιγμιαίος παλμός, μεταβαίνοντας στιγμιαία από την τιμή 0 στην τιμή 1. Έτσι ο βρόχος σταδιακής σβέσης τίθεται εκτός λειτουργίας, αφού δίνεται ο απαραίτητος παλμός για το μηδενισμό του flip-flop στο Σχήμα 4.26. Για να επανέλθει πλήρως στην αρχική κατάσταση το σύστημα, μέσω του παραπάνω παλμού μηδενίζεται και η προηγούμενη καταγραφή του ολοκληρωτή στο Σχήμα 4.27, η είσοδος, έξοδος, και αρχικές συνθήκες του οποίου λαμβάνουν πάλι την τιμή 0.

Έτσι πλέον η ροή αέρα έχει μηδενιστεί, οδηγώντας σε ομαλή επαναφορά του καυσίμου στα επίπεδα που ορίζει η ζήτηση του φορτίου, δίχως την ροή αέρα από το αεροφυλάκιο. Κατ' αυτόν τον τρόπο η συχνότητα προσεγγίζει ομαλά τη μόνιμη τιμή της.



Σχήμα 4.29 : Τερματισμός ομαλής σβέσης του αεροφυλακίου

Τέλος, στο Σχήμα 4.30 φαίνεται ο αθροιστής ο οποίος αθροίζει τα σήματα προερχόμενα από την αρχική ενεργοποίηση του αεροφυλακίου (k_2) και από την ομαλή σβέση του (s_{th}):



Σχήμα 4.30 : Τελικό σήμα ανοίγματος της δικλείδας αέρα - έλεγχος συχνότητας

Η έξοδος του αθροιστή είναι το σήμα k_{2s} , το οποίο είναι το τελικό σήμα για το άνοιγμα της δικλείδας εκ μέρους του ελέγχου συχνότητας. Είναι προφανές από την παραπάνω περιγραφή, ότι όταν το k_2 είναι ενεργό, το s_{th} είναι 0. Ομοίως, όταν το s_{th} είναι ενεργό, το k_2 είναι 0. Σε οποιαδήποτε άλλη χρονική στιγμή τα δύο σήματα είναι μηδέν. Έτσι στην ουσία το σήμα k_{2s} είναι το σήμα k_2 όταν δοθεί η εντολή ενεργοποίησης του αεροφυλακίου. Μόλις επιτευχθεί η εξάλειψη της διαταραχής, το σήμα k_2 μεταβαίνει στην τιμή 0, και ταυτόχρονα το σήμα s_{th} μεταβαίνει στην τιμή που είχε το k_2 προηγουμένως ($s_{th} = K_{sat}$). Από εκεί και έπειτα το σήμα k_{2s} είναι το σήμα s_{th} , το οποίο αρχίζει να μειώνεται από την τιμή K_{sat} στην τιμή 0. Έτσι λοιπόν, το σήμα k_{2s} πριν τη διαταραχή είναι μηδέν. Μόλις διαγνωστεί η απαιτούμενη διαταραχή ($N_f < -n_{rc}$), τότε το σήμα k_{2s} μεταβαίνει βηματικά στην τιμή K_{sat} . Όταν η διαταραχή έχει αποκατασταθεί, το σήμα k_{2s} αρχίζει να μειώνεται γραμμικά με το χρόνο για $\Delta t = K_{sat} / T_{sat}$ δευτερόλεπτα. Από εκεί και μετά, το αεροφυλάκιο έχει απενεργοποιηθεί καθιστώντας το παραπάνω σήμα ίσο με 0.

4.3.2 Έλεγχος ισχύος

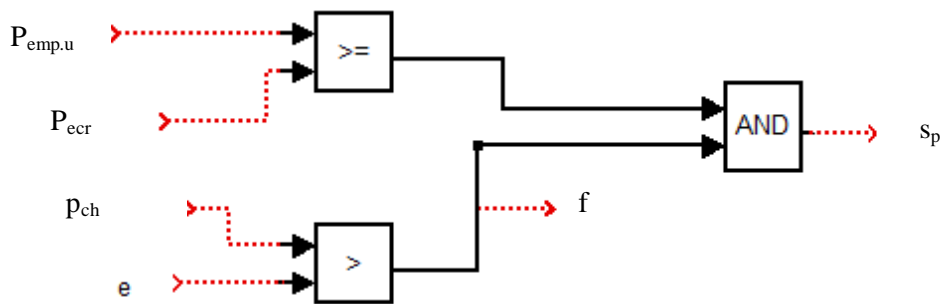
Είναι γνωστό ότι στην περίπτωση που το φορτίο του αεριοστροβίλου είναι ονομαστικό, τότε όλα τα μεγέθη που αφορούν τη λειτουργία του είναι επίσης στις ονομαστικές τους τιμές. Η κρισιμότερη παράμετρος που περιορίζει την παραγωγή του είναι η θερμοκρασία στην έξοδο του θαλάμου καύσης. Όταν η ζήτηση του φορτίου αυξηθεί πέρα από την ονομαστική του τιμή, τότε μεταβατικά ο αεριοστροβίλος αποκρίνεται μέσω του ρυθμιστή στροφών, εγχέοντας επιπλέον καύσιμο στο θάλαμο καύσης, προκειμένου να αυξήσει την παραγωγή του. Δεδομένου ότι αρχικά η θερμοκρασία ήταν στην ονομαστική της τιμή, υπό αυτές τις συνθήκες, επιπλέον καύσιμο συνεπάγεται αύξηση της θερμοκρασίας του θαλάμου καύσης άνω της ονομαστικής της τιμής. Με την πάροδο ελάχιστων δευτερολέπτων από τη στιγμή που αυξήθηκε το φορτίο του αεριοστροβίλου, ενεργοποιείται ο έλεγχος της θερμοκρασίας, με στόχο την προστασία της διάταξης του στροβίλου από υπερθέρμανση, μειώνοντας το καύσιμο που εγχέεται στο θάλαμο καύσης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την επαναφορά της παραγόμενης μηχανικής ισχύος κάτω από την ονομαστική της τιμή, με τη συχνότητα να επιδεινώνεται ακόμα περισσότερο. Αν η ζήτηση του φορτίου δεν επανέλθει άμεσα στα επιτρεπτά επίπεδα, τότε ο αεριοστροβίλος θα αποσυνδεθεί από το δίκτυο, μέσω των διατάξεων προστασίας από υποσυχνότητα. Το πρόβλημα αυτό δύναται να αντιμετωπιστεί σε κάποιο βαθμό, με την έγχυση επιπλέον αέρα από το αεροφυλάκιο. Έτσι, πλεονεκτήματα της χρήσης του επιπλέον πεπιεσμένου αέρα είναι :

- Η μηχανική παραγόμενη ισχύς από τον αεριοστροβίλο, για δεδομένη ποσότητα καυσίμου, αυξάνεται μεταβατικά με την ενεργοποίηση του αεροφυλακίου, μιας και είναι γνωστό ότι το παραγόμενο έργο του στροβίλου είναι ανάλογο της ροής μάζας αέρα που προσπίπτει στα πτερύγιά του. Έτσι, η προσθήκη πεπιεσμένου αέρα

συνεπάγεται και υψηλότερη παραγόμενη ισχύ συγκριτικά με την περίπτωση δίχως το αεροφυλάκιο, για την ίδια ποσότητα καυσίμου.

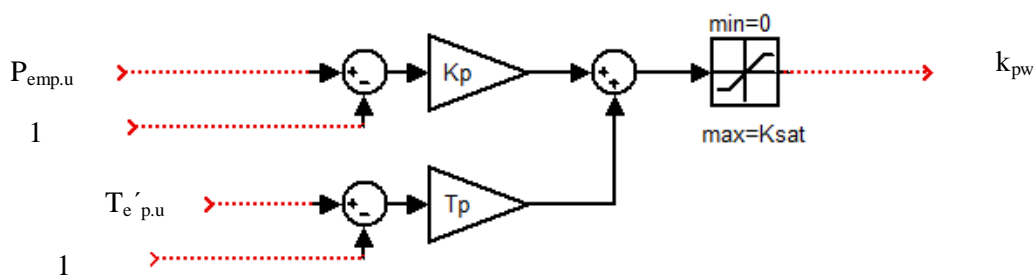
- Η έγχυση αέρα από το αεροφυλάκιο έχει ως αποτέλεσμα την μείωση της θερμοκρασίας που επικρατεί στην έξοδο του θαλάμου καύσης, δίνοντας τη δυνατότητα προσθήκης επιπλέον καυσίμου. Έτσι, χαλαρώνεται σε ένα βαθμό ο περιορισμός αύξησης του καυσίμου πέρα από τα ονομαστικά επίπεδα, αφού σε αυτή την περίπτωση ο έλεγχος υπερθέρμανσης θα ενεργοποιηθεί για υψηλότερες τιμές ροής καυσίμου. Αυτός είναι και ο βασικότερος λόγος που εξετάζεται το αεροφυλάκιο ως μέθοδος προστασίας από υποσυχνότητα των αεριοστροβλικών μονάδων, λόγω του ότι αυξάνεται μεταβατικά η δυνατότητα παραγωγής ισχύος άνω της ονομαστικής της τιμής, δίχως υπερδιαστασιολόγηση του εξοπλισμού.

Ο έλεγχος ισχύος αναλαμβάνει την ενεργοποίηση του αεροφυλακίου όταν η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς της γεννήτριας ξεπεράσει την ονομαστική τιμή [1]. Η διάταξη που υλοποιεί τον έλεγχο φαίνεται στο Σχήμα 4.31. Η μετρούμενη ηλεκτρική ισχύς της γεννήτριας $P_{emp.u}$ συγκρίνεται με ένα όριο P_{ecr} , άνω του οποίου δίνεται εντολή για την ενεργοποίηση του αεροφυλακίου. Το λογικό σήμα $P_{emp.u} \geq P_{ecr}$, μαζί με το αντίστοιχο λογικό σήμα f , που διασφαλίζει ότι στο αεροφυλάκιο υπάρχει επαρκής πίεση ($p_{ch} > e$), εισέρχονται στον τελεστή AND, η έξοδος του οποίου καθορίζει την τελική ενεργοποίηση του αεροφυλακίου. Έτσι δηλαδή, μόλις η ηλεκτρική ισχύς υπερβεί το όριο P_{ecr} , και δεδομένου ότι η πίεση στο αεροφυλάκιο p_{ch} είναι άνω του προκαθορισμένου ορίου e , τότε δίνεται σήμα ($s_p = 1$) για το άνοιγμα της δικλείδας αέρα. Σημειώνεται ότι το λογικό σήμα f είναι αυτό που εμφανίστηκε και σε προηγούμενα σχήματα στον έλεγχο συχνότητας, η υλοποίηση του οποίου γίνεται εδώ.



Σχήμα 4.31: Ενεργοποίηση αεροφυλακίου από τον έλεγχο ισχύος

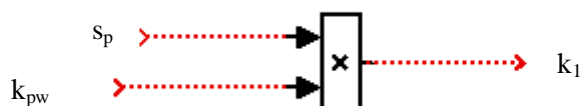
Όταν δοθεί εντολή για έγχυση πεπιεσμένου αέρα λόγω υπερφόρτισης του αεριοστροβίλου, πρέπει να καθοριστεί και το άνοιγμα της δικλείδας. Σε αυτό το είδος ελέγχου (έλεγχος ισχύος - θερμοκρασίας), σε αντίθεση με τον έλεγχο συχνότητας, το άνοιγμα δεν είναι σταθερό αλλά μεταβλητό. Συγκεκριμένα, η διαφορά της ηλεκτρικής ισχύος $P_{emp.u}$ από την ονομαστική (1,0 ανά μονάδα) πολλαπλασιάζεται με ένα αναλογικό κέρδος (K_p), η διαφορά της θερμοκρασίας των καυσαερίων ($T_{e'p.u}$) από την ονομαστική (1,0 ανά μονάδα) πολλαπλασιάζεται με ένα κέρδος (T_p), και τα δύο σήματα εισέρχονται σε έναν αθροιστή, ο οποίος τελικώς καθορίζει το άνοιγμα της δικλείδας. Σημειώνεται ότι το σήμα αυτό διέρχεται από τον γνωστό περιοριστή, που καθορίζει το μέγιστο (K_{sat}) και ελάχιστο (0) άνοιγμα της δικλείδας, η έξοδος του οποίου είναι το οριοθετημένο άνοιγμα της δικλείδας (k_{pw}). Στο Σχήμα 4.32 παρουσιάζεται η υλοποίηση της παραπάνω περιγραφής.



Σχήμα 4.32 : Καθορισμός ανοίγματος δικλείδας αέρα από τον έλεγχο ισχύος

Τέλος, στο Σχήμα 4.33 καθορίζεται το τελικό άνοιγμα της δικλείδας k_1 από τον έλεγχο ισχύος. Συγκεκριμένα, η μία είσοδος του πολλαπλασιαστή είναι το σήμα s_p , ενώ η άλλη είναι το σήμα k_{pw} . Όσο ο έλεγχος ισχύος είναι ανενεργός, το σήμα s_p είναι μηδέν, με αποτέλεσμα να είναι μηδέν και το σήμα k_1 ανοίγματος της δικλείδας αέρα. Μόλις δοθεί εντολή για την ενεργοποίηση του αεροφυλακίου εκ μέρους του ελέγχου ισχύος, το σήμα s_p μεταβαίνει στην τιμή 1. Έτσι πλέον η έξοδος του πολλαπλασιαστή k_1 γίνεται ίση με το σήμα k_{pw} , με αποτέλεσμα να έχει καθοριστεί το επιθυμητό άνοιγμα της δικλείδας.

Συνεπώς, όταν το αεροφυλάκιο έχει ενεργοποιηθεί, η προσαρμογή της ροής μάζας αέρα προς το θάλαμο καύσης γίνεται μέσω του καθορισμού του ανοίγματος της δικλείδας αέρα, σύμφωνα με την απόκλιση της ηλεκτρικής ισχύος και της θερμοκρασίας στην είσοδο του στροβίλου από τα ονομαστικά επίπεδα. Στην πραγματικότητα, λόγω του ότι οι θερμοκρασίες που αναπτύσσονται στο θάλαμο καύσης είναι πολύ υψηλές και δεν υπάρχει η δυνατότητα απευθείας μέτρησης, αυτή που συγκρίνεται με την ονομαστική της τιμή και η διαφορά τους πολλαπλασιάζεται με το αναλογικό κέρδος T_p , είναι η θερμοκρασία των καυσαερίων στην έξοδο του στροβίλου, η οποία καθορίζει έμμεσα και την θερμοκρασία στην είσοδο του στροβίλου (έξοδος θαλάμου καύσης).



Σχήμα 4.33 : Τελικό άνοιγμα δικλείδας αέρα από τον έλεγχο ισχύος

Συνοψίζοντας, μέσω του ελέγχου ισχύος, λαμβάνουμε το σήμα k_1 για το άνοιγμα της δικλείδας αέρα, το οποίο σε συνδυασμό με το σήμα k_{2s} που προέρχεται από τον έλεγχο συχνότητας καθορίζουν το τελικό σήμα k και κατ' επέκταση την ροή αέρα από το αεροφυλάκιο προς το θάλαμο καύσης (Σχήμα 4.15 και 4.16).

Τέλος, παρατίθεται ο Πίνακας 4.1, στον οποίο συνοψίζονται τα σύμβολα τα οποία χρησιμοποιήθηκαν σε αυτή την ενότητα, με την αντίστοιχη επεξήγησή τους. Εμφανίζονται επίσης οι σταθερές τιμές τις οποίες λαμβάνουν κάποια από αυτά στις προσομοιώσεις που ακολουθούν στο επόμενο κεφάλαιο. Στο επόμενο κεφάλαιο λοιπόν θα εξεταστούν διαταραχές του ηλεκτρικού φορτίου, προκειμένου να κατανοήσουμε τη συμβολή του αεροφυλακίου στην πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας, και θα συγκριθούν τα αποτελέσματα της λειτουργίας του αεριοστροβίλου με και χωρίς την παρουσία του αεροφυλακίου.

Πίνακας 4.1 : Περιγραφή συμβόλων

| Συμβολισμός | Παράμετρος | Μονάδα μέτρησης | Σταθερή Τιμή |
|-------------|---|-----------------|--------------|
| p_{in} | Αρχική πίεση αεροφυλακίου | Ανά μονάδα τιμή | 1,07 |
| p_{ch} | Τρέχουσα πίεση αεροφυλακίου | Ανά μονάδα τιμή | |
| p_d | Πίεση θαλάμου καύσης | Ανά μονάδα τιμή | |
| DP | Διαφορά πίεσεως μεταξύ αεροφυλακίου και θαλάμου καύσης | Ανά μονάδα τιμή | |
| k_{2s} | Σήμα ρύθμισης του ανοίγματος της δικλείδας αέρα λόγω του ελέγχου συχνότητας | Ανά μονάδα τιμή | |
| k_1 | Σήμα ρύθμισης του ανοίγματος της δικλείδας αέρα λόγω του ελέγχου ισχύος | Ανά μονάδα τιμή | |
| K_{sat} | Μέγιστο άνοιγμα της δικλείδας | Ανά μονάδα τιμή | 0,6 |
| T_{ch} | Χρονική σταθερά δικλείδας αέρα | s | 0,1 |
| T_{cap} | Χρονική σταθερά αεροφυλακίου | s | 100 |
| k | Τελικό σήμα ανοίγματος της δικλείδας αέρα | Ανά μονάδα τιμή | |
| W_{ch} | Ροή μάζας αέρα που εξέρχεται από το αεροφυλάκιο | Ανά μονάδα τιμή | |
| e | Κατώτατο όριο πίεσης αεροφυλακίου | Ανά μονάδα τιμή | 1,03 |
| f | Σήμα ελέγχου της πίεσης στο αεροφυλάκιο | Λογικό σήμα | |
| N_r | Ρυθμός μεταβολής της συχνότητας / έλεγχος συχνότητας | Ανά μονάδα / s | |
| n_{rc} | Όριο ρυθμού πτώσης συχνότητας για την ενεργοποίηση του αεροφυλακίου / έλεγχος συχνότητας | Ανά μονάδα / s | 0,004 |
| k_2 | Άνοιγμα της δικλείδας αέρα λόγω εντολής ενεργοποίησης του αεροφυλακίου / έλεγχος συχνότητας | Ανά μονάδα τιμή | |
| R_{es} | Σήμα για το κλείσιμο της δικλείδας / έλεγχος συχνότητας | Λογικό σήμα | |
| q | Σήμα ενεργοποίησης του αεροφυλακίου / έλεγχος συχνότητας | Λογικό σήμα | |
| N_{rel} | Όριο ρυθμού μεταβολής της συχνότητας για την απενεργοποίηση του αεροφυλακίου / έλεγχος συχνότητας | Ανά μονάδα / s | 0,001 |
| r_{st} | Σήμα μηδενισμού της καταγραφής του χρόνου όπου ισχύει $ N_r < N_{rel}$ / έλεγχος συχνότητας | Λογικό σήμα | |
| s_{th} | Άνοιγμα της δικλείδας αέρα λόγω εντολής απενεργοποίησης του αεροφυλακίου / έλεγχος συχνότητας | Ανά μονάδα τιμή | |
| T_{sat} | Χρονική σταθερά του βρόχου ομαλής σβέσης του αεροφυλακίου / έλεγχος συχνότητας | s | 0,1 |

| | | | |
|-------------|--|-----------------|------|
| t_{rel} | Χρονική ένδειξη εξάλειψης της διαταραχής / έλεγχος συχνότητας | s | 11 |
| t_{ch} | Μετρητής του χρόνου ηρεμίας του ρυθμού μεταβολής της συχνότητας / έλεγχος συχνότητας | s | |
| c_t | Σήμα έναρξης της μέτρησης του χρόνου ηρεμίας του ρυθμού μεταβολής της συχνότητας / έλεγχος συχνότητας | Λογικό σήμα | |
| f_{sh} | Σήμα ολοκλήρωσης της ομαλής σβέσης του αεροφυλακίου / έλεγχος συχνότητας | Λογικό σήμα | |
| b_{gn} | Σήμα έναρξης της ομαλής σβέσης του αεροφυλακίου / έλεγχος συχνότητας | Λογικό σήμα | |
| k_{st} | Άνοιγμα της δικλίδας αέρα εκ μέρους του ελέγχου σταδιακής σβέσης του αεροφυλακίου / έλεγχος συχνότητας | Ανά μονάδα τιμή | |
| $P_{emp.u}$ | Μετρούμενη ηλεκτρική ισχύς / έλεγχος ισχύος | Ανά μονάδα τιμή | |
| $T_{e'p.u}$ | Μετρούμενη θερμοκρασία καυσαερίων αεριοστροβίλου / έλεγχος ισχύος | Ανά μονάδα τιμή | |
| P_{ecr} | Όριο ηλεκτρικής ισχύος για την ενεργοποίηση του αεροφυλακίου / έλεγχος ισχύος | Ανά μονάδα τιμή | 1,01 |
| s_p | Σήμα ενεργοποίησης του αεροφυλακίου / έλεγχος ισχύος | Λογικό σήμα | |
| K_p | Αναλογικό κέρδος ρύθμισης του ανοίγματος της δικλίδας αέρα για τη διόρθωση της ισχύος / έλεγχος ισχύος | Απόλυτη τιμή | 15 |
| T_p | Αναλογικό κέρδος ρύθμισης του ανοίγματος της δικλίδας αέρα για τη διόρθωση της θερμοκρασίας / έλεγχος ισχύος | Απόλυτη τιμή | 20 |
| k_{pw} | Οριοθετημένο άνοιγμα της δικλίδας / έλεγχος ισχύος | Ανά μονάδα τιμή | |

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Προσομοίωση λειτουργίας αεριοστροβίλου με αεροφυλάκιο σε σύστημα γεννήτριας-απομονωμένου φορτίου

Στο κεφάλαιο αυτό προσομοιώνεται η απόκριση του αεριοστροβίλου σε διαταραχές του ηλεκτρικού φορτίου, σε σύστημα γεννήτριας - απομονωμένου φορτίου. Η υλοποίηση του μοντέλου του αεριοστροβίλου με αεροφυλάκιο γίνεται στο Simulink, και ο τρόπος παράστασής του έχει περιγραφεί πλήρως στο Κεφάλαιο 4. Οι προσομοιώσεις λαμβάνουν χώρα εξετάζοντας τη συμπεριφορά του αεριοστροβίλου με ενσωματωμένο αεροφυλάκιο, συγκριτικά με την περίπτωση αεριοστροβίλου δίχως αεροφυλάκιο, προκειμένου να φανούν τα πλεονεκτήματα από τη χρήση του. Συγκεκριμένα, στην πρώτη ενότητα παρατίθενται τα δεδομένα της λειτουργίας του αεριοστροβίλου με αεροφυλάκιο, και γίνεται η επιλογή τιμών για διάφορες παραμέτρους. Στην δεύτερη ενότητα εξηγείται ο τρόπος αρχικοποίησης του μοντέλου, και στην τρίτη ενότητα παρουσιάζονται οι προσομοιώσεις και εξάγονται τα αντίστοιχα συμπεράσματα.

5.1 Δεδομένα και επιλογή παραμέτρων

Τα δεδομένα που αφορούν τη λειτουργία του μοντέλου του αεριοστροβίλου συνοψίζονται στους Πίνακες 5.1 και 5.2 [4]. Για τον προσδιορισμό των ονομαστικών θερμοκρασιών αρκεί η ονομαστική θερμοκρασία T_{f0} των καυσαερίων στην είσοδο του στροβίλου, δεδομένου ότι οι T_{d0} , T_{e0} προκύπτουν βάσει των θερμοδυναμικών εξισώσεων, οπότε παραλείπονται από τους πίνακες που ακολουθούν.

Πίνακας 5.1: Παράμετροι λειτουργίας αεριοστροβίλου

| Συμβολισμός | Παράμετρος | Τιμή | Μονάδα Μέτρησης |
|-------------|--|-------|-----------------|
| T_i | Θερμοκρασία εισόδου του συμπιεστή (ονομαστική) | 303 | (°K) |
| T_{f0} | Θερμοκρασία εισόδου στροβίλου (ονομαστική) | 1358 | (°K) |
| $T_{rp,u}$ | Θερμοκρασία αναφοράς ελέγχου υπερθέρμανσης | 1,01 | Ανά μονάδα |
| $P_{e1p,u}$ | Ισχύς έναρξης δεύτερης περιοχής λειτουργίας | 0,85 | Ανά μονάδα |
| $P_{e2p,u}$ | Ισχύς έναρξης τρίτης περιοχής λειτουργίας | 0,55 | Ανά μονάδα |
| P_{c0} | Ονομαστικός λόγος συμπίεσης | 11,5 | Απόλυτη τιμή |
| γ | Λόγος ειδικών θερμοχωρητικοτήτων (c_p/c_v) | 1,4 | Απόλυτη τιμή |
| η_c | Εσωτερικός βαθμός απόδοσης συμπιεστή | 0,85 | Απόλυτη τιμή |
| η_t | Εσωτερικός βαθμός απόδοσης στροβίλου | 0,85 | Απόλυτη τιμή |
| H | Ανηγμένη χρονική σταθερά αδράνειας | 6 | (s) |
| $T_{r1p,u}$ | Θερμοκρασία αναφοράς πτερυγίων εισόδου | 0,939 | Ανά μονάδα |

Πίνακας 5.2 : Παράμετροι ελέγχου αεριοστροβίλου

| Συμβολισμός | Παράμετρος | Τιμή | Μονάδα Μέτρησης |
|-------------------|--|--------|-----------------|
| R | Στατισμός | 0,05 | Ανά μονάδα |
| T _g | Χρονική σταθερά ρυθμιστή στροφών | 0,05 | (s) |
| K ₄ | Κέρδος ασπίδας θερμότητας (ακαριαία) | 0,8 | Ανά μονάδα |
| K ₅ | Κέρδος ασπίδας θερμότητας (σταδιακά) | 0,2 | Ανά μονάδα |
| T ₃ | Χρονική σταθερά ασπίδας θερμότητας | 15 | (s) |
| T ₄ | Χρονική σταθερά αισθητήρα θερμοκρασίας | 2,5 | (s) |
| T ₅ | Χρονική σταθερά του τμήματος του ελέγχου θερμοκρασίας που παρεμβαίνει στην ροή του καυσίμου | 3,3 | (s) |
| T _t | Ρυθμός ολοκλήρωσης του τμήματος του ελέγχου θερμοκρασίας που παρεμβαίνει στην ροή του καυσίμου | 0,4699 | (s) |
| T _{cmax} | Μέγιστη τιμή της εξόδου T _c του τμήματος ελέγχου θερμοκρασίας | 1,1 | Ανά μονάδα |
| F _{dmax} | Άνω όριο εισόδου στον έλεγχο καυσίμου | 1,5 | Ανά μονάδα |
| F _{dmin} | Κάτω όριο εισόδου στον έλεγχο καυσίμου | 0 | Ανά μονάδα |
| K ₃ | Εύρος ανοίγματος βαλβίδας καυσίμου | 0,77 | Ανά μονάδα |
| K ₆ | Ελάχιστο άνοιγμα βαλβίδας καυσίμου | 0,23 | Ανά μονάδα |
| T _v | Χρονική σταθερά ρυθμιστή θέσης της βαλβίδας καυσίμου | 0,05 | (s) |
| T _f | Χρονική σταθερά συστήματος καυσίμου | 0,4 | (s) |
| g _{max} | Μέγιστο άνοιγμα πτερυγίων εισόδου | 1 | Ανά μονάδα |
| g _{min} | Ελάχιστο άνοιγμα πτερυγίων εισόδου | 0,7333 | Ανά μονάδα |
| T _{igv} | Χρονική σταθερά πτερυγίων | 0,1 | (s) |
| T _{cd} | Χρονική σταθερά αεριοστροβίλου | 0,2 | (s) |
| ḡ _{max} | Μέγιστος ρυθμός αύξησης ανοίγματος πτερυγίων | 0,01 | Ανά μονάδα / s |
| ḡ _{min} | Μέγιστος ρυθμός μείωσης ανοίγματος πτερυγίων | -0,01 | Ανά μονάδα / s |
| T _{pw} | Χρονική σταθερά μετρητή ηλεκτρικής ισχύος | 0,05 | (s) |

Το σήμα N_{ref} προκύπτει από την αρχικοποίηση του μοντέλου και ο τρόπος υπολογισμού του θα εξηγηθεί στην ενότητα 5.2. Τα δεδομένα για το αεροφυλάκιο αναφέρθηκαν στο τέλος του Κεφαλαίου 4 και παρατίθενται ξανά εδώ στον Πίνακα 5.3 για λόγους πληρότητας της περιγραφής.

Η αρχική πίεση του αεροφυλακίου p_{in} θεωρείται ότι υπερβαίνει κατά 7% την ονομαστική πίεση του θαλάμου καύσης και το μέγιστο άνοιγμα της δικλείδας αέρα στην έξοδο του αεροφυλακίου K_{sat} είναι 0,6 ανά μονάδα. Οι τιμές αυτές επιλέχθηκαν επειδή επιθυμούμε η μέγιστη ροή μάζας αέρα που θα προκύψει προς το θάλαμο καύσης να μην υπερβαίνει το 5% της ονομαστικής ροής του αεριοστροβίλου, στο πλήρες άνοιγμα της δικλείδας.

Είναι γνωστό ότι όσο μεγαλύτερη είναι η ροή αέρα που εισέρχεται στο θάλαμο καύσης τόσο υψηλότερη γίνεται η πίεση που επικρατεί σε αυτόν. Έτσι, στην έξοδο του συμπιεστή εμφανίζεται πίεση μεγαλύτερη από την ονομαστική. Θεωρούμε ότι μέχρι ενός ορίου πάνω από τα ονομαστικά επίπεδα της πίεσεως, ο συμπιεστής μπορεί να λειτουργεί κανονικά. Αν η

πίεση όμως αυξηθεί πολύ, ο συμπιεστής δεν θα μπορεί από εκεί και μετά να παράγει την ίδια ροή αέρα αφού δεν θα μπορεί να αντιμετωπίσει την πίεση στην έξοδο, με αποτέλεσμα η ροή να αρχίσει να μειώνεται [29]. Κατά συνέπεια, η ροή αέρα από το αεροφυλάκιο δεν μπορεί να πάρει πολύ μεγάλες τιμές. Λόγω του ότι δεν διαθέτουμε τεχνικά χαρακτηριστικά των συμπιεστών, γίνεται η παραδοχή πως η μέγιστη πίεση που μπορεί να υπάρχει στην έξοδο ώστε να λειτουργεί κανονικά ο συμπιεστής είναι 5% άνω της ονομαστικής. Δοκιμαστικά λοιπόν καταλήξαμε πως για αρχική ανά μονάδα πίεση αεροφυλακίου 1,07 και μέγιστο άνοιγμα δικλείδας 0,6 ανά μονάδα, η ροή αέρα από το αεροφυλάκιο δεν υπερβαίνει το 5% της ονομαστικής ροής του αεριοστροβίλου, και κατ' επέκταση η πίεση στο θάλαμο καύσης διατηρείται κάτω του 1,05 ανά μονάδα. Σημειώνεται πως η αναλογία αυτή μεταξύ ροής αέρα αεροφυλακίου W_{ch} και της πίεσεως του θαλάμου καύσης p_d εξηγείται από τη σχέση (4.31) του Κεφαλαίου 4 :

$$p_d = W + W_{ch}$$

Πίνακας 5.3 : Παράμετροι αεροφυλακίου

| Συμβολισμός | Παράμετρος | Μονάδα μέτρησης | Τιμή |
|-------------|---|-----------------|-------|
| p_{in} | Αρχική πίεση αεροφυλακίου | Ανά μονάδα τιμή | 1,07 |
| K_{sat} | Μέγιστο άνοιγμα της δικλείδας αέρα | Ανά μονάδα τιμή | 0,6 |
| T_{ch} | Χρονική σταθερά δικλείδας αέρα | (s) | 0,1 |
| T_{cap} | Χρονική σταθερά αεροφυλακίου | (s) | 100 |
| e | Κατώτατο όριο πίεσης αεροφυλακίου | Ανά μονάδα τιμή | 1,03 |
| n_{rc} | Όριο ρυθμού πτώσης συχνότητας για την ενεργοποίηση του αεροφυλακίου / έλεγχος συχνότητας | Ανά μονάδα / s | 0,004 |
| N_{rel} | Όριο ρυθμού μεταβολής της συχνότητας για την απενεργοποίηση του αεροφυλακίου / έλεγχος συχνότητας | Ανά μονάδα / s | 0,001 |
| T_{sat} | Χρονική σταθερά του βρόχου ομαλής σβέσης του αεροφυλακίου / έλεγχος συχνότητας | (s) | 0,1 |
| t_{rel} | Χρονική ένδειξη εξάλειψης της διαταραχής / έλεγχος συχνότητας | (s) | 11 |
| P_{ecr} | Όριο ηλεκτρικής ισχύος για την ενεργοποίηση του αεροφυλακίου / έλεγχος ισχύος | Ανά μονάδα τιμή | 1,01 |
| K_p | Αναλογικό κέρδος ρύθμισης του ανοίγματος της δικλείδας αέρα για τη διόρθωση της ισχύος / έλεγχος ισχύος | Απόλυτη τιμή | 15 |
| T_p | Αναλογικό κέρδος ρύθμισης του ανοίγματος της δικλείδας αέρα για τη διόρθωση της θερμοκρασίας / έλεγχος ισχύος | Απόλυτη τιμή | 20 |

Η χρονική σταθερά της δικλείδας αέρα έχει θεωρηθεί $T_{ch} = 0,1$ s, αφού η μεταβολή του ανοίγματος είναι γενικά μια γρήγορη διαδικασία. Η χρονική σταθερά του αεροφυλακίου έχει επιλεγεί ως $T_{cap} = 100$ s. Όπως δείξαμε στο Κεφάλαιο 4, η σταθερά T_{cap} εξαρτάται αναλογικά από τον όγκο του αεροφυλακίου, συνεπώς οι διαστάσεις του αεροφυλακίου είναι

τέτοιες ώστε η παραπάνω σταθερά να έχει αυτή την τιμή. Επίσης το κατώτατο επιτρεπτό όριο της πίεσεως του αεροφυλακίου έχει επιλεγεί ως $e = 1,03$ ανά μονάδα. Η τιμή αυτή είναι ικανή να εξασφαλίσει πως δεν θα υπάρξει αντιστροφή της ροής μάζας αέρα από το θάλαμο καύσης προς το αεροφυλάκιο.

Το όριο του ρυθμού πτώσης της συχνότητας για την ενεργοποίηση του αεροφυλακίου επιλέχθηκε ίσο με $n_{rc} = 0,004$ ανά μονάδα / s [4]. Αυτή είναι μια συμβιβαστική τιμή που επιτυγχάνει την ενεργοποίηση του αεροφυλακίου σε αρκετά μεγάλο εύρος διαταραχών, χωρίς να είναι πολύ ευαίσθητο και να ενεργοποιείται με την οσοδήποτε μικρή διαταραχή. Όσον αφορά το όριο του ρυθμού μεταβολής της συχνότητας για την απενεργοποίηση του αεροφυλακίου θεωρείται $N_{rel} = 0,001$ ανά μονάδα / s, μια τιμή που καλύπτει τις πολύ μικρές μεταβολές της συχνότητας λόγω της σταδιακής εξάντλησης του αεροφυλακίου, και επομένως σηματοδοτεί την εξάλειψη της διαταραχής.

Η σταθερά του βρόχου ομαλής σβέσης του αεροφυλακίου ορίζεται ως $T_{sat} = 0,1$ s, δεδομένου ότι επιθυμούμε ο χρόνος κατά τον οποίο η δικλείδα θα κλείνει να είναι $\Delta t = K_{sat} / T_{sat} = 0,6 / 0,1 = 6$ s. Εξακριβώθηκε μέσω δοκιμών ότι ο χρόνος αυτός επιτυγχάνει τη σταδιακή σβέση του αεροφυλακίου, δίνοντας τη δυνατότητα στον αεριοστρόβιλο να αναλάβει ομαλά το φορτίο που καλυπτόταν από το αεροφυλάκιο μετά τη διαταραχή. Ως χρονική ένδειξη εξάλειψης της διαταραχής επιλέχθηκε $t_{rel} = 11$ s, δεδομένου ότι στον χρόνο αυτό εξάγονται ασφαλή συμπεράσματα για την πλήρη αντιμετώπιση της διαταραχής, όπως παρατηρήσαμε προσομοιώνοντας το σύστημα.

Για την ενεργοποίηση του αεροφυλακίου λόγω υπέρβασης της ονομαστικής ισχύος, το όριο θεωρήθηκε ίσο με $P_{ecr} = 1,01$ ανά μονάδα. Έτσι, στην περίπτωση υπερφόρτισης εξασφαλίζεται η ενεργοποίηση του αεροφυλακίου.

Τέλος, τα κέρδη ρυθμίσεως της ισχύος και της θερμοκρασίας των καυσαερίων επιλέχθηκαν ως $K_p = 15$ και $T_p = 20$ αντίστοιχα [4]. Η επιλογή των τιμών αυτών έγινε έπειτα από διεξοδική μελέτη της απόκρισης του αεριοστρόβιλου, καταλήγοντας πως ο συνδυασμός αυτός εξασφαλίζει τη βέλτιστη συνεισφορά του αεροφυλακίου στη διόρθωση των αποκλίσεων των τιμών από τα ονομαστικά μεγέθη. Μικρότερες τιμές από τις επιλεγείσες οδηγούσαν σε χειρότερη απόκριση, ενώ υψηλότερες δεν είχαν κάποιο ουσιαστικό αποτέλεσμα, καθώς σε πολλές διαταραχές το άνοιγμα της δικλείδας έφτανε το όριο K_{sat} .

5.2 Αρχικοποίηση μοντέλου

Η μοναδική είσοδος του μοντέλου αεριοστρόβιλου με αεροφυλάκιο που αναπτύχθηκε στο Κεφάλαιο 4, είναι η ανά μονάδα τιμή της ηλεκτρικής ισχύος της γεννήτριας. Όλα τα υπόλοιπα μεγέθη λειτουργίας προσδιορίζονται βάσει των αλγεβρικών εξισώσεων και συναρτήσεων μεταφοράς που αναφέρονται στο Κεφάλαιο 4. Η αρχικοποίηση λοιπόν του μοντέλου έγκειται στον προσδιορισμό των μεγεθών αυτών δεδομένης της αρχικής ανά μονάδα τιμής της ηλεκτρικής ισχύος, καθώς και στον προσδιορισμό των αρχικών τιμών στους ολοκληρωτές των διαγραμμάτων βαθμίδων που εμφανίστηκαν στην ενότητα 4.2.

Στην παράγραφο 4.1.6 αναφερθήκαμε στον τρόπο προσδιορισμού του αρχικού σημείου λειτουργίας μέσω της επίλυσης των εξισώσεων ισορροπίας. Οι εξισώσεις αυτές παρατίθενται ξανά εδώ. Στο προηγούμενο κεφάλαιο, μία από τις εξισώσεις προς επίλυση ήταν η (4.26) η οποία εξισώνει την παραγόμενη μηχανική ισχύ με την ηλεκτρική, ως συνθήκη μόνιμης

κατάστασης. Λόγω του γεγονότος πως ασχολούμαστε με ανά μονάδα μεγέθη, η σχέση αυτή τροποποιείται εξισώνοντας τις ανά μονάδα τιμές της παραγόμενης μηχανικής και ηλεκτρικής ισχύος. Έτσι έχουμε την ακόλουθη σχέση:

$$P_{out} = P_{ep.u.} \quad (5.1)$$

όπου P_{out} η ανά μονάδα παραγόμενη μηχανική ισχύς στον άξονα και $P_{ep.u.}$ η ανά μονάδα ηλεκτρική ισχύς. Επίσης, στη μόνιμη κατάσταση η παραγόμενη ισχύς από το θερμοδυναμικό σύστημα ισούται με την παραγόμενη ισχύ στον άξονα. Έτσι προκύπτει η παρακάτω σχέση :

$$P_{out} = P_m \quad (5.2)$$

Οι υπόλοιπες εξισώσεις προς επίλυση είναι οι εξής, σύμφωνα με όσα εκτέθηκαν στο Κεφάλαιο 4 :

$$P_m = K_1 [W_{tot}(T_f - T_e) - W(T_d - T_i)] \quad (5.3)$$

$$T_e = T_f \left[1 - n_t \left(1 - \frac{1}{x} \right) \right] \quad (5.4)$$

$$T_f = T_d + (T_{f0} - T_{d0}) \frac{W_f}{W_{tot}} \quad (5.5)$$

$$P_c = P_{c0} W_{tot} \quad (5.6)$$

$$W_{tot} = W + W_{ch} \quad (5.7)$$

$$W = g N \quad (5.8)$$

$$x = (P_c)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \quad (5.9)$$

$$T_d = T_i \left[1 + \frac{1}{n_c} (x - 1) \right] \quad (5.10)$$

$$\begin{aligned} g = 1, \quad P_{ep.u} > P_{e1p.u} \\ T_{e'p.u} = T_{r1p.u}, \quad P_{e2p.u} < P_{ep.u} < P_{e1p.u} \\ g = g_{min}, \quad P_{ep.u} < P_{e2p.u} \end{aligned} \quad (5.11)$$

$$K_1 = \frac{1}{[T_{f0} - T_{e0} - T_{d0} + T_i]} \quad (5.12)$$

$$T_{e0} = T_{f0} \left[1 - n_t \left(1 - \frac{1}{x_0} \right) \right] \quad (5.13)$$

$$x_0 = (P_{c0})^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \quad (5.14)$$

$$T_{d0} = T_i \left[1 + \frac{1}{n_c} (x_0 - 1) \right] \quad (5.15)$$

$$T_{ep.u.} = \frac{T_e}{T_{e0}} \quad (5.16)$$

Στην μόνιμη κατάσταση λειτουργίας, η ανά μονάδα τιμή της θερμοκρασίας των καυσαερίων στην έξοδο του στροβίλου ισούται με τη μετρούμενη τιμή της. Έτσι έχουμε :

$$T_{ep.u.} = T_{e' p.u} \quad (5.17)$$

Επίσης, σε μόνιμη κατάσταση η συχνότητα θεωρείται στην ονομαστική τιμή της και η ροή αέρα του αεροφυλακίου είναι μηδενική. Έτσι προκύπτουν οι ακόλουθες σχέσεις:

$$N = 1 \quad (5.18)$$

$$W_{ch} = 0 \quad (5.19)$$

Οι άγνωστοι που πρέπει να προσδιοριστούν είναι : $P_m, W_{tot}, W, T_f, T_e, T_d, x, W_f, P_c, g, P_{out}, K_1, T_{d0}, T_{e0}, T_{e' p.u.}, x_0, T_{ep.u.}$. Συνεπώς έχουμε 17 εξισώσεις, από (5.1) έως (5.17), και 17 αγνώστους. Επομένως, για κάθε αρχική ανά μονάδα τιμή $P_{ep.u.}$ του ηλεκτρικού φορτίου προκύπτει ένα σημείο λειτουργίας όπου τα παραπάνω μεγέθη είναι γνωστά. Η επίλυση των παραπάνω εξισώσεων γίνεται στη Matlab με κατάλληλα αρχεία, τα οποία περιέχουν τα δεδομένα του αεριοστρόβιλου και επιλύουν τις παραπάνω εξισώσεις μέσω της συνάρτησης fsolve.

Ας εξετάσουμε τις αρχικές τιμές που λαμβάνουν οι ολοκληρωτές και οι συναρτήσεις μεταφοράς στα Σχήματα 5.1 έως 5.7. Σημειώνεται ότι τα σχήματα αυτά αντιστοιχούν στις συναρτήσεις μεταφοράς που παρατέθηκαν στην ενότητα 4.2 του Κεφαλαίου 4.

Η αρχική είσοδος και η αρχική έξοδος της συνάρτησης μεταφοράς στο Σχήμα 5.1 είναι ταυτόσημες και ισούνται με την αρχική ανά μονάδα τιμή της ηλεκτρικής ισχύος, όπως φαίνεται από τις σχέσεις (5.1) και (5.2). Ο ολοκληρωτής στο Σχήμα 5.2 έχει αρχική τιμή 1, όπως φαίνεται από τη σχέση (5.18). Στο Σχήμα 5.3, η αρχική είσοδος και η έξοδος της συνάρτησης μεταφοράς των πτερυγίων είναι ίδιες και ίσες με την αρχική τιμή g του ανοίγματος των πτερυγίων, όπως προκύπτει από την αρχικοποίηση. Την ίδια τιμή έχει και η αρχική συνθήκη του ολοκληρωτή στο ίδιο σχήμα. Τα σήματα W_f, W'_f, W''_f στο Σχήμα 5.4 ταυτίζονται και έχουν τιμή ίδια με αυτή που προκύπτει για τη ροή καυσίμου W_f από την αρχικοποίηση του μοντέλου. Δεδομένου ότι η συχνότητα στη μόνιμη κατάσταση είναι $N = 1$, το σήμα F_d προκύπτει ως

$$F_d = \frac{W_f - K_6}{K_3} \quad (5.20)$$

Έτσι καθορίζεται λοιπόν η αρχική τιμή της εντολής καυσίμου F_d . Στο Σχήμα 5.5 η αρχική τιμή του σήματος T_c (αρχική τιμή ολοκληρωτή) είναι ίση με T_{cmax} , αφού στη μόνιμη κατάσταση ο έλεγχος υπερθέρμανσης είναι ανενεργός, με αποτέλεσμα η εντολή καυσίμου F_d να καθορίζεται πλήρως από το σήμα ζήτησης καυσίμου F_c του ρυθμιστή στροφών. Έτσι λοιπόν ισχύει :

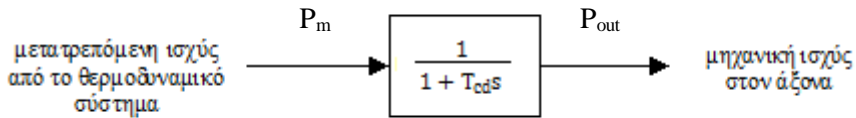
$$F_d = F_c = \frac{W_f - K_6}{K_3} \quad (5.21)$$

Στο Σχήμα 5.6 τα σήματα $T_{e'p.u.}$, $T_{e''p.u.}$ είναι ίσα με την τιμή που προκύπτει για τη θερμοκρασία των καυσαερίων $T_{ep.u.}$ κατά την αρχικοποίηση του μοντέλου.

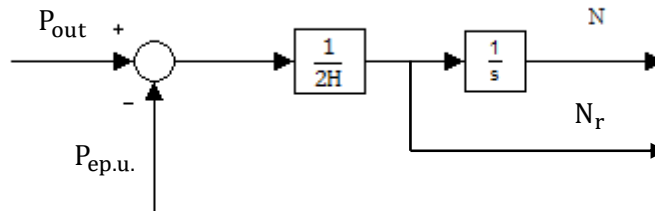
Τέλος, αρκεί να ορίσουμε τις αρχικές τιμές των σημάτων $\Delta\omega$ και N_{ref} του Σχήματος 5.7. Στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας ο τελεστής Laplace (s) λαμβάνει την τιμή 0. Επίσης, λόγω της σχέσης (5.18), ισχύει ότι $\Delta N = 0$. Συμπερασματικά, καταλήγουμε στην εξής σχέση:

$$N_{ref} = \Delta\omega = RF_c = \frac{R(W_f - K_6)}{K_3} \quad (5.22)$$

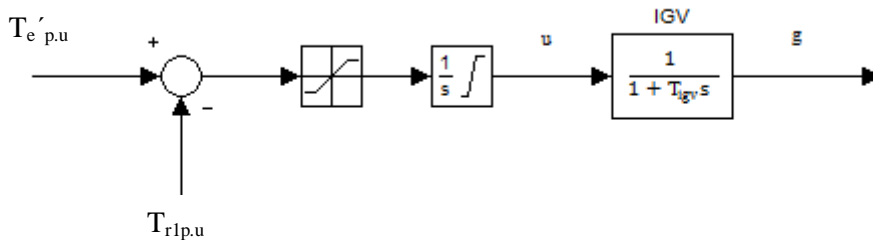
Έτσι, πλέον όλα τα μεγέθη που αφορούν την αρχική κατάσταση του αεριοστροβίλου είναι γνωστά, και το μοντέλο είναι έτοιμο να προσομοιωθεί στο Simulink.



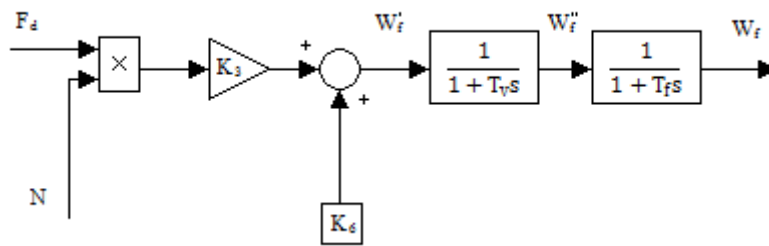
Σχήμα 5.1 : Πραγματική αποδιδόμενη ισχύς στον άξονα περιστροφής



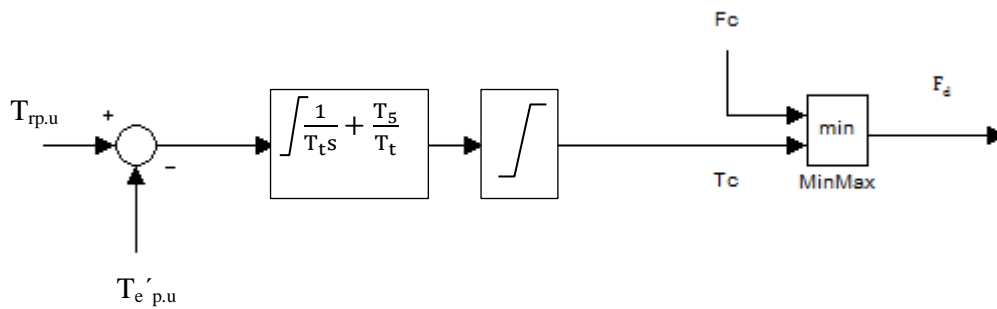
Σχήμα 5.2 : Μηχανικό μοντέλο γεννήτριας



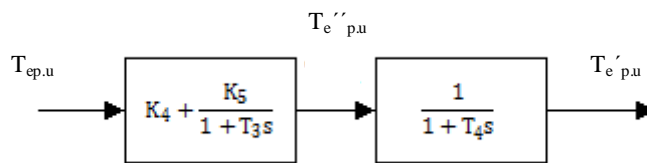
Σχήμα 5.3 : Έλεγχος πτερυγίων εισόδου του αέρα



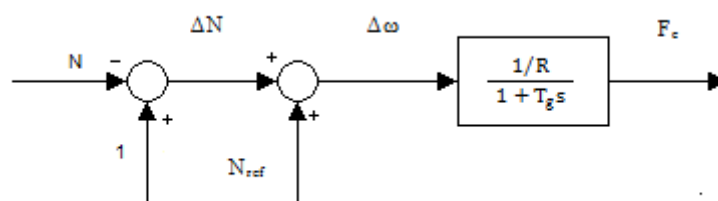
Σχήμα 5.4 : Αντλίες καυσίμου



Σχήμα 5.5 : Διάταξη ελέγχου υπερθέρμανσης



Σχήμα 5.6 : Διάταξη μέτρησης της θερμοκρασίας



Σχήμα 5.7: Ρυθμιστής στροφών

5.3 Προσομοίωση λειτουργίας και σχολιασμός αποκρίσεων

Στην παρούσα ενότητα εξετάζεται η απόκριση του αεριοστροβίλου σε βηματική αύξηση της ζήτησης του ηλεκτρικού φορτίου. Για το σκοπό αυτό, θεωρήθηκαν δύο αρχικές λειτουργικές καταστάσεις της μονάδας, μία στην οποία η αρχικά παραγόμενη ισχύς ήταν 0,85 ανά μονάδα και μία όπου ήταν 1,0 ανά μονάδα. Στην πρώτη κατάσταση εξετάζεται διαταραχή 15%, δηλαδή το ηλεκτρικό φορτίο από το 85% της ονομαστικής τιμής του αυξάνει στο 100%. Στην δεύτερη αρχική κατάσταση, δηλαδή σε ονομαστική παραγωγή, προσομοιώνονται δύο διαταραχές του φορτίου :

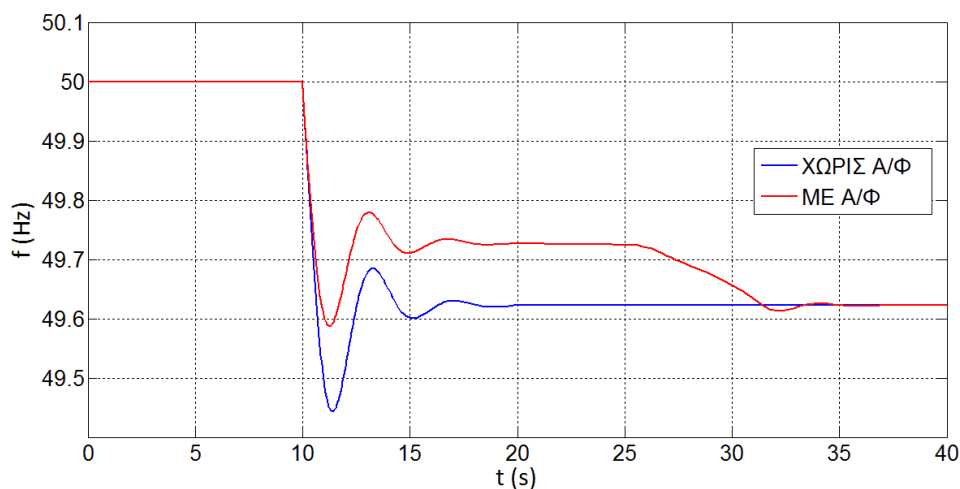
- Μεταβατική αύξηση της ζήτησης στο 120% για 5 δευτερόλεπτα.
- Αύξηση της ζήτησης στο 105% μέχρι να εξαντληθεί το αεροφυλάκιο.

Για το σύνολο των προσομοιώσεων, τα προσαρμοσμένα πτερύγια στον συμπιεστή που ρυθμίζουν την ροή αέρα στον αεριοστρόβιλο είναι πλήρως ανοιχτά ($g = 1$) για τα φορτία που μελετάται, μιας και ισχύει ότι $P_{ep,u} > P_{e1p,u}$, δηλαδή ο αεριοστρόβιλος λειτουργεί στην πρώτη περιοχή της σχέσης (5.11).

5.3.1 Βηματική αύξηση του φορτίου στο 100%

Όπως προαναφέρθηκε, στην παρούσα προσομοίωση τόσο η ηλεκτρική ισχύς που εγχέεται στο δίκτυο, όσο και η μηχανική παραγόμενη ισχύς του αεριοστροβίλου, είναι αρχικά στο 85% της ονομαστικής. Θεωρείται μόνιμη βηματική αύξηση του ηλεκτρικού φορτίου στο 100%, που λαμβάνει χώρα τη χρονική στιγμή $t = 10$ s της προσομοίωσης. Σκοπός είναι η σύγκριση της απόκρισης του αεριοστροβίλου χωρίς το αεροφυλάκιο με την απόκριση που περιλαμβάνει τη βοήθεια του πεπιεσμένου αέρα που είναι αποθηκευμένος αν ενεργοποιηθεί το αεροφυλάκιο.

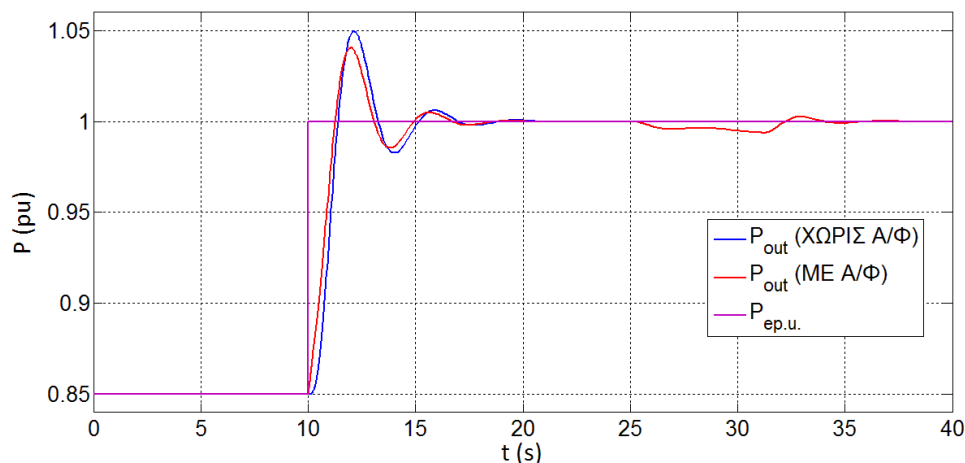
Στο Σχήμα 5.8 φαίνεται η απόκριση της συχνότητας f του αεριοστροβίλου για τις δύο περιπτώσεις, με και χωρίς αεροφυλάκιο.



Σχήμα 5.8 : Απόκριση συχνότητας αεριοστροβίλου (α) με αεροφυλάκιο (κόκκινη γραμμή) και (β) χωρίς αεροφυλάκιο (μπλε γραμμή)

Παρατηρούμε ότι η συχνότητα, στην περίπτωση που το αεροφυλάκιο είναι ενεργοποιημένο, εμφανίζει υψηλότερη ελάχιστη τιμή συγκριτικά με την περίπτωση αεριοστροβίλου δίχως αεροφυλάκιο. Συγκεκριμένα, στην πρώτη περίπτωση, η ελάχιστη τιμή της συχνότητας που εμφανίζεται είναι $f = 49,6$ Hz, ενώ στη δεύτερη είναι $f = 49,45$ Hz. Σε καμία από τις δύο υλοποιήσεις ωστόσο δεν έχουμε αποκοπές φορτίων, μιας και αυτές λαμβάνουν χώρα συνήθως για συχνότητα κάτω από τα 48,5 Hz. Παρ' όλα αυτά, αντιλαμβανόμαστε τη θετική συμβολή του αεροφυλακίου στη ρύθμιση συχνότητας, δεδομένου ότι με την άμεση έγχυση αέρα στο θάλαμο καύσης επιτυγχάνει ταχύτερη αύξηση της παραγόμενης ισχύος του αεριοστροβίλου, διατηρώντας τη συχνότητα σε υψηλότερα επίπεδα από αυτά της απλής διάταξης αεριοστροβίλου. Σημειώνεται ότι στο διάστημα 14 s - 25 s, η παράγωγος της συχνότητας σταθεροποιείται γύρω από μια πολύ μικρή κατ' απόλυτο τιμή, γεγονός που υποδεικνύει ότι η διαταραχή έχει εξαλειφθεί. Είναι εκείνο το διάστημα, που όπως έχουμε αναφέρει, όταν ο ρυθμός μεταβολής της συχνότητας βρεθεί εντός ενός στενού εύρους $\pm N_{rel} = \pm 0,001$ για 11 διαδοχικά δευτερόλεπτα, μετά το πέρας του χρόνου αυτού, δίνεται εντολή για την ομαλή απενεργοποίηση του αεροφυλακίου. Αυτό συμβαίνει τη χρονική στιγμή $t = 25$ s της προσομοίωσης. Έτσι, διακρίνουμε τη σταδιακή μείωση της συχνότητας στο διάστημα 25 s $< t < 31$ s, γεγονός που οφείλεται όπως εξηγήσαμε στην ομαλή σβέση του αεροφυλακίου, με τη συχνότητα να προσεγγίζει ομαλά την μόνιμη τιμή της και τον αεριοστροβίλο να αναλαμβάνει πλήρως το φορτίο που του αναλογεί, απομονώνοντας το αεροφυλάκιο.

Στο Σχήμα 5.9 απεικονίζεται η ηλεκτρική ισχύς ($P_{ep.u.}$ - μωβ γραμμή), η μηχανική ισχύς με το αεροφυλάκιο εκτός λειτουργίας (P_{out} - μπλε γραμμή), και η μηχανική ισχύς αν ενεργοποιηθεί το αεροφυλάκιο (P_{out} - κόκκινη γραμμή), σε ανά μονάδα τιμές.



Σχήμα 5.9 : Απόκριση ισχύος αεριοστροβίλου με και χωρίς αεροφυλάκιο

Παρατηρούμε ότι η μηχανική ισχύς είναι παρόμοια και στις δύο περιπτώσεις. Δηλαδή, μετά τη διαταραχή, η μηχανική ισχύς αρχίζει να αυξάνεται σταδιακά μέσω του ρυθμιστή στροφών, εγχέοντας επιπλέον καύσιμο στο θάλαμο καύσης. Λόγω των χρονικών καθυστερήσεων που επιβάλλει η λειτουργία του αεριοστροβίλου (ρυθμιστής στροφών, αντλίες καυσίμου, μετατροπή ισχύος από το θερμοδυναμικό σύστημα σε περιστροφική ισχύ), η μηχανική παραγόμενη ισχύς του αεριοστροβίλου εξισώνεται στιγμιαία με την τελική τιμή της ηλεκτρικής ισχύος στο χρονικό διάστημα 11 s $< t < 12$ s περίπου της προσομοίωσης. Στο σημείο αυτό, λόγω του ότι το προηγούμενο χρονικό διάστημα η ηλεκτρική ισχύς υπερέβαινε την μηχανική του αεριοστροβίλου, η συχνότητα έχει φτάσει στην ελάχιστη τιμή της. Από εκεί

και μέχρι η μηχανική ισχύς να εξισωθεί για δεύτερη φορά με την ηλεκτρική ($t = 13$ s περίπου), ο άξονας επιταχύνεται ως απόρροια του ότι πλέον η μηχανική ισχύς υπερβαίνει την ηλεκτρική. Η επιτάχυνση αυτή δίνει ένα αρνητικό σήμα για την έγχυση καυσίμου, με αποτέλεσμα η μηχανική ισχύς να αρχίσει να μειώνεται.

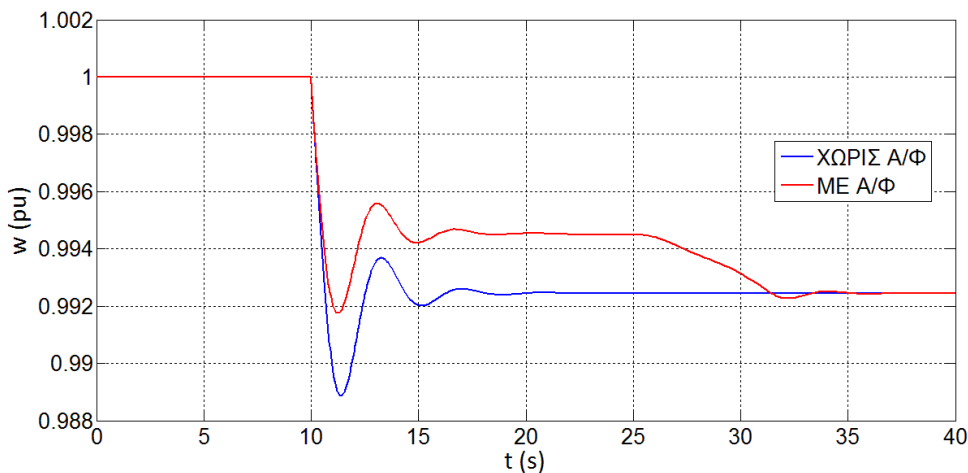
Τη χρονική στιγμή $t = 13$ s περίπου της προσομοίωσης, όπου οι ροπές επιτάχυνσης - επιβράδυνσης έχουν εξισωθεί, η συχνότητα σημειώνει τοπικό μέγιστο. Κατά τη διάρκεια του επόμενου δευτερολέπτου, λόγω της προηγούμενης εντολής για μείωση καυσίμου, η παραγωγή συνεχίζει να μειώνεται κάτω από την τιμή ισορροπίας. Αυτό το αντιλαμβάνεται ο ρυθμιστής στροφών, οδηγώντας σε αύξηση της έγχυσης καυσίμου από την $t = 14$ s και μετά, όπου η μηχανική ισχύς έχει σημειώσει τοπικό ελάχιστο. Από εκεί και μετά ο κύκλος αυτός (αύξηση - μείωση παραγωγής) φαίνεται να επαναλαμβάνεται άλλη μία φορά, με μειωμένο πλάτος, και τελικά η συχνότητα ισορροπεί σε ένα σημείο, μιας και πλέον η ηλεκτρική και η μηχανική ισχύς έχουν εξισωθεί.

Η ταλαντωτική συμπεριφορά της μηχανικής ισχύος που αναφέρθηκε και εμφανίζεται στο Σχήμα 5.9, οφείλεται στην προσπάθεια του ρυθμιστή στροφών να προσαρμόσει την παραγωγή, δεδομένων των υπαρχόντων χρονικών καθυστερήσεων των επιμέρους διατάξεων που συμμετέχουν στην πρωτεύουσα ρύθμιση. Η παραπάνω περιγραφή είναι κοινή τόσο στην περίπτωση με το αεροφυλάκιο ενεργοποιημένο, όσο και στην περίπτωση χωρίς αυτό. Ωστόσο, υπάρχουν οι εξής διαφορές μεταξύ των δύο υλοποιήσεων :

- Πρώτον, παρατηρούμε ότι στην περίπτωση όπου το αεροφυλάκιο συνεισφέρει στην ρύθμιση συχνότητας (κόκκινη γραμμή), η παραγόμενη μηχανική ισχύς του αεριοστροβίλου προσαρμόζεται καλύτερα στο φορτίο. Αυτό φαίνεται στο Σχήμα 5.9, όπου η μηχανική ισχύς στη διάρκεια του πρώτου δευτερόλεπτου της διαταραχής, για κάθε δεδομένη χρονική στιγμή, είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη χωρίς το αεροφυλάκιο (μπλε γραμμή). Αυτό είναι ίσως και το σημαντικότερο πλεονέκτημα της χρήσης του αεροφυλακίου, αφού έτσι η ελάχιστη τιμή της συχνότητας είναι μεγαλύτερη. Επίσης, στην επόμενη περιοχή του διαγράμματος (11,5 s ως 13 s), όπου η μηχανική ισχύς είναι μεγαλύτερη από την ηλεκτρική και ο άξονας επιταχύνεται, η παραγόμενη μηχανική ισχύς του αεριοστροβίλου είναι μικρότερη από την αντίστοιχη χωρίς το αεροφυλάκιο. Αντίστοιχα στην τρίτη περιοχή (13 s - 15 s), όπου η μηχανική ισχύς είναι μικρότερη από την ηλεκτρική, η παραγόμενη μηχανική ισχύς είναι μεγαλύτερη στην περίπτωση με το αεροφυλάκιο ενεργοποιημένο. Αντιλαμβανόμαστε λοιπόν ότι η χρήση του αεροφυλακίου συνεισφέρει στη μείωση του πλάτους των ταλαντώσεων της συχνότητας λειτουργώντας ως απόσβεση, δεδομένου ότι η μηχανική ισχύς παραμένει πιο κοντά στη μόνιμη τιμή της ηλεκτρικής ισχύος.
- Δεύτερον, παρατηρούμε στο Σχήμα 5.9 ότι μετά τα 25 s της προσομοίωσης, η μηχανική ισχύς (ME A/Φ) μειώνεται σταδιακά για 6 δευτερόλεπτα. Αυτό είναι αποτέλεσμα της λογικής ελέγχου του αεροφυλακίου, δηλαδή της εντολής για ομαλή σβέση του, δεδομένου ότι η διαταραχή έχει αντιμετωπιστεί επιτυχώς. Έτσι, στο διάστημα αυτό, το αεροφυλάκιο μειώνει την εγγεόμενη ροή αέρα στο θάλαμο καύσης γραμμικά με το χρόνο, με σκοπό την πλήρη ανάληψη του φορτίου από τον αεριοστροβίλο με την αντίστοιχη έγχυση καυσίμου. Για $t = 31$ s περίπου, η ροή του αεροφυλακίου έχει μηδενιστεί, με το καύσιμο να συνεχίζει να αυξάνει, προκειμένου να αυξηθεί η μηχανική ισχύς στα επίπεδα που ορίζει το ηλεκτρικό φορτίο. Από εκεί και έπειτα η παραγόμενη μηχανική ισχύς προσεγγίζει τη μόνιμη τιμή της, με το φορτίο να έχει αναληφθεί πλήρως από τον αεριοστροβίλο, και το αεροφυλάκιο να έχει τεθεί εκτός λειτουργίας. Αντιθέτως, στην περίπτωση αεριοστροβίλου χωρίς

αεροφυλάκιο (ΧΩΡΙΣ Α/Φ), η προσαρμογή της ισχύος του έχει επιτευχθεί από την $t = 20$ s της προσομοίωσης, όπου η πρωτεύουσα ρύθμιση έχει ολοκληρωθεί και η συχνότητα έχει εξισωθεί με τη μόνιμη τιμή της.

Λόγω του γεγονότος πως η παρεχόμενη ροή αέρα από το συμπιεστή W είναι ανάλογη με τη συχνότητα του άξονα περιστροφής, η μεταβατική βύθιση της συχνότητας επιδρά αρνητικά στην ροή αέρα, μειώνοντάς την. Αυτό συνεπάγεται την μείωση της παραγόμενης μηχανικής ισχύος καθώς και την αύξηση της θερμοκρασίας στην έξοδο του θαλάμου καύσης. Μια αύξηση λοιπόν του ηλεκτρικού φορτίου έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της συχνότητας και κατ' επέκταση της ροής αέρα του συμπιεστή, γεγονός που δυσχεραίνει το έργο του ρυθμιστή στροφών για αύξηση της μηχανικής ισχύος. Επίσης στα υψηλά φορτία, για μεγάλες διαταραχές, η θερμοκρασία εξόδου του θαλάμου καύσης θα ξεπεράσει την ονομαστική, με αποτέλεσμα να ενεργοποιηθεί ο έλεγχος υπερθέρμανσης περιορίζοντας τελικά το καύσιμο κάτω από την επιθυμητή τιμή. Αυτά τα δύο προβλήματα αντιμετωπίζονται σε ένα βαθμό από το αεροφυλάκιο. Στο Σχήμα 5.10 φαίνεται η ανά μονάδα τιμή της ροής αέρα από τον συμπιεστή, στις περιπτώσεις με το αεροφυλάκιο ενεργοποιημένο (κόκκινη γραμμή) και απενεργοποιημένο (μπλε γραμμή), συναρτήσει του χρόνου προσομοίωσης.



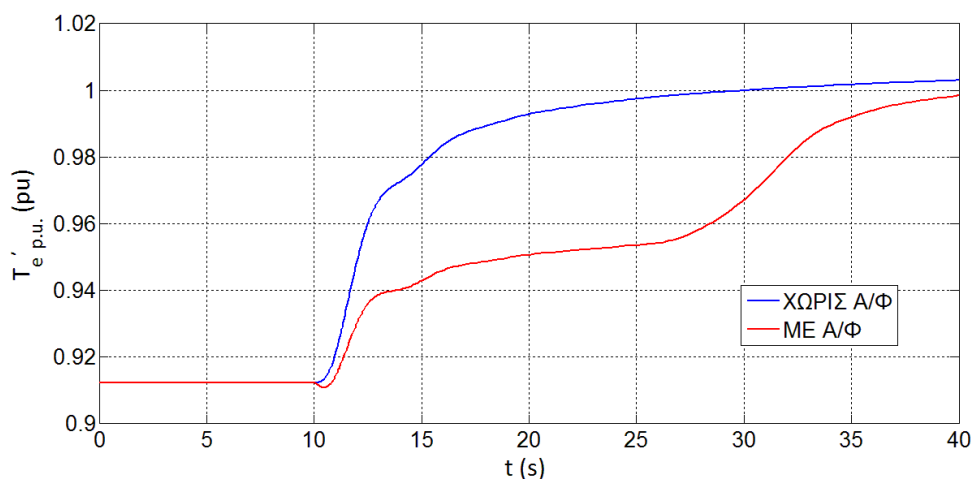
Σχήμα 5.10 : Ανά μονάδα παρεχόμενη ροή αέρα από το συμπιεστή

Επειδή το αεροφυλάκιο συγκρατεί τη συχνότητα σε υψηλότερη τιμή, η βύθιση της τιμής της ροής αέρα από το συμπιεστή είναι μικρότερη στην περίπτωση που το αεροφυλάκιο εγγχεί αέρα στο θάλαμο καύσης. Αυτό είναι ένα ακόμα πλεονέκτημα της χρήσης του αεροφυλακίου, δεδομένου ότι, εκτός από τα άμεσα θετικά αποτελέσματα της χρήσης του που προαναφέρθηκαν, η λειτουργική κατάσταση του αεριοστροβίλου δεν επιδεινώνεται όσο στην περίπτωση χωρίς αεροφυλάκιο, αφού πλέον ο συμπιεστής συνεισφέρει υψηλότερη τιμή ροής αέρα. Με λίγα λόγια, η συνεισφορά του αεροφυλακίου δεν έγκειται μόνο στην άμεση παραγωγή ισχύος ως επιπλέον αέρας που εκτονώνεται στο στρόβιλο, αλλά βελτιώνει και τη συνολική απόκριση του αεριοστροβίλου, υποβοηθώντας τον να παράγει μεγαλύτερη ισχύ με τη συγκράτηση της συχνότητας σε υψηλότερες τιμές (και συνεπώς και της ροής αέρα του συμπιεστή), και της θερμοκρασίας του θαλάμου καύσης σε χαμηλότερα επίπεδα.

Στο Σχήμα 5.11 φαίνεται η μετρούμενη θερμοκρασία των καυσαερίων ($T_{e' p.u}$) σε ανά μονάδα τιμή, η οποία είναι και η βασική ένδειξη για τη θερμοκρασία εξόδου του θαλάμου καύσης. Αυτό είναι το σήμα που δέχεται ο έλεγχος υπερθέρμανσης και καθορίζει την ενεργοποίησή του. Αρχικά παρατηρούμε πως σε καμία από τις δύο υλοποιήσεις δεν

δημιουργείται πρόβλημα υπερθέρμανσης, αφού η θερμοκρασία των καυσαερίων παραμένει μονίμως κάτω από το όριο ενεργοποίησης του ελέγχου υπερθέρμανσης (1,01 ανά μονάδα). Ωστόσο, διακρίνεται η θετική συμβολή του επιπλέον πεπιεσμένου αέρα που εγχέεται στο θάλαμο καύσης, όπου το διάστημα της ενεργοποίησης του αεροφυλακίου από τον έλεγχο συχνότητας (10 s - 25 s), η θερμοκρασία των καυσαερίων βρίσκεται κάτω από το 96% της ονομαστικής της τιμής.

Η μικρή πτώση της θερμοκρασίας το πρώτο δευτερόλεπτο της διαταραχής οφείλεται στην άμεση έγχυση πεπιεσμένου αέρα στο θάλαμο καύσης. Τα επόμενα 2 δευτερόλεπτα, όπου το άνοιγμα της δικλείδας αέρα του αεροφυλακίου είναι πλέον μέγιστο και κατ' επέκταση και η ροή αέρα του αεροφυλακίου, η αύξηση της θερμοκρασίας οφείλεται στην διαρκώς αυξανόμενη έγχυση καυσίμου στο θάλαμο καύσης για τη συγκράτηση της συχνότητας. Η ελαφρώς ανοδική τάση που παρατηρούμε στο διάστημα 14 s - 25 s, δεδομένου ότι η συχνότητα έχει σχεδόν αποκατασταθεί γύρω από μια σταθερή τιμή όπως και η έγχυση καυσίμου, οφείλεται στην σταδιακή μείωση της πίεσης που επικρατεί στο αεροφυλάκιο λόγω της μάζας αέρα που το εγκαταλείπει, γεγονός που συνεπάγεται και τη σταδιακή μείωση της ροής μάζας αέρα προς το θάλαμο καύσης. Έτσι η θερμοκρασία αυξάνεται με ένα μικρό ρυθμό, που αντιστοιχεί στο ρυθμό μείωσης της ροής μάζας αέρα από το αεροφυλάκιο. Στο επόμενο διάστημα η θερμοκρασία αυξάνεται με ταχύτερο ρυθμό, λόγω της ομαλής σβέσης του αεροφυλακίου. Το κλείσιμο της δικλείδας αέρα του αεροφυλακίου συνεπάγεται μεγαλύτερη έγχυση καυσίμου στο θάλαμο καύσης για την υποκατάσταση της ισχύος που παρείχε η ροή μάζας αέρα από το αεροφυλάκιο, καθώς και μικρότερη συνολική ροή που εισέρχεται στο θάλαμο καύσης. Από εκεί και μετά, η θερμοκρασία τείνει να σταθεροποιηθεί στην μόνιμη τιμή της, η οποία ταυτίζεται με αυτή που αντιστοιχεί στη λειτουργία του αεριοστροβίλου δίχως αεροφυλάκιο.

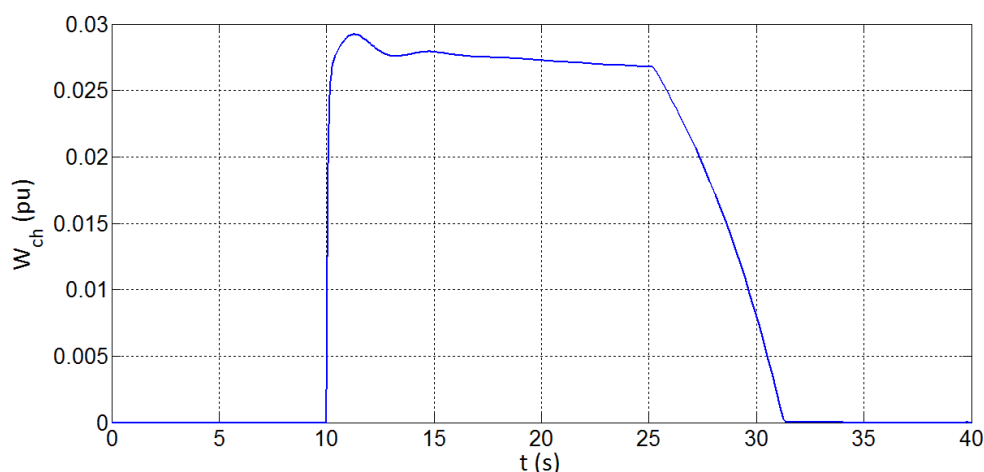


Σχήμα 5.11 : Μετρούμενη θερμοκρασία των καυσαερίων στην έξοδο του στροβίλου σε ανά μονάδα τιμή

Στο Σχήμα 5.12 παρατίθεται το γράφημα της ροής μάζας αέρα του αεροφυλακίου (W_{ch}) σε ανά μονάδα τιμή, συναρτήσεως του χρόνου. Το αεροφυλάκιο ενεργοποιείται την χρονική στιγμή $t = 10$ s, όπου εμφανίζεται απότομη πτώση της συχνότητας. Έτσι σύμφωνα με τη συγκεκριμένη λογική ελέγχου, η δικλείδα αέρα ανοίγει στο μέγιστο, παρέχοντας τη μεγαλύτερη δυνατή ροή αέρα προς το θάλαμο καύσης. Παρατηρούμε μία μικρή υπερακόντιση της ροής αέρα (τιμή πάνω από την αναμενόμενη), η οποία οφείλεται στο εξής γεγονός : Λόγω της πτώσης της συχνότητας, η ροή αέρα του συμπιεστή μειώνεται επειδή

είναι ανάλογη με τη συχνότητα περιστροφής, όπως έχουμε θεωρήσει. Η μείωση αυτή της ροής αέρα μειώνει και την πίεση που επικρατεί στο θάλαμο καύσης, δεδομένου ότι τα δύο μεγέθη αυτά έχουν υποτεθεί ανάλογα. Έτσι η διαφορά πίεσης μεταξύ αεροφυλακίου και θαλάμου καύσης μεγαλώνει μεταβατικά, με αποτέλεσμα, για το δεδομένο μέγιστο άνοιγμα της δικλίδας, να αυξάνεται η ροή αέρα που εισέρχεται στο θάλαμο καύσης από το αεροφυλάκιο. Αυτό είναι ένα σημαντικό φαινόμενο, λόγω του ότι η πτώση της συχνότητας προσφέρει μια αυτορρύθμιση της μηχανικής παραγόμενης ισχύος διατηρώντας την σε υψηλότερα επίπεδα, λόγω της αύξησης της διαφοράς πίεσης και κατ' επέκταση της ροής μάζας αέρα από το αεροφυλάκιο. Έτσι, με ενεργοποιημένο το αεροφυλάκιο, μια πτώση της συχνότητας ενώ θα μειώσει τη ροή αέρα που παρέχει ο συμπιεστής, θα προκαλέσει την αύξηση της ροής από το αεροφυλάκιο, με αποτέλεσμα να μικραίνει το πρόβλημα της επιδείνωσης της λειτουργίας του αεριοστροβίλου λόγω της μείωσης της ροής αέρα από το συμπιεστή. Αυτό συμβαίνει διότι η συνολική ροή πλέον είναι το άθροισμα της ροής από το συμπιεστή και από το αεροφυλάκιο.

Στο Σχήμα 5.12 παρατηρούμε ότι μετά την άμεση έγχυση αέρα στο θάλαμο καύσης ($t = 10$ s της προσομοίωσης), ακολουθεί μια μικρή ταλάντωση της ροής που οφείλεται στην αντίστοιχη ταλάντωση της συχνότητας. Στη συνέχεια η ροή αρχίζει να μειώνεται με μικρό ρυθμό, λόγω της μείωσης της πίεσης που επικρατεί στο αεροφυλάκιο. Την χρονική στιγμή $t = 25$ s έχει δοθεί η εντολή για την ομαλή σβέση του αεροφυλακίου, με αποτέλεσμα η ροή να μειώνεται με μεγαλύτερο ρυθμό έως ότου μηδενιστεί την χρονική στιγμή $t = 31$ s περίπου.

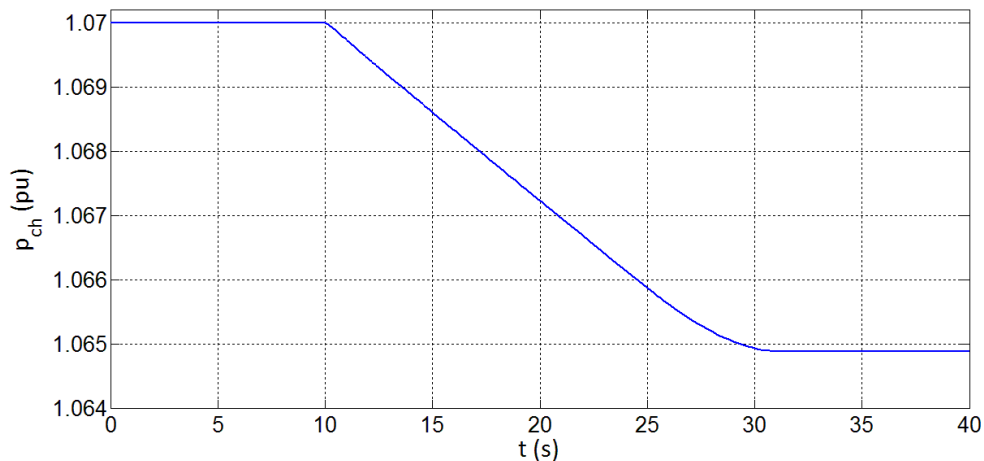


Σχήμα 5.12 : Ροή αέρα από το αεροφυλάκιο

Στο Σχήμα 5.13 φαίνεται η γραφική παράσταση της ανά μονάδα τιμής της πίεσης του αεροφυλακίου p_{ch} συναρτήσει του χρόνου, επιβεβαιώνοντας αυτά που περιγράφηκαν παραπάνω. Τη στιγμή της ενεργοποίησης του αεροφυλακίου ($t = 10$ s), η πίεση που επικρατεί στο αεροφυλάκιο αρχίζει να μειώνεται γραμμικά με το χρόνο, λόγω της μείωσης της μάζας αέρα που είναι αποθηκευμένη. Από την $t = 25$ s μέχρι η πίεση να σταθεροποιηθεί πλήρως, λόγω της ομαλής σβέσης του αεροφυλακίου, ο ρυθμός ελάττωσης της πίεσης μειώνεται εξαιτίας της μείωσης της ροής μάζας αέρα που εξέρχεται από αυτό με την πάροδο του χρόνου.

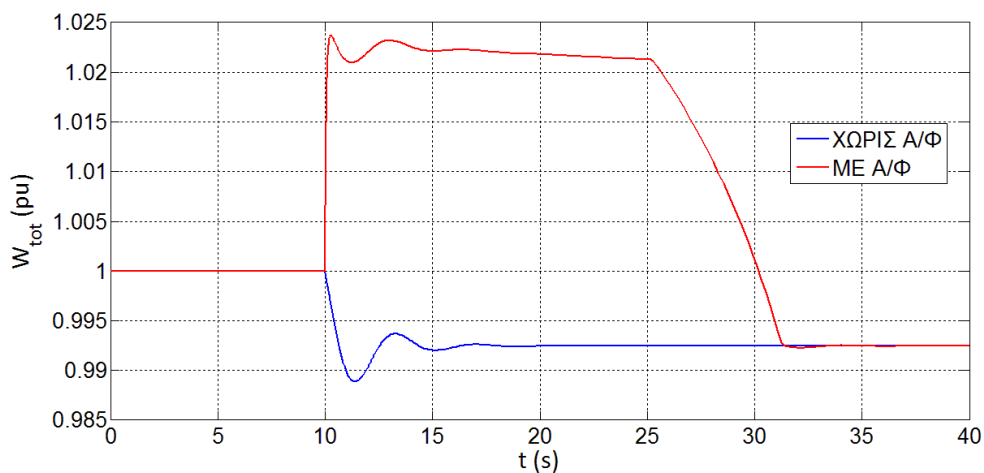
Είναι σημαντικό να αναφέρουμε ότι για τη διαταραχή που προσομοιώθηκε, καθώς και για τα δεδομένα του αεροφυλακίου (αρχική πίεση – χωρητικότητα), η πίεση μειώνεται από 1,07 σε 1,065. Αυτό συνεπάγεται πως το αεροφυλάκιο θα μπορούσε να συνεισφέρει ξανά στη ρύθμιση συχνότητας, χωρίς να χρειαστεί η συμπλήρωση του αέρα που εξήλθε και η ανύψωση

της πίεσης του στα αρχικά επίπεδα. Με λίγα λόγια θα μπορούσε να αντιμετωπίσει 4 με 5 όμοιες διαταραχές, δίχως την αναγκαιότητα επαναφοράς του στις αρχικές συνθήκες. Βεβαίως κατ' αυτόν τον τρόπο η αποτελεσματικότητά του, καθώς αυξάνονται οι διαδοχικές χρήσεις του, θα μειώνεται, δεδομένου ότι θα πέφτει από χρήση σε χρήση η πίεση που επικρατεί σε αυτό, γεγονός το οποίο θα οδηγεί σε μειωμένη παροχή αέρα στο θάλαμο καύσης. Έτσι συνιστάται μετά από κάθε χρήση η συμπλήρωση αέρα σε αυτό, χωρίς όμως να κρίνεται επιτακτικό.



Σχήμα 5.13 : Ανά μονάδα τιμή της πίεσης του αεροφυλακίου

Αξίζει να παραθέσουμε το γράφημα της συνολικής ανά μονάδα ροής αέρα που εκτονώνεται στο στρόβιλο W_{tot} συναρτήσει του χρόνου, ώστε να διακρίνουμε τη συνολική επίδραση του αεροφυλακίου, συνυπολογίζοντας την μείωση της ροής μάζας αέρα που παρέχει ο συμπιεστής και την ροή μάζας αέρα που εισέρχεται στο θάλαμο καύσης από το αεροφυλάκιο, στην περίπτωση της εξεταζόμενης διαταραχής. Έτσι έχουμε το Σχήμα 5.14 :

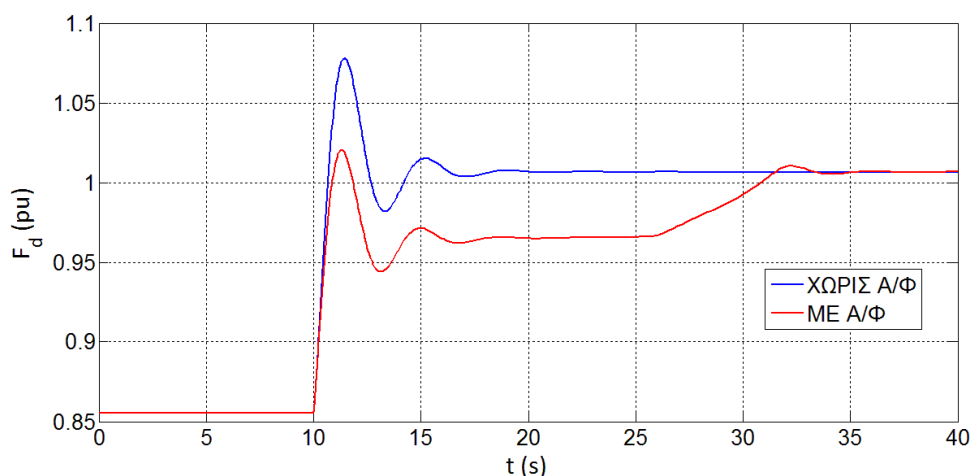


Σχήμα 5.14 : Συνολική ροή αέρα που εκτονώνεται στον στρόβιλο

Εδώ γίνεται σαφέστατη η θετική επίδραση του αεροφυλακίου, παρατηρώντας ότι δίχως τη συμβολή του, η συνολική ροή αέρα που εκτονώνεται στο στρόβιλο (η οποία πρακτικά είναι η ροή που παρέχει ο συμπιεστής) τη στιγμή που η συχνότητα αγγίζει την ελάχιστη τιμή της, είναι στο 99% της ονομαστικής της τιμής. Αντίθετα, με το αεροφυλάκιο ενεργοποιημένο, η

συνολική ροή αέρα που εκτονώνεται στο στρόβιλο (άθροισμα ροής αέρα από το αεροφυλάκιο και από τον συμπιεστή) την ίδια στιγμή με πριν, είναι κοντά στο 102,5%, 3,5% υψηλότερη συγκριτικά με την άλλη περίπτωση. Έτσι δικαιολογούνται τα θετικά αποτελέσματα στην άμεση παραγωγή ισχύος και στη μείωση της θερμοκρασίας της εισόδου του στροβίλου, όταν το αεροφυλάκιο ενεργοποιηθεί. Η αιτιολόγηση της μορφής της συνολικής ροής αέρα είναι η ίδια με αυτή που αναλύθηκε στο γράφημα της ροής αέρα από το αεροφυλάκιο (W_{ch}).

Στο Σχήμα 5.15 παριστάνεται η εντολή για έγχυση καυσίμου F_d σε ανά μονάδα τιμή, στην περίπτωση με το αεροφυλάκιο ενεργοποιημένο και απενεργοποιημένο.

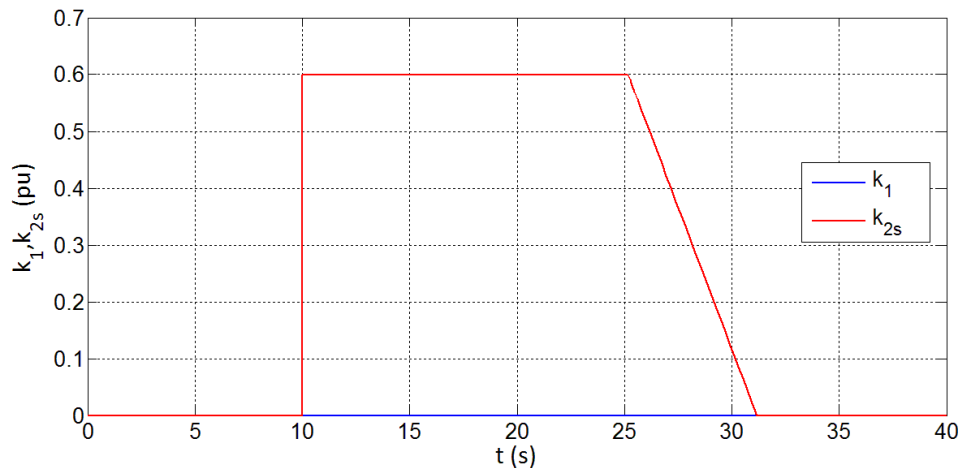


Σχήμα 5.15 : Εντολή έγχυσης καυσίμου

Όπως αναμενόταν, το σήμα έγχυσης καυσίμου είναι μικρότερο στην περίπτωση που το αεροφυλάκιο ενεργοποιείται, συγκριτικά με την προσομοίωση του αεριοστρόβιλου χωρίς αεροφυλάκιο. Αυτό οφείλεται στο ότι στην πρώτη περίπτωση, η επιπλέον ροή μάζας αέρα από το αεροφυλάκιο συνεισφέρει στην άμεση παραγωγή ισχύος, με αποτέλεσμα το καύσιμο που απαιτείται για να παραχθεί η ίδια ποσότητα ισχύος να είναι μικρότερο συγκριτικά με τη δεύτερη περίπτωση. Επίσης, η ελάχιστη τιμή της συχνότητας είναι πλησιέστερα στην ονομαστική της τιμή στην πρώτη περίπτωση, με αποτέλεσμα η ζήτηση καυσίμου από τον ρυθμιστή στροφών να είναι μικρότερη, λόγω του μικρότερου σφάλματος συχνότητας που δέχεται ως σήμα. Έτσι, η μέγιστη ζήτηση καυσίμου με ενεργοποιημένο το αεροφυλάκιο είναι στο 1,02 ανά μονάδα, ενώ στη δεύτερη περίπτωση δίχως το αεροφυλάκιο είναι στο 1,08 ανά μονάδα. Σημειώνεται ότι έχουμε θεωρήσει δυνατότητα μεταβατικής υπερφόρτισης, με ροή καυσίμου $F_d \leq 1,1$ ανά μονάδα.

Στο διάστημα από 14 s έως 25 s, όπου η συχνότητα έχει αποκατασταθεί (πολύ μικρός ρυθμός μεταβολής εντός του στενού εύρους $\pm N_{rel} = \pm 0,001$), η έγχυση του καυσίμου σταθεροποιείται στο 96,5%. Για $t > 25$ s όπου έχει ξεκινήσει η ομαλή σβέση του αεροφυλακίου, η έγχυση του καυσίμου αυξάνεται σταδιακά ως αποτέλεσμα της μείωσης της ροής μάζας αέρα, που συνεπάγεται μείωση της παραγόμενης ισχύος και αυτή με τη σειρά της μείωση της συχνότητας. Για $t > 31$ s, όπου η δικλείδα αέρα του αεροφυλακίου έχει κλείσει, η εντολή για καύσιμο F_d σταθεροποιείται στη μόνιμη τιμή της κοντά στο 100%, τιμή την οποία επιβάλλει το φορτίο στη λειτουργία με το αεροφυλάκιο εκτός. Από εκεί και έπειτα το φορτίο έχει αναληφθεί πλήρως από τον αεριοστρόβιλο.

Τέλος, θα συνοψίσουμε τη λογική ελέγχου του αεροφυλακίου στα διαγράμματα των Σχημάτων 5.16 - 5.17, τα οποία απεικονίζουν τα αντίστοιχα σήματα που παράγει το μοντέλο και καθορίζουν την απόκρισή του, στην συγκεκριμένη διαταραχή.



Σχήμα 5.16 : Εντολές ανοίγματος της δικλείδας αέρα

Στο Σχήμα 5.16 φαίνονται οι εντολές ανοίγματος της δικλείδας αέρα του αεροφυλακίου, η μία προερχόμενη από τον έλεγχο ισχύος (k_1) και η άλλη από τον έλεγχο συχνότητας (k_{2s}). Οι δύο αυτοί έλεγχοι έχουν αναλυθεί εκτενώς στο προηγούμενο κεφάλαιο (παράγραφος 4.2.10), όπου περιγράφεται η λειτουργία και η λογική ελέγχου του αεροφυλακίου. Παρατηρούμε ότι το σήμα k_1 για το άνοιγμα της δικλείδας αέρα από τον έλεγχο ισχύος είναι μηδέν σε όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης, μιας και η ηλεκτρική ισχύς της γεννήτριας είναι διαρκώς κάτω του 1,01 ανά μονάδα, της κρίσιμης τιμής δηλαδή για την ενεργοποίηση του ελέγχου αυτού. Αντίθετα, το σήμα για άνοιγμα της δικλείδας k_{2s} από τον έλεγχο συχνότητας ενεργοποιείται την στιγμή $t = 10$ s όπου εμφανίζεται ο απότομος ρυθμός μεταβολής της συχνότητας, καθιστώντας ως σήμα εξόδου το μέγιστο άνοιγμα της δικλείδας $K_{sat} = 0,6$ ανά μονάδα. Η τιμή αυτή διατηρείται ως την $t = 25$ s της προσομοίωσης περίπου, όπου αμέσως μετά το σήμα k_{2s} για άνοιγμα της δικλείδας μειώνεται γραμμικά με το χρόνο για 6 δευτερόλεπτα, μετά το πέρας των οποίων λαμβάνει την τιμή μηδέν. Το τελικό άνοιγμα της δικλείδας αέρα k , που προκύπτει από την άθροιση των επιμέρους δύο σημάτων k_{2s} και k_1 , είναι πρακτικά το σήμα που προέρχεται από τον έλεγχο συχνότητας, μιας και το άλλο όπως εξηγήθηκε λαμβάνει την τιμή μηδέν, σε όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης.

Ο λόγος για τον οποίο το σήμα k_{2s} που προκύπτει από τον έλεγχο συχνότητας ενεργοποιείται και απενεργοποιείται τις προαναφερθείσες χρονικές στιγμές, γίνεται εμφανής στο Σχήμα 5.17. Το σχήμα αυτό αποτελείται από 4 ξεχωριστές γραφικές παραστάσεις, διατεταγμένες με κοινή κλίμακα χρόνου, έτσι ώστε να φαίνεται η αντιστοιχία μεταξύ τους κάθε χρονική στιγμή.

Συγκεκριμένα, στο πρώτο γράφημα του Σχήματος 5.17-(α) απεικονίζονται τα 3 καθοριστικά σήματα του ελέγχου συχνότητας για το αεροφυλάκιο συναρτήσει του χρόνου, τα οποία είναι τα εξής :

- q : το λογικό σήμα ενεργοποίησης του αεροφυλακίου, το οποίο ουσιαστικά είναι η έξοδος του flip-flop στο Σχήμα 4.19, και λαμβάνει την τιμή 1 στο διάστημα 10 - 25 s περίπου, υποδεικνύοντας το χρονικό διάστημα για το οποίο δίνεται η εντολή για μέγιστο άνοιγμα της δικλείδας αέρα ($k = K_{sat} = 0,6$ ανά μονάδα).
- R_{es} : το λογικό σήμα (στιγμιαίος παλμός) που δίνει εντολή για την ομαλή σβέση του αεροφυλακίου, με τη σταδιακή μείωση του ανοίγματος της δικλείδας αέρα για 6 s από τη στιγμή που θα δοθεί ο παλμός. Ο παλμός αυτός (μετάβαση από κατάσταση 0

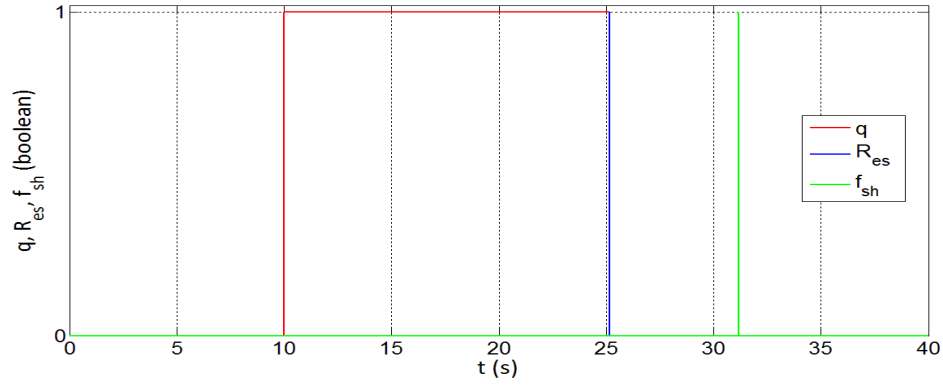
σε κατάσταση 1 στιγμιαία) πυροδοτεί τη σβέση του αεροφυλακίου την χρονική στιγμή $t = 25$ s περίπου.

- f_{sh} : το λογικό σήμα που υποδεικνύει τη χρονική στιγμή όπου η ομαλή σβέση του αεροφυλακίου έχει ολοκληρωθεί, και δίνει την εντολή για την επαναφορά της διάταξης στις αρχικές συνθήκες, για μεταγενέστερη χρήση του αεροφυλακίου. Ο παλμός αυτός (μετάβαση από κατάσταση 0 σε κατάσταση 1 στιγμιαία) λαμβάνει χώρα τη στιγμή $t = 31$ s της προσομοίωσης περίπου, 6 δευτερόλεπτα δηλαδή μετά την εντολή σβέσης.

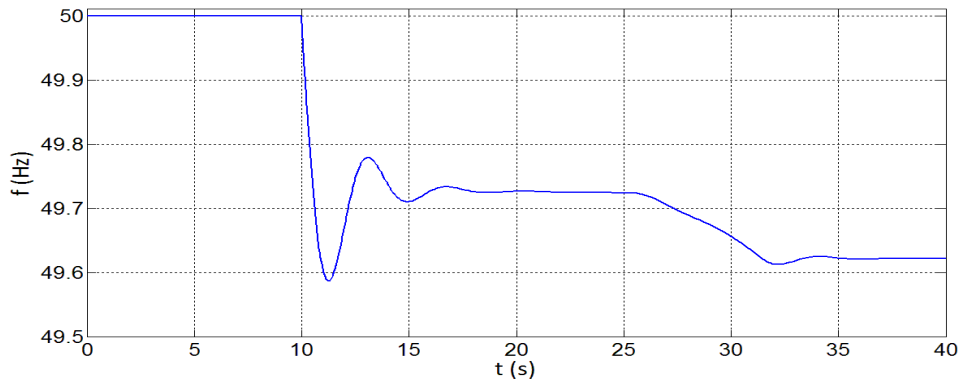
Στο δεύτερο γράφημα του Σχήματος 5.17-(β) απεικονίζεται η συχνότητα της γεννήτριας f σε Hz. Παρατηρείται ότι τη στιγμή $t = 10$ s της διαταραχής, εμφανίζεται μεγάλος ρυθμός πτώσης της συχνότητας, με αποτέλεσμα να ενεργοποιείται το αεροφυλάκιο, καθιστώντας την έξοδο του flip-flop που αναφέρθηκε $q = 1$.

Στην τρίτη κατά σειρά γραφική παράσταση του Σχήματος 5.17-(γ), φαίνεται το σήμα t_{ch} (s) συναρτήσεως του χρόνου, το οποίο είναι αυτό που καταγράφει το χρόνο για τον οποίο ο ρυθμός μεταβολής της συχνότητας N_f βρίσκεται εντός του στενού εύρους τιμών $\pm N_{rel} = \pm 0,001$. Όπως έχει περιγραφεί στο Σχήμα 4.23, μόλις ο ρυθμός αυτός ξεφύγει από τα όρια αυτά τότε η μέτρηση μηδενίζεται, και ξεκινάει πάλι από την αρχή. Παρατηρούμε ότι πριν τη διαταραχή, η συχνότητα είναι στην ονομαστική της τιμή σταθερά, με αποτέλεσμα ο μετρητής να καταγράφει το χρόνο, αφού ισχύει $-N_{rel} < df / dt = 0 < +N_{rel}$. Τη χρονική στιγμή $t = 10$ s, ο ρυθμός μεταβολής της συχνότητας ξεφεύγει από τα όρια λόγω της διαταραχής, με αποτέλεσμα ο μετρητής να μηδενίζεται, και να ξεκινάει πλέον η χρήσιμη καταγραφή για τον υπολογισμό του χρόνου σταθεροποίησης του ρυθμού μεταβολής της συχνότητας. Μέχρι την $t = 14$ s, παρατηρούμε ότι υπάρχουν δύο πολύ μικρές καταγραφές, οι οποίες αντιπροσωπεύουν μικρά χρονικά διαστήματα για τα οποία η παράγωγος της συχνότητας βρέθηκε εντός των προαπαιτούμενων ορίων, αλλά μετά από λίγο ξέφυγε από αυτά, μηδενίζοντας εκ νέου το μετρητή. Τη χρονική στιγμή $t = 14$ s περίπου, παρατηρούμε από το διάγραμμα της συχνότητας με το χρόνο ότι ο ρυθμός μεταβολής της έχει αρχίσει να σταθεροποιείται, ευρισκόμενος εντός των ορίων $\pm N_{rel} = \pm 0,001$. Έτσι ο μετρητής αρχίζει πάλι την καταγραφή. Λόγω της οριστικής απόσβεσης των προηγούμενων ταλαντώσεων της συχνότητας, ο μετρητής συνεχίζει την καταγραφή του χρόνου έως τη χρονική στιγμή $t = 25$ s, 11 δευτερόλεπτα δηλαδή μετά την τελευταία επανεκκίνησή του. Έτσι λοιπόν έχει επιτευχθεί το απαραίτητο χρονικό διάστημα $\Delta t = t_{rel} = 11$ s που καταδεικνύει την εξάλειψη της διαταραχής πλήρως, με αποτέλεσμα να δοθεί εντολή για την ομαλή σβέση του αεροφυλακίου (R_{es}).

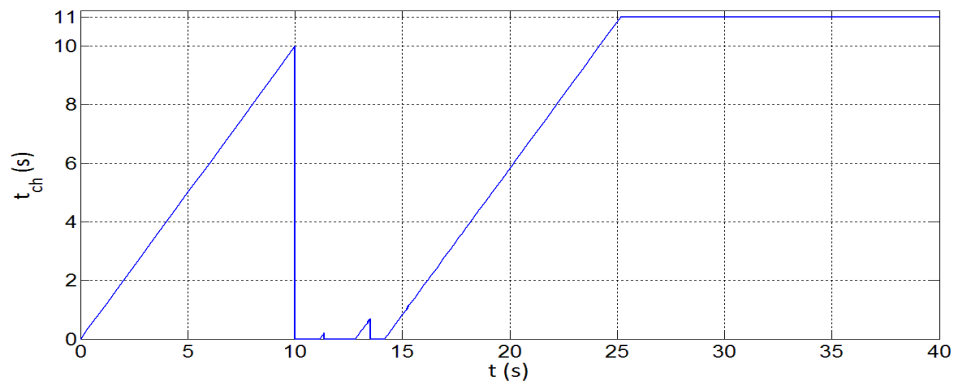
Τέλος, στο τέταρτο γράφημα του Σχήματος 5.17-(δ) απεικονίζονται τα σήματα ανοίγματος της δικλείδας εξαιτίας του ελέγχου συχνότητας. Την $t = 10$ s, όπου το q μεταβαίνει στην τιμή 1, δίνεται εντολή για πλήρες άνοιγμα της δικλείδας αέρα ($k_{2s} = k_2 = K_{sat} = 0,6$ ανά μονάδα), το οποίο διαρκεί μέχρι την χρονική στιγμή $t = 25$ s, όπου θα αρχίσει η ομαλή σβέση του αεροφυλακίου. Έτσι το σήμα k_2 λαμβάνει την τιμή 0,6 ανά μονάδα στο διάστημα 10 s - 25 s, και οποιαδήποτε άλλη χρονική στιγμή λαμβάνει την τιμή μηδέν. Την χρονική στιγμή $t = 25$ s, όπου η διαταραχή έχει εξαλειφθεί πλήρως και έχει παραχθεί το σήμα R_{es} , το σήμα k_2 μεταβαίνει στην τιμή μηδέν και ταυτόχρονα το σήμα s_{th} μεταβαίνει στην τιμή 0,6, στην προηγούμενη τιμή δηλαδή που είχε το άνοιγμα της δικλείδας πριν, και αρχίζει να μειώνεται γραμμικά με το χρόνο. Έτσι ενεργοποιείται η ομαλή σβέση του αεροφυλακίου, η οποία θα διαρκέσει 6 δευτερόλεπτα. Μετά το πέρας του παραπάνω χρονικού διαστήματος, όπου έχει παραχθεί το σήμα f_{sh} , η ομαλή σβέση έχει ολοκληρωθεί ($s_{th} = 0$). Τέλος, το τελικό



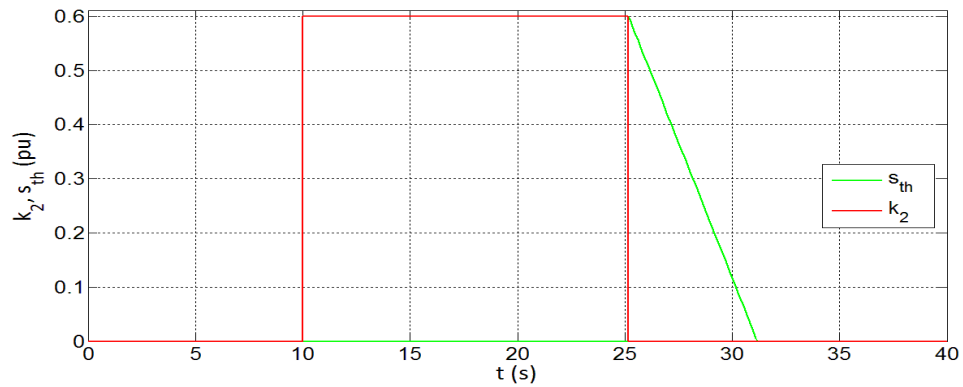
(α) Σήματα ενεργοποίησης – απενεργοποίησης αεροφυλακίου



(β) Απόκριση συχνότητας



(γ) Χρονικό διάστημα όπου ισχύει $|df / dt| < N_{rel}$



(δ) Εντολές ανοίγματος δικλείδας αέρα από τον έλεγχο συχνότητας

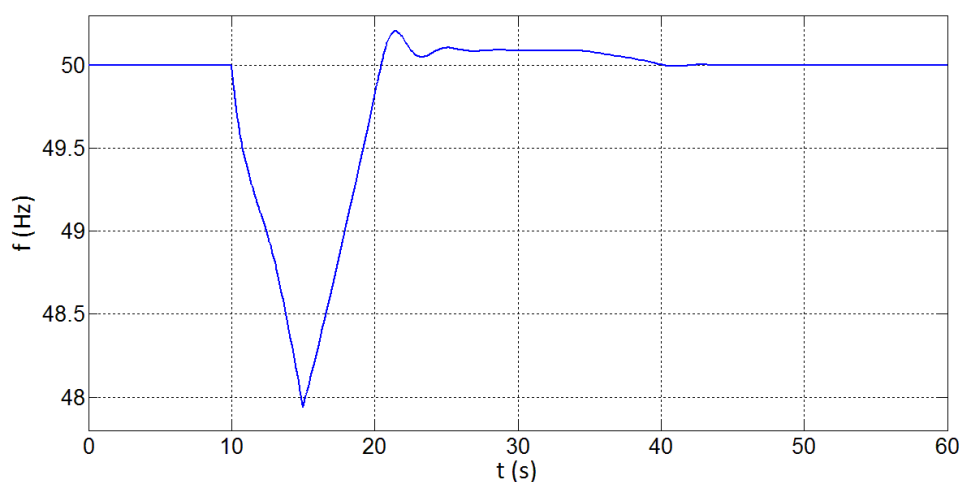
Σχήμα 5.17 : Σήματα ελέγχου αεροφυλακίου

σήμα που προκύπτει από τον έλεγχο αυτόν για το άνοιγμα της δικλείδας αέρα, είναι το σήμα k_{2s} , το οποίο προκύπτει από την άθροιση των σημάτων k_2 και s_{th} . Με λίγα λόγια το σήμα k_{2s} είναι το σήμα k_2 όταν το $q = 1$, ενώ όταν δοθεί εντολή για ομαλή σβέση του αεροφυλακίου είναι το σήμα s_{th} . Οποιαδήποτε άλλη χρονική στιγμή λαμβάνει την τιμή μηδέν.

5.3.2 Μεταβατική αύξηση του φορτίου στο 120%

Στην συγκεκριμένη προσομοίωση εξετάζεται η απόκριση του αεριοστροβίλου σε βηματική αύξηση του ηλεκτρικού φορτίου, από την ονομαστική του τιμή στο 120%, για 5 δευτερόλεπτα, με τη συμβολή του πεπιεσμένου αέρα από το αεροφυλάκιο. Η διαταραχή λαμβάνει χώρα σε χρόνο $t = 10$ s της προσομοίωσης και ολοκληρώνεται τη χρονική στιγμή $t = 15$ s, οπότε το φορτίο επιστρέφει στο 100%. Είναι προφανές ότι σε μια τέτοια διαταραχή, ο αεριοστροβίλος δεν μπορεί να αντεπεξέλθει καθόλου και τίθεται σε ελάχιστο χρονικό διάστημα εκτός λειτουργίας δίχως τη συμβολή του αεροφυλακίου. Για το λόγο αυτό θα εξεταστεί αρχικά η απόκριση του αεριοστροβίλου με το αεροφυλάκιο εντός λειτουργίας, και έπειτα θα δείξουμε ενδεικτικά την απόκρισή του σε περίπτωση που το αεροφυλάκιο είναι απενεργοποιημένο.

Στο Σχήμα 5.18 παρατίθεται το γράφημα της συχνότητας συναρτήσει του χρόνου για τη συγκεκριμένη διαταραχή.



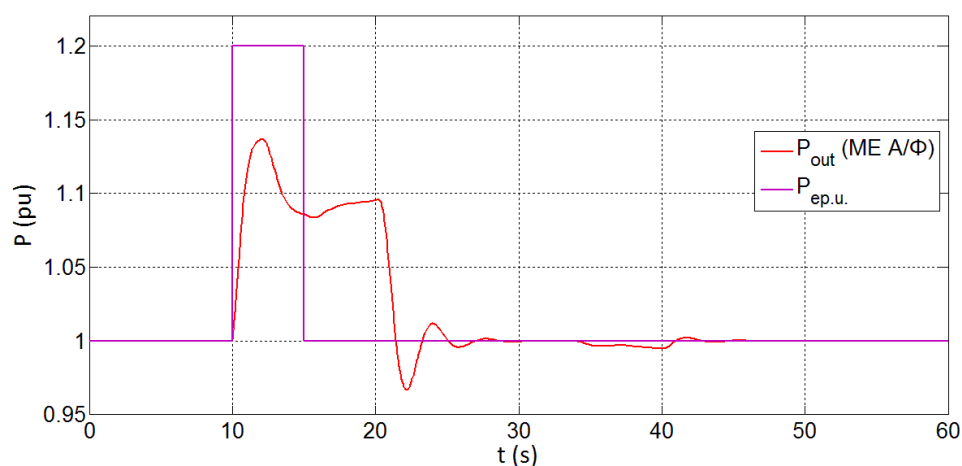
Σχήμα 5.18 : Απόκριση συχνότητας για μεταβατική αύξηση φορτίου στο 120%

Στο διάστημα από 10 s ως 15 s η συχνότητα f μειώνεται διαρκώς, γεγονός που οφείλεται στο ότι η ηλεκτρική ισχύς είναι συνεχώς άνω της μηχανικής. Η ελάχιστη τιμή της συχνότητας είναι στα 48 Hz την χρονική στιγμή $t = 15$ s. Είναι σημαντικό να αναφέρουμε ότι υπό την επίδραση της συγκεκριμένης διαταραχής, στην περίπτωση που το σύστημα αεριοστροβίλος – αεροφυλάκιο είναι σε λειτουργία, παρέχοντας ισχύ σε μια γεννήτρια συνδεδεμένη στο δίκτυο, θα έχουν δράσει οι ηλεκτρονόμοι προστασίας αποκόπτοντας φορτία (θεωρώντας ως όριο ενεργοποίησης των ηλεκτρονόμων υποσυχνότητας τα 48,5 Hz). Ωστόσο, το μεγάλο πλεονέκτημα της χρήσης του αεροφυλακίου ως μεταβατική αύξηση της ισχύος του αεριοστροβίλου στην μεγάλη αυτή διαταραχή, έγκειται στο γεγονός πως η αεριοστροβιλική μονάδα δεν αποσυνδέεται από το δίκτυο. Αυτό ισχύει θεωρώντας ως ελάχιστη επιτρεπόμενη τιμή της συχνότητας λειτουργίας της μονάδας τα 47 Hz. Το παραπάνω έχει μεγάλη σημασία

για την ευστάθεια ενός συστήματος, διότι δίχως την ενίσχυση της παραγωγής ισχύος μεταβατικά από το αεροφυλάκιο, η συχνότητα θα είχε πέσει κάτω από το όριο λειτουργίας του αεροστροβίλου. Έτσι, η μονάδα παραγωγής θα είχε τεθεί εκτός λειτουργίας, επιδεινώνοντας το πρόβλημα υποσυχνότητας και οδηγώντας σε διαδοχικές καταρρέψεις και τις υπόλοιπες μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, με αποτέλεσμα την ολική σβέση του συστήματος [2]. Το αεροφυλάκιο λοιπόν έδωσε τη δυνατότητα στην αεροστροβιλική μονάδα να αντέξει διαταραχή 20% άνω της ονομαστικής παραγωγής, διάρκειας 5 δευτερολέπτων, δίχως να αποσυνδεθεί από το δίκτυο.

Σημειώνεται ότι μετά την πάροδο της διαταραχής της ισχύος, η ηλεκτρική ισχύς έχει επανέλθει στα ονομαστικά επίπεδα, με την παραγόμενη μηχανική ισχύ να είναι μεγαλύτερη παροδικά, με αποτέλεσμα η συχνότητα να επανέρχεται σταδιακά κοντά στα 50 Hz. Για $t = 34$ s ξεκινά η πλήρης επαναφορά της στη μόνιμη τιμή της, με την ομαλή σβέση του αεροφυλακίου, γεγονός το οποίο ολοκληρώνεται τη χρονική στιγμή $t = 40$ s όπου το αεροφυλάκιο έχει πλήρως απενεργοποιηθεί. Από εκεί και έπειτα η συχνότητα παραμένει στη μόνιμη τιμή της, στα 50 Hz.

Στο Σχήμα 5.19 φαίνεται η ηλεκτρική ισχύς ($P_{ep.u.}$ - μωβ γραμμή) και η απόκριση της μηχανικής ισχύος (P_{out} - κόκκινη γραμμή) που παράγει ο αεροστροβίλος σε ανά μονάδα τιμές, συναρτήσει του χρόνου.



Σχήμα 5.19 : Απόκριση ισχύος αεροστροβίλου

Κατά την εμφάνιση της διαταραχής, ο αεροστροβίλος με την συμβολή του πεπιεσμένου αέρα από το αεροφυλάκιο, αρχίζει να παράγει μηχανική ισχύ άνω της ονομαστικής του τιμής, προσεγγίζοντας το 115%, η οποία είναι και η μέγιστη παραγωγή την οποία επιτυγχάνει. Αυτή η σημαντική μεταβατική αύξηση της μηχανικής ισχύος οφείλεται στο αεροφυλάκιο, το οποίο όπως έχει αναφερθεί, εγγχεί αέρα που συμβάλλει στην άμεση παραγωγή ισχύος ως επιπλέον αέρας που εκτονώνεται στο στρόβιλο, καθώς και μειώνει την θερμοκρασία στην έξοδο του θαλάμου καύσης, καθυστερώντας τον περιορισμό της ροής καυσίμου που εισάγει ο έλεγχος υπερθέρμανσης. Έτσι, για $t = 12$ s η μηχανική ισχύς είναι κάτι λιγότερο από το 115% της ονομαστικής της τιμής. Από το σημείο αυτό και μετά, η παραγόμενη ισχύς αρχίζει να μειώνεται ως αποτέλεσμα της μείωσης της ροής του καυσίμου που εγγέεται στο θάλαμο καύσης, με σκοπό την προστασία του στροβίλου από υπερθέρμανση.

Τη στιγμή $t = 15$ s όπου η ηλεκτρική ισχύς επανέρχεται στα ονομαστικά επίπεδα, η μηχανική ισχύς αρχίζει να αυξάνει ελαφρώς, μέχρι την $t = 20$ s. Αυτό συμβαίνει διότι η μηχανική ισχύς υπερβαίνει πλέον την ηλεκτρική και ο άξονας αρχίζει να επιταχύνεται, με

αποτέλεσμα να αυξάνει η συχνότητα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την σταδιακή αύξηση του παρεχόμενου αέρα από το συμπιεστή στο θάλαμο καύσης, δεδομένου ότι έχει θεωρηθεί ανάλογος της συχνότητας. Έτσι, η αύξηση του αέρα που διέρχεται από το θάλαμο καύσης οδηγεί στην μείωση της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στην έξοδό του, με αποτέλεσμα ο περιορισμός στην έγχυση καυσίμου λόγω του ελέγχου υπερθέρμανσης να χαλαρώνει σταδιακά. Επομένως το καύσιμο αρχίζει να αυξάνει με το ρυθμό που του επιτρέπει ο έλεγχος υπερθέρμανσης.

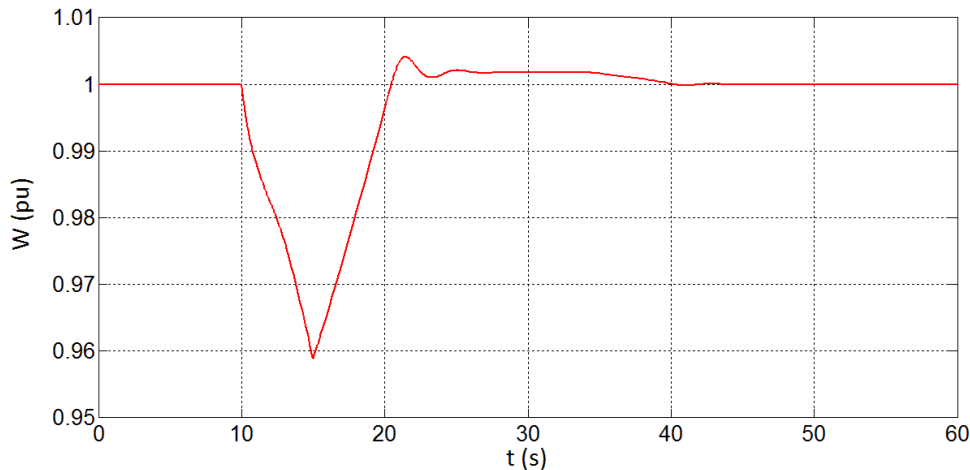
Για χρόνο $t = 20$ s περίπου, η συχνότητα έχει προσεγγίσει σχεδόν την ονομαστική της τιμή, συνεπάγοντας την μείωση του εγχόμενου καυσίμου και κατ' επέκταση της παραγόμενης μηχανικής ισχύος. Λίγο μετά την $t = 21$ s της προσομοίωσης, η μηχανική ισχύς εξισώνεται με την ηλεκτρική στα ονομαστικά επίπεδα. Ωστόσο, η παραγωγή του αεριοστροβίλου δεν παραμένει μόνιμα σε αυτήν την τιμή, διότι όπως έχουμε εξηγήσει, λόγω των χρονικών καθυστερήσεων που επιβάλλει η λειτουργία του, όταν η μηχανική ισχύς έχει εξισωθεί με την ηλεκτρική η συχνότητα είναι άνω των 50 Hz. Αυτό οδηγεί στην περαιτέρω μείωση της μηχανικής ισχύος, έως ότου επιτευχθεί τοπικό ελάχιστο για $t = 22,3$ s περίπου. Στο σημείο αυτό η συχνότητα είναι κάτω της μόνιμης τιμής της, με αποτέλεσμα η μηχανική ισχύς να αρχίσει πάλι να αυξάνει. Εν ολίγοις, μετά από μία ταλάντωση της ισχύος, η τιμή της σταθεροποιείται στη μόνιμη κατάσταση, δηλαδή στο 100%.

Τέλος, η μείωση της μηχανικής ισχύος που αρχίζει για $t = 34$ s και ολοκληρώνεται την $t = 40$ s, οφείλεται στη σταδιακή σβέση του αεροφυλακίου με τη μείωση του αέρα που εγχέεται στο θάλαμο καύσης, ενώ η επαναφορά της ισχύος στα ονομαστικά επίπεδα οφείλεται στην δράση του ρυθμιστή στροφών με την έγχυση επιπλέον καυσίμου. Είναι δηλαδή η περίοδος όπου το αεροφυλάκιο τίθεται ομαλά εκτός λειτουργίας, με τον αεριοστροβίλο να αναλαμβάνει πλήρως το φορτίο που του αναλογεί, δεδομένου ότι η διαταραχή έχει εξαλειφθεί. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι κατά τη διάρκεια της διαταραχής της ισχύος (10 s - 15 s), η μηχανική ισχύς παρά την κρίσιμη συμβολή του αεροφυλακίου, παραμένει μόνιμως κάτω του 120%. Το γεγονός αυτό συνεπάγεται πως στο διάστημα αυτό η συχνότητα βαίνει διαρκώς μειούμενη, όπως παρατηρήσαμε στο Σχήμα 5.18.

Στο σημείο αυτό αξίζει να παραθέσουμε τα διαγράμματα που αφορούν τη ροή αέρα του συμπιεστή (W), του αεροφυλακίου (W_{ch}), και τη συνολική ροή (W_{tot}) που εισέρχεται στο θάλαμο καύσης από το άθροισμα των επιμέρους ροών, σε ανά μονάδα τιμές, προκειμένου να αντιληφθούμε την θετική συμβολή του αεροφυλακίου στην λειτουργία του αεριοστροβίλου.

Στο Σχήμα 5.20, στο οποίο απεικονίζεται η ροή αέρα του συμπιεστή W συναρτήσει του χρόνου, παρατηρούμε ότι κατά τη διαταραχή της ηλεκτρικής ισχύος η ροή αέρα μειώνεται με σημαντικό ρυθμό, ο οποίος πρακτικά αντιστοιχεί στο ρυθμό πτώσης της συχνότητας, μιας και τα δύο μεγέθη έχουν θεωρηθεί ανάλογα. Έτσι εμφανίζεται, κατά τη στιγμή όπου η συχνότητα έχει την ελάχιστη τιμή της, ελάχιστη τιμή ροής αέρα από το συμπιεστή ύψους 96%. Αν δεν υπήρχε το αεροφυλάκιο, με μόνη την ύπαρξη της ροής του συμπιεστή, θα επιδειωνόταν σημαντικά το πρόβλημα της υπερθέρμανσης, και δεν θα υπήρχε η άμεση παραγωγή ισχύος που προσφέρει το αεροφυλάκιο.

Στο Σχήμα 5.21 φαίνεται η ροή μάζας αέρα W_{ch} προερχόμενη από το αεροφυλάκιο. Παρατηρούμε ότι κατά το πρώτο δευτερόλεπτο της διαταραχής, η ροή που εγχέει το αεροφυλάκιο στο θάλαμο καύσης μεταβαίνει άμεσα στο 3% της ονομαστικής ροής αέρα του αεριοστροβίλου. Έτσι δίνεται η δυνατότητα της άμεσης ανταπόκρισης στη διαταραχή, με την παροχή σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα επιπλέον αέρα που θα εκτονωθεί στον στροβίλο, αυξάνοντας τη μηχανική ισχύ.



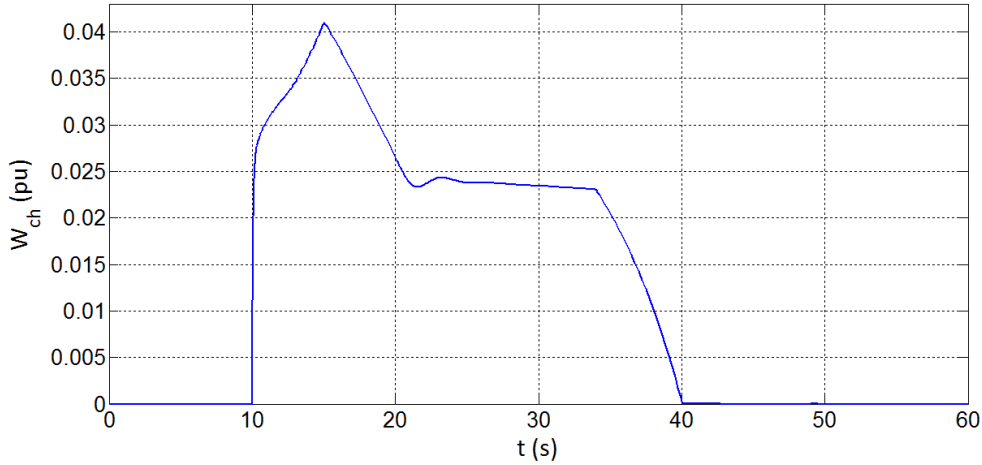
Σχήμα 5.20: Ροή συμπιεστή

Είναι αξιοσημείωτο επίσης ότι μετά το χρόνο $t = 10$ s της προσομοίωσης όπου λαμβάνει χώρα η διαταραχή, αφού παρέλθει η πρώτη απότομη αύξηση της ροής μάζας αέρα στο 3%, η ροή του αεροφυλακίου συνεχίζει να αυξάνει, με μικρότερο ρυθμό όμως, όπως παρατηρούμε στο Σχήμα 5.21. Όπως εξηγήθηκε στην προηγούμενη προσομοίωση, αυτό οφείλεται στην εξάρτηση της πίεσης του θαλάμου καύσης από τη συχνότητα. Έτσι, καθώς η συχνότητα μειώνεται, ελαττώνεται και η πίεση που επικρατεί στο θάλαμο καύσης, με αποτέλεσμα η διαφορά πίεσης μεταξύ αεροφυλακίου και θαλάμου καύσης να μεγαλώνει, και συνεπώς να αυξάνεται η εγγεόμενη ροή αέρα από το αεροφυλάκιο. Αυτό αντισταθμίζει κατά ένα μέρος τη μείωση της ροής από το συμπιεστή, που επιφέρει η πτώση της συχνότητας. Έτσι λοιπόν, τη στιγμή όπου η συχνότητα είναι στην ελάχιστη τιμή της (15 s), η ροή αέρα που παρέχει το αεροφυλάκιο φτάνει στο μέγιστο της (4%). Από το σημείο αυτό μέχρι τη χρονική στιγμή $t = 20$ s, η ροή αέρα από το αεροφυλάκιο μειώνεται ως αποτέλεσμα της αύξησης της συχνότητας και της επακόλουθης μείωσης της διαφοράς πίεσης μεταξύ θαλάμου καύσης και αεροφυλακίου. Στο χρονικό διάστημα $23 \text{ s} < t < 34 \text{ s}$ η ροή αέρα μειώνεται με έναν πολύ μικρό ρυθμό, ο οποίος οφείλεται στο ρυθμό μείωσης της πίεσης που επικρατεί στο αεροφυλάκιο, λόγω της ελάττωσης του αποθηκευμένου αέρα. Από την $t = 34$ s έως τη χρονική στιγμή $t = 40$ s, λαμβάνει χώρα η ομαλή σβέση του αεροφυλακίου, με αποτέλεσμα η ροή να μειώνεται ως απόρροια του σταδιακού κλεισίματος της δικλείδας αέρα. Από το σημείο αυτό και μετά η ροή πλέον έχει μηδενιστεί και το αεροφυλάκιο είναι πλέον εκτός λειτουργίας.

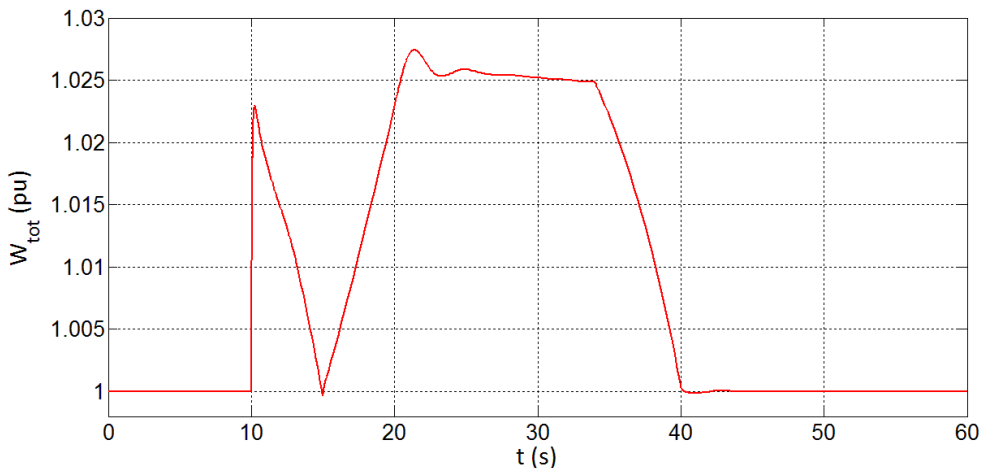
Η συνολική ροή W_{tot} η οποία εισέρχεται στο θάλαμο καύσης, είναι το άθροισμα της ροής του συμπιεστή και του αεροφυλακίου, και απεικονίζεται στο Σχήμα 5.22. Εδώ φαίνεται καθαρά ότι με το αεροφυλάκιο ενεργοποιημένο, επιτυγχάνεται κατά τη διάρκεια της διαταραχής η συνολική παρεχόμενη ροή αέρα να είναι μονίμως άνω της ονομαστικής ροής του αεριοστροβίλου. Έτσι, δεδομένης της υποσυχνότητας, ενώ στην απλή διάταξη του αεριοστροβίλου η ροή πέφτει σημαντικά, με την προσθήκη του αεροφυλακίου δύναται η συγκράτηση της συνολικής ροής που εκτονώνεται στο στρόβιλο να πάρει τιμές μεγαλύτερες, αυξάνοντας την μηχανική ισχύ και αποφεύγοντας την υπερθέρμανση του θαλάμου καύσης.

Τη στιγμή όπου εμφανίζεται η διαταραχή της ηλεκτρικής ισχύος, η συνολική ροή αέρα αυξάνεται απότομα ως αποτέλεσμα της άμεσης συνεισφοράς του αεροφυλακίου, φτάνοντας 2,5% περίπου πάνω από τα ονομαστικά επίπεδα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.22. Από εκείνο το σημείο μέχρι να επανέλθει η ηλεκτρική ισχύς στο 100% ($t = 15$ s), η συνολική ροή αρχίζει να μειώνεται, λόγω του σημαντικού ρυθμού μείωσης της ροής που παρέχει ο συμπιεστής.

Τέλος, μετά την $t = 15$ s η συνολική ροή αρχίζει να αυξάνει, μιας και εξαιτίας της αύξησης της συχνότητας, αυξάνει και η ροή του συμπιεστή. Από τη χρονική στιγμή $t = 20$ s και μετά, η μορφή της ακολουθεί τη μορφή της ροής αέρα από το αεροφυλάκιο, μιας και η ροή από το συμπιεστή έχει πλέον σταθεροποιηθεί.



Σχήμα 5.21 : Ροή αεροφυλακίου

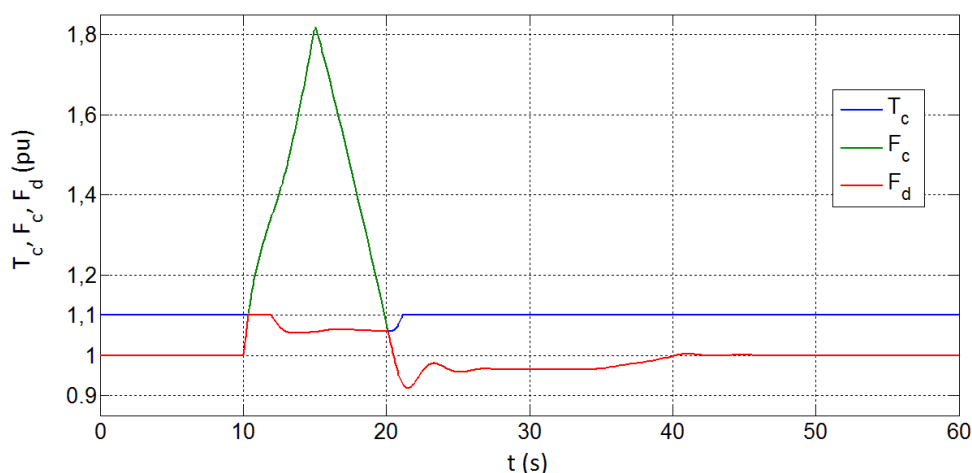


Σχήμα 5.22 : Συνολική ροή αέρα

Στο Σχήμα 5.23 απεικονίζεται το σήμα ζήτησης καυσίμου από τον ρυθμιστή στροφών (πράσινη γραμμή- F_c), το σήμα ελέγχου υπερθέρμανσης (μπλε γραμμή- T_c), και η πραγματική εντολή που δίνεται στην αντλία καυσίμου για έγχυση στο θάλαμο καύσης (κόκκινη γραμμή- F_d), σε ανά μονάδα τιμές. Σημειώνεται ότι το σήμα F_d προκύπτει ως η ελάχιστη τιμή μεταξύ των άλλων δύο σημάτων.

Παρατηρούμε ότι το σήμα F_c , εξαρτώμενο από το σφάλμα συχνότητας, λόγω της σημαντικής πτώσης των στροφών, αυξάνει σε επίπεδα πολύ υψηλότερα από τα ονομαστικά, φτάνοντας στην μέγιστη τιμή του 180%. Σε όλο το διάστημα όπου η ηλεκτρική ισχύς είναι στο 120%, το σήμα αυτό βαίνει αυξανόμενο ως αποτέλεσμα της διαρκούς μείωσης της συχνότητας. Μόλις η συχνότητα φτάσει την ελάχιστη τιμή της και αρχίσει να ανέρχεται, το σήμα ζήτησης καυσίμου από το ρυθμιστή στροφών αρχίζει να μειώνεται. Παρατηρούμε ότι κατά τη χρονική στιγμή $t = 20$ s περίπου, έχει φτάσει στην τιμή που ορίζει το φορτίο (100%),

και συνεχίζει να κατέρχεται σημειώνοντας μια ταλάντωση, οφειλόμενη στις χρονικές καθυστερήσεις που υπεισέρχονται από τον έλεγχο συχνότητας. Από την $t = 23$ s ως την $t = 34$ s, η ζήτηση καυσίμου ισορροπεί σε τιμή λίγο χαμηλότερη από την ονομαστική, μιας και στο χρονικό διάστημα αυτό, παρότι η συχνότητα έχει σταθεροποιηθεί και το φορτίο είναι ονομαστικό, ένα μέρος της παραγωγής οφείλεται στον πεπιεσμένο αέρα που προέρχεται από το αεροφυλάκιο, με αποτέλεσμα να απαιτείται μικρότερη ροή καυσίμου για την παραγωγή ίδιας ποσότητας ισχύος. Στο χρονικό διάστημα 34 s $<$ t $<$ 40 s, όπου λαμβάνει χώρα η ομαλή σβέση του αεροφυλακίου, το καύσιμο αρχίζει να αυξάνει σταδιακά, υποκαθιστώντας το μέρος της παραγωγής που μέχρι πρότινος κάλυπτε το αεροφυλάκιο. Τέλος, από εκεί και μετά, ο αεριοστρόβιλος έχει αναλάβει πλήρως το φορτίο, με τη ζήτηση καυσίμου να ισορροπεί στη μόνιμη τιμή του 100%, όση είναι δηλαδή και η ανά μονάδα ηλεκτρική ισχύς.



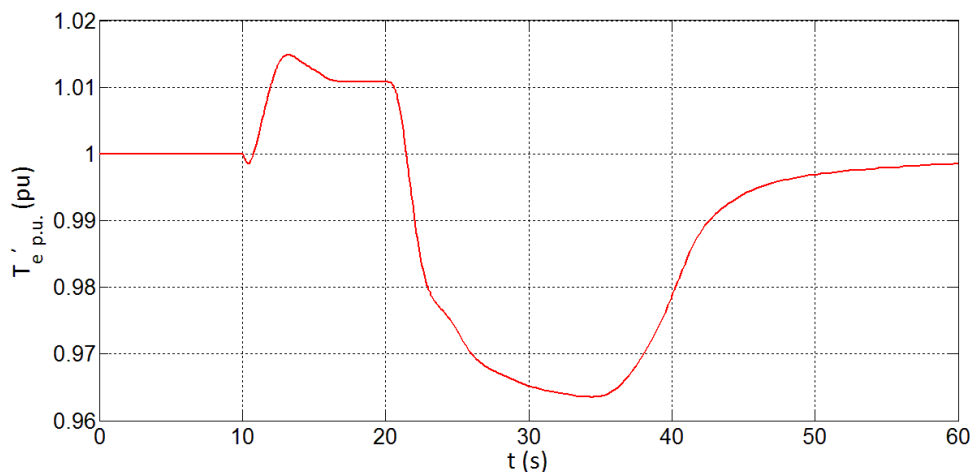
Σχήμα 5.23 : Σήματα ρύθμισης της ροής καυσίμου

Όσον αφορά το σήμα ελέγχου υπερθέρμανσης T_c , αρχίζει να μειώνεται τη στιγμή $t = 12$ s, όπως παρατηρούμε στο Σχήμα 5.23. Αντιλαμβανόμαστε λοιπόν πως το αεροφυλάκιο έδωσε τη δυνατότητα 2 δευτερολέπτων στο σύστημα, προτού ενεργοποιηθεί ο έλεγχος υπερθέρμανσης, μειώνοντας τη θερμοκρασία εξόδου του θαλάμου καύσης. Επίσης, η τιμή του σήματος T_c παρότι μειώθηκε από την αρχική τιμή του 110%, δεν έπεσε πολύ, μιας και την ανύψωση της θερμοκρασίας την αντισταθμίζει κατά τη διάρκεια της διαταραχής η επιπλέον ροή μάζας αέρα από το αεροφυλάκιο. Είναι προφανές ότι δίχως το αεροφυλάκιο, ο έλεγχος υπερθέρμανσης θα ενεργοποιούνταν πολύ πιο σύντομα, και το όριο T_c θα έφτανε σε χαμηλότερες τιμές.

Τέλος το σήμα F_d , η πραγματική εντολή καυσίμου δηλαδή που δίνεται στις αντλίες, κατά τη διάρκεια της διαταραχής της ισχύος ακολουθεί το σήμα T_c , επειδή η ζήτηση καυσίμου υπερβαίνει το όριο που θέτει ο έλεγχος υπερθέρμανσης. Στο διάστημα 15 s $<$ t $<$ 20 s, παρότι η ηλεκτρική ισχύς έχει επανέλθει στα αρχικά της επίπεδα, δεν συμβαίνει το ίδιο με τη συχνότητα, με αποτέλεσμα ο ρυθμιστής στροφών να συνεχίζει να ζητάει μεγάλες τιμές ροής καυσίμου, καταλήγοντας και στο διάστημα αυτό η πραγματική εντολή καυσίμου να ισούται με το όριο που θέτει ο βρόχος υπερθέρμανσης. Από εκεί και μετά, η ζήτηση καυσίμου του ρυθμιστή στροφών είναι κάτω του ορίου, συνεπώς η πραγματική εντολή καυσίμου ακολουθεί το σήμα του ρυθμιστή στροφών.

Στο Σχήμα 5.24 παρατίθεται η γραφική παράσταση της μετρούμενης θερμοκρασίας των καυσαερίων $T_{e'_{p.u}}$ σε ανά μονάδα τιμή, συναρτήσει του χρόνου. Σημειώνεται ότι αυτό είναι το σήμα το οποίο εισέρχεται στον έλεγχο υπερθέρμανσης, και ελέγχεται αν είναι άνω του

ορίου (1,01 ανά μονάδα), ενεργοποιώντας τη μείωση του σήματος T_c , ένα εκ των δύο σημάτων που οδηγούν την αντλία καυσίμου. Είναι η ένδειξη εκείνη που υποδεικνύει την υπερθέρμανση ή μη του στροβίλου, και είναι ο βασικός περιοριστικός παράγοντας στην παραγωγή ισχύος άνω της ονομαστικής τιμής της.



Σχήμα 5.24 : Μετρούμενη θερμοκρασία καυσαερίων

Τη χρονική στιγμή $t = 10$ s της προσομοίωσης όπου μόλις έχει συμβεί η διαταραχή, η θερμοκρασία των καυσαερίων (και κατ' επέκταση και της εξόδου του θαλάμου καύσης), σημειώνει μια μικρή απότομη μείωση, ως αποτέλεσμα της άμεσης έγχυσης πεπιεσμένου αέρα από το αεροφυλάκιο. Για τα επόμενα 3 δευτερόλεπτα, η θερμοκρασία αυξάνεται σταδιακά, ενώ την $t = 12$ s ξεπερνά το όριο υπερθέρμανσης (1,01 ανά μονάδα). Αυτός είναι ο λόγος που τη συγκεκριμένη χρονική στιγμή αρχίζει να μειώνεται το όριο T_c και συνεπώς η έγχυση καυσίμου στο θάλαμο καύσης, συνεπάγοντας την αντίστοιχη μείωση της παραγόμενης μηχανικής ισχύος, όπως φάνηκε στο αντίστοιχο σχήμα.

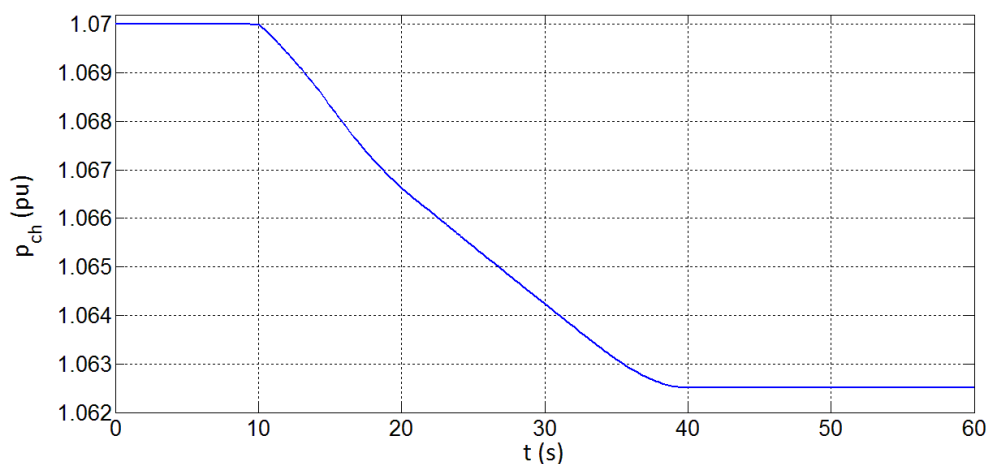
Μετά την μικρή υπερακόνηση που σημειώνεται, η μετρούμενη θερμοκρασία των καυσαερίων σταθεροποιείται γύρω από το όριο του 1,01 ανά μονάδα στο υπόλοιπο διάστημα (13 s - 20 s), πριν η συχνότητα επανέλθει στα ονομαστικά της επίπεδα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός πως πλέον τον έλεγχο του αεριοστροβίλου τον αναλαμβάνει ο βρόχος υπερθέρμανσης.

Από τη χρονική στιγμή $t = 20$ s έως την $t = 34$ s, η θερμοκρασία βαίνει μειούμενη, λόγω της μείωσης της ροής του καυσίμου, δεδομένου ότι η συχνότητα πλέον βρίσκεται κοντά στην ονομαστική της τιμή. Θεωρητικά θα έπρεπε μέσα στο χρονικό διάστημα αυτό η θερμοκρασία να είχε σταθεροποιηθεί σε κάποια τιμή, δεδομένου ότι τόσο οι ροές αέρα όσο και η αντίστοιχη ροή καυσίμου παίρνουν μετά από κάποια στιγμή σταθερή τιμή ($25 < t < 34$ s). Ο λόγος για τον οποίο αυτό δεν συμβαίνει και η θερμοκρασία συνεχίζει να μειώνεται, οφείλεται στο ότι η θερμοκρασία αυτή είναι μετρούμενη, με αποτέλεσμα να υπάρχει χρονική υστέρηση που οφείλεται στη διάταξη μέτρησης. Η χρονική αυτή καθυστέρηση είναι αρκετά μεγάλη, με αποτέλεσμα ενώ η πραγματική θερμοκρασία των καυσαερίων σταθεροποιείται μετά την $t = 25$ s, η διάταξη μέτρησης εξακολουθεί να είναι θερμή, απάγοντας τη θερμότητα σταδιακά.

Για $t = 34$ s, ενώ η μετρούμενη θερμοκρασία των καυσαερίων τείνει να εξισωθεί με την πραγματική, έχοντας απάγει την περίσσεια θερμότητας που συγκρατούσε λόγω της θερμικής αγωγιμότητας της διάταξης μέτρησης, λαμβάνει χώρα η ομαλή σβέση του αεροφυλακίου. Κατά συνέπεια, η ροή αέρα που διέρχεται από το θάλαμο καύσης αρχίζει να μειώνεται σταδιακά, μέχρι την $t = 40$ s όπου η δικλείδα αέρα του αεροφυλακίου έχει κλείσει και η ροή

προερχόμενη από αυτό έχει μηδενιστεί. Στο παραπάνω χρονικό διάστημα λοιπόν, όπως αναμενόταν, η θερμοκρασία αρχίζει να αυξάνει, για να σταθεροποιηθεί μετά τη σβέση του αεροφυλακίου στην μόνιμη τιμή του 1,0 ανά μονάδα. Σημειωτέον ότι στο παραπάνω διάγραμμα δεν φαίνεται η επίτευξη αυτής της τιμής, καθώς η πλήρης επαναφορά της μετρούμενης θερμοκρασίας στο 100% λαμβάνει χώρα μετά το πέρας των 60 δευτερολέπτων της προσομοίωσης, λόγω της χρονικής καθυστέρησης που εισάγει η διάταξη μέτρησης.

Ας εξετάσουμε τι συμβαίνει στην ανά μονάδα πίεση του αεροφυλακίου p_{ch} , που απεικονίζεται στο Σχήμα 5.25. Παρατηρούμε ότι η πίεση του αεροφυλακίου μετά τη διαταραχή αρχίζει να μειώνεται από την αρχική τιμή της (1,07 ανά μονάδα), ως απόρροια του ανοίγματος της δικλείδας αέρα και της επακόλουθης μείωσης της μάζας αέρα που είναι αποθηκευμένη σε αυτό. Στο διάστημα $34 \text{ s} < t < 40 \text{ s}$, ο ρυθμός μείωσης της πίεσης ελαττώνεται, αφού είναι το διάστημα που έχει δοθεί εντολή για την ομαλή σβέση του αεροφυλακίου, με αποτέλεσμα να μειώνεται η ροή μάζας αέρα που εξέρχεται από το αεροφυλάκιο. Τέλος, η πίεση του αεροφυλακίου σταθεροποιείται στη μόνιμη τιμή της, στο 1,0625 ανά μονάδα. Παρατηρούμε ότι η συμπεριφορά της πίεσεως είναι όμοια με αυτή που περιγράφηκε στην προηγούμενη προσομοίωση της παραγράφου 5.3.1, με ουσιαστική διαφορά την χαμηλότερη τελική τιμή που σημειώνει, γεγονός που οφείλεται στην περισσότερη μάζα αέρα που εισήλθε στο θάλαμο καύσης για την αντιμετώπιση της διαταραχής.



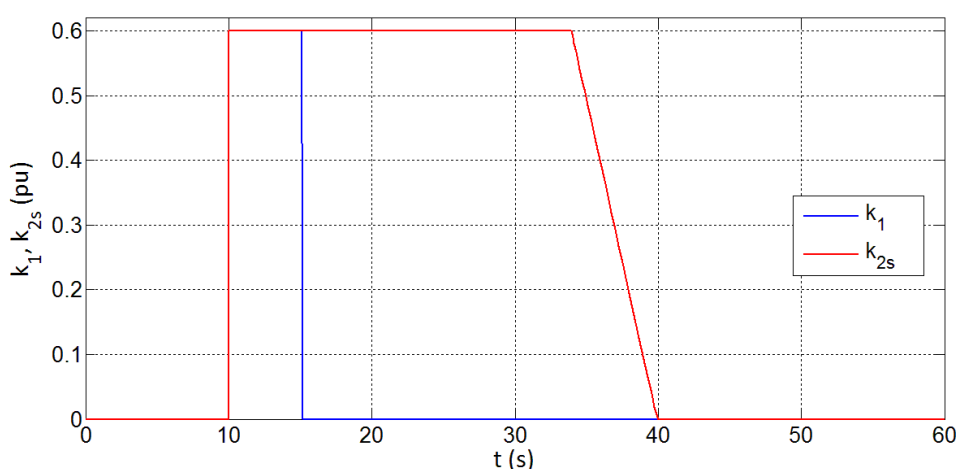
Σχήμα 5.25 : Ανά μονάδα πίεση αεροφυλακίου

Τέλος, θα εξετάσουμε τα σήματα ελέγχου του αεροφυλακίου που αφορούν την ενεργοποίηση και απενεργοποίησή του, καθώς και τα αντίστοιχα σήματα που αφορούν τις εντολές ανοίγματος της δικλείδας αέρα. Έτσι έχουμε το Σχήμα 5.26 που απεικονίζει τα σήματα k_1 , k_{2s} που αντιπροσωπεύουν τις εντολές ανοίγματος της δικλείδας αέρα από τον έλεγχο ισχύος και από τον έλεγχο συχνότητας, αντίστοιχα.

Τη χρονική στιγμή $t = 10 \text{ s}$, ενεργοποιείται τόσο ο έλεγχος ισχύος όσο και ο έλεγχος συχνότητας. Αυτό είναι αναμενόμενο, μιας και η βηματική αύξηση του φορτίου στο 120%, ξεπερνά το όριο του 101% που θέτει ο έλεγχος ισχύος για την παραγόμενη ηλεκτρική ισχύ της γεννήτριας, και ο ρυθμός μεταβολής της συχνότητας ξεπερνά την ελάχιστη τιμή $N_r = -n_{rc} = -0,004$ που θέτει ως όριο ο έλεγχος συχνότητας. Έτσι, ελάχιστο χρόνο μετά την εκδήλωση της διαταραχής, τα σήματα k_1 και k_{2s} μεταβαίνουν στη μέγιστη τιμή που ορίζει το άνοιγμα της δικλείδας (0,6 ανά μονάδα). Την χρονική στιγμή $t = 15 \text{ s}$, η ηλεκτρική ισχύς μεταβαίνει στην αρχική της τιμή (100%), με αποτέλεσμα το σήμα k_1 να μηδενίζεται. Αντιθέτως, το σήμα

k_{2s} εξακολουθεί να παραμένει στη μέγιστη τιμή του, μιας και η συχνότητα είναι εκτός ορίων. Τη στιγμή $t = 23$ s, παρότι ο ρυθμός μεταβολής της συχνότητας έχει προσεγγίσει την τιμή μηδέν, το σήμα k_{2s} θα συνεχίσει να λαμβάνει τη μέγιστη τιμή έως την $t = 34$ s, το απαιτούμενο χρονικό διάστημα δηλαδή για την ανίχνευση της εξάλειψης της διαταραχής. Από $t = 34$ s το άνοιγμα της δικλείδας μειώνεται γραμμικά με το χρόνο, φτάνοντας την $t = 40$ s την τιμή μηδέν. Αυτό είναι αποτέλεσμα της εντολής για την ομαλή σβέση του αεροφυλακίου.

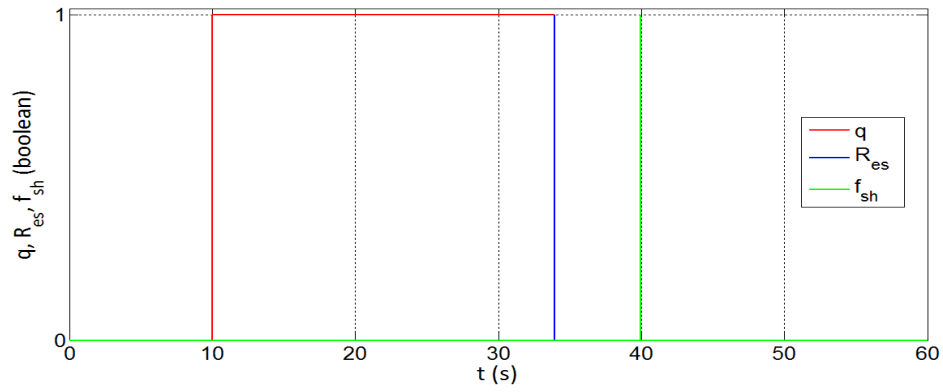
Τέλος, το σήμα k_1 , το οποίο είναι η τελική εντολή που δίνεται στη δικλείδα για το μέγεθος του ανοίγματος και προκύπτει από την άθροιση των k_{2s} και k_1 , ουσιαστικά στο διάστημα 10 s $< t < 34$ s λαμβάνει τη μέγιστη τιμή που επιτρέπεται από το άνοιγμα της δικλείδας (0,6 ανά μονάδα), ενώ από $t = 34$ s και μετά μειώνεται με σταθερό ρυθμό για 6 δευτερόλεπτα, μετά το πέρας των οποίων μηδενίζεται. Αυτό είναι το σήμα το οποίο καθορίζει το πραγματικό άνοιγμα της δικλείδας αέρα, μεταξύ αεροφυλακίου και θαλάμου καύσης.



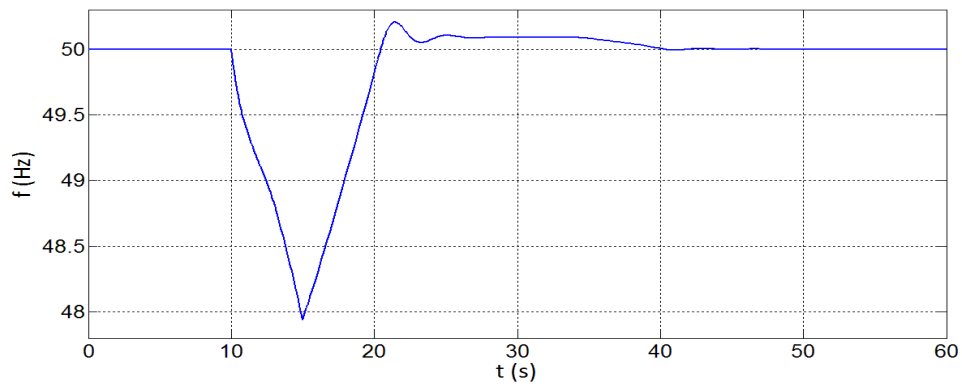
Σχήμα 5.26 : Εντολές ανοίγματος της δικλείδας αέρα

Στο Σχήμα 5.27 φαίνονται τα σήματα q , R_{es} , f_{sh} , f , t_{ch} , k_2 , s_{th} , τα οποία έχουν περιγραφεί στο αντίστοιχο διάγραμμα της παραγράφου 5.3.1 και στην ενότητα 4.3 του Κεφαλαίου 4, και αφορούν τη λειτουργία του ελέγχου υποσυχνότητας.

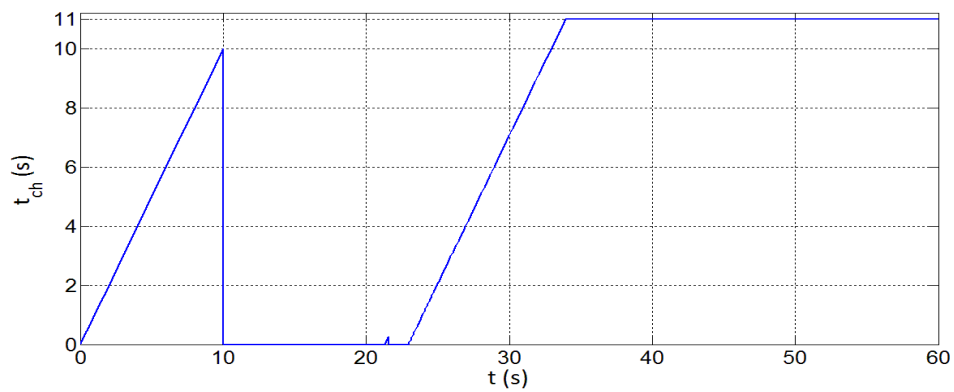
Κατά την εκδήλωση της διαταραχής ($t = 10$ s), το σήμα q μεταβαίνει στην τιμή 1, ως αποτέλεσμα του μεγάλου ρυθμού πτώσης της συχνότητας, ενεργοποιώντας το αεροφυλάκιο μέσω του σήματος k_2 (εντολή ανοίγματος της δικλείδας αέρα), το οποίο λαμβάνει πλέον την μέγιστη τιμή του $K_{sat} = 0,6$ ανά μονάδα. Την ίδια χρονική στιγμή μηδενίζεται και ο μετρητής (σήμα t_{ch}), ο οποίος ανιχνεύει την εξάλειψη της διαταραχής της συχνότητας. Από την χρονική στιγμή $t = 23$ s και μετά, η συχνότητα τείνει να σταθεροποιηθεί, με αποτέλεσμα ο μετρητής να ξεκινάει την καταγραφή του χρόνου όπου ο ρυθμός μεταβολής της συχνότητας έχει περιοριστεί σε πολύ χαμηλή τιμή. Η καταγραφή αυτή συνεχίζεται ως την $t = 34$ s της προσομοίωσης, όπου έχει επιτευχθεί το απαραίτητο χρονικό διάστημα των 11 δευτερολέπτων παραμονής του ρυθμού μεταβολής της συχνότητας εντός του στενού εύρους $\pm N_{rel} = \pm 0,001$. Έτσι βεβαιώνεται η πλήρης εξάλειψη της διαταραχής, με αποτέλεσμα να δίνεται η εντολή για ομαλή σβέση του αεροφυλακίου. Κατ' αυτόν τον τρόπο προκύπτει το σήμα R_{es} , μηδενίζοντας το σήμα k_2 την $t = 34$ s, και ταυτόχρονα ενεργοποιώντας το σήμα s_{th} , το οποίο μεταβαίνει ακαριαία στην τιμή 0,6 τη συγκεκριμένη χρονική στιγμή και αρχίζει να μειώνεται για 6 δευτερόλεπτα, έως ότου τελικά μηδενιστεί τη στιγμή $t = 40$ s. Τότε προκύπτει το σήμα f_{sh} , το οποίο επαναφέρει το σήμα s_{th} στην αρχική του κατάσταση για μεταγενέστερη χρήση του



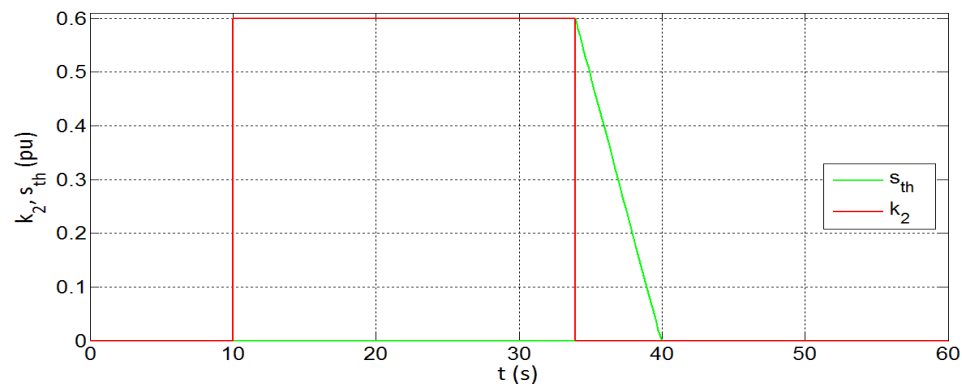
(α) Σήματα ενεργοποίησης – απενεργοποίησης αεροφυλακίου



(β) Απόκριση συχνότητας



(γ) Χρονικό διάστημα όπου ισχύει $|df / dt| < N_{rel}$

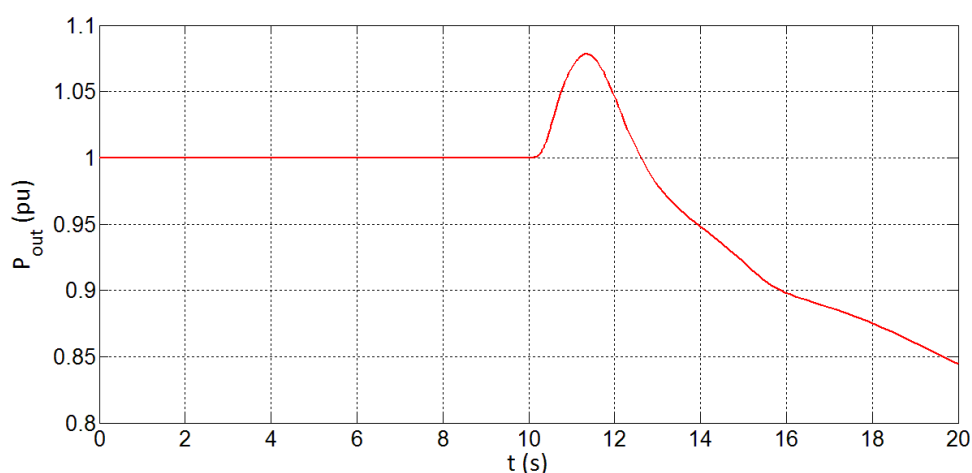


(δ) Εντολές ανοίγματος δικλείδας αέρα από τον έλεγχο συχνότητας

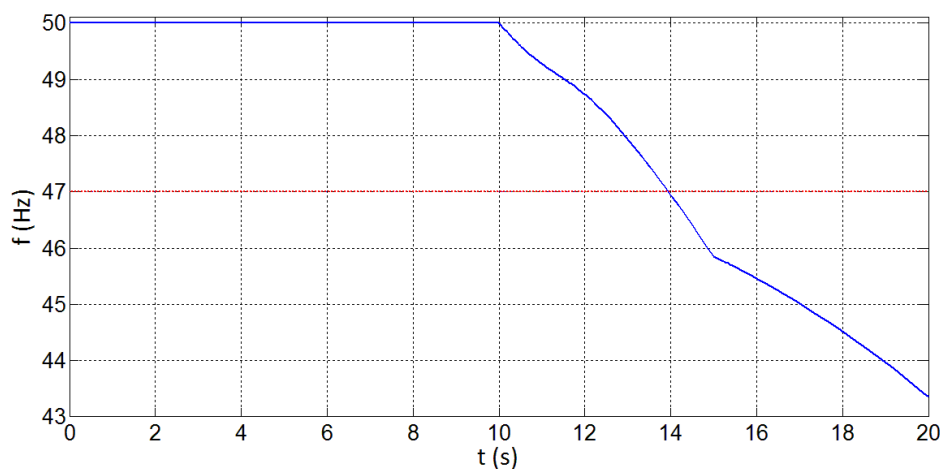
Σχήμα 5.27 : Σήματα ελέγχου αεροφυλακίου

αεροφυλακίου, και σηματοδοτεί την πλήρη σβέση του. Σημειώνεται ότι το σήμα k_{2s} είναι στην πραγματικότητα το σήμα k_2 στο διάστημα 10 s - 34 s, ενώ στο διάστημα 34 s - 40 s αντιστοιχεί στο σήμα s_{th} . Οποιαδήποτε άλλη χρονική στιγμή λαμβάνει την τιμή μηδέν.

Στο σημείο αυτό, αξίζει να εξετάσουμε την απόκριση του αεροστροβίλου στην ίδια διαταραχή, δίχως τη συμβολή του αεροφυλακίου. Για το σκοπό αυτό παρατίθεται το Σχήμα 5.28 το οποίο παρουσιάζει την απόκριση του αεροστροβίλου όσον αφορά την ανά μονάδα παραγόμενη μηχανική ισχύ (P_{out}) καθώς και τη συχνότητα περιστροφής του άξονα (f).



(α) Ανά μονάδα παραγόμενη μηχανική ισχύς



(β) Απόκριση συχνότητας

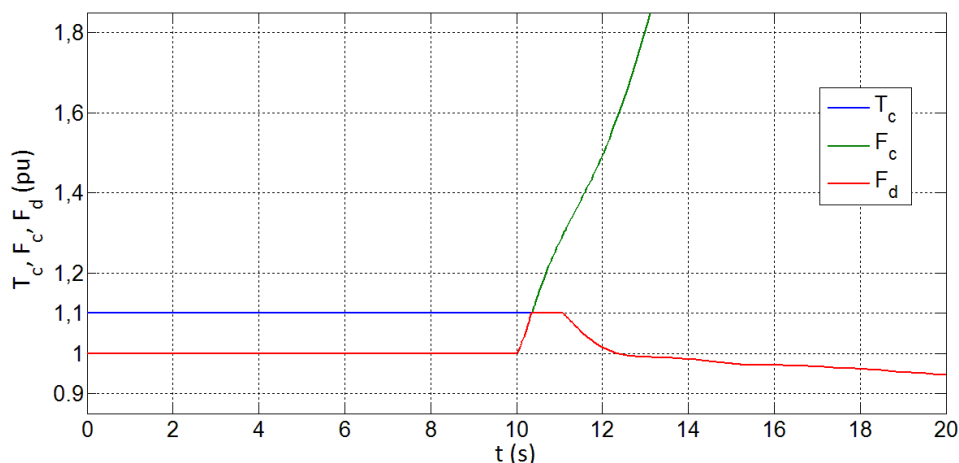
Σχήμα 5.28 : Απόκριση αεροστροβίλου χωρίς αεροφυλάκιο

Από το διάγραμμα της μηχανικής ισχύος φαίνεται ότι η μέγιστη δυνατή παραγωγή που επιτυγχάνει ο αεροστροβίλος είναι 108%. Το σημαντικότερο όμως στοιχείο που εξάγεται είναι ότι το διάστημα όπου η μηχανική ισχύς ξεπερνά τα ονομαστικά της επίπεδα είναι μόλις 2,5 δευτερόλεπτα περίπου ($10\text{ s} < t < 12,5\text{ s}$). Αντιθέτως, όσον αφορά τη διάταξη του αεροστροβίλου με το αεροφυλάκιο, η παραγόμενη μηχανική ισχύς δεν έπεσε κάτω του 108%, παρά μόνο όταν απαιτήθηκε από το ρυθμιστή στροφών. Σημειωτέον επίσης ότι, στην περίπτωση του αεροφυλακίου, η μέγιστη παραγωγή ήταν στο 114% περίπου.

Όσον αφορά τη συχνότητα, παρατηρούμε ότι από την χρονική στιγμή $t = 14\text{ s}$ περίπου, έχει ξεπεράσει το κατώτατο όριο λειτουργίας της μονάδας (47 Hz), με αποτέλεσμα, στην

περίπτωση που ο αεριοστρόβιλος ήταν συνδεδεμένος στο δίκτυο με ενεργούς τους ηλεκτρονόμους προστασίας, την παραπάνω χρονική στιγμή θα είχε τεθεί εκτός λειτουργίας. Είναι αξιοσημείωτο επίσης ότι και ο περιορισμός στη συχνότητα να μην υφίστατο, παρότι η ηλεκτρική ισχύς επανέρχεται στα ονομαστικά επίπεδα την $t = 15$ s, ο αεριοστρόβιλος αδυνατεί να συγκρατήσει τη συχνότητα από εκεί και μετά. Αυτό είναι αποτέλεσμα του διαρκούς κύκλου πτώση συχνότητας - μείωση αέρα από το συμπιεστή - αύξηση θερμοκρασίας - μείωση καυσίμου στο θάλαμο καύσης - μείωση παραγόμενης μηχανικής ισχύος - περαιτέρω πτώση συχνότητας. Αντιλαμβανόμαστε λοιπόν πως η άμεση ώθηση που έδωσε το αεροφυλάκιο στην παραγωγή, καθώς και η μείωση της θερμοκρασίας στην είσοδο του στροβίλου που επέφερε, ήταν η αιτία για τη συγκράτηση της συχνότητας σε επιτρεπτά επίπεδα και της παραγωγής σε τιμές αρκετά υψηλότερες της ονομαστικής.

Για λόγους πληρότητας της ανάλυσης παραθέτουμε και το Σχήμα 5.29, στο οποίο απεικονίζονται τα σήματα T_c , F_c , F_d , τα οποία αφορούν το όριο στην έγχυση καυσίμου που επιβάλλει ο έλεγχος υπερθέρμανσης, τη ζήτηση καυσίμου από το ρυθμιστή στροφών, καθώς και την πραγματική εντολή για καύσιμο που δίνεται στις αντλίες, προκύπτων ως το ελάχιστο μεταξύ των προηγούμενων δύο, αντίστοιχα, σε ανά μονάδα τιμές.



Σχήμα 5.29 : Σήματα ρύθμισης της ροής καυσίμου

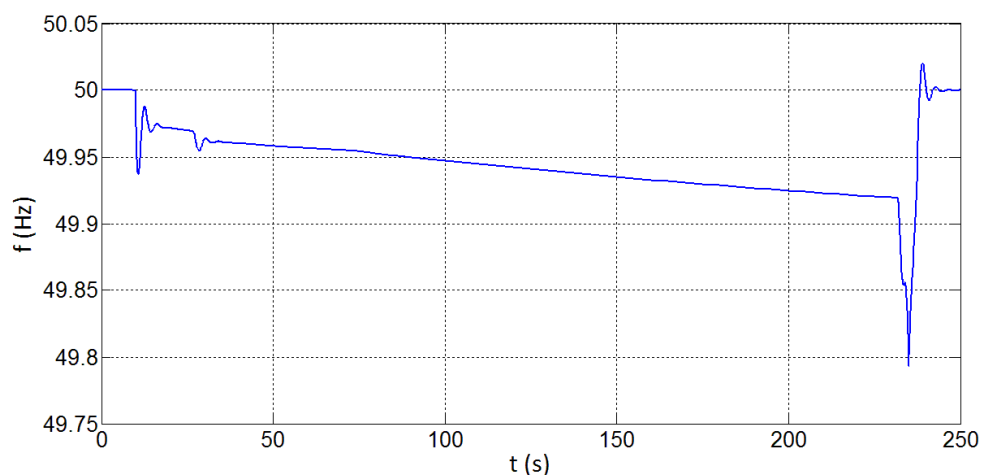
Χαρακτηριστική είναι η τεράστια ζήτηση καυσίμου από το ρυθμιστή στροφών F_c ως αποτέλεσμα της μεγάλης υποσυχνότητας, με την πραγματική εντολή για καύσιμο F_d να μην μπορεί να ακολουθήσει την προηγούμενη, λόγω του γεγονότος πως περιορίζεται από τον έλεγχο υπερθέρμανσης (σήμα T_c) σε τιμές πλησίον, αλλά κάτω της ονομαστικής. Τη στιγμή $t = 12$ s, η τιμή της εντολής έγχυσης προς τις αντλίες F_d έχει πέσει κάτω της ονομαστικής τιμής και βαίνει μειούμενη, με αποτέλεσμα η μηχανική ισχύς να πέφτει ομοίως κάτω από τα ονομαστικά επίπεδα. Έτσι ενισχύεται η πτώση συχνότητας, και τελικώς το σύστημα οδηγείται σε αστάθεια.

Συνοψίζοντας απ' όλα τα παραπάνω, καταλήγουμε ότι σε τόσο μεγάλη διαταραχή ο αεριοστρόβιλος είναι ανίκανος να την αντιμετωπίσει με ίδια μέσα. Έτσι, η συνεισφορά του αεροφυλακίου κρίνεται αναγκαία για την ευστάθεια του αεριοστρόβιλου και γενικότερα του συστήματος όπου είναι συνδεδεμένη η μονάδα.

5.3.3 Βηματική αύξηση του φορτίου στο 105 %

Στην παράγραφο αυτή εξετάζεται η απόκριση της αεριοστροβλικής μονάδας με αεροφυλάκιο σε βηματική αύξηση της ηλεκτρικής ισχύος από το 100% στο 105%, έως ότου εξαντληθεί ο αέρας που υπάρχει στο αεροφυλάκιο. Η απενεργοποίηση του αεροφυλακίου λόγω εξάντλησης του αποθηκευμένου αέρα λαμβάνει χώρα σε χρόνο $t = 231,8$ s, ενώ η διαταραχή προσομοιώνεται στο διάστημα από την $t = 10$ s έως την $t = 235$ s.

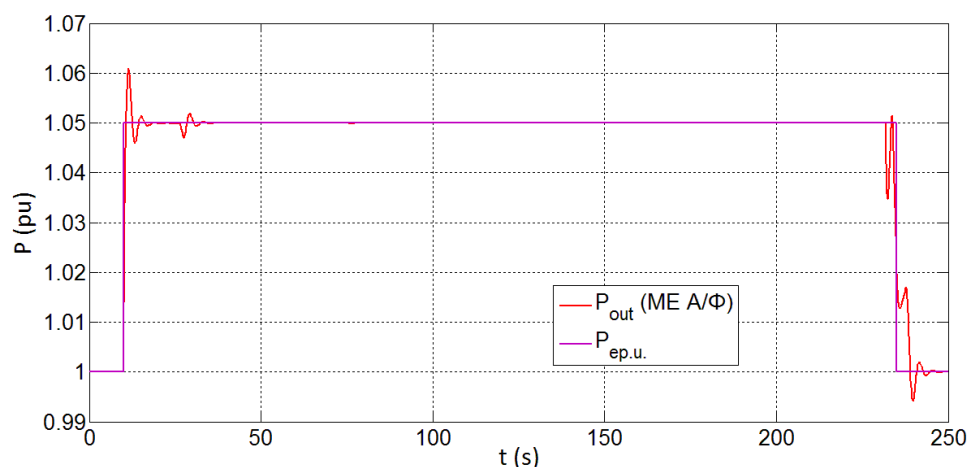
Στο Σχήμα 5.30 απεικονίζεται η συχνότητα της γεννήτριας f συναρτήσει του χρόνου προσομοίωσης.



Σχήμα 5.30 : Απόκριση συχνότητας

Παρατηρούμε ότι σε όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης η συχνότητα παραμένει μονίμως άνω του 49,8 Hz. Συγκεκριμένα, η βηματική αυτή αύξηση της ηλεκτρικής ισχύος κατά 5% άνω της ονομαστικής παραγωγής του αεριοστροβίλου, δεν δημιουργεί μεγάλο πρόβλημα υποσυχνότητας, δεδομένου ότι κατά το διάστημα που το αεροφυλάκιο τροφοδοτεί το θάλαμο καύσης με πεπιεσμένο αέρα ($10 \text{ s} < t < 231,8 \text{ s}$), η ελάχιστη τιμή της συχνότητας που εμφανίζεται είναι 49,92 Hz. Η πτώση κατά περίπου 0,1 Hz επιπλέον οφείλεται στο διάστημα 231,8 s έως 235 s, όπου το αεροφυλάκιο έχει τεθεί εκτός, με την ηλεκτρική ισχύ να είναι ακόμη άνω της ονομαστικής, με αποτέλεσμα ο άξονας να επιβραδύνεται. Αν δηλαδή η ηλεκτρική ισχύς είχε επανέλθει στην αρχική της τιμή ελάχιστα πριν αποσυνδεθεί το αεροφυλάκιο, θα είχαμε συχνότητα ελάχιστης τιμής άνω των 49,9 Hz. Η πρώτη πτώση της συχνότητας που εμφανίζεται (49,94 Hz), οφείλεται στη χρονική καθυστέρηση του ρυθμιστή στροφών να αυξήσει την παραγωγή του αεριοστροβίλου. Οι δύο ταλαντώσεις που ακολουθούν και εμφανίζονται μέσα στα πρώτα 30 δευτερόλεπτα της προσομοίωσης, εξηγούνται από τις αντίστοιχες ταλαντώσεις που περιγράφονται στο διάγραμμα ισχύος-χρόνου του Σχήματος 5.31. Η μείωση της συχνότητας με πολύ μικρό ρυθμό στο διάστημα $30 \text{ s} < t < 231,8 \text{ s}$ δικαιολογείται από την σταδιακή εξάντληση του αέρα που είναι αποθηκευμένος στο αεροφυλάκιο, οδηγώντας στην μείωση της πίεσης που επικρατεί σε αυτό, και κατ' επέκταση στην σταδιακή μείωση της ροής μάζας αέρα που τροφοδοτεί το θάλαμο καύσης. Συνοψίζουμε δηλαδή ότι η συχνότητα κατά τη διάρκεια της διαταραχής παραμένει πολύ κοντά στην ονομαστική της τιμή και δεν τίθεται θέμα αποκοπής φορτίων, πόσο μάλλον αστάθειας της μονάδας.

Στο Σχήμα 5.31 παριστάνεται η ηλεκτρική ισχύς ($P_{ep.u.}$ - μωβ γραμμή) και η αντίστοιχη μηχανική (P_{out} - κόκκινη γραμμή), σε ανά μονάδα τιμές, συναρτήσει του χρόνου προσομοίωσης.



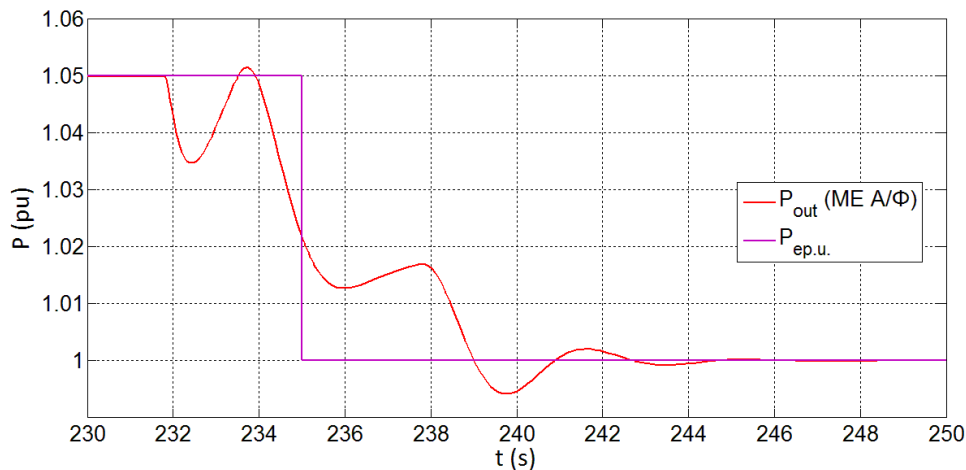
Σχήμα 5.31 : Απόκριση ισχύος αεριοστροβίλου

Τη χρονική στιγμή $t = 10$ s της προσομοίωσης όπου εμφανίζεται η διαταραχή της ηλεκτρικής ισχύος, η μηχανική ισχύς αυξάνεται με μεγάλο ρυθμό λόγω της δράσης του ρυθμιστή στροφών καθώς και εξαιτίας της άμεσης έγχυσης πεπιεσμένου αέρα από το αεροφυλάκιο, σημειώνοντας μέγιστη τιμή στο 106% για $t = 11,4$ s. Μετά από μια μικρή ταλάντωση διάρκειας 3 δευτερολέπτων περίπου λόγω των χρονικών καθυστερήσεων της διάταξης, η μηχανική ισχύς σταθεροποιείται στο 105%, τιμή που αντιστοιχεί στο φορτίο. Στο διάστημα από 26,4 s έως 30 s περίπου, η μηχανική ισχύς αρχικά μειώνεται και μετά αυξάνεται ξανά, με αποτέλεσμα να σταθεροποιηθεί μόνιμα πλέον στην τιμή του 105%. Η μικρή ταλάντωση αυτή της ισχύος οφείλεται στη λογική έλεγχο του αεροφυλακίου, το οποίο αρχικώς μειώνει το άνοιγμα της δικλίδας ως αποτέλεσμα της ομαλής σβέσης του (σταθεροποίηση συχνότητας), και έπειτα το αυξάνει ξανά ως αποτέλεσμα του ελέγχου ισχύος - θερμοκρασίας (η θερμοκρασία εξόδου του θαλάμου καύσης τείνει να αυξηθεί).

Παρατηρούμε ότι όσο το αεροφυλάκιο τροφοδοτεί το θάλαμο καύσης με πεπιεσμένο αέρα, δύναται η παραγωγή μηχανικής ισχύος 5% άνω της ονομαστικής της τιμής σε μόνιμη βάση, έως ότου δηλαδή εξαντληθεί ο αέρας που παρέχει το αεροφυλάκιο. Δεδομένων των χαρακτηριστικών του αεροφυλακίου που προσομοιώθηκε (πεπερασμένη χωρητικότητα), η εξάντλησή του λαμβάνει χώρα τη στιγμή $t = 231,8$ s. Για 221,8 δευτερόλεπτα δηλαδή, ο αεριοστροβίλος παρήγαγε ισχύ 5% άνω της ονομαστικής τιμής. Αυτό είναι ένα πολύ σημαντικό χαρακτηριστικό, δεδομένου ότι στην περίπτωση που είχαμε ακόμη μεγαλύτερο αεροφυλάκιο, θα μιλούσαμε για αύξηση της ισχύος άνω της ονομαστικής τιμής για διαστήματα κάποιων λεπτών. Δεδομένου ότι στην ίδια χρονική κλίμακα λαμβάνει χώρα η ένταξη μιας αεριοστροβιλικής μονάδας στο δίκτυο, αντιλαμβανόμαστε πόσο χρήσιμο είναι αυτό το δεδομένο για ένα σύστημα όπου κάποια μονάδα αποσυνδέεται. Αυτό ισχύει διότι, με την αποσύνδεση κάποιας μονάδας παραγωγής, λόγω βλάβης για παράδειγμα, η ζήτηση της ηλεκτρικής ισχύος από τις υπόλοιπες θα αυξηθεί σε μεγάλο βαθμό [2]. Έτσι, δεδομένης της αεριοστροβιλικής μονάδας με το αεροφυλάκιο, δίνεται η δυνατότητα παροχής ισχύος άνω της ονομαστικής της τιμής για κάποια λεπτά, καλύπτοντας σημαντικό μέρος του ελλείμματος ισχύος που εμφανίζεται στο σύστημα, χρόνο στον οποίο δύναται να ενεργοποιηθεί μια δεύτερη μονάδα αεριοστροβίλου, η οποία τελικώς θα συνδεθεί στο δίκτυο για την ενίσχυση

της παραγωγής. Με λίγα λόγια, μεγάλο αεροφυλάκιο συνεπάγεται την δυνατότητα παροχής ισχύος άνω της ονομαστικής τιμής για μεγάλο χρονικό διάστημα, χρόνος ο οποίος μπορεί να εκμεταλλευθεί για την προετοιμασία και την έναρξη παραγωγής κάποιας άλλης μονάδας.

Ας εξετάσουμε τι συμβαίνει στην παραγωγή του αεριοστροβίλου όταν εξαντληθεί το αεροφυλάκιο. Για το λόγο ότι το Σχήμα 5.31 αναφέρεται στο συνολικό διάστημα της προσομοίωσης, δεν είναι ευκρινής η απόκριση στο διάστημα 230 s - 250 s που θα εξετάσουμε. Έτσι, παρατίθεται το Σχήμα 5.32 που εστιάζει στην περιοχή αυτή.

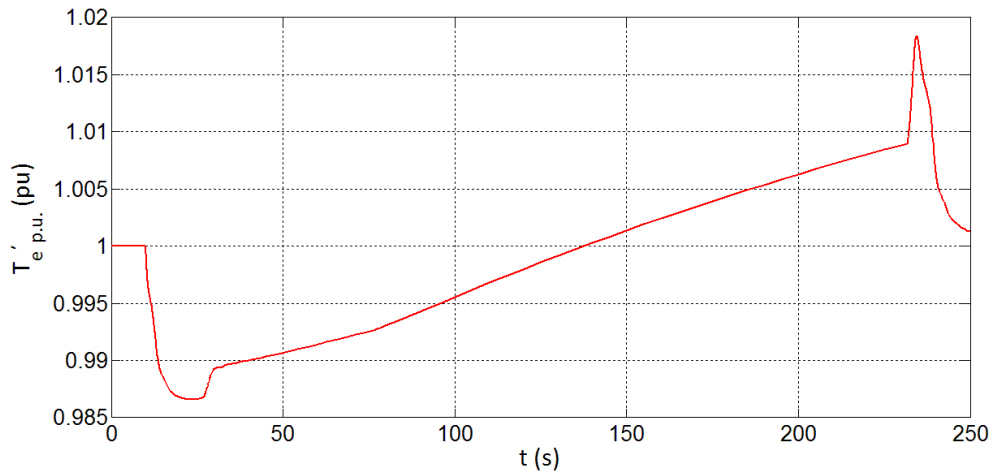


Σχήμα 5.32 : Απόκριση ισχύος στο διάστημα όπου το αεροφυλάκιο τίθεται εκτός λειτουργίας

Την $t = 231,8$ s το αεροφυλάκιο απενεργοποιείται (η πίεσή του πέφτει κάτω από το όριο 1,03 ανά μονάδα), με αποτέλεσμα η μηχανική ισχύς την ίδια χρονική στιγμή να αρχίσει να μειώνεται. Την $t = 232,4$ s, όπου η δικλείδα αέρα έχει κλείσει εντελώς, η μηχανική ισχύς σημειώνει τοπικό ελάχιστο. Τότε, δεδομένου ότι έχει ενεργοποιηθεί ο ρυθμιστής στροφών εγγέοντας επιπλέον ποσότητα καυσίμου στο θάλαμο καύσης, η παραγόμενη ισχύς αρχίζει να αυξάνεται σταδιακά έως την $t = 233,7$ s. Από εκεί και μετά η ισχύς έχει αρχίσει να μειώνεται ως αποτέλεσμα της δράσης του ελέγχου υπερθέρμανσης. Την $t = 235$ s, η ηλεκτρική ισχύς επανέρχεται στα ονομαστικά επίπεδα, με αποτέλεσμα η συχνότητα να αρχίσει να αυξάνει. Το γεγονός αυτό οδηγεί στην αύξηση του αέρα που προέρχεται από το συμπιεστή, δίνοντας τη δυνατότητα της επιπλέον έγχυσης καυσίμου στο θάλαμο καύσης λόγω της μείωσης της θερμοκρασίας που επικρατεί στην έξοδό του, συνεπάγοντας την αύξηση της μηχανικής ισχύος. Από τη στιγμή $t = 238$ s και μετά, η συχνότητα έχει προσεγγίσει τη μόνιμη τιμή της, με αποτέλεσμα η μηχανική ισχύς να μειώνεται, στα επίπεδα που ορίζει το φορτίο. Αφού παρέλθει μια ταλάντωση της ισχύος, αυτή σταθεροποιείται πλέον στο 100% της παραγωγής.

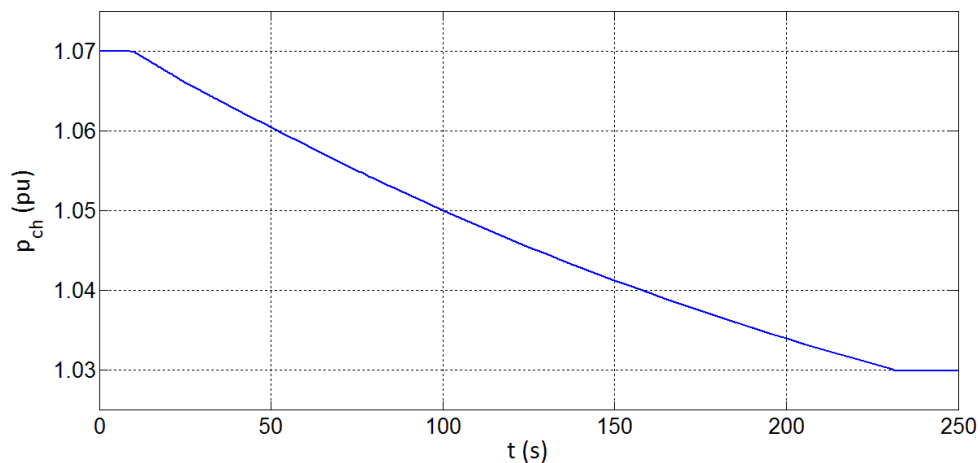
Στο Σχήμα 5.33 παρατίθεται το διάγραμμα της μετρούμενης θερμοκρασίας των καυσαερίων $T_{e'p.u}$ σε ανά μονάδα τιμή, συναρτήσει του χρόνου προσομοίωσης. Με την άμεση έγχυση του πεπιεσμένου αέρα από το αεροφυλάκιο, η θερμοκρασία εξόδου του θαλάμου καύσης και κατ' επέκταση των καυσαερίων στην έξοδο του στροβίλου, πέφτει κάτω της ονομαστικής. Η πτώση αυτή δεν είναι απότομη αλλά σταδιακή (διάρκειας 10 δευτερολέπτων περίπου), διότι όπως έχουμε εξηγήσει, η διάταξη μέτρησης της θερμοκρασίας επιφέρει κάποια χρονική καθυστέρηση. Η θερμοκρασία σταθεροποιείται μέχρι την $t = 27$ s, και μετά αυξάνει από την $t = 27$ s ως την $t = 30$ s προσεγγίζοντας το 99% της ονομαστικής της τιμής. Η αύξηση αυτή οφείλεται στην αρχική μείωση του ανοίγματος δικλείδας αέρα του αεροφυλακίου λόγω αποκατάστασης της συχνότητας, ώσπου την $t=30$ s η δικλείδα έχει ανοίξει πάλι στο μέγιστο λόγω της αύξησης της θερμοκρασίας. Από εκεί και μετά, η

θερμοκρασία των καυσαερίων αυξάνεται με ένα μικρό ρυθμό. Αυτό οφείλεται στην σταδιακή μείωση του αέρα που προέρχεται από το αεροφυλάκιο λόγω της αντίστοιχης μείωσης της πίεσης που επικρατεί σε αυτό, και στην ταυτόχρονη περαιτέρω έγχυση καυσίμου στο θάλαμο καύσης για την υποκατάσταση της ισχύος που μέχρι πρότινος κάλυπτε το κομμάτι της ροής αέρα που μειώθηκε. Την $t = 231,8$ s όπου το αεροφυλάκιο τίθεται εκτός, η θερμοκρασία αυξάνει όπως αναμενόταν, δεδομένου ότι πλέον ο λόγος (καύσιμο/αέρα) είναι μεγαλύτερος από πριν. Τέλος, μόλις η ηλεκτρική ισχύς έχει επανέλθει στα αρχικά επίπεδα, και η συχνότητα έχει προσεγγίσει την ονομαστική της τιμή, η θερμοκρασία των καυσαερίων μειώνεται ως αποτέλεσμα της μικρότερης ζήτησης καυσίμου από το ρυθμιστή στροφών.



Σχήμα 5.33 : Μετρούμενη θερμοκρασία καυσαερίων

Στο Σχήμα 5.34 φαίνεται η ανά μονάδα τιμή της πίεσης του αεροφυλακίου p_{ch} συναρτήσει του χρόνου.

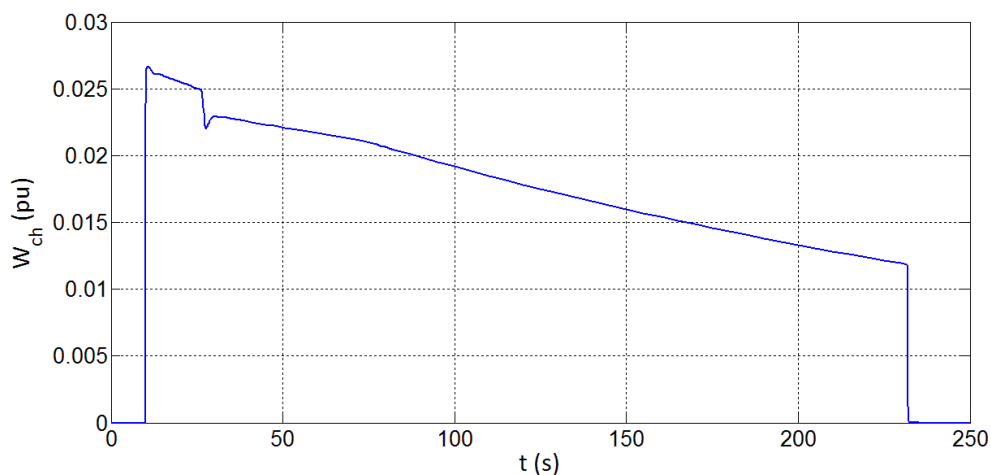


Σχήμα 5.34 : Ανά μονάδα τιμή της πίεσης του αεροφυλακίου

Τη στιγμή $t = 10$ s όπου το αεροφυλάκιο ενεργοποιείται, η πίεση που επικρατεί σε αυτό αρχίζει να μειώνεται με την πάροδο του χρόνου, ως αποτέλεσμα της μείωσης της μάζας αέρα που είναι αποθηκευμένη. Το φαινόμενο αυτό συνεχίζεται έως τη χρονική στιγμή $t = 231,8$ s, όπου η πίεση έχει φτάσει στο κατώτατο όριο λειτουργίας του αεροφυλακίου (1,03 ανά

μονάδα), οπότε η διάταξη τίθεται εκτός λειτουργίας και η πίεση παραμένει μόνιμα στην παραπάνω τιμή.

Στο σημείο αυτό αξίζει να παραθέσουμε το γράφημα της ροής μάζας αέρα W_{ch} που εξέρχεται από το αεροφυλάκιο σε ανά μονάδα τιμή, συναρτήσει του χρόνου προσομοίωσης. Έτσι προκύπτει το Σχήμα 5.35.



Σχήμα 5.35: Ροή αέρα από το αεροφυλάκιο

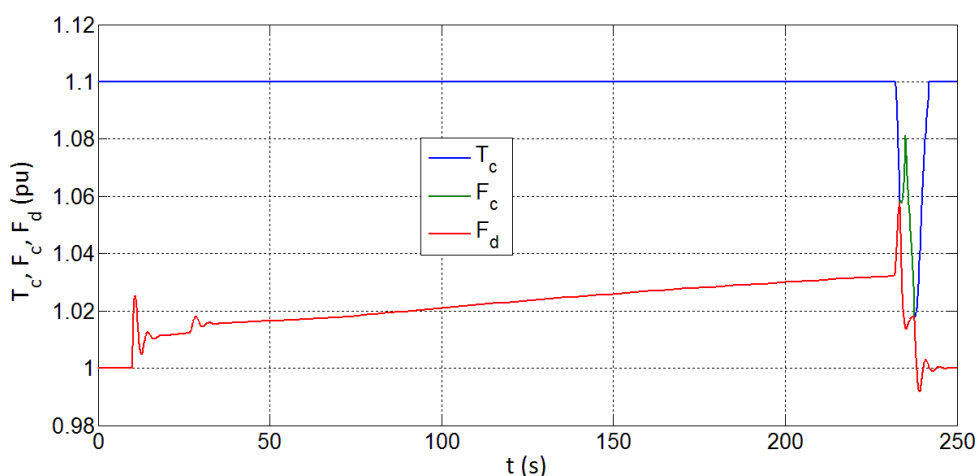
Με την εμφάνιση της διαταραχής και της επακόλουθης ενεργοποίησης του αεροφυλακίου, η ροή αέρα που τροφοδοτεί το θάλαμο καύσης φτάνει το 2,7% της ονομαστικής ροής αέρα του αεριοστροβίλου. Στη συνέχεια η ροή αρχίζει να μειώνεται με αργό ρυθμό εξαιτίας της πτώσης πίεσεως που επικρατεί στο αεροφυλάκιο. Στο διάστημα από $t = 26,4$ s ως $t = 30$ s, η ροή πέφτει αρχικά ελαφρώς και στη συνέχεια αυξάνεται ξανά, ως αποτέλεσμα των δύο σημάτων ανοίγματος της δικλείδας αέρα, τα οποία προέρχονται από τον έλεγχο ισχύος - θερμοκρασίας και από τον έλεγχο συχνότητας. Μετά την πάροδο αυτής της μικρής ταλάντωσης, η ροή αέρα αρχίζει να μειώνεται πάλι με τον ίδιο ρυθμό με πριν, που αντιστοιχεί στο ρυθμό μείωσης της πίεσεως στο αεροφυλάκιο. Από την χρονική στιγμή $t = 231,8$ s και μετά, όπου το αεροφυλάκιο απενεργοποιείται λόγω της χαμηλής πίεσης που επικρατεί σε αυτό, η ροή αέρα μηδενίζεται.

Ας εξετάσουμε τι συμβαίνει με τις εντολές έγχυσης καυσίμου από το ρυθμιστή στροφών F_c , από τον έλεγχο υπερθέρμανσης T_c , και με την τελική εντολή F_d που δίνεται στις αντλίες για έγχυση καυσίμου στο θάλαμο καύσης, παρατηρώντας το Σχήμα 5.36.

Το σήμα T_c παραμένει μέχρι και την $t = 232$ s της προσομοίωσης στην αρχική του τιμή, δηλαδή στο 1,1 ανά μονάδα. Αυτό σημαίνει πως κατά τη διάρκεια της διαταραχής, σε όλο το χρονικό διάστημα που το αεροφυλάκιο ήταν ενεργοποιημένο, ο στρόβιλος δεν υπερθερμάνθηκε. Είναι ευνόητο πως αυτή τη δυνατότητα την έδωσε ο επιπλέον πεπιεσμένος αέρας που εισήλθε στο θάλαμο καύσης από το αεροφυλάκιο. Την στιγμή που το αεροφυλάκιο τίθεται εκτός λειτουργίας, το σήμα T_c αρχίζει να μειώνεται ως αποτέλεσμα της υψηλής τιμής καυσίμου που απαιτεί το φορτίο. Αφού την χρονική στιγμή $t = 235$ s η ηλεκτρική ισχύς επιστρέφει στην αρχική τιμή του 100%, το όριο που θέτει ο έλεγχος υπερθέρμανσης αρχίζει να αυξάνει, με αποτέλεσμα μετά από λίγο χρονικό διάστημα όπου έχει αποκατασταθεί η ισορροπία, να επιστρέφει στην αρχική τιμή του (1,1 ανά μονάδα).

Όσον αφορά τη ζήτηση καυσίμου F_c του ρυθμιστή στροφών, παρατηρούμε μία υπερακόνηση τη στιγμή της διαταραχής, ως απόρροια της προσπάθειας να αυξηθεί η μηχανική ισχύς για τη συγκράτηση της συχνότητας. Στη συνέχεια ισορροπεί σε μία τιμή

υψηλότερη της ονομαστικής, που αντιστοιχεί στο φορτίο που αναλογεί στον αεριοστρόβιλο (ένα μικρό μέρος του φορτίου καλύπτεται από τον πεπιεσμένο αέρα του αεροφυλακίου). Από εκεί και έπειτα, αφού παρέλθει άλλη μία μικρή ταλάντωση εξαιτίας της λειτουργίας του αεροφυλακίου, η ζήτηση καυσίμου αρχίζει να αυξάνει με μικρό ρυθμό. Όπως έχει αναφερθεί, ο ρυθμός αυτός αντιστοιχεί στο ρυθμό μείωσης της ροής αέρα από το αεροφυλάκιο με την πάροδο του χρόνου. Τη στιγμή της απενεργοποίησης του αεροφυλακίου, ο ρυθμιστής στροφών αυξάνει τη ζήτηση καυσίμου, έτσι ώστε να καλύψει το ποσοστό της ισχύος που μέχρι πρότινος κάλυπτε η ροή αέρα από το αεροφυλάκιο. Μετά την επαναφορά της ηλεκτρικής ισχύος στα ονομαστικά επίπεδα και της συχνότητας στα 50 Hz, η ζήτηση καυσίμου επανέρχεται στην αρχική τιμή της (1,0 ανά μονάδα).

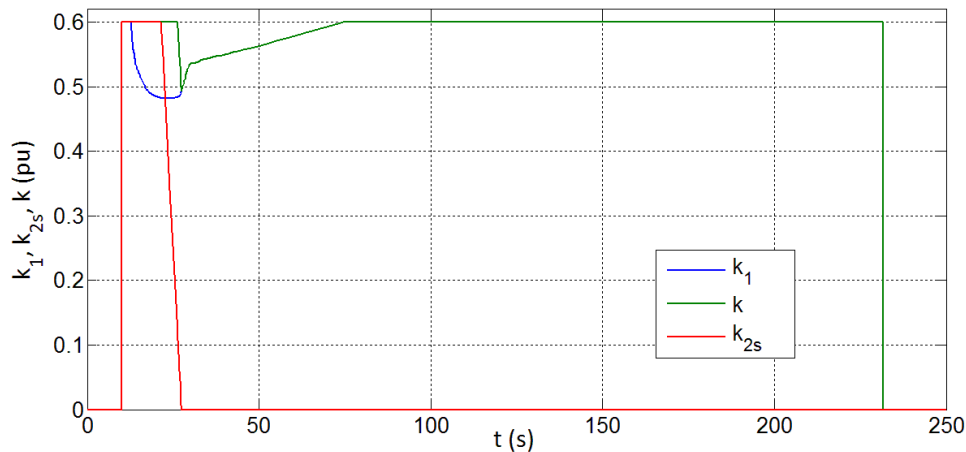


Σχήμα 5.36 : Σήματα ρύθμισης της ροής καυσίμου

Τέλος, ως γνωστόν, η πραγματική εντολή που δίνεται στις αντλίες για έγχυση καυσίμου (F_d) προκύπτει ως το ελάχιστο σήμα μεταξύ των άλλων δύο (T_c , F_c). Καθόλη τη διάρκεια που το αεροφυλάκιο είναι ενεργοποιημένο, το σήμα που δίνεται στις αντλίες ακολουθεί επ' ακριβώς αυτό του ρυθμιστή στροφών, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.36. Όταν το αεροφυλάκιο τεθεί εκτός λειτουργίας, λόγω του ότι το σήμα T_c μειώνεται για την προστασία της διάταξης από υπερθέρμανση, το σήμα F_d περιορίζεται σύμφωνα με το T_c . Μόλις η διαταραχή εξαλείφεται και το σήμα T_c αρχίζει να αυξάνει λόγω της πτώσης της θερμοκρασίας εξόδου του θαλάμου καύσης, το σήμα F_d ταυτίζεται πάλι με το σήμα F_c , ώστε να προσεγγίσει τη μόνιμη τιμή του στο 100%.

Τέλος, θα εξετάσουμε στο Σχήμα 5.37 τη λειτουργία του αεροφυλακίου, παρατηρώντας τα σήματα που οδηγούν τη δικλείδα αέρα εξαιτίας του ελέγχου ισχύος - θερμοκρασίας (k_1) και συχνότητας (k_{2s}), καθώς και το τελικό σήμα (k) που προκύπτει από την άθροιση των άλλων δύο το οποίο είναι το τελικό σήμα που δίνεται στη δικλείδα για το μέγεθος του ανοίγματος.

Λόγω του μεγάλου ρυθμού πτώσης της συχνότητας με την εμφάνιση της διαταραχής ($t = 10$ s), το σήμα k_{2s} μεταβαίνει στην τιμή 0,6, το μέγιστο δηλαδή που ορίζει το άνοιγμα της δικλείδας αέρα. Μετά από λίγα δευτερόλεπτα η συχνότητα αποκαθίσταται, με αποτέλεσμα, αφού έχει παρέλθει το απαιτούμενο χρονικό διάστημα των 11 δευτερολέπτων για την ανίχνευση της σταθεροποίησης της συχνότητας, το σήμα k_{2s} αρχίζει να μειώνεται την $t = 21,5$ s. Έτσι, την χρονική στιγμή $t = 27,5$ s, το σήμα έχει μεταβεί στην τιμή μηδέν.



Σχήμα 5.37 : Εντολές ανοίγματος της δικλείδας αέρα

Το σήμα k_1 που προέρχεται από τον έλεγχο ισχύος, ομοίως μεταβαίνει στη μέγιστη τιμή 0,6 τη χρονική στιγμή $t = 10$ s, ως αποτέλεσμα της βηματικής αύξησης της ηλεκτρικής ισχύος. Την χρονική στιγμή $t = 12,7$ s αρχίζει να μειώνεται, λόγω της μείωσης της θερμοκρασίας των καυσαερίων, για να σταθεροποιηθεί προσωρινά λίγο πιο κάτω από την τιμή 0,5 ανά μονάδα. Μέχρι την χρονική στιγμή $t = 26,4$ s, το συνολικό σήμα k που τελικώς καθορίζει το άνοιγμα της δικλείδας αέρα, βρίσκεται στη μέγιστη τιμή που επιτρέπεται (0,6 ανά μονάδα), μιας και μέχρι τότε ισχύει $k = k_1 + k_{2s} > 0,6$. Από την παραπάνω χρονική στιγμή και μετά, το σήμα k_{2s} μειούμενο οδηγεί στην μείωση του συνολικού σήματος k κάτω από το 0,6. Το φαινόμενο αυτό της μείωσης του σήματος k διατηρείται μέχρι την $t = 27,5$ s, γεγονός που συνεπάγεται τη μείωση του ανοίγματος της δικλείδας και κατά συνέπεια την ελάττωση της ροής αέρα από το αεροφυλάκιο.

Δεδομένης της αυξημένης έγχυσης καυσίμου στο θάλαμο καύσης άνω της ονομαστικής τιμής, η θερμοκρασία που επικρατεί αρχίζει να αυξάνει. Επομένως, ο έλεγχος ισχύος-θερμοκρασίας αυξάνει σταδιακά ξανά το σήμα k_1 έως ότου τελικά ισορροπήσει στη μέγιστη τιμή του. Αντίστοιχα, αυξάνεται και το τελικό σήμα k στην μέγιστη τιμή του ανοίγματος της δικλείδας αέρα. Μέχρι την απενεργοποίηση του αεροφυλακίου, τα σήματα k_1 και k ταυτίζονται, δεδομένου ότι το σήμα k_{2s} έχει πλέον μηδενιστεί. Την $t = 231,8$ s το αεροφυλάκιο τίθεται εκτός λειτουργίας λόγω χαμηλής πίεσης, με αποτέλεσμα τα δύο παραπάνω σήματα να μεταβαίνουν στην τιμή μηδέν. Η αρχική μείωση λοιπόν του σήματος k και εν συνεχεία η αύξησή του, δικαιολογεί την ταλάντωση που εμφανίστηκε στα προηγούμενα διαγράμματα της παραγράφου 5.3.3 στο χρονικό διάστημα από $t = 26,4$ s έως $t = 30$ s.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

Υβριδικό μοντέλο αποθήκευσης και παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με τη μορφή πεπιεσμένου αέρα

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται το μοντέλο GT-CAES του συστήματος αποθήκευσης και παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας υπό μορφή πεπιεσμένου αέρα (Gas Turbine – Compressed Air Energy Storage). Συγκεκριμένα, στην ενότητα 6.1 αναφέρονται οι θερμοδυναμικές σχέσεις που διέπουν τη λειτουργία της μονάδας και παρατίθενται οι αντίστοιχες συναρτήσεις μεταφοράς και διατάξεις ελέγχου. Στην ενότητα 6.2 περιγράφεται ο τρόπος υλοποίησης του συστήματος GT-CAES στο Simulink.

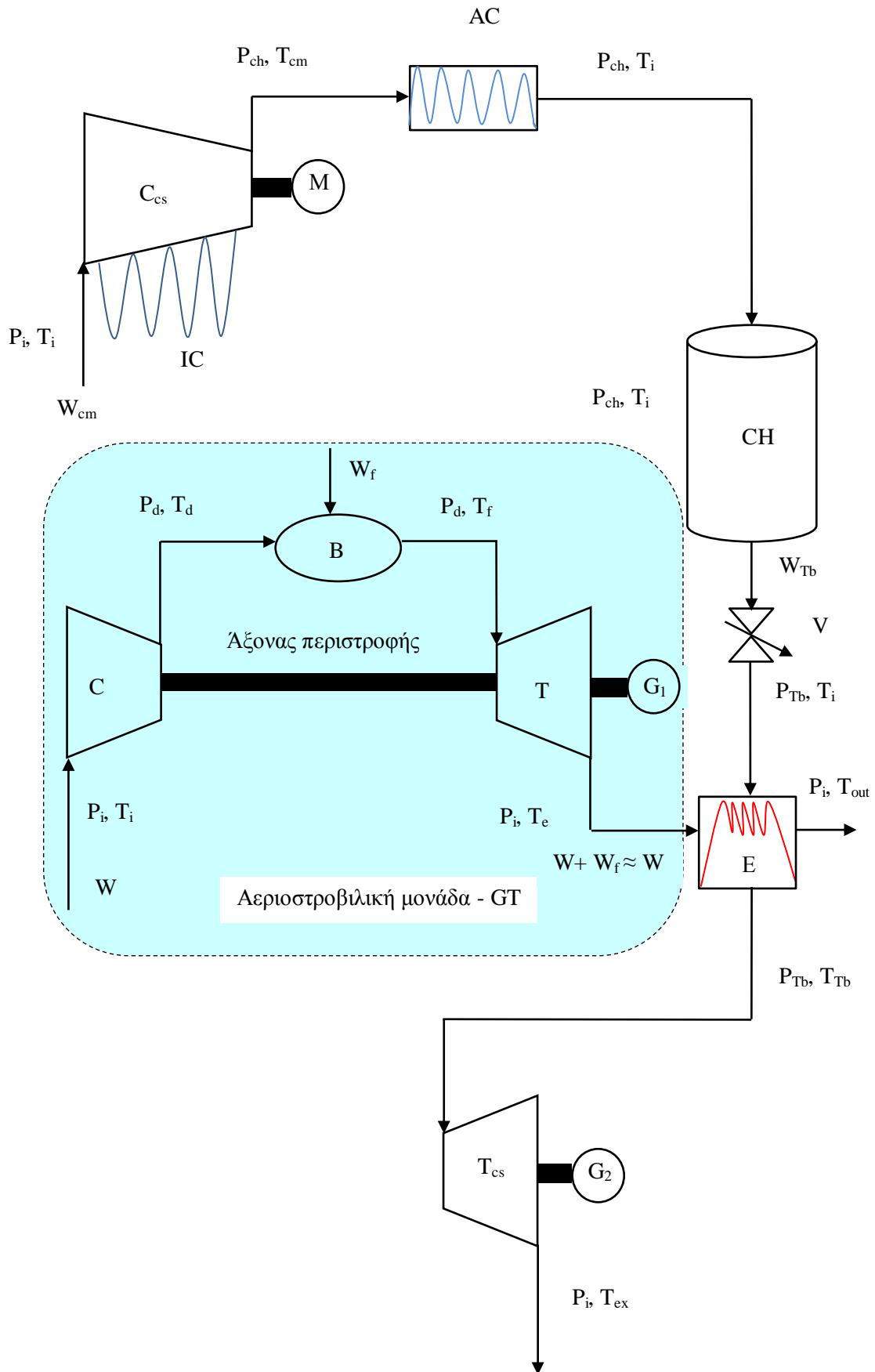
6.1 Περιγραφή μοντέλου GT-CAES

6.1.1 Δομή και λειτουργία μονάδας GT-CAES

Η μονάδα GT-CAES είναι ένα σύστημα CAES δεύτερης γενιάς, το δομικό διάγραμμα του οποίου απεικονίζεται στο Σχήμα 6.1, και περιλαμβάνει μια αεριοστροβιλική μονάδα. Στην ενότητα 3.3 του Κεφαλαίου 3 έχουν περιγραφεί αναλυτικά οι διάφοροι τύποι συστημάτων CAES. Το μοντέλο που παρουσιάζεται στο παρόν Κεφάλαιο είναι παρόμοιο με αυτό στο Σχήμα 3.15 του Κεφαλαίου 3. Οι δομικές συνιστώσες της μονάδας GT-CAES είναι η πλήρης αεριοστροβιλική μονάδα (GT) με μια γεννήτρια (G_1) σε κοινό άξονα περιστροφής, ο ανεξάρτητος συμπιεστής (C_{cs}) με έναν σύγχρονο ηλεκτρικό κινητήρα (M), ενδιάμεσοι ψύκτες (IC) και ένας τελικός ψύκτης (AC), η διάταξη αποθήκευσης του πεπιεσμένου αέρα (CH), ο στρόβιλος εκτόνωσης του αέρα από το αεροφυλάκιο (T_{cs}), η βαλβίδα (V) ελέγχου της ροής αέρα που εξέρχεται από το αεροφυλάκιο και καθορίζει την πίεση του στρόβιλου T_{cs} , ένας εναλλάκτης θερμότητας (E), και μια ηλεκτρική γεννήτρια (G_2) προσαρτημένη στον ίδιο άξονα με τον στρόβιλο T_{cs} . Σημειώνεται ότι οι θερμοκρασίες και οι πιέσεις που εμφανίζονται στο Σχήμα 6.1 είναι σε βαθμούς Kelvin και σε kPa αντίστοιχα, ενώ οι ροές αέρα είναι σε ανά μονάδα τιμές.

Η αρχή λειτουργίας της αεριοστροβιλικής μονάδας του συστήματος GT-CAES διαφέρει από αυτή που αναφέρεται στο Κεφάλαιο 4, λόγω του ότι δεν εγχέεται πεπιεσμένος αέρας στο θάλαμο καύσης. Έτσι οι εξισώσεις, οι διατάξεις ελέγχου και οι συναρτήσεις μεταφοράς που μοντελοποιούν την αεριοστροβιλική μονάδα είναι ίδιες με αυτές του Κεφαλαίου 4, χωρίς όμως την επίδραση του αεροφυλακίου. Συνεπώς η αεριοστροβιλική μονάδα του παρόντος Κεφαλαίου λειτουργεί αυτόνομα παράγοντας περιστροφική ισχύ, η οποία μέσω της γεννήτριας G_1 μετατρέπεται σε ηλεκτρική και εγχέεται στο δίκτυο.

Σε περιόδους παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, η αεριοστροβιλική μονάδα GT είναι ενταγμένη στο δίκτυο παράγοντας ηλεκτρική ισχύ, μέσω της γεννήτριας G_1 . Ως γνωστόν, η θερμοκρασία των καυσαερίων που εξέρχονται από την αεριοστροβιλική μονάδα είναι κατά πολύ υψηλότερη από αυτή του περιβάλλοντος T_f . Σημειώνεται ότι, θεωρούμε πως η ροή του καυσίμου W_f που εγχέεται στο θάλαμο καύσης B της αεριοστροβιλικής μονάδας, δεν



Σχήμα 6.1 : Διάταξη GT-CAES

μεταβάλλει τη συνολική ροή του αέρα. Έτσι γίνεται η παραδοχή ότι η ροή των καυσαερίων ταυτίζεται με τη ροή αέρα W της αεριοστροβιλικής μονάδας. Τα καυσαέρια W εξέρχονται σε πίεση περιβάλλοντος P_i και σε θερμοκρασία T_e , με $T_e \gg T_i$. Αν υπάρχει επαρκής πίεση στο αεροφυλάκιο CH , τότε μέσω της βαλβίδας ελέγχου V εξέρχεται πεπιεσμένος αέρας και εκτονώνεται στον ανεξάρτητο στρόβιλο T_{cs} , συνεισφέροντας στην παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος μέσω της γεννήτριας G_2 . Η προθέρμανση του πεπιεσμένου αέρα γίνεται στον εναλλάκτη θερμότητας E , ο οποίος αποδίδει μέρος της θερμικής ισχύος των καυσαερίων της αεριοστροβιλικής μονάδας στον εξερχόμενο αέρα από το αεροφυλάκιο.

Η μάζα αέρα που είναι αποθηκευμένη στο αεροφυλάκιο είναι σε συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας P_{ch} και T_i αντίστοιχα. Μέσω της βαλβίδας ελέγχου V ρυθμίζεται η πίεση P_{Tb} και η ροή W_{Tb} του αέρα που εκτονώνεται στο στρόβιλο. Η ροή αέρα W_{Tb} που εξέρχεται από το αεροφυλάκιο εισέρχεται στον εναλλάκτη θερμότητας σε πίεση P_{Tb} και σε θερμοκρασία περιβάλλοντος T_i . Στην έξοδο του ανακομιστή θερμότητας ο πεπιεσμένος αέρας διατηρεί την ίδια πίεση P_{Tb} , δεδομένου ότι αμελούμε τις απώλειες πίεσης, ενώ η θερμοκρασία του έχει ανυψωθεί σε τιμή T_{Tb} . Η δεύτερη έξοδος του εναλλάκτη αναφέρεται στα εξερχόμενα από αυτόν καυσαέρια, σε πίεση περιβάλλοντος P_i και σε θερμοκρασία T_{out} . Τέλος, ο προθερμασμένος αέρας εκτονώνεται στον ανεξάρτητο στρόβιλο T_{cs} και εξέρχεται σε πίεση περιβάλλοντος P_i και σε θερμοκρασία T_{ex} .

Σε περιόδους αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας συνδέεται στο δίκτυο ο σύγχρονος κινητήρας M , απορροφώντας ισχύ από το ηλεκτρικό σύστημα. Έτσι παρέχεται η αναγκαία μηχανική ισχύς για την περιστροφή του συμπιεστή C_{cs} . Η επιλογή μιας σύγχρονης μηχανής ως κινητήρα οφείλεται στην ανάγκη για δυνατότητα ρύθμισης της συχνότητας, παραγωγής έργου ισχύος, και λειτουργίας υπό σταθερές στροφές περιστροφής ανεξάρτητα του φορτίου.

Η ροή αέρα W_{cm} εισέρχεται στο συμπιεστή σε συνθήκες περιβάλλοντος, δηλαδή σε πίεση P_i και σε θερμοκρασία T_i . Μεταξύ των βαθμίδων του συμπιεστή παρεμβάλλονται ενδιάμεσοι ψύκτες IC , για την ψύξη του αέρα και τη μείωση του καταναλισκόμενου έργου. Ο αέρας εξέρχεται από το συμπιεστή στην πίεση P_{ch} του αεροφυλακίου και σε θερμοκρασία T_{cm} . Για την περαιτέρω βελτίωση του βαθμού απόδοσης της διαδικασίας της συμπίεσης του αέρα, μεταξύ συμπιεστή και αεροφυλακίου παρεμβάλλεται ένας τελικός ψύκτης AC ο οποίος επαναφέρει τη θερμοκρασία του αέρα σε αυτή του περιβάλλοντος T_i . Λόγω του ότι αμελούμε τις απώλειες πίεσης όπως αναφέρθηκε, η πίεση του αέρα στην έξοδο του τελικού ψύκτη ταυτίζεται με αυτή του αεροφυλακίου P_{ch} .

Σημειώνεται ότι ως αεροφυλάκιο θεωρούμε μια μεγάλη εγκατάσταση αποθήκευσης του πεπιεσμένου αέρα όπως αυτές που αναφέρθηκαν στο Κεφάλαιο 3, δηλαδή σπήλαια άλατος, υπόγεια βραχώδη σπήλαια, εγκαταλελειμμένα ανθρακωρυχεία, μεγάλα υπέργεια συστήματα αποθήκευσης αέρα κτλ. Αντιθέτως, στο Κεφάλαιο 4, ως αεροφυλάκιο θεωρήσαμε μια μικρή δεξαμενή αέρα με περιορισμένη αποθηκευτική ικανότητα, δεδομένου ότι χρησιμοποιείται σε μεταβατικά φαινόμενα και όχι στην κανονική λειτουργία της αεριοστροβιλικής μονάδας. Η μονάδα GT - $CAES$ του παρόντος Κεφαλαίου απαιτεί μεγάλη αποθηκευτική ικανότητα του αεροφυλακίου, δεδομένου ότι προορίζεται για την αποθήκευση ενέργειας σε περιόδους υψηλής αιολικής παραγωγής και για την τροφοδότηση της αιχμής του φορτίου, φαινόμενα που διαρκούν μερικές ώρες στη διάρκεια της ημέρας.

Στις παραγράφους που ακολουθούν περιγράφεται αναλυτικά η κάθε συνιστώσα της μονάδας GT - $CAES$ και παρατίθενται οι βασικές σχέσεις που τις μοντελοποιούν.

6.1.2 Αεροφυλάκιο (CH)

Το μοντέλο του αεροφυλακίου της μονάδας GT-CAES είναι ίδιο με αυτό που αναπτύχθηκε στο Κεφάλαιο 4, με τη διαφορά ότι έχει δύο εισόδους, και φαίνεται στο Σχήμα 6.2. Η πρώτη είσοδος αναφέρεται στην εισερχόμενη ροή μάζας αέρα από το συμπιεστή W_{cm} σε ανά μονάδα τιμή ως προς την ονομαστική ροή αέρα \dot{m}_{C0} του συμπιεστή (kg/s), ενώ η δεύτερη αφορά την εξερχόμενη ροή μάζας αέρα που εκτονώνεται στο στρόβιλο W_{Tb} σε ανά μονάδα τιμή ως προς την ονομαστική ροή αέρα \dot{m}_{T0} του στρόβιλου (kg/s).

Η ονομαστική ροή αέρα του συμπιεστή \dot{m}_{C0} και του στρόβιλου \dot{m}_{T0} διαφέρουν στη γενική περίπτωση, καθότι εξαρτώνται από την ονομαστική ισχύ των διατάξεων οι οποίες συνήθως είναι διαφορετικές. Η ονομαστική ισχύς του συμπιεστή εξαρτάται από τη μέγιστη αναμενόμενη αιολική ισχύ που πρόκειται να απορροφάται και τη χρονική διάρκεια της αποθήκευσης, ενώ η ονομαστική ισχύς του στρόβιλου σχετίζεται με τη διάρκεια και το μέγεθος της αιχμής του φορτίου, δεδομένου ότι η μονάδα προορίζεται για την αντιμετώπιση των αιχμών.

Η ανά μονάδα ροή αέρα του συμπιεστή ως προς την ονομαστική ροή που συμπίεζει, ορίζεται ως :

$$W_{cm} = \frac{\dot{m}_{cm}}{\dot{m}_{C0}} \quad (6.1)$$

όπου \dot{m}_{cm} η ροή αέρα του συμπιεστή σε kg/s.

Η ανά μονάδα ροή αέρα που εκτονώνεται στο στρόβιλο ως προς την ονομαστική του ροή, είναι :

$$W_{Tb} = \frac{\dot{m}_{Tb}}{\dot{m}_{T0}} \quad (6.2)$$

όπου \dot{m}_{Tb} η ροή αέρα του στρόβιλου σε kg/s.

Για τη μοντελοποίηση του αεροφυλακίου, θεωρούμε ως βασική ροή την ονομαστική ροή του στρόβιλου. Έτσι, η ανά μονάδα ροή αέρα του συμπιεστή W'_{cm} ως προς την ονομαστική ροή του στρόβιλου ορίζεται ως :

$$W'_{cm} = W_{cm} \frac{\dot{m}_{C0}}{\dot{m}_{T0}} \quad (6.3)$$

Η ανά μονάδα τιμή της πίεσης p_{ch} στο αεροφυλάκιο είναι :

$$p_{ch} = \frac{P_{ch}}{P_{ch0}} \quad (6.4)$$

όπου P_{ch} η επικρατούσα πίεση του αεροφυλακίου και P_{ch0} η ονομαστική πίεση λειτουργίας του σε kPa.

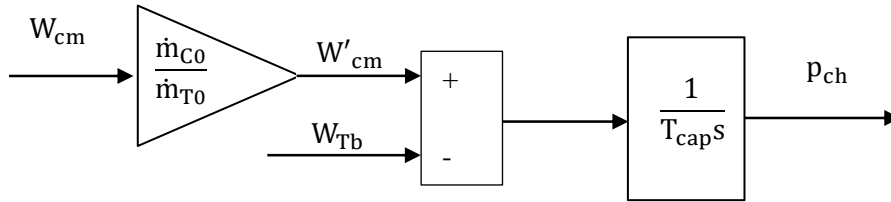
Συνεπώς, η διαφορική εξίσωση της ανά μονάδα πίεσης που επικρατεί στο αεροφυλάκιο δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$T_{cap} \dot{p}_{ch} = W'_{cm} - W_{Tb} \quad (6.5)$$

με

$$T_{cap} = \frac{VP_{ch0}}{RT\dot{m}_{T0}} \quad (6.6)$$

όπου T_{cap} η χρονική σταθερά του αεροφυλακίου σε s, T η θερμοκρασία που επικρατεί στο αεροφυλάκιο σε °K, R η σταθερά του αέρα σε kJ/(kg°K) και V ο όγκος του αεροφυλακίου σε m^3 .



Σχήμα 6.2 : Διάταξη υπολογισμού της πίεσης του αεροφυλακίου

Η πίεση του αεροφυλακίου δεν πρέπει να υπερβαίνει το όριο αντοχής της κατασκευής P_{ch0} . Για το σκοπό αυτό χρειάζεται ρύθμιση που να αναλαμβάνει να διατηρεί την πίεση κάτω από τη μέγιστη τιμή P_{ch0} (1,0 ανά μονάδα). Σε περιπτώσεις λοιπόν όπου το αεροφυλάκιο φορτιστεί πλήρως με πεπιεσμένο αέρα, τότε ο συμπιεστής σταματάει να λειτουργεί και η πίεση της διάταξης παραμένει στη μέγιστη τιμή P_{ch0} .

Το κάτω όριο της πίεσης του αεροφυλακίου οφείλεται στην αρχή λειτουργίας των μονάδων CAES. Όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 3, η ελάχιστη πίεση λειτουργίας των εγκαταστάσεων αποθήκευσης πεπιεσμένου αέρα πρέπει να υπερβαίνει την ονομαστική πίεση του στροβίλου P_{Tb0} . Αυτό συμβαίνει διότι, αν η πίεση του αεροφυλακίου γίνει μικρότερη από την ονομαστική πίεση του στροβίλου, τότε η μονάδα CAES δεν θα έχει τη δυνατότητα παραγωγής ονομαστικής ισχύος. Όσο ελαττώνεται περαιτέρω η επικρατούσα πίεση της αποθήκης αέρα, τόσο θα μειώνεται η δυνατότητα ρύθμισης της παραγόμενης ισχύος. Συμπερασματικά, για λόγους αξιοπιστίας της μονάδας, η ελάχιστη πίεση λειτουργίας του αεροφυλακίου επιλέγεται ως P_{min} σε kPa, με $P_{min} > P_{Tb0}$. Σε ανά μονάδα τιμή λοιπόν, το κάτω όριο της πίεσης ορίζεται ως :

$$p_{min} = \frac{P_{min}}{P_{ch0}} \quad (6.7)$$

Συνεπώς, όταν η πίεση του αεροφυλακίου P_{ch} τείνει να γίνει μικρότερη από το όριο P_{min} τότε η βαλβίδα (V) κλείνει αυτόματα.

Σημειώνεται ότι για την εξαγωγή της σχέσης (6.5) έγινε η παραδοχή ότι η θερμοκρασία που επικρατεί στο αεροφυλάκιο είναι σταθερή και ίση με αυτή του περιβάλλοντος. Στην πραγματικότητα, η συσσώρευση μάζας αέρα μέσω της λειτουργίας της συμπίεσης αυξάνει τη θερμοκρασία του αέρα. Δηλαδή, ακόμη και στην τέλεια ισόθερμη συμπίεση όπου η θερμοκρασία του εισερχόμενου αέρα ταυτίζεται με αυτή του περιβάλλοντος, η θερμοκρασία του αέρα της εγκατάστασης αποθήκευσης αυξάνει με την εισροή αέρα στο αεροφυλάκιο. Αντίθετα, η μείωση της αποθηκευμένης μάζας αέρα σε περιόδους λειτουργίας του στροβίλου, συνεπάγεται την ελάττωση της θερμοκρασίας. Η πραγματική θερμοδυναμική συμπεριφορά

μιας εγκατάστασης αποθήκευσης του αέρα (ένα σπήλαιο άλατος) αναλύεται στο [39]. Όπως αναφέρεται στο Κεφάλαιο 3, στις υπόγειες εγκαταστάσεις αποθήκευσης του πεπιεσμένου αέρα (συνήθως σπήλαια), ο αέρας ανταλλάσει θερμότητα με τα τοιχώματα του σπηλαίου, με αποτέλεσμα η θερμοκρασία του να διατηρείται πλησίον της θερμοκρασίας των τοιχωμάτων, η οποία με τη σειρά της είναι παρόμοια με τη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Στα υπέργεια συστήματα αποθήκευσης, οι σωλήνες έρχονται σε επαφή με τον ατμοσφαιρικό αέρα, οπότε η θερμοκρασία του αποθηκευμένου αέρα είναι ομοίως πλησίον της θερμοκρασίας περιβάλλοντος. Συμπερασματικά, η παραδοχή ότι η θερμοκρασία που επικρατεί στο αεροφυλάκιο είναι σταθερή και ίση με αυτή του περιβάλλοντος επιφέρει μικρές αποκλίσεις από τα πραγματικά δεδομένα.

6.1.3 Ανεξάρτητος συμπίεστης (C_{cs})

Ο αέρας εισέρχεται στο συμπίεστη C_{cs} σε συνθήκες περιβάλλοντος, δηλαδή σε θερμοκρασία T_i (°K) και σε πίεση P_i (kPa). Όπως εξηγήθηκε στο Σχήμα 6.1, μεταξύ των βαθμίδων του συμπίεστη παρεμβάλλονται ενδιάμεσοι ψύκτες, και στην έξοδό του υπάρχει ένας τελικός ψύκτης που επαναφέρει τη θερμοκρασία του αέρα στην τιμή περιβάλλοντος. Για λόγους απλότητας δεν μοντελοποιούνται οι ψύκτες, αλλά γίνεται η θεώρηση ότι η συμπίεση είναι μια ισόθερμη διαδικασία.

Σύμφωνα με την παραπάνω παραδοχή, η ροή αέρα \dot{m}_{cm} (kg/s) που συμπιέζει ο συμπίεστης εξέρχεται από αυτόν σε θερμοκρασία περιβάλλοντος T_i και στην πίεση του αεροφυλακίου P_{ch} (kPa). Έτσι, η ισχύς P_{mc} (kW) που καταναλώνει ο συμπίεστης δίνεται κατά προσέγγιση από την παρακάτω σχέση :

$$n_c P_{mc} = \dot{m}_{cm} R T_i \ln\left(\frac{P_{ch}}{P_i}\right) \quad (6.8)$$

όπου n_c ο βαθμός απόδοσης της συμπίεσης.

Η ονομαστική ισχύς (kW) του συμπίεστη P_{mc0} προκύπτει ως :

$$n_c P_{mc0} = \dot{m}_{c0} R T_i \ln\left(\frac{P_{ch0}}{P_i}\right) \quad (6.9)$$

Διαιρώντας κατά μέλη τις σχέσεις (6.8) και (6.9), προκύπτει ότι η ανά μονάδα καταναλισκόμενη ισχύς p_{mc} του συμπίεστη είναι :

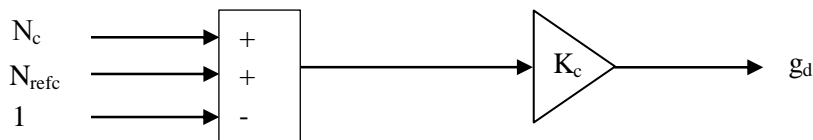
$$p_{mc} = W_{cm} \frac{\ln\left(\frac{P_{ch}}{P_i}\right)}{\ln\left(\frac{P_{ch0}}{P_i}\right)} \quad (6.10)$$

6.1.4 Διατάξεις ελέγχου ανεξάρτητου συμπίεστη C_{cs}

Ο συμπίεστης C_{cs} της μονάδας GT-CAES διαθέτει δυνατότητα ρύθμισης της καταναλισκόμενης ισχύος μέσω της μεταβολής της ροής αέρα που συμπιέζει. Η ρύθμιση της ροής αέρα επιτυγχάνεται μέσω των πτερυγίων εισόδου, τα οποία έχουν μεταβλητό άνοιγμα.

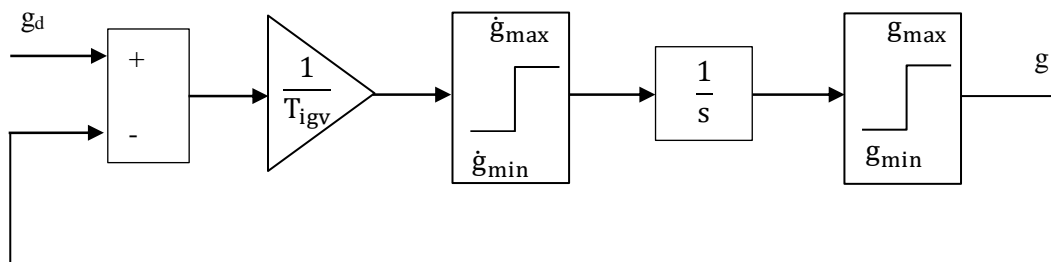
Σε περιόδους αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας, ο συμπιεστής μπορεί να συνεισφέρει στη ρύθμιση συχνότητας με κατάλληλη μεταβολή του ανοίγματος των πτερυγίων. Στο Σχήμα 6.3 απεικονίζεται η διάταξη ρύθμισης των πτερυγίων.

Συμβολίζουμε ως N_c την ανά μονάδα ταχύτητα περιστροφής του συμπιεστή, η οποία ταυτίζεται με την ανά μονάδα ταχύτητα περιστροφής του αντίστοιχου σύγχρονου ηλεκτρικού κινητήρα M , διότι και οι δύο διατάξεις είναι συνδεδεμένες στον ίδιο άξονα περιστροφής. Το σφάλμα της συχνότητας ($\Delta N_c = N_c - 1$) πολλαπλασιάζεται με ένα αναλογικό κέρδος K_c . Στην έξοδο του ρυθμιστή προκύπτει η επιθυμητή τιμή του ανοίγματος g_d των πτερυγίων εισόδου του συμπιεστή σε ανά μονάδα τιμή. Το σήμα N_{refc} αφορά την αρχική τιμή του ανοίγματος των πτερυγίων και προκύπτει από την αρχικοποίηση του μοντέλου, με βάση την αρχική καταναλισκόμενη ισχύ του συμπιεστή. Όταν ο συμπιεστής καταναλώνει ηλεκτρική ισχύ, τότε το σήμα g_d διαμορφώνεται με βάση την απόκλιση της συχνότητας από την ονομαστική της τιμή (1,0 ανά μονάδα). Έτσι σε περιπτώσεις υποσυχνότητας, το σφάλμα $\Delta N_c = N_c - 1$ είναι αρνητικό, με αποτέλεσμα να δίνεται σήμα για τη μείωση του ανοίγματος των πτερυγίων εισόδου. Η μείωση του ανοίγματος των πτερυγίων συνεπάγεται την μείωση της ροής μάζας αέρα και κατ' επέκταση την μείωση της καταναλισκόμενης ισχύος του συμπιεστή. Αντίθετα, σε περιπτώσεις υπερσυχνότητας, το σφάλμα $\Delta N_c = N_c - 1$ είναι θετικό, με αποτέλεσμα να δίνεται σήμα για την αύξηση του ανοίγματος των πτερυγίων εισόδου. Η αύξηση του ανοίγματος των πτερυγίων συνεπάγεται την αύξηση της ροής μάζας αέρα και κατ' επέκταση την αύξηση της καταναλισκόμενης ισχύος του συμπιεστή. Δεδομένου ότι η υπερσυχνότητα οφείλεται σε περίσσεια παραγόμενης ισχύος ενώ η υποσυχνότητα σε έλλειμμα ισχύος, η ρύθμιση του ανοίγματος των πτερυγίων μειώνει την απόκλιση της συνολικά παραγόμενης και της συνολικά καταναλισκόμενης ισχύος.



Σχήμα 6.3 : Ρυθμιστής του ανοίγματος των πτερυγίων

Το σήμα ρύθμισης του ανοίγματος των πτερυγίων εισόδου g_d του συμπιεστή εισέρχεται στη διάταξη υπολογισμού της τελικής ανά μονάδας τιμής του ανοίγματος g , η οποία φαίνεται στο Σχήμα 6.4. Η διάταξη αυτή είναι μια συνάρτηση μεταφοράς πρώτης τάξης με σταθερά χρόνου T_{igv} , που μοντελοποιεί τη χρονική καθυστέρηση μεταβολής του ανοίγματος των πτερυγίων. Ο πρώτος περιοριστής αφορά τα όρια του ρυθμού μεταβολής του ανοίγματος των πτερυγίων (\dot{g}_{max} , \dot{g}_{min}), ενώ ο δεύτερος αφορά τα όρια του ανοίγματος (g_{max} , g_{min}).



Σχήμα 6.4 : Μοντέλο οδηγών πτερυγίων εισόδου του ανεξάρτητου συμπιεστή

Η ανά μονάδα τιμή της ροής αέρα W_{cm} που εισέρχεται στο αεροφυλάκιο, δίνεται από την παρακάτω σχέση :

$$W_{cm} = g N_c C_m \quad (6.11)$$

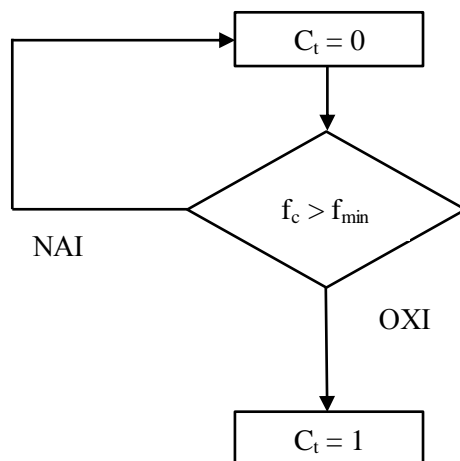
Το σήμα C_m είναι μια λογική μεταβλητή που καθορίζει αν ο συμπιεστής και ο κινητήρας είναι συνδεδεμένοι στο δίκτυο καταναλώνοντας ηλεκτρική ισχύ, και προκύπτει από την αρχικοποίηση του μοντέλου. Συγκεκριμένα, όταν επιλεγθεί $C_m = 0$ τότε ο συμπιεστής είναι εκτός λειτουργίας και η ροή αέρα που συμπιέζει είναι μηδενική, ενώ όταν είναι $C_m = 1$ τότε ο συμπιεστής είναι ενταγμένος στο σύστημα απορροφώντας ηλεκτρική ισχύ.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, ο συμπιεστής συμμετέχει στη ρύθμιση συχνότητας με τη μεταβολή της καταναλισκόμενης ισχύος του, μέσω της αντίστοιχης μεταβολής του ανοίγματος των πτερυγίων. Σε περιπτώσεις όπου η συχνότητα f_c (Hz) του κινητήρα M πέσει αρκετά κάτω από την ονομαστική της τιμή, για να αποφευχθούν οι αποκοπές φορτίων, ο κινητήρας που περιστρέφει το συμπιεστή αποσυνδέεται από το δίκτυο. Έτσι η απόκλιση της παραγόμενης και της καταναλισκόμενης ισχύος που υφίσταται σε μία μεγάλη διαταραχή στο ηλεκτρικό σύστημα (όπως βλάβη κάποιας γεννήτριας), ελαττώνεται ως συνέπεια της διακοπής τροφοδότησης του ηλεκτρικού κινητήρα. Συμπερασματικά, η συνθήκη αποσύνδεσης του ηλεκτρικού κινητήρα από το δίκτυο είναι :

$$f_c < f_{min} \quad (6.12)$$

όπου f_{min} η κρίσιμη συχνότητα αποκοπής του κινητήρα σε Hz.

Ορίζουμε ως C_t το λογικό σήμα ελέγχου της αποσύνδεσης του κινητήρα. Όσο η συχνότητα είναι άνω του προκαθορισμένου ορίου f_{min} , τότε το σύστημα συμπιεστής-κινητήρας παραμένει συνδεδεμένο απορροφώντας ισχύ από το δίκτυο (δεδομένου ότι $C_m = 1$), και το σήμα C_t λαμβάνει την τιμή 0. Όταν η συχνότητα ελαττωθεί κάτω από την τιμή f_{min} , τότε το σήμα $C_t = 1$ και ο κινητήρας αποσυνδέεται. Το λογικό διάγραμμα ελέγχου απεικονίζεται στο Σχήμα 6.5.



Σχήμα 6.5 : Διάγραμμα ελέγχου της αποσύνδεσης του κινητήρα

6.1.5 Ανεξάρτητος στρόβιλος (T_{cs})

Ο αέρας εισέρχεται στο στρόβιλο σε πίεση P_{Tb} (kPa) και θερμοκρασία T_{Tb} ($^{\circ}K$). Αφού εκτονωθεί σε αυτόν, τότε εξέρχεται σε περιβαλλοντική πίεση P_i (kPa) και σε θερμοκρασία T_{ex} ($^{\circ}K$). Η εκτόνωση του αέρα θεωρείται μια αδιαβατική μεταβολή.

Ο λόγος εκτόνωσης του στρόβιλου είναι :

$$r_p = \frac{P_{Tb}}{P_i} \quad (6.13)$$

Για ιδανική ισεντροπική μεταβολή προκύπτει ότι [2]:

$$\frac{T_{Tb}}{T_{ex}'} = (r_p)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} = x \quad (6.14)$$

όπου T_{ex}' η ισεντροπική θερμοκρασία εξόδου και γ η τιμή του λόγου c_p/c_v του αέρα. Σημειώνεται ότι όλες οι θερμοκρασίες αναφέρονται σε βαθμούς $^{\circ}K$.

Η εκτόνωση όμως δεν είναι αντιστρεπτή λόγω των απωλειών του στρόβιλου. Έτσι, για σταθερό συντελεστή θερμοχωρητικότητας c_p , ορίζεται ο εσωτερικός βαθμός απόδοσης του στρόβιλου n_t ως εξής [2]:

$$n_t = \frac{h_{Tb} - h_{ex}}{h_{Tb} - h_{ex}'} = \frac{T_{Tb} - T_{ex}}{T_{Tb} - T_{ex}'} \quad (6.15)$$

όπου :

- h_{ex}' : η ιδανική ενθαλπία εξόδου του αέρα από τον στρόβιλο
- h_{ex} : η πραγματική ενθαλπία εξόδου του αέρα από τον στρόβιλο
- h_{Tb} : η ενθαλπία εισόδου του αέρα στον στρόβιλο
- T_{ex} : η πραγματική θερμοκρασία εξόδου του αέρα από το στρόβιλο

Σύμφωνα με τις σχέσεις (6.14) και (6.15) προκύπτει η ακόλουθη σχέση, η οποία καθορίζει την πραγματική θερμοκρασία εξόδου του αέρα από το στρόβιλο :

$$T_{ex} = T_{Tb} \left[1 - n_t \left(1 - \frac{1}{x} \right) \right] \quad (6.16)$$

όπου $x = (r_p)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}$ όπως προαναφέρθηκε.

Η ισχύς (σε kW) που παράγει ο στρόβιλος είναι :

$$P_{mT} = \dot{m}_{Tb} (h_{Tb} - h_{ex}) = \dot{m}_{Tb} c_p (T_{Tb} - T_{ex}) \quad (6.17)$$

όπου \dot{m}_{Tb} η ροή αέρα που εκτονώνεται στον στρόβιλο σε kg/s, P_{mT} η παραγόμενη ισχύς του στρόβιλου, c_p ο συντελεστής θερμοχωρητικότητας υπό σταθερή πίεση σε kJ/kg $^{\circ}K$.

Η ονομαστική ισχύς P_{mT0} του στρόβιλου (σε kW) είναι :

$$P_{mT0} = \dot{m}_{T0} c_p (T_{Tb0} - T_{ex0}) \quad (6.18)$$

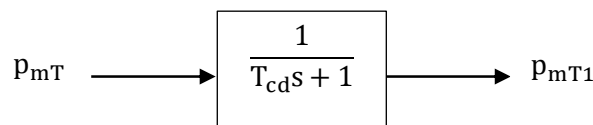
όπου \dot{m}_{T0} η ονομαστική ροή αέρα του στρόβιλου σε kg/s, T_{Tb0} και T_{ex0} οι ονομαστικές θερμοκρασίες εισόδου και εξόδου αντίστοιχα. Διαιρώντας κατά μέλη τις σχέσεις (6.17) και

(6.18), συνυπολογίζοντας τη σχέση (6.2), προκύπτει ότι :

$$P_{mT} = W_{Tb} \frac{(T_{Tb} - T_{ex})}{(T_{Tb0} - T_{ex0})} \quad (6.19)$$

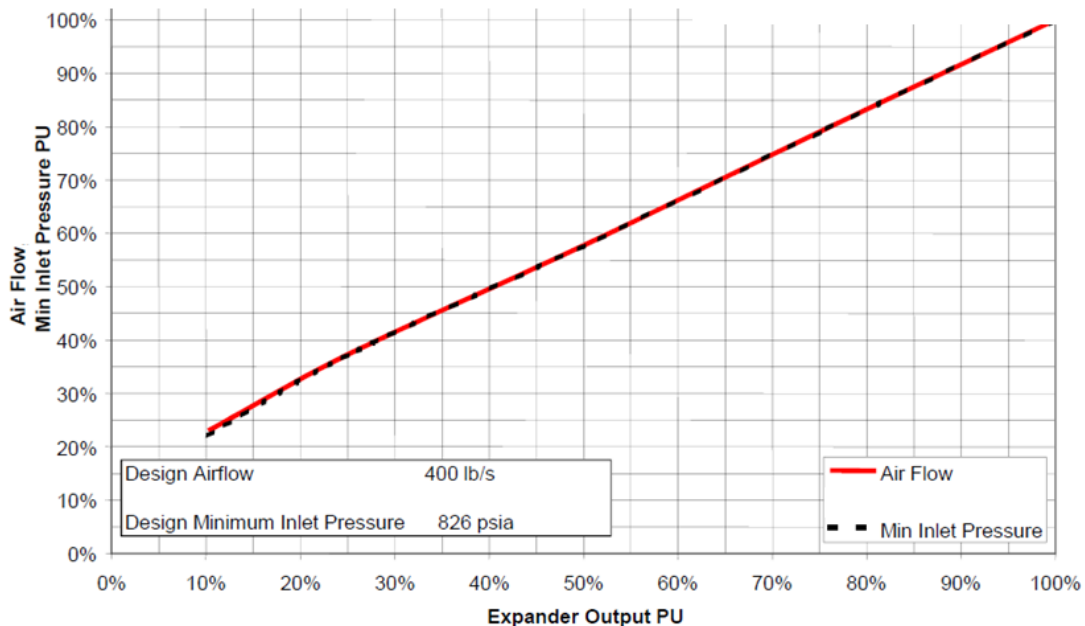
όπου P_{mT} η ανά μονάδα παραγόμενη ισχύς του στροβίλου.

Λόγω της κατανομής της ισχύος σε διάφορες βαθμίδες στροβίλων, καθώς και λόγω της συμπίεστικότητας του αέρα, οποιαδήποτε μεταβολή συντελείται σταδιακά με μια συγκεκριμένη χρονική σταθερά. Η χρονική υστέρηση αυτή εκφράζεται με μια συνάρτηση μεταφοράς 1^{ns} τάξης με σταθερά χρόνου T_{cd} , η οποία φαίνεται στο Σχήμα 6.6. Η είσοδος της διάταξης είναι η υπολογισμένη ανά μονάδα ισχύς P_{mT} από τη σχέση (6.19), και η έξοδος είναι η πραγματική ανά μονάδα ισχύς P_{mT1} που αποδίδεται στον άξονα του στροβίλου.



Σχήμα 6.6 : Πραγματική αποδιδόμενη ισχύς στον άξονα περιστροφής του ανεξάρτητου στροβίλου

Η ροή αέρα και η πίεση του στροβίλου θεωρούνται μεγέθη ανάλογα μεταξύ τους. Το γεγονός αυτό δικαιολογείται αν εξετάσουμε ένα σύστημα CAES που κυκλοφορεί στην αγορά, κατασκευασμένο από την εταιρεία Dresser-Rand, επωνομαζόμενο ως Smart CAES [48]. Στο Σχήμα 6.7 φαίνεται η ροή μάζας αέρα που εκτονώνεται στο στροβίλο του συστήματος Smart CAES, συναρτήσει της πίεσης στην είσοδο του στροβίλου και της παραγόμενης ισχύος, σε ανά μονάδα τιμές.



Σχήμα 6.7 : Ροή αέρα, πίεση εισόδου και παραγόμενη ισχύς στροβίλου μονάδας Smart CAES

Σύμφωνα με το Σχήμα 6.7, καθώς αυξάνει η πίεση εισόδου του στροβίλου του συστήματος Smart CAES, αυξάνει ομοίως και η ροή αέρα που εκτονώνεται σε αυτόν, οδηγώντας τελικά στην αύξηση της παραγόμενης ισχύος. Συμπερασματικά, για το μοντέλο CAES που αναπτύσσεται στο παρόν Κεφάλαιο ακολουθείται η ίδια λογική, η αναλογία δηλαδή της ροής αέρα και της πίεσης εισόδου του στροβίλου.

Η ανά μονάδα πίεση εισόδου p_{Tb} του στροβίλου δίνεται από την παρακάτω σχέση :

$$p_{Tb} = \frac{P_{Tb}}{P_{Tb0}} \quad (6.20)$$

όπου P_{Tb0} η ονομαστική πίεση εισόδου (kPa) όπως έχει αναφερθεί προηγουμένως.

Λόγω της θεώρησης πως η ροή αέρα είναι ανάλογη με την πίεση εισόδου του στροβίλου, οι ανά μονάδα τιμές των δύο μεγεθών είναι ίσες. Σύμφωνα με τα παραπάνω, προκύπτει η παρακάτω σχέση:

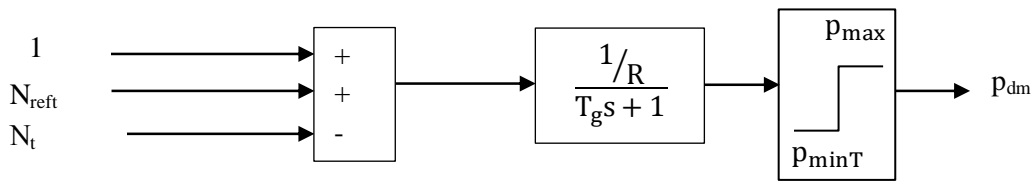
$$W_{Tb} = C_T p_{Tb} \quad (6.21)$$

όπου C_T λογικό σήμα που καθορίζει αν το σύστημα στρόβιλος - γεννήτρια παράγει ηλεκτρική ισχύ. Σε περιόδους όπου ο στρόβιλος είναι εκτός λειτουργίας, το σήμα C_T λαμβάνει την τιμή 0. Όταν το σύστημα στροβίλου – γεννήτριας ενταχθεί στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, τότε ισχύει ότι $C_T = 1$.

6.1.6 Διατάξεις ελέγχου ανεξάρτητου στροβίλου T_{cs}

Η ρύθμιση της παραγόμενης ισχύος του στροβίλου επιτυγχάνεται μέσω του ελέγχου της πίεσεως εισόδου του αέρα στο στρόβιλο. Η ρύθμιση της πίεσης γίνεται μέσω κατάλληλων βαλβίδων (V) με μεταβλητό άνοιγμα, ο οποίες υποβιβάζουν την πίεση του αεροφυλακίου στα επίπεδα που ορίζει το φορτίο (Throttling control). Η παραπάνω λογική ελέγχου ακολουθείται επίσης από τους στροβίλους ατμού [50]. Η μεταβολή της πίεσης έχει ως αποτέλεσμα τη μεταβολή της ροής μάζας αέρα που εκτονώνεται στο στρόβιλο και κατ' επέκταση τη μεταβολή της παραγόμενης ισχύος, όπως φαίνεται από τις σχέσεις (6.19) και (6.21).

Στο Σχήμα 6.8 φαίνεται ο ρυθμιστής στροφών του στροβίλου αέρος. Το σφάλμα της συχνότητας $1 - N_t$, όπου N_t η ανά μονάδα ταχύτητα περιστροφής του στροβίλου και της αντίστοιχης γεννήτριας G_2 , εισέρχεται σε μια συνάρτηση μεταφοράς πρώτης τάξης με σταθερά χρόνου T_g και κέρδος $1/R$, όπου R ο στατισμός της μονάδας και T_g χρονική σταθερά που εκφράζει τη χρονική καθυστέρηση του ρυθμιστή στροφών. Η έξοδος της διάταξης είναι το σήμα p_{dm} που αντιστοιχεί στην ανά μονάδα επιθυμητή πίεση εισόδου του στροβίλου (ως προς την ονομαστική πίεση του στροβίλου P_{Tb0}). Έτσι, αν η συχνότητα πέσει κάτω από την ονομαστική της τιμή ($1 - N_t > 0$), τότε το σήμα p_{dm} αυξάνει, ενώ αντίθετα αν η συχνότητα υπερβεί την ονομαστική της τιμή ($1 - N_t < 0$), τότε το σήμα p_{dm} μειώνεται. Συμπερασματικά, η πτώση της συχνότητας οδηγεί στην αύξηση της παραγόμενης ισχύος, ενώ σε περιπτώσεις υπερσυχνότητας η παραγόμενη ισχύς μειώνεται, συμβάλλοντας κατ' αυτόν τον τρόπο στην πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας. Το σήμα N_{ref} καθορίζει την αρχική ανά μονάδα πίεση στην είσοδο του στροβίλου, και προκύπτει από την αρχικοποίηση του μοντέλου.



Σχήμα 6.8 : Ρυθμιστής στροφών ανεξάρτητου στροβίλου

Ο περιοριστής που φαίνεται στο Σχήμα 6.8 έχει ως άνω όριο τη μέγιστη ανά μονάδα επιτρεπτή τιμή της πίεσης ($p_{\max} = 1$), και ως κάτω όριο την ελάχιστη δυνατή τιμή της πίεσης $p_{\min T}$ επίσης σε ανά μονάδα. Το άνω όριο προκύπτει από το γεγονός πως η πίεση εισόδου του στροβίλου P_{Tb} δεν μπορεί να υπερβεί την ονομαστική της τιμή P_{Tb0} για λόγους προστασίας της διάταξης. Το κάτω όριο οφείλεται στο τεχνικό ελάχιστο της μονάδας, άνω του οποίου το σύστημα λειτουργεί ομαλά και αξιόπιστα. Το όριο $p_{\min T}$ προκύπτει από την παρακάτω σχέση :

$$p_{\min T} = \frac{P_{T\min}}{P_{Tb0}} \quad (6.22)$$

όπου $P_{T\min}$ η ελάχιστη επιτρεπτή τιμή της πίεσης εισόδου του στροβίλου σε kPa.

Λόγω της συμπιεστότητας του αέρα, σε μία μεταβολή του ανοίγματος των βαλβίδων που ρυθμίζουν την πίεση στην είσοδο του στροβίλου, υπάρχει χρονική καθυστέρηση μέχρι να αποκατασταθεί η πίεση στη νέα της τιμή. Έτσι το σήμα p_{dm} εισέρχεται σε μια συνάρτηση μεταφοράς 1^{ης} τάξης με σταθερά χρόνου T_{pt} , με έξοδο την πραγματική ανά μονάδα τιμή της πίεσης p_{Tb} . Σύμφωνα με τα παραπάνω, προκύπτει η εξής σχέση :

$$\frac{p_{Tb}}{p_{dm}} = \frac{1}{T_{pt}s + 1} \quad (6.23)$$

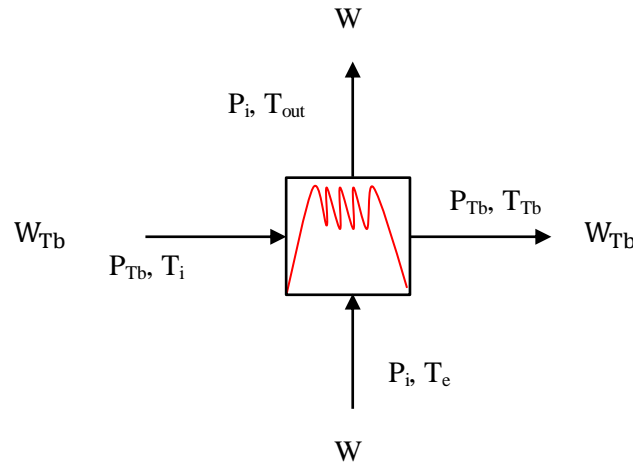
6.1.7 Εναλλάκτης θερμότητας (E)

Ο εναλλάκτης θερμότητας έχει δύο εισόδους και δύο εξόδους, και απεικονίζεται στο Σχήμα 6.9. Η μία είσοδος και έξοδος αναφέρεται στην ανά μονάδα ροή αέρα από το αεροφυλάκιο προς το στροβίλο (W_{Tb}), ενώ το δεύτερο ζεύγος εισόδου – εξόδου αφορά τη ροή των καυσαερίων της αεριοστροβιλικής μονάδας (W) σε ανά μονάδα τιμή επίσης. Τα καυσαέρια εξέρχονται από την αεριοστροβιλική μονάδα και εισέρχονται στον εναλλάκτη σε θερμοκρασία T_e (°K). Αφού αποδώσουν το μεγαλύτερο μέρος της θερμικής τους ενέργειας στη ροή αέρα του στροβίλου, εξέρχονται από τον ανακομιστή θερμότητας σε θερμοκρασία T_{out} (°K). Αντίστοιχα, ο πεπιεσμένος αέρας εισέρχεται στον εναλλάκτη σε θερμοκρασία περιβάλλοντος T_i (°K) και εξέρχεται από αυτόν σε θερμοκρασία T_{Tb} (°K). Σημειώνεται ότι η εναλλαγή θερμότητας μεταξύ των δύο διαφορετικών εργαζόμενων μέσων (πεπιεσμένος αέρας - καυσαέρια) γίνεται υπό σταθερή πίεση. Δηλαδή τα καυσαέρια διατηρούνται στην πίεση περιβάλλοντος P_i , ενώ η ροή του αέρα στην πίεση P_{Tb} που ορίζει η είσοδος του στροβίλου.

Θεωρώντας ως \dot{m}_{gt} τη ροή των καυσαερίων (kg/s), προκύπτει η εξής σχέση :

$$W = \frac{\dot{m}_{gt}}{\dot{m}_{g0}} \quad (6.24)$$

όπου \dot{m}_{g0} η ονομαστική ροή (kg/s) και W η ανά μονάδα ροή των καυσαερίων.



Σχήμα 6.9 : Εναλλάκτης θερμότητας

Όσον αφορά τις θερμοκρασίες εξόδου της ροής αέρα και των καυσαερίων (T_{Tb} και T_{out} αντίστοιχα), ισχύουν οι παρακάτω περιορισμοί [16]:

$$\begin{aligned} T_{Tb} &< T_e \\ T_{out} &> T_i \end{aligned} \quad (6.25)$$

Σύμφωνα με την αρχή διατήρησης της ενέργειας του ανακομιστή θερμότητας, προκύπτει η παρακάτω σχέση [2]:

$$\dot{m}_{gt} (T_e - T_{out}) = \dot{m}_{Tb} (T_{Tb} - T_i) \quad (6.26)$$

Σημειώνεται ότι για την εξαγωγή της σχέσης (6.26) θεωρούνται σταθεροί και ίσοι μεταξύ τους οι συντελεστές θερμοχωρητικότητας του αέρα και των καυσαερίων.

Οι ονομαστικές ροές \dot{m}_{T0} , \dot{m}_{g0} , του πεπιεσμένου αέρα που εκτονώνεται στο στρόβιλο και των καυσαερίων της αεριοστροβιλικής μονάδας αντίστοιχα, θεωρούνται ίσες μεταξύ τους στο μοντέλο της μονάδας GT-CAES που αναπτύσσεται στο Κεφάλαιο αυτό. Η παραδοχή αυτή δεν διαφέρει πολύ από την πραγματικότητα, όπως παρατηρήσαμε στο Κεφάλαιο 3 για τα διάφορα συστήματα CAES που περιλαμβάνουν ανακομιστή θερμότητας, όπου η ονομαστική ροή αέρα του στρόβιλου και των καυσαερίων της αεριοστροβιλικής μονάδας είναι παραπλήσιες. Ο λόγος για τον οποίο συμβαίνει αυτό, εξηγείται αν εξετάσουμε τις σχέσεις (6.25) και (6.26). Συγκεκριμένα, όσο μεγαλύτερη είναι η ονομαστική ροή των καυσαερίων \dot{m}_{g0} , τόσο υψηλότερη είναι η θερμοκρασία εξόδου της ροής αέρα T_{Tb} , όπως προκύπτει από τη σχέση (6.26). Το γεγονός αυτό είναι επιθυμητό, καθώς έτσι αυξάνει η δυνατότητα παραγωγής ισχύος από το στρόβιλο, λόγω της μεγαλύτερης ενθαλπίας του αέρα στην είσοδό του. Ωστόσο, όπως φαίνεται από τη σχέση (6.25), η θερμοκρασία εξόδου του αέρα από τον εναλλάκτη θερμότητας δεν μπορεί να ξεπεράσει τη θερμοκρασία εισόδου των

καυσαερίων T_e . Συμπερασματικά, όσο αυξάνει η ονομαστική ροή των καυσαερίων πέρα από την ονομαστική ροή αέρα, αυτό που επιτυγχάνεται είναι η θερμοκρασία του αέρα να προσεγγίζει με ολοένα μικρότερο ρυθμό την ανώτατη τιμή T_e . Η περίσσεια ισχύος που δεν απορροφάται, γίνεται απώλειες υπό μορφή θερμικής ενέργειας που αποδίδεται στο περιβάλλον μέσω των καυσαερίων. Επομένως, για τη μεγιστοποίηση του βαθμού απόδοσης της διαδικασίας ανακομιδής θερμότητας, θεωρούμε ότι οι ονομαστικές ροές του αέρα και των καυσαερίων είναι ίσες. Έτσι έχουμε την ακόλουθη σχέση :

$$\dot{m}_{g0} = \dot{m}_{T0} \quad (6.27)$$

Διαιρώντας κατά μέλη τις σχέσεις (6.26) και (6.27), δεδομένων των (6.2) και (6.24), προκύπτει ότι :

$$W(T_e - T_{out}) = W_{Tb}(T_{Tb} - T_i) \quad (6.28)$$

Γίνεται η παραδοχή ότι οι θερμοκρασίες εξόδου του αέρα (T_{Tb}) και των καυσαερίων (T_{out}), από τον εναλλάκτη θερμότητας, είναι ανάλογες. Έτσι έχουμε την ακόλουθη σχέση :

$$\frac{T_{out}}{T_{Tb}} = k \quad (6.29)$$

όπου k σταθερά που προκύπτει από τον ονομαστικό λόγο θερμοκρασιών του ανακομιστή θερμότητας. Είναι δηλαδή :

$$k = \frac{T_{out0}}{T_{Tb0}} \quad (6.30)$$

όπου T_{Tb0} η ονομαστική θερμοκρασία εξόδου του αέρα και T_{out0} η ονομαστική θερμοκρασία εξόδου των καυσαερίων από τον εναλλάκτη θερμότητας.

Μια αύξηση της θερμοκρασίας εισόδου των καυσαερίων έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της θερμοκρασίας εξόδου τους και την αύξηση της θερμοκρασίας του αέρα που εξέρχεται από τον ανακομιστή θερμότητας. Αυτό οφείλεται στο γεγονός πως στον εναλλάκτη εισέρχεται μεγαλύτερη θερμική ισχύς από τα καυσαέρια. Ένα μέρος της επιπλέον αυτής θερμικής ισχύος αποδίδεται στον εξερχόμενο αέρα και το υπόλοιπο εξέρχεται με τα καυσαέρια από τον εναλλάκτη. Έτσι, για δεδομένη ροή αέρα και καυσαερίων, οι θερμοκρασίες εξόδου των δύο εργαζόμενων μέσων αυξάνουν. Ίδια συμπεριφορά παρατηρείται σε περίπτωση αύξηση της ροής των καυσαερίων, για σταθερή θερμοκρασία εισόδου των καυσαερίων και για δεδομένη ροή αέρα, ή στην περίπτωση μείωσης της ροής του αέρα, για δεδομένη ροή και θερμοκρασία εισόδου των καυσαερίων.

Η σχέση (6.29) ισχύει όταν ικανοποιούνται οι περιορισμοί της σχέσεως (6.25). Όταν η θερμοκρασία εξόδου του αέρα από τον εναλλάκτη T_{Tb} προσεγγίσει την οριακή τιμή T_e , τότε σταθεροποιείται σε αυτή την τιμή, και η θερμοκρασία εξόδου των καυσαερίων προκύπτει από τη σχέση (6.28). Όταν η θερμοκρασία εξόδου των καυσαερίων από τον εναλλάκτη T_{out} προσεγγίσει το κάτω όριο T_i , τότε σταθεροποιείται σε αυτή την τιμή, και η θερμοκρασία εξόδου του αέρα προκύπτει από τη σχέση (6.28) ομοίως. Η οριακή θερμοκρασία του αέρα όπου συμβαίνει αυτό είναι $T_{Tb} = T_{out}/k = T_i/k$.

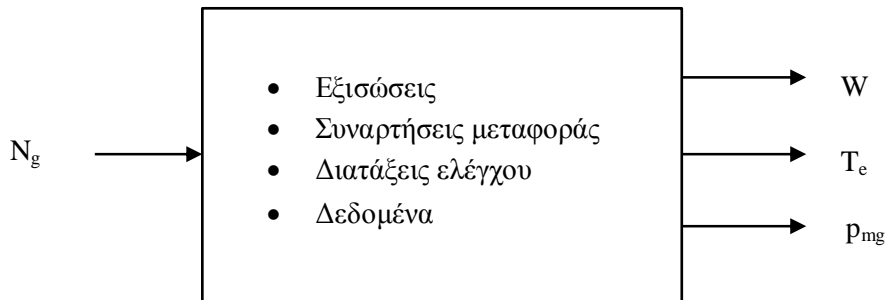
Συνδυάζοντας λοιπόν τις σχέσεις (6.25), (6.28) και (6.29) προκύπτει η παρακάτω σχέση που υπολογίζει τη θερμοκρασία εξόδου T_{Tb} του πεπιεσμένου αέρα από τον ανακομιστή θερμότητας :

$$\begin{aligned}
 T_{Tb} &= \frac{W T_e + W_{Tb} T_i}{W_{Tb} + k W}, & \frac{T_i}{k} < \frac{W T_e + W_{Tb} T_i}{W_{Tb} + k W} < T_e \\
 T_{Tb} &= T_e, & \frac{W T_e + W_{Tb} T_i}{W_{Tb} + k W} &\geq T_e \\
 T_{Tb} &= \frac{W (T_e - T_i) + W_{Tb} T_i}{W_{Tb}}, & \frac{W T_e + W_{Tb} T_i}{W_{Tb} + k W} &\leq \frac{T_i}{k}
 \end{aligned} \tag{6.31}$$

6.1.8 Αεριοστροβιλική μονάδα (GT) – ηλεκτρικές μηχανές (G_1, G_2, M)

Όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 6.1.1, η αεριοστροβιλική μονάδα του παρόντος Κεφαλαίου είναι ίδια με το μοντέλο που αναπτύχθηκε στο Κεφάλαιο 4, με τη διαφορά ότι δεν εγχέεται αέρας στο θάλαμο καύσης. Για το λόγο αυτό, η περιγραφή των διατάξεων ελέγχου και των συνιστωσών της μονάδας παραλείπεται. Όσον αφορά τις εξισώσεις και τις συναρτήσεις μεταφοράς που μοντελοποιούν την αεριοστροβιλική μονάδα, είναι ταυτόσημες με αυτές που αναφέρονται στο Κεφάλαιο 4 θεωρώντας στους τύπους $W_{ch} = 0$, όπου ως W_{ch} έχει οριστεί η ανά μονάδα ροή αέρα από το αεροφυλάκιο προς το θάλαμο καύσης.

Το μοντέλο της αεριοστροβιλικής μονάδας, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.10, έχει ως είσοδο την ανά μονάδα συχνότητα N_g του άξονα περιστροφής που συνδέει το στροβιλοσυμπιεστή και την αντίστοιχη σύγχρονη γεννήτρια G_1 . Οι έξοδοι του μοντέλου είναι η ανά μονάδα ροή των καυσαερίων W (ως προς την ονομαστική ροή του αεριοστροβίλου), η θερμοκρασία εξόδου των καυσαερίων T_e (°K), και η ανά μονάδα παραγόμενη μηχανική ισχύς p_{mg} ως προς την ονομαστική ισχύ P_{mg0} (kW) της αεριοστροβιλικής μονάδας.



Σχήμα 6.10 : Μοντέλο αεριοστροβιλικής μονάδας

Όπως έχει αναφερθεί, οι γεννήτριες G_1, G_2 , της αεριοστροβιλικής μονάδας GT και του στροβίλου T_{cs} της μονάδας CAES αντίστοιχα, καθώς και ο κινητήρας M του συμπιεστή C_{cs} , είναι σύγχρονες μηχανές. Η μοντελοποίηση της σύγχρονης μηχανής μέσω διαφορικών και αλγεβρικών εξισώσεων γίνεται στο Κεφάλαιο 2. Μία από τις εισόδους του μοντέλου μιας σύγχρονης μηχανής είναι η ανά μονάδα μηχανική ροπή που ασκείται στον άξονα περιστροφής. Σε εφαρμογές γεννήτριας η μηχανική ροπή θεωρείται θετική, ενώ σε εφαρμογές κινητήρα λαμβάνεται αρνητική. Η μηχανική ροπή T_m (kN·m) ορίζεται ως [2]:

$$T_m = \frac{P_m}{\omega_r} \quad (6.32)$$

όπου P_m η περιστροφική ισχύς (kW) και ω_r η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής (r/s). Η ονομαστική μηχανική ροπή T_{m0} (kN·m) που ασκείται στον άξονα περιστροφής μίας γεννήτριας δίνεται από την ακόλουθη σχέση :

$$T_{m0} = \frac{P_{m0}}{\omega_s} \quad (6.33)$$

όπου P_{m0} η ονομαστική περιστροφική ισχύς (kW) και ω_s η σύγχρονη γωνιακή ταχύτητα περιστροφής (r/s).

Διαιρώντας κατά μέλη τις σχέσεις (6.32) και (6.33) προκύπτει η ανά μονάδα μηχανική ροπή t_m :

$$t_m = \frac{p_m}{\omega_p} \quad (6.34)$$

όπου p_m η ανά μονάδα περιστροφική ισχύς και ω_p γωνιακή ταχύτητα περιστροφής σε ανά μονάδα τιμή επίσης.

Σύμφωνα με τη σχέση (6.34) προκύπτουν οι ανά μονάδα μηχανικές ροπές t_{mT} , t_{mg} , t_{mc} της γεννήτριας (G_2) του ανεξάρτητου στροβίλου, της γεννήτριας (G_1) της αεριοστροβιλικής μονάδας, και του ηλεκτρικού κινητήρα (M) του ανεξάρτητου συμπιεστή, αντίστοιχα :

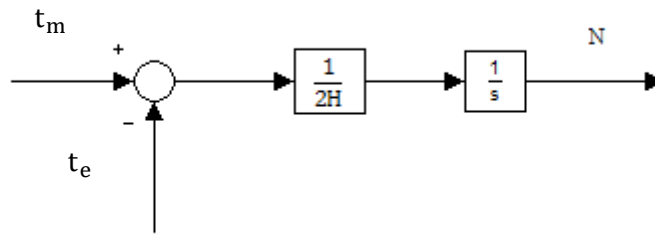
$$\begin{aligned} t_{mT} &= \frac{P_{mT1}}{N_t} \\ t_{mg} &= \frac{P_{mg}}{N_g} \\ t_{mc} &= - \frac{P_{mc}}{N_c} \end{aligned} \quad (6.35)$$

όπου P_{mT1} , P_{mg} , P_{mc} , η ανά μονάδα περιστροφική ισχύς του στροβίλου, της αεριοστροβιλικής μονάδας, και του συμπιεστή αντίστοιχα, όπως έχει αναφερθεί προηγουμένως, με τις αντίστοιχες ανά μονάδα ταχύτητες περιστροφής N_t , N_g , N_c . Σημειώνεται ότι το πρόσημο (-) στην τελευταία εξίσωση της σχέσης (6.35) οφείλεται στο γεγονός πως ο συμπιεστής καταναλώνει ισχύ, επομένως σύμφωνα με την προηγούμενη θεώρηση, η μηχανική ροπή λαμβάνεται αρνητική.

Τέλος, η ανά μονάδα ταχύτητα περιστροφής N της σύγχρονης γεννήτριας προκύπτει από την εξής διαφορική εξίσωση [2]:

$$t_m - t_e = 2 H \frac{dN}{dt} \quad (6.36)$$

όπου t_e η ανά μονάδα ηλεκτρομαγνητική ροπή της γεννήτριας και H η ανηγμένη χρονική σταθερά αδρανείας (s). Έτσι έχουμε το Σχήμα 6.11, που αντιστοιχεί στο μηχανικό μοντέλο της γεννήτριας.



Σχήμα 6.11 : Μηχανικό μοντέλο γεννήτριας

Σύμφωνα με τα παραπάνω, οι ανά μονάδα ταχύτητες περιστροφής του στροβίλου T_{cs} (γεννήτρια G_2), της αεριοστροβλικής μονάδας GT (γεννήτρια G_1) και του συμπιεστή C_{cs} (κινητήρας M), δίνονται από τις ακόλουθες διαφορικές εξισώσεις :

$$\begin{aligned}
 t_{mT} - t_{eT} &= 2 H_T \frac{dN_t}{dt} \\
 t_{mg} - t_{eg} &= 2 H_g \frac{dN_g}{dt} \\
 t_{mc} - t_{ec} &= 2 H_c \frac{dN_c}{dt}
 \end{aligned}
 \tag{6.37}$$

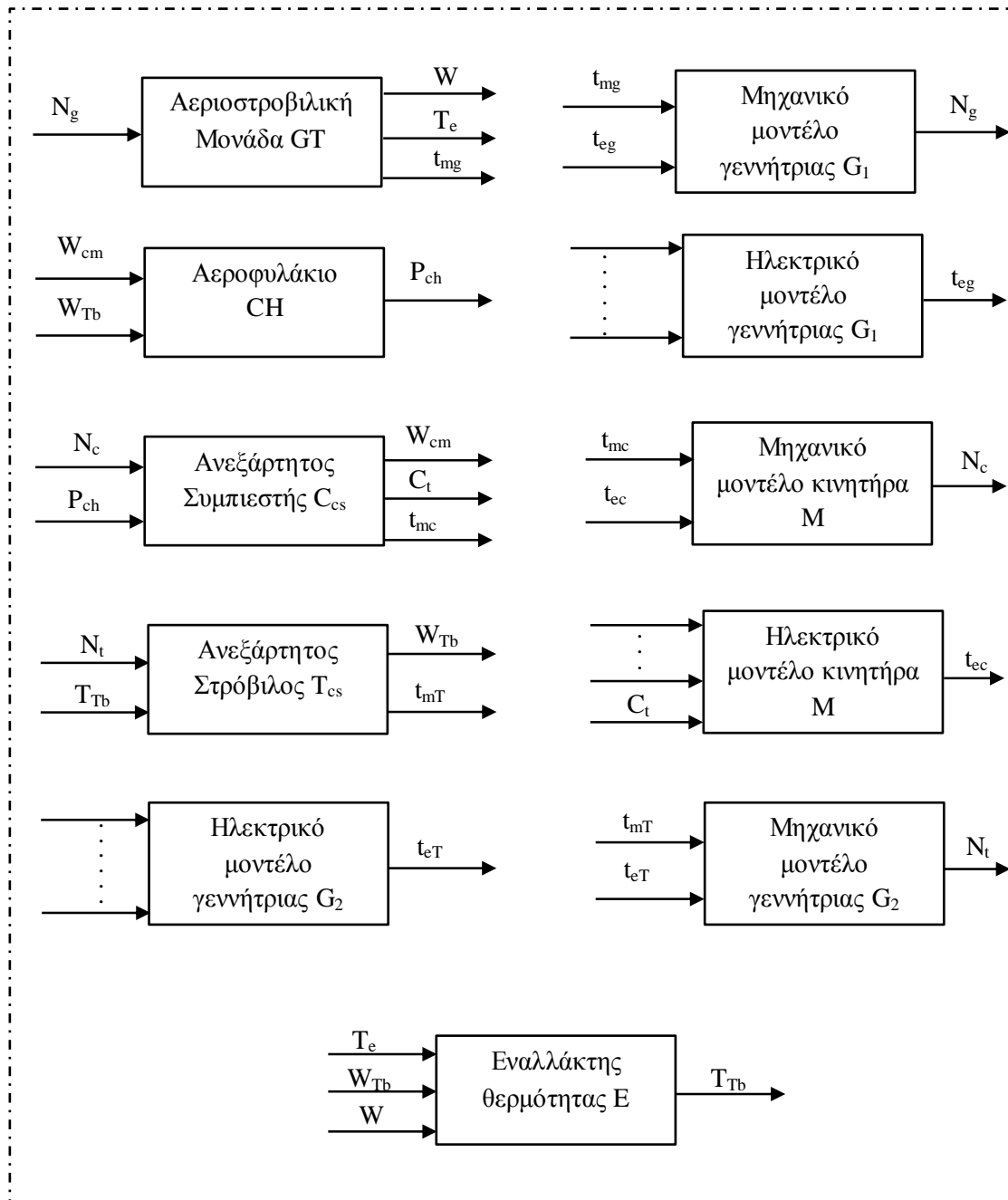
όπου t_{eT} , t_{eg} , t_{ec} , η ανά μονάδα ηλεκτρομαγνητική ροπή της γεννήτριας G_2 , της γεννήτριας G_1 , και του κινητήρα M , αντίστοιχα. Ομοίως, ως H_T , H_g , H_c ορίζονται οι ανηγμένες χρονικές σταθερές αδρανείας της γεννήτριας G_2 , της γεννήτριας G_1 , και του κινητήρα M , αντίστοιχα.

6.1.9 Ολοκληρωμένο μοντέλο μονάδας GT-CAES

Το πλήρες μοντέλο της μονάδας GT-CAES, με τα επιμέρους μπλοκ διαγράμματα, απεικονίζεται στο Σχήμα 6.12. Το μπλοκ ‘αεριοστροβλική μονάδα’ περιγράφηκε στο Σχήμα 6.10. Το μηχανικό μοντέλο των γεννητριών G_2 , G_1 , και του κινητήρα M , υλοποιείται με βάση τις διαφορικές εξισώσεις της σχέσης (6.37), με εισόδους τις ανά μονάδα μηχανικές και ηλεκτρομαγνητικές ροπές, t_{mT} , t_{mg} , t_{mc} , και t_{eT} , t_{eg} , t_{ec} αντίστοιχα. Οι έξοδοι των μπλοκ διαγραμμάτων ‘μηχανικό μοντέλο’ είναι οι ανά μονάδα ταχύτητες περιστροφής N_t , N_g , N_c των γεννητριών G_2 , G_1 , και του κινητήρα M , αντίστοιχα.

Το ηλεκτρικό μοντέλο των δύο γεννητριών και του κινητήρα αναφέρεται στο Κεφάλαιο 2 όπου μοντελοποιείται η σύγχρονη μηχανή, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως. Εκτός από τις διάφορες εισόδους που περιλαμβάνει το μοντέλο της σύγχρονης μηχανής, το ηλεκτρικό μοντέλο του κινητήρα δέχεται μία είσοδο επιπλέον. Η είσοδος αυτή είναι το λογικό σήμα C_i για την αποκοπή του κινητήρα σε περίπτωση μεγάλης υποσυχνότητας. Οι έξοδοι των μπλοκ διαγραμμάτων ‘ηλεκτρικό μοντέλο’ είναι οι ανά μονάδα ηλεκτρομαγνητικές ροπές t_{eT} , t_{eg} , t_{ec} των γεννητριών G_2 , G_1 , και του κινητήρα M αντίστοιχα.

Το μοντέλο του αεροφυλακίου υλοποιείται όπως στο Σχήμα 6.2, με τη χρήση των σχέσεων (6.3), (6.4), (6.5). Οι εισοδοι του μοντέλου είναι οι ανά μονάδα ροές αέρα W_{cm} , W_{Tb} , του συμπιεστή και του στροβίλου αντίστοιχα, ενώ έξοδος είναι η πίεση P_{ch} (kPa) που επικρατεί στο αεροφυλάκιο.



Σχήμα 6.12 : Πλήρες μοντέλο μονάδας GT-CAES

Το μπλοκ διάγραμμα του ανεξάρτητου συμπιεστή έχει ως είσοδο την ανά μονάδα ταχύτητα περιστροφής N_c του άξονα, και την πίεση P_{ch} (kPa) του αεροφυλακίου. Οι έξοδοι του μοντέλου είναι η ανά μονάδα ροή μάζας αέρα W_{cm} που συμπιέζει, το λογικό σήμα C_t για την αποκοπή του κινητήρα, και η ανά μονάδα μηχανική ροπή t_{mc} που ασκείται στον άξονα. Η υλοποίηση του συμπιεστή γίνεται με τις σχέσεις (6.10), (6.11), (6.35) και σύμφωνα με το Σχήμα 6.3, 6.4 και 6.5.

Το μοντέλο του ανεξάρτητου στροβίλου έχει ως είσοδο την ανά μονάδα ταχύτητα περιστροφής N_t του άξονα, και τη θερμοκρασία εισόδου T_{Tb} ($^{\circ}K$) του αέρα στο στρόβιλο. Οι έξοδοι του μοντέλου είναι η ανά μονάδα ροή μάζας αέρα W_{Tb} που εκτονώνεται στο στρόβιλο, καθώς και η ανά μονάδα μηχανική ροπή t_{mT} που ασκείται στον άξονα. Η μοντελοποίηση του

στροβίλου γίνεται μέσω των σχέσεων (6.13), (6.14), (6.16), (6.19), (6.20), (6.21), (6.23), (6.35), και σύμφωνα με το Σχήμα 6.6 και 6.8.

Τέλος, το μπλοκ διάγραμμα του ανακομιστή θερμότητας δέχεται ως είσοδο την ανά μονάδα ροή W και θερμοκρασία T_e ($^{\circ}K$) των καυσαερίων της αεριοστροβλικής μονάδας, καθώς και την ανά μονάδα τιμή της ροής αέρα W_{Tb} που εξέρχεται από το αεροφυλάκιο. Η έξοδος του μοντέλου είναι η θερμοκρασία του αέρα T_{Tb} ($^{\circ}K$) όταν εξέρχεται από τον εναλλάκτη θερμότητας. Η υλοποίηση του ανακομιστή θερμότητας περιλαμβάνει τη σχέση (6.31).

Στην ενότητα που ακολουθεί περιγράφεται ο τρόπος παράστασης του μοντέλου της μονάδας GT-CAES στο Simulink.

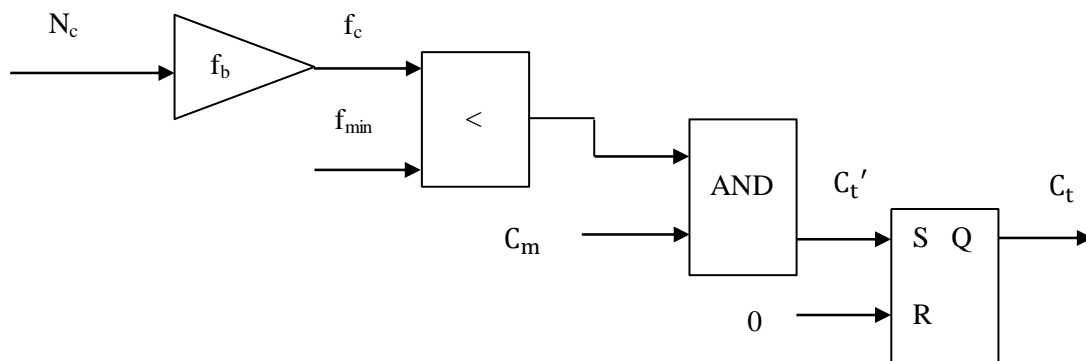
6.2 Παράσταση μοντέλου GT-CAES στο Simulink

6.2.1 Υλοποίηση μοντέλου

Η μονάδα GT-CAES υλοποιείται στο Simulink με τις συναρτήσεις μεταφοράς και τις αλγεβρικές εξισώσεις που αναφέρονται στην ενότητα 6.1. Οι διαφορικές εξισώσεις της σχέσης (6.37) μετατρέπονται σε αντίστοιχες συναρτήσεις μεταφοράς πρώτης τάξης ως εξής :

$$\begin{aligned} N_t &= \frac{t_{mT} - t_{eT}}{2 H_{Ts}} \\ N_g &= \frac{t_{mg} - t_{eg}}{2 H_{gs}} \\ N_c &= \frac{t_{mc} - t_{ec}}{2 H_{cs}} \end{aligned} \quad (6.38)$$

Το λογικό σήμα C_i αποκοπής του κινητήρα M , υλοποιείται στο Simulink όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.13, που αντιστοιχεί στο λογικό διάγραμμα του Σχήματος 6.5.



Σχήμα 6.13 : Λογικό σήμα αποκοπής του κινητήρα του συμπιεστή

Η ανά μονάδα ταχύτητα περιστροφής N_c του συμπιεστή, αφού πολλαπλασιαστεί με την ονομαστική συχνότητα περιστροφής f_b (Hz) έτσι ώστε να προκύψει η συχνότητα f_c σε Hz, εισέρχεται στο λογικό τελεστή (<), όπου συγκρίνεται με την κρίσιμη συχνότητα αποκοπής f_{min} (Hz). Όσο η συχνότητα περιστροφής είναι άνω του ορίου ($f_c > f_{min}$), τότε η έξοδος του τελεστή (<) είναι μηδέν. Αντίθετα, μόλις η συχνότητα γίνει μικρότερη από την κρίσιμη ($f_c < f_{min}$), τότε η έξοδος του τελεστή (<) λαμβάνει την τιμή 1. Το λογικό σήμα εξόδου του τελεστή (<) εισέρχεται στο λογικό τελεστή AND, σε συνδυασμό με το σήμα C_m . Όπως έχει αναφερθεί, το σήμα C_m είναι μια λογική μεταβλητή που καθορίζει αν ο συμπιεστής και ο κινητήρας είναι συνδεδεμένοι στο δίκτυο καταναλώνοντας ηλεκτρική ισχύ, και προκύπτει από την αρχικοποίηση του μοντέλου. Όταν ισχύει $C_m = 0$ τότε ο κινητήρας του συμπιεστή είναι εκτός λειτουργίας, ενώ όταν είναι $C_m = 1$ τότε ο κινητήρας είναι ενταγμένος στο σύστημα. Η έξοδος C_i' του τελεστή AND εισέρχεται στην πύλη S ενός flip – flop. Η λειτουργία του flip – flop καθορίζεται στον Πίνακα 6.1.

Πίνακας 6.1 : Λογικά σήματα εισόδου-εξόδου flip-flop

| S | R | Q_n |
|---|---|-----------|
| 0 | 0 | Q_{n-1} |
| 0 | 1 | 0 |
| 1 | 0 | 1 |
| 1 | 1 | 0 |

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.13, η πύλη R του flip – flop παραμένει μόνιμα στην τιμή 0. Έτσι, η έξοδος Q του flip – flop, η οποία ταυτίζεται με το σήμα C_t , καθορίζεται πλήρως από το σήμα C_i' . Όσο η συχνότητα είναι άνω του ορίου ($f_c > f_{min}$), δεδομένου ότι $C_m = 1$, τότε θα ισχύει ότι $C_i' = C_t = 0$. Αν η συχνότητα ξεπεράσει το προαναφερθέν όριο ($f_c < f_{min}$), τότε γίνεται $C_i' = C_t = 1$. Από εκεί και μετά, για οποιαδήποτε μεταβολή του σήματος C_i' , το σήμα C_t αποκοπής του κινητήρα παραμένει μόνιμα στην τιμή 1.

Τέλος, όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 6.1.7, ο εναλλάκτης θερμότητας μοντελοποιείται με βάση τη σχέση (6.31). Μέσω της σχέσης αυτής προσδιορίζεται η θερμοκρασία T_{Tb} εξόδου του αέρα από τον εναλλάκτη. Ο τρόπος υλοποίησης του ανακομιστή θερμότητας στο Simulink φαίνεται στο Σχήμα 6.14.

Ο πολυπλέκτης 'Mux' έχει ως είσοδο τη θερμοκρασία εξόδου των καυσαερίων από την αεριοστροβιλική μονάδα T_e (°K), και τις ανά μονάδα ροές των καυσαερίων W και του αέρα που εξέρχεται από το αεροφυλάκιο W_{Tb} . Στην έξοδο του πολυπλέκτη προκύπτει το διάνυσμα u , το οποίο περιλαμβάνει τις τρεις μεταβλητές που προαναφέρθηκαν. Έτσι είναι :

$$u = [T_e, W, W_{Tb}] \quad (6.39)$$

Οι συναρτήσεις $f_1(u)$ και $f_2(u)$ αντιστοιχούν στο 1^ο και στο 3^ο σκέλος της σχέσης (6.31) αντίστοιχα. Έτσι έχουμε :

$$f_1(u) = \frac{u(2) u(1) + u(3) T_i}{u(3) + k u(2)} \quad (6.40)$$

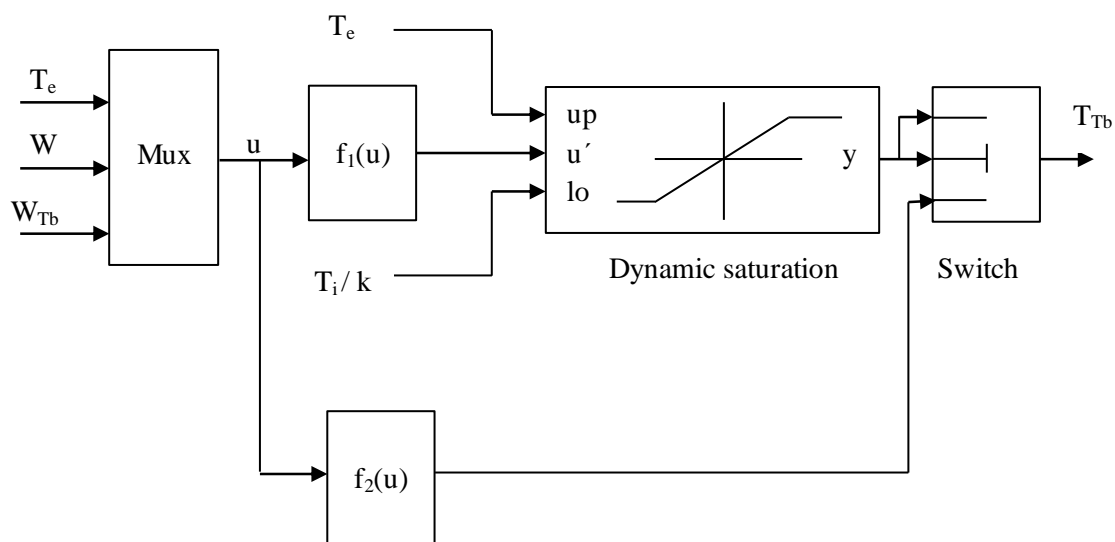
και

$$f_2(u) = \frac{u(2) (u(1) - T_i) + u(3) T_i}{u(3)} \quad (6.41)$$

Το μπλοκ διάγραμμα ‘Dynamic saturation’ περιορίζει τη μεσαία είσοδο (σήμα u') μεταξύ της 1^{ns} και της 3^{ns} εισόδου (σήμα u_p και l_o αντίστοιχα). Η έξοδος του περιοριστή είναι το σήμα y . Τέλος, ο διακόπτης Switch επιλέγει μεταξύ της 1^{ns} και της 3^{ns} εισόδου του, ανάλογα με το αν η μεσαία είσοδος ικανοποιεί ένα προκαθορισμένο κριτήριο. Ως κριτήριο επιλογής της 1^{ns} εισόδου του διακόπτη έχει οριστεί η εξής συνθήκη :

$$y > \frac{T_i}{k} \quad (6.42)$$

Σύμφωνα με τα παραπάνω, όσο ικανοποιείται η συνθήκη (6.42), τότε η θερμοκρασία T_{Tb} προκύπτει από τη συνάρτηση $f_1(u)$. Συγκεκριμένα, αν το σήμα u' , που υπολογίζεται από τη συνάρτηση $f_1(u)$, υπερβεί τη θερμοκρασία T_e , τότε η έξοδος του περιοριστή γίνεται $y = T_e > T_i / k$. Επομένως θα είναι $T_{Tb} = T_e$. Αν το σήμα u' βρίσκεται μεταξύ των ορίων T_e και T_i / k , τότε η έξοδος του περιοριστή θα είναι $y = f_1(u) > T_i / k$. Συνεπώς η έξοδος του διακόπτη θα είναι $T_{Tb} = f_1(u)$. Τέλος, αν το σήμα u' γίνει μικρότερο από την ελάχιστη τιμή T_i / k , τότε η έξοδος του περιοριστή γίνεται $y = T_i / k$, ενώ ο διακόπτης έχει πλέον ως έξοδο το αποτέλεσμα της συνάρτησης $f_2(u)$. Στην περίπτωση αυτή δηλαδή, ισχύει ότι $T_{Tb} = f_2(u)$. Συμπερασματικά, κατ’ αυτόν τον τρόπο ορίζεται πλήρως η σχέση (6.31) στο Simulink, σύμφωνα με το Σχήμα 6.14.



Σχήμα 6.14 : Μοντέλο εναλλάκτη θερμότητας στο Simulink

Το υπόλοιπο μοντέλο της μονάδας GT-CAES στο Simulink αντιστοιχεί στις συναρτήσεις μεταφοράς και στις αλγεβρικές εξισώσεις που παρατέθηκαν στην ενότητα 6.1 με σχέσεις και με σχήματα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

Αεριοστρόβιλος με αεροφυλάκιο-Μονάδα GT-CAES στο αυτόνομο σύστημα της Ρόδου

Στο Κεφάλαιο αυτό προσομοιώνεται το αυτόνομο σύστημα της Ρόδου σε ένα αρχικό σενάριο παραγωγής. Η εξεταζόμενη διαταραχή είναι η αποσύνδεση ενός σταθμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας λόγω σφάλματος. Σκοπός του παρόντος Κεφαλαίου είναι να εξεταστεί η επίδραση της ένταξης στο σύστημα της Ρόδου μιας αεριοστροβιλικής μονάδας με αεροφυλάκιο και μιας μονάδας GT-CAES. Συγκεκριμένα, στην ενότητα 7.1 παρατίθενται γενικά στοιχεία του συστήματος της Ρόδου και των διατάξεων που ενυπάρχουν σε αυτό. Στην ενότητα 7.2 εξετάζεται η απόκριση του συστήματος στην προαναφερθείσα διαταραχή, όταν σε αυτό ενταχθεί αεριοστροβιλική μονάδα με αεροφυλάκιο. Στις ενότητες 7.3 και 7.4 προσομοιώνεται το σύστημα όταν σε αυτό ενταχθεί μια μονάδα GT-CAES που λειτουργεί σε κατάσταση παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και σε κατάσταση αποθήκευσης, αντίστοιχα.

7.1 Περιγραφή του αυτόνομου συστήματος της Ρόδου

Στον Πίνακα 7.1 φαίνονται κάποια τυπικά χαρακτηριστικά του συστήματος της Ρόδου αναφορικά με το φορτίο, τις συμβατικές μονάδες παραγωγής και τα αιολικά πάρκα. Στη διπλωματική εργασία [44] εξετάστηκαν τα δύο σενάρια λειτουργίας που φαίνονται στον Πίνακα 7.1, δηλαδή προσομοιώθηκε το σύστημα της Ρόδου σε συνθήκες μέγιστης αιολικής παραγωγής και σε κατάσταση μέγιστης αιολικής διείσδυσης. Σημειώνεται ότι οι συνθήκες αυτές αναφέρονται σε εκτίμηση του 2008 για ένα μελλοντικό σενάριο.

Πίνακας 7.1: Βασικά χαρακτηριστικά και σενάρια λειτουργίας του ΣΗΕ της Ρόδου

| ΣΗΕ Ρόδου | | |
|---|-------------------------------|--------------------------------|
| Μέγιστη ζήτηση (MW) | 233,1 | |
| Ονομαστική ισχύς συμβατικών μονάδων (MW) | 322,9 | |
| Ονομαστική ισχύς αιολικών σταθμών (MW) | 48,8 | |
| Σενάρια λειτουργίας | Α (Μέγιστη παραγωγή αιολικών) | Β (Μέγιστη διείσδυση αιολικών) |
| Φορτίο Συστήματος (MW) | 168,75 | 83,07 |
| Παραγωγή Αιολικών (MW) | 45,23 | 28,24 |
| Παραγωγή Αιολικών (% Εγκ. Ισχύος) | 92,7% | 57,9% |
| Διείσδυση Αιολικών (% Φορτίου Συστήματος) | 26,8% | 34% |

Στο ηλεκτρικό σύστημα της Ρόδου υπάρχουν τρεις τύποι μονάδων παραγωγής. Συγκεκριμένα αυτοί είναι ατμοηλεκτρικός σταθμός, αεριοστροβιλική μονάδα και νηξελοηλεκτρικός σταθμός. Ως κρίσιμη διαταραχή επιλέχθηκε η απώλεια των ατμοηλεκτρικών μονάδων που είναι ενταγμένες στο σύστημα. Τα αρχικά σενάρια που θα εξεταστούν στο παρόν Κεφάλαιο αναφέρονται στις ενότητες 7.2, 7.3 και 7.4, όπου ενσωματώνεται στο σύστημα της Ρόδου η αεριοστροβιλική μονάδα με αεροφυλάκιο, η μονάδα GT-CAES σε καταστάσεις παραγωγής και αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας, αντίστοιχα.

Ο ατμοηλεκτρικός και ο νηξελοηλεκτρικός σταθμός έχουν περιγραφεί και μοντελοποιηθεί στο Κεφάλαιο 2. Όσον αφορά το μοντέλο της αεριοστροβιλικής μονάδας με αεροφυλάκιο, έχει παρουσιαστεί εκτενώς στο Κεφάλαιο 4. Το μοντέλο της συμβατικής αεριοστροβιλικής μονάδας είναι ίδιο με αυτό της αεριοστροβιλικής μονάδας με αεροφυλάκιο, με τη διαφορά ότι δεν υπάρχει αεροφυλάκιο. Συνεπώς οι εξισώσεις του Κεφαλαίου 4 ισχύουν και για τη συμβατική αεριοστροβιλική μονάδα, αμελώντας την επίδραση του αεροφυλακίου (θεωρώντας δηλαδή στους τύπους του Κεφαλαίου 4 μηδενική εγχεόμενη ροή στο θάλαμο καύσης από το αεροφυλάκιο). Τέλος, η μονάδα GT-CAES έχει αναφερθεί στο Κεφάλαιο 6, όπου έχουν παρατεθεί οι σχέσεις που περιγράφουν τη συμπεριφορά της.

Τα μοντέλα των παραπάνω μονάδων έχουν ως έξοδο την παραγόμενη μηχανική ισχύ και ροπή στον άξονα περιστροφής. Η μοντελοποίηση του ηλεκτρικού μέρους της γεννήτριας γίνεται σε ξεχωριστό μπλοκ (ενότητα 2.2), και αναφέρεται στο μοντέλο της σύγχρονης μηχανής. Σημειώνεται ότι στο μπλοκ αυτό περιλαμβάνεται και το μηχανικό μοντέλο του άξονα περιστροφής (εξισώσεις κίνησης δρομέα). Έτσι κάθε σύγχρονη γεννήτρια συνοδεύεται και από το αντίστοιχο μπλοκ ρυθμιστή στροφών, όπως αυτά περιγράφηκαν στα Κεφάλαια 2, 4 και 6. Τα δεδομένα του αεριοστροβίλου, του ατμοστροβίλου και της νηξελομηχανής δίνονται στους Πίνακες 7.8 έως 7.10. Οι τιμές παραμέτρων του αεροφυλακίου και της μονάδας GT-CAES παρατίθενται στους Πίνακες 7.14 και 7.15 αντίστοιχα.

Για την παράσταση των συστημάτων διέγερσης και ρύθμισης της τάσης των σύγχρονων γεννητριών του συστήματος χρησιμοποιήθηκε το απλοποιημένο μοντέλο αυτόματου ρυθμιστή τάσης τύπου AC4 κατά IEEE το οποίο περιγράφηκε στην ενότητα 2.9. Τα δεδομένα του APT παρατίθενται στον Πίνακα 7.7, σε συνδυασμό με τις παραμέτρους της αντίστοιχης γεννήτριας στην οποία συνδέεται.

Στο ηλεκτρικό σύστημα της Ρόδου παριστάνονται ανεμογεννήτριες τύπου Α, Γ και Δ. Τα μοντέλα των ανεμογεννητριών αυτών έχουν περιγραφεί στο Κεφάλαιο 2. Σημειώνεται ότι η πλήρης μοντελοποίηση των διαφόρων τύπων ανεμογεννητριών γίνεται στα συγγράμματα [5], [52] και [44]. Για τα πέντε αιολικά πάρκα που θεωρούμε σε λειτουργία στο νησί έχει ακολουθηθεί η λογική της ισοδύναμης ενοποιημένης ανεμογεννήτριας (aggregated model). Επειδή δηλαδή τα πάρκα αποτελούνται από ομοειδείς ανεμογεννήτριες (ίδιες ονομαστικής ισχύος και κοινά τεχνικά χαρακτηριστικά), αυτές αναπαρίστανται από μία ισοδύναμη Α/Γ, ισχύος ίση με τη συνολική του πάρκου. Κάνουμε την παραδοχή για ενιαία ταχύτητα ανέμου και αμελούμε τις ιδιαιτερότητες της εσωτερικής εγκατάστασης του κάθε πάρκου.

Κάθε αιολικό πάρκο συνδέεται στο δίκτυο μέσω μετασχηματιστή ανυψώσεως. Στους Πίνακες 7.4 και 7.5 δίνονται αναλυτικότερα στοιχεία για τον τρόπο σύνδεσης του καθενός, με τα δεδομένα του αντίστοιχου μετασχηματιστή και την ονομαστική ισχύ του κάθε πάρκου. Οι λειτουργικές παράμετροι των αιολικών πάρκων παρατίθενται στους Πίνακες 7.11 έως 7.13.

Όσον αφορά την διαμόρφωση της εντολής έγχυσης αέργου ισχύος στα τέσσερα πάρκα που αποτελούνται από ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών (Τύπος Γ και Δ), επιλέχθηκε λειτουργία σταθερού συντελεστή ισχύος (PF). Επιπροσθέτως, με βάση τις απαιτήσεις που θέτουν οι σύγχρονοι κώδικες για τα Α/Π, θεωρούμε ότι όλες οι ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών ακολουθούν τη λογική αδιάλειπτης λειτουργίας σε βυθίσεις τάσης (LVRT). Εξαίρεση αποτελεί το Α/Π 4, αποτελούμενο από Α/Γ σταθερών στροφών, όπου θεωρούμε ότι λειτουργεί προστασία υπότασης με κρίσιμη τιμή αποσύνδεσης τη 0,85 αμ τερματική τάση.

Στο σύστημα της Ρόδου υπάρχουν εγκατεστημένοι ηλεκτρονόμοι (H/N) υποσυχνότητας στους υποσταθμούς διανομής του φορτίου (ΣΟΡ ΜΤ, ΙΑΛ ΜΤ, ΡΔΙ ΜΤ, ΑΦ ΜΤ, ΓΕΝ ΜΤ, ΡΟΔ ΜΤ). Η προστασία υποσυχνότητας για το ηλεκτρικό σύστημα της Ρόδου υλοποιείται με σύστημα αποκοπής φορτίου που ενεργοποιείται μόνο με την τιμή της συχνότητας, χωρίς να

λαμβάνεται υπόψη και ο ρυθμός πτώσης της συχνότητας. Τα όρια υποσυχνότητας κυμαίνονται από 48,5 έως 48 Hz, με τον κάθε H/N να απορρίπτει το ανάλογο φορτίο όταν η συχνότητα πέσει κάτω από το επίπεδο ρύθμισής του για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα από την αντίστοιχη καθυστέρηση [44]. Να σημειωθεί εδώ πως στα πλαίσια των προσομοιώσεων η αποκοπή φορτίου δεν γίνεται αυτόματα, αλλά με βάση την απόκριση της συχνότητας υπολογίζεται αν θα συμβεί αποκοπή λόγω δράσης των H/N. Έτσι δεν παρατίθενται αναλυτικά στοιχεία για τη δράση των H/N και απλά γίνεται διάγνωση της αποκοπής φορτίου όταν η συχνότητα του συστήματος πέσει κάτω των 48,5 Hz μετά τη διαταραχή.

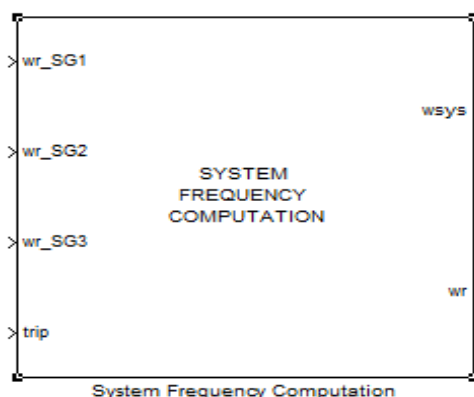
Η παράσταση των φορτίων γίνεται μέσω της μετατροπής τους σε σταθερές αγωγιμότητες, ανεξάρτητες από την συχνότητα του δικτύου, σύμφωνα με τις παρακάτω εξισώσεις [44]:

$$G = \frac{P_0}{V_0^2}, \quad B = -\frac{Q_0}{V_0^2} \quad (7.1)$$

όπου P_0, Q_0, V_0 , η ενεργός ισχύς, η άεργος ισχύς και η τάση του φορτίου στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας προ της διαταραχής.

Σημειώνεται ακόμη πως λόγω έλλειψης λεπτομερών στοιχείων αλλά και για λόγους απλότητας θεωρούμε ότι όλοι οι μετασχηματιστές του δικτύου είναι σταθερής λήψης, αγνοούμε δηλαδή τη δράση των ΣΑΤΥΦ.

Η γωνιακή ταχύτητα του σύγχρονου πλαισίου αναφοράς του συστήματος (w_{sys}) στην περίπτωση αυτόνομων δικτύων λαμβάνεται ως ο σταθμισμένος μέσος όρος των συχνοτήτων που προκύπτουν από τις σύγχρονες γεννήτριες με βάση τη σχέση (2.1). Σχηματικά, παρατίθεται το μπλοκ υλοποίησης του υπολογισμού της σταθμισμένης συχνότητας στο Σχήμα 7.1. Σύμφωνα με αυτό, η σταθμισμένη συχνότητα προκύπτει με βάση τις γωνιακές ταχύτητες των σύγχρονων γεννητριών (wr_SG1, wr_SG2, wr_SG3) [44]. Κατά τη στιγμή της αποσύνδεσης της μιας μονάδας, αλλάζει η τιμή της μεταβλητής *trip* και πλέον ο σταθμισμένος μέσος όρος προκύπτει από τις δύο εναπομένουσες συμβατικές μονάδες. Κατά την ίδια λογική, η μεταβλητή *trip* τη στιγμή της αποσύνδεσης δίνει εντολή για μηδενική έγχυση ρευμάτων εκ μέρους της γεννήτριας που αποσυνδέεται, προσαρμόζοντας κατάλληλα το διάλυμα της *di2dn*, με το οποίο τροφοδοτείται η ρουτίνα επίλυσης των αλγεβρικών εξισώσεων του δικτύου (παράγραφοι 2.1.3 και 2.2.5).



Σχήμα 7.1: Μπλοκ υπολογισμού σταθμισμένης συχνότητας του συστήματος

Εδώ αξίζει να σημειωθεί ότι στο σύστημα της Ρόδου, οι μονάδες (νηξελογεννήτρια, ατμοηλεκτρικός σταθμός, αεριοστροβιλική μονάδα) είναι εγκατεστημένες σε 3 διαφορετικούς ζυγούς. Συγκεκριμένα υπάρχουν συνολικά 4 αεριοστροβιλικές μονάδες εγκατεστημένες στο ζυγό 1, 2 ατμοηλεκτρικές μονάδες στο ζυγό 2, και 8 νηξελογεννήτριες στον ζυγό 3. Σε περίπτωση αρχικού σεναρίου παραγωγής όπου σε κάποιο ζυγό είναι συνδεδεμένες άνω των δύο όμοιων μονάδων παραγωγής, γίνεται η παραδοχή ότι η γεννήτρια

και ο αντίστοιχος ρυθμιστής στροφών έχουν ονομαστική ισχύ το άθροισμα των ονομαστικών ισχύων των επιμέρους μονάδων. Δηλαδή δεν μοντελοποιείται ξεχωριστά η κάθε όμοια μονάδα παραγωγής, αλλά ακολουθείται η λογική της ισοδύναμης ενοποιημένης μονάδας, όπως στην περίπτωση των αιολικών πάρκων. Στον Πίνακα 7.2 αναφέρονται οι ζυγοί του συστήματος της Ρόδου σε συνδυασμό με την κωδική ονομασία τους [44].

Πίνακας 7.2: Κωδική ονομασία και αρίθμηση ζυγών στην προσομοίωση του συστήματος της Ρόδου

| Ονομασία ζυγού | Κωδικός αριθμός ζυγού | Ονομασία ζυγού | Κωδικός αριθμός ζυγού | Ονομασία ζυγού | Κωδικός αριθμός ζυγού |
|----------------|-----------------------|----------------|-----------------------|----------------|-----------------------|
| ΣΟΡ (GAS) | 1 | ΓΕΝ ΥΤ | 8 | ΓΕΝ ΜΤ | 15 |
| ΣΟΡ (STEAM) | 2 | ΡΟΔ ΥΤ | 9 | ΡΟΔ ΜΤ | 16 |
| ΝΡΟΔ (DIESEL) | 3 | ΝΡΟΔ ΥΤ | 10 | ΨΖ | 17 |
| ΣΟΡ ΥΤ | 4 | ΣΟΡ ΜΤ | 11 | ΑΦ (Α/Π 1) | 18 |
| ΙΑΛ ΥΤ | 5 | ΙΑΛ ΜΤ | 12 | ΓΕΝ (Α/Π 5) | 19 |
| ΡΔΙ ΥΤ | 6 | ΡΔΙ ΜΤ | 13 | ΑΦ (Α/Π 3) | 20 |
| ΑΦ ΥΤ | 7 | ΑΦ ΜΤ | 14 | ΓΕΝ (Α/Π 2) | 21 |

Στον Πίνακα 7.3 παρατίθενται τα δεδομένα των μετασχηματιστών ανυψώσεως από τη Μέση Τάση προς την Υψηλή Τάση. Σημειώνεται ότι ως R και X συμβολίζεται η ωμική αντίσταση και η επαγωγική αντίδραση του κάθε μετασχηματιστή αντίστοιχα, στη βάση ισχύος του συστήματος (100 MVA). Όσον αφορά το λόγο μετασχηματισμού, για τις προσομοιώσεις της παρούσας διπλωματικής, διατηρήθηκαν οι τιμές του Σεναρίου Β που περιγράφεται στο [44].

Πίνακας 7.3: Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά Μετασχηματιστών Ανυψώσεως

| Μ/Σ σε βάση ισχύος 100 MVA | | | | |
|----------------------------|---------------|---------|---------|-----------------------|
| Ζυγός ΥΤ | Ζυγός ΜΤ | R (αμ) | X (αμ) | Λόγος μετασχηματισμού |
| ΣΟΡ ΥΤ | ΣΟΡ ΜΤ | 0,01008 | 0,39983 | 1 |
| ΡΔΙ ΥΤ | ΡΔΙ ΜΤ | 0,0029 | 0,21486 | 1,0125 |
| ΙΑΛ ΥΤ | ΙΑΛ ΜΤ | 0,0029 | 0,21486 | 1,0125 |
| ΓΕΝ ΥΤ | ΓΕΝ ΜΤ | 0,01008 | 0,39983 | 1,025 |
| ΑΦ ΥΤ | ΑΦ ΜΤ | 0,0029 | 0,21486 | 1 |
| ΡΟΔ ΥΤ | ΡΟΔ ΜΤ | 0,0029 | 0,21486 | 1,0125 |
| ΣΟΡ ΥΤ | ΣΟΡ (GAS) | 0,01266 | 0,39983 | 1,0625 |
| ΣΟΡ ΥΤ | ΣΟΡ (STEAM) | 0,0125 | 0,21486 | 1,067 |
| ΝΡΟΔ ΥΤ | ΝΡΟΔ (DIESEL) | 0,0025 | 0,21486 | 1,05 |

Στους Πίνακες 7.4 και 7.5 δίνονται τα δεδομένα των αιολικών πάρκων και των μετασχηματιστών σύνδεσής τους στο δίκτυο, αντίστοιχα [44]. Η ωμική αντίσταση R των μετασχηματιστών έχει θεωρηθεί μηδενική.

Πίνακας 7.4: Δεδομένα Αιολικών Πάρκων του συστήματος της Ρόδου

| Κωδικός Αιολικού Πάρκου | Όνομασία ζυγού σύνδεσης Α/Π | Κωδικός αριθμός ζυγού | Τύπος Α/Γ | Πλήθος Α/Γ | Ισχύς Α/Γ (KW) | Εγκατεστημένη ισχύς Α/Π (MW) |
|-------------------------|-----------------------------|-----------------------|-----------|------------|----------------|------------------------------|
| 1 | ΑΦ (Α/Π1) | 18 | Γ | 13 | 850 | 11,05 |
| 2 | ΓΕΝ (Α/Π2) | 21 | Δ | 9 | 2000 | 18 |
| 3 | ΑΦ (Α/Π3) | 20 | Δ | 5 | 660 | 3,3 |
| 4 | ΣΟΡ ΜΤ | 11 | Α | 13 | 900 | 11,7 |
| 5 | ΓΕΝ (Α/Π5) | 19 | Γ | 7 | 850 | 5,95 |

Πίνακας 7.5: Δεδομένα μετασχηματιστών σύνδεσης Αιολικών Πάρκων στο δίκτυο ΜΤ

| Μ/Σ σύνδεσης Α/Π σε βάση ισχύος 100 MVA | | | |
|---|---------------------|--|--------|
| Κωδικός Αιολικού Πάρκου | Υποσταθμός σύνδεσης | X (αμ) | R (αμ) |
| 1 | ΑΦ ΜΤ | 0,3257 | 0,0 |
| 2 | ΓΕΝ ΜΤ | 0,2222 | 0,0 |
| 3 | ΑΦ ΜΤ | 1,21 | 0,0 |
| 5 | ΓΕΝ ΜΤ | 0,605 | 0,0 |
| 4 | ΣΟΡ ΜΤ | ** Έχουν συμπεριληφθεί στη σύνθετη αντίσταση του στάτη της ισοδύναμης μηχανής επαγωγής | |

Στον Πίνακα 7.6 παρατίθενται τα δεδομένα των γραμμών μεταφοράς [44], όπου φαίνονται ο ζυγός αναχώρησης και ο ζυγός άφιξης της γραμμής. Οι παράμετροι R, X, B, αντιστοιχούν στην ωμική αντίσταση, επαγωγική αντίδραση, εγκάρσια αγωγιμότητα της γραμμής, αντίστοιχα, στη βάση ισχύος του συστήματος (100 MVA).

Πίνακας 7.6: Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά Γραμμών Μεταφοράς

| Γραμμές Μεταφοράς σε βάση ισχύος 100 MVA | | | | | |
|--|---|---------|----------|----------|---------|
| Γραμμή Μεταφοράς | | | R (αμ) | X (αμ) | B (αμ) |
| ΣΟΡ ΥΤ | - | ΡΔΙ ΥΤ | 0,01094 | 0,0441 | 0,01655 |
| ΣΟΡ ΥΤ | - | ΡΔΙ ΥΤ | 0,01094 | 0,0441 | 0,01655 |
| ΣΟΡ ΥΤ | - | ΙΑΛ ΥΤ | 0,01595 | 0,03883 | 0,0114 |
| ΣΟΡ ΥΤ | - | ΓΕΝ ΥΤ | 0,02291 | 0,09237 | 0,03488 |
| ΣΟΡ ΥΤ | - | ΑΦ ΥΤ | 0,00699 | 0,02818 | 0,01064 |
| ΡΔΙ ΥΤ | - | ΑΦ ΥΤ | 0,01497 | 0,03846 | 0,0107 |
| ΡΔΙ ΥΤ | - | ΡΟΔ ΥΤ | 0,0006 | 0,0023 | 0,03382 |
| ΙΑΛ ΥΤ | - | ΡΟΔ ΥΤ | 0,0071 | 0,0171 | 0,03877 |
| ΓΕΝ ΥΤ | - | ΝΡΟΔ ΥΤ | 0,01014 | 0,04088 | 0,01543 |
| ΑΦ ΥΤ | - | ΨΖ ΥΤ | 0,007485 | 0,010823 | 0,00535 |
| ΨΖ ΥΤ | - | ΝΡΟΔ ΥΤ | 0,007485 | 0,010823 | 0,00535 |

Στον Πίνακα 7.7 αναφέρονται τα δεδομένα των γεννητριών και των αντίστοιχων ΑΡΤ, που αντιστοιχούν στις ατμοηλεκτρικές μονάδες (Steam 1,2), στις αεριοστροβιλικές μονάδες (Gas 1-4) και στις νηζελογεννήτριες (Diesel 1-8) [44].

Πίνακας 7.7: Χαρακτηριστικά Γεννητριών και APT Συστήματος Ρόδου

| Χαρακτηριστικό | | Μονάδα Παραγωγής | | |
|----------------------------|--|------------------|----------|------------|
| Παράμετρος | Επεξήγηση παραμέτρου | Steam 1,2 | Gas 1-4 | Diesel 1-8 |
| Γεννήτρια-Στροβίλος | | | | |
| S_N (MVA) | Ονομαστική φαινόμενη ισχύς της γεννήτριας | 20 | 47,5 | 19,5 |
| V_N (kV) | Ονομαστική τάση εξόδου της γεννήτριας | 6,3 | 11,5 | 11 |
| P_{nom} (MW) | Αποδιδόμενη Καθαρή Ισχύς του στροβίλου | 14,2 | 27,5 | 15 |
| X_{ls} | Επαγωγική αντίδραση σκεδάσεως στάτη (αμ στη βάση της γεννήτριας) | 0,1064 | 0,12 | 0,175 |
| X_d | Σύγχρονη αντίδραση ευθέως άξονα (αμ στη βάση της γεννήτριας) | 2,351 | 1,88 | 2,07 |
| X_q | Σύγχρονη αντίδραση εγκάρσιου άξονα (αμ στη βάση της γεννήτριας) | 2,25 | 1 | 1,04 |
| X_d' | Μεταβατική αντίδραση ευθέως άξονα (αμ στη βάση της γεννήτριας) | 0,215 | 0,3 | 0,35 |
| X_q' | Μεταβατική αντίδραση εγκάρσιου άξονα (αμ στη βάση της γεννήτριας) | 0,45 | 0,34 | 0,236 |
| T_d | Μεταβατική χρονική σταθερά ανοιχτού κυκλώματος ευθέως άξονα (sec) | 8,99 | 9,6 | 5,8 |
| T_q | Μεταβατική χρονική σταθερά ανοιχτού κυκλώματος εγκάρσιου άξονα (sec) | 0,5 | 0,4 | 0,128 |
| H | Σταθερά αδράνειας σε sec (αμ στη βάση ισχύος του στροβίλου) | 3,82 | 1,5 | 1,33 |
| R_s | Ωμική αντίσταση στάτη (αμ στη βάση της γεννήτριας) | 0 | 0 | 0 |
| R | Στατισμός μονάδας (αμ στη βάση ισχύος του στροβίλου) | 0,05 | 0,04 | 0,04 |
| APT | | | | |
| K_A | Αναλογικό κέρδος του Αυτόματου Ρυθμιστή Τάσεως της γεννήτριας | 55 | 50 | 100 |
| T_A | Χρονική σταθερά του Αυτόματου Ρυθμιστή Τάσεως της γεννήτριας | 0,35 | 0,3 | 0,04 |
| T_B | Χρονικές σταθερές φίλτρου μεταπορείας | 15 | 15 | 10 |
| T_C | | 1,5 | 1,5 | 1,5 |
| $E_{fmin} - E_{fmax}$ | Όρια τάσης διέγερσης | 0 - 5,05 | 0 - 5,05 | 0 - 6,9 |

Στον Πίνακα 7.8 φαίνονται τα δεδομένα του αεριοστροβίλου. Τα δεδομένα αυτά είναι ίδια με αυτά της αεριοστροβλικής μονάδας που αναπτύχθηκε στο Κεφάλαιο 4 και παρατέθηκαν στο Κεφάλαιο 5.

Πίνακας 7.8: Δεδομένα αεριοστροβίλων

| Συμβολισμός | Παράμετρος | Τιμή | Μονάδα Μέτρησης |
|-----------------|--|--------|-----------------|
| T_i | Θερμοκρασία εισόδου του συμπιεστή (ονομαστική) | 303 | (°K) |
| T_{f0} | Θερμοκρασία εισόδου στροβίλου (ονομαστική) | 1358 | (°K) |
| $T_{rp.u}$ | Θερμοκρασία αναφοράς ελέγχου υπερθέρμανσης | 1,01 | Ανά μονάδα |
| $P_{e1p.u.}$ | Ισχύς έναρξης δεύτερης περιοχής λειτουργίας | 0,85 | Ανά μονάδα |
| $P_{e2p.u.}$ | Ισχύς έναρξης τρίτης περιοχής λειτουργίας | 0,55 | Ανά μονάδα |
| P_{c0} | Ονομαστικός λόγος συμπίεσης | 11,5 | Απόλυτη τιμή |
| γ | Λόγος ειδικών θερμοχωρητικοτήτων (c_p/c_v) | 1,4 | Απόλυτη τιμή |
| η_c | Εσωτερικός βαθμός απόδοσης συμπιεστή | 0,85 | Απόλυτη τιμή |
| η_t | Εσωτερικός βαθμός απόδοσης στροβίλου | 0,85 | Απόλυτη τιμή |
| $T_{r1p.u.}$ | Θερμοκρασία αναφοράς περυγίων εισόδου | 0,939 | Ανά μονάδα |
| T_g | Χρονική σταθερά ρυθμιστή στροφών | 0,05 | (s) |
| K_4 | Κέρδος ασπίδας θερμότητας (ακαριαία) | 0,8 | Ανά μονάδα |
| K_5 | Κέρδος ασπίδας θερμότητας (σταδιακά) | 0,2 | Ανά μονάδα |
| T_3 | Χρονική σταθερά ασπίδας θερμότητας | 15 | (s) |
| T_4 | Χρονική σταθερά αισθητήρα θερμοκρασίας | 2,5 | (s) |
| T_5 | Χρονική σταθερά του τμήματος του ελέγχου θερμοκρασίας που παρεμβαίνει στην ροή του καυσίμου | 3,3 | (s) |
| T_t | Ρυθμός ολοκλήρωσης του τμήματος του ελέγχου θερμοκρασίας που παρεμβαίνει στην ροή του καυσίμου | 0,4699 | (s) |
| T_{cmax} | Μέγιστη τιμή της εξόδου T_c του τμήματος ελέγχου θερμοκρασίας | 1,1 | Ανά μονάδα |
| F_{dmax} | Άνω όριο εισόδου στον έλεγχο καυσίμου | 1,5 | Ανά μονάδα |
| F_{dmin} | Κάτω όριο εισόδου στον έλεγχο καυσίμου | 0 | Ανά μονάδα |
| K_3 | Εύρος ανοίγματος βαλβίδας καυσίμου | 0,77 | Ανά μονάδα |
| K_6 | Ελάχιστο άνοιγμα βαλβίδας καυσίμου | 0,23 | Ανά μονάδα |
| T_v | Χρονική σταθερά ρυθμιστή θέσης της βαλβίδας καυσίμου | 0,05 | (s) |
| T_f | Χρονική σταθερά συστήματος καυσίμου | 0,4 | (s) |
| g_{max} | Μέγιστο άνοιγμα περυγίων εισόδου | 1 | Ανά μονάδα |
| g_{min} | Ελάχιστο άνοιγμα περυγίων εισόδου | 0,7333 | Ανά μονάδα |
| T_{igv} | Χρονική σταθερά περυγίων | 0,1 | (s) |
| T_{cd} | Χρονική σταθερά αεριοστροβίλου | 0,2 | (s) |
| \dot{g}_{max} | Μέγιστος ρυθμός αύξησης ανοίγματος περυγίων | 0,01 | Ανά μονάδα / s |
| \dot{g}_{min} | Μέγιστος ρυθμός μείωσης ανοίγματος περυγίων | -0,01 | Ανά μονάδα / s |
| T_{pw} | Χρονική σταθερά μετρητή ηλεκτρικής ισχύος | 0,05 | (s) |

Στους Πίνακες 7.9 και 7.10 παρατίθενται τα λειτουργικά δεδομένα των ρυθμιστών στροφών των ατμοηλεκτρικών μονάδων και των νηξεληλεκτρικών σταθμών, αντίστοιχα [44].

Πίνακας 7.9: Δεδομένα ατμοστροβίλων

| Συμβολισμός | Παράμετρος | Τιμή |
|-------------|---|-------|
| T_{sm} | Χρονική σταθερά σερβομηχανισμού (s) | 0,1 |
| z_{max} | Μέγιστος ρυθμός ανοίγματος βαλβίδας ατμού (pu/s) | 0,03 |
| z_{min} | Μέγιστος ρυθμός κλεισίματος βαλβίδας ατμού (pu/s) | -0,03 |
| F_{hp} | Ποσοστό που εκτονώνεται στο στρόβιλο υψηλής πίεσης (pu) | 0,4 |
| F_{mp} | Ποσοστό που εκτονώνεται στο στρόβιλο μέσης πίεσης (pu) | 0,3 |
| T_{hp} | Χρονική σταθερά εκτόνωσης υψηλής πίεσης (s) | 0,2 |
| T_r | Χρονική σταθερά αναθέρμανσης (s) | 4 |
| T_{bp} | Χρονική σταθερά εκτόνωσης χαμηλής πίεσης (s) | 0,3 |

Πίνακας 7.10: Δεδομένα νηξελομηχανών

| Συμβολισμός | Παράμετρος | Τιμή |
|-------------|--|------|
| T_d | Χρονική σταθερά ρυθμιστή στροφών (s) | 0,07 |
| rate max | Μέγιστος ρυθμός ανοίγματος βαλβίδας καυσίμου (pu/s) | 0,1 |
| rate min | Μέγιστος ρυθμός κλεισίματος βαλβίδας καυσίμου (pu/s) | -0,1 |
| P_{max} | Μέγιστη παραγωγή ισχύος (pu) | 1 |

Στους Πίνακες 7.11, 7.12 και 7.13, δίνονται τα δεδομένα των αιολικών πάρκων και οι τιμές των παραμέτρων των διαφόρων βρόχων ελέγχου [44].

Πίνακας 7.11: Τιμές Παραμέτρων Α/Π 4 (Τύπου Α)

| Παράμετρος | Επεξήγηση παραμέτρου | Τιμή |
|------------------|---|------|
| S_{base} (MVA) | Βάση ισχύος συστήματος | 100 |
| f_{base} (Hz) | Ονομαστική συχνότητα συστήματος | 50 |
| bus code | Ζυγός σύνδεσης | 11 |
| S_{nom} (MVA) | Ονομαστική φαινόμενη ισχύς Αιολικού Πάρκου | 11,7 |
| f_{nom} (Hz) | Ονομαστική συχνότητα λειτουργίας | 50 |
| R_s | Αντίσταση στάτη (αμ) | 0,01 |
| X_{ls} | Επαγωγική αντίδραση στάτη (αμ) | 0,1 |
| X_m | Επαγωγική αντίδραση μαγνήτισης (αμ) | 3 |
| R_r | Αντίσταση δρομέα (αμ) | 0,1 |
| X_{lr} | Επαγωγική αντίδραση δρομέα (αμ) | 0,08 |
| H (s) | Συνολική ανηγμένη σταθερά αδρανείας (για λογική μίας μάζας) | 3 |
| n_{turb} | Αριθμός Α/Γ | 13 |
| radius (m) | Ακτίνα πτερωτής | 26,1 |
| ratio | Λόγος μειωτήρα στροφών (κιβώτιο ταχυτήτων) | 67,5 |
| v_{nom} (m/s) | Ονομαστική ταχύτητα ανέμου | 15 |
| p_{nom} (MW) | Ονομαστική ενεργός ισχύς | 0,9 |
| poles | Αριθμός πόλων γεννήτριας επαγωγής | 4 |
| H_f (s) | Ανηγμένη σταθερά αδρανείας για τον δρομέα της μηχανής επαγωγής και του κιβωτίου ταχυτήτων, που θεωρούνται μια μάζα και αναφέρονται στην πλευρά υψηλών ταχυτήτων | 0,5 |
| H_l (s) | Ανηγμένη σταθερά αδρανείας του δρομέα του ανεμοκινητήρα (πλευρά χαμηλών ταχυτήτων) | 2,5 |

| | | |
|----------|---------------------------------|-----|
| K_{sh} | Σταθερά ελαστικότητας του άξονα | 0,3 |
| D_{sh} | Συντελεστής απόσβεσης | 0 |

Πίνακας 7.12: Τιμές Παραμέτρων Α/Π1 και Α/Π5 (Τύπου Γ)

| Παράμετρος | Επεξήγηση παραμέτρου | Τιμή Παραμέτρου Α/Π 1 | Τιμή Παραμέτρου Α/Π 5 |
|------------------|---|-----------------------|-----------------------|
| S_{base} (MVA) | Βάση ισχύος συστήματος | 100 | 100 |
| f_{base} (Hz) | Ονομαστική συχνότητα συστήματος | 50 | 50 |
| bus code | Κωδικός αρίθμησης ζυγού | 18 | 19 |
| S_{nom} (MVA) | Ονομαστική φαινόμενη ισχύς | 12,28 | 6,612 |
| f_{nom} (Hz) | Ονομαστική συχνότητα λειτουργίας | 50 | 50 |
| K_{pll} | Παράμετροι βρόχου κλειδώματος φάσης: κέρδος βρόχου, όρια ρυθμού αύξησης και μείωσης της γωνίας μεταξύ του πλαισίου της μηχανής και της τερματικής τάσης | 30 | 30 |
| PLL_{MX} | | 0,1 | 0,1 |
| PLL_{MN} | | -0,1 | -0,1 |
| H_r (s) | Ανηγμένη σταθερά αδράνειας για τον δρομέα της μηχανής επαγωγής και το κιβώτιο ταχυτήτων | 0,962 | 0,962 |
| H_l (s) | Ανηγμένη σταθερά αδράνειας του δρομέα του ανεμοκινητήρα | 3,395 | 3,395 |
| D_{tg} | Συντελεστής απόσβεσης | 2,344 | 2,344 |
| K_{tg} | Σταθερά ελαστικότητας του άξονα | 1,387 | 1,387 |
| X_{eq} | Ισοδύναμη αντίδραση Norton (αμ) | 0,8 | 0,8 |
| n_{turb} | Αριθμός Α/Γ | 13 | 7 |
| v_{nom} (m/s) | Ονομαστική ταχύτητα ανέμου | 11,4 | 11,4 |
| p_{nom} | Ονομαστική ενεργός ισχύς 1Α/Γ (MW) | 0,85 | 0,85 |
| beta_0 (°) | Αρχική γωνία βήματος πτερυγίων | 0 | 0 |
| poles | Αριθμός πόλων | 6 | 6 |
| K_{p-p} | Αναλογικό κέρδος ελεγκτή γωνίας βήματος | 150 | 150 |
| K_{i-p} | Ολοκληρωτικό κέρδος ελεγκτή γωνίας βήματος | 25 | 25 |
| T_{servo} (s) | Χρονική σταθερά σερβομηχανισμού ελεγκτή γωνίας βήματος | 0,3 | 0,3 |
| rate_lim (°/s) | Όρια ρυθμού μεταβολής γωνίας βήματος | 10 | 10 |
| beta_min (°) | Ελάχιστη γωνία βήματος | 0 | 0 |
| beta_max (°) | Μέγιστη γωνία βήματος | 27 | 27 |
| Q_{max} | Άνω όριο αέργου ισχύος (αμ στη βάση της μηχανής) | 0,296 | 0,296 |
| Q_{min} | Κάτω όριο αέργου ισχύος (αμ στη βάση της μηχανής) | -0,436 | -0,436 |
| P_{MX} | Άνω όριο ενεργού ισχύος (αμ στη βάση της μηχανής) | 1,12 | 1,12 |
| P_{MN} | Κάτω όριο ενεργού ισχύος (αμ στη βάση της μηχανής) | 0,04 | 0,04 |
| V_{max} | Άνω όριο της τερματικής τάσης (αμ) | 1,2 | 1,2 |
| V_{min} | Κάτω όριο της τερματικής τάσης (αμ) | 0,9 | 0,9 |

| | | | |
|-------------------|--|------|------|
| XIQ_{min} | Τιμές για τον περιορισμό της αέργου ισχύος όταν είναι ενεργός ο έλεγχος τερματικής τάσης (TVC) | 0,5 | 0,5 |
| XIQ_{max} | | 1,45 | 1,45 |
| R_{comp} (α.μ.) | Ισοδύναμη ωμική αντίσταση από τον ζυγό της ΑΓΔΤ στο σημείο ρύθμισης της τάσης κατά τον έλεγχο ρύθμισης τάσης (VC) | 0 | 0 |
| X_{comp} (α.μ.) | Ισοδύναμη επαγωγική αντίδραση από τον ζυγό της ΑΓΔΤ στο σημείο ρύθμισης της τάσης κατά τον έλεγχο ρύθμισης τάσης (VC) | 0,04 | 0,04 |
| K_{Qi} | Κέρδη ολοκληρωματικών ελεγκτών του ρυθμιστή αέργου ισχύος | 0,05 | 0,05 |
| K_{vi} | | 40 | 40 |
| $w_{p_{min}}$ | Διακριτά σημεία για την καμπύλη ισχύος-ταχύτητας (αμ) | 0,3 | 0,3 |
| $w_{p_{20}}$ | | 0,69 | 0,69 |
| $w_{p_{40}}$ | | 0,78 | 0,78 |
| $w_{p_{60}}$ | | 0,98 | 0,98 |
| $w_{p_{100}}$ | | 1,2 | 1,2 |
| T_{LVPL} | Παράμετροι LVPL : σταθερά χρόνου μέτρησης της τερματικής τάσης, τερματική τάση μηδενισμού του περιοριστή LVPL, τερματική τάση ενεργοποίησης του περιοριστή LVPL, τιμή του περιοριστή στην τερματική τάση ενεργοποίησης, όριο ρυθμού αύξησης του ενεργού ρεύματος | 0,02 | 0,02 |
| $VLVPL1$ | | 0,5 | 0,5 |
| $VLVPL2$ | | 0,9 | 0,9 |
| $GLVPL$ | | 1,11 | 1,11 |
| Rip_{LVPL} | | 5 | 5 |

Πίνακας 7.13: Τιμές Παραμέτρων Α/Π 2 και Α/Π 3 (Τύπου Δ)

| Παράμετρος | Επεξήγηση παραμέτρου | Τιμή Παραμέτρου Α/Π 2 | Τιμή Παραμέτρου Α/Π 3 |
|------------------------------|--|-----------------------|-----------------------|
| S_{base} (MVA) | Βάση ισχύος συστήματος | 100 | 100 |
| bus code | Κωδικός αρίθμησης ζυγού | 21 | 20 |
| P_{nom} (MW) | Ονομαστική ενεργός ισχύς αιολικού πάρκου | 18 | 3,3 |
| R (m) | Ακτίνα περωτής | 37,5 | 22 |
| v_{nom} (m/s) | Ονομαστική ταχύτητα ανέμου | 12 | 12 |
| Nr_{nom} | Ονομαστικές στροφές (ΣΑΛ) | 18 | 32,5 |
| Nr_{min} | Ελάχιστες στροφές (ΣΑΛ) | 9 | 16 |
| p_{nom} (MW) | Ονομαστική ενεργός ισχύς 1 Α/Γ | 2 | 0,66 |
| beta_0 (°) | Αρχική γωνία βήματος πτερυγίων | 0 | 0 |
| pf | Συντελεστής ισχύος | 1 | 1 |
| H (s) | Ανηγμένη σταθερά αδρανείας | 3,64 | 2 |
| K_{p-p} | Αναλογικό κέρδος ελεγκτή γωνίας βήματος | 200 | 200 |
| K_{i-p} | Ολοκληρωτικό κέρδος ελεγκτή γωνίας βήματος | 60 | 60 |
| T_s (s) | Χρονική σταθερά σερβομηχανισμού ελεγκτή γωνίας βήματος | 0,25 | 0,25 |
| betadot _{max} (°/s) | Όρια ρυθμού μεταβολής γωνίας βήματος | 8 | 8 |

| | | | |
|--------------------------|--|--------|------|
| β_{\min} (°) | Ελάχιστη γωνία βήματος | 0 | 0 |
| β_{\max} (°) | Μέγιστη γωνία βήματος | 30 | 30 |
| R_{comp} (α.μ.) | Ισοδύναμη ωμική αντίσταση από τον θερματικό ζυγό του αιολικού πάρκου στο σημείο ρύθμισης της τάσης κατά τον έλεγχο ρύθμισης τάσης (vc) | 0 | 0 |
| X_{comp} (α.μ.) | Ισοδύναμη επαγωγική αντίδραση από τον θερματικό ζυγό του αιολικού πάρκου στο σημείο ρύθμισης της τάσης κατά τον έλεγχο ρύθμισης τάσης (vc) | 0,2222 | 1,21 |
| $k_{p,q}$ | Κέρδη PI ελεγκτή κατά τον έλεγχο ρύθμισης τάσης του σημείου κοινής σύνδεσης του αιολικού πάρκου με το δίκτυο (vc) | 5 | 5 |
| $K_{i,q}$ | | 0,5 | 0,5 |
| T_i (s) | Σταθερά χρόνου μέτρησης της τάσης του σημείου κοινής σύνδεσης του αιολικού πάρκου με το δίκτυο | 0,06 | 0,06 |

Στον Πίνακα 7.14 παρατίθενται τα δεδομένα του αεροφυλακίου που θα ενσωματωθεί στο σύστημα της Ρόδου στην ενότητα 7.2. Το αεροφυλάκιο συνδυάζεται με μια αεριοστροβιλική μονάδα με χαρακτηριστικά ίδια με αυτά που αναφέρονται στον Πίνακα 7.8. Σημειώνεται ότι οι παράμετροι του αεροφυλακίου είναι ίδιες με αυτές που αναφέρθηκαν στο Κεφάλαιο 5.

Πίνακας 7.14: Τιμές Παραμέτρων αεροφυλακίου

| Συμβολισμός | Παράμετρος | Μονάδα μέτρησης | Τιμή |
|-------------|---|-----------------|-------|
| p_{in} | Αρχική πίεση αεροφυλακίου | Ανά μονάδα τιμή | 1,07 |
| K_{sat} | Μέγιστο άνοιγμα της δικλείδας αέρα | Ανά μονάδα τιμή | 0,6 |
| T_{ch} | Χρονική σταθερά δικλείδας αέρα | s | 0,1 |
| T_{cap} | Χρονική σταθερά αεροφυλακίου | s | 100 |
| e | Κατώτατο όριο πίεσης αεροφυλακίου | Ανά μονάδα τιμή | 1,03 |
| n_{rc} | Όριο ρυθμού πτώσης συχνότητας για την ενεργοποίηση του αεροφυλακίου / έλεγχος συχνότητας | Ανά μονάδα / s | 0,004 |
| N_{rel} | Όριο ρυθμού μεταβολής της συχνότητας για την απενεργοποίηση του αεροφυλακίου / έλεγχος συχνότητας | Ανά μονάδα / s | 0,001 |
| T_{sat} | Χρονική σταθερά του βρόχου ομαλής σβέσης του αεροφυλακίου / έλεγχος συχνότητας | s | 0,1 |
| t_{rel} | Χρονική ένδειξη εξάλειψης της διαταραχής / έλεγχος συχνότητας | s | 11 |
| P_{ecr} | Όριο ηλεκτρικής ισχύος για την ενεργοποίηση του αεροφυλακίου / έλεγχος ισχύος | Ανά μονάδα τιμή | 1,01 |

| | | | |
|-------|---|--------------|----|
| K_p | Αναλογικό κέρδος ρύθμισης του ανοίγματος της δικλείδας αέρα για τη διόρθωση της ισχύος / έλεγχος ισχύος | Απόλυτη τιμή | 15 |
| T_p | Αναλογικό κέρδος ρύθμισης του ανοίγματος της δικλείδας αέρα για τη διόρθωση της θερμοκρασίας / έλεγχος ισχύος | Απόλυτη τιμή | 20 |

Στον Πίνακα 7.15 φαίνονται τα δεδομένα της μονάδας GT-CAES που θα ενσωματωθεί στο σύστημα της Ρόδου στις ενότητες 7.3 και 7.4. Το σύστημα GT-CAES, όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 6, αποτελείται από 5 συνιστώσες, την αεριοστροβιλική μονάδα, το αεροφυλάκιο, τον ανεξάρτητο συμπιεστή, τον εναλλάκτη θερμότητας και τον ανεξάρτητο στρόβιλο. Τα δεδομένα της αεριοστροβιλικής μονάδας διατηρήθηκαν ίδια με αυτά που παρατέθηκαν στον Πίνακα 7.8.

Όσον αφορά την εγκατάσταση αποθήκευσης του αέρα (αεροφυλάκιο), ως μέγιστη και ελάχιστη πίεση λειτουργίας επιλέχθηκαν 70 bar και 45 bar αντίστοιχα, λαμβάνοντας υπόψιν τα δεδομένα που εμφανίζονται στον Πίνακα 3.9 (μονάδα CAES Huntorf) του Κεφαλαίου 3. Η χρονική σταθερά του αεροφυλακίου θεωρήθηκε $T_{cap} = 30.000$ s, μια αρκετά μεγάλη τιμή ώστε να εξασφαλίζεται η χρονική διάρκεια παραγωγής ισχύος που απαιτείται για την τροφοδότηση της αιχμής του φορτίου (περίπου 3 ώρες στη διάρκεια της ημέρας). Τέλος, σύμφωνα με τις παραδοχές που έγιναν στο Κεφάλαιο 6, η θερμοκρασία του αέρα στο αεροφυλάκιο διατηρείται σταθερή και ίση με αυτή του περιβάλλοντος, δηλαδή $T_{ic} = 303$ °K, δεδομένου ότι η θερμοκρασία περιβάλλοντος θεωρείται $T_i = 30$ °C.

Τα οδηγία πτερυγία εισόδου του συμπιεστή έχουν μέγιστο άνοιγμα $g_{maxc} = 1$ ανά μονάδα, όταν είναι πλήρως ανοιχτά. Το ελάχιστο άνοιγμα των πτερυγίων έχει οριστεί $g_{minc} = 0,65$ ανά μονάδα, ενώ ο μέγιστος ρυθμός αύξησης και μείωσης του ανοίγματος έχει θεωρηθεί $\dot{g}_{maxc} = 0,006$ και $\dot{g}_{minc} = -0,006$ αντίστοιχα. Τα δεδομένα αυτά προέκυψαν από το σύστημα CAES που έχει αναπτύξει η κατασκευάστρια εταιρεία Dresser-Rand [54]. Η χρονική σταθερά των οδηγών πτερυγίων εισόδου του ανεξάρτητου συμπιεστή θεωρήθηκε $T_{igvc} = 0,1$ s, ίδια με αυτή που αναφέρεται στο συμπιεστή της αεριοστροβιλικής μονάδας. Το κέρδος του ρυθμιστή στροφών του ανεξάρτητου συμπιεστή (κέρδος ενίσχυσης του σφάλματος συχνότητας για τη ρύθμιση του ανοίγματος των πτερυγίων) επιλέχθηκε $K_c = 5$, μια συμβιβαστική τιμή που επιτρέπει ικανοποιητική ρύθμιση της καταναλισκόμενης ισχύος ανάλογα με το σφάλμα συχνότητας. Μικρότερες τιμές από αυτή έχουν χειρότερη απόκριση όσον αφορά τη ρύθμιση συχνότητας, ενώ μεγαλύτερες τιμές έχουν ως αποτέλεσμα απόκριση με το μέγιστο ρυθμό μεταβολής των πτερυγίων ακόμα και σε πολύ μικρές διαταραχές. Τέλος, η κρίσιμη συχνότητα αποσύνδεσης του κινητήρα του ανεξάρτητου συμπιεστή από το δίκτυο θεωρήθηκε $f_{min} = 49$ Hz, δεδομένου ότι οι αποκοπές φορτίων λαμβάνουν χώρα για συχνότητα κάτω των 48,5 Hz. Κατ' αυτόν τον τρόπο ελαχιστοποιείται η πιθανότητα αποκοπής φορτίων όταν ο ανεξάρτητος συμπιεστής είναι σε λειτουργία, διότι αν η συχνότητα πέσει κάτω από 49 Hz ο συμπιεστής αποσυνδέεται, μειώνοντας κατ' αυτόν τον τρόπο τη συνολικά ζητούμενη ισχύ και άρα ελαττώνοντας την απόκλιση που εμφανίζεται στο ισοζύγιο ισχύος.

Σύμφωνα με τα δεδομένα της αεριοστροβιλικής μονάδας στον Πίνακα 7.15, παρατηρούμε ότι η ονομαστική θερμοκρασία εξόδου των καυσαερίων από τον αεριοστρόβιλο είναι $T_{e0} = 778,18$ °K. Η ονομαστική θερμοκρασία εισόδου του αέρα στον ανεξάρτητο στρόβιλο ορίζεται ως $T_{Tb0} = 678,18$ °K, 100 °K κάτω από την ονομαστική θερμοκρασία εξόδου των καυσαερίων της αεριοστροβιλικής μονάδας. Η θεώρηση αυτή προκύπτει εξετάζοντας το Σχήμα 3.15 του Κεφαλαίου 3, όπου η ονομαστική θερμοκρασία εισόδου των καυσαερίων στον ανακομιστή θερμότητας και η ονομαστική θερμοκρασία εξόδου του

πεπιεσμένου αέρα από αυτόν, διαφέρουν κατά 100 °K. Αξίζει να σημειωθεί ότι η θερμοκρασία T_{Tb0} δεν αντιστοιχεί στο μέγιστο όριο αντοχής του ανεξάρτητου στροβίλου, αλλά προκύπτει για ονομαστική ροή και θερμοκρασία των καυσαερίων της αεριοστροβιλικής μονάδας και για ονομαστική ροή αέρα του ανεξάρτητου στροβίλου. Το γεγονός αυτό επιτρέπει την εμφάνιση θερμοκρασιών με τιμές υψηλότερες της T_{Tb0} , χωρίς να τίθεται πρόβλημα υπερθέρμανσης του ανεξάρτητου στροβίλου.

Επιπλέον, η ονομαστική θερμοκρασία εξόδου των καυσαερίων από τον ανακομιστή θερμότητας είναι περίπου 400 °K στο Σχήμα 3.15. Χρησιμοποιώντας τη σχέση (6.28) του Κεφαλαίου 6, για ονομαστικά δεδομένα (ροή αέρα και καυσαερίων, θερμοκρασίες), προκύπτει ότι η ονομαστική θερμοκρασία εξόδου των καυσαερίων από τον ανακομιστή θερμότητας της μονάδας GT- CAES είναι $T_{out0} = 403$ °K, τιμή παρόμοια με την αντίστοιχη θερμοκρασία του Σχήματος 3.15. Τέλος, εφαρμόζοντας τη σχέση (6.30) προκύπτει ότι ο ονομαστικός λόγος των θερμοκρασιών εξόδου των καυσαερίων και του πεπιεσμένου αέρα από τον εναλλάκτη είναι $k = 0,5942$, ενώ μέσω της σχέσης (6.16) για ονομαστικά δεδομένα προκύπτει ότι $T_{ex0} = 299,88$ °K.

Ο εσωτερικός βαθμός απόδοσης του ανεξάρτητου στροβίλου διατηρήθηκε ίδιος με τον αντίστοιχο της αεριοστροβιλικής μονάδας, δηλαδή $\eta_{it} = 0,85$. Η ονομαστική πίεση εισόδου θεωρείται $P_{Tb0} = 42$ bar, ίση με την αντίστοιχη του στροβίλου της μονάδας στο Huntorf (Πίνακας 3.9). Η χρονική σταθερά του ρυθμιστή στροφών του ανεξάρτητου στροβίλου επιλέχθηκε $T_{gt} = 0,05$ s, ίδια με αυτή του ρυθμιστή στροφών της αεριοστροβιλικής μονάδας. Ως μέγιστη και ελάχιστη ανά μονάδα πίεση εισόδου ορίστηκε $p_{maxT} = 1$ και $p_{minT} = 0,2$ αντίστοιχα, λαμβάνοντας υπόψιν τα αντίστοιχα όρια του στροβίλου της Dresser-Rand (Σχήμα 6.7). Η χρονική σταθερά ρύθμισης της πίεσης εισόδου του στροβίλου θεωρήθηκε ίση με $T_{pt} = 0,3$ s. Η χρονική σταθερά αυτή αναφέρεται στην χρονική καθυστέρηση που υπεισέρχεται από τη στιγμή που θα μεταβληθεί το άνοιγμα της δικλείδας αέρα μέχρι να αποκατασταθεί η πίεση εισόδου του στροβίλου στη νέα της τιμή, λόγω της συμπιεστότητας του αέρα και των διαστάσεων των σωληνώσεων στις οποίες ρέει (παράγραφος 2.7.2). Τέλος, η χρονική σταθερά μεταβολής της παραγόμενης ισχύος του ανεξάρτητου στροβίλου επιλέχθηκε $T_{cdT} = 0,2$ s, ίση με την αντίστοιχη του αεριοστροβίλου. Σημειώνεται ότι η χρονική αυτή καθυστέρηση οφείλεται στη συμπιεστότητα του αέρα που εκτονώνεται στο στροβίλο.

Πίνακας 7.15: Τιμές Παραμέτρων μονάδας GT-CAES

| Συμβολισμός | Παράμετρος | Τιμή | Μονάδα Μέτρησης |
|------------------------|--|--------|-----------------|
| Αεριοστροβιλική μονάδα | | | |
| T_i | Θερμοκρασία εισόδου του συμπιεστή (ονομαστική) | 303 | (°K) |
| T_{Tb0} | Θερμοκρασία εισόδου στροβίλου (ονομαστική) | 1358 | (°K) |
| T_{d0} | Θερμοκρασία εξόδου του συμπιεστή (ονομαστική) | 662,78 | (°K) |
| T_{e0} | Θερμοκρασία εξόδου στροβίλου (ονομαστική) | 778,18 | (°K) |
| $T_{rp.u}$ | Θερμοκρασία αναφοράς ελέγχου υπερθέρμανσης | 1,01 | Ανά μονάδα |
| $P_{e1p.u.}$ | Ισχύς έναρξης δεύτερης περιοχής λειτουργίας | 0,85 | Ανά μονάδα |
| $P_{e2p.u.}$ | Ισχύς έναρξης τρίτης περιοχής λειτουργίας | 0,55 | Ανά μονάδα |
| P_{c0} | Ονομαστικός λόγος συμπίεσης | 11,5 | Απόλυτη τιμή |

| | | | |
|---|--|--------|------------------|
| γ | Λόγος ειδικών θερμοχωρητικοτήτων (c_p/c_v) | 1,4 | Απόλυτη τιμή |
| η_c | Εσωτερικός βαθμός απόδοσης συμπίεστη | 0,85 | Απόλυτη τιμή |
| η_t | Εσωτερικός βαθμός απόδοσης στροβίλου | 0,85 | Απόλυτη τιμή |
| $T_{r1p.u.}$ | Θερμοκρασία αναφοράς πτερυγίων εισόδου | 0,939 | Ανά μονάδα |
| T_g | Χρονική σταθερά ρυθμιστή στροφών | 0,05 | (s) |
| K_4 | Κέρδος ασπίδας θερμότητας (ακαριαία) | 0,8 | Ανά μονάδα |
| K_5 | Κέρδος ασπίδας θερμότητας (σταδιακά) | 0,2 | Ανά μονάδα |
| T_3 | Χρονική σταθερά ασπίδας θερμότητας | 15 | (s) |
| T_4 | Χρονική σταθερά αισθητήρα θερμοκρασίας | 2,5 | (s) |
| T_5 | Χρονική σταθερά του τμήματος του ελέγχου θερμοκρασίας που παρεμβαίνει στην ροή του καυσίμου | 3,3 | (s) |
| T_t | Ρυθμός ολοκλήρωσης του τμήματος του ελέγχου θερμοκρασίας που παρεμβαίνει στην ροή του καυσίμου | 0,4699 | (s) |
| T_{cmax} | Μέγιστη τιμή της εξόδου T_c του τμήματος ελέγχου θερμοκρασίας | 1,1 | Ανά μονάδα |
| F_{dmax} | Άνω όριο εισόδου στον έλεγχο καυσίμου | 1,5 | Ανά μονάδα |
| F_{dmin} | Κάτω όριο εισόδου στον έλεγχο καυσίμου | 0 | Ανά μονάδα |
| K_3 | Εύρος ανοίγματος βαλβίδας καυσίμου | 0,77 | Ανά μονάδα |
| K_6 | Ελάχιστο άνοιγμα βαλβίδας καυσίμου | 0,23 | Ανά μονάδα |
| T_v | Χρονική σταθερά ρυθμιστή θέσης της βαλβίδας καυσίμου | 0,05 | (s) |
| T_f | Χρονική σταθερά συστήματος καυσίμου | 0,4 | (s) |
| g_{max} | Μέγιστο άνοιγμα πτερυγίων εισόδου | 1 | Ανά μονάδα |
| g_{min} | Ελάχιστο άνοιγμα πτερυγίων εισόδου | 0,7333 | Ανά μονάδα |
| T_{igv} | Χρονική σταθερά πτερυγίων | 0,1 | (s) |
| T_{cd} | Χρονική σταθερά αεριοστροβίλου | 0,2 | (s) |
| \dot{g}_{max} | Μέγιστος ρυθμός αύξησης ανοίγματος πτερυγίων | 0,01 | Ανά μονάδα / sec |
| \dot{g}_{min} | Μέγιστος ρυθμός μείωσης ανοίγματος πτερυγίων | -0,01 | Ανά μονάδα / sec |
| Εγκατάσταση αποθήκευσης του αέρα (αεροφυλάκιο) | | | |
| P_{ch0} | Μέγιστη πίεση αεροφυλακίου | 70 | bar |
| P_{minC} | Ελάχιστη πίεση αεροφυλακίου | 45 | bar |
| T_{cap} | Χρονική σταθερά αεροφυλακίου | 30.000 | (s) |
| T_{ic} | Θερμοκρασία που επικρατεί στο αεροφυλάκιο | 303 | (°K) |

| Ανεξάρτητος Συμπιεστής | | | |
|------------------------|---|--------|------------------|
| g_{maxc} | Μέγιστο άνοιγμα πτερυγίων εισόδου | 1 | Ανά μονάδα |
| g_{minc} | Ελάχιστο άνοιγμα πτερυγίων εισόδου | 0,65 | Ανά μονάδα |
| R_a | Σταθερά του αέρα | 0,287 | kJ/(kg °K) |
| P_i | Ατμοσφαιρική πίεση | 1 | (bar) |
| T_{igvc} | Χρονική σταθερά πτερυγίων | 0,1 | (s) |
| \dot{g}_{maxc} | Μέγιστος ρυθμός αύξησης ανοίγματος πτερυγίων | 0,006 | Ανά μονάδα / sec |
| \dot{g}_{minc} | Μέγιστος ρυθμός μείωσης ανοίγματος πτερυγίων | -0,006 | Ανά μονάδα / sec |
| K_c | Κέρδος ρυθμιστή στροφών ανεξάρτητου συμπιεστή | 5 | Απόλυτη τιμή |
| f_{min} | Κρίσιμη συχνότητα αποσύνδεσης του κινητήρα του συμπιεστή από το δίκτυο | 49 | (Hz) |
| Ανακομιστής θερμότητας | | | |
| k | Ονομαστικός λόγος θερμοκρασίας εξόδου από τον εναλλάκτη των καυσαερίων προς αυτή του αέρα | 0,5942 | Απόλυτη τιμή |
| T_{out0} | Ονομαστική θερμοκρασία εξόδου των καυσαερίων από τον εναλλάκτη θερμότητας | 403 | (°K) |
| Ανεξάρτητος στρόβιλος | | | |
| η_{it} | Εσωτερικός βαθμός απόδοσης ανεξάρτητου στρόβιλου | 0,85 | Απόλυτη τιμή |
| c_p | Συντελεστής θερμοχωρητικότητας υπό σταθερή πίεση | 1,004 | kJ/(kg °K) |
| T_{Tb0} | Θερμοκρασία εισόδου ανεξάρτητου στρόβιλου (ονομαστική) | 678,18 | (°K) |
| T_{ex0} | Θερμοκρασία εξόδου ανεξάρτητου στρόβιλου (ονομαστική) | 299,88 | (°K) |
| P_{Tb0} | Πίεση εισόδου ανεξάρτητου στρόβιλου (ονομαστική) | 42 | bar |
| T_{gt} | Χρονική σταθερά ρυθμιστή στροφών ανεξάρτητου στρόβιλου | 0,05 | (s) |
| p_{minT} | Ελάχιστη πίεση εισόδου ανεξάρτητου στρόβιλου | 0,2 | Ανά μονάδα |
| p_{maxT} | Μέγιστη πίεση εισόδου ανεξάρτητου στρόβιλου | 1 | Ανά μονάδα |
| T_{pt} | Χρονική σταθερά ρύθμισης της πίεσης εισόδου του στρόβιλου | 0,3 | (s) |
| T_{cdT} | Χρονική σταθερά ανεξάρτητου στρόβιλου | 0,2 | (s) |

7.2 Προσομοίωση του αυτόνομου συστήματος της Ρόδου – Αεριοστροβιλική μονάδα με αεροφυλάκιο

7.2.1 Περιγραφή Σεναρίου

Στην ενότητα αυτή προσομοιώνεται το αυτόνομο σύστημα της Ρόδου σε ένα αρχικό σενάριο παραγωγής και κατανάλωσης, το οποίο εμφανίζεται στους Πίνακες 7.16 και 7.17. Το σενάριο αυτό είναι παρόμοιο με το Σενάριο Β που εξετάστηκε στο [44], με μόνη διαφορά την αρχική κατανομή ισχύος στις συμβατικές μονάδες παραγωγής, και αναφέρεται σε συνθήκες μέγιστης αιολικής διείσδυσης. Συγκεκριμένα, επιλέχθηκε υψηλότερη αρχική παραγόμενη ισχύς για την αεριοστροβιλική μονάδα και χαμηλότερη για τον ατμοηλεκτρικό σταθμό, διατηρώντας την παραγωγή των νητζελογεννητριών σταθερή.

Πίνακας 7.16: Κατανομή παραγόμενης ισχύος – Σενάριο 1

| Μονάδα Παραγωγής | Ζυγός σύνδεσης μονάδας παραγωγής | Σενάριο 1 (Μέγιστη αιολική διείσδυση) | |
|--|----------------------------------|---------------------------------------|--------------------------|
| | | Παραγόμενη ισχύς (MW) | Στρεφόμενη εφεδρεία (MW) |
| Steam 1 | ΣΟΡ (STEAM) | 8,5 | 5,7 |
| Steam 2 | ΣΟΡ (STEAM) | 8,5 | 5,7 |
| Gas 1 | ΣΟΡ (GAS) | - | - |
| Gas 2 | ΣΟΡ (GAS) | - | - |
| Gas 3 | ΣΟΡ (GAS) | - | - |
| Gas 4 | ΣΟΡ (GAS) | 24,38 | 3,12 |
| Diesel 1 | NPOΔ (DIESEL) | 7,5 | 7,5 |
| Diesel 2 | NPOΔ (DIESEL) | 7,5 | 7,5 |
| Diesel 3 | NPOΔ (DIESEL) | - | - |
| Diesel 4 | NPOΔ (DIESEL) | - | - |
| Diesel 5 | NPOΔ (DIESEL) | - | - |
| Diesel 6 | NPOΔ (DIESEL) | - | - |
| Diesel 7 | NPOΔ (DIESEL) | - | - |
| Diesel 8 | NPOΔ (DIESEL) | - | - |
| Σύνολο παραγωγής συμβατικών μονάδων και στρεφόμενης εφεδρείας | | 56,39 | 29,51 |
| A/Π | Ζυγός σύνδεσης A/Π | Παραγόμενη ισχύς (MW) | |
| 4 | ΣΟΡ ΜΤ | 6,63 | |
| 3 | ΑΦ (A/Π3) | 1,87 | |
| 1 | ΑΦ (A/Π1) | 6,26 | |
| 5 | ΓΕΝ (A/Π5) | 3,37 | |
| 2 | ΓΕΝ (A/Π2) | 10,11 | |
| Σύνολο παραγωγής αιολικών πάρκων | | 28,24 | |
| ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΙΣΧΥΟΣ | | 84,63 | |

Σκοπός της παρούσας ενότητας είναι να εξετάσουμε την επίδραση που έχει στο σύστημα της Ρόδου η ένταξη ενός αεροφυλακίου στην αεριοστροβιλική μονάδα, σε περίπτωση κάποιας διαταραχής. Ως διαταραχή θεωρήθηκε η απώλεια των ατμοηλεκτρικών μονάδων, οι οποίες αποσυνδέονται απότομα από το δίκτυο μια δεδομένη χρονική στιγμή, υποθέτοντας κοινό σφάλμα.

Όπως παρατηρούμε από τον Πίνακα 7.16, η αρχική παραγόμενη ισχύς των ατμοηλεκτρικών μονάδων είναι συνολικά 17 MW, και αντιστοιχεί στο 20% του συνολικού φορτίου του συστήματος στο συγκεκριμένο σενάριο παραγωγής (Σενάριο 1). Η αποσύνδεση των ατμοηλεκτρικών μονάδων λαμβάνει χώρα τη χρονική στιγμή $t = 1$ s της προσομοίωσης, και συγκρίνεται η απόκριση του συστήματος της Ρόδου χωρίς αεροφυλάκιο (περίπτωση α) με την περίπτωση που το αεροφυλάκιο έχει ενταχθεί στην αεριοστροβιλική μονάδα (περίπτωση β). Σημειώνεται ότι μετά την απώλεια των μονάδων, η συνολική στρεφόμενη εφεδρεία του συστήματος ισούται με 18,11 MW, οριακά άνω των 17 MW του ατμοηλεκτρικού σταθμού που αποσυνδέεται.

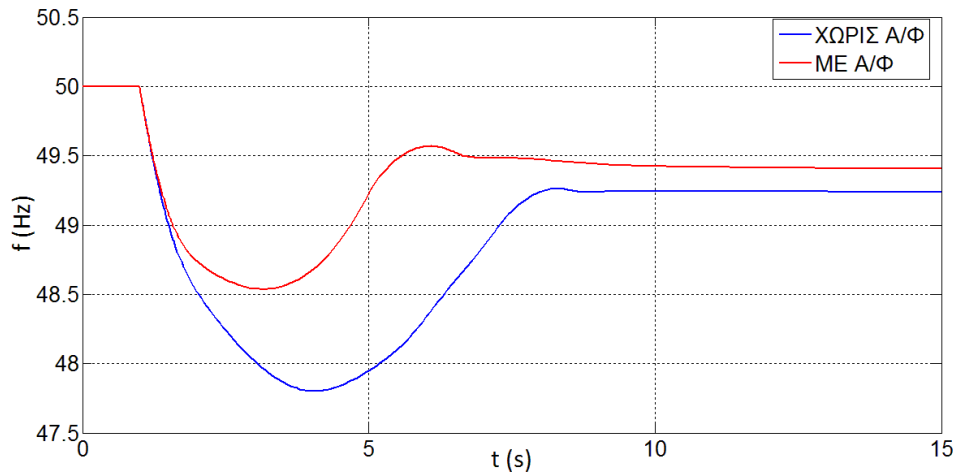
Πίνακας 7.17: Ζήτηση Φορτίων Ηλεκτρικού Συστήματος Ρόδου – Σενάριο 1

| Φορτίο | | Σενάριο 1 (Μέγιστη αιολική διείσδυση) | |
|---------------------|-----------------------|---------------------------------------|--------------|
| Υποσταθμός σύνδεσης | Κωδικός αριθμός ζυγού | P (MW) | Q (MVar) |
| ΣΟΡ ΜΤ | 11 | 6,34 | 3,51 |
| ΙΑΛ ΜΤ | 12 | 16,64 | 9,21 |
| ΡΔΙ ΜΤ | 13 | 21,95 | 12,15 |
| ΑΦ ΜΤ | 14 | 22,02 | 12,19 |
| ΓΕΝ ΜΤ | 15 | 4,49 | 2,48 |
| ΡΟΔ ΜΤ | 16 | 11,62 | 6,43 |
| Σύνολο | | 83,06 | 45,97 |

7.2.2 Αποτελέσματα προσομοίωσης

Στο Σχήμα 7.2 φαίνεται η απόκριση της συχνότητας του συστήματος της Ρόδου συναρτήσει του χρόνου, στις περιπτώσεις (α) και (β) (αεριοστροβιλική μονάδα χωρίς και με αεροφυλάκιο, αντίστοιχα). Με την απώλεια των ατμοηλεκτρικών μονάδων την $t = 1$ s, και στις δύο περιπτώσεις η συχνότητα αρχίζει να μειώνεται ως αποτέλεσμα της διατάραξης του ισοζυγίου ισχύος. Συγκεκριμένα, η αποσύνδεση των ατμοηλεκτρικών μονάδων οδηγεί σε έλλειμμα παραγόμενης ισχύος στο σύστημα, με αποτέλεσμα, για δεδομένη καταναλισκόμενη ηλεκτρική ισχύ των φορτίων, η επιπλέον ισχύς που απαιτείται να απορροφάται από τους άξονες περιστροφής των γεννητριών στις οποίες υπάρχει συσσωρευμένη κινητική ενέργεια. Παρατηρούμε ότι σε συνθήκες αυτόνομης λειτουργίας της αεριοστροβιλικής μονάδας χωρίς το αεροφυλάκιο, η ελάχιστη μεταβατική τιμή της συχνότητας του συστήματος είναι $f_{\min a} = 47,8$ Hz. Το γεγονός αυτό συνεπάγεται πως στο συγκεκριμένο σενάριο παραγωγής και για τη δεδομένη διαταραχή, θα υπάρξουν αποκοπές φορτίων, δεδομένου ότι η συχνότητα έναρξης της αποκοπής φορτίων είναι 48,5 Hz. Αντίθετα, αν στην αεριοστροβιλική μονάδα ενταχθεί το αεροφυλάκιο, η ελάχιστη μεταβατική συχνότητα του συστήματος είναι $f_{\min b} = 48,54$ Hz, αποφεύγοντας οριακά τις αποκοπές φορτίων λόγω της μεταβατικής αύξησης της παραγόμενης ισχύος της αεριοστροβιλικής μονάδας με τη χρήση του αεροφυλακίου.

Χαρακτηριστικό είναι επίσης το γεγονός πως η συχνότητα προσεγγίζει ταχύτερα τη μόνιμη τιμή της στην περίπτωση (β).



Σχήμα 7.2 : Απόκριση συχνότητας του συστήματος της Ρόδου

Η μόνιμη τιμή της συχνότητας στο τέλος της πρωτεύουσας ρύθμισης, διαφέρει στις περιπτώσεις (α) και (β) όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.2. Αυτό οφείλεται στο γεγονός πως στην περίπτωση (β) το αεροφυλάκιο εξακολουθεί να τροφοδοτεί το θάλαμο καύσης της αεριοστροβλικής μονάδας με πεπιεσμένο αέρα και μετά την αντιμετώπιση της διαταραχής. Έτσι ένα ποσοστό της συνολικά παραγόμενης ισχύος από τις μονάδες οφείλεται στον πεπιεσμένο αέρα από το αεροφυλάκιο που εκτονώνεται στο στρόβιλο της αεριοστροβλικής μονάδας. Συμπερασματικά, παρότι η απολεσθείσα ισχύς των ατμοηλεκτρικών μονάδων είναι ίδια και στις δύο περιπτώσεις, στην περίπτωση (β) συνεισφέρει στην παραγωγή ισχύος και το αεροφυλάκιο, με αποτέλεσμα η συνολική μεταβολή της ισχύος που επέρχεται στο σύστημα να είναι μικρότερη. Δεδομένου ότι το σφάλμα συχνότητας μετά το πέρας της πρωτεύουσας ρύθμισης εξαρτάται από το μέγεθος της μεταβολής της ισχύος, η μόνιμη τιμή της συχνότητας είναι υψηλότερη στην περίπτωση (β) σε σχέση με την περίπτωση (α). Τέλος, αναφέρεται ότι γενικά το μόνιμο σφάλμα συχνότητας που ακολουθεί μια διαταραχή απαλείφεται με την δευτερεύουσα ρύθμιση φορτίου – συχνότητας, η οποία όμως δεν εφαρμόζεται στις προσομοιώσεις του παρόντος Κεφαλαίου.

Στο σημείο αυτό αξίζει να παραθέσουμε τα διαγράμματα που αφορούν την αποδιδόμενη μηχανική ισχύ στον άξονα περιστροφής των γεννητριών συναρτήσει του χρόνου, στις περιπτώσεις (α) και (β). Έτσι έχουμε το Σχήμα 7.3 όπου απεικονίζεται η παραγόμενη μηχανική ισχύς των συμβατικών μονάδων που παραμένουν σε λειτουργία μετά τη διαταραχή, δηλαδή της αεριοστροβλικής μονάδας (Gas) και των νηζελογεννητριών (Diesel). Συγκεκριμένα, στο Σχήμα 7.3-(α) φαίνεται η απόκριση ισχύος των μονάδων χωρίς την παρουσία αεροφυλακίου, ενώ στο Σχήμα 7.3-(β) απεικονίζεται η μηχανική ισχύς των μονάδων με την ενσωμάτωση του αεροφυλακίου στην αεριοστροβλική μονάδα. Και στις δύο περιπτώσεις η πτώση της συχνότητας (Σχήμα 7.2) έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της παραγόμενης ισχύος των μονάδων, λόγω της δράσης του ρυθμιστή στροφών της καθεμιάς.

Η ονομαστική ισχύς της αεριοστροβλικής μονάδας είναι 27,5 MW ενώ των νηζελογεννητριών είναι 30 MW, σύμφωνα με τον Πίνακα 7.7. Σημειώνεται ξανά εδώ ότι οι δύο νηζελογεννήτριες, όπως και στην περίπτωση των δύο ατμοηλεκτρικών μονάδων, παριστάνονται ως μία ισοδύναμη μονάδα με συνολική ονομαστική ισχύ το άθροισμα των

ονομαστικών ισχύων. Η κάθε νηζελογεννήτρια έχει ως μέγιστο όριο παραγωγής ισχύος την ονομαστική της τιμή, σύμφωνα με τον τρόπο υλοποίησης που περιγράφηκε στην ενότητα 2.8 του Κεφαλαίου 2. Έτσι, η μέγιστη δυνατή παραγωγή ισχύος της ισοδύναμης μονάδας των νηζελογεννητριών είναι 30 MW. Αντίθετα, όπως έχει αναφερθεί στο Κεφάλαιο 4, η αεριοστροβιλική μονάδα είναι δυνατόν να αυξήσει προσωρινά την παραγόμενη μηχανική ισχύ ελαφρά άνω της ονομαστικής της τιμής για μικρό χρονικό διάστημα, έως ότου δράσει ο έλεγχος υπερθέρμανσης μειώνοντας την έγχυση καυσίμου και συνεπώς την ισχύ εξόδου της μονάδας για την προστασία της διάταξης.

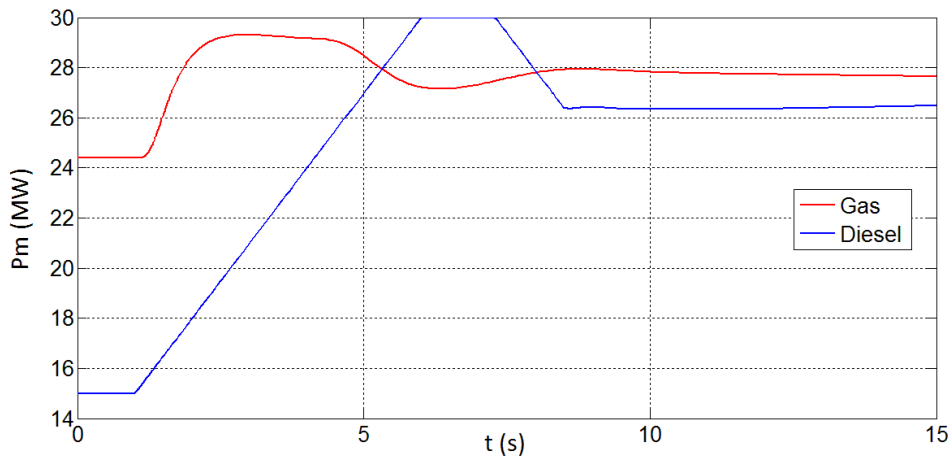
Σύμφωνα με τα παραπάνω, δικαιολογείται η μέγιστη τιμή της παραγόμενης μηχανικής ισχύος της αεριοστροβιλικής μονάδας στο Σχήμα 7.3-(α), η οποία είναι $P_{\max ga} = 29,3$ MW και ξεπερνά ελαφρώς τα ονομαστικά επίπεδα. Αντίθετα, η μέγιστη παραγόμενη μηχανική ισχύς των νηζελομηχανών είναι $P_{\max da} = 30$ MW στην περίπτωση (α), χωρίς δηλαδή την παρουσία αεροφυλακίου. Παρατηρούμε δηλαδή ότι προσωρινά και οι δύο μονάδες παρέχουν τη μέγιστη δυνατή ισχύ στις αντίστοιχες γεννήτριες, για την αντιμετώπιση της διαταραχής. Ωστόσο, όπως σημειώθηκε στο Σχήμα 7.2, οι αποκοπές φορτίων λόγω μεταβατικής υποσυχνότητας δεν αποφεύγονται.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.3-(α), ο ρυθμός ανάληψης φορτίου (κλίση καμπύλης) είναι μεγαλύτερος για την αεριοστροβιλική μονάδα συγκριτικά με τις νηζελογεννήτριες. Δεδομένου επίσης ότι η αρχική στρεφόμενη εφεδρεία της αεριοστροβιλικής μονάδας είναι αρκετά μικρότερη από την αντίστοιχη των νηζελογεννητριών σύμφωνα με τον Πίνακα 7.16, η επίτευξη της μέγιστης παραγωγής λαμβάνει χώρα νωρίτερα για την αεριοστροβιλική μονάδα απ' ό,τι για τις νηζελογεννήτριες. Το χρονικό διάστημα $2,5 \text{ s} < t < 4,5 \text{ s}$ η αεριοστροβιλική μονάδα αποδίδει τη μέγιστη ισχύ της, όπου t ο χρόνος προσομοίωσης. Μετά τη χρονική στιγμή $t = 4,5 \text{ s}$ η μηχανική ισχύς του αεριοστροβίλου μειώνεται, παρότι η διαταραχή δεν έχει αντιμετωπιστεί πλήρως ακόμα. Το γεγονός αυτό, όπως θα φανεί σε επόμενο σχήμα, οφείλεται στη δράση της διάταξης υπερθέρμανσης που μειώνει την έγχυση καυσίμου στο θάλαμο καύσης για την προστασία από τις υψηλές θερμοκρασίες που υφίστανται στην είσοδο του στροβίλου. Αντίθετα, η παραγωγή ισχύος των νηζελομηχανών συνεχίζει να αυξάνει έως την $t = 6 \text{ s}$ όπου επιτυγχάνεται η ονομαστική ισχύς εξόδου. Από την χρονική στιγμή αυτή έως την $t = 7,3 \text{ s}$ η ισχύς των νηζελογεννητριών παραμένει στα ονομαστικά επίπεδα. Από εκεί και μετά αρχίζει να μειώνεται για να προσεγγίσει τη μόνιμη τιμή της 26,36 MW σε χρόνο $t = 8,6 \text{ s}$ περίπου. Την ίδια χρονική στιγμή η ισχύς εξόδου της αεριοστροβιλικής μονάδας είναι 27,93 MW.

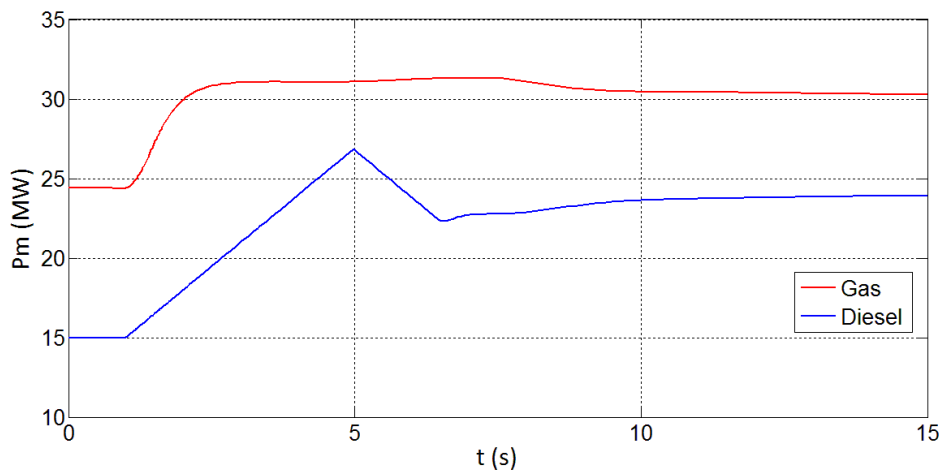
Όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.2, η χρονική στιγμή $t = 8,6 \text{ s}$ είναι αυτή όπου η συχνότητα έχει προσεγγίσει τη μόνιμη τιμή της. Στην πραγματικότητα, για $t > 8,6 \text{ s}$ η παραγόμενη ισχύς των μονάδων δεν παραμένει πλήρως σταθερή, όπως παρατηρούμε από το Σχήμα 7.3-(α). Συγκεκριμένα, η ισχύς της αεριοστροβιλικής μονάδας μειώνεται με έναν μικρό ρυθμό, ενώ με τον ίδιο ρυθμό αυξάνει η ισχύς των νηζελογεννητριών. Αυτό οφείλεται στη δράση του ελέγχου υπερθέρμανσης, ο οποίος επαναφέρει σταδιακά τη ροή καυσίμου στο θάλαμο καύσης της αεριοστροβιλικής μονάδας στα ονομαστικά επίπεδα, καθότι η παραγόμενη ισχύς εξακολουθεί να είναι άνω της ονομαστικής. Έτσι η μείωση της ισχύος του αεριοστροβίλου υποκαθίσταται από ανάλογη αύξηση της ισχύος των νηζελομηχανών.

Συνοψίζοντας, η μεγάλη μεταβατική βύθιση της συχνότητας στην περίπτωση (α) αποδίδεται στην μικρή αρχική στρεφόμενη εφεδρεία της αεριοστροβιλικής μονάδας, η οποία εξαντλείται σε χρόνο $t = 2,5 \text{ s}$, με τις νηζελογεννήτριες, οι οποίες έχουν μικρότερο ρυθμό ανάληψης φορτίου συγκριτικά με τον αεριοστροβίλο, να αναλαμβάνουν από εκεί και μετά τη συγκράτηση τη συχνότητας. Τέλος, λόγω του ότι στο διάστημα $4,5 \text{ s} < t < 7,3 \text{ s}$ αρχικά η ισχύς της αεριοστροβιλικής μονάδας μειώνεται και έπειτα η ισχύς των νηζελογεννητριών

σταθεροποιείται (προσωρινά) στη μέγιστη τιμή της, η συχνότητα καθυστερεί να προσεγγίσει τη μόνιμη τιμή της, όπως σημειώθηκε στο Σχήμα 7.2.



(α) Χωρίς αεροφυλάκιο



(β) Με αεροφυλάκιο

Σχήμα 7.3 : Παραγόμενη μηχανική ισχύς συμβατικών μονάδων

Όταν ενσωματωθεί το αεροφυλάκιο στην αεριοστροβιλική μονάδα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.3-(β), η μέγιστη μεταβατικά παραγόμενη μηχανική ισχύς της αεριοστροβιλικής μονάδας γίνεται 31,32 MW, ενώ των νηζελογεννητριών 26,83 MW. Το αεροφυλάκιο συνεπώς έδωσε τη δυνατότητα παραγωγής επιπλέον 2,02 MW στην αεριοστροβιλική μονάδα με τη μεταβατική έγχυση πεπιεσμένου αέρα στο θάλαμο καύσης, συγκριτικά με την περίπτωση (α). Το χρονικό διάστημα $3\text{ s} < t < 8\text{ s}$ η αεριοστροβιλική μονάδα αποδίδει άνω των 31 MW μηχανικής ισχύος, συγκριτικά με την περίπτωση (α) όπου η μέγιστη παραγωγή ήταν μικρότερου μεγέθους και διάρκειας. Η μικρή μείωση της παραγόμενης ισχύος της αεριοστροβιλικής μονάδας μετά τη χρονική στιγμή $t = 8\text{ s}$ στο Σχήμα 7.3-(β), οφείλεται στη δράση του ελέγχου υπερθέρμανσης. Ωστόσο, παρά τη μείωση του καυσίμου που επιβάλλει η διάταξη υπερθέρμανσης, η παραγόμενη ισχύς εξακολουθεί να είναι άνω των 30 MW σε όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης, εξαιτίας της διαρκούς τροφοδότησης του θαλάμου καύσης με πεπιεσμένο αέρα.

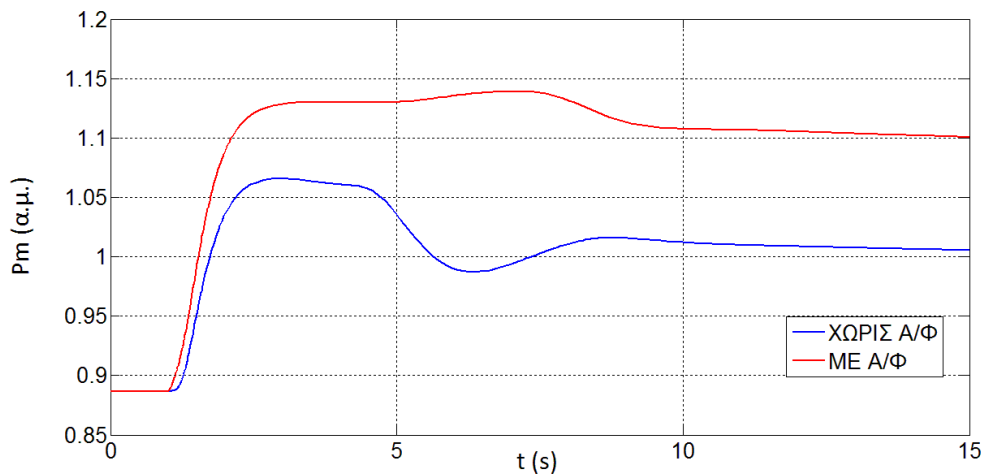
Στο τέλος της παραγράφου αυτής που προσομοιώνεται το σύστημα για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα, θα παρατηρήσουμε τη μηχανική ισχύ της αεριοστροβλικής μονάδας να ελαττώνεται σταδιακά με ένα μικρό ρυθμό, ο οποίος αντιστοιχεί στο ρυθμό μείωσης της πίεσης και συνακόλουθα της ροής αέρα του αεροφυλακίου. Στο Σχήμα 7.3-(β) το φαινόμενο αυτό δεν φαίνεται λόγω της διαβάθμισης των αξόνων και του μικρού χρόνου προσομοίωσης. Επιπλέον, η δευτερεύουσα ρύθμιση φορτίου-συχνότητας, μετά την αντιμετώπιση της διαταραχής μπορεί να αναλάβει την ανακατανομή της ισχύος στις συμβατικές μονάδες, μειώνοντας την παραγόμενη ισχύ της αεριοστροβλικής μονάδας και αυξάνοντας την αντίστοιχη των νηζελομηχανών. Τότε το αεροφυλάκιο δεν θα χρειάζεται πλέον και δύναται να απενεργοποιηθεί, όπως έχει αναφερθεί στο Κεφάλαιο 4. Το γεγονός αυτό επίσης δεν είναι εμφανές διότι, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, δεν μοντελοποιείται η δευτερεύουσα ρύθμιση συχνότητας.

Όσον αφορά τις νηζελογεννήτριες, παρατηρούμε στο Σχήμα 7.3-(β) ότι ο ρυθμός ανάληψης φορτίου είναι ίδιος με αυτόν στην περίπτωση (α) και αντιστοιχεί στο μέγιστο ρυθμό που μπορούν να μεταβάλλουν την παραγωγή τους. Η μέγιστη παραγωγή ισχύος τους όπως αναφέρθηκε είναι 26,83 MW, 3,17 MW μικρότερη συγκριτικά με την περίπτωση (α), και επιτυγχάνεται την χρονική στιγμή $t = 5$ s. Η μικρότερη μέγιστη τιμή της ισχύος των νηζελογεννητριών στην περίπτωση (β) οφείλεται στο γεγονός πως όλο το προηγούμενο χρονικό διάστημα, η αεριοστροβλική μονάδα παρήγαγε μεγαλύτερη ισχύ συγκριτικά με την περίπτωση (α), οδηγώντας στην ταχύτερη επαναφορά της συχνότητας. Μετά την χρονική στιγμή $t = 5$ s η παραγόμενη ισχύς των νηζελομηχανών αρχίζει να μειώνεται ως αποτέλεσμα της δράσης του ρυθμιστή στροφών τους, καθώς η συχνότητα έχει αρχίσει να πλησιάζει τη μόνιμη τιμή της. Μετά την αποκατάσταση της συχνότητας, η παραγόμενη ισχύς των νηζελογεννητριών παρατηρείται να αυξάνει με έναν μικρό ρυθμό. Ο ρυθμός αυτός αντιστοιχεί στο ρυθμό μείωσης της παραγόμενης ισχύος της αεριοστροβλικής μονάδας λόγω του ελέγχου υπερθέρμανσης αρχικά, και μετά λόγω της σταδιακής μείωσης της πίεσης του αεροφυλακίου, προκειμένου να διατηρείται το ισοζύγιο ισχύος.

Συνοψίζοντας, αντιλαμβανόμαστε ότι η χρήση του αεροφυλακίου έδωσε τη δυνατότητα στην αεριοστροβλική μονάδα να παράγει ισχύ μεγαλύτερης τιμής στην περίπτωση (β) σε σχέση με την περίπτωση (α), πάνω από τα ονομαστικά επίπεδα, και για μεγαλύτερη χρονική διάρκεια. Έτσι δικαιολογείται η συγκράτηση της συχνότητας του συστήματος της Ρόδου σε υψηλότερες τιμές και η ταχύτερη αποκατάστασή της στη μόνιμη τιμή, πριν τη δευτερεύουσα ρύθμιση. Συμπερασματικά, το αεροφυλάκιο μπορεί να θεωρηθεί ως μία διάταξη παροχής μεταβατικά στρεφόμενης εφεδρείας, συνεισφέροντας στην πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας με τη μεταβατική αύξηση της παραγόμενης ισχύος της αεριοστροβλικής μονάδας, σε περιπτώσεις απότομων διαταραχών του ισοζυγίου ισχύος του συστήματος.

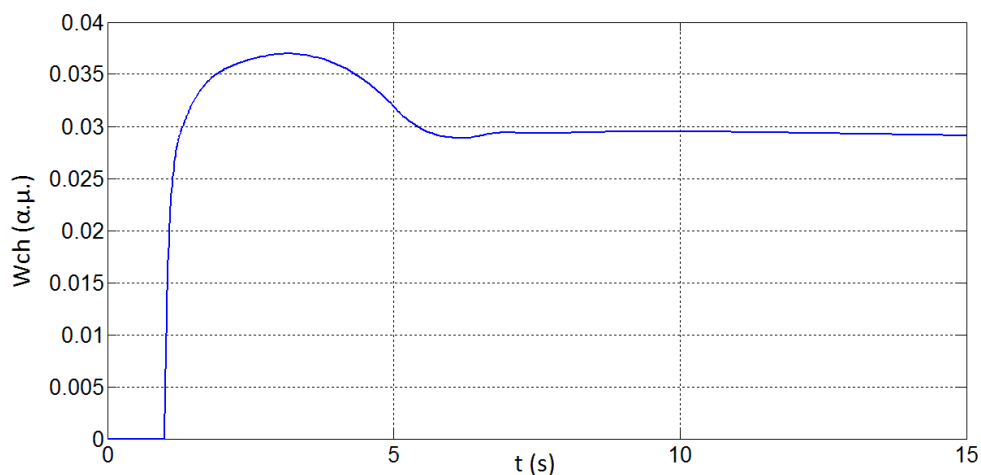
Για την καλύτερη σύγκριση της απόκρισης της αεριοστροβλικής μονάδας στις περιπτώσεις (α) και (β), παρατίθεται το Σχήμα 7.4 όπου απεικονίζεται η παραγόμενη ανά μονάδα μηχανική ισχύς του αεριοστροβίλου με το αεροφυλάκιο εκτός και εντός λειτουργίας αντίστοιχα, συναρτήσει του χρόνου. Με την άμεση έγχυση πεπιεσμένου αέρα στο θάλαμο καύσης, η παραγόμενη ισχύς της αεριοστροβλικής μονάδας αρχίζει να ανέρχεται ταχύτερα στην περίπτωση (β). Συγκεκριμένα, παρατηρούμε στο Σχήμα 7.4 ότι κάθε χρονική στιγμή η παραγωγή ισχύος είναι μεγαλύτερη στην περίπτωση που ενταχθεί το αεροφυλάκιο στον αεριοστροβίλο. Το γεγονός αυτό είναι μεγάλης σημασίας τα πρώτα δευτερόλεπτα μετά από κάποια διαταραχή, διότι με την άμεση αύξηση της παραγωγής προλαμβάνεται η βύθιση της συχνότητας σε χαμηλές τιμές. Στο Σχήμα 7.4 γίνονται επίσης εμφανή αυτά που περιγράφηκαν παραπάνω, ότι δηλαδή η παραγόμενη ισχύς της αεριοστροβλικής μονάδας

έχει μεγαλύτερη μέγιστη τιμή και μεγαλύτερη διάρκεια παραγωγής πάνω από τα ονομαστικά επίπεδα, στην περίπτωση (β).



Σχήμα 7.4 : Παραγόμενη μηχανική ισχύς αεροστροβιλικής μονάδας σε ανά μονάδα τιμή

Στο Σχήμα 7.5 φαίνεται η ανά μονάδα ροή αέρα που εγχέεται στο θάλαμο καύσης της αεροστροβιλικής μονάδας από το αεροφυλάκιο συναρτήσει του χρόνου (περίπτωση β). Πριν την αποσύνδεση των ατμοηλεκτρικών μονάδων, η ροή αέρα του αεροφυλακίου είναι μηδενική, όπως αναμενόταν. Την χρονική στιγμή $t = 1$ s που εμφανίζεται μεγάλος ρυθμός πτώσης της συχνότητας (Σχήμα 7.2) λόγω της απώλειας ισχύος των ατμοηλεκτρικών μονάδων, η εγχεόμενη ροή αέρα στο θάλαμο καύσης αρχίζει να αυξάνει ταχύτατα. Η έναρξη της έγχυσης ροής αέρα από το αεροφυλάκιο στο θάλαμο καύσης επιτυγχάνεται μέσω της αντίστοιχης δικλείδας ελέγχου, όπου εξαιτίας της διάγνωσης υψηλού ρυθμού πτώσης της συχνότητας, η δικλείδα αέρα ανοίγει στη μέγιστη τιμή παρέχοντας τη μέγιστη δυνατή ροή αέρα στο θάλαμο καύσης (παράγραφος 4.2.10). Λόγω της μικρής χρονικής καθυστέρησης που συνεπάγεται η λειτουργία της δικλείδας αέρα, την $t = 1,3$ s η ροή αέρα του αεροφυλακίου έχει φτάσει στο 3% της ονομαστικής ροής του αεροστροβίλου, ενώ την χρονική στιγμή $t = 3$ s η ροή αέρα από το αεροφυλάκιο έχει φτάσει στη μέγιστη τιμή της 3,7%.



Σχήμα 7.5 : Ανά μονάδα εγχεόμενη ροή αέρα στο θάλαμο καύσης από το αεροφυλάκιο

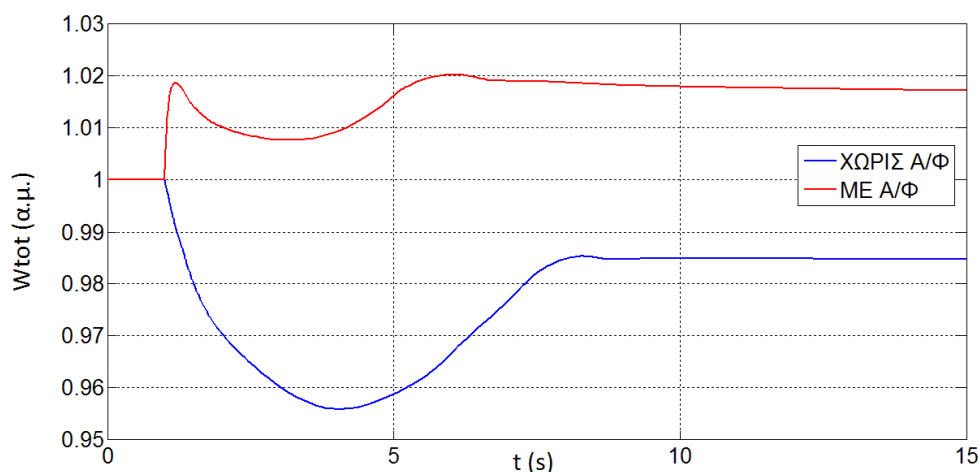
Ο μεγάλος ρυθμός αύξησης της ροής αέρα (Σχήμα 7.5) που εμφανίζεται στο χρονικό διάστημα $1\text{ s} < t < 1,3\text{ s}$ οφείλεται στο ταχύτατο άνοιγμα της δικλείδας αέρας στη μέγιστη επιτρεπτή τιμή και στη μικρή χρονική καθυστέρηση που αναφέρθηκε. Ο μικρότερος ρυθμός αύξησης της ροής που σημειώνεται στο διάστημα $1,3\text{ s} < t < 3\text{ s}$ αντιστοιχεί στο ρυθμό πτώσης της συχνότητας. Όπως έχει εξηγηθεί στο Κεφάλαιο 4, η πίεση του θαλάμου καύσης είναι ανάλογη της συνολικής ροής αέρα που εκτονώνεται στο στρόβιλο. Η ροή αέρα του συμπιεστή είναι με τη σειρά της ανάλογη με τη συχνότητα περιστροφής του άξονα. Η μεταβατική βύθιση της συχνότητας έχει λοιπόν ως αποτέλεσμα την μείωση της ροής του συμπιεστή και κατ' επέκταση της συνολικής ροής αέρα που εκτονώνεται στο στρόβιλο. Το γεγονός αυτό συνεπάγεται πως η πίεση του θαλάμου καύσης ελαττώνεται αναλογικά με τη μείωση της συχνότητας. Δεδομένου ότι η ροή αέρα του αεροφυλακίου έχει θεωρηθεί ανάλογη της διαφοράς πίεσης μεταξύ αεροφυλακίου και θαλάμου καύσης, για δεδομένο άνοιγμα της δικλείδας ελέγχου, η πτώση της πίεσης του θαλάμου καύσης οδηγεί στην αύξηση της εγχόμενης ροής αέρα από το αεροφυλάκιο. Συμπερασματικά, το αεροφυλάκιο προσφέρει δυνατότητα αυτορρύθμισης της παραγόμενης ισχύος του συστήματος αεριοστροβίλου-αεροφυλακίου, όπου η πτώση της συχνότητας, με την μείωση της ροής αέρα του συμπιεστή που επακολουθεί, οδηγεί στην αύξηση της ροής αέρα από το αεροφυλάκιο, διατηρώντας τη συνολική ροή που εκτονώνεται στο στρόβιλο σε υψηλά επίπεδα.

Τέλος, η ροή αέρα του αεροφυλακίου μειώνεται σταδιακά στο διάστημα $3\text{ s} < t < 6\text{ s}$, ακολουθώντας τον αντίστοιχο ρυθμό αύξησης της συχνότητας, και σταθεροποιείται προσωρινά στην τιμή 2,95 %. Με την πάροδο του χρόνου η ροή από το αεροφυλάκιο αρχίζει να μειώνεται, διότι εξαντλείται η αποθηκευμένη μάζα αέρα και συνεπώς ελαττώνεται η πίεση που επικρατεί σε αυτό. Το γεγονός αυτό θα φανεί καλύτερα στο τέλος της παραγράφου όπου προσομοιώνεται το σύστημα για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα. Σημειώνεται επίσης ότι, το αεροφυλάκιο, παρά την επιτυχή αντιμετώπιση της διαταραχής, εξακολουθεί να τροφοδοτεί το θάλαμο καύσης με πεπιεσμένο αέρα, λόγω του γεγονότος πως η παραγόμενη ισχύς της αεριοστροβιλικής μονάδας είναι διαρκώς άνω της ονομαστικής τιμής (Σχήμα 7.4). Έτσι, παρότι σύμφωνα με τον έλεγχο συχνότητας (παράγραφος 4.2.10) η δικλείδα αέρα θα έπρεπε να κλείσει δεδομένου ότι η συχνότητα έχει αποκατασταθεί, υπάρχει ο έλεγχος ισχύος-θερμοκρασίας (παράγραφος 4.2.10) που αποτρέπει την απενεργοποίηση του αεροφυλακίου.

Στο Σχήμα 7.6 απεικονίζεται η συνολική ροή αέρα, σε ανά μονάδα τιμή, που εκτονώνεται στο στρόβιλο της αεριοστροβιλικής μονάδας συναρτήσει του χρόνου, στις περιπτώσεις (α) και (β). Στην περίπτωση (α), η μεταβατική βύθιση της συχνότητας επιφέρει ανάλογη μείωση της ροής αέρα του συμπιεστή, η οποία ταυτίζεται με τη συνολική ροή αέρα που εκτονώνεται στο στρόβιλο, δεδομένης της απουσίας αεροφυλακίου. Η ελάχιστη τιμή της ροής αέρα είναι 95,6% και εμφανίζεται την $t = 4,1\text{ s}$, χρονική στιγμή που ταυτίζεται με την αντίστοιχη της εμφάνισης της ελάχιστης τιμής της συχνότητας. Παρατηρούμε ότι με την σταθεροποίηση της συχνότητας στην περίπτωση (α), η ροή αέρα προσεγγίζει τη μόνιμη τιμή της 98,5 %.

Αντιθέτως, η χρήση αεροφυλακίου στην περίπτωση (β) οδηγεί στην αύξηση της συνολικής ροής αέρα που εκτονώνεται στο στρόβιλο σε τιμές πάνω από τα ονομαστικά επίπεδα, με μέγιστη τιμή 102%. Αξίζει να σημειωθεί ότι σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα μετά την απώλεια των ατμοηλεκτρικών μονάδων, η συνολική ροή αέρα έχει φτάσει στο 101,86% της ονομαστικής της τιμής. Δεδομένου ότι η συνολική ροή προκύπτει ως το άθροισμα της ροής αέρα από το συμπιεστή και από το αεροφυλάκιο, η πτώση της συχνότητας έχει δύο αντίθετες επιδράσεις στις συνιστώσες της συνολικής ροής. Συγκεκριμένα, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η βύθιση της συχνότητας οδηγεί στην μείωση της ροής αέρα του συμπιεστή και στην αύξηση της ροής που προέρχεται από το αεροφυλάκιο. Όπως

παρατηρούμε από το Σχήμα 7.6, μεγαλύτερη επίδραση στη μεταβολή της συνολικής ροής αέρα έχει η ροή του συμπιεστή. Για το λόγο αυτό, δεδομένου ότι το άνοιγμα της δικλείδας του αεροφυλακίου έχει ανοίξει στο μέγιστο βαθμό, παρατηρούμε την πτώση της συνολικής ροής το υπόλοιπο διάστημα που η συχνότητα μειώνεται, δηλαδή μέχρι την $t = 3$ s. Σημειώνεται ότι η πρώτη υπερακόντιση της συνολικής ροής που εμφανίζεται μετά την απώλεια των ατμοηλεκτρικών μονάδων στην περίπτωση (β), οφείλεται στην άμεση έγχυση αέρα από το αεροφυλάκιο.



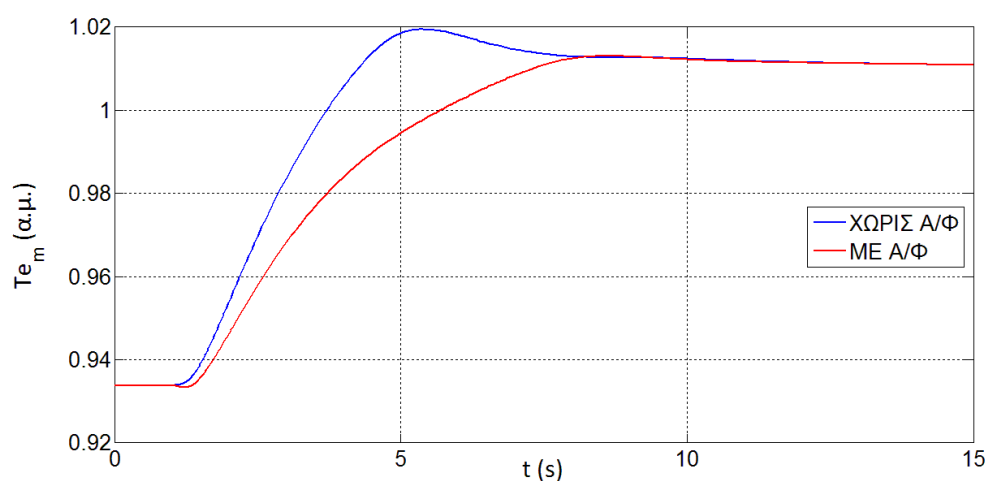
Σχήμα 7.6 : Συνολική ανά μονάδα ροή αέρα που εκτονώνεται στο στρόβιλο

Συνοψίζοντας, η έγχυση αέρα από το αεροφυλάκιο στην περίπτωση (β) διατηρεί τη συνολική ροή αέρα που εκτονώνεται στο στρόβιλο πάνω από τα ονομαστικά επίπεδα σε όλη τη διάρκεια της διαταραχής, σε αντίθεση με την περίπτωση (α) όπου η ροή που εκτονώνεται στο στρόβιλο μειώνεται αρκετά κάτω από την ονομαστική της τιμή. Το γεγονός αυτό συνεπάγεται μεγαλύτερη δυνατότητα παραγωγής ισχύος στην περίπτωση (β) (Σχήμα 7.3 και 7.4), διότι η αυξημένη ροή αέρα συνεπάγεται και μεγαλύτερη παραγόμενη ισχύ του στροβίλου, όπως έχει αναφερθεί στο Κεφάλαιο 4. Επίσης, η μεγαλύτερη ροή αέρα απάγει σημαντικό ποσό θερμότητας που αναπτύσσεται στην είσοδο του στροβίλου, δίνοντας τη δυνατότητα για επιπλέον έγχυση καυσίμου και περαιτέρω αύξηση της παραγόμενης ισχύος.

Στο σημείο αυτό αξίζει να παραθέσουμε το διάγραμμα που αφορά τη μετρούμενη θερμοκρασία εξόδου των καυσαερίων από την αεριοστροβιλική μονάδα (σε ανά μονάδα τιμή) συναρτήσει του χρόνου, στις περιπτώσεις (α) και (β). Έτσι έχουμε το Σχήμα 7.7 όπου φαίνονται οι θετικές επιδράσεις της αύξησης της συνολικής ροής αέρα που εκτονώνεται στο στρόβιλο με τη χρήση του αεροφυλακίου.

Συγκεκριμένα, η έγχυση πεπιεσμένου αέρα στο θάλαμο καύσης της αεριοστροβιλικής μονάδας οδηγεί στην μείωση των θερμοκρασιών που αναπτύσσονται στην είσοδο του στροβίλου, καθότι απάγονται μεγαλύτερα ποσά θερμότητας, όπως προαναφέρθηκε. Για το λόγο αυτό παρατηρούμε στο Σχήμα 7.7 ότι η καμπύλη της μετρούμενης θερμοκρασίας των καυσαερίων στην περίπτωση (β) είναι κάτω από την αντίστοιχη της περίπτωσης (α), σε όλη τη διάρκεια της διαταραχής. Είναι χαρακτηριστικό ότι χωρίς το αεροφυλάκιο (περίπτωση α) η θερμοκρασία εξόδου των καυσαερίων ξεπερνά την ονομαστική της τιμή την χρονική στιγμή $t = 3,7$ s, ενώ στην περίπτωση (β) όπου εντάσσεται το αεροφυλάκιο η ονομαστική τιμή της θερμοκρασίας επέρχεται σε χρόνο $t = 5,7$ s.

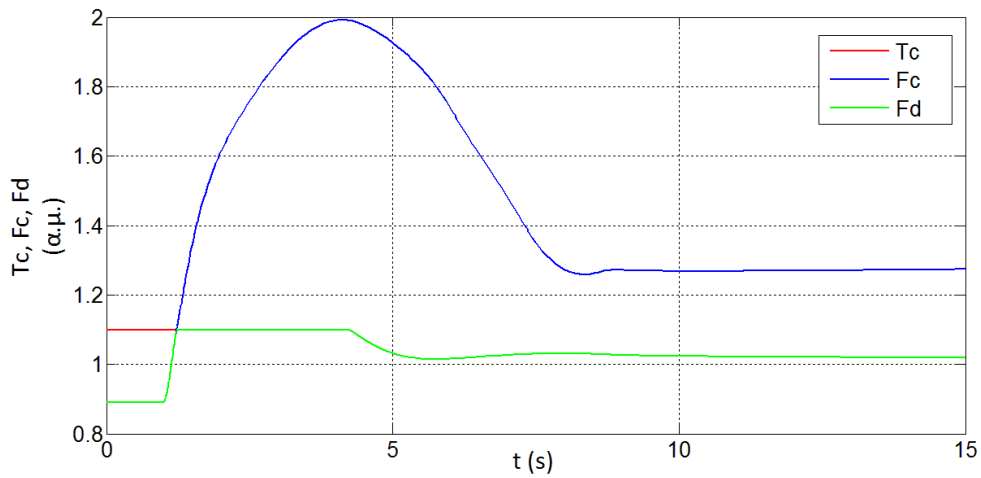
Επιπλέον, όπως αναφέρεται στον Πίνακα 7.8, η θερμοκρασία αναφοράς του ελέγχου υπερθέρμανσης είναι $T_{rp,u} = 1,01$ ανά μονάδα. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του Σχήματος 7.7, στην περίπτωση (β) η μετρούμενη θερμοκρασία των καυσαερίων φτάνει τη θερμοκρασία αναφοράς σε χρόνο $t = 7,3$ s, ενώ στην περίπτωση (α) αυτό συμβαίνει για $t = 4,25$ s. Συμπερασματικά, η διάταξη προστασίας του αεριοστροβίλου από υπερθέρμανση ενεργοποιείται ταχύτερα στην περίπτωση (α), μειώνοντας την έγχυση καυσίμου στο θάλαμο καύσης και κατ' επέκταση την ισχύ εξόδου της μονάδας. Έτσι δικαιολογείται η μικρότερης διάρκειας μέγιστη παραγωγή ισχύος στην περίπτωση (α), όπως εμφανίστηκε στα Σχήματα 7.3 και 7.4. Επίσης, όπως προκύπτει από το Σχήμα 7.7, η μέγιστη τιμή της θερμοκρασίας των καυσαερίων χωρίς αεροφυλάκιο είναι 1,02 ανά μονάδα, ενώ με τη χρήση αεροφυλακίου η αντίστοιχη τιμή είναι 1,013 σε ανά μονάδα τιμή επίσης. Το γεγονός αυτό εξηγεί τη μεγαλύτερη βύθιση της παραγόμενης ισχύος λόγω υπερθέρμανσης, στην περίπτωση χωρίς αεροφυλάκιο (Σχήμα 7.3 και 7.4).



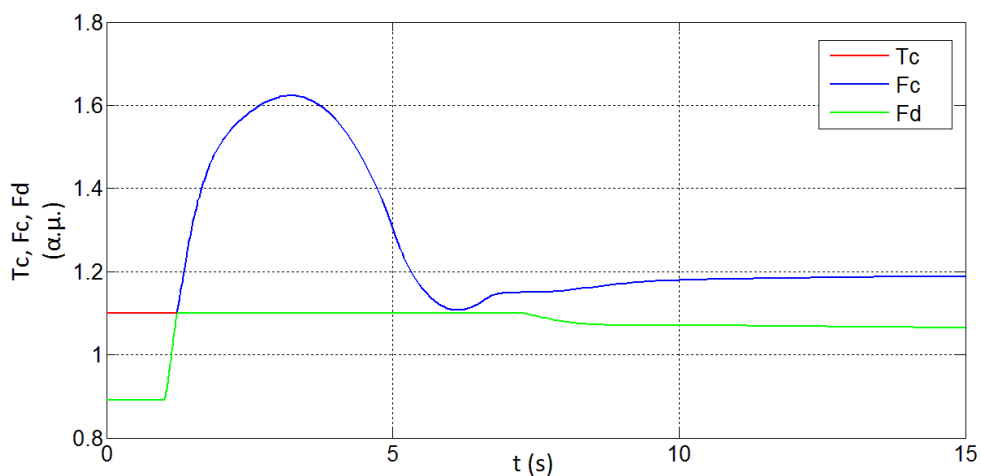
Σχήμα 7.7 : Ανά μονάδα τιμή της μετρούμενης θερμοκρασίας εξόδου των καυσαερίων της αεριοστροβιλικής μονάδας

Στο Σχήμα 7.8 απεικονίζονται τα σήματα ελέγχου F_c , T_c , F_d της ροής καυσίμου στο θάλαμο καύσης της αεριοστροβιλικής μονάδας (σε ανά μονάδα τιμή), στις περιπτώσεις (α) και (β). Το σήμα F_c αντιστοιχεί στην ανά μονάδα τιμή της ζήτησης καυσίμου από το ρυθμιστή στροφών, το σήμα T_c αναφέρεται στον περιορισμό της έγχυσης καυσίμου στο θάλαμο καύσης από τη διάταξη υπερθέρμανσης, και τέλος το σήμα F_d είναι η πραγματική εντολή που δίνεται στις αντλίες για την έγχυση καυσίμου. Σημειώνεται ότι το σήμα F_d καθορίζεται από το σήμα F_c του ρυθμιστή στροφών, λαμβάνοντας υπόψιν τον περιορισμό T_c που εισάγει ο έλεγχος υπερθέρμανσης. Δηλαδή, όπως έχει αναφερθεί και στην παράγραφο 4.2.7, το σήμα F_d προκύπτει ως το ελάχιστο μεταξύ των F_c και T_c .

Όπως παρατηρούμε στο Σχήμα 7.8, μετά την απώλεια των ατμοηλεκτρικών μονάδων την $t = 1$ s, η πραγματική εντολή για καύσιμο F_d καθορίζεται αποκλειστικά σύμφωνα με το σήμα περιορισμού T_c του ελέγχου υπερθέρμανσης, τόσο στην περίπτωση (α) όσο και στη (β). Αυτό συμβαίνει διότι σε όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης, και στις δύο υλοποιήσεις, το σήμα ζήτησης καυσίμου από το ρυθμιστή στροφών F_c υπερβαίνει το όριο T_c , λόγω του μεγάλου μεγέθους της διαταραχής και της ανάγκης για υψηλή ποσότητα καυσίμου.



(α) Χωρίς αεροφυλάκιο



(β) Με αεροφυλάκιο

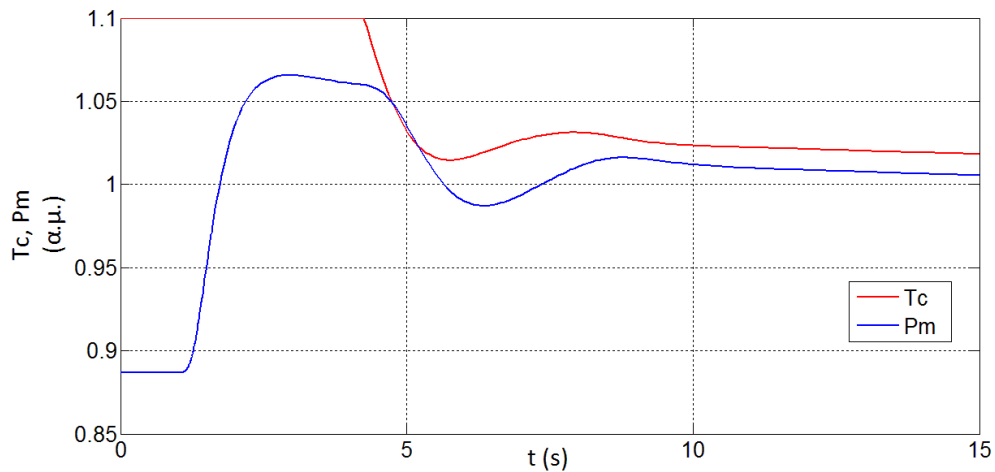
Σχήμα 7.8 : Σήματα ελέγχου της ροής καυσίμου της αεροστροβλικής μονάδας

Όσον αφορά το σήμα T_c , αρχίζει να ελαττώνεται τη χρονική στιγμή $t = 4,25$ s χωρίς την παρουσία αεροφυλακίου (Σχήμα 7.8-α), ενώ με ενταγμένο το αεροφυλάκιο στην αεροστροβλική μονάδα το όριο T_c ξεκινά να μειώνεται την $t = 7,3$ s (Σχήμα 7.8-β). Οι χρονικές στιγμές αυτές αναφέρθηκαν προηγουμένως, και αντιστοιχούν στο σημείο όπου η μετρούμενη θερμοκρασία των καυσαερίων φτάνει την τιμή αναφοράς $T_{p,u} = 1,01$. Επίσης διακρίνεται στο Σχήμα 7.8 η μεγαλύτερη και ταχύτερη βύθιση του T_c στην περίπτωση (α) συγκριτικά με τη (β), λόγω της μεγαλύτερης και συντομότερης υπερθέρμανσης (Σχήμα 7.7).

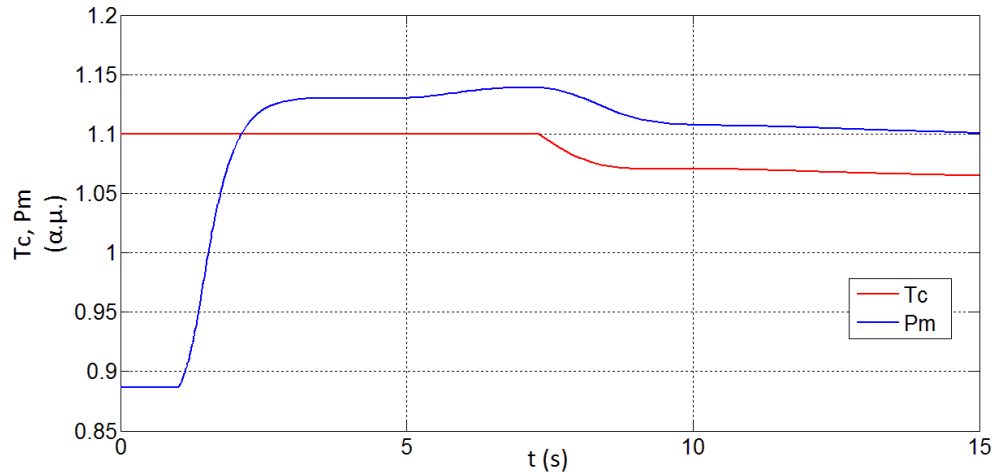
Τέλος, αξίζει να αναφερθεί ότι το σήμα ζήτησης καυσίμου F_c του ρυθμιστή στροφών της αεροστροβλικής μονάδας στο Σχήμα 7.8, σημειώνει μικρότερη μέγιστη τιμή στην περίπτωση (β) καθότι το σφάλμα συχνότητας που δέχεται είναι μικρότερο σε σχέση με την περίπτωση (α) (Σχήμα 7.2).

Για την καλύτερη κατανόηση της επίδρασης του ελέγχου υπερθέρμανσης (σήμα T_c) στην παραγόμενη ισχύ εξόδου της αεροστροβλικής μονάδας (σήμα P_m), παρατίθεται το

Σχήμα 7.9. Παρατηρούμε ότι το σήμα ελέγχου υπερθέρμανσης καθορίζει την έγχυση καυσίμου στο θάλαμο καύσης (Σχήμα 7.8) και επομένως την απόκριση της μηχανικής ισχύος, μετά την απώλεια των ατμοηλεκτρικών μονάδων. Έτσι, δεδομένου ότι η υπερθέρμανση της αεροστροβλικής μονάδας λαμβάνει χώρα συντομότερα στην περίπτωση (α), η μηχανική ισχύς αρχίζει να μειώνεται νωρίτερα, όπως έχει αναφερθεί και προηγουμένως. Στην περίπτωση (β), η υπερθέρμανση καθυστερεί λόγω της αυξημένης ροής αέρα που διέρχεται από το θάλαμο καύσης, συνεπώς έτσι δικαιολογείται η διάρκεια της αυξημένης παραγωγής ισχύος.



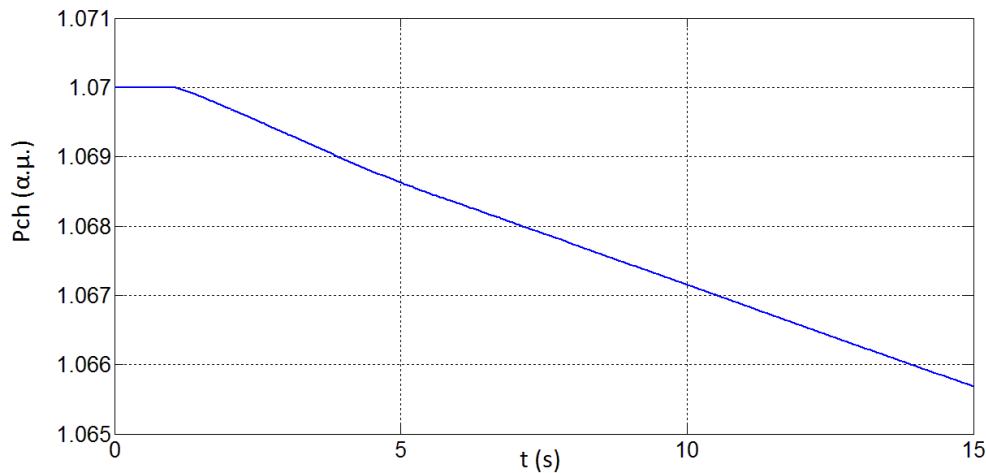
(α) Χωρίς αεροφυλάκιο



(β) Με αεροφυλάκιο

Σχήμα 7.9 : Σήμα ελέγχου υπερθέρμανσης – Ανά μονάδα παραγόμενη μηχανική ισχύς

Στο Σχήμα 7.10 φαίνεται η απόκριση της πίεσης του αεροφυλακίου (σε ανά μονάδα τιμή ως προς την ονομαστική πίεση του θαλάμου καύσης) συναρτήσει του χρόνου. Η αρχική τιμή της πίεσης έχει οριστεί στον Πίνακα 7.14 ως 1,07 ανά μονάδα. Για το δεδομένο μέγεθος του αεροφυλακίου που έχει επιλεγεί (χρονική σταθερά T_{cap}) και για τη συγκεκριμένη διαταραχή, όπως παρατηρούμε από το Σχήμα 7.10, τη στιγμή $t = 10$ s όπου η διαταραχή έχει αντιμετωπιστεί πλήρως, η ανά μονάδα τιμή της πίεσης έχει μειωθεί μόλις 0,3 % περίπου.



Σχήμα 7.10 : Ανά μονάδα τιμή της πίεσης του αεροφυλακίου

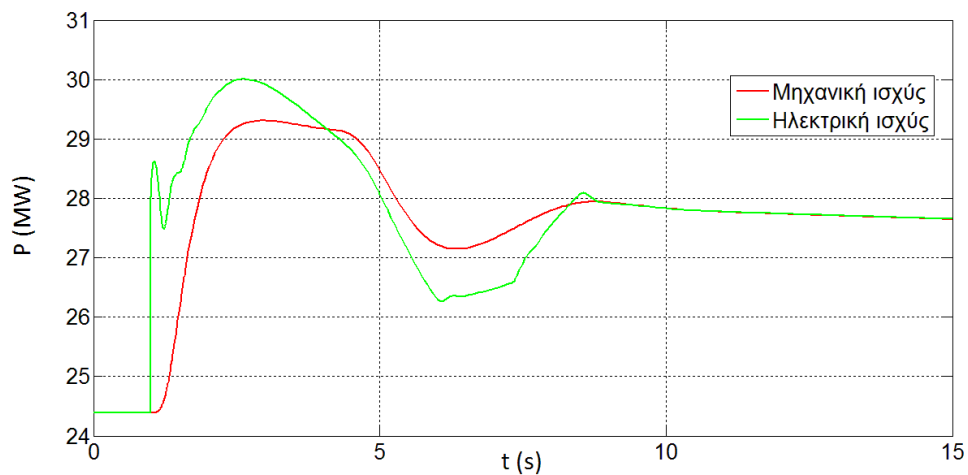
Στα Σχήματα 7.11 και 7.12, φαίνονται η παραγόμενη μηχανική και ηλεκτρική ισχύς της αεριοστροβιλικής μονάδας και του νηξελοηλεκτρικού σταθμού αντίστοιχα, στις περιπτώσεις (α) και (β). Παρατηρούμε ότι με την απώλεια των ατμοηλεκτρικών μονάδων την $t = 1$ s, η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς των υπόλοιπων γεννητριών αυξάνεται απότομα, λόγω του γεγονότος πως η ηλεκτρική ισχύς που μέχρι πρότινος παρείχε ο ατμοηλεκτρικός σταθμός θα εγχυθεί στο δίκτυο από τις εναπομένουσες συμβατικές μονάδες, για τη διατήρηση του ισοζυγίου ισχύος παραγωγής και κατανάλωσης.

Ο ρόλος του ρυθμιστή στροφών της κάθε μονάδας είναι να διατηρεί τη συχνότητα περιστροφής του δρομέα της αντίστοιχης γεννήτριας και κατ' επέκταση την ηλεκτρική συχνότητα του συστήματος, σε επιτρεπτά επίπεδα. Η συχνότητα περιστροφής του άξονα της κάθε γεννήτριας εξαρτάται από την παραγόμενη περιστροφική ισχύ της κάθε μηχανής και από την αποδιδόμενη ηλεκτρική ισχύ στο δίκτυο. Συγκεκριμένα, όταν η ηλεκτρική ισχύς που παράγει η γεννήτρια υπερβαίνει την παραγόμενη μηχανική ισχύ στον άξονα, τότε η συχνότητα περιστροφής μειώνεται, λόγω του γεγονότος πως η επιπλέον ισχύς που αποδίδεται στο δίκτυο προέρχεται από την απορρόφηση μέρους της κινητικής ενέργειας του άξονα περιστροφής. Το αντίστροφο συμβαίνει όταν η ηλεκτρική ισχύς υπολείπεται της παραγόμενης μηχανικής ισχύος στον άξονα, όπου η περίσσεια ισχύος αποθηκεύεται υπό μορφή κινητικής ενέργειας και η συχνότητα αυξάνει. Συμπερασματικά, για να διατηρηθεί η συχνότητα περιστροφής της κάθε γεννήτριας και η ηλεκτρική συχνότητα του συστήματος σε επιτρεπτά επίπεδα, πρέπει η παραγόμενη μηχανική ισχύς των μονάδων να παρακολουθεί τις μεταβολές της ηλεκτρικής ισχύος της γεννήτριας, μέσω του ρυθμιστή στροφών. Για το λόγο αυτό παρατηρούμε στα Σχήματα 7.11 και 7.12 ότι η μορφή της μηχανικής ισχύος ακολουθεί την αντίστοιχη της ηλεκτρικής ισχύος.

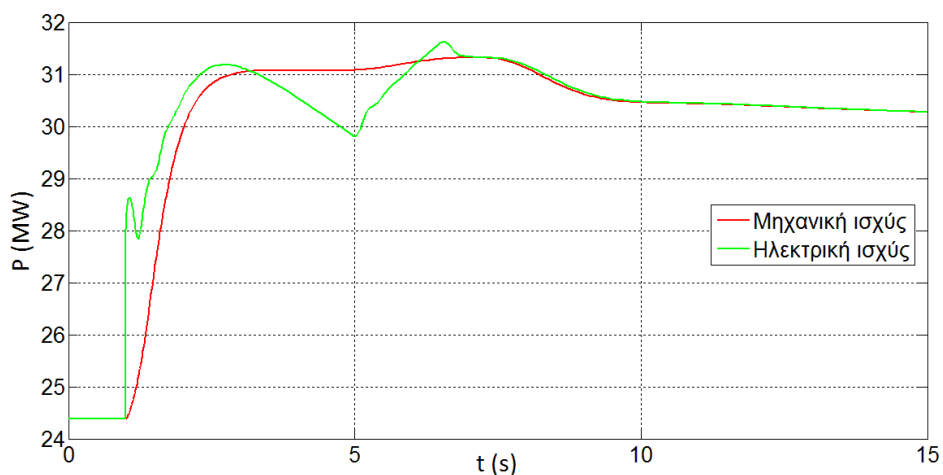
Στο Σχήμα 7.11 φαίνεται ότι στην περίπτωση (β), τα πρώτα δευτερόλεπτα μετά την απώλεια των ατμοηλεκτρικών μονάδων, η καμπύλη της μηχανικής ισχύος της αεριοστροβιλικής μονάδας είναι πιο κοντά στην αντίστοιχη της ηλεκτρικής, συγκριτικά με την περίπτωση (α). Το γεγονός αυτό συνεπάγεται ότι, η μείωση της κινητικής ενέργειας του άξονα περιστροφής και κατ' επέκταση της συχνότητας θα είναι μικρότερη στην περίπτωση (β). Το ίδιο φαινόμενο εμφανίζεται και στο Σχήμα 7.12, όπου η παραγόμενη μηχανική ισχύς των νηξελομηχανών εμφανίζει μικρότερη απόκλιση από την ηλεκτρική ισχύ των αντίστοιχων γεννητριών τα πρώτα δευτερόλεπτα μετά τη διαταραχή, στην περίπτωση (β). Τέλος, σημειώνεται ότι μετά από χρόνο $t = 10$ s όπου η συχνότητα του συστήματος της

Ρόδου (Σχήμα 7.2) έχει αποκατασταθεί, η καμπύλη της μηχανικής ισχύος ταυτίζεται με την αντίστοιχη της ηλεκτρικής (Σχήμα 7.11 και 7.12), τόσο για τις νηξελογεννήτριες όσο και για την αεριοστροβιλική μονάδα.

Συμπερασματικά, η χρήση του αεροφυλάκιου, με την άμεση αύξηση της παραγόμενης μηχανικής ισχύος της αεριοστροβιλικής μονάδας, οδηγεί σε βελτίωση του συνολικού προφίλ παραγωγής ισχύος των μονάδων, συγκρατώντας την ηλεκτρική συχνότητα του συστήματος της Ρόδου σε υψηλότερες τιμές (Σχήμα 7.2).

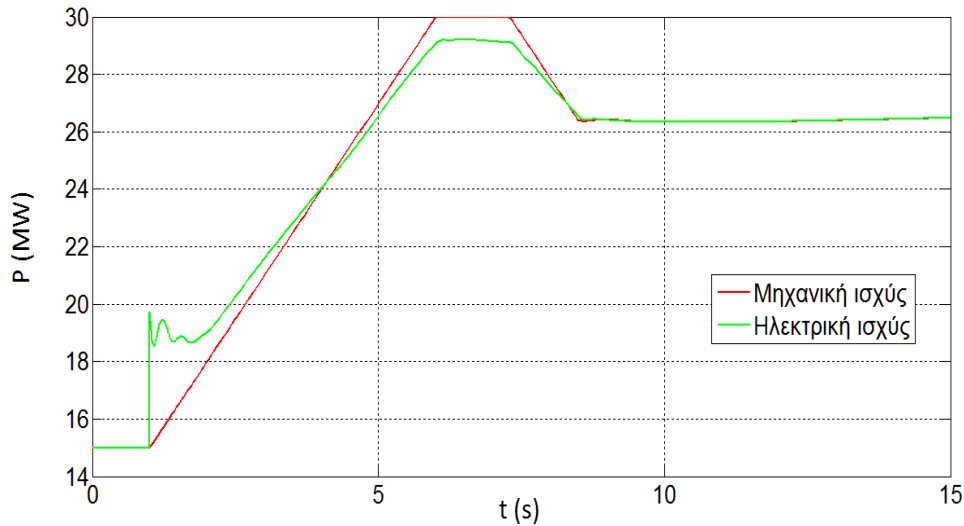


(α) Χωρίς αεροφυλάκιο

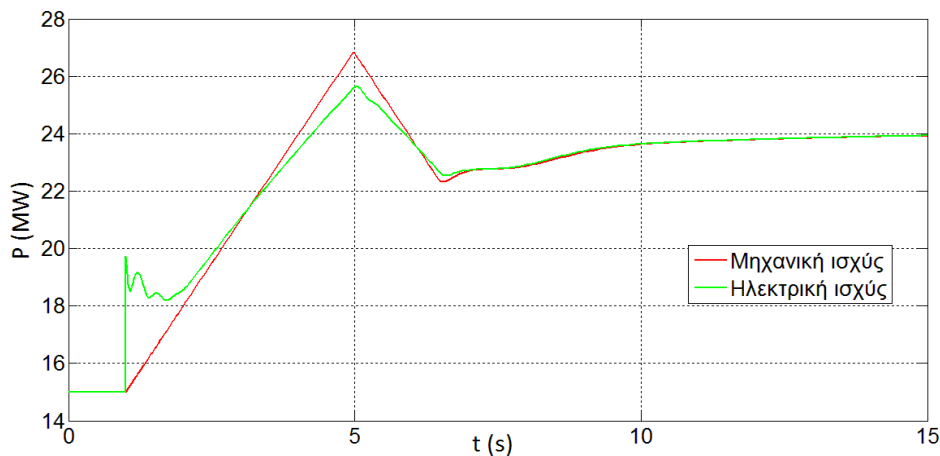


(β) Με αεροφυλάκιο

Σχήμα 7.11 : Παραγόμενη μηχανική-ηλεκτρική ισχύς αεριοστροβιλικής μονάδας



(α) Χωρίς αεροφυλάκιο

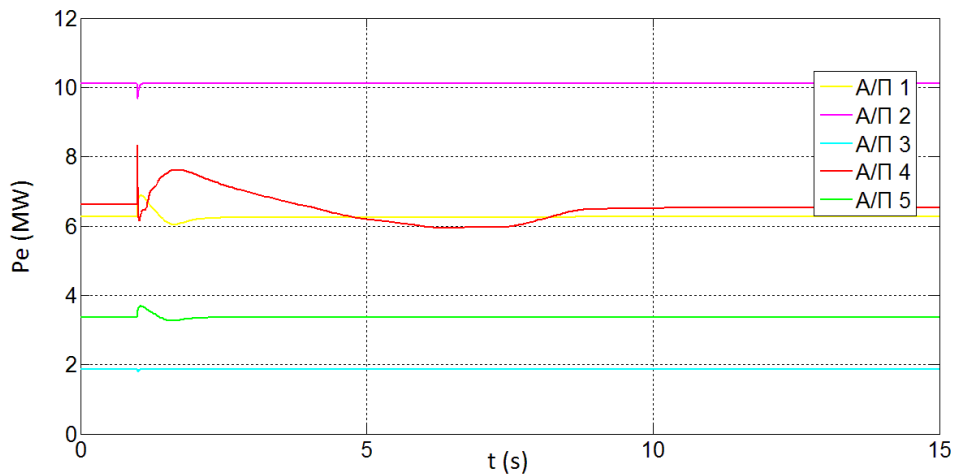


(β) Με αεροφυλάκιο

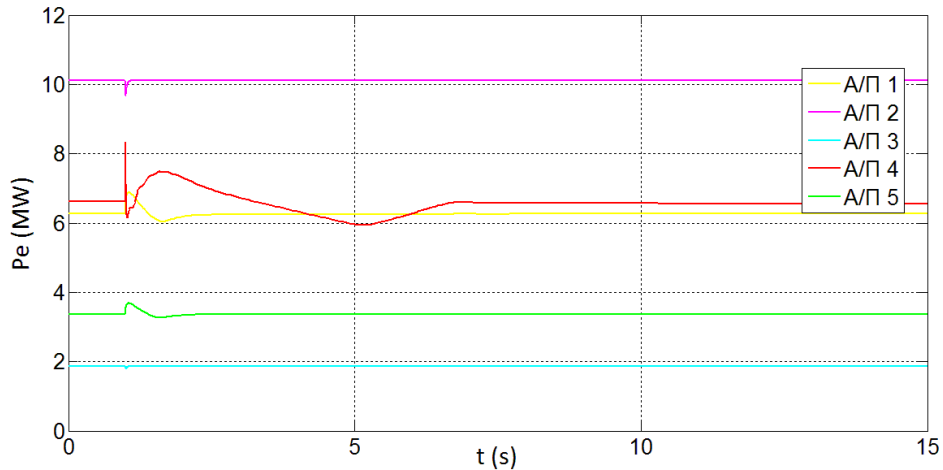
Σχήμα 7.12 : Παραγόμενη μηχανική-ηλεκτρική ισχύς νηζελοηλεκτρικού σταθμού

Στο Σχήμα 7.13 απεικονίζεται η παραγόμενη ενεργός ισχύς του κάθε αιολικού πάρκου συναρτήσει του χρόνου προσομοίωσης, ενώ στο Σχήμα 7.14 φαίνεται η ανά μονάδα τιμή των τάσεων των ζυγών που συνδέονται τα αιολικά πάρκα στο δίκτυο, στις περιπτώσεις (α) και (β). Συγκρίνοντας τις αποκρίσεις της ηλεκτρικής ισχύος των αιολικών πάρκων, παρατηρούμε ότι τη μεγαλύτερη διαταραχή την υφίσταται το Α/Π 4. Το συγκεκριμένο αιολικό πάρκο, όπως αναφέρεται στον Πίνακα 7.4, είναι Τύπου Α, δηλαδή αποτελείται από ανεμογεννήτριες σταθερών στροφών. Ως γνωστόν, οι ανεμογεννήτριες σταθερών στροφών είναι μηχανές επαγωγής, οι οποίες συνδέονται στο δίκτυο χωρίς μετατροπέα ισχύος. Η έλλειψη μετατροπέα συνεπάγεται την άμεση εξάρτηση των ανεμογεννητριών Τύπου Α από την τάση και τη συχνότητα στο σημείο σύνδεσης με το ηλεκτρικό δίκτυο. Συμπερασματικά, οποιαδήποτε διαταραχή που εμφανίζεται στο δίκτυο (μεταβολές τάσης και συχνότητας) μεταφράζεται σε αντίστοιχη μεταβολή της εγχεόμενης ηλεκτρικής ισχύος. Επομένως, η απώλεια παραγωγής των ατμοηλεκτρικών μονάδων οδηγεί σε αύξηση της ηλεκτρομαγνητικής ροπής και σε μεταβατική υπερακόντιση της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος που εγχέει το συγκεκριμένο αιολικό πάρκο στο δίκτυο (Σχήμα 7.13).

Παρατηρούμε ότι και στα υπόλοιπα αιολικά πάρκα σημειώνεται μια απότομη μεταβολή της ηλεκτρικής ισχύος τη χρονική στιγμή που αποσυνδέεται ο ατμοηλεκτρικός σταθμός, η οποία ωστόσο είναι μικρότερου μεγέθους συγκριτικά με την αντίστοιχη του Α/Π 4, λόγω της χρήσης ηλεκτρονικών ισχύος. Συγκεκριμένα, τη μικρότερη υπερακόντιση την εμφανίζουν τα Α/Π 2 και Α/Π 3 λόγω της απόζευξης των αντίστοιχων ανεμογεννητριών από το δίκτυο με τη χρήση πλήρους μετατροπέα ισχύος (Τύπου Δ). Τα Α/Π 1 και Α/Π 5 (Τύπου Γ) εμφανίζουν υψηλότερη μεταβατική μεταβολή της ηλεκτρικής ισχύος από τα Α/Π 2 και Α/Π 3, καθώς ο στάτης των αντίστοιχων ανεμογεννητριών είναι απευθείας συνδεδεμένος στο δίκτυο.



(α) Χωρίς αεροφυλάκιο



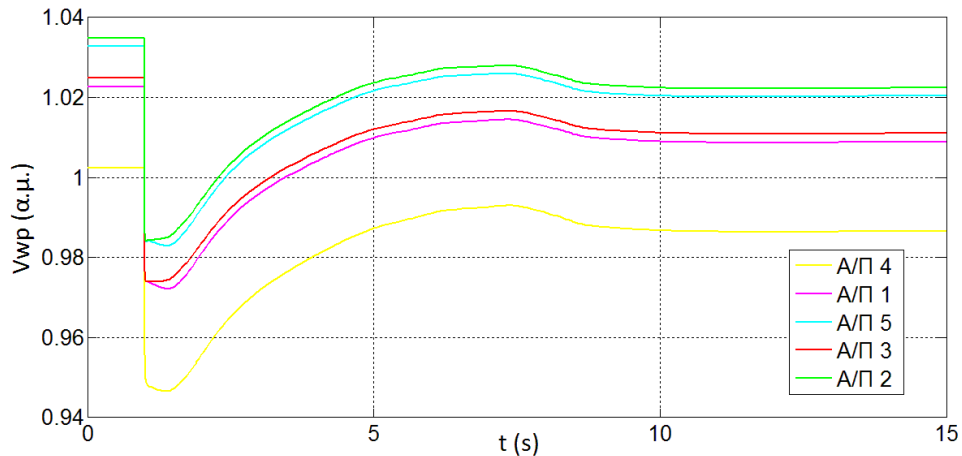
(β) Με αεροφυλάκιο

Σχήμα 7.13 : Παραγόμενη ενεργός ισχύς Αιολικών Πάρκων

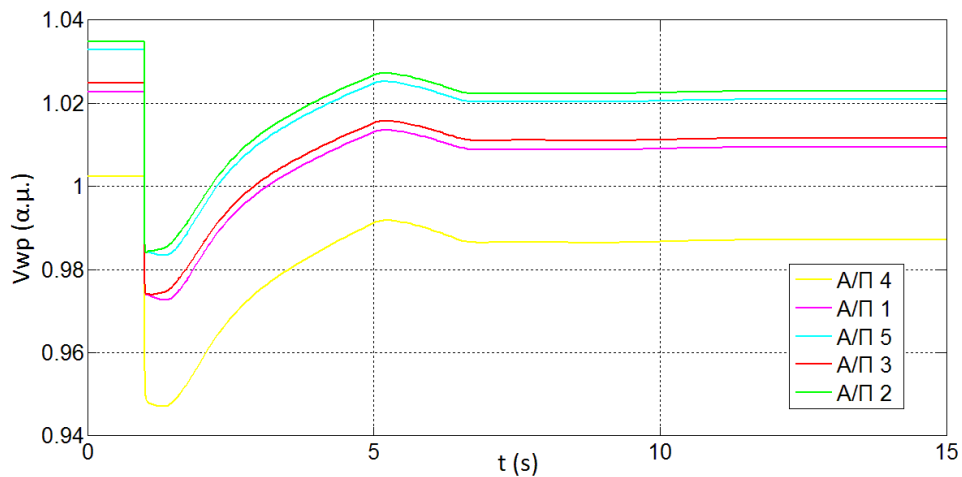
Η χρήση των ηλεκτρονικών ισχύος ευνοεί επίσης την άμεση επαναφορά της παραγόμενης ενεργού ισχύος των αιολικών πάρκων 1,2,3,5 στα αρχικά επίπεδα. Το Α/Π 4 εξαρτάται άμεσα από τις διακυμάνσεις της τάσεως του ζυγού σύνδεσης και της ηλεκτρικής συχνότητας του δικτύου, με αποτέλεσμα η ηλεκτρική ισχύς που εγγείει στο δίκτυο να επανέρχεται στα αρχικά επίπεδα μετά τη σταθεροποίηση της τάσεως και της συχνότητας. Παρατηρούμε ότι με την ενσωμάτωση του αεροφυλακίου στην αεριοστροβιλική μονάδα, η παραγόμενη ενεργός ισχύς του Α/Π 4 σταθεροποιείται ταχύτερα (Σχήμα 7.13) σε σχέση με

την περίπτωση (α), λόγω της αποκατάστασης της συχνότητας σε μικρότερο χρονικό διάστημα. Τα υπόλοιπα αιολικά πάρκα έχουν σχεδόν ταυτόσημη συμπεριφορά με ή χωρίς την παρουσία αεροφυλακίου, καθότι ο μετατροπέας ισχύος απεμπλέκει μερικώς (Τύπου Γ) ή τελείως (Τύπου Δ) τη συχνότητα περιστροφής των ανεμογεννητριών από την ηλεκτρική συχνότητα του δικτύου.

Στο Σχήμα 7.14, όπως αναφέρθηκε, φαίνονται οι τάσεις των ζυγών των αιολικών πάρκων (σε ανά μονάδα τιμές), ενώ στο Σχήμα 7.15 απεικονίζονται οι τάσεις των ζυγών στους οποίους υπάρχουν τα ηλεκτρικά φορτία (σε ανά μονάδα τιμές επίσης), στις περιπτώσεις (α) και (β).



(α) Χωρίς αεροφυλάκιο



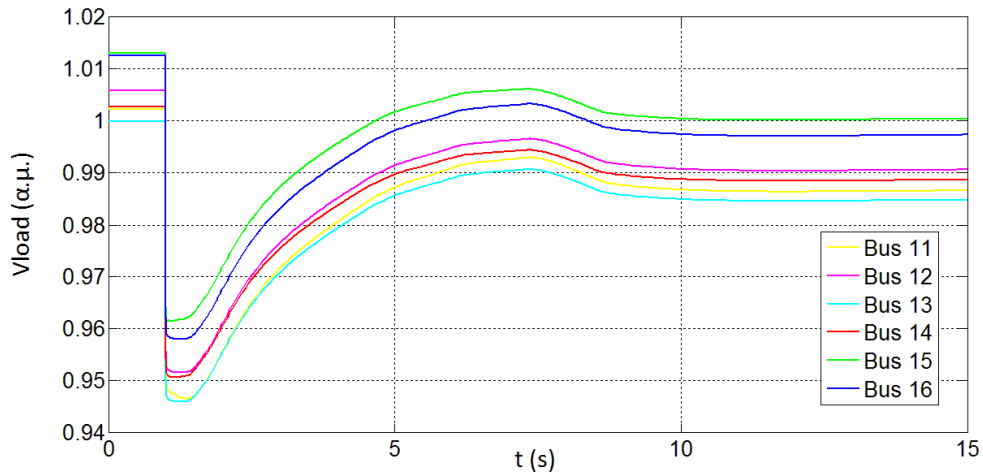
(β) Με αεροφυλάκιο

Σχήμα 7.14 : Ανά μονάδα τιμή των τάσεων των ζυγών σύνδεσης των Αιολικών Πάρκων στο δίκτυο της Ρόδου

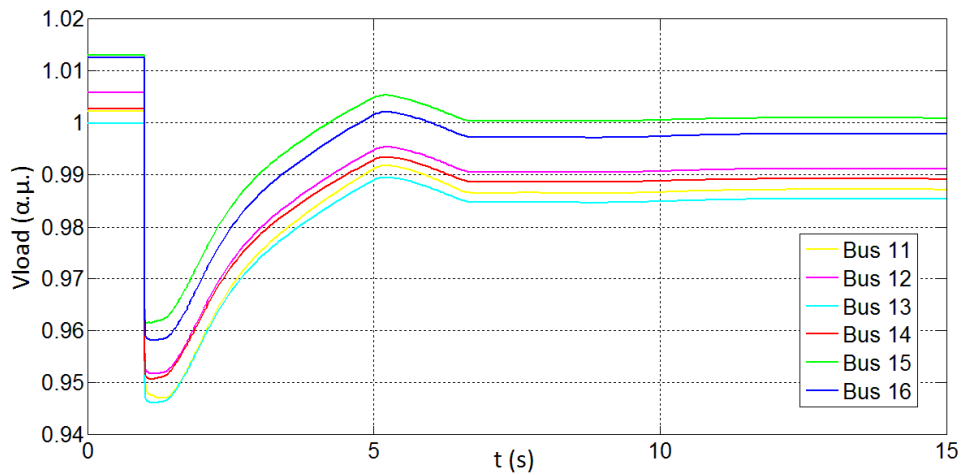
Με την απώλεια των ατμοηλεκτρικών μονάδων, οι τάσεις όλων των ζυγών του συστήματος της Ρόδου βυθίζονται απότομα (Σχήμα 7.14 και 7.15). Αυτό οφείλεται στη διατάραξη του ισοζυγίου αέργου ισχύος, όπου τη στιγμή $t = 1$ s που αποσυνδέεται ο ατμοηλεκτρικός σταθμός από το δίκτυο, εμφανίζεται στο σύστημα έλλειμμα αέργου ισχύος. Είναι γνωστό επίσης ότι οι τάσεις των ζυγών ενός συστήματος εξαρτώνται άμεσα από τις ροές ισχύος στις

γραμμές μεταφοράς. Η απότομη απώλεια λοιπόν της αρχικώς παραγόμενης αέργου ισχύος των ατμοηλεκτρικών μονάδων, οδηγεί στην αντίστοιχη πτώση των τάσεων των ζυγών του συστήματος της Ρόδου.

Οι απότομες βυθίσεις των τάσεων των ζυγών των αιολικών πάρκων (Σχήμα 7.14) είχαν ως αποτέλεσμα την απότομη μεταβολή της παραγόμενης ενεργού ισχύος τους, όπως προαναφέρθηκε. Όσον αφορά τους ζυγούς φορτίου (Σχήμα 7.15), η μείωση της τάσης έχει ως αποτέλεσμα την πτώση της καταναλισκόμενης ηλεκτρικής ισχύος, δεδομένης της παραδοχής φορτίων σταθερής αγωγιμότητας. Το γεγονός αυτό συνεισφέρει στη ρύθμιση συχνότητας, διότι μειώνεται η απόκλιση της συνολικά παραγόμενης και καταναλισκόμενης ισχύος.



(α) Χωρίς αεροφυλάκιο



(β) Με αεροφυλάκιο

Σχήμα 7.15 : Ανά μονάδα τιμή των τάσεων των ζυγών φορτίου στο δίκτυο της Ρόδου

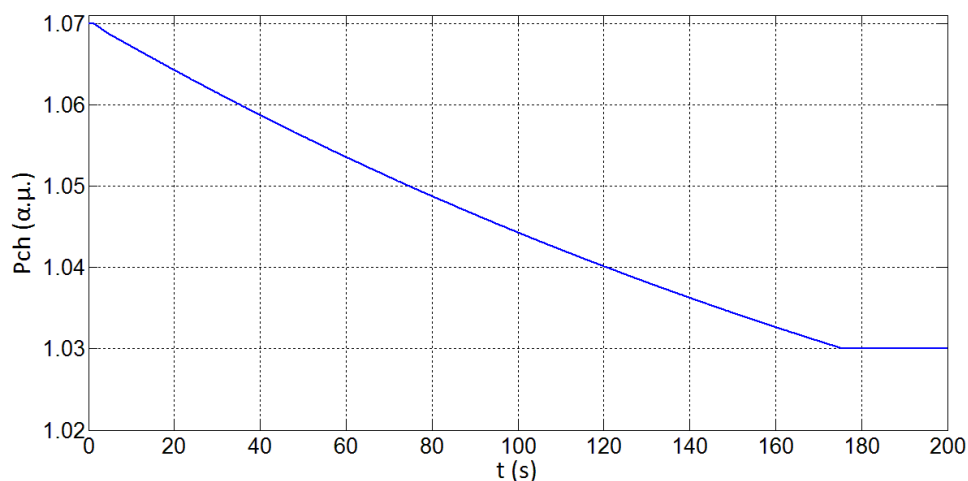
Τόσο για τους ζυγούς των φορτίων όσο και για τους ζυγούς των αιολικών πάρκων (Σχήμα 7.14 και 7.15), οι τάσεις αποκαθίστανται πιο σύντομα στη μόνιμη τιμή τους στην περίπτωση (β). Σημειώνεται ωστόσο ότι η αρχική βύθιση των τάσεων εξαρτάται αποκλειστικά από το μέγεθος της διαταραχής, και συγκεκριμένα από την απώλεια αέργου ισχύος κατά την αποσύνδεση των ατμοηλεκτρικών μονάδων, όντας ίδια στις περιπτώσεις (α) και (β) .

Συνοψίζοντας, η ένταξη του αεροφυλακίου στην αεροστροβλική μονάδα έχει ως αποτέλεσμα την ταχύτερη αποκατάσταση των τάσεων, και συνακόλουθα τόσο της παραγόμενης ισχύος του Α/Π 4 όσο και των καταναλώσεων των φορτίων.

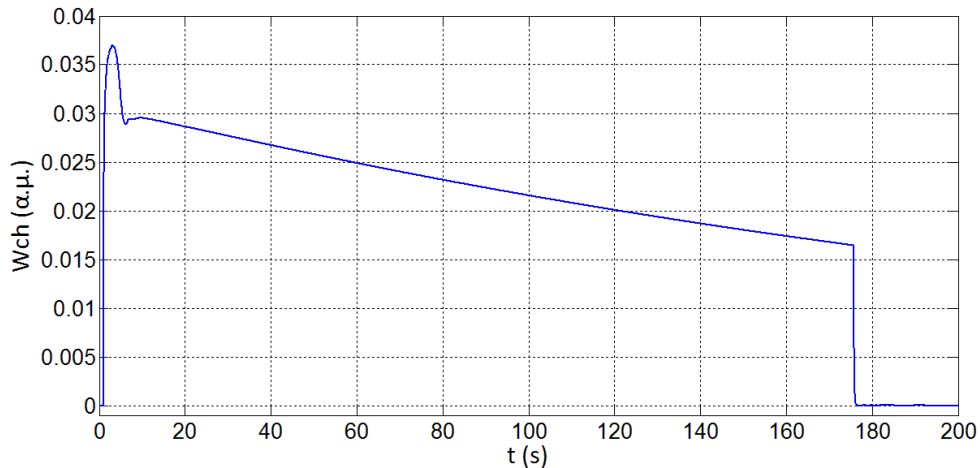
Στο σημείο αυτό αξίζει να εξετάσουμε το σύστημα της Ρόδου σε μεγαλύτερο χρονικό διάστημα προσομοίωσης, προκειμένου να αντιληφθούμε την επίδραση που έχει στην απόκριση του συστήματος η σταδιακή εξάντληση της πίεσης του αεροφυλακίου. Έτσι, προσομοιώνεται το αυτόνομο σύστημα της Ρόδου στο χρονικό διάστημα $0 < t < 200$ s, στο ίδιο αρχικό σενάριο παραγωγής-κατανάλωσης και στην ίδια διαταραχή, με ενσωματωμένο το αεροφυλάκιο στην αεροστροβλική μονάδα.

Στο Σχήμα 7.16 εμφανίζεται η πίεση του αεροφυλακίου σε ανά μονάδα τιμή, ενώ στο Σχήμα 7.17 φαίνεται η ανά μονάδα εγχέομενη ροή αέρα του αεροφυλακίου στο θάλαμο καύσης της αεροστροβλικής μονάδας, συναρτήσει του χρόνου προσομοίωσης. Παρατηρούμε ότι με την πάροδο του χρόνου η πίεση του αεροφυλακίου μειώνεται, ως αποτέλεσμα της ελάττωσης της αποθηκευμένης μάζας αέρα σε αυτό. Η πτώση της πίεσης του αεροφυλακίου έχει ως απόρροια την ελάττωση της διαφοράς πίεσης μεταξύ αεροφυλακίου και θαλάμου καύσης, οδηγώντας στην μείωση της ροής του αεροφυλακίου. Συμπερασματικά, διαρκής τροφοδότηση του θαλάμου καύσης της αεροστροβλικής μονάδας με πεπιεσμένο αέρα συνεπάγεται τη μείωση της πίεσεως του αεροφυλακίου, με αποτέλεσμα την αντίστοιχη μείωση της εγχέομενης ροής. Το γεγονός αυτό αποδίδεται στην αναλογία που έχει θεωρηθεί στο Κεφάλαιο 4, μεταξύ της ροής και της διαφοράς πίεσεως αεροφυλακίου-θαλάμου καύσεως.

Όπως αναφέρεται στον Πίνακα 7.14, το κατώτατο όριο της πίεσης λειτουργίας του αεροφυλακίου έχει οριστεί 1,03 ανά μονάδα. Εξετάζοντας το Σχήμα 7.16 παρατηρούμε ότι για $t = 176$ s περίπου η πίεση του αεροφυλακίου γίνεται ίση με το όριο που έχει υποτεθεί. Κατά συνέπεια, την παραπάνω χρονική στιγμή, η δικλείδα αέρα κλείνει, θέτοντας εκτός λειτουργίας το αεροφυλάκιο. Επομένως, η ροή αέρα του αεροφυλακίου μηδενίζεται, όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.17, και η πίεση του παραμένει από εκεί και μετά στο κατώτατο όριο 1,03 ανά μονάδα.

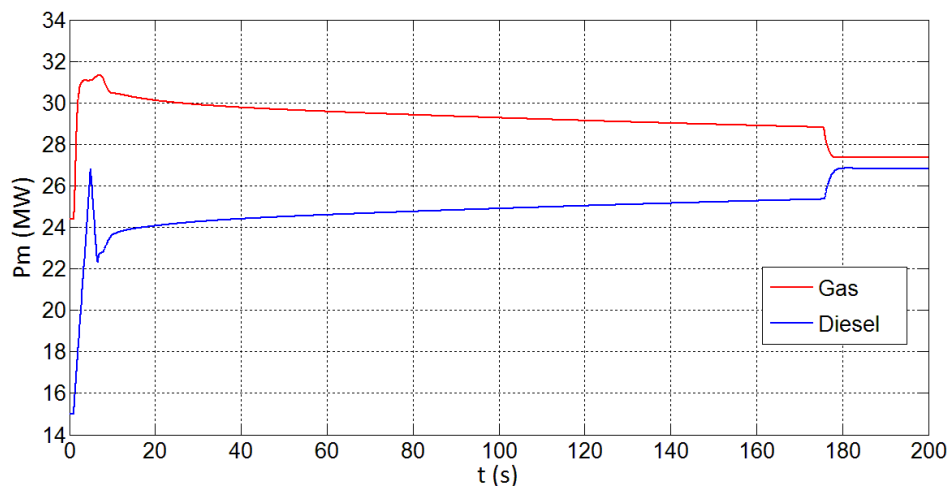


Σχήμα 7.16 : Ανά μονάδα τιμή της πίεσης αεροφυλακίου σε διάστημα προσομοίωσης $0s < t < 200s$



Σχήμα 7.17 : Ανά μονάδα τιμή της ροής αεροφυλακίου σε διάστημα προσομοίωσης $0s < t < 200s$

Στο Σχήμα 7.18 φαίνεται η απόκριση της μηχανικής ισχύος της αεριοστροβλικής μονάδας (Gas) και του νηζελοηλεκτρικού σταθμού (Diesel), συναρτήσει του χρόνου προσομοίωσης. Παρατηρούμε ότι πριν την αποσύνδεση του αεροφυλακίου την $t = 176$ s, η παραγωγή ισχύος του αεριοστροβίλου μειώνεται με έναν μικρό ρυθμό. Το γεγονός αυτό οφείλεται στη σταδιακή μείωση της εγχεόμενης ροής αέρα από το αεροφυλάκιο στο θάλαμο καύσης, όπως εμφανίστηκε στο Σχήμα 7.17. Η μείωση της παραγόμενης μηχανικής ισχύος της αεριοστροβλικής μονάδας υποκαθίσταται από ανάλογη αύξηση της παραγωγής του νηζελοηλεκτρικού σταθμού, κατά το ίδιο χρονικό διάστημα.

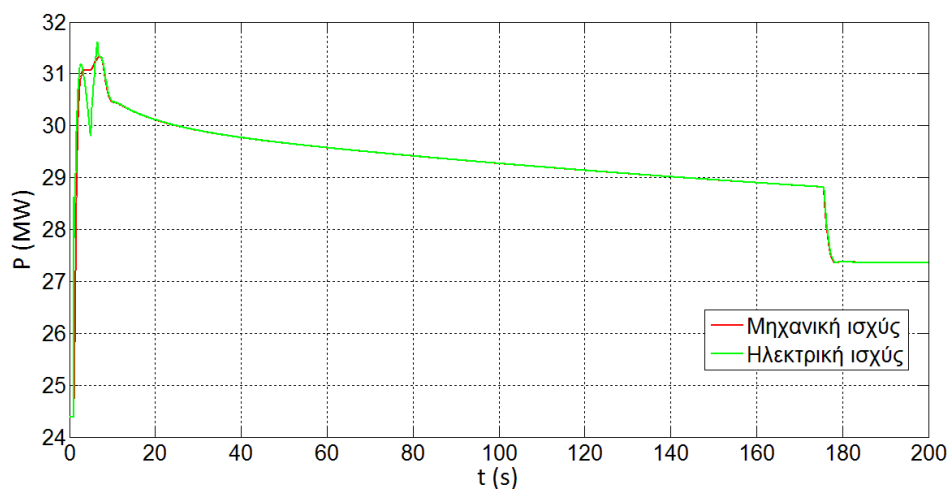


Σχήμα 7.18 : Παραγόμενη μηχανική ισχύς εναπομεινουσών μονάδων σε διάστημα προσομοίωσης $0s < t < 200s$

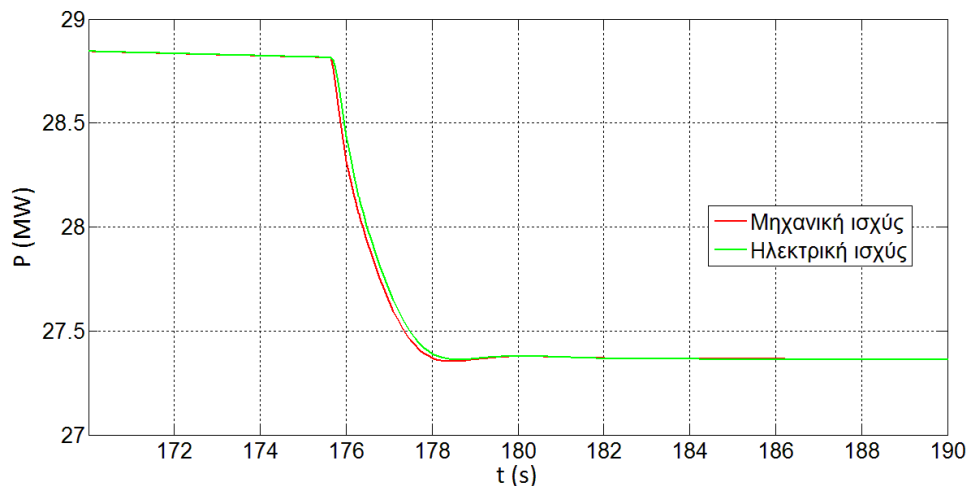
Σε χρόνο $t = 176$ s όπου το αεροφυλάκιο τίθεται εκτός λειτουργίας και η ροή εξ' αυτού μηδενίζεται, σημειώνεται απότομη πτώση της μηχανικής ισχύος του αεριοστροβίλου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.18. Αυτό συνεπάγεται πτώση της συχνότητας του συστήματος, λόγω διατάραξης του ισοζυγίου ισχύος, με αποτέλεσμα ο ρυθμιστής στροφών των νηζελομηχανών να αυξάνει την παραγόμενη μηχανική ισχύ τους. Αφού η παραγωγή ισχύος του νηζελοηλεκτρικού σταθμού αυξηθεί επαρκώς ώστε να καλυφθεί το έλλειμμα ισχύος που εμφανίστηκε στο σύστημα, η παραγόμενη μηχανική ισχύς των μονάδων σταθεροποιείται στη μόνιμη τιμή της. Η μόνιμη τιμή της μηχανικής ισχύος των νηζελογεννητριών είναι 26,8 MW

ενώ του αεριοστροβίλου 27,36 MW. Αντιλαμβανόμαστε λοιπόν ότι, μετά την αποσύνδεση του αεροφυλακίου, η παραγόμενη μηχανική ισχύς της αεριοστροβιλικής μονάδας επανέρχεται ελαφρώς κάτω από τα ονομαστικά επίπεδα (27,5 MW σύμφωνα με τον Πίνακα 7.7).

Στο Σχήμα 7.19 και 7.20 απεικονίζεται η παραγόμενη μηχανική και ηλεκτρική ισχύς της αεριοστροβιλικής μονάδας και του νηζελοηλεκτρικού σταθμού, αντίστοιχα. Μετά την εξάλειψη της διαταραχής της απώλειας του ατμοηλεκτρικού σταθμού και πριν την αποσύνδεση του αεροφυλακίου, παρατηρούμε ότι η μηχανική και ηλεκτρική ισχύς ταυτίζονται, τόσο στην περίπτωση της αεριοστροβιλικής μονάδας όσο και των νηζελογεννητριών. Μετά από χρόνο $t = 176$ s περίπου, όπου το αεροφυλάκιο τίθεται εκτός λειτουργίας, η παραγόμενη μηχανική ισχύς του αεριοστροβίλου μειώνεται, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως.



(α) Συνολικός χρόνος προσομοίωσης

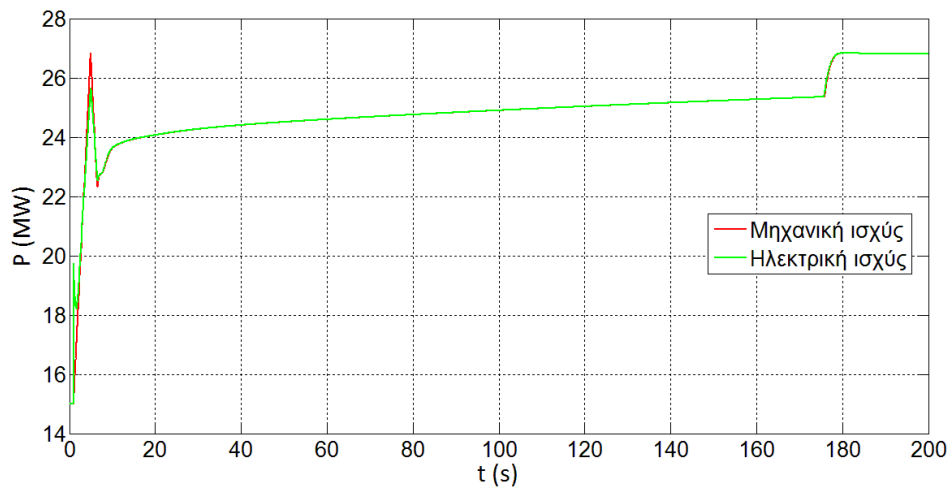


(β) Εστίαση στο χρονικό διάστημα $170 \text{ s} < t < 190 \text{ s}$

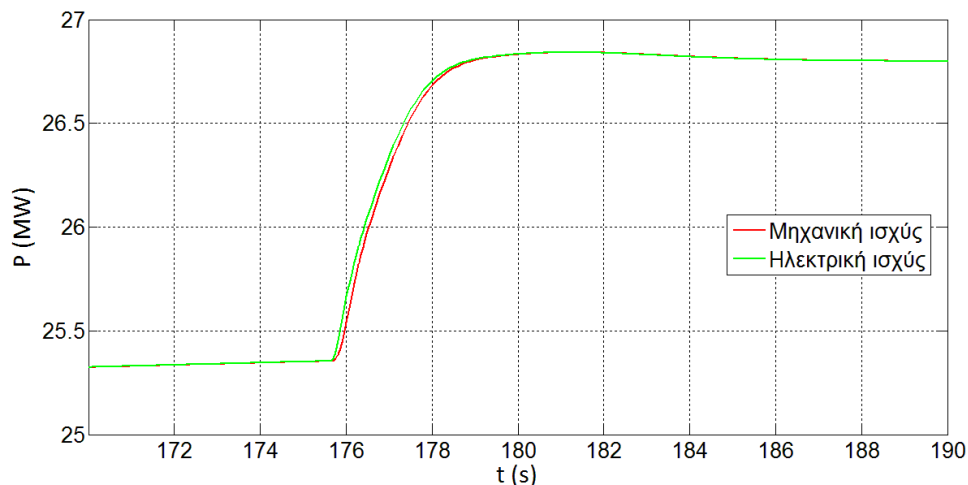
Σχήμα 7.19 : Παραγόμενη ισχύς αεριοστροβιλικής μονάδας με αεροφυλάκιο σε διάστημα προσομοίωσης $0 \text{ s} < t < 200 \text{ s}$

Εξετάζοντας το Σχήμα 7.19-(β) που εστιάζει στο χρονικό διάστημα της αποσύνδεσης του αεροφυλακίου, αντιλαμβανόμαστε ότι η μείωση της μηχανικής ισχύος του αεριοστροβίλου ακολουθείται από ανάλογη πτώση της ηλεκτρικής ισχύος που εγγεί στο

δίκτυο. Η μείωση της ενεργού ηλεκτρικής ισχύος της αεριοστροβιλικής μονάδας, υποκαθίσταται από την αύξηση της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος των νηξελογεννητριών, όπως εμφανίζεται στο Σχήμα 7.20-(β).



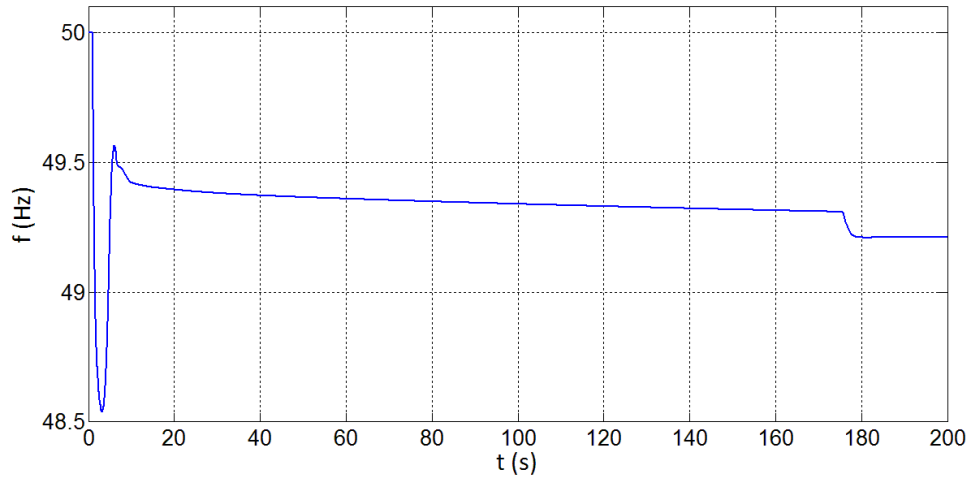
(α) Συνολικός χρόνος προσομοίωσης



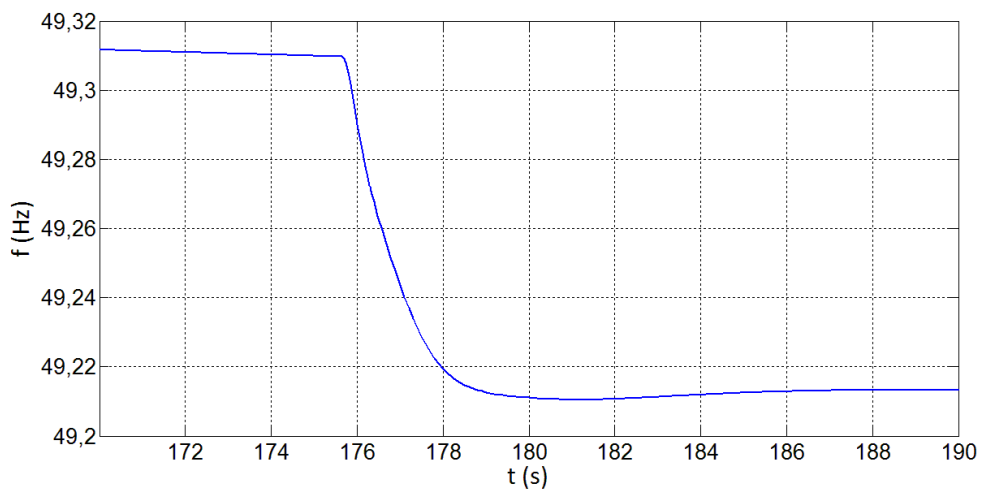
(β) Εστίαση στο χρονικό διάστημα $170\text{ s} < t < 190\text{ s}$

Σχήμα 7.20 : Παραγόμενη ισχύς νηξελοηλεκτρικού σταθμού σε διάστημα προσομοίωσης $0\text{ s} < t < 200\text{ s}$

Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι η μηχανική και ηλεκτρική ισχύς είναι παραπλήσιες κατά το χρονικό διάστημα της αποσύνδεσης του αεροφυλακίου, τόσο στην περίπτωση της αεριοστροβιλικής μονάδας όσο και σε αυτή του νηξελοηλεκτρικού σταθμού, εξετάζοντας τα Σχήματα 7.19-(β) και 7.20-(β). Το γεγονός αυτό συνεπάγεται πως η ηλεκτρική συχνότητα του συστήματος της Ρόδου δεν μεταβάλλεται σημαντικά το παραπάνω χρονικό διάστημα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.21 (πτώση κατά 0,1 Hz περίπου λόγω της αποσύνδεσης του αεροφυλακίου). Μετά την αποκατάσταση της ισορροπίας, η ηλεκτρική και μηχανική ισχύς πλέον ταυτίζονται, και η συχνότητα του συστήματος έχει προσεγγίσει τη μόνιμη τιμή της στα 49,21 Hz περίπου.



(α) Συνολικός χρόνος προσομοίωσης



(β) Εστίαση στο χρονικό διάστημα $170\text{ s} < t < 190\text{ s}$

Σχήμα 7.21 : Απόκριση συχνότητας του συστήματος σε διάστημα προσομοίωσης $0\text{ s} < t < 200\text{ s}$

Σύμφωνα με τα παραπάνω, η ισχύς που οφείλεται στο αεροφυλάκιο λόγω παροχής πεπιεσμένου αέρα που εκτονώνεται στο στρόβιλο της αεροστροβιλικής μονάδας, υποκαθίσταται ομαλά από την αύξηση της ισχύος των νηζελογεννητριών, χωρίς την εμφάνιση σημαντικών μεταβατικών φαινομένων στην απόκριση της συχνότητας του συστήματος της Ρόδου. Έτσι, μετά την ανακατανομή της παραγωγής ισχύος μεταξύ του νηζελοηλεκτρικού σταθμού και της αεροστροβιλικής μονάδας, εξαιτίας της αποσύνδεσης του αεροφυλακίου, το σύστημα εξακολουθεί να λειτουργεί ομαλά και αξιόπιστα.

7.3 Προσομοίωση του αυτόνομου συστήματος της Ρόδου – Μονάδα GT-CAES σε κατάσταση παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας

7.3.1 Περιγραφή Σεναρίου

Στην ενότητα αυτή θεωρούμε ότι εντάσσεται στο σύστημα της Ρόδου, το οποίο περιγράφηκε στην ενότητα 7.1, μια μονάδα GT-CAES. Στην παρούσα ενότητα εξετάζεται η μονάδα σε συνθήκες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Το αρχικό σενάριο παραγωγής και κατανάλωσης (Σενάριο 2) εμφανίζεται στους Πίνακες 7.18 και 7.19.

Πίνακας 7.18: Κατανομή παραγόμενης ισχύος – Σενάριο 2

| Μονάδα Παραγωγής | Κωδικός αριθμός ζυγού σύνδεσης μονάδας παραγωγής | Σενάριο 2 (Μέγιστη αιολική διείσδυση) | |
|--|--|---------------------------------------|--------------------------|
| | | Παραγόμενη ισχύς (MW) | Στρεφόμενη εφεδρεία (MW) |
| Steam 1 | 2 | 8,5 | 5,7 |
| Steam 2 | 2 | 8,5 | 5,7 |
| GT-CAES | 3 | 20,38 | 7,12 |
| Diesel 1 | 1 | 9,5 | 5,5 |
| Diesel 2 | 1 | 9,5 | 5,5 |
| Σύνολο παραγωγής συμβατικών μονάδων και στρεφόμενης εφεδρείας | | 56,38 | 29,52 |
| A/Π | Ζυγός σύνδεσης A/Π | Παραγόμενη ισχύς (MW) | |
| 4 | ΣΟΡ ΜΤ | 6,63 | |
| 3 | ΑΦ (Α/Π3) | 1,87 | |
| 1 | ΑΦ (Α/Π1) | 6,26 | |
| 5 | ΓΕΝ (Α/Π5) | 3,37 | |
| 2 | ΓΕΝ (Α/Π2) | 10,11 | |
| Σύνολο παραγωγής αιολικών πάρκων | | 28,24 | |
| ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΙΣΧΥΟΣ | | 84,62 | |

Το Σενάριο 2 είναι παρόμοιο με το Σενάριο 1 που εξετάστηκε στην ενότητα 7.2, με διαφορά την αρχική κατανομή ισχύος στις συμβατικές μονάδες παραγωγής καθώς και την ένταξη της μονάδας GT-CAES, και αναφέρεται επίσης σε συνθήκες μέγιστης αιολικής διείσδυσης. Συγκεκριμένα, το σύστημα GT-CAES αντικαθιστά την αεριοστροβιλική μονάδα του Σεναρίου 1 και θεωρείται ότι συνδέεται στο ζυγό 3 (ζυγός που στο Σενάριο 1 αντιστοιχούσε στις νηζελογεννήτριες). Ο ζυγός σύνδεσης και η αρχική παραγωγή ισχύος των ατμοηλεκτρικών μονάδων διατηρούνται ίδια με αυτά του Σεναρίου 1, ενώ οι νηζελογεννήτριες θεωρείται ότι συνδέονται στο ζυγό 1 (ζυγός που στο Σενάριο 1 αντιστοιχούσε στην αεριοστροβιλική μονάδα). Τέλος αναφέρεται ότι, συγκριτικά με το Σενάριο 1, η συνολική αρχική παραγωγή ισχύος των νηζελογεννητριών είναι αυξημένη κατά 4 MW, ενώ η αρχική παραγωγή της μονάδας GT-CAES επιλέγεται μικρότερη κατά 4 MW σε

σχέση με την αρχική παραγόμενη ισχύ της αεριοστροβλικής μονάδας του Σεναρίου 1 (Πίνακας 7.16 και 7.18). Η αιολική παραγωγή ισχύος (Πίνακας 7.18) και οι καταναλώσεις των ηλεκτρικών φορτίων (Πίνακας 7.19) του Σεναρίου 2, ταυτίζονται με τα δεδομένα του Σεναρίου 1 (Πίνακες 7.16 και 7.17). Ως διαταραχή θεωρήθηκε, όπως και στην ενότητα 7.2, η απώλεια των ατμοηλεκτρικών μονάδων, οι οποίες αποσυνδέονται απότομα από το δίκτυο μια δεδομένη χρονική στιγμή.

Όπως αναφέρεται εκτενώς στο Κεφάλαιο 6, η παραγωγή ισχύος της μονάδας GT-CAES προέρχεται από την ισχύ που παράγει η συμβατική αεριοστροβλική μονάδα και ο ανεξάρτητος στρόβιλος, με τις αντίστοιχες συνδεδεμένες γεννήτριες. Για λόγους απλότητας της υλοποίησης, θεωρείται κοινός άξονας περιστροφής της αεριοστροβλικής μονάδας και του ανεξάρτητου στροβίλου, και μία γεννήτρια για την ηλεκτρομηχανική μετατροπή. Στον κοινό άξονα είναι προσαρτημένος τόσο ο ανεξάρτητος στρόβιλος όσο και οι συνιστώσες της αεριοστροβλικής μονάδας (συμβατικός συμπιεστής και στρόβιλος), καθώς και ο δρομέας της σύγχρονης γεννήτριας. Τέλος, σημειώνεται ότι ο ανεξάρτητος συμπιεστής της μονάδας GT-CAES με τον αντίστοιχο ηλεκτρικό κινητήρα είναι εκτός λειτουργίας, δεδομένου ότι η μονάδα παράγει ηλεκτρική ενέργεια και δεν αποθηκεύει, στην παρούσα προσομοίωση.

Πίνακας 7.19: Ζήτηση Φορτίων Ηλεκτρικού Συστήματος Ρόδου – Σενάριο 2

| Φορτίο | | Σενάριο 2 (Μέγιστη αιολική διείσδυση) | |
|---------------------|-----------------------|---------------------------------------|--------------|
| Υποσταθμός σύνδεσης | Κωδικός αριθμός ζυγού | P (MW) | Q (MVar) |
| ΣΟΡ ΜΤ | 11 | 6,34 | 3,51 |
| ΙΑΛ ΜΤ | 12 | 16,64 | 9,21 |
| ΡΔΙ ΜΤ | 13 | 21,95 | 12,15 |
| ΑΦ ΜΤ | 14 | 22,02 | 12,19 |
| ΓΕΝ ΜΤ | 15 | 4,49 | 2,48 |
| ΡΟΔ ΜΤ | 16 | 11,62 | 6,43 |
| Σύνολο | | 83,06 | 45,97 |

Στον Πίνακα 7.20 παρατίθενται τα χαρακτηριστικά στοιχεία της γεννήτριας και του αντίστοιχου αυτόματου ρυθμιστή τάσης της μονάδας GT-CAES, ενώ στον Πίνακα 7.21 δίνονται κάποια δεδομένα σχετικά με τις συνιστώσες της μονάδας (αεριοστροβλική μονάδα-ανεξάρτητος στρόβιλος).

Τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά της γεννήτριας και του APT της μονάδας GT-CAES (Πίνακας 7.20) διατηρούνται ίδια με αυτά της συμβατικής αεριοστροβλικής μονάδας (GAS) του Πίνακα 7.7. Ωστόσο, υπάρχει μία διαφορά ως προς την τιμή της ανηγμένης χρονικής σταθεράς αδρανείας. Όπως αναφέρεται στον Πίνακα 7.7, η σταθερά αδρανείας της αεριοστροβλικής μονάδας είναι $H_g=1,5$ s ανηγμένη στη βάση ισχύος του αεριοστροβίλου. Η αδράνεια αυτή αφορά τη σταθερά αδρανείας του συμβατικού συμπιεστή (H_{CV}), του συμβατικού στροβίλου (H_{TV}) και του δρομέα της γεννήτριας (H_{av}). Θεωρώντας ότι η χρονική σταθερά αδρανείας είναι ισομοιρασμένη στις 3 προαναφερθείσες διατάξεις, προκύπτει ότι :

$$H_{CV} = H_{TV} = H_{av} = 0,5 \text{ s} \quad (7.2)$$

Κάνοντας επίσης την παραδοχή ότι η ανά μονάδα χρονική σταθερά αδρανείας του ανεξάρτητου στροβίλου (H_{uv}) ταυτίζεται με την αντίστοιχη του συμβατικού στροβίλου (H_{Tv}) της αεριοστροβλικής μονάδας, δεδομένης της (7.2), έχουμε :

$$H_{Tv} = H_{uv} = 0,5 \text{ s} \quad (7.3)$$

Πίνακας 7.20: Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά Γεννήτριας και APT Μονάδας GT-CAES

| Παράμετρος | Επεξήγηση παραμέτρου | Τιμή |
|-----------------------|--|----------|
| Γεννήτρια | | |
| S_N (MVA) | Ονομαστική φαινόμενη ισχύς της γεννήτριας | 47,5 |
| V_N (kV) | Ονομαστική τάση εξόδου της γεννήτριας | 11,5 |
| X_{ls} | Επαγωγική αντίδραση σκεδάσεως στάτη (αμ στη βάση της γεννήτριας) | 0,12 |
| X_d | Σύγχρονη αντίδραση ευθέος άξονα (αμ στη βάση της γεννήτριας) | 1,88 |
| X_q | Σύγχρονη αντίδραση εγκάρσιου άξονα (αμ στη βάση της γεννήτριας) | 1 |
| X_d' | Μεταβατική αντίδραση ευθέος άξονα (αμ στη βάση της γεννήτριας) | 0,3 |
| X_q' | Μεταβατική αντίδραση εγκάρσιου άξονα (αμ στη βάση της γεννήτριας) | 0,34 |
| T_d | Μεταβατική χρονική σταθερά ανοιχτού κυκλώματος ευθέος άξονα (sec) | 9,6 |
| T_q | Μεταβατική χρονική σταθερά ανοιχτού κυκλώματος εγκάρσιου άξονα (sec) | 0,4 |
| H_{total} | Ολική σταθερά αδράνειας σε sec (αμ στη βάση ισχύος της μονάδας) | 1,184 |
| R_{stator} | Ωμική αντίσταση στάτη (αμ στη βάση της γεννήτριας) | 0 |
| APT | | |
| K_A | Αναλογικό κέρδος του Αυτόματου Ρυθμιστή Τάσεως της γεννήτριας | 50 |
| T_A | Χρονική σταθερά του Αυτόματου Ρυθμιστή Τάσεως της γεννήτριας | 0,3 |
| T_B | Χρονικές σταθερές φίλτρου μεταπορείας | 15 |
| T_C | | 1,5 |
| $E_{fmin} - E_{fmax}$ | Όρια τάσης διέγερσης | 0 - 5,05 |

Δεδομένου ότι στον κοινό άξονα περιστροφής της μονάδας GT-CAES είναι προσαρτημένος ο δρομέας της γεννήτριας, ο ανεξάρτητος στροβίλος, ο συμβατικός συμπιεστής και ο συμβατικός στροβίλος, προσαρμόζοντας τις σταθερές αδρανείας σύμφωνα με την ονομαστική ισχύ της κάθε διάταξης (Πίνακας 7.21), και ανάγοντας τη συνολική σταθερά αδρανείας στη βάση ισχύος της μονάδας GT-CAES, σε συνδυασμό με τις (7.2) και (7.3), προκύπτει ότι :

$$H_{total} = \frac{(H_{Tv} + H_{Cv}) * P_{mg0} + H_{uv} * P_{mT0} + H_{av} * P_{nom}}{P_{nom}} = 1,184 \text{ s} \quad (7.4)$$

όπου H_{total} η ολική σταθερά αδρανείας της μονάδας GT-CAES. Σύμφωνα με τη σχέση (7.4) αντιλαμβανόμαστε ότι η χρονική σταθερά αδρανείας είναι μικρότερη στην περίπτωση της μονάδας GT-CAES συγκριτικά με την αντίστοιχη της συμβατικής αεριοτροβλικής μονάδας, για κοινή ονομαστική ισχύ (27,5 MW).

Όπως φαίνεται από τον Πίνακα 7.21, η συνολική ονομαστική μηχανική ισχύς της μονάδας GT-CAES ($P_{nom} = 27,5$ MW) είναι ίδια με την αντίστοιχη της συμβατικής αεριοτροβλικής μονάδας (Πίνακας 7.7) που προσομοιώθηκε στην ενότητα 7.2. Η ονομαστική ισχύς P_{nom} προέρχεται από το άθροισμα της ονομαστικής ισχύος του ανεξάρτητου στρόβιλου ($P_{mT0} = 17,387$ MW) και της συμβατικής αεριοτροβλικής μονάδας ($P_{mg0} = 10,113$ MW) του συστήματος GT-CAES. Οι τιμές P_{mg0} και P_{mT0} προέκυψαν από την παραδοχή που έγινε στο Κεφάλαιο 6 για ίδια ονομαστική ροή αέρα στον ανεξάρτητο στρόβιλο και στην αεριοτροβλική μονάδα, λαμβάνοντας υπόψιν τα δεδομένα του Πίνακα 7.15. Κατ' αυτόν τον τρόπο, η ονομαστική ροή αέρα υπολογίζεται ως $m_{nom} = 45,78$ kg/s.

Πίνακας 7.21: Χαρακτηριστικά Συνιστωσών Μονάδας GT-CAES

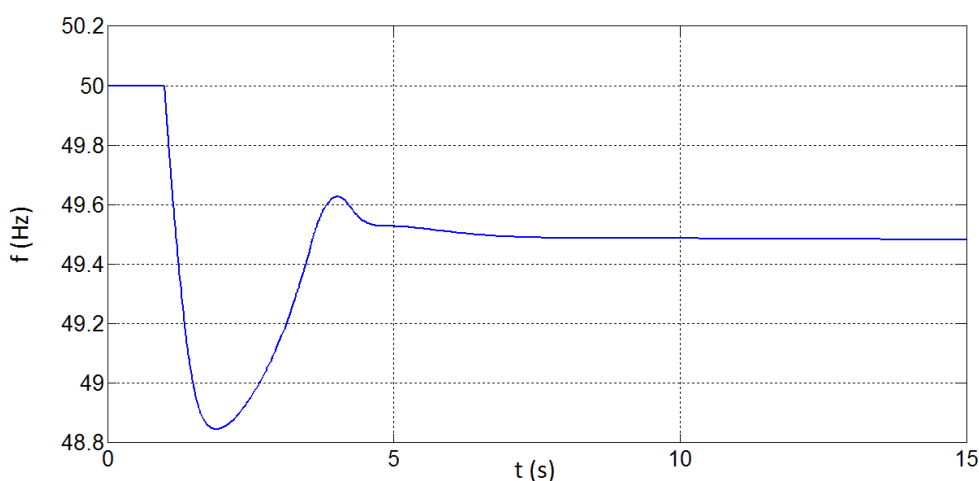
| Παράμετρος | Επεξήγηση παραμέτρου | Τιμή παραμέτρου |
|----------------|--|-----------------|
| P_{nom} (MW) | Συνολικά Αποδιδόμενη Καθαρή Ισχύς της μονάδας GT-CAES | 27,5 |
| P_{mg0} (MW) | Ονομαστική ισχύς αεριοτροβίλου | 10,113 |
| P_{mT0} (MW) | Ονομαστική ισχύς ανεξάρτητου στρόβιλου | 17,387 |
| R_t | Στατισμός ανεξάρτητου στρόβιλου (αμ στη βάση ισχύος του ανεξάρτητου στρόβιλου) | 0,04 |
| R_g | Στατισμός αεριοτροβλικής μονάδας (αμ στη βάση ισχύος του αεριοτροβίλου) | 0,04 |
| m_{nom} | Ονομαστική ροή αέρα ανεξάρτητου στρόβιλου και αεριοτροβλικής μονάδας (kg/s) | 45,78 |
| P_{mT} (MW) | Αρχική παραγόμενη ισχύς ανεξάρτητου στρόβιλου | 12,89 |
| P_{mg} (MW) | Αρχική παραγόμενη ισχύς αεριοτροβλικής μονάδας | 7,49 |
| P_m (MW) | Συνολική αρχική παραγόμενη ισχύς της μονάδας GT-CAES | 20,38 |

Σύμφωνα με το Σενάριο 2 του Πίνακα 7.18, η συνολική αρχική παραγόμενη ισχύς της μονάδας GT-CAES είναι $P_m = 20,38$ MW. Η ισχύς αυτή επιμερίζεται στον ανεξάρτητο στρόβιλο και στη συμβατική αεριοτροβλική μονάδα με τρόπο ώστε να είναι φορτισμένες κατά το ίδιο ποσοστό. Συγκεκριμένα, η αρχική παραγόμενη ισχύς της αεριοτροβλικής μονάδας είναι $P_{mg} = 7,49$ MW και αντιστοιχεί στο 74 % της ονομαστικής της παραγωγής, ενώ η αρχική παραγωγή ισχύος του ανεξάρτητου στρόβιλου είναι $P_{mT} = 12,89$ MW και αντιστοιχεί σε ίδιο ποσοστό φόρτισης ως προς την ονομαστική παραγόμενη ισχύ του στρόβιλου (Πίνακας 7.21). Τέλος, η αρχική πίεση του αεροφυλακίου θεωρείται $P_{ch} = 50$ bar, τιμή η οποία βρίσκεται προφανώς εντός των ορίων του Πίνακα 7.15 ($P_{minC} < P_{ch} < P_{ch0}$).

Η αποσύνδεση των ατμοηλεκτρικών μονάδων λαμβάνει χώρα για $t = 1$ s της προσομοίωσης (συνολική απώλεια 17 MW), και εξετάζεται η απόκριση του τροποποιημένου συστήματος της Ρόδου καθώς και η συμπεριφορά της μονάδας GT-CAES, στα σχήματα που παρατίθενται στην επόμενη παράγραφο.

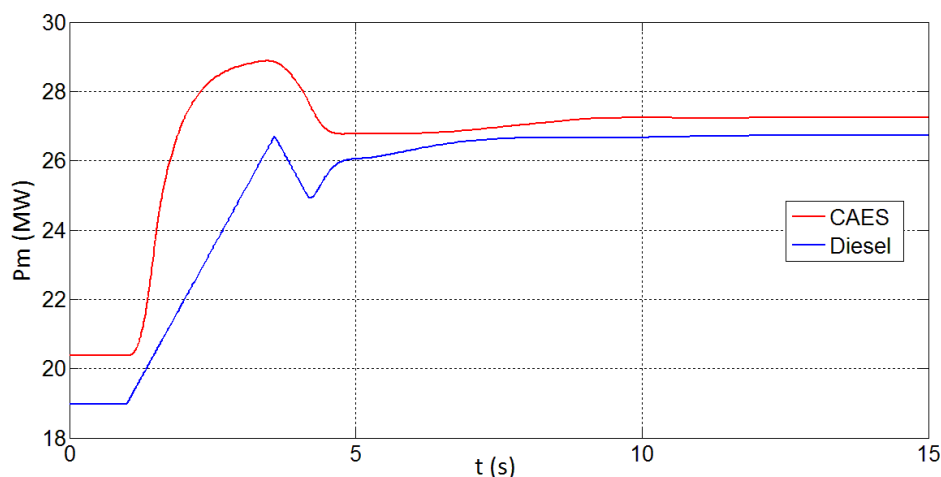
7.3.2 Αποτελέσματα προσομοίωσης

Στο Σχήμα 7.22 φαίνεται η απόκριση της ηλεκτρικής συχνότητας του συστήματος της Ρόδου. Όπως αναφέρθηκε, την $t = 1$ s αποσυνδέονται από το ηλεκτρικό δίκτυο λόγω κοινού σφάλματος οι ατμοηλεκτρικές μονάδες, με αποτέλεσμα να εμφανίζεται έλλειμμα ισχύος στο σύστημα της Ρόδου, οπότε η συχνότητα αρχίζει να μειώνεται. Μέσω των ρυθμιστών στροφών των εναπομεινουσών μονάδων, η παραγόμενη ισχύς της μονάδας GT-CAES και των νηζελογεννητριών αρχίζει να αυξάνει, μειώνοντας την απόκλιση της συνολικά παραγόμενης και καταναλισκόμενης ισχύος του συστήματος. Τη χρονική στιγμή $t = 1,9$ s η συχνότητα σημειώνει την ελάχιστη τιμή της και έπειτα αρχίζει να ανέρχεται, για να σταθεροποιηθεί στη μόνιμη τιμή της για $t = 7,5$ s περίπου. Η ελάχιστη μεταβατική τιμή της συχνότητας είναι $f_{\min} = 48,85$ Hz, οπότε δεν τίθεται θέμα αποκοπής φορτίων, δεδομένου ότι η συχνότητα ενεργοποίησης των ηλεκτρονόμων υποσυχνότητας είναι 48,5 Hz.



Σχήμα 7.22 : Απόκριση συχνότητας του συστήματος της Ρόδου

Στο Σχήμα 7.23 φαίνεται η παραγόμενη μηχανική ισχύς της μονάδας GT-CAES και των νηζελογεννητριών συναρτήσει του χρόνου προσομοίωσης. Σημειώνεται ότι για τις νηζελογεννήτριες γίνεται η θεώρηση της ισοδύναμης ενοποιημένης μονάδας, όπως στην ενότητα 7.2. Τη στιγμή της αποσύνδεσης των ατμοηλεκτρικών μονάδων, η παραγωγή ισχύος του νηζελοηλεκτρικού σταθμού και της μονάδας GT-CAES αρχίζει να αυξάνει με τη δράση των αντίστοιχων ρυθμιστών στροφών. Όπως φαίνεται από το Σχήμα 7.23, ο ρυθμός ανάληψης φορτίου της μονάδας GT-CAES είναι υψηλότερος συγκριτικά με αυτόν των νηζελομηχανών. Αυτό οφείλεται στην άμεση απόκριση της συμβατικής αεριοστροβιλικής μονάδας και του ανεξάρτητου στροβίλου της μονάδας GT-CAES. Την $t = 3,5$ s η παραγωγή ισχύος των εναπομεινουσών μονάδων αρχίζει να μειώνεται, λόγω του ότι η συχνότητα πλησιάζει κοντά στη μόνιμη τιμή της. Μετά την $t = 5$ s, παρότι η συχνότητα ελαττώνεται με έναν μικρό ρυθμό (Σχήμα 7.22), παρατηρούμε ότι η παραγόμενη μηχανική ισχύς της μονάδας CAES είναι σχεδόν σταθερή ενώ αυξάνεται η ισχύς των νηζελομηχανών (Σχήμα 7.23). Το γεγονός αυτό οφείλεται στην προσωρινή δράση του ελέγχου υπερθέρμανσης της αεριοστροβιλικής μονάδας του συστήματος GT-CAES, ο οποίος εμποδίζει την αύξηση της παραγόμενης ισχύος. Τέλος, μετά την $t = 9$ s περίπου όπου έχει αντιμετωπιστεί η διαταραχή πλήρως, οι παραγωγές ισχύος των μονάδων σταθεροποιούνται στις μόνιμες τιμές τους.

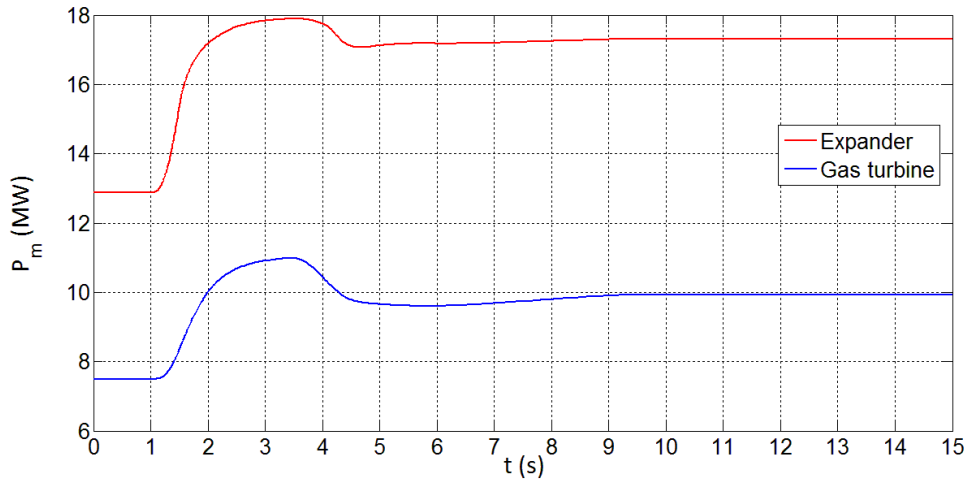


Σχήμα 7.23 : Απόκριση μηχανικής ισχύος εναπομενουσών μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας

Στο Σχήμα 7.24 εμφανίζεται η παραγόμενη μηχανική ισχύς των δύο συνιστωσών της μονάδας GT-CAES, συναρτήσει του χρόνου. Όπως έχει αναφερθεί, η συνολική παραγωγή ισχύος της μονάδας GT-CAES προέρχεται από το άθροισμα της παραγόμενης ισχύος της συμβατικής αεριοστροβλικής μονάδας (Gas turbine) και του ανεξάρτητου στροβίλου (Expander). Μετά την απώλεια των ατμοηλεκτρικών μονάδων σε χρόνο $t = 1$ s, οι παραγωγές ισχύος της αεριοστροβλικής μονάδας και του ανεξάρτητου στροβίλου αρχίζουν να αυξάνουν. Υπενθυμίζεται ότι η ρύθμιση της παραγόμενης ισχύος του αεριοστροβίλου επιτυγχάνεται με την μεταβολή του εγγεόμενου καυσίμου στο θάλαμο καύσης της αεριοστροβλικής μονάδας, ενώ η ρύθμιση της παραγωγής ισχύος του ανεξάρτητου στροβίλου γίνεται με τη μεταβολή της πίεσης εισόδου και κατ' επέκταση της ροής αέρα του στροβίλου. Σημειώνεται επίσης ότι στον έλεγχο της ισχύος της αεριοστροβλικής μονάδας συμμετέχουν έμμεσα και τα οδηγία πτερύγια εισόδου του συμβατικού συμπιεστή (IGVs).

Όπως παρατηρούμε από το Σχήμα 7.24, ο ρυθμός ανάληψης φορτίου του ανεξάρτητου στροβίλου είναι υψηλότερος από τον αντίστοιχο της αεριοστροβλικής μονάδας, επιβεβαιώνοντας όσα αναφέρονται στο Κεφάλαιο 3. Αυτό οφείλεται στο γεγονός πως η παραγωγή ισχύος της αεριοστροβλικής μονάδας διέπεται από χρονικές καθυστερήσεις οι οποίες είναι μεγαλύτερες από τη χρονική καθυστέρηση που συνεπάγεται η ρύθμιση της ροής αέρα του ανεξάρτητου στροβίλου.

Επίσης είναι εμφανές ότι οι μορφές των καμπυλών του Σχήματος 7.24 είναι παρόμοιες, γεγονός το οποίο δικαιολογείται ως εξής : Η αύξηση της ροής καυσίμου που εγγέεται στο θάλαμο καύσης της αεριοστροβλικής μονάδας για την αύξηση της παραγόμενης ισχύος, έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της θερμοκρασίας των καυσαερίων. Δεδομένου ότι τα καυσαέρια διέρχονται από τον ανακομιστή θερμότητας, η αυξημένη θερμοκρασία εισόδου τους στον εναλλάκτη οδηγεί στην άνοδο της θερμοκρασίας του πεπιεσμένου αέρα που εξέρχεται από αυτόν. Κατά συνέπεια, μεγαλύτερη θερμοκρασία εισόδου του πεπιεσμένου αέρα στον ανεξάρτητο στροβίλο συνεπάγεται και μεγαλύτερη παραγόμενη ισχύς. Κατά την ίδια λογική, η μείωση του εγγεόμενου καυσίμου στο θάλαμο καύσης οδηγεί στην πτώση της παραγωγής ισχύος της αεριοστροβλικής μονάδας και ακολούθως του ανεξάρτητου στροβίλου. Σύμφωνα με τα παραπάνω, δικαιολογείται το γεγονός πως η παραγόμενη ισχύς των δύο συνιστωσών της μονάδας GT-CAES έχει παρόμοια συμπεριφορά (Σχήμα 7.24).

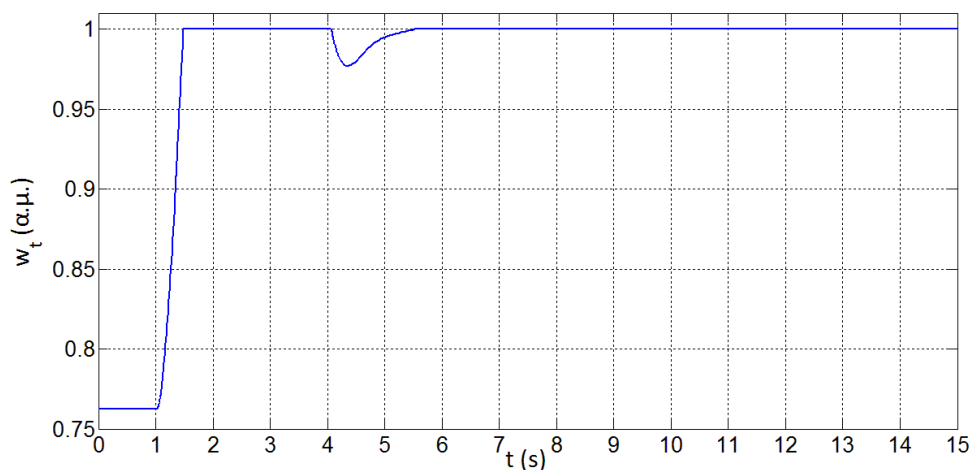


Σχήμα 7.24 : Απόκριση μηχανικής ισχύος συνιστωσών μονάδας GT-CAES

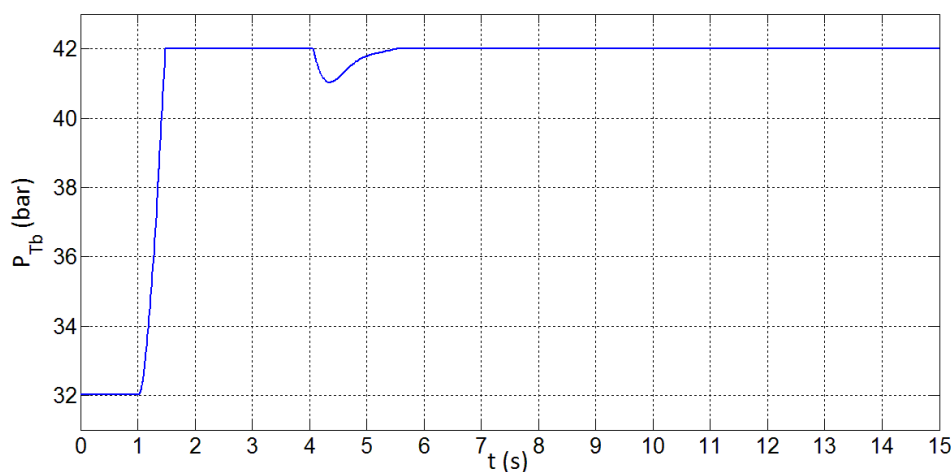
Η πίεση εισόδου (P_{Tb}) και η ανά μονάδα ροή αέρα που εκτονώνεται στον ανεξάρτητο στρόβιλο (W_i) απεικονίζονται στο Σχήμα 7.25, συναρτήσει του χρόνου προσομοίωσης. Στο Κεφάλαιο 6 έγινε η παραδοχή ότι τα δύο μεγέθη αυτά είναι ανάλογα (ροή αέρα και πίεση εισόδου), με αποτέλεσμα οι μορφές των δύο καμπυλών στα Σχήματα 7.25-(α) και 7.25-(β) να είναι ίδιες.

Τη χρονική στιγμή $t = 1$ s, που αποσυνδέονται οι ατμοηλεκτρικές μονάδες από το ηλεκτρικό σύστημα της Ρόδου, το άνοιγμα της βαλβίδας ελέγχου της ροής αέρα του ανεξάρτητου στρόβιλου αυξάνει. Το γεγονός αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της ροής αέρα που εξέρχεται από το αεροφυλάκιο και εκτονώνεται στο στρόβιλο, καθώς και την αύξηση της πίεσης εισόδου του αέρα στο στρόβιλο (Σχήμα 7.25). Παρατηρούμε ότι από $t = 1,5$ s έχει επιτευχθεί ονομαστική πίεση λειτουργίας (42 bar-Πίνακας 7.15) και ονομαστική ροή αέρα (1,0 ανά μονάδα). Αντιλαμβανόμαστε λοιπόν πως η άμεση απόκριση της βαλβίδας του αέρα οδηγεί στην ταχύτερη αύξηση της παραγόμενης ισχύος του ανεξάρτητου στρόβιλου (Σχήμα 7.24). Το γεγονός αυτό συνεισφέρει στη συγκράτηση της συχνότητας σε υψηλές τιμές (Σχήμα 7.22) και στην αποφυγή της αποκοπής φορτίων.

Τέλος, όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.25, η ροή αέρα και ακολούθως η πίεση εισόδου του ανεξάρτητου στρόβιλου μειώνονται παροδικά και μετά αυξάνονται ξανά στα ονομαστικά επίπεδα, στο διάστημα $4 \text{ s} < t < 5 \text{ s}$. Αυτό δικαιολογείται από την αντίστοιχη ταλάντωση που σημειώνεται στη συχνότητα (Σχήμα 7.22) κατά το ίδιο χρονικό διάστημα, η οποία ταλάντωση επηρεάζει το σήμα ρύθμισης της δικλείδας αέρα του ρυθμιστή στροφών του ανεξάρτητου στρόβιλου. Μετά την προσωρινή μεταβολή της πίεσεως εισόδου και της ροής αέρα του ανεξάρτητου στρόβιλου το προαναφερθέν χρονικό διάστημα, τα μεγέθη αυτά σταθεροποιούνται στις ονομαστικές τιμές τους (Σχήμα 7.25).



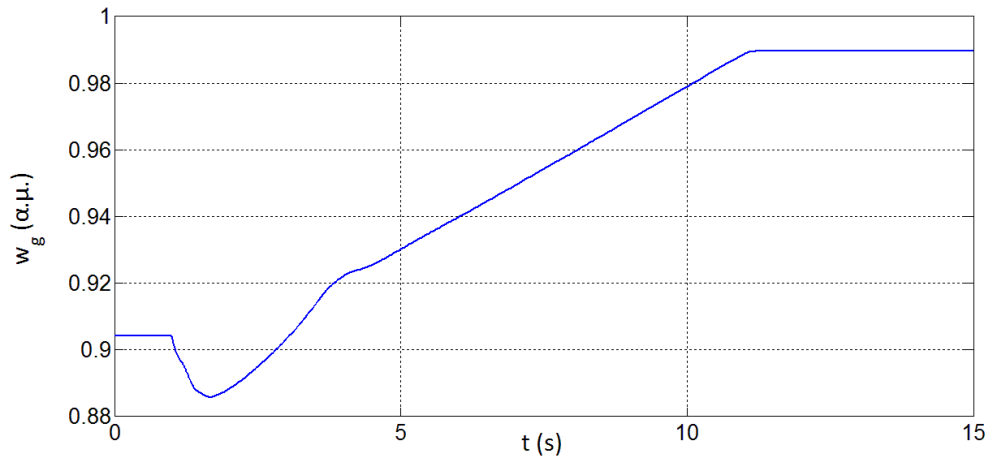
(α) Ανά μονάδα ροή αέρα ανεξάρτητου στροβίλου



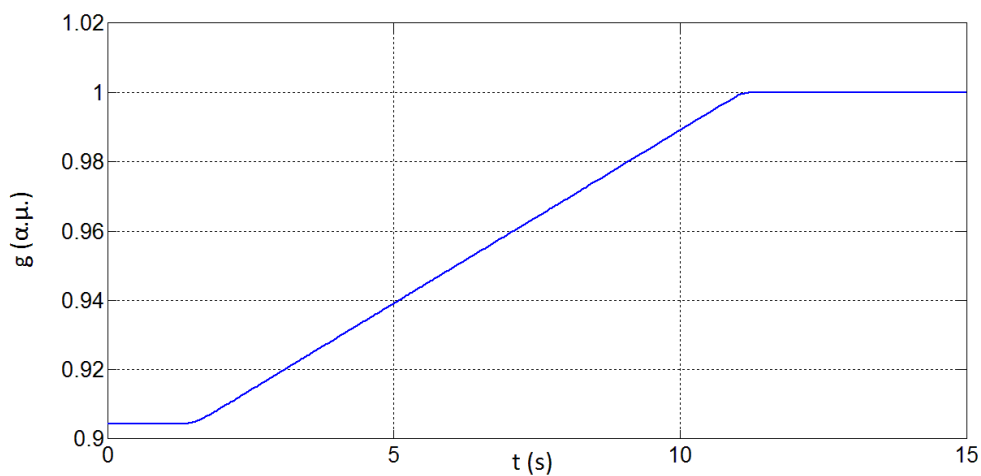
(β) Πίεση εισόδου ανεξάρτητου στροβίλου

Σχήμα 7.25 : Ροή αέρα και πίεση εισόδου ανεξάρτητου στροβίλου

Στο Σχήμα 7.26 φαίνεται το διάγραμμα της ροής των καυσαερίων (w_g) και του ανοίγματος των πτερυγίων του συμπιεστή της αεριοστροβιλικής μονάδας (g), συναρτήσει του χρόνου, σε ανά μονάδα τιμές. Σημειώνεται ότι, όπως έχει αναφερθεί στην παράγραφο 6.1.1 του Κεφαλαίου 6, η ανά μονάδα ροή αέρα που συμπιέζει ο συμβατικός συμπιεστής και η ανά μονάδα ροή των καυσαερίων που εκτονώνονται στο συμβατικό στρόβιλο θεωρούνται ίσες (δηλαδή αμελείται η μεταβολή της μάζας του εργαζόμενου μέσου λόγω της έγχυσης καυσίμου στο θάλαμο καύσης της αεριοστροβιλικής μονάδας). Λόγω του γεγονότος πως η αρχική παραγόμενη ισχύς της αεριοστροβιλικής μονάδας P_{mgas} είναι περίπου στο 74% της ονομαστικής της τιμής (παράγραφος 7.3.1), βρισκόμαστε στη δεύτερη περιοχή λειτουργίας ($55\% < P_{mgas} < 85\%$) σύμφωνα με τον Πίνακα 7.15. Κατά συνέπεια, πριν την αποσύνδεση των ατμοηλεκτρικών μονάδων, τα πτερύγια εισόδου δεν είναι πλήρως ανοιχτά και η ροή αέρα είναι μικρότερη από την ονομαστική (Σχήμα 7.26).



(α) Ανά μονάδα ροή αέρα (καυσαερίων) αεριοστροβλικής μονάδας

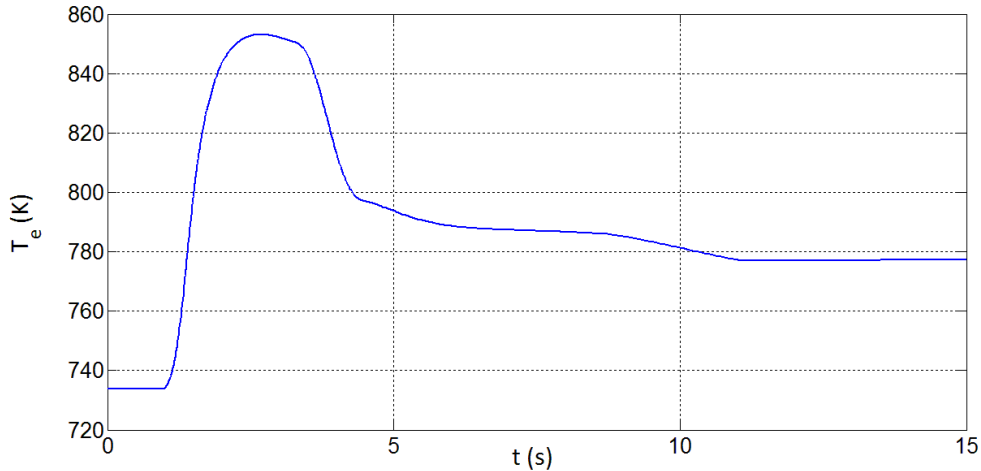


(β) Ανά μονάδα τιμή του ανοίγματος των οδηγών πτερυγίων εισόδου (IGVs) του συμπιεστή της αεριοστροβλικής μονάδας

Σχήμα 7.26 : Ροή καυσαερίων και άνοιγμα οδηγών πτερυγίων εισόδου της αεριοστροβλικής μονάδας

Για $t = 1$ s όπου οι ατμοηλεκτρικές μονάδες αποκόπτονται από το δίκτυο, όπως φάνηκε στο Σχήμα 7.22 η συχνότητα αρχίζει να μειώνεται, με αποτέλεσμα τη μεταβατική μείωση της ροής αέρα w_g της αεριοστροβλικής μονάδας στο Σχήμα 7.26-(α). Σύμφωνα με το Σχήμα 7.26-(β), μετά την αποσύνδεση του ατμοηλεκτρικού σταθμού αρχίζει να αυξάνει το άνοιγμα των πτερυγίων και επομένως και η ροή των καυσαερίων της αεριοστροβλικής μονάδας. Αυτό οφείλεται στο γεγονός πως η αυξημένη έγχυση καυσίμου στο θάλαμο καύσης για την αύξηση της παραγωγής ισχύος, συνεπάγεται την ενεργοποίηση της διάταξης των πτερυγίων με σκοπό τη διατήρηση της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στην είσοδο του συμβατικού στροβίλου της αεριοστροβλικής μονάδας σε επιτρεπτά επίπεδα. Η ρύθμιση του ανοίγματος των πτερυγίων ολοκληρώνεται μετά την $t = 11$ s, όπου τα πτερύγια έχουν ανοίξει στο μέγιστο βαθμό που επιτρέπεται και η ροή αέρα-καυσαερίων της αεριοστροβλικής μονάδας λαμβάνει τη μέγιστη δυνατή τιμή. Όπως παρατηρούμε στο Σχήμα 7.26, μετά την $t = 11$ s παρότι τα πτερύγια εισόδου έχουν ανοίξει πλήρως, η ροή αέρα της αεριοστροβλικής μονάδας είναι λίγο χαμηλότερα από την ονομαστική της τιμή, γεγονός που αποδίδεται στο μόνιμο σφάλμα συχνότητας (Σχήμα 7.22).

Στο Σχήμα 7.27 φαίνεται η θερμοκρασία εξόδου των καυσαερίων της αεριοστροβιλικής μονάδας. Τα καυσαέρια αφού εξέλθουν από τον αεριοστρόβιλο εισέρχονται στον εναλλάκτη θερμότητας, όπου αποδίδουν μέρος της θερμικής τους ενέργειας στον πεπιεσμένο αέρα που διέρχεται από τον ανακομιστή θερμότητας και εκτονώνεται στον ανεξάρτητο στρόβιλο.



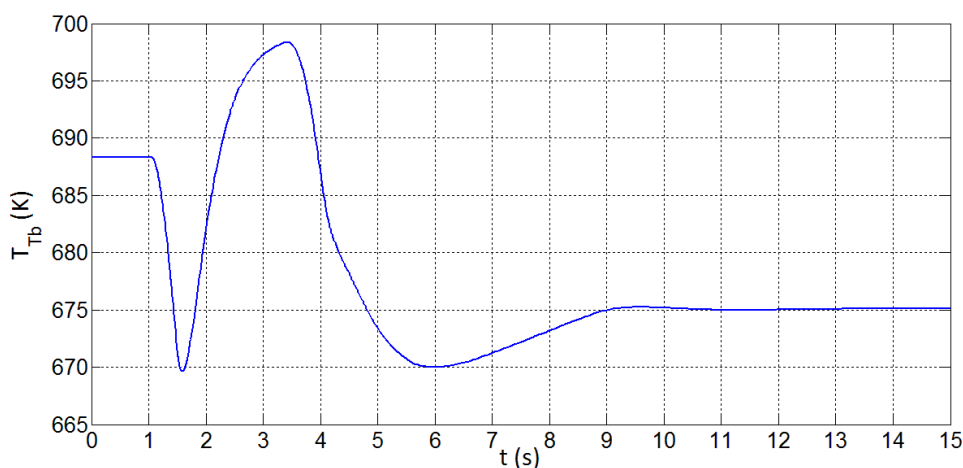
Σχήμα 7.27 : Θερμοκρασία εισόδου των καυσαερίων της αεριοστροβιλικής μονάδας στον εναλλάκτη θερμότητας

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η αποσύνδεση των ατμοηλεκτρικών μονάδων από το ηλεκτρικό δίκτυο για $t = 1$ s έχει ως απόρροια την αύξηση του εγγεόμενου καυσίμου στο θάλαμο καύσης της αεριοστροβιλικής μονάδας προκειμένου να αυξηθεί η παραγόμενη ισχύς. Το γεγονός αυτό συνεπάγεται την αύξηση της θερμοκρασίας των καυσαερίων που εξέρχονται από την αεριοστροβιλική μονάδα, όπως αποτυπώνεται στο Σχήμα 7.27. Στον Πίνακα 7.15 αναφέρεται ότι η ονομαστική θερμοκρασία εξόδου των καυσαερίων είναι $T_{e0} = 778,18$ °K. Κατά τη διάρκεια λοιπόν της διαταραχής, σύμφωνα με το Σχήμα 7.27 η θερμοκρασία των καυσαερίων υπερβαίνει παροδικά την ονομαστική της τιμή, οδηγώντας στην ενεργοποίηση του ελέγχου υπερθέρμανσης. Για το λόγο αυτό, σε συνδυασμό με το ότι η συχνότητα έχει αρχίσει να αποκαθίσταται στη μόνιμη τιμή της (Σχήμα 7.22), η έγχυση καυσίμου αρχίζει να μειώνεται και επομένως παρατηρείται η πτώση της θερμοκρασίας μετά από χρόνο $t = 3,5$ s. Τέλος, στο διάστημα $5 \text{ s} < t < 11 \text{ s}$ η θερμοκρασία των καυσαερίων μειώνεται με έναν μικρό ρυθμό, λόγω της σταδιακής αύξησης του ανοίγματος των πτερυγίων και ακολούθως της ροής αέρα, όπως φάνηκε στο Σχήμα 7.26. Από τη στιγμή $t = 11$ s και μετά, η θερμοκρασία αποκαθίσταται στη μόνιμη τιμή της, δεδομένου ότι τόσο η ροή καυσίμου όσο και η ροή αέρα της αεριοστροβιλικής μονάδας έχουν σταθεροποιηθεί.

Στο Σχήμα 7.28 παρατίθεται το διάγραμμα της θερμοκρασίας εισόδου του πεπιεσμένου αέρα στον ανεξάρτητο στρόβιλο της μονάδας GT-CAES (T_{Tb}), συναρτήσει του χρόνου. Στο Κεφάλαιο 6 έχει γίνει η παραδοχή ότι ο πεπιεσμένος αέρας που είναι αποθηκευμένος στο αεροφυλάκιο βρίσκεται σε θερμοκρασία περιβάλλοντος ($T_{ic} = 303$ °K σύμφωνα με τον Πίνακα 7.15). Επομένως, η αύξηση της θερμοκρασίας του αέρα που εκτονώνεται στον ανεξάρτητο στρόβιλο οφείλεται αποκλειστικά στη διέλευσή του από τον ανακομιστή θερμότητας, όπου και προσλαμβάνει θερμική ενέργεια.

Όπως παρατηρούμε από το Σχήμα 7.28, με την απώλεια του ατμοηλεκτρικού σταθμού την $t = 1$ s, η θερμοκρασία εξόδου του πεπιεσμένου αέρα από τον εναλλάκτη θερμότητας αρχίζει να μειώνεται. Αυτό αποδίδεται στην ταχεία αύξηση της ροής αέρα που εξέρχεται από

το αεροφυλάκιο, όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.25-(α). Από $t = 1,5$ s και μετά, η ροή αέρα του ανεξάρτητου στρόβιλου έχει σημειώσει την ονομαστική της τιμή και παραμένει σε αυτήν (Σχήμα 7.25). Στο Σχήμα 7.28 βλέπουμε ότι η θερμοκρασία T_{Tb} αρχίζει να αυξάνει μετά από $t = 1,5$ s, γεγονός που οφείλεται στην διαρκή αύξηση της θερμοκρασίας και της ροής των καυσαερίων που εισέρχονται στον ανακομιστή θερμότητας (Σχήμα 7.26 και 7.27). Κατά συνέπεια, για δεδομένη ροή αέρα w_i (Σχήμα 7.25-α), μεγαλύτερη ροή και θερμοκρασία καυσαερίων συνεπάγεται υψηλότερη θερμική ενέργεια που αποδίδεται στον πεπιεσμένο αέρα από το αεροφυλάκιο, άρα και μεγαλύτερη θερμοκρασία.



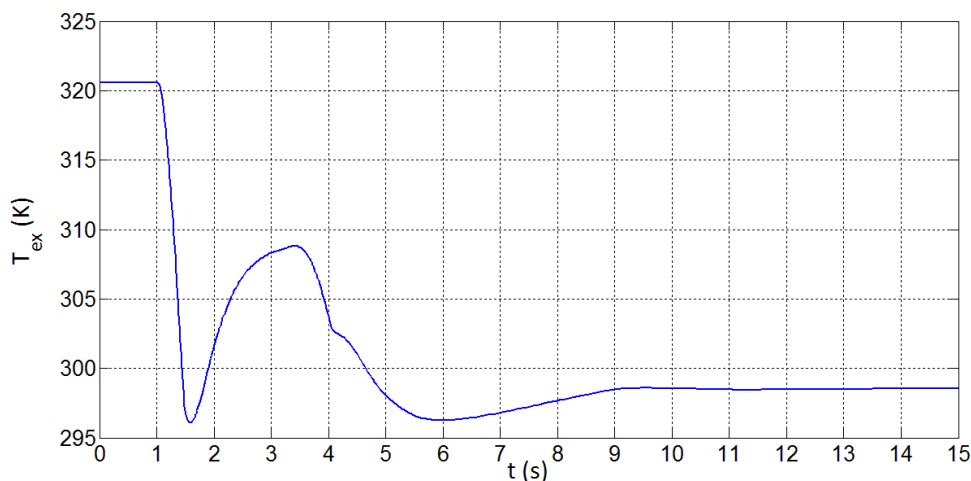
Σχήμα 7.28 : Θερμοκρασία εισόδου του πεπιεσμένου αέρα στον ανεξάρτητο στρόβιλο

Μετά την $t = 3,5$ s η θερμοκρασία T_{Tb} αρχίζει να μειώνεται για να σταθεροποιηθεί τελικά, μετά από μία μικρή βύθιση, στη μόνιμη τιμή της για $t = 9$ s. Η πτώση της θερμοκρασίας T_{Tb} στο διάστημα $3,5$ s < t < 6 s οφείλεται στην αντίστοιχη μείωση της θερμοκρασίας των εισερχόμενων καυσαερίων στον εναλλάκτη θερμότητας (Σχήμα 7.27). Αντίθετα, η ελαφρά άνοδος της θερμοκρασίας T_{Tb} στο διάστημα 6 s < t < 9 s οφείλεται στην σταδιακή αύξηση της ροής των καυσαερίων μέσω των IGVs (Σχήμα 7.26). Τέλος, η θερμοκρασία T_{Tb} παραμένει πρακτικά σταθερή στο διάστημα 9 s < t < 11 s, δεδομένου ότι δέχεται δύο αντίθετες επιδράσεις που αλληλοαναιρούνται, αυτή της μείωσης της θερμοκρασίας των καυσαερίων (Σχήμα 7.27) και αυτή της αύξησης της ροής των καυσαερίων (Σχήμα 7.26) στο χρονικό διάστημα αυτό.

Το σημαντικότερο συμπέρασμα που εξάγεται από το Σχήμα 7.28 είναι ότι, σε όλο το εύρος της προσομοίωσης, η θερμοκρασία T_{Tb} εισόδου του πεπιεσμένου αέρα στον ανεξάρτητο στρόβιλο δεν απομακρύνεται πολύ από την ονομαστική τιμή ($T_{Tb0} = 678,18$ °K – Πίνακας 7.15). Αυτό επιτυγχάνεται με τη θεώρηση για αρχικά ίσο ποσοστό φόρτισης της αεριοστροβλικής μονάδας και του ανεξάρτητου στρόβιλου (ενότητα 7.3.1), γεγονός που επιτρέπει τη διατήρηση της θερμοκρασίας T_{Tb} σε υψηλά επίπεδα. Έτσι, ο ανεξάρτητος στρόβιλος δύναται να παράγει μεγάλη ισχύ σε περιπτώσεις διαταραχών, παρότι η λειτουργία του δεν περιλαμβάνει καύσιμο, με τη χρήση μόνο του ανακομιστή θερμότητας για την προθέρμανση του πεπιεσμένου αέρα.

Στο Σχήμα 7.29 φαίνεται η θερμοκρασία εξόδου του αέρα από τον ανεξάρτητο στρόβιλο T_{ex} , συναρτήσει του χρόνου προσομοίωσης. Όπως παρατηρούμε, η θερμοκρασία T_{ex} ακολουθεί τη μορφή της καμπύλης της θερμοκρασίας T_{Tb} (Σχήμα 7.28). Αυτό είναι αναμενόμενο, καθώς υψηλή θερμοκρασία εισόδου του αέρα στον ανεξάρτητο στρόβιλο συνεπάγεται και μεγάλη θερμοκρασία εξόδου, και το αντίθετο.

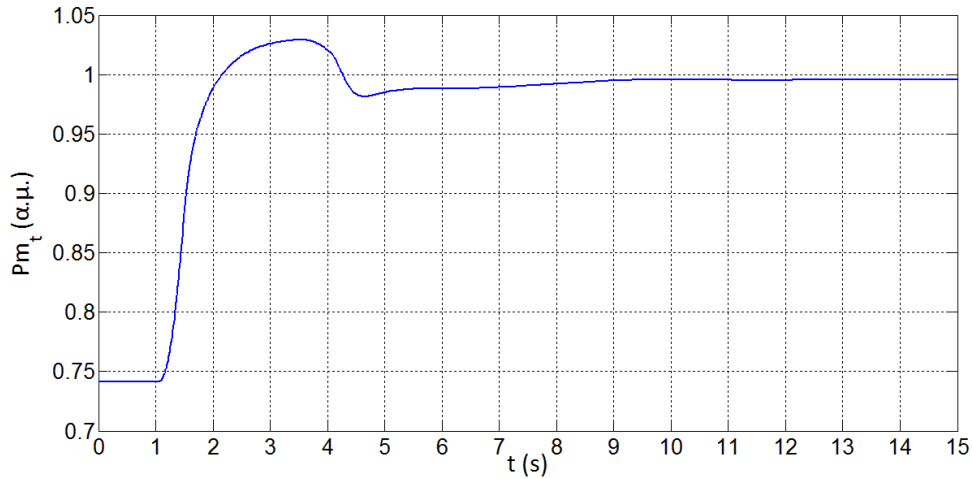
Όπως έχει αναφερθεί στην παράγραφο 3.1.3 του Κεφαλαίου 3, με την εμφάνιση πολύ χαμηλών θερμοκρασιών στους στρόβιλους (πλησίον των 0 °C) εγκυμονεί ο κίνδυνος της δημιουργίας κρυστάλλων πάγου και της καταστροφής των πτερυγίων. Ωστόσο, εξετάζοντας το Σχήμα 7.29 προκύπτει ότι η ελάχιστη θερμοκρασία εξόδου που σημειώνεται είναι $T_{ex_min} = 296 \text{ °K} = 23 \text{ °C}$, αρκετά υψηλότερη της οριακής θερμοκρασίας εμφάνισης κρυστάλλων πάγου στα πτερώγια του στρόβιλου.



Σχήμα 7.29 : Θερμοκρασία εξόδου του αέρα από τον ανεξάρτητο στρόβιλο

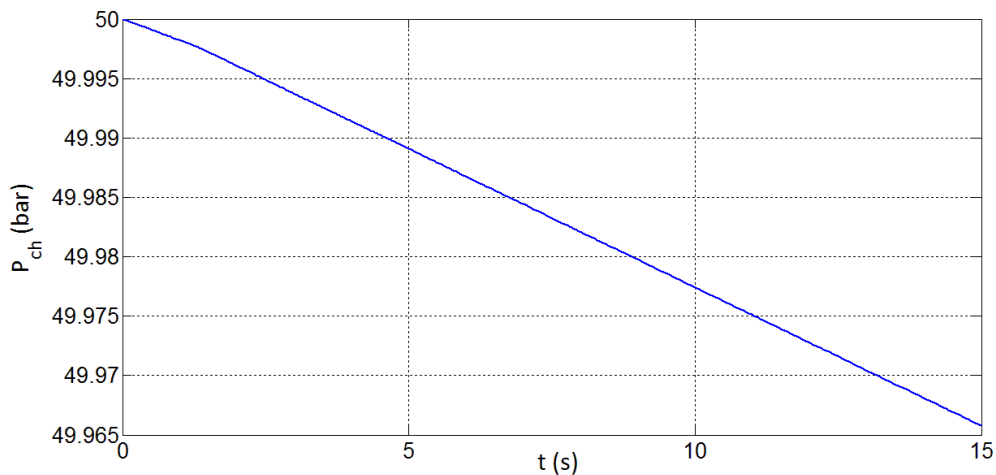
Στο Σχήμα 7.30 φαίνεται η παραγόμενη μηχανική ισχύς P_{mt} του ανεξάρτητου στρόβιλου σε ανά μονάδα τιμή ως προς την ονομαστική ισχύ του P_{mt0} (παράγραφος 7.3.1). Όπως έχει αναφερθεί στο Κεφάλαιο 6, η ισχύς που παράγει ο ανεξάρτητος στρόβιλος εξαρτάται από τη ροή αέρα που εκτονώνεται σε αυτόν (και ακολούθως από την πίεση εισόδου), καθώς και από τη θερμοκρασία του αέρα στην είσοδό του. Με την απώλεια των αμφοιλεκτρικών μονάδων για $t = 1 \text{ s}$ η ισχύς P_{mt} αρχίζει να αυξάνει ως αποτέλεσμα της αύξησης της ροής αέρα και της πίεσης εισόδου, μέσω της αντίστοιχης βαλβίδας ελέγχου (Σχήμα 7.25). Την $t = 1,5 \text{ s}$, όπως είδαμε στο Σχήμα 7.25, η ροή και η πίεση του αέρα στην είσοδο του ανεξάρτητου στρόβιλου έχουν ήδη σημειώσει την ονομαστική τους τιμή. Ωστόσο, η ισχύς του ανεξάρτητου στρόβιλου P_{mt} εξακολουθεί να αυξάνει, διότι αυξάνει και η θερμοκρασία του εισερχόμενου αέρα T_{Tb} (Σχήμα 7.28). Από την $t = 1,5 \text{ s}$ λοιπόν και μετά, οι μεταβολές της θερμοκρασίας T_{Tb} καθορίζουν τις αντίστοιχες μεταβολές της παραγόμενης ισχύος P_{mt} .

Συμπερασματικά, σύμφωνα με τα παραπάνω, ο ρυθμιστής στροφών του ανεξάρτητου στρόβιλου έχει ανοίξει τη βαλβίδα ελέγχου της ροής αέρα στο μέγιστο βαθμό από $t = 1,5 \text{ s}$. Τη χρονική στιγμή αυτή η παραγόμενη ισχύς είναι ήδη $P_{mt} = 0,9$ ανά μονάδα. Για την περαιτέρω αύξηση της παραγόμενης ισχύος, ο ανεξάρτητος στρόβιλος αναμένει τη μεταβολή της θερμοκρασίας εισόδου του αέρα, η οποία όπως είδαμε προηγουμένως εξαρτάται από τη ροή και τη θερμοκρασία των καυσαερίων της αεριοστροβλικής μονάδας. Έτσι, η επίτευξη της ονομαστικής παραγωγής ισχύος λαμβάνει χώρα μετά τη χρονική στιγμή $t = 2 \text{ s}$. Τέλος, όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.30, η παραγόμενη ισχύς του ανεξάρτητου στρόβιλου υπερβαίνει παροδικά τα ονομαστικά επίπεδα στο διάστημα $2,2 \text{ s} < t < 4,2 \text{ s}$, λόγω της μεγάλης θερμοκρασίας εισόδου του αέρα T_{Tb} (Σχήμα 7.28), η οποία προκύπτει από την αυξημένη θερμοκρασία των καυσαερίων της αεριοστροβλικής μονάδας πέρα της ονομαστικής της τιμής (Σχήμα 7.27).



Σχήμα 7.30 : Ανά μονάδα παραγόμενη μηχανική ισχύς ανεξάρτητου στροβίλου

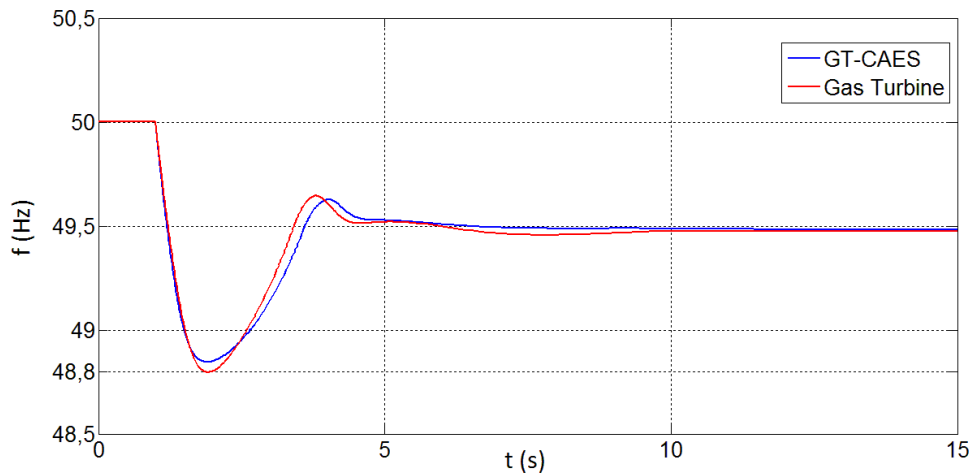
Στο Σχήμα 7.31 φαίνεται το διάγραμμα της πίεσης του αεροφυλακίου (P_{ch}) συναρτήσει του χρόνου προσομοίωσης. Παρατηρούμε ότι με την πάροδο του χρόνου, η πίεση που επικρατεί στο αεροφυλάκιο μειώνεται ως απόρροια της ελάττωσης της μάζας αέρα που είναι αποθηκευμένη σε αυτό. Ωστόσο, για το χρονικό διάστημα της προσομοίωσης (15 s) η μεταβολή της επικρατούσας πίεσης είναι αρκετά μικρή, δεδομένου ότι έχει θεωρηθεί αεροφυλάκιο μεγάλης χωρητικότητας ($T_{cap} = 30.000 \text{ s}$ – Πίνακας 7.15). Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι μετά την $t = 1 \text{ s}$ που αποσυνδέεται ο ατμοηλεκτρικός σταθμός και αυξάνει η ροή αέρα από το αεροφυλάκιο προς τον ανεξάρτητο στρόβιλο (Σχήμα 7.25-α), ο ρυθμός μείωσης της πίεσης του αεροφυλακίου αυξάνει, γεγονός που δεν είναι εμφανές στο Σχήμα 7.31 λόγω της διαβάθμισης των αξόνων.



Σχήμα 7.31 : Πίεση του αεροφυλακίου

Με τα σχήματα που παρατέθηκαν στην παρούσα παράγραφο, έγινε εμφανής η επίδραση της ένταξης της μονάδας GT-CAES στο σύστημα της Ρόδου, και μελετήθηκε η απόκριση των συνιστωσών της (αεριοστροβιλική μονάδα-ανεξάρτητος στρόβιλος) στην εξεταζόμενη διαταραχή (απώλεια ατμοηλεκτρικών μονάδων). Στο σημείο αυτό αξίζει να συγκρίνουμε τη συμπεριφορά του ηλεκτρικού συστήματος της Ρόδου, στην περίπτωση που αντί της μονάδας GT-CAES χρησιμοποιηθεί αεριοστροβιλική μονάδα με ίδια ονομαστική ισχύ. Για το λόγο

αυτό παρατίθεται το Σχήμα 7.32, όπου φαίνεται η ηλεκτρική συχνότητα του συστήματος στην περίπτωση της μονάδας GT-CAES και στην περίπτωση μεμονωμένης αεριοστροβλικής μονάδας.



Σχήμα 7.32 : Απόκριση συχνότητας του συστήματος της Ρόδου με ενταγμένη τη μονάδα GT-CAES (μπλε γραμμή) και με την αεριοστροβλική μονάδα (κόκκινη γραμμή)

Όπως παρατηρούμε από το Σχήμα 7.32, η μορφή της συχνότητας είναι παραπλήσια και αποφεύγεται η αποκοπή φορτίων και στις δύο περιπτώσεις. Ωστόσο, με τη χρήση της μονάδας GT-CAES επιτυγχάνεται ελαφρώς υψηλότερη τιμή συχνότητας. Συμπερασματικά, παρά τη μειωμένη αδράνεια που χαρακτηρίζει τη μονάδα GT-CAES, όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 7.3.1, καθώς και την αρκετά μικρότερη ποσότητα καυσίμου που απαιτεί η λειτουργία της συγκριτικά με μια συμβατική αεριοστροβλική μονάδα ίδιας ονομαστικής ισχύος, η μεταβατική απόκριση του συστήματος GT-CAES σε περιπτώσεις διαταραχών είναι παρόμοια και ελαφρώς βελτιωμένη έναντι της αντίστοιχης της αεριοστροβλικής μονάδας. Επομένως, πέρα από τα θετικά στοιχεία που αναφέρονται στο Κεφάλαιο 3 σχετικά με τις μονάδες CAES, καταλήγουμε ότι η μονάδα GT-CAES μπορεί να συνεισφέρει αποτελεσματικά και στη ρύθμιση συχνότητας.

Τέλος σημειώνεται ότι, σε αντίθεση με το Σενάριο 1 στην περίπτωση αυτόνομης λειτουργίας της αεριοστροβλικής μονάδας (χωρίς έγχυση αέρα από το αεροφυλάκιο στο θάλαμο καύσης), δεν σημειώνονται αποκοπές παρότι η αρχική κατανάλωση των φορτίων είναι κοινή τόσο στο Σενάριο 2 όσο και στο Σενάριο 1. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό είναι ότι στο Σενάριο 2 υπάρχει καλύτερη αρχική κατανομή ισχύος στις συμβατικές μονάδες, με αποτέλεσμα η αεριοστροβλική μονάδα (Gas Turbine) που προσομοιώθηκε στο Σχήμα 7.32 να έχει μεγαλύτερη στρεφόμενη εφεδρεία.

7.4 Προσομοίωση του αυτόνομου συστήματος της Ρόδου – Μονάδα GT-CAES σε κατάσταση αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας

7.4.1 Περιγραφή Σεναρίου

Στην ενότητα αυτή προσομοιώνεται το αυτόνομο σύστημα της Ρόδου, με ενταγμένη τη μονάδα GT-CAES σε συνθήκες αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτό συνεπάγεται πως λειτουργεί ο συμπιεστής με τον αντίστοιχο ηλεκτρικό κινητήρα της μονάδας GT-CAES, απορροφώντας ισχύ από το δίκτυο. Η αεριοστροβιλική μονάδα και ο ανεξάρτητος στρόβιλος, με τις αντίστοιχες γεννήτριες, της μονάδας GT-CAES είναι εκτός λειτουργίας. Το αρχικό σενάριο παραγωγής και κατανάλωσης (Σενάριο 3) εμφανίζεται στους Πίνακες 7.22 και 7.23 αντίστοιχα.

Όπως παρατηρούμε από τον Πίνακα 7.22, η αρχική παραγόμενη ισχύς των ατμοηλεκτρικών μονάδων συνολικά είναι 28,2 MW, ενώ των νηξελογεννητριών είναι 10,86 MW. Όσον αφορά τη μονάδα GT-CAES, σύμφωνα με το Σενάριο 3 που εξετάζεται στην παρούσα ενότητα, η αρχική καταναλισκόμενη ισχύς του συμπιεστή θεωρείται ίση με 20 MW. Δεδομένου ότι απορροφάται ισχύς από το ηλεκτρικό σύστημα της Ρόδου, η αρχική ισχύς του ηλεκτρικού κινητήρα που κινεί το συμπιεστή λαμβάνεται αρνητική (σύμβαση γεννήτριας). Η στρεφόμενη εφεδρεία των ατμοηλεκτρικών μονάδων και των νηξελομηχανών που εμφανίζεται στον Πίνακα 7.22 έχει προκύψει από την αρχικώς παραγόμενη και την ονομαστική ισχύ των μονάδων (Πίνακας 7.7). Η στρεφόμενη εφεδρεία της μονάδας GT-CAES στο Σενάριο 3 ισούται με την αρχική απορροφούμενη ισχύ του κινητήρα, δηλαδή είναι ίση με 20 MW (Πίνακας 7.22), δεδομένου ότι σε περιπτώσεις μεγάλης υποσυχνότητας ο κινητήρας δύναται να αποσυνδεθεί από το δίκτυο.

Σκοπός της παρούσας ενότητας είναι να εξετάσουμε τις θετικές επιδράσεις της αποθήκευσης αιολικής ενέργειας, στη μεταβατική απόκριση του συστήματος της Ρόδου. Για το λόγο αυτό θεωρούμε ένα εναλλακτικό σενάριο (Σενάριο 3) παραγωγής ισχύος των αιολικών πάρκων (Πίνακας 7.22), όπου η παραγόμενη ισχύς του κάθε πάρκου θεωρείται πλησίον της ονομαστικής της τιμής (Πίνακας 7.4). Εξαίρεση αποτελεί το Α/Π 4, η ισχύς του οποίου διατηρείται ίδια με αυτή του Σεναρίου 2 (Πίνακας 7.18). Στον Πίνακα 7.22 φαίνεται ότι η συνολική ισχύς που παράγουν τα Α/Π είναι 43,13 MW. Τέλος, όσον αφορά τα ηλεκτρικά φορτία που είναι συνδεδεμένα στους ζυγούς του δικτύου της Ρόδου (Πίνακας 7.23), στο σενάριο αυτό η ισχύς που καταναλώνουν θεωρείται ίση με το 70% της κατανάλωσης του Σεναρίου 2 (Πίνακας 7.19). Έτσι η συνολική κατανάλωση των φορτίων, υπό ονομαστική τάση λειτουργίας, είναι ίση με 58,14 MW.

Δεδομένου ότι τα φορτία έχουν θεωρηθεί ως σταθερές αγωγιμότητες, η κατανάλωση ισχύος εξαρτάται από το επίπεδο της τάσεως των ζυγών στους οποίους συνδέονται. Συγκεκριμένα, η συνολική καταναλισκόμενη ισχύς των φορτίων (58,14 MW) που αναφέρεται στον Πίνακα 7.23, αντιστοιχεί σε ονομαστική τάση λειτουργίας των ζυγών του συστήματος. Οι τάσεις όμως των ζυγών στους οποίους είναι συνδεδεμένα τα φορτία, όπως θα φανεί και σε σχετικό σχήμα, είναι άνω της ονομαστικής τιμής σύμφωνα με την αρχική ροή φορτίου. Για το λόγο αυτό, η συνολική αρχική κατανάλωση των φορτίων είναι 60,7 MW, όπως φαίνεται στον Πίνακα 7.23. Επιπλέον, σύμφωνα με τον Πίνακα 7.22, η συνολική αρχική παραγόμενη ισχύς των συμβατικών μονάδων και των αιολικών πάρκων είναι 62,19 MW. Η απόκλιση που

υπάρχει μεταξύ της συνολικά αρχικά παραγόμενης (62,19 MW) και καταναλισκόμενης (60,7 MW) ενεργού ισχύος, οφείλεται στις απώλειες των γραμμών μεταφοράς.

Πίνακας 7.22: Κατανομή παραγόμενης ισχύος – Σενάριο 3

| Μονάδα Παραγωγής | Κωδικός αριθμός ζυγού σύνδεσης μονάδας παραγωγής | Σενάριο 3 | |
|--|--|-----------------------|--------------------------|
| | | Παραγόμενη ισχύς (MW) | Στρεφόμενη εφεδρεία (MW) |
| Steam 1 | 2 | 14,1 | 0,1 |
| Steam 2 | 2 | 14,1 | 0,1 |
| GT-CAES | 3 | -20 | 20 |
| Diesel 1 | 1 | 5,43 | 9,57 |
| Diesel 2 | 1 | 5,43 | 9,57 |
| Σύνολο παραγωγής συμβατικών μονάδων και στρεφόμενης εφεδρείας | | 19,06 | 39,34 |
| A/Π | Ζυγός σύνδεσης A/Π | Παραγόμενη ισχύς (MW) | |
| 4 | ΣΟΡ ΜΤ | 6,63 | |
| 3 | ΑΦ (Α/Π3) | 3,00 | |
| 1 | ΑΦ (Α/Π1) | 10,5 | |
| 5 | ΓΕΝ (Α/Π5) | 5,5 | |
| 2 | ΓΕΝ (Α/Π2) | 17,5 | |
| Σύνολο παραγωγής αιολικών πάρκων | | 43,13 | |
| Ισχύς αιολικών πάρκων που καταλήγει στα φορτία | | 23,13 | |
| ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΙΣΧΥΟΣ | | 62,19 | |

Αν δεν ήταν ενταγμένος στο σύστημα ο κινητήρας με τον ανεξάρτητο συμπιεστή, τότε δεν θα υπήρχε αποθήκευση ενέργειας, με αποτέλεσμα το σύνολο της παραγωγής ισχύος των αιολικών πάρκων να τροφοδοτούσε τα φορτία του συστήματος. Στην περίπτωση αυτή, χωρίς δηλαδή αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας, η διείσδυση της αιολικής ισχύος είναι:

$$\frac{\text{Σύνολο παραγωγής αιολικών πάρκων}}{\text{Σύνολο κατανάλωσης φορτίων}} = \frac{43,13}{60,7} \approx 72\% \quad (7.5)$$

Ωστόσο, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, 20 MW ισχύος από τα Α/Π χρησιμοποιούνται για την περιστροφή του ηλεκτρικού κινητήρα και κατ' επέκταση του συμπιεστή της μονάδας GT-CAES. Επομένως ο κινητήρας της μονάδας GT-CAES θεωρείται ως ένα επιπλέον φορτίο συνδεδεμένο στο σύστημα της Ρόδου. Συνεπώς, στο εξεταζόμενο σενάριο που αποθηκεύεται ηλεκτρική ενέργεια, ο δείκτης διείσδυσης είναι ο εξής :

$$\frac{\text{Συνολική Ισχύς Α/Π}}{\text{Σύνολο κατανάλωσης φορτίων και κινητήρα}} = \frac{43,13}{60,7 + 20} \approx 53\% \quad (7.6)$$

Όπως αναφέρεται στην παράγραφο 1.5.3 του Κεφαλαίου 1, το όριο διείσδυσης της αιολικής ενέργειας είναι από 30% έως 40% στα περισσότερα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Σύμφωνα με την (7.6), παρατηρούμε ότι η διείσδυση της αιολικής ισχύος, στο Σενάριο 3 που μελετάται, υπερβαίνει το μέγιστο επιτρεπτό όριο που συναντάται στα

σύγχρονα Σ.Η.Ε. Ωστόσο, το γεγονός αυτό δεν προκαλεί προβλήματα στην ομαλή λειτουργία του δικτύου, δεδομένου ότι η ισχύς που καταναλώνει ο ηλεκτρικός κινητήρας της μονάδας GT-CAES είναι ελεγχόμενη, με τη μεταβολή της καταναλισκόμενης ισχύος του ανεξάρτητου συμπιεστή (μέσω της χρήσης των οδηγών πτερυγίων εισόδου), συμμετέχοντας στη ρύθμιση συχνότητας. Επιπλέον, όπως έχει αναφερθεί, ο κινητήρας δύναται να απορριφθεί σε περιπτώσεις υποσυχνότητας, δίνοντας τη δυνατότητα της άμεσης μείωσης της απόκλισης που εμφανίζεται στο ισοζύγιο ισχύος σε περίπτωση κάποιας διαταραχής. Συμπερασματικά, μέσω της λειτουργίας της αποθήκευσης με πεπιεσμένο αέρα, τα προαναφερθέντα όρια διείσδυσης μπορούν να χαλαρώσουν σε ένα βαθμό, επιτρέποντας ακόμα μεγαλύτερη διείσδυση της αιολικής ενέργειας στην ηλεκτροπαραγωγή. Τέλος, αντιλαμβανόμαστε πως εάν δεν υπήρχε η δυνατότητα αποθήκευσης ενέργειας (κατανάλωση ισχύος από συμπιεστή), μεγάλο μέρος της αιολικής ισχύος θα είχε απορριφθεί από το διαχειριστή του Σ.Η.Ε. έτσι ώστε να τηρούνται τα προκαθορισμένα όρια αιολικής διείσδυσης.

Πίνακας 7.23: Ζήτηση Φορτίων Ηλεκτρικού Συστήματος Ρόδου – Σενάριο 3

| Φορτίο | | Σενάριο 3 | | | |
|-----------------------------------|-----------------------|--|----------|-------------------------------|----------|
| | | Κατανάλωση φορτίων υπό ονομαστική τάση | | Πραγματική κατανάλωση φορτίων | |
| Υποσταθμός σύνδεσης | Κωδικός αριθμός ζυγού | P (MW) | Q (MVar) | P (MW) | Q (MVar) |
| ΣΟΡ ΜΤ | 11 | 4,44 | 2,46 | 4,60 | 2,55 |
| ΙΑΛ ΜΤ | 12 | 11,65 | 6,45 | 12,20 | 6,76 |
| ΡΔΙ ΜΤ | 13 | 15,37 | 8,51 | 15,97 | 8,84 |
| ΑΦ ΜΤ | 14 | 15,41 | 8,53 | 16,06 | 8,89 |
| ΓΕΝ ΜΤ | 15 | 3,14 | 1,74 | 3,27 | 1,82 |
| ΡΟΔ ΜΤ | 16 | 8,13 | 4,50 | 8,60 | 4,76 |
| Σύνολο κατανάλωσης φορτίων | | 58,14 | 32,18 | 60,70 | 33,62 |

Το Σενάριο 3 λοιπόν που μελετάται, είναι ένα υποθετικό σενάριο που εξετάζει την συμπεριφορά του συστήματος της Ρόδου σε συνθήκες πολύ μεγάλης αιολικής διείσδυσης (53% - σχέση (7.6)), με τη χρήση πεπιεσμένου αέρα ως μέθοδος αποθήκευσης ενέργειας.

Η διαταραχή που προσομοιώνεται στην παρούσα ενότητα είναι ίδια με αυτή που εξετάστηκε στις ενότητες 7.2 και 7.3, δηλαδή θεωρείται ότι κάποια δεδομένη χρονική στιγμή λαμβάνει χώρα η αποσύνδεση των ατμοηλεκτρικών μονάδων από κοινή αιτία. Όπως έχει αναφερθεί, η συνολική παραγόμενη ισχύς του ατμοηλεκτρικού σταθμού πριν την αποκοπή από το δίκτυο είναι 28,2 MW, και αντιστοιχεί στο 46,5% του συνολικού φορτίου του συστήματος.

Στον Πίνακα 7.24 παρατίθενται τα χαρακτηριστικά στοιχεία του σύγχρονου κινητήρα και του αντίστοιχου αυτόματου ρυθμιστή τάσης της μονάδας GT-CAES. Τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του σύγχρονου κινητήρα και του αντίστοιχου ΑΡΤ της μονάδας GT-CAES (Πίνακας 7.24) λαμβάνονται ίδια με αυτά της γεννήτριας του συμβατικού αεριοστροβίλου (GAS) του Πίνακα 7.7. Ωστόσο, όπως και στην περίπτωση της παραγωγής ενέργειας από την ισοδύναμη γεννήτρια της μονάδας GT-CAES που αναφέρθηκε στην ενότητα 7.3, υπάρχει μία διαφορά ως προς την τιμή της ανηγμένης χρονικής σταθεράς αδρανείας. Δεδομένου ότι στον άξονα περιστροφής είναι προσαρτημένος ο ανεξάρτητος συμπιεστής και ο δρομέας του

κινητήρα, η συνολική αδράνεια H του συστήματος συμπιεστής-κινητήρας προκύπτει από το άθροισμα των επιμέρους αδρανειών. Κάνοντας επίσης την παραδοχή ότι η σταθερά αδρανείας του ανεξάρτητου συμπιεστή (H_{Cu}) ταυτίζεται με την αντίστοιχη του συμβατικού συμπιεστή της αεριοστροβιλικής μονάδας ($H_{Cv} = 0,5$ s), δεδομένης της (7.2), προκύπτει ότι :

$$H = H_{Cu} + H_{av} = 1 \text{ s} \quad (7.7)$$

όπου $H_{av} = 0,5$ s η σταθερά αδρανείας του δρομέα του κινητήρα.

Πίνακας 7.24: Χαρακτηριστικά Σύγχρονου Κινητήρα και APT Μονάδας GT-CAES

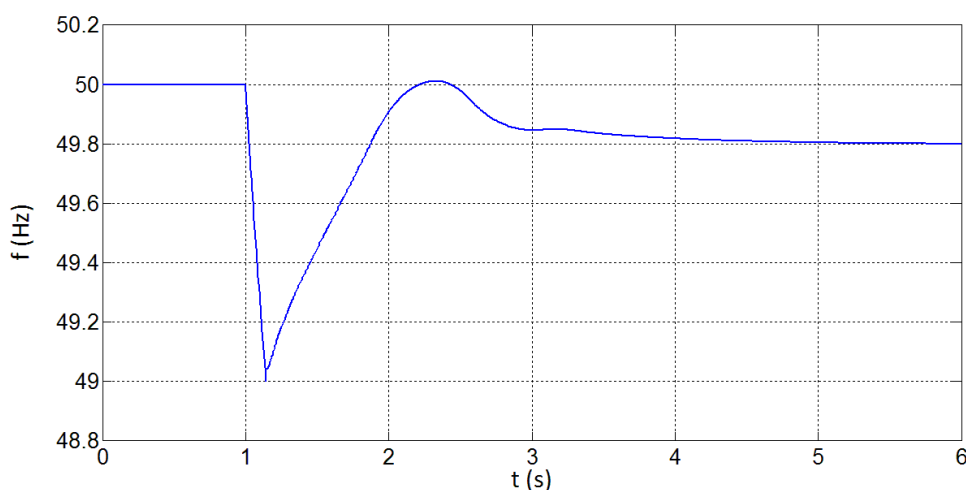
| Παράμετρος | Επεξήγηση παραμέτρου | Τιμή |
|-----------------------------|--|----------|
| Κινητήρας-συμπιεστής | | |
| S_N (MVA) | Ονομαστική φαινόμενη ισχύς του κινητήρα | 47,5 |
| V_N (kV) | Ονομαστική τάση εξόδου του κινητήρα | 11,5 |
| P_{nom} (MW) | Ονομαστική ισχύς συμπιεστή | 27,5 |
| m_{cnom} | Ονομαστική ροή αέρα συμπιεστή (kg/s) | 74,43 |
| X_{ls} | Επαγωγική αντίδραση σκεδάσεως στάτη (αμ στη βάση του κινητήρα) | 0,12 |
| X_d | Σύγχρονη αντίδραση ευθέως άξονα (αμ στη βάση του κινητήρα) | 1,88 |
| X_q | Σύγχρονη αντίδραση εγκάρσιου άξονα (αμ στη βάση του κινητήρα) | 1 |
| X_d' | Μεταβατική αντίδραση ευθέως άξονα (αμ στη βάση του κινητήρα) | 0,3 |
| X_q' | Μεταβατική αντίδραση εγκάρσιου άξονα (αμ στη βάση του κινητήρα) | 0,34 |
| T_d | Μεταβατική χρονική σταθερά ανοιχτού κυκλώματος ευθέως άξονα (sec) | 9,6 |
| T_q | Μεταβατική χρονική σταθερά ανοιχτού κυκλώματος εγκάρσιου άξονα (sec) | 0,4 |
| H | Σταθερά αδράνειας σε sec (αμ στη βάση ισχύος του συμπιεστή) | 1 |
| R_{stator} | Ωμική αντίσταση στάτη (αμ στη βάση του κινητήρα) | 0 |
| APT κινητήρα | | |
| K_A | Αναλογικό κέρδος του Αυτόματου Ρυθμιστή Τάσεως της μηχανής | 50 |
| T_A | Χρονική σταθερά του Αυτόματου Ρυθμιστή Τάσεως της μηχανής | 0,3 |
| T_B | Χρονικές σταθερές φίλτρου μεταπορείας | 15 |
| T_C | | 1,5 |
| $E_{fmin} - E_{fmax}$ | Όρια τάσης διέγερσης | 0 - 5,05 |

Τέλος, η αρχική πίεση του αεροφυλακίου ορίζεται ως $P_{ch} = 50$ bar, τιμή η οποία βρίσκεται προφανώς εντός των ορίων του Πίνακα 7.15 ($P_{minC} < P_{ch} < P_{ch0}$). Η αποσύνδεση των ατμοηλεκτρικών μονάδων λαμβάνει χώρα για $t = 1$ s της προσομοίωσης (συνολική απώλεια 28,2 MW), και εξετάζεται η απόκριση του συστήματος της Ρόδου στα σχήματα που παρατίθενται στην επόμενη παράγραφο.

7.4.2 Αποτελέσματα προσομοίωσης

Στο Σχήμα 7.33 φαίνεται η απόκριση της ηλεκτρικής συχνότητας του συστήματος της Ρόδου, ενώ στο Σχήμα 7.34 απεικονίζεται η μηχανική ισχύς της μονάδας GT-CAES, των ντηζελογεννητριών (Diesel) και του ατμοηλεκτρικού σταθμού (Steam), συναρτήσει του χρόνου προσομοίωσης. Όπως αναφέρθηκε και στην παράγραφο 7.4.1, η μηχανική ισχύς της μονάδας GT-CAES είναι αρνητική επειδή έχει ληφθεί σύμβαση γεννήτριας. Σημειώνεται επίσης ότι το Σχήμα 7.34-(δ) εστιάζει στο χρονικό διάστημα $0,9 \text{ s} < t < 1,15 \text{ s}$ έτσι ώστε να φανεί καλύτερα η ρύθμιση της καταναλισκόμενης ισχύος του συμπιεστή, μέσω της μεταβολής του ανοίγματος των περυγίων εισόδου, πριν την αποκοπή του από το δίκτυο.

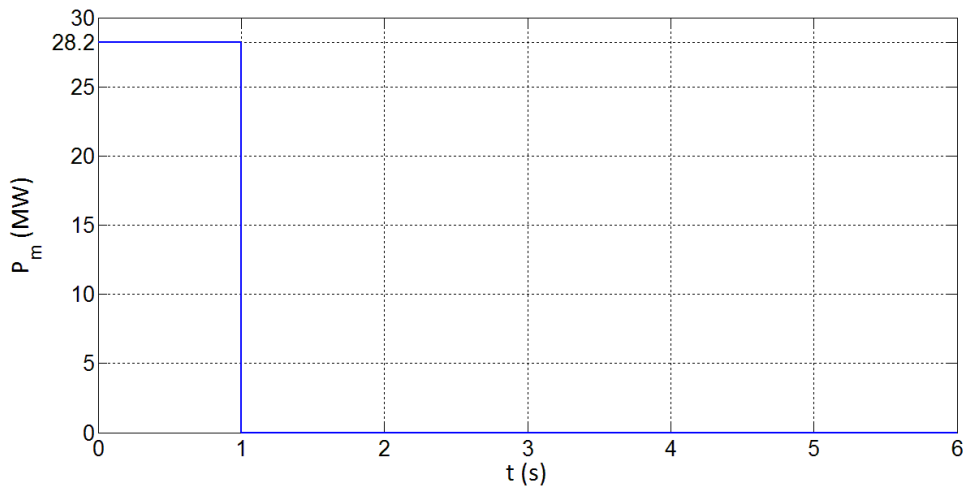
Με την απώλεια των ατμοηλεκτρικών μονάδων σε χρόνο $t = 1 \text{ s}$ (Σχήμα 7.34-α), η ηλεκτρική συχνότητα αρχίζει να μειώνεται με πολύ μεγάλο ρυθμό, όπως παρατηρείται στο Σχήμα 7.33. Το γεγονός αυτό οφείλεται στη σοβαρότητα της διαταραχής, καθώς σημειώνεται απώλεια παραγωγής ισχύος ίση με το 46,5% του συνολικού φορτίου του συστήματος, σε συνδυασμό με την μεγάλη αιολική διείδυση. Για $t = 1,14 \text{ s}$ η συχνότητα κατερχόμενη γίνεται ίση με 49 Hz. Όπως αναφέρεται στον Πίνακα 7.15, η κρίσιμη συχνότητα αποσύνδεσης του κινητήρα της μονάδας GT-CAES από το δίκτυο είναι $f_{\min} = 49 \text{ Hz}$. Κατά συνέπεια, την παραπάνω χρονική στιγμή ο ηλεκτρικός κινητήρας και ο συμπιεστής θέτονται εκτός δικτύου (Σχήμα 7.34-γ και 7.34-δ), με αποτέλεσμα να μειώνεται η συνολικά καταναλισκόμενη ισχύς του συστήματος της Ρόδου. Για το λόγο αυτό παρατηρούμε στο Σχήμα 7.33 τη συχνότητα του συστήματος να αρχίζει να ανέρχεται μετά την $t = 1,14 \text{ s}$. Η μόνη μονάδα παραγωγής που είναι συνδεδεμένη στο σύστημα πλέον είναι ο ντηζελοηλεκτρικός σταθμός (Σχήμα 7.34-β), ο οποίος αυξάνει διαρκώς την παραγόμενη ισχύ του μετά την αποσύνδεση των ατμοηλεκτρικών μονάδων. Έτσι, μετά και την αποκοπή του κινητήρα της μονάδας GT-CAES, οι ντηζελογεννήτριες αναλαμβάνουν πλήρως την ρύθμιση συχνότητας. Τέλος, όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.33, η συχνότητα, μετά από μια μικρή υπερακόνηση, προσεγγίζει τη μόνιμη τιμή της 49,8 Hz.



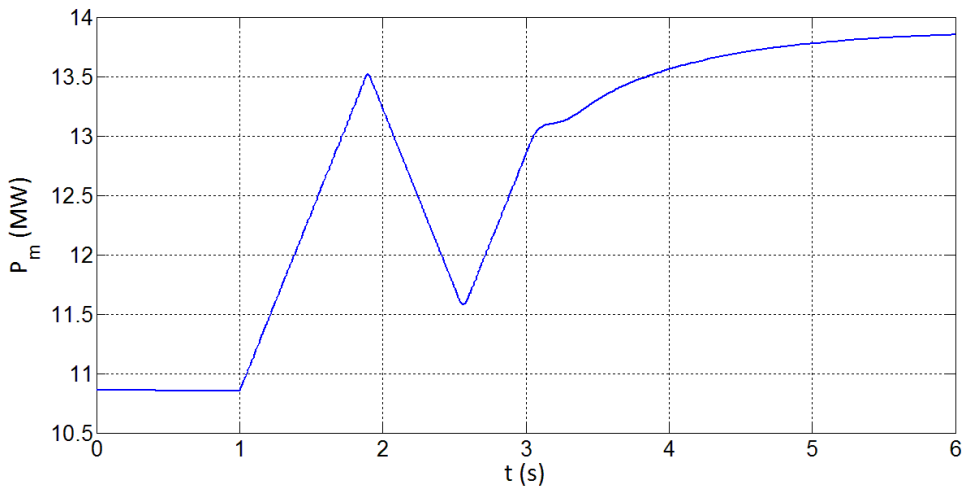
Σχήμα 7.33 : Απόκριση συχνότητας του συστήματος της Ρόδου

Εξετάζοντας το Σχήμα 7.34-(β), παρατηρούμε ότι η μέγιστη παραγωγή ισχύος των ντηζελογεννητριών που σημειώνεται τα πρώτα δευτερόλεπτα της διαταραχής ($t = 1,9 \text{ s}$) είναι μόλις 13,52 MW. Δεδομένου επίσης ότι ο ρυθμός ανάληψης φορτίου του ντηζελοηλεκτρικού σταθμού είναι ο μέγιστος δυνατός, γίνεται αντιληπτό ότι δίχως την αποκοπή του κινητήρα της

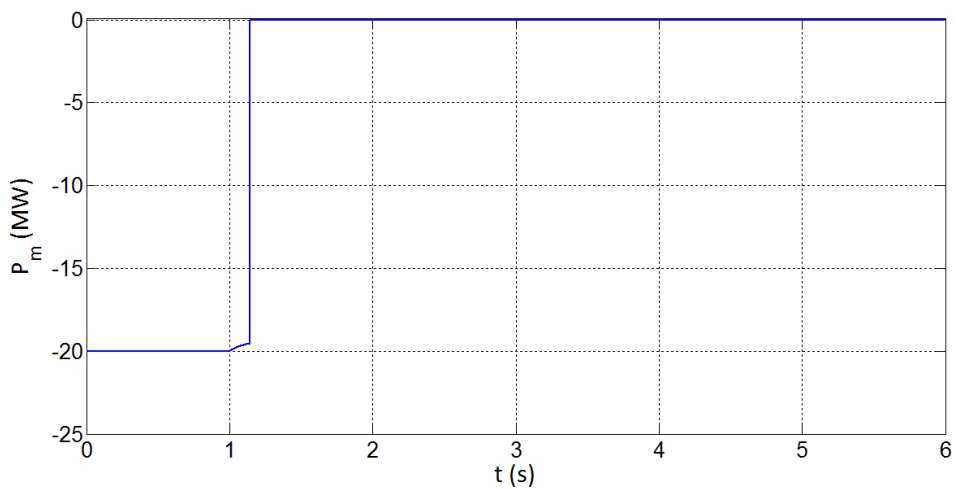
μονάδας GT-CAES, το σύστημα είτε θα είχε καταστεί ασταθές είτε στην καλύτερη περίπτωση θα είχε υποστεί μεγάλες αποκοπές φορτίων.



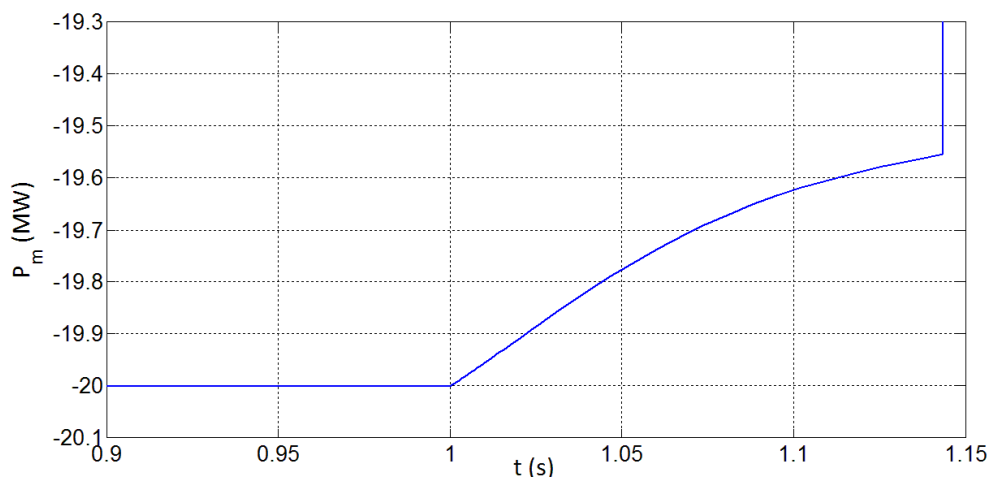
Σχήμα 7.34-(α) : Μηχανική παραγόμενη ισχύς ατμοηλεκτρικού σταθμού



Σχήμα 7.34-(β) : Μηχανική παραγόμενη ισχύς νηξελιοηλεκτρικού σταθμού



Σχήμα 7.34-(γ) : Κατανάλωση μηχανικής ισχύος μονάδας GT-CAES



Σχήμα 7.34-(δ) : Κατανάλωση μηχανικής ισχύος μονάδας GT-CAES το πρώτο δευτερόλεπτο της διαταραχής

Στο διάστημα $1 \text{ s} < t < 1,14 \text{ s}$ όπου έχει αποσυνδεθεί ο ατμοηλεκτρικός σταθμός, η καταναλισκόμενη ισχύς του ανεξάρτητου συμπιεστή της μονάδας GT-CAES μειώνεται με έναν μικρό ρυθμό, ο οποίος λόγω της διαβάθμισης των αξόνων του Σχήματος 7.34-(γ) γίνεται δύσκολα εμφανής. Για το λόγο αυτό παρατίθεται το Σχήμα 7.34-(δ), όπου εστιάζει στο παραπάνω χρονικό διάστημα. Η ελαφρά μείωση της κατανάλωσης ισχύος του συμπιεστή κατά το χρονικό διάστημα αυτό, πριν δηλαδή την αποσύνδεση του αντίστοιχου ηλεκτρικού κινητήρα από το δίκτυο, οφείλεται στη μείωση του ανοίγματος των πτερυγίων. Όπως έχει αναφερθεί στο Κεφάλαιο 6, τα πτερύγια ρυθμίζουν τη ροή αέρα που εγχέει ο συμπιεστής στο αεροφυλάκιο και κατ' επέκταση την καταναλισκόμενη ισχύ της μονάδας GT-CAES, σύμφωνα με το σφάλμα συχνότητας που δέχεται ο αντίστοιχος ρυθμιστής στροφών. Επομένως, λόγω της υποσυχνότητας τα πτερύγια αρχίζουν να μειώνουν το άνοιγμά τους μέχρι την $t = 1,14 \text{ s}$, όπου η συχνότητα γίνεται ίση με την κρίσιμη και το σύστημα κινητήρας-συμπιεστής τίθεται εκτός δικτύου.

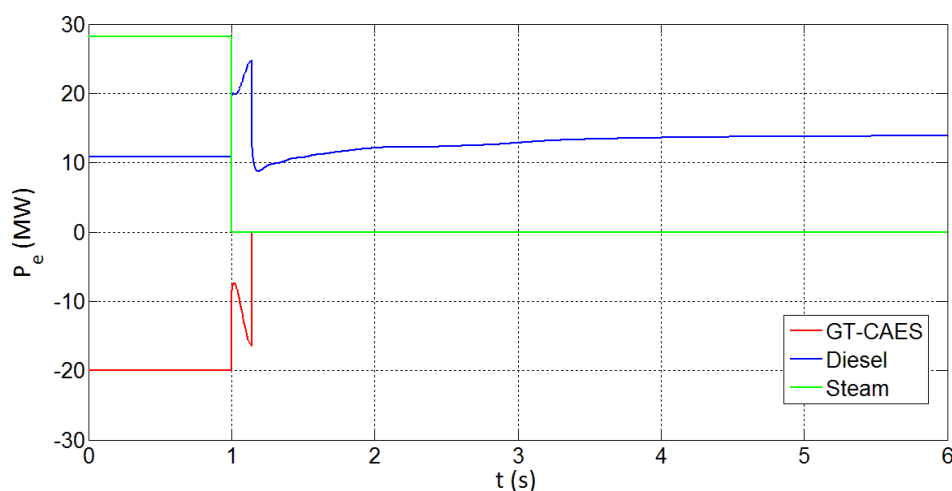
Η μόνιμη τιμή της παραγόμενης ισχύος των νηξελογεννητριών είναι 13,86 MW. Δεδομένης της αρχικής παραγωγής των νηξελομηχανών (Πίνακας 7.22), η μόνιμη μεταβολή της ισχύος τους είναι 3 MW. Αντίθετα, η παραγωγή των ατμοηλεκτρικών μονάδων μηδενίστηκε (απώλεια 28,2 MW) όπως και του κινητήρα της μονάδας GT-CAES (μείωση κατανάλωσης κατά 20 MW). Σύμφωνα με τα παραπάνω, η συνολική μεταβολή της ισχύος των μονάδων είναι $\Delta P = -5,2 \text{ MW}$. Το πρόσημο (-) σημαίνει ότι η συνολική παραγωγή ισχύος των μονάδων (GT-CAES, ατμοηλεκτρικός σταθμός, νηξελογεννήτριες) μειώθηκε. Το γεγονός αυτό εξηγείται από την αντίστοιχη μείωση των καταναλώσεων των φορτίων, λόγω της πτώσης της τάσεως στους αντίστοιχους ζυγούς, όπως θα φανεί σε επόμενο σχήμα.

Τέλος, συμπεραίνουμε ότι, παρά το μεγάλο μέγεθος της διαταραχής, το σύστημα παραμένει ευσταθές διατηρώντας τη συχνότητα σε επιτρεπτά επίπεδα και αποφεύγοντας τις αποκοπές φορτίων (οι οποίες λαμβάνουν χώρα για συχνότητα κάτω από 48,5 Hz). Είναι γεγονός ότι η συγκράτηση της συχνότητας οφείλεται ως επί των πλείστων στην απόρριψη του φορτίου του κινητήρα, με αποτέλεσμα η συνολική κατανάλωση ισχύος να μειωθεί άμεσα (μείωση κατά 20 MW περίπου), ελαττώνοντας την απόκλιση που εμφανίζεται στο ισοζύγιο της συνολικά παραγόμενης και καταναλισκόμενης ισχύος.

Στο Σχήμα 7.35 παρατίθεται το διάγραμμα της ηλεκτρικής ισχύος που παράγουν οι γεννήτριες των μονάδων συναρτήσει του χρόνου προσομοίωσης. Σημειώνεται και εδώ ότι η αρχική ηλεκτρική ισχύς της μονάδας GT-CAES είναι αρνητική, λόγω του ότι ο κινητήρας της

μονάδας απορροφά ισχύ από το δίκτυο (σύμβαση γεννήτριας). Την $t = 1$ s που αποσυνδέονται οι ατμοηλεκτρικές μονάδες, η εγγεόμενη ηλεκτρική ισχύς στο δίκτυο από το συγκεκριμένο σταθμό παραγωγής προφανώς μηδενίζεται (απώλεια ηλεκτρικής ισχύος 28,2 MW). Την παραπάνω χρονική στιγμή, η έλλειψη ισχύος που εμφανίζεται στο σύστημα καλύπτεται εν μέρει από την ακαριαία αύξηση της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος των νηζελογεννητριών και την μείωση της κατανάλωσης του κινητήρα της μονάδας GT-CAES (Σχήμα 7.35), καθώς και από τη μείωση της κατανάλωσης των φορτίων μέσω της πτώσης της τάσεως στους αντίστοιχους ζυγούς. Έτσι διατηρείται η συνέχεια της συνολικής ηλεκτρικής ισχύος που παράγεται και καταναλώνεται για $t = 1$ s.

Μετά την πρακτικά ακαριαία αύξηση ($t = 1$ s) της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος των νηζελογεννητριών, καθώς και την πτώση της κατανάλωσης του κινητήρα της μονάδας GT-CAES όπως αναφέρθηκε, τόσο η ισχύς που παράγει ο νηζελοηλεκτρικός σταθμός όσο και αυτή που καταναλώνει ο κινητήρας αρχίζουν να αυξάνουν. Το φαινόμενο αυτό συνεχίζεται μέχρι την $t = 1,14$ s όπου ο ηλεκτρικός κινητήρας της μονάδας GT-CAES τίθεται εκτός δικτύου. Η επιπλέον ηλεκτρική ισχύς που παράγουν στο διάστημα $1 \text{ s} < t < 1,14$ s οι νηζελογεννήτριες προέρχεται από την επιβράδυνση του δρομέα της αντίστοιχης γεννήτριας, με την απορρόφηση μέρους της κινητικής ενέργειας που είναι συσσωρευμένη στον άξονα περιστροφής. Η αποκοπή του κινητήρα της μονάδας GT-CAES από το δίκτυο σε χρόνο $t = 1,14$ s επιφέρει το μηδενισμό της αντίστοιχης απορροφούμενης ηλεκτρικής ισχύος της μονάδας. Η πτώση της συνολικής κατανάλωσης ισχύος που εμφανίζεται στο σύστημα αντισταθμίζεται από την μείωση της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος των νηζελογεννητριών την ίδια χρονική στιγμή (Σχήμα 7.35). Κατ' αυτόν τον τρόπο, η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς του νηζελοηλεκτρικού σταθμού επανέρχεται σε επίπεδα στα οποία μπορεί να τροφοδοτήσει ικανώς ο ρυθμιστής στροφών της μονάδας (Σχήμα 7.34-β).

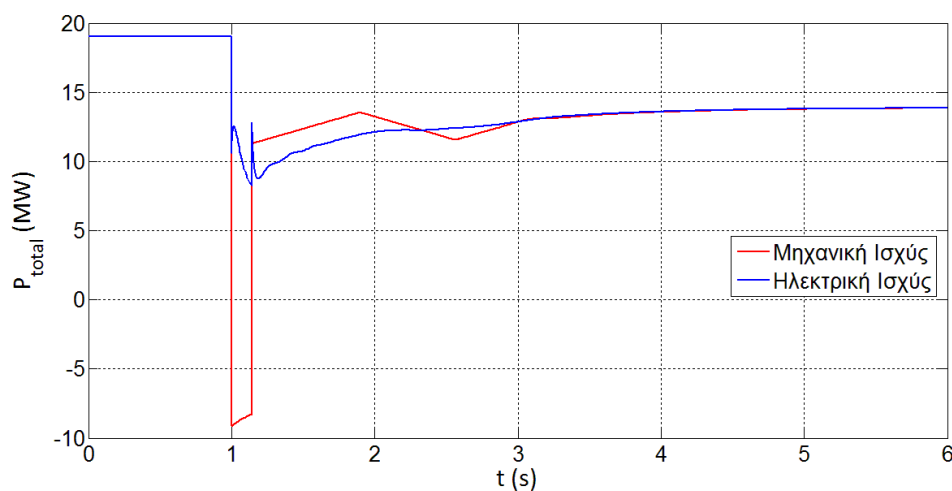


Σχήμα 7.35 : Απόκριση ηλεκτρικής ισχύος μονάδων

Για να κατανοήσουμε περαιτέρω τη μορφή της ηλεκτρικής συχνότητας του συστήματος της Ρόδου (Σχήμα 7.33), παρατίθεται το Σχήμα 7.36 όπου απεικονίζεται η συνολικά παραγόμενη μηχανική (P_{mot}) και ηλεκτρική (P_{etot}) ισχύς των μονάδων. Έτσι, με κόκκινη γραμμή εμφανίζεται το άθροισμα της μηχανικής ισχύος του ατμοηλεκτρικού σταθμού, των νηζελογεννητριών και της μονάδας GT-CAES, όπως παρουσιάστηκαν στο Σχήμα 7.34. Αντιθέτως, με μπλε γραμμή εμφανίζεται το άθροισμα της ηλεκτρικής ισχύος των μονάδων, όπως παρατέθηκαν στο Σχήμα 7.35.

Τη χρονική στιγμή $t = 1 \text{ s}$ που αποσυνδέονται οι ατμοηλεκτρικές μονάδες, τόσο η συνολική μηχανική ισχύς P_{mtot} όσο και η ηλεκτρική ισχύς P_{etot} μειώνονται απότομα (Σχήμα 7.36). Ωστόσο, η μείωση της P_{mtot} είναι πολύ μεγαλύτερη από την αντίστοιχη της P_{etot} , με αποτέλεσμα η συχνότητα του συστήματος της Ρόδου να αρχίζει να μειώνεται (Σχήμα 7.33). Συγκεκριμένα, αμέσως μετά την αποσύνδεση του ατμοηλεκτρικού σταθμού, η συνολική μηχανική ισχύς που παράγεται είναι $P_{\text{mtot}} = -9,14 \text{ MW}$, όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.36. Το πρόσημο (-) οφείλεται στο γεγονός πως η ισχύς αυτή στην πραγματικότητα δεν είναι παραγόμενη αλλά καταναλισκόμενη (σύμβαση γεννήτριας), δεδομένου ότι για $t = 1 \text{ s}$ το μηχανικό φορτίο του κινητήρα (συμπιεστής) υπερβαίνει την παραγωγή μηχανικής ισχύος των νηζελογεννητριών (Σχήμα 7.34). Στο διάστημα $1 \text{ s} < t < 1,14 \text{ s}$ πριν την αποκοπή του κινητήρα, η ισχύς P_{mtot} αρχίζει να αυξάνει (Σχήμα 7.36) ως απόρροια του ότι αυξάνει η παραγόμενη μηχανική ισχύς των νηζελομηχανών στον αντίστοιχο άξονα περιστροφής, και διότι μειώνεται ελαφρά η κατανάλωση του ανεξάρτητου συμπιεστή της μονάδας GT-CAES με τη ρύθμιση των πτερυγίων εισόδου του αέρα (Σχήμα 7.34). Αμέσως μετά την αποκοπή της μονάδας GT-CAES από το δίκτυο την $t = 1,14 \text{ s}$, η ισχύς P_{mtot} αυξάνεται πρακτικά ακαριαία, δεδομένου ότι απορρίπτεται το μηχανικό φορτίο που αντιστοιχεί στον ανεξάρτητο συμπιεστή της μονάδας. Τέλος σημειώνεται ότι, μετά την $t = 1,14 \text{ s}$, η ισχύς P_{mtot} αντιστοιχεί στην παραγωγή μηχανικής ισχύος του νηζελοηλεκτρικού σταθμού, καθώς είναι η μόνη μονάδα παραγωγής που είναι πλέον συνδεδεμένη στο δίκτυο (Σχήμα 7.34).

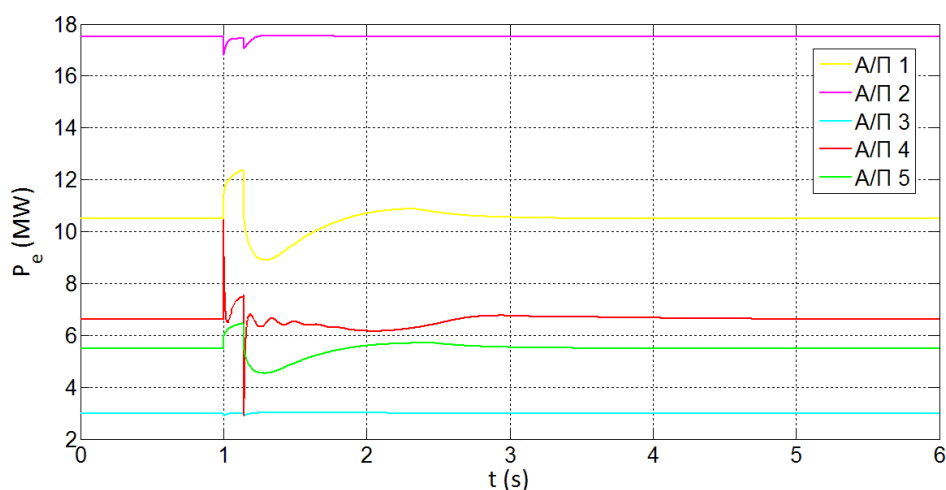
Το σημαντικότερο που εξάγεται από το Σχήμα 7.36 είναι ότι μετά την αποκοπή του κινητήρα και του αντίστοιχου συμπιεστή της μονάδας GT-CAES από το δίκτυο την $t = 1,14 \text{ s}$, η ισχύς P_{mtot} υπερβαίνει την ισχύ P_{etot} . Έτσι δικαιολογείται λοιπόν η αύξηση της ηλεκτρικής συχνότητας του συστήματος της Ρόδου (Σχήμα 7.33) μετά την παραπάνω χρονική στιγμή.



Σχήμα 7.36 : Συνολική παραγόμενη ισχύς μονάδων

Στο Σχήμα 7.37 φαίνεται η απόκριση της ενεργού ηλεκτρικής ισχύος των αιολικών πάρκων, συναρτήσει του χρόνου προσομοίωσης. Η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς των αιολικών πάρκων σημειώνει μία υπερακόντιση τη στιγμή που αποσυνδέεται ο ατμοηλεκτρικός σταθμός ($t = 1 \text{ s}$) και άλλη μία κατά την αποκοπή του κινητήρα της μονάδας GT-CAES από το δίκτυο ($t = 1,14 \text{ s}$). Όπως φαίνεται από το Σχήμα 7.37, η μικρότερη διαταραχή της παραγωγής ισχύος σημειώνεται για τα Α/Π 2 και Α/Π 3 (Τύπου Δ), καθότι η σύνδεσή τους στο δίκτυο γίνεται με πλήρη μετατροπέα ισχύος. Αντίθετα τα Α/Π 1 και Α/Π 5 (Τύπου Γ), δεδομένου ότι ο στάτης των αντίστοιχων ανεμογεννητριών είναι απευθείας

συνδεδεμένος στο δίκτυο, σημειώνουν μεγαλύτερη μεταβατική μεταβολή της ενεργού ισχύος που παράγουν κατά τη διαταραχή της ηλεκτρικής συχνότητας του συστήματος της Ρόδου. Τέλος, η μεγαλύτερη υπερακόντιση της ηλεκτρικής ισχύος εμφανίζεται για το Α/Π 4 (Τύπου Α), οι ανεμογεννήτριες του οποίου συνδέονται απευθείας στο δίκτυο χωρίς την παρεμβολή μετατροπέα ισχύος, με αποτέλεσμα να υφίστανται άμεσα τις διαταραχές συχνότητας του συστήματος και της τάσεως του αντίστοιχου ζυγού. Σημειώνεται ότι μετά την αντιμετώπιση της διαταραχής, η ισχύς των αιολικών πάρκων επιστρέφει στην αρχική της τιμή, δεδομένου ότι τόσο η συχνότητα όσο και οι τάσεις των αντίστοιχων ζυγών έχουν σταθεροποιηθεί.



Σχήμα 7.37 : Απόκριση ισχύος Αιολικών Πάρκων

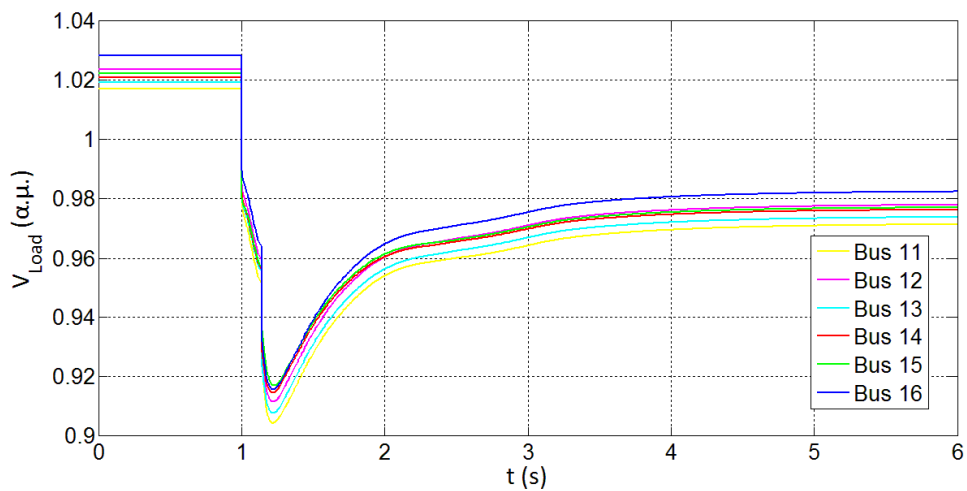
Στο Σχήμα 7.38 απεικονίζονται οι τάσεις των ζυγών του συστήματος της Ρόδου σε ανά μονάδα τιμή, συναρτήσει του χρόνου προσομοίωσης. Συγκεκριμένα, στο Σχήμα 7.38-(α) φαίνονται οι τάσεις των ζυγών στους οποίους συνδέονται τα φορτία του συστήματος, ενώ στο Σχήμα 7.38-(β) εμφανίζονται οι τάσεις των ζυγών στους οποίους είναι εγκατεστημένα τα αιολικά πάρκα. Στο Σχήμα 7.39 φαίνεται η παραγόμενη άεργος ισχύς του ατμοηλεκτρικού σταθμού, των νηξελογεννητριών και της μονάδας GT-CAES, ενώ στο Σχήμα 7.40 απεικονίζεται η συνολικά εγχεόμενη άεργος ισχύς από τις μονάδες στο ηλεκτρικό δίκτυο της Ρόδου.

Τη στιγμή $t = 1$ s που λαμβάνει χώρα η αποσύνδεση των ατμοηλεκτρικών μονάδων, οι τάσεις των ζυγών του συστήματος της Ρόδου σημειώνουν μια απότομη βύθιση, όπως παρατηρούμε στο Σχήμα 7.38. Η πτώση των τάσεων τη χρονική στιγμή αυτή οφείλεται στην απώλεια της άεργης παραγωγής ισχύος του ατμοηλεκτρικού σταθμού (Σχήμα 7.39). Όπως έχει αναφερθεί, ο σύγχρονος ηλεκτρικός κινητήρας της μονάδας GT-CAES παράγει άεργο ισχύ και συνεισφέρει στη ρύθμιση της τάσεως (κινητήρας με χωρητική συμπεριφορά [3]). Την $t = 1,14$ s λοιπόν που τίθεται εκτός λειτουργίας, πέρα από το μηδενισμό της ενεργού ισχύος που απορροφούσε, μηδενίζεται και η άεργος ισχύς που εγγεί στο δίκτυο (Σχήμα 7.39). Για το λόγο αυτό παρατηρούμε στο Σχήμα 7.38 ότι οι τάσεις των ζυγών του συστήματος της Ρόδου βυθίζονται ξανά την $t = 1,14$ s, σημειώνοντας ελάχιστη τιμή.

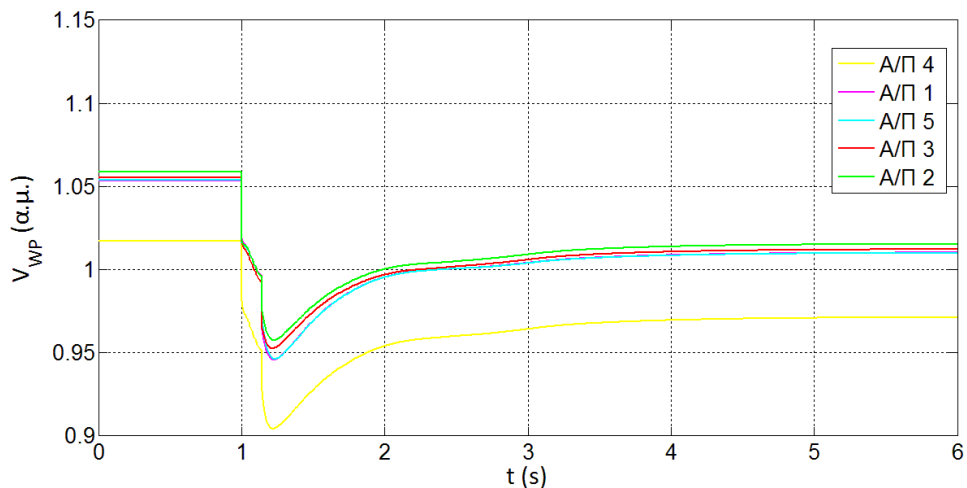
Τέλος, μετά την αποσύνδεση και του κινητήρα της μονάδας GT-CAES, οι τάσεις των ζυγών του συστήματος της Ρόδου (Σχήμα 7.38) αρχίζουν να αυξάνουν, καθότι αυξάνει η παραγωγή άεργου ισχύος των νηξελογεννητριών (Σχήμα 7.39) μέσω του αντίστοιχου αυτόματου ρυθμιστή τάσης, και η συχνότητα έχει αρχίσει να ανέρχεται (Σχήμα 7.33).

Η πτώση των τάσεων των ζυγών φορτίου στο Σχήμα 7.38-(α) ευνοεί τη ρύθμιση συχνότητας, διότι όπως αναφέρθηκε προηγουμένως τα φορτία θεωρούνται ως σταθερές

αγωγιμότητες, με αποτέλεσμα να μειώνεται μεταβατικά η κατανάλωση ενεργού ισχύος. Αξιοσημείωτη είναι η μεγάλη μεταβατική βύθιση της τάσεως του ζυγού του Α/Π 4, όπως παρατηρείται στο Σχήμα 7.38-(β), η οποία οφείλεται στο γεγονός πως το συγκεκριμένο αιολικό πάρκο καταναλώνει σημαντική ποσότητα αέργου ισχύος, δεδομένου ότι αποτελείται από γεννήτριες επαγωγής που συνδέονται απευθείας στο δίκτυο. Κατά συνέπεια, η απώλεια της αέργου παραγωγής ισχύος του ατμοηλεκτρικού σταθμού και της μονάδας GT-CAES τις $t = 1$ s και $t = 1,14$ s αντίστοιχα (Σχήμα 7.39), συνεπάγεται τη μείωση της αέργου ισχύος που απορροφά το Α/Π 4, με άμεσο αντίκτυπο τη μεταβατική βύθιση της τάσεως του αντίστοιχου ζυγού. Αντίθετα, οι ζυγοί των άλλων αιολικών πάρκων, δεδομένου ότι χρησιμοποιείται μετατροπέας ισχύος για τη σύνδεσή τους στο δίκτυο, εξαρτώνται σε μικρότερο βαθμό από τις διακυμάνσεις της αέργου ισχύος του συστήματος, με αποτέλεσμα οι αντίστοιχες τάσεις να σημειώνουν μικρότερη μεταβατική βύθιση (Σχήμα 7.38-β).

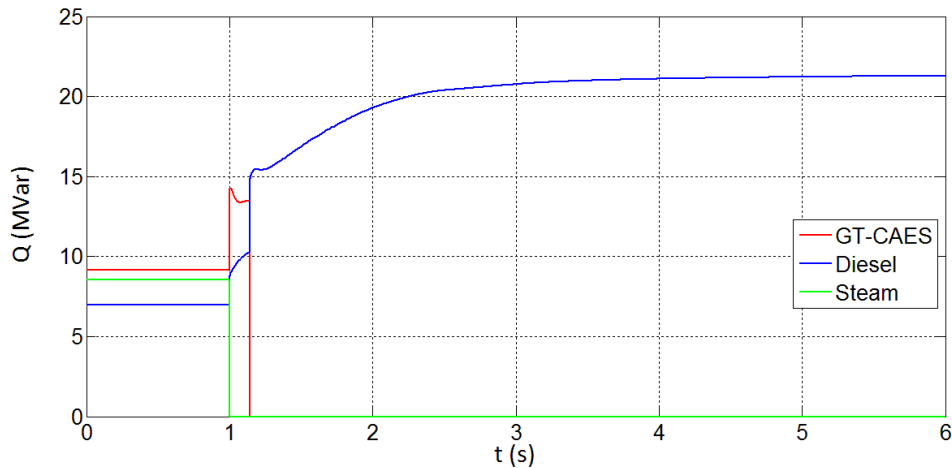


(α) Τάσεις ζυγών φορτίων

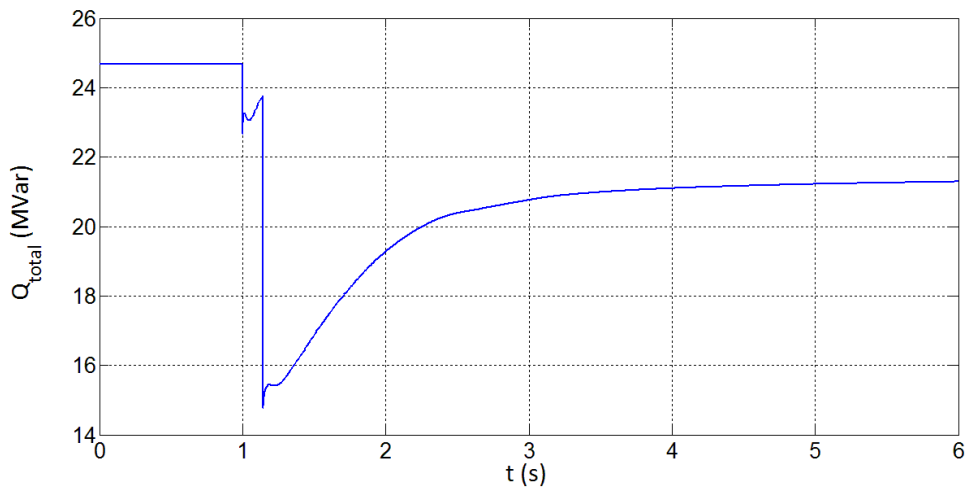


(β) Τάσεις ζυγών Αιολικών Πάρκων

Σχήμα 7.38 : Ανά μονάδα τιμή των τάσεων των ζυγών του συστήματος



Σχήμα 7.39 : Εγγεόμενη άεργος ισχύς της κάθε μονάδας στο δίκτυο



Σχήμα 7.40 : Συνολικά παραγόμενη άεργος ισχύς των μονάδων

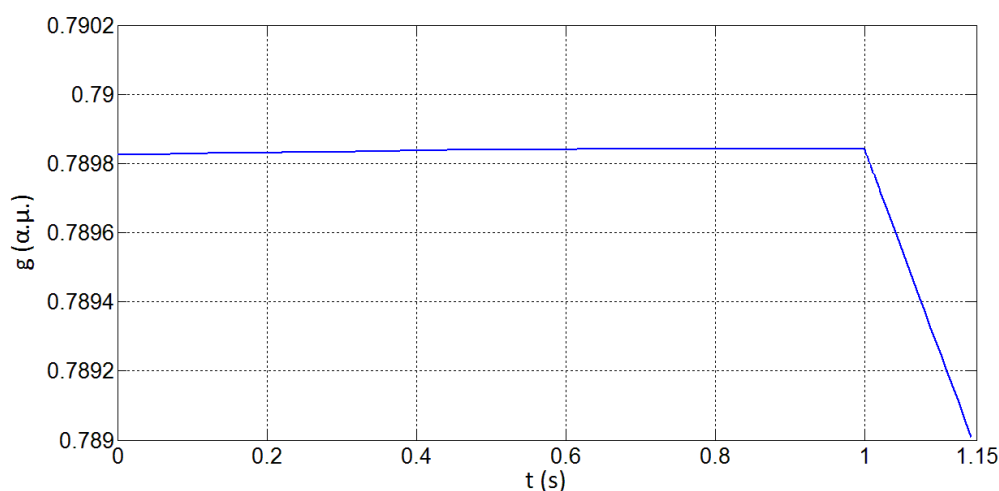
Στο Σχήμα 7.41 φαίνεται το άνοιγμα των πτερυγίων του ανεξάρτητου συμπιεστή της μονάδας GT-CAES σε ανά μονάδα τιμή, ενώ στο Σχήμα 7.42 απεικονίζεται η ανά μονάδα ροή αέρα που εγγείει ο συμπιεστής στο αεροφυλάκιο, συναρτήσεως του χρόνου προσομοίωσης. Σημειώνεται ότι το Σχήμα 7.41 αναφέρεται μέχρι την $t = 1,14$ s, στο διάστημα δηλαδή όπου ο κινητήρας και κατ' επέκταση ο συμπιεστής της μονάδας GT-CAES είναι ενταγμένος στο σύστημα της Ρόδου. Μετά την προαναφερθείσα χρονική στιγμή είναι αδιάφορη η τιμή του ανοίγματος των πτερυγίων, διότι ο κινητήρας αποσυνδέεται από το δίκτυο και ο συμπιεστής παύει να εγγείει αέρα στο αεροφυλάκιο.

Όπως παρατηρούμε από το Σχήμα 7.41, πριν την αποκοπή του κινητήρα της μονάδας GT-CAES, το άνοιγμα των πτερυγίων είναι σταθερό στην τιμή 0,7898 ανά μονάδα, που προέκυψε κατά την αρχικοποίηση του μοντέλου για τη δεδομένη αρχική καταναλισκόμενη ισχύ του συμπιεστή. Την $t = 1$ s που αποσυνδέονται οι ατμοηλεκτρικές μονάδες από το σύστημα της Ρόδου, το άνοιγμα των πτερυγίων αρχίζει να μειώνεται μέχρι και την $t = 1,14$ s όπου η μονάδα GT-CAES τίθεται εκτός δικτύου. Η εντολή μείωσης του ανοίγματος των πτερυγίων προέρχεται από το ρυθμιστή στροφών του ανεξάρτητου συμπιεστή (Κεφάλαιο 6), ο οποίος λόγω της υποσυχνότητας προσπαθεί να μειώσει την καταναλισκόμενη ισχύ μέσω της ελάττωσης της ροής αέρα που εγγέεται στο αεροφυλάκιο. Ωστόσο, λόγω του περιορισμένου μέγιστου ρυθμού μεταβολής του ανοίγματος των πτερυγίων ($\pm 0,006$ ανά

μονάδα - Πίνακας 7.15), καθώς και τη μικρή διάρκεια της ρύθμισης (από την $t = 1$ s μέχρι την $t = 1,14$ s), τη στιγμή της αποκοπής του κινητήρα της μονάδας GT-CAES η ελάχιστη τιμή του ανοίγματος που σημειώνεται είναι μόλις 0,08 % μικρότερη της αρχικής τιμής.

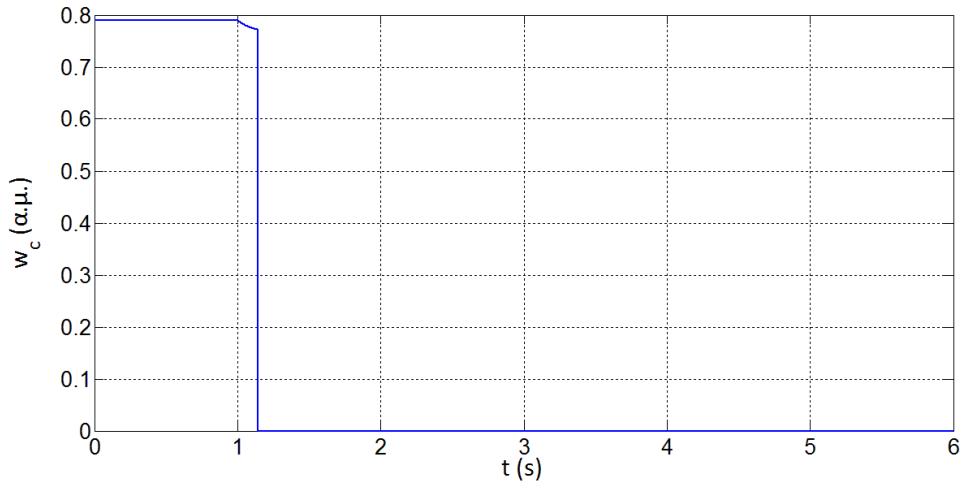
Το χρονικό διάστημα 1 s $< t < 1,14$ s όπου τα πτερύγια μεταβάλλουν το άνοιγμά τους, η εγγεόμενη ροή αέρα στο αεροφυλάκιο μειώνεται, όπως παρατηρούμε στο Σχήμα 7.42. Η ποσοστιαία μείωση της ροής αέρα είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη μείωση του ανοίγματος των πτερυγίων. Αυτό οφείλεται στο γεγονός πως η ροή του συμπιεστή είναι ανάλογη με την ταχύτητα περιστροφής του άξονα και κατ' επέκταση με την ηλεκτρική συχνότητα του συστήματος. Συμπερασματικά, η πτώση της συχνότητας οδηγεί σε μείωση της εγγεόμενης ροής αέρα στο αεροφυλάκιο, συνεισφέροντας κατ' αυτόν τον τρόπο στη μείωση της κατανάλωσης ισχύος του ανεξάρτητου συμπιεστή και ακολούθως στη βελτίωση της απόκρισης συχνότητας του συστήματος.

Μετά την αποσύνδεση της μονάδας GT-CAES από το δίκτυο, η ροή αέρα που εισέρχεται στο αεροφυλάκιο μηδενίζεται, καθώς ο συμπιεστής δεν απορροφά πλέον την απαιτούμενη ισχύ για την παροχή αέρα στην υψηλή πίεση του αεροφυλακίου. Ο μηδενισμός της ροής αέρα που δέχεται το αεροφυλάκιο επιτυγχάνεται με κατάλληλη βαλβίδα εκτάκτου ανάγκης, η οποία κλείνει άμεσα την $t = 1,14$ s για την αποφυγή της διαρροής πεπιεσμένου αέρα από το αεροφυλάκιο προς το περιβάλλον.

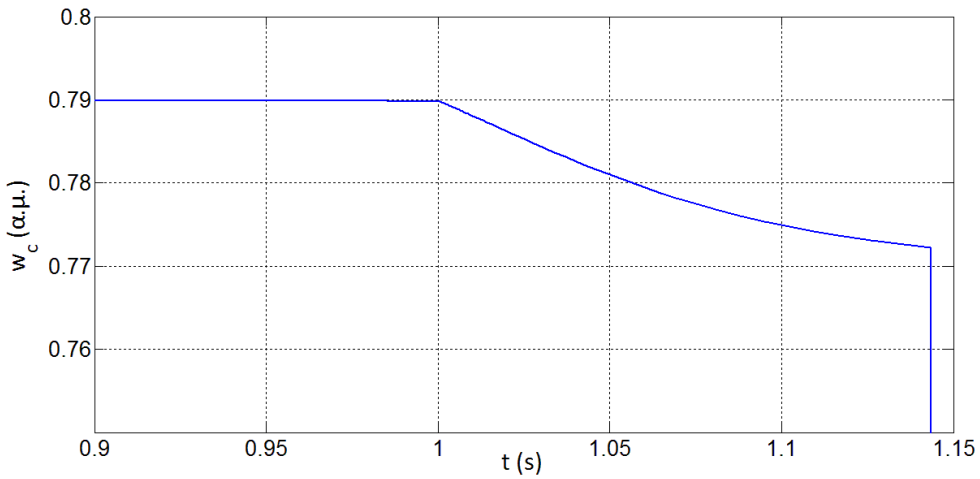


Σχήμα 7.41 : Ανά μονάδα τιμή του ανοίγματος των πτερυγίων του ανεξάρτητου συμπιεστή της μονάδας GT-CAES

Στο Σχήμα 7.43 φαίνεται η πίεση του αεροφυλακίου της μονάδας GT-CAES συναρτήσει του χρόνου προσομοίωσης. Το χρονικό διάστημα 0 s $< t < 1,14$ s όπου ο συμπιεστής συμπιέζει αέρα, η πίεση του αεροφυλακίου αυξάνει σταδιακά, λόγω της συσσώρευσης ολοένα και μεγαλύτερης μάζας αέρα στο εσωτερικό του. Ο ρυθμός αύξησης της πίεσης ωστόσο είναι μικρός, λόγω του μεγάλου μεγέθους του αεροφυλακίου που έχουμε θεωρήσει ($T_{cap} = 30.000$ s – Πίνακας 7.15). Την $t = 1,14$ s που η μονάδα GT-CAES τίθεται εκτός λειτουργίας, η πίεση του αεροφυλακίου σταθεροποιείται, δεδομένου ότι δεν εγγέεται πεπιεσμένος αέρας πλέον σε αυτό.

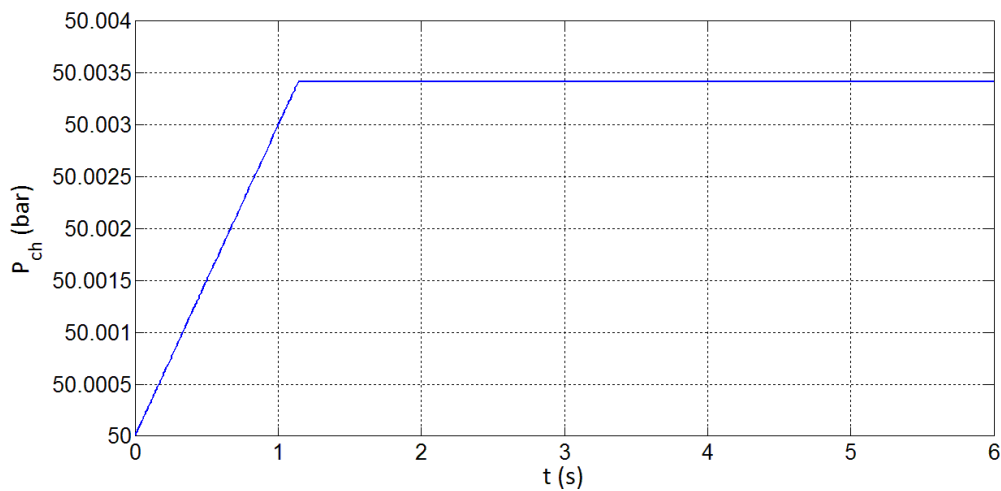


(α) Συνολικό χρονικό διάστημα προσομοίωσης



(β) Εστίαση στο χρονικό διάστημα $0,9 \text{ s} < t < 1,15 \text{ s}$

Σχήμα 7.42 : Ανά μονάδα εγγεόμενη ροή αέρα του ανεξάρτητου συμπιεστή της μονάδας GT-CAES στο αεροφυλάκιο



Σχήμα 7.43 : Πίεση αεροφυλακίου της μονάδας GT-CAES

7.4.3 Απόκριση του συστήματος της Ρόδου χωρίς αποθήκευση αιολικής ενέργειας

Στην παράγραφο αυτή εξετάζουμε την απόκριση του τροποποιημένου συστήματος της Ρόδου, στην περίπτωση που δεν αποθηκεύεται ηλεκτρική ενέργεια με τη μορφή πεπιεσμένου αέρα. Έτσι θεωρούμε ένα εναλλακτικό σενάριο παραγωγής (Σενάριο 4) όπου η μονάδα GT-CAES είναι εκτός λειτουργίας, με το σύνολο της αιολικής παραγωγής να εγχέεται στο ηλεκτρικό δίκτυο της Ρόδου. Όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 7.4.1, το όριο διείσδυσης της αιολικής ενέργειας φτάνει συνήθως μέχρι 40% στα σύγχρονα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Δεδομένης της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος των Α/Π που εμφανίζεται στον Πίνακα 7.22, στην περίπτωση όπου δεν αποθηκεύεται μέρος της αιολικής ενέργειας, το ποσοστό διείσδυσης είναι περίπου 72%, όπως προέκυψε από τη σχέση (7.5). Ως εκ τούτου, ο διαχειριστής του Σ.Η.Ε. είναι υποχρεωμένος να απορρίψει μέρος της αιολικής παραγωγής έτσι ώστε να ικανοποιούνται τα προκαθορισμένα όρια διείσδυσης. Θεωρώντας λοιπόν ως όριο διείσδυσης της αιολικής ισχύος το 40% (ως προς την καταναλισκόμενη ισχύ των φορτίων), στο Σενάριο 4 που εξετάζεται, η εγχεόμενη ηλεκτρική ισχύς των αιολικών πάρκων στο δίκτυο δίνεται στον Πίνακα 7.25.

Πίνακας 7.25 : Ισχύς Αιολικών Πάρκων – Σενάριο 4

| Σενάριο 4 | | | | |
|---------------|--------------------|----------------------------------|---------------------------------|------------------------------------|
| Α/Π | Ζυγός σύνδεσης Α/Π | Δυνατότητα παραγωγής ισχύος (MW) | Εγχεόμενη ισχύς στο δίκτυο (MW) | Απορριπτόμενη ηλεκτρική ισχύς (MW) |
| 4 | ΣΟΡ ΜΤ | 6,63 | 3,55 | 3,08 |
| 3 | ΑΦ (Α/Π3) | 3,00 | 1,59 | 1,41 |
| 1 | ΑΦ (Α/Π1) | 10,5 | 5,64 | 4,86 |
| 5 | ΓΕΝ (Α/Π5) | 5,5 | 2,94 | 2,56 |
| 2 | ΓΕΝ (Α/Π2) | 17,5 | 9,41 | 8,09 |
| Σύνολο | | 43,13 | 23,13 | 20 |

Όπως φαίνεται στον Πίνακα 7.25, από τα 43,13 MW που μπορούν να παράγουν τα αιολικά πάρκα, μόλις τα 23,13 MW εγχέονται στο δίκτυο. Το υπόλοιπο μέρος της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος (20 MW), το οποίο ταυτίζεται με την απορροφούμενη ισχύ του κινητήρα της μονάδας GT-CAES στο Σενάριο 3, απορρίπτεται. Η ισχύς που εγχέεται στο δίκτυο αντιστοιχεί στο 54% της συνολικής ισχύος που παράγεται από τα Α/Π. Σημειώνεται ότι η ποσοστιαία απόρριψη της ηλεκτρικής ισχύος θεωρείται η ίδια για το κάθε αιολικό πάρκο (46%).

Δεδομένου ότι οι καταναλώσεις των φορτίων διατηρούνται ίδιες με αυτές του Σεναρίου 3 (Πίνακας 7.23), το ποσοστό διείσδυσης της αιολικής παραγωγής στο Σενάριο 4, συνυπολογίζοντας την προαναφερθείσα απόρριψη αιολικής ισχύος, είναι :

$$\frac{\text{Εγχεόμενη ισχύς Α/Π στο δίκτυο}}{\text{Σύνολο κατανάλωσης φορτίων}} = \frac{23,13}{60,7} \approx 38\% \quad (7.8)$$

Έτσι, σύμφωνα με την (7.8), η διείσδυση της αιολικής ενέργειας στην ηλεκτροπαραγωγή ικανοποιεί πλέον το όριο διείσδυσης που υποτέθηκε.

Η συνολική αρχική παραγόμενη ισχύς των ατμοηλεκτρικών μονάδων διατηρείται ίδια με αυτή του Σεναρίου 3 (28,2 MW), καθώς και ο τύπος της διαταραχής (απώλεια ατμοηλεκτρικού σταθμού την $t = 1$ s).

Σύμφωνα με τα παραπάνω, η υπόλοιπη ισχύς που απαιτούν τα φορτία είναι $60,7 - 28,2 - 23,13 = 9,37$ MW, σε τιμές των τάσεων των ζυγών του Σεναρίου 3. Η ισχύς αυτή πρέπει να καλυφθεί από επιπλέον συμβατικές μονάδες παραγωγής. Εξετάζουμε λοιπόν την απόκριση συχνότητας του συστήματος της Ρόδου στην περίπτωση όπου εντάσσεται διαφορετικός αριθμός συμβατικών μονάδων, δεδομένης της αρχικής παραγωγής του ατμοηλεκτρικού σταθμού και της εγγεόμενης ισχύος των Α/Π στο δίκτυο.

Στον Πίνακα 7.26 παρατίθενται συνοπτικά τα δεδομένα των μονάδων που εντάσσονται στο σύστημα στην κάθε περίπτωση. Σημειώνεται ότι από τον Πίνακα 7.26 παραλείπεται η αναφορά στον ατμοηλεκτρικό σταθμό, καθότι είναι ενταγμένος στο σύστημα της Ρόδου σε όλες τις διαφορετικές περιπτώσεις που εξετάζονται. Η στήλη 'συνολική αρχική παραγωγή' του Πίνακα 7.26 αναφέρεται στην αρχική παραγωγή των συμβατικών μονάδων, εκτός του ατμοηλεκτρικού σταθμού, και αντιστοιχεί στην υπόλοιπη ισχύ που πρέπει να τροφοδοτήσουν στα φορτία του συστήματος. Τα ονομαστικά στοιχεία των μονάδων προέκυψαν από τον Πίνακα 7.7. Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι η μικρή διαφορά που εμφανίζεται στην αρχική παραγωγή των μονάδων στον Πίνακα 7.26 οφείλεται στην αρχική ροή φορτίου, όπου οι τάσεις των ζυγών του συστήματος στις περιπτώσεις Β και Γ είναι ελαφρώς υψηλότερες συγκριτικά με την περίπτωση Α, με αποτέλεσμα μεγαλύτερη καταναλισκόμενη ισχύ των φορτίων.

Πίνακας 7.26 : Ενταγμένες συμβατικές μονάδες παραγωγής στο σύστημα της Ρόδου - Σενάριο 4

| Περίπτωση | Ενταγμένες μονάδες (εκτός του ατμοηλεκτρικού σταθμού) | Συνολική Ονομαστική Ισχύς (MW) | Συνολική αρχική παραγωγή (MW) | Συνολική στρεφόμενη εφεδρεία (MW) |
|-----------|---|--------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|
| A | 4 Ντηζελογεννήτριες | 60 | 9,19 | 50,81 |
| B | 4 Ντηζελογεννήτριες, 1 Αεριοστροβιλική μονάδα | 87,5 | 10,02 | 77,48 |
| Γ | 6 Ντηζελογεννήτριες, 2 Αεριοστροβιλικές μονάδες | 145 | 10,02 | 134,98 |

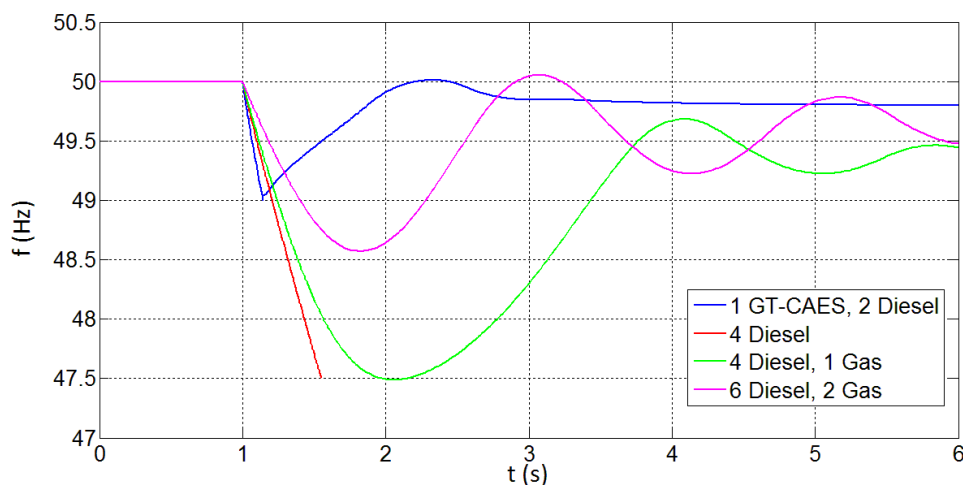
Στο Σχήμα 7.44 φαίνεται η απόκριση της ηλεκτρικής συχνότητας του συστήματος της Ρόδου, συναρτήσει του χρόνου προσομοίωσης, όταν είναι ενταγμένος διαφορετικός αριθμός συμβατικών μονάδων παραγωγής. Με μπλε γραμμή εμφανίζεται το γράφημα της συχνότητας στην περίπτωση της αποθήκευσης ενέργειας του Σεναρίου 3 που εξετάστηκε στην παράγραφο 7.4.2, για λόγους σύγκρισης. Όλες οι υπόλοιπες καμπύλες αντιστοιχούν στο Σενάριο 4 (Περιπτώσεις Α,Β,Γ), δηλαδή όταν δεν γίνεται αποθήκευση μέρους της αιολικής ισχύος, αλλά αυτή απορρίπτεται από το διαχειριστή του Σ.Η.Ε.

Με κόκκινη γραμμή (4 Diesel) παριστάνεται η συχνότητα του συστήματος της Ρόδου στην περίπτωση όπου είναι ενταγμένες 4 ντηζελογεννήτριες και ο ατμοηλεκτρικός σταθμός (Περίπτωση Α). Όπως παρατηρούμε από το Σχήμα 7.44, με την απώλεια των ατμοηλεκτρικών μονάδων την $t = 1$ s η συχνότητα αρχίζει να μειώνεται με πολύ μεγάλο ρυθμό, με αποτέλεσμα οι ντηζελογεννήτριες να μην μπορούν να τη συγκρατήσουν σε υψηλά επίπεδα. Δεδομένου ότι η ενεργοποίηση των ηλεκτρονόμων υποσυχνότητας λαμβάνει χώρα κάτω από τα 48,5 Hz, στην περίπτωση αυτή θα υπάρξουν αποκοπές φορτίων και υπάρχει πιθανότητα το σύστημα να καταστεί ασταθές. Είναι σημαντικό να αναφέρουμε ότι η

ονομαστική ισχύς και των 4 νηζελογεννητριών συνολικά είναι $4 \times 15 = 60$ MW (Πίνακας 7.26), με αποτέλεσμα για αρχική παραγωγή ισχύος 9,19 MW η συνολική στρεφόμενη εφεδρεία του νηζελοηλεκτρικού σταθμού να είναι 50,81 MW. Αντιλαμβανόμαστε λοιπόν ότι η στρεφόμενη εφεδρεία των νηζελογεννητριών υπερκαλύπτει την απώλεια του ατμοηλεκτρικού σταθμού ($50,81 \text{ MW} > 28,2 \text{ MW}$). Ωστόσο, λόγω της σοβαρότητας της διαταραχής, της αυξημένης αιολικής διεύθυνσης και της μικρής ικανότητας ανάληψης φορτίου των εναπομεινουσών μονάδων, η συχνότητα δεν μπορεί να διατηρηθεί σε επιτρεπτά επίπεδα.

Στην Περίπτωση Β (4 Diesel, 1 Gas) όπου σε συνδυασμό με τις 4 νηζελογεννήτριες, εντάσσεται και μια αεριοστροβιλική μονάδα στο δίκτυο, η απόκριση συχνότητας είναι βελτιωμένη συγκριτικά με την Περίπτωση Α. Η ελάχιστη τιμή της συχνότητας είναι 47,5 Hz όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.44, με αποτέλεσμα και σε αυτή την περίπτωση την ενεργοποίηση των ηλεκτρονόμων υποσυχνότητας. Ωστόσο, οι αποκοπές φορτίου που θα λάβουν χώρα θα είναι λιγότερες εν συγκρίσει με την περίπτωση Α, διότι η συχνότητα συγκρατείται σε υψηλότερες τιμές. Η συνολική στρεφόμενη εφεδρεία των εναπομεινουσών μονάδων παραγωγής στην Περίπτωση Β είναι 77,48 MW όπως παρατηρούμε από τον Πίνακα 7.26.

Τέλος εξετάζουμε την Περίπτωση Γ, όπου εντάσσονται στο σύστημα της Ρόδου 6 νηζελογεννήτριες και 2 αεριοστροβιλικές μονάδες συνολικά, σε συνδυασμό με τον υπάρχοντα ατμοηλεκτρικό σταθμό (6 Diesel, 2 Gas). Όπως παρατηρούμε από το Σχήμα 7.44, η ελάχιστη τιμή της συχνότητας είναι οριακά άνω των 48,5 Hz και συνεπώς δεν ενεργοποιούνται οι ηλεκτρονόμοι υποσυχνότητας. Κατ' αυτόν τον τρόπο αποφεύγονται οι αποκοπές φορτίων και το σύστημα παραμένει ευσταθές. Στην περίπτωση αυτή όμως, η συνολική στρεφόμενη εφεδρεία των μονάδων που είναι συνδεδεμένες στο ηλεκτρικό σύστημα της Ρόδου μετά την απώλεια του ατμοηλεκτρικού σταθμού είναι 134,98 MW, όπως φαίνεται από τον Πίνακα 7.26.



Σχήμα 7.44 : Απόκριση συχνότητας συστήματος της Ρόδου σε διαφορετικές αρχικές κατανομές παραγόμενης ισχύος

Συμπερασματικά, από τις Περιπτώσεις Α, Β, Γ που εξετάστηκαν, μόνο στην τελευταία περίπτωση αποφεύγονται οι αποκοπές φορτίων. Για να επιτευχθεί αυτό ωστόσο χρειάστηκαν 6 νηζελογεννήτριες και 2 αεριοστροβιλικές μονάδες να είναι ενταγμένες στο σύστημα, με συνολική ονομαστική ισχύ 145 MW (Πίνακας 7.26). Δεδομένου ότι το συνολικό φορτίο του συστήματος είναι μόλις 58,14 MW (για ονομαστικές τάσεις των ζυγών), αντιλαμβανόμαστε

ότι στην Περίπτωση Γ οι μονάδες παράγουν πολύ χαμηλότερα από την ονομαστική τους ισχύ (εκτός του ατμοηλεκτρικού σταθμού), με αποτέλεσμα η λειτουργία τους να είναι αντικοινομική. Επιπλέον, υπάρχει το ενδεχόμενο να μην μπορεί καν να υλοποιηθεί η Περίπτωση Γ, λόγω του περιορισμού του τεχνικού ελαχίστου των μονάδων που δεν εξετάστηκε ωστόσο εδώ. Τέλος, όπως φαίνεται από το Σχήμα 7.44, η συχνότητα του συστήματος της Ρόδου στην Περίπτωση Γ, παρότι δεν ξεπερνά την οριακή τιμή των 48,5 Hz, σημειώνει αποσβεννύμενες ταλαντώσεις σχετικά μεγάλου πλάτους και διάρκειας, καθυστερώντας την επίτευξη μόνιμης τιμής.

Αντίθετα, στην περίπτωση της αποθήκευσης ενός ποσοστού της αιολικής ενέργειας που εξετάστηκε στην παράγραφο 7.4.2, εκτός του ατμοηλεκτρικού σταθμού, στο σύστημα της Ρόδου είναι ενταγμένες μόλις 2 νηξελογεννήτριες και η μονάδα GT-CAES. Οι 2 νηξελογεννήτριες έχουν ονομαστική ισχύ συνολικά 30 MW, ενώ η αρχική παραγωγή ισχύος τους είναι 10,86 MW (Πίνακας 7.22). Συμπερασματικά, η στρεφόμενη εφεδρεία του νηξελοηλεκτρικού σταθμού είναι 19,14 MW. Ωστόσο, όπως αναφέρθηκε στο Σενάριο 3 της παραγράφου 7.4.2, 20 MW της αιολικής ισχύος καταλήγουν στον κινητήρα της μονάδας GT-CAES ο οποίος περιστρέφει τον αντίστοιχο ανεξάρτητο συμπιεστή, αποθηκεύοντας ενέργεια με τη μορφή πεπιεσμένου αέρα. Συνεπώς, υπάρχουν άλλα 20 MW στρεφόμενης εφεδρείας από τη μονάδα GT-CAES. Η δυνατότητα αποσύνδεσης του κινητήρα της μονάδας GT-CAES από το δίκτυο, είχε ως αποτέλεσμα την συγκράτηση της συχνότητας σε υψηλά επίπεδα αποφεύγοντας τις αποκοπές φορτίων.

Εξετάζοντας το Σχήμα 7.44 και συγκρίνοντας το Σενάριο 3 (1 GT-CAES, 2 Diesel) με την περίπτωση Γ του Σεναρίου 4 (6 Diesel, 2 Gas), ενώ και στις δύο περιπτώσεις αποφεύγονται οι αποκοπές φορτίων, στην περίπτωση της αποθήκευσης ενέργειας η συχνότητα συγκρατείται σε υψηλότερα επίπεδα (ελάχιστη τιμή 49 Hz) και επανέρχεται ταχύτερα στη μόνιμη τιμή της. Επιπλέον εκμεταλλεύεται το σύνολο της αιολικής παραγωγής, με το ποσοστό που δεν μπορεί να απορροφηθεί από το σύστημα να αποθηκεύεται με τη μορφή πεπιεσμένου αέρα, σε αντίθεση με την Περίπτωση Γ όπου μεγάλο μέρος της αιολικής ισχύος απορρίπτεται ώστε να τηρούνται τα προκαθορισμένα όρια διείσδυσης. Τέλος, στην Περίπτωση Γ, όπως αναφέρθηκε, υπάρχει ζήτημα αντικοινομικής λειτουργίας των μονάδων καθώς και ενδεχόμενος περιορισμός τεχνικού ελαχίστου.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, η αποθήκευση της αιολικής ενέργειας υπό μορφή πεπιεσμένου αέρα, πέρα από τα γνωστά θετικά αποτελέσματα για την χρήση και αποθήκευση των ανανεώσιμων μορφών ενέργειας που αναφέρονται εκτενώς στο Κεφάλαιο 1, ευνοεί σε μεγάλο βαθμό τη ρύθμιση συχνότητας και γενικότερα βελτιώνει τη μεταβατική απόκριση των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας σε περιπτώσεις σοβαρών διαταραχών.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8

Συμπεράσματα και προοπτικές

8.1 Ανασκόπηση διπλωματικής εργασίας

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκε η χρήση του πεπιεσμένου αέρα ως μέθοδος μεταβατικής ενίσχυσης της παραγωγής ισχύος σε αεριοστροβιλικές μονάδες και ως μέθοδος αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας για συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας με μεγάλη αιολική διείδυση.

Συγκεκριμένα, αναπτύχθηκε βελτιωμένο το μοντέλο [4] αεριοστροβίλου απλού άξονα, κατάλληλο για μελέτες ευστάθειας, στο οποίο ενσωματώθηκε ένα αεροφυλάκιο με στόχο τη μεταβατική έγχυση πεπιεσμένου αέρα στο θάλαμο καύσης της αεριοστροβιλικής μονάδας σε περιπτώσεις διαταραχών. Αφού περιγράφηκε το μοντέλο μέσω διαφορικών-αλγεβρικών εξισώσεων, διαγραμμάτων βαθμίδων και συναρτήσεων μεταφοράς, εξηγήθηκε ο τρόπος ελέγχου του αεριοστροβίλου και του αεροφυλακίου. Επίσης, προσομοιώθηκε το μοντέλο σε διαταραχές του ηλεκτρικού φορτίου (σε περιβάλλον Matlab-Simulink), θεωρώντας απομονωμένη λειτουργία γεννήτριας, όπου και έγιναν σαφή τα πλεονεκτήματα της χρήσης αεροφυλακίου στην απόκριση της αεριοστροβιλικής μονάδας.

Στη συνέχεια περιγράφηκε η μέθοδος αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας με πεπιεσμένο αέρα (μονάδες CAES) και παρατέθηκαν διάφορες παραλλαγές συστημάτων αποθήκευσης. Με βάση τη λογική των συστημάτων αυτών και χρησιμοποιώντας αντίστοιχα δεδομένα σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, αναπτύχθηκε ένα υβριδικό μοντέλο αποθήκευσης και παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με πεπιεσμένο αέρα (μονάδα GT-CAES). Το σύστημα GT-CAES περιγράφηκε μέσω αλγεβρικών και διαφορικών εξισώσεων, συναρτήσεων μεταφοράς και διαγραμμάτων βαθμίδων, και αναλύθηκε ο τρόπος ελέγχου του.

Τα δύο παραπάνω μοντέλα ενσωματώθηκαν στο αυτόνομο σύστημα της Ρόδου, το οποίο προσομοιώθηκε σε συνθήκες μεγάλης αιολικής διείδυσης, μελετώντας την απόκρισή του σε περίπτωση απώλειας ενός σταθμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Όπως προέκυψε από τις προσομοιώσεις, τόσο η αεριοστροβιλική μονάδα με αεροφυλάκιο όσο και η μονάδα GT-CAES βελτιώνουν τη μεταβατική απόκριση του συστήματος και συνεισφέρουν στη διατήρηση της ευστάθειας συχνότητας.

Στην ενότητα 8.2 αναφέρονται τα συμπεράσματα από την ανάπτυξη και προσομοίωση του μοντέλου αεριοστροβίλου απλού άξονα με αεροφυλάκιο και της μονάδας GT-CAES, ενώ στην ενότητα 8.3 συνοψίζονται οι προοπτικές για μελλοντική έρευνα στο συγκεκριμένο αντικείμενο μελέτης.

8.2 Συμπεράσματα

8.2.1 Αεριοστροβιλική μονάδα με ενσωματωμένο αεροφυλάκιο

Όπως εξάγεται από τις προσομοιώσεις του Κεφαλαίου 5, ένα αεροφυλάκιο περιορισμένης χωρητικότητας βελτιώνει σημαντικά την απόκριση μιας αεριοστροβιλικής μονάδας, με αποτελεσματικότερη ρύθμιση συχνότητας. Στο γεγονός αυτό συμβάλλει και ο τρόπος ελέγχου του αεροφυλακίου που αναπτύχθηκε στο Κεφάλαιο 4. Ο έλεγχος του αεροφυλακίου υλοποιήθηκε κατά τρόπο ώστε να τίθεται σε λειτουργία είτε όταν η ηλεκτρική ισχύς υπερβεί την ονομαστική της τιμή είτε όταν εμφανιστεί σημαντικός ρυθμός πτώσης συχνότητας. Η ρύθμιση της ροής αέρα που εγγέει το αεροφυλάκιο στο θάλαμο καύσης της αεριοστροβιλικής μονάδας γίνεται με κατάλληλη δικλείδα ελέγχου με μεταβλητό άνοιγμα, σύμφωνα με το ρυθμό μεταβολής της συχνότητας καθώς και με την απόκλιση της ισχύος και της θερμοκρασίας των καυσαερίων από τις ονομαστικές τους τιμές σε περίπτωση υπερφόρτισης.

Στην περίπτωση μόνιμης βηματικής αύξησης της ηλεκτρικής ισχύος της γεννήτριας κάτω από τα ονομαστικά επίπεδα, παρατηρήσαμε ότι η χρήση αεροφυλακίου επέτρεψε στην αεριοστροβιλική μονάδα να αποκριθεί ταχύτερα, οδηγώντας σε ελάττωση της μεταβατικής βύθισης συχνότητας. Επίσης, λόγω του ελέγχου του αεροφυλακίου, η συχνότητα αποκαθίσταται ομαλά στη μόνιμη τιμή της μετά την πάροδο της διαταραχής, και το αεροφυλάκιο απενεργοποιείται σταδιακά. Κατ' αυτόν τον τρόπο δεν εξαντλείται ο πεπιεσμένος αέρας που είναι αποθηκευμένος, αλλά εγγέεται τόση μάζα αέρα όση απαιτεί η αποκατάσταση της ισορροπίας. Συμπερασματικά, το αεροφυλάκιο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ξανά σε κάποια άλλη διαταραχή, χωρίς να χρειαστεί η συμπλήρωση αέρα σε αυτό.

Εκτός της υψηλότερης μεταβατικής τιμής της συχνότητας, φάνηκε ότι το αεροφυλάκιο μειώνει τις ταλαντώσεις που εμφανίζονται στη συχνότητα μετά τη διαταραχή, λειτουργώντας ως απόσβεση. Επιπλέον, η αυξημένη ροή αέρα που εισέρχεται στο θάλαμο καύσης λόγω του αεροφυλακίου, έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στην είσοδο του στροβίλου. Κατά συνέπεια, το γεγονός αυτό συνεπάγεται πως καθυστερεί η ενεργοποίηση του ελέγχου υπερθέρμανσης, δίνοντας τη δυνατότητα για έγχυση επιπλέον καυσίμου στο θάλαμο καύσης της αεριοστροβιλικής μονάδας, οδηγώντας σε υψηλότερη και μεγαλύτερης διάρκειας μεταβατική παραγόμενη μηχανική ισχύ. Συμπερασματικά, η μεγαλύτερη ισχύς που παράγει η αεριοστροβιλική μονάδα με τη χρήση αεροφυλακίου προέρχεται από το γεγονός πως εκτονώνεται μεγαλύτερη ροή αέρα στο στρόβιλο καθώς και λόγω του ότι χαλαρώνεται σε ένα βαθμό ο περιορισμός της έγχυσης καυσίμου που εισάγει ο έλεγχος υπερθέρμανσης.

Προσομοιώνοντας το σύστημα αεριοστρόβιλος-αεροφυλάκιο σε μεγάλη μεταβατική αύξηση του φορτίου πάνω από τα ονομαστικά επίπεδα, μικρής διάρκειας, παρατηρήθηκε ότι η ευστάθεια του συστήματος διατηρείται, εξαιτίας των λόγων που προαναφέρθηκαν. Είδαμε ότι η χρήση αεροφυλακίου επιτρέπει στην αεριοστροβιλική μονάδα να παράγει ισχύ άνω της ονομαστικής της τιμής για ένα πεπερασμένο χρονικό διάστημα, συγκρατώντας τη συχνότητα ακόμα και σε μεγάλες διαταραχές που υπερβαίνουν την ονομαστική ισχύ της μονάδας. Αυτό οφείλεται ως επί των πλείστων στην αμεσότητα της απόκρισης του αεροφυλακίου με την έγχυση πεπιεσμένου αέρα στο θάλαμο καύσης του αεριοστροβίλου, καθώς και στη δυνατότητα για έγχυση καυσίμου άνω της ονομαστικής ροής μεταβατικά. Η αυξημένη ροή καυσίμου επιτρέπεται σε ένα βαθμό με την ενσωμάτωση του αεροφυλακίου καθώς, λόγω του

γεγονότος πως η συνολική ροή αέρα που εκτονώνεται στο στρόβιλο είναι μεγαλύτερη, η θερμοκρασία ενεργοποίησης του ελέγχου υπερθέρμανσης προκύπτει σε μεγαλύτερες τιμές καυσίμου.

Χαρακτηριστικό είναι επίσης το γεγονός πως το αεροφυλάκιο προσφέρει δυνατότητα αυτορρύθμισης της παραγόμενης μηχανικής ισχύος του αεριοστροβίλου. Σε περιπτώσεις υποσυχνότητας είδαμε ότι η ροή αέρα του συμπιεστή ελαττώνεται. Αυτό συνεπάγεται τη μείωση της πίεσεως του θαλάμου καύσης, καθότι τα μεγέθη αυτά έχουν θεωρηθεί ανάλογα. Η πτώση της πίεσης του θαλάμου καύσης έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της διαφοράς πίεσης μεταξύ αεροφυλακίου και θαλάμου καύσεως. Δεδομένου επίσης ότι έχει θεωρηθεί στο Κεφάλαιο 4 πως η ροή του αεροφυλακίου που εγχέεται στο θάλαμο καύσης της αεριοστροβιλικής μονάδας είναι ανάλογη της διαφοράς πίεσεως μεταξύ των δύο διατάξεων, τελικά η πτώση της συχνότητας συνεπάγεται την αύξηση της ροής αέρα του αεροφυλακίου. Σύμφωνα με τα παραπάνω, η συνολική ροή αέρα που προκύπτει από το άθροισμα της ροής του συμπιεστή και του αεροφυλακίου, διατηρείται σε ικανοποιητικά επίπεδα και η λειτουργία του αεριοστροβίλου δεν επιδεινώνεται σημαντικά με την εμφάνιση υποσυχνότητας.

Αντίθετα, χωρίς αεροφυλάκιο η μόνη ροή αέρα που εκτονώνεται στο στρόβιλο είναι αυτή του συμπιεστή. Επομένως, σε περιπτώσεις υποσυχνότητας η ροή του συμπιεστή και κατ' επέκταση του στροβίλου ελαττώνεται κάτω από την ονομαστική της τιμή, με αποτέλεσμα κατά τη διάρκεια μεγάλων αυξήσεων του ηλεκτρικού φορτίου να ενεργοποιείται άμεσα ο έλεγχος υπερθέρμανσης, περιορίζοντας την έγχυση καυσίμου. Το γεγονός αυτό συνεπάγεται τον περιορισμό της παραγόμενης μηχανικής ισχύος, οδηγώντας στην περαιτέρω κάθοδο της συχνότητας. Αν το φορτίο δεν επανέλθει σύντομα σε επιτρεπτά επίπεδα, ο παραπάνω κύκλος επιδείνωσης της λειτουργίας του αεριοστροβίλου θα καταλήξει τελικά στην αποσύνδεσή του από το δίκτυο και στην αστάθεια του συστήματος. Όπως είδαμε λοιπόν, το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίζεται σε ένα βαθμό με τη χρήση αεροφυλακίου, καθιστώντας την αεριοστροβιλική μονάδα λιγότερο ευαίσθητη στις μεταβολές συχνότητας.

Στη συνέχεια του Κεφαλαίου 5 εξετάστηκε η απόκριση του συστήματος αεριοστροβίλος-αεροφυλάκιο σε μικρή μεταβατική αύξηση του φορτίου πάνω από τα ονομαστικά επίπεδα έως ότου εξαντληθεί ο αέρας που είναι συσσωρευμένος στο αεροφυλάκιο. Όπως παρατηρήθηκε, η συχνότητα του συστήματος διατηρείται πολύ κοντά στην ονομαστική της τιμή σε όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης. Ωστόσο, μειώνεται σταδιακά με έναν μικρό ρυθμό, λόγω του ότι μειώνεται η πίεση και η ροή αέρα του αεροφυλακίου με την πάροδο του χρόνου. Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι το αεροφυλάκιο, εκτός από διάταξη άμεσης παροχής ισχύος σε περιπτώσεις μεγάλων διαταραχών, δύναται να λειτουργεί και ως διάταξη παροχής εφεδρείας για ένα πεπερασμένο χρονικό διάστημα το οποίο είναι ανάλογο της χωρητικότητάς του.

Σε περιπτώσεις απώλειας κάποιου σταθμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας λόγω βλάβης, η ηλεκτρική ισχύς που παράγεται από τις υπόλοιπες γεννήτριες του συστήματος αυξάνεται απότομα. Αν η διαταραχή είναι μεγάλο μέγεθος και η στρεφόμενη εφεδρεία των υπόλοιπων μονάδων περιορισμένη, τότε υπάρχει ενδεχόμενο η ισχύς που καλούνται να εγχύσουν οι υπόλοιπες μονάδες μετά τη διαταραχή να είναι άνω της ονομαστικής τιμής. Στην περίπτωση αυτή μπορεί να δώσει λύση η ενσωμάτωση ενός αεροφυλακίου σε έναν αεριοστροβίλο, δίνοντας τη δυνατότητα παραγωγής ισχύος πάνω από τα ονομαστικά επίπεδα, όπως αναφέρθηκε. Έτσι, εάν η ενίσχυση της παραγωγής του αεριοστροβίλου μέσω του αεροφυλακίου καλύπτει το έλλειμμα στρεφόμενης εφεδρείας που εμφανίζεται στο σύστημα, τότε η συχνότητα δεν θα μειωθεί πολύ και θα διατηρηθεί η ευστάθεια του συστήματος. Λόγω του γεγονότος πως το αεροφυλάκιο για τις χρήσεις αυτές έχει γενικά μικρή χωρητικότητα, το διάστημα παροχής ισχύος από τον αεριοστροβίλο άνω της ονομαστικής τιμής είναι

περιορισμένο. Ωστόσο, όσο χρόνο τροφοδοτεί το αεροφυλάκιο το θάλαμο καύσης της αεριοστροβιλικής μονάδας με πεπιεσμένο αέρα, μπορεί να αρχίσει να ετοιμάζεται ένας ακόμη αεριοστροβίλος για να ενταχθεί στο ηλεκτρικό σύστημα. Δεδομένου ότι γενικά ο χρόνος εκκίνησης μιας αεριοστροβιλικής μονάδας είναι εν γένει μικρός, πριν την εξάντληση του αεροφυλακίου θα ενταχθεί στο ηλεκτρικό σύστημα η επιπλέον αεριοστροβιλική μονάδα που αναφέρθηκε. Έτσι, η επιπλέον ισχύς που τροφοδοτούσε το αεροφυλάκιο θα παρέχεται πλέον από τη νέα μονάδα, και το αεροφυλάκιο μπορεί να απενεργοποιηθεί. Σύμφωνα με την παραπάνω ανάλυση, καταλήγουμε ότι το αεροφυλάκιο, παρέχοντας στρεφόμενη εφεδρεία στο σύστημα, περιορισμένου μεγέθους και διάρκειας, συνεισφέρει στην αξιοπιστία και ευστάθεια του ηλεκτρικού συστήματος και βελτιώνει τη διαχείρισή του.

Τα πλεονεκτήματα που συνοδεύουν την ενσωμάτωση ενός αεροφυλακίου σε μια αεριοστροβιλική μονάδα έγιναν εμφανή και στο Κεφάλαιο 7, όπου εντάξαμε σε έναν αεριοστροβίλο του τροποποιημένου αυτόνομου συστήματος της Ρόδου ένα αεροφυλάκιο, ίδιο με αυτό που προσομοιώθηκε στο Κεφάλαιο 5. Προσομοιώνοντας το αυτόνομο σύστημα της Ρόδου, θεωρώντας απώλεια ενός σταθμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, έγινε φανερό ότι με τη χρήση αεροφυλακίου η ηλεκτρική συχνότητα του τροποποιημένου συστήματος της Ρόδου σημειώνει μικρότερη μεταβατική βύθιση και ταχύτερη αποκατάσταση στη μόνιμη τιμή της, συγκριτικά με την περίπτωση αεριοστροβίλου χωρίς αεροφυλάκιο. Επιπλέον, διαπιστώθηκε ότι αποφεύγονται οι αποκοπές φορτίων αν ενσωματωθεί το αεροφυλάκιο στην αεριοστροβιλική μονάδα, θεωρώντας ότι οι αποκοπές λαμβάνουν χώρα για συχνότητα κάτω από 48,5 Hz. Αντίθετα, στο ίδιο αρχικό σενάριο παραγωγής και στην ίδια διαταραχή, η συχνότητα του συστήματος μειώθηκε κάτω από το όριο αποκοπής φορτίων χωρίς το αεροφυλάκιο.

Η βελτιωμένη απόκριση συχνότητας του συστήματος της Ρόδου οφείλεται στην άμεση παροχή αέρα από το αεροφυλάκιο στο θάλαμο καύσης της αεριοστροβιλικής μονάδας με την εμφάνιση της διαταραχής. Συγκεκριμένα, το αεροφυλάκιο έδωσε τη δυνατότητα στην αεριοστροβιλική μονάδα να παράγει ισχύ άνω της ονομαστικής της τιμής σε όλο σχεδόν το χρονικό διάστημα της διαταραχής. Επιπλέον, τα πρώτα κρίσιμα δευτερόλεπτα της διαταραχής όπου η συχνότητα μειώνεται, με το αεροφυλάκιο η παραγόμενη μηχανική ισχύς του αεριοστροβίλου ανέρχεται ταχύτερα συγκριτικά με την περίπτωση χωρίς το αεροφυλάκιο. Συμπερασματικά, η ηλεκτρική συχνότητα του συστήματος συγκρατείται σε υψηλότερα επίπεδα λόγω του αυξημένου ρυθμού ανάληψης φορτίου καθώς και της μεγάλης σε μέγεθος και διάρκειας παραγωγής ισχύος του αεριοστροβίλου, με τη χρήση αεροφυλακίου. Στο γεγονός αυτό συνέβαλε και η καθυστέρηση ενεργοποίησης του ελέγχου υπερθέρμανσης, λόγω της αυξημένης ροής αέρα που εκτονώνεται στο στρόβιλο μετά τη διαταραχή, δίνοντας τη δυνατότητα για αυξημένη ροή καυσίμου στο θάλαμο καύσης της αεριοστροβιλικής μονάδας πάνω από την ονομαστική τιμή.

Τέλος, προσομοιώνοντας το σύστημα για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα παρατηρήθηκε ότι η πίεση του αεροφυλακίου ελαττώνεται με την πάροδο του χρόνου, διότι μειώνεται η αποθηκευμένη μάζα αέρα σε αυτό. Το γεγονός αυτό είχε ως αποτέλεσμα τη σταδιακή μείωση της ροής αέρα του αεροφυλακίου οδηγώντας στη σταδιακή ελάττωση της παραγόμενης μηχανικής ισχύος της αεριοστροβιλικής μονάδας. Ωστόσο, όπως φάνηκε στα αντίστοιχα σχήματα του Κεφαλαίου 7, δεν δημιουργείται πρόβλημα στη λειτουργία του συστήματος, καθότι η ισχύς του αεριοστροβίλου που μειώνεται υποκαθίσταται από ανάλογη αύξηση της παραγωγής των άλλων μονάδων που είναι ενταγμένες. Όταν η πίεση του αεροφυλακίου, με την πάροδο του χρόνου, φτάσει στο κατώτατο όριο λειτουργίας, τότε το αεροφυλάκιο τίθεται εκτός λειτουργίας και η παραγόμενη μηχανική ισχύς του αεριοστροβίλου μειώνεται απότομα. Όπως είδαμε ωστόσο, πάλι δεν υπάρχει πρόβλημα στη λειτουργία του συστήματος για τον

ίδιο λόγο με πριν. Δηλαδή η ισχύς που μέχρι πρότινος παρείχε το αεροφυλάκιο, μετά την απενεργοποίησή του καλύπτεται από την αύξηση της παραγωγής των υπόλοιπων συμβατικών μονάδων. Το μόνο αξιοσημείωτο μεταβατικό φαινόμενο που παρατηρήθηκε είναι η πτώση της συχνότητας τη στιγμή της αποσύνδεσης του αεροφυλακίου, η οποία ωστόσο είναι πολύ μικρού μεγέθους και δεν συνιστά ανησυχία. Μετά και την αποκοπή του αεροφυλακίου, είδαμε ότι η ισχύς του αεριοστροβίλου επανέρχεται κοντά στα ονομαστικά επίπεδα όπου και παραμένει, με την ηλεκτρική συχνότητα και τις ισχύς των υπόλοιπων μονάδων να σταθεροποιούνται στις μόνιμες τιμές τους. Κατά συνέπεια, η διαταραχή αντιμετωπίστηκε επιτυχώς και το σύστημα επανήλθε ομαλά στην μόνιμη κατάσταση, με το αεροφυλάκιο εκτός λειτουργίας.

8.2.2 Μονάδα παραγωγής και αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας με τη χρήση πεπιεσμένου αέρα

Όπως αναφέρθηκε, στο Κεφάλαιο 6 αναπτύχθηκε ένα υβριδικό μοντέλο παραγωγής και αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας υπό μορφή πεπιεσμένου αέρα (μονάδα GT-CAES), βασιζόμενοι σε χαρακτηριστικά και παραλλαγές συστημάτων που παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 3. Το μοντέλο αυτό ενσωματώθηκε στο αυτόνομο σύστημα της Ρόδου στο Κεφάλαιο 7, προκειμένου να εξετάσουμε την απόκριση του συστήματος σε συνθήκες μεγάλης αιολικής διεύθυνσης. Έτσι, αρχικά προσομοιώσαμε το αυτόνομο σύστημα της Ρόδου με τη μονάδα GT-CAES να παράγει ηλεκτρική ενέργεια και στη συνέχεια να αποθηκεύει. Ως διαταραχή επιλέχθηκε πάλι η απώλεια ενός σταθμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας λόγω βλάβης.

Σε κατάσταση παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, για το δεδομένο αρχικό σενάριο που εμφανίστηκε στην ενότητα 7.3, η συχνότητα του συστήματος συγκρατείται σε υψηλότερα επίπεδα από το όριο αποκοπής φορτίων, με αποτέλεσμα οι αποκοπές να αποφεύγονται. Στη συνέχεια προσομοιώθηκε το σύστημα της Ρόδου στο ίδιο σενάριο παραγωγής, όπου αντί της μονάδας GT-CAES εντάσσεται μια συμβατική αεριοστροβιλική μονάδα, για λόγους σύγκρισης. Εξετάζοντας τις αποκρίσεις συχνότητας στις δύο παραπάνω περιπτώσεις προέκυψε ότι είναι παρόμοιες, με διαφορά ότι στην περίπτωση της μονάδας GT-CAES η μεταβατική βύθιση της συχνότητας είναι ελαφρώς μικρότερη. Το γεγονός αυτό συνεπάγεται πως η μονάδα GT-CAES, σε κατάσταση παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, έχει παρόμοια και ελαφρώς καλύτερη συμπεριφορά από μια συμβατική αεριοστροβιλική μονάδα, παρότι η λειτουργία της περιλαμβάνει αρκετά μικρότερη ποσότητα καυσίμου. Συμπερασματικά, καταλήγουμε ότι τα ευεργετικά οφέλη της ένταξης μιας μονάδας GT-CAES σε αυτόνομο σύστημα είναι πολλά, όπως σημαντικός ρυθμός ανάληψης φορτίου, μεγάλη ικανότητα ρύθμισης φορτίου-συχνότητας, μειωμένο καύσιμο που συνεπάγεται χαμηλές εκπομπές CO₂ και χαμηλό λειτουργικό κόστος.

Ακολούθως, προσομοιώθηκε το τροποποιημένο σύστημα της Ρόδου σε ένα εναλλακτικό αρχικό σενάριο, όπου η μονάδα GT-CAES αποθηκεύει ηλεκτρική ενέργεια μέσω του κινητήρα που είναι συνδεδεμένος στο δίκτυο, ο οποίος απορροφά ηλεκτρική ισχύ και περιστρέφει το συμπιεστή. Έτσι παρέχεται η αναγκαία μηχανική ισχύς που απαιτεί ο συμπιεστής, εγχέοντας αέρα στο αεροφυλάκιο της μονάδας. Στο συγκεκριμένο σενάριο θεωρήθηκε υψηλή διεύθυνση αιολικής ενέργειας, και μια μεγάλη διαταραχή (σημαντική απώλεια παραγωγής λόγω αποσύνδεσης ενός σταθμού μια δεδομένη χρονική στιγμή).

Σύμφωνα με τον τρόπο ελέγχου της μονάδας GT-CAES που αναπτύχθηκε στο Κεφάλαιο 6, ο συμπιεστής έχει δυνατότητα μεταβολής της καταναλισκόμενης ισχύος του μέσω της ρύθμισης του ανοίγματος των πτερυγίων εισόδου. Επιπλέον, υλοποιήθηκε ένας ελεγκτής ο οποίος σε περιπτώσεις μεγάλης υποσυχνότητας θέτει τον κινητήρα της μονάδας GT-CAES εκτός δικτύου.

Όπως παρατηρήσαμε από την προσομοίωση του τροποποιημένου συστήματος της Ρόδου στο Κεφάλαιο 7, λόγω της απώλειας του συμβατικού σταθμού παραγωγής, εμφανίζεται μεγάλος ρυθμός πτώσης της συχνότητας. Η συχνότητα, επειδή δεν μπορούν να τη συγκρατήσουν οι εναπομείνουσες μονάδες, φτάνει στο όριο αποκοπής του κινητήρα με αποτέλεσμα να τίθεται εκτός δικτύου. Το γεγονός αυτό οδηγεί στην μείωση της συνολικά καταναλισκόμενης ισχύος του συστήματος, με αποτέλεσμα η ηλεκτρική συχνότητα να αρχίσει να ανέρχεται. Κατ' αυτόν τον τρόπο αποφεύγονται οι αποκοπές φορτίων και το σύστημα παραμένει ευσταθές, παρά το μεγάλο μέγεθος της διαταραχής και της υψηλής αιολικής διεύθυνσης.

Τέλος, για λόγους σύγκρισης προσομοιώθηκε το αυτόνομο σύστημα της Ρόδου στο ίδιο αρχικό σενάριο και στην ίδια διαταραχή, με τη μονάδα GT-CAES να είναι εκτός λειτουργίας. Το μέρος της αιολικής ισχύος που κατανάλωνε ο κινητήρας της μονάδας θεωρήθηκε ότι απορρίπτεται, έτσι ώστε να τηρούνται τα προκαθορισμένα όρια αιολικής διεύθυνσης. Αντί της μονάδας GT-CAES θεωρήσαμε τρεις διαφορετικές περιπτώσεις, όπου στην κάθε μία εντάσσεται και διαφορετικός αριθμός συμβατικών μονάδων στο σύστημα της Ρόδου. Όπως φάνηκε, για να αποφευχθούν οι αποκοπές φορτίων απαιτείται να λειτουργούν πολύ περισσότερες μονάδες απ' όσες είναι αναγκαίο, και μάλιστα με συνολική ονομαστική ισχύ περίπου τρεις φορές της αρχικής κατανάλωσης των φορτίων.

Συνεπώς, με τη μονάδα GT-CAES σε συνθήκες αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας, το σύνολο της αιολικής ισχύος μπορεί να απορροφηθεί, ενώ υπάρχει παράλληλα βελτιωμένη μεταβατική απόκριση του συστήματος σε περιπτώσεις διαταραχών και αποδοτικότερη λειτουργία στη μόνιμη κατάσταση.

8.3 Προοπτικές για περαιτέρω έρευνα

Η παρούσα διπλωματική εργασία είχε ως κύριο θέμα τη μεταβατική απόκριση ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας σε διαταραχές του φορτίου ή της παραγωγής, με τη χρήση πεπιεσμένου αέρα είτε για ρύθμιση φορτίου-συχνότητας (μεταβατική ενίσχυση της παραγωγής των αεριοστροβίλων σε περιπτώσεις διαταραχών) είτε ως μέθοδος αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας.

8.3.1 Αεριοστροβιλική μονάδα με ενσωματωμένο αεροφυλάκιο

Αντικείμενο μελλοντικής ερευνητικής μελέτης μπορεί να αποτελέσει μια οικονομική ανάλυση της επίδρασης της ένταξης ενός αεροφυλακίου σε αεριοστροβιλική μονάδα. Συγκεκριμένα, το κόστος της ενσωμάτωσης ενός αεροφυλακίου σε μια αεριοστροβιλική μονάδα αποτελείται από το κόστος αγοράς που εξαρτάται από το μέγεθος και το εύρος της πίεσης λειτουργίας του αεροφυλακίου, από το κόστος της μετατροπής του αεριοστροβίλου

και από τα κόστη εγκατάστασης και αγοράς βοηθητικού εξοπλισμού. Αντίθετα, τα κέρδη από τη χρήση του αεροφυλακίου προέρχονται από την επιπλέον στρεφόμενη εφεδρεία που παρέχεται στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας, από την μεγαλύτερη ικανότητα ανάληψης φορτίου του αεριοστροβίλου καθώς και από την οικονομικότερη λειτουργία του, δεδομένου ότι με ενεργό το αεροφυλάκιο το καύσιμο που απαιτείται είναι μικρότερο. Συνοψίζοντας, μια πιθανή προοπτική είναι να σταθμιστούν τα κέρδη και κόστη που συνεπάγεται η ενσωμάτωση του αεροφυλακίου σε μια αεριοστροβιλική μονάδα και να αναδειχθούν τα οικονομικά οφέλη που τη συνοδεύουν.

Επίσης, μια πιθανή βελτίωση του μοντέλου μπορεί να επέλθει με την ακριβέστερη παράσταση του αεριοστροβίλου και του αεροφυλακίου. Για τον αεριοστροβίλο μπορούν να χρησιμοποιηθούν look-up-tables που συσχετίζουν τη ροή αέρα, την πίεση και ταχύτητα περιστροφής καθώς και αντίστοιχοι χάρτες (compressor maps, turbine maps) που περιγράφουν επακριβώς τη λειτουργία του. Το αεροφυλάκιο και η επίδρασή του στην αεριοστροβιλική μονάδα μπορούν να μοντελοποιηθούν πιστότερα χρησιμοποιώντας ακριβείς σχέσεις που ορίζει η θεωρία των αερίων.

8.3.2 Μονάδα παραγωγής και αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας με τη χρήση πεπιεσμένου αέρα

Ένα θέμα προς μελλοντική διερεύνηση αναφορικά με το μοντέλο της μονάδας GT-CAES που αναπτύχθηκε στο Κεφάλαιο 6 είναι ο ακριβέστερος τρόπος μοντελοποίησης της λειτουργίας της δικλείδας ελέγχου της ροής αέρα που εξέρχεται από το αεροφυλάκιο και εκτονώνεται στον ανεξάρτητο στροβίλο της μονάδας. Στην παρούσα διπλωματική εργασία έγινε η παραδοχή ότι η δικλείδα υποβιβάζει την πίεση του αεροφυλακίου στα επίπεδα που ορίζει ο ρυθμιστής στροφών της μονάδας για την πίεση εισόδου του στροβίλου (throttling control). Επιπλέον θεωρήθηκε ότι η ροή αέρα και η πίεση εισόδου του στροβίλου είναι μεγέθη ανάλογα. Συμπερασματικά, καθορίζοντας την πίεση εισόδου του στροβίλου μέσω του μεταβλητού ανοίγματος της δικλείδας αέρα προκύπτει και η ροή αέρα που εκτονώνεται σε αυτόν. Σύμφωνα με τα παραπάνω, αγνοούνται τα μεταβατικά φαινόμενα που σχετίζονται με τη λειτουργία της δικλείδας αέρα. Υπάρχει λοιπόν ενδιαφέρον για κάποια μελλοντική μελέτη να διερευνηθεί ένας πληρέστερος τρόπος μοντελοποίησης της δικλείδας, ώστε να περιγράφεται σύμφωνα με τη διαφορά πίεσης που υφίσταται στα άκρα της. Για το σκοπό αυτό χρήζει βελτίωσης και το μοντέλο του ανεξάρτητου στροβίλου, το οποίο μπορεί να περιγραφεί είτε με τη χρήση look-up-tables είτε με την εφαρμογή χαρτών λειτουργίας (air motor maps).

Όπως είδαμε στο Κεφάλαιο 7 που προσομοιώθηκε το τροποποιημένο σύστημα της Ρόδου με ενταγμένη τη μονάδα GT-CAES σε κατάσταση αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας, η δυνατότητα ρύθμισης του ανοίγματος των πτερυγίων του ανεξάρτητου συμπιεστή και κατ' επέκταση της καταναλισκόμενης ισχύος του σε περιπτώσεις διαταραχών συχνότητας είναι περιορισμένη, λόγω του μικρού μέγιστου ρυθμού μεταβολής του ανοίγματος των πτερυγίων. Ο ρυθμός αυτός προέκυψε από πραγματικά δεδομένα ενός σύγχρονου συστήματος CAES [54]. Ένα θέμα προς διερεύνηση στο μέλλον συνεπώς είναι αν υπάρχει δυνατότητα αύξησης του ρυθμού μεταβολής των πτερυγίων του ανεξάρτητου συμπιεστή. Επίσης, ενδιαφέρον θα είχε να εξευρεθούν και άλλοι τρόποι άμεσης μείωσης της κατανάλωσης ισχύος της μονάδας GT-CAES σε περιπτώσεις υποσυχνότητας, όπως π.χ. με τη χρήση ηλεκτρονικών ισχύος. Τέλος, μπορεί να αναπτυχθεί ένα σύστημα CAES όπου θα

υπάρχουν περισσότεροι και μικρότερης ισχύος συμπιεστές και κινητήρες. Έτσι, σύμφωνα με τη λογική αποκοπής του κινητήρα που αναπτύχθηκε στο Κεφάλαιο 6, σε περιπτώσεις υποσυχνότητας θα υπάρχει μεγαλύτερη δυνατότητα και εύρος απόρριψης ισχύος, καθότι ανάλογα με το σφάλμα συχνότητας θα τίθεται εκτός δικτύου και ο κατάλληλος αριθμός κινητήρων. Αντίθετα, στο σύστημα που αναπτύξαμε θεωρήθηκε η ύπαρξη ενός μόνο κινητήρα και συμπιεστή, με αποτέλεσμα η απόρριψη ισχύος που δύναται να επέλθει σε περιπτώσεις υποσυχνότητας να ταυτίζεται με την κατανάλωση του κινητήρα εκείνη τη χρονική στιγμή.

Τέλος, ενδιαφέρον θα είχε να προσομοιωθεί το τροποποιημένο σύστημα της Ρόδου ή κάποιο άλλο αυτόνομο σύστημα, στο οποίο εντάσσεται η μονάδα GT-CAES, για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα. Για τους σκοπούς αυτούς μπορούν να χρησιμοποιηθούν πραγματικές χρονοσειρές ανέμου και φορτίου, ώστε να μελετηθεί η απόκριση της μονάδας GT-CAES και γενικότερα του ηλεκτρικού συστήματος στις μεταβολές της κατανάλωσης των φορτίων και της αιολικής παραγωγής. Έτσι μπορούν να αναδειχθούν τα θετικά στοιχεία της αποθήκευσης ενέργειας σε περιπτώσεις μεγάλης αιολικής διεύδυσης και της επιστροφής της στο δίκτυο σε συνθήκες αιχμής του φορτίου. Στην ίδια λογική, μπορεί να εκπονηθεί μια μελέτη αναφορικά με τα κέρδη που συνεπάγεται η αποθήκευση ενέργειας λόγω της μείωσης του καυσίμου των υπόλοιπων συμβατικών μονάδων, από την παροχή επικουρικών υπηρεσιών στο δίκτυο, και από την πώληση ηλεκτρικής ενέργειας στις αιχμές του φορτίου όπου οι τιμές είναι υψηλές. Σταθμίζοντας τα παραπάνω κέρδη με τα κόστη που συνεπάγεται η εγκατάσταση της μονάδας CAES και η αγορά ενέργειας σε συνθήκες αποθήκευσης, μπορεί να υπολογιστούν οικονομικά μεγέθη όπως η καθαρή παρούσα αξία της επένδυσης και η έντοκη περίοδος αποπληρωμής.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] I. Kandiloros, C. Ziras, C. Voumas, “Gas Turbine Stability Improvement through a Compressed-Air Chamber”, Medpower Conference 2012.
- [2] Κ. Βουρνάς, Β. Κ. Παπαδιάς, Κ. Ντελκίς, “Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας - Έλεγχος και Ευστάθεια Συστήματος”, Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα 2011.
- [3] Κ. Βουρνάς, Γ. Κονταξής, “Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας”, Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα 2010.
- [4] Χ. Γ. Ζήρας, “Ανάπτυξη Μοντέλων Αεριοστροβίλων για Μελέτες Ευστάθειας ΣΗΕ”, Διπλωματική εργασία, Αθήνα 2009.
- [5] Γ. Τσουράκης, “Συμβολή της Αιολικής Διείσδυσης στην Ευστάθεια των Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας”, Διδακτορική διατριβή, Αθήνα 2010.
- [6] W. I. Rowen, “Simplified Mathematical Representations of Heavy Duty Gas Turbines”, Transactions ASME, vol. 105, pp.865-869, Oct 1983.
- [7] N. Kakimoto, K. Baba, “Performance of Gas Turbine-Based Plants During Frequency Drops”, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 18, No 3, August 2003.
- [8] Κ. Ντελκίς, “Σημειώσεις Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας”, ΕΜΠ.
- [9] H Cohen, GFC Rogers, HIH Saravanamuttoo, “Gas Turbine Theory” 4th edition, 1995.
- [10] US Patent : 6519944 B2, 18/2/2003, “Method of generating a transient plant power boost in a gas turbine apparatus”, Available from:
<http://www.patentgenius.com/patent/6519944.html>.
- [11] Ι. Κ. Μάντζαρης, “Ανάλυση δυναμικής συμπεριφοράς σταθμού συνδυασμένου κύκλου”, Διπλωματική εργασία, Αθήνα 2005.
- [12] Κ. Μαθιουδάκης, “Λειτουργία αεριοστροβίλων και ατμοστροβίλων”, ΕΜΠ, Αθήνα 1997.
- [13] P. Kundur, “Power System Stability and Control”, McGraw-Hill, New York, 1994.
- [14] Γ. Φ. Δανιήλ, “Κινητήριες Μηχανές ΙΙ”, Ίδρυμα Ευγενίδου, Αθήνα 1989.
- [15] Central Electricity Generating Board, “Modern Power Station Practice – Mechanical (Turbines and Auxiliary Equipment)”, Pergamon Press, 1971.
- [16] Α. Πολυζάκης, “Λειτουργία Αεριοστροβίλων και Παραγωγή Ενέργειας – Προώθηση (Θεωρία)”, Power Heat Cool, Αθήνα, 2012.
- [17] Δ. Α. Κουρεμένος, “Θερμοδυναμική Ι”, Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα 1991.

- [18] Ε. Γ. Ποταμιανάκης, “Προσομοίωση και Γραμμικοποίηση Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας για την Ανάλυση Βραχυπρόθεσμης Ευστάθειας Τάσης”, Διδακτορική διατριβή, ΕΜΠ, Αθήνα 2006.
- [19] Κ. Δ. Παπαηλιού, “Περίληπτικές Σημειώσεις του Μαθήματος Θερμικών Στροβιλομηχανών Ι”, ΕΜΠ, Αθήνα 1989.
- [20] Μ. Π. Παπαδόπουλος, “ Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας από Ανανεώσιμες Πηγές”, ΕΜΠ, Αθήνα 1997.
- [21] Μ. Π. Παπαδόπουλος, “Δίκτυα Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας”, ΕΜΠ, Αθήνα 1994.
- [22] Σ. Παπαθανασίου, “Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας – Σημειώσεις Παραδόσεων”, ΕΜΠ, Αθήνα 2008.
- [23] RWE Power AG, “Adele – Adiabatic Compressed–Air Energy Storage for Electricity Supply”, Cologne 2010.
- [24] Arizona Research Institute for Solar Energy, “Study of Compressed Air Energy Storage with Grid and Photovoltaic Energy Generation”, Draft Final Report, University of Arizona, August 2010.
- [25] R. Gay, S. van der Linden “Power Augmentation using Air Injection, an Alternative solution to Peak Power Demands – using the large installed base of existing GT&CC power plants”, Electric Power Conference, 2007.
- [26] N. M. Jubeh, Y. S. H. Najjar, “Power augmentation with CAES (compressed air energy storage) by air injection or supercharging makes environment greener”, Energy, The International Journal, vol.38, pp. 228-235, 2012.
- [27] Y. S. H. Najjar, M. S. Zaamout, “Performance Analysis of Compressed Air Energy Storage (CAES) Plant for Dry Regions”, Energy Convers. Mgmt Vol. 39, No. 15, pp. 1503-1511, 1998.
- [28] J. Rutqvist, H. M. Kim, D. W. Ryu, J. H. Synn, W. K. Song, “Modeling of coupled thermodynamic and geomechanical performance of underground compressed air energy storage in lined rock caverns”, International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 52 (2012), 71–81.
- [29] Meherwan P. Boyce, “Axial-Flow Compressors - Gas Turbine Engineering Handbook”, Second Edition, Butterworth-Heinemann 2003.
- [30] Η. Σ. Ψιμούλη, “Ανάλυση ευστάθειας αυτόνομου συστήματος με αεριοστρόβιλους και αιολική παραγωγή”, Διπλωματική εργασία, ΕΜΠ, Αθήνα 2007.

- [31] R. B. Schainker, M. Nakhmkin, P. Kulkarni, T. Key, "New Utility Scale CAES Technology: Performance and Benefits (Including CO₂ Benefits)", EPRI Paper on CAES Technology, online: http://www.energystorageandpower.com/pdf/epri_paper.pdf.
- [32] V. Fthenakis, "Compressed Air Energy Storage (CAES) - Scoping Workshop", Center for Energy & Life Cycle Analysis, Earth and Environmental Engineering, Columbia University, New York 2008.
- [33] J. Taylor, A. Haines, "Analysis of Compressed Air Energy Storage", PCIC Europe 2010 Conference, 15-17 June 2010, Dublin, Ireland.
- [34] H. Daneshi, A.K. Srivastava, A. Daneshi, "Generation Scheduling with Integration of Wind Power and Compressed Air Energy Storage", Proceedings of the Transmission and Distribution Conference and Exposition, April 2010, New Orleans, USA.
- [35] A. Daneshi, N. Sadrmomtazi, H. Daneshi, M. Khederzadeh, "Wind Power Integrated with Compressed Air Energy Storage", 2010 IEEE International Conference on Power and Energy (PECon2010), Nov. 2010, Kuala Lumpur, Malaysia.
- [36] M. M. Chowdhury, M. E. Haque, M. Aktarujjaman, M. Negnevitsky, A. Gargoom, "Grid Integration Impacts and Energy Storage Systems for Wind Energy Applications-A Review", IEEE PES General Meeting, July 2011, Detroit, USA.
- [37] E. Lerch, "Storage of Fluctuating Wind Energy", European Conference on Power Electronics and Applications, Sept. 2007.
- [38] S. Lemofouet, A. Rufer, "A Hybrid Energy Storage System Based on Compressed Air and Supercapacitors with Maximum Efficiency Point Tracking (MEPT)", IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 53, No. 4, August 2006.
- [39] M. Raju, S. K. Khaitan, "Modeling and simulation of compressed air storage in caverns: A case study of the Huntorf plant", Applied Energy 89 (2012), pp: 474–481.
- [40] I. Arsie, V. Marano, G. Nappi, G. Rizzo, "A Model of a Hybrid Power Plant with Wind Turbines and Compressed Air Energy Storage", Proceedings of PWR2005, ASME Power, Chicago, April 2005.
- [41] S. Succar, R. H. Williams, "Compressed Air Energy Storage: Theory, Resources, and Applications for Wind Power", Princeton Environmental Institute, Carbon Mitigation Initiative, Princeton University, April 2008.
- [42] EPRI-DOE, "Handbook of Energy Storage for Transmission & Distribution Applications", EPRI, Palo Alto, CA, and the U.S. Department of Energy, Washington, DC: 2003.
- [43] S. van der Linden, "Wind Power: Integrating Wind Turbine Generators (WTG's) with Energy Storage", Wind Power, S. M. Muyeen (Ed.), INTECH, June 2010, Available from: <http://www.intechopen.com/books/wind-power/wind-power-integrating-wind-turbine-generators-wtg-s-with-energy-storage>.

- [44] Ι. Γ. Σφακιανάκης, “Οργάνωση βιβλιοθήκης μοντέλων για προσομοίωση συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας με αυξημένη αιολική διεύθυνση και σχεδίαση αδρανειακού ελεγκτή ανεμογεννητριών σε αυτόνομο σύστημα”, Διπλωματική εργασία, ΕΜΠ, Αθήνα 2012.
- [45] Ο. Ντένα, Π. Σαρρή, “Έλεγχος Στρεφόμενης Αποθήκης Ενέργειας”, Διπλωματική εργασία, ΑΠΘ, Θεσσαλονίκη 2011.
- [46] New York State Electric and Gas (NYSEG), Customized Energy Solutions Ltd, EPRI, AWS Truewind, “Compressed Air Energy Storage Engineering and Economic Study”, Final Report, December 2009.
- [47] Ι. Ψαράς, “Διαχείριση Ενέργειας και Περιβαλλοντική Πολιτική”, Διαλέξεις μαθήματος, ΕΜΠ.
- [48] Fred Conroy, “Dresser-Rand Smart CAES”, United States Chamber of Commerce, Special Event, September 2011.
- [49] S. Kemblea, G. Manfridab, A. Milazzoc, F. Buffa, “Thermoeconomics of a ground based CAES plant for peak-load energy production system”, proceedings of ECOS 2012, Perugia, Italy, June 2012.
- [50] S. S. Bhamble, “Steam Turbines”, Shri Sant Gajanan Maharaj College of Engineering, Shegaon.
- [51] C.D. Vournas, E.G. Potamianakis, C. Moors, T. Van Cutsem, “An educational simulation tool for power system control and stability”, IEEE Trans. Power Syst., vol. 19, no. 1, pp. 48-55, February 2004.
- [52] Ι. Δ. Μάργαρης, “Μοντελοποίηση ανεμογεννητριών για τη μελέτη δυναμικών φαινομένων σε συνθήκες αυξημένης αιολικής διεύθυνσης”, Διδακτορική διατριβή, ΕΜΠ, Αθήνα, Ιούλιος 2011.
- [53] Β. Ι. Στυλιανός, “Ανάλυση, μοντελοποίηση και έλεγχος ανεμογεννήτριας διπλής τροφοδότησης στάτη και δρομέα (Doubly-Fed Induction Generator)”, Διπλωματική εργασία, ΑΠΘ, Θεσσαλονίκη, Ιούλιος 2010.
- [54] Dresser-Rand, “Compressed Air Energy Storage (CAES)”, informational brochure, USA, 2010.
- [55] Ν. Γ. Σακελλαρίδης, “Τοπικές – Υπερτοπικές Διακλαδώσεις Συνδιάστασης 1 έως 3 σε μικρό Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας”, Διπλωματική εργασία, Αθήνα, Οκτώβρης 2003.
- [56] Α. Κ. Μέτσιου, “Προστασία από αστάθεια τάσεως με αντίστροφο έλεγχο μετασχηματιστών μεταβλητής λήψης”, Διπλωματική εργασία, Αθήνα, Οκτώβρης 2003.
- [57] IEEE/CIGRE, “Definition and classification of power system stability”, Joint Task Force on Stability terms and Definitions, August, 2002.

[58] J. Mantzaris, C. D. Vournas, "Modeling and Stability of a Single-Shaft Combined Cycle Power Plant", *Int. J. of Thermodynamics*, Vol. 10 (No. 2), pp. 71-78, June 2007.