



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

**Οργάνωση βιβλιοθήκης μοντέλων για προσομοίωση ΣΗΕ με
αιολική διείδυση και σχεδίαση αδρανειακού ελεγκτή
ανεμογεννητριών σε αυτόνομο σύστημα**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ιωάννης Γ. Σφακιανάκης

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

Αθήνα, Απρίλιος 2012



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

**Οργάνωση βιβλιοθήκης μοντέλων για προσομοίωση ΣΗΕ με
αιολική διείδυση και σχεδίαση αδρανειακού ελεγκτή
ανεμογεννητριών σε αυτόνομο σύστημα**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ιωάννης Γ. Σφακιανάκης

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

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 30η Απριλίου 2012.

.....
Κ.Βουρνάς
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Γ. Κορρές
Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Π. Γεωργιλάκης
Λέκτορας Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Απρίλιος 2012

.....

Ιωάννης Γ. Σφακιανάκης

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Ιωάννης Γ. Σφακιανάκης, 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

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η οργάνωση βιβλιοθήκης μοντέλων και εγχειριδίου χρήσης για το λογισμικό πακέτο προσομοίωσης WHSSP (Wind-Hybrid System Simulation Package). Το εκπαιδευτικό πρόγραμμα WHSSP αναπτύχθηκε σε περιβάλλον MATLAB/Simulink στο εργαστήριο Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας του ΕΜΠ και θεωρείται κατάλληλο για δυναμικές προσομοιώσεις και μελέτες ευστάθειας διασυνδεδεμένων ή αυτόνομων δικτύων, στα οποία έχουν διεισδύσει μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής και ειδικότερα αιολικά πάρκα. Στην εργασία αυτή επιχειρείται η συστηματική καταγραφή των μοντέλων του WHSSP που έχουν ήδη αναπτυχθεί σε παλιότερες εργασίες ή αναπτύχθηκαν στα πλαίσια της παρούσας. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στα μοντέλα ανεμογεννητριών μεταβλητών στροφών για τα οποία σχεδιάστηκε αδρανειακός ελεγκτής με βάση ένα πραγματικό αυτόνομο σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που προσομοιώθηκε.

Προκειμένου να μελετηθεί η συμπεριφορά των υπό μελέτη διατάξεων αλλά και του αυτόνομου συστήματος πραγματοποιούνται προσομοιώσεις σε περιβάλλον MATLAB/Simulink. Η κάθε διάταξη περιγράφεται από το αντίστοιχο μοντέλο που σχεδιάστηκε στο περιβάλλον του Simulink για τις μελέτες ευστάθειας, όπως αυτό παρουσιάζεται στη βιβλιοθήκη. Τα φορτία στους διάφορους ζυγούς θεωρούνται φορτία αγωγιμότητας εκτός από τον κινητήρα επαγωγής και τα δυναμικά αυτορυθμιζόμενα φορτία για τα οποία χρησιμοποιούνται τα αντίστοιχα μοντέλα της βιβλιοθήκης.

Στο κομμάτι της εργασίας που μελετάται η συμπεριφορά των ανεμογεννητριών μεταβλητών στροφών έλαβαν χώρα μια σειρά από δοκιμές. Έτσι προς εξαγωγή συμπερασμάτων διεξήχθησαν συγκριτικές δοκιμές με το επαγγελματικό πρόγραμμα PSS/E σε ένα ακτινικό σύστημα σύνδεσης αιολικού πάρκου σε άπειρος ζυγό. Επίσης έγινε σύγκριση με ένα λεπτομερές ηλεκτρομαγνητικό μοντέλο που αναπαριστά ένα αιολικό πάρκο αποτελούμενο από ανεμογεννήτριες διπλής τροφοδότησης.

Στη συνέχεια προσομοιώθηκε το αυτόνομο ηλεκτρικό σύστημα της Ρόδου, όπου έγινε ανάλυση δύο ενδεικτικών σεναρίων λειτουργίας για τη μελέτη της συμπεριφοράς του δικτύου και ιδιαίτερα της συχνότητας αυτού. Το ένα αφορά την περίπτωση μέγιστης παραγωγής από αιολικά πάρκα και το άλλο την περίπτωση μέγιστης αιολικής διείσδυσης ως ποσοστό επί του φορτίου του νησιού. Και στις δύο περιπτώσεις θεωρήθηκε ως διαταραχή του συστήματος η απώλεια μιας συμβατικής μονάδας παραγωγής. Επιπροσθέτως έγινε χρήση της ανάλυσης ιδιοτιμών και ιδιοδιανυσμάτων του γραμμικοποιημένου συστήματος ώστε να μελετηθούν οι κρίσιμοι ρυθμοί απόκρισης που επηρεάζουν τη συμπεριφορά του.

Στο πρώτο σενάριο λειτουργίας μελετάται κυρίως η επίδραση του ελέγχου τερματικής τάσης στις Α/Γ μεταβλητών στροφών στη διαμόρφωση της συχνότητας του συστήματος. Στο δεύτερο μελετούνται τρόποι αποφυγής ενεργοποίησης των ηλεκτρονόμων αποκοπής φορτίου λόγω υποσυχνότητας. Για το λόγο αυτό προτείνεται μία εναλλακτική κατανομή της παραγωγής από συμβατικές μονάδες. Τέλος σε χωριστό κεφάλαιο γίνεται η ανάλυση του σχεδιασμού κατάλληλου αδρανειακού ελεγκτή στις Α/Γ μεταβλητών στροφών προς βελτίωση της απόκρισης της συχνότητας του συστήματος κατά τη μεταβατική βύθιση λόγω απώλειας παραγωγής.

Λέξεις Κλειδιά

Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας, MATLAB/Simulink, αιολικά πάρκα, ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών, ασύγχρονη γεννήτρια διπλής τροφοδότησης, ανεμογεννήτρια με πλήρη μετατροπέα, αδιάλειπτη λειτουργία υπό χαμηλή τάση, έλεγχος τερματικής τάσης, ρύθμιση συχνότητας, αυτόνομο σύστημα, αδρανειακός ελεγκτής

Abstract

The subject of this diploma thesis is the organization of a library of models and user manual for the simulation software tool WHSSP (Wind-Hybrid System Simulation Package). The educational software tool WHSSP was developed in the environment of MATLAB/Simulink in the Electrical Energy Systems Laboratory of NTUA and is considered suitable for dynamic simulations and stability studies of interconnected or autonomous networks, with penetration of dispersed generation and especially wind farms. In this thesis the systematic recording of WHSSP models that have already been developed in older projects or were developed in the present thesis is carried out. Particular emphasis is given to the models of variable speed wind generators, for which an inertial controller was designed and applied to a real autonomous power system that was simulated.

In order to study the behavior of the studied units and the autonomous system simulations are carried out in the environment of MATLAB/Simulink. Each unit is described by the corresponding model that was designed in the environment of Simulink for stability studies. These units are presented in the model library that was developed. The loads of the system are considered as constant impedances except for the induction motor and the dynamically restorative loads, for which the corresponding models from the library are used.

In the part of this thesis, where the behavior of variable speed wind generators is studied, various tests took place. Thus, in order to draw conclusions, comparative tests were carried out with the professional program PSS/E in a radial network of a wind park connected to an infinite bus. A comparison test with a detailed electromagnetic model, which represents a wind park with doubly-fed wind generators, was also carried out.

Afterwards the autonomous power system of the island of Rhodes was simulated, where analysis of two indicative operation scenarios was conducted studying the behavior of the network and particularly of system frequency. The first scenario concerns the case of maximum generated power from wind farms and the second one corresponds to the case of maximum wind penetration as percentage of the total load of the island. In both cases, the loss of a conventional generating unit was considered as the critical disturbance. In addition, the analysis of eigenvalues and eigenvectors of the linearized system was used, in order to study the main modes of response that influence its behavior.

What is mainly studied in the first operation scenario is the effect of the terminal voltage control of variable speed wind turbines on the system frequency regulation. In the second scenario, we study techniques to avoid the activation of underfrequency load shedding relays. For this reason, an alternative generation dispatch between conventional units is proposed. Finally, in a separate chapter, the analysis of designing a suitable inertial controller for the variable speed wind generators is conducted, in order to improve the system frequency response during the transient dip due to generation loss.

Keywords

Power-Systems, MATLAB/Simulink, wind farms, variable speed wind turbines, Doubly-Fed Asynchronous Generator, Full Converter wind generator, Low Voltage Ride Through, Terminal Voltage Control, frequency regulation, autonomous system, wind inertia controller

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να εκφράσω την ιδιαίτερη ευγνωμοσύνη μου προς τον επιβλέποντα καθηγητή της διπλωματικής μου εργασίας κ. Κωνσταντίνο Βουρνά για την πολύπλευρη και ουσιαστική καθοδήγηση που μου παρείχε καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας. Θα ήθελα ακόμα να τον ευχαριστήσω για τις πολύτιμες γνώσεις που μου προσέφερε κατά τη συνεργασία μας και για την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπό μου. Κυρίως όμως τον ευχαριστώ για τη δυνατότητα που μου πρόσφερε να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον αντικείμενο και για την γόνιμη επιμονή του για το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον υποψήφιο διδάκτορα κ. Γιώργο Τσουράκη για τη συνεχή στήριξη που μου παρείχε και για την εν γένει καταλυτική του συνεισφορά στην άρτια εκπόνηση της παρούσας εργασίας.

Τέλος, ευχαριστώ τους γονείς μου και τη Μαίρη για την αγάπη τους και την αμέριστη συμπαράστασή τους στην προσπάθεια μου.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	15
1.1 Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας.....	15
1.2 Αιολική ενέργεια και ηλεκτροπαραγωγή.....	16
1.3 Τεχνικά Χαρακτηριστικά ανεμογεννητριών.....	17
1.4 Αδιάλειπτη λειτουργία σε συνθήκες βύθισης τάσης (Low Voltage Ride Through).....	20
1.5 Ευστάθεια ΣΗΕ.....	22
1.6 Μη Γραμμικά Συστήματα – Γραμμικοποίηση.....	24
1.6.1 Σημεία ισορροπίας – Γραμμικοποίηση – Ανάλυση Ιδιοτιμών.....	24
1.6.2 Ιδιοδιανύσματα – Συντελεστές Συμμετοχής.....	28
1.6.3 Φαινόμενα συντονισμού.....	29
1.7 Ρύθμιση Συχνότητας – Αυτόνομα Συστήματα με αυξημένη αιολική διείσδυση.....	30
1.7.1 Γενικά περί ρύθμισης συχνότητας.....	30
1.7.2 Ρύθμιση συχνότητας σε αυτόνομο σύστημα – Απλοποιημένο μοντέλο αυτόνομου ΣΗΕ.....	32
1.7.3 Ρύθμιση συχνότητας σε αυτόνομο σύστημα με αυξημένη αιολική διείσδυση.....	35
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 Περιγραφή περιβάλλοντος προσομοίωσης.....	39
2.1 Υπολογιστικό περιβάλλον WHSSP.....	39
2.1.1 Γενικά.....	39
2.1.2 Αλγεβρικές εξισώσεις του δικτύου.....	41
2.1.3 Εξισώσεις διαφορών (Σύστημα Αλλαγής Τάσης Υπό Φορτίο).....	46
2.2 Γενική δομή μοντέλων στο Simulink.....	47
2.2.1 Δομή διατάξεων ΣΗΕ.....	47
2.2.2 Δομή μοντέλου επίλυσης των εξισώσεων του δικτύου.....	47
2.3 Μέθοδοι επίλυσης αλγεβρικών εξισώσεων του δικτύου.....	48
2.3.1 Επίλυση με τη χρήση αλγεβρικού βρόχου (ή ρουτίνας fsolve).....	48
2.3.2 Επίλυση χωρίς τη χρήση αλγεβρικού βρόχου όταν απουσιάζουν τα μη γραμμικά φορτία.....	51
2.3.3 Επίλυση στην περίπτωση ύπαρξης μη γραμμικών εξισώσεων μέσω επαναληπτικών μεθόδων.....	53
2.3.4 Εναλλακτική μέθοδος προσεγγιστικής προσομοίωσης μη γραμμικών φορτίων.....	56
2.4 Ενημέρωση πίνακα αγωγιμοτήτων κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης.....	57
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 Οργάνωση βιβλιοθήκης συνιστωσών ΣΗΕ (εκτός ανεμογεννητριών).....	59
3.1 Οργάνωση βιβλιοθήκης.....	59
3.1.1 Γενικά.....	59
3.1.2 Πέρασμα παραμέτρων και αρχικοποίηση μοντέλων.....	60
3.2 Μοντέλα συνιστωσών ΣΗΕ.....	63

3.2.1 Σύγχρονη Γεννήτρια.....	64
3.2.2 Τριφασική Μηχανή Επαγωγής.....	66
3.2.3 Μοντέλα Αυτόματων Ρυθμιστών Τάσης (APT).....	68
3.2.4 Μοντέλα στροβίλων και Ρυθμιστών στροφών	72
3.2.5 ΣΑΥΤΦ και Δυναμικά Αυτορυθμιζόμενα Φορτία	77

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 Οργάνωση βιβλιοθήκης μοντέλων ανεμογεννητριών.....81

4.1 Γενικά.....	81
4.2 Ανεμογεννήτρια σταθερών στροφών με μηχανή επαγωγής βραχυκυκλωμένου δρομέα (Τύπος Α).....	81
4.3 Ανεμογεννήτρια μεταβλητών στροφών με ασύγχρονη γεννήτρια διπλής τροφοδότησης και σύστημα μετατροπών ισχύος συνδεδεμένων στο δρομέα (Τύπος Γ).....	88
4.3.1 Μοντέλο ΑΓΔΤ1 (DFAG1).....	97
4.3.2 Περιορισμός ενεργού ρεύματος σε βυθίσεις τάσης – Low Voltage Power Logic (LVPL) – Μοντέλο ΑΓΔΤ2 (DFAG2).....	99
4.4 Ανεμογεννήτρια μεταβλητών στροφών με πλήρη μετατροπέα ισχύος (Τύπος Δ).....	99
4.4.1 Μοντέλο Ανεμογεννήτριας με πλήρη μετατροπέα (FCWG1).....	107
4.4.2 Εναλλακτικό Μοντέλο Ανεμογεννήτριας τύπου Δ (FCWT2).....	110
4.5 Σύγκριση του μοντέλου DFAG1 με ένα λεπτομερές ηλεκτρομαγνητικό μοντέλο (Wind Farm – DFIG Average Model).....	110
4.5.1 Σκοπός σύγκρισης – περιγραφή μοντέλου μέσης τιμής (Average).....	113
4.5.2 Διεξαγωγή σύγκρισης και σχολιασμός αποτελεσμάτων.....	117
4.6 Προσομοίωση στο PSS/E και επαλήθευση μοντέλων Simulink	117
4.6.1 Σύγκριση με PSSE για το μοντέλο DFAG2.....	117
4.6.2 Σύγκριση με PSSE για το μοντέλο FCWT2.....	119

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 Προσομοίωση του αυτόνομου συστήματος της Ρόδου στο περιβάλλον του WHSSP.....123

5.1 Γενικά.....	123
5.2 Περιγραφή αυτόνομου συστήματος της Ρόδου και σεναρίων λειτουργίας.....	124
5.3 Ανάλυση Σεναρίου Α – Μέγιστη αιολική παραγωγή.....	136
5.3.1 Προσομοίωση Συστήματος – Σχολιασμός αποτελεσμάτων.....	136
5.3.2 Ανάλυση ρυθμών (ιδιοτιμές- ιδιοδιανύσματα-συντελεστές συμμετοχής).....	142
5.4 Ανάλυση Σεναρίου Β – Μέγιστη αιολική διείδυση.....	148
5.4.1 Προσομοίωση Συστήματος – Σχολιασμός αποτελεσμάτων.....	148
5.4.2 Ανάλυση ρυθμών (ιδιοτιμές- -συντελεστές συμμετοχής).....	151
5.4.3 Εναλλακτική κατανομή της παραγωγής από συμβατικές μονάδες.....	152

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 Σχεδίαση ελεγκτή αδρανειακής απόκρισης στα Α/Π του συστήματος της Ρόδου.....157

6.1 Γενικά περί εξομοιωτή αδρανείας – ελεγκτή αδρανειακής απόκρισης.....	157
6.2 Σχεδίαση ελεγκτή αδρανειακής απόκρισης στις Α/Γ μεταβλητών στροφών της Ρόδου.....	159
6.2.1 Μοντέλο ελεγκτή αδρανειακής απόκρισης.....	159
6.2.2 Σχεδιασμός ελεγκτή αδρανειακής απόκρισης για τις ασύγχρονες γεννήτριες διπλής τροφοδότησης.....	161

6.2.3 Σχεδιασμός ελεγκτή αδρανειακής απόκρισης για τις ανεμογεννήτριες με πλήρη μετατροπέα.....	173
6.2.4 Προσομοίωση Σεναρίου Β με ενεργοποιημένο αδρανειακό ελεγκτή σε όλες τις Α/Γ μεταβλητών στροφών.....	181
6.2.5 Ενεργοποίηση αδρανειακού ελεγκτή με ενεργό τον έλεγχο γωνίας βήματος των πτερυγίων.....	183
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 Συμπεράσματα-Προοπτικές.....	187
7.1 Συμπεράσματα.....	187
7.2 Μελλοντικές Προοπτικές.....	188
Βιβλιογραφία.....	191
Παράρτημα Α.....	193
Παράρτημα Β.....	199
Παράρτημα Γ.....	205
Παράρτημα Δ.....	209

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Εισαγωγή

1.1 Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

Η γενικευμένη χρήση ηλεκτρικής ενέργειας αποτελεί βασική ανάγκη του σύγχρονου πολιτισμού και ταυτόχρονα καθοριστικό παράγοντα για την κοινωνική και οικονομική ανάπτυξη μιας χώρας. Τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας (ΣΗΕ) αποτελούν το σύνολο των εγκαταστάσεων και των μέσων τα οποία χρησιμεύουν στην ικανοποίηση αυτής της ανάγκης. Έτσι ένα ΣΗΕ είναι υπεύθυνο για την παραγωγή, τη μεταφορά και τη διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας στις τοποθεσίες κατανάλωσής της. Η ενέργεια αυτή θα πρέπει να ικανοποιεί τις ολοένα αυξανόμενες ανάγκες ζήτησης των καταναλωτών, τηρώντας παράλληλα κάποιες προδιαγραφές ποιότητας όσον αφορά την τάση τη συχνότητα και την αξιοπιστία. Επίσης η παροχή της θα πρέπει να γίνεται με γνώμονα τον περιορισμό κατά το δυνατόν του οικονομικού αλλά και οικολογικού κόστους.

Η ηλεκτρική ενέργεια παράγεται από τη μετατροπή μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική μέσω των γεννητριών. Στις μέρες μας, η μηχανική αυτή ενέργεια, εξακολουθεί να παράγεται ως επί το πλείστον από τις λεγόμενες συμβατικές μονάδες παραγωγής μέσω της καύσης ορυκτών καυσίμων (άνθρακες, πετρέλαια). Ωστόσο τα τελευταία χρόνια παρατηρείται έντονη στροφή στην παραγωγή που προέρχεται από τις λεγόμενες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ). Οι ολοένα αυξανόμενες ενεργειακές ανάγκες και η λογική της αιεφόρου ανάπτυξης συνετέλεσαν στο να γίνει κοινή συνείδηση η ανάγκη αποτελεσματικότερης αξιοποίησης των προσφερόμενων από τη φύση ενεργειακών πόρων. 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 διαπιστωμένα στην έξαρση 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). Αύξηση της συγκέντρωσης των αερίων αυτών, (με κυριότερο το CO_2) έχει ως συνέπεια την δημιουργία και διατήρηση του λεγομένου φαινομένου του θερμοκηπίου. Ως γνωστόν 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 προ 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. Έγινε έτσι επιτακτικότερη η ανάγκη για την εκμετάλλευση εναλλακτικών πηγών ενέργειας, λιγότερο επιζήμιων προς το περιβάλλον, αλλά και για την εξεύρεση τρόπων εξοικονόμησης ενέργειας. Ταυτόχρονα η απελευθέρωση των αγορών ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία λαμβάνει χώρα στις περισσότερες ανεπτυγμένες χώρες έδωσε νέα ώθηση στην επένδυση από ανεξάρτητους παραγωγούς στον τομέα των ανανεώσιμων πηγών 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 είδη των ΑΠΕ είναι τα ακόλουθα [23]:

- Αιολική Ενέργεια
- Ηλιακή ενέργεια
- Υδροηλεκτρική Ενέργεια

- Ενέργεια από Βιομάζα
- Γεωθερμική Ενέργεια
- Ενέργεια από θαλάσσια κύματα

Παρά τα τεράστια βήματα προόδου που έχουν γίνει από τα μέσα του προηγούμενου αιώνα στην εκμετάλλευση αυτών των μορφών ενέργειας, 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.

1.1 Αιολική ενέργεια και ηλεκτροπαραγωγή

Περιβαλλοντικοί, τεχνολογικοί, οικονομικοί και πολιτικοί παράγοντες έχουν οδηγήσει στη ραγδαία ανάπτυξη της αιολικής ενέργειας για ηλεκτροπαραγωγή τα τελευταία χρόνια. Χαρακτηριστικό είναι ότι το 2007 εγκαταστάθηκαν 20 GW παγκοσμίως, ενώ η Ευρώπη παραμένει πρωτοπόρος με 61% της παγκόσμιας εγκατεστημένης ισχύος. Η ραγδαία αυτή ανάπτυξη έχει ως αποτέλεσμα να σημειώνονται όλο και υψηλότερα επίπεδα διείσδυσης σε αρκετά Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ). Στη Δανία περίπου 20% της ηλεκτρικής ενέργειας προέρχεται από την αιολική ενέργεια και στη Γερμανία 7%. Στην Ισπανία και την Πορτογαλία, συστήματα με περιορισμένη διασύνδεση με την υπόλοιπη Ευρώπη, το αντίστοιχο ποσοστό είναι 11%. Η Ιρλανδία, ένα αυτόνομο σύστημα, παράγει το 9% της ηλεκτρικής της ενέργειας από αιολικά. Στην Ελλάδα, μέχρι σήμερα, υψηλά ποσοστά αιολικής διείσδυσης έχουν σημειωθεί στα αυτόνομα νησιωτικά συστήματα, όπως της Κρήτης (περίπου 14% της ηλεκτρικής ενέργειας το 2010).

Όπως κάθε πηγή ενέργειας, η αιολική ενέργεια έχει ιδιαίτερα χαρακτηριστικά και η υψηλή συμμετοχή της στα ΣΗΕ επιφέρει αλλαγές στη συμπεριφορά των δικτύων. Έτσι εγείρονται διάφορα θέματα, από τον σχεδιασμό ανάπτυξης ενός ΣΗΕ έως την οικονομική κατανομή και την εκτίμηση δυναμικής ασφάλειας. Βασικό χαρακτηριστικό της αιολικής παραγωγής είναι η μη αποθήκευση της πρωτογενούς ενέργειας. Λόγω αυτού οι ανεμογεννήτριες αντικαθιστούν περισσότερο ενέργεια και λιγότερο εγκατεστημένη ισχύ. Βασικά και προφανή οφέλη τους είναι η μείωση της κατανάλωσης καυσίμων και των αντίστοιχων εκπεμπόμενων ρύπων. Σημαντική ιδιαιτερότητα των ανεμογεννητριών είναι επίσης η χρήση διαφορετικών συστημάτων ηλεκτρομηχανικής μετατροπής ενέργειας σε σχέση με τις σύγχρονες γεννήτριες των συμβατικών μονάδων παραγωγής, των οποίων τα χαρακτηριστικά και η συμπεριφορά έχει μελετηθεί επί δεκαετίες.

Η συνεχώς αυξανόμενη αιολική διείσδυση στα ΣΗΕ συνεπάγεται και την ανάγκη για συνεχή βελτίωση των μοντέλων αναπαράστασης των αιολικών πάρκων στα πλαίσια των μελετών ευστάθειας αλλά και ασφάλειας των συστημάτων. Και αυτό γιατί έχει παρατηρηθεί πως η επίδραση της αιολικής παραγωγής στην ασφάλεια και τη λειτουργία των ΣΗΕ δεν είναι μία στατική, μονόδρομη διαδικασία αλλά δυναμική και αμφίδρομη.

Χαρακτηριστικό είναι ότι κατά τα πρώτα χρόνια ανάπτυξης της αιολικής ενέργειας, οι ανεμογεννήτριες αντιμετωπίζονταν καθαρά σαν “αρνητικά φορτία”. Έτσι δεν συμμετείχαν καθόλου σε επικουρικές υπηρεσίες προς το δίκτυο και είχαν τις ίδιες υποχρεώσεις με τους καταναλωτές. Αυτές αφορούσαν κυρίως σε ζητήματα ποιότητας ισχύος στο δίκτυο διανομής όπου συνδέονταν (π.χ. αρμονικές, αντιστάθμιση αέργου ισχύος). Στη συνέχεια, η αύξηση της αιολικής ισχύς τόσο σε συνολικό επίπεδο όσο και σε επιμέρους αιολικά πάρκα έκανε αισθητή την επίδρασή της στα συστήματα μεταφοράς. Έτσι ξεκίνησε μια διαδικασία αλληλεπίδρασης μεταξύ των ΣΗΕ και των κατασκευαστών των ανεμογεννητριών. Από τη μία υπάρχουν οι διάφοροι κανονισμοί που εκδίδουν

οι διαχειριστές του δικτύου σχετικά με τις προδιαγραφές λειτουργίας των αιολικών πάρκων και από την άλλη η εξέλιξη των μοντέλων των κατασκευαστών ώστε να ανταποκρίνονται καλύτερα στις προδιαγραφές αυτές.

Έτσι παλιότερα σε περίπτωση εμφάνισης βραχυκυκλώματος οι ανεμογεννήτριες δεν ήταν υποχρεωμένες να παραμένουν συνδεδεμένες στο δίκτυο και αποσυνδέονταν προς προστασία του εξοπλισμού τους. Δεδομένης και της συνεχώς αυξανόμενης αιολικής διείσδυσης έγινε φανερό ότι το γεγονός αυτό έθετε περιορισμό στη στιγμιαία αιολική διείσδυση, αφού ένα βραχυκύκλωμα μπορούσε να προκαλέσει την ξαφνική απώλεια τεράστιας ποσότητας ισχύος. Για το λόγο αυτό από το 2000 περίπου εμφανίστηκαν οι πρώτοι κανονισμοί που επέβαλαν ορισμένες υποχρεώσεις στα αιολικά πάρκα που συνδέονται στο σύστημα μεταφοράς. Μια βασική υποχρέωση αποτελεί και η αδιάλειπτη λειτουργία σε βυθίσεις τάσης ή αδιάλειπτη λειτουργία σε σφάλμα (Low Voltage Ride-Through ή Fault Ride Through), γεγονός που οδήγησε τους κατασκευαστές ανεμογεννητριών στην ανάπτυξη της κατάλληλης τεχνολογίας. Μέχρι πρόσφατα, αυτοί οι κώδικες εφαρμόζονταν σε χώρες με πιο ισχυρά δίκτυα και υψηλή αιολική διείσδυση. Όμως η νέα φιλοσοφία των καινούριων κανόνων είναι χρήσιμη και σε ασθενή δίκτυα, όπου τα αιολικά πάρκα μπορούν να συμβάλλουν στη βελτίωση της ευστάθειας του δικτύου. Έτσι τα αιολικά πάρκα τείνουν να αντιμετωπίζονται πλέον περισσότερο σαν συμβατικοί σταθμοί παραγωγής παρά ως “αρνητικά φορτία” που αντιμετωπιζόταν παλιότερα.

Τα βασικά ζητούμενα από τους κώδικες δικτύων σχετικά με τη σύνδεση αιολικών πάρκων στο σύστημα είναι:

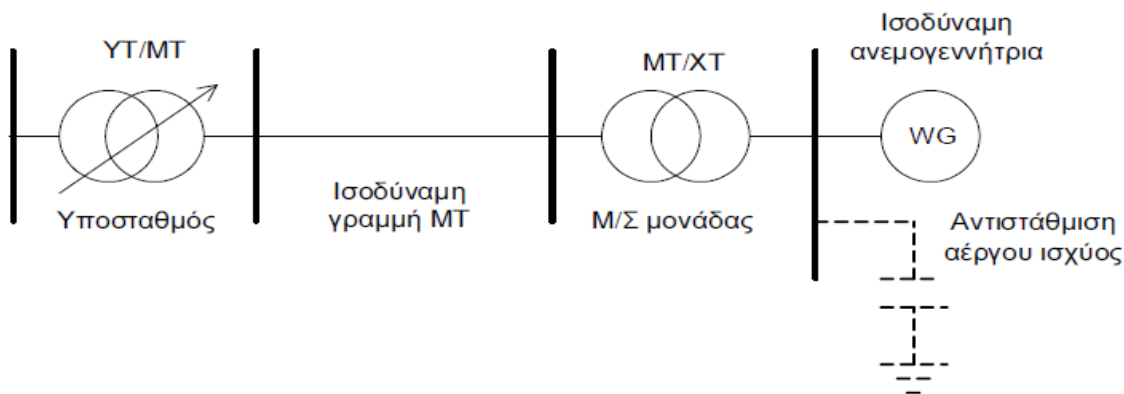
- Όρια τάσης σε μεγάλο εύρος, ανάλογα με το επίπεδο τάσης του σημείου διασύνδεσης.
- Όρια συχνότητας σε μεγάλο εύρος. Σε περίπτωση υπερσυχνότητας η παραγόμενη ισχύς πρέπει να μειωθεί.
- Απαιτείται μείωση της ενεργού ισχύος σε περίπτωση ανάγκης.
- Έλεγχος αέργου ισχύος: τα αιολικά πάρκα οφείλουν να ελέγχουν το συντελεστή ισχύος σε μεγάλο εύρος (επαγωγικό ή χωρητικό) ή να συμβάλλουν στη ρύθμιση της τάσης.
- Αδιάλειπτη λειτουργία σε βύθιση τάσης (LVRT): σε περίπτωση σύντομων βυθίσεων της τάσης, οι ανεμογεννήτριες δεν αποσυνδέονται. Μάλιστα υποστηρίζουν τοπικά την τάση παράγοντας άεργο ισχύ.
- Όρια ποιότητας ισχύος, π.χ. για φλίκερ (flicker), αρμονικές, μεταβολές τάσης.
- Στην περίπτωσης αυτόνομων κυρίως συστημάτων, μπορεί να ζητείται ο περιορισμός της παραγωγής των αιολικών πάρκων, ώστε να μπορούν να αυξήσουν την ισχύ τους σε περίπτωση πτώσης της συχνότητας, συμμετέχοντας έτσι στη διαδικασία πρωτεύουσας ρύθμισης της συχνότητας. Επίσης σε αυτόνομα συστήματα μπορεί να απαιτείται προσωρινή αύξηση της ισχύος των αιολικών πάρκων ώστε να περιοριστεί η βύθιση της συχνότητας μετά από μια διαταραχή, απαίτηση που θα αναλυθεί εκτενέστερα στην ενότητα 1.7.3.

1.3 Τεχνικά χαρακτηριστικά ανεμογεννητριών

Η εγκατάσταση των ανεμογεννητριών γίνεται σε ομάδες που συνθέτουν τα αιολικά πάρκα (Wind Farms). Η ονομαστική ισχύς μιας μεγάλης ανεμογεννήτριας σήμερα κυμαίνεται από 850 kW έως και 5 MW και τα αιολικά πάρκα που υπάρχουν ή σχεδιάζονται στην Ελλάδα σήμερα είναι περίπου από 5 έως 50 MW. Στις μελέτες σε επίπεδο συστήματος συνήθως χρησιμοποιείται μία ισοδύναμη ανεμογεννήτρια για μία ομάδα ανεμογεννητριών που θεωρούνται συναφείς (coherent), δηλαδή ότι έχουν τα ίδια τεχνικά χαρακτηριστικά. Η ομαδοποίηση (aggregation) γίνεται κατά κανόνα σε επίπεδο ενός αιολικού πάρκου ή και περισσότερων γειτονικών πάρκων. Στα πλαίσια της

παρούσας εργασίας ακολουθείται η σύμβαση της παράστασης μέσω ισοδύναμης ανεμογεννήτριας για κάθε αιολικό πάρκο.

Το Σχ 1.8 δείχνει μια τυπική αναπαράσταση ενός αιολικού πάρκου σε ροή φορτίου. Ανάλογα με τον τύπο της ανεμογεννήτριας μπορεί να χρησιμοποιείται και αντιστάθμιση αέργου ισχύος. Όπως κάθε μεμονωμένη ανεμογεννήτρια, έτσι και η ισοδύναμη συνδέεται στον αντίστοιχο μετασχηματιστή χαμηλής/μέσης τάσης. Η γραμμή μέσης τάσης είναι ισοδύναμη του δικτύου μέσης τάσης εντός και εκτός του αιολικού πάρκου μέχρι τον υποσταθμό μέσης/υψηλής τάσης.



Σχ 1.1: Τυπική αναπαράσταση αιολικού πάρκου σε ροή φορτίου

Μία βασική διάκριση των ανεμογεννητριών είναι σε σταθερών και μεταβλητών στροφών. Η διάκριση αυτή σχετίζεται άμεσα με τη διαμόρφωση του συστήματος ηλεκτρομηχανικής μετατροπής. Οι ανεμογεννήτριες σταθερών στροφών χρησιμοποιούν απλές μηχανές επαγωγής, απευθείας συνδεδεμένες στο δίκτυο. Λόγω της μικρής τιμής της ολίσθησης των μηχανών επαγωγής σε κανονική λειτουργία, η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα είναι πρακτικά σταθερή. Στις ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών η απόξευση της ταχύτητας περιστροφής του δρομέα επιτυγχάνεται με τη χρήση μετατροπέων με ηλεκτρονικά ισχύος.

Ένα πλεονέκτημα των ανεμογεννητριών μεταβλητών στροφών είναι ότι, καθώς η ταχύτητα περιστροφής ρυθμίζεται ανάλογα με την ταχύτητα του ανέμου, επιτυγχάνεται αυξημένη ενεργειακή απόδοση. Συγκεκριμένα η τεχνολογία μεταβλητών στροφών επιτρέπει τη βέλτιστη εκμετάλλευση της αεροδυναμικής ροπής. Σημαντική είναι, επίσης, η μείωση της μηχανικής καταπόνησης σε σύγκριση με τη λειτουργία σταθερών στροφών, όπου οι διακυμάνσεις του ανέμου μετατρέπονται σε ανάλογες διακυμάνσεις της ροπής. Επιπροσθέτως εξομαλύνονται οι διαταραχές στην ισχύ εξόδου περιορίζοντας έτσι το φαινόμενο flicker. Ακόμη, οι αυξημένες δυνατότητες ελέγχου που διαθέτουν οι ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών καθιστούν δυνατή την ικανοποίηση των συνεχώς αυξανόμενων απαιτήσεων που υπαγορεύονται από τους διαχειριστές ΣΗΕ. Το μειονέκτημα των Α/Γ μεταβλητών στροφών είναι το υψηλότερο κόστος λόγω της χρήσης των ηλεκτρονικών ισχύος και η αυξημένη ευαισθησία αυτών σε τυχόν σφάλματα.

Επίσης ένα άλλο κριτήριο διαχωρισμού σχετίζεται με τη διαμόρφωση των πτερυγίων και τον τρόπο με τον οποίο υλοποιείται ο έλεγχος της γωνίας τους με σκοπό τον έλεγχο και τον περιορισμό της αεροδυναμικής ισχύος (και ροπής). Οι παλαιότερες, κυρίως, ανεμογεννήτριες σταθερών στροφών διαθέτουν παθητικό αεροδυναμικό έλεγχο, δηλαδή η γεωμετρία των πτερυγίων είναι σταθερή και χρησιμοποιείται το αεροδυναμικό φαινόμενο της απώλειας στήριξης (stall effect) για τον περιορισμό της ισχύος στις υψηλές ταχύτητες ανέμου. Η απώλεια στήριξης εμφανίζεται καθώς μεταβάλλεται η γωνία πρόσπτωσης του ανέμου στα πτερύγια (angle of attack) αυξανόμενης της ταχύτητας του ανέμου. Οι νεότερες ανεμογεννήτριες διαθέτουν σύστημα μεταβολής της γωνίας βήματος των πτερυγίων (pitch control), οπότε μειώνουν την ισχύ, μειώνοντας τη γωνία πρόσπτωσης και άρα τον αεροδυναμικό συντελεστή. Μία άλλη τεχνική ελέγχου είναι ο ενεργός αεροδυναμικός

έλεγχος (active stall control), κατά τον οποίο η γωνία βήματος μεταβάλλεται στην αντίθετη κατεύθυνση, ώστε η γωνία πρόσπτωσης να αυξηθεί και να μειωθεί ο αεροδυναμικός συντελεστής με την εκδήλωση του φαινομένου της απώλεια στήριξης. Ο τελευταίος χρησιμοποιείται συνήθως με ανεμογεννήτριες με απλές μηχανές επαγωγής.

Οι βασικές κατηγορίες των πιο ευρέως διαδομένων ανεμογεννητριών, με βάση τη διαμόρφωση του συστήματος ηλεκτρομηχανικής μετατροπής, είναι οι εξής (σε παρένθεση φαίνεται η εκτίμηση του μεριδίου στην παγκόσμια αγορά το 2005):

- Τύπος Α - Σταθερών στροφών με γεννήτρια επαγωγής βραχυκυκλωμένου δρομέα (30%)
- Τύπος Β - Ημι-μεταβλητών στροφών με γεννήτρια επαγωγής με μεταβλητή αντίσταση δρομέα (10%)
- Τύπος Γ - Μεταβλητών στροφών με ασύγχρονη γεννήτρια διπλής τροφοδότησης (45%)
- Τύπος Δ - Μεταβλητών στροφών με πλήρη μετατροπέα (15%)

Μέχρι το 2005 οι ανεμογεννήτριες τύπου Γ και Δ είχαν κυριαρχήσει.

Η πρώτη κατηγορία προέρχεται από την πρώτη “γενιά” ανεμογεννητριών η οποία χρησιμοποιεί απλές γεννήτριες επαγωγής, συνήθως κλωβού, απευθείας συνδεδεμένες στο δίκτυο. Καθώς οι γεννήτριες επαγωγής συνδέονται απευθείας στο δίκτυο, η ταχύτητα περιστροφής τους μεταβάλλεται πολύ λίγο με το σημείο λειτουργίας και είναι πάντα πολύ κοντά στη σύγχρονη. Για το λόγο αυτό χαρακτηρίζονται ως “σταθερών στροφών”. Επειδή η πτερωτή στρέφεται με σχετικά χαμηλή ταχύτητα περιστροφής, χρησιμοποιείται, επίσης, μειωτήρας στροφών (κιβώτιο ταχυτήτων). Αρκετές ανεμογεννήτριες αυτού του είδους δουλεύουν σε δύο ταχύτητες. Η χαμηλή ταχύτητα που χρησιμοποιείται στις χαμηλές ταχύτητες ανέμου έχει ως αποτέλεσμα καλύτερη απόδοση και μειωμένο θόρυβο. Στα νεότερα και μεγαλύτερα μοντέλα αυτού του είδους, χρησιμοποιείται συνήθως ενεργός αεροδυναμικός έλεγχος. Δεδομένου ότι οι γεννήτριες επαγωγής καταναλώνουν άεργο ισχύ, τα αιολικά πάρκα με ανεμογεννήτριες σταθερών στροφών συνοδεύονται από διατάξεις αντιστάθμισης (π.χ. πυκνωτές) ώστε να είναι δυνατή η ρύθμιση του συντελεστή ισχύος.

Η δεύτερη κατηγορία αποτελεί παραλλαγή της πρώτης, όπου όμως χρησιμοποιείται τυλιγμένος δρομέας με μεταβλητή εξωτερική αντίσταση. Η μεταβολή της εξωτερικής αντίστασης επιτρέπει τη μεταβολή της ταχύτητας περιστροφής μέχρι $\pm 10\%$.

Η τρίτη κατηγορία είναι η πιο διαδεδομένη σήμερα. Η Ασύγχρονη Γεννήτρια Διπλής Τροφοδότησης (ΑΓΔΤ) είναι μια ασύγχρονη μηχανή τυλιγμένου δρομέα της οποίας και ο στάτης 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 αποτελείται από δύο μετατροπείς πηγής τάσης με διαμόρφωση εύρους παλμών (Pulse Width Modulation - PWM) οι οποίοι έχουν κοινή DC πλευρά. Λειτουργώντας το κύκλωμα του δρομέα σε μεταβλητή συχνότητα, επιτυγχάνεται μεταβλητή μηχανική ταχύτητα περιστροφής. Η συνολική ενεργός ισχύς της μηχανής είναι το άθροισμα της ισχύος που διοχετεύεται στο δίκτυο από τον στάτη και -μέσω του μετατροπέα- από τον δρομέα. Δεδομένου ότι μόνο ένα μέρος της συνολικής ισχύος περνάει από το μετατροπέα (περίπου 25-30%), αυτός είναι μειωμένης ονομαστικής ισχύος και άρα μειωμένου κόστους σε σχέση με ένα μετατροπέα πλήρους ισχύος.

Στην τέταρτη κατηγορία των ανεμογεννητριών με πλήρη μετατροπέα σήμερα χρησιμοποιούνται κυρίως σύγχρονες γεννήτριες για την ηλεκτρομηχανική μετατροπή (ο μετατροπέας ισχύος απεμπλέκει πλήρως τη συχνότητα της γεννήτριας από τη συχνότητα του δικτύου). Οι σύγχρονες γεννήτριες μπορούν να έχουν τύλιγμα διέγερσης ή να είναι μόνιμων μαγνητών και επιτρέπουν την αποφυγή του κιβωτίου ταχυτήτων. Στην περίπτωση αυτή η γεννήτρια έχει μεγάλο αριθμό πόλων και μεγαλύτερη διάμετρο, πράγμα που αυξάνει τον όγκο και το κόστος

της γεννήτριας. Ένα διαδεδομένο σχήμα, σήμερα, χρησιμοποιεί γεννήτρια με τύλιγμα διέγερσης και ανορθωτή διόδων στην πλευρά της γεννήτριας. Σε άλλα σχήματα χρησιμοποιείται PWM μετατροπέας στην πλευρά της γεννήτριας, οπότε η γεννήτρια μπορεί να είναι μηχανή επαγωγής.

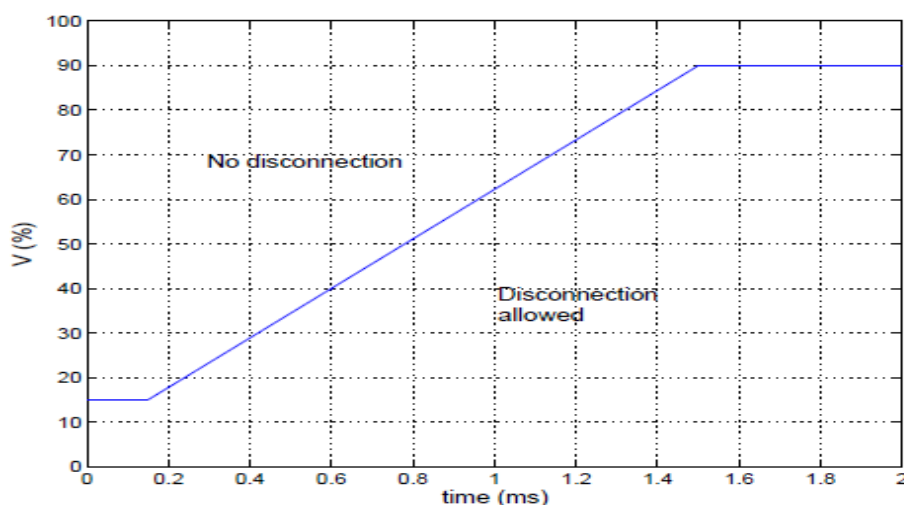
Θα πρέπει να τονιστεί πως κάθε κατηγορία χρειάζεται διαφορετική αναπαράσταση σε μελέτες ευστάθειας ΣΗΕ λόγω των διαφορετικών τεχνικών χαρακτηριστικών.

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

Μέχρι πριν λίγα χρόνια, όταν η διείσδυση της αιολικής παραγωγής ήταν μικρή, οι ανεμογεννήτριες αποσυνδέονταν από το σύστημα σε περιπτώσεις βύθισης της τάσης όπου η τερματική τους τάση έπεφτε 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 Α/Γ 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. Η νησιδοποίηση είναι άκρως ανεπιθύμητη, καθώς στο νησιδοποιημένο δίκτυο οι τάσεις και οι συχνότητες δεν ελέγχονται πλέον από τους συμβατικούς μεγάλους σταθμούς παραγωγής. Έτσι μπορεί να προκληθούν μεγάλες διακυμάνσεις της τάσης και της συχνότητας από τις ονομαστικές τιμές, θέτοντας σε κίνδυνο τόσο τα στοιχεία του δικτύου όσο και τον εξοπλισμό του καταναλωτή.

Καθώς η αιολική ενέργεια αναπτύσσεται κατά τρόπο πρωτοφανή σε αρκετά συστήματα, έγινε γρήγορα κατανοητό ότι αυτή η συμπεριφορά έθετε ένα όριο στην αιολική διείσδυση, 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. Ελλοχεύει 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. Η απαίτηση αυτή εκφράζεται υπό τη μορφή καμπυλών τάσης - χρόνου, όπως αυτή του Ελληνικού κώδικα που φαίνεται στο Σχ. 1.2.

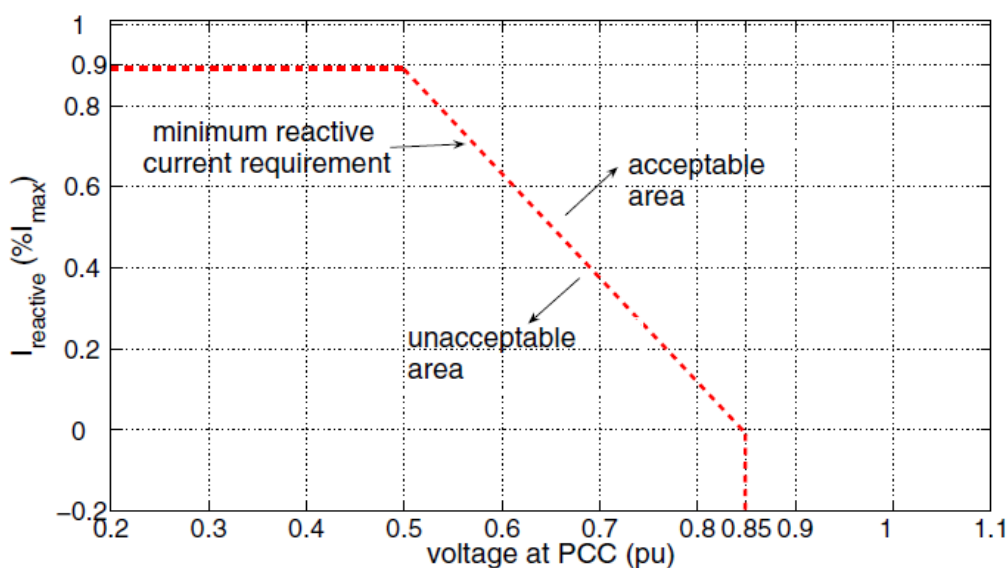


Σχ. 1.2: Καμπύλη απαίτησης αδιάλειπτης λειτουργίας υπό χαμηλή τάση [22]

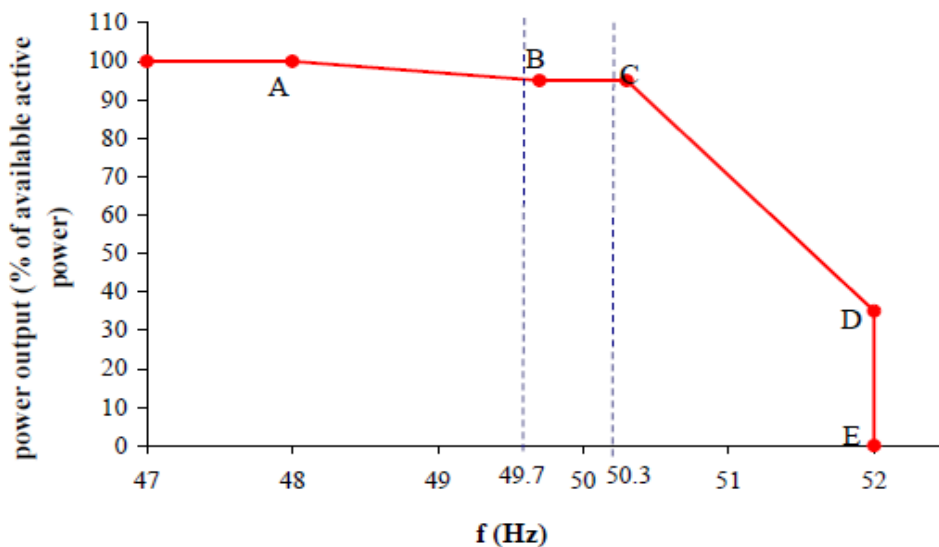
Η χρονική στιγμή $t=0$ s στο διάγραμμα αναφέρεται στην έναρξη της βύθισης της τάσης και το επίπεδο της τάσης αναφέρεται στην πλευρά υψηλής τάσης του μετασχηματιστή σύνδεσης του αιολικού πάρκου. Εφόσον η τάση παραμένει πάνω από το όριο που φαίνεται στο Σχ. 1.2 το αιολικό πάρκο (αιολική μονάδα παραγωγής) πρέπει να παραμείνει συνδεδεμένο και να συνεχίσει να παράγει ενεργό ισχύ μετά την εκκαθάριση των σφαλμάτων, με ρυθμό ανάληψης ισχύος τουλάχιστον ίσο με 20% της ονομαστικής του ισχύος ανά δευτερόλεπτο.

Αντίστοιχη καμπύλη έχουν πλέον όλοι οι κώδικες των συστημάτων με σημαντική αιολική διείσδυση. Η συγκεκριμένη μορφή της καμπύλης διαφέρει, ανάλογα με τις ιδιαιτερότητες του κάθε συστήματος. Μάλιστα πέραν της αποσύνδεσης ή μη των Α/Γ, υπάρχουν κώδικες στους οποίους απαιτείται η παραγωγή αέργου ισχύος από τις ανεμογεννήτριες ανάλογα με τον τάση στον ζυγό κοινής σύνδεσης (Point of Common Coupling, PCC). Στο Σχ. 1.3 φαίνεται ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα από τον κώδικα του Ισπανικού συστήματος. Στην καμπύλη αυτή ορίζεται το επιθυμητό εύρος του παραγόμενου αέργου ρεύματος (I_{reactive}) στις ανεμογεννήτριες ως ποσοστό του ονομαστικού τους (I_{max}) και συναρτήσει του επιπέδου της τάσης στο σημείο κοινής σύνδεσης (ΣΚΣ).

Τέλος σε αρκετές χώρες με μεγάλη αιολική διείσδυση οι σχετικοί κώδικες απαιτούν δυνατότητες ελέγχου της ενεργού ισχύος, κυρίως των μεγαλύτερων αιολικών σταθμών. Ενδεικτική είναι η καμπύλη του Σχ. 1.4 από τον κώδικα του Ιρλανδικού συστήματος. Σύμφωνα με αυτή η ισχύς των αιολικών πάρκων μπορεί να μεταβάλλεται συναρτήσει των μεταβολών της συχνότητας του συστήματος μέσω κατάλληλου ρυθμιστή. Όπως φαίνεται στο σχήμα, έξω από τη νεκρή ζώνη κανονικής λειτουργίας, το αιολικό πάρκο συμμετέχει στην πρωτεύουσα ρύθμιση, παρόμοια με τις συμβατικές μονάδες παραγωγής. Για να μπορέσει να αυξήσει την παραγωγή σε περίπτωση υποσυχνότητας, το αιολικό πάρκο θα πρέπει να διαθέτει την απαραίτητη εφεδρεία ισχύος, δηλαδή να παράγει σε κανονική λειτουργία λιγότερο από το μέγιστο δυνατό.



Σχ. 1.3: Ισπανικός κώδικας για την απαίτηση παραγωγής αέργου ρεύματος συναρτήσει της τάσης στο ΣΚΣ [21]



Σχ. 1.4: Ιρλανδικός κώδικας για την απαίτηση ρύθμισης της ενεργού ισχύος εξόδου συναρτήσει της συχνότητας του δικτύου [21]

1.5 Ευστάθεια ΣΗΕ

Η ευστάθεια ενός ΣΗΕ ορίζεται από την ικανότητα του συστήματος, για ένα δεδομένο αρχικό λειτουργικό σημείο, να επανακτά ένα αποδεκτό σημείο λειτουργίας μετά από μία διαταραχή, ώστε το συνολικό σύστημα να παραμένει πρακτικά αμετάβλητο [20].

Τα ΣΗΕ είναι πολύπλοκα μη γραμμικά συστήματα τα οποία λειτουργούν σε ένα συνεχώς μεταβαλλόμενο περιβάλλον, στο οποίο τα φορτία, οι έξοδοι των γεννητριών και ένα σύνολο λειτουργικών παραμέτρων αλλάζουν διαρκώς τιμές. Η διατήρηση της ευσταθούς λειτουργίας ενός ΣΗΕ στο ενδεχόμενο μίας διαταραχής εξαρτάται από τις αρχικές λειτουργικές συνθήκες, καθώς επίσης και από τη φύση της διαταραχής.

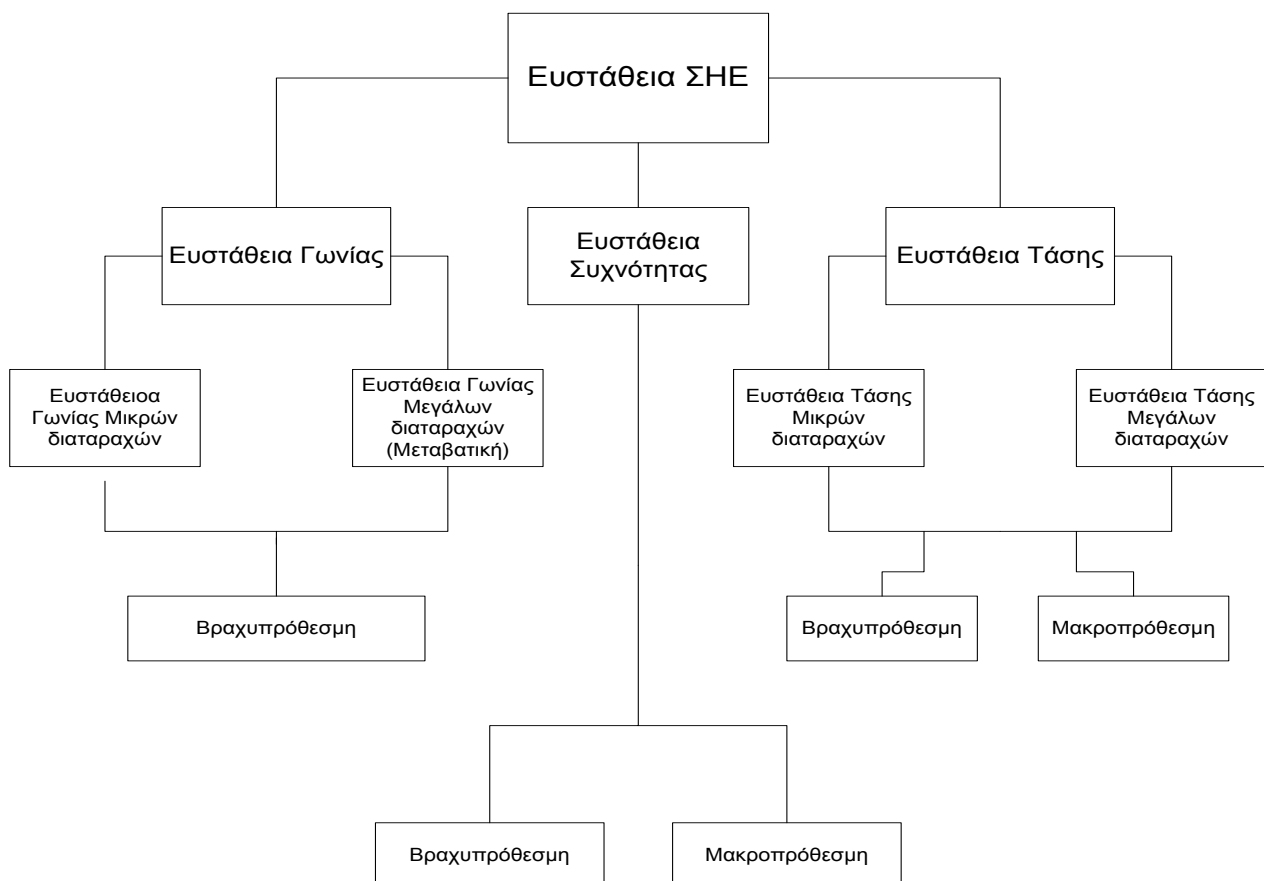
Τα ΣΗΕ υπόκεινται σε ένα μεγάλο πλήθος μικρών και μεγάλων διαταραχών. Οι μικρές διαταραχές συμβαίνουν διαρκώς, αν αναλογιστεί κανείς ότι το ηλεκτρικό φορτίο των διαφόρων καταναλωτών μεταβάλλεται συνεχώς. Στις περιπτώσεις αυτές, το εξεταζόμενο σύστημα θα πρέπει να διαθέτει την ικανότητα της άμεσης προσαρμογής στις εκάστοτε λειτουργικές συνθήκες, ώστε να αποκρίνεται ικανοποιητικά. Επίσης, είναι επιθυμητή η αντοχή του συστήματος σε ιδιαίτερα κρίσιμες διαταραχές, όπως είναι για παράδειγμα ένα τριφασικό βραχυκύκλωμα σε μία γραμμή μεταφοράς ή η απώλεια μίας μεγάλης μονάδας παραγωγής. Μία κρίσιμη διαταραχή μπορεί να προκαλέσει την ενεργοποίηση ορισμένων διακοπών προστασίας, με αποτέλεσμα τη μεταβολή της τοπολογίας του δικτύου και τη δημιουργία δύο ή περισσότερων νησίδων.

Σε ένα σύνολο σημείων ισορροπίας, ένα ΣΗΕ μπορεί να είναι ευσταθές για μία δεδομένη μεγάλη διαταραχή και ασταθές για μία άλλη. Όπως γίνεται κατανοητό, η σχεδίαση των ΣΗΕ με σκοπό τη διατήρηση της ευσταθείας σε κάθε πιθανό σενάριο διαταραχών είναι ασύμφορη τόσο από πρακτικής όσο και από οικονομικής πλευράς. Αντιθέτως, η σχεδίαση αυτή πραγματοποιείται λαμβάνοντας υπόψη μόνο τις διαταραχές οι οποίες εμφανίζουν υψηλά ποσοστά εμφάνισης. Επομένως, η ευστάθεια μεγάλων διαταραχών αναφέρεται πάντα σε ένα συγκεκριμένο σενάριο διαταραχής. Ένα ευσταθές σύνολο σημείων ισορροπίας έχει μία πεπερασμένη περιοχή έλξης και μάλιστα όσο μεγαλύτερη είναι η περιοχή αυτή, τόσο πιο εύρωστο θεωρείται το σύστημα σε μεγάλες διαταραχές. Η περιοχή έλξης των ευσταθών σημείων ισορροπίας μεταβάλλεται ανάλογα με τις λειτουργικές συνθήκες του εξεταζόμενου ΣΗΕ.

Όπως προαναφέρθηκε, τα ΣΗΕ υπόκεινται σε συνεχείς διακυμάνσεις μικρού πλάτους. Ωστόσο, στις μελέτες ευστάθειας θεωρείται ότι στο αρχικό σημείο λειτουργίας πριν την κατά περίπτωση εξεταζόμενη διαταραχή, το σύστημα βρίσκεται σε σημείο μονίμου καταστάσεως.

Η μελέτη ευστάθειας των ΣΗΕ διευκολύνεται σημαντικά διαχωρίζοντας τα φαινόμενα της ευστάθειας σε κατάλληλες κατηγορίες, όπως φαίνεται στο Σχ. 1.6. Η κατηγοριοποίηση των φαινομένων ευστάθειας των ΣΗΕ ακολουθεί τα παρακάτω κριτήρια [4]:

- Τη φύση της αστάθειας, που υποδεικνύεται από τις κυρίαρχες μεταβλητές του συστήματος, στις αποκρίσεις των οποίων παρατηρείται η εμφανιζόμενη αστάθεια.
- Το μέγεθος της εξεταζόμενης διαταραχής, το οποίο επηρεάζει τη μεθοδολογία για τον υπολογισμό και την πρόβλεψη της αστάθειας.
- Τις διατάξεις, τις διαδικασίες και τη χρονική κλίμακα που πρέπει να ληφθούν υπόψη για την εκτίμηση της ευστάθειας.



Σχ. 1.6: Κατηγοριοποίηση ευστάθειας ΣΗΕ[20]

Οι κατηγορίες της ευστάθειας ΣΗΕ ανάλογα με τη φύση των εμπλεκόμενων φαινομένων είναι οι εξής [4, 20]:

- Η *ευστάθεια γωνίας* αναφέρεται στην ικανότητα των σύγχρονων μηχανών ενός διασυνδεδεμένου συστήματος να παραμένουν σε συγχρονισμό με το δίκτυο μετά από μία 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.

- Η *ευστάθεια συχνότητας* αναφέρεται στην ικανότητα ενός ΣΗΕ να διατηρεί τη συχνότητά του εντός ενός προκαθορισμένου εύρους τιμών μετά από μία διαταραχή, η οποία διαταράσσει το συνολικό ισοζύγιο μεταξύ παραγόμενης και καταναλισκόμενης ισχύος.
- Η *ευστάθεια τάσης* αναφέρεται στην ικανότητα του συστήματος να διατηρεί αποδεκτές τιμές τάσεων σε όλους τους ζυγούς όταν υποβάλλεται σε μία διαταραχή από ένα δεδομένο αρχικό σημείο λειτουργίας. Ο συνήθης ορισμός για την αστάθεια τάσης είναι ότι αυτή προκαλείται από την απόπειρα του φορτίου (μέσω της δυναμικής του συμπεριφοράς) να αυξήσει την ισχύ, που καταναλώνει, πέρα από τη φυσική ικανότητα μεταφοράς του συνδυασμένου συστήματος παραγωγής και μεταφοράς [2].

Ανάλογα με τη χρονική κλίμακα των φαινομένων, η ευστάθεια διακρίνεται σε *βραχυπρόθεσμη* (μερικά δευτερόλεπτα) και *μακροπρόθεσμη* (λεπτά της ώρας). Σημειώνεται ότι σύμφωνα με την παραπάνω κατηγοριοποίηση, θεωρούνται πάντα σε ευσταθή ισορροπία τα ηλεκτρομαγνητικά φαινόμενα των γραμμών μεταφοράς και του στάτη των μηχανών κατά τη διάρκεια βραχυκυκλωμάτων. Τα φαινόμενα αυτά λαμβάνουν χώρα μέσα σε κλάσματα δευτερολέπτου και θεωρούνται ακαριαία.

Ανάλογα με το μέγεθος της διαταραχής, υπάρχει η διάκριση σε ευστάθεια μικρών και μεγάλων διαταραχών. Η ανάλυση ευστάθειας μικρών διαταραχών πραγματοποιείται με γραμμικοποίηση του συστήματος πολύ κοντά στην περιοχή του εξεταζόμενου σημείου ισορροπίας, όπως αναφέρθηκε. Από την άλλη πλευρά, η μελέτη ευστάθειας μεγάλων διαταραχών προϋποθέτει συνήθως την προσομοίωση της δυναμικής συμπεριφοράς του δικτύου με κατάλληλο πρόγραμμα προσομοίωσης. Ο διαχωρισμός αυτός αναφέρεται κυρίως στην ευστάθεια γωνίας. Η ευστάθεια γωνίας μικρών διαταραχών αναφέρεται και ως *ευστάθεια μόνιμης κατάστασης*, ενώ η ευστάθεια γωνίας μεγάλων διαταραχών είναι γνωστή και ως *μεταβατική ευστάθεια* και οι θεωρούμενες διαταραχές είναι συνήθως συμμετρικά τριφασικά βραχυκυκλώματα.

Τέλος, συνηθίζεται η ευστάθεια να διαχωρίζεται με βάση την κινητήρια δύναμη των μηχανισμών αστάθειας σε *οδηγούμενη από την παραγωγή* (ευστάθεια γωνίας και συχνότητας) και *οδηγούμενη από το φορτίο* (ευστάθεια τάσης). Σημειώνεται ότι στη βραχυπρόθεσμη χρονική κλίμακα δεν υπάρχει πάντα ξεκάθαρος διαχωρισμός μεταξύ των δύο παραπάνω ειδών, καθώς και ότι η διάκριση της κινητήριας δύναμης της αστάθειας δεν αποκλείει τη συμμετοχή των υπόλοιπων συνιστωσών του συστήματος.

Στην επόμενη ενότητα εισάγεται η μαθηματική θεωρία για την ανάλυση ευστάθειας μικρών διαταραχών, ενώ η ενότητα 1.7 επικεντρώνεται στην ευστάθεια συχνότητας.

1.6 Μη Γραμμικά Συστήματα – Γραμμικοποίηση

1.6.1 Σημεία ισορροπίας – Γραμμικοποίηση – Ανάλυση Ιδιοτιμών

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζεται συνοπτικά η μαθηματική θεωρία για τα μη γραμμικά δυναμικά συστήματα [6]. Τα συνεχή δυναμικά συστήματα [2] μπορούν να αναλυθούν χρησιμοποιώντας ένα σύνολο από N συνήθεις διαφορικές εξισώσεις, οι οποίες γράφονται υπό διανυσματική μορφή ως εξής:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}) \quad (1.1)$$

όπου \mathbf{x} είναι το $N \times 1$ διάνυσμα κατάστασης και κάθε συνάρτηση f_i ($i=1, \dots, N$) είναι στη γενική περίπτωση μία μη γραμμική συνάρτηση όλων των μεταβλητών κατάστασης x_i ($i=1, \dots, N$). Το διάνυσμα \mathbf{x} ορίζει ένα σημείο στο χώρο των καταστάσεων.

Ένα σημείο $\bar{\mathbf{x}}$ καλείται σημείο ισορροπίας του συστήματος, το οποίο περιγράφεται από τη σχέση (1.1), εάν ικανοποιεί την ακόλουθη συνθήκη:

$$\mathbf{f}(\bar{\mathbf{x}}) = \mathbf{0} \quad (1.2)$$

η οποία αποτελεί ένα σύστημα N αλγεβρικών εξισώσεων με N αγνώστους.

Τα σημεία ισορροπίας χαρακτηρίζονται κατά Lyapunov ως προς την ευστάθειά τους ως εξής [2]:

- Ένα σημείο ισορροπίας $\bar{\mathbf{x}}$ είναι ευσταθές, εάν για κάθε περιοχή V του $\bar{\mathbf{x}}$, μπορεί να βρεθεί μία περιοχή V_1 του $\bar{\mathbf{x}}$, τέτοια ώστε για όλα τα \mathbf{x}_0 τα οποία ανήκουν στην V_1 , υπάρχει λύση $\mathbf{x}(t)$ και βρίσκεται εντός της περιοχής V για κάθε χρονική στιγμή $t > 0$.
- Ένα σημείο ισορροπίας $\bar{\mathbf{x}}$ είναι ασυμπτωτικά ευσταθές, εάν όλες οι τροχιές του συστήματος με αρχική συνθήκη \mathbf{x}_0 εντός της περιοχής V_1 τείνουν στο $\bar{\mathbf{x}}$, καθώς ο χρόνος τείνει στο άπειρο ($t \rightarrow \infty$).
- Ένα σημείο ισορροπίας $\bar{\mathbf{x}}$ καλείται ασταθές εάν δεν είναι ευσταθές.

Η κατά Lyapunov ευστάθεια όπως προκύπτει από τα παραπάνω είναι μία τοπική ιδιότητα του συστήματος, αφορά δηλαδή περιοχές κοντά στα σημεία ισορροπίας. Εποπτικότερη εικόνα για τη συνολική συμπεριφορά του συστήματος ως προς την ευστάθειά του δίνεται από τη μελέτη του πορτραίτου φάσεων, όπου φαίνεται η περιοχή από την οποία οι τροχιές του συστήματος καταλήγουν σε ένα ευσταθές σημείο ισορροπίας.

Η μεγαλύτερη περιοχή A , τέτοια ώστε οι τροχιές του συστήματος με αρχικές συνθήκες $\mathbf{x}_0 \in A$ να τείνουν σε ένα ασυμπτωτικά ευσταθές σημείο ισορροπίας $\bar{\mathbf{x}}$, καλείται περιοχή έλξης του $\bar{\mathbf{x}}$.

Στα γραμμικά συστήματα όπως αυτό της μορφής:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} \quad (1.3)$$

η ευστάθεια του σημείου ισορροπίας (εδώ μοναδικό σημείο ισορροπίας είναι το $\bar{\mathbf{x}} = \mathbf{0}$) καθορίζεται από τις ιδιοτιμές του πίνακα κατάστασης \mathbf{A} .

Οι ιδιοτιμές του πίνακα \mathbf{A} δίνονται από τις τιμές της βαθμωτής παραμέτρου λ για τις οποίες υπάρχουν μη τετριμμένες λύσεις της εξίσωσης:

$$\mathbf{A}\mathbf{v}_i = \lambda\mathbf{v}_i \quad (1.4)$$

όπου \mathbf{v}_i το άγνωστο $N \times 1$ διάνυσμα. Με τον όρο μη τετριμμένες λύσεις, εννοούνται λύσεις διάφορες της μηδενικής, δηλαδή $\mathbf{v}_i \neq \mathbf{0}$. Για τον υπολογισμό των ιδιοτιμών του πίνακα \mathbf{A} , η (1.4) γράφεται στη μορφή:

$$(\mathbf{A} - \lambda\mathbf{I}_N)\mathbf{v}_i = \mathbf{0} \quad (1.5)$$

όπου \mathbf{I}_N ο μοναδιαίος πίνακας διαστάσεων $N \times N$. Η ύπαρξη μη τετριμμένων λύσεων της (1.5) προϋποθέτει ότι:

$$\det(\mathbf{A} - \lambda\mathbf{I}_N) = 0 \quad (1.6)$$

Από την ανάπτυξη της παραπάνω ορίζουσας προκύπτει το χαρακτηριστικό πολυώνυμο του πίνακα \mathbf{A} , του οποίου οι N λύσεις ($\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_N$) ορίζουν τις ιδιοτιμές του θεωρούμενου πίνακα. Οι ιδιοτιμές μπορεί να είναι είτε πραγματικές ή μιγαδικές. Εάν ο πίνακας \mathbf{A} είναι πραγματικός (υπόθεση που ισχύει σε όλα τα φυσικά συστήματα όπως είναι τα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας), οι μιγαδικές ιδιοτιμές εμφανίζονται πάντα σε συζυγή ζεύγη.

Επανερχόμενοι στο θέμα της ευστάθειας των σημείων ισορροπίας, εάν όλες οι ιδιοτιμές έχουν αρνητικά πραγματικά μέρη, το σημείο ισορροπίας είναι ασυμπτωτικά ευσταθές. Αν έστω και μία ιδιοτιμή έχει θετικό πραγματικό μέρος, το σημείο είναι ασταθές. Σημειώνεται ότι στα γραμμικά συστήματα η περιοχή έλξης ενός ασυμπτωτικά ευσταθούς σημείου ισορροπίας είναι όλος ο χώρος των καταστάσεων [2,3].

Σε αντίθεση με τα γραμμικά συστήματα, το πλήθος των σημείων ισορροπίας σε ένα μη γραμμικό σύστημα ποικίλει. Συγκεκριμένα, ένα μη γραμμικό σύστημα μπορεί να έχει ένα, περισσότερα του ενός ή κανένα σημείο ισορροπίας. Επιπρόσθετα, η περιοχή έλξης ενός σημείου ισορροπίας σε ένα μη γραμμικό σύστημα μπορεί να είναι φραγμένη. Συνεπώς, η ύπαρξη ευσταθούς σημείου ισορροπίας δεν είναι επαρκής για να εγγυηθεί την ευσταθή απόκριση του συστήματος.

Στις περισσότερες περιπτώσεις μη γραμμικών συστημάτων, η μελέτη της ευστάθειας των σημείων ισορροπίας διευκολύνεται με γραμμικοποίηση του συστήματος γύρω από μία περιοχή του εξεταζόμενου σημείου ισορροπίας. Εάν οριστεί:

$$\Delta \mathbf{x} = \mathbf{x} - \bar{\mathbf{x}} \quad (1.7)$$

και διατηρηθεί μόνο ο όρος πρώτης τάξης του αναπτύγματος Taylor γύρω από το $\bar{\mathbf{x}}$, το αντίστοιχο γραμμικοποιημένο σύστημα έχει την ακόλουθη μορφή:

$$\Delta \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A} \Delta \mathbf{x} \quad (1.8)$$

Ο πίνακας κατάστασης \mathbf{A} στην περίπτωση αυτή είναι ο Ιακωβιανός Πίνακας του συστήματος, ο οποίος υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\mathbf{A} = \mathbf{f}_{\mathbf{x}} = \left. \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{x}} \right|_{\mathbf{x}=\bar{\mathbf{x}}} = \begin{bmatrix} \left. \frac{\partial f_1(\mathbf{x})}{\partial x_1} \right|_{\mathbf{x}=\bar{\mathbf{x}}} & \dots & \left. \frac{\partial f_1(\mathbf{x})}{\partial x_N} \right|_{\mathbf{x}=\bar{\mathbf{x}}} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \left. \frac{\partial f_N(\mathbf{x})}{\partial x_1} \right|_{\mathbf{x}=\bar{\mathbf{x}}} & \dots & \left. \frac{\partial f_N(\mathbf{x})}{\partial x_N} \right|_{\mathbf{x}=\bar{\mathbf{x}}} \end{bmatrix} \quad (1.9)$$

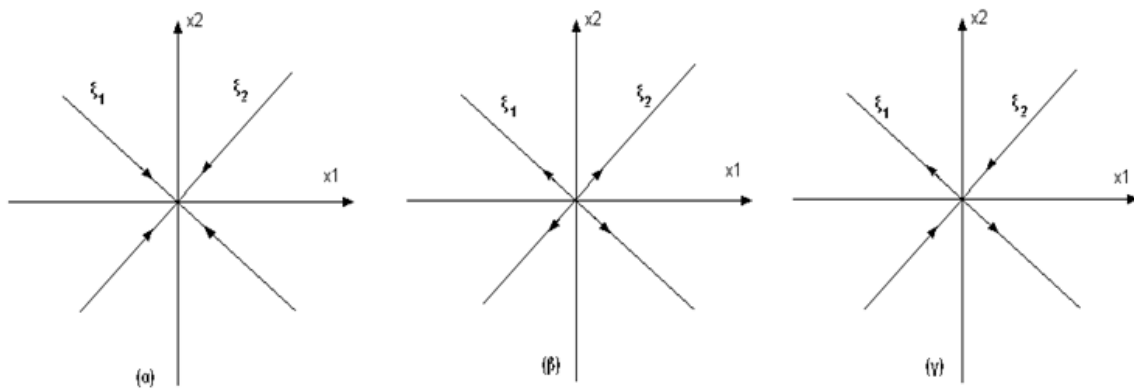
Με τον τρόπο αυτό, η μελέτη ευστάθειας των σημείων ισορροπίας του μη γραμμικού συστήματος ανάγεται στη μελέτη ευστάθειας του γραμμικοποιημένου συστήματος γύρω από κάθε σημείο ισορροπίας, δηλαδή στον υπολογισμό των ιδιοτιμών του πίνακα \mathbf{A} .

Ένα σημείο ισορροπίας $\bar{\mathbf{x}}$ του συστήματος (1.1) ονομάζεται *υπερβολικό* όταν ο Ιακωβιανός Πίνακας (1.9) δεν έχει καμία ιδιοτιμή με μηδενικό πραγματικό μέρος. Ως *τύπος* ενός υπερβολικού σημείου ισορροπίας ορίζεται ο αριθμός των ιδιοτιμών του Ιακωβιανού Πίνακα με θετικό πραγματικό μέρος.

Τα ασυμπτωτικά ευσταθή σημεία ισορροπίας ενός μη γραμμικού συστήματος ονομάζονται ευσταθείς κόμβοι. Τα ασταθή σημεία ισορροπίας που έχουν όλες τις ιδιοτιμές του πίνακα κατάστασης με θετικά πραγματικά μέρη, ονομάζονται πηγές ή ασταθείς κόμβοι. Τα ασταθή σημεία ισορροπίας, τα οποία έχουν μερικές ιδιοτιμές του πίνακα κατάστασης με θετικά πραγματικά μέρη και όλες τις άλλες με αρνητικά, ονομάζονται σαγματικά σημεία ή διάσελα.

Σημειώνεται ότι η γραμμικοποίηση δεν παρέχει πληροφορία για την ευστάθεια ενός σημείου ισορροπίας, όταν ο αντίστοιχος Ιακωβιανός Πίνακας κατάστασης έχει μία ή περισσότερες ιδιοτιμές με μηδενικό πραγματικό μέρος. Στην περίπτωση αυτή, το σημείο ισορροπίας χαρακτηρίζεται ως μη υπερβολικό, ενώ η ευστάθειά του προσδιορίζεται χρησιμοποιώντας τον ορισμό της ευστάθειας.

Στο Σχ. 1.5 παρατίθενται κάποια πορτραίτα φάσεων για ένα γραμμικό σύστημα δεύτερης τάξης, όπου φαίνονται τα αντίστοιχα ιδιοδιανύσματα του σημείου ισορροπίας $\bar{\mathbf{x}} = \mathbf{0}$ (ή ισοδύναμα $(x_1, x_2) = (0, 0)$).



Σχ. 1.5: (α) Ασυμπτωτικά ευσταθής κόμβος ($\lambda_1 < \lambda_2 < 0$), (β) Ασταθής κόμβος ($\lambda_1 > \lambda_2 > 0$), (γ) Σαγματικό σημείο ($\lambda_1 > 0 > \lambda_2$)

Ένας συγκεκριμένος τύπος μη υπερβολικού σημείου ισορροπίας είναι ο σαγματικός κόμβος, ο οποίος συναντάται συχνά στα ΣΗΕ. Η διακλάδωση σαγματικού κόμβου παρουσιάζεται με την εξαφάνιση ή την εμφάνιση ενός ζεύγους σημείων ισορροπίας (συνήθως ενός ευσταθούς και ενός ασταθούς) ως συνέπεια μίας μικρής μεταβολής των παραμέτρων του συστήματος. Επομένως, στα σημεία διακλάδωσης σαγματικού κόμβου ο Ιακωβιανός Πίνακας (1.9) δεν είναι αντιστρέψιμος. Η χαρακτηριστική ιδιότητα ενός σαγματικού κόμβου σύμφωνα με το Σχ. 1.5, είναι ότι υπάρχει μία κατεύθυνση στο χώρο των καταστάσεων, τέτοια ώστε οι τροχιές με αρχικές συνθήκες από τη μία μεριά του σημείου ισορροπίας να συγκλίνουν στο σημείο ισορροπίας, ενώ από την άλλη μεριά να αποκλίνουν από αυτό. Σημειώνεται ότι μολονότι η διακλάδωση σαγματικού κόμβου είναι μη γραμμικό φαινόμενο, μπορεί να εντοπιστεί από τη γραμμικοποίηση του συστήματος γύρω από το σημείο διακλάδωσης όπου ο Ιακωβιανός Πίνακας (1.9) του γραμμικοποιημένου συστήματος έχει απλή μηδενική ιδιοτιμή και η ορίζουσά του μηδενίζεται.

Ένας άλλος τύπος μη υπερβολικού σημείου ισορροπίας είναι το κέντρο. Το κέντρο είναι ένα σημείο ισορροπίας του οποίου ο Ιακωβιανός Πίνακας κατάστασης χαρακτηρίζεται από ένα ζευγάρι συζυγών μιγαδικών ιδιοτιμών με μηδενικό πραγματικό μέρος.

Στον Πίνακα 1.1 φαίνεται η διάκριση των σημείων ισορροπίας ως προς την ευστάθειά τους για ένα σύστημα δευτέρας τάξεως, ανάλογα με τις ιδιοτιμές του Ιακωβιανού Πίνακα κατάστασης

Πίνακας 1.1: Ιδιότητες ευστάθειας σημείων ισορροπίας σε σύστημα δευτέρας τάξεως

Ιδιοτιμές	Είδος σημείου ισορροπίας	Ευστάθεια
$\lambda_1 \geq \lambda_2 > 0$	Κόμβος (πηγή)	Ασταθές
$\lambda_1 \leq \lambda_2 < 0$	Κόμβος (ευσταθής)	Ασυμπτωτικά Ευσταθές
$\lambda_1 > 0 > \lambda_2$	Σαγματικό Σημείο	Ασταθές
$\lambda_1, \lambda_2 = \sigma \pm j\omega$	Σπειροειδές σημείο (Εστία)	Ασταθές ($\sigma > 0$) Ασυμπτωτικά Ευσταθές ($\sigma < 0$)
$\lambda_1 = j\omega, \lambda_2 = -j\omega$	Κέντρο	Ευσταθές
$\lambda_1 = 0, \lambda_2 < 0$	Σαγματικός κόμβος	Ασταθές

1.6.2 Ιδιοδιανύσματα – Συντελεστές Συμμετοχής

Για κάθε ιδιοτιμή λ_i , το άγνωστο $N \times 1$ διάνυσμα \mathbf{v}_i που ικανοποιεί την (1.4) ονομάζεται δεξί ιδιοδιάνυσμα του πίνακα \mathbf{A} που σχετίζεται με την ιδιοτιμή λ_i . Ισχύει δηλαδή ότι:

$$\mathbf{A} \mathbf{v}_i = \lambda_i \mathbf{v}_i \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (1.10)$$

Το ιδιοδιάνυσμα \mathbf{v}_i έχει την εξής μορφή:

$$\mathbf{v}_i = [v_{1i} \quad v_{2i} \quad \dots \quad v_{Ni}]^T \quad (1.11)$$

Επειδή η (1.10) είναι ομογενής, το διάνυσμα $k\mathbf{v}_i$ (με k βαθμωτό μέγεθος) είναι επίσης λύση της εξίσωσης αυτής.

Όμοια με το δεξί ιδιοδιάνυσμα, το $N \times 1$ διάνυσμα \mathbf{w}_i που ικανοποιεί την ακόλουθη σχέση:

$$\mathbf{w}_i^T \mathbf{A} = \lambda_i \mathbf{w}_i^T \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (1.12)$$

ορίζεται ως το αριστερό ιδιοδιάνυσμα που αντιστοιχεί στην ιδιοτιμή λ_i .

Τα δεξιά και αριστερά ιδιοδιανύσματα τα οποία αντιστοιχούν σε διαφορετικές ιδιοτιμές είναι ορθογώνια μεταξύ τους. Δηλαδή, εάν η ιδιοτιμή λ_i δεν είναι ίση με την λ_j , ισχύει ότι:

$$\mathbf{w}_j^T \mathbf{v}_i = 0 \quad (1.13)$$

Αντίθετα, για τα ιδιοδιανύσματα που αντιστοιχούν στην ίδια ιδιοτιμή λ_i , ισχύει ότι:

$$\mathbf{w}_i^T \mathbf{v}_i = C_i \quad (1.14)$$

όπου C_i είναι μία μη μηδενική σταθερά. Συνηθίζεται η κανονικοποιημένη μορφή των ιδιοδιανυσμάτων, η οποία προκύπτει για $C_i=1$.

Αναφορικά με τη φυσική σημασία των ιδιοδιανυσμάτων, τα δεξιά ιδιοδιανύσματα δείχνουν τη σχετική δράση των μεταβλητών κατάστασης όταν διεγείρεται ένας συγκεκριμένος ρυθμός. Για παράδειγμα, το στοιχείο v_{ki} του δεξιού ιδιοδιανύσματος \mathbf{v}_i φανερώνει το βαθμό εμφάνισης της k μεταβλητής κατάστασης στον i ρυθμό.

Στην περίπτωση μιγαδικών ιδιοτιμών, το μέτρο κάθε στοιχείου του δεξιού ιδιοδιανύσματος \mathbf{v}_i παριστά το εύρος ταλάντωσης των μεταβλητών κατάστασης στον i ρυθμό, ενώ η γωνία κάθε στοιχείου δείχνει τη μετατόπιση φάσης των μεταβλητών κατάστασης κατά την ταλάντωση που εκφράζει ο εξεταζόμενος ρυθμός.

Το αριστερό ιδιοδιάνυσμα \mathbf{w}_i προσδιορίζει ποιος συνδυασμός μεταβλητών κατάστασης προκαλεί την εμφάνιση μόνο του i ρυθμού.

Ένα σημαντικό μειονέκτημα στο να χρησιμοποιούνται ξεχωριστά τα δεξιά από τα αριστερά ιδιοδιανύσματα για την εξακρίβωση της σχέσης μεταξύ των μεταβλητών κατάστασης και των ρυθμών είναι ότι τα στοιχεία των ιδιοδιανυσμάτων εξαρτώνται από τις μονάδες μέτρησης και τις κλίμακες των μεταβλητών κατάστασης. Για το λόγο αυτό, ορίζεται ο πίνακας \mathbf{P} των συντελεστών συμμετοχής σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση:

$$\mathbf{P} = [\mathbf{p}_1 \quad \mathbf{p}_2 \quad \dots \quad \mathbf{p}_N] \quad (1.15)$$

όπου:

$$\mathbf{p}_i = [p_{1i} \quad p_{2i} \quad \dots \quad p_{Ni}]^T = [v_{1i}w_{i1} \quad v_{2i}w_{i2} \quad \dots \quad v_{Ni}w_{iN}]^T \quad (1.16)$$

Το στοιχείο v_{ki} (w_{ki}) είναι το k στοιχείο του δεξιού (αριστερού) ιδιοδιανύσματος \mathbf{v}_i (\mathbf{w}_i) που αντιστοιχεί στην ιδιοτιμή λ_i .

Το στοιχείο $p_{ki} = v_{ki}w_{ik}$ ορίζεται ως συντελεστής συμμετοχής και αποτελεί ένα μέτρο της σχετικής συμμετοχής της k μεταβλητής κατάστασης στη διέγερση του i ρυθμού, και αντίστροφα.

Το πλεονέκτημα των συντελεστών συμμετοχής είναι ότι πολλαπλασιάζοντας τα στοιχεία των δεξιών και των αριστερών ιδιοδιανυσμάτων, προκύπτει το αδιάστατο το γινόμενο p_{ki} , ανεξάρτητο δηλαδή από την επιλογή των μονάδων μέτρησης των μεταβλητών κατάστασης.

Λαμβάνοντας υπόψη την κανονικοποίηση των ιδιοδιανυσμάτων, το άθροισμα των συντελεστών συμμετοχής οι οποίοι σχετίζονται με οποιονδήποτε ρυθμό ($\sum_{i=1}^N p_{ki}$) ή με οποιαδήποτε μεταβλητή κατάσταση ($\sum_{k=1}^N p_{ki}$) ισούται με 1.

Ένας άλλος ορισμός του συντελεστή συμμετοχής p_{ki} είναι η ευαισθησία της ιδιοτιμής λ_i ως προς το διαγώνιο στοιχείο α_{kk} του πίνακα κατάστασης \mathbf{A} , δηλαδή:

$$p_{ki} = \frac{\partial \lambda_i}{\partial \alpha_{kk}} \quad (1.17)$$

Σε γενικές γραμμές, οι συντελεστές συμμετοχής είναι ενδεικτικοί του ποσοστού συμμετοχής των σχετικών μεταβλητών κατάστασης στη διέγερση των αντιστοίχων ρυθμών. Η ανάλυση των συντελεστών συμμετοχής είναι χρήσιμη στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας για την ερμηνεία της συμπεριφοράς τους και την μελέτη των αλληλεπιδράσεων ανάμεσα στις διάφορες συνιστώσες. Στο σημείο αυτό κρίνεται σκόπιμο να δοθούν και οι παρακάτω ορισμοί σχετικά με τον χαρακτηρισμό ρυθμών, όταν παρατηρείται αλληλεπίδραση ανάμεσα σε μηχανές του συστήματος, με βάση τα στοιχεία των δεξιών ιδιοδιανυσμάτων [12].

Κοινός ρυθμός ταλάντωσης: Οι ρυθμοί αυτοί έχουν ιδιοδιανύσματα με παρόμοιες γωνίες για τις αντίστοιχες μεταβλητές κατάστασης και περιγράφουν την από κοινού απόκριση των μηχανών στις οποίες ανήκουν οι παραπάνω μεταβλητές κατάστασης. Περιγράφουν ταλαντώσεις εν φάσει των δυο μηχανών.

Ρυθμός αλληλεπίδρασης: Στην κατηγορία αυτή συγκαταλέγονται οι ρυθμοί με ιδιοδιανύσματα αντίθετης φάσεως και περιγράφουν την αλληλεπίδραση ανάμεσα στις μηχανές. Πιο συγκεκριμένα περιγράφουν ανταλλαγές ισχύος μεταξύ των μηχανών οι οποίες δεν εμφανίζονται στο δίκτυο τροφοδοσίας (όπως οι ηλεκτρομηχανικές ταλαντώσεις).

1.6.3 Φαινόμενα συντονισμού

Μια από τις έντονες μορφές αλληλεπίδρασης των ρυθμών είναι η εμφάνιση προσεγγιστικού ισχυρού συντονισμού πρώτης τάξεως δύο ρυθμών. Καθώς το σημείο λειτουργίας του συστήματος μεταβάλλεται και αλλάζουν οι ρυθμοί του συστήματος, είναι δυνατό δύο ιδιοτιμές να έρθουν πολύ κοντά ή ακόμα και να ταυτιστούν. Αν τα δεξιά ιδιοδιανύσματα των δύο ιδιοτιμών ευθυγραμμίζονται, τότε η παραμικρή διαταραχή από αυτό το σημείο λειτουργίας προκαλεί στροφή των δύο ιδιοτιμών προς διαφορετικές κατευθύνσεις και την απότομη απομάκρυνσή τους [18].

Είναι προφανές ότι ο συντονισμός ενός ηλεκτρομηχανικού ρυθμού, ο οποίος λόγω χαμηλής απόσβεσης βρίσκεται κοντά στον άξονα των φανταστικών αριθμών, με κάποιον άλλο ρυθμό μπορεί να οδηγήσει απότομα το σύστημα σε ταλαντωτική αστάθεια. Αν το σημείο λειτουργίας του συστήματος περάσει κοντά από ένα σημείο ισχυρού συντονισμού, τότε είναι δυνατό κάποιος ηλεκτρομηχανικός ρυθμός να στραφεί προς το δεξιό ημιεπίπεδο και να εμφανιστεί ταλαντωτική αστάθεια. Το φαινόμενο προσέγγισης σε ένα σημείο ισχυρού συντονισμού δεν είναι σπάνιο στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Από τη θεωρία των μη γραμμικών δυναμικών συστημάτων, ο προσεγγιστικός ισχυρός συντονισμός δύο ρυθμών χαρακτηρίζεται σαν ένα φαινόμενο συνδιάστασης 1, δηλαδή μπορεί να εμφανιστεί με τη μεταβολή μίας και μόνο παραμέτρου του συστήματος. [19].

Στην περίπτωση του συντονισμού δύο ενδεχόμενα υπάρχουν:

- **Τα ιδιοδιανύσματα των ιδιοτιμών ευθυγραμμίζονται.** Η πρώτη περίπτωση αναφέρεται στη βιβλιογραφία ως ισχυρός συντονισμός και οι δύο ιδιοτιμές λέγονται μη γραμμικοί διαιρέτες. Σε αυτή την περίπτωση δεν είναι δυνατόν οι αντίστοιχοι ρυθμοί να αποζευχθούν. Οι δύο ρυθμοί περιγράφονται από την κοινή τους ιδιοτιμή και από ένα και μόνο δεξιό ιδιοδιάνυσμα. Στην περίπτωση εμφάνισης ισχυρού συντονισμού, οι δύο ιδιοτιμές πλησιάζουν η μία την άλλη και στην τιμή συντονισμού τα ιδιοδιανύσματα ευθυγραμμίζονται με αποτέλεσμα οι δύο ρυθμοί που συντονίζονται να περιγράφονται από ένα και μόνο ιδιοδιάνυσμα (αλγεβρική και γεωμετρική πολλαπλότητα).
- **Τα ιδιοδιανύσματα είναι διακριτά.** Η περίπτωση αυτή αναφέρεται ως ασθενής συντονισμός και οι δύο ρυθμοί περιγράφονται από μια κοινή ιδιοτιμή και δύο διαφορετικά δεξιά ιδιοδιανύσματα (αλγεβρική μόνο πολλαπλότητα). [18]

Η έντονη και απότομη μορφή με την οποία εκδηλώνεται το φαινόμενο του συντονισμού καθώς ακόμα και μια απειροστή μεταβολή του κέρδους μιας διάταξης ελέγχου αρκεί για να οδηγήσει έναν ρυθμό σε αστάθεια, κάνει αναγκαία την θεώρηση αυτού του φαινομένου κατά τη συστηματική σχεδίαση ρυθμιστών, ειδικά δε στον υπολογισμό της μέγιστης τιμής του κέρδους τους. Τα παραπάνω ισχύουν ιδιαίτερα για τις ηλεκτρομηχανικές ταλαντώσεις, καθώς εμφανίζονται σε ένα πολύ περιορισμένο εύρος συχνοτήτων, χαρακτηρίζονται από χαμηλή σχετικά απόσβεση, ενώ μπορούν να διεγερθούν από τους πολλούς και διαφορετικούς ρυθμιστές.

1.7 Ρύθμιση Συχνότητας – Αυτόνομα Συστήματα με αυξημένη αιολική διεύθυνση

1.7.1 Γενικά περί ρύθμισης συχνότητας

Στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας η ρύθμιση της συχνότητας αποτελεί θέμα μείζονος σημασίας. Οι διακυμάνσεις σε αυτό το μέγεθος προκαλούνται κυρίως από διαφορές ανάμεσα στην παραγόμενη ισχύ από τις επιμέρους μονάδες παραγωγής και την ζητούμενη ισχύ από τα διάφορα φορτία. Η διατήρηση της συχνότητας σε συγκεκριμένο πεδίο τιμών είναι πολύ σημαντική για την ασφάλεια και αξιόπιστη λειτουργία των στοιχείων που συνδέονται στο δίκτυο.

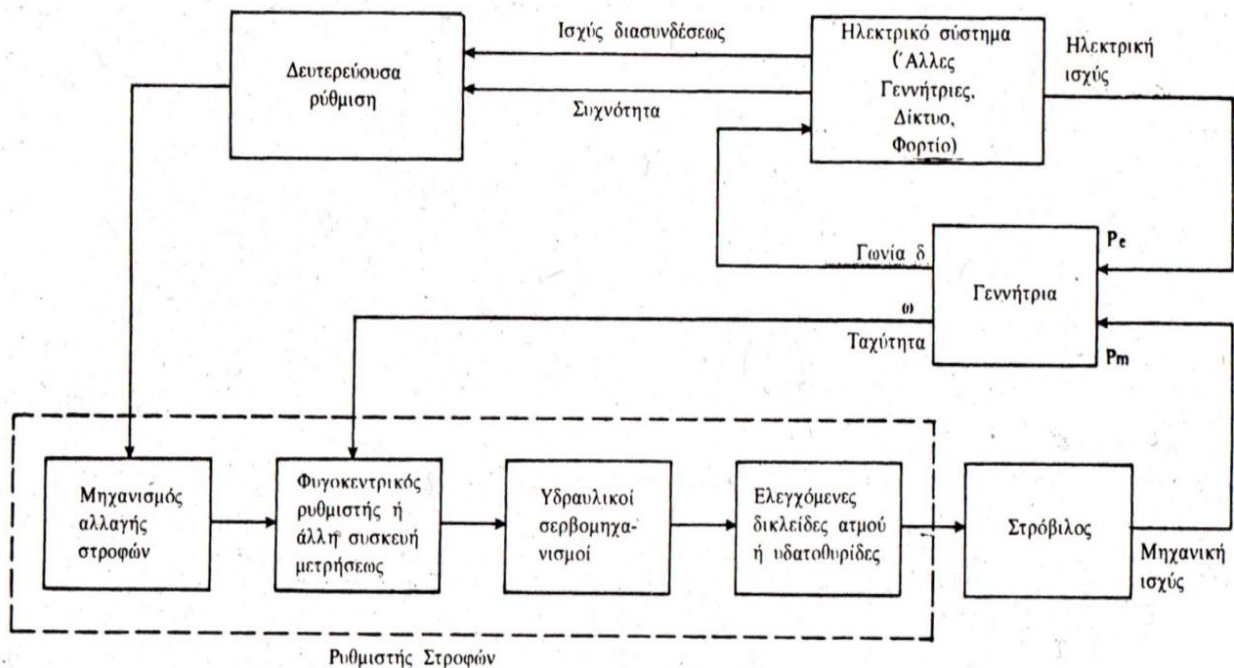
Με τον όρο ευστάθεια συχνότητας αναφερόμαστε στην ικανότητα ενός ΣΗΕ να διατηρεί τη συχνότητά του εντός ενός προκαθορισμένου εύρους τιμών, μετά από μια διαταραχή, η οποία διαταράσσει το συνολικό ισοζύγιο μεταξύ παραγόμενης και καταναλισκόμενης ισχύος [1, 4]. Ειδικότερα, η ευστάθεια συχνότητας εξαρτάται από την ικανότητα του συστήματος να διατηρεί ή να επαναφέρει το ισοζύγιο μεταξύ παραγωγής και ζήτησης με τη μικρότερη δυνατή απόρριψη παραγωγής ή φορτίου. Μια πιθανή αστάθεια εκδηλώνεται με τη μορφή συνεχών ταλαντώσεων στην τιμή της συχνότητας, οι οποίες μπορεί να οδηγήσουν στη διαδοχική αποκοπή μονάδων παραγωγής και φορτίων μέχρι την ολική σβέση του συστήματος.

Θεωρώντας μεμονωμένη γεννήτρια στη μόνιμη κατάσταση, αυτή παράγει συγκεκριμένη ποσότητα ισχύος και στρέφεται με σταθερή γωνιακή ταχύτητα. Αυτή μεταβάλλεται όταν μεταβληθούν οι ροπές που ασκούνται στο δρομέα της. Αυτές είναι η ηλεκτρομαγνητική ροπή, η οποία οφείλεται στο φορτίο που τροφοδοτεί η γεννήτρια, οι τριβές και η μηχανική ροπή του στροβίλου που κινεί την γεννήτρια. Αν αυξηθεί το φορτίο, από τις παραπάνω θα αυξηθεί μόνο η ηλεκτρομαγνητική ροπή με αποτέλεσμα να επιβραδυνθεί ο δρομέας και να μειωθεί η συχνότητα του συστήματος. Ανάλογα και για μείωση του φορτίου η συχνότητα αυξάνεται.

Προκειμένου να μην παρατηρούνται τα παραπάνω φαινόμενα σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας οι γεννήτριες δεν παράγουν την μέγιστη δυνατή ισχύ ώστε να μπορούν να ανταπεξέλθουν σε περιπτώσεις αύξησης της ζήτησης ή απώλειας παραγωγής λόγω κάποιου σφάλματος. Έτσι ορίζεται το μέγεθος της στρεφόμενης εφεδρείας ως η επιπλέον ποσότητα ισχύος που μπορεί να παράγει κάθε γεννήτρια έως ότου να φτάσει στη μέγιστη δυνατή.

Όσον αφορά στο θέμα ελέγχου της συχνότητας, επιβάλλεται οι μεταβολές του μεγέθους της να είναι όσον το δυνατόν μικρότερες. Έτσι υπάρχουν δυο επίπεδα ελέγχου, η πρωτεύουσα ρύθμιση για μια βραχυχρόνια προσαρμογή της ισχύος και η δευτερεύουσα ρύθμιση για την εξάλειψη των μόνιμων σφαλμάτων συχνότητας.

Στο Σχ. 1.7 παρουσιάζονται οι διατάξεις που συμβάλλουν στη ρύθμιση της συχνότητας [1]:



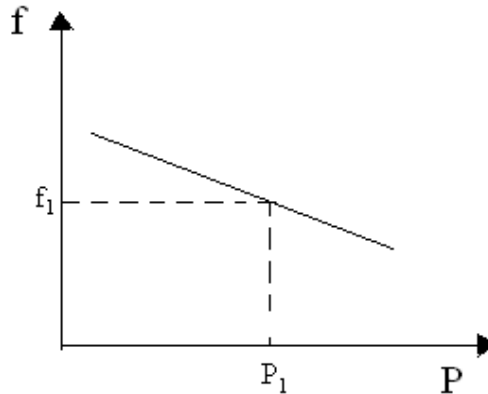
Σχ. 1.7 Μπλοκ διάγραμμα ρύθμισης συχνότητας

Η πρωτεύουσα ρύθμιση γίνεται σε κάθε μονάδα παραγωγής ξεχωριστά και πρωτεύοντα ρόλο σε αυτήν διαδραματίζει ο ρυθμιστής στροφών. Αναφέρεται κυρίως σε περιπτώσεις όπου απαιτείται βραχυχρόνια προσαρμογή της ισχύος. Με την ρύθμιση αυτή ελέγχεται η μηχανική ισχύς που παράγεται στις γεννήτριες για να ανταποκρίνεται στη ζήτηση φορτίου και έτσι σταθεροποιείται η συχνότητα. Είσοδος της διάταξης του ρυθμιστή στροφών είναι η συχνότητα περιστροφής και έξοδος η παραγόμενη ισχύς. Η δευτερεύουσα ρύθμιση αναφέρεται σε μακροχρόνιες μεταβολές της ισχύος και αντισταθμίζει τα μόνιμα σφάλματα που αφήνει η πρωτεύουσα ρύθμιση.

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 νηξελογεννήτριες ο ρυθμιστής στροφών καθορίζει το άνοιγμα της βαλβίδας για τη ροή του καυσίμου (νήξελ) 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 μηχανική ισχύς.

Η δευτερεύουσα ρύθμιση όπως προαναφέρθηκε διορθώνει τα μόνιμα σφάλματα της πρωτεύουσας και πραγματοποιείται με κατάλληλη μετατόπιση της χαρακτηριστικής φορτίου-συχνότητας της γεννήτριας. Στο σημείο αυτό κρίνεται σκόπιμο να δοθεί ο ορισμός του *στατισμού*.

Ως *στατισμός*, R , ορίζεται η κλίση της χαρακτηριστικής φορτίου-συχνότητας. Συγκεκριμένα αν έχουμε την καμπύλη του Σχ. 1.8:



Σχ. 1.8: Χαρακτηριστική φορτίου-συχνότητας

Ο στατισμός θα δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$R = -\frac{\Delta f}{\Delta P} \quad (1.18)$$

Η μεταβολή της συχνότητας αναφέρεται στην μόνιμη κατάσταση μετά την πρωτεύουσα ρύθμιση και προκύπτει από την αντίδραση του ρυθμιστή στροφών σε μεταβολή του φορτίου. Το σφάλμα αυτό εξαλείφεται μετά και την δευτερεύουσα ρύθμιση. Ανάλογα με τις τιμές του στατισμού για ορισμένη μεταβολή στην συχνότητα έχουμε:

- Μεγάλος στατισμός: μικρή μεταβολή στην παραγωγή
- Μικρός στατισμός: μεγάλη μεταβολή στην παραγωγή
- Μηδενικός στατισμός: η συχνότητα δεν επηρεάζεται από τυχόν αλλαγές στο φορτίο

Η δευτερεύουσα ρύθμιση πραγματοποιείται από τον μηχανισμό αλλαγής στροφών, ο οποίος υπάρχει στους ρυθμιστές στροφών και μεταθέτει κατάλληλα την χαρακτηριστική φορτίου-συχνότητας και προσαρμόζει με αυτόν τον τρόπο την παραγόμενη ισχύ των επιμέρους γεννητριών του συστήματος.

Σε γενικές γραμμές, τα προβλήματα αστάθειας συχνότητας σχετίζονται με αστοχίες του εξοπλισμού προστασίας, με ανεπιτυχή συνεργασία μεταξύ των διατάξεων ελέγχου και προστασίας, με έλλειψη στρεφόμενης εφεδρείας ή με περίσσεια παραγωγής μετά από νησιδοποίηση [24]. Σε απομονωμένα νησιωτικά συστήματα, η ανάλυση της ευστάθειας συχνότητας εξετάζεται για κάθε σενάριο διαταραχής, το οποίο προκαλεί σημαντική απώλεια παραγωγής ή φορτίου [26]. Η ανάλυση ευστάθειας συχνότητας πραγματοποιείται με εξαγωγή κατάλληλων ισοδυνάμων μοντέλων, σύμφωνα με τα οποία θεωρείται ότι όλες οι γεννήτριες και όλα τα φορτία κάθε νησίδας συνδέονται σε έναν κοινό ζυγό. Στην ενότητα που ακολουθεί θα περιγραφεί μια τέτοια απλοποιημένη παράσταση για την περίπτωση ενός αυτόνομου συστήματος

1.7.2 Ρύθμιση συχνότητας σε αυτόνομο σύστημα – Απλοποιημένο μοντέλο αυτόνομου ΣΗΕ

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 εξ' ολοκλήρου 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 γωνιακή συχνότητα λαμβάνεται ως ο σταθμισμένος μέσος όρος των συχνοτήτων που προκύπτουν από τις σύγχρονες γεννήτριες (NG το πλήθος), δηλαδή:

$$\omega_{sys} = \frac{\sum_{i=1}^{NG} H_i \omega_i}{\sum_{i=1}^{NG} H_i} \quad (1.19)$$

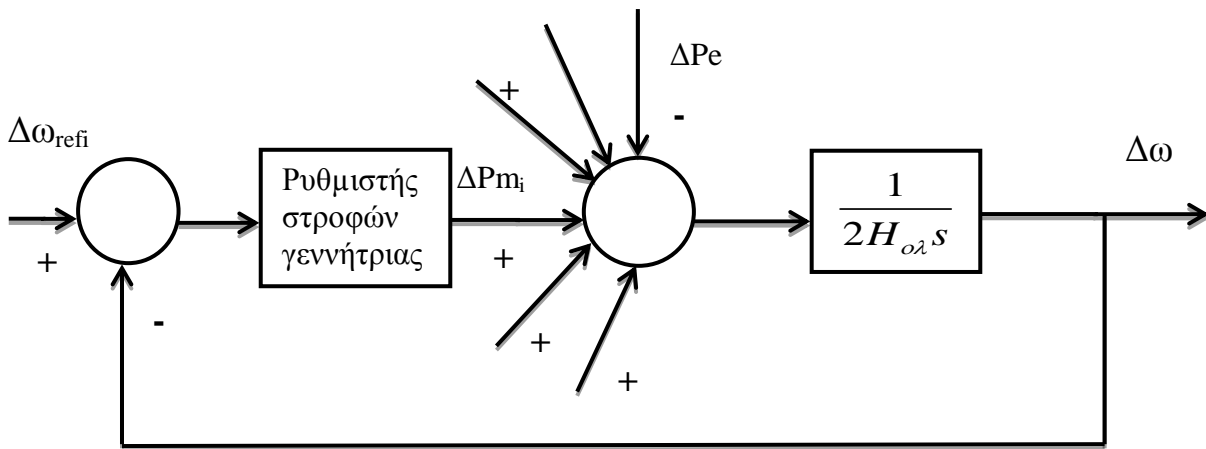
Λόγω των χρονικών σταθερών που διέπουν τη λειτουργία των ρυθμιστών στροφών υπάρχει μία καθυστέρηση μέχρι να δοθεί η εντολή απ' αυτούς για αύξηση της παραγόμενης μηχανικής ισχύς των γεννητριών. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μεταβατική βύθιση της συχνότητας κατά τα πρώτα δευτερόλεπτα μετά από μια τέτοια διαταραχή. Είναι σημαντικό η βύθιση αυτή να μην ξεπερνά κάποια προκαθορισμένα όρια που θα οδηγήσει σε αναγκαστική ενεργοποίηση των διατάξεων προστασίας και ελέγχου 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 κατά τα πρώτα δευτερόλεπτα 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 συμβάλει 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 η μικρότερη η επιβράδυνση στις γωνιακές ταχύτητες των δρομέων τους, από τις οποίες προκύπτει και η συχνότητα του συστήματος.

Στο Σχ. 1.8 παρουσιάζεται μέσω διαγραμμάτων βαθμίδων ένα απλοποιημένο μοντέλο ενός αυτόνομου ΣΗΕ με την παραδοχή κοινού ζυγού σύνδεσης για όλες τις συνιστώσες του συστήματος (φορτία – γεννήτριες). Θεωρούμε δηλαδή ότι οι δρομείς των γεννητριών στρέφονται με κοινή γωνιακή ταχύτητα ή ισοδύναμα πως ισχύει $\omega_{sys} = \omega_i$ για κάθε σύγχρονη γεννήτρια. Σε αυτή την περίπτωση η συνολική ανηγμένη αδράνεια του συστήματος ισούται με:

$$H_{o\lambda} = \sum_{i=1}^{NG} H_i \quad (1.20)$$

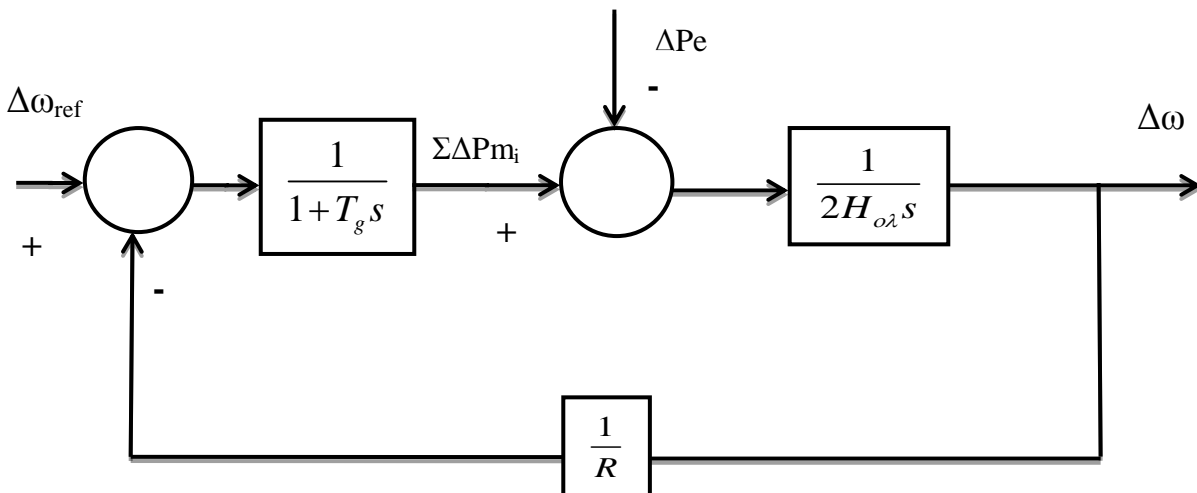
Εφόσον γραμμικοποιηθεί το σύστημα γύρω από ένα σημείο κοντά στη σύγχρονη ταχύτητα, η εξίσωση κίνησης του ενοποιημένου δρομέα (με αδράνεια ίση με $H_{o\lambda}$) μπορεί ισοδύναμα να περιγραφεί στο αμ σύστημα με βάση τη σχέση (1.4), όπου θεωρούμε ότι οι αμ τιμές των ροπών ισούνται περίπου με τις αμ τιμές των ισχύων. Το άθροισμα $\sum \Delta P_{mi}$ παριστά τη συνολική μεταβολή της παραγόμενης μηχανικής ισχύος των γεννητριών και το ΔP_e παριστά τη μεταβολή της καταναλισκόμενης ηλεκτρικής ισχύς λόγω του φορτίου.

$$\Sigma \Delta P_{mi} - \Delta P_e = 2H_{o\lambda} \Delta \dot{\omega} \quad (1.21)$$



Σχ. 1.8: Απλοποιημένο μοντέλο αυτόνομου συστήματος (παραδοχή κοινού ζυγού)

Έτσι η αδρανειακή απόκριση του συστήματος εξαρτάται από τη συνολική ανηγμένη αδράνεια $H_{o\lambda}$. Όσο μεγαλύτερη είναι αυτή τόσο περιορίζεται και ο ρυθμός πτώσης της συχνότητας, άρα και η μεταβατική της βύθιση, μετά από ενδεχόμενη διαταραχή που διαταράσσει το ισοζύγιο ενέργειας του συστήματος. Η είσοδος $\Delta\omega_{refi}$ του κάθε ρυθμιστή στροφών είναι μηδενική όταν δεν υπάρχει μόνιμο σφάλμα στη συχνότητα. Η απλοποιημένη παράσταση του Σχ. 1.8 μπορεί να απλοποιηθεί ακόμα περισσότερο αν θεωρήσουμε πως όλες οι μονάδες παραγωγής είναι πανομοιότυπες, πράγμα που ισοδυναμεί με ενιαία θεώρηση των χαρακτηριστικών των επιμέρους ρυθμιστών στροφών (στατισμοί, χρονικές σταθερές). Στο Σχ. 1.9 δίνεται το διάγραμμα βαθμίδων που περιγράφει την απόκριση συχνότητας του αυτόνομου συστήματος για αυτή την περίπτωση. Με R συμβολίζεται ο στατισμός της ισοδύναμης πλέον μονάδας παραγωγής και με T_g η χρονική σταθερά προς αναπαράσταση της χρονικής καθυστέρησης του ισοδύναμου ρυθμιστή στροφών.

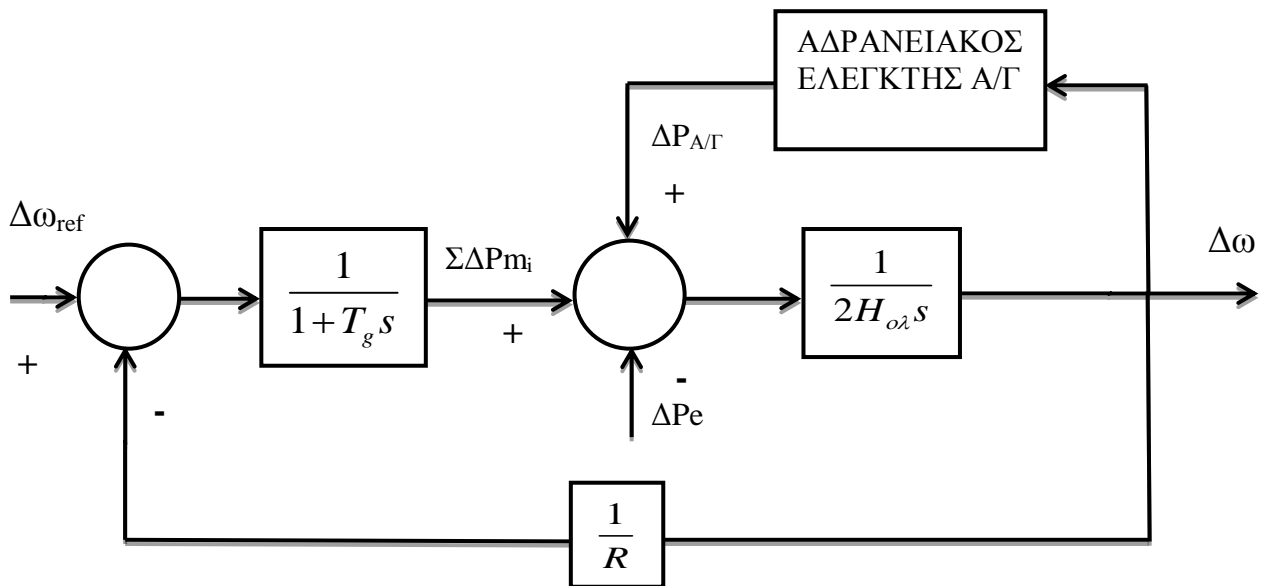


Σχ. 1.9: Απλοποιημένο μοντέλο αυτόνομου συστήματος (παραδοχή κοινού ζυγού) με τη θεώρηση ότι όλες οι μονάδες παραγωγής είναι πανομοιότυπες

1.7.3 Ρύθμιση συχνότητας σε αυτόνομο σύστημα με αυξημένη αιολική διείσδυση

Σε ένα αυτόνομο σύστημα με αυξημένη αιολική διείσδυση η ικανότητα του συστήματος για αδρανειακή απόκριση μπορεί να μειωθεί αισθητά. Συγκεκριμένα αυτό συμβαίνει σε χρονικές περιόδους όπου σημαντικό ποσοστό της παραγωγής καλύπτεται από τα αιολικά πάρκα. Κάτι τέτοιο συνεπάγεται και αντίστοιχη μείωση στην ποσόστωση της παραγόμενης ισχύος από τις συμβατικές μονάδες παραγωγής. Έτσι ενδεχόμενη διαταραχή στο ισοζύγιο ενέργειας σε τέτοιες συνθήκες μπορεί να οδηγήσει σε έντονη μεταβατική βύθιση της συχνότητας με τις συνακόλουθες συνέπειες για την ομαλή λειτουργία του δικτύου. Σε αναλογία με την απλοποιημένη παράσταση ενός αυτόνομου συστήματος, όπως παρουσιάστηκε στο Σχ. 1.8, η μείωση του ποσοστού συμμετοχής των συμβατικών μονάδων στην κάλυψη του φορτίου ισοδυναμεί με μείωση της συνολικής ανηγμένης σταθεράς αδράνειας $H_{ολ}$. Κάτι τέτοιο πρακτικά ισοδυναμεί με αύξηση του ρυθμού πτώσης της συχνότητας του συστήματος ω_{sys} αμέσως μετά τη διαταραχή, καθώς για τα πρώτες χρονικές στιγμές αυτός καθορίζεται από τον όρο $1/2H_{ολ}$ (αμ συχνότητα/s).

Για τους παραπάνω λόγους κρίνεται αναγκαία σε αυτόνομα συστήματα με υψηλή αιολική διείσδυση η συμβολή και των ανεμογεννητριών στην αδρανειακή απόκριση του συστήματος, προς βελτίωση των χαρακτηριστικών μεταβατικής βύθισης της συχνότητας. Η συμβολή αυτή είναι εφικτή στις ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών και μπορεί να επιτευχθεί μέσω της προσαρμογής σε αυτές ενός κατάλληλα διαμορφωμένου αδρανειακού ελεγκτή. Σκοπός του ελεγκτή αυτού είναι η αύξηση της εγχεόμενης ενεργού ισχύος από τα αιολικά πάρκα όταν διαγνωστεί πτώση στη συχνότητα. Η αύξηση αυτή ($\Delta P_{ΑΓ}$ στο Σχ. 1.10) είναι προσωρινή και οδηγεί σε προσωρινή επιβράδυνση του ρομέα των ανεμογεννητριών. Γίνεται εκμετάλλευση δηλαδή της αποθηκευμένης κινητικής ενέργειας στους άξονες τους ώστε να συμβάλλουν και αυτές στην αδρανειακή απόκριση του συστήματος. Έτσι δύναται η δυνατότητα να υποβοηθήσουν το έργο των συμβατικών μονάδων έως ότου δράσουν οι ρυθμιστές στροφών αυτών κατά την πρωτεύουσα ρύθμιση. Φυσικά όταν ολοκληρωθεί η πρωτεύουσα ρύθμιση οι ανεμογεννήτριες επιστρέφουν στο αρχικό σημείο λειτουργίας. Επομένως ο αδρανειακός ελεγκτής (ή εξομοιωτής αδρανείας) αποτελεί ουσιαστικά ένα φίλτρο απαλοιφής που ενεργοποιείται όταν διαγνωστεί μεταβολή στη συχνότητα του συστήματος και έχει μηδενική έξοδο σε συνθήκες μόνιμου καταστάσεως (όπως μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας πρωτεύουσας ρύθμισης όπου προκύπτει ένα μόνιμο σφάλμα συχνότητας).



Σχ. 1.10: Απλοποιημένο μοντέλο αυτόνομου συστήματος (παραδοχή κοινού ζυγού) με τη θεώρηση ότι όλες οι μονάδες παραγωγής είναι πανομοιότυπες και αδρανειακό ελεγκτή στις Α/Γ

Σε αναλογία με όσα αναφέρθηκαν λοιπόν στην ενότητα 1.7.2, η προσαρμογή του αδρανειακού ελεγκτή οδηγεί στην απλοποιημένη παράσταση του αυτόνομου συστήματος, όπως αυτή φαίνεται στο Σχ. 1.10, για την παραδοχή κοινού ζυγού και πανομοιότυπων συμβατικών μονάδων. Να σημειωθεί ότι στην απλοποιημένη αυτή παράσταση θεωρείται επίσης μία ισοδύναμη ανεμογεννήτρια που συνδέεται στον κοινό ζυγό, για την αναπαράσταση του συνόλου της αιολικής παραγωγής, στην οποία τοποθετείται ο αδρανειακός ελεγκτής.

1.8 Αντικείμενο και δομή της διπλωματικής

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής είναι η οργάνωση βιβλιοθήκης μοντέλων και εγχειριδίου χρήσης αυτών για το λογισμικό πακέτο προσομοίωσης WHSSP που αναπτύχθηκε στο εργαστήριο Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας του ΕΜΠ με σκοπό τη μελέτη ευστάθειας ΣΗΕ. Συγκεκριμένα γίνεται μία προσπάθεια συστηματικής καταγραφής των μοντέλων που έχουν ήδη αναπτυχθεί ή αναπτύχθηκαν στα πλαίσια της εργασίας αυτής με ιδιαίτερη έμφαση στα μοντελοποίηση ανεμογεννητριών μεταβλητών στροφών. Επιπροσθέτως γίνεται εφαρμογή των μοντέλων αυτών για τη μελέτη του αυτόνομου ηλεκτρικού συστήματος της Ρόδου στο περιβάλλον του WHHSP.

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μία εισαγωγή στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και ιδιαίτερα στην αιολική ενέργεια παρουσιάζοντας τις επικρατέστερες τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται σήμερα για την κατασκευή ανεμογεννητριών. Επίσης γίνεται μία αναφορά στους βασικούς κανόνες που θεσπίζονται από τους διαχειριστές ΣΗΕ σχετικά με τις απαιτήσεις από τα αιολικά πάρκα που συνδέονται στο δίκτυο. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στο θέμα ρύθμισης της συχνότητας σε αυτόνομα συστήματα με αυξημένη αιολική διείσδυση. Για το σκοπό αυτό γίνεται σύντομη περιγραφή των διαδικασιών ρύθμισης συχνότητας που λαμβάνουν χώρα σε ένα ΣΗΕ. Τέλος δίνονται συνοπτικά τα θεωρητικά υπόβαθρο για την ανάλυση ευστάθειας συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς αποτελεί αναπόσπαστο κομμάτι για την κατανόηση δυναμικών φαινομένων που συμβαίνουν σε ένα ΣΗΕ και τα οποία θα μελετηθούν και στην παρούσα εργασία.

Στο δεύτερο κεφάλαιο αναλύεται το υπολογιστικό πακέτο WHSSP. Συγκεκριμένα επεξηγείται ο τρόπος υλοποίησης του πακέτου αυτού προσομοίωσης στο περιβάλλον του MATLAB/Simulink μέσω της περιγραφής της γενική δομής των διατάξεων ΣΗΕ και του μοντέλου επίλυσης των εξισώσεων του δικτύου. Γίνεται για το σκοπό αυτό μια σύντομη περιγραφή των αλγεβρικών εξισώσεων που διέπουν το δίκτυο και αναλύονται οι μέθοδοι επίλυσής τους ανάλογα με τις παραδοχές που γίνονται για την παράσταση των διαφόρων συνιστωσών. Τέλος παρουσιάζονται διάφορες προσεγγίσεις που σχετίζονται με τη κατάστρωση του πίνακα αγωγιμοτήτων του δικτύου κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης στο περιβάλλον του WHSSP.

Στο τρίτο κεφάλαιο, παρουσιάζονται τα μοντέλα διαφόρων συνιστωσών ΣΗΕ που ενσωματώθηκαν στη βιβλιοθήκη του WHSSP, εκτός από αυτά που αφορούν τη μοντελοποίηση ανεμογεννητριών. Γίνεται μια προσπάθεια ομαδοποίησης ομοειδών μοντέλων στα πλαίσια συστηματικής οργάνωσης της βιβλιοθήκης. Στη συνέχεια περιγράφεται το κάθε μοντέλο ξεχωριστά με την παράθεση διαγραμμάτων βαθμίδων όπου απαιτείται περισσότερη σαφήνεια. Επίσης σε κάθε μοντέλο παρατίθενται οι παράμετροι που διέπουν τη λειτουργία του και δίνονται επεξηγήσεις σχετικά με τον τρόπο εισαγωγής τιμών στις παραμέτρους αυτές.

Στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται η παρουσίαση της μοντελοποίησης των ανεμογεννητριών τύπου Α, Γ και Δ στα πλαίσια του WHSSP. Επιχειρείται μια αναλυτική περιγραφή του τρόπου λειτουργίας, των σχημάτων ελέγχου και των χαρακτηριστικών παραμέτρων του κάθε μοντέλου. Ιδιαίτερη προσοχή δίνεται στη μελέτη της συμπεριφοράς των ανεμογεννητριών μεταβλητών στροφών (ασύγχρονες γεννήτριες διπλής τροφοδότησης και πλήρους μετατροπέα) και στις διάφορες παραλλαγές των σχημάτων ελέγχου τους. Συγκεκριμένα μελετώνται στρατηγικές ελέγχου συνδεδεμένες με την απαίτηση για αδιάλειπτη λειτουργία σε βύθιση τάσης. Έτσι προς εξαγωγή συμπερασμάτων διεξήχθησαν συγκριτικές δοκιμές με το επαγγελματικό πρόγραμμα PSS/E σε ένα

σύστημα ανεμογεννήτρια-άπειρος ζυγός (όπως στο Σχ. 1.1). Τέλος, σε ένα τέτοιο σύστημα, έγινε σύγκριση με ένα πλήρες ηλεκτρομαγνητικό μοντέλο αναπαράστασης αιολικού πάρκου αποτελούμενου από ασύγχρονες γεννήτριες διπλής τροφοδότησης, το οποίο βρίσκεται στη βιβλιοθήκη των demo του Simulink.

Στο πέμπτο κεφάλαιο προσομοιώνεται το αυτόνομο σύστημα της Ρόδου χρησιμοποιώντας τα μοντέλα της βιβλιοθήκης. Συγκεκριμένα έγινε ανάλυση δύο ενδεικτικών σεναρίων λειτουργίας για τη μελέτη της συμπεριφοράς του δικτύου, και ιδιαίτερα της συχνότητας αυτού, σε συνθήκες αυξημένης αιολικής διείσδυσης. Πρώτα εξετάζεται η περίπτωση μέγιστης αιολικής παραγωγής και στη συνέχεια η περίπτωση μέγιστης αιολικής διείσδυσης ως ποσοστό επί του φορτίου του νησιού. Και στις δύο περιπτώσεις θεωρήθηκε ως κρίσιμη διαταραχή η απώλεια συμβατικής μονάδας παραγωγής και έγινε ανάλυση των ιδιοτιμών και των ιδιοδιανυσμάτων του γραμμικοποιημένου συστήματος ώστε να μελετηθούν οι κυρίαρχοι ρυθμοί απόκρισης που επηρεάζουν τη συμπεριφορά του. Ειδική αναφορά γίνεται και στην επίδραση που έχει στη μεταβατική βύθιση της συχνότητας η ενεργοποίηση του ελέγχου τερματικής τάσης στα αιολικά πάρκα με ΑΓΔΤ.

Στο έκτο κεφάλαιο εξετάζεται η προσθήκη ελεγκτή αδρανειακής απόκρισης στις ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών με σκοπό την αποφυγή αποκοπής φορτίου λόγω υποσυχνότητας στην περίπτωση του δεύτερου σεναρίου λειτουργίας του κεφαλαίου 5. Η σχεδίαση του αδρανειακού ελεγκτή εξετάζεται ξεχωριστά για τις ανεμογεννήτριες τύπου Γ και Δ μελετώντας την επίδραση που έχει στην λειτουργία τους. Μελετάται επίσης η μεταβολή των ιδιοτιμών του γραμμικοποιημένου συστήματος σε σχέση με την επιλογή των παραμέτρων του ελεγκτή.

Τέλος στο έβδομο κεφάλαιο συνοψίζονται τα συμπεράσματα που εξάγονται από τη μελέτη των προηγούμενων κεφαλαίων. Αναφέρονται ακόμα ζητήματα με τα οποία δεν ασχολείται η παρούσα εργασία και μπορούν να αποτελέσουν αντικείμενο μελλοντικής ερευνητικής μελέτης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

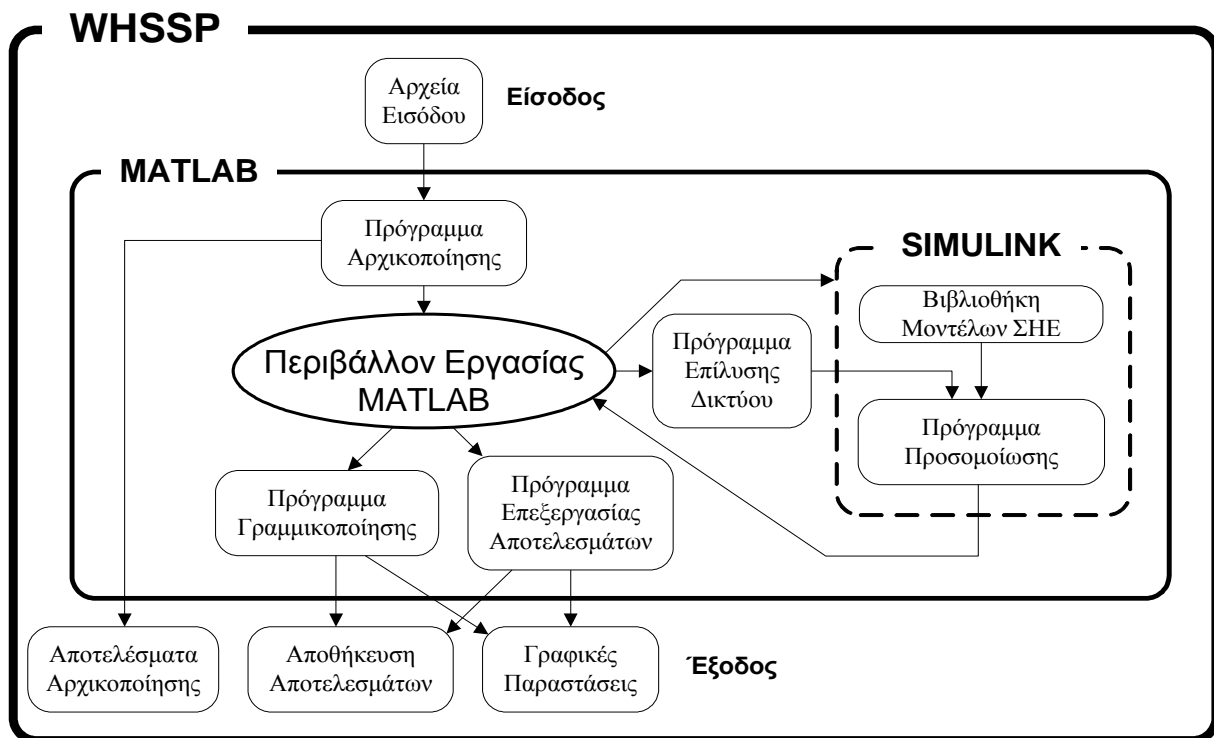
Περιγραφή περιβάλλοντος προσομοίωσης

2.1 Υπολογιστικό περιβάλλον WHSSP

2.1.1 Γενικά

Το υπολογιστικό πακέτο WHSSP (Wind-Hybrid System Simulation Package), έχει υλοποιηθεί σε περιβάλλον MATLAB, με τη χρήση κυρίως της πλατφόρμας προσομοίωσης και σχεδίασης δυναμικών συστημάτων Simulink, στα πλαίσια συνεργασίας του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου και του Πανεπιστημίου Λιέγης [5]. Αναπτύχθηκε στο εργαστήριο Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας του ΕΜΠ στα πλαίσια διδακτορικής διατριβής [6] ως εκπαιδευτικό εργαλείο κατάλληλο για δυναμικές προσομοιώσεις και μελέτες ευστάθειας μικρών έως μεσαίων διασυνδεδεμένων ή αυτόνομων δικτύων με αυξημένη αιολική διείσδυση.

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. Επίσης ως ευέλικτο εργαλείο στην ανάπτυξη και τη επέκτασή του, προσφέρεται για τη μελέτη ενός ευρέος φάσματος φαινομένων που σχετίζονται με τη λειτουργία ενός Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας. Η γενική δομή του πακέτου WHSSP περιγράφεται στο Σχ 2.1 [6] που ακολουθεί:



Σχ.2.1 Γενική δομή πακέτου WHSSP

Στο Σχ. 2.1 διακρίνονται τα βασικά δομικά χαρακτηριστικά του πακέτου:

- 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. Στο παράρτημα Α δίνονται αναλυτικοί πίνακες που επεξηγούν την κατάστρωση των συγκεκριμένων αρχείων. 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) αποτελεί ένα τυποποιημένο εργαλείο για την εκτέλεση σημαντικών διαδικασιών. Συγκεκριμένα 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 (π.χ. βραχυκύκλωμα σε ζυγό ή γραμμή μεταφοράς) 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.

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). Για το σκοπό αυτό ο χρήστης μπορεί να ανατρέξει στις έτοιμες βιβλιοθήκες βαθμίδων του Simulink, οι οποίες καλύπτουν ένα μεγάλο εύρος δομικών στοιχείων, όπως είναι για παράδειγμα οι βαθμίδες διατάξεων συνεχούς και διακριτού χρόνου, μαθηματικών συναρτήσεων, διαφόρων γραμμικών και μη γραμμικών συνιστωσών, διατάξεων γραφικής απεικόνισης αποτελεσμάτων, παράστασης πηγών κτλ. Μάλιστα στον τομέα αυτό έγκειται και ο ακαδημαϊκός προσανατολισμός του συγκεκριμένου πακέτου αφού σε αντίθεση με αντίστοιχα επαγγελματικά προγράμματα προσομοιώσεων δεν υπάρχουν μοντέλα διατάξεων που να αντιμετωπίζονται ως «μαύρα κουτιά». Αντίθετα εδώ υπάρχει η δυνατότητα εμβάθυνσης στα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της κάθε συνιστώσας και ο χρήστης μπορεί να επέμβει προς επέκταση και βελτίωση των ήδη υπαρχόντων. Εδώ έγκειται και η σημασία οργάνωσης μιας πλήρους βιβλιοθήκης ώστε ο χρήστης να διαθέτει μια μεγάλη γκάμα έτοιμων μπλοκ, υλοποιημένων στο Simulink, μπορώντας έτσι να προσομοιώσει κατά το δυνατόν πιστότερα ένα ΣΗΕ στις μελέτες ευστάθειας. Αναλυτικότερα στα επόμενα δύο κεφάλαια θα παρατεθούν μοντέλα που έχουν ήδη αναπτυχθεί ή αναπτύχθηκαν και επεκτάθηκαν στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

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 εξισώσεων που περιγράφουν τη συμπεριφορά τους. Όσον αφορά τις διατάξεις διακριτού χρόνου, (π.χ. Συστήματα Αλλαγής Τάσης Υπό Φορτίο

στους μετασχηματιστές) αυτές περιγράφονται από εξισώσεις διαφορών. Εκτός από τις παραπάνω εξισώσεις ισχύουν φυσικά και η Αρχή Διατήρησης της Ενέργειας και οι νόμοι του Kirchhoff. Από τους τελευταίους προκύπτουν και αλγεβρικές εξισώσεις οι οποίες διέπουν το δίκτυο και εκφράζουν το ισοζύγιο ενεργού-άεργου ισχύος σε όλους τους ζυγούς. Στη συνέχεια του παρόντος κεφαλαίου ακολουθεί μία σύντομη περιγραφή της γενικής δομής των διαφορών διατάξεων, ενώ γίνεται και μία επισκόπηση στους τρόπους επίλυσης των εξισώσεων του δικτύου.

2.1.2 Αλγεβρικές εξισώσεις του δικτύου

Στην ενότητα αυτή θα παραθέσουμε τις αλγεβρικές εξισώσεις που διέπουν το δίκτυο ώστε να γίνουν ευκολότερα κατανοητά τόσο το μοντέλο αναπαράστασης των διαφορών συνιστωσών όσο και η διαδικασία επίλυσης. Έστω λοιπόν 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 θεωρούνται σταθερής τάσης κατά μέτρο και γωνία (άπειροι ζυγοί).

Έστω xy το κοινό ορθογώνιο πλαίσιο 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 του συστήματος. 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:

$$\omega_{sys} = \frac{\sum_{i=1}^G H_i \omega_i}{\sum_{i=1}^G H_i} \quad (2.2)$$

όπου G το πλήθος των σύγχρονων γεννητριών του συστήματος, ω_i η αντίστοιχη ταχύτητα του δρομέα και H_i η αδράνεια της γεννήτριας i [6]. Η μέθοδος αυτή είναι γνωστή ως παράσταση του συστήματος μέσω του θεωρήματος κέντρου αδρανείας (Center Of Inertia, COI) [3].

Αν v_N, 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 i_N, i_I τα αντίστοιχα διανύσματα για τα εγγεόμενα ρεύματα, σύμφωνα με τον Νόμο του Ohm θα ισχύει:

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

και

$$i_N = \left[\begin{bmatrix} i_{x1} & i_{y1} \end{bmatrix} \cdots \begin{bmatrix} i_{xN} & i_{yN} \end{bmatrix} \right]^T \quad (2.2\beta)$$

$$\begin{bmatrix} i_N \\ i_I \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} Y_N & Y_{NI} \\ Y_{IN} & Y_I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_N \\ v_I \end{bmatrix} = \mathbf{0}_{2(N+NI) \times 1} \quad (2.2\gamma)$$

όπου:

- \mathbf{Y}_N , \mathbf{Y}_{NI} , \mathbf{Y}_{IN} και \mathbf{Y}_I είναι 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 της σχέσης (2.2γ) αποτελείται από N υποπίνακες \mathbf{y}_{ij} διαστάσεων 2×2 , οι οποίοι έχουν την εξής μορφή:

$$\mathbf{y}_{ij} = \begin{bmatrix} g_{ij} & -b_{ij} \\ b_{ij} & g_{ij} \end{bmatrix} \quad (2.2\delta)$$

Έτσι με βάση τις σχέσεις (2.2α-δ), το σύνολο των αλγεβρικών εξισώσεων που διέπουν το δίκτυο μπορεί να γραφεί και αναλυτικά σε διανυσματική μορφή ως εξής:

$$\begin{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{x1} \\ i_{y1} \\ \vdots \\ i_{xi} \\ i_{yi} \\ \vdots \\ i_{xN} \\ i_{yN} \end{bmatrix} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} g_{11} & -b_{11} \\ b_{11} & g_{11} \end{bmatrix} & \dots & \begin{bmatrix} g_{1i} & -b_{1i} \\ b_{1i} & g_{1i} \end{bmatrix} & \dots & \begin{bmatrix} g_{1N} & -b_{1N} \\ b_{1N} & g_{1N} \end{bmatrix} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \begin{bmatrix} g_{i1} & -b_{i1} \\ b_{i1} & g_{i1} \end{bmatrix} & & \begin{bmatrix} g_{ii} & -b_{ii} \\ b_{ii} & g_{ii} \end{bmatrix} & & \begin{bmatrix} g_{iN} & -b_{iN} \\ b_{iN} & g_{iN} \end{bmatrix} \\ \vdots & & \vdots & \ddots & \vdots \\ \begin{bmatrix} g_{N1} & -b_{N1} \\ b_{N1} & g_{N1} \end{bmatrix} & \dots & \begin{bmatrix} g_{Ni} & -b_{Ni} \\ b_{Ni} & g_{Ni} \end{bmatrix} & \dots & \begin{bmatrix} g_{NN} & -b_{NN} \\ b_{NN} & g_{NN} \end{bmatrix} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{x1} \\ v_{y1} \\ \vdots \\ v_{yi} \\ v_{yi} \\ \vdots \\ v_{xN} \\ v_{yN} \end{bmatrix} \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

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 από το πρόγραμμα επίλυσης δικτύου, 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 (2.2γ). Οπότε, το άγνωστο $2N \times 1$ διάνυσμα \mathbf{v}_N των N τάσεων του δικτύου θα προκύψει από την επίλυση του συστήματος:

$$\mathbf{i}_N - \mathbf{Y}_N \mathbf{v}_N - \mathbf{Y}_{NI} \mathbf{v}_I = \mathbf{0}_{2N \times 1} \quad (2.4)$$

Προκειμένου να επιλυθεί το σύστημα (2.4), το διάνυσμα \mathbf{i}_N των προβολών των εγγεόμενων ρευμάτων μπορεί να εκφραστεί συναρτήσει του αγνώστου διανύσματος \mathbf{v}_N των τάσεων.

Στη γενική περίπτωση (αγνοώντας σε πρώτη φάση την ύπαρξη ανεμογεννητριών στο δίκτυο), 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 i_N προκύπτει από το παρακάτω άθροισμα:

$$i_N = i_G + i_M + i_{NL} \quad (2.5)$$

όπου i_G, i_M, 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 [6]:

$$i_G = Y_G v_N + b_G \quad (2.6)$$

$$i_M = Y_M v_N + b_M \quad (2.7)$$

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

$$i_{G,i} = Y_{G,i} \begin{bmatrix} v_{xi} \\ v_{yi} \end{bmatrix} + b_{G,i} \quad (2.8)$$

$$i_{M,i} = Y_{M,i} \begin{bmatrix} v_{xi} \\ v_{yi} \end{bmatrix} + b_{M,i} \quad (2.9)$$

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 (2.8) και (2.9) θεωρούμε ότι το διάνυσμα των εγγεόμενων ρευμάτων στο δίκτυο λόγω των 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 αυτά θεωρούνται γραμμικά, παραδοχή κοινή στα πλαίσια των μελετών ευστάθειας ΣΗΕ. Στο [6] επεξηγείται πως προκύπτουν οι αναλυτικές εκφράσεις των συνιστωσών αυτών για μοντέλο τετάρτης και τρίτης τάξης των σύγχρονων και ασύγχρονων μηχανών αντίστοιχα.

Στο σημείο αυτό ορίζεται ο τελεστής $\begin{bmatrix} N \\ \text{diag}(\alpha_i) \\ i=1 \end{bmatrix}$, 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:

$$\begin{bmatrix} N \\ \text{diag}(\alpha_i) \\ i=1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_1 & & & 0 \\ & \alpha_2 & & \\ & & \ddots & \\ & & & 0 \\ & & & & \alpha_N \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

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 $NM_1 \times NM_2$.

Επανερχόμενοι στην (2.6), για τον πίνακα Y_G διαστάσεων $2N \times 2N$ και το $2N \times 1$ διάνυσμα b_G ισχύει:

$$Y_G = \left[\begin{array}{c} N \\ \text{diag}(Y_{G,i}) \\ i=1 \end{array} \right] \text{ και } b_G = [b_{G,1}^T \quad \dots \quad b_{G,N}^T]^T \quad (2.11)$$

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

Αντίστοιχα στην (2.7) για τον πίνακα Y_M διαστάσεων $2N \times 2N$ και το $2N \times 1$ διάνυσμα b_M ισχύει:

$$Y_M = \left[\begin{array}{c} N \\ \text{diag}(Y_{M,i}) \\ i=1 \end{array} \right] \text{ και } b_M = [b_{M,1}^T \quad \dots \quad b_{M,N}^T]^T \quad (2.12)$$

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

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

$$i_{NL}(v_N) = [i_{NL,1}^T(v_{x1}, v_{y1}) \quad \dots \quad i_{NL,N}^T(v_{xN}, v_{yN})]^T \quad (2.13)$$

όπου το κάθε υποδιάνυσμα δίνεται από την σχέση:

$$i_{NL,i}(v_{xi}, v_{yi}) = -z_{NL,i} \begin{bmatrix} \frac{P_{Li}(V_i)v_{xi} + Q_{Li}(V_i)v_{yi}}{v_{xi}^2 + v_{yi}^2} \\ \frac{P_{Li}(V_i)v_{yi} - Q_{Li}(V_i)v_{xi}}{v_{xi}^2 + v_{yi}^2} \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

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

και V_i το μέτρο της τάσης στον ζυγό i :

$$V_i = \sqrt{v_{xi}^2 + v_{yi}^2} \quad (2.15)$$

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

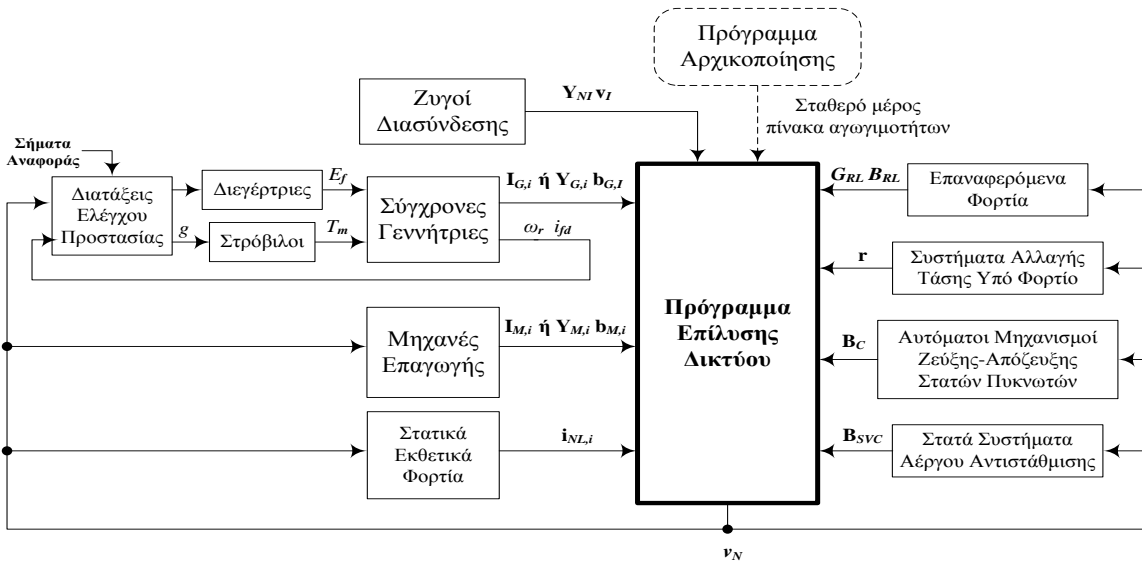
Αντικαθιστώντας τις (2.5), (2.6), (2.7) στην (2.4) προκύπτει:

$$Y_G v_N + b_G + Y_M v_N + b_M + i_{NL}(v_N) - Y_N v_N - Y_{NI} v_I = \mathbf{0}_{2N \times 1} \quad (2.16)$$

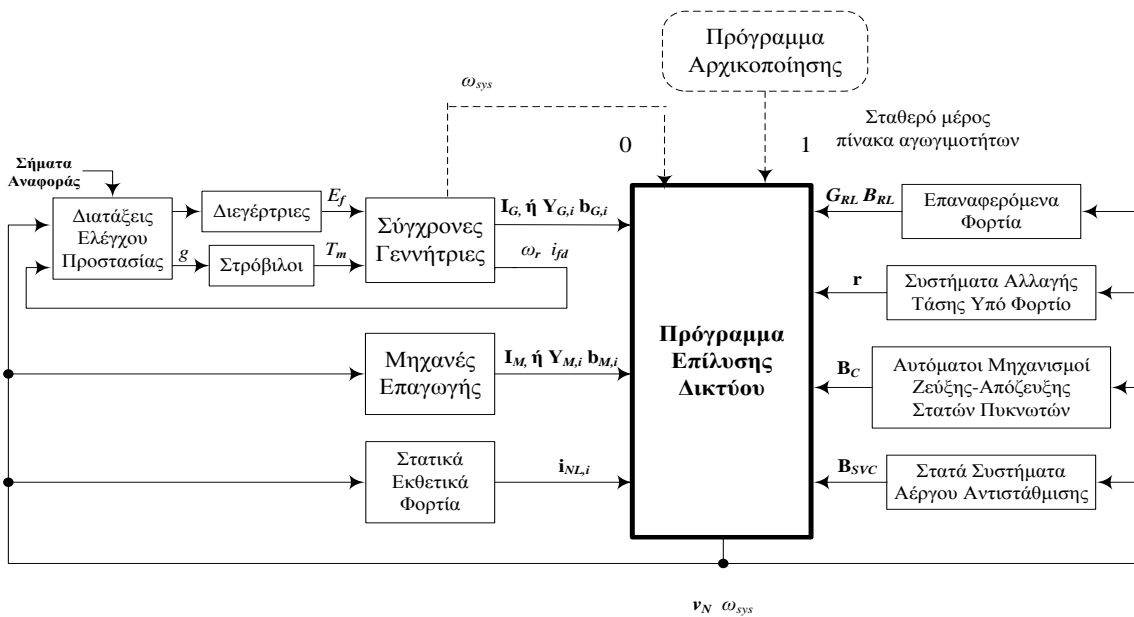
το οποίο είναι εν γένει ένα μη γραμμικό σύστημα $2N$ αλγεβρικών εξισώσεων και για την επίλυση του οποίου χρησιμοποιείται συνήθως η αριθμητική μέθοδος Newton-Raphson.

Ο αλγόριθμος προσομοίωσης στη γενική του μορφή για την περίπτωση διασυνδεδεμένου και αυτόνομου δικτύου παρουσιάζεται στα Σχ. 2.2 και 2.3 αντίστοιχα [6]. Όπως φαίνεται σε αυτά, 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 διδιάστατοι 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 (2.4), ενώ στη δεύτερη βάσει της εξίσωσης (2.16). Παρακάτω θα αναλυθεί εκτενέστερα η μεθοδολογία επίλυσης του δικτύου στο περιβάλλον του WHSSP ανάλογα με τις παραδοχές που γίνονται και τον τρόπο παράστασης των μη γραμμικών φορτίων.



Σχ. 2.2: Αλγόριθμος προσομοίωσης διασυνδεδεμένου δικτύου



Σχ. 2.3: Αλγόριθμος προσομοίωσης αυτόνομου δικτύου

Στην περίπτωση που μελετάται κάποιο αυτόνομο δίκτυο οι ζυγοί διασύνδεσης απουσιάζουν ($NI=0$) με αποτέλεσμα την απλοποίηση του προς επίλυση συστήματος. Επίσης στην περίπτωση αυτόνομου δικτύου, ολόκληρη η μήτρα αγωγιμοτήτων μπορεί να υπολογίζεται σε κάθε βήμα της προσομοίωσης (επιλογή 0 στο Σχ. 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, θεωρείται προτιμότερη εντέλει η προσέγγιση της μήτρας αγωγιμοτήτων ως μη επηρεαζόμενη από τυχόν μεταβολές της συχνότητας (επιλογή 1 στο Σχ. 2.3). Η προσέγγιση αυτή θα αναλυθεί εκτενέστερα στην ενότητα 2.4.

2.1.3 Εξισώσεις διαφορών (Σύστημα Αλλαγής Τάσης Υπό Φορτίο)

Τα Συστήματα Αλλαγής Τάσης Υπό Φορτίο (ΣΑΤΥΦ) χρησιμοποιούνται για την ρύθμιση της τάσης των δικτύων διανομής και παρατίθεται μια σύντομη περιγραφή τους καθώς θα αναφερθούμε στον ιδιαίτερο ρόλο τους. Περιλαμβάνουν ένα τύλιγμα ρυθμίσεως, το οποίο συνδέεται σε σειρά προς ένα από τα δυο κύρια τυλίγματα του μετασχηματιστή, συνήθως το τύλιγμα ΥΤ. Το τύλιγμα ρυθμίσεως περιλαμβάνει πολλαπλές λήψεις, ενώ η επαγόμενη σε αυτό τάση μπορεί να προστίθεται ή να αφαιρείται στην τάση του κύριου τυλίγματος μέσω του Αναστροφέα. Συνήθως η τάση ρυθμίσεως κυμαίνεται σε ποσοστό $\pm 10\%$ της τάσης του κύριου τυλίγματος σε σταθερά βήματα μεγέθους περίπου 1% της ονομαστικής τάσης [7].

Το μοντέλο του ΣΑΤΥΦ ενεργοποιείται εφόσον η τάση στον ρυθμιζόμενο ζυγό που συνδέεται ο εν λόγω μετασχηματιστής ξεφύγει από τα επιτρεπτά όρια που έχουν τεθεί $[V_{\min}, V_{\max}]$. Παράλληλα ο λόγος μετασχηματισμού r παίρνει συγκεκριμένες διακριτές τιμές που ανήκουν στο σύνολο $[r_{\min}, r_{\max}]$. Το κύκλωμα έναυσης περιλαμβάνει δύο χρονικές καθυστερήσεις, την T_{D0} και την T_{D1} . Στην πρώτη αλλαγή λήψης του Μ/Σ η χρονική καθυστέρηση ισούται με $T_{D0} + T_{D1}$, ενώ σε όλες τις υπόλοιπες με T_{D1} .

Είναι σημαντικό να αναφερθεί επίσης ότι στο αρχείο εισόδου που αφορά τους μετασχηματιστές δηλώνεται ρητώς αν ο μετασχηματιστής είναι σταθερής ή μεταβλητής λήψης ώστε ανάλογα να ανανεώνεται και ο πίνακας αγωγιμοτήτων κατά τη διαδικασία επίλυσης των αλγεβρικών εξισώσεων του δικτύου.

Το μοντέλο του παραπάνω συστήματος φαίνεται στον πίνακα 2.1 που ακολουθεί [6]:

Πίνακας 2.1: Μοντέλο Συστήματος αλλαγής τάσης υπό φορτίο

Συνθήκες (Σ1,Σ2) έναυσης μετρητή ΣΑΤΥΦ τη χρονική στιγμή t_0 ($k=0$)	$\Sigma 1: V_{\min} \leq V(t_0^-) \leq V_{\max}$ $\Sigma 2: V(t_0^+) < V_{\min}$ ή $V(t_0^+) > V_{\max}$
Χρονική στιγμή t_{k+1} αλλαγής του λόγου Μ/Σ	$t_{k+1} = t_k + \Delta T_k$ εφόσον $\forall t \in [t_k, t_{k+1}]$ η $\Sigma 2$ είναι αληθής, όπου: $\Delta T_k = \begin{cases} T_{D0} + T_{D1}, & k = 0 \\ T_{D1}, & k = 1, 2, \dots \end{cases}$
Μηχανισμός αλλαγής λόγου Μ/Σ r_{k+1} όταν ελεγχόμενος ζυγός είναι ο ζυγός αγωγιμότητας	$r_{k+1} = \begin{cases} r_k + \Delta r, & \text{αν } V > V_{\max} \text{ και } r_k + \Delta r \leq r_{\max} \\ r_k - \Delta r, & \text{αν } V < V_{\min} \text{ και } r_k - \Delta r \geq r_{\min} \\ r_k, & \text{σε κάθε άλλη περίπτωση} \end{cases}$ Δr : βήμα αλλαγής λόγου Μ/Σ
Μηχανισμός αλλαγής λόγου Μ/Σ r_{k+1} όταν ελεγχόμενος ζυγός είναι ο ζυγός μεταβλητής λήψης	$r_{k+1} = \begin{cases} r_k - \Delta r, & \text{αν } V > V_{\max} \text{ και } r_k - \Delta r \geq r_{\min} \\ r_k + \Delta r, & \text{αν } V < V_{\min} \text{ και } r_k + \Delta r \leq r_{\max} \\ r_k, & \text{σε κάθε άλλη περίπτωση} \end{cases}$ Δr : βήμα αλλαγής λόγου Μ/Σ

2.2 Γενική δομή μοντέλων στο Simulink

2.2.1 Δομή διατάξεων ΣΗΕ

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 Σχ.2.4.



Σχήμα 2.4: Γενικό μοντέλο διατάξεων

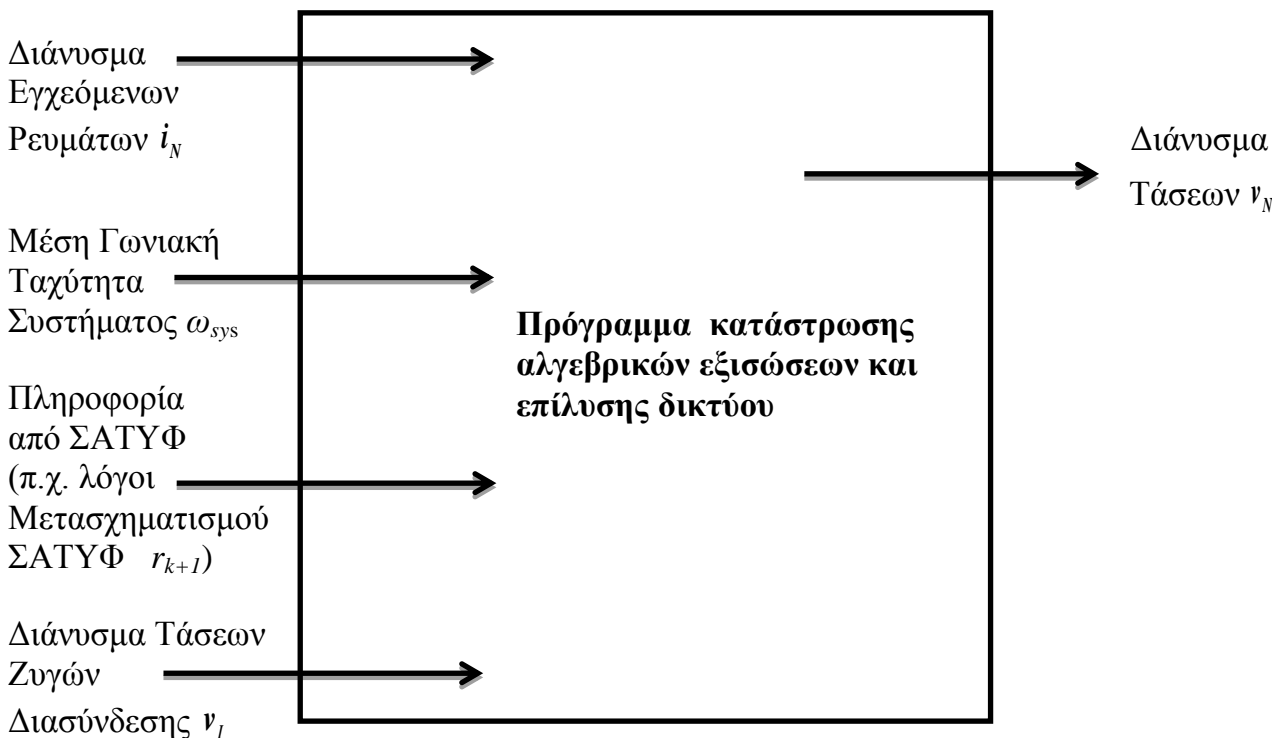
Όπως φαίνεται παραπάνω, οι διατάξεις αυτές δέχονται ως είσοδο τις συνιστώσες του διανύσματος της τάσης (V_x, V_y) του ζυγού στον οποίο συνδέονται, εκφρασμένες στο σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς του συστήματος. Επίσης μπορεί να δέχονται και άλλα σήματα εισόδου απαραίτητα για τη λειτουργία τους, όπως σήματα 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 (scope), 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. Να σημειωθεί ότι στην περίπτωση διατάξεων ελέγχου (π.χ. ρυθμιστές στροφών, ΣΑΤΥΦ) η δομή αυτή απλοποιείται, καθώς αυτές δεν εγχέουν ρεύμα στο δίκτυο.

Το μοντέλο αναπαράστασης της κάθε διάταξης αποτελεί ένα αυτόνομο υποσύστημα (subsystem), εσωτερικά του οποίου υλοποιείται το διάγραμμα βαθμίδων που περιγράφει τη λειτουργία της διάταξης. Κάθε τέτοιο υποσύστημα συνοδεύεται από το παράθυρο δεδομένων του (block parameters). Σε αυτό ο χρήστης δηλώνει τις τιμές που λαμβάνουν οι διαφορές παράμετροι που σχετίζονται με τη λειτουργία του (π.χ. κέρδη, χρονικές σταθερές). Επίσης στη μάσκα του κάθε υποσυστήματος υλοποιούνται οι απαραίτητες διαδικασίες για την ορθή αντιστοίχιση των τιμών αυτών αλλά και την αρχικοποίηση των μεταβλητών κατάστασης που αυτό περιέχει. Η συστηματική καταγραφή των παραπάνω χαρακτηριστικών γίνεται σε επόμενα κεφάλαια στα πλαίσια οργάνωσης της βιβλιοθήκης μοντέλων του WHSSP.

2.2.2 Δομή μοντέλου επίλυσης των εξισώσεων του δικτύου

Η γενική δομή του μοντέλου επίλυσης των αλγεβρικών εξισώσεων που διέπουν το δίκτυο (2.4), ώστε να προκύψει το διάνυσμα των τάσεων των ζυγών του συστήματος (2.2α), δίνεται στο Σχ. 2.5. Σύμφωνα με την απλοποιημένη αυτή σχηματική παράσταση θεωρούμε ότι το δίκτυο δεν

περιλαμβάνει αυτόματους μηχανισμούς ζεύξης-απόζευξης στατών πυκνωτών και στατά συστήματα αέργου αντιστάθμισης.



Σχήμα 2.5: Γενικό μοντέλο επίλυσης

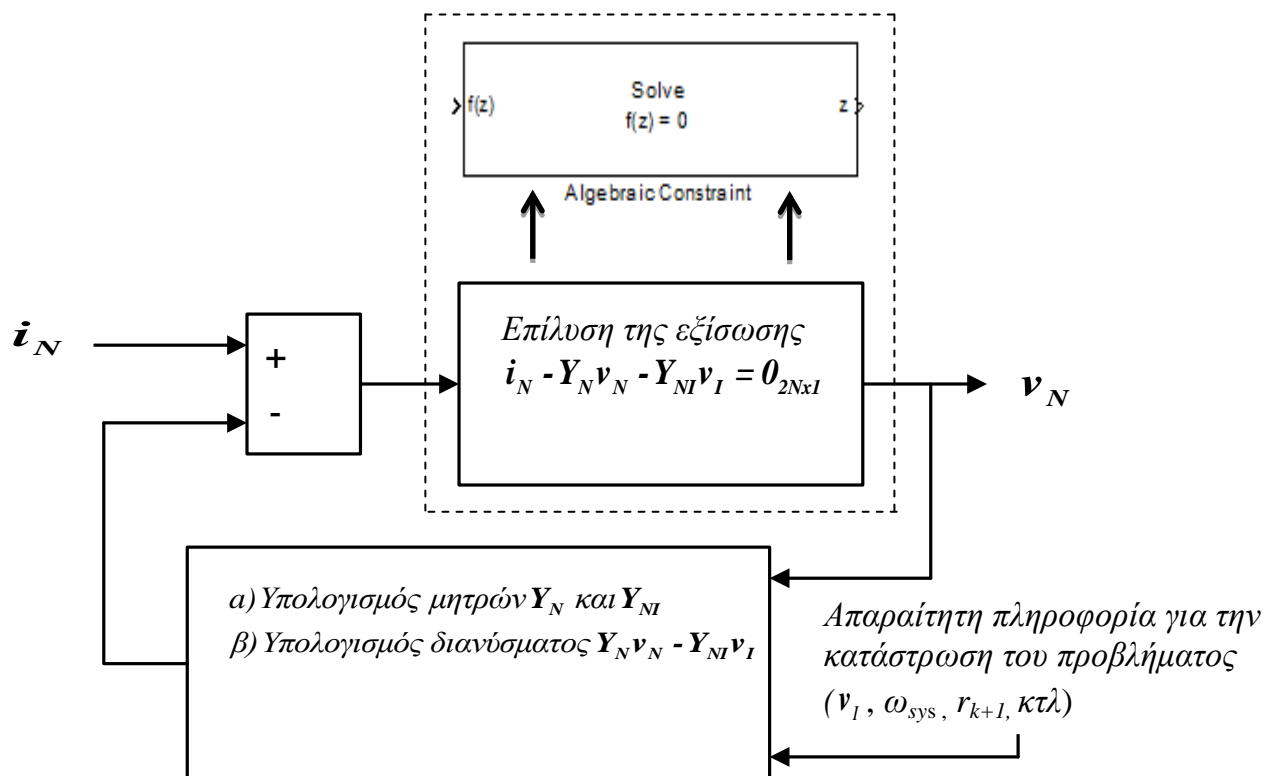
Έτσι για κάθε χρονική στιγμή της προσομοίωσης το πρόγραμμα επίλυσης του δικτύου δέχεται ως εισόδους τα εγγεόμενα ρεύματα σε κάθε ζυγό i_N (ανηγμένα στο σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς), τη γωνιακή ταχύτητα ω_{sys} εφόσον πρόκειται για αυτόνομο ΣΗΕ, αλλά και πληροφορία που σχετίζεται με τη δράση των ΣΑΤΥΦ ώστε 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, μέσω μίας από τις μεθόδους που αναλύονται στην ενότητα που ακολουθεί, 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 στο επόμενο βήμα ολοκλήρωσης για να συνεχιστεί η διαδικασία προσομοίωσης. Επισημαίνεται ξανά ότι μοντελοποίηση της διαδικασίας επίλυσης μπορεί να διαφοροποιείται στη πράξη ανάλογα με τη μεθοδολογία επίλυσης ή τις παραδοχές που γίνονται για το δίκτυο. Ωστόσο δόθηκε εδώ σε μία γενική σχηματική μορφή ως απαραίτητο εισαγωγικό υπόβαθρο για την κατανόηση της λογικής λειτουργίας του υπολογιστικού πακέτου WHSSP.

2.3 Μέθοδοι επίλυσης αλγεβρικών εξισώσεων του δικτύου

2.3.1 Επίλυση με τη χρήση αλγεβρικού βρόχου (ή ρουτίνας fsolve)

Η μέθοδος αυτή είναι η απλούστερη από πλευράς υλοποίησης και βασίζεται στην απλή αριθμητική επίλυση της εξίσωσης που διέπει το δίκτυο, όπως αυτή εκφράστηκε στη γενική της μορφή (2.4), μέσω αλγεβρικού βρόχου. Η εξίσωση αυτή, όπως αναφέρθηκε και προωτέρω, είναι μη

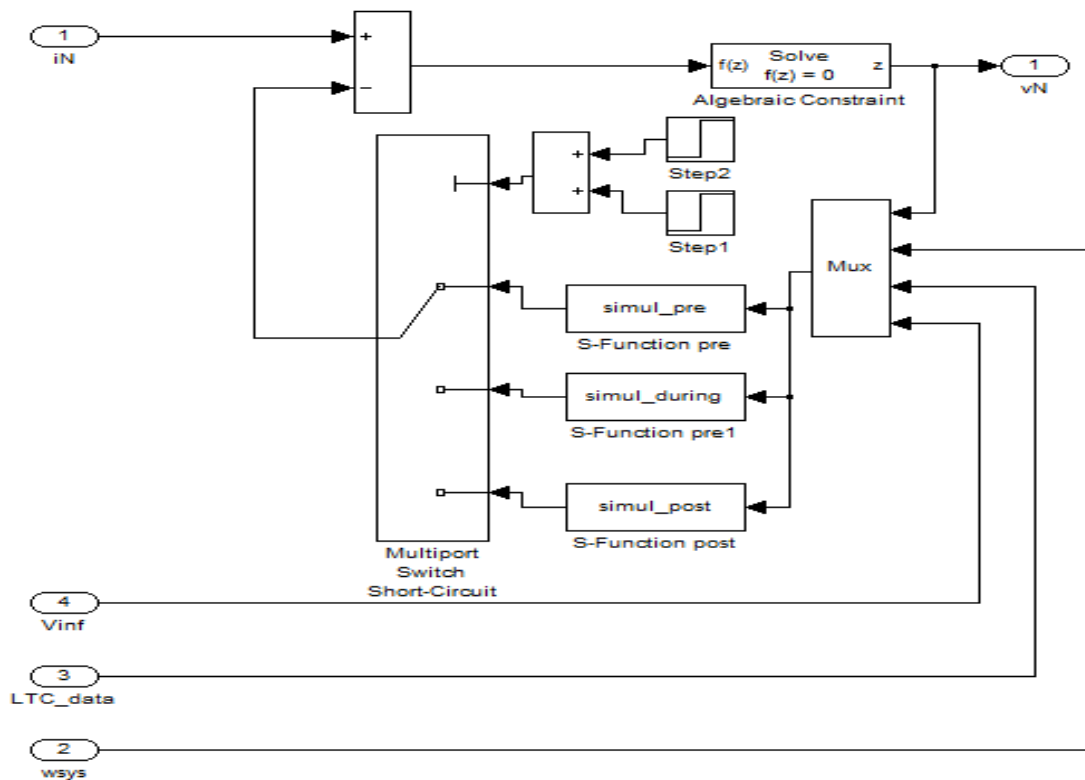
γραμμική αφού τα εγγεόμενα ρεύματα μπορεί να εξαρτώνται κατά μη γραμμικό τρόπο από τις τάσεις των ζυγών (όπως στην περίπτωση στατικών μη γραμμικών φορτίων). Επίσης, βάσει της ισοδύναμης περιγραφής αυτής στη (2.16), προέκυψε πως τα εγγεόμενα ρεύματα των διαφόρων διατάξεων μπορεί να περιέχουν συνιστώσα απευθείας εξαρτώμενη από τις μεταβλητές κατάστασης τους (π.χ. $\mathbf{b}_G, \mathbf{b}_M$). Ένας απλός τρόπος λοιπόν επίλυσης της (2.4) είναι μέσω της χρήσης του μπλοκ αλγεβρικών περιορισμών (algebraic constraint). Έτσι σε αυτή την περίπτωση δημιουργείται ο αλγεβρικός βρόχος που φαίνεται στο Σχ. 2.6 και την επίλυση αναλαμβάνει το Simulink μέσω της ρουτίνας fsolve χωρίς να απαιτούνται άλλες παρεμβάσεις από τον χρήστη. Το μπλοκ αυτό βρίσκεται στην κατηγορία μαθηματικών τελεστών (math operations) του simulink και παρατίθεται επίσης στο Σχ 2.6.



Σχήμα 2.6: Υλοποίηση αλγεβρικού βρόχου

Συγκεκριμένα για κάθε κάθε χρονική στιγμή της προσομοίωσης επιλύεται μέσω της ρουτίνας fsolve η μη γραμμική εξίσωση $f(z)=0$ ώστε να προκύψει το διάνυσμα των τάσεων που την ικανοποιεί (πραγματική και φανταστική συνιστώσα αφού τα μιγαδικά μεγέθη έχουν αποσυμπλεχθεί και δουλεύουμε με ισοδύναμες πραγματικές εξισώσεις). Η λύση \mathbf{v}_N προκύπτει βέβαια συναρτήσει της τρέχουσας τιμής των μεταβλητών κατάστασης των διαφόρων διατάξεων και της τρέχουσας τοπολογίας του δικτύου που παρίσταται μέσω της πραγματικής μήτρας αγωγιμοτήτων. Προκειμένου η MATLAB να επιλύσει την εξίσωση με την έτοιμη αυτή ρουτίνα απαιτείται επαναληπτική μέθοδος εως ότου η λύση να συγκλίνει ικανοποιητικά με βάση τις προδιαγραφές της ρουτίνας fsolve. Μάλιστα επιλέγεται και μια αρχικοποίηση της λύσης (initial guess), που δίνεται από το χρήστη, προς επιτάχυνση της μεθόδου. Πρακτικά χρησιμοποιείται το αρχικό διάνυσμα τάσεων $\mathbf{v}_N^{(0)}$, όπως αυτό προέκυψε από την επίλυση της ροής φορτίου για το αρχικό σημείο ισορροπίας. Στο σημείο αυτό αξίζει να αναφερθεί ότι σαν αρχική τιμή $\mathbf{v}_N^{(0)}$ θα μπορούσε να επιλέγεται κάθε φορά η λύση του αμέσως προηγούμενου χρονικού βήματος. Εντούτοις, για τη συγκεκριμένη περίπτωση και από

πλευράς προγραμματισμού, η υλοποίηση της επιλογής αυτής θα απαιτούσε τη χρήση πολύπλοκων προγραμματιστικών τεχνασμάτων, τα οποία προτιμήθηκε να αποφευχθούν. Το ακριβές σχήμα, όπως αυτό υλοποιείται στο περιβάλλον του Simulink, δίνεται στο Σχ.2.7.



Σχήμα 2.7: Υλοποίηση αλγεβρικού βρόχου στο Simulink

Παρατηρούμε στο Σχ. 2.7 πως η ρουτίνα συγκρίνει σε κάθε ανακύκλωση το διάνυσμα των εγχέομενων ρευμάτων i_N (με βάση την τάση και τις μεταβλητές κατάστασης του προηγούμενου βήματος ολοκλήρωσης) και το διάνυσμα $(Y_N v_N - Y_{NI} v_I)$ όπως αυτό προκύπτει από τη τρέχουσα τοπολογία του δικτύου (μήτρες αγωγιμοτήτων Y_N, Y_{NI}) και το εκτιμώμενο διάνυσμα της τάσης. Όταν διαγνωστεί ικανοποιητική σύγκλιση, δηλαδή $i_N - Y_N v_N - Y_{NI} v_I = \mathbf{0}_{2N \times 1}$ με μεγάλη ακρίβεια, η ρουτίνα τροφοδοτεί το μοντέλο με το διάνυσμα τάσης που προέκυψε για να συνεχιστεί η προσομοίωση (επόμενο βήμα ολοκλήρωσης \rightarrow μεταβλητές κατάστασης \rightarrow επανάκληση ρουτίνας του algebraic constraint και ούτω καθεξής). Οι S-Functions με τις ονομασίες simul_pre, simul_during και simul_post καλούν τις αντίστοιχες εκτελέσιμες συναρτήσεις (.m αρχεία) για τον υπολογισμό του διανύσματος $(Y_N v_N - Y_{NI} v_I)$ στο εκάστοτε βήμα. Για την διεκπεραίωση του υπολογισμού αυτού δέχονται ως εισόδους όλες τις απαραίτητες πληροφορίες, όπως α) την τάση του άπειρου ζυγού (V_{inf} στο Σχ.2.7), εφόσον πρόκειται για διασυνδεδεμένο δίκτυο, β) τη συχνότητα του συστήματος ($wsys$ στο Σχ.2.7), εφόσον πρόκειται για αυτόνομο δίκτυο, γ) την πληροφορία από τα ΣΑΤΥΦ (LTC_data στο Σχ. 2.7), καθώς και δ) το εκτιμώμενο διάνυσμα της τάσης στο τρέχον βήμα ανακύκλωσης του αλγεβρικού βρόχου (v_N στο Σχ. 2.7).

Οι συναρτήσεις (S-Functions) είναι τρεις 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_pre αντιστοιχεί στην τοπολογία του δικτύου προ σφάλματος,

η simul_during στην τοπολογία κατά τη διάρκεια και η simul_pre στην τοπολογία μετά την εκκαθάρισή του.

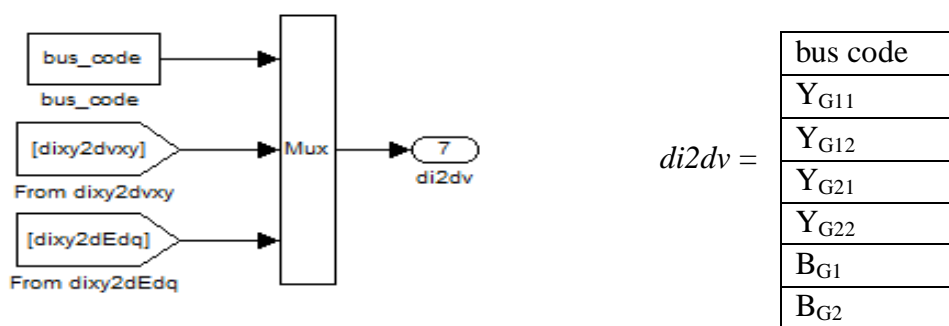
Η μέθοδος επίλυσης που περιγράφηκε παρέχει πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα από πλευράς αριθμητικής ευστάθειας και ακρίβειας αλλά υστερεί σημαντικά από πλευράς χρόνου εκτέλεσης, λόγω της επαναληπτικής μεθόδου που χρησιμοποιείται.

2.3.2 Επίλυση χωρίς τη χρήση αλγεβρικού βρόχου όταν απουσιάζουν τα μη γραμμικά φορτία

Στη μέθοδο αυτή εκμεταλλευόμαστε το γεγονός πως όταν στο εξεταζόμενο δίκτυο απουσιάζουν τα μη γραμμικά φορτία τότε η μητρική εξίσωση (2.16) γίνεται γραμμική. Φυσικά για να επιτευχθεί αυτό έχει η 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 (2.8) και (2.9). Σε επόμενα κεφάλαια θα δοθούν και οι αναλυτικές εκφράσεις αυτών που αφορούν τόσο τις σύγχρονες και ασύγχρονες μηχανές όσο και τα διάφορα μοντέλα ανεμογεννητριών.

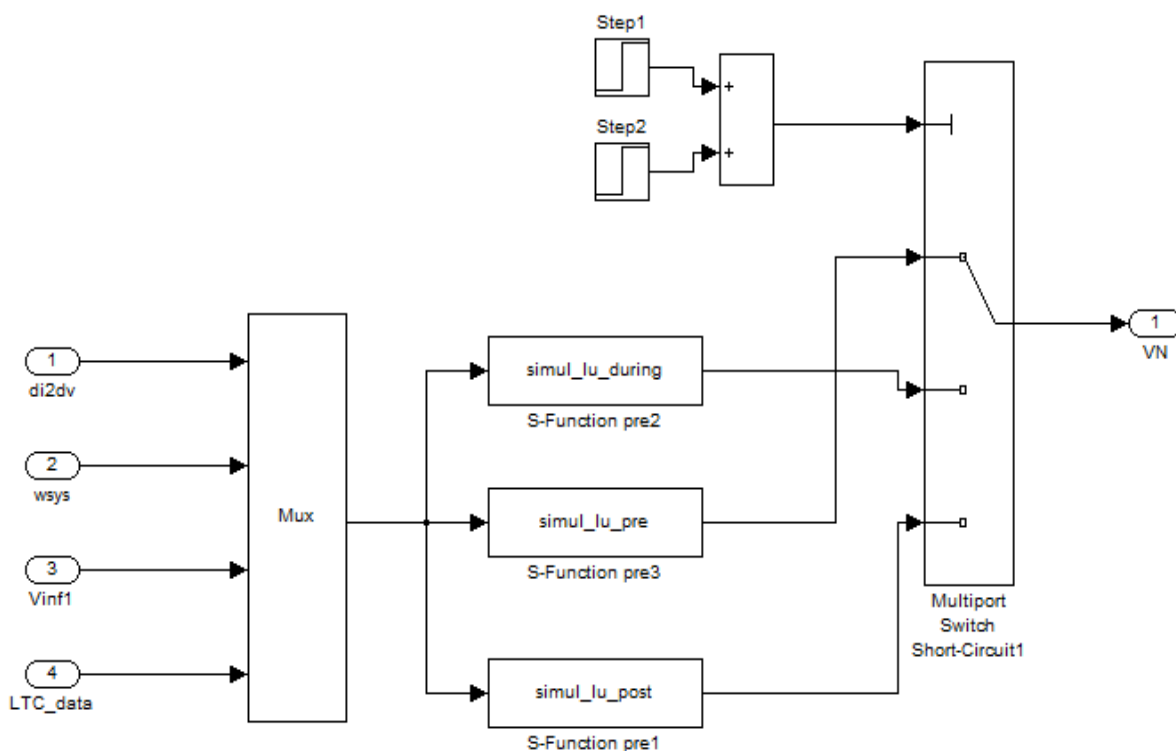
Η σημασία του διαχωρισμού αυτού έγκειται στο γεγονός ότι η επίλυση των αλγεβρικών εξισώσεων του δικτύου γίνεται σαφώς απλούστερη όταν απουσιάζουν τα μη γραμμικά φορτία, τα οποία είναι και τα μοναδικά που δεν μπορούν να μοντελοποιηθούν κατ' αυτόν τον τρόπο (με συνιστώσα γραμμικώς εξαρτώμενη από την τάση). Δίνεται δηλαδή η δυνατότητα άρσης της μη γραμμικότητας που εμπεριέχεται στη εξίσωση του δικτύου και επομένως η επίλυσή της με μεθόδους γραμμικής άλγεβρας (μέσω αντιστροφής ή LU παραγοντοποίησης), καθιστώντας γρηγορότερη τη όλη διαδικασία της προσομοίωσης.

Στην έξοδο του κάθε υποσυστήματος λοιπόν λαμβάνεται ένας δισδιάστατος πίνακας παραγόντων (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 ποσότητα έγχυσης στους άξονες του σύγχρονου πλαισίου αναφοράς. Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας οι επιπλέον 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 (Σχ. 2.8):



Σχήμα 2.8: Υλοποίηση και επεξήγηση $di2dv$

Έτσι η συνιστώσα $di2dv$ παριστά τις παραμέτρους γραμμικής εξάρτησης από την τερματική τάση και η συνιστώσα $di2dEdq$ 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 αρίθμησης του ζυγού που συνδέεται για την ορθή κατάστροψη των εξισώσεων. Σε αναλογία λοιπόν με όσα αναφέρθηκαν και για την περίπτωση του αλγεβρικού βρόχου το σχήμα που χρησιμοποιείται προς επίλυση του δικτύου στο περιβάλλον Simulink είναι το κάτωθι (Σχ. 2.9):



Σχήμα 2.9: Υλοποίηση χωρίς αλγεβρικό βρόχο στο Simulink

Από το παραπάνω σχήμα φαίνεται πως το διάνυσμα $di2dv$ αντικαθιστά κατά κάποιο τρόπο το διάνυσμα των εγγεόμενων ρευμάτων i_N που είχαμε στην περίπτωση επίλυσης μέσω αλγεβρικού βρόχου. Το διάνυσμα αυτό περιέχει όλα τα διανύσματα $di2dv$ των επιμέρους διατάξεων που προκαλούν την έγχυση ρεύματος στους ζυγούς του συστήματος. Μάλιστα σε αντίθεση με την προηγούμενη μέθοδο το συνολικό διάνυσμα $di2dv$ δεν είναι ανάγκη να είναι διατεταγμένο βάσει της αρίθμησης των ζυγών, αφού η ορθή αντιστοίχιση των συνιστωσών του γίνεται στον κώδικα των συναρτήσεων επίλυσης του δικτύου (με βάση τον κωδικό αριθμό του ζυγού σύνδεσης). Επίσης ένα πλεονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι η μη αναγκαιότητα κατασκευής ολόκληρου του i_N στο περιβάλλον του Simulink. Κάτι τέτοιο είναι ιδιαίτερα σημαντικό σε περιπτώσεις προσομοίωσης δικτύων με πολλούς ζυγούς όπου είναι αρκετά πιθανό η πλειονότητα αυτών να είναι ενδιάμεσοι ζυγοί, δηλαδή ζυγοί μηδενικού εγγεόμενου ρεύματος. Βέβαια στη συγκεκριμένη μέθοδο το διάνυσμα $di2dv$ δεν αποτελεί είσοδο για κάποια ρουτίνα επαναληπτικής διαδικασίας αλλά 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 (2.16). Φυσικά από αυτή

απουσιάζει πλέον ο όρος $i_{NL}(v_N)$ αφού θεωρούμε ότι το εξεταζόμενο δίκτυο δεν περιλαμβάνει μη γραμμικά φορτία. Συγκεκριμένα για να επιλυθεί η (2.16) γράφεται στη ακόλουθη μορφή:

$$(Y_G + Y_M - Y_N)v_N = Y_{NI}v_I - b_G - b_M \quad (2.17)$$

όπου αν θέσουμε :

$$Y_{total} = Y_G + Y_M - Y_N \quad (2.18)$$

και

$$B_{total} = Y_{NI}v_I - b_G - b_M \quad (2.19)$$

τελικά καταλήγουμε στο ακόλουθο γραμμικό σύστημα εκφρασμένο σε μητρική μορφή:

$$Y_{total}v_N = B_{total} \quad (2.20)$$

Δηλαδή καταστρώνονται σε κάθε βήμα της προσομοίωσης οι επαυξημένοι πίνακες Y_{total} και B_{total} ώστε να προκύψει το απλό γραμμικό σύστημα της σχέσης (2.20). 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 επιλύεται με τριγωνική παραγοντοποίηση του επαυξημένου πίνακα Y_{total} και στη συνέχεια με εφαρμογή της ευθείας και αντιστρόφου αντικαταστάσεως. Αξίζει να τονισθεί ξανά ότι η παραπάνω διαδικασία πραγματοποιείται μόνο μία φορά σε κάθε χρονικό βήμα της προσομοίωσης προς εξαγωγή του διανύσματος v_N . Κάτι τέτοιο συντελεί στη σημαντική επιτάχυνση της προσομοίωσης συγκριτικά με την περίπτωση αριθμητικής επίλυσης μέσω αλγεβρικού βρόχου όπου σε κάθε χρονικό βήμα γίνεται χρήση επαναληπτικής μεθόδου.

Προς απόδειξη της σημαντικής βελτίωσης από πλευράς εκτελεσιμότητας παρατίθενται μια τυπική σύγκριση στο παράρτημα Β. Συγκεκριμένα συγκρίνεται ο χρόνος εκτέλεσης της προσομοίωσης με και χωρίς αλγεβρικό βρόχο για ένα ακτινικό δίκτυο σύνδεσης αιολικού πάρκου (βλ. Σχ. 1.8).

2.3.3 Επίλυση στην περίπτωση ύπαρξης μη γραμμικών εξισώσεων μέσω επαναληπτικών μεθόδων

Στην περίπτωση που το εξεταζόμενο δίκτυο περιλαμβάνει στατικά μη γραμμικά φορτία, των οποίων οι εγχύσεις περιγράφονται από τη σχέση (2.14), τότε η μέθοδος της ενότητας 2.3.2 δεν μπορεί να εφαρμοστεί καθώς υπάρχει μη γραμμική εξάρτηση του ρεύματος από την τάση του ζυγού στον οποίο συνδέονται τα φορτία. Επομένως είναι απαραίτητο να επιλυθεί η μη γραμμική εξίσωση (2.16) με κάποια αριθμητική μέθοδο. Όπως ήδη αναλύθηκε στην ενότητα 2.3.1, ένας τρόπος αποτελεί η χρήση της έτοιμης ρουτίνας *fsolve* όπως αυτή υλοποιείται στο περιβάλλον του Simulink. Εναλλακτικά η επίλυση μπορεί να γίνει όπως περιγράφηκε προηγουμένως με κατάλληλη τροποποίηση της λογικής που περιγράφεται στο Σχ. 2.9. Συγκεκριμένα στις S-Functions εισέρχεται ως είσοδος το διάνυσμα των εγχεόμενων ρευμάτων i_N και με κατάλληλη τροποποίηση του κώδικα επιλύεται το σύστημα με χρήση της μεθόδου Newton-Raphson. Οι δύο τρόποι μπορούν να θεωρηθούν ισοδύναμοι με τη μόνη ουσιαστική διαφορά να έγκειται στο γεγονός ότι στη δεύτερη

περίπτωση ο χρήστης μπορεί να επέμβει για τα κριτήρια σύγκλισης της μεθόδου. Έτσι οι ανακυκλώσεις σταματάνε όταν:

- Το μεγαλύτερο κατ' απόλυτη τιμή στοιχείο του διανύσματος σφάλματος είναι μικρότερο από ένα όριο ανοχής, δηλαδή έχει επιτευχθεί ικανοποιητική σύγκλιση. Το όριο ανοχής καθορίζεται από το χρήστη.
- Ο αριθμός των ανακυκλώσεων ξεπεράσει ένα μέγιστο αριθμό, τον οποίο επίσης καθορίζει ο χρήστης. Στην περίπτωση αυτή, θεωρείται ότι οι αλγεβρικές εξισώσεις του δικτύου δεν συγκλίνουν και η προσομοίωση τερματίζεται πρόωρα με ένδειξη αλγεβρικής ιδιομορφίας (algebraic singularity).

Με βάση τη μέθοδο Newton-Raphson, ένα σημείο ισορροπίας του συστήματος προκύπτει επιλύοντας επαναληπτικά μία ακολουθία γραμμικών συστημάτων της μορφής:

$$\mathbf{J}_N^{(j)} \left[\mathbf{v}_N^{(j+1)} - \mathbf{v}_N^{(j)} \right] = -\mathbf{g}_N^{(j)} \quad j = 0, 1, 2, \dots \quad (2.21)$$

όπου \mathbf{J}_N είναι ο Ιακωβιανός πίνακας του συστήματος διαστάσεων $2N \times 2N$, ενώ με εκθέτη j συμβολίζονται οι τιμές των μεταβλητών και των συναρτήσεων στην j -ανακύκλωση. Το διάνυσμα στο αριστερό μέλος της (2.21) ονομάζεται διάνυσμα διόρθωσης, ενώ το διάνυσμα στο δεξιό μέλος είναι γνωστό σαν διάνυσμα σφάλματος. Στη συνέχεια, παρουσιάζεται αναλυτικά ο αλγόριθμος για την επίλυση της σχέσης (2.21), όπως αυτός περιγράφεται στο [6].

Εφόσον τα διανύσματα \mathbf{b}_G και \mathbf{b}_M των σύγχρονων και των ασύγχρονων μηχανών αντίστοιχα δεν εξαρτώνται από το διάνυσμα \mathbf{v}_N των τάσεων στους ζυγούς του δικτύου, ο Ιακωβιανός πίνακας \mathbf{J}_N δίνεται από την εξίσωση:

$$\mathbf{J}_N = \left[\frac{\partial \mathbf{g}_N}{\partial \mathbf{v}_N} \right] = \mathbf{Y}_G + \mathbf{Y}_M + \left[\frac{\partial \mathbf{i}_{NL}}{\partial \mathbf{v}_N} \right] - \mathbf{Y}_N \quad (2.22)$$

Οπότε, η κατασκευή του Ιακωβιανού πίνακα \mathbf{J}_N προϋποθέτει τον υπολογισμό του πίνακα των μερικών παραγώγων $\left[\frac{\partial \mathbf{i}_{NL}}{\partial \mathbf{v}_N} \right]$ των στατικών μη γραμμικών φορτίων, διαστάσεων $2N \times 2N$.

Στο σημείο αυτό αξίζει να αναφέρουμε ότι τα στατικά φορτία που εξαρτώνται από την τάση διαχωρίζονται γενικά σε εκθετικά και πολυωνυμικά. Ωστόσο τα πολυωνυμικά φορτία αποτελούν ουσιαστικά άθροισμα διαφόρων εκθετικών φορτίων με κατάλληλους συντελεστές βαρύτητας. Επομένως, χωρίς βλάβη της γενικότητας και για λόγους απλοποίησης των παραστάσεων των εξαγόμενων σχέσεων, θεωρείται ότι τα μόνα στατικά μη γραμμικά φορτία του εξεταζόμενου δικτύου είναι τα εκθετικά φορτία. Υπενθυμίζεται ότι η ενεργός και η άεργος κατανάλωση του εκθετικού φορτίου στον i ζυγό του συστήματος δίνονται από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$P_{Li}(V_i) = P_{Loi} \left(\frac{V_i}{V_{oi}} \right)^{\alpha_{Li}} \quad (2.23)$$

$$Q_{Li}(V_i) = Q_{Loi} \left(\frac{V_i}{V_{oi}} \right)^{\beta_{Li}} \quad (2.24)$$

όπου το μέτρο της τάσης του ζυγού i δίνεται από τη σχέση (2.15).

Αντικαθιστώντας τις εκφράσεις των P_{Li} και Q_{Li} από τις (2.23) και (2.24) αντίστοιχα στην (2.9), προκύπτει η ακόλουθη σχέση για τον πίνακα $\left[\frac{\partial \mathbf{i}_{NL}}{\partial \mathbf{v}_N} \right]$:

$$\left[\frac{\partial \mathbf{i}_{NL}}{\partial \mathbf{v}_N} \right] = \left[\mathbf{diag}_{i=1}^N \left(\left[\frac{\partial \mathbf{i}_{NL,i}}{\partial \mathbf{v}_N} \right] \right) \right] \quad \text{όπου} \quad \left[\frac{\partial \mathbf{i}_{NL,i}}{\partial \mathbf{v}_N} \right] = \begin{bmatrix} \left. \frac{\partial i_{NL,x}}{\partial v_x} \right|_i & \left. \frac{\partial i_{NL,x}}{\partial v_y} \right|_i \\ \left. \frac{\partial i_{NL,y}}{\partial v_x} \right|_i & \left. \frac{\partial i_{NL,y}}{\partial v_y} \right|_i \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

όπου ο τελεστής $\left[\mathbf{diag}_{i=1}^N (\alpha_i) \right]$ ορίστηκε στη σχέση (2.10).

Τα στοιχεία κάθε 2×2 υποπίνακα $\left[\frac{\partial \mathbf{i}_{NL}}{\partial \mathbf{v}_N} \right]$ αναφορικά με το μη γραμμικό εκθετικό φορτίο στον i ζυγό του δικτύου, δίνονται από το παρακάτω σύνολο εξισώσεων:

$$\left. \frac{\partial i_{NL,x}}{\partial v_x} \right|_i = z_{NL,i} \left[-P_{L0i} \left(\frac{V_i}{V_{0i}} \right)^{\alpha_{Li}} \frac{V_i^2 + (\alpha_{Li} - 2)v_{xi}^2}{V_i^4} - Q_{L0i} \left(\frac{V_i}{V_{0i}} \right)^{\beta_{Li}} \frac{(\beta_{Li} - 2)v_{xi}v_{yi}}{V_i^4} \right] \quad (2.26)$$

$$\left. \frac{\partial i_{NL,x}}{\partial v_y} \right|_i = z_{NL,i} \left[-P_{L0i} \left(\frac{V_i}{V_{0i}} \right)^{\alpha_{Li}} \frac{(\alpha_{Li} - 2)v_{xi}v_{yi}}{V_i^4} - Q_{L0i} \left(\frac{V_i}{V_{0i}} \right)^{\beta_{Li}} \frac{V_i^2 + (\beta_{Li} - 2)v_{yi}^2}{V_i^4} \right] \quad (2.27)$$

$$\left. \frac{\partial i_{NL,x}}{\partial v_x} \right|_i = z_{NL,i} \left[-P_{L0i} \left(\frac{V_i}{V_{0i}} \right)^{\alpha_{Li}} \frac{(\alpha_{Li} - 2)v_{xi}v_{yi}}{V_i^4} + Q_{L0i} \left(\frac{V_i}{V_{0i}} \right)^{\beta_{Li}} \frac{V_i^2 + (\beta_{Li} - 2)v_{xi}^2}{V_i^4} \right] \quad (2.28)$$

$$\left. \frac{\partial i_{NL,x}}{\partial v_y} \right|_i = z_{NL,i} \left[-P_{L0i} \left(\frac{V_i}{V_{0i}} \right)^{\alpha_{Li}} \frac{V_i^2 + (\alpha_{Li} - 2)v_{yi}^2}{V_i^4} + Q_{L0i} \left(\frac{V_i}{V_{0i}} \right)^{\beta_{Li}} \frac{(\beta_{Li} - 2)v_{xi}v_{yi}}{V_i^4} \right] \quad (2.29)$$

Επομένως, το γραμμικό σύστημα (2.21) καταλήγει στην εξής μορφή:

$$\mathbf{J}_N^{(j)} \left[\mathbf{v}_N^{(j+1)} - \mathbf{v}_N^{(j)} \right] = -\mathbf{g}_N^{(j)} \quad j = 0, 1, 2, \dots \quad (2.30)$$

όπου:

$$\mathbf{J}_N^{(j)} = \mathbf{Y}_G + \mathbf{Y}_M + \left[\frac{\partial \mathbf{i}_{NL}}{\partial \mathbf{v}_N} \right]^{(j)} - \mathbf{Y}_N \quad (2.31)$$

$$\mathbf{g}_N^{(j)} = (\mathbf{Y}_G + \mathbf{Y}_M - \mathbf{Y}_N) \mathbf{v}_N + \mathbf{b}_G + \mathbf{b}_M + \mathbf{i}_{NL}(\mathbf{v}_N^{(j)}) \mathbf{v}_N - \mathbf{Y}_M \mathbf{v}_I \quad (2.32)$$

Το παραπάνω γραμμικό σύστημα καταστρώνεται και επιλύεται σε κάθε χρονική στιγμή προσομοίωσης στο πρόγραμμα επίλυσης δικτύου. Όσον αφορά την κατάστροψη του συστήματος (2.30)- (2.32), το πρόγραμμα επίλυσης των εξισώσεων του δικτύου εκτελεί τις ακόλουθες λειτουργίες:

- Υπολογίζει τους πίνακες \mathbf{Y}_G , \mathbf{Y}_M και τα διανύσματα \mathbf{b}_G , \mathbf{b}_M σύμφωνα ανάλογα με τις επιμέρους εξόδους $Y_{G,i}$, $b_{G,i}$ ή $Y_{M,i}$, $b_{M,i}$ της σύγχρονης ή ασύγχρονης μηχανής αντίστοιχα στον i ζυγό.
- Υπολογίζει τον πίνακα $\left[\frac{\partial \mathbf{i}_{NL}}{\partial \mathbf{v}_N} \right]^{(j)}$ και το διάνυσμα $\mathbf{i}_{NL}(\mathbf{v}_N^{(j)})$ αναφορικά με την έγχυση ρεύματος των στατικών μη γραμμικών φορτίων.
- Κατασκευάζει το συνολικό πίνακα αγωγιμοτήτων του δικτύου, ενημερώνοντας το μεταβαλλόμενο μέρος του σε συνδυασμό με το σταθερό μέρος, το οποίο έχει ήδη υπολογιστεί από το πρόγραμμα αρχικοποίησης (εφόσον δεν λαμβάνεται υπόψη η επίδραση μεταβολής της συχνότητας στα αυτόνομα δίκτυα).

2.3.4 Εναλλακτική μέθοδος προσεγγιστικής προσομοίωσης μη γραμμικών φορτίων

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζεται και μία εναλλακτική μέθοδος προσομοίωσης ενός συστήματος το οποίο περιλαμβάνει μη γραμμικά εκθετικά φορτία. Σκοπός της μεθόδου αυτής είναι η παράσταση των φορτίων αυτών κατά τέτοιο τρόπο ώστε να έχουμε άρση της μη γραμμικής συνιστώσας που οφείλεται σ' αυτά, αλλά ταυτόχρονα και ικανοποιητική περιγραφή της δυναμικής τους συμπεριφοράς.

Λαμβάνοντας υπόψη όσα έχουν αναφερθεί έως τώρα για το μη γραμμικό σύστημα (2.16) είναι απαραίτητη η χρήση επαναληπτικών αριθμητικών μεθόδων. Όμως σε περιπτώσεις μεσαίων ή μεγάλων δικτύων, καθώς επίσης και άστοχης επιλογής της αρχικής τιμής του διανύσματος των τάσεων $\mathbf{v}_N^{(0)}$ η προσομοίωση πραγματοποιείται με αρκετά βραδύ ρυθμό. Κάτι τέτοιο είναι φυσικό επακόλουθο, αφού προκειμένου να επιτευχθεί ικανοποιητική σύγκλιση, απαιτούνται σε κάθε χρονικό βήμα περισσότερες από μία τριγωνικές παραγοντοποιήσεις ακολουθούμενες από εφαρμογές της μεθόδου ευθείας και αντιστρόφου αντικαταστάσεως.

Η εναλλακτική μέθοδος προσομοίωσης βασίζεται στην αντικατάσταση των μη γραμμικών φορτίων εκθετικών από δυναμικά αυτορυθμιζόμενα φορτία. Συγκεκριμένα, το εκθετικό φορτίο του ζυγού i (ενεργό και άεργο) αντικαθίσταται από ένα δυναμικά αυτορυθμιζόμενο φορτίο μεταβαλλόμενων αγωγιμοτήτων $G_{RL,i}$ και $B_{RL,i}$. Τα δυναμικά αυτορυθμιζόμενα φορτία τείνουν να ανακτήσουν δυναμικά την καταναλισκόμενη ισχύ τους ύστερα από μία μεταβολή της τάσης του δικτύου. Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας χρησιμοποιείται ένα πρώτης τάξεως μοντέλο για την περιγραφή της δυναμικής συμπεριφοράς αυτού του είδους των φορτίων [2]. Έτσι έχουμε τις ακόλουθες σχέσεις που περιγράφουν τη δυναμική τους:

$$T_P \frac{dG_{RL}}{dt} = P_{L0} \left(\frac{V}{V_0} \right)^{\alpha_L} - G_{RL} V^2 \quad (2.33\alpha)$$

$$T_Q \frac{dB_{RL}}{dt} = Q_{L0} \left(\frac{V}{V_0} \right)^{\beta_L} - B_{RL} V^2 \quad (2.33\beta)$$

όπου:

- a_L και β_L είναι οι εκθέτες οι οποίοι ορίζουν τις χαρακτηριστικές μονίμου καταστάσεως του ενεργού και του άεργου φορτίου αντίστοιχα.
- T_p και T_Q είναι οι χρονικές σταθερές επαναφοράς της ενεργού και της άεργου συνιστώσας του φορτίου αντίστοιχα. Εάν υποθέσουμε μάλιστα πολύ μικρές τιμές στα T_p και T_Q (π.χ. 20-50 ms), τότε τα φορτία της (2.33α και β) προσεγγίζουν ικανοποιητικά τα αντίστοιχα στατικά φορτία.

Στο σημείο αυτό πρέπει να παρατηρηθεί ότι και τα στατικά εκθετικά φορτία αποτελούν προσέγγιση των πραγματικών φορτίων, δεδομένου ότι η αποκατάσταση σταθερής ισχύος (ή άλλης εκθετικής συμπεριφοράς με $a_L, \beta_L < 2$) απαιτεί μηχανισμούς ελέγχου (π.χ. ηλεκτρονικά ισχύος ή δυναμική συμπεριφορά μηχανής) και δε αποκαθίσταται ακαριαία. Η παρατήρηση αυτή συνεπάγεται ότι τα στατικά φορτία δεν είναι κατ' ανάγκη πιο ακριβή από τα δυναμικά αποκαθιστάμενα μέσω της σχέσης (2.33α και β).

Μέσω της παράστασης αυτής των μη γραμμικών φορτίων, αίρεται η μη γραμμικότητα των αλγεβρικών περιορισμών και πλέον η επίλυσή τους πραγματοποιείται με μία απλή αντιστροφή. Επομένως, σε κάθε χρονικό βήμα απαιτείται ο υπολογισμός μόνο μίας LU τριγωνικής παραγοντοποίησης και ακολούθως εφαρμογή της μεθόδου ευθείας και αντιστρόφου αντικαταστάσεως. Καταφέρνουμε δηλαδή να εναρμονίσουμε την παρουσία φορτίων με τη μέθοδο που περιγράφηκε στο 2.3.2, μειώνοντας έτσι δραστικά το χρόνο που απαιτείται για την εκτέλεση της διαδικασίας προσομοίωσης. Ωστόσο, η προσέγγιση αυτή ενέχει και κάποια πιθανά μειονεκτήματα που καλό είναι να αναφερθούν:

- Η αύξηση του συνόλου των διαφορικών εξισώσεων που περιγράφουν το σύστημά μας λόγω των πρόσθετων δυναμικών αυτορρυθμιζόμενων φορτίων. Μάλιστα οι μικρές σταθερές χρόνου επιβάλλουν μικρό βήμα ολοκλήρωσης, επιβραδύνοντας έτσι τη διαδικασία της προσομοίωσης.
- Η ανάγκη ενημέρωσης περισσότερων στοιχείων του συνολικού πίνακα αγωγιμοτήτων του δικτύου σε κάθε χρονική στιγμή, αν και τελικά αυτή η ανάγκη δεν μοιάζει σημαντική μπροστά στην επιτάχυνση που επιτυγχάνεται.
- Τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευστάθειας μικρών διαταραχών στο εναλλακτικό σύστημα δεν μπορούν να γενικευθούν στο πραγματικό με μεγάλη αξιοπιστία, καθώς μεταβάλλεται η τάξη του τελευταίου, λόγω των πρόσθετων υποθετικών μεταβλητών κατάστασης (του μοντέλου αναπαράστασης των δυναμικά αυτορρυθμιζόμενων φορτίων στο Simulink).

2.4 Ενημέρωση πίνακα αγωγιμοτήτων κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης

Η παρούσα ενότητα αφορά τις διάφορες προσεγγίσεις που σχετίζονται με τη κατάστρωση του πραγματικού πίνακα αγωγιμοτήτων του δικτύου κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης στο περιβάλλον του WHSSP. Σε πρώτη φάση αυτός κατασκευάζεται στη ρουτίνα αρχικοποίησης αφού όλη η απαραίτητη πληροφορία περιέχεται στα αρχεία εισόδου όπου δηλώνονται τα δεδομένα των μετασχηματιστών και των γραμμών μεταφοράς. Όπως είναι λογικό, δεν είναι απαραίτητη η κατάστρωσή του σε κάθε βήμα της προσομοίωσης, κατά την επίλυση του δικτύου ,εφόσον έχει ήδη υπολογιστεί και εφόσον τα στοιχεία του δεν μεταβάλλονται. Η επανακατάστρωση απαιτεί εξάλλου και το ανάλογο υπολογιστικό κόστος, επιβραδύνοντας έτσι την προσομοίωση. Υπάρχουν όμως δύο σημαντικοί παράγοντες που καθορίζουν το κατά πόσο ο πίνακας αγωγιμοτήτων παραμένει αναλλοίωτος στην όλη διαδικασία:

- Πρώτον υπάρχει το θέμα της μεταβλητής συχνότητας όταν μελετούνται αυτόνομα δίκτυα. Από τυπικής απόψεως οι τιμές των στοιχείων του πίνακα αγωγιμοτήτων μεταβάλλονται αφού οι επαγωγικές και χωρητικές αντιδράσεις εξαρτώνται άμεσα από την τιμή της γωνιακής συχνότητας του συστήματος ω_{sys} . Έτσι καθίσταται αναγκαία η ενημέρωση ολόκληρου του πίνακα κατά την επίλυση, πράγμα που εύλογα καθυστερεί τη συνολική διαδικασία επίλυσης. Τίθεται όμως παράλληλα και το ζήτημα του κατά πόσο η προσέγγιση αυτή οδηγεί και σε πιο αξιόπιστη αναπαράσταση της δυναμικής συμπεριφοράς του δικτύου. Στα πλαίσια των μελετών ευστάθειας αγνοούμε τα ταχέα ηλεκτρομαγνητικά φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα στις γραμμές μεταφοράς. Επίσης με εξαίρεση ακραίες περιπτώσεις διαταραχών η τιμή της συχνότητας δεν μεταβάλλεται σε μεγάλο βαθμό. Συνυπολογίζοντας και την εν γένει επαγωγική συμπεριφορά του δικτύου, η οποία δρα προς την θετική κατεύθυνση στις διαδικασίες ρύθμισης της συχνότητας, καταλήγουμε πως η ενημέρωση των επιμέρους στοιχείων του πίνακα μπορεί να παραληφθεί. Έτσι μπορούμε να γλυτώσουμε υπολογιστικό κόστος και να απλοποιήσουμε το μοντέλο επίλυσης αφού η γωνιακή συχνότητα ω_{sys} δεν είναι απαραίτητη πλέον ως είσοδος στις ρουτίνες επίλυσης του δικτύου. Βεβαίως κάτι τέτοιο είναι αυτονόητο στην περίπτωση μελέτης διασυνδεδεμένου συστήματος, όπου η συχνότητα διατηρείται σταθερή από τις διασυνδέσεις.
- Δεύτερον υπάρχει η περίπτωση ύπαρξης ΣΑΤΥΦ στο μοντέλο προσομοίωσης όταν επιθυμούμε πιστότερη αναπαράσταση και δεν παρίστανται όλοι οι μετασχηματιστές ως σταθερές λήψης. Άρα αναγκαστικά τα σχετιζόμενα στοιχεία του πίνακα πρέπει να ανανεώνονται λόγω των μεταβλητών λήψεων. Ακριβώς γι' αυτό συμπεριλήφθηκε η πληροφορία των ΣΑΤΥΦ (π.χ. αριθμός ζυγού πρωτεύοντος τυλίγματος, λόγος μετασχηματισμού r_{k+1}) στο Σχ. 2.5 του γενικού μοντέλου επίλυσης. Το θετικό σε σχέση με την περίπτωση ενημέρωσης των στοιχείων λόγω μεταβλητής συχνότητας έγκειται στην ανάγκη ενημέρωσης μόνο ενός μικρού μέρους του πίνακα συνήθως (τέσσερα στοιχεία για κάθε ΣΑΤΥΦ). Ωστόσο το κομμάτι αυτό θα πρέπει αναπόφευκτα να καταστρώνεται σε κάθε χρονικό βήμα της προσομοίωσης.

Μια διαφορετική προσέγγιση που δοκιμάστηκε στα πλαίσια της παρούσας εργασίας ήταν η διεύρυνση του διανύσματος εισόδου που προέρχεται από τα ΣΑΤΥΦ ώστε να περιλαμβάνει και μία λογική μεταβλητή ένδειξης αλλαγής του λόγου μετασχηματισμού. Εξάλλου λόγω των αργών χρονικών σταθερών που χαρακτηρίζουν τις συγκεκριμένες διατάξεις στην πλειονότητά τους διαδοχικές εκτελέσεις των ρουτινών επίλυσης δέχονται την ίδια είσοδο r_{k+1} από αυτές. Επομένως υπάρχει η δυνατότητα με βάση την ένδειξη αλλαγής να παρακάμπτεται η εκτέλεση των εντολών της συνάρτησης που σχετίζονται με τον υπολογισμό των στοιχείων αυτών του πίνακα αγωγιμοτήτων. Πρακτικά πάντως, όπως φάνηκε από διάφορες προσομοιώσεις που διεξήχθησαν, η επιτάχυνση της συνολικής διαδικασίας ήταν αμελητέα με την παράκαμψη της ανανέωσης σε αυτές τις περιπτώσεις. Μάλιστα σε συνδυασμό με την ανάγκη για μικρές τροποποιήσεις τόσο στο μοντέλο αναπαράστασης των ΣΑΤΥΦ όσο και των καλούμενων S-functions τελικά εγκαταλείφθηκε η συγκεκριμένη λογική επέκτασης για λόγους απλότητας και αποφυγής περίπλοκων προγραμματιστικών υλοποιήσεων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Οργάνωση βιβλιοθήκης συνιστωσών ΣΗΕ (εκτός ανεμογεννητριών)

3.1 Οργάνωση βιβλιοθήκης

3.1.1 Γενικά

Όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, το WHSSP είναι ένα πακέτο που σχεδιάστηκε για εκπαιδευτικούς και ερευνητικούς σκοπούς και δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να τροποποιήσει ή να εμπλουτίσει τις ήδη μοντελοποιημένες διατάξεις ενός ΣΗΕ καθώς και να αναπτύξει καινούριες. Η σπουδαιότητα οργάνωσης μιας βιβλιοθήκης μοντέλων έγκειται στην βελτίωση της φιλικότητας προς τον χρήστη αλλά και της πληρότητας του συγκεκριμένου πακέτου. Έτσι στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει μία προσπάθεια συστηματικής καταγραφής των διατάξεων που έχουν ήδη μοντελοποιηθεί στα πλαίσια παλαιότερων εργασιών ή μοντελοποιήθηκαν κατά την εκπόνηση της παρούσας. Τονίζεται ιδιαίτερος ότι στο παρόν κεφάλαιο θα παρουσιαστούν οι υλοποιήσεις μοντέλων που δεν αφορούν μοντέλα ανεμογεννητριών, καθώς αυτά εξετάζονται ξεχωριστά στο επόμενο κεφάλαιο.

Τα υποσυστήματα συνεχούς χρόνου ενός ΣΗΕ περιγράφονται μέσω αλγεβρικών και διαφορικών εξισώσεων, οι οποίες έχουν αναλυθεί εκτενώς στη βιβλιογραφία και γι αυτό δεν θα παρατεθούν εδώ αλλά θα γίνονται οι αντίστοιχες παραπομπές για το σύνολο των εξισώσεων που περιγράφει τα κάθε μοντέλο, εκτός από κάποιες περιπτώσεις που περισσότερη σαφήνεια κρίνεται αναγκαία. Γι' αυτές ειδικά θα χρησιμοποιηθούν τα διαγράμματα βαθμίδων που είναι ένας εναλλακτικός τρόπος παρουσίασης της λειτουργίας των μοντέλων. Βασικές συνιστώσες ενός ΣΗΕ είναι οι ακόλουθες:

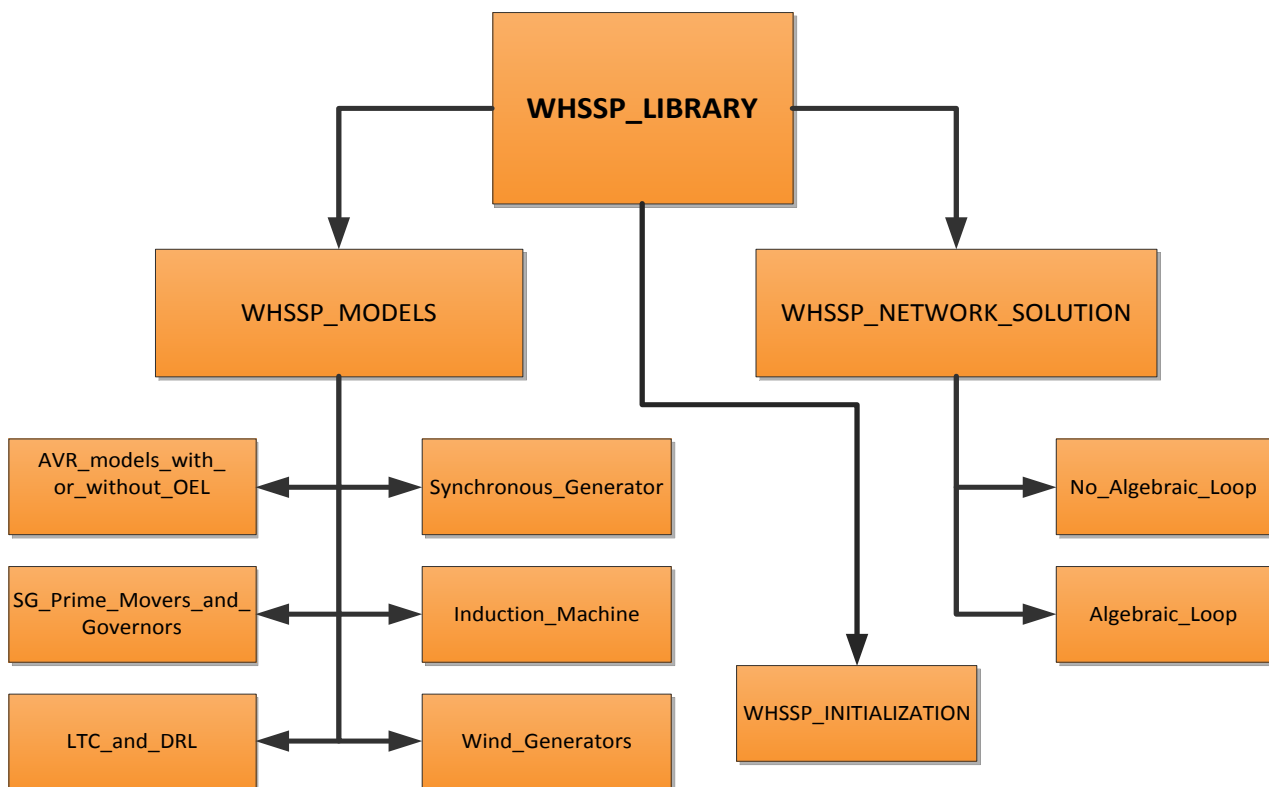
- Οι σύγχρονες γεννήτριες συμπεριλαμβανομένων των συστημάτων ελέγχου και προστασίας, όπως είναι οι Αυτόματοι Ρυθμιστές Τάσης (APT), τα Συστήματα Προστασίας Υπερδιεγέρσεως (ΣΠΥ) και οι σταθεροποιητές συστήματος ισχύος.
- Οι στρόβιλοι με τους αντίστοιχους ρυθμιστές στροφών (υδροστρόβιλοι, αεριοστρόβιλοι, μονάδες συνδυασμένου κύκλου και μονάδες Ντίτζελ).
- Οι ατμοπαραγωγοί στην περίπτωση ατμοηλεκτρικών μονάδων.
- Οι μηχανές επαγωγής.
- Τα δυναμικά αυτορυθμιζόμενα φορτία.
- Τα ΣΑΤΥΦ που είναι διατάξεις διακριτού χρόνου και αναλύθηκαν στην υποενότητα 2.1.3.

Οι περισσότερες από τις παραπάνω συνιστώσες ενός ΣΗΕ έχουν μοντελοποιηθεί στα πλαίσια του WHSSP και έχουν οργανωθεί (ή και ομαδοποιηθεί) στην βιβλιοθήκη μας στις εξής υποκατηγορίες:

- A) Σύγχρονη Γεννήτρια
- B) Μηχανή Επαγωγής
- Γ) Μοντέλα APT (με ενσωματωμένο ή όχι ΣΠΥ)
- Δ) Μοντέλα Στροβίλων μαζί με τους αντίστοιχους Ρυθμιστές στροφών για διάφορα είδη συμβατικών μονάδων
- E) ΣΑΤΥΦ και Δυναμικά Αυτορυθμιζόμενα Φορτία

Επίσης στη βιβλιοθήκη περιλαμβάνονται τα σχήματα επίλυσης των αλγεβρικών εξισώσεων του δικτύου (στο περιβάλλον του Simulink) για τις μεθόδους επίλυσης που περιγράφηκαν στις ενότητες 2.3.1 (με αλγεβρικό βρόχο) και 2.3.2 (χωρίς αλγεβρικό βρόχο), καθώς και οι κατάλληλες

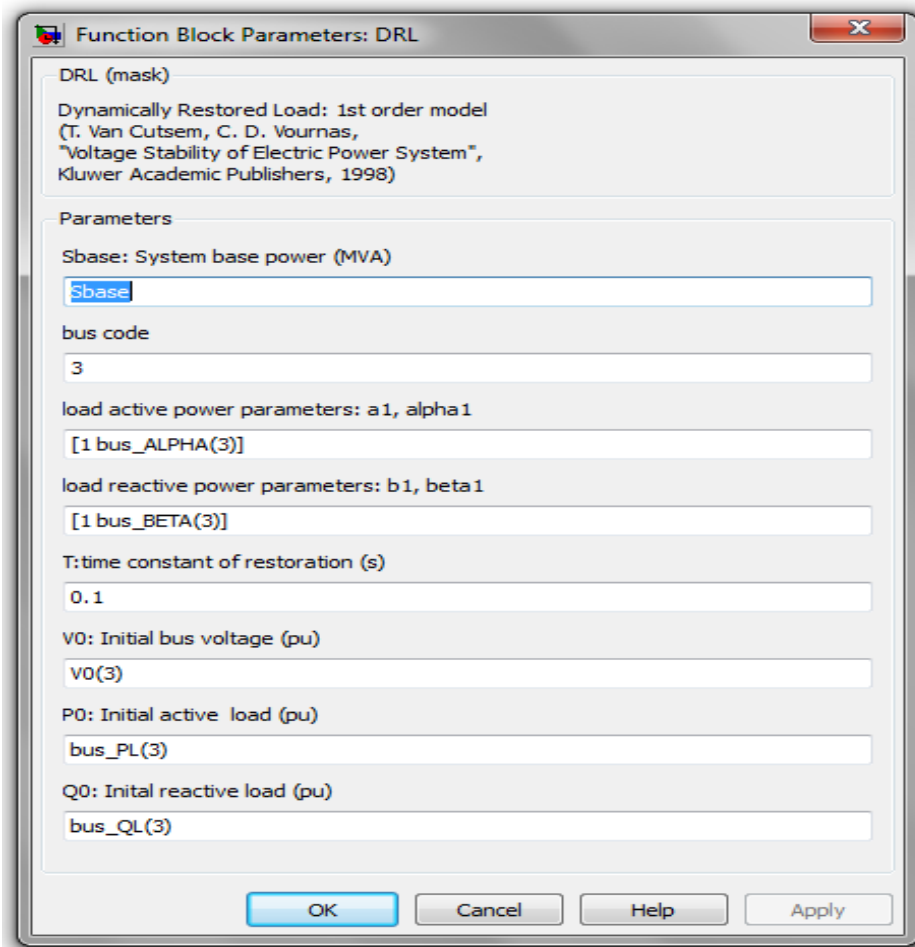
συναρτήσεις (.m αρχεία) που καλούνται (μέσω του μπλοκ S-Function) στην κάθε μέθοδο. Η γενική δομή οργάνωσης των αρχείων της βιβλιοθήκης (WHSSP_LIBRARY) φαίνεται στο Σχ. 3.1. Ουσιαστικά τα αρχεία της χωρίζονται σε τρεις βασικές κατηγορίες, οι οποίες είναι α) WHSSP_MODELS, δηλαδή το σύνολο των αρχείων που περιλαμβάνουν μοντέλα των συνιστωσών ΣΗΕ μαζί με τις συνεργαζόμενες ρουτίνες (.m αρχεία) που πιθανώς τα συνοδεύουν και β) WHSSP_NETWORK_SOLUTION, δηλαδή τα αρχεία που σχετίζονται με την επίλυση των αλγεβρικών εξισώσεων που διέπουν το δίκτυο και γ) WHSSP_INITIALIZATION, όπου περιέχεται η ρουτίνα αρχικοποίησης.



Σχ. 3.1: Δομή οργάνωσης βιβλιοθήκης WHSSP

3.1.2 Εισαγωγή παραμέτρων και αρχικοποίηση μοντέλων

Για να είναι το περιβάλλον φιλικό προς το χρήστη, η ανάθεση τιμών στις παραμέτρους και στα δεδομένα καθενός μοντέλου πραγματοποιείται με τη βοήθεια κατάλληλου παράθυρου δεδομένων (block parameters). Ως χαρακτηριστικό παράδειγμα παρατίθεται το παράθυρο δεδομένων του μοντέλου του δυναμικά αυτορυθμιζόμενου φορτίου (Dynamically Restorative Model, DRL), το οποίο φαίνεται στο Σχ. 3.2 και μοντελοποιήθηκε βάσει της περιγραφής του στην ενότητα 2.3.4. Στο παράθυρο αυτό εισάγονται τιμές για τους εκθέτες οι οποίοι ορίζουν τις χαρακτηριστικές μονίμου καταστάσεως του φορτίου, τη χρονική σταθερά επαναφοράς, τις αρχικές συνθήκες κτλ. Ορισμένες από τις τιμές των παραπάνω δεδομένων βρίσκονται στα αντίστοιχα αρχεία εισόδου (αρχείο με δεδομένα ζυγών στη συγκεκριμένη περίπτωση) είτε προκύπτουν από την εκτέλεση του προγράμματος αρχικοποίησης (αρχικές συνθήκες), ενώ οι υπόλοιπες μπορεί να συμπληρώνονται χειροκίνητα από τον χρήστη. Ουσιαστικά δηλαδή, το παράθυρο δεδομένων του Σχ. 3.2 αποτελεί το συνδετικό κρίκο του περιβάλλοντος εργασίας της MATLAB με το μοντέλο του δυναμικά αυτορυθμιζόμενου φορτίου στο Simulink.

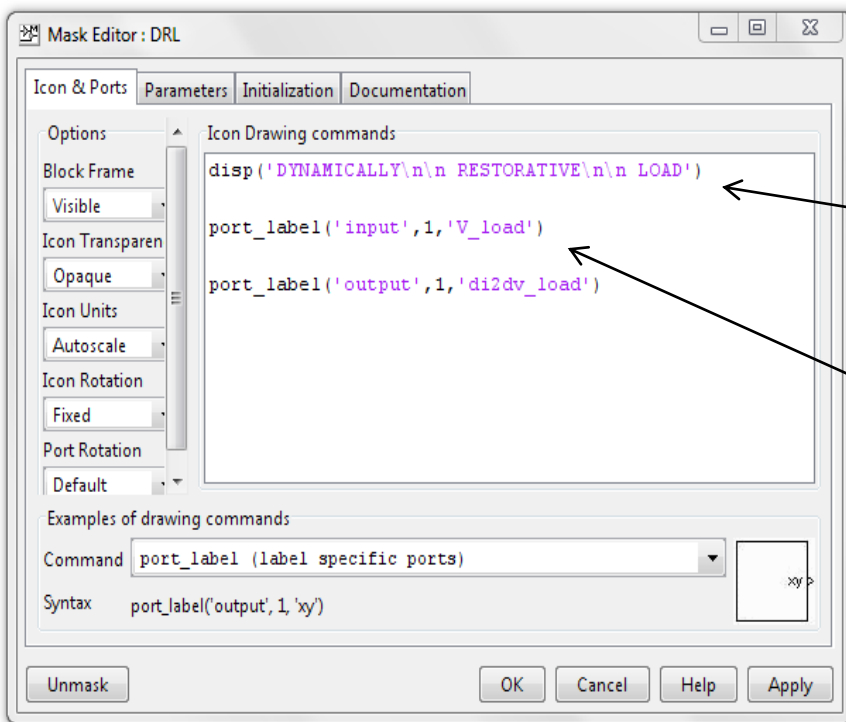


Σχ. 3.2: Παράθυρο δεδομένων για το μοντέλο του δυναμικά αυτορυθμιζόμενου φορτίου

Για παράδειγμα η μεταβλητή *Sbase* αναφέρεται στην βάση ισχύος του συστήματος και η τιμή της ορίζεται από τον χρήστη στη ρουτίνα αρχικοποίησης. Αντίστοιχα οι εκθέτες περιγραφής των χαρακτηριστικών του ενεργού και άεργου φορτίου (*alpha1*, *beta1*) προέρχονται από το αρχείο κειμένου με την πληροφορία των ζυγών (βλ. Παράρτημα Α). Ο χρήστης εισάγει χειροκίνητα τον κωδικό αρίθμησης του ζυγού που συνδέεται το φορτίο (*bus code*) καθώς και τις αρχικές συνθήκες (*V0*, *P0* και *Q0*). Αυτές προκύπτουν από την επίλυση της αρχικής ροής φορτίου στη ρουτίνα αρχικοποίησης και καταχωρούνται σε διατεταγμένους πίνακες-στήλες με βάση την αρίθμηση των ζυγών, στο περιβάλλον εργασίας της MATLAB.

Η δημιουργία του παραθύρου δεδομένων του δυναμικά αυτορυθμιζόμενου φορτίου πραγματοποιείται με τη βοήθεια του παραθύρου δημιουργίας υποσυστήματος (*mask editor*). Το παράθυρο αυτό αποτελείται από τέσσερα υποπαράθυρα, τα οποία φαίνονται στα Σχ. 3.3α-δ, και μέσω των οποίων γίνεται η τροποποίηση του υποσυστήματος από τον χρήστη. Στο πρώτο από αυτά (*Icons and Ports*) ορίζεται η μορφοποίηση του μπλοκ του υποσυστήματος, δηλαδή η ονομασία του, ο τρόπος εμφάνισης των εισόδων και των εξόδων του, κτλ. Στο δεύτερο (*Parameters*) ορίζονται οι παράμετροι του μπλοκ, όπως αυτές εμφανίζονται στο παράθυρο δεδομένων (Σχ. 3.2), καθώς και η κωδική ονομασία αυτών μέσω της οποίας ορίζονται ως τοπικές μεταβλητές στο συγκεκριμένο υποσύστημα. Στο τρίτο (*Initialization*) ορίζεται η διαδικασία αρχικοποίησης των εσωτερικών μεταβλητών κατάστασης του μοντέλου ή άλλων μεγεθών. Συγκεκριμένα το πεδίο αυτό (*Initialization commands*) είναι διαθέσιμο για ανάπτυξη κώδικα σε MATLAB. Ο κώδικας αυτός εκτελείται στο αρχικό χρονικό σημείο της προσομοίωσης (χρονική στιγμή $t=0$) και έτσι αρχικοποιούνται οι μεταβλητές κατάστασης με βάση τις εξισώσεις που διέπουν τη λειτουργία του μοντέλου και τις αρχικές του συνθήκες. Τέλος στο τέταρτο (*Documentation*) υπάρχουν πεδία

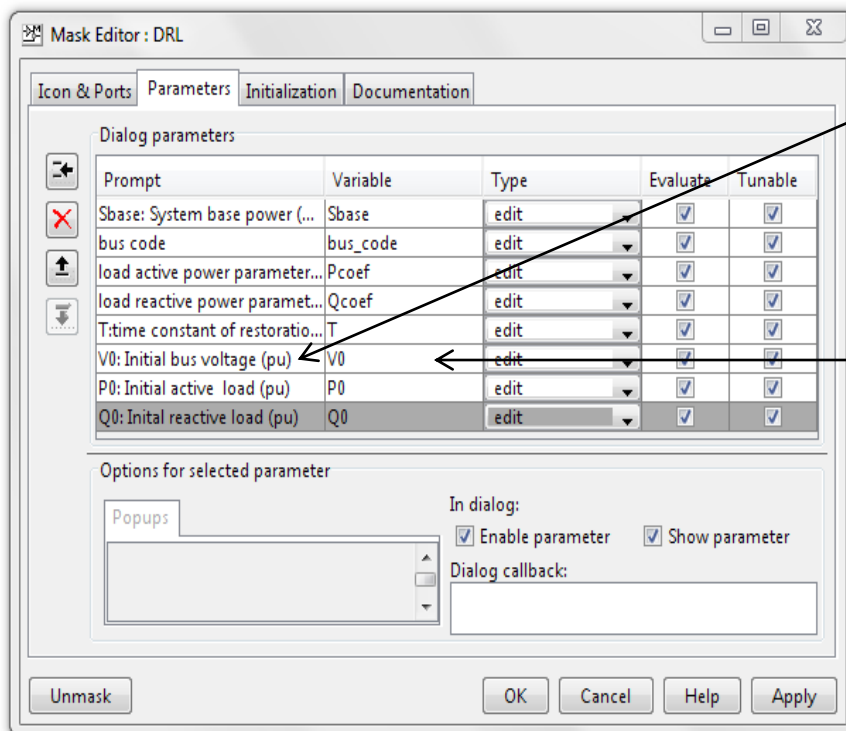
κειμένου ώστε να συμπληρωθούν πληροφορίες, εφόσον το επιθυμεί ο χρήστης, σχετικές με τη υλοποίηση του μοντέλου (π.χ. παραδοχές λειτουργίας, βιβλιογραφία σχετική με την μοντελοποίηση της διάταξης, οδηγίες χρήσης του μοντέλου).



Με την εντολή *disp* καθορίζεται η ονομασία του μπλοκ.

Μέσω την εντολής *port label* καθορίζονται οι ονομασίες των εισόδων και των εξόδων.

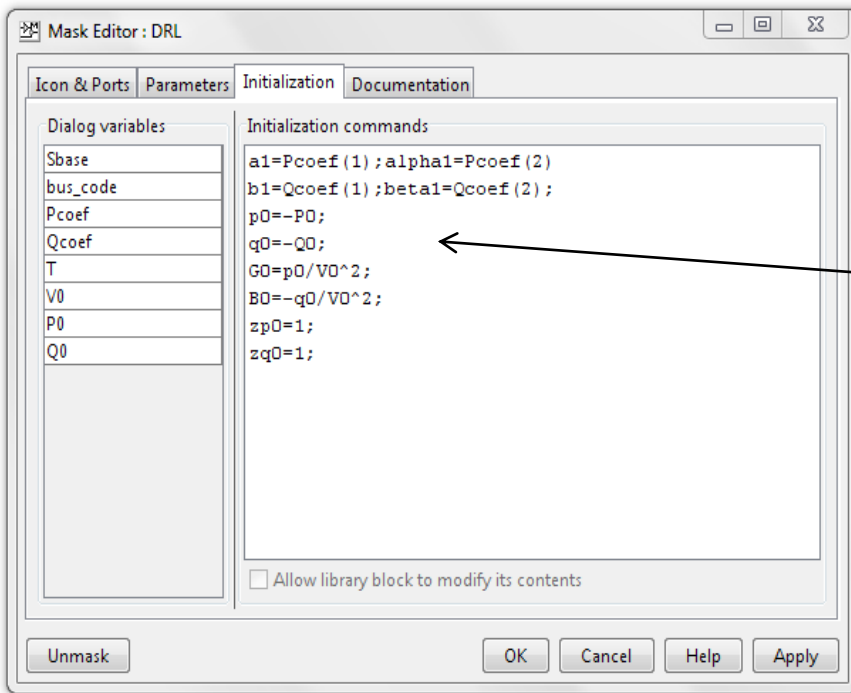
Σχ. 3.3α: Παράθυρο δημιουργίας υποσυστήματος – Μορφοποίηση μπλοκ υποσυστήματος



Στο πεδίο *Prompt* καθορίζεται η ονομασία των παραμέτρων όπως αυτή προβάλλεται στο παράθυρο δεδομένων

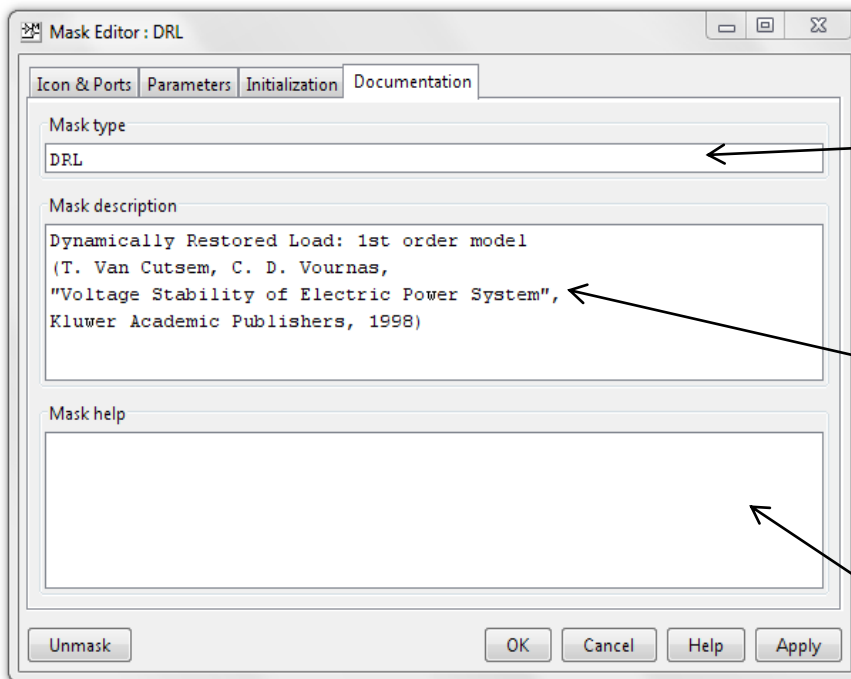
Στο πεδίο *Variable* ορίζεται η κωδική ονομασία των παραμέτρων ως τοπικών μεταβλητών εσωτερικά του υποσυστήματος

Σχ. 3.3β: Παράθυρο δημιουργίας υποσυστήματος – Ορισμός παραμέτρων υποσυστήματος



Στο πεδίο των εντολών αρχικοποίησης (*Initialization commands*) καθορίζεται η αρχική τιμή των μεταβλητών κατάστασης ή άλλων μεγεθών που εμφανίζονται στο διάγραμμα βαθμίδων του υποσυστήματος (κέρδη, σταθερές).

Σχ. 3.3γ: Παράθυρο δημιουργίας υποσυστήματος – Εντολές αρχικοποίησης υποσυστήματος



Ορισμός τύπου υποσυστήματος (Mask type) όπως αυτός φαίνεται στο παράθυρο δεδομένων

Περιγραφή μοντέλου (Mask description), η οποία επίσης φαίνεται στο παράθυρο δεδομένων

Βοηθητικές πληροφορίες για το μοντέλο (π.χ. οδηγίες προς τον χρήστη για την συμπλήρωση του παραθύρου δεδομένων)

Σχ. 3.3δ: Παράθυρο δημιουργίας υποσυστήματος – Πληροφορίες υποσυστήματος

3.2 Μοντέλα συνιστωσών ΣΗΕ

Ακολουθεί η παρουσίαση των μοντέλων της βιβλιοθήκης ανά κατηγορία. Σε κάθε μοντέλο γίνεται η παράθεση του χαρακτηριστικού του μπλοκ και ενός πίνακα επεξήγησης των παραμέτρων του, όπως αυτές εμφανίζονται στο παράθυρο δεδομένων του (block parameters). Επίσης γίνεται μια

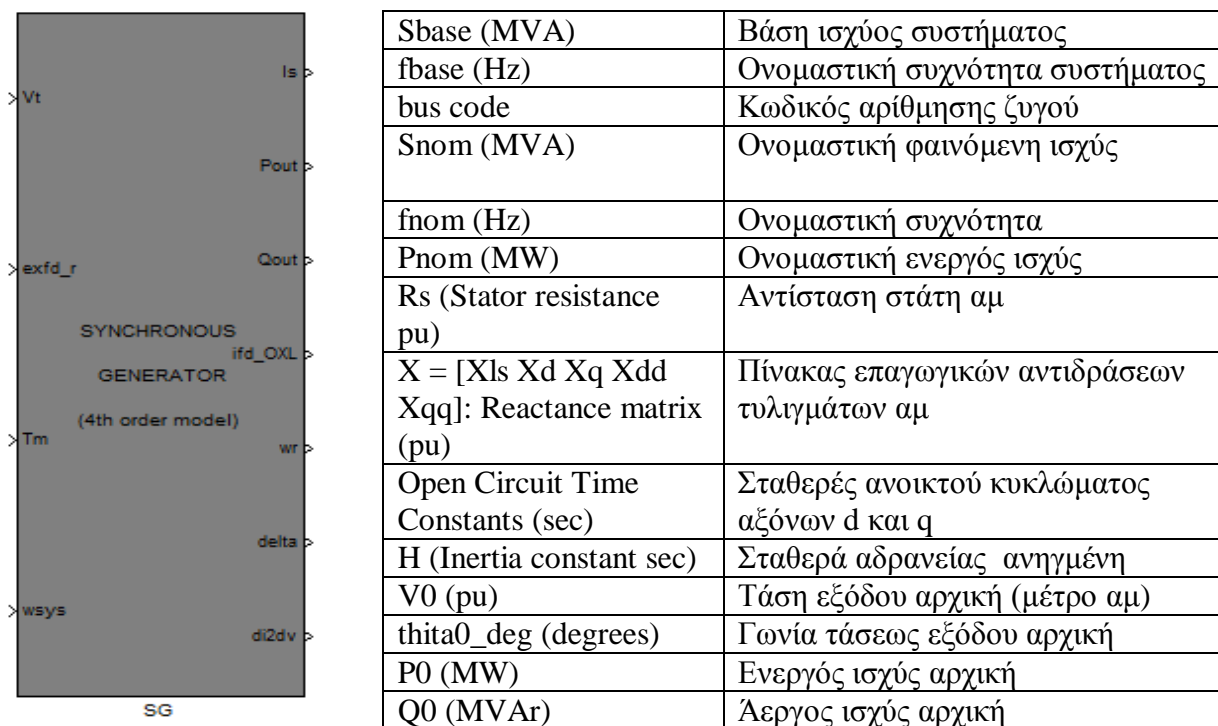
σύντομη περιγραφή του μοντέλου (εξαιρούνται περιπτώσεις που απαιτείται περισσότερη σαφήνεια, π.χ. ομοειδή μοντέλα) ακολουθούμενη από περιγραφή εισόδων, εξόδων και μεταβλητών κατάστασης καθώς και των συμβολικών ονομάτων αυτών στα πλαίσια του WHSSP. Φυσικά αναφέρεται πάντα και η κωδική ονομασία με την οποία αρχειοθετήθηκαν τα μοντέλα στη βιβλιοθήκη (.mdl αρχεία).

3.2.1 Σύγχρονη Γεννήτρια

Το μοντέλο της σύγχρονης γεννήτριας βρίσκεται στο αρχείο *Synchronous_Generator* της βιβλιοθήκης και αποτελεί την υλοποίηση μιας συμμετρικής τριφασικής γεννήτριας που περιγράφεται από τις εξισώσεις του Park και πρόκειται για μοντέλο τέταρτης τάξης. Έχουν γίνει οι ακόλουθες παραδοχές [3]:

- (1) Τα τυλίγματα του στάτη έχουν ημιτονοειδή κατανομή κατά μήκος του διακένου.
- (2) Οι αύλακες του στάτη δεν προκαλούν σημαντική μεταβολή των αυτεπαγωγών και των αλληλεπαγωγών λόγω της θέσης του δρομέα.
- (3) Το φαινόμενο της μαγνητικής υστέρησης αμελείται.
- (4) Η συνεισφορά του μαγνητικού κορεσμού αμελείται (ύπαρξη μόνο γραμμικά συζευγμένων μαγνητικών κυκλωμάτων, γεγονός το οποίο εξυπηρετεί την ευκολία της ανάλυσης).
- (5) Αμελούνται τα ηλεκτρομαγνητικά φαινόμενα του τυλίγματος του στάτη (εξελισσονται σε χρονικό διάστημα μικρό σε σχέση με το διάστημα ενδιαφέροντος στις μελέτες ευστάθειας)

Η υλοποίηση του μπλοκ αυτού έγινε στα πλαίσια της διατριβής [6] όπου δίνεται και το σύνολο των αλγεβρικών και διαφορικών εξισώσεων που χαρακτηρίζουν τη δυναμική του συμπεριφορά. Το μπλοκ *Synchronous_Generator.mdl* μαζί με τον πίνακα παραμέτρων του και μια σύντομη επεξήγησή τους φαίνονται στο Σχ. 3.4. Επισημαίνεται πως οι τιμές των παραμέτρων και γενικά των διαφόρων μεγεθών του μοντέλου είναι ανηγμένες στα βασικά μεγέθη του στάτη. Τέλος οι δείκτες *s* ή *r* συμβολίζουν το τυλίγμα του στάτη ή του δρομέα αντίστοιχα.



Σχήμα 3.4: Μπλοκ Σύγχρονης Γεννήτριας και επεξήγηση παραμέτρων

Το μοντέλο αυτό δέχεται τέσσερις εισόδους, οι οποίες είναι:

- το διάνυσμα (v_x, v_y) της τερματικής τάσης της γεννήτριας Vt (αμ) ανηγμένο στο σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς του συστήματος.
- την τάση του τυλίγματος διέγερσης του δρομέα $exfd_r$ (αμ) στα ονομαστικά μεγέθη της γεννήτριας, που προέρχεται από το μοντέλο του αυτόματου ρυθμιστή τάσης της γεννήτριας.
- την μηχανική ροπή Tm (αμ) στη βάση του συστήματος, που προέρχεται από το μοντέλο του ρυθμιστή στροφών της γεννήτριας.
- την 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) του 2ου Κεφαλαίου για αυτόνομο.

Οι έξοδοι του μοντέλου είναι επτά και είναι οι ακόλουθες:

- το διάνυσμα (i_x, i_y) του εγγεόμενου ρεύματος της γεννήτριας Is (αμ) στη βάση του συστήματος και ανηγμένο στο σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς.
- την εγγεόμενη ενεργό ισχύ στην έξοδο $Pout$ (αμ) στη βάση του συστήματος.
- την εγγεόμενη άεργο ισχύ στην έξοδο $Qout$ (αμ) στη βάση του συστήματος.
- το ρεύμα του πεδίου διέγερσης ifd_OXL (αμ) στα ονομαστικά μεγέθη της γεννήτριας.
- η γωνιακή ταχύτητα του δρομέα της σύγχρονης γεννήτριας wr (αμ).
- η γωνία $delta$ (σε μοίρες) ανάμεσα στο σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς του συστήματος xy και το σύγχρονο πλαίσιο της γεννήτριας dq (βλ. Σχ. 2.4).
- το διάνυσμα $di2dv$ για την επίλυση του δικτύου χωρίς τη χρήση επαναληπτικών μεθόδων (βλ. ενότητα 2.3.2) και το οποίο για την συγκεκριμένη περίπτωση αναλύεται σε [6]:

$$di2dv = [(bus\ code) \ Y_{G11} \ Y_{G12} \ Y_{G21} \ Y_{G22} \ B_{G1} \ B_{G2}]^T \quad (3.1)$$

όπου

$$Y_G = \begin{bmatrix} Y_{G11} & Y_{G12} \\ Y_{G21} & Y_{G22} \end{bmatrix} = -\frac{I}{r_s^2 + \lambda_\omega^2 X'_d X'_q} T \begin{bmatrix} r_s & \lambda_\omega X'_q \\ -\lambda_\omega X'_d & r_s \end{bmatrix} T^{-1} \quad (3.2)$$

και

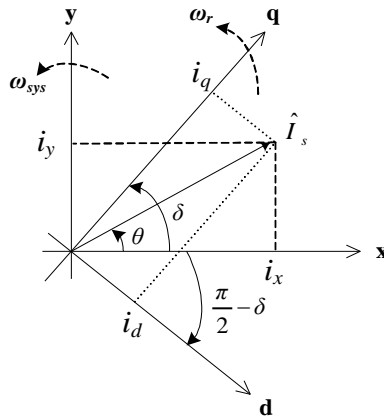
$$b_G = \begin{bmatrix} b_{G1} \\ b_{G2} \end{bmatrix} = \frac{\lambda_\omega}{r_s^2 + \lambda_\omega^2 X'_d X'_q} T \begin{bmatrix} r_s & \lambda_\omega X'_q \\ -\lambda_\omega X'_d & r_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E'_d \\ E'_q \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

Στο σημείο αυτό κρίνεται σκόπιμο να οριστούν τα μεγέθη που εμφανίζονται στις σχέσεις (3.1) έως (3.3). Έτσι έχουμε:

$$\lambda_\omega = \frac{\omega_{sys}}{\omega_b} \quad (3.4)$$

όπου ω_b είναι η ονομαστική συχνότητα του συστήματος. Με E'_d και E'_q συμβολίζονται οι μεταβατικές ΗΕΔ κατά τον ευθύ (d) και τον εγκάρσιο (q) άξονα του dq πλαισίου και με X'_d , X'_q οι αντίστοιχες μεταβατικές αντιδράσεις του κάθε άξονα. Επίσης με r_s συμβολίζεται η ωμική αντίσταση του στάτη. Τέλος ο πίνακας T ονομάζεται πίνακας μετασχηματισμού και αντιστοιχεί στον στροφέα

$e^{-j\left(\frac{\pi}{2}-\delta\right)}$, όπου δ η γωνία ανάμεσα στο σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς του συστήματος xy και το σύγχρονο πλαίσιο της γεννήτριας dq , όπως φαίνεται στο Σχ. 3.5.



Σχ. 3.5: Ορθογώνια πλαίσια αναφοράς συστήματος και σύγχρονης γεννήτριας

Έτσι ο πίνακας T ορίζεται ως

$$T = \begin{bmatrix} \sin\delta & \cos\delta \\ -\cos\delta & \sin\delta \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

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

$$T^{-1} = T' = \begin{bmatrix} \sin\delta & -\cos\delta \\ \cos\delta & \sin\delta \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

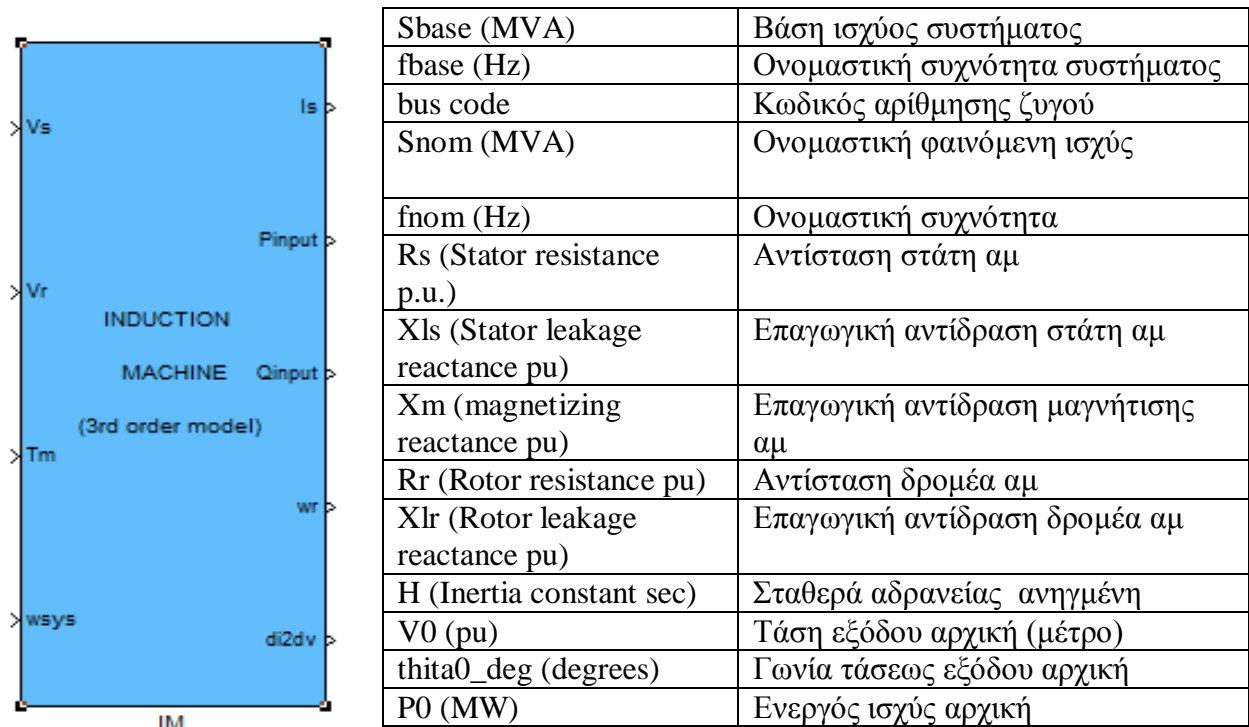
Όσον αφορά τις μεταβλητές κατάστασης του μοντέλου, αυτές είναι οι πεπλεγμένες ροές ευθέος και εγκάρσιου άξονα του σύγχρονου πλαισίου της γεννήτριας (y_{fd_r} και y_{kq_r} αντίστοιχα), η γωνιακή ταχύτητα του δρομέα (SG_wr) και η γωνία ανάμεσα στα πλαίσια dq και xy (SG_delta). Η αρχικοποίηση τους λαμβάνει χώρα στη διαδικασία αρχικοποίησης που καθορίζεται στη μάσκα του μοντέλου (Initialization) με βάση τις αρχικές συνθήκες και τις τιμές των διαφόρων παραμέτρων. Σε αυτή υπολογίζονται επίσης οι τιμές των X'_d , X'_q . Σημειώνεται ότι οι αρχικές συνθήκες V_0 , θ_{i0_deg} , P_0 , Q_0 προκύπτουν από την επίλυση της αρχικής ροής φορτίου στη ρουτίνα αρχικοποίησης, όπως αναφέρθηκε στην ενότητα 3.1.2.

3.2.2 Τριφασική Μηχανή Επαγωγής

Το μοντέλο αυτό βρίσκεται στο αρχείο *Induction_Machine* της βιβλιοθήκης και αποτελεί την υλοποίηση μιας συμμετρικής τριφασικής μηχανής επαγωγής βραχυκυκλωμένου δρομέα που περιγράφεται από τις εξισώσεις του Park και αποτελεί μοντέλο τρίτης τάξης. Έχουν γίνει οι ακόλουθες παραδοχές για λόγους απλοποίησης των εξισώσεων:

- (1) Το φαινόμενο του μαγνητικού κορεσμού αμελείται.
- (2) Η ωμική αντίσταση του δρομέα θεωρείται σταθερή.
- (3) Αμελούνται τα ηλεκτρομαγνητικά φαινόμενα του τυλίγματος του στάτη όπως και στην περίπτωση της σύγχρονης γεννήτριας.

Η υλοποίηση και αυτού του μπλοκ έγινε στα πλαίσια της διατριβής [6] όπου δίνεται και το σύνολο των αλγεβρικών και διαφορικών εξισώσεων που χαρακτηρίζουν τη δυναμική του συμπεριφορά. Το μπλοκ Induction_Machine.mdl μαζί με τον πίνακα παραμέτρων του και μια σύντομη επεξήγησή τους φαίνονται στο Σχ. 3.6. Και εδώ οι τιμές των κυκλωματικών παραμέτρων και γενικότερα όλων των μεγεθών θεωρούνται ανηγμένες στα βασικά μεγέθη του στάτη ενώ διατηρείται παράλληλα η σύμβαση των δεικτών s και r για τα τυλίγματα.



Σχήμα 3.6: Μπλοκ Μηχανής Επαγωγής και επεξήγηση παραμέτρων

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) και το οποίο είναι μηδενικό για την περίπτωση βραχυκυκλωμένου δρομέα.
- την μηχανική ροπή T_m (αμ) στη βάση του συστήματος, η οποία μπορεί να είναι σταθερά για φορτίο σταθερής ροπής ή να προκύπτει συναρτήσει των στροφών (π.χ. τετραγωνικό φορτίο)
- την γωνιακή ταχύτητα του σύγχρονου πλαισίου αναφοράς w_{sys} (αμ)

Και πέντε εξόδους που 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.
- την απορροφούμενη (σύμβαση κινητήρα) ενεργό ισχύ P_{input} (αμ) στη βάση του συστήματος.
- την απορροφούμενη (σύμβαση κινητήρα) άεργο ισχύ Q_{input} (αμ) στη βάση του συστήματος.
- η γωνιακή ταχύτητα του δρομέα της σύγχρονης γεννήτριας w_r (αμ)
- το διάνυσμα $di2dv$ για την επίλυση του δικτύου το οποίο στην περίπτωση αυτή είναι [6]:

$$di2dv = [(bus\ code) \ Y_{M11} \ Y_{M12} \ Y_{M21} \ Y_{M22} \ B_{M1} \ B_{M2}]^T \quad (3.7)$$

όπου

$$Y_M = \begin{bmatrix} Y_{M11} & Y_{M12} \\ Y_{M21} & Y_{M22} \end{bmatrix} = -\frac{I}{r_s^2 + \lambda_\omega^2 X_s'^2} \begin{bmatrix} r_s & \lambda_\omega X_s' \\ -\lambda_\omega X_s' & r_s \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

και

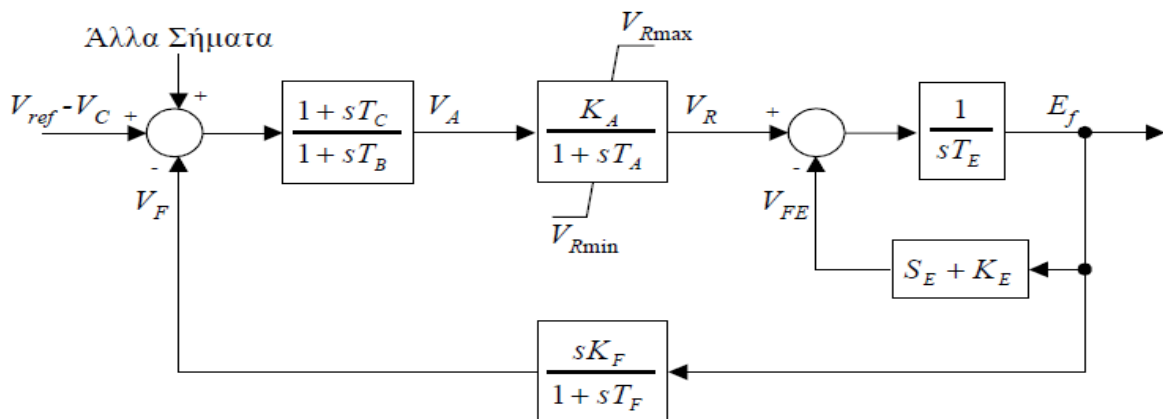
$$b_M = \begin{bmatrix} b_{M1} \\ b_{M2} \end{bmatrix} = \frac{\lambda_\omega}{r_s^2 + \lambda_\omega^2 X_s'^2} \begin{bmatrix} r_s & \lambda_\omega X_s'^2 \\ -\lambda_\omega X_s'^2 & r_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E'_d \\ E'_q \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

Με E'_d και E'_q συμβολίζονται οι μεταβατικές ΗΕΔ κατά τον ευθύ (d) και τον εγκάρσιο (q) άξονα του dq πλαισίου της μηχανής, με X'_s η μεταβατική αντίδραση της μηχανής και με r_s η ωμική αντίσταση του στάτη.

Οι μεταβλητές κατάστασης αποτελούνται από τις πεπλεγμένες ροές ευθέος και εγκάρσιου άξονα του σύγχρονου πλαισίου της μηχανής (ydr_e και ygr_e αντίστοιχα) και την γωνιακή ταχύτητα του δρομέα (IM_{wr}) με την αρχικοποίηση τους να πραγματοποιείται στη διαδικασία αρχικοποίησης στη μάσκα του μοντέλου. Σε αυτή υπολογίζεται επίσης και η τιμή της X'_s . Για τις αρχικές συνθήκες ισχύει ότι ειπώθηκε και για την περίπτωση της σύγχρονης γεννήτριας.

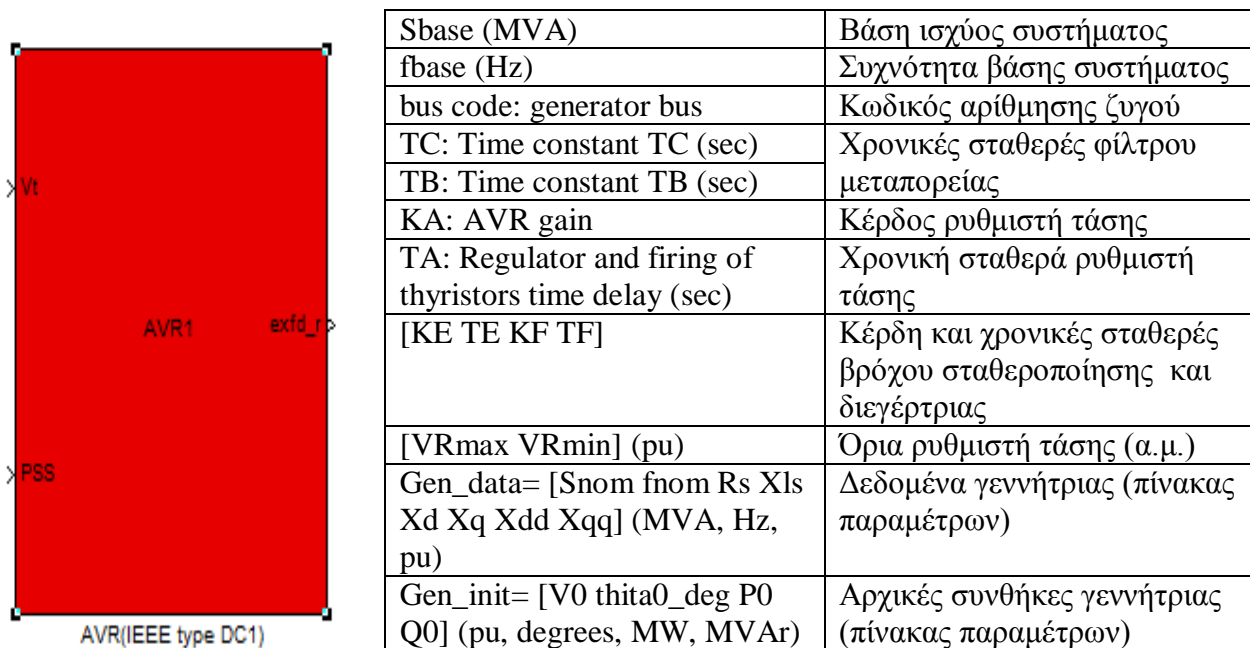
3.2.3 Μοντέλα Αυτόματων Ρυθμιστών Τάσης (APT)

Ο Αυτόματος Ρυθμιστής Τάσης (APT) είναι η διάταξη ελέγχου, η οποία κρατάει σταθερή (ή σχεδόν σταθερή) την τερματική τάση μίας γεννήτριας μέσω της ρύθμισης της τάσης που επιβάλλεται στο τύλιγμα διέγερσης. Υπάρχουν διάφοροι τύποι APT. Στη βιβλιογραφία [IWG81,3] έχουν προταθεί διάφορα μοντέλα τόσο στρεφόμενων όσο και στατών συστημάτων διέγερσης, κατάλληλα για δυναμικές προσομοιώσεις. Συνοψίζονται εδώ δύο μοντέλα αυτόματων ρυθμιστών τάσης που έχουν μοντελοποιηθεί για τις ανάγκες του WHSSP και τα μπλοκ τους βρίσκονται στη βιβλιοθήκη στο αρχείο AVR. Πρόκειται για το μοντέλο APT τύπου DCI και τύπου AC4A κατά IEEE, τα οποία αφορούν διεγέρτριες συνεχούς και εναλλασσόμενου ρεύματος αντίστοιχα. Η μοντελοποίηση τους έγινε στο [6] όπου δίνονται οι χαρακτηριστικές τους εξισώσεις και τα αναλυτικά διαγράμματα βαθμίδων που περιγράφουν τη λειτουργία τους και τα οποία παραθέτουμε εδώ για να γίνουν κάποιες απαραίτητες διευκρινήσεις. Το διάγραμμα βαθμίδων του APT τύπου DCI φαίνεται στο Σχ 3.7:



Σχήμα 3.7: Διάγραμμα βαθμίδων APT τύπου DCI κατά IEEE

Στο Σχ. 3.7 διακρίνεται ένας βρόχος σταθεροποίησης με διαφορικό κέρδος K_F και χρονική σταθερά T_F , ο οποίος παράγει ένα σήμα ανατροφοδότησης V_F , το οποίο αφαιρείται στον κύριο αθροιστή εισόδου του APT. Στον αθροιστή αυτόν εισέρχεται επίσης το σφάλμα της τερματικής τάσης (V_C στο Σχ. 3.7) από την τάση αναφοράς (V_{ref}) και πιθανώς βοηθητικά σήματα που προέρχονται από συνεργαζόμενες διατάξεις ελέγχου (όπως σταθεροποιητές, συστήματα προστασίας υπερδιεγέρσεως). Στη συνέχεια, το σήμα εξόδου του αθροιστή εισάγεται στη μονάδα ρύθμισης της τάσεως. Η μονάδα αυτή αποτελείται από ένα φίλτρο μεταπορείας ($T_B > T_C$) και το ρυθμιστή τάσης. Το φίλτρο μεταπορείας (lag-lead filter) 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. Ο ρυθμιστής τάσης προσεγγίζεται από μία συνάρτηση μεταφοράς πρώτου βαθμού με κέρδος K_A και χρονική σταθερά T_A ενώ το κέρδος K_E , η χρονική σταθερά T_E και η συνάρτηση S_E περιγράφουν τη διεγέρτρια και τον κορεσμό της. Η υλοποίηση του ρυθμιστή αυτού στο WHSSP περιέχει κάποιες απλοποιήσεις. Έτσι στο μοντέλο μας απουσιάζει η συνάρτηση κορεσμού S_E αφού το φαινόμενο του κορεσμού αμελείται όπως και στις γεννήτριες. Φυσικά ο χρήστης μπορεί εύκολα να τροποποιήσει το μοντέλο ώστε να έρχεται σε πλήρη συμφωνία με το θεωρητικό διάγραμμα. Στο Σχ 3.8 δίνεται το αντίστοιχο μπλοκ της βιβλιοθήκης (AVR1.mdl) μαζί με την επεξήγηση των παραμέτρων του.



Σχήμα 3.8: Μπλοκ APT τύπου DC1 κατά IEEE και επεξήγηση παραμέτρων

Το μοντέλο δέχεται τις ακόλουθες τρεις εισόδους:

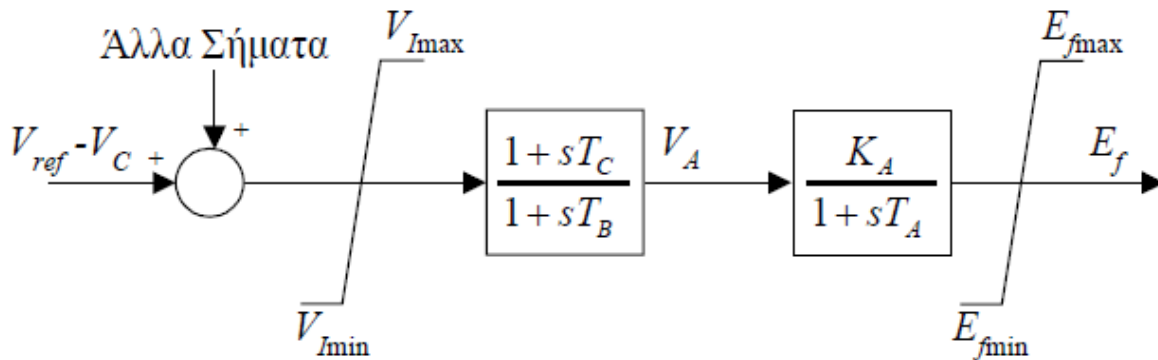
- το διάνυσμα (v_x, v_y) της τερματικής τάσης της σύγχρονης γεννήτριας V_t (α.μ.) και ανηγμένο στο σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς του συστήματος.
- το βοηθητικό σήμα PSS (προστίθεται στον κύριο αθροιστή) που προέρχεται από τον σταθεροποιητή συστήματος ισχύος (Power System Stabilizer), ο οποίος αποτελεί μία διάταξη που ενεργοποιείται σε μεταβατικές καταστάσεις και παρέχει πρόσθετη ροπή αποσβέσεως μέσω του συστήματος διέγερσης.

Έξοδος του APT είναι του λαμβάνεται το σήμα $exfd_r$ (α.μ.) που τροφοδοτεί την γεννήτρια με την τάση του κυκλώματος διέγερσης του δρομέα (αμ στα ονομαστικά της μεγέθη). Στο χώρο

κατάστασης, το εξεταζόμενο μοντέλο APT παρουσιάζει τις εξής τέσσερις μεταβλητές κατάστασης η αρχικοποίηση των οποίων γίνεται στη μάσκα του:

- τη μεταβλητή x_{ll} , η οποία συνδέεται με το φίλτρο μεταπορείας
- τη μεταβλητή x_{sf} , η οποία συνδέεται με το βρόχο διαφορικής ανατροφοδότησης.
- την έξοδο του ρυθμιστή τάσης V_R .
- την τάση διεγέρσεως E_f , η οποία είναι και η έξοδος του APT.

Το διάγραμμα βαθμίδων του APT τύπου AC4A φαίνεται στο Σχ 3.9:

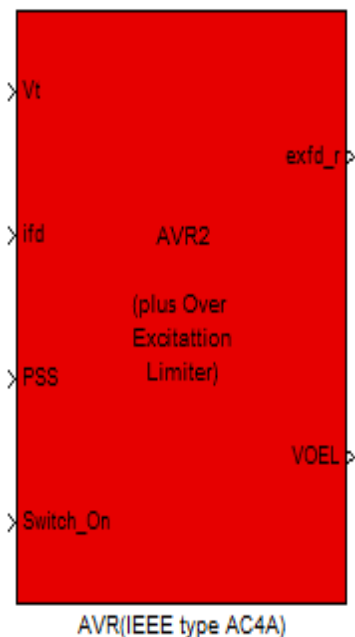


Σχήμα 3.9: Διάγραμμα βαθμίδων APT τύπου AC4A κατά IEEE

Η χρονική σταθερά T_A αντιπροσωπεύει την καθυστέρηση της ρύθμισης και η σταθερά K_A παριστάνει το συνολικό κέρδος μόνιμου καταστάσεως του APT. Οι δύο περιοριστές χρησιμεύουν στον περιορισμό των σημάτων εισόδου και εξόδου του ενώ το φίλτρο μεταπορείας ($T_B > T_C$) επιτελεί τον ίδιο ακριβώς ρόλο με προηγουμένως. Στα πλαίσια του WHSSP αναπτύχθηκε επακριβώς το παραπάνω μοντέλο, το οποίο όμως περιέχει ενσωματωμένη και τη λειτουργία του Συστήματος Προστασίας Υπερδιεγέρσεως (ΣΠΥ). Πρόκειται δηλαδή για την διάταξη η οποία προστατεύει το τύλιγμα διεγέρσεως μίας σύγχρονης μηχανής από υπερθέρμανση λόγω παρατεταμένων υπερεντάσεων.

Το τύλιγμα πεδίου της μηχανής είναι σχεδιασμένο, ώστε να λειτουργεί στη μόνιμη κατάσταση σε μία τιμή που αντιστοιχεί σε ονομαστικές συνθήκες φόρτισης. Εντούτοις επιτρέπεται το ρεύμα πεδίου να ξεπεράσει την τιμή αυτή για ένα σύντομο χρονικό διάστημα. Συγκεκριμένα μετά από μεγάλες διαταραχές, όπως π.χ. βραχυκυκλώματα, το ρεύμα πεδίου επιτρέπεται να φτάσει - για περιορισμένο χρονικό διάστημα - μία μέγιστη τιμή, η οποία είναι πολλαπλάσια του μέγιστου επιτρεπόμενου ρεύματος στη μόνιμη κατάσταση.

Το ενσωματωμένο σύστημα προστασίας υπερδιεγέρσεως παράγει ένα σήμα που προστίθεται στον κύριο αθροιστή του APT με αρνητικό πρόσημο. Το σήμα αυτό είναι μηδενικό σε συνθήκες κανονικής λειτουργίας, ενώ υποχρεώνει το ρεύμα πεδίου να μειωθεί στη μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή του σε συνθήκες υπερφόρτισης, μειώνοντας ουσιαστικά την τάση αναφοράς V_{ref} στον κύριο αθροιστή εισόδου του APT. Γι' αυτό και τα ΣΠΥ που ακολουθούν την παραπάνω τεχνική καλούνται αθροιστικά (summed type). Ωστόσο το συγκεκριμένο ΣΠΥ μπορεί να λειτουργήσει και σαν διακοπτικό (takeover type), παρακάμπτοντας τον APT και επιδρώντας απευθείας στη διεγέρτρια, όπου τελικά κυριαρχεί το ελάχιστο των δύο σημάτων. Αναλυτική παρουσίαση της λειτουργίας του συγκεκριμένου ΣΠΥ γίνεται στο [6]. Στο Σχ 3.10 δίνεται το αντίστοιχο μπλοκ της βιβλιοθήκης (AVR2.mdl) μαζί με την επεξήγηση των παραμέτρων του.



Sbase (MVA)	Βάση ισχύος συστήματος
fbase (Hz)	Συχνότητα βάσης συστήματος
bus code	Κωδικός αρίθμησης ζυγού
TC, TB	Χρονικές σταθερές φίλτρου μεταπορείας
KA	Κέρδος ρυθμιστή τάσης
TA	Χρονική σταθερά ρυθμιστή τάσης
Iflim: maximum field current controlled by OEL (pu)	Μέγιστο επιτρεπόμενο ρεύμα διέγερσης μόνιμου καταστάσεως (αμ)
Td_OEL: OEL time delay (sec)	Χρονική καθυστέρηση ΣΠΥ
Ifmax: maximum transient field current (pu)	Μέγιστο επιτρεπόμενο μεταβατικό ρεύμα διέγερσης (αμ)
Ten: Maximum time duration for ifd>Imax (sec)	Μέγιστη διάρκεια υπέρβασης του ορίου μόνιμης κατάστασης
Kp: proportional gain of PI controller	Αναλογικό κέρδος P ελεγκτή του σφάλματος ρέματος διέγερσης
limits E: [Emin Emax] (pu)	Όρια τάσης διεγέρσεως (αμ)
Gen_data= [Snom fnom Rs Xls Xd Xq Xdd Xqq] (MVA, Hz, pu)	Δεδομένα γεννήτριας (πίνακας παραμέτρων)
Gen_init= [V0 thita0_deg P0 Q0] (pu ,degrees, MW, MVar)	Αρχικές συνθήκες γεννήτριας (πίνακας παραμέτρων)

Σχήμα 3.10: Μπλοκ APT τύπου AC4A κατά IEEE και επεξήγηση παραμέτρων

Το μπλοκ αυτό δέχεται τις ακόλουθες πέντε εισόδους:

- το διάνυσμα της τερματικής τάσης της σύγχρονης γεννήτριας V_t (αμ) και ανηγμένο στο σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς του συστήματος.
- το ρεύμα διέγερσης ifd (αμ), προερχόμενο από το μοντέλο της σύγχρονης γεννήτριας.
- το βοηθητικό σήμα PSS (προστίθεται στον κύριο αθροιστή) που προέρχεται τον σταθεροποιητή συστήματος ισχύος (Power System Stabilizer), εφόσον αυτός υπάρχει .
- τον προαιρετικό σήμα $switch\ on$ που αποτελεί ένδειξη για το αν είναι ενεργοποιημένος ο APT.

Και έχουμε δύο σήματα στην έξοδο:

- το σήμα $exfd_r$ που τροφοδοτεί την γεννήτρια με την τάση του κυκλώματος διέγερσης του δρομέα (αμ) στα ονομαστικά της μεγέθη.
- το σήμα $VOEL$ του ΣΠΥ που προστίθεται (με αρνητικό πρόσημο) στον κύριο αθροιστή του APT.

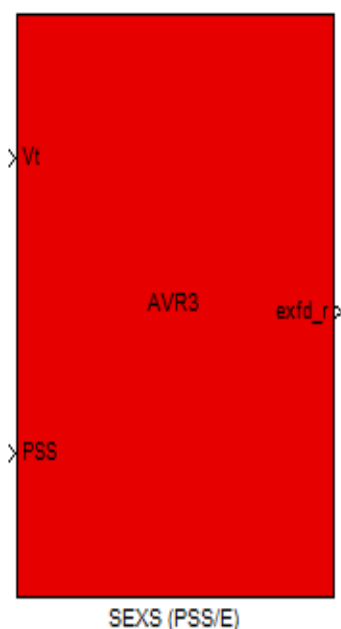
Το θεωρούμενο μοντέλο APT χαρακτηρίζεται από τις εξής δύο μεταβλητές κατάστασης, η αρχικοποίηση των οποίων γίνεται στη μάσκα του:

- τη μεταβλητή xll , η οποία συνδέεται με το φίλτρο μεταπορείας.
- την τάση διεγέρσεως Ef , η οποία είναι και η έξοδος του APT.

Ενώ οι μεταβλητές κατάστασης που αφορούν το ενσωματωμένο ΣΠΥ είναι:

- η μεταβλητή του χρονικού κυκλώματος έναυσης της βαθμίδας μονίμου καταστάσεως xt .
- το ρεύμα αναφοράς $Iref$.
- η μεταβλητή της βαθμίδας μείωσης του ρεύματος πεδίου στη μέγιστη μεταβατική τιμή xen .

Για λόγους πληρότητας παρατίθεται και το μπλοκ μιας εναλλακτικής υλοποίησης του παραπάνω APT, που ουσιαστικά διαφέρει σε σχέση με αυτόν ως προς την απουσία του ΣΠΥ. Σημειώνεται ότι η ονομασία του προέρχεται από την βιβλιοθήκη μοντέλων του [17]. Το αντίστοιχο μπλοκ της βιβλιοθήκης (AVR3.mdl) φαίνεται στο Σχ 3.11 μαζί με την επεξήγηση των παραμέτρων του.



Sbase (MVA)	Βάση ισχύος συστήματος
fbase (Hz)	Συχνότητα βάσης συστήματος
bus code	Κωδικός αρίθμησης ζυγού
TC, TB	Χρονικές σταθερές φίλτρου μεταπορείας
KA	Κέρδος ρυθμιστή τάσης
TA	Χρονική σταθερά ρυθμιστή τάσης
limits E: [Emin Emax] (p.u)	Όρια τάσης διεγέρσεως (αμ)
Gen_data= [Snom fnom Rs Xls Xd Xq Xdd Xqq] (MVA, Hz, pu)	Δεδομένα γεννήτριας (πίνακας παραμέτρων)
Gen_init= [V0 thita0_deg P0 Q0] (pu, degrees, MW, MVAr)	Αρχικές συνθήκες γεννήτριας (πίνακας παραμέτρων)

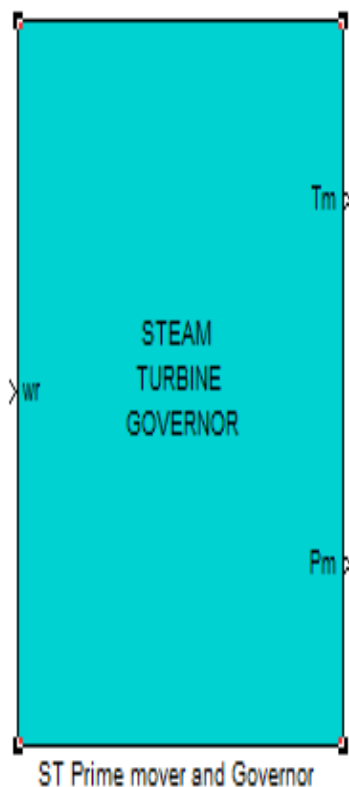
Σχήμα 3.11: Εναλλακτικό μπλοκ APT τύπου AC4A κατά IEEE (SEXS-PSS/E)

3.2.4 Μοντέλα στροβίλων και Ρυθμιστών στροφών

Κάθε σύγχρονη γεννήτρια συνοδεύεται από την κατάλληλη διάταξη που περιγράφει τη λειτουργία του στροβίλου (ατμοστρόβιλος, αεριοστρόβιλος, υδροστρόβιλος, κ.λπ.) για την απόδοση μηχανικής ροπής στον άξονα της γεννήτριας αλλά 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*. Έτσι τα μπλοκ που έχουν αναπτυχθεί στα πλαίσια του WHSSP αντιστοιχούν στη αναπαράσταση ποικίλων συμβατικών μονάδων παραγωγής όπως ατμοηλεκτρικών και υδροηλεκτρικών μονάδων, μονάδων με αεριοστρόβιλο, μονάδων συνδυασμένου κύκλου και μονάδων με Ντιζελοκινητήρα. Σημειώνεται εδώ πως σε όλες τις περιπτώσεις τα προαναφερόμενα μπλοκ δέχονται ως είσοδο τη γωνιακή ταχύτητα του δρομέα της σύγχρονης γεννήτριας ω_r (αμ) και αποδίδουν 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.

Το μοντέλο ατμοστροβίλου τριών βαθμίδων (βαθμίδες υψηλής, μέσης και χαμηλής πίεσης) συνοδευόμενο από ένα κλασικό μηχανικό-υδραυλικό ρυθμιστή στροφών, ο οποίος χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της μηχανικής ισχύος στην έξοδό του, αναπτύχθηκε στο [6] και το χαρακτηριστικό του μπλοκ του (Steam_Turbine_Governor.mdl) παρουσιάζεται μαζί με τον πίνακα των παραμέτρων του στο Σχ. 3.12:



Sbase (MVA)	Βάση ισχύος συστήματος
fbase (Hz)	Συχνότητα βάσης συστήματος
Pnom: nominal power of steam turbine (MW)	Ονομαστική ενεργός ισχύς ατμοστροβίλου
R: static droop	Μόνιμος στατισμός γεννήτριας σε ποσοστό % ανηγμένο στη βάση ισχύος του στροβίλου
Gen_data= [Snom fnom Rs Xls Xd Xq Xdd Xqq] (MVA, Hz, pu)	Δεδομένα γεννήτριας (πίνακας παραμέτρων)
Gen_init= [V0 thita0_deg P0 Q0] (pu, degrees, MW, MVA _r)	Αρχικές συνθήκες γεννήτριας (πίνακας παραμέτρων)
Tsm: servomotor time constant (sec)	Χρονική σταθερά σερβομηχανισμού του ρυθμιστή στροφών
z'min: min rate of change of main valve position (pu/sec)	Ελάχιστος ρυθμός μεταβολής θέσης της κύριας δικλείδας ελέγχου (αμ/δευτ)
z'max: max rate of change of main valve position (pu/sec)	Μέγιστος ρυθμός μεταβολής θέσης της κύριας δικλείδας ελέγχου (αμ/δευτ)
Thp : HP diffusion time constant (sec)	Χρονική σταθερά διάχυσης ατμού βαθμίδας ΥΠ
Fhp: fraction of torque developed in HP stage	Ποσοστό αναπτυσσόμενης μηχανικής ροπής στο στάδιο ΥΠ
Tr: reheat time constant (sec)	Χρονική σταθερά αναθέρμανσης
Fmp: fraction of torque developed in MP stage	Ποσοστό αναπτυσσόμενης μηχανικής ροπής στο στάδιο ΜΠ
Tlp: LP diffusion time constant (sec)	Χρονική σταθερά διάχυσης ατμού βαθμίδας ΧΠ

Σχήμα 3.12: Μπλοκ Ατμοστροβίλου με Ρυθμιστή στροφών και επεξήγηση παραμέτρων

Στο χώρο κατάστασης ο εξεταζόμενος ατμοστροβίλος παρουσιάζει τις εξής τρεις μεταβλητές κατάστασης:

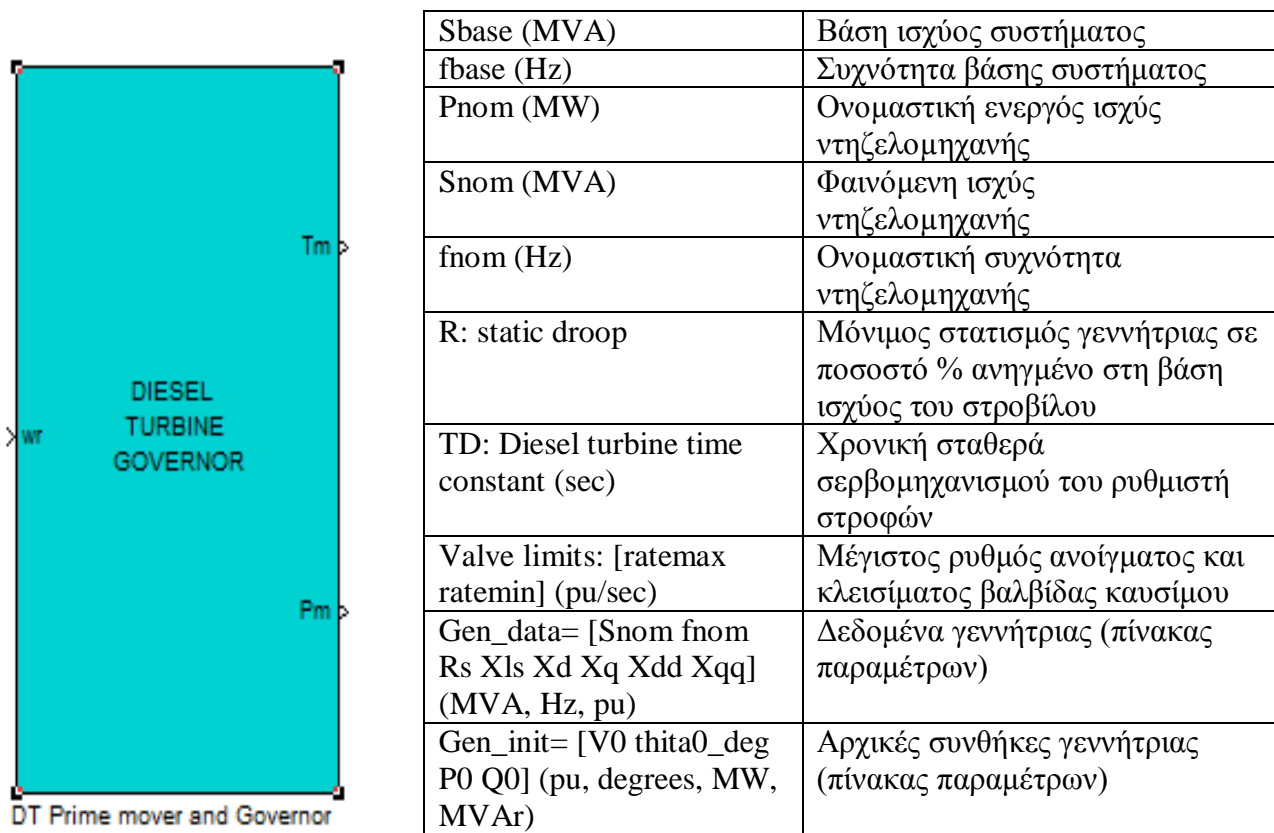
- τη ροή ατμού d_{hp} στις σωληνώσεις εισόδου.
- τη ροή ατμού d_{mp} στη έξοδο της βαθμίδας αναθέρμανσης.

- τη ροή ατμού dI_p στη σταυροειδή σωλήνωση που συνδέει τις βαθμίδες μέσης και χαμηλής πίεσης.

Αντίστοιχα για τον ρυθμιστή στροφών έχουμε:

- το άνοιγμα g της κύριας δικλείδας ελέγχου του ατμού

Σε αυτόνομα δίκτυα (π.χ. νησιωτικά ΣΗΕ), οι Ντιζελογεννήτριες χρησιμοποιούνται ευρέως για την υποστήριξη της τοπικής συμβατικής παραγωγής. Επειδή οι ντιζελομηχανές χαρακτηρίζονται από γρήγορη απόκριση ισχύος, θεωρείται ότι η μοναδική σημαντική χρονική καθυστέρηση στη μεταβατική τους απόκριση εισάγεται λόγω του ρυθμιστή στροφών και έτσι για λόγους απλοποίησης αμελείται το κομμάτι που αφορά την κινητήρια μηχανή. Το αντίστοιχο μπλοκ (Diesel_Turbine_Governor.mdl) αναπτύχθηκε στο [6] και φαίνεται μαζί με τον πίνακα των παραμέτρων του στο Σχ. 3.13:

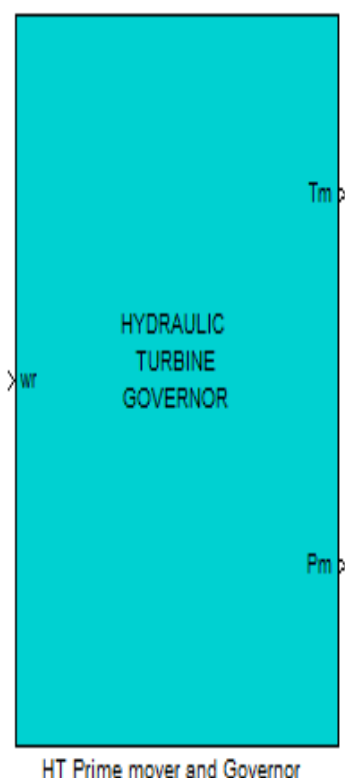


Σχήμα 3.13: Μπλοκ Ρυθμιστή στροφών Ντιζελογεννήτριας και επεξήγηση παραμέτρων

Επειδή το μοντέλο αυτό αποτελεί μια απλοποιημένη εκδοχή η μόνη μεταβλητή κατάστασης είναι η αποδιδόμενη μηχανική ισχύς P_m (αμ στη βάση του γεννήτριας), η οποία πρακτικά ταυτίζεται και με το άνοιγμα της δικλείδας καυσίμου.

Οι υδροστροβίλοι μετατρέπουν τη μηχανική ενέργεια του νερού που πέφτει από μία υψηλότερη σε μία χαμηλότερη δεξαμενή σε ωφέλιμη κινητική ενέργεια, η οποία αποδίδει μηχανική ροπή για την περιστροφή του δρομέα μίας σύγχρονης γεννήτριας. Η ιδιόμορφη απόκριση του υδροστροβίλου σε απότομες μεταβολές του ανοίγματος της υδατοθυρίδας (φαινόμενο υδραυλικού πλήγματος) επιβάλλει κατάλληλη αντιστάθμιση κατά τη σχεδίαση των αντίστοιχων ρυθμιστών στροφών. Η αντιστάθμιση αυτή πραγματοποιείται με τη βαθμίδα του μεταβατικού στατισμού. Συγκεκριμένα, σε μία απότομη μεταβολή του ανοίγματος της υδατοθυρίδας ο μεταβατικός

στατισμός δ_{tr} , ο οποίος είναι αρκετά μεγαλύτερος από το μόνιμο στατισμό σ , κυριαρχεί και μειώνει σε σημαντικό βαθμό το συνολικό κέρδος του ρυθμιστή στροφών περιορίζοντας κατ' αυτόν τον τρόπο την κίνηση της υδατοθυρίδας και το συνακόλουθο υδραυλικό πλήγμα. Το ενοποιημένο μπλοκ περιγραφής της δυναμικής του υδροστροβίλου και του ρυθμιστή στροφών του (Hydraulic_Turbine_Governor.mdl) αναπτύχθηκε στο [6] και ακολουθεί μαζί με τον πίνακα παραμέτρων του στο Σχ. 3.14:



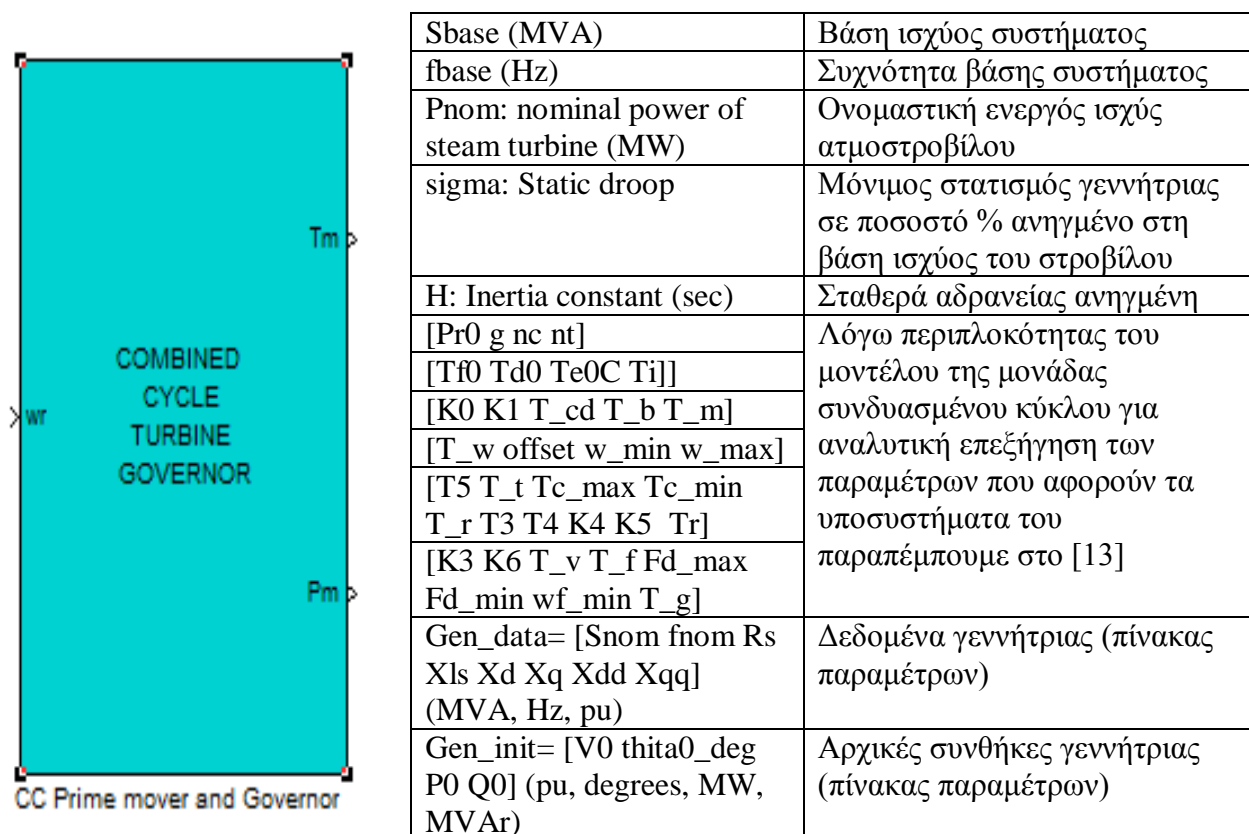
Sbase (MVA)	Βάση ισχύος συστήματος
fbase (Hz)	Συχνότητα βάσης συστήματος
Pnom: Nominal power of hydro turbine (MW)	Ονομαστική ενεργός ισχύς νηξελομηχανής
H: Inertia constant (sec)	Φαινόμενη ισχύς νηξελομηχανής
n: Turbine efficiency ($n < 1$)	Βαθμός απόδοσης υδροστροβίλου (αμ)
Pen_dim = [L1 d1 L2 d2]: Penstock length and diameter (m)	Χαρακτηριστικά μεγέθη υδατοφράκτη (μήκη και διάμετροι)
HR: Reservoir or static head (m)	Καθαρό υδραυλικό ύψος δεξαμενής υδροστροβίλου
Qhnom: Nominal discharge into the turbine (m^3/sec)	Ονομαστική παροχή υδροστροβίλου
sigma: static droop	Μόνιμος στατισμός γεννήτριας σε ποσοστό % ανηγμένο στη βάση ισχύος του στροβίλου
Tg: Main servo time constant (sec)	Χρονική σταθερά σερβομηχανισμού του ρυθμιστή στροφών
Gen_data= [Snom fnom Rs Xls Xd Xq Xdd Xqq] (MVA, Hz, pu)	Δεδομένα γεννήτριας (πίνακας παραμέτρων)
Gen_init= [V0 thita0_deg P0 Q0] (pu, degrees, MW, MVA _r)	Αρχικές συνθήκες γεννήτριας (πίνακας παραμέτρων)

Σχήμα 3.14: Μπλοκ Υδροστροβίλου με Ρυθμιστή στροφών και επεξήγηση παραμέτρων

Στο χώρο κατάστασης το θεωρούμενο μοντέλο υδροστροβίλου με ρυθμιστή στροφών χαρακτηρίζεται από τις ακόλουθες μεταβλητές κατάστασης:

- η παροχή νερού Q προς τον υδροστροβίλο.
- η μεταβλητή της βαθμίδας του μεταβατικού στατισμού του ρυθμιστή στροφών xtr .
- το άνοιγμα g των υδατοθυρίδων.

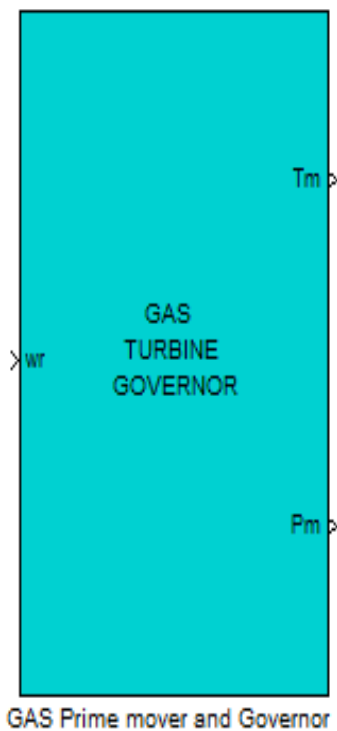
Οι μονάδες παραγωγής συνδυασμένου κύκλου ονομάζονται έτσι επειδή συνδυάζουν την λειτουργία αεροστροβίλου και ατμοστροβίλου. Με λίγα λόγια, αφού τα καυσαέρια από την καύση του καυσίμου (συνήθως φυσικό αέριο) εκτονωθούν στον αεριοστρόβιλο, οδηγούνται σε εναλλάκτη θερμότητας όπου με τη θερμική τους ενέργεια παράγεται ατμός σε ατμοπαραγωγό, ο οποίος με την σειρά του παράγει μηχανική ισχύ σε έναν ατμοστρόβιλο συνεισφέροντας στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Όπως γίνεται κατανοητό, οι μονάδες συνδυασμένου κύκλου έχουν αυξημένο βαθμό απόδοσης κάτι που οφείλεται στο γεγονός ότι η θερμική ενέργεια των καυσαερίων γίνεται εκμεταλλεύσιμη μέσω του ατμοστροβίλου. Για τους σκοπούς του WHSSP αναπτύχθηκε το κατάλληλο μπλοκ (Combined_Cycle_Turbine_Governor.mdl) στα πλαίσια του [10,13] και παρουσιάζεται στο Σχ. 3.15 μαζί με τον πίνακα παραμέτρων του:



Σχήμα 3.15: Μπλοκ Μονάδας Συνδυασμένου Κύκλου και επεξήγηση παραμέτρων

Επειδή ακριβώς το παραπάνω μοντέλο είναι αρκετά αναλυτικό και αποτελείται από αρκετές επιμέρους βαθμίδες δεν γίνεται λεπτομερής αναφορά στις μεταβλητές κατάστασης. Αυτές είναι έντεκα στο σύνολο και σχετίζονται με διάφορες επιμέρους λειτουργίες (μετρητής θερμοκρασίας, έλεγχος θερμοκρασίας-αέρα, έλεγχος βαλβίδας, έλεγχος ζήτησης καυσίμου, έλεγχος θερμοκρασίας καυσαερίων κ.λπ.) της μονάδας. Στο σημείο αυτό είναι σκόπιμο να αναφερθεί πως η αρχικοποίηση τους γίνεται στη διαδικασία αρχικοποίησης στη μάσκα αλλά παράλληλα απαιτούνται και κάποιες βοηθητικές ρουτίνες (m. αρχεία) απαραίτητες για την ολοκλήρωση της διαδικασίας αυτής. Έτσι το μοντέλο συνοδεύεται και από τις ρουτίνες pro1.m ,pro2.m και pro3.m οι οποίες βρίσκονται στον ίδιο φάκελο για να τις χειριστεί ο χρήστης. Φυσικά η ενσωμάτωσή τους στη μάσκα είναι εφικτή με μερικές τροποποιήσεις, αλλά δεν προτείνεται για το μοντέλο αυτό λόγω της ήδη αυξημένης πολυπλοκότητας του.

Κλείνοντας την υποενότητα αυτή παραθέτουμε και το μπλοκ που προσομοιώνει τη λειτουργία του αεριοστροβίλου. Πρακτικά το μπλοκ αυτό διαφέρει σε σχέση με το προηγούμενο μόνο στο γεγονός ότι απουσιάζει το τμήμα εκείνο που αφορά τη λειτουργία του ατμοστροβίλου. Πρόκειται δηλαδή επίσης για ένα αναλυτικό μοντέλο το οποίο αναπτύχθηκε στο [10]. Το χαρακτηριστικό μπλοκ (Gas_Turbine_Governor.mdl) φαίνεται στο Σχ 3.16 μαζί με τον πίνακα των παραμέτρων του:



Sbase (MVA)	Βάση ισχύος συστήματος
fbase (Hz)	Συχνότητα βάσης συστήματος
Pnom: nominal power of steam turbine (MW)	Ονομαστική ενεργός ισχύς ατμοστροβίλου
sigma: Static droop	Μόνιμος στατισμός γεννήτριας σε ποσοστό % ανηγμένο στη βάση ισχύος του στροβίλου
H: Inertia constant (sec)	Σταθερά αδρανείας ανηγμένη
[Pr0 g nc nt]	Ισχύει ότι και στην περίπτωση της μονάδα συνδυασμένου κύκλου.
[Tf0 Td0 Te0C Ti]	
[K0 K1 T_cd T_b T_m]	
[T_w offset w_min w_max]	
[T5 T_t Tc_max Tc_min T_r T3 T4 K4 K5 Tr]	
[K3 K6 T_v T_f Fd_max Fd_min wf_min T_g]	
Gen_data= [Snom fnom Rs Xls Xd Xq Xdd Xqq] (MVA, Hz, pu)	Δεδομένα γεννήτριας (πίνακας παραμέτρων)
Gen_init= [V0 thita0_deg P0 Q0] (pu ,degrees, MW, MVAr)	Αρχικές συνθήκες γεννήτριας (πίνακας παραμέτρων)

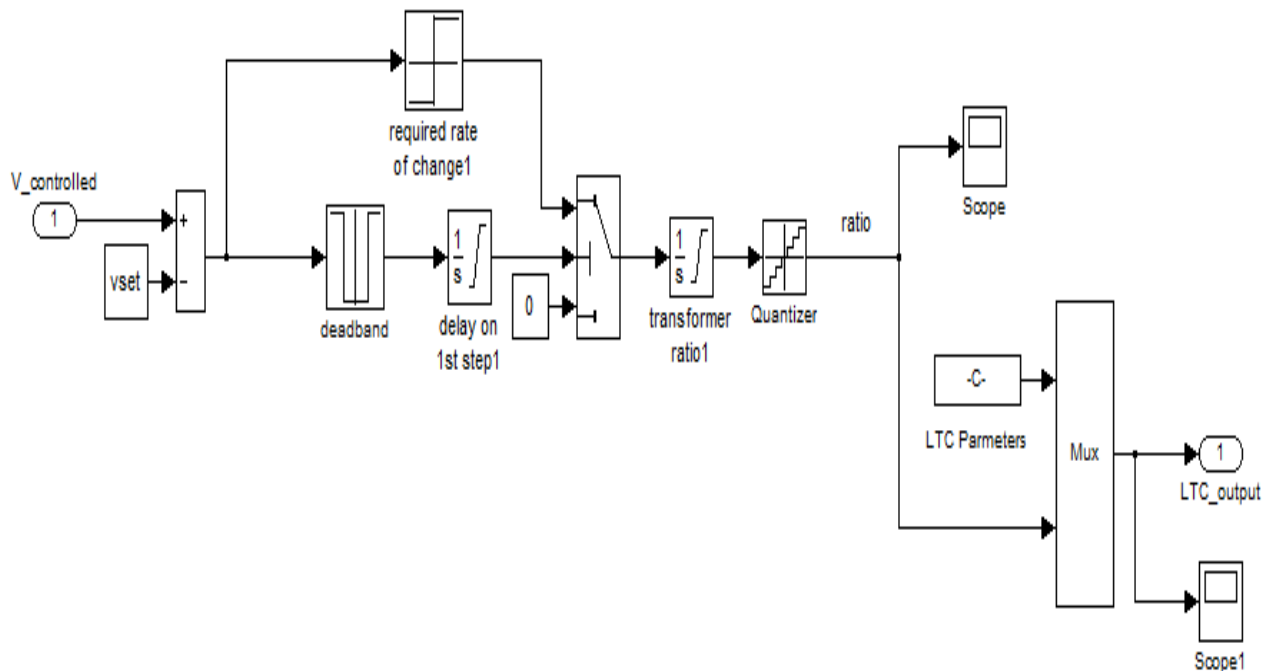
Σχήμα 3.16: Μπλοκ Αεριοστροβίλου με Ρυθμιστή στροφών και επεξήγηση παραμέτρων

Το μοντέλο αυτό όπως και του συνδυασμένου κύκλου απαιτεί κάποιες βοηθητικές ρουτίνες για την ολοκλήρωση της διαδικασίας αρχικοποίησης του. Οι ρουτίνες αυτές, που καλούνται από τις εντολές αρχικοποίησης στη μάσκα, βρίσκονται στον ίδιο φάκελο με το .mdl αρχείο που περιλαμβάνει το παραπάνω μπλοκ με τις ονομασίες prog1.m ,prog2.m και prog3.m αντίστοιχα.

3.2.5 ΣΑΤΥΦ και Δυναμικά Αυτορυθμιζόμενα Φορτία

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται τα δύο μοντέλα, ΣΑΤΥΦ και δυναμικά αυτορυθμιζόμενα φορτία, που παίζουν ρόλο στην διαδικασία προσομοίωσης στα πλαίσια του WHSSP όπως εκτενώς αναλύθηκε στο κεφάλαιο 2. Τα μπλοκ προσομοίωσης των δυναμικών αυτών διατάξεων διαχωρίστηκαν σε δύο συνιστώσες στα πλαίσια της παρούσας εργασίας έχοντας ως πρότυπο τις αντίστοιχες υλοποιήσεις στο [ref Λιέγη] και βρίσκονται στη βιβλιοθήκη στο αρχείο *LTC_and_DRL*. Να σημειωθεί μάλιστα ότι στα πλαίσια του [ref Λιέγη] παρίστανται και ως ενοποιημένη μονάδα γι' αυτό και κατηγοριοποιήθηκαν μαζί αν και αποτελούν ξεχωριστές διατάξεις. Έτσι με σκοπό την καλύτερη κατανόησή τους θα παρατεθούν και τα αντίστοιχα διαγράμματα βαθμίδων, όπως αυτά αναπτύχθηκαν στο περιβάλλον του Simulink.

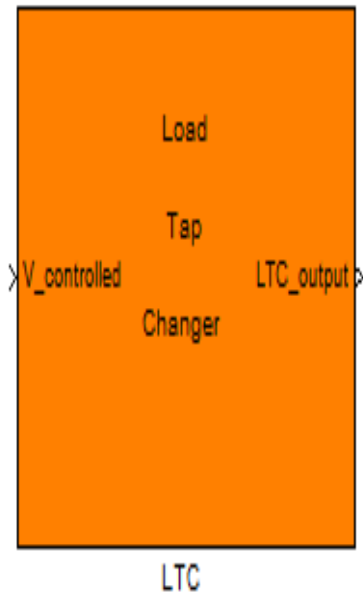
Αρχικά παρουσιάζεται στο Σχ. 3.17 το διάγραμμα του μοντέλου που προσομοιώνει τη δυναμική συμπεριφορά των ΣΑΤΥΦ (Load Tap changer, LTC) με βάση τα όσο αναφέρθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο (πίνακας 2.1) για τις αρχές που διέπουν τη λειτουργία τους:



Σχήμα 3.17: Διάγραμμα βαθμίδων ΣΑΤΥΦ

Παρατηρούμε στο Σχ. 3.17 ότι το σφάλμα ανάμεσα στην τάση του ρυθμιζόμενου ζυγού ($V_{controlled}$) και την τάση αναφοράς ($vset$) τροφοδοτείται σε έναν ελεγκτή προσήμου (*required rate of change*) και σ' έναν ζωνοπερατό ελεγκτή (*deadband*). Στον πρώτο καθορίζεται προς ποια κατεύθυνση απαιτείται μεταβολή του λόγου μετασχηματισμού και στον δεύτερο αν το μέγεθος του σφάλματος ξεπερνά τα προκαθορισμένα όρια όπου το ΣΑΤΥΦ παραμένει ανενεργό. Αν όντως το σφάλμα είναι μεγαλύτερο τότε, αφού προηγηθεί η καθυστέρηση της πρώτης αλλαγής λήψης ($T_{Do}+T_{DI}$), δίνεται σήμα στον επιλογέα να περάσει στην έξοδο την απαιτούμενη μεταβολή του λόγου λήψης. Βέβαια για τις επόμενες αλλαγές η καθυστέρηση αυτή θα είναι μικρότερη (T_{DI}). Σε κάθε βήμα ολοκλήρωσης οι μεταβολές αυτές συσσωρεύονται μέσω ενός ολοκληρωτή με άνω και κάτω περιοριστή ($rmin$, $rmax$) ώστε να προκύψει ο ολικός λόγος μετασχηματισμού. Τελικά αυτός διαμορφώνεται στην έξοδο ενός κβαντιστή (*Quantizer*) λόγω των διακριτών λήψεων που υποστηρίζει το τύλιγμα ρύθμισης. Το μπλοκ όπως συναντάται στη βιβλιοθήκη (*Load_Tap_Changer.mdl*) μαζί με τον πίνακα παραμέτρων του φαίνεται στο Σχ. 3.18.

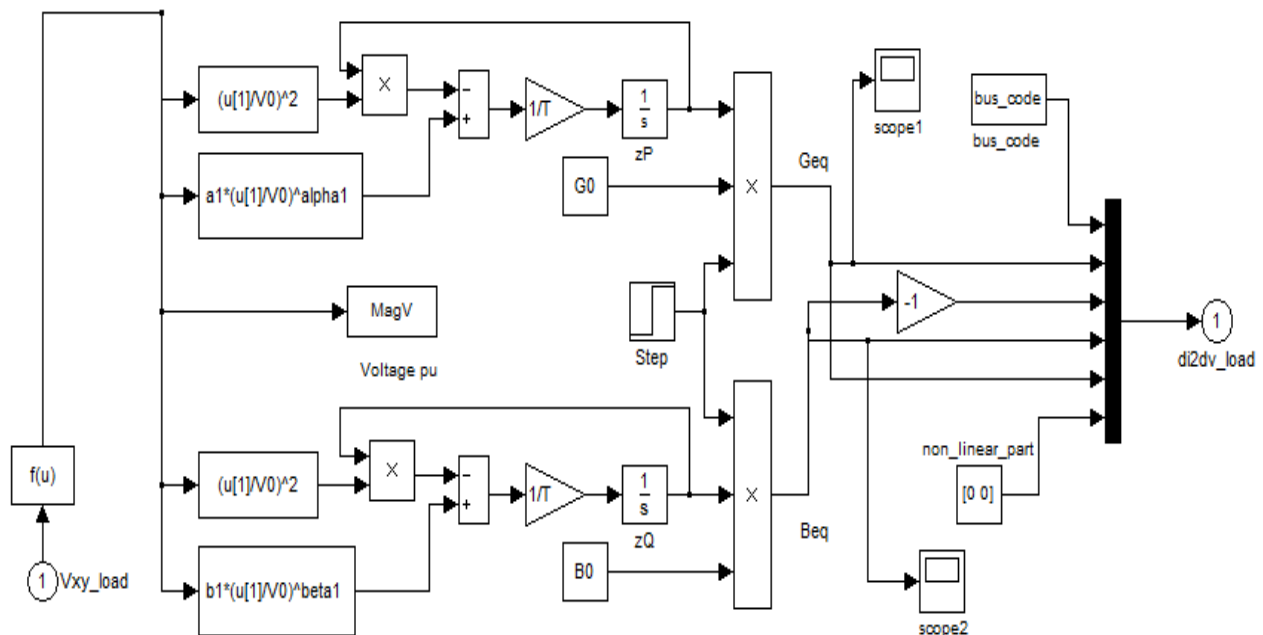
Ως είσοδο το μπλοκ του ΣΑΤΥΦ δέχεται το μέτρο της τάσης του ρυθμιζόμενου ζυγού $V_{controlled}$ και στην έξοδο δίνει ένα διάνυσμα επτά διαστάσεων (LTC_output) το οποίο περιλαμβάνει τις στατικές παραμέτρους του (ζυγοί σύνδεσης, αρχικός λόγος μετασχηματισμού ($r0$), κυκλωματικές παράμετροι) και τον λόγο μετασχηματισμού ($ratio$ στο Σχ. 3.17), όπως αυτός διαμορφώθηκε στο τελευταίο βήμα ολοκλήρωσης. Το διάνυσμα αυτό, όπως αναλύθηκε στο 2ο κεφάλαιο, οδηγείται στην είσοδο της ρουτίνας επίλυσης του δικτύου και περιέχει την απαραίτητη πληροφορία για την ενημέρωση του μεταβαλλόμενου μέρους του πραγματικού πίνακα αγωγιμοτήτων λόγω δράσης του ΣΑΤΥΦ.



Vmax: Maximum desired voltage (pu)	Μέγιστη επιθυμητή τάση (αμ)
Vmin: Minimum desired voltage (pu)	Ελάχιστη επιθυμητή τάση (αμ)
rmax: Maximum LTC ratio	Μέγιστος λόγος μετασχηματισμού
rmin: Minimum LTC ratio	Ελάχιστος λόγος μετασχηματισμού
dr: LTC step ratio	Βήμα αλλαγής λόγου μετασχηματισμού
Tm+Td: Delay for first tap change (sec)	Χρονική καθυστέρηση πρώτης αλλαγής λήψης
Td: Time delay between two sequential step changes (sec)	Χρονική καθυστέρηση ανάμεσα σε διαδοχικές βηματικές αλλαγές λήψης
LTC_static_parameters = [LTC_send LTC_recv LTC_nc LTC_RR LTC_XX LTC_BB LTC_ro]	Δεδομένα στατικών παραμέτρων του ΣΑΤΥΦ (πίνακας παραμέτρων)

Σχήμα 3.18: Μπλοκ ΣΑΤΥΦ και επεξήγηση παραμέτρων

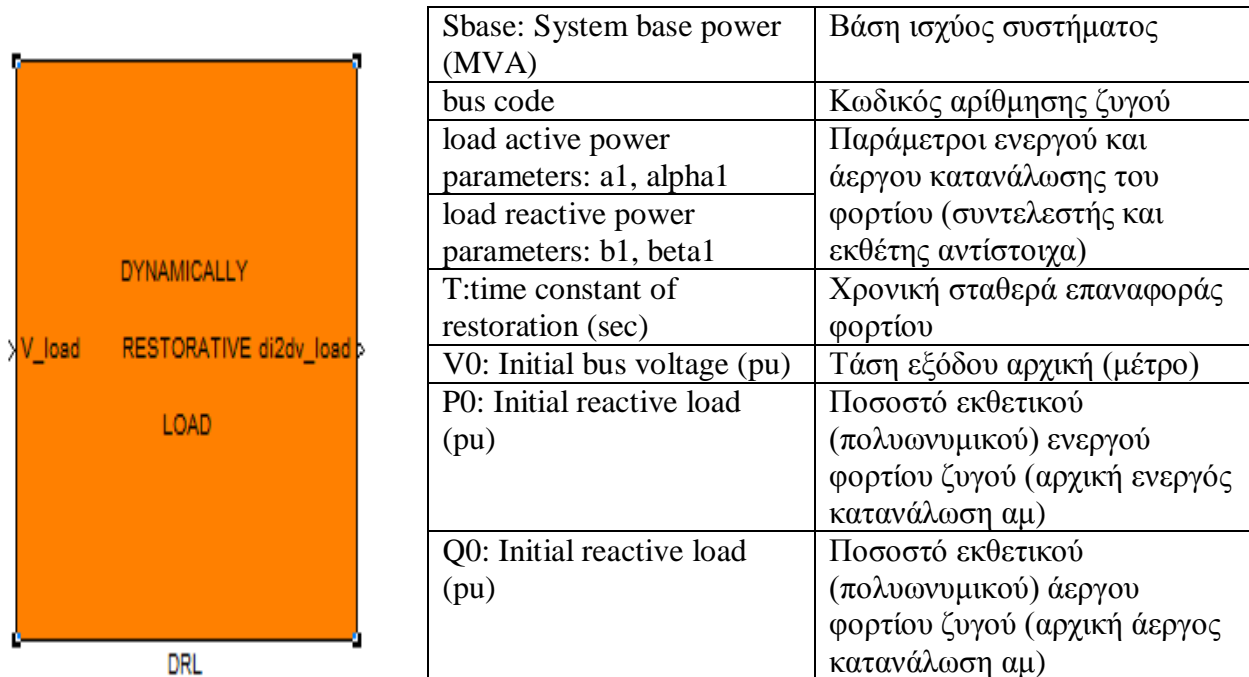
Στο Σχ. 3.19 φαίνεται το διάγραμμα βαθμίδων που περιγράφει τη λειτουργία του δυναμικά αυτορυθμιζόμενου Φορτίου (Dynamically_Restorative_Load, DRL) με βάση τις σχέσεις (2.15) και (2.16).



Σχήμα 3.19: Διάγραμμα βαθμίδων Αυτορυθμιζόμενου Φορτίου

Οι μεταβλητές κατάστασης zP και zQ που φαίνονται στο Σχ. 3.15 εκφράζουν ουσιαστικά την ενεργό και άεργο ζήτηση του φορτίου (α.μ.) ως ποσοστό των αντίστοιχων ονομαστικών. Υπολογίζονται δε, σε κάθε βήμα ολοκλήρωσης, συναρτήσει του μέτρου της τάσης του ζυγού

(v_{load}) στον οποίο συνδέεται το φορτίο και ακολουθώντας τη χρονική σταθερά αποκατάστασης της ζήτησης T (υποθέτουμε δηλαδή $T_P=T_Q=T$). Έτσι προκύπτει το πραγματικό και το φανταστικό μέρος της ισοδύναμης αγωγιμότητας του φορτίου (Geq και Beq αντίστοιχα) ως γινόμενο της τρέχουσας ζήτησης και των αρχικών τους τιμών $G0$ και $B0$. Το χαρακτηριστικό μπλοκ (Dynamically_Restorative_Load.mdl) και ο πίνακας παραμέτρων του φαίνονται στο Σχ. 3.20:



Σχήμα 3.20: Μπλοκ Αυτορρυθμιζόμενου Φορτίου και επεξήγηση παραμέτρων

Η είσοδος V_{load} αποτελείται από το διάνυσμα της τάσης του ζυγού του φορτίου (α.μ.) ανηγμένο στο σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς. Μοναδική έξοδος του υποσυστήματος είναι το διάνυσμα εφτά διαστάσεων $di2dv_{load}$ που είναι απαραίτητο για την επίλυση του δικτύου χωρίς τη χρήση επαναληπτικών μεθόδων (βλ. ενότητα 2.3.2) και αναλύεται σε:

$$di2dv = [(bus\ code) \ Y_{RL11} \ Y_{RL12} \ Y_{RL21} \ Y_{RL22} \ 0 \ 0]^T \quad (3.10)$$

όπου

$$Y_{RL} = \begin{bmatrix} Y_{RL11} & Y_{RL12} \\ Y_{RL21} & Y_{RL22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Geq & -Beq \\ Beq & Geq \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

Δηλαδή ο πίνακας Y_{RL} που παριστά τη γραμμική εξάρτηση της έγχυσης ρεύματος του φορτίου από την τάση έχει ως στοιχεία την ισοδύναμη ωμική και χωρητική αγωγιμότητα του φορτίου, ενώ η μη γραμμικώς εξαρτώμενη συνιστώσα είναι μηδενική. Σημειώνεται επίσης πως για κατανάλωση αέργου ισχύος έχουμε $Beq < 0$.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Οργάνωση βιβλιοθήκης μοντέλων ανεμογεννητριών

4.1 Γενικά

Αντικείμενο του κεφαλαίου αυτού είναι η παρουσίαση των μοντέλων διαφόρων τύπου ανεμογεννητριών στα πλαίσια της επέκτασης της βιβλιοθήκης μοντέλων του υπολογιστικού πακέτου WHSSP. Όπως αναλύθηκε στην ενότητα 1.3, τέσσερις είναι οι βασικές κατηγορίες στις οποίες χωρίζονται οι ανεμογεννήτριες με βάση τη διαμόρφωση του συστήματος ηλεκτρομηχανικής μετατροπής. Συγκεκριμένα για τις ανάγκες του WHSSP έχουν αναπτυχθεί μοντέλα που αναπαριστούν τη δυναμική συμπεριφορά των ανεμογεννητριών τύπου Α, Γ και Δ και βρίσκονται στο αρχείο *Wind_Generators* της βιβλιοθήκης.

Εκτός της αναλυτικής παρουσίασης των μοντέλων και της επεξήγησης των παραμέτρων τους, εστιάζουμε κυρίως στη λειτουργία των ανεμογεννητριών μεταβλητών στροφών (τύποι Γ και Δ). Προς την κατεύθυνση αυτή διενεργήθηκαν μια σειρά από συγκριτικές δοκιμές. Σκοπός των δοκιμών αυτών ήταν αφενός μεν να γίνει προσπάθεια πιστοποίησης της καταλληλότητας των μοντέλων για μελέτες ευστάθειας και αφετέρου η σύγκριση μεταξύ κάποιων εναλλακτικών υλοποιήσεων. Οι υλοποιήσεις αυτές διαφέρουν κατά βάση στη λειτουργία κάποιων επιμέρους ελεγκτών και σχετίζονται με την απαίτηση για αδιάλειπτη παροχή ισχύος σε συνθήκες χαμηλής τάσης (Low Voltage Ride Through). Φυσικά για να γίνουν κατανοητές οι διάφορες τεχνικές ελέγχου και οι προτεινόμενες παραλλαγές τους θα παρατεθούν τα αντίστοιχα διαγράμματα βαθμίδων που τις περιγράφουν.

Όσον αφορά την καταλληλότητα των προτεινόμενων μοντέλων για τις μελέτες ευστάθειας, οι συγκρίσεις έλαβαν χώρα με τις αντίστοιχες αναπαραστάσεις των ανεμογεννητριών διπλής τροφοδότησης και πλήρους μετατροπέα στα πλαίσια του επαγγελματικού λογισμικού *PSS/E* για προσομοιώσεις Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας. Ιδιαίτερα για την περίπτωση της ανεμογεννήτριας διπλής τροφοδότησης διεξήχθη επιπλέον σύγκριση με ένα πλήρες ηλεκτρομαγνητικό μοντέλο που βρίσκεται στη βιβλιοθήκη των demo του Simulink. Περαιτέρω πληροφορίες για το μοντέλο αυτό θα δοθούν στην αντίστοιχη υποενότητα.

Πριν προχωρήσουμε στην παρουσίαση των μοντέλων, όπως αυτά οργανώθηκαν στη βιβλιοθήκη, θα περιγράψουμε τις βασικές αρχές λειτουργίας που διέπουν το καθένα. Παρά τις διαφοροποιήσεις που υπεισέρχονται στους διάφορους τύπους, τα βασικά συστατικά μέρη μιας ανεμογεννήτριας μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε τρεις κατηγορίες. Έτσι κάθε μοντέλο απαρτίζεται από τις διατάξεις που περιγράφουν το μηχανικό μέρος και τα αεροδυναμικά χαρακτηριστικά του, τις διατάξεις που περιγράφουν την δυναμική συμπεριφορά των ηλεκτρικών μεγεθών και αυτές που σχετίζονται με τα διάφορα συστήματα ελέγχου. Τα συστήματα αυτά είναι υπεύθυνα για την παρακολούθηση των σημαντικών μηχανικών και ηλεκτρικών μεγεθών και τη δημιουργία των απαραίτητων σημάτων αναφοράς ώστε αυτά να ακολουθούν κάποια προκαθορισμένη επιθυμητή συμπεριφορά. Γι' αυτό θα παρατεθούν τα αντίστοιχα διαγράμματα βαθμίδων ή σύνολα εξισώσεων όπου απαιτείται περισσότερη σαφήνεια για τη λειτουργία των επιμέρους διατάξεων που συνθέτουν τα μοντέλα.

4.2 Ανεμογεννήτρια σταθερών στροφών με μηχανή επαγωγής βραχυκυκλωμένου δρομέα (Τύπος Α)

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

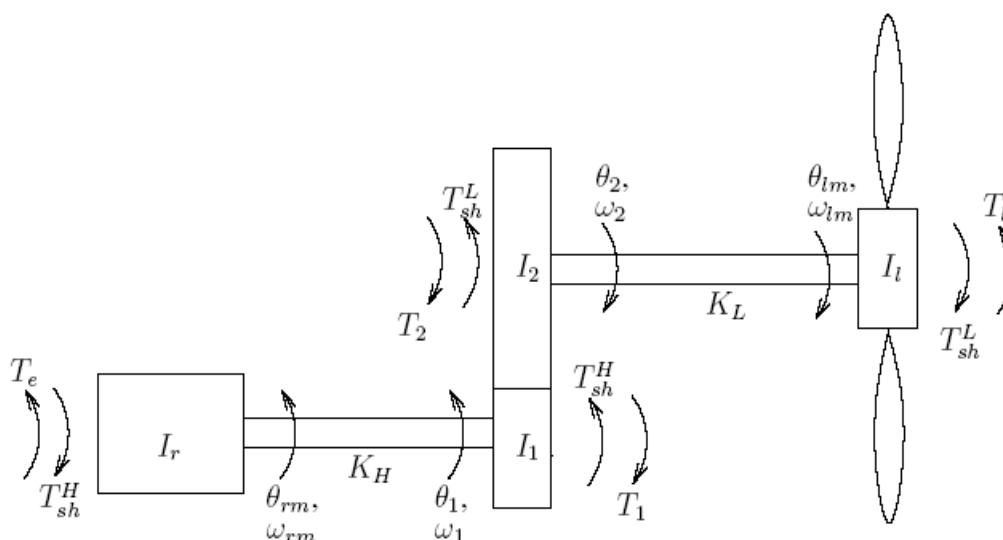
παρουσιάστηκε στην παράγραφο 3.2.2 αυτής της εργασίας. Έτσι σε ότι έχει να κάνει με το ηλεκτρικό μέρος της ανεμογεννήτριας (με την παραδοχή της οιονεί ημιτονοειδούς κατάστασης) η προσομοίωση του κατ' αυτόν τον τρόπο κρίνεται επαρκής. Η διαφοροποίηση σε σχέση με την απλή μηχανή επαγωγής έγκειται στον τρόπο παράστασης του μηχανικού μέρους. Η προσέγγιση που χρησιμοποιείται είναι στις συνήθεις μηχανές επαγωγής αυτή της μίας μάζας, δηλαδή θεωρείται ότι όλες οι περιστρεφόμενες μάζες αντιπροσωπεύονται από μία ισοδύναμη. Η απλοποίηση αυτή είναι αρκετά συχνή σε μελέτες συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας και θεωρεί ότι ο άξονας που συνδέει τον δρομέα της μηχανής επαγωγής με την έλικα είναι απολύτως ανελαστικός.

Στην πράξη όμως, όταν η ανεμογεννήτρια είναι μηχανή επαγωγής, χρησιμοποιείται ένα κιβώτιο ταχυτήτων-ουσιαστικά ένας μειωτήρας-για την κίνηση της 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 μάζες και είναι οι ακόλουθες:

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

Το μοντέλο 4 μαζών δίνεται στο σχήμα 4.1 [8]. 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 έχουμε:

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



Σχ. 4.1: Μηχανικό μοντέλο ανεμογεννήτριας με 4 μάζες

Οι αναλυτικές εξισώσεις που ισχύουν για το μοντέλο αυτό μπορούν να αναζητηθούν στην σχετική βιβλιογραφία [8]. Θεωρώντας ότι οι δυο άξονες έχουν μεγάλη σταθερά ελαστικότητας χωρίς μεγάλη απόκλιση από την πραγματικότητα μπορούμε να καταλήξουμε σε ένα απλοποιημένο μοντέλο 2 μαζών όπου οι μάζες σε κάθε άξονα θεωρούνται συγκεντρωμένες. Μέσω αυτής της προσέγγισης μπορεί να αναπαρασταθεί ένας στεπτικός ρυθμός ταλάντωσης του άξονα, η συχνότητα του οποίου κυμαίνεται συνήθως μεταξύ των 1-2 Hz. Εφόσον οι απώλειες αμελούνται και ανάγουμε τα μεγέθη της πλευράς χαμηλών ταχυτήτων σε αυτή υψηλών ταχυτήτων, καταλήγουμε τελικά στις ακόλουθες σχέσεις στο ανά μονάδα σύστημα [8]:

$$2H_r \frac{1}{\omega_b} \cdot \frac{d\omega_r}{dt} = T_e - T_{sh} \quad (4.1)$$

$$2H_l \frac{1}{\omega_b} \cdot \frac{d\omega_l}{dt} = T_{sh} - T_l \quad (4.2)$$

$$T_{sh} = K_{sh} \Delta\theta + D(\omega_r - \omega_l) \cdot \frac{1}{\omega_b} \quad (4.3)$$

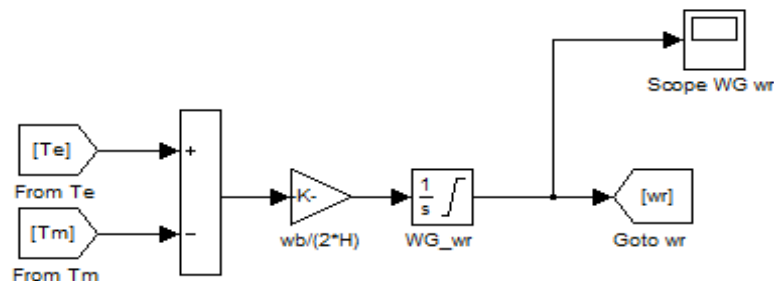
όπου έχουμε:

- 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 ταχυτήτων.
- H_l η ανηγμένη σταθερά του δρομέα του ανεμοκινητήρα (πλευρά χαμηλών ταχυτήτων).
- K_{sh} η σταθερά ελαστικότητας του άξονα
- D ο συντελεστής απόσβεσης και $\Delta\theta$ η γωνία που περιγράφει τη στρέψη του άξονα. Οι ταχύτητες περιστροφής του δρομέα της μηχανής επαγωγής και του δρομέα του ανεμοκινητήρα συνδέονται με την ακόλουθη σχέση:

$$\Delta\dot{\theta} = \omega_r - \omega_l \quad (4.4)$$

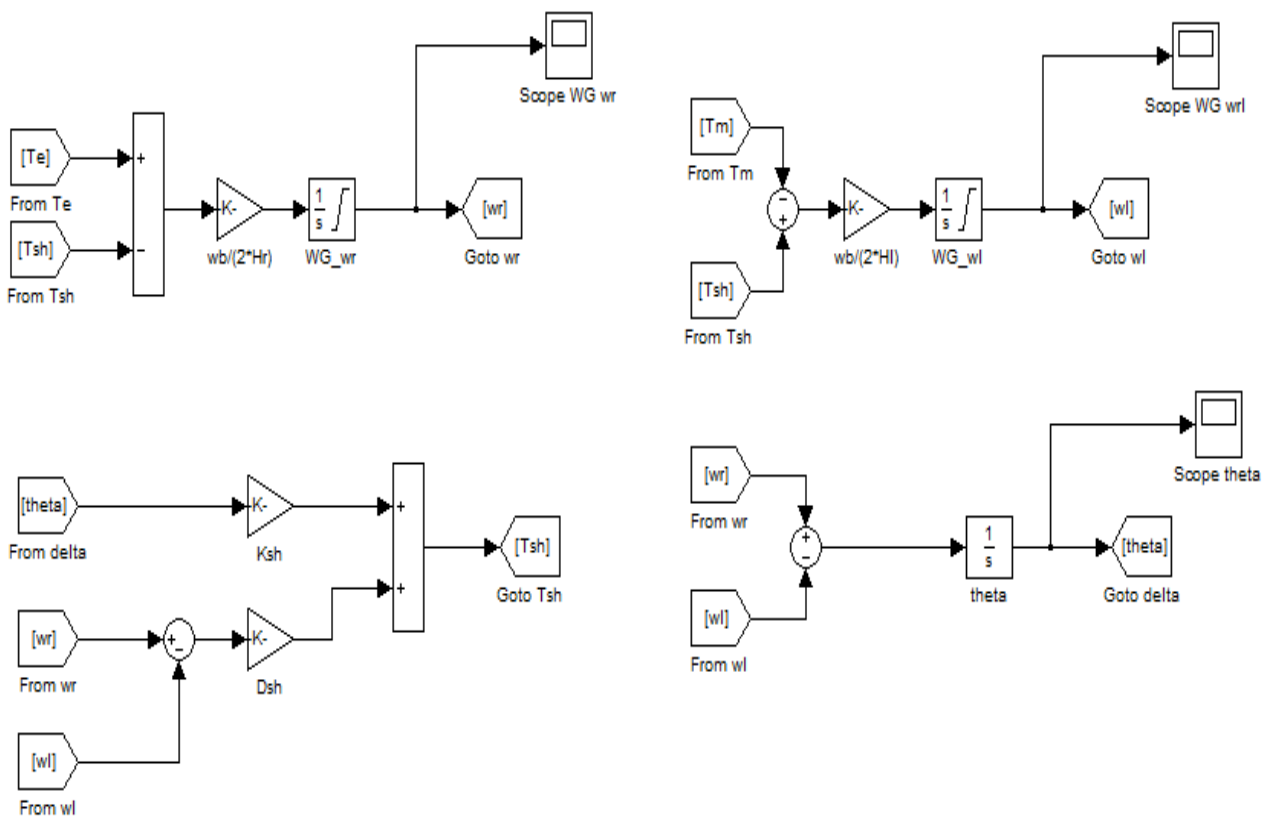
Για την σταθερά ελαστικότητας μπορεί να θεωρηθεί μια τυπική τιμή (π.χ. $K_{sh}=0.3$) ενώ για την αδράνεια του άξονα μια συνήθης πρακτική είναι να θεωρήσουμε ότι είναι μοιρασμένη κατά 1/6 στην πλευρά του δρομέα της μηχανής επαγωγής και κατά 5/6 στην πλευρά του δρομέα του ανεμοκινητήρα.

Στη λογική παράστασης μίας μάζας η υλοποίηση του μηχανικού μέρους, όπως προαναφέρθηκε ταυτίζεται με αυτή της μηχανής επαγωγής και η υλοποίηση στο περιβάλλον του Simulink είναι όπως φαίνεται στο Σχ. 4.2, όπου υλοποιείται απλά η εξίσωση της κίνησης του δρομέα (εδώ η μηχανική ροπή λόγω ανέμου συμβολίζεται με T_m):



Σχ. 4.2: Μηχανικό μοντέλο ανεμογεννήτριας με 1 μάζα στο Simulink

Αντίστοιχα για τη λογική δύο μαζών τροποποιείται κατάλληλα το μοντέλο της μηχανής επαγωγής ώστε να εξομοιωθεί και η λειτουργία του μηχανικού μέρους, με την υλοποίηση στο περιβάλλον του Simulink να δίνεται στο Σχ. 4.3:



Σχ. 4.3: Μηχανικό μοντέλο ανεμογεννήτριας με 2 μάζες στο Simulink

Γενικά η αναπαράσταση μέσω δύο μαζών επειδή συμπεριλαμβάνει σε ένα βαθμό και τη δυναμική του συστήματος μετάδοσης της κίνησης κρίνεται καλύτερη ενώ και από πλευράς υλοποίησης δεν περιπλέκει σημαντικά το μοντέλο μας. Έτσι θα προτιμηθεί και στη συνέχεια για την παράσταση ανεμογεννήτριας τύπου A στην προσομοίωση ενός αυτόνομου συστήματος στα Κεφάλαια 5 και 6.

Εκτός όμως της δυναμικής του συστήματος μετάδοσης της κίνησης υπάρχει και η δυναμική που σχετίζεται με τα αεροδυναμικά χαρακτηριστικά των πτερυγίων της έλικας του ανεμοκινητήρα. Έτσι προς πιστότερη αναπαράσταση του μηχανικού μέρους απαιτείται και η αντίστοιχη μοντελοποίηση της μηχανικής ροπής που αποδίδεται συναρτήσει της ταχύτητας του ανέμου. Φυσικά θα μπορούσαμε όπως και στην περίπτωση της απλής μηχανής επαγωγής να τροφοδοτούμε το μοντέλο μας απευθείας με μια ισοδύναμη μηχανική ροπή όπως αυτή θα προκύψει από τη διαδικασία αρχικοποίησης. Σε αυτή την περίπτωση πιθανή διαταραχή του ανέμου μπορεί να προσομοιωθεί μέσω μιας βηματικής αλλαγής στην τιμή που αναπαριστά την αποδιδόμενη μηχανική ροπή. Ωστόσο για λόγους ακριβέστερης αναπαράστασης θα συμπεριλάβουμε στο μοντέλο μας και τη δυναμική του ανέμου ώστε ο χρήστης, εφόσον το επιθυμεί, να μπορεί να προσομοιώσει πιστότερα ενδεχόμενη διαταραχή.

Θα παραθέσουμε στο σημείο αυτό τις σχέσεις που περιγράφουν την αεροδυναμική συμπεριφορά του ανεμοκινητήρα για να γίνει ευκολότερα κατανοητή αυτή η εναλλακτική υλοποίηση. Η βασική σχέση που εκφράζει την αεροδυναμική ισχύ μιας οποιασδήποτε A/Γ είναι η ακόλουθη:

$$P_m = \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot C_p(\lambda, \beta) \cdot V_w^3 \quad (4.5)$$

όπου:

- P_m είναι η μηχανική ισχύς στον άξονα του ανεμοκινητήρα (Watt)
- ρ είναι η πυκνότητα του αέρα (συνήθης τιμή 1.225 kg/ m^3)
- A είναι η επιφάνεια που διαγράφει η έλικα (m^2)
- V_w είναι η ταχύτητα του ανέμου (m/sec)
- C_p είναι ο αεροδυναμικός συντελεστής ισχύος

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

$$\lambda = \frac{\omega_l \cdot R}{V_w} \quad (4.6)$$

όπου:

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

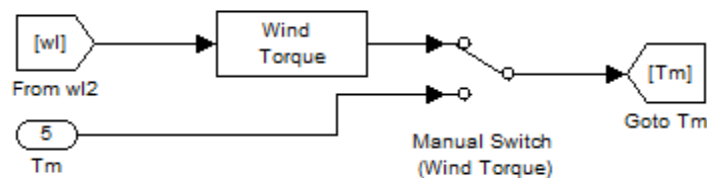
Όσο μεγαλύτερη τιμή έχει ο αεροδυναμικός συντελεστής τόσο μεγαλύτερη είναι και η εκμεταλλεύσιμη αεροδυναμική ισχύς. Τυπικές τιμές του C_p είναι από 0,4 έως 0,5, ενώ το θεωρητικά μέγιστο όριο είναι 0.593 (όριο Betz). Γνωρίζοντας λοιπόν την αεροδυναμική ισχύ και την ταχύτητα περιστροφής του ανεμοκινητήρα, η αποδιδόμενη μηχανική ροπή στην περωτή της A/G είναι:

$$T_m = \frac{P_m}{\omega_l} \quad (4.7)$$

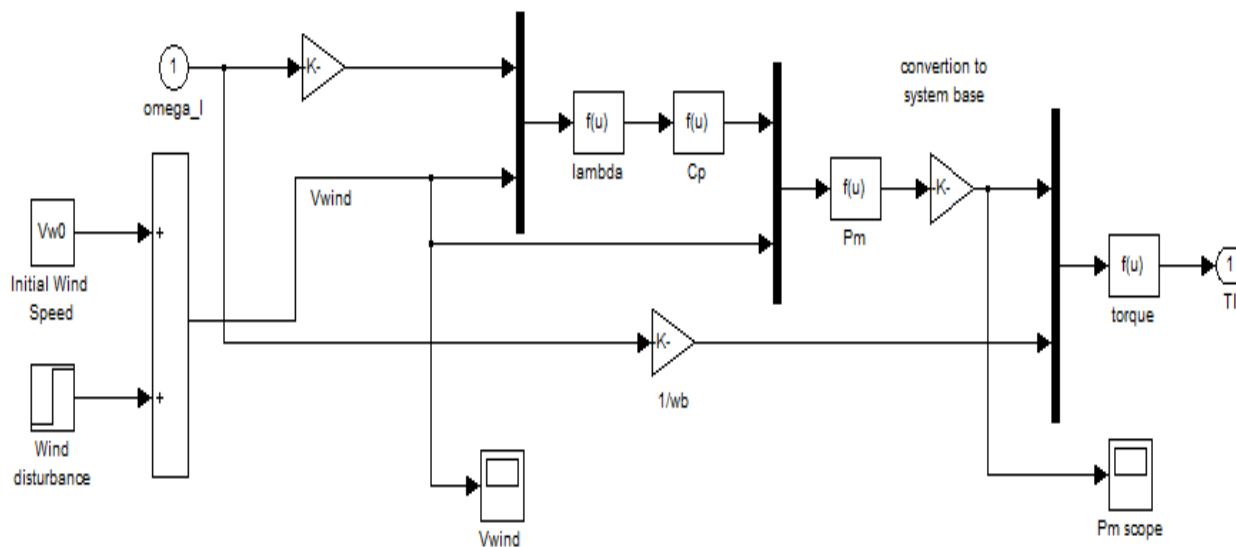
Για τη μοντελοποίηση αυτή θεωρείται σταθερή γωνία βήματος β ίση με 0, καθώς θεωρούμε ότι ο έλεγχος αεροδυναμικής ισχύος διενεργείται μέσω της λογικής παθητικής απώλειας στήριξης (passive stall). Δηλαδή τα πτερύγια της ανεμογεννήτριας είναι στερεωμένα στην πλήμνη του δρομέα υπό συγκεκριμένη γωνία που δεν μεταβάλλεται. Επιπροσθέτως είναι αεροδυναμικά σχεδιασμένα κατά τρόπο τέτοιο ώστε αυξανόμενης της ταχύτητας του ανέμου, το σχήμα του πτερυγίου σταδιακά να ωθεί στη υποχώρηση απέναντι στην τύρβη και τελικά στην απώλεια στήριξης (stall effect). Βέβαια με μικρές τροποποιήσεις μπορεί να επεκταθεί η παραπάνω υλοποίηση ώστε να υποστηρίζει και ενεργό έλεγχο απώλειας στήριξης (active stall), δηλαδή να μεταβάλλεται η γωνία βήματος των πτερυγίων, λογική που συναντάται κυρίως σε ανεμογεννήτριες μεγάλης ονομαστικής ισχύος που συνδέονται απευθείας στο δίκτυο. Τέλος θα πρέπει να αναφερθεί ότι η αποδιδόμενη μηχανική ροπή T_m προκύπτει μετά από αναγωγή στη λογική ενοποιημένης ισοδύναμης ανεμογεννήτριας για ένα αιολικό πάρκο και αφού μετατραπεί σε ανά μονάδα τιμή στη βάση του συστήματος.

Όσον αφορά τις αναλυτικές σχέσεις που συνδέουν τον C_p με το λ και β δεν θα παραθέσουμε κάποια συγκεκριμένα και θα παραπέμψουμε απλώς στην σχετική βιβλιογραφία. Εξάλλου η υλοποίηση της αεροδυναμικής συμπεριφοράς, όπως αυτή περιγράφηκε, έγινε σε γενική μορφή ώστε να μπορεί να προσαρμοστεί κατάλληλα από τον χρήστη ανάλογα με τα αεροδυναμικά χαρακτηριστικά της εκάστοτε περίπτωσης. Στο Σχ. 4.4 δίνεται και η προτεινόμενη υλοποίηση σε περιβάλλον Simulink. Μέσω ενός χειροκίνητου επιλογέα (Manual Switch) ο χρήστης μπορεί να επιλέξει ως προς τον τρόπο υπολογισμού της αποδιδόμενης μηχανικής ροπής T_m στον δρομέα του ανεμοκινητήρα. Συγκεκριμένα επιλέγεται αν θα προέρχεται από το αντίστοιχο σήμα εισόδου που

αγνοεί την αεροδυναμική συμπεριφορά της πτερωτής ή αν θα υπολογίζεται αναλυτικά βάση αυτής εσωτερικά του υποσυστήματος Wind Torque το οποίο φαίνεται στο Σχ. 4.5.



Σχ. 4.4 Επιλογέας για τον υπολογισμό της μηχανικής ροπής στο Simulink



Σχ. 4.5 Υποσύστημα Wind Torque στο Simulink

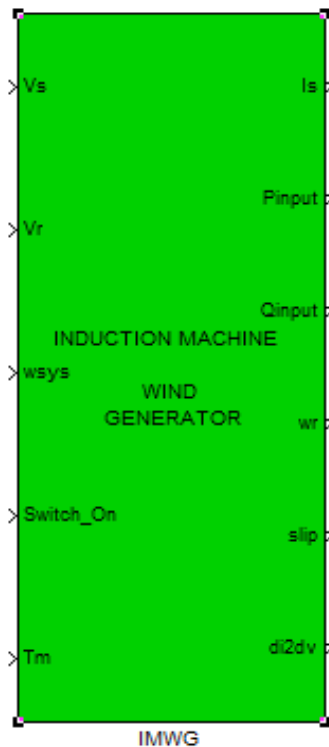
Όπως φαίνεται στο Σχ. 4.5, εσωτερικά του υποσυστήματος υπολογίζεται η αποδιδόμενη μηχανική ροπή αφού προηγουμένως υπολογιστεί η αεροδυναμική ισχύς P_m συναρτήσει της ταχύτητας του ανέμου V_{wind} και της γωνιακής ταχύτητας του ανεμοκινητήρα ω_l . Η αρχική ταχύτητα του ανέμου V_{w0} υπολογίζεται στη διαδικασία αρχικοποίησης στη μάσκα του μοντέλου και μέσω του μπλοκ βηματικής μεταβολής (Wind disturbance) προσομοιώνονται οι διαταραχές ανέμου.

Για την αρχικοποίηση της ταχύτητας του ανέμου υπάρχει στην αρχική εκδοχή του μοντέλου ένα συνεργαζόμενο αρχείο (m.file) με την ονομασία *windpower.m* το οποίο καλείται εσωτερικά στη μάσκα μέσω της εντολής *fzero* της MATLAB. Στο *windpower.m* υλοποιείται η κατάλληλη συνάρτηση βάσει των αεροδυναμικών χαρακτηριστικών και υπολογίζεται η V_{w0} ώστε η αεροδυναμική ισχύς να ταυτίζεται με την αντίστοιχη υπολογιζόμενη από τις αρχικές τιμές των μεταβλητών του μοντέλου. Το συνεργαζόμενο αυτό αρχείο διατηρήθηκε για λόγους πληρότητας στη βιβλιοθήκη αν και προτιμήθηκε η λογική ενσωμάτωσης του στη μάσκα, όπως έγινε και σε άλλα μοντέλα.

Όσον αφορά τα συστήματα ελέγχου οι ανεμογεννήτριες τύπου A ουσιαστικά διαθέτουν μόνο πιθανό έλεγχο της γωνίας βήματος πτερυγίων όπως προαναφέρθηκε. Λειτουργούν χωρίς τη δυνατότητα ελέγχου ταχύτητας, και η ολίσθηση υφίσταται απλά μικρές διακυμάνσεις, ενώ η απόδοσή τους μεγιστοποιείται σε συγκεκριμένη ταχύτητα ανέμου. Επίσης δεν μπορούν να συμβάλλουν στις ρυθμίσεις του δικτύου που απαιτούν οι νέοι κώδικες από τα αιολικά πάρκα αφού

παρουσιάζουν μη ελέγξιμη κατανάλωση αέργου ισχύος, η οποία επιβάλλεται από τη δυναμική της γεννήτριας επαγωγής. Γι αυτό και συνοδεύονται από μία συστοιχία πυκνωτών που παρέχει την αναγκαία αντιστάθμιση αέργου ισχύος.

Το μπλοκ της περιγραφόμενης μοντελοποίησης, όπως θα το συναντήσει ο χρήστης στη βιβλιοθήκη ως Induction_Machine_Wind_Generator.mdl, μαζί με τον πίνακα παραμέτρων του και μια σύντομη επεξήγησή τους φαίνεται στο Σχ. 4.6:



Sbase (MVA)	Βάση ισχύος συστήματος
fbase (Hz)	Ονομαστική συχνότητα συστήματος
bus code	Κωδικός αρίθμησης ζυγού
Snom (MVA)	Ονομαστική φαινόμενη ισχύς
fnom (Hz)	Ονομαστική συχνότητα
Rs (Stator resistance pu)	Αντίσταση στάτη (αμ)
Xls (Stator leakage reactance pu)	Επαγωγική αντίδραση στάτη (αμ)
Xm (magnetizing reactance p.u.)	Επαγωγική αντίδραση μαγνήτισης (αμ)
Rr (Rotor resistance pu)	Αντίσταση δρομέα (αμ)
Xlr (Rotor leakage reactance pu)	Επαγωγική αντίδραση δρομέα (αμ)
H (Inertia constant sec)	Σταθερά αδρανείας ανηγμένη (για λογική μίας μάζας)
Wind turbine parameters: [nturb radius ratio vnom pnom poles]	Παράμετροι ανεμογεννήτριας-αιολικού πάρκου: [αριθμός Α/Γ, ακτίνα πτερωτής, λόγος μειωτήρα, ονομαστική ταχύτητα ανέμου, ονομαστική ενεργός ισχύς, αριθμός πόλων γεννήτριας επαγωγής]
Shaft parameters: [Hr HI Ksh Dsh]	Ανηγμένες σταθερές συστήματος μετάδοσης κίνησης (για λογική δύο μαζών)
Motor_init = [V0 thita0_deg P0]: Induction motor initial data (pu deg MW)	Αρχικές συνθήκες μηχανής επαγωγής (σύμβαση κινητήρα)

Σχήμα 4.6: Μπλοκ ανεμογεννήτριας τύπου A και επεξήγηση παραμέτρων

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).

- την γωνιακή ταχύτητα του σύγχρονου πλαισίου αναφοράς ω_{sys} (αμ).
- τον σήμα *switch on* που αποτελεί ένδειξη για το αν είναι συνδεδεμένη στο δίκτυο η ανεμογεννήτρια και μπορεί να προέρχεται από κάποια διάταξη προστασίας που την αποσυνδέει σε μεγάλες διαταραχές (trip).
- την μηχανική ροπή T_m (αμ) ανηγμένη στη βάση ισχύος του συστήματος για την περίπτωση που αμελούμε αεροδυναμική συμπεριφορά.

Οι πέντε έξοδοι του μοντέλου είναι οι ακόλουθες:

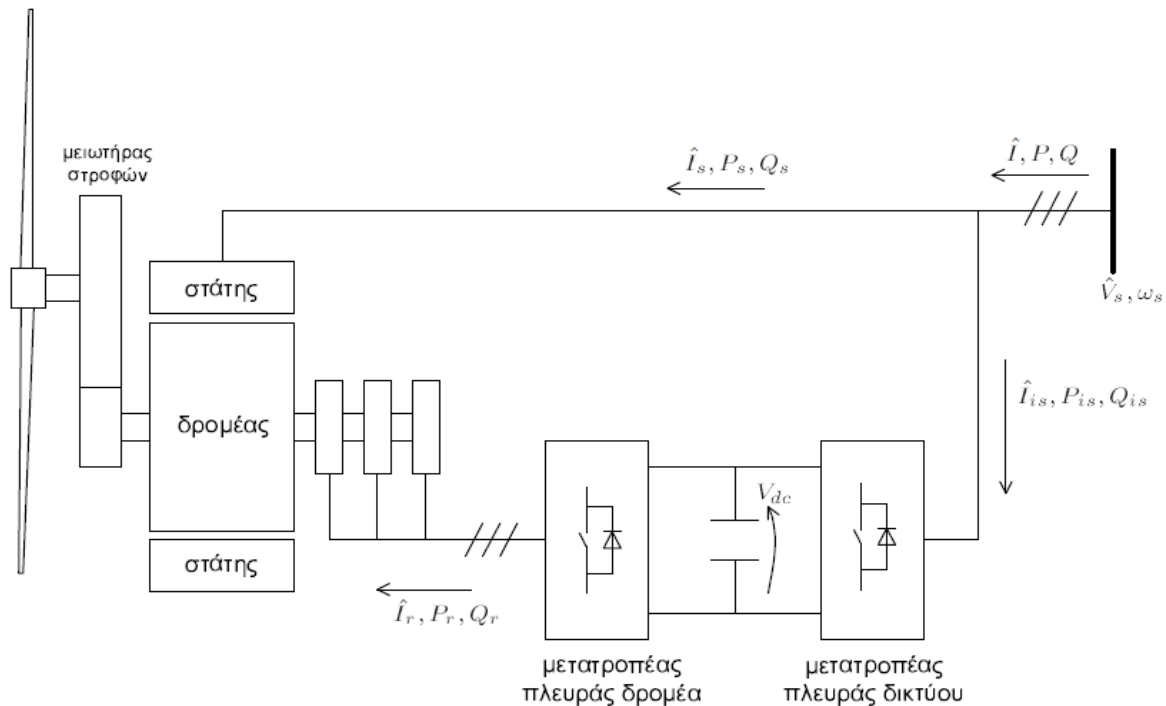
- το διάνυσμα (i_x, i_y) του απορροφούμενου (σύμβαση κινητήρα) ρεύματος της μηχανής I_s (αμ) στη βάση του συστήματος και ανηγμένο στο σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς.
- η απορροφούμενη (σύμβαση κινητήρα) ενεργό ισχύ P_{input} (αμ) στη βάση του συστήματος.
- η απορροφούμενη (σύμβαση κινητήρα) άεργο ισχύ Q_{input} (αμ) στη βάση του συστήματος.
- η γωνιακή ταχύτητα του δρομέα της σύγχρονης γεννήτριας ω_r (αμ).
- η τιμή της ολίσθησης slip (%).
- το διάνυσμα $di2dv$ για την επίλυση του δικτύου χωρίς επαναληπτικές μεθόδους και το οποίο είναι ακριβώς το ίδιο με την μηχανή επαγωγής (βλ. ενότητα 3.2.2).

Οι μεταβλητές κατάστασης αποτελούνται από τις πεπλεγμένες ροές ευθέος και εγκάρσιου άξονα του σύγχρονου πλαισίου της μηχανής (ydr_e και yqr_e αντίστοιχα), τη γωνιακή ταχύτητα του δρομέα της γεννήτριας και του ανεμοκινητήρα (WG_wr και WG_wl) καθώς και τη γωνιακή παραμόρφωση του άξονα θ , ενώ η διαδικασία αρχικοποίησης τους καθορίζεται στη μάσκα του μοντέλου.

4.3 Ανεμογεννήτρια μεταβλητών στροφών με ασύγχρονη γεννήτρια διπλής τροφοδότησης και σύστημα μετατροπών ισχύος συνδεδεμένων στο δρομέα (Τύπος Γ)

4.3.1 Μοντέλο ΑΓΔΤ1 (DFAG1)

Όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 1, 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 πλήρους μετατροπέα. 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. Λειτουργώντας το κύκλωμα του δρομέα σε μεταβλητή συχνότητα, επιτυγχάνεται μεταβλητή μηχανική ταχύτητα περιστροφής. 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. Δεδομένου λοιπόν ότι μόνο ένα ποσοστό της συνολικής ισχύος (περίπου μέχρι το ένα τρίτο αυτής) εγχέεται μέσω του μετατροπέα, αυτός είναι μειωμένης ονομαστικής ισχύς και επομένως και μειωμένου κόστους σε σχέση με ένα μετατροπέα πλήρους ισχύος. Η βασική διάταξη της ΑΓΔΤ φαίνεται στο Σχ. 4.7. 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 μπορεί να υπάρχει και μετασχηματιστής ο οποίος δεν εμφανίζεται στο παρακάτω σχήμα [9].

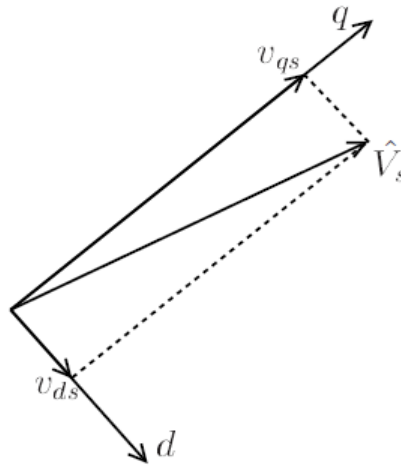


Σχήμα 4.7: Βασική διάταξη της ΑΓΔΤ

Το μοντέλο το οποίο αναπτύχθηκε για το περιβάλλον του WHSSP στο [9] είναι κατάλληλο για την αναπαράσταση ενός αιολικού πάρκου αποτελούμενο από ανεμογεννήτριες διπλής τροφοδότησης και ακολουθεί το παράρτημα Β της αναφοράς [26]. Το μοντέλο αυτό χαρακτηρίζεται από λεπτομερείς βρόχους ελέγχου αφού περιλαμβάνει λεπτομερή παράσταση των ελεγκτών ενεργού και άεργου ισχύος, με βάση το σχεδιασμό συγκεκριμένου κατασκευαστή (GE) [27]. Ωστόσο μπορεί να χαρακτηριστεί και ως γενικευμένο μοντέλο (generic model) υπό την έννοια ότι περιγράφει σε γενικά πλαίσια τη δυναμική των ΑΓΔΤ για τους σκοπούς των μελετών ευστάθειας συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Εξάλλου το γενικευμένο μοντέλο που προτείνεται [15] είναι ισοδύναμο με το μοντέλο της GE εφόσον χρησιμοποιηθούν οι κατάλληλες παράμετροι. Τα γενικευμένα μοντέλα προτιμώνται από τα αντίστοιχα αναλυτικά των κατασκευαστών καθώς αυτά συνήθως δεν είναι διαθέσιμα αλλά ταυτόχρονα αυξάνουν και τη περιπλοκότητα στις μελέτες του δικτύου λόγω των μικροδιαφορών που παρουσιάζουν.

Κατά βάση, τα γενικευμένα μοντέλα χαρακτηρίζονται από α) ευκολία στην ανταλλαγή δεδομένων από τα ενδιαφερόμενα μέρη, β) δυνατότητα διεξαγωγής συγκρίσεων της δυναμικής συμπεριφοράς του συστήματος σε διαφορετικά προγράμματα προσομοίωσης, γ) δυνατότητα υλοποίησης τους σε διαφορετικά περιβάλλοντα προσομοίωσης, ενώ δ) καθιστούν δυνατή τη ρύθμιση των παραμέτρων τους για την προσαρμογή στα πραγματικά μοντέλα των κατασκευαστών, χωρίς τη αποκάλυψη απόρρητων πληροφοριών που αφορούν τον εξοπλισμό τους [15].

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 άεργου ισχύος μέσω της ρύθμισης των αντίστοιχων συνιστωσών του ρεύματος του δρομέα. Αμελώντας μάλιστα τα μεταβατικά του στάτη και την ωμική αντίσταση του στάτη το πλαίσιο αυτό ταυτίζεται με αυτό της τερματικής τάσης της μηχανής. Θεωρώντας λοιπόν ότι ο άξονας d του σύγχρονου πλαισίου αναφοράς της μηχανής βρίσκεται επί του διανύσματος της πεπλεγμένης ροής του στάτη $\vec{\Psi}_s$, ο άξονας q συμπίπτει με το διάνυσμα της τερματικής τάσης \hat{V}_s όπως φαίνεται στο Σχ. 4.8.



Σχήμα 4.8: Σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς dq

Στο [9] περιγράφεται με αναλυτικό τρόπο μέσω των αντίστοιχων εξισώσεων πως ο διανυσματικός έλεγχος (με την παραδοχή της οιονεί ημιτονοειδούς κατάστασης) επιτυγχάνει τελικά την αποσύμπλεξη 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. Έτσι τελικά καταλήγουμε στις ακόλουθες αποσυζευγμένες σχέσεις για τα ρεύματα του μετατροπέα πλευράς δρομέα:

$$T_e = -\frac{X_M}{X_{ss}} \frac{\omega_b}{\omega_s} V_s i_{qr} \quad (4.8)$$

$$Q_s = V_s \frac{-X_M i_{dr} - (\omega_b / \omega_s) V_s}{X_{ss}} \quad (4.9)$$

Όπου

- X_M είναι η αντίδραση μαγνήτισης της μηχανής
- X_{ss} είναι η σύγχρονη αντίδραση του στάτη
- ω_s είναι η γωνιακή ταχύτητα του σύγχρονου πλαισίου αναφοράς dq
- ω_b είναι η γωνιακή ταχύτητα του σύγχρονου πλαισίου αναφοράς του συστήματος xy
- i_{dr} , i_{qr} είναι το ρεύμα δρομέα στον d και q άξονα αντίστοιχα

Επομένως ρυθμίζοντας το i_{qr} ελέγχεται η ηλεκτρομαγνητική ροπή T_e και μέσω αυτής η ταχύτητα του δρομέα, ενώ το i_{dr} χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της εγχεόμενης αέργου ισχύος Q_s από τον στάτη της μηχανής στο δίκτυο.

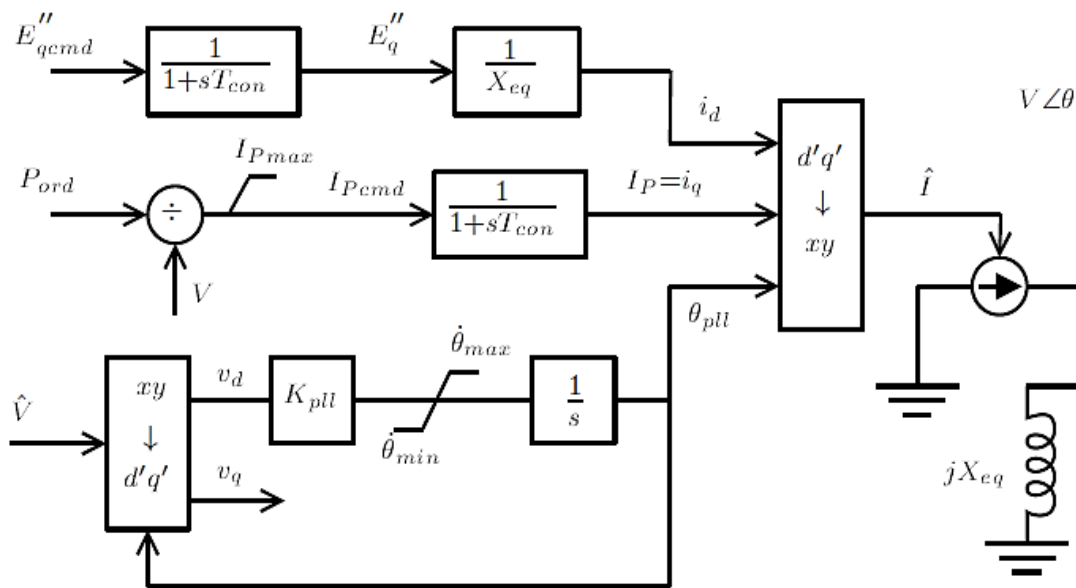
Όσον αφορά το μετατροπέα πλευράς δικτύου, η ροή ενεργού ισχύος ελέγχεται κατά τέτοιο τρόπο ώστε να διατηρείται σταθερή η DC τάση του ενδιάμεσου πυκνωτή (V_{dc} στο Σχ. 4.7). Δηλαδή

εγγεί στο δίκτυο την ενεργό ισχύ που μεταφέρει ο μετατροπέας πλευράς δρομέα. Η DC τάση ανάμεσα στους μετατροπείς μπορεί να θεωρηθεί σταθερή λόγω του γρήγορου ελέγχου του ενεργού ρεύματος από το μετατροπέα αυτόν. Επίσης λειτουργεί συνήθως σε λογική μοναδιαίου συντελεστή ισχύος ώστε η εγγεόμενη άεργος ισχύς να ελέγχεται εξολοκλήρου από τον άλλο μετατροπέα.

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

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

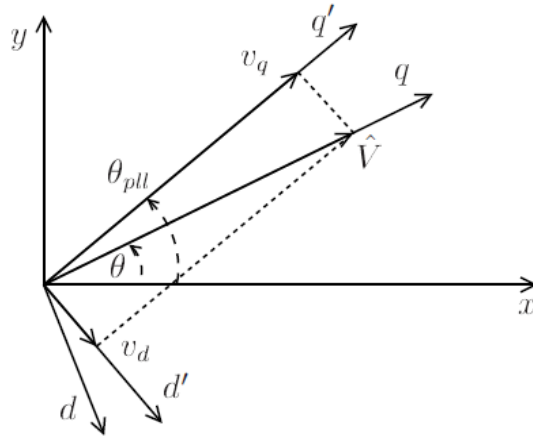
Στο Σχ. 4.9 παρουσιάζεται το διάγραμμα βαθμίδων της μοντελοποίησης του μέρους Γεννήτρια/Μετατροπέας. Η επαγωγική αντίδραση X_{eq} αποτελεί την ισοδύναμη αντίδραση Norton που εισάγεται όταν θεωρούμε την ΑΓΔΤ (με έλεγχο μετατροπέα) ως μία ελεγχόμενη πηγή ρεύματος. Στη ίδια λογική, η E_q'' είναι μία ισοδύναμη τάση που ελέγχει την έγχυση αέργου ρεύματος της ΑΓΔΤ. Η εντολή για τη ρύθμιση της άεργης συνιστώσας του ρεύματος E_{qcnd}'' προέρχεται από τον ελεγκτή αέργου ισχύος και η αντίστοιχη εντολή για την ενεργό συνιστώσα P_{ord} από τον ελεγκτή της ταχύτητας του δρομέα (έλεγχος στροφών).



Σχήμα 4.9: Μοντελοποίηση Γεννήτριας/Μετατροπέα

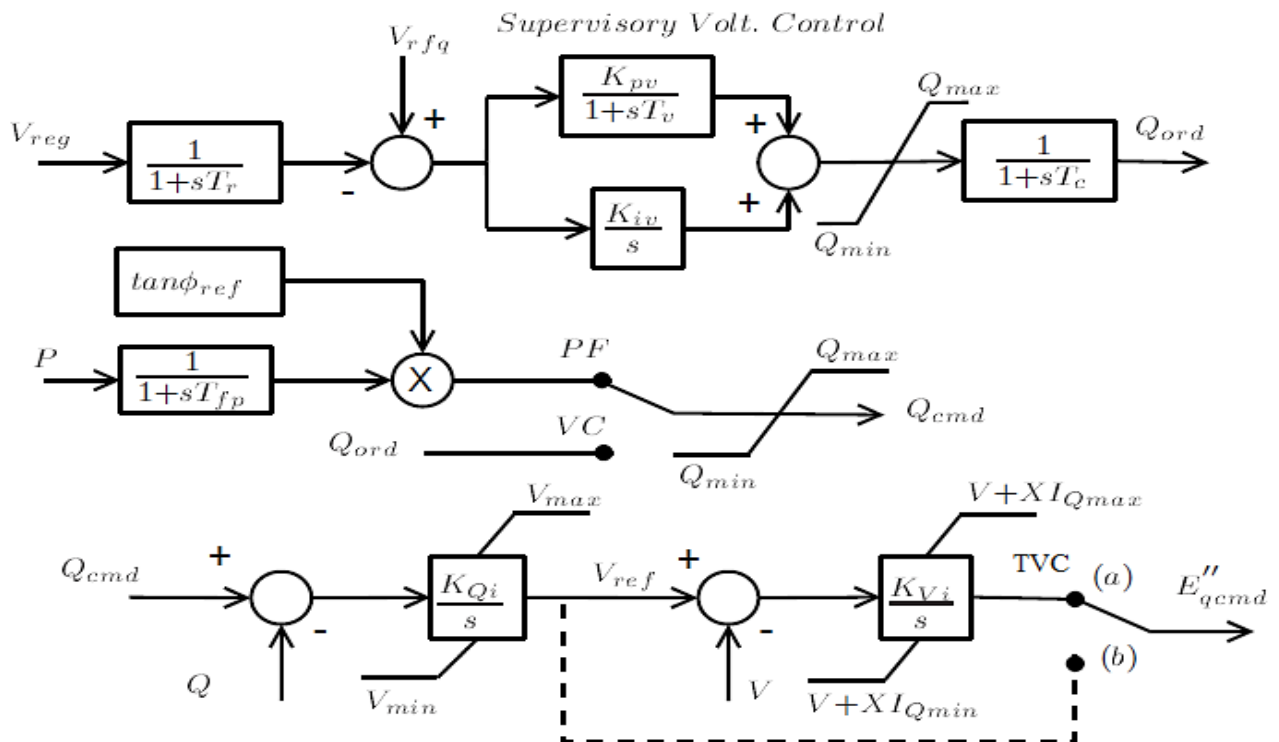
Καθώς ο μετατροπέας πλευράς δρομέα οδηγεί το ρεύμα δρομέα πολύ γρήγορα, η δυναμική που συνδέεται με την πεπλεγμένη μαγνητική ροή του δρομέα μπορεί να αμεληθεί. Παρόλα αυτά το μοντέλο περιέχει δύο μικρές χρονικές σταθερές ($T_{con}=20$ ms) προς αναπαράσταση των καθυστερήσεων στους αντίστοιχους βρόχους ελέγχου. Επίσης λαμβάνεται υπόψη η καθυστέρηση στην ευθυγράμμιση του dq πλαισίου της μηχανής με την τερματική τάση κατά την εφαρμογή του διανυσματικού ελέγχου. Η καθυστέρηση αυτή οφείλεται στην απευθείας σύνδεση του στάτη της γεννήτριας στο δίκτυο και την αντίστοιχη μαγνητική σύζευξη που αυτή συνεπάγεται. Γεγονός που οδηγεί στη ύπαρξη μεταβατικά μίας απόκλισης στην προσαρμογή του πλαισίου αναφοράς της

γεννήτριας. Λειτουργία του βρόχου κλειδώματος φάσης (Phase Locked Loop-PLL) είναι η εκτίμηση της απόκλισης αυτής. Αναλυτικότερα, στο Σχ. 4.9 το πλαίσιο που καθορίζεται από το βρόχο κλειδώματος φάσης του μετατροπέα συμβολίζεται με $d'q'$ και συμπίπτει με το πλαίσιο dq στη μόνιμη κατάσταση, όταν δηλαδή ισχύει $\theta_{pll} = \theta$, $v_d = 0$ και $v_q = V$.



Σχήμα 4.10: Σύγχρονα πλαίσια αναφοράς

Ο Έλεγχος Μετατροπέα περιλαμβάνει τον ελεγκτή αέργου ισχύος και τον ελεγκτή στροφών από τους οποίους προκύπτουν οι εντολές E''_{qcmd} και P_{ord} αντίστοιχα. Στο Σχ. 4.11 φαίνεται ο ελεγκτής αέργου ισχύος.

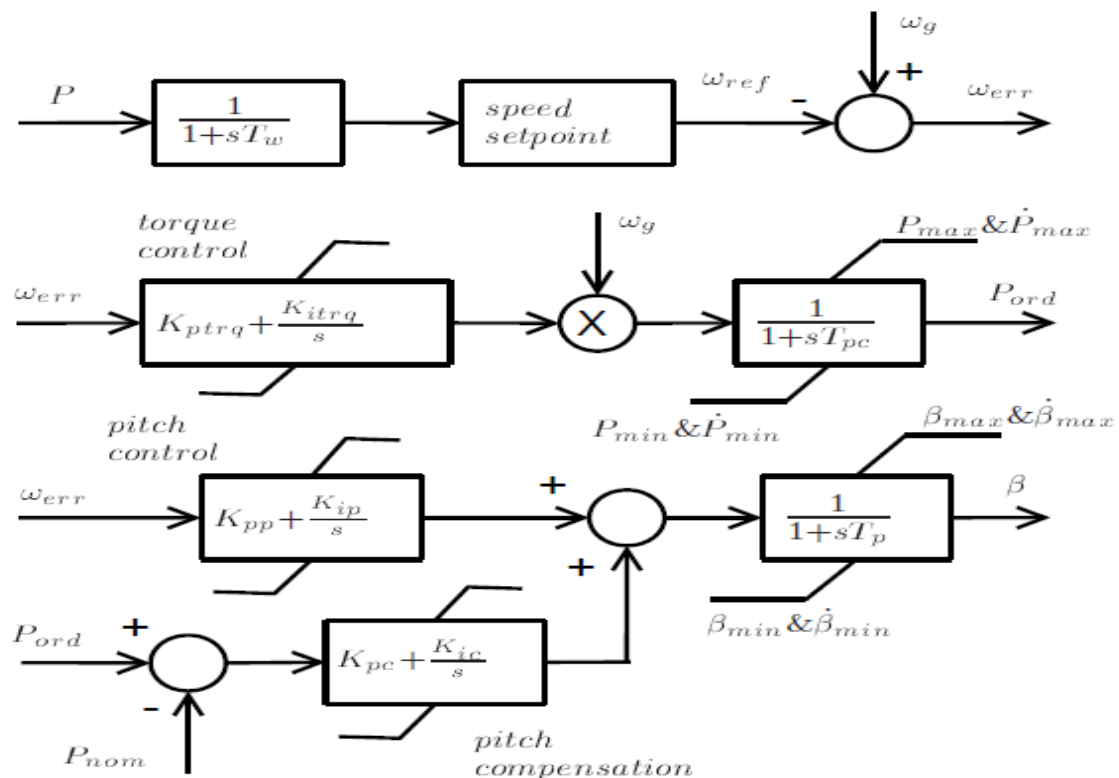


Σχήμα 4.11: Έλεγχος αέργου ισχύος

Υπάρχουν δύο δυνατότητες ελέγχου τάσεως/αέργου ισχύος, είτε μέσω ρύθμισης του συντελεστή ισχύος (Power Factor, PF), είτε μέσω ρύθμισης της τάσης (Voltage Control, VC). Και στις δύο περιπτώσεις η αέργος ισχύς Q_{cmd} που ζητείται να παράγει η ΑΓΔΤ είναι η τιμή αναφοράς για ένα ολοκληρωματικό ελεγκτή. Αν ο δεύτερος διακόπτης του Σχ. 4.11 βρίσκεται στη θέση (α), η έξοδος V_{ref} του ολοκληρωτή (αναφορά για την τερματική τάση της ΑΓΔΤ) είναι η είσοδος ενός δεύτερου ολοκληρωματικού ελεγκτή, ο οποίος οδηγεί το E''_{qcmd} . Αυτός ο έλεγχος της τερματικής τάσης (Terminal Voltage Control, TVC) των ανεμογεννητριών μπορεί να είναι σημαντικός για την επίτευξη καλής απόκρισης της τάσης σε περιπτώσεις τοπικών σφαλμάτων ή άλλων διαταραχών. Επομένως είναι πιθανό ότι ο διαχειριστής του αιολικού πάρκου θα επιλέξει να τον ενεργοποιήσει και γι αυτό συμπεριλαμβάνεται ως επιλογή στο προτεινόμενο μοντέλο. Σε αντίθετη περίπτωση, ο βρόχος του ελέγχου της τερματικής τάσης μπορεί να παρακαμφθεί (διακόπτης στη θέση β).

Αξίζει να σημειωθεί πως για τα όρια του περιοριστή του δεύτερου ολοκληρωματικού ελεγκτή υπάρχουν δύο τεχνικές. Είτε υπολογίζονται συναρτήσει του μέτρου της τερματικής τάσης V όπως φαίνεται στο Σχ. 4.11, οπότε έχουμε μεταβλητά όρια, είτε πρόκειται για σταθερές τιμές (XI_{Qmax}, XI_{Qmin}) που επιλέγονται ως άνω και κάτω όριο για ένα εύλογο εύρος διακύμανσης της τερματικής τάσης. Στην περίπτωση ελέγχου τάσης (VC), ρυθμίζεται η τάση σε κάποιο σημείο ενδιαφέροντος με βάση κάποια τάση αναφοράς (V_{ref} στο Σχ. 4.11). Συνήθως το σημείο αυτό είναι το σημείο κοινής σύνδεσης (Point of Common Coupling, PCC) του αιολικού πάρκου με το δίκτυο. Έτσι το Q_{cmd} προέρχεται από ένα απλοποιημένο μοντέλο του ελεγκτή ολόκληρου του αιολικού πάρκου (Supervisory Voltage Controller) [9]. Όσον αφορά τις χρονικές σταθερές T_r, T_{fp}, T_c , αυτές σχετίζονται με καθυστερήσεις που οφείλονται στις διαδικασίες ελέγχου, μέτρησης και φιλτραρίσματος των διαφορών μεγεθών.

Οι βρόχοι του ελεγκτή στροφών και του ελεγκτή γωνίας βήματος φαίνονται μαζί στο Σχ. 4.12.

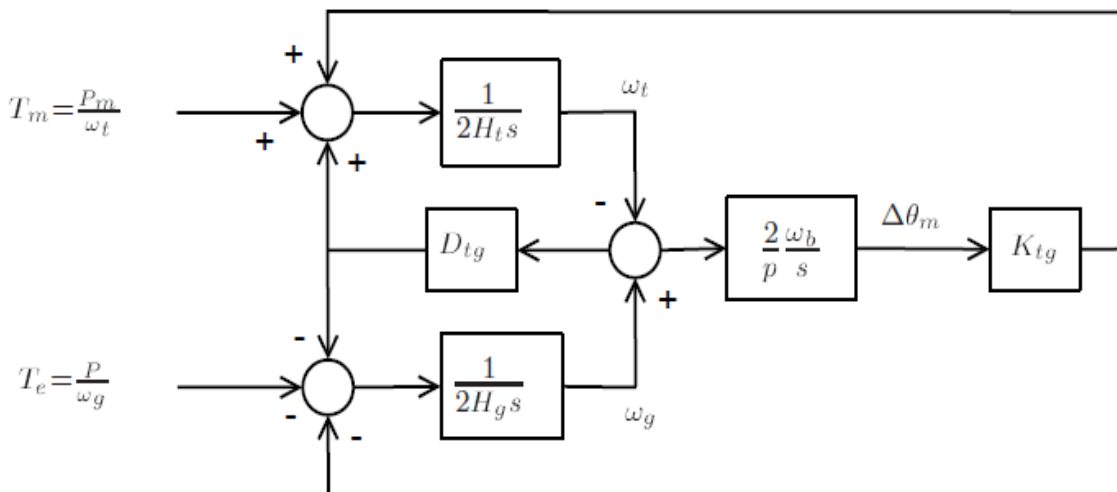


Σχήμα 4.12: Έλεγχος στροφών και γωνίας βήματος

Ο έλεγχος στροφών γίνεται με βάση τη μέτρηση της παραγόμενης ενεργού ισχύος P . Η ταχύτητα αναφοράς ω_{ref} προκύπτει από την καμπύλη ελέγχου στροφών (speed setpoint) όπου σε κάθε μετρούμενη τιμή P αντιστοιχεί μία ταχύτητα αναφοράς για την οποία μεγιστοποιείται ο αεροδυναμικός συντελεστής ισχύος. Στα πλαίσια του μοντέλου η καμπύλη αυτή υλοποιείται με γραμμοποίηση ανάμεσα σε διακριτά σημεία αντιστοίχισης ισχύος – ταχύτητας και συγκεκριμένα για ελάχιστη ισχύ εξόδου (τεχνικό ελάχιστο), 20%, 40% ,60% και 100% της ονομαστικής ισχύος (ακολουθώντας τη μοντελοποίηση που προτίνεται για την ΑΓΔΤ στο [17]). Επίσης υπάρχει και μια σχετικά μεγάλη χρονική σταθερά ($T_w=5$ sec) που εισάγει την καθυστέρηση στην προσαρμογή της ταχύτητας αναφοράς στις μεταβολές της ισχύος για να αποφεύγονται προσαρμογές σε μεταβατικές μεταβολές του ανέμου.

Ο ρυθμιστής της γωνίας βήματος (pitch control) είναι ένας PI ελεγκτής με έξοδο την επιθυμητή γωνία βήματος και είσοδο το σφάλμα της ταχύτητας περιστροφής από την ταχύτητα αναφοράς. Προκειμένου να εξασφλιζείται ότι στη μόνιμη κατάσταση σε αυτή την περιοχή λειτουργίας, η γωνία βήματος θα έχει την ελάχιστη τιμή (ώστε να μπορεί να επιτευχθεί ο μέγιστος αεροδυναμικός συντελεστής ισχύος) χρησιμοποιείται κι ένας επιπλέον βρόχος αντιστάθμισης (pitch compensation). Έτσι σε μόνιμη λειτουργία με ισχύ κάτω της ονομαστικής, το σφάλμα του PI ελεγκτή αντιστάθμισης είναι αρνητικό και επομένως η γωνία βήματος περιορίζεται στην ελάχιστη τιμή της.

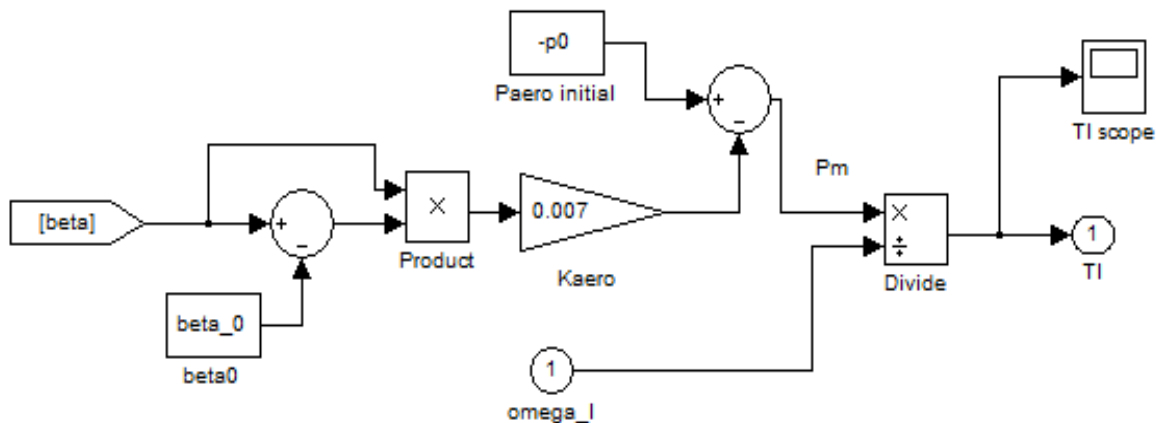
Τέλος για το μηχανικό μέρος χρησιμοποιείται κι εδώ, όπως και στην περίπτωση των ανεμογεννητριών τύπου Α, το μοντέλο των δύο στρεφόμενων μαζών προς αναπαράσταση της δυναμικής που οφείλεται στο σύστημα μετάδοσης της κίνησης. Η υλοποίησή του μηχανικού μέρους φαίνεται στο Σχ. 4.13, το οποίο μπορεί εύκολα να τροποποιηθεί και για την απλούστερη εκδοχή της μίας στρεφόμενης μάζας σε περιπτώσεις που η απόκριση των μηχανικών μεγεθών δεν είναι πρωτεύουσας σημασίας. Η ταχύτητα του δρομέα της ΑΓΔΤ συμβολίζεται με ω_g και η ταχύτητα του δρομέα του ανεμοκινητήρα με ω_l (σε α.μ.). Σημειώνεται ότι η γωνιακή παραμόρφωση του άξονα $\Delta\theta_m$ είναι σε μηχανικά ακτίνια.



Σχήμα 4.13: Μηχανικό μέρος – Μοντέλο δύο στρεφόμενων μαζών

Η αποδιδόμενη μηχανική ροπή T_m (ή T_l εφόσον προέρχεται από τον ανεμοκινητήρα) υπολογίζεται στη συγκεκριμένη μοντελοποίηση μέσω μιας προσεγγιστικής λογικής κατάλληλης για μελέτες ευστάθειας [28]. Η λογική αυτή συνδέει την αεροδυναμική ισχύ με τη γωνία βήματος των

πτερυγίων, όπως φαίνεται στο Σχ. 4.14, και δεν χρησιμοποιείται ο αναλυτικός τύπος υπολογισμού της αεροδυναμικής ισχύος (4.5). Γι' αυτό το λόγο το μοντέλο δεν υποστηρίζει την δυνατότητα προσομοίωσης διαταραχών ανέμου καθώς εστιάζει στη συμπεριφορά της ΑΓΔΤ στις διαταραχές του δικτύου. Μάλιστα συμπίπτει ως υλοποίηση με το μηχανικό μέρος WT3T1 που προτείνεται για τις ΑΓΔΤ στα πλαίσια της βιβλιοθήκης μοντέλων του PSS/E [17]. Να σημειωθεί ότι το αρνητικό πρόσημο στην αρχική ενεργό ισχύ p_0 οφείλεται στη σύμβαση κινητήρα που ακολουθείται (θεωρούμε ότι η ανεμογεννήτρια απορροφά αρνητική ισχύ).



Σχήμα 4.14: Σύνδεση αεροδυναμικού με μηχανικό μέρος (υπολογισμός μηχανικής ροπής)

Έτσι για τη μηχανική ισχύ και ροπή αντίστοιχα ισχύει:

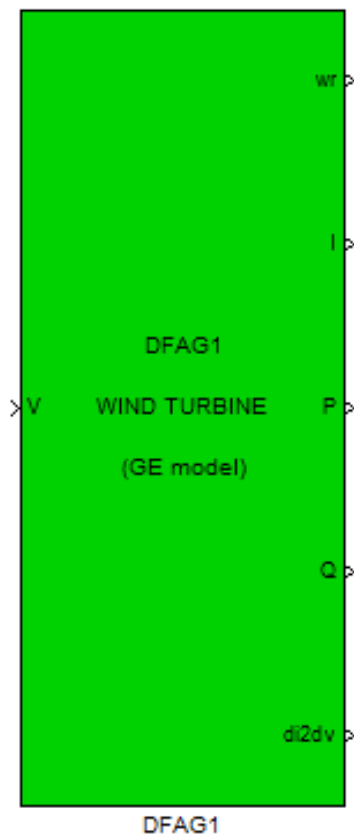
$$P_m = P_0 - (\beta - \beta_0) \cdot \beta \cdot Kaero \quad (4.10)$$

$$T_l = \frac{P_m}{\omega_l} \quad (4.11)$$

όπου

- P_0 είναι η αρχική ενεργός ισχύς (α.μ. στη βάση της μηχανής)
- β είναι η τρέχουσα γωνία βήματος των πτερυγίων (deg)
- β_0 είναι η αρχική γωνία βήματος των πτερυγίων (deg)
- $Kaero$ είναι ο συντελεστής που συνδέει τη γωνία βήματος με τη μηχανική ισχύ (επιλέχθηκε η τιμή 0.007 που προτείνεται στο PSS/E)

Το μπλοκ της περιγραφόμενης μοντελοποίησης της ΑΓΔΤ, όπως θα το συναντήσει ο χρήστης στη βιβλιοθήκη ως Doubly_Fed_Wind_Turbine1.mdl, μαζί με τον πίνακα παραμέτρων του και μια σύντομη επεξήγησή τους φαίνεται στο Σχ. 4.15. Ο χαρακτηρισμός του ως DFAG1 αφορά τον διαχωρισμό του με το βελτιωμένο μοντέλο DFAG2, το οποίο εμπεριέχει τη λειτουργία Low Voltage Power Logic (LVPL) και η οποία θα επεξηγηθεί αναλυτικά στη συνέχεια. Να σημειωθεί επίσης ότι το μοντέλο συνοδεύεται από το συνεργαζόμενο αρχείο *Eqq_lim.m*. Σε αυτό υλοποιείται η λειτουργία του δεύτερου ολοκληρωματικού ελεγκτή (επιλογή TVC) για την περίπτωση που ο ανω και κάτω περιοριστής του μεταβάλλονται συναρτήσει της τερματικής τάσης της ανεμογεννήτριας. Αν και η υλοποίηση της λειτουργίας αυτής είναι εφικτή στο περιβάλλον του Simulink, χωρίς τη χρήση του αρχείου *Eqq_lim.m*, προτιμήθηκε τελικά η διατήρηση της αρχικής μοντελοποίησης για λόγους απλότητας.



Sbase (MVA)	Βάση ισχύος συστήματος
fbase (Hz)	Ονομαστική συχνότητα συστήματος
bus code	Κωδικός αριθμησης ζυγού
Snom (MVA)	Ονομαστική φαινόμενη ισχύς
fnom (Hz)	Ονομαστική συχνότητα
PLL data: [Kpll PLLMX PLLMN]	Παράμετροι βρόχου κλειδώματος φάσης: [κέρδος βρόχου, όρια ρυθμού αύξησης και μείωσης της θ_{pll}]
[Hr HI Dtg Ktg] (pu Snom base)	Παράμετροι μοντέλου δύο στρεφόμενων μαζών
Xeq: equivalent reactance	Ισοδύναμη αντίδραση Norton αμ
WT parameters: [nturb vnom pnom beta_0 poles]	Παράμετροι ανεμογεννήτριας-αιολικού πάρκου: [αριθμός Α/Γ, ονομαστική ταχύτητα ανέμου, ονομαστική ενεργός ισχύς, αρχική γωνία βήματος περυγίων, αριθμός πόλων ασύγχρονης μηχανής]
Pitch parameters: [Kp_p Ki_p Tservo(s) ratelim(degrees/s) betamin betamax]:	Παράμετροι ελεγκτή γωνίας βήματος: [αναλογικό και ολοκληρωτικό κέρδος ελεγκτή, χρονική σταθερά σερβομηχανισμού, όρια ρυθμού αλλαγής γωνίας βήματος, μέγιστη και ελάχιστη γωνία βήματος]
[Qmax Qmin PMX PMN] (generator convention - pu Snom base)	Άνω και κάτω περιορισμοί ενεργού και αέργου ισχύος (αμ στη βάση της μηχανής)
[Vmax Vmin]	Άνω και κάτω επιθυμητό όριο της τερματικής τάσης (αμ) – περιορισμός πρώτου ολοκληρωματικού ελεγκτή E''_{qcmd}
[XIQmin XIQmax]	Τιμές για τον περιορισμό του E''_{qcmd} όταν είναι ενεργός ο έλεγχος τερματικής τάσης (TVC)
Zcomp: [Rcomp Xcomp] (pu on Snom)	Ισοδύναμη ωμική αντίσταση και επαγωγική αντίδραση από τον ζυγό της ΑΓΔΤ στο σημείο ρύθμισης της τάσης κατά τον έλεγχο ρύθμισης τάσης (VC)
[KQi Kvi]	Κέρδη ολοκληρωματικών ελεγκτών του E''_{qcmd}
DFAG initial data: [V0 thita0_deg P0 Q0] (pu deg MW MVAr)	Αρχικές συνθήκες ΑΓΔΤ (σύμβαση κινητήρα)
[wpmín wp20 wp40 wp60 wp100] (pu)	Διακριτά σημεία για την καμπύλη ισχύος-ταχύτητας (αμ)

Σχήμα 4.15: Μπλοκ ανεμογεννήτριας τύπου Γ και επεξήγηση παραμέτρων

Στο μοντέλο διακρίνουμε μία είσοδο, η οποία είναι το διάνυσμα (v_x, v_y) της τερματικής 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 του δρομέα της μηχανής επαγωγής της ΑΓΔΤ ω_r (αμ).
- το διάνυσμα (i_x, i_y) του συνολικά απορροφούμενου (σύμβαση κινητήρα) ρεύματος της ΑΓΔΤ I (αμ) στη βάση του συστήματος και ανηγμένο στο σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς.
- την εγγεόμενη (σύμβαση γεννήτριας) ενεργό ισχύ P (αμ) στη βάση του συστήματος.
- την εγγεόμενη (σύμβαση γεννήτριας) άεργο ισχύ Q (αμ) στη βάση του συστήματος.
- το διάνυσμα $di2dv$ για την επίλυση του δικτύου χωρίς τη χρήση επαναληπτικών μεθόδων (βλ. ενότητα 2.3.2) και το οποίο για την συγκεκριμένη περίπτωση αναλύεται σε:

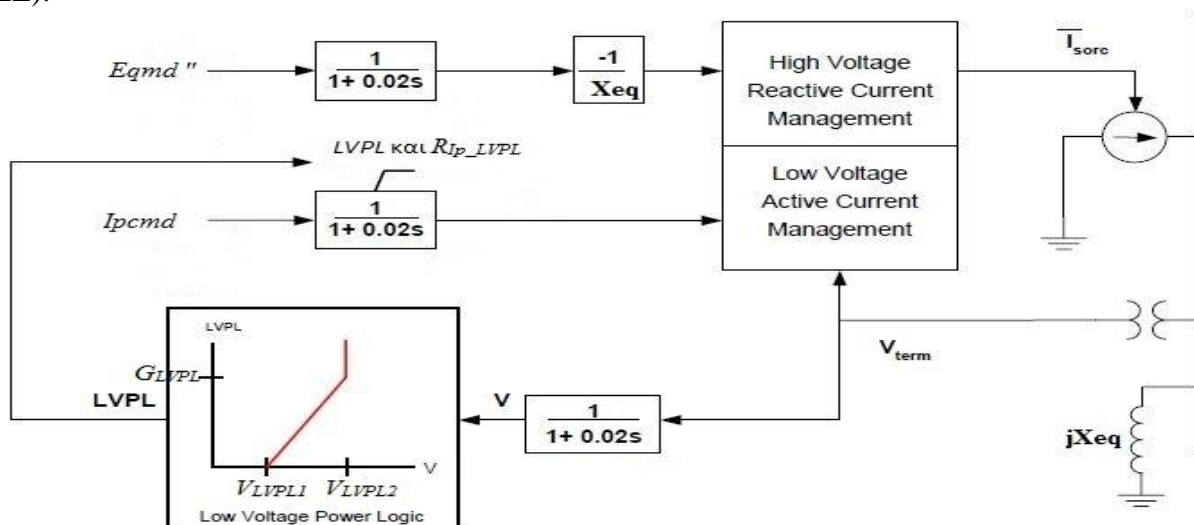
$$di2dv = [(bus\ code)\ 0\ -1/X_{eq}\ 1/X_{eq}\ 0\ i_{nl,x}\ i_{nl,y}]^T \quad (4.12)$$

όπου $i_{nl,x}, i_{nl,y}$ τα εγγεόμενα ρεύματα, τα οποία δεν εξαρτώνται γραμμικά από την τερματική τάση αλλά προκύπτουν ως συνάρτηση των διαφορών μεταβλητών κατάστασης εσωτερικά του μοντέλου της ΑΓΔΤ (ουσιαστικά οι συνιστώσες του ρεύματος \hat{I} της ισοδύναμης πηγής ρεύματος του Σχ. 4.9).

4.3.2 Περιορισμός ενεργού ρεύματος σε βυθίσεις τάσης – Low Voltage Power Logic (LVPL) – Μοντέλο ΑΓΔΤ2 (DFAG2)

Όπως είδαμε στην ενότητα 1.4 η ολοένα αυξανόμενη αιολική διείσδυση οδήγησε τους διαχειριστές των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας να τροποποιήσουν τους σχετικούς κώδικες για τα αιολικά πάρκα με την απαίτηση για αδιάλειπτη λειτουργία σε βυθίσεις της τάσης. Στην ίδια φιλοσοφία εντάσσεται και η λογική περιορισμού του ενεργού ρεύματος των αιολικών πάρκων (LVPL) στις βυθίσεις τάσης από τη στιγμή που παραμένουν συνδεδεμένα κατά τη διάρκεια διαταραχών.

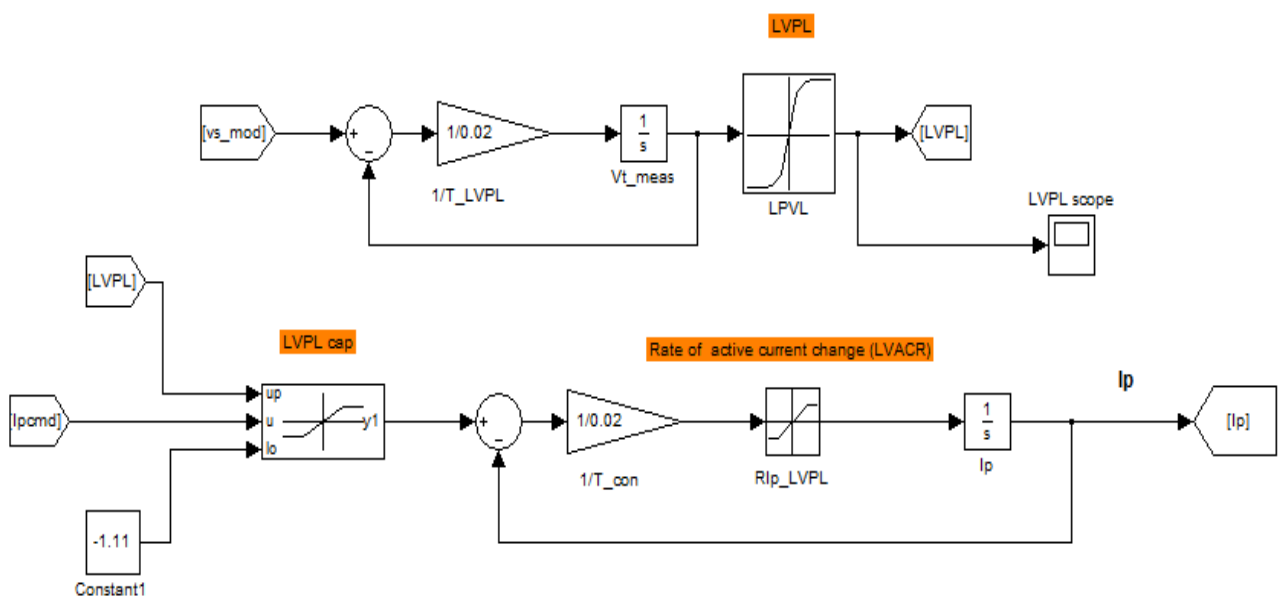
Μέσω της λειτουργίας LVPL συντελείται μείωση της καταπόνησης των ανεμογεννητριών κατά τη διάρκεια και αμέσως μετά από σοβαρές διαταραχές στο δίκτυο, αυξάνεται η δυνατότητα τους για άεργο έγχυση και αποφεύγεται η αστάθεια στην περίπτωση που αυτή δεν θα μπορούσε να μεταφερθεί λόγω χαμηλής τάσης [29]. Ο τρόπος που εντάσσεται η λειτουργία LVPL στο μοντέλο που περιγράφηκε στην προηγούμενη παράγραφο φαίνεται στο Σχ. 4.16 [15] (εδώ απουσιάζει ο PLL).



Σχήμα 4.16: Μοντελοποίηση Γεννήτριας/Μετατροπέα με LVPL

Όπως φαίνεται στο Σχ. 4.16 η μείωση της εντολής για ενεργό ρεύμα γίνεται μέσω της επιβολής άνω περιορισμού ($LVPL$) ενώ ταυτόχρονα περιορίζεται και ο ρυθμός αύξησης της (R_{Ip_LVPL}). Υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας, η τερματική τάση της ΑΓΔΤ διατηρείται πάνω από μία προκαθορισμένη τιμή (V_{LVPL2}) και ο περιορισμός είναι ανενεργός. Όταν η τερματική τάση πέσει κάτω από την τιμή αυτή, ο περιοριστής ενεργοποιείται και υπολογίζεται το όριο που αυτός θέτει συναρτήσει του μέτρου της τερματικής τάσης και μέσω μιας γραμμικής σχέσης. Εφόσον η τάση πέσει ακόμα χαμηλότερα και ξεπεραστεί ένα προκαθορισμένο κατώτατο όριο (V_{LVPL1}), ο περιοριστής λαμβάνει πλέον μηδενική τιμή. Μετά τον περιορισμό της ενεργού ισχύος η αποκατάσταση του ενεργού ρεύματος δεν μπορεί να γίνει ταχύτερα από ένα ρυθμό R_{Ip_LVPL} , ο οποίος εξαρτάται από τον μετατροπέα και σχετίζεται με την προστασία των διακοπτικών του στοιχείων. Δηλαδή ο περιοριστής του ρυθμού αύξησης του ενεργού ρεύματος σχετίζεται με την προστασία των ηλεκτρονικών ισχύος και καθορίζει σε μεγάλο βαθμό την αποκατάσταση του συστήματος. Έτσι κατά της διάρκεια της εκκαθάρισης, η τάση θα υπερβεί κάποια στιγμή το όριο δράσης του περιοριστή του ενεργού ρεύματος V_{LVPL2} και θα σταματήσει ο περιορισμός του. Ωστόσο η επαναφορά του ενεργού ρεύματος δεν θα γίνει ακαριαία αλλά μέσα στα επιτρεπόμενα πλαίσια που καθορίζονται από τον τιμή του περιοριστή ρυθμού R_{Ip_LVPL} . Επισημαίνεται στο σημείο αυτό ότι η απαίτηση για περιορισμό του ενεργού ρεύματος σε χαμηλή τάση αφορά εξίσου και τις ανεμογεννήτριες πλήρους μετατροπέα.

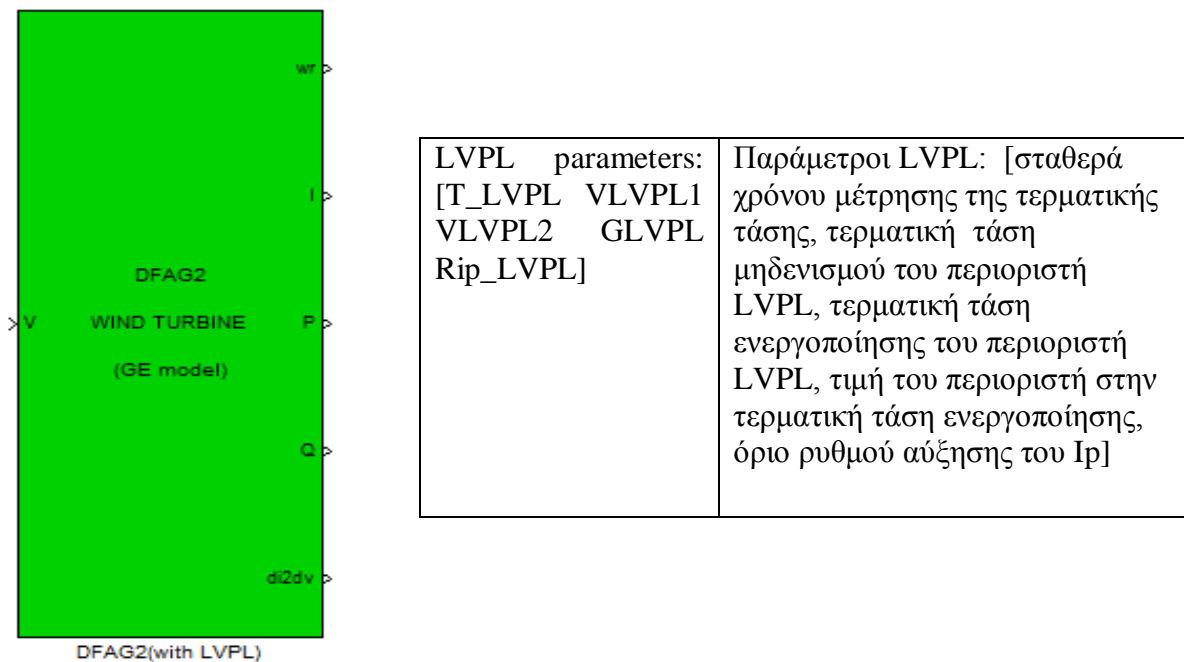
Η τροποποίηση του μοντέλου της ΑΓΔΤ ακολουθεί τη λογική που προτείνεται για το μέρος Γεννήτρια/Μετατροπέας στο PSS/E με την ονομασία WT3G2U [17]. Σημειώνεται ότι οι χρονικές σταθερές (T_{con}) που αφορούν τις μικρές καθυστερήσεις που λαμβάνονται υπόψη στους βρόχους ελέγχου εδώ παρουσιάζονται με τις συνήθεις τυπικές τιμές των 0,02 sec. Επίσης προστίθεται και μία μικρή χρονική καθυστέρηση (T_{LVPL}) που συνδέεται με τη μέτρηση της τερματικής τάσης ώστε να υπολογιστεί το όριο $LVPL$ που τελικά επιβάλλεται στην εντολή ενεργού ρεύματος. Και γι' αυτή χρησιμοποιείται ως τυπική τιμή τα 0,02 sec όπως φαίνεται στο Σχ. 4.16. Η τιμή G_{LVPL} που λαμβάνει ο περιοριστής στο κατώφλι V_{LVPL2} είναι τέτοια που πρακτικά να ισοδυναμεί με απενεργοποίησή του όταν η τερματική τάση επανέρχεται σε φυσιολογικά επίπεδα (τυπική τιμή 1,11). Η προσαρμογή του περιορισμού ενεργού ρεύματος σε χαμηλή τάση για το μοντέλο της ΑΓΔΤ στο περιβάλλον του Simulink φαίνεται στο Σχ. 4.17, όπου η υλοποίηση της τμηματικά γραμμικής σχέσης που συνδέει την τερματική τάση με το επιβαλλόμενο όριο $LVPL$ γίνεται με τη χρήση *look up table*.



Σχήμα 4.17: Υλοποίηση περιορισμού ενεργού ισχύος σε χαμηλή τάση στο Simulink

Αξίζει να αναφερθεί ότι τα μπλοκ High Voltage Reactive Current Management και Low Voltage Active Current Management που φαίνονται στο Σχ. 4.16 αποτελούν ένας είδος ‘μαύρων κουτιών’ στην προτεινόμενη υλοποίηση WT3G2U του PSS/E και επομένως απουσιάζουν από το μοντέλο DFAG2 που υλοποιήθηκε στα πλαίσια της παρούσας ετργσίας. Το μοντέλο αυτό ενσωματώνει τη λειτουργία LVPL και αποτελεί επέκταση του DFAG1 που περιγράφηκε στην προηγούμενη παράγραφο.

Το μπλοκ του επεκταμένου μοντέλου της ΑΓΔΤ DFAG2, φαίνεται στο Σχ. 4.18 και αρχειοθετήθηκε στη βιβλιοθήκη ως Doubly_Fed_Wind_Turbine2.mdl. Για λόγους ευκρίνειας δεν παραθέτουμε εδώ όλες τις παραμέτρους του μοντέλου, αφού αυτές ουσιαστικά είναι κοινές με το μοντέλο DFAG1. Μόνη διαφορά σε σχέση με πριν είναι η ενσωμάτωση των παραμέτρων που σχετίζονται με τη λειτουργία του LVPL. Έτσι παρουσιάζονται κι αυτές μαζί με το αντίστοιχο μπλοκ στο Σχ. 4.18.



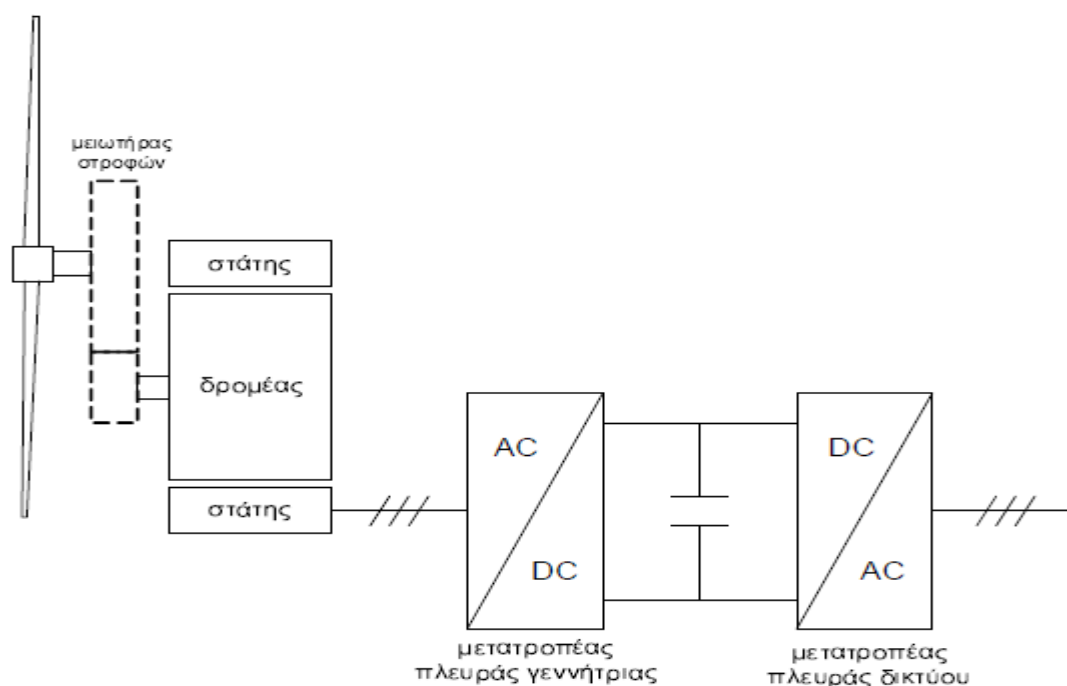
Σχήμα 4.18: Μπλοκ A/G τύπου Γ (με λειτουργία LVPL) και επεξήγηση πρόσθετων παραμέτρων

4.4 Ανεμογεννήτρια μεταβλητών στροφών με πλήρη μετατροπέα ισχύος (Τύπος Δ)

4.4.1 Μοντέλο Ανεμογεννήτριας με πλήρη μετατροπέα (FCWG1)

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, πράγμα βέβαιο που ισοδυναμεί με αύξηση του μεγέθους της. Παράλληλα απαιτείται κι ένας πλήρης μετατροπέας – σε αντίθεση με τις ΑΓΔΤ – αφού το 100% της παραγόμενης ισχύος περνά απ’ αυτόν.

Ο μετατροπέας συχνότητας αποτελείται από ένα ΕΡ/ΣΡ (AC/DC) μετατροπέα στη πλευρά της γεννήτριας και ένα 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. Η βασική διάταξη της ανεμογεννήτριας πλήρους μετατροπέα φαίνεται στο Σχ. 4.19. Ανάμεσα στους δύο μετατροπείς παρεμβάλλεται ένας ΣΡ/ΣΡ (DC/DC) μετατροπέας (δεν φαίνεται στο Σχ. 4.19). 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 εγγερόμενη στο δίκτυο.

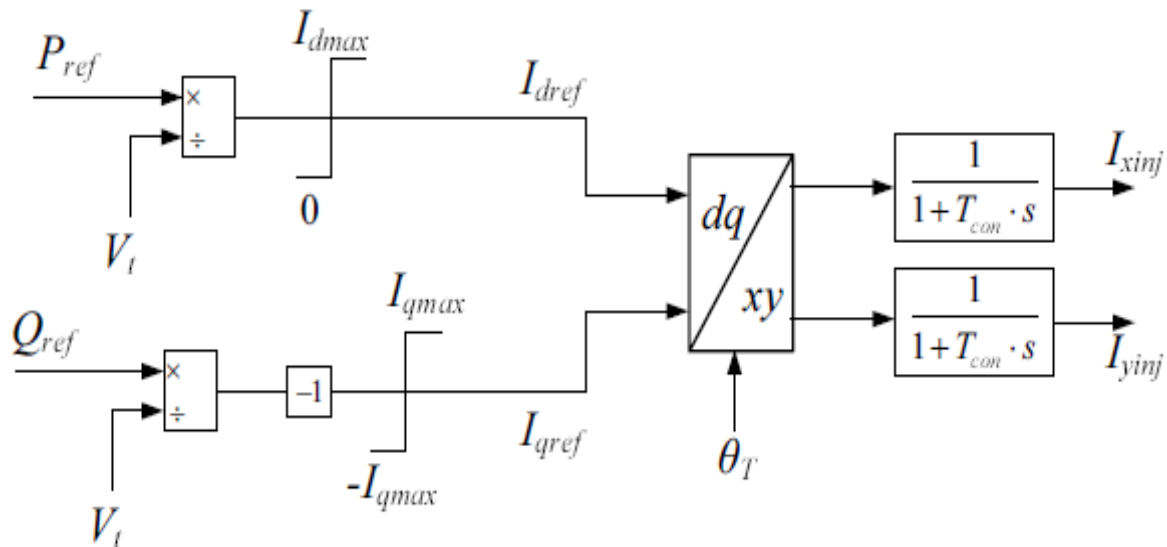


Σχήμα 4.19: Βασική διάταξη της ανεμογεννήτριας πλήρους μετατροπέα

Το μοντέλο το οποίο αναπτύχθηκε για το περιβάλλον του WHSSP στο [11] είναι κατάλληλο για την αναπαράσταση ενός αιολικού πάρκου αποτελούμενο από ανεμογεννήτριες πλήρους μετατροπέα και ακολουθεί και αυτό 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 άεργου ισχύος, και ανάλογα με την τιμή της τερματικής τάσης, εγγεί στο δίκτυο τα αντίστοιχα ενεργά και άεργα ρεύματα. 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)

Στο Σχ. 4.20 φαίνεται το διάγραμμα βαθμίδων της μοντελοποίησης του μέρους Γεννήτρια/Μετατροπέας.

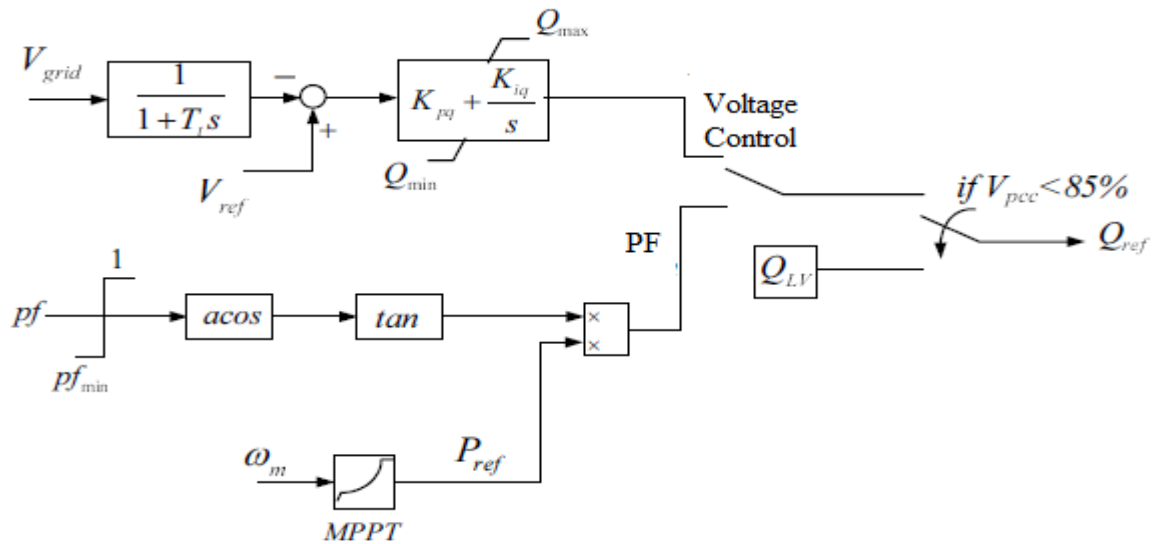


Σχήμα 4.20: Μοντελοποίηση Γεννήτριας/Μετατροπέα

Παρατηρούμε ότι σε αντίθεση με την ΑΓΔΤ, εδώ 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 . Έτσι εδώ δεν υπάρχει κάποια ισοδύναμη επαγωγική αντίδραση X_{eq} . Επίσης παρατηρούμε πως απουσιάζει ο βρόχος κλειδώματος φάσης PLL και η μετατροπή των ρευμάτων από το σύγχρονο πλαίσιο dq της γεννήτριας στο σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς xy γίνεται απευθείας με χρήση της μετρούμενης γωνίας της τερματικής τάσης θ_t ως προς το xy πλαίσιο. Κάτι τέτοιο δικαιολογείται από το γεγονός ότι η γεννήτρια είναι μαγνητικά πλήρως αποσυνζευγμένη από το δίκτυο στη διαμόρφωση που εξετάζουμε. Επομένως μπορούμε να ισχυριστούμε ότι η προσαρμογή του πλαισίου dq γίνεται ακαριαία από τον μετατροπέα συχνότητας κατά τη διαδικασία ελέγχου των επιθυμητών εγχύσεων.

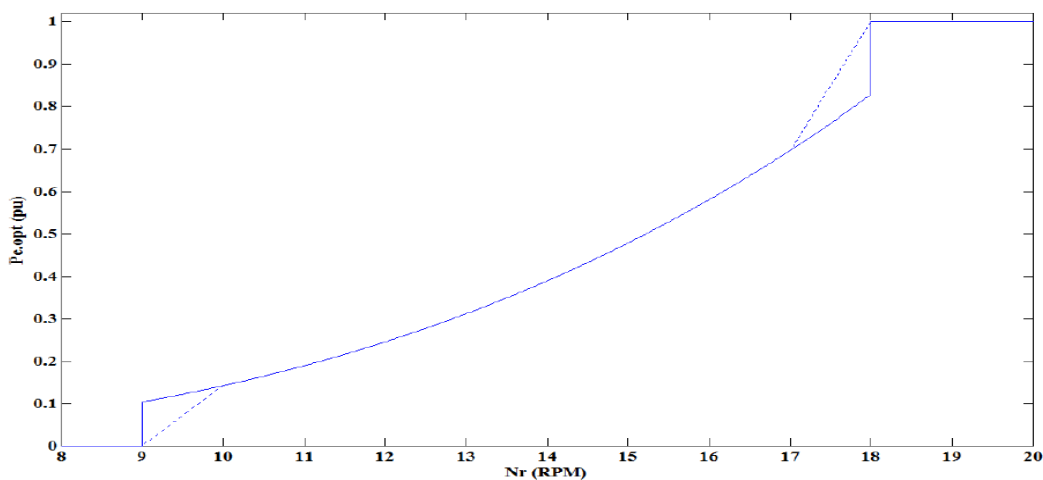
Μία ακόμα διαφοροποίηση από το αντίστοιχο μέρος της ΑΓΔΤ είναι η τοποθέτηση των μικρών χρονικών σταθερών ($T_{con}=20$ ms), προς αναπαράσταση των καθυστερήσεων στους βρόχους ελέγχου, μετά τη μετατροπή των συνιστωσών ρεύματος στο xy πλαίσιο. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό συνδέεται με τη διαδικασία προσομοίωσης στο περιβάλλον του Simulink. Επειδή απουσιάζει ο βρόχος PLL η γωνία θ_t για την $dq \rightarrow xy$ μετατροπή δεν αποτελεί πλέον μεταβλητή κατάστασης εσωτερικά στο μοντέλο αλλά προκύπτει από τη ρουτίνα επίλυσης του δικτύου (ουσιαστικά αποτελεί είσοδο). Έτσι η τοποθέτηση των καθυστερήσεων πριν τη μετατροπή δημιουργεί πρόβλημα κατά την κλήση της ρουτίνας επίλυσης του δικτύου. Από τις συγκρίσεις με το αντίστοιχο προτεινόμενο μοντέλο του PSS/E για την ανεμογεννήτρια του πλήρους μετατροπέα φάνηκε πως η διαφοροποίηση αυτή δεν έχει σημαντική επίδραση στη συμπεριφορά του μοντέλου.

Ο Έλεγχος Μετατροπέα φαίνεται στο Σχ. 4.21 και περιλαμβάνει τον ελεγκτή αέργου ισχύος και τον ελεγκτή ενεργού ισχύος (ελεγκτής στροφών) από τους οποίους προκύπτουν οι εντολές Q_{ref} και P_{ref} αντίστοιχα.



Σχήμα 4.21: Μοντελοποίηση Έλεγχου Μετατροπέα

Η εντολή για ενεργό ισχύ P_{ref} προκύπτει μέσω της στρατηγικής μέγιστης απολαβής ισχύος (Maximum Power Point Tracking, MPPT) 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 (4.5), γίνεται μέγιστη. Σκοπός του ελέγχου στροφών είναι η διατήρηση σταθερού λόγου ακροπερυγίου (4.6) στην τιμή που μεγιστοποιείται ο αεροδυναμικός συντελεστής και επομένως και η αεροδυναμική ισχύς. Έτσι συλλέγοντας όλα τα ζεύγη τιμών (P_{eopt} , N_r) σχηματίζεται μία καμπύλη η οποία δίνει τη μέγιστη ηλεκτρική ισχύ συναρτήσει της ταχύτητας περιστροφής. Η συνεχής καμπύλη που φαίνεται στο Σχ. 4.22 (οι τιμές του N_r είναι ενδεικτικές) έχει υπολογιστεί διατηρώντας μέγιστο τον αεροδυναμικού συντελεστή ($C_p = C_{pmax}$) για όλες τις ταχύτητες ανέμου κάτω της ονομαστικής (φυσικά με τη γωνία βήματος περυγίων περιορισμένη στο 0). Η καμπύλη αυτή λοιπόν, χρησιμοποιείται σε κατάλληλο ελεγκτή (ουσιαστικά ένας *look up table*) ο οποίος δίνει σήμα για την τιμή της ηλεκτρικής ισχύος της ανεμογεννήτριας συναρτήσει των στροφών της. Βέβαια στην πράξη χρησιμοποιείται η διακεκομμένη καμπύλη του Σχ. 4.22 ώστε να αποφευχθούν προβλήματα υπολογισμού γύρω από την ελάχιστη και τη μέγιστη ταχύτητα του δρομέα, ακόμα κι αν αυτό συνεπάγεται υποβέλτιστη λειτουργία στις περιοχές αυτές.



Σχήμα 4.22: Χαρακτηριστική ελέγχου στροφών (MPPT)

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) ανάλογα με τη θέση του πρώτου διακόπτη στο Σχ. 4.22. Κατά το έλεγχο τάσης, ένας 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 (η χρονική σταθερά T_i παριστά μια εύλογη καθυστέρηση στη μέτρηση και το φιλτράρισμα της τερματικής τάσης). Αντίθετα κατά την απευθείας ρύθμιση του συντελεστή ισχύος, η Q_{ref} προκύπτει μέσω της σχέσης $Q_{ref} = P_{ref} \tan\varphi$, όπου το $\tan\varphi$ ορίζεται από τον χρήστη (συνήθως από 0.95 επαγωγικό έως 0.95 χωρητικό, ανάλογα με τις εκάστοτε συνθήκες του δικτύου). Φυσικά κάτι τέτοιο συνεπάγεται και κατάλληλη διαμόρφωση του προσήμου της Q_{ref} , ανάλογα με το αν η ανεμογεννήτρια απορροφά ή καταναλώνει άεργο ισχύ.

Ιδιαίτερη σημασία έχει η διαμόρφωση της εντολής αέργου ισχύος στην περίπτωση που η τάση του σημείου κοινής σύνδεσης του αιολικού πάρκου με το δίκτυο (V_{pcc}) πέσει κάτω από κάποιο συνήθως αποδεκτό όριο (χρησιμοποιείται ως τυπική τιμή το 85% της ονομαστικής τιμής). Έτσι στην περίπτωση αυτή, η Q_{ref} λαμβάνει μία υψηλή τιμή (π.χ. $Q_{LV} = 1$ αμ) ώστε η εντολή για άεργο έγχυση να αυξηθεί σημαντικά έως το σημείο που επιτρέπει ο περιοριστής ρεύματος συναρτήσει και της στρατηγικής αδιάλειπτης λειτουργίας σε χαμηλή τάση που ακολουθείται. Σύμφωνα με αυτή λοιπόν, η ανεμογεννήτρια παραμένει συνδεδεμένη κατά τη διάρκεια βυθίσεων τάσης και επαναδιαμορφώνει τις εντολές εγχύσεων σύμφωνα με τις απαιτήσεις του κώδικα του δικτύου. Συνήθως απαιτείται μια ελάχιστη τιμή αέργου 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. Στην συγκεκριμένη υλοποίηση [11] θεωρήθηκαν δύο κρίσιμες τιμές, ανάλογα με το αν η τιμή της V_{pcc} είναι πάνω ή κάτω του αποδεκτού ορίου:

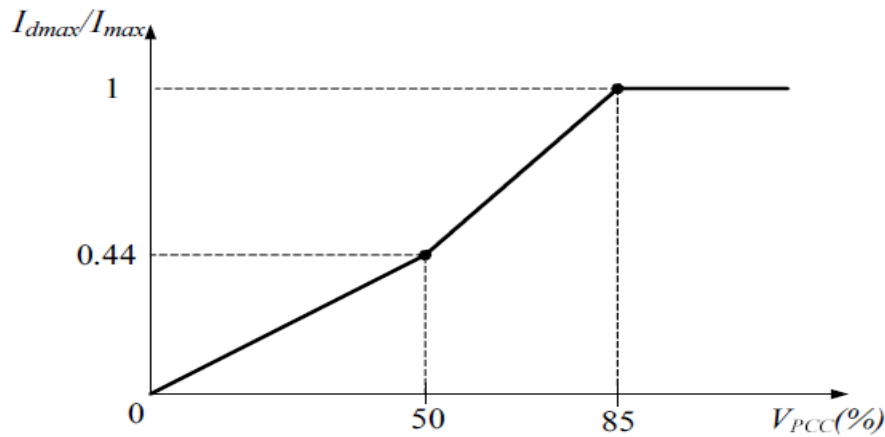
- Το μέγιστο ρεύμα I_{max} υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας, δηλαδή το ονομαστικό
- Το μεταβατικό μέγιστο ρεύμα $I_{max,t}$, το οποίο μπορεί να εγχυθεί από την ανεμογεννήτρια σε περιπτώση διαταραχής, για ένα σύντομο χρονικό διάστημα

Ανάλογα λοιπόν με την τιμή της V_{pcc} προσαρμόζεται και ο περιοριστής του ολικά εγχέομένου ρεύματος από την ανεμογεννήτρια. Επίσης στη συγκεκριμένη υλοποίηση ακολουθείται η λογική της προτεραιότητας της έγχυσης ενεργού ισχύος (P priority). Έτσι εφόσον ισχύει $V_{pcc} > 0.85$, θεωρούμε συνθήκες κανονικής λειτουργίας κι επομένως το ενεργό ρεύμα I_{dref} δύναται να καλύπτει εξ' ολοκλήρου την τιμή ρεύματος που αντέχει ο μετατροπέας. Έτσι το μέγιστο επιτρεπόμενο άεργο ρεύμα I_{qmax} , σε συνθήκες κανονικής λειτουργίας, ορίζεται από την σχέση:

$$I_{qmax} = \sqrt{I_{max}^2 - I_{dref}^2} \quad (4.13)$$

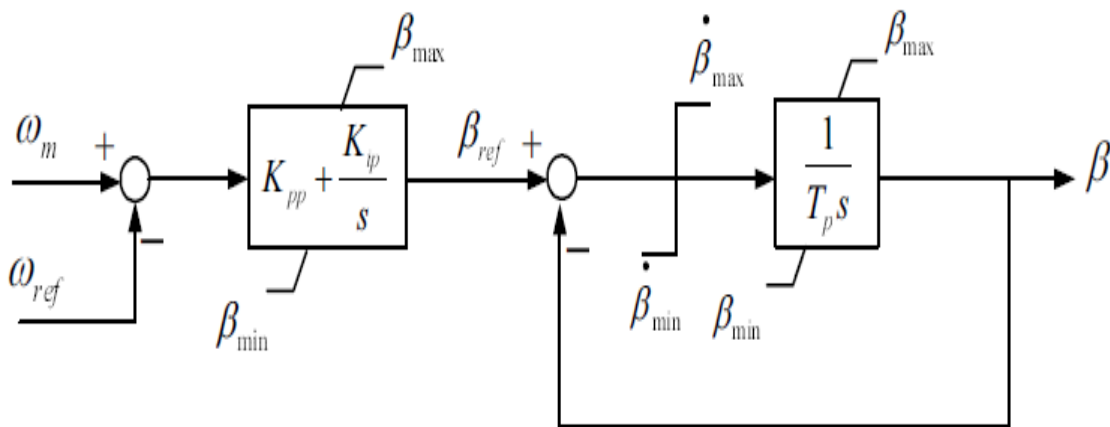
Στην περίπτωση που ισχύει $V_{pcc} < 0.85$ το μέγιστο επιτρεπόμενο ενεργό ρεύμα μειώνεται σύμφωνα με μία τμηματικά γραμμική σχέση που φαίνεται στο Σχ. 4.23 (σε αναλογία ουσιαστικά με τα όσα αναφέρθηκαν για τη λειτουργία LVPL στην ενότητα 4.3.2). Κατ' αυτό τον τρόπο αφήνεται αρκετό περιθώριο στο μετατροπέα ώστε να ικανοποιηθεί η απαίτηση για αυξημένη άεργο ισχύ (οι τιμές του σχήματος είναι ενδεικτικές και σχετίζονται με τις απαιτήσεις του Ισπανικού κώδικα [11]). Επίσης με βάση τα όσα προαναφέρθηκαν το μέγιστο επιτρεπόμενο άεργο ρεύμα I_{qmax} , σε συνθήκες βύθισης τάσης, ορίζεται με βάση τη σχέση:

$$I_{qmax} = \sqrt{I_{max,t}^2 - I_{dref}^2} \quad (4.14)$$



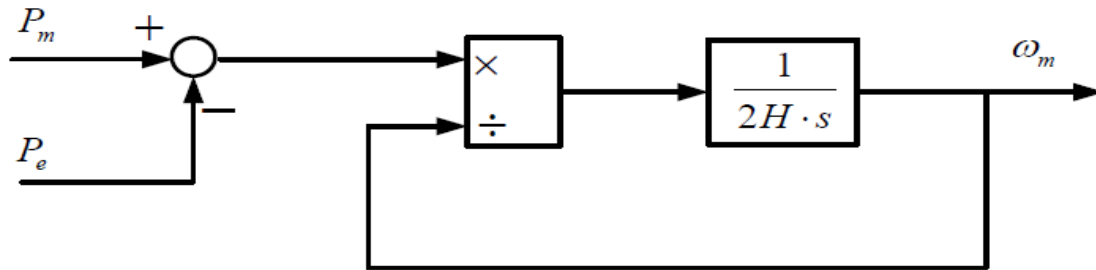
Σχήμα 4.23: Μέγιστο επιτρεπόμενο ενεργό ρεύμα συναρτήσει της τάσης στο ΣΚΣ

Ο βρόχος του ελεγκτή γωνίας βήματος πτερυγίων φαίνεται στο Σχ. 4.24. Σημειώνεται ότι στη συγκεκριμένη υλοποίηση απουσιάζει ο βρόχος αντιστάθμισης σε σχέση με το αντίστοιχο σύστημα ελέγχου της ΑΓΔΤ για τη ρύθμιση της γωνίας βήματος (Σχ. 4.12).



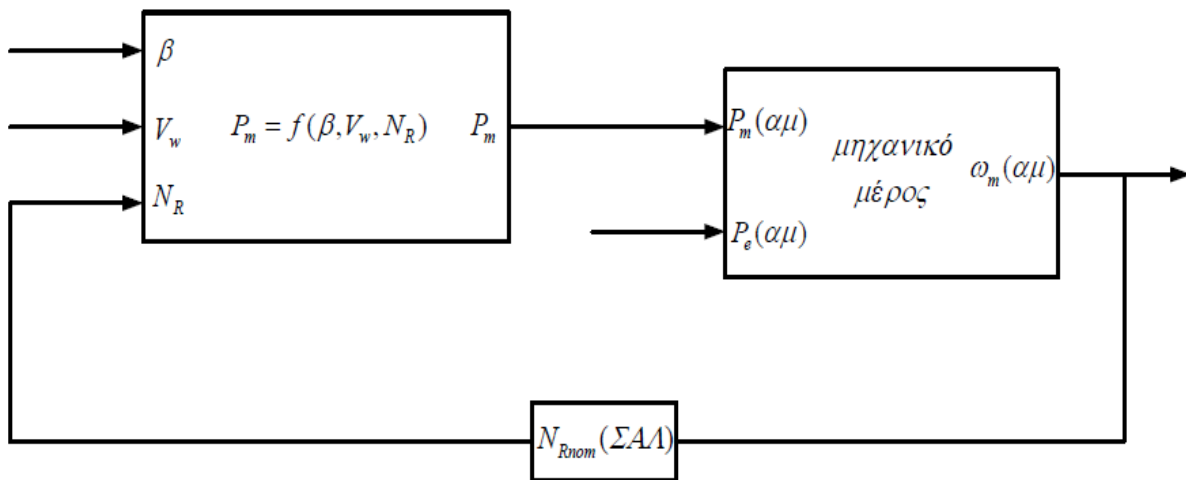
Σχήμα 4.24: Έλεγχος γωνίας βήματος (pitch controller)

Τέλος στο Σχ. 4.25 φαίνεται η υλοποίηση του μηχανικού μέρους για την ανεμογεννήτρια πλήρους μετατροπέα. Εδώ θεωρούμε ότι 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. Στο σχήμα φαίνεται και η μετατροπή από τιμές μηχανικής και ηλεκτρικής ισχύος (P_m, P_e) σε αντίστοιχες ροπές (T_m, T_e), οι οποίες καθορίζουν τον ρυθμό μεταβολής της γωνιακής ταχύτητας του δρομέα ω_m .



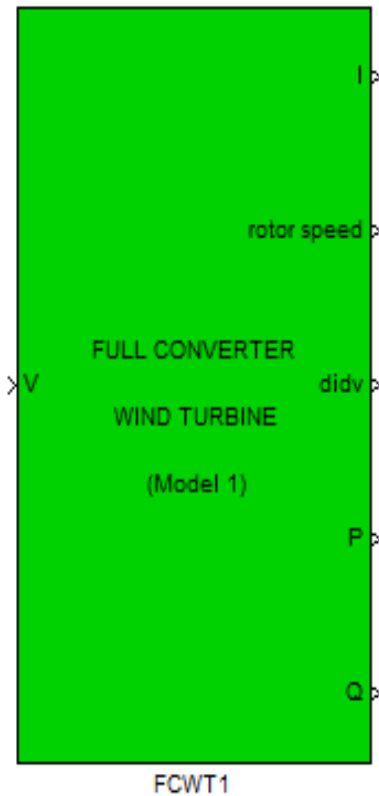
Σχήμα 4.24: Μηχανικό μέρος-Μοντέλο μίας στρεφόμενης μάζας

Η σύνδεση του αεροδυναμικού μέρους με το μηχανικό φαίνεται στο διάγραμμα βαθμίδων του Σχ. 4.26. Ουσιαστικά στο αεροδυναμικό μέρος υπολογίζεται η μηχανική (αεροδυναμική) ισχύς P_m συναρτήσει 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 σύμφωνα με την σχέση 4.5. Έτσι το μοντέλο αυτό επιτρέπει στο χρήστη να προσομοιώσει και διαταραχές ανέμου. Να σημειωθεί επίσης ότι η γωνιακή ταχύτητα ω_m είναι σε ανά μονάδα τιμή και μέσω πολλαπλασιασμού με τις ονομαστικές στροφές της ανεμογεννήτριας (N_{Rnom}) γίνεται η μετατροπή σε ΣΑΛ. Μάλιστα στην πράξη αυτό το σήμα (N_R) χρησιμοποιείται ως είσοδος για την εφαρμογή του ελέγχου μέγιστης απολαβής ισχύος (MPPT).



Σχήμα 4.26: Σύνδεση αεροδυναμικού με μηχανικό μέρος

Το χαρακτηριστικό μπλοκ του μοντέλου της ανεμογεννήτριας πλήρους μετατροπέα FCWT 1, όπως θα το συναντήσει ο χρήστης στη βιβλιοθήκη ως Full_Converter_Wind_Turbine1.mdl, μαζί με τον πίνακα παραμέτρων του και μια σύντομη επεξήγησή τους φαίνεται στο Σχ. 4.27. Στην αρχική εκδοχή του περιγραφόμενου μοντέλου υπήρχε το συνεργαζόμενο αρχείο *wind_turb_init.m*. Σ' αυτό γινόταν η ανάθεση τιμών στις βασικές παραμέτρους του μοντέλου (π.χ. ονομαστική ισχύς, ακτίνα πτωτής), η αρχικοποίηση του ανέμου (V_w0) βάσει των αρχικών συνθηκών και η κατασκευή της χαρακτηριστικής (P_{emax} , N_R) για την εφαρμογή του ελέγχου μέγιστης απολαβής ισχύος. Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας προτιμήθηκε η ενσωμάτωση του στη διαδικασία αρχικοποίησης στη μάσκα του μοντέλου καθώς και η κατάλληλη προσαρμογή του πίνακα παραμέτρων, προς ενίσχυση της φιλικότητας προς τον χρήστη. Το συνεργαζόμενο αυτό αρχείο διατηρήθηκε για λόγους πληρότητας στο αρχείο του μοντέλου στη βιβλιοθήκη.



Sbase (MVA)		Βάση ισχύος συστήματος
bus code		Κωδικός αριθμησης ζυγού
Pnom (MW)		Ονομαστική ενεργός ισχύς αιολικού πάρκου
initial active power (MW)	P0	Αρχικές συνθήκες ανεμογεννήτριας πλήρους μετατροπέα (σύμβαση γεννήτριας)
initial reactive power (MVA _r)	Q0	
initial terminal voltage magnitude (pu)	V0	
initial terminal voltage phase (deg)	thita0	
WT parameters: [R vnom Nrnom Nrin pnom beta_0 pf H]		
Pitch parameters: [Kp_p Ki_p Ts betadot.max(degrees/s) betamin betamax]		Παράμετροι ελεγκτή γωνίας βήματος: [αναλογικό και ολοκληρωτικό κέρδος ελεγκτή, χρονική σταθερά σερβομηχανισμού, όρια ρυθμού αλλαγής γωνίας βήματος, μέγιστη και ελάχιστη γωνία βήματος]
Zcomp: [Rcomp Xcomp] (pu on Sbase)		Ισοδύναμη ωμική αντίσταση και επαγωγική αντίδραση από τον τερματικό ζυγό του αιολικού πάρκου στο σημείο ρύθμισης της τάσης κατά τον έλεγχο ρύθμισης τάσης (vc)
voltage control:[kp_q Ki_q Tt]		Κέρδη PI ελεγκτή κατά τον έλεγχο ρύθμισης τάσης (vc), σταθερά χρόνου μέτρησης της V_{pcc}

Σχήμα 4.27: Μπλοκ ανεμογεννήτριας τύπου Δ και επεξήγηση παραμέτρων

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 έξι 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 *Nr*) σε ΣΑΛ.
- η εγχεόμενη (σύμβαση γεννήτριας) ενεργός ισχύς *P* (αμ) στη βάση του συστήματος.
- η εγχεόμενη (σύμβαση γεννήτριας) άεργος ισχύς *Q* (αμ) στη βάση του συστήματος.
- το διάνυσμα *di2dv* για την επίλυση του δικτύου χωρίς τη χρήση επαναληπτικών μεθόδων και το οποίο για την συγκεκριμένη περίπτωση αναλύεται σε:

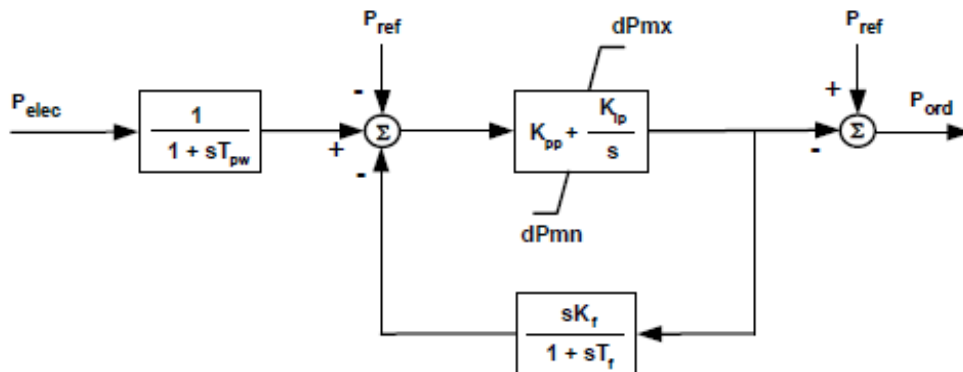
$$di2dv = [(bus\ code)\ 0\ 0\ 0\ 0\ i_x\ i_y]^T \quad (4.15)$$

όπου i_x, i_y τα εγχεόμενα ρεύματα, τα οποία δεν εξαρτώνται γραμμικά από την τερματική τάση αλλά προκύπτουν ως συνάρτηση των διαφορών μεταβλητών κατάστασης εσωτερικά του μοντέλου (ουσιαστικά οι συνιστώσες i_{xinj}, i_{yinj} του Σχ. 4.20 που στην προκειμένη περίπτωση συνθέτουν και το ολικό εγχεόμενο ρεύμα I).

4.4.2 Εναλλακτικό Μοντέλο Ανεμογεννήτριας τύπου Δ (FCWT2)

Στα πλαίσια των δοκιμών που έγιναν στην παρούσα εργασία μελετήθηκαν και εναλλακτικές προσεγγίσεις των βασικών συστατικών μερών που συνθέτουν μια ανεμογεννήτρια πλήρους μετατροπέα. Εδώ θα παρατεθεί η μοντελοποίηση του ‘γενικευμένου’ μοντέλου για της ανεμογεννήτριας τύπου Δ, όπως αυτό προτείνεται στο [15].

Βασική διαφοροποίηση σε σχέση με το μοντέλο που περιγράφηκε στην προηγούμενη παράγραφο αποτελεί η απλοποιημένη παράσταση του μηχανικού μέρους. Ουσιαστικά δεν μοντελοποιείται η εξίσωση κίνησης που περιγράφει την μεταβολή της ταχύτητας της σύγχρονης γεννήτριας και οι μηχανικές συνιστώσες (P_m, ω_m) απουσιάζουν εντελώς ως μεταβλητές από το μοντέλο. Φυσικό επακόλουθο είναι η απουσία οποιασδήποτε παράστασης που συνδέεται με την αεροδυναμική συμπεριφορά της ανεμογεννήτριας (υπολογισμός αεροδυναμικής ισχύς, έλεγχος γωνίας βήματος πτερυγίων). Πρόκειται δηλαδή για ένα μοντέλο που επικεντρώνεται στην ηλεκτρική δυναμική συμπεριφορά της ανεμογεννήτριας ως συνιστώσα του δικτύου και δεν προσφέρεται για την προσομοίωση διαταραχών ανέμου. Η απλοποιημένη αυτή λογική δικαιολογείται από το γεγονός ότι η σύγχρονη γεννήτρια, σε αντίθεση με την περίπτωση της ΑΓΔΤ, είναι πλήρως αποσυμπλεγμένη από το δίκτυο. Λόγω της μεταβλητής συχνότητας που χαρακτηρίζει τη λειτουργία της σύγχρονης μηχανής και της παρεμβολής του μετατροπέα συχνότητας, η διαμόρφωση των εγχεόμενων ρευμάτων γίνεται εξολοκλήρου από τον μετατροπέα πλευράς δικτύου. Έτσι το απλοποιημένο μηχανικό μέρος που παριστά την αλληλεπίδραση με το ηλεκτρικό μέρος λόγω της διαδικασίας ελέγχου στροφών φαίνεται στο διάγραμμα βαθμίδων του Σχ. 4.28.



Σχήμα 4.28: Απλοποιημένο μηχανικό μέρος

Σύμφωνα με το Σχ. 4.28 η εντολή P_{ord} για τη διαμόρφωση του ενεργού ρεύματος αναφοράς I_{dref} προκύπτει ως άθροισμα του σήματος αναφοράς P_{ref} και του κατάλληλα διαμορφωμένου

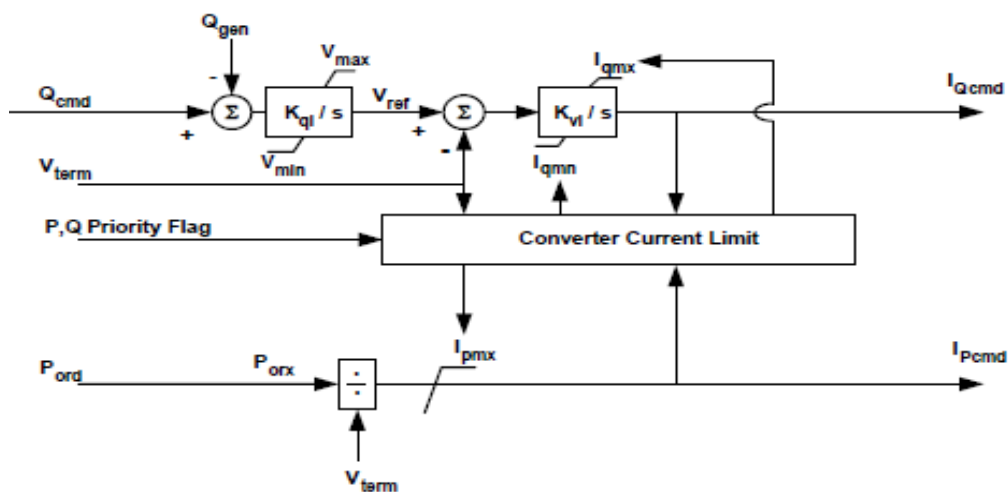
σφάλματος (PI ενισχυτής και υπερυπερατό φίλτρο) ανάμεσα στο P_{ref} και την μετρούμενη ενεργό ισχύ εξόδου P_{elec} . Βάσει δηλαδή της συγκεκριμένης υλοποίησης, οποιαδήποτε αλλαγή στο αεροδυναμικό μέρος (π.χ. ταχύτητα ανέμου) εμφανίζεται μόνο σαν μεταβολή στην ισχύ αναφοράς P_{ref} .

Όσον αφορά τον έλεγχο του μετατροπέα, το προτεινόμενο σχήμα ελέγχου, όπως παρουσιάζεται στο Σχ. 4.29, περιλαμβάνει τη λογική ελέγχου της τερματικής τάσης (Terminal Voltage Control, TVC), όπως αυτή περιγράφηκε και στη μοντελοποίηση της ΑΓΔΤ (Σχ. 4.11). Υπάρχει διαφοροποίηση όμως σχετικά με τον τρόπο υλοποίησης του *anti-wind up* ελέγχου του δεύτερου ολοκληρωματικού ελεγκτή και τον περιορισμό της εντολής ενεργού έγχυσης I_{dref} (ή I_{pcmd}). Στο σημείο αυτό κρίνεται σκόπιμο να επεξηγηθούν οι παρακάτω έννοιες που σχετίζονται με τον ολοκληρωματικό έλεγχο:

Wind up: Στην περίπτωση αυτή η συσσώρευση σφάλματος στον ολοκληρωματικό ελεγκτή γίνεται χωρίς περιορισμό (δεν περιορίζεται η μεταβλητή κατάστασης εσωτερικά του ελεγκτή) ενώ ταυτόχρονα υποβάλλεται σε περιορισμό το σήμα εξόδου του ελεγκτή. Το γεγονός αυτό μπορεί να οδηγήσει σε μακρά μεταβατική περίοδο τα σύστημα λόγω μεγάλης συσσώρευσης σφάλματος το οποίο στη συνέχεια δεν μπορεί να εξαλειφθεί γρήγορα λόγω του περιοριστή στην έξοδο του ολοκληρωματικού ελεγκτή.

Anti-wind up: Στην περίπτωση αυτή υποβάλλεται στον ίδιο περιορισμό με την έξοδο του ολοκληρωματικού ελεγκτή και η συσσώρευση σφάλματος (περιορισμός μεταβλητής κατάστασης). Έτσι καταυτόν τον τρόπο αποφεύγεται η πιθανή αρνητική επίδραση του ολοκληρωματικού ελέγχου στον χρόνο αποκατάστασης του συστήματος.

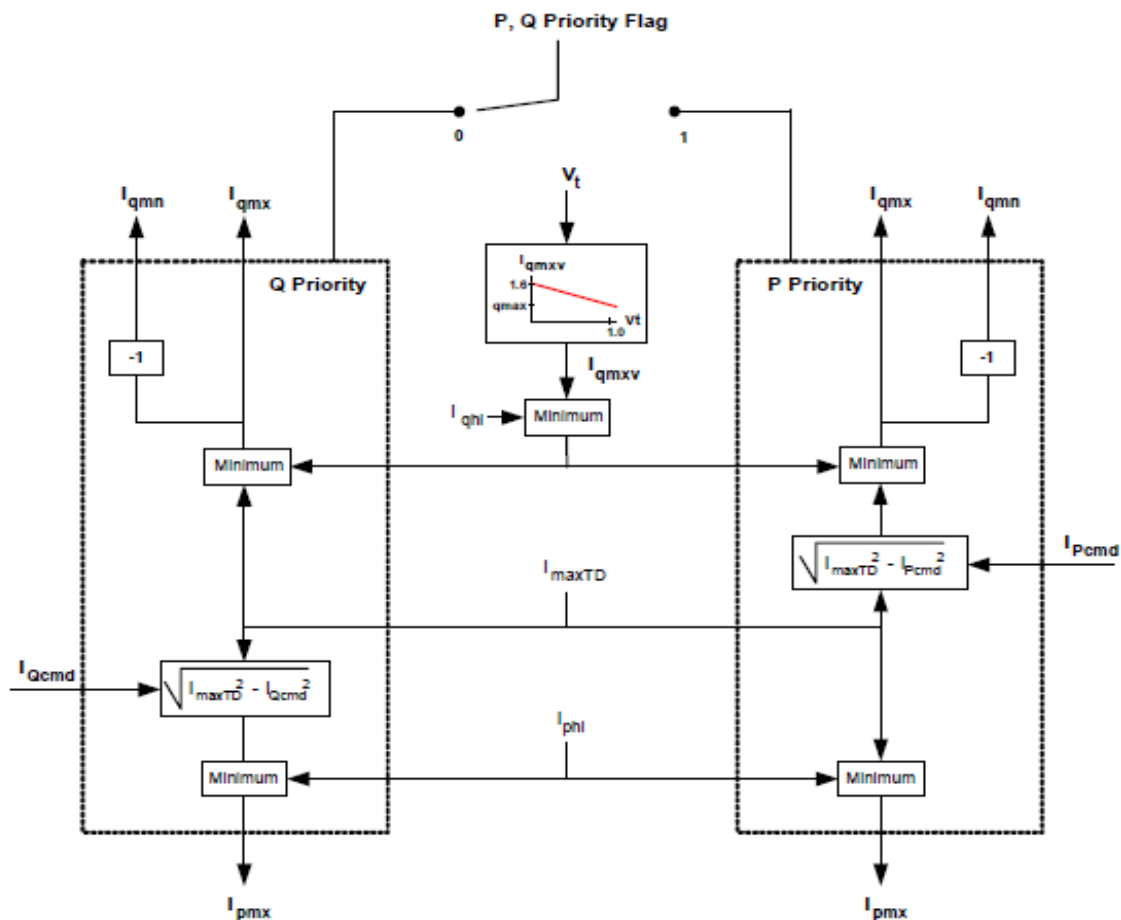
Συγκεκριμένα τα όρια του περιοριστή του ολοκληρωματικού ελεγκτή υπολογίζονται στο μπλοκ Converter Current Limit, η λειτουργία του οποίου αποσαφηνίζεται στο Σχ. 4.30.



Σχήμα 4.29: Έλεγχος Μετατροπέα με έλεγχο τερματικής τάσης (TVC)

Το μπλοκ αυτό είναι υπεύθυνο για τον περιορισμό της ενεργού και άεργης συνιστώσας του ρεύματος που εγχέεται από τον μετατροπέα, ώστε ο συνδυασμός τους να μην υπερβαίνει την ικανότητα μεταγωγής. Σημαντικό ρόλο στην υλοποίηση αυτή κατέχει η δυνατότητα επιλογής από τον χρήστη ανάμεσα σε δύο τύπους διαμόρφωσης των ορίων των περιοριστών. Έτσι επιλέγεται αν θα έχει προτεραιότητα η εντολή για ενεργό ή άεργη συνιστώσα (P ή Q Priority αντίστοιχα) όταν ο συνδυασμός τους δεν είναι εφικτός για λόγους προστασίας. Συνήθως η προτεραιότητα, πέρα από τα τεχνικά χαρακτηριστικά του εξοπλισμού, υπαγορεύεται από τον κώδικα του δικτύου. Τα υπολογιζόμενα όρια I_{qmn} , I_{qmx} και I_{pmx} εξαρτώνται από τα μέγιστο επιτρεπόμενο ενεργό και άεργο ρεύμα (I_{qhl} και I_{phl} αντίστοιχα), καθώς και το ολικό μέγιστο I_{maxTD} . Ειδικά για τον περιορισμό της άεργης συνιστώσας συμμετέχει και η μεταβλητή I_{qmxv} που καθορίζει ένα όριο συναρτήσεως της

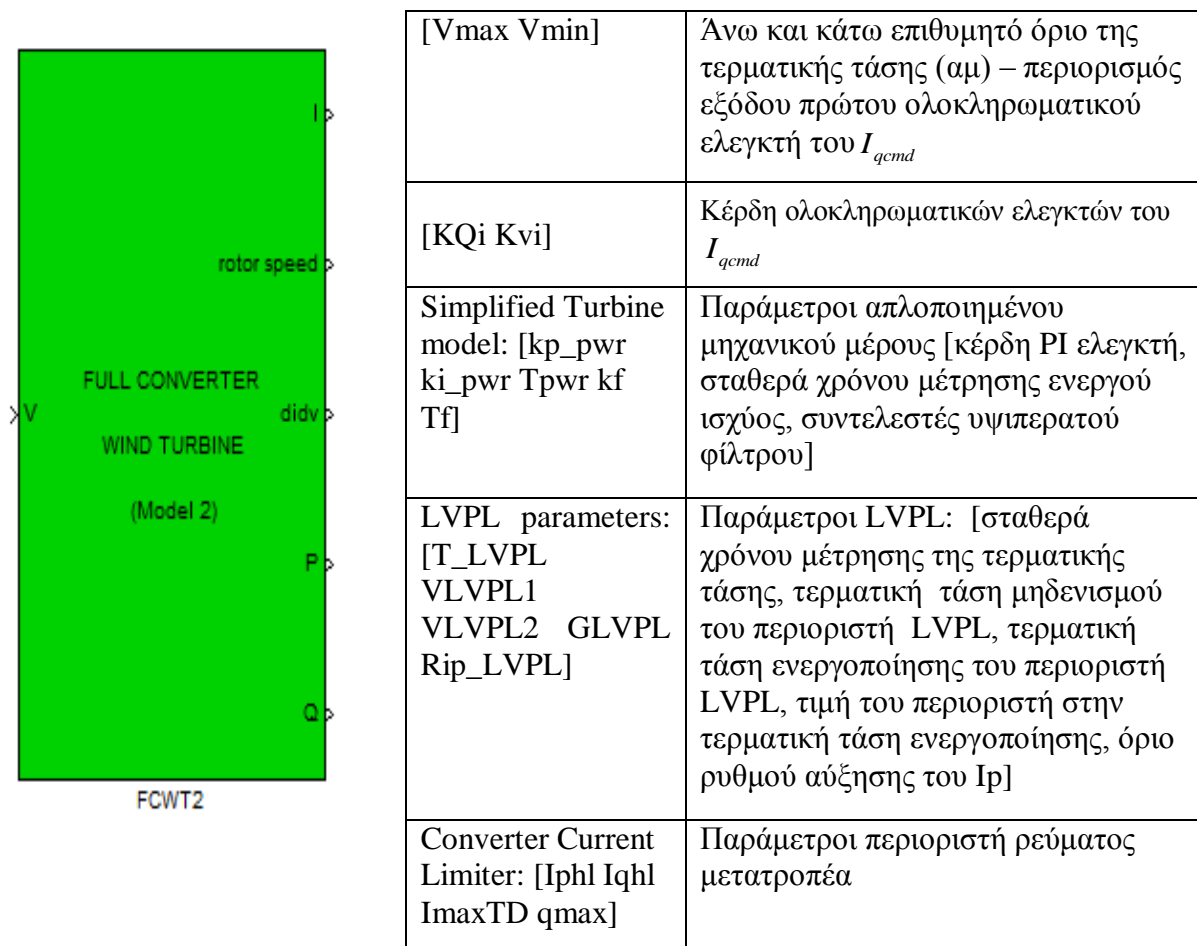
τιμής της τερματικής τάσης (μέσω μιας γραμμικής σχέσης). Συγκεκριμένα για χαμηλή τερματική τάση το όριο I_{qmxv} είναι συγκρίσιμο με το I_{qhl} ενώ για ονομαστική τερματική τάση περιορίζεται σύμφωνα με τη μέγιστη επιτρεπόμενη άεργο ισχύ εξόδου q_{max} του μετατροπέα.



Σχήμα 4.30: Περιορισμός ρεύματος μετατροπέα (Converter Current Limiter)

Τέλος στην εκδοχή αυτή παράστασης της ανεμογεννήτριας πλήρους μετατροπέα περιλαμβάνεται και η λειτουργία περιορισμού του ενεργού ρεύματος σε χαμηλή τάση (LVPL), όπως αυτή περιγράφεται στο Σχ. 4.16, με τη διαφορά ότι εδώ έχουμε ισοδύναμες εντολές για ενεργό και άεργο ρεύμα. Όσον αφορά τις χρονικές καθυστερήσεις, αυτές τοποθετούνται μετά τη μετατροπή των συνιστωσών στο σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς του συστήματος για λόγους που αναλύθηκαν στην ενότητα 4.4.1 και σχετίζονται με την επίλυση του δικτύου στο περιβάλλον του WHSSP. Φυσικά όπως και για το μοντέλο της ΑΓΔΤ, η υλοποίηση στο Simulink δεν περιλαμβάνει τα μπλοκ High Voltage Reactive Current Management και Low Voltage Active Current Management του Σχ. 4.16.

Το μπλοκ του εναλλακτικού μοντέλου της ανεμογεννήτριας πλήρους μετατροπέα, FCWT2, φαίνεται στο Σχ. 4.31 και συναντάται στη βιβλιοθήκη ως Full_Converter_Wind_Turbine2.mdl. Για λόγους ευκρίνειας δεν παραθέτουμε πάλι όλες τις παραμέτρους αφού αυτές ουσιαστικά είναι κοινές με το μοντέλο FCWT1. Η διαφοροποίηση σε σχέση με αυτό έγκειται στην ενσωμάτωση των παραμέτρων που σχετίζονται με τη λειτουργία του περιορισμού του ενεργού ρεύματος σε χαμηλή τάση (LVPL), την απλοποιημένη παράσταση του μηχανικού μέρους και την λογική ελέγχου της τερματικής τάσης (TVC). Έτσι παρουσιάζονται και οι επιπλέον αυτές παράμετροι μαζί με το αντίστοιχο μπλοκ στο Σχ. 4.31. Σημειώνεται τέλος ότι το μοντέλο συνοδεύεται από το συνεργαζόμενο αρχείο *Iq_lim.m*. Σε αυτό υλοποιείται η λειτουργία του δεύτερου ολοκληρωματικού ελεγκτή (TVC) μαζί με τον υπολογισμό των μεταβλητών ορίων του περιοριστή (*anti-wind up control*).



Σχήμα 4.31: Μπλοκ εναλλακτικής μοντελοποίησης A/T τύπου Δ (με λειτουργία LVPL, TVC και απλοποιημένο μηχανικό μέρος) και επεξήγηση πρόσθετων παραμέτρων

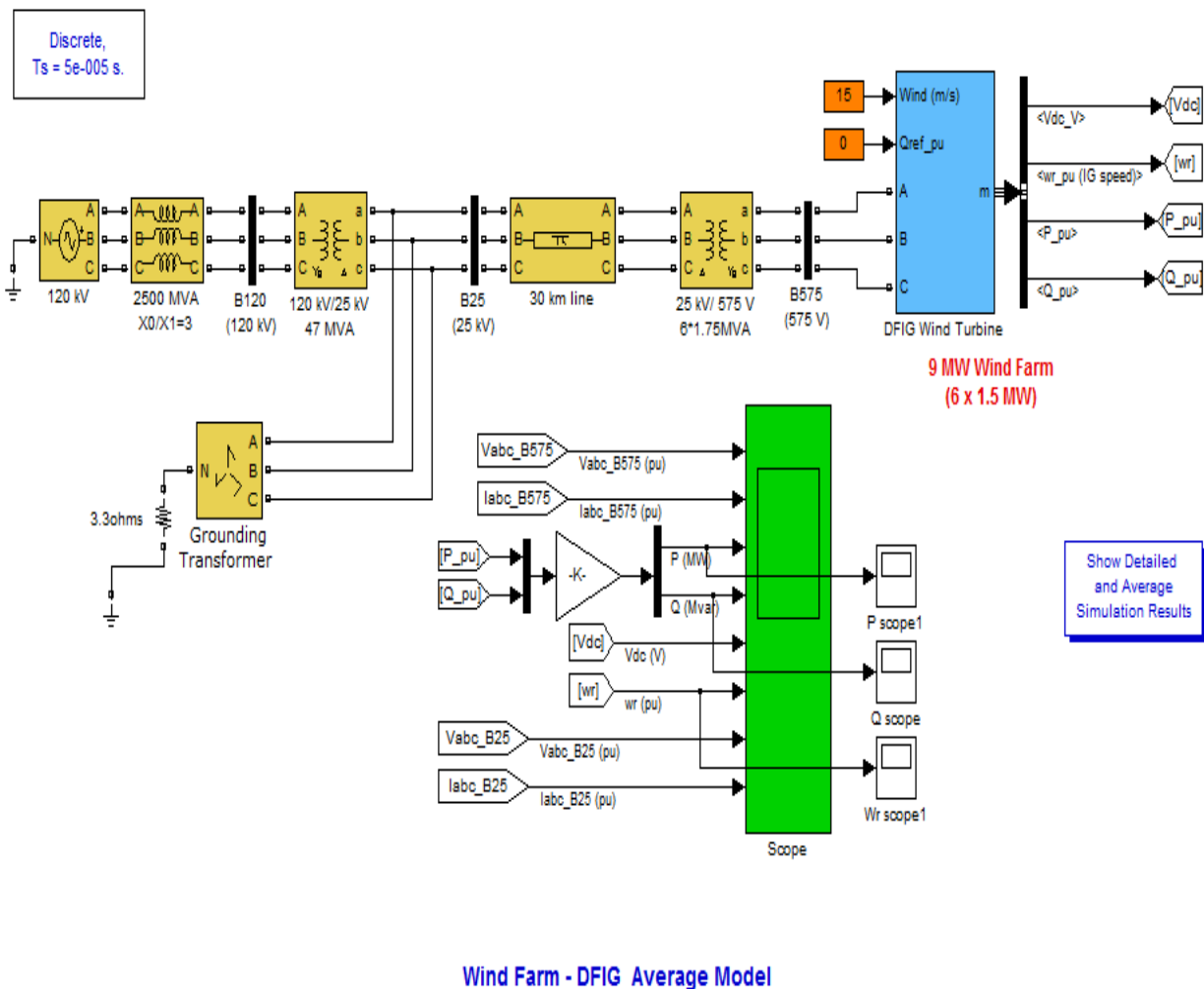
4.5 Σύγκριση του μοντέλου DFAG1 με ένα λεπτομερές ηλεκτρομαγνητικό μοντέλο (Wind Farm – DFIG Average Model)

4.5.1 Σκοπός σύγκρισης – περιγραφή μοντέλου μέσης τιμής (Average)

Σκοπός της σύγκρισης αυτής είναι η πιστοποίηση ότι το μοντέλο που αναπτύχθηκε στα πλαίσια του WHSSP για την προσομοίωση της λειτουργίας της ανεμογεννήτριας διπλής τροφοδότησης – DFAG1 όπως παρουσιάστηκε στο 4.3.1 – δεν διαφέρει σημαντικά από το αντίστοιχο αναλυτικό ηλεκτρομαγνητικό μοντέλο που έχει αναπτυχθεί στο περιβάλλον του MATLAB/Simulink και ονομάζεται power_wind_dfig_avg.mdl. Το μοντέλο αυτό βρίσκεται στον φάκελο Distributed Resources Models στην βιβλιοθήκη SimPowerSystems των demo του Simulink. Αναπτύχθηκε στα πλαίσια εργασιών του ινστιτούτου ερευνών της εταιρείας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας Hydro-Québec (Institut de Recherche d'Hydro-Québec) που εδρεύει στον Καναδά και περισσότερες πληροφορίες γι' αυτό μπορούν να αναζητηθούν στο [14]. Αξίζει να σημειωθεί στο σημείο αυτό πως ο όρος DFIG (doubly-fed induction generator) χρησιμοποιείται επίσης, αν και η ορολογία DFAG είναι πιο κατάλληλη.

Στο μοντέλο αυτό αναπαρίσταται ένα αιολικό πάρκο (Wind Farm) των 9 MW αποτελούμενο από έξι ομοειδείς ανεμογεννήτριες διπλής τροφοδότησης ονομαστικής ισχύος 1.5 MW η κάθε μία. Ακολουθείται κι εδώ η λογική ενός ενοποιημένου μοντέλου (aggregate model) καθώς η

αναπαράσταση της κάθε ανεμογεννήτριας χωριστά αυξάνει σημαντικά το υπολογιστικό κόστος της προσομοίωσης. Έτσι θεωρείται μία ισοδύναμη ανεμογεννήτρια με την παραδοχή σταθερής ταχύτητας ανέμου ίσης με 15 m/sec (ονομαστική 11 m/sec). Το αιολικό πάρκο, όπως φαίνεται στο Σχ. 4.32, συνδέεται σε άπειρο ζυγό (120 kV) μέσω μετασχηματιστή 525 V/25 kV, γραμμής μεταφοράς MT (30 km) και μετασχηματιστή 120/25 kV. Ο άπειρος ζυγός παρίσταται μέσω μιας ισοδύναμης πηγής τάσης (ισοδύναμο Thevenin) στην οποία μπορούν να ρυθμιστούν ο χρόνος αλλά και το είδος της επιθυμητής διαταραχής.



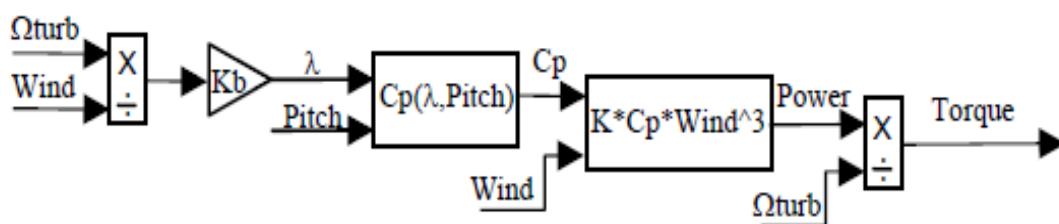
Σχήμα 4.32: Αναλυτικό ηλεκτρομαγνητικό μοντέλο της ΑΓΔΤ (Average)

Η σημασία της σύγκρισης έγκειται στο γεγονός πως το προτεινόμενο μεταβατικό ηλεκτρομαγνητικό μοντέλο (EMT model) της Hydro-Québec περιέχει λεπτομερή αναπαράσταση των διαφόρων συνιστωσών που συνθέτουν μία ΑΓΔΤ σε αντίθεση με τα απλοποιημένα μοντέλα με ισοδύναμους βρόχους ελέγχου που χρησιμοποιούνται για τις ανάγκες των μελετών ευστάθειας ΣΗΕ. Έχουμε δηλαδή μοντελοποίηση δυναμικών χαρακτηριστικών που εξελίσσονται σε ταχύτερες χρονικές κλίμακες από αυτές που κατά βάση μας ενδιαφέρουν. Έτσι στο μοντέλο μέσης τιμής (average) περιλαμβάνεται η δυναμική των PWM μετατροπέων πλευράς δρομέα και δικτύου ως ξεχωριστών μονάδων. Μόνη διαφορά σε σχέση με το ακόμα λεπτομερέστερο power_wind_dfig_det.mdl (που επίσης περιέχεται στο Distributed Resources Models) αποτελεί η παράσταση της δυναμικής των διακοπτικών στοιχείων IGBTs. Πιο συγκεκριμένα, τα IGBTs στο μοντέλο μέσης τιμής παρουσιάζονται ως ιδανικές πηγές τάσης που παράγουν τη μέση τάση EP (AC) σε ένα κύκλο της διακοπτικής συχνότητας των PWM. Επομένως στα πλαίσια του μοντέλου

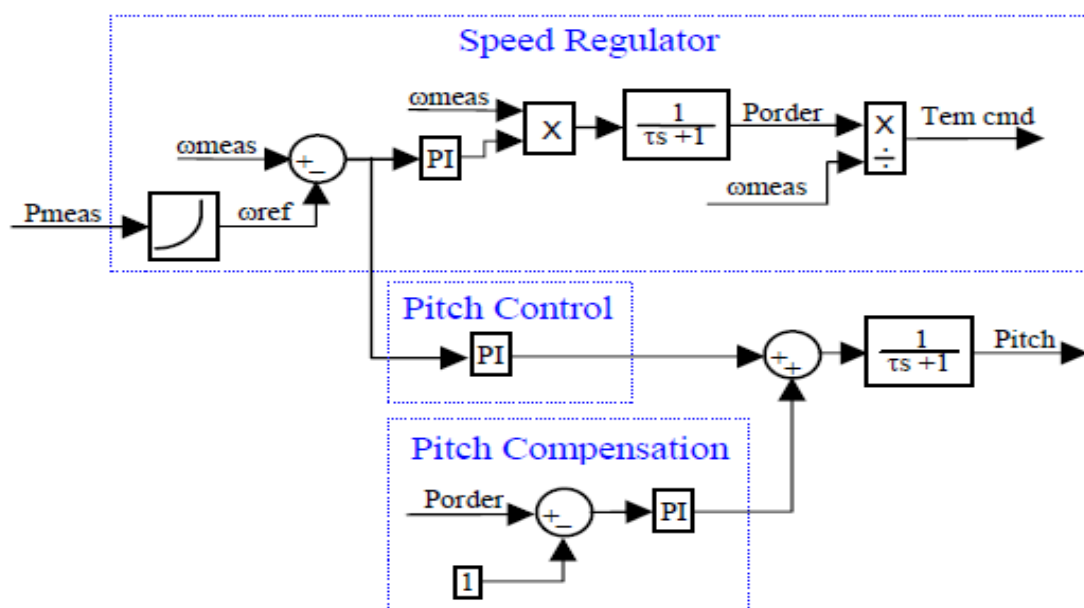
μέσης τιμές δεν προσομοιώνονται οι παραγόμενες αρμονικές που δεν εμπίπτουν στο πεδίο ανάλυσής μας, ενώ παράλληλα απαιτούν μικρότερο βήμα ολοκλήρωσης και άρα επιβραδύνουν την προσομοίωση.

Μείζονος σημασίας είναι η παράσταση της δυναμικής του ενδιάμεσου πυκνωτή του Σχ. 4.7, που εμείς αγνοήσαμε στο μοντέλο του WHSSP βάσει των παραδοχών που έγιναν. Φυσικά υπάρχουν και στο μοντέλο μέσης τιμές λεπτομερείς βρόγχοι ελέγχου για τη ρύθμιση των επιθυμητών ρευμάτων που εγχέονται στην κάθε πλευρά αλλά και οι αντίστοιχοι περιοριστές ρευμάτων που αφορούν την ανοχή των ηλεκτρονικών ισχύος. Επίσης περιλαμβάνεται αναλυτικό μοντέλο τόσο της ασύγχρονης γεννήτριας (όπως συναντάται ως μεμονωμένο στοιχείο στη βασική βιβλιοθήκη του Simulink στην υποκατηγορία SimPowerSystems/Machines, με την ονομασία Asynchronous Machine) όσο και του ελεγκτή κλειδώματος φάσης PLL για την εκτίμηση της γωνίας της τερματικής τάσης στο σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς του συστήματος.

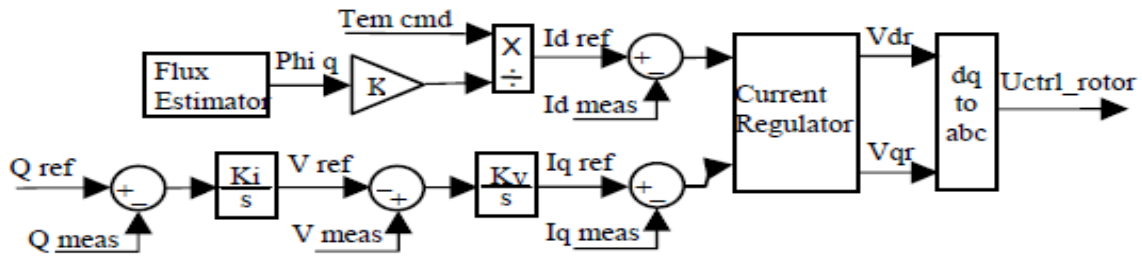
Η αεροδυναμική ροπή υπολογίζεται αναλυτικά βάσει των (4.5)-(4.7), όπως φαίνεται στο Σχ. 4.33, ενώ χρησιμοποιείται ισοδύναμο μοντέλο δύο μαζών για το μηχανικό μέρος. Όσον αφορά τους ισοδύναμους βρόγχους ελέγχου, αυτοί αποσαφηνίζονται μέσω των διαγραμμάτων βαθμίδων των Σχ. 4.34, 4.35 και 4.36 [30]. Από αυτά τα συστήματα ελέγχου προκύπτουν η εντολή για τη γωνία βήματος πτερυγίων (*Pitch*) καθώς και οι εντολές για τις τάσεις (*Uctrl_rotor* και *Uctrl_gc*) προς τους μετατροπείς πλευράς δρομέα και δικτύου αντίστοιχα. Μέσω των δύο τελευταίων επιτυγχάνεται ο έλεγχος των στροφών της γεννήτριας, της συνεχής τάσης του ενδιάμεσου πυκνωτή και της εγχεόμενης αέρου ισχύος στο δίκτυο.



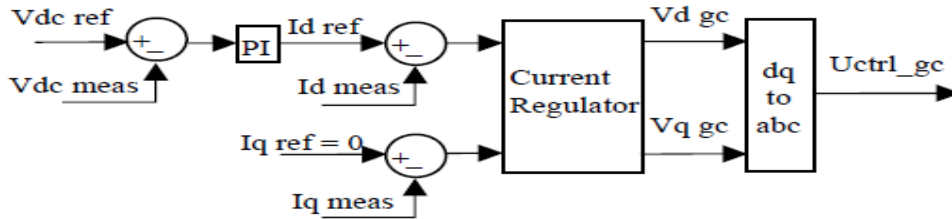
Σχήμα 4.33: Υπολογισμός μηχανικής ισχύος (*Turbine model*)



Σχήμα 4.34: Έλεγχος στροφών (*Speed Regulator*) και γωνίας βήματος (*Pitch Control*)



Σχήμα 4.35: Σύστημα ελέγχου μετατροπέα πλευράς δρομέα



Σχήμα 4.36: Σύστημα ελέγχου μετατροπέα πλευράς δικτύου

Η λογική ελέγχου της εγγεόμενης αέργου ισχύος (Σχ. 4.35) ουσιαστικά συμπίπτει με επιλογή για σταθερό συντελεστή ισχύος (PF mode) με ταυτόχρονο έλεγχο της τερματικής τάσης της ισοδύναμης Α/Γ (TVC mode) σε αντιπαράβολή με το μοντέλο DFAG1. Για την διεξαγωγή της σύγκρισης θεωρήθηκε $Q_{ref}=0$, διατηρώντας έτσι την αρχική επιλογή του μοντέλου μέσης τιμής. Όσον αφορά τις εντολές $Uctrl_rotor$ και $Uctrl_gc$, αυτές προκύπτουν αφού το σφάλμα ανάμεσα στο ρεύματα αναφοράς ($Iq\ ref$, $Id\ ref$) και τα αντίστοιχα μετρούμενα ($Iq\ mes$, $Id\ mes$) περάσει από τους αντίστοιχους ρυθμιστές ρεύματος (Current Regulators) που ουσιαστικά αποτελούν PI ελεγκτές. Η εντολή για την επιθυμητή ροπή $Te\ cmd$ προκύπτει κατά τρόπο ανάλογα με την υλοποίηση της παραγράφου 4.3.1, αφού ο έλεγχος στροφών βασίζεται στην παρακολούθηση μιας βέλτιστης χαρακτηριστικής $P_{meas} - \omega_{ref}$, συναρτήσεως της μετρούμενης ηλεκτρικής ισχύος. Ωστόσο εδώ η τελική εντολή μεταφράζεται σε επιθυμητή ροπή αντί για επιθυμητή ενεργό ισχύ και τελικά μετατρέπεται σε ισοδύναμη εντολή ρεύματος μέσω της εκτίμησης της μαγνητικής ροής στάτη (Flux Estimation). Ο μετατροπέας πλευράς δικτύου ακολουθεί τη λογική μοναδιαίου συντελεστή ισχύος ($Iq\ ref=0$) και αποσκοπεί στη ρύθμιση της dc τάσης πυκνωτή σε κάποια προκαθορισμένη τιμή ($Vdc\ ref$). Τέλος στην ρύθμιση της γωνίας βήματος των πτερυγίων υπάρχει απόλυτη ταύτιση ανάμεσα στα δύο μοντέλα στο χρησιμοποιούμενο σχήμα ελέγχου.

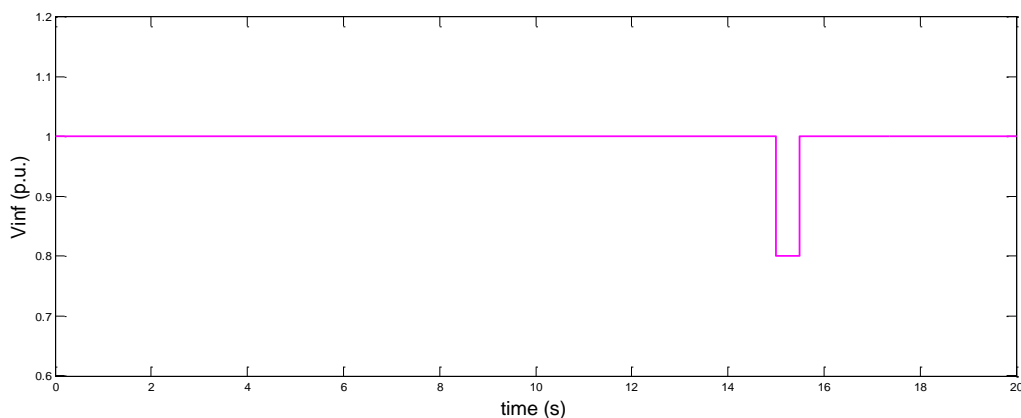
4.5.2 Διεξαγωγή σύγκρισης και σχολιασμός αποτελεσμάτων

Όπως γίνεται εύκολα κατανοητό η σύγκριση με το μοντέλο DFAG1 απαιτεί την κατάλληλη παραμετροποίηση (tuning) των δύο μοντέλων ώστε να προκύψουν συγκρίσιμα αποτελέσματα. Οι αλλαγές αυτές δεν αλλοιώνουν τα ποιοτικά συμπεράσματα που προκύπτουν αφού αποτελούν θέμα που σχετίζεται με τα επιθυμητά χαρακτηριστικά ελέγχου. Η στρατηγική που ακολουθήθηκε για την αντιστοίχιση των παραμέτρων ήταν η κατά το δυνατόν διατήρηση των αρχικών τιμών (default values) του πρωτότυπου ηλεκτρομαγνητικού μοντέλου μέσης τιμής. Η βασική διαφοροποίηση σε σχέση με τις αρχικές ρυθμίσεις αφορά την αύξηση του μεγίστου επιτρεπόμενου ρεύματος του μετατροπέα πλευράς δρομέα σε 1,237 αμ. Ουσιαστικά η επιλογή αυτή ισοδυναμεί με μεγαλύτερη διαστασιολόγησή του και προέκυψε μετά από διαδοχικές συγκρίσεις. Απώτερος στόχος ήταν οι επιμέρους περιορισμοί των PWM να αντιστοιχούν στη θεώρηση ενιαίου μετατροπέα ισχύος που

ακολουθείται στο μοντέλο DFAG1. Επίσης τα κέρδη k_{i_var} και k_{i_volt} για της ρύθμισης της εγχεόμενης αέργου ισχύος έχουν ρυθμιστεί σε 0,1 και 40 αντίστοιχα από 0,05 και 20 που ήταν αρχικά στον πίνακα παραμέτρων του πρωτότυπου μοντέλου. Ακόμα, επειδή στο μοντέλο μέσης τιμής η ονομαστική συχνότητα του συστήματος είναι 60 Hz (όπως στο δίκτυο του Καναδά), χρησιμοποιήσαμε αυτή την τιμή στις προσομοιώσεις. Αναλυτική παρουσίαση των παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν για την προσαρμογή του μοντέλου DFAG1 στα πλαίσια του WHSSP γίνεται στο Παράρτημα Γ (Πίνακας Γ.1).

Φυσικά θα πρέπει να λάβουμε υπόψη μας ότι παρά την προσαρμογή των συνιστωσών του δικτύου (μετασηματιστές, γραμμές μεταφοράς) για τις προσομοιώσεις που έγιναν στο WHSSP, το μοντέλο μέσης τιμής περιέχει ακριβέστερες αναπαραστάσεις με παραμετροποίηση των ισοδύναμων κυκλωματικών στοιχείων για τη θετική και τη μηδενική ακολουθία. Εξάλλου από τη μία έχουμε ένα μοντέλο φασιθετών που εξυπηρετεί τους σκοπούς των μελετών ευστάθειας (οιονεί ημιτονοειδής κατάσταση) και από την άλλη ένα αναλυτικό ηλεκτρομαγνητικό μοντέλο. Ακόμα θα πρέπει να ληφθεί υπόψη και η διαφορά στην μέθοδο αριθμητικής επίλυσης. Το DFAG1 είναι ένας συνεχές μοντέλο και επιλέχθηκε η μέθοδο ολοκλήρωσης μεταβλητού βήματος *ode23tb* ενώ το ηλεκτρομαγνητικό μοντέλο μέσης τιμής είναι διακριτό (λόγω των διακοπτικών συχνοτήτων λειτουργίας των PWM) και επιλύεται με τη διακριτή μέθοδο (discrete-no continue states) και χρήση σταθερού βήματος που εξαρτάται από τον επιλεγόμενο χρόνο δειγματοληψίας (διατηρήθηκε η προεπιλεγμένη τιμή $T_s=50 \mu\text{sec}$).

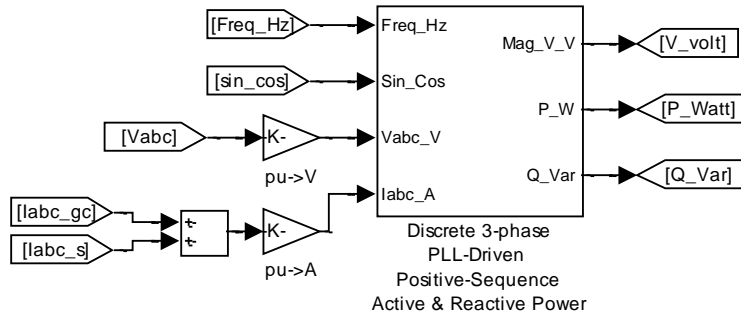
Η διαταραχή που επιλέχθηκε για την προσομοίωση και τη σύγκριση των δύο μοντέλων είναι η πτώση τάσης (voltage dip) στον ζυγό B120 του Σχ. 4.33. Επιλέχθηκε βηματική μεταβολή της τάξης του 0,2 αμ και η επαναφορά της στην ονομαστική τιμή μετά από χρονικό διάστημα 0,5 sec, όπως φαίνεται στο Σχ. 4.37. Να σημειώσουμε πως ορίστηκε ως χρόνος διαταραχής τα 15 sec έτσι ώστε το μοντέλο μέσης τιμής να έχει φτάσει σε μόνιμη κατάσταση λειτουργίας. Υπενθυμίζεται πως θεωρούμε σταθερή ταχύτητα ανέμου για το χρονικό εύρος της προσομοίωσης και το DFAG1 τίθεται σε λειτουργία σταθερού συντελεστή ισχύος (επιλογή PF στο Σχ. 4.11) με παράλληλη ρύθμιση της τερματικής τάσης (επιλογή TVC, δηλαδή ο διακόπτης στη θέση (α) στο Σχ. 4.11). Όσον αφορά τα όρια του περιοριστή του δεύτερου ολοκληρωματικού ελεγκτή του Σχ. 4.11 επιλέχθηκε να υπολογίζονται συναρτήσει της τερματικής τάσης.



Σχ. 4.37: Τάση ζυγού 120 kV

Επικεντρώνουμε το ενδιαφέρον μας στην αλληλεπίδραση του αιολικού πάρκου με το δίκτυο λόγω της εμφανιζόμενης διαταραχής και έτσι εστιάζουμε την προσοχή μας στα ηλεκτρικά μεγέθη της ενεργού και αέργου ισχύος, που εγχέονται από το Α/Π, καθώς και στο μέτρο της τερματικής τάσης. Για την μέτρηση των μεγεθών αυτών υπάρχει εσωτερικά του average μοντέλου, η διάταξη του Σχ. 4.38 όπου γίνεται το απαραίτητο φιλτράρισμα των αποκρίσεων ώστε να προκύψουν οι συνιστώσες θετικής ακολουθίας (positive sequence). Οι είσοδοι Freq_Hz και sin_cos καθορίζουν τη θεμελιώδη συχνότητα και το πλαίσιο αναφοράς για τους υπολογισμούς αντίστοιχα.

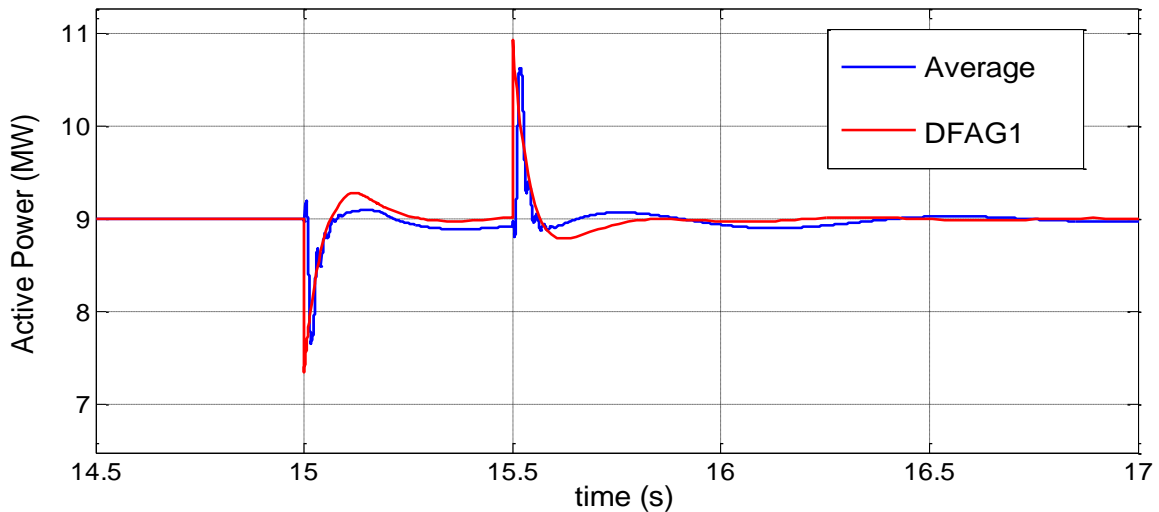
P, Q & V



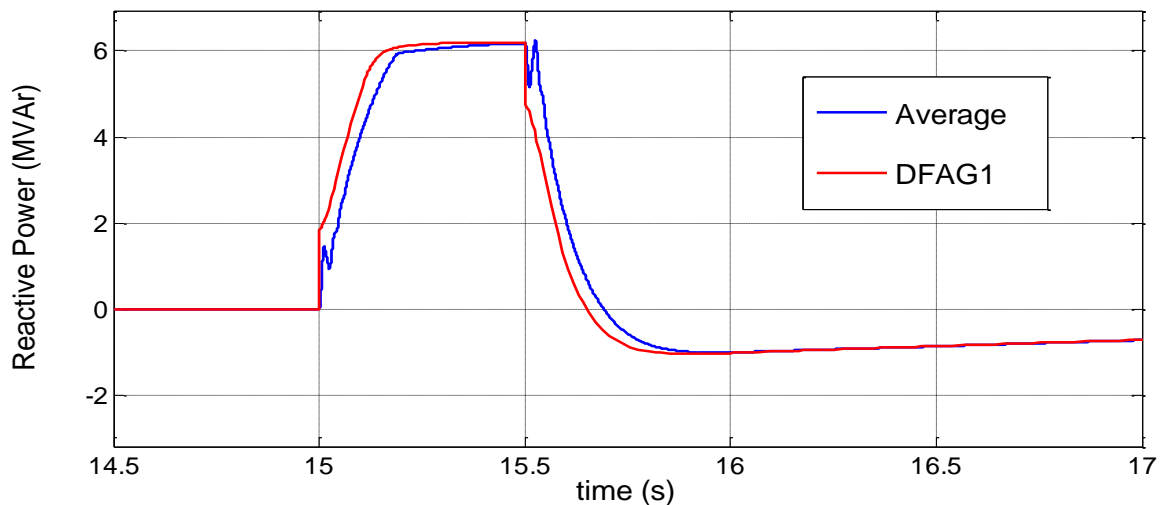
Calculation of P Q measured
including filter contribution

Σχ. 4.38: Διάταξη μέτρησης συνιστωσών θετικής ακολουθίας

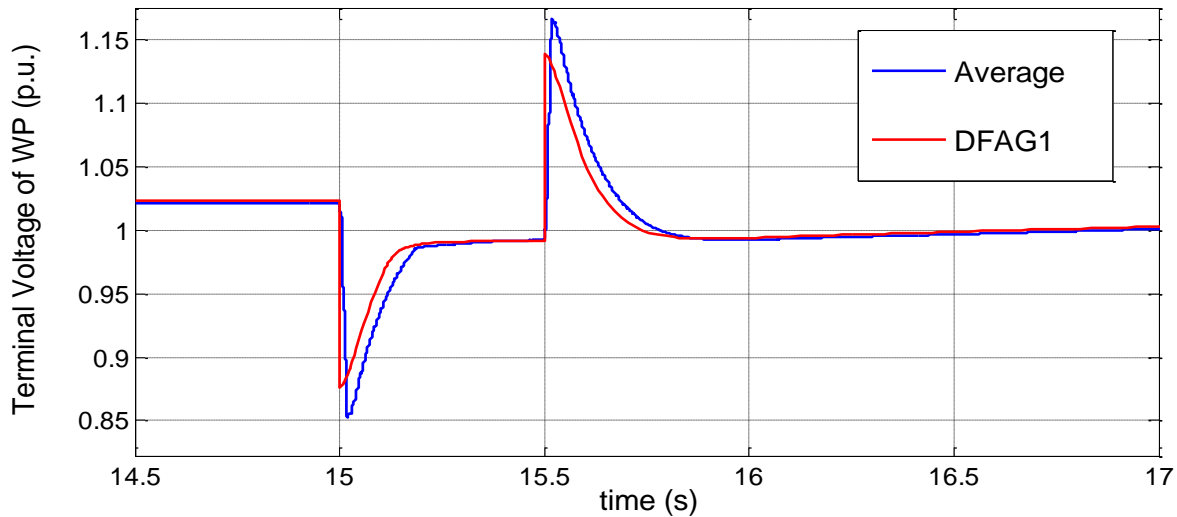
Η σύγκριση των αποκρίσεων της ενεργού ισχύος, της αέργου ισχύος και της τερματικής τάσης του ηλεκτρομαγνητικού μοντέλου μέσης τιμής (average) με τις αντίστοιχες του DFAG1 φαίνονται στα Σχ. 4.39, 4.40, 4.41.



Σχ. 4.39: Παραγωγή ενεργού ισχύος

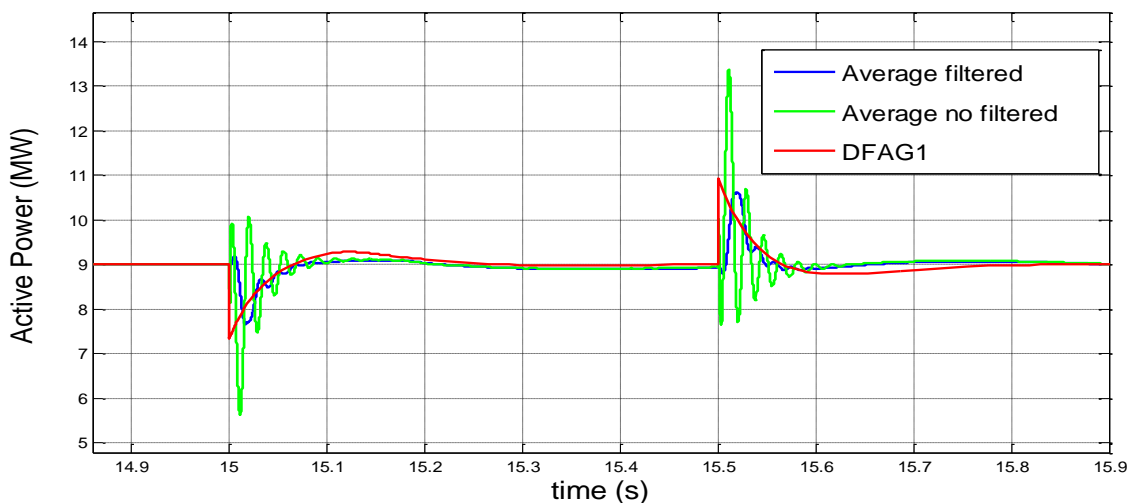


Σχ. 4.40: Παραγωγή αέργου ισχύος



Σχ. 4.41: Τερματική τάση του αιολικού πάρκου

Όπως φαίνεται από τα συγκριτικά διαγράμματα οι αποκρίσεις είναι αρκετά κοντά με εξαίρεση κάποιες επιπλέον δυναμικές που αποτυπώνονται σ' αυτές του ηλεκτρομαγνητικού μοντέλου. Οι αποκρίσεις μάλιστα της αέργου ισχύος ταυτίζονται σε μεγάλο βαθμό. Αξιοσημείωτη είναι η ομοιότητα τόσο στο εύρος διακύμανσης της, όσο και στο ρυθμό αποκατάστασης μετά το πέρας της διαταραχής. Μικροδιαφορές υπάρχουν στα πρώτα msec μετά την εμφάνιση και την αποκατάσταση της διαταραχής και μπορούν να εξηγηθούν ως αποτέλεσμα της απότομης απομαγνήτισης και μαγνήτισης της ασύγχρονης γεννήτριας, η δυναμική της οποίας παρίσταται αναλυτικά στο ηλεκτρομαγνητικό μοντέλο. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί το ότι στο μοντέλο του WHSSP αμελούμε τα μεταβατικά του στάτη. Επιπροσθέτως σημαντικό ρόλο παίζει και η δυναμική των συνιστωσών του δικτύου (μετασχηματιστές, γραμμές μεταφοράς). Τα ταχέα ηλεκτρομαγνητικά φαινόμενα λαμβάνονται υπόψη στο μοντέλο μέσης τιμής, κάτι που φαίνεται ξεκάθαρα και από τη βαθμιαία και πριονωτή πτώση της τερματικής τάσης σε σχέση με την αντίστοιχη απότομη που εμφανίζεται στο μοντέλο DFAG1. Η απόκλιση στις τιμές κορυφής (peak values) τόσο στη ενεργό ισχύ όσο και στην τερματική τάση είναι μικρότερες του 5% και μπορούν να δικαιολογηθούν με βάση τα όσο έχουν ήδη αναφερθεί. Ιδιαίτερα όσον αφορά τις διαφορές με το ηλεκτρομαγνητικό μοντέλο στην απόκριση της ενεργού ισχύος (κυμάτωση, επαναφορά στη μόνιμη κατάσταση) θα πρέπει να αναλογιστούμε και την δυναμική που εισάγει η λεπτομερής παράσταση του ενδιάμεσου πυκνωτή.



Σχ. 4.42: Παραγωγή ενεργού ισχύος

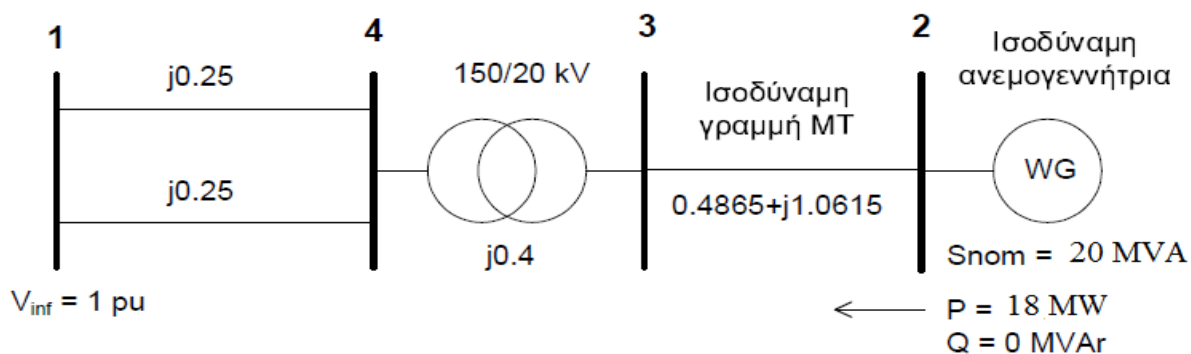
Τέλος παρατίθεται και ένα επιπλέον συγκριτικό διάγραμμα (Σχ. 4.42) με την στιγμιαία ενεργό ισχύ του ηλεκτρομαγνητικού μοντέλου όπως αυτή υπολογίζεται άμεσα από το γινόμενο των φασικών ρευμάτων και τάσεων του δρομέα και του στάτη. Δηλαδή χωρίς αυτή να φιλτράρεται από τη διάταξη του Σχ. 4.38. Στο διάγραμμα αυτό παρατηρούμε μία υπερτιθέμενη ταλάντωση συχνότητας των 60 HZ, όπως και αναμενόταν.

Συμπερασματικά καταλήγουμε πως για τους σκοπούς των μελετών ευστάθειας ΣΗΕ το μοντέλο που αναπτύχθηκε στα πλαίσια του WHSSP κρίνεται ικανοποιητικό, παρά τις απλοποιητικές παραδοχές που περιέχει, αφού αποτυπώνεται η ίδια δυναμική συμπεριφορά ως συνολική εικόνα.

4.6 Προσομοίωση στο PSS/E και επαλήθευση μοντέλων Simulink

4.6.1 Σύγκριση με PSS/E για το μοντέλο DFAG2

Για την πραγμάτωση της σύγκρισης αυτής και όσων διεξήχθησαν με το PSS/E χρησιμοποιήθηκε το ακτινικό δίκτυο σύνδεσης αιολικού πάρκου σε άπειρο ζυγό, μέσω μετασχηματιστή ανύψωσης και γραμμής μεταφοράς (1-4) διπλού κυκλώματος. Οι παράμετροι για τις συνιστώσες του δικτύου είναι αντίστοιχες της διατριβής [9]. Στο Σχ 4.43 φαίνεται το δοκιμαστικό σύστημα που χρησιμοποιήθηκε μαζί με τις παραμέτρους της ροής φορτίου.



Σχ. 4.43: Σύστημα ισοδύναμης ΑΓΔΤ συνδεδεμένης σε άπειρο ζυγό

Οι σύνθετες αντιστάσεις του συστήματος του Σχ. 4.43 είναι σε αμ σε βάση 100 MVA ($S_{base}=100$ MVA) και ο λόγος του μετασχηματιστή λήφθηκε μοναδιαίος. Οι ανεμογεννήτριες του αιολικού πάρκου αναπαριστώνται με μία ισοδύναμη μηχανή, πρακτική που ακολουθήθηκε εν γένει στα πλαίσια της παρούσας εργασίας και συμβαδίζει με τη λογική υλοποίησης των χρησιμοποιούμενων μοντέλων. Το σύνολο των σύνθετων αντιστάσεων μέχρι τον υποσταθμό 150/20 kV (μετασχηματιστής ανύψωσης ανεμογεννήτριας, εσωτερικό δίκτυο μέσης τάσης αιολικού πάρκου) συμπεριλαμβάνονται στην ισοδύναμη γραμμή μέσης τάσης (MT) του παραπάνω σχήματος. Στο παράρτημα Γ (Πίνακας Γ.2) δίνονται αναλυτικά οι τιμές των παραμέτρων για το μοντέλο DFAG2 της ισοδύναμης ανεμογεννήτριας. Να σημειωθεί εδώ πως επειδή οι παράμετροι του μοντέλου της ΑΓΔΤ αναφέρονται σε ανεμογεννήτρια ισχύος 1,5 MW, το αιολικό πάρκο θεωρούμε ότι αποτελείται από 12 όμοιες μηχανές.

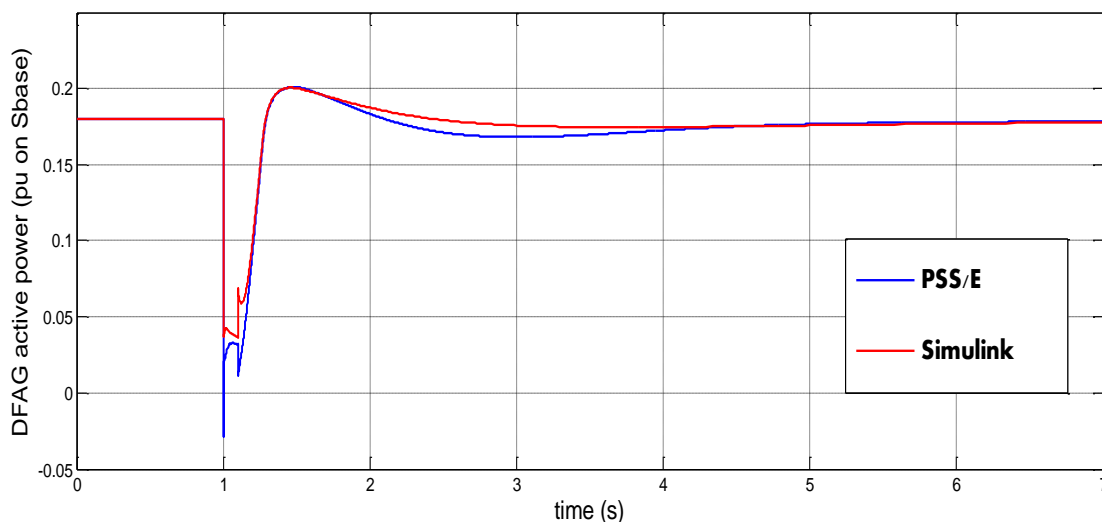
Ως διαταραχή επιλέχθηκε η εμφάνιση συμμετρικού τριφασικού βραχυκυκλώματος στη μία γραμμή ΥΤ κοντά στον ζυγό 4 τη χρονική στιγμή $t=1$ sec. Η ισοδύναμη σύνθετη αντίσταση του σφάλματος ως προς γη θεωρήθηκε ίση με $0+j0.01$ αμ και η εκκαθάρισή του σφάλματος γίνεται μέσω του ανοίγματος του πληγέντος κυκλώματος 1-4 μετά από 100 msec. Επίσης επιλέχθηκε λειτουργία των ανεμογεννητριών σε λογική σταθερού συντελεστή ισχύος (επιλογή PF στο Σχ. 4.11) με ταυτόχρονο έλεγχο της τερματικής τάσης (επιλογή TVC, δηλαδή ο διακόπτης στη θέση (α) στο Σχ. 4.11), ενώ η ταχύτητα του ανέμου θεωρείται σταθερή στη διάρκεια της προσομοίωσης. Τέλος οι

τυπικές τιμές που χρησιμοποιήθηκαν για την εφαρμογή του περιορισμού του ενεργού ρεύματος υπό χαμηλή τάση (LVPL) φαίνονται στον Πίνακα 4.1.

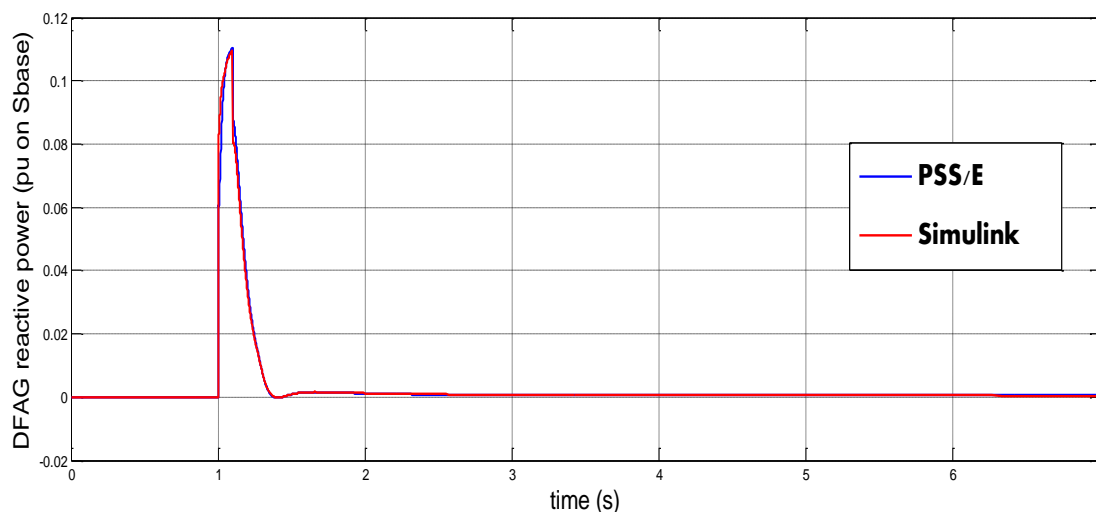
Πίνακας 4.1: Παράμετροι LVPL ελέγχου

V_{LVPL1}	0,5
V_{LVPL2}	0,9
G_{LVPL}	1,11
R_{Ip_LVPL}	5
T_{LVPL}	0,02

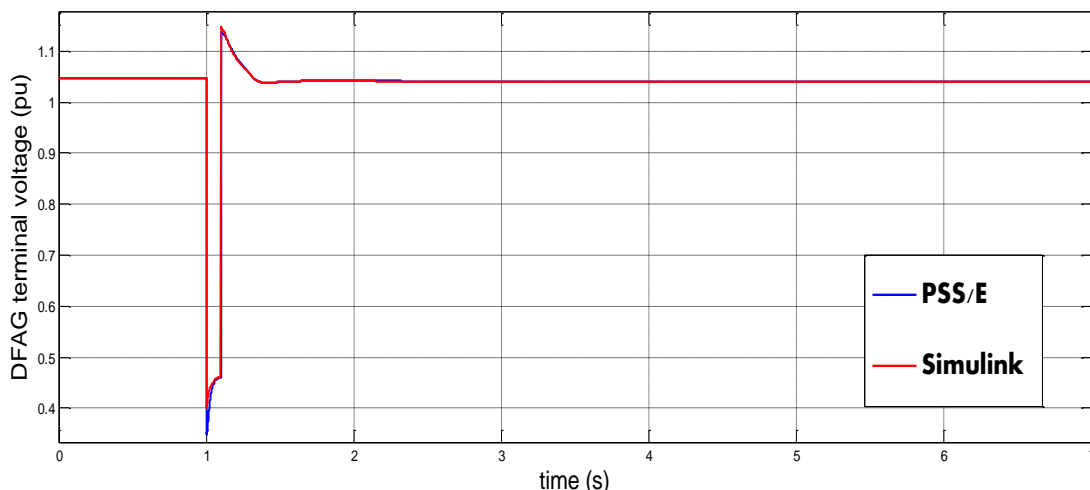
Στα Σχ. 4.44, 4.45, 4.46 φαίνονται οι αποκρίσεις της ενεργού και αέργου ισχύος, καθώς και της τερματικής τάσης της ισοδύναμης ΑΓΔΤ αντίστοιχα, όπως προέκυψαν από το PSS/E και το μοντέλο DFAG2 του WHSSP (Simulink).



Σχήμα 4.44: Παραγωγή ενεργού ισχύος της ισοδύναμης ΑΓΔΤ



Σχήμα 4.45: Παραγωγή αέργου ισχύος της ισοδύναμης ΑΓΔΤ



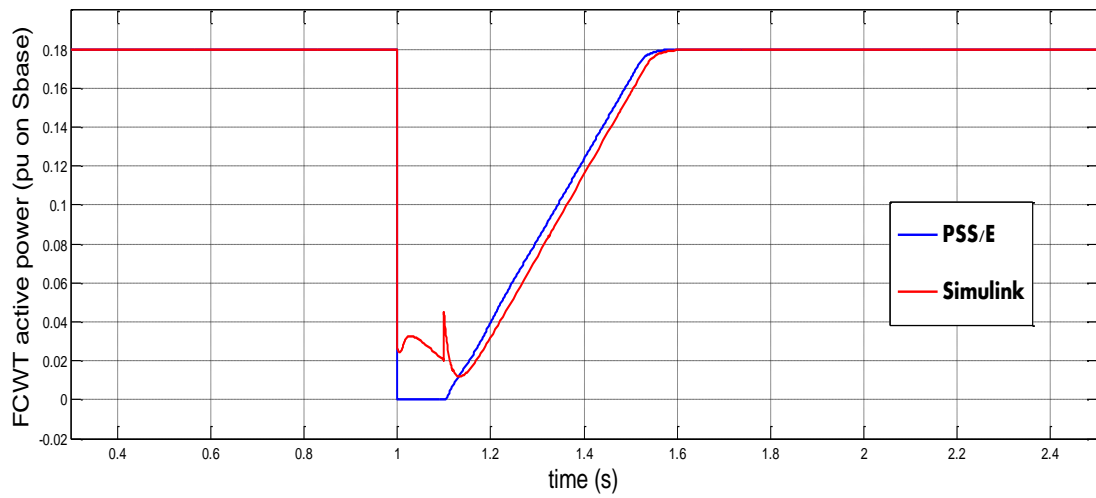
Σχήμα 4.46: Τερματική τάση της ισοδύναμης ΑΓΔΤ

Όπως φαίνεται στα παραπάνω συγκριτικά διαγράμματα, οι αποκρίσεις σε PSS/E και *Simulink* ταυτίζονται σε μεγάλο βαθμό, ιδιαίτερα στην περίπτωση της αέργου ισχύος και της τερματικής τάσης. Μικρή διαφοροποίηση υπάρχει στην απόκριση της ενεργού ισχύος ως προς το επίπεδο πτώση αυτής στη διάρκεια του σφάλματος (1-1.1 sec), ενώ διαφέρει ελαφρώς και το διάστημα αργής αποκατάστασης (2-5 sec) στην προ του σφάλματος τιμή. Παρόλα αυτά ως συνολική εικόνα μπορούμε να ισχυριστούμε ότι αποτυπώνεται η ίδια δυναμική συμπεριφορά. Μάλιστα παρατηρείται ταύτιση τόσο στο σκέλος της απότομης πτώσης της ενεργούς ισχύος (λόγω του επιβαλλόμενου ορίου LVPL στην ενεργό συνιστώσα του ρεύματος), όσο και στο ρυθμό αύξησης της κατά την επαναφορά της τάσης στα φυσιολογικά επίπεδα (λόγω του περιοριστή ρυθμού αύξησης R_{Ip_LVPL}). Εξάλλου η ύπαρξη ‘μαύρων κουτιών’ στο μοντέλο του PSS/E (βλ. ενότητα 4.3.2) μπορεί να δικαιολογήσει μικρές αποκλίσεις. Επομένως μπορούμε να ισχυριστούμε ότι το προτεινόμενο μοντέλο DFAG2 που συμπεριλήφθηκε στη βιβλιοθήκη του WHSSP είναι κατάλληλο για την προσομοίωση ΑΓΔΤ στην περίπτωση που αυτή διαθέτει τη λογική ελέγχου LVPL.

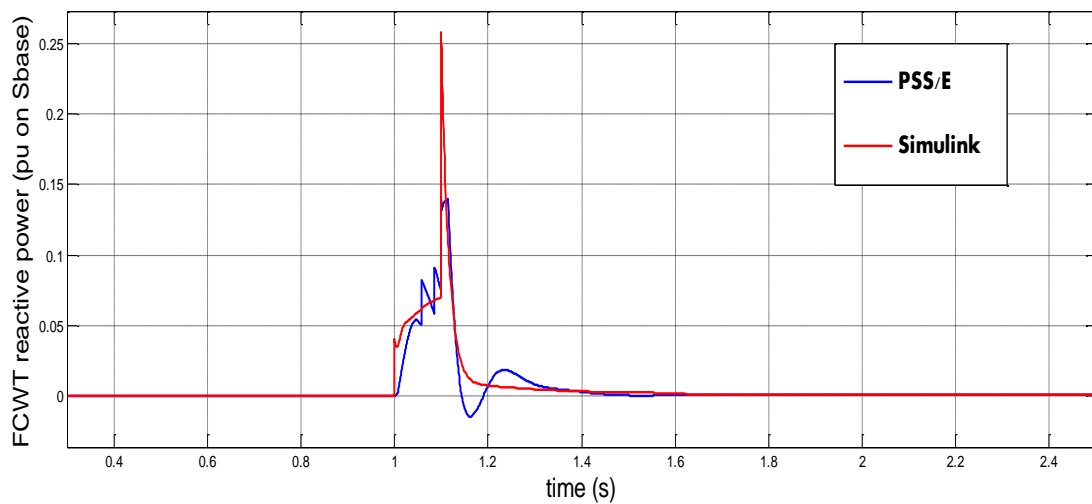
4.6.2 Σύγκριση με PSS/E για το μοντέλο FGWT2

Η σύγκριση πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας το ίδιο δοκιμαστικό σύστημα με την παραγράφο 4.6.1. Διατηρήθηκαν δηλαδή οι ίδιες τιμές για τις κυκλωματικές παραμέτρους και την αρχική ροή φορτίου (όπως αυτές φαίνονται στο Σχ. 4.43), καθώς και τα χαρακτηριστικά της εμφανιζόμενης διαταραχής. Θεωρούμε επίσης λειτουργία της ισοδύναμης ανεμογεννήτριας πλήρους μετατροπέα σε λογική σταθερού συντελεστή ισχύος (PF στο Σχ. 4.21) σε συνδυασμό με έλεγχο τερματικής τάσης και σταθερή ταχύτητα ανέμου. Αξίζει να σημειωθεί πως στην αντίστοιχη μοντελοποίηση του ελέγχου μετατροπέα (WT4E1) στο περιβάλλον του PSS/E [17], δεν υπάρχει η δυνατότητα παράκαμψης του ελέγχου τερματικής τάσης, όπως φαίνεται δηλαδή και στο Σχ. 4.29. Ανεξαρτήτως δηλαδή της επιλογής για την διαμόρφωση της εντολής για το εγχεόμενο άεργο ρεύμα (PF ή Voltage control), θεωρούμε πάντα ενεργοποιημένο τον έλεγχο αυτό. Και σε αυτή την περίπτωση ως τυπικές τιμές για την εφαρμογή του περιορισμού του ενεργό ρεύματος υπό χαμηλή τάση χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές του πίνακα 4.1. Όσον αφορά τέλος τον περιορισμό του ρεύματος μετατροπέα επιλέχθηκε προτεραιότητα για την ενεργό συνιστώσα (P Priority στο Σχ. 4.30). Στο παράρτημα Γ (πίνακας Γ.3) δίνονται αναλυτικά οι τιμές των παραμέτρων για το μοντέλο FCWT2 της ισοδύναμης ανεμογεννήτριας πλήρους μετατροπέα. Υπενθυμίζεται πως επειδή οι παράμετροι του μοντέλου αναφέρονται σε ανεμογεννήτρια ισχύος 1,5 MW, το αιολικό πάρκο θεωρούμε ότι αποτελείται από 12 όμοιες μηχανές. Στα Σχ. 4.47, 4.48, 4.49 φαίνονται οι αποκρίσεις της ενεργού

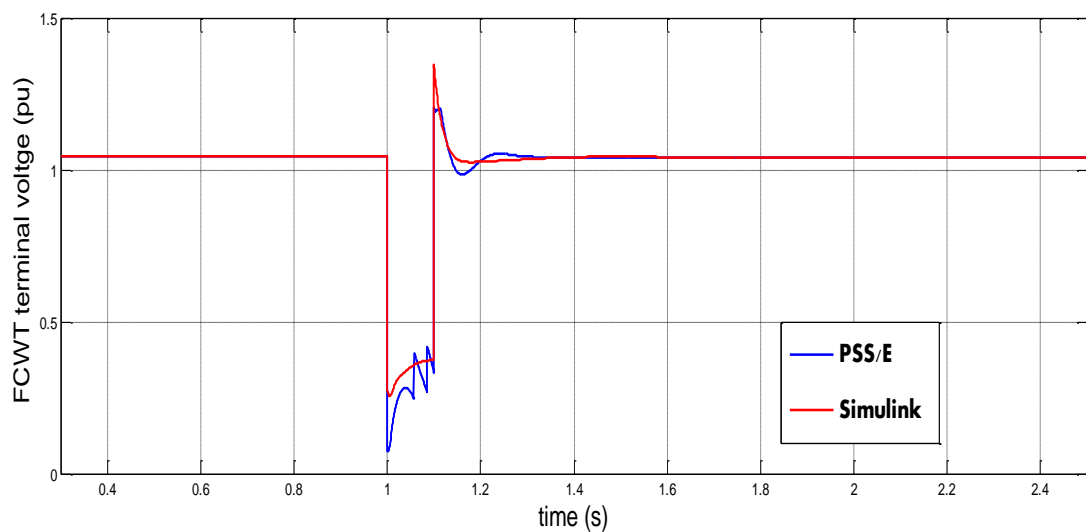
και αέργου ισχύος, καθώς και της τερματικής τάσης της ισοδύναμης ανεμογεννήτριας αντίστοιχα, όπως προέκυψαν από το PSS/E και το μοντέλο FCWT2 του WHSSP (Simulink).



Σχήμα 4.47: Παραγωγή ενεργού ισχύος της ισοδύναμης ανεμογεννήτριας πλήρους μετατροπέα



Σχήμα 4.48: Παραγωγή αέργου ισχύος της ισοδύναμης ανεμογεννήτριας πλήρους μετατροπέα

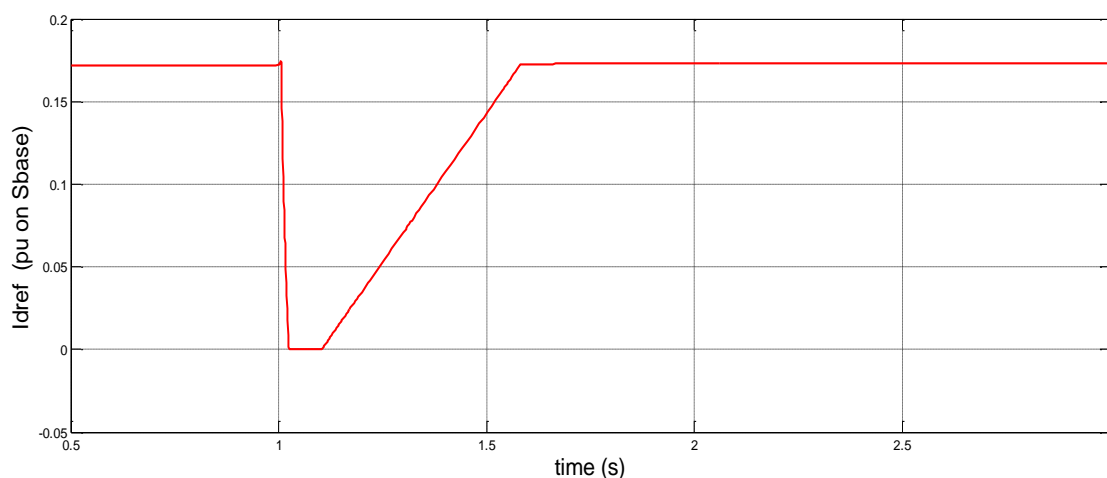


Σχήμα 4.49: Τερματική τάση της ισοδύναμης ανεμογεννήτριας πλήρους μετατροπέα

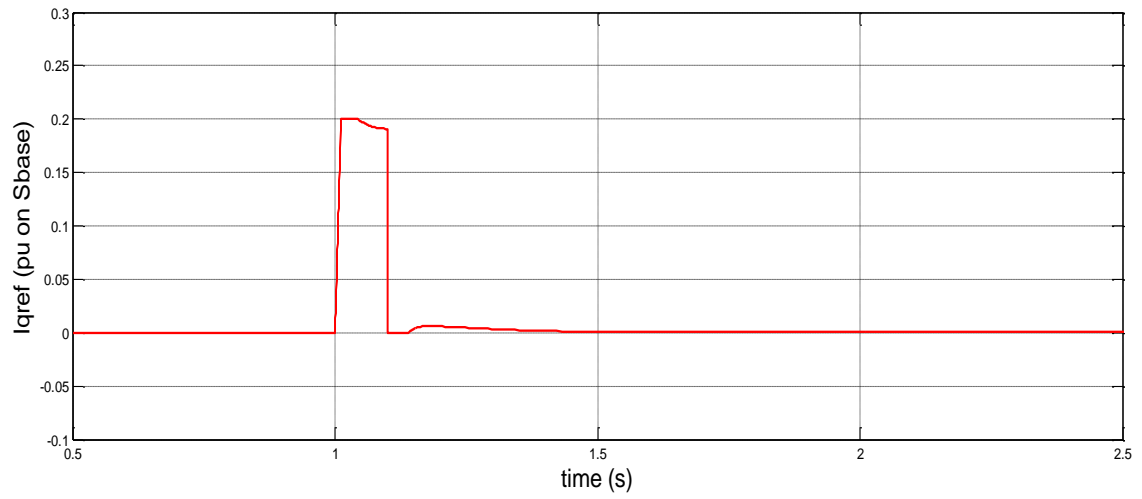
Από τα παραπάνω συγκριτικά διαγράμματα συμπεράνουμε ότι στα δύο προγράμματα προσομοίωσης αποτυπώνεται η ίδια συνολική δυναμική συμπεριφορά ακόμα κι αν υπάρχουν εμφανείς αποκλίσεις. Η απόκριση της ενεργού ισχύος και στα δύο μοντέλα κυριαρχείται από τη λειτουργία περιορισμού του ενεργού ρεύματος σε χαμηλά τάση. Ωστόσο η παραγόμενη ενεργός ισχύς δεν μηδενίζεται εντελώς στο μοντέλο του Simulink. Επίσης παρατηρείται λίγο καθυστερημένη επαναφορά στην αρχική της τιμή μετά την εκκαθάριση του σφάλματος στο μοντέλο του Simulink σε σχέση με το αντίστοιχο του PSS/E. Πιθανή αιτία των αποκλίσεων αυτών είναι η διαφορετική τοποθέτηση των ισοδύναμων χρονικών καθυστερήσεων στις εντολές των εγχεόμενων ρευμάτων (βλ. ενότητα 4.4.1). Οι αποκλίσεις στην άεργο ισχύ και την τερματική τάση οφείλονται στον διαφορετικό τρόπο επίλυσης των αλγεβρικών εξισώσεων. Κάτι τέτοιο γίνεται αντιληπτό από τις απότομες μεταβολές που φαίνονται στην απόκριση της τάσης στο PSS/E κι ως φυσικό επακόλουθο στην άεργο ισχύ (λόγω του ελέγχου τερματικής τάσης), κατά τη διάρκεια του σφάλματος (1-1.1 sec). Πρόκειται μάλλον για αριθμητική ταλάντωση που υποδηλώνει πρόβλημα σύγκλισης κατά την επίλυση των αλγεβρικών περιορισμών του δικτύου στο PSS/E.

Παρατηρούμε ακόμα μεγαλύτερη υπερακόντιση στις αποκρίσεις της άεργου ισχύος και της τερματικής τάσης στο μοντέλο του Simulink. Το γεγονός αυτό μπορεί να οφείλεται στα ‘μαύρα κουτιά’ που υπάρχουν στη μοντελοποίηση του μέρους Γεννήτρια/Μετατροπέας στο PSS/E. Στη συγκεκριμένη περίπτωση φαίνεται πως ενεργοποιείται ο έλεγχος που επιβάλλει το μπλοκ High Voltage Reactive Current Management (βλ. Σχ. 4.16), ώστε να αποφευχθεί η εμφάνιση υπέρτασης κατά τη στιγμή της εκκαθάρισης.

Προς καλύτερη αποσαφήνιση του μοντέλου FCWT2 που αναπτύχθηκε σε αυτή την εργασία παρατίθενται τα διαγράμματα των αποκρίσεων των εντολών I_{dref} και I_{qref} (Σχ. 4.50 και 4.51) όπως αυτές διαμορφώνονται πριν τη μετατροπή στο πλαίσιο αναφοράς του δικτύου. Στο πρώτο διάγραμμα φαίνεται ξεκάθαρα η επίδραση του περιορισμού (LVPL) στο ενεργό ρεύμα λόγω βύθισης της τάσης. Η μη ακαριαία πτώση του I_{dref} τη στιγμή εμφάνισης της διαταραχής οφείλεται στη χρονική καθυστέρηση μέτρησης της τερματικής τάσης για την εφαρμογή του εν λόγω περιορισμού. Όσον αφορά την αποκατάσταση στην προς σφάλματος τιμή, κυριαρχεί η επιβολή του περιοριστή ρυθμού αύξησης R_{lp_LVPL} . Στο διάγραμμα του I_{qref} αποτυπώνεται η επίδραση του ελέγχου τερματικής τάσης στην αύξηση της άεργης συνιστώσας. Επίσης φαίνεται η επιβολή ενός άνω ορίου στην άεργο έγχυση που οφείλεται στον περιοριστή ρεύματος μετατροπέα (Converter Current Limiter στο Σχ. 4.30). Το όριο αυτό καθορίζεται από το μέγιστο επιτρεπόμενο άεργο ρεύμα I_{qhl} από τη στιγμή που το ενεργό ρεύμα I_{dref} παραμένει μηδενικό έως ότου να γίνει η εκκαθάριση του σφάλματος.



Σχήμα 4.50: Εντολή ενεργής συνιστώσας εγχεόμενου ρεύματος I_{dref}



Σχήμα 4.51: Εντολή άεργης συνιστώσας εγχεόμενου ρεύματος I_{qref}

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Προσομοίωση του αυτόνομου συστήματος της Ρόδου στο περιβάλλον του WHSSP

5.1 Γενικά

Στην ενότητα αυτή θα ασχοληθούμε με ένα αυτόνομο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας, δηλαδή με ένα σύστημα το οποίο δεν είναι συνδεδεμένο με άλλο δίκτυο. Οι λόγοι ύπαρξης τέτοιου είδους συστημάτων είναι συνήθως οικονομικοί καθώς η γεωγραφική θέση μιας περιοχής μπορεί να καθιστά οικονομικά ασύμφορη την σύνδεση της στο κεντρικό δίκτυο. Αποτελούν ιδιαίτερα συνηθισμένη πρακτική στον ελλαδικό χώρο, όπου η σύνδεση των νησιών με το δίκτυο της ηπειρωτικής Ελλάδας θα ήταν ιδιαίτερα δαπανηρή. Τέτοια περίπτωση αποτελεί και το αυτόνομο σύστημα της Ρόδου.

Χαρακτηριστικό των αυτόνομων συστημάτων είναι ότι δεν μπορούν να βασιστούν σε ένα μεγαλύτερο σύστημα ούτως ώστε να βοηθηθούν στον έλεγχο της συχνότητας. Ειδικά σε περιπτώσεις αυξημένης αιολικής διείσδυσης, όπως αυτή που θα μελετηθεί παρακάτω, οι ξαφνικές αλλαγές στην ταχύτητα του ανέμου ή τυχόν σφάλματα στο δίκτυο και τις μονάδες παραγωγής μπορούν να δημιουργήσουν προβλήματα στο αυτόνομο σύστημα. Η σοβαρότητά τους εξαρτάται από το πόσο γρήγορα οι εναπομένουσες ενταγμένες μονάδες παραγωγής θα καταφέρουν να αντισταθμίσουν τη διαφορά σε παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια μετά τη διαταραχή. Στη συνέχεια θα επικεντρωθούμε στην περίπτωση όπου έχουμε απώλεια μονάδας παραγωγής και θα μελετήσουμε την συμπεριφορά του συστήματος ως προς τη ρύθμιση της συχνότητας. Κύριος άξονας της μελέτης είναι η δυνατότητα αποφυγής αποκοπής φορτίου λόγω δράσης των ηλεκτρονόμων υποσυχνότητας. Για το λόγο αυτό μελετάται η μεταβατική συμπεριφορά της συχνότητας του συστήματος μετά από την εξεταζόμενη διαταραχή.

Στο αυτόνομο σύστημα της Ρόδου συναντώνται και οι τρεις τύποι ανεμογεννητριών (Τύποι Α, Γ και Δ), οι οποίοι περιγράφηκαν αναλυτικά προηγούμενο κεφάλαιο και εντάχθηκαν στην βιβλιοθήκη μοντέλων. Επομένως αποτελεί πρόσφορο πεδίο για πρακτική εφαρμογή του προγράμματος προσομοίωσης WHSSP και δίνει τη δυνατότητα για μελέτη της συμπεριφοράς των μοντέλων αυτών σε ένα πραγματικό αυτόνομο ΣΗΕ. Επίσης μεγάλης σημασίας είναι η αυξημένη αιολική διείσδυση, πράγμα που συνεπάγεται δυσκολίες στον τομέα ρύθμισης της συχνότητας. Για το λόγο αυτό γίνεται επιτακτικότερη η λήψη κατάλληλων μέτρων που θα εξασφαλίσουν την ομαλή συμπεριφορά του συστήματος. Έτσι αφενός προκύπτει η απαίτηση για αδιάλειπτη λειτουργία των αιολικών πάρκων σε βυθίσεις τάσης (LVRT), αφετέρου μελετώνται επιπλέον λύσεις (όπως ο σχεδιασμός αδρανειακού ελεγκτή στις ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών) προς βελτίωση της απόκρισης συχνότητας σε ενδεχόμενες διαταραχές.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η απόκριση του συστήματος σε συνθήκες αυξημένης αιολικής παραγωγής, όταν δηλαδή αυτή εξυπηρετεί σημαντικό τμήμα του καταναλισκόμενου φορτίου. Γι' αυτό το λόγο, τα δύο επιλεγόμενα σενάρια για τη λειτουργία του ΣΗΕ της Ρόδου που θα εξετάσουμε παρακάτω αφορούν τέτοιες περιπτώσεις. Συγκεκριμένα το πρώτο σενάριο που θα εξεταστεί αφορά την περίπτωση μέγιστης αιολικής παραγωγής, ενώ το δεύτερο αφορά τη μέγιστη αιολική διείσδυση ως ποσοστό του φορτίου του νησιού.

5.2 Περιγραφή αυτόνομου συστήματος της Ρόδου και σεναρίων λειτουργίας

Τα βασικά χαρακτηριστικά του συστήματος της Ρόδου καθώς και η γενική περιγραφή των σεναρίων λειτουργίας που θα εξεταστούν φαίνονται στον Πίνακα 5.1.

Πίνακας 5.1: Βασικά χαρακτηριστικά και σεσάρια 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	A (Μέγιστη παραγωγή αιολικών)	B (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%

Τα απαραίτητα δεδομένα για τη προσομοίωση του αυτόνομου συστήματος παραγωγής και μεταφοράς της Ρόδου συλλέχθηκαν από τη ΔΕΗ Α.Ε. στα πλαίσια της μελέτης που έγινε στο [16]. Πιο συγκεκριμένα, για τα στοιχεία που αφορούν τη μελλοντική ανάπτυξη του συστήματος, χρησιμοποιήθηκε η Μελέτη Ανάπτυξης Συστήματος Μεταφοράς Νήσων (ΜΑΣΜ-Ν) 2008-2012 για το συγκεκριμένο νησί. Οι μονάδες ΑΠΕ που εμφανίζονται στα εξεταζόμενα σεσάρια περιλαμβάνουν τόσο τις ήδη υπάρχουσες, όσο και αυτές που έχουν λάβει όρους σύνδεσης από την ΔΕΗ Α.Ε. Αναλυτική παρουσίαση των δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν στην προσομοίωση για την παράσταση των διαφόρων συνιστωσών του δικτύου αλλά και των εξεταζόμενων σεναρίων λειτουργίας γίνεται στους πίνακες που ακολουθούν (Πίνακες 5.2 έως 5.17).

Για την παράσταση των συστημάτων διέγερσης και ρύθμισης της τάσης των σύγχρονων γεννητριών του συστήματος χρησιμοποιήθηκε το απλοποιημένο μοντέλο αυτόματου ρυθμιστή τάσης SEXS, όπως αυτό προτείνεται στη βιβλιοθήκη του PSS/E [17]. Πρόκειται για το εναλλακτικό μπλοκ APT τύπου AC4A κατά IEEE (χωρίς ενσωματωμένο σύστημα προστασίας υπερδιεγέρσεως) το οποίο συμπεριλήφθηκε στη βιβλιοθήκη του WHSSP και περιγράφηκε στην ενότητα 3.2.3. Επιλέχθηκε για λόγους απλότητας ένα συμβατικό μοντέλο που με κατάλληλα δεδομένα δίνει τυπικά χαρακτηριστικά συντηρητικής απόκρισης και το ΣΠΥ δεν ενεργοποιείται. Συγκεκριμένα τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν παρατίθενται στον Πίνακα 5.9.

Για την παράσταση των ρυθμιστών στροφών χρησιμοποιήθηκαν τα αντίστοιχα μοντέλα που εντάχθηκαν στη βιβλιοθήκη του WHSSP για το κάθε είδος συμβατικής μονάδας παραγωγής. Στο ηλεκτρικό σύστημα της Ρόδου συναντάμε τρεις τύπους μονάδων παραγωγής. Συγκεκριμένα αυτοί είναι μονάδα με ατμοστρόβιλο, μονάδα με αεριοστρόβιλο και μονάδα με Ντιζελογεννήτρια. Έτσι

κάθε σύγχρονη γεννήτρια συνοδεύεται και από το αντίστοιχο μπλοκ ρυθμιστή στροφών, όπως αυτά περιγράφηκαν στην ενότητα 3.2.4. Τα δεδομένα για τον κάθε ρυθμιστή στροφών δίνονται στους Πίνακες 5.9 έως 5.11.

Όπως αναφέρθηκε και στην προηγούμενη παράγραφο, στο ηλεκτρικό σύστημα της Ρόδου συνυπάρχουν όλοι οι τύποι ανεμογεννητριών εκτός από τον τύπο Β. Τα μοντέλα ανεμογεννητριών αυτά παρίστανται μέσω των μοντέλων που παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 4. Πιο συγκεκριμένα για τις Α/Γ τύπου Α έγινε χρήση του μοντέλου της παραγράφου 4.2 (IMWG), για τις Α/Γ τύπου Γ του μοντέλου της παραγράφου 4.3.2 (DFAG2) και για τις Α/Γ τύπου Δ του μοντέλου της παραγράφου 4.4.1 (FCWT1). Να σημειωθεί πως και 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 (ίδιας 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 πάρκου.

Στην αρχική μοντελοποίηση του συστήματος της Ρόδου μέσω ισοδύναμων ζυγών στα πλαίσια της [16], τα αιολικά πάρκα θεωρούνταν απευθείας συνδεδεμένα σε ζυγούς μέσης τάσης, όπου παράλληλα βρίσκεται και σημαντικό ποσοστό του φορτίου του νησιού. Επίσης τα τέσσερα αιολικά πάρκα που αποτελούνται από ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών (1,2,3,5) παρουσιάζονταν συνδεδεμένα ανά δύο σε κοινό ζυγό (1 με 3 και 2 με 5). Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας προτιμήθηκε ως ρεαλιστικότερη παράσταση η μοντελοποίηση ξεχωριστού μετασχηματιστή ανύψωσης για κάθε ένα από αυτά. Στον Πίνακα 5.5 δίνονται αναλυτικότερα στοιχεία για τον τρόπο σύνδεσης του καθενός. Έτσι θεωρήσαμε ότι τα τέσσερα αυτά Α/Π συνδέονται μέσω ισοδύναμου μετασχηματιστή με επαγωγική αντίδραση 0,04 αμ στη βάση ισχύος του πάρκου. Παράλληλα θεωρήθηκε μηδενική ωμική αντίσταση με την παραδοχή ότι οι ωμικές απώλειες έχουν συμπεριληφθεί στις τιμές παραγόμενης ενεργού ισχύος. Ακόμα θα πρέπει να επισημανθεί ότι για τις ασύγχρονες γεννήτριες διπλής τροφοδότησης οι παράμετροι αντιστοιχούν στο ισοδύναμο μοντέλο 1,5 MW/1,667 MVA της GE. Επομένως έχουν γίνει οι ανάλογες προσαρμογές όσον αφορά τα μεγέθη φαινόμενης ισχύος με βάση την ονομαστική ενεργό ισχύ του κάθε πάρκου (Πίνακες 5.4, 5.13, 5.15). Επίσης για την παράσταση του μηχανικού μέρους των ΑΓΔΤ έγινε χρήση του μοντέλου δύο μαζών. Οι τιμές που χρησιμοποιήθηκαν στον πίνακα παραμέτρων των μοντέλων στο περιβάλλον του Simulink (βλ. Κεφ. 4) για την παράσταση του κάθε αιολικού πάρκου δίνονται αναλυτικά στους Πίνακες 5.12 έως 5.16.

Επικεντρωνόμαστε κυρίως στη συμβολή των αιολικών πάρκων στα θέματα ρύθμισης συχνότητας. Έτσι επιλέχθηκε λειτουργία σταθερού συντελεστή ισχύος (επιλογή PF) όσον αφορά την διαμόρφωση της εντολής έγχυσης αέργου ισχύος στα τέσσερα πάρκα που αποτελούνται από ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών. Παράλληλα όμως εξετάζουμε την επίδραση του ελέγχου τερματικής τάσης (TVC) όταν η λειτουργία αυτή ενεργοποιείται στις ΑΓΔΤ καθώς για τις ανεμογεννήτριες πλήρους μετατροπέα επιλέχθηκε το μοντέλο FCWT1 που δεν υποστηρίζει τη δυνατότητα αυτή. Ωστόσο, όπως θα φανεί παρακάτω, τα συμπεράσματα που προκύπτουν για τη χρήση του ελέγχου αυτού μπορούν να γενικευθούν και για την περίπτωση των ανεμογεννητριών πλήρους μετατροπέα. 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). Εξάιρεση 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, ΙΑΑ 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 που 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 ρύθμισης του για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα από την αντίστοιχη καθυστέρηση. 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 (Πίνακας 5.6) γίνεται μέσω της μετατροπής τους σε σταθερές αγωγιμότητες, ανεξάρτητες από την συχνότητα του δικτύου, σύμφωνα με τις παρακάτω εξισώσεις:

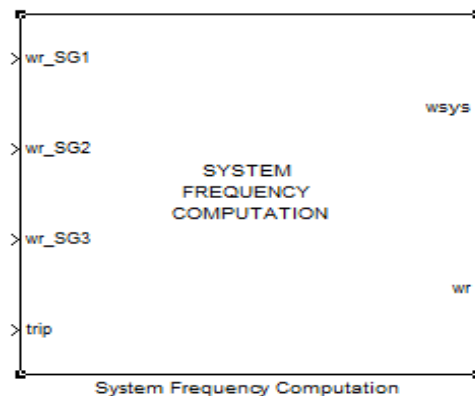
$$G = \frac{P_0}{V_0^2}, \quad B = -\frac{Q_0}{V_0^2} \quad (5.1)$$

όπου P_0 , Q_0 , η ενεργός και άεργος ισχύς του φορτίου στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας,

V_0 η τάση στη μόνιμη κατάσταση λειτουργία προ της διαταραχής (θεωρούμε 1 αμ).

Σημειώνεται ακόμη πως λόγω έλλειψης λεπτομερών στοιχείων αλλά και για λόγους απλότητας θεωρούμαι ότι όλοι οι μετασχηματιστές του δικτύου είναι σταθερής λήψης, αγνοούμε δηλαδή τη δράση των ΣΑΤΥΦ. Όσον αφορά τις αρχικές συνθήκες λειτουργίας των αιολικών πάρκων, αυτές συμπληρώθηκαν από τα στοιχεία που προέκυψαν από τη ρουτίνα αρχικοποίησης του WHSSP μέσω της επίλυσης της αρχικής ροής φορτίου. Αναλυτικά τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την επίλυση της αρχικής ροής φορτίου για το κάθε σενάριο δίνονται στο Παράρτημα Δ, όπου φαίνεται και η άεργος παραγωγή των σύγχρονων γεννητριών.

Ολοκληρώνοντας την περιγραφή του συστήματος της Ρόδου, των εξεταζόμενων σεναρίων και των λεπτομερειών της προσομοίωσης αξίζει να αναφερθούμε και στον τρόπο υπολογισμού της γωνιακής ταχύτητας του σύγχρονου πλαισίου αναφοράς του συστήματος (w_{sys}). Η γωνιακή συχνότητα στην περίπτωση αυτόνομων δικτύων λαμβάνεται ως ο σταθμισμένος μέσος όρος των συχνοτήτων που προκύπτουν από τις σύγχρονες γεννήτριες με βάση τη σχέση (2.1). Ως κρίσιμη διαταραχή επιλέχθηκε η απώλεια της αεριοστροβλικής μονάδας Gas 4, συνολικής μέγιστης αποδιδόμενης ισχύος παραγωγής 27,5 MW, που αποτελεί και τη μεγαλύτερη συμβατική μονάδα στο νησί. Αυτό συνεπάγεται και την αντίστοιχη προσαρμογή της παραπάνω σχέσης υπολογισμού. Σχηματικά, παρατίθεται το μπλοκ υλοποίησης του υπολογισμού της σταθμισμένης συχνότητας στο Σχ. 5.1. Σύμφωνα με αυτό η σταθμισμένη συχνότητα προκύπτει με βάση τις γωνιακές ταχύτητες των σύγχρονων γεννητριών (wr_SG1 , wr_SG2 , wr_SG3). Κατά τη στιγμή της αποσύνδεσης του αεριοστρόβιλου, 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 αεριοστροβλικής μονάδας, προσαρμόζοντας κατάλληλα το διάνυσμα της $di2dn$, με το οποίο τροφοδοτείται η ρουτίνα επίλυσης των αλγεβρικών εξισώσεων του δικτύου (βλέπε 2.3.2).



Σχήμα 5.1: Μπλοκ υπολογισμού σταθμισμένης συχνότητας του συστήματος

Πίνακας 5.2: 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/Π1)	18
ΙΑΛ ΥΤ	5	ΙΑΛ ΜΤ	12	ΓΕΝ (Α/Π5)	19
ΡΔΙ ΥΤ	6	ΡΔΙ ΜΤ	13	ΑΦ (Α/Π3)	20
ΑΦ ΥΤ	7	ΑΦ ΜΤ	14	ΓΕΝ (Α/Π2)	21

Πίνακας 5.3: Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά Μετασχηματιστών Ανυψώσεως

Μ/Σ σε βάση ισχύος 100 MVA					
Ζυγός ΥΤ	Ζυγός ΜΤ	R (αμ)	X (αμ)	Λόγος μετασχηματισμού	
				Σενάριο Α	Σενάριο Β
ΣΟΡ ΥΤ	ΣΟΡ ΜΤ	0,01008	0.39983	1,0000	1,0000
ΡΔΙ ΥΤ	ΡΔΙ ΜΤ	0,0029	0,21486	0,9875	1,0125
ΙΑΛ ΥΤ	ΙΑΛ ΜΤ	0,0029	0,21486	0,9875	1,0125
ΓΕΝ ΥΤ	ΓΕΝ ΜΤ	0,01008	0.39983	1,0250	1,0250
ΑΦ ΥΤ	ΑΦ ΜΤ	0,0029	0,21486	1,0000	1,0000
ΡΟΔ ΥΤ	ΡΟΔ ΜΤ	0,0029	0,21486	0,9875	1,0125
ΣΟΡ ΥΤ	ΣΟΡ (GAS)	0,01266	0.39983	1,0625	1,0625
ΣΟΡ ΥΤ	ΣΟΡ (STEAM)	0,01250	0,21486	1,0670	1,0670
ΝΡΟΔ ΥΤ	ΝΡΟΔ (DIESEL)	0,00250	0,21486	1,0500	1,0500

Πίνακας 5.4: Δεδομένα Αιολικών Πάρκων Ρόδου

Κωδικός Αιολικού Πάρκου	Ονομασία 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 5.5: Δεδομένα μετασχηματιστών σύνδεσης Αιολικών Πάρκων στο δίκτυο ΜΤ

Μ/Σ σύνδεσης Α/Π σε βάση ισχύος 100 ΜVA			
Κωδικός Αιολικού Πάρκου	Υποσταθμός σύνδεσης	X (αμ)	R (αμ)
1	ΑΦ ΜΤ	0,3257	* Θεωρούμε ότι οι ωμικές απώλειες έχουν συμπεριληφθεί στις τιμές παραγόμενης ενεργού ισχύος
2	ΓΕΝ ΜΤ	0,2222	
3	ΑΦ ΜΤ	1,2100	
5	ΓΕΝ ΜΤ	0,6050	
4	**Θεωρούμε απευθείας σύνδεση του Α/Π 4 στο ζυγό ΣΟΡ ΜΤ		

Πίνακας 5.6: Πρόβλεψη Ζήτησης Φορτίων Ηλεκτρικού Συστήματος Ρόδου

Ζήτηση		Σενάριο Α 2012 (Μέγιστη παραγωγή αιολικών)		Σενάριο Β 2012 (Μέγιστη διείσδυση αιολικών)	
Υποσταθμός σύνδεσης	Κωδικός αριθμός ζυγού	P (MW)	Q (MVar)	P (MW)	Q (MVar)
ΣΟΡ ΜΤ	11	12,89	2,13	6,34	3,51
ΙΑΛ ΜΤ	12	33,81	11,21	16,64	9,21
ΡΔΙ ΜΤ	13	44,59	13,37	21,95	12,15
ΑΦ ΜΤ	14	44,74	11,45	22,02	12,19
ΓΕΝ ΜΤ	15	9,12	5,05	4,49	2,48
ΡΟΔ ΜΤ	16	23,60	13,06	11,62	6,43
Σύνολο		168,75	56,27	83,06	45,97

Πίνακας 5.7: 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

Πίνακας 5.8: Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά Γεννητριών και APT Συστήματος Ρόδου

<i>Μονάδα Παραγωγής</i>	<i>Steam 1,2</i>	<i>Gas 4</i>	<i>Diesel 1-8 (N.Ρόδος)</i>
S_N (MVA)	20	47,5	19,5
$\cos\phi$	0,8	0,8	0,8
V_N (kV)	6,3	11,5	11
<i>Εγκατεστημένη Ισχύς (MW)</i>	15	28	15,6
<i>Αποδιδόμενη Καθαρή Ισχύς (MW)</i>	14,2	27,5	15
X_{ls}	0,1064	0,12	0,175
X_d	2,351	1,88	2,07
X_q	2,25	1	1,04
$X_{d'}$	0,215	0,3	0,35
$X_{q'}$	0,45	0,34	0,236
T_d	8,99	9,6	5,8
T_q	0,5	0,4	0,128
H	3,82	1,5	1,33
R	0,05	0,04	0,04
<i>Μοντέλο APT</i>	<i>PSS/E SEXS</i>	<i>PSS/E SEXS</i>	<i>PSS/E SEXS</i>
KA	55	50	100
TA	1,5	1,5	1,5
TB	15	15	10
TB	15	15	10
TE	0,35	0,3	0,04
$V_{min} - V_{max}$	0-5,05	0-5,05	0-6,9

Πίνακας 5.9: Δεδομένα Ρυθμιστή Στροφών αεριοστροβίλων

Συμβολισμός	Παράμετρος	Τιμή
T_{i0}	Θερμοκρασία εισόδου του συμπιεστή (ονομαστική) ($^{\circ}\text{C}$)	30
T_{d0}	Θερμοκρασία εξόδου του συμπιεστή (ονομαστική) ($^{\circ}\text{C}$)	390
T_{f0}	Θερμοκρασία εισόδου στροβίλου (ονομαστική) ($^{\circ}\text{C}$)	1085
T_{e0}	Θερμοκρασία καυσαερίων στην έξοδο του στροβίλου (ονομαστική) ($^{\circ}\text{C}$)	532
P_{r0}	Ονομαστικός ρυθμός συμπίεσης	11,5
Γ	Λόγος ειδικών θερμοτήτων (C_p/C_v)	1,4
n_c	Απόδοση συμπιεστή	0,85
n_t	Εσωτερική απόδοση στροβίλου	0,85
K_0	Ποσοστό ισχύος αεριοστροβίλου ($1/^{\circ}\text{K}$)	0,004628
T_g	Χρονική σταθερά ρυθμιστή στροφών (s)	0,05
K_4	Κέρδος ασπίδας θερμότητας (ακαριαία)	0,8
K_5	Κέρδος ασπίδας θερμότητας	0,2
T_3	Χρονική σταθερά ασπίδας θερμότητας (s)	15
T_4	Χρονική σταθερά αισθητήρα θερμοκρασίας (s)	2,5
T_5	Χρονική σταθερά του τμήματος του ελέγχου θερμοκρασίας που παρεμβαίνει στη ροή του καυσίμου (s)	3,3
T_t	Ρυθμός ολοκλήρωσης του τμήματος ελέγχου θερμοκρασίας που παρεμβαίνει στη ροή καυσίμου (s)	0,4699
$T_{c\ max}$	Μέγιστη τιμή της εξόδου T_c του τμήματος ελέγχου θερμοκρασίας	1,1
$T_{c\ min}$	Ελάχιστη τιμή της εξόδου T_c του τμήματος ελέγχου θερμοκρασίας	0
$F_{d\ max}$	Άνω όριο εισόδου στον έλεγχο καυσίμου	1,5
$F_{d\ min}$	Κάτω όριο εισόδου στον έλεγχο καυσίμου	-0,1
K_3	Εύρος ανοίγματος βαλβίδας καυσίμου	0,77
K_6	Ελάχιστο άνοιγμα βαλβίδας καυσίμου	0,23
T_v	Χρονική σταθερά ρυθμιστή θέσης της βαλβίδας καυσίμου (s)	0,05
T_f	Χρονική σταθερά συστήματος καυσίμου (s)	0,4
T_w	Σταθερά χρόνου του τμήματος ελέγχου αέρα (s)	0,4699
T_{cd}	Χρονική σταθερά αεριοστροβίλου (s)	0,2

Πίνακας 5.10: Δεδομένα Ρυθμιστών Στροφών ατμοστρόβιλων

Συμβολισμός	Παράμετρος	Τιμή
T_{sm}	Χρονική σταθερά σερβομηχανισμού	0,1
z_{max}	Μέγιστος ρυθμός ανοίγματος βαλβίδας καυσίμου (pu/s)	0,03
z_{min}	Μέγιστος ρυθμός κλεισίματος βαλβίδας καυσίμου (pu/s)	-0,03
F_{hp}	Ποσοστό που εκτονώνεται στο στρόβιλο υψηλής πίεσης	0,4
F_{mp}	Ποσοστό που εκτονώνεται στο στρόβιλο μέσης πίεσης	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 5.11: Δεδομένα Ρυθμιστών Στροφών νηζελογεννητριών

Συμβολισμός	Παράμετρος	Τιμή
T_d	Χρονική σταθερά ρυθμιστή (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

Πίνακας 5.12: Τιμές Παραμέτρων Α/Π 4 στο Simulink

Παράμετροι Α/Π 4 (Τύπος Α)	
S_{base} (MVA)	100
f_{base} (Hz)	50
$bus\ code$	11
S_{nom} (MVA)	11,7
f_{nom} (Hz)	50
R_s (Stator resistance p.u.)	0,01
X_{ls} (Stator leakage reactance p.u.)	0,1
X_m (magnetizing reactance p.u.)	3
R_r (Rotor resistance p.u.)	0,1
X_{lr} (Rotor leakage reactance p.u.)	0,08
H (Inertia constant sec)	3
Wind turbine parameters: [nturb radius ratio vnom pnom poles]	[13 52,2/2 67,5 15 0,9*10 ⁶ 4]
Shaft parameters: [Hr Hl Ksh Dsh]	[3*1/6 3*5/6 0,3 0]

Πίνακας 5.13: Τιμές Παραμέτρων Α/Π 1 στο Simulink

Παράμετροι Α/Π 1 (Τύπος Γ)	
<i>Sbase (MVA)</i>	100
<i>fbase (Hz)</i>	50
<i>bus code</i>	18
<i>Snom (MVA)</i>	12,28
<i>fnom (Hz)</i>	50
<i>PLL data: [Kpll PLLMX PLLMN]</i>	[30 0,1 -0,1]
<i>[Hr Hl Dtg Ktg] (pu Snom base)</i>	[0,962 3,395 2,344 1,387]
<i>Xeq: equivalent reactance</i>	0,8
<i>WT parameters: [nturb vnom pnom beta_0 poles]</i>	[13 11,4 0,85 0 6]
<i>Pitch parameters: [Kp_p Ki_p Tservo(s) ratelim(degrees/s) betamin betamax]:</i>	[150 25 0,3 10 0 27]
<i>[Qmax Qmin PMX PMN] (generator convention - pu Snom base)</i>	[0,296 -0,436 1,12 0,04]
<i>[Vmax Vmin]</i>	[1,2 0,9]
<i>[XIQmin XIQmax]</i>	[0,5 1,45]
<i>Zcomp: [Rcomp Xcomp] (pu on Snom)</i>	[0 0,04]
<i>[KQi Kvi]</i>	[0,05 40]
<i>[wpmin wp20 wp40 wp60 wp100] (pu)</i>	[0,3 0,69 0,78 0,98 1,2]
<i>LVPL parameters: [T_LVPL VLVPL1 VLVPL2 GLVPL Rip_LVPL]</i>	[0,02 0,5 0,9 1,11 5]

Πίνακας 5.14: Τιμές Παραμέτρων Α/Π 2 στο Simulink

Παράμετροι Α/Π 2 (Τύπος Δ)	
<i>Sbase (MVA)</i>	100
<i>bus code</i>	21
<i>Pnom (MW)</i>	18
<i>WT parameters: [R vnom Nrnom Nr in pnom beta_0 pf H]</i>	[75/2 12 18 9 2 0 1 3.64]
<i>Pitch parameters: [Kp_p Ki_p Ts betadot.max(degrees/s) betamin betamax]:</i>	[200 60 0,25 8 0 30]
<i>Zcomp: [Rcomp Xcomp] (pu on Sbase)</i>	[0 0,2222]
<i>voltage control:[kp_q Ki_q Tt]</i>	[5 0,5 0,06]

Πίνακας 5.15: Τιμές Παραμέτρων Α/Π 5 στο Simulink

Παράμετροι Α/Π 5 (Τύπος Γ)	
<i>Sbase (MVA)</i>	100
<i>fbase (Hz)</i>	50
<i>bus code</i>	19
<i>Snom (MVA)</i>	6,612
<i>fnom (Hz)</i>	50
<i>PLL data: [Kpll PLLMX PLLMN]</i>	[30 0,1 -0,1]
<i>[Hr Hl Dtg Ktg] (pu Snom base)</i>	[0,962 3,395 2,344 1,387]
<i>Xeq: equivalent reactance</i>	0,8
<i>WT parameters: [nturb vnom pnom beta_0 poles]</i>	[7 11,4 0,85 0 6]
<i>Pitch parameters: [Kp_p Ki_p Tservo(s) ratelim(degrees/s) betamin betamax]:</i>	[150 25 0,3 10 0 27]
<i>[Qmax Qmin PMX PMN] (generator convention - pu Snom base)</i>	[0,296 -0,436 1,12 0,04]
<i>[Vmax Vmin]</i>	[1,2 0,9]
<i>[XIQmin XIQmax]</i>	[0,5 1,45]
<i>Zcomp: [Rcomp Xcomp] (pu on Snom)</i>	[0 0,04]
<i>[KQi Kvi]</i>	[0,05 40]
<i>[wpmin wp20 wp40 wp60 wp100] (pu)</i>	[0,3 0,69 0,78 0,98 1,2]
<i>LVPL parameters: [T_LVPL VLVPL1 VLVPL2 GLVPL Rip_LVPL]</i>	[0,02 0,5 0,9 1,11 5]

Πίνακας 5.16: Τιμές Παραμέτρων Α/Π 13 στο Simulink

Παράμετροι Α/Π 3 (Τύπος Δ)	
<i>Sbase (MVA)</i>	100
<i>bus code</i>	20
<i>Pnom (MW)</i>	3,3
<i>WT parameters: [R vnom Nrnom Nrln pnom beta_0 pf H]</i>	[44/2 12 32.5 16 0.66 0 1 2]
<i>Pitch parameters: [Kp_p Ki_p Ts betadot.max(degrees/s) betamin betamax]:</i>	[200 60 0,25 8 0 30]
<i>Zcomp: [Rcomp Xcomp] (pu on Sbase)</i>	[0 1,2100]
<i>voltage control:[kp_q Ki_q Tt]</i>	[5 0,5 0,06]

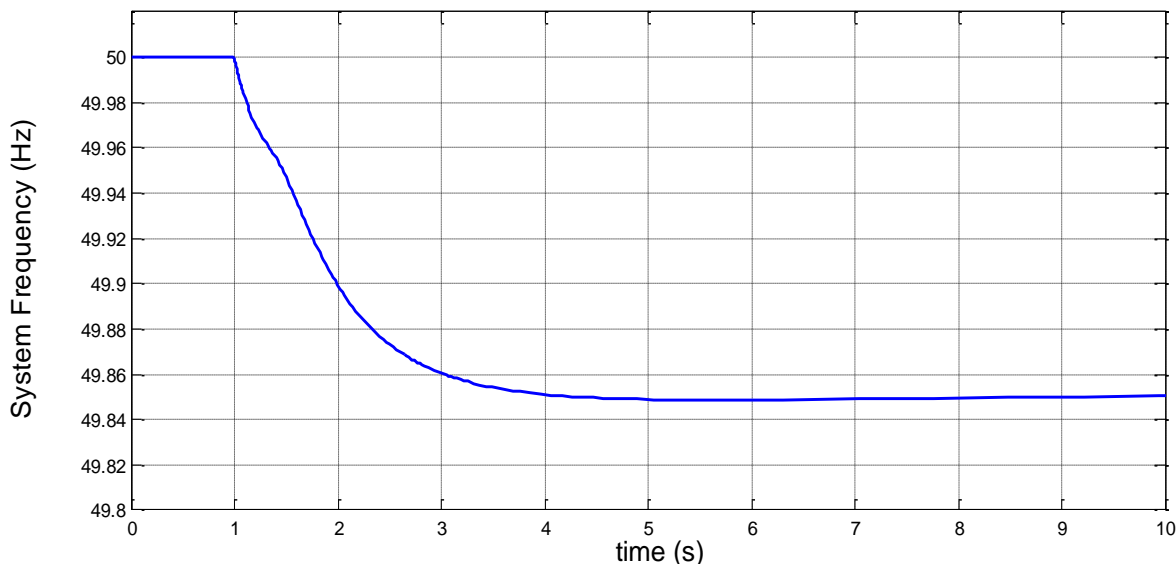
Πίνακας 5.17: Σχήμα Παραγωγής Σεναρίων Ηλεκτρικού Συστήματος Ρόδου

Μονάδα Παραγωγής	Ζυγός σύνδεσης μονάδας παραγωγής	Συνθήκες φορτίου			
		Σενάριο Α (Μέγιστη παραγωγή αιολικών)		Σενάριο Β (Μέγιστη παραγωγή αιολικών)	
		Παραγόμεν η ισχύς (MW)	Παραγόμενη ισχύς (MW)	Παραγόμεν η ισχύς (MW)	Παραγόμεν η ισχύς (MW)
Steam 1	ΣΟΡ (STEAM)	12,50	1,70	14,10	0,10
Steam 2	ΣΟΡ (STEAM)	12,50	1,70	14,10	0,10
Gas 1	ΣΟΡ (GAS)	-	-	-	-
Gas 2	ΣΟΡ (GAS)	-	-	-	-
Gas 3	ΣΟΡ (GAS)	-	-	-	-
Gas 4	ΣΟΡ (GAS)	14,37	13,13	13,19	14,31
Diesel 1	ΝΡΟΔ (DIESEL)	12,86	2,14	7,50	7,50
Diesel 2	ΝΡΟΔ (DIESEL)	12,86	2,14	7,50	7,50
Diesel 3	ΝΡΟΔ (DIESEL)	12,86	2,14	-	-
Diesel 4	ΝΡΟΔ (DIESEL)	12,86	2,14	-	-
Diesel 5	ΝΡΟΔ (DIESEL)	12,86	2,14	-	-
Diesel 6	ΝΡΟΔ (DIESEL)	12,86	2,14	-	-
Diesel 7	ΝΡΟΔ (DIESEL)	12,86	2,14	-	-
Diesel 8	ΝΡΟΔ (DIESEL)	-	-	-	-
Σύνολο παραγωγής συμβατικών μονάδων και στρεφόμενης εφεδρείας		129,39	31,51	56,39	29,51
A/Π	Ζυγός σύνδεσης A/Π	Παραγόμενη ισχύς (MW)		Παραγόμενη ισχύς (MW)	
4	ΣΟΡ ΜΤ	10,61		6,63	
3	ΑΦ (Α/Π3)	2,99		1,87	
1	ΑΦ (Α/Π1)	10,02		6,26	
5	ΓΕΝ (Α/Π5)	5,40		3,37	
2	ΓΕΝ (Α/Π2)	16,19		10,11	
Σύνολο παραγωγής αιολικών πάρκων		45,21		28,24	
ΣΥΝΟΛΑ		174,6		84,63	

5.3 Ανάλυση Σεναρίου Α – Μέγιστη αιολική παραγωγή

5.3.1 Προσομοίωση Συστήματος – Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Όπως προαναφέρθηκε, για τη μελέτη της δυναμικής συμπεριφοράς του συστήματος της Ρόδου θεωρήσαμε ως κρίσιμη διαταραχή την αποσύνδεση της αεριοστροβλικής μονάδας (Gas 4). Η αποσύνδεσή της ισοδυναμεί για τις συνθήκες του σεναρίου Α με απώλεια παραγωγής 14,37 MW και αντιστοιχεί στο 8,5% του συνολικού φορτίου του συστήματος. Σε πρώτη φάση επιλέγουμε τα Α/Π με ΑΓΔΤ (1, 5) να βρίσκονται σε λειτουργία σταθερού συντελεστή ισχύος (επιλογή PF) χωρίς να είναι ενεργοποιημένος ο έλεγχος τερματικής τάσης (όχι TVC). Συγκεκριμένα θεωρούμαι ότι έχουν ρυθμιστεί να λειτουργούν σε μοναδιαίο συντελεστή ισχύος ενώ το ίδιο ισχύει και για τα Α/Π με ανεμογεννήτριες πλήρους μετατροπέα (2, 3). Για τους σκοπούς της προσομοίωσης θεωρήθηκε ότι η διαταραχή εμφανίζεται τη χρονική στιγμή $t=1$ s. Στο Σχ. 5.2 παρουσιάζεται η απόκριση της συχνότητας του συστήματος μετά την παραπάνω διαταραχή.



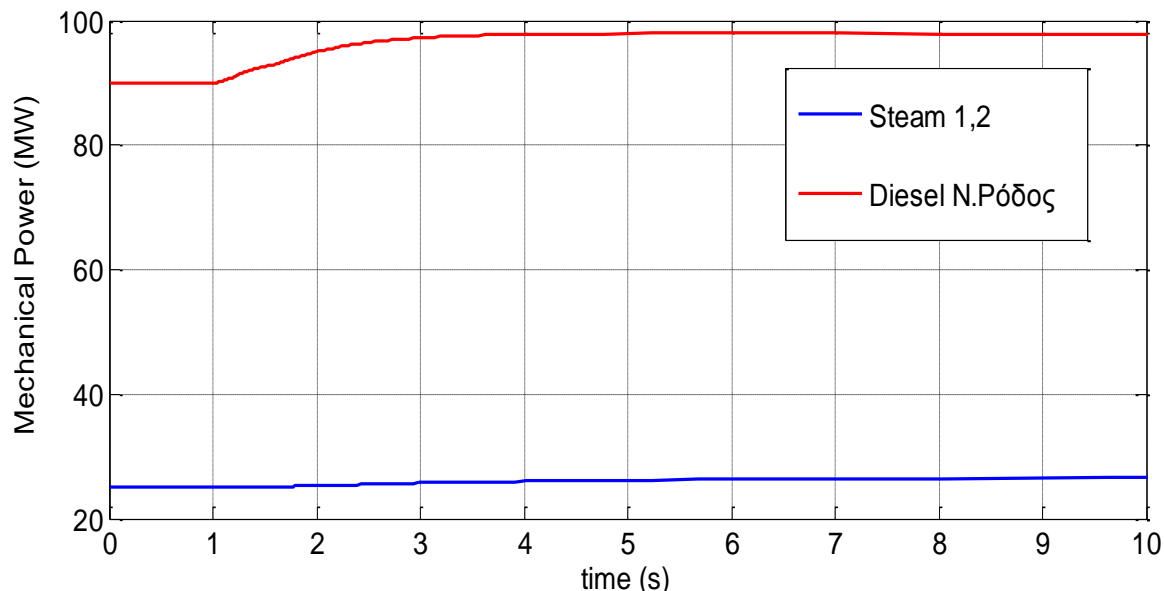
Σχήμα 5.2: Απόκριση Συχνότητας -Σενάριο Α (χωρίς ρύθμιση της τερματικής τάσης των ΑΓΔΤ)

Παρατηρούμε ότι το σύστημα είναι ευσταθές με αρκετά ομαλή απόκριση της συχνότητας. Σχετικά με τις τιμές της συχνότητας έχουμε:

- Μόνιμη κατάσταση $f_{ss}=49,853$ Hz
- Μεταβατική βύθιση $f_{min}=49,849$ Hz

Επομένως η μέγιστη πτώση που παρατηρείται είναι της τάξης των 99,7% και δεν ενεργοποιείται κανένας από τους H/N προστασίας υποσυχνότητας. Μάλιστα η πρωτεύουσα ρύθμιση των στροφών των εναπομενουσών συμβατικών μονάδων επαναφέρει το σύστημα σε μόνιμη κατάσταση μετά τη διαταραχή (μέσα στα πρώτα 5 s περίπου). Παρατηρείται επίσης ένα μόνιμο σφάλμα συχνότητας λίγο μικρότερο των 0,15 Hz που αντιστοιχεί στη ρυθμίζουσα ενέργεια του συστήματος και η διόρθωσή του αποτελεί αντικείμενο της δευτερεύουσας ρύθμισης και δεν εξετάζεται εδώ. Το γεγονός ότι τα φορτία του συστήματος θεωρούνται αγωγιμότητες έχει σαν αποτέλεσμα η πτώση τάσης στους υποσταθμούς να μειώνει αντίστοιχα και την κατανάλωση. Έτσι οι σύγχρονες γεννήτριες που παραμένουν συνδεδεμένες στο σύστημα προλαβαίνουν να καλύψουν την απώλεια παραγωγής χωρίς να επιβραδυνθούν σημαντικά και να έχουμε υπολογίσιμη πτώση της

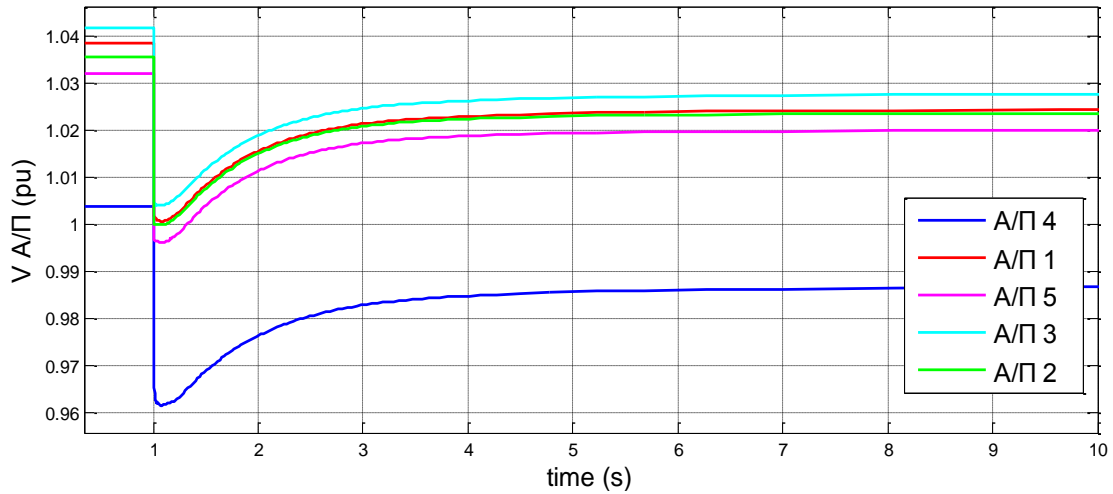
συχνότητας. Στο Σχ. 5.3 παρουσιάζονται οι αποκρίσεις μηχανικής ισχύος των δύο συμβατικών μονάδων (Steam 1,2 και Diesel N.Ρόδου) που παραμένουν εντός δικτύου μετά την διαταραχή. Να σημειωθεί ότι αν και στο πραγματικό σύστημα οι σταθμοί παραγωγής αποτελούνται από συστοιχίες ομοειδών γεννητριών, στα πλαίσια των προσομοιώσεων θεωρούμε μια ενιαία γεννήτρια που αποδίδει τη συνολική τους ισχύ.



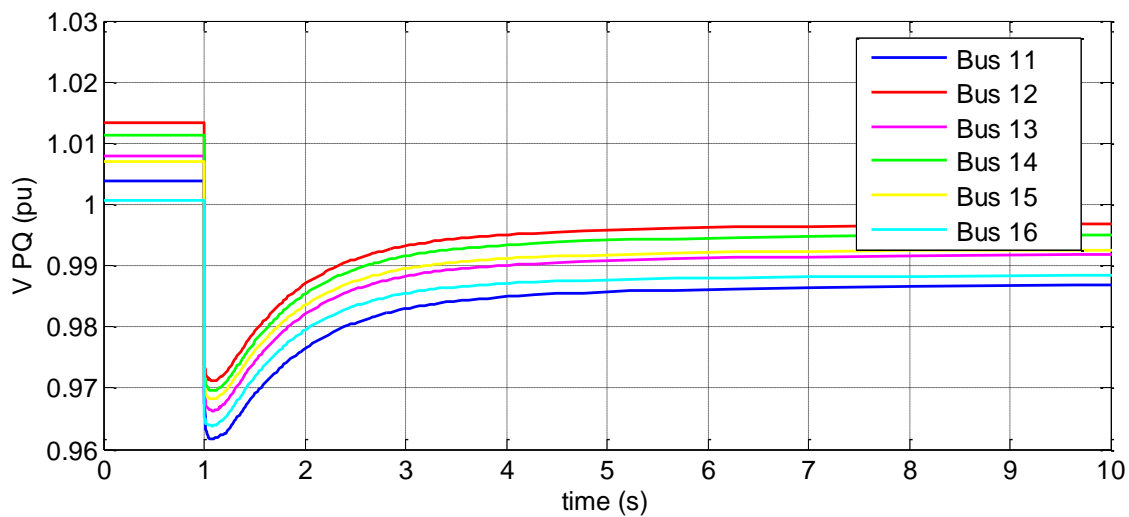
Σχήμα 5.3: Παραγόμενη μηχανική ισχύς συμβατικών μονάδων

Όπως φαίνεται στο παραπάνω διάγραμμα, η μονάδα της N.Ρόδου με την Ντιζελογεννήτρια αναλαμβάνει σχεδόν εξολοκλήρου την απολεσθείσα ισχύ της μονάδας Gas 4. Η κατανομή της παραγωγής οφείλεται στους στατισμούς των μονάδων και την ονομαστική τους ισχύ (Πίνακας 5.8). Επίσης η ατμοηλεκτρική μονάδα δεν έχει πολλά περιθώρια από πλευράς στρεφόμενης εφεδρείας (Πίνακας 5.17). Έτσι η παραγωγή της μονάδας N.Ρόδου διαμορφώνεται σε 97,73 MW από 90 MW που ήταν αρχικά και της ατμοηλεκτρικής σε 26,67 MW από 25 MW που ήταν αρχικά.

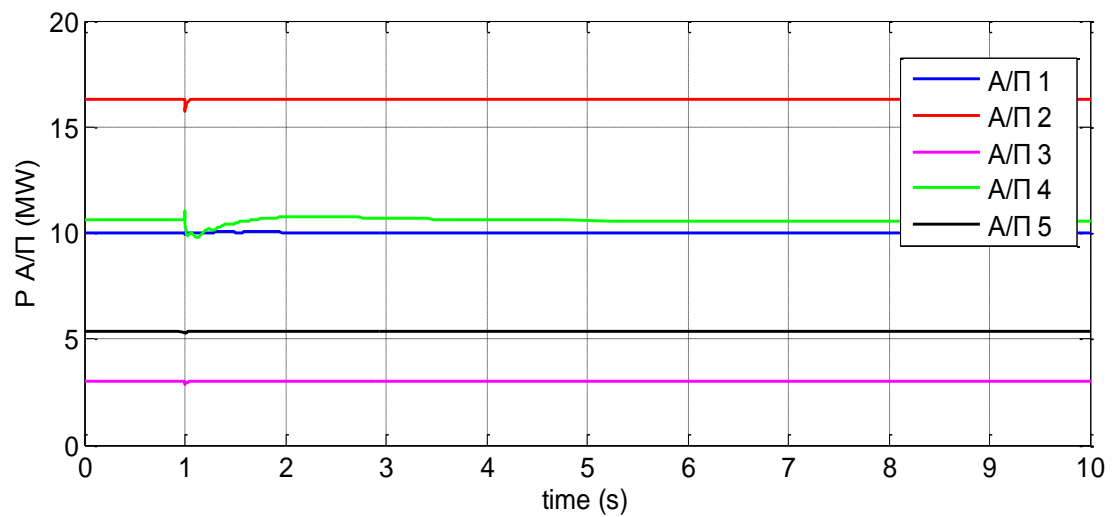
Στα Σχ. 5.4 και 5.5 φαίνονται οι τάσεις των ζυγών που συνδέονται τα Α/Π (ζυγοί 11, 18, 19, 20, 21), καθώς και των ζυγών διανομής (11, 12, 13, 14, 15, 16) όπου θεωρούμε ότι συνδέεται το σύνολο του φορτίου του νησιού (όπως εμφανίζεται στον Πίνακα 5.6) για το Σενάριο Α. Όπως φαίνεται στα δύο αυτά σχήματα, οι τάσεις των ζυγών του συστήματος μειώνονται ελαφρά με μέγιστη εμφανιζόμενη βύθιση περί τα 4%. Λόγω της παράστασης που επιλέχθηκε για τα φορτία, η βύθιση αυτή μειώνει την κατανάλωση συνεισφέροντας έτσι στην γρηγορότερη αποκατάσταση της διαταραχής. Μάλιστα μετά από περίπου 3 με 4 sec το σύστημα επανέρχεται σε ισορροπία με τις τάσεις των ζυγών να εμφανίζουν μια μόνιμη πτώση τάσης της τάξης του 1-1,5% σε σχέση με το αρχικό σημείο λειτουργίας. Είναι ευνόητο ότι η λειτουργία των Α/Π δεν επηρεάζεται σημαντικά κατά τη διάρκεια της διαταραχής. Κάτι τέτοιο αποδεικνύεται και από τις αποκρίσεις της παραγόμενης ενεργού ισχύος των Α/Π που φαίνονται στο Σχ. 5.6. Φυσικά τα Α/Π μεταβλητών στροφών παραμένουν συνδεδεμένα, αφού λειτουργούν σε λογική LVRT. Το ίδιο όμως συμβαίνει και με το Α/Π 4 αφού η τερματική του τάση δεν πέφτει κάτω από το 0,85 αμ που θεωρήσαμε ως όριο αποσύνδεσης.



Σχήμα 5.4: Τερματική τάση A/Π



Σχήμα 5.5: Τερματική τάση ζυγών φορτίου

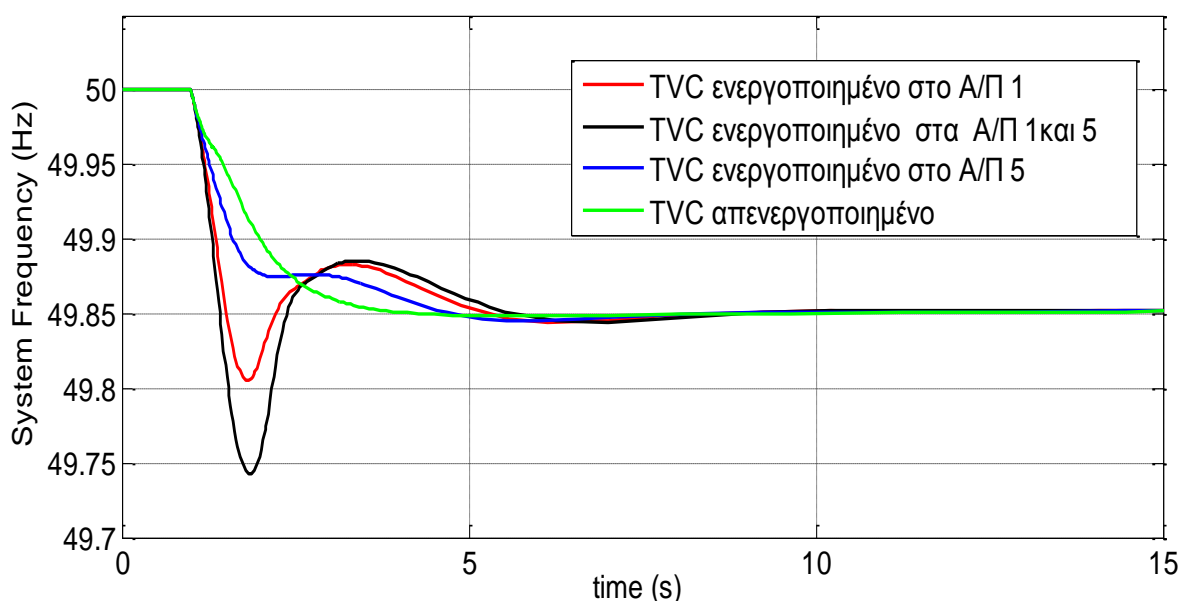


Σχήμα 5.6: Παραγόμενη Ενεργός Ισχύς A/Π

Εξετάζουμε τώρα την επίδραση στη συμπεριφορά του συστήματος όταν τα A/Π που αποτελούνται από ΑΓΔΤ λειτουργούν πάλι σε λογική σταθερού συντελεστή ισχύος για τον έλεγχο της άεργης έγχυσης, αλλά με ενεργοποιημένο ταυτόχρονα τον έλεγχο της τερματικής τάσης (TVC).

Στο συγκριτικό Σχ 5.7 φαίνεται η απόκριση της συχνότητας του συστήματος για τις εξής περιπτώσεις:

- Ενεργοποιημένος ο έλεγχος τερματικής τάσης στα Α/Π 1 και 5
- Ενεργοποιημένος ο έλεγχος τερματικής τάσης μόνο στο Α/Π 1 (ονομαστικής φαινόμενης ισχύος 12,28 MVA)
- Ενεργοποιημένος ο έλεγχος τερματικής τάσης μόνο στο Α/Π 5 (ονομαστικής φαινόμενης ισχύος 6,612 MVA)
- Απενεργοποιημένος ο έλεγχος τερματικής τάσης και στα δύο Α/Π (όπως στο Σχ. 5.2)

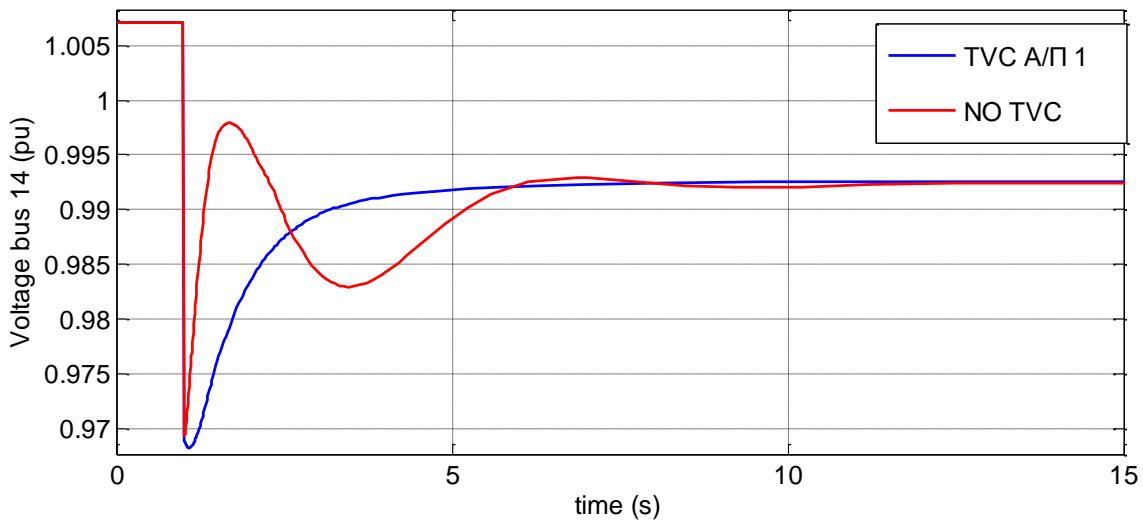


Σχήμα 5.7: Απόκριση Συχνότητας-Σενάριο Α (με και χωρίς ρύθμιση της τερματικής τάσης των ΑΓΔΤ)

Παρατηρούμε ότι η ενεργοποίηση του ελέγχου της τερματικής τάσης δυσχεραίνει την απόκριση της συχνότητας του συστήματος οδηγώντας στην εμφάνιση μικρότερης ελάχιστης τιμής. Εξαιρείται η περίπτωση που ο έλεγχος είναι ενεργοποιημένος μόνο στο Α/Π 5. Βέβαια ακόμα και στην περίπτωση όπου και τα δύο Α/Π λειτουργούν με έλεγχο της τερματικής τάσης, η ελάχιστη εμφανιζόμενη τιμή συχνότητα είναι γύρω στα 49,74 Hz, δηλαδή μεταβατική βύθιση της τάξεως των 0,25 Hz, η οποία δεν προκαλεί αποκοπή φορτίων. Επίσης σημαντικό μειονέκτημα της ρύθμισης της τερματικής τάσης αποτελεί η βραδύτερη αποκατάσταση του συστήματος σε τιμές μόνιμης κατάστασης, η οποία δεν μεταβάλλεται. Επιπροσθέτως γίνεται πιο απότομος ο ρυθμός πτώσης της συχνότητας κατά τα πρώτα ms μετά την διαταραχή, πράγμα σαφώς ανεπιθύμητο, παρά το γεγονός ότι εδώ οι H/N προστασίας δεν θέτουν τέτοιο περιορισμό.

Η επίδραση του ελέγχου τερματικής τάσης στη συχνότητα μπορεί να δικαιολογηθεί από τη φύση του. Όταν είναι ενεργοποιημένος αναγκάζει το αιολικό πάρκο να εγχύσει κάποια ποσότητα αέργου ισχύος ούτως ώστε να αντισταθμιστεί η εμφανιζόμενη βύθιση της τερματικής του τάσεως. Αυτό έχει ανάλογο αντίκτυπο και στους γειτονικούς ζυγούς επαναφέροντας την τάση τους γρηγορότερα σε φυσιολογικά επίπεδα λόγω της άεργης υποστήριξης που παρέχεται. Επομένως αναλογιζόμενοι την παράσταση των φορτίων ως σταθερές αγωγιμότητες, γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι το ίδιο ισχύει και για την κατανάλωση δυσχεραίνοντας έτσι το έργο των σύγχρονων γεννητριών στη ρύθμιση της συχνότητας. Ως παράδειγμα δίνεται στο Σχ. 5.8 η τάση του ζυγού διανομής 14

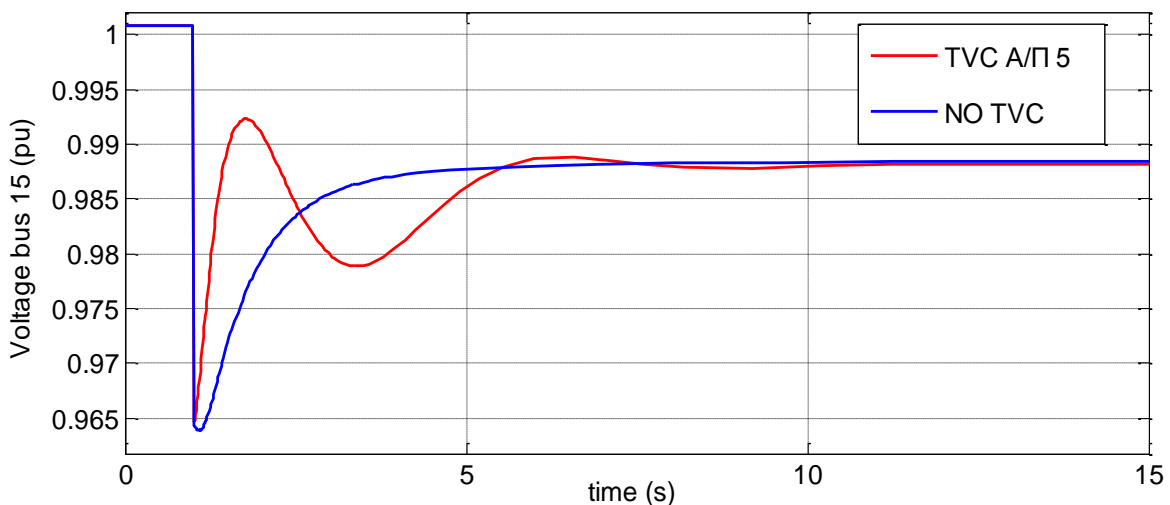
(ΑΦ ΜΤ), ο οποίος συνδέεται μέσω ισοδύναμου μετασχηματιστή με το Α/Π 1, με και χωρίς έλεγχο της τερματικής τάσης σε αυτό.



Σχήμα 5.8: Τάση ζυγού διανομής 14 με και χωρίς ρύθμιση της τερματικής τάσης στο Α/Π 1

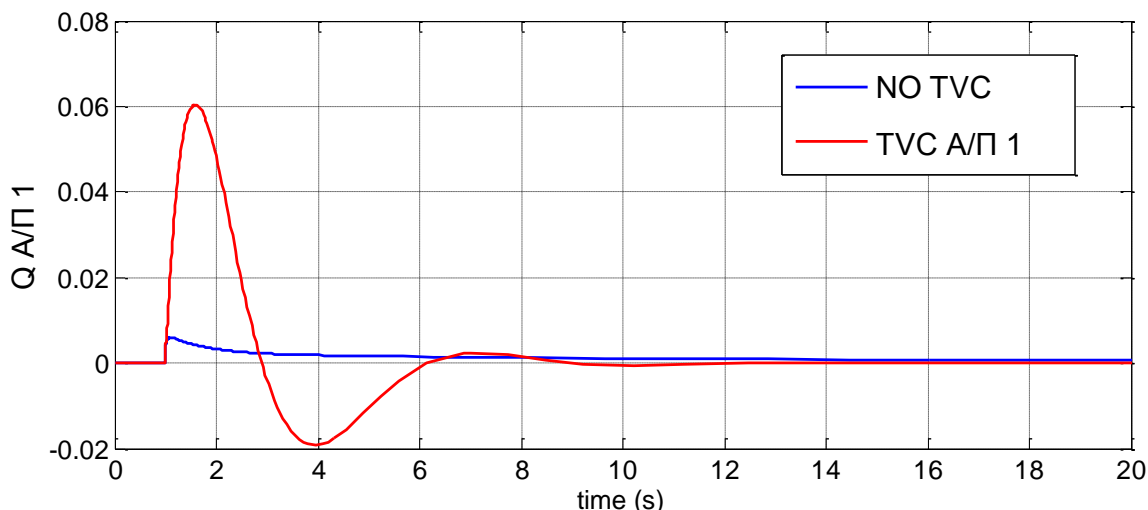
Από την απόκριση της τάσης στο ζυγό αυτό επαληθεύεται ο ισχυρισμός για την επίδραση του ελέγχου τερματικής τάσης. Η τάση επανέρχεται γρηγορότερα μετά τη διαταραχή αλλά ταυτόχρονα παρατηρείται μια ταλαντωτική συμπεριφορά και αργότερη αποκατάσταση στην τιμή μονίμου καταστάσεως.

Σε αντιστοιχία παρατίθεται στο Σχ. 5.9 η τάση του ζυγού διανομής 15 (ΓΕΝ ΜΤ), ο οποίος συνδέεται μέσω ισοδύναμου μετασχηματιστή με το Α/Π 5, για ενεργοποιημένη και μη τη ρύθμιση τερματικής τάσης. Παρατηρούμε παρόμοια χαρακτηριστικά κι εδώ στην απόκριση της τάσης λόγω της δράσης του ελέγχου αυτού. Ωστόσο η επίδραση στο μέγεθος της συχνότητας φαίνεται να είναι ασθενέστερη όταν η λειτουργία αυτή επιτελείται μόνο από το Α/Π 5. Κάτι τέτοιο μπορεί να δικαιολογηθεί από το αρκετά μικρότερο φορτίο που συνδέεται στον ζυγό 15 σε σχέση με τον ζυγό 14 (Πίνακας 5.6), πράγμα που σημαίνει και μικρότερο τμήμα της κατανάλωσης του νησιού. Επομένως είναι εύλογα μικρότερος και ο αντίκτυπος στην προσπάθεια ανάληψης του πλεονάζοντος φορτίου από τις σύγχρονες γεννήτριες.

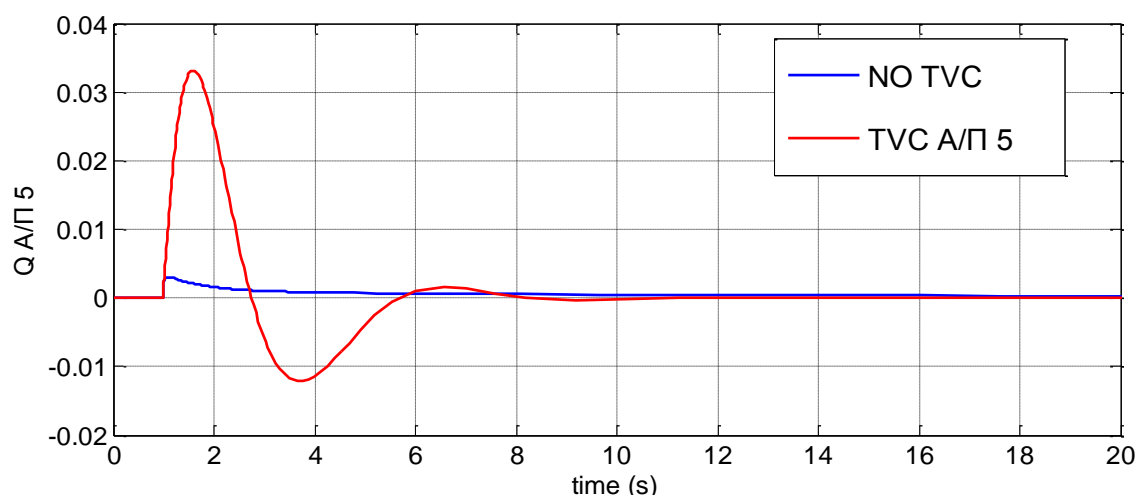


Σχήμα 5.9: Τάση ζυγού διανομής 15 με και χωρίς ρύθμιση της τερματικής τάσης στο Α/Π 5

Στα Σχ. 5.10 και 5.11 παρατίθενται και οι αποκρίσεις της εγγεόμενης αέργου ισχύος από τα Α/Π 1 και 5 για την περίπτωση που στο καθένα απ' αυτά ενεργοποιείται ή όχι ο έλεγχος τερματικής τάσης. Σε αυτά παρατηρούμε την άεργη υποστήριξη που παρέχεται προς αποκατάσταση της τερματικής τάσης αλλά και το γεγονός πως αυτή είναι πιο έντονη στην περίπτωση του Α/Π 1, λόγω μεγαλύτερης ονομαστικής ισχύος.



Σχήμα 5.10: Παραγόμενη Αεργος Ισχύς Α/Π 1 με και χωρίς ρύθμιση της τερματικής τάσης



Σχήμα 5.11: Παραγόμενη Αεργος Ισχύς Α/Π 5 με και χωρίς ρύθμιση της τερματικής τάσης

Συμπερασματικά, καταλήγουμε ότι για το συγκεκριμένο σενάριο λειτουργίας, το αυτόνομο σύστημα δεν παρουσιάζει πρόβλημα στη ρύθμιση της συχνότητας. Δεν προκύπτει η ανάγκη για αποκοπή φορτίου και η απόκριση της συχνότητας απέχει αρκετά από τιμές που θα ενεργοποιούσαν κάποιο Η/Ν προστασίας υποσυχνότητας. Έτσι από πλευράς ασφαλείας συχνότητας μπορούμε να αποφανθούμε πως η αυξημένη αιολική διείσδυση στο νησί της Ρόδου δεν προκαλεί πρόβλημα σε συνθήκες μέγιστης αιολικής παραγωγής, τουλάχιστον για το είδος της διαταραχής που προσομοιώθηκε. Ωστόσο θα πρέπει να τονιστεί η πιθανή αρνητική συμβολή της λειτουργίας ρύθμισης τερματικής τάσης στα αιολικά πάρκα, ιδιαίτερα όταν η ενεργοποίησή της επηρεάζει σημαντικό ποσοστό της κατανάλωσης του φορτίου. Φυσικά το συμπέρασμα αυτό μπορεί να επεκταθεί αναλόγως και στην περίπτωση που οι ανεμογεννήτριες με πλήρη μετατροπέα διαθέτουν τη δυνατότητα αυτού του είδους ελέγχου. Στη συνέχεια ακολουθεί ανάλυση των ιδιοτιμών του συστήματος προς αποσαφήνιση της συνολικής επίδρασης της λειτουργίας ρύθμισης τερματικής τάσης στους βασικούς ρυθμούς απόκρισης του συστήματος της Ρόδου.

5.3.2 Ανάλυση ρυθμών (ιδιοτιμές- ιδιοδιανύσματα-συντελεστές συμμετοχής)

Προκειμένου να βρεθούν οι ιδιοτιμές του συστήματος, πραγματοποιείται γραμμικοποίηση του. Η γραμμικοποίηση λαμβάνει χώρα γύρω από το νέο σημείο ισορροπίας του συστήματος μετά τη διαταραχή, όπως αυτό προέκυψε από την προσομοίωση. Δηλαδή το σύστημα επανασχεδιάστηκε με αρχικές συνθήκες (τάσεις ζυγών, παραγωγή συμβατικών μονάδων) αυτές του νέου σημείου ισορροπίας και χωρίς την απολεσθείσα μονάδα Gas 4. Τα αποτελέσματα της αρχικής ροής φορτίου για το νέο αυτό σημείο λειτουργίας (θεωρώντας ως ζυγό αναφοράς το ζυγό της νητζελογεννήτριας), όπως προέκυψε από τη ρουτίνα αρχικοποίησης, παρατίθενται στο Παράρτημα Δ. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν για τις ιδιοτιμές, τα ιδιοδιανύσματα, και τους συντελεστές συμμετοχής των μεταβλητών κατάστασης τους συστήματος υπολογίσθηκαν χρησιμοποιώντας την συνάρτηση *linmodv5* του λογισμικού MATLAB.

Το μοντέλο του συστήματος περιλαμβάνει συνολικά 74 μεταβλητές κατάστασης. Δεν καταγράφονται όλες εδώ, αφενός για λόγους οικονομίας, αφετέρου γιατί έχουν ήδη περιγραφεί για κάθε μεμονωμένη συνιστώσα στα πλαίσια παρουσίασης της βιβλιοθήκης του WHSSP. Συστηματική παρουσίαση όλων των ιδιοτιμών του συστήματος μαζί με τους συντελεστές συμμετοχής γίνεται στο παράρτημα Δ όπου επιβεβαιώνεται η ευστάθεια μονίμου καταστάσεως με όλες τις ιδιοτιμές να έχουν αρνητικό πραγματικό μέρος. Σημειώνεται ότι δεν παρουσιάζονται οι ιδιοτιμές με που σχετίζονται με απενεργοποιημένα σχήματα ελέγχου για τις συνθήκες λειτουργίας του σεναρίου Α (έλεγχος γωνίας βήματος, έλεγχος τάσης-Voltage Control για την εντολή αέργου έγχυσης των Α/Γ μεταβλητών στροφών). Επικεντρώνουμε εδώ το ενδιαφέρον μας στους κυρίαρχους ταλαντωτικούς ρυθμούς απόκρισης που διέπουν τη λειτουργία του συστήματος, αμελούμε δηλαδή αυτούς που παρουσιάζουν μεγάλη απόσβεση ($\zeta > 0,8$). Συγκεκριμένα εξετάζουμε πως επιδρά ο έλεγχος τερματικής τάσης στους κυρίαρχους ρυθμούς απόκρισης όταν αυτός ενεργοποιείται στο Α/Π 1. Αρχικά παρατίθενται οι ιδιοτιμές στον πίνακα 5.18 για την περίπτωση που η λειτουργία ρύθμισης τάσης δεν είναι ενεργοποιημένη. Προηγουμένως γίνεται μια επεξήγηση των μεταβλητών κατάστασης οι οποίες εμφανίζονται στην ανάλυσή των ρυθμών αυτών.

Α/Π 4 (WF4 IMWG)

Ανεμογεννήτρια Τύπου Α:

<i>WF4 IMW /wr</i>	γωνιακή ταχύτητα δρομέα μηχανής επαγωγής
<i>WF4 IMWG/wl</i>	γωνιακή ταχύτητα ανεμοκινητήρα
<i>WF4 IMWG/theta</i>	γωνιακή παραμόρφωση άξονα μετάδοσης κίνησης

Ατμοστροβιλική Μονάδα (Steam)

Σύγχρονη Γεννήτρια:

<i>Steam/SG/wr</i>	γωνιακή ταχύτητα δρομέα σύγχρονης μηχανής
<i>Steam/SG/delta</i>	γωνία ανάμεσα στα πλαίσια <i>xy</i> και <i>dq</i>
<i>Steam/SG/ykq_r</i>	πεπλεγμένη ροή τυλίγματος απόσβεσης δρομέα

Ατμοστρόβιλος-Ρυθμιστής στροφών:

<i>Steam/ST Prime mover and Governor /dhp</i>	ροή ατμού στις σωληνώσεις εισόδου
<i>Steam/ST Prime mover and Governor /zsr</i>	άνοιγμα της κύριας δικλείδας ελέγχου του ατμού

Μονάδα Ντίζελ (Diesel)

Σύγχρονη Γεννήτρια:

<i>Diesel/SG/wr</i>	γωνιακή ταχύτητα δρομέα σύγχρονης μηχανής
---------------------	---

Diesel /SG/delta γωνία ανάμεσα στα πλαίσια xy και dq
Diesel /SG/ykq_r πεπλεγμένη ροή τυλίγματος απόσβεσης δρομέα

Ρυθμιστής στροφών:

Diesel/DT Prime mover and Governor /Pm άνοιγμα δικλείδας καυσίμου (μηχανική ισχύς)

Πίνακας 5.18: Ιδιοτιμές Συστήματος (κυρίαρχοι ταλαντωτικοί ρυθμοί απόκρισης)

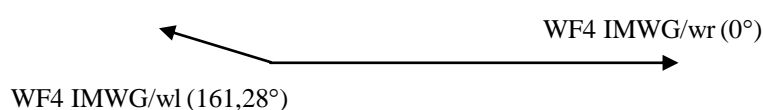
Ιδιοτιμή		Συχνότητα f (Hz)	Συντελεστής Απόσβεσης ζ	Συντελεστές συμμετοχής	Ρυθμός
1,2	$-5.28 \pm j38.837$	6.181	0.135	<i>WF4 IMWG/wr</i> 0.92 <i>WF4 IMWG/wl</i> 0.16 <i>WF4 IMWG /theta</i> 1.00	Ταλάντωση A/Γ 4 ανάμεσα στις δυο μάζες
3,4	$-3.474 \pm j14.427$	2.293	0.232	<i>Steam /SG/wr</i> 0.54 <i>Steam /SG/delta</i> 0.47 <i>Steam /SG/ykq_r</i> 0.19 <i>Diesel/SG/wr</i> 1.00 <i>Diesel /SG/delta</i> 0.63 <i>Diesel/DT Prime mover and Governor /Pm</i> 0.40	Ηλεκτρομηχανική ταλάντωση σύγχρονων μηχανών
5,6	$-4.801 \pm j6.259$	0.996	0.609	<i>Steam /SG/wr</i> 0.91 <i>Steam /SG/delta</i> 0.28 <i>Steam /SG/ykq_r</i> 0.43 <i>Diesel/SG/wr</i> 0.99 <i>Diesel /SG/delta</i> 0.24 <i>Diesel /SG/ykq_r</i> 0.13 <i>Steam/ST Prime mover and Governor/dhp</i> 0.15 <i>Steam/ST Prime mover and Governor/zsr</i> 0.11 <i>Diesel/DT Prime mover and Governor/Pm</i> 1.00	Ταλάντωση ρύθμισης συχνότητας συστήματος

Στην συνέχεια θα επεξηγηθεί ο χαρακτηρισμός των παραπάνω ρυθμών με βάση τα στοιχεία των δεξιών ιδιοδιανυσμάτων (δεν παρατίθενται στον πίνακα 5.18). Κρίνεται σκόπιμο να υπενθυμίσουμε από την εισαγωγή (βλ ενότητα 1.6.2):

Κοινός ρυθμός ταλάντωσης: Ο ρυθμός αυτός περιγράφει ταλαντώσεις εν φάσει των μεταβλητών κατάστασης διαφορετικών μηχανών.

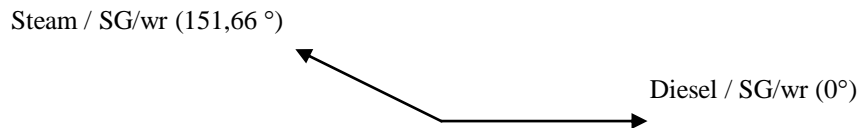
Ρυθμός αλληλεπίδρασης: Ο ρυθμός αυτός περιγράφει ταλαντώσεις με αντίθετη φάση των μεταβλητών κατάστασης διαφορετικών μηχανών.

Για τις ιδιοτιμές 1, 2 του Πίνακα 5.18 έχουμε την ταλάντωση που σχετίζεται με το σύστημα μετάδοσης της κίνησης στην A/Γ Τύπου A (A/Π 4) και το μοντέλο παράστασης δύο μαζών. Γι αυτό και κυριαρχούν οι μεταβλητές ταχύτητας και γωνιακής παραμόρφωσης του άξονα μετάδοσης της κίνησης.



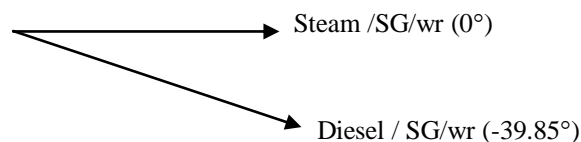
Σχ. 5.12: Στρεπτική ταλάντωση A/Π 4 (ιδιοτιμές 1, 2)

Για τις ιδιοτιμές 3, 4 του πίνακα 5.18 έχουμε την ηλεκτρομηχανική ταλάντωση των δύο σύγχρονων γεννητριών (Ατμοστρόβιλος - Ντίζελ) που παραμένουν συνδεδεμένες μετά τη διαταραχή. Κυριαρχούν κυρίως οι ταχύτητες (wr) και οι γωνίες δρομέων ($delta$). Η γωνία ανάμεσα στα δεξιά ιδιοδιανύσματα, που φαίνεται στο Σχ. 5.12, υποδηλώνει ταλάντωση της μίας μηχανής ως προς την άλλη. Η γωνία ανάμεσα στα δυο ιδιοδιανύσματα είναι ακριβώς 180° .



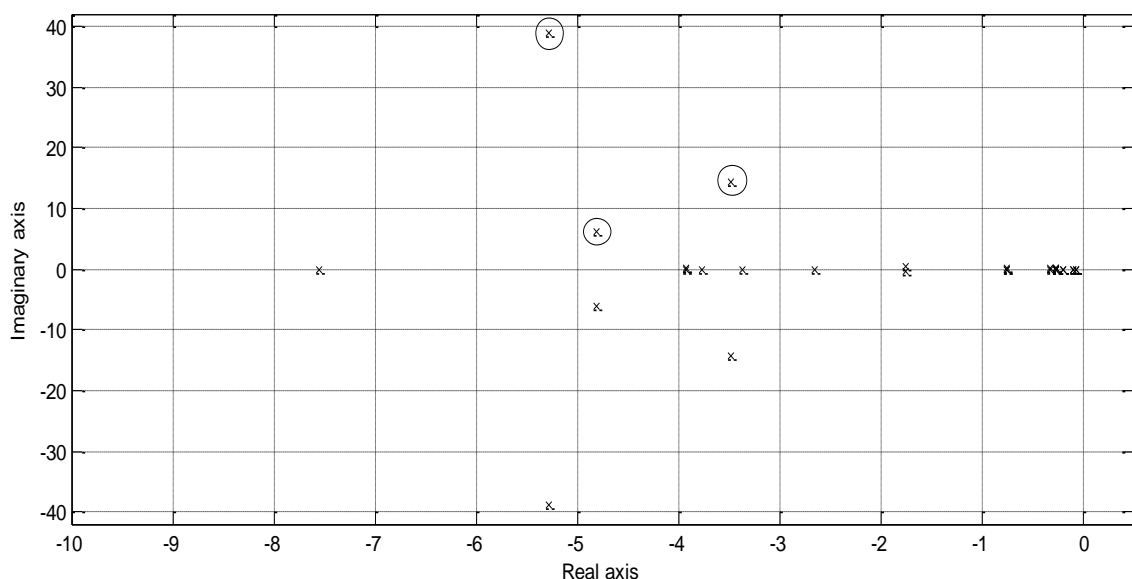
Σχ. 5.13: Ηλεκτρομηχανική ταλάντωση *Steam /SG/delta* και *Diesel /SG/delta* (ιδιοτιμές 3, 4)

Για τις ιδιοτιμές 5, 6 του πίνακα 5.18 έχουμε την ταλάντωση που σχετίζεται με τη ρύθμιση της συχνότητας του συστήματος, με κυρίαρχες μεταβλητές τις ταχύτητες των δύο σύγχρονων γεννητριών και την εντολή ανοίγματος της δικλείδας καυσίμου της Ντιζελογεννήτριας. Η γωνία ανάμεσα στα δεξιά ιδιοδιανύσματα υποδηλώνει τον κοινό ρυθμό ταλάντωσης ανάμεσα στις ταχύτητες των σύγχρονων γεννητριών που ουσιαστικά διαμορφώνουν την συχνότητα του συστήματος. Στο Σχ. 5.12 φαίνεται η γωνία ανάμεσα στα δυο ιδιοδιανύσματα που είναι $38,31^\circ$. Να σημειωθεί ότι και εδώ τα δεξιά ιδιοδιανύσματα που σχετίζονται με τις γωνίες $delta$ είναι αντίρροπα.



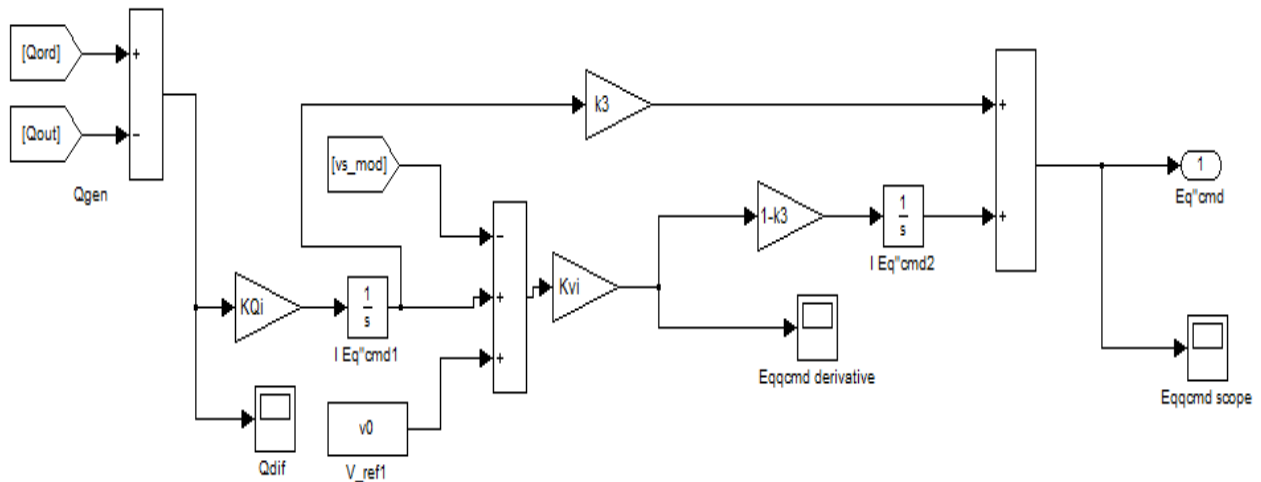
Σχ. 5.14: Κοινός ρυθμός ταλάντωσης *Steam /SG/wr* και *Diesel /SG/wr* (ιδιοτιμές 5, 6)

Στο Σχ. 5.15 φαίνεται η θέση των ιδιοτιμών του συστήματος στο μιγαδικό επίπεδο (πραγματικό μέρος > -10) και σημειωμένες τις ιδιοτιμές του πίνακα 5.18.



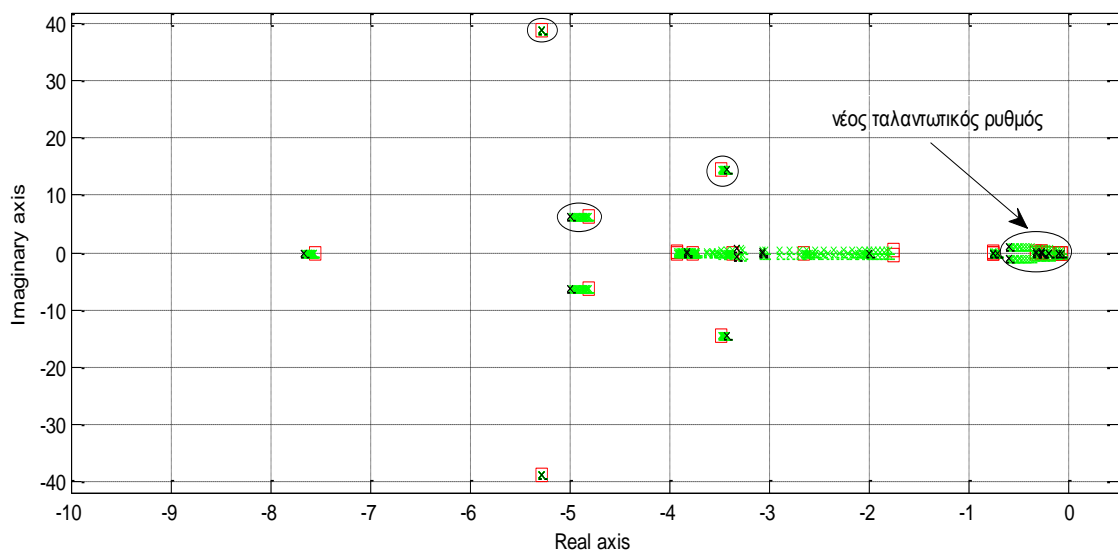
Σχ. 5.15: Διάγραμμα ιδιοτιμών σημείου ισορροπίας μετά τη διαταραχή-Σενάριο A (πραγματικό μέρος > -10)

Εν συνεχεία εξετάζουμε την επίδραση στις ιδιοτιμές της ενεργοποίησης του ελέγχου τερματικής τάσης στο Α/Π 1. Προκειμένου γίνει η μελέτη της κίνησης των ιδιοτιμών χρησιμοποιείται ένα ιδεατό σχήμα ελέγχου, στο οποίο ουσιαστικά σταθμίζεται μέσω ενός κέρδους kI το ποσοστό συμμετοχής του ελέγχου τερματικής τάσης στη διαμόρφωση της εντολής για το εγχεόμενο άεργο ρεύμα (E_{qcmd}''). Στην πράξη θεωρούμε ότι η λειτουργία ρύθμισης της τερματικής τάσης είναι είτε ενεργοποιημένη ($kI=0$) είτε όχι ($kI=1$). Υπενθυμίζεται πως έχουμε λειτουργία σταθερού συντελεστή ισχύος (επιλογή PF) και θεωρούμε σταθερά όρια για τον περιοριστή του δεύτερου ολοκληρωματικού ελεγκτή. Η υλοποίηση του ιδεατού σχήματος ελέγχου στο περιβάλλον του Simulink φαίνεται στο Σχ. 5.16.

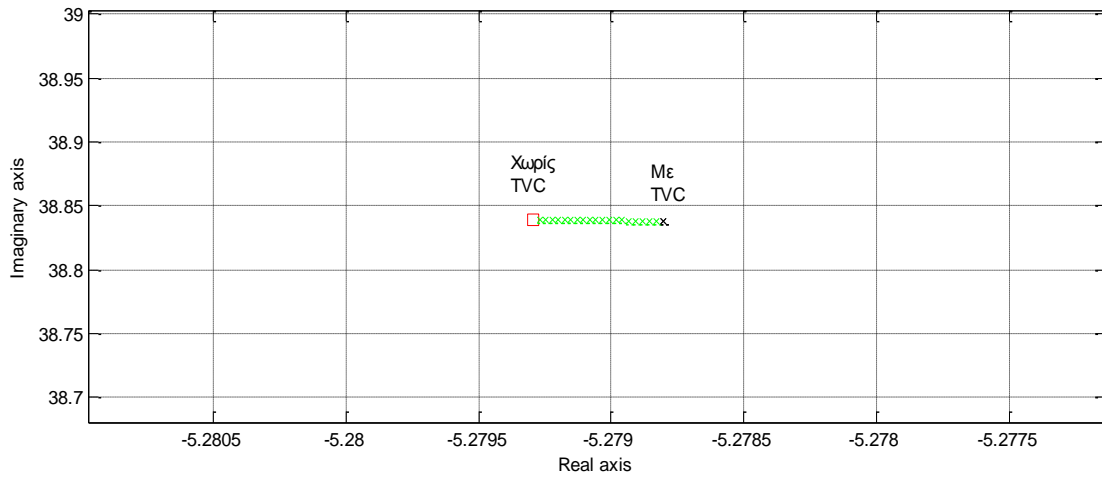


Σχ. 5.16: Υλοποίηση μεικτού σχήματος ελέγχου για την εντολή E_{qcmd}'' προς μελέτη της επίδρασης του ελέγχου τερματικής τάσης στο Α/Π 1

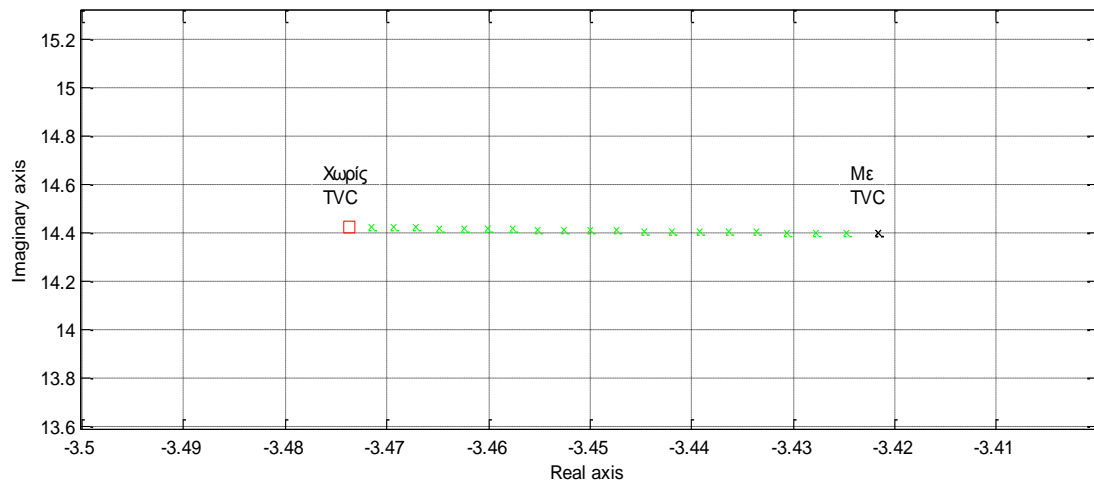
Εξετάζουμε λοιπόν των γεωμετρικό τόπο ριζών του συστήματος, εστιάζοντας στις ιδιοτιμές του πίνακα 5.18, για μεταβολή της τιμής του kI από 0 έως 1. Για την κατασκευή του γεωμετρικού τόπου ριζών η μεταβολή του kI έγινε με βήμα 0.05 και στα Σχ 5.19 έως 5.23 παρατίθεται η κίνηση των ιδιοτιμών με τη σειρά που αυτές παρουσιάστηκαν στον Πίνακα 5.11. Με κόκκινο \square σημειώνεται η θέση των ιδιοτιμών για kI ίσο με 1, με μαύρο \times για kI ίσο με 0 και με πράσινο \times για τις ενδιάμεσες τιμές. Στο Σχ. 5.17 παρατίθεται ο γεωμετρικός τόπος ριζών του συστήματος (πραγματικό μέρος > -10) και στα Σχ. 5.18 έως 5.20 η κίνηση των ιδιοτιμών που εστιάζουμε.



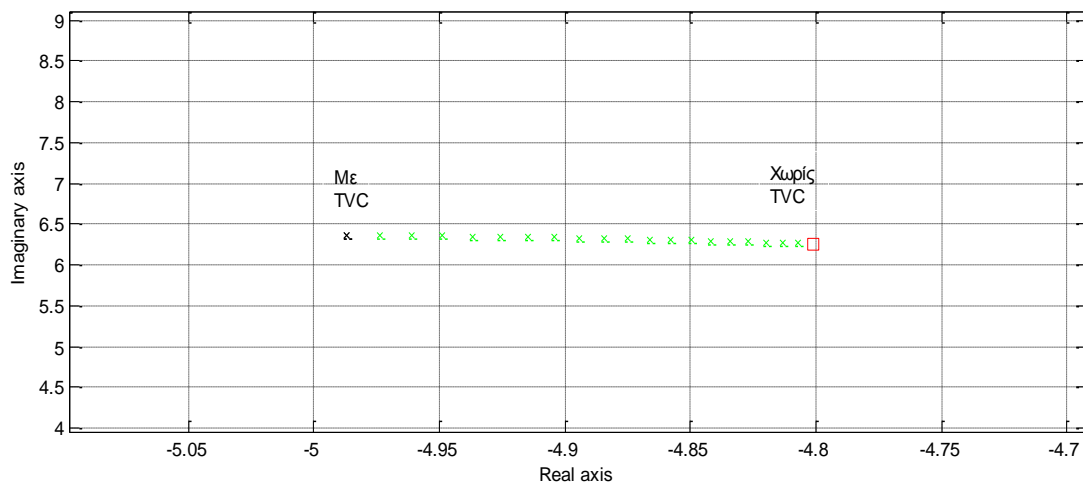
Σχ. 5.17: Γεωμετρικός τόπος ριζών του συστήματος για μεταβαλλόμενο kI (πραγματικό μέρος > -10)



Σχ. 5.18: Μεταβολή της ιδιοτιμής του ταλαντωτικού ρυθμού ανάμεσα στις ταχύτητες της ισόδυναμης A/G 4



Σχ. 5.19: Μεταβολή της ιδιοτιμής του ηλεκτρομηχανικού ταλαντωτικού ρυθμού του συστήματος



Σχ. 5.20: Μεταβολή της ιδιοτιμής του ταλαντωτικού ρυθμού ρύθμισης της συχνότητας του συστήματος

Από τα Σχ. 5.18 έως 5.20 παρατηρούμε ότι οι ταλαντωτικοί ρυθμοί του συστήματος επηρεάζονται ελάχιστα από την ενεργοποίηση του ελέγχου τερματικής τάσης στο Α/Π 1. Λίγο μεγαλύτερη φαίνεται η επίδραση στο ρυθμό ρύθμισης συχνότητας, προς τη θετική μάλιστα κατεύθυνση, αφού η ιδιοτιμή μετακινείται αριστερότερα στο μιγαδικό επίπεδο και ο συντελεστής απόσβεσης ζ αυξάνεται ελαφρώς (0,616 από 0,61 που ήταν αρχικά). Παρατηρώντας συνολικά τον γεωμετρικό τόπο ριζών του συστήματος παρατηρούμε την εμφάνιση ενός ακόμα ενδιαφέροντος ταλαντωτικού ρυθμού, όταν ενεργοποιείται η λειτουργία ελέγχου της τερματικής τάσης. Αυτός φαίνεται στο Σχ. 5.21 και ακολουθώντας τη λογική ανάλυσης των συντελεστών συμμετοχής (Πίνακας 5.19) αναδεικνύουμε τη σημασία του για την συνολική συμπεριφορά του συστήματος. Προηγουμένως όμως επεξηγούνται οι μεταβλητές κατάστασης που εμφανίζονται στους συντελεστές συμμετοχής τους.

Α/Π 1 (WF1 DFAG2)

Ανεμογεννήτρια Τύπου Γ:

WF1 DFAG2/Reactive power Control/ I Eq"cmd1

Εντολή πρώτου ολοκληρωματικού ελεγκτή για την άεργο ισχύ

WF1 DFAG2/Reactive power Control/ I Eq"cmd2

Εντολή δεύτερου ολοκληρωματικού ελεγκτή για την άεργο ισχύ

Μονάδα Ντίζελ (Diesel)

Σύγχρονη Γεννήτρια:

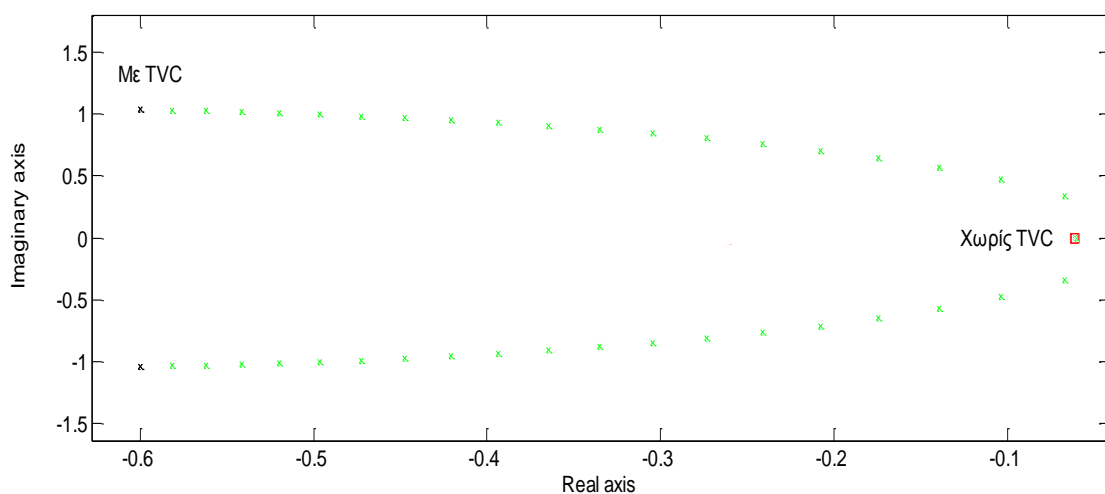
Diesel/SG/yfd_r Πεπλεγμένη ροή τυλίγματος διέγερσης δρομέα

Αυτόματος Ρυθμιστής Τάσης:

Diesel/SEXS/xll Μεταβλητή συνδεδεμένη με το φίλτρο μεταφοράς του APT

Πίνακας 5.19: Πίνακας χαρακτηριστικών νεοεμφανιζόμενου ταλαντωτικού ρυθμού

Ιδιοτιμή	Συχνότητα f (Hz)	Παράγοντας Απόσβεσης ζ	Συντελεστές συμμετοχής
-0.599±j1.038	0.165	0.5	WF1 DFAG2/Reactive power Control/ I Eq"cmd1
			WF1 DFAG2/Reactive power Control/ I Eq"cmd 2
			Diesel/SG/yfd_r
			Diesel/SEXS /SG xll
			1.00
			0.58
			0.28
			0.57



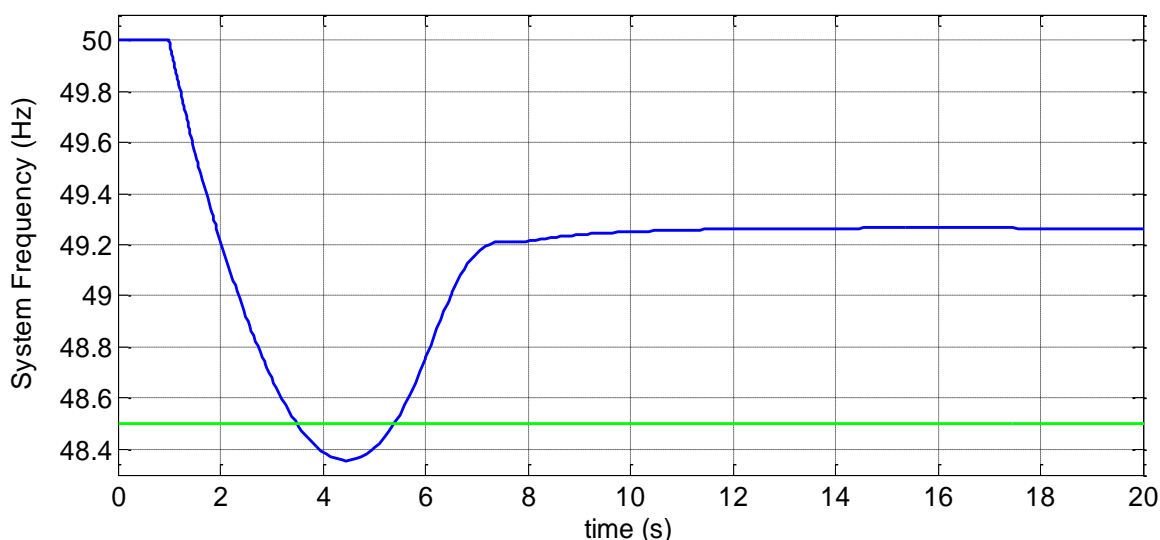
Σχ. 5.21: Μεταβολή ιδιοτιμής σχετιζόμενης με τον έλεγχο αέργου ισχύος των Α/Π 1

Από τον πίνακα 5.19 προκύπτει ότι ο νεοεμφανιζόμενος ρυθμός συνδέεται με την διαμόρφωση της εντολής άεργης έγχυσης από το Α/Π 1. Παρατηρούμε ότι η ενεργοποίηση του ελέγχου τερματικής τάσης, οδηγεί στην εμφάνιση αυτού του νέου ταλαντωτικού ρυθμού, ο οποίος μάλιστα συνδέεται με τη λειτουργία της Ντιζελογεννήτριας αφού εμφανίζονται στους συντελεστές συμμετοχής μεταβλητές κατάστασης που σχετίζονται με τη διαδικασία διέγερσης της σύγχρονης μηχανής. Ο ρυθμός αυτός παρότι έχει σημαντική απόσβεση αυξάνει τη μεταβατική βύθιση της συχνότητας. Συγκεκριμένα σχετίζεται με την αποκατάσταση των τάσεων των ζυγών του συστήματος μετά τη διαταραχή λόγω της άεργης έγχυσης του Α/Π 1, όπως φαίνεται στα Σχ. 5.8 και 5.10, και επομένως και των καταναλώσεων του συστήματος.

5.4 Ανάλυση Σεναρίου Β – Μέγιστη αιολική διείσδυση

5.4.1 Προσομοίωση Συστήματος – Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Για τη διεξαγωγή της προσομοίωσης αυτού του σεναρίου λειτουργίας ισχύουν πάλι οι παραδοχές που έγιναν και στην περίπτωση της μέγιστης αιολικής παραγωγής για τον τρόπο λειτουργίας των αιολικών πάρκων (επιλογή PF χωρίς ρύθμιση της τερματικής τάσης). Θεωρούμε κι εδώ ότι η αποσύνδεση της αεριοστροβιλικής μονάδας Gas 4 λαμβάνει χώρα τη χρονική στιγμή $t=1$ s της προσομοίωσης. Η αποσύνδεσή της ισοδυναμεί για τις συνθήκες του σεναρίου Β με απώλεια παραγωγής 13,19 MW και αντιστοιχεί περίπου στο 15,9% του συνολικού φορτίου του συστήματος. Στο Σχ. 5.22 παρουσιάζεται η απόκριση της συχνότητας του συστήματος.



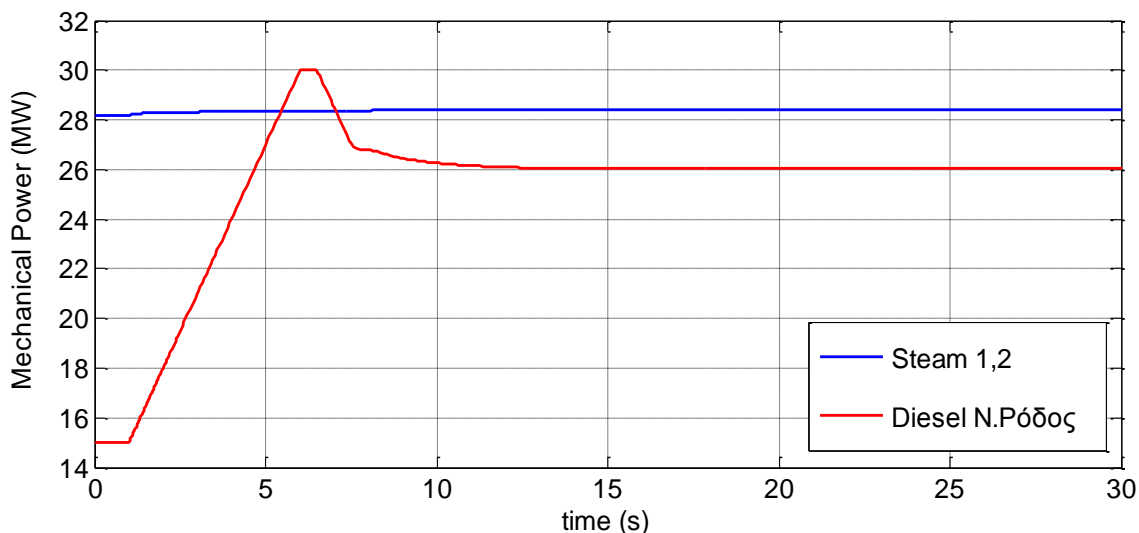
Σχήμα 5.22: Απόκριση Συχνότητας-Σενάριο Β (χωρίς ρύθμιση της τερματικής τάσης των ΑΓΔΤ)

Παρατηρούμε ότι το σύστημα είναι ευσταθές με την τιμή της συχνότητας όμως να έχει σημαντική μεταβατική βύθιση, παρότι σταθεροποιείται σχετικά γρήγορα (περίπου στα 10 s). Σχετικά με τις τιμές ενδιαφέροντος του μεγέθους της συχνότητας έχουμε:

- Μόνιμη κατάσταση $f_{ss}=49,264$ Hz
- Μεταβατική βύθιση $f_{min}=48,356$ Hz

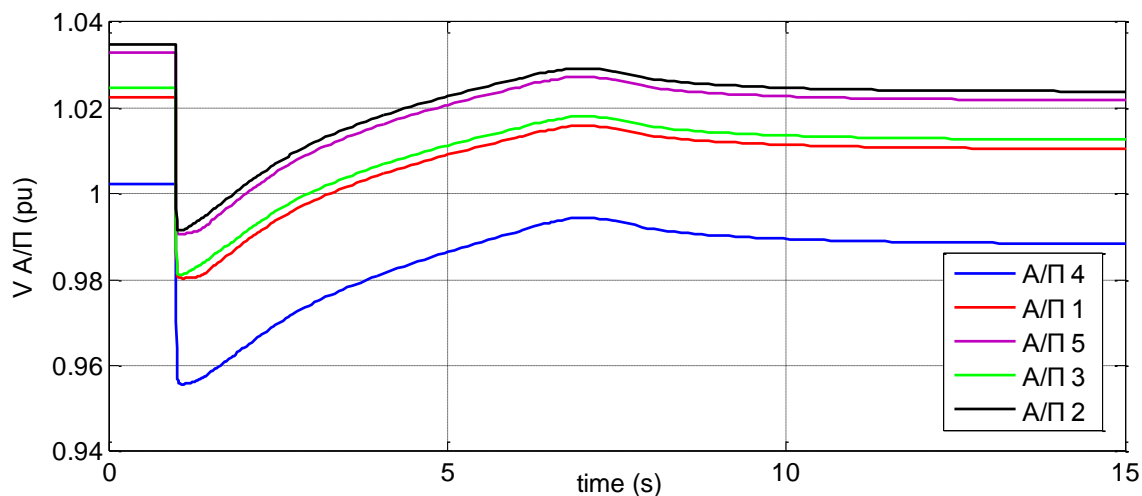
Έτσι η μεταβατική βύθιση που παρατηρείται είναι της τάξης των 1,6 Hz , πράγμα που οδηγεί στην ενεργοποίηση Η/Ν υποσυχνότητας με συνακόλουθο την αποκοπή φορτίου. Η πρώτη ενεργοποίηση συμβαίνει 2,5 sec μετά την εμφάνιση του σφάλματος, όταν η τιμή της συχνότητας

περάσει το κατώφλι των 48,5 Hz (πράσινη γραμμή στο Σχ. 5.25). Να σημειωθεί ξανά ότι η διαδικασία αποκοπής των φορτίων δεν επιτελείται στα πλαίσια της προσομοίωσης αλλά αρκούμαστε στη διάγνωση της. Στα Σχ. 5.23 έως 5.25 φαίνεται η παραγόμενη μηχανική ισχύς των γεννητριών, οι τάσεις των ζυγών που συνδέονται τα Α/Π (ζυγοί 11, 18, 19, 20, 21), καθώς και των ζυγών διανομής του νησιού (11, 12, 13, 14, 15, 16) όπου θεωρούμε ότι συνδέεται το σύνολο του φορτίου του νησιού (όπως εμφανίζεται στον Πίνακα 5.6) για το Σενάριο Β.

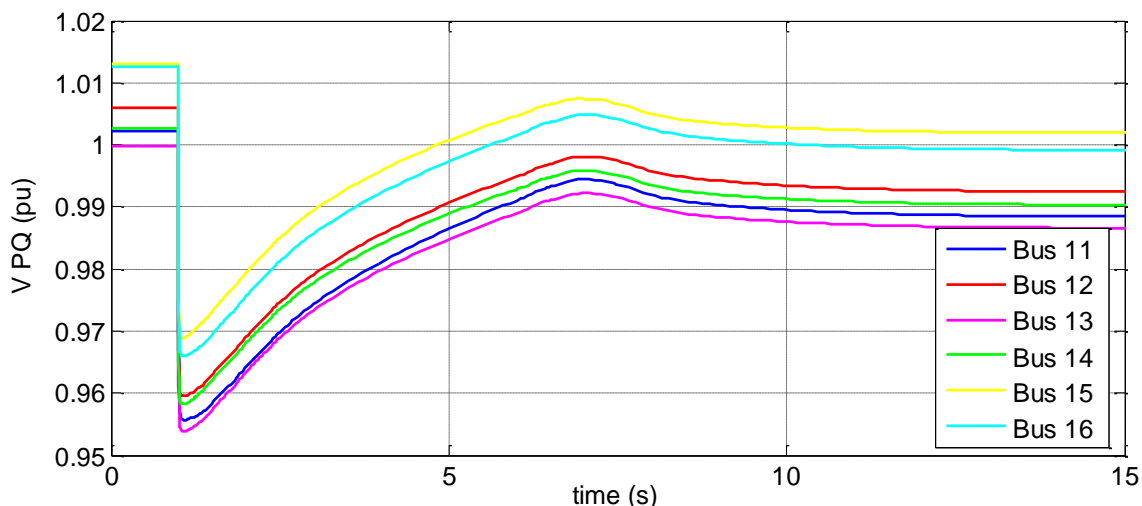


Σχήμα 5.23: Παραγόμενη μηχανική ισχύς συμβατικών μονάδων

Παρατηρούμε από το Σχ. 5.23, όπως και στο σενάριο Α, ότι η μονάδα της Ν.Ρόδου αναλαμβάνει σχεδόν εξ' ολοκλήρου την απολεσθείσα ισχύ της μονάδας Gas 4. Συγκεκριμένα η παραγωγή της ατμοηλεκτρικής μονάδας διαμορφώνεται σε 28,4 MW από 28,2 MW που ήταν αρχικά και της Ντίτζελ σε 26,05 MW από 15 MW που ήταν αρχικά. Φυσικά αυτό οφείλεται πέρα από την διαφορά τους στατισμούς των μονάδων και στην έλλειψη στρεφόμενης εφεδρείας από μέρους της ατμοστροβιλικής μονάδας (Πίνακας 5.17) ώστε να μπορέσει να συνεισφέρει στη ρύθμιση της συχνότητας. Χαρακτηριστικό είναι το γεγονός ότι ο ρυθμιστής στροφών της ισοδύναμης Ντίτζελ μονάδας λειτουργεί με το μέγιστο επιτρεπόμενο ρυθμό ανάληψης φορτίου, πράγμα που οδηγεί τελικά σε μεγάλη μεταβατική βύθιση της συχνότητας. Επίσης αξίζει να επισημανθεί πως η Ντιζελογεννήτρια φτάνει μεταβατικά στο μέγιστο της αποδιδόμενη πραγματικής ισχύς, χρησιμοποιείται δηλαδή παροδικά το σύνολο της στρεφόμενης εφεδρείας της μέχρις ότου να ολοκληρωθεί η πρωτεύουσα ρύθμιση.

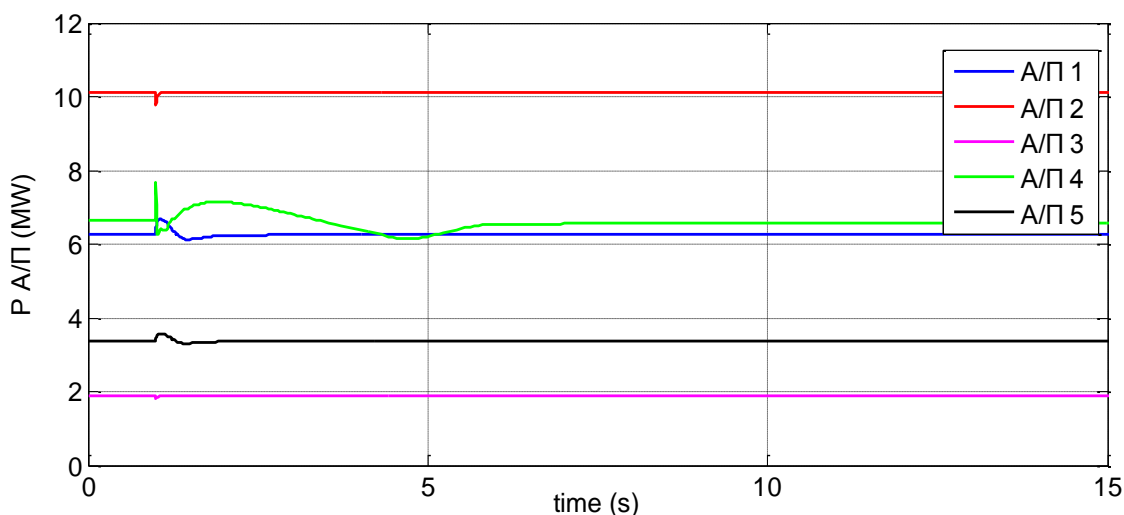


Σχήμα 5.24: Τερματική τάση Α/Π



Σχήμα 5.25: Τερματική τάση ζυγών φορτίου

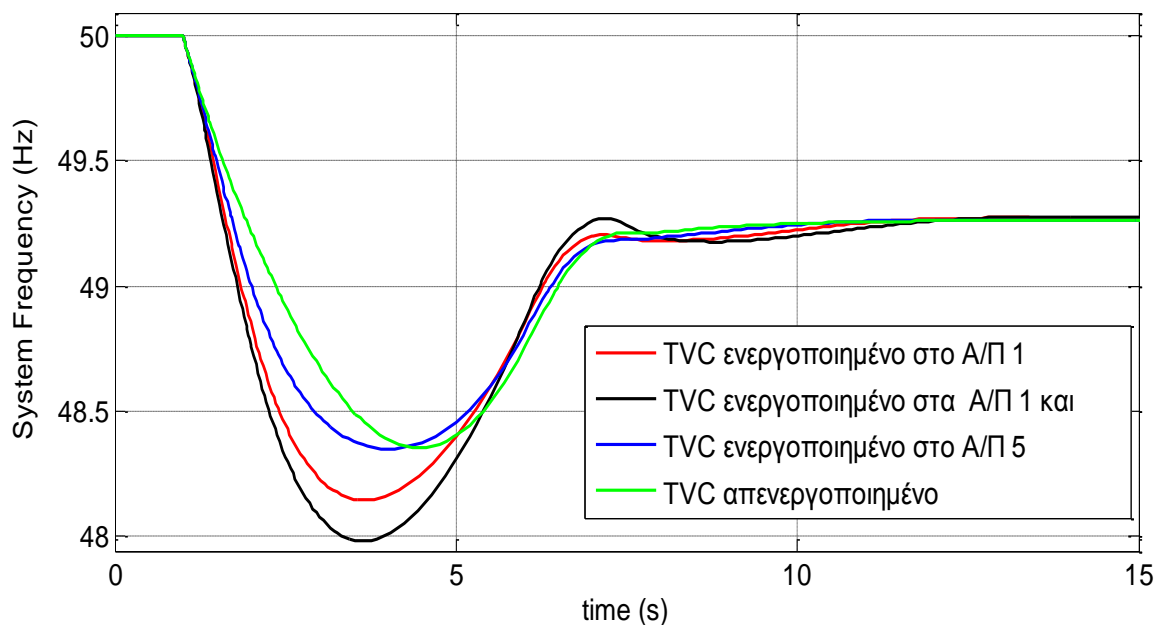
Όπως φαίνεται στα Σχ. 5.23 και 5.24 οι τάσεις των ζυγών του συστήματος δεν μειώνονται αισθητά, με μέγιστη μεταβατική βύθιση περί τα 4,5% της ονομαστικής τους τιμής. Επίσης παρατηρούμε ότι εδώ έχουμε βραδύτερη αποκατάσταση (περί τα 10 s) στις τιμές μόνιμου καταστάσεως σε σχέση με το σενάριο A. Παρά το γεγονός ότι η μείωση της τάσεως συνεπάγεται και μείωση στις καταναλώσεις του νησιού, το σύστημα δεν δύναται να ολοκληρώσει την πρωτεύουσα ρύθμιση χωρίς αποκοπές φορτίου. Πάντως όσον αφορά τη λειτουργία των Α/Π, αυτή δεν επηρεάζεται σημαντικά από τη στιγμή που οι τερματικές τους τάσεις παραμένουν σε υψηλά επίπεδα. Συγκεκριμένα για το Α/Π 4 που θέσαμε όριο αποσύνδεσης (0,85 αμ), παρατηρούμε ότι η ελάχιστη εμφανιζόμενη τιμή (0,956 αμ) απέχει αισθητά απ' αυτό. Η παραγόμενη ενεργός ισχύς των Α/Π φαίνεται στο Σχ. 5.29, όπου άξια σχολιασμού είναι η μεταβολή ενεργού ισχύος του Α/Π 4 κατά τη μεταβατική περίοδο.



Σχήμα 5.29: Παραγόμενη Ενεργός Ισχύς Α/Π

Συμπερασματικά, καταλήγουμε ότι στο επίπεδο μέγιστης αιολικής διείδυσης η εξεταζόμενη διαταραχή μπορεί να οδηγήσει σε αποκοπές φορτίου (όταν η αιολική παραγωγή καλύπτει σημαντικό ποσοστό της ζήτησης του νησιού και συγκεκριμένα 34%). Έτσι με βάση την κατανομή της παραγωγής που θεωρήθηκε για το σενάριο B δεν τηρούνται οι προδιαγραφές δυναμικής ασφαλείας (αποφυγή αποκοπής φορτίου) για απώλεια της μεγαλύτερης συμβατικής μονάδας παραγωγής. Φυσικά με βάση την ανάλυση που έγινε για το σενάριο A, αναμένουμε η ενεργοποίηση του ελέγχου τερματικής τάσης στα αιολικά πάρκα με ασύγχρονες γεννήτριες διπλής τροφοδότησης να οξύνει το

πρόβλημα που πρόκυψε στην απόκριση της συχνότητας. Πράγματι κάτι τέτοιο επιβεβαιώνεται στο Σχ. 5.30 για όλες τις επιμέρους περιπτώσεις. Συγκεκριμένα η ενεργοποίηση στο Α/Π 5 οδηγεί μόνο σε πιο απότομη πτώση κατά τη βύθιση, ενώ η ενεργοποίηση στο Α/Π 1 συνεπάγεται ακόμα μικρότερη ελάχιστη τιμή κι επομένως περεταίρω ανάγκη για αποκοπές φορτίου. Μάλιστα η ταυτόχρονη ενεργοποίηση της ρύθμισης τερματικής τάσης στα δύο Α/Π αποτελεί εύλογα τη δυσμενέστερη περίπτωση, με τη συχνότητα να πέφτει κάτω από τα 48 Hz, οδηγώντας έτσι στην ενεργοποίηση όλων των Η/Ν προστασίας υποσυχνότητας του νησιού [16].



Σχήμα 5.30: Απόκριση Συχνότητας του συστήματος

5.4.2 Ανάλυση ρυθμών (ιδιοτιμές- -συντελεστές συμμετοχής)

Προκειμένου να βρεθούν οι ιδιοτιμές του συστήματος, πραγματοποιείται γραμμικοποίηση του ακολουθώντας την ίδια διαδικασία με το σενάριο Α. Η γραμμικοποίηση λαμβάνει χώρα γύρω από το νέο σημείο ισορροπίας του συστήματος μετά τη διαταραχή, όπως αυτό προέκυψε από την προσομοίωση για το σενάριο Β. Τα αποτελέσματα της ροής φορτίου για το νέο αυτό σημείο λειτουργίας παρατίθενται στο Παράρτημα Δ. Επικεντρώνουμε και εδώ το ενδιαφέρον μας στους βασικούς ταλαντωτικούς ρυθμούς που διέπουν τη λειτουργία του συστήματος (αμελούμε δηλαδή αυτούς που παρουσιάζουν μεγάλη απόσβεση), θεωρώντας τον έλεγχο τερματικής τάσης εκτός λειτουργίας. Ακολουθεί μία συνοπτική σύγκριση των ιδιοτιμών και των συντελεστών συμμετοχής σε σχέση με το σενάριο Α. Για τις μεταβλητές κατάστασης που εμφανίζονται ισχύει η περιγραφή που έγινε στην παράγραφο 5.3.2. Συστηματική παρουσίαση όλων των ιδιοτιμών του συστήματος γίνεται στο παράρτημα Δ, όπου επιβεβαιώνεται η ευστάθεια μονίμου καταστάσεως με όλες τις ιδιοτιμές να έχουν αρνητικό πραγματικό μέρος. Σημειώνεται ότι δεν παρουσιάζονται οι ιδιοτιμές με που σχετίζονται με απενεργοποιημένα σχήματα ελέγχου για τις συνθήκες λειτουργίας του σεναρίου Β (έλεγχος γωνίας βήματος, έλεγχος τάσης-Voltage Control για την εντολή αέργου έγχυσης των Α/Γ μεταβλητών στροφών)

Πίνακας 5.20: Ιδιοτιμές Συστήματος (κυρίαρχοι ταλαντωτικοί ρυθμοί απόκρισης)

Ιδιοτιμή		Συχνότητα f (Hz)	Συντελεστή ς Απόσβεσης ζ	Συντελεστές συμμετοχής	Ρυθμός	
1,2	$-5.66 \pm j39.07$	6.217	0.144	WF4 IMWG/wr WF4 IMWG/wl WF4 IMWG /theta WF4 IMWG/ydr_e	0.94 0.16 1.00 0.10	Ταλάντωση Α/Γ 4 ανάμεσα στις δυο μάζες
3,4	$-4.054 \pm j18.07$	2.876	0.219	zygos PV 2 Steam /SG/wr zygos PV 2 Steam /SG/delta zygos PV 3 Diesel/SG/ykq_r zygos PV 3 Diesel/SG/wr zygos PV 3 Diesel /SG/delta zygos PV 3 Diesel/DT Prime mover and Governor /Pm	0.21 0.63 0.18 1.00 0.25 0.30	Ηλεκτρομη χανική ταλάντωση σύγχρονων μηχανών
5,6	$-3.309 \pm j3.222$	0.513	0.717	zygos PV 2 Steam /SG/wr zygos PV 2 Steam /SG/delta zygos PV 2 Steam /SG/ykq_r zygos PV 3 Diesel/SG/wr zygos PV 3 Diesel /SG/ykq_r WF4 IMWG/wl zygos PV 2 Steam/ST Prime mover and Governor/dhp zygos PV 2 Steam/ST Prime mover and Governor/zsr zygos PV 3 Diesel/DT Prime mover and Governor/Pm	1.00 0.34 0.74 0.47 0.12 0.13 0.41 0.46 0.47	Ταλάντωση ρύθμισης συχνότητας συστήματος

Το πρώτο ζεύγος ιδιοτιμών του Πίνακα 5.20 αντιστοιχεί την ταλάντωση που σχετίζεται με το σύστημα μετάδοσης της κίνησης στην Α/Γ Τύπου Α (Α/Π 4) και τα χαρακτηριστικά του ρυθμού αυτού είναι πανομοιότυπα με το σενάριο Α. Το δεύτερο ζεύγος ιδιοτιμών συνδέεται με την ηλεκτρομηχανική ταλάντωση των δύο σύγχρονων γεννητριών (Ατμοστροβίλος - Ντίζελ) που παραμένουν συνδεδεμένες μετά τη διαταραχή και οι μικροδιαφορές στους συντελεστές συμμετοχής, τη συχνότητα και το συντελεστή απόσβεσης είναι απόρροια του σχήματος παραγωγής για το σενάριο Β. Στο τρίτο ζεύγος, που σχετίζεται με τη ρύθμιση της συχνότητας, έχουμε αισθητή διαφορά σε όλα τα σχετιζόμενα μεγέθη και κυρίως στη συχνότητα του ρυθμού που πέφτει στο μισό. Έτσι έχουμε αύξηση των τιμών των συντελεστών συμμετοχής που συνδέονται με τη λειτουργία του ρυθμιστή στροφών του ατμοστροβίλου. Μάλιστα φαίνεται να εμπλέκεται και η ταχύτητα του ανεμοκινητήρα του Α/Π 4 στον ρυθμό αυτό. Τέλος να αναφερθεί ότι ο χαρακτηρισμός των ρυθμών έγινε ακολουθώντας την ίδια διαδικασία με το σενάριο Α. Απλά εδώ παραλείπεται η σχηματική επεξήγηση με τις γωνίες των δεξιών ιδιοδιανυσμάτων για λόγους οικονομίας.

5.4.3 Εναλλακτική κατανομή της παραγωγής από συμβατικές μονάδες

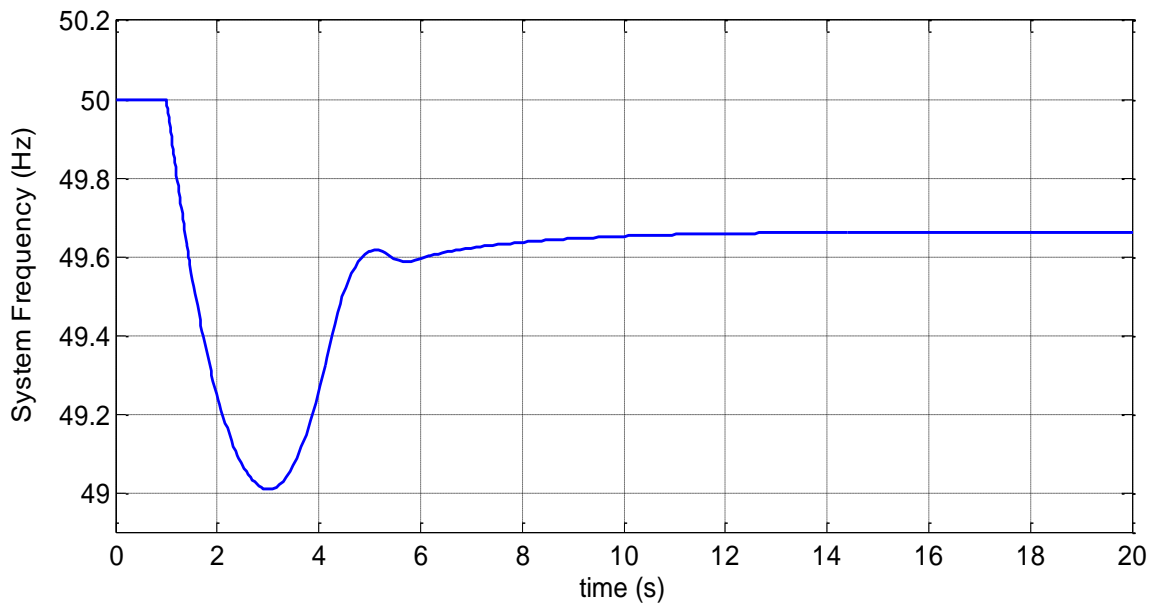
Όπως φάνηκε στο Σχ. 5.26, η μη ικανοποιητική απόκριση της συχνότητας του συστήματος οφείλεται στα όρια ρυθμού μεταβολής της παραγωγής και στρεφόμενης εφεδρείας. Στην υποενοότητα αυτή προτείνεται μια ανακατανομή της παραγωγής από τις συμβατικές μονάδες με σκοπό τη βελτίωση της απόκρισης της συχνότητας και την αποφυγή αποκοπής φορτίων. Ο λόγος που εξετάζεται μία τέτοια περίπτωση πηγάζει από την έλλειψη επαρκούς στρεφόμενης εφεδρείας με βάση το σχήμα παραγωγής που αρχικά θεωρήθηκε για το σενάριο Β. Επίσης λήφθηκε υπόψη και η ικανότητα των Ντιζελογεννητριών για γρηγορότερη ανάληψη φορτίου. Έτσι στο νέο σχήμα

παραγωγής θεωρούμε ότι εντάσσεται μία ακόμα μονάδα Diesel στο σταθμό Ν.Ρόδου, αυξάνοντας την συνολική παραγωγή του εν λόγω σταθμού σε 22,5 (3×7,5) MW από 15 MW που ήταν αρχικά. Παράλληλα διατηρείται η ίδια στρεφόμενη εφεδρεία (7,5 MW) για κάθε επιμέρους γεννήτρια του σταθμού. Η δε παραγωγή που ενσωματώθηκε σε αυτόν αφαιρείται αναλογικά από τις δύο γεννήτριες του ατμοηλεκτρικού σταθμού (Steam 1 ,2), οι οποίες πλέον παράγουν από 10,35 MW έκαστη. Αναλυτικά, το νέο σχήμα παραγωγής για τις συμβατικές μονάδες του νησιού παρατίθεται μαζί με το αρχικό στον Πίνακα 5.21. Σε αυτόν δεν περιλαμβάνεται η παραγωγή των Α/Π, που παραμένει ως είχε. Η μικρή αλλαγή στη παραγωγή της αεριοστροβλικής μονάδας οφείλεται στη επιλογή του ζυγού στον οποίο συνδέεται ως ζυγού αναφοράς για την επίλυση της αρχικής ροή φορτίου. Τα αποτελέσματα της ροής φορτίου για τις νέες αυτές συνθήκες λειτουργίας δίνονται επίσης στο Παράρτημα Δ.

Πίνακας 5.21: Αρχικό και εναλλακτικό σχήμα παραγωγής Ηλεκτρικού Συστήματος Ρόδου-Σενάριο Β

Μονάδα Παραγωγής	Ζυγός σύνδεσης μονάδας παραγωγής	Συνθήκες φορτίου Σεναρίου Β			
		Αρχική κατανομή		Βελτιωμένη κατανομή	
		Παραγόμενη ισχύς (MW)	Στρεφόμενη εφεδρεία (MW)	Παραγόμενη ισχύς (MW)	Στρεφόμενη εφεδρεία(MW)
Steam 1	ΣΟΡ (STEAM)	14,10	0,10	10,35	3,85
Steam 2	ΣΟΡ (STEAM)	14,10	0,10	10,35	3,85
Gas 1	ΣΟΡ (GAS)	-	-	-	-
Gas 2	ΣΟΡ (GAS)	-	-	-	-
Gas 3	ΣΟΡ (GAS)	-	-	-	-
Gas 4	ΣΟΡ (GAS)	13,19	14,31	13,15	14,35
Diesel 1	NΠΟΔ (DIESEL)	7,50	7,50	7,50	7,50
Diesel 2	NΠΟΔ (DIESEL)	7,50	7,50	7,50	7,50
Diesel 3	NΠΟΔ (DIESEL)	-	-	7,50	7,50
Diesel 4	NΠΟΔ (DIESEL)	-	-	-	-
Diesel 5	NΠΟΔ (DIESEL)	-	-	-	-
Diesel 6	NΠΟΔ (DIESEL)	-	-	-	-
Diesel 7	NΠΟΔ (DIESEL)	-	-	-	-
Diesel 8	NΠΟΔ (DIESEL)	-	-	-	-
Σύνολο παραγωγής θερμικών μονάδων και στρεφόμενης εφεδρείας		56,39	29,51	56,35	44,55

Επαναλαμβάνουμε τη διαδικασία της προσομοίωσης με τις αρχικές παραδοχές όσον αφορά τη λειτουργία των Α/Π (επιλογή PF χωρίς ρύθμιση της τερματικής τάσης) και την εμφανιζόμενη διαταραχή (αποσύνδεση αεριοστροβλικής μονάδας 4 τη στιγμή t=1 s). Η απόκριση της συχνότητας του συστήματος για τις νέες συνθήκες λειτουργίας φαίνεται στο Σχ. 5.31.

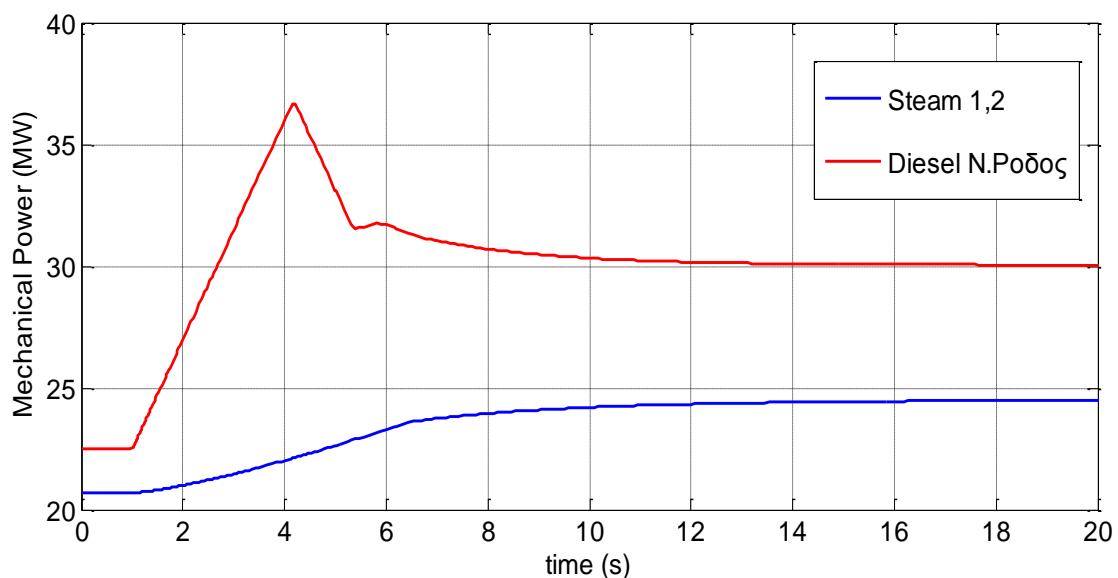


Σχήμα 5.31: Απόκριση Συχνότητας του συστήματος

Παρατηρούμε ότι το σύστημα είναι ευσταθές, πράγμα αναμενόμενο, με την τιμή της συχνότητας μάλιστα να παραμένει πάνω από 49 Hz κατά τη βύθιση και να σταθεροποιείται σχετικά γρήγορα (περίπου στα 8 s). Σχετικά με τις τιμές ενδιαφέροντος του μεγέθους της συχνότητας έχουμε:

- Μόνιμη κατάσταση $f_{ss}=49,665$ Hz
- Μεταβατική βύθιση $f_{min}=49,012$ Hz

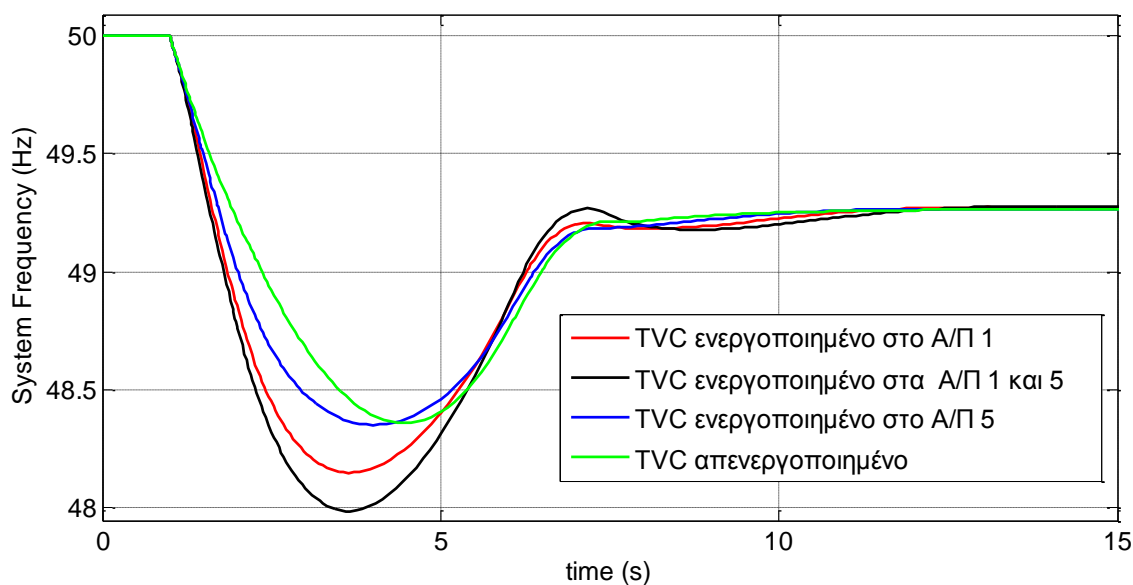
Έτσι με την εναλλακτική κατανομή της συμβατικής παραγωγής που θεωρήσαμε επετεύχθη αισθητή βελτίωση στην απόκριση της συχνότητας. Αποφεύγεται η ενεργοποίηση κάποιου H/N προστασίας υποσυχνότητας και υπάρχει επιπλέον κι ένα όριο ασφαλείας της τάξεως των 0,5 Hz περίπου από την τιμή (48,5 Hz) όπου ξεκινά η διαδικασία αποκοπής φορτίων. Στο Σχ. 5.32 φαίνονται και οι αποκρίσεις της παραγόμενης μηχανικής ισχύς των γεννητριών.



Σχήμα 5.32: Παραγόμενη μηχανική ισχύς συμβατικών μονάδων

Από το παραπάνω διάγραμμα φαίνεται η παραγωγή της ισοδύναμης ατμοηλεκτρικής μονάδας διαμορφώνεται στη μόνιμη κατάσταση σε 24,5 MW από 20,7 MW που ήταν αρχικά και της ισοδύναμης Ντίτζελ σε 30,04 MW από 21,5 MW που ήταν αρχικά. Γίνεται σαφές δηλαδή ότι η απολεσθείσα ισχύς της αεριοστροβιλικής μονάδας κατανέμεται καλύτερα ανάμεσα στις εναπομένουσες συμβατικές μονάδες σε σχέση με πριν. Και σε αυτή την περίπτωση έχουμε περιορισμό του ρυθμού μεταβολής της παραγωγής της ισοδύναμης Ντίτζελ μονάδας αλλά ο ρυθμός είναι μεγαλύτερος αφού προστέθηκε μία Ντιζελογεννήτρια ακόμη. Επίσης συμμετέχει στη ρύθμιση της συχνότητας και ο ατμοηλεκτρικός σταθμός αφού πλέον διαθέτει ικανή στρεφόμενη εφεδρεία. Σημαντικό πλεονέκτημα αποτελεί το γεγονός ότι οι γεννήτριες προβαίνουν στη πρωτεύουσα ρύθμιση της συχνότητας χωρίς να φτάνουν στο όριο της αποδιδόμενης ισχύος τους. Έτσι εκτός από καλύτερο προφίλ στην απόκριση της συχνότητας μειώνεται και η καταπόνηση των συμβατικών μονάδων.

Εν συνεχεία συγκρίνουμε πάλι της απόκριση συχνότητας για την περίπτωση που ενεργοποιείται ο έλεγχος τερματικής τάσης στα Α/Π 1 και 5. Το συγκριτικό γράφημα για την απόκριση της συχνότητας σε κάθε περίπτωση, φαίνεται στο Σχ. 5.33. Παρατηρούμε ότι για τη συγκεκριμένη κατανομή παραγωγής των συμβατικών μονάδων αποφεύγεται η αποκοπή φορτίου σε όλες τις επιμέρους περιπτώσεις. Βέβαια η αρνητική συμβολή της λειτουργίας TVC γίνεται εμφανής και εδώ όσον αφορά τα μεταβατικά χαρακτηριστικά της απόκρισης. Ακόμα όμως και για την περίπτωση που αυτή είναι ταυτόχρονα ενεργοποιημένη στα Α/Π 1 και 5, η ελάχιστη τιμή της συχνότητας του συστήματος είναι οριακά άνω του κατωφλίου δράσης των Η/Ν, δηλαδή τα 48,5 Hz.



Σχήμα 5.33: Απόκριση Συχνότητας του συστήματος

Επιβεβαιώθηκε λοιπόν ότι μια καλύτερη κατανομή της παραγωγής των συμβατικών μονάδων μπορεί να αποκλείσει το ενδεχόμενο αποκοπής φορτίων. Θα πρέπει να συνυπολογίσουμε όμως και το οικονομικό κόστος μιας τέτοιας επιλογής. Η ένταξη μιας επιπλέον μονάδας Ντίτζελ αυξάνει σημαντικά το λειτουργικό κόστος. Βέβαια στα πλαίσια της παρούσας εργασίας επικεντρώνουμε το ενδιαφέρον μας στη εύρεση τρόπων βελτίωσης του προφίλ της συχνότητας σε ενδεχόμενη διαταραχή και δεν επεκτεινόμαστε στην οικονομικοτεχνική ανάλυση. Ωστόσο είναι φρόνιμο να αναφερθούμε και στον οικονομικό αντίκτυπο που συνεπάγεται η προτεινόμενη κατανομή. Ακριβώς για το λόγο αυτό γεννάται η ανάγκη για την εύρεση εναλλακτικών τρόπων αντιμετώπισης του προβλήματος που προέκυψε για το σενάριο Β. Συγκεκριμένα στο επόμενο κεφάλαιο θα αναλυθεί ο τρόπος με τον οποίο τα Α/Π μπορούν να συνεισφέρουν στη βελτίωση των χαρακτηριστικών μεταβατικής απόκρισης της συχνότητας μετά τη διαταραχή.

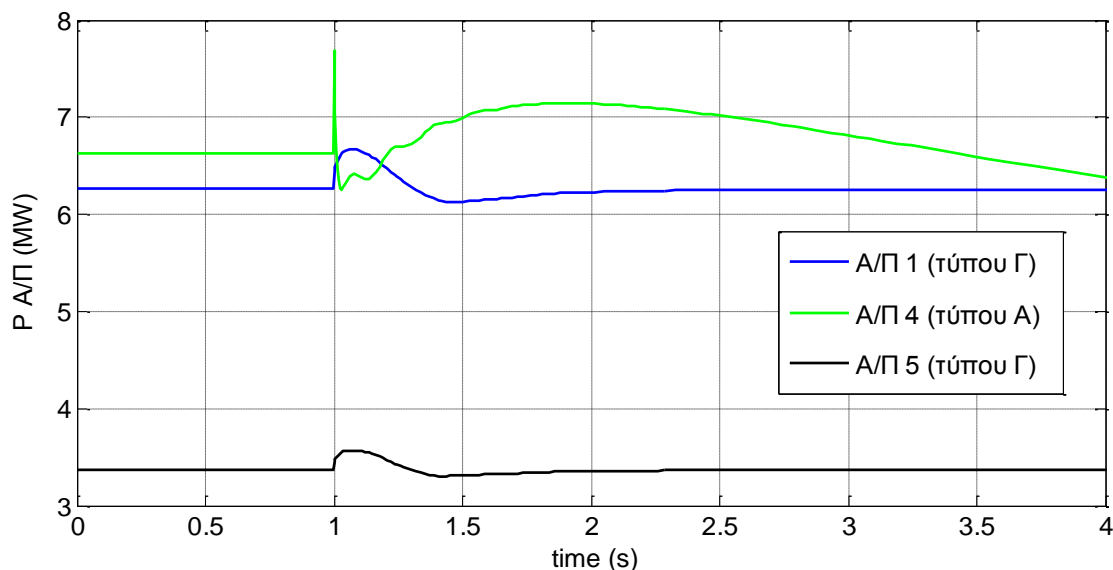
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

Σχεδίαση ελεγκτή αδραειακής απόκρισης στα Α/Π του συστήματος της Ρόδου

6.1 Γενικά περί εξομοιωτή αδραειάς – ελεγκτή αδραειακής απόκρισης

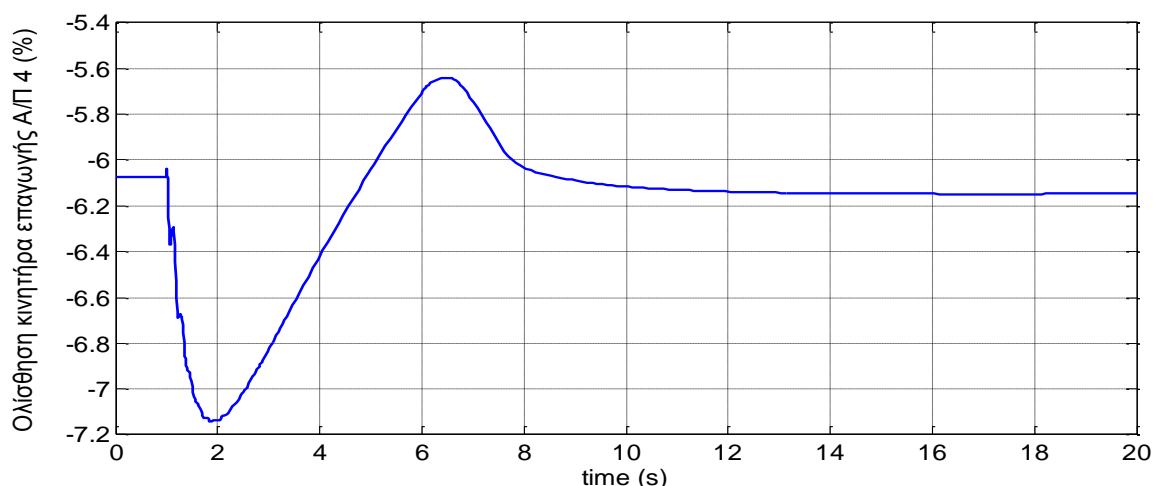
Όπως αναφέρθηκε και στην εισαγωγή (παράγραφος 1.7.3), σφάλματα στο δίκτυο που περιλαμβάνουν απώλεια παραγωγής (όπως αυτό που προσομοιώθηκε στο κεφάλαιο 5) συντελούν στη μεταβατική βύθιση της συχνότητας του συστήματος. Ιδιαίτερα στα αυτόνομα συστήματα που δεν μπορούν να βασιστούν σε ένα μεγαλύτερο σύστημα για να εξασφαλιστεί το ισοζύγιο ενέργειας, οι συνέπειες μιας τέτοιας διαταραχής είναι εντονότερες. Ο ρυθμός πτώσης της συχνότητας μετά το σφάλμα, η ελάχιστη εμφανιζόμενη τιμή κατά τη βύθιση και ο χρόνος επαναφοράς στη μόνιμη κατάσταση εξαρτάται από τη δυναμική των σύγχρονων γεννητριών που παραμένουν συνδεδεμένες στο αυτόνομο σύστημα. Συγκεκριμένα κατά τα πρώτα δευτερόλεπτα μετά την απώλεια παραγωγής, η δυναμική της συχνότητας του συστήματος κυριαρχείται από την απόκριση αδραειάς των συμβατικών μονάδων. Αυτές, από τη φύση των σύγχρονων γεννητριών, συνεισφέρουν από την κινητική τους ενέργεια στο σύστημα συμβάλλοντας στον αρχικό ρυθμό πτώσης της συχνότητας έως ότου δράσουν οι ρυθμιστές στροφών και αναπροσαρμόσουν την παραγόμενη μηχανική ισχύ.

Σε περιπτώσεις όπου έχουμε αυξημένη αιολική διείσδυση, το πρόβλημα της ρύθμισης της συχνότητας μπορεί να γίνει ακόμα εντονότερο. Από τη στιγμή που η αιολική παραγωγή συμμετέχει για την κάλυψη σημαντικού ποσοστού της ζήτησης περιορίζεται αντίστοιχα και το ποσοστό συμμετοχής των συμβατικών μονάδων παραγωγής. Έτσι μειώνεται η συσσωρευμένη κινητική ενέργεια των σύγχρονων μηχανών και αυξάνει ο ρυθμός πτώσης στη μεταβατική βύθιση της συχνότητας. Τα αποτελέσματα που πρόεκυψαν για παράδειγμα στην παράγραφο 5.4.1 επιβεβαιώνουν του λόγου το αληθές, αφού προέκυψε η ανάγκη για εκτεταμένη αποκοπή φορτίου. Οι ανεμογεννήτριες συμμετέχουν στην απόκριση, εκτός από τις Α/Γ πλήρους μετατροπέα όπου η γεννήτρια είναι μαγνητικώς αποσυζευγμένη από το δίκτυο. Παραθέτουμε στο Σχ. 6.1 την απόκριση ενεργού ισχύος στην έξοδο των Α/Γ τύπου Α και Γ για το σενάριο Β (αρχικά κατανομή παραγωγής του προηγούμενου κεφαλαίου), εστιάζοντας στα πρώτα δευτερόλεπτα μετά τη διαταραχή (απώλεια αεροστροβιλικής μονάδας, βλ Κεφ. 5).

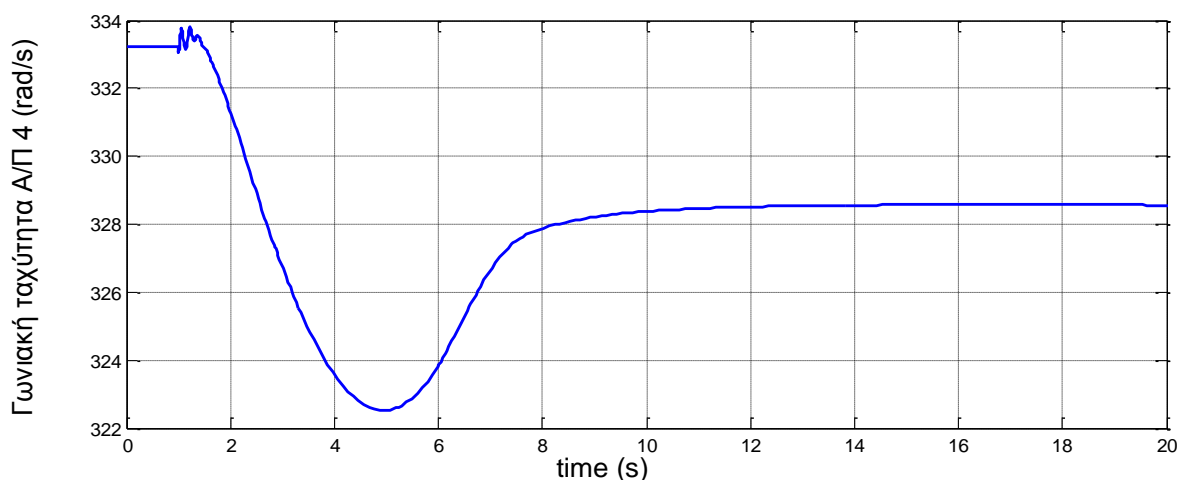


Σχήμα 6.1: Παραγόμενη Ενεργός Ισχύς Α/Π 1, 4, 5 για το Β Σενάριο λειτουργίας του ΣΗΕ της Ρόδου

Παρατηρούμε στο Σχ. 6.1 πως προκύπτει μια παροδική αύξηση στην εγγεόμενη ενεργό ισχύ των αιολικών πάρκων. Λόγω της απευθείας σύνδεσης των ανεμογεννητριών τύπου A στο δίκτυο, κατά την εμφάνιση του σφάλματος η εγκλωβισμένη μαγνητική ροή ($HE\Delta E'$) προκαλεί ακαριαία έγχυση ισχύος. Η ενεργός παραγωγή στη συνέχεια επιβραδύνει το δρομέα της μηχανής επαγωγής, της οποίας η διέγερση μειώνεται ταχύτατα (απομαγνήτιση) κι έτσι η μεταβατική έγχυση ισχύος διαρκεί πολύ λίγο. Ακολουθεί μια βραδύτερη μεταβατική απόκριση μέχρι να ισοροπήσει σε μια νέα τιμή η ταχύτητα (Σχ. 6.3) και η ολίσθηση (Σχ. 6.2, επί τοις εκατό). Στις ΑΓΔΤ υπάρχει η απευθείας σύνδεση του στάτη στο δίκτυο, όμως στα πλαίσια της μοντελοποίησης τους ως ελεγχόμενων πηγών ρεύματος, όπως περιγράφηκε στην ενότητα 4.3.1, δεν έχουμε αναλυτική αναπαράσταση της δυναμικής της μηχανής επαγωγής. Βέβαια η ύπαρξη του βρόχου κλειδώματος φάσης (PLL) και της ισοδύναμης αντίδρασης X_{eq} αποτυπώνει τη δυναμική της ως ένα βαθμό. Ωστόσο η ταχύτατη δράση των ηλεκτρονικών ισχύος επαναφέρει αμέσως την παραγόμενη ισχύ. Έτσι η μέγιστη αύξηση είναι της τάξης του μόλις 4 με 5% στις ανεμογεννήτριες τύπου Γ και λίγο πάνω από 10% στην ανεμογεννήτριες τύπου A, σε σχέση με τις αρχικές τιμές ενεργού ισχύος. Η ισχυρή ηλεκτρομαγνητική σύζευξη που υπάρχει στην περίπτωση της ανεμογεννήτριας σταθερών στροφών, όπου δεν παρεμβάλλονται ηλεκτρονικά ισχύος και κυριαρχεί η δυναμική της μηχανής επαγωγής, δικαιολογεί την εντονότερη απόκριση αυτής. Αντίθετα η συμβολή των ανεμογεννητριών μεταβλητών στροφών στην άμβλυνση των φαινομένων της μεταβατικής βύθισης της συχνότητας είναι ελάσσονος σημασίας .

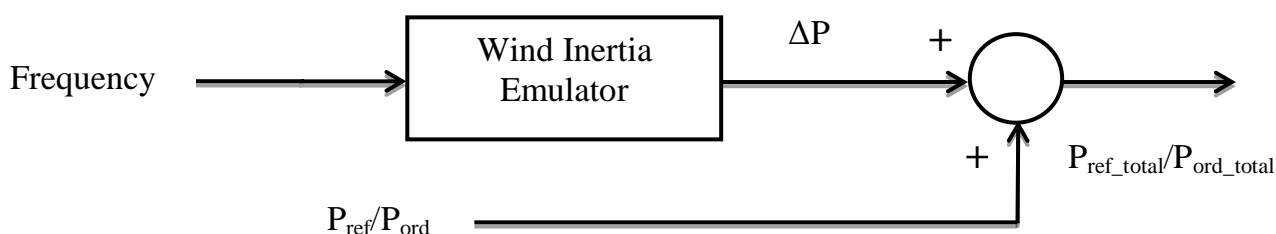


Σχήμα 6.2: Ολίσθηση της ισοδύναμης Α/Γ του Α/Π 4 (τύπου Α)



Σχήμα 6.3: Γωνιακή ταχύτητα δρομέα ισοδύναμης Α/Γ του Α/Π 4 (τύπου Α)

Η θετική συμβολή από μέρους των ανεμογεννητριών μεταβλητών στροφών είναι δυνατή με τη συμμετοχή τους στην αδρανειακή απόκριση του συστήματος, υποβοηθώντας κατ' αυτό τον τρόπο το έργο των συμβατικών μονάδων. Μπορούν δηλαδή οι Α/Γ μεταβλητών στροφών να επιβραδυνθούν προσωρινά, εκμεταλλευόμενες έτσι την κινητική ενέργεια που είναι αποθηκευμένη στον άξονά τους, και να εγχύσουν αυξημένη ενεργό ισχύ στο σύστημα για σύντομο χρονικό διάστημα. Κάτι τέτοιο μπορεί να επιτευχθεί με την κατάλληλη προσαρμογή του σχήματος ελέγχου που αφορά στη διαμόρφωση του σήματος αναφοράς P_{ref} (ή P_{ord}) για την παραγόμενη ενεργό ισχύ (βλ. ενότητα 4.31 και 4.3.3). Ανεξαρτήτως των επιμέρους διαφορών των ανεμογεννητριών τύπου Γ και Δ η λογική που ακολουθείται είναι κοινή. Έτσι προστίθεται στο P_{ref} (ή P_{ord}) ένα σήμα προερχόμενο από τον εξομοιωτή αδρανείας [30,31] όπως φαίνεται στο Σχ. 6.4. Ο εξομοιωτής αδρανείας (Wind Inertia Emulator), αποτελεί ένα κατάλληλα διαμορφωμένο ελεγκτή που παρέχει ένα επιπλέον σήμα αναφοράς ΔP ανάλογα με την πτώση στη συχνότητα του συστήματος. Η επιλογή των παραμέτρων που χαρακτηρίζουν τη λειτουργία του εν λόγω ελεγκτή αποτελεί θέμα σχεδίασης. Σχετίζεται τόσο με τη συνολική επιθυμητή συμπεριφορά του ηλεκτρικού συστήματος όσο και με τη επιθυμητή συμπεριφορά των επιμέρους συνιστωσών στις οποίες δρα, δηλαδή των ανεμογεννητριών μεταβλητών στροφών.



Σχ. 6.4: Γενική μορφή ελεγκτή αδρανειακής απόκρισης στις Α/Γ μεταβλητών στροφών

6.2 Σχεδίαση ελεγκτή αδρανειακής απόκρισης στις Α/Γ μεταβλητών στροφών της Ρόδου

6.2.1 Μοντέλο ελεγκτή αδρανειακής απόκρισης

Όπως προέκυψε από την προσομοίωση του συστήματος της Ρόδου στην παράγραφο 5.4.1, σε συνθήκες μέγιστης αιολικής διεύθυνσης, η απώλεια της παραγωγής της αεριοστροβλικής μονάδας 4 οδήγησε σε έντονη μεταβατική βύθιση της συχνότητας και εντέλει στην ανάγκη για αποκοπή φορτίου. Στην παρούσα ενότητα θα εξεταστεί η θετική δράση που έχει στο προφίλ της συχνότητας του συστήματος η προσαρμογή του αδρανειακού ελεγκτή στις Α/Γ μεταβλητών στροφών του νησιού (Α/Π 1, 2, 3, 5). Να σημειωθεί ότι στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, αντί για το μέγεθος της συχνότητας χρησιμοποιείται η ανηγμένη γωνιακή ταχύτητα του σύγχρονου πλαισίου αναφοράς του συστήματος ω_{sys} ως είσοδος για τους αδρανειακούς ελεγκτές. Υπενθυμίζεται ότι αυτή στα πλαίσια της προσομοίωσης υπολογίζεται βάσει της σχέσης (2.1) συναρτήσει των στροφών των σύγχρονων γεννητριών (σταθμισμένη μέση). Έτσι το σήμα ΔP στην έξοδο του ελεγκτή αδρανειακής απόκρισης προκύπτει με βάση τη ακόλουθη συνάρτηση μεταφοράς:

$$\Delta P = k \frac{sT_w}{1 + sT_w} \Delta \omega \quad (6.1)$$

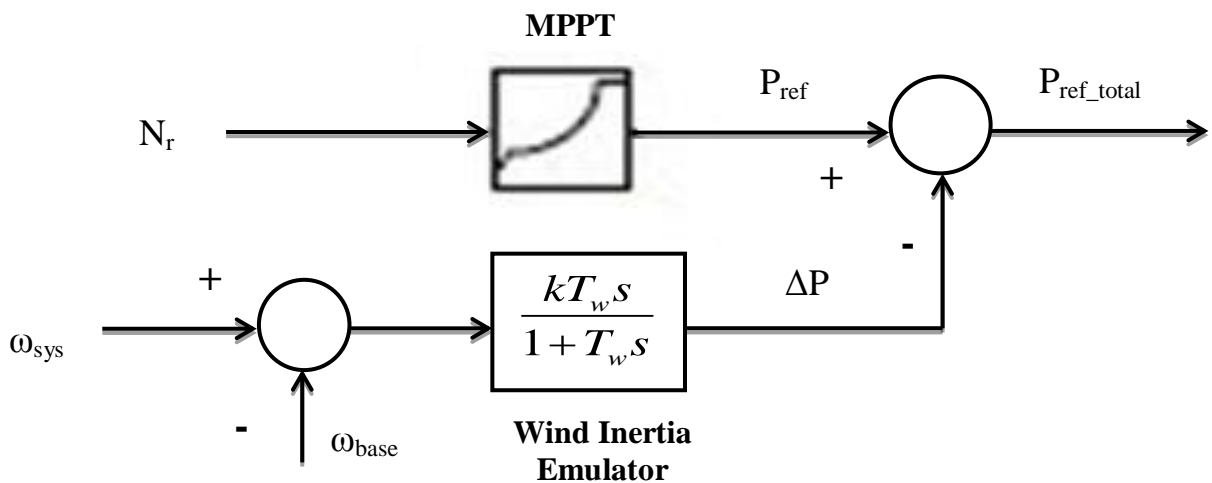
όπου το $\Delta \omega$ είναι σε αμ και ισχύει:

$$\Delta\omega = \omega_{sys} - \omega_{base} \quad (6.2)$$

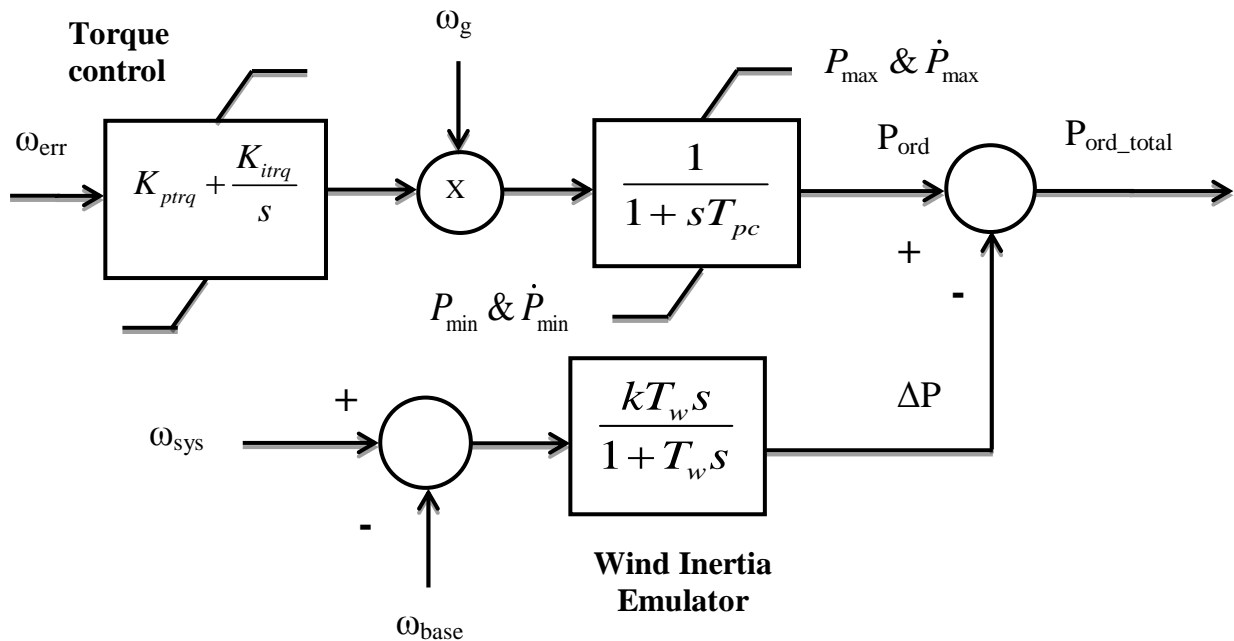
Ουσιαστικά πρόκειται για ένα υψιπερατό φίλτρο που δέχεται ως είσοδο τη συχνότητα του συστήματος (ή το σφάλμα από την ονομαστική της τιμή) και παρέχει στη έξοδό του ένα σήμα ΔP ίσο με την πρόσθετη ενεργό ισχύ λόγω αδρανειακής απόκρισης. Φυσικά στη μόνιμη κατάσταση η έξοδος του φίλτρου είναι μηδενική.

Οι παράμετροι T_w και k καθορίζουν τα επιθυμητά χαρακτηριστικά λειτουργίας του περιγραφόμενου ελεγκτή. Στην ανάλυση που θα ακολουθήσει θα γίνει η επιλογή κατάλληλων τιμών χωριστά για την περίπτωση του ασύγχρονων γεννητριών διπλής τροφοδότησης (μοντέλο DFAG2) και των ανεμογεννητριών πλήρους μετατροπέα (μοντέλο FCWT1) επιδιώκοντας χαρακτηριστικά σθεναρού ελέγχου. Θα μελετηθεί δηλαδή η ευαισθησία ως προς τις παραμέτρους αυτές τόσο του συστήματος συνολικά όσο και των επιμέρους ανεμογεννητριών. Τα σχήματα ελέγχου στροφών από τα οποία προκύπτει η εντολή P_{ref} (ή P_{ord}) για τα μοντέλα FCWT1 (Σχ. 4.20) και DFAG2 (Σχ. 4.12), που χρησιμοποιήθηκαν στην προσομοίωση του συστήματος της Ρόδου, προσαρμόζονται όπως φαίνεται στα Σχ. 6.5 και 6.6 αντίστοιχα. Να σημειωθεί επίσης ότι δεν λαμβάνουμε υπόψη τη χρονική καθυστέρηση μέτρησης της συχνότητας στον τερματικό ζυγό των Α/Γ. Έτσι με την προσθήκη του ελεγκτή αδρανειακής απόκρισης το τελικό σήμα για την εντολή έγχυσης ενεργού ισχύος P_{ref_total} (ή P_{ord_total}) στις Α/Γ μεταβλητών στροφών προκύπτει ως άθροισμα των σημάτων P_{ref} (ή P_{ord}) και ΔP .

Αξίζει στο σημείο αυτό να γίνουν δύο παρατηρήσεις σχετικά με την προσαρμογή του αδρανειακού ελεγκτή στα μοντέλα που αναφέρθηκαν. Καταρχάς η σύμβαση που ακολουθήθηκε για το $\Delta\omega$ σημαίνει πως αυτό είναι έχει αρνητικό πρόσημο όταν έχουμε πτώση στη συχνότητα. Επομένως και το σήμα ΔP θα είναι αρνητικό σε αυτή την περίπτωση και για αυτό το λόγο εισάγεται με αρνητικό πρόσημο στον αθροιστή από όπου προκύπτει η τελική εντολή για την εγχεόμενη ενεργό ισχύ. Επίσης θα πρέπει να αναφερθεί και μια τεχνική λεπτομέρεια σχετικά με μια διαφορά υλοποίησης ανάμεσα στα δύο μοντέλα στα πλαίσια του WHSSP. Το μέγεθος ΔP εξαρτάται από την ονομαστική ισχύ της κάθε ανεμογεννήτριας. Όσο μεγαλύτερη είναι αυτή τόσο μεγαλύτερη και η εντολή ΔP που θα προκύψει λόγω μεταβολής της συχνότητας. Στο μοντέλο DFAG2 λόγω μοντελοποίησης αυτό προκύπτει άμεσα στα ονομαστικά της μεγέθη. Αντίθετα στο μοντέλο FCWT1 όλα τα εσωτερικά μεγέθη μετατρέπονται στη βάση του συστήματος. Έτσι για να προκύψει το σωστό ΔP αναλογικά με την ονομαστική ισχύ της Α/Γ θα πρέπει να γίνει αναγωγή αυτού στα ονομαστικά της μεγέθη. Για λόγους απλοποίησης κάτι τέτοιο δεν φαίνεται στο Σχ. 6.5.



Σχ. 6.5: Προσαρμογή ελεγκτή αδρανειακής απόκρισης στο σχήμα ελέγχου στροφών των ανεμογεννητριών πλήρους μετατροπέα (μοντέλο FCWT1)

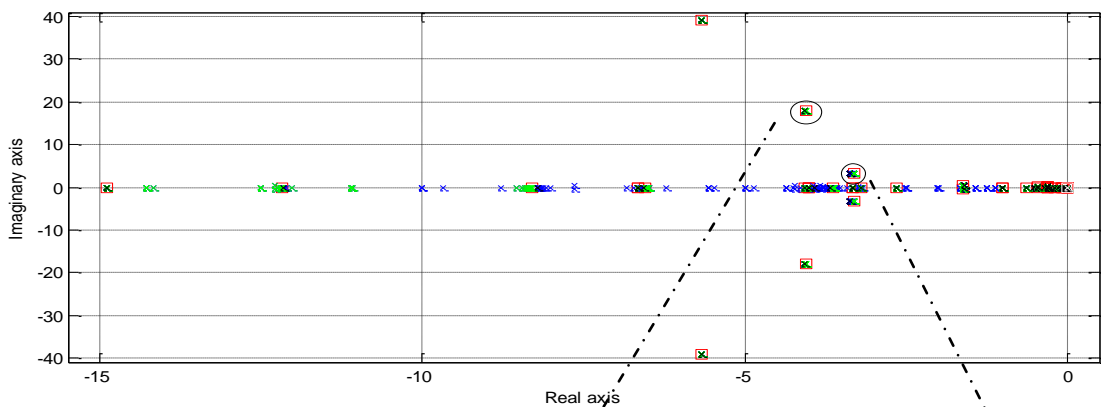


Σχ. 6.6: Προσαρμογή ελεγκτή αδρανειακής απόκρισης στο σχήμα ελέγχου στροφών των ΑΓΔΤ (μοντέλο DFAG2)

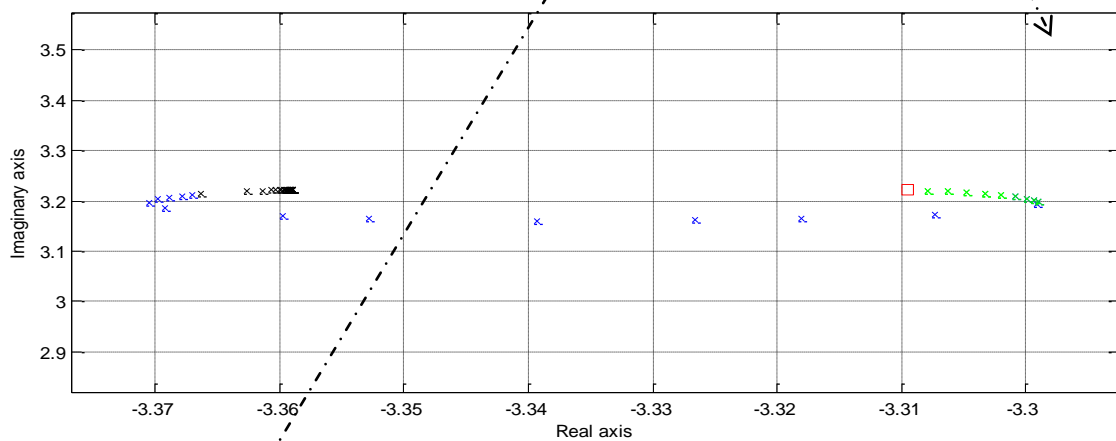
6.2.2 Σχεδιασμός ελεγκτή αδρανειακής απόκρισης για τις ασύγχρονες γεννήτριες διπλής τροφοδότησης

Προτού ερευνήσουμε την επίδραση των παραμέτρων του εξομοιωτή αδρανείας στα χαρακτηριστικά της μεταβατικής βύθισης της συχνότητας, εξετάζουμε την επίδραση στους ταλαντωτικούς ρυθμούς που συνοψίζονται στον Πίνακα 5.20 του προηγούμενου Κεφαλαίου. Επικεντρώνουμε το ενδιαφέρον μας στους ρυθμούς που σχετίζονται με την απόκριση των ταχυτήτων των σύγχρονων γεννητριών και επομένως της σταθμισμένης συχνότητας του συστήματος. Εξετάζουμε την κίνηση των ιδιοτιμών του ρυθμού ηλεκτρομηχανικής ταλάντωσης και του ρυθμού ρύθμισης της συχνότητας στο μιγαδικό επίπεδο, όταν μεταβάλλονται οι παράμετροι k και T_w του ελεγκτή αδρανειακής απόκρισης. Για την ανάλυση ευαισθησίας θεωρούμε ενεργοποιημένο τον ελεγκτή μόνο στην ισοδύναμη ανεμογεννήτρια του Α/Π 1, που είναι η ΑΓΔΤ με τη μεγαλύτερη ονομαστική ισχύ στο νησί. Ο ελεγκτής θεωρείται απενεργοποιημένος στις ανεμογεννήτριες πλήρους μετατροπέα που θα εξεταστούν χωριστά. Αρχικά, ακολουθώντας τη διαδικασία γραμμικοποίησης όπως περιγράφηκε κεφάλαιο 5, εξετάζουμε τη μεταβολή των ιδιοτιμών του συστήματος για δεδομένη τιμή του κέρδους k του ελεγκτή και μεταβαλλόμενη την τιμή της παραμέτρου T_w του φίλτρου. Για διευκόλυνση της ανάλυσης ευαισθησίας σημειώνεται με αντιπροσωπευτικό χρώμα η θέση της κάθε ιδιοτιμής ανάλογα με το εύρος τιμών που κινείται το T_w . Έτσι με κόκκινο \square έχουμε την αρχική θέση της ιδιοτιμής ($T_w=0$, πίνακας 5.20), με πράσινο \times σημειώνεται η κίνησή της για το εύρος τιμών του T_w από 0,01 ως 0,1 s, με μπλε \times από 0,1 ως 1 s και με μαύρο \times από 1 ως 30 s. Στα Σχ. 6.7 έως 6.19 παρουσιάζεται η επίδραση της μεταβολής του T_w στις ιδιοτιμές του συστήματος, εστιάζοντας στην επίδραση στον ρυθμό ρύθμισης της συχνότητας και ρυθμό ηλεκτρομηχανικής ταλάντωσης για διάφορες ενδεικτικές τιμές του κέρδους k .

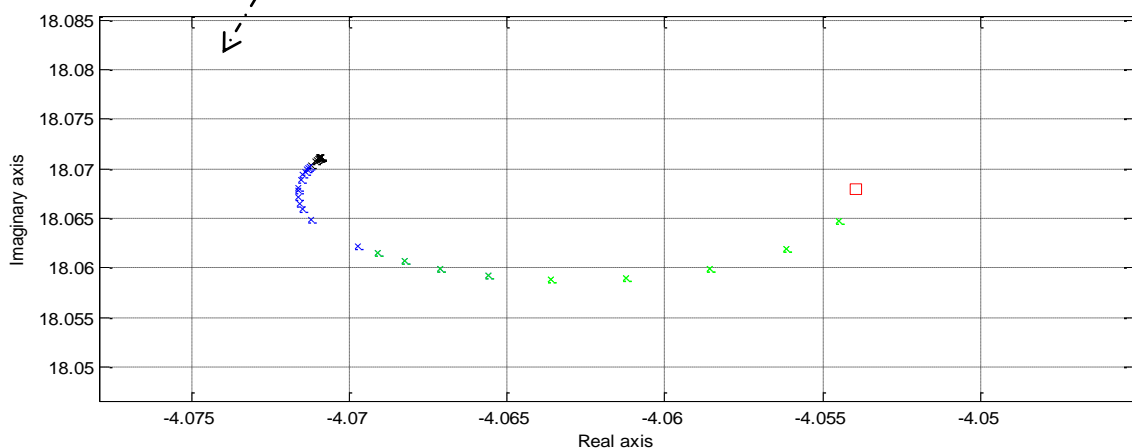
$k=1$:



Σχ. 6.7: Μεταβολή ιδιοτιμών (πραγματικό μέρος > -16) για $k=1$ και T_w μεταβαλλόμενο



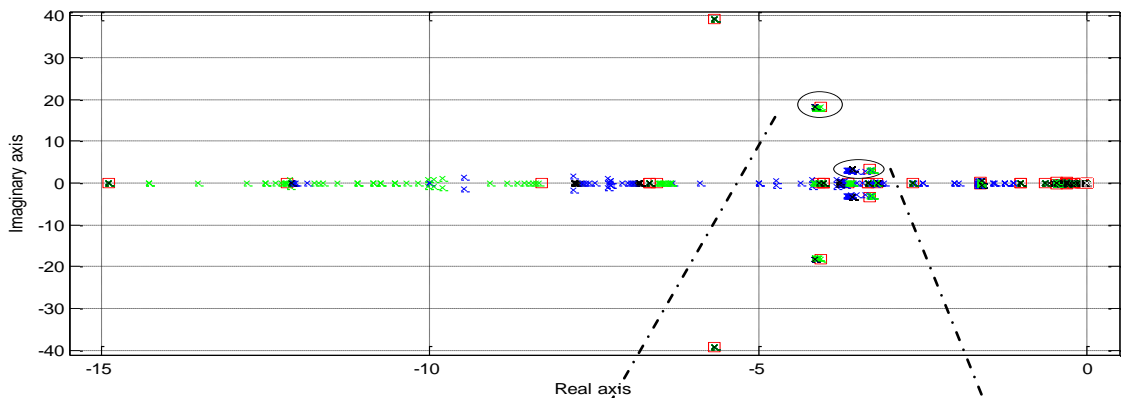
Σχ. 6.8: Μεταβολή ιδιοτιμής ρύθμισης συχνότητας για $k=1$ και T_w μεταβαλλόμενο



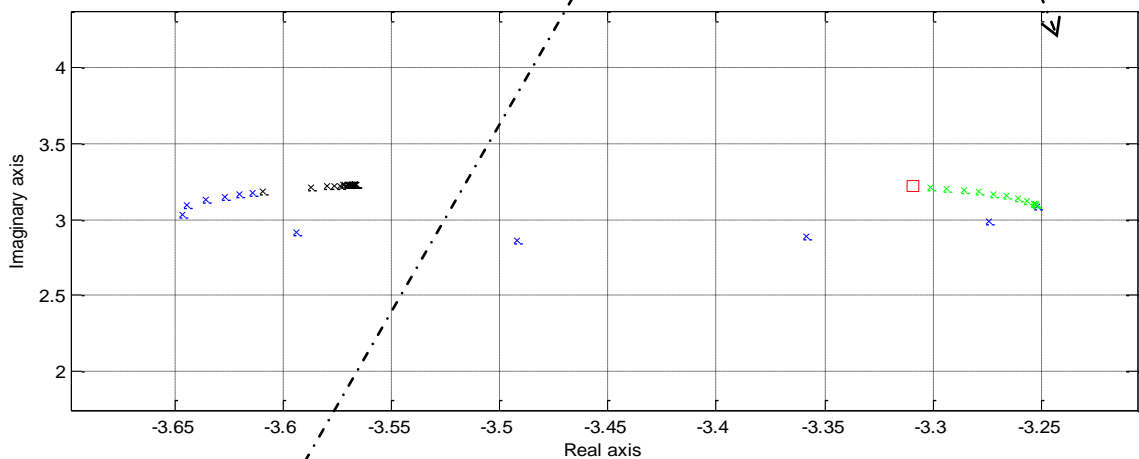
Σχ. 6.9: Μεταβολή ιδιοτιμής ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων για $k=1$ και T_w μεταβαλλόμενο

Για $k=1$ παρατηρείται στο Σχ. 6.8 μικρή ευαισθησία στον ρυθμό ρύθμισης συχνότητας για μεταβολή του T_w από 0,1 έως 0,4 s αν και πρακτικά ο συντελεστής απόσβεσης ζ δεν μεταβάλλεται πολύ, κυμαινόμενος σε τιμές από 0,717 έως 0,727 περίπου. Ομοίως και η συχνότητα κυμαίνεται γύρω από τα 0,51 Hz. Μάλιστα για τιμές του T_w μεγαλύτερες του 1 s η ιδιοτιμή φαίνεται να σταθεροποιείται. Μικρή είναι η επίδραση της μεταβολής του T_w στον ηλεκτρομηχανικό ρυθμό (Σχ. 6.9), κυρίως στο εύρος 0,01 έως 0,1 .

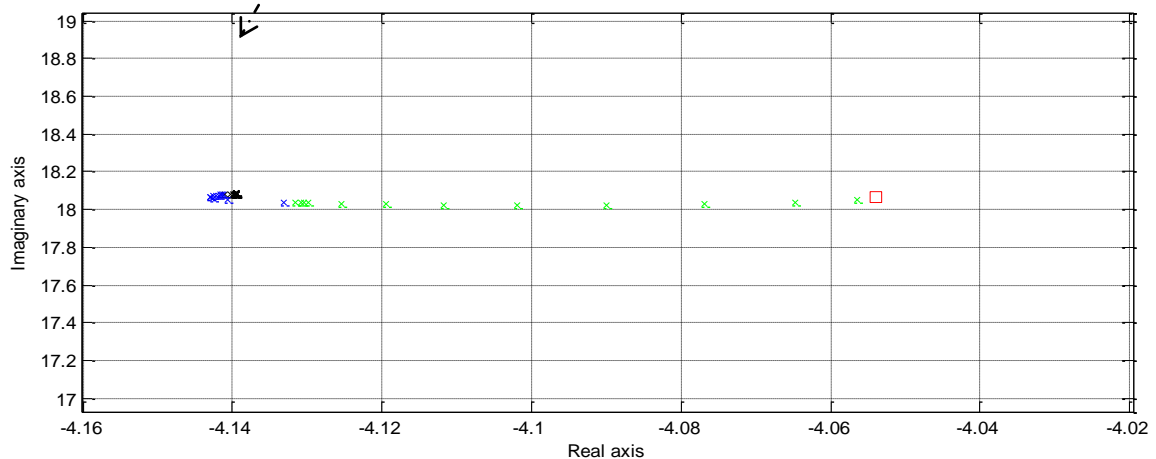
$k=5$:



Σχ. 6.10: Μεταβολή ιδιοτιμών (πραγματικό μέρος > -16) για $k=5$ και T_w μεταβαλλόμενο



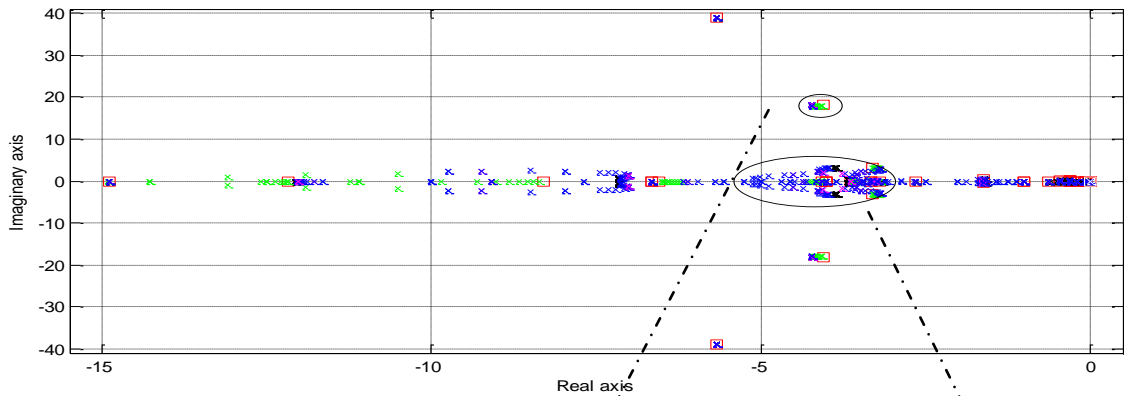
Σχ. 6.11: Μεταβολή ιδιοτιμής ρύθμισης συχνότητας για $k=5$ και T_w μεταβαλλόμενο



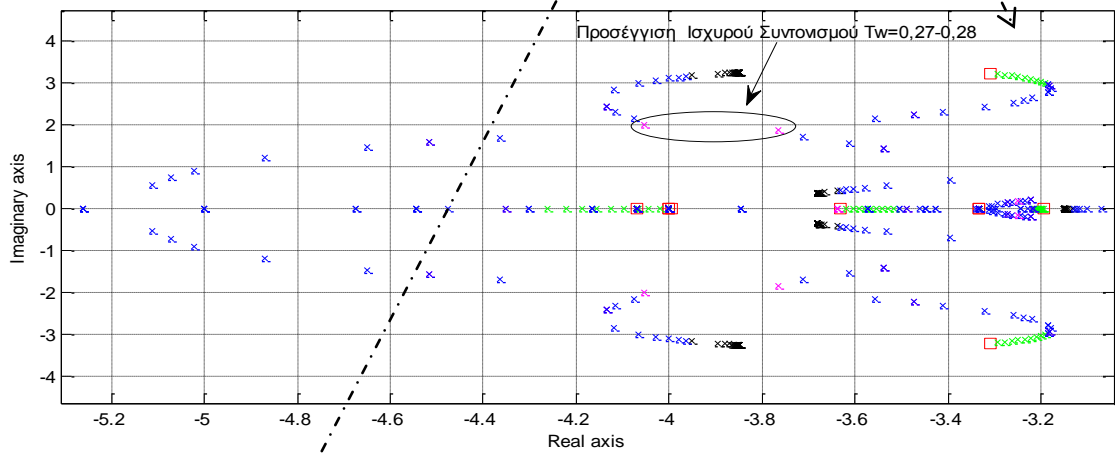
Σχ. 6.12: Μεταβολή ιδιοτιμής ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων για $k=5$ και T_w μεταβαλλόμενο

Παρόμοια συμπεριφορά παρατηρείται στο Σχ. 6.11 και για $k=5$ με τη μεγαλύτερη ευαισθησία στο ρυθμό ρύθμισης της συχνότητας να παρουσιάζεται για μεταβολή του T_w από 0,1 έως 0,4 s. Ο συντελεστής απόσβεσης ζ μεταβάλλεται από 0,717 έως 0,78 περίπου και η συχνότητα κυμαίνεται πάλι γύρω από τα 0,5 Hz αλλά σε λίγο μεγαλύτερο εύρος σε σχέση με πριν (0,46 με 0,52 Hz). Κι εδώ η ιδιοτιμή σταθεροποιείται για T_w μεγαλύτερο του 1 s, ενώ ο ηλεκτρομηχανικός ρυθμός επηρεάζεται ελάχιστα από τη μεταβολή του T_w , όπως φαίνεται στο Σχ. 6.12.

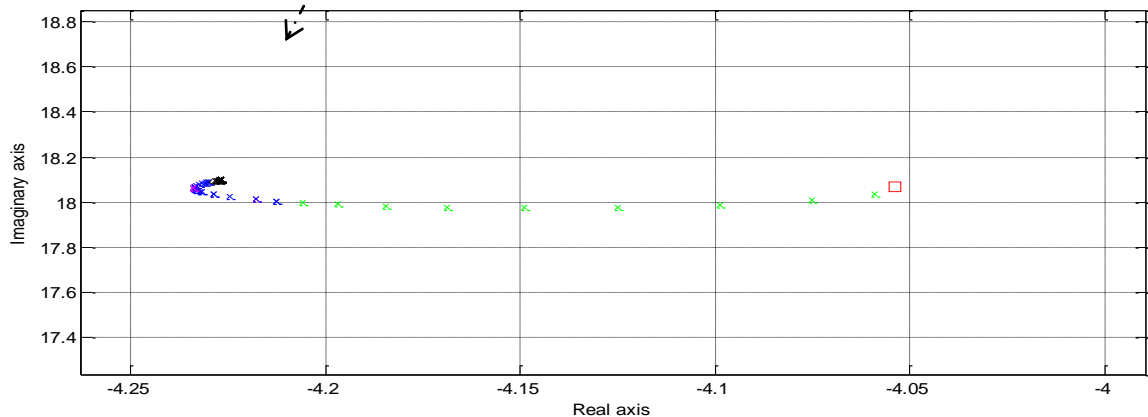
$K=10$:



Σχ. 6.13: Μεταβολή ιδιοτιμών, (πραγματικό μέρος > -16) για $k=10$ και T_w μεταβαλλόμενο



Σχ. 6.14: Μεταβολή ιδιοτιμής ρύθμισης συχνότητας για $k=10$ και T_w μεταβαλλόμενο

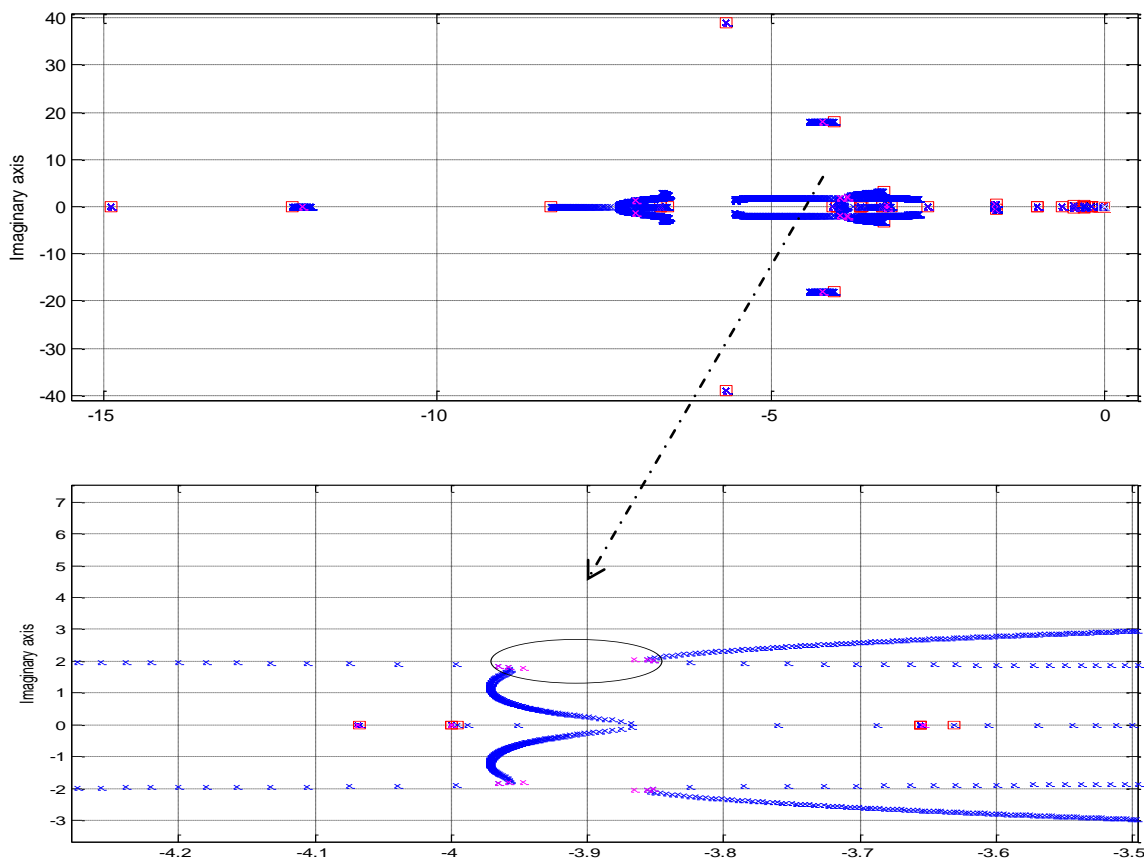


Σχ. 6.15: Μεταβολή ιδιοτιμής ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων για $k=10$ και T_w μεταβαλλόμενο

Για $k=10$ παρατηρείται στο Σχ. 6.14 μεγάλη ευαισθησία στο ρυθμό ρύθμισης συχνότητας για τιμές του T_w από 0,1 έως 0,5 s. Σε αυτή την περίπτωση όμως δύο ιδιοτιμές συντονίζονται, και ανάλογα με την τιμή του T_w , κυριαρχούν στη ρύθμιση της συχνότητας (πρακτικά στις ταχύτητες των σύγχρονων γεννητριών με βάση τους συντελεστές συμμετοχής). Έτσι εδώ το ζ του ρυθμού αλλάζει αρκετά (από 0,717 έως 0,87 περίπου) για μικρό εύρος τιμών αφού η μία ιδιοτιμή καταλήγει στον πραγματικό άξονα κι αυτή που εντέλει κυριαρχεί σταθεροποιείται σε μία περιοχή πλησίον του

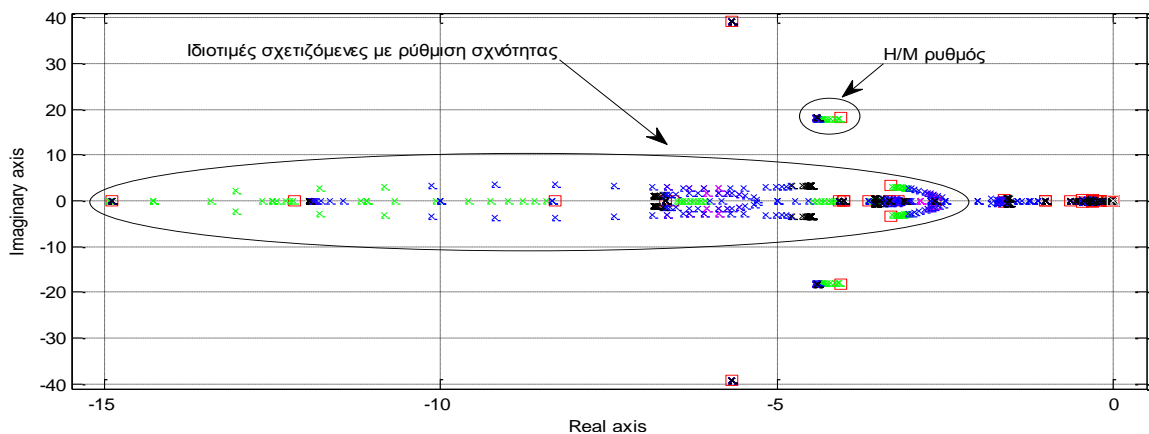
σημείου εκκίνησης του κλάδου της άλλης. Και εδώ για τιμές του T_w άνω του 1 s έχουμε σταθεροποίηση με το ζ να κυμαίνεται γύρω από το 0,77. Η επίδραση στον ηλεκτρομηχανικό ρυθμό παραμένει αμελητέα (Σχ. 6.15).

Επομένως παρατηρώντας αυτή την προσέγγιση ισχυρού συντονισμού για T_w περίπου ίσο με 0.273 s κατασκευάζουμε τώρα τον γεωμετρικό τόπο ριζών του συστήματος (Σχ. 6.15α) για αυτή τη τιμή του T_w και μεταβλητό k ώστε να προσεγγιστεί καλύτερα το φαινόμενο του ισχυρού συντονισμού. Όντως για k ίσο με 9,8 περίπου προσεγγίζεται ικανοποιητικά το φαινόμενο του ισχυρού συντονισμού όπως φαίνεται στο Σχ. 6.16β.

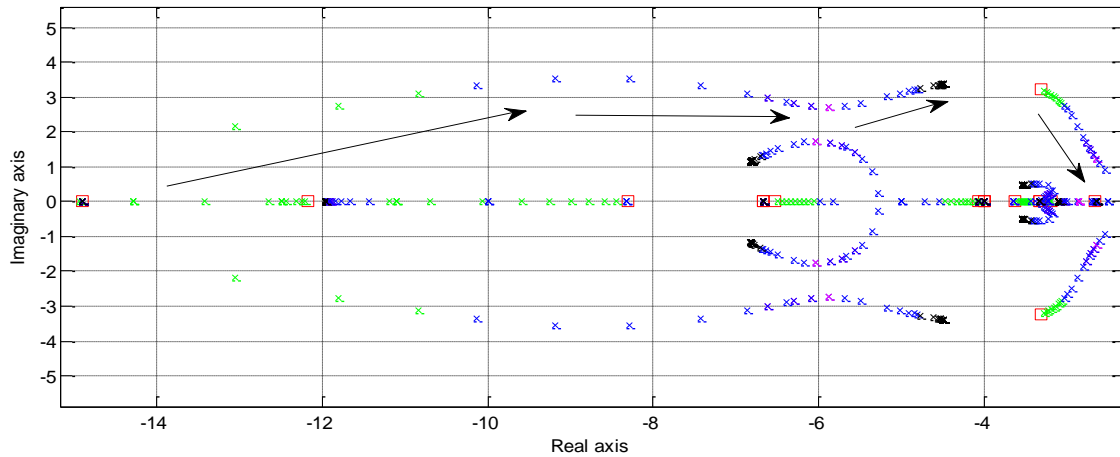


Σχ. 6.16α,β: Προσέγγιση φαινομένου ισχυρού συντονισμού

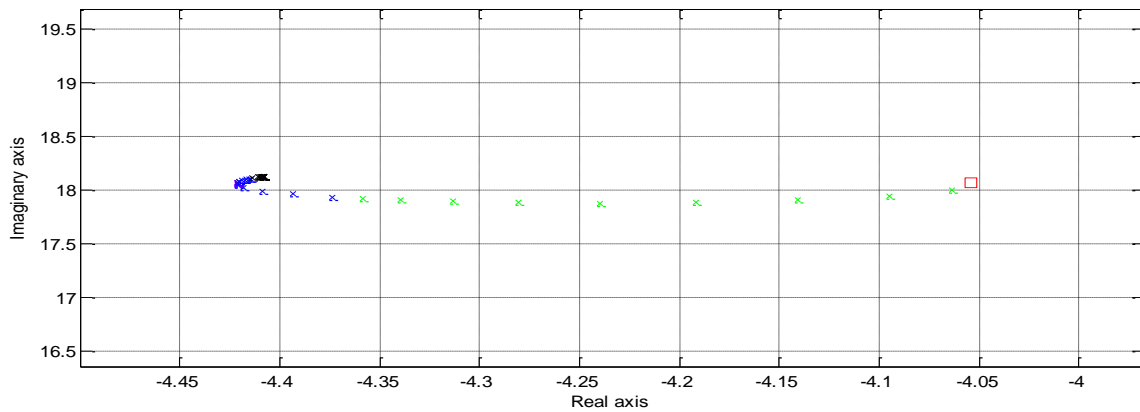
$k=20$:



Σχ. 6.17: Μεταβολή ιδιοτιμών (πραγματικό μέρος > -16) για $k=20$ και T_w μεταβαλλόμενο



Σχ. 6.18: Μεταβολή ιδιοτιμής ρύθμισης συχνότητας για $k=20$ και T_w μεταβαλλόμενο



Σχ. 6.19: Μεταβολή ιδιοτιμής ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων για $k=20$ και T_w μεταβαλλόμενο

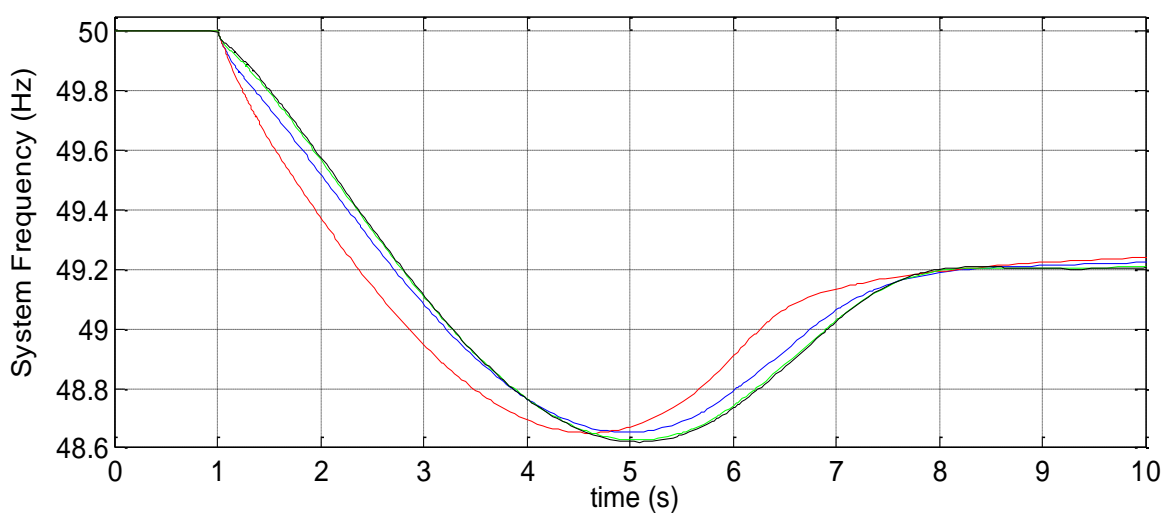
Ακόμα μεγαλύτερη ευαισθησία παρατηρείται στο Σχ. 6.18 για $k=20$ όταν το T_w κυμαίνεται στο εύρος από 0,05 έως 0,5. Εδώ επισυνάπτονται και βέλη που δείχνουν την κίνηση των δύο ιδιοτιμών που κυριαρχούν στη ρύθμιση της συχνότητας (με βάση τους συντελεστές συμμετοχής). Επιβεβαιώνεται και σε αυτό το γράφημα ότι για T_w μεγαλύτερο του 1 s η ιδιοτιμή που μας ενδιαφέρει σταθεροποιείται γύρω από μία συγκεκριμένη περιοχή στο μιγαδικό επίπεδο με το ζ να κυμαίνεται γύρω από το 0,8 και τη συχνότητα γύρω από τα 0,54 Hz.

Από τα παραπάνω γραφήματα των Σχ. 6.7 έως 6.19 παρατηρείται αξιοσημείωτη ευαισθησία στο εύρος 0,01 έως 0,1 s (πράσινο χρώμα) και κυρίως στο εύρος 0,1 έως 0,5 s (μπλε χρώμα) οπότε από τη σκοπιά αυτή είναι προτιμότερο να αποκλειστούν οι τιμές αυτές ως επιλογή για το T_w . Εξάλλου η πιθανότητα εμφάνισης προσεγγιστικού ισχυρού συντονισμού για σχετικά μικρές τιμές του T_w αποτελεί επιπλέον κίνητρο για να προτιμηθούν μεγαλύτερες τιμές. Σε κάθε περίπτωση όμως κυρίαρχο ρόλο στην επιλογή των παραμέτρων, παίζει η κατά το δυνατόν αύξηση της εικονικής αδράνειας που προσδίδεται στις ΑΓΔΤ. Πρακτικά αυτή είναι ανάλογη του γινομένου kT_w . Δοκιμάζοντας λοιπόν διάφορες τιμές για το γινόμενο αυτό, παρατηρήθηκε ότι μία επιλογή γύρω στο 40 αρκεί για να αποφευχθεί η αποκοπή φορτίου λόγω υποσυχνότητας (δηλαδή μεταβατική βύθιση κάτω των 48,5 Hz) με ενεργό τον αδρανειακό ελεγκτή μόνο στις ΑΓΔΤ (ΑΠ 1 και 5). Για να εξεταστεί η επίδραση της επιλογής του T_w συγκρίναμε, διατηρώντας σταθερό το γινόμενο kT_w , την απόκριση της συχνότητας του συστήματος (Σχ. 6.20) και της ενεργού ισχύος (αμ στη βάση των 100 MW) στη έξοδο του Α/Π 1 (Σχ. 6.21) για διάφορους συνδυασμούς του T_w και του k σε ένα ευρύ

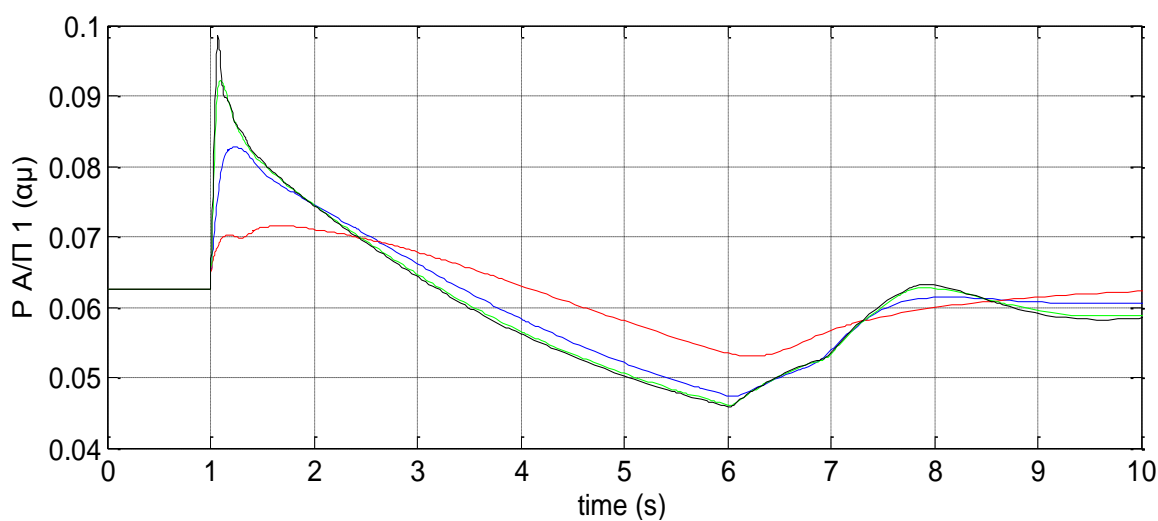
φάσμα τιμών. Στον πίνακα 6.1 φαίνονται οι συνδυασμοί τιμών για τις οποίες διεξήχθη η σύγκριση και το χρώμα που αντιστοιχεί σε κάθε ένα από αυτούς στις αποκρίσεις των Σχ. 6.20 και 6.21.

Πίνακας 6.1: Δοκιμαστικές τιμές για τον αδρανειακό ελεγκτή με σταθερό γινόμενο $kT_w = 40$ s

$T_w=0.04$ s	$k=1000$	Μαύρο χρώμα
$T_w=0.1$ s	$k=400$	Πράσινο χρώμα
$T_w=0.4$ s	$k=100$	Μπλε χρώμα
$T_w=2$ s	$k=20$	Κόκκινο χρώμα



Σχ. 6.20: Παραγόμενη ενεργός ισχύς A/Π 1 για σταθερό γινόμενο $kT_w = 40$ s

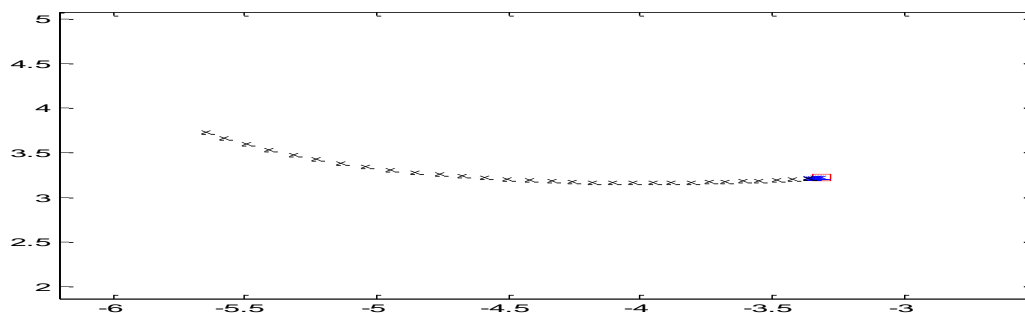


Σχ. 6.21: Παραγόμενη ενεργός ισχύς A/Π 1 για σταθερό γινόμενο $kT_w = 40$ s

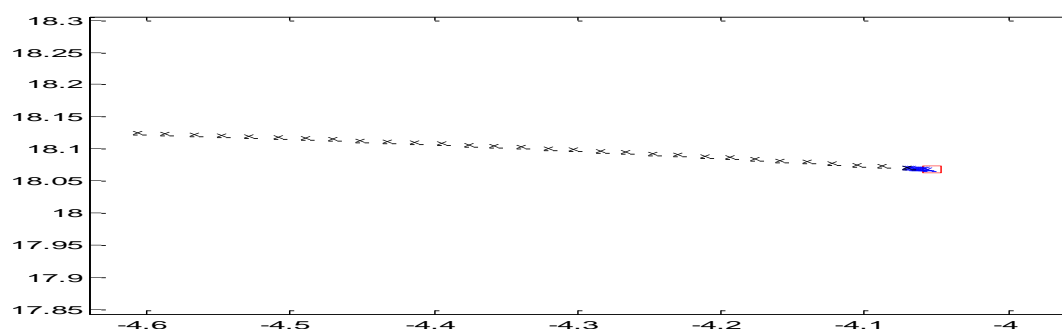
Από το Σχ. 6.20 φαίνεται πως η ελάχιστη τιμή κατά τη μεταβατική βύθιση κυμαίνεται λίγο πάνω από τα 48,6 Hz σε όλες τις περιπτώσεις και είναι ελαφρώς υψηλότερη για τις δύο μεγαλύτερες τιμές του T_w . Παρατηρείται επίσης πως καθώς μειώνεται η τιμή του T_w γίνεται λιγότερο απότομος ο ρυθμός πτώσης της συχνότητας μετά τη διαταραχή αλλά παράλληλα γίνεται και ελαφρώς βραδύτερη η επαναφορά της στην τιμή μονίμου καταστάσεως. Επομένως με δεδομένο και ότι οι ηλεκτρονόμοι αποκοπής φορτίου δεν λαμβάνουν υπόψη τον ρυθμό πτώσης της συχνότητας του συστήματος δεν προκύπτει από τις αποκρίσεις αυτές κάποιο ξεκάθαρο συμπέρασμα για το κατάλληλο εύρος τιμών. Ωστόσο ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα αποτελέσματα που προέκυψαν στο Σχ. 6.21. Παρατηρείται πως καθώς μικραίνει το T_w γίνεται όλο και εντονότερη η μεταβατική αύξηση της ενεργού ισχύος μετά τη διαταραχή, ενώ το ίδιο ισχύει και για την πτώση αυτής στη συνέχεια λόγω της απότομης επιβράδυνσης του δρομέα. Κάτι τέτοιο είναι λογικό αφού η χρονική σταθερά T_w επηρεάζει την ταχύτητα δράσης του αδρανειακού ελεγκτή. Επομένως αναλογιζόμενοι ότι η συνεισφορά του Α/Π στον περιορισμό της μεταβατική βύθισης της συχνότητας είναι παρόμοια, μία ομαλότερη απόκριση (όπως αυτή που προέκυψε για T_w ίσο με 2 s) είναι πιο επιθυμητή για την ασφαλή λειτουργία της ΑΓΔΤ.

Συνυπολογίζοντας και την γενικότερη ευαισθησία που παρατηρήθηκε για μικρότερες τιμές, κρίνεται ως καλή στρατηγική για το σχεδιασμό του ελεγκτή η επιλογή της σταθεράς χρόνου T_w στο εύρος τιμών 1 έως 10 s. Μεγαλύτερες τιμές αποφεύγονται καθώς καθιστούν υπερβολικά αργό τον ελεγκτή. Εν συνεχεία σχεδιάστηκαν οι γεωμετρικοί τόποι ριζών για σταθερό T_w στο εύρος που επιλέχθηκε και μεταβαλλόμενο k . Στα Σχ. 6.22 έως 6.25 φαίνεται η κίνηση του ρυθμού ρύθμισης συχνότητας και του ηλεκτρομηχανικού ρυθμού για δύο ενδεικτικές τιμές του T_w και μεταβαλλόμενο k . Με κόκκινο \square σημειώνεται η αρχική θέση της ιδιοτιμής ($k = 0$, πίνακας 5.20), με μπλε \times σημειώνεται η κίνησή της για το εύρος τιμών του k από 0,1 ως 1 και με μαύρο \times από 1 ως 30. Παρατηρείται πως η αύξηση του k μετακινεί αριστερότερα τις ιδιοτιμές συμβάλλοντας στη βελτίωση της ευστάθειας του συστήματος.

$T_w=1$:

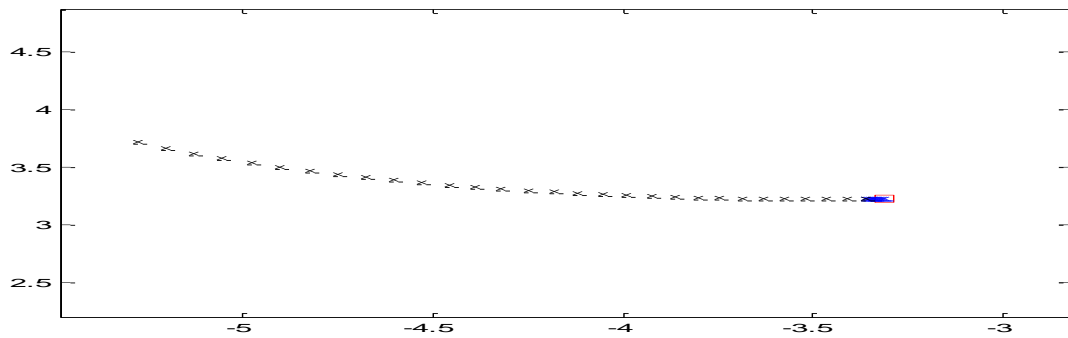


Σχ. 6.22: Μεταβολή ιδιοτιμής ρύθμισης συχνότητας για $T_w=1$ s και k μεταβαλλόμενο

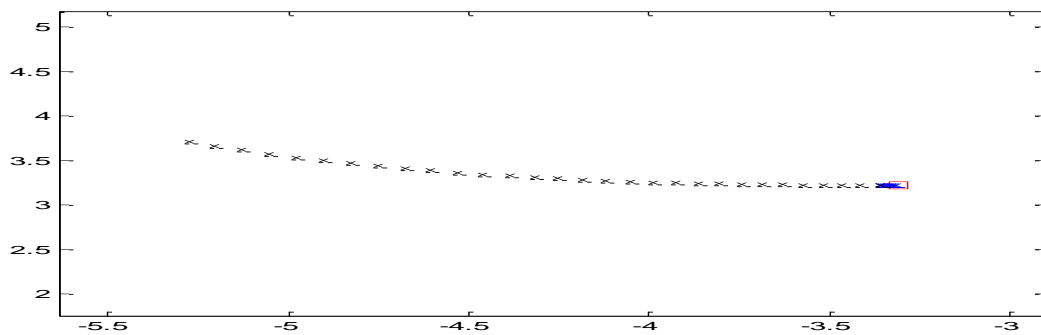


Σχ. 6.23: Μεταβολή ιδιοτιμής ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων για $T_w=1$ s και k μεταβαλλόμενο

$T_w=5$:



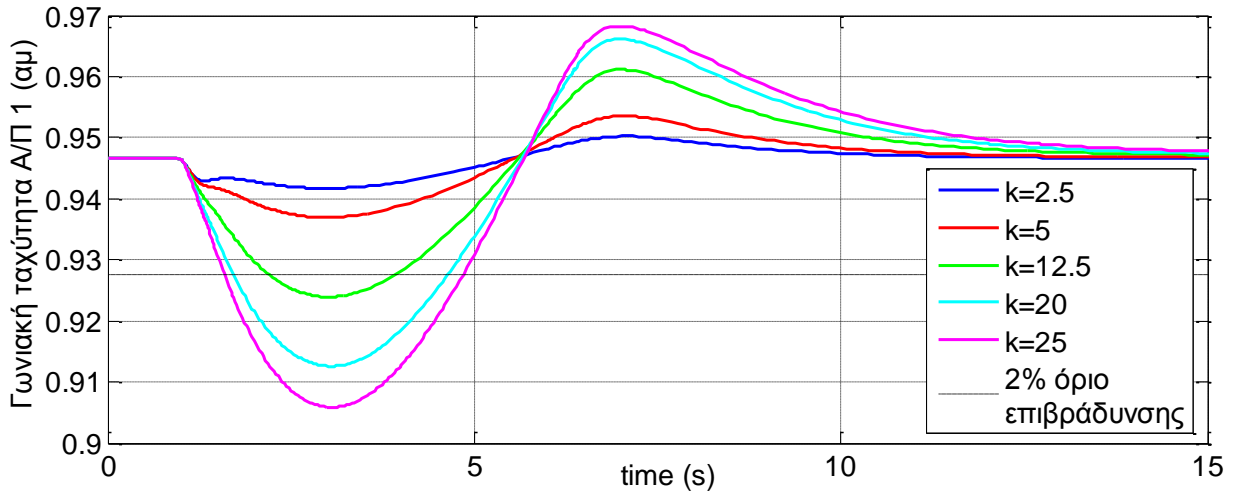
Σχ. 6.24: Μεταβολή ιδιοτιμής ρύθμισης συχνότητας για $T_w=5$ s και k μεταβαλλόμενο



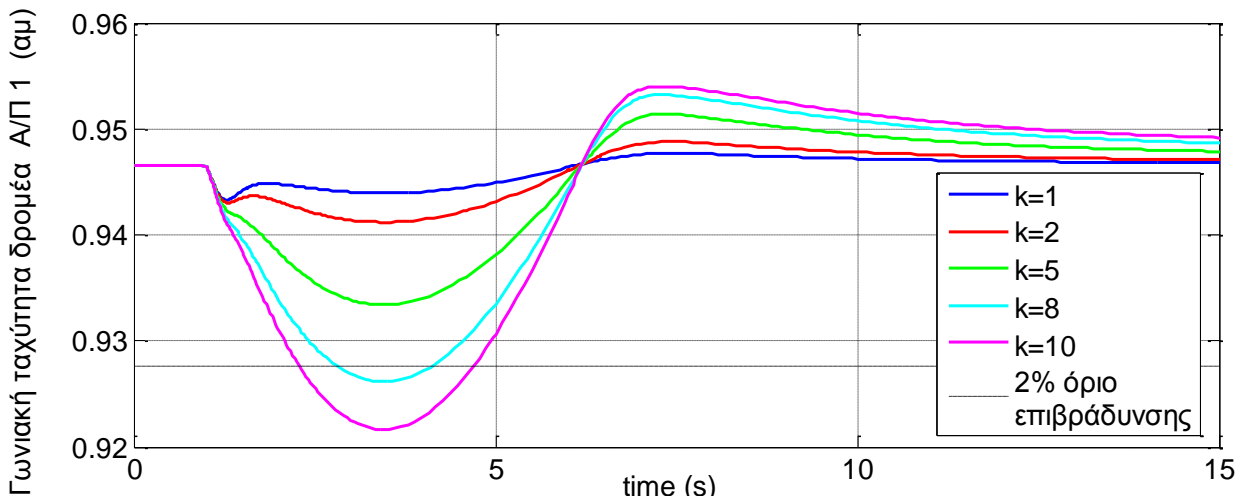
Σχ. 6.25: Μεταβολή ιδιοτιμής ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων για $T_w=5$ s και k μεταβαλλόμενο

Η επιλογή των παραμέτρων, όπως προαναφέρθηκε, στοχεύει στην κατά το δυνατόν αύξηση της εικονικής αδράνειας που προσδίδεται από τις ΑΓΔΤ. Ταυτόχρονα όμως θα πρέπει να τεθεί κι ένα όριο για το ποσοστό επιβράδυνσης του δρομέα της γεννήτριας, εξαιτίας της δράσης του ελεγκτή αδρανειακής απόκρισης. Στόχος είναι να μειωθεί κατά το δυνατόν η καταπόνηση του άξονα της μηχανής λόγω επιβράδυνσης αλλά και να μην κινδυνέψει γενικότερα η ομαλή της λειτουργία. Ένα σχετικά αυστηρό όριο για τις ΑΓΔΤ μπορεί να θεωρηθεί το 2%.

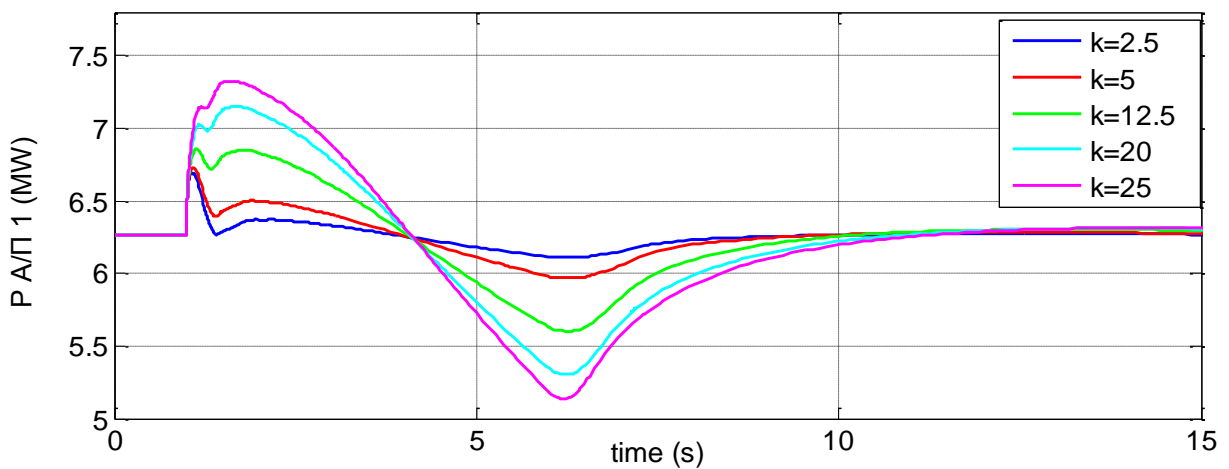
Επιλέγοντας το T_w ίσο με 2 ή με 5 s, βάσει και της ανάλυσης που προηγήθηκε, εξετάζουμε την απόκριση της γωνιακής ταχύτητας δρομέα και της ενεργού ισχύος της μεγαλύτερης ΑΓΔΤ (Α/Π 1) στο σύστημα της Ρόδου για τις συνθήκες του σεναρίου Β και για μεταβαλλόμενο k . Επειδή η προσδιδόμενη αδράνεια είναι ανάλογη του γινομένου kT_w συγκρίνουμε τα αποτελέσματα για σταθερό γινόμενο kT_w (5, 10, 25, 40, 50). Επαναλαμβάνουμε τη διαδικασία προσομοίωσης όπως στην ενότητα 5.4.1 υπενθυμίζοντας ότι θεωρούμε λειτουργία των Α/Π σε λογική σταθερού συντελεστή ισχύος και με απενεργοποιημένο τον έλεγχο τερματικής τάσης. Οι αποκρίσεις της γωνιακής ταχύτητας (αμ) και της εγχεόμενης ενεργού ισχύος (MW) φαίνονται στα Σχ. 6.26 έως 6.29, ενώ σε αυτά της γωνιακής ταχύτητας σχεδιάζεται με διακεκομμένη γραμμή το όριο επιβράδυνσης που υιοθετήσαμε. Αξίζει να σημειωθεί ότι λόγω της επιλεγόμενης κοινής μοντελοποίησης των ΑΓΔΤ του συστήματος και του γεγονότος ότι παράγουν την ίδια ενεργό ισχύ αμ στη βάση της ονομαστικής τους ισχύος (βλ. Πίνακα 5.χ), η απόκριση της γωνιακής ταχύτητας της άλλης ισοδύναμης ΑΓΔΤ (Α/Π 5) είναι ταυτόσημη, οπότε αρκούμαστε στη μελέτη του Α/Π 1.



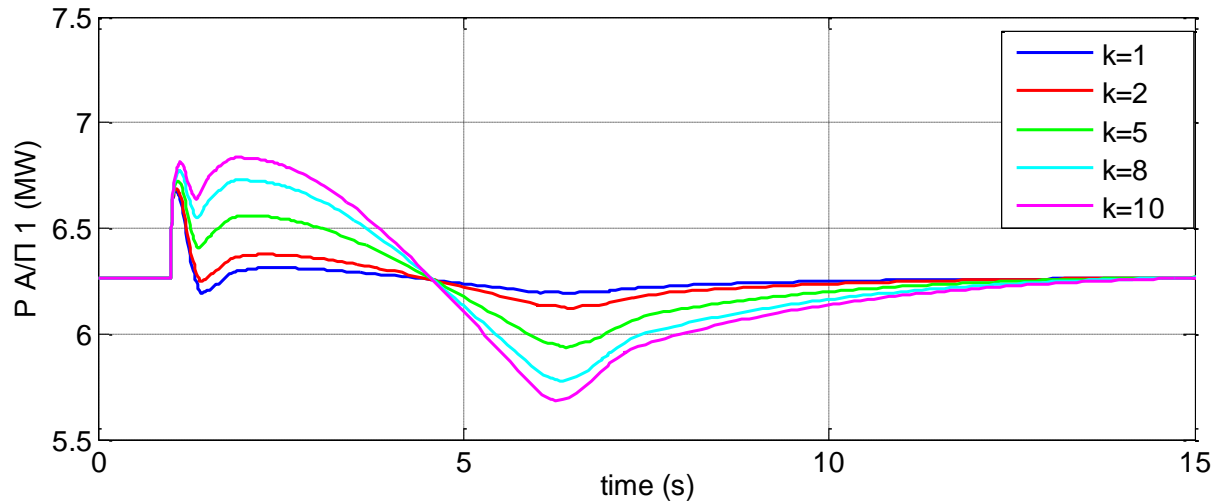
Σχ. 6.26: Γωνιακή ταχύτητα δρομέα της ισοδύναμης A/Γ του A/Π 1 για $T_w = 2$ s και μεταβαλλόμενο k



Σχ. 6.27: Γωνιακή ταχύτητα δρομέα της ισοδύναμης A/Γ του A/Π 1 για $T_w = 5$ s και μεταβαλλόμενο k



Σχ. 6.28: Παραγόμενη ενεργός ισχύς A/Π 1 για $T_w = 2$ s και μεταβαλλόμενο k



Σχ. 6.29: Παραγόμενη ενεργός ισχύς Α/Π 1 για $T_w = 5$ s και μεταβαλλόμενο k

Στον πίνακα 6.2 συνοψίζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν. Σημειώνεται ότι η μέγιστη παραγόμενη ισχύς αναφέρεται στη μέγιστη εμφανιζόμενη τιμή μετά την πρώτη ακαριαία μεταβολή της αμέσως μετά τη διαταραχή, η οποία παρατηρήθηκε και με απενεργοποιημένο τον αδρανειακό ελεγκτή (Σχ. 6.1). Αυτή οφείλεται στην ακαριαία μεταβολή των τάσεων των ζυγών του συστήματος μετά την απώλεια της παραγωγής του αεριοστροβίλου. Έτσι μεταβάλλεται ακαριαία και η γωνία της τερματικής τάσης του Α/Π 1, όμως η γωνία του PLL δεν έχει προλάβει να αλλάξει και κρατά τη τιμή πριν από τη διαταραχή. Έτσι παρατηρούμε αυτή την παροδική απότομη αύξηση της ενεργούς ισχύος.

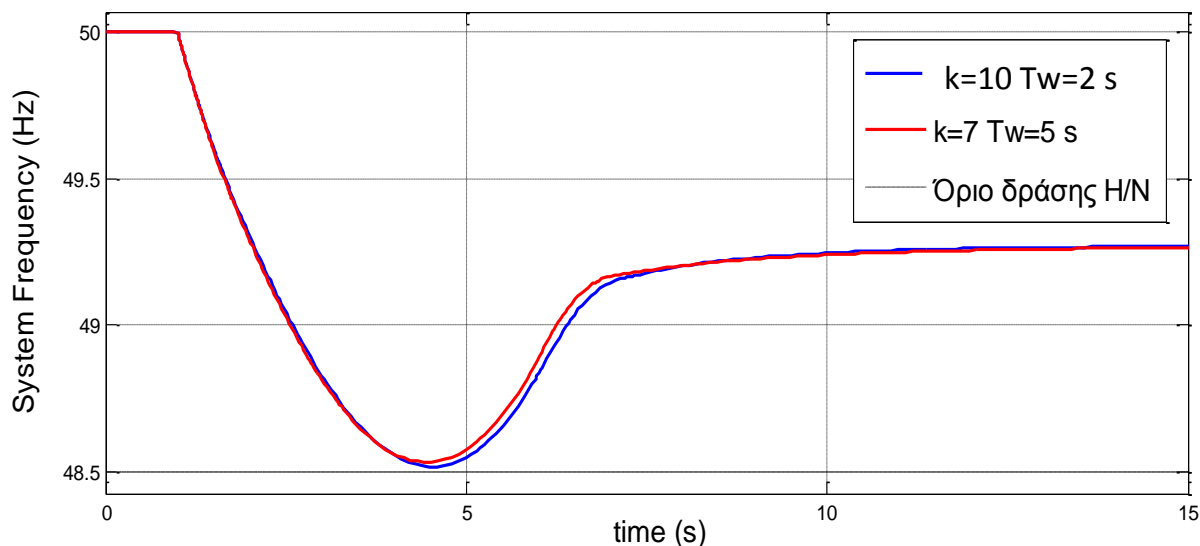
Πίνακας 6.2: Συγκριτικά αποτελέσματα για $T_w=2$ s και $T_w=5$ s

Γινόμενο $k \cdot T_w$	Τιμή k		Μέγιστη επιβράδυνση δρομέα (%)		Μέγιστη παραγόμενη ισχύς (MW)	
	$T_w=2$ s	$T_w=5$ s	$T_w=2$ s	$T_w=5$ s	$T_w=2$ s	$T_w=5$ s
5	2.5	1	0.51	0.28	6.37	6.311
10	5	2	1.4	0.56	6.501	6.377
25	12.5	5	2.38	1.38	6.852	6.558
40	20	8	3.82	2.14	7.147	6.728
50	25	10	4.29	2.63	7.325	6.834

Από τον Πίνακα 6.2 προκύπτει ότι για ίδια τιμή του γινομένου kT_w , όταν το T_w είναι ίσο με 2 s έχουμε μεγαλύτερη αύξηση της παραγόμενης ενεργού ισχύος, πράγμα επιθυμητό, αλλά παράλληλα αυτό έχει ως αποτέλεσμα και μεγαλύτερη επιβράδυνση του δρομέα. Επιβεβαιώνεται δηλαδή ότι για σταθερό γινόμενο kT_w , μεγαλύτερο T_w οδηγεί σε ηπιότερη απόκριση της ανεμογεννήτριας. Επίσης παρατηρούμε από τα Σχ. 6.28 και 6.29 ότι η απόκριση της παραγόμενης ενεργού ισχύς μετά το πέρας του πρώτου μεταβατικού, το οποίο οφείλεται στη δράση του PLL, έχει ομαλότερη συμπεριφορά για T_w ίσο με 2 s. Συγκεκριμένα προκύπτει λίγο μικρότερη κυμάτωση στο πρώτο δευτερόλεπτο μετά τη διαταραχή και γι' αυτό μάλλον είναι προτιμότερη ως τιμή.

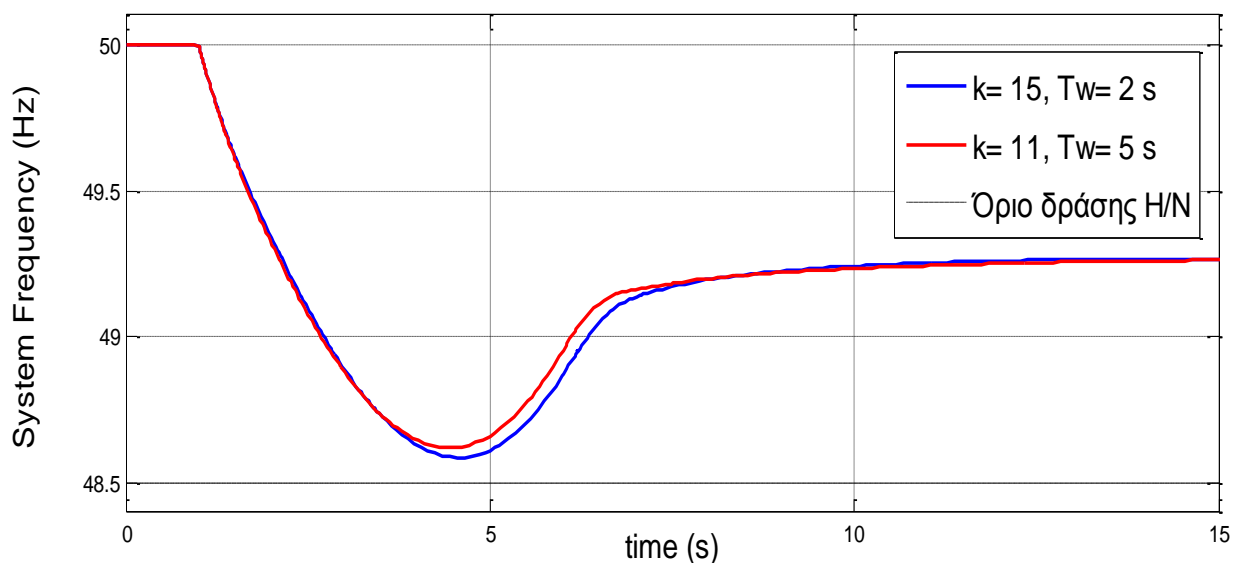
Με βάση λοιπόν όριο επιβράδυνσης που θέσαμε μια τιμή για το k γύρω στο 10 για T_w ίσο με 2 s φαίνεται ικανοποιητική. Αντίστοιχα για T_w ίσο με 5 s μια τιμή για το k γύρω στο 7 ικανοποιεί το

κριτήριο. Φυσικά πρωταρχικός στόχος αποτελεί η συμμετοχή των ΑΓΔΤ στην αδρανειακή απόκριση του συστήματος. Έτσι με ενεργοποιημένο τον ελεγκτή αδρανειακής απόκρισης πλέον και στα δύο Α/Π που αποτελούνται από ΑΓΔΤ (Α/Π 1 και 5) παρατηρούμαι στο Σχ. 6.30 την απόκριση της συχνότητας του αυτόνομου συστήματος για τις τιμές που επιλέξαμε για το k ανάλογα με την τιμή της χρονικής σταθεράς T_w . Επίσης στο ίδιο σχήμα φαίνεται και το όριο δράσης των Η/Ν προστασίας υποσυχνότητας.



Σχ. 6.30: Απόκριση Συχνότητας του συστήματος για $T_w=2\text{ s}, k=10$ και για $T_w=5\text{ s}, k=7$

Παρατηρούμε στο Σχ. 6.30 πως για τις τιμές που επιλέχθηκαν επιτυγχάνεται η αποφυγή αποκοπής φορτίου, έστω και οριακά. Με γνώμονα το ότι οι Η/Ν προστασίας υποσυχνότητας του συστήματος που εκτελούν τις αποκοπές φορτίου ενεργοποιούνται στα 48,5 Hz είναι επιθυμητό να υπάρχει και ένα περιθώριο ασφαλείας. Έτσι επαναλαμβάνουμε την προσομοίωση για k ίσο με 15 και 11 ανάλογα με την τιμή της χρονικής σταθεράς T_w , ακόμα και αν αυτό οδηγεί σε επιβράδυνση δρομέα σε ποσοστό περίπου 3%. Η απόκριση της συχνότητας του συστήματος για αυτές τις περιπτώσεις φαίνεται στο Σχ. 6.31.



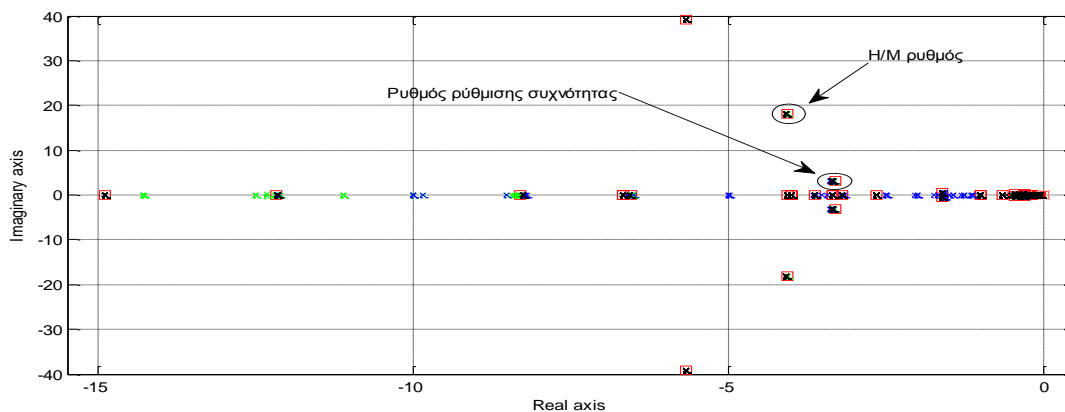
Σχ. 6.31: Απόκριση Συχνότητας του συστήματος για $T_w=2\text{ s}, k=15$ και για $T_w=5\text{ s}, k=11$

Θα πρέπει να τονιστεί εδώ πως το όριο μείωσης της ταχύτητας επιλέγεται ώστε η αδρανιακή ρύθμιση να προκαλεί μικρές διαταραχές και να μην κινδυνέψει η ομαλή λειτουργία των Α/Γ. Ο κίνδυνος θα είναι μεγαλύτερος στα μικρά φορτία, κοντά δηλαδή στην ω_{\min} (ταχύτητα τεχνικού ελαχίστου). Ωστόσο εφόσον ο αδρανιακός ελεγκτής θεωρείται πάντα ενεργός, καλό είναι να μην προκύπτουν μεγάλες μεταβολές σε κανένα σημείο λειτουργίας. Πάντως για το σημείο λειτουργίας που εξετάζεται εδώ, η Α/Γ λειτουργεί σχετικά κοντά στην ονομαστική της ταχύτητα κι επομένως μπορούμε να ανεχτούμε και μεγαλύτερο ποσοστό επιβράδυνσης προς βελτίωση της απόκρισης της συχνότητας. Βέβαια από τη στιγμή που θεωρούμε εδώ ότι ο εξομοιωτής αδρανείας δεν είναι ενεργοποιημένος στις ανεμογεννήτριες πλήρους μετατροπέα, μπορούν να ληφθούν και μικρότερες τιμές για το k , καθώς και αυτά τα Α/Π με τη σειρά τους θα συμβάλλουν στην αδρανιακή απόκριση του συστήματος. Θα πρέπει επίσης να επισημανθεί ξανά πως η συμβολή στη αδρανιακή απόκριση εξαρτάται τόσο από το μέγεθος των αιολικών πάρκων, αφού αυτό καθορίζει και τη δυνατότητα του καθενός για επιπλέον έγχυση ενεργού ισχύος, όσο και από το επίπεδο της αιολικής παραγωγής κατά τη στιγμή εμφάνισης της διαταραχής. Με βάση όλα τα παραπάνω επιλέγεται $T_w=2$ s και $k=15$.

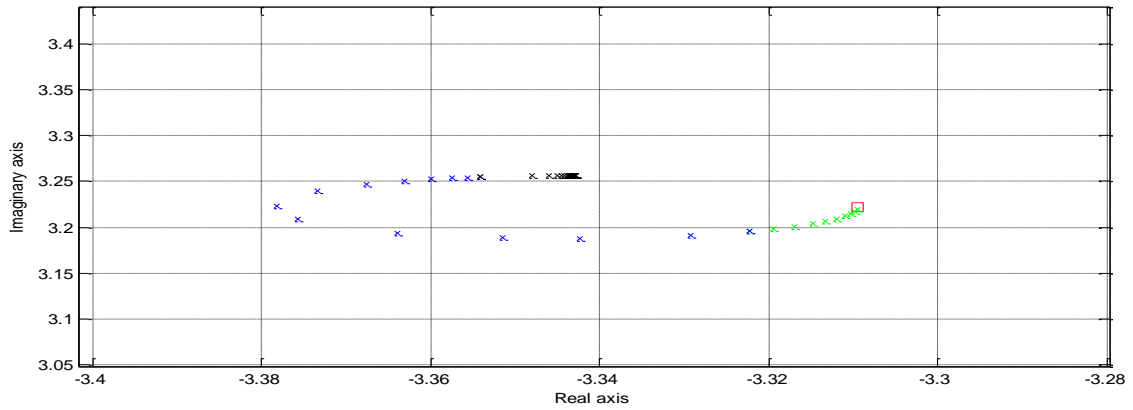
6.2.3 Σχεδιασμός ελεγκτή αδρανιακής απόκρισης για τις ανεμογεννήτριες με πλήρη μετατροπέα

Ακολουθούμε τα ίδια βήματα για την σχεδίαση του αδρανιακού ελεγκτή στις ανεμογεννήτριες με πλήρη μετατροπέα. Έτσι εξετάζουμε την μεταβολή των ιδιοτιμών του ηλεκτρομηχανικού ρυθμού και του ρυθμού ρύθμισης της συχνότητας στο μιγαδικό επίπεδο, όταν μεταβάλλονται οι παράμετροι k και T_w του ελεγκτή αδρανιακής απόκρισης. Για το σκοπό αυτό θεωρούμε τον ελεγκτή ενεργοποιημένο μόνο στην ισοδύναμη ανεμογεννήτρια του Α/Π 2 που είναι η Α/Γ τύπου Δ μεγαλύτερης ονομαστικής ισχύος. Αρχικά όπως και στη περίπτωση των ΑΓΔΤ παρατηρούμε την κίνηση των ιδιοτιμών θεωρώντας ότι η παράμετρος k είναι σταθερή και η T_w μεταβαλλόμενη. Για λόγους ομοιογένειας στην ανάλυση ευαισθησίας διατηρούμε την ίδια σύμβαση με την παράγραφο 6.2.2 όσον αφορά τη χρήση αντιπροσωπευτικού χρώματος για τη θέση των ιδιοτιμών ανάλογα με το εύρος τιμών στο οποίο κινείται το T_w . Έτσι με κόκκινο \square έχουμε την αρχική θέση της κάθε ιδιοτιμής ($T_w=0$, πίνακας 5.20), με πράσινο \times σημειώνεται η κίνησή της για το εύρος τιμών του T_w από 0,01 ως 0,1 s, με μπλε \times από 0,1 ως 1 s και με μαύρο \times από 1 ως 30 s. Στα Σχ. 6.32 έως 6.40 παρουσιάζεται η επίδραση της μεταβολής του T_w στις ιδιοτιμές του συστήματος, εστιάζοντας στην επίδραση στον ρυθμό ρύθμισης της συχνότητας και ρυθμό ηλεκτρομηχανικής ταλάντωσης για διάφορες ενδεικτικές τιμές του κέρδους k .

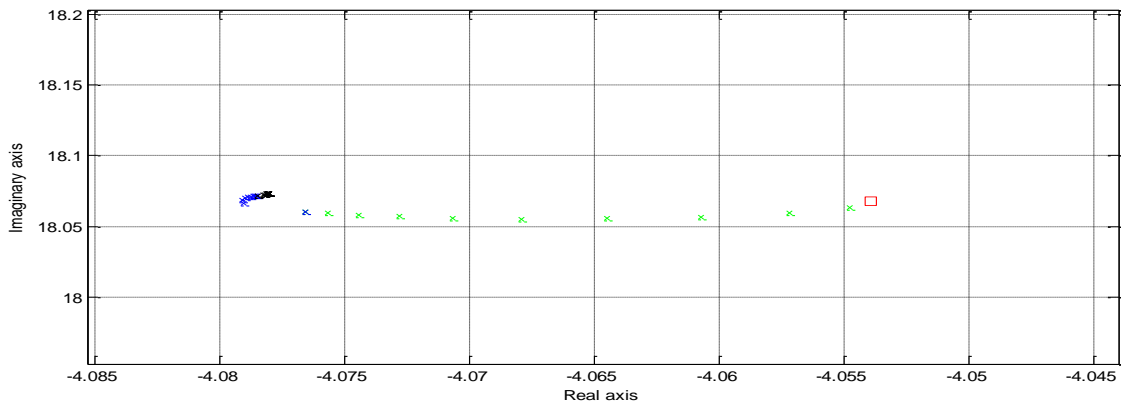
$k=1$:



Σχ. 6.32: Μεταβολή ιδιοτιμών (πραγματικό μέρος > -16) για $k=1$ και T_w μεταβαλλόμενο



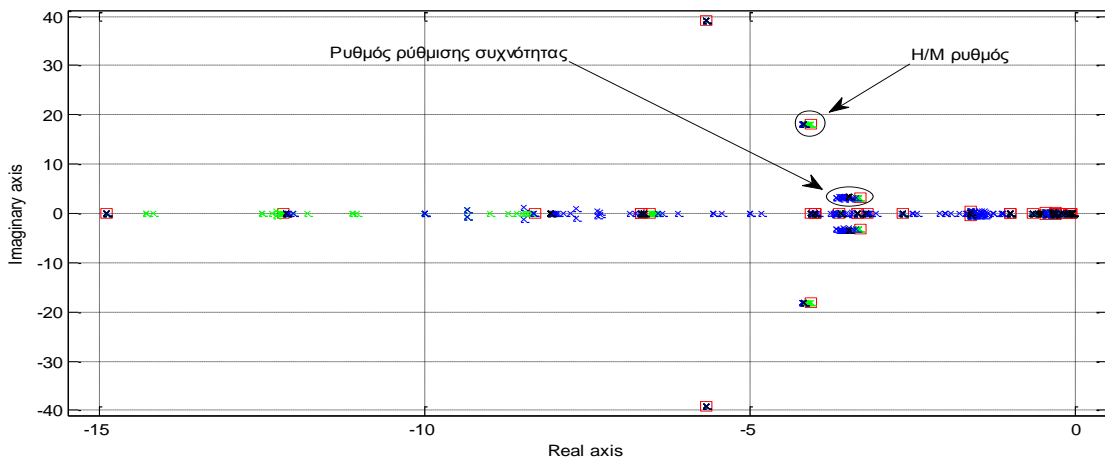
Σχ. 6.33: Μεταβολή ιδιοτιμής ρύθμισης συχνότητας για $k=1$ και T_w μεταβαλλόμενο



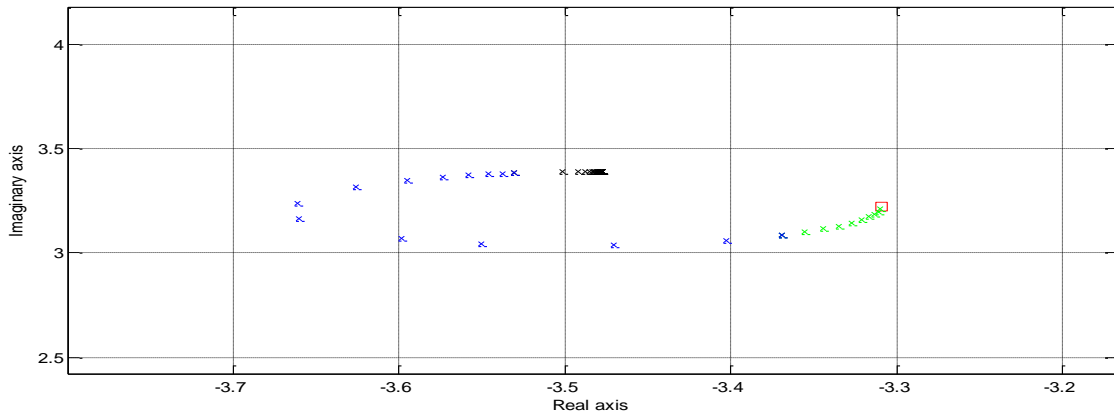
Σχ. 6.34: Μεταβολή ιδιοτιμής ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων για $k=1$ και T_w μεταβαλλόμενο

Για $k=1$ παρατηρείται στο Σχ. 6.33 μικρή ευαισθησία στον ρυθμό ρύθμισης συχνότητας για μεταβολή του T_w από 0,1 έως 1 s αν και πρακτικά ο συντελεστής απόσβεσης ζ δεν μεταβάλλεται πολύ, κυμαινόμενος σε τιμές από 0,716 έως 0,723 περίπου. Ομοίως και η συχνότητα κυμαίνεται γύρω από τα 0,51 Hz. Μάλιστα για τιμές του T_w μεγαλύτερες του 2 s η ιδιοτιμή φαίνεται να σταθεροποιείται σε μια στενή περιοχή τιμών. Μικρή είναι η επίδραση της μεταβολής του T_w στον ηλεκτρομηχανικό ρυθμό (Σχ. 6.34), κυρίως στο εύρος 0,01 έως 0,1 s .

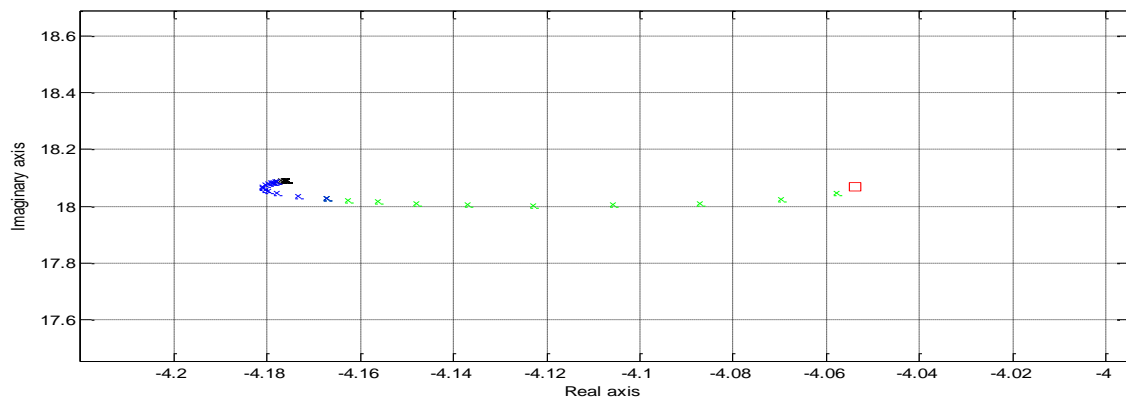
$k=5$:



Σχ. 6.35: Μεταβολή ιδιοτιμών (πραγματικό μέρος > -16) για $k=5$ και T_w μεταβαλλόμενο



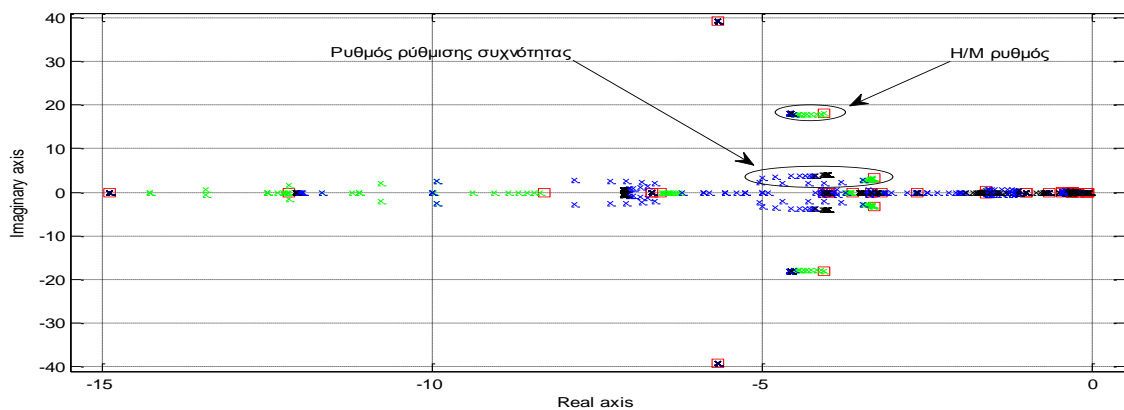
Σχ. 6.36: Μεταβολή ιδιοτιμής ρύθμισης συχνότητας για $k=5$ και T_w μεταβαλλόμενο



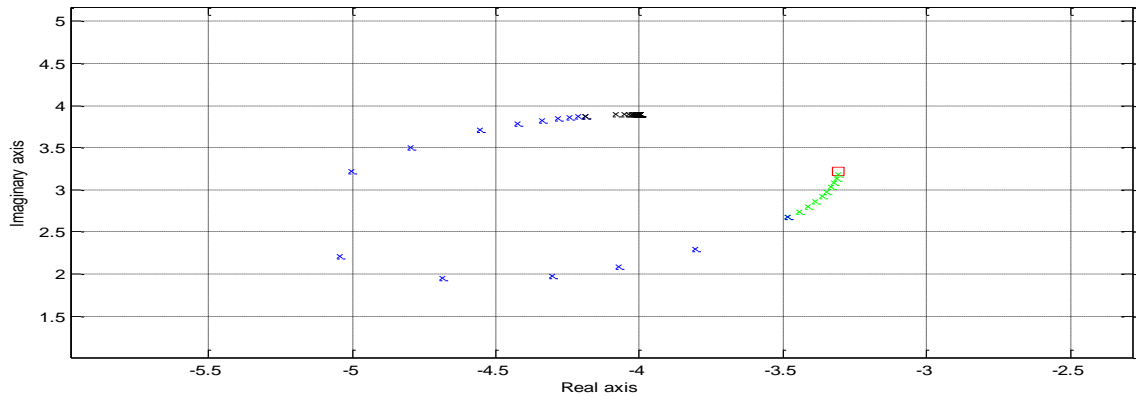
Σχ. 6.37: Μεταβολή ιδιοτιμής ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων για $k=5$ και T_w μεταβαλλόμενο

Παρόμοια συμπεριφορά παρατηρείται στο Σχ. 6.36 και για $k=5$ με τη μεγαλύτερη ευαισθησία στο ρυθμό ρύθμισης της συχνότητας να παρουσιάζεται για μεταβολή του T_w από 0,1 έως 1 s. Ο συντελεστής απόσβεσης ζ μεταβάλλεται από 0,716 έως 0,76 περίπου και η συχνότητα κυμαίνεται πάλι γύρω από τα 0,5 Hz αλλά σε λίγο μεγαλύτερο εύρος σε σχέση με πριν (0,5 με 0,54 Hz). Κι εδώ η ιδιοτιμή ουσιαστικά σταθεροποιείται για T_w μεγαλύτερο του 2 s, ενώ ο και εδώ ο ηλεκτρομηχανικός ρυθμός επηρεάζεται ελάχιστα από τη μεταβολή του T_w , όπως φαίνεται στο Σχ. 6.37.

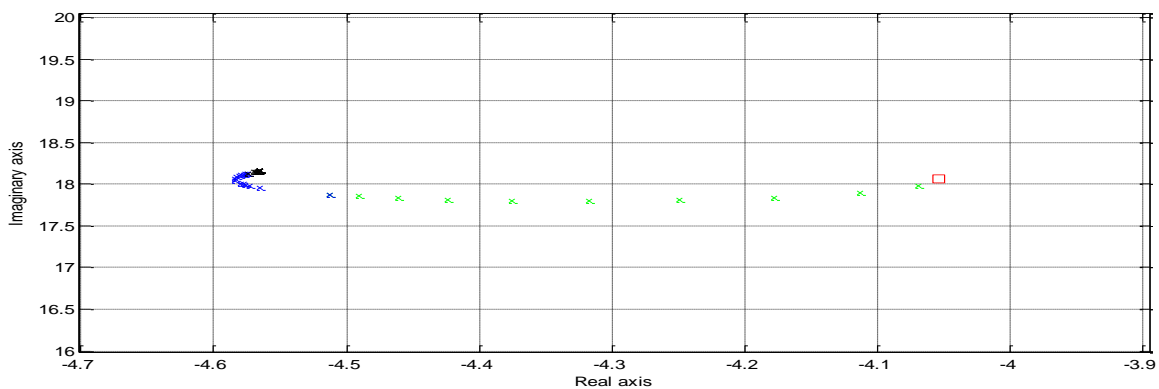
$k=20$:



Σχ. 6.38: Μεταβολή ιδιοτιμών (πραγματικό μέρος > -16) για $k=20$ και T_w μεταβαλλόμενο



Σχ. 6.39: Μεταβολή ιδιοτιμής ρύθμισης συχνότητας για $k=20$ και T_w μεταβαλλόμενο



Σχ. 6.40: Μεταβολή ιδιοτιμής ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων για $k=5$ και T_w μεταβαλλόμενο

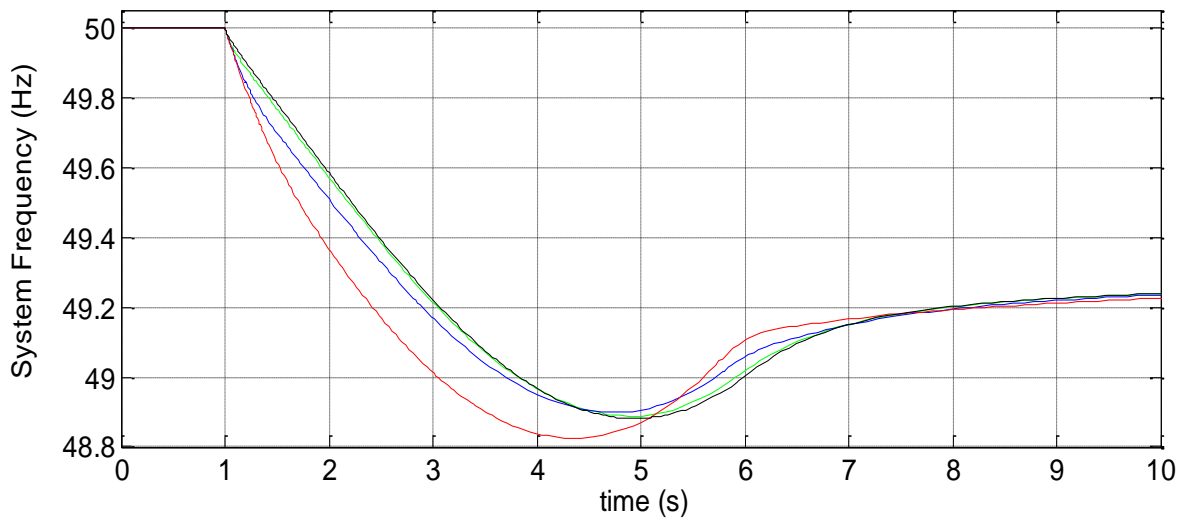
Παρατηρούμε στο Σχ. 6.39 πως αυξάνεται σημαντικά το εύρος κίνησης της ιδιοτιμής ρύθμισης της συχνότητας για τις περιοχές έντονης ευαισθησίας ως προς το T_w . Χαρακτηριστικό είναι πως ο συντελεστής απόσβεσης ζ μεταβάλλεται από 0,712 έως 0,91 περίπου ενώ η συχνότητα κυμαίνεται από 0,37 Hz έως 0,62 Hz. Πάντως και σε αυτή την περίπτωση διαπιστώνουμε αμελητέα μεταβολή της ιδιοτιμής για τιμές του T_w μεγαλύτερες του 2 s. Όσον αφορά την επίδραση στον ηλεκτρομηχανικό ρυθμό αυτή είναι λίγο εντονότερη εδώ (Σχ. 6.40) και εντοπίζεται κυρίως στο εύρος τιμών 0,01 έως 0,1 s.

Από τα παραπάνω γραφήματα των Σχ. 6.32 έως 6.40 παρατηρείται αξιοσημείωτη ευαισθησία στο εύρος 0,01 έως 0,1 s (πράσινο χρώμα) και κυρίως στο εύρος 0,1 έως 1 s (μπλε χρώμα) οπότε από τη σκοπιά αυτή είναι προτιμότερο να αποκλειστούν οι τιμές αυτές ως επιλογή για το T_w . Θα πρέπει όμως να τονισθεί και εδώ πως κυρίαρχο ρόλο στην επιλογή των παραμέτρων, παίζει η κατά το δυνατόν αύξηση της εικονικής αδράνειας που προσδίδεται στις ανεμογεννήτριες πλήρους μετατροπέα και όχι κάποια βέλτιστη σχεδίαση με βάση τη θέση των ιδιοτιμών του γραμμικοποιημένου συστήματος. Όπως και στην περίπτωση των ΑΓΔΤ, η προσδιδόμενη εικονική αδράνεια εξαρτάται κυρίως από το γινόμενο kT_w . Δοκιμάζοντας λοιπόν αρχικά τυχαίες τιμές για το γινόμενο αυτό, παρατηρήθηκε ότι μία επιλογή γύρω στο 20 αρκεί για να αποφευχθεί η αποκοπή φορτίου λόγω υποσυχνότητας (δηλαδή μεταβατική βύθιση κάτω των 48,5 Hz) με ενεργό τον αδρανειακό ελεγκτή μόνο στις ανεμογεννήτριες πλήρους μετατροπέα (ΑΠ 2 και 3). Για να εξεταστεί η επίδραση της επιλογής του T_w συγκρίναμε, διατηρώντας σταθερό το γινόμενο kT_w , την απόκριση της συχνότητας του συστήματος (Σχ. 6.41) και της ενεργού ισχύος (αμ στη βάση των 100 MW) στη έξοδο του Α/Π 2 (Σχ 6.42) για διάφορους συνδυασμούς του T_w και του k σε ένα ευρύ φάσμα τιμών.

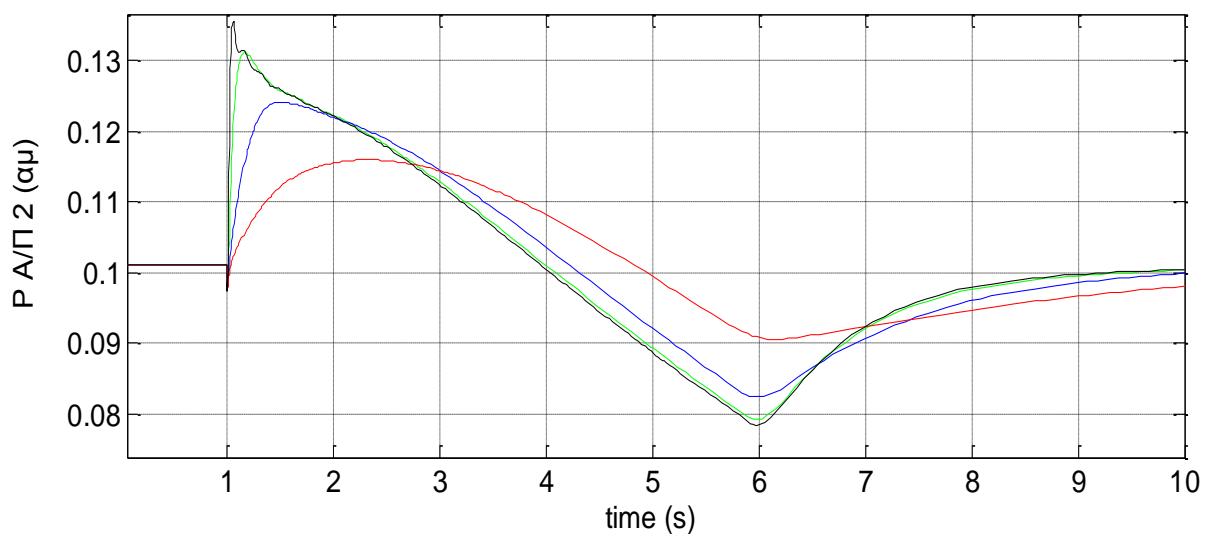
Στον πίνακα 6.3 φαίνονται οι συνδυασμοί τιμών για τις οποίες διεξήχθη η σύγκριση και το χρώμα που αντιστοιχεί σε κάθε ένα από αυτούς στις αποκρίσεις των Σχ. 6.41 και 6.42.

Πίνακας 6.3: Δοκιμαστικές τιμές για τον αδρανειακό ελεγκτή με σταθερό γινόμενο $k \cdot T_w = 20 \text{ s}$

$T_w=0.02 \text{ s}$	$k=1000$	Μαύρο χρώμα
$T_w=0.1 \text{ s}$	$k=200$	Πράσινο χρώμα
$T_w=0.5 \text{ s}$	$k=100$	Μπλε χρώμα
$T_w=2 \text{ s}$	$k=10$	Κόκκινο χρώμα



Σχ. 6.41: Παραγόμενη ενεργός ισχύς $A/\Pi 2$ για σταθερό γινόμενο $k \cdot T_w = 20 \text{ s}$

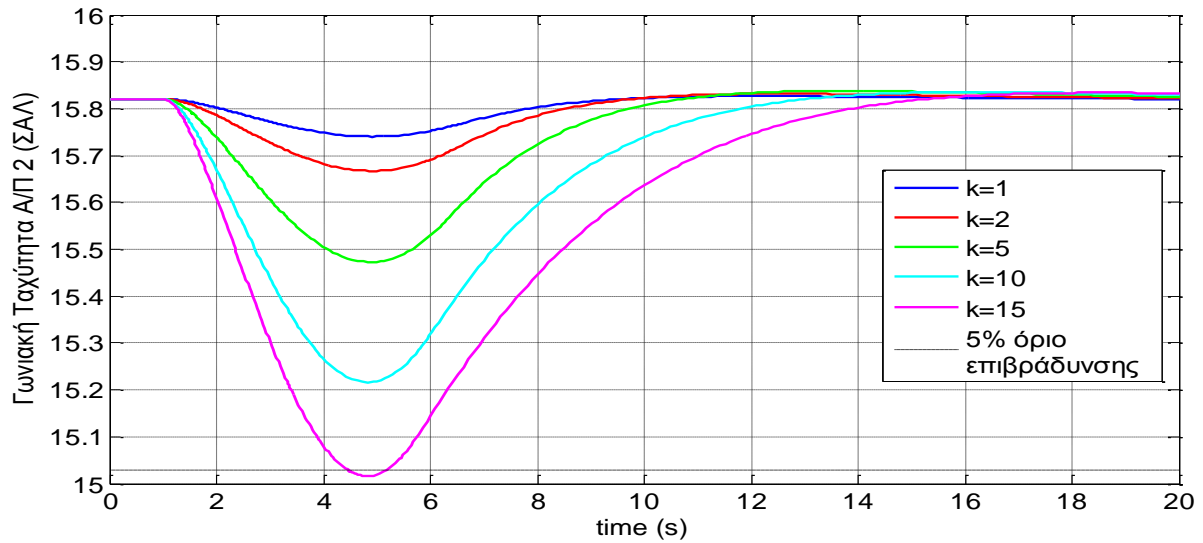


Σχ. 6.42: Παραγόμενη ενεργός ισχύς $A/\Pi 2$ για σταθερό γινόμενο $k \cdot T_w = 20 \text{ s}$

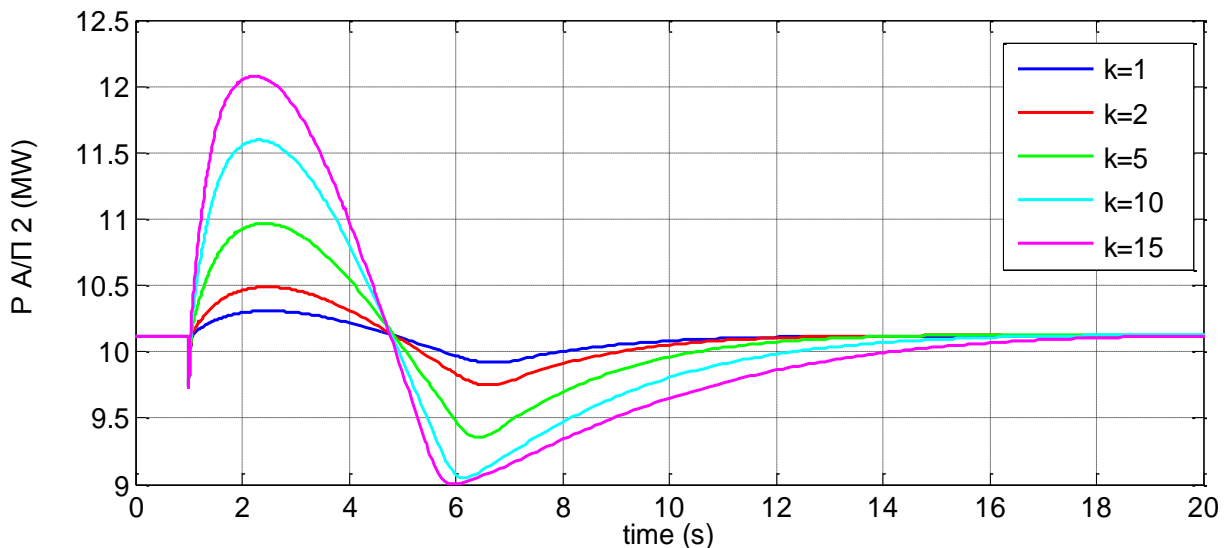
Από το Σχ. 6.41 φαίνεται πως η ελάχιστη τιμή κατά τη μεταβατική βύθιση κυμαίνεται γύρω στα 48,8 με 49,9 Hz σε όλες τις περιπτώσεις και είναι ελαφρώς υψηλότερη για T_w ίσο με 0,5 s. Παρατηρείται, όπως και στην περίπτωση των ΑΓΔΤ, πως καθώς μειώνεται η τιμή του T_w γίνεται λιγότερο απότομος ο ρυθμός πτώσης της συχνότητας μετά τη διαταραχή αλλά παράλληλα γίνεται και ελαφρώς αργότερη η επαναφορά της στην τιμή μονίμου καταστάσεως. Επομένως με δεδομένο και ότι οι Η/Ν αποκοπής φορτίου δεν λαμβάνουν υπόψη τον ρυθμό πτώσης της συχνότητας του συστήματος δεν προκύπτει από τις αποκρίσεις αυτές κάποιο ξεκάθαρο συμπέρασμα για το κατάλληλο εύρος τιμών. Μεγαλύτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα αποτελέσματα που προέκυψαν στο Σχ. 6.42. Προκύπτουν τα ίδια συμπεράσματα όπως και για την ενεργό ισχύ εξόδου της ΑΓΔΤ στο Σχ. 6.21. Έτσι καθώς μικραίνει το T_w γίνεται όλο και εντονότερη η μεταβατική αύξηση της ενεργού ισχύος μετά τη διαταραχή, ενώ το ίδιο ισχύει και για την πτώση αυτής στη συνέχεια λόγω της απότομης επιβράδυνσης του δρομέα. Επομένως αναλογιζόμενοι ότι η συνεισφορά του Α/Π στον περιορισμό της μεταβατική βύθισης της συχνότητας είναι παρόμοια, μία ομαλότερη απόκριση (όπως αυτή που προέκυψε για T_w ίσο με 2 s) είναι πιο επιθυμητή για την λειτουργία της ανεμογεννήτριας πλήρους μετατροπέα..

Όπως και στη ενότητα 6.2.2 θα πρέπει να τεθεί ένα όριο ανοχής από πλευράς επιβράδυνσης του δρομέα της γεννήτριας. Σε αυτό τον τύπο Α/Γ μπορούμε να θέσουμε ένα μεγαλύτερο όριο ως ανεκτή επιβράδυνση, π.χ. γύρω στο 5%. Για την επιλογή αυτή λαμβάνουμε υπόψη την ανεξάρτηση της γεννήτριας από το δίκτυο αλλά και την παράσταση του μηχανικού μέρους με ισοδύναμο μοντέλο μίας μάζας, αφού συνήθως χρησιμοποιούνται πολυπολικές μηχανές για την επίτευξη χαμηλών στροφών και τη μη αναγκαιότητα χρήσης κιβωτίου ταχυτήτων. Έτσι με γνώμονα το ότι η προσδιόδημη εικονική αδράνεια είναι σχεδόν ανάλογη του γινομένου των δύο παραμέτρων, αφού επιλέξουμε μία εύλογη τιμή για το T_w , σταθμίζουμε το κέρδος k με βάση τις επιθυμητές προδιαγραφές. Το όριο μείωσης της ταχύτητας επιλέγεται ώστε η αδρανειακή ρύθμιση να προκαλεί μικρές διαταραχές και να μην κινδυνεύει η ομαλή λειτουργία των Α/Γ, κυρίως στις χαμηλές φορτίσεις της μηχανής, κοντά δηλαδή στην ω_{\min} (ταχύτητα τεχνικού ελαχίστου). Στο εξεταζόμενο σημείο λειτουργίας, οι ανεμογεννήτριες πλήρους μετατροπέα λειτουργούν σχετικά κοντά στην ονομαστική τους ταχύτητα κι ο κίνδυνος είναι μικρότερος, όπως σχολιάστηκε και στην περίπτωση των ΑΓΔΤ. Ωστόσο και εδώ είναι θεμιτό ο αδρανειακός ελεγκτής να μην προκαλεί μεγάλες μεταβολές σε κανένα σημείο λειτουργίας.

Επιλέγεται, όπως και στην περίπτωση των ΑΓΔΤ, το T_w ίσο με 2 s και εν συνεχεία σταθμίζουμε το k . Στο σημείο αυτό παραλείπονται οι γεωμετρικοί τόποι ριζών για μεταβαλλόμενο k και σταθερό T_w , αφού όπως και στην ενότητα 6.2.2 (Σχ. 6.22-25) η αύξησή του μετακινεί αριστερότερα στο μιγαδικό επίπεδο τις ιδιοτιμές που επικεντρώσαμε το ενδιαφέρον μας. Καταλήγουμε έτσι στο κατάλληλο κέρδος με βάση την συμπεριφορά της γωνιακής ταχύτητας της ισοδύναμης Α/Γ αλλά και της σταθμισμένης μέσης συχνότητας του συστήματος λόγω της δράσης του ελεγκτή αδρανειακής απόκρισης. Επαναλαμβάνουμε τη διαδικασία προσομοίωσης όπως στο 5.4.1 υπενθυμίζοντας ότι θεωρούμε λειτουργία των Α/Π σε λογική σταθερού συντελεστή ισχύος και με απενεργοποιημένο τον έλεγχο τερματικής τάσης. Οι αποκρίσεις της γωνιακής ταχύτητας (ΣΑΛ) και της εγγεόμενης ενεργού ισχύος (MW) της ισοδύναμης Α/Γ του Α/Π 2 φαίνονται στα Σχ. 6.43 και 6.44 αντίστοιχα για διάφορες τιμές του k . Στο πρώτο σχήμα επισημαίνεται και το όριο επιβράδυνσης που επιλέξαμε σε αυτή την περίπτωση.



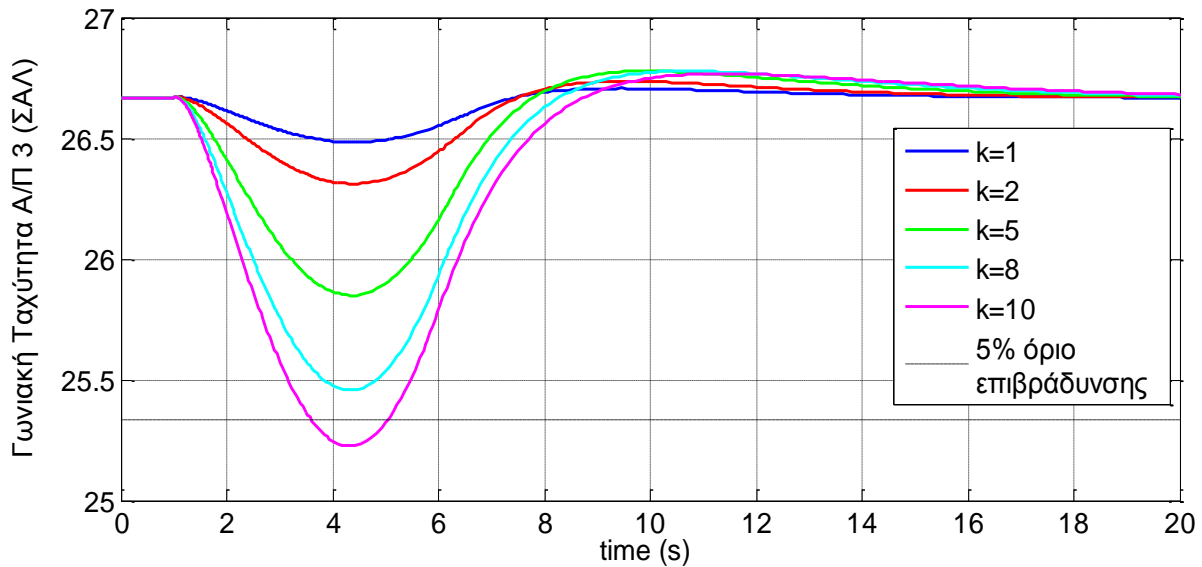
Σχ. 6.43: Γωνιακή ταχύτητα δρομέα της ισοδύναμης Α/Γ του Α/Π 2 για $T_w = 2$ s και μεταβαλλόμενο k



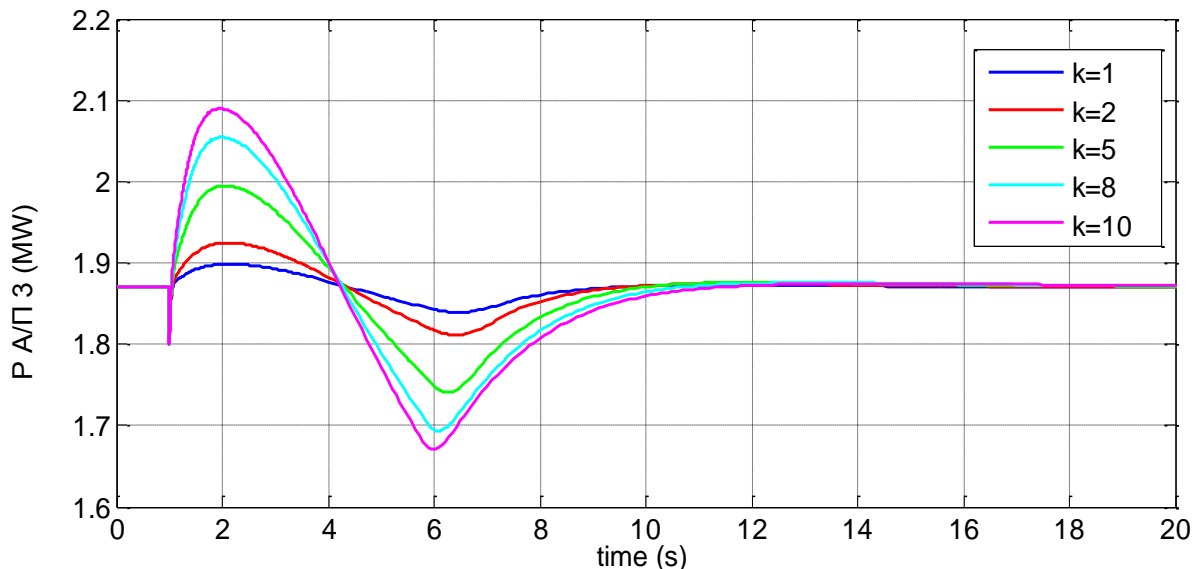
Σχ. 6.44: Παραγόμενη ενεργός ισχύς Α/Π 2 για $T_w = 2$ s και μεταβαλλόμενο k

Παρατηρούμε στο Σχ. 6.43 ότι το όριο που θεωρήσαμε παραβιάζεται για τιμές του κέρδους k γύρω στο 15. Αξίζει να σχολιαστεί η σχετικά αργή επαναφορά στη μόνιμη κατάσταση που αποτυπώνεται τόσο στη γωνιακή ταχύτητα όσο και στην εγχεόμενη ενεργό ισχύ, ιδιαίτερα για τιμές του k μεγαλύτερες του 5. Βέβαια παρά το γεγονός αυτό, το εύρος τιμών στο οποίο μεταβάλλεται η ταχύτητα είναι αρκετά στενό. Φυσικά και εδώ η τελική επιλογή του κέρδους εξαρτάται από τη συμβολή των Α/Γ στην αδρανειακή απόκριση του συστήματος.

Θα πρέπει επίσης να λάβουμε υπόψη μας πως στην περίπτωση των Α/Π 2 και 3 έχουμε θεωρήσει διαφορετικά αδρανειακά χαρακτηριστικά και ονομαστικές στροφές (Πίνακες 5.16, 5.17), σε αντίθεση με τις ΑΓΔΤ. Επομένως κρίνεται φρόνιμο να γίνει ξεχωριστή σχεδίαση του αδρανειακού ελεγκτή με βάση τις τεχνικές προδιαγραφές του κάθε Α/Π. Έτσι στα Σχ. 6.45 και 6.46 παρατίθενται οι αποκρίσεις της γωνιακής ταχύτητας και της εγχεόμενης ενεργού ισχύος της ισοδύναμης Α/Γ του Α/Π 3 για μεταβαλλόμενο k , θεωρώντας κι εδώ το ίδιο όριο ανεκτής επιβράδυνσης (5%) του δρομέα της μηχανής.

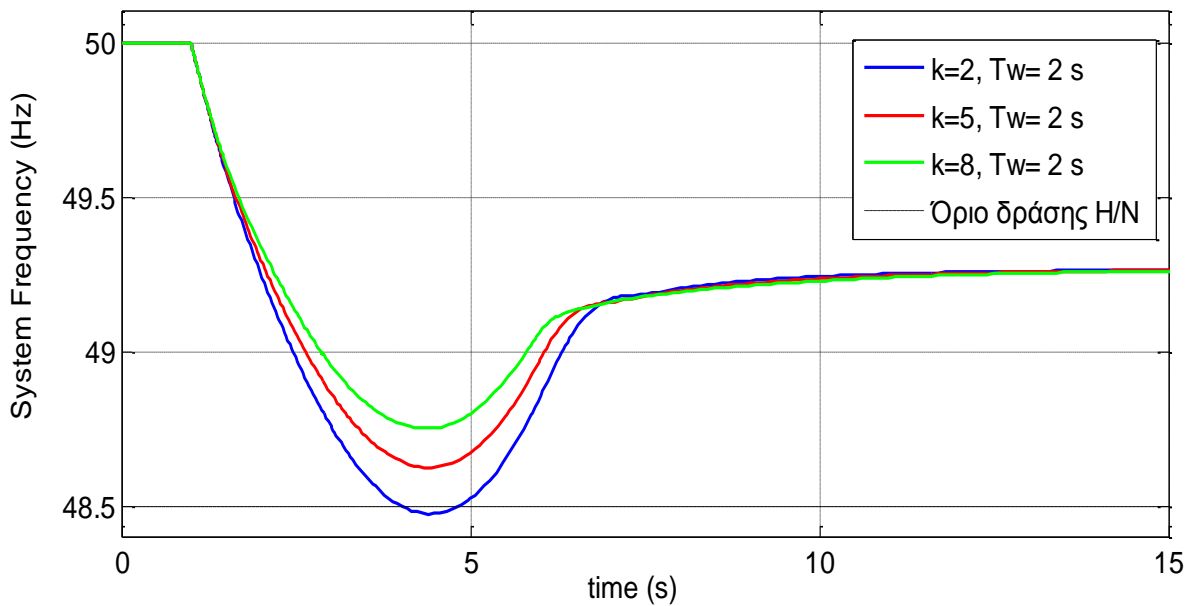


Σχ. 6.45: Γωνιακή ταχύτητα δρομέα της ισοδύναμης Α/Γ του Α/Π 3 για $T_w = 2$ s και μεταβαλλόμενο k



Σχ. 6.46: Παραγόμενη ενεργός ισχύς Α/Π 3 για $T_w = 2$ s και μεταβαλλόμενο k

Στην περίπτωση αυτή, συμπεραίνουμε από το Σχ. 6.45 πως για τιμές του κέρδους λίγο μεγαλύτερες από 8 παραβιάζεται το όριο που υιοθετήσαμε. Το γεγονός ότι εδώ έχουμε μικρότερη τιμή αδρανείας οδηγεί σε μεγαλύτερη επιβράδυνση αναλογικά με το Α/Π 2 αλλά και σε λίγο γρηγορότερη αποκατάσταση στα προ διαταραχής επίπεδα. Όσον αφορά την εγχεόμενη ενεργό ισχύ λόγω αδρανειακής απόκρισης, η επιπλέον έγχυση του Α/Π 2 σε σχέση με το Α/Π 3 οφείλεται στη διαφορά στην ονομαστική τους ισχύ, δηλαδή το μέγεθος των πάρκων. Έτσι για παράδειγμα για $k=10$ η μέγιστη πρόσθετη αποδιδόμενη ισχύς του Α/Π 2 ανέρχεται σε 1,5 MW περίπου όταν αυτή του Α/Π 3 δεν ξεπερνά τα 0,2 MW. Σε κάθε περίπτωση η τελική επιλογή του κέρδους εξαρτάται από τη συμβολή των Α/Π στον περιορισμό της μεταβατικής βύθισης της συχνότητας του συστήματος. Θεωρώντας λοιπόν τον ελεγκτή αδρανειακής απόκρισης ενεργοποιημένο μόνο σε αυτό το είδος Α/Γ προκύπτουν οι ακόλουθες αποκρίσεις της συχνότητας, όπως αυτές φαίνονται στο Σχ. 6.47, για T_w ίσο με 2 s και μεταβαλλόμενο k . Για λόγους απλότητας θεωρήθηκε κοινό k στα Α/Π 2 και 3, αρκεί να μην παραβιάζεται και στα δύο το όριο επιβράδυνσης. Στο σχήμα αυτό επισημαίνεται και το όριο δράσης των Η/Ν προστασίας υποσυχνότητας.



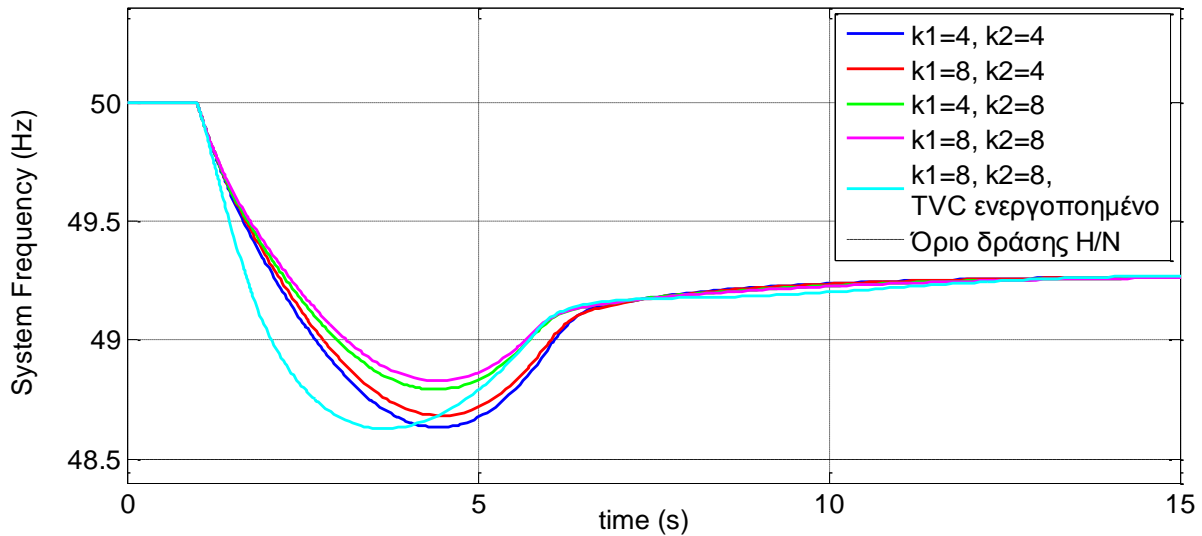
Σχ. 6.47: Απόκριση Συχνότητας του συστήματος για T_w ίσο με 2 s και μεταβαλλόμενο k

Συμπεραίνουμε πως ακόμα και για μικρές τιμές του κέρδους, όπως για k ίσο με 5, η βύθιση της συχνότητας είναι άνω των 48,6 Hz και αποφεύγεται η αποκοπή φορτίου. Η συμβολή των Α/Π αυτού του τύπου στην αισθητή βελτίωση του προφίλ της συχνότητας οφείλεται κυρίως στο Α/Π 2 που ως το μεγαλύτερο πάρκο στο νησί της Ρόδου έχει και αυξημένες δυνατότητες αδρανειακής απόκρισης, πράγμα που έγινε εμφανές και στο Σχ. 6.44. Επομένως μπορούμε να επιλέξουμε μια ενιαία τιμή όπως k ίσο με 5 ως ικανοποιητική με βάση όλα τα κριτήρια που εξετάστηκαν. Εφόσον προτιμηθεί να υπάρχει κι ένα ασφαλές περιθώριο από τα 48,5 Hz, τότε το k μπορεί να τεθεί ίσο με 8. Φυσικά όπως ειπώθηκε και στην ενότητα 6.2.2, μπορούν να ληφθούν και μικρότερες τιμές για το k , από τη στιγμή που ο αδρανειακός ελεγκτής θα ενεργοποιείται ταυτόχρονα σε όλες τις ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών του νησιού.

6.2.4 Προσομοίωση Σεναρίου Β με ενεργοποιημένο αδρανειακό ελεγκτή σε όλες τις Α/Γ μεταβλητών στροφών

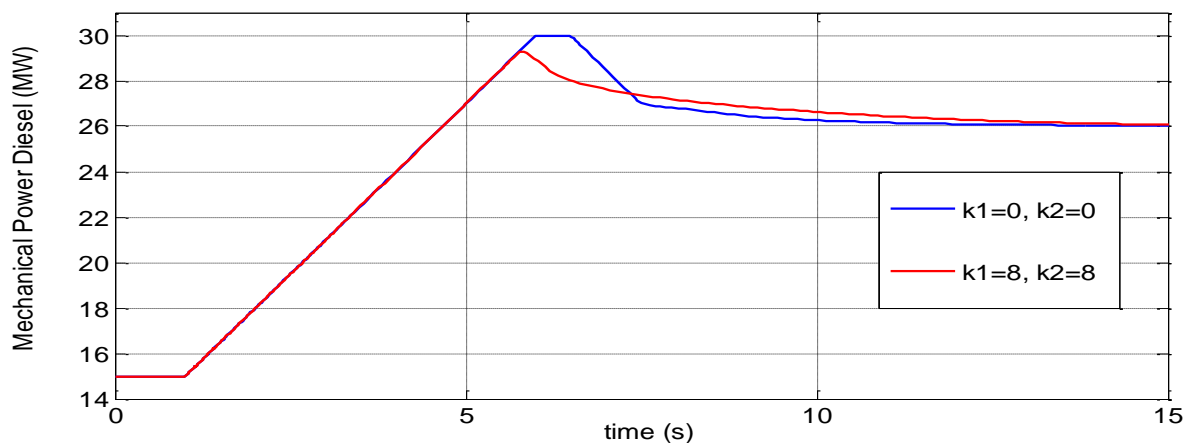
Στην ενότητα αυτή εξετάζουμε την επίδραση που έχει στη συμπεριφορά του συστήματος η από κοινού ενεργοποίηση των ελεγκτών αδρανειακής απόκρισης σε όλες τις Α/Γ μεταβλητών στροφών του συστήματος. Όπως γίνεται κατανοητό, κάτι τέτοιο μας επιτρέπει να επιλέξουμε και πιο συντηρητικές τιμές για το k ώστε να περιοριστεί κατά το δυνατόν η καταπόνηση των αξόνων τους. Η παράμετρος T_w τίθεται ίσο με 2 s σε όλους τους ελεγκτές και το κέρδος k ίσο με 4 ή 8 τόσο στις Α/Γ τύπου Γ όσο και στις Α/Γ τύπου Δ. Μάλιστα εξετάζεται και μία περίπτωση όπου ενεργοποιείται ταυτόχρονα ο έλεγχος τερματικής τάσης (TVC) στα Α/Π 1 και 5, έχοντας υπόψη την αναμενόμενη αρνητική συμβολή στη μεταβατική βύθιση της συχνότητας, όπως διαπιστώθηκε στο κεφάλαιο 5. Συγκριτικά αποτελέσματα της απόκρισης της συχνότητας φαίνονται στο Σχ. 6.48. Με k_1 συμβολίζεται το κέρδος του αδρανειακού ελεγκτή για τις Α/Γ τύπου Γ και με k_2 για τις Α/Γ τύπου Δ.

Παρατηρούμε ότι σε όλες τις περιπτώσεις αποφεύγεται η αποκοπή φορτίων, ενώ ακόμα και στη δυσμενέστερη περίπτωση, δηλαδή όταν οι ενεργοποιείται ο έλεγχος τερματικής τάσης στις ΑΓΔΤ, η μεταβατική βύθιση φτάνει μέχρι τα 48,63 Hz. Μάλιστα η επαναφορά του συστήματος σε μόνιμη κατάσταση γίνεται πάντα μέσα στα πρώτα 6 sec.



Σχ. 6.48: Απόκριση Συχνότητας Σεναρίου B για T_w ίσο με 2 s και μεταβαλλόμενα $k1$ και $k2$ στους αδρανειακούς ελεγκτές

Επομένως μπορούμε να ισχυριστούμε ότι με την προσθήκη του αδρανειακού ελεγκτή στις Α/Γ μεταβλητών στροφών και την κατάλληλη στάθμιση των παραμέτρων του μπορεί να επιτευχθεί πολύ ικανοποιητική συμπεριφορά όσον αφορά τη συνολική συμπεριφορά του συστήματος ακόμα και σε συνθήκες υψηλής αιολικής διεύθυνσης, όπως αυτές του σεναρίου B. Επίσης παρατίθεται στο Σχ. 6.49 η απόκριση της μηχανικής ισχύος της ισοδύναμης Ντίζελ μονάδας της Ν.Ρόδου για T_w ίσο με 2 s, $k1$ και $k2$ ίσο με 8, σε σχέση με την αντίστοιχη που προέκυψε στο Σχ. 5.26, δηλαδή πριν τοποθετηθούν οι αδρανειακοί ελεγκτές στις Α/Γ ($k1=0$, $k2=0$). Όσον αφορά την ατμοηλεκτρική μονάδα, η απόκρισή της είναι όμοια με αυτή του Σχ. 5.26 καθώς λόγω έλλειψης στρεφόμενης εφεδρείας συμμετέχει ελάχιστα στην διαδικασία πρωτεύουσας ρύθμισης. Στις αποκρίσεις του Σχ. 6.49 για τη ισοδύναμη Ντίζελ μονάδα διαπιστώνεται πως παρότι αυτή εξακολουθεί να λειτουργεί με τον μέγιστο επιτρεπόμενο ρυθμό ανάληψης φορτίου (3 MW/s) δεν φτάνει στο μέγιστο της αποδιδόμενης ισχύς της (30 MVA), όταν ενεργοποιούνται οι αδρανειακοί ελεγκτές.



Σχ. 6.49: Παραγόμενη μηχανική ισχύς Ντίζελ μονάδας για T_w ίσο με 5 και μεταβαλλόμενα $k1$ και $k2$ στους αδρανειακούς ελεγκτές

Συμπερασματικά, αφού εξετάστηκαν αποκρίσεις για διάφορες τιμές των παραμέτρων, φάνηκε ότι η σταθεροποίηση που επιφέρει ο αδρανειακός ελεγκτής στη συχνότητα του συστήματος

της Ρόδου είναι εμφανής και επιτυγχάνεται το επιθυμητό αποτέλεσμα (αποφυγή αποκοπής φορτίου) για ένα μεγάλο εύρος τιμών των παραμέτρων

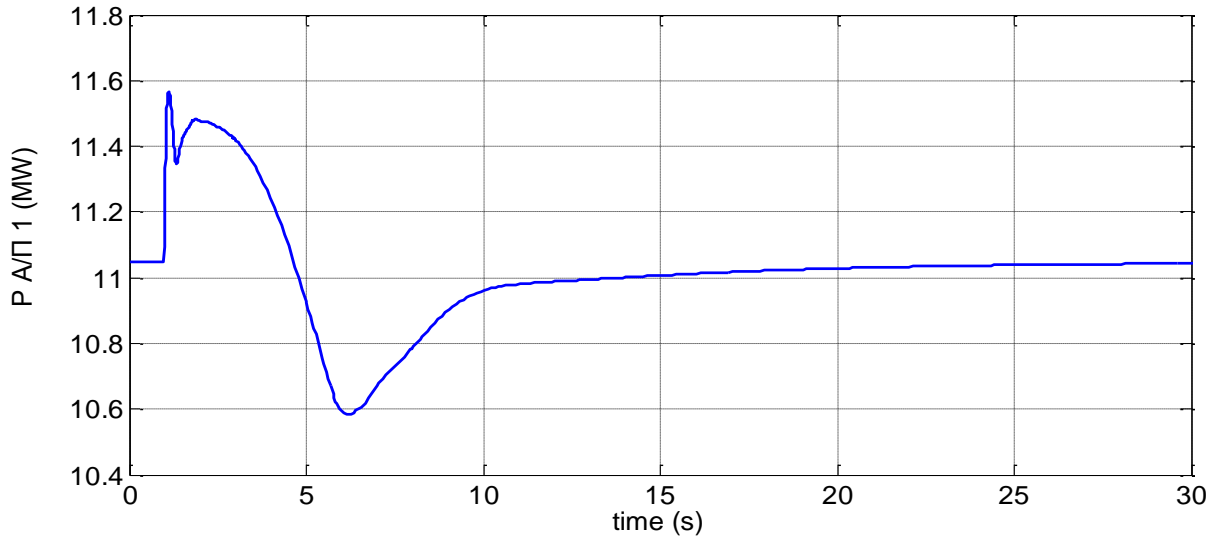
6.2.5 Ενεργοποίηση αδρανειακού ελεγκτή με ενεργό τον έλεγχο γωνίας βήματος των πτερυγίων

Στην ενότητα αυτή εξετάζεται η περίπτωση όπου στο σημείο λειτουργίας προ της διαταραχής είναι ενεργοποιημένος ο έλεγχος γωνίας βήματος πτερυγίων ($\beta \neq 0$), δηλαδή κάποιο Α/Π παράγει την ονομαστική του ισχύ ώστε να διαπιστωθεί η επίδραση του αδρανειακού ελεγκτή στη λειτουργία των Α/Γ υπό αυτές τις συνθήκες. Για να προσομοιώσουμε ένα τέτοιο σενάριο θα αλλάξουμε τις συνθήκες παραγωγής των Α/Π του Σεναρίου Β όπως φαίνεται στον πίνακα 6.4. Θεωρούμε δηλαδή ίδιο συνολικό ποσοστό αιολικής διείσδυσης στο σύστημα αλλά ανακατανέμουμε την αιολική παραγωγή ώστε τη μία φορά το Α/Π 1 (Σενάριο Β2) και την άλλη το Α/Π 3 (Σενάριο Β3) να παράγουν την ονομαστική τους ισχύ. Φυσικά πρόκειται για υποθετικά σενάρια όπου δεν λαμβάνουμε υπόψη την τοπολογία των πάρκων και την πιθανότητα ύπαρξης τέτοιων συνθηκών ανέμου. Και στις δύο περιπτώσεις η αρχική γωνία βήματος των πτερυγίων τίθεται στις 10 μοίρες. Να σημειωθεί ότι η προσωρινή υπέρβαση της ονομαστικής ενεργούς ισχύος λόγω αδρανειακής απόκρισης θεωρείται επιτρεπτή. Επίσης τα Α/Π λειτουργούν σε λογική σταθερού συντελεστή ισχύος και με απενεργοποιημένο τον έλεγχο τερματικής τάσης. Σε όλους τους αδρανειακούς ελεγκτές η παράμετρος T_w τίθεται ίση με 2 και το k ίσο με 8. Σημειώνεται ακόμα, πως και στα δύο υποθετικά σενάρια αποφεύγεται η αποκοπή φορτίου λόγω υποσυχνότητας, οπότε δεν παραθέτουμε ξανά τις αποκρίσεις συχνότητας, αφού εδώ εστιάζουμε στη συμπεριφορά των Α/Γ.

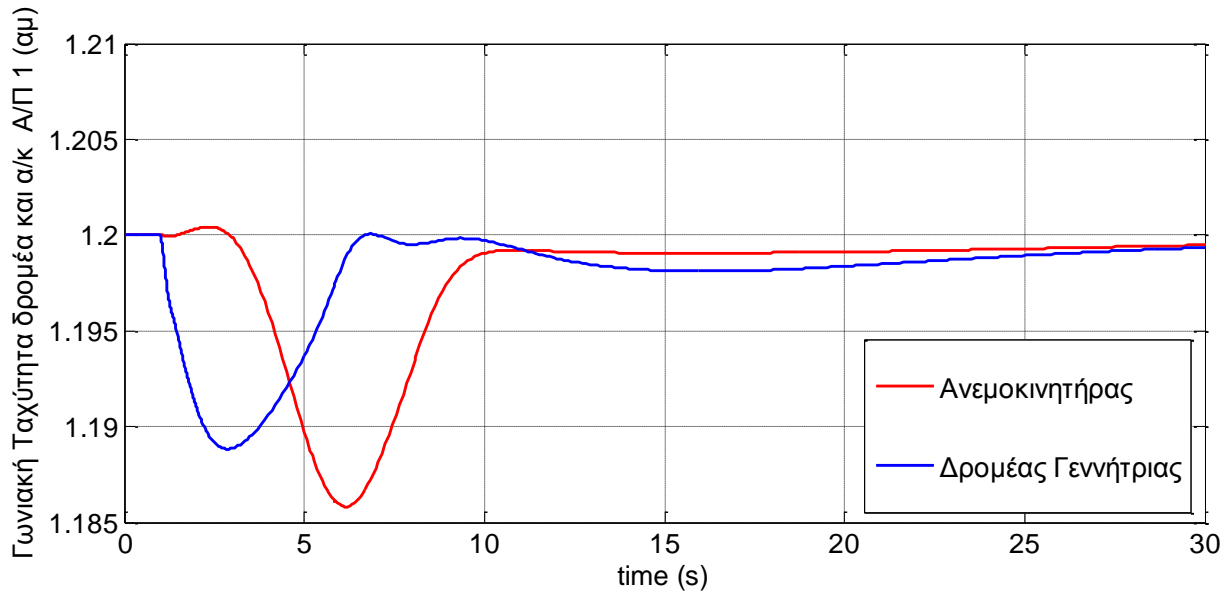
Πίνακας 6.4: Εναλλακτικά σενάρια αιολικής παραγωγής (σταθερή αιολική διείσδυση)

Συνθήκες Αιολικής Παραγωγής Σεναρίου Β					
<i>Κωδικός Αιολικού Πάρκου στην προσομοίωση</i>	<i>Τύπος Α/Γ</i>	<i>Αρχική παραγωγή αιολικών Β1</i>	<i>Νέα Παραγωγή αιολικών Β2</i>	<i>Νέα Παραγωγή αιολικών Β3</i>	<i>Κωδικός ζυγού σύνδεσης</i>
4	A	6,63	6,63	6,63	11
3	Δ	1,87	1,87	3,3(max)	20
1	Γ	6,26	11,05(max)	6,26	18
5	Γ	3,37	3,37	3,37	19
2	Δ	10,11	5,32	8,68	21
Σύνολο παραγωγής αιολικών πάρκων		28,24	28,24	28,24	

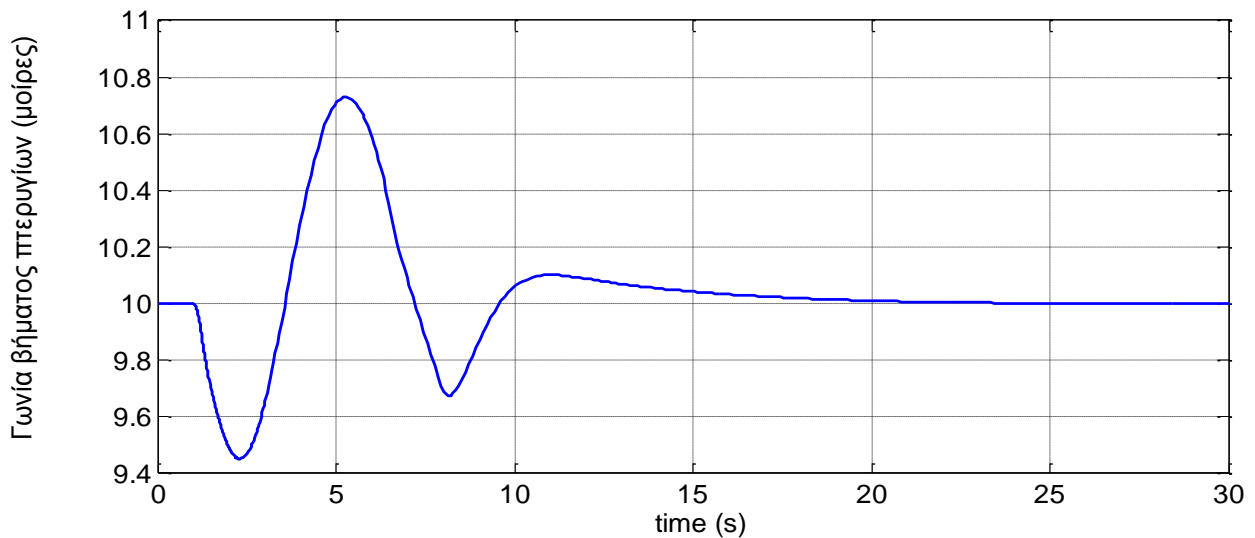
Οι αποκρίσεις της ενεργού ισχύος, των γωνιακών ταχυτήτων του ανεμοκινητήρα και του δρομέα της μηχανής καθώς και της γωνίας βήματος πτερυγίων της ισοδύναμης Α/Γ του Α/Π 1, για τις συνθήκες του Σεναρίου Β2, φαίνονται στα Σχ. 6.50 έως 6.52.



Σχ. 6.50: Παραγόμενη ενεργός ισχύς A/Π 1, Σενάριο B2



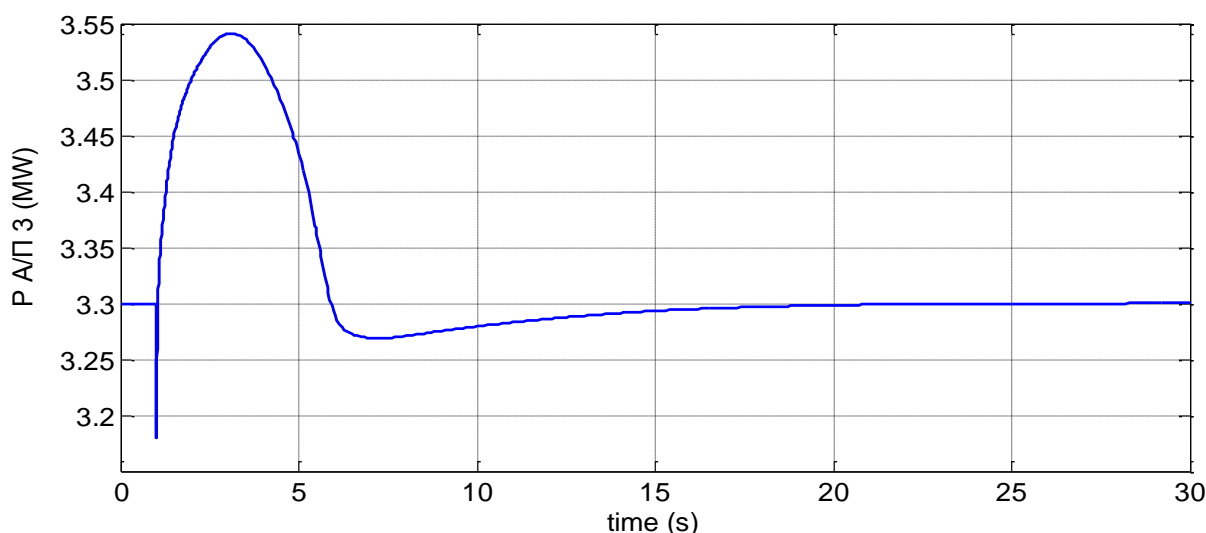
Σχ. 6.51: Γωνιακή ταχύτητα δρομέα και ανεμοκινητήρα της ισοδύναμης A/Γ του A/Π 1, Σενάριο B2



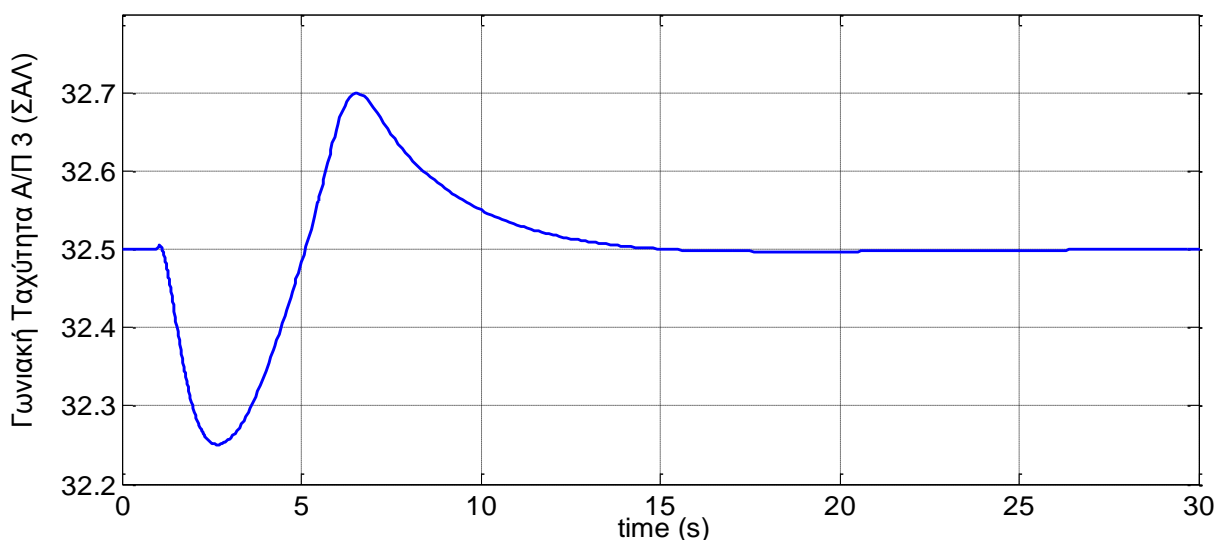
Σχ. 6.52: Γωνία βήματος πτερυγίων της ισοδύναμης A/Γ του A/Π 1, , Σενάριο B2

Στο Σχ. 6.50 παρατηρούμε πως η παραγόμενη ενεργός ισχύς του Α/Π 1 φτάνει έως τα 11,55 MW περίπου, δηλαδή αύξηση κατά 4,5 % από την ονομαστική της τιμή. Το σχετικά μικρό διάστημα όμως υπέρβασής της τιμής αυτής δεν καθιστά την αύξηση αυτή επικίνδυνη για τη λειτουργία της Α/Γ. Στο Σχ. 6.51 παρατηρούμε ότι ο ανεμοκινητήρας επιβραδύνεται λίγο περισσότερο σε σχέση με το δρομέα. Επίσης φαίνεται πως αμέσως μετά τη διαταραχή επιταχύνεται ελαφρώς, πράγμα που δικαιολογείται από την άμεση μείωση της γωνίας των πτερυγίων, όπως φαίνεται στο Σχ. 6.52. Η άμεση ενεργοποίηση του ελέγχου γωνίας βήματος των πτερυγίων οφείλεται στην επιβράδυνση του δρομέα της γεννήτριας. Ακολουθεί μια ταλαντωτική συμπεριφορά της γωνίας βήματος έως ότου να ισοροπήσει τελικά στην αρχική της τιμή. Πάντως το εύρος κίνησης της γωνίας είναι μικρό (περίπου 1,2 μοίρες). Συμπερασματικά καταλήγουμε πως η ενεργοποίηση του αδρανειακού ελεγκτή δεν επηρεάζει σημαντικά τη λειτουργία ελέγχου γωνίας βήματος της ΑΓΔΤ .

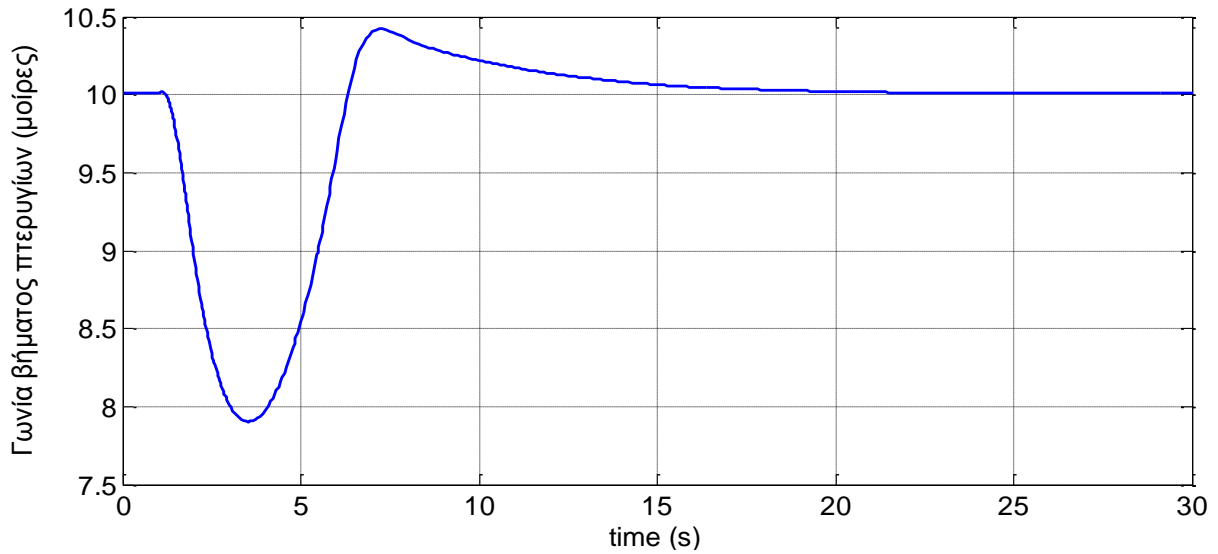
Οι αποκρίσεις της ενεργού ισχύος, της γωνιακής ταχύτητας του δρομέα της μηχανής (εδώ ταυτίζεται με του ανεμοκινητήρα αφού έχουμε μοντέλο μίας μάζας) καθώς και της γωνίας βήματος πτερυγίων της ισοδύναμης Α/Γ του Α/Π 3, για τις συνθήκες του Σεναρίου Β3, φαίνονται στα Σχ. 6.53 έως 6.55.



Σχ. 6.53: Παραγόμενη ενεργός ισχύς Α/Π, Σενάριο Β3



Σχ. 6.54: Γωνιακή ταχύτητα δρομέα της ισοδύναμης Α/Γ του Α/Π 3, Σενάριο Β3



Σχ. 6.55: Γωνία βήματος πτερυγίων της ισοδύναμης A/G του A/Π 3, Σενάριο B3

Στο Σχ. 6.53 παρατηρούμε πως η παραγόμενη ενεργός ισχύς του A/Π 3 φτάνει έως τα 3,55 MW περίπου, δηλαδή αύξηση κατά 6,6 % από την ονομαστική της τιμή. Όπως αναφέρθηκε και για την ΑΓΔΤ, η αύξηση αυτή είναι σύντομη και μπορεί να θεωρηθεί ανεκτή. Μάλιστα είναι αξιοσημείωτο πως η επαναφορά της ενεργού ισχύος στα προ διαταραχής επίπεδα γίνεται ταχύτερα, συγκριτικά με την περίπτωση όπου ο έλεγχος γωνίας δεν είναι ενεργός (βλ. Σχ. 6.46). Στο Σχ. 6.54 παρατηρούμε ότι η επιβράδυνση του δρομέα είναι σε ανεκτά όρια. Αξίζει να σχολιαστεί πως η μεταβολή της γωνίας βήματος οδηγεί και σε προσωρινή υπερτάχυνση. Η άμεση ενεργοποίηση του ελέγχου γωνίας βήματος των πτερυγίων οφείλεται στην αρχική επιβράδυνση του δρομέα. Εδώ το εύρος κίνησης της γωνίας βήματος είναι λίγο μεγαλύτερο (2,5 μοίρες περίπου) σε σχέση με το σενάριο B2 αλλά έχουμε το ίδιο γρήγορη επαναφορά στην αρχική τιμή. Συμπεραίνουμε λοιπόν πως ο έλεγχος γωνίας βήματος συνεισφέρει θετικά στην αδρανειακή απόκριση της ανεμογεννήτριας πλήρους μετατροπέα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

Συμπεράσματα-Προοπτικές

7.1 Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία αρχικά οργανώθηκε μία βιβλιοθήκη μοντέλων για το λογισμικό πακέτο WHSSP. Το εκπαιδευτικό πρόγραμμα WHSSP αναπτύχθηκε σε περιβάλλον MATLAB/Simulink στο εργαστήριο Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας του ΕΜΠ [6] και θεωρείται κατάλληλο για δυναμικές προσομοιώσεις και μελέτες ευστάθειας διασυνδεδεμένων ή αυτόνομων δικτύων, στα οποία έχουν διεισδύσει μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής και ειδικότερα αιολικά πάρκα.

Συγκεκριμένα στην εργασία αυτή πραγματοποιήθηκε η αρχειοθέτηση των μοντέλων του WHSSP, που έχουν ήδη αναπτυχθεί σε παλιότερες εργασίες ή αναπτύχθηκαν στα πλαίσια της παρούσας, ανά κατηγορία με βάση το είδος των διατάξεων (π.χ. Ρυθμιστές Στροφών, Αυτόματοι Ρυθμιστές Τάσης). Περιγράφηκαν συνοπτικά οι αρχές λειτουργίας των μοντέλων παράλληλα με τη συστηματική παρουσίαση των παραμέτρων, των εισόδων, των εξόδων και των μεταβλητών κατάστασης του καθενός. Επιπροσθέτως παρουσιάστηκε το χαρακτηριστικό μπλοκ του κάθε υποσυστήματος και επεξηγήθηκαν οι παράμετροι του όπως αυτές φαίνονται μέσω συμβολικών ονομάτων στο παράθυρο δεδομένων του στο περιβάλλον του Simulink. Απώτερος σκοπός της παρουσίασης αυτής ήταν να λειτουργήσει ως εγχειρίδιο χρήσης καθιστώντας έτσι ευκολότερη την απόδοση τιμών στις διάφορες παραμέτρους από τον χρήστη και ενισχύοντας τη φιλικότητα του περιβάλλοντος προσομοίωσης. Προς αυτή την κατεύθυνση αναλύθηκαν επίσης οι διάφοροι τρόποι επίλυσης των αλγεβρικών περιορισμών του δικτύου στο περιβάλλον του Simulink σε συνάρτηση με την παράσταση των διαφόρων συνιστωσών του συστήματος και ιδιαίτερα των μη γραμμικών φορτίων.

Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στα μοντέλα ανεμογεννητριών και γι' αυτό το λόγο παρουσιάστηκαν σε ξεχωριστό κεφάλαιο. Για τους σκοπούς τη μελέτης μας ακολουθήθηκε η λογική αναπαράστασης των αιολικών πάρκων μέσω ισοδύναμης ενοποιημένης ανεμογεννήτριας. Συγκεκριμένα στη βιβλιοθήκη του WHSSP συμπεριλήφθηκαν μοντέλα αναπαράστασης αιολικών πάρκων κατάλληλα για μελέτες ευστάθειας τα οποία αποτελούνται από ανεμογεννήτριες τύπου Α, Γ και Δ. Αναλύθηκαν οι βασικές αρχές λειτουργίας για κάθε τύπου και οι παραδοχές οι σχετικές με τη μοντελοποίηση τους στο περιβάλλον του WHSSP. Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας μοντελοποιήθηκαν ακόμα δύο εναλλακτικά μοντέλα για τις Α/Γ μεταβλητών στροφών και τα οποία επίσης συμπεριλήφθηκαν στη βιβλιοθήκη. Το πρώτο (DFAG2) αποτελεί επέκταση του μοντέλου της ασύγχρονης γεννήτριας διπλής τροφοδότησης και περιλαμβάνει τη λογική περιορισμού του ενεργού ρεύματος σε βυθίσεις τάσης (LVPL). Το δεύτερο (FCWT) αφορά τις ανεμογεννήτριες πλήρους μετατροπέα και χαρακτηρίζεται από απλοποιημένη παράσταση του μηχανικού μέρους, έλεγχο της τερματικής τάσης (TVC) και μια σύνθετη λογική για τον περιορισμό των εγγεόμενων ρευμάτων του μετατροπέα πλευράς δικτύου ανάλογα με το αν δίνεται προτεραιότητα στην εγγεόμενη ενεργό ή άεργο ισχύ της Α/Γ.

Για τα δύο εναλλακτικά μοντέλα ανεμογεννητριών διεξήχθησαν συγκρίσεις με τα αντίστοιχα προτεινόμενα μοντέλα στο περιβάλλον του επαγγελματικού προγράμματος PSS/E μέσω της προσομοίωσης τριφασικού βραχυκυκλώματος σε τυπικό δίκτυο σύνδεσης αιολικού πάρκου σε άπειρο ζυγό. Από τα αποτελέσματα όντως παρατηρήθηκε σύγκλιση στις αποκρίσεις παρά τις μικροδιαφορές που παρατηρήθηκαν. Ιδιαίτερα στην περίπτωση του επεκταμένου μοντέλου της ΑΓΔΤ στο Simulink με τη λογική περιορισμού του ενεργού ρεύματος διαπιστώθηκε ταυτόσημη συμπεριφορά. Επιπλέον για το αρχικό μοντέλο της ΑΓΔΤ (DFAG1) έγινε σύγκριση με το αντίστοιχο

αναλυτικό ηλεκτρομαγνητικό μοντέλο μέσης τιμής (average) που έχει αναπτυχθεί στο περιβάλλον του MATLAB/Simulink και περιλαμβάνεται στα demo του Simulink στην κατηγορία που αφορά τα ΣΗΕ. Για το σκοπό αυτό το ηλεκτρομαγνητικό μοντέλο προσαρμόστηκε ώστε οι επιμέρους περιορισμοί των PWM μετατροπών να αντιστοιχούν στη θεώρηση ενιαίου μετατροπέα ισχύος που ακολουθείται στο μοντέλο DFAG1 ενώ παράλληλα χρησιμοποιήθηκαν κοινοί παράμετροι για τα διάφορα σχήματα ελέγχου. Από τη σύγκριση αυτή προέκυψε πως, παρά τις απλοποιητικές παραδοχές για τους σκοπούς των μελετών ευστάθειας ΣΗΕ (π.χ. θεώρηση σταθερής τάσης στον ενδιάμεσο πυκνωτή, αγνόηση ταχέων ηλεκτρομαγνητικών φαινομένων) το μοντέλο που αναπτύχθηκε στα πλαίσια του WHSSP κρίνεται ικανοποιητικό, αφού αποτυπώνεται η ίδια δυναμική συμπεριφορά ως συνολική εικόνα με το αντίστοιχο αναλυτικό.

Στη συνέχεια προσομοιώθηκε ένα πραγματικό αυτόνομο ηλεκτρικό σύστημα, όπου έγινε ανάλυση δύο ενδεικτικών σεναρίων λειτουργίας για τη μελέτη της συμπεριφοράς του δικτύου και ιδιαίτερα της συχνότητας αυτού σε συνθήκες αυξημένης αιολικής διείδυσης. Και για τα δύο σενάρια λειτουργίας του συστήματος θεωρήθηκε ως διαταραχή η απώλεια μιας συμβατικής μονάδας παραγωγής. Από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων και την ανάλυση ιδιοτιμών του γραμμικοποιημένου συστήματος διαπιστώθηκε η αρνητική συμβολή που έχει ο έλεγχος τερματικής τάσης, όταν ενεργοποιείται στα αιολικά πάρκα με ΑΓΔΤ, στη μεταβατική βύθιση της συχνότητας μετά τη διαταραχή. Επίσης διαπιστώθηκε ότι ενεργοποιούνται οι ηλεκτρονόμοι υποσυχνότητας με επακόλουθο την αποκοπή φορτίου για το σενάριο μέγιστης αιολικής διείδυσης αλλά όχι γι' αυτό της μέγιστης αιολικής παραγωγής. Έτσι για την περίπτωση μέγιστης αιολικής διείδυσης προτάθηκε σε πρώτη φάση η ένταξη μιας επιπλέον συμβατικής μονάδας παραγωγής προς αύξηση της στρεφόμενης εφεδρείας και επομένως αποτελεσματικότερης ρύθμισης της συχνότητας από τις συμβατικές μονάδες. Λαμβάνοντας υπόψη όμως το οικονομικό και περιβαλλοντικό κόστος μιας τέτοιας επιλογής τελικά προτιμήθηκε ως στρατηγική η σχεδίαση αδρανειακού ελεγκτή στις ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών του νησιού ώστε να συμμετάσχουν και αυτές στην αδρανειακή απόκριση του συστήματος περιορίζοντας τη μεταβατική βύθιση της συχνότητας.

Από τις προσομοιώσεις του συστήματος για διάφορες τιμές των παραμέτρων του αδρανειακού ελεγκτή προέκυψε πως ένα μεγάλο εύρος τιμών παρέχει το επιθυμητό αποτέλεσμα, δηλαδή την αποφυγή αποκοπής φορτίου. Έτσι έγινε ξεχωριστή ανάλυση για τις ασύγχρονες γεννήτριες διπλής τροφοδότησης και τις ανεμογεννήτριες με πλήρη μετατροπέα λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση του ελεγκτή τόσο στη λειτουργία τους όσο και στην γενικότερη συμπεριφορά του συστήματος. Για το σκοπό αυτό αναλύθηκε η ευαισθησία του ρυθμού ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων και του ρυθμού ρύθμισης συχνότητας του γραμμικοποιημένου συστήματος ως προς τις παραμέτρους του αδρανειακού ελεγκτή. Συνυπολογίζοντας τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας και τις αποκρίσεις της παραγόμενης ενεργού ισχύος και των ταχυτήτων των ανεμογεννητριών καταλήξαμε τελικά σε ένα στενότερο εύρος με βάση τις προδιαγραφές που τέθηκαν. Τέλος μελετήθηκαν δύο ενδεικτικά σενάρια για την επίδραση του ελέγχου της γωνίας βήματος των πτερυγίων, όταν είναι ενεργός ο αδρανειακός ελεγκτής, με τα αποτελέσματα να συνηγορούν στη μάλλον θετική συμβολή του ως προς τη συνολική απόκριση των ανεμογεννητριών.

7.2 Προοπτικές

Αντικείμενο μελλοντικής ερευνητικής μελέτης μπορεί να αποτελέσει η εν γένει βελτίωση του υπολογιστικού πακέτου WHSSP. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η επέκταση του εργαλείου

αρχικοποίησης ώστε να παράγεται αυτόματα, με βάση τα δεδομένα των αρχείων εισόδου, το μοντέλο προσομοίωσης του ηλεκτρικού συστήματος στο περιβάλλον του Simulink. Δηλαδή να μην είναι απαραίτητο ο χρήστης να δημιουργήσει χειροκίνητα το μοντέλο του συστήματος με την πρόσθεση των διαφόρων διατάξεων και την υλοποίηση των κατάλληλων συνδέσεων. Επίσης τα αρχεία εισόδου θα μπορούσαν να επεκταθούν ώστε να περιλαμβάνουν δεδομένα σχετιζόμενα με το είδος, τις στρατηγικές ελέγχου και τις διάφορες παραμέτρους των αιολικών πάρκων σε συνδυασμό με την ευκολότερη προσομοίωση σεναρίων με μεταβαλλόμενη αιολική διεύθυνση. Μια ακόμα βελτίωση θα ήταν η ενσωμάτωση επιπλέον διατάξεων και ιδιαίτερα μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής στη βιβλιοθήκη μοντέλων του WHSSP, όπως για παράδειγμα τα φωτοβολταϊκά συστήματα και οι κυψέλες καυσίμου.

Ένα επιπλέον θέμα που χρήζει περισσότερης μελέτης είναι η σύγκριση και η επέκταση των διαφόρων στρατηγικών ελέγχου των μετατροπέων των ανεμογεννητριών μεταβλητών στροφών σε σχέση με την απαίτηση για αδιάλειπτη λειτουργία σε βυθίσεις τάσης. Συγκεκριμένα θα μπορούσε να μελετηθεί η επίδραση των κωδικών δικτύου στη διαμόρφωση των κατάλληλων στρατηγικών βάσει των οποίων το αιολικό πάρκο εγγχεί ενεργό και άεργο ισχύ στο δίκτυο κατά τη διάρκεια βυθίσεων τάσης αλλά και η προσαρμοστικότητα των διαφόρων μοντέλων στις συνεχώς αυξανόμενες απαιτήσεις. Μάλιστα στη λογική επέκτασης της βιβλιοθήκης του WHSSP θα μπορούσε να εξεταστεί και η μοντελοποίηση των κατάλληλων διατάξεων προστασίας που αποσυνδέουν τις Α/Γ ανάλογα με το μέγεθος και τη διάρκεια των βυθίσεων τάσης.

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε η συμπεριφορά του αυτόνομου συστήματος της Ρόδου σε περίπτωση απώλειας παραγωγής και για συνθήκες αυξημένης αιολικής διεύθυνσης. Ενδιαφέρον θα είχε η μελέτη του συγκεκριμένου συστήματος σε αυτές τις συνθήκες αλλά για διαφορετικού τύπου διαταραχές, όπως για παράδειγμα ένα βραχυκύκλωμα ή η διαταραχή ανέμου, δηλαδή απότομη μεταβολή της αιολικής παραγωγής.

Τέλος ένα ζήτημα που πραγματικά αξίζει να διερευνηθεί είναι η επιλογή βέλτιστων παραμέτρων για τον αδρανειακό ελεγκτή των Α/Γ σε συνάρτηση τόσο με τα χαρακτηριστικά του εξεταζόμενου δικτύου όσο και τις εκάστοτε συνθήκες λειτουργίας των αιολικών πάρκων, δηλαδή στη λογική προσαρμοστικού ελέγχου. Επίσης θα μπορούσε να μελετηθεί η επίδραση του ελεγκτή αυτού σε συνδυασμό με τη στρατηγική εφεδρείας ενεργού ισχύος που προβλέπει συμμετοχή των αιολικών πάρκων στην πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Β.Κ Παπαδιάς, Κ. Βουρνάς, “Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και έλεγχος συχνότητας και τάσεως”, Αθήνα, 1991.
- [2] T. Van Cutsem, C. D. Vournas, “Voltage Stability of Electric Power System”, Kluwer Academic Publishers, 1998.
- [3] P. Kundur, “Power System Stability and Control”, EPRI Power System Engineering Series, McGraw-Hill, 1994.
- [4] P. Kundur, et al, “Definitions and Classification of Power System Stability”, IEEE/CIGRE Joint Task Force on Stability Terms and Definitions, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 19, No. 2, pp. 1387-1401, May 2004.
- [5] 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.
- [6] Εμμανουήλ Γ. Ποταμιανάκης, “Προσομοίωση και Γραμμικοποίηση Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας για την Ανάλυση Βραχυπρόθεσμης Ευστάθειας Τάσης”, διδακτορική διατριβή, ΕΜΠ, Αθήνα, Απρίλιος 2006.
- [7] Μιχ.Π. Παπαδόπουλος, “Δίκτυα Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας”, Αθήνα 1994.
- [8] Giorgos Tsourakis “Induction-Machine Based Wind Energy Conversion Systems: Modeling and Applications”, μεταπτυχιακή εργασία, Universite de Liege, Ακαδημαϊκό έτος 2002-2003.
- [9] Γιώργου Τσουράκη “Συμβολή της Αιολικής Διείσδυσης στην Ευστάθεια των Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας”, διδακτορική διατριβή, ΕΜΠ, Αθήνα, Μάρτιος 2010.
- [10] Ιωάννης Κ. Μάντζαρης, διπλωματική εργασία με θέμα “Ανάλυση δυναμικής συμπεριφοράς σταθμού συνδυασμένου κύκλου”, ΕΜΠ, Αθήνα, Νοέμβρης 2005.
- [11] Σωτήρη Ι. Νάνου, διπλωματική εργασία με θέμα “Μοντέλο Ανεμογεννήτριας με πλήρη μετατροπέα για μελέτες ευστάθειας”, ΕΜΠ, Αθήνα, Ιούλιος 2009.
- [12] Βασίλειος Μ. Νομικός “Συστηματική σχεδίαση σταθεροποιητών σε συστήματα με σύγχρονες και ασύγχρονες μηχανές”, διδακτορική διατριβή, ΕΜΠ, Αθήνα, Απρίλιος 2005.
- [13] Ήλια-Κωνσταντίνα Σ.Ψιμούλη, διπλωματική εργασία με θέμα “Ανάλυση ευστάθειας αυτόνομου συστήματος με αεριοστροβίλους και αιολική παραγωγή”, ΕΜΠ, Αθήνα, Φεβρουάριος 2007.

- [14] Richard Gagnon, Gilbert Turmel, Christian Larose, Jacques Brochu, Gilbert Sybille, Martin Fecteau, “Large-Scale Real-Time Simulation of Wind Power Plants into Hydro-Québec Power System”, 11th International Workshop on Large-Scale Integration of Wind Power into Power Systems as well as on Transmission Networks for Offshore Wind Power Plants, Lisbon, Portugal 13-15 November, 2012.
- [15] WECC, IEEE, “Description and Technical Specifications for Generic WTG Models – A Status Report”, Power Systems Conference and Exposition, Phoenix, Arizona, U.S.A., 20-23 March 2011.
- [16] Τεχνική έκθεση, “Ανάπτυξη μοντέλων για τη δυναμική προσομοίωση αυτόνομων νησιωτικών συστημάτων με παρουσία μονάδων ΑΠΕ και την εκτίμηση του ορίου ασφαλούς αιολικής διεύθυνσης”, ΔΕΗ Α.Ε.-ΕΠΙΣΕΥ, ΕΜΠ, Αθήνα, Μάρτιος 2008.
- [17], PSS/E 32.0.5 Wind Model Library, Siemens-PTI, 2010
- [18] I. Dobson, J. Zhang, S. Greene, H. Engdahl, P. W. Sauer, “Is strong modal resonance a precursor to power system oscillations?”, IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications, vol. 48, pp. 340 – 349, March 2001.
- [19] S. Wiggins, “Introduction to Applied Nonlinear Dynamical Systems and Chaos. New York: Springer-Verlag”, 1990.
- [20] IEEE/CIGRE, “Definition and classification of power system stability”, Joint Task Force on Stability terms and Definitions, August 2002.
- [21] Marina Tsili, Christos Patsiouras and Stavros Papathanassiou, “Grid code requirements for large wind farms: A review of technical regulations and available wind turbine technologies”, in EWEC 2008, Belgium, 31 March- 3 April 2008.
- [22] Τροποποίηση Διατάξεων του Κώδικα Διαχείρισης του Συστήματος και Συναλλαγών ηλεκτρικής ενέργειας (Αποφ. Υπ Ανάπτυξης Δ5/ΗΛ/Β/Φ.1.10/1086/10413/13-05-2008, ΦΕΚ Β/937/21-05-2008).
- [23] Μιχ.Π. Παπαδόπουλος “ Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας από Ανανεώσιμες Πηγές” , Αθήνα 1997.
- [24] CIGRE Task Force 38.02.14 Report, “Analysis and Modeling Needs of Power Systems Under Major Frequency Disturbances”, January 1999.
- [25] N. Hatziargyriou, E. Karapidakis, D. Hatzifotis, “Frequency Stability of Power System in Large Islands with High Wind Power Penetration”, Bulk Power Systems Dynamics Control Symposium-IV Restructuring, Vol. PAS-102, Santorini, Greece, August 24-28, 1998.

- [26] Modeling and dynamic behavior of wind generation as it relates to power control and dynamic performance. CIGRE Technical Brochure n.328, WG C4.601, P.Pourbeik (convener), August 2007.
- [27] N. W. Miller, J. J. Sanchez-Gasca, W. W. Price, “Dynamic modeling of ge 1.5 and 3.6 mw wind turbine-generators for stability simulations. In Proc. Of IEEE PES Gen Meeting, Toronto, Canada, Jul 2003.
- [28] W. W. Price, J.J. Sanchez-Gasca, “Simplified Wind Turbine Generator Aerodynamic Models for Transient Stability Studies”, Proc. IEEE PES 2006 Power Systems Conference and Exposition (PSCE), GA, pp. 986-992, Atlanta, Oct. 29-Nov. 1, 2006.
- [29] I. Elrich, F Shewarega, S. Engelhardt, J. Kretschmann, J. Fortmann, F. Koch, “Effect of Wind Turbine Outpout Current during Faults on Grid Voltage and the Trasient Stability of Wind Parks”, In Proc. Of IEEE PES Gen Meeting, Calgary, Canada, Jul 2003.
- [30] Gillian Lalor, Allan Mullane, Mark O’Malley, “Frequency Control and Wind Turbines Technologies”, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 20, no. 4, November 2005.
- [31] Nayeem Rahmat Ullah, Torbjörn Thiringer, Daniel Karlsson, “Temporary Primary Frequency Control Support by Variable Speed Wind Turbines—Potential and Applications”, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 23, no. 2, May 2008.

ΠΑΡΑΤΗΜΑ Α

Περιγραφή δομής αρχείων εισόδου (.dat) του WHSSP

Προκειμένου να μπορέσει ο χρήστης να προσομοιώσει τη συμπεριφορά ενός Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας στο περιβάλλον WHSSP, θα πρέπει να δημιουργήσει τα εξής πέντε (5) αρχεία εισόδου δεδομένων:

1. Αρχείο δεδομένων ζυγών (bus.dat).
2. Αρχείο δεδομένων γραμμών μεταφοράς (line.dat).
3. Αρχείο δεδομένων μετασχηματιστών, στατικών ή δυναμικών (trans.dat).
4. Αρχείο δεδομένων σύγχρονων γεννητριών (gener.dat).
5. Αρχείο δεδομένων κινητήρων επαγωγής (motor.dat).

Κάθε αρχείο εισόδου αποτελείται από ένα διατεταγμένο πίνακα δεδομένων. Σε κάθε γραμμή αντιστοιχούν τα δεδομένα μιας συνιστώσας του συστήματος που προσομοιώνεται (π.χ. μιας γεννήτριας, ενός μετασχηματιστή) και σε κάθε στήλη αντιστοιχεί κάποια συγκεκριμένη παράμετρος που χαρακτηρίζει τη συνιστώσα αυτή.

Η ρουτίνα αρχικοποίησης διαβάζει τα αρχεία εισόδου για να επιλύσει την αρχική ροή φορτίου και επίσης καταχωρεί τα δεδομένα αυτά σε πίνακες-γραμμές στο περιβάλλον εργασίας (Workspace) της MATLAB ώστε να χρησιμοποιηθούν για την απόδοση τιμών στα μοντέλα διατάξεων του Simulink. Έτσι για παράδειγμα η μεταβλητή bus_PG(i) αντιστοιχεί στην ενεργό παραγωγή του ζυγού i. Σημειώνεται ότι τα δεδομένα που σχετίζονται με την παραγωγή και το φορτίο των ζυγών ανάγονται κατά την αρχικοποίηση στη βάση ισχύος του συστήματος (Sbase).

Ακολουθεί επεξήγηση της δομής των αρχείων εισόδου και των μεταβλητών περιγραφής των παραμέτρων για την σωστή απόδοση των τιμών τους από τον χρήστη στο περιβάλλον του Simulink.

Πίνακας Α.1: Αρχείο δεδομένων ζυγών (bus.dat)

Αριθμός στήλης	Επεξήγηση παραμέτρου	Κωδική ονομασία μεταβλητής στο περιβάλλον εργασίας της MATLAB για τον ζυγό i
1	Κωδικός αριθμός ζυγού για την προσομοίωση	bus_num(i)
2	Τύπος ζυγού: <ul style="list-style-type: none"> • 1 για ζυγούς PQ • 2 για ζυγούς PV • 3 για ζυγούς με σταθερή τάση κατά μέτρο και γωνία (ζυγός ταλάντωσης, ζυγοί διασύνδεσης κτλ.) 	bus_type(i)
3	Ενεργός παραγωγή ζυγού σε MW	bus_PG(i)
4	Άεργος παραγωγή ζυγού σε MVA _r	bus_QG(i)
5	Συνολικό ενεργό φορτίο ζυγού σε MW	bus_PL(i)
6	Συνολικό άεργο φορτίο ζυγού σε MVA _r	bus_QL(i)
7	Εγκάρσια αγωγιμότητα ζυγού σε MW υπό ονομαστική τάση	bus_GL(i)
8	Εγκάρσια αγωγιμότητα ζυγού σε MVA _r υπό ονομαστική τάση: <ul style="list-style-type: none"> • BL>0 σε περίπτωση πυκνωτή • BL<0 σε περίπτωση πηνίου 	bus_BL(i)
9	Αρχική τιμή μέτρου τάσης ζυγού (αμ)	bus_V0(i)
10	Αρχική γωνία τάσης ζυγού (μοίρες)	bus_thita0(i)
11	Ποσοστό του ενεργού φορτίου που είναι εκθετικής μορφής (αμ)	bus_P_PRC_EXP(i)
12	Ποσοστό του ενεργού φορτίου λόγω κινητήρα επαγωγής (αμ)	bus_P_PRC_MOT(i)
13	Ποσοστό του άεργου φορτίου που είναι εκθετικής μορφής (αμ)	bus_Q_PRC_EXP
14	Εκθέτης ενεργού φορτίου εκθετικής μορφής	bus_ALPHA(i)
15	Εκθέτης άεργου φορτίου εκθετικής μορφής	bus_BETA(i)
16	Ένδειξη δυναμικού ενεργού φορτίου: <ul style="list-style-type: none"> • 1 εάν το ενεργό εκθετικό φορτίο είναι δυναμικό • 0 εάν το ενεργό εκθετικό φορτίο δεν είναι δυναμικό 	bus_PEXP_dyn(i)
17	Ένδειξη δυναμικού άεργου φορτίου: <ul style="list-style-type: none"> • 1 εάν το άεργο εκθετικό φορτίο είναι δυναμικό • 0 εάν το άεργο εκθετικό φορτίο δεν είναι δυναμικό 	bus_QEXP_dyn(i)

Πίνακας A.2: Αρχείο δεδομένων γραμμών μεταφοράς (line.dat)

Αριθμός στήλης	Επεξήγηση παραμέτρου	Κωδική ονομασία μεταβλητής στο περιβάλλον εργασίας της MATLAB για την γραμμή i
1	Κωδικός αριθμός ζυγού αναχώρησης κυκλώματος γραμμής.	line_send(i)
2	Κωδικός αριθμός ζυγού αναχώρησης κυκλώματος γραμμής.	line_recv(i)
3	Ακέραιος αριθμός με τον οποίο διακρίνονται οι παράλληλοι κλάδοι μεταξύ τους. Ένδειξη μονού ή διπλού κυκλώματος: <ul style="list-style-type: none"> • 1 για γραμμή μεταφοράς μονού κυκλώματος • 2 για γραμμή μεταφοράς διπλού κυκλώματος 	line_circnum(i)
4	Ισοδύναμη ωμική αντίσταση κυκλώματος γραμμής (αμ στη βάση ισχύος του συστήματος)	line_R(i)
5	Ισοδύναμη επαγωγική αντίδραση κυκλώματος γραμμής (αμ στη βάση ισχύος του συστήματος)	line_X(i)
6	Ισοδύναμη χωρητική αγωγιμότητα κυκλώματος γραμμής (αμ στη βάση ισχύος του συστήματος)	line_B(i)

Πίνακας A.3: Αρχείο δεδομένων μετασχηματιστών (trans.dat)

Αριθμός στήλης	Επεξήγηση παραμέτρου	Κωδική ονομασία μεταβλητής στο περιβάλλον εργασίας της MATLAB για τον μετασχηματιστή i
1	Ζυγός πρωτεύοντος τυλίγματος (πλευρά μεταβλητής λήψης)	trans_send(i)
2	Ζυγός δευτερεύοντος τυλίγματος	trans_recv(i)
3	Ακέραιος αριθμός με τον οποίο διακρίνονται οι παράλληλοι μετασχηματιστές μεταξύ τους Ένδειξη μονού ή διπλού κυκλώματος: <ul style="list-style-type: none"> • 1 για μετασχηματιστή μονού κυκλώματος • 2 για μετασχηματιστή διπλού κυκλώματος 	trans_circnum(i)
4	Ισοδύναμη ωμική αντίσταση μετασχηματιστή (αμ στη βάση ισχύος του συστήματος και ανηγμένη στο δευτερεύον τύλιγμα)	trans_R(i)
5	Ισοδύναμη επαγωγική αντίδραση μετασχηματιστή (αμ στη βάση ισχύος του συστήματος και ανηγμένη στο δευτερεύον τύλιγμα)	trans_X(i)
6	Ισοδύναμη χωρητική αγωγιμότητα μετασχηματιστή (αμ στη βάση ισχύος του συστήματος και ανηγμένη	trans_B(i)

	στο δευτερεύον τύλιγμα)	
7	Ονομαστικός λόγος μετασχηματισμού (αμ)	trans_r0(i)
8	Ένδειξη για δυναμικό ή στατικό μετασχηματιστή: <ul style="list-style-type: none"> • 0 για μετασχηματιστή σταθερής λήψης • 1 για μετασχηματιστή μεταβλητής λήψης (ΣΑΤΥΦ) 	trans_LTC(i)

Πίνακας Α.4: Αρχείο δεδομένων σύγχρονων γεννητριών (*gener.dat*)

Αριθμός στήλης	Επεξήγηση παραμέτρου	Κωδική ονομασία μεταβλητής στο περιβάλλον εργασίας της MATLAB για την γεννήτρια i
1	Κωδικός αριθμός ζυγού στον οποίο συνδέεται η γεννήτρια.	gener_bus(i)
2	Ονομαστική ισχύς γεννήτριας σε MVA.	gener_Snom(i)
3	Ονομαστική συχνότητα γεννήτριας σε Hz.	gener_fnom(i)
4	Ονομαστική ισχύς σε MW του στροβίλου ο οποίος κινεί τη γεννήτρια.	gener_Pnom(i)
5	Ωμική αντίσταση στάτη (αμ στη βάση της γεννήτριας).	gener_Rs(i)
6	Επαγωγική αντίδραση σκεδάσεως στάτη (αμ στη βάση της γεννήτριας).	gener_Xls(i)
7	Σύγχρονη αντίδραση ευθέως άξονα (αμ στη βάση της γεννήτριας).	gener_Xd(i)
8	Σύγχρονη αντίδραση εγκάρσιου άξονα (αμ στη βάση της γεννήτριας).	gener_Xq(i)
9	Μεταβατική αντίδραση ευθέως άξονα (αμ στη βάση της γεννήτριας).	gener_Xdd(i)
10	Μεταβατική αντίδραση εγκάρσιου άξονα (αμ στη βάση της γεννήτριας).	gener_Xqq(i)
11	Μεταβατική χρονική σταθερά ανοιχτού κυκλώματος ευθέως άξονα (sec).	gener_Td0(i)
12	Μεταβατική χρονική σταθερά ανοιχτού κυκλώματος εγκάρσιου άξονα (sec).	gener_Tq0(i)
13	Σταθερά αδράνειας σε sec (αμ στη βάση ισχύος του στροβίλου).	gener_H(i)
14	Στατισμός μονάδας (αμ στη βάση ισχύος του στροβίλου).	gener_droop(i)
15	Αναλογικό κέρδος του Αυτόματου Ρυθμιστή Τάσεως της γεννήτριας.	gener_KAVR(i)
16	Χρονική σταθερά του Αυτόματου Ρυθμιστή Τάσεως της γεννήτριας.	gener_TAVR(i)

Πίνακας Α.4: Αρχείο δεδομένων κινητήρων επαγωγής (gener.dat)

Αριθμός στήλης	Επεξήγηση παραμέτρου	Κωδική ονομασία μεταβλητής στο περιβάλλον εργασίας της MATLAB για τον κινητήρα i
1	Κωδικός αριθμός ζυγού στον οποίο συνδέεται ο κινητήρας.	motor_bus(i)
2	Ονομαστική ισχύς κινητήρα σε MVA.	motor_Snom(i)
3	Ονομαστική συχνότητα κινητήρα σε Hz.	motor_fnom(i)
4	Ωμική αντίσταση στάτη (αμ στη βάση του κινητήρα).	motor_Rs(i)
5	Επαγωγική αντίδραση σκεδάσεως στάτη (αμ στη βάση του κινητήρα).	motor_Xls(i)
6	Επαγωγική αντίδραση μαγνητίσεως στάτη (αμ στη βάση του κινητήρα).	motor_Xm(i)
7	Ωμική αντίσταση στάτη (αμ στη βάση του κινητήρα).	motor_Rr(i)
8	Επαγωγική αντίδραση σκεδάσεως δρομέα (αμ στη βάση του κινητήρα).	motor_Xlr(i)
9	Στοιχεία για τον υπολογισμό της μηχανικής ροπής του κινητήρα. Θεωρούμε μηχανικό φορτίο σταθερής ισχύος ή δυναμικό φορτίο που εξαρτάται από τις στροφές του κινητήρα μέσω εκθετικής σχέσης. Έτσι η μηχανική ροπή υπολογίζεται βάσει της σχέσης:	motor_Am(i)
10	$T_m = T_{m0}((1 - A_m) + A_m \omega_r^m)$ <p>όπου T_{m0} η αρχική ροπή, A_m το ποσοστό (αμ) του δυναμικού μηχανικού φορτίου και m ο εκθέτης της χαρακτηριστικής του δυναμικού φορτίου συναρτήσεως των στροφών (ω_r)</p>	motor_m(i)
11	Σταθερά αδράνειας σε sec (στη βάση ισχύος του κινητήρα).	motor_H(i)

ΠΑΡΑΤΗΜΑ Β

Σύγκριση χρόνου εκτέλεσης προσομοίωσης με και χωρίς αλγεβρικό βρόχο σε ακτινικό δίκτυο σύνδεσης αιολικού πάρκου σε άπειρο ζυγό

Η χρονική σύγκριση των δύο μεθόδων επίλυσης του δικτύου (βλ. ενότητα 2.3) στο Simulink πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας το ίδιο δοκιμαστικό σύστημα με την παραγράφο 4.6. Διατηρήθηκαν δηλαδή οι ίδιες τιμές για τις κυκλωματικές παραμέτρους και την αρχική ροή φορτίου (όπως αυτές φαίνονται στο Σχ. 4.43), καθώς και τα χαρακτηριστικά της εμφανιζόμενης διαταραχής. Θεωρούμε επίσης λειτουργία της ισοδύναμης ανεμογεννήτριας τύπου Γ του αιολικού πάρκου σε λογική σταθερού συντελεστή ισχύος (PF στο Σχ. 4.11) σε συνδυασμό με έλεγχο τερματικής τάσης (επιλογή TVC, δηλαδή ο διακόπτης στη θέση (α) στο Σχ. 4.11) και σταθερή ταχύτητα ανέμου. Σημειώνεται ότι για τη συγκεκριμένη σύγκριση χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο DFAG1 της βιβλιοθήκης του WHSSP (βλ. ενότητα 4.3.1) και η τιμή των παραμέτρων του μοντέλου στο περιβάλλον του Simulink φαίνεται στον Πίνακα Β.2. Τέλος θεωρούμε μία ισοδύναμη μάζα για το μηχανικό μέρος και μεταβαλλόμενα όρια για τον δεύτερο ολοκληρωματικό ελεγκτή της εντολής αέργου έγχυσης (βλ. Σχ. 4.11).

Για τη μέτρηση του πραγματικού χρόνου εκτέλεσης της προσομοίωσης χρησιμοποιήθηκε ο ακόλουθος κώδικας στο περιβάλλον εργασίας της MATLAB:

```
tic; sim('onoma_montelou.mdl', simulation_time); toc;
```

Η εντολή *tic* σηματοδοτεί την έναρξη του χρονομέτρου. Εν συνεχεία με την εντολή *sim* καλείται το προς εκτέλεση μοντέλο του Simulink καθορίζοντας ταυτόχρονα τον επιθυμητό χρόνο προσομοίωσης. Τέλος με την εντολή *toc* υπολογίζεται ο πραγματικός χρόνος εκτέλεσης όταν ολοκληρωθεί η προσομοίωση. Ως μέθοδος ολοκλήρωσης και για τους δύο τρόπους επίλυσης χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος *ode15s*, με τις λεπτομερείς ρυθμίσεις της αριθμητικής επίλυσης στο περιβάλλον του Simulink (simulation→configuration parameters→solver) να φαίνονται στο Σχ. Β.1.

Θα πρέπει να αποσαφηνιστούν δύο πράγματα πριν την παράθεση των συγκριτικών αποτελεσμάτων. Αφενός, υπάρχει ένας μικρός χρόνος (της τάξης των msec) ανάμεσα στην έναρξη του χρονομέτρου και την αρχή εκτέλεσης του μοντέλου, ο οποίος όμως δεν επηρεάζει πρακτικά αφού είναι ίδιος σε όλες τις περιπτώσεις και η τάξη μεγέθους του επιτρέπει να τον αγνοήσουμε. Αφετέρου, στο χρόνο που υπολογίζεται περιέχεται και ο χρόνος της διαδικασίας αρχικοποίησης του κάθε μοντέλου που προηγείται της έναρξης της προσομοίωσης. Θα πρέπει όμως να παρατηρηθεί ότι ο χρόνος αυτός είναι περίπου ο ίδιος για δύο παρόμοια μοντέλα που η μόνη διαφορά έγκειται στη μέθοδο επίλυσης των αλγεβρικών περιορισμών του δικτύου, δηλαδή αφορά την διαδικασία προσομοίωσης αυτή καθαυτή κι όχι το στάδιο της αρχικοποίησης. Επίσης ο χρόνος αυτός παραμένει αμετάβλητος και είναι μικρός αναλογικά με το συνολικό χρόνο ολοκλήρωσης της προσομοίωσης. Άρα συμπεραίνουμε ότι τα χρονικά συγκριτικά που θα παρατεθούν για τις δύο μεθόδους επίλυσης καταδεικνύουν την επιτάχυνση που επιτυγχάνεται χωρίς αλγεβρικό βρόχο. Μάλιστα για να αποσαφηνιστεί καλύτερα η βελτίωση αυτή παρατίθενται στον Πίνακα Β.1 οι πραγματικοί χρόνοι εκτέλεσης για τρεις διαφορετικές διάρκειες των χρόνων προσομοίωσης 5, 10 και 20 s αντίστοιχα.

Πίνακας Β.1: Σύγκριση χρόνων εκτέλεσης των δύο μεθόδων

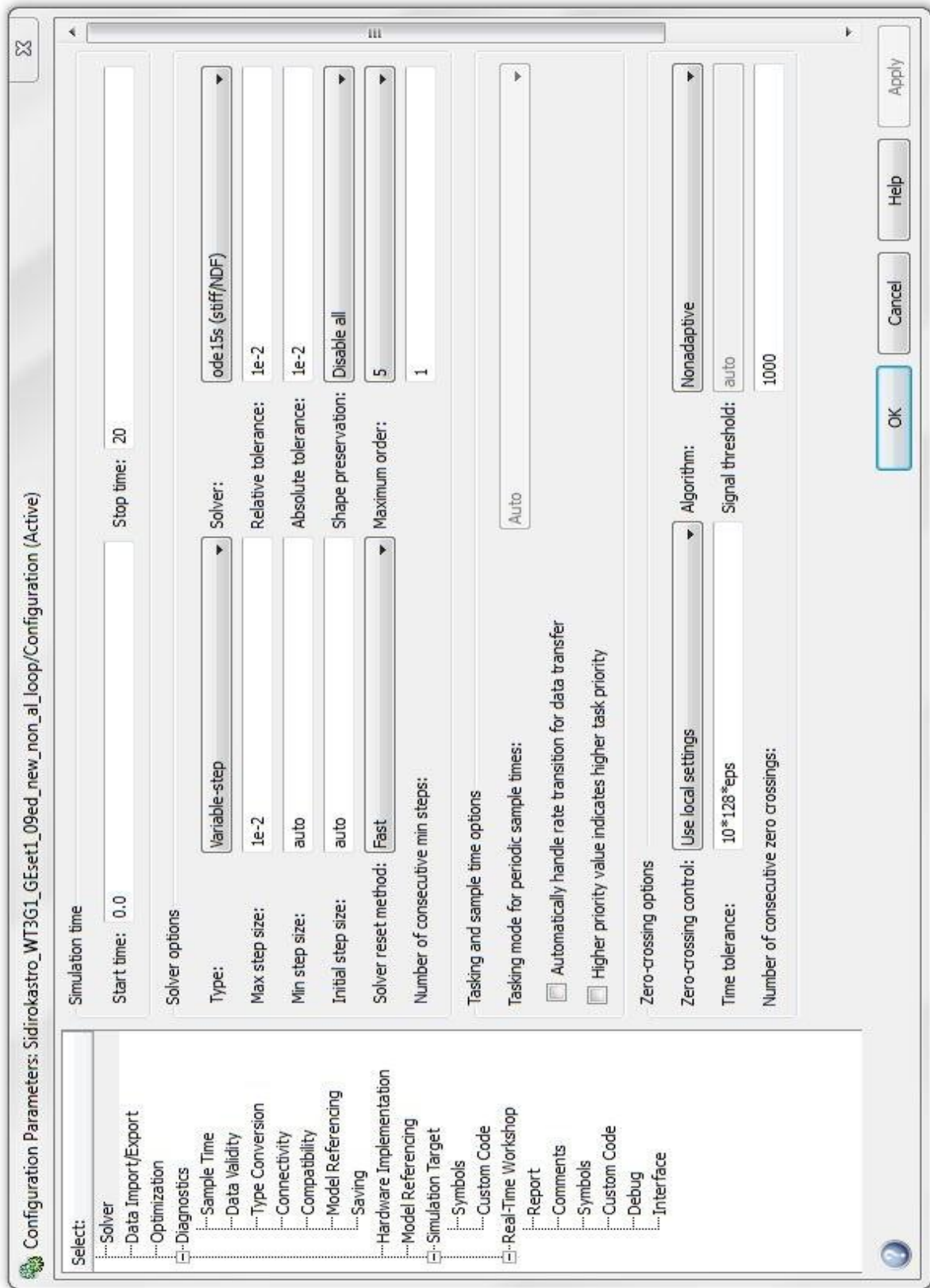
Χρόνος Προσομοίωσης(s)	Χρόνος εκτέλεσης για το μοντέλο με αλγεβρικό βρόχο(s)	Χρόνος εκτέλεσης για το μοντέλο χωρίς αλγεβρικό βρόχο(s)	Απόλυτο κέρδος (s)	Σχετικό κέρδος
5	6,2948	1,2577	5,0371	1:0,1998
10	13,0629	2,3176	10,7453	1:0,1774
20	26,2733	5,1480	21,1253	1:0,1959

Παρατηρούμε από τα παραπάνω αποτελέσματα ότι το απόλυτο κέρδος σε χρόνο, λόγω της χρήσης της μεθόδου χωρίς αλγεβρικό βρόχο, αυξάνεται και μάλιστα σχεδόν αναλογικά με την αύξηση του χρόνου προσομοίωσης. Έτσι το σχετικό κέρδος μεταβάλλεται λίγο και τα αποτελέσματα υποδεικνύουν ότι η γρήγορη μέθοδος είναι περίπου πέντε φορές ταχύτερη. Είναι ξεκάθαρη λοιπόν η υπεροχή της μεθόδου χωρίς αλγεβρικό βρόχο. Θα πρέπει μάλιστα να τονιστεί ότι το δοκιμαστικό δίκτυο που επιλέξαμε εμπεριέχει μόλις μία έγχυση ρεύματος, προερχόμενη από την ισοδύναμη ανεμογεννήτρια του αιολικού πάρκου. Επομένως γίνεται άμεσα αντιληπτό πόσο σημαντική επιτάχυνση μπορεί να επιτευχθεί όταν προσομοιώνονται μεγαλύτερα και πιο πολύπλοκα δίκτυα.

Πίνακας Β.2: Τιμές παραμέτρων Α/Π στο Simulink

Παράμετροι Α/Π (DFAG1)	
<i>Sbase (MVA)</i>	100
<i>fbase (Hz)</i>	50
<i>bus code</i>	2
<i>Snom (MVA)</i>	20
<i>fnom (Hz)</i>	50
<i>PLL data: [Kpll PLLMX PLLMN]</i>	[30 0,1 -0,1]
<i>[Hr Hl Dtg Ktg] (pu Snom base)</i>	[4,95 0 0 0](μοντέλο μίας μάζας)
<i>Xeq: equivalent reactance</i>	0,8
<i>WT parameters: [nturb vnom pnom beta_0 poles]</i>	[12 12 1.5 0]
<i>Pitch parameters: [Kp_p Ki_p Tservo(s) ratelim(degrees/s) betamin betamax]:</i>	[150 25 0,3 10 0 27]
<i>[Qmax Qmin PMX PMN] (generator convention - pu Snom base)</i>	[0,296 -0,436 1,12 0,04]
<i>[Vmax Vmin]</i>	[1,2 0,9]
<i>[XIQmin XIQmax]</i>	[-0,5 0,4]
<i>[KQi Kvi]</i>	[0,05 40]
<i>[wpmin wp20 wp40 wp60 wp100] (pu)</i>	[0,69 0,78 0,98 1,12 1,2]

Σχ. Β.1: Επιλογές αριθμητικής επίλυσης στο περιβάλλον του Simulink



ΠΑΡΑΤΗΜΑ Γ

Παράμετροι για τα μοντέλα Α/Γ στο Simulink (DFAG1, DFAG2 και FCWT2) στις συγκρίσεις των ενότητων 4.5 και 4.6

Πίνακας Γ.1: Παράμετροι μοντέλου DFAG1 στο περιβάλλον του Simulink (ενότητα 4.5.2)

<i>Παράμετροι μοντέλου DFAG1</i>	
<i>Sbase (MVA)</i>	<i>10</i>
<i>fbase (Hz)</i>	<i>60</i>
<i>bus code</i>	<i>2</i>
<i>Snom (MVA)</i>	<i>10</i>
<i>fnom (Hz)</i>	<i>60</i>
<i>PLL data: [Kpl PLLMX PLLMN]</i>	<i>[30 0,1 -0,1]</i>
<i>[Hr Hl Dtg Ktg] (pu Snom base)</i>	<i>[0,962 3,395 2,344 1,387]</i>
<i>Xeq: equivalent reactance</i>	<i>0,8</i>
<i>WT parameters: [nturb vnom pnom beta_0 poles]</i>	<i>[6 15 1,5 0 6]</i>
<i>Pitch parameters: [Kp_p Ki_p Tservo(s) ratelim(degrees/s) betamin betamax]:</i>	<i>[150 25 0,3 10 0 27]</i>
<i>[Qmax Qmin PMX PMN] (generator convention - pu Snom base)</i>	<i>[0,496 -0,496 1,12 0,04]</i>
<i>[Vmax Vmin]</i>	<i>[1,1 0,9]</i>
<i>[XIQmin XIQmax]</i>	<i>[-0,5 0,5]</i>
<i>[KQi Kvi]</i>	<i>[0,1 40]</i>
<i>[wpmin wp20 wp40 wp60 wp100] (pu)</i>	<i>[0,69 0,78 0,98 1,12 2]</i>

Πίνακας Γ.2: Παράμετροι μοντέλου DFAG2 στο περιβάλλον του Simulink (ενότητα 4.6.1)

Παράμετροι μοντέλου DFAG2	
<i>Sbase (MVA)</i>	100
<i>fbase (Hz)</i>	50
<i>bus code</i>	2
<i>Snom (MVA)</i>	20
<i>fnom (Hz)</i>	50
<i>PLL data: [Kpll PLLMX PLLMN]</i>	[30 0,1 -0,1]
<i>[Hr Hl Dtg Ktg] (pu Snom base)</i>	[4.95 0 0 0](μοντέλο μίας μάζας)
<i>Xeq: equivalent reactance</i>	0,8
<i>WT parameters: [nturb vnom pnom beta_0 poles]</i>	[12 12 1,5 0 4]
<i>Pitch parameters: [Kp_p Ki_p Tservo(s) ratelim(degrees/s) betamin betamax]:</i>	[150 25 0,3 10 0 27]
<i>[Qmax Qmin PMX PMN] (generator convention - pu Snom base)</i>	[0,296 -0,436 1,12 0,04]
<i>[Vmax Vmin]</i>	[1,2 0,9]
<i>[XIQmin XIQmax]</i>	[0,5 1,45]
<i>[KQi Kvi]</i>	[0,05 40]
<i>[wpmín wp20 wp40 wp60 wp100] (pu)</i>	[0,3 0,69 0,78 0,98 1,2]
<i>LVPL parameters: [T_LVPL VLVPL1 VLVPL2 GLVPL Rip_LVPL]</i>	[0,02 0,5 0,9 1,11 5]

Πίνακας Γ.3: Παράμετροι μοντέλου FCWT2 στο περιβάλλον του Simulink (ενότητα 4.6.2)

Παράμετροι μοντέλου FCWT2	
<i>Sbase (MVA)</i>	100
<i>bus code</i>	2
<i>Pnom (MW)</i>	18
<i>[Vmax Vmin]</i>	[1,1 0,9]
<i>[KQi Kvi]</i>	[0,1 120]
<i>Simplified Turbine model: [kp_pwr ki_pwr Tpwr kf Tf]</i>	[0 0 5 0 10] (Pref=σταθερό)
<i>LVPL parameters: [T_LVPL VLVPL1 VLVPL2 GLVPL Rip_LVPL]</i>	[0,02 0,5 0,9 1,11 2]
<i>Converter Current Limiter: [Iphl Iqhl ImaxTD qmax]</i>	[1,11 1,11 1,7 0]

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ

ΡΟΕΣ ΦΟΡΤΙΟΥ

ΑΡΧΙΚΗ ΡΟΗ ΦΟΡΤΙΟΥ-ΣΕΝΑΡΙΟ Α

BUS 1 : ΣΟΡ (GAS) V = 1.02000 thita = 0.000
SLACK BUS WITH SYNCHRONOUS GENERATOR: Pgen = 14.36477

Qgen = 18.15642

1 - 4 P = 14.36477 Q = 18.15642

BUS 2 : ΣΟΡ (STEAM) V = 1.02000 thita = 1.553
PV BUS WITH SYNCHRONOUS GENERATOR: Pgen = 25.00000

Qgen = 19.68166

2 - 4 P = 25.00000 Q = 19.68166

BUS 3 : ΝΡΟΔ (DIESEL) V = 1.02000 thita = 2.662
PV BUS WITH SYNCHRONOUS GENERATOR: Pgen = 90.00000

Qgen = 29.42452

3 - 10 P = 90.00000 Q = 29.42452

BUS 4 : ΣΟΡ ΥΤ V = 1.03557 thita = -1.920
PQ BUS

4 - 6 P = 21.45317 Q = 10.35204
4 - 6 P = 21.45317 Q = 10.35204
4 - 5 P = 29.08836 Q = 9.45528
4 - 8 P = -26.07811 Q = -7.28516
4 - 7 P = -9.12702 Q = 3.11537
4 - 1 P = -14.29955 Q = -16.87968
4 - 2 P = -24.87837 Q = -17.25214
4 - 11 P = 2.38835 Q = 8.14223

BUS 5 : ΙΑΛ ΥΤ V = 1.02735 thita = -2.441
PQ BUS

5 - 9 P = -5.76823 Q = -3.98276
5 - 4 P = -28.94744 Q = -10.32510
5 - 12 P = 34.71567 Q = 14.30785

BUS 6 : ΡΔΙ ΥΤ V = 1.02854 thita = -2.362
PQ BUS

6 - 7 P = -32.43573 Q = -5.82813
6 - 9 P = 29.91038 Q = 11.28129
6 - 4 P = -21.39332 Q = -11.88426
6 - 4 P = -21.39332 Q = -11.88426
6 - 13 P = 45.31198 Q = 18.31536

BUS 7 : ΑΦ ΥΤ V = 1.03518 thita = -1.768

PQ BUS

7 - 17	P =	-74.51959	Q =	-15.00375
7 - 4	P =	9.13335	Q =	-4.23052
7 - 6	P =	32.58852	Q =	5.06098
7 - 14	P =	32.79772	Q =	14.17329

BUS 8 : GEN YT V = 1.04640 thita = -0.711

PQ BUS

8 - 10	P =	-14.43341	Q =	-9.83308
8 - 4	P =	26.22966	Q =	4.11633
8 - 15	P =	-11.79624	Q =	5.71675

BUS 9 : POΔ YT V = 1.02808 thita = -2.395

PQ BUS

9 - 6	P =	-29.90433	Q =	-14.83432
9 - 5	P =	5.77072	Q =	-0.10613
9 - 16	P =	24.13362	Q =	14.94044

BUS 10 : PAI YT V = 1.05132 thita = -0.452

PQ BUS

10 - 8	P =	14.46019	Q =	8.24355
10 - 17	P =	75.32437	Q =	15.79926
10 - 3	P =	-89.78456	Q =	-24.04280

BUS 11 : ΣOP MT V = 1.00393 thita = -2.401

PQ BUS

INDUCTION MACHINE (WP4): Pind = 10.61000 MW Qind = -5.73883 MVar

s0 = -0.09835

11 - 4	P =	-2.38158	Q =	-7.87379
--------	-----	----------	-----	----------

BUS 12 : IAA MT V = 1.01325 thita = -6.497

PQ BUS

12 - 5	P =	-34.71189	Q =	-11.50903
--------	-----	-----------	-----	-----------

BUS 13 : PAI MT V = 1.00799 thita = -7.680

PQ BUS

13 - 6	P =	-45.30559	Q =	-13.58457
--------	-----	-----------	-----	-----------

BUS 14 : AΦ MT V = 1.00712 thita = -5.621

PQ BUS

14 - 18	P =	-9.72623	Q =	0.00000
14 - 20	P =	-2.89034	Q =	0.00000
14 - 7	P =	-32.76317	Q =	-11.61373

BUS 15 : GEN MT V = 1.00074 thita = 1.967

PQ BUS

15 - 19	P =	-5.19685	Q =	-0.00000
15 - 21	P =	-15.74960	Q =	-0.00000
15 - 8	P =	11.81286	Q =	-5.05753

BUS 16 : ΡΟΔ ΜΤ V = 1.01079 thita = -5.196
PQ BUS

16 - 9 P = -24.11206 Q = -13.34337

BUS 17 : ΨΖ V = 1.04323 thita = -1.106
PQ BUS

17 - 10 P = -74.92260 Q = -15.40751
17 - 7 P = 74.92260 Q = 15.40751

BUS 18 : ΑΦ (Α/Π1) V = 1.03858 thita = -5.621
PQ BUS

WP1 : Pe = 10.03000 MW

18 - 14 P = 10.03000 Q = -0.00000

BUS 19 : ΓΕΝ (Α/Π5) V = 1.03216 thita = 1.967
PQ BUS

WP5 : Pe = 5.36000 MW

19 - 15 P = 5.36000 Q = 0.00000

BUS 20 : ΑΦ (Α/Π3) V = 1.04185 thita = -5.621
PQ BUS

WP2 : Pe = 2.99000 MW

20 - 14 P = 2.99000 Q = -0.00000

BUS 21 : ΓΕΝ (Α/Π2) V = 1.03572 thita = 1.967
PQ BUS

WP1 : Pe = 16.30000 MW

21 - 15 P = 16.30000 Q = 0.00000

ΡΟΗ ΦΟΡΤΙΟΥ ΣΤΟ ΣΗΜΕΙΟ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑΣ ΜΕΤΑ ΤΗ ΔΙΤΑΡΑΧΗ-ΣΕΝΑΡΙΟ Α (ΓΡΑΜΜΙΚΟΠΟΙΗΣΗ)

BUS 1 : ΝΡΟΔ (DIESEL) V = 1.01500 thita = 0.000
SLACK BUS WITH SYNCHRONOUS GENERATOR: Pgen = 96.74783

Qgen = 43.20194

1 - 10 P = 96.74783 Q = 43.20194

BUS 2 : ΣΟΡ (STEAM) V = 1.01170 thita = -1.197
PV BUS WITH SYNCHRONOUS GENERATOR: Pgen = 26.67000 Qgen = 23.77567

2 - 4 P = 26.67000 Q = 23.77567

BUS 3 : ΣΟΡ (GAS) V = 0.95584 thita = -4.985
PQ BUS

3 - 4 P = 0.00000 Q = -0.00000

BUS 4 : ΣOP YT V = 1.01558 thita = -4.985
PQ BUS

4 - 6	P =	19.62953	Q =	8.92507
4 - 6	P =	19.62953	Q =	8.92507
4 - 5	P =	27.15773	Q =	8.45784
4 - 8	P =	-28.08126	Q =	-10.90340
4 - 7	P =	-13.69158	Q =	-2.79608
4 - 3	P =	-0.00000	Q =	-0.00000
4 - 2	P =	-26.51410	Q =	-20.66162
4 - 11	P =	1.87015	Q =	8.05314

BUS 5 : IAA YT V = 1.00789 thita = -5.495
PQ BUS

5 - 9	P =	-6.38197	Q =	-4.45466
5 - 4	P =	-27.03102	Q =	-9.31630
5 - 12	P =	33.41299	Q =	13.77096

BUS 6 : PAI YT V = 1.00924 thita = -5.409
PQ BUS

6 - 7	P =	-34.09753	Q =	-8.26827
6 - 9	P =	29.62702	Q =	11.48576
6 - 4	P =	-19.57850	Q =	-10.42599
6 - 4	P =	-19.57850	Q =	-10.42599
6 - 13	P =	43.62752	Q =	17.63449

BUS 7 : AΦ YT V = 1.01715 thita = -4.780
PQ BUS

7 - 17	P =	-79.23020	Q =	-22.98473
7 - 4	P =	13.70465	Q =	1.74957
7 - 6	P =	34.27717	Q =	7.60734
7 - 14	P =	31.24838	Q =	13.62782

BUS 8 : ΓEN YT V = 1.03046 thita = -3.679
PQ BUS

8 - 10	P =	-16.22335	Q =	-13.63607
8 - 4	P =	28.27483	Q =	8.03322
8 - 15	P =	-12.05148	Q =	5.60285

BUS 9 : POΔ YT V = 1.00877 thita = -5.443
PQ BUS

9 - 6	P =	-29.62082	Q =	-14.90519
9 - 5	P =	6.38525	Q =	0.52069
9 - 16	P =	23.23558	Q =	14.38449

BUS 10 : PAI YT V = 1.03716 thita = -3.393
PQ BUS

10 - 8	P =	16.26417	Q =	12.15152
10 - 17	P =	80.21123	Q =	24.24513
10 - 1	P =	-96.47540	Q =	-36.39665

BUS 11 : ΣOP MT V = 0.98371 thita = -5.367
PQ BUS

INDUCTION MACHINE (WP4): Pind = 10.61000 MW Qind = -5.66993 MVar

s0 = -0.10267

11 - 4 P = -1.86347 Q = -7.78817

BUS 12 : IAA MT V = 0.99406 thita = -9.550
PQ BUS

12 - 5 P = -33.40935 Q = -11.07716

BUS 13 : PAI MT V = 0.98908 thita = -10.727
PQ BUS

13 - 6 P = -43.62137 Q = -13.07956

BUS 14 : AΦ MT V = 0.98965 thita = -8.582
PQ BUS

14 - 18 P = -9.71607 Q = -0.00000
14 - 20 P = -2.88703 Q = -0.00000
14 - 7 P = -31.21581 Q = -11.21427

BUS 15 : IEN MT V = 0.98545 thita = -0.858
PQ BUS

15 - 19 P = -5.19206 Q = -0.00000
15 - 21 P = -15.73354 Q = -0.00000
15 - 8 P = 12.06909 Q = -4.90409

BUS 16 : POΔ MT V = 0.99181 thita = -8.244
PQ BUS

16 - 9 P = -23.21482 Q = -12.84685

BUS 17 : ΨZ V = 1.02713 thita = -4.081
PQ BUS

17 - 10 P = -79.72166 Q = -23.62273
17 - 7 P = 79.72166 Q = 23.62273

BUS 18 : AΦ (A/Π1) V = 1.02163 thita = -8.582
PQ BUS

WP1 : Pe = -10.03000 MW

18 - 14 P = 10.03000 Q = 0.00000

BUS 19 : IEN (A/Π5) V = 1.01732 thita = -0.858
PQ BUS

WP5 : Pe = -5.36000 MW

19 - 15 P = 5.36000 Q = 0.00000

BUS 20 : AΦ (A/Π3) V = 1.02495 thita = -8.582
PQ BUS

WP 3: Pe = -2.99000 MW

20 - 14 P = 2.99000 Q = 0.00000

BUS 21 : IEN (A/Π2) V = 1.02093 thita = -0.858

PQ BUS
WP2 : Pe = -16.30000 MW

21 - 15 P = 16.30000 Q = 0.00000

ΑΡΧΙΚΗ ΡΟΗ ΦΟΡΤΙΟΥ-ΣΕΝΑΡΙΟ Β ΑΡΧΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

BUS 1 : ΣΟΡ (GAS) V = 1.01000 thita = 0.000
SLACK BUS WITH SYNCHRONOUS GENERATOR: Pgen = 13.18786

Qgen = 10.84849

1 - 4 P = 13.18786 Q = 10.84849

BUS 2 : ΣΟΡ (STEAM) V = 1.01000 thita = 2.188
PV BUS WITH SYNCHRONOUS GENERATOR: Pgen = 28.20000

Qgen = 12.46449

2 - 4 P = 28.20000 Q = 12.46449

BUS 3 : ΝΡΟΔ (DIESEL) V = 1.01000 thita = -1.153
PV BUS WITH SYNCHRONOUS GENERATOR: Pgen = 15.00000

Qgen = 16.06358

3 - 10 P = 15.00000 Q = 16.06358

BUS 4 : ΣΟΡ ΥΤ V = 1.04361 thita = -1.809
PQ BUS

4 - 6 P = 12.50131 Q = 4.70041
4 - 6 P = 12.50131 Q = 4.70041
4 - 5 P = 15.60849 Q = 4.61305
4 - 8 P = -5.72863 Q = -5.87612
4 - 7 P = 6.59965 Q = 1.34722
4 - 1 P = -13.15167 Q = -10.14006
4 - 2 P = -28.08352 Q = -10.13779
4 - 11 P = -0.24693 Q = 10.79290

BUS 5 : ΙΑΛ ΥΤ V = 1.03929 thita = -2.085
PQ BUS

5 - 9 P = -1.27042 Q = -4.35005
5 - 4 P = -15.56880 Q = -5.75289
5 - 12 P = 16.83922 Q = 10.10294

BUS 6 : ΡΔΙ ΥΤ V = 1.03994 thita = -2.067
PQ BUS

6 - 7 P = -10.16404 Q = -4.11571
6 - 9 P = 13.18127 Q = 3.48394
6 - 4 P = -12.48245 Q = -6.43140
6 - 4 P = -12.48245 Q = -6.43140
6 - 13 P = 21.94767 Q = 13.49458

BUS 7 : AΦ YT V = 1.04264 thita = -1.899
PQ BUS

7 - 17	P =	-17.76788	Q =	-13.50219
7 - 4	P =	-6.59662	Q =	-2.49274
7 - 6	P =	10.18007	Q =	2.99457
7 - 14	P =	14.18442	Q =	13.00036

BUS 8 : ΓEN YT V = 1.04839 thita = -1.579
PQ BUS

8 - 10	P =	2.84849	Q =	-4.96376
8 - 4	P =	5.73886	Q =	2.10108
8 - 15	P =	-8.58736	Q =	2.86268

BUS 9 : POΔ YT V = 1.03974 thita = -2.082
PQ BUS

9 - 6	P =	-13.18015	Q =	-7.13649
9 - 5	P =	1.27086	Q =	0.16166
9 - 16	P =	11.90929	Q =	6.97483

BUS 10 : PΔI YT V = 1.04972 thita = -1.662
PQ BUS

10 - 8	P =	-2.84618	Q =	3.27497
10 - 17	P =	17.83434	Q =	12.49289
10 - 3	P =	-14.98816	Q =	-15.76787

BUS 11 : ΣOP MT V = 1.00228 thita = -1.695
PQ BUS

INDUCTION MACHINE (WP4): Pind = 6.63000 MW Qind = -4.55223 MVar
s0 = -0.06074

11 - 4	P =	0.25772	Q =	-10.36503
--------	-----	---------	-----	-----------

BUS 12 : IAA MT V = 1.00588 thita = -4.091
PQ BUS

12 - 5	P =	-16.83816	Q =	-9.31653
--------	-----	-----------	-----	----------

BUS 13 : PΔI MT V = 0.99986 thita = -4.697
PQ BUS

13 - 6	P =	-21.94584	Q =	-12.14259
--------	-----	-----------	-----	-----------

BUS 14 : AΦ MT V = 1.00267 thita = -3.570
PQ BUS

14 - 18	P =	-6.13795	Q =	0.00000
14 - 20	P =	-1.82971	Q =	0.00000
14 - 7	P =	-14.17430	Q =	-12.25026

BUS 15 : ΓEN MT V = 1.01304 thita = 0.336
PQ BUS

15 - 19	P =	-3.30558	Q =	-0.00000
---------	-----	----------	-----	----------

15 - 21 P = -9.89787 Q = -0.00000
15 - 8 P = 8.59525 Q = -2.54953

BUS 16 : POΔ MT V = 1.01228 thita = -3.481
PQ BUS

16 - 9 P = -11.90405 Q = -6.58673

BUS 17 : ΨZ V = 1.04623 thita = -1.781
PQ BUS

17 - 10 P = -17.80163 Q = -13.00079
17 - 7 P = 17.80163 Q = 13.00079

BUS 18 : AΦ (A/Π1) V = 1.02261 thita = -3.570
PQ BUS

WP1 : Pe = 6.26000 MW

18 - 14 P = 6.26000 Q = 0.00000

BUS 19 : ΓEN (A/Π5) V = 1.03278 thita = 0.336
PQ BUS

WP5 : Pe = 3.37000 MW

19 - 15 P = 3.37000 Q = 0.00000

BUS 20 : AΦ (A/Π3) V = 1.02475 thita = -3.570
PQ BUS

WP3 : Pe = 1.87000 MW

20 - 14 P = 1.87000 Q = 0.00000

BUS 21 : ΓEN (A/Π2) V = 1.03475 thita = 0.336
PQ BUS

WP2 : Pe = 10.11000 MW

21 - 15 P = 10.11000 Q = 0.00000

ΑΡΧΙΚΗ ΡΟΗ ΦΟΡΤΙΟΥ-ΣΕΝΑΡΙΟ Β ΒΕΛΤΙΩΜΕΝΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

BUS 1 : ΣOP (GAS) V = 1.01000 thita = 0.000
SLACK BUS WITH SYNCHRONOUS GENERATOR: Pgen = 13.15427

Qgen = 10.93078

1 - 4 P = 13.15427 Q = 10.93078

BUS 2 : ΣOP (STEAM) V = 1.01000 thita = 1.106
PV BUS WITH SYNCHRONOUS GENERATOR: Pgen = 20.70000

Qgen = 12.46834

2 - 4 P = 20.70000 Q = 12.46834

BUS 3 : NPOΔ (DIESEL) V = 1.01000 thita = -0.722

PV BUS WITH SYNCHRONOUS GENERATOR: Pgen = 22.50000

Qgen = 15.30331

3 - 10 P = 22.50000 Q = 15.30331

BUS 4 : ΣOP YT V = 1.04339 thita = -1.804

PQ BUS

4 - 6 P = 11.84595 Q = 4.82901
4 - 6 P = 11.84595 Q = 4.82901
4 - 5 P = 15.15073 Q = 4.77025
4 - 8 P = -7.98071 Q = -5.74500
4 - 7 P = 3.13417 Q = 1.78450
4 - 1 P = -13.11796 Q = -10.22015
4 - 2 P = -20.62844 Q = -11.03907
4 - 11 P = -0.24967 Q = 10.79144

BUS 5 : IAA YT V = 1.03908 thita = -2.069

PQ BUS

5 - 9 P = -1.71980 Q = -4.18501
5 - 4 P = -15.11284 Q = -5.91398
5 - 12 P = 16.83263 Q = 10.09899

BUS 6 : PAI YT V = 1.03974 thita = -2.046

PQ BUS

6 - 7 P = -11.90830 Q = -3.67867
6 - 9 P = 13.62617 Q = 3.31957
6 - 4 P = -11.82854 Q = -6.56513
6 - 4 P = -11.82854 Q = -6.56513
6 - 13 P = 21.93920 Q = 13.48937

BUS 7 : AΦ YT V = 1.04254 thita = -1.841

PQ BUS

7 - 17 P = -22.97630 Q = -12.62975
7 - 4 P = -3.13318 Q = -2.93791
7 - 6 P = 11.92927 Q = 2.56989
7 - 14 P = 14.18021 Q = 12.99778

BUS 8 : ΓEN YT V = 1.04857 thita = -1.464

PQ BUS

8 - 10 P = 0.58867 Q = -4.85879
8 - 4 P = 7.99723 Q = 1.99543
8 - 15 P = -8.58589 Q = 2.86336

BUS 9 : POΔ YT V = 1.03954 thita = -2.061

PQ BUS

9 - 6 P = -13.62500 Q = -6.97049
9 - 5 P = 1.72028 Q = -0.00166
9 - 16 P = 11.90472 Q = 6.97215

BUS 10 : PAI YT V = 1.05008 thita = -1.497

PQ BUS

10 - 8 P = -0.58715 Q = 3.16593

10 - 17	P =	23.06900	Q =	11.68408
10 - 3	P =	-22.48185	Q =	-14.85001

BUS 11 : ΣOP MT V = 1.00207 thita = -1.689
PQ BUS
INDUCTION MACHINE (WP4): Pind = 6.63000 MW Qind = -4.55091 MVar
s0 = -0.06077

11 - 4	P =	0.26046	Q =	-10.36352
--------	-----	---------	-----	-----------

BUS 12 : ΙΑΛ MT V = 1.00568 thita = -4.076
PQ BUS

12 - 5	P =	-16.83157	Q =	-9.31289
--------	-----	-----------	-----	----------

BUS 13 : ΡΔΙ MT V = 0.99967 thita = -4.676
PQ BUS

13 - 6	P =	-21.93738	Q =	-12.13791
--------	-----	-----------	-----	-----------

BUS 14 : ΑΦ MT V = 1.00258 thita = -3.512
PQ BUS

14 - 18	P =	-6.13793	Q =	-0.00000
14 - 20	P =	-1.82970	Q =	0.00000
14 - 7	P =	-14.17009	Q =	-12.24791

BUS 15 : ΓΕΝ MT V = 1.01321 thita = 0.450
PQ BUS

15 - 19	P =	-3.30560	Q =	-0.00000
15 - 21	P =	-9.89793	Q =	0.00000
15 - 8	P =	8.59378	Q =	-2.55039

BUS 16 : ΡΟΔ MT V = 1.01209 thita = -3.461
PQ BUS

16 - 9	P =	-11.89948	Q =	-6.58420
--------	-----	-----------	-----	----------

BUS 17 : ΨΖ V = 1.04636 thita = -1.670
PQ BUS

17 - 10	P =	-23.02314	Q =	-12.16021
17 - 7	P =	23.02314	Q =	12.16021

BUS 18 : ΑΦ (Α/Π1) V = 1.02252 thita = -3.512
PQ BUS
WP1 : Pe = 6.26000 MW

18 - 14	P =	6.26000	Q =	0.00000
---------	-----	---------	-----	---------

BUS 19 : ΓΕΝ (Α/Π5) V = 1.03295 thita = 0.450
PQ BUS
WP5 : Pe = 3.37000 MW

19 - 15	P =	3.37000	Q =	0.00000
---------	-----	---------	-----	---------

BUS 20 : ΑΦ (Α/Π3) V = 1.02466 thita = -3.512

PQ BUS
WP3 : Pe = 1.87000 MW

20 - 14 P = 1.87000 Q = -0.00000

BUS 21 : GEN (A/Π2) V = 1.03492 thita = 0.450

PQ BUS

WP2 : Pe = 10.11000 MW

21 - 15 P = 10.11000 Q = -0.00000

ΡΟΗ ΦΟΡΤΙΟΥ ΣΤΟ ΣΗΜΕΙΟ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑΣ ΜΕΤΑ ΤΗ ΔΙΤΑΡΑΧΗ- ΣΕΝΑΡΙΟ Β ΑΡΧΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ (ΓΡΑΜΜΙΚΟΠΟΙΗΣΗ)

BUS 1 : ΝΡΟΔ (DIESEL) V = 1.00440 thita = 0.000

SLACK BUS WITH SYNCHRONOUS GENERATOR: Pgen = 25.91111

Qgen = 22.54726

1 - 10 P = 25.91111 Q = 22.54726

BUS 2 : ΣΟΡ (STEAM) V = 1.00650 thita = 2.823

PV BUS WITH SYNCHRONOUS GENERATOR: Pgen = 28.39990

Qgen = 16.34475

2 - 4 P = 28.39990 Q = 16.34475

BUS 3 : ΣΟΡ (GAS) V = 0.96894 thita = -1.243

PQ BUS

3 - 4 P = 0.00000 Q = 0.00000

BUS 4 : ΣΟΡ ΥΤ V = 1.02950 thita = -1.243

PQ BUS

4 - 6 P = 11.10664 Q = 4.09398

4 - 6 P = 11.10664 Q = 4.09398

4 - 5 P = 14.38414 Q = 4.25329

4 - 8 P = -8.94919 Q = -7.82815

4 - 7 P = 1.04631 Q = -1.61236

4 - 3 P = 0.00000 Q = -0.00000

4 - 2 P = -28.26741 Q = -13.69844

4 - 11 P = -0.42713 Q = 10.69770

BUS 5 : ΙΑΛ ΥΤ V = 1.02545 thita = -1.504

PQ BUS

5 - 9 P = -2.04445 Q = -4.46341

5 - 4 P = -14.34945 Q = -5.37235

5 - 12 P = 16.39391 Q = 9.83576

BUS 6 : ΠΔΙ ΥΤ V = 1.02620 thita = -1.479

PQ BUS

6 - 7	P =	-12.83171	Q =	-5.17912
6 - 9	P =	13.64283	Q =	3.62151
6 - 4	P =	-11.09135	Q =	-5.79138
6 - 4	P =	-11.09135	Q =	-5.79138
6 - 13	P =	21.37159	Q =	13.14037

 BUS 7 : AΦ YT V = 1.02972 thita = -1.263
 PQ BUS

7 - 17	P =	-25.45502	Q =	-17.26669
7 - 4	P =	-1.04616	Q =	0.48500
7 - 6	P =	12.85815	Q =	4.11283
7 - 14	P =	13.64304	Q =	12.66886

 BUS 8 : ΓEN YT V = 1.03688 thita = -0.873
 PQ BUS

8 - 10	P =	-0.29237	Q =	-7.02504
8 - 4	P =	8.97423	Q =	4.20568
8 - 15	P =	-8.68186	Q =	2.81936

 BUS 9 : ΡΟΔ YT V = 1.02600 thita = -1.495
 PQ BUS

9 - 6	P =	-13.64160	Q =	-7.17764
9 - 5	P =	2.04513	Q =	0.38602
9 - 16	P =	11.59647	Q =	6.79162

 BUS 10 : ΡΔΙ YT V = 1.03935 thita = -0.900
 PQ BUS

10 - 8	P =	0.29600	Q =	5.37680
10 - 17	P =	25.58587	Q =	16.44014
10 - 1	P =	-25.88188	Q =	-21.81694

 BUS 11 : ΣΟΡ ΜΤ V = 0.98800 thita = -1.086
 PQ BUS

INDUCTION MACHINE (WP4): Pind = 6.63000 MW Qind = -4.46632 MVar

s0 = -0.06254

11 - 4	P =	0.43803	Q =	-10.26529
--------	-----	---------	-----	-----------

 BUS 12 : ΙΑΛ ΜΤ V = 0.99249 thita = -3.511
 PQ BUS

12 - 5	P =	-16.39287	Q =	-9.07016
--------	-----	-----------	-----	----------

 BUS 13 : ΡΔΙ ΜΤ V = 0.98665 thita = -4.109
 PQ BUS

13 - 6	P =	-21.36981	Q =	-11.82387
--------	-----	-----------	-----	-----------

 BUS 14 : ΑΦ ΜΤ V = 0.99026 thita = -2.910
 PQ BUS

14 - 18	P =	-6.13499	Q =	0.00000
14 - 20	P =	-1.82873	Q =	0.00000

```

14 - 7      P =   -13.63332      Q =   -11.94878
-----
BUS 15 : GEN MT V = 1.00191      thita =  1.106
PQ BUS

15 - 19      P =   -3.30420      Q =   -0.00000
15 - 21      P =   -9.89332      Q =    0.00000
15 - 8       P =    8.69006      Q =   -2.49379
-----
BUS 16 : POΔ MT V = 0.99890      thita = -2.894
PQ BUS

16 - 9       P =  -11.59137      Q =   -6.41372
-----
BUS 17 : ΨZ V = 1.03458      thita = -1.082
PQ BUS

17 - 10      P =  -25.52112      Q =  -16.85773
17 - 7       P =   25.52112      Q =   16.85773
-----
BUS 18 : AΦ (A/Π1) V = 1.01044      thita = -2.910
PQ BUS
WP1 : Pe =  6.26000  MW

18 - 14      P =    6.26000      Q =    0.00000
-----
BUS 19 : GEN (A/Π5) V = 1.02186      thita =  1.106
PQ BUS
WP5 : Pe =  3.37000  MW

19 - 15      P =    3.37000      Q =    0.00000
-----
BUS 20 : AΦ (A/Π3) V = 1.01260      thita = -2.910
PQ BUS
WP3 : Pe =  -1.87000  MW

20 - 14      P =    1.87000      Q =   -0.00000
-----
BUS 21 : GEN (A/Π2) V = 1.02385      thita =  1.106
PQ BUS
WP2 : Pe = -10.11000  MW

21 - 15      P =   10.11000      Q =    0.00000
-----

```

ΙΔΙΟΤΙΜΕΣ-ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΣΥΜΜΕΤΟΧΗΣ

(ΓΡΑΜΜΙΚΟΠΟΙΗΣΗ ΣΤΟ ΣΗΜΕΙΟ ΙΣΟΡΟΠΙΑΣ ΜΕΤΑ ΤΗ ΔΙΑΤΑΡΑΧΗ)

ΣΕΝΑΡΙΟ Α-ΧΩΡΙΣ ΕΛΕΓΧΟ ΤΕΡΜΑΤΙΚΗΣ ΤΑΣΗΣ

```
-5.00000e+001 + j 0.00000e+000 => damping ratio = 1.00e+000 freq =
0.00000e+000
Scenario_A_no_TVC/WF1 DFAG2/Vt_meas
1.00e+000
-----
-2.00000e+001 + j 0.00000e+000 => damping ratio = 1.00e+000 freq =
0.00000e+000
Scenario_A_no_TVC/WF1 DFAG2/Reactive power
Control/Pmeas 1.00e+000
-----
-5.00000e+001 + j 0.00000e+000 => damping ratio = 1.00e+000 freq =
0.00000e+000
Scenario_A_no_TVC/WF5 DFAG2/Vt_meas
1.00e+000
-----
-2.00000e+001 + j 0.00000e+000 => damping ratio = 1.00e+000 freq =
0.00000e+000
Scenario_A_no_TVC/WF5 DFAG2/Reactive power
Control/Pmeas 1.00e+000
-----
-1.24541e+002 + j 2.30039e+001 => damping ratio = 9.83e-001 freq =
3.66119e+000
Scenario_A_no_TVC/WF4 IMWG/ydr_e
1.00e+000
Scenario_A_no_TVC/WF4 IMWG/yqr_e 9.20e-
001
-----
-5.27929e+000 + j 3.88389e+001 => damping ratio = 1.35e-001 freq =
6.18140e+000
Scenario_A_no_TVC/WF4 IMWG/wr 9.18e-
001
Scenario_A_no_TVC/WF4 IMWG/wl 1.57e-
001
Scenario_A_no_TVC/WF4 IMWG/theta
1.00e+000
-----
-5.57926e+001 + j 0.00000e+000 => damping ratio = 1.00e+000 freq =
0.00000e+000
Scenario_A_no_TVC/WF1 DFAG2/Ip 2.72e-
001
Scenario_A_no_TVC/WF2 FCWT1/regulation of grid
side-converter/converter lag Ix/Ixc 1.00e+000
Scenario_A_no_TVC/WF2 FCWT1/regulation of grid
side-converter/converter lag Iy/Iyc 7.21e-001
Scenario_A_no_TVC/WF5 DFAG2/Ip 6.23e-
001
-----
-4.50002e+001 + j 0.00000e+000 => damping ratio = 1.00e+000 freq =
0.00000e+000
```

```

Scenario_A_no_TVC/WF2 FCWT1/regulation of grid
side-converter/converter lag Ix/Ixc 3.56e-001
Scenario_A_no_TVC/WF2 FCWT1/regulation of grid
side-converter/converter lag Iy/Iyc 1.00e+000
-----
-5.30686e+001 + j 0.00000e+000 => damping ratio = 1.00e+000 freq =
0.00000e+000
Scenario_A_no_TVC/WF1 DFAG2/Ip
1.00e+000
Scenario_A_no_TVC/WF5 DFAG2/Ip 2.11e-
001
-----
-5.23507e+001 + j 0.00000e+000 => damping ratio = 1.00e+000 freq =
0.00000e+000
Scenario_A_no_TVC/WF1 DFAG2/Ip 1.28e-
001
Scenario_A_no_TVC/WF2 FCWT1/regulation of grid
side-converter/converter lag Ix/Ixc 7.36e-001
Scenario_A_no_TVC/WF5 DFAG2/Ip
1.00e+000
-----
-4.80390e+001 + j 0.00000e+000 => damping ratio = 1.00e+000 freq =
0.00000e+000
Scenario_A_no_TVC/WF3 FCWT1/regulation of grid
side-converter/converter lag1/Iyc 1.00e+000
-----
-5.11331e+001 + j 0.00000e+000 => damping ratio = 1.00e+000 freq =
0.00000e+000
Scenario_A_no_TVC/WF3 FCWT1/regulation of grid
side-converter/converter lag/Ixc 1.00e+000
-----
-4.99453e+001 + j 0.00000e+000 => damping ratio = 1.00e+000 freq =
0.00000e+000
Scenario_A_no_TVC/WF1 DFAG2/Iq
1.00e+000
-----
-4.99427e+001 + j 0.00000e+000 => damping ratio = 1.00e+000 freq =
0.00000e+000
Scenario_A_no_TVC/WF5 DFAG2/Iq
1.00e+000
-----
-2.84942e+001 + j 0.00000e+000 => damping ratio = 1.00e+000 freq =
0.00000e+000
Scenario_A_no_TVC/WF1 DFAG2/theta_p11 5.56e-
001
Scenario_A_no_TVC/WF5 DFAG2/theta_p11
1.00e+000
-----
-2.87809e+001 + j 0.00000e+000 => damping ratio = 1.00e+000 freq =
0.00000e+000
Scenario_A_no_TVC/WF1 DFAG2/theta_p11
1.00e+000
Scenario_A_no_TVC/WF5 DFAG2/theta_p11 5.83e-
001
-----
-2.33860e+001 + j 0.00000e+000 => damping ratio = 1.00e+000 freq =
0.00000e+000
Scenario_A_no_TVC/Diesel/SEXS/Ef
1.00e+000
-----

```

```

-3.47375e+000 + j 1.44265e+001 => damping ratio = 2.34e-001 freq =
2.29606e+000
Scenario_A_no_TVC/Steam/SG/SG_delta 4.67e-
001
Scenario_A_no_TVC/Diesel/SG/SG_delta 6.26e-
001
Scenario_A_no_TVC/Steam/SG/SG_wr 5.44e-
001
Scenario_A_no_TVC/Steam/SG/ykq_r 1.87e-
001
Scenario_A_no_TVC/Diesel/SG/SG_wr
1.00e+000
Scenario_A_no_TVC/Diesel/DT Prime mover and
Governor /Pm 4.01e-001
-----
-1.57141e+001 + j 0.00000e+000 => damping ratio = 1.00e+000 freq =
0.00000e+000
Scenario_A_no_TVC/Diesel/SG/ykq_r 1.90e-
001
Scenario_A_no_TVC/WF1 DFAG2/Ip 1.14e-
001
Scenario_A_no_TVC/WF5 DFAG2/Ip 1.02e-
001
Scenario_A_no_TVC/WF1 DFAG2/rotating
mass/omega_r 2.39e-001
Scenario_A_no_TVC/WF5 DFAG2/rotating
mass/omega_r 2.11e-001
Scenario_A_no_TVC/WF1 DFAG2/Speed
Control/filter 1.00e+000
Scenario_A_no_TVC/WF5 DFAG2/Speed
Control/filter 8.84e-001
-----
-1.53704e+001 + j 0.00000e+000 => damping ratio = 1.00e+000 freq =
0.00000e+000
Scenario_A_no_TVC/WF1 DFAG2/Ip 1.10e-
001
Scenario_A_no_TVC/WF5 DFAG2/Ip 1.29e-
001
Scenario_A_no_TVC/WF1 DFAG2/rotating
mass/omega_r 2.30e-001
Scenario_A_no_TVC/WF5 DFAG2/rotating
mass/omega_r 2.64e-001
Scenario_A_no_TVC/WF1 DFAG2/Speed
Control/filter 8.70e-001
Scenario_A_no_TVC/WF5 DFAG2/Speed
Control/filter 1.00e+000
-----
-1.08623e+001 + j 8.21778e-001 => damping ratio = 9.97e-001 freq = 1.30790e-
001
Scenario_A_no_TVC/Steam/SG/SG_wr 1.59e-
001
Scenario_A_no_TVC/Steam/SG/ykq_r 2.86e-
001
Scenario_A_no_TVC/Diesel/SG/ykq_r
1.00e+000
Scenario_A_no_TVC/Diesel/DT Prime mover and
Governor /Pm 1.73e-001
Scenario_A_no_TVC/Steam/ST Prime mover and
Governor /dhp 1.98e-001
Scenario_A_no_TVC/Steam/ST Prime mover and
Governor /zsr 9.83e-001

```



```

-----
-4.80110e+000 + j 6.25869e+000 => damping ratio = 6.09e-001 freq = 9.96102e-
001
Scenario_A_no_TVC/Steam/SG/SG_delta 2.84e-
001
Scenario_A_no_TVC/Diesel/SG/SG_delta 2.35e-
001
Scenario_A_no_TVC/Steam/SG/SG_wr 9.13e-
001
Scenario_A_no_TVC/Steam/SG/ykq_r 4.29e-
001
Scenario_A_no_TVC/Diesel/SG/SG_wr 9.91e-
001
Scenario_A_no_TVC/Diesel/SG/ykq_r 1.26e-
001
Governor /Pm 1.00e+000
Scenario_A_no_TVC/Diesel/DT Prime mover and
Governor /dhp 1.46e-001
Scenario_A_no_TVC/Steam/ST Prime mover and
Governor /zsr 1.13e-001
Scenario_A_no_TVC/Steam/ST Prime mover and
-----
-7.55554e+000 + j 0.00000e+000 => damping ratio = 1.00e+000 freq =
0.00000e+000
Scenario_A_no_TVC/Steam/SG/SG_delta 1.66e-
001
Scenario_A_no_TVC/Diesel/SG/SG_delta 1.89e-
001
Scenario_A_no_TVC/Steam/SG/SG_wr 1.07e-
001
Scenario_A_no_TVC/Steam/SG/ykq_r 8.25e-
001
Scenario_A_no_TVC/Diesel/SG/SG_wr 3.48e-
001
Scenario_A_no_TVC/Diesel/SG/ykq_r 2.35e-
001
Scenario_A_no_TVC/Diesel/DT Prime mover and
Governor /Pm 1.00e+000
Scenario_A_no_TVC/Steam/ST Prime mover and
Governor /dhp 3.51e-001
Scenario_A_no_TVC/Steam/ST Prime mover and
Governor /zsr 3.66e-001
-----
-3.92666e+000 + j 2.07002e-001 => damping ratio = 9.99e-001 freq = 3.29455e-
002
Scenario_A_no_TVC/Steam/SG/SG_wr 1.15e-
001
Scenario_A_no_TVC/Steam/SG/ykq_r 6.19e-
001
Scenario_A_no_TVC/Diesel/SG/yfd_r 1.71e-
001
Scenario_A_no_TVC/WF1 DFAG2/rotating
mass/omega_r 8.71e-001
Scenario_A_no_TVC/WF5 DFAG2/rotating
mass/omega_r 7.66e-001
Scenario_A_no_TVC/Steam/ST Prime mover and
Governor /dhp 1.00e+000
Scenario_A_no_TVC/Steam/ST Prime mover and
Governor /dlp 3.91e-001
Scenario_A_no_TVC/Steam/ST Prime mover and
Governor /zsr 1.80e-001

```

```

wr_ref 1.24e-001          Senario_A_no_TVC/WF1 DFAG2/Speed Control/I
Control/filter 1.91e-001  Senario_A_no_TVC/WF1 DFAG2/Speed
wr_ref 1.09e-001          Senario_A_no_TVC/WF5 DFAG2/Speed Control/I
Control/filter 1.68e-001  Senario_A_no_TVC/WF5 DFAG2/Speed
-----
-3.36461e+000 + j 0.00000e+000 => damping ratio = 1.00e+000 freq =
0.00000e+000
Governor /dlp 1.00e+000  Senario_A_no_TVC/Steam/ST Prime mover and
-----
-3.77042e+000 + j 0.00000e+000 => damping ratio = 1.00e+000 freq =
0.00000e+000
mass/omega_r 8.73e-001   Senario_A_no_TVC/WF1 DFAG2/rotating
mass/omega_r 1.00e+000   Senario_A_no_TVC/WF5 DFAG2/rotating
wr_ref 1.21e-001          Senario_A_no_TVC/WF1 DFAG2/Speed Control/I
Control/filter 1.79e-001  Senario_A_no_TVC/WF1 DFAG2/Speed
wr_ref 1.38e-001          Senario_A_no_TVC/WF5 DFAG2/Speed Control/I
Control/filter 2.04e-001  Senario_A_no_TVC/WF5 DFAG2/Speed
-----
-2.65571e+000 + j 0.00000e+000 => damping ratio = 1.00e+000 freq =
0.00000e+000
1.00e+000                Senario_A_no_TVC/Steam/SEXS/Ef
-----
-1.75320e+000 + j 4.41894e-001 => damping ratio = 9.70e-001 freq = 7.03296e-
002
1.00e+000                Senario_A_no_TVC/Diesel/SG/yfd_r
3.61e-001                Senario_A_no_TVC/Diesel/SEXS/x11
4.07e-001                Senario_A_no_TVC/WF4 IMWG/wl
-----
-7.51437e-001 + j 1.06093e-002 => damping ratio = 1.00e+000 freq = 1.68852e-
003
001                      Senario_A_no_TVC/Diesel/SG/yfd_r 4.95e-
001                      Senario_A_no_TVC/WF2 FCWT1/equation of
5.29e-001                Senario_A_no_TVC/Diesel/SEXS/x11
1.00e+000
-----
-7.49064e-001 + j 0.00000e+000 => damping ratio = 1.00e+000 freq =
0.00000e+000
1.00e+000                Senario_A_no_TVC/WF3 FCWT1/equation of
1.52e-001                Senario_A_no_TVC/WF2 FCWT1/equation of
-----
-3.18038e-001 + j 1.94097e-001 => damping ratio = 8.54e-001 freq = 3.08915e-
002

```

```

Senario_A_no_TVC/Steam/SG/yfd_r
1.00e+000
Senario_A_no_TVC/Steam/SEXS/x11 9.63e-
001
-----
-2.70777e-001 + j 0.00000e+000 => damping ratio = 1.00e+000 freq =
0.00000e+000
Senario_A_no_TVC/Steam/ST Prime mover and
Governor /dmp 1.00e+000
Senario_A_no_TVC/Steam/SEXS/x11 1.95e-
001
-----
-2.60316e-001 + j 9.29337e-002 => damping ratio = 9.42e-001 freq = 1.47909e-
002
Senario_A_no_TVC/WF5 DFAG2/Speed Control/I
wr_ref 7.50e-001
Senario_A_no_TVC/WF5 DFAG2/Speed Control/I
Te_ref 3.85e-001
Senario_A_no_TVC/WF5 DFAG2/rotating
mass/omega_1 5.92e-001
Senario_A_no_TVC/WF5 DFAG2/rotating
mass/shaft twist 1.00e+000
-----
--
-2.60651e-001 + j 9.28427e-002 => damping ratio = 9.42e-001 freq = 1.47764e-
002
Senario_A_no_TVC/WF1 DFAG2/Speed Control/I
wr_ref 7.48e-001
Senario_A_no_TVC/WF1 DFAG2/Speed Control/I
Te_ref 3.83e-001
Senario_A_no_TVC/WF1 DFAG2/rotating
mass/omega_1 5.92e-001
Senario_A_no_TVC/WF1 DFAG2/rotating
mass/shaft twist 1.00e+000
-----
-6.09852e-002 + j 0.00000e+000 => damping ratio = 1.00e+000 freq =
0.00000e+000
Senario_A_no_TVC/WF1 DFAG2/Reactive power
Control/I Eq''cmd1 7.65e-001
Senario_A_no_TVC/WF5 DFAG2/Reactive power
Control/I Eq''cmd1 1.00e+000
-----
-6.16674e-002 + j 0.00000e+000 => damping ratio = 1.00e+000 freq =
0.00000e+000
Senario_A_no_TVC/WF1 DFAG2/Reactive power
Control/I Eq''cmd1 1.00e+000
Senario_A_no_TVC/WF5 DFAG2/Reactive power
Control/I Eq''cmd1 7.65e-001
-----
-9.26479e-002 + j 0.00000e+000 => damping ratio = 1.00e+000 freq =
0.00000e+000
Senario_A_no_TVC/WF5 DFAG2/rotating
mass/omega_r 2.00e-001
Senario_A_no_TVC/WF5 DFAG2/Speed Control/I
wr_ref 1.00e+000
Senario_A_no_TVC/WF5 DFAG2/Speed Control/I
Te_ref 1.09e-001
Senario_A_no_TVC/WF5 DFAG2/rotating
mass/omega_1 6.99e-001
-----

```

-9.24379e-002 + j 0.00000e+000 => damping ratio = 1.00e+000 freq =
0.00000e+000
mass/omega_r 2.01e-001 Scenario_A_no_TVC/WF1 DFAG2/rotating
wr_ref 1.00e+000 Scenario_A_no_TVC/WF1 DFAG2/Speed Control/I
Te_ref 1.07e-001 Scenario_A_no_TVC/WF1 DFAG2/Speed Control/I
mass/omega_l 7.04e-001 Scenario_A_no_TVC/WF1 DFAG2/rotating

-2.00000e-001 + j 0.00000e+000 => damping ratio = 1.00e+000 freq =
0.00000e+000
wr_ref 1.66e-001 Scenario_A_no_TVC/WF5 DFAG2/Speed Control/I
Te_ref 1.00e+000 Scenario_A_no_TVC/WF5 DFAG2/Speed Control/I

-2.00000e-001 + j 0.00000e+000 => damping ratio = 1.00e+000 freq =
0.00000e+000
wr_ref 1.65e-001 Scenario_A_no_TVC/WF1 DFAG2/Speed Control/I
Te_ref 1.00e+000 Scenario_A_no_TVC/WF1 DFAG2/Speed Control/I

ΣΕΝΑΡΙΟ Α-ΜΕ ΕΛΕΓΧΟ ΤΕΡΜΑΤΙΚΗΣ ΤΑΣΗΣ

-5.00000e+001 + j 0.00000e+000 => damping ratio = 1.00e+000 freq =
0.00000e+000
1.00e+000 Scenario_A_TVC/WF1 DFAG2/Vt_meas

-2.00000e+001 + j 0.00000e+000 => damping ratio = 1.00e+000 freq =
0.00000e+000
Control/Pmeas 1.00e+000 Scenario_A_TVC/WF1 DFAG2/Reactive power

-5.00000e+001 + j 0.00000e+000 => damping ratio = 1.00e+000 freq =
0.00000e+000
1.00e+000 Scenario_A_TVC/WF5 DFAG2/Vt_meas

-2.00000e+001 + j 0.00000e+000 => damping ratio = 1.00e+000 freq =
0.00000e+000
Control/Pmeas 1.00e+000 Scenario_A_TVC/WF5 DFAG2/Reactive power

-1.24565e+002 + j 2.29995e+001 => damping ratio = 9.83e-001 freq =
3.66049e+000
1.00e+000 Scenario_A_TVC/WF4 IMWG/ydr_e
001 Scenario_A_TVC/WF4 IMWG/yqr_e 9.19e-

-5.27881e+000 + j 3.88384e+001 => damping ratio = 1.35e-001 freq =
6.18132e+000

```

001                               Senario_A_TVC/WF4  IMWG/wr  9.18e-
001                               Senario_A_TVC/WF4  IMWG/wl  1.57e-
1.00e+000                        Senario_A_TVC/WF4  IMWG/theta
-----
-5.55079e+001 + j 0.00000e+000 => damping ratio = 1.00e+000 freq =
0.00000e+000
001                               Senario_A_TVC/WF1 DFAG2/Ip  1.06e-
side-converter/converter lag Ix/Ixc 1.00e+000
Scenario_A_TVC/WF2 FCWT1/regulation of grid
side-converter/converter lag Iy/Iyc 7.22e-001
Scenario_A_TVC/WF2 FCWT1/regulation of grid
001                               Senario_A_TVC/WF5 DFAG2/Ip  6.68e-
-----
-4.48684e+001 + j 0.00000e+000 => damping ratio = 1.00e+000 freq =
0.00000e+000
side-converter/converter lag Ix/Ixc 3.50e-001
Scenario_A_TVC/WF2 FCWT1/regulation of grid
side-converter/converter lag Iy/Iyc 1.00e+000
Scenario_A_TVC/WF2 FCWT1/regulation of grid
-----
-5.24540e+001 + j 0.00000e+000 => damping ratio = 1.00e+000 freq =
0.00000e+000
001                               Senario_A_TVC/WF1 DFAG2/Ip  3.01e-
side-converter/converter lag Ix/Ixc 4.17e-001
Scenario_A_TVC/WF2 FCWT1/regulation of grid
1.00e+000                        Senario_A_TVC/WF5 DFAG2/Ip
-----
-5.20862e+001 + j 0.00000e+000 => damping ratio = 1.00e+000 freq =
0.00000e+000
1.00e+000                        Senario_A_TVC/WF1 DFAG2/Ip
001                               Senario_A_TVC/WF1 DFAG2/Iq  2.39e-
-----
-4.77853e+001 + j 0.00000e+000 => damping ratio = 1.00e+000 freq =
0.00000e+000
001                               Senario_A_TVC/WF1 DFAG2/Iq  3.13e-
side-converter/converter lag/Ixc 1.12e-001
Scenario_A_TVC/WF3 FCWT1/regulation of grid
side-converter/converter lag1/Iyc 1.00e+000
Scenario_A_TVC/WF3 FCWT1/regulation of grid
-----
-5.10749e+001 + j 0.00000e+000 => damping ratio = 1.00e+000 freq =
0.00000e+000
side-converter/converter lag/Ixc 1.00e+000
Scenario_A_TVC/WF3 FCWT1/regulation of grid
-----
-4.92882e+001 + j 0.00000e+000 => damping ratio = 1.00e+000 freq =
0.00000e+000
001                               Senario_A_TVC/WF1 DFAG2/Ip  2.52e-
1.00e+000                        Senario_A_TVC/WF1 DFAG2/Iq

```

```

Scenario_A_TVC/WF3 FCWT1/regulation of grid
side-converter/converter lag1/Iyc 1.67e-001
-----
-4.99427e+001 + j 0.00000e+000 => damping ratio = 1.00e+000 freq =
0.00000e+000
Scenario_A_TVC/WF5 DFAG2/Iq
1.00e+000
-----
-2.84994e+001 + j 0.00000e+000 => damping ratio = 1.00e+000 freq =
0.00000e+000
Scenario_A_TVC/WF1 DFAG2/theta_pll 3.88e-
001
Scenario_A_TVC/WF5 DFAG2/theta_pll
1.00e+000
-----
-2.88456e+001 + j 0.00000e+000 => damping ratio = 1.00e+000 freq =
0.00000e+000
Scenario_A_TVC/WF1 DFAG2/theta_pll
1.00e+000
Scenario_A_TVC/WF5 DFAG2/theta_pll 4.11e-
001
-----
-2.33455e+001 + j 0.00000e+000 => damping ratio = 1.00e+000 freq =
0.00000e+000
Scenario_A_TVC/Diesel/SEXS/Ef
1.00e+000
-----
-3.42171e+000 + j 1.43988e+001 => damping ratio = 2.31e-001 freq =
2.29163e+000
Scenario_A_TVC/Steam/SG/SG_delta 4.77e-
001
Scenario_A_TVC/Diesel/SG/SG_delta 6.38e-
001
Scenario_A_TVC/Steam/SG/SG_wr 5.61e-
001
Scenario_A_TVC/Steam/SG/ykq_r 1.94e-
001
Scenario_A_TVC/Diesel/SG/SG_wr
1.00e+000
Scenario_A_TVC/Diesel/DT Prime mover and
Governor /Pm 4.01e-001
-----
-1.56611e+001 + j 0.00000e+000 => damping ratio = 1.00e+000 freq =
0.00000e+000
Scenario_A_TVC/Diesel/SG/ykq_r 1.01e-
001
Scenario_A_TVC/WF1 DFAG2/Ip 1.15e-
001
Scenario_A_TVC/WF1 DFAG2/rotating mass/omega_r
2.42e-001
Scenario_A_TVC/WF5 DFAG2/rotating mass/omega_r
1.48e-001
Scenario_A_TVC/WF1 DFAG2/Speed Control/filter
1.00e+000
Scenario_A_TVC/WF5 DFAG2/Speed Control/filter
6.10e-001
-----
-1.54195e+001 + j 0.00000e+000 => damping ratio = 1.00e+000 freq =
0.00000e+000
Scenario_A_TVC/WF5 DFAG2/Ip 1.29e-
001

```

```

1.66e-001          Scenario_A_TVC/WF1 DFAG2/rotating mass/omega_r
2.60e-001          Scenario_A_TVC/WF5 DFAG2/rotating mass/omega_r
6.38e-001          Scenario_A_TVC/WF1 DFAG2/Speed Control/filter
1.00e+000          Scenario_A_TVC/WF5 DFAG2/Speed Control/filter
-----
-1.06094e+001 + j 1.03338e+000 => damping ratio = 9.95e-001 freq = 1.64467e-
001
001          Scenario_A_TVC/Steam/SG/SG_delta 1.19e-
001          Scenario_A_TVC/Steam/SG/SG_wr 1.58e-
001          Scenario_A_TVC/Steam/SG/ykq_r 4.37e-
001          Scenario_A_TVC/Diesel/SG/ykq_r 9.82e-
001          Scenario_A_TVC/Diesel/DT Prime mover and
Governor /Pm 2.58e-001          Scenario_A_TVC/Steam/ST Prime mover and
Governor /dhp 2.10e-001          Scenario_A_TVC/Steam/ST Prime mover and
Governor /zsr 1.00e+000
-----
-4.98672e+000 + j 6.37021e+000 => damping ratio = 6.16e-001 freq =
1.01385e+000
001          Scenario_A_TVC/Steam/SG/SG_delta 2.82e-
001          Scenario_A_TVC/Diesel/SG/SG_delta 2.26e-
001          Scenario_A_TVC/Steam/SG/SG_wr 8.67e-
001          Scenario_A_TVC/Steam/SG/ykq_r 4.67e-
001          Scenario_A_TVC/Diesel/SG/SG_wr 9.75e-
001          Scenario_A_TVC/Diesel/SG/ykq_r 1.54e-
001          Scenario_A_TVC/Diesel/DT Prime mover and
Governor /Pm 1.00e+000          Scenario_A_TVC/Steam/ST Prime mover and
Governor /dhp 1.35e-001          Scenario_A_TVC/Steam/ST Prime mover and
Governor /zsr 1.06e-001
-----
-7.66289e+000 + j 0.00000e+000 => damping ratio = 1.00e+000 freq =
0.00000e+000
001          Scenario_A_TVC/Steam/SG/SG_delta 1.86e-
001          Scenario_A_TVC/Diesel/SG/SG_delta 2.14e-
001          Scenario_A_TVC/Steam/SG/ykq_r 3.80e-
001          Scenario_A_TVC/Diesel/SG/SG_wr 3.37e-
001          Scenario_A_TVC/Diesel/SG/yfd_r 1.18e-
001          Scenario_A_TVC/Diesel/SG/ykq_r 2.04e-
001

```

Governor /Pm	1.00e+000	Scenario_A_TVC/Diesel/DT Prime mover and
Governor /dhp	2.48e-001	Scenario_A_TVC/Steam/ST Prime mover and
Governor /zsr	2.83e-001	Scenario_A_TVC/Steam/ST Prime mover and

	-3.32670e+000 + j 8.35562e-001	=> damping ratio = 9.70e-001 freq = 1.32984e-001
		Scenario_A_TVC/Steam/SG/SG_wr 2.69e-001
		Scenario_A_TVC/Steam/SG/yfd_r 1.05e-001
		Scenario_A_TVC/Steam/SG/ykq_r 4.13e-001
		Scenario_A_TVC/Diesel/SG/yfd_r
	1.00e+000	Scenario_A_TVC/Diesel/SG/ykq_r 2.08e-001
		Scenario_A_TVC/WF1 DFAG2/rotating mass/omega_r
	2.55e-001	Scenario_A_TVC/Diesel/SEXS/Ef 1.37e-001
		Scenario_A_TVC/Diesel/SEXS/xll 1.81e-001
Governor /dhp	5.42e-001	Scenario_A_TVC/Steam/ST Prime mover and
Governor /dlp	3.14e-001	Scenario_A_TVC/Steam/ST Prime mover and
		Scenario_A_TVC/Steam/SEXS/Ef 2.72e-001
Governor /zsr	1.51e-001	Scenario_A_TVC/Steam/ST Prime mover and
Control/I Eq''cmd1	2.07e-001	Scenario_A_TVC/WF1 DFAG2/Reactive power
Control/I Eq''cmd2	9.74e-001	Scenario_A_TVC/WF1 DFAG2/Reactive power
		Scenario_A_TVC/WF4 IMWG/wl 1.25e-001

	-3.81532e+000 + j 1.51012e-003	=> damping ratio = 1.00e+000 freq = 2.40342e-004
		Scenario_A_TVC/WF1 DFAG2/rotating mass/omega_r
	9.28e-001	Scenario_A_TVC/WF5 DFAG2/rotating mass/omega_r
	1.00e+000	Scenario_A_TVC/WF1 DFAG2/Speed Control/I
wr_ref	1.30e-001	Scenario_A_TVC/WF1 DFAG2/Speed Control/filter
	1.94e-001	Scenario_A_TVC/WF5 DFAG2/Speed Control/I
wr_ref	1.39e-001	Scenario_A_TVC/WF5 DFAG2/Speed Control/filter
	2.08e-001	

	-3.05720e+000 + j 2.47007e-001	=> damping ratio = 9.97e-001 freq = 3.93124e-002
		Scenario_A_TVC/Steam/SG/SG_wr 1.53e-001
		Scenario_A_TVC/Steam/SG/yfd_r 1.24e-001


```

Senario_A_TVC/Steam/SG/ykq_r 2.69e-
001
Senario_A_TVC/Diesel/SG/yfd_r 7.99e-
001
Senario_A_TVC/Diesel/SG/ykq_r 1.19e-
001
Senario_A_TVC/WF1 DFAG2/rotating mass/omega_r
2.59e-001
Senario_A_TVC/Diesel/SEXS/x11 1.65e-
001
Senario_A_TVC/Steam/ST Prime mover and
Governor /dhp 1.73e-001
Senario_A_TVC/Steam/ST Prime mover and
Governor /dmp 1.36e-001
Senario_A_TVC/Steam/ST Prime mover and
Governor /dlp 9.54e-001
Senario_A_TVC/Steam/SEXS/Ef
1.00e+000
Senario_A_TVC/WF1 DFAG2/Reactive power
Control/I Eq''cmd1 2.01e-001
Senario_A_TVC/WF1 DFAG2/Reactive power
Control/I Eq''cmd2 7.59e-001
Senario_A_TVC/WF4 IMWG/wl 1.44e-
001
-----
-1.99211e+000 + j 0.00000e+000 => damping ratio = 1.00e+000 freq =
0.00000e+000
Senario_A_TVC/Diesel/SG/yfd_r 1.23e-
001
Senario_A_TVC/WF4 IMWG/wr 2.07e-
001
Senario_A_TVC/WF1 DFAG2/Reactive power
Control/I Eq''cmd2 1.16e-001
Senario_A_TVC/WF4 IMWG/wl
1.00e+000
-----
-5.99856e-001 + j 1.03779e+000 => damping ratio = 5.00e-001 freq = 1.65169e-
001
Senario_A_TVC/Diesel/SG/yfd_r 5.67e-
001
Senario_A_TVC/Diesel/SEXS/x11 2.77e-
001
Senario_A_TVC/WF1 DFAG2/Reactive power
Control/I Eq''cmd1 1.00e+000
Senario_A_TVC/WF1 DFAG2/Reactive power
Control/I Eq''cmd2 5.79e-001
-----
-7.01859e-001 + j 0.00000e+000 => damping ratio = 1.00e+000 freq =
0.00000e+000
Senario_A_TVC/Diesel/SG/yfd_r 3.42e-
001
Senario_A_TVC/Diesel/SEXS/x11
1.00e+000
-----
-7.47001e-001 + j 0.00000e+000 => damping ratio = 1.00e+000 freq =
0.00000e+000
Senario_A_TVC/WF3 FCWT1/equation of motion/wr
2.12e-001
Senario_A_TVC/WF2 FCWT1/equation of motion/wr
1.00e+000

```

```

-7.49058e-001 + j 0.00000e+000 => damping ratio = 1.00e+000 freq =
0.00000e+000
Scenario_A_TVC/WF3 FCWT1/equation of motion/wr
1.00e+000
Scenario_A_TVC/WF2 FCWT1/equation of motion/wr
2.12e-001
-----
-3.17655e-001 + j 1.97766e-001 => damping ratio = 8.49e-001 freq = 3.14754e-
002
Scenario_A_TVC/Steam/SG/yfd_r
1.00e+000
Scenario_A_TVC/Diesel/SEXS/x11 1.09e-
001
Scenario_A_TVC/Steam/SEXS/x11 9.59e-
001
-----
-2.69549e-001 + j 0.00000e+000 => damping ratio = 1.00e+000 freq =
0.00000e+000
Scenario_A_TVC/Steam/ST Prime mover and
Governor /dmp 1.00e+000
Scenario_A_TVC/Steam/SEXS/x11 2.11e-
001
-----
-2.60626e-001 + j 9.28239e-002 => damping ratio = 9.42e-001 freq = 1.47734e-
002
Scenario_A_TVC/WF1 DFAG2/Speed Control/I
wr_ref 7.48e-001
Scenario_A_TVC/WF1 DFAG2/Speed Control/I
Te_ref 3.83e-001
Scenario_A_TVC/WF1 DFAG2/rotating mass/omega_1
5.92e-001
Scenario_A_TVC/WF1 DFAG2/rotating mass/shaft
twist 1.00e+000
-----
-2.60315e-001 + j 9.29357e-002 => damping ratio = 9.42e-001 freq = 1.47912e-
002
Scenario_A_TVC/WF5 DFAG2/Speed Control/I
wr_ref 7.50e-001
Scenario_A_TVC/WF5 DFAG2/Speed Control/I
Te_ref 3.85e-001
Scenario_A_TVC/WF5 DFAG2/rotating mass/omega_1
5.92e-001
Scenario_A_TVC/WF5 DFAG2/rotating mass/shaft
twist 1.00e+000
-----
-6.12773e-002 + j 0.00000e+000 => damping ratio = 1.00e+000 freq =
0.00000e+000
Scenario_A_TVC/WF5 DFAG2/Reactive power
Control/I Eq''cmd1 1.00e+000
-----
-9.24392e-002 + j 0.00000e+000 => damping ratio = 1.00e+000 freq =
0.00000e+000
Scenario_A_TVC/WF1 DFAG2/rotating mass/omega_r
2.01e-001
Scenario_A_TVC/WF1 DFAG2/Speed Control/I
wr_ref 1.00e+000
Scenario_A_TVC/WF1 DFAG2/Speed Control/I
Te_ref 1.07e-001
Scenario_A_TVC/WF1 DFAG2/rotating mass/omega_1
7.04e-001
-----

```

```

-9.26479e-002 + j 0.00000e+000 => damping ratio = 1.00e+000 freq =
0.00000e+000
Scenario_A_TVC/WF5 DFAG2/rotating mass/omega_r
2.00e-001
wr_ref 1.00e+000
Scenario_A_TVC/WF5 DFAG2/Speed Control/I
Te_ref 1.09e-001
Scenario_A_TVC/WF5 DFAG2/Speed Control/I
6.99e-001
Scenario_A_TVC/WF5 DFAG2/rotating mass/omega_1
-----
-2.00000e-001 + j 0.00000e+000 => damping ratio = 1.00e+000 freq =
0.00000e+000
Scenario_A_TVC/WF1 DFAG2/Speed Control/I
wr_ref 1.65e-001
Scenario_A_TVC/WF1 DFAG2/Speed Control/I
Te_ref 1.00e+000
-----
-2.00000e-001 + j 0.00000e+000 => damping ratio = 1.00e+000 freq =
0.00000e+000
Scenario_A_TVC/WF5 DFAG2/Speed Control/I
wr_ref 1.66e-001
Scenario_A_TVC/WF5 DFAG2/Speed Control/I
Te_ref 1.00e+000
-----

```

ΣΕΝΑΡΙΟ Β-ΑΡΧΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

```

-5.00000e+001 + j 0.00000e+000 => damping ratio = 1.00e+000 freq =
0.00000e+000
Scenario_B/WF1 DFAG2/Vt_meas
1.00e+000
-----
-2.00000e+001 + j 0.00000e+000 => damping ratio = 1.00e+000 freq =
0.00000e+000
Scenario_B/WF1 DFAG2/Reactive power
Control/Pmeas 1.00e+000
-----
-5.00000e+001 + j 0.00000e+000 => damping ratio = 1.00e+000 freq =
0.00000e+000
Scenario_B/WF5 DFAG2/Vt_meas
1.00e+000
-----
-2.00000e+001 + j 0.00000e+000 => damping ratio = 1.00e+000 freq =
0.00000e+000
Scenario_B/WF5 DFAG2/Reactive power
Control/Pmeas 1.00e+000
-----
-1.16122e+002 + j 8.97432e+000 => damping ratio = 9.97e-001 freq =
1.42831e+000
Scenario_B/WF4 IMWG/ydr_e
1.00e+000
Scenario_B/WF4 IMWG/yqr_e 9.27e-
001
-----
-5.66462e+000 + j 3.90652e+001 => damping ratio = 1.44e-001 freq =
6.21741e+000
Scenario_B/WF4 IMWG/ydr_e 1.02e-
001

```

```

001 Senario_B/WF4 IMWG/wr 9.37e-
001 Senario_B/WF4 IMWG/wl 1.55e-
1.00e+000 Senario_B/WF4 IMWG/theta
-----
-5.47993e+001 + j 0.00000e+000 => damping ratio = 1.00e+000 freq =
0.00000e+000
001 Senario_B/WF1 DFAG2/Ip 3.92e-
Scenario_B/WF2 FCWT1/regulation of grid side-
converter/converter lag Ix/Ixc 1.00e+000
Scenario_B/WF2 FCWT1/regulation of grid side-
converter/converter lag Iy/Iyc 7.41e-001
001 Senario_B/WF5 DFAG2/Ip 5.62e-
-----
-4.62830e+001 + j 0.00000e+000 => damping ratio = 1.00e+000 freq =
0.00000e+000
converter/converter lag Ix/Ixc 3.29e-001
Scenario_B/WF2 FCWT1/regulation of grid side-
converter/converter lag Iy/Iyc 1.00e+000
-----
-5.24413e+001 + j 0.00000e+000 => damping ratio = 1.00e+000 freq =
0.00000e+000
1.00e+000 Senario_B/WF1 DFAG2/Ip
001 Senario_B/WF5 DFAG2/Ip 5.28e-
-----
-5.19151e+001 + j 0.00000e+000 => damping ratio = 1.00e+000 freq =
0.00000e+000
001 Senario_B/WF1 DFAG2/Ip 4.25e-
Scenario_B/WF2 FCWT1/regulation of grid side-
converter/converter lag Ix/Ixc 1.00e+000
001 Senario_B/WF5 DFAG2/Ip 9.32e-
-----
-4.87298e+001 + j 0.00000e+000 => damping ratio = 1.00e+000 freq =
0.00000e+000
converter/converter lag1/Iyc 1.00e+000
-----
-5.05872e+001 + j 0.00000e+000 => damping ratio = 1.00e+000 freq =
0.00000e+000
converter/converter lag/Ixc 1.00e+000
-----
-4.99439e+001 + j 0.00000e+000 => damping ratio = 1.00e+000 freq =
0.00000e+000
1.00e+000 Senario_B/WF1 DFAG2/Iq
-----
-4.99402e+001 + j 0.00000e+000 => damping ratio = 1.00e+000 freq =
0.00000e+000
1.00e+000 Senario_B/WF5 DFAG2/Iq
-----

```

```

-4.05403e+000 + j 1.80679e+001 => damping ratio = 2.19e-001 freq =
2.87560e+000
Scenario_B/Steam/SG/SG_delta 6.32e-
001
Scenario_B/Diesel/SG/SG_delta 2.53e-
001
Scenario_B/Steam/SG/SG_wr 2.11e-
001
Scenario_B/Diesel/SG/SG_wr
1.00e+000
Scenario_B/Diesel/SG/ykq_r 1.83e-
001
Scenario_B/Diesel/DT Prime mover and Governor
/Pm 3.02e-001
-----
-2.90239e+001 + j 0.00000e+000 => damping ratio = 1.00e+000 freq =
0.00000e+000
Scenario_B/WF1 DFAG2/theta_pll
1.00e+000
-----
-2.93231e+001 + j 0.00000e+000 => damping ratio = 1.00e+000 freq =
0.00000e+000
Scenario_B/WF5 DFAG2/theta_pll
1.00e+000
-----
-2.39584e+001 + j 0.00000e+000 => damping ratio = 1.00e+000 freq =
0.00000e+000
Scenario_B/Diesel/SEXS/Ef
1.00e+000
-----
-1.74254e+001 + j 0.00000e+000 => damping ratio = 1.00e+000 freq =
0.00000e+000
Scenario_B/Diesel/SG/ykq_r
1.00e+000
Scenario_B/Diesel/DT Prime mover and Governor
/Pm 1.35e-001
Scenario_B/WF1 DFAG2/Speed Control/filter
7.01e-001
Scenario_B/WF5 DFAG2/Speed Control/filter
4.49e-001
-----
-1.49058e+001 + j 0.00000e+000 => damping ratio = 1.00e+000 freq =
0.00000e+000
Scenario_B/WF5 DFAG2/Ip 1.42e-
001
Scenario_B/WF1 DFAG2/rotating mass/omega_r
1.71e-001
Scenario_B/WF5 DFAG2/rotating mass/omega_r
2.76e-001
Scenario_B/WF1 DFAG2/Speed Control/filter
6.20e-001
Scenario_B/WF5 DFAG2/Speed Control/filter
1.00e+000
-----
-1.21726e+001 + j 0.00000e+000 => damping ratio = 1.00e+000 freq =
0.00000e+000
Scenario_B/Steam/SG/SG_delta 2.87e-
001
Scenario_B/Steam/SG/SG_wr 2.96e-
001

```

```

Senario_B/Steam/SG/ykq_r 4.75e-
001
Senario_B/Diesel/SG/ykq_r 6.11e-
001
Senario_B/WF1 DFAG2/Ip 2.06e-
001
Senario_B/WF1 DFAG2/theta_pll 4.43e-
001
Senario_B/WF5 DFAG2/Ip 1.25e-
001
Senario_B/WF5 DFAG2/theta_pll 2.61e-
001
Senario_B/WF1 DFAG2/rotating mass/omega_r
5.28e-001
Senario_B/WF5 DFAG2/rotating mass/omega_r
3.18e-001
Senario_B/Diesel/DT Prime mover and Governor
/Pm 2.10e-001
Senario_B/WF1 DFAG2/Speed Control/I wr_ref
1.58e-001
Senario_B/WF1 DFAG2/Speed Control/filter
1.00e+000
Senario_B/WF5 DFAG2/Speed Control/filter
6.02e-001
-----
-8.30168e+000 + j 0.00000e+000 => damping ratio = 1.00e+000 freq =
0.00000e+000
Senario_B/Steam/SG/SG_delta 3.67e-
001
Senario_B/Diesel/SG/SG_wr 2.75e-
001
Senario_B/Diesel/SG/ykq_r 1.51e-
001
Senario_B/WF1 DFAG2/theta_pll 1.47e-
001
Senario_B/WF1 DFAG2/rotating mass/omega_r
1.72e-001
Senario_B/Diesel/DT Prime mover and Governor
/Pm 1.00e+000
Senario_B/WF1 DFAG2/Speed Control/filter
1.42e-001
-----
-6.53680e+000 + j 0.00000e+000 => damping ratio = 1.00e+000 freq =
0.00000e+000
Senario_B/Steam/SG/SG_wr 3.87e-
001
Senario_B/Steam/SG/ykq_r 3.05e-
001
Senario_B/Diesel/SG/SG_wr 1.11e-
001
Senario_B/Diesel/DT Prime mover and Governor
/Pm 2.40e-001
Senario_B/Steam/ST Prime mover and Governor
/dhp 1.00e+000
Senario_B/Steam/ST Prime mover and Governor
/zsr 5.09e-001
-----
-3.30945e+000 + j 3.22211e+000 => damping ratio = 7.16e-001 freq = 5.12814e-
001
Senario_B/Steam/SG/SG_delta 3.35e-
001

```

```

Senario_B/Steam/SG/SG_wr
1.00e+000
001
Senario_B/Steam/SG/ykq_r 7.41e-
001
Senario_B/Diesel/SG/SG_wr 4.67e-
001
Senario_B/Diesel/SG/ykq_r 1.23e-
/Pm 4.65e-001
Senario_B/Diesel/DT Prime mover and Governor
/dhp 4.05e-001
Senario_B/Steam/ST Prime mover and Governor
/zsr 4.56e-001
Senario_B/Steam/ST Prime mover and Governor
Senario_B/WF4 IMWG/wl 1.26e-
001
-----
-3.63123e+000 + j 0.00000e+000 => damping ratio = 1.00e+000 freq =
0.00000e+000
Senario_B/Diesel/SG/SG_delta 1.34e-
001
Senario_B/Steam/SG/ykq_r
1.00e+000
Senario_B/Diesel/SG/yfd_r 2.40e-
001
Senario_B/WF1 DFAG2/rotating mass/omega_r
2.81e-001
Senario_B/WF5 DFAG2/rotating mass/omega_r
2.06e-001
Senario_B/Steam/SEXS/Ef 1.47e-
001
Senario_B/Steam/ST Prime mover and Governor
/zsr 5.43e-001
Senario_B/WF4 IMWG/wl 1.21e-
001
-----
-3.99577e+000 + j 0.00000e+000 => damping ratio = 1.00e+000 freq =
0.00000e+000
Senario_B/Diesel/SG/SG_delta 1.13e-
001
Senario_B/Steam/SG/ykq_r 1.34e-
001
Senario_B/WF1 DFAG2/rotating mass/omega_r
1.00e+000
Senario_B/WF5 DFAG2/rotating mass/omega_r
8.17e-001
Senario_B/Steam/ST Prime mover and Governor
/zsr 1.43e-001
Senario_B/WF1 DFAG2/Speed Control/I wr_ref
2.15e-001
Senario_B/WF1 DFAG2/Speed Control/filter
2.40e-001
Senario_B/WF5 DFAG2/Speed Control/I wr_ref
1.75e-001
Senario_B/WF5 DFAG2/Speed Control/filter
1.96e-001
-----
-4.06775e+000 + j 0.00000e+000 => damping ratio = 1.00e+000 freq =
0.00000e+000
Senario_B/WF1 DFAG2/rotating mass/omega_r
8.36e-001

```

```

1.00e+000          Scenario_B/WF5 DFAG2/rotating mass/omega_r
1.81e-001          Scenario_B/WF1 DFAG2/Speed Control/I wr_ref
2.07e-001          Scenario_B/WF1 DFAG2/Speed Control/filter
2.17e-001          Scenario_B/WF5 DFAG2/Speed Control/I wr_ref
2.47e-001          Scenario_B/WF5 DFAG2/Speed Control/filter
-----
-3.19207e+000 + j 0.00000e+000 => damping ratio = 1.00e+000 freq =
0.00000e+000
/dlp 1.00e+000     Scenario_B/Steam/ST Prime mover and Governor
/zsr 1.64e-001     Scenario_B/Steam/ST Prime mover and Governor
-----
-2.65169e+000 + j 0.00000e+000 => damping ratio = 1.00e+000 freq =
0.00000e+000
1.00e+000          Scenario_B/Steam/SEXS/Ef
001                Scenario_B/WF4 IMWG/wl 1.26e-
-----
-1.60542e+000 + j 4.14555e-001 => damping ratio = 9.68e-001 freq = 6.59785e-
002
1.00e+000          Scenario_B/Diesel/SG/yfd_r
001                Scenario_B/Diesel/SEXS/xll 2.97e-
001                Scenario_B/WF4 IMWG/wl 3.66e-
-----
-6.39148e-001 + j 0.00000e+000 => damping ratio = 1.00e+000 freq =
0.00000e+000
1.00e+000          Scenario_B/WF3 FCWT1/equation of motion/wr
-----
-4.51194e-001 + j 1.41028e-001 => damping ratio = 9.54e-001 freq = 2.24453e-
002
001                Scenario_B/Steam/SG/yfd_r 3.01e-
001                Scenario_B/Diesel/SG/yfd_r 4.42e-
1.00e+000          Scenario_B/Diesel/SEXS/xll
/dmp 5.61e-001     Scenario_B/Steam/ST Prime mover and Governor
001                Scenario_B/Steam/SEXS/xll 1.43e-
-----
-3.03431e-001 + j 1.65307e-001 => damping ratio = 8.78e-001 freq = 2.63093e-
002
1.00e+000          Scenario_B/Steam/SG/yfd_r
001                Scenario_B/Diesel/SG/yfd_r 2.92e-
001                Scenario_B/Diesel/SEXS/xll 8.07e-

```



```

Scenario_B/Steam/ST Prime mover and Governor
/dmp 3.32e-001
Scenario_B/Steam/SEXS/x11 9.11e-
001
-----
-3.01491e-001 + j 0.00000e+000 => damping ratio = 1.00e+000 freq =
0.00000e+000
Scenario_B/WF2 FCWT1/equation of motion/wr
1.00e+000
-----
-2.97961e-001 + j 7.79576e-002 => damping ratio = 9.67e-001 freq = 1.24073e-
002
Scenario_B/WF1 DFAG2/Speed Control/I wr_ref
6.54e-001
Scenario_B/WF1 DFAG2/Speed Control/I Te_ref
2.63e-001
Scenario_B/WF1 DFAG2/rotating mass/omega_1
5.47e-001
Scenario_B/WF1 DFAG2/rotating mass/shaft twist
1.00e+000
Scenario_B/WF5 DFAG2/Speed Control/I wr_ref
2.78e-001
Scenario_B/WF5 DFAG2/Speed Control/I Te_ref
1.12e-001
Scenario_B/WF5 DFAG2/rotating mass/omega_1
2.32e-001
Scenario_B/WF5 DFAG2/rotating mass/shaft twist
4.25e-001
-----
-2.97879e-001 + j 7.80488e-002 => damping ratio = 9.67e-001 freq = 1.24219e-
002
Scenario_B/WF1 DFAG2/Speed Control/I wr_ref
2.78e-001
Scenario_B/WF1 DFAG2/Speed Control/I Te_ref
1.12e-001
Scenario_B/WF1 DFAG2/rotating mass/omega_1
2.32e-001
Scenario_B/WF1 DFAG2/rotating mass/shaft twist
4.25e-001
Scenario_B/WF5 DFAG2/Speed Control/I wr_ref
6.55e-001
Scenario_B/WF5 DFAG2/Speed Control/I Te_ref
2.64e-001
Scenario_B/WF5 DFAG2/rotating mass/omega_1
5.47e-001
Scenario_B/WF5 DFAG2/rotating mass/shaft twist
1.00e+000
-----
-6.04444e-002 + j 0.00000e+000 => damping ratio = 1.00e+000 freq =
0.00000e+000
Scenario_B/WF1 DFAG2/Reactive power Control/I
Eq''cmd1 1.00e+000
Scenario_B/WF5 DFAG2/Reactive power Control/I
Eq''cmd1 1.46e-001
-----
-6.16430e-002 + j 0.00000e+000 => damping ratio = 1.00e+000 freq =
0.00000e+000
Scenario_B/WF1 DFAG2/Reactive power Control/I
Eq''cmd1 1.45e-001
Scenario_B/WF5 DFAG2/Reactive power Control/I
Eq''cmd1 1.00e+000

```

```
-----
-7.11067e-002 + j 0.00000e+000 => damping ratio = 1.00e+000 freq =
0.00000e+000
Scenario_B/WF1 DFAG2/rotating mass/omega_r
2.72e-001
Scenario_B/WF1 DFAG2/Speed Control/I wr_ref
7.62e-001
Scenario_B/WF1 DFAG2/rotating mass/omega_l
1.00e+000
-----
```

```
-----
-7.11164e-002 + j 0.00000e+000 => damping ratio = 1.00e+000 freq =
0.00000e+000
Scenario_B/WF5 DFAG2/rotating mass/omega_r
2.72e-001
Scenario_B/WF5 DFAG2/Speed Control/I wr_ref
7.63e-001
Scenario_B/WF5 DFAG2/rotating mass/omega_l
1.00e+000
-----
```

```
-----
-2.00000e-001 + j 0.00000e+000 => damping ratio = 1.00e+000 freq =
0.00000e+000
Scenario_B/WF5 DFAG2/Speed Control/I wr_ref
1.16e-001
Scenario_B/WF5 DFAG2/Speed Control/I Te_ref
1.00e+000
-----
```

```
-----
-2.00000e-001 + j 0.00000e+000 => damping ratio = 1.00e+000 freq =
0.00000e+000
Scenario_B/WF1 DFAG2/Speed Control/I wr_ref
1.16e-001
Scenario_B/WF1 DFAG2/Speed Control/I Te_ref
1.00e+000
-----
```