



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

**Μοντελοποίηση ανεμογεννητριών για τη μελέτη δυναμικών
φαινομένων σε συνθήκες αυξημένης αιολικής διείδυσης**

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Γιάννη Δ. Μάργαρη

Αθήνα, Ιούλιος 2011



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

Μοντελοποίηση ανεμογεννητριών για τη μελέτη δυναμικών φαινομένων σε συνθήκες αυξημένης αιολικής διεύθυνσης

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Γιάννη Δ. Μάργαρη

Συμβουλευτική Επιτροπή : Νικόλαος Δ. Χατζηαργυρίου

Κωνσταντίνος Δ. Βουρνάς

Σταύρος Α. Παπαθανασίου

Εγκρίθηκε από την πενταμελή εξεταστική επιτροπή την 20^η Ιουλίου 2011.

.....
Νικόλαος Δ. Χατζηαργυρίου
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Κωνσταντίνος Δ. Βουρνάς
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Σταύρος Α. Παπαθανασίου
Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Σταυρούλα Καβατζά
Λέκτορας ΕΜΠ

.....
Αρθούρος Ζερβός
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Γεώργιος Κορρές
Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Νικόλαος Βοβός
Καθηγητής Πανεπιστήμιο Πάτρας

Αθήνα, Ιούλιος 2011

.....

Γιάννης Δ. Μάργαρης

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

Copyright © Ιωάννης Δ. Μάργαρης. 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.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η συνεχώς αυξανόμενη αιολική διείσδυση στα σύγχρονα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας θέτει προκλήσεις στην αιολική τεχνολογία όσον αφορά τη δυνατότητα των ανεμογεννητριών να λειτουργούν σύμφωνα με τους περιορισμούς που προδιαγράφονται από τους διαχειριστές των δικτύων. Πλήθος λειτουργιών ρύθμισης και ελέγχου που παραδοσιακά καλύπτονταν αποκλειστικά από συμβατικές μονάδες παραγωγής απαιτούνται πλέον από τις ανεμογεννήτριες που συνδέονται στα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας. Στόχος της παρούσας διατριβής είναι η ανάπτυξη εξειδικευμένων τεχνικών ελέγχου και σχεδίασης των ανεμογεννητριών, που επιτρέπει τη λειτουργία τους ως ενεργές συνιστώσες των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας.

Κατά τη διάρκεια της διατριβής έμφαση δόθηκε στους δύο βασικούς τύπους ανεμογεννητριών ανεμογεννητριών μεταβλητών στροφών – η ανεμογεννήτρια με ασύγχρονη γεννήτρια τυλιγμένου δρομέα διπλής τροφοδότησης και μετατροπέα μερικής ισχύος συνδεδεμένο στο δρομέα και η ανεμογεννήτρια με σύγχρονη γεννήτρια (ηλεκτρικής διέγερσης ή μονίμων μαγνητών) και πλήρη μετατροπέα. Τα μοντέλα που αναπτύχθηκαν χρησιμοποιούνται για τη μελέτη της αλληλεπίδρασης ανεμογεννητριών-αιολικών πάρκων και δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας τόσο κατά τη διάρκεια συνθηκών κανονικής λειτουργίας όσο και για τη μελέτη μεταβατικών φαινομένων όπως πχ. σφάλματα στο δίκτυο.

Αρχικά αναπτύσσονται δυναμικά μοντέλα που αναπαριστούν την αεροδυναμική και μηχανική συμπεριφορά της ανεμογεννήτριας καθώς και το πλήρες ηλεκτρικό σύστημα – γεννήτρια, μετατροπέας και σύνδεση στο δίκτυο. Τα μοντέλα αναπτύχθηκαν σε λογισμικά προσομοίωσης όπως Matlab/Simulink και DIGSILENT Power Factory. Στη συνέχεια αναπτύσσονται στρατηγικές ελέγχου για κάθε τύπο ανεμογεννήτριας για την κανονική λειτουργία με στόχο τη μελέτη της επίδρασης της διακύμανσης της αιολικής παραγωγής στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας λόγω διακυμάνσεων στην ταχύτητα ανέμου και επιπρόσθετες τεχνικές ελέγχου για τη λειτουργία κατά τη διάρκεια μεταβατικών φαινομένων στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Η πρώτη κατηγορία μεταβατικών φαινομένων αφορά στη δυνατότητα αδιάλειπτης παροχής ισχύος κατά τη διάρκεια βυθίσεων τάσης για τους δύο τύπους ανεμογεννητριών καθώς και στη δυνατότητα συμβολής στη ρύθμιση τάσης. Η δεύτερη κατηγορία μεταβατικών αναφέρεται σε διαταραχές που επιδρούν σημαντικά στο ισοζύγιο ενεργού ισχύος του συστήματος και στην απόκριση της συχνότητας. Σχεδιάζονται και μελετώνται ελεγκτές συχνότητας για τις ανεμογεννήτριες ώστε να είναι σε θέση να συμβάλλουν στην πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας με τρόπο παρόμοιο με τις συμβατικές μονάδες. Οι στρατηγικές ελέγχου δεν αναφέρονται μόνο σε επιμέρους ανεμογεννήτριες αλλά επεκτείνονται και σε αιολικά πάρκα των οποίων η ονομαστική ισχύς σήμερα πλέον προσεγγίζει σε μέγεθος τους συμβατικούς σταθμούς παραγωγής. Οι ελεγκτές στο επίπεδο του αιολικού πάρκου αναλαμβάνουν να ρυθμίσουν την παραγωγή ενεργού ισχύος των ανεμογεννητριών με βάση σήματα που λαμβάνουν από το διαχειριστή του συστήματος όσον αφορά πλήθος λειτουργιών, όπως εφεδρεία ενεργού ισχύος, αδρανειακή απόκριση, έλεγχος στατισμού και όρια ρυθμού μεταβολής ενεργού ισχύος.

Τα μοντέλα που αναπτύσσονται χρησιμοποιούνται στη συνέχεια για τη διερεύνηση της λειτουργίας αιολικών πάρκων στα σύγχρονα ΣΗΕ με έμφαση στα μη διασυνδεδεμένα συστήματα, όπως τα νησιωτικά. Τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των απομονωμένων συστημάτων θέτουν ειδικές απαιτήσεις ως προς τις υπηρεσίες στήριξης του δικτύου εκ μέρους των αιολικών πάρκων. Η μεθοδολογία προσέγγισης περιλαμβάνει μελέτη της λειτουργίας κατά τη διάρκεια διακυμάνσεων στην αιολική παραγωγή λόγω της στοχαστικής φύσης του ανέμου και ανάλυση της αλληλεπίδρασης ανεμογεννητριών και δικτύου κατά τη διάρκεια μεταβατικών φαινομένων που επιδρούν είτε στην τάση είτε στη συχνότητα του συστήματος. Τα στάδια ανάλυσης συγκροτούν μια μεθοδολογία προσέγγισης των ορίων αιολικής διείσδυσης αλλά και παραμέτρων όπως το ποσό εφεδρείας ενεργού ισχύος που πρέπει να απαιτείται από τα αιολικά πάρκα κατά την πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας. Αν και τα ποσοτικά αποτελέσματα που προκύπτουν από τη συγκεκριμένη περίπτωση συστήματος που μελετάται (σύστημα Ρόδου) δεν μπορούν να γενικευθούν αυτομάτως, εν τούτοις είναι σαφές ότι οι στρατηγικές ελέγχου που αναπτύσσονται και παρουσιάζονται στην παρούσα διατριβή παρέχουν τη δυνατότητα επέκτασης των ορίων αιολικής διείσδυσης χωρίς παραβίαση των ορίων δυναμικής ασφάλειας του συστήματος.

Λέξεις κλειδιά

Ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών, αδιάλειπτη παροχή ισχύος, ρύθμιση τάσης, έλεγχος συχνότητας, αδρανειακή απόκριση, αιολική δειξίδυση, μη διασυνδεδεμένα συστήματα, DIgSILENT Power Factory.

ABSTRACT

Increasing wind power penetration in modern power systems is posing serious challenges to wind turbine technology regarding wind turbines' capability to operate according to the restrictions specified by system operators. Numerous regulatory and control functions traditionally offered exclusively by conventional units are nowadays required by wind turbines connected to the grid. The scope of this PhD dissertation is to develop dedicated control and design techniques for wind turbines enabling them to behave as active components of power systems.

During the dissertation emphasis was given to two basic types of variable speed wind turbines - the doubly-fed induction generator wind turbine and the direct driven wind turbine with synchronous generator (electrical excitation or permanent magnet) and full converter. The models are used to investigate the interaction of wind turbines-wind farms with the grid during normal operation and during transient events, such as faults in the grid.

In the first step, dynamic models are developed representing the aerodynamic and mechanical behavior of the wind turbine as well as the complete electrical system - generator, converters and connection to the grid. The models were developed in simulation softwares such as Matlab / Simulink and DIgSILENT Power Factory. Afterwards control strategies are designed for each type of wind turbine for normal operation in order to investigate the effect of wind power fluctuations in the electricity system due to fluctuations in wind speed and additional control techniques for the operation during transient phenomena in the grid. The first type of transient phenomena refers to the fault-ride through capability during voltage dips for the two types of wind turbines and the possible contribution to the voltage control. The second type refers to events with significant impact on the active power balance and system frequency. Frequency controllers are designed for wind turbines to be able to contribute to the primary frequency control in a similar way to conventional units. Control strategies do not only refer to individual wind turbines but also to wind farms with a rated power that approaches that of conventional power plants. The controllers at the wind farm level regulate active power production of individual wind turbines based on signals received from the system operator for various functions, such as active power reserve, inertial response, droop control and limits of rate of change of active power.

The models developed are then used to investigate the operation of wind farms in modern power systems, with emphasis given on non-interconnected systems, such as island systems. The characteristics of isolated systems pose special requirements for grid support services on behalf of wind farms. The methodology approach includes investigation of the operation during wind power fluctuations due to the stochastic nature of wind and analysis of the interaction between wind turbines and the grid during transient phenomena that affect either the voltage or the frequency of the system. The steps of investigation establish a methodology to estimate the limits of wind power penetration as well as other parameters, such as the amount of active power reserve required by wind farms during primary frequency control. Although the quantitative results produced with the specific system under study (Rhodes power system) can not be generalized, it is clear that the control strategies developed and presented in this dissertation provide with the possibility of extending the limits of wind power penetration without violating the dynamic security margins of the system.

Key words

Variable speed wind turbines, fault-ride through, voltage regulation, frequency control, wind power penetration, non-interconnected power systems, DIgSILENT Power Factory.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η διατριβή αυτή ξεκίνησε τον Απρίλιο του 2007 και ολοκληρώθηκε τον Ιούλιο του 2011 στο Εργαστήριο Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Ε.Μ.Π.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα Καθηγητή ΕΜΠ κ. Νίκο Χατζηαργυρίου για τη ξεχωριστή στήριξη του κατά τη διάρκεια όλων αυτών των χρόνων. Χάρη στη συνεχή επαφή μας πάνω σε ζητήματα ακαδημαϊκά και ερευνητικά αλλά και ευρύτερα θέματα γύρω από την ενέργεια μπόρεσα να αναπτύξω την ερευνητική αυτή προσπάθεια. Η δική του συμβολή στο συναφές επιστημονικό πεδίο αποτελούσε πάντα κίνητρο και έμπνευση κάθε προσπάθειας μου.

Στη συνέχεια θέλω να ευχαριστήσω ιδιαίτερος θερμά τον Καθηγητή ΕΜΠ κ. Κώστα Βουρνά και Επίκουρο Καθηγητή ΕΜΠ κ. Σταύρο Παπαθανασίου, μέλη της τριμελούς συμβουλευτικής επιτροπής, για την πολύτιμη επιστημονική τους συμβολή κατά τη διάρκεια αυτής της διατριβής και πλήθους ερευνητικών προγραμμάτων στα οποία συμμετείχα.

Ευχαριστώ πολύ όλα τα μέλη του Εργαστηρίου Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας για το κλίμα συνεργασίας που μου παρείχε τα μέσα για να ανταπεξέλθω στις ανάγκες μιας τέτοιας ερευνητικής προσπάθειας. Ειδικά θα ήθελα να αναφέρω τον Άγγελο Τσουχνικά, χωρίς τη βοήθεια του οποίου η διατριβή αυτή δεν θα είχε κάνει τα πρώτα της σημαντικά βήματα, και το Δρ. μηχανικό Νίκο Σουλτάνη που στάθηκε δίπλα μου αυτά τα χρόνια με πολύτιμες συμβουλές.

Ευχαριστώ, πολύ, επίσης τους υποψήφιους διδάκτορες ΕΜΠ Γιάννη Μάντζαρη και Στέφανο Παπαευθυμίου και τους Δρ. μηχανικούς ΕΜΠ Μιχάλη Καρυστιανό και Γιώργο Τσουράκη για τη συνεργασία τους σε πολλά δύσκολα σημεία της έρευνας.

Επιπλέον κατά τη διάρκεια της διατριβής είχα την ευκαιρία να συνεργαστώ για ένα εξάμηνο με τους Poul Sørensen, Anca D. Hansen και Νίκο Κουτουλούλη στο Εθνικό Ερευνητικό Κέντρο για Αειφόρο Ενέργεια Risøe DTU της Δανίας, τους οποίους ευχαριστώ θερμά για το ξεχωριστό κλίμα συνεργασίας και τις επιστημονικές τους γνώσεις που έπαιξαν σημαντικό ρόλο στη διατριβή.

Βέβαια, όλα αυτά τα χρόνια υπήρξαν άνθρωποι που με στήριζαν και οι οποίοι δεν εμπλέχτηκαν άμεσα στο διδακτορικό μου. Χωρίς όμως αυτούς δε θα μπορούσα να εξασφαλίσω τους όρους ώστε να μπορώ να ανταπεξέλθω στις απαιτήσεις της προσπάθειας. Θα αναφέρω μόνο τον Παύλο, τη Γιωργία, το Γιώργο, τη Λίλυ, τον έτερο Γιώργο, την Κατερίνα, τον Κώστα, τον έτερο Κώστα, την Ιωάννα, τον Filippo, τον Πάρη, την Ελεάνα, τη Φωφώ, το Θωμά και το Βαγγέλη.

Τέλος, ένα ευχαριστώ, που δεν αρκεί για να εκφράσει την ευγνωμοσύνη μου, στους γονείς μου Διονύση και Ελένη και στην αδερφή μου Νίκη που με ανέχτηκαν στα δύσκολα!

G. M.

Ιούλιος 2011

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	13
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 – ΕΙΣΑΓΩΓΗ	17
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 – ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΑΝΕΜΟΥ	21
2.1. Η φύση του ανέμου	21
2.2. Μακροπρόθεσμες Μεταβολές Ταχύτητας Ανέμου	21
2.3. Ετήσιες και Εποχικές Μεταβολές Ταχύτητας Ανέμου	22
2.4. Συνοπτικές και Ημερήσιες Διακυμάνσεις	22
2.5. Τύρβη - Η φύση της τύρβης.....	23
2.6. Συμπεράσματα.....	26
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – ΚΩΔΙΚΕΣ ΔΙΚΤΥΟΥ	27
3.1. Ανοχή σε βυθίσεις τάσης και απόκριση σε συνθήκες σφάλματος δικτύου	28
3.2. Έλεγχος τάσης και αέργου ισχύος.....	30
3.3. Έλεγχος συχνότητας και ενεργού ισχύος.....	32
3.4. Σύστημα ελέγχου και επικοινωνίας.....	35
3.5. Ζητήματα εναρμόνισης κωδίκων δικτύου	35
3.6. Συμπεράσματα.....	35
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 – ΤΥΠΟΙ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ	37
4.1. Ανεμογεννήτρια σταθερών στροφών με ασύγχρονη γεννήτρια τύπου κλωβού – Τύπου Α	39
4.2. Ανεμογεννήτρια περιορισμένης λειτουργίας μεταβλητών στροφών με ασύγχρονη γεννήτρια τυλιγμένου δρομέα μεταβλητής αντίστασης δρομέα – Τύπου Β	40
4.3. Ανεμογεννήτρια μεταβλητών στροφών με ασύγχρονη γεννήτρια τυλιγμένου δρομέα διπλής τροφοδότησης και σύστημα μετατροπών ισχύος συνδεδεμένων στο δρομέα – Τύπου Γ	41
4.4. Ανεμογεννήτρια μεταβλητών στροφών με πλήρη μετατροπέα ισχύος – Τύπου Δ.....	42
4.5. Συμπεράσματα.....	46
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 – ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ Α/Γ	47
5.1. Μοντελοποίηση δρομέα	47

5.2. Έλεγχος αεροδυναμικής ισχύος.....	50
5.3. Μοντελοποίηση μηχανικού συστήματος	57
5.4. Απόσβεση ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων στην Α/Γ Τύπου Δ2.....	60
5.5. Συμπεράσματα.....	61
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 – ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑ ΜΕ ΑΣΥΓΧΡΟΝΗ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ ΤΥΛΙΓΜΕΝΟΥ ΔΡΟΜΕΑ ΔΙΠΛΗΣ ΤΡΟΦΟΔΟΤΗΣΗΣ (ΤΥΠΟΥ Γ) – ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΚΑΙ ΈΛΕΓΧΟΣ.....	63
6.1. Μοντελοποίηση ασύγχρονης γεννήτριας τυλιγμένου δρομέα	63
6.2. Ανάλυση μονίμου καταστάσεως.....	69
6.3. Σύστημα ελέγχου ανεμογεννήτριας Τύπου Γ	72
6.4. Έλεγχος μετατροπών.....	75
6.5. Λειτουργία συστήματος για ντετερμινιστικές και στοχαστικές ταχύτητες ανέμου	82
6.6. Μελέτη δυνατότητας αδιάλειπτης παροχής ισχύος κατά τη διάρκεια σφαλμάτων στο δίκτυο και υπηρεσίες υποστήριξης δικτύου σε μεταβατικές καταστάσεις – Α/Γ Τύπου Γ	87
6.7. Συμπεράσματα.....	103
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 – ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑ ΜΕ ΣΥΓΧΡΟΝΗ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ ΚΑΙ ΠΛΗΡΗ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑ (ΤΥΠΟΥ Δ) – ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΚΑΙ ΈΛΕΓΧΟΣ.....	105
7.1. Μοντελοποίηση σύγχρονης γεννήτριας ηλεκτρικής διέγερσης	106
7.2. Ανάλυση μονίμου καταστάσεως.....	112
7.3. Μοντελοποίηση σύγχρονης γεννήτριας μονίμων μαγνητών.....	115
7.4. Ισοδύναμα κυκλώματα στη μόνιμη κατάσταση	117
7.5. Ανάλυση μονίμου καταστάσεως ανεμογεννήτριας Τύπου Δ1	118
7.6. Σύστημα ελέγχου Α/Γ Τύπου Δ1.....	122
7.7. Λειτουργία συστήματος για ντετερμινιστικές ταχύτητες ανέμου	128
7.8. Λειτουργία συστήματος για στοχαστικές ταχύτητες ανέμου.....	130
7.9. Σύστημα ελέγχου Α/Γ Τύπου Δ2.....	132
7.10. Λειτουργία συστήματος για ντετερμινιστικές και στοχαστικές ταχύτητες ανέμου	138
7.11. Μελέτη δυνατότητας αδιάλειπτης παροχής ισχύος κατά τη διάρκεια σφαλμάτων στο δίκτυο και υπηρεσίες υποστήριξης δικτύου σε μεταβατικές καταστάσεις – Α/Γ Τύπου Δ2	144
7.11. Συμπεράσματα.....	154
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 – ΣΥΜΒΟΛΗ Α/Γ ΣΤΗ ΡΥΘΜΙΣΗ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ.....	157

8.1. Ρύθμιση στροφών σε συμβατικές μονάδες.....	158
8.2. Μοντέλα ρυθμιστών στροφών συμβατικών μονάδων.....	160
8.3. Εγγενής αδρανειακή απόκριση Α/Γ σε μεταβολές της συχνότητας	165
8.4. Συμβολή Α/Γ στη ρύθμιση συχνότητας.....	169
8.5. Συμβολή Α/Γ Τύπου Γ και Δ στη ρύθμιση συχνότητας.....	172
8.6. Εφεδρεία ισχύος σε Α/Γ Τύπου Γ και Δ.....	177
8.7. Ελεγκτής συχνότητας σε Α/Γ Τύπου Γ και Δ.....	181
8.8. Συμβολή στη δευτερεύουσα ρύθμιση συχνότητας	194
8.9. Αυτόματη Ρύθμιση Παραγωγής (ΑΡΠ) και αιολική παραγωγή	200
8.10. Συμπεράσματα.....	202
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9 – ΑΝΑΛΥΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΣΗΕ ΜΕ ΑΥΞΗΜΕΝΗ ΑΙΟΛΙΚΗ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗ	203
9.1. Διακομάνσεις ισχύος και συχνότητας λόγω μεταβλητότητας ανέμου	203
9.2. Συνθήκες βύθισης τάσης	210
9.3. Συμβολή Α/Γ Τύπου Γ και Δ στη ρύθμιση συχνότητας.....	217
9.4. Συμπεράσματα.....	224
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10 - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΣΥΜΒΟΛΗ-ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ	227
10.1. Συμπεράσματα.....	227
10.2. Συμβολή.....	233
10.3. Προοπτικές.....	234
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	237
Π1. Προσομοίωση του μηχανικού συστήματος μετάδοσης της κίνησης.....	237
Π2. Στρεφόμενα Πλαίσια Αναφοράς.....	239
Π3. Ανά Μονάδα Σύστημα	241
Π4. Εναλλακτική μέθοδος ελέγχου μετατροπέα στην πλευρά του δικτύου	242
Π5. Γενικό μοντέλο συστήματος μεταφοράς.....	246
Π6. Τεχνικές συγκεντρωτικών μοντέλων	247
Π7. Λογισμικά προσομοίωσης	249
Π8. Απλουστευμένο μοντέλο Α/Γ μεταβλητών στροφών και δικτύου για μελέτες συχνότητας	252

Π9. Μοντέλο ελεγκτή στο επίπεδο του Α/Π για Α/Γ μεταβλητών στροφών	253
Π10. ΣΗΕ Ρόδου.....	256
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	261
ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ ΤΟΥ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ.....	273

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 – Εισαγωγή

Μία από τις μεγαλύτερες προκλήσεις στα σημερινά δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας είναι η ενσωμάτωση μονάδων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και η εξασφάλιση της ασφάλειας και της αξιοπιστίας στη λειτουργία τους. Σύμφωνα με τον παραδοσιακό τρόπο ανάπτυξης των δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας, συμβατικές γεννήτριες μεγάλης ισχύος τροφοδοτούσαν την κατανάλωση μέσω γραμμών μεταφοράς και διανομής, ενώ παράλληλα επιτελούσαν όλες τις επιμέρους λειτουργίες ελέγχου και ρύθμισης που απαιτούνταν σε ένα Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ). Κατ' αυτόν τον τρόπο, τα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας ήταν, με εξαίρεση τον τομέα παραγωγής συμβατικών μονάδων, παθητικά ως προς τη λειτουργία τους.

Τις τελευταίες δεκαετίες, μπροστά στο θεμελιώδες για τις σύγχρονες ανθρώπινες κοινωνίες ζήτημα της κλιματικής αλλαγής, δόθηκε μεγάλη έμφαση στην ανάπτυξη τεχνολογιών που χρησιμοποιούν Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, με στόχο τη μείωση των εκπομπών CO₂ στην ατμόσφαιρα και τη σταδιακή απεξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα. Τα μέχρι τώρα παθητικά δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας έχουν μετατραπεί σε ενεργητικά, μέσω της διασύνδεσης μονάδων ΑΠΕ, οι οποίες λόγω ιδιαιτεροτήτων σε σχέση με τις συμβατικές μονάδες θέτουν πλήθος επιστημονικών και τεχνολογικών προκλήσεων.

Σε αυτό το πολιτικό, κοινωνικό, επιστημονικό και τεχνολογικό πλαίσιο, ο τομέας αιολικής ενέργειας έχει αναπτυχθεί με εξαιρετικά ταχύ ρυθμό, αποτελώντας, τουλάχιστον στην Ευρώπη, τη βασική μορφή ΑΠΕ που αυξάνει συνεχώς τα όρια διείσδυσής της, [EWE09]. Η μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από τον άνεμο, η ανεμογεννήτρια, καθώς και η αλληλεπίδραση της με το δίκτυο στο οποίο συνδέεται είναι το αντικείμενο μελέτης στην παρούσα εργασία. Οι ανεμογεννήτριες σήμερα, όταν συνδέονται στο δίκτυο οργανώνονται κυρίως σε αιολικά πάρκα, τα οποία ως ελεγχόμενες πλέον μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας αποτελούν επίσης αντικείμενο της μελέτης.

Αν και η έννοια ενός στρεφόμενου δρομέα υπό την επίδραση του ανέμου είναι αρχαία και η τεχνολογία ηλεκτρικών μηχανών ήταν ήδη καθιερωμένη από το πρώτο μισό του 20ου αιώνα, η τεχνολογική μορφή που έχει σήμερα η ανεμογεννήτρια διαμορφώθηκε κυρίως τις τελευταίες δύο δεκαετίες του αιώνα που πέρασε. Στην πρώτη φάση ανάπτυξης των ανεμογεννητριών και εγκατάστασής τους στα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας – δεκαετίες 1970-1980, οι ανεμογεννήτριες ήταν ένας σχετικά απλός συνδυασμός της τεχνολογίας των ασύγχρονων ηλεκτρικών μηχανών (μηχανές επαγωγής) και της τεχνογνωσίας στον τομέα της αεροδυναμικής, δηλ. των πτερυγίων – οι ανεμογεννήτριες σταθερών στροφών. Όπως υποδηλώνεται από το όνομα, οι ανεμογεννήτριες αυτές λειτουργούν με συγκεκριμένη ταχύτητα περιστροφής του δρομέα ανεξαρτήτως από την ταχύτητα του ανέμου ή οποιαδήποτε άλλη μεταβλητή. Σε αυτήν τη φάση ανάπτυξης, οι ανεμογεννήτριες δεν συμμετείχαν στον έλεγχο του δικτύου ενώ σε περιπτώσεις έντονων μεταβατικών φαινομένων αποσυνδέονταν από το σύστημα με στόχο την προστασία τους.

Με την παράλληλη ανάπτυξη στον τομέα των ηλεκτρονικών ισχύος και την ολοένα αυξανόμενη διείσδυση της αιολικής ενέργειας στα ΣΗΕ, προέκυψαν νέα είδη ανεμογεννητριών – οι λεγόμενες ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών. Στις μονάδες αυτές υλοποιούνται σύγχρονες μέθοδοι ελέγχου ηλεκτρικών και ηλεκτρονικών συστημάτων με στόχο τη μέγιστη δυνατή εκμετάλλευση του αιολικού δυναμικού για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Οι ανεμογεννήτριες αυτές συνδέονται στο δίκτυο μέσω μετατροπέων ηλεκτρονικών ισχύος ενώ η ταχύτητα του δρομέα είναι μεταβλητή με αρκετά μεγάλο εύρος που καθορίζεται από τη σχεδίαση του συστήματος, [WEH01].

Στα πρώτα χρόνια εμφάνισης των ανεμογεννητριών μεταβλητών στροφών, η προστασία τους κατά τη διάρκεια μεταβατικών φαινομένων επέβαλλε την αποσύνδεση τους, ενώ η συμμετοχή τους στον έλεγχο των ΣΗΕ δεν είχε αναπτυχθεί ακόμα. Η αυξημένη όμως διείσδυσή τους στα δίκτυα και η σταδιακή αντικατάσταση μονάδων συμβατικής παραγωγής από αιολικά πάρκα έθεσε το ζήτημα της ρύθμισης του δικτύου εκ μέρους των μονάδων αιολικής παραγωγής. Με την εμφάνιση των πρώτων μεγάλων αιολικών πάρκων, η ονομαστική ισχύς των οποίων ήταν συγκρίσιμη με αυτή των συμβατικών μονάδων παραγωγής, προέκυψε η ανάγκη τεχνολογίας ανεμογεννητριών που είναι σε θέση να ικανοποιήσει ένα ευρύ πλήθος τεχνικών απαιτήσεων. Οι σύγχρονοι κώδικες δικτύου, που

ορίζουν τους όρους και τις απαιτήσεις διασύνδεσης αιολικών παραγωγών, θέτουν προϋποθέσεις, οι οποίες προσομοιάζουν στις κλασσικές λειτουργίες ελέγχου και ρύθμισης που επιτελούσαν οι συμβατικές γεννήτριες στα παραδοσιακά ΣΗΕ. Η ανοχή σε βυθίσεις τάσης κατά τη διάρκεια σφαλμάτων στο δίκτυο, ο έλεγχος τάσης και αέργου ισχύος και ο έλεγχος συχνότητας και ενεργού ισχύος είναι μερικές από τις ρυθμίσεις που απαιτείται να ικανοποιούν τα αιολικά πάρκα κατά τη σύνδεση τους στα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας σήμερα, [AKH03a][EON06].

Ενώ λοιπόν ο στόχος των σύγχρονων μονάδων αιολικής παραγωγής ταυτίζεται με αυτόν των συμβατικών μονάδων, δηλαδή η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και η ρύθμιση βασικών μεγεθών του δικτύου, εν τούτοις τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των αιολικών μονάδων διαφοροποιούν σημαντικά τις δύο τεχνολογίες. Κατ' αρχάς, η πρωτογενής πηγή ενέργειας στα αιολικά, δηλαδή ο άνεμος, είναι μη ελεγχόμενο μέγεθος και αρκετά δύσκολα προβλέψιμο, παρά τη σημαντική πρόοδο στο σχετικό τομέα έρευνας σήμερα. Η οργάνωση των ανεμογεννητριών (Α/Γ) σε αιολικά πάρκα (Α/Π) μεγάλου αριθμού ανεμογεννητριών μικρής σχετικά ισχύος έκαστη (μικρότερη των 5 MW), σε αντίθεση με την κατανομή των συμβατικών μονάδων μεγάλης ισχύος στους συμβατικούς σταθμούς παραγωγής ενέργειας (εκατοντάδες MW), δημιουργεί μεγάλες διαφοροποιήσεις ως προς τη λειτουργία τους και τον τρόπο ελέγχου τους. Επιπλέον η γεωγραφική διασπορά των ανεμογεννητριών που αποτελούν ένα αιολικό πάρκο καθώς και η δυνατότητα εγκατάστασης τους σε τοποθεσίες με κύριο κριτήριο το διαθέσιμο αιολικό δυναμικό και όχι τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του τοπικού δικτύου δυσχαιρένουν την ενσωμάτωσή τους σε μεγάλη κλίμακα στα δίκτυα.

Η συγκεκριμένη επίσης τεχνολογία που χρησιμοποιείται για την μετατροπή της πρωτογενούς πηγής ενέργειας (εν προκειμένω για την αιολική τεχνολογία, ο άνεμος) διαφοροποιεί σημαντικά τα δυναμικά χαρακτηριστικά τους. Η πλειοψηφία των ανεμογεννητριών που εγκαθίστανται στα σύγχρονα ΣΗΕ χρησιμοποιεί μετατροπείς ηλεκτρονικών ισχύος, γεγονός που καθορίζει σχεδόν ολοκληρωτικά την αλληλεπίδραση τους με τα δίκτυα. Η χρήση των αντιστροφών για σύνδεση των περισσότερων αιολικών μονάδων στο δίκτυο, διαφοροποιεί τη λειτουργία ενός δικτύου με αυξημένα επίπεδα διείσδυσης σε σχέση με ένα σύστημα ισχύος στο οποίο συμμετέχουν μόνο θερμοηλεκτρικές και νηξέλοηλεκτρικές μονάδες. Η ευστάθεια των ΣΗΕ βασίζεται στις στρεφόμενες μάζες των μηχανών που συνδέονται απευθείας στο δίκτυο. Στην περίπτωση των ανεμογεννητριών μεταβλητών στροφών η σύνδεση γίνεται είτε μερικά (ανεμογεννήτριες Τύπου Γ) είτε ολικά (ανεμογεννήτριες Τύπου Δ) μέσω αντιστροφών και επομένως το σύστημα δεν διαθέτει την απαραίτητη αδράνεια που εξασφαλίζουν οι στρεφόμενες μηχανές μέσω της αποθηκευμένης κινητικής ενέργειας. Εναπόκειται στον έλεγχο των αντιστροφών να υποκατασταστήσει την ευσταθή απόκριση που έχει ένα διασυνδεδεμένο σύστημα με στρεφόμενες μηχανές, [ACK05][HEI06].

Οι διαφοροποιήσεις αυτές της αιολικής τεχνολογίας σε σχέση με τη συμβατική τεχνολογία παραγωγής ενέργειας, η οποία σημειώνεται εδώ ότι πρόκειται για τεχνολογία εμπεδωμένη στα ΣΗΕ για σχεδόν ένα αιώνα, καθιστούν την έρευνα στον τομέα αυτό ιδιαίτερα σημαντική. Τα τεχνικά ζητήματα που προκύπτουν από την ολοκληρωτική αναμόρφωση των σύγχρονων ΣΗΕ μέσω της αυξανόμενης διείσδυσης αιολικής ενέργειας σκιαγραφήθηκαν παραπάνω, αν και θα αναλυθούν εκτενέστερα παρακάτω. Οποιαδήποτε μελέτη της αλληλεπίδρασης των δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας με τα αιολικά πάρκα απαιτεί λεπτομερειακή ανάλυση των χαρακτηριστικών λειτουργίας τόσο των ανεμογεννητριών όσο και των δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας. Οι ανεμογεννήτριες ως ενεργές πλέον συνιστώσες των ΣΗΕ επηρεάζουν και επηρεάζονται από τα δίκτυα, με αυτή την αλληλεπίδραση να αποτελεί το βασικό αντικείμενο της παρούσας εργασίας.

Είναι προφανές ότι το πλήθος των τεχνικών ζητημάτων που πρέπει να επιλυθούν, για να επιτραπεί η ασφαλής και αξιόπιστη λειτουργία των δικτύων στις νέες συνθήκες διαμόρφωσής τους, είναι μεγάλο. Η ευσταθής λειτουργία, θέματα προστασίας και ασφάλειας, έλεγχος και επικοινωνία των μονάδων παραγωγής σε τοπικό και κεντρικό επίπεδο, θέματα ποιότητας ισχύος, είναι τομείς έρευνας που χρήζουν ανάλυσης. Η παρούσα εργασία καλύπτει ένα μέρος των θεμάτων αυτών και η πορεία ανάλυσης ακολουθεί κάποια επιμέρους στάδια, που παρουσιάζονται ακολούθως.

Προτού αναλυθεί η επίδραση των ανεμογεννητριών στα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας (και αντίστροφα), μελετώνται τα είδη ανεμογεννητριών που χρησιμοποιούνται ευρέως σήμερα. Στο

πλαίσιο αυτό, στο πρώτο μέρος της εργασίας περιγράφονται οι τέσσερις βασικοί τύποι ανεμογεννητριών που είναι διαθέσιμοι σήμερα στην αιολική βιομηχανία, [CIG07]:

- Ανεμογεννήτρια σταθερών στροφών με ασύγχρονη γεννήτρια τύπου κλωβού – *Τύπου Α*
- Ανεμογεννήτρια περιορισμένης λειτουργίας μεταβλητών στροφών με ασύγχρονη γεννήτρια τυλιγμένου δρομέα μεταβλητής αντίστασης δρομέα – *Τύπου Β*
- Ανεμογεννήτρια μεταβλητών στροφών με ασύγχρονη γεννήτρια τυλιγμένου δρομέα διπλής τροφοδοτήσεως και σύστημα μετατροπών ισχύος συνδεδεμένων στο δρομέα – *Τύπου Γ*
- Ανεμογεννήτρια μεταβλητών στροφών με πλήρη μετατροπέα ισχύος – *Τύπου Δ*

Η βασική μέθοδος που χρησιμοποιείται για τη μελέτη των παραπάνω τύπων είναι η μοντελοποίηση του ζεύγους ανεμογεννήτρια-δίκτυο σε κατάλληλα λογισμικά και η ανάλυση δοκιμών που προσομοιώνουν πιθανές καταστάσεις και μεταβατικά φαινόμενα των ΣΗΕ. Σημειώνεται ότι έμφαση δίνεται στην ανάλυση των *Τύπων Γ* και *Δ* καθώς αποτελούν τους αντιπροσωπευτικούς τύπους ανεμογεννητριών που εγκαθίστανται την τελευταία τουλάχιστον δεκαετία στα ΣΗΕ παγκοσμίως. Παρ' όλα αυτά, για λόγους πληρότητας και σύγκρισης συμπεριλαμβάνονται και οι *Τύποι Α* και *Β*, από τη στιγμή που ένα μεγάλο μέρος των ήδη εγκαταστημένων αιολικών πάρκων χρησιμοποιεί την τεχνολογία αυτή, [SLO03].

Η μοντελοποίηση παρουσιάζεται σε ένα ευρύ φάσμα της διεθνούς βιβλιογραφίας, όπου παρουσιάζονται μοντέλα ποικίλης πολυπλοκότητας. Ένα κομμάτι των μελετών αυτών, κυρίως αυτό που διερευνά την ηλεκτρική αλληλεπίδραση με τα δίκτυα, τείνει να απλοποιεί σημαντικά τα αεροδυναμικά και μηχανικά μέρη του συστήματος της ανεμογεννήτριας και συνήθως δίνει έμφαση στις χρονικές κλίμακες που σχετίζονται με τη γεννήτρια και τους μετατροπείς ηλεκτρονικών ισχύος. Σε αντίθεση, οι λεπτομέρειες αυτών των συστημάτων απουσιάζουν από έρευνες αεροδυναμικών χαρακτηριστικών και μηχανολογικών ιδιοτήτων. Το είδος των μοντέλων και το επίπεδο λεπτομέρειας καθορίζεται από το είδος των μελετών και το εύρος συχνότητας που ενδιαφέρει. Κατά τη διάρκεια της έρευνας αναπτύχθηκαν μοντέλα διαφορετικών επιπέδων λεπτομέρειας και τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της εκάστοτε μελέτης καθορίζουν και το είδος του μοντέλου που εφαρμόζεται σε κάθε περίπτωση, [SLO03].

Η αλληλεξάρτηση μεγεθών του δικτύου και της ανεμογεννήτριας, η βελτιστοποίηση του ελέγχου της ανεμογεννήτριας καθώς και τα φυσικά όρια ενός τέτοιου συστήματος ως προς τις δυνατότητες ρύθμισης, οι μηχανισμοί καθορισμού των ορίων ευστάθειας είναι κάποια από τα ειδικά θέματα που προσεγγίζονται στην παρούσα εργασία. Σημειώνεται ότι η προσέγγιση αφορά τις τεχνικές λεπτομέρειες και δεν υπολογίζει το κόστος των συγκεκριμένων τεχνολογιών αν και προφανώς οι κάθε είδους καινοτομίες εμπεριέχουν το στόχο οικονομικής λειτουργίας των ΣΗΕ. Η ποσοτικοποίηση όμως αυτών των οφελών που προκύπτουν από τις αυξημένες δυνατότητες ρύθμισης εκ μέρους των αιολικών δεν αποτελούν ακτικείμενο της παρούσας ανάλυσης.

Η μοντελοποίηση των συνιστωσών των ΣΗΕ που καθορίζουν την απόκριση του συστήματος αποτελεί επίσης σημαντικό κομμάτι της παρούσας έρευνας, περιλαμβάνοντας μοντέλα των θερμοηλεκτρικών και νηξελιοηλεκτρικών σταθμών παραγωγής και πιο συγκεκριμένα, μοντέλα για:

- Σύγχρονες γεννήτριες
- Συστήματα διέγερσης, ρυθμιστές στροφών και αυτόματους ρυθμιστές τάσης
- Βασικές συνιστώσες ατμοστροβίλων, μονάδων νηξελ και αεριοστροβίλων
- Συστήματα προστασίας των παραπάνω μονάδων
- Μετασχηματιστές συστήματος μεταφοράς και διανομής, ανάλογα με το δίκτυο προς μελέτη
- Σύστημα προστασίας τάσεως και συχνότητας του δικτύου
- Φορτία, ανάλογα με το είδος της μελέτης και το επίπεδο λεπτομέρειας που απαιτείται

Η στατική και δυναμική ασφάλεια των ΣΗΕ πρέπει να εξασφαλίζεται παρά τη συνεχή αναδιαμόρφωση στον τομέα της παραγωγής, καθιστώντας την ανάλυση των δυναμικών φαινομένων

κρίσιμη, [KUN94]. Μια παράμετρος της έρευνας στην παρούσα εργασία είναι και το είδος των διαταραχών που προσομοιώνονται, π.χ. απώλεια φορτίου, σφάλματα βραχυκυκλώσεως και ειδικότερα τα τριφασικά σφάλματα και απώλεια μονάδων παραγωγής. Η μοντελοποίηση όλων των παραπάνω αναφερόμενων συνιστωσών των σύγχρονων ΣΗΕ έχει ως στόχο την πρόβλεψη της απόκρισης του συστήματος σε δυναμικά φαινόμενα και την βελτίωση της μέσω νέων τεχνικών ελέγχου και λειτουργίας των διατάξεων. Η ενσωμάτωση αιολικών μονάδων πρέπει να προσεγγίζεται τόσο υπό το φως της υπάρχουσας δομής των ΣΗΕ όσο και με βάση την προοπτική των δυνατοτήτων που η μελλοντική τεχνολογία θα προσφέρει στην μερική ή ολική αναδιαμόρφωση τους.

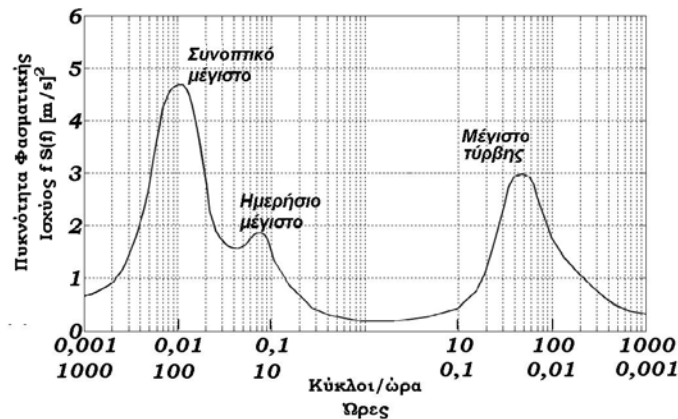
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 – Μοντελοποίηση ανέμου

2.1. Η φύση του ανέμου

Η πρωτογενής πηγή ενέργειας σε ένα αιολικό σύστημα μεταβάλλεται με την ταχύτητα του ανέμου, οπότε η εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας απαιτεί την πλήρη κατανόηση των βασικών χαρακτηριστικών του ανέμου. Σε όλα τα στάδια ανάπτυξης και χρήσης της αιολικής τεχνολογίας, από την επιλογή κατάλληλης τοποθεσίας και τις μελέτες απόδοσης μιας αιολικής εγκατάστασης μέχρι το σχεδιασμό των ανεμογεννητριών και την αλληλεπίδραση των αιολικών πάρκων με τα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας, η διερεύνηση των μηχανισμών στους οποίους υπόκεινται οι μεταβολές του ανέμου είναι ζωτικής σημασίας.

Η μεταβλητότητα του ανέμου, τόσο γεωγραφικά όσο και χρονικά, κυμαίνεται σε μεγάλες χρονικές και χωρικές κλίμακες. Σε μεγάλη κλίμακα, η χωρική μεταβλητότητα ενδεικνύει την ποικιλία κλιματικών περιοχών στον κόσμο, με κάποιες να παρουσιάζουν πολύ μεγαλύτερο αιολικό δυναμικό από άλλες. Αυτές οι περιοχές ορίζονται σε μεγάλο βαθμό από το γεωγραφικό πλάτος που καθορίζει και την ένταση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας. Σε μικρότερη κλίμακα, η φυσική γεωγραφία της κάθε κλιματικής περιοχής ορίζει και την αυξημένη μεταβλητότητα μέσα στα όρια της. Σε σχέση με τη χρονική μεταβλητότητα μπορεί να γίνει διάκριση ανάμεσα στις μακροπρόθεσμες μεταβολές ανέμου, που αναφέρονται σε κλίμακα ενός έτους έως και δεκαετίας, και στις βραχυπρόθεσμες, οι οποίες αναφέρονται ως συνοπτικές μεταβολές και σχετίζονται με την εναλλαγή των καιρικών συστημάτων. Στις μεν μακροπρόθεσμες μεταβολές υπάρχει μεγάλη δυσκολία πρόγνωσης, ενώ αντίθετα στις βραχυπρόθεσμες έχει αναπτυχθεί ήδη σημαντική τεχνογνωσία που παρέχει τη δυνατότητα αξιόπιστων προβλέψεων, γεγονός που ευνοεί τον ασφαλή προγραμματισμό των δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας. Σε ακόμα μικρότερες χρονικές κλίμακες λεπτών ή δευτερολέπτων, η μεταβλητότητα αναφέρεται ως τύρβη και έχει σημαντικές επιπτώσεις στη λειτουργία των ανεμογεννητριών και των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας στις οποίες συνδέονται αυτές, με αποτέλεσμα να λαμβάνονται υπ' όψιν κατά το σχεδιασμό των αιολικών διατάξεων.

Στο Σχήμα 2.1, παρουσιάζεται το φάσμα ταχύτητας ανέμου που παρουσιάστηκε το 1957 από τον *Van der Hoven* στη Νέα Υόρκη, και αντιστοιχεί στα συνοπτικά, ημερήσια φαινόμενα μεταβολής καθώς και στα φαινόμενα τύρβης, [VAN57]. Το φασματικό κενό, που εμφανίζεται μεταξύ ημερήσιων μεγίστων και μεγίστων τύρβης, ενδεικνύει ότι τα φαινόμενα τύρβης μπορούν να αντιμετωπιστούν σε εντελώς ξεχωριστό πλαίσιο ανάλυσης από τις δύο άλλες κατηγορίες μεταβολής του ανέμου.



Σχήμα 2.1. Φάσμα Van der Hoven, [VAN57]

2.2. Μακροπρόθεσμες Μεταβολές Ταχύτητας Ανέμου

Το είδος αυτό μεταβολών στην ταχύτητα του ανέμου αναφέρεται σε χρονικές κλίμακες πολλών ετών ή και δεκαετιών, για τις οποίες η έλλειψη ιστορικών στοιχείων δυσχαιρένει την ανάλυσή τους. Σχετίζεται με τις μεταβολές στις θερμοκρασίες του πλανήτη σε μακρές χρονικές περιόδους και αναφέρεται στην παρούσα εργασία μόνο για λόγους πληρότητας. Πρέπει να αναφερθεί ότι η

αβεβαιότητα που υπεισέρχεται στην πρόβλεψη τους καθιστά τον υπολογισμό της απόδοσης αιολικών εγκαταστάσεων σε τέτοια χρονική κλίμακα αδύνατο.

2.3. Ετήσιες και Εποχικές Μεταβολές Ταχύτητας Ανέμου

Σε αντίθεση με την προηγούμενη κατηγορία μεταβολών, οι ετήσιες και εποχικές διακυμάνσεις ανέμου μπορούν να εκφραστούν μέσω πιθανοτικής κατανομής. Η κατανομή *Weibull* χρησιμοποιείται ευρέως για την αναπαράσταση της ωριαίας μέσης ταχύτητας ανέμου κατά τη διάρκεια ενός έτους. Η κατανομή εκφράζεται ως εξής:

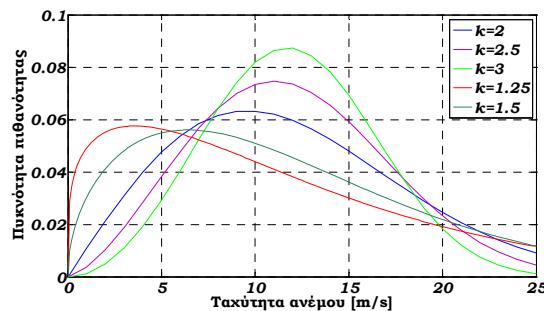
$$F(U) = \exp\left(\left(-\frac{U}{c}\right)^k\right) \quad (2.1)$$

όπου $F(U)$ είναι το όριο του χρόνου για το οποίο η ωριαία μέση ταχύτητα ανέμου υπερβαίνει την τιμή U . Οι παράμετροι που εμφανίζονται στην εξίσωση (2.1) είναι η *παράμετρος κλίμακας* c και η *παράμετρος μορφής* k , που δηλώνει τη διακύμανση γύρω από τη μέση ταχύτητα \bar{U} . Η *παράμετρος κλίμακας* συνδέεται με τη μέση ταχύτητα μέσω της εξίσωσης (2.2):

$$\bar{U} = c\Gamma(1+1/k) \quad (2.2)$$

όπου Γ η πλήρης συνάρτηση γάμμα.

Ως ειδική περίπτωση της παραπάνω κατανομής αναφέρεται η κατανομή *Rayleigh*, με τιμή παραμέτρου $k = 2$, που αντιστοιχεί σε αρκετές ρεαλιστικές περιπτώσεις. Υψηλότερες τιμές του k , ($2.5 \div 3$), υποδηλώνουν μικρή διακύμανση της ωριαίας μέσης ταχύτητας ανέμου γύρω από την ετήσια μέση, ενώ χαμηλότερες τιμές, ($1.2 \div 1.5$), ενδεικνύουν μεγαλύτερη διακύμανση αντίστοιχα. Παραδείγματα τέτοιων κατανομών δίνονται στο Σχήμα 2.2.



Σχήμα 2.2. Παραδείγματα κατανομών Weibull

Αν και η κατανομή *Weibull* αναπαριστά αρκετά πιστά τη συμπεριφορά του ανέμου σε συγκεκριμένες τοποθεσίες, ενδέχεται σε άλλες να απαιτείται η χρήση της *bi-Weibull* κατανομής. Σε αυτή, οι διαφορές στη διακύμανση του ανέμου μεταξύ χειμώνα και καλοκαίρι επιβάλλουν τη χρήση διαφορετικών τιμών των παραμέτρων σε κάθε περίοδο. Η μαθηματική έκφραση σε αυτήν την περίπτωση δίνεται από την εξίσωση (2.3):

$$F(U) = F_1 \exp\left(\left(-\frac{U}{c_1}\right)^{k_1}\right) + (1-F_1) \exp\left(\left(-\frac{U}{c_2}\right)^{k_2}\right) \quad (2.3)$$

2.4. Συνοπτικές και Ημερήσιες Διακυμάνσεις

Οι συνοπτικές διακυμάνσεις έχουν περιεχόμενο συχνότητας που συνήθως παρουσιάζει μέγιστο περίπου στις 4 ημέρες. Φαινόμενα, όπως οι διαφορές ατμοσφαιρικής πίεσης, η μετακίνηση καιρικών μετώπων κατά μήκος της επιφάνειας της γης και οι δυνάμεις *Coriolis*, σχετίζονται με αυτό το είδος διακυμάνσεων. Τα ημερήσια μέγιστα εμφανίζονται με συχνότητα 24 ωρών και οφείλονται σε τοπικά θερμικά φαινόμενα, ενώ συνδέονται και με την τύρβη, που αναλύεται παρακάτω.

2.5. Τύρβη - Η φύση της τύρβης

Οι διακυμάνσεις σε σχετικά γρήγορη χρονική κλίμακα, συνήθως μικρότερη από 10 λεπτά, αντιστοιχούν στο φασματικό μέγιστο μέγιστης συχνότητας, βλέπε Σχήμα 2.1. Οι μηχανισμοί δημιουργίας της τύρβης συνδέονται με την τριβή που προκαλείται σε σχέση με την επιφάνεια της γης και με θερμικά φαινόμενα που διαμορφώνουν κάθετες μετακινήσεις αέριων μαζών. Ιδιότητες, όπως θερμοκρασία, υγρασία, ένταση και πίεση πρέπει να ληφθούν υπ' όψιν κατά την αναπαράσταση του φαινομένου της τύρβης μέσω φυσικών νόμων. Κυρίως λόγω όμως της πολυπλοκότητας μιας τέτοιας διαδικασίας αλλά και της αβεβαιότητας που υφίσταται σε θέματα πρόβλεψης, εφαρμόζεται η προσέγγιση των στατιστικών ιδιοτήτων της τύρβης.

Η ένταση της τύρβης είναι ένα ενδεικτικό μέγεθος και ορίζεται ως εξής:

$$I = \frac{\sigma}{\bar{U}} \quad (2.4)$$

όπου σ είναι η απόκλιση των διακυμάνσεων στην ταχύτητα ανέμου γύρω από τη μέση ταχύτητα \bar{U} που ορίζεται συνήθως σε 10 λεπτά ή μια ώρα. Η ένταση της τύρβης εξαρτάται από την τραχύτητα της επιφάνειας του εδάφους και από το υψόμετρο. Προφανώς, τοπικά τοπογραφικά χαρακτηριστικά διαμορφώνουν την εξέλιξη του φαινομένου μέσα στο χρόνο. Το μέρος της ατμόσφαιρας, όπου η επιφάνεια της γης καθορίζει σε μεγάλο βαθμό τα φαινόμενα που σχετίζονται με τις διακυμάνσεις στην ταχύτητα του ανέμου, ονομάζεται οριακό στρώμα. Σε αυτήν την περιοχή, η τραχύτητα της επιφάνειας, θερμικά φαινόμενα και φαινόμενα *Coriolis* εξ' αιτίας περιστροφής της γης είναι μερικές από τις ιδιότητες που διαμορφώνουν το πλαίσιο διαμόρφωσης των παραγόντων σχετικά με τις μεταβολές στον άνεμο.

Η τραχύτητα της επιφάνειας εδάφους χαρακτηρίζεται μέσω της παραμέτρου τραχύτητας επιφάνειας z_0 . Στον Πίνακα 2.1 δίνονται χαρακτηριστικές τιμές της παραμέτρου z_0 .

Τύπος εδάφους	Παράμετρος τραχύτητας επιφάνειας z_0 (m)
Πόλεις, δάση	0.7
Προάστια, περιοχές πυκνής βλάστησης	0.3
Χωριά, επαρχίες με δέντρα και θάμνους	0.1
Γεωργικές εκτάσεις, λίγα δέντρα και κτίρια	0.03
Επίπεδες πεδινές εκτάσεις με γρασίδι	0.01
Επίπεδες έρημοι, θάλασσα	0.001

Πίνακας 2.1. Τοπικές τιμές παραμέτρου τραχύτητας επιφάνειας

Αν και οι προσεγγίσεις ποικίλλουν, μια γενικά αποδεκτή είναι η παράσταση της διάτμησης ανέμου (*wind shear*) μέσω της λογαριθμικής σχέσης:

$$\bar{U}(z) \propto \ln(z/z_0) \quad (2.5)$$

όπου z είναι το ύψος πάνω από την επιφάνεια του εδάφους. Το φάσμα τύρβης, που περιγράφει το περιεχόμενο συχνοτήτων των διακυμάνσεων της ταχύτητας ανέμου, σύμφωνα με το νόμο του *Kolmogorov* πρέπει να προσεγγίζει ένα ασυμπτωτικό όριο ανάλογο του $f^{-5/3}$ σε υψηλή συχνότητα (όπου f η συχνότητα σε Hz). Δύο ευρέως διαδεδομένες εκφράσεις για την τύρβη, που τείνουν στο ασυμπτωτικό αυτό όριο, είναι τα φάσματα *Kaimal* και *Karman*, που έχουν την ακόλουθη μορφή, [LAN96].

$$\text{Kaimal: } \frac{f \cdot S(f)}{\sigma^2} = \frac{\frac{4 \cdot f \cdot L_1}{\bar{U}}}{\left(1 + 6 \cdot \frac{f \cdot L_1}{\bar{U}}\right)^{\frac{5}{3}}} \quad (2.6)$$

$$\text{von Karman: } \frac{f \cdot S(f)}{\sigma^2} = \frac{\frac{4 \cdot f \cdot L_2}{\bar{U}}}{\left(1 + 70.8 \cdot \left(\frac{f \cdot L_2}{\bar{U}}\right)^2\right)^{\frac{5}{3}}} \quad (2.7)$$

όπου f συχνότητα τύρβης [Hz]

σ^2 διακύμανση [m^2 / s^2]

L_1, L_2 κλίμακες τύρβης [m]

s φασματική πυκνότητα [m/s]

Περισσότερες πληροφορίες στα παραπάνω θέματα ανάλυσης ανέμου μπορούν να αναζητηθούν σε σχετική βιβλιογραφία, [WEH01][ΠΑΠ97].

Το είδος των μοντέλων που αναπτύσσονται και εφαρμόζονται στην παρούσα εργασία εξαρτάται από το είδος διερεύνησης. Σε πρώτη φάση, χρησιμοποιούνται βηματικές μεταβολές στην ταχύτητα του ανέμου ώστε να διαπιστωθεί η δυναμική απόκριση των μοντέλων των ανεμογεννητριών. Τέτοιου είδους μεταβολές χρησιμοποιούνται κατεξοχήν κατά τη σχεδίαση των ελεγκτών υποσυστημάτων των μοντέλων με στόχο την βελτιστοποίηση τους. Σε δεύτερο επίπεδο μελέτης, κατά την ανάλυση δυναμικών φαινομένων του δικτύου και διερεύνησης της απόκρισης των αιολικών συστημάτων σε διαταραχές ηλεκτρικής φύσης, η ταχύτητα του ανέμου θεωρείται σταθερή, καθ' ότι στο εύρος αυτής της χρονικής κλίμακας οποιεσδήποτε μεταβολές ανέμου μπορούν να αμεληθούν. Πιο σύνθετα μοντέλα ανέμου αναπτύσσονται στη φάση ανάλυσης των διακυμάνσεων ισχύος σε δίκτυα με μεγάλη διείσδυση αιολικής ενέργειας. Το εύρος χρόνου της ανάλυσης κυμαίνεται μεταξύ ενός λεπτού και μέχρι δύο ώρες, διάστημα στο οποίο έχουν παρατηρηθεί σημαντικές μεταβολές ανέμου και αντίστοιχες διακυμάνσεις ισχύος στα ηλεκτρικά δίκτυα [SØR02][SØR07][SØR08].

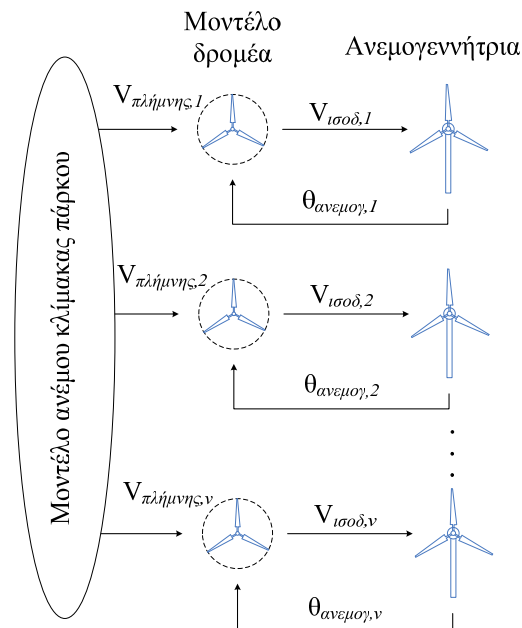
Μετά το γενικό πλαίσιο για τα βασικά χαρακτηριστικά του ανέμου που δίνεται παραπάνω, θα παρουσιαστεί η συγκεκριμένη προσέγγιση που υιοθετήθηκε στην παρούσα εργασία για τη μοντελοποίηση του ανέμου με στόχο τη μελέτη της αλληλεπίδρασης μεταξύ αιολικών πάρκων και του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας, στο οποίο συνδέονται.

Η αυξημένη διείσδυση των αιολικών πάρκων δημιουργεί πλήθος τεχνικών προκλήσεων όσον αφορά την απόκριση των αιολικών πάρκων τόσο σε φαινόμενα μεταβολής του ανέμου όσο και σε φαινόμενα ηλεκτρικής φύσεως (δυναμική απόκριση σε βυθίσεις τάσης κ.α.). Οι διακυμάνσεις ισχύος κατά τη διάρκεια συνεχούς λειτουργίας των αιολικών πάρκων είναι ιδιαίτερα σημαντικές και μπορεί να προκαλέσουν σοβαρές αυξομειώσεις στη συχνότητα του δικτύου με κίνδυνο ενεργοποίησης του συστήματος προστασίας και σημαντικής αποκοπής φορτίου. Ειδικά σε μη διασυνδεδεμένα συστήματα με μειωμένη αδράνεια, τέτοιου είδους διακυμάνσεις ισχύος μπορεί να αποτελέσουν περιοριστικό παράγοντα για τα όρια διείσδυσης της αιολικής ενέργειας. Επομένως, η μοντελοποίηση του ανέμου αποτελεί καθοριστικό παράγοντα κατά τη διερεύνηση αυτών των ζητημάτων.

Οι χρονοσειρές ανέμου που χρησιμοποιήθηκαν παρήχθησαν από τα μοντέλα που περιγράφονται στα [SØR07][SØR08] τα οποία βασίζονται σε ένα μοντέλο ανέμου, το οποίο περιγράφεται αναλυτικά στο [SØR02]. Το μοντέλο αυτό βασίζεται σε μια περιγραφή της φασματικής πυκνότητας της τύρβης, που περιλαμβάνει τη συνοχή μεταξύ των ταχυτήτων του ανέμου σε διαφορετικές ανεμογεννήτριες ενός αιολικού πάρκου και τις συνέπειες της περιστροφικής δειγματοληψίας των στρεφόμενων πτερυγίων στους δρομείς των επιμέρους ανεμογεννητριών. Τόσο η χωρική διακύμανση της τύρβης όσο και το

φαινόμενο σκίασης των πύργων λαμβάνονται υπ' όψιν στο μοντέλο για την περιστροφική δειγματοληψία. Το μοντέλο έχει επαληθευθεί μέσω μετρήσεων ανέμου και διακυμάνσεων ισχύος από ανεμογεννήτριες. Σημειώνεται ότι στην ανάλυση αυτή μελετάται μόνο η διαμήκης συνιστώσα του ανέμου λόγω της καθοριστικής επίδρασής της στα αεροδυναμικά φορτία των ανεμογεννητριών.

Το μοντέλο ανέμου κλίμακας πάρκου, προσομοιώνει τις ταχύτητες ανέμου $V_{πλήμνης,1}, \dots, V_{πλήμνης,v}$ σε δεδομένο σημείο (στο ύψος της πλήμνης της ανεμογεννήτριας) σε κάθε μία από τις v -ανεμογεννήτριες λαμβάνοντας υπ' όψιν τη συνοχή της κλίμακας πάρκου (*park scale coherence*). Το μοντέλο του δρομέα προσομοιώνει την περιστροφική δειγματοληψία και την ολοκλήρωση στο πεδίο του δρομέα καθώς στρέφονται τα πτερύγια της ανεμογεννήτριας. Από αυτό προκύπτει μια απλή χρονοσειρά, η ισοδύναμη ταχύτητα ανέμου $V_{ισοδ,v}$ για κάθε ανεμογεννήτρια v του αιολικού πάρκου, η οποία θα χρησιμοποιηθεί ως είσοδος στο αεροδυναμικό μοντέλο ανεμογεννήτριας. Το Σχήμα 2.3 απεικονίζει τη βασική δομή του μοντέλου.



Σχήμα 2.3. Βασική δομή μοντέλου

Η ταχύτητα όπως φαίνεται από τα στρεφόμενα πτερύγια της v -οστής ανεμογεννήτριας καθορίζεται από την αξιμουθιανή θέση του δρομέα $\theta_{ανεμογ,v}$, η οποία ανατροφοδοτείται στο μοντέλο του δρομέα από το αεροδυναμικό-μηχανικό μοντέλο της ανεμογεννήτριας.

Η μέθοδος προσομοίωσης του ανέμου σε κλίμακα αιολικού πάρκου βασίζεται στη μέθοδο μήτρας ετεροφασματικής πυκνότητας (*cross spectral matrix*), που αναπτύχθηκε από τον Shinozuka, [SHI72]. Η μέθοδος αυτή παρουσιάζει πλεονεκτήματα σε σχέση με άλλες μεθόδους που έχουν χρησιμοποιηθεί κατά καιρούς για την προσομοίωση ανέμου σε αιολικά πάρκα και παράγει έναν μιγαδικό πίνακα. Χρησιμοποιείται η μήτρα ετεροφασματικής πυκνότητας ισχύος (*cross power spectrum*) $S(f)=[S_{rc}(f)]$, όπου κάθε στοιχείο γραμμής r και στήλης c υπολογίζεται ως η αλληλοσυσχέτιση της τύρβης ανάμεσα στις ανεμογεννήτριες r και c , και ορίζεται ως ο μετασχηματισμός *Fourier* της συνάρτησης αλληλοσυσχέτισης $R_{rc}(\tau)$:

$$S_{rc}(f) = \int_{-\infty}^{\infty} R_{rc}(\tau) e^{-j2\pi f\tau} d\tau \quad (2.8)$$

Η συνάρτηση αλληλοσυσχέτισης $R_{rc}(\tau)$ ανάμεσα στις ταχύτητες $V_{πλήμνης,r}(t)$ και $V_{πλήμνης,c}(t)$ ορίζεται ως εξής:

$$R_{rc}(\tau) = E[V_{πλήμνης,r}(t) \cdot V_{πλήμνης,c}(t-\tau)] \quad (2.9)$$

όπου $E[f(t)]$ δηλώνει τη μέση τιμή του $f(t)$ σε χρόνο t .

Κατ' αντιστοιχία με την (2.6) χρησιμοποιούνται για τη μοντελοποίηση τα φάσματα *Kaimal* και *Hojstrup*, [HOJ90]. Όσον αφορά τη συνάρτηση συσχέτισης, έχει επιλεγθεί η συσχέτιση τύπου *Davenport*, [DAV61], με παραμέτρους απόσβεσης τους προτεινόμενους κατά *Schlez* και *Infield*, [SCH98]. Όσον αφορά το μοντέλο του δρομέα, της τύρβης, του φαινομένου σκίασης πύργου και την επαλήθευση του μοντέλου, λεπτομέρειες δίνονται στο [SØR02]. Σημειώνεται ότι, στην περίπτωση αυτή, τα φαινόμενα *wind shear* (διάτμηση ανέμου) και *yaw error* (σφάλμα λόγω οριζόντιας στροφικής κίνησης της ανεμογεννήτριας), που είναι ιδιαίτερα σημαντικά για τη δομική φόρτιση των πτερυγίων της ανεμογεννήτριας, δεν έχουν συμπεριληφθεί, διότι η άθροιση της ροπής από τα τρία πτερύγια αφαιρεί τη μεγαλύτερη επίδραση αυτών των παραγόντων.

2.6. Συμπεράσματα

Στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάστηκαν αναλυτικά οι βασικοί μηχανισμοί που καθορίζουν τη μεταβλητότητα του ανέμου σε διαφορετικές κλίμακες χώρου και χρόνου. Στην παρούσα διατριβή το φαινόμενο που αποτελεί αντικείμενο μελέτης είναι η τύρβη καθώς θα μελετηθούν οι διακυμάνσεις ισχύος που προκαλούνται από Α/Π σε μη διασυνδεδεμένα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας σε χρονική κλίμακα των 10 λεπτών. Για το λόγο αυτό απαιτούνται μοντέλα χρονοσειρών ανέμου που λαμβάνουν υπ' όψιν το φαινόμενο της τύρβης καθώς και την περιστροφική δειγματοληψία του στρεφόμενου δρομέα των επιμέρους Α/Γ στο εσωτερικό ενός Α/Π. Γίνεται μια περιγραφή των βασικών αρχών μοντελοποίησης που εφαρμόστηκαν ενώ αποτελέσματα από την επίδραση των φαινομένων αυτών στη λειτουργία μη διασυνδεδεμένων δικτύων δίνονται στο Κεφάλαιο 9.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – Κώδικες Δικτύου

Στις πρώτες φάσεις ενσωμάτωσης της αιολικής ενέργειας στα ηλεκτρικά δίκτυα, μικρές αιολικές μονάδες συνδέονταν κυρίως στο δίκτυο διανομής, χωρίς να ανακύπτουν κρίσιμα ζητήματα ευστάθειας του δικτύου. Η αυξημένη διείσδυση που ακολούθησε και κυρίως η εμφάνιση αιολικών πάρκων συγκρίσιμου μεγέθους ισχύος¹ με συμβατικούς σταθμούς καθώς και η σύνδεση αυτών στα δίκτυα μεταφοράς (ακόμα και σε δίκτυα Υπερυψηλής Τάσης) επιτάχυνε τη διαδικασία ανάπτυξης συγκεκριμένων τεχνικών απαιτήσεων που οφείλουν να τηρούν οι αιολικοί παραγωγοί κατά τη σύνδεση τους σε δίκτυα. Η συμβολή των συμβατικών μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στον έλεγχο του συστήματος περιορίζεται λόγω αποκέντρωσης και αντικατάστασης των συμβατικών σταθμών από μονάδες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, με πρώτη την αιολική. Το μέγεθος επίσης των σύγχρονων αιολικών πάρκων αυξάνεται συνεχώς, ιδιαίτερα στις παράκτιες εγκαταστάσεις. Συχνά, οι αιολικές εγκαταστάσεις συνδέονται σε ασθενή δίκτυα, ενώ η μεταβαλλόμενη φύση της αιολικής παραγωγής είναι πιθανό να προκαλέσει διακυμάνσεις ισχύος στα δίκτυα που πρέπει συνεχώς να εξισορροπούνται.

Η ευστάθεια των ΣΗΕ και η αξιοπιστία παροχής ισχύος στους καταναλωτές απειλούνται συχνά, λόγω σφαλμάτων, με συχνότερη αιτία τα βραχυκυκλώματα. Οι βυθίσεις τάσης που ακολουθούν τα σφάλματα μπορούν να επεκταθούν σε μεγαλύτερα τμήματα του δικτύου και η χρονική διάρκεια του μεταβατικού φαινομένου εξαρτάται από πλήθος παραγόντων, με βασικό το χρόνο απόκρισης του συστήματος προστασίας που εξασφαλίζει την εκκαθάριση του σφάλματος απομονώνοντας τις περιοχές όπου εκδηλώνονται τα μεταβατικά. Σε σχετικά ασθενή συστήματα ο κίνδυνος κατάρρευσης της τάσης (μπλακ άουτ) είναι ιδιαίτερα έντονος. Η χρονική κλίμακα των φαινομένων αυτών είναι κάποιες δεκάδες δέκατα του δευτερολέπτου έως λίγα δευτερόλεπτα.

Οι κώδικες δικτύου, που παρουσιάζονται στην παρούσα ενότητα, περιλαμβάνουν και αναφέρονται σε ευρεία ομάδα θεμάτων που σχετίζονται με τη λειτουργία ενός ασφαλούς και αξιόπιστου ηλεκτρικού δικτύου μεταφοράς. Η προσέγγιση θα εστιάσει στα ζητήματα που εφάπτονται της υφιστάμενης τεχνολογίας ανεμογεννητριών και στη σκιαγράφηση των προοπτικών εξέλιξης της. Τα θέματα που επιλέχθηκαν για παρουσίαση έχουν καθοριστεί από τους διαχειριστές του συστήματος ως κεντρικής σημασίας για τη διασφάλιση της ασφάλειας και επομένως υποδεικνύουν τις κατευθυντήριες γραμμές για την τεχνολογική ανάπτυξη στον τομέα των αιολικών.

Οι ιδιαίτερες τεχνικές απαιτήσεις που θα αποτελέσουν τη βάση της προσέγγισης είναι:

- Ανοχή σε βυθίσεις τάσης και απόκριση κατά τη διάρκεια και μετά την εκκαθάριση σφαλμάτων στο δίκτυο
- Έλεγχος τάσης και αέργου ισχύος
- Έλεγχος συχνότητας και ενεργού ισχύος

Οι παραπάνω απαιτήσεις θέτουν επίσης τα όρια και τις προδιαγραφές για την ενσωμάτωση μεγάλων αιολικών πάρκων στα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας. Οι ιδιαιτερότητες του κώδικα που εφαρμόζεται σε κάθε χώρα από το διαχειριστή του συστήματος εξαρτώνται από τα εγγενή χαρακτηριστικά κάθε δικτύου, τη διασπορά παραγωγής και κατανάλωσης, το είδος τεχνολογίας παραγωγής που χρησιμοποιείται, τη συνολική αδράνεια του συστήματος, το σύστημα προστασίας και τους χρόνους εκκαθάρισης και από πλήθος άλλες παραμέτρους τεχνικής φύσης. Συστήματα που είναι μη διασυνδεδεμένα και επομένως πιο ασθενή είναι πιο ευάλωτα στην εξάπλωση σφαλμάτων και βυθίσεων τάσης. Ενδεικτικά αναφέρουμε ότι είναι διαθέσιμοι οι κώδικες της Γερμανίας, Βρετανίας, Ιρλανδίας, Βελγίου, Καναδά, Η.Π.Α και ο κοινός κώδικας Δανίας/Φινλανδίας/Νορβηγίας/Σουηδίας (*Nordic Grid Code*). Μια αναλυτική ανασκόπηση κωδικών δικτύων διάφορων χωρών δίνεται στα [ΠΑΤ07][SIN09][CIU09]. Οι ιδιαίτερες στρατηγικές ελέγχου, που εφαρμόζονται στα αιολικά πάρκα ώστε να ικανοποιούν τις τεχνικές απαιτήσεις, περιγράφονται στο αντίστοιχο Κεφάλαιο.

¹ Το μεγαλύτερο παράκτιο αιολικό πάρκο σε λειτουργία μέχρι το τέλος του 2009 ήταν το *Horns Rev 2* στη Δανία με 91 ανεμογεννήτριες συνολικής εγκαταστημένης ισχύος 209 MW

Σε πλήθος βιβλιογραφικών αναφορών ο Γερμανικός κώδικας αναφέρεται ως ο πιο πλήρως τεχνικά καταρτισμένος και χρησιμοποιείται ως βάση αναφοράς για τη σχεδίαση πολλών νέων. Η αυξανόμενη διείσδυση της αιολικής ενέργειας στο Γερμανικό ΣΗΕ δημιουργεί αυξημένες απαιτήσεις από τα αιολικά πάρκα οι οποίες συνεχώς ανανεώνονται και πλέον τείνουν στην εναρμόνιση με τις παραδοσιακές ρυθμιστικές δυνατότητες των συμβατικών μονάδων παραγωγής. Για το λόγο αυτό επιλέχθηκε η συνοπτική παρουσίαση του στην παρούσα εργασία. Στον Ελληνικό Κώδικα Συστήματος δεν περιλαμβάνονται εξειδικευμένες απαιτήσεις για τα αιολικά αν και στον υπό σχεδίαση Κώδικα έχουν προστεθεί τα σχετικά άρθρα. Προς το παρόν οι απαιτήσεις όσον αφορά τα θέματα ρύθμισης που αναφέρθηκαν παραπάνω αφορούν στις συμβατικές θερμικές και υδροηλεκτρικές μονάδες παραγωγής (λιγνιτικές, ατμοηλεκτρικές, ανθρακικές, αεριοστροβιλικές μη συνδυασμένου κύκλου, μηχανές εσωτερικής καύσης και συνδυασμένου κύκλου).

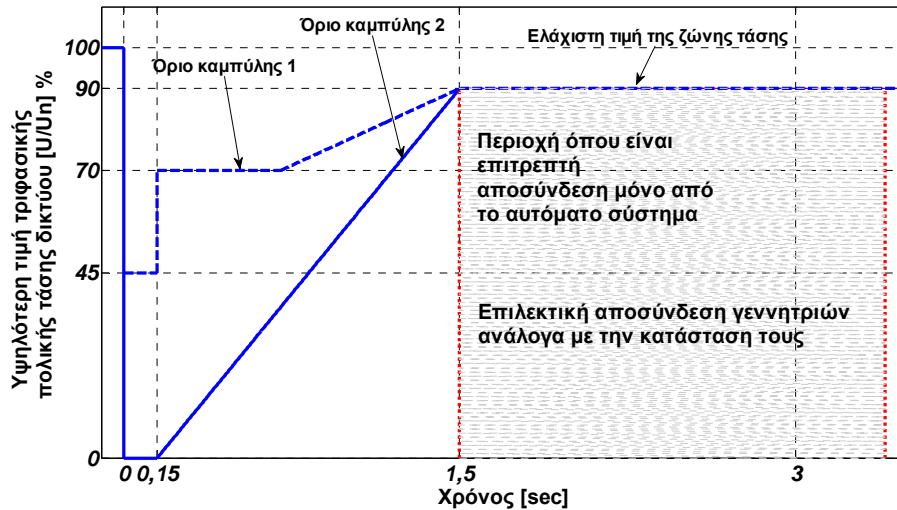
3.1. Ανοχή σε βυθίσεις τάσης και απόκριση σε συνθήκες σφάλματος δικτύου

Μια από τις βασικές απαιτήσεις που περιλαμβάνει η πλειοψηφία κωδίκων δικτύου είναι η δυνατότητα των αιολικών πάρκων να παραμένουν σε λειτουργία κατά τη διάρκεια βυθίσεων τάσης καθώς και η απόκριση τους κατά τη διάρκεια ή και μετά την εκκαθάριση σφαλμάτων στο δίκτυο. Τα αιολικά πάρκα πρέπει να είναι σε θέση να λειτουργούν σε επίπεδα τάσης χαμηλότερα από τα ονομαστικά για καθορισμένο χρονικό διάστημα, αλλά και να μεταβάλλουν την ενεργό και άεργο παραγωγή τους με τρόπο ελεγχόμενο και πλήρως εναρμονισμένο με τις ανάγκες του δικτύου. Η ανοχή σε σφάλματα εμφανίζεται στη διεθνή βιβλιογραφία μέσω των ισοδύναμων όρων *Fault Ride through (FRT)* και *Low Voltage ride Through (LVRT)*. Στο Σχήμα 3.1 δίνεται μια τυπική καμπύλη τάσης-χρόνου που χρησιμοποιείται στους κώδικες για να ορίσει τις τεχνικές λεπτομέρειες της απαιτητής ανοχής σε βυθίσεις τάσης.

Οι βυθίσεις τάσης είναι ένα ιδιαίτερα συχνό φαινόμενο στα ΣΗΕ και ακολουθούν βραχυκύκλωμα ή άλλες διαταραχές στο δίκτυο. Ενδέχεται να είναι σε μια ή περισσότερες φάσεις καθιστώντας το τριφασικό βραχυκύκλωμα το πιο σοβαρό από άποψη καταπόνησης του εξοπλισμού. Το σύστημα προστασίας και ο χρόνος απόκρισης καθορίζει τη διάρκεια της βύθισης, ενώ επίσης η δυνατότητα εξάπλωσης της βύθισης σε γειτονικά τμήματα του δικτύου εξαρτάται από την ταχύτητα απομόνωσης του τμήματος στο οποίο εμφανίστηκε το βραχυκύκλωμα.

Κατά τη διάρκεια της βύθισης, λόγω μειωμένης τάσης στους τερματικούς ζυγούς των γεννητριών, η ενεργός ισχύς δε μπορεί να διοχετευθεί στο δίκτυο, με αποτέλεσμα η ισορροπία μεταξύ μηχανικής ισχύος εισόδου και ηλεκτρικής ισχύος εξόδου σε κάθε σύστημα ηλεκτρομηχανικής μετατροπής να διαταράσσεται. Στην περίπτωση των συμβατικών μονάδων, η αδιάλειπτη λειτουργία και ο συγχρονισμός εξασφαλίζεται μέσω των ρυθμιστών στροφών, ενώ στην περίπτωση των αιολικών πάρκων εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη χρησιμοποιούμενη τεχνολογία ανεμογεννήτριας. Επιπλέον οι συμβατικές μονάδες μέσω των συστημάτων διέγερσης αλλά και της αποθηκευμένης ενέργειας στο μαγνητικό τους πεδίο, είναι σε θέση να στηρίζουν την τάση μέσω παροχής πρόσθετης αέργου ισχύος κατά τη διάρκεια αλλά και μετά την εκκαθάριση του σφάλματος.

Όπως αναφέρεται και στην αρχή της παρούσας ενότητας, στην πρώτη φάση σύνδεσης μικρών αιολικών μονάδων στα δίκτυα διανομής η ενδεχόμενη αποσύνδεση τους κατά τη διάρκεια βυθίσεων τάσης δεν αποτελούσε πρόβλημα για το δίκτυο λόγω της περιορισμένης διείσδυσης. Στην περίπτωση αυτή οι ανεμογεννήτριες προστατεύονταν από πιθανή καταστροφή λόγω των συνθηκών βραχυκυκλώματος. Σε συνθήκες αυξημένης όμως ενσωμάτωσης μεγάλων αιολικών πάρκων η αποσύνδεση τους δημιουργεί πρόσθετη καταπόνηση στο σύστημα μέσω της απώλειας πρόσθετης παραγωγής σε συνθήκες ήδη κρίσιμες. Για το λόγο αυτό, και παράλληλα με την εξέλιξη της αιολικής τεχνολογίας (εκτεταμένη χρήση των *Τύπων Γ* και *Δ*), ορίστηκαν από τους κώδικες ειδικές ρυθμίσεις σε σχέση με τη συμπεριφορά των αιολικών πάρκων σε συνθήκες βύθισης. Οι ρυθμίσεις αυτές αφορούν όχι μόνο στην ανοχή σε χαμηλά επίπεδα τάσης αλλά και στη δυναμική συμπεριφορά των αιολικών πάρκων τόσο κατά τη διάρκεια όσο και μετά την εκκαθάριση του σφάλματος από το σύστημα προστασίας του δικτύου. Η παροχή αέργου ρεύματος για τη στήριξη της τάσης, ο ρυθμός μεταβολής ενεργού και αέργου ισχύος είναι μερικές από τις παραμέτρους που αφορούν στη συμβολή των αιολικών πάρκων στη στήριξη του δικτύου κατά τη διάρκεια μεταβατικών φαινομένων τέτοιας φύσης.



Σχήμα 3.1. Τυπική καμπύλη FRT – Γερμανικός κώδικας, [DEN05]

Στο Γερμανικό κώδικα, αν η τάση (η μεγαλύτερη από τις τρεις πολικές τάσεις μετρημένη στην πλευρά XT του Μ/Σ κάθε Α/Γ του Α/Π) μειωθεί κάτω από το 80% της ελάχιστης τιμής του εύρους τάσης κανονικής λειτουργίας, τότε προβλέπεται η σταδιακή αποσύνδεση των Α/Γ του Α/Π, σε τέσσερα στάδια, με χρονική καθυστέρηση 1.5 sec, 1.8 sec, 2.1 sec και 2.4 sec, ενώ σε κάθε στάδιο αποσυνδέεται το 25% του συνόλου των Α/Γ του πάρκου. Στην περίπτωση όμως που η μέγιστη από τις πολικές τάσεις στο σημείο σύνδεσης του Α/Π με το δίκτυο μειωθεί κάτω από το 85% της ονομαστικής τάσης και η αιολική παραγωγή απορροφάει αέργο ισχύ, τότε προβλέπεται η υποχρεωτική αποσύνδεση με χρονική καθυστέρηση 0.5 sec.

Σύμφωνα με την καμπύλη του Σχήματος 3.1, στην περιοχή άνω του ορίου καμπύλης 1 δεν επιτρέπεται η αποσύνδεση των Α/Γ. Στην ενδιάμεση ζώνη μεταξύ ορίου καμπύλης 1 και 2, αν δεν καταστεί δυνατό οι ανεμογεννήτριες να παραμείνουν σε λειτουργία, προβλέπεται η περίπτωση να καταρτιστεί συμφωνία με τον διαχειριστή ώστε να εφαρμοστεί το ευνοϊκότερο όριο της καμπύλης 2. Ο χρόνος επανασύνδεσης των αιολικών μονάδων πρέπει να είναι πολύ μικρός (μικρότερος των 2 sec) στην περίπτωση αναπόφευκτης αποσύνδεσης, ενώ απαιτείται μια ελάχιστη έγχυση αέργου ισχύος κατά τη διάρκεια της αποσύνδεσης. Αν παρατηρηθεί αστάθεια των ανεμογεννητριών κατά τη διάρκεια του σφάλματος ή ενεργοποίηση του συστήματος προστασίας τους, προβλέπεται ομοίως η δυνατότητα σύντομης αποσύνδεσής τους. Ο χρόνος επανασυγχρονισμού με το δίκτυο δεν πρέπει να υπερβεί τα 2 sec μετά την αποσύνδεση και η έγχυση ενεργού ισχύος πρέπει να αυξηθεί στην προ του σφάλματος τιμή με ρυθμό τουλάχιστον ίσο με 10% της ονομαστικής ισχύος του σταθμού ανά δευτερόλεπτο.

Στην περιοχή κάτω από το όριο καμπύλης 2, η αποσύνδεση των ανεμογεννητριών γίνεται αποδεκτή και ενδέχεται να επιτραπεί από το διαχειριστή ο χρόνος επανασυγχρονισμού να είναι μεγαλύτερος των 2 sec και με ρυθμό αύξησης της ενεργού ισχύος μικρότερο του 10% της ονομαστικής.

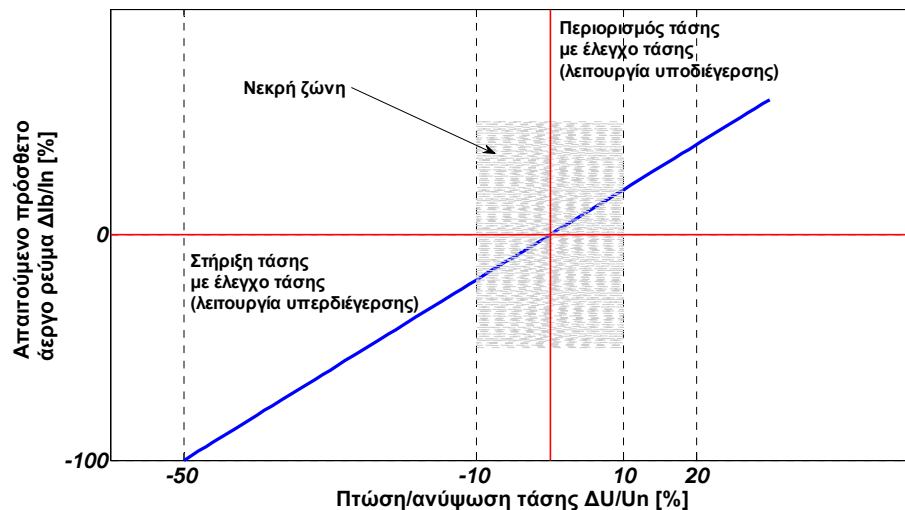
Σε περιπτώσεις που οι ανεμογεννήτριες δεν αποσυνδεθούν κατά τη διάρκεια του σφάλματος, είναι υποχρεωμένες να παράγουν ενεργό ισχύ αμέσως μετά την εκκαθάριση του σφάλματος με ρυθμό ανάληψης ισχύος τουλάχιστον ίσο με 20% της ονομαστικής τους ισχύος ανά δευτερόλεπτο. Στη γραμμοσκιασμένη περιοχή του Σχήματος 3.1 επιτρέπεται η αποσύνδεση των ανεμογεννητριών από το σύστημα.

Στον κώδικα αναφέρεται επίσης ότι δεν επιτρέπεται η αποσύνδεση των ανεμογεννητριών λόγω ταλαντώσεων ισχύος, και επομένως ίσως απαιτείται ειδικό σύστημα αποσβεσης τέτοιων ταλαντώσεων. Επιπλέον, καθορίζονται και οι απαιτήσεις για την παροχή αέργου ισχύος κατά τη διάρκεια των σφαλμάτων, που θα αναφερθούν παρακάτω στον έλεγχο αέργου ισχύος και τάσης.

Ειδικά καθορίζονται και οι απαιτήσεις σχετικά με την επαναφορά μετά το σφάλμα, κάνοντας διάκριση ανάλογα με το αν αποσυνδέθηκαν οι ανεμογεννήτριες ή όχι. Καθορίζονται οι ρυθμοί αύξησης της ενεργού ισχύος εξόδου - για επανασύνδεση μετά από αυτόματη απόζευξη ο ρυθμός ορίζεται ίσος με 10% της ικανότητας διασύνδεσης ανά min, για σύντομη αποσύνδεση ο ρυθμός αύξησης πρέπει να είναι τουλάχιστον 10% της ονομαστικής ισχύος των ανεμογεννητριών ανά δευτερόλεπτο, ενώ για ανεμογεννήτριες που δεν αποσυνδέθηκαν ορίζεται ρυθμός ανάληψης ισχύος τουλάχιστον ίσος με το 20% της ονομαστικής τους ισχύος ανά δευτερόλεπτο.

Στους κώδικες της Γερμανίας, της Βρετανίας, της Ιρλανδίας και της Ισπανίας επίσης συμπεριλαμβάνονται απαιτήσεις αέργου ρεύματος κατά τη διάρκεια του σφάλματος, και γενικότερα κατά τη διάρκεια μεγάλων διακυμάνσεων της τάσης από τα ονομαστικά επίπεδα. Στο Γερμανικό κώδικα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.2, το άεργο ρεύμα εξόδου στη πλευρά XT του Μ/Σ της γεννήτριας πρέπει να αυξηθεί με ρυθμό τουλάχιστον 2% του ονομαστικού ανά 1% απόκλιση της τάσης (ώστε για βύθιση 50% η αύξηση του αέργου ρεύματος να ισούται με 100% του ονομαστικού της γεννήτριας).

Στους κώδικες η τάση μετράται στους ακροδέκτες της κάθε γεννήτριας και η κάθε Α/Γ επιτελεί έλεγχο τάσης και αέργου ισχύος τοπικά. Παρ' όλα αυτά, ενδέχεται σε περίπτωση μεγάλης απόστασης των ανεμογεννητριών από το σημείο σύνδεσης στο δίκτυο να απαιτείται η ρύθμιση της αέργου ισχύος να γίνεται στο σημείο σύνδεσης.



Σχήμα 3.2. Απαιτήσεις Γερμανικού κώδικα για άεργο ρεύμα εξόδου κατά τη διαταραχή τάσης

3.2. Έλεγχος τάσης και αέργου ισχύος

Η ασφαλής και αξιόπιστη λειτουργία των ΣΗΕ επιβάλλει συγκεκριμένα όρια για τις τάσεις και τις διακυμάνσεις τόσο σε μόνιμη κατάσταση όσο και κατά τη διάρκεια μεταβατικών καταστάσεων που συνοδεύουν τα σφάλματα. Ακόμα και στη μόνιμη κατάσταση ενδέχεται μια διαταραχή στο ισοζύγιο παραγωγής-κατανάλωσης αέργου ισχύος να προκαλέσει αποκλίσεις της τάσης από τις ονομαστικές τιμές. Οι εξοπλισμοί τόσο του τομέα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας όσο και κατανάλωσης έχουν σχεδιαστεί να λειτουργούν μέσα σε προκαθορισμένα όρια τάσης. Σε περίπτωση μεγάλης απόκλισης από τα όρια αυτά, είτε μικρότερης απόκλισης αλλά μεγάλης χρονικής διάρκειας, η απόδοση των εξοπλισμών απειλείται και ο κίνδυνος καταστροφής τους αυξάνεται, [KUN94].

Ο έλεγχος τάσης και αέργου ισχύος είναι καθοριστικός παράγοντας για την ευστάθεια του συστήματος. Μια παράμετρος, που καθιστά το είδος αυτό ελέγχου κρίσιμο, είναι ότι ο έλεγχος τάσης πρέπει να επιτελείται σε τοπικό επίπεδο – σε αντίθεση με τον έλεγχο συχνότητας και ενεργού ισχύος, που θα συζητηθεί παρακάτω. Η άεργος ισχύς δε μπορεί να μεταφερθεί σε μεγάλες αποστάσεις και επομένως ο έλεγχος πρέπει να υφίσταται σε όλα τα τμήματα ενός δικτύου, περιλαμβάνοντας τον

έλεγχου της παραγωγής, απορρόφησης και ροής αέργου ισχύος σε όλα τα επίπεδα τάσης ενός ΣΗΕ. Βασική συνιστώσα ελέγχου είναι οι σύγχρονες γεννήτριες των συμβατικών μονάδων παραγωγής μέσω των αυτόματων ρυθμιστών τάσης και του πεδίου διέγερσης που εξασφαλίζουν τα προκαθορισμένα επίπεδα τάσης στον τερματικό ζυγό τους. Στο υπόλοιπο δίκτυο, επιπλέον μέσα που χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο είναι:

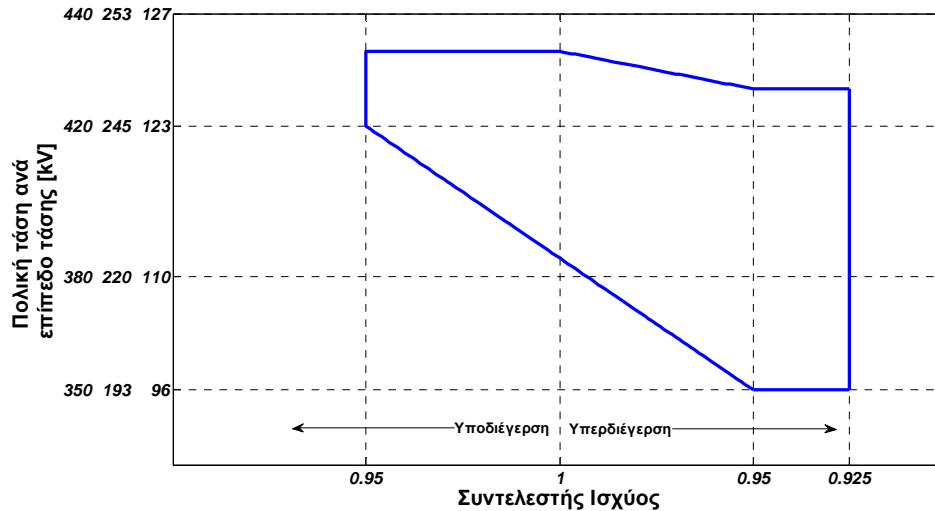
- Στοιχεία παραγωγής ή απορρόφησης αέργου ισχύος, όπως αποζεύξιμοι πυκνωτές και επαγωγικές αντιδράσεις, συσκευές *FACTS* και σύγχρονοι αντισταθμιστές (*STATCOM, SVC*)
- Στοιχεία αντιστάθμισης γραμμών, όπως πυκνωτές σε σειρά
- Μετασχηματιστές με δυνατότητα ρύθμισης, όπως Σύστημα Αλλαγής Τάσης Υπό Φορτίο (*ΣΑΤΥΦ*)

Οι μέθοδοι αυτοί διακρίνονται σε ενεργή και παθητική αντιστάθμιση. Στην πρώτη περίπτωση η άεργος που καταναλώνεται ή παράγεται αυξομειώνεται αυτόματα με βάση την τάση του ζυγού στον οποίο συνδέονται, ενώ στη δεύτερη η συνεισφορά στον έλεγχο τάσης γίνεται μέσω της τροποποίησης των χαρακτηριστικών του δικτύου από τη στιγμή που ο εξοπλισμός είναι μόνιμα ή μέσω διακόπτη συνδεδεμένος στο δίκτυο μεταφοράς ή διανομής.

Η αυξημένη διείσδυση μεγάλων αιολικών πάρκων στα ΣΗΕ οδήγησε σε τροποποιήσεις της ρύθμισης αέργου. Στην πρώτη φάση εγκατάστασης αιολικών πάρκων στα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας, οι ανεμογεννήτριες σταθερών στροφών ήταν εφοδιασμένες με γεννήτριες επαγωγής (*Τύπου Α και Β*) και κατανάλωναν άεργο ισχύ κατά τη λειτουργία τους. Οι πρώτες απαιτήσεις, που τέθηκαν από τους διαχειριστές του δικτύου, καθόριζαν ελάχιστες τιμές για το Συντελεστή Ισχύος (*ΣΙ*) του αιολικού πάρκου.

Με την εμφάνιση των αιολικών πάρκων με ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών και τη συνακόλουθη ακόμα μεγαλύτερη αύξηση της διείσδυσης, οι απαιτήσεις σχετικά με το *ΣΙ* του αιολικού σταθμού τροποποιήθηκαν και σήμερα περιλαμβάνουν ένα σύνολο αυξημένων ρυθμιστικών διαδικασιών. Το εύρος ρύθμισης του *ΣΙ* πλέον έχει διευρυνμένα όρια, τόσο στην επαγωγική όσο και τη χωρητική περιοχή λειτουργίας. Επιπλέον, σε πολλούς κώδικες η περιοχή ρύθμισης εξαρτάται από τα επίπεδα τάσης των ζυγών στο δίκτυο στο οποίο συνδέεται το αιολικό πάρκο, δεδομένου ότι πρέπει να εξασφαλίζεται ότι η παραγωγή ή κατανάλωση αέργου ισχύος, έστω και μέσα σε καθορισμένα όρια, από το αιολικό πάρκο πρέπει να εξασφαλίζει ονομαστικές τιμές τάσεις. Στους κώδικες δικτύων παρατηρείται μεγάλη ποικιλία σε σχέση με τον τρόπο συμβολής των αιολικών πάρκων στον έλεγχο τάσης και αέργου ισχύος. Σε μερικές περιπτώσεις τα αιολικά πάρκα δύνανται να επιτελέσουν ενεργό ρύθμιση τάσης, κατ' αντιστοιχία με τις συμβατικές γεννήτριες, στον τερματικό ή άλλο κοντινό ζυγό. Το γενικό πλαίσιο απαιτήσεων από τα αιολικά πάρκα περιλαμβάνει τη ρύθμιση του *ΣΙ* είτε με βάση τις εντολές από κεντρικό σύστημα ρύθμισης του διαχειριστή του δικτύου είτε με χαρακτηριστική ρύθμισης με παράμετρο την τάση του συστήματος.

Το Σχήμα 3.3 αποτυπώνει το περιθώριο ρύθμισης του *ΣΙ* του αιολικού πάρκου συναρτήσει της τάσης του δικτύου, όταν η συχνότητα του δικτύου είναι στο εύρος $49.5\text{Hz} \pm 50.5\text{Hz}$. Σε λειτουργία υπερδιέγερσης τα αιολικά πάρκα παράγουν άεργο ισχύ και σε λειτουργία υποδιέγερσης καταναλώνουν αντίστοιχα. Σημειώνεται ότι η άεργος ισχύς σε αυτήν την περίπτωση αναφέρεται στο σημείο σύνδεσης του αιολικού πάρκου στο δίκτυο, γεγονός που σημαίνει ότι ενδέχεται η άεργος που απαιτείται να μπορεί να προσφερθεί από πρόσθετα συστήματα αντιστάθμισης. Οι βηματικές αλλαγές στην παραγωγή αέργου ισχύος δεν πρέπει να ξεπερνάνε το 2.5% της ικανότητας στο σημείο σύνδεσης, για δίκτυα Υψηλής Τάσης (*ΥΤ*), και το 5% για δίκτυα Υπερψηλής Τάσης (*ΥΥΤ*). Επομένως συστήματα όπως στατοί αντισταθμιστές αέργου ισχύος (*Static Var Compensators – SVC*) που εξασφαλίζουν συνεχείς μεταβολές στην άεργο ισχύ μπορούν να χρησιμοποιηθούν αποδοτικά σε τέτοια περίπτωση. Ενδέχεται επίσης το αιολικό πάρκο να πραγματοποιεί ενεργό ρύθμιση της τάσης στο σημείο σύνδεσης του με βάση τιμές σε πραγματικό χρόνο που δίνονται από το διαχειριστή του δικτύου.



Σχήμα 3.3. Παραγωγή αέργου ισχύος συναρτήσει της τάσης χωρίς περιορισμό ενεργού ισχύος, Γερμανικός κώδικας

Σε κώδικες άλλων χωρών και σε σχέση με τον έλεγχο τάσης και αέργου ισχύος, υποδεικνύονται χαρακτηριστικές ενεργού – αέργου ισχύος, περιθώρια ρύθμισης ΣΙ, ρύθμιση ΣΙ ή τάσης ή αέργου ισχύος βάση τιμών σε πραγματικό χρόνο από το διαχειριστή και πλήθος άλλων ρυθμιστικών διαδικασιών. Οι απαιτήσεις αυτές σχετίζονται τόσο με στατικά φαινόμενα (συνεχής παροχή αέργου στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας) όσο και με δυναμικά φαινόμενα (δυναμική ικανότητα αέργου ισχύος).

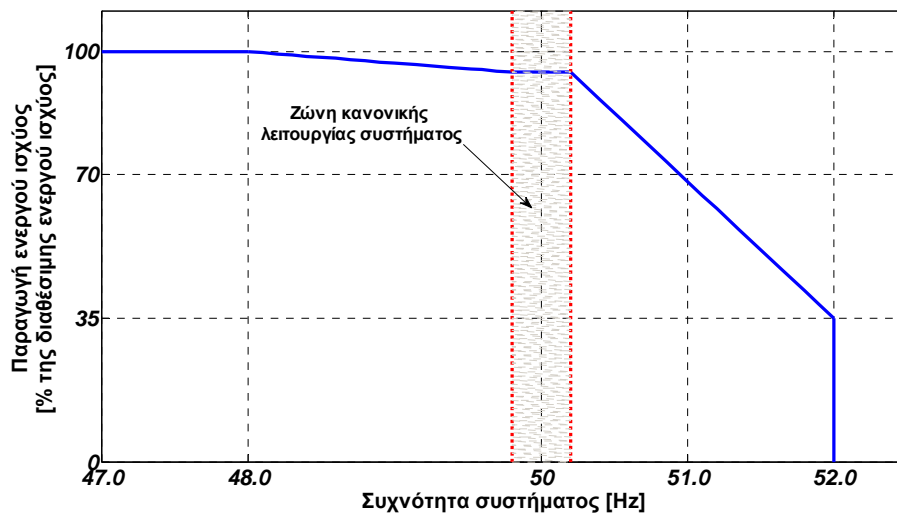
3.3. Έλεγχος συχνότητας και ενεργού ισχύος

Μια θεμελιώδης παράμετρος ασφαλούς λειτουργίας των ΣΗΕ είναι η συχνότητα η οποία πρέπει να παραμένει σχεδόν σταθερή και ίση με την ονομαστική της τιμή. Το ισοζύγιο παραγωγής-κατανάλωσης ενεργού ισχύος πρέπει να διασφαλίζει την ισορροπία σε κάθε χρονική στιγμή, ενώ σε διαφορετική περίπτωση προκύπτουν μικρές ή μεγάλες διακυμάνσεις στη συχνότητα. Η συχνότητα συνδέεται στενά με την ταχύτητα περιστροφής σύγχρονων και ασύγχρονων μηχανών που συνδέονται στο δίκτυο. Σε περίπτωση απόκλισης της συχνότητας από ένα καθορισμένο εύρος γύρω από την ονομαστική της τιμή η ασφάλεια και αξιοπιστία της λειτουργίας τους απειλείται. Σε αντίθεση με τη ρύθμιση τάσης, που αναλύθηκε παραπάνω, μια διαταραχή στο ισοζύγιο ενεργού ισχύος σε ένα σημείο του δικτύου, προκαλεί διακυμάνσεις στη συχνότητα επηρεάζοντας τις συνιστώσες σε όλο το δίκτυο. Σημαντική πτώση της συχνότητας ενδέχεται να προκαλέσει υψηλά ρεύματα μαγνήτισης σε ασύγχρονους κινητήρες και μετασχηματιστές. Επίσης η συχνότητα χρησιμοποιείται για τη εξασφάλιση της λειτουργίας σύγχρονων χρονομετρητών, η λειτουργία των οποίων στηρίζεται στον υπολογισμό του ολοκληρώματος της συχνότητας, [KUN94],[ΠΑΠ91].

Η ρύθμιση της ενεργού ισχύος και συχνότητας περιλαμβάνει δυο διαδοχικές λειτουργικές περιοχές:

- *Πρωτεύουσα ρύθμιση*, όπου οι τυχόν μεταβολές φορτίου (ή αντίστοιχες μεταβολές της παραγωγής ενεργού ισχύος) κατανέμονται μεταξύ των μονάδων παραγωγής αντιστρόφως ανάλογα προς το στατισμό των ρυθμιστών τους. Στη φάση αυτή, εξασφαλίζεται η σταθεροποίηση της συχνότητας με μόνιμο σφάλμα από την ονομαστική τιμή.
- *Δευτερεύουσα ρύθμιση*, όπου το μόνιμο σφάλμα συχνότητας διορθώνεται με κατάλληλη ρύθμιση στροφών των ρυθμιστών στροφών των γεννητριών. Οι μονάδες παραγωγής μεταβάλλουν την παραγωγή τους μετακινώντας κατάλληλα τις χαρακτηριστικές φορτίου-συχνότητας, εξασφαλίζοντας την επαναφορά της συχνότητας στο εύρος ονομαστικής λειτουργίας – συχνά στη βιβλιογραφία αναφέρεται ως *ρύθμιση φορτίου – συχνότητας (load frequency control)*.

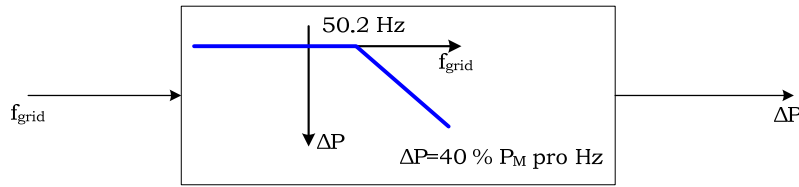
Οι συμβατικές μονάδες είναι υποχρεωμένες να παραμένουν σε λειτουργία παρά τυχόν διακυμάνσεις της συχνότητας με σκοπό να συμμετέχουν στην απαραίτητη ρύθμιση. Στο πλαίσιο προσέγγισης των αιολικών πάρκων ως σταθμών παραγωγής οι κώδικες περιλαμβάνουν ειδικές αναφορές σχετικά με τη συμβολή των αιολικών μονάδων στον έλεγχο συχνότητας και ενεργού ισχύος. Σε πρώτη φάση, τα αιολικά είναι υποχρεωμένα να παραμένουν σε λειτουργία κατά τη διάρκεια διακυμάνσεων της συχνότητας σε εύρος περίπου $47 \div 52$ Hz, καθ' ότι η αποσύνδεση τους σε περίοδο μειωμένης συχνότητας για παράδειγμα θα οδηγούσε σε περαιτέρω μείωση της συχνότητας επιβαρύνοντας ακόμα περισσότερο την αρχική καταπόνηση του συστήματος. Σε δεύτερη φάση πολλοί κώδικες απαιτούν ελεγχόμενη απόκριση ενεργού ισχύος από τα αιολικά πάρκα σύμφωνα με συγκεκριμένους όρους στις περιόδους μεταβολής της συχνότητας. Η συμμετοχή πλέον των αιολικών πάρκων τόσο στην πρωτεύουσα όσο και τη δευτερεύουσα ρύθμιση του συστήματος καθίσταται αναγκαία για την ασφαλή λειτουργία των ΣΗΕ σε περιβάλλον αυξημένης διείσδυσης. Το Σχήμα 3.4 δίνει μια καμπύλη μεταβολής ενεργού ισχύος αιολικών μονάδων ανάλογα με τη συχνότητα του συστήματος.



Σχήμα 3.4. Καμπύλη μεταβολής ενεργού ισχύος συναρτήσει της συχνότητας του συστήματος, Ιρλανδικός Κώδικας, [ΠΑΤ07]

Σύμφωνα με την ενδεικτική αυτή καμπύλη, σε συνθήκες κανονικής συχνότητας το αιολικό πάρκο παράγει λιγότερη ενεργό από τη διαθέσιμη με βάση τον άνεμο ενεργό ισχύ, ώστε να είναι σε θέση να προσφέρει έγχυση πρόσθετης ενεργού ισχύος σε περίπτωση υποσυχνότητας (λειτουργία αιολικού σε εφεδρεία ισχύος). Όταν η συχνότητα του συστήματος υπερβαίνει τη ζώνη κανονικής λειτουργίας (παραγωγή > κατανάλωση), το αιολικό πάρκο είναι υποχρεωμένο να περιορίσει την ενεργό ισχύ που προσφέρει στο δίκτυο ώστε να συμβάλλει στην αποκατάσταση του ισοζυγίου ενεργού ισχύος. Αντιθέτως σε χαμηλές συχνότητες (παραγωγή < κατανάλωση), η αιολική παραγωγή πρέπει να ισούται με τη μέγιστη διαθέσιμη. Τέτοιου είδους χαρακτηριστικές ελέγχου προσομοιάζουν στις καμπύλες στατισμών των συμβατικών μονάδων. Επιπλέον, οι αυξομειώσεις στην παραγωγή των αιολικών μονάδων σε ορισμένες περιπτώσεις έχουν όρια ρυθμού μεταβολής, ενώ ενδέχεται το αιολικό πάρκο να δέχεται εντολή από το σύστημα ελέγχου του διαχειριστή του δικτύου να τροποποιεί την παραγωγή του με βάση σήμα αναφοράς για την ενεργό ισχύ εξόδου του.

Χρησιμοποιώντας πάλι το Γερμανικό κώδικα σαν βάση μελέτης και προσέγγισης των ζητημάτων που αφορούν στις τεχνικές απαιτήσεις από τις αιολικές μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, δίνεται στο Σχήμα 3.5 η μεταβολή της ενεργού ισχύος εξόδου συναρτήσει της συχνότητας του συστήματος.



Σχήμα 3.5. Μεταβολή ενεργού ισχύος εξόδου αιολικού πάρκου συναρτήσει της συχνότητας του συστήματος, Γερμανικός κώδικας E. ON.

Οι παράμετροι του παραπάνω σχήματος ορίζονται ως εξής:

$$\Delta P = 20P_M \frac{50.2\text{Hz} - f_{grid}}{50\text{Hz}} \quad \text{όταν } 50.2\text{Hz} < f_{grid} < 51.5\text{Hz}$$

όπου

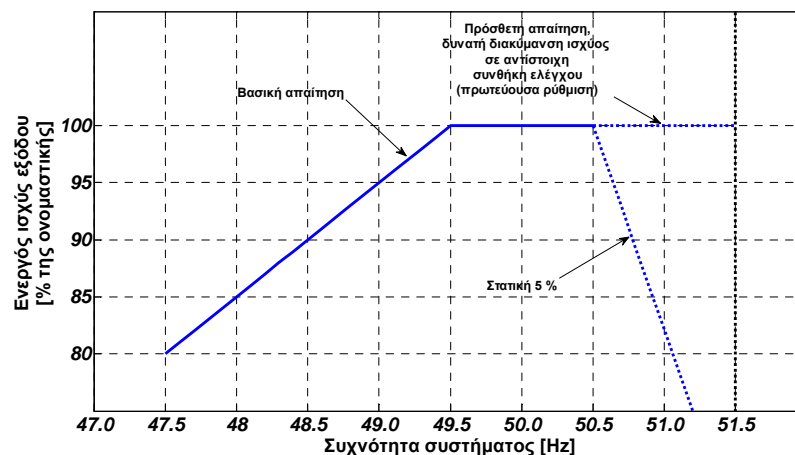
ΔP η μείωση ενεργού ισχύος εξόδου

P_M η διαθέσιμη ενεργός ισχύς

f_{grid} η συχνότητα δικτύου

Στο εύρος $47.5\text{Hz} < f_{grid} < 50.2\text{Hz}$ δεν υπεισέρχεται περιορισμός. Όταν $f_{grid} \leq 47.5\text{Hz}$ και $f_{grid} \geq 51.5\text{Hz}$ προβλέπεται η αποσύνδεση από το δίκτυο χωρίς χρονική καθυστέρηση.

Το εύρος συχνοτήτων στο οποίο επιβάλλεται η παραμονή σε λειτουργία για τα αιολικά πάρκα είναι $47.5\text{Hz} \div 51.5\text{Hz}$. Όταν η συχνότητα ξεπεράσει τα 50.2 Hz , η ενεργός ισχύς εξόδου κάθε ανεμογεννήτριας πρέπει να μειωθεί με ρυθμό 40% της διαθέσιμης ισχύος ανά Hz. Όταν η συχνότητα επανέλθει στα 50.05 Hz , επιτρέπεται η απόδοση της διαθέσιμης ισχύος. Προβλέπεται και εύρος ευαισθησίας μικρότερο από 10 mHz . Δεν απαιτείται από τους αιολικούς σταθμούς να διατηρούν εφεδρεία ισχύος ώστε να συμβάλλουν στην πρωτεύουσα ρύθμιση ισχύος, ούτε και ζητείται ικανότητα *black-start*². Σαν ξεχωριστή απαίτηση, συμπεριλαμβάνεται η επιβολή ορίου στην ενεργό ισχύ εξόδου, με ρυθμό τουλάχιστον 10% της ικανότητας διασύνδεσης ανά λεπτό. Στην περιοχή συχνοτήτων $47.5 - 49.5 \text{ Hz}$ επιτρέπεται η μείωση της ενεργού ισχύος έως το 80% της ονομαστικής. Το Σχήμα 3.6 απεικονίζει τις βασικές απαιτήσεις ενεργού ισχύος του Γερμανικού κώδικα συναρτήσει της συχνότητας για το σύνολο των σταθμών παραγωγής.



Σχήμα 3.6. Μεταβολή ενεργού ισχύος εξόδου σταθμού παραγωγής συναρτήσει της συχνότητας του συστήματος για το Γερμανικό κώδικα

² Με τον όρο *black-start* δηλώνεται η δυνατότητα εκκίνησης του συστήματος από κατάσταση σβέσης

3.4. Σύστημα ελέγχου και επικοινωνίας

Οι νέες απαιτήσεις που προκύπτουν στο περιβάλλον αυξημένης αιολικής διείσδυσης θέτουν και συγκεκριμένες προδιαγραφές σε σχέση με την το σύστημα επικοινωνίας του αιολικού πάρκου με το κεντρικό σύστημα ελέγχου του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας στο οποίο συνδέεται. Ο προγραμματισμός της παραγωγής και η διαχείριση των συστημάτων πρόβλεψης διενεργούνται μέσω των παραμέτρων που περιλαμβάνονται στα τηλεμετρικά δίκτυα SCADA, [AAB04]. Οι κώδικες δικτύου αναφέρονται σε συγκεκριμένες παραμέτρους πληροφορίας που απαιτούνται από τους διαχειριστές των δικτύων όπως τάση, ρεύμα, συχνότητα, ενεργός ισχύς, άεργος ισχύς, κατάσταση λειτουργίας, ταχύτητα ανέμου, δυνατότητα ρύθμισης, θερμοκρασία και πίεση περιβάλλοντος, εξωτερικές δυνατότητες ελέγχου, [SAY08].

3.5. Ζητήματα εναρμόνισης κωδίκων δικτύου

Η συνεχώς αυξανόμενη διείσδυση της αιολικής ενέργειας έχει δημιουργήσει και την ανάγκη εναρμόνισης των κωδικών δικτύων των διάφορων διαχειριστών, τουλάχιστον στα θέματα που αυτό καθίσταται δυνατό. Στο [EWE09] αναφέρονται ενδεικτικά ως τέτοια πεδία η συμπεριφορά του αιολικού πάρκου σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας, η απόκριση κατά τη διάρκεια και αμέσως μετά τις διαταραχές στο δίκτυο, η απόκριση συχνότητας – έλεγχος ενεργού ισχύος, ο έλεγχος τάσης-αέργου ισχύος και οι απαραίτητες δοκιμές. Μια εναρμόνιση των κωδικών σε διεθνές επίπεδο έχει ως στόχο τον ορισμό αρτιότερων κανονισμών, την υποστήριξη διεθνών προτύπων για τα προϊόντα και τις υπηρεσίες της αιολικής βιομηχανίας και τη διάδραση μεταξύ των επιμέρους διαχειριστών σε θέματα λειτουργίας των δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας. Αν και η τάση προς την κατεύθυνση αυτή είναι σαφής, τα ειδικά χαρακτηριστικά των δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας, ο τρόπος ανάπτυξης τους αλλά και τα άνισα επίπεδα διείσδυσης της αιολικής ενέργειας καθορίζουν ακόμα τις έντονες, σε μερικές περιπτώσεις, διαφοροποιήσεις μεταξύ κωδικών διαφορετικών εθνικών δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας.

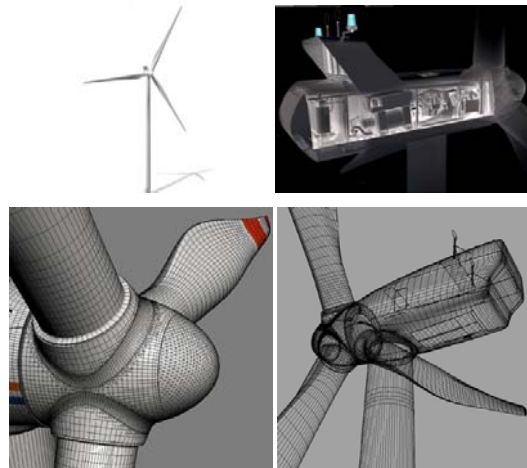
3.6. Συμπεράσματα

Στο παρόν Κεφάλαιο παρουσιάστηκε το πλαίσιο τεχνικών απαιτήσεων που ορίζεται από τους κώδικες διαχείρισης δικτύων σε χώρες με αυξημένη διείσδυση αιολικής ενέργειας. Σημειώνεται ότι υπάρχουν κάποιες επιπλέον ρυθμίσεις όσον αφορά τα αιολικά πάρκα, ενώ οι λεπτομέρειες και τα συγκεκριμένα δεδομένα συνεχώς αναθεωρούνται σε συνάρτηση με την εξέλιξη στον τομέα της αιολικής τεχνολογίας και τη διείσδυση στα δίκτυα. Αν και παρατηρείται σημαντική ποικιλία στους επιμέρους κώδικες διάφορων διαχειριστών, ο στόχος της παρούσας ανάλυσης ήταν η σύνοψη βασικών ρυθμίσεων, από τη στιγμή που δεν αποτελεί αντικείμενο της εργασίας η μελέτη των συγκεκριμένων χαρακτηριστικών κάποιου εκ των διαθέσιμων κωδικών.

Ανάμεσα στις απαιτήσεις που περιλαμβάνουν οι κώδικες δικτύου, η ανοχή σε βυθίσεις τάσης και ο έλεγχος τάσης κυρίως κατά τη διάρκεια σφαλμάτων στο δίκτυο που επιδρούν στο ισοζύγιο αέργου ισχύος χρήζουν συστηματικής έρευνας σε συνθήκες αυξανόμενης αιολικής διείσδυσης στα ΣΗΕ. Επιπλέον η λειτουργία των Α/Γ κατά τη διάρκεια έντονων μεταβολών της συχνότητας του συστήματος καθώς και η δυνατότητα τους για συμβολή στον έλεγχο της ενεργού ισχύος εξόδου τους κατά τη διάρκεια διαταραχών στο ισοζύγιο ενεργού ισχύος περιλαμβάνεται στους περισσότερους κώδικες δικτύου. Στην παρούσα διατριβή μελετάται το σύνολο των βασικών ρυθμίσεων που παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 3, κυρίως ως προς τη δυνατότητα των Α/Γ μεταβλητών στροφών να ικανοποιήσουν τις απαιτήσεις που τίθενται από τους διαχειριστές των δικτύων στα οποία συνδέονται.

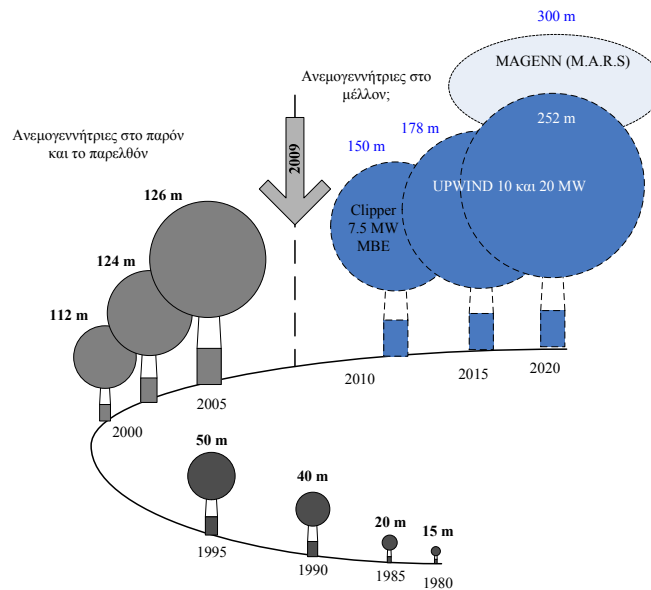
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 – Τύποι Ανεμογεννητριών

Μια ιστορική ανασκόπηση της εξέλιξης της αιολικής τεχνολογίας δεν περιλαμβάνεται εδώ, αλλά ενδιαφέροντα στοιχεία για τον τρόπο ανάπτυξης της κατά τη διάρκεια των τελευταίων αιώνων, πριν ακόμα χρησιμοποιηθεί στον τομέα της ηλεκτροπαραγωγής, μπορεί να αναζητηθεί στο [HIL96]. Η βασική αρχιτεκτονική της σύγχρονης ανεμογεννήτριας, παρά τις συνεχείς βελτιώσεις, έχει παραμείνει βασικά η ίδια από τις αρχές της δεκαετίας του 1980, οπότε και θεωρείται η εποχή της εμπορευματοποίησης της αιολικής τεχνολογίας ηλεκτροπαραγωγής. Η πλειοψηφία των εγκαταστημένων ανεμογεννητριών έχουν προσήνεμο δρομέα (*upwind rotor*) με τρία πτερύγια και ενεργό σύστημα οριζόντιας στροφικής κίνησης (*active yaw system*) για διασφάλιση της ευθυγράμμισης με την κατεύθυνση του ανέμου. Τα είδη των ανεμογεννητριών που εμφανίζονται σήμερα στα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας μπορούν να κατανοηθούν με βάση το εύρος ταχύτητας (σταθερών στροφών έναντι μεταβλητών) και τον έλεγχο ισχύος (έλεγχος γωνίας βήματος έναντι αεροδυναμικής απώλειας στήριξης πτερυγίων – *pitch control vs. stall control*). Απεικονίσεις μιας τυπικής σύγχρονης ανεμογεννήτριας δίνονται στο Σχήμα 4.1.



Σχήμα 4.1. Μέρη τυπικής ανεμογεννήτριας τριών πτερυγίων, [VES09]

Μια γενική τάση στην αιολική τεχνολογία μέχρι τις αρχές του 21^{ου} αιώνα, ήταν η εκθετικού τύπου αύξηση του μεγέθους των ανεμογεννητριών. Εν τούτοις από το 2005 έως και το 2009, αν και το ενδιαφέρον εξακολουθεί να επικεντρώνεται σε ολοένα μεγαλύτερες ανεμογεννήτριες κυρίως λόγω της ανάπτυξης στην αγορά παράκτιων αιολικών πάρκων, έχει παρατηρηθεί ιδιαίτερα αυξημένη συχνότητα εγκατάστασης ανεμογεννητριών εύρους 1.5 MW έως 3 MW σε χερσαία αιολικά πάρκα, ενώ από το 2004 μέχρι και το 2009 δεν έχει εμφανιστεί μεγαλύτερη διάμετρος ανεμογεννήτριας από τα 126 m του μοντέλου *Enercon E-126*. Η εκθετική αύξηση που χαρακτήρισε την ανάπτυξη του μεγέθους από τις αρχές της δεκαετίας του 1980 έως και το 2004, καθώς και οι τεχνολογικές τάσεις για το άμεσο μέλλον δίνονται στο Σχήμα 4.2, [EWE09]. Το ενδιαφέρον για ανεμογεννήτριες που φτάνουν τα 10 και 20 MW, κυρίως για παράκτιες εφαρμογές, αντικατοπτρίζεται στο ευρωπαϊκό ερευνητικό πρόγραμμα *UpWind*, στο πλαίσιο του οποίου διεξάχθηκε και μέρος της παρούσας εργασίας, [UPW09]. Το πρόγραμμα αυτό καλύπτει ένα ευρύ φάσμα θεμάτων που επαφίονται της αιολικής ενέργειας και στοχεύει στην αύξηση κλίμακας στο μέγεθος της ανεμογεννήτριας εκτιμώντας τα τεχνικά και οικονομικά στοιχεία μια τέτοιας εξέλιξης.



Σχήμα 4.2. Αύξηση στο μέγεθος εμπορικών ανεμογεννητριών

Τα σχεδιαστικά κριτήρια της τεχνολογίας ανεμογεννητριών έχουν αλλάξει μέσα στις δεκαετίες 1990 – 2000, περνώντας από την περιοχή της συμβατικής στην περιοχή της βέλτιστης λειτουργίας. Εκτός από την αύξηση στο μέγεθος των ανεμογεννητριών οι τεχνολογικές διαμορφώσεις έχουν εξελιχθεί από το στάδιο των σταθερών στροφών, ελέγχου *stall* με κιβώτιο ταχυτήτων σε μεταβλητών στροφών, με έλεγχο γωνίας βήματος πτερυγίων με ή χωρίς κιβώτιο ταχυτήτων. Παρά τις διαφοροποιήσεις που υπεισέρχονται στους διάφορους τύπους ανεμογεννητριών αλλά και κατά την εξέλιξη κάθε τύπου, μπορούν να επισημανθούν τα παρακάτω συστατικά μέρη μιας τυπικής σύγχρονης ανεμογεννήτριας, [PIE04]:

Μηχανικά και αεροδυναμικά μέρη	Ηλεκτρικά μέρη	Σύστημα ελέγχου
Δρομέας ανεμογεννήτριας		Σύστημα ελέγχου μετατροπέα
Πύργος στήριξης	Τύποι γεννήτριας:	Σύστημα ελέγχου γωνίας βήματος πτερυγίων
Κιβώτιο ταχυτήτων	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ασύγχρονη τύπου κλωβού ▪ Ασύγχρονη τυλιγμένου δρομέα ▪ Ασύγχρονη τυλιγμένου δρομέα διπλής τροφοδότησης ▪ Σύγχρονη μονίμων πόλων ▪ Σύγχρονη ηλεκτρικής διέγερσης 	Γενικό σύστημα ελέγχου
Μηχανισμός αλλαγής γωνίας βήματος πτερυγίων		
Άξονας μετάδοσης κίνησης		
Πέδηση έκτακτης ανάγκης	Ηλεκτρονικά ισχύος	
	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Σύστημα εκκίνησης ▪ Συστοιχία πυκνωτών ▪ Στατός ανισταθμιστής αέργου ισχύος ▪ Μετατροπέας συχνότητας 	

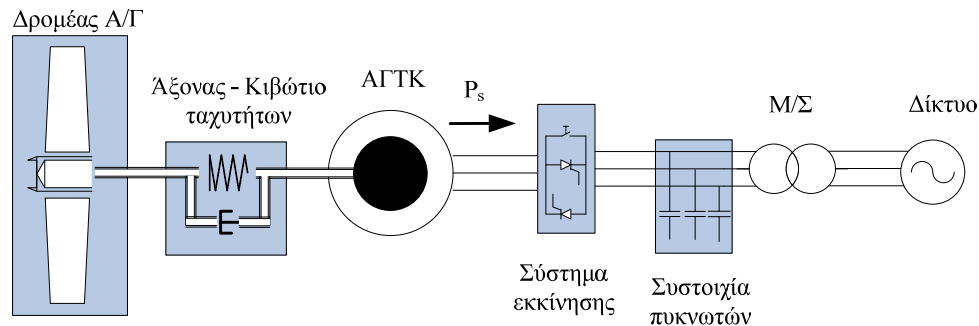
	Σύστημα προστασίας Μετασχηματιστής Αγωγοί	
--	---	--

Πίνακας 4.1. Υποσυστήματα και βασικές συνιστώσες ανεμογεννήτριας

Η πλειοψηφία των εγκαταστημένων ανεμογεννητριών εμφανίζεται με τέσσερις διαφορετικές τεχνολογικές διαμορφώσεις, οι οποίες παρουσιάζονται συνοπτικά στον Πίνακα 4.2 και αναλύονται σε αυτήν την ενότητα.

4.1. Ανεμογεννήτρια σταθερών στροφών με ασύγχρονη γεννήτρια τύπου κλωβού – Τύπου A

Το Σχήμα 4.3 απεικονίζει έναν ευρέως χρησιμοποιημένο και πλέον συμβατικό τύπο ανεμογεννήτριας. Ένας δρομέας με *stall* ή *active stall* έλεγχο αεροδυναμικής ισχύος συνδέεται μέσω κιβωτίου ταχυτήτων σε ασύγχρονη γεννήτρια τύπου κλωβού (ΑΓΤΚ), η οποία συνδέεται μέσω μετασχηματιστή (Μ/Σ) στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Μια συστοιχία πυκνωτών παρέχει την αναγκαία αντιστάθμιση αέργου ισχύος και η βελτιωμένη συμβατότητα με το δίκτυο επιτυγχάνεται μέσω ενός εκκινήτη ομαλής εκκίνησης (*softstarter*).



Σχήμα 4.3. Ανεμογεννήτρια με ασύγχρονη γεννήτρια τύπου κλωβού, κιβώτιο ταχυτήτων και «απ' ευθείας» σύνδεση στο δίκτυο – Τύπος A

Η γεννήτρια, όντας απ' ευθείας και χωρίς τη μεσολάβηση μετατροπέα συνδεδεμένη στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας, λειτουργεί σε σταθερές στροφές. Η ολίσθηση βέβαια επιτρέπει μικρές διακυμάνσεις στην ταχύτητα που ομαλοποιούν τη χαρακτηριστική ροπής-ταχύτητας. Η απόδοση της ανεμογεννήτριας μεγιστοποιείται σε συγκεκριμένη ταχύτητα ανέμου. Συχνά, με στόχο την αύξηση της ενεργειακής απόδοσης, η γεννήτρια είναι εφοδιασμένη με δύο ομάδες τυλιγμάτων: το ένα χρησιμοποιείται κατά τις χαμηλές ταχύτητες ανέμου (συνήθως 8 ζεύγη πόλων) και το άλλο για μέτριες και υψηλές ταχύτητες ανέμου (4 ή 6 ζεύγη πόλων).

Η συγκεκριμένη διαμόρφωση ανεμογεννήτριας διακρίνεται για την απλή σχεδίαση, το χαμηλό κόστος, την αξιοπιστία λειτουργίας και την ανθεκτικότητα ενώ η ελεγχιμότητά της είναι εμφανώς περιορισμένη. Εξ' αιτίας του τελευταίου, οι διακυμάνσεις στην ταχύτητα του ανέμου μεταφράζονται σε διακυμάνσεις της μηχανικής ροπής και περαιτέρω της ηλεκτρικής ισχύος που αποδίδεται στο δίκτυο, [HAN07]. Αυτές ενδέχεται να προκαλέσουν αντίστοιχες μεταβολές στην τάση στο σημείο σύνδεσης στο δίκτυο σε περίπτωση ασθενούς δικτύου. Εξαιτίας αυτών των διακυμάνσεων, η απορρόφηση αέργου ισχύος από την ασύγχρονη γεννήτρια είναι κυμαινόμενη, αυξάνοντας τις απώλειες γραμμών και τις μεταβολές στην τάση. Επομένως, η διαμόρφωση της ανεμογεννήτριας σταθερών στροφών εμφανίζει τα εξής βασικά μειονεκτήματα, [CIG07]:

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

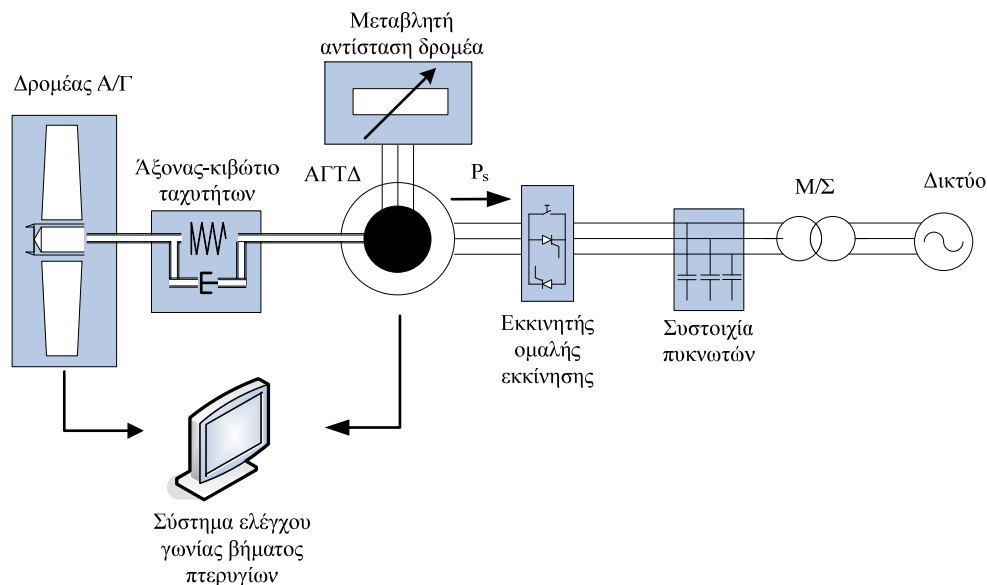
- Απαιτείται ενισχυμένη στήριξη των μηχανικών μερών της ανεμογεννήτριας για την αποφυγή καταπονήσεων σε περίπτωση ρυπών ανέμου

Ο αεροδυναμικός έλεγχος γίνεται με χρήση του *stall* ή *active stall* ελέγχου. Συνηθίζεται σε ανεμογεννήτριες με ονομαστική ισχύ μικρότερη ή περίπου ίση με 1 MW να ακολουθείται η στρατηγική *stall*, ενώ σε μεγαλύτερες η λογική του *active stall* είναι προτιμητέα, καθώς τα υψηλά επίπεδα ισχύος απαιτούν ρύθμιση της γωνίας βήματος πτερυγίων για την αποφυγή εκταμένης καταπόνησης των μηχανικών υποσυστημάτων της ανεμογεννήτριας.

Σύμφωνα με τον έλεγχο *stall* (ή αλλιώς *passive stall*), τα πτερύγια της ανεμογεννήτριας είναι στερεωμένα στην πλύμη του δρομέα υπό συγκεκριμένη γωνία, ενώ είναι αεροδυναμικά σχεδιασμένα με τέτοιο τρόπο ώστε όταν αυξάνεται η ταχύτητα του ανέμου, το σχήμα του πτερυγίου σταδιακά ωθεί στην υποχώρηση απέναντι στην τύρβη και τελικά στην απόρριψη της στήριξης (*stall effect*). Στην περίπτωση του *active stall* ελέγχου, χρησιμοποιείται επιπλέον ένας μηχανισμός ρύθμισης της γωνίας βήματος των πτερυγίων. Σε χαμηλές ταχύτητες ανέμου, ο έλεγχος γωνίας βήματος γίνεται με παρόμοιο τρόπο, όπως και στον κλασικό έλεγχο *pitch*. Περισσότερες λεπτομέρειες για τους τρόπους αεροδυναμικού ελέγχου, *stall*, *active stall* και *pitch control*, δίνονται στην ενότητα 5.2.

4.2. Ανεμογεννήτρια περιορισμένης λειτουργίας μεταβλητών στροφών με ασύγχρονη γεννήτρια τυλιγμένου δρομέα μεταβλητής αντίστασης δρομέα – Τύπου B

Ο Τύπος B εισάχθηκε στην αγορά από τον Δανέζικο κατασκευαστή ανεμογεννητριών *Vestas Wind Systems* στα μέσα της δεκαετίας του 1990 με την ονομασία *OptiSlip*, [VES09]. Η διαμόρφωση της ανεμογεννήτριας Τύπου B είναι βασικά η ίδια με αυτήν στον Τύπο A, βλέπε Σχήμα 4.4. Στην προκειμένη περίπτωση χρησιμοποιείται μια ασύγχρονη γεννήτρια τυλιγμένου δρομέα (ΑΓΤΔ) με εξωτερική ρυθμιζόμενη αντίσταση δρομέα, που επιτρέπει την περιορισμένη λειτουργία μεταβλητών στροφών σε εύρος περίπου 0-10% πάνω από τη σύγχρονη ταχύτητα. Η ολίσθηση δηλαδή της γεννήτριας λαμβάνει μεγαλύτερες τιμές επιφέροντας όμως αυξημένες ωμικές απώλειες στις πρόσθετες αντιστάσεις. Η ρύθμιση των εξωτερικών αντιστάσεων γίνεται είτε μέσω ενός οπτικά ελεγχόμενου μετατροπέα που είναι τοποθετημένος στο δρομέα της γεννήτριας είτε μέσω παθητικών στοιχείων, [WAL98]. Αυτή η οπτική σύνδεση αναιρεί την ανάγκη για ακριβή δαχτυλίδια ολίσθησης (*slip rings*) που απαιτούν συντήρηση. Οι απαιτήσεις σε άεργο ισχύ επίσης ικανοποιούνται από τη συστοιχία πυκνωτών αντιστάθμισης στον τερματικό ζυγό. Σε αντίθεση με τον Τύπο A παραπάνω, εφαρμόζεται συνήθως ο έλεγχος γωνίας βήματος πτερυγίων για τον περιορισμό της αεροδυναμικής ισχύος σε ταχύτητες ανέμου μεγαλύτερες της ονομαστικής.



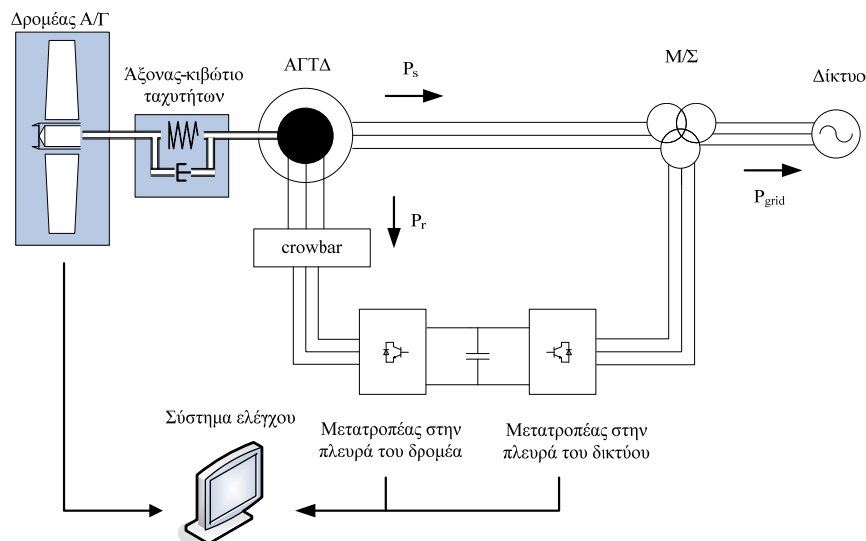
Σχήμα 4.4. Ανεμογεννήτρια με ασύγχρονη γεννήτρια τυλιγμένου δρομέα και μεταβλητή αντίσταση δρομέα – Τύπος B

4.3. Ανεμογεννήτρια μεταβλητών στροφών με ασύγχρονη γεννήτρια τυλιγμένου δρομέα διπλής τροφοδότησης και σύστημα μετατροπών ισχύος συνδεδεμένων στο δρομέα – Τύπου Γ

Δρομέας με έλεγχο γωνίας βήματος πτερυγίων, συνδεδεμένος μέσω κιβωτίου ταχυτήτων σε ασύγχρονη γεννήτρια τυλιγμένου δρομέα (ΑΓΤΔ) με μετατροπέα συχνότητας μερικής ισχύος αποτελεί τη βασική διαμόρφωση της ανεμογεννήτριας μεταβλητών στροφών Τύπου Γ. Ο μετατροπέας, μεταφέροντας μόνο την ισχύ του δρομέα προς το δίκτυο, σχεδιάζεται με ονομαστική ισχύ περίπου το 30% της ονομαστικής ισχύος της γεννήτριας και συνδέεται στο κύκλωμα του δρομέα, επιτρέποντας την αντιστάθμιση και έλεγχο της αέργου ισχύος καθώς και την ομαλή διασύνδεση στο δίκτυο. Η ανεμογεννήτρια έχει εύρος ταχύτητας $\pm 30\%$ γύρω από τη σύγχρονη ταχύτητα ενώ το σχετικά περιορισμένο μέγεθος του μετατροπέα ισχύος καθιστά τον τύπο αυτό οικονομικά ιδιαίτερα ανταγωνιστικό και τον πλέον διαδεδομένο σήμερα στα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας, [HAN07].

Το ευρύ φάσμα ταχυτήτων ανέμου στο οποίο η ενεργειακή απόδοση της ανεμογεννήτριας μεγιστοποιείται, αυξάνει σημαντικά την ενεργειακή απόδοση της διάταξης, γεγονός που αποτελεί και το βασικό πλεονέκτημα σε σχέση με τους Τύπους Α και Β, που παρουσιάστηκαν παραπάνω. Η ροπή της γεννήτριας παραμένει σχεδόν σταθερή σε αντίθεση με μια ανεμογεννήτρια σταθερών στροφών (Τύπος Α), με τρόπο που οι διακυμάνσεις στην ταχύτητα της γεννήτριας να απορροφάνε τις ταχείες μεταβολές στην ταχύτητα του ανέμου. Η δυνατότητα αυτή προσφέρεται χάρη στη λειτουργία του μετατροπέα ισχύος μειώνοντας τις μηχανικές καταπονήσεις σε μέρη της ανεμογεννήτριας. Η λειτουργία σε χαμηλές ταχύτητες της γεννήτριας και του δρομέα κατά τη διάρκεια χαμηλών ταχυτήτων ανέμου μειώνει τον ακουστικό θόρυβο που παράγεται από τα στρεφόμενα πτερύγια, ο οποίος σε μεγέθη ανεμογεννήτριας σαν τα σημερινά αποτελεί σημαντική παράμετρο σχεδίασης, [HEI98].

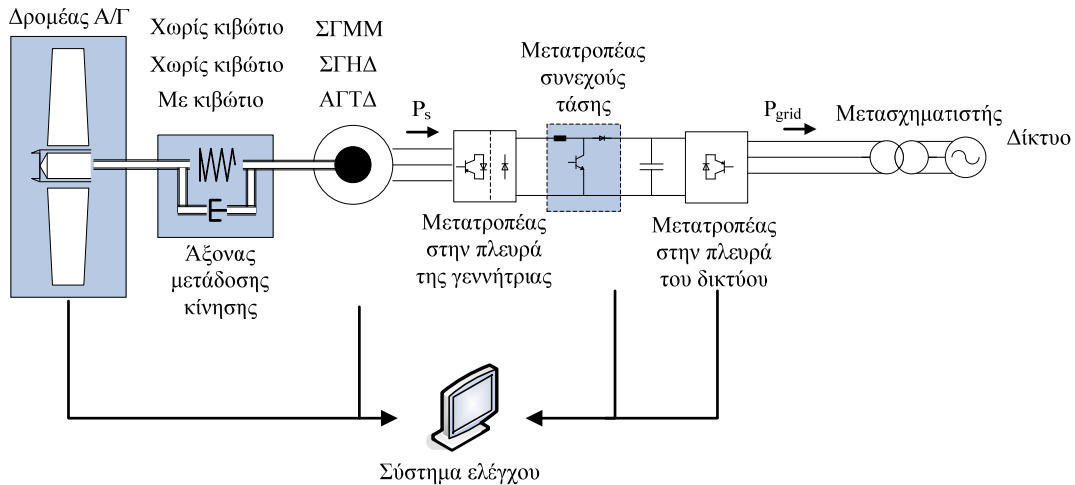
Το Σχήμα 4.5 απεικονίζει τη διαμόρφωση Τύπου Γ. Οι ανεμογεννήτριες Τύπου Γ έχουν εξοπλιστεί πλέον με πλήθος λειτουργιών που επιτρέπουν τη συμβολή τους στη ρύθμιση παραμέτρων του δικτύου, όπως απαιτείται από τους διαχειριστές του δικτύου σχετικά με τον έλεγχο ενεργού και αέργου ισχύος, την ταχεία απόκριση σε μεταβατικά και δυναμικά φαινόμενα των δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας, στα οποία συνδέονται, συμβολή στην εξασφάλιση της ευστάθειας των ΣΗΕ, και βελτιωμένη ποιότητα ισχύος (μειωμένες διακυμάνσεις τάσεις σύντομης και μακράς περιόδου, εξάλειψη αρμονικών χαμηλής τάξης και μειωμένα ρεύματα εκκίνησης και βραχυκύκλωσης). Τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του Τύπου Γ και οι δυνατότητες ικανοποίησης των τεχνικών απαιτήσεων, όπως αυτές τίθενται από το διαχειριστή δικτύου, προσεγγίζονται σε επόμενη ενότητα της παρούσας εργασίας.



Σχήμα 4.5. Ασύγχρονη γεννήτρια διπλής τροφοδότησης με μετατροπέα συχνότητας μερικής ισχύος – Τύπος Γ

Παρ' όλα αυτά, η χρήση δαχτυλιδιών σύνδεσης (*slip rings*) στο δρομέα της γεννήτριας για τη σύνδεση του μετατροπέα, η ανάγκη για σύστημα προστασίας κατά τη διάρκεια σφαλμάτων στο δίκτυο, θέματα αξιοπιστίας και αυξημένου κόστους που προκύπτουν από τη χρήση των μετατροπέων ισχύος αποτελούν τα βασικά μειονεκτήματα της συγκεκριμένης διαμόρφωσης.

4.4. Ανεμογεννήτρια μεταβλητών στροφών με πλήρη μετατροπέα ισχύος – Τύπου Δ



Σχήμα 4.6. Ανεμογεννήτρια μεταβλητών στροφών με πλήρη μετατροπέα ισχύος – Τύπος Δ

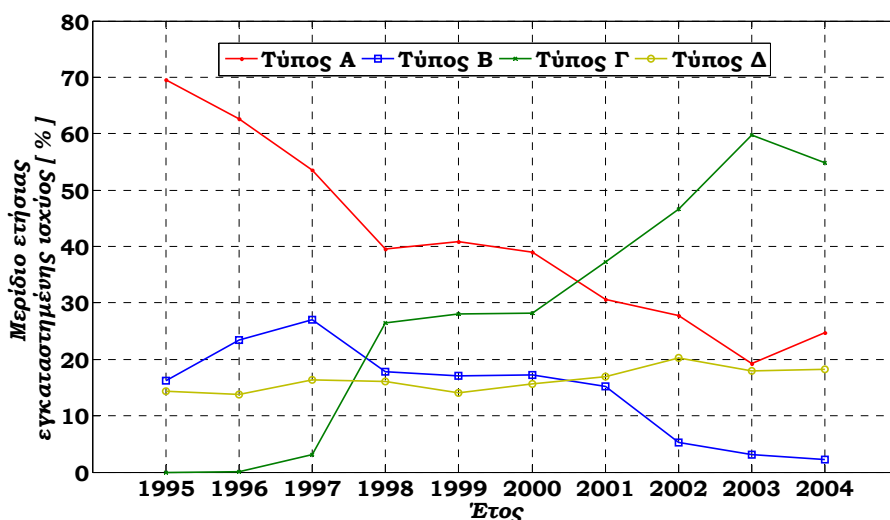
Στη διαμόρφωση αυτή ανεμογεννήτριας μεταβλητών στροφών ο δρομέας με έλεγχο γωνίας βήματος περυγίων συνδέεται με ασύγχρονη ή σύγχρονη γεννήτρια μέσω κιβωτίου ταχυτήτων ή όχι αντίστοιχα και πλήρη μετατροπέα ισχύος που συνδέεται στο δίκτυο. Ο πλήρης μετατροπέας, που αναλαμβάνει τον έλεγχο της αέργου ισχύος και την ομαλή διασύνδεση στο δίκτυο, επιτρέπει λειτουργία μεταβλητών στροφών σε όλο το εύρος ταχύτητας της γεννήτριας.

Οι διαφοροποιήσεις της διαμόρφωσης αυτής καθορίζονται από το είδος της γεννήτριας που χρησιμοποιείται. Στην περίπτωση ασύγχρονης γεννήτριας τυλιγμένου δρομέα (ΑΓΤΔ) παρεμβάλλεται κιβώτιο ταχυτήτων στον άξονα μετάδοσης της κίνησης από το δρομέα στη γεννήτρια. Στη διαμόρφωση που χρησιμοποιεί πολυπολική σύγχρονη γεννήτρια μονίμων μαγνητών (ΣΓΜΜ) είτε ηλεκτρικής διέγερσης (ΣΓΗΔ), το κιβώτιο μπορεί να παραλειφθεί καθώς η γεννήτρια στρέφεται σε χαμηλές στροφές όπως και ο δρομέας της ανεμογεννήτριας. Ο μετατροπέας συνεχούς τάσης που εμφανίζεται στο Σχήμα 4.6 αναφέρεται στην περίπτωση της ΣΓΗΔ, όπου η γεννήτρια συνδέεται σε ανορθωτή διόδων. Στις άλλες δύο περιπτώσεις – ΑΓΤΔ και ΣΓΜΜ – η γεννήτρια συνδέεται σε πλήρη μετατροπέα διακοπτικών στοιχείων IGBTs.

Τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα του συγκεκριμένου τύπου ανεμογεννήτριας είναι σε μεγάλο βαθμό όμοια με τα όσα αναφέρονται στον Τύπο Γ παραπάνω και σχετίζονται με τη χρήση μετατροπέα ισχύος. Η λειτουργία μεταβλητών στροφών στον Τύπο Δ είναι προφανώς εκτεταμένη σε σύγκριση με τον Τύπο Γ, αφού δεν υπάρχει κανενός είδους σύνδεση της γεννήτριας με τη συχνότητα του συστήματος. Η προστασία επίσης της γεννήτριας στον Τύπο Δ από μεταβατικά φαινόμενα στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας είναι εγγενώς αυξημένη λόγω παρεμβολής του μετατροπέα, σε αντίθεση με τη γεννήτρια διπλής τροφοδότησης στον Τύπο Γ που είναι έκθετη σε μεταβατικά φαινόμενα λόγω της απ' ευθείας σύνδεσης στο δίκτυο. Ο Τύπος Δ παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα σε σχέση με τον Τύπο Γ ως προς την ενεργειακή απόδοση, αξιοπιστία και θέματα συντήρησης. Παρ' όλα αυτά όμως, ο Τύπος Γ, τουλάχιστον μέχρι το 2004, καταλάμβανε το μεγαλύτερο μερίδιο της αγοράς ανεμογεννητριών (περίπου 55%) ενώ το μερίδιο του Τύπου Δ ήταν περίπου 20%, [HAN07]. Τα συγκριτικά πλεονεκτήματα πάντως του Τύπου Δ αναμένεται να εντατικοποιήσουν τη χρήση του στην αγορά αιολικής ενέργειας στο άμεσο μέλλον, [ISE07].

Στην παρούσα εργασία αντικείμενο μελέτης είναι η διαμόρφωση *Τύπου Δ* που χρησιμοποιεί σύγχρονη γεννήτρια (μονίμων μαγνητών ή ηλεκτρικής διέγερσης) και προτείνονται νέοι τρόποι ελέγχου. Οι δυνατότητες επίσης της συγκεκριμένης διαμόρφωσης ως προς την ικανοποίηση τεχνικών απαιτήσεων, όπως ανοχή σε βυθίσεις τάσης, έλεγχο συχνότητας και τάσης, αναλύονται στο πλαίσιο της εργασίας.

Από τα μέσα της δεκαετίας του 1990 μέχρι σήμερα, η επικρατούσα διαμόρφωση ανεμογεννήτριας στην παγκόσμια αγορά αιολικής ενέργειας έχει αλλάξει. Στο [HAN07] περιγράφεται αναλυτικά η εξέλιξη της διείσδυσης των ανωτέρω τεσσάρων τύπων για τη δεκαετία 1995-2004, από όπου προκύπτει και το Σχήμα 4.7, όπου δίνεται το ετήσιο επί τοις εκατό ποσοστό της εγκατασταμένης ισχύος ανεμογεννητριών που εγκαταστάθηκαν παγκοσμίως ανάλογα με τον τύπο της ανεμογεννήτριας που χρησιμοποιήθηκε.



Σχήμα 4.7. Ετήσια παγκόσμια εγκαταστημένη ισχύς ανεμογεννητριών για τα έτη 1995-2004 ανά τύπο ανεμογεννήτριας, [HAN07]

Από τα δεδομένα του Σχήματος 4.7, είναι προφανές ότι η μεγαλύτερη αύξηση παρατηρείται στις ανεμογεννήτριες *Τύπου Γ*, οι οποίες από το 2001 και ύστερα αποτελούν τον πιο διαδεδομένο τύπο ανεμογεννήτριας, ενώ το 1994 η συμμετοχή τους στο ισοζύγιο εγκαταστημένων ανεμογεννητριών ήταν μηδενική. Σχετικά σταθερή είναι η εξέλιξη όσον αφορά τις ανεμογεννήτριες *Τύπου Δ*. Η μείωση της χρήσης είναι χαρακτηριστική για τον *Τύπο Α*, ο οποίος το 1994 κατείχε το 70% της παγκόσμιας εγκαταστημένης ισχύος. Αντίστοιχη, αν και όχι τόσο μεγάλη, είναι και η μείωση στη χρήση του *Τύπου Β*, ο οποίος δεν ξεπέρασε ποτέ το 28% του συνόλου, ενώ το 2004 η συμμετοχή του κινείται στο 2.2%.

Αντίστοιχα στον Πίνακα 4.2 δίνονται οι κατασκευάστριες εταιρείες ανεμογεννητριών με το μεγαλύτερο μερίδιο στην αγορά αιολικής ενέργειας για το έτος 2007 και κάποια βασικά στοιχεία των μοντέλων ανεμογεννητριών που χρησιμοποιούν η κάθε μία, [EWE09].

	Μερίδιο (%)	Μοντέλο	Κιβώτιο ταχυτήτων	Ονομαστική ισχύς (kW)	Διάμετρος (m)	Είδος γεννήτριας
<i>Vestas</i>	22.8	V90	✓	3000	90	Ασύγχρονη
<i>GE Energy</i>	16.6	2.5XL	✓	2500	100	Σύγχρονη γεννήτρια μονίμων μαγνητών και πλήρη μετατροπέα
<i>Gamesa</i>	15.4	G90	✓	2000	90	Ασύγχρονη γεννήτρια διπλής τροφοδότησης
<i>Enercon</i>	14	E82	--	2000	82	Σύγχρονη
<i>Suzlon</i>	10.5	S88	✓	2100	88	Ασύγχρονη
<i>Siemens</i>	7.1	3.6 SWT	✓	3600	107	Ασύγχρονη
<i>Acciona</i>	4.4	AW-119/3000	✓	3000	116	Ασύγχρονη γεννήτρια διπλής τροφοδότησης
<i>Goldwind</i>	4.2	Repower 750	✓	750	48	Ασύγχρονη
<i>Nordex</i>	3.4	N100	✓	2500	99.8	Ασύγχρονη γεννήτρια διπλής τροφοδότησης
<i>Sinovel</i>	3.4	1500 (Windtec)	✓	1500	70	

Πίνακας 4.2. Σχεδιαστικές επιλογές βασικών κατασκευαστών, [EWE09]

Συνοψίζοντας τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των παραπάνω διαδεδομένων τύπων ανεμογεννητριών ως προς τις βασικές δομικές αλλά και λειτουργικές διαμορφώσεις προκύπτει ο Πίνακας 4.3.

	Τύπος Α	Τύπος Β	Τύπος Γ	Τύπος Δ
Έλεγχος ταχύτητας	Σταθερών στροφών	Μεταβλητών στροφών		
Εύρος ταχύτητας	Ονομαστική ταχύτητα ~ 2% ολίσθηση	Ονομαστική ταχύτητα ~ 10% ολίσθηση	Ονομαστική ταχύτητα ~ +/- 30% ολίσθηση	Ονομαστική ταχύτητα ~ +/-100% ολίσθηση
Έλεγχος αεροδυναμικής ισχύος	Παθητικός η ενεργός έλεγχος απώλειας στήριξης (Stall/Active Stall)	Έλεγχος γωνίας βήματος πτερυγίων (pitch control)		
Είδος γεννήτριας	Ασύγχρονη γεννήτρια τύπου κλωβού	Ασύγχρονη γεννήτρια τυλιγμένου δρομέα μεταβλητής εξωτερικής αντίστασης δρομέα	Ασύγχρονη γεννήτρια τυλιγμένου δρομέα διπλής τροφοδότησης	Ασύγχρονη γεννήτρια τυλιγμένου δρομέα
Αξονας μετάδοσης κίνησης	✓	✓	✓	✓
Σύνδεση στο δίκτυο	Απ' ευθείας	Απ' ευθείας	Μετατροπέας συχνότητας μερικής ισχύος	Πλήρης μετατροπέας
Έλεγχος ενεργού και αέργου ισχύος	-	-	✓	✓

Πίνακας 4.3. Βασικές δομικές και λειτουργικές παράμετροι των διαμορφώσεων ανεμογεννητριών

4.5. Συμπεράσματα

Στο παρόν Κεφάλαιο έγινε μια γενική παρουσίαση των εμπορικών τύπων Α/Γ με έμφαση στα διαφορετικά τεχνικά χαρακτηριστικά τους. Μεταξύ των βασικών τύπων που εγκαθίστανται στα ΣΗΕ σήμερα, η Α/Γ σταθερών στροφών με ασύγχρονη γεννήτρια (Τύπος Α) είναι ο πλέον απλός τύπος από άποψη δυνατοτήτων ελέγχου. Μια τροποποίηση αυτού είναι ο Τύπος Β, όπου επιτυγχάνεται μεγαλύτερη ολίσθηση ταχύτητας δρομέα χάρη στη σύνδεση εξωτερικών αντιστάσεων στο κύκλωμα του δρομέα. Ενώ οι δύο αυτοί τύποι χρησιμοποιήθηκαν εκτεταμένα κατά το πρώτο διάστημα ενσωμάτωσης αιολικής ενέργειας στα δίκτυα, τις τελευταίες δύο δεκαετίες οι Α/Γ μεταβλητών στροφών (Τύπου Γ και Δ) αυξάνουν σημαντικά το ποσοστό χρήσης τους, κυρίως λόγω των αυξημένων δυνατοτήτων ρύθμισης, που οφείλονται στη χρήση ηλεκτρονικών μετατροπών ισχύος. Η Α/Γ με ασύγχρονη γεννήτρια διπλής τροφοδότησης και μετατροπέα μερικής ισχύος συνδεδεμένο στο δρομέα (Τύπος Γ) αποτελεί τον πιο διαδεδομένο τύπο Α/Γ, γεγονός που οφείλεται κυρίως στο μειωμένο κόστος σε σχέση με τον Τύπο Δ, όπου χρησιμοποιείται μετατροπέας πλήρους ισχύος. Παρ' όλα αυτά, η χρήση του τελευταίου αναμένεται να αυξηθεί σημαντικά στο άμεσο μέλλον καθώς το κόστος των ηλεκτρονικών ισχύος μειώνεται συνεχώς ενώ οι δυνατότητες ελέγχου παραμέτρων του δικτύου που προσφέρει είναι αυξημένες. Στην παρούσα διατριβή μελετήθηκαν συστηματικά οι Τύποι Γ και Δ, κυρίως ως προς τη δυναμική τους απόκριση σε μεταβατικά φαινόμενα του δικτύου. Συγκεκριμένα στο Κεφάλαιο 7 μελετώνται και αναλύονται δυο τροποποιήσεις του Τύπου Δ, η διαμόρφωση που χρησιμοποιεί σύγχρονη γεννήτρια ηλεκτρικής διέγερσης και ανορθωτή διόδων στην πλευρά της γεννήτριας (Τύπος Δ1) και η διαμόρφωση με σύγχρονη γεννήτρια μονίμων μαγνητών και πλήρως ελεγχόμενο μετατροπέα για τη σύνδεση στο δίκτυο (Τύπος Δ2).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 – Μοντελοποίηση αεροδυναμικού και μηχανικού συστήματος Α/Γ

Στο προηγούμενο Κεφάλαιο παρουσιάστηκαν οι τέσσερις βασικοί τύποι ανεμογεννητριών, οι οποίοι παρουσιάζουν διαφορετικές απαιτήσεις όσον αφορά τη μοντελοποίησή τους. Το είδος επίσης της μελέτης θα καθορίσει τη λεπτομέρεια των μοντέλων και κατά τη συνέπεια το λογισμικό εργαλείο που θα χρησιμοποιηθεί. Στο παρόν Κεφάλαιο περιγράφονται τα μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν για το αεροδυναμικό και μηχανικό σύστημα των Α/Γ.

5.1. Μοντελοποίηση δρομέα

Η ροή αέρα πάνω από μια στατική αεροτομή παράγει δύο δυνάμεις, μια δύναμη ανύψωσης κάθετη στη ροή του αέρα και μια δύναμη έλξης στην κατεύθυνση της ροής. Η αλληλεπίδραση και εξέλιξη αυτών των πρωταρχικών δυνάμεων, καθώς η αεροτομή κινείται ως προς τον άνεμο, αλλά και η παραγόμενη ροπή από σύστημα αεροτομών συνδεδεμένων σε κοινό άξονα, αποτελεί και την αρχή λειτουργίας του δρομέα μιας ανεμογεννήτριας, [WEH01]. Μια αναλυτική βιβλιογραφική ανασκόπηση των μεθόδων αεροελαστικότητας που εφαρμόζονται στις ανεμογεννήτριες παρουσιάζεται στο [ΜΠΑ04]. Η απόδοση μιας ανεμογεννήτριας εξαρτάται σημαντικά από την κατασκευή, τον προσανατολισμό και τον έλεγχο των πτερυγίων του δρομέα, και ανάλογα με το πεδίο διερεύνησης απαιτείται και αντίστοιχη λεπτομέρεια μοντελοποίησης.

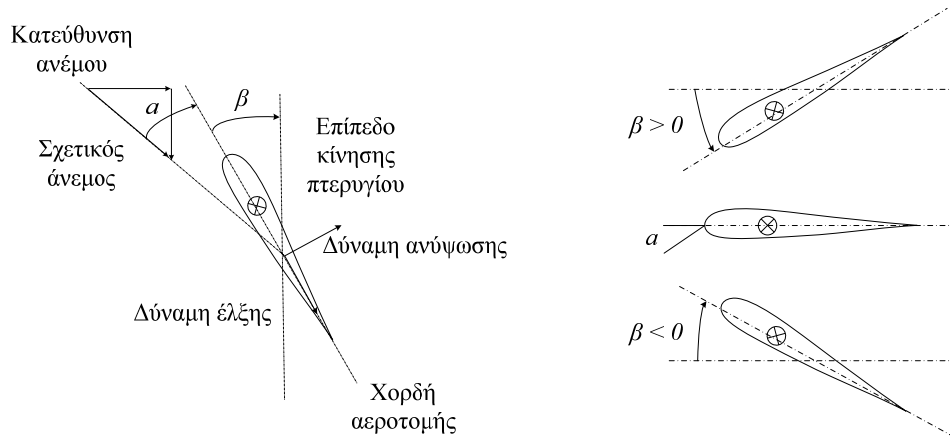
Μια πιστή αναπαράσταση του δρομέα για τον υπολογισμό της αναπτυσσόμενης μηχανικής ροπής θα απαιτούσε χρήση της μεθόδου ανάλυσης στοιχείων πτερυγίου (*Blade Element Momentum theory*), που απαιτεί εξειδικευμένες γνώσεις αεροναυπηγικής καθώς και πλήθος διαθέσιμων στοιχείων σε σχέση με τα πτερύγια και το πεδίο ανέμου γύρω από το δρομέα, [HEI98]. Η θεμελιώδης αρχή της μεθόδου αυτής είναι ότι η δύναμη ενός στοιχείου του πτερυγίου είναι αυτή και μόνο υπεύθυνη για την αλλαγή της ορμής του αέρα που διέρχεται μέσω του δακτυλίου που σαρώνεται από το στοιχείο, [WEH01]. Μια τέτοια προσέγγιση παρέχει μεγαλύτερη ακρίβεια στην αναπαράσταση του δυναμικού φαινομένου μετατροπής ενέργειας του ανέμου σε μηχανική αλλά δεν αποτελεί μέρος της ανάλυσης στην παρούσα εργασία. Τα μοντέλα ανεμογεννητριών που αναλύονται παρακάτω, χρησιμοποιούν *οιωνεί στατικά* μοντέλα δρομέα, σύμφωνα με τα οποία η μηχανική ισχύς που εξάγεται από τον άνεμο συνδέεται μέσω αλγεβρικής σχέσης με την ταχύτητα του ανέμου:

$$P_{rot} = C_p(\lambda, \beta) \left(\frac{1}{2} \rho \pi R^2 V_w^3 \right) \quad (5.1)$$

όπου P_{rot} είναι η αεροδυναμική ισχύς, ρ είναι η πυκνότητα αέρα, R η ακτίνα του δρομέα και V_w η ταχύτητα του ανέμου. Το όριο της διαθέσιμης αεροδυναμικής ισχύος στον άνεμο δίνεται από τον αεροδυναμικό συντελεστή ισχύος $C_p(\lambda, \beta)$, ως συνάρτηση του λόγου ταχύτητας ακροπτερυγίου, λ , και της γωνίας βήματος πτερυγίου, β , όπου

$$\lambda = \frac{\omega_{rot} R}{V_w} \quad (5.2)$$

Στο Σχήμα 5.1 απεικονίζεται η γωνία βήματος β του πτερυγίου σε σχέση με την κατεύθυνση του ανέμου και τη θέση του πτερυγίου. Η γωνία βήματος ορίζεται ως η γωνία μεταξύ της χορδής της αεροτομής του πτερυγίου και του επιπέδου περιστροφής. Η χορδή της αεροτομής είναι η ευθεία γραμμή που ενώνει το αρχικό και τελικό σημείο μιας αεροτομής. Η γωνία βήματος είναι στατική γωνία και εξαρτάται μόνο από την κατεύθυνση του πτερυγίου. Η γωνία α ονομάζεται γωνία προσβολής (*angle of attack*) και ορίζεται ως η γωνία μεταξύ του άξονα σχετικού ανέμου και της χορδής αεροτομής του πτερυγίου.



Σχήμα 5.1. Δυνάμεις ανύψωσης, έλξης και γωνίες βήματος και προσβολής ενός πτερυγίου

Ο συντελεστής αεροδυναμικής ισχύος καθορίζεται είτε μέσω μετρήσεων της ισχύος της ανεμογεννήτριας, είτε θεωρητικά μέσω ανάλυσης των δυνάμεων ανυψώσεως και έλξης που αναπτύσσονται στα πτερύγια, [JOH85]. Αντίστοιχα ορίζεται η αεροδυναμική ροπή που αναπτύσσεται στον κύριο άξονα του δρομέα και εκφράζεται με την ακόλουθη στατική σχέση:

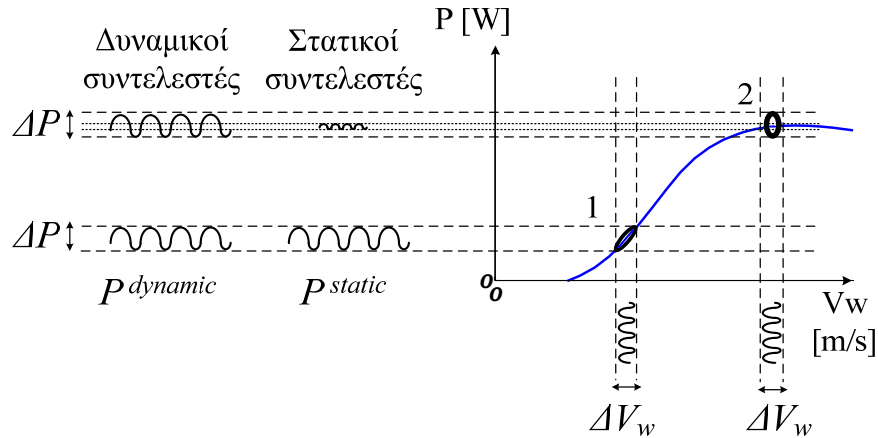
$$T_{rot} = \frac{P_{rot}}{\omega_{rot}} = \frac{C_p(\lambda, \beta)}{\omega_{rot}} \left(\frac{1}{2} \rho \pi R^2 V_w^3 \right) \quad (5.3)$$

ή

$$T_{rot} = C_q(\lambda, \beta) \left(\frac{1}{2} \rho \pi R^2 V_w^3 \right) \quad (5.4)$$

όπου $C_q(\lambda, \beta)$ είναι ο αεροδυναμικός συντελεστής ροπής.

Σε ορισμένες περιπτώσεις, η χρήση της αεροδυναμικής ροπής καθίσταται καταλληλότερη, όπως κατά την ακινησία του δρομέα όπου η αεροδυναμική ισχύς είναι μηδενική αλλά όχι και η ροπή. Οι παραπάνω εξισώσεις, τόσο για την αεροδυναμική ισχύ όσο και για την αεροδυναμική ροπή, είναι μη μονότονες και μη γραμμικές, ενώ εκφράζονται σε σημεία λειτουργίας μόνιμης κατάστασης. Οι συντελεστές αεροδυναμικής ισχύος και ροπής δίνονται επομένως σε τιμές μόνιμου καταστάσεως. Με μια τέτοια προσέγγιση, οι διακυμάνσεις ισχύος στην περιοχή της απώλειας στήριξης (*stall region*) ενδέχεται να παραβλεφθούν, επομένως το μοντέλο μπορεί να βελτιωθεί εισάγοντας τους δυναμικούς συντελεστές ισχύος και ροπής, $C_p^{dynamic}(\lambda, \beta)$ και $C_q^{dynamic}(\lambda, \beta)$ αντίστοιχα, [ØYE91][SØR01]. Οι στατικοί συντελεστές που εμφανίζονται στις εξισώσεις (5.1), (5.3) και (5.4) θα συμβολίζονται στη συνέχεια ως $C_p^{static}(\lambda, \beta)$ και $C_q^{static}(\lambda, \beta)$, αντίστοιχα. Η διαφορά στην εκτίμηση διακυμάνσεων ισχύος που προκύπτει από τη χρήση των στατικών ή δυναμικών συντελεστών δεν είναι εμφανής στις χαμηλές ταχύτητες ανέμου, βλέπε Σχήμα 5.2.



Σχήμα 5.2. Επίδραση του φαινομένου δυναμικής απώλειας στήριξης

Ο δυναμικός συντελεστής $C_p^{dynamic}(\lambda, \beta)$ προκύπτει μέσω τριών συνιστωσών, του στατικού (μόνιμης κατάστασης) $C_p^{static}(\lambda, \beta)$, του προσαρτημένου $C_p^{attached}(\lambda, \beta)$ και του διαχωρισμένου $C_p^{separated}(\lambda, \beta)$ συντελεστή ισχύος. Η σχέση μεταξύ των επιμέρους αυτών συντελεστών και το πως αυτή διαφοροποιείται από τις χαμηλές (όπου το φαινόμενο δυναμικής απώλειας στήριξης είναι αμελητέο) στις υψηλές ταχύτητες ανέμου δίνεται στον Πίνακα 5.1, [SØR01].

Περιοχή ταχυτήτων ανέμου, V_w	Τιμές λόγου ταχύτητας ακροπτερυγίου, λ	$C_p^{static}(\lambda, \beta)$	$C_p^{dynamic}(\lambda, \beta)$
Χαμηλές ταχύτητες ανέμου, $V_w \ll$	Υψηλές, $\lambda \gg$	$C_p^{static}(\lambda, \beta) \rightarrow C_p^{attached}(\lambda, \beta)$	$C_p^{dynamic}(\lambda, \beta) \equiv C_p^{static}(\lambda, \beta)$
Υψηλές ταχύτητες ανέμου, $V_w \gg$	Χαμηλές, $\lambda \ll$	$C_p^{static}(\lambda, \beta) \rightarrow C_p^{separated}(\lambda, \beta)$	$C_p^{dynamic}(\lambda, \beta) \neq C_p^{static}(\lambda, \beta)$

Πίνακας 5.1. Σχέσεις συντελεστών ισχύος ανάλογα με την ταχύτητα του ανέμου

Ο δυναμικός συντελεστής $C_p^{dynamic}(\lambda, \beta)$ προκύπτει με παρεμβολή μεταξύ των $C_p^{attached}(\lambda, \beta)$ και $C_p^{separated}(\lambda, \beta)$ σύμφωνα με τη σχέση (5.5):

$$C_p^{dynamic}(\lambda, \beta) = f \cdot C_p^{attached}(\lambda, \beta) + (1 - f) \cdot C_p^{separated}(\lambda, \beta) \quad (5.5)$$

όπου ο δυναμικός παράγοντας διαχωρισμού f ορίζεται ως εξής:

$$f = \frac{C_p^{static}(\lambda, \beta) - C_p^{separated}(\lambda, \beta)}{C_p^{attached}(\lambda, \beta) - C_p^{separated}(\lambda, \beta)} \frac{1}{1 + s\tau} \quad (5.6)$$

Το φίλτρο πρώτης τάξης, με σταθερά χρόνου τ , εκφράζει το γεγονός ότι ο δυναμικός συντελεστής $C_p^{dynamic}(\lambda, \beta)$ δε μεταβάλλεται στιγμιαία αλλά παραμένει σε ενδιάμεσες τιμές για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Αντίστοιχη με τα παραπάνω είναι η ανάλυση για το δυναμικό συντελεστή ροπής $C_q^{dynamic}(\lambda, \beta)$. Λαμβάνοντας υπ' όψιν τα παραπάνω δυναμικά φαινόμενα, το μοντέλο του

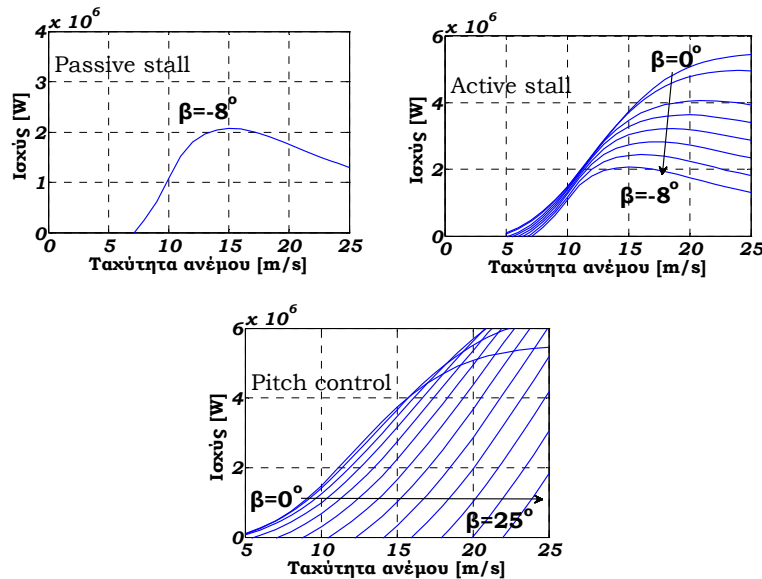
αεροδυναμικού συστήματος προσομοιώνει με μεγαλύτερη ακρίβεια τις διακυμάνσεις ισχύος σε υψηλές ταχύτητες ανέμου γύρω από την περιοχή *stall*.

5.2. Έλεγχος αεροδυναμικής ισχύος

Όπως προκύπτει και από τα παραπάνω, η ισχύς που εξάγεται από τον άνεμο μέσω της περιστροφικής κίνησης του δρομέα, μπορεί να ελεγχθεί ρυθμίζοντας είτε την ταχύτητα περιστροφής είτε τη γωνία βήματος των πτερυγίων. Οι διαφορετικοί τρόποι ελέγχου των μεταβλητών αυτών που θα περιγραφούν στη συνέχεια είναι οι ακόλουθοι:

- Παθητικός έλεγχος απώλειας στήριξης – *passive stall*
- Ενεργός έλεγχος απώλειας στήριξης – *active stall*
- Έλεγχος γωνίας βήματος πτερυγίων – *pitch control*

Η διαφορά με την οποία ελέγχεται η αεροδυναμική ισχύς απεικονίζεται στο Σχήμα 5.3, όπου δίνονται οι καμπύλες αεροδυναμικής ισχύος συναρτήσει της ταχύτητας του ανέμου ανάλογα με τη γωνία βήματος. Οι καμπύλες έχουν υπολογιστεί για σταθερή ταχύτητα περιστροφής δρομέα.



Σχήμα 5.3. Καμπύλες αεροδυναμικής ισχύος συναρτήσει ταχύτητας ανέμου για παθητικό έλεγχο απώλειας στήριξης, ενεργό έλεγχο απώλειας στήριξης και έλεγχο γωνίας βήματος πτερυγίων αντίστοιχα

5.2.1. Παθητικός έλεγχος απώλειας στήριξης – *passive stall*

Ο απλούστερος τύπος ελέγχου της αεροδυναμικής ισχύος είναι ο παθητικός έλεγχος απώλειας στήριξης που βασίζεται στο φαινόμενο *stall*, σύμφωνα με το οποίο η αεροδυναμική ισχύς δεν υπερβαίνει το όριο της μέγιστης ισχύος, όπως αυτό καθορίζεται από τη σχεδίαση του δρομέα και της γεννήτριας στην οποία συνδέεται. Ιδανικά, η ισχύς θα έπρεπε να αυξάνεται μέχρι το όριο της μέγιστης ισχύος και στη συνέχεια να παραμένει σταθερή ανεξάρτητα από την αλλαγή στην ταχύτητα του ανέμου (ιδανική ρύθμιση απώλειας στήριξης). Παρ' όλα αυτά, στην πραγματικότητα οι ανεμογεννήτριες δεν παρουσιάζουν μια τέτοια ιδανική συμπεριφορά. Όπως απεικονίζεται και στο Σχήμα 5.3, η ισχύς για ταχύτητες ανέμου υψηλότερες της ονομαστικής δεν παραμένει σταθερή, αλλά μειώνεται λόγω του φαινομένου *stall*. Η μέγιστη ισχύς μια ανεμογεννήτριας με χρήση του φαινομένου *stall* εξαρτάται από την πυκνότητα του ανέμου, τη συχνότητα του δικτύου και επιδράσεις αεροδυναμικής φύσεως.

Το βασικό πλεονέκτημα της διαμόρφωσης αυτής, είναι η απλότητα, η σύνδεση των πτερυγίων σε σταθερή γωνία στην πλώμη του δρομέα και η αποφυγή κινούμενων μηχανικών μερών και άλλων σύνθετων διαδικασιών ελέγχου που σχετίζονται με τον έλεγχο της γωνίας βήματος. Το σχέδιο αυτό

ελέγχου αεροδυναμικής ισχύος αποτέλεσε το πλέον διαδεδομένο στην πρώτη φάση ανάπτυξης των εμπορικών ανεμογεννητριών ηλεκτροπαραγωγής, πριν την χρήση των ανεμογεννητριών μεταβλητών στροφών, καθώς και τη βασική επιλογή της σχεδίασης πτερυγίων για τις ανεμογεννήτριες σταθερών στροφών *Τύπου Α*. Εν τούτοις, ελλείπει δυνατότητας ρύθμισης της γωνίας βήματος των πτερυγίων, η αεροδυναμική συμπεριφορά των πτερυγίων είναι απρόβλεπτη στο εύρος υψηλών ταχυτήτων ανέμου, και η ισχύς εξόδου μετά την εμφάνιση του φαινομένου *stall* παρουσιάζει έντονες διακυμάνσεις προκαλώντας σοβαρές φορτίσεις στα πτερύγια και τους πύργους στήριξης, κυρίως στις ανεμογεννήτριες μεγάλης ονομαστικής ισχύος. Θέματα επίσης που σχετίζονται με την απόσβεση δονήσεων των πτερυγίων, η οποία στην περίπτωση σταθερής γωνίας βήματος πτερυγίων είναι αρκετά μειωμένη, αυξάνουν την ευαισθησία των ανεμογεννητριών που χρησιμοποιούν αυτή τη μέθοδο σε καταπονήσεις αεροδυναμικής φύσεως, [WEH01][ACK05]. Ο παθητικός έλεγχος έχει γενικά εφαρμογή σε ανεμογεννήτριες ισχύος μικρότερης του 1 MW, ενώ σε ισχείς μεγαλύτερες χρησιμοποιείται ο ενεργός έλεγχος, που αναλύεται στη συνέχεια.

5.2.2. Ενεργός έλεγχος απώλειας στήριξης – *active stall*

Η αρχή λειτουργίας της ενεργού απώλειας στήριξης στηρίζεται στο συνδυασμό του παθητικού ελέγχου, που περιγράφηκε παραπάνω, και της μεταβλητής γωνίας βήματος των πτερυγίων. Η μέθοδος αυτή ελέγχου αεροδυναμικής ισχύος εφαρμόζεται στις ανεμογεννήτριες *Τύπου Α*, που χρησιμοποιούν ασύγχρονη γεννήτρια τύπου κλωβού με απ' ευθείας σύνδεση στο δίκτυο. Η γωνία βήματος πτερυγίων ρυθμίζεται με στόχο τη μερική βελτιστοποίηση του αεροδυναμικού συντελεστή ισχύος C_p για ταχύτητες ανέμου μικρότερες της ονομαστικής καθώς και τον έλεγχο του φαινομένου *stall* και τη χρήση του για τον περιορισμό της ισχύος σε υψηλές ταχύτητες ανέμου. Η μεταβολή της γωνίας βήματος πτερυγίων μετατοπίζει το φαινόμενο *stall* προς εύρος υψηλότερων ταχυτήτων ανέμου και εξασφαλίζει σταθερή ισχύ, αντίθετα με τον παθητικό έλεγχο απώλειας στήριξης, καθώς και αυξημένες δυνατότητες προστασίας της ανεμογεννήτριας από έντονες καταπονήσεις του μηχανικού συστήματος, [JAU04]. Επομένως, σε χαμηλές ταχύτητες ανέμου η λειτουργία προσομοιάζει στον έλεγχο γωνίας βήματος και ενώ η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα είναι σταθερή, η απόδοση της ανεμογεννήτριας αυξάνεται μέσω της βελτιστοποίησης του συντελεστή C_p . Σε περίπτωση απότομης αύξησης της ταχύτητας ανέμου, το σύστημα ενεργού ελέγχου απώλειας στήριξης θα μεταβάλλει τη γωνία βήματος προς την αντίθετη κατεύθυνση απ' ό,τι ο έλεγχος γωνίας βήματος, επιδιώκοντας την άμεση λειτουργία του φαινομένου *stall* στα πτερύγια – βλέπε Σχήμα 5.3. Στο [SPR06] αναλύεται η δυνατότητα του ενεργού ελέγχου απώλειας στήριξης να αντισταθμίσει μειώσεις που παρατηρούνται στην ισχύ λόγω μόλυνσης των πτερυγίων ή πάγου, σε αντίθεση με τον παραδοσιακό παθητικό έλεγχο απώλειας στήριξης, [COR00][COR01]. Ο όρος *active stall* χρησιμοποιήθηκε αρχικά από τις κατασκευάστριες εταιρείες *NEG-Micon*, πλέον *Vestas Wind Systems*, ενώ εντοπίζεται και μια παραλλαγή με τον όρο *combi stall* από την εταιρεία *Bonus-Siemens*, [EWE09].

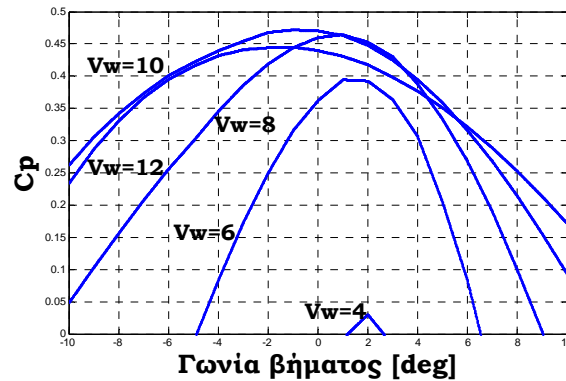
Στον ενεργό έλεγχο απώλειας στήριξης διακρίνονται δύο περιοχές λειτουργίας ανάλογα με την ταχύτητα ανέμου:

Βελτιστοποίηση Ισχύος

Στις χαμηλές ταχύτητες ανέμου, με κάτω όριο την ταχύτητα εισόδου και άνω όριο την ονομαστική ταχύτητα ανέμου ο έλεγχος στοχεύει στη *βελτιστοποίηση* της αεροδυναμικής ισχύος και επομένως της ηλεκτρικής ισχύος εξόδου. Ο συντελεστής αεροδυναμικής ισχύος, $C_p(\lambda, \beta)$, μεταβάλλεται ώστε να έχει τη μέγιστη τιμή σε κάθε ταχύτητα ανέμου μέσω της ρύθμισης της γωνίας βήματος, β . Οι δύο συνθήκες, που πρέπει να ικανοποιούνται για να επιδιωχθεί η βελτιστοποίηση, αφορούν στην ταχύτητα του ανέμου και στην ηλεκτρική ισχύ εξόδου, οι οποίες πρέπει να είναι μικρότερες των ονομαστικών τους τιμών. Στη διεθνή βιβλιογραφία έχουν προταθεί τρόποι για τη βελτιστοποίηση, άλλοι από τους οποίους μεταβάλλουν το λόγο ταχύτητας ακροπτερυγίου, λ , και άλλοι ρυθμίζουν τη γωνία βήματος. Στην παρούσα εργασία εφαρμόστηκε ο δεύτερος τρόπος καθώς η λειτουργία της γεννήτριας σε δύο διαφορετικές ταχύτητες δεν εξετάστηκε, ως περιορισμένα εφαρμοσμένο σχέδιο στις εμπορικές ανεμογεννήτριες. Η βελτιστοποίηση της ισχύος υλοποιήθηκε ως σχήμα ελέγχου ανοιχτού βρόχου χωρίς ανάδραση. Η γωνία β ρυθμίζεται αποκλειστικά με βάση τη μέση τιμή της

ταχύτητας ανέμου σε ένα στοιχειώδες χρονικό διάστημα μέτρησης. Στο [LEH98] περιγράφεται η δυνατότητα να ληφθούν υπ' όψη και φαινόμενα όπως η κυμαινόμενη πυκνότητα αέρα ή η μόλυνση των πτερυγίων κατά την αναζήτηση της βέλτιστης τιμής γωνίας βήματος.

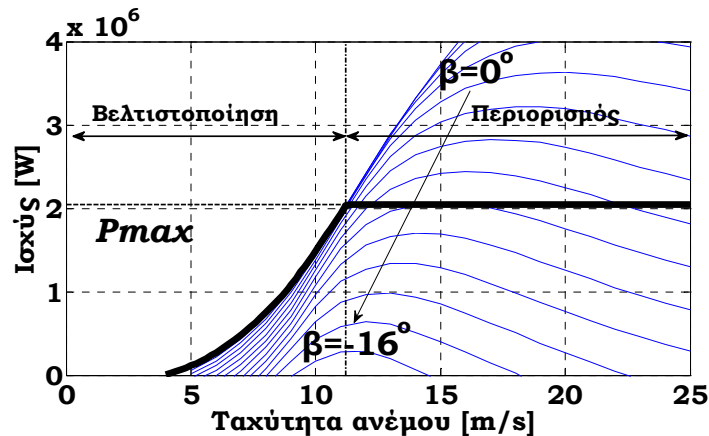
Για κάθε ταχύτητα ανέμου αναζητάται η τιμή της γωνίας β που μεγιστοποιεί τον αεροδυναμικό συντελεστή ισχύος $C_p(\lambda, \beta)$, βλέπε Σχήμα 5.4. Σε χαμηλές ταχύτητες ανέμου η καμπύλη $C_p(\beta)$ έχει αιχμηρό μέγιστο, δηλαδή η τιμή του C_p είναι ευαίσθητη σε μικρές μεταβολές του βέλτιστου β , που αντιστοιχεί στο μέγιστο C_p . Αντίθετα σε μεγαλύτερες ταχύτητες ανέμου η καμπύλη γίνεται πιο επίπεδη και μικρές μεταβολές στη γωνία βήματος δεν επιφέρουν μεγάλες αλλαγές στις τιμές του C_p . Η σχέση μεταξύ γωνίας βήματος και αεροδυναμικού συντελεστή ισχύος στην περιοχή βελτιστοποίησης ισχύος απεικονίζεται στο Σχήμα 5.4.



Σχήμα 5.4. Ο αεροδυναμικός συντελεστής ισχύος $C_p(\lambda, \beta)$ συνάρτηση της γωνίας βήματος β με παράμετρο την ταχύτητα του ανέμου V_w .

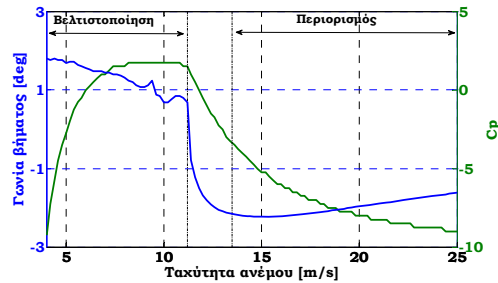
Περιορισμός Ισχύος

Η γωνία βήματος ρυθμίζεται με στόχο τον έλεγχο του φαινομένου απώλειας στήριξης στις ταχύτητες ανέμου μεγαλύτερες της ονομαστικής και μικρότερες της ταχύτητας αποκοπής. Η ισχύς περιορίζεται στην ονομαστική της τιμή όταν είτε η ηλεκτρική ισχύς είτε η ταχύτητα ανέμου υπερβαίνουν τις ονομαστικές τους τιμές, δίνοντας τη στατική καμπύλη ισχύος του Σχήματος 5.5. Το σχήμα ελέγχου στην περίπτωση αυτή είναι κλειστού βρόχου όπου η μετρούμενη και η μέση τιμή της ισχύος συγκρίνεται με την τιμή αναφοράς. Όταν η ισχύς υπερβαίνει την τιμή αναφοράς η γωνία βήματος ρυθμίζεται προς τις αρνητικές τιμές, ώστε να ενισχυθεί η επίδραση του φαινομένου απώλειας στήριξης, ενώ στην αντίθετη περίπτωση οδηγείται σε πιο θετικές τιμές.



Σχήμα 5.5. Στατική καμπύλη αεροδυναμικής ισχύος για ανεμογεννήτρια ενεργού ελέγχου απώλειας στήριξης 2 MW

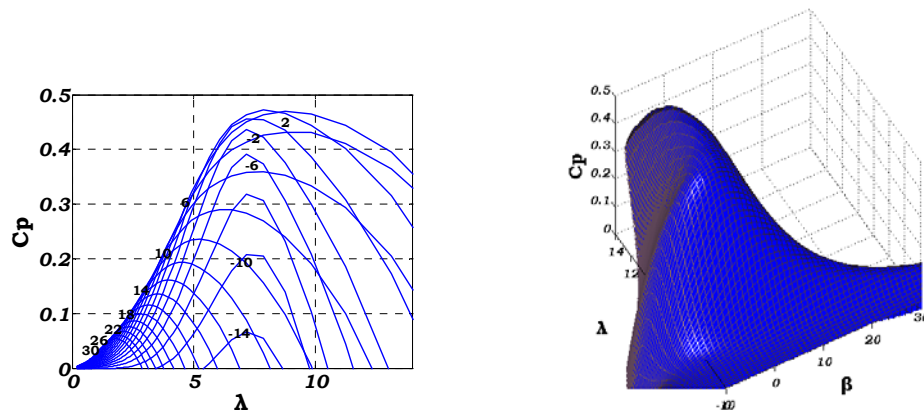
Στις καμπύλες του Σχήματος 5.6, η περιοχή μεταξύ των δύο διακριτών περιοχών βελτιστοποίησης και περιορισμού της ισχύος ονομάζεται περιοχή μετάβασης και οι τιμές της γωνίας βήματος υπολογίζονται με στόχο την ομαλή μετάβαση από τη μια κατάσταση λειτουργίας στην άλλη. Οι τιμές της γωνίας που υπολογίζονται κατά τη βελτιστοποίηση της ισχύος στις τιμές ταχύτητας ανέμου λίγο κάτω από την ονομαστική (άνω όριο της περιοχής βελτιστοποίησης) διαφέρουν πολύ από τις τιμές της γωνίας στις τιμές ταχύτητας ανέμου λίγο πάνω από την ονομαστική. Αυτό προκύπτει επειδή, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.5, οι καμπύλες αεροδυναμικής ισχύος είναι πολύ απότομες και σχεδόν συμπίπτουν μεταξύ τους στην περιοχή αυτή ταχυτήτων ανέμου. Οι τιμές λοιπόν της γωνίας που χρησιμοποιούνται, προκύπτουν μέσω γραμμικής παρεκβολής (*linear extrapolation*) των προηγούμενων τιμών της στην περιοχή βελτιστοποίησης, [JAU04].



Σχήμα 5.6. Γωνία βήματος και αεροδυναμικός συντελεστής ισχύος σε όλο το εύρος ταχυτήτων ανέμου

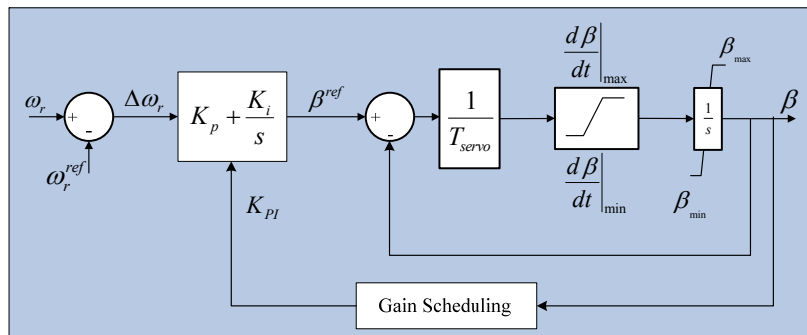
5.2.3. Έλεγχος γωνίας βήματος περυγίων – pitch control

Πλέον στην πλειοψηφία των εμπορικών ανεμογεννητριών που εγκαθίστανται στα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιείται ο έλεγχος γωνίας βήματος περυγίων. Εφαρμόζεται στις ανεμογεννήτριες Τύπων *B*, *Γ* και *Δ* και απαιτεί σύστημα στρέψης της γωνίας βήματος. Η αρχή λειτουργίας είναι η ίδια με τον ενεργό έλεγχο απώλειας στήριξης αν και το εύρος ρύθμισης της γωνίας είναι μεγαλύτερο σε αυτήν την περίπτωση. Μειώνονται οι καταπονήσεις στις υψηλές ταχύτητες ανέμου και επιτυγχάνεται η βελτιστοποίηση της αεροδυναμικής απόδοσης σε μεγάλο εύρος ταχυτήτων ανέμου. Η πιθανότητα εμφάνισης έντονων διακυμάνσεων *flicker* περιορίζεται σημαντικά, ενώ σε περίπτωση απότομης μεταβολής της ταχύτητας του ανέμου, ο δρομέας απορροφάει ένα μέρος των διακυμάνσεων της αεροδυναμικής ισχύος στη μορφή αποθηκευμένης μηχανικής ενέργειας, αποφεύγοντας την περαιτέρω μετάδοση των διακυμάνσεων ισχύος στα ηλεκτρικά δίκτυα, [FRE90]. Ο αεροδυναμικός συντελεστής ισχύος $C_p(\lambda, \beta)$, ως συνάρτηση πλέον του λόγου ταχύτητας ακροπερυγίου λ και της γωνίας βήματος β δίνεται στο Σχήμα 5.7 σε δισδιάστατη και τρισδιάστατη απεικόνιση στο $C_p - \lambda$ (με παράμετρο τη γωνία β) και στο $C_p - \lambda - \beta$ πεδίο ανάλυσης αντίστοιχα. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν για τον αεροδυναμικό συντελεστή ισχύος είτε αριθμητικές προσεγγίσεις, είτε δεδομένα από μετρήσεις σε πρωτότυπα ανεμογεννητριών, [HEI06][SLO01][HAN05].



Σχήμα 5.7. Απεικόνιση του αεροδυναμικού συντελεστή ισχύος σε δισδιάστατο και τρισδιάστατο πεδίο

Για ταχύτητες ανέμου μικρότερες της ονομαστικής μεγιστοποιείται η αεροδυναμική ισχύς, ρυθμίζοντας το λόγο ταχύτητας ακροπερυγίου, λ , ενώ η γωνία βήματος παραμένει σταθερή, όσο η ταχύτητα του δρομέα προσαρμόζεται μέσω του συστήματος ελέγχου της ανεμογεννήτριας στις μεταβολές της ταχύτητας του ανέμου. Η λειτουργία των μεταβλητών στροφών εξασφαλίζεται μέσω του ελέγχου του ηλεκτρικού συστήματος της γεννήτριας, που περιγράφεται σε επόμενη ενότητα της παρούσας εργασίας. Στις ταχύτητες ανέμου μεγαλύτερες της ονομαστικής, η αεροδυναμική ισχύς περιορίζεται με ανάλογη ρύθμιση της γωνίας βήματος. Ο ελεγκτής γωνίας βήματος, που απεικονίζεται στο Σχήμα 5.8, ελέγχει την ταχύτητα του δρομέα μέσω ενός αναλογικού-ολοκληρωτικού ελεγκτή PI . Η μετρούμενη ταχύτητα του δρομέα ω_r συγκρίνεται με την τιμή αναφοράς ω_r^{ref} , ενώ στο μοντέλο περιλαμβάνεται η χρονική καθυστέρηση που υφίσταται λόγω του σερβομηχανισμού (χρονική σταθερά T_{servo}) καθώς και τα όρια ρύθμισης τόσο της γωνίας βήματος ($0 \div 30deg$) όσο και της παραγώγου της ($\pm 10deg/sec$). Τα όρια ρυθμού μεταβολής της γωνίας βήματος είναι απαραίτητα για τη ρεαλιστική προσομοίωση του μηχανισμού αλλαγής της γωνίας κυρίως σε περιπτώσεις απότομης μεταβολής της ταχύτητας του δρομέα.



Σχήμα 5.8. Ελεγκτής γωνίας βήματος στις ανεμογεννήτριες Τύπου Β, Γ και Δ

Στόχος του ελεγκτή γωνίας βήματος είναι ο περιορισμός της ταχύτητας του δρομέα στην ονομαστική της τιμή, καθορίζοντας εμμέσως ότι και η ισχύς δεν υπερβαίνει την ονομαστική. Η σύνδεση αυτή μεταξύ ισχύος και ταχύτητας περιστροφής προκύπτει μέσω της στρατηγικής Μέγιστης Απολαβής Ισχύος (*Maximum Power Point Tracking strategy*) που ακολουθείται στις ανεμογεννήτριες Τύπου Γ και Δ από το σύστημα ελέγχου του ηλεκτρικού συστήματος, που θα αναλυθεί σε επόμενη ενότητα. Ενώ το αργό σύστημα ελέγχου της γωνίας βήματος καθορίζει την ταχύτητα του δρομέα και της γεννήτριας και συνδέεται με την αργή απόκριση του μηχανικού συστήματος, ο γρήγορος έλεγχος των μετατροπέων που χρησιμοποιούνται στις ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών καθορίζει την ισχύ της γεννήτριας. Λόγω των διαφορετικών χρόνων απόκρισης ηλεκτρικού και μηχανικού συστήματος, προκύπτουν δυναμικές διακυμάνσεις της ταχύτητας του δρομέα σε ταχύτητες ανέμου μεγαλύτερες της ονομαστικής, γεγονός που επιτρέπει στην πρόσθετη ενέργεια που οφείλεται σε απότομες μεταβολές της ταχύτητας ανέμου να αποθηκεύεται προσωρινά ως περιστροφική ενέργεια στη στρεφόμενη μάζα του δρομέα, ενώ παράλληλα το σύστημα ελέγχου των μετατροπέων εξασφαλίζει σταθερή ηλεκτρική ισχύ εξόδου.

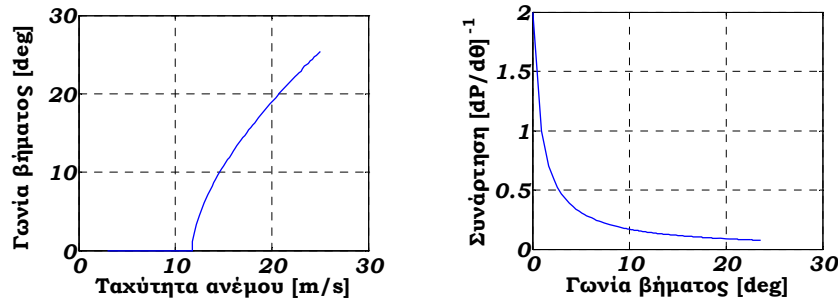
Στο Σχήμα 5.8 έχει προστεθεί στη διαμόρφωση του ελεγκτή ένα σύστημα προκαθορισμένων κερδών (*gain scheduling*), που ως στόχο έχει την αντιστάθμιση των μη γραμμικών αεροδυναμικών χαρακτηριστικών, [GAI06][HAN05]. Το ολικό κέρδος του συστήματος ελέγχου γωνίας βήματος, K_p , μπορεί να εκφραστεί ως ένα αναλογικό κέρδος, K_{PI} στον ελεγκτή PI του Σχήματος 5.8, πολλαπλασιασμένο με την αεροδυναμική ευαισθησία του συστήματος $\frac{dP}{d\theta}$:

$$K_p = K_{PI} \frac{dP}{d\theta} = K_{con} \left[\frac{dP}{d\theta} \right]^{-1} \frac{dP}{d\theta} \quad (5.7)$$

Οι συνθήκες λειτουργίας (η ταχύτητα ανέμου, η γωνία βήματος ή η τιμή αναφοράς για την ηλεκτρική ισχύ) καθορίζουν την αεροδυναμική ευαισθησία $\frac{dP}{d\theta}$ του συστήματος, η οποία μπορεί να προσεγγιστεί ως γραμμικώς αύξουσα συνάρτηση της γωνίας βήματος, [HAN08]. Επομένως, σε υψηλές ταχύτητες ανέμου και συνεπώς σε μεγαλύτερες γωνίες βήματος, όπου η ευαισθησία του συστήματος είναι αυξημένη, το κέρδος του ελεγκτή πρέπει να είναι μικρότερο. Το ολικό κέρδος του συστήματος K_p διατηρείται σταθερό, μεταβάλλοντας το K_{PI} με τέτοιο τρόπο που αντισταθμίζεται η διακύμανση της ευαισθησίας $\frac{dP}{d\theta}$ μέσω της αντίστροφης συνάρτησης ευαισθησίας $\left[\frac{dP}{d\theta}\right]^{-1}$:

$$K_{PI} = K_{con} \left[\frac{dP}{d\theta}\right]^{-1} \quad (5.8)$$

Η παράμετρος K_{con} είναι το σταθερό αναλογικό κέρδος του ελεγκτή PI . Η κανονικοποιημένη αντίστροφη συνάρτηση ευαισθησίας $\left[\frac{dP}{d\theta}\right]^{-1}$ δίνεται ως συνάρτηση της γωνίας βήματος στο Σχήμα 5.9.



Σχήμα 5.9. Γωνία βήματος συναρτήσει ταχύτητας ανέμου και κανονικοποιημένη αντίστροφη συνάρτηση ευαισθησίας σε ανεμογεννήτρια με έλεγχο γωνίας βήματος

Για τον υπολογισμό των παραμέτρων του PI ελεγκτή η δυναμική συμπεριφορά του συστήματος προσεγγίζεται με σύστημα δεύτερης τάξης:

$$\frac{K}{Js^2 + Ds + K} = \frac{\omega_0^2}{s^2 + 2\zeta\omega_0 + \omega_0^2} \quad (5.9)$$

όπου J , K και D είναι η σταθερά αδρανείας, ο συντελεστής δυσκαμψίας και ο συντελεστής απόσβεσης του συστήματος αντίστοιχα.

Η προσέγγιση αυτή βασίζεται στην παραδοχή ότι το μηχανικό σύστημα της ανεμογεννήτριας παρουσιάζει μεγάλο βαθμό δυσκαμψίας, οπότε η περιστροφή του άξονα, σαν ο μόνος βαθμός ελευθερίας, υπακούει στη διαφορική εξίσωση δεύτερης τάξης (5.10) για τη γωνία περιστροφής του άξονα όταν ο έλεγχος γωνίας βήματος είναι ενεργός και η A/Γ λειτουργεί σε σταθερή ισχύ.

$$J\ddot{\theta}_{shaft} + D\dot{\theta}_{shaft} + K\theta_{shaft} = 0 \quad (5.10)$$

όπου η γωνία του άξονα ορίζεται ως εξής:

$$\dot{\theta}_{shaft} = \omega - \omega_{ref} \quad (5.11)$$

και οι παράμετροι δίνονται από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$J = J_{rot} + n^2_{gear} J_{gen} \quad (5.12)$$

$$D = \frac{I}{\omega_{ref}} \left[-\frac{dP}{d\theta} \right] K_p n_{gear} \frac{30}{\pi} - \frac{P_{ref}}{\omega_{ref}^2} \quad (5.13)$$

$$K = \frac{I}{\omega_{ref}} \left[-\frac{dP}{d\theta} \right] K_i n_{gear} \frac{30}{\pi} \quad (5.14)$$

Οι μεταβλητές ω_{ref} και P_{ref} αντιστοιχούν στις τιμές αναφοράς για την ταχύτητα του δρομέα και την ισχύ αντίστοιχα. Ο *PI* έλεγχος έχει απόκριση με συχνότητα και λόγο απόσβεσης που δίνονται από τις ακόλουθες σχέσεις αντίστοιχα:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{K}{J}} \quad (5.15)$$

$$\zeta = \frac{1}{2} \frac{D}{J\omega_0} = \frac{D}{2\sqrt{KJ}} \quad (5.16)$$

Τυπικές τιμές για τη συχνότητα και το λόγο απόσβεσης είναι 0.6 rad/sec και 0.66 αντίστοιχα.

Ο υπολογισμός των παραμέτρων του ελεγκτή μπορούν να γίνει είτε με χρήση της μεθόδου *Ziegler-Nichols*, είτε αναλυτικά με τους ακόλουθους δύο τρόπους, [ELL04]:

Θεωρώντας το σύστημα εισόδου-εξόδου ενός *PI* ελεγκτή:

$$y = \left(K_p + \frac{K_i}{s} \right) u \quad (5.17)$$

το αναλογικό και ολοκληρωτικό κέρδος του ελεγκτή υπολογίζονται ως εξής:

$$K_i = \frac{K \omega_{ref}}{n_{gear} \frac{30}{\pi}} \left[-\frac{dP}{d\theta} \right]^{-1} \quad (5.18)$$

$$K_p \cong 2\zeta \frac{K_i}{\omega_0} \quad (5.19)$$

Στην πρώτη αυτή μέθοδο τόσο το αναλογικό όσο και το ολοκληρωτικό κέρδος του ελεγκτή εμπεριέχουν την αντίστροφη συνάρτηση ευαισθησίας $\left[\frac{dP}{d\theta} \right]^{-1}$, όπως προκύπτει από τις εξισώσεις (5.18) και (5.19).

Στη δεύτερη μέθοδο παραμετροποίησης το σύστημα του *PI* ελεγκτή είναι:

$$y = K_p \left(1 + \frac{1}{sT_i} \right) \quad (5.20)$$

όπου οι παράμετροι αυτή τη φορά υπολογίζονται:

$$T_i = \frac{K_p}{K_i} = \frac{2\zeta}{\omega_0} \quad (5.21)$$

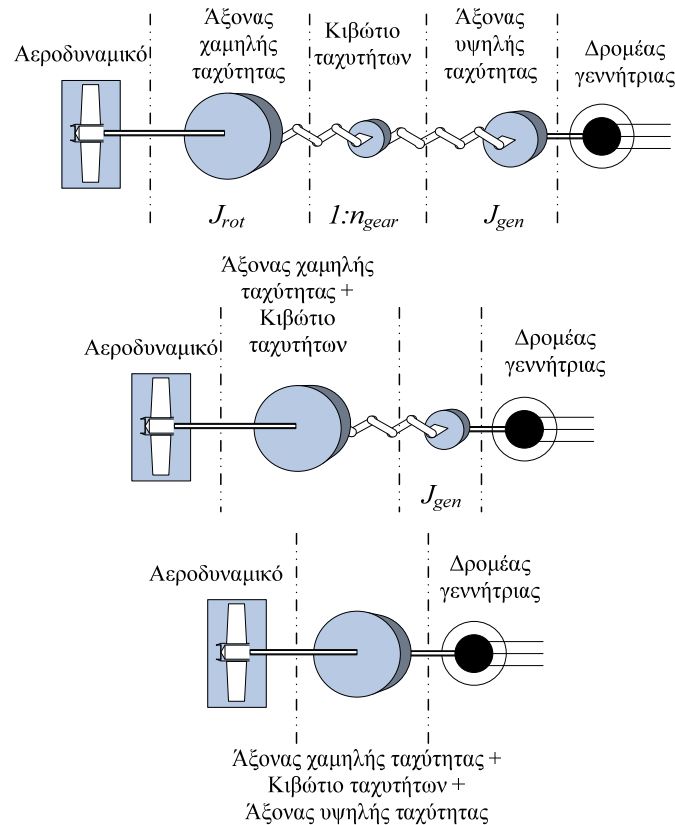
$$K_p \cong \frac{2\zeta}{\omega_0} \frac{K \omega_{ref}}{n_{gear} \frac{30}{\pi}} \left[-\frac{dP}{d\theta} \right]^{-1} \quad (5.22)$$

Στην περίπτωση αυτή, μόνο το αναλογικό κέρδος μεταβάλλεται ανάλογα με την αντίστροφη συνάρτηση ευαισθησίας, $\left[-\frac{dP}{d\theta}\right]^{-1}$, ενώ η σταθερά χρόνου T_i καθορίζεται με βάση τις παραμέτρους σχεδίασης ζ και ω_b (με τυπικές τιμές 0.66 και 0.6 αντίστοιχα).

5.3. Μοντελοποίηση μηχανικού συστήματος

Τα μηχανικά συστήματα με ελαστικές ιδιότητες, όπως ο άξονας μετάδοσης κίνησης σε μια ανεμογεννήτρια, έχουν άπειρο αριθμό βαθμών ελευθερίας. Επομένως μια πιστή αναπαράσταση του συστήματος θα απαιτούσε τη μοντελοποίηση του ως συνεχές σύστημα. Παρ' όλα αυτά, περιορισμοί που υπεισέρχονται ως προς τις δυνατότητες των μεθόδων ανάλυσης αλλά και ως προς τα διαθέσιμα πραγματικά δεδομένα τέτοιων συστημάτων επιβάλλουν την απεικόνισή τους μέσω περιορισμένου αριθμού πεπερασμένων στοιχείων. Στόχος της απλούστευσης είναι η κατά το δυνατόν ακριβέστερη μεν αλλά όχι απαγορευτικά πολύπλοκη προσομοίωση τέτοιων συστημάτων, [RAO90].

Το είδος του μοντέλου που χρησιμοποιείται κατά την προσομοίωση ανεμογεννητριών για το μηχανικό σύστημα μετάδοσης της κίνησης, που συνδέει το δρομέα μέσω του ενδεχόμενου κιβωτίου ταχυτήτων με το δρομέα της γεννήτριας, καθορίζεται από το είδος της ανάλυσης και το εύρος συχνοτήτων στο οποίο συγκαταλέγονται τα φαινόμενα υπό μελέτη. Μια τυπική αναπαράσταση με βάση τη διαθέσιμη βιβλιογραφία απεικονίζεται στο Σχήμα 5.10.

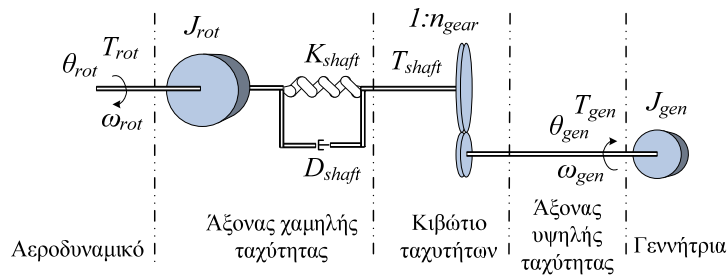


Σχήμα 5.10. Τυπικά μοντέλα μηχανικού συστήματος ανεμογεννήτριας, μοντέλο τριών μαζών, δύο μαζών και μίας μάζας αντίστοιχα

Μια ανεμογεννήτρια αποτελείται τυπικά από το δρομέα, στον οποίο συνδέονται τα τρία πτερύγια, τον άξονα που συνδέεται με αυτόν και χαρακτηρίζεται ως χαμηλής ταχύτητας, το κιβώτιο ταχυτήτων, τον άξονα που συνδέει το τελευταίο με τη γεννήτρια και την ίδια τη γεννήτρια. Όσο αυξάνονται οι βαθμοί ελευθερίας του συστήματος που χρησιμοποιείται για την αναπαράσταση, δηλαδή οι μάζες, τα ελατήρια και τα στοιχεία απόσβεσης τόσο επιτυγχάνεται μεγαλύτερη ακρίβεια στην αναπαράσταση.

Το μηχανικό ισοδύναμο που παρουσιάζεται στο παραπάνω σχήμα υιοθετεί την προσέγγιση αντιστοίχισης μαζών στο δρομέα της ανεμογεννήτριας και της γεννήτριας και ελατηρίων στους άξονες χαμηλής και υψηλής ταχύτητας, [SAL03]. Λεπτομερής παρουσίαση των στρεπτικών ρυθμών ταλάντωσης του μηχανικού συστήματος, θέμα που δεν εμπίπτει στο αντικείμενο της παρούσας διατριβής, γίνεται στο [ΠΑΠ97]. Οι εξισώσεις για το γενικό σύστημα N στρεφόμενων μαζών δίνονται στο Παράρτημα.

Κατά τη διάρκεια της παρούσας εργασίας αναπτύχθηκαν ισοδύναμα μοντέλα και των τριών κατηγοριών, αλλά επιλέχθηκε η παρουσίαση του μοντέλου δύο μαζών με στοιχεία ελαστικότητας και απόσβεσης. Η μελέτη της επίδρασης των ανεμογεννητριών στα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας κατά τη διάρκεια μεταβολών στην ταχύτητα ανέμου και σφαλμάτων στο δίκτυο απαιτεί κατ' ελάχιστο αυτό το επίπεδο λεπτομέρειας στη μοντελοποίηση του μηχανικού συστήματος, ώστε να εξασφαλιστεί ικανοποιητικά ακριβής προσομοίωση της δυναμικής συμπεριφοράς της ανεμογεννήτριας, [AKH03]. Οι υπόλοιπες συνιστώσες του συστήματος, όπως πύργος στήριξης και πτερύγια, δε λαμβάνονται υπ' όψιν, [HAN02].



Σχήμα 5.11. Μοντέλο δύο μαζών για το σύστημα μετάδοσης κίνησης

- J_{rot} αδράνεια δρομέα, $kg \cdot m^2$
- T_{rot} ροπή δρομέα ανεμογεννήτριας, Nm
- ω_{rot} γωνιακή ταχύτητα άξονα χαμηλής ταχύτητας, rad / sec
- θ_{rot} γωνιακή θέση άξονα χαμηλής ταχύτητας, rad
- K_{shaft} παράμετρος δυσκαμψίας άξονα, Nm / rad
- D_{shaft} παράμετρος απόσβεσης άξονα, $Nm / (rad / sec)$
- T_{shaft} ροπή άξονα, Nm
- $I:n_{gear}$ λόγος κιβωτίου ταχυτήτων
- J_{gen} αδράνεια γεννήτριας, $kg \cdot m^2$
- T_{gen} ροπή γεννήτριας, Nm
- ω_{gen} γωνιακή ταχύτητα άξονα υψηλής ταχύτητας, rad / sec
- θ_{gen} γωνιακή θέση άξονα υψηλής ταχύτητας, rad

Στο βασικό μοντέλο δύο μαζών που αναπτύχθηκε περιλαμβάνεται ένας άξονας με παράμετρο δυσκαμψίας K_{shaft} (η αντίστροφη ποσότητα $\frac{1}{K_{shaft}}$ ορίζει την ελαστικότητα) και παράμετρο απόσβεσης, D_{shaft} . Το μηχανικό ισοδύναμο του άξονα είναι ένα ελατήριο στρέψης που συνδέεται

ανάμεσα σε δύο μάζες, τη μάζα που αναπαριστά την αδράνεια του δρομέα της ανεμογεννήτριας, J_{rot} , και τη μάζα που εκπροσωπεί την αδράνεια της γεννήτριας, J_{gen} . Στις ανεμογεννήτριες Τύπου A , B και Γ προστίθεται ένα ιδανικό κιβώτιο ταχυτήτων με λόγο στροφών $1:n_{gear}$. Οι παράμετροι ελαστικότητας και απόσβεσης μοντελοποιούνται στην πλευρά χαμηλής ταχύτητας του άξονα, ενώ ο άξονας υψηλής ταχύτητας θεωρείται άκαμπτος. Στην περίπτωση ανεμογεννητριών Τύπου A με πολυπολική σύγχρονη γεννήτρια το κιβώτιο μπορεί να παραλειφθεί ($n_{gear}=1$). Στην περίπτωση αυτή οι ροπές άξονα T_{shaft} και T_{gen} είναι ίσες στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας και ο δρομέας της γεννήτριας στρέφεται με την ίδια ταχύτητα με τον δρομέα της ανεμογεννήτριας.

Για την έκφραση των ποσοτήτων στον άξονα υψηλής ταχύτητας, χρησιμοποιούνται οι παρακάτω μετασχηματισμοί εκφρασμένοι σε φυσικές μονάδες:

$$J'_{rot} = \frac{J_{rot}}{n_{gear}} \quad (5.23)$$

$$D'_{shaft} = \frac{D_{shaft}}{n_{gear}^2} \quad (5.24)$$

$$K'_{shaft} = \frac{K_{shaft}}{n_{gear}^2} \quad (5.25)$$

$$\omega'_{rot} = n_{gear} \cdot \omega_{rot} \quad (5.26)$$

$$\theta'_{rot} = n_{gear} \cdot \theta_{rot} \quad (5.27)$$

$$T'_{rot} = \frac{T_{rot}}{n_{gear}} \quad (5.28)$$

Με βάση τις παραπάνω σχέσεις, προκύπτουν οι εξισώσεις κίνησης:

$$T'_{rot} = J'_{rot} \frac{d\omega_{rot}}{dt} + D'_{shaft} (\omega'_{rot} - \omega_{gen}) + K_{shaft} (\theta'_{rot} - \theta_{gen}) \quad (5.29)$$

$$-T'_{gen} = J_{gen} \frac{d\omega_{gen}}{dt} + D'_{shaft} (\omega_{gen} - \omega'_{rot}) + K_{shaft} (\theta_{gen} - \theta'_{rot}) \quad (5.30)$$

$$\frac{d\theta'_{rot}}{dt} = \omega'_{rot} \quad (5.31)$$

$$\frac{d\theta_{gen}}{dt} = \omega_{gen} \quad (5.32)$$

Ως είσοδοι του μοντέλου δύο μαζών ορίζονται η αεροδυναμική ροπή T_{rot} και η γωνιακή ταχύτητα του άξονα υψηλής ταχύτητας, ω_{gen} . Ως άγνωστες μεταβλητές του συστήματος των εξισώσεων (5.29) - (5.32), η γωνιακή ταχύτητα ω_{rot} , η ροπή T_{gen} , οι γωνιακές θέσεις θ_{gen} και θ_{rot} μπορούν να υπολογιστούν ενώ η ροπή άξονα T_{shaft} προκύπτει από την εξίσωση (5.33):

$$-T'_{shaft} = D'_{shaft} (\omega'_{rot} - \omega_{gen}) + K_{shaft} (\theta'_{rot} - \theta_{gen}) \quad (5.33)$$

Η παράμετρος δυσκαμψίας του άξονα αναπαριστά τις ισοδύναμες δυσκαμψίες του άξονα υψηλής και χαμηλής ταχύτητας σύμφωνα με τη σχέση (5.34):

$$\frac{1}{K'_{shaft}} = \frac{1}{\frac{K_{rot}}{n_{gear}^2}} + \frac{1}{K_{gen}} \quad (5.34)$$

Ο ορισμός για τη λογαριθμική μείωση μιας ταλάντωσης στο μηχανικό σύστημα είναι:

$$\delta = \ln \left(\frac{a(t)}{a(t+t_p)} \right) \quad (5.35)$$

όπου a είναι το πλάτος της ταλάντωσης με περίοδο t_p . Η λογαριθμική μείωση εν προκειμένω εκφράζεται μέσω του λόγου του πλάτους του σήματος ταλάντωσης στην αρχή μιας περιόδου προς το πλάτος στο τέλος της επόμενης περιόδου. Με χρήση της (5.35) ορίζεται και ο συντελεστής απόσβεσης ζ :

$$\zeta = \frac{\delta}{\sqrt{\delta^2 + 4\pi^2}} \quad (5.36)$$

Τέλος, η παράμετρος απόσβεσης D_{shaft} προκύπτει ως συνάρτηση του συντελεστή απόσβεσης ζ , της αδράνειας του δρομέα J_{rot} και της παραμέτρου δυσκαμψίας K_{shaft} :

$$D_{shaft} = 2\zeta \sqrt{K_{shaft} \cdot J_{rot}} \quad (5.37)$$

Η ιδιοσυχνότητα του μηχανικού συστήματος *free-free* συνδέεται με την παράμετρο δυσκαμψίας μέσω της σχέσης:

$$f_{free-free} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K_{shaft}}{J_{eq}}} \quad (5.38)$$

όπου η ισοδύναμη αδράνεια υπολογίζεται ως εξής:

$$J_{eq} = \frac{J_{rot} n_{gear}^2 J_{gen}}{J_{rot} + n_{gear}^2 J_{gen}} \quad (5.39)$$

Η συχνότητα των ταλαντώσεων που διεγείρονται στον άξονα μετάδοσης της κίνησης κατά τη διάρκεια οποιουδήποτε μεταβατικού φαινομένου που επιδρά στο μηχανικό σύστημα δίνεται από την (5.38).

5.4. Απόσβεση ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων στην Α/Γ Τύπου Δ2

Η ακριβής προσομοίωση ταλαντώσεων που διεγείρονται στον άξονα μετάδοσης της κίνησης λόγω απότομων μεταβολών ανέμου ή λόγω σφαλμάτων στο δίκτυο είναι ιδιαίτερα σημαντική ιδιαίτερα στην περίπτωση που το σύστημα δεν παρουσιάζει εγγενώς απόσβεση. Η Α/Γ Τύπου Δ2 είναι ένα τέτοιο σύστημα καθώς δε διαθέτει τυλίγματα απόσβεσης ή πεδίου τα οποία θα συνέβαλλαν στην απόσβεση τυχόν ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων. Η σύνδεση του πλήρους μετατροπέα στο στάτη της σύγχρονης γεννήτριας αναιρεί τη σχετική κίνηση του πεδίου του δρομέα σε σχέση με το στάτη καθώς η συχνότητα του πεδίου του στάτη είναι μεταβλητή ακολουθώντας τη ταχύτητα περιστροφής του δρομέα. Επομένως ακόμα και στην περίπτωση που εισαγόταν τύλιγμα απόσβεσης στη σύγχρονη γεννήτρια δεν θα εγλυόταν τάση σε αυτό. Επομένως η απόσβεση των ταλαντώσεων στο μηχανικό σύστημα πρέπει να εισαχθεί εξωτερικά από το σύστημα ελέγχου της Α/Γ. Η πολυπολική σύγχρονη γεννήτρια επίσης διαθέτει μεγαλύτερη αδράνεια λόγω της παρουσίας των πόλων καθώς και της μεγαλύτερης διαμέτρου. Η χρήση του μοντέλου των δυο μαζών είναι απαραίτητη για την προσομοίωση ενός τέτοιου συστήματος.

Σύμφωνα και με τις [AKH03a][AKH03b], η αποτελεσματική δυσκαμψία του άξονα K_{shaft}^{effect} μειώνεται με τον αριθμό των πόλων σύμφωνα με τη σχέση:

$$K_{shaft}^{effect} = \frac{K_{shaft} \omega_{gen}}{S_B \frac{poles}{2}} \quad (5.40)$$

όπου S_B η βασική ισχύς σε MVA και $poles$ ο αριθμός πόλων της γεννήτριας. Μια διεγερόμενη ταλάντωση επομένως στον άξονα θα έχει μεγαλύτερη επίδραση στις μεταβολές της ηλεκτρικής γωνίας του δρομέα σε μια γεννήτρια με μεγάλο αριθμό πόλων. Για το λόγο αυτό απαιτείται επιπλέον απόσβεση είτε μέσω του μηχανικού είτε του ηλεκτρικού συστήματος. Στην ενότητα περιγραφής της Α/Γ Τύπου Δ2, περιγράφεται ο βρόχος απόσβεσης των ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων μέσω του ηλεκτρικού συστήματος που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα διατριβή.

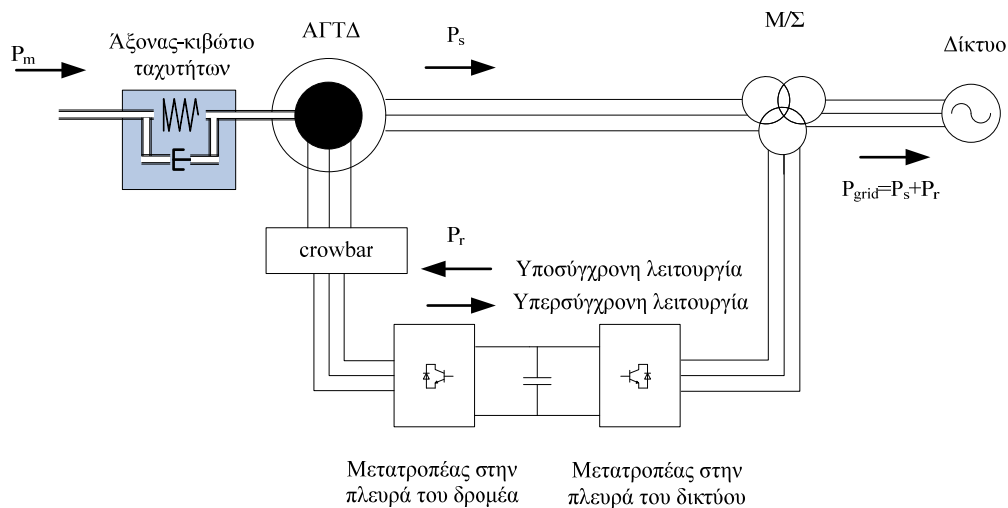
5.5. Συμπεράσματα

Στο Κεφάλαιο 5 μελετώνται τα μοντέλα του αεροδυναμικού και μηχανικού υποσυστήματος που αναπτύχθηκαν κατά τη διάρκεια της παρούσας διατριβής. Το *οιωνεί στατικό* μοντέλο δρομέα, που χρησιμοποιείται σε έρευνες φαινομένων που αφορούν στην αλληλεπίδραση Α/Γ και ηλεκτρικού δικτύου, επεκτείνεται με τη χρήση δυναμικών αεροδυναμικών συντελεστών ισχύος και ροπής, εξασφαλίζοντας την επαρκή μοντελοποίηση διακυμάνσεων ισχύος στην περιοχή απώλειας στήριξης (*stall region*). Μελετώνται οι διαφορετικές αρχές αεροδυναμικού ελέγχου που εφαρμόζονται στις Α/Γ, περιλαμβάνοντας την παθητική και ενεργή απώλεια στήριξης πτερυγίων (*passive-active stall* αντίστοιχα) και τον έλεγχο γωνίας βήματος πτερυγίων (*pitch control*). Ο τελευταίος χρησιμοποιείται στις Α/Γ μεταβλητών στροφών που παρουσιάζονται στα κεφάλαια 6 και 7 της παρούσας διατριβής. Στο σύστημα ελέγχου γωνίας βήματος έχει προστεθεί ένα σύστημα προκαθορισμένων κερδών (*gain scheduling*) με στόχο την αντιστάθμιση μη γραμμικών αεροδυναμικών χαρακτηριστικών. Το ολικό κέρδος του συστήματος ελέγχου γωνίας βήματος διατηρείται σταθερό, μεταβάλλοντας τις παραμέτρους του ελεγκτή με τρόπο που να αντισταθμίζεται η διακύμανση της ευαισθησίας $\frac{dP}{d\theta}$ στις

διαφορετικές ταχύτητες ανέμου. Επιπλέον, περιλαμβάνεται η μοντελοποίηση του μηχανικού συστήματος μετάδοσης της κίνησης, που συνδέει το δρομέα μέσω του ενδεχόμενου κιβωτίου ταχυτήτων με το δρομέα της γεννήτριας. Έμφαση δίνεται στο μοντέλο δυο μαζών, με το οποίο επιτυγχάνεται ικανοποιητική προσομοίωση των στρεπτικών χαρακτηριστικών του μηχανικού συστήματος κατά τη διάρκεια μεταβατικών φαινομένων στο δίκτυο αλλά και ταχέων μεταβολών στην ταχύτητα ανέμου. Σημειώνεται ότι, στο Παράρτημα γίνεται περιγραφή των εξισώσεων μοντέλου έξι μαζών για λόγους πληρότητας. Το μοντέλο του μηχανικού συστήματος πρέπει να εξασφαλίζει την ακριβή προσομοίωση των ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων που ενδέχεται να διεγερθούν στο μηχανικό σύστημα των Α/Γ, με απώτερο στόχο τη σχεδίαση πρόσθετου συστήματος ελέγχου που να εξασφαλίζει την επαρκή απόσβεση τους, θέμα που μελετάται στο Κεφάλαιο 7 για Α/Γ Τύπου Δ2.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 – Ανεμογεννήτρια με Ασύγχρονη Γεννήτρια Τυλιγμένου Δρομέα Διπλής τροφοδότησης (Τύπου Γ) – Ηλεκτρικό Σύστημα και Έλεγχος

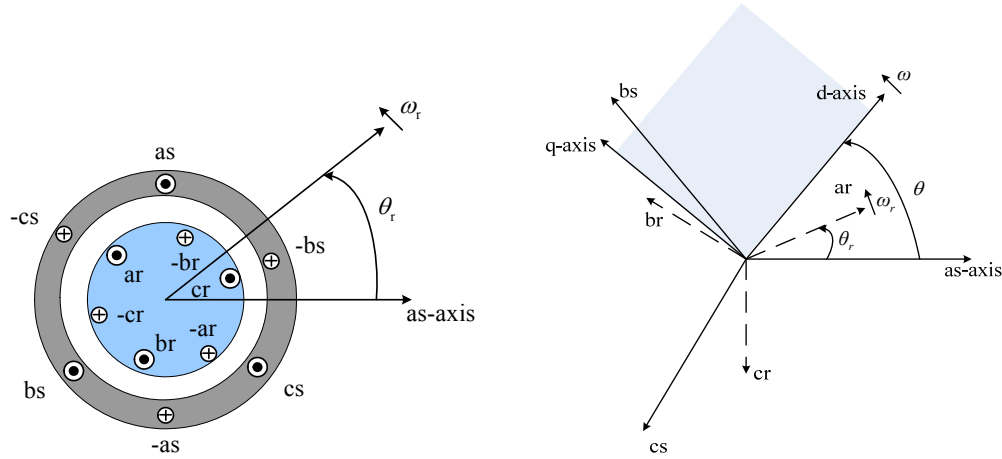
Στη διαμόρφωση ανεμογεννήτριας Τύπου Γ χρησιμοποιείται ασύγχρονη γεννήτρια τυλιγμένου δρομέα, ο οποίος συνδέεται μέσω μετατροπέα τύπου πηγής τάσης στο δίκτυο, βλέπε Σχήμα 6.1. Ο μετατροπέας παρέχει τις τάσεις σε συχνότητα ολίσθησης στο κύκλωμα του δρομέα, η μεταβλητότητα των οποίων εξασφαλίζει τη λειτουργία μεταβλητών στροφών της γεννήτριας και τον ανεξάρτητο έλεγχο της ενεργού και αέργου ισχύος. Ο στάτης συνδέεται απ' ευθείας στο δίκτυο και αποδίδει ισχύ P_s στο δίκτυο, ενώ ανάλογα με το πλάτος και τη φάση των τάσεων του δρομέα, ο μετατροπέας άλλοτε εγχύει ισχύ P_r στο δίκτυο (υπερσύγχρονη λειτουργία) και άλλοτε διοχετεύει ισχύ από το δίκτυο στο δρομέα (υποσύγχρονη λειτουργία). Αυτή η αμφίδρομη ροή ισχύος στο μετατροπέα απαιτεί τη χρήση ενεργών ημιαγωγικών διακοπών, π.χ. IGBTs ή GTOs.



Σχήμα 6.1. Ηλεκτρική διαμόρφωση ανεμογεννήτριας Τύπου Γ

6.1. Μοντελοποίηση ασύγχρονης γεννήτριας τυλιγμένου δρομέα

Ο στάτης της τριφασικής ασύγχρονης γεννήτριας αποτελείται από τρία όμοια τυλίγματα as , bs , cs (δηλαδή ένα για κάθε φάση), τοποθετημένα σε απόσταση 120 ηλεκτρικών μοιρών το ένα από το άλλο κατά μήκος της περιφέρειας του διακένου, βλέπε Σχήμα 6.2. Όταν τα τυλίγματα αυτά τροφοδοτούνται από ένα συμμετρικό τριφασικό σύστημα ρευμάτων, παράγεται ένα στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο στο διάκενο της μηχανής, [KRA00]. Όσον αφορά το κύκλωμα του δρομέα, το τριφασικό κύκλωμα είναι όμοιο με το τυλίγμα του στάτη, του οποίου οι αντίστοιχες φάσεις συμβολίζονται με ar , br , cr . Η δυναμική συμπεριφορά των ασύγχρονων μηχανών περιγράφεται από ένα σύστημα διαφορικών εξισώσεων εξαρτώμενων από την ταχύτητα περιστροφής του δρομέα η οποία μεταβάλλεται συνεχώς με το χρόνο π.χ. οι αλληλεπαγωγές μεταβάλλονται με την σχετική θέση των τυλιγμάτων η οποία μεταβάλλεται με τον χρόνο, [KRA86][ONG98][ΠΑΠ95]. Πολύ συχνά είναι χρήσιμο να γίνεται αλλαγή μεταβλητών για την μείωση της πολυπλοκότητας αυτών των διαφορικών εξισώσεων (επίτευξη σταθερών αλληλεπαγωγών με τον χρόνο). Ένας τέτοιος μετασχηματισμός ανάγει τις μεταβλητές της μηχανής σε ένα στρεφόμενο πλαίσιο αναφοράς, [KRA86]. Η χρήση αυτών των μετασχηματισμών ενδείκνυται κατά την προσομοίωση-ανάλυση συστημάτων ή π.χ. όταν προσομοιώνονται συστήματα έλεγχου, που γενικά αποτελούν πολύπλοκες διαδικασίες.



Σχήμα 6.2. Ιδανικό κύκλωμα τριφασικής ασύγχρονης γεννήτριας και σχέση μεταξύ abc και αυθαίρετου dq πλαισίου-σύμβαση γεννήτριας

Οι εξισώσεις του *Park* αποτελούν το μαθηματικό εργαλείο για την περιγραφή και των μηχανών επαγωγής, [KRA00]. Τόσο το τριφασικό τύλιγμα as , bs , cs του στάτη όσο και το αντίστοιχο ar , br , cr του δρομέα αντικαθίστανται από d , q , θ τυλίγματα, τα οποία περιστρέφονται με την ηλεκτρική γωνιακή ταχύτητα ω_s της τάσεως τροφοδοσίας του στάτη. Τα δύο τυλίγματα d και q είναι ορθογώνια μεταξύ τους και ορίζουν το πλαίσιο αναφοράς dq της μηχανής επαγωγής. Ο άξονας του τυλίγματος d μπορεί πολλές φορές να θεωρηθεί ότι ταυτίζεται με τον άξονα της φάσης as του στάτη, ενώ ο άξονας q προπορεύεται κατά 90° . Το τυλίγμα θ , όπως και στην περίπτωση των σύγχρονων μηχανών, δεν είναι μαγνητικά συζευγμένο με τα άλλα δύο νέα τυλίγματα και παίζει ρόλο μόνο σε ασύμμετρες συνθήκες φόρτισης. Επειδή στην παρούσα διατριβή θα ασχοληθούμε μόνο με συμμετρικές καταστάσεις, το τυλίγμα θ παραλείπεται. Περισσότερες πληροφορίες για τη θεωρία μετασχηματισμών καθώς και για το ανά μονάδα σύστημα που χρησιμοποιείται δίνονται στο Παράρτημα.

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

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

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

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

Μοντέλο πέμπτης τάξης

Οι εξισώσεις του *Park* για τις τάσεις στάτη και δρομέα στο πλαίσιο αναφοράς dq της μηχανής και με σύμβαση γεννήτριας γράφονται ως εξής [KRA00]:

$$v_{ds} = r_s i_{ds} - \frac{\omega_s}{\omega_b} \psi_{qs} + \frac{1}{\omega_b} \dot{\psi}_{ds} \quad (6.1)$$

$$v_{qs} = r_s i_{qs} + \frac{\omega_s}{\omega_b} \psi_{ds} + \frac{1}{\omega_b} \dot{\psi}_{qs} \quad (6.2)$$

$$v_{dr} = r_r i_{dr} - \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_b} \psi_{qr} + \frac{1}{\omega_b} \dot{\psi}_{dr} \quad (6.3)$$

$$v_{qr} = r_r i_{qr} + \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_b} \psi_{dr} + \frac{1}{\omega_b} \dot{\psi}_{qr} \quad (6.4)$$

όπου

v_{ds} (v_{dr}), v_{qs} (v_{qr}) οι ανά μονάδα τάσεις των τυλιγμάτων στάτη (δρομέα) στους δύο άξονες d και q αντίστοιχα.

i_{ds} (i_{dr}), i_{qs} (i_{qr}) τα ανά μονάδα ρεύματα στάτη (δρομέα) στους δύο άξονες d και q αντίστοιχα.

ψ_{ds} (ψ_{dr}), ψ_{qs} (ψ_{qr}) οι ανά μονάδα πεπλεγμένες ροές ανά δευτερόλεπτο στάτη (δρομέα) στους δύο άξονες d και q αντίστοιχα.

ω_s , ω_r η ηλεκτρική γωνιακή ταχύτητα του πλαισίου αναφοράς dq και του δρομέα αντίστοιχα σε ηλεκτρικά rad/s.

ω_b η βασική (ονομαστική) ηλεκτρική γωνιακή ταχύτητα του συστήματος σε ηλεκτρικά rad/s, 2π.50 rad/sec.

r_s (r_r) η ανά μονάδα ωμική αντίσταση των τυλιγμάτων στάτη (δρομέα).

Σύμφωνα με τις παραπάνω σχέσεις, η δυναμική συμπεριφορά των μηχανών επαγωγής χαρακτηρίζεται από:

- Τα ηλεκτρομαγνητικά μεταβατικά φαινόμενα του τυλίγματος του στάτη (6.1) και (6.2). Τα φαινόμενα αυτά είναι, όπως και στην περίπτωση των σύγχρονων μηχανών, της τάξης των κλασμάτων του δευτερολέπτου και συνήθως αμελούνται σε μελέτες ευστάθειας.
- Τα ηλεκτρικά μεταβατικά φαινόμενα του τυλίγματος του δρομέα (6.3) και (6.4), τα οποία είναι της ίδιας χρονικής κλίμακας με τα υπομεταβατικά φαινόμενα των σύγχρονων μηχανών.
- Την εξίσωση επιταχύνσεως του δρομέα, η οποία για σύμβαση γεννήτριας περιγράφεται από την ακόλουθη σχέση:

$$2H \frac{\dot{\omega}_r}{\omega_b} = T_m - T_e \quad (6.5)$$

όπου:

- H είναι η ανηγμένη σταθερά αδράνειας της μηχανής (σε sec).
- T_e και T_m είναι αντίστοιχα η ηλεκτρομαγνητική και η μηχανική ροπή σε ανά μονάδα τιμή.

Παρατηρώντας τις εξισώσεις (6.1)-(6.4) εύκολα διακρίνεται η μη γραμμική συμπεριφορά του μοντέλου, ενώ στην πράξη είναι και χρονικά μεταβαλλόμενο καθώς οι παράμετροι της γεννήτριας μεταβάλλονται συνεχώς. Στις προσομοιώσεις που έχουν γίνει κάτι τέτοιο δεν λαμβάνεται υπόψη αφού ξεφεύγει από το πλαίσιο της εργασίας. Οι εξισώσεις είναι εκφρασμένες στο ανά μονάδα σύστημα και έχουν γραφεί υιοθετώντας σύμβαση γεννήτριας για τα ρεύματα του στάτη.

Η αναπτυσσόμενη από την γεννήτρια ηλεκτρομαγνητική ροπή δίνεται από την σχέση:

$$T_e = \frac{P_{em}}{\omega_r} = \psi_{dr} i_{qs} - \psi_{qr} i_{ds} = X_m (i_{qs} i_{dr} - i_{ds} i_{qr}) \quad (6.6)$$

Όλα τα μεγέθη είναι εκφρασμένα σε (α.μ) και έχει υιοθετηθεί σύμβαση γεννήτριας για την ηλεκτρομαγνητική ροπή T_e (δηλ. είναι θετική όταν είναι επιβραδύνουσα). Στις προσομοιώσεις της εργασίας χρησιμοποιείται το μοντέλο πέμπτης τάξης ενώ στη [MAP06] γίνεται σύγκριση μεταξύ μοντέλου πέμπτης και τρίτης τάξης κατά τη διάρκεια σφαλμάτων στο δίκτυο.

Οι ανά μονάδα πεπλεγμένες ροές ανά δευτερόλεπτο στάτη και δρομέα στους δύο άξονες d και q αντίστοιχα δίνονται ως εξής:

$$\psi_{ds} = (X_{ls} + X_m) i_{qs} + X_m i_{qr} \quad (6.7)$$

$$\psi_{qs} = (X_{ls} + X_m) i_{ds} + X_m i_{dr} \quad (6.8)$$

$$\psi_{dr} = X_m i_{ds} + (X_m + X_{lr}) i_{dr} \quad (6.9)$$

$$\psi_{qr} = X_m i_{qs} + (X_m + X_{lr}) i_{qr} \quad (6.10)$$

όπου

X_{ls} , X_m , X_{lr} οι αντιδράσεις σκέδασης στάτη, μαγνητίσεως και σκέδασης δρομέα αντίστοιχα.

Ορίζονται επίσης οι σύγχρονες αντιδράσεις ως εξής:

$$X_{ss} = X_m + X_{ls} \quad (6.11)$$

$$X_{rr} = X_m + X_{lr} \quad (6.12)$$

όπου

X_{ss} η σύγχρονη αντίδραση του στάτη.

X_{rr} η σύγχρονη αντίδραση του δρομέα.

Μοντέλο τρίτης τάξης

Θα πρέπει να τονιστεί σε αυτό το σημείο ότι μια εναλλακτική λύση για την αναπαράσταση της ασύγχρονης γεννήτριας στην Α/Γ Τύπου Γ είναι το μοντέλο τρίτης τάξης, όπου αγνοούνται τα ηλεκτρομαγνητικά μεταβατικά φαινόμενα του στάτη. Το κύριο πλεονέκτημα του μοντέλου αυτού είναι η μειωμένη πολυπλοκότητα του ενώ το προφανές μειονέκτημα του είναι η μειωμένη ακρίβεια.

Οι αντίστοιχες διαφορικές εξισώσεις (6.1) και (6.2) και μετατρέπονται στις παρακάτω αλγεβρικές:

$$v_{ds} = r_s i_{ds} - \frac{\omega_s}{\omega_b} \psi_{qs} \quad (6.13)$$

$$v_{qs} = r_s i_{qs} + \frac{\omega_s}{\omega_b} \psi_{ds} \quad (6.14)$$

ενώ οι διαφορικές εξισώσεις του κυκλώματος δρομέα, (6.3) και (6.4) παραμένουν ως έχουν:

$$v_{dr} = r_r i_{dr} - \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_b} \psi_{qr} + \frac{1}{\omega_b} \dot{\psi}_{dr} \quad (6.15)$$

$$v_{qr} = r_r i_{qr} + \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_b} \psi_{dr} + \frac{1}{\omega_b} \dot{\psi}_{qr} \quad (6.16)$$

Τα ρεύματα i_{dr} και i_{qr} εκφράζονται συναρτήσει των ροών ψ_{dr} και ψ_{qr} αντίστοιχα καθώς και των ρευμάτων i_{ds} και i_{qs} αντίστοιχα, μέσω των (6.9) και (6.10), ως εξής:

$$i_{dr} = \frac{1}{X_{rr}} (\psi_{dr} - X_m i_{ds}) \quad (6.17)$$

$$i_{qr} = \frac{1}{X_{rr}} (\psi_{qr} - X_m i_{qs}) \quad (6.18)$$

Με χρήση των παραπάνω σχέσεων οι (6.7) και (6.8) γράφονται:

$$\psi_{ds} = \left(X_{ss} - \frac{X_m^2}{X_{rr}} \right) i_{ds} + \frac{X_m}{X_{rr}} \psi_{dr} \quad (6.19)$$

$$\psi_{qs} = \left(X_{ss} - \frac{X_m^2}{X_{rr}} \right) i_{qs} + \frac{X_m}{X_{rr}} \psi_{qr} \quad (6.20)$$

Ο ορισμός των ΗΕΔ, οι οποίες είναι ανάλογες των πεπλεγμένων ροών για τα τυλίγματα του δρομέα, προκύπτει ως εξής:

$$E_q' = \frac{X_m}{X_{rr}} \psi_{dr} \quad (6.21)$$

$$E_d' = -\frac{X_m}{X_{rr}} \psi_{qr} \quad (6.22)$$

Οι ΗΕΔ ονομάζονται μεταβατικές ΗΕΔ της μηχανής κατά τον εγκάρσιο (q) και τον ευθύ (d) άξονα αντίστοιχα. Ορίζεται επίσης η μεταβατική αντίδραση X_s' :

$$X_s' = X_{ss} - \frac{X_m^2}{X_{rr}} \quad (6.23)$$

Αντικαθιστώντας τις (6.21) έως (6.23) στις (6.19) και (6.20), οι ροές ψ_{ds} και ψ_{qs} δίνονται ισοδύναμα:

$$\psi_{ds} = X_s' i_{ds} + E_q' \quad (6.24)$$

$$\psi_{qs} = X_s' i_{qs} - E_d' \quad (6.25)$$

Οι τάσεις λοιπόν για τα τυλίγματα του στάτη εκφράζονται με τις ακόλουθες αλγεβρικές εξισώσεις:

$$v_{ds} = r_s i_{ds} - \frac{\omega_s}{\omega_b} X_s' i_{qs} + \frac{\omega_s}{\omega_b} E_d' \quad (6.26)$$

$$v_{qs} = r_s i_{qs} + \frac{\omega_s}{\omega_b} X_s' i_{ds} + \frac{\omega_s}{\omega_b} E_q' \quad (6.27)$$

Τα ρεύματα δρομέα αντικαθίστανται αντίστοιχα στις (6.15) και (6.16) και προκύπτει:

$$\left(\frac{X_{rr}}{\omega_b r_r} \right) \left(\frac{X_m}{X_{rr}} \dot{\psi}_{dr} \right) = \frac{X_m}{r_r} v_{dr} - \frac{X_m}{X_{rr}} \psi_{dr} + \frac{X_m^2}{X_{rr}} i_{ds} + \left(\frac{X_m}{X_{rr}} \right) \left(\frac{X_{rr}}{\omega_b r_r} \right) (\omega_s - \omega_r) \psi_{qr} \quad (6.28)$$

$$\left(\frac{X_{rr}}{\omega_b r_r} \right) \left(\frac{X_m}{X_{rr}} \dot{\psi}_{qr} \right) = \frac{X_m}{r_r} v_{qr} - \frac{X_m}{X_{rr}} \psi_{qr} + \frac{X_m^2}{X_{rr}} i_{qs} - \left(\frac{X_m}{X_{rr}} \right) \left(\frac{X_{rr}}{\omega_b r_r} \right) (\omega_s - \omega_r) \psi_{dr} \quad (6.29)$$

Ορίζοντας τη μεταβατική χρονική σταθερά T_r' των τυλιγμάτων δρομέα σύμφωνα με τη σχέση:

$$T_r' = \frac{X_{rr}}{\omega_b r_r} \quad (6.30)$$

οι διαφορικές εξισώσεις (6.28) και (6.29) γράφονται ως εξής:

$$T_r' \dot{E}_q' = \frac{X_m}{r_r} v_{dr} - \dot{E}_q' + (X_{ss} - X_s') i_{ds} + (\omega_s - \omega_r) T_r' E_d' \quad (6.31)$$

$$T_r' \dot{E}_d' = \frac{X_m}{r_r} v_{qr} - \dot{E}_d' + (X_{ss} - X_s') i_{qs} - (\omega_s - \omega_r) T_r' E_q' \quad (6.32)$$

Η ηλεκτρομαγνητική ροπή εκφράζεται συναρτήσει των ρευμάτων δρομέα χρησιμοποιώντας τις (6.21) και (6.22) ως εξής:

$$T_e = \psi_{qr} i_{dr} - \psi_{dr} i_{qs} = E_d' i_{ds} + E_q' i_{qs} \quad (6.33)$$

Τα μοντέλα τρίτης τάξης χρησιμοποιούνται εκτενώς σε μελέτες ευστάθειας που περιλαμβάνουν τόσο σύγχρονες μηχανές όσο και μηχανές επαγωγής. Μεταξύ των πλεονεκτημάτων αυτής της απλοποίησης είναι η εύκολη διασύνδεση με το μοντέλο του δικτύου και μεγαλύτερα βήματα ολοκλήρωσης. Η απλούστευση αυτή φαίνεται ακριβής όταν η Α/Γ λειτουργεί κοντά στη σύγχρονη ταχύτητα, διότι η συχνότητα του ρεύματος του δρομέα είναι κοντά στο μηδέν και το σημείο λειτουργίας είναι παρόμοιο με αυτό μιας σύγχρονης γεννήτριας. Εν τούτοις η κατάσταση αλλάζει όσο η ταχύτητα απομακρύνεται από τη σύγχρονη. Υπάρχει μεγάλη ποικιλία μελετών και προσομοιώσεων που καταλήγουν στο συμπέρασμα ότι τα επιχειρήματα που αναπτύσσονται για το αποτέλεσμα των μεταβατικών του στάτη στα μοντέλα των σύγχρονων γεννητριών είναι επίσης εφαρμόσιμα στα μοντέλα των Α/Γ Τύπου Γ. Σύμφωνα με αυτήν την άποψη λοιπόν τα μεταβατικά του στάτη μπορούν να αγνοηθούν εξαιτίας των ακόλουθων [LED04]:

- Τα αποτελέσματα προσομοιώσεων σε συνθήκες βραχυκυκλώματος όταν η μηχανή λειτουργεί ακόμα και σε ταχύτητες διαφορετικές από τη σύγχρονη είναι παρόμοια από την πλευρά της ευστάθειας

- Όσον αφορά την ταχύτητα του δρομέα της ΓΕΔΤ, τα αποτελέσματα είναι πιο συντηρητικά.

Στην περίπτωση που ο έλεγχος της Α/Γ γίνεται με ανεξάρτητο έλεγχο ενεργού και αέργου ισχύος, η απλούστευση αυτή οδηγεί μόνο σε αγνόηση των μεταβατικών της θεμελιώδους συχνότητας (μεταβατικά των 50 Hz για την περίπτωση του ελληνικού ηλεκτρικού δικτύου) σε όλα τα ηλεκτρικά μεγέθη της Α/Γ. Εν τούτοις, σε μελέτες ευστάθειας με θέμα τις συνέπειες ενός βραχυκυκλώματος στο ηλεκτρικό σύστημα απαιτείται πιο λεπτομερής ανάλυση και προσεκτική επιχειρηματολογία, όσον αφορά τη χρήση μοντέλου μειωμένης τάξης. Το βασικό επιχείρημα για την αγνόηση των μεταβατικών του στάτη σε μοντέλα Α/Γ Τύπου Γ που χρησιμοποιούνται σε τέτοιου είδους μελέτες, είναι η εφαρμογή του ανεξάρτητου ελέγχου για την ενεργό και την άεργο ισχύ ή απλοποιήσεις με στόχο τη μείωση των υπολογιστικών χρόνων και της πολυπλοκότητας. Το τελευταίο επιχείρημα από τα παραπάνω - που αφορά στην πολυπλοκότητα - είναι προφανώς αφύσικο, αλλά έχει συνδεθεί με την περίοδο που οι υπολογιστικές δυνατότητες πολλά χρόνια πριν ήταν μικρές. Η επιχειρηματολογία που αφορά την εφαρμογή του ανεξάρτητου ελέγχου φαίνεται να είναι πιο σχετική. Σε αυτήν την περίπτωση, η φυσική συμπεριφορά της Α/Γ έχει να κάνει περισσότερο με τη συμπεριφορά και τη δυνατότητα ελέγχου μιας σύγχρονης μηχανής.

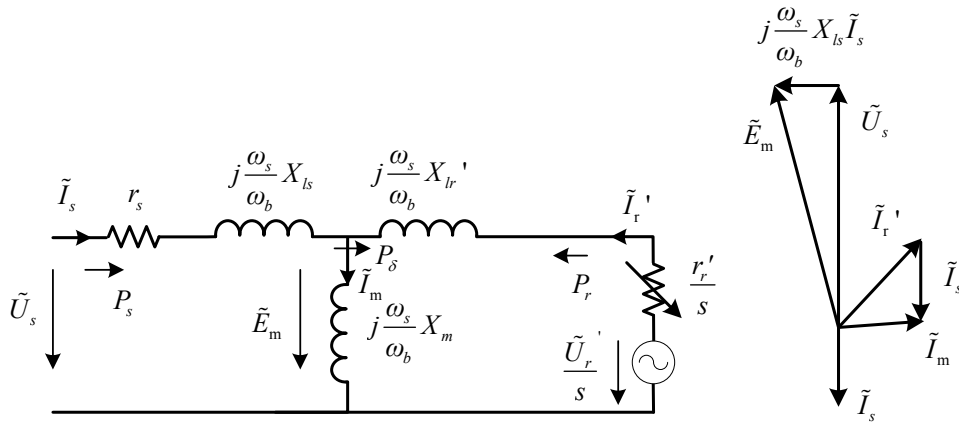
Λεπτομερής ανάλυση για την αγνόηση των μεταβατικών του στάτη στην περίπτωση ερευνών ευστάθειας στα ηλεκτρικά συστήματα με σύγχρονες γεννήτριες δίνεται στο [KUN94]. Σε αυτές τις έρευνες, αναφέρεται παρόμοια ότι ενδεχόμενες ασυμφωνίες ανάμεσα στις ηλεκτρικές ιδιότητες χρησιμοποιώντας μοντέλα 3ης ή 5ης τάξης θα έχουν μόνο ακαδημαϊκό ενδιαφέρον *αν και μόνο αν* η προστασία του μετατροπέα από υπερεντάσεις δεν περιλαμβάνεται στις έρευνες. Ο μετατροπέας της Α/Γ Τύπου Γ, παρ' όλα αυτά, σχεδιάζεται συχνά για να χειρίζεται μόνο την ισχύ του δρομέα (και τη μαγνήτιση της γεννήτριας μέσω του κυκλώματος του δρομέα), σαν βασικό πλεονέκτημα αυτής της εφαρμογής μεταβλητών στροφών. Από την άλλη πλευρά αυτό θα μπορούσε να κάνει το μετατροπέα το πιο ευαίσθητο κομμάτι της Α/Γ διότι τα ρεύματα που διέρχονται μέσω του μετατροπέα είναι περιορισμένα (πρέπει να ληφθεί υπ' όψιν ότι τα IGBT's του μετατροπέα μπορούν να καταστραφούν από υπερεντάσεις).

Ένας αριθμός από ηλεκτρικά μεγέθη όπως τα ρεύματα στο στάτη, στο δρομέα και στο μετατροπέα από την πλευρά του δικτύου, καθώς και η τάση παρακολουθούνται με στόχο την *προστασία του μετατροπέα* κατά τη διάρκεια διαταραχών σε ολόκληρο το δίκτυο. Από σύγκριση αποτελεσμάτων μεταξύ των μοντέλων τρίτης και πέμπτης τάξης, το μοντέλο τρίτης τάξης γενικά προβλέπει χαμηλές τιμές για τα ρεύματα του στάτη και του δρομέα σαν αποτέλεσμα της αγνόησης των μεταβατικών θεμελιώδους συχνότητας. Οι ασυμφωνίες που προκύπτουν από την απλούστευση του μοντέλου εμφανίζονται όταν το βραχυκύκλωμα εφαρμόζεται στο δίκτυο και εξακολουθούν να υπάρχουν ακόμα και όταν το σφάλμα εκκαθαρίζεται. Σημειώνεται ότι η τάξη του μοντέλου της συμβατικής ασύγχρονης γεννήτριας δεν παίζει κανένα ρόλο όσον αφορά στη συμπεριφορά των ηλεκτρικών μεγεθών της γεννήτριας και την ευστάθεια. Αυτό σημαίνει ότι το απλουστευμένο μοντέλο, όπου τα μεταβατικά αγνοούνται, μπορεί να οδηγήσει σε παραπλανητικά συμπεράσματα σε θέματα σχετικά με την δράση του μετατροπέα (προστασία και μπλοκάρισμα έναντι αδιάλλειπτης λειτουργίας) και στο αποτέλεσμα ως προς μια δεδομένη περίπτωση μελέτης ευστάθειας. Το γεγονός ότι ο μετατροπέας που συνδέεται στο ανοικτό κύκλωμα του δρομέα αποτελείται από ηλεκτρονικά ισχύος, που απαιτούν προστασία έναντι ηλεκτρικών και θερμικών υπερεντάσεων/καταστροφών, διαφοροποιεί την Α/Γ Τύπου Γ από άλλες συμβατικές (σύγχρονες ή ασύγχρονες) γεννήτριες με βραχυκυκλωμένο δρομέα. Το μοντέλο πρέπει να παράγει σωστά αποτελέσματα για τα ρεύματα με στόχο την εκτίμηση του κινδύνου ενδεχόμενων καταστροφών των ηλεκτρονικών ισχύος του μετατροπέα, [AKH02a][MAR07].

Στα [HAN05][ERT89][KRA86] δίνονται πληροφορίες και για τα μοντέλα πρώτης και δεύτερης τάξης, όπου αμελούνται τα ηλεκτρομαγνητικά μεταβατικά φαινόμενα του δρομέα και διατηρείται μόνο η διαφορική εξίσωση επιταχύνσεως του δρομέα (6.5). Στο μοντέλο πρώτης τάξης, υιοθετείται η υπόθεση ότι η ισχύς της γεννήτριας είναι σε κάθε στιγμή ίση με την τιμή αναφοράς της. Στο μοντέλο δεύτερης τάξης, προστίθεται η δυναμική του ελεγκτή αέργου ισχύος, αλλά θεωρείται ότι το ρεύμα δρομέα αποκρίνεται στιγμιαία, δηλαδή ισούται με την τιμή αναφοράς του.

6.2. Ανάλυση μονίμου καταστάσεως

Θεωρώντας όλα τα ηλεκτρικά μεταβατικά ότι έχουν καταλήξει σε μόνιμη κατάσταση, προκύπτουν οι εξισώσεις μονίμου καταστάσεως. Παρ' όλα αυτά, η μηχανή δεν είναι απαραίτητα σε μηχανική μόνιμη κατάσταση, και επομένως η ολίσθηση μπορεί να κυμαίνεται. Αν και η εξίσωση κίνησης (6.5) είναι σε ισορροπία, τότε πρόκειται για πλήρη μόνιμη κατάσταση του συστήματος, [TSO03]. Οι εξισώσεις του μοντέλου τέταρτης τάξης της ασύγχρονης γεννήτριας σε συνδυασμό με τους περιορισμούς της μόνιμης κατάστασης λειτουργίας οδηγούν στο ανά φάση ισοδύναμο κύκλωμα μονίμου κατάστασης του Σχήματος 6.3 για συχνότητα λειτουργίας ω_s . Το ρεύμα του στάτη έχει σχεδιαστεί με σύμβαση κινητήρα ενώ οι αντιδράσεις του κυκλώματος είναι υπολογισμένες σε συχνότητα ω_b .



Σχήμα 6.3. Ισοδύναμο κύκλωμα μονίμου καταστάσεως της ασύγχρονης γεννήτριας σε A/Γ Τύπου Γ και διανυσματικό διάγραμμα φασιθετών

Το ισοδύναμο κύκλωμα δίνει τις ακόλουθες εξισώσεις εκφρασμένες με διανύσματα χώρου (*space vectors*):

$$\tilde{U}_s = r_s \tilde{I}_s + j \frac{\omega_s}{\omega_b} X_{ls} \tilde{I}_s + j \frac{\omega_s}{\omega_b} X_m \tilde{I}_m \quad (6.34)$$

$$\frac{\tilde{U}_r'}{s} = \frac{r_r'}{s} \tilde{I}_r' + j \frac{\omega_s}{\omega_b} X_{lr}' \tilde{I}_r' + j \frac{\omega_s}{\omega_b} X_m \tilde{I}_m \quad (6.35)$$

όπου

\tilde{U}_s τάση στάτη

r_r' αντίσταση τυλίγματος δρομέα αναφερόμενο στην πλευρά του στάτη

\tilde{I}_s ρεύμα στάτη

X_{lr}' αντίδραση σκέδασης δρομέα αναφερόμενη στην πλευρά του στάτη

\tilde{U}_r' τάση δρομέα αναφερόμενη στην πλευρά του στάτη

\tilde{I}_m ρεύμα μαγνήτισης

\tilde{I}_r' ρεύμα δρομέα αναφερόμενο στην πλευρά του

s ολίσθηση στάτη

Η ολίσθηση (*slip*) ορίζεται ως η ποσοστιαία διαφορά της ταχύτητας του κινητήρα από τη σύγχρονη ταχύτητα:

$$s = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s} \times 100\% \quad (6.36)$$

Η ισχύς διακένου P_δ μεταφέρεται από το στάτη μέσω του διακένου στο δρομέα και είναι ίση με:

$$P_\delta = P_s - 3r_s |\tilde{I}_s|^2 = 3 \frac{r_r'}{s} |\tilde{I}_r'|^2 - 3R \left\{ \frac{\tilde{U}_r'}{s} \tilde{I}_r'^* \right\} \quad (6.37)$$

Η μηχανική ισχύς P_{mech} ορίζεται ως:

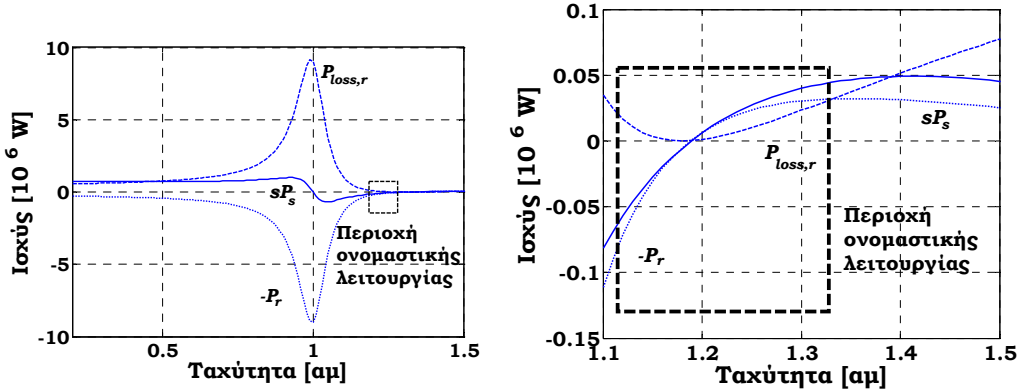
$$P_{mech} = 3 \frac{(1-s)}{s} r_r' |\tilde{I}_r'|^2 - 3R \left\{ \frac{(1-s)}{s} \tilde{U}_r' \tilde{I}_r'^* \right\} \quad (6.38)$$

Εισάγοντας και τις απώλειες δρομέα, $P_{loss,r}$, η (6.37) γράφεται:

$$s \cdot P_\delta = 3r_r' |\tilde{I}_r'|^2 - 3R \left\{ \tilde{U}_r' \tilde{I}_r'^* \right\} = P_{loss,r} - P_r \quad (6.39)$$

Αμελώντας τις απώλειες στάτη, $P_{loss,s} = 3r_s |\tilde{I}_s|^2$, και δρομέα, $P_{loss,r} = 3r_r' |\tilde{I}_r'|^2$, προκύπτει η γνωστή εξίσωση που συνδέει την ισχύ στάτη και δρομέα σε μια ανεμογεννήτρια Τύπου Γ:

$$P_r = -s \cdot P_s \quad (6.40)$$

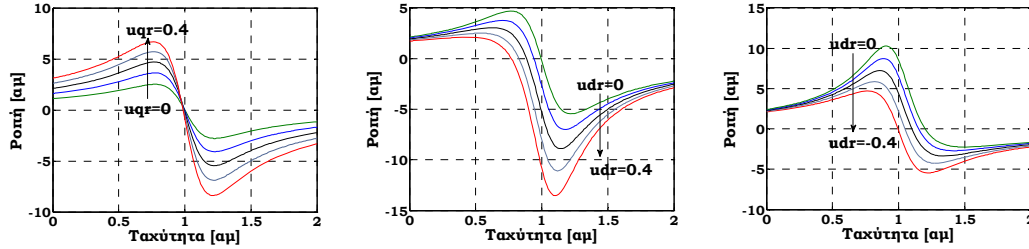


Σχήμα 6.4. Καμπύλες μόνιμης κατάστασης ανεμογεννήτριας Τύπου Γ – λεπτομέρεια στην περιοχή ονομαστικής λειτουργίας

Η ισότητα (6.40) ισχύει, όπως αποτυπώνεται και στο Σχήμα 6.4, σε μια περιοχή γύρω από το σημείο λειτουργίας – το οποίο στο σχήμα επιλέχθηκε να είναι στην περιοχή ονομαστικής ταχύτητας της ανεμογεννήτριας, [GAI06].

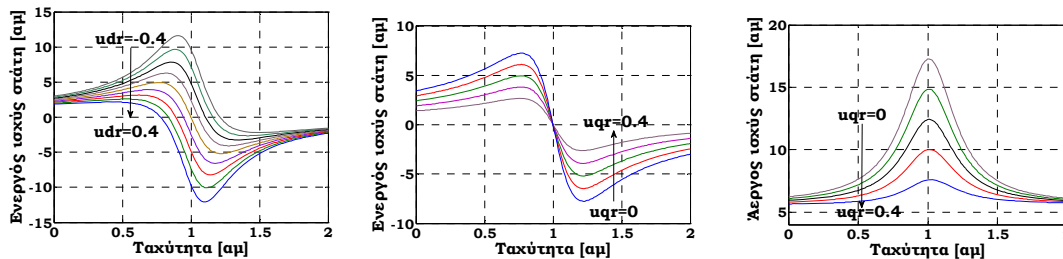
Αντίθετα με μια τυπική ασύγχρονη γεννήτρια, η χαρακτηριστική ροπής-ταχύτητας σε μια Α/Γ Τύπου Γ, δεν εξαρτάται μόνο από την τάση στάτη αλλά και από την εγχυόμενη μέσω του μετατροπέα τάση δρομέα. Το πλάτος και η γωνία της τάσης δρομέα αλλάζουν καθώς μεταβάλλονται τα σήματα ελέγχου ενεργού και αέργου ισχύος από το μετατροπέα στην πλευρά του δρομέα. Όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 6.5, όταν αλλάζει πρόσημο το πραγματικό μέρος της τάσης δρομέα $\Re[\tilde{U}_r']$ η χαρακτηριστική μετατοπίζεται αναλόγως και η ολίσθηση κενού φορτίου, s_{NL} , όπως ορίζεται στην (6.41), περνάει στην υποσύγχρονη περιοχή. Στην περίπτωση αυτή, η ισχύς του δρομέα, P_r , διοχετεύεται από το κύκλωμα του δρομέα στο δίκτυο.

$$s_{NL} = \frac{\Re[\tilde{U}_r']}{|U_s|} \quad (6.41)$$



Σχήμα 6.5. Χαρακτηριστικές ροπής-ταχύτητας για A/G Τύπου Γ με διαφορετική τάση δρομέα, $v_{dr} = 0$, $v_{qr} = 0.2$, και $v_{dr} > 0$, $v_{qr} = 0.2$ και $v_{dr} < 0$ αντίστοιχα

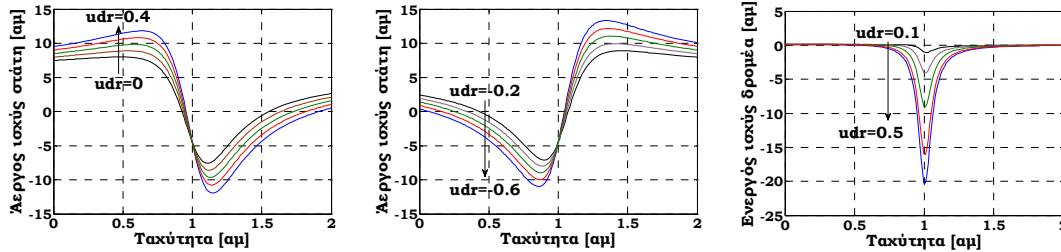
Η ολίσθηση λειτουργίας καθορίζεται επομένως και από την τάση δρομέα. Τα χαρακτηριστικά ισχύος και ηλεκτρομαγνητικής ροπής διαφέρουν επομένως από αυτά σε μια A/G Τύπου A ή B που χρησιμοποιούν ασύγχρονη γεννήτρια. Στα παραπάνω αποτελέσματα έχει θεωρηθεί ότι η συνιστώσα v_{qr} παραμένει θετική για τον έλεγχο της ενεργού ισχύος, η v_{dr} μπορεί να αλλάζει πρόσημο κατά τον έλεγχο της αέργου ισχύος και όλες οι μεταβλητές είναι εκφρασμένες στο αμ σύστημα, όπως περιγράφεται στο Παράρτημα. Στο Σχήμα 6.5, όταν και οι δύο συνιστώσες της τάσης δρομέα είναι μηδενικές, η χαρακτηριστική είναι αυτή που αντιστοιχεί σε μια τυπική ασύγχρονη γεννήτρια και η λειτουργία γεννήτριας εξασφαλίζεται μόνο σε ταχύτητες μεγαλύτερες της σύγχρονης. Όταν αυξάνεται το φανταστικό μέρος της τάσης δρομέα, v_{qr} , ενώ παράλληλα το πραγματικό μέρος, v_{dr} , παραμένει σταθερό, η χαρακτηριστική μετατοπίζεται από την περιοχή υπερσύγχρονης σε περιοχή υποσύγχρονης λειτουργίας, και η εξασφαλίζεται η ευστάθεια καθώς η ροπή αποσυγχρονισμού αυξάνεται επίσης. Για σταθερή δηλαδή τιμή ροπής, αυξάνοντας τη v_{qr} , η ταχύτητα της A/G Τύπου Γ παίρνει τιμές μικρότερες της σύγχρονης ταχύτητας. Αντίστοιχα, η αύξηση της v_{dr} , κρατώντας σταθερή τη v_{qr} , η ευσταθής λειτουργία της γεννήτριας μετατοπίζεται προς την υποσύγχρονη περιοχή, ενώ η ροπή αποσυγχρονισμού αυξάνεται για αρνητικές τιμές της v_{dr} .



Σχήμα 6.6. Ενεργός ισχύς στάτη με $v_{qr} = 0.2$, Ενεργός ισχύς στάτη με $v_{dr} = 0$ και $v_{qr} > 0$, Αεργος ισχύς στάτη με $v_{dr} = 0$ και $v_{qr} > 0$ αντίστοιχα

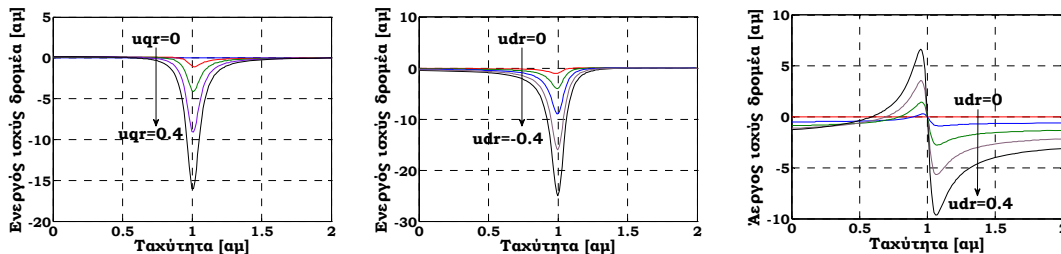
Μια A/G Τύπου A τροφοδοτεί ενεργό ισχύ το δίκτυο σε ταχύτητες μεγαλύτερες της σύγχρονης αλλά απορροφά άεργο ισχύ από το δίκτυο για την κάλυψη των αναγκών αέργου ισχύος σκέδασης και μαγνήτισης. Η χαρακτηριστική αυτή τροποποιείται σε μια A/G Τύπου Γ, όπως φαίνεται και από το Σχήμα 6.6. Μεταβάλλοντας τις συνιστώσες v_{qr} είτε v_{dr} στη θετική περιοχή, οι χαρακτηριστικές ενεργού ισχύος μετατοπίζονται στην υποσύγχρονη περιοχή λειτουργίας. Καθώς η v_{dr} αυξάνεται από αρνητικές σε θετικές τιμές, η ενεργός ισχύς σταδιακά από εισερχόμενη στην ασύγχρονη μηχανή (λειτουργία κινητήρα) μεταβάλλεται σε εξερχόμενη στο δίκτυο (λειτουργία γεννήτριας). Από την τελευταία παράσταση του Σχήματος 6.6 αλλά και τις δύο πρώτες του Σχήματος 6.7, προκύπτει ότι η αύξηση της v_{qr} οδηγεί σε αύξηση των αναγκών σε άεργο ισχύ για την ασύγχρονη γεννήτρια διπλής τροφοδότησης. Αντίθετα η αύξηση της v_{dr} μειώνει την κατανάλωση αέργου ισχύος, ενώ θα

μπορούσε να προκύψει και χωρητική συμπεριφορά, δηλαδή να παραχθεί άεργος ισχύς. Η αύξηση της v_{dr} σε αρνητικές τιμές προκαλεί αύξηση των αναγκών σε άεργο ισχύ. Από τα παραπάνω προκύπτει ότι κατάλληλος συνδυασμός ελέγχου των συνιστωσών της τάσης δρομέα εξασφαλίζει βέλτιστη λειτουργία της Α/Γ Τύπου Γ όσον αφορά την αναπτυσσόμενη ηλεκτρομαγνητική ροπή, την ενεργό και την άεργο ισχύ.



Σχήμα 6.7. Άεργος ισχύς στάτη με $v_{qr}=0.2$ και $v_{dr}>0$, Άεργος ισχύς στάτη με $v_{qr}=0.2$ και $v_{dr}<0$, Ενεργός ισχύς δρομέα με $v_{qr}=0$ και $v_{dr}>0$ αντίστοιχα

Οι χαρακτηριστικές ισχύος δρομέα που τροφοδοτούνται μέσω του μετατροπέα στο δίκτυο εξαρτώνται κυρίως από το πλάτος της εγχυόμενης τάσης δρομέα. Για υψηλές τιμές της τάσης, η ενεργός ισχύς δρομέα είναι μέγιστη στη σύγχρονη ταχύτητα, όπου ο δρομέας της γεννήτριας διπλής τροφοδότησης είναι βραχυκυκλωμένος. Κατάλληλος έλεγχος των συνιστωσών της τάσης δρομέα είναι καθοριστικός για την αποφυγή επικίνδυνων υπερρευσμάτων στο κύκλωμα του δρομέα. Προφανώς, όταν δεν εγχύεται τάση στο δρομέα, δεν υπάρχει ροή ισχύος από και προς το δρομέα μέσω του μετατροπέα. Όταν αυξάνεται η τάση δρομέα σταδιακά, η ροή αέργου ισχύος από το δρομέα προς το μετατροπέα αυξάνεται όσο η γεννήτρια παραμένει στην υποσύγχρονη περιοχή λειτουργίας. Στην υπερσύγχρονη περιοχή, η ροή αέργου ισχύος αλλάζει κατεύθυνση και ο δρομέας απορροφάει άεργο ισχύ.



Σχήμα 6.8. Ενεργός ισχύς δρομέα με $v_{dr}=0.2$ και $v_{qr}>0$, Ενεργός ισχύς δρομέα με $v_{qr}=0.2$ και $v_{dr}<0$, Άεργος ισχύς δρομέα με $v_{qr}=0.2$ και $v_{dr}>0$ αντίστοιχα

6.3. Σύστημα ελέγχου ανεμογεννήτριας Τύπου Γ

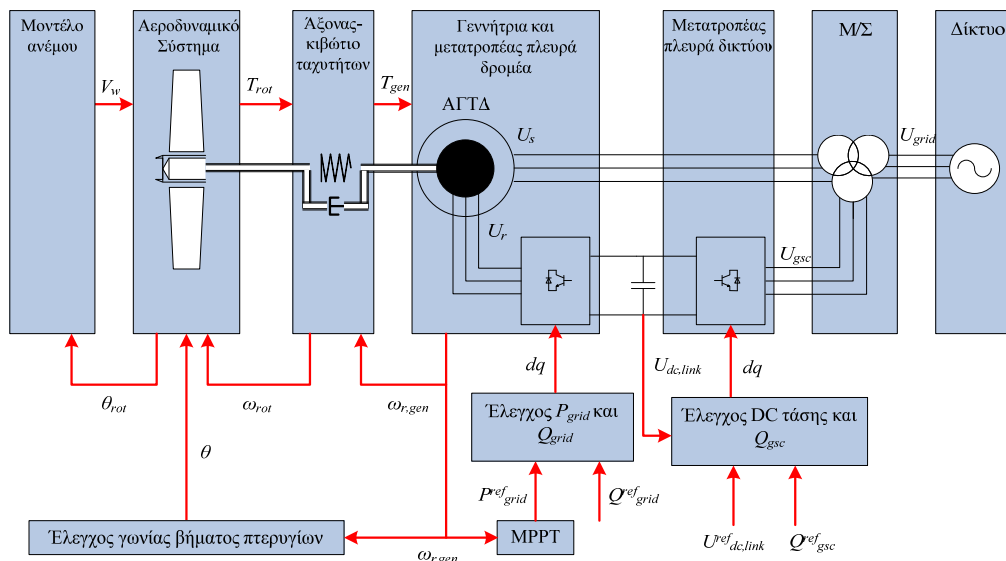
Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα των ανεμογεννητριών μεταβλητών στροφών είναι η μέγιστη ενεργειακή απόδοση με την παρακολούθηση της βέλτιστης ταχύτητας περιστροφής και η συνεισφορά στη ρύθμιση βασικών μεγεθών του δικτύου, όπως η τάση και η συχνότητα. Το σύστημα ελέγχου της γεννήτριας χρησιμοποιεί διάφορα σήματα όπως η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα, τα φασικά ρεύματα του στάτη ή του δρομέα ανάλογα με τη διαμόρφωση του σχήματος ελέγχου. Πολλά μεγέθη που είναι πρακτικά δύσκολο να μετρηθούν μπορούν να εκτιμηθούν σε πραγματικό χρόνο μέσω διαφόρων μεθόδων [BOS97][ROW95]. Οι γνωστές γενικές μέθοδοι ελέγχου στη βιβλιογραφία μπορούν να συνοψιστούν στους εξής, [KAN03]:

- Βαθμωτός έλεγχος – Εφαρμόζεται στον έλεγχο ασύγχρονων γεννητριών και έχει σαν κύριο στόχο τη διατήρηση σταθερής μαγνητικής ροής του διακένου με απευθείας ανατροφοδότησής της και στην συνέχεια τον έλεγχο της. Η απευθείας μέτρηση της ηλεκτρομαγνητικής ροής διακένου με τα αισθητήρες *Hall* δεν προτιμάται λόγω θορύβου και δυσκολίας τοποθέτησής των

αισθητήρων. Ο συνήθης τρόπος ελέγχου της μαγνητικής ροής του διακένου είναι ο έμμεσος τρόπος ελέγχου κατά τον οποίο επιβάλλεται τάση στον στάτη της γεννήτριας με μέτρο ανάλογο της συχνότητας της. Η αρχή του έμμεσου ελέγχου της ροής διακένου είναι να διατηρείται σταθερός ο λόγος της τερματικής τάσης του στάτη προς την συχνότητα τροφοδοσίας. Η τήρηση της προηγούμενης συνθήκης συνεπάγεται προσεγγιστικά την διατήρηση σταθερής ηλεκτρομαγνητικής ροής διακένου καθώς αυτή είναι ανάλογη του λόγου της τάσης διακένου προς την συχνότητα διεγέρσεως.

- Διανυσματικός έλεγχος - Οι αρχές του διανυσματικού ελέγχου πηγάζουν από τον τρόπο λειτουργίας των DC ηλεκτρικών μηχανών. Σε μια DC ηλεκτρική μηχανή οι μαγνητευρτικές δυνάμεις που εγκαθίστανται από τα ρεύματα των τυλιγμάτων του δρομέα και του στάτη θα είναι κάθετες μεταξύ τους. Συνεπώς και οι άξονες του πεδίου του στάτη και του δρομέα θα είναι κάθετοι μεταξύ τους. Τα δυο ορθογώνια μεταξύ τους πεδία δεν παρουσιάζουν καμιά αλληλεπίδραση επιτρέποντας τον αποξευγμένο έλεγχο τους. Ο διανυσματικός έλεγχος ονομάζεται *άμεσος* όταν ο προσδιορισμός της γωνίας μεταξύ του άξονα του πεδίου του δρομέα και της φάσης a του στάτη γίνεται με απευθείας μετρήσεις της ηλεκτρομαγνητικής ροής διακένου και *έμμεσος* όταν ο προσδιορισμός της γίνεται με υποκατάστατες μετρήσεις.

Στην παρούσα διατριβή χρησιμοποιήθηκε ο διανυσματικός έλεγχος για τα μοντέλα των ανεμογεννητριών μεταβλητών στροφών. Οι στρατηγικές έλεγχου και η λειτουργία της ανεμογεννήτριας *Τύπου Γ* έχουν μελετηθεί εκτενώς στη βιβλιογραφία τα τελευταία χρόνια, [LEO01][MOH96][NOV98][PEN96]. Το γενικό σύστημα έλεγχου που αναπτύχθηκε στην παρούσα διατριβή μπορεί να χωριστεί σε δύο μεγάλα υποσυστήματα – το σύστημα έλεγχου γωνίας βήματος πτερυγίων, όπως περιγράφηκε στην ενότητα του αεροδυναμικού συστήματος, και το σύστημα έλεγχου των μετατροπών συχνότητας, το οποίο περιγράφεται στην παρούσα ενότητα – μεταξύ των οποίων απαιτείται κατάλληλος συντονισμός. Ο χρόνος απόκρισης του πρώτου είναι μεγαλύτερος καθώς συνδέεται με την απόκριση του μηχανικού συστήματος. Ο μετατροπέας μερικής ισχύος που συνδέεται στο δρομέα της ασύγχρονης γεννήτριας επιτρέπει ανεξάρτητο έλεγχο ενεργού και άεργου ισχύος και επιτρέπει τη λειτουργία μεταβλητών στροφών με βελτιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης της ανεμογεννήτριας. Ο έλεγχος του μετατροπέα αφορά το μετατροπέα στην πλευρά του δρομέα, ο οποίος ελέγχει τη γεννήτρια εγχύοντας μεταβλητή τάση στο κύκλωμα του δρομέα και το μετατροπέα στην πλευρά του δικτύου ο οποίος ρυθμίζει τη συνεχή τάση ανάμεσα στους δύο μετατροπέες και την άεργο ισχύ που ανταλλάσσει με το δίκτυο. Το Σχήμα 6.9 παρουσιάζει τη γενική δομή του μοντέλου και τη σύνδεση των επιμέρους υποσυστημάτων.



Σχήμα 6.9. Βασική διαμόρφωση ελέγχου μοντέλου ανεμογεννήτριας Τύπου Γ

Ο έλεγχος της γεννήτριας χρησιμοποιεί το μετασχηματισμό των τριφασικών μεγεθών σε κατάλληλα πλαίσια αναφοράς dq , σύμφωνα με τη γενική θεωρία μετασχηματισμών που αναλύεται στο Παράρτημα. Ένας συνήθης τρόπος είναι η χρήση του διανύσματος της ροής στάτη η δρομέα για τον έλεγχο ρεύματος (*field oriented current control*), που επιτρέπει τον αποζευγμένο έλεγχο ενεργού και αέργου ισχύος, [NOV98]. Στην περίπτωση που επιλέγεται το διάνυσμα ροής στάτη, ο άξονας d του πλαισίου αναφοράς συνδέεται με το διάνυσμα της ροής, και καθώς αυτό περιστρέφεται με την ηλεκτρική συχνότητα του στάτη όλες οι ποσότητες του στάτη – ροή, ρεύμα και τάση – προκύπτουν ως ποσότητες μόνιμης κατάστασης (*Stator Flux Reference Frame – SFRF – Synchronous Frame*³). Ο έλεγχος του μετατροπέα στην πλευρά του δρομέα γίνεται σε αυτό το πλαίσιο. Αμελώντας την αντίσταση του στάτη η ροή ισούται με το ολοκλήρωμα της τάσης στάτη, επομένως το διάνυσμα της τάσης στάτη είναι κάθετο στο διάνυσμα της ροής. Σύμφωνα με το [KRA00] η ενεργός και η αέργος ισχύς στάτη δίνονται από τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$\left. \begin{aligned} P_s &= v_{ds} i_{ds} + v_{qs} i_{qs} \\ Q_s &= v_{ds} i_{qs} - v_{qs} i_{ds} \end{aligned} \right\} \begin{aligned} &\xrightarrow{SFRF} P_s = v_{qs} i_{qs} \\ &\xrightarrow{v_d=0} Q_s = -v_{qs} i_{ds} \end{aligned} \quad (6.42)$$

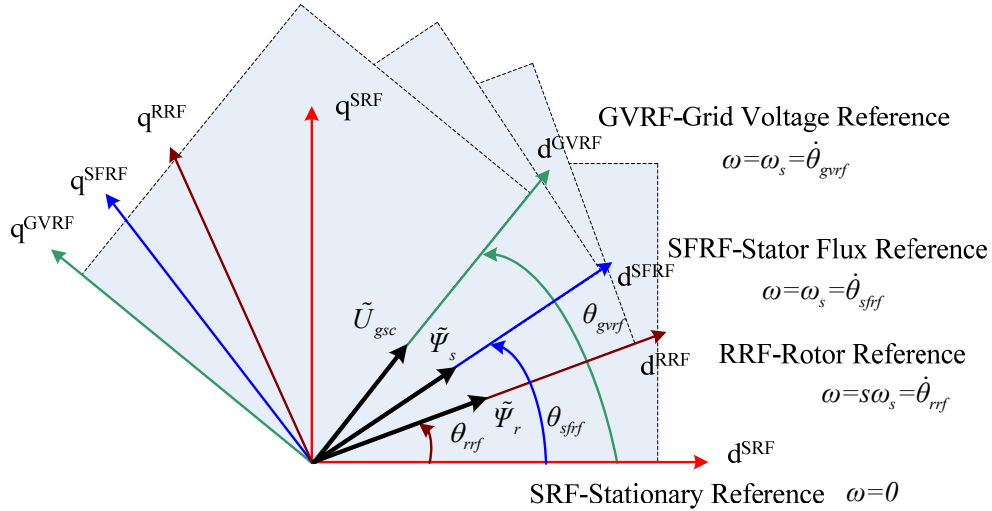
Αντίθετα με την ανάλυση του μοντέλου της γεννήτριας που παρουσιάζεται στην αρχή της παρούσας ενότητας, όπου χρησιμοποιείται το *SFRF* πλαίσιο αναφοράς, ενδέχεται να χρησιμοποιηθεί το πλαίσιο αναφοράς του δρομέα (*Rotor Reference Frame –RRF*) που συνδέεται με το διάνυσμα ροής του δρομέα της γεννήτριας⁴, [HAN03]. Η γωνιακή θέση του πλαισίου αναφοράς είναι ουσιαστικά η θέση του δρομέα. Η ταχύτητα περιστροφής του πλαισίου ως προς το στάτη είναι η ταχύτητα ολίσθησης του δρομέα, $s\omega_s$. Στην περίπτωση του μετατροπέα στην πλευρά του δικτύου, χρησιμοποιείται το πλαίσιο αναφοράς τάσης δικτύου (*Grid side Converter Voltage Oriented Reference Frame – GVRF*), όπου ο άξονας d συνδέεται με το διάνυσμα της εναλασσόμενης τάσης στην έξοδο του μετατροπέα. Αντίστοιχα οι εξισώσεις για την ενεργό και αέργο ισχύ του μετατροπέα στην πλευρά του δικτύου γίνονται:

$$\left. \begin{aligned} P_{gsc} &= v_{d,gsc} i_{d,gsc} + v_{q,gsc} i_{q,gsc} \\ Q_{gsc} &= v_{d,gsc} i_{q,gsc} - v_{q,gsc} i_{d,gsc} \end{aligned} \right\} \begin{aligned} &\xrightarrow{GVRF} P_{gsc} = v_{d,gsc} i_{d,gsc} \\ &\xrightarrow{v_q=0} Q_{gsc} = v_{d,gsc} i_{q,gsc} \end{aligned} \quad (6.43)$$

Όπως προκύπτει από την (6.43), ο έλεγχος της DC τάσης γίνεται μέσω της συνιστώσας $i_{d,gsc}$ του ρεύματος του μετατροπέα και ο έλεγχος της αέργου ισχύος που ανταλλάσσει ο μετατροπέας με το δίκτυο μέσω της $i_{q,gsc}$. Στο Σχήμα 6.10 απεικονίζονται τα πλαίσια αναφοράς που αναφέρονται παραπάνω. Οι γωνιακές θέσεις εκφράζονται ως προς το ακίνητο πλαίσιο αναφοράς όπου $\omega=0$ (*Stationary Reference Frame-SRF*).

³ Επειδή η ταχύτητα περιστροφής του διανύσματος ροής στάτη είναι η σύγχρονη ταχύτητα του συστήματος $\omega_s = 2 \cdot \pi \cdot 50 \text{ rad/sec}$, το πλαίσιο αναφέρεται συχνά ως *Σύγχρονο Πλαίσιο Αναφοράς*.

⁴ Η σύμβαση αυτή χρησιμοποιείται στο μοντέλο ασύγχρονης γεννήτριας που είναι ενσωματωμένο στο λογισμικό *Power Factory*



Σχήμα 6.10. Πλαίσια αναφοράς που χρησιμοποιούνται στο μοντέλο της A/G Τύπου Γ

Για την επικοινωνία των επιμέρους υποσυστημάτων του μοντέλου απαιτούνται οι κατάλληλοι μετασχηματισμοί των μεταβλητών από το ένα πλαίσιο αναφοράς στο άλλο, [KRA86]. Ο μετασχηματισμός οποιουδήποτε μεγέθους X^{RFi} (τάση, ροή, ρεύμα) από το πλαίσιο αναφοράς RFi στο πλαίσιο αναφοράς RFk γίνεται με βάση τη σχέση:

$$X^{RFi} = X_d^{RFi} + jX_q^{RFi} = (X_d^{RFk} + jX_q^{RFk}) e^{j\Delta\theta} = X^{RFk} e^{j\Delta\theta} \quad (6.44)$$

όπου $\Delta\theta = \theta^{RFk} - \theta^{RFi}$ η διαφορά γωνίας των δύο πλαισίων.

6.4. Έλεγχος μετατροπέων

Το σύστημα μετατροπέων που συνδέεται στο δρομέα της ασύγχρονης γεννήτριας αποτελείται από δύο τριφασικούς μετατροπείς τύπου πηγής τάσης σε διαμόρφωση *back-to-back* με στοιχεία *IGBTs*. Η ταχύτατη ανάπτυξη των μικροεπεξεργαστών καθώς και η πρόοδος των ηλεκτρονικών ισχύος επιτρέπουν την χρήση προηγμένων τεχνικών *PWM* και την εφαρμογή εξελιγμένων τεχνικών ελέγχου, όπως ο διανυσματικός, ενώ συνεπάγονται την μείωση των αρμονικών της τάσης εξόδου και συνεπώς την χρήση μικρότερων φίλτρων. Ακολουθείται η προσέγγιση θεμελιώδους συχνότητας που είναι κατάλληλη κατά την ανάλυση συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Αναλυτικό μοντέλο του μετατροπέα που αναπτύχθηκε κατά τη διάρκεια της παρούσας εργασίας περιγράφεται στην [ΓΚΙ08], ενώ λεπτομέρειες για το μοντέλο δίνονται στην αντίστοιχη ενότητα. Η σχέση μεταξύ της θεμελιώδους συχνότητας της εναλασσόμενης πολικής τάσης και της *DC* τάσης για τους μετατροπείς του Σχήματος 6.11 – θεωρώντας ιδανική *DC* τάση και ιδανική διαμόρφωση *PWM* άπειρης συχνότητας διαμόρφωσης – είναι:

$$\begin{aligned} U_{AC,real} &= F_m \cdot m_{a,real} \cdot U_{dc,link} \\ U_{AC,imag} &= F_m \cdot m_{a,imag} \cdot U_{dc,link} \end{aligned} \quad (6.45)$$

όπου ο συντελεστής F_m εξαρτώνται από τη μέθοδο διαμόρφωσης (τετραγωνική ή ημιτονοειδή) και οι συντελεστές m_a χωρίζονται σε πραγματικό $m_{a,real}$ και φανταστικό μέρος $m_{a,imag}$, κυμαίνονται μεταξύ -1 και 1 για την αποφυγή φαινομένων κορεσμού και αποτελούν τις μεταβλητές ελέγχου των μετατροπέων. Στη γραμμική περιοχή ($|m_a| \leq 1$), η θεμελιώδης συνιστώσα της εναλασσόμενης τάσης ποικίλλει γραμμικά με το πλάτος του συντελεστή διαμόρφωσης m_a , [MOH89]. Στην περιοχή κορεσμού το μέγεθος των αρμονικών χαμηλής τάξης αυξάνεται σημαντικά. Στην περίπτωση της ημιτονοειδούς διαμόρφωσης, όπου οι αρμονικές είναι μειωμένες, ο συντελεστής F_m ορίζεται ως:

$$F_m = \frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{2}} \quad (6.46)$$

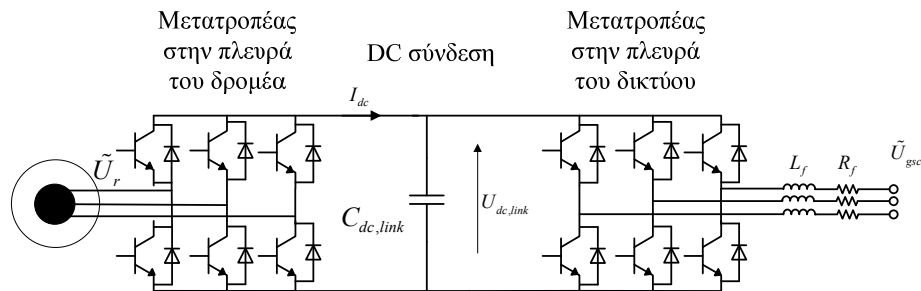
Το μοντέλο για τους μετατροπείς ολοκληρώνεται με την εξίσωση ισχύος αμελώντας τις απώλειες:

$$U_{dc,link} I_{dc} + \sqrt{3} \operatorname{Re}(\tilde{U}_{AC} \tilde{I}_{AC}^*) = 0 \quad (6.47)$$

Η διακοπτική συχνότητα των μετατροπέων κυμαίνεται σε επίπεδα kHz με αποτέλεσμα οι βασικές απώλειες να είναι οι διακοπτικές. Από τη στιγμή που οι μέσες διακοπτικές απώλειες είναι ανάλογες του τετραγώνου της DC τάσης, $U_{dc,link}^2$, μπορούν να ληφθούν υπ' όψιν μέσω μιας ωμικής αντίστασης στη DC πλευρά του μοντέλου θεμελιώδους συχνότητας, [POL03].

Υπενθυμίζεται ότι τα εναλασσόμενα μεγέθη στις εξισώσεις (6.45) και (6.47) αναφέρονται σε οποιαδήποτε από τις δύο πλευρές, είτε στου δρομέα ($\tilde{U}_{AC} = \tilde{U}_r$) είτε του δικτύου ($\tilde{U}_{AC} = \tilde{U}_{gsc}$).

Λαμβάνοντας υπ' όψιν τη σχέση (6.40) προκύπτει ότι το εύρος ταχύτητας της Α/Γ Τύπου Γ καθορίζεται από την ονομαστική ισχύ του μετατροπέα. Όσο αυξάνεται η ισχύς που μπορεί να διοχετευθεί μέσω του μετατροπέα, τόσο αυξάνεται η ολίσθηση που μπορεί να επιτευχθεί. Ο συμβιβασμός που έχει επικρατήσει μεταξύ αυξημένου μεγέθους, που συνεπάγεται αυξημένο κόστος, και αυξημένης ολίσθησης είναι περίπου στο 1/3 της ονομαστικής ισχύος της ανεμογεννήτριας, δίνοντας ένα εύρος ταχύτητας κοντά στο $\pm 30\%$.



Σχήμα 6.11. IGBT μετατροπέας back-to-back τύπου πηγής τάσης στο κύκλωμα δρομέα της Α/Γ Τύπου Γ

Στο Σχήμα 6.11 έχει προστεθεί στην έξοδο του μετατροπέα στην πλευρά του δικτύου το φίλτρο εξόδου, το οποίο περιγράφεται στη συνέχεια της παρούσας ενότητας.

Μετατροπέας στην πλευρά του δρομέα (RSC)

Στο πλαίσιο *SFRF*, όπου επιλέγεται το διάνυσμα της ροής του στάτη ως αναφορά για τον ορισμό του *dq* πλαισίου, η ροπή της ασύγχρονης γεννήτριας – και επομένως και η ενεργός ισχύς – ελέγχεται μέσω της συνιστώσας i_{qr} του ρεύματος δρομέα ενώ η άεργος ισχύς μέσω του i_{dr} . Θεωρώντας την επίδραση της αντίστασης του στάτη αμελητέα, η σχέση για την ηλεκτρομαγνητική ροπή προκύπτει από τις εξισώσεις (6.1) έως (6.4) και (6.6) ως (6.10) ως εξής, [LEO01]:

$$T_e = -\frac{X_m i_{qr}}{X_{ss} v_s} \quad (6.48)$$

όπου η ροπή είναι ανάλογη του i_{qr} και μπορεί να ρυθμιστεί μέσω της v_{qr} . Στο σημείο αυτό διακρίνονται δύο είδη ελέγχου της ΑΓΔΤ:

- Ο έλεγχος ροπής, όπου η τιμή αναφοράς i_{qr}^{ref} προκύπτει από ένα σήμα αναφοράς για την ηλεκτρομαγνητική ροπή
- Ο έλεγχος ταχύτητας, όπου η τιμή αναφοράς i_{qr}^{ref} προκύπτει από ένα εξωτερικό σχήμα ελέγχου της ταχύτητας

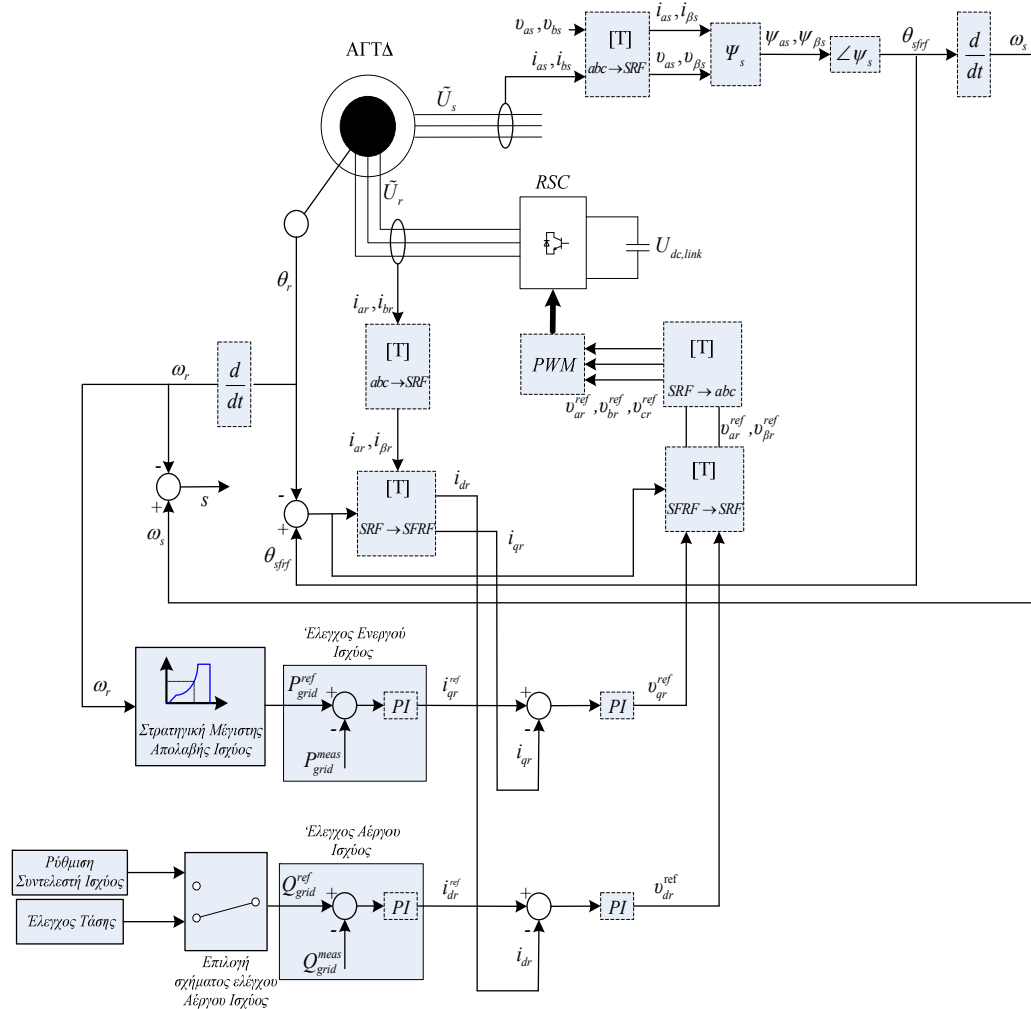
Αντίστοιχα η άεργος ισχύς προκύπτει ως συνάρτηση του i_{dr} και ρυθμίζεται μέσω της v_{dr} :

$$Q_s = \frac{v_s^2}{X_{ss}} \frac{\omega_b}{\omega_e} - \frac{X_m}{X_{ss}} v_s i_{dr} \quad (6.49)$$

Ο έλεγχος άεργου ισχύος επιτρέπει στην Α/Γ Τύπου Γ να μεταβάλλει την αέργο ισχύ που ανταλλάσσει με το δίκτυο και να συμβάλλει με δύο τρόπους στη ρύθμιση του ζεύγους τάση-άεργος ισχύς:

- Ρύθμιση Συντελεστή Ισχύος, δηλαδή με βάση την παραγωγή ενεργού ισχύος καθορίζεται μια τιμή αναφοράς για το Συντελεστή Ισχύος της A/Γ και κατά συνέπεια μια τιμή αναφοράς για την άεργο ισχύ που ανταλλάσσεται με το δίκτυο
- Ρύθμιση Τάσης, όπου η τάση, είτε στο ζυγό της ανεμογεννήτριας είτε στο Σημείο Κοινής Σύνδεσης (*Point of Common Coupling – PCC*) του αιολικού πάρκου, ελέγχεται παρέχοντας την τιμή αναφοράς για την άεργο ισχύ που ανταλλάσσεται με το δίκτυο.

Το σχήμα ελέγχου του μετατροπέα στην πλευρά του δρομέα δίνεται στο Σχήμα 6.12, όπου απεικονίζονται και οι απαραίτητοι μετασχηματισμοί πλαισίων αναφοράς. Ως είσοδος του συστήματος χρησιμοποιούνται η μετρούμενη τάση του στάτη (για συμμετρικό σύστημα αρκούν οι μετρήσεις δυο από τις τρεις φάσεις), τα μετρούμενα ρεύματα στάτη και δρομέα και η γωνία θ_r του δρομέα. Μετασχηματίζοντας την τάση και το ρεύμα στάτη στο ακίνητο πλαίσιο αναφοράς υπολογίζεται η ροή στάτη και η γωνία της ως προς τον ακίνητο πραγματικό άξονα, δίνοντας τη γωνία θ_{sfrf} του πλαισίου αναφοράς SFRF. Χρησιμοποιώντας τις επιθυμητές τιμές της ενεργού και της αέργου ισχύος υπολογίζονται οι συνιστώσες του ρεύματος αναφοράς δρομέα στο σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς οι οποίες στην συνέχεια μέσω του ελεγκτή ρεύματος δίνουν τις αναφορές για τις συνιστώσες αναφοράς της τάσης δρομέα. Με τον αντίστροφο μετασχηματισμό από το πλαίσιο SFRF στο ακίνητο πλαίσιο SRF και τελικά στο τριφασικό abc προκύπτουν οι αναφορές για τις φασικές τάσεις δρομέα που εισάγονται στο σύστημα διαμόρφωσης PWM. Μια εναλλακτική μέθοδος για τον έλεγχο του ρεύματος μέσω της τάσης εξόδου του μετατροπέα δικτύου είναι ο έλεγχος υστέρησης για το ρεύμα όπου ο άμεσος και ταχύς έλεγχος του ρεύματος είναι δυνατός χωρίς την χρήση επιπλέον ελεγκτών του ρεύματος. Ο συνδυασμός των βρόχων ελέγχου ισχύος και ρεύματος, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.12, παρουσιάζει εξαιρετική δυναμική συμπεριφορά και προσφέρει ικανοποιητική λύση σε θέματα αλληλεπίδρασης της A/Γ με το δίκτυο κατά τη διάρκεια γρήγορων μεταβατικών φαινομένων, γεγονός που έχει γενικεύσει τη χρήση του σε συστήματα ανεμογεννητριών και γενικότερα διατάξεων διεσπαρμένης παραγωγής.



Σχήμα 6.12. Δομή διανυσματικού ελέγχου για το μετατροπέα στην πλευρά του δρομέα

Ο έλεγχος του μετατροπέα περιλαμβάνει δύο επίπεδα ελεγκτών που διαφέρουν ως προς τους χρόνους απόκρισης:

- Τον αργό (εξωτερικό) βρόχο ελέγχου ισχύος (ενεργού ή αέργου) που δίνει τις τιμές αναφοράς για το ρεύμα δρομέα (i_{qr}^{ref} ή i_{dr}^{ref} αντίστοιχα) και
- Το γρήγορο (εσωτερικό) βρόχο ελέγχου ρεύματος (ενεργού ή αέργου) που ρυθμίζει τις συνιστώσες τάσης δρομέα (v_{qr}^{ref} ή v_{dr}^{ref} αντίστοιχα).

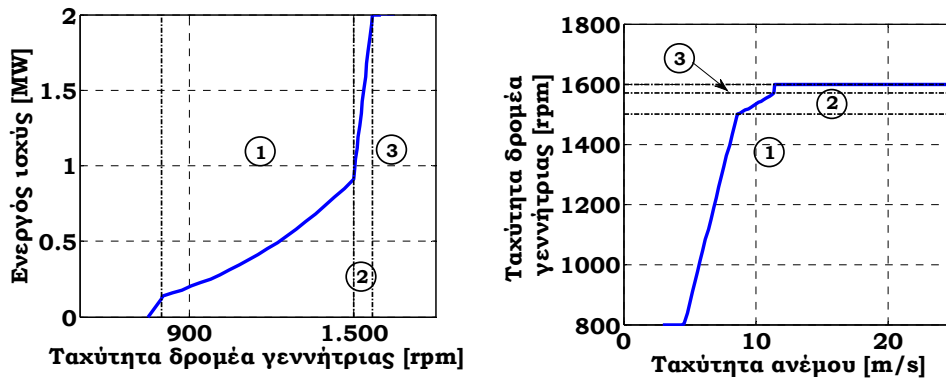
Ο μετατροπέας ελέγχει γρήγορα την ενεργό ισχύ ενώ η ταχύτητα του δρομέα, η απόκριση της οποίας καθορίζεται από τις χρονικές σταθερές του μηχανικού συστήματος, ελέγχεται από το αργό σύστημα ελέγχου γωνίας βήματος περυγίων, όπως παρουσιάζεται στην αντίστοιχη ενότητα. Και τα δύο συστήματα αυτά χρησιμοποιούν σαν σήμα εισόδου την ταχύτητα περιστροφής του δρομέα. Ο έλεγχος της ενεργού ισχύος βασίζεται στη στρατηγική Μέγιστης Απολαβής Ισχύος, σύμφωνα με την οποία για κάθε τιμή μετρούμενης ταχύτητας δρομέα προκύπτει η αντίστοιχη τιμή αναφοράς ενεργού ισχύος ικανοποιώντας τη συνθήκη μεγιστοποίησης της αεροδυναμικής απόδοσης. Η λειτουργία της Α/Γ χωρίζεται σε τρεις περιοχές:

- *Περιοχή 1:* Η περιοχή μεγιστοποίησης της αεροδυναμικής ισχύος, σε ταχύτητες ανέμου μικρότερες της ονομαστικής, όπου η ταχύτητα και η ενεργός ισχύς της Α/Γ ρυθμίζονται αυτόματα με στόχο την επίτευξη βέλτιστου λόγου ταχύτητας ακροπτερυγίου, λ_{opt} , ο οποίος αντιστοιχεί και στην βέλτιστη τιμή του αεροδυναμικού συντελεστή $C_{p,opt} = C_p(\lambda_{opt}, \beta_{opt})$. Στο

εύρος αυτό, η γωνία βήματος πτερυγίων, β , δε μεταβάλλεται αλλά διατηρείται σταθερή (στην A/Γ που προσομοιώνεται $\beta_{opt}=0$). Η ισχύς στην περιοχή αυτή παρουσιάζει ως προς την ταχύτητα περιστροφής αναλογία της μορφής $P \propto \omega^3$, [MAP06].

- *Περιοχή 2:* Η περιοχή γραμμικής αύξησης της ενεργού ισχύος συναρτήσει της ταχύτητας περιστροφής μέχρι την ονομαστική ταχύτητα. Ακολουθώντας αυτήν την τακτική επιτρέπονται μεταβατικές μεταβολές της ταχύτητας γύρω από την ονομαστική ταχύτητα για την απορρόφηση ταχέων αλλαγών στην αεροδυναμική ισχύ που προκαλούνται από ριπές ανέμου καθώς επίσης αποφεύγονται επικίνδυνες αυξημένες διακυμάνσεις ισχύος στην περιοχή μετάβασης από τη μερική φόρτιση στην περιοχή ονομαστικής λειτουργίας της A/Γ.
- *Περιοχή 3:* Η περιοχή ονομαστικής λειτουργίας, όπου η ενεργός ισχύς της A/Γ παραμένει σταθερή και ίση με την ονομαστική της τιμή, ενώ το σύστημα ελέγχου γωνίας βήματος των πτερυγίων ρυθμίζει την γωνία βήματος όποτε η ταχύτητα περιστροφής υπερβαίνει την ονομαστική τιμή.

Στο σχήμα που ακολουθεί δίνεται η χαρακτηριστική ελέγχου που υλοποιεί τη στρατηγική Μέγιστης Απολαβής Ισχύος καθώς και η χαρακτηριστική στροφών της γεννήτριας συναρτήσει της ταχύτητας ανέμου για A/Γ Τύπου Γ ονομαστικής ισχύος 2 MW. Οι αντίστοιχες περιοχές λειτουργίας σημειώνονται και στα δύο διαγράμματα.



Σχήμα 6.13. Χαρακτηριστική ελέγχου στρατηγικής Μέγιστης Απολαβής Ισχύος και Χαρακτηριστική στροφών συναρτήσει ταχύτητας ανέμου

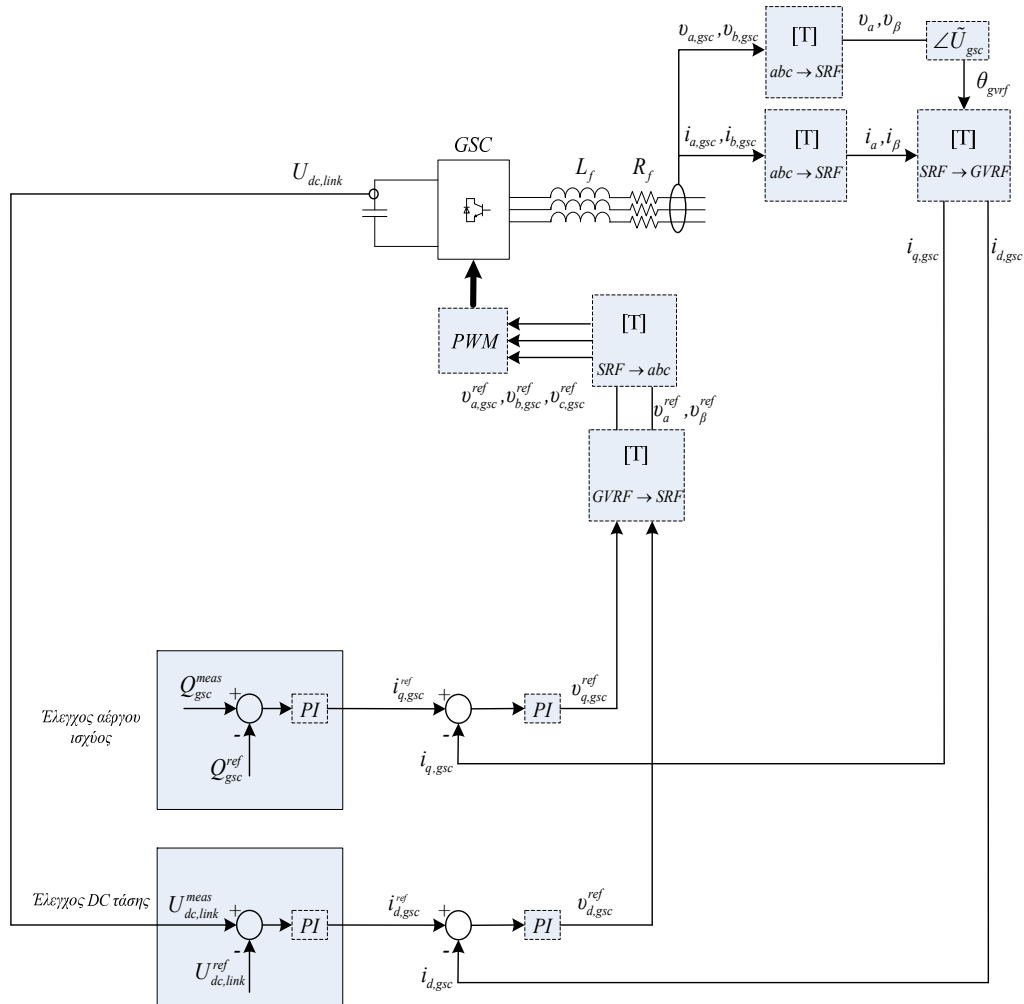
Μετατροπέας στην πλευρά του δικτύου (GSC)

Κατ' αντιστοιχία με τον έλεγχο που περιγράφεται παραπάνω, ο έλεγχος του μετατροπέα στην πλευρά του δικτύου έχει δύο βασικούς στόχους:

- Τον έλεγχο της τάσης στη DC σύνδεση, $U_{dc,link}$, μεταξύ των δύο μετατροπέων. Η τάση διατηρείται σταθερή ανεξάρτητα από το μέγεθος και την κατεύθυνση της ισχύος δρομέα.
- Τον έλεγχο της αέργου ισχύος του κυκλώματος δρομέα. Η συνήθης πρακτική είναι η διατήρηση μοναδιαίου συντελεστή ισχύος στο μετατροπέα, έτσι ώστε η αέργου ισχύς που ανταλλάσσεται μεταξύ A/Γ και δικτύου να προκύπτει μόνο από το κύκλωμα του στάτη.

Ο αποζευγμένος έλεγχος ενεργού και αέργου ισχύος επιτυγχάνεται στην περίπτωση αυτή με τη χρήση του πλαισίου αναφοράς τάσης δικτύου (*Grid side Converter Voltage Oriented Reference Frame – GVRF*). Τα δύο επίπεδα ελεγκτών που χρησιμοποιούνται διαφέρουν ως προς τους χρόνους απόκρισης:

- Ο αργός (εξωτερικός) βρόχος ελέγχου αέργου ισχύος ή DC τάσης που δίνει τις τιμές αναφοράς για τις συνιστώσες ρεύματος $i_{q,gsc}^{ref}$ ή $i_{d,gsc}^{ref}$ αντίστοιχα και
- Ο γρήγορος (εσωτερικός) βρόχος ελέγχου ρεύματος $i_{q,gsc}$ ή $i_{d,gsc}$ που ρυθμίζει τις συνιστώσες τάσης αναφοράς $v_{q,gsc}^{ref}$ ή $v_{d,gsc}^{ref}$ αντίστοιχα.



Σχήμα 6.14. Δομή διανυσματικού ελέγχου για το μετατροπέα στην πλευρά του δικτύου

Είσοδοι στην περίπτωση αυτή είναι η τάση και το ρεύμα στην έξοδο του μετατροπέα (μετά το φίλτρο εξόδου) και η DC τάση. Μετασχηματίζοντας τα εναλλασσόμενα abc μεγέθη στο ακίνητο πλαίσιο, υπολογίζεται η γωνία θ_{gvrf} του πλαισίου αναφοράς GVRF. Με χρήση αυτής γίνεται ο αντίστροφος μετασχηματισμός των τάσεων αναφοράς τάσης δικτύου που προκύπτουν από τον έλεγχο ρεύματος στο ακίνητο πλαίσιο και στη συνέχεια στο abc σύστημα για να δοθούν ως είσοδος στο σύστημα ελέγχου PWM του μετατροπέα. Τα χαρακτηριστικά και ο τρόπος ελέγχου του μετατροπέα στην πλευρά του δικτύου είναι πρωταρχικής σημασίας κατά την ανάλυση των βοηθητικών υπηρεσιών προς το δίκτυο που μελετώνται σε επόμενο Κεφάλαιο της παρούσας διατριβής. Η απόκριση του μετατροπέα σε βραχυχρόνια μεταβατικά φαινόμενα της τάξης κλασμάτων του δευτερολέπτου καθιστούν τη μοντελοποίηση του κρίσιμο παράγοντα για το συνολικό σύστημα της Α/Γ.

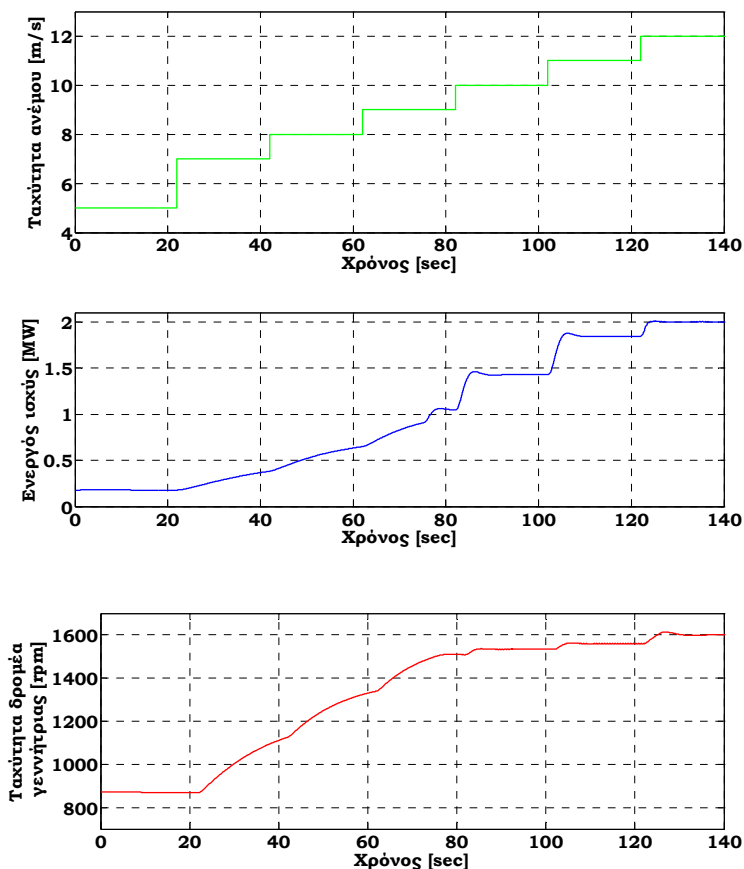
DC πλευρά

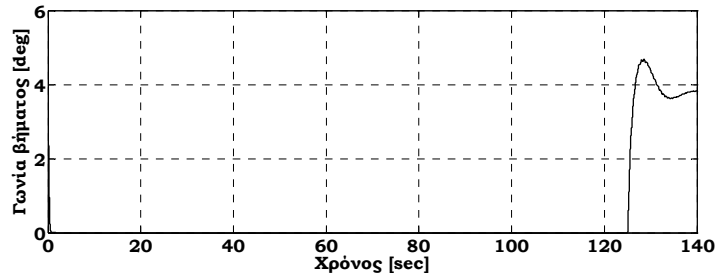
Στη DC πλευρά χρησιμοποιείται εγκάρσιος πυκνωτής για την επίτευξη σταθερής τάσης ή μια αυτεπαγωγή σειράς για την επίτευξη σταθερού ρεύματος. Οι πρώτοι αναφέρονται ως μετατροπείς τύπου πηγής τάσης και οι δεύτεροι ως μετατροπείς τύπου πηγής ρεύματος. Στον Πίνακα 6.1 παρουσιάζονται και οι δύο παραλλαγές αν και στα μοντέλα Α/Γ που αναπτύχθηκαν και παρουσιάζονται (Α/Γ Τύπου Γ και Δ) για τις DC συνδέσεις υιοθετήθηκε η χρήση μετατροπέων πηγής τάσης.

6.5. Λειτουργία συστήματος για ντετερμινιστικές και στοχαστικές ταχύτητες ανέμου

Για την ανάλυση της λειτουργίας του μοντέλου παρουσιάζεται στην παρούσα ενότητα μια ομάδα αποτελεσμάτων προσομοιώσεων για ντετερμινιστικές βηματικές αλλαγές στην ταχύτητα ανέμου καθώς και για χρονοσειρές ανέμου, που παρήχθησαν σύμφωνα με τη διαδικασία που περιγράφεται στο Κεφάλαιο 2. Το εύρος ταχυτήτων ανέμου περιλαμβάνει σχεδόν όλο το τυπικό εύρος λειτουργίας σύγχρονων ανεμογεννητριών Τύπου Γ, με στόχο να εξασφαλισθεί η θεμιτή απόκριση σε όλες τις συνθήκες λειτουργίας. Με βάση τα αποτελέσματα των βηματικών αποκρίσεων γίνεται και η βελτιστοποίηση των παραμέτρων των ελεγκτών. Οι μεταβλητές που επιλέχθηκαν να παρουσιαστούν είναι η ενεργός ισχύς μετρούμενη στο ΣΚΣ, η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα της γεννήτριας και η γωνία βήματος πτερυγίων. Σημειώνεται ότι σε όσα αποτελέσματα προσομοιώσεων δεν περιλαμβάνεται η άεργος ισχύς, ακολουθείται η λειτουργία μοναδιαίου ΣΙ, οπότε η άεργος ισχύς εξόδου είναι μηδενική ανεξάρτητα από το σημείο λειτουργίας της Α/Γ και τις μεταβολές στην ταχύτητα του ανέμου.

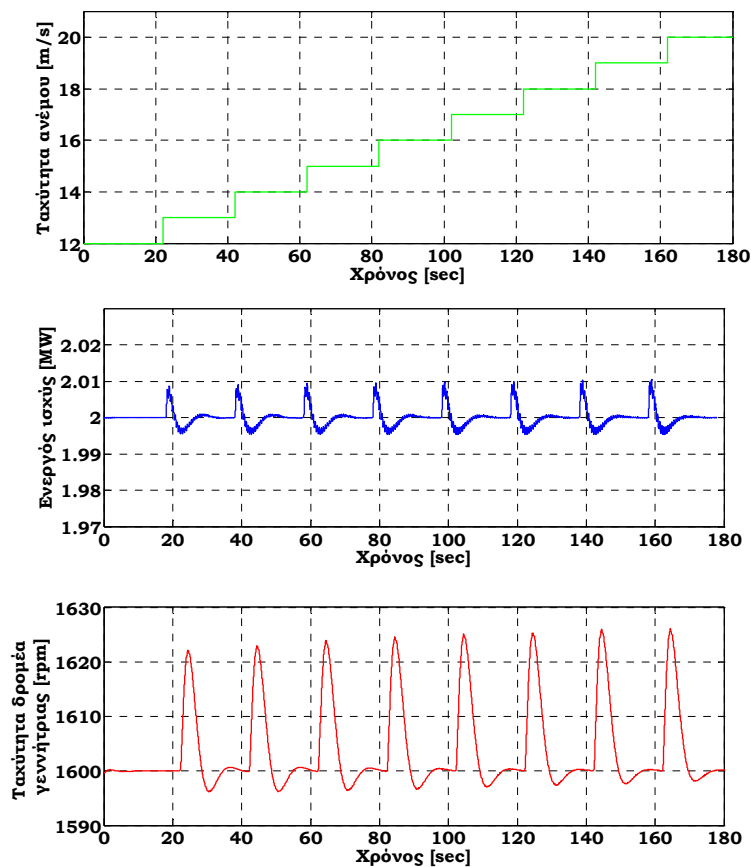
Σε χαμηλές ταχύτητες ανέμου, μικρότερες της ονομαστικής, το σύστημα ρύθμισης της γωνίας βήματος πτερυγίων διατηρεί τη γωνία σταθερή και ίση με τη βέλτιστη τιμή (στη μοντελοποιημένη Α/Γ η τιμή αυτή είναι το μηδέν) ενώ ο ελεγκτής ενεργού ισχύος – βλέπε Σχήμα 6.12 – υλοποιεί τη στρατηγική Μέγιστης Απολαβής Ισχύος με στόχο την εξαγωγή της μέγιστης ισχύος από τον άνεμο. Τα αποτελέσματα αυτά αντιστοιχούν στις Περιοχές 1, 2 λειτουργίας του Σχήματος 6.13. Η ταχύτητα δρομέα μεταβάλλεται συνεχώς προσαρμοζόμενη στην ταχύτητα του ανέμου. Όταν η ταχύτητα ανέμου φτάνει την ονομαστική της τιμή και την υπερβαίνει, ενώ αντίστοιχα η ταχύτητα του δρομέα υπερβαίνει τις ονομαστικές στροφές (Περιοχή 3 του Σχήματος 6.13), ο ελεγκτής γωνίας βήματος αυξάνει τη γωνία βήματος των πτερυγίων συγκρατώντας την ταχύτητα του δρομέα στην ονομαστική της τιμή.

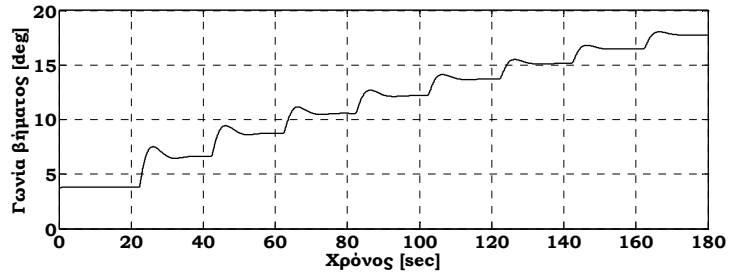




Σχήμα 6.16. A/G Τύπου Γ: Ταχύτητα ανέμου, ενεργός ισχύς, ταχύτητα δρομέα γεννήτριας και γωνία βήματος περυγίων για βηματικές αυξήσεις στον άνεμο από 5 m/s έως 12 m/s με βήμα 1 m/s

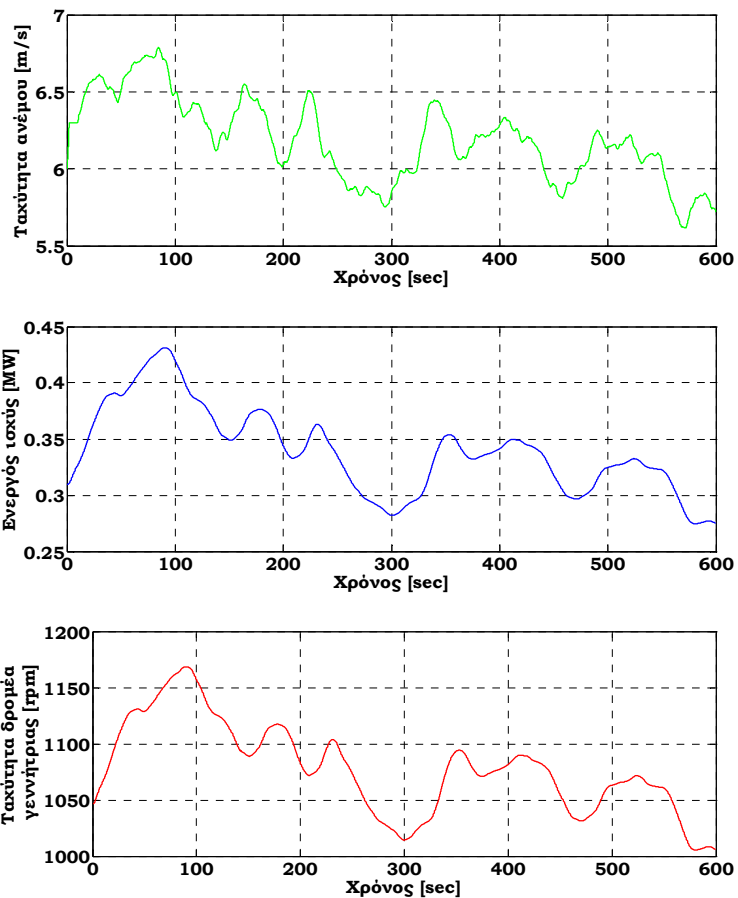
Στην περιοχή περιορισμού της αεροδυναμικής ισχύος η απόκριση της ταχύτητας δρομέα είναι πανομοιότυπη – γεγονός που ενδεικνύει τη θεμιτή λειτουργία του συστήματος προκαθορισμένων κερδών, *gain scheduling* – ενώ αποφεύγονται ανεπιθύμητες υπερπηδήσεις και ταλαντώσεις στην απόκριση και της γωνίας βήματος περυγίων. Οι χρόνοι απόκρισης είναι μικρότεροι από τους αντίστοιχους στην περιοχή χαμηλών ταχυτήτων ανέμου. Ο ελεγκτής ενεργού ισχύος διατηρεί την ενεργό ισχύ εξόδου σχεδόν σταθερή και ίση με την ονομαστική ενώ οι γρήγορες μεταβολές στην ταχύτητα του δρομέα επιτρέπουν την προσωρινή αποθήκευση ενέργεια υπό τη μορφή κινητικής ενέργειας στη στρεφόμενη μάζα του δρομέα της A/G κατά την εμφάνιση των ρυπών του ανέμου. Το τελευταίο συνδέεται με τις χρονικές σταθερές που υπεισέρχονται στο σύστημα ελέγχου της γωνίας βήματος περυγίων που ελέγχει την ταχύτητα του δρομέα και οι οποίες είναι μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες χρονικές σταθερές του μετατροπέα που ελέγχει την ενεργό ισχύ.

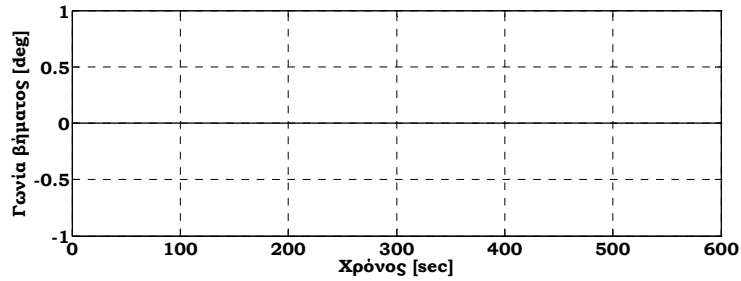




Σχήμα 6.17. Α/Γ Τύπου Γ: Ταχύτητα ανέμου, ενεργός ισχύς, ταχύτητα δρομέα γεννήτριας και γωνία βήματος περυνίων για βηματικές αυξήσεις στον άνεμο από 12 m/s έως 20 m/s με βήμα 1 m/s

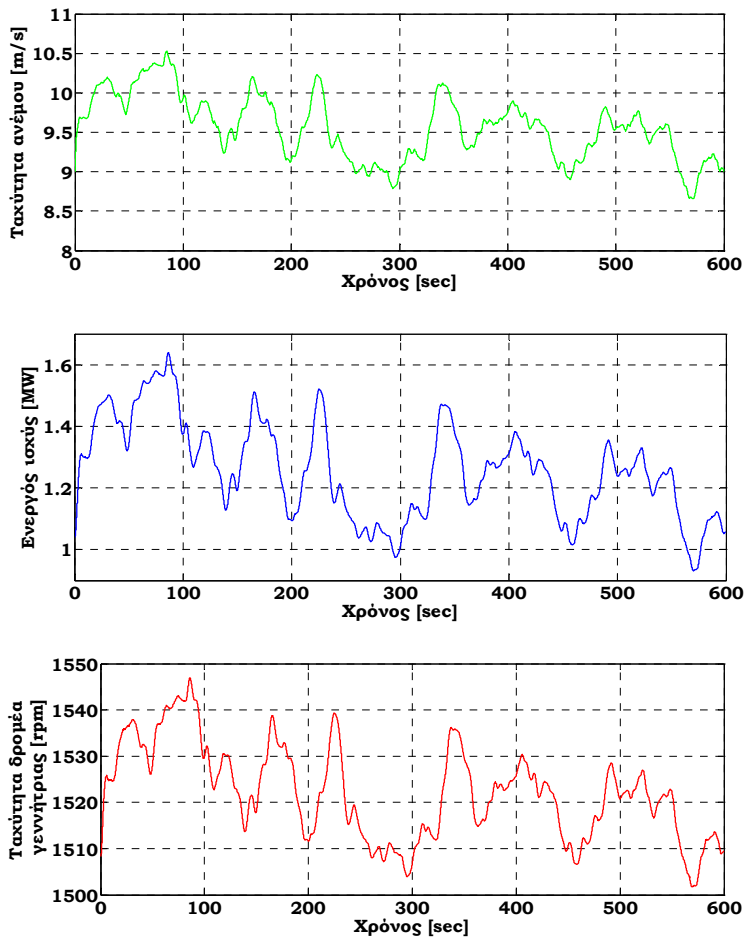
Η συμπεριφορά της Α/Γ προσομοιώθηκε επίσης και για χρονοσειρές στην περιοχή χαμηλών (~ 6 m/s) και μεσαίων (~ 9.5 m/s) ταχυτήτων ανέμου (Περιοχές 1 και 2 αντίστοιχα της χαρακτηριστικής ελέγχου στο Σχήμα 6.13). Στις χαμηλές ταχύτητες ανέμου η γωνία βήματος παραμένει μηδενική ενώ η ταχύτητα του δρομέα και η ενεργός ισχύς εξόδου ακολουθούν τις αργές μεταβολές στην ταχύτητα του ανέμου, μεγιστοποιώντας την εξαγόμενη αεροδυναμική ισχύ.

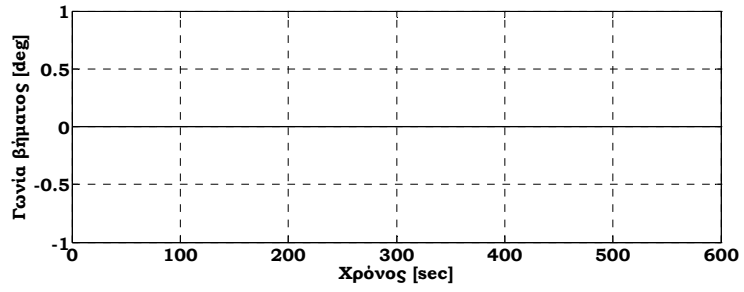




Σχήμα 6.18. A/G Τύπου Γ: Ταχύτητα ανέμου, ενεργός ισχύς, ταχύτητα δρομέα γεννήτριας και γωνία βήματος περυγίων για στοχαστική ταχύτητα ανέμου στην περιοχή των 6 m/s

Στην περιοχή μεσαίων ταχυτήτων ανέμου η κλίση της καμπύλης της χαρακτηριστικής ελέγχου είναι αυξημένη. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα η ενεργός ισχύς και η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα να παρουσιάζουν σχετικά έντονη διακύμανση στο εύρος μεσαίων ταχυτήτων ανέμου που παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.19, συγκρινόμενη με τα αποτελέσματα του Σχήματος 6.18. Δηλαδή για μικρές διακυμάνσεις στην ταχύτητα του ανέμου η διακύμανση της ενεργού ισχύος είναι μεγαλύτερη – αναλογικά – στην Περιοχή 2 ελέγχου ισχύος απ’ ότι στην Περιοχή 1 (βλέπε Σχήμα 6.13). Η γωνία βήματος παραμένει μηδενική και σε αυτήν την περίπτωση.





Σχήμα 6.19. Α/Γ Τύπου Γ: Ταχύτητα ανέμου, ενεργός ισχύς, ταχύτητα δρομέα γεννήτριας και γωνία βήματος περυγίων για στοχαστική ταχύτητα ανέμου στην περιοχή των 9.5 m/s

6.6. Μελέτη δυνατότητας αδιάλειπτης παροχής ισχύος κατά τη διάρκεια σφαλμάτων στο δίκτυο και υπηρεσίες υποστήριξης δικτύου σε μεταβατικές καταστάσεις – A/Γ Τύπου Γ

Ως βύθιση τάσης ορίζεται η απότομη μείωση – μεταξύ 10% και 90% - της τάσης σε ένα σημείο στο ηλεκτρικό δίκτυο, που διαρκεί από μισή περίοδο ως ένα λεπτό, [IEE92]. Τα πιθανά αίτια ποικίλλουν: βραχυκύκλωμα στο δίκτυο, ροή υψηλών ρευμάτων λόγω εκκίνησης μεγάλων κινητήρων συνδεδεμένων στο σύστημα, λειτουργία του διακοπτικού εξοπλισμού προστασίας ή υψηλά ρεύματα λόγω σφάλματος σε Μ/Σ. Στην παρούσα εργασία μελετώνται τα βραχυκυκλώματα, καθώς αποτελούν την πιο συχνή αιτία εμφάνισης βυθίσεων τάσης στα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας. Τα σφάλματα μπορούν να είναι συμμετρικά (τριφασικά ή τριφασικά προς γη) ή ασύμμετρα (μονοφασικά ή διφασικά ή διφασικά προς γη). Ανάλογα με το είδος του σφάλματος το μέγεθος της βύθισης ενδέχεται να είναι ίδιο για όλες τις φάσεις (περίπτωση συμμετρικού σφάλματος) ή να διαφέρει (περίπτωση ασύμμετρου σφάλματος). Η ελάχιστη τιμή της τάσης κατά τη διάρκεια του σφάλματος καθορίζεται κυρίως από τον τύπο του σφάλματος, την απόσταση από το σημείο του σφάλματος, τη διαμόρφωση του δικτύου και την αντίσταση σφάλματος.

6.6.1. Μελέτη ρεύματος βραχυκύκλωσης ασύγχρονης γεννήτριας διπλής τροφοδότησης

Η ανάλυση της μεταβατικής συμπεριφοράς της A/Γ Τύπου Γ, που ακολουθεί, στηρίζεται στη μεθοδολογία που εισήχθηκε κατ' αρχάς στην εργασία των *Kovacs* και *Racz*, [KOV59], οι οποίοι τόνισαν τη σημασία φυσικής απεικόνισης των διαδικασιών που επιτελούνται κατά την ανάλυση των μεταβατικών φαινομένων. Η ανάλυση των μεταβατικών στις AC ηλεκτρικές μηχανές καθορίστηκε σημαντικά από την εργασία των προαναφερθέντων κυρίως ως προς τη φυσική περιγραφή και κατανόηση των μεταβατικών φαινομένων, αν και η αφετηρία όλων των σχετικών μελετών είναι η εργασία του *Park*, [KRA00]. Μια ενδιαφέρουσα μελέτη των θεωριών ανάλυσης μεταβατικών και των αντίστοιχων μαθηματικών εργαλείων περιλαμβάνεται στις [SER93a][SER93b]. Στην [VIC91] γίνεται ανάλυση της μεταβατικής κατάστασης της ασύγχρονης γεννήτριας διπλής τροφοδότησης με βάση τη γενικευμένη θεωρία μηχανών.

Ακολουθώντας τον ορισμό των διανυσμάτων χώρου – *space vectors* –, κατά *Kovacs* και *Racz*, οι εξισώσεις της ασύγχρονης μηχανής (6.1)-(6.12) γράφονται ως εξής:

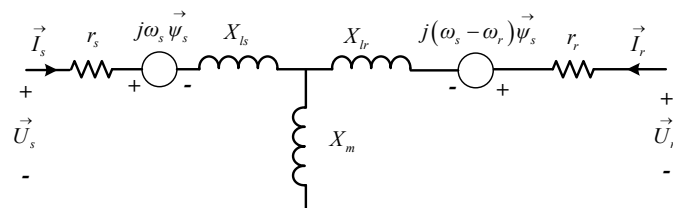
$$\vec{U}_s = r_s \vec{I}_s + \frac{d\vec{\psi}_s}{dt} + j\omega_s \vec{\psi}_s \quad (6.52)$$

$$\vec{U}_r = r_r \vec{I}_r + \frac{d\vec{\psi}_r}{dt} + j(\omega_s - \omega_r) \vec{\psi}_r \quad (6.53)$$

$$\vec{\psi}_s = X_{ss} \vec{I}_s + X_m \vec{I}_r \quad (6.54)$$

$$\vec{\psi}_r = X_m \vec{I}_s + X_{rr} \vec{I}_r \quad (6.55)$$

Με βάση αυτές τις εξισώσεις, όπου όλα τα μεγέθη είναι ανηγμένα στην πλευρά του στάτη, προκύπτει το ισοδύναμο του Σχήματος 6.20 για τη μεταβατική ανάλυση της ασύγχρονης γεννήτριας.



Σχήμα 6.20. Ισοδύναμο κύκλωμα ασύγχρονης γεννήτριας για μεταβατική ανάλυση

Με βάση την κλασσική ανάλυση βραχυκυκλωμάτων ασύγχρονης γεννήτριας, η οποία δεν περιλαμβάνεται εδώ, τη στιγμή του βραχυκυκλώματος στον τερματικό ζυγό της ασύγχρονης

γεννήτριας τα κυκλώματα του στάτη και του δρομέα βραχυκυκλώνονται. Θεωρώντας ότι ο δρομέας προ βραχυκυκλώματος στρεφόταν με τη σύγχρονη ταχύτητα, οι ροές ψ_s και ψ_r έχουν την ίδια γωνία, αλλά η ροή δρομέα θα αλλάξει ακολουθώντας το δρομέα και μετά από μισή περίοδο, θα έχει διαφορά φάσης 180° , δηλαδή αντίθετη κατεύθυνση. Τα ρεύματα τότε στη μηχανή λαμβάνουν τη μεγαλύτερη τιμή τους, η οποία μπορεί να είναι αρκετά υψηλή και περιορίζεται μόνο από τις αντιδράσεις σκέδασης.

Το ρεύμα βραχυκύκλωσης στάτη δίνεται τότε από την ακόλουθη εξίσωση:

$$\vec{I}_s = \frac{\sqrt{2}U_s}{jX'_s} \left[e^{-t/T'_s} - (1-\sigma)e^{j\omega_s t} e^{-t/T'_r} \right] \quad (6.56)$$

όπου ως $\sigma = 1 - \frac{X_m^2}{X_s X_r}$ ορίζεται ο παράγοντας σκέδασης. Η παραπάνω εξίσωση προκύπτει αμελώντας

την ωμική αντίσταση του στάτη και του δρομέα, υπονοώντας ότι το ρεύμα είναι μη αποσβέσιμο. Στην πραγματικότητα πάντα μειώνεται. Ο πρώτος όρος μέσα στην αγκύλη της εξίσωσης εκφράζει τη DC συνιστώσα στο ρεύμα στάτη και αποσβένεται με τη μεταβατική σταθερά χρόνου στάτη T'_s . Ο δεύτερος όρος εκφράζει την AC συνιστώσα στο ρεύμα στάτη, στην οποία οφείλεται και η DC συνιστώσα στο ρεύμα δρομέα, και αποσβένεται με τη μεταβατική χρονική σταθερά του δρομέα T'_r .

Η τάση προ βραχυκυκλώματος συμβολίζεται με U_s ενώ το ρεύμα δρομέα προ βραχυκυκλώματος είναι μηδενικό. Μια καλή προσέγγιση του μέγιστου ρεύματος στάτη στο βραχυκύκλωμα προκύπτει σε χρόνο μισής περιόδου, $t = \frac{T}{2}$:

$$I_{s,max} = \frac{\sqrt{2}U_s}{jX'_s} \left[e^{-T/2T'_s} - (1-\sigma)e^{j\omega_s T/2} e^{-T/2T'_r} \right] \quad (6.57)$$

Ο όρος έξω από την αγκύλη εκφράζει την αρχική τιμή του ρεύματος στάτη προ βραχυκυκλώματος ($t=0$). Σε συνθήκες μόνιμης λειτουργίας, αμελώντας την αντίσταση στάτη, η παράγωγος της ροής στάτη είναι ανάλογη της τάσης δικτύου – βλέπε (6.52). Όταν η τάση μειώνεται στο μηδέν λόγω βραχυκυκλώματος, το διάνυσμα χώρου της ροής στάτη σταματάει να στρέφεται. Αυτό εισάγει μια DC συνιστώσα στη ροή στάτη. Η DC συνιστώσα της ροής δρομέα είναι συζευγμένη με το δρομέα και συνεχίζει να στρέφεται. Αυτό επομένως εισάγει μια AC συνιστώσα στη DC συνιστώσα της ροής στάτη. Η μέγιστη τιμή των ρευμάτων στάτη και δρομέα καθορίζεται κυρίως από τις αντιδράσεις σκέδασης στάτη και δρομέα. Ο ρυθμός, με τον οποίο η DC συνιστώσα μειώνεται, διαμορφώνεται από τις μεταβατικές σταθερές χρόνου στάτη και δρομέα.

Στην περίπτωση της ασύγχρονης γεννήτριας διπλής τροφοδότησης η βύθιση τάσης προκαλεί ταλαντούμενα ρεύματα στο δρομέα της γεννήτριας, στον οποίο συνδέεται ο μετατροπέας. Απαιτείται μια μεγάλη τάση για τον έλεγχο του ρεύματος δρομέα. Τα όρια τάσης του μετατροπέα όμως είναι καθορισμένα, και επομένως μετά από ένα σημείο ο έλεγχος του ρεύματος δεν είναι πλέον εφικτός. Τα υψηλά ρεύματα ενδέχεται λοιπόν να καταστρέψουν το μετατροπέα.

Στα μοντέλα που υλοποιήθηκαν στο πλαίσιο της διατριβής, η προστασία του μετατροπέα εξασφαλίζεται με τη χρήση της (παθητικής ή ενεργούς) διάταξης βραχυκύκλωσης δρομέα, γνωστό στη διεθνή βιβλιογραφία ως (*passive* ή *active*) *crowbar*. Η διάταξη αυτή αποτελείται από αντιστάσεις που συνδέονται στο τύλιγμα δρομέα μέσω ηλεκτρονικού διακόπτη. Όταν τα ρεύματα δρομέα είναι υψηλά, το ημιαγωγικό στοιχείο ενεργοποιείται και τα υψηλά ρεύματα δεν ρέουν πλέον μέσω του μετατροπέα αλλά μέσω των αντιστάσεων της διάταξης βραχυκύκλωσης.

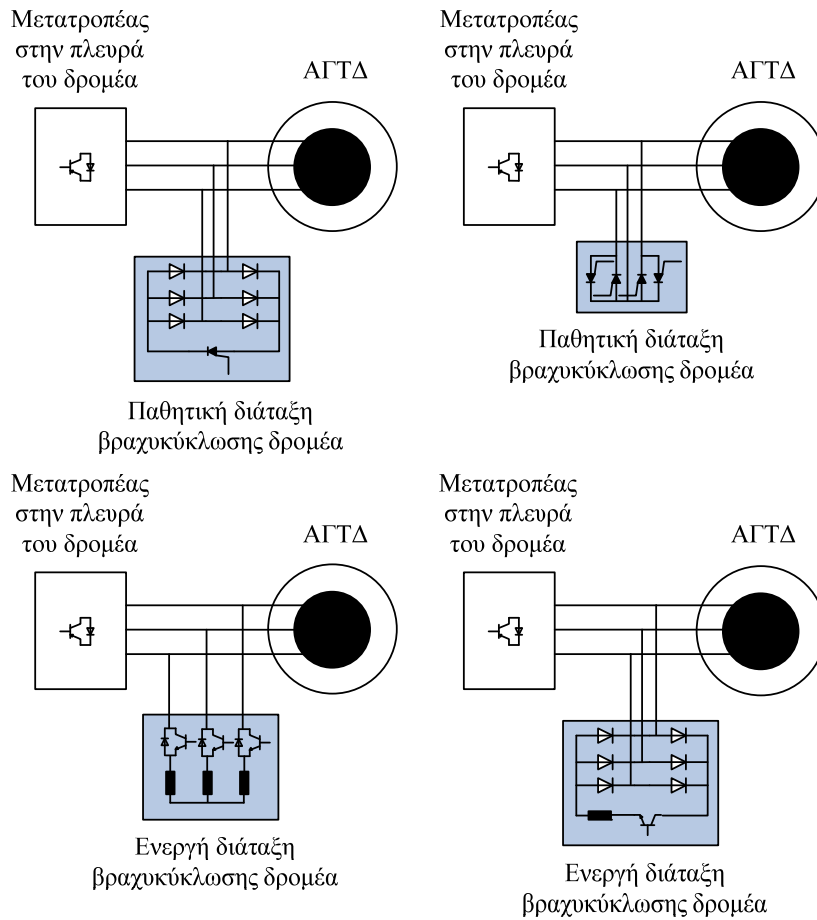
Οι περισσότερες διατάξεις βραχυκύκλωσης στη βιβλιογραφία περιγράφονται σαν προστασία που απενεργοποιεί το μετατροπέα στην πλευρά του δρομέα και βραχυκυκλώνει το κύκλωμα του δρομέα, [HOL03a][EKA03], όταν το ρεύμα του δρομέα υπερβεί μια συγκεκριμένη τιμή. Σε άλλες περιπτώσεις η ενεργοποίηση της διάταξης βραχυκύκλωσης γίνεται όταν η τάση στη DC σύνδεση των μετατροπέων υπερβαίνει ένα όριο, [PET05][POU03]. Ο *Nirranen* περιγράφει αρκετές παραλλαγές για

το κύκλωμα της διάταξης βραχυκύκλωσης που ως ημιαγωγικό στοιχείο έχουν αντιπαράλληλα θυρίστορ ή ημι-ελεγχόμενη γέφυρα θυρίστορ ή γέφυρα διόδων. Αυτή η διαμόρφωση ανορθώνει τα ρεύματα δρομέα φάσης μέσω της γέφυρας των ημιαγωγικών στοιχείων και χρησιμοποιεί θυρίστορ για τον έλεγχο της βραχυκύκλωσης.

Η ίδια αυτή τοπολογία χρησιμοποιείται και στη λεγόμενη ενεργή διάταξη βραχυκύκλωσης δρομέα (*active crowbar*), [NIR04]. Η διαφορά της λεγόμενης παθητικής από την ενεργή διάταξη έγκειται ότι η τελευταία είναι πλήρως ελεγχόμενη, μέσω ενός ελεγχόμενου ημιαγωγικού διακόπτη, οπότε είναι σε θέση να διακόψει το ρεύμα βραχυκύκλωσης, όποτε αυτό απαιτείται. Δηλαδή, η διάταξη βραχυκύκλωσης συνδέεται και αποσυνδέεται με το χειρισμό του ημιαγωγικού διακόπτη ανεξάρτητα από το ρεύμα που διαρρέει εκείνη τη στιγμή τη διάταξη. Στην παθητική διάταξη – η οποία αναφέρεται συχνά και ως *συμβατική* – χρησιμοποιείται θυρίστορ το οποίο, ενώ είναι δυνατόν να ενεργοποιηθεί με χειρισμό, απαιτεί όμως μηδενισμό του ρεύματος της διάταξης για την επίτευξη της σβέσης του. Αυτό συνήθως είναι το πρόβλημα για την πρώτη διάταξη του Σχήματος 6.21, όπου το ρεύμα μέσω του θυρίστορ είναι συνεχές και δεν επιτρέπει το σβήσιμο. Η δεύτερη διάταξη του Σχήματος 6.21 μπορεί ομοίως να έχει κάποια προβλήματα διότι τα ρεύματα δρομέα μπορεί να έχουν σημαντική DC συνιστώσα και άρα οι μηδενισμοί που θα οδηγούσαν σε αποκοπή τα θυρίστορ δεν υπάρχουν όταν απαιτείται, [MAP06].

Η ακολουθία ελέγχου της διάταξης βραχυκύκλωσης, που ακολουθείται γενικά, ποικίλλει. Η Α/Γ μπορεί να είναι αποσυνδεδεμένη από το δίκτυο κατά τη διάρκεια του βραχυκυκλώματος, [PER04]. Στην περίπτωση που η Α/Γ παραμένει συνδεδεμένη στο δίκτυο, [SUN04], η γεννήτρια κατά τη διάρκεια του βραχυκυκλώματος συμπεριφέρεται σαν τυπική ασύγχρονη γεννήτρια με αυξημένη αντίσταση δρομέα. Στην περίπτωση που και ο μετατροπέας παραμένει συνδεδεμένος στο δρομέα, καθίσταται δυνατή η επαναφορά της Α/Γ σε κανονική λειτουργία αμέσως μετά την εκκαθάριση του σφάλματος, [MOR05][DIT05].

Σύμφωνα με τη λογική που ακολουθείται στην ενεργή διάταξη, όταν το ρεύμα δρομέα ή η τάση στη DC σύνδεση μεταξύ των μετατροπέων υπερβούν κάποιο κρίσιμο μέγιστο όριο, ο μετατροπέας στην πλευρά του δρομέα απενεργοποιείται και η ενεργή διάταξη βραχυκύκλωσης ενεργοποιείται. Τα όρια που χρησιμοποιήθηκαν στο μοντέλο που παρουσιάζεται παρακάτω ορίστηκαν ως 1.3 αμ για το ρεύμα δρομέα και 1.25 αμ για τη συνεχή τάση μεταξύ των μετατροπέων, [AKH03a]. Αυτές οι τιμές εν γένει καθορίζονται από τον κατασκευαστή, εν τούτοις είναι δυνατή η προσέγγισή τους σε ένα πλαίσιο λογικών υποθέσεων και αξιολόγησης της λειτουργίας των μετατροπέων. Κατά τη διάρκεια της λειτουργίας της, η τάση στην αντίσταση της διάταξης αλλά και η DC τάση μεταξύ των μετατροπέων επιτηρούνται, και όταν είναι αρκετά χαμηλές, η ενεργή διάταξη τίθεται εκτός λειτουργίας. Με μια μικρή καθυστέρηση, για να εξασφαλιστεί η μείωση των ρευμάτων δρομέα, ο μετατροπέας επανενεργοποιείται και η άεργος ισχύς που παράγεται από την Α/Γ αυξάνεται για τη στήριξη της τάσης δικτύου, [MAR07].



Σχήμα 6.21. Τοπολογίες παθητικής και ενεργής διάταξης βραχυκύκλωσης δρομέα σε ΑΓΤ Τύπου Γ

Στην παρούσα εργασία εφαρμόστηκε η ενεργή διάταξη βραχυκύκλωσης για την εξασφάλιση της αδιάλλειπτης παροχής ισχύος κατά τη διάρκεια των βραχυκυκλωμάτων στο δίκτυο, [NIR06]. Ο μετατροπέας στην πλευρά του δρομέα επανεργοποιείται όταν η διάταξη βραχυκύκλωσης τίθεται εκτός λειτουργίας, οπότε έχει εξασφαλιστεί η μείωση των μεταβατικών ρευμάτων και τάσεων.

Συνεχίζοντας την ανάλυση βραχυκυκλωμάτων που έγινε παραπάνω για μια τυπική ασύγχρονη γεννήτρια, η απόκριση μιας ασύγχρονης γεννήτριας διπλής τροφοδότησης διαφοροποιείται σημαντικά, [VIC91]. Κατ' αρχάς η ωμική αντίσταση λόγω της σύνδεσης των εξωτερικών αντιστάσεων της διάταξης βραχυκύκλωσης δεν μπορεί πλέον να αμεληθεί, όπως στην περίπτωση της τυπικής ασύγχρονης γεννήτριας, και επιπλέον η ολίσθηση δεν είναι πάντα σχεδόν μηδενική. Το γεγονός της μη μηδενικής ολίσθησης έχει σαν συνέπεια ότι τη στιγμή εμφάνισης του βραχυκυκλώματος τα διανύσματα των ροών στάτη και δρομέα δεν είναι σε φάση. Στην περίπτωση της υπερσύγχρονης λειτουργίας της γεννήτριας, η ροή του δρομέα προπορεύεται της ροής του στάτη και επομένως απαιτείται λιγότερο από μισή περίοδο ($T/2$) για να καταστούν τα διανύσματα των ροών αντίστροφα, δηλ. να έχουν διαφορά φάσης 180° . Η στιγμή αυτή είναι η χρονική στιγμή εμφάνισης του μέγιστου ρεύματος βραχυκύκλωσης. Το αντίθετο ισχύει στην περίπτωση υποσύγχρονης λειτουργίας. Λόγω των εξωτερικών αντιστάσεων, η περιστροφή των διανυσμάτων ροής στάτη και δρομέα δεν είναι πλέον αμελητέα (στην περίπτωση της τυπικής ασύγχρονης γεννήτριας θεωρείται ότι τα διανύσματα παύουν να περιστρέφονται όταν η τάση στον τερματικό ζυγό της γεννήτριας μηδενίζεται). Όσο αυξάνεται η εξωτερική αντίσταση της διάταξης βραχυκύκλωσης, R_{cr} , η μεταβατική χρονική σταθερά δρομέα T'_r , καθώς και το χρονικό διάστημα που απαιτείται για το πρώτο μέγιστο του ρεύματος βραχυκύκλωσης στάτη μειώνονται. Μια προσέγγιση για το μέγιστο αυτό είναι, [MOR07]:

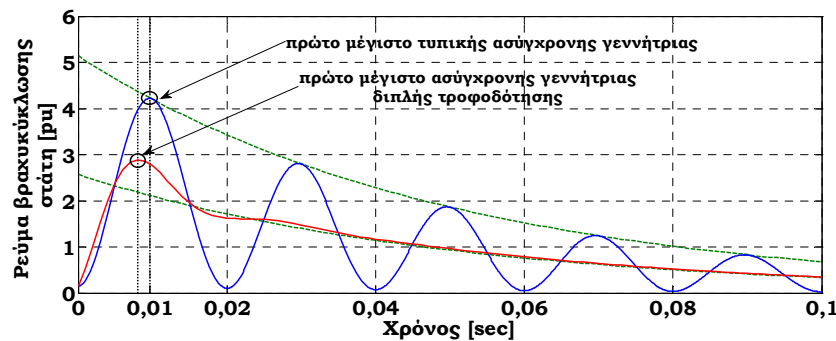
$$I_{s,max} \cong \frac{1.8U_s}{\sqrt{X'_s{}^2 + R_{cr}{}^2}} \quad (6.58)$$

Η διαμόρφωση της τιμής της εξωτερικής αντίστασης της διάταξης βραχυκύκλωσης γίνεται με άνω όριο την αναγκαία μείωση στην τιμή του ρεύματος βραχυκύκλωσης και με κάτω όριο την αποφυγή υψηλής τιμής τάσης δρομέα. Μια πολύ χαμηλή τιμή λοιπόν της αντίστασης θα έχει ως αποτέλεσμα υψηλά ρεύματα δρομέα, αν και η θερμική χρονική σταθερά του δρομέα είναι εν γένει αρκετά υψηλή ώστε να μην απειλείται με καταστροφή λόγω υψηλών ρευμάτων βραχυκύκλωσης για μικρό χρονικό διάστημα. Μια πολύ υψηλή τιμή όμως αντίστασης, μπορεί να οδηγήσει σε υπερβολικά υψηλή τιμή τάσης δρομέα και άρα σε καταστροφή της μόνωσης του δρομέα και του μετατροπέα και πιθανή διαρροή ρευμάτων μέσω των αντιπαράλληλων διόδων του μετατροπέα, αυξάνοντας έτσι επικίνδυνα τη συνεχή τάση μεταξύ των μετατροπέων. Μια προσέγγιση λοιπόν της μέγιστης τιμής αντίστασης της διάταξης βραχυκύκλωσης είναι:

$$R_{cr,max} \cong \frac{\sqrt{2}U_{r,max}X'_s}{\sqrt{3.2U_s{}^2 - 2U_{r,max}{}^2}} \quad (6.59)$$

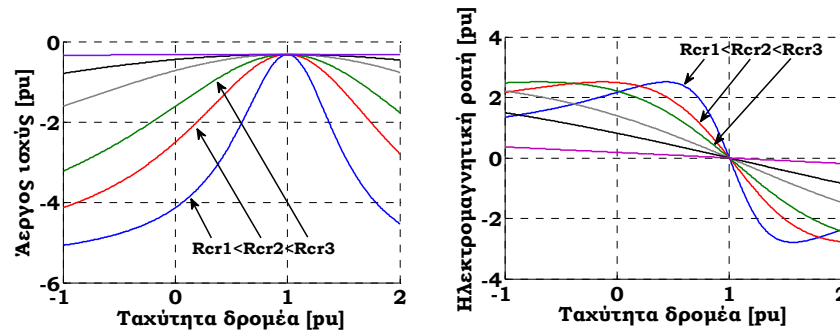
όπου $U_{r,max}$ είναι η μέγιστη τιμή τάσης δρομέα. Αυτή καθορίζεται από τη μέγιστη τιμή ρεύματος βραχυκύκλωσης δρομέα, που είναι περίπου ίση με τη μέγιστη τιμή ρεύματος βραχυκύκλωσης στάτη.

Το Σχήμα 6.22 απεικονίζει το ρεύμα βραχυκύκλωσης κατά τις πέντε πρώτες περιόδους μετά το βραχυκύκλωμα για μια τυπική ασύγχρονη γεννήτρια και μια ασύγχρονη γεννήτρια διπλής τροφοδότησης με εξωτερική αντίσταση διάταξης βραχυκύκλωσης.



Σχήμα 6.22. Ρεύμα βραχυκύκλωσης στάτη σε μια φάση τυπικής ασύγχρονης γεννήτριας (μπλε καμπύλη) και ασύγχρονης γεννήτριας διπλής τροφοδότησης με εξωτερική αντίσταση διάταξης βραχυκύκλωσης (κόκκινη καμπύλη)

Η επίδραση των ωμικών αντιστάσεων της διάταξης βραχυκύκλωσης στις στατικές καμπύλες ηλεκτρομαγνητικής ροπής και αέργου ισχύος της γεννήτριας δίνονται στο Σχήμα 6.23. Η δυναμική ευστάθεια της γεννήτριας βελτιώνεται, καθώς η ροπή αποσυγχρονισμού μετατοπίζεται προς μεγαλύτερες ταχύτητες δρομέα. Κατά τη διάρκεια της ενεργοποίησης της διάταξης βραχυκύκλωσης δρομέα, η ασύγχρονη γεννήτρια συμπεριφέρεται σαν τυπική ασύγχρονη γεννήτρια απορροφώντας άεργο ισχύ. Όπως προκύπτει και από τις ακόλουθες καμπύλες, οι απαιτήσεις αυτές σε άεργο ισχύ μειώνονται για συγκεκριμένη τιμή ταχύτητας δρομέα.

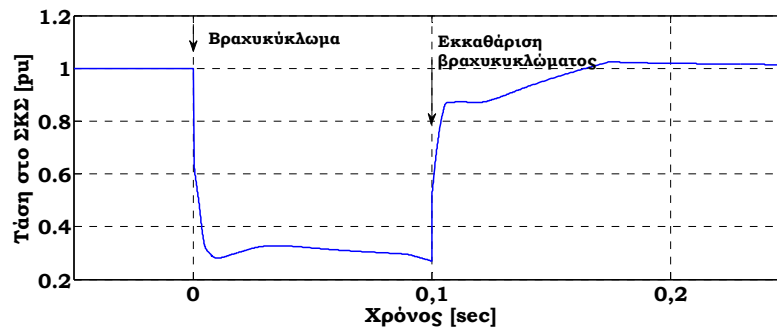


Σχήμα 6.23. Α/Γ Τύπου Γ: Στατικές καμπύλες αερίου ισχύος και ηλεκτρομαγνητικής ροπής για βραχυκυκλωμένο δρομέα και διαφορετικές τιμές αντίστασης διάταξης βραχυκύκλωσης R_{cr} συναρτήσει της ταχύτητας δρομέα γεννήτριας

6.6.2. Προσομοιώσεις βραχυκυκλωμάτων

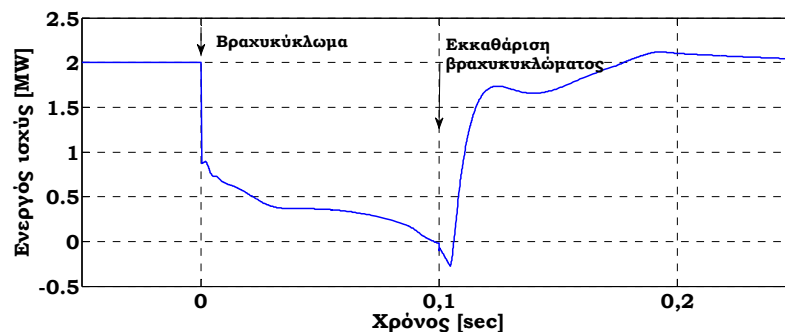
Στις προσομοιώσεις που ακολουθούν η Α/Γ Τύπου Γ λειτουργεί σε ονομαστική ισχύ πριν το βραχυκύκλωμα, καθώς αυτή η περίπτωση αντιστοιχεί στην πιο κρίσιμη περίπτωση από πλευρά δυναμικής ευστάθειας – η διαφορά ανάμεσα στην αεροδυναμική και την εξαγόμενη ηλεκτρική ισχύ είναι μέγιστη. Η ταχύτητα ανέμου θεωρείται σταθερή κατά τη διάρκεια του σφάλματος και το σφάλμα είναι τριφασικό με χρόνο εκκαθάρισης 100 ms. Το δίκτυο που χρησιμοποιήθηκε για τις προσομοιώσεις περιγράφεται στο Παράρτημα.

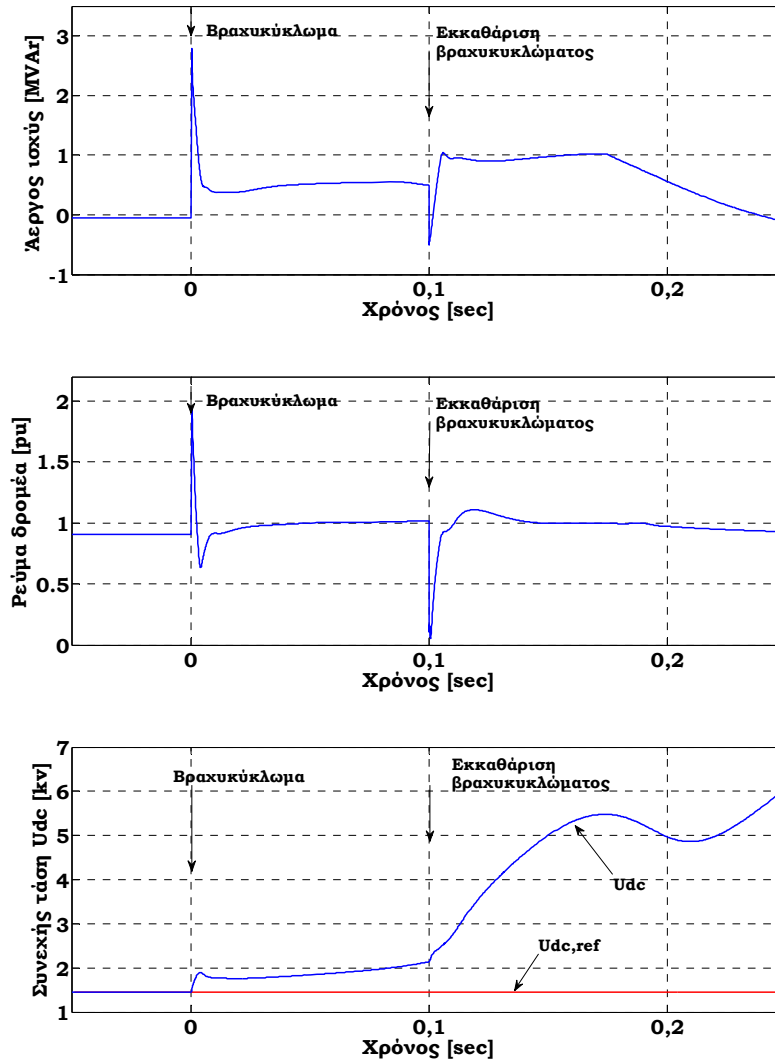
Κατ' αρχάς παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για την περίπτωση όπου η Α/Γ Τύπου Γ δεν είναι εφοδιασμένη με κάποιο σύστημα προστασίας κατά τη διάρκεια του βραχυκυκλώματος. Δηλ. ο έλεγχος ακολουθεί τη λογική κανονικής λειτουργίας του Σχήματος 6.9, ενώ η διάταξη βραχυκύκλωσης δεν έχει συμπεριληφθεί στο μοντέλο. Το Σχήμα 6.24 απεικονίζει τη βύθιση τάσης στο ΣΚΣ της Α/Γ Τύπου Γ με ονομαστική ισχύ 2 MW.



Σχήμα 6.24. Τάση στο ΣΚΣ για τριφασικό βραχυκύκλωμα στο συνδεδεμένο δίκτυο με χρόνο εκκαθάρισης 100 ms

Το Σχήμα 6.25 περιλαμβάνει βασικές μεταβλητές του ηλεκτρικού συστήματος της Α/Γ.



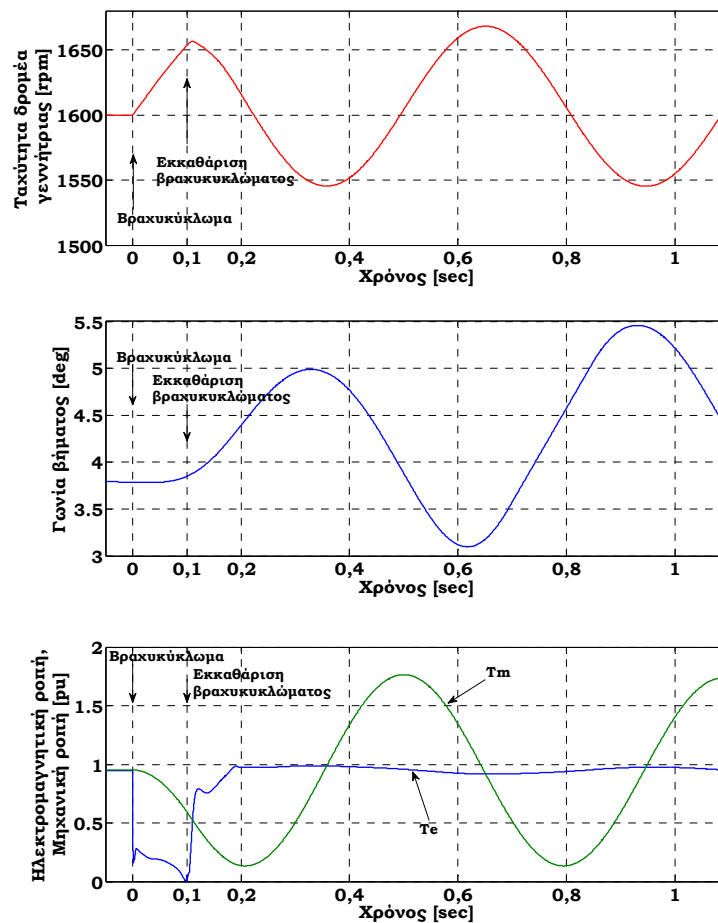


Σχήμα 6.25. A/G Τύπου Γ: Ενεργός ισχύς, άεργος ισχύς, ρεύμα δρομέα (κόκκινη και μπλε καμπύλη αντίστοιχα) και συνεχής τάση U_{dc} για τριφασικό βραχυκύκλωμα στο συνδεδεμένο δίκτυο με χρόνο εκκαθάρισης 100 ms – χωρίς σύστημα προστασίας

Η απ' ευθείας σύνδεση του στάτη της ασύγχρονης γεννήτριας διπλής τροφοδότησης στο δίκτυο συνεπάγεται υψηλά ρεύματα βραχυκύκλωσης στάτη στην περίπτωση σημαντικών διαταραχών στην τάση δικτύου. Η απότομη μείωση της τάσης δικτύου τη στιγμή εμφάνισης του σφάλματος προκαλεί μείωση στη ροή στάτη και δρομέα της γεννήτριας, επιφέροντας αντίστοιχη μείωση στην ηλεκτρομαγνητική ροπή και την ενεργό ισχύ που παράγει η γεννήτρια. Λόγω της μείωσης της ροής στάτη, η απομαγνήτιση της γεννήτριας συντελείται μέσω του στάτη, γεγονός που εξηγεί την απότομη αύξηση της αέργου ισχύος που καταναλώνεται τη στιγμή του σφάλματος. Η μαγνητική σύζευξη στάτη και δρομέα και σύμφωνα με το νόμο διατήρησης της ροής επιφέρει αντίστοιχες διαταραχές και στο κύκλωμα του δρομέα, δηλαδή υψηλά ρεύματα δρομέα. Ο έλεγχος του μετατροπέα στην πλευρά του δρομέα επιχειρεί να αντισταθμίσει την αύξηση αυτή των ρευμάτων αυξάνοντας την τάση δρομέα, οδηγώντας σε μια αυξημένη ροή ισχύος από το δρομέα προς το μετατροπέα. Η αδυναμία του μετατροπέα στην πλευρά του δικτύου να διοχετεύσει την ενέργεια στο δίκτυο, λόγω της χαμηλής τάσης, προκαλεί αυξημένη φόρτιση του πυκνωτή στην DC των δυο μετατροπέων και σημαντική αύξηση της συνεχούς τάσης. Επομένως, κατά τη διάρκεια των βραχυκυκλωμάτων στο δίκτυο τα υπερρεύματα στο μετατροπέα στην πλευρά του δρομέα, οι υπερτάσεις στο κύκλωμα του δρομέα και στη συνεχή σύνδεση των μετατροπέων πρέπει να αντιμετωπιστούν κατάλληλα από ένα σύστημα προστασίας. Στην εκκαθάριση του σφάλματος, η τάση στάτη αποκαθίσταται και η ροή αυξάνεται

αντίστοιχα. Η μεταβολή αυτή στη ροή προκαλεί μεταβατικά ρεύματα στο κύκλωμα του στάτη και δρομέα και τη στιγμή εκκαθάρισης του σφάλματος.

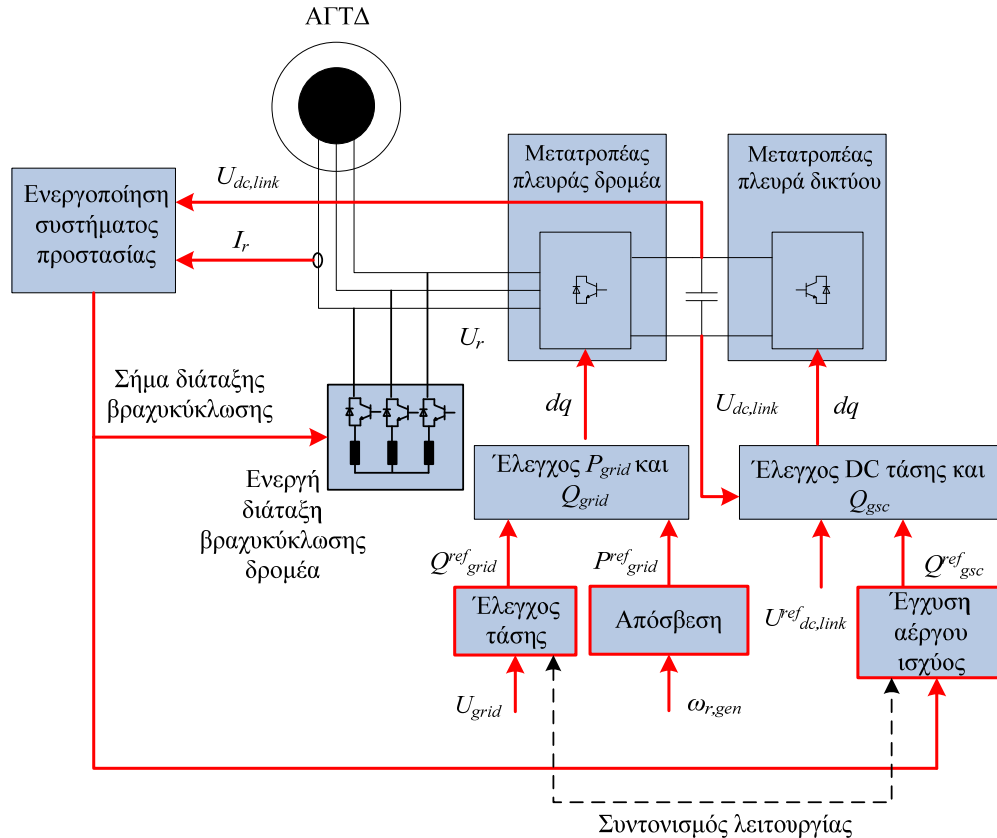
Το Σχήμα 6.26 περιλαμβάνει αποτελέσματα που σχετίζονται με το μηχανικό σύστημα της Α/Γ. Κατά τη διάρκεια του σφάλματος ο άξονας μετάδοσης της κίνησης εμφανίζει συμπεριφορά παρόμοια με στρεπτικό ελατήριο. Η μηχανική ροπή και ο δρομέας ταλαντώνονται με τη συχνότητα $f_{free-free}$, όπως αυτή ορίστηκε στην ενότητα μοντελοποίησης του μηχανικού συστήματος. Σύμφωνα με τη [AKH02b], οι ταλαντώσεις αυτές ενδέχεται να διεγερθούν και να καταστούν μη αποσβέσιμες κατά το γρήγορο ελέγχο του μετατροπέα. Η μείωση της μηχανικής ροπής καθυστερεί σε σχέση με την ηλεκτρομαγνητική ροπή με αποτέλεσμα ο δρομέας να επιταχύνεται. Η επιτάχυνση αυτή αντισταθμίζεται από τη λειτουργία του συστήματος ελέγχου της γωνίας βήματος. Η διαφορά ανάμεσα στις ροπές που αναπτύσσονται στον άξονα μετάδοσης και η αυξημένη χρονική διάρκεια ταλαντώσεων προκαλούν αυξημένη μηχανική καταπόνηση στο σύστημα της Α/Γ. Παρακάτω θα αναλυθεί η δυνατότητα απόσβεσης των ηλεκτρομηχανικών αυτών ταλαντώσεων μέσω κατάλληλου ελέγχου κατά τη διάρκεια σφαλμάτων.



Σχήμα 6.26. Α/Γ Τύπου Γ: Γεννήτρια δρομέα γεννήτριας, γωνία βήματος περυγίων και ηλεκτρομαγνητική-μηχανική ροπή για τριφασικό βραχυκύκλωμα στο συνδεδεμένο δίκτυο με χρόνο εκκαθάρισης 100 ms – χωρίς σύστημα προστασίας

6.6.3. Σύστημα αδιάλειπτης παροχής ισχύος κατά τη διάρκεια σφαλμάτων

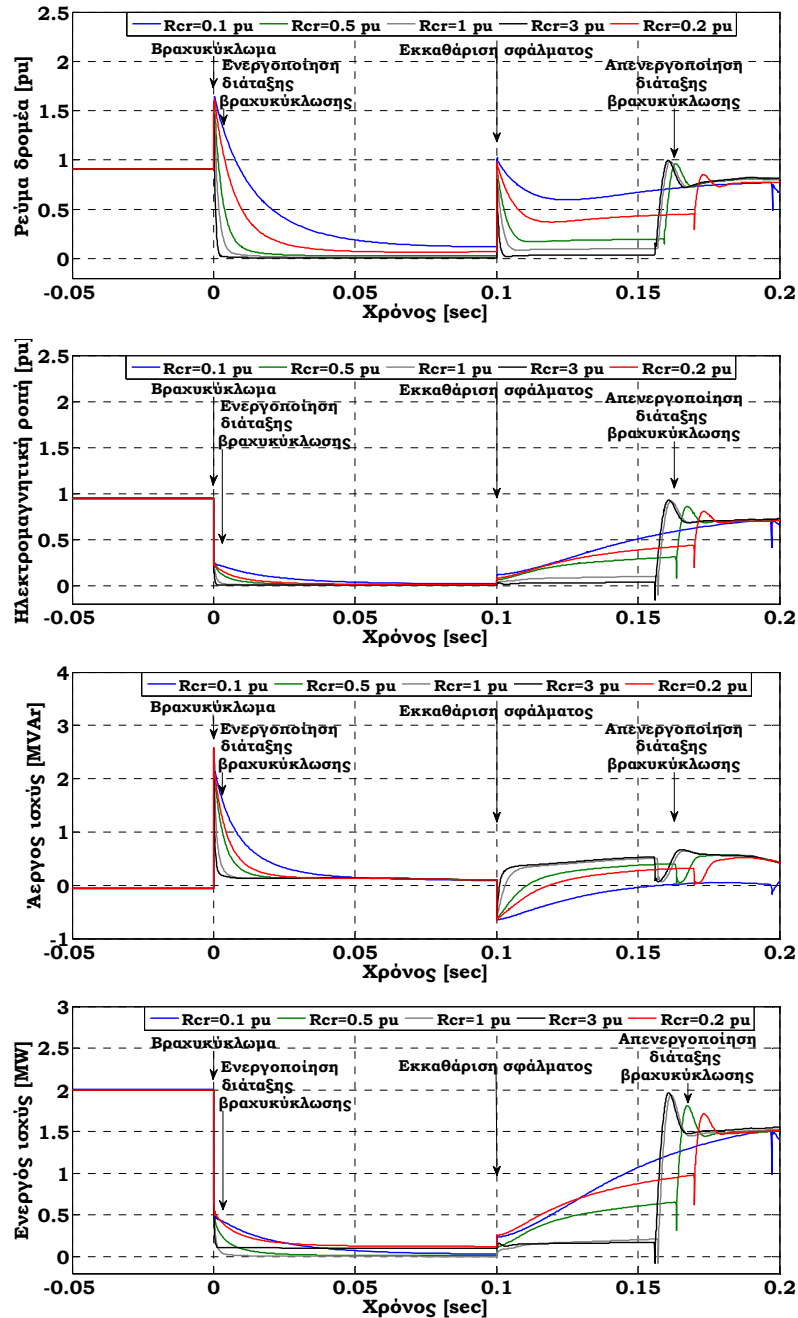
Τα παραπάνω αποτελέσματα αποκαλύπτουν την ανάγκη σχεδίασης συστήματος ελέγχου και προστασίας που θα επιτρέπει στην Α/Γ Τύπου Γ να παραμένει σε λειτουργία κατά τη διάρκεια σφαλμάτων στο δίκτυο και να συμβάλλει στην δυναμική ευστάθεια του συστήματος χωρίς τον κίνδυνο υπερβολικής καταπόνησης ή καταστροφής των μετατροπέων. Το Σχήμα 6.27 συνοψίζει τους επιπλέον βρόχους ελέγχου που προστίθενται στο σχήμα ελέγχου κανονικής λειτουργίας και σε συνδυασμό με την διάταξη βραχυκύκλωσης του δρομέα εξασφαλίζουν την αδιάλειπτη παροχή ισχύος, την παροχή αέργου ισχύος και στήριξη τάσης κατά τη διάρκεια βυθίσεων τάσης. Στη σωστή λειτουργία συμβάλλει και το σύστημα ελέγχου γωνίας βήματος περυγίων, έτσι όπως έχει περιγραφεί στην ενότητα ανάλυσης του αεροδυναμικού συστήματος.



Σχήμα 6.27. Α/Γ Τύπου Γ: Σύστημα ελέγχου αδιάλειπτης παροχής ισχύος

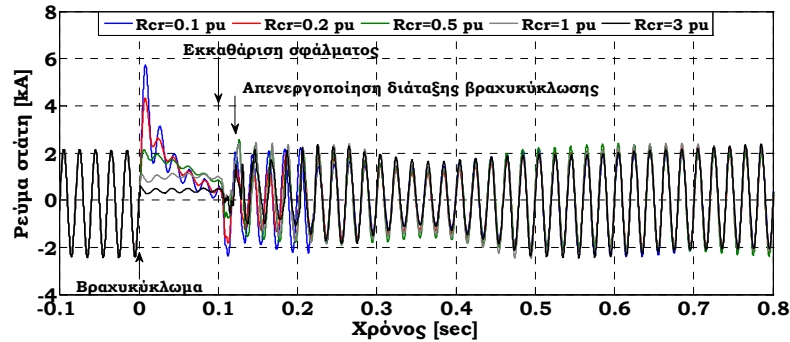
Στο Σχήμα 6.28 δίνονται τα αποτελέσματα προσομοιώσεων για τριφασικό βραχυκύκλωμα στο συνδεδεμένο δίκτυο με χρόνο εκκαθάρισης 100 ms. Τη στιγμή εμφάνισης του σφάλματος το ρεύμα δρομέα αυξάνεται ενεργοποιώντας την ενεργή διάταξη βραχυκύκλωσης που παρακάμπτει το μετατροπέα στην πλευρά του δρομέα. Τα αποτελέσματα αναδεικνύουν την επίδραση της διάταξης βραχυκύκλωσης στην άεργο ισχύ που καταναλώνει η γεννήτρια κατά τη διάρκεια του σφάλματος αλλά και τη στιγμή εκκαθάρισης του. Όταν η τιμή της αντίστασης αυξάνεται, η απόσβεση των μεταβατικών στο ρεύμα δρομέα και την ηλεκτρομαγνητική ροπή είναι σημαντικότερη. Παρ' όλα αυτά, ιδιαίτερα μεγάλες τιμές της αντίστασης ενδέχεται να προκαλέσουν σημαντικά μεταβατικά τη στιγμή απενεργοποίησης της διάταξης βραχυκύκλωσης. Ο χρόνος κατά τον οποίο η διάταξη βραχυκύκλωσης παραμένει ενεργοποιημένη κυμαίνεται ανάλογα με τον τύπο του σφάλματος, τη δυναμική των ηλεκτρονικών ισχύος του μετατροπέα, το είδος της διάταξης βραχυκύκλωσης – ενεργή ή παθητική – και κυμαίνεται από 60-120 ms, αν και εξαρτάται αρκετά από τις συγκεκριμένες συνθήκες, [ERL07]. Εν γένει ο χρόνος αυτός επιδιώκεται να είναι ελάχιστος, ώστε να εξασφαλίζεται γρήγορα ο έλεγχος της γεννήτριας με την επανασύνδεση του μετατροπέα στην πλευρά του δρομέα,

[SEM06]. Στο Σχήμα 6.28 η διάταξη βραχυκύκλωσης απενεργοποιείται περίπου 50 ms μετά την εκκαθάριση του σφάλματος, οπότε οι υπερτάσεις και τα υπερρεύματα έχουν πλέον αποσβεστεί και καθίσταται ασφαλής η λειτουργία του συστήματος.



Σχήμα 6.28. Α/Γ Τύπου Γ: Ρεύμα δρομεία, ηλεκτρομαγνητική ροπή, άεργος ισχύς και ενεργός ισχύς για τριφασικό βραχυκύκλωμα στο συνδεδεμένο δίκτυο με χρόνο εκκαθάρισης 100 ms για διαφορετικές τιμές αντίστασης για την διάταξη βραχυκύκλωσης

Για λόγους πληρότητας της παρουσίασης στο Σχήμα 6.29 δίνεται η απόκριση του ρεύματος στάτη για το ίδιο βραχυκύκλωμα σε προσομοίωση στιγμιαίων τιμών, όπου τα μεταβατικά του στάτη της γεννήτριας δεν αμελούνται. Στην περίπτωση αυτή τα μεταβατικά των 50 Hz είναι σημαντικά, γεγονός που αναδεικνύει την ανάγκη χρήσης του μοντέλου 5^{ης} τάξης της γεννήτριας στην περίπτωση που απαιτείται λεπτομερέστερη ανάλυση της λειτουργίας της διάταξης βραχυκύκλωσης δρομεία.



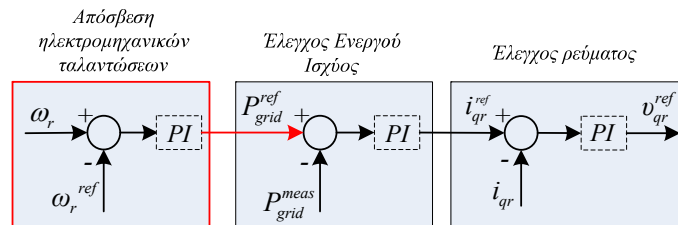
Σχήμα 6.29. Α/Γ Τύπου Γ: Ρεύμα στάτη για τριφασικό βραχυκύκλωμα στο συνδεδεμένο δίκτυο με χρόνο εκκαθάρισης 100 ms για διαφορετικές τιμές αντίστασης στη διάταξη βραχυκύκλωσης σε προσομοίωση στιγμιαίων τιμών

Η συγκεκριμένη λοιπόν ακολουθία γεγονότων εμφάνιση σφάλματος, ενεργοποίηση διάταξης βραχυκύκλωσης, απενεργοποίηση μετατροπέα πλευράς δρομέα, εκκαθάριση σφάλματος, απενεργοποίηση διάταξης βραχυκύκλωσης, επανένταξη μετατροπέα σε πλήρη λειτουργία κ.α., έτσι όπως απεικονίζεται και στα παραπάνω σχήματα, καθορίζεται από μεγάλο πλήθος παραμέτρων. Συγκεκριμένα παραδείγματα παρόμοιας λειτουργίας και ανάλυση των διαφορών ανάλογα με το αν η Α/Γ λειτουργεί προ σφάλματος στην υπερσύγχρονη ή υποσύγχρονη περιοχή δίνονται στις [KAY06][MAP06][ERL07][SEM06][NIR04][NIR06].

Έχουν προταθεί επίσης και άλλες μέθοδοι προστασίας της Α/Γ Τύπου Γ κατά τη διάρκεια σφαλμάτων, με τη χρήση μετατροπέα συνεχούς τάσης μεταξύ των μετατροπέων και μερική ή πλήρη αντικατάσταση της διάταξης βραχυκύκλωσης δρομέα να παρουσιάζεται ως η πλέον ενδεδειγμένη λύση, [ERL07][ENG07]. Η χρήση συσσωρευτών μεταξύ των μετατροπέων ως μέθοδος για τη βελτίωση της δυναμικής ευστάθειας της Α/Γ Τύπου Γ έχει επίσης αναλυθεί, [SET07].

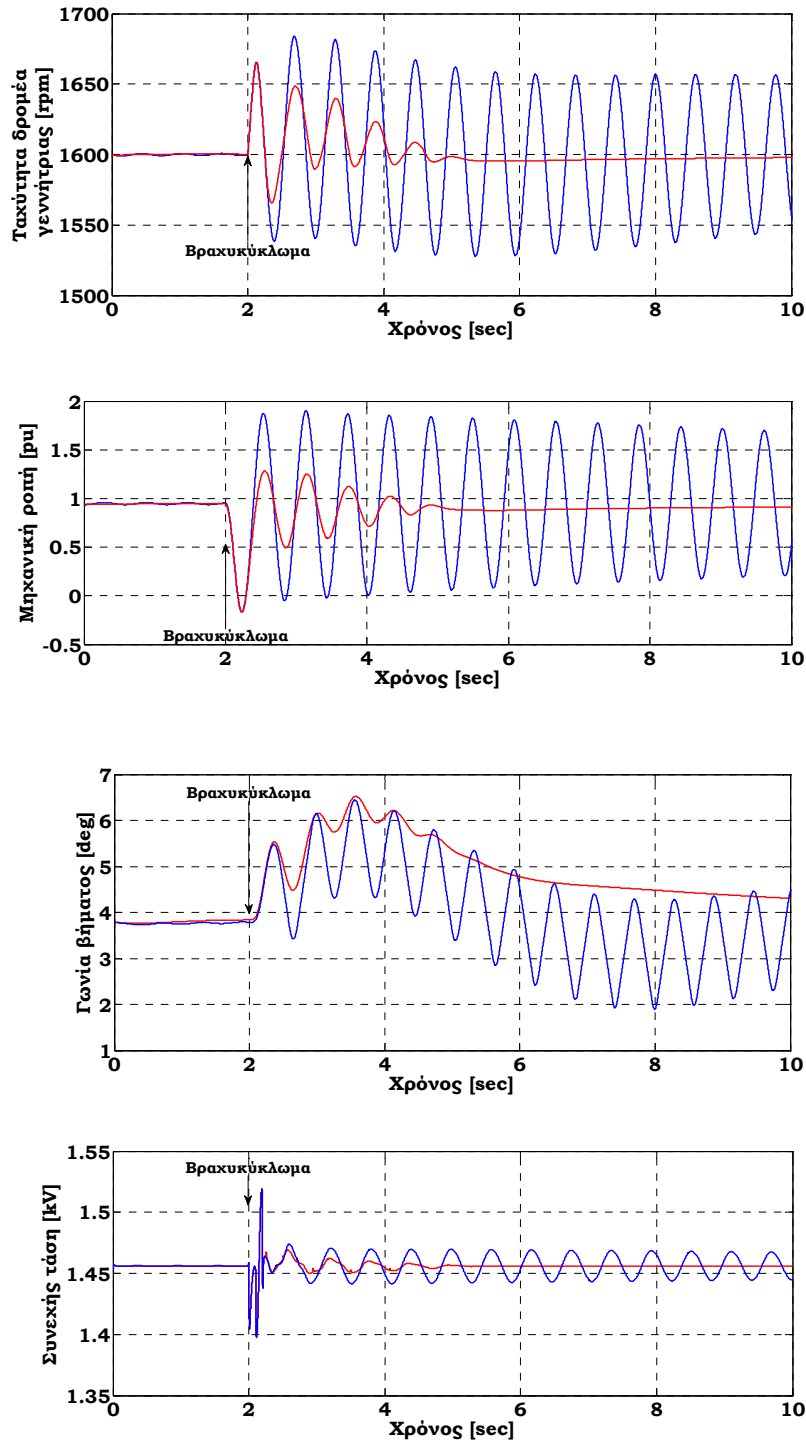
6.6.4. Σύστημα απόσβεσης ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων

Το Σχήμα 6.26 ανέδειξε την ανάγκη απόσβεσης των ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων, οι οποίες αναπτύσσονται κατά τη διάρκεια σφαλμάτων στο δίκτυο και προκαλούν αυξημένη μηχανική καταπόνηση στο σύστημα της Α/Γ. Για το λόγο αυτό σχεδιάστηκε το σύστημα απόσβεσης το οποίο δράοντας στο σύστημα ελέγχου της ενεργού ισχύος του μετατροπέα στην πλευρά του δρομέα αποσβάνει τις ταλαντώσεις που εμφανίζονται στην ταχύτητα του δρομέα - βλέπε Σχήμα 6.30.



Σχήμα 6.30. Α/Γ Τύπου Γ: Βρόχος απόσβεσης ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων – μετατροπέας πλευράς δρομέα

Η προσθήκη του συστήματος απόσβεσης καθιστά τη μείωση των ταλαντώσεων σημαντική και μάλιστα σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα μετά την εμφάνιση του σφάλματος. Όταν ο βρόχος απόσβεσης δεν περιλαμβάνεται στο σύστημα ελέγχου της Α/Γ, οι ταλαντώσεις που αναπτύσσονται στον άξονα μετάδοσης της κίνησης παραμένουν ιδιαίτερα αυξημένες ακόμα και 10 sec μετά το σφάλμα, γεγονός που υποδηλώνει αυξημένη καταπόνηση στο μηχανικό σύστημα. Η επίδραση και στο ηλεκτρικό σύστημα είναι εμφανής στην απόκριση της συνεχούς τάσης μεταξύ των μετατροπέων, βλέπε Σχήμα 6.31.



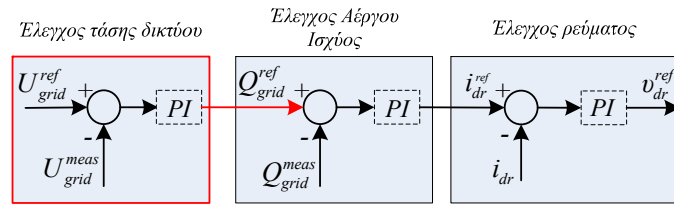
Σχήμα 6.31. Α/Γ Τύπου Γ: Γεννήτρια δρομέα γεννήτριας, μηχανική ροπή, γωνία βήματος περυγίων και συνεχής τάση U_{dc} για τριφασικό βραχυκύκλωμα στο συνδεδεμένο δίκτυο με χρόνο εκκαθάρισης 100 ms με και χωρίς σύστημα απόσβεσης ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων (κόκκινη και μπλε γραμμή αντίστοιχα)

Σημαντική συμβολή στην ευσταθή δυναμική συμπεριφορά της Α/Γ Τύπου Γ επιτελεί και το σύστημα ελέγχου της γωνίας βήματος περυγίων. Κατά την εμφάνιση του σφάλματος, η συνεπαγόμενη μείωση της ενεργού ισχύος και της ηλεκτρομαγνητικής ροπής προκαλεί την επιτάχυνση του δρομέα. Όσο η διάταξη βραχυκύκλωσης δρομέα είναι ενεργοποιημένη και ο δρομέας βραχυκυκλωμένος, η επιτάχυνση αυτή προκαλεί αυξημένη κατανάλωση αέργου ισχύος στην υπερσύγχρονη περιοχή

λειτουργίας επιδρώντας αρνητικά στην ευστάθεια τάσης του συστήματος, βλέπε Σχήμα 6.23. Το σύστημα ελέγχου γωνίας βήματος πτερυγίων, όπως αυτό περιγράφεται στην ενότητα ανάλυσης του αεροδυναμικού συστήματος, ελέγχει την ταχύτητα περιστροφής του δρομέα και στην περίπτωση επιτάχυνσης αυξάνει τη γωνία βήματος, επενεργώντας σαν σύστημα περιορισμού της επιτάχυνσης, βλέπε Σχήμα 6.31. Οι χρονικές σταθερές, που υπεισέρχονται στο βρόχο ρύθμισης της γωνίας βήματος, καθορίζουν τη δυναμική απόκριση του συστήματος, καθώς απαιτείται η κατά το δυνατόν γρηγορότερη μείωση της αεροδυναμικής ισχύος.

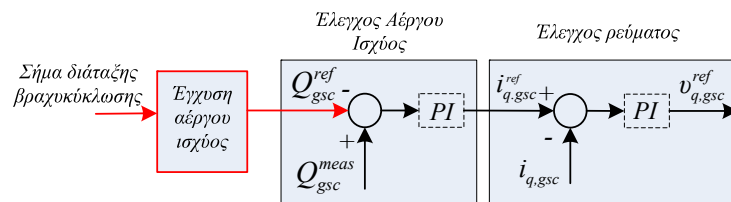
6.6.5. Έλεγχος τάσης δικτύου

Στην κανονική λειτουργία ο ελεγκτής τάσης ή ΣΙ του μετατροπέα στην πλευρά του δρομέα παρέχει το σήμα αναφοράς για την άεργο ισχύ που ανταλλάσσεται με το δίκτυο, με βάση τη μέτρηση της τάσης στον τερματικό ζυγό της Α/Γ ή στο ΣΚΣ του αιολικού πάρκου, βλέπε Σχήμα 6.32.



Σχήμα 6.32. Α/Γ Τύπου Γ: Βρόχος ελέγχου τάσης δικτύου κανονικής λειτουργίας – μετατροπέας πλευράς δρομέα

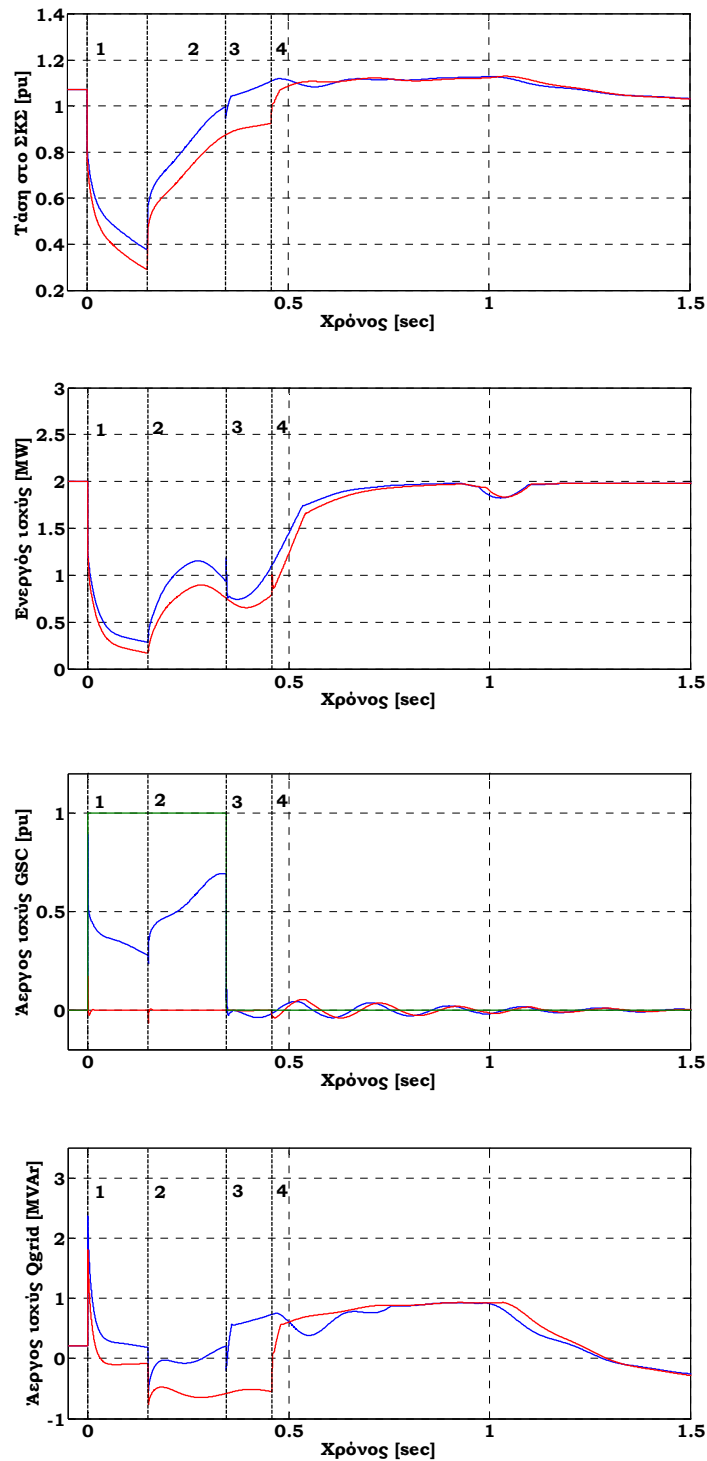
Το σύστημα ελέγχου για τις περιπτώσεις σφαλμάτων στο δίκτυο περιλαμβάνει έναν επιπλέον βρόχο, ο οποίος επενεργεί στο μετατροπέα στην πλευρά του δικτύου όταν και μόνο όταν ο μετατροπέας στην πλευρά του δικτύου είναι απενεργοποιημένος λόγω λειτουργίας της διάταξης βραχυκύκλωσης. Κατά τη διάρκεια του σφάλματος λοιπόν, ο επιπρόσθετος βρόχος παρέχει σήμα αναφοράς για την παραγωγή μεγίστου αέργου ισχύος -1 αμ – στο μετατροπέα στην πλευρά του δικτύου, ο οποίος με τον τρόπο αυτό συμβάλλει στην ευστάθεια τάσης κατά τη διάρκεια έντονων μεταβατικών φαινομένων, όπως τα βραχυκυκλώματα, βλέπε Σχήμα 6.33. Για την αποφυγή ασυνεχειών στο σύστημα ελέγχου της Α/Γ, μεταβατικών ρευμάτων αλλά και για την αποφυγή καταπονήσεων ή επαναλαμβανόμενων ενεργοποιήσεων της διάταξης βραχυκύκλωσης απαιτείται συντονισμός της λειτουργίας του ελεγκτή αέργου ισχύος κανονικής και έκτακτης λειτουργίας.



Σχήμα 6.33. Α/Γ Τύπου Γ: Βρόχος έγχυσης αέργου ισχύος έκτακτης λειτουργίας – μετατροπέας πλευράς δικτύου

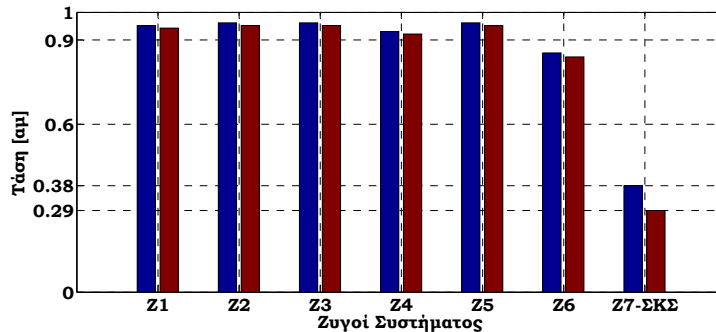
Στο Σχήμα 6.34 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα τριφασικού βραχυκυκλώματος στο δίκτυο με χρόνο εκκαθάρισης 100 ms για την περίπτωση που περιλαμβάνεται ο βρόχος έγχυσης αέργου ισχύος στο μετατροπέα στην πλευρά του δικτύου και την περίπτωση που ο μετατροπέας αυτός λειτουργεί με μοναδιαίο ΣΙ, όπως στην κανονική λειτουργία. Στα γραφήματα σημειώνεται και η χρονική στιγμή εκκαθάρισης του σφάλματος για την περίπτωση χρήσης του βρόχου έγχυσης αέργου. Στην περίπτωση αυτή, όσο η διάταξη βραχυκύκλωσης είναι ενεργοποιημένη, ο μετατροπέας στην πλευρά του δικτύου λειτουργώντας σαν STATCOM, συμβάλλει στην προμήθεια αέργου ισχύος και βλεπώνει το επίπεδο τάσης. Όσο αυτό παραμένει χαμηλό, η δυνατότητα του μετατροπέα να παρέχει άεργο ισχύ περιορίζεται επίσης αν και ο έλεγχος προβλέπει ονομαστική άεργο ισχύ. Κατά την εκκαθάριση του σφάλματος, η τάση δεν επανέρχεται στο προ σφάλματος επίπεδο, καθώς η γεννήτρια εξακολουθεί να λειτουργεί σαν τυπική ασύγχρονη γεννήτρια, καταναλώνοντας άεργο ισχύ και καθυστερώντας την αύξηση της τάσης. Όταν η διάταξη βραχυκύκλωσης απενεργοποιείται και ο μετατροπέας στην πλευρά του δρομέα επανέρχεται σε κανονική λειτουργία, ο ελεγκτής τάσης του μετατροπέα ρυθμίζει την παροχή ή απορρόφηση αέργου ισχύος ανάλογα με το επίπεδο τάσης στο σημείο ελέγχου, το ΣΚΣ

του αιολικού πάρκου στην προκειμένη περίπτωση. Οι χρονικές στιγμές 3 και 4 αντιστοιχούν στην απενεργοποίηση της διάταξης για την περίπτωση που ο βρόχος έγχυσης αέργου ισχύος περιλαμβάνεται ή όχι αντίστοιχα στον έλεγχο του συστήματος.



Σχήμα 6.34. Α/Γ Τύπου Γ: Τάση στο ΣΚΣ, ενεργός ισχύς, άεργος ισχύς μετατροπέα στην πλευρά του δικτύου και σήμα έγχυσης ονομαστικής αέργου ισχύος (πράσινη γραμμή), ολική άεργος ισχύς κατά τη διάρκεια τριφασικού βραχυκυκλώματος στο συνδεδεμένο δίκτυο με χρόνο εκκαθάρισης 100 ms στην περίπτωση επιπρόσθετου βρόχου στήριξης αέργου ισχύος στο μετατροπέα στην πλευρά του δικτύου (μπλε γραμμή) και στην περίπτωση μοναδιαίου ΣΙ (κόκκινη γραμμή)

Η επίδραση της πρόσθετης παροχής αέργου ισχύος από την Α/Γ Τύπου Γ στις τάσεις των ζυγών του συστήματος κατά τη διάρκεια του βραχυκυκλώματος απεικονίζεται στο Σχήμα 6.35. Η ελάχιστη τιμή της τάσης κατά το σφάλμα βελτιώνεται κατά 1% για τους υπόλοιπους ζυγούς ενώ στο ΣΚΣ, όπου προσομοιώνεται το βραχυκύκλωμα, κατά 9%.

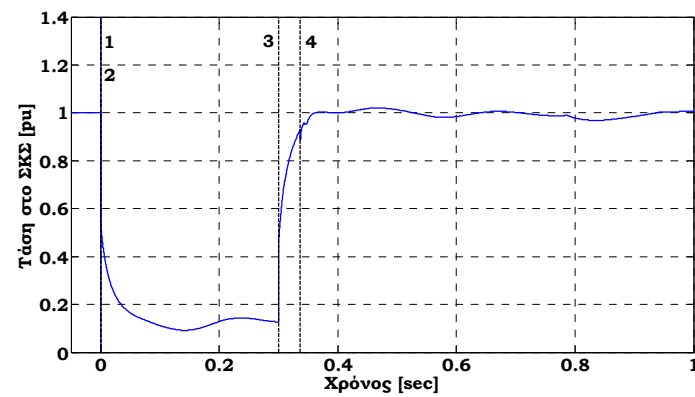
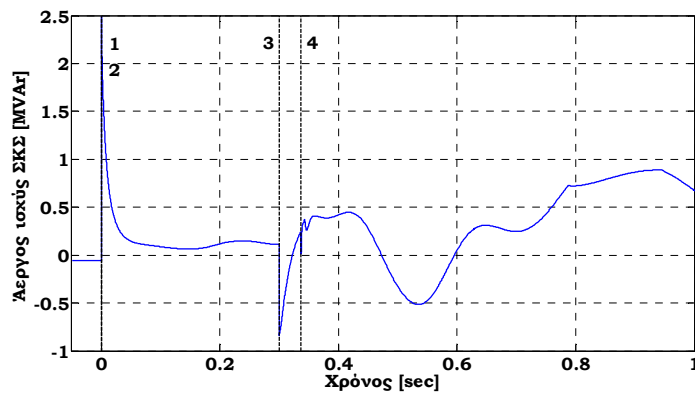
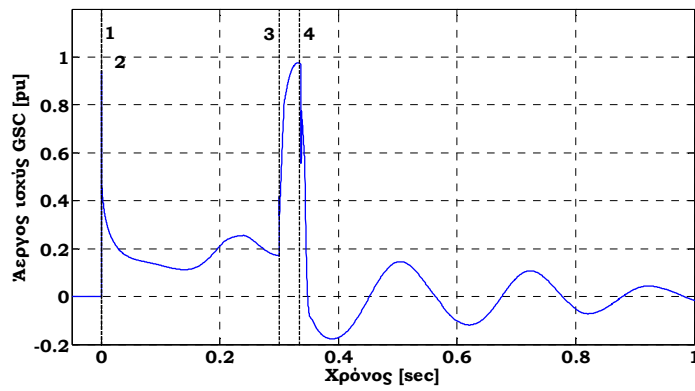


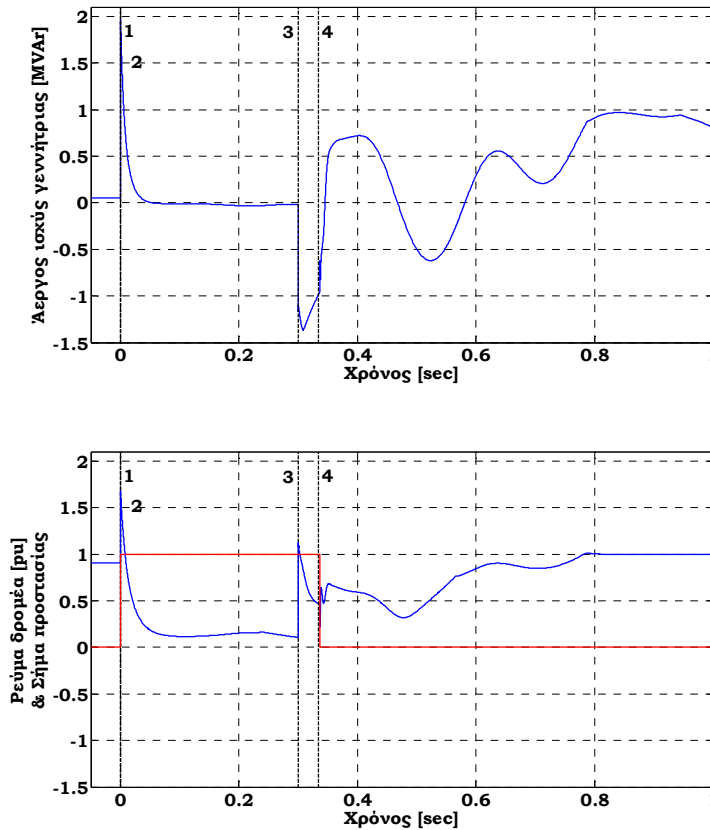
Σχήμα 6.35. Ελάχιστες τιμές τάσης ζυγών ΜΤ και ΥΤ κατά το βραχυκύκλωμα με και χωρίς έλεγχο τάσης στο Α/Π με Α/Γ Τύπου Γ (μπλε και κόκκινη στήλη αντίστοιχα)

Η ακολουθία των λειτουργικών καταστάσεων του συστήματος της Α/Γ κατά τη διάρκεια του σφάλματος αποτυπώνεται πιο αναλυτικά στο Σχήμα 6.36 που ακολουθεί. Το σφάλμα που προσομοιώνεται είναι μεγαλύτερης διάρκειας, δηλ. 300 msec, και δίνονται τα αποτελέσματα για την τάση στο ΣΚΣ της Α/Γ και για τις άεργες ισχύεις – την άεργο ισχύ της γεννήτριας, την άεργο ισχύ που ανταλλάσσει ο μετατροπέας στην πλευρά του δικτύου με το δίκτυο και τη συνολική ισχύ που ανταλλάσσει η Α/Γ μετρημένη στο ΣΚΣ. Οι χρονικές στιγμές που αποτυπώνονται αντιστοιχούν στη στιγμή του σφάλματος (1), τη στιγμή ενεργοποίησης της ενεργούς διάταξης βραχυκύκλωσης (2), τη στιγμή εκκαθάρισης του σφάλματος (3) και τη στιγμή απενεργοποίησης της διάταξης βραχυκύκλωσης (4).

Πριν την εμφάνιση του σφάλματος η τάση στο ΣΚΣ είναι ονομαστική οπότε η άεργος ισχύς που ανταλλάσσει η Α/Γ με το δίκτυο είναι ουσιαστικά μηδενική. Ο μετατροπέας στην πλευρά του δρομέα ρυθμίζει την άεργο ισχύ κάνοντας έλεγχο τάσης όπως έχει περιγραφεί παραπάνω, ενώ ο μετατροπέας στην πλευρά του δικτύου εξασφαλίζει μοναδιαίο συντελεστή ισχύος του μετατροπέα δηλ. μηδενική ανταλλαγή αέργου ισχύος. Τη στιγμή του σφάλματος η βύθιση τάσης προκαλεί αύξηση στην άεργο ισχύ που παράγει η Α/Γ καθώς ο μετατροπέας στην πλευρά του δρομέα προσπαθεί να ελέγξει την τάση παρέχοντας σήμα για αύξηση της παραγόμενης αέργου ισχύος. Έτσι εμφανίζεται η απότομη αύξηση στην άεργο ισχύ που παρέχεται στο ΣΚΣ – μεταξύ χρονικών στιγμών (1) και (2). Σε αυτό το διάστημα ο μετατροπέας στην πλευρά του δικτύου εξακολουθεί να λειτουργεί με μοναδιαίο συντελεστή ισχύος. Στη συνέχεια με την ενεργοποίηση της διάταξης, ο μετατροπέας στην πλευρά του δρομέα απενεργοποιείται με αποτέλεσμα η τιμή αναφοράς για την άεργο να μηδενίζεται, ενώ ο μετατροπέας στην πλευρά του δικτύου εγχύει έκτακτα άεργο ισχύ. Αν και η τιμή αναφοράς είναι ονομαστική (στη βάση ισχύος του μετατροπέα) λόγω χαμηλής τάσης η άεργος ισχύς που τελικά παράγεται από το μετατροπέα στην πλευρά του δικτύου είναι μικρότερη από 1 α.μ. Λόγω επίσης χαμηλού επιπέδου τάσης η γεννήτρια καταναλώνει σχεδόν μηδενική άεργο ισχύ λειτουργώντας σαν τυπική ασύγχρονη γεννήτρια με βραχυκυκλωμένο δρομέα. Όταν εκκαθαρίζεται το σφάλμα και πριν απενεργοποιηθεί η διάταξη βραχυκύκλωσης, η τάση αυξάνεται με αποτέλεσμα η άεργος ισχύς που παράγει ο μετατροπέας στην πλευρά του δικτύου να αυξάνεται και αυτή, ενώ το ίδιο ισχύει και για την άεργο ισχύ που καταναλώνει η γεννήτρια. Όπως φαίνεται και στην απόκριση της αέργου ισχύος στο ΣΚΣ η συνολική άεργος ισχύς που καταναλώνεται είναι σημαντική. Μετά από τη μείωση των μεταβατικών στο ρεύμα του δρομέα και την επάνοδο της τάσης σε κανονικά επίπεδα, η διάταξη βραχυκύκλωσης

αποσυνδέεται και ο μετατροπέας επανέρχεται σε κανονική λειτουργία ελέγχοντας την τάση, ενώ ο μετατροπέας στην πλευρά του δρομέα ακολουθεί τη λειτουργία μοναδιαίου συντελεστή ισχύος.





Σχήμα 6.36. A/G Τύπου Γ: Τάση στο ΣΚΣ, αέριος ισχύς μετατροπέα στην πλευρά του δικτύου, αέριος ισχύς στο ΣΚΣ, αέριος ισχύς γεννήτριας, ρεύμα δρομέα και σήμα προστασίας

6.7. Συμπεράσματα

Στο Κεφάλαιο 6 μελετάται διεξοδικά το μοντέλο που αναπτύχθηκε για την A/G Τύπου Γ, με τελικό στόχο την ανάπτυξη μεθόδων ελέγχου που επιτρέπουν στις A/G να συμβάλλουν στη ρύθμιση παραμέτρων του δικτύου, όπως η τάση και η συχνότητα. Αρχικά γίνεται λεπτομερής ανάλυση των εξισώσεων Park για μοντέλα 3^{ης} και 5^{ης} τάξης για την ασύγχρονη γεννήτρια τυλιγμένου δρομέα διπλής τροφοδότησης και παρουσίαση των χαρακτηριστικών μόνιμης κατάστασης. Παρουσιάζεται η επίδραση της μεταβλητής και ελεγχόμενης τάσης δρομέα στις χαρακτηριστικές ενεργού-αέργου ισχύος και ροπής, αναδεικνύοντας τις αυξημένες δυνατότητες ελέγχου της συγκεκριμένης διαμόρφωσης. Στη συνέχεια περιγράφεται το σχήμα διανυσματικού ελέγχου που εφαρμόζεται σε συνθήκες κανονικής λειτουργίας, σύμφωνα με το οποίο ο μετατροπέας στην πλευρά του δρομέα ελέγχει ανεξάρτητα την ενεργό και αέργο ισχύ που παράγει η γεννήτρια, ενώ ο μετατροπέας στην πλευρά του δικτύου αναλαμβάνει τη ρύθμιση της DC τάσης μεταξύ των μετατροπέων καθώς και την αέργο ισχύ που παρέχεται από το μετατροπέα στο δίκτυο. Σε συνθήκες κανονικής λειτουργίας ο μετατροπέας στην πλευρά του δικτύου ελέγχεται να λειτουργεί με μοναδιαίο συντελεστή ισχύος. Ενώ ο έλεγχος ενεργού ισχύος ακολουθεί τη στρατηγική Μέγιστης Απολαβής Ισχύος μέσω του μετατροπέα στην πλευρά του δρομέα, το σύστημα ελέγχου γωνίας βήματος περυσίων ρυθμίζει την ταχύτητα περιστροφής του δρομέα της γεννήτριας. Επιμέρους υποσυστήματα, όπως η DC σύνδεση των μετατροπέων και τα φίλτρα εξόδου στην πλευρά του δικτύου, περιλαμβάνονται στην παρουσίαση ολοκληρώνοντας τη συστηματική μελέτη του συγκεκριμένου τύπου A/G. Η λειτουργία του μοντέλου που αναπτύχθηκε, αποτυπώνεται με μια σειρά από προσομοιώσεις για βηματικές αλλαγές στην ταχύτητα ανέμου. Σε ταχύτητες μικρότερες της ονομαστικής ο έλεγχος αποσκοπεί στη μεγιστοποίηση της εξαγόμενης αεροδυναμικής ισχύος ενώ για μεγαλύτερες τιμές ανέμου ο μετατροπέας στην πλευρά του δρομέα εξασφαλίζει ονομαστική ενεργό ισχύ εξόδου και ο ελεγκτής ταχύτητας δρομέα επιτρέπει

διακυμάνσεις στην ταχύτητα περιστροφής με στόχο τον περιορισμό των καταπονήσεων στο μηχανικό σύστημα.

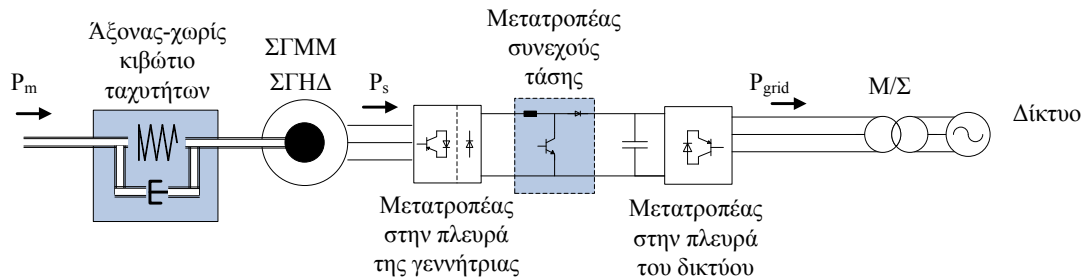
Στη συνέχεια αντικείμενο μελέτης είναι η συμπεριφορά του συστήματος σε βυθίσεις τάσης που οφείλονται π.χ. σε σφάλματα στο δίκτυο. Η ανάλυση των ρευμάτων βραχυκύκλωσης που αναπτύσσονται κατά τη διάρκεια του μεταβατικού στο στάτη και το δρομέα της ασύγχρονης γεννήτριας έδειξε ότι τα όρια ελέγχου του συνδεδεμένου στο δρομέα μετατροπέα δεν επιτρέπουν την ασφαλή λειτουργία του συστήματος σε συνθήκες βύθισης τάσης. Η απότομη έγχυση ισχύος στο μετατροπέα και στη DC σύνδεση προκαλεί υπερφόρτιση του πυκνωτή με ενδεχόμενη καταστροφή των ηλεκτρονικών ισχύος. Η προστασία επιτυγχάνεται με την εισαγωγή διάταξης βραχυκύκλωσης στο κύκλωμα του δρομέα, μέσω της οποίας εξασφαλίζεται μείωση των μεταβατικών ρευμάτων χωρίς κίνδυνο για το μετατροπέα. Αναλύεται επίσης η επίδραση της εξωτερικής αντίστασης της διάταξης στο ρεύμα βραχυκύκλωσης στάτη και δρομέα αλλά και στη χαρακτηριστική ροπής της ασύγχρονης γεννήτριας. Η αποφυγή επιταχύνσεων στο δρομέα της γεννήτριας κατά τη διάρκεια του μεταβατικού εξασφαλίζεται μέσω του ελεγκτή γωνίας βήματος των πτερυγίων, στον οποίο όπως προκύπτει από τα αποτελέσματα, δεν απαιτείται επιπρόσθετη ρύθμιση για την περίπτωση μεταβατικών φαινομένων. Η συστηματική μελέτη της δυνατότητας αδιάλειπτης παροχής ισχύος κατά τη διάρκεια σφαλμάτων στο δίκτυο ολοκληρώνεται με τη σχεδίαση συστήματος ελέγχου που επιτρέπει επιπλέον τη στήριξη της τάσης του δικτύου μέσω της παροχής αέργου ισχύος από το μετατροπέα στην πλευρά του δικτύου. Ο έλεγχος τάσης δικτύου γίνεται είτε μέσω του μετατροπέα στην πλευρά του δρομέα, όσο η διάταξη βραχυκύκλωσης δεν είναι ενεργοποιημένη, είτε μέσω του μετατροπέα στην πλευρά του δικτύου, ο οποίος παρέχει πρόσθετη άεργο ισχύ λειτουργώντας σαν STATCOM. Το σύστημα απόσβεσης, το οποίο έχει σχεδιαστεί και ενσωματωθεί στο σύστημα ελέγχου ενεργού ισχύος του μετατροπέα στην πλευρά του δρομέα, επιτυγχάνει σβέση των ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων που διεγείρονται στο μηχανικό σύστημα της Α/Γ. Η ενδεχόμενη αποσύνδεση της Α/Γ για λόγους προστασίας των μηχανικών μερών αποφεύγεται έτσι, επιτρέποντας στην Α/Γ να παραμείνει συνδεδεμένη στο δίκτυο προσφέροντας στήριξη της τάσης κατά τη διάρκεια μεταβατικών φαινομένων που προκαλούν τη βύθιση. Η δυνατότητα που παρέχει το σύστημα ελέγχου στην Α/Γ Τύπου Γ να ικανοποιήσει τις απαιτήσεις των κωδίκων δικτύου όσον αφορά τις βυθίσεις τάσης και τον έλεγχο αέργου ισχύος αναδεικνύεται μέσω κατάλληλων προσομοιώσεων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 – Ανεμογεννήτρια με Σύγχρονη Γεννήτρια και Πλήρη Μετατροπέα (Τύπου Δ) – Ηλεκτρικό Σύστημα και Έλεγχος

Στην παρούσα ενότητα μελετάται το ηλεκτρικό σύστημα και ο έλεγχος της Α/Γ Τύπου Δ, ο οποίος τα τελευταία χρόνια χρησιμοποιείται με ολοένα και αυξανόμενο ρυθμό, [HAN07]. Κατά τη διάρκεια της παρούσας εργασίας, μελετήθηκαν οι εξής δύο παραλλαγές του Τύπου Δ:

- Πολυπολική σύγχρονη γεννήτρια ηλεκτρικής διέγερσης, χωρίς κιβώτιο ταχυτήτων και σύνδεση στο δίκτυο μέσω ανορθωτή διόδων στην πλευρά της γεννήτριας, μετατροπέα συνεχούς τάσης, και αντιστροφέα διακοπτικών στοιχείων IGBTs στην πλευρά του δικτύου – Τύπος Δ1
- Πολυπολική σύγχρονη γεννήτρια μονίμων μαγνητών, χωρίς κιβώτιο ταχυτήτων και σύνδεση στο δίκτυο μέσω πλήρους μετατροπέα πηγής τάσης διακοπτικών στοιχείων IGBTs - Τύπος Δ2

Ο μετατροπέας συνεχούς τάσης DC-DC, που εμφανίζεται στο Σχήμα 7.1, περιλαμβάνεται μόνο στον Τύπο Δ1. Η μεγαλύτερη Α/Γ Τύπου Δ, και συγκεκριμένα Τύπου Δ1, που χρησιμοποιείται σήμερα είναι το μοντέλο E-112 της εταιρείας *Enercon GmbH* με ισχύ 4.5 MW, διάμετρο γεννήτριας 112 m και βάρος 220 τόνους, [MCD06][ENG07].



Σχήμα 7.1. Ηλεκτρική διαμόρφωση ανεμογεννήτριας Τύπου Γ

Και στις δύο περιπτώσεις, ο μετατροπέας αποδεσμεύει την ταχύτητα της γεννήτριας από τη συχνότητα του δικτύου και εξασφαλίζει τη λειτουργία μεταβλητών στροφών. Η άεργος ισχύς επίσης που παρέχεται στο δίκτυο από το μετατροπέα είναι ανεξάρτητη από το σημείο λειτουργίας αέργου ισχύος της γεννήτριας. Η πολυπολική σύγχρονη γεννήτρια εξαλείφει την ανάγκη χρήσης κιβωτίου ταχυτήτων, αποφεύγοντας το αυξημένο βάρος, κόστος, απώλειες και ανάγκες συντήρησης. Σαν βασικά πλεονεκτήματα του Τύπου Δ1, αναφέρονται το μειωμένο κόστος λόγω χρήσης απλού ανορθωτή διόδων στην πλευρά της γεννήτριας, οι μειωμένες απώλειες, οι αυξημένες δυνατότητες ελέγχου που προσφέρει το σύστημα διέγερσης και η μειωμένη πολυπλοκότητα της ηλεκτρομαγνητικής κατασκευής. Το σύστημα παρουσιάζει εγγενώς μη γραμμικότητες παράγοντας αρμονικές στο ρεύμα της διάταξης. Μια εναλλακτική διαμόρφωση που χρησιμοποιεί θυρίστορ καταναλώνει άεργο ισχύ και παράγει υψηλότερες ακόμα αρμονικές. Ο συνδυασμός που επιλέγεται στον Τύπο Δ1 έχει πολύ χαμηλότερο ολικό κόστος από μια ισοδύναμη ασύγχρονη γεννήτρια με μετατροπέα IGBT, [ACK05]. Αντίθετα, ο Τύπος Δ2 έχει χρησιμοποιηθεί πιο μαζικά από την αιολική βιομηχανία, κυρίως λόγω της αυξημένης απόδοσης και στιβαρής κατασκευής της σύγχρονης γεννήτριας μονίμων μαγνητών. Παρ' όλα αυτά το υψηλό κόστος για τα υλικά των μονίμων μαγνητών και η σταθερή διέγερση που δεν μεταβάλλεται ανάλογα με το σημείο λειτουργίας της ανεμογεννήτριας αποτελούν σοβαρά μειονεκτήματα του τύπου αυτού. Μια αναλυτική παρουσίαση των γεννητριών που χρησιμοποιούνται στις Α/Γ Τύπου Δ δίνεται στο [BAN08].

Τα τρία βασικά είδη σύγχρονων γεννητριών είναι:

- *Σύγχρονη Γεννήτρια Έκτοπων Πόλων*: Τα τυλίγματα του δρομέα είναι τοποθετημένα σε συγκεντρωμένο τυλίγμα γύρω από τον πόλο. Αυτό δημιουργεί διαφορετική μαγνητική αντίσταση κατά μήκος των αξόνων d και q , που συνεπάγεται διαφορετικές τιμές αντιδράσεων X_d και X_q . Ένα

τυλίγμα απόσβεσης τοποθετείται στον πόλο. Χρησιμοποιούνται ευρέως σε υδροηλεκτρικές μονάδες με τυπικές τιμές ταχύτητας 375 έως 750 *rpm* για μηχανές 16 έως 8 πόλους αντίστοιχα.

- *Σύγχρονη Γεννήτρια Κυκλικού Δρομέα*: Τα τυλίγματα δρομέα είναι διανεμημένα ομοιόμορφα στις διατρήσεις του δρομέα, γεγονός που συνεπάγεται ίσες αντιδράσεις στους άξονες της μηχανής, X_d και X_q . Διπολικές ή τετραπολικές σύγχρονες γεννήτριες κυκλικού δρομέα χρησιμοποιούνται κυρίως σε θερμοηλεκτρικούς σταθμούς με ταχύτητες 3000 και 1500 *rpm* αντίστοιχα.
- *Πολυπολική Σύγχρονη Γεννήτρια Μόνιμων Μαγνητών*: Αντί για ηλεκτρική διέγερση το μαγνητικό πεδίο του δρομέα παρέχεται από μόνιμους μαγνήτες. Λειτουργούν σε χαμηλές ταχύτητες, π.χ. στις 20 *rpm*, ενώ λόγω της σχεδόν ομοιόμορφης κατανομής των μαγνητών επιφανείας, μπορούν να θεωρηθούν σαν μηχανές κυλινδρικού δρομέα, δηλαδή οι αντιδράσεις στους άξονες της μηχανής είναι ίσες.

7.1. Μοντελοποίηση σύγχρονης γεννήτριας ηλεκτρικής διέγερσης

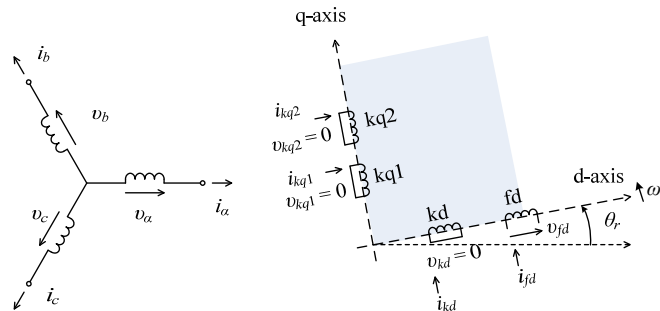
Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται οι βασικές διαφορικές και αλγεβρικές εξισώσεις, οι οποίες περιγράφουν μία συμμετρική τριφασική σύγχρονη γεννήτρια, καθώς επίσης και οι αναγκαίες παραδοχές και απλοποιήσεις που οδηγούν στο μοντέλο τέταρτης τάξεως, το οποίο χρησιμοποιείται στην παρούσα διατριβή.

Για την εξαγωγή των εξισώσεων του εξεταζόμενου μοντέλου της σύγχρονης γεννήτριας γίνονται οι ακόλουθες παραδοχές [KUN94]:

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

Οι πρώτες τρεις παραδοχές εισάγουν αμελητέο σφάλμα όσον αφορά τη λειτουργία της πραγματικής μηχανής, όπως έχει αποδειχθεί από μετρήσεις. Η τελευταία παραδοχή οδηγεί στην ύπαρξη μόνο γραμμικά συζευγμένων μαγνητικών κυκλωμάτων, γεγονός το οποίο εξυπηρετεί την ευκολία της ανάλυσης.

Στο Σχήμα 7.2 δίνεται η κυκλωματική παράσταση τριφασικής σύγχρονης μηχανής.



Σχήμα 7.2. Κυκλωματική παράσταση στάτη και δρομέα σύγχρονης γεννήτριας αντίστοιχα

Το κύκλωμα του στάτη αποτελείται από τα τριφασικά τυλίγματα του τυμπάνου με στιγμιαίες τάσεις v_a , v_b , v_c και στιγμιαία ρεύματα i_a , i_b , i_c αντίστοιχα. Επειδή στην πλειοψηφία των περιπτώσεων οι σύγχρονες μηχανές λειτουργούν ως γεννήτριες, θεωρείται ότι τα ρεύματα του στάτη έχουν θετικό πρόσημο όταν εξέρχονται από τους ακροδέκτες της μηχανής.

Το κύκλωμα του δρομέα περιλαμβάνει το τυλίγμα του πεδίου διέγερσης, καθώς επίσης και τα τυλίγματα απόσβεσης. Τα τυλίγματα αυτά είναι τοποθετημένα κατά μήκος του ευθέος (d) και του εγκάρσιου μαγνητικού (q) άξονα. Ο ευθύς άξονας συμπίπτει με τον μαγνητικό άξονα του τυλίγματος διεγέρσεως, ενώ ο εγκάρσιος άξονας προπορεύεται κατά 90° . Τα τυλίγματα kd , $kq1$ και $kq2$ είναι

τυλίγματα αποσβέσεως, τα οποία παριστάνουν την επίδραση των δινορρευμάτων στις μηχανές με συμπαγή δρομέα. Στο τύλιγμα του πεδίου διεγέρσεως επιβάλλεται συνεχής τάση (v_{fd}), ενώ τα τυλίγματα αποσβέσεως θεωρούνται βραχυκυκλωμένα.

Η κίνηση του δρομέα χαρακτηρίζεται από την ηλεκτρική γωνία θ_r ανάμεσα στον ευθύ άξονα του δρομέα και τον άξονα της φάσης α του στάτη, όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.2. Αν το πεδίο του δρομέα της μηχανής περιστρέφεται με ηλεκτρική γωνιακή ταχύτητα ω_r (σε ηλεκτρικά rad/s), τότε η γωνία θ_r (σε ηλεκτρικά rad) δίνεται από τη σχέση:

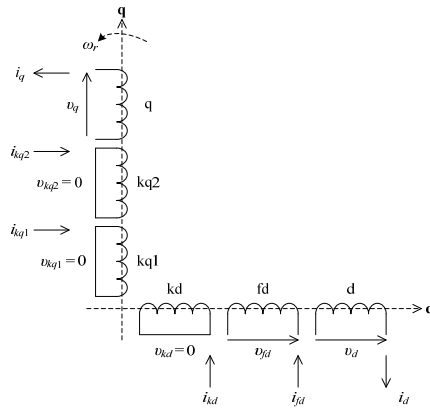
$$\theta_r = \omega_r t + \theta_{r0} \quad (7.1)$$

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

$$\dot{\theta}_r = \omega_r \quad (7.2)$$

7.1.1. Περιγραφή σύγχρονης μηχανής ηλεκτρικής διέγερσης με τις εξισώσεις του Park

Ο μετασχηματισμός του Park [KRA00] αποτελεί το μαθηματικό εργαλείο για την ανάλυση των σύγχρονων μηχανών. Ο μετασχηματισμός αυτός συνίσταται στην αντικατάσταση των τριών τυλιγμάτων a, b, c του στάτη από τρία υποθετικά (ισοδύναμα) τυλίγματα $d, q, 0$. Τα τυλίγματα d, q του στάτη περιστρέφονται μαζί με το δρομέα της μηχανής και βρίσκονται στους ίδιους άξονες με τα αντίστοιχα τυλίγματα του δρομέα (τύλιγμα διεγέρσεως και τυλίγματα αποσβέσεως). Το τρίτο τύλιγμα 0 δεν είναι μαγνητικά συζευγμένο με τα άλλα δύο νέα τυλίγματα του στάτη και παίζει ρόλο μόνο σε συνθήκες ασύμμετρης φόρτισης της μηχανής. Επειδή στην παρούσα ανάλυση θα ασχοληθούμε μόνο με συμμετρικές συνθήκες φόρτισης, το τύλιγμα 0 παραλείπεται. Η σχηματική παράσταση των τυλιγμάτων τυπικής σύγχρονης μηχανής μετά την εφαρμογή του μετασχηματισμού του Park δίνεται στο Σχήμα 7.3.



Σχήμα 7.3. Παράσταση σύγχρονης μηχανής κατά το μετασχηματισμό του Park

Το κύριο πλεονέκτημα του μετασχηματισμού του Park είναι η απαλοιφή της χρονικής εξάρτησης των αυτεπαγωγών και των αλληλεπαγωγών από τις εξισώσεις τάσεως της μηχανής [KUN94][KRA00].

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

$$v_d = -r_s i_d - \frac{\omega_r}{\omega_b} \psi_q + \frac{1}{\omega_b} \dot{\psi}_d \quad (7.3)$$

$$v_q = -r_s i_q + \frac{\omega_r}{\omega_b} \psi_d + \frac{1}{\omega_b} \dot{\psi}_q \quad (7.4)$$

όπου

v_d, v_q οι τάσεις των τυλιγμάτων d, q του στάτη αντίστοιχα

i_d, i_q τα ρεύματα των τυλιγμάτων d, q του στάτη αντίστοιχα

ψ_d, ψ_q οι πεπλεγμένες ροές ανά δευτερόλεπτο των τυλιγμάτων d, q του στάτη αντίστοιχα

ω_r η ηλεκτρική γωνιακή ταχύτητα (σε ηλεκτρικά rad/s)

ω_b η βασική ηλεκτρική γωνιακή ταχύτητα του συστήματος (σε ηλεκτρικά rad/s)

r_s η ωμική αντίσταση του στάτη.

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

Οι εξισώσεις του Park για τα τυλίγματα του δρομέα του Σχήματος 7.3 γράφονται ως εξής:

$$v_{fd} = r_{fd} i_{fd} + \frac{1}{\omega_b} \dot{\psi}_{fd} \quad (7.5)$$

$$0 = r_{kd} i_{kd} + \frac{1}{\omega_b} \dot{\psi}_{kd} \quad (7.6)$$

$$0 = r_{kq1} i_{kq1} + \frac{1}{\omega_b} \dot{\psi}_{kq1} \quad (7.7)$$

$$0 = r_{kq2} i_{kq2} + \frac{1}{\omega_b} \dot{\psi}_{kq2} \quad (7.8)$$

όπου v_{fd} είναι η συνεχής τάση που εφαρμόζεται στα άκρα του τυλίγματος διεγέρσεως, r_{fd} είναι η αντίστασή του, ψ_{fd} η πεπλεγμένη ροή ανά δευτερόλεπτο και i_{fd} το ρεύμα του πεδίου. Οι αντίστοιχοι συμβολισμοί των (7.6), (7.7) και (7.8) αναφέρονται στα υπόλοιπα τυλίγματα του δρομέα.

Σημειώνεται ότι οι (7.3)-(7.8) είναι διατυπωμένες στο ανά μονάδα σύστημα του στάτη, τα βασικά μεγέθη του οποίου είναι η ονομαστική τριφασική ισχύς και η θερματική τάση της μηχανής.

Όσον αφορά τη δυναμική τους συμπεριφορά, οι σύγχρονες μηχανές χαρακτηρίζονται από [KUN94]:

- Τα ηλεκτρομαγνητικά φαινόμενα των τυλιγμάτων του στάτη, τα οποία σχετίζονται με τις τάσεις μετασηματιστού. Συγκεκριμένα, μετά από μία διαταραχή οι τάσεις μετασηματιστού αποσβένονται μέσα σε κλάσματα του δευτερολέπτου, αφήνοντας τις τάσεις ταχύτητας να διαδραματίσουν πρωταρχικό ρόλο στην απόκριση του συστήματος. Για παράδειγμα, μετά από ένα τριφασικό βραχυκύκλωμα, οι τάσεις μετασηματιστού είναι υπεύθυνες για την εμφάνιση της συνεχούς συνιστώσας στα ρεύματα του στάτη, η οποία μηδενίζεται σε χρονικό διάστημα μερικών δέκατων του δευτερολέπτου. Το χρονικό αυτό διάστημα θεωρείται πολύ μικρό σε σχέση με το διάστημα ενδιαφέροντος σε μελέτες ευστάθειας. Επομένως, τα εξεταζόμενα φαινόμενα συνήθως αμελούνται σε παρόμοιες μελέτες.
- Τα ηλεκτρικά μεταβατικά φαινόμενα των τυλιγμάτων του δρομέα. Τα φαινόμενα αυτά σχετίζονται με τις παραγώγους των πεπλεγμένων ροών ανά δευτερόλεπτο $\dot{\psi}_{fd}$, $\dot{\psi}_{kq1}$ κλπ. των ηλεκτρικών εξισώσεων του δρομέα και μπορούν να διαχωριστούν σε δύο επιμέρους κατηγορίες:
 - Τα υπομεταβατικά, τα οποία σχετίζονται με τα τυλίγματα αποσβέσεως και τα δινορρεύματα. Τα φαινόμενα αυτά εξελίσσονται αρκετά γρήγορα
 - Τα μεταβατικά, η δυναμική των οποίων καθορίζεται από το τυλίγμα του πεδίου διεγέρσεως
- Τη δυναμική συμπεριφορά της μηχανικής κίνησης του δρομέα.

Αμελώντας τα ηλεκτρομαγνητικά φαινόμενα του στάτη, οι τάσεις και τα ρεύματα του στάτη περιέχουν μόνο όρους θεμελιώδους συχνότητας και επομένως οι διαφορικές εξισώσεις (7.3) και (7.4) μετατρέπονται σε αλγεβρικές.

Επίσης, τα ταχέα ηλεκτρομαγνητικά φαινόμενα του δικτύου λαμβάνουν χώρα στην ίδια χρονική κλίμακα με τα μεταβατικά φαινόμενα του στάτη μίας σύγχρονης μηχανής. Επομένως, επειδή η χρονική κλίμακα των φαινομένων αυτών δεν ενδιαφέρει - όπως προαναφέρθηκε - σε μελέτες ευστάθειας, εξάγεται το συμπέρασμα ότι μπορούν να αμεληθούν και τα ταχέα ηλεκτρομαγνητικά φαινόμενα του δικτύου. Η τελευταία παραδοχή επιτρέπει την περιγραφή του δικτύου με μιγαδικές αλγεβρικές εξισώσεις αντί διαφορικών εξισώσεων.

7.1.2. Εξισώσεις κίνησης δρομέα

Σε μελέτες ευστάθειας συνήθίζεται να αναφέρεται η θέση του πεδίου του δρομέα ως προς έναν άξονα αναφοράς. Για το λόγο αυτό, ορίζεται η γωνία δ του δρομέα της σύγχρονης μηχανής ως η ηλεκτρική γωνία (σε ηλεκτρικά rad) μεταξύ του εγκάρσιου μαγνητικού άξονα της μηχανής και ενός άξονα αναφοράς, δηλαδή:

$$\delta = \theta_r - \omega_{sys} t + \delta_0 \quad (7.9)$$

όπου δ_0 είναι η αρχική τιμή της γωνίας δ , ενώ ω_{sys} είναι η γωνιακή ταχύτητα του άξονα αναφοράς (σε ηλεκτρικά rad/s). Παραγωγίζοντας και τα δύο μέλη της (7.9), προκύπτει η παρακάτω διαφορική σχέση:

$$\dot{\delta} = \dot{\theta}_r - \omega_{sys} \quad (7.10)$$

η οποία λόγω της (7.2), γίνεται:

$$\dot{\delta} = \omega_r - \omega_{sys} \quad (7.11)$$

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

$$2H \frac{\dot{\omega}_r}{\omega_b} = T_m - T_e - D \left(\frac{\omega_r}{\omega_b} - 1 \right) \quad (7.12)$$

όπου

H η ανηγμένη σταθερά αδράνειας σε MWs/MVA

ω_r η γωνιακή ταχύτητα του πεδίου του δρομέα σε ηλεκτρικά rad/s

T_m η ανά μονάδα παραγόμενη από το στρόβιλο μηχανική ροπή

T_e η ηλεκτρομαγνητική ροπή της γεννήτριας σε αμ

D ο συντελεστής απόσβεσης σε αμ

Οι διαφορικές εξισώσεις (7.11) και (7.12) είναι γνωστές σαν εξισώσεις ταλάντωσης της μηχανής και συνιστούν την απλούστερη παράσταση της σύγχρονης μηχανής.

7.1.3. Μοντέλο τέταρτης τάξεως σύγχρονης γεννήτριας

Το μοντέλο τέταρτης τάξεως, το οποίο θα χρησιμοποιηθεί στην παρούσα διατριβή, στηρίζεται στις ακόλουθες παραδοχές [KUN94]:

- Οι τάσεις μετασηματιστού $(1/\omega_b)\dot{\psi}_d$ και $(1/\omega_b)\dot{\psi}_q$ αμελούνται για τους λόγους που αναφέρθηκαν παραπάνω
- Στον δρομέα παριστάνονται δύο μόνο τυλίγματα, το τυλίγμα του πεδίου διεγέρσεως και ένα τυλίγμα αποσβέσεως στον εγκάρσιο μαγνητικό άξονα. Τα δύο αυτά τυλίγματα θεωρείται ότι δεν είναι μαγνητικά συζευγμένα μεταξύ τους
- Η επίδραση του μαγνητικού κορεσμού αμελείται
- Η δυναμική της κίνησης του δρομέα περιγράφεται από τις εξισώσεις ταλάντωσης της μηχανής.

Σύμφωνα με την πρώτη παραδοχή οι διαφορικές εξισώσεις (7.3) και (7.4) των τυλιγμάτων του στάτη μετατρέπονται στις παρακάτω αλγεβρικές σχέσεις:

$$v_d = -r_s i_d - \lambda_\omega \psi_q \quad (7.13)$$

$$v_q = -r_s i_q + \lambda_\omega \psi_d \quad (7.14)$$

όπου λ_ω είναι ο λόγος των γωνιακών ταχυτήτων ω_r προς ω_b . Στο σημείο αυτό αξίζει να αναφερθεί ότι επειδή οι σύγχρονες μηχανές λειτουργούν συνήθως πολύ κοντά στη σύγχρονη ταχύτητα (απόκλιση $\pm 1\%$), ο λόγος λ_ω είναι πρακτικά ίσος με τη μονάδα και για πρακτικούς λόγους αμελείται. Ωστόσο, επειδή στην παρούσα διατριβή θα εξεταστούν αυτόνομα συστήματα, στα οποία η διακύμανση της συχνότητας μπορεί να λάβει σοβαρές τιμές, θα θεωρηθεί ότι τόσο το δίκτυο όσο και τα τυλίγματα του στάτη των μηχανών λειτουργούν σε συχνότητα ω_{sys} διαφορετική από την ονομαστική ω_b . Συνεπώς, ο λόγος λ_ω δίνεται ως:

$$\lambda_\omega = \frac{\omega_{sys}}{\omega_b} \quad (7.15)$$

Οι πεπλεγμένες ροές ανά δευτερόλεπτο των δύο τυλιγμάτων του στάτη και των δύο τυλιγμάτων του δρομέα στο πλαίσιο αναφοράς dq του δρομέα συνδέονται με τα αντίστοιχα ρεύματα σύμφωνα με τις παρακάτω εξισώσεις αλληλεπαγωγών:

$$\psi_d = -X_d i_d + X_{md} i_{fd} \quad (7.16)$$

$$\psi_q = -X_q i_q + X_{mq} i_{kq} \quad (7.17)$$

$$\psi_{fd} = -X_{md} i_d + X_{fd} i_{fd} \quad (7.18)$$

$$\psi_{kq} = -X_{mq} i_q + X_{kq} i_{kq} \quad (7.19)$$

όπου

X_d, X_q οι σύγχρονες αντιδράσεις κατά τον ευθύ d και τον εγκάρσιο άξονα q αντίστοιχα

X_{fd} η επαγωγική αντίδραση του τυλίγματος διεγέρσεως (ανηγμένη στο στάτη)

X_{kq} η επαγωγική αντίδραση του τυλίγματος αποσβέσεως στον εγκάρσιο άξονα του δρομέα (ανηγμένη στο στάτη)

X_{md} η αμοιβαία επαγωγική αντίδραση μεταξύ του τυλίγματος διεγέρσεως και του τυλίγματος του άξονα d του στάτη

X_{mq} η αμοιβαία επαγωγική αντίδραση μεταξύ του τυλίγματος αποσβέσεως και του τυλίγματος του άξονα q του στάτη

Η δεύτερη παραδοχή οδηγεί στις ακόλουθες διαφορικές εξισώσεις, οι οποίες περιγράφουν τη δυναμική του ηλεκτρικού κυκλώματος του δρομέα:

$$v_{fd} = r_{fd} i_{fd} + \frac{1}{\omega_b} \dot{\psi}_{fd} \quad (7.20)$$

$$0 = r_{kq} i_{kq} + \frac{1}{\omega_b} \dot{\psi}_{kq} \quad (7.21)$$

Προκειμένου να απαλειφθούν οι πεπλεγμένες ροές ανά δευτερόλεπτο ψ_d και ψ_q από τις αλγεβρικές εξισώσεις (7.13) και (7.14) του στάτη αντίστοιχα, εκφράζεται καταρχήν το ρεύμα του πεδίου διεγέρσεως i_{fd} συναρτήσει των όρων ψ_{fd} και i_d από την (7.18), δηλαδή:

$$i_{fd} = \frac{1}{X_{fd}} (\psi_{fd} + X_{md} i_d) \quad (7.22)$$

και ομοίως το ρεύμα του τυλίγματος αποσβέσεως i_{kq} συναρτήσει των όρων ψ_{kq} και i_q από την (7.19), δηλαδή:

$$i_{kq} = \frac{1}{X_{kq}} (\psi_{kq} + X_{mq} i_q) \quad (7.23)$$

Στη συνέχεια, οι (7.22) και (7.23) αντικαθίστανται στις (7.16) και (7.17) των πεπλεγμένων ροών ανά δευτερόλεπτο ψ_d και ψ_q του στάτη αντίστοιχα, οπότε προκύπτουν οι σχέσεις:

$$\psi_d = - \left(X_d - \frac{X_{md}^2}{X_{fd}} \right) i_d + \frac{X_{md}}{X_{fd}} \psi_{fd} \quad (7.24)$$

$$\psi_q = - \left(X_q - \frac{X_{mq}^2}{X_{kq}} \right) i_q + \frac{X_{mq}}{X_{kq}} \psi_{kq} \quad (7.25)$$

Στο σημείο αυτό ορίζονται η ΗΕΔ E'_q :

$$E'_q = \frac{X_{md}}{X_{fd}} \psi_{fd} \quad (7.26)$$

η οποία ονομάζεται μεταβατική ΗΕΔ κατά τον εγκάρσιο άξονα q και η αντίδραση X'_d :

$$X'_d = X_d - \frac{X_{md}^2}{X_{fd}} \quad (7.27)$$

η οποία ονομάζεται μεταβατική αντίδραση κατά τον ευθύ άξονα d .

Αντίστοιχα, εισάγονται η ΗΕΔ E'_d (μεταβατική ΗΕΔ κατά τον ευθύ άξονα):

$$E'_d = - \frac{X_{mq}}{X_{kq}} \psi_{kq} \quad (7.28)$$

και η αντίδραση X'_q (μεταβατική αντίδραση κατά τον εγκάρσιο άξονα):

$$X'_q = X_q - \frac{X_{mq}^2}{X_{kq}} \quad (7.29)$$

Σύμφωνα με τους παραπάνω ορισμούς, οι (7.24) και (7.25) παίρνουν την εξής μορφή:

$$\psi_d = -X'_d i_d + E'_q \quad (7.30)$$

$$\psi_q = -X'_q i_q - E'_d \quad (7.31)$$

Αντικαθιστώντας τις (7.30) και (7.31) στις (7.13) και (7.14) των τάσεων των τυλιγμάτων του στάτη αντίστοιχα, προκύπτουν οι ακόλουθες σχέσεις:

$$v_d = -r_s i_d + \lambda_\omega X'_q i_q + \lambda_\omega E'_d \quad (7.32)$$

$$v_q = -r_s i_q - \lambda_\omega X'_d i_d + \lambda_\omega E'_q \quad (7.33)$$

Ακολούθως, τα ρεύματα των δύο τυλιγμάτων του δρομέα αντικαθίστανται από τις (7.22) και (7.23) στις (7.20) και (7.21) αντίστοιχα, οι οποίες παίρνουν την εξής μορφή:

$$v_{fd} = \frac{r_{fd}}{X_{fd}} \psi_{fd} + \frac{r_{fd} X_{md}}{X_{fd}} i_d + \frac{I}{\omega_b} \dot{\psi}_{fd} \quad (7.34)$$

$$0 = \frac{r_{kq}}{X_{kq}} \psi_{kq} + \frac{r_{kq} X_{mq}}{X_{kq}} i_q + \frac{I}{\omega_b} \dot{\psi}_{kq} \quad (7.35)$$

Εκτελώντας τις πράξεις στις παραπάνω εξισώσεις, προκύπτει:

$$\left(\frac{X_{fd}}{\omega_b r_{fd}} \right) \left(\frac{X_{md}}{X_{fd}} \dot{\psi}_{fd} \right) = \frac{X_{md}}{r_{fd}} v_{fd} - \frac{X_{md}}{X_{fd}} \psi_{fd} - \frac{X_{md}^2}{X_{fd}} i_d \quad (7.36)$$

$$\left(\frac{X_{kq}}{\omega_b r_{kq}} \right) \left(\frac{X_{mq}}{X_{kq}} \dot{\psi}_{kq} \right) = -\frac{X_{mq}}{X_{kq}} \psi_{kq} - \frac{X_{mq}^2}{X_{kq}} i_q \quad (7.37)$$

Ο λόγος για τον οποίο γράφτηκαν οι ηλεκτρικές διαφορικές εξισώσεις του δρομέα στην παραπάνω μορφή, είναι για να οριστούν η ΗΕΔ διεγέρσεως E_f :

$$E_f = \frac{X_{md}}{r_{fd}} v_{fd} \quad (7.38)$$

η οποία είναι ανάλογη της συνεχούς τάσεως v_{fd} του πεδίου, καθώς επίσης και οι χρονικές σταθερές:

$$T'_{d0} = \frac{X_{fd}}{\omega_b r_{fd}} \quad (7.39)$$

$$T'_{q0} = \frac{X_{kq}}{\omega_b r_{kq}} \quad (7.40)$$

οι οποίες ονομάζονται μεταβατικές χρονικές σταθερές ανοιχτού κυκλώματος ευθέος (d) και εγκάρσιου (q) άξονα, αντίστοιχα.

Σύμφωνα με τους παραπάνω ορισμούς, οι εξισώσεις των τυλιγμάτων του δρομέα καταλήγουν στην εξής μορφή:

$$T'_{d0} \dot{E}'_q = E_f - E'_q - (X_d - X'_d) i_d \quad (7.41)$$

$$T'_{q0} \dot{E}'_d = -E'_d + (X_q - X'_q) i_q \quad (7.42)$$

Η ηλεκτρομαγνητική ροπή T_e δίνεται συναρτήσει των ρευμάτων και των πεπλεγμένων ροών ανά δευτερόλεπτο του στάτη από την παρακάτω σχέση:

$$T_e = \psi_d i_q - \psi_q i_d \quad (7.43)$$

Αντικαθιστώντας τους όρους ψ_d και ψ_q σύμφωνα με τις (7.30) και (7.31), προκύπτει ο ακόλουθος τύπος για τον υπολογισμό της ηλεκτρομαγνητικής ροπής T_e .

$$T_e = E'_d i_d + E'_q i_q + (X'_q - X'_d) i_d i_q \quad (7.44)$$

Η παραπάνω εξίσωση αντικαθίσταται στη διαφορική εξίσωση (7.12) επιτάχυνσης του δρομέα της μηχανής, η οποία παίρνει τελικά την εξής μορφή:

$$2H \frac{\dot{\omega}_r}{\omega_b} = T_m - E'_d i_d - E'_q i_q - (X'_q - X'_d) i_d i_q - D \left(\frac{\omega_r}{\omega_b} - 1 \right) \quad (7.45)$$

Αναφορικά με την ενεργό ισχύ εξόδου της γεννήτριας P_G , υπολογίζεται από τον τύπο:

$$P_G = v_d i_d + v_q i_q \quad (7.46)$$

ενώ η παραγόμενη άεργος ισχύς Q_G προκύπτει από την ακόλουθη σχέση:

$$Q_G = v_q i_d - v_d i_q \quad (7.47)$$

7.2. Ανάλυση μονίμου καταστάσεως

Στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας οι διαφορικές εξισώσεις των τάσεων μεταπίπτουν σε αλγεβρικές, διότι μηδενίζονται οι χρονικές παράγωγοι των πεπλεγμένων ροών, και σε αυτή τη μορφή παρατίθενται στη συνέχεια:

$$v_d = -r_s i_d - \frac{\omega_r}{\omega_b} \psi_q \quad (7.48)$$

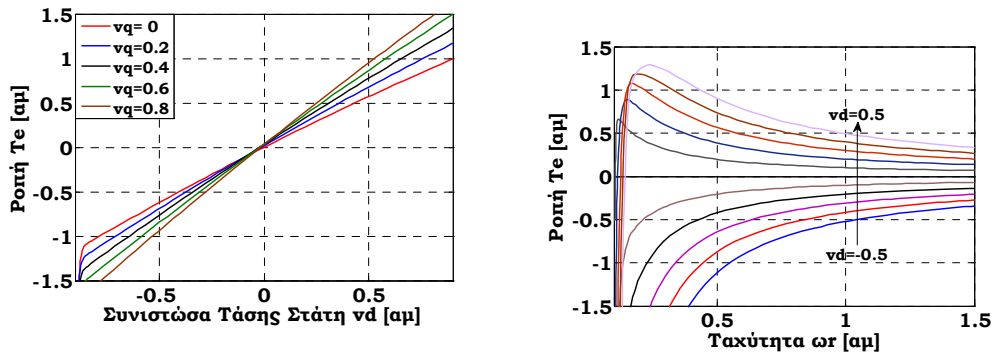
$$v_q = -r_s i_q + \frac{\omega_r}{\omega_b} \psi_d \quad (7.49)$$

Χρησιμοποιώντας τις (7.16) και (7.17), οι ανωτέρω εξισώσεις γίνονται:

$$v_d = -r_s i_d - \frac{\omega_r}{\omega_b} (-X_q i_q + X_{mq} i_{kq}) \quad (7.50)$$

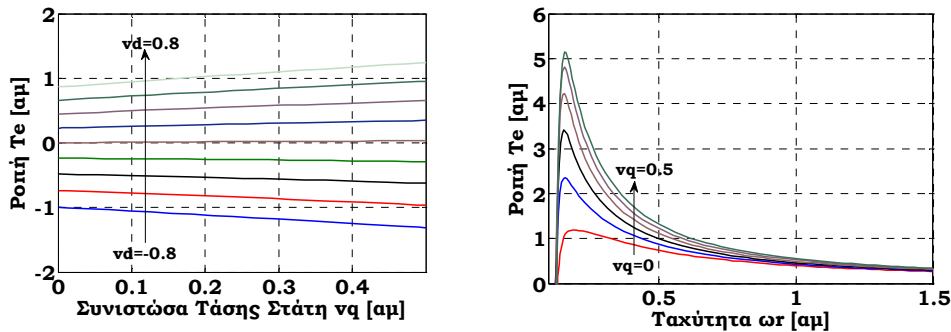
$$v_q = -r_s i_q + \frac{\omega_r}{\omega_b} (-X_d i_d + X_{md} i_{fd}) \quad (7.51)$$

Οι παραπάνω εξισώσεις ισχύουν για οποιαδήποτε γωνιακή ταχύτητα λειτουργίας. Σε συνθήκες μόνιμης κατάστασης υπολογίστηκαν οι χαρακτηριστικές ροπές, όπως δίνονται στο Σχήμα 7.4. Η πρώτη παράσταση έχει υπολογιστεί για σταθερή ταχύτητα δρομέα. Οι χαρακτηριστικές ροπές προκύπτουν έντονα γραμμικές ως προς τη συνιστώσα v_d της τάσης στάτη. Η σύγχρονη μηχανή λειτουργεί σαν γεννήτρια για θετικές τιμές της v_d και σαν κινητήρας σε αρνητικές τιμές αντίστοιχα. Όσο πιο μεγάλη είναι η v_d στις θετικές τιμές, τόσο πιο υψηλές τιμές παίρνει η ηλεκτρομαγνητική ροπή σε λειτουργία γεννήτριας. Εν τούτοις, καθώς αλλάζει η ταχύτητα δρομέα λόγω λειτουργίας μεταβλητών στροφών της Α/Γ Τύπου ΔΙ, προκύπτει από τη δεύτερη παράσταση του Σχήματος 7.4 ότι για την ίδια ταχύτητα όσο πιο υψηλή τιμή έχει η συνιστώσα v_d , τόσο πιο υψηλή είναι και η ηλεκτρομαγνητική ροπή. Σε διαφορετικές ταχύτητες αλλά ίδια τιμή τάσης, όσο πιο μικρή είναι η ταχύτητα δρομέα, τόσο αυξάνεται η ηλεκτρομαγνητική ροπή. Αυτό σημαίνει ότι, για μικρές τιμές διαθέσιμης ροπής της ανεμογεννήτριας, ο έλεγχος της συνιστώσας v_d πρέπει επίσης να τη διατηρεί σε χαμηλές τιμές.



Σχήμα 7.4. Χαρακτηριστικές ροπές σύγχρονης γεννήτριας ηλεκτρικής διέγερσης 2MW, συναρτήσει v_d για σταθερή ταχύτητα 0.8 αμ και συναρτήσει ταχύτητας για $v_d = -0.5$ αμ έως 0.5 αμ και $v_q = 0$ αμ

Αντίθετα, η επίδραση της συνιστώσας v_q στη χαρακτηριστική ροπής δεν είναι ιδιαίτερα σημαντική. Το Σχήμα 7.5 παρουσιάζει τυπικές χαρακτηριστικές ροπής καθώς η v_q μεταβάλλεται από 0 σε 0.5 αμ, ενώ η v_d παραμένει σταθερή, τόσο για σταθερή ταχύτητα, 0.8 αμ, όσο και για μεταβλητή, 0 έως 1.5 αμ.



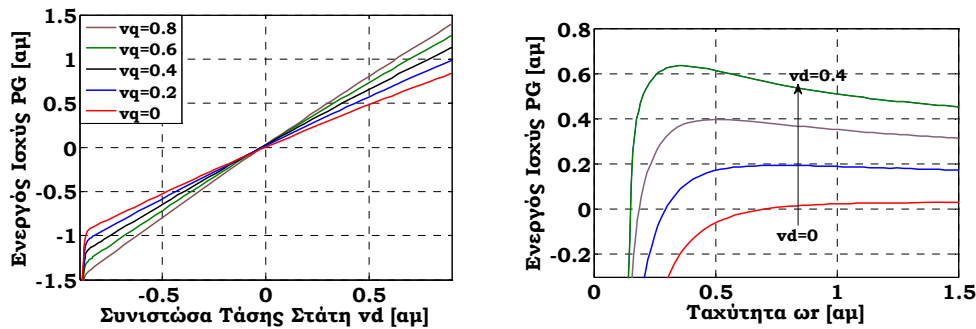
Σχήμα 7.5. Χαρακτηριστικές ροπές σύγχρονης γεννήτριας ηλεκτρικής διέγερσης 2MW, συναρτήσει v_q για σταθερή ταχύτητα 0.8 αμ και συναρτήσει ταχύτητας για $v_q = 0$ αμ έως 0.5 αμ και $v_d = 0.4$ αμ

Η ενεργός και άεργος ισχύς που παράγεται από τη σύγχρονη γεννήτρια τροφοδοτείται στο μετατροπέα στην πλευρά της γεννήτριας (απλός ανορθωτής ή αντιστροφέας *IGBTs* ανάλογα με την επιλεγμένη διαμόρφωση) μέσω του κυκλώματος στάτη. Μια συμβατική σύγχρονη γεννήτρια λειτουργεί στη σύγχρονη ταχύτητα του συστήματος και το πλάτος της τάσης δικτύου είναι συνήθως σταθερό. Επομένως, η ενεργός ισχύς ελέγχεται μέσω της γωνίας φορτίου δ και η άεργος ισχύς μέσω του πεδίου διέγερσης, [KUN94]. Στην ανεμογεννήτρια όμως, είτε *Τύπου Δ1* είτε *Τύπου Δ2*, η ταχύτητα λειτουργίας καθορίζεται από την ταχύτητα ανέμου, και η τερματική τάση διαμορφώνεται από το σχήμα ελέγχου που ακολουθείται, διαφοροποιώντας τις χαρακτηριστικές ισχύος από μια συμβατική σύγχρονη γεννήτρια.

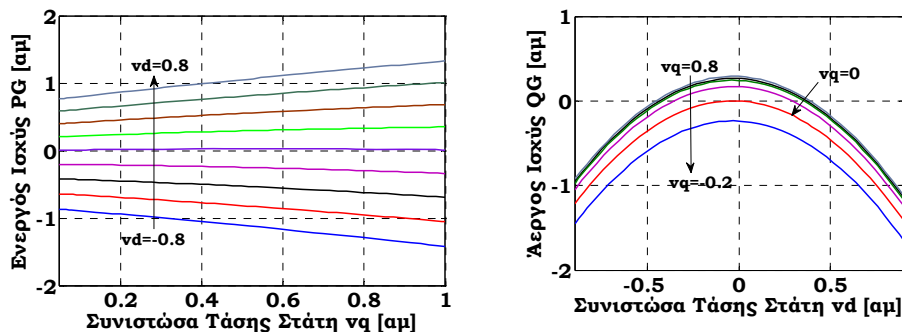
Θεωρώντας σταθερή την ταχύτητα της γεννήτριας, η ενεργός ισχύς στάτη φανερώνει μια γραμμική συμπεριφορά σε σχέση με τη συνιστώσα v_d , δηλ. όσο πιο αυξημένη είναι η v_d , τόσο πιο αυξημένη είναι η παραγόμενη ενεργός ισχύς. Συγκρίνοντας με το Σχήμα 7.4, προκύπτει ότι η επίδραση της τιμής της συνιστώσας v_d στη ροπή είναι αρκετά σημαντικότερη σε σχέση με την ενεργό ισχύ. Για την παραγωγή της ίδιας ενεργού ισχύος αμ για την ίδια τιμή τάσης, όσο πιο μικρή είναι η ταχύτητα της γεννήτριας, τόσο υψηλότερη είναι η ηλεκτρομαγνητική ροπή.

Σε συνθήκες μεταβλητής ταχύτητας η ενεργός ισχύς στάτη παρουσιάζει διαφορετική συμπεριφορά από τη ροπή. Αν η συνιστώσα της τάσης είναι η ίδια, η ενεργός ισχύς παραμένει σχεδόν σταθερή εκτός από πολύ χαμηλές ταχύτητες. Σε αυτήν την περιοχή λειτουργίας η ωμική αντίσταση του κυκλώματος στάτη καθορίζει τη συμπεριφορά της γεννήτριας και η ενεργός ισχύς της γεννήτριας μειώνεται ραγδαία ή περνάει και στην περιοχή της απορρόφησης (λειτουργία κινητήρα).

Αντίστοιχα στην πρώτη παράσταση του Σχήματος 7.7 για σταθερή ταχύτητα η μεταβολή της συνιστώσας v_q δεν ασκεί ιδιαίτερη επίδραση στην ενεργό ισχύ που παράγεται από το κύκλωμα του στάτη.



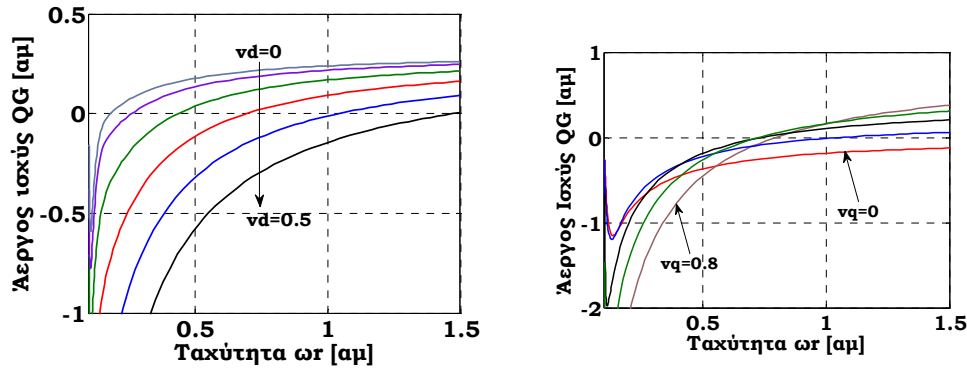
Σχήμα 7.6. Ενεργός ισχύς σύγχρονης γεννήτριας ηλεκτρικής διέγερσης 2MW, συναρτήσει v_d για σταθερή ταχύτητα 0.8 αμ και συναρτήσει ταχύτητας για $v_q=0$ αμ έως 0.5 αμ και $v_d=0.4$ αμ



Σχήμα 7.7. Ενεργός ισχύς σύγχρονης γεννήτριας ηλεκτρικής διέγερσης 2MW, συναρτήσει v_q για σταθερή ταχύτητα 0.8 αμ και άεργος ισχύς γεννήτριας συναρτήσει v_d για $v_q=-0.2$ έως 0.8 αμ

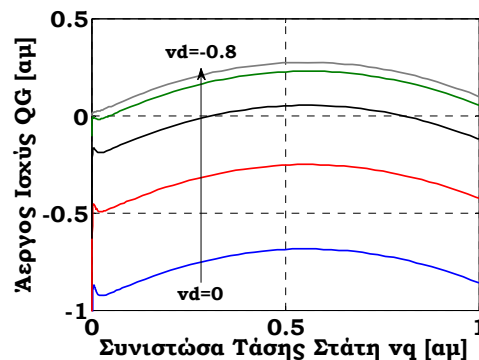
Αν και η συνιστώσα v_d είναι αποτελεσματική στον έλεγχο της ενεργού ισχύος, επηρεάζει και την άεργο ισχύ, όπως παρουσιάζεται στα Σχήματα 7.7-7.9. Όσο μεγαλύτερη είναι η συνιστώσα αυτή, ενώ

παράλληλα η v_q παραμένει σταθερή, τόσο αυξημένη είναι η άεργος ισχύς που απορροφάει η σύγχρονη μηχανή από το μετατροπέα στην περιοχή της γεννήτριας. Αν και ρυθμίζοντας τη v_q μπορεί να ελεγχθεί η άεργος ισχύς, παρ' όλα αυτά η επίδραση είναι περιορισμένη. Το Σχήμα 7.8 απεικονίζει την άεργο ισχύ σε συνθήκες μεταβαλλόμενης ταχύτητας. Προκύπτει από την ανάλυση ότι, η επίδραση της ταχύτητας είναι σημαντική. Όσο μικρότερη είναι η ταχύτητα, τόσο αυξημένη είναι η άεργος που απορροφάται από τη γεννήτρια. Αυτό αποκαλύπτει και τη σημασία κατάλληλης σχεδίασης της γεννήτριας και του εύρους ταχύτητάς της ως προς τη μεγιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης.



Σχήμα 7.8. Άεργος ισχύς σύγχρονης γεννήτριας ηλεκτρικής διέγερσης 2MW, συναρτήσει ταχύτητας για $v_d=0.3$ και $v_d=0$ έως 0.5 αμ και άεργος ισχύς γεννήτριας συναρτήσει ταχύτητας για $v_d=-0.4$ και $v_q=0$ έως 0.8 αμ

Από το δεύτερο διάγραμμα του Σχήματος 7.8, προκύπτει ότι η τιμή της συνιστώσας v_q που συνεπάγεται τη βέλτιστη αντιστάθμιση άεργου ισχύος ποικίλλει με την ταχύτητα της γεννήτρια, όταν η συνιστώσα v_d παραμένει σταθερή. Στο Σχήμα 7.9, η μορφή της χαρακτηριστικής άεργου ισχύος για μεταβαλλόμενη v_q και σταθερές τιμές ταχύτητας και συνιστώσας v_d είναι παραβολικής μορφής. Επομένως, για κάθε ταχύτητα λειτουργίας και συνθήκη ελέγχου της v_d υπάρχει μοναδική τιμή της v_q που βελτιστοποιεί την αντιστάθμιση άεργου ισχύος που απορροφάται από τη γεννήτρια.



Σχήμα 7.9. Άεργος ισχύς σύγχρονης γεννήτριας ηλεκτρικής διέγερσης 2MW, συναρτήσει v_q για σταθερή ταχύτητα 0.8 αμ

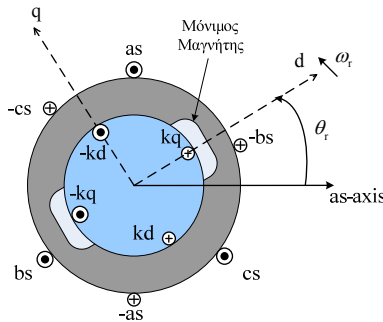
7.3. Μοντελοποίηση σύγχρονης γεννήτριας μόνιμων μαγνητών

Η σύγχρονη γεννήτρια με μόνιμους μαγνήτες διαφέρει από μια κοινή σύγχρονη γεννήτρια, καθ' ότι δε διαθέτει τύλιγμα διέγερσης. Το πεδίο διέγερσης της μηχανής δημιουργείται από τη συστοιχία των μόνιμων μαγνητών, οι οποίοι βρίσκονται τοποθετημένοι περιμετρικά στην επιφάνεια του δρομέα, ώστε να δημιουργούν ακτινικό μαγνητικό πεδίο. Οι μόνιμοι μαγνήτες δημιουργούν μια μαγνητεγερτική δύναμη στο διάκενο, η οποία έχει χωρικά ημιτονοειδή μορφή. Με άλλα λόγια, το μαγνητικό πεδίο στο διάκενο παρίσταται με τη θεμελιώδη συνιστώσα της χωρικής του διανομής. Η απλουστευτική αυτή παραδοχή επιτρέπει την εφαρμογή της γενικευμένης θεωρίας των ηλεκτρικών μηχανών. Το μοντέλο που τελικά προσδιορίζεται και χρησιμοποιείται στις προσομοιώσεις είναι το

πλήρες μοντέλο μιας σύγχρονης γεννήτριας μονίμων μαγνητών, το οποίο επιτρέπει τον υπολογισμό της απόκρισης της μηχανής για οποιαδήποτε μεταβολή των μεταβλητών εισόδου.

7.3.1. Περιγραφή σύγχρονης μηχανής μονίμων μαγνητών με τις εξισώσεις του Park

Ο εγκάρσιος μαγνητικός (q) άξονας είναι ο άξονας του τυλίγματος αποσβέσεως kq , ενώ ο ευθύς (d) άξονας ταυτίζεται με τον άξονα του μαγνητικού πεδίου των μονίμων μαγνητών και του τυλίγματος αποσβέσεως kd . Ο δρομέας στη γενικότερη περίπτωση διαθέτει δύο βραχυκυκλωμένα τυλίγματα αποσβέσεως, αλλά δεν έχει τυλίγμα πεδίου. Τα τυλίγματα αποσβέσεως εν γένει αντιπροσωπεύουν τις οδούς των ρευμάτων εξ επαγωγής στο δρομέα. Τα ρεύματα είναι δυνατό να ρέουν είτε σε τυλίγματα κλωβού, όμοια με τα τυλίγματα κλωβού των μηχανών επαγωγής, είτε στο σίδηρο του δρομέα. Επομένως, τα τυλίγματα αποσβέσεως χρησιμοποιούνται παράλληλα για τη μοντελοποίηση των απωλειών σιδήρου λόγω δινορρευμάτων. Οι εντάσεις του στάτη θεωρούνται συμβατικά εξερχόμενες από τους ακροδέκτες της μηχανής, δηλαδή ακολουθείται η γνωστή σύμβαση γεννήτριας για τη γραφή των εξισώσεων. Οι άξονες as , bs , cs σχεδιάζονται στην κατεύθυνση αρνητικών πεπλεγμένων ροών σε σχέση με τη θεωρούμενη θετική φορά των ρευμάτων του στάτη. Συνεπώς, με τη δεδομένη θετική φορά των μαγνητικών αξόνων, αρνητικές πεπλεγμένες ροές προκύπτουν από θετικά ρεύματα στο στάτη.



Σχήμα 7.10. Διάγραμμα απλουστευμένης διπολικής σύγχρονης γεννήτριας μονίμων μαγνητών

Με βάση την υπόθεση ημιτονοειδούς κατανομής της μαγνητικής ροής, η ροή μπορεί να περιγραφεί μέσω διανύσματος και επομένως η ΗΕΔ διεγέρσεως E_f που εγχύεται στο κύκλωμα του στάτη από τους μόνιμους μαγνήτες μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$\vec{E}_f = j \cdot \omega_r \cdot \vec{\psi}_{PM} = j \cdot 2\pi f \cdot \vec{\psi}_{PM} \quad (7.52)$$

όπου

$\vec{\psi}_{PM}$ είναι η ροή που παράγεται από τους μόνιμους μαγνήτες

f η ηλεκτρική συχνότητα

Επομένως η ΗΕΔ διεγέρσεως είναι ανάλογη με την ηλεκτρική ταχύτητα της γεννήτριας. Οι εξισώσεις της σύγχρονης γεννήτριας μονίμων μαγνητών προκύπτουν από τις εξισώσεις, όπως έχουν δοθεί παραπάνω για την σύγχρονη γεννήτρια ηλεκτρικής διέγερσης, με την απλούστευση της έλλειψης τυλιγμάτων απόσβεσης, [KUN94]. Οι πεπλεγμένες ροές ανά δευτερόλεπτο των δύο τυλιγμάτων του στάτη στο πλαίσιο αναφοράς dq του δρομέα γίνονται στην περίπτωση αυτή:

$$\psi_d = -X_d i_d + \psi_{PM} \quad (7.53)$$

$$\psi_q = -X_q i_q \quad (7.54)$$

Η εξίσωση της ηλεκτρομαγνητικής ροπής είναι αντίστοιχα:

$$T_e = (X_q' - X_d') i_d i_q + \psi_{PM} i_q \quad (7.55)$$

Αν η γεννήτρια θεωρηθεί κυλινδρικού δρομέα όπου $X_q' = X_d'$, η ροπή προκύπτει μόνο από τη ροή μονίμων μαγνητών και τη συνιστώσα q του ρεύματος στάτη.

$$T_e = \psi_{PM} i_q \quad (7.56)$$

Οι εξισώσεις (7.46) και (7.47) δίνουν την ενεργό και άεργο παραγωγή της γεννήτριας. Σημειώνεται ότι αυτή η άεργος ισχύς ανταλλάσσεται ανάμεσα στη γεννήτρια και το μετατροπέα στην πλευρά της γεννήτριας και όχι με το δίκτυο.

Οι πολυπολικές σύγχρονες γεννήτριες μονίμων μαγνητών λειτουργούν σε χαμηλές ταχύτητες ενώ λόγω και της σύνδεσης τους στο δίκτυο μέσω πλήρη μετατροπέα, τα τυλίγματα απόσβεσης μπορούν να παραλειφθούν, [AKH03b]. Η απουσία των τυλιγμάτων απόσβεσης αλλά και διέγερσης έχει ως συνέπεια να ταυτίζονται οι μεταβατικές και υπομεταβατικές αντιδράσεις με τις σύγχρονες αντιδράσεις:

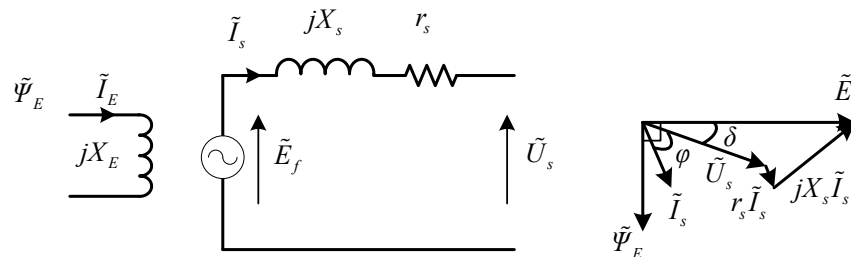
$$X_d = X_d' = X_d'' \quad (7.57)$$

$$X_q = X_q' = X_q'' \quad (7.58)$$

Η ανάλυση μόνιμης κατάστασης είναι όμοια με την ανάλυση που έγινε παραπάνω για τον Τύπο Δ1, γι' αυτό και δεν θα συμπεριληφθεί εδώ. Λεπτομερής μελέτη γίνεται στο [LI08].

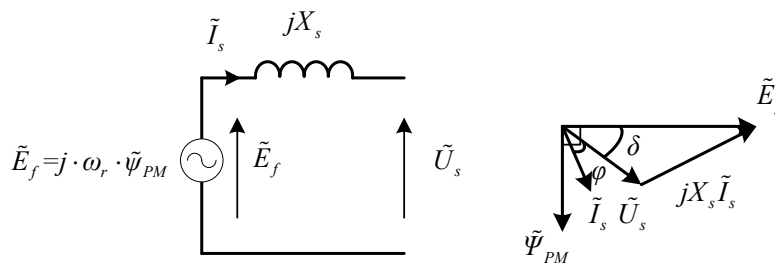
7.4. Ισοδύναμο κυκλώματα στη μόνιμη κατάσταση

Μια σύγχρονη γεννήτρια με ηλεκτρική διέγερση μπορεί να αναπαρασταθεί με το ισοδύναμο ανά φάση κύκλωμα του Σχήματος 7.11. Το διάγραμμα φασισθετών δίνεται επίσης για αυθαίρετο σημείο λειτουργίας. Το πεδίο του δρομέα παράγεται από το ρεύμα διέγερσης \tilde{I}_E , που επάγει την τάση \tilde{E}_f (Ηλεκτρεγερτική Δύναμη – HEΔ) στα τυλίγματα του στάτη.



Σχήμα 7.11. Ανά φάση ισοδύναμο κύκλωμα και διανυσματικό διάγραμμα φασισθετών σύγχρονης γεννήτριας ηλεκτρικής διέγερσης

Αν αμεληθεί η αντίσταση του κυκλώματος στάτη προκύπτει το απλοποιημένο ισοδύναμο, όπως αυτό που δίνεται στο Σχήμα 7.12 για τη σύγχρονη γεννήτρια μονίμων μαγνητών.



Σχήμα 7.12. Ανά φάση ισοδύναμο κύκλωμα και διανυσματικό διάγραμμα φασισθετών σύγχρονης γεννήτριας μονίμων μαγνητών

όπου

\tilde{U}_s τάση στάτη

X_s σύγχρονη αντίδραση

\tilde{I}_s ρεύμα στάτη

\tilde{I}_E ρεύμα διέγερσης

\tilde{E}_f ηλεκτρεγερτική δύναμη – HEΔ

$\tilde{\Psi}_E$ ροή ηλεκτρικής διέγερσης

r_s αντίσταση τυλίγματος στάτη

δ γωνία ροπής ή ισχύος

X_E αντίδραση τυλίγματος πεδίου

φ γωνία συντελεστή ισχύος

Οι σχέσεις για την ενεργό ισχύ που παράγεται από τη γεννήτρια (είτε ηλεκτρικής διέγερσης είτε μονίμων μαγνητών) και την ηλεκτρομαγνητική ροπή προκύπτουν ως εξής:

$$P_G = 3R \{ \tilde{U}_s \tilde{I}_s^* \} = 3R \left\{ \tilde{U}_s \frac{\tilde{U}_s - \tilde{E}_f (\cos\delta - j\sin\delta)}{-jX_s} \right\} \quad (7.59)$$

$$= -3 \frac{\tilde{U}_s \tilde{E}_f}{X_s} \sin\delta$$

$$T_e = \frac{P_G}{\omega_{rm}} = - \frac{3}{\omega_{rm}} \frac{\tilde{U}_s \tilde{E}_f}{X_s} \sin\delta \quad (7.60)$$

Η άεργος ισχύς της γεννήτριας είναι ίση με:

$$Q_G = 3Im \{ \tilde{U}_s \tilde{I}_s^* \} = 3Im \left\{ \tilde{U}_s \frac{\tilde{U}_s - \tilde{E}_f (\cos\delta - j\sin\delta)}{-jX_s} \right\} \quad (7.61)$$

$$= 3 \frac{\tilde{U}_s - \tilde{U}_s \tilde{E}_f \cos\delta}{X_s}$$

όπου

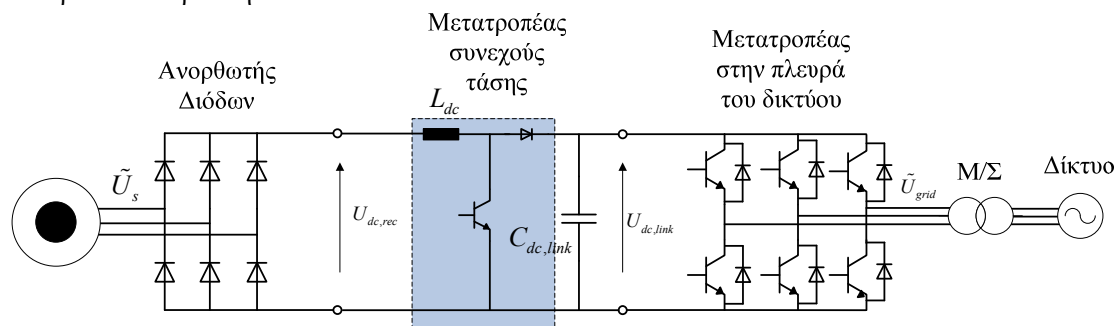
ω_{rm} η μηχανική γωνιακή ταχύτητα του δρομέα της γεννήτριας

7.5. Ανάλυση μονίμου καταστάσεως ανεμογεννήτριας Τύπου Δ1

Στην Α/Γ Τύπου Δ1 λόγω χρήσης του συστήματος διέγερσης, η γεννήτριας μπορεί να παράγει μόνη της το απαιτούμενο πεδίο, με αποτέλεσμα να αρκεί ένας απλός ανορθωτής διόδων στην έξοδο της. Η μέση τιμή της τάσης στη DC πλευρά του ανορθωτή (*Generator Side Rectifier – GSR*) και η τάση εξόδου της γεννήτριας συνδέονται μέσω της παρακάτω γραμμικής σχέσης [MOH89]:

$$\bar{U}_{dc,rec} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} |\tilde{U}_s| \quad (7.62)$$

όπου \tilde{U}_s είναι η πολική τάση στην έξοδο της γεννήτριας και $\bar{U}_{dc,rec}$ η μέση τιμή της τάσης στη DC πλευρά του ανορθωτή σε Volts.



Σχήμα 7.13. Κυκλωματική αναπαράσταση Α/Γ Τύπου Δ1

Η παρουσία του ανορθωτή εισάγει τον περιορισμό της μηδενικής παραγωγής αέργου ισχύος από τη γεννήτρια. Αυτό προκύπτει με την παραδοχή αγνόησης των φαινομένων μεταγωγής (*commutation*)

effects), οπότε η διαφορά φάσης των θεμελιωδών συνιστώσεων τάσης και ρεύματος είναι μηδέν, [MOH89][BOR97]. Τα συγκεκριμένα λειτουργικά χαρακτηριστικά του συστήματος γεννήτρια – ανορθωτής είναι πρωταρχικής σημασίας για τη λειτουργία της Α/Γ. Για την πλήρη κατανόηση των λειτουργικών χαρακτηριστικών μιας πολυπολικής, ηλεκτρικά διεγχειρόμενης σύγχρονης γεννήτριας που συνδέεται σε ανορθωτή διόδων, είναι απαραίτητη η ανάλυση μονίμου καταστάσεως, [HOE87].

Σύμφωνα με την [HOE91], το σύστημα μιας σύγχρονης γεννήτριας με ανορθωτή διόδων ενδέχεται να παρουσιάζει αστάθεια, η οποία μπορεί να αποφευχθεί με τη χρήση ανορθωτή θυρίστορ ελεγχόμενου μέσω ρεύματος. Παρ' όλα αυτά, πέρα από τα μειονεκτήματα της διαμόρφωσης αυτής που αναφέρονται στην αρχή της παρούσας ενότητας, η χρήση ενός ανορθωτή θυρίστορ είναι πολύ πιο ακριβή σε σχέση με τον απλό ανορθωτή και επίσης απαιτεί τη χρήση μεγαλύτερης γεννήτριας. Χρησιμοποιείται λοιπόν ένας ανορθωτής διόδων εάν το ρεύμα του ανορθωτή μπορεί να ελεγχθεί με άλλον τρόπο. Αυτό καθίσταται δυνατό με μέσα ελέγχου ρεύματος του ανορθωτή. Ο έλεγχος βέβαια ενδέχεται να είναι λίγο πιο αργός από τον αντίστοιχο στο σχήμα με θυρίστορ.

Οι εξισώσεις για την ενεργό και την άεργο ισχύ που παράγεται από τη γεννήτρια είναι:

$$P_G = v_d i_d + v_q i_q \quad (7.63)$$

$$Q_G = v_q i_d - v_d i_q \quad (7.64)$$

Η μηδενική παραγωγή αέργου λόγω χρήσης του ανορθωτή εκφράζεται εδώ ως:

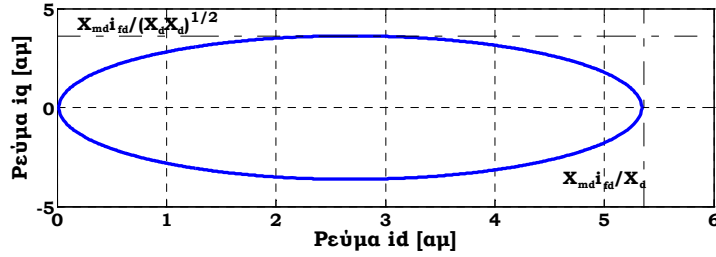
$$Q_G = v_q i_d - v_d i_q = 0 \Rightarrow v_q i_d = v_d i_q \Rightarrow \begin{cases} i_d = \frac{v_d}{v_q} i_q \\ i_q = \frac{v_q}{v_d} i_d \end{cases} \quad (7.65)$$

Αντικαθιστώντας τις εξισώσεις (7.13) και (7.14) στη σχέση (7.65) προκύπτει:

$$\begin{aligned} -r_s i_d i_q + \frac{\omega_r}{\omega_b} X_q i_q^2 &= -r_s i_q i_d - \frac{\omega_r}{\omega_b} X_d i_d^2 + \frac{\omega_r}{\omega_b} X_{md} i_{fd} i_d \Rightarrow \\ \frac{\omega_r}{\omega_b} X_q i_q^2 + \frac{\omega_r}{\omega_b} X_d i_d^2 - \frac{\omega_r}{\omega_b} X_{md} i_{fd} i_d &= 0 \Rightarrow \\ X_q i_q^2 + X_d i_d^2 - X_{md} i_{fd} i_d &= 0 \end{aligned} \quad (7.66)$$

Η (7.66) εκφράζει το γεωμετρικό τόπο των συνιστωσών του ρεύματος στάτη για μηδενική παραγωγή αέργου ισχύος και με πράξεις προκύπτει η ακόλουθη εξίσωση έλλειψης στο πεδίο i_d - i_q , η οποία απεικονίζεται στο Σχήμα 7.14. Στο ίδιο σχήμα δίνονται και οι μέγιστες τιμές των συνιστωσών:

$$\frac{i_q^2}{\left(\frac{X_{md} i_{fd}}{4 X_d X_q}\right)^2} + \frac{\left(i_d^2 - \frac{X_{md} i_{fd}}{2 X_d}\right)}{\left(\frac{X_{md} i_{fd}}{4 X_d}\right)^2} = 1 \quad (7.67)$$



Σχήμα 7.14. Γεωμετρικός τόπος συνιστωσών ρεύματος στάτη υπό συνθήκη μηδενικού αέργου ισχύος

Με χρήση της (7.63) προκύπτει για την ενεργό ισχύ:

$$P = v_q i_q + v_d i_d \Rightarrow P = v_d i_d + \frac{v_q^2}{v_d} i_d \Rightarrow v_d P = i_d (v_d^2 + v_q^2) \Rightarrow i_d = \frac{v_d P}{(v_d^2 + v_q^2)} \quad (7.68)$$

$$P = v_q i_q + v_d i_d \Rightarrow P = v_q i_q + \frac{v_d^2}{v_q} i_q \Rightarrow v_q P = i_q (v_d^2 + v_q^2) \Rightarrow i_q = \frac{u_q P}{(v_d^2 + v_q^2)}$$

Οι εξισώσεις (7.13) και (7.14) γράφονται τώρα:

$$v_d + r_s \frac{v_d P}{(v_d^2 + v_q^2)} - \frac{\omega_r}{\omega_b} X_q v_q \frac{P}{(v_d^2 + v_q^2)} = 0 = R_1 \quad (7.69)$$

$$v_q + r_s \frac{v_q P}{(v_d^2 + v_q^2)} + \frac{\omega_r}{\omega_b} X_d v_d \frac{P}{(v_d^2 + v_q^2)} - \frac{\omega_r}{\omega_b} E_f = 0 = R_2$$

Το πρόβλημα εύρεσης της μέγιστης ενεργού ισχύος είναι ουσιαστικά πρόβλημα βελτιστοποίησης με αναγκαίες συνθήκες βελτίστου 1^{ης} τάξης ή συνθήκες *Kuhn-Tucker*. Το πρόβλημα είναι μη γραμμικό και μπορεί αριθμητικά να επιλυθεί ως προς τη μέγιστη ενεργό ισχύ και τις v_d, v_q , για γνωστές παραμέτρους της γεννήτριας και γνωστή τάση διέγερσης.

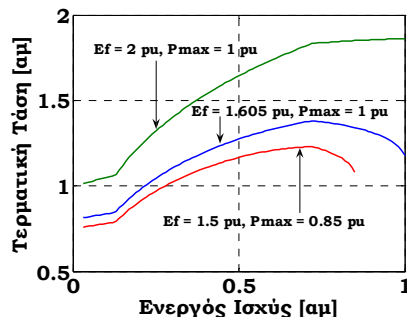
Η 3η εξίσωση που απαιτείται για την επίλυση του συστήματος των εξισώσεων (7.69) παρέχεται μέσω της θεωρίας του γενικού προβλήματος βελτιστοποίησης [MAP90][VUT98][ΦΑΡ06]:

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial R_1}{\partial v_d} & \frac{\partial R_1}{\partial v_q} \\ \frac{\partial R_2}{\partial v_d} & \frac{\partial R_2}{\partial v_q} \end{bmatrix} = (v_q^2 + v_d^2)^2 - P^2 r_s^2 - P^2 X_d X_q + 2P v_d v_q (X_q - X_d) (v_q^2 + v_d^2) = 0 \quad (7.70)$$

Οι ίδιες εξισώσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό της ελάχιστης τάσης διέγερσης που απαιτείται ώστε να μπορεί η γεννήτρια να παράγει ονομαστική ενεργό ισχύ. Η λειτουργική κατάσταση λοιπόν της γεννήτριας διακρίνεται μεταξύ Σταθερής Τάσης διέγερσης και Μεταβλητής Τάσης Διέγερσης.

7.5.1. Σταθερή Τάση Διέγερσης

Για τρεις διαφορετικές τιμές της τάσης διέγερσης, η τερματική τάση της γεννήτριας σε σχέση με τη μέγιστη δυνατή ενεργό ισχύ παρουσιάζεται στο Σχήμα 7.15. Για χαμηλή τάση διέγερσης η γεννήτρια δε μπορεί να παράγει ονομαστική ενεργό ισχύ, δηλ. το σύστημα των εξισώσεων (7.70) δεν έχει λύση για χαμηλές τιμές τάσης διέγερσης. Είναι επίσης εμφανές ότι, διατηρώντας την τάση διέγερσης σταθερή απαιτείται υψηλή τερματική τάση ώστε η γεννήτρια να είναι σε θέση να παράγει την ονομαστική της ενεργό ισχύ. Ο περιορισμός αυτός ενεργού ισχύος μεταφράζεται σε αντίστοιχο περιορισμό για τα ρεύματα της γεννήτριας.

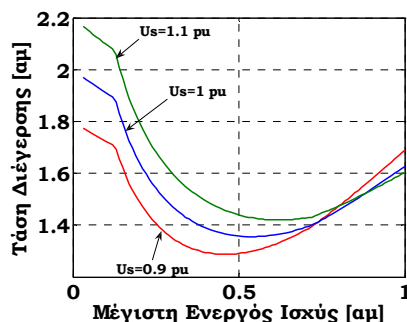


Σχήμα 7.15. Τερματική τάση ως προς μέγιστη παρεχόμενη ενεργό ισχύ για διαφορετικές τιμές τάσης διέγερσης.

Οι καμπύλες αυτές προέκυψαν από την επίλυση των εξισώσεων (7.70), με αγνώστους τις συνιστώσες v_d και v_q της τάσης. Η τιμή για την τάση διέγερσης και την ενεργό ισχύ είναι δεδομένες, ενώ η ταχύτητα δρομέα υπολογίζεται για κάθε περίπτωση από την χαρακτηριστική ελέγχου της ενεργού ισχύος του Σχήματος 7.19.

7.5.2. Μεταβλητή Τάση Διέγερσης

Η σχέση μεταξύ μεταβλητής τάσης διέγερσης και ενεργού ισχύος για τρεις διαφορετικές τιμές τερματικής τάσης της γεννήτριας γύρω από την ονομαστική παρουσιάζεται στο Σχήμα 7.16. Για χαμηλές ταχύτητες ανέμου, όταν αυξάνεται η ενεργός ισχύς που παράγεται, η τάση διέγερσης μειώνεται, ενώ το αντίθετο συμβαίνει για υψηλότερες τιμές ενεργού ισχύος. Αυτή η σχέση μεταξύ τερματικής τάσης, τάσης διέγερσης και ενεργού ισχύος είναι καθοριστικής σημασίας για τον έλεγχο και τη λειτουργία της Α/Γ με αυτό το ηλεκτρικό σχήμα διαμόρφωσης. Ένας βασικός στόχος κατά τη σχεδίαση του συστήματος είναι η ελαχιστοποίηση των απωλειών, οπότε η τάση διέγερσης πρέπει να διατηρείται στην ελάχιστη δυνατή τιμή που εξασφαλίζει ότι η γεννήτρια μπορεί να παράγει την ονομαστική της ενεργό ισχύ. Εν τούτοις, η τερματική τάση της γεννήτριας πρέπει να διατηρείται σε σχετικά χαμηλές τιμές αλλιώς τα έξοδα μόνωσης της γεννήτριας είναι σημαντικά. Τα ιδιαίτερα αυτά χαρακτηριστικά του συστήματος γεννήτρια – ανορθωτής που αναλύθηκαν εδώ λαμβάνονται υπ' όψιν κατά τη σχεδίαση του συστήματος ελέγχου που έχει υλοποιηθεί.

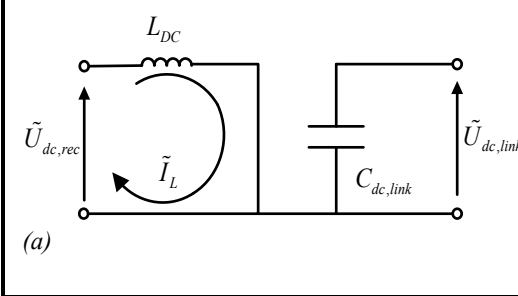
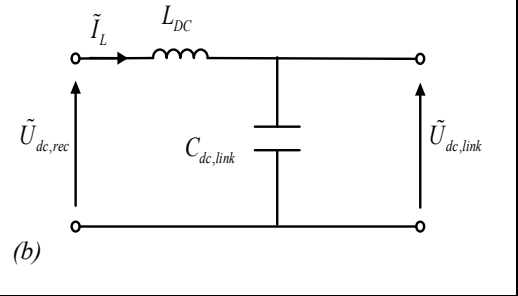


Σχήμα 7.16. Τάση διέγερσης ως προς μέγιστη ενεργό ισχύ για διαφορετικές τιμές τερματικής τάσης

7.5.3. Μοντέλο μετατροπέα DC-DC

Ο μετατροπέας συνεχούς τάσης έχει δύο λειτουργικές καταστάσεις. Στην πρώτη, όταν το IGBT άγει, το ρεύμα που εισέρχεται στο μετατροπέα αυξάνεται και η ενέργεια αποθηκεύεται στο πηνίο L_{dc} . Κατά τη διάρκεια αυτής της φάσης που διαρκεί για χρόνο t_{on} , ο πυκνωτής $C_{dc,link}$ εκφορτίζεται παρέχοντας ενέργεια στο μετατροπέα στην πλευρά του δικτύου. Η τάση σε αυτήν πλευρά του μετατροπέα μειώνεται. Στη δεύτερη λειτουργική κατάσταση, η αποθηκευμένη στο πηνίο ενέργεια απελευθερώνεται και το ρεύμα του πηνίου μειώνεται, ενώ ο πυκνωτής φορτίζεται. Ο χρόνος κατά τον οποίο το IGBT είναι σε αποκοπή συμβολίζεται ως t_{off} . Ο Πίνακας 7.1 απεικονίζει το μοντέλο μέσης

τιμής και τις λειτουργικές καταστάσεις του μετατροπέα συνεχούς τάσης που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα διατριβή.

Φάση 1 – IGBT ON	Φάση 2 – IGBT OFF
 <p>(a)</p>	 <p>(b)</p>
$U_{dc,rec} = L_{dc} \frac{dI_L}{dt}$ $0 < t < DT$	$U_{dc,rec} - L_{dc} \frac{dI_L}{dt} = U_{dc,link}$ $DT < t < T$
$D = \frac{t_{on}}{T}$	

Πίνακας 7.1. Λειτουργικές καταστάσεις του μετατροπέα DC-DC

όπου D είναι ο βαθμός χρησιμοποίησης του διακόπτη και T είναι η περίοδος του συστήματος, δηλαδή $T = t_{on} + t_{off}$. Υποθέτωντας μηδενικές απώλειες για τους διακόπτες προκύπτει το μοντέλο μέσης τιμής, που περιγράφεται από τις διαφορικές (7.71):

$$\frac{dU_{dc,link}}{dt} = \frac{1-D}{C_{dc,link}} \cdot i_L \quad (7.71)$$

$$\frac{di_L}{dt} = -\frac{1-D}{L_{dc}} \cdot U_{dc,link} + \frac{1}{L_{dc}} U_{dc,rec}$$

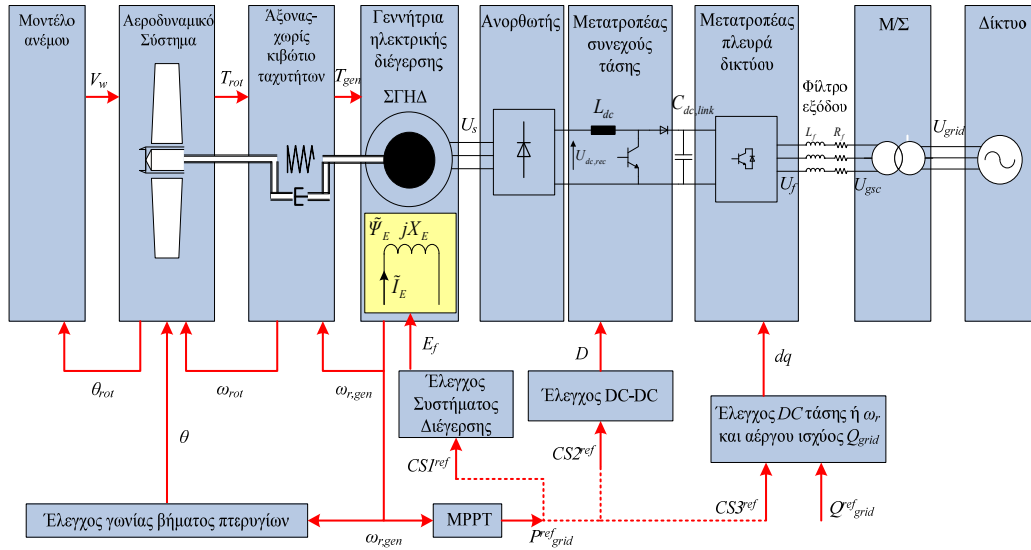
Σε συνθήκες μόνιμου καταστάσεως ο βαθμός χρησιμοποίησης του διακόπτη D ισούται με:

$$D = 1 - \frac{U_{dc,rec}}{U_{dc,link}} \quad (7.72)$$

Για τα μοντέλα του πυκνωτή στη DC πλευρά, του μετατροπέα στην πλευρά του δικτύου και του φίλτρου εξόδου ο αναγνώστης παραπέμπεται στην αντίστοιχη ενότητα της παρούσας διατριβής, όπου αναλύονται τα αντίστοιχα υποσυστήματα για την A/G Τύπου Γ.

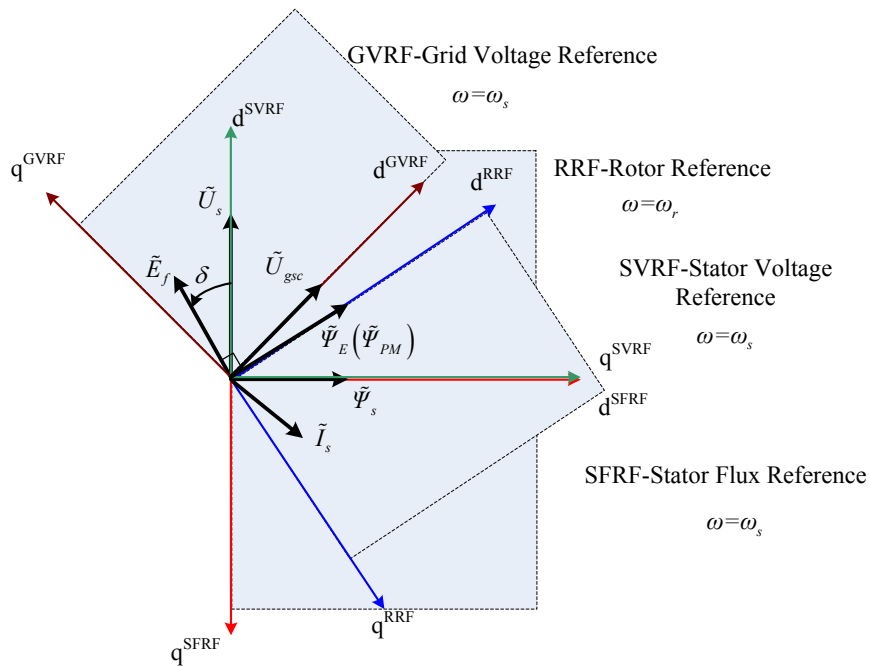
7.6. Σύστημα ελέγχου A/G Τύπου Δ1

Στο Σχήμα 7.17 παρουσιάζεται το σχήμα ελέγχου της A/G Τύπου Δ1, που περιλαμβάνει το αεροδυναμικό, το μηχανικό και το ηλεκτρικό σύστημα. Το σύστημα ελέγχου περιλαμβάνει τον ελεγκτή γωνίας βήματος πτερυγίων, το σύστημα διέγερσης, τον έλεγχο του μετατροπέα DC-DC και τον έλεγχο του μετατροπέα στην πλευρά του δικτύου. Κατά τη διάρκεια της παρούσας διατριβής αναπτύχθηκαν διάφοροι τρόποι ελέγχου και συντονισμού των παραπάνω συστημάτων, [MAR09a]. Τα σήματα CSI^{ref} , $i=1,2,3$, που εμφανίζονται στο σχήμα αναφέρονται σε μεγέθη του συστήματος όπως τάση ακροδεκτών γεννήτριας, συνεχής τάση $U_{dc,link}$ κ.α. τα οποία ποικίλλουν ανάλογα με το συγκεκριμένο σχήμα ελέγχου που ακολουθείται. Η στρατηγική Μέγιστης Απολαβής Ισχύος (Maximum Power Point tracking-MPPT) παρέχει το σήμα αναφοράς για την ενεργό ισχύ P_{grid}^{ref} , και υλοποιείται είτε στο σύστημα ελέγχου της διέγερσης είτε του μετατροπέα συνεχούς τάσης είτε του μετατροπέα στην πλευρά του δικτύου.



Σχήμα 7.17. Βασική διαμόρφωση ελέγχου μοντέλου ανεμογεννήτριας Τύπου Δ1

Κατ’ αντιστοιχία με τα πλαίσια αναφοράς που περιγράφονται στην ενότητα για την Α/Γ Τύπου Γ, το Σχήμα 7.18 απεικονίζει τα πλαίσια που χρησιμοποιούνται κατά τη μοντελοποίηση του συστήματος της Α/Γ Τύπου Δ1 αλλά και Τύπου Δ2 που περιγράφεται παρακάτω.



Σχήμα 7.18. Πλαίσια αναφοράς που χρησιμοποιούνται στα μοντέλο Α/Γ Τύπου Δ1 και Δ2

Το πλαίσιο αναφοράς του δρομέα (Rotor Reference Frame – RRF) συνδέεται με το διάνυσμα της ροής του δρομέα $\tilde{\Psi}_E$ στην περίπτωση της Α/Γ Τύπου Δ1 και $\tilde{\Psi}_{PM}$ στην περίπτωση της Α/Γ Τύπου Δ2. Η ταχύτητα περιστροφής του είναι η ηλεκτρική γωνιακή ταχύτητα ω_r του δρομέα, η οποία ισούται με:

$$\omega_r = 2\pi f = \omega_{r,mech} \cdot \frac{poles}{2} \tag{7.73}$$

όπου

$\omega_{r,mech}$ η μηχανική ταχύτητα περιστροφής του δρομέα

f η αντίστοιχη ηλεκτρική συχνότητα

$poles$ ο αριθμός πόλων σύγχρονης γεννήτριας

Στο πλαίσιο αναφοράς τάσης στάτη (*Stator Voltage Reference Frame – SVRF*) ο άξονας d συνδέεται με το διάνυσμα της τάσης στάτη \tilde{U}_s , με συνέπεια η συνιστώσα v_{qs} να είναι μηδενική και οι εξισώσεις για την ενεργό και άεργο ισχύ (7.46) και (7.47) να γράφονται ως εξής:

$$P_G = v_d i_d \quad (7.74)$$

$$Q_G = -v_d i_q \quad (7.75)$$

Η ταχύτητα περιστροφής του πλαισίου *SVRF* είναι η ω_s η οποία είναι και η ηλεκτρική γωνιακή συχνότητα της τάσης στάτη. Με την ίδια ταχύτητα στρέφεται και το πλαίσιο αναφοράς ροής στάτη (*Stator Flux Reference Frame – SFRF*), στο οποίο ο άξονας d συνδέεται με το, κάθετο στην τάση του στάτη, διάνυσμα $\tilde{\Psi}_s$ της ροής που αναπαριστά τη συνολική ροή της μηχανής ως άθροισμα της ροής που παράγεται από το δρομέα και το ρεύμα στάτη.

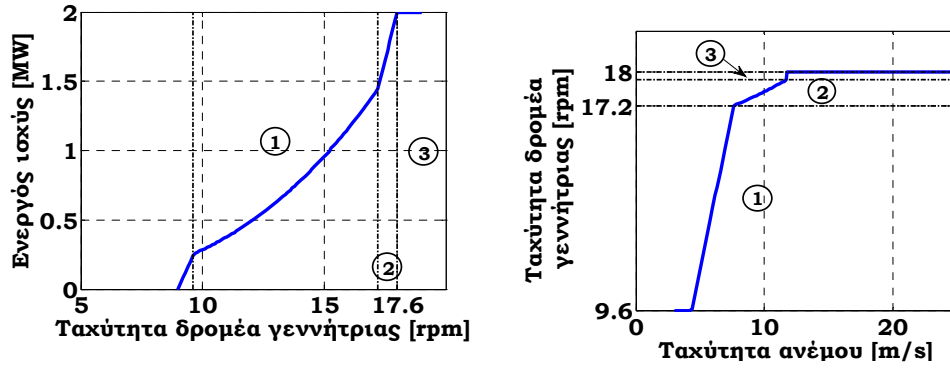
Σε ένα σύστημα με πολλές σύγχρονες μηχανές ορίζεται το λεγόμενο Σύγχρονο Σύστημα αναφοράς (*Synchronous Reference Frame-SRF*), το οποίο συνδέεται με τη γεννήτρια αναφοράς και στρέφεται με την ηλεκτρική συχνότητα του δικτύου, 50 Hz. Στην περίπτωση που το σύστημα περιλαμβάνει μόνο σύγχρονη γεννήτρια μέσω μετατροπών συχνότητας, όπως στην *A/G Τύπου Δ*, ο ορισμός ενός σύγχρονου συστήματος αναφοράς δε μπορεί να οριστεί με αυτόν τον τρόπο, γι' αυτό και γίνεται διάκριση μεταξύ καθολικού (*global*) και τοπικού (*local*) συστήματος αναφοράς, [DIG06]. Στο Σχήμα 7.18 περιλαμβάνεται και το πλαίσιο τάσης δικτύου (*Grid Voltage Reference Frame – GVRF*) το οποίο στρέφεται με τη συχνότητα της τάσης του ζυγού της *A/G* και χρησιμοποιείται στη μοντελοποίηση των μετατροπών που συνδέονται στο δίκτυο.

7.6.1. Σχήμα Ελέγχου 1

Η τάση ακροδεκτών της σύγχρονης γεννήτριας ελέγχεται μέσω του Ρυθμιστή Τάσης Γεννήτριας, ο οποίος εξασφαλίζει ονομαστική τάση στα άκρα της ρυθμίζοντας την τάση διέγερσης, λειτουργώντας σαν κλασικός Αυτόματος Ρυθμιστής Τάσης, ευρέως γνωστός από τη θεωρία σύγχρονων μηχανών, [KUN94].

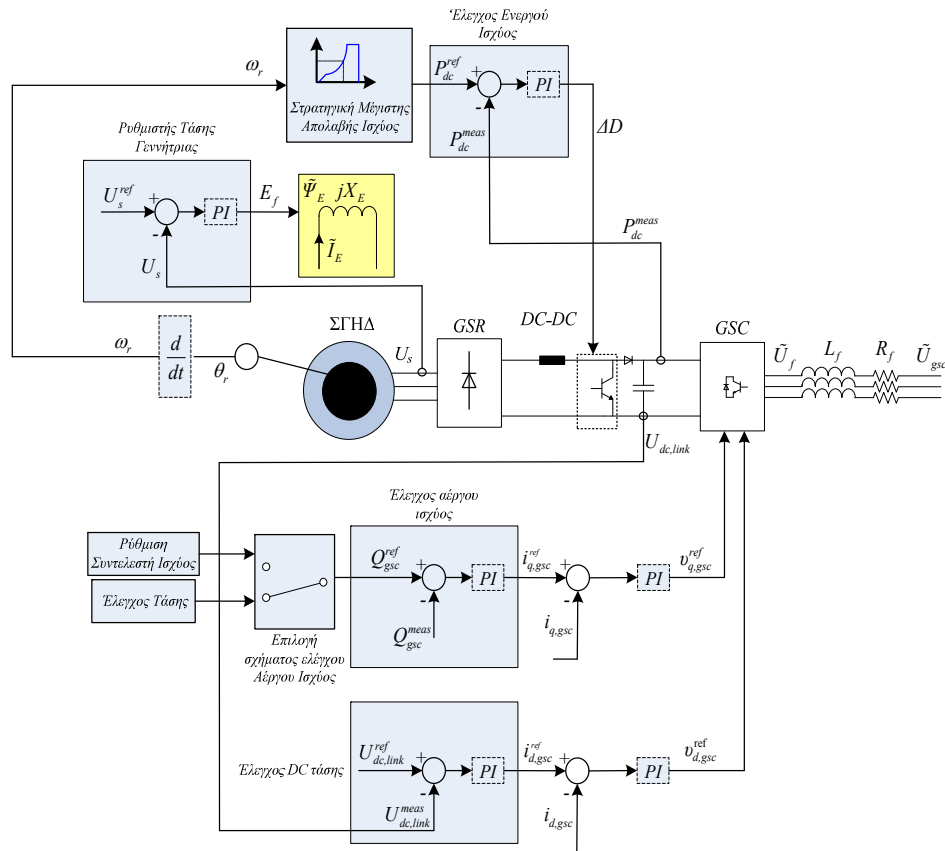
Ο μετατροπέας DC-DC υλοποιεί τη στρατηγική Μέγιστης Απολαβής Ισχύος για την *A/G* με βάση τη μέτρηση της πραγματικής ταχύτητας δρομέα. Το Σχήμα 7.19 δίνει τη χαρακτηριστική ελέγχου που χρησιμοποιήθηκε στο μοντέλο *A/G* ονομαστικής ισχύος 2 MW. Το IGBT του μετατροπέα ελέγχεται ανάλογα με το αν η μετρούμενη ενεργός ισχύς στη σύνδεση DC είναι υψηλότερη ή χαμηλότερη από την τιμή αναφοράς P_{grid}^{ref} , η οποία δίνει ουσιαστικά την τιμή αναφοράς για την ισχύ στη DC σύνδεση, P_{dc}^{ref} . Στις περισσότερες βιβλιογραφικές αναφορές, [ACH03][BEH05], ο μετατροπέας χρησιμοποιείται για να εξασφαλίζει υψηλή τάση στα τερματικά της γεννήτριας. Στις χαρακτηριστικές του Σχήματος 7.19, διακρίνονται, όμοια με την *A/G Τύπου Γ*, τρεις περιοχές ελέγχου:

- *Περιοχή 1*: Η περιοχή μεγιστοποίησης της αεροδυναμικής ισχύος
- *Περιοχή 2*: Η περιοχή γραμμικής αύξησης της ενεργού ισχύος συναρτήσει της ταχύτητας περιστροφής μέχρι την ονομαστική ισχύ
- *Περιοχή 3*: Η περιοχή ονομαστικής λειτουργίας



Σχήμα 7.19. Χαρακτηριστική ελέγχου στρατηγικής Μέγιστης Απολαβής Ισχύος και Χαρακτηριστική στροφών συναρτήσει ταχύτητας ανέμου

Ο μετατροπέας στην πλευρά του δικτύου ελέγχει την τάση στη DC σύνδεση και το Συντελεστή Ισχύος του συστήματος ή την τερματική τάση στο ζυγό σύνδεσης παρέχοντας σήμα αναφοράς για την άεργο ισχύ που ανταλλάσσεται με το δίκτυο. Ο αποζευγμένος έλεγχος ενεργού και άεργου ισχύος επιτυγχάνεται στην περίπτωση αυτή με τη χρήση του πλαισίου αναφοράς τάσης δικτύου (*Grid side Converter Voltage Oriented Reference Frame – GVRF*). Τα δύο επίπεδα ελεγκτών που χρησιμοποιούνται, ο βρόχος ελέγχου ισχύος και ο βρόχος ελέγχου ρεύματος, είναι ίδια με τα αντίστοιχα που περιγράφονται για το μοντέλο της Α/Γ Τύπου Γ στο μετατροπέα στην πλευρά του δικτύου. Στο Σχήμα 7.20 δίνονται οι βρόχοι ελέγχου του συστήματος στην περίπτωση αυτή. Σημειώνεται ότι για τους μετασχηματισμούς των μεταβλητών μεταξύ των πλαισίων αναφοράς ισχύουν κατ’ αντιστοιχία ότι και στην Α/Γ Τύπου Γ, όποτε παραλείπονται για λόγους ευκρίνειας.

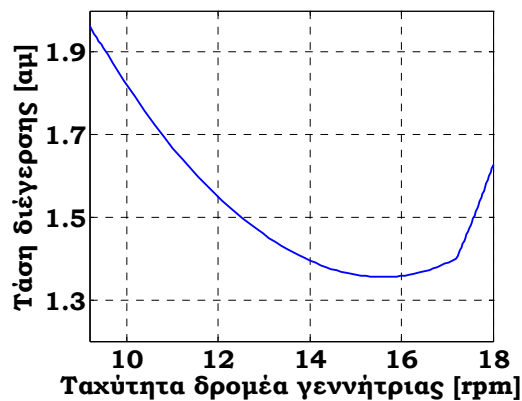


Σχήμα 7.20. Δομή ελέγχου για Α/Γ Τύπου Δ1 – Σχήμα ελέγχου 1

Ένας εναλλακτικός τρόπος ελέγχου για το μετατροπέα στην πλευρά του δικτύου, που βασίζεται στην αναλογία μεταξύ ροής ενεργού ισχύος και της διαφοράς φάσης μεταξύ της τάσης εξόδου του μετατροπέα και της τάσης του δικτύου και της αέργου ισχύος και της διαφοράς των μέτρων των δυο τάσεων, περιγράφεται στο Παράρτημα.

7.6.2. Σχήμα Ελέγχου 2

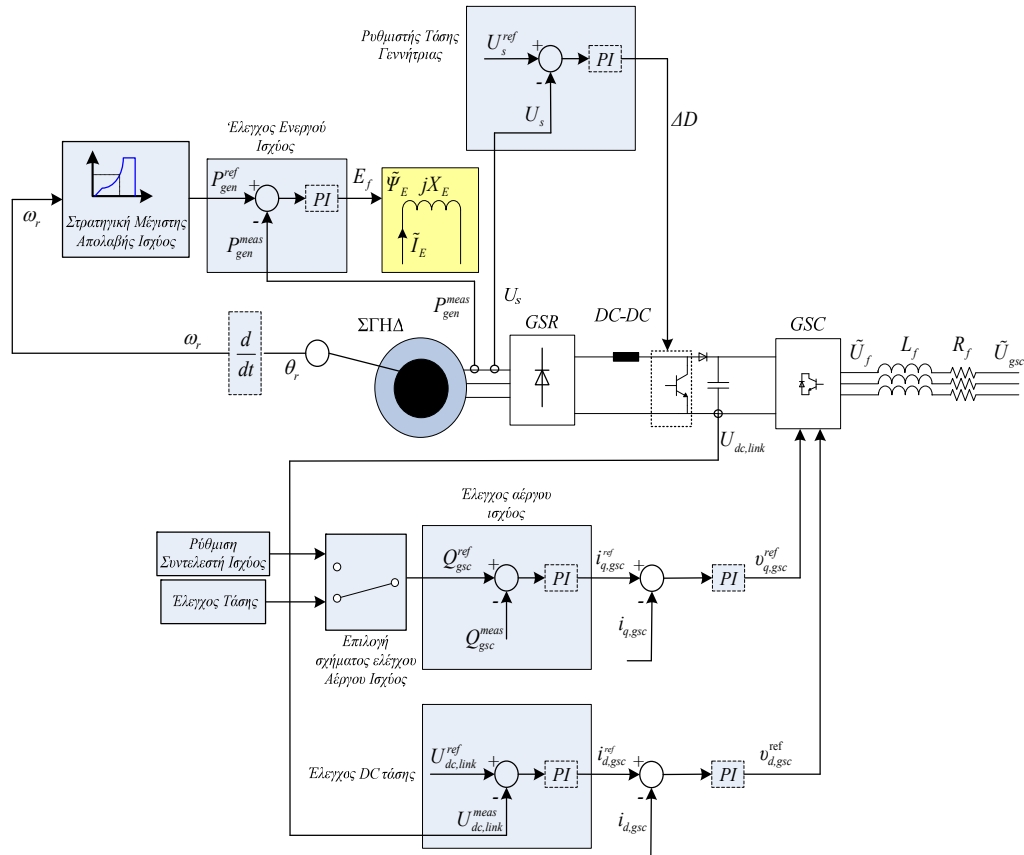
Στην περίπτωση αυτή ο έλεγχος ενεργού ισχύος γίνεται μέσω του συστήματος διέγερσης, δηλαδή η στρατηγική Μέγιστης Απολαβής Ισχύος υλοποιείται στο σύστημα διέγερσης της σύγχρονης γεννήτριας. Η καμπύλη που δείχνει αυτή τη σχέση μεταξύ τάσης διέγερσης και ενεργού ισχύος που παράγει η γεννήτρια απεικονίζεται στο Σχήμα 7.16 για διαφορετικές θερμοκρασίες της γεννήτριας. Λαμβάνοντας υπ' όψιν τη σχέση μεταξύ βέλτιστης ισχύος και ταχύτητας δρομέα του Σχήματος 7.19, μπορεί να εξαχθεί η σχέση μεταξύ τάσης διέγερσης και ταχύτητας δρομέα ώστε να χρησιμοποιηθεί στο σύστημα ελέγχου. Η καμπύλη του Σχήματος 7.21 υπολογίσθηκε για ονομαστική θερμοκρασία.



Σχήμα 7.21. Βέλτιστη τάση διέγερσης ως προς ταχύτητα δρομέα

Η σχέση μεταξύ τάσης διέγερσης και ταχύτητας δρομέα δεν είναι μονότονη. Για χαμηλές ταχύτητες δρομέα η κλίση της καμπύλης είναι αρνητική, δηλαδή μια αύξηση στην ενεργό ισχύ που παράγεται οδηγεί σε μείωση της τάσης διέγερσης. Αυτή η σχέση αντιστρέφεται σε ταχύτητα δρομέα περίπου ίση με 15.6 rpm, μετά από την οποία μια αύξηση στην ενεργό ισχύ απαιτεί αύξηση της τάσης διέγερσης.

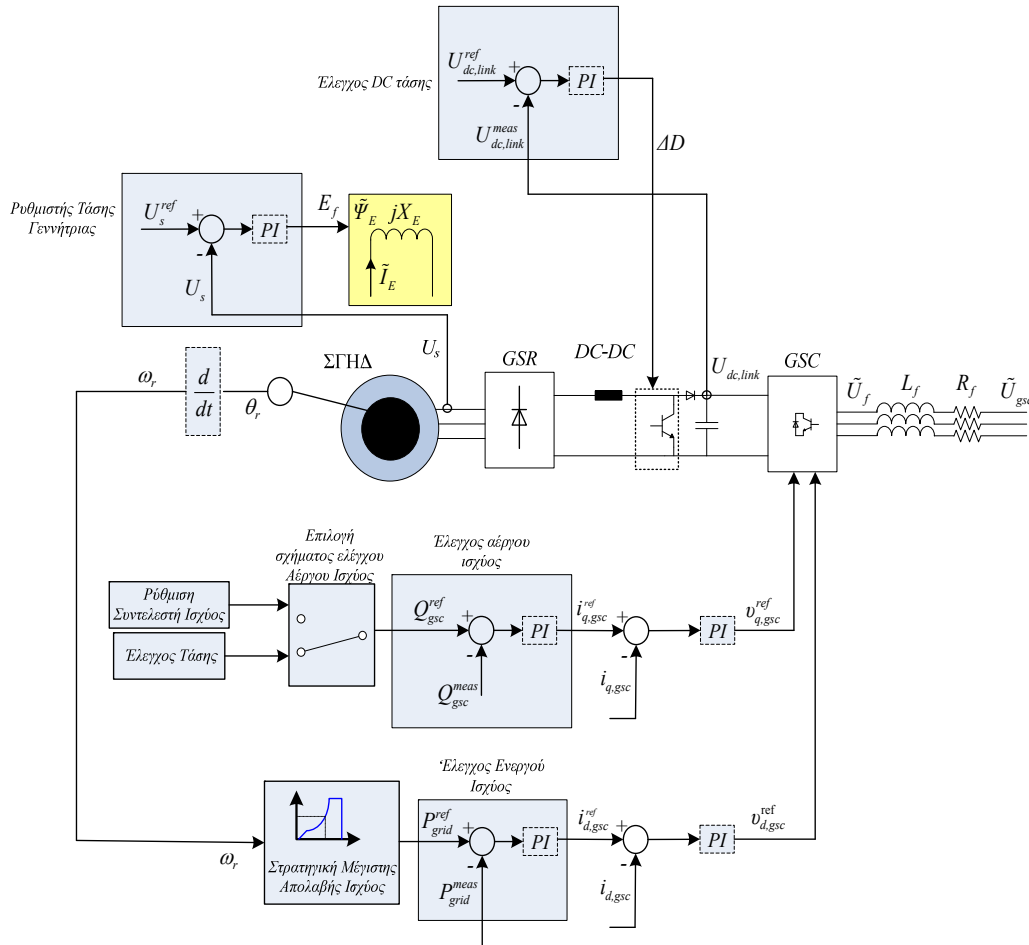
Ο Ρυθμιστής Τάσης Γεννήτριας σε αυτήν την περίπτωση καθορίζει το βαθμό χρησιμοποίησης του *IGBT* του μετατροπέα DC-DC, εξασφαλίζοντας τιμές για την θερμοκρασία της γεννήτριας γύρω από την ονομαστική. Ο μετατροπέας στην πλευρά του δικτύου λειτουργεί όπως περιγράφηκε παραπάνω.



Σχήμα 7. 22. Δομή ελέγχου για A/G Τύπου Δ1 – Σχήμα ελέγχου 2

7.6.3. Σχήμα Ελέγχου 3

Ο έλεγχος ενεργού ισχύος εξασφαλίζεται μέσω του μετατροπέα στην πλευρά του δικτύου που ελέγχει την ενεργό που εγχύεται στο δίκτυο σύμφωνα με τη στρατηγική Μέγιστης Απολαβής Ισχύος. Ο ίδιος μετατροπέας ελέγχει επίσης την τερματική τάση στο ζυγό σύνδεσης ή τον Συντελεστή Ισχύος παρέχοντας τιμή αναφοράς για την άεργο που ανταλλάσσεται με το δίκτυο. Η τάση στη DC σύνδεση διατηρείται γύρω από την ονομαστική της τιμή μέσω της λειτουργίας του μετατροπέα DC-DC, όπου η λειτουργία του διακόπτη τώρα καθορίζεται από την τιμή της τάσης στη DC σύνδεση. Ο Ρυθμιστής Τάσης Γεννήτριας εξασφαλίζει ονομαστική τάση στα τερματικά της γεννήτριας όπως παρουσιάστηκε στο Σχήμα Ελέγχου 1. Το αντίστοιχο διάγραμμα ελέγχου δίνεται στο σχήμα που ακολουθεί.



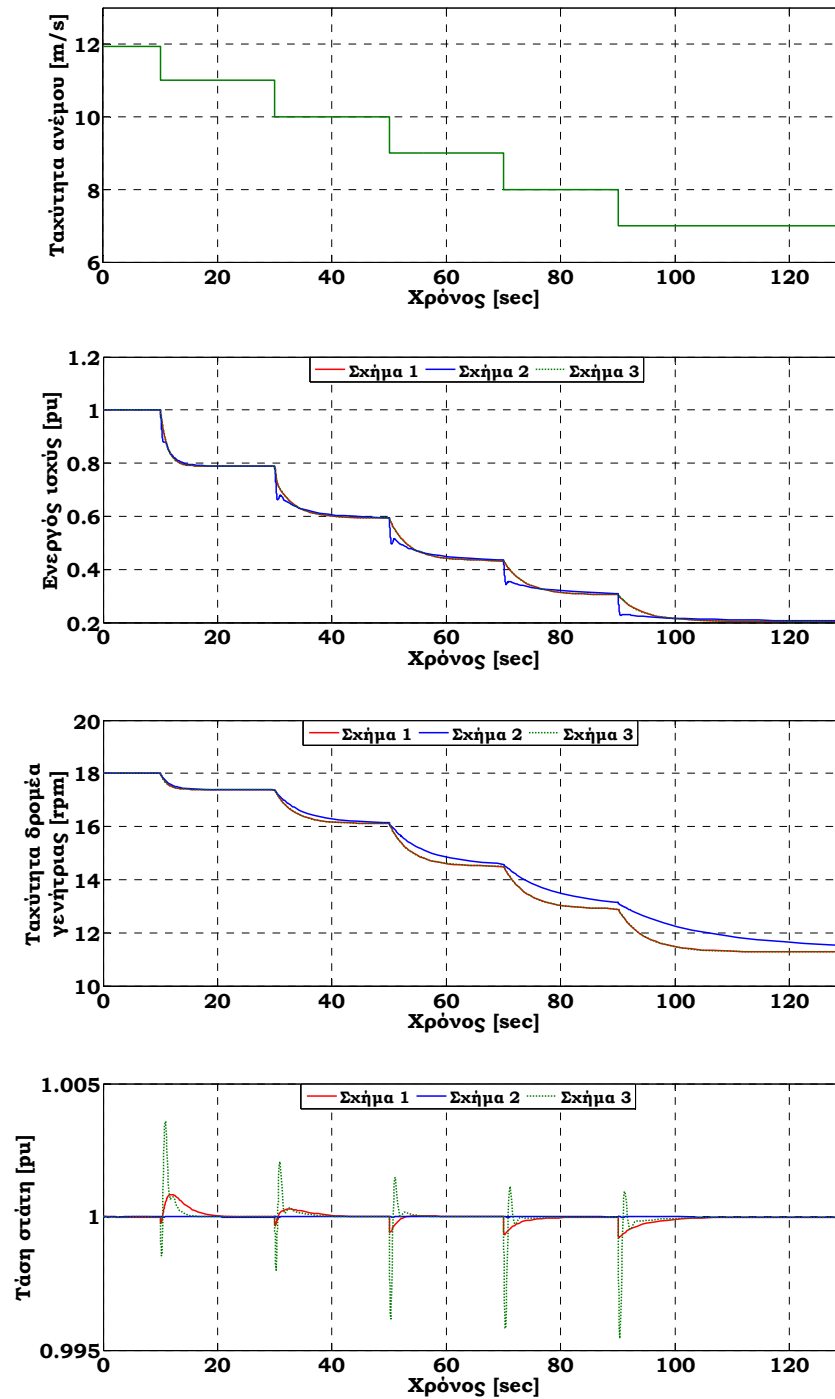
Σχήμα 7.23. Δομή ελέγχου για A/G Τύπου Δ1 – Σχήμα ελέγχου 3

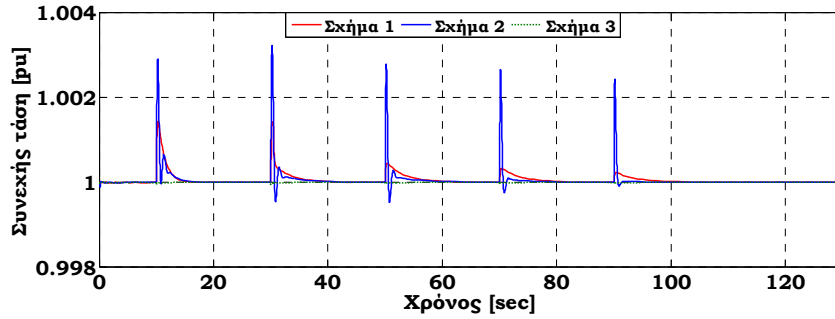
7.7. Λειτουργία συστήματος για ντετερμινιστικές ταχύτητες ανέμου

Η απόκριση της A/G Τύπου Δ1, με τις τρεις παραλλαγές ελέγχου που υλοποιήθηκαν, αποτυπώνεται στο Σχήμα 7.24, όπου συνοψίζονται τα αποτελέσματα για βηματική μείωση της ταχύτητας ανέμου από 12 m/s στα 7 m/s με βήμα 1 m/s. Οι βασικές μεταβλητές που επιλέχθηκαν είναι η ενεργός ισχύς, η ταχύτητα δρομέα και η τάση στάτη. Σημειώνεται ότι σε όσα αποτελέσματα προσομοιώσεων δεν περιλαμβάνεται η άεργος ισχύς, ακολουθείται η λειτουργία μοναδιαίου ΣΙ, οπότε η άεργος ισχύς εξόδου είναι μηδενική ανεξάρτητα από το σημείο λειτουργίας της A/G και τις μεταβολές στην ταχύτητα του ανέμου.

Η συμπεριφορά του μοντέλου και για τα τρία Σχήματα Ελέγχου είναι η επιθυμητή αν και παρουσιάζονται διαφορές μεταξύ τους που οφείλονται στις διαφορετικές χρονικές κλίμακες των επιμέρους συστημάτων ελέγχου που χρησιμοποιούνται κάθε φορά. Η απόκριση της ταχύτητας δρομέα στην περίπτωση του Σχήματος Ελέγχου 2, όπου η στρατηγική Μέγιστης Απολαβής Ισχύος υλοποιείται μέσω του συστήματος διέγερσης της σύγχρονης γεννήτριας, είναι εμφανώς πιο αργή σε σύγκριση με τις δύο άλλες παραλλαγές. Η μεταβατική ΗΕΔ αναπτύσσεται στην υπομεταβατική χρονική κλίμακα, επομένως για μια μικρή διαταραχή γύρω από το αρχικό σημείο λειτουργίας, πολύ γρήγορα το σύστημα μεταβαίνει σε ένα νέο σημείο ισορροπίας. Η εξίσωση κίνησης παρ' όλα αυτά λειτουργεί σε διαφορετική χρονική κλίμακα με αποτέλεσμα ενώ ένα νέο σημείο ισορροπίας έχει επιτευχθεί για την ενεργό ισχύ, η ταχύτητα δρομέα να μην έχει λάβει την αντίστοιχη βέλτιστη τιμή. Στο σχήμα αυτό ελέγχου ο μετατροπέας συνεχούς τάσης διατηρεί την τάση στάτη σταθερή και ίση με την ονομαστική της τιμή, ενώ οι μεταβολές της ταχύτητας ανέμου προκαλούν αντίστοιχες μεταβολές στη συνεχή τάση, η οποία μέσω του μετατροπέα στην πλευρά του δικτύου διατηρείται σε ένα μικρό

εύρος γύρω από την ονομαστική τιμή. Στην περίπτωση των δύο άλλων Σχημάτων Ελέγχου, 1 και 3, η απόκριση όσον αφορά την ενεργό ισχύ και την ταχύτητα δρομέα είναι πανομοιότυπη, ακολουθώντας τη στρατηγική Μέγιστης Απολαβής Ισχύος, είτε μέσω του μετατροπέα συνεχούς τάσης είτε μέσω του μετατροπέα στην πλευρά του δικτύου αντίστοιχα. Και στις δύο περιπτώσεις η τάση στάτη και η συνεχής τάση ρυθμίζονται να παραμένουν κοντά στις ονομαστικές τους τιμές.

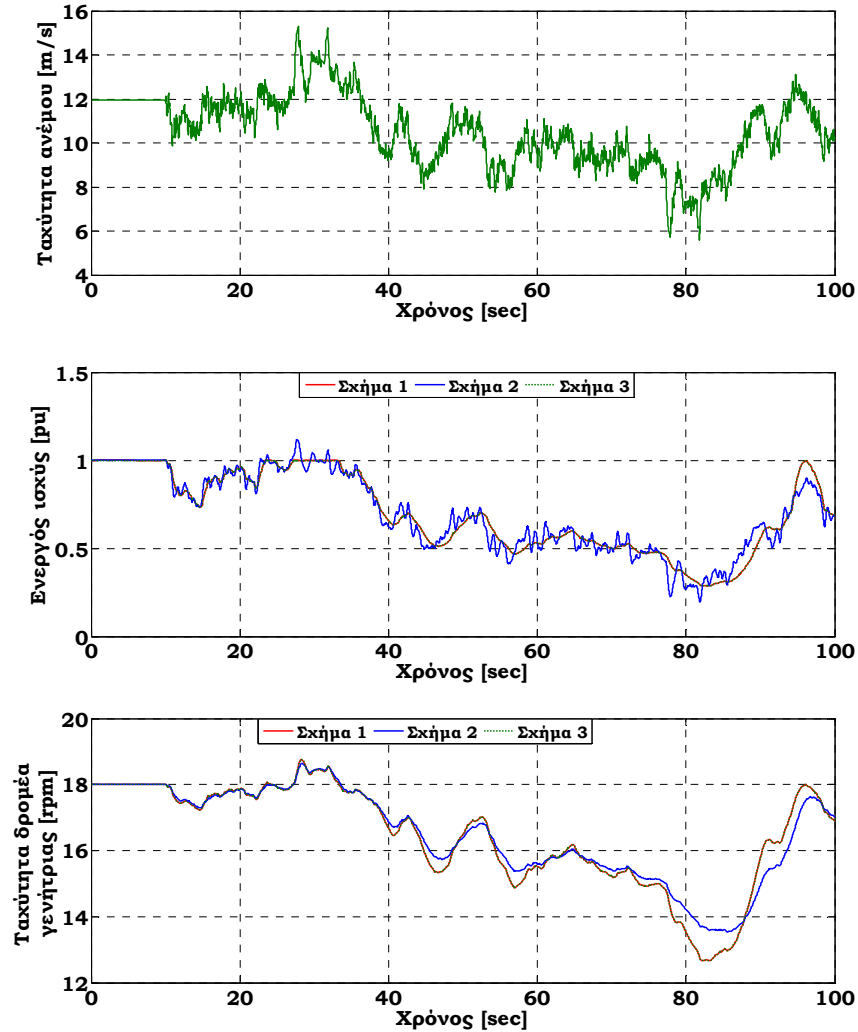


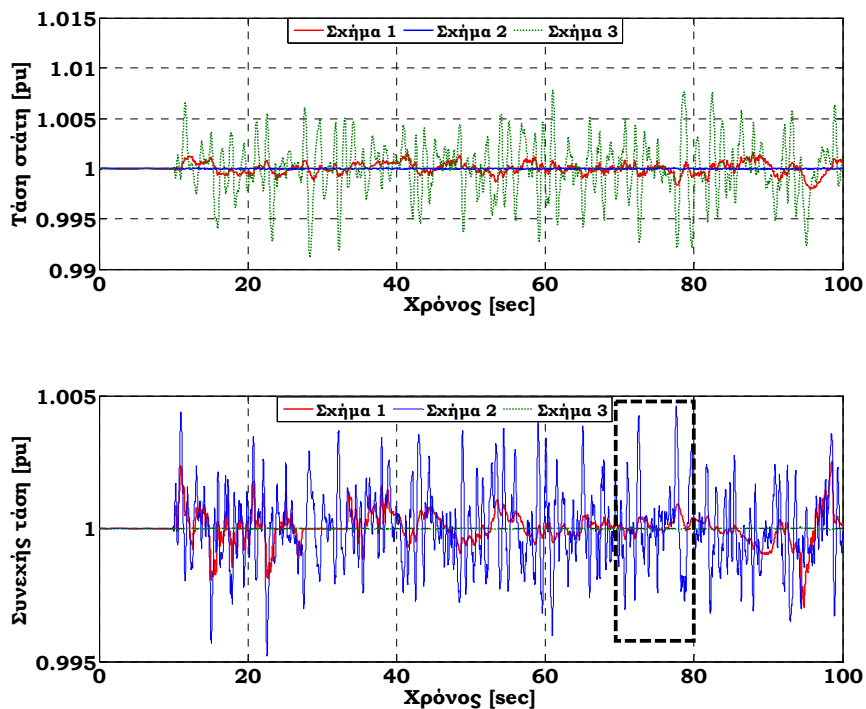


Σχήμα 7.24. A/G Τύπου Δ1: Ταχύτητα ανέμου, ενεργός ισχύς, ταχύτητα δρομέα γεννήτριας, τάση στάτη και συνεχής τάση U_{dc} για για βηματικές μειώσεις στον άνεμο από 12 m/s έως 7 m/s με βήμα 1 m/s

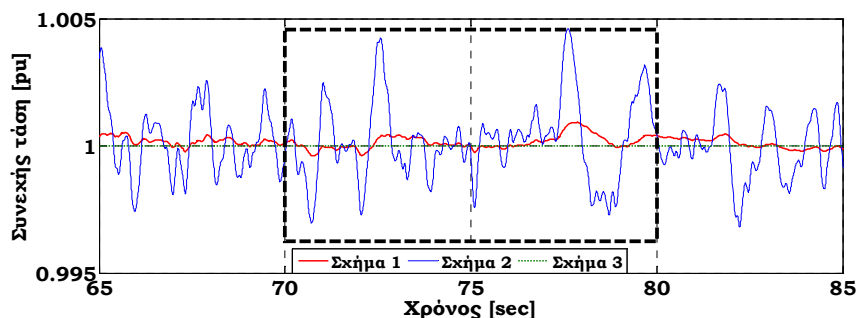
7.8. Λειτουργία συστήματος για στοχαστικές ταχύτητες ανέμου

Η συγκριτική μελέτη των τριών μεθόδων ελέγχου της A/G Τύπου Δ1 γίνεται και με τη χρήση στοχαστικής χρονοσειράς ταχύτητας ανέμου στην περιοχή ονομαστικής λειτουργίας. Τα Σχήματα 7.25-7.26 συνοψίζουν τα αποτελέσματα των βασικών μεταβλητών του συστήματος.





Σχήμα 7.25. Α/Γ Τύπου Δ1: Ταχύτητα ανέμου, ενεργός ισχύς, ταχύτητα δρομέα γεννήτριας, τάση στάτη και συνεχής τάση U_{dc} για στοχαστική ταχύτητα ανέμου στην περιοχή των 12 m/s



Σχήμα 7.26. Α/Γ Τύπου Δ1: Μεγέθυνση στην περιοχή 1 για τη συνεχή τάση U_{dc} για στοχαστική ταχύτητα ανέμου στην περιοχή των 12 m/s

Η ταχύτητα ανέμου έχει υψίσυχνες μεταβολές οι οποίες ενώ απαλείφονται από την ενεργό ισχύ εξόδου για τα Σχήματα Ελέγχου 1 και 3, εντοπίζονται στην τερματική τάση της σύγχρονης γεννήτριας και τη συνεχή τάση. Όποτε η ταχύτητα ανέμου υπερβαίνει την ονομαστική τιμή η ενεργός ισχύς διατηρείται σταθερή και ίση με 2 MW, που είναι η ονομαστική ισχύς της Α/Γ. Η εύρυθμη λειτουργία του συστήματος ελέγχου γωνίας βήματος εξασφαλίζει την προστασία των μηχανικών μερών της Α/Γ.

Στο Σχήμα ελέγχου 1, όταν αυξάνεται η ταχύτητα ανέμου, η τάση στα άκρα της γεννήτριας αυξάνεται επίσης, οδηγώντας το σύστημα διέγερσης σε μια ελαφρή μείωση αρχικά αλλά τελικά στην αύξηση της τάσης διέγερσης οδηγώντας σε αύξηση της ενεργού ισχύος που παράγει η γεννήτρια. Η σχέση μεταξύ τάσης διέγερσης και ισχύος που παράγεται από τη σύγχρονη γεννήτρια εξαρτάται σημαντικά από το σημείο λειτουργίας στην καμπύλη του Σχήματος 7.16. Για χαμηλές ταχύτητες ανέμου, όταν η ισχύς αυξάνεται, η τάση διέγερσης μειώνεται, ενώ το αντίστροφο ισχύει για υψηλότερες τιμές ταχύτητας ανέμου. Η τερματική τάση της σύγχρονης γεννήτριας και η συνεχής τάση εμφανίζουν γρήγορες μεταβολές, αλλά παραμένουν κοντά στις ονομαστικές τιμές. Αυτό το σχήμα ελέγχου εξασφαλίζει βέλτιστο έλεγχο ισχύος επιτρέποντας στη γεννήτρια να λειτουργεί σε εύρος

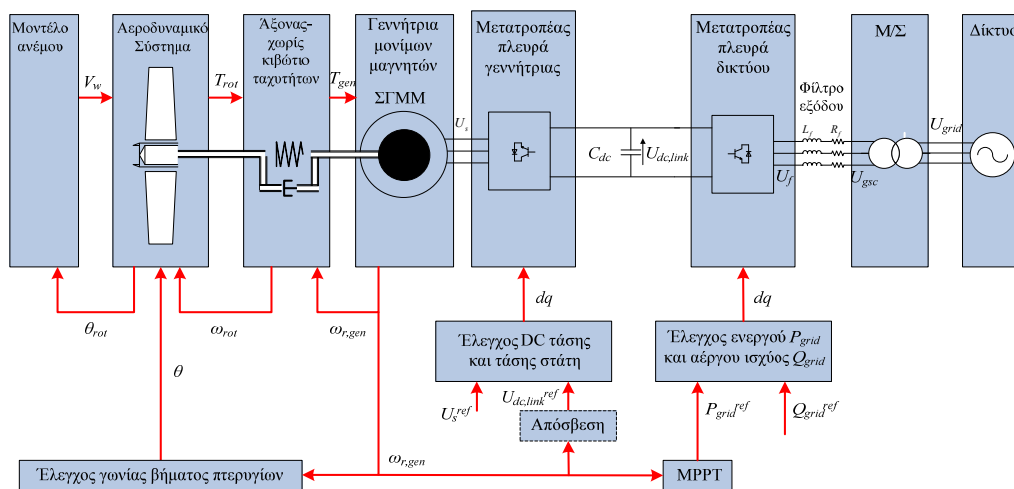
ονομαστικών τιμών τερματικής τάσης. Με αυτόν τον τρόπο, ο νέος έλεγχος που προτείνεται μέσω του μετατροπέα συνεχούς τάσης φαίνεται να συνδυάζει αποδοτικά τη λειτουργία Μέγιστης Απολαβής Ισχύος και ονομαστικές τιμές τάσης.

Συγκρίνοντας με τα αποτελέσματα του Σχήματος Ελέγχου 1, προκύπτουν σχετικά διαφορετικές αποκρίσεις για την ενεργό ισχύ και την ταχύτητα δρομέα όταν υλοποιείται το Σχήμα Ελέγχου 2. Όπως προαναφέρθηκε στο σχολιασμό των αποτελεσμάτων σε βηματικές αλλαγές της ταχύτητας του ανέμου, η διαφορά αυτή σχετίζεται με την αργή απόκριση του συστήματος διέγερσης. Ο μετατροπέας συνεχούς τάσης στην περίπτωση αυτή εξασφαλίζει ονομαστική τερματική τάση για τη σύγχρονη γεννήτρια, ενώ η συνεχής τάση παρουσιάζει μια γρήγορη διακύμανση, που σχετίζεται με την απόκριση της ενεργού ισχύος. Αυτή η διακύμανση παραμένει εν τούτοις σε ένα πολύ στενό εύρος γύρω από την ονομαστική τιμή, και επομένως δεν έχει σοβαρό αντίκτυπο στην απόκριση του συστήματος συνολικά.

Στο τρίτο και τελευταίο Σχήμα Ελέγχου, ο μετατροπέας στην πλευρά του δικτύου, λειτουργώντας σε υψηλή συχνότητα, έχει πολύ γρήγορη απόκριση όσον αφορά τον έλεγχο ενεργού ισχύος. Η ενεργός ισχύς και η ταχύτητα του δρομέα έχουν πανομοιότυπη απόκριση με το Σχήμα Ελέγχου 1. Ο μετατροπέας συνεχούς τάσης διατηρεί τη συνεχή τάση σταθερή – βλέπε Σχήμα 7.26 –, ενώ η τερματική τάση της γεννήτριας παρουσιάζει μια γρήγορη διακύμανση γύρω από την ονομαστική τιμή, καθώς οι υψίσυχνες μεταβολές του ανέμου εμφανίζονται εκεί. Στα Σχήματα Ελέγχου 1 και 3 ο έλεγχος ενεργού ισχύος επιτυγχάνεται χωρίς καθυστέρηση, και επομένως η ισχύς εξόδου ακολουθεί με μεγάλη ακρίβεια την τιμή αναφοράς. Στο Σχήμα Ελέγχου 2 τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του συστήματος διέγερσης επηρεάζουν σημαντικά την απόκριση της Α/Γ κατά τη διάρκεια γρήγορων μεταβολών του ανέμου. Παρ' όλα αυτά, στη δεύτερη αυτή μέθοδο ελέγχου, η τερματική τάση της σύγχρονης γεννήτριας διατηρείται στην ονομαστική τιμή, ανεξάρτητα από τις μεταβολές στην ταχύτητα του ανέμου, εξασφαλίζοντας βέλτιστη απόδοση για τη γεννήτρια και ελαχιστοποιώντας την καταπόνηση από τυχόν συχνές αλλαγές στην τάση.

7.9. Σύστημα ελέγχου Α/Γ Τύπου Δ2

Στην περίπτωση της Α/Γ Τύπου Δ2 ο έλεγχος αφορά στους δύο μετατροπέες σε διαμόρφωση *back-to-back* και στο συντονισμό τους με τον έλεγχο γωνίας βήματος πτερυγίων. Το σύστημα ελέγχου του Σχήματος 7.27 διαφοροποιείται σημαντικά σε σχέση με τον Τύπο Δ1, που περιγράφεται παραπάνω, γι' αυτό και αντιμετωπίζεται ξεχωριστά. Τα πλαίσια αναφοράς που χρησιμοποιούνται δίνονται στο Σχήμα 7.18. Συμπεριλαμβάνεται και το σύστημα απόσβεσης ταλαντώσεων στη ταχύτητα του δρομέα, το οποίο αναλύεται παρακάτω.



Σχήμα 7.27. Βασική διαμόρφωση ελέγχου μοντέλου ανεμογεννήτριας Τύπου Δ2

7.9.1. Έλεγχος μετατροπέων

Ο μετατροπέας που συνδέεται στη γεννήτρια ελέγχει την τάση ακροδεκτών της γεννήτριας μέσω του Ρυθμιστή Τάσης Γεννήτριας και την τάση στη DC σύνδεση, ώστε να παραμένουν σταθερές και ίσες με την ονομαστική τους τιμή. Με τον τρόπο αυτό αποφεύγονται επικίνδυνες υπερτάσεις, περιπτώσεις κορεσμού του μετατροπέα καθώς και συχνές φορτίσεις-εκφορτίσεις του πυκνωτή στη συνεχή τάση. Η γεννήτρια και ο μετατροπέας μπορούν να λειτουργούν σε ονομαστική τάση, οπότε η διαστασιολόγηση τους γίνεται εξασφαλίζοντας βέλτιστη λειτουργία. Ένα μειονέκτημα είναι ότι ο μετατροπέας στην πλευρά της γεννήτριας πρέπει να παρέχει τη μεταβλητή άεργο ισχύ που απαιτείται από τη σύγχρονη γεννήτρια, γεγονός που αυξάνει το μέγεθος του και επομένως το κόστος. Το πλαίσιο που χρησιμοποιείται για τον έλεγχο είναι το πλαίσιο αναφοράς τάσης στάτη (*Stator Voltage Reference Frame – SVRF*) και τα επίπεδα ελεγκτών που χρησιμοποιούνται είναι:

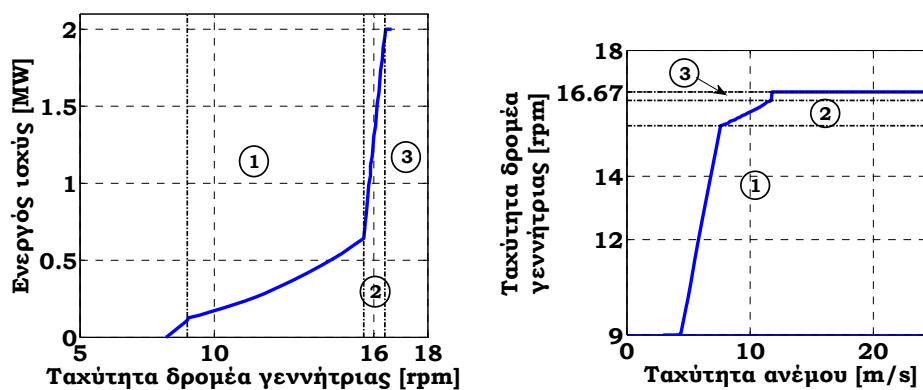
- Οι βρόχοι ελέγχου τάσης στάτη και DC τάσης που δίνουν τις τιμές αναφοράς για τις συνιστώσες του ρεύματος τυλιγμάτων στάτη i_{ds}^{ref} και i_{qs}^{ref} αντίστοιχα
- Οι βρόχοι ελέγχου ρεύματος i_{ds} και i_{qs} που ρυθμίζουν τις συνιστώσες dq των σημάτων ελέγχου, $cm_{ds}-cm_{qs}$, που είναι είσοδοι στο μοντέλο της διαμόρφωσης *PWM*

Είσοδος στον έλεγχο της DC τάσης είναι το σήμα αναφοράς, $U_{dc,link}^{ref}$, το οποίο είτε είναι ίσο με την ονομαστική τιμή της τάσης, είτε προκύπτει από το σύστημα απόσβεσης ταλαντώσεων στον άξονα, το οποίο περιγράφεται στη συνέχεια.

Στο μετατροπέα στην πλευρά του δικτύου ελέγχονται η ενεργός και η άεργος ισχύς που ανταλλάσσονται με το δίκτυο σε πλαίσιο αναφοράς τάσης δικτύου (*Grid Voltage Reference Frame – GVRF*). Αντίστοιχα οι ελεγκτές είναι:

- Τον αργό (εξωτερικό) βρόχο ελέγχου ισχύος (ενεργού ή αέργου) που δίνει τις τιμές αναφοράς για το ρεύμα δρομέα ($i_{d,gsc}^{ref}$ ή $i_{q,gsc}^{ref}$ αντίστοιχα) και
- Το γρήγορο (εσωτερικό) βρόχο ελέγχου ρεύματος (ενεργού ή αέργου) που ρυθμίζει τις συνιστώσες dq των σημάτων ελέγχου, $cm_{d,gsc}-cm_{q,gsc}$, που είναι είσοδοι στο μοντέλο της διαμόρφωσης *PWM*

Ο έλεγχος της ενεργού ισχύος υλοποιεί τη στρατηγική Μέγιστης Απολαβής Ισχύος με βάση τις χαρακτηριστικές του Σχήματος 7.28. Όσον αφορά στην άεργο ισχύ, το σήμα αναφοράς μπορεί να προκύψει είτε από το σύστημα ρύθμισης του Συντελεστή Ισχύος – ανάλογα με τις ανάγκες του ΣΗΕ σε άεργο ισχύ – είτε από επιπρόσθετο βρόχο ελέγχου της τάσης στο τερματικό ζυγό της Α/Γ ή στο Σημείο Κοινής Σύνδεσης του αιολικού πάρκου, βλέπε Σχήμα 7.29.



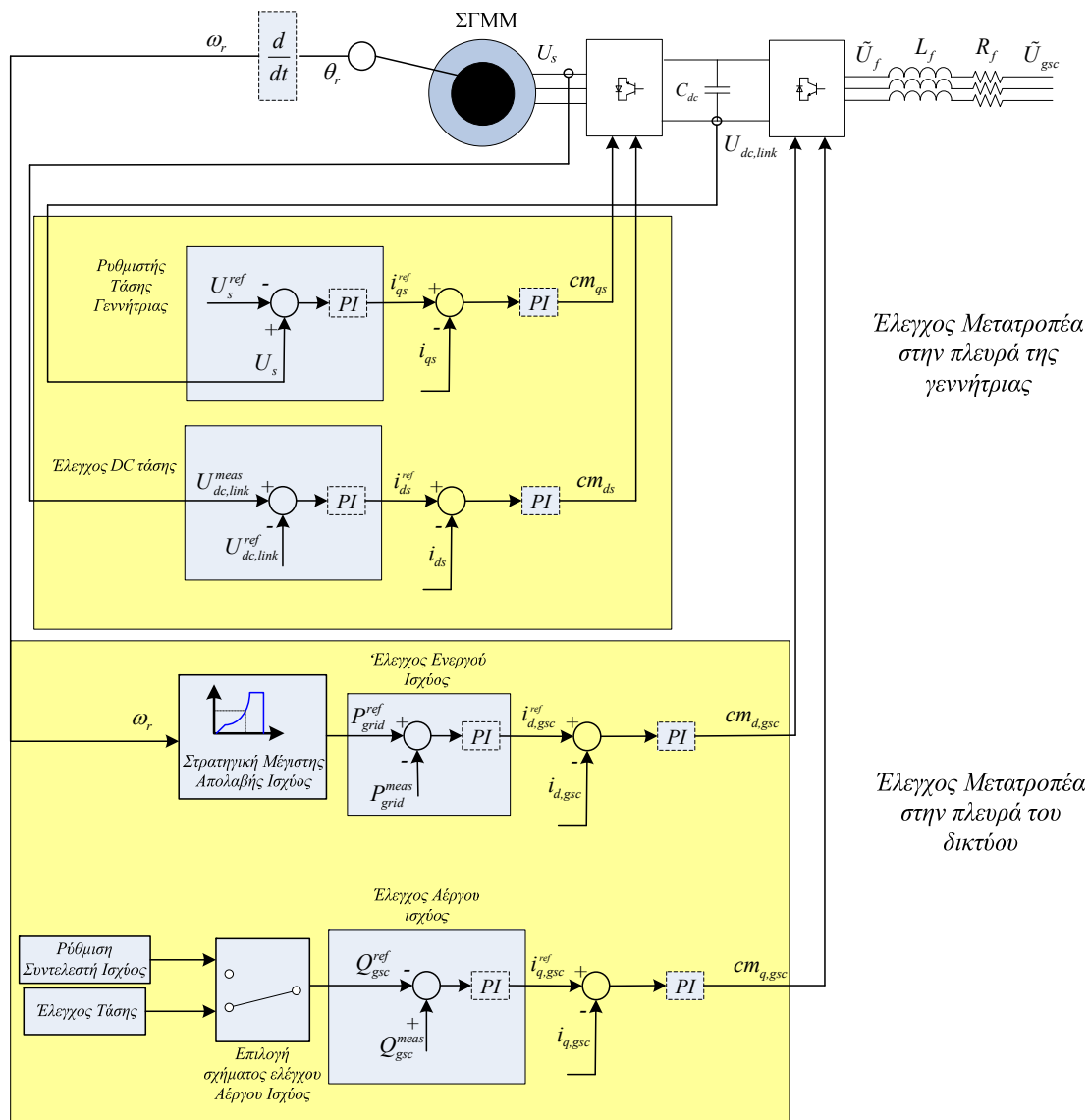
Σχήμα 7.28. Χαρακτηριστική έλεγχου στρατηγικής Μέγιστης Απολαβής Ισχύος και Χαρακτηριστική στροφών συναρτήσει ταχύτητας ανέμου

Οι Περιοχές λειτουργίας 1, 2 και 3 που σημειώνονται στο παραπάνω σχήμα ακολουθούν τους αντίστοιχους ορισμούς, όπως αυτοί δίνονται στην ενότητα περιγραφής της Α/Γ Τύπου Δ1.

Εναλλακτικοί τρόποι ελέγχου των μετατροπέων έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία και αναφέρονται εδώ για λόγους πληρότητας, [MIC07]:

- Έλεγχος μέγιστης ροπής: Το ολικό ρεύμα του στάτη χρησιμοποιείται για την παραγωγή ροπής ενώ οι απαιτήσεις της γεννήτριας σε άεργο ισχύ πρέπει να καλυφθούν από το μετατροπέα στην πλευρά της γεννήτριας
- Έλεγχος μοναδιαίου συντελεστή ισχύος της γεννήτριας: Ο μετατροπέας στην πλευρά της γεννήτριας ελέγχει την ενεργό και άεργο ισχύ παραγωγή της
- Έλεγχος τάσης ακροδεκτών γεννήτριας: Για την αποφυγή υπερτάσεων και τυχόν κορεσμό του μετατροπέα η τάση ελέγχεται να παραμένει σταθερή και ίση με την ονομαστική

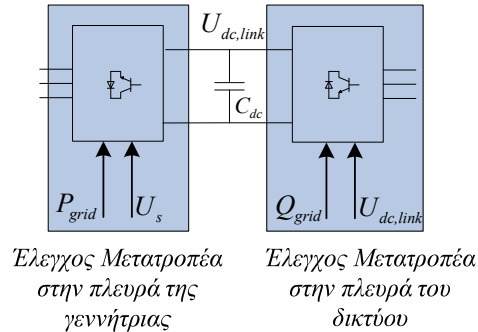
Το γενικό σχήμα ελέγχου που υλοποιήθηκε για την Α/Γ Τύπου Δ2 απεικονίζεται στο Σχήμα 7.29.



Σχήμα 7.29. Δομή ελέγχου για Α/Γ Τύπου Δ2

Μια παραλλαγή της μεθόδου ελέγχου που περιγράφηκε παραπάνω και έχει εκτενώς αναλυθεί στη βιβλιογραφία, [AKH03b][SVE05], απεικονίζεται στο Σχήμα 7.30. Ο μετατροπέας στην πλευρά της γεννήτριας ελέγχει την ενεργό ισχύ και την τάση στάση ενώ ο μετατροπέας στην πλευρά του δικτύου

την άεργο ισχύ και τη συνεχή τάση μεταξύ των δύο μετατροπέων. Όπως προκύπτει και από την ανάλυση της συμπεριφοράς της Α/Γ κατά τη διάρκεια βυθίσεων τάσης που ακολουθεί, ο έλεγχος που εφαρμόζεται στην παρούσα εργασία εμφανίζει πλεονεκτήματα ως προς τη δυνατότητα αδιάλειπτης παροχής ισχύος κατά τη διάρκεια σφαλμάτων στο δίκτυο, καθώς δεν απαιτούνται πρόσθετα μέτρα προστασίας.

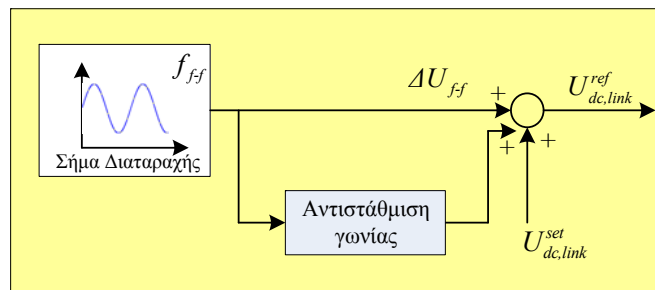


Σχήμα 7.30. Εναλλακτικός τρόπος ελέγχου Α/Γ Τύπου Δ2

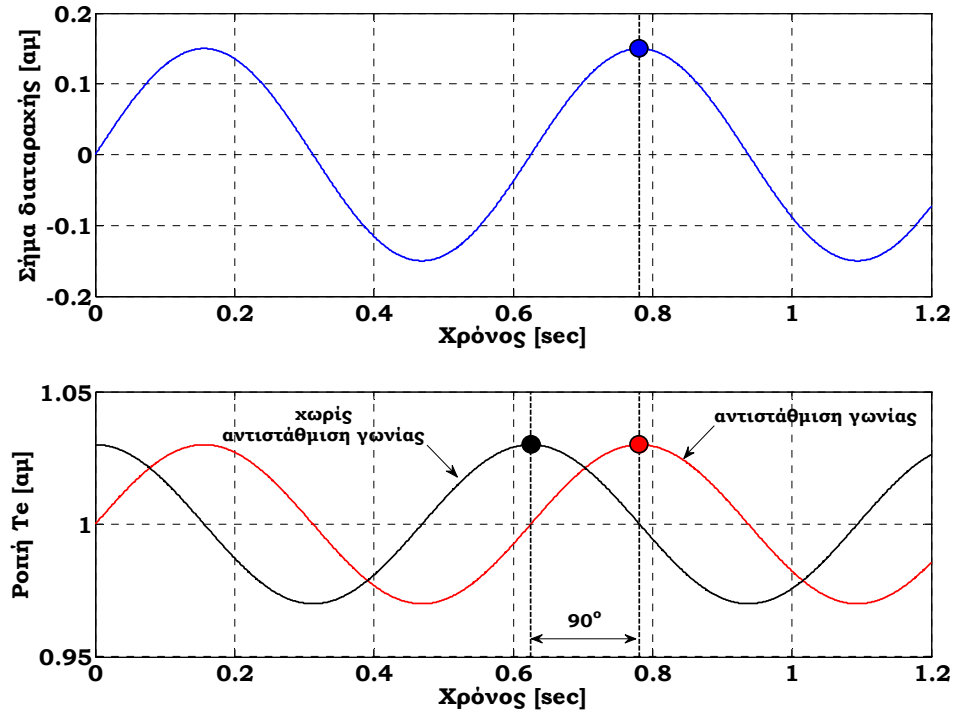
7.9.2. Σύστημα απόσβεσης ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων

Η απόσβεση των ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων – βλέπε ενότητα 5.4 – επιτυγχάνεται μέσω του μετατροπέα στην πλευρά της γεννήτριας, ο οποίος χρησιμοποιεί τη DC σύνδεση σαν βραχυχρόνια αποθήκη ενέργειας. Περιοδικές φορτίσεις και εκφορτίσεις του πυκνωτή μεταβάλλουν το ρεύμα της γεννήτριας με αποτέλεσμα να αναπτύσσονται ταλαντώσεις στην ηλεκτρομαγνητική ροπή, οι οποίες αντισταθμίζουν τις ταλαντώσεις στην ταχύτητα του δρομέα και επομένως συμβάλλουν στην απόσβεση τους. Ο εξωτερικός βρόχος απόσβεσης ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων δρώντας στο σύστημα ελέγχου της DC τάσης έχει ως είσοδο την ταχύτητα περιστροφής του δρομέα και ως έξοδο την τιμή αναφοράς $U_{dc,link}^{ref}$ η οποία περιέχει πλέον και ταλαντούμενη συνιστώσα.

Η σχεδίαση του συστήματος απόσβεσης γίνεται με βάση την αναγνώριση συχνότητας και φάσης των ταλαντώσεων ταχύτητας δρομέα. Για το σκοπό αυτό κατ' αρχάς σχεδιάζεται το ζωνοπερατό φίλτρο που επιλέγει τις συχνότητες γύρω από τη συχνότητα $f_{free-free}$ των ταλαντώσεων του δρομέα. Το σύστημα απόσβεσης λειτουργεί παρόμοια με έναν σταθεροποιητή ΣΗΕ (*Power System Stabilizer*), κατά τον οποίο παράγεται μια συνιστώσα ηλεκτρομαγνητικής ροπής σε φάση με τις ταλαντώσεις της ταχύτητας δρομέα. Η φάση των ταλαντώσεων μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας ένα ημιτονοειδές σήμα διαταραχής συχνότητας $f_{free-free}$, το οποίο εισάγεται σαν είσοδος στον ελεγκτή DC τάσης του Σχήματος 7.31. Το σήμα αυτό υπερτίθεται στην τιμή αναφοράς $U_{dc,link}^{set}$ της DC τάσης και καθορίζει την τιμή αναφοράς $U_{dc,link}^{ref}$ που στέλνεται στον ελεγκτή DC τάσης του μετατροπέα στην πλευρά της γεννήτριας. Υπολογίζοντας τη διαφορά φάσης μεταξύ της ηλεκτρομαγνητικής ροπής της γεννήτριας και του ημιτονοειδούς σήματος υπολογίζεται η απαιτούμενη φάση των ταλαντώσεων. Επειδή η ροπή προηγείται κατά 90° είναι απαραίτητη η προσθήκη αντιστάθμισης γωνίας που εισάγει μια καθυστέρηση -90° θέτοντας τη ροπή σε φάση με το ημιτονοειδές σήμα διαταραχής. Τα σήματα διαταραχής και ηλεκτρομαγνητικής ροπής που προκύπτουν κατά την αναγνώριση της γωνίας των ταλαντώσεων απεικονίζονται στο Σχήμα 7.32.

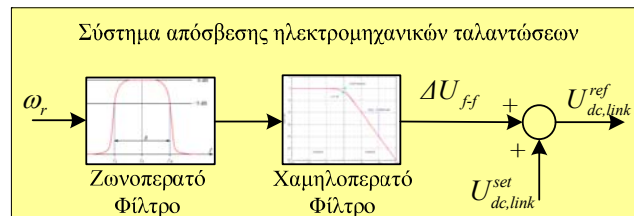


Σχήμα 7.31. Μοντέλο αναγνώρισης γωνίας στο σύστημα απόσβεσης ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων



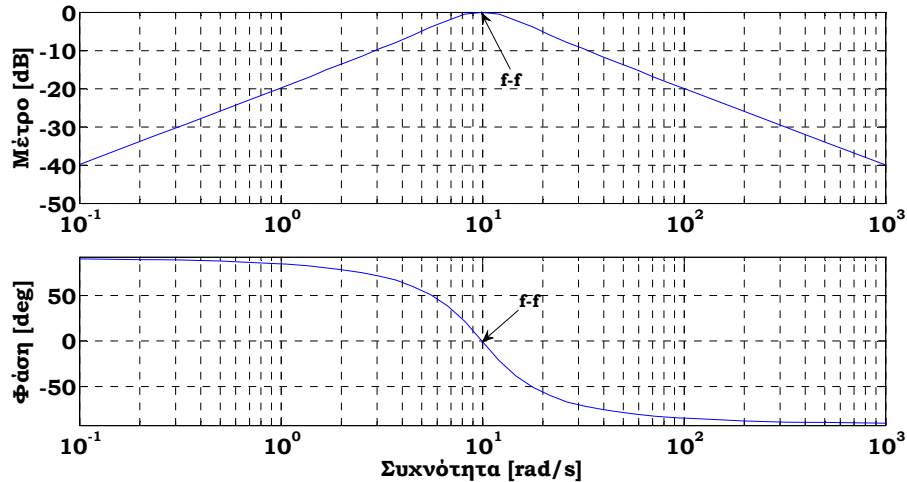
Σχήμα 7.32. Σήματα αναγνώρισης γωνίας στο σύστημα απόσβεσης ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων

Μετά τον προσδιορισμό της συχνότητας και γωνίας των ταλαντώσεων σχεδιάζεται το σύστημα απόσβεσης που περιλαμβάνει ένα ζωνοπερατό και ένα χαμηλοπερατό φίλτρο. Η τιμή αναφοράς για τη DC σύνδεση, $U_{dc,link}^{ref}$, προκύπτει σαν άθροισμα της τιμής ελέγχου $U_{dc,link}^{set}$ και της τάσης υπέρθεσης $U_{dc,link}^{ff}$. Η αντιστάθμιση γωνίας υπεισέρχεται μέσω του χαμηλοπερατού φίλτρου, το οποίο σχεδιάζεται με βάση τη συνάρτηση μεταφοράς της DC τάσης προς την ηλεκτρομαγνητική ροπή.

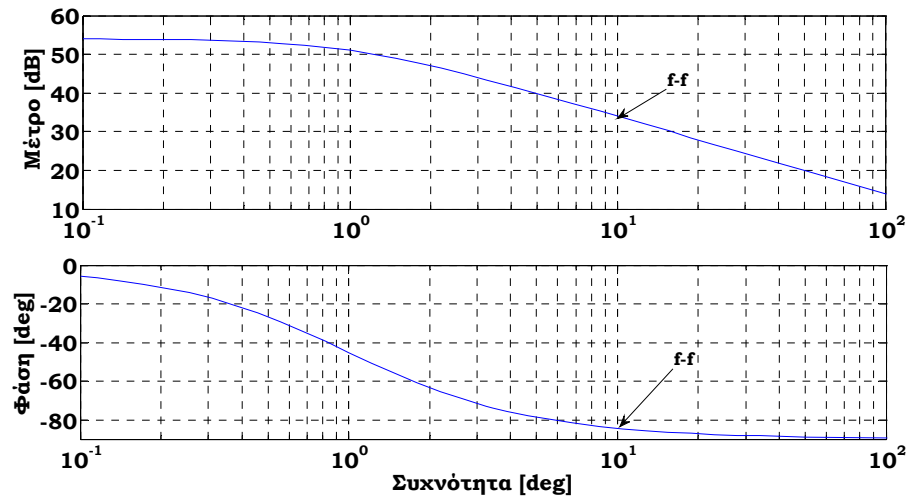


Σχήμα 7.33. Σύστημα απόσβεσης ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων

Για την Α/Γ που μοντελοποιήθηκε, ονομαστικής ισχύος 2 MW, η ιδιοσυχνότητα $f_{free-free}$ είναι περίπου 1.6 Hz και τα Bode διαγράμματα για το ζωνοπερατό και χαμηλοπερατό φίλτρο αντίστοιχα δίνονται στα Σχήματα 7.34 και 7.35 αντίστοιχα, όπου και σημειώνεται η συχνότητα $f_{free-free}$ (~10 rad/s).



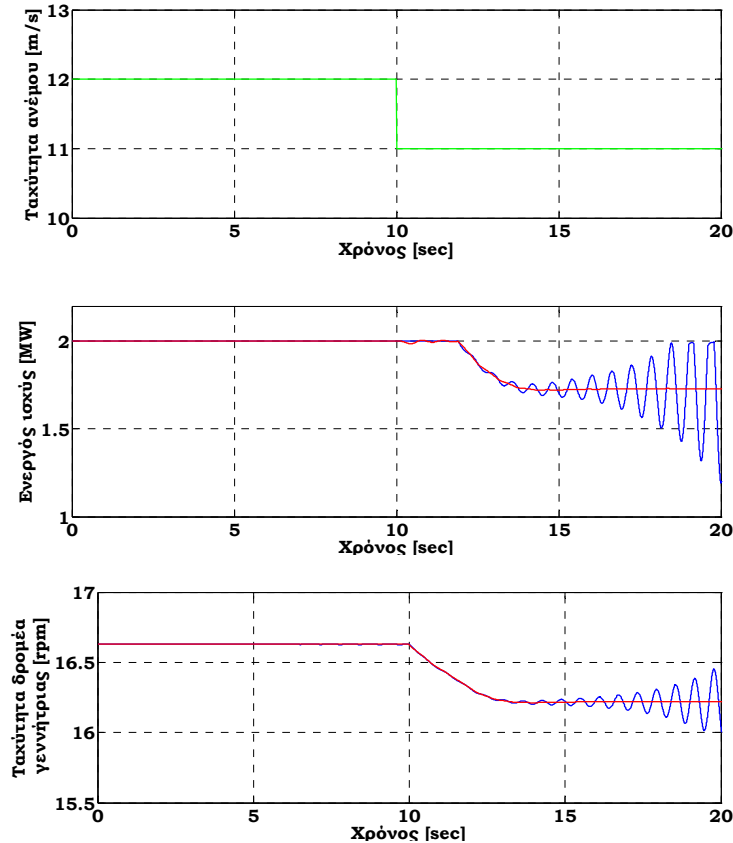
Σχήμα 7.34. Bode διάγραμμα για το ζωνοπερατό φίλτρο



Σχήμα 7.35. Bode διάγραμμα για το χαμηλοπερατό φίλτρο

Σημειώνεται ότι αν και συνήθως απαιτείται σταθερή συνεχής τάση μεταξύ των μετατροπέων για να εξασφαλιστεί η μεταφορά της ενεργού ισχύος από τη γεννήτρια στο δίκτυο, επιτρέπονται οι μικρές διακυμάνσεις όσον αφορά την ηλεκτρική απόσβεση του συστήματος. Παρ' όλα αυτά, στην περίπτωση εκτεταμένων μεταβολών της ταχύτητας περιστροφής, όπως κατά τη διάρκεια σφαλμάτων στο δίκτυο, οι ενδεχόμενες μεγάλες διακυμάνσεις στην τιμή αναφοράς $U_{dc,link}^{ref}$ – όπως αυτές θα προκύψουν από το σύστημα απόσβεσης που θα επιχειρεί να αντισταθμίσει τις ταλαντώσεις στην ταχύτητα περιστροφής – θα πρέπει να περιοριστούν για την αποφυγή υπερτάσεων και την αστάθεια του συστήματος ή τυχόν καταστροφή των ηλεκτρονικών ισχύος. Επομένως τα όρια της συνεχούς τάσης καθορίζονται ως συμβιβασμός ανάμεσα στις πιθανές υπερτάσεις και την απόσβεση των ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων, η οποία δεν πρέπει να αναιρεθεί.

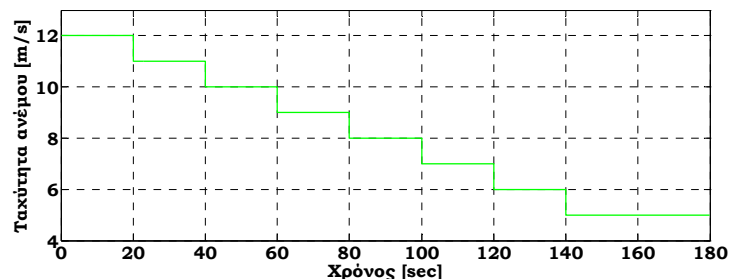
Η συμβολή του συστήματος απόσβεσης στην απόκριση του συστήματος δίνεται μέσω του Σχήματος 7.36, όπου προσομοιώνεται βηματική μείωση της ταχύτητας ανέμου κατά 1 m/s. Οι ταλαντώσεις, που αναπτύσσονται στον άξονα μετάδοσης της κίνησης, εκδηλώνονται ως ταλαντώσεις σημαντικού πλάτους στην ενεργό ισχύ εξόδου και στην ταχύτητα του δρομέα της γεννήτριας. Οι τελευταίες αποσβένονται εμφανώς όταν προστίθεται στο σύστημα της Α/Γ ο μηχανισμός απόσβεσης, όπως αυτός περιγράφηκε παραπάνω.

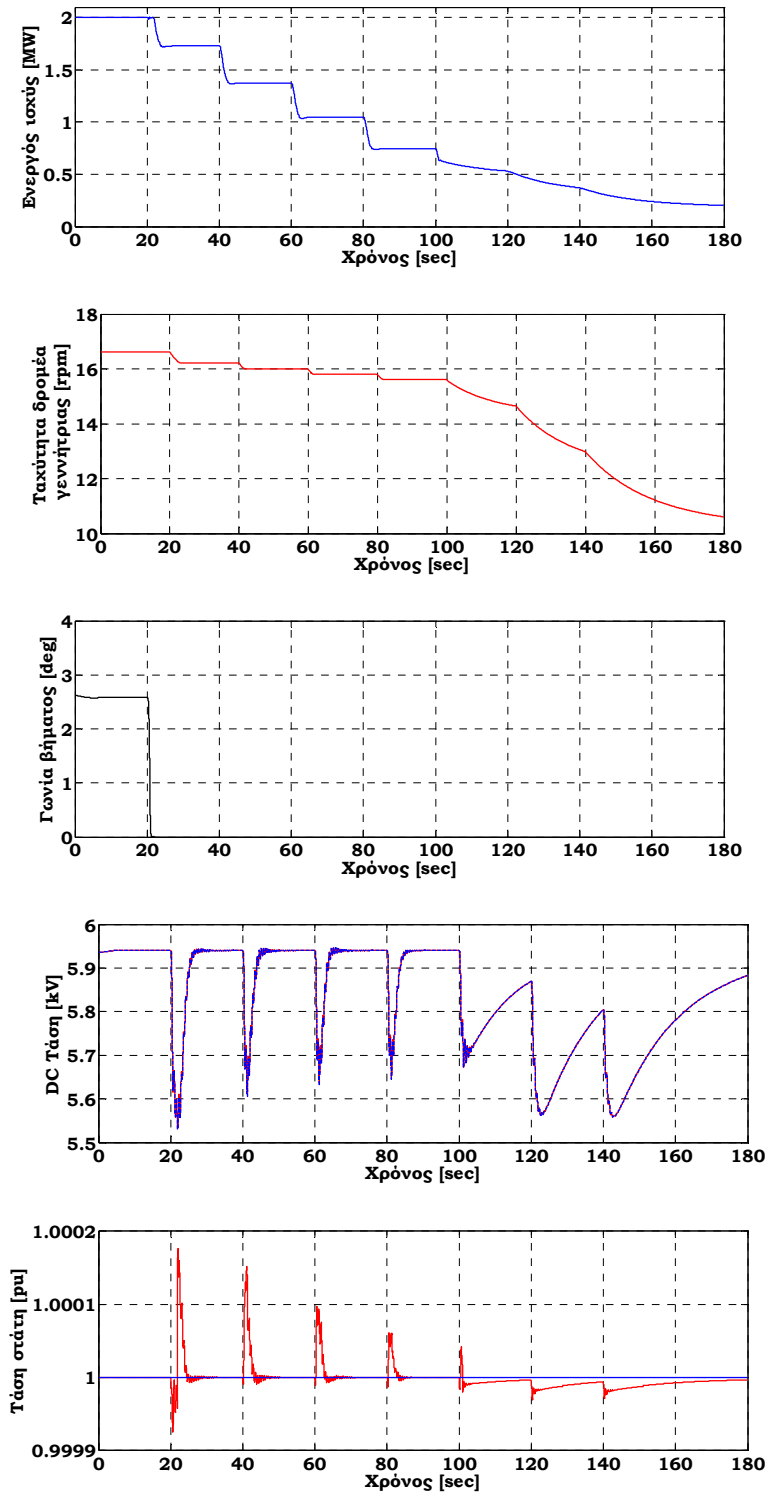


Σχήμα 7.36. Μεταβολή ταχύτητας δρομέα γεννήτριας και ενεργού ισχύος σε βηματική μείωση της ταχύτητας ανέμου κατά 1 m/s για τις περιπτώσεις εφαρμογής συστήματος απόσβεσης (κόκκινη γραμμή) και χωρίς (μπλε γραμμή)

7.10. Λειτουργία συστήματος για νετερμινιστικές και στοχαστικές ταχύτητες ανέμου

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τυπικές μεταβλητές του συστήματος Α/Γ Τύπου Δ2 για νετερμινιστικές και στοχαστικές αλλαγές στην ταχύτητα ανέμου. Στο Σχήμα 7.37 δίνεται η ενεργός ισχύς, η ταχύτητα δρομέα της γεννήτριας, η γωνία βήματος, η συνεχής τάση $U_{dc,link}$ και η τάση στάτη για βηματικές μειώσεις ταχύτητας ανέμου κατά 1 m/s σε ταχύτητες ανέμου μικρότερες της ονομαστικής. Σε αυτό το εύρος ταχυτήτων η γωνία βήματος παραμένει μηδενική ενώ ακολουθείται η στρατηγική Μέγιστης Απολαβής Ισχύος με την ενεργό ισχύ και την ταχύτητα δρομέα να προσαρμόζονται συνεχώς στην ταχύτητα ανέμου (Περιοχές 1,2 λειτουργίας – Σχήμα 7.28). Ειδικότερα στην Περιοχή 2 λειτουργίας, όπου η ενεργός ισχύς μεταβάλλεται γραμμικά ως προς την ταχύτητα περιστροφής του δρομέα της γεννήτριας, ο χρόνος απόκρισης της ταχύτητας και της ισχύος είναι μικρότερος σε σχέση με την Περιοχή 1 λειτουργίας, οπότε και σχέση μεταξύ ισχύος και ταχύτητας περιστροφής είναι της μορφής $P \sim \omega_r^3$.

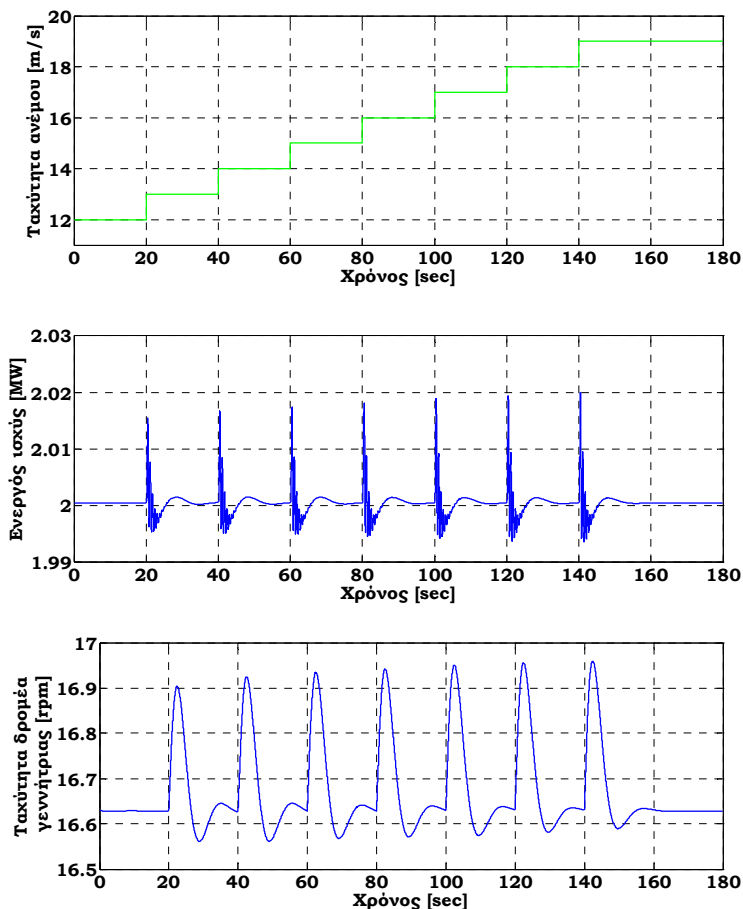


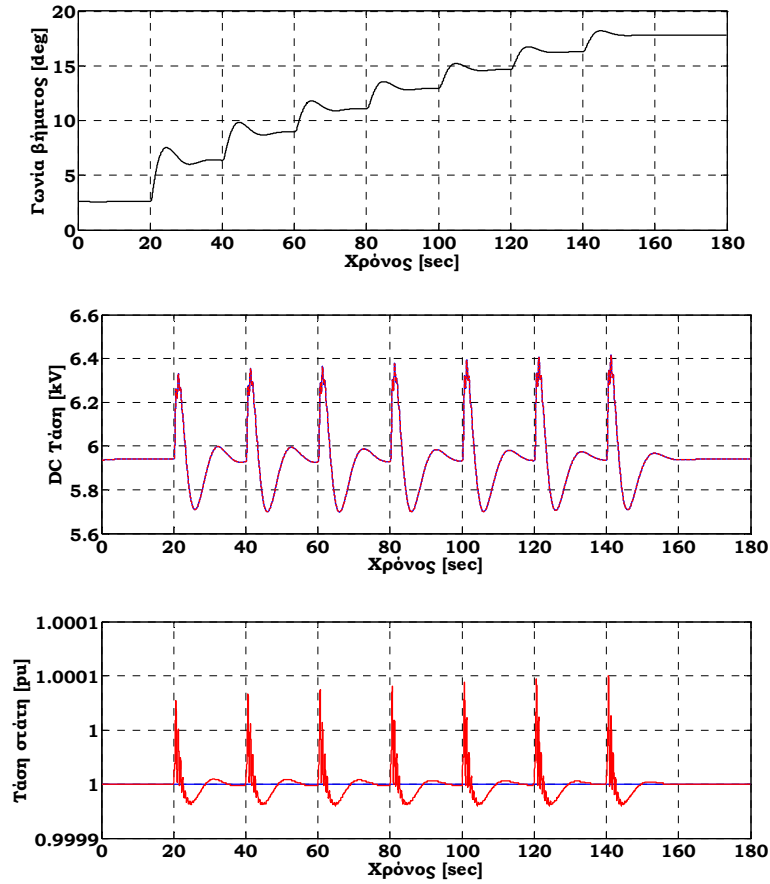


Σχήμα 7.37. Α/Γ Τύπου Δ2: Ταχύτητα ανέμου, ενεργός ισχύς, ταχύτητα δρομέα γεννήτριας, γωνία βήματος περυγίων, τάση DC σύνδεσης (με μπλε καμπύλη η τιμή αναφοράς και με κόκκινη καμπύλη η μετρούμενη τιμή) και τάση στάτη (με μπλε καμπύλη η τιμή αναφοράς και με κόκκινη καμπύλη η μετρούμενη τιμή) για βηματικές μειώσεις στον άνεμο από 12 m/s έως 5 m/s με βήμα 1 m/s

Το σύστημα ελέγχου του μετατροπέα ρυθμίζει την τάση στάτη σχεδόν σταθερή στην ονομαστική της τιμή ενώ η συνεχής τάση $U_{dc,link}$ ακολουθεί την τιμή αναφοράς, όπως αυτή προκύπτει από το σύστημα απόσβεσης ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων.

Το Σχήμα 7.38 δίνει τα αποτελέσματα για βηματικές αυξήσεις στην ταχύτητα ανέμου κατά 1 m/s στο εύρος ταχυτήτων ανέμου μεγαλύτερων από την ονομαστική, που αντιστοιχεί στην Περιοχή 3 λειτουργίας του Σχήματος 7.28. Κατ' αντιστοιχία προς τα αποτελέσματα για την Α/Γ Τύπου Γ, το σύστημα ελέγχου γωνίας βήματος έχει αργή απόκριση συγκρινόμενο με το σύστημα ελέγχου του μετατροπέα και οι απότομες αυξήσεις στην ταχύτητα του ανέμου συνεπάγονται αυξημένη κινητική ενέργεια περιστροφής στις στρεφόμενες μάζες του συστήματος. Η ενεργός ισχύς εξόδου διατηρείται σταθερή και ίση με την ονομαστική, ενώ αποφεύγονται σημαντικές υπερπηδήσεις και ταλαντώσεις στην ταχύτητα περιστροφής και τη γωνία βήματος. Τα μη γραμμικά αεροδυναμικά χαρακτηριστικά αντισταθμίζονται επαρκώς μέσω του συστήματος προκαθορισμένου κέρδους, *gain scheduling*, που έχει ενσωματωθεί στο αεροδυναμικό σύστημα της Α/Γ – γεγονός που αποτυπώνεται με την πανομοιότυπη απόκριση των μεγεθών σε όλο το εύρος ταχυτήτων ανέμου από 12 m/s έως 20 m/s. Η τάση στάτη και η συνεχής τάση $U_{dc,link}$ ακολουθούν τις τιμές αναφοράς τους, όπως υπογραμμίστηκε και στο προηγούμενο σχήμα.



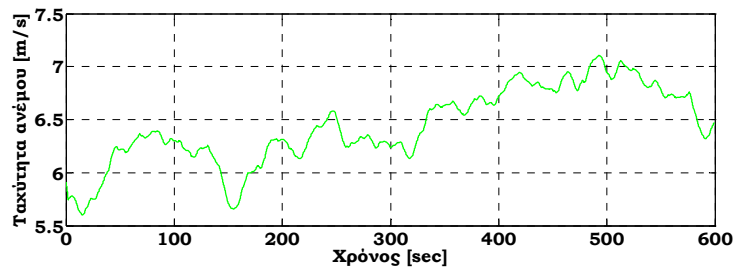


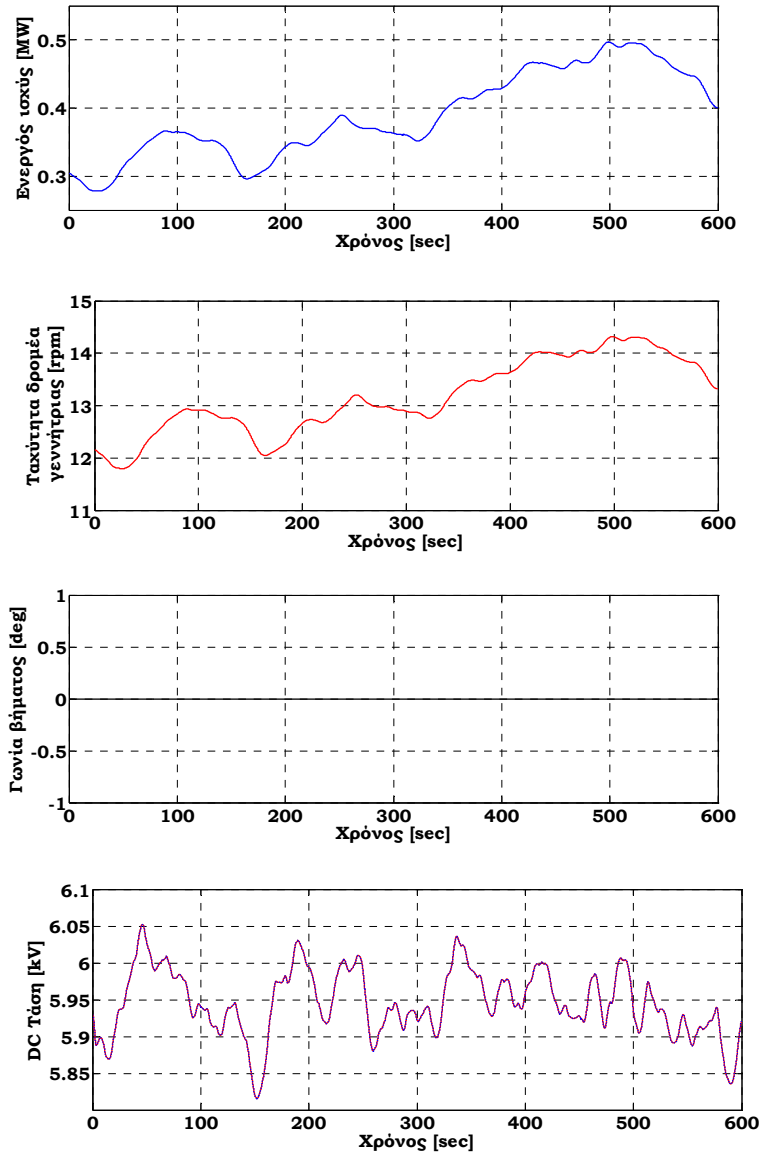
Σχήμα 7.38. Α/Γ Τύπου Δ2: Ταχύτητα ανέμου, ενεργός ισχύς, ταχύτητα δρομέα γεννήτριας, γωνία βήματος περυγίων, τάση DC σύνδεσης (με μπλε καμπύλη η τιμή αναφοράς και με κόκκινη καμπύλη η μετρούμενη τιμή) και τάση στάτη (με μπλε καμπύλη η τιμή αναφοράς και με κόκκινη καμπύλη η μετρούμενη τιμή) για βηματικές αυξήσεις στον άνεμο από 12 m/s έως 19 m/s με βήμα 1 m/s

Λειτουργία συστήματος για στοχαστικές ταχύτητες ανέμου

Η απόκριση του μοντέλου Α/Γ Τύπου Δ2 παρουσιάζεται στα Σχήματα 7.39-7.41 που αντιστοιχούν σε περιοχές χαμηλής (~6.5 m/s), μεσαίας (~10 m/s) και υψηλής ταχύτητας ανέμου (~12 m/s). Στην τελευταία περίπτωση μελετάται και η δυνατότητα εφαρμογής εξωτερικού σήματος αναφοράς για την ενεργό και άεργο ισχύ στα πρότυπα των συμβατικών μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

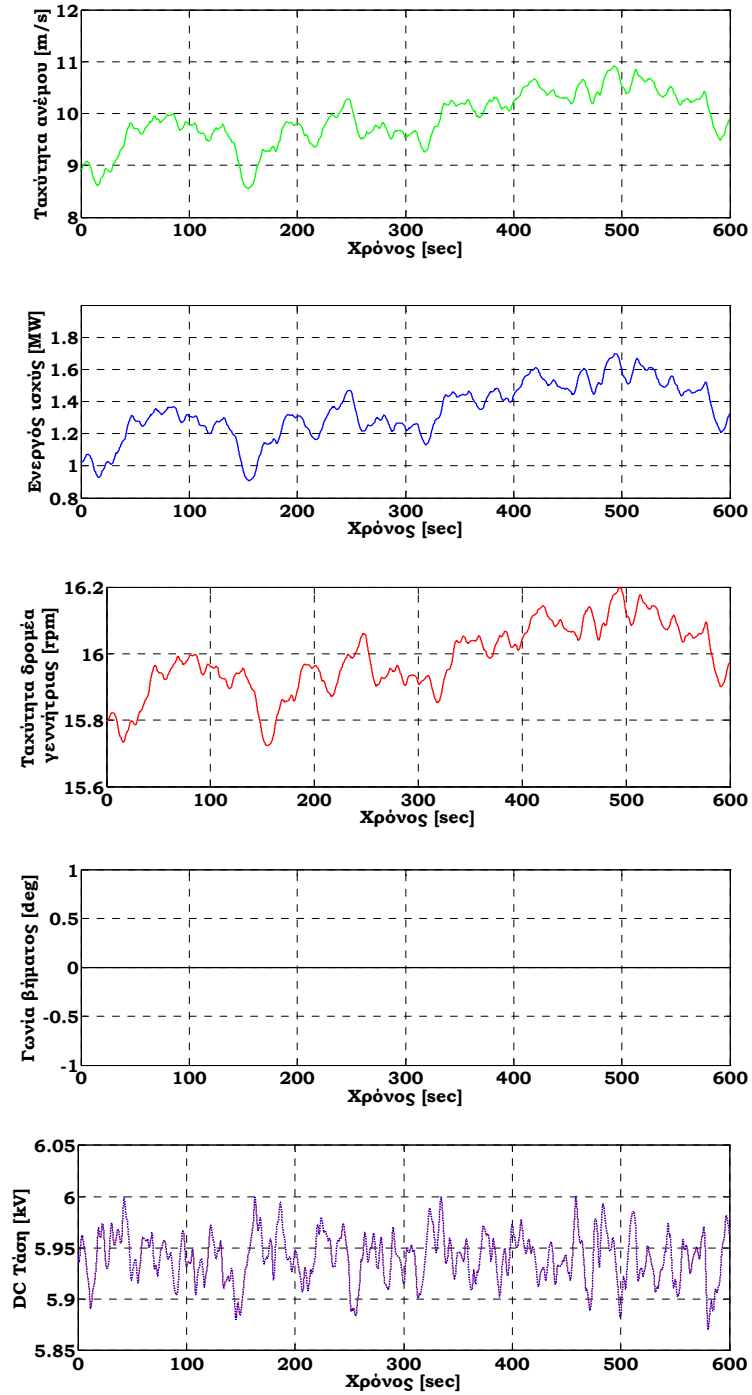
Στις χαμηλές ταχύτητες ανέμου η ενεργός ισχύς και η ταχύτητα περιστροφής ακολουθούν τις αργές μεταβολές της ταχύτητας ανέμου και η γωνία βήματος παραμένει μηδενική.





Σχήμα 7.39. Α/Γ Τύπου Δ2: Ταχύτητα ανέμου, ενεργός ισχύς, ταχύτητα δρομέα γεννήτριας, γωνία βήματος περυγίων, τάση DC σύνδεσης (με μπλε καμπύλη η τιμή αναφοράς και με κόκκινη καμπύλη η μετρούμενη τιμή) για στοχαστική ταχύτητα ανέμου στην περιοχή των 6.5 m/s

Στο εύρος μεσαίων ταχυτήτων ανέμου – Περιοχή 2 λειτουργίας, βλέπε Σχήμα 7.28 – η διακύμανση στην ενεργό ισχύ και την ταχύτητα δρομέα είναι πιο έντονη λόγω της έντονης κλίσης της ράμπας ελέγχου που ακολουθείται στη στρατηγική Μέγιστης Απολαβής Ισχύος. Η γωνία βήματος παραμένει μηδενική, ενώ η συνεχής τάση μεταβάλλεται ακολουθώντας την τιμή αναφοράς του συστήματος απόσβεσης.



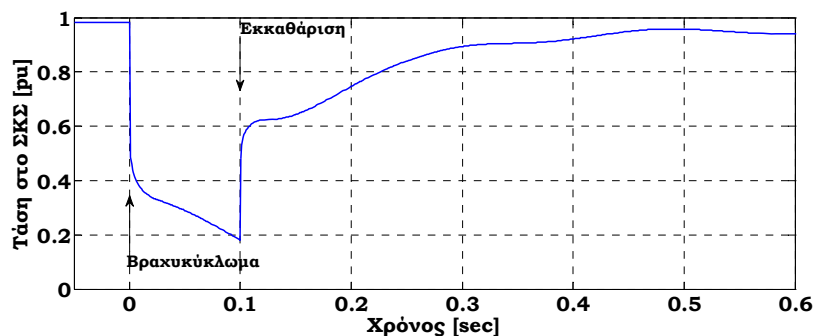
Σχήμα 7.40. Α/Γ Τύπου Δ2: Ταχύτητα ανέμου, ενεργός ισχύς, ταχύτητα δρομέα γεννήτριας, γωνία βήματος περυγίων, τάση DC σύνδεσης (με μπλε καμπύλη η τιμή αναφοράς και με κόκκινη καμπύλη η μετρούμενη τιμή) για στοχαστική ταχύτητα ανέμου στην περιοχή των 10 m/s

7.11. Μελέτη δυνατότητας αδιάλειπτης παροχής ισχύος κατά τη διάρκεια σφαλμάτων στο δίκτυο και υπηρεσίες υποστήριξης δικτύου σε μεταβατικές καταστάσεις – Α/Γ Τύπου Δ2

Αξίζει να σημειωθεί ότι η λειτουργία αδιάλειπτης παροχής ισχύος υλοποιήθηκε και στο μοντέλο Α/Γ Τύπου Δ1 κατά τη διάρκεια της διατριβής και τα αποτελέσματα περιλαμβάνονται στο [MAR09b]. Δεν θα γίνει ανάλυση της υλοποίησης στην παρούσα εργασία για την αποφυγή ανεπιθύμητων επαναλήψεων, καθώς η λογική σχεδίασης είναι παρόμοια με αυτή που περιγράφεται για το μοντέλο Α/Γ Τύπου Δ2.

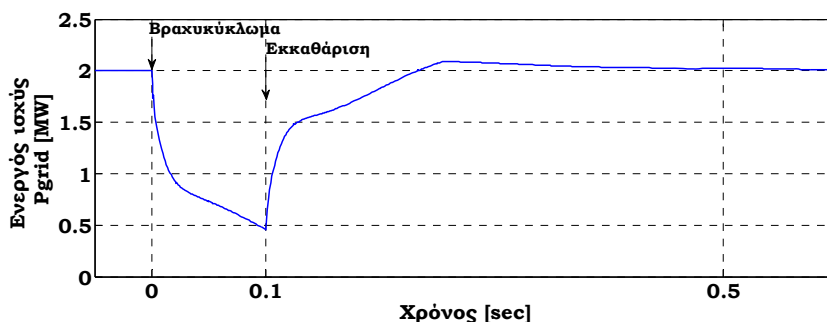
7.11.1. Προσομοιώσεις βραχυκυκλωμάτων

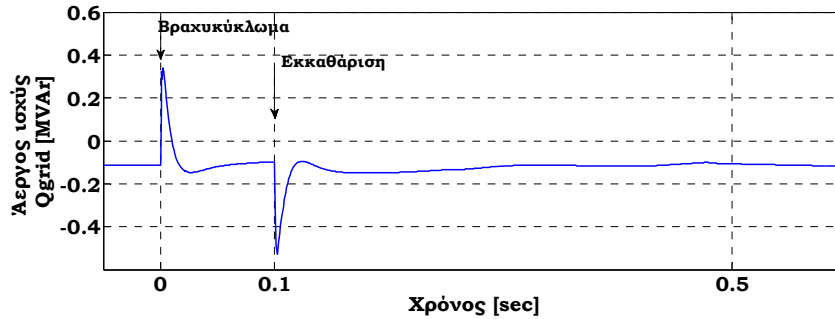
Στις προσομοιώσεις που ακολουθούν η Α/Γ Τύπου Δ2 λειτουργεί σε ονομαστική ισχύ πριν το βραχυκύκλωμα. Η ταχύτητα ανέμου θεωρείται σταθερή κατά τη διάρκεια του σφάλματος και το σφάλμα είναι τριφασικό με χρόνο εκκαθάρισης 100 ms. Το δίκτυο που χρησιμοποιήθηκε είναι το ίδιο με αυτό στις προσομοιώσεις για το μοντέλο Α/Γ Τύπου Γ (βλέπε Παράρτημα). Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για την περίπτωση όπου η Α/Γ δεν είναι εφοδιασμένη με κάποιο σύστημα προστασίας ή επιπρόσθετη στήριξη τάσης κατά τη διάρκεια του βραχυκυκλώματος. Ο έλεγχος ακολουθεί τη λογική κανονικής λειτουργίας του Σχήματος 7.29. Το Σχήμα 7.41 απεικονίζει τη βύθιση τάσης στο ΣΚΣ της Α/Γ Τύπου Δ2 με ονομαστική ισχύ 2 MW.



Σχήμα 7.41. Τάση στο ΣΚΣ για τριφασικό βραχυκύκλωμα στο συνδεδεμένο δίκτυο με χρόνο εκκαθάρισης 100 ms

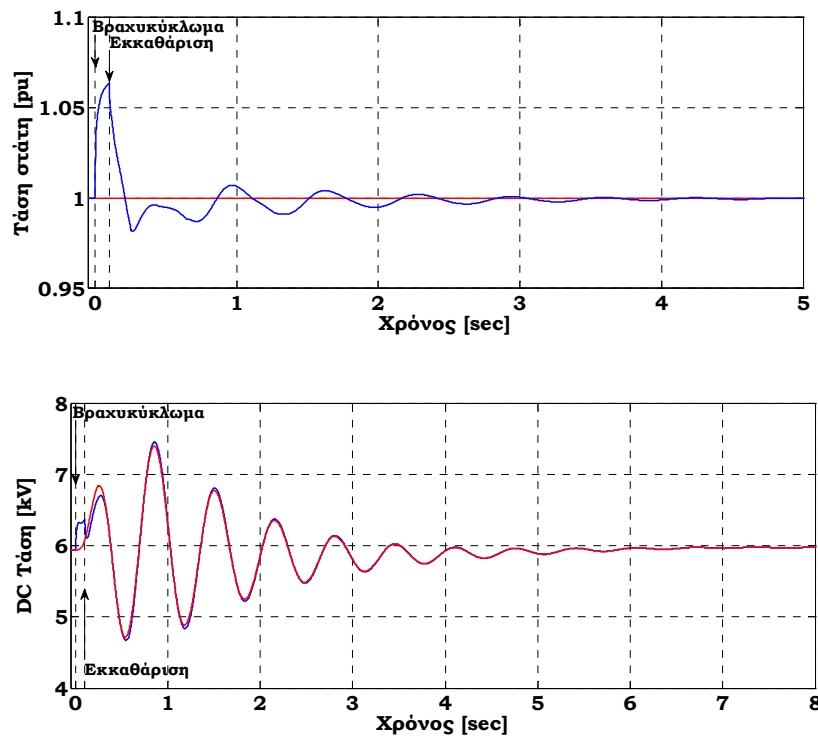
Λόγω μείωσης της τάσης στο ζυγό σύνδεσης της Α/Γ, η ενεργός ισχύς δε μπορεί να ελεχθεί στην τιμή αναφοράς της και η δυνατότητα έγχυσης ενεργού ισχύος στο δίκτυο μειώνεται, βλέπε Σχήμα 7.42. Παράλληλα, ο μετατροπέας στην πλευρά του δικτύου εξακολουθεί να ελέγχει την άεργο ισχύ με βάση τη συνθήκη μοναδιαίου συντελεστή ισχύος, με αποτέλεσμα η άεργος ισχύς που καταναλώνεται να είναι σχεδόν μηδενική καλύπτοντας μόνο τις απώλειες στο Μ/Σ. Οι δύο αιχμές αέργου ισχύος του Σχήματος 7.42 οφείλονται στη μαγνήτιση και απομαγνήτιση του Μ/Σ κατά τη βύθιση και ανάκαμψη της τάσης – κατά την εκκαθάριση του σφάλματος – αντίστοιχα.





Σχήμα 7.42. Α/Γ Τύπου Δ2: Ενεργός ισχύς, άεργος ισχύς για τριφασικό βραχυκύκλωμα στο συνδεδεμένο δίκτυο με χρόνο εκκαθάρισης 100 ms – χωρίς σύστημα προστασίας

Σαν αποτέλεσμα της ανισορροπίας που προκύπτει μεταξύ ενεργού ισχύος εξαγόμενης στο δίκτυο και παραγόμενης από τη σύγχρονη γεννήτρια, η συνεχής τάση στη DC σύνδεση των μετατροπέων υπόκειται σε αύξηση, μέσω της μεταβατικής φόρτισης του πυκνωτή, βλέπε Σχήμα 7.43. Κατά τη διαδικασία αυτή αυξάνεται ο κίνδυνος καταστροφής του πυκνωτή είτε ακόμα και των μετατροπέων. Επομένως προκύπτει η ανάγκη κατάλληλου ελέγχου της ενεργού ισχύος κατά τη διάρκεια τέτοιων μεταβατικών.

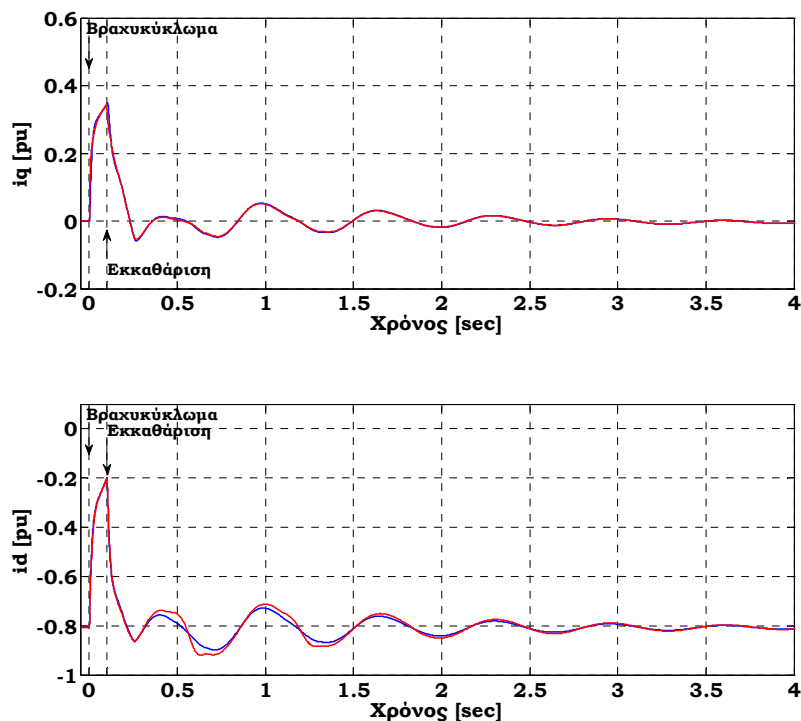


Σχήμα 7.43. Α/Γ Τύπου Δ2: Τάση στάτη U_s και συνεχής τάση U_{dc} (μπλε καμπύλες) και αντίστοιχες τιμές αναφοράς (κόκκινες καμπύλες) για τριφασικό βραχυκύκλωμα στο συνδεδεμένο δίκτυο με χρόνο εκκαθάρισης 100 ms – χωρίς σύστημα προστασίας

Στη διεθνή βιβλιογραφία έχουν προταθεί αρκετοί τρόποι για την αντιμετώπιση της ανισορροπίας ενεργού ισχύος, [ROB07]. Σύμφωνα με μια προσέγγιση, η οποία περιγράφεται αναλυτικότερα παρακάτω, χρησιμοποιείται ένας μετατροπέας συνεχούς τάσης στη συνεχή σύνδεση μεταξύ των μετατροπέων, εξασφαλίζοντας την κατανάλωση της πρόσθετης ενεργού ισχύος σε μια ωμική αντίσταση που συνδέεται παράλληλα στο πυκνωτή. Ο μετατροπέας αυτός ενεργοποιείται όταν η συνεχής τάση υπερβεί ένα καθορισμένο όριο ασφάλειας. Με βάση το σχήμα ελέγχου που ακολουθείται στην Α/Γ Τύπου Δ2, βλέπε Σχήμα 7.29, ο μετατροπέας στην πλευρά της γεννήτριας

ρυθμίζει την συνεχή τάση, ώστε αυτή να παραμένει σταθερή. Λόγω μείωσης της εξαγόμενης ενεργού ισχύος μέσω του μετατροπέα στην πλευρά του δικτύου, ο μετατροπέας στην πλευρά της γεννήτριας μειώνει τη συνιστώσα ενεργού ρεύματος ώστε να ελαττωθεί ροή ενεργού στη συνεχή σύνδεση. Αυτό με τη σειρά του προκαλεί μείωση του ρεύματος στάτη, μεταφέροντας την ανισορροπία ενεργού ισχύος από τη συνεχή τάση στη γεννήτρια. Με την ισχύ της γεννήτριας να ελαττώνεται και την ισχύ που μεταφέρεται μέσω του άξονα από το δρομέα να παραμένει σταθερή, προκύπτει επιτάχυνση της γεννήτριας και συνεπακόλουθα του δρομέα της Α/Γ. Το πλεόνασμα ενεργού ισχύος μετατρέπεται πλέον σε ενέργεια περιστροφής των στρεφόμενων μαζών. Σε περίπτωση που η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα υπερβεί την ονομαστική της τιμή, ο έλεγχος γωνίας βήματος αναλαμβάνει να μειώσει την επιτάχυνση, αυξάνοντας τη γωνία βήματος με στόχο τη μείωση της εισερχόμενης αεροδυναμικής ισχύος. Ο χρόνος απόκρισης βέβαια του συστήματος ελέγχου γωνίας βήματος πτερυγίων είναι αρκετά μεγαλύτερος από το χρονικό πλαίσιο σφαλμάτων όπως τα βραχυκύκλωμα.

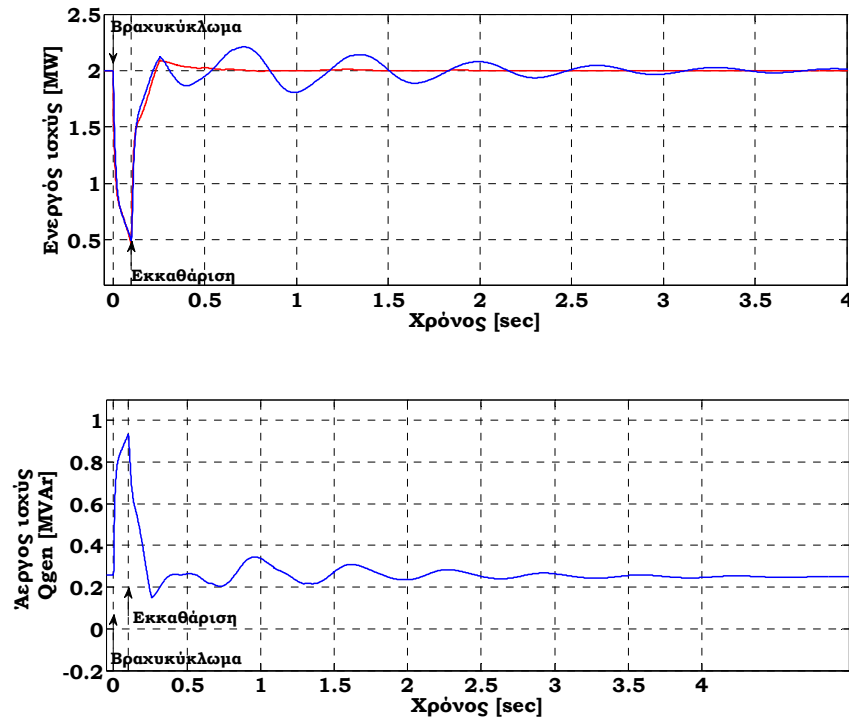
Μετά την εκκαθάριση του σφάλματος, η συνεχής τάση ταλαντώνεται λόγω του ελεγκτή απόσβεσης, που περιγράφεται στην ενότητα 7.9.2. Με βάση το Σχήμα 7.33, οι ταλαντώσεις της ταχύτητας δρομέα της γεννήτριας προκαλούν μια συνιστώσα ταλάντωσης στην τιμή αναφοράς της συνεχούς τάσης, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 7.43, η οποία συνεπάγεται μια συνιστώσα ροπής στη γεννήτρια που αντισταθμίζει τις ταλαντώσεις της ταχύτητας περιστροφής. Παράλληλα, η τάση στάτη ελέγχεται και παραμένει σχεδόν σταθερή. Η μείωση όμως του ενεργού ρεύματος στο μετατροπέα – συνιστώσα d – στην πλευρά της γεννήτριας μειώνει την γωνία δ του διανύσματος της ΗΕΔ της σύγχρονης γεννήτριας – βλέπε Σχήμα 7.12. Για να αντισταθμιστεί αυτή η μεταβολή και να παραμείνει σταθερή η τερματική τάση της σύγχρονης γεννήτριας, ελέγχεται ανάλογα η συνιστώσα q του ρεύματος στάτη, Σχήμα 7.44.



Σχήμα 7.44. Α/Γ Τύπου Δ2: Συνιστώσες q και d ρεύματος στο μετατροπέα στην πλευρά της γεννήτριας (μπλε καμπύλες) και αντίστοιχες τιμές αναφοράς (κόκκινες καμπύλες) για τριφασικό βραχυκύκλωμα στο συνδεδεμένο δίκτυο με χρόνο εκκαθάρισης 100 ms – χωρίς σύστημα προστασίας

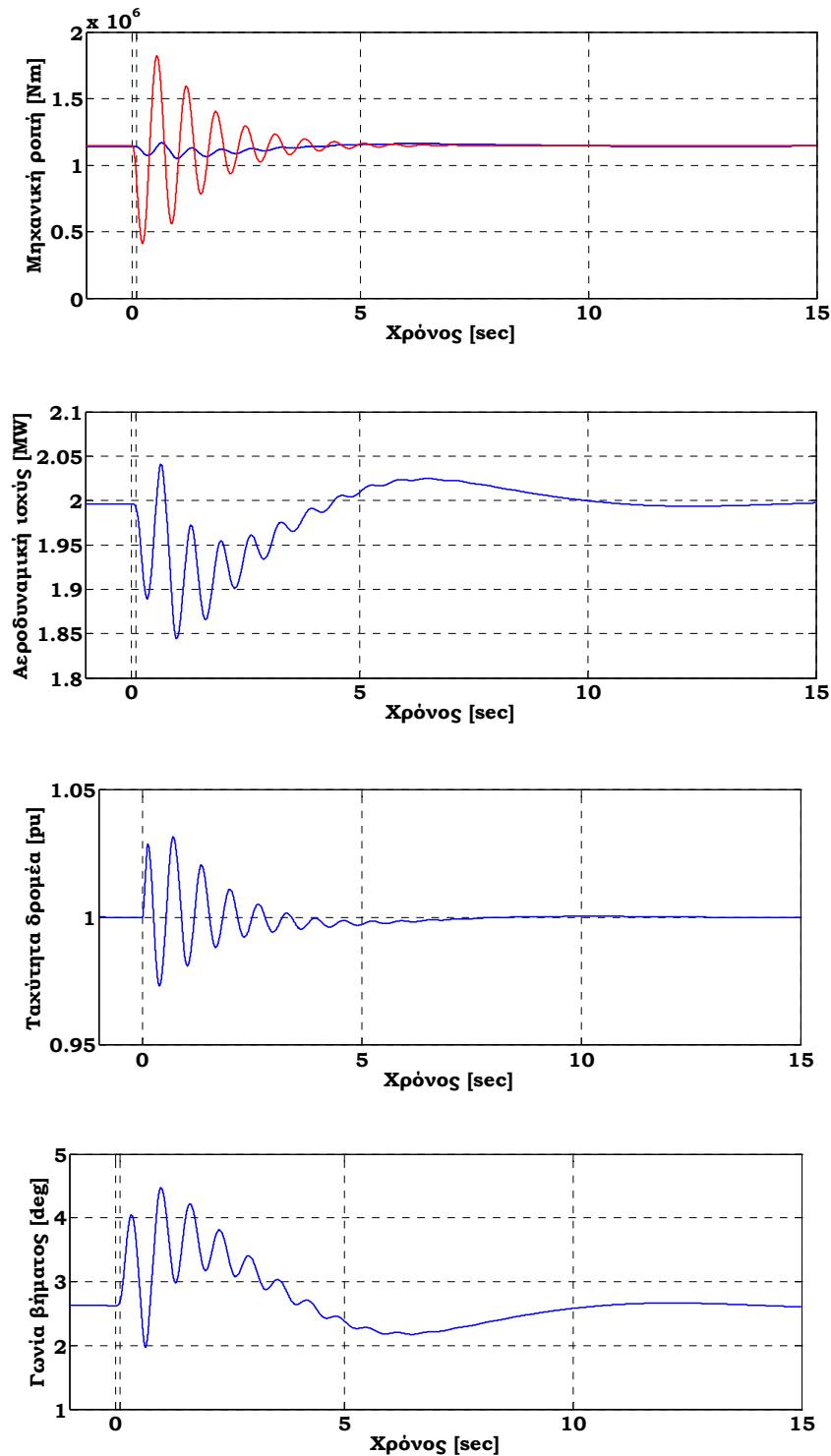
Η αύξηση στη συνιστώσα i_q του ρεύματος στάτη οδηγεί σε αύξηση της τιμής αναφοράς για την άεργο ισχύ που παράγεται από τη γεννήτρια, βλέπε Σχήμα 7.45. Στο ίδιο σχήμα δίνεται και η απόκριση ενεργού ισχύος γεννήτριας και μετατροπέα στην πλευρά του δικτύου. Όσο διαρκεί η βύθιση τάσης, τα

δύο αυτά μεγέθη έχουν ίδια απόκριση, ενώ μετά την εκκαθάριση του σφάλματος η ενεργός ισχύς της γεννήτριας ταλαντώνεται λόγω των ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων που διεγείρονται στο δρομέα.



Σχήμα 7.45. A/G Τύπου Δ2: Ενεργός ισχύς γεννήτριας (μπλε καμπύλη), ενεργός ισχύς μετατροπέα στην πλευρά του δικτύου (κόκκινη καμπύλη) και άεργος ισχύς μετατροπέα στην πλευρά του δικτύου για τριφασικό βραχυκύκλωμα στο συνδεδεμένο δίκτυο με χρόνο εκκαθάρισης 100 ms – χωρίς σύστημα προστασίας

Όπως περιγράφηκε παραπάνω, το μηχανικό σύστημα υπόκειται σε συνθήκες σφάλματος μέσω της ανισορροπίας ενεργού ισχύος που παράγεται από το δρομέα της A/G και της εξαγόμενης ισχύος από τη σύγχρονη γεννήτρια. Οι ταλαντώσεις που διεγείρονται στα σήματα του Σχήματος 7.46 αποσβένονται μέσω του συστήματος απόσβεσης ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων που έχει σχεδιαστεί για το συγκεκριμένο μοντέλο A/G σε περίπου 6 sec. Εν τούτοις ταλαντώσεις μεγάλου πλάτους στην ταχύτητα δρομέα θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε σημαντικές υπερτάσεις στη συνεχή τάση, γι' αυτό και ο έλεγχος απόσβεσης πρέπει να εξασφαλίζει διακυμάνσεις για τη συνεχή τάση εντός αποδεκτών ορίων ασφάλειας. Η μείωση της ενεργού ισχύος που παράγεται από τη γεννήτρια προκαλεί ταλαντώσεις στη ροπή άξονα μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες ταλαντώσεις στην αεροδυναμική ροπή, των οποίων το πλάτος περιορίζεται λόγω μεγάλης τιμής αδράνειας του δρομέα της A/G. Η επιτάχυνση του δρομέα ενεργοποιεί το σύστημα ελέγχου γωνίας βήματος πτερυγίων με στόχο τη μείωση της εξαγόμενης αεροδυναμικής ισχύος. Στο Σχήμα 7.46 η ταχύτητα του δρομέα δεν ξεπερνάει το 3% της ονομαστικής ταχύτητας, αν και υπό συγκεκριμένες συνθήκες το μέγιστο αυτό μπορεί να ξεπεράσει το 20%. Αν και επιταχύνσεις αυτής της τάξης δεν θέτουν ζήτημα καταστρεπτικής καταπόνησης του μηχανικού συστήματος της A/G, αυξάνουν το κίνδυνο υπερτάσεων στη συνεχή τάση, οι οποίες πρέπει να αποφευχθούν.



Σχήμα 7.46. A/G Τύπου Δ2: Ροπή άξονα (κόκκινη καμπύλη) και αεροδυναμική ροπή (μπλε καμπύλη), αεροδυναμική ισχύς, ταχύτητα δρομέα και γωνία βήματος για τριφασικό βραχυκύκλωμα στο συνδεδεμένο δίκτυο με χρόνο εκκαθάρισης 100 ms – χωρίς σύστημα προστασίας

Όπως προκύπτει από τα παραπάνω αποτελέσματα, η A/G Τύπου Δ2, όταν ο έλεγχος ακολουθεί τη δομή του Σχήματος 7.29, είναι σε θέση να παραμείνει σε λειτουργία σε συνθήκες χαμηλής τάσης χωρίς πρόσθετο εξοπλισμό ή έλεγχο. Αντίθετα με τις A/G Τύπου A, B ή Γ, όπου τα ρεύματα βραχυκύκλωσης ενδέχεται να είναι αυξημένα και να ενεργοποιήσουν το σύστημα προστασίας

αποσυνδέοντας την Α/Γ από το δίκτυο, η μεθοδολογία ελέγχου που παρουσιάστηκε παραπάνω για την Α/Γ Τύπου Δ2 εξασφαλίζει την αδιάλειπτη λειτουργία. Μια εναλλακτική μέθοδος ελέγχου που έχει προταθεί για το συγκεκριμένο τύπο Α/Γ [ΑΚΗ03], δίνεται στο Σχήμα 7.30. Στην περίπτωση αυτή, σε συνθήκες χαμηλής τάσης καθώς τα περιθώρια ρύθμισης από το μετατροπέα στην πλευρά του δικτύου είναι περιορισμένα, λόγω χαμηλής τάσης, η συνεχής τάση δε μπορεί να διατηρηθεί σε ασφαλή όρια ειδικά από τη στιγμή που η προτεραιότητα δίνεται στον έλεγχο της αέργου ισχύος από τον ίδιο μετατροπέα, [ΑΚΗ03]. Στο εν τω μεταξύ, ο μετατροπέας στην πλευρά της γεννήτριας εξακολουθεί να τροφοδοτεί με ενεργό ισχύ τη συνεχή σύνδεση με αποτέλεσμα να απαιτείται επιπρόσθετος έλεγχος και συντονισμός μεταξύ των δύο μετατροπέων για την προστασία των μετατροπέων κατά τη διάρκεια βυθίσεων τάσης.

Αν και η Α/Γ Τύπου Δ2 μπορεί να παραμείνει σε λειτουργία κατά τη διάρκεια βύθισης τάσης, υπηρεσίες προς το δίκτυο, όπως παροχή αέργου ισχύος για τη στήριξη τάσης, απαιτούν επιπλέον μέτρα, τα οποία περιγράφονται στην ενότητα που ακολουθεί.

7.11.2. Σύστημα αδιάλειπτης παροχής ισχύος κατά τη διάρκεια σφαλμάτων

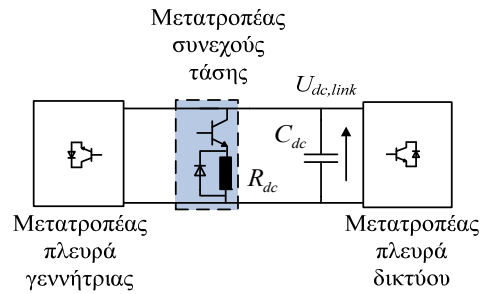
Όπως περιγράφεται στο Κεφάλαιο 3, όπου αναλύονται τα βασικά χαρακτηριστικά των κωδίκων δικτύων, οι απαιτήσεις περιλαμβάνουν και θέματα παροχής αέργου ισχύος από τα αιολικά πάρκα με στόχο τη στήριξη τάσης. Για το σκοπό αυτό, σε περίπτωση που απαιτείται μέγιστη συμβολή αέργου ρεύματος (συνιστώσα i_q) από το μετατροπέα στην πλευρά του δικτύου, το ενεργό ρεύμα μηδενίζεται, οπότε η ανισορροπία ενεργού ισχύος μεταξύ ισχύος παραγόμενης από το δρομέα της Α/Γ και της μηδενικής ενεργού ισχύος που διοχετεύεται από το μετατροπέα στην πλευρά του δικτύου καθίσταται μέγιστη. Αυτό συνεπάγεται μέγιστη επιτάχυνση δρομέα καθώς και μέγιστες ηλεκτρομηχανικές ταλαντώσεις. Τα επιπλέον μέτρα που απαιτούνται για την ασφαλή λειτουργία της Α/Γ είναι:

- Περιορισμός συνεχούς τάσης

Όπως περιγράφηκε παραπάνω, το σύστημα απόσβεσης των ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων προσθέτει στο σήμα αναφοράς συνεχούς τάσης ταλαντώσεις μικρού πλάτους με βάση τις ταλαντώσεις που διεγείρονται στην ταχύτητα περιστροφής του δρομέα της γεννήτριας. Για την αποφυγή επικίνδυνων υπερτάσεων ή υποτάσεων, οι οποίες μπορεί να προκαλέσουν φαινόμενα αστάθειας ακόμη και καταστροφής των μετατροπέων, επιβάλλεται ο περιορισμός της συνεχούς τάσης σε ένα καθορισμένο εύρος γύρω από την ονομαστική τιμή, χωρίς αυτό να μειώνει την απόδοση του συστήματος απόσβεσης των ταλαντώσεων. Στο Σχήμα 7.48, όπου προσομοιώνεται βραχυκύκλωμα με χρόνο εκκαθάρισης 300 ms, δίνεται η απόκριση της συνεχούς τάσης για την περίπτωση που ο περιορισμός της τιμής αναφοράς της συνεχούς τάσης στο εύρος 5-7 kV γύρω από την ονομαστική τιμή των 6 kV είναι εμφανής (κόκκινη καμπύλη).

- Χρήση μετατροπέα συνεχούς τάσης

Η χρήση ενός μετατροπέα συνεχούς τάσης (*chopper*) καθιστά δυνατή την αποφυγή επιταχύνσεων και έντονων ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων στο δρομέα της γεννήτριας που ενδέχεται να είναι καταστροφικές. Ειδικότερα σε συνθήκες που η παροχή αέργου ισχύος από το μετατροπέα στην πλευρά του δικτύου τίθεται ως προτεραιότητα, λόγω τεχνικών απαιτήσεων δικτύου, η χρήση πρόσθετου μετατροπέα συνεχούς τάσης καθίσταται απολύτως απαραίτητη για την αποφυγή επικίνδυνων ταλαντώσεων τόσο στην ταχύτητα περιστροφής όσο και στη συνεχή τάση. Η σύνδεση του μετατροπέα απεικονίζεται στο Σχήμα 7.47.

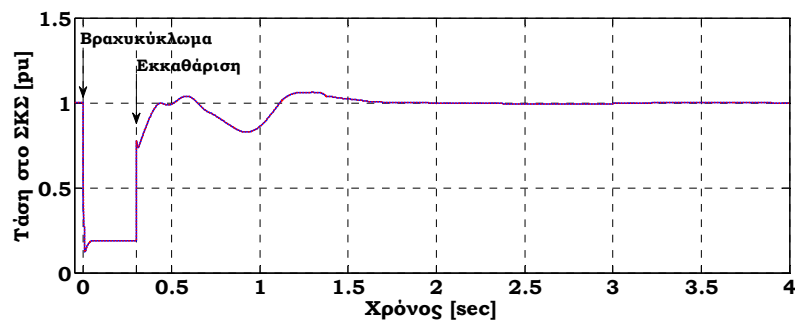


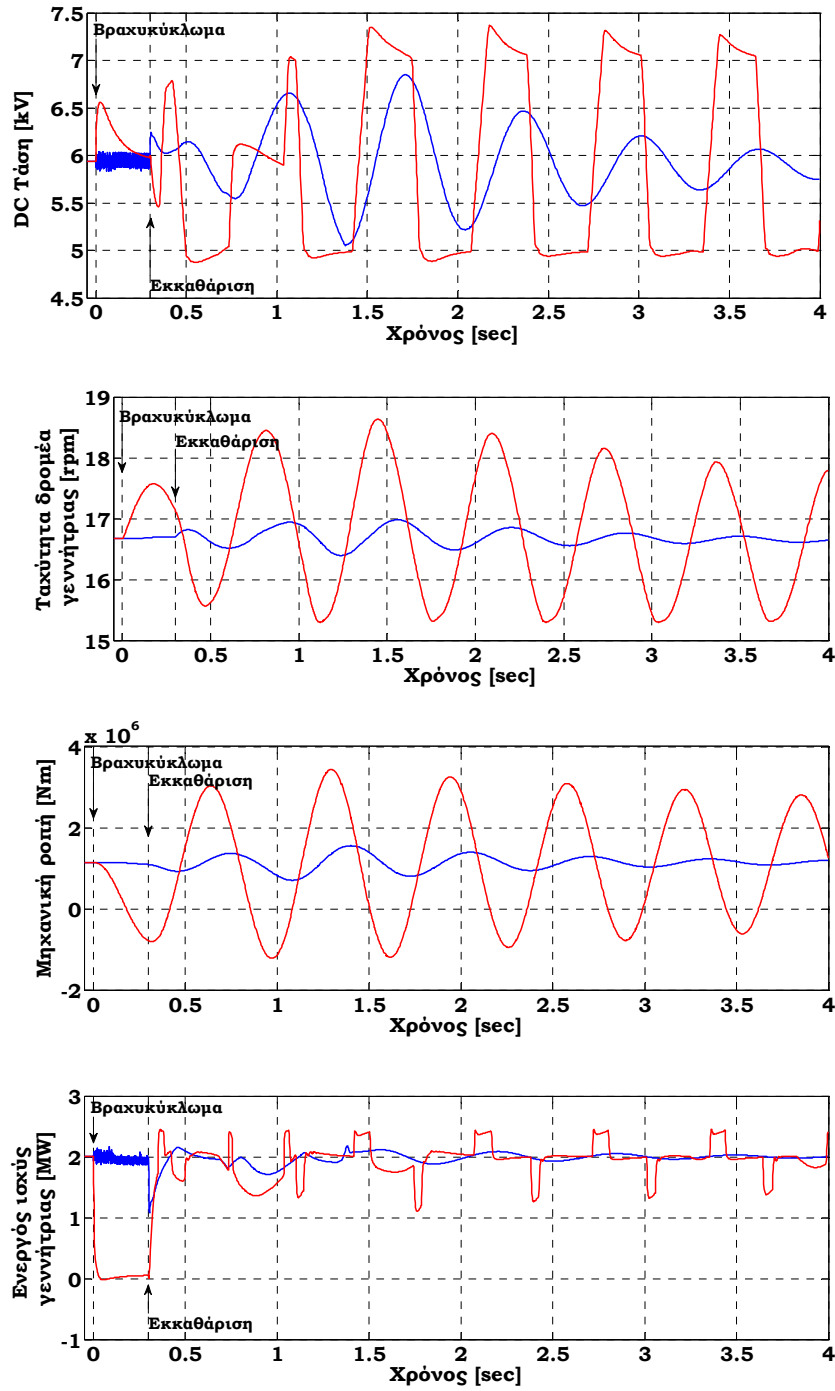
Σχήμα 7.47. Μετατροπέας συνεχούς τάση για βελτιωμένη απόκριση σε συνθήκες χαμηλής τάσης

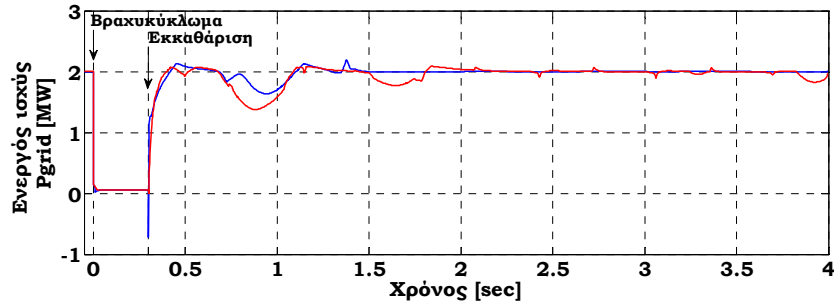
Πρόκειται ουσιαστικά για μια ωμική αντίσταση η οποία συνδέεται παράλληλη προς τον πυκνωτή της συνεχούς σύνδεσης μέσω ενός ηλεκτρονικού ημιαγωγικού διακόπτη, π.χ. IGBT, με διακοπτική συχνότητα στην περιοχή των 500 Hz, [AKH05a]. Επισημαίνεται, σε αντίθεση με την A/Γ Τύπου Δ1, όπου η χρήση μετατροπέα ανύψωσης τάσης (boost-up converter) ενσωματώνεται στο πλαίσιο κανονικής λειτουργίας της A/Γ, ότι στόχος στην προκειμένη περίπτωση είναι η περαιτέρω ενίσχυση της δυνατότητας για αδιάλειπτη παροχή ισχύος και υπηρεσίες στήριξης δικτύου.

Σε συνθήκες χαμηλής τάσης δικτύου η συνεχής τάση αυξάνεται μέσω της φόρτισης του πυκνωτή και προκύπτει πλεονάσμα ενεργού ισχύος, όπως περιγράφηκε παραπάνω. Όταν η συνεχής τάση υπερβεί ένα όριο ασφάλειας ο διακόπτης του μετατροπέα ενεργοποιείται και η πλεονάζουσα ισχύς καταναλώνεται στην ωμική αντίσταση, εκφορτίζοντας τον πυκνωτή. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται με τη διακοπτική συχνότητα. Με τον τρόπο αυτό αποφεύγονται επικίνδυνες υπερτάσεις στη συνεχή τάση αλλά και αυξημένες ταλαντώσεις στην ταχύτητα περιστροφής του δρομέα.

Στο Σχήμα 7.48 συγκρίνεται η απόκριση βασικών μεγεθών της A/Γ όταν ο μετατροπέας συνεχούς τάσης περιλαμβάνεται ή όχι στον έλεγχο του συστήματος. Η τάση δικτύου είναι πανομοιότυπη στις δύο περιπτώσεις, καθώς η λειτουργία του μετατροπέα συνεχούς τάσης δεν επηρεάζει τη λειτουργία του μετατροπέα στην πλευρά του δικτύου. Χωρίς το μετατροπέα, αν και η συνεχής τάση παραμένει εντός του καθορισμένου εύρους που θεωρείται ασφαλές, η ανισορροπία ενεργού ισχύος προκαλεί έντονες ταλαντώσεις στο δρομέα, ενώ η ισχύς που παράγεται από τη γεννήτρια μειώνεται κατά τη διάρκεια της βύθισης της τάσης δικτύου. Αντίθετα, όταν ενεργοποιείται ο μετατροπέας συνεχούς τάσης και η ωμική αντίσταση συνδέεται παράλληλα στον πυκνωτή, η γεννήτρια εξακολουθεί να παράγει ενεργό ισχύ, με αποτέλεσμα οι ταλαντώσεις στο δρομέα αλλά και οι συνεπαγόμενες ταλαντώσεις στη συνεχή τάση – μέσω της λειτουργίας του συστήματος απόσβεσης – να μειώνονται σημαντικά. Η απόκριση της μηχανική ροπής στο ίδιο σχήμα ενδεικνύει τη μειωμένη καταπόνηση του μηχανικού συστήματος (στο δρομέα A/Γ και τον άξονα μετάδοσης κίνησης) όταν προστίθεται ο μετατροπέας συνεχούς τάσης.

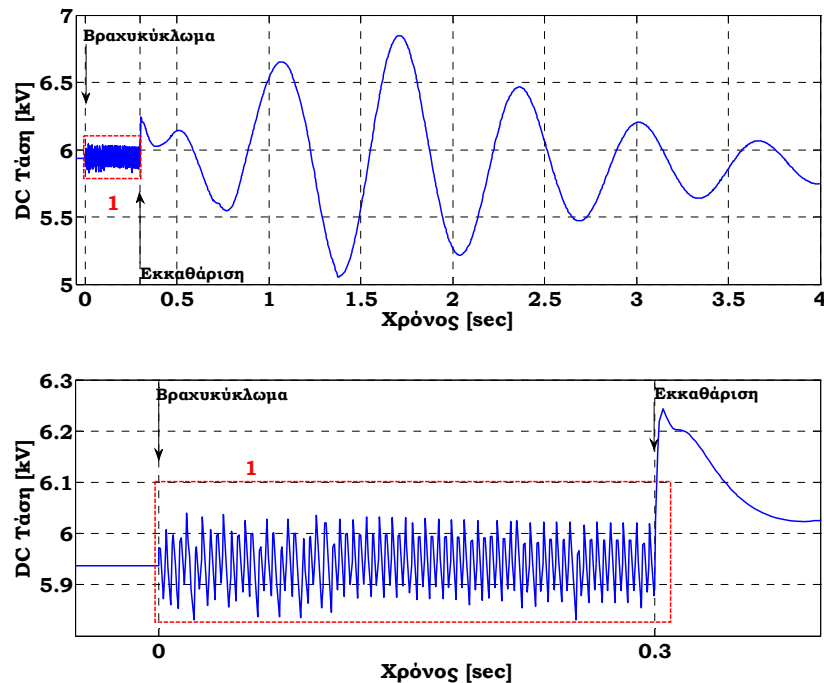






Σχήμα 7.48. Α/Γ Τύπου Δ2: Τάση στο ΣΚΣ, συνεχής τάση U_{dc} , ταχύτητα δρομέα γεννήτριας, μηχανική ροπή, ενεργός ισχύς γεννήτριας και ενεργός ισχύς αποδιδόμενη στο δίκτυο για τριφασικό βραχυκύκλωμα στο συνδεδεμένο δίκτυο με χρόνο εκκαθάρισης 300 ms με και χωρίς σύστημα μετατροπέα συνεχούς τάσης (μπλε και κόκκινη γραμμή αντίστοιχα)

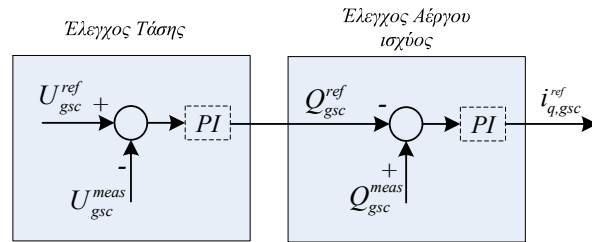
Το Σχήμα 7.49 απεικονίζει την απόκριση της συνεχούς τάσης κατά τα πρώτα ms μετά τη βύθιση τάσης. Όταν η τάση υπερβεί το καθορισμένο μέγιστο όριο ασφάλειας, ο μετατροπέας συνεχούς τάσης ενεργοποιείται με αποτέλεσμα ο πυκνωτής να φορτίζεται και να εκφορτίζεται με τη διακοπτική συχνότητα του μετατροπέα, εμφανής στην απόκριση της συνεχούς τάσης. Όταν το σφάλμα εκκαθαρίζεται στα 300 ms, ο μετατροπέας απενεργοποιείται, και όταν οι ταλαντώσεις δρομέα αποσβεθούν, η συνεχής τάση παίρνει πάλι την τιμή προ σφάλματος. Η απόσβεση των ταλαντώσεων της τάσης σε σύγκριση με την περίπτωση που δε χρησιμοποιείται ο μετατροπέας συνεχούς τάσης είναι προφανής – Σχήμα 7.48.



Σχήμα 7.49. Α/Γ Τύπου Δ2: συνεχής τάση U_{dc} για τριφασικό βραχυκύκλωμα στο συνδεδεμένο δίκτυο με χρόνο εκκαθάρισης 300 ms – μεγένθυση στα πρώτα ms μετά την εκδήλωση του σφάλματος

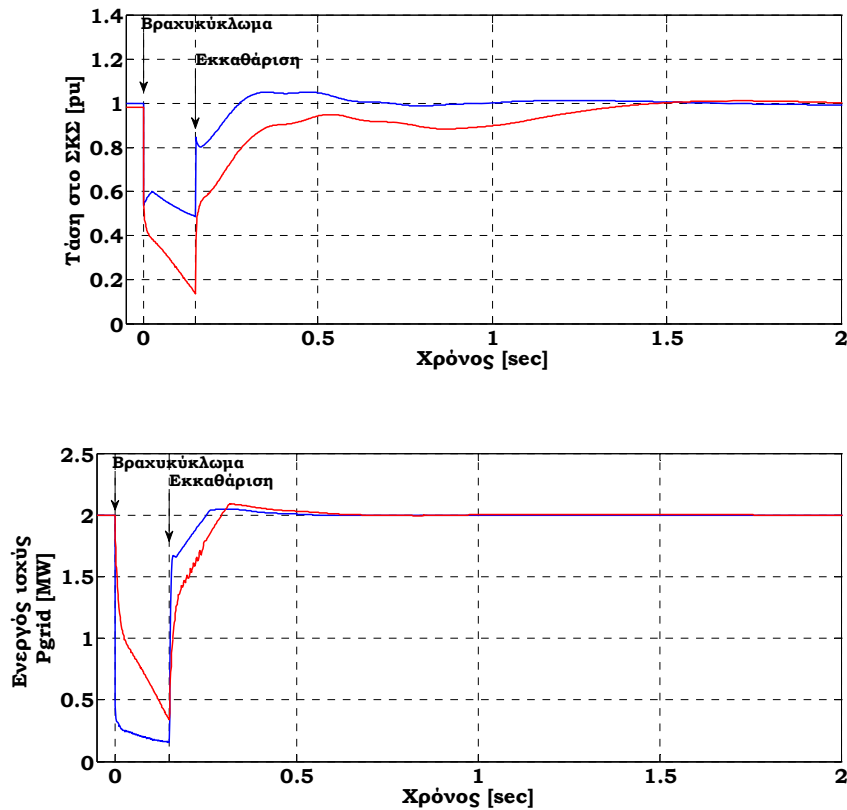
7.11.3. Έλεγχος τάσης και παροχή αέργου ισχύος σε συνθήκες χαμηλής τάσης

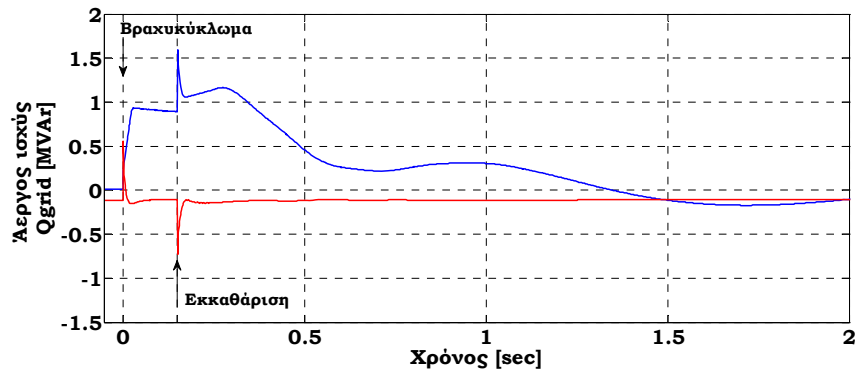
Η παροχή αέργου ισχύος είναι δυνατή ανεξάρτητα από το σημείο λειτουργίας της γεννήτριας στην διαμόρφωση Α/Γ Τύπου Δ2 χάρη στην παρουσία του πλήρους μετατροπέα. Η διαστασιολόγηση του τελευταίου γίνεται λαμβάνοντας υπ' όψιν τις απαιτήσεις σε άεργο ισχύ, οπότε στην προκειμένη περίπτωση που η ονομαστική ισχύς της Α/Γ είναι 2 MW, ο μετατροπέας έχει μοντελοποιηθεί με ονομαστική ισχύ τα 2.5 MVA.



Σχήμα 7.50. Βρόχος ελέγχου τάσης δικτύου στο μετατροπέα στην πλευρά του δικτύου

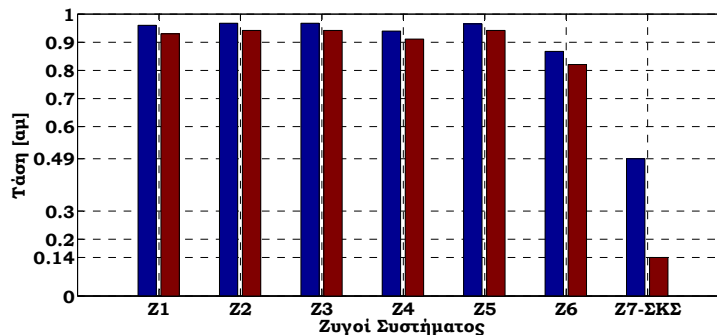
Ο ελεγκτής τάσης υλοποιείται στο σύστημα ελέγχου του μετατροπέα στην πλευρά του δικτύου και παρέχει το σήμα αναφοράς για την άεργο ισχύ στον εσωτερικό βρόχο ελέγχου αέργου ισχύος, ο οποίος με τη σειρά του καθορίζει την τιμή αναφοράς για την άεργο συνιστώσα του ρεύματος του μετατροπέα, βλέπε Σχήμα 7.50. Ο βρόχος είναι ενεργός τόσο σε συνθήκες κανονικής λειτουργίας, οπότε η τάση ρυθμίζεται ώστε να έχει την τιμή αναφοράς όσο και σε συνθήκες σφάλματος, οπότε σύμφωνα με τη φιλοσοφία των σύγχρονων κωδίκων δικτύου, απαιτείται η προμήθεια αέργου ισχύος προς το δίκτυο με στόχο τη στήριξη τάσης. Στο Σχήμα 7.51 δίνονται τα αποτελέσματα από βραχυκύκλωμα με χρόνο εκκαθάρισης 150 ms. Όταν ο έλεγχος τάσης είναι διαθέσιμος, το επίπεδο τάσης τόσο κατά τη διάρκεια όσο και μετά την εκκαθάριση του σφάλματος είναι εμφανώς βελτιωμένο. Με στόχο τη μεγιστοποίηση της παραγωγής αέργου ισχύος, η ενεργός ισχύς ελέγχεται ώστε να είναι σχεδόν μηδενική κατά τη διάρκεια του σφάλματος. Λόγω χαμηλής τάσης, ο μετατροπέας στην πλευρά του δικτύου δε μπορεί να παράγει ονομαστική άεργο ισχύ. Εν τούτοις, η παροχή αέργου ισχύος εξασφαλίζει βελτίωση της τάσης κατά τη διάρκεια του σφάλματος από 0.08 αμ (στην περίπτωση που δε παρέχεται έλεγχος τάσης) σε 0.46 αμ, δηλ. μια αύξηση ίση με 35%.





Σχήμα 7.51. Α/Γ Τύπου Δ2: Τάση στο ΣΚΣ, ενεργός και άεργος ισχύς αποδιδόμενη στο δίκτυο για τριφασικό βραχυκύκλωμα στο συνδεδεμένο δίκτυο με χρόνο εκκαθάρισης 100 ms με και χωρίς έλεγχο τάσης (μπλε και κόκκινη γραμμή αντίστοιχα)

Η επίδραση που έχει η παροχή αέργου ισχύος στις τάσεις των ζυγών ΜΤ και ΥΤ δίνεται στο Σχήμα 7.52. Το χαμηλότερο επίπεδο τάσης κατά τη διάρκεια του σφάλματος βελτιώνεται κατά 3% περίπου. Υπενθυμίζεται ότι στο ΣΚΣ του Α/Π συνδέεται επίσης το Α/Π με Α/Γ Τύπου Α, το οποίο κατά τη διάρκεια της βύθισης καταναλώνει άεργο ισχύ, καθιστώντας τις συνθήκες στήριξης τάσης ιδιαίτερα κρίσιμες (βλέπε Παράρτημα).



Σχήμα 7.52. Ελάχιστες τιμές τάσης ζυγών ΜΤ και ΥΤ κατά το βραχυκύκλωμα με και χωρίς έλεγχο τάσης στο Α/Π με Α/Γ Τύπου Δ2 (μπλε και κόκκινη στήλη αντίστοιχα)

7.11. Συμπεράσματα

Στο Κεφάλαιο 7 περιγράφεται η μοντελοποίηση και ανάλυση δύο βασικών παραλλαγών Α/Γ Τύπου Δ. Στην πρώτη περίπτωση (Τύπος Δ1), χρησιμοποιείται μια σύγχρονη γεννήτρια ηλεκτρικής διέγερσης με ανορθωτή διόδων στην πλευρά της γεννήτριας, μετατροπέα ανύψωσης τάσης στη DC σύνδεση των μετατροπέων και πλήρως ελεγχόμενο μετατροπέα στην πλευρά του δικτύου. Στην δεύτερη περίπτωση (Τύπος Δ2), μια πολυπολική σύγχρονη γεννήτρια μονίμων μαγνητών συνδέεται στο δίκτυο μέσω πλήρως ελεγχόμενου μετατροπέα.

Αρχικά δίνονται οι εξισώσεις Park για το μοντέλο 4^{ης} τάξης σύγχρονης γεννήτριας ηλεκτρικής διέγερσης και ακολουθεί ανάλυση μόνιμης κατάστασης της σύγχρονης γεννήτριας, όπου συμπεριλαμβάνεται η επίδραση της τάσης στάτη στις χαρακτηριστικές ενεργού-αέργου ισχύος και ηλεκτρομαγνητικής ροπής. Κατ' αντιστοιχία περιγράφεται και το μοντέλο που αναπτύχθηκε για την πολυπολική σύγχρονη γεννήτρια μονίμων μαγνητών.

Το σύστημα ελέγχου που αναπτύχθηκε στην περίπτωση Α/Γ Τύπου Δ1 υλοποιείται με τρεις διαφορετικούς τρόπους. Με βάση την ανάλυση μόνιμης κατάστασης που προηγείται, προτείνονται και συγκρίνονται μεταξύ τους οι διαφορετικές μέθοδοι ελέγχου. Σύμφωνα με το πρώτο σχήμα ελέγχου, ο έλεγχος ενεργού ισχύος γίνεται μέσω του μετατροπέα DC-DC που παρεμβάλλεται

ανάμεσα στον ανορθωτή και το μετατροπέα στην πλευρά του δικτύου, υλοποιώντας τη στρατηγική Μέγιστης Απολαβής Ισχύος. Ο μετατροπέας στην πλευρά του δικτύου αναλαμβάνει τη ρύθμιση της DC τάσης και τον έλεγχο τάσης-αέργου ισχύος με μέτρηση της τάσης στο ΣΚΣ του Α/Π. Σε συνθήκες κανονικής λειτουργίας ο μετατροπέας λειτουργεί με μοναδιαίο ΣΙ. Η τερματική τάση της σύγχρονης γεννήτριας ελέγχεται από το σύστημα διέγερσης μέσω του Ρυθμιστή Τάσης Γεννήτριας. Στο δεύτερο σχήμα ελέγχου, ο DC-DC μετατροπέας ελέγχει την τερματική τάση της σύγχρονης γεννήτριας, ενώ η στρατηγική Μέγιστης Απολαβής Ισχύος υλοποιείται με κατάλληλο έλεγχο του συστήματος διέγερσης της γεννήτριας. Ο μετατροπέας λειτουργεί όπως στο πρώτο σχήμα ελέγχου. Στο τρίτο σχήμα ελέγχου, η στρατηγική Μέγιστης Απολαβής Ισχύος υλοποιείται στο μετατροπέα στην πλευρά του δικτύου, ο οποίος ελέγχει και την τάση στο ΣΚΣ του Α/Π καθορίζοντας την άεργο ισχύ που παρέχει. Η DC τάση ρυθμίζεται στην περίπτωση αυτή από το μετατροπέα DC-DC ενώ ο Ρυθμιστής Τάσης της Γεννήτριας εξασφαλίζει ονομαστική τάση στα τερματικά της σύγχρονης γεννήτριας, όμοια με το πρώτο σχήμα ελέγχου. Οι παραλλαγές αυτές στο σύστημα ελέγχου της Α/Γ συγκρίνονται μέσω προσομοιώσεων σε ντετερμινιστικές και στοχαστικές σειρές ανέμου.

Το αντίστοιχο μοντέλο Α/Γ *Τύπου Δ2* που αναπτύχθηκε κατά τη διάρκεια της διατριβής περιλαμβάνει έλεγχο των μετατροπέων παρόμοιο με αυτόν που περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 6 για την Α/Γ *Τύπου Γ*. Ο μετατροπέας στην πλευρά της γεννήτριας ελέγχει τη DC τάση καθώς και την τερματική τάση της σύγχρονης γεννήτριας, ενώ ο μετατροπέας στην πλευρά εξασφαλίζει τον έλεγχο της ενεργού και αέργου ισχύος. Σημειώνεται ότι στα μοντέλα που αναπτύχθηκαν, τόσο για τον *Τύπο Δ1* όσο και για τον *Τύπο Δ2*, η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα της γεννήτριας ελέγχεται μέσω του συστήματος ελέγχου γωνίας βήματος πτερυγίων, όπως αυτό περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 5.

Όπως αναφέρθηκε και στην ενότητα 5.4, η Α/Γ *Τύπου Δ2* στερείται εγγενούς απόσβεσης ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων, γεγονός που δημιουργεί την ανάγκη για σχεδίαση ενός συστήματος απόσβεσης που να εξασφαλίζει την ασφαλή λειτουργία της Α/Γ σε περίπτωση διέγερσης τέτοιων ταλαντώσεων κατά τη διάρκεια μεταβατικών φαινομένων. Το σύστημα που αναπτύχθηκε, περιλαμβάνοντας κατάλληλα φίλτρα και αντιστάθμιση γωνίας, προστίθεται στο βρόχο ελέγχου της DC τάσης, εισάγοντας ταλαντώσεις μικρού πλάτους στο σήμα αναφοράς. Τα όρια επίσης για τις διακυμάνσεις στην τάση, που μπορούν να θεωρηθούν ασφαλή, καθορίζονται με συμβιβασμό ανάμεσα στην αποφυγή επικίνδυνων υπερτάσεων στη DC πλευρά και την εξασφάλιση επαρκούς απόσβεσης των ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων.

Στη συνέχεια του κεφαλαίου γίνεται συστηματική μελέτη της συμπεριφοράς της Α/Γ *Τύπου Δ2* κατά τη διάρκεια σφαλμάτων στο δίκτυο που προκαλούν βύθιση τάσης. Τα σχετικά αποτελέσματα έδειξαν ότι ο συγκεκριμένος τρόπος ελέγχου, που εφαρμόστηκε στο μοντέλο, εξασφαλίζει τη δυνατότητα αδιάλειπτης παροχής ισχύος χωρίς κάποια πρόσθετα μέτρα. Οι δυνατότητες ελέγχου του μετατροπέα στην πλευρά της γεννήτριας δεν περιορίζονται κατά τη διάρκεια της βύθισης τάσης, γεγονός που επιτρέπει τη ρύθμιση της DC τάσης σε επιτρεπτά επίπεδα παρά την ανισορροπία στο ισοζύγιο ενεργού ισχύος που παράγεται από το δρομέα της Α/Γ και την ενεργό που παρέχεται στο δίκτυο σε συνθήκες μειωμένου επιπέδου τάσης δικτύου.

Εν τούτοις, σε περίπτωση που απαιτείται ενισχυμένη παροχή αέργου ισχύος, ενδέχεται η ανισορροπία ενεργού ισχύος να οδηγήσει σε επικίνδυνη επιτάχυνση του δρομέα της Α/Γ και αυξημένες ηλεκτρομηχανικές ταλαντώσεις. Για το λόγο αυτό προτείνονται δυο επιπλέον μέτρα, ο περιορισμός της DC τάσης καθώς και η χρήση μετατροπέα συνεχούς τάσης, που εξασφαλίζουν την αδιάλειπτη παροχή ισχύος σε κρίσιμες συνθήκες μεταβατικών φαινομένων. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων αποδεικνύουν τη θετική συνεισφορά των πρόσθετων μέτρων στην απόκριση των ηλεκτρικών μεγεθών του συστήματος της Α/Γ καθώς και τον περιορισμό των ταλαντώσεων που διεγείρονται στο μηχανικό σύστημα της Α/Γ. Τέλος αναπτύχθηκε κατάλληλος έλεγχος της αέργου ισχύος στο μετατροπέα στην πλευρά του δικτύου, ο οποίος εξασφαλίζει τη στήριξη της τάσης δικτύου, τόσο σε συνθήκες κανονικής λειτουργίας όσο και σε συνθήκες που απαιτείται από το διαχειριστή του δικτύου αυξημένη παροχή αέργου ισχύος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 – Συμβολή Α/Γ στη ρύθμιση συχνότητας

Η ρύθμιση της συχνότητας στα ΣΗΕ αποσκοπεί στη διαρκή εξίσωση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας των γεννητριών του συστήματος με τη ζήτηση των φορτίων. Κάθε μεταβολή του φορτίου αντιμετωπίζεται αρχικά με αντίστοιχη μεταβολή στην κινητική ενέργεια των στρεφόμενων γεννητριών (και στροβίλων στην περίπτωση θερμικών μονάδων). Στο παρόν Κεφάλαιο θα μελετηθεί η δυνατότητα συμβολής των Α/Γ μεταβλητών στροφών, *Τύπου Γ* και *Δ*, στην πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας ακολουθώντας τις γενικές απαιτήσεις των κωδικών δικτύου, βλέπε Κεφάλαιο 3 παρούσας διατριβής. Οι τάσεις στη σύγχρονη αιολική τεχνολογία ενδεικνύουν την απομάκρυνση από την κλασσική λειτουργία Μέγιστης Απολαβής Ισχύος για τις Α/Γ και τη κατεύθυνση προς πλήρως ελεγχόμενη αιολική παραγωγή με βάση σήματα αναφοράς από το διαχειριστή του συστήματος τόσο για την ενεργό όσο και για την άεργο ισχύ.

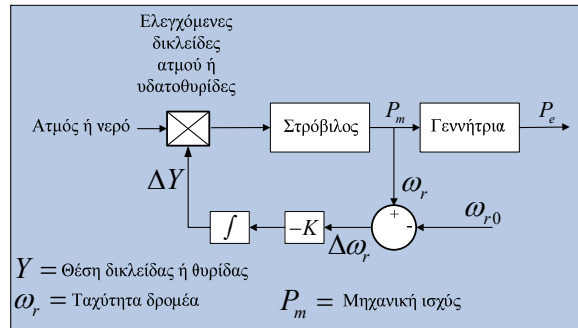
Η συμβολή Α/Γ στη ρύθμιση συχνότητας αποτελεί κεντρική παράμετρο των μελετών που σχετίζονται με τη διερεύνηση των επιτρεπόμενων ορίων διείσδυσης της αιολικής ενέργειας στα μη διασυνδεδεμένα ΣΗΕ. Οι περιορισμοί διείσδυσης μονάδων ΑΠΕ σε μη διασυνδεδεμένα ΣΗΕ διακρίνονται σε *στατικούς* και *δυναμικούς*. Οι στατικοί αναφέρονται σε συνθήκες κανονικής (μόνιμης-συνεχούς) κατάστασης λειτουργίας ενώ οι δυναμικοί σε έκτακτη κατάσταση λειτουργίας και για την περίπτωση του ελληνικού συστήματος και των ελληνικών μη διασυνδεδεμένων νησιών (ΜΔΝ) περιγράφονται στον Κώδικα Μη Διασυνδεδεμένων Νησιών της ΔΕΗ, [[ΔΕΗ10](#)].

Στην πρώτη περίπτωση, η φόρτιση των συμβατικών μονάδων (ελεγχόμενης παραγωγής) καθορίζεται με στόχο τη μεγιστοποίηση της διείσδυσης των ΑΠΕ εξασφαλίζοντας ταυτόχρονα την απρόσκοπτη λειτουργία του ηλεκτρικού συστήματος. Οι στατικοί περιορισμοί αφορούν στη λειτουργία κάθε μονάδος εντός της περιοχής φόρτισης που ορίζεται από την ελάχιστη και την μέγιστη φόρτιση (ισχύς και χρόνος), σύμφωνα με τα δηλούμενα χαρακτηριστικά της μονάδας. Ως ελάχιστη φόρτιση ορίζεται η ελάχιστη ισχύς λειτουργίας που είτε επιβάλλεται από τον κατασκευαστή (τεχνικό ελάχιστο), είτε έχει καθοριστεί ως η ελάχιστη ισχύς για οικονομικούς λόγους. Σημαντική παράμετρο αποτελεί το μέγεθος της στρεφόμενης εφεδρείας που τηρείται. Όταν δεν υπάρχουν μη ελεγχόμενες μονάδες παραγωγής τηρείται συνήθως μια εφεδρεία ισχύος τουλάχιστον ίση με το 10-15% της ζήτησης ισχύος, ή σε σχετικά μεγαλύτερα συστήματα, μπορεί να διατηρείται στρεφόμενη εφεδρεία ισχύος ίση με τη φόρτιση της μεγαλύτερης εν λειτουργία μονάδας, ώστε να εξασφαλίζεται η συνέχεια της τροφοδότησης σε περίπτωση απώλειας οποιασδήποτε μονάδας λόγω βλάβης. Σε ΣΗΕ μεσαίου-μεγάλου μεγέθους, όπως η Κρήτη και η Ρόδος, η μεγαλύτερη μονάδα είναι σχετικά μεγάλης ισχύος και επομένως, ιδιαίτερα στα χαμηλά φορτία, η διατήρησης τόσο μεγάλης στρεφόμενης εφεδρείας κρίνεται πολλές φορές αντιοικονομική. Σε αρκετές περιπτώσεις γίνεται αποδεκτό ότι σε περίπτωση απώλειας της μεγαλύτερης μονάδας θα ενεργοποιηθεί το σύστημα αποκοπών με τους ηλεκτρονόμους υποσυχνότητας και έτσι διατηρείται μικρότερη εφεδρεία. Σύμφωνα με τα κριτήρια αυτά καθορίζεται και το πλήθος των μονάδων ταχείας ανάληψης φορτίου (αερ/λοι ή υδρ/κές μονάδες) που απαιτούνται για την παροχή της στρεφόμενης εφεδρείας. Εφόσον επομένως ο ρυθμός ανάληψης φορτίου από τις μονάδες ταχείας ανάληψης δεν επαρκεί, η στρεφόμενη εφεδρεία εξασφαλίζεται με περισσότερες μονάδες.

Όσον αφορά στους δυναμικούς περιορισμούς διείσδυσης, μελετάται κατ' αρχάς η λειτουργία του συστήματος σε απότομες μεταβολές της παραγωγής ισχύος από τις μη ελεγχόμενες μονάδες, λόγω αντίστοιχης μεταβολής της πρωτογενούς ισχύος (π.χ. της ταχύτητας του ανέμου) ή και γενικότερα λόγω της μεταβολής της παραγόμενης ισχύος. Στην ίδια κατηγορία μεταβατικών φαινομένων εμπίπτουν και τα βραχυκυκλώματα επί του δικτύου ή απομονώσεις μονάδων παραγωγής λόγω βλαβών. Οι προκαλούμενες διαταραχές της συχνότητας και κυρίως της τάσης έχουν συχνά επίπτωση και στην ομαλή λειτουργία των μη ελεγχόμενων μονάδων παραγωγής. Η αξιολόγηση των περιπτώσεων αυτών γίνεται σε συνδυασμό με την συχνότητα εμφάνισής τους και την έκταση των επιπτώσεων που έχουν. Το πρόγραμμα λειτουργίας του συστήματος καταρτίζεται από το Διαχειριστή των ΜΔΝ ανά ώρα καθορίζοντας και το όριο διείσδυσης των μονάδων ΑΠΕ (κυρίως αιολικά στην ελληνική περίπτωση).

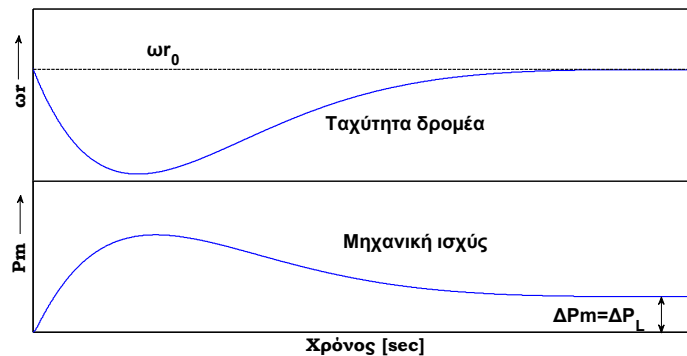
8.1. Ρύθμιση στροφών σε συμβατικές μονάδες

Η πιο απλή περίπτωση εφαρμογής της ρύθμισης στροφών αντιστοιχεί στη λειτουργία μιας απομονωμένης γεννήτριας που τροφοδοτεί ένα τοπικό φορτίο. Η αρχή λειτουργίας του ισόγχρονου ρυθμιστή παρουσιάζεται στο Σχήμα 8.1.



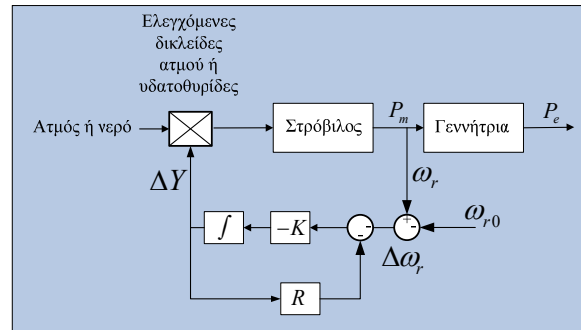
Σχήμα 8.1. Σχηματικό διάγραμμα ισόγχρονου ρυθμιστή, [KUN94]

Το Σχήμα 8.2 απεικονίζει την απόκριση μιας γεννήτριας με ισόγχρονο ρυθμιστή στροφών για αύξηση στο φορτίο. Η αύξηση της ηλεκτρικής ισχύος P_e προκαλεί μείωση στη συχνότητα του συστήματος με ρυθμό που καθορίζεται από την αδράνεια του δρομέα. Λόγω μείωσης της ταχύτητας του δρομέα, η μηχανική ισχύς αυξάνεται και σαν συνέπεια ο ρυθμός μείωσης της ταχύτητας του δρομέα μειώνεται έως το σημείο που η ισχύς του στροβίλου είναι μεγαλύτερη από την ισχύ του φορτίου. Η ταχύτητα του δρομέα επιστρέφει τελικά στην αρχική της τιμή (τιμή αναφοράς) και η τιμή μόνιμης κατάστασης της μηχανικής ισχύος αυξάνεται κατά ποσότητα ίση με την αύξηση του φορτίου. Η απλή αυτή περίπτωση ρύθμισης στροφών δε μπορεί να εφαρμοστεί σε ΣΗΕ όπου δύο ή η περισσότερες γεννήτριες συμμετέχουν στη ρύθμιση φορτίου-συχνότητας.



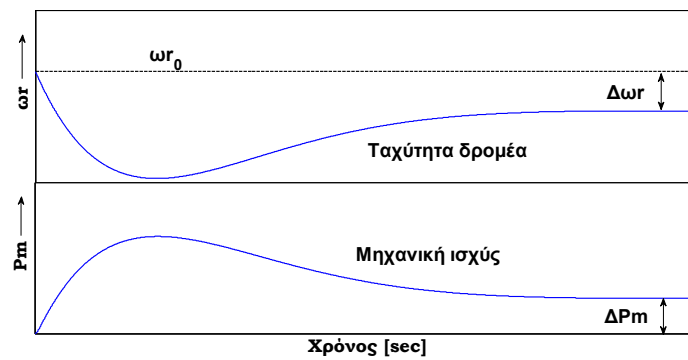
Σχήμα 8.2. Απόκριση γεννήτριας με ισόγχρονο ρυθμιστή στροφών, [KUN94]

Για την ευσταθή διανομή του φορτίου μεταξύ δύο ή περισσότερων γεννητριών, οι ρυθμιστές στροφών διαθέτουν χαρακτηριστική ρύθμισης φορτίου-συχνότητας, η οποία μπορεί να προστεθεί μέσω βρόχου ανάδρασης μόνιμης κατάστασης στον ολοκληρωτή, βλέπε Σχήμα 8.3. Ο ρυθμιστής αυτός χαρακτηρίζεται ως αναλογικός ελεγκτής με κέρδος $1/R$, όπου R η κλίση της ευθύγραμμης χαρακτηριστικής φορτίου-συχνότητας, γνωστή ως στατισμός της μονάδας (ή του ρυθμιστή στροφών).



Σχήμα 8.3. Ρυθμιστής στροφών με χαρακτηριστική φορτίου-συχνότητας, [KUN94]

Η απόκριση μιας γεννήτριας με ρυθμιστή στροφών με χαρακτηριστική φορτίου-συχνότητας για αύξηση στο φορτίο απεικονίζεται στο Σχήμα 8.4. Λόγω του στατισμού, η αύξηση στην ισχύ εξόδου συνοδεύεται από μόνιμο σφάλμα συχνότητας.

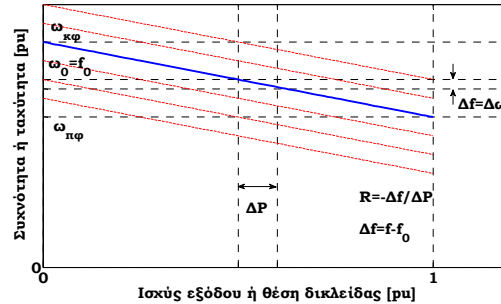


Σχήμα 8.4. Απόκριση γεννήτριας με ρυθμιστή στροφών με χαρακτηριστική φορτίου-συχνότητας

Η τιμή του στατισμού R καθορίζει την τιμή μόνιμης κατάστασης της ταχύτητας ως προς τη χαρακτηριστική φορτίου της γεννήτριας, βλέπε Σχήμα 8.5. Ο λόγος της μεταβολής της ταχύτητας $\Delta\omega_r$ (ή μεταβολής της συχνότητας Δf) προς τη μεταβολή της θέσης της δικλείδας ατμού ή υδατοθυρίδας ΔY (ή της ισχύος εξόδου ΔP) είναι ίσος με το στατισμό - βλέπε εξίσωση (8.1). Ο στατισμός εκφράζεται σε α.μ. τιμές, πχ. στατισμός $R=0.05 pu$ αντιστοιχεί σε μεταβολή συχνότητας στη μόνιμη κατάσταση κατά 5% μετά από μεταβολή φορτίου ίση με την ονομαστική ισχύ της γεννήτριας. Οι μονάδες με μικρό στατισμό μεταβάλλουν περισσότερο το φορτίο τους, και για το λόγο αυτό αναφέρονται ως *ρυθμιζουσες μονάδες*, ενώ μονάδες με μεγαλύτερο στατισμό δεν αναλαμβάνουν τις μεταβολές του φορτίου σε αντίστοιχο βαθμό και χαρακτηρίζονται ως *μονάδες βάσης*. Για τον τρόπο με τον οποίο μονάδες, που λειτουργούν παράλληλα και εξυπηρετούν κοινό φορτίο, διαμοιράζονται τις μεταβολές του φορτίου βλέπε [ΠΑΠ91].

$$R = -\frac{\Delta\omega_r}{\Delta Y} = -\frac{\Delta f}{\Delta P} \quad (8.1)$$

Μια τυπική χαρακτηριστική φορτίου-συχνότητας γεννήτριας δίνεται στο Σχήμα 8.5. Η χαρακτηριστική (μπλε καμπύλη) αντιστοιχεί στη μόνιμη κατάσταση μετά την πρωτεύουσα ρύθμιση και πριν τη δευτερεύουσα ρύθμιση.



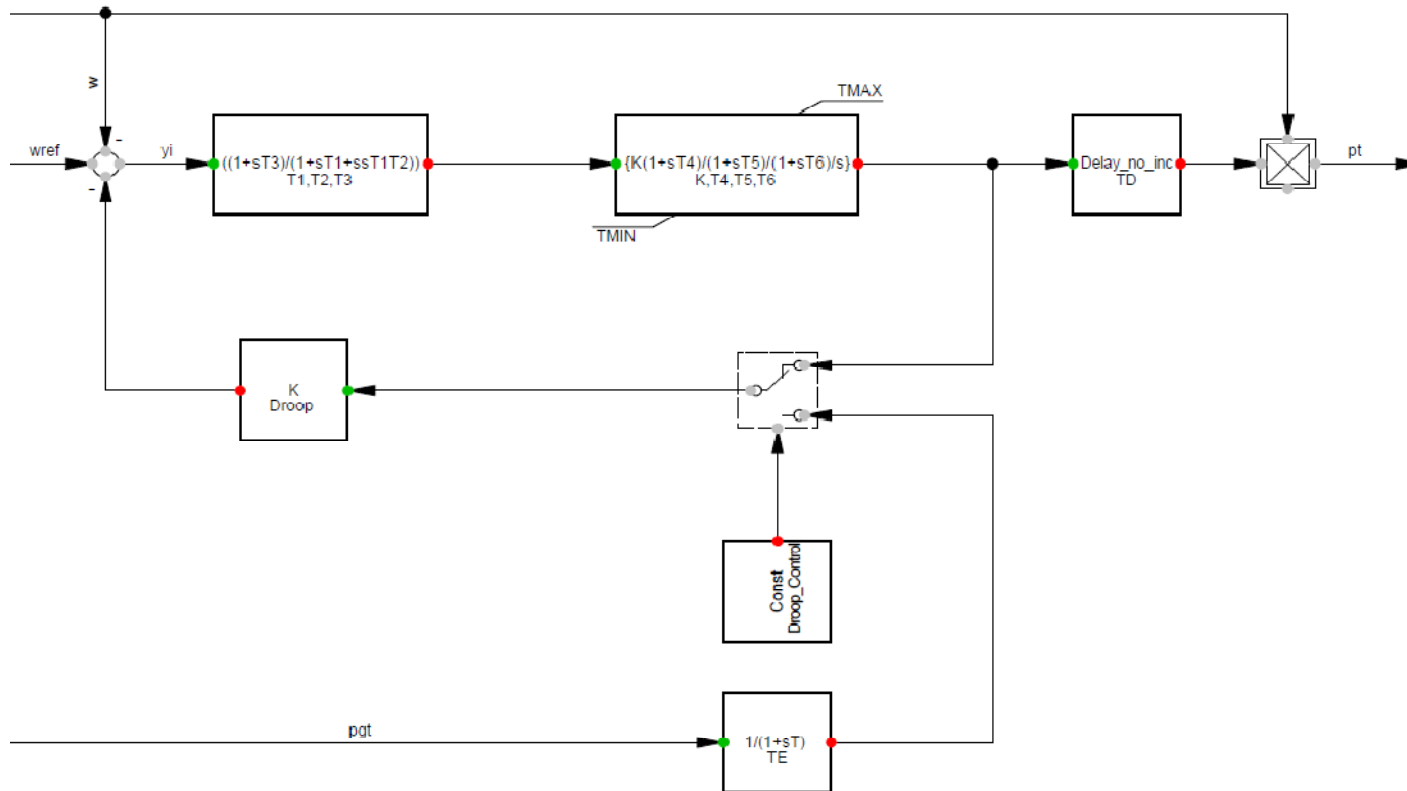
Σχήμα 8.5. Χαρακτηριστική φορτίου-συχνότητας

Οι κόκκινες διακεκομμένες χαρακτηριστικές στο παραπάνω σχήμα αντιστοιχούν σε διαφορετική ρύθμιση του μηχανισμού αλλαγής στροφών του ρυθμιστή στροφών, η οποία καθορίζεται είτε χειροκίνητα είτε μέσω Αυτόματης Ρύθμισης Παραγωγής (Automatic Generation Control – AGC). Η μεταβολή αυτή του ρυθμιστή είναι πιο αργή σε σχέση με την *προτεύουσα ρύθμιση* και αναφέρεται στη *δευτερεύουσα ρύθμιση*. Η δευτερεύουσα ρύθμιση εφαρμόζεται από το κέντρο κατανομής του φορτίου με σκοπό τον έλεγχο της διανομής της παραγωγής μεταξύ επιμέρους σταθμών στο ΣΗΕ με στόχο την ελαχιστοποίηση του ολικού κόστους παραγωγής. Χρήσιμοι ορισμοί για τις λειτουργίες ρύθμισης συχνότητας στο ΣΗΕ μπορούν να αναζητηθούν στο Εγχειρίδιο Κατανομής του ΔΕΣΜΗΕ, [ΔΕΣ10].

8.2. Μοντέλα ρυθμιστών στροφών συμβατικών μονάδων

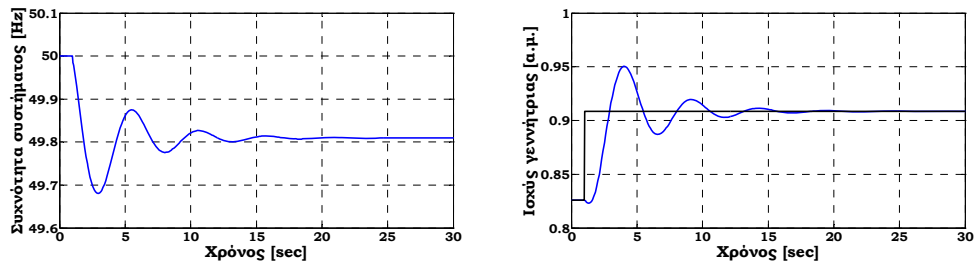
Για τις ανάγκες διερεύνησης της συμβολής των Α/Π στη ρύθμιση συχνότητας αναπτύχθηκαν μοντέλα θερμικών σταθμών και αντίστοιχων ρυθμιστών στροφών παραγωγής σε λογισμικό περιβάλλον Simulink (Matlab) και PowerFactory (DIgSILENT). Οι συμβατικές μονάδες που χρησιμοποιήθηκαν στις σχετικές μελέτες ήταν νηζελογεννήτριες, αεριοστρόβιλοι ατμοστρόβιλοι. Για τη μοντελοποίηση των ρυθμιστών στροφών των αεριοστρόβιλων σε λειτουργία ανοιχτού κύκλου χρησιμοποιείται ο ελεγκτής Speedtronic (GAST2A) από τη βιβλιοθήκη του PowerFactory και για τις μονάδες Diesel θεωρήθηκε ότι διαθέτουν ηλεκτρονικό ρυθμιστή στροφών της εταιρείας WOODWARD που παριστάνεται από το μοντέλο DEGOV1 του PowerFactory. Για τις ατμοστροβιλικές μονάδες επελέγη το γενικό μοντέλο IEEEG1 (τύπου 1 κατά IEEE) που είναι διαθέσιμο στη βιβλιοθήκη του λογισμικού. Τα αντίστοιχα διαγράμματα βαθμίδων για τους ρυθμιστές στροφών δίνονται στα Σχήματα 8.6-8.8.

Οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν για τους αεριοστρόβιλους σε λειτουργία ανοιχτού κύκλου μπορούν να αναζητηθούν στα [HAN93][KAK03][ΔΕΗ08].

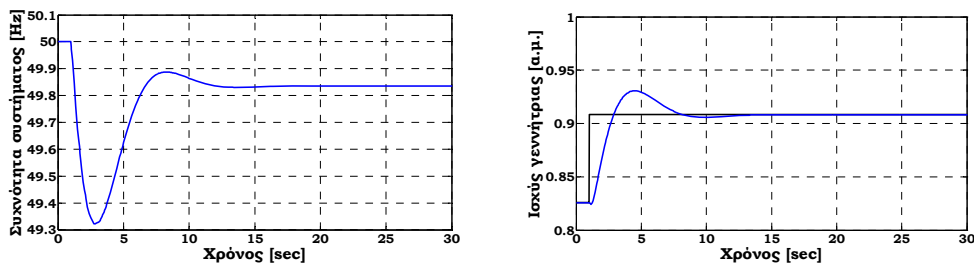


Σχήμα 8.8. Μοντέλο ρυθμιστή στροφών νηζελογεννητριών DEGOV1, [DIG06]

Στα σχήματα που ακολουθούν δίνονται αποτελέσματα απομονωμένης λειτουργίας ενός αεριοστρόβιλου και μιας νηξελογεννήτριας σε βηματική αύξηση του φορτίου 10%. Το Σχήμα 8.9 απεικονίζει τα αποτελέσματα για αεριοστρόβιλο μέγιστης αποδιδόμενης ισχύος 28 MW, που τη στιγμή της αύξησης του φορτίου παράγει σχεδόν ισχύ 0.8 α.μ., και το Σχήμα 8.10 δίνει την απόκριση της νηξελογεννήτριας μέγιστης αποδιδόμενης ισχύος 13 MW. Η συνεισφορά των ατμοστροβιλικών μονάδων στις διαταραχές και ο ρυθμός ανάληψης φορτίου από αυτές έχουν αρκετά μικρές τιμές, προκειμένου να αποφεύγονται μεταβατικά φαινόμενα στην πίεση του ατμού. Επιπλέον στα σενάρια που εξετάζονται θεωρείται ότι οι ατμοηλεκτρικές μονάδες λειτουργούν στα όρια της ονομαστικής τους ισχύος. Σε σοβαρές διαταραχές η μεταβολή της παραγωγής των ατμοστρόβιλων τα πρώτα κρίσιμα δευτερόλεπτα είναι περιορισμένη.



Σχήμα 8.9. Συχνότητα συστήματος, ηλεκτρική και μηχανική ισχύς (μαύρη και μπλε καμπύλη αντίστοιχα) αεριοστροβλικής μονάδας σε απομονωμένη λειτουργία για βηματική αύξηση φορτίου 10%



Σχήμα 8.10. Συχνότητα συστήματος, ηλεκτρική και μηχανική ισχύς (μαύρη και μπλε καμπύλη αντίστοιχα) νηξελογεννήτριας σε απομονωμένη λειτουργία για βηματική αύξηση φορτίου 10%

8.3. Εγγενής αδρανειακή απόκριση A/G σε μεταβολές της συχνότητας

Ο τρόπος με τον οποίο οι επιμέρους τύποι A/G αποκρίνονται εγγενώς (χωρίς επιπρόσθετο έλεγχο συχνότητας) σε μεταβολές της συχνότητας εξαρτάται από τη διαμόρφωση του ηλεκτρικού μέρους και τον έλεγχο ενεργού ισχύος που εφαρμόζεται (στην περίπτωση των A/G Τύπου Γ και Δ). Η A/G Τύπου Α συμπεριφέρεται παρόμοια με οποιαδήποτε άλλη ασύγχρονη γεννήτρια ή κινητήρα κατά τη διάρκεια απότομων μεταβολών στη συχνότητα του συστήματος. Για μείωση της συχνότητας ο δρομέας επιβραδύνεται σε ρυθμό που καθορίζεται από την αδράνεια του δρομέα της μηχανής σε συνδυασμό με τις μάζες που συνδέονται στον άξονα της μηχανής. Προκύπτει έτσι απότομη αύξηση στην εγχυόμενη στο δίκτυο ενεργό ισχύ, η οποία προκύπτει από τη μετατροπή της κινητικής ενέργειας του δρομέα σε ηλεκτρική. Τυπικές τιμές της αδράνειας για A/G Τύπου Α με ονομαστική ισχύ μεγαλύτερη του 1 MW κυμαίνονται σε ένα εύρος 3-5 sec. Σημειώνεται εδώ ότι οι συμβατικές σύγχρονες γεννήτριες που λειτουργούν στα σύγχρονα ΣΗΕ έχουν εν γένει υψηλότερες τιμές αδράνειας.

Εν τούτοις, τα τελευταία χρόνια η ονομαστική ισχύς των A/G μεταβλητών στροφών ξεπερνάει τα 5 MW, με αποτέλεσμα σε αρκετές περιπτώσεις η αδράνεια τους να μπορεί να συγκριθεί με αυτή των συμβατικών μονάδων. Επιπλέον, η ταχύτητα περιστροφής της γεννήτριας μπορεί να μειωθεί σε επίπεδα αρκετά χαμηλά (πχ. 0.7 α.μ.), ενώ οι συμβατικές γεννήτριες έχουν περιορισμένο εύρος ταχυτήτων περιστροφής (0.95 α.μ.). Γι' αυτό, μία A/G μεταβλητών στροφών ίδιας ονομαστικής ισχύος και ίδιας αδράνειας με μια συμβατική γεννήτρια μπορεί να έχει τετραπλάσια σχεδόν κινητική ενέργεια αποθηκευμένη στο στρεφόμενο δρομέα. Αυτή η κινητική ενέργεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί ώστε να συμβάλει η A/G στην πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας σε περίπτωση έντονων μεταβολών της συχνότητας του συστήματος.

Επιπλέον από τη σύγκριση της απόκρισης συμβατικών γεννητριών με αυτή των A/G προκύπτει ότι οι θερμικές, οι ατμοστροβιλικές και οι υδροηλεκτρικές μονάδες απαιτούν 4-25 sec ως χρόνο απόκρισης και 20-68 sec ως χρόνο αποκατάστασης της μηχανικής ισχύος ενώ οι αντίστοιχοι χρόνοι για A/G είναι της τάξης 3-9 sec και 8-38 sec αντίστοιχα, [DIN08]. Επομένως κατά τη διάρκεια αυτών των χρονικών περιόδων οι A/G μπορούν να προσφέρουν σημαντική συμβολή μέσω της παροχής ενεργού ισχύος ώστε να αποκατασταθεί το ισοζύγιο ενεργού ισχύος στο σύστημα. Ειδικότερα οι υδροστροβιλικές μονάδες παρουσιάζουν απόκριση αντίθετη από την επιθυμητή κατά τα πρώτα δευτερόλεπτα μετά από μια μεταβολή της συχνότητας ανάλογα με τα χαρακτηριστικά της μονάδας και το μέγεθος μεταβολής της συχνότητας. Για το λόγο αυτό η παρουσία A/G με δυνατότητα έγχυσης ενεργού ισχύος αμέσως μετά το μεταβατικό (πχ. απώλεια γεννήτριας στο σύστημα) μπορεί να είναι ιδιαίτερα σημαντική για την ευστάθεια σε περιπτώσεις συστημάτων με σημαντική παραγωγή από υδροστροβιλικές μονάδες.

Η αδρανειακή απόκριση ασύγχρονων γεννητριών ή A/G Τύπου Α είναι χαμηλότερη και πιο αργή σε σύγκριση με τις συμβατικές μονάδες λόγω της μειωμένης συσχέτισης μεταξύ ταχύτητας δρομέα και συχνότητας συστήματος καθώς και λόγω της μικρότερης αδράνειας, [LAL05]. Η συνολική αδράνεια των AC στρεφόμενων μηχανών που συνδέονται απ' ευθείας στο σύστημα, περιλαμβάνοντας την αδράνεια των σύγχρονων γεννητριών των σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και των αντίστοιχων στροβίλων καθώς και φορτίων του συστήματος με στρεφόμενους δρομείς είναι καθοριστική για την απόκριση της συχνότητας σε μεταβατικές διαταραχές του ισοζυγίου ενεργού ισχύος. Η αδράνεια περιορίζει το ρυθμό μεταβολής της συχνότητας, γεγονός που επιτρέπει στην πρωτεύουσα ρύθμιση να ανταποκριθεί καλύτερα στη ρύθμιση της συχνότητας. Η σχέση που συνδέει τη μεταβολή στο ισοζύγιο ενεργού ισχύος – μεταβολή φορτίου ή μεταβολή παραγωγής – με τη συνεπαγόμενη μεταβολή συχνότητας είναι η ακόλουθη:

$$\frac{\partial f}{\partial t} = \frac{\Delta P}{2H} \quad (8.2)$$

όπου

$\frac{\partial f}{\partial t}$ ο ρυθμός μεταβολής της συχνότητας σε

ΔP η μεταβολή στο φορτίο ή την παραγωγή

H η συνολική αδράνεια του συστήματος σε MWsec/MVA

Το ζήτημα της αδράνειας είναι ιδιαίτερα κρίσιμο για υψηλά επίπεδα διείσδυσης αιολικής ενέργειας σε ένα ΣΗΕ. Στο διασυνδεδεμένο σύστημα (UCTE κ.ο.κ.), η αδράνεια των Α/Γ δεν αποτελεί πιθανότατα πρόβλημα. Σε περίπτωση βέβαια απώλειας των διασυνδέσεων μια συγκεκριμένη ποσότητα αδράνειας είναι απαραίτητη για την εξασφάλιση της λειτουργίας στο τμήμα του δικτύου που απομονώθηκε. Στα πλαίσια αυτά έχει γίνει ιδιαίτερη μελέτη της επίδρασης διαφορετικών τύπων Α/Γ στην αδράνεια του ΣΗΕ της Ιρλανδίας, [MAL04]. Η κρισιμότητα βέβαια της αδράνειας είναι προφανής σε μη διασυνδεδεμένα ΣΗΕ, όπως αυτά των νησιωτικών συστημάτων που μελετώνται στην παρούσα διατριβή. Εν τούτοις είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι τα συμπεράσματα που προκύπτουν κατά την ανάλυση της λειτουργίας τέτοιων μη διασυνδεδεμένων ΣΗΕ σε μεταβατικά φαινόμενα συχνότητας είναι χρήσιμα ευρύτερα για τη σχεδίαση κωδίκων δικτύου εν γένει, δηλ. στα διασυνδεδεμένα συστήματα.

Η μεταβολή της συχνότητας σε ένα ΣΗΕ είναι ανάλογη των διακυμάνσεων των ροπών σε όλες τις στρεφόμενες μηχανές που συνδέονται στο δίκτυο και των οποίων η ταχύτητα περιστροφής εξαρτάται από τη συχνότητα του συστήματος. Με όρους ισχύος η διακύμανση της συχνότητας είναι:

$$\frac{df}{dt} = \frac{\sum P_{mi} - \sum P_{load}}{2H_{eq}f} \quad (8.3)$$

όπου

P_{mi} η μηχανική ισχύς του στροβίλου της μονάδας παραγωγής i

P_{load} η στιγμιαία κατανάλωση ενεργού ισχύος στο δίκτυο και

H_{eq} η ισοδύναμη σταθερά αδρανείας του συστήματος (φαινόμενη αδράνεια) σε δευτερόλεπτα

Η ισοδύναμη σταθερά αδρανείας H_{eq} μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

$$H_{eq} = \frac{\sum S_{ni}H_i}{\sum S_{ni}} \quad [sec] \quad (8.4)$$

όπου

S_{ni} η φαινόμενη ισχύς της μονάδας παραγωγής και

H_i η αντίστοιχη σταθερά αδρανείας

Εξ' ορισμού, η σταθερά αδρανείας κάθε μηχανής δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$H_i = \frac{J_i \omega_{e0}^2}{2p^2 S_{ni}} \quad [sec] \quad (8.5)$$

όπου

J_i η ροπή αδρανείας του στρεφόμενου μηχανικού συστήματος σε kgm^2

ω_{e0} η ονομαστική ηλεκτρική ισχύς σε rad/sec

p τα ζεύγη πόλων της γεννήτριας και

S_{ni} η φαινόμενη ισχύς της μονάδας παραγωγής σε VA

Η στιγμιαία ηλεκτρική ισχύς για κάθε μονάδα παραγωγής όταν προκύπτει διακύμανση της συχνότητας μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

$$P_{ei} = P_{mi} - 2PH_i f \frac{df}{dt} \quad [\alpha. \mu.] \quad (8.6)$$

Για σύγχρονες ή ασύγχρονες γεννήτριες που συνδέονται απ' ευθείας στο δίκτυο, προκύπτει αυξημένη έγχυση ενεργού ισχύος στο δίκτυο για μειώσεις της συχνότητας του συστήματος λόγω επιβράδυνσης του δρομέα. Για μια μεταβολή στη συχνότητα του συστήματος από αρχική τιμή f_1 σε τιμή f_2 , και αντίστοιχη μεταβολή της ταχύτητας του δρομέα από τιμή ω_1 σε ω_2 , η κινητική ενέργεια $\Delta E_{κιν}$ που μετατρέπεται σε ηλεκτρική υπολογίζεται από τις ακόλουθες σχέσεις, [EKA04]:

$$E_{κιν} = \frac{1}{2} J \omega_1^2 \quad (8.7)$$

$$E_{κιν,1} - \Delta E_{κιν} = \frac{1}{2}J(\omega_1 - \Delta\omega)^2 \quad (8.8)$$

όπου

$$\Delta\omega = (\omega_1 - \omega_2)$$

Προκύπτει επομένως

$$\Delta E_{κιν} = E_{κιν,1} \left(1 - \frac{\omega_2^2}{\omega_1^2}\right) = E_{κιν,1} \left(1 - \frac{f_2^2}{f_1^2}\right) \quad (8.9)$$

Παραγωγίζοντας την κινητική ενέργεια που είναι διαθέσιμη και μπορεί να εξαχθεί από το στρεφόμενο δρομέα προκύπτει η ισχύς που μπορεί να χρησιμοποιηθεί:

$$P = \frac{dE_{κιν}}{dt} = J\omega \frac{d\omega}{dt} \quad (8.10)$$

Χρησιμοποιώντας τον ορισμό της σταθεράς αδρανείας (8.5), προκύπτει:

$$\frac{P}{S} = 2H \frac{\omega}{\omega_{e0}} \frac{d(\frac{\omega}{\omega_{e0}})}{dt} \quad (8.11)$$

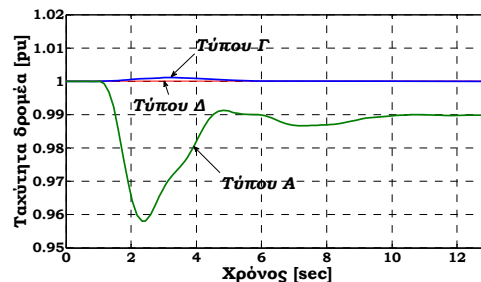
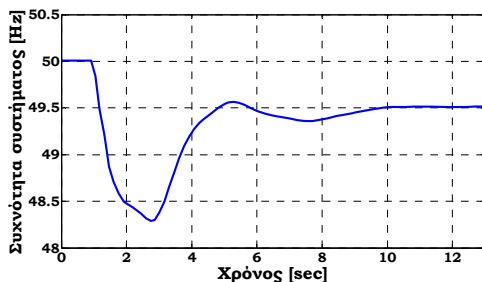
Σε α.μ. τιμές η ισχύς είναι:

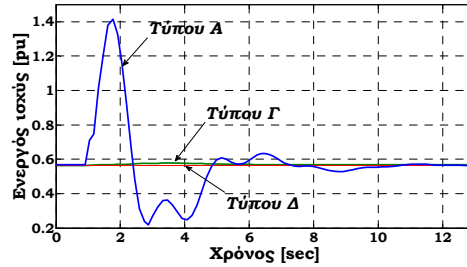
$$\bar{P} = 2H\bar{\omega} \frac{d(\bar{\omega})}{dt} \quad (8.12)$$

Και με όρους ροπής είναι:

$$\bar{T} = 2H \frac{d(\bar{\omega})}{dt} \quad (8.13)$$

Στην περίπτωση των Α/Γ μεταβλητών στροφών (Τύπου Γ και Δ) η απόκριση σε μεταβολές της συχνότητας καθορίζεται από τον έλεγχο ενεργού ισχύος που εφαρμόζεται στο σύστημα μετατροπών, [HOL03][EKA03][HOL04]. Ο έλεγχος αυτός αποδεσμεύει την ταχύτητα του δρομέα από τις μεταβολές στη συχνότητα του συστήματος, με αποτέλεσμα η αδρανειακή απόκριση σε μεταβολές της συχνότητας του συστήματος να είναι ουσιαστικά αμελητέα. Στην περίπτωση των Α/Γ Τύπου Δ η αποδέσμευση της ταχύτητας του δρομέα είναι πλήρης λόγω της παρεμβολής του πλήρους μετατροπέα ενώ στις Α/Γ Τύπου Γ η σύνδεση του στάτη απ' ευθείας στο δίκτυο συνεπάγεται μια συσχέτιση μεταξύ ταχύτητας και δρομέα, η οποία όμως δε προκαλεί σημαντική αδρανειακή απόκριση κατά τη διάρκεια μεταβολών στη συχνότητα, [RAM07a]. Το Σχήμα 8.11 δίνει τις μεταβολές στην ταχύτητα του δρομέα και στην εξαγόμενη ενεργό ισχύ για Α/Γ Τύπου Α, Γ και Δ σε απότομη μείωση στη συχνότητα του συστήματος, [MAR09c]. Η αδράνεια των Α/Γ μεταβλητών στροφών από την πλευρά του συστήματος είναι ουσιαστικά μηδενική.



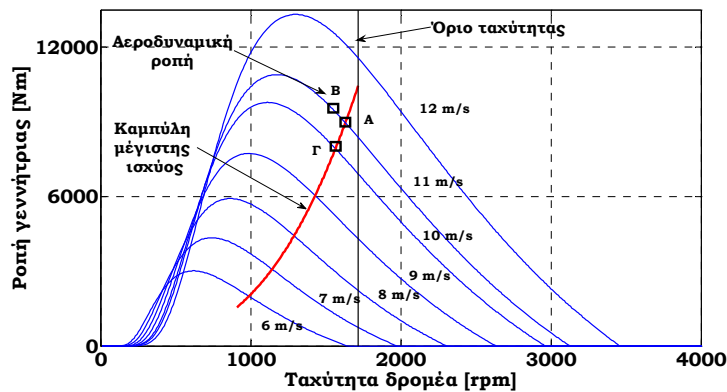


Σχήμα 8.11. Αδρανηϊακή απόκριση Α/Γ Τύπου Α, Γ και Δ σε απότομη μείωση της συχνότητας

Όσον αφορά τις Α/Γ Τύπου Γ, η εγγενής αδρανηϊακή απόκριση κατά τη διάρκεια μεταβολών της συχνότητας μπορεί να εξηγηθεί με όρους αντιπαράλληλων ροπών που δρουν στη στρεφόμενη μάζα του δρομέα, [RAM07a]. Κατά τη μείωση της συχνότητας η ηλεκτρομαγνητική ροπή και η αεροδυναμική ροπή μεταβάλλονται με διαφορετικό τρόπο και ρυθμό ως εξής:

- Η αρχική μείωση της ταχύτητας του δρομέα μπορεί να θεωρηθεί ως συνέπεια μιας συνιστώσας επιβραδύνουσας ροπής που επιδρά στη στρεφόμενη μάζα. Η συνιστώσα αυτή μπορεί να υπολογιστεί με παραγωγή της κινητικής ενέργειας ($\frac{1}{2}J\omega_r^2$) που απελευθερώνεται και στη συνέχεια με διαίρεση της ισοδύναμης ισχύος με την ταχύτητα περιστροφής ω_r . Η επιβραδύνουσα ροπή είναι ανάλογη προς το ρυθμό μεταβολής της ταχύτητας $\frac{d\omega_r}{dt}$ και επομένως του ρυθμού μεταβολής της συχνότητας $\frac{df}{dt}$.
- Καθώς μειώνεται η ταχύτητα, η ηλεκτρομαγνητική ροπή μειώνεται από το σύστημα ελέγχου ακολουθώντας την καμπύλη Μέγιστης Απολαβής Ισχύος (από το σημείο λειτουργίας Α προς το Γ στο Σχήμα 8.12). Η αεροδυναμική ισχύς αρχίζει να αυξάνεται από το σημείο λειτουργίας Α προς το Β με ρυθμό σημαντικά πιο αργό σε σύγκριση με την αλλαγή της ηλεκτρομαγνητικής ροπής. Οι μεταβολές αυτές των ροπών προκαλούν μια συνιστώσα επιταχύνουσας ροπής η οποία επιδρά ως ροπή επαναφοράς όσον αφορά τη μεταβολή της ταχύτητας.

Επομένως στην περίπτωση της Α/Γ Τύπου Γ, η εγγενής αδρανηϊακή απόκριση μπορεί να ενισχυθεί με μείωση της επιταχύνουσας συνιστώσας και αντίστοιχη αύξηση της επιβραδύνουσας ροπής, επιτρέποντας τη λειτουργία της Α/Γ σε μειωμένη ταχύτητα.



Σχήμα 8.12. Χαρακτηριστική ροπής ταχύτητας Α/Γ Τύπου Γ

8.4. Συμβολή A/G στη ρύθμιση συχνότητας

Στη διεθνή βιβλιογραφία έχουν προταθεί μέθοδοι συμβολής των A/G στη ρύθμιση συχνότητας, με έμφαση στην αδρανειακή απόκριση των A/G Τύπου Γ. Οι έρευνες στα [EKA04][HOL04][RAM07a][JOH06][BHA10][AKB10] εστιάζουν κυρίως στο σχεδιασμό και στην τροποποίηση του ελέγχου των A/G Τύπου Γ ώστε να προκύψει απόκριση παρόμοια με αυτή των σύγχρονων γεννητριών σε μεταβολές της συχνότητας. Παρ' όλα αυτά, δεν έχει γίνει διερεύνηση ώστε να ποσοτικοποιηθεί η απώλεια αδράνειας του συστήματος που οφείλεται σε αντικατάσταση συμβατικών γεννητριών από A/G, και μάλιστα A/G Τύπου Γ και Δ που δε συμβάλλουν εγγενώς στην αδρανειακή απόκριση. Οι αναλύσεις στα [MUL05][LAL05] σε ένα βαθμό επιχειρούν να απαντήσουν σε αυτό το ερώτημα για το σύστημα της Ιρλανδίας. Στο [MUL05] θεωρούνται διάφορα επίπεδα αιολικής διεύθυνσης και μελετάται η μεταβολή της συχνότητας καθώς και ο ρυθμός μεταβολής της συχνότητας για διαφορετικές τεχνολογίες A/G. Από αυτή τη μελέτη έχει συναχθεί το συμπέρασμα ότι ο μέγιστος ρυθμός μεταβολής της συχνότητας είναι ανεξάρτητος της τεχνολογίας A/G. Εν τούτοις, όσον αφορά τη συχνότητα για δοσμένη διαταραχή, το σύστημα με A/G Τύπου Γ παρουσιάζει χαμηλότερη συχνότητα σε σύγκριση με το σύστημα με A/G Τύπου A και αυτή η διαφορά θα μπορούσε να αποτελεί σημείο έντονης σημασίας κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες λειτουργίας και επίπεδα αιολικής διεύθυνσης. Στο [LAL05] επισημαίνεται ότι η απώλεια αδράνειας που οφείλεται στην είσοδο A/G Τύπου Γ στο σύστημα μπορεί να αποτελέσει πρόβλημα για το σύστημα της Ιρλανδίας υπό προϋποθέσεις. Αποδεικνύεται όμως ότι, η αδρανειακή απόκριση καθορίζεται από το εύρος του ελεγκτή ρεύματος και αυξάνοντας αυτό, η απόκριση μπορεί να προσεγγίσει την απόκριση A/G Τύπου A. Στο [DOH10] προκύπτει από μελέτη του απομονωμένου συστήματος της Ιρλανδίας ότι, ακόμα και σε σχετικά χαμηλά επίπεδα αιολικής παραγωγής, ενδέχεται να είναι διαθέσιμη μια μεγάλη σχετικά πηγή κινητικής ενέργειας, με τη μορφή αδρανειακής απόκρισης, δεδομένου ότι - εκτός από τις A/G Τύπου A που προσφέρουν εγγενώς αδρανειακή απόκριση - και οι A/G Τύπου Γ περιλαμβάνουν σύστημα απόκρισης σε μεταβολές της συχνότητας.

Πιο αναλυτικά, στο [HOL04] προτείνεται η επαναφορά της αδρανειακής απόκρισης στις A/G Τύπου Γ με προσθήκη ενός όρου ανάλογου με το $2H \frac{df}{dt}$ στο σήμα αναφοράς της ηλεκτρομαγνητικής ροπής, όπου H η σταθερά αδράνειας της A/G. Στην περίπτωση αυτή, και για αδρανειακή απόκριση κινητικής ενέργειας ίσου μεγέθους με μια σύγχρονη γεννήτρια η επίδραση στην ταχύτητα του δρομέα και επομένως στη λειτουργία του αεροδυναμικού συστήματος θα είναι αμελητέα. Στο ίδιο άρθρο προτείνεται επιπλέον μια μέθοδος αποφόρτισης για A/G Τύπου A και Γ - ώστε σε περίπτωση υποσυχνότητας να είναι σε θέση η A/G να συμβάλλει με πρόσθετη ενεργό ισχύ - που χρησιμοποιεί το σύστημα ελέγχου γωνίας βήματος εφαρμόζοντας χαρακτηριστική στατισμού στο σήμα αναφοράς ενεργού ισχύος που εφαρμόζεται ως είσοδος στο σύστημα ελέγχου γωνίας βήματος. Στο [RAM07a] προστίθεται ένας βρόχος ανάλογος της διακύμανσης συχνότητας Δf στο σήμα ελέγχου της ηλεκτρομαγνητικής ροπής A/G Τύπου Γ με στόχο τη βελτίωση της αδρανειακής απόκρισης. Στην περίπτωση αυτή, για μείωση της συχνότητας (όχι μόνο κατά τη διάρκεια του μεταβατικού αλλά και στη μόνιμη κατάσταση μετά το σφάλμα), η ταχύτητα δρομέα ισορροπεί σε νέα μειωμένη τιμή, με αποτέλεσμα η A/G να λειτουργεί εκτός της καμπύλης Μέγιστης Απολαβής Ισχύος. Οι συγγραφείς προτείνουν ότι η επαναφορά στην κανονική λειτουργία μπορεί να γίνει αρκετό χρόνο μετά το μεταβατικό. Η μέθοδος αυτή δεν εξασφαλίζει όμως συμβολή στην περίπτωση που η A/G λειτουργεί στη μέγιστη ισχύ εξόδου (ονομαστική). Για το σκοπό αυτό προτείνεται η αύξηση του μέγιστου ορίου ενεργού ισχύος εξόδου για κάποια δευτερόλεπτα ώστε να καταστεί δυνατή η αδρανειακή απόκριση ακόμα και όταν η A/G λειτουργεί στα ονομαστικά. Στο ίδιο προτείνεται και μια μέθοδος αποφόρτισης που χρησιμοποιεί εκτός από το πρόσθετο σήμα στο σήμα αναφοράς της ηλεκτρομαγνητικής ροπής (για λειτουργία με ταχύτητες δρομέα μικρότερες της ονομαστικής) και τροποποιημένη λειτουργία του συστήματος ελέγχου γωνίας βήματος πτερυγίων (για λειτουργία με ονομαστική ταχύτητα δρομέα). Στα [CON08][RAM07b] αναφέρεται η χρήση του πρόσθετου βρόχου αδρανειακής απόκρισης στο σήμα αναφοράς ηλεκτρομαγνητικής ροπής σε μοντέλα A/G Τύπου Δ2. Ο συνδυασμός αδρανειακής απόκρισης και στατισμού μόνιμου καταστάσεως για τις A/G Τύπου Γ εισάγεται ως αρχή σχεδιασμού στο [MOR06] χωρίς να γίνεται αναλυτική μελέτη της επίδρασης στη λειτουργία της A/G ή στην απόκριση του συστήματος ενώ η επαναφορά σε κανονική λειτουργία γίνεται απότομα με έντονη μεταβατική αλλαγή στην ενεργό ισχύ της A/G. Στο [BHA10] ερευνάται ομοίως η εισαγωγή βρόχου

στατισμού στο σύστημα ελέγχου A/G Τύπου Γ ενώ η επαναφορά σε κανονική λειτουργία δεν προβλέπεται, αλλά αντίθετα επαφίεται στην αποκατάσταση της ονομαστικής συχνότητας του συστήματος μέσω της πρωτεύουσας και δευτερεύουσας ρύθμισης των συμβατικών γεννητριών. Παρόμοιος βρόχος στατισμού επίσης προβλέπεται και στα [CHA10][HAN10] για A/G Τύπου Γ. Η εισαγωγή αδρανειακής απόκρισης σε A/G Τύπου Γ έχει επίσης περιγραφεί στα [LAL04][LAL05] με προσθήκη όρου ανάλογου προς το ρυθμό μεταβολής της συχνότητας του συστήματος στο σήμα αναφοράς της ηλεκτρομαγνητικής ροπής. Η χρήση μεθόδων ασαφούς λογικής – με εισόδους στο σύστημα ελέγχου τη μέση ταχύτητα ανέμου, τη μεταβλητότητα της ταχύτητας ανέμου και τη μέση διακύμανση της συχνότητας του συστήματος – έχει επίσης προταθεί με στόχο τον περιορισμό των διακυμάνσεων συχνότητας σε μικρά ΣΗΕ με μεγάλη αιολική διείδυση στο [SEN07]. Η βελτιστοποίηση της κινητικής ενέργειας που είναι αποθηκευμένη στο στρεφόμενο δρομέα της A/G προτείνεται στο [ZER10] μέσω συνδυασμού του ελέγχου ταχύτητας δρομέα και του συστήματος ελέγχου γωνίας βήματος περυγίων για την περιοχή ταχυτήτων ανέμων κάτω της ονομαστικής. Η σχεδίαση του συστήματος ελέγχου γωνίας βήματος περυγίων με στατισμό για τη συχνότητα περιγράφεται στο [NAR09].

Στο [RAM07c] προτείνεται επίσης μέθοδος για A/G Τύπου Γ να παρέχουν στρεφόμενη εφεδρεία, με το να λειτουργείται η A/G στη μέγιστη ταχύτητα ενώ παράγει μειωμένη ισχύ. Αυτό επιτυγχάνεται μειώνοντας – έως και τη μηδενική τιμή – την τιμή αναφοράς για τη ροπή. Όποτε προκύπτει ανάγκη για παροχή ισχύος, η ισχύς εξόδου αυξάνεται μέσω αύξησης της τιμής αναφοράς της ροπής. Στα [ALM05][ALM06][ALM07] προτείνεται η εισαγωγή βρόχου στατισμού στο σύστημα ελέγχου A/G Τύπου Γ, παρόμοια με το βρόχο στατισμού στους ρυθμιστές στροφών των συμβατικών γεννητριών, με εξασφάλιση παροχής εφεδρείας από τις A/G μέσω τροποποιημένης χαρακτηριστικής ελέγχου στροφών.

Σημειώνεται ότι ανάμεσα στους κατασκευαστές A/G η γερμανική εταιρεία Enercon αναφέρει ότι κάποια από τα μοντέλα A/G προσφέρουν τη δυνατότητα αδρανειακής απόκρισης, αναφερόμενη ως *inertia emulation*. Η δυνατότητα αυτή παρέχεται αν η A/G παράγει ισχύ τουλάχιστον ίση με 4% της ονομαστικής ενώ η έγχυση ενεργού ισχύος είναι ίση με 10% της ονομαστικής και προσφέρεται σε χρόνο 800 msec μετά την ενεργοποίηση του συστήματος ρύθμισης συχνότητας. Δεν αναφέρεται ο τρόπος με τον οποίο επιτυγχάνεται μια τέτοια λειτουργία αν και προτείνεται η ρύθμιση της διέγερσης με βάση μέτρηση της συχνότητας του συστήματος. Στο [ENE10] αναφέρεται επίσης η δυνατότητα λειτουργίας της A/G στο 110% της ονομαστικής ισχύος για πεπερασμένο χρονικό διάστημα (της τάξης των 10 sec) με στόχο τη συμμετοχή στη ρύθμιση συχνότητας. Αντίθετα η μείωση της ισχύος δεν περιορίζεται χρονικά, όπως αναφέρεται στα έντυπα της κατασκευάστριας εταιρείας. Επίσης αναφέρεται σχετικά ότι οι A/G Τύπου Δ2 παραμένουν σε λειτουργία για μεταβολές της συχνότητας του συστήματος με μέγιστο ρυθμό 4 Hz/sec.

Αντίστοιχα η GE αναφέρεται στην αδρανειακή απόκριση με τον όρο WindINERTIA™ Control. Σύμφωνα με το [WIN11] παρέχεται η δυνατότητα για αύξηση της εξαγόμενης ισχύος κατά 5-10% με σκοπό τη συμβολή στη ρύθμιση συχνότητας κατά τη διάρκεια μεταβατικών φαινομένων που επιδρούν στο ισοζύγιο ενεργού ισχύος και οδηγούν σε υποσυχνότητες. Στην αυξημένη έγχυση ενεργού ισχύος η συγκεκριμένη εταιρεία αναφέρεται με τον όρο *παλμοί ισχύος*, των οποίων η χρονική διάρκεια και η μορφή εξασφαλίζουν ασφαλή λειτουργία της A/G χωρίς επίδραση στο χρόνο ζωής του εξοπλισμού.

Ομοίως και η εταιρεία Vestas έχει αρχίσει να ερευνά τη δυνατότητα αδρανειακής απόκρισης από μεγάλο μεγέθους A/G Τύπου Γ, [TAR10a]. Στις σχετικές μελέτες διερευνάται η συμπεριφορά A/G Τύπου Γ 2 MW και τα αποτελέσματα δείχνουν ότι είναι δυνατόν να λειτουργήσει η A/G παράγοντας έως και 0.2 α.μ. πάνω από την ονομαστική της ισχύ για τουλάχιστον 10 sec συμβάλλοντας σε περιπτώσεις συστημάτων με αργούς ρυθμιστές στροφών ή χαμηλή αδράνεια, [TAR10b].

Μια σύνοψη των μεθόδων συμβολής A/G στη ρύθμιση συχνότητας που έχουν προταθεί μπορεί να διακρίνει μεταξύ τριών επιπέδων συμβολής:

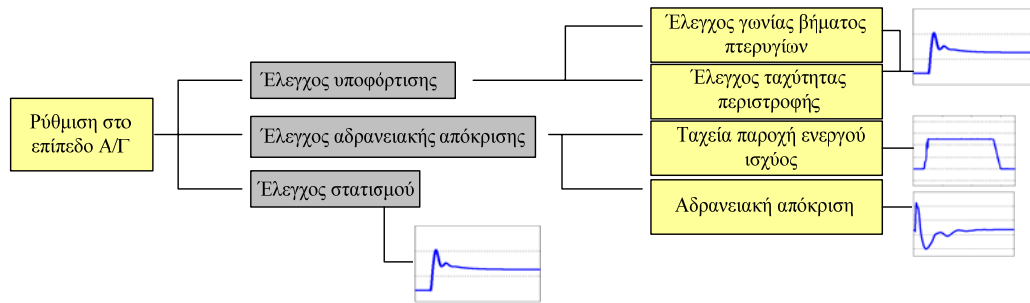
- Επίπεδο A/Γ
- Επίπεδο A/Π

- Επίπεδο ΣΗΕ

Επιπλέον μπορούν να εντοπιστούν τρεις δείκτες απόκρισης συχνότητας όσον αφορά την ποσοτικοποίηση της συμβολής των Α/Γ στη ρύθμιση συχνότητας:

- Ελάχιστη τιμή συχνότητας κατά το μεταβατικό φαινόμενο
- Ρυθμός μεταβολής συχνότητας
- Διακύμανση συχνότητας μόνιμης κατάστασης

Στο επίπεδο Α/Γ οι μέθοδοι συμβολής στη ρύθμιση συνοψίζονται στο ακόλουθο διάγραμμα:



Σχήμα 8.13. Σύνοψη μεθόδων συμβολής Α/Γ στη ρύθμιση συχνότητας στο επίπεδο Α/Γ

Ο έλεγχος υποφόρτισης αναιρεί τη λειτουργία Μέγιστης Απολαβής Ισχύος, δηλ. ένα ποσοστό της διαθέσιμης ενεργού ισχύος απορρίπτεται με στόχο την παροχή των απαιτούμενων εφεδρειών ισχύος και την οικονομικότερη λειτουργία του συστήματος παρά την απώλεια αιολικής παραγωγής (εξοικονόμηση μέσω του περιορισμού κόστους επενδύσεων σε εφεδρεία και σε συστήματα αποθήκευσης). Η ρύθμιση της αιολικής παραγωγής είναι πιο γρήγορη από την αντίστοιχη των θερμικών σταθμών λόγω ελέγχου ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος. Η υποφόρτιση ενδέχεται να πραγματοποιηθεί μέσω του συστήματος ελέγχου γωνίας βήματος πτερυγίων με κατάλληλη τροποποίηση ή μέσω ελέγχου της ταχύτητας περιστροφής του δρομέα σε τιμές μεγαλύτερες από αυτές που αντιστοιχούν σε συνθήκες Μέγιστης Απολαβής Ισχύος. Στην πρώτη περίπτωση ο έλεγχος είναι κατάλληλος για Α/Γ σταθερών και μεταβλητών στροφών (Τύπου Α, Β, Γ και Δ) αλλά είναι σχετικά αργός λόγω των χρονικών σταθερών του μηχανικού συστήματος ενώ αυξάνεται η φθορά λόγω καταπόνησης. Στη δεύτερη περίπτωση ο έλεγχος είναι γρήγορος και παρέχει τη δυνατότητα για αποθήκευση σημαντικής κινητικής ενέργειας, όμοια με μια διάταξη αποθήκευσης σφονδύλων.

Ο έλεγχος αδρανειακής απόκρισης αφορά σε Α/Γ μεταβλητών στροφών (Τύπου Γ και Δ) και στόχο έχει τη μείωση του μέγιστου ρυθμού μεταβολής της συχνότητας και τη βελτίωση της ελάχιστης συχνότητας κατά τη διάρκεια των μεταβατικών. Σε σύγκριση με την εγγενή αδρανειακή απόκριση Α/Γ Τύπου Α και συμβατικών γεννητριών παρέχεται η δυνατότητα για παροχή μεγαλύτερων ποσών κινητικής ενέργειας καθώς και ταχύτερης απόκρισης. Η ταχεία παροχή ενεργού ισχύος εξασφαλίζεται με τρόπο όμοιο με την αδρανειακή απόκριση, αντισταθμίζει τις απώλειες ισχύος για σύντομο χρονικό διάστημα και εξασφαλίζει τον απαραίτητο χρόνο στις μονάδες αργής απόκρισης ώστε να συμμετέχουν στη ρύθμιση συχνότητας. Στην περίπτωση αυτή δίνεται σήμα για αυξημένη παραγωγή σταθερής ενεργού ισχύος για περιορισμένο χρονικό διάστημα.

Ο έλεγχος στατισμού αφορά επίσης σε Α/Γ μεταβλητών στροφών (Τύπου Γ και Δ), αυξάνει την ελάχιστη μεταβατική τιμή της συχνότητας αλλά απαιτείται είτε η λειτουργία του για περιορισμένο χρονικό διάστημα ώστε να αποφευχθεί το φαινόμενο αεροδυναμικής απώλειας στήριξης πτερυγίων (*stalling*) είτε ο συντονισμός του με έλεγχο υποφόρτισης.

Στο επίπεδο του Α/Π γίνεται καταμερισμός των σημάτων του διαχειριστή του συστήματος μεταξύ των επιμέρους Α/Γ ανάλογα με το επίπεδο φόρτισης, το σημείο λειτουργίας γενικότερα και τις δυνατότητες συμβολής στη ρύθμιση συχνότητας. Στην παρούσα ενότητα και στο αντίστοιχο Παράρτημα προτείνεται μια μέθοδος συντονισμένης λειτουργίας μεταξύ των ελεγκτών στο επίπεδο του Α/Π και στο επίπεδο των επιμέρους Α/Γ.

Στο επίπεδο του ΣΗΕ ο έλεγχος αφορά την επαναφορά της συχνότητας στην ονομαστική της τιμή (50 Hz) σε σύστημα Αυτόματης Ρύθμισης Παραγωγής (βλέπε ενότητα 8.9 παρούσας διατριβής).

8.5. Συμβολή A/Γ Τύπου Γ και Δ στη ρύθμιση συχνότητας

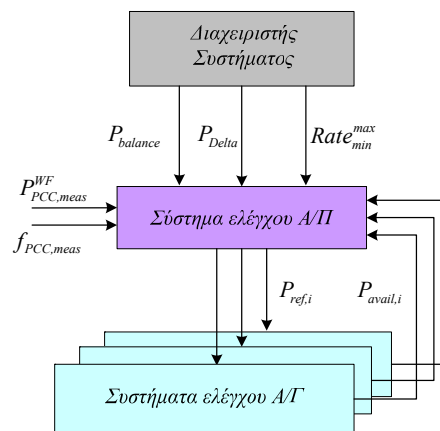
Η συμμετοχή στην πρωτεύουσα ρύθμιση απαιτείται πλέον από πολλούς κώδικες δικτύων, (βλέπε Κεφάλαιο 3 παρούσας διατριβής). Πρόσθετη συμμετοχή στη δευτερεύουσα ρύθμιση προβλέπεται για τη σύνδεση μεγάλων αιολικών πάρκων σε δίκτυα ΥΤ ή ΥΥΤ. Για την πρωτεύουσα ρύθμιση καθορίζεται συχνά συγκεκριμένο εύρος κανονικής λειτουργίας (*dead-band*) και στατισμός (*droop*), ενώ καθορίζονται επίσης λειτουργίες παροχής εφεδρείας (τύπου *balance* και *delta*) με καθορισμό ορίων στο ρυθμό μεταβολής ενεργού ισχύος.

Η συμβολή των A/Π στη ρύθμιση συχνότητας – πρωτεύουσα ή δευτερεύουσα – συνεπάγεται εν γένει την απώλεια αιολικής παραγωγής, γεγονός που πρέπει να λαμβάνεται υπ’ όψιν κατά τη σχεδίαση των κωδικών δικτύου που αναφέρονται σε παρόμοιες λειτουργίες ρύθμισης εκ μέρους των A/Π. Η συμβολή των A/Γ γενικά και ειδικότερα των μεγάλων A/Π στην αδράνεια του συστήματος δεν απαιτεί γενικά μεγάλες απώλειες αιολικής παραγωγής (για λόγους που θα αναλυθούν παρακάτω).

Οι τεχνικές απαιτήσεις στους κώδικες δικτύων που αναφέρονται στη συμβολή των A/Π στη ρύθμιση συχνότητας αναφέρονται σε διαφορετικούς τύπους ελέγχου ενεργού ισχύος: περιορισμός ισχύος, εφεδρεία τύπου *delta*, εφεδρεία τύπου *balance*, έλεγχος ακινητοποίησης, περιορισμός ρυθμού μεταβολής ισχύος κ.α. Στον ελεγκτή συχνότητας που υλοποιήθηκε κατά τη διάρκεια της παρούσας διατριβής έχουν ενσωματωθεί η εφεδρεία τύπων *balance* και *delta*, ο περιορισμός ρυθμού μεταβολής ισχύος και ο ελεγκτής συχνότητας για συμβολή στην πρωτεύουσα ρύθμιση.

Η δομή των ελεγκτών δίνεται στο σχήμα που ακολουθεί. Μπορούν να διακριθούν δύο επίπεδα ιεράρχησης ελεγκτών, βλέπε Σχήμα 8.14:

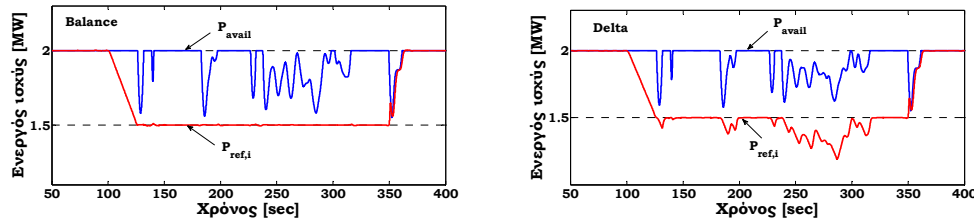
- ο ελεγκτής στο επίπεδο του A/Π, που παρέχει το σήμα ενεργού ισχύος που απαιτεί ο διαχειριστής του συστήματος στο ΣΚΣ του A/Π και εξασφαλίζει την απαιτούμενη ισχύ καθορίζοντας τις ισχείς αναφοράς στις επιμέρους A/Γ του A/Π
- οι ελεγκτές στο επίπεδο των επιμέρους A/Γ του A/Π, οι οποίοι εξασφαλίζουν την απαιτούμενη ισχύ στο σημείο σύνδεσης της A/Γ. Αν ληφθούν υπ’ όψιν οι απώλειες ενέργειας στο εσωτερικό δίκτυο του A/Π, είναι προφανές ότι το άθροισμα της ισχύος των επιμέρους A/Γ θα είναι υψηλότερο από την ισχύ που μετράται στο ΣΚΣ του A/Π



Σχήμα 8.14. Δομή ελεγκτών ενεργού ισχύος στο επίπεδο του A/Π και στο επίπεδο των A/Γ

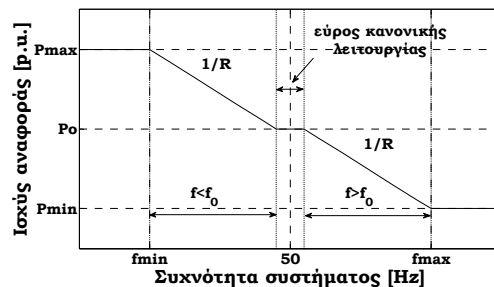
Οι επιμέρους A/Γ παρέχουν στον ελεγκτή του A/Π μια εκτίμηση για τη διαθέσιμη ενεργό ισχύ. Σε περίπτωση που οι A/Γ λειτουργούν σε εφεδρεία ισχύος, δηλ. παράγουν λιγότερο από τη διαθέσιμη ενεργό ισχύ με βάση τον άνεμο, είναι σημαντικό να υπάρχει η δυνατότητα για υπολογισμό των απωλειών ενέργειας ιδιαίτερα στην περίπτωση που η λειτουργία σε εφεδρεία ενεργού ισχύος επιβάλλεται από το διαχειριστή του συστήματος. Το Σχήμα 8.15 απεικονίζει τη λειτουργία A/Π με A/Γ μεταβλητών στροφών (Τύπου Γ ή Δ) σε εφεδρεία τύπου *balance* ή *delta*. Στην πρώτη περίπτωση

καθορίζεται ένα σταθερό επίπεδο ενεργού ισχύος ανεξάρτητα από τις διακυμάνσεις στη διαθέσιμο ενεργό ισχύ με βάση τον άνεμο. Στη δεύτερη περίπτωση επιδιώκεται σταθερή ποσότητα εφεδρείας, αν και κάτι τέτοιο δεν είναι πάντα εφικτό λόγω του περιορισμού στο ρυθμό μεταβολής της ενεργού ισχύος. Σημειώνεται εδώ ότι η λειτουργία παροχής εφεδρείας τύπου *balance* και *delta* έχει υλοποιηθεί στα Α/Π *Horns Rev* και *Nysted* της Δανίας, [SØR09]. Η χρήση των συστημάτων SCADA στην παροχή υπηρεσιών, όπως η στρεφόμενη εφεδρεία εκ μέρους των Α/Π, συζητείται επίσης και από συγκεκριμένες εταιρείες κατασκευής Α/Γ, [SAY06]. Η δυνατότητα λειτουργίας του Α/Π με σήμα αναφοράς για τη συνολική ενεργό ισχύ συνδέεται με τη συμβολή των Α/Π στη δευτερεύουσα ρύθμιση του συστήματος, οπότε επιβάλλονται από το διαχειριστή του συστήματος σήματα καθορισμού της ενεργού ισχύος στις μονάδες του συστήματος με στόχο την οικονομικότερη λειτουργία και την επαναφορά της συχνότητας στην ονομαστική της τιμή.



Σχήμα 8.15. Παροχή εφεδρείας ενεργού ισχύος τύπου *balance* και *delta* σε Α/Γ μεταβλητών στροφών

Το Σχήμα 8.16 απεικονίζει μια τυπική χαρακτηριστική φορτίου-συχνότητας, που εφαρμόζεται συχνά σε κώδικες δικτύου για τα Α/Π, και περιλαμβάνει μια ζώνη κανονικής λειτουργίας. Υπό κανονικές συνθήκες (χωρίς να παρέχεται εφεδρεία ενεργού ισχύος εκ μέρους του Α/Π) η τιμή αναφοράς για την ενεργό ισχύ P_o θα είναι ίση με τη μέγιστη διαθέσιμη ισχύ P_{max} και η χαρακτηριστική θα αναφέρεται μόνο σε υπερ-συχνότητες, καθώς δεν υπάρχει διαθέσιμη εφεδρεία ενεργού ισχύος ώστε να καθίσταται δυνατή η συμβολή σε υπο-συχνότητες.



Σχήμα 8.16. Τυπική χαρακτηριστική φορτίου-συχνότητας για συμβολή Α/Π στη ρύθμιση συχνότητας

Στους κανονισμούς του Δανέζικου διαχειριστή του συστήματος, *Energinet.dk*, καθορίζεται ότι οι Α/Γ πρέπει να ρυθμίζουν την παραγωγή τους με βάση μια χαρακτηριστική φορτίου-συχνότητας όμοια με αυτή του Σχήματος 8.16, [ENE04]. Με τον ίδιο τρόπο έχει αναφερθεί ότι έχει υλοποιηθεί ο έλεγχος συχνότητας στο Α/Π *Horns Rev* της Δανίας, [KRI03]. Στην περίπτωση αυτή η ρύθμιση συχνότητας ενσωματώνεται στο σύστημα ελέγχου των επιμέρους Α/Γ, γεγονός που επιτυγχάνει γρήγορη απόκριση σε μεταβατικά φαινόμενα συχνότητας χωρίς τον κίνδυνο καθυστερήσεων, που μπορεί να οφείλονται στο σύστημα επικοινωνίας μεταξύ ελεγκτή Α/Π και ελεγκτών των επιμέρους Α/Γ. Επιπλέον με αυτόν τον τρόπο εξασφαλίζεται ότι όλες οι Α/Γ ενός Α/Π παραμένουν σε λειτουργία, μειώνοντας κατάλληλα την ισχύ εξόδου τους (στην περίπτωση ελέγχου στο επίπεδο του Α/Π, ενδέχεται να απαιτηθεί η παύση λειτουργίας κάποιων Α/Γ σε περίπτωση αιχμής για μείωση της συνολικής ισχύος εξόδου του Α/Π). Ενδιαφέρον παρουσιάζει η έρευνα που διεξάγεται γύρω από το ζήτημα παροχής εφεδρείας ισχύος εκ μέρους των Α/Π, όπως πχ. από την εταιρεία Iberdrola στην Ιβηρική χερσόνησο, [McG10].

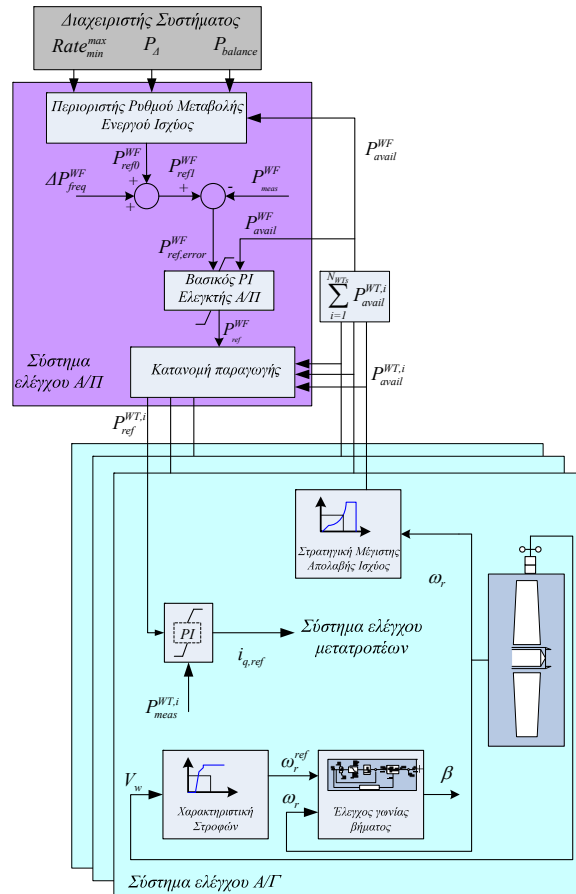
Στην παρούσα διατριβή επιλέχθηκε η υλοποίηση του συστήματος πρωτεύουσας ρύθμισης της συχνότητας να γίνει στον ελεγκτή του Α/Π, αποφεύγοντας ενδεχόμενες αστάθειες που μπορεί να προκληθούν σε περίπτωση που ο κλειστός βρόχος ελέγχου ισχύος στον ελεγκτή του Α/Π αντισταθμίζει τη λειτουργία των επιμέρους Α/Γ να ελέγξουν την ενεργό τους ισχύ με βάση τη συχνότητα του συστήματος, [MAR09c]. Από τη στιγμή που ο ελεγκτής του Α/Π δέχεται σήματα από το διαχειριστή του συστήματος σχετικά με θέματα εφεδρείας, περιορισμού ρυθμού μεταβολής της ισχύος κ.ο.κ, κρίθηκε ως πιο συνεπής λύση ο κεντρικός έλεγχος της συχνότητας να υλοποιηθεί στον ελεγκτή του Α/Π ενώ οι επιμέρους ελεγκτές των Α/Γ να εξασφαλίζουν την ισχύ αναφοράς χωρίς να αποκρίνονται σε μεταβολές της συχνότητας του συστήματος. Η αποφυγή αυτής της ενδεχόμενης ασυμφωνίας μεταξύ ελεγκτή Α/Π και ελεγκτών των επιμέρους Α/Γ θα μπορούσε να αποφευχθεί επίσης με το να επιτραπεί ο έλεγχος συχνότητας στους ελεγκτές των επιμέρους Α/Γ για λίγα δευτερόλεπτα, δεδομένου ότι ο έλεγχος στο επίπεδο του Α/Π είναι σχετικά αργός. Στο [CHR01] αναφέρεται ότι στο παράκτιο Α/Π *Horns Rev* στη Δανία, ο έλεγχος γίνεται στα συστήματα ελέγχου των επιμέρους Α/Γ, χωρίς να αποσαφηνίζεται ο τρόπος με τον οποίο αποφεύγεται η ενδεχόμενη σύγκρουση μεταξύ ελέγχου ισχύος στο επίπεδο του Α/Π και ελέγχου συχνότητας στο επίπεδο των επιμέρους Α/Γ. Η μέθοδος αυτή παρουσιάζει κάποια πλεονεκτήματα - η απόκριση στα φαινόμενα συχνότητας πρέπει να είναι όσο το δυνατόν πιο ταχεία. Υλοποιώντας τον ελεγκτή συχνότητας στα συστήματα ελέγχου επιμέρους Α/Γ αποφεύγει τυχόν καθυστερήσεις στο σύστημα επικοινωνίας μεταξύ ελεγκτή Α/Γ και επιμέρους Α/Γ. Επιπλέον ο έλεγχος συχνότητας πρέπει να εξασφαλίζεται με μεταβολή της εξαγόμενης ενεργού ισχύος όλων των Α/Γ και όχι με διακοπή λειτουργίας κάποιων επιμέρους Α/Γ, σε περίπτωση που απαιτείται μείωση της ισχύος. Τέλος, οι απαιτήσεις για επιμέρους Α/Γ στους κώδικες δικτύων θα είναι ίδιες με τις απαιτήσεις για Α/Γ σε Α/Π. Μια εναλλακτική μέθοδος θα ήταν η υλοποίηση του ελέγχου συχνότητας στο επίπεδο του Α/Π ως σύστημα ανοικτού βρόχου. Σε αυτήν την περίπτωση ο έλεγχος θα εφαρμοζόταν στο άθροισμα της ενεργού ισχύος των επιμέρους Α/Γ και όχι στη μετρούμενη τιμή ενεργού ισχύος στο ΣΚΣ του Α/Π, επιτρέποντας ένα σφάλμα που θα αντιστοιχούσε στις απώλειες στο εσωτερικό δίκτυο του Α/Π, βλέπε επίσης Παράρτημα Π9.

Ο ελεγκτής στο επίπεδο του Α/Π εξασφαλίζει τον έλεγχο της ενεργού ισχύος στο ΣΚΣ του Α/Π ενώ σε περίπτωση διακοπής της λειτουργίας επιμέρους Α/Γ θα είναι σε θέση να αντισταθμίσει την απώλεια ισχύος, αυξάνοντας την απαιτούμενη ενεργό ισχύ από τις εναπομείνουσες σε λειτουργία Α/Γ. Επιπλέον οι καθυστερήσεις που ενδεχομένως υπεισέρχονται στο σύστημα επικοινωνίας των Α/Γ και του ελεγκτή Α/Π, αν και δεν αποτελούν αντικείμενο διερεύνησης στην παρούσα διατριβή, καθίστανται συνεχώς μειούμενες λόγω της διαρκούς εξέλιξης των τηλεπικοινωνιακών συστημάτων που εφαρμόζονται στα σύγχρονα συστήματα ελέγχου.

Στόχος του ελεγκτή συχνότητας του Α/Π είναι να εξασφαλίζει τη στρατηγική Μέγιστης Απολαβής Ισχύος όταν δεν προβλέπεται συμμετοχή στη ρύθμιση συχνότητας ή περιορισμός ισχύος λόγω εφεδρείας. Στην περίπτωση αυτή η διαθέσιμη ισχύς $P_{avail}^{WT,i}$ τίθεται ως σήμα αναφοράς για κάθε Α/Γ. Ο διαχειριστής του συστήματος ορίζει τα σήματα περιορισμού ρυθμού μεταβολής της ενεργού ισχύος - $Rate_{min}^{max}$ -, παροχής εφεδρείας ενεργού ισχύος τύπου *delta* - P_{Δ} - ή τύπου *balance* - $P_{balance}$. Το σύστημα πρωτεύουσας ρύθμισης παρέχει το σήμα μεταβολής ενεργού ισχύος ΔP_{aux}^{WF} με βάση τις μεταβολές της συχνότητας του συστήματος. Το είδος του ελέγχου που εφαρμόζεται στην πρωτεύουσα ρύθμιση ενδέχεται να διαφέρει (έλεγχος αδράνειας, έλεγχος στατισμού, συνδυασμένος έλεγχος) και πρόκειται να αναλυθεί στη συνέχεια του παρόντος κεφαλαίου. Η κατανομή ενεργού ισχύος γίνεται αναλογικά με βάση τη διαθέσιμη ενεργό ισχύ κάθε Α/Γ, βλέπε εξίσωση (8.14):

$$P_{ref}^{WT,i} = \frac{P_{avail}^{WT,i}}{P_{avail}^{WF}} P_{ref}^{WF} \quad (8.14)$$

Το διάγραμμα ελέγχου απεικονίζεται στο Σχήμα 8.17.



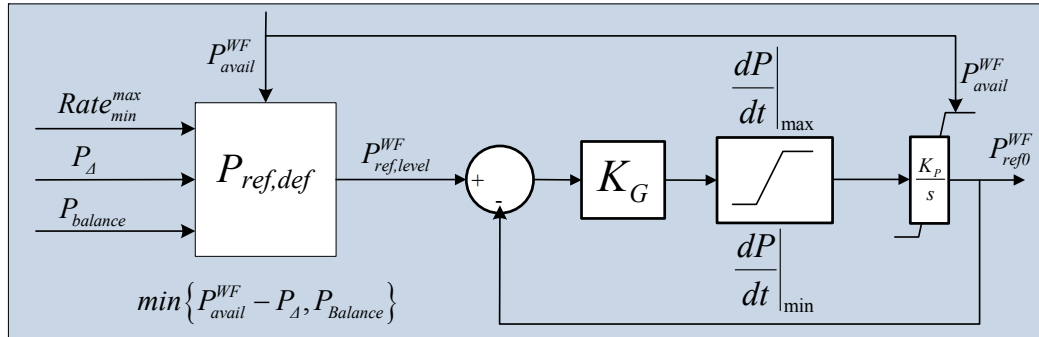
Σχήμα 8.17. Διάγραμμα ελέγχου Α/Π με Α/Γ μεταβλητών στροφών (Τύπου Γ ή Δ)

Σημειώνεται ότι αντίθετα με το σχήμα ελέγχου για τις Α/Γ Τύπου Γ και Δ, που έχει περιγραφεί στα Κεφάλαια 6 και 7 αντίστοιχα της παρούσας διατριβής, στο Σχήμα 8.17 η αναφορά για την ταχύτητα περιστροφής της Α/Γ, ω_r^{ref} , δεν είναι πλέον η ονομαστική ταχύτητα αλλά προκύπτει από τη χαρακτηριστική ελέγχου στροφών με βάση τη μετρούμενη ταχύτητα ανέμου μετά από κατάλληλο φίλτρο. Αν διατηρούνταν η ονομαστική ταχύτητα περιστροφής ως τιμή αναφοράς, ενδέχεται η Α/Γ να επιταχύνονταν έως την ονομαστική ταχύτητα πριν ο ελεγκτής ταχύτητας προλάβει να περιορίσει την ταχύτητα μέσω του συστήματος ελέγχου γωνίας βήματος. Αυτό θα οδηγούσε σε υψηλότερα φορτία κόπωσης (*fatigue loads*) στην Α/Γ όταν ο έλεγχος ισχύος αναλαμβάνεται από τον ελεγκτή του Α/Π, λόγω υψηλότερης ταχύτητας δρομέα. Επίσης, οι μετρούμενες τιμές ενεργού ισχύος επιμέρους Α/Γ αλλά και του Α/Π φιλτράρονται με κατάλληλα χαμηλοπερατά φίλτρα πρώτης τάξεως ώστε να αποφευχθεί η ενίσχυση τυχόν διακυμάνσεων ροπής $3p$ – λόγω περιστροφικής κίνησης δρομέα – στην ισχύ μέσω του συστήματος ελέγχου. Οι αναλογικοί-ολοκληρωτικοί ελεγκτές που περιλαμβάνονται στο σύστημα ελέγχου έχουν τροποποιηθεί καταλλήλως ώστε να αποφευχθούν περιπτώσεις *windup* των ολοκληρωτικών ελεγκτών.

Ο τρόπος με τον οποίο υλοποιείται η συμβολή στη ρύθμιση συχνότητας επηρεάζει αλλά και καθορίζεται σε σημαντικό βαθμό από τα φορτία κόπωσης που αναπτύσσονται στη μηχανική κατασκευή των Α/Γ. Η καταπόνηση των μηχανικών μερών της Α/Γ αποτέλεσε βασική παράμετρο σχεδίασης των Α/Γ όλων των τύπων, από τις πρώτες Α/Γ Τύπου Α έως και τα τελευταία μοντέλα Α/Γ Τύπου Γ ή Δ. Ο χρόνος ζωής των μερών της Α/Γ διαμορφώνεται όχι μόνο από τη διαμόρφωση και τη συγκεκριμένη σύνδεση τους αλλά και από το σύστημα ελέγχου που εφαρμόζεται. Στο [THO03] έχει αναλυθεί η επίδραση στα φορτία για Α/Γ που λειτουργεί στο 50% και στο 100% της διαθέσιμης ενεργού ισχύος. Οι δύο βασικοί τρόποι για τη μείωση της εξαγόμενης ισχύος, μέσω του συστήματος ελέγχου γωνίας βήματος πτερυγίων και μέσω της μείωσης της ταχύτητας περιστροφής, παρουσιάζουν

διαφορετικά φορτία κόπωσης για την Α/Γ. Στη δεύτερη περίπτωση τα φορτία κόπωσης στο δρομέα ήταν μειωμένα κατά 25% με 50% σε σχέση με την εναλλακτική μέθοδο χρήσης του συστήματος ελέγχου γωνίας βήματος. Επομένως στρατηγικές ρύθμισης συχνότητας που επιβάλλουν ρύθμιση της γωνίας βήματος τείνουν να περιορίζουν σημαντικά το χρόνο ζωής της μηχανικής κατασκευής της Α/Γ. Θα ήταν δυνατό επίσης να εφαρμόζεται η μέθοδος που χρησιμοποιεί το σύστημα ελέγχου γωνίας βήματος για ρύθμιση συχνότητας σε μεμονωμένα περιστατικά που απαιτείται σημαντική συμβολή ενεργού ισχύος και σχετικά ταχεία απόκριση (έντονα μεταβατικά φαινόμενα συχνότητας) διατηρώντας τον έλεγχο ταχύτητας του δρομέα για συνεχή ρύθμιση της συχνότητας του συστήματος (διακυμάνσεις συχνότητας με μικρό εύρος γύρω από την ονομαστική συχνότητα που μπορεί να οφείλονται σε διακυμάνσεις της ταχύτητας ανέμου, ιδιαίτερα σε αυτόνομα συστήματα).

Ο περιοριστής του ρυθμού μεταβολής της ενεργού ισχύος δίνεται στο Σχήμα 8.18.



Σχήμα 8.18. Περιορισμός ρυθμού μεταβολής ενεργού ισχύος σε Α/Π με Α/Γ μεταβλητών στροφών (Τύπου Γ ή Δ)

Οι προσομοιώσεις που ακολουθούν πραγματοποιήθηκαν με μέγιστο ρυθμό μεταβολής της ενεργού ισχύος 0.02 MW/sec (0.01 α.μ/δευτ. για ονομαστική ισχύ Α/Γ 2 MW). Στόχος επίσης του περιοριστή είναι η εξασφάλιση ότι στην περίπτωση που κατά τη διάρκεια της ζητούμενης εφεδρείας ισχύος η ταχύτητα ανέμου μειωθεί σε επίπεδο που η διαθέσιμη ισχύς είναι μικρότερη του επιπέδου ισχύος της Α/Γ να αποφευχθεί η απαίτηση από την Α/Γ να παράγει παραπάνω από τη διαθέσιμη ισχύ, ενδεχόμενο που θα μπορούσε να οδηγήσει σε επιβράδυνση του δρομέα της Α/Γ μέχρι και σε αστάθεια με συνέπεια την αποσύνδεση της Α/Γ για λόγους προστασίας. Σημειώνεται ότι, όπως αποτυπώνεται και στο Σχήμα 8.17, ο περιοριστής ρυθμού μεταβολής προηγείται του σήματος ελέγχου συχνότητας ΔP_{freq}^{WF} με αποτέλεσμα οι ρυθμοί μεταβολής της ενεργού ισχύος του Α/Π κατά τη διάρκεια μεταβατικών μεταβολών στη συχνότητα του συστήματος να είναι αρκετά μεγαλύτεροι του ορίου που τίθεται στον περιοριστή ρυθμού. Στο [CHR01] σημειώνεται ότι ο μέγιστος ρυθμός μεταβολής ισχύος του Α/Π κατά τη διάρκεια απότομων μειώσεων στην ταχύτητα ανέμου πρέπει να αντιστοιχεί σε μείωση της παραγωγής από το 100% της ονομαστικής ισχύος σε λιγότερο του 20% σε 5 (πέντε) δευτερόλεπτα κάτω από τις χειρίστες συνθήκες λειτουργίας. Η εταιρεία Enercon αναφέρει ότι ο ρυθμός μεταβολής της ενεργού ισχύος κατά τη διάρκεια κανονικής λειτουργίας και την εφαρμογή σήματος αναφοράς για την ενεργό ισχύ του Α/Π είναι προσαρμόσιμος μεταξύ 1 MW/min και 4 MW/min, [TAV10].

Εκτίμηση διαθέσιμης ενεργού ισχύος Α/Γ και Α/Π

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι η εκτίμηση της διαθέσιμης ενεργού ισχύος είναι ιδιαίτερα κρίσιμη τόσο για τη σχεδίαση αξιόπιστου συστήματος ρύθμισης συχνότητας στις Α/Γ όσο και για τον υπολογισμό των απωλειών ενέργειας που συνδέονται με τη λειτουργία των Α/Γ σε εφεδρεία ισχύος, βλέπε Κεφάλαιο 9 παρούσας διατριβής.

Για λόγους πληρότητας της ανάλυσης στην παρούσα ενότητα αναφέρονται εδώ δύο εναλλακτικοί τρόποι υπολογισμού της διαθέσιμης ενεργού ισχύος των Α/Γ (και κατ' επέκταση του Α/Π) με βάση τη διαθέσιμη βιβλιογραφία. Αξίζει να σημειωθεί ότι το ζήτημα υπολογισμού της διαθέσιμης ενεργού ισχύος παραμένει ανοιχτό πεδίο διαφωνίας μεταξύ διαχειριστών του συστήματος και επιμέρους εταιρειών αιολικής παραγωγής όσον αφορά τον πλέον αποδοτικό και αξιόπιστο τρόπο εκτίμησης της

διαθέσιμης ενεργού ισχύος, αφού με βάση αυτήν υπολογίζονται οι απώλειες ενέργειας για το Α/Π κατά τη συμβολή σε λειτουργίες στήριξης του δικτύου.

Η πρώτη μέθοδος, γνωστή και ως μέθοδος καμπύλης ισχύος, είναι προέκταση της παρούσας πρακτικής που εφαρμόζεται στο Α/Π Nysted της Δανίας, [NYS11], χρησιμοποιεί μετρήσεις της ταχύτητας ανέμου από τη νασσέλα (Nacelle Wind Speed – NWS) και μια καμπύλη ισχύος για την εκτίμηση της πιθανής παραγωγής, [EIS07]. Για τη βελτίωση της εκτίμησης έχει προταθεί μια διόρθωση των μετρήσεων ώστε να ληφθούν υπ' όψιν τυχόν μεταβολές στη ροή του ανέμου τοπικά. Προτείνεται επίσης η χρήση δυναμικού μοντέλου των φαινομένων απωλειών ομόρου (wake effect) ώστε να συμπεριληφθούν οι αλλαγές μεταξύ κανονικής λειτουργίας και επιβεβλημένης λειτουργίας σε εφεδρεία ισχύος.

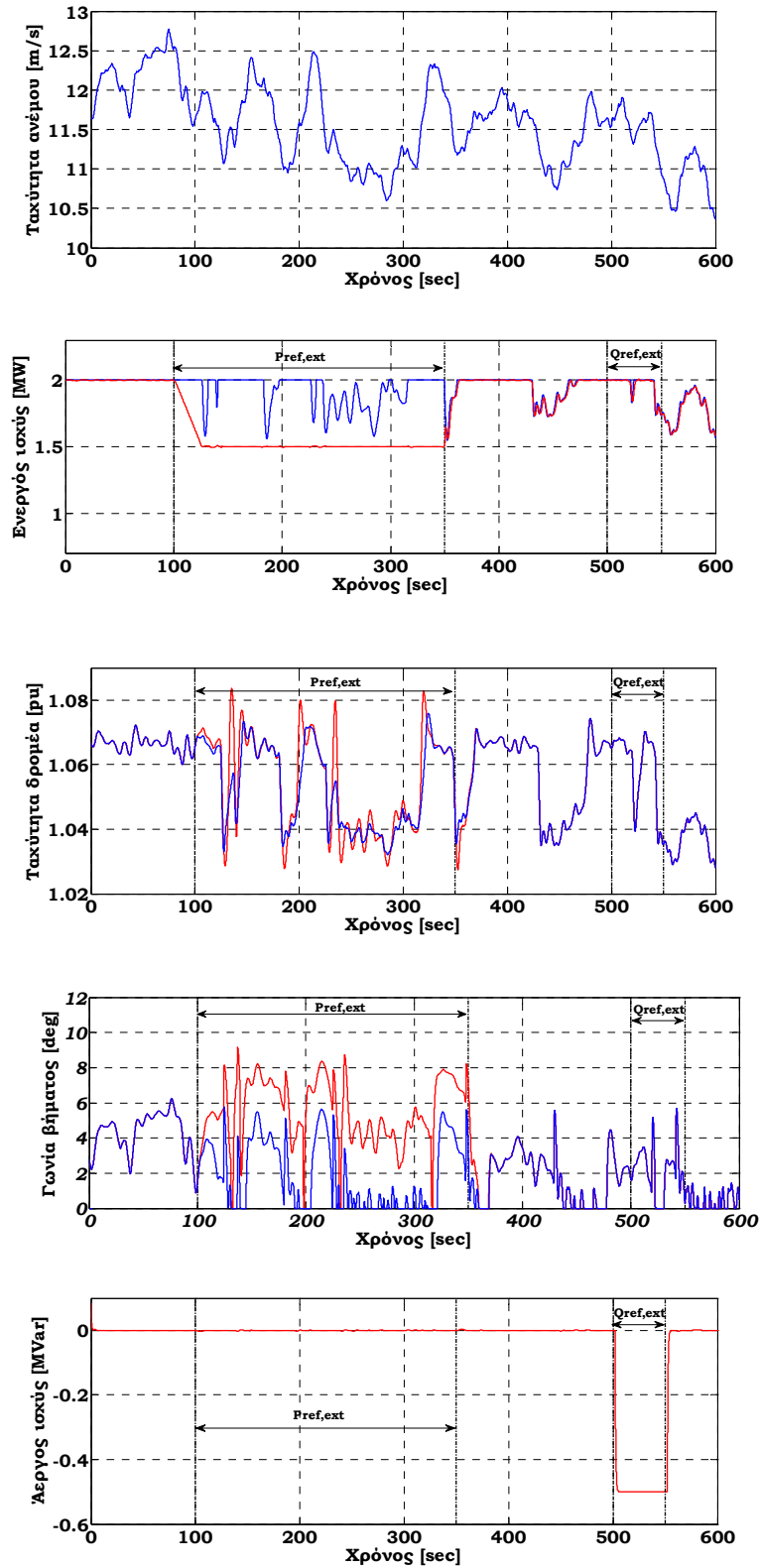
Η δεύτερη εναλλακτική μέθοδος χρησιμοποιεί μετρήσεις ισχύος αντί για μετρήσεις ανέμου και δεν απαιτεί διόρθωση. Το Α/Π χωρίζεται σε δύο δίκτυα, χρησιμοποιώντας το ένα για την εκτίμηση της ολικής παραγωγής του Α/Π και το άλλο για την εφαρμογή των εντολών μείωσης της εξαγόμενης ισχύος από το διαχειριστή του συστήματος. Αν και η μέθοδος αυτή έχει το πλεονέκτημα της απλότητας, εν τούτοις η δυνατότητα ρύθμισης της ισχύος του Α/Π σε μειωμένα επίπεδα (σε λειτουργία εφεδρείας) περιορίζεται στο 50% της ολικής εγκαταστημένης ισχύος του Α/Π ή ακόμα λιγότερο ανάλογα με τους περιορισμούς στη λειτουργία εφεδρείας κάθε Α/Γ.

8.6. Εφεδρεία ισχύος σε Α/Γ Τύπου Γ και Δ

Η στοχαστική φύση της αιολικής ενέργειας δημιουργεί την ανάγκη για επιπρόσθετα μέτρα όσον αφορά τον έλεγχο και την εξασφάλιση απαραίτητων εφεδρειών ενεργού ισχύος, λειτουργία την οποία καθορίζουν οι διαχειριστές των ΣΗΕ. Η παροχή εφεδρείας εκ μέρους των Α/Π σταδιακά ενσωματώνεται στους κώδικες των δικτύων, ιδιαίτερα στα συστήματα με αυξημένα επίπεδα διείσδυσης αιολικής ισχύος.

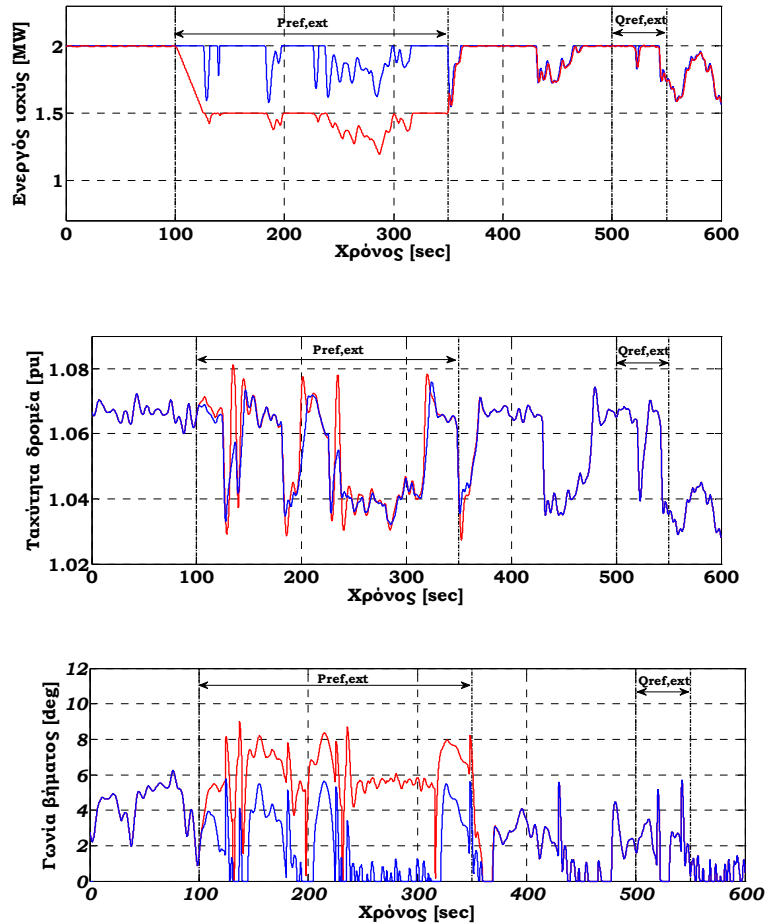
Χρησιμοποιώντας τις χρονοσειρές ανέμου, που παρήχθησαν σύμφωνα με τη διαδικασία που περιγράφεται στο Κεφάλαιο 2, προσομοιώθηκε η συμπεριφορά των Α/Γ μεταβλητών στροφών στην περιοχή υψηλών ταχυτήτων ανέμου (~12 m/s). Επιδεικνύεται η δυνατότητα του σχεδιασμένου συστήματος ελέγχου για Α/Π με Α/Γ μεταβλητών στροφών (Τύπου Γ ή Δ) να παρέχει τη δυνατότητα συμμετοχής στη ρύθμιση συχνότητας μέσω παροχής εφεδρείας ισχύος.

Στην Περιοχή 3 ονομαστικής λειτουργίας η γωνία βήματος αντανακλά το στοχαστικό χαρακτήρα του ανέμου και ακολουθεί τις αργές μεταβολές στην ταχύτητα του ανέμου. Το σύστημα ελέγχου ενεργού ισχύος κατορθώνει να διατηρεί ονομαστική ενεργό ισχύ εξόδου όσο η ταχύτητα ανέμου υπερβαίνει την ονομαστική της τιμή. Στα σχήματα που ακολουθούν απεικονίζεται η δυνατότητα της Α/Γ να ρυθμίζει την παραγωγή ισχύος παρέχοντας εφεδρεία ισχύος – ακολουθώντας τη λογική ρύθμισης των συμβατικών μονάδων – για την ενεργό. Συγκεκριμένα στο Σχήμα 8.19 η Α/Γ Τύπου Γ λειτουργεί σε εφεδρεία ισχύος τύπου *balance* με περιορισμό στο ρυθμό μεταβολής της ενεργού ισχύος (*ramp rate limitation*). Για την πληρότητα της παρουσίασης έχει προστεθεί και σήμα όσον αφορά την άεργο ισχύ, κατά τη διάρκεια του οποίου η Α/Γ πρέπει να παράγει 0.5 MVar για χρονικό διάστημα 50 sec. Πριν και μετά το εξωτερικό σήμα καθορισμού της άεργου ισχύος η Α/Γ λειτουργεί με μοναδιαίο ΣΙ. Ο αποξενωμένος έλεγχος ενεργού και άεργου ισχύος επιτρέπει την παραπάνω λειτουργία, δεδομένου ότι η ταχύτητα ανέμου είναι αρκούντως μεγάλη. Το σήμα περιορισμού της ενεργού ισχύος συνεπάγεται αυξημένες τιμές γωνίας βήματος. Το σήμα αναφοράς για την εφεδρεία δίνεται από το διαχειριστή της μονάδας αιολικής παραγωγής ή το Κέντρο Ελέγχου ενέργειας του διαχειριστή του συστήματος.



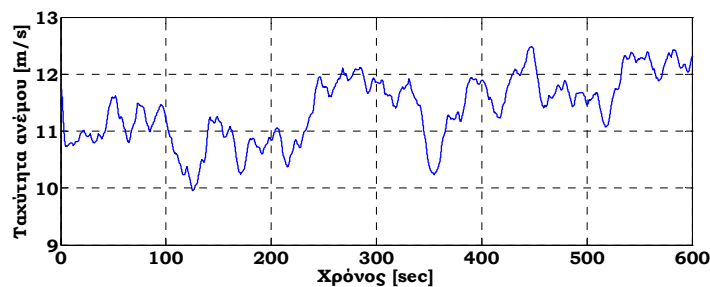
Σχήμα 8.19. Α/Γ Τύπου Γ: Ταχύτητα ανέμου, ενεργός ισχύς και διαθέσιμος ενεργός ισχύς (κόκκινη και μπλε καμπύλη αντίστοιχα), ταχύτητα δρομέα γεννήτριας, γωνία βήματος περηνγίων και άεργος ισχύς για στοχαστική ταχύτητα ανέμου στην περιοχή των 12 m/s με ή χωρίς εφεδρεία ενεργού ισχύος τύπου balance και εξωτερικό σήμα αναφοράς για την άεργο ισχύ (κόκκινη και μπλε γραμμική αντίστοιχα)

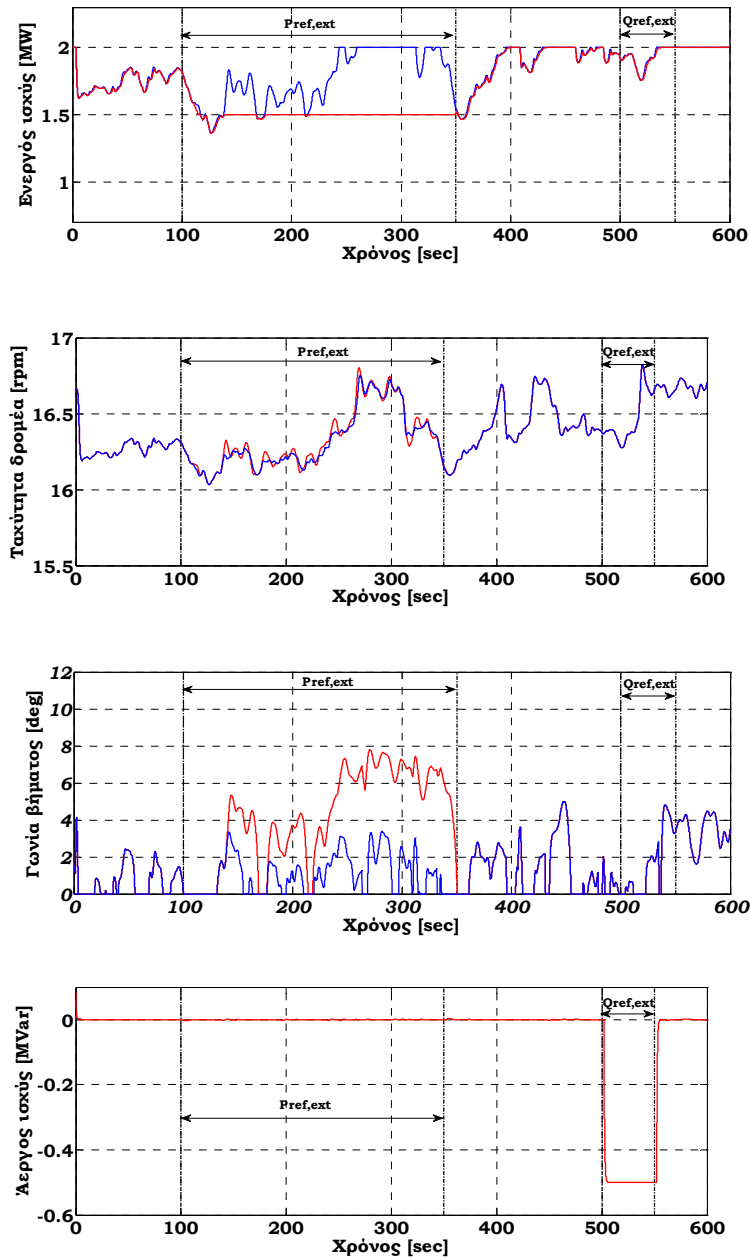
Κατ' αντιστοιχία με την εφεδρεία τύπου *balance*, το μοντέλο της Α/Γ Τύπου Γ εφοδιάστηκε επιπλέον με τη δυνατότητα για εφεδρεία τύπου *delta*, όπου εξασφαλίζεται ένα καθορισμένο ποσό εφεδρείας ισχύος που είναι διαθέσιμο. Το Σχήμα 8.20 συνοψίζει τα αποτελέσματα για εφεδρεία ισχύος 0.5 MW. Η λειτουργία αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε σύστημα αυτόματης πρωτεύουσας ρύθμισης συχνότητας. Ενσωματώθηκε επίσης ο περιορισμός του ρυθμού μεταβολής της ενεργού ισχύος ώστε να αποφευχθούν απότομες αλλαγές. Η απόκριση αέργου ισχύος είναι ίδια με αυτή του Σχήματος 8.19.



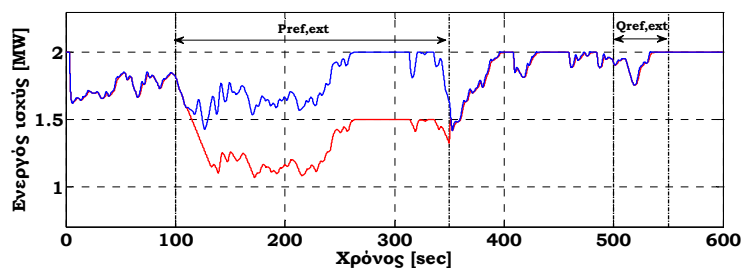
Σχήμα 8.20. Α/Γ Τύπου Γ: Ταχύτητα ανέμου, ενεργός ισχύς και διαθέσιμος ενεργός ισχύς (κόκκινη και μπλε καμπύλη αντίστοιχα), ταχύτητα δρομέα γεννήτριας, γωνία βήματος πτερυγίων και άεργος ισχύς για στοχαστική ταχύτητα ανέμου στην περιοχή των 12 m/s με ή χωρίς εφεδρεία ενεργού ισχύος τύπου *delta* και εξωτερικό σήμα αναφοράς για την άεργο ισχύ (κόκκινη και μπλε γραμμική αντίστοιχα)

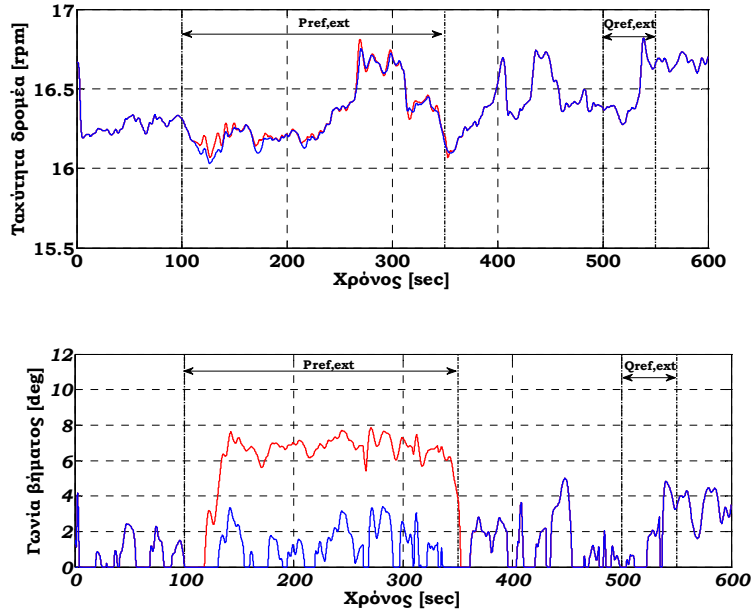
Αντίστοιχα αποτελέσματα προκύπτουν για τις Α/Γ Τύπου Δ2, βλέπε Σχήματα 8.21 και 8.22 για χρονοσειρά ανέμου στην Περιοχή 3 ονομαστικής λειτουργίας.





Σχήμα 8.21. Α/Γ Τύπου Δ2: Ταχύτητα ανέμου, ενεργός ισχύς (κόκκινη καμπύλη) και διαθέσιμος ενεργός ισχύς (μπλε καμπύλη), άεργος ισχύς, ταχύτητα δρομέα γεννήτριας και γωνία βήματος πτερυγίων για στοχαστική ταχύτητα ανέμου στην περιοχή των 12 m/s με ή χωρίς εφεδρεία ενεργού ισχύος τύπου delta και εξωτερικό σήμα αναφοράς για την άεργο ισχύ (κόκκινη και μπλε γραμμή αντίστοιχα)



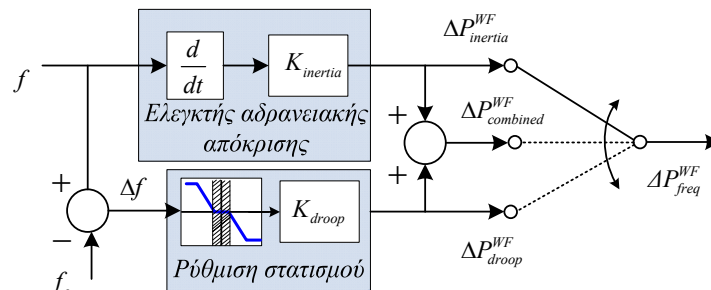


Σχήμα 8.22. Α/Γ Τύπου Δ2: Ταχύτητα ανέμου, ενεργός ισχύς (κόκκινη καμπύλη) και διαθέσιμος ενεργός ισχύς (μπλε καμπύλη), ταχύτητα δρομέα γεννήτριας και γωνία βήματος περυνίων για στοχαστική ταχύτητα ανέμου στην περιοχή των 12 m/s με ή χωρίς εφεδρεία ενεργού ισχύος τύπου delta και εξωτερικό σήμα αναφοράς για την άεργο ισχύ (κόκκινη και μπλε γραμμή αντίστοιχα)

8.7. Ελεγκτής συχνότητας σε Α/Γ Τύπου Γ και Δ

Ο γενικός ελεγκτής που προτείνεται για Α/Γ μεταβλητών στροφών (Τύπου Γ και Δ) ενσωματώνει τις δύο θεμελιώδεις μεθόδους απόκρισης σε μεταβολές της συχνότητας του συστήματος, τον έλεγχο αδρανειακής απόκρισης (*inertia control*) και τον έλεγχο στατισμού (*droop control*). Στο τέλος του παρόντος κεφαλαίου, για λόγους πληρότητας της ανάλυσης και της παρουσίας, περιλαμβάνεται και ανάλυση της δευτερεύουσας ρύθμισης συχνότητας με συμβολή Α/Γ μεταβλητών στροφών στη ρύθμιση φορτίου-συχνότητας.

Κάθε μία από τις μεθόδους συμβολής στην πρωτεύουσα ρύθμιση, καθώς και ο συνδυασμός τους, μπορεί να επιλεγεί στο σχήμα ελέγχου που απεικονίζεται στο Σχήμα 8.23. Ο ελεγκτής αδρανειακής απόκρισης μπορεί να ενσωματωθεί στο σύστημα ελέγχου των επιμέρους Α/Γ ενός Α/Π (με στόχο τη γρήγορη απόκριση σε μεταβολές της συχνότητας) ενώ η ρύθμιση με βάση τη χαρακτηριστική φορτίου-συχνότητας και το στατισμό στον ελεγκτή στο επίπεδο του Α/Π, [MAR09c]. Κατά τη μελέτη της συμβολής των Α/Γ γενικά και Α/Π ειδικά στη ρύθμιση συχνότητας στα μη διασυνδεδεμένα συστήματα εφαρμόζεται η μέθοδος συγκεντρωτικών μοντέλων που περιγράφεται στο Παράρτημα. Επομένως η διάκριση μεταξύ ελεγκτή στο επίπεδο του Α/Π και στο επίπεδο των Α/Γ δεν καθορίζει πλέον τη σχεδίαση των ελεγκτών συχνότητας που περιγράφονται στη συνέχεια.



Σχήμα 8.23. Ελεγκτής συχνότητας σε Α/Π με Α/Γ μεταβλητών στροφών (Τύπου Γ και Δ)

Ελεγκτής αδρανειακής απόκρισης – εικονική αδράνεια

Σύμφωνα με την αρχή λειτουργίας της αδρανειακής απόκρισης, η A/Γ αποκρίνεται με βάση το ρυθμό μεταβολής της συχνότητας (Rate of Change of Frequency – ROCOF). Από τη στιγμή που το σύστημα ελέγχου χρησιμοποιεί το σήμα $\frac{df}{dt}$, απαιτείται προσεκτικό φιλτράρισμα του σήματος για αποφυγή του σχετικού θορύβου. Για την αποφυγή αυξημένης καταπόνησης της γεννήτριας είναι δυνατή επίσης η χρήση ζώνης υστέρησης της τάξης των 0.001-0.01 Hz/sec, [JOH10]. Η μέθοδος αυτή αναφέρεται συχνά ως εικονική αδράνεια (virtual inertia), καθώς εισάγει στην ροπή αναφοράς της A/Γ έναν όρο ανάλογο προς το $2H_{WT} \frac{df}{dt}$, [MUL05]. Η επιπρόσθετη ενέργεια που μπορεί να παραχθεί μέσω της αδρανειακής απόκρισης είναι περιορισμένη από την ποσότητα της κινητικής ενέργειας που είναι αποθηκευμένη στη στρεφόμενη μάζα του δρομέα, τις αποδεκτές μεταβολές στην ταχύτητα του δρομέα και τη λειτουργία επαναφοράς της κινητικής ενέργεια στην προ του μεταβατικού τιμή και επομένως και της ταχύτητας περιστροφής στην τιμή που είχε πριν την αδρανειακή απόκριση. Αυτό σημαίνει ότι κατά τη διάρκεια π.χ. μιας μεταβατικής μείωσης της συχνότητας υπάρχει δυνατότητα εκμετάλλευσης πρόσθετης ισχύος, αν η τιμή αναφοράς για την ενεργό ισχύ στην A/Γ ρυθμιστεί κατάλληλα στις μεταβολές της συχνότητας. Αυτή η προσαρμογή της ενεργού ισχύος καθιστά αντιληπτές τις μεταβολές της συχνότητας στην A/Γ μεταβλητών στροφών, ιδιότητα που, όπως αναλύθηκε στην ενότητα 8.2 περί εγγενούς αδρανειακής απόκρισης των διάφορων τύπων A/Γ, δεν ισχύει στην περίπτωση των A/Γ μεταβλητών στροφών λόγω παρεμβολής των ηλεκτρονικών μετατροπέων. Όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 8.23, το σήμα αναφοράς της ενεργού ισχύος διορθώνεται με τον πρόσθετο όρο $\Delta P_{inertia}^{WT}$, που υπολογίζεται με βάση το ρυθμό μεταβολής της συχνότητας. Η ισχύς που εξάγεται από τη στρεφόμενη μάζα του δρομέα κατά τη διάρκεια μεταβολής στη συχνότητα (και επομένως στην ταχύτητα περιστροφής του δρομέα) μπορεί να εκφραστεί ως εξής σε α.μ., [TAR09]:

$$\Delta P_{inertia}^{WT} = -2H_{WT} \frac{df}{dt} f \quad (8.15)$$

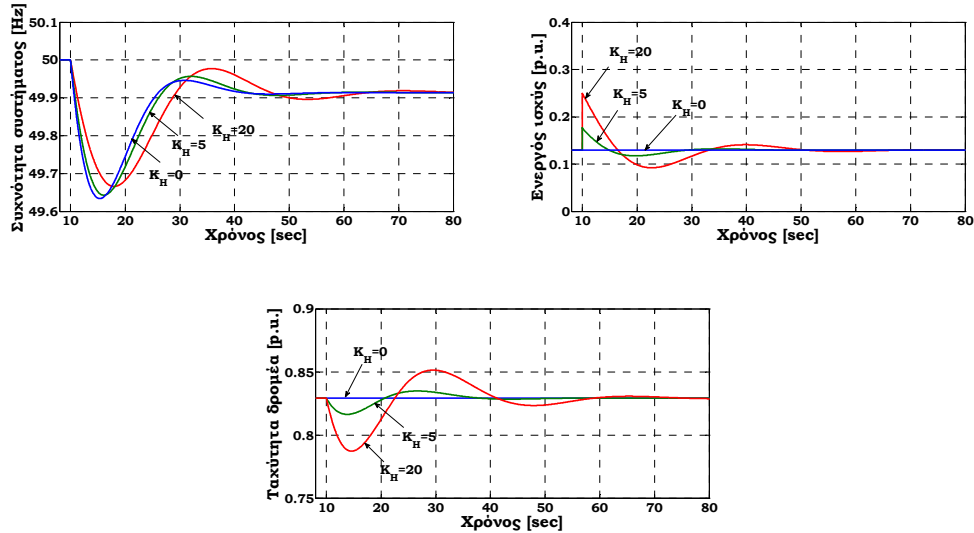
όπου H_{WT} είναι η σταθερά αδρανείας της A/Γ σε sec υπολογισμένη στην ονομαστική ταχύτητα περιστροφής (βλέπε Παράρτημα Π1) και εκφράζει την κινητική ενέργεια που βρίσκεται αποθηκευμένη στο δρομέα σε ονομαστική ταχύτητα περιστροφής ή αλλιώς το χρόνο που απαιτείται για τη μείωση της ταχύτητας περιστροφής από την ονομαστική τιμή στο μηδέν διατηρώντας ονομαστική την ισχύ της A/Γ. Όπως έχει ήδη αναφερθεί παραπάνω, οι A/Γ μεταβλητών στροφών χωρίς πρόσθετο έλεγχο δεν απορροφούν ή παράγουν ενέργεια κατά τη διάρκεια μεταβολών στη συχνότητα του συστήματος. Με βάση την εξίσωση (8.15), σχεδιάζεται ο ελεγκτής αδρανειακής απόκρισης ή αλλιώς ο έλεγχος εικονικής αδρανείας:

$$\Delta P_{inertia}^{WT} = -K_H H_{WT} \frac{df}{dt} \quad (8.16)$$

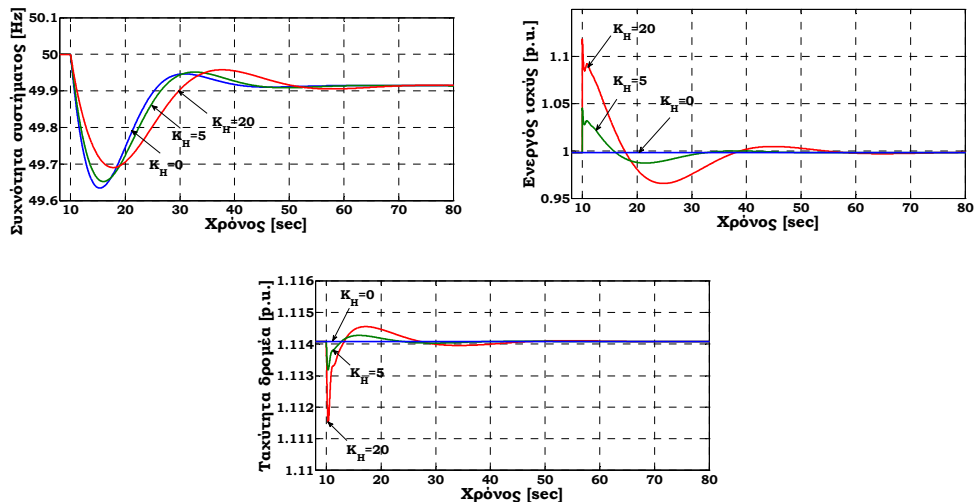
όπου το α.μ. κέρδος K_H μπορεί να διαμορφωθεί κατάλληλα και η συχνότητα σε α.μ. αμελείται καθότι εν γένει προσεγγίζει τη μονάδα. Από την (8.16) προκύπτει ότι το συνολικό κέρδος του ελεγκτή αδρανειακής απόκρισης $K_{inertia}$, όπως αυτό δίνεται στο Σχήμα 8.23 προκύπτει από τον πολ/σμό του α.μ. κέρδους K_H με τη σταθερά αδρανείας H_{WT} .

Είναι σημαντικό να αναφερθεί εδώ ότι η πραγματική ενέργεια που βρίσκεται αποθηκευμένη ως κινητική στο δρομέα ενδέχεται να είναι μικρότερη από αυτή που αντιστοιχεί σε $2H_{WT}$, καθώς η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα στις A/Γ μεταβλητών στροφών κυμαίνεται σε μεγάλο εύρος τιμών και μπορεί να απέχει αρκετά από την ονομαστική τιμή της. Παρ' όλα αυτά, η προτεινόμενη στρατηγική ελέγχου επιτρέπει την εξαγωγή περισσότερης ενέργειας χωρίς να οδηγείται το σύστημα σε αστάθεια, δηλ. να οδηγείται η ταχύτητα περιστροφής στο μηδενισμό. Οι τιμές για το κέρδος του ελεγκτή αδρανειακής απόκρισης που έχουν επιλεγεί είναι σχετικά μικρές και δεν προκύπτει ζήτημα αστάθειας. Το γεγονός ότι η ταχύτητα περιστροφής δεν είναι μόνιμα ίση με την ονομαστική της τιμή

οδηγεί σε σχετικά μεγαλύτερη συμβολή στην περιοχή χαμηλών ταχυτήτων, εφ' όσον η τιμή του κέρδους του ελεγκτή παραμένει σταθερή, υπό την έννοια ότι η Α/Γ με μικρή ταχύτητα περιστροφής θα αποδώσει μεγαλύτερο ποσοστό της αδρανειακής-κινητικής ενέργειας που είναι αποθηκευμένη πραγματικά στο δρομέα. Στα Σχήματα 8.24 και 8.25 δίνονται τα αποτελέσματα προσομοιώσεων με το απλουστευμένο μοντέλο Α/Γ μεταβλητών στροφών και δικτύου για βηματική αύξηση του φορτίου κατά 5% για διαφορετικές τιμές του κέρδους του ελεγκτή αδρανειακής απόκρισης K_H στην περιοχή χαμηλών και υψηλών ταχυτήτων ανέμου αντίστοιχα. Τη στιγμή της αλλαγής του φορτίου η αιολική παραγωγή αντιστοιχεί στο 20% του φορτίου. Τα δεδομένα των απλουστευμένων μοντέλων Α/Γ και δικτύου μπορούν να αναζητηθούν στο Παράρτημα Π8. Σημειώνεται ότι στην περίπτωση αυτή η συμβολή της αδρανειακής απόκρισης δεν περιορίζεται από την ονομαστική ισχύ της Α/Γ, επιτρέπεται δηλ. η αύξηση της ενεργού ισχύος μέχρι και 10% πάνω από την ονομαστική ισχύ.



Σχήμα 8.24. Συχνότητα συστήματος, ενεργός ισχύς Α/Γ μεταβλητών στροφών και ταχύτητα περιστροφής για βηματική αύξηση φορτίου κατά 5% με υλοποίηση του ελέγχου αδρανειακής απόκρισης – Περιοχή χαμηλών ταχυτήτων ανέμου



Σχήμα 8.25. Συχνότητα συστήματος, ενεργός ισχύς Α/Γ μεταβλητών στροφών και ταχύτητα περιστροφής για βηματική αύξηση φορτίου κατά 5% με υλοποίηση του ελέγχου αδρανειακής απόκρισης – Περιοχή υψηλών ταχυτήτων ανέμου

Όπως είναι λογικό, μεγαλύτερες τιμές του κέρδους αδρανειακής απόκρισης οδηγούν σε μείωση του ρυθμού μείωσης της συχνότητας στα πρώτα δευτερόλεπτα μετά τη μεταβατική μείωση της συχνότητας και σε μεγαλύτερο χρόνο αποκατάστασης της μόνιμης κατάστασης της συχνότητας.

Ταυτόχρονα, αύξηση του κέρδους δε συνεπάγεται απαραίτητα βελτίωση της ελάχιστης μεταβατικής συχνότητας για λόγους που θα εξηγηθούν στη συνέχεια.

Ελλείπει στατισμού στον έλεγχο των Α/Γ, η μόνιμη τιμή της συχνότητας μετά το σφάλμα είναι ίδια σε όλες τις περιπτώσεις και μάλιστα ταυτίζεται με την τιμή που θα είχε το σύστημα αν η αιολική παραγωγή ήταν μηδενική.

Στην περίπτωση της λειτουργίας στην περιοχή των υψηλών ταχυτήτων για μεγάλες τιμές του κέρδους αδρανειακής απόκρισης (κόκκινη καμπύλη στο Σχήμα 8.25), η δράση του ελέγχου γωνίας βήματος καθορίζει την παραγωγή ενεργού ισχύος από τη στιγμή που η ταχύτητα υπερβαίνει την ονομαστική της τιμή (δηλ. 1.114 α.μ. στο μοντέλο αυτό). Με τον τρόπο αυτό περιορίζει την παραγωγή ενεργού ισχύος μη επιτρέποντας την εξαγωγή μέρους της διαθέσιμης ενεργού ισχύος στο σύστημα, γεγονός που λειτουργεί αρνητικά ως προς την αδρανειακή συμβολή της Α/Γ στη ρύθμιση συχνότητας.

Επιπλέον στο Σχήμα 8.25 παρατηρείται ότι η παραγωγή ενεργού ισχύος υπερβαίνει την ονομαστική (δηλ. 1 α.μ.) για περιορισμένο χρονικό διάστημα. Αυτό δεν αποτελεί πρόβλημα από τη στιγμή που έχει ληφθεί υπ' όψιν κατά τη σχεδίαση της γεννήτριας ώστε να είναι σε θέση να χειριστεί μέγιστο ισχύος πάνω από το 1 α.μ. Παρ' όλα αυτά, η παρουσία τέτοιου μεταβατικού ενδέχεται να προκαλέσει σημαντική μηχανική καταπόνηση της Α/Γ.

Σε συνθήκες αυξημένης αιολικής διεύθυνσης η παραγωγή των συμβατικών μονάδων περιορίζεται, αν και παραμένουν εντός λειτουργίας σε στρεφόμενη εφεδρεία ώστε να εξασφαλισθεί ότι η αδράνεια του συστήματος είναι επαρκώς υψηλή. Στην περίπτωση που οι Α/Γ είναι εφοδιασμένες με έλεγχο αδρανειακής απόκρισης και μπορούν να συμβάλλουν κατά τη διάρκεια μεταβατικών φαινομένων της συχνότητας και επομένως να προσθέσουν αδράνεια στο σύστημα, ένα μέρος των συμβατικών μονάδων θα μπορούσε να τεθεί εκτός λειτουργίας συμβάλλοντας έτσι στην οικονομικότερη λειτουργία του συστήματος. Στο σημείο αυτό θα αναλυθεί η δυνατότητα αντικατάστασης μέρους των συμβατικών μονάδων από Α/Γ με δυνατότητα αδρανειακής απόκρισης. Το απλουστευμένο σύστημα, που περιγράφεται στο Παράρτημα Π8, αρχικά προσομοιώνεται με μηδενική αιολική παραγωγή. Κατόπιν προστίθεται παραγωγή από τις Α/Γ αντικαθιστώντας 50% της συμβατικής παραγωγής χωρίς *εικονική αδράνεια*, δηλ. η αδράνεια του συστήματος μειώνεται κατά 50% καθώς δε διατηρούνται οι συμβατικές μονάδες σε εφεδρεία. Αναζητείται επομένως το κατάλληλο κέρδος του ελεγκτή αδρανειακής απόκρισης (αλλιώς *εικονικής αδράνειας*) ώστε η μεταβολή της συχνότητας που προκύπτει από τη μεταβατική απώλεια 25% συμβατικής παραγωγής να είναι ίδια με αυτή που αντιστοιχεί σε παραγωγή εξ' ολοκλήρου από τις συμβατικές μονάδες.

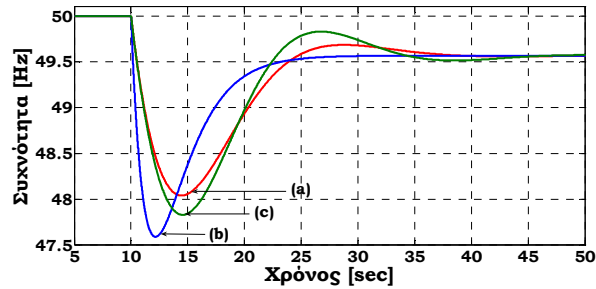
Στο Σχήμα 8.26 είναι εμφανής η μείωση της αδράνειας του συστήματος όταν οι Α/Γ δεν έχουν *εικονική αδράνεια* με αποτέλεσμα τη μεγαλύτερη και ταχύτερη βύθιση της συχνότητας. Η αδράνεια που εισάγεται στο σύστημα όταν υπάρχει *εικονική αδράνεια* στις Α/Γ προκύπτει από την αδράνεια των Α/Γ πολ/σμένη με το μερίδιο της αιολικής παραγωγής και το κέρδος του ελεγκτή αδρανειακής απόκρισης:

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} K_H M_{WT} S_{WP} \frac{df}{dt} &= M_{WT \rightarrow system} \frac{df}{dt} \Rightarrow \\ K_{inertia} S_{WP} \frac{df}{dt} &= M_{WT \rightarrow system} \frac{df}{dt} \end{aligned} \quad (8.17)$$

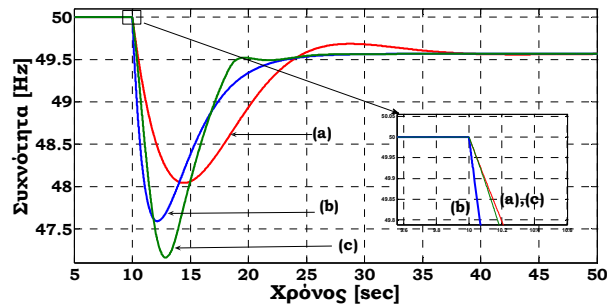
όπου M_{WT} είναι η στροφορμή σε α.μ. υπολογισμένη σε ονομαστική ταχύτητα δρομέα ($M_{WT} = 2H_{WT}$ σε α.μ. και σε ονομαστική ταχύτητα δρομέα και $K_{inertia} = K_H H_{WT}$), ενώ $M_{WT \rightarrow system}$ είναι ίση με την αδράνεια που αντιστοιχεί στο 50% της αδρανειακής σταθεράς του αρχικού συστήματος (δηλ. με μηδενική αιολική παραγωγή). Το κέρδος του ελεγκτή αδρανειακής απόκρισης K_H μπορεί να υπολογισθεί από τη σχέση (8.18):

$$K_H = \frac{M_{WT \rightarrow system}}{H_{WT} S_{WP}} \quad (8.18)$$

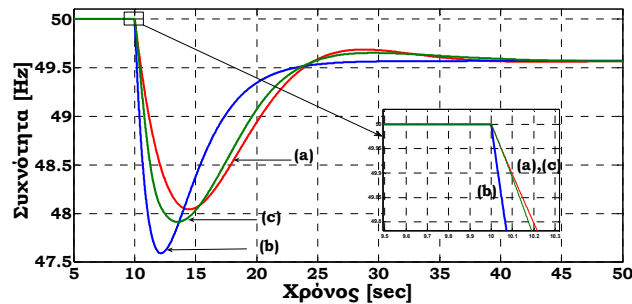
Για τα δεδομένα του απλουστευμένου συστήματος προκύπτει ότι απαιτείται τιμή για το κέρδος του ελεγκτή αδρανειακής απόκρισης ίση με 4.4 α.μ. ώστε η εικονική αδράνεια των Α/Γ να είναι ίση με τη μετώση της αδράνειας του συστήματος, που οφείλεται στην αντικατάσταση συμβατικών μονάδων από Α/Γ. Υπενθυμίζεται ότι οι παραπάνω σχέσεις έχουν εφαρμογή για ονομαστική ταχύτητα περιστροφής του δρομέα της Α/Γ, δηλ. σε περιοχή υψηλών ταχυτήτων. Τα αποτελέσματα στα σχήματα που ακολουθούν αντιστοιχούν σε χαμηλές (8 m/sec), μεσαίες (12 m/sec) και υψηλές ταχύτητες ανέμου (16 m/sec) ενώ το μεταβατικό που προσομοιώνεται είναι η απώλεια 25% της συμβατικής παραγωγής.



Σχήμα 8.26. Συχνότητα συστήματος για σύστημα χωρίς αιολική παραγωγή (κόκκινη καμπύλη), και με αντικατάσταση 50% της συμβατικής παραγωγής από Α/Γ με εικονική αδράνεια (πράσινη καμπύλη) και χωρίς εικονική αδράνεια (μπλε καμπύλη) – Περιοχή χαμηλών ταχυτήτων ανέμου (~ 8 m/s)



Σχήμα 8.27. Συχνότητα συστήματος για σύστημα χωρίς αιολική παραγωγή (κόκκινη καμπύλη), και με αντικατάσταση 50% της συμβατικής παραγωγής από Α/Γ με εικονική αδράνεια (πράσινη καμπύλη) και χωρίς εικονική αδράνεια (μπλε καμπύλη) – Περιοχή μεσαίων ταχυτήτων ανέμου (~ 12 m/s)



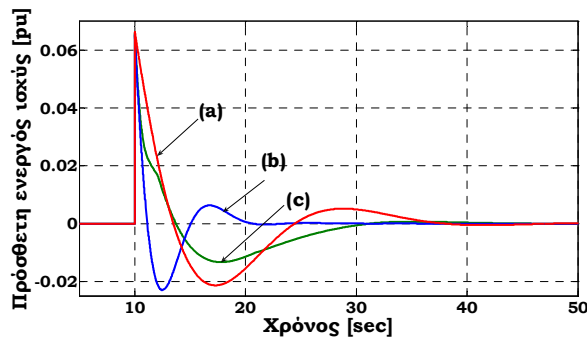
Σχήμα 8.28. Συχνότητα συστήματος για σύστημα χωρίς αιολική παραγωγή (κόκκινη καμπύλη), και με αντικατάσταση 50% της συμβατικής παραγωγής από Α/Γ με εικονική αδράνεια (πράσινη καμπύλη) και χωρίς εικονική αδράνεια (μπλε καμπύλη) – Περιοχή υψηλών ταχυτήτων ανέμου (~ 16 m/s)

Τα γραφήματα αποδεικνύουν ότι η τιμή που προέκυψε από τις αναλυτικές σχέσεις παραπάνω για την εικονική αδράνεια (4.4 α.μ.) είναι σωστή από τη στιγμή που η αρχική μεταβολή της συχνότητας είναι η επιθυμητή. Στις μεσαίες και υψηλές ταχύτητες ανέμου προκύπτει ότι οι αντίστοιχες καμπύλες (κόκκινη και πράσινη) έχουν όντως την ίδια αρχική κλίση, επομένως και η αδράνεια του συστήματος

είναι ίδια. Εν τούτοις, παρά την αρχική απόκριση η συνολική απόκριση συχνότητας για την περίπτωση που χρησιμοποιείται η εικονική αδράνεια είναι χειρότερη από την περίπτωση χωρίς αιολική παραγωγή. Στις μεσαίες ταχύτητες ανέμου, η απόκριση συχνότητας είναι χειρότερη από την περίπτωση που οι Α/Γ δεν έχουν εικονική αδράνεια, βλέπε Σχήμα 8.27. Η εξήγηση προκύπτει από τη χαρακτηριστική στροφών της Α/Γ και από τη συνδυασμένη λειτουργία του ελέγχου ισχύος και ελέγχου γωνίας βήματος. Στις χαμηλές και μεσαίες ταχύτητες ανέμου, η γωνία βήματος είναι σταθερή και η ισχύς αναφοράς καθορίζεται απ' ευθείας από τη χαρακτηριστική στροφών, βλέπε Σχήμα Π7 στο Παράρτημα. Επομένως, μια μείωση στην ταχύτητα περιστροφής της Α/Γ, που προκύπτει από την πρόσθετη έγχυση ισχύος λόγω εικονικής αδράνειας, οδηγεί σε άμεση μείωση της συνολικής ισχύος των Α/Γ, καθώς ο έλεγχος ισχύος λειτουργεί ακαριαία και ο έλεγχος γωνίας βήματος δεν είναι ενεργός (λειτουργία σε στρατηγική Μέγιστης Απολαβής Ισχύος). Επιπλέον, στις μεσαίες ταχύτητες ανέμου η ευαισθησία $\frac{\partial P}{\partial \omega_r}$ είναι αυξημένη με αποτέλεσμα μικρές μειώσεις στην ταχύτητα να

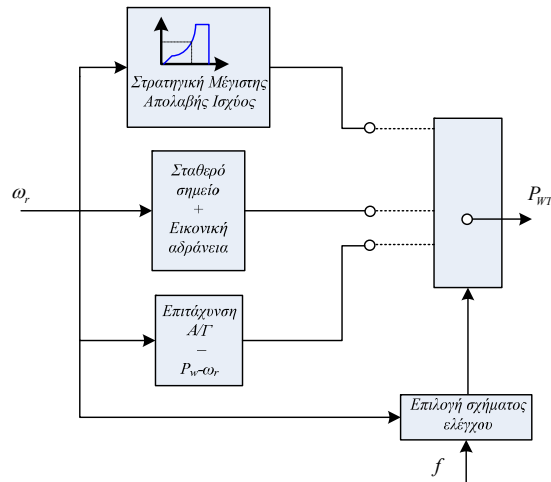
συνεπάγονται αυξημένες μεταβολές στην ενεργό ισχύ (απότομο κομμάτι χαρακτηριστικής στο Σχήμα Π7 του Παραρτήματος). Η απόκριση ήταν χειρότερη και για τις υψηλές ταχύτητες ανέμου, καθώς ο έλεγχος γωνίας βήματος σε αυτήν την περίπτωση δεν είναι αρκετά γρήγορος. Παρ' όλα αυτά, η απόκριση βελτιώνεται όσο η ταχύτητα ανέμου αυξάνεται πλησιάζοντας την απόκριση χωρίς αιολική παραγωγή.

Τα συμπεράσματα είναι πιο σαφή στο Σχήμα 8.29, όπου δίνεται η πρόσθετη έγχυση ενεργού ισχύος στα διαφορετικά επίπεδα ταχύτητας ανέμου, για την ίδια τιμή παραμέτρου εικονικής αδράνειας (4.4 α.μ.), την ίδια διαταραχή στο ισοζύγιο ενεργού ισχύος και την ίδια τιμή στροφορμής συστήματος. Η περιοχή μεταξύ των καμπυλών και του επιπέδου ισχύος 0 α.μ. εκφράζει την πρόσθετη ενέργεια που παρέχεται από την Α/Γ. Η διαφορά μεταξύ των περιπτώσεων είναι εμφανής. Είναι επίσης αξιοσημείωτο, ότι από την πλευρά της πρωτεύουσας ρύθμισης η συμβολή κατά τα πρώτα msec μετά τη διαταραχή είναι πολύ πιο σημαντική απ' ότι αργότερα. Αν και η συμβολή στο σύστημα είναι παρόμοια και στις τρεις περιπτώσεις, στις χαμηλές ταχύτητες ανέμου αρχικά παρέχεται αυξημένη ενέργεια στο σύστημα σε σύγκριση με τις άλλες ταχύτητες ανέμου.



Σχήμα 8.29. Πρόσθετη έγχυση ενεργού ισχύος για διαφορετικές ταχύτητες ανέμου – (α) χαμηλές ταχύτητες, 8 m/sec, (β) μεσαίες ταχύτητες, 12 m/sec και (γ) υψηλές ταχύτητες, 16 m/sec

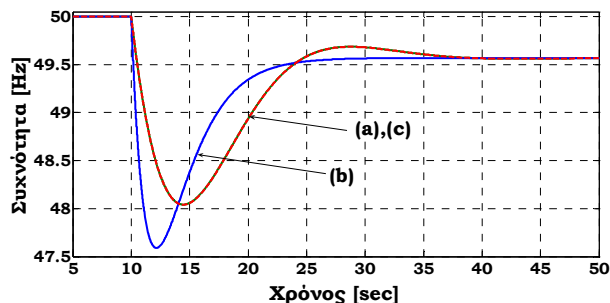
Η αδρανειακή απόκριση μπορεί επομένως να βελτιωθεί ώστε να επιτευχθούν καλύτερα αποτελέσματα συνολικά. Εν τούτοις, είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι η έννοια της εικονικής αδράνειας αναφέρεται εν γένει στην απόκριση κατά την αρχική μεταβολή της συχνότητας (πρώτα msec μετά το μεταβατικό). Όμως, η επιθυμητή αδρανειακή απόκριση ενδέχεται να επιδρά αρνητικά στη συνολική απόκριση του συστήματος κατά την πρωτεύουσα ρύθμιση. Στην παρούσα ενότητα προτείνεται μια μέθοδος που δε χρησιμοποιεί τον έλεγχο ισχύος με βάση τη χαρακτηριστική στροφών σε περίπτωση απότομων μεταβατικών. Η διαμόρφωση ελέγχου δίνεται στο Σχήμα 8.30 που ακολουθεί.



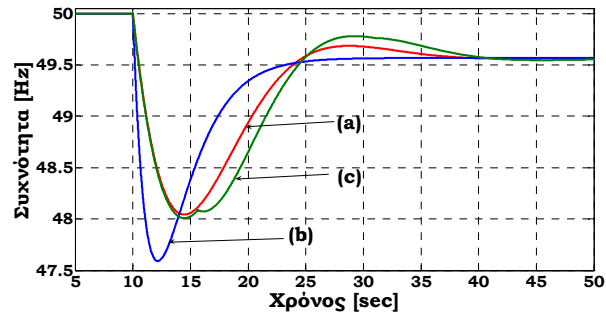
Σχήμα 8.30. Σχήμα ελέγχου βελτίωσης αδρανειακής απόκρισης

Σε κανονική λειτουργία εφαρμόζεται η στρατηγική Μέγιστης Απολαβής Ισχύος, ενώ στην περίπτωση που απαιτείται εικονική αδράνεια ενεργοποιείται το σύστημα σταθερό σημείο-εικονική αδράνεια, βλέπε Σχήμα 8.30. Η στρατηγική Μέγιστης Απολαβής Ισχύος ενεργοποιείται ξανά όταν η ταχύτητα περιστροφής μειώνεται κάτω από ένα συγκεκριμένο επίπεδο, του οποίου η τιμή εξαρτάται από την ταχύτητα ανέμου. Όταν η ανάγκη για εικονική αδράνεια παρέλθει, δεν απαιτείται πλέον η μείωση της παραγόμενης ενεργού ισχύος στο επίπεδο που προκύπτει από τη χαρακτηριστική στροφών, από τη στιγμή που ενδέχεται να είναι διαθέσιμη μεγαλύτερη αεροδυναμική ισχύς. Επομένως, το τρίτο σύστημα ελέγχου του Σχήματος 8.30 ενεργοποιείται για να επιταχύνει ξανά την Α/Γ, πριν επιστρέψει σε κανονική λειτουργία Μέγιστης Απολαβής Ισχύος. Προφανώς, αυτό είναι δυνατό μόνο με την κατάλληλη επιλογή της ελάχιστης επιτρεπόμενης ταχύτητας περιστροφής όταν δεν εφαρμόζεται ο έλεγχος κανονικής λειτουργίας. Έτσι, η Α/Γ συμπεριφέρεται όμοια με Α/Γ σταθερών στροφών (Τύπου Α), όπου η παραγωγή ενεργού ισχύος προκύπτει από τη διαθέσιμη αεροδυναμική ισχύ με την αδρανειακή απόκριση να προστίθεται σε αυτή. Η αναζήτηση της ελάχιστης επιτρεπόμενης ταχύτητας περιστροφής μπορεί να γίνει με πίνακα αναφοράς αλλά θα μπορούσε να γίνει και με αναλυτικό τρόπο.

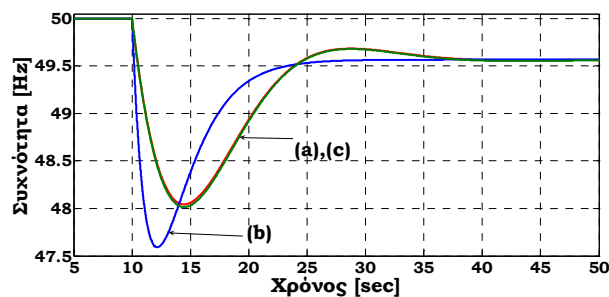
Αποτελέσματα για τα ίδια σενάρια που δόθηκαν παραπάνω περιλαμβάνονται στα σχήματα που ακολουθούν για χαμηλές (8 m/s), μεσαίες (12 m/s) και υψηλές ταχύτητες ανέμου (16 m/s) αντίστοιχα. Στα νέα αποτελέσματα παρατηρείται σαφής βελτίωση σε σύγκριση με τα προηγούμενα, καθώς για χαμηλές και υψηλές ταχύτητες ανέμου η απόκριση συχνότητας είναι σχετικά όμοια με την περίπτωση χωρίς αιολική παραγωγή και πλήρη αδράνεια του συστήματος. Η μόνη ελάχιστη διαφορά, που αποτυπώνεται πιο έντονα στην ελάχιστη συχνότητα κατά το μεταβατικό, οφείλεται στην έλλειψη στατισμού στην Α/Γ. Στο σύστημα χωρίς αιολική παραγωγή, ο έλεγχος στατισμού βελτιώνει την απόκριση συχνότητας οδηγώντας σε ελαφρώς μικρότερη βύθιση.



Σχήμα 8.31. Συχνότητα συστήματος για σύστημα χωρίς αιολική παραγωγή (κόκκινη καμπύλη), και με αντικατάσταση 50% της συμβατικής παραγωγής από Α/Γ με εικονική αδράνεια (πράσινη καμπύλη) και χωρίς εικονική αδράνεια (μπλε καμπύλη) – Περιοχή χαμηλών ταχυτήτων ανέμου (~ 8 m/s)



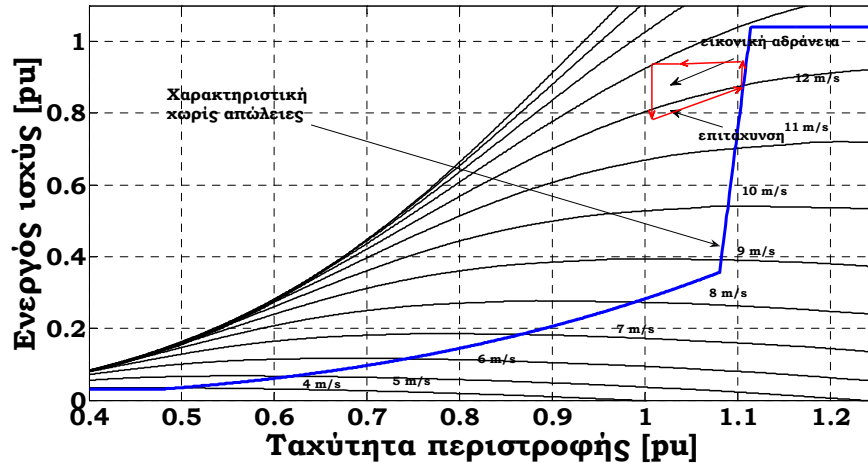
Σχήμα 8.32. Συχνότητα συστήματος για σύστημα χωρίς αιολική παραγωγή (κόκκινη καμπύλη), και με αντικατάσταση 50% της συμβατικής παραγωγής από Α/Γ με εικονική αδράνεια (πράσινη καμπύλη) και χωρίς εικονική αδράνεια (μπλε καμπύλη) – Περιοχή μεσαίων ταχυτήτων ανέμου (~ 12 m/s)



Σχήμα 8.33. Συχνότητα συστήματος για σύστημα χωρίς αιολική παραγωγή (κόκκινη καμπύλη), και με αντικατάσταση 50% της συμβατικής παραγωγής από Α/Γ με εικονική αδράνεια (πράσινη καμπύλη) και χωρίς εικονική αδράνεια (μπλε καμπύλη) – Περιοχή υψηλών ταχυτήτων ανέμου (~ 16 m/s)

Στις μεσαίες ταχύτητες ανέμου, παρατηρείται μια καθυστέρηση στην επαναφορά της συχνότητας, επειδή σε αυτήν την περίπτωση η ταχύτητα περιστροφής προσέγγισε την ελάχιστη επιτρεπόμενη τιμή οπότε η Α/Γ πρέπει να επιταχυνθεί. Αν δεν επιλεγόταν αυτή η τακτική, η Α/Γ θα έπρεπε να επιταχυνθεί αργότερα οδηγώντας σε μεγαλύτερη μείωση της αιολικής παραγωγής και επομένως σε νέο μεταβατικό της συχνότητας. Η δεύτερη βύθιση συχνότητας μπορεί να ελαχιστοποιηθεί ρυθμίζοντας κατάλληλα την ελάχιστη τιμή ταχύτητας περιστροφής σύμφωνα με τη διαθέσιμη αεροδυναμική ισχύ, δηλ. την ταχύτητα ανέμου, υποθέτοντας λειτουργία πάνω στην καμπύλη Μέγιστης Απολαβής Ισχύος.

Το Σχήμα 8.34 δίνει τη διαθέσιμη αεροδυναμική ισχύ σαν συνάρτηση της ταχύτητας περιστροφής για βέλτιστη τιμή της γωνίας βήματος πτερυγίων και διαφορετικές ταχύτητες ανέμου. Είναι εμφανές ότι, στην περίπτωση απότομου μεταβατικού, όπως αυτό που μελετάται εδώ, η Α/Γ μπορεί μόνο να επιβραδυνθεί σε επίπεδο όπου η διαθέσιμη αεροδυναμική ισχύς δεν είναι αρκετά χαμηλή, εάν μια δεύτερη βύθιση συχνότητας δεν κρίνεται αποδεκτή.



Σχήμα 8.34. Διαθέσιμη αεροδυναμική ισχύς ως προς ταχύτητα περιστροφής για βέλτιστη τιμή γωνίας βήματος περυγίων και διαφορετικές ταχύτητες ανέμου

Από το Σχήμα 8.34 προκύπτει ότι για ταχύτητα ανέμου κοντά στα 12 m/sec, η μείωση της ταχύτητας περιστροφής προκαλεί σχετικά μεγάλη μείωση στη διαθέσιμη αεροδυναμική ισχύ, καθώς η καμπύλη που αντιστοιχεί σε αυτήν την ταχύτητα ανέμου είναι αρκετά απότομη. Για π.δ. μια μείωση κατά 0.11 α.μ. στην ταχύτητα περιστροφής προκαλεί μείωση της διαθέσιμης αεροδυναμικής ισχύος κατά 0.1 α.μ. Η ελάχιστη επιτρεπόμενη τιμή ταχύτητας περιστροφής πρέπει να είναι τέτοια ώστε να αποφευχθεί μεγάλη μείωση της αιολικής παραγωγής κατά τη διάρκεια της πρωτεύουσας ρύθμισης. Ένα τέτοιο όριο προφανώς εξαρτάται από το μεταβατικό, την αδράνεια των Α/Γ καθώς και το επίπεδο αιολικής διείσδυσης.

Ελεγκτής στατισμού

Ακολουθώντας τη λειτουργία των ρυθμιστών στροφών στις συμβατικές μονάδες, ο έλεγχος στατισμού παρέχει έναν όρο ανάλογο προς την απόκλιση της συχνότητας από την ονομαστική της τιμή (τιμή αναφοράς πιο γενικά):

$$\Delta P_{droop}^{WT} = K_{droop} (f - f_o) \quad (8.19)$$

όπου f_o είναι η τιμή αναφοράς για τη συχνότητα του συστήματος και το κέρδος K_{droop} είναι το αντίστροφο του στατισμού R :

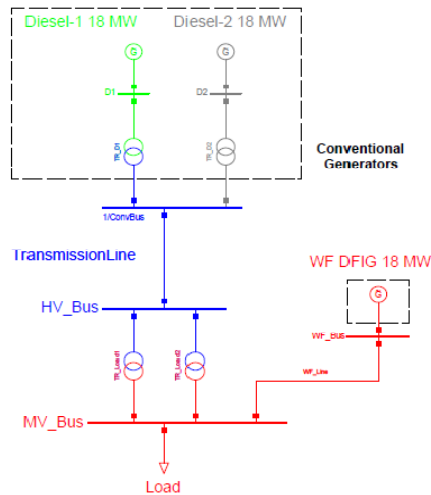
$$R = \frac{\Delta f}{\Delta P} = \frac{1}{K_{droop}} \quad (8.20)$$

Υπενθυμίζεται ότι ο στατισμός στις συμβατικές μονάδες λαμβάνει τιμές στο εύρος 3-5%. Στόχος του ελέγχου στατισμού είναι η μείωση της συνιστώσας επιταχύνουσας ροπής που επενεργεί στο δρομέα της γεννήτριας κατά τη διάρκεια μιας μεταβατικής μείωσης της συχνότητας, βλέπε ενότητα 8.2 παραπάνω.

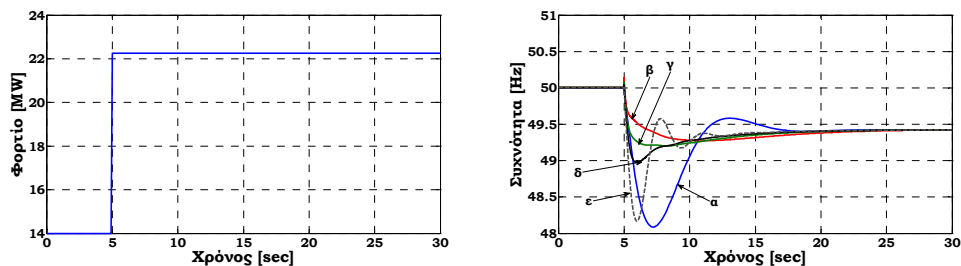
Εφαρμόζοντας το συνδυασμένο έλεγχο, διαμορφώνεται ένας αναλογικός-διαφορικός ελεγκτής PD, ο οποίος καθορίζει το σήμα ενεργού ισχύος ΔP_{freq}^{WT} με βάση τη μετρούμενη συχνότητα του συστήματος. Κατά τα πρώτα δευτερόλεπτα μιας μεταβατικής μεταβολής της συχνότητας του συστήματος, ο έλεγχος αδρανειακής απόκρισης παρέχει γρήγορη απόκριση αυξάνοντας την αδράνεια του συστήματος. Η συμβολή αυτή είναι μεταβατική. Ο έλεγχος στατισμού, που χρησιμοποιεί τυπική χαρακτηριστική φορτίου-συχνότητας, παρέχει μόνιμη απόκριση και συμβάλλει στην πρωτεύουσα ρύθμιση της συχνότητας σε συνδυασμό με τις συμβατικές μονάδες. Οι παράμετροι στατισμού των Α/Π σε ένα ΣΗΕ, ειδικά στα μη διασυνδεδεμένα ΣΗΕ, πρέπει να καθοριστούν σε συσχέτιση με τις παραμέτρους στατισμού των συμβατικών μονάδων, ώστε να επιτευχθεί η κατάλληλη κατανομή

παραγωγής κατά τη διάρκεια μεταβατικών φαινομένων και το επιθυμητό μόνιμο σφάλμα συχνότητας στο σύστημα.

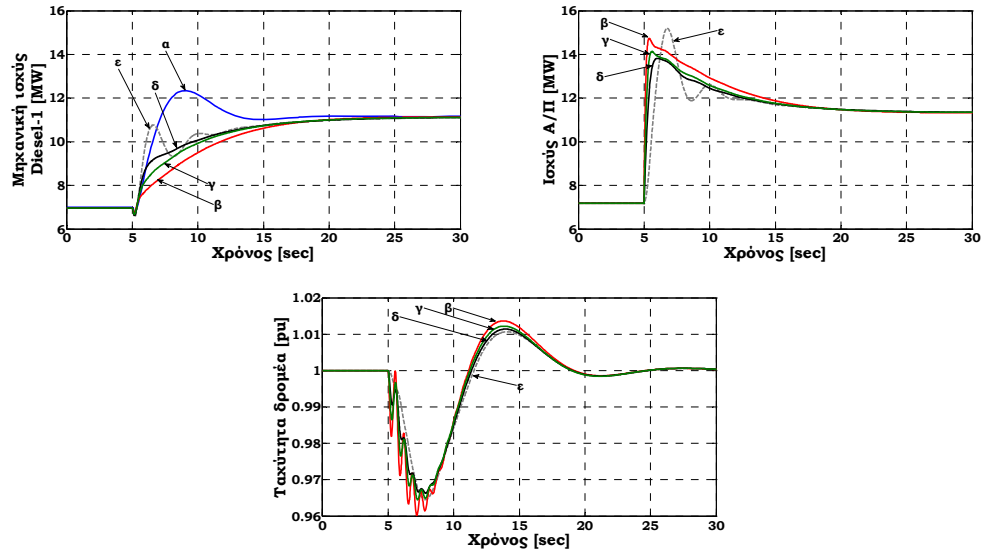
Στα Σχήματα που ακολουθούν δίνονται αποτελέσματα για το σύστημα του Σχήματος 8.35, με προσομοίωση βηματικής αύξησης του φορτίου κατά 60%. Στην πρώτη περίπτωση ((α) στο Σχήμα 8.36) το φορτίο καλύπτεται μόνο από συμβατικές μονάδες (τις δύο νηζελογεννήτριες των 18 MW) με στατισμό 5%. Στις υπόλοιπες περιπτώσεις η αιολική παραγωγή – με Α/Γ Τύπου Γ και σύστημα ρύθμισης συχνότητας όπως αυτό περιγράφεται στον παρόν Κεφάλαιο – καλύπτει το 50% του φορτίου αντικαθιστώντας τη μισή συμβατική παραγωγή (το Α/Π, αποτελούμενο από 9 όμοιες Α/Γ ονομαστικής ισχύος 2 MW, αντικαθιστά τη μία από τις δύο συμβατικές γεννήτριες του Σχήματος 8.35 - αιολική διείσδυση δηλ. 50%). Στις Α/Γ ο στατισμός είναι ίσος με τις συμβατικές μονάδες, 5%, γι' αυτό και η τιμή μόνιμης κατάστασης μετά τη μεταβατική αύξηση στο φορτίο είναι ίδια σε όλες τις περιπτώσεις. Στην περίπτωση αυτή, για να είναι εφικτή η σύγκριση, τηρείται ίση στρεφόμενη εφεδρεία στο Α/Π και στη συμβατική γεννήτρια. Η απόκριση της συχνότητας μεταξύ των περιπτώσεων (β) έως (ε) διαφοροποιείται ως προς την τιμή της *εικονικής αδράνειας* που εφαρμόζεται στις Α/Γ. Παρατηρείται ότι για τιμές *εικονικής αδράνειας* μικρότερες του 3 α.μ. (περιπτώσεις (δ) και (ε) στο Σχήμα 8.36) ο αρχικός ρυθμός μεταβολής της συχνότητας είναι μεγαλύτερος σε σύγκριση με την περίπτωση όπου το φορτίο καλύπτεται αποκλειστικά από συμβατικές μονάδες. Είναι σημαντικό όμως ότι η ελάχιστη συχνότητα κατά το μεταβατικό βελτιώνεται ακόμα και για την περίπτωση της μηδενικής *εικονικής αδράνειας*.



Σχήμα 8.35. Μονογραμμικό σύστημα.

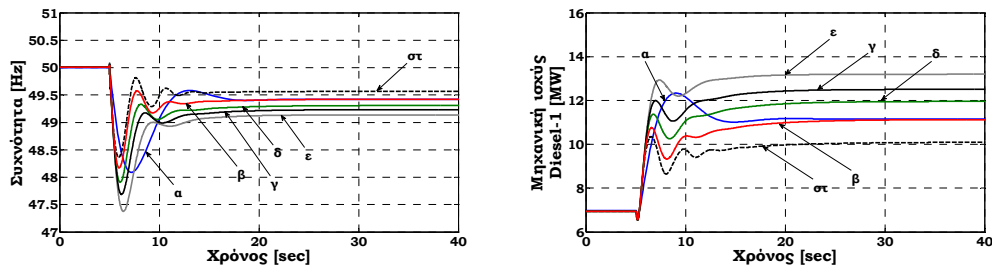


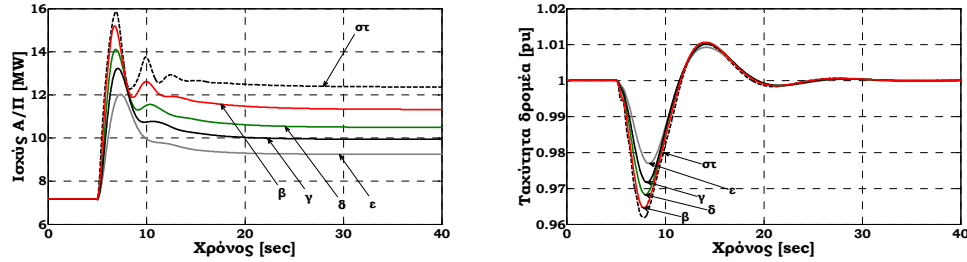
Σχήμα 8.36. Μεταβολή φορτίου και συχνότητα συστήματος για σύστημα (α) χωρίς αιολική παραγωγή, (β) με αιολική διείσδυση 50%, στατισμό 5% - εικονική αδράνεια 10 α.μ., (γ) με αιολική διείσδυση 50%, στατισμό 5% - εικονική αδράνεια 5 α.μ., (δ) με αιολική διείσδυση 50%, στατισμό 5% - εικονική αδράνεια 2.5 α.μ., (ε) με αιολική διείσδυση 50%, στατισμό 5% - εικονική αδράνεια 0 α.μ.



Σχήμα 8.37. Μηχανική ισχύς συμβατικής γεννήτριας, ισχύς εξόδου Α/Π και ταχύτητα δρομέα Α/Γ για σύστημα (α) χωρίς αιολική παραγωγή, (β) με αιολική διείσδυση 50%, στατισμό 5% - εικονική αδράνεια 10 α.μ., (γ) με αιολική διείσδυση 50%, στατισμό 5% - εικονική αδράνεια 5 α.μ., (δ) με αιολική διείσδυση 50%, στατισμό 5% - εικονική αδράνεια 2.5 α.μ., (ε) με αιολική διείσδυση 50%, στατισμό 5% - εικονική αδράνεια 0 α.μ.

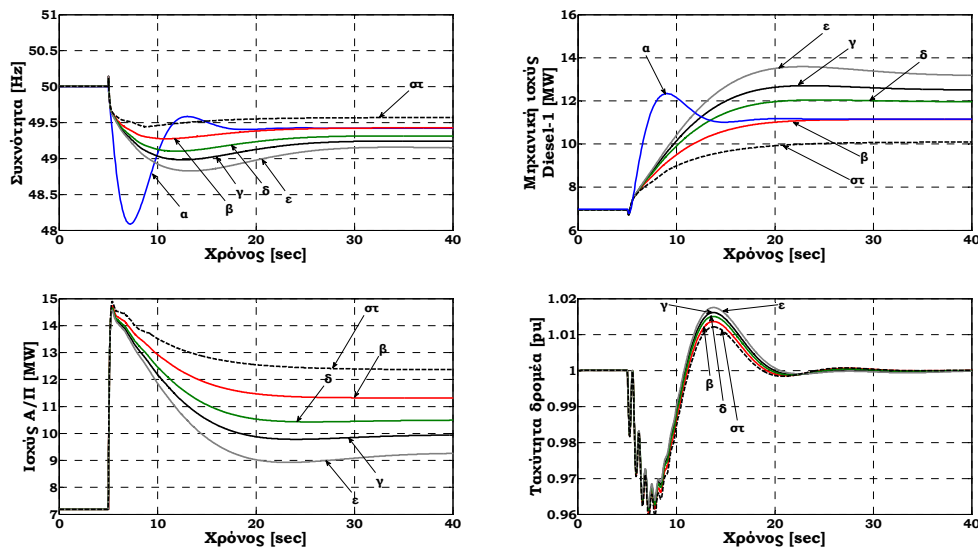
Τα αποτελέσματα για εφαρμογή του ελεγκτή στατισμού χωρίς εικονική αδράνεια δίνονται στο Σχήμα 8.38 για την ίδια μεταβολή φορτίου. Η τιμή στατισμού παίρνει τιμές από 3% έως 15%. Για τιμές στατισμού στο Α/Π μεγαλύτερες του 5% το Α/Π αναλαμβάνει λιγότερο ενεργό ισχύ σε σύγκριση με τη συμβατική γεννήτρια και η τιμή μόνιμης κατάστασης της συχνότητας μετά το μεταβατικό είναι μικρότερη. Για λόγους πληρότητας της παρουσίασης στα αποτελέσματα περιλαμβάνεται και η περίπτωση στατισμού 3% στο Α/Π αν και επί της αρχής δεν προτείνεται το Α/Π να αναλαμβάνει πρώτο ενεργό ισχύ. Στα ΣΗΕ, όπου η ρύθμιση συχνότητας εκ μέρους των Α/Π περιλαμβάνεται στους κώδικες, ο στατισμός στο Α/Π τίθεται γενικά μεγαλύτερος ή ίσος από το στατισμό των συμβατικών μονάδων. Η απουσία εικονικής αδράνειας στις Α/Γ έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της αδράνειας του συστήματος σε σύγκριση με την περίπτωση όπου το φορτίο καλύπτεται μόνο από συμβατικές μονάδες (περίπτωση (α) στο Σχήμα 8.38). Έτσι ο αρχικός ρυθμός μεταβολής της συχνότητας είναι μεγαλύτερος και η ελάχιστη συχνότητα κατά το μεταβατικό είναι μικρότερη για όλες τις τιμές στατισμού στο Α/Π. Προκύπτει λοιπόν ότι η εικονική αδράνεια καθίσταται απαραίτητη για τη συμβολή των Α/Π στη ρύθμιση συχνότητας κατά τη διάρκεια έντονων μεταβατικών, όπως η απότομη μεταβολή φορτίου (ή παραγωγής).





Σχήμα 8.38. Συχνότητα συστήματος, μηχανική ισχύς συμβατικής γεννήτριας, ισχύς εξόδου Α/Π και ταχύτητα δρομέα Α/Γ για σύστημα (α) χωρίς αιολική παραγωγή, (β) με αιολική διείσδυση 50%, στατισμό 5% - εικονική αδράνεια 0 α.μ., (γ) με αιολική διείσδυση 50%, στατισμό 10% - εικονική αδράνεια 0 α.μ., (δ) με αιολική διείσδυση 50%, στατισμό 7.5% - εικονική αδράνεια 0 α.μ., (ε) με αιολική διείσδυση 50%, στατισμό 15% - εικονική αδράνεια 0 α.μ., (στ) με αιολική διείσδυση 50%, στατισμό 3% - εικονική αδράνεια 0 α.μ.

Η επίδραση του ελεγκτή στατισμού στην απόκριση της συχνότητας και στα βασικά μεγέθη του Α/Π και της συμβατικής γεννήτριας δίνεται στο Σχήμα 8.39 για την ίδια μεταβολή φορτίου και για την ίδια τιμή εικονικής αδράνειας σε όλες τις περιπτώσεις (10 α.μ.). Υπενθυμίζεται ότι ο στατισμός της συμβατικής γεννήτριας είναι 5%. Από τη στιγμή που η εικονική αδράνεια είναι ίδια σε όλες τις περιπτώσεις, ο αρχικός ρυθμός μεταβολής της συχνότητας – κατά τα πρώτα msec μετά τη μεταβολή του φορτίου – είναι ίδιος σε όλες τις περιπτώσεις, γεγονός που αποτυπώνεται και στην αρχική απόκριση της ενεργού ισχύος του Α/Π, που είναι ίδια για όλες τις τιμές του ελεγκτή στατισμού. Σε αντίθεση με τα αποτελέσματα του Σχήματος 8.38, η εφαρμογή της εικονικής αδράνειας συμβάλλει σημαντικά στη μείωση του αρχικού ρυθμού μεταβολής της συχνότητας καθώς και στη βελτίωση της ελάχιστης συχνότητας κατά τη διάρκεια του μεταβατικού. Παράλληλα παρατηρείται χρονική καθυστέρηση – της τάξης των 1-3 sec – στην εμφάνιση ελαχίστου της συχνότητας καθώς και στην αποκατάσταση της τιμής μόνιμης κατάστασης. Εν τούτοις, από την πλευρά προστασίας του συστήματος δεν θεωρείται προβληματική μια καθυστέρηση τέτοιας τάξης ενώ κρίνεται ως ιδιαίτερα σημαντική η συμβολή της εικονικής αδράνειας στη μείωση του αρχικού ρυθμού μεταβολής της συχνότητας – μέγεθος ιδιαίτερα κρίσιμο για την προστασία του συστήματος.



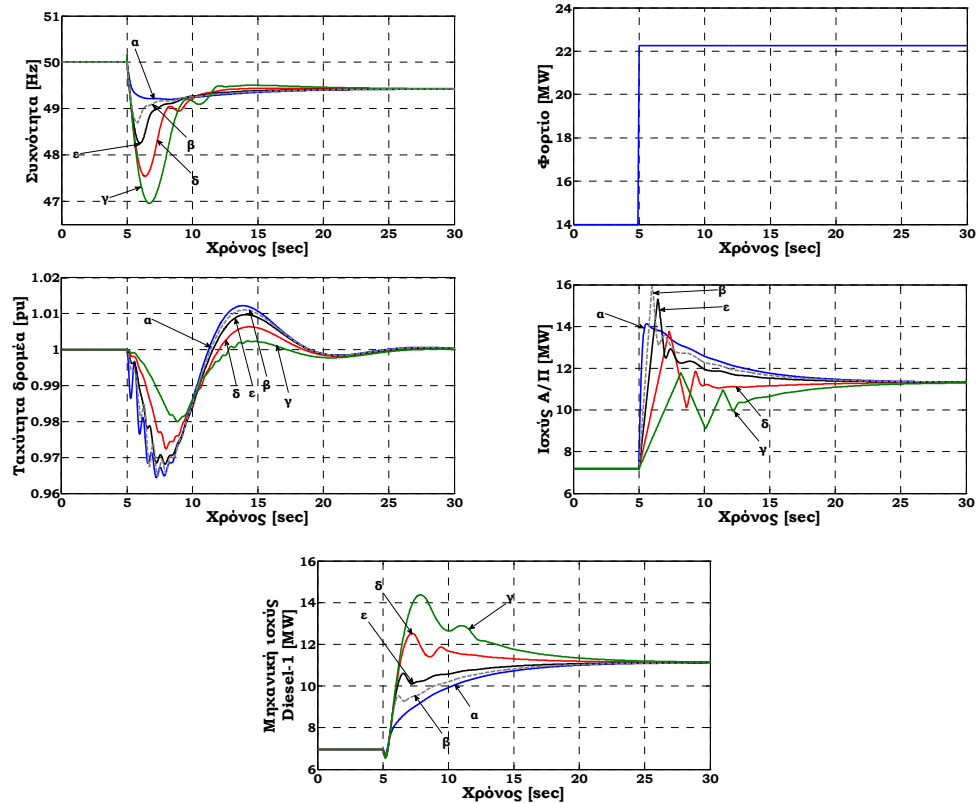
Σχήμα 8.39. Συχνότητα συστήματος, μηχανική ισχύς συμβατικής γεννήτριας, ισχύς εξόδου Α/Π και ταχύτητα δρομέα Α/Γ για σύστημα (α) χωρίς αιολική παραγωγή, (β) με αιολική διείσδυση 50%, στατισμό 5% - εικονική αδράνεια 10 α.μ., (γ) με αιολική διείσδυση 50%, στατισμό 10% - εικονική αδράνεια 10 α.μ., (δ) με αιολική διείσδυση 50%, στατισμό 7.5% - εικονική αδράνεια 10 α.μ., (ε) με αιολική διείσδυση 50%, στατισμό 15% - εικονική αδράνεια 10 α.μ., (στ) με αιολική διείσδυση 50%, στατισμό 3% - εικονική αδράνεια 10 α.μ.

Περιοριστής ρυθμού μεταβολής ισχύος

Όπως δίνεται στο Σχήμα 8.17, ο περιοριστής ρυθμού μεταβολής της ενεργού ισχύος στο σύστημα ελέγχου του Α/Π, που λαμβάνει ως σήμα από το διαχειριστή του συστήματος τα αποδεκτά όρια στο

ρυθμό, προηγείται του σήματος που προκύπτει από τον ελεγκτή συχνότητας (στατισμού ή αδρανειακής απόκρισης). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, ο ρυθμός μεταβολής της ενεργού ισχύος να υπερβαίνει τα όρια σε περίπτωση μεταβατικής απόκρισης των Α/Γ σε φαινόμενα έντονης μεταβολής της συχνότητας. Τα όρια, με αυτήν την έννοια, τηρούνται κατά την εφαρμογή των σημάτων εφεδρείας ισχύος, τύπου *balance* ή *delta*. Επί της αρχής η αδρανειακή απόκριση των Α/Γ δεν πρέπει να περιοριστεί όσον αφορά το ρυθμό μεταβολής της ενεργού ισχύος, εν τούτοις κρίνεται απαραίτητο να μελετηθεί η απόκριση σε μεταβατικά φαινόμενα συχνότητας σε περίπτωση που τεθούν όρια στο ρυθμό μεταβολής του σήματος αναφοράς για την ενεργό ισχύ, όπως αυτό προκύπτει από τον ελεγκτή συχνότητας. Η τροποποίηση στο σύστημα ελέγχου του Α/Π περιλαμβάνει έναν περιοριστή ρυθμού – όμοιο με αυτόν που περιγράφεται στο Σχήμα 8.18 – στο σήμα $P_{ref,error}^{WF}$.

Στο Σχήμα 8.40 δίνονται αποτελέσματα για την ίδια μεταβολή του φορτίου – 60% – σε σύστημα με 50% αιολική διείσδυση. Οι ελεγκτές στατισμού και αδρανειακής απόκρισης έχουν τιμές 5% και δοκιμάζονται όρια στο ρυθμό μεταβολής από 0.08 α.μ. έως 0.5 α.μ. Υπενθυμίζεται ότι στο σχετικό άρθρο, [CHR01], αναφέρεται ως μέγιστος ρυθμός μεταβολής της ισχύος το 0.16 α.μ – αν και δεν διευκρινίζεται αν το όριο αφορά σε περιπτώσεις σημάτων εφεδρείας ισχύος ή σε μεταβατικές αποκρίσεις σε φαινόμενα συχνότητας.



Σχήμα 8.40. Μεταβολή φορτίου, συχνότητα συστήματος, ταχύτητα δρομέα Α/Γ, ισχύς εξόδου Α/Π και μηχανική ισχύς συμβατικής γεννήτριας για σύστημα με 50% αιολική διείσδυση και (α) χωρίς όριο στον περιοριστή ρυθμού, (β) με όριο 0.5 α.μ./δεντ., (γ) με όριο 0.08 α.μ./δεντ. (δ) με όριο 0.16 α.μ./δεντ. και (ε) με όριο 0.32 α.μ./δεντ.

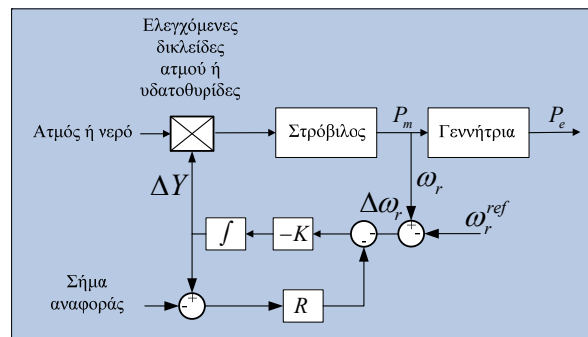
8.8. Συμβολή στη δευτερεύουσα ρύθμιση συχνότητας

Όπως έχει παρουσιασθεί στην αρχή του παρόντος κεφαλαίου, με τη δράση της πρωτεύουσας ρύθμισης μια μεταβολή στο φορτίο του συστήματος θα έχει ως αποτέλεσμα μια διακύμανση της συχνότητας από την ονομαστική της τιμή στη μόνιμη κατάσταση μετά το μεταβατικό. Η επαναφορά της συχνότητας απαιτεί πρόσθετο σύστημα ελέγχου που ρυθμίζει κατάλληλα τα σήματα αναφοράς στο μηχανισμό αλλαγής στροφών των ρυθμιστών στροφών. Η προσαρμογή της ισχύος των γεννητριών σε διαταραχές του φορτίου του συστήματος με επιθυμητό τρόπο εξασφαλίζεται λοιπόν μέσω των σημάτων αναφοράς που δίνονται σε επιλεγμένες γεννήτριες του συστήματος.

Επειδή οι μεταβολές του φορτίου στο σύστημα είναι συνεχείς απαιτείται αυτόματο σύστημα δευτερεύουσας ρύθμισης, γνωστό ως Αυτόματη Ρύθμιση Παραγωγής (ΑΡΙΠ – Automatic Generation Control, AGC). Οι πρωταρχικοί στόχοι ενός τέτοιου συστήματος είναι η ρύθμιση της συχνότητας σε συγκεκριμένη ονομαστική τιμή καθώς και η διατήρηση της ισχύος διασύνδεσης μεταξύ περιοχών ελέγχου του συστήματος σε προγραμματισμένες τιμές μέσω της ρύθμισης της ισχύος επιλεγμένων γεννητριών.

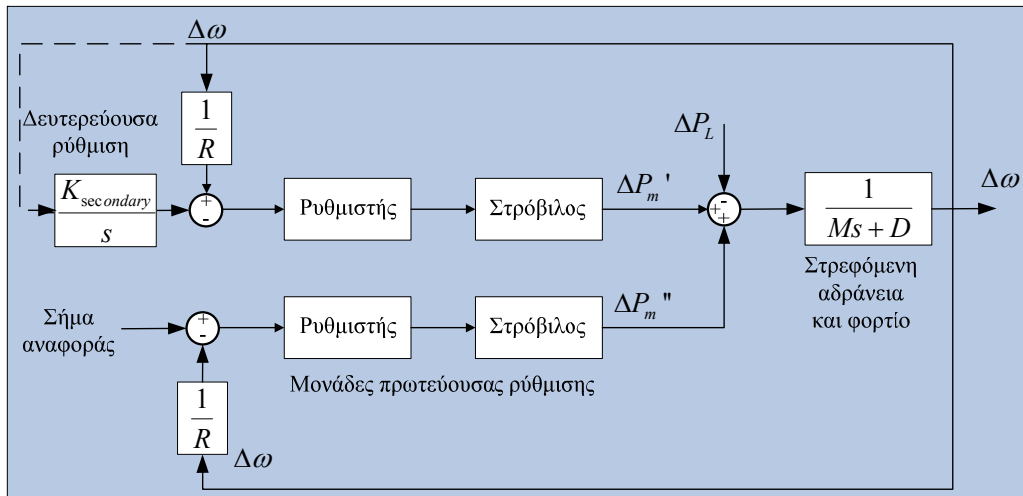
Στα απομονωμένα συστήματα, τα οποία είναι αντικείμενο μελέτης στην παρούσα διατριβή, η λειτουργία της ΑΡΙΠ έχει ως στόχο την επαναφορά της συχνότητας στην καθορισμένη ονομαστική τιμή της, καθ' ότι ροές διασύνδεσης δεν υπάρχουν. Η διόρθωση του σφάλματος συχνότητας είναι συσσωρευτική. Δηλαδή προστίθεται ολοκληρωτικός ελεγκτής που επιδρά στο μηχανισμό αλλαγής στροφών των ρυθμιστών στροφών. Ο ολοκληρωτικός έλεγχος εξασφαλίζει μηδενικό σφάλμα συχνότητας στη μόνιμη κατάσταση. Η δευτερεύουσα ρύθμιση είναι αρκετά πιο αργή από τη δράση της πρωτεύουσας ρύθμισης και επενεργεί αφού η συχνότητα έχει πρώτα λάβει τιμή μόνιμης κατάστασης. Επομένως η ΑΡΙΠ ρυθμίζει τους μηχανισμούς αλλαγής στροφών επιλεγμένων μονάδων του συστήματος, και επομένως την ισχύ παραγωγής τους, και με αυτόν τον τρόπο επαναφέρει την παραγωγή των υπόλοιπων μονάδων (που δεν συμμετέχουν στην ΑΡΙΠ) στις προγραμματισμένες τιμές.

Το Σχήμα 8.41 δίνει το διάγραμμα ελέγχου του ρυθμιστή συμβατικής γεννήτριας, όπου έχει προστεθεί και το σήμα αναφοράς του μηχανισμού αλλαγής στροφών.



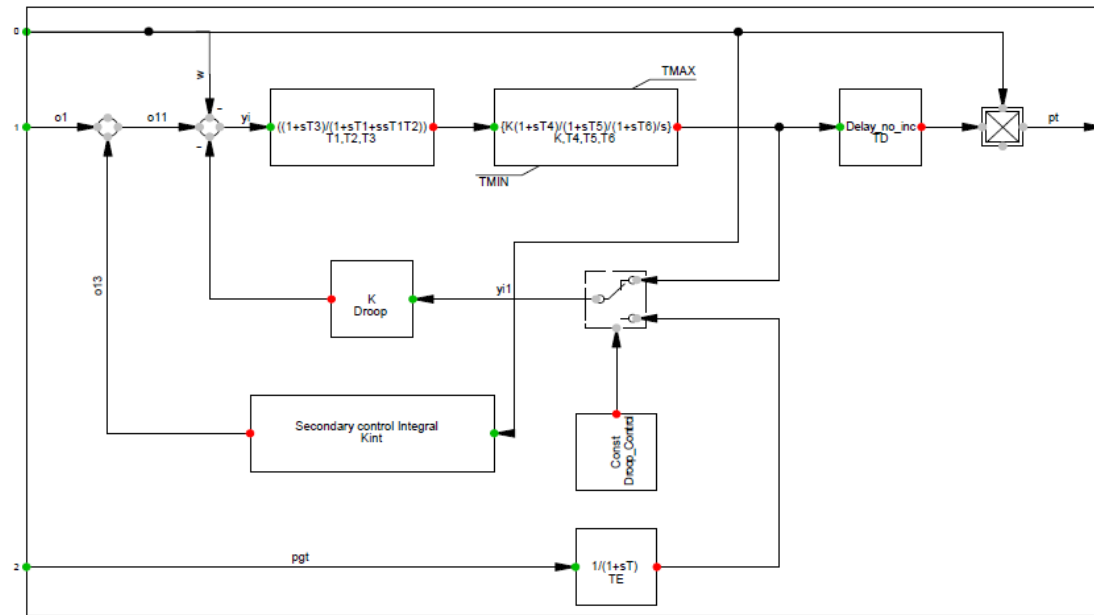
Σχήμα 8.41. Ρυθμιστής στροφών με χαρακτηριστική φορτίου-συχνότητας και μηχανισμό αλλαγής στροφών, [KUN94]

Στα Σχήματα που ακολουθούν δίνονται διαγράμματα ελέγχου των ρυθμιστών στροφών συμβατικών γεννητριών που συμμετέχουν στη δευτερεύουσα ρύθμιση του συστήματος μέσω ολοκληρωτικού ελεγκτή. Το Σχήμα 8.42 δίνει το γενικό διάγραμμα ρυθμιστή στροφών με προσθήκη ολοκληρωτικού ελεγκτή και το Σχήμα 8.43 απεικονίζει το τροποποιημένο μοντέλο του ρυθμιστή στροφών για μονάδες Diesel που χρησιμοποιήθηκε για τις αναλύσεις σε αυτό και στο επόμενο Κεφάλαιο (μοντέλο DEGOV1 στο λογισμικό PowerFactory-DIGSILENT).



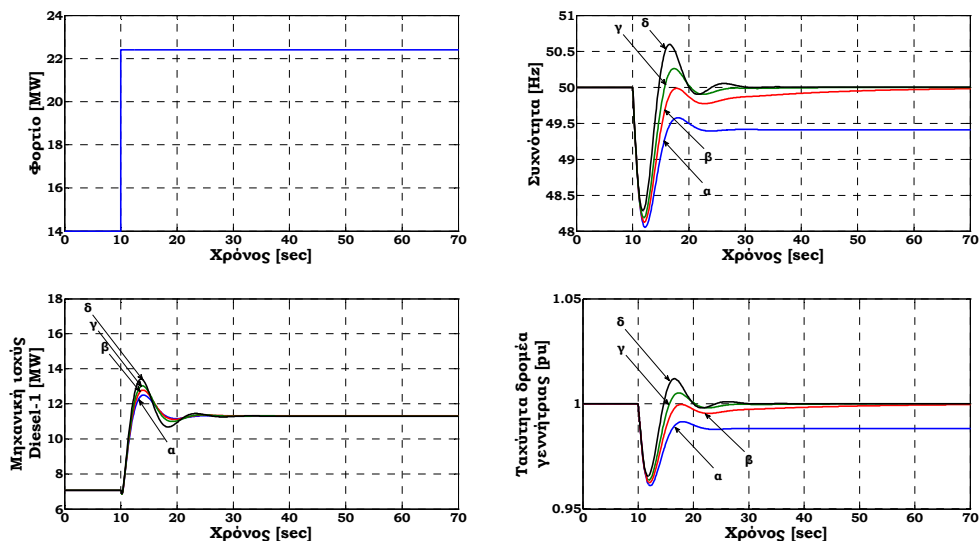
Σχήμα 8.42. Προσθήκη ολοκληρωτικού ελεγκτή σε επιλεγμένες μονάδες του συστήματος, [KUN94]

Το ολοκλήρωμα του σφάλματος της συχνότητας πολ/ζεται με μια σταθερά, $K_{secondary}$, από την τιμή της οποίας καθορίζεται ο ρυθμός ολοκλήρωσης και επομένως και η ταχύτητα απόκρισης. Με ανάλυση των χαρακτηριστικών εξισώσεων προκύπτουν οι περιπτώσεις απόκρισης που διακρίνονται ως υποκρίσιμη, υπερκρίσιμη και κρίσιμη περίπτωση. Για διαφορετικές τιμές της σταθεράς $K_{secondary}$ προκύπτουν αντίστοιχες περιπτώσεις.



Σχήμα 8.43. Τροποποιημένο μοντέλο ρυθμιστή στροφών νηζελογεννητριών DEGOV1 με προσθήκη ολοκληρωτικού ελεγκτή

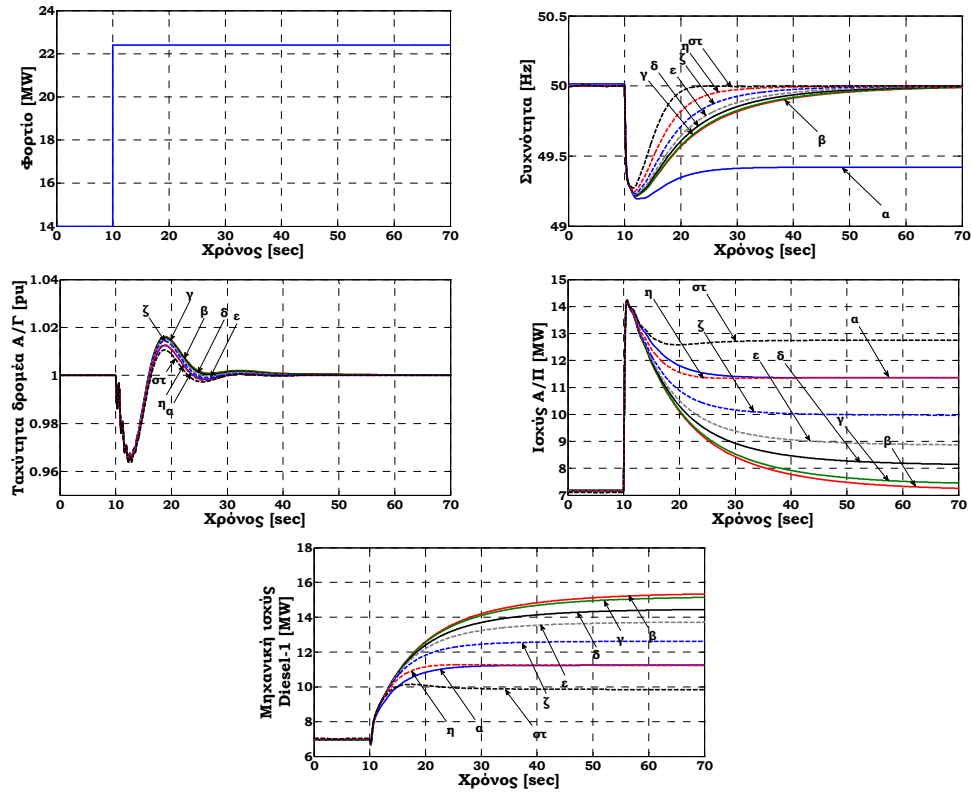
Προσομοιώνοντας την ίδια βηματική μεταβολή φορτίου – 60% – σε σύστημα χωρίς αιολική διεύθυνση, έχουμε τα αποτελέσματα του Σχήματος 8.44. Στις δύο συμβατικές γεννήτριες που καλύπτουν το φορτίο ο ολοκληρωτικός ελεγκτής έχει την ίδια τιμή α.μ. Η μεταβολή της συχνότητας προσομοιώθηκε για διαφορετικές τιμές της σταθεράς $K_{secondary}$. Η περίπτωση (γ) - που αντιστοιχεί σε τιμή 0.1 α.μ. - μπορεί να θεωρηθεί ότι αντιστοιχεί στην κρίσιμη περίπτωση, η περίπτωση (δ) σε υπερκρίσιμη και η (β) σε υποκρίσιμη. Η καμπύλη (α) αντιστοιχεί σε πρωτεύουσα ρύθμιση μόνο. Στην υπερκρίσιμη περίπτωση η απόκριση είναι πιο γρήγορη αλλά προκαλείται σημαντική υπερπήδηση της συχνότητας. Μειώνοντας την τιμή της σταθεράς του ολοκληρωτή η απόκριση επιβραδύνεται και οδηγείται σε υποκρίσιμες αποκρίσεις. Το σφάλμα μηδενίζεται πιο αργά καθυστερώντας την αποκατάσταση της ονομαστικής συχνότητας.



Σχήμα 8.44. Μεταβολή φορτίου, συχνότητα συστήματος, μηχανική ισχύς συμβατικής γεννήτριας και ταχύτητα δρομεία γεννήτριας για σύστημα χωρίς αιολική παραγωγή και με συντελεστή ολοκληρωτικού ελεγκτή $K_{secondary}^{diesel}$ ίσο με (α) 0 α.μ., (β) 0.05 α.μ., (γ) 0.1 α.μ. και (δ) 0.2 α.μ..

Όπως έχει παρουσιασθεί ήδη στην παρούσα ενότητα, το σύστημα ελέγχου του Α/Π που προτείνεται στην παρούσα διατριβή παρέχει τη δυνατότητα στις Α/Γ να συμμετέχουν στη δευτερεύουσα ρύθμιση συχνότητας από τη στιγμή που μπορούν να δεχτούν σήματα ελέγχου από το διαχειριστή του συστήματος, όπως εφεδρεία ισχύος τύπου *balance* ή *delta*, ρυθμός μεταβολής ενεργού ισχύος κτλ.

Ακολουθώντας την ίδια λογική δευτερεύουσας ρύθμισης μέσω ολοκληρωτικού ελεγκτή το σύστημα ελέγχου του Α/Π, όπως αυτό περιγράφεται στην αρχή του παρόντος κεφαλαίου, μπορεί να τροποποιηθεί κατάλληλα και να συμπεριλάβει τον επιπρόσθετο βρόχο μηδενισμού του σφάλματος συχνότητας. Εφαρμόζοντας την ίδια βηματική μεταβολή στο φορτίο – 60% – και με 50% αιολική διεύθυνση (με αντικατάσταση της μίας από τις δύο συμβατικές γεννήτριες του Σχήματος 8.35 από Α/Π με Α/Γ Τύπου Γ). Ο ολοκληρωτικός ελεγκτής στη μονάδα Diesel έχει τιμή 0.1 α.μ. που αντιστοιχούσε στην κρίσιμη απόκριση για 0% αιολική διεύθυνση. Εφαρμόζονται διαφορετικές τιμές της σταθεράς ολοκλήρωσης του συστήματος ελέγχου του Α/Π και δίνονται τα αποτελέσματα για τις βασικές μεταβλητές του συστήματος. Υπενθυμίζεται ότι οι ελεγκτές στατισμού και αδρανειακής απόκρισης έχουν τιμή 5% σε όλες τις περιπτώσεις.



Σχήμα 8.45. Μεταβολή φορτίου, συχνότητα συστήματος, ταχύτητα δρομέα Α/Π, ισχύς εξόδου Α/Π και μηχανική ισχύς συμβατικής γεννήτριας για σύστημα με 50% αιολική διείδυση και (α) $K_{secondary}^{diesel}=0 p.u., K_{secondary}^{WT}=0 p.u.$ (β)

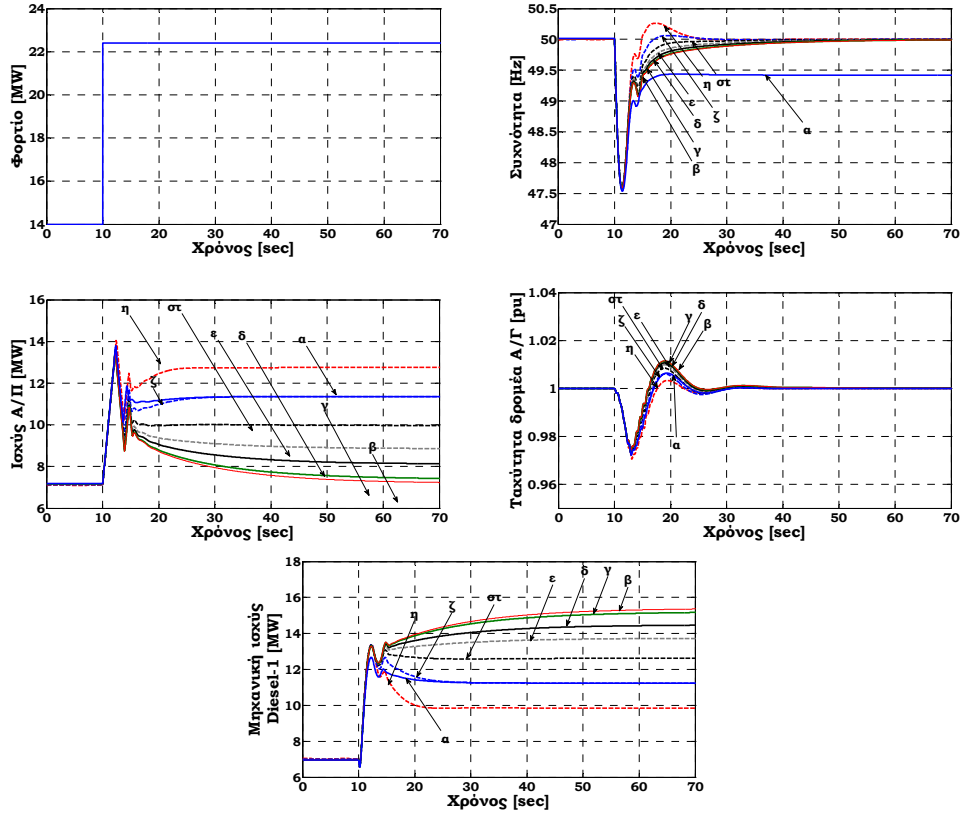
$K_{secondary}^{diesel}=0.1 p.u., K_{secondary}^{WT}=0 p.u.$ (γ) $K_{secondary}^{diesel}=0.1 p.u., K_{secondary}^{WT}=0.1 p.u.$ (δ) $K_{secondary}^{diesel}=0.1 p.u., K_{secondary}^{WT}=0.5 p.u.,$ (ε)

$K_{secondary}^{diesel}=0.1 p.u., K_{secondary}^{WT}=1 p.u.,$ (στ) $K_{secondary}^{diesel}=0.1 p.u., K_{secondary}^{WT}=2 p.u.,$ (ζ) $K_{secondary}^{diesel}=0.1 p.u., K_{secondary}^{WT}=4 p.u.$ και (η)

$K_{secondary}^{diesel}=0.1 p.u., K_{secondary}^{WT}=8 p.u.$

Περιοριστής ρυθμού μεταβολής ισχύος

Σε αντίθεση με το Σχήμα 8.45, όπου δεν υπάρχει περιοριστής ρυθμού μεταβολής της ενεργού ισχύος (παρά μόνο όσον αφορά τα σήματα εφεδρείας τύπου *balance* ή *delta* που λαμβάνονται από το διαχειριστή του συστήματος), στη συνέχεια παρουσιάζονται αποτελέσματα με την προσθήκη περιοριστή ρυθμού μεταβολής της ενεργού ισχύος για το Α/Π στο σήμα αναφοράς ενεργού ισχύος που προκύπτει από τον ελεγκτή συχνότητας του Α/Π (πρωτεύουσας και δευτερεύουσας ρύθμισης). Οι παράμετροι των ελεγκτών στατισμού και αδρανειακής απόκρισης έχουν τιμές 5%, ενώ το όριο στο ρυθμό μεταβολής που έχει προστεθεί είναι 0.32 MW/sec – τιμή που αντιστοιχεί στο 0.16 α.μ. – μεταβολή δηλαδή από το 80% της ονομαστικής ισχύος στο 20% σε 5 δευτερόλεπτα, [CHRO1]. Υπενθυμίζεται ότι στα Σχήματα 8.45 και 8.46 διαφέρει και η περίπτωση (α) – αν και ο ολοκληρωτικός ελεγκτής έχει μηδενική τιμή στη συμβατική γεννήτρια και στο Α/Π – γιατί ο περιοριστής ρυθμού μεταβολής της ενεργού ισχύος που έχει προστεθεί επιδρά στο σήμα που προκύπτει από τον ελεγκτή στατισμού και αδρανειακής απόκρισης, με αποτέλεσμα να προκύπτει πιο αργή απόκριση στο Σχήμα 8.46 και μεγαλύτερη βύθιση συχνότητας στο μεταβατικό.



Σχήμα 8.46. Μεταβολή φορτίου, συχνότητα συστήματος, ταχύτητα δρομεία A/Γ, ισχύς εξόδου A/Π και μηχανική ισχύς συμβατικής γεννήτριας για σύστημα με 50% αιολική διείσδυση, περιοριστή ρυθμού ενεργού ισχύος στις A/Γ και (α) $K_{secondary}^{diesel}=0 p.u., K_{secondary}^{WT}=0 p.u.$ (β) $K_{secondary}^{diesel}=0.1 p.u., K_{secondary}^{WT}=0 p.u.$ (γ) $K_{secondary}^{diesel}=0.1 p.u., K_{secondary}^{WT}=0.1 p.u.$ (δ) $K_{secondary}^{diesel}=0.1 p.u., K_{secondary}^{WT}=0.5 p.u.$, (ε) $K_{secondary}^{diesel}=0.1 p.u., K_{secondary}^{WT}=1 p.u.$, (στ) $K_{secondary}^{diesel}=0.1 p.u., K_{secondary}^{WT}=2 p.u.$, (ζ) $K_{secondary}^{diesel}=0.1 p.u., K_{secondary}^{WT}=4 p.u.$ και (η) $K_{secondary}^{diesel}=0.1 p.u., K_{secondary}^{WT}=8 p.u.$

8.9. Αυτόματη Ρύθμιση Παραγωγής (ΑΡΠ) και αιολική παραγωγή

Για λόγους πληρότητας της παρουσίασης, στην παρούσα ενότητα αναλύονται οι τροποποιήσεις του προγράμματος Αυτόματης Ρύθμισης Παραγωγής που απαιτούνται σε συστήματα με αυξημένη αιολική διείσδυση. Μια σημαντική λειτουργία της δευτερεύουσας ρύθμισης της ΑΡΠ είναι η κατανομή του φορτίου με τρόπο οικονομικό στις μονάδες παραγωγής – γνωστή ως Οικονομική Κατανομή Φορτίου-ΟΚΦ (*Economic Dispatch Control-EDC*). Οι απαιτήσεις της ΟΚΦ μπορούν να ικανοποιηθούν ως μέρος της λειτουργίας της ΑΡΠ. Σε συχνά χρονικά διαστήματα γίνονται υπολογισμοί οικονομικής κατανομής καθώς το φορτίο μεταβάλλεται διαρκώς. Η κατανομή στις επιμέρους μονάδες γίνεται μέσω των σημείων βάσης (*base points*) και των συντελεστών συμμετοχής (*participation factors-pf*). Το σημείο βάσης είναι η πιο οικονομική παραγωγή κάθε μονάδας και ο συντελεστής συμμετοχής είναι ο ρυθμός μεταβολής της παραγωγής της μονάδας ως προς τη μεταβολή στη συνολική παραγωγή. Η νέα επιθυμητή παραγωγή κάθε γεννήτριας είναι, [KUN94]:

$$P_{desired} = P_{basepoint} + PF(\Delta P_{total}) \quad (8.21)$$

όπου ΔP_{total} είναι η διαφορά της συνολικής νέας παραγωγής μείον το άθροισμα των σημείων βάσης για όλες τις μονάδες. Το άθροισμα των συντελεστών συμμετοχής για όλες τις μονάδες είναι ίσο με τη μονάδα. Η εκτέλεση της ΑΡΠ κάθε 2 έως 4 δευτερόλεπτα οδηγεί εν γένει σε καλή απόδοση.

Κατά τον προγραμματισμό της λειτουργίας του συστήματος, πρέπει να υπάρχει διαθέσιμη ισχύς για να αντισταθμίσει τόσο τις μακροπρόθεσμες μεταβολές του φορτίου όσο και τις απαιτήσεις ευσταθούς απόκρισης σε μεταβατικές αλλαγές. Λόγω του στοχαστικού χαρακτήρα της αιολικής παραγωγής η ΑΡΠ πρέπει να τροποποιηθεί κατάλληλα ώστε να συμπεριλάβει την ολοένα αυξανόμενη αιολική παραγωγή στους υπολογισμούς κατανομής φορτίου του συστήματος.

Το σφάλμα ελέγχου περιοχής (ΣΕΠ) αναπαριστά τη μεταβολή που απαιτείται στην παραγωγή της περιοχής ώστε να αποκατασταθεί η συχνότητα και οι ροές διασύνδεσης στις επιθυμητές τιμές. Οι εξισώσεις για το ΣΕΠ είναι οι ακόλουθες:

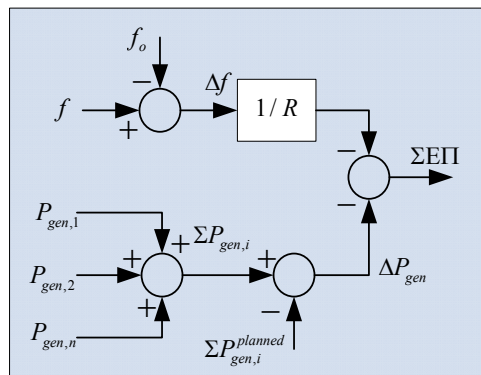
$$\Sigma \text{ΕΠ} = -\Delta P_{gen} - \frac{\Delta f}{R} \quad (8.22)$$

όπου ΔP_{gen} = η διαφορά μεταξύ πραγματικής και προγραμματισμένης παραγωγής

Δf = η διαφορά μεταξύ πραγματικής και ονομαστικής συχνότητας

R = συνολικός στατισμός για τις μονάδες που λαμβάνονται υπ' όψιν

Η αρχή λειτουργίας της ΑΡΠ δίνεται στο Σχήμα 8.47.

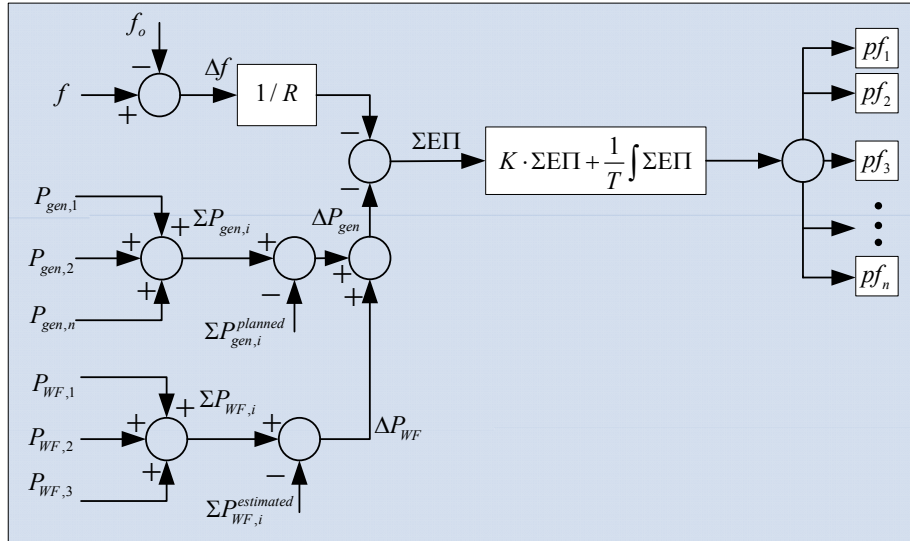


Σχήμα 8.47. Υπολογισμός ΣΕΠ σε κλασική ΑΡΠ

Ανάμεσα στις κλασικές λειτουργίες της ΑΡΠ είναι και η μεταβολή της ισχύος παραγωγής μιας μονάδας με καθορισμένο ρυθμό μεταβολής (*ramping*). Επιπλέον κατά το σχεδιασμό της ΑΡΠ πρέπει να ληφθεί υπ' όψιν το γεγονός ότι οι μονάδες, ανάλογα με το είδος τους, δε μπορούν συχνά να μεταβάλλουν την ισχύ τους ακαριαία. Αυτό ισχύει ειδικά για θερμικές μονάδες. Εν τούτοις ενδέχεται

ο περιορισμός στο ρυθμό μεταβολής να ισχύει και σε υδροηλεκτρικές μονάδες ανάλογα με τη σχεδίαση των αγωγών.

Η εκτέλεση του προγράμματος ΑΡΠ που λειτουργεί στο κέντρο ελέγχου του συστήματος καταλήγει σε παλμούς αύξησης ή μείωσης στις μονάδες παραγωγής. Η αυξανόμενη αιολική διείσδυση στα σύγχρονα ΣΗΕ απαιτεί κατάλληλη τροποποίηση της ΑΡΠ ώστε να συμπεριλάβει τη μεταβλητή αιολική παραγωγή. Εν γένει η συνολική παραγωγή ενός Α/Π είναι εξομαλυμένη σε σχέση με την μεμονωμένη παραγωγή μιας Α/Γ. Γι' αυτό και προτείνεται η μέτρηση της αιολικής παραγωγής και των διακυμάνσεων της στο Σημείο Κοινής Σύνδεσης -ΣΚΚ του Α/Π. Η διαφορά μεταξύ πραγματικής και εκτιμώμενης αιολικής παραγωγής συμβάλλει στο ΣΕΠ και κατανέμεται κατάλληλα μέσω των συντελεστών συμμετοχής στις επιλεγμένες μονάδες του συστήματος, [SUW07].



Σχήμα 8.48. Υπολογισμός ΣΕΠ σε ΑΡΠ με αιολική παραγωγή

Η τιμή των συντελεστών συμμετοχής καθορίζεται από αρκετούς παράγοντες πχ. οικονομία, μέγιστος δυνατός ρυθμός μεταβολής ισχύος κ.α. Το σήμα αναφοράς μεταβολής της συνολικής παραγωγής υπολογίζεται με βάση την παρακάτω εξίσωση:

$$\Delta P_{set} = K \cdot \Sigma \text{ΕΠ} + \frac{1}{T} \int \Sigma \text{ΕΠ} \quad (8.23)$$

όπου K είναι το αναλογικό κέρδος και T η χρονική σταθερά ολοκλήρωσης.

8.10. Συμπεράσματα

Οι σημερινοί κώδικες δικτύων σταδιακά περιλαμβάνουν σημαντικές απαιτήσεις όσον αφορά τη συμπεριφορά των Α/Γ και των Α/Π κατά τη διάρκεια μεταβολών της συχνότητας του συστήματος. Όσο η αιολική διείσδυση αυξάνεται, η αντίληψη γύρω από τη λειτουργία των Α/Π ως αρνητικών φορτίων αντικαθίσταται από τη λογική λειτουργίας των Α/Π ως πλήρως ελεγχόμενων μονάδων παραγωγής που καλούνται να παίζουν ενεργητικό ρόλο στη λειτουργία του συστήματος. Στην πρώτη φάση ανάπτυξης πρόσθετων λειτουργιών ειδικά στις Α/Γ μεταβλητών στροφών (Τύπου Γ και Δ) κεντρικό ρόλο έπαιξε ο έλεγχος αέργου ισχύος και η ρύθμιση τάσης. Στη φάση υλοποίησης της παρούσας διατριβής το κύριο ερευνητικό ενδιαφέρον κινήθηκε γύρω από τη δυνατότητα των Α/Γ να συμβάλλουν ενεργά στον έλεγχο συχνότητας με έμφαση στην πρωτεύουσα ρύθμιση.

Όταν μια σύγχρονη γεννήτρια συνδέεται στο δίκτυο προσθέτει εγγενώς αδράνεια στο σύστημα μέσω της στρεφόμενης μάζας του δρομέα. Η σύζευξη που υπάρχει ανάμεσα στη συχνότητα του συστήματος και την ηλεκτρομαγνητική ροπή (και τη συνεπαγόμενη ηλεκτρική ισχύ εξόδου) της γεννήτριας προσφέρει τη δυνατότητα αδρανειακής απόκρισης σε περιπτώσεις έντονων μεταβολών της συχνότητας. Αυτή η δυνατότητα διατηρείται στην περίπτωση Α/Γ σταθερών στροφών με ασύγχρονη γεννήτρια απ' ευθείας σύνδεσης στο δίκτυο. Σε περίπτωση για π.δ. μεταβατικής μείωσης της συχνότητας του δικτύου η συνεπακόλουθη επιβράδυνση του δρομέα της Α/Γ εξασφαλίζει μια μεταβατική έγχυση ενεργού ισχύος στο δίκτυο που προκύπτει από την κινητική ενέργεια των στρεφόμενων μαζών της Α/Γ. Με τον τρόπο αυτό οι Α/Γ Τύπου Α και Β συμβάλλουν με αδρανειακή απόκριση. Στην περίπτωση των Α/Γ μεταβλητών στροφών (Τύπου Γ και Δ) η γεννήτρια (σύγχρονη ή ασύγχρονη) συνδέεται στο δίκτυο μέσω μετατροπέων ισχύος που δημιουργούν ηλεκτρική απόζηυση μεταξύ της μηχανής και του δικτύου. Η απόζηυση αυτή είναι μερική στην περίπτωση των Α/Γ Τύπου Γ λόγω μερικής σύνδεσης της γεννήτριας στο δίκτυο μέσω του στάτη και ολική στην περίπτωση Α/Γ Τύπου Δ. Επομένως αν και οι Α/Γ μεταβλητών στροφών έχουν σημαντικά ποσά κινητικής ενέργειας συσσωρευμένης στις στρεφόμενες μάζες, δε συμβάλλουν στην αδράνεια του συστήματος καθώς η ταχύτητα του δρομέα είναι αποδεσμευμένη από τη συχνότητα του δικτύου λόγω των ηλεκτρονικών ισχύος που παρεμβάλλονται.

Στο παρόν κεφάλαιο προτείνεται και αναλύεται η λειτουργία ενός ελεγκτή συχνότητας για Α/Γ μεταβλητών στροφών (Τύπου Γ και Δ), που περιλαμβάνει τις δύο βασικές αρχές ελέγχου – την αδρανειακή απόκριση και τον έλεγχο στατισμού. Διερευνώνται τρεις παραλλαγές του σχήματος ελέγχου (έλεγχος αδράνειας, έλεγχος στατισμού και συνδυασμένος έλεγχος) και δίνονται αποτελέσματα για διαφορετικές τιμές στις παραμέτρους του ελεγκτή. Ο ελεγκτής αδρανειακής απόκρισης παίρνει ως είσοδο το ρυθμό μεταβολής της συχνότητας και παρέχει μεταβατική απόκριση κυρίως κατά τη διάρκεια έντονων διαταραχών στο σύστημα. Η προσθήκη *εικονικής αδράνειας* στις Α/Γ μεταβλητών στροφών, μέσω του ελεγκτή αδρανειακής απόκρισης, επιτρέπει την αντικατάσταση συμβατικών μονάδων από Α/Π χωρίς τη μείωση της συνολικής αδράνειας του συστήματος, γεγονός που αποτελεί από τους πιο σημαντικούς περιορισμούς αύξησης της αιολικής διείσδυσης ειδικότερα στα μη διασυνδεδεμένα συστήματα. Κατά τη διάρκεια της διερεύνησης της λειτουργίας του ελεγκτή αδρανειακής απόκρισης, μελετήθηκε η απόκριση των Α/Γ σε διαφορετικές περιοχές λειτουργίας με σημαντικά συμπεράσματα όσον αφορά τη σχεδίαση του ελέγχου. Ο ελεγκτής στατισμού, που προσομοιάζει τον αντίστοιχο έλεγχο των ρυθμιστών στροφών των συμβατικών μονάδων παρέχει μόνιμη απόκριση, είναι αποτελεσματικός για σχετικά πιο βραδείες μεταβολές της συχνότητας και επιτρέπει τη συμμετοχή των Α/Γ στην πρωτεύουσα ρύθμιση του συστήματος. Ο συνδυασμένος έλεγχος εξασφαλίζει τη βέλτιστη απόκριση, μειώνοντας σημαντικά τα έντονα μεταβατικά συχνότητας και το μόνιμο σφάλμα συχνότητας. Στο τέλος του κεφαλαίου περιλαμβάνεται περιγραφή της δευτερεύουσας ρύθμισης και των αντίστοιχων μεθόδων υλοποίησης στους ρυθμιστές στροφών των συμβατικών μονάδων. Οι τροποποιήσεις που υφίστανται στα συστήματα Αυτόματης Ρύθμισης Παραγωγής ώστε να συμπεριλάβουν ως ενεργές συνιστώσες τα Α/Π που είναι εφοδιασμένα με έλεγχο συχνότητας σε ΣΗΕ με σημαντική αιολική διείσδυση δίνονται συνοπτικά στην τελευταία ενότητα του κεφαλαίου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9 – Ανάλυση λειτουργίας ΣΗΕ με αυξημένη αιολική διείδυση

Στην παρούσα ενότητα μελετάται η λειτουργία των ΣΗΕ σε συνθήκες αυξημένης αιολικής διείδυσης σε τρία πεδία ανάλυσης. Αρχικά ερευνάται η επίδραση των διακυμάνσεων της αιολικής παραγωγής - λόγω διακυμάνσεων στην ταχύτητα ανέμου - στην ασφαλή λειτουργία του συστήματος. Στη συνέχεια αναλύεται η συμβολή των Α/Π με Α/Γ Τύπου Γ και Δ στη δυναμική ασφάλεια του συστήματος κατά τη διάρκεια βραχυκυκλωμάτων και ανάλυση της συμβολής της δυνατότητας αδιάλειπτης παροχής ισχύος και της δυνατότητας στήριξης τάσης εκ μέρους των Α/Π. Για λόγους πληρότητας της παρουσίασης παρουσιάζεται και η απόκριση Α/Γ Τύπου Α με εφαρμογή της μεθόδου περιορισμού της ενεργού ισχύος κατά τη διάρκεια των βυθίσεων τάσης. Η ανάλυση ολοκληρώνεται με διερεύνηση της δυνατότητας συμμετοχής των Α/Π στη ρύθμιση συχνότητας - για Α/Γ Τύπου Γ και Δ - εφαρμόζοντας τις μεθόδους ελέγχου συχνότητας που έχουν παρουσιαστεί στο Κεφάλαιο 8 της παρούσας διατριβής - τόσο κατά τη διάρκεια σφαλμάτων - όπως πχ. απώλεια παραγωγής - όσο και κατά τη διάρκεια κανονικής λειτουργίας και διακυμάνσεων συχνότητας λόγω διακυμάνσεων στην ταχύτητα ανέμου. Για την παραπάνω ανάλυση χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο του ΣΗΕ Ρόδου, στοιχεία για το οποίο περιλαμβάνονται στο Παράρτημα Π10. Τα σενάρια παραγωγής, φορτίου και αιολικής διείδυσης που έχουν αναπτυχθεί μπορούν να αναζητηθούν στο [ΑΕΗ08], ενώ βασικά δεδομένα δίνονται και στο Παράρτημα Π10. Σημειώνεται ότι, αν και χρησιμοποιείται ως μελέτη περίπτωσης το μη διασυνδεδεμένο ΣΗΕ της Ρόδου, η ανάλυση μπορεί να γενικευθεί στα διασυνδεδεμένα συστήματα και ειδικότερα σε περιπτώσεις απώλειας διασυνδέσεων, ασθενών διασυνδέσεων ή απομόνωσης τμημάτων του δικτύου (νησιδοποίηση).

9.1. Διακυμάνσεις ισχύος και συχνότητας λόγω μεταβλητότητας ανέμου

Για τα μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα ενότητα - τόσο για τις διακυμάνσεις στην ταχύτητα ανέμου, όσο και για τα μοντέλα των Α/Γ και Α/Π - ο αναγνώστης παραπέμπεται στα προηγούμενα κεφάλαια της παρούσας διατριβής. Η μεταβλητότητα του ανέμου μπορεί να ειπωθεί ως είσοδος στα δυναμικά μοντέλα των Α/Π. Ως τέτοια, η διακύμανση της ταχύτητας ανέμου είναι η αιτία διακυμάνσεων της αιολικής ισχύος, αν και διαφορετικές τεχνολογίες Α/Γ αποκρίνονται περισσότερο ή λιγότερο ομαλά στις μεταβολές του ανέμου.

Μια προσέγγιση της ανάλυσης των διακυμάνσεων θα μπορούσε να είναι η εφαρμογή μετρούμενων χρονοσειρών ανέμου ως είσοδο. Σε αυτή την περίπτωση οι ταχύτητες ανέμου θα έπρεπε να μετρηθούν σε όλες τις θέσεις των Α/Π - εν προκειμένω για το ΣΗΕ Ρόδου στις πέντε τοποθεσίες των Α/Π, βλέπε Παράρτημα Π10 - καθ' ότι η συσχέτιση μεταξύ των ταχυτήτων ανέμου σε διαφορετικές θέσεις έχει σημαντική επίδραση στις διακυμάνσεις στην αθροισόμενη ισχύ από όλα τα Α/Π. Και όσον αφορά το ΣΗΕ, αυτή η αθροισόμενη ισχύ είναι ακριβώς ο παράγοντας που επηρεάζει την απόκριση και περαιτέρω τον έλεγχο της συχνότητας στο σύστημα.

Για τις ανάγκες της παρούσας ανάλυσης, εφαρμόστηκε το λογισμικό μοντέλο *Correlated Wind (CorWind)* για την προσομοίωση στιγμιαίων τιμών ταχύτητας ανέμου σε όλες τις θέσεις Α/Π. Για περισσότερες λεπτομέρειες ο αναγνώστης παραπέμπεται στο Κεφάλαιο 2, ενότητα 2.5. Η είσοδος στο μοντέλο είναι οι τοποθεσίες των Α/Γ διότι η συσχέτιση μεταξύ των ταχυτήτων ανέμου σε διαφορετικές θέσεις εξαρτάται αποφασιστικά από την απόσταση μεταξύ των σημείων. Αυτό περιλαμβάνεται στο μοντέλο μέσω μιας μιγαδικής συνάρτησης συνοχής, που λαμβάνει επίσης υπ' όψιν την χρονική καθυστέρηση με την οποία απότομες μεταβολές στον άνεμο επαναλαμβάνονται περαιτέρω κατάντη.

Στα σενάρια λειτουργίας (που μπορούν να αναζητηθούν στο Παράρτημα Π10) η ολική εγκαταστημένη αιολική ισχύς και η μέγιστη ετήσια ζήτηση είναι 48 MW και 233 MW αντίστοιχα, βλέπε Πίνακα 9.1.

ΣΗΕ Ρόδου	
Μέγιστη ζήτηση (MW)	233.1
Ονομαστική ισχύς συμβατικών μονάδων (MW)	322.9
Ονομαστική ισχύς αιολικών σταθμών (MW)	48.8

Πίνακας 9.1. Δεδομένα ΣΗΕ Ρόδου ενότητας 9.1

Οι λεπτομέρειες για το είδος και τον αριθμό των Α/Γ των Α/Π δίνονται στο Παράρτημα Π10, στον Πίνακα Π9. Τρία σενάρια λειτουργίας έχουν εξεταστεί για το έτος αναφοράς 2012:

- Σενάριο μέγιστης ζήτησης (ΣΕΝ1)
- Σενάριο μέγιστης αιολικής παραγωγής (σε απόλυτες τιμές παραγωγής) (ΣΕΝ2)
- Σενάριο μέγιστης αιολικής διείσδυσης (επί τοις εκατό της ζήτησης) (ΣΕΝ3)

Το πρώτο σενάριο αντιστοιχεί σε περιόδους του έτους, όπου η αιολική διείσδυση είναι χαμηλή και η ζήτηση μέγιστη. Μια τέτοια λειτουργία χαρακτηρίζει τις θερινές περιόδους, όπου το τουριστικό φορτίο είναι αυξημένο και το αιολικό δυναμικό ασθενές. Σε αυτήν την περίπτωση, η ισχύς παράγεται κυρίως από τις συμβατικές μονάδες και η αδράνεια του συστήματος είναι υψηλή. Το δεύτερο σενάριο αντιστοιχεί σε μέγιστη αιολική παραγωγή σε απόλυτες τιμές, όπου η διείσδυση αγγίζει επίπεδα άνω του 20% της ζήτησης – αντιστοιχώντας σε μια τυπική λειτουργία χειμερινής περιόδου. Στο τελευταίο σενάριο η διείσδυση είναι άνω του 30%, που θεωρείται συχνά όριο ασφαλούς λειτουργίας στα απομονωμένα συστήματα. Η αδράνεια του συστήματος είναι σημαντικά μειωμένη, καθώς η παραγωγή καλύπτεται σημαντικά από τους αιολικούς σταθμούς.

Για κάθε Α/Π προσομοιώνονται τρία σύνολα χρονοσειρών ανέμου (ένα για κάθε σενάριο λειτουργίας). Στο πρώτο σενάριο, έχει θεωρηθεί μέση ταχύτητα ανέμου περίπου ίση με 6 m/s, που είναι μια τυπική τιμή για τη θερινή περίοδο. Η μέση τιμή θεωρείται ίδια για όλα τα Α/Π, καθώς οι θέσεις τους είναι σχετικά κοντινές. Παρόμοια, για το δεύτερο σενάριο η μέση ταχύτητα ανέμου είναι 11.5 m/s και για το τρίτο 9 m/s αντίστοιχα.

Για λόγους πληρότητας της ανάλυσης αναφέρεται ότι για όλα τα σενάρια έχει εξασφαλισθεί η ασφαλής λειτουργία του συστήματος σε συνθήκες μονίμου καταστάσεως με βάση τα κριτήρια ασφαλούς λειτουργίας κανονικής (N) και έκτακτης λειτουργίας (N-1), αντίστοιχα. Μεταξύ των απαιτήσεων που πρέπει να πληρούνται είναι οι εξής:

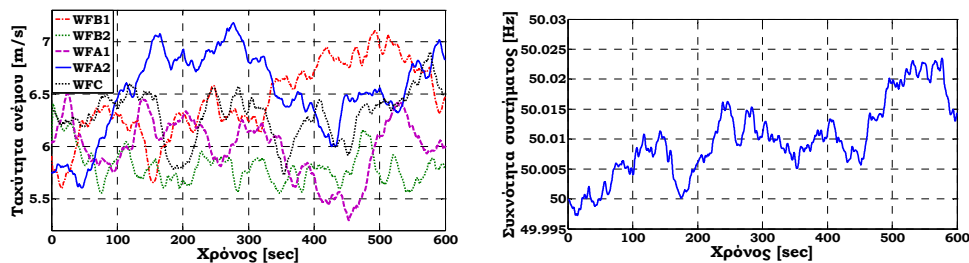
- Η φόρτιση των γραμμών μεταφοράς πρέπει να ικανοποιεί τα απαιτούμενα όρια
- Οι τάσεις των ζυγών πρέπει να κυμαίνονται σε εύρος $\pm 5\%$ γύρω από την ονομαστική τιμή της τάσης για κανονική λειτουργία (N)
- Οι τάσεις των ζυγών πρέπει να κυμαίνονται σε εύρος $\pm 10\%$ γύρω από την ονομαστική τιμή της τάσης για έκτακτη λειτουργία (N-1)

Στόχος της ανάλυσης είναι η μελέτη της επίδρασης των διακυμάνσεων ταχύτητας ανέμου στην ασφαλή λειτουργία του συστήματος αλλά και η δυνατότητα του συστήματος ελέγχου των διαφορετικών τύπων Α/Γ να εξασφαλίσει την ασφαλή λειτουργία των Α/Γ κατά τη διάρκεια μεταβλητότητας στην ταχύτητα του ανέμου σε όλο το εύρος λειτουργίας τους.

Για κάθε Α/Π και κάθε σενάριο λειτουργίας έχουν παραχθεί διαφορετικές χρονοσειρές ανέμου των 10 λεπτών. Η συσχέτιση μεταξύ των ταχυτήτων ανέμου των Α/Π είναι σημαντική, ιδιαίτερα σε συστήματα μεγέθους όπως η Ρόδος, καθώς οι αποστάσεις μεταξύ των Α/Π είναι σχετικά μικρές και επομένως οι ταχύτητες ανέμου ενδέχεται να παρουσιάζουν υψηλό βαθμό συσχέτισης.

Αποτελέσματα προσομοιώσεων

Το Σχήμα 9.1 απεικονίζει τις χρονοσειρές ανέμου, που αντιστοιχούν στα πέντε Α/Π, σύμφωνα με το σενάριο φόρτισης μέγιστης ζήτησης (ΣΕΝ1). Στην περίπτωση αυτή όλα τα Α/Π βρίσκονται στη λειτουργία βελτιστοποίησης της εξαγόμενης ισχύος, καθώς οι ταχύτητες ανέμου είναι μικρότερες της ονομαστικής. Σε αυτό το σενάριο, τα Α/Π παράγουν συνολικά 7.5 MW, που αντιστοιχεί σε μόλις 3 % της συνολικής ζήτησης. Όπως απεικονίζεται και στο Σχήμα 9.1, οι διακυμάνσεις συχνότητας εξαιτίας των διακυμάνσεων στην ταχύτητα ανέμου είναι αμελητέες. Δεν προκύπτουν ζητήματα έντονων διακυμάνσεων και επομένως ασφαλούς λειτουργίας, τόσο των Α/Π όσο και του συστήματος γενικότερα.



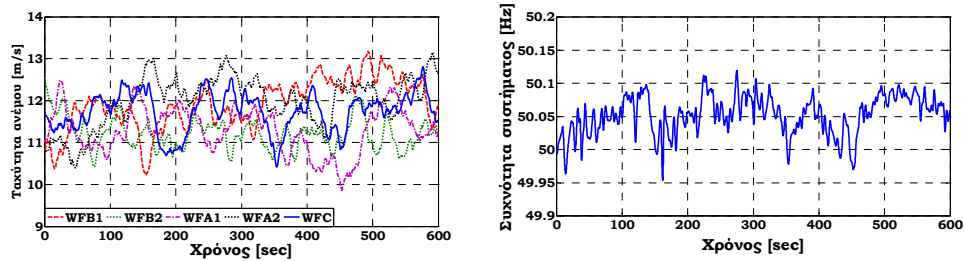
Σχήμα 9.1. Ταχύτητες ανέμου και συχνότητα συστήματος (ΣΕΝ1)

Αντίστοιχα το Σχήμα 9.2 απεικονίζει τις χρονοσειρές ταχύτητας ανέμου για το ΣΕΝ2 δηλ. σε συνθήκες λειτουργίας μέγιστης αιολικής παραγωγής (σε απόλυτες παραγωγής). Στο ΣΕΝ2 οι Α/Γ λειτουργούν σε ένα περιορισμένο εύρος γύρω από την ονομαστική τους ισχύ. Εξ' αιτίας των ταχυτήτων ανέμου με υψηλό βαθμό συσχέτισης, η απόκριση της συχνότητας του συστήματος (Σχήμα 9.2) δε σχετίζεται άμεσα με μια συγκεκριμένη χρονοσειρά ανέμου, αλλά με το συνδυασμό των διακυμάνσεων ισχύος που προκύπτει από τη λειτουργία όλων των Α/Π. Στο σενάριο αυτό, τα Α/Π παράγουν συνολικά 45.2 MW, που αντιστοιχεί στο 26 % της συνολικής ζήτησης. Αξίζει να σημειωθεί ότι η συχνότητα του συστήματος εμφανίζει πολύ γρήγορες διακυμάνσεις στο εύρος 49.95 Hz – 50.15 Hz, που θεωρείται εύρος ασφαλούς λειτουργίας του συστήματος.

Αν και η στιγμιαία αιολική διείδυση είναι σημαντική στο ΣΕΝ2, οι διακυμάνσεις συχνότητας δε θεωρούνται σημαντικές ώστε να τεθούν ζητήματα ασφαλούς λειτουργίας. Ο υψηλός βαθμός συσχέτισης των ταχυτήτων ανέμου εξασφαλίζει ότι η συχνότητα του συστήματος δεν επηρεάζεται σημαντικά από μία απότομη μείωση ή αύξηση της ταχύτητας ανέμου σε ένα Α/Π.

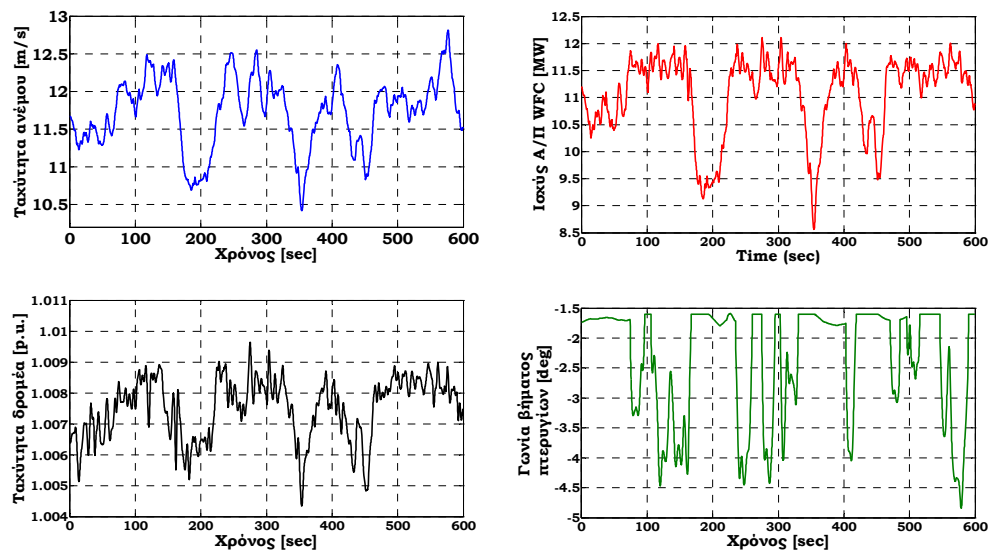
Ανάμεσα στους καθοριστικούς παράγοντες που επηρεάζουν τις διακυμάνσεις συχνότητας – εκτός από τις παραμέτρους των ρυθμιστών των συμβατικών μονάδων και το ρυθμό ανάληψης ισχύος τους – είναι προφανώς και το μέγεθος των Α/Π καθώς και το είδος των Α/Γ που χρησιμοποιούνται.

Τα ακόλουθα σχήματα δίνουν σε λεπτομέρεια την απόδοση δύο τύπων Α/Γ στο σενάριο ΣΕΝ2, του Τύπου Α και του Τύπου Δ2. Επιλέχθηκαν ώστε να απεικονίσουν τη συμπεριφορά των δύο βασικών διαφοροποιήσεων Α/Γ, σταθερών και μεταβλητών στροφών αντίστοιχα. Στα σχήματα που ακολουθούν περιλαμβάνονται βασικά μεγέθη του συστήματος των Α/Γ, όπως ισχύς προς το δίκτυο, ταχύτητα δρομέα και γωνία βήματος πτερυγίων.



Σχήμα 9.2. Ταχύτητες ανέμου και συχνότητα συστήματος (ΣΕΝ2)

Το Σχήμα 9.3 απεικονίζει τις χρονοσειρές ανέμου που αντιστοιχούν σε μία Α/Γ Τύπου Α του Α/Π WFC, βλέπε πίνακα Π9 – Παράρτημα Π10. Η μέση ταχύτητα ανέμου είναι περίπου 11.5 m/s. Αξίζει να σημειωθεί ότι στο ΣΕΝ2, το Α/Π με τις Α/Γ Τύπου Α παράγει περίπου 6% της συνολικής ζήτησης. Το σημείο λειτουργίας για τις Α/Γ κινείται στην περιοχή μετάβασης μεταξύ του εύρους λειτουργίας μεγιστοποίησης της εξαγόμενης αεροδυναμικής ισχύος και της περιοχής περιορισμού. Ο υψηλός βαθμός συσχέτισης μεταξύ των διακυμάνσεων στην ταχύτητα ανέμου, την ενεργό ισχύ εξόδου και την ταχύτητα του δρομέα είναι εμφανής στο Σχήμα 9.3. Όπως αναμένεται για μία Α/Γ Τύπου Α, οι διακυμάνσεις $3p$ είναι εμφανείς τόσο στην ενεργό ισχύ εξόδου όσο και στην ταχύτητα δρομέα. Όταν η ταχύτητα ανέμου είναι μικρότερη της ονομαστικής, η Α/Γ παράγει τη μέγιστη δυνατή ισχύ. Σε αυτήν την περίπτωση η γωνία βήματος πτερυγίων είναι ίση με τη βέλτιστη τιμή, δηλ. -1.7° . Σε περιπτώσεις όπου η ταχύτητα ανέμου υπερβαίνει την ονομαστική, η γωνία λαμβάνει τιμές που διατηρούν την ισχύ της Α/Γ στην ονομαστική τιμή. Παρατηρείται επίσης μια σχετική καθυστέρηση στην απόκριση της γωνίας που οφείλεται στον περιοριστή ρυθμού μεταβολής της γωνίας βήματος, που έχει συμπεριληφθεί στο μοντέλο του σερβομηχανισμού αλλαγής της γωνίας (σχετικά βλέπε Κεφάλαιο 5 παρούσας διατριβής). Παρά τις γρήγορες διακυμάνσεις στην ταχύτητα ανέμου, ο ελεγκτής γωνίας βήματος εξασφαλίζει ομαλή μετάβαση μεταξύ των περιοχών βελτιστοποίησης και περιορισμού της ισχύος κάθε φορά που η ταχύτητα ανέμου αυξομειώνεται γύρω από την ονομαστική της τιμή.

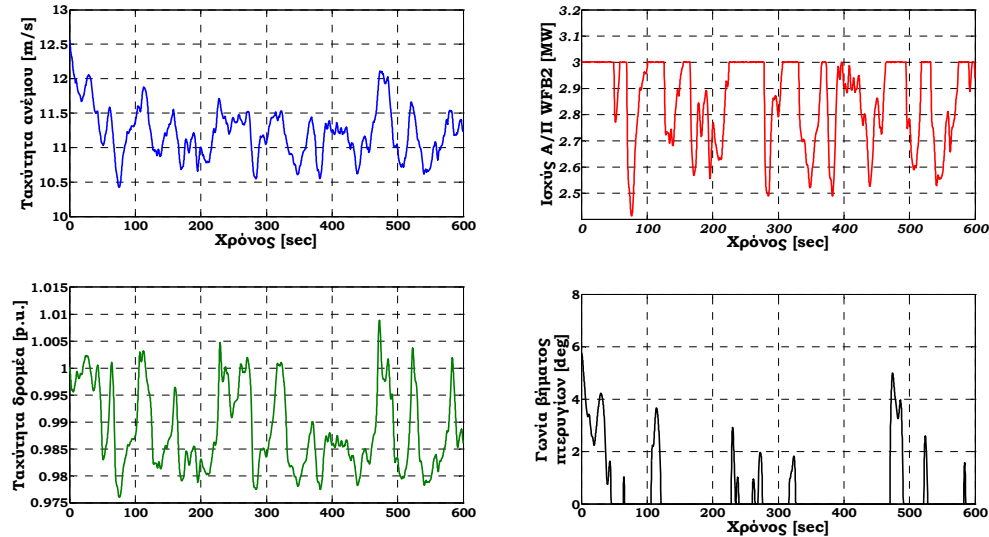


Σχήμα 9.3. Αποτελέσματα για Α/Γ Τύπου Α: Ταχύτητα ανέμου, ισχύς Α/Π, ταχύτητα δρομέα και γωνία βήματος πτερυγίων – Α/Π WFC (ΣΕΝ2)

Το Σχήμα 9.4 απεικονίζει την απόκριση Α/Γ Τύπου Δ2 του Α/Π WFB2 κατά τη διάρκεια του ΣΕΝ2. Περιλαμβάνονται τα βασικά μεγέθη της Α/Γ. Παρομοίως, το σημείο λειτουργίας αντιστοιχεί στην περιοχή μετάβασης μεταξύ του γραμμικού τμήματος της χαρακτηριστικής Μέγιστης Απολαβής Ισχύος και της περιοχής περιορισμού ισχύος, βλέπε ενότητα 7.91 παρούσας διατριβής. Η ονομαστική ισχύς του συγκεκριμένου Α/Π είναι 3 MW, που αντιστοιχεί στο 1% της συνολικής ζήτησης. Όπως

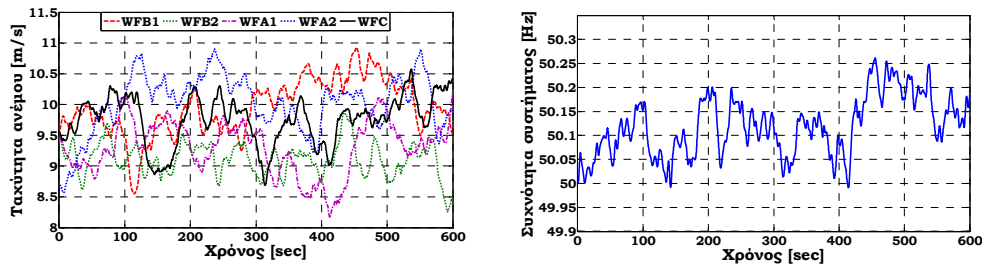
προκύπτει από τα αποτελέσματα που ακολουθούν, όταν η ταχύτητα ανέμου ξεπερνάει την ονομαστική τιμή, ο έλεγχος γωνίας βήματος εξασφαλίζει σταθερή ενεργό ισχύ εξόδου ίση με την ονομαστική τιμή.

Ο ελεγκτής απόσβεσης ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων που περιγράφεται στην ενότητα 7.9.2 της παρούσας διατριβής, εξασφαλίζει επαρκή απόσβεση των ταλαντώσεων που διεγείρονται στον άξονα μετάδοσης της κίνησης. Σε σύγκριση με τα αποτελέσματα για την Α/Γ Τύπου Α παραπάνω, οι γρήγορες διακυμάνσεις στην ταχύτητα ανέμου δεν οδηγούν σε αντίστοιχες διακυμάνσεις της ενεργού ισχύος εξόδου. Η γεννήτρια είναι αποδεσμευμένη από το δίκτυο μέσω του μετατροπέα και οι απότομες μεταβολές της ταχύτητας ανέμου δεν προκαλούν σημαντικές διακυμάνσεις στην ενεργό ισχύ που παρέχεται στο δίκτυο.



Σχήμα 9.4. Αποτελέσματα για Α/Γ Τύπου Δ2: Ταχύτητα ανέμου, ισχύς Α/Π, ταχύτητα δρομέα και γωνία βήματος πτερυγίων – Α/Π WFB2 (ΣΕΝ2)

Στο σενάριο ΣΕΝ3 μέγιστης αιολικής διείσδυσης (32% της συνολικής ζήτησης), αν και τα Α/Π παράγουν λιγότερο απ' ό,τι στο ΣΕΝ2 σε απόλυτες τιμές, η αιολική παραγωγή αντιστοιχεί σε μεγαλύτερο ποσοστό της ζήτησης. Το σενάριο αυτό θεωρείται το πλέον επισφαλές, καθώς οι διακυμάνσεις ισχύος ενδέχεται να έχουν σημαντική επίδραση στη λειτουργία του ΣΗΕ. Η αδράνεια του συστήματος, που ορίζεται ως το άθροισμα των αδρανειών των στρεφόμενων μαζών αδρανείας του συστήματος, δηλ. γεννητριών και φορτίων με στρεφόμενη μάζα, είναι μειωμένη σε σύγκριση με το ΣΕΝ2, καθ' ό,τι ο αριθμός των συμβατικών μονάδων που είναι συνδεδεμένες στο σύστημα είναι μικρότερος. Τα Α/Π, που χωρίς επιπρόσθετο έλεγχο συχνότητας, δεν συμβάλλουν στην αδράνεια του συστήματος παράγουν τώρα μεγαλύτερο ποσοστό της συνολικής παραγωγής. Το Σχήμα 9.5 απεικονίζει τις χρονοσειρές ανέμου που αντιστοιχούν στα πέντε Α/Π κατά τη διάρκεια του ΣΕΝ3.



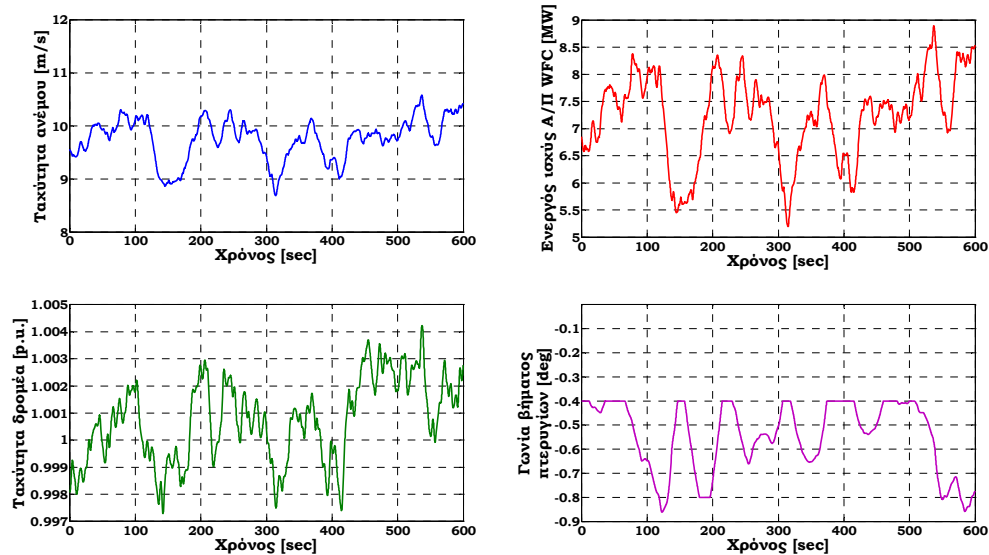
Σχήμα 9.5. Ταχύτητες ανέμου και συχνότητα συστήματος (ΣΕΝ3)

Όπως προκύπτει από τα αποτελέσματα, λόγω των διακυμάνσεων στην ταχύτητα ανέμου, η συχνότητα του συστήματος κυμαίνεται μεταξύ 50 Hz και 50.25 Hz, παρουσιάζοντας εντονότερη διακύμανση σε

σχέση με το ΣΕΝ2. Παρ' όλα αυτά, ο ρυθμός ανάληψης ισχύος των συμβατικών μονάδων είναι αρκετός ώστε να αντισταθμιστούν οι γρήγορες διακυμάνσεις ισχύος των Α/Π. Στη συνέχεια δίνονται τα αποτελέσματα για δύο τύπους Α/Γ, *Τύπου Α* και *Τύπου Γ*.

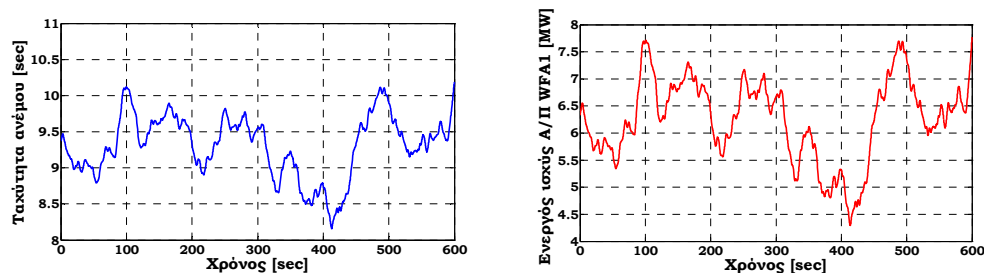
Στα Σχήματα που ακολουθούν δίνονται αποτελέσματα για βασικά μεγέθη του Α/Π WFC στο ΣΕΝ3, που παράγει περίπου 7 MW, δηλ. το 8 % συνολικής ζήτησης.

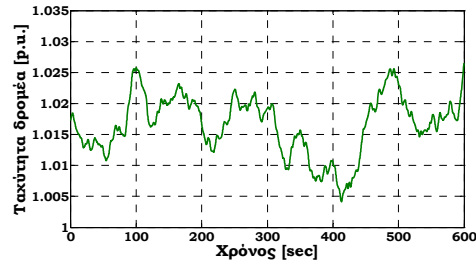
Οι διακυμάνσεις στην ταχύτητα ανέμου, την ενεργό ισχύ και την ταχύτητα δρομέα έχουν υψηλό βαθμό συσχέτισης σε αυτήν την περίπτωση, και οι γρήγορες διακυμάνσεις είναι επίσης σημαντικές. Η γωνία βήματος πτερυγίων μειώνεται με ρυθμό που καθορίζεται από τον περιοριστή ρυθμού.



Σχήμα 9.6. Αποτελέσματα για Α/Γ Τύπου Α: Ταχύτητα ανέμου, ισχύς Α/Π, ταχύτητα δρομέα και γωνία βήματος πτερυγίων – Α/Π WFC (ΣΕΝ3)

Η δυναμική απόδοση των Α/Γ *Τύπου Γ* του Α/Π WFA1 στο ΣΕΝ3 παρουσιάζεται στα επόμενα σχήματα – το συγκεκριμένο Α/Π παράγει 6.5 MW δηλ. 7.5% της συνολικής ζήτησης. Η στρατηγική Μέγιστης Απολαβής Ισχύος, που έχει υλοποιηθεί στο μετατροπέα στην πλευρά του δρομέα του συστήματος της Α/Γ *Τύπου Γ* εξασφαλίζει βέλτιστη λειτουργία της Α/Γ για χαμηλές ταχύτητες ανέμου μεγιστοποιώντας τον αεροδυναμικό συντελεστή C_p . Στην γραμμική περιοχή της χαρακτηριστικής ελέγχου – βλέπε ενότητα 6.4 παρούσας διατριβής – για μικρές μεταβολές στην ταχύτητα περιστροφής η ενεργός ισχύς μεταβάλλεται σημαντικά – βλέπε Σχήμα 9.7. Σε αντίθεση με το Α/Π με Α/Γ *Τύπου Α*, η ταχύτητα του δρομέα είναι μερικώς αποδεσμευμένη από τη συχνότητα του συστήματος. Σημειώνεται ότι η γωνία βήματος διατηρείται σε μηδενική τιμή, καθώς η ταχύτητα ανέμου παραμένει μικρότερη της ονομαστικής.





Σχήμα 9.7. Αποτελέσματα για A/Γ Τύπου Γ: Ταχύτητα ανέμου, ισχύς A/Π και ταχύτητα δρομέα – A/Π WFA1 (ΣΕΝ3)

Σημειώνεται επίσης ότι στην ενότητα 9.3 της παρούσας ενότητας παρουσιάζονται αποτελέσματα για διακυμάνσεις στην ταχύτητα ανέμου, όπου εφαρμόζεται έλεγχος συχνότητας στα A/Π με A/Γ Τύπου Γ και Δ, με διατήρηση εφεδρείας για τις περιπτώσεις όπου οι διακυμάνσεις στη συχνότητα δεν μπορούν να θεωρηθούν αποδεκτές από πλευράς συστήματος. Για το σκοπό αυτό έχει εφαρμοσθεί η ίδια χρονοσειρά ανέμου σε όλα τα A/Π.

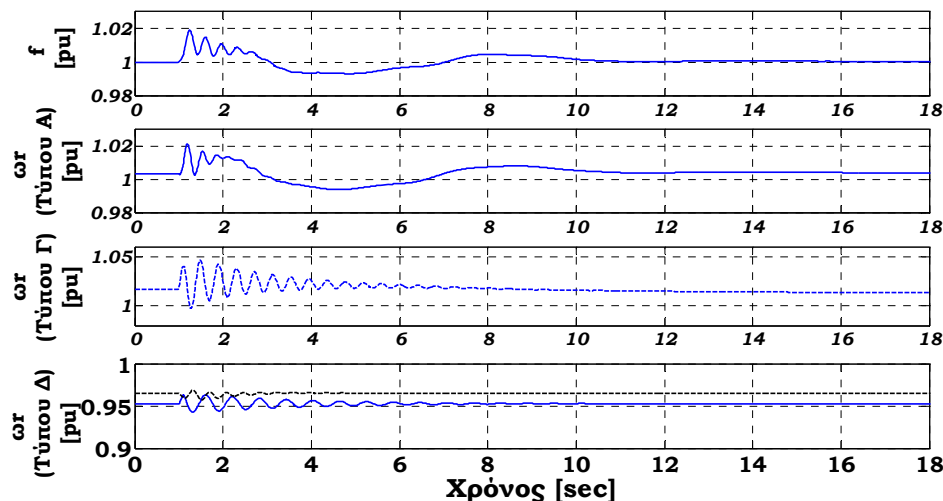
9.2. Συνθήκες βύθισης τάσης

Η μελέτη βραχυκυκλωμάτων έχει γίνει σε όλα τα σενάρια λειτουργίας και περιλαμβάνονται στο [MAR10c]. Τα αποτελέσματα αφορούν σε μεμονωμένες Α/Γ των Α/Π που είναι συνδεδεμένα στο σύστημα της Ρόδου το έτος αναφοράς της ανάλυσης 2012. Τα σενάρια που αναπτύχθηκαν για τις μελέτες βραχυκυκλωμάτων είναι τα αναφερόμενα στην αρχή του παρόντος κεφαλαίου και επαναλαμβάνονται εδώ για διευκόλυνση της παρουσίασης:

- Σενάριο μέγιστου φορτίου – (ΣΕΝ1)
- Σενάριο μέγιστης αιολικής παραγωγής (σε απόλυτες τιμές ισχύος) – (ΣΕΝ2)
- Σενάριο μέγιστης αιολικής διείσδυσης (σε ποσοστό επί της ζήτησης) – (ΣΕΝ3)

9.2.1. Προσομοιώσεις βραχυκυκλωμάτων

Στην ενότητα αυτή δίνονται τα αποτελέσματα για τριφασικό βραχυκύκλωμα με χρόνο εκκαθάρισης 100 msec στο μέσο της γραμμής 150 kV Αφάντου-Ν. Ρόδος στο σενάριο μέγιστης αιολικής διείσδυσης (ΣΕΝ3). Οι Α/Γ Τύπου Γ και Δ είναι εφοδιασμένες με σύστημα αδιάλλειπτης παροχής ισχύος και παραμένουν σε λειτουργία κατά τη διάρκεια του σφάλματος. Το σύστημα προστασίας που χρησιμοποιείται είναι η διάταξη βραχυκύκλωσης δρομέα που περιγράφηκε στην ενότητα 6.6 για τις Α/Γ Τύπου Γ και η χρήση μετατροπέα συνεχούς τάσης και περιορισμού της που αναλύεται στην ενότητα 7.10 για τις Α/Γ Τύπου Δ. Το Σχήμα 9.8 απεικονίζει τη συχνότητα του συστήματος και τις ταχύτητες των δρομέων για τις Α/Γ των Α/Π που λειτουργούν στο δίκτυο της Ρόδου το 2012. Καθώς η Α/Γ Τύπου Α έχει απ' ευθείας σύνδεση στο δίκτυο, η ταχύτητα του δρομέα παρουσιάζει όμοια απόκριση με τη συχνότητα του συστήματος. Τη στιγμή εμφάνισης του σφάλματος, τόσο η συχνότητα όσο και η ταχύτητα του δρομέα αυξάνονται κυρίως λόγω της μείωσης στην ισχύ που παράγεται στο σύστημα κατά τη διάρκεια του σφάλματος. Ο δρομέα κάθε Α/Γ συσσωρεύει ενέργεια στη στρεφόμενη μάζα, ως αποτέλεσμα της ανισορροπίας μεταξύ μηχανικής ισχύος και της μειωμένης ηλεκτρικής ισχύος εξόδου. Παρόμοια, οι συμβατικές γεννήτριες αντισταθμίζουν τη μειωμένη προσφορά ισχύος στο σύστημα μέσω της επιτάχυνσης και επομένως αύξησης της συχνότητας του συστήματος. Στο ίδιο σχήμα είναι εμφανείς οι ταλαντώσεις ροπής που διεγείρονται στις Α/Γ Τύπου Γ και Δ, οι οποίες αποσβένονται μέσω του συστήματος ελέγχου των Α/Γ.

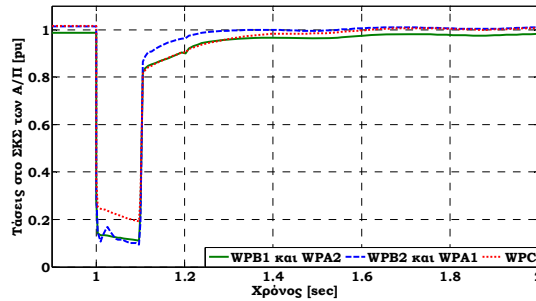


Σχήμα 9.8. Συχνότητα συστήματος και ταχύτητα δρομέα για Α/Γ Τύπου Α, Γ και Δ

Η συσχέτιση μεταξύ συχνότητας συστήματος και ταχύτητας δρομέα στις Α/Γ Τύπου Α καθίσταται ιδιαίτερα σημαντική κατά τη διάρκεια διακυμάνσεων της συχνότητας που προκύπτουν με απότομη μεταβολή του φορτίου ή της παραγωγής, πχ. όταν η συχνότητα του συστήματος μειώνεται, ο δρομέας των Α/Γ Τύπου Α επιβραδύνεται και η κινητική ενέργεια της στρεφόμενης μάζας του δρομέα

παρέχεται στο δίκτυο συμβάλλοντας στην αδρανειακή απόκριση κατά την πρωτεύουσα ρύθμιση του συστήματος (βλέπε επίσης ενότητα 9.3 παρούσας διατριβής).

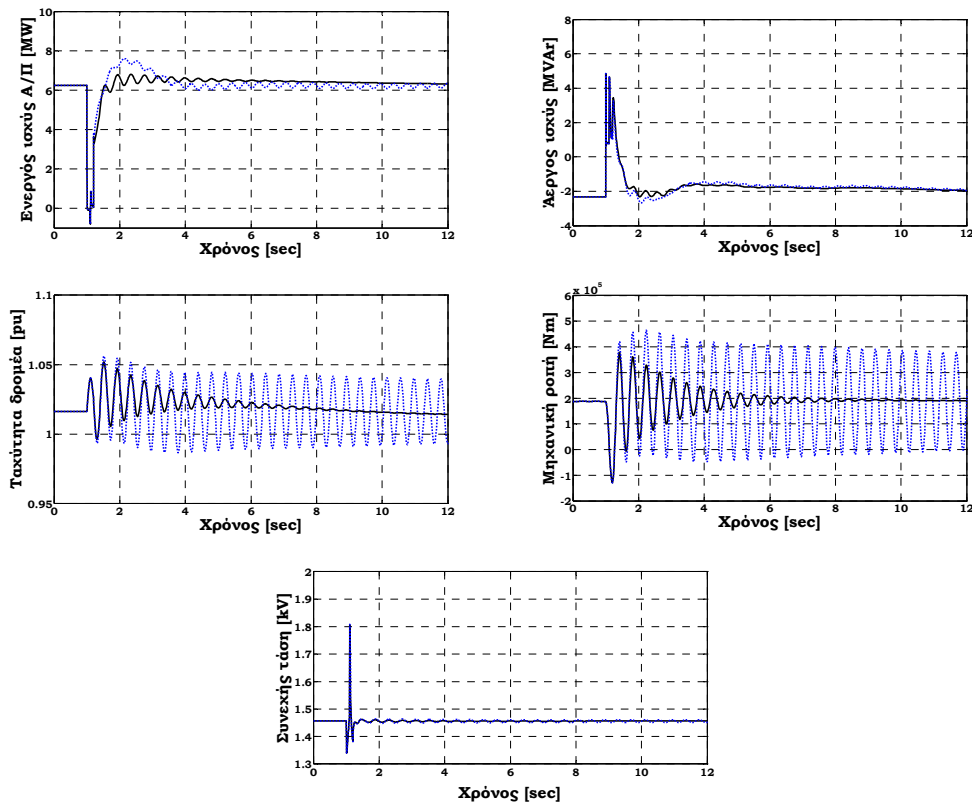
Το Σχήμα 9.9 απεικονίζει τις τάσεις στο ΣΚΣ κάθε Α/Π. Η τάση μειώνεται έως το 0.1 αμ στο ΣΚΣ των Α/Π με Α/Γ Τύπου Γ και Δ και περίπου στο 0.2 αμ στο ΣΚΣ του Α/Π με Α/Γ Τύπου Α.



Σχήμα 9.9. Τάσεις στα ΣΚΣ των Α/Π

9.2.2. Αποτελέσματα για Α/Γ Τύπου Γ

Στο Σχήμα 9.10 δίνεται η απόκριση των Α/Γ Τύπου Γ ενός από τα Α/Π κατά τη διάρκεια τριφασικού βραχυκυκλώματος με και χωρίς σύστημα απόσβεσης ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων. Η ενεργός και η άεργος ισχύς που απεικονίζονται αντιστοιχούν στην απόκριση του Α/Π ενώ τα υπόλοιπα μεγέθη σε μία Α/Γ.



Σχήμα 9.10. Α/Γ Τύπου Γ: Ενεργός και άεργος ισχύς Α/Π, ταχύτητα δρομέα, μηχανική ροπή και συνεχής τάση μετατροπέων για τριφασικό βραχυκύκλωμα στο συνδεδεμένο δίκτυο με χρόνο εκκαθάρισης 100 ms με και χωρίς σύστημα απόσβεσης ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων (μαύρη και μπλε καμπύλη αντίστοιχα) – Α/Π WFA1

Η απότομη μείωση της τάσης προκαλεί μείωση της ροής στάτη και δρομέα, με συνέπεια τη μείωση της ενεργού ισχύος που παράγει η γεννήτρια. Η ηλεκτρομαγνητική ροπή μειώνεται ομοίως, και καθώς ο άξονας μετάδοσης της κίνησης λειτουργεί ως στροφικό ελατήριο, η μηχανική ροπή μειώνεται ακολούθως. Εν τούτοις, η μηχανική ροπή μειώνεται με πιο αργό ρυθμό σε σχέση με την ηλεκτρομαγνητική ροπή οδηγώντας σε επιτάχυνση του δρομέα.

Τα υψηλά ρεύματα που ακολουθούν τη μείωση της τάσης, ενεργοποιούν τη διάταξη βραχυκύκλωσης του δρομέα. Ο μετατροπέας στην πλευρά του δρομέα απενεργοποιείται και η γεννήτρια συμπεριφέρεται όπως μια συμβατική ασύγχρονη γεννήτρια.

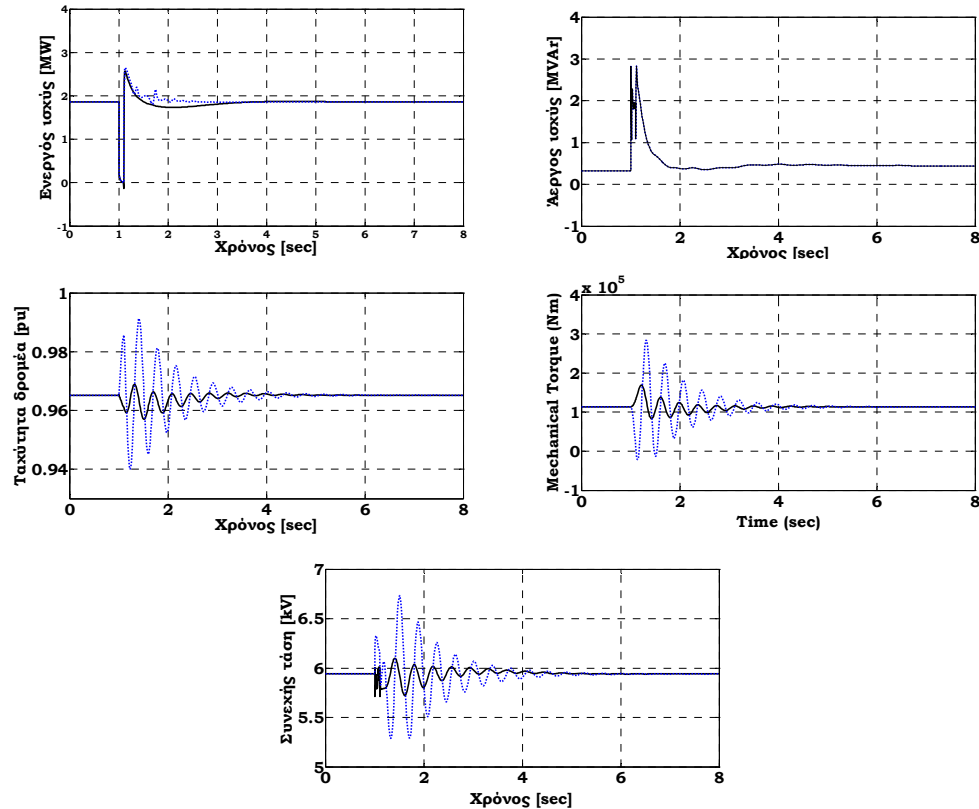
Η επίδραση του συστήματος απόσβεσης ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων, που επενεργεί απ' απ' ευθείας στο σήμα αναφοράς ενεργού ισχύος, είναι ιδιαίτερα κρίσιμη. Οι ταλαντώσεις που διεγείρονται στο μηχανικό σύστημα παραμένουν μη αποσβέσιμες στη μηχανική ροπή και την ταχύτητα του δρομέα σε περίπτωση μη λειτουργίας του συστήματος απόσβεσης καθιστώντας μη ασφαλή τη λειτουργία του συστήματος και απαιτώντας την αποσύνδεση της Α/Γ για λόγους προστασίας. Οι διακυμάνσεις της μηχανικής ροπής γύρω από τη μηδενική τιμή, όταν δεν εφαρμόζεται απόσβεση, συνεπάγεται σημαντική μηχανική καταπόνηση στα μηχανικά μέρη.

Στο σύστημα ελέγχου που περιγράφεται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 6 της παρούσας διατριβής, ο μετατροπέας στην πλευρά του δρομέα ελέγχει την τάση στο ΣΚΣ κατά τη διάρκεια της κανονικής λειτουργίας καθορίζοντας τη ροή αέργου ισχύος προς και από το δίκτυο, λειτουργώντας ουσιαστικά ως σύστημα αντιστάθμιση αέργου ισχύος STATCOM. Τη στιγμή εμφάνισης του σφάλματος, ο μετατροπέας στην πλευρά του δικτύου παρέχει πρόσθετη άεργο ισχύ κατά τη διάρκεια που ο μετατροπέας στην πλευρά του δρομέα παραμένει απενεργοποιημένος. Με την απενεργοποίηση της διάταξης βραχυκύκλωσης δρομέα, ο μετατροπέας στην πλευρά του δρομέα επανέρχεται στην κανονική λειτουργία ενώ ο μετατροπέας στην πλευρά του δικτύου ελέγχεται σε λειτουργία μοναδιαίου συντελεστή ισχύος.

Κατά τη διάρκεια του σφάλματος το Α/Π παράγει άεργο ισχύ υποστηρίζοντας την τάση στο δίκτυο ενώ κατά την εκκαθάριση του σφάλματος η γεννήτρια απορροφά άεργο ισχύ για όσο χρόνο η διάταξη βραχυκύκλωσης δρομέα είναι ενεργοποιημένη. Ο μετατροπέας στην πλευρά του δρομέα παραμένει απενεργοποιημένος καθυστερώντας την επαναφορά της τάσης, βλέπε Σχήμα 9.9.

9.2.3. Αποτελέσματα για Α/Γ Τύπου Δ

Το Σχήμα 9.11 παρουσιάζει τη λειτουργία Α/Γ Τύπου Δ με δυνατότητα αδιάλειπτης παροχής ισχύος με και χωρίς χρήση μετατροπέα συνεχούς τάσης. Κατά τη διάρκεια του σφάλματος ο μετατροπέας στην πλευρά του δικτύου δεν μπορεί να διαθέσει την ενεργό ισχύ στο δίκτυο λόγω χαμηλού επιπέδου τάσης. Όταν δεν περιλαμβάνεται ο μετατροπέας συνεχούς τάσης, η ισχύς της γεννήτριας είναι όμοια με την ισχύ που παρέχεται στο δίκτυο, καθώς ο μετατροπέας στην πλευρά της γεννήτριας μειώνει την παραγόμενη ισχύ ώστε να διατηρηθεί η συνεχής τάση σε ονομαστικά επίπεδα. Η επιτάχυνση του δρομέα προκύπτει από την ανισορροπία μεταξύ αεροδυναμικής και ηλεκτρικής ισχύος. Οι ταλαντώσεις στη μηχανική ροπή προκύπτουν κατά όμοιο τρόπο με την περίπτωση των Α/Γ Τύπου Γ που περιγράφεται παραπάνω. Αν και οι Α/Γ Τύπου Δ είναι σε θέση να παραμείνουν σε λειτουργία κατά τη διάρκεια του σφάλματος χωρίς επιπλέον εξοπλισμό προστασίας, οι ταλαντώσεις στη ροπή και στην ταχύτητα του δρομέα μπορούν να μειωθούν δραστικά με την προσθήκη του μετατροπέα συνεχούς τάσης. Εκτός από την ταχύτερη απόσβεση των ταλαντώσεων, ο μετατροπέας συμβάλλει στη μείωση της μέγιστης ροπής καθώς και της μέγιστης επιτάχυνσης του δρομέα που ακολουθούν τη μείωση της τάσης, ελαχιστοποιώντας τη μηχανική καταπόνηση της Α/Γ. Ο μετατροπέας συνεχούς τάσης μειώνει επιπλέον τις ταλαντώσεις στη συνεχή τάση, όπως προκύπτει από τα αποτελέσματα. Το πλεόνασμα ενέργειας που δε μπορεί να διοχετευθεί στο δίκτυο καταναλώνεται στις αντιστάσεις του μετατροπέα.

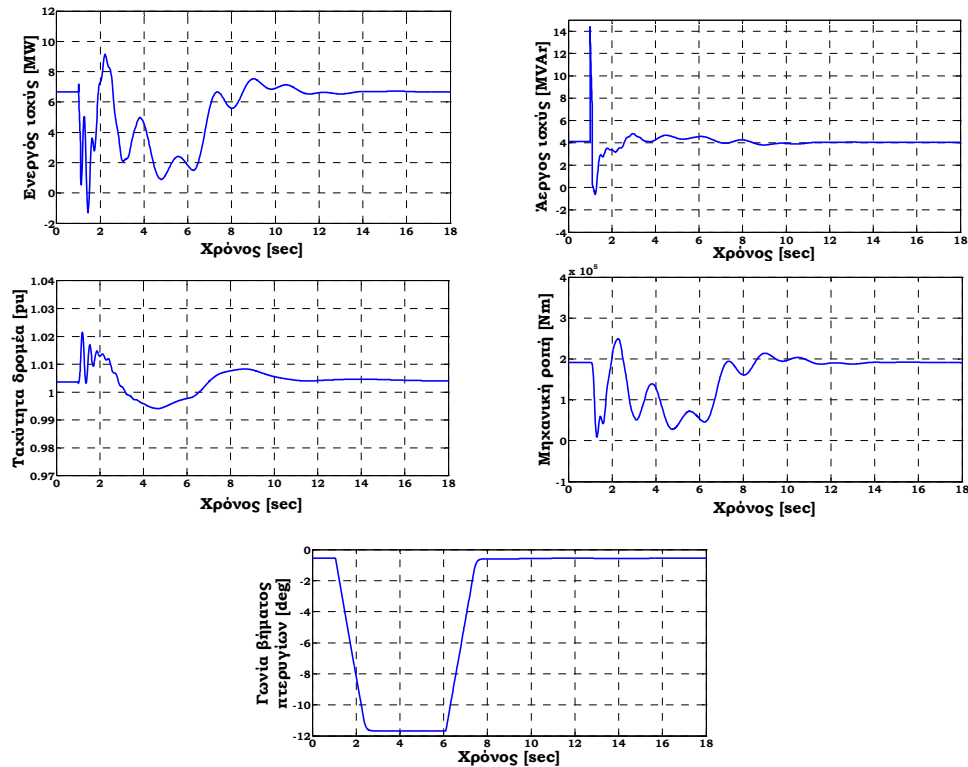


Σχήμα 9.11. Α/Γ Τύπου Α: Ενεργός και άεργος ισχύς Α/Π, ταχύτητα δρομέα, μηχανική ροπή και συνεχής τάση μετατροπέων για τριφασικό βραχυκύκλωμα στο συνδεδεμένο δίκτυο με χρόνο εκκαθάρισης 100 ms με και χωρίς σύστημα απόσβεσης ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων (μαύρη και μπλε καμπύλη αντίστοιχα) – Α/Π WFB2

Η παροχή αέργου ισχύος από την Α/Γ εξασφαλίζεται μέσω πρόσθετου ελεγκτή τάσης που έχει υλοποιηθεί στο μετατροπέα στην πλευρά του δικτύου. Για να εξασφαλισθεί η μέγιστη παραγωγή αέργου, δίνεται προτεραιότητα στο άεργο ρεύμα του μετατροπέα στην πλευρά του δικτύου μειώνοντας την ενεργό. Η ενεργός ωθείται στο μηδενισμό κατά τη διάρκεια του σφάλματος και το εύρος αέργου ισχύος μεγιστοποιείται. Εν τούτοις, λόγω του χαμηλού επιπέδου τάσης, η αναφορά αέργου ισχύος δεν μπορεί να επιτευχθεί σαν συνέπεια της μεγάλης βύθισης τάσης. Στην εκκαθάριση του σφάλματος η απότομη αλλαγή στην τάση οδηγεί σε αντίστοιχη μεταβολή στην παροχή αέργου τάσης. Η προ του σφάλματος παραγωγή αέργου ισχύος εξασφαλίζεται όταν η τάση στο ΣΚΣ επιστρέφει στην προ του σφάλματος τιμή. Λεπτομέρειες για τον έλεγχο τάσης μπορούν να αναζητηθούν στο Κεφάλαιο 7 της παρούσας διατριβής.

9.2.4. Αποτελέσματα για Α/Γ Τύπου Α

Για λόγους πληρότητας της παρουσίασης δίνεται εδώ και η απόκριση Α/Γ σταθερών στροφών Τύπου Α με ενεργό έλεγχο απώλειας στήριξης (*active stall* - βλέπε ενότητα 5.2.2). Σε περίπτωση βύθισης τάσης εφαρμόζεται περιορισμός της ενεργού ισχύος μέσω του συστήματος ελέγχου της γωνίας βήματος ώστε να αποφευχθεί αστάθεια και πιθανή αποσύνδεση των Α/Γ λόγω υπερτάχυνσης δρομέα. Η ενεργός ισχύς που μπορεί να διοχετευθεί στο δίκτυο σε συνθήκες χαμηλής τάσης είναι περιορισμένη και απαιτείται μείωση της εξαγόμενης μέσω του δρομέα αεροδυναμικής ισχύος ώστε να ελαττωθεί η διαφορά μεταξύ μηχανικής και ηλεκτρομαγνητικής ροπής που επιδρούν στο στρεφόμενο δρομέα της Α/Γ κατά τη διάρκεια της βύθισης τάσης. Υπενθυμίζεται εδώ ότι οι θερμικές σταθερές των ασύγχρονων γεννητριών είναι γενικά υψηλές ώστε σε συναφείς αναλύσεις να μην προκρίνεται ο κίνδυνος καταστροφής της γεννήτριας λόγω των υπερρευμάτων που αναπτύσσονται κατά τη διάρκεια βραχυκυκλωμάτων στο δίκτυο αλλά κυρίως ο κίνδυνος αποσύνδεσης λόγω υπερτάχυνσης του δρομέα.



Σχήμα 9.12. Α/Γ Τύπου Α: Ενεργός και άεργος ισχύς Α/Π, ταχύτητα δρομέα, μηχανική ροπή και γωνία βήματος πτερυγίων για τριφασικό βραχυκύκλωμα στο συνδεδεμένο δίκτυο με χρόνο εκκαθάρισης 100 ms – με σύστημα περιορισμού ενεργού ισχύος – Α/Π WFC

Όπως προκύπτει από τα αποτελέσματα του Σχήματος 9.12, όταν η γωνία βήματος πτερυγίων παίρνει την τιμή που αντιστοιχεί στη μείωση της εξαγόμενης αεροδυναμικής ισχύος, η Α/Γ ελέγχεται ώστε να παραμείνει σε αυτή τη λειτουργία για ορισμένα δευτερόλεπτα μετά την εκκαθάριση του σφάλματος. Στη συνέχεια ακολουθείται αύξηση με συγκεκριμένο ρυθμό για τη γωνία βήματος ώστε να επανέλθει στην τιμή κανονικής λειτουργίας. Η μείωση της ισχύος δεν έχει επίδραση κυρίως κατά τη διάρκεια του σφάλματος όσο από τη στιγμή που η τάση έχει επανέλθει στα προ του σφάλματος επίπεδα.

Κατά τη διάρκεια του χαμηλού επιπέδου τάσης στο δίκτυο, η Α/Γ Τύπου Α απορροφά άεργο ισχύ. Μετά την αρχική μεταβατική αύξηση στην άεργο ισχύ, το Α/Π καταναλώνει άεργο ισχύ επιδεινώνοντας τις συνθήκες ευστάθειας τάσης του δικτύου. Η άεργος που δίνεται στο Σχήμα 9.12 περιλαμβάνει την άεργο ισχύ που παρέχεται από τις συστοιχίες των πυκνωτών που έχουν εγκατασταθεί στο ΣΚΣ του Α/Π ώστε να ελαττωθεί η αρνητική επίδραση του Α/Π στον έλεγχο τάσης/άεργου ισχύος του συστήματος κατά τη διάρκεια σοβαρών σφαλμάτων, όπως το τριφασικό βραχυκύκλωμα.

9.2.5. Επίδραση στη συχνότητα του συστήματος

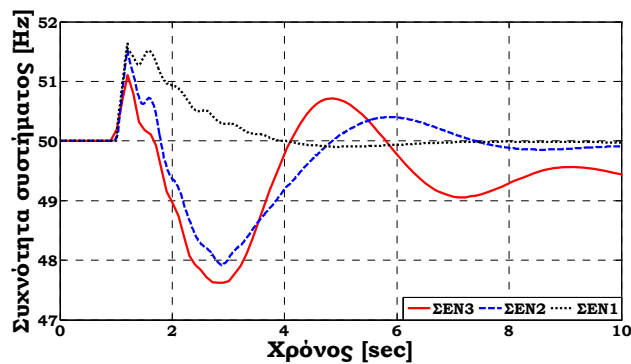
Μέχρι τη συγγραφή της παρούσας διατριβής οι κώδικες δικτύου για τα μη διασυνδεδεμένα συστήματα δεν είναι επαρκώς ανεπτυγμένοι με αποτέλεσμα στις περισσότερες περιπτώσεις οι Α/Γ να αποσυνδέονται για λόγους προστασίας κατά τη διάρκεια σφαλμάτων στο δίκτυο. Οι συμβατικές γεννήτριες είναι αποκλειστικά επιφορτισμένες με τη στήριξη του συστήματος σε συνθήκες σφάλματος ή άλλες συνθήκες έκτακτης λειτουργίας. Αυτό έχει ως άμεση συνέπεια, τον υπολογισμό της απαιτούμενης εφεδρείας ισχύος χωρίς να λαμβάνεται υπ' όψιν η εγκαταστημένη αιολική ισχύς και σε συνέχεια τον περιορισμό της αιολικής διεϊσδύσης για λόγους που συνδέονται με τη δυναμική ασφάλεια του συστήματος.

Η επίδραση του τριφασικού βραχυκύκλωματος, που παρουσιάστηκε και στα παραπάνω σχήματα, στη συχνότητα του συστήματος δίνεται στο Σχήμα 9.13 όταν οι Α/Γ δε διαθέτουν σύστημα αδιάλλειπτης

παροχής ισχύος (ή σύστημα μείωσης της εξαγόμενης αεροδυναμικής ισχύος για την περίπτωση των Α/Γ Τύπου Α). Στο σενάριο μέγιστης αιολικής διεύθυνσης (ΣΕΝ3) η συχνότητα του συστήματος μειώνεται έως τα 47.6 Hz, σε επίπεδα κάτω των αποδεκτών ορίων ασφαλούς λειτουργίας. Η βύθιση αυτή στη συχνότητα προκύπτει λόγω της μεγάλης απώλειας αιολικής ισχύος μερικά msec μετά τη βύθιση της τάσης. Όταν η συχνότητα ξεπερνάει τα όρια του συστήματος προστασίας υποσυχνότητας, ποσοστό του φορτίου των υποσταθμών αποσυνδέεται. Η απόρριψη φορτίου στο σενάριο 3 είναι 65.5 %, δηλ. 54 MW φορτίο αποσυνδέεται.

Η απόκριση για το ίδιο βραχυκύκλωμα στο σενάριο μέγιστης αιολικής παραγωγής (ΣΕΝ2) απεικονίζεται επίσης στο Σχήμα 9.13. Σε αυτήν την περίπτωση η συχνότητα μειώνεται έως τα 47.9 Hz οδηγώντας σε απόρριψη φορτίου 34 %. Αν και η αιολική παραγωγή είναι μεγαλύτερη στο σενάριο 2 σε σχέση με το σενάριο 3 σε απόλυτα μεγέθη, εν τούτοις το ποσοστό αιολικής παραγωγής είναι μικρότερο. Η ελάχιστη συχνότητα συστήματος κατά τη διάρκεια του μεταβατικού είναι ελάχιστα υψηλότερη.

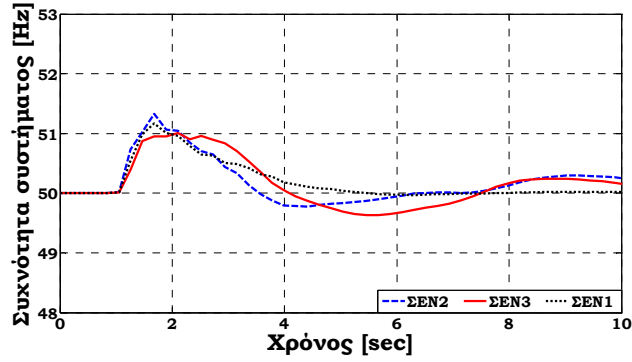
Τέλος, στο σενάριο μέγιστου φορτίου (ΣΕΝ1) η συχνότητα δεν πέφτει κάτω από τα 49 Hz και η απόρριψη φορτίου αποφεύγεται. Η αιολική παραγωγή σε αυτό το σενάριο αντιστοιχεί στο 3 % της ολικής παραγωγής, οπότε όταν τα Α/Π αποσυνδέονται δεν οδηγούν σε σημαντική απώλεια παραγωγής.



Σχήμα 9.13. Συχνότητα συστήματος Ρόδου σε διαφορετικά σενάρια λειτουργίας – χωρίς δυνατότητα αδιάλλειπτης παροχής ισχύος στα Α/Π

Το Σχήμα 9.14 απεικονίζει την απόκριση της συχνότητας του συστήματος της Ρόδου για την περίπτωση που τα Α/Π παραμένουν σε λειτουργία μέσω της αδιάλλειπτης παροχής ισχύος (είτε μείωσης της εξαγόμενης αεροδυναμικής ισχύος για την περίπτωση Α/Γ Τύπου Α). Η ελάχιστη συχνότητα είναι 49.7 Hz στο σενάριο μέγιστης αιολικής διεύθυνσης (ΣΕΝ3) και η απόρριψη φορτίου είναι μηδενική. Τα αποτελέσματα αυτά καθιστούν σαφές ότι η αδιάλλειπτη παροχή ισχύος στα Α/Π είναι θεμελιώδης για την ασφαλή λειτουργία των μη διασυνδεδεμένων συστημάτων καθώς και για την αποφυγή απορρίψεων φορτίου σε συνθήκες υψηλής αιολικής διεύθυνσης.

Παρόμοια με το ΣΕΝ3, η συχνότητα στα άλλα δύο σενάρια λειτουργίας (ΣΕΝ1, ΣΕΝ2) δεν μειώνεται κάτω από τα 49 Hz. Τα αποτελέσματα συνοψίζονται στον Πίνακα 9.2.



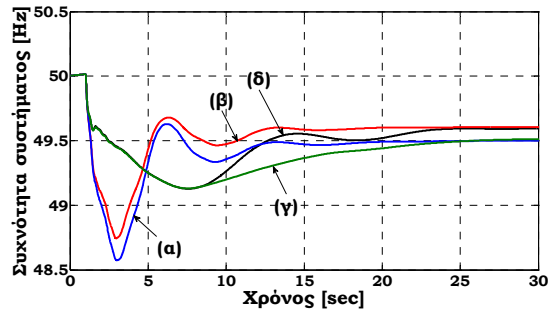
Σχήμα 9.14. Συχνότητα συστήματος Ρόδου σε διαφορετικά σενάρια λειτουργίας – με δυνατότητα αδιάλλειπτης παροχής ισχύος στα Α/Π

Σενάριο λειτουργίας		Αδιάλλειπτη παροχή ισχύος στα Α/Π	Χωρίς αδιάλλειπτη παροχή ισχύος στα Α/Π
ΣΕΝ1	f_{minimum} [Hz]	49.9	49.9
	Απόρριψη φορτίου	0	0%
ΣΕΝ2	f_{minimum} [Hz]	49.8	47.9
	Απόρριψη φορτίου	0	34%
ΣΕΝ3	f_{minimum} [Hz]	49.7	47.6
	Απόρριψη φορτίου	0	65.5 %

Πίνακας 9.2. Ελάχιστη συχνότητα συστήματος και απόρριψη φορτίου σε διαφορετικά σενάρια λειτουργίας

9.3. Συμβολή A/Γ Τύπου Γ και Δ στη ρύθμιση συχνότητας

Τα αποτελέσματα που ακολουθούν αφορούν σε προσομοιώσεις του συστήματος της Ρόδου, όπου ο έλεγχος συχνότητας έχει ενσωματωθεί στο σύστημα ελέγχου των Α/Π με Α/Γ μεταβλητών στροφών (Τύπου Γ και Δ). Οι Α/Γ στην περίπτωση αυτή λειτουργούν με εφεδρεία ενεργού ισχύος 10% ενώ προσομοιώνεται η απώλεια ατμοστροβίλου που παράγει 14 MW, [MAR10b]. Λεπτομέρειες για το σενάριο λειτουργίας μπορούν να αναζητηθούν στο Παράρτημα Π10.

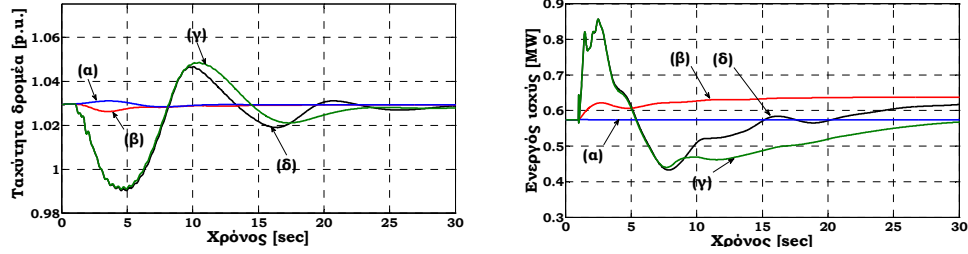


Σχήμα 9.15. Συχνότητα συστήματος σε απώλεια της μεγαλύτερης θερμικής μονάδας, για διαφορετικές μεθόδους ελέγχου συχνότητας στις Α/Γ Τύπου Γ και Δ – (α) Χωρίς έλεγχο συχνότητας, (β) Έλεγχος στατισμού, (γ) Έλεγχος αδρανειακής απόκρισης, (δ) Συνδυασμένος έλεγχος

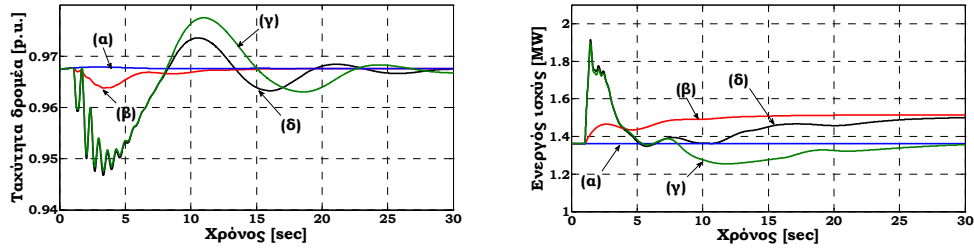
Όταν δεν εφαρμόζεται έλεγχος συχνότητας στα Α/Π με Α/Γ Τύπου Γ και Δ, η μεταβατική μείωση της συχνότητας φτάνει τα 1.4 Hz. Ο έλεγχος στατισμού επιτυγχάνει ελάχιστη βελτίωση της ελάχιστης μεταβατικής συχνότητας, ενώ ο αρχικός ρυθμός μεταβολής της συχνότητας (που είναι μέγιστος τα πρώτα δευτερόλεπτα μετά το σφάλμα) είναι ο ίδιος. Ο έλεγχος αδρανειακής απόκρισης, είτε αυτόνομα είτε σε συνδυασμό με τον ελεγκτή στατισμού (περίπτωση συνδυασμένου ελέγχου, βλέπε καμπύλη (δ) στο Σχήμα 9.15) η μεταβατική μείωση της συχνότητας βελτιώνεται κατά 50% ενώ ο ρυθμός μείωσης της συχνότητας είναι σαφώς μικρότερος. Είναι επίσης σημαντικό ότι παρατηρείται μια καθυστέρηση στην επαναφορά της συχνότητας στην τελική τιμή μόνιμης κατάστασης στην περίπτωση ελέγχου αδρανειακής απόκρισης (καμπύλη (γ) στο Σχήμα 9.15), γεγονός που εξηγείται χάρη στη μείωση της εξαγόμενης ισχύος των Α/Π κατά το χρονικό διάστημα 5-25 sec που προκύπτει έως ότου εξασφαλισθεί η επαναφορά της ταχύτητας περιστροφής του δρομέα και της κινητικής ενέργειας στις τιμές προ του σφάλματος. Η καλύτερη απόκριση (από την πλευρά της συχνότητας του συστήματος) παρατηρείται στην περίπτωση του συνδυασμένου ελέγχου (καμπύλη (δ) στο Σχήμα 9.15), με την έννοια ότι επιπρόσθετα βελτιώνεται το μόνιμο σφάλμα συχνότητας χάρη στη λειτουργία του στατισμού. Όσον αφορά όμως τη μεταβατική συμπεριφορά του συστήματος είναι σαφές ότι ο έλεγχος αδρανειακής απόκρισης καθορίζει σημαντικά την απόκριση των Α/Π σε αλλαγές της συχνότητας.

Στα Σχήματα 9.16 και 9.17 δίνεται η μεταβατική απόκριση των Α/Γ μεταβλητών στροφών Τύπου Γ και Δ (ταχύτητα περιστροφής δρομέα και ενεργός ισχύς εξόδου) για την ίδια απώλεια παραγωγής. Όταν δεν εφαρμόζεται ο έλεγχος συχνότητας η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα των Α/Γ και η ενεργός ισχύς παραμένουν πρακτικά αμετάβλητα. Κατά την εφαρμογή των διαφόρων μεθόδων ελέγχου συχνότητας ο δρομέας επιβραδύνεται ώστε να διοχετευθεί επιπλέον ενεργός ισχύς στο σύστημα. Μεγαλύτερες επιβραδύνσεις στο δρομέα συνεπάγονται αυξημένη έγχυση ενεργού ισχύος μετά το σφάλμα και σημαντικότερη συμβολή στη μεταβατική μείωση της συχνότητας (περιπτώσεις (γ) και (δ) στα Σχήματα 9.16 και 9.17).

Στον έλεγχο αδρανειακής απόκρισης, η επίδραση της συμβολής παύει μετά την ολοκλήρωση της πρωταρχικής ρύθμισης οπότε η Α/Γ επιστρέφει στην προ του σφάλματος ταχύτητα περιστροφής και ενεργό ισχύ εξόδου. Στις περιπτώσεις (γ) και (δ), οι Α/Γ συμμετέχουν στη ρύθμιση φορτίου-συχνότητας και η τελική ενεργός ισχύς που παρέχουν στο σύστημα μετά το σφάλμα είναι αυξημένη.



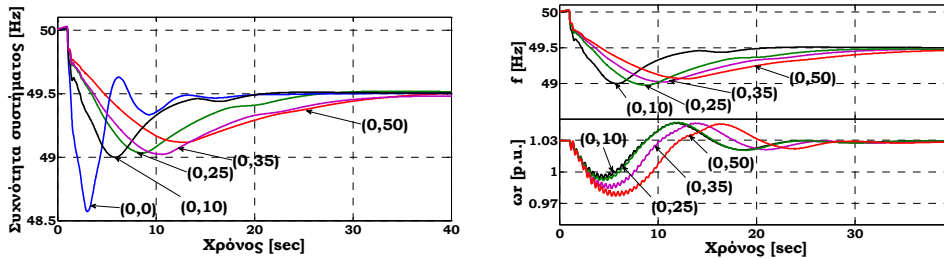
Σχήμα 9.16. Ταχύτητα δρομέα και ενεργός ισχύς A/G Τύπου Γ σε απόλεια της μεγαλύτερης θερμικής μονάδας, για διαφορετικές μεθόδους ελέγχου συχνότητας στις A/G Τύπου Γ και Δ – (α) Χωρίς έλεγχο συχνότητας, (β) Έλεγχος στατισμού, (γ) Έλεγχος αδρανειακής απόκρισης, (δ) Συνδυασμένος έλεγχος



Σχήμα 9.17. Ταχύτητα δρομέα και ενεργός ισχύς A/G Τύπου Δ σε απόλεια της μεγαλύτερης θερμικής μονάδας, για διαφορετικές μεθόδους ελέγχου συχνότητας στις A/G Τύπου Γ και Δ – (α) Χωρίς έλεγχο συχνότητας, (β) Έλεγχος στατισμού, (γ) Έλεγχος αδρανειακής απόκρισης, (δ) Συνδυασμένος έλεγχος

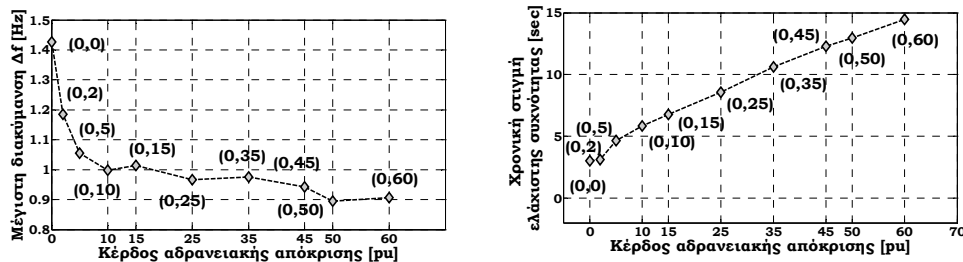
9.3.1. Επίδραση του κέρδους του ελέγχου αδρανειακής απόκρισης

Η επίδραση του ελεγκτή αδρανειακής απόκρισης, $K_{inertia}$, στη συχνότητα του συστήματος απεικονίζεται στο Σχήμα 9.18, για την ίδια διαταραχή, με τον έλεγχο στατισμού να μην επενεργεί - $K_{droop} = 0$. Το ζεύγος των παραμέτρων στα σχήματα που ακολουθούν δηλώνουν τις α.μ. τιμές των κερδών των ελεγκτών συχνότητας ($K_{droop}, K_{inertia}$).



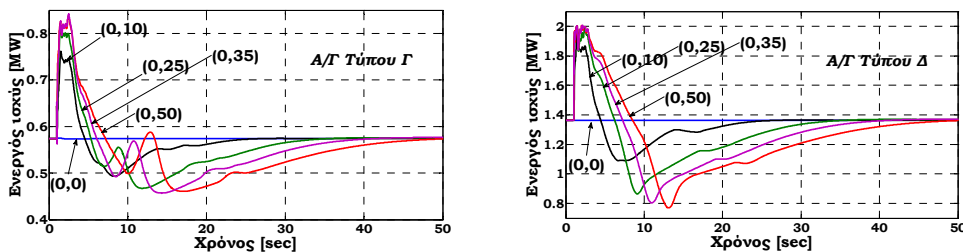
Σχήμα 9.18. Συχνότητα συστήματος και ταχύτητα δρομέα Α/Γ Τύπου Γ σε απώλεια της μεγαλύτερης θερμικής μονάδας, για διαφορετικές τιμές κέρδους ελεγκτή αδρανειακής απόκρισης στις Α/Γ Τύπου Γ και Δ

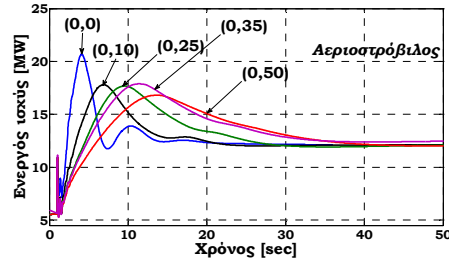
Αυξάνοντας το κέρδος του ελεγκτή αδρανειακής απόκρισης, από το μηδέν έως το 50 α.μ., η μέγιστη μεταβατική μείωση της συχνότητας μειώνεται από το 1.44 Hz στο 0.9 Hz, ενώ ο χρόνος εμφάνισης της ελάχιστης συχνότητας κατά τη διάρκεια του μεταβατικού αυξάνεται από τα 3 sec στα 14 sec, αποτυπώνοντας αντίστοιχη μείωση στο ρυθμό μεταβολής της συχνότητας σε συνδυασμό με καθυστέρηση στην επαναφορά της μόνιμης κατάστασης μετά το σφάλμα. Οι δύο αυτοί δείκτες μεταβατικής απόκρισης αποτυπώνονται στο Σχήμα 9.19. Η βασική παρατήρηση είναι ότι αυξημένη εικονική αδράνεια πέρα από ένα όριο (της τάξης του 10 α.μ.) δε συμβάλλει σημαντικά στον περιορισμό των μεταβατικών μειώσεων της συχνότητας, αν και συνεπάγεται μια σχετική μείωση στους αντίστοιχους ρυθμούς μεταβολής της συχνότητας.



Σχήμα 9.19. Μέγιστη μεταβατική διακύμανση συχνότητας και χρονική στιγμή εμφάνισης της ελάχιστης συχνότητας σε απώλεια της μεγαλύτερης θερμικής μονάδας, για διαφορετικές τιμές κέρδους ελεγκτή αδρανειακής απόκρισης στις Α/Γ Τύπου Γ και Δ

Η μεταβολή στην ενεργό ισχύ των Α/Γ μεταβλητών στροφών Τύπου Γ και Δ καθώς και του ατμοστροβίλου δίνεται στο Σχήμα 9.20. Αυξημένες τιμές του κέρδους του ελεγκτή αδρανειακής απόκρισης μειώνουν τη μέγιστη ισχύ καθώς και το ρυθμό φόρτισης της θερμικής μονάδας του ατμοστροβίλου κατά τη διάρκεια των πρώτων δευτερολέπτων μετά τη διαταραχή. Παρόμοια είναι η απόκριση όλων των συμβατικών που συμμετέχουν στην πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας. Επομένως, η αδρανειακή απόκριση των Α/Γ συμβάλλει σημαντικά με ιδιαίτερα θετικό τρόπο στη λειτουργία των συμβατικών μονάδων.



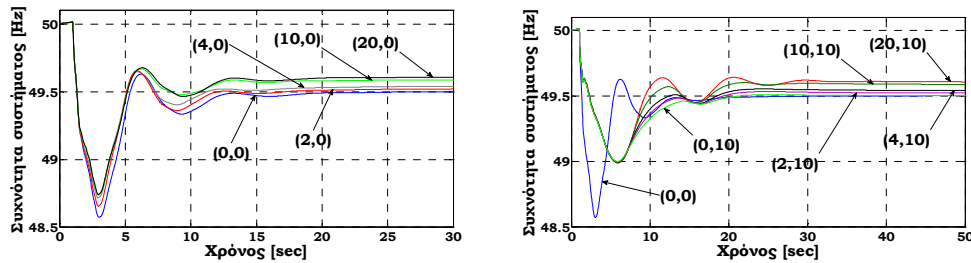


Σχήμα 9.20. Ενεργός ισχύς για Α/Γ Τύπου Γ, Δ και για αεριοστρόβιλο σε απώλεια της μεγαλύτερης θερμικής μονάδας, για διαφορετικές τιμές κέρδους ελεγκτή αδρανειακής απόκρισης στις Α/Γ Τύπου Γ και Δ

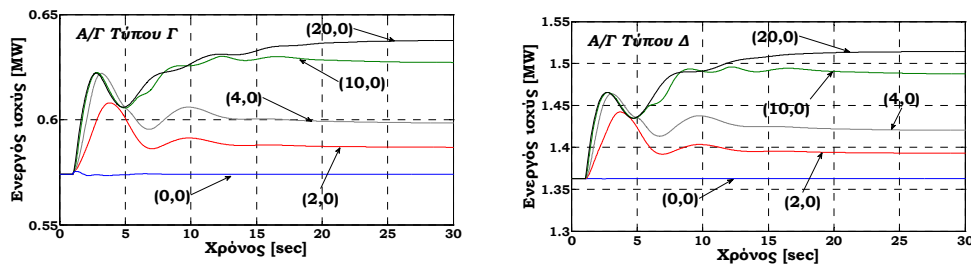
9.3.2. Επίδραση κέρδους ελεγκτή στατισμού

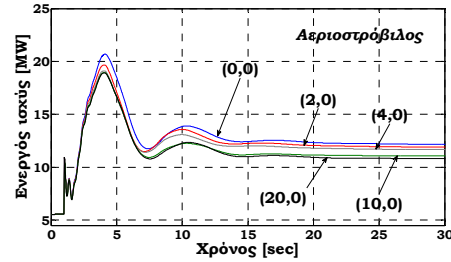
Στο Σχήμα 9.21 δίνεται η επίδραση του κέρδους του ελεγκτή στατισμού στην απόκριση της συχνότητας για την ίδια διαταραχή απώλειας ατμοστροβίλου. Περιλαμβάνονται αποτελέσματα με και χωρίς ελεγκτή αδρανειακής απόκρισης. Υψηλές τιμές του κέρδους του ελεγκτή στατισμού δε βελτιώνουν αισθητά τη μεταβατική απόκριση συχνότητας. Η επίδραση περιορίζεται στο μόνιμο σφάλμα συχνότητα μετά τη διαταραχή, όπου μεγάλες τιμές του κέρδους συνεπάγονται μικρότερο μόνιμο σφάλμα, καθώς οι Α/Γ αναλαμβάνουν μεγαλύτερο μέρος του φορτίου, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 9.22. Συνάγεται επομένως το συμπέρασμα ότι μεγάλα κέρδη στον ελεγκτή στατισμού (και άρα μικρές τιμές στατισμού) είναι προτιμητέες όταν η εφεδρεία των συμβατικών μονάδων είναι περιορισμένη (π.χ. κατά την αντικατάσταση συμβατικών μονάδων παραγωγής από Α/Π σε συνθήκες αυξημένης αιολικής διείσδυσης) και κρίνεται απαραίτητη η συμβολή των Α/Π στην πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας.

Είναι προφανές ότι η αποτελεσματικότητα του ελέγχου στατισμού συνδέεται άμεσα με το επίπεδο εφεδρείας που διατηρείται από τα Α/Π κατά την κανονική λειτουργία (δηλ. το επίπεδο της αποφόρτισης των Α/Γ σε σύγκριση με τη διαθέσιμη ενεργό ισχύ με βάση τον άνεμο). Αυξημένα επίπεδα εφεδρείας έχουν όμως αναπόφευκτες οικονομικές συνέπειες για τον διαχειριστή των Α/Π. Η συμβολή όμως της αδρανειακής απόκρισης δεν εξαρτάται από την εφεδρεία αλλά κυρίως από το σημείο λειτουργίας των Α/Γ προ του σφάλματος και από τη δυνατότητα αύξησης της ενεργού ισχύος από την τιμή προ σφάλματος έως την ονομαστική ή μέγιστη ενεργό ισχύ εξόδου.



Σχήμα 9.21. Συχνότητα συστήματος σε απώλεια της μεγαλύτερης θερμικής μονάδας, για διαφορετικές τιμές κέρδους ελεγκτή στατισμού χωρίς και με αδρανειακή απόκριση στις Α/Γ Τύπου Γ και Δ

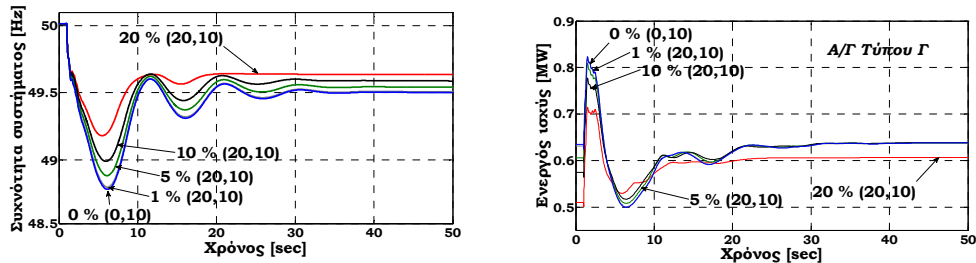




Σχήμα 9.22. Ενεργός ισχύς για Α/Γ Τύπου Γ, Δ και για αεριοστρόβιλο σε απώλεια της μεγαλύτερης θερμικής μονάδας, για διαφορετικές τιμές κέρδους ελεγκτή στατισμού στις Α/Γ Τύπου Γ και Δ

9.3.3. Επίδραση του επιπέδου εφεδρείας

Η επίδραση που έχουν τα διαφορετικά επίπεδα εφεδρείας στη μεταβατική απόκριση συχνότητας του συστήματος απεικονίζεται στο Σχήμα 9.23. Σε αυτήν την περίπτωση η ζήτηση του φορτίου είναι 74.8 MW και η αιολική διείσδυση κυμαίνεται από 46.3% (για εφεδρεία τύπου *balance* 20 %) έως 54% (για εφεδρεία τύπου *balance* 0%) τη στιγμή του σφάλματος (βλέπε Παράρτημα Π10 για λεπτομέρειες σχετικά με το σενάριο λειτουργίας). Για μεγάλα ποσά εφεδρείας π.χ. 20% η απόκριση της συχνότητας βελτιώνεται σημαντικά. Παρ' όλα αυτά, οι σχετικές απώλειες ενέργειας που προκύπτουν για τα Α/Π που συμμετέχουν στη ρύθμιση της συχνότητας είναι υψηλότερες. Σημειώνεται ότι δεν υπάρχει διαθέσιμη δευτερεύουσα ρύθμιση στο μοντέλο του ΣΗΕ της Ρόδου, γι' αυτό και η τιμή μόνιμης κατάστασης διαφέρει για τα διαφορετικά επίπεδα εφεδρείας. Για χαμηλές εφεδρείες, π.χ. 1-5%, η μεταβατική απόκριση της συχνότητας βελτιώνεται επίσης αλλά η συχνότητα λαμβάνει περίπου την ίδια τιμή μόνιμης κατάστασης μετά τη διαταραχή με την περίπτωση που δεν εφαρμόζεται έλεγχος συχνότητας στα Α/Π με Α/Γ μεταβλητών στροφών. Σε τέτοια επίπεδα εφεδρείας η διαθέσιμη ενεργός ισχύς είναι περιορισμένη.



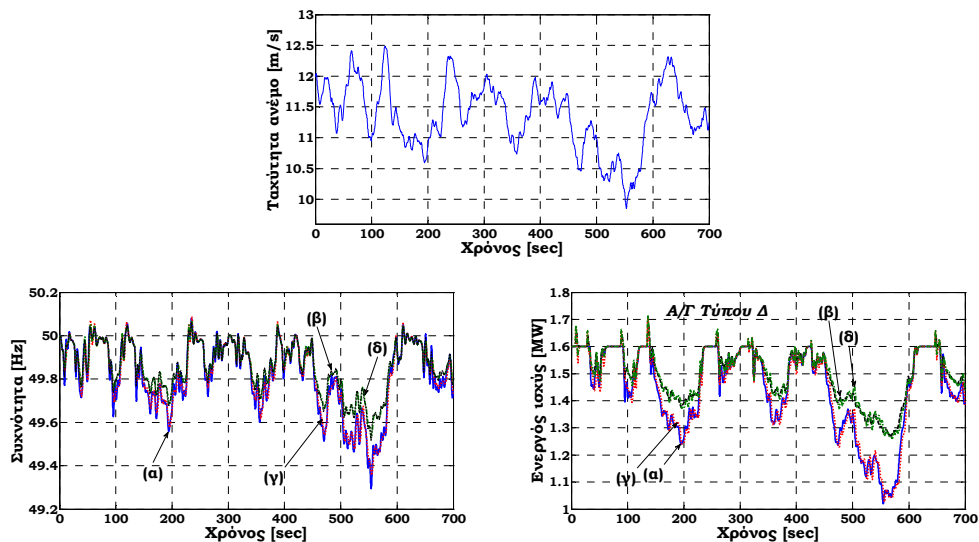
Σχήμα 9.23. Συχνότητα συστήματος και ενεργός ισχύς για Α/Γ Τύπου Γ σε απώλεια της μεγαλύτερης θερμικής μονάδας, για διαφορετικά επίπεδα εφεδρείας τύπου *balance* με συνδυασμένο έλεγχο συχνότητας στις Α/Γ Τύπου Γ και Δ

Επίπεδα εφεδρείας της τάξης του 5-10% εξασφαλίζουν ικανοποιητική απόκριση συχνότητας, δεδομένου ότι σε υψηλότερα επίπεδα οι απώλειες ενέργειας για τα Α/Π καθίστανται ιδιαίτερα απαιτητικές. Σημειώνεται επίσης ότι στο Σχήμα 9.23, για επίπεδα εφεδρείας 0-10% αν και η ενεργός ισχύς στη μόνιμη κατάσταση μετά τη διαταραχή είναι σχεδόν ίση για τα Α/Π που συμμετέχουν στην πρωτεύουσα ρύθμιση, το μόνιμο σφάλμα συχνότητας δεν είναι το ίδιο καθώς η μεταβολή στην ενεργό ισχύ εξόδου των Α/Π δεν είναι ίδια λόγω διαφορετικής αρχικής παραγωγής.

9.3.4. Διακυμάνσεις ισχύος

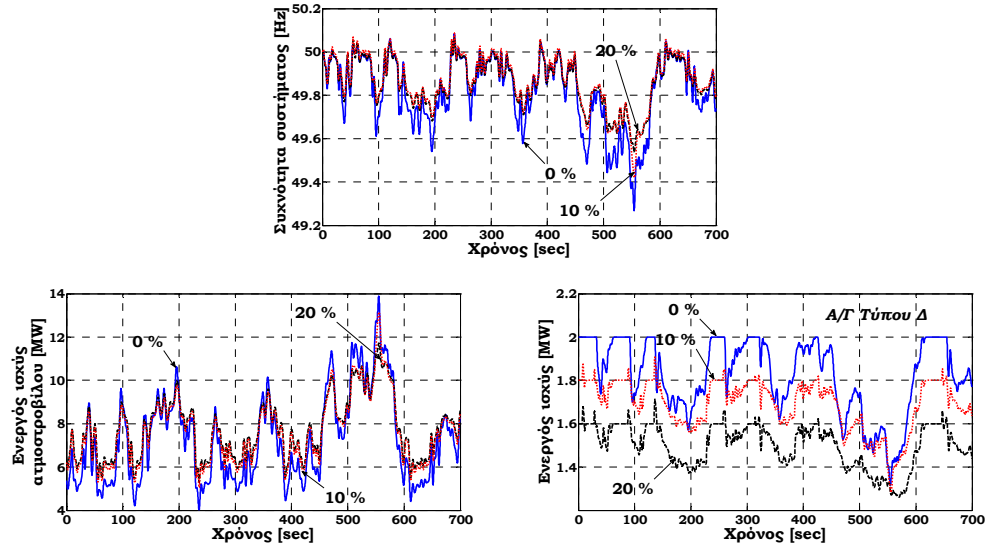
Στην ενότητα αυτή μελετώνται οι επιδράσεις των διακυμάνσεων ισχύος που προκύπτουν σε μη διασυνδεδεμένα ΣΗΕ λόγω διακυμάνσεων στην ταχύτητα του ανέμου. Σημειώνεται ότι στην περίπτωση παράκτιων αιολικών πάρκων ενδέχεται οι διακυμάνσεις ισχύος να είναι ιδιαίτερα έντονες λόγω της γεωγραφικής διασποράς της αιολικής παραγωγής, [AKH05b][TAN05]. Η κλίμακα χρόνου στην οποία παρουσιάζονται οι διακυμάνσεις είναι από 10 λεπτά έως μερικές ώρες. Τα αυξημένα επίπεδα διείσδυσης αιολικής ενέργειας (είτε σε παράκτια αιολικά πάρκα είτε σε μη διασυνδεδεμένα ΣΗΕ) εισάγουν σημαντικές προκλήσεις όσον αφορά την αξιόπιστη και ασφαλή λειτουργία των ΣΗΕ. Οι διακυμάνσεις ενεργού ισχύος και η επίδραση στη συχνότητα μη διασυνδεδεμένων ΣΗΕ σε διάφορα σενάρια λειτουργίας και για διαφορετικά επίπεδα αιολικής διείσδυσης έχει μελετηθεί εκτενώς κατά τη διάρκεια της παρούσας διατριβής, [MAR10a]. Σε τέτοια ΣΗΕ εφαρμόζονται συχνά

αποκοπές φορτίου ώστε να αποφευχθούν σημαντικότερα προβλήματα στη λειτουργία του συστήματος. Η επίδραση του συνδυασμένου ελέγχου συχνότητας και η συμβολή των Α/Π είναι σαφής, όπως προκύπτει και από το Σχήμα 9.24 για εφεδρεία τύπου *delta* με και χωρίς έλεγχο συχνότητας εκ μέρους των Α/Π μεταβλητών στροφών Τύπου Γ και Δ. Ο συνδυασμένος έλεγχος συχνότητας αποφεύγει σημαντικές μειώσεις ενεργού ισχύος από τα Α/Π κατά τη διάρκεια μεγάλων μειώσεων στην ταχύτητα ανέμου που προκαλούν αποκλίσεις στη συχνότητα έως και 0.6 Hz κάτω από τα 50 Hz. Σημειώνεται ότι στα αποτελέσματα που ακολουθούν εφαρμόζεται η ίδια χρονοσειρά ανέμου σε όλα τα Α/Π του ΣΗΕ της Ρόδου, ώστε να μελετηθεί η χείριστη περίπτωση (από πλευράς διακυμάνσεων συχνότητας) ταυτοχρονισμού της μεταβλητότητας του ανέμου σε όλα τα Α/Π στο σύστημα της Ρόδου. Περιλαμβάνεται σύγκριση μεταξύ των διαφόρων τρόπων ελέγχου συχνότητας που παρουσιάστηκαν παραπάνω, δηλ. έλεγχο στατισμού, έλεγχο αδρανειακής απόκρισης και συνδυασμένο έλεγχο. Όπως προκύπτει από την απόκριση της συχνότητας, σε αντίθεση με τα αποτελέσματα για μεγάλη μεταβατική μείωση της συχνότητας (λόγω απώλειας παραγωγής), ο έλεγχος στατισμού εξασφαλίζει συγκριτικά καλύτερη απόκριση από τον έλεγχο αδρανειακής απόκρισης. Επομένως προκύπτει μια διάκριση μεταξύ των μεταβατικών φαινομένων συχνότητας από την οπτική συμβολής της απόκρισης των Α/Γ με έλεγχο συχνότητας. Στις μεταβατικές μειώσεις, όπου ο ρυθμός αλλαγής συχνότητας κυμαίνεται σε εύρος έως 0.1 Hz/sec (π.χ. διακυμάνσεις συχνότητας λόγω διακυμάνσεων στην ταχύτητα ανέμου), ο έλεγχος στατισμού προσφέρει καλύτερη απόκριση σε σχέση με τον έλεγχο αδρανειακής απόκρισης. Το αντίθετο ισχύει για διακυμάνσεις συχνότητας με ρυθμούς που φτάνουν τα 1-3 Hz/sec (π.χ. μεταβατικές μεταβολές συχνότητας λόγω απότομης μεταβολής παραγωγής ή απότομης μεταβολής στο φορτίο). Κατά τις διακυμάνσεις ισχύος που οφείλονται σε διακύμανση της ταχύτητας ανέμου ο έλεγχος στατισμού εξασφαλίζει ίδια σχεδόν απόκριση με το συνδυασμένο έλεγχο, καθιστώντας τη χρήση του ελεγκτή αδρανειακής απόκρισης περιττή.



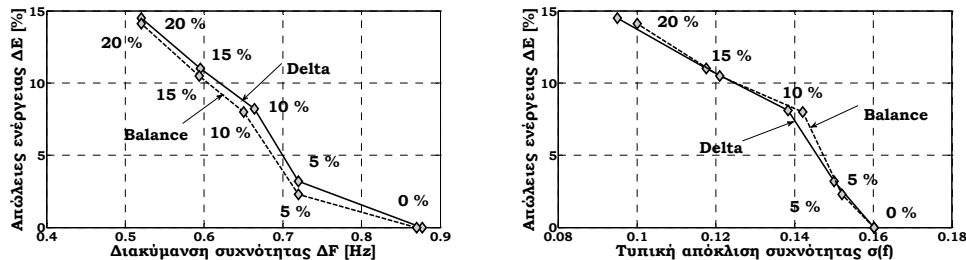
Σχήμα 9.24. Ταχύτητα ανέμου, συχνότητα συστήματος και ενεργός ισχύς για Α/Γ Τύπου Δ σε διακυμάνσεις ανέμου για εφεδρεία τύπου *delta* 20 % - (α) Χωρίς έλεγχο συχνότητας, (β) Έλεγχο στατισμού, (γ) Έλεγχο αδρανειακής απόκρισης, (δ) Συνδυασμένο έλεγχο στις Α/Γ Τύπου Γ και Δ

Το Σχήμα 9.25 απεικονίζει τη συχνότητα του συστήματος και τις διακυμάνσεις ενεργού ισχύος για αεριοστρόβιλο και Α/Γ Τύπου Δ 2 MW σε διαφορετικά επίπεδα εφεδρείας ενεργού ισχύος, που κυμαίνονται από 0 % έως και 20 % της διαθέσιμης ενεργού ισχύος. Σε αυτήν την περίπτωση εφαρμόζεται ο συνδυασμένος έλεγχος συχνότητας και τα κέρδη των ελεγκτών έχουν επιλεγεί με βάση τη διαδικασία παραμετροποίησης που παρουσιάστηκε στην προηγούμενη ενότητα. Από την απόκριση του αεριοστρόβιλου για τα διάφορα επίπεδα εφεδρείας από την πλευρά των Α/Γ είναι εμφανής ο περιορισμός στις διακυμάνσεις ενεργού ισχύος των συμβατικών μονάδων που εξασφαλίζεται όταν οι εφεδρείες που προσφέρουν τα Α/Π είναι αυξημένες.



Σχήμα 9.25. Συχνότητα συστήματος και ενεργός ισχύς για αεριοστρόβιλο και Α/Γ Τύπου Δ σε διακυμάνσεις ανέμου για διαφορετικά επίπεδα εφεδρείας τύπου delta με συνδυασμένο έλεγχο συχνότητας στις Α/Γ Τύπου Γ και Δ

Το Σχήμα 9.26 απεικονίζει τη σχέση μεταξύ απωλειών ενέργειας για τα Α/Π (με εφεδρεία τύπου *delta* και συνδυασμένο έλεγχο συχνότητας) και τη διακύμανση συχνότητας ή την τυπική απόκλιση της συχνότητας αντίστοιχα. Εφεδρεία περίπου 10% εξασφαλίζει μια ικανοποιητική σχέση μεταξύ απωλειών ενέργειας και διακυμάνσεων στη συχνότητα, καθώς μεγαλύτερα επίπεδα εφεδρείας, πχ. 20%, συνεπάγονται πολύ υψηλές απώλειες ενέργειας, πχ. 14% της διαθέσιμης ενέργειας αντίστοιχα, ενώ χαμηλά επίπεδα εφεδρείας τύπου *delta* δεν προσφέρουν αρκετά στις διακυμάνσεις συχνότητας σε σχέση με την περίπτωση μηδενικών εφεδρειών εκ μέρους των Α/Π.



Σχήμα 9.26. Απώλειες ενέργειας για Α/Π σε σχέση με διακύμανση συχνότητας και τυπική απόκλιση συχνότητας για διαφορετικά επίπεδα εφεδρείας τύπου delta με συνδυασμένο έλεγχο συχνότητας στις Α/Γ Τύπου Γ και Δ

Στο Σχήμα 9.26 περιλαμβάνονται επίσης τα αντίστοιχα αποτελέσματα για διαφορετικά επίπεδα εφεδρείας τύπου *balance*. Όταν δεν παρέχεται εφεδρεία από τα Α/Π με Α/Γ μεταβλητών στροφών Τύπου Γ και Δ, η διακύμανση της συχνότητας φτάνει τα 0.9 Hz, που θεωρείται υψηλή για το δοσμένο ΣΗΕ. Όπως προέκυψε και από τα αποτελέσματα για εφεδρείες τύπου *delta*, επίπεδα εφεδρείας κοντά στο 10% θεωρούνται ικανοποιητικά όσον αφορά τις διακυμάνσεις συχνότητας και τις σχετικές απώλειες ενέργειας.

Οι διαφορές στα αποτελέσματα δε μπορούν να οδηγήσουν σε συμπεράσματα όσον αφορά την επιλογή μεταξύ των δύο τύπων εφεδρείας. Επί της αρχής βέβαια η εφεδρεία τύπου *delta* κρίνεται πιο αποτελεσματική καθώς εξασφαλίζεται δεδομένη εφεδρεία ανεξάρτητα από τις διακυμάνσεις στην ταχύτητα του ανέμου και επομένως στη διαθέσιμη ισχύ. Παρ' όλα αυτά, τα αποτελέσματα όταν τα Α/Π συμβάλλουν στη ρύθμιση συχνότητας μέσω του προτεινόμενου ελεγκτή είναι πανομοιότυπα για τους δύο τύπους εφεδρείας.

9.4. Συμπεράσματα

Στην ενότητα αυτή παρουσιάστηκαν μια σειρά από μελέτες που αφορούν σε μη διασυνδεδεμένα συστήματα, όπου η αυξανόμενη αιολική διείσδυση έχει αρχίσει να θέτει σοβαρά ζητήματα δυναμικής ευστάθειας στο άμεσο μέλλον. Διαφορετικά σενάρια παραγωγής αναπτύχθηκαν για την περίπτωση του συστήματος της Ρόδου, όπου πέντε Α/Π θεωρήθηκαν ότι θα λειτουργούν το έτος αναφοράς 2012. Το μοντέλο του ΣΗΕ που αναπτύχθηκε περιλαμβάνει όλες τις βασικές συνιστώσες, όπως συμβατικές μονάδες παραγωγής – μοντέλα γεννητριών, Αυτόματων Ρυθμιστών Τάσης και Ρυθμιστών Στροφών. Η απόκριση των ρυθμιστών κατά τη διάρκεια δυναμικών φαινομένων στο σύστημα είναι θεμελιώδης για τη συνολική απόκριση. Ειδικότερα ο ρυθμός ανάληψης ισχύος από τα διαφορετικά είδη μονάδων, για πδ. αμοστροβίλους, αεριοστροβίλους και νηξελογεννήτριες, είναι πρωταρχικής σημασίας για τη λειτουργία του συνολικού συστήματος.

Η διερεύνηση της λειτουργίας των μη διασυνδεδεμένων συστημάτων έγινε με ανάπτυξη διαφορετικών σεναρίων αιολικής διείσδυσης – το σενάριο μέγιστης αιολικής διείσδυσης, το σενάριο μέγιστης αιολικής παραγωγής και το σενάριο μέγιστου φορτίου. Η μεθοδολογική προσέγγιση περιλαμβάνει την προσομοίωση του συστήματος υπό μελέτη (στην προκειμένη περίπτωση το σύστημα της Ρόδου) κατά τη διάρκεια διακυμάνσεων στην ταχύτητα ανέμου, σφαλμάτων στο δίκτυο που οδηγούν σε βύθιση τάσης όπως πχ. βραχυκυκλώματα, και κατά τη διάρκεια σφαλμάτων που οδηγούν σε έντονες μεταβολές της συχνότητας όπως πχ. η απώλεια μονάδας παραγωγής. Η αυξημένη αιολική διείσδυση δεν περιορίζει μόνο τη δυνατότητα των θερμικών σταθμών να αναλάβουν πρόσθετη ισχύ αλλά και την αδράνεια του συστήματος, παράμετρος που είναι καθοριστική για τη δυναμική ασφάλεια του συστήματος καθώς καθορίζει το ρυθμό μεταβολής της συχνότητας του συστήματος. Στις προσομοιώσεις που παρουσιάστηκαν αναλύθηκε η απόκριση των Α/Π με Α/Γ διαφορετικών τύπων κατά τη διάρκεια διακυμάνσεων στην ταχύτητα ανέμου που έχει μοντελοποιηθεί λαμβάνοντας υπ' όψιν την αλληλοσυσχέτιση μεταξύ των χρονοσειρών ανέμου των επιμέρους Α/Π.

Στη συνέχεια διερευνήθηκε η ανάγκη παροχής από τα Α/Π δυνατότητας αδιάλειπτης παροχής ισχύος κατά τη διάρκεια βυθίσεων τάσης που οφείλονται σε σφάλματα στο δίκτυο όπως πχ. βραχυκυκλώματα. Από την ανάλυση προέκυψε ότι, η δυνατότητα αδιάλειπτης παροχής ισχύος για Α/Γ όλων των τύπων και η απόκριση των Α/Γ κατά τη διάρκεια και μετά την εκκαθάριση των σφαλμάτων στο δίκτυο σε συνδυασμό με το σύστημα προστασίας των μη διασυνδεδεμένων συστημάτων καθορίζουν την απόρριψη φορτίου και τις διακυμάνσεις συχνότητας. Η απόρριψη φορτίου που ακολουθεί συχνά τα σφάλματα δικτύου σε απομονωμένα συστήματα μπορεί να φτάσει σε μη αποδεκτά επίπεδα όταν οι Α/Γ αποσυνδέονται για λόγους προστασίας του εξοπλισμού τους, γεγονός που αποτελεί πρόσθετη απώλεια παραγωγής σε συνθήκες που είναι ήδη επισφαλείς για τη λειτουργία του συστήματος.

Το τρίτο στάδιο της μεθοδολογίας ανάλυσης μη διασυνδεδεμένων συστημάτων περιλαμβάνει διερεύνηση της δυνατότητας συμβολής των Α/Γ μεταβλητών στροφών στη ρύθμιση συχνότητας κατά τη διάρκεια τόσο έντονων διακυμάνσεων της αιολικής παραγωγής, λόγω διακυμάνσεων στην ταχύτητα ανέμου, όσο και κατά τη διάρκεια έντονων μεταβατικών στη συχνότητα που οφείλονται σε σφάλματα, όπως η απώλεια μονάδας παραγωγής λόγω σφάλματος. Αν και οι Α/Γ σταθερών στροφών (Τύπου Α) συμβάλλουν εγγενώς στην αδράνεια του συστήματος, δεν ισχύει το ίδιο για τις Α/Γ μεταβλητών στροφών (Τύπου Γ και Δ) που αποτελούν και τη συντριπτική πλειοψηφία των Α/Γ που εγκαθίστανται σήμερα στα ΣΗΕ. Στο παρόν κεφάλαιο χρησιμοποιήθηκε ο ελεγκτής συχνότητας που προτάθηκε στο Κεφάλαιο 9 ώστε να διερευνηθεί η δυνατότητα και το εύρος συμβολής Α/Γ μεταβλητών στροφών στη δυναμική ασφάλεια του συστήματος. Η ανάλυση περιλαμβάνει τόσο μεταβατικά φαινόμενα στο δίκτυο, όπως απώλεια συμβατικής μονάδας, όσο και ανάλυση της λειτουργίας του συστήματος κατά τη διάρκεια κανονικής λειτουργίας και έντονων διακυμάνσεων στην ταχύτητα ανέμου. Μέσω εφαρμογής του ελέγχου συχνότητας σε Α/Γ Τύπου Γ και Δ, αναπτύχθηκε μια μεθοδολογία προσέγγισης κρίσιμων ζητημάτων που συνδέονται με τη συμβολή των Α/Γ στη ρύθμιση συχνότητας, όπως το επίπεδο εφεδρείας ενεργού ισχύος που απαιτείται από τα Α/Π, οι τιμές των παραμέτρων του ελεγκτή συχνότητας και η σχέση μεταξύ απωλειών ενέργειας που συνεπάγεται η λειτουργία σε εφεδρεία ισχύος και βελτίωσης της απόκρισης συχνότητας του

συστήματος κατά τη διάρκεια διακυμάνσεων στην αιολική παραγωγή λόγω μεταβολών στην ταχύτητα ανέμου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10 - Συμπεράσματα-Συμβολή-Προοπτικές

10.1. Συμπεράσματα

Το αντικείμενο της παρούσας διατριβής είναι η μελέτη της δυναμικής συμπεριφοράς Α/Γ και η αλληλεπίδραση Α/Π με τα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας. Η συνεχώς αυξανόμενη διείσδυση της αιολικής ενέργειας στα ΣΗΕ θέτει προς συστηματική έρευνα ένα ευρύ φάσμα τεχνικών ζητημάτων. Οι κώδικες των διαχειριστών του δικτύου, οι οποίοι συντάσσονται και αναθεωρούνται σε αυτές τις συνθήκες, απαιτούν από τα Α/Π υπηρεσίες ρύθμισης που παραδοσιακά αναφέρονταν μόνο σε συμβατικούς σταθμούς παραγωγής. Καθώς αναμένεται στο εγγύς μέλλον η αιολική ενέργεια να αποτελέσει ίσως τη σημαντικότερη ανανεώσιμη πηγή ενέργειας, τουλάχιστον στην Ευρώπη, οι προκλήσεις που αντιμετωπίζει η αιολική τεχνολογία είναι εξαιρετικά μεγάλες. Για τη μελέτη των τεχνικών αυτών θεμάτων επιλέχθηκε στην παρούσα διατριβή η συστηματική μελέτη και ανάλυση δύο εκ των βασικών διαμορφώσεων ανεμογεννητριών μεταβλητών στροφών – η Α/Γ με ασύγχρονη γεννήτρια τυλιγμένου δρομέα διπλής τροφοδότησης και μετατροπέα μερικής ισχύος συνδεδεμένο στο δρομέα (*Τύπος Γ*) και η Α/Γ με σύγχρονη γεννήτρια (ηλεκτρικής διέγερσης ή μονίμων μαγνητών) και πλήρη μετατροπέα (*Τύπος Δ1* ή *Δ2* αντίστοιχα). Ο *Τύπος Γ* αποτέλεσε την τεχνολογία αιχμής κατά τη διάρκεια της τελευταίας δεκαετίας ενώ οι παραλλαγές του *Τύπου Δ* αναμένεται στο μέλλον να αυξήσουν σημαντικά το μερίδιό τους στην αγορά Α/Γ, ειδικά σε εφαρμογές παράκτιων Α/Π.

Τα μοντέλα που αναπτύχθηκαν, χρησιμοποιούνται για τη μελέτη της αλληλεπίδρασης Α/Π και δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας τόσο κατά τη διάρκεια συνθηκών κανονικής λειτουργίας όσο και για τη μελέτη μεταβατικών φαινομένων όπως πχ. σφάλματα στο δίκτυο. Το μηχανικό σύστημα περιλαμβάνει μοντέλα για τα αεροδυναμικά χαρακτηριστικά του δρομέα και τον άξονα μετάδοσης της κίνησης. Τα μη γραμμικά αεροδυναμικά χαρακτηριστικά λαμβάνονται επίσης υπ' όψιν, ώστε να μην παραβλεφθούν διακυμάνσεις ισχύος στην περιοχή απόλωσης στήριξης. Τα αποτελέσματα που αναλύθηκαν βασίζονται στο μοντέλο δύο μαζών με το οποίο προσομοιώνονται οι ηλεκτρομηχανικές ταλαντώσεις που διεγείρονται στο σύστημα σε περίπτωση έντονων μεταβατικών είτε στην ταχύτητα του ανέμου είτε λόγω σφαλμάτων ηλεκτρικής φύσης του δικτύου. Η γενική μεθοδολογία για τον έλεγχο των Α/Γ είναι κοινή και στους δύο τύπους που μελετήθηκαν (*Τύπος Γ* και *Τύπος Δ*), περιλαμβάνοντας το σύστημα ελέγχου ταχύτητας περιστροφής του δρομέα της γεννήτριας και το σύστημα ελέγχου ισχύος. Ο έλεγχος ταχύτητας πραγματοποιείται μέσω του συστήματος ελέγχου γωνίας βήματος και τα αποτελέσματα ενδεικνύουν την αποδοτική λειτουργία του για ευρύ φάσμα λειτουργικών καταστάσεων. Σε υψηλές ταχύτητες ανέμου, ο ελεγκτής ταχύτητας επιτρέπει μια μικρή διακύμανση γύρω από την ονομαστική τιμή με σκοπό την αποφυγή έντονων μηχανικών καταπονήσεων. Σημειώνεται επίσης ότι η προστασία του δρομέα από κρίσιμες επιταχύνσεις κατά τη διάρκεια σφαλμάτων στο δίκτυο εξασφαλίζεται μέσω του ελέγχου ταχύτητας χωρίς την ανάγκη τροποποίησης του.

Στην περίπτωση της Α/Γ *Τύπου Γ* ο έλεγχος ενεργού ισχύος γίνεται με υλοποίηση της στρατηγικής Μέγιστης Απολαβής Ισχύος στο μετατροπέα στην πλευρά του δρομέα. Για χαμηλές ταχύτητες ανέμου εξασφαλίζεται η μεγιστοποίηση τη εξαγόμενης αεροδυναμικής ισχύος, ενώ για ταχύτητες που υπερβαίνουν την ονομαστική διατηρείται σταθερή ονομαστική ενεργός ισχύς εξόδου. Το σύστημα ελέγχου κανονικής λειτουργίας επεκτάθηκε για να εξασφαλίσει την επιθυμητή λειτουργία της Α/Γ κατά τη διάρκεια σφαλμάτων στο δίκτυο που οδηγούν σε βύθιση τάσης. Η αδιάλειπτη παροχή ισχύος αλλά και η στήριξη της τάσης του δικτύου μέσω παροχής πρόσθετης αέργου από την Α/Γ στηρίζεται στη συντονισμένη λειτουργία της ενεργούς διάταξης βραχυκύκλωσης δρομέα, του ελεγκτή τάσης στο μετατροπέα στην πλευρά του δρομέα, του ελεγκτή απόσβεσης και του συστήματος πρόσθετης παροχής αέργου ισχύος στο μετατροπέα στην πλευρά του δικτύου. Συμπεραίνεται ότι η απόσβεση των ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων αποτελεί κρίσιμο ζήτημα καθώς αποφεύγεται η αποσύνδεση της Α/Γ κατά τη διάρκεια έντονων μεταβατικών για λόγους προστασίας ενώ παράλληλα μειώνονται σημαντικά οι συνεπαγόμενες καταπονήσεις του μηχανικού συστήματος. Αναλύθηκε επίσης η επίδραση της τιμής της αντίστασης της διάταξης βραχυκύκλωσης του δρομέα στην απόκριση του συστήματος. Μέσω της λειτουργίας του μετατροπέα στην πλευρά του δικτύου ως STATCOM, όσο ο δρομέας παραμένει βραχυκυκλωμένος, κατέστη δυνατή η στήριξη της τάσης του

δικτύου τόσο κατά τη διάρκεια της βύθισης τάσης όσο και αμέσως μετά την εκκαθάριση του σφάλματος.

Στην περίπτωση της Α/Γ Τύπου Δ1 το σύστημα ελέγχου ισχύος υλοποιήθηκε με τρεις διαφορετικούς τρόπους στηριζόμενο στη συντονισμένη λειτουργία του Ρυθμιστή Τάσης της Γεννήτριας, το μετατροπέα DC-DC και το μετατροπέα στην πλευρά του δικτύου. Η στρατηγική Μέγιστης Απολαβής Ισχύος και η ρύθμιση της τερματικής τάσης της σύγχρονης γεννήτριας αλλά και της DC τάσης δοκιμάστηκαν συγκριτικά για όλους τους τρόπους ελέγχου μέσω προσομοιώσεων σε στοχαστικές ταχύτητες ανέμου.

Αντίστοιχα στο μοντέλο για την Α/Γ Τύπου Δ2 ο έλεγχος ισχύος υλοποιήθηκε στο μετατροπέα στην πλευρά του δικτύου, ενώ ο μετατροπέας στην πλευρά της γεννήτριας ρυθμίζει τις τάσεις της γεννήτριας και της DC σύνδεσης. Η ανάλυση των αποτελεσμάτων για σφάλματα δικτύου, όπως βραχυκυκλώματα, έδειξε ότι το συγκεκριμένο σχήμα ελέγχου παρέχει τη δυνατότητα αδιάλειπτης παροχής ισχύος χωρίς επιπρόσθετο εξοπλισμό ή τροποποίηση στο σύστημα ελέγχου της Α/Γ. Το σύστημα απόσβεσης ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων που σχεδιάστηκε ενισχύει την προστασία της Α/Γ κατά τη διάρκεια έντονων μεταβατικών φαινομένων. Παρ' όλα αυτά, η απόκριση της Α/Γ κατά τη διάρκεια σφαλμάτων αλλά και η δυνατότητα πρόσθετης παροχής αέργου ισχύος μπορούν να βελτιωθούν περαιτέρω μέσω των κατάλληλων επεκτάσεων που έγιναν. Το τροποποιημένο σύστημα ελέγχου περιλαμβάνει περιορισμό της DC τάσης, την προσθήκη ενός DC-DC μετατροπέα και τη χρήση ελεγκτή τάσης στο μετατροπέα στην πλευρά του δικτύου. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για σφάλματα στο δίκτυο ανέδειξαν τη δυνατότητα του συγκεκριμένου τύπου Α/Γ να παρέχει δύο από τις βασικές απαιτήσεις των κωδικών δικτύου, την ανοχή σε βυθίσεις τάσης και την παροχή αέργου ισχύος για στήριξη της τάσης.

Οι προσομοιώσεις που αφορούν στη σχεδίαση και μοντελοποίηση των συστημάτων Α/Γ σταθερών και μεταβλητών στροφών έγιναν με χρήση του γενικού μοντέλου συστήματος μεταφοράς που περιγράφεται στο Παράρτημα και αποτελεί μια απλουστευμένη αλλά ρεαλιστική εκδοχή που έχει διαθέσει ο διαχειριστής του συστήματος μεταφοράς της Δανίας *Energinet.dk* για ερευνητικές και εκπαιδευτικές εργασίες.

Αφού αναλύθηκε η συμπεριφορά των δύο βασικών τύπων Α/Γ μεταβλητών στροφών (Τύπου Γ και Δ) κατά τη διάρκεια διακυμάνσεων στην ταχύτητα ανέμου αλλά και κατά τη διάρκεια σφαλμάτων στο δίκτυο που προκαλούν βύθιση τάσης, διερευνήθηκε η συμβολή των Α/Γ μεταβλητών στροφών στη ρύθμιση της συχνότητας. Η λειτουργία αυτή αναιρεί μερικώς τη λειτουργία τους σε συνθήκες μεγιστοποίησης της εξαγόμενης αεροδυναμικής ισχύος καθώς απαιτείται σε κάποιες περιπτώσεις να λειτουργούν με εφεδρεία ενεργού ισχύος ώστε να είναι σε θέση να συνδράμουν στην πρωτεύουσα ρύθμιση της συχνότητας. Στην παρούσα διατριβή προτείνεται ένα σύστημα ελέγχου Α/Π που αποτελείται από Α/Γ μεταβλητών στροφών και εξασφαλίζει τη συμβολή στην πρωτεύουσα ρύθμιση του συστήματος ανεξαρτήτως του είδους των Α/Γ από τις οποίες αποτελείται το Α/Π (Τύπου Γ ή Δ). Ο ελεγκτής στο επίπεδο του Α/Π εξασφαλίζει τον έλεγχο της ενεργού ισχύος στο ΣΚΣ του Α/Π και στόχο έχει την εξασφάλιση της στρατηγικής Μέγιστης Απολαβής Ισχύος όταν δεν προβλέπεται συμμετοχή στη ρύθμιση συχνότητας ή περιορισμός ισχύος λόγω εφεδρείας. Η απρόσκοπτη λειτουργία του ελεγκτή στο επίπεδο του Α/Π εξασφαλίζει την απαιτούμενη ισχύ καθορίζοντας τις ισχείς αναφοράς στις επιμέρους Α/Γ του Α/Π. Ο ελεγκτής λαμβάνει από το διαχειριστή του συστήματος (ή του Α/Π) τα σήματα περιορισμού ρυθμού μεταβολής της ενεργού ισχύος και παροχής εφεδρείας ενεργού ισχύος τύπου *delta* ή τύπου *balance*. Οι ελεγκτές στο επίπεδο των επιμέρους Α/Γ του Α/Π καθορίζουν την ενεργό παραγωγή κάθε Α/Γ με βάση το σήμα που δέχονται από τον ελεγκτή του Α/Π. Στη διατριβή περιλαμβάνονται και αποτελέσματα από μοντέλο που αναπτύχθηκε και περιλαμβάνει τον ελεγκτή στο επίπεδο του Α/Π και τρεις επιμέρους Α/Γ, όπου καταδεικνύεται η λειτουργία του ελεγκτή που παρουσιάστηκε. Η τιμή αναφοράς για την ταχύτητα περιστροφής κάθε Α/Γ δεν είναι πλέον η ονομαστική ταχύτητα αλλά προκύπτει από τη χαρακτηριστική ελέγχου στροφών με βάση τη μετρούμενη ταχύτητα ανέμου. Στην αντίθετη περίπτωση η Α/Γ ενδέχεται να οδηγούνταν σε επιτάχυνση έως την ονομαστική ταχύτητα πριν ο ελεγκτής ταχύτητας προλάβει να την περιορίσει μέσω του συστήματος ελέγχου γωνίας βήματος των πτερυγίων, γεγονός που συνεπάγεται ιδιαίτερα φορτία κόπωσης για τα μηχανικά μέρη της Α/Γ. Στα μοντέλα που αναπτύχθηκαν δοκιμάστηκε και παρουσιάστηκε η δυνατότητα λειτουργίας των Α/Γ μεταβλητών

στροφών με εφεδρεία ισχύος και με όρια στο ρυθμό μεταβολής της ενεργού ισχύος του αιολικού πάρκου που είναι παράμετροι του μοντέλου και κυμαίνονται σε επίπεδα της τάξης μερικών MW/min (1MW/min-4MW/min). Το σύστημα πρωτεύουσας ρύθμισης παρέχει το σήμα μεταβολής ενεργού ισχύος με βάση τις μεταβολές της συχνότητας του συστήματος.

Το είδος του ελέγχου που εφαρμόστηκε στην πρωτεύουσα ρύθμιση περιλαμβάνει τον έλεγχο αδράνειας, τον έλεγχο στατισμού και το συνδυασμό αυτών. Κατά το πρώτο είδος ελέγχου, τον έλεγχο αδρανειακής απόκρισης, η Α/Γ αποκρίνεται με βάση το ρυθμό μεταβολής της συχνότητας. Η επιπρόσθετη ενέργεια που μπορεί να παραχθεί μέσω της αδρανειακής απόκρισης περιορίζεται από την ποσότητα της κινητικής ενέργειας που είναι αποθηκευμένη στη στρεφόμενη μάζα του δρομέα, τις αποδεκτές μεταβολές στην ταχύτητα του δρομέα και τη λειτουργία επαναφοράς της κινητικής ενέργειας στην προ του μεταβατικού τιμή της. Κατά τη διάρκεια της ανάλυσης που έγινε, αναδείχθηκε η διαφορετική συμπεριφορά της Α/Γ καθώς και η διαφορετική συμβολή στη ρύθμιση συχνότητας ανάλογα με την περιοχή ταχυτήτων ανέμου στην οποία λειτουργεί η Α/Γ. Κατά τη λειτουργία στην περιοχή υψηλών ταχυτήτων ανέμου για μεγάλες τιμές του κέρδους αδρανειακής απόκρισης η παραγωγή ενεργού ισχύος περιορίζεται από τη δράση του ελέγχου γωνίας βήματος πτερυγίων μη επιτρέποντας την εξαγωγή μέρους της διαθέσιμης ενεργού ισχύος στο σύστημα. Στις μελέτες περιλαμβάνεται και η περίπτωση κατά την οποία προβλέπεται η δυνατότητα λειτουργίας της Α/Γ σε επίπεδα ενεργού ισχύος μεγαλύτερα της ονομαστικής ισχύος για περιορισμένο χρονικό διάστημα – της τάξης των 10 δευτ. Η εφαρμογή του ελέγχου αδρανειακής απόκρισης στο σύστημα των Α/Γ μεταβλητών στροφών αξιοποιήθηκε στη συνέχεια για να αναλυθεί η δυνατότητα αντικατάστασης μέρους των συμβατικών μονάδων από Α/Γ με δυνατότητα αδρανειακής απόκρισης. Η προσομοίωση συστήματος με 50% αιολική διείσδυση ανέδειξε σημαντικά ζητήματα όσον αφορά τα προβλήματα που προκύπτουν κατά τη λειτουργία των Α/Γ σε διαφορετικές ταχύτητες ανέμου. Αναλύθηκαν τα βασικά θεωρητικά ζητήματα γύρω από την αδρανειακή απόκριση και παρουσιάστηκε μια μέθοδος βελτίωσης της μεθόδου εικονικής αδράνειας. Οι βασικές πλευρές του προβλήματος αφορούν στους περιορισμούς ισχύος και ενέργειας των Α/Γ καθώς και στις στρατηγικές ελέγχου ισχύος και γωνίας βήματος. Κάποιες μέθοδοι που προτείνονται από κατασκευαστές Α/Γ ενδέχεται να είναι πιο συνεκτικές, εν τούτοις στην παρούσα διατριβή η μεθοδολογία προσέγγισης του προβλήματος στηρίζεται σε μια ανάλυση των θεωρητικών ζητημάτων γύρω από τη δυνατότητα αδρανειακής απόκρισης επιτρέποντας τη σκιαγράφηση της βασικής κατεύθυνσης επίλυσης των σχετικών προβλημάτων.

Από τα αποτελέσματα προέκυψε ότι οι Α/Γ μεταβλητών στροφών είναι σε θέση να συμβάλλουν στην πρωτεύουσα ρύθμιση κατά τα πρώτα msec μετά το μεταβατικό συχνότητας. Εφαρμόζοντας κατάλληλη λογική ελέγχου, είναι δυνατή η εκμετάλλευση της αδράνειας των Α/Γ, και για περιορισμένο χρονικό διάστημα η συμβολή ενδέχεται να είναι σημαντικότερη από αυτή των Α/Γ σταθερών στροφών. Επιπλέον μελετήθηκε η δυνατότητα αντικατάστασης συμβατικής παραγωγής οδηγώντας στο συμπέρασμα ότι απαιτείται μια βελτιωμένη μέθοδος ελέγχου των Α/Γ ώστε να η αδράνεια του συστήματος να παραμείνει σχεδόν αμετάβλητη. Εν τούτοις, είναι σαφές ότι στις ταχύτητες ανέμου μεταξύ της περιοχής βελτιστοποίησης και περιορισμού της ισχύος η λειτουργία καθίσταται ιδιαίτερα κρίσιμη. Η απλή αναλυτική σχέση που προτείνεται για την προσέγγιση της παραμέτρου του ελεγκτή αδρανειακής απόκρισης ώστε να καταστεί δυνατή η αντικατάσταση μέρους της συμβατικής παραγωγής επαληθεύτηκε, επιτρέποντας μια αξιόπιστη μέθοδο υπολογισμού της παραμέτρου σε πραγματικά συστήματα. Τα συμπεράσματα που προκύπτουν κατά την αντικατάσταση συμβατικής παραγωγής από Α/Γ μεταβλητών στροφών με εικονική αδράνεια είναι ιδιαίτερα σημαντικά καθ' όσον αφορούν σαφώς στα διασυνδεδεμένα συστήματα, όπου πλέον τα Α/Π προσεγγίζουν σε μέγεθος συμβατικούς σταθμούς παραγωγής. Επομένως η ανάλυση δεν περιορίζεται σε περιπτώσεις μη διασυνδεδεμένων ΣΗΕ όπου η αδράνεια είναι εγγενώς περιορισμένη, αλλά επεκτείνεται σε κάθε ΣΗΕ με αυξημένη αιολική διείσδυση.

Ο έλεγχος στατισμού ακολουθεί τη λογική λειτουργίας των συμβατικών μονάδων με χαρακτηριστική στατισμού που καθορίζει την παραγωγή ενεργού ισχύος με βάση τη διακύμανση της συχνότητας από την ονομαστική της τιμή. Ο έλεγχος στατισμού παρέχει μόνιμη απόκριση, σε αντίθεση με την αδρανειακή απόκριση που είναι μόνο μεταβατική, και συμβάλει στην πρωτεύουσα ρύθμιση της συχνότητας ενώ απαιτείται η λειτουργία της Α/Γ σε εφεδρεία ισχύος, ώστε να είναι σε θέση να

συμβάλλει στη ρύθμιση σε περίπτωση υποσυχνότητας. Αυτό προϋποθέτει ότι δεν προβλέπεται η λειτουργία της Α/Γ σε επίπεδα ενεργού ισχύος μεγαλύτερα από την ονομαστική ισχύ, όπως αναφέρθηκε παραπάνω. Επομένως ενώ το όριο για την αδρανειακή απόκριση σε σχέση με τα επίπεδα ισχύος που μπορεί να παράξει η Α/Γ κατά τη διάρκεια του μεταβατικού είναι η ονομαστική ισχύς (εκτός από την περίπτωση που έχει γίνει υπερδιαστασιολόγηση των μετατροπέων και της γεννήτριας ώστε να υπάρχει η δυνατότητα λειτουργίας σε μεγαλύτερα επίπεδα για περιορισμένο χρονικό διάστημα), στην περίπτωση του ελέγχου στατισμού το όριο είναι η διαθέσιμη ενεργός ισχύς με βάση τον άνεμο, καθώς σε αντίθετη περίπτωση δεν εξασφαλίζεται η ευσταθής λειτουργία της Α/Γ. Η λειτουργία της Α/Γ με στατισμό πρέπει να προσφέρεται είτε για περιορισμένο χρονικό διάστημα είτε σε συνδυασμό με εφεδρεία ενεργού ισχύος, όπως έχει προταθεί στην παρούσα διατριβή. Οι παράμετροι στατισμού των Α/Π, ιδιαίτερα στα μη διασυνδεδεμένα ΣΗΕ, πρέπει να καθορίζονται σε σχέση με τις παραμέτρους στατισμού των συμβατικών μονάδων, ώστε να εξασφαλιστεί η κατάλληλη κατανομή παραγωγής κατά τη διάρκεια μεταβατικών φαινομένων και το επιθυμητό μόνιμο σφάλμα συχνότητας στο σύστημα. Επιπλέον αναλύθηκε και παρουσιάστηκε η εφαρμογή του συνδυασμένου ελέγχου αδρανειακής απόκρισης και στατισμού που παίρνει τη μορφή ενός αναλογικού-διαφορικού ελεγκτή στο σύστημα ελέγχου του Α/Π. Κατά τις δοκιμές που παρουσιάστηκαν, για μεταβατική αύξηση του φορτίου κατά 60% σε σενάριο λειτουργίας με αιολική διεύθυνση 50% και στατισμό στις Α/Γ ίσο με 5% (όσο και στις συμβατικές μονάδες), παρατηρήθηκε ότι για σχετικά μικρές τιμές κέρδους του ελεγκτή αδρανειακής απόκρισης ο αρχικός ρυθμός μεταβολής της συχνότητας είναι μεγαλύτερος σε σύγκριση με την περίπτωση όπου το φορτίο καλύπτεται αποκλειστικά από συμβατικές μονάδες. Η ελάχιστη συχνότητα όμως βελτιώνεται ελαφρώς ακόμα και για την περίπτωση μηδενικής αδρανειακής απόκρισης. Η απουσία αδρανειακής απόκρισης και εφαρμογής μόνο ελέγχου στατισμού στις Α/Γ έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της αδράνειας του συστήματος με αποτέλεσμα ο ρυθμός μεταβολής της συχνότητας κατά το μεταβατικό να είναι μεγαλύτερος και η ελάχιστη συχνότητα να είναι μικρότερη για όλες τις τιμές στατισμού στο σύστημα των Α/Γ. Προκύπτει επομένως ότι η εικονική αδράνεια καθίσταται απαραίτητη για τη συμβολή των Α/Π στη ρύθμιση συχνότητας κατά τη διάρκεια έντονων μεταβατικών, όπως η απότομη μεταβολή στο ισοζύγιο ενεργού ισχύος. Αντίστοιχα, κατά την εφαρμογή του συνδυασμένου ελέγχου, διατηρώντας την ίδια τιμή κέρδους του ελεγκτή αδρανειακής απόκρισης, ο αρχικός ρυθμός μεταβολής της συχνότητας είναι ίδιος για όλες τις τιμές στατισμού γεγονός που αποτυπώνεται και στην απόκριση ενεργού ισχύος του Α/Π κατά τα πρώτα msec μετά τη διαταραχή. Τα αποτελέσματα οδηγούν στο συμπέρασμα ότι η αδρανειακή απόκριση μπορεί να ληφθεί υπ' όψιν μόνο ως βραχυπρόθεσμη συμβολή ταχείας απόκρισης στα μεταβατικά συχνότητας ενώ ο έλεγχος στατισμού συνδέεται με τη μόνιμη ρύθμιση συχνότητας και τη συμβολή στην πρωτεύουσα ρύθμιση.

Για λόγους πληρότητας της παρουσίασης αναλύθηκαν και οι τροποποιήσεις που απαιτούνται σε συστήματα Αυτόματης Ρύθμισης Παραγωγής από τη στιγμή που τα Α/Π θα έχουν τη δυνατότητα μέσω της λειτουργίας σε εφεδρεία ισχύος να συμμετέχουν και στη δευτερεύουσα ρύθμιση συχνότητας. Σημαντικό ρόλο στην ένταξη των Α/Π στο σύστημα ΑΡΠ διαδραματίζουν η δυνατότητα περιορισμού του ρυθμού μεταβολής της ενεργού ισχύος των Α/Π καθώς και η εκτίμηση της διαθέσιμης αιολικής παραγωγής με μεθόδους πρόβλεψης του ανέμου.

Από την ανάλυση που έγινε στα πλαίσια της παρούσας διατριβής προκύπτει ότι η δυνατότητα συμβολής των Α/Π στη ρύθμιση συχνότητας δεν απαιτεί σημαντικές τεχνικές αλλαγές στον τρόπο με τον οποίο γίνεται η ρύθμιση συχνότητα στα ΣΗΕ σήμερα αλλά προϋποθέτει ανανέωση των κανόνων και πρακτικών που τηρούνται κατά την πρωτεύουσα και επακόλουθα κατά τη δευτερεύουσα ρύθμιση συχνότητας. Δημιουργείται η ανάγκη επαναπροσδιορισμού της απαραίτητης εφεδρείας, με έμφαση στα μη διασυνδεδεμένα ΣΗΕ, από τη στιγμή που οι σύγχρονες μονάδες αιολικής παραγωγής θα είναι σε θέση να αντικαθιστούν συμβατικές μονάδες χωρίς την ανάγκη διατήρησης στρεφόμενης εφεδρείας εκ μέρους των συμβατικών μονάδων για την περίπτωση διαταραχών στο ισοζύγιο ενεργού ισχύος – γεγονός που οδηγεί σε εξοικονόμηση καυσίμου για τις συμβατικές μονάδες. Ο έλεγχος ενεργού ισχύος των Α/Π μεταβλητών στροφών σε όλο το εύρος λειτουργίας τους και η δυνατότητα ταχείας απόκρισης σε περίπτωση μεταβατικών στη συχνότητα του συστήματος παρέχει τη δυνατότητα σημαντικής συμβολής ενεργού ισχύος ενώ παράλληλα προβλέπεται ο έλεγχος του ρυθμού μεταβολής της ενεργού ισχύος μέσω του περιοριστή ενεργού ισχύος που παρουσιάστηκε. Σημαντικό ζήτημα παραμένει ο τρόπος με τον οποίο υπολογίζεται η διαθέσιμη ενεργός ισχύς με βάση τον άνεμο καθ' ότι

αποτελεί κρίσιμη παράμετρο, όχι μόνο για τη λειτουργία του Α/Π με τον ελεγκτή συχνότητας, αλλά και για την εκτίμηση της εφεδρείας που διατηρούν τα Α/Π. Η εκτίμηση της διαθέσιμης ισχύος συνδέεται επίσης άμεσα και με τον υπολογισμό των απωλειών ενέργειας που συνεπάγεται για το διαχειριστή του Α/Π η λειτουργία σε εφεδρεία ισχύος. Παρ' όλα αυτά, η απόρριψη αιολικής παραγωγής, που σε συνθήκες αυξημένης αιολικής διείσδυσης είναι ολοένα και πιο σημαντική, λόγω μη δυνατότητας απορρόφησης αιολικής ισχύος από το ΣΗΕ υπό συγκεκριμένες συνθήκες, μπορεί να αξιοποιηθεί ως εφεδρεία ισχύος χωρίς πρόσθετο κόστος απωλειών ενέργειας (ενδεικτικά αναφέρεται μόνο ότι στην Κίνα περίπου 30% της διαθέσιμης αιολικής ισχύος απορρίπτεται – ποσό που ισοδυναμεί με 26 GW αιολικής παραγωγής). Στο σημείο αυτό είναι σημαντικό να αναφερθεί επιπλέον ότι τα σφάλματα πρόβλεψης ανέμου και αιολικής παραγωγής μπορούν να αντισταθμιστούν με παροχή μικρών ποσών εφεδρείας ενεργού ισχύος εκ μέρους των Α/Π.

Τα μοντέλα που αναπτύχθηκαν στο πρώτο μέρος της διατριβής χρησιμοποιήθηκαν στη συνέχεια για τη διερεύνηση των μεταβολών που υπεισέρχονται στα σύγχρονα ΣΗΕ, με έμφαση στα μη διασυνδεδεμένα συστήματα, λόγω αυξανόμενης αιολικής διείσδυσης. Η δυνατότητα των Α/Π να παρέχουν υπηρεσίες στήριξης τάσης και συχνότητας καθίσταται κρίσιμη για την ασφαλή λειτουργία των ΣΗΕ σε υψηλά επίπεδα διείσδυσης. Η προσέγγιση που ακολουθήθηκε περιλαμβάνει τρία πεδία – τη λειτουργία του συστήματος κατά τη διάρκεια διακυμάνσεων στην ταχύτητα ανέμου, την απόκριση κατά τη διάρκεια μεταβατικών φαινομένων που οδηγούν σε βύθιση τάσης, όπως τα βραχυκυκλώματα στο δίκτυο, και τη λειτουργία κατά τη διάρκεια μεταβατικών που επιδρούν σημαντικά στο ισοζύγιο ενεργού ισχύος, όπως η απώλεια μονάδας παραγωγής. Η πλατφόρμα προσομοίωσης που αναπτύχθηκε αποτελείται από λεπτομερή μοντέλα τριών βασικών τύπων Α/Γ – Τύπου Α, Γ και Δ.

Στο πρώτο στάδιο ανάλυσης, οι χρονοσειρές ανέμου που χρησιμοποιήθηκαν για τα αποτελέσματα προσομοιώθηκαν με το μοντέλο *CorWind* και περιλαμβάνουν τη συσχέτιση μεταξύ των ταχυτήτων ανέμου στις τοποθεσίες εγκατάστασης των Α/Π. Η συσχέτιση μεταξύ των επιμέρους Α/Π μπορεί να καταστεί ιδιαίτερα κρίσιμη σε απομονωμένα συστήματα λόγω της σχετικά μειωμένης απόστασης μεταξύ των Α/Π. Μέσω προσομοιώσεων προσεγγίστηκαν διαφορετικά σενάρια λειτουργίας του συστήματος, όπως για π.δ. τα σενάρια μέγιστης αιολικής παραγωγής και μέγιστης αιολικής διείσδυσης. Με βάση αυτά, η απόκριση του συστήματος υπό μελέτη κρίνεται ικανοποιητική καθώς παρά τις ταχείες διακυμάνσεις στον άνεμο, δεν προκύπτουν αποκοπές φορτίου και η συχνότητα κυμαίνεται σε ένα περιορισμένο εύρος γύρω από την ονομαστική τιμή των 50 Hz. Στο σενάριο μέγιστης αιολικής διείσδυσης, όπου η λειτουργία είναι πιο κρίσιμη σε σύγκριση με τα υπόλοιπα σενάρια, οι διακυμάνσεις στη συχνότητα που προκύπτουν από τις διακυμάνσεις στον άνεμο δεν θεωρούνται αρκετά σημαντικές ώστε να θέσουν ζήτημα ασφαλούς λειτουργίας. Παρ' όλα αυτά, η επίδραση των διακυμάνσεων είναι εμφανής στη συχνότητα του συστήματος και η συσχέτιση μεταξύ των χρονοσειρών ανέμου και της συχνότητας του συστήματος πρέπει να διερευνάται πριν από κάθε αναθεώρηση των επιπέδων αιολικής διείσδυσης. Η αυξημένη αιολική διείσδυση δεν περιορίζει μόνο τη δυνατότητα των θερμικών σταθμών να αναλάβουν ισχύ αλλά περιορίζει σημαντικά και την αδράνεια του συστήματος, παράμετρος που καθορίζει το ρυθμό μεταβολής της συχνότητας κατά τις διαταραχές στο ισοζύγιο ενεργού ισχύος του συστήματος. Η ανάλυση έδειξε ότι, όσον αφορά τις διακυμάνσεις αιολικής ισχύος, τα επίπεδα διείσδυσης μπορούν να επεκταθούν πέρα του ορίου 30%.

Το δεύτερο βήμα της προσέγγισης της ασφάλειας μη διασυνδεδεμένων συστημάτων περιλαμβάνει τη μελέτη της δυναμικής ασφάλειας κατά τη διάρκεια μεταβατικών φαινομένων που προκαλούν βύθιση τάσης, όπως τα σφάλματα στο δίκτυο. Η απόκριση των Α/Γ κατά τη διάρκεια βυθίσεων τάσης και η δυνατότητα αδιάλειπτης παροχής ισχύος καθίστανται ιδιαίτερα σημαντικές για τη δυναμική ασφάλεια συστημάτων χωρίς διασυνδέσεις. Οι διαταραχές στη συχνότητα του συστήματος και η συνεπαγόμενη απόρριψη φορτίου καθορίζονται σε μεγάλο βαθμό από το κατά πόσον η αιολική παραγωγή είναι σε θέση να παραμείνει συνδεδεμένη κατά τη διάρκεια τέτοιων σφαλμάτων. Πρέπει να σημειωθεί ότι εκτός από τη σημασία που έχει η τεχνολογία Α/Γ, υπάρχουν μια σειρά από παραμέτρους, όπως η αδράνεια του συστήματος, ο τύπος των συμβατικών μονάδων, η κατανομή της παραγωγής, το σύστημα προστασίας που είναι καθοριστικά για την απόκριση μεγεθών του συστήματος, δηλ. της τάσης και της συχνότητας. Ειδικότερα ο ρυθμός ανάληψης ισχύος από τις συμβατικές μονάδες και το ποσό απορριπτόμενης αιολικής παραγωγής – όταν δεν υπάρχει δυνατότητα αδιάλειπτης παροχής ισχύος – καθορίζουν το μέγεθος του απορριπτόμενου φορτίου.

Όπως προκύπτει από την ανάλυση των παραπάνω αποτελεσμάτων, σε μη διασυνδεδεμένα ΣΗΕ η απόρριψη φορτίου, που προκύπτει από σφάλματα στο δίκτυο, ενδέχεται να λάβει μη αποδεκτές τιμές, στην περίπτωση που τα Α/Π δεν έχουν τη δυνατότητα αδιάλλειπτης παροχής ισχύος. Ο βασικός λόγος για αυτό είναι η απώλεια παραγωγής που προκύπτει κατά την αποσύνδεση των Α/Γ για λόγους προστασίας του εξοπλισμού τους. Η αυξημένη αιολική διείδυση δεν περιορίζει μόνο τη δυνατότητα ανάληψης ισχύος των θερμικών σταθμών αλλά και την αδράνεια του συστήματος. Η τελευταία καθορίζει και το ρυθμό μεταβολής της συχνότητας.

Στο τρίτο βήμα της προσέγγισης μελετάται η συμβολή των Α/Π στη ρύθμιση συχνότητας του ΣΗΕ. Στα μη διασυνδεδεμένα ΣΗΕ η περιορισμένη αδράνεια καθίσταται κρίσιμη παράμετρος λειτουργίας, ιδιαίτερα σε συνθήκες αυξημένης αιολικής διείδυσης, οπότε Α/Π τείνουν να αντικαθιστούν συμβατικές μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Σε τέτοιες συνθήκες καθίσταται απαραίτητη η παροχή πρόσθετων υπηρεσιών στήριξης του δικτύου από τα Α/Π, γεγονός που αντικατοπτρίζεται σε αρκετούς σύγχρονους κώδικες δικτύων.

Κατά τη διάρκεια της παρούσας διατριβής αναπτύχθηκε ελεγκτής συχνότητας για Α/Γ μεταβλητών στροφών – Τύπου Γ και Δ . Δύο διαφορετικοί μέθοδοι παροχής εφεδρείας ισχύος, τύπου *balance* και *delta*, εφαρμόστηκαν στο σύστημα ελέγχου των Α/Γ. Η απόκριση των Α/Γ σε μεταβατικές διαταραχές της συχνότητας του συστήματος ενισχύθηκε μέσω τριών μεθόδων ελέγχου συχνότητας, τον έλεγχο αδρανειακής απόκρισης, τον έλεγχο στατισμού και το συνδυασμένο έλεγχο. Ο τελευταίος εξασφαλίζει τα βέλτιστα αποτελέσματα, βελτιώνοντας τόσο τη μεταβατική απόκριση συχνότητας όσο και το μόνιμο σφάλμα συχνότητας. Αυξημένες τιμές του κέρδους του ελεγκτή αδρανειακής απόκρισης καθυστερούν τη μεταβατική απόκριση συχνότητας, περιορίζοντας την καταπόνηση στην οποία υπόκεινται οι συμβατικές μονάδες κατά τη διάρκεια διαταραχών στο ισοζύγιο ενεργού ισχύος του συστήματος. Για μεγάλες τιμές του κέρδους του ελεγκτή η καθυστέρηση στο σύστημα που μελετήθηκε, αυτό της Ρόδου, αποδείχθηκε ιδιαίτερα αυξημένη. Το όριο στη συμβολή της αδρανειακής απόκρισης τίθεται από την ονομαστική ισχύ της Α/Γ ή τη μέγιστη επιτρεπόμενη ισχύ εξόδου (στην περίπτωση που αυτή είναι μεγαλύτερη από την ονομαστική), ενώ στην περίπτωση του ελέγχου στατισμού το αντίστοιχο όριο καθορίζεται από τη διαθέσιμη ενεργό ισχύ της Α/Γ. Σε συνθήκες αυξημένης αιολικής διείδυσης, ο έλεγχος στατισμού καθίσταται απαραίτητος καθώς η πρωτεύουσα εφεδρεία εκ μέρους των συμβατικών μονάδων περιορίζεται σημαντικά. Με εφαρμογή του συνδυασμένου ελέγχου συχνότητας στις Α/Γ μεταβλητών στροφών Τύπου Γ και Δ , πρωτεύουσα εφεδρεία 10 % της διαθέσιμης ενεργού ισχύος εξασφαλίζει τη στήριξη της συχνότητας του συστήματος αποφεύγοντας παράλληλα αυξημένες απώλειες ενέργειας για τα Α/Π. Ομοίως κατά τη διάρκεια έντονων διακυμάνσεων ανέμου που προκαλούν αντίστοιχες σημαντικές διακυμάνσεις συχνότητας, εφεδρεία 10 %, είτε τύπου *balance* είτε *delta*, εξασφαλίζουν ικανοποιητική συμβολή στη ρύθμιση της συχνότητας χωρίς οι απώλειες ενέργειας για τα Α/Π να καθίστανται απαγορευτικές. Για επίπεδα εφεδρείας υψηλότερα του 10%, η σχετική βελτίωση στη διακύμανση της συχνότητας δεν αρκεί για να δικαιολογήσει τις αυξημένες απώλειες ενέργειας που υπερβαίνουν το 10% της διαθέσιμης ενεργού ισχύος.

Η ανάλυση που παρουσιάστηκε στη διατριβή ενδεικνύει ότι ο κανόνας του 30 % για τη διείδυση σε μη διασυνδεδεμένα ΣΗΕ που εφαρμόζεται εν γένει ακόμα και σήμερα, μπορεί να επεκταθεί περαιτέρω όταν τα Α/Π που εγκαθίστανται είναι εφοδιασμένα με έλεγχο συχνότητας και δυνατότητα παροχής εφεδρείας ενεργού ισχύος. Αν και τα ποσοτικά αποτελέσματα που παρουσιάζονται για το ΣΗΕ της Ρόδου όσον αφορά τα επίπεδα εφεδρείας, τις απώλειες ενέργειας και τις διακυμάνσεις συχνότητας καθορίζονται σε μεγάλο βαθμό από τα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά του συστήματος υπό διερεύνηση, η μεθοδολογία που ακολουθείται και παρουσιάζεται μπορεί να εφαρμοστεί γενικότερα σε μη διασυνδεδεμένα ΣΗΕ με στόχο τον καθορισμό των εφεδρειών που απαιτούνται από τα Α/Π. Οι οικονομικές απώλειες για τα Α/Π που συνεπάγονται από τις απώλειες ενέργειας κατά τη διάρκεια της λειτουργίας σε εφεδρεία μπορούν με τον τρόπο αυτό να προσεγγισθούν και να αντισταθμιστούν, αν αυτό κριθεί απαραίτητο, από το διαχειριστή του συστήματος. Η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε λαμβάνει υπ' όψιν τόσο μεταβατικές καταστάσεις όσο και την κανονική λειτουργία σε συνθήκες διείδυσης που ξεπερνούν το 50%. Είναι επομένως δυνατό με την ανάλυση αυτή να καθοριστεί από το διαχειριστή του συστήματος κώδικας που να καθορίζει συγκεκριμένες απαιτήσεις όσον αφορά τη συμβολή των Α/Π στη ρύθμιση συχνότητας.

Α/Γ μεταβλητών στροφών που διαθέτουν το σύστημα ελέγχου που αναπτύχθηκε στην παρούσα διατριβή μπορούν να ικανοποιήσουν τους ολοένα αυξανόμενους περιορισμούς που θέτουν οι διαχειριστές των συστημάτων όσον αφορά στη λειτουργία τους τόσο κατά τη διάρκεια κανονικής λειτουργίας (διακυμάνσεις στην αιολική παραγωγή λόγω διακυμάνσεων στην ταχύτητα ανέμου) όσο και κατά τη διάρκεια σφαλμάτων στο δίκτυο και μπορούν επιπροσθέτως να συμβάλλουν στη δυναμική ασφάλεια των ΣΗΕ. Κατά τη διάρκεια της παρούσας διατριβής σχεδιάστηκαν, εφαρμόστηκαν και δοκιμάστηκαν μέσω προσομοιώσεων σχήματα ελέγχου που επιτρέπουν στις Α/Γ μεταβλητών στροφών να συμμετέχουν πλέον ως ενεργές συνιστώσες στον έλεγχο των ΣΗΕ. Επομένως οι περιορισμοί αιολικής διείσδυσης, που συνδέονται με τα ζητήματα τεχνικής φύσης που παρουσιάστηκαν σε αυτήν τη διατριβή, μπορούν να αναθεωρηθούν.

10.2. Συμβολή

Η συμβολή της διατριβής συνοψίζεται στα εξής:

- Ανάπτυξη μοντέλων ανεμογεννητριών σταθερών και μεταβλητών στροφών για μελέτες δυναμικής ευστάθειας. Αναπτύχθηκαν μοντέλα για ανεμογεννήτριες *Τύπου Α* (σταθερών στροφών με ασύγχρονη γεννήτρια), *Τύπου Γ* (ανεμογεννήτρια μεταβλητών στροφών με ασύγχρονη γεννήτρια τυλιγμένου δρομέα διπλής τροφοδότησης) και δύο παραλλαγές *Τύπου Δ* (ανεμογεννήτρια μεταβλητών στροφών με σύγχρονη γεννήτρια και πλήρη μετατροπέα, ηλεκτρικής διέγερσης – *Τύπου Δ1* – ή μονίμων μαγνητών – *Τύπου Δ2*).
- Ανάπτυξη και σύγκριση τριών μεθόδων ελέγχου για τις ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών με σύγχρονη γεννήτρια ηλεκτρικής διέγερσης (*Τύπου Δ1*) ώστε να αναδειχθούν και να αξιολογηθούν διαφορές στην απόκριση κατά τη διάρκεια απότομων μεταβολών στη λειτουργία του συστήματος. Ο έλεγχος ισχύος, η ρύθμιση τερματικής τάσης της σύγχρονης γεννήτριας και της DC τάσης υλοποιήθηκαν και δοκιμάστηκαν με προσομοιώσεις για στοχαστικές σειρές ταχύτητας ανέμου.
- Εισαγωγή πρόσθετων βρόχων ελέγχου στις ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών (*Τύπου Γ* και *Δ*) ώστε να συμβαδίζουν με τις βασικές προδιαγραφές που προβλέπουν οι σύγχρονοι κώδικες δικτύου – αδιάλλειπτη παροχή ισχύος κατά τη διάρκεια βυθίσεων τάσης, στήριξη τάσης και παροχή αέργου ισχύος κατά τη διάρκεια σφαλμάτων στο δίκτυο και συμβολή στην πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας.
- Θεωρητική ανάλυση του ρεύματος βραχυκύκλωσης σε ανεμογεννήτρια μεταβλητών στροφών ασύγχρονης γεννήτριας διπλής τροφοδότησης και προσέγγιση των ασφαλών τιμών για την αντίσταση της ενεργούς διάταξης βραχυκύκλωσης δρομέα (*active crowbar*). Στο ίδιο πλαίσιο έγινε διερεύνηση της επίδρασης της τιμής της αντίστασης στην απόκριση της ανεμογεννήτριας κατά τη διάρκεια βραχυκυκλωμάτων και ανάδειξη των ορίων εφαρμογής μοντέλων 3^{ης} τάξης για τη λεπτομερή μελέτη του συστήματος προστασίας της ανεμογεννήτριας.
- Ανάπτυξη πλατφόρμας προσομοίωσης ΣΗΕ στο λογισμικό Power Factory (DIgSilent) που περιλαμβάνει δυναμικά μοντέλα τριών τύπων συμβατικών μονάδων παραγωγής (αεριοστροβίλους, ατμοστροβίλους και νηζελογεννήτριες) και μοντέλα αιολικών πάρκων με ανεμογεννήτριες *Τύπου Α*, *Γ* και *Δ*. Ανάπτυξη σεναρίων διείσδυσης και διερεύνηση της λειτουργίας των αιολικών πάρκων με εφαρμογή σε διασυνδεδεμένο σύστημα (απλουστευμένο σύστημα μεταφοράς Δανίας – Energinet.dk) και σε νησιωτικό σύστημα (σύστημα Ρόδου).
- Διερεύνηση και εφαρμογή μεθοδολογίας προσέγγισης της δυναμικής ασφάλειας ΣΗΕ με αυξημένη αιολική διείσδυση που περιλαμβάνει τρία πεδία ανάλυσης – τη μελέτη διακυμάνσεων ισχύος και συχνότητας που οφείλονται σε διακυμάνσεις της ταχύτητας ανέμου, λαμβάνοντας υπ' όψιν τη συσχέτιση μεταξύ των ταχυτήτων ανέμου στις τοποθεσίες εγκατάστασης αιολικών πάρκων στο σύστημα – τη μελέτη δυναμικής απόκρισης ανεμογεννητριών σταθερών και μεταβλητών στροφών κατά τη διάρκεια βραχυκυκλωμάτων στο δίκτυο, με ανάδειξη της σημασίας της δυνατότητας αδιάλλειπτης παροχής ισχύος στις

ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών για την αποφυγή σημαντικών απορρίψεων φορτίου, και – τη μελέτη δυνατότητας παροχής εφεδρείας ενεργού ισχύος εκ μέρους των αιολικών πάρκων με ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών καθώς και συμβολής στην πρωτεύουσα ρύθμιση κατά τη διάρκεια μεταβατικών στο ισοζύγιο ενεργού ισχύος του συστήματος.

- Σχεδίαση συστήματος ελέγχου αιολικού πάρκου με ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών που εξασφαλίζει τη συμβολή στην πρωτεύουσα ρύθμιση ανεξαρτήτως του τύπου των ανεμογεννητριών (Τύπου Γ ή Δ). Διερεύνηση της λειτουργίας του ελεγκτή στο επίπεδο του αιολικού πάρκου κατά τη διάρκεια παροχής εφεδρείας ενεργού ισχύος, τύπου *balance* ή *delta*, ή κατά τη διάρκεια συμβολής στη ρύθμιση συχνότητας. Παρουσίαση της λειτουργίας του ελεγκτή σε αναλυτικό μοντέλο που περιλαμβάνει τρεις επιμέρους ανεμογεννήτριες.
- Διερεύνηση της δυνατότητας παροχής εφεδρείας ενεργού ισχύος από αιολικά πάρκα με ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών και εισαγωγή περιοριστή ρυθμού μεταβολής ενεργού ισχύος του αιολικού πάρκου με όρια που μπορούν να καθοριστούν από το διαχειριστή του συστήματος.
- Ανάπτυξη συστήματος ελέγχου συχνότητας για ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών που περιλαμβάνει ελεγκτή αδρανειακής απόκρισης (εικονική αδράνεια), ελεγκτή στατισμού και συνδυασμό αυτών των δύο. Ανάδειξη της σημασίας της αδρανειακής απόκρισης ως βραχυπρόθεσμη συμβολή ταχείας απόκρισης σε μεταβατικά φαινόμενα συχνότητας και του ελέγχου στατισμού για τη συμβολή στη μόνιμη ρύθμιση συχνότητας. Αναζήτηση ορίων για τη συμβολή των επιμέρους μεθόδων στον έλεγχο συχνότητας του συστήματος.
- Θεωρητική μελέτη της αδρανειακής απόκρισης ανεμογεννητριών μεταβλητών στροφών με ενσωματωμένο ελεγκτή συχνότητας και διερεύνηση της δυνατότητας αναλυτικού υπολογισμού του κέρδους του ελεγκτή εικονικής αδράνειας ώστε να καταστεί δυνατή η αντικατάσταση συμβατικών μονάδων χωρίς σημαντική επίδραση στην αδράνεια του συστήματος. Σύγκριση και επεξεργασία των αποτελεσμάτων απόκρισης των ανεμογεννητριών μεταβλητών στροφών ανάλογα με την περιοχή λειτουργίας τους και τροποποίηση του βασικού ελεγκτή εικονικής αδράνειας με στόχο τη βελτίωση της απόκρισης κατά τη διάρκεια λειτουργίας στις μεσαίες ταχύτητες ανέμου.
- Παραμετροποίηση του ελεγκτή συχνότητας (εικονικής αδράνειας, στατισμού ή συνδυασμένου ελέγχου) με δοκιμές σε σύστημα περιορισμένης αδράνειας (σύστημα Ρόδου). Μελέτη της απόκρισης αιολικών πάρκων με δυνατότητα ελέγχου συχνότητας σε μεταβατικά φαινόμενα συχνότητας αλλά και κατά τη διάρκεια διακυμάνσεων στην ταχύτητα ανέμου. Διερεύνηση επιπέδου εφεδρείας ενεργού ισχύος εκ μέρους των αιολικών πάρκων που εξασφαλίζει ικανοποιητική στήριξη συχνότητας λαμβάνοντας υπ' όψιν τις συνεπαγόμενες απώλειες ενέργειας για την αιολική παραγωγή.

10.3. Προοπτικές

Όπως κάθε ερευνητική εργασία, έτσι και η παρούσα διατριβή δεν μπορεί να συμπεριλάβει και να αναλύσει ενδελεχώς το σύνολο των ερωτημάτων και τεχνικών προβλημάτων που συνδέονται με την αυξανόμενη αιολική διείσδυση στα σύγχρονα ΣΗΕ. Η αλληλεπίδραση αιολικών μονάδων παραγωγής με τα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας θα πρέπει να μελετηθεί διεξοδικά και σε συνδυασμό με κρίσιμα ερωτήματα που δεν έχουν προσεγγιστεί εδώ. Ενδεικτικά θα μπορούσαμε να αναφέρουμε την ανάγκη να υπάρξει ένας συνδυασμός των μοντέλων πρόβλεψης αιολικής παραγωγής με τα δυναμικά μοντέλα των Α/Γ που παρουσιάστηκαν εδώ, ώστε να διερευνηθεί η δυνατότητα συμβολής των Α/Π στη ρύθμιση συχνότητας με βάση τα δεδομένα των μοντέλων πρόβλεψης. Επιπλέον τα αποτελέσματα από έναν τέτοιο συνδυασμό θα μπορούσαν να συγκριθούν με μετρήσεις και δεδομένα από πραγματικά Α/Π ώστε να επικυρωθούν τα μοντέλα που αναπτύχθηκαν, τόσο για την πρόβλεψη όσο και για τους διάφορους τύπους Α/Γ. Η ανάλυση πρόσθετων δυναμικών φαινομένων, όπως τα ασύμμετρα σφάλματα, θα μπορούσε επίσης να αποτελεί μια συνέχεια της παρούσας εργασίας ενώ η ανάγκη να γίνουν αναλύσεις για επίπεδα διείσδυσης πολύ παραπάνω από αυτά που προσεγγίστηκαν εδώ κρίνεται επίσης σημαντική. Τέλος ένα πεδίο που θα αποτελούσε σημαντικό εργαλείο για την κατανόηση των φαινομένων είναι σίγουρα η ανάλυση ευστάθειας τάσης και γωνίας (μικρών και

μεγάλων διαταραχών) για ΣΗΕ κάτω από τις νέες συνθήκες ανάπτυξής τους, όπου αιολικές μονάδες παραγωγής αντικαθιστούν συμβατικές μονάδες. Τέλος, η αναλυτική διερεύνηση της δυνατότητας συμβολής των ανεμογεννητριών στην πρωτεύουσα αλλά και δευτερεύουσα ρύθμιση συχνότητας λαμβάνοντας υπ' όψιν περιορισμούς μηχανικής καταπόνησης των ανεμογεννητριών κρίνεται ιδιαίτερα σημαντική και επείγουσα. Οι τάσεις στη σύγχρονη βιομηχανία συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας ενδεικνύουν ότι η αιολική ενέργεια θα αποτελέσει σημαντικό, αν όχι ίσως το σημαντικότερο πύλώνα αξιοποίησης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, γεγονός που απαιτεί τη συνεχή βελτίωση της αιολικής τεχνολογίας αλλά και αναθεώρηση των κωδίκων δικτύου.

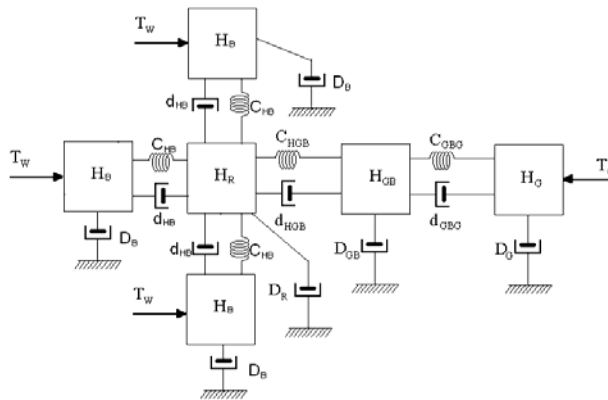
Παράρτημα

Στο παρόν παράρτημα αναλύονται συμπληρωματικές πληροφορίες της διατριβής. Περιγράφονται κατά σειρά οι εξισώσεις μηχανικού συστήματος μετάδοσης της κίνησης N στρεφόμενων μαζών, οι μετασχηματισμοί σε στρεφόμενα πλαίσια αναφοράς και η χρησιμότητά τους, το ανά μονάδα σύστημα για abc , dc και $dq0$ ποσότητες, μια εναλλακτική μέθοδος ελέγχου για μετατροπέα συνδεδεμένο στο δίκτυο, το γενικό μοντέλο συστήματος μεταφοράς που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα διατριβή, οι τεχνικές συγκεντρωτικών μοντέλων που εφαρμόστηκαν κατά τη μοντελοποίηση Α/Π και μια γενική επισκόπηση των λογισμικών που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια της εργασίας.

III. Προσομοίωση του μηχανικού συστήματος μετάδοσης της κίνησης

Στην παρούσα παράγραφο περιγράφεται η μοντελοποίηση του μηχανικού συστήματος μιας ανεμογεννήτριας χωρίς να αναλύονται οι ρυθμοί ταλάντωσης αφού αυτό δεν εμπίπτει στο αντικείμενο της παρούσας διατριβής.

Στις ανεμογεννήτριες γίνεται χρήση ελαστικών αξόνων για την μείωση της καταπόνησης του μηχανικού μέρους και της μεταβλητότητας της παραγόμενης ισχύος. Η ελαστικότητα του συστήματος μετάδοσης της κίνησης σε συνδυασμό με την μεγάλη αδράνεια του δρομέα και το σχετικά πλούσιο φασματικό περιεχόμενο του ανέμου οδηγούν στην εμφάνιση στρεπτικών ταλαντώσεων, οι οποίες δεν μπορούν να αγνοηθούν κατά την προσομοίωση του συστήματος. Για την αναπαράσταση των στρεπτικών χαρακτηριστικών του συστήματος μετάδοσης της κίνησης χρησιμοποιείται η κλασική μέθοδος μοντελοποίησης των ελαστικά συνδεδεμένων στρεφόμενων μαζών. Τα επικρατέστερα μοντέλα για το μηχανικό σύστημα μιας ανεμογεννήτριας είναι των τριών και των έξι στρεφόμενων μαζών. Στην δεύτερη περίπτωση αυξάνει η πολυπλοκότητα του μοντέλου αλλά και η ακρίβεια αναπαράστασης της πραγματικότητας. Το χρησιμοποιούμενο μοντέλο για το μηχανικό σύστημα διαθέτει δυο στρεφόμενες μάζες ώστε να μπορεί να παρασταθεί η ταλάντωση λόγω της ελαστικότητας του άξονα χαμηλών στροφών.



Σχήμα III. Μοντέλο έξι μαζών, [ΠΑΠ97]

Το μοντέλο έξι στρεφόμενων μαζών αναπαριστάται στο Σχήμα III. Το ισοδύναμο μοντέλο των 6 μαζών διαφέρει από αυτό των τριών μαζών στο ότι τα πτερύγια θεωρούνται ανεξάρτητες αδράνειας ελαστικά συνδεδεμένες στην πλήμνη. Οι υπόλοιπες τρεις μάζες αναπαριστούν την πλήμνη, το κιβώτιο ταχυτήτων και τον δρομέα της γεννήτριας. Με αυτή την θεώρηση είναι δυνατόν να δρουν σε κάθε πτερύγιο διαφορετικές αεροδυναμικές ροπές οι οποίες εξαρτώνται από τις ανά πτερύγιο ισοδύναμες ταχύτητες του ανέμου. Η χρήση διαφορετικής ταχύτητας ανέμου ανά πτερύγιο επιτρέπει την ακριβέστερη και πιο ρεαλιστική αναπαράσταση του φαινομένου της σκίασης του πύργου και της αλλαγής της ταχύτητας του ανέμου με το ύψος. Για λόγους απλότητας κάθε ισοδύναμη αδράνεια μπορεί να αναπαριστά τις αδράνειας περισσοτέρων του ενός στοιχείων του μηχανικού συστήματος ενώ τα στοιχεία ελαστικότητας πρακτικά κυριαρχούνται από τις ελαστικότητες των συνδέσμων.

Για την γραφή των εξισώσεων κατάστασης N στρεφομένων ελαστικά συνδεδεμένων μαζών υπάρχουν δυο διαφορετικές μεθοδολογίες, [ΠΑΠ97]. Σύμφωνα με τον πρώτο τρόπο γραφής ως μεταβλητές κατάστασης θεωρούνται οι γωνιακές θέσεις και ταχύτητες των μαζών ενώ κατά τον δεύτερο τρόπο γραφής ως μεταβλητές κατάστασης θεωρούνται οι γωνιακές ταχύτητες και οι ροπές ελαστικότητας. Στην συνέχεια περιγράφονται οι δυο τρόποι γραφής των εξισώσεων της κίνησης N μαζών ελαστικά συνδεδεμένων μεταξύ τους. Ξεκινώντας από την εξίσωση κινήσεως κάθε μάζας ξεχωριστά, καταλήγουμε στην εξίσωση κίνησης σε μητρική μορφή:

$$2H\ddot{\theta}_m + D\dot{\theta}_m + C\theta_m = T \quad (\text{Π1})$$

όπου

$$\theta_m = [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_N]^T, \text{ το } N \times 1 \text{ διάνυσμα των γωνιακών θέσεων των σωμάτων}$$

$$\omega = [\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_N]^T, \text{ το } N \times 1 \text{ διάνυσμα των γωνιακών θέσεων των σωμάτων}$$

$$T = [T_1, T_2, \dots, T_N]^T, \text{ το } N \times 1 \text{ διάνυσμα των εξωτερικών ροπών των σωμάτων}$$

$$H = \begin{bmatrix} H_1 & & \\ & O & \\ & & H_N \end{bmatrix}, \text{ ο διαγώνιος } N \times N \text{ πίνακας των σταθερών αδράνειας}$$

$$D = \begin{bmatrix} \cdot & & & \\ & \cdot & D_{i-1,i} & \\ & & D_{i,i} & \\ & & D_{i+1,i} & \cdot \\ & & & & \cdot \end{bmatrix}, \text{ ο } N \times N \text{ τρι-διαγώνιος πίνακας απόσβεσης με διαγώνια στοιχεία το άθροισμα των στοιχείων απόσβεσης που καταλήγουν στην αντίστοιχη αδράνεια και μη διαγώνια στοιχεία (i,j) το αντίθετο του στοιχείου απόσβεσης μεταξύ των αδρανειών i και j}$$

$$C = \begin{bmatrix} \cdot & & & \\ & \cdot & C_{i-1,i} & \\ & & C_{i,i} & \\ & & C_{i+1,i} & \cdot \\ & & & & \cdot \end{bmatrix}, \text{ ο } N \times N \text{ τρι-διαγώνιος πίνακας δυσκαμψίας με διαγώνια στοιχεία το άθροισμα των στοιχείων δυσκαμψίας που καταλήγουν στην αντίστοιχη αδράνεια και μη διαγώνια στοιχεία (i,j) το αντίθετο του στοιχείου δυσκαμψίας μεταξύ των αδρανειών i και j}$$

Για την περίπτωση συστήματος τριών μαζών οι προηγούμενοι πίνακες γίνονται:

$$\theta_m = [\theta_R, \theta_{GB}, \theta_G], \quad \omega = [\omega_R, \omega_{GB}, \omega_G], \quad H = \begin{bmatrix} H_R & 0 & 0 \\ 0 & H_{GB} & 0 \\ 0 & 0 & H_G \end{bmatrix},$$

$$D = \begin{bmatrix} D_R + d_{HGB} & -d_{HGB} & 0 \\ -d_{HGB} & D_{GB} + d_{HGB} + d_{GBG} & -d_{GBG} \\ 0 & -d_{GBG} & D_G + d_{GBG} \end{bmatrix}, \quad C = \begin{bmatrix} C_{HGB} & -C_{HGB} & 0 \\ -C_{HGB} & C_{HGB} + C_{GBG} & -C_{GBG} \\ 0 & -C_{GBG} & C_{GBG} \end{bmatrix}$$

Επιλέγοντας ως διάνυσμα κατάστασης τις γωνίες και τις γωνιακές ταχύτητες περιστροφής των σωμάτων η εξίσωση (Π1) χωρίζεται στις επόμενες εξισώσεις οι οποίες στην συνέχεια κατάλληλα διαμορφωμένες δίνουν το μοντέλο του μηχανικού συστήματος στον χώρο κατάστασης:

$$\left. \begin{aligned} \dot{\theta}_m &= \omega \\ \ddot{\theta}_m &= \frac{1}{2} H^{-1} (-C\theta - D\dot{\theta} + T) \end{aligned} \right\} \Leftrightarrow$$

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \theta \\ \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0(N \times N) & I(N \times N) \\ -\frac{1}{2}H^{-1}C & -\frac{1}{2}H^{-1}D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta \\ \omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0(N \times N) \\ \frac{1}{2}H^{-1} \end{bmatrix} T \quad (\text{Π2})$$

όπου

$0(N \times N)$, ο μηδενικός $N \times N$ πίνακας

$I(N \times N)$, ο μοναδιαίος $N \times N$ πίνακας

ενώ επιλέγοντας σαν διάνυσμα κατάστασης τις ροπές ελαστικότητας και τις γωνίες των σωμάτων το μοντέλο του μηχανικού συστήματος είναι αυτό της (Π3). Τα επιπλέον υπεισερχόμενα μεγέθη περιγράφονται στην συνέχεια.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \omega \\ T_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2}H^{-1}D & -\frac{1}{2}H^{-1}G \\ K & 0(M \times M) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega \\ T_t \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{2}H^{-1} \\ 0(M \times N) \end{bmatrix} T \quad (\text{Π3})$$

όπου

$G = \begin{bmatrix} C_{HGB} & C_{GBG} \\ H_R \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ H_{GB} \begin{bmatrix} -1 & 1 \\ H_G \begin{bmatrix} 0 & -1 \end{bmatrix} \end{bmatrix} \end{bmatrix}$ ο $N \times M$ πίνακας όπου N ο αριθμός των μαζών και M ο αριθμός των ελαστικοτήτων του οποίου τα στοιχεία είναι μονάδες σε θέσεις που αντιστοιχούν σε σύνδεση ελαστικότητας με μάζα και επιπλέον έχουν θετικό πρόσημο εάν η άλλη μάζα στην οποία συνδέεται το στοιχείο ελαστικότητας, είναι κοντινότερη στον δρομέα της γεννήτριας π.χ για το σύστημα τριών μαζών

$K = \begin{bmatrix} H_R & H_{GB} & H_G \\ C_{HGB} \begin{bmatrix} C_{HGB} & -C_{HGB} & 0 \\ C_{GBG} \begin{bmatrix} 0 & C_{GBG} & -C_{GBG} \end{bmatrix} \end{bmatrix}$, ο $M \times N$ πίνακας του οποίου τα στοιχεία είναι αυτά του ανάστροφου G πολλαπλασιασμένα με την κατάλληλη ελαστικότητα. π.χ για το σύστημα τριών μαζών
 $T_t = [T_{c,R} \ T_{c,GB} \ T_{c,G}]$, $M \times 1$ διάνυσμα των ροπών

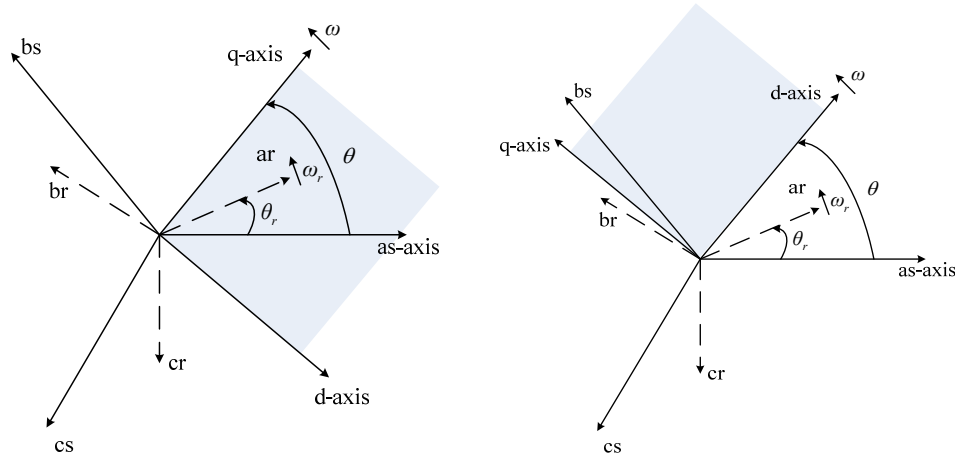
ελαστικότητας για σύστημα τριών μαζών

$0(M \times M)$, Μηδενικοί πίνακες $M \times M$ διάστασης

$0(M \times N)$, Μηδενικοί πίνακες $M \times N$ διάστασης

Π2. Στρεφόμενα Πλαίσια Αναφοράς

Η δυναμική συμπεριφορά των ασύγχρονων μηχανών περιγράφεται από ένα σύστημα διαφορικών εξισώσεων εξαρτώμενων από την ταχύτητα περιστροφής του δρομέα η οποία μεταβάλλεται συνεχώς με το χρόνο π.χ. οι αλληλεπαγωγές μεταβάλλονται με την σχετική θέση των τυλιγμάτων η οποία μεταβάλλεται με τον χρόνο. Συχνά είναι χρήσιμο να γίνεται αλλαγή μεταβλητών για την μείωση της πολυπλοκότητας αυτών των διαφορικών εξισώσεων (επίτευξη σταθερών αλληλεπαγωγών με τον χρόνο). Ένας τέτοιος μετασχηματισμός ανάγει τις μεταβλητές της μηχανής σε ένα στρεφόμενο πλαίσιο αναφοράς. Η χρήση αυτών των μετασχηματισμών ενδείκνυται κατά την προσομοίωση-ανάλυση συστημάτων ή π.χ. όταν προσομοιώνονται συστήματα έλεγχου, που γενικά αποτελούν πολύπλοκες διαδικασίες. Στο σχήμα δίνονται οι συμβάσεις γεννήτριας και κινητήρα για ένα $dq0$ μετασχηματισμό.



Σχήμα Π2. Σχέση μεταξύ abc και αυθαίρετου dq πλαισίου-σύμβαση γεννήτριας και σύμβαση κινητήρα αντίστοιχα

Η μέθοδος της αλλαγής μεταβλητών χρησιμοποιείται κυρίως στην ανάλυση των ac μηχανών για την εξάλειψη των χρονικά μεταβαλλόμενων επαγωγών, ωστόσο χρησιμοποιείται επίσης και στην ανάλυση άλλων στοιχείων σταθερών παραμέτρων ενός συστήματος ισχύος. Όλοι οι γνωστοί μετασχηματισμοί εμπεριέχονται στον μετασχηματισμό του αυθαίρετου πλαισίου αναφοράς. Για τις μεταβλητές των ασύγχρονων μηχανών χρησιμοποιείται συνήθως ο μετασχηματισμός στο σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς ενώ για τις σύγχρονες μηχανές είναι σκόπιμο να γίνεται αναγωγή σε πλαίσιο αναφοράς προσαρμοσμένο στον δρομέα.

Η μέθοδος της αλλαγής των 3-φασικών μεταβλητών στο αυθαίρετο πλαίσιο αναφοράς με σύμβαση γεννήτριας, μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$X_{dq0} = T_{abc}^{dq0} X_{abc} \quad (\text{II4})$$

όπου

$$X_{dq0}^T = [X_d \quad X_q \quad X_0], \text{ διάνυσμα μεταβλητών στο αυθαίρετο πλαίσιο αναφοράς}$$

$$X_{abc}^T = [X_a \quad X_b \quad X_c], \text{ διάνυσμα μεταβλητών στο τριφασικό σύστημα}$$

$$T_{abc}^{dq0} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin\theta & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix}, \text{ πίνακας μετασχηματισμού}$$

$$\theta = \int_0^t \omega(t) dt + \theta(0), \text{ γωνία του αυθαίρετου πλαισίου αναφοράς με την φάση a}$$

Ο αντίστροφος μετασχηματισμός περιγράφεται από τον ακόλουθο πίνακα μετασχηματισμού:

$$T_{abc}^{dq0-1} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 1 \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & 1 \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{II5})$$

Το διάνυσμα X μπορεί να περιέχει τάσεις, ρεύματα, πεπλεγμένες ροές κ.τ.λ. Το πλαίσιο αναφοράς μπορεί να περιστρέφεται με οποιαδήποτε σταθερή ή μεταβλητή γωνιακή ταχύτητα ή μπορεί απλά να είναι ακίνητο. Η αυθαιρεσία του μετασχηματισμού προκύπτει από το γεγονός ότι η γωνιακή ταχύτητα του πλαισίου αναφοράς είναι απροσδιόριστη και μπορεί να επιλεγεί έτσι ώστε το προκύπτον σύστημα εξισώσεων να είναι το δυνατόν απλούστερο και βολικότερο στην εφαρμογή του.

Παρά το γεγονός ότι, η συμπεριφορά μιας συμμετρικής ασύγχρονης μηχανής μπορεί να περιγραφεί από οποιοδήποτε πλαίσιο αναφοράς, τρία από αυτά είναι τα συνηθέστερα. Συγκεκριμένα, αυτά είναι το σταθερό πλαίσιο αναφοράς, το πλαίσιο αναφοράς του δρομέα και το σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς. Γενικά οι συνθήκες λειτουργίας καθορίζουν πιο πλαίσιο αναφοράς είναι το καταλληλότερο. Αν, για παράδειγμα, οι τάσεις του στάτη είναι ασύμμετρες ενώ οι τάσεις που εφαρμόζονται στο δρομέα είναι συμμετρικές ή μηδενικές, τότε θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί το σταθερό πλαίσιο αναφοράς. Γενικά, το σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς χρησιμοποιείται για την ανάλυση συμμετρικών συνθηκών και της μεταβατικής και δυναμικής ευστάθειας μεγάλων συστημάτων ισχύος, με ενσωματωμένα τα δυναμικά χαρακτηριστικά των ασύγχρονων κινητήρων/γεννητριών.

Οποιοσδήποτε μετασχηματισμός θα πρέπει να ικανοποιεί το αναλλοίωτο της μεταφερόμενης ισχύος, δηλαδή η συνολική ισχύς εκφρασμένη σε $dq\theta$ μεταβλητές πρέπει να ισούται με τη συνολική ισχύ όπως υπολογίζεται με τις abc μεταβλητές. Η συνολική στιγμιαία ισχύς μπορεί να εκφραστεί σε abc μεταβλητές ως εξής:

$$\mathbf{P}_{abc} = v_a i_a + v_b i_b + v_c i_c \quad (\text{Π6})$$

και χρησιμοποιώντας την εξίσωση (Π4) προκύπτει επίσης για την ισχύ:

$$\mathbf{P}_{qd\theta} = \mathbf{P}_{abc} = \frac{3}{2} (v_q i_q + v_d i_d + 2v_\theta i_\theta) \quad (\text{Π7})$$

Ο συντελεστής $3/2$ που προκύπτει στην εξίσωση (Π7) οφείλεται στην επιλογή της σταθεράς που χρησιμοποιήθηκε κατά το μετασχηματισμό. Παρά το γεγονός ότι οι κυματομορφές των $dq\theta$ τάσεων, ρευμάτων, πεπλεγμένων ροών κ.τ.λ. εξαρτώνται από την γωνιακή ταχύτητα του πλαισίου αναφοράς, η ισχύς είναι ανεξάρτητη του πλαισίου αναφοράς.

Π3. Ανά Μονάδα Σύστημα

ABC και $DQ\theta$ μεταβλητές

Σε πολλές εφαρμογές είναι χρήσιμο οι παράμετροι και οι μεταβλητές της μηχανής να εκφράζονται σε ανά μονάδα τιμές. Επιλέγονται αρχικά η βάση ισχύος και η βάση τάσεως και οι υπόλοιποι παράμετροι και οι μεταβλητές κανονικοποιούνται χρησιμοποιώντας αυτά τα βασικά μεγέθη. Η RMS τιμή της ονομαστικής φασικής ή πολικής τάσης επιλέγεται γενικά ως βάση της τάσης για τις abc μεταβλητές, ενώ η μέγιστη τιμή της επιλέγεται ως βάση τάσεως για τις μεταβλητές $dq\theta$. Εάν π.χ. $V_B(abc)$ είναι η RMS τιμή της φασικής τάσης και αποτελεί την βασική τάση για τις abc ποσότητες, για την βασική τάση των $dq\theta$ μεταβλητών θα ισχύει $V_{B(dq\theta)} = \sqrt{2} V_{B(abc)}$. Η βάση ισχύος δίνεται από τις επόμενες εξισώσεις:

$$S_B = 3 V_{B(abc)} \times I_{B(abc)} \quad (\text{Π8})$$

$$S_B = \frac{3}{2} V_{B(dq\theta)} \times I_{B(dq\theta)} \quad (\text{Π9})$$

Η τιμή βάσης της ροπής της γεννήτριας ορίζεται ως ακολούθως:

$$T_B = \frac{S_B}{(2/P)\omega_b} \quad (\text{Π10})$$

όπου

ω_b , η βασική συχνότητα της μηχανής

P , ο αριθμός των πόλων της γεννήτριας

Αφού επιλεγούν η βασική τάση και ισχύς, η βασική τιμή του ρεύματος μπορεί να προκύψει χρησιμοποιώντας τις προηγούμενες εξισώσεις. Η τιμή βάσης της αντίστασης δίνεται από τους επόμενους τύπους:

$$Z_B = \frac{V_{B(abc)}}{I_{B(abc)}} = \frac{3V_{B(abc)}^2}{S_B} \quad (\text{Π11})$$

$$Z_B = \frac{V_{B(dq0)}}{I_{B(dq0)}} = \left(\frac{3}{2}\right) \frac{V_{B(dq0)}^2}{S_B} \quad (\text{Π12})$$

Για ανεμογεννήτριες με σύστημα μετατροπών ισχύος συνδεδεμένο στο στάτη της γεννήτριας, τα βασικά μεγέθη στην ac πλευρά του μετατροπέα εξόδου ορίζονται ίσα με αυτά του στάτη της γεννήτριας.

DC μεταβλητές

Η βασική ισχύς και αντίσταση στο DC σύστημα δίνονται από τις σχέσεις:

$$S_B = \frac{3}{2} V_{Bdc} I_{Bdc} \quad (\text{Π13})$$

$$Z_{Bdc} = \frac{V_{Bdc}}{I_{Bdc}} = Z_{Babc} \quad (\text{Π14})$$

Ενώ, οι τιμές βάσης της τάσης και του ρεύματος στο dc σύστημα υπολογίζονται από τις επόμενες σχέσεις:

$$V_{Bdc} = \sqrt{2} V_{Babc} \quad (\text{Π15})$$

$$I_{Bdc} = \sqrt{2} I_{Babc} \quad (\text{Π16})$$

Μηχανικό σύστημα

Στην συνέχεια ορίζονται η τιμή βάσης της αδράνειας και η τιμή βάσης του συντελεστή δυσκαμψίας και απόσβεσης.

$$J_B = \frac{S_B}{0.5\omega_B^2}, \text{ βάση αδράνειας} \quad (\text{Π17})$$

$$C_B = \frac{T_B}{\omega_B}, \text{ βάση συντελεστή δυσκαμψίας} \quad (\text{Π18})$$

$$D_B = \frac{T_B}{\omega_B}, \text{ βάση συντελεστή απόσβεσης} \quad (\text{Π19})$$

Η αναγωγή στα βασικά μεγέθη της πλευράς χαμηλών στροφών γίνεται χρησιμοποιώντας τις ακόλουθες σχέσεις:

$$\frac{n^1}{n^2} = \frac{\omega_B^1}{\omega_B^2} = \frac{T_B^2}{T_B^1} = \sqrt{\frac{J_B^2}{J_B^1}} = \sqrt{\frac{C_B^2}{C_B^1}} = \sqrt{\frac{D_B^2}{D_B^1}} \quad (\text{Π20})$$

Οι εκθέτες 1 και 2 αναφέρονται στις πλευρές χαμηλών και υψηλών στροφών, αντίστοιχα.

Π4. Εναλλακτική μέθοδος ελέγχου μετατροπέα στην πλευρά του δικτύου

Η μέθοδος που έχει χρησιμοποιηθεί εκτενώς στη βιβλιογραφία για τον έλεγχο μετατροπών στην πλευρά του δικτύου μονάδων διανεμημένης παραγωγής βασίζεται στις εξής σχέσεις για την ενεργό και άεργο ισχύ στο αμ σύστημα, [ΠΑΠ85][KUN94]:

$$\begin{aligned}
 P &= \frac{U_f U_{gsc}}{X_f} \sin \delta \\
 Q &= \frac{U_f U_{gsc}}{X_f} \cos \delta - \frac{U_{gsc}^2}{X_f} \\
 \delta &= \angle(\tilde{U}_f, \tilde{U}_{gsc}) = \delta_0 + \int_{t=0}^t (\omega_f(t) - \omega_{gsc}(t)) dt
 \end{aligned}
 \tag{Π21}$$

όπου

U_f το μέτρο της θεμελιώδους συνιστώσας της τάσης στην έξοδο του μετατροπέα

U_{gsc} το μέτρο της θεμελιώδους συνιστώσας της τάσης δικτύου (μετά το φίλτρο εξόδου)

X_f η αντίδραση του φίλτρου εξόδου (πολύ μεγαλύτερη από την ωμική αντίσταση R_f του φίλτρου, η οποία και παραλείπεται)

ω_f, ω_{gsc} οι κυκλικές συχνότητες των θεμελιωδών τάσεων εξόδου μετατροπέα και δικτύου αντίστοιχα

δ η διαφορά φάσης των διανυσμάτων των τάσεων (της τάξης λίγων μοιρών)

Για τις τάσεις και το φίλτρο εξόδου ο αναγνώστης παραπέμπεται στην αντίστοιχη ενότητα ανάλυσης του συστήματος ελέγχου της Α/Γ Τύπου Γ. Για μικρές τιμές της γωνίας δ η άεργος ισχύς δίνεται προσεγγιστικά:

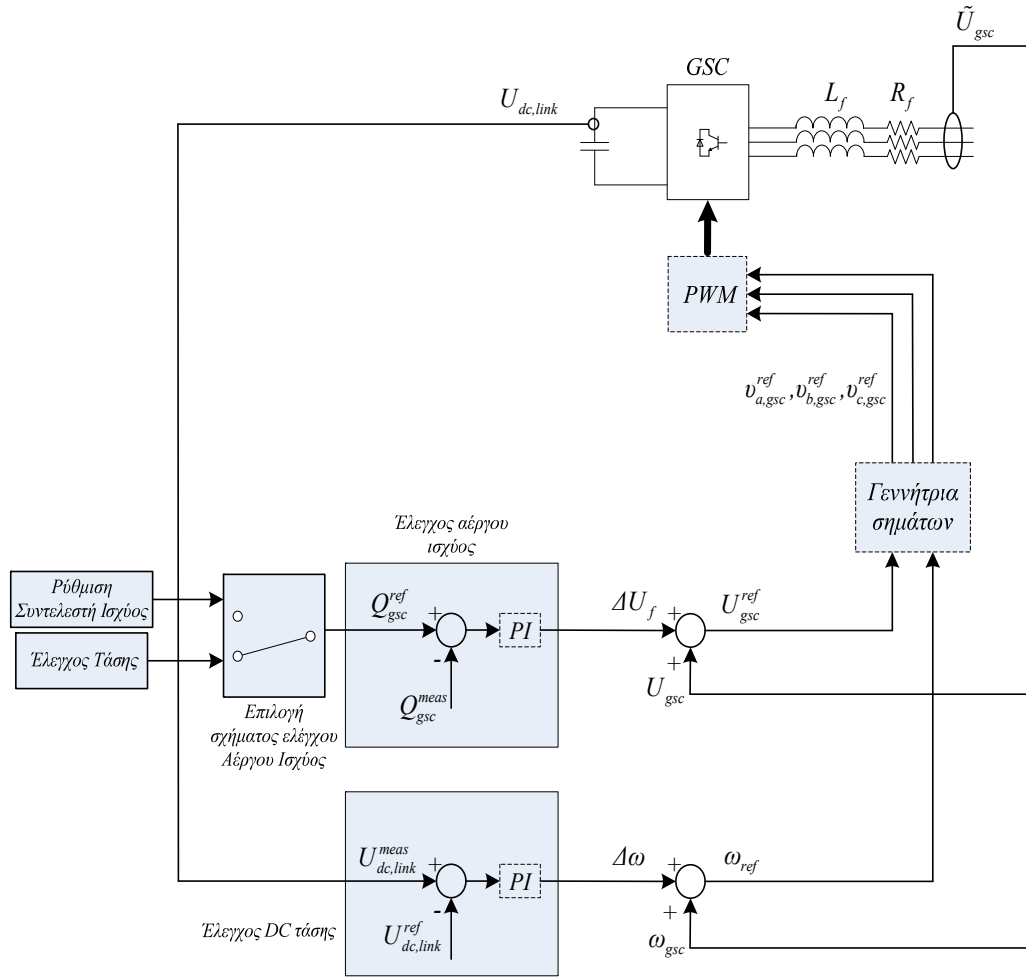
$$Q \approx \frac{U_{gsc} \Delta U_f}{X_f}
 \tag{Π22}$$

όπου

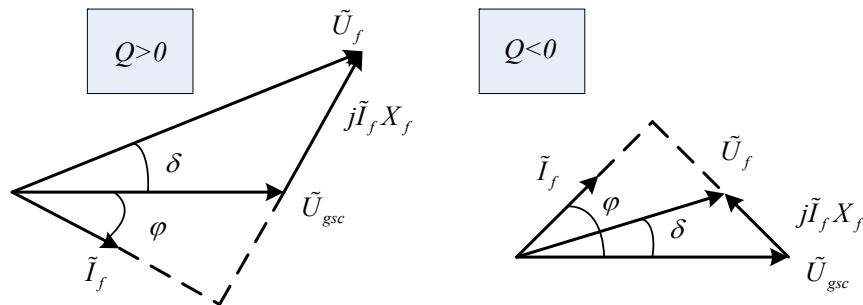
ΔU_f η πτώση τάσης στην αντίδραση του φίλτρου X_f

Επομένως, η ενεργός και άεργος ισχύς ελέγχονται μέσω της γωνίας δ και του μέτρου της πτώσης τάσης στο φίλτρο εξόδου ΔU_f μέσω των δύο βρόχων ελέγχου που απεικονίζονται στο Σχήμα Π3. Οι βρόχοι αυτοί εμφανίζουν ασθενή σύζευξη με την προϋπόθεση ότι η ωμική αντίσταση του φίλτρου εξόδου είναι αρκετά μικρότερη από την επαγωγική αντίδραση. Είσοδος του βρόχου ελέγχου της αέργου ισχύος είναι η τιμή αναφοράς για την άεργο ισχύ, η οποία προκύπτει είτε από το ρυθμιστή συντελεστή ισχύος είτε από βρόχο ελέγχου τάσης δικτύου – στο ζυγό της ανεμογεννήτριας ή στο σημείο κοινής σύνδεσης του αιολικού πάρκου. Η απόκλιση της μετρούμενης αέργου ισχύος από την τιμή αναφοράς είναι είσοδος στον PI ελεγκτή, ο οποίος παράγει το σήμα της επιθυμητής πτώσης τάσης ΔU_f πάνω στο φίλτρο εξόδου. Αντίστοιχα είσοδος στο βρόχο ελέγχου της DC τάσης είναι η τιμή αναφοράς για τη συνεχή τάση και έξοδος του PI ελεγκτή είναι η γωνία δ μεταξύ της τάσης εξόδου του μετατροπέα και της τάσης δικτύου, η οποία καθορίζει τη ροή ενεργού ισχύος από το μετατροπέα προς το δίκτυο.

Σε λειτουργία χωρητικού συντελεστή ισχύος – παραγωγή αέργου ισχύος – από τη σχέση (Π21) προκύπτει ότι πρέπει $U_f \cos \delta - U_{gsc} > 0$, ενώ αντίστοιχα για την περίπτωση μικρής γωνίας δ από την (Π22) προκύπτει $\Delta U_f > 0$. Επομένως στην περίπτωση αυτή πρέπει το μέτρο της τάσης \tilde{U}_f να είναι μεγαλύτερο από το μέτρο της τάσης του δικτύου \tilde{U}_{gsc} , γεγονός που συνεπάγεται ότι απαιτείται και αυξημένη DC τάση. Στην περίπτωση επαγωγικού συντελεστή ισχύος – κατανάλωση αέργου ισχύος – οι συνθήκες για τις τάσεις γίνονται $U_f \cos \delta - U_{gsc} < 0$ και $\Delta U_f < 0$ αντίστοιχα, ενώ το μέτρο της τάσης \tilde{U}_f μπορεί να είναι μικρότερο, ίσο ή μεγαλύτερο από το μέτρο της τάσης του δικτύου \tilde{U}_{gsc} . Τα διανυσματικά διαγράμματα για τις δύο περιπτώσεις λειτουργίας δίνονται στο Σχήμα Π4.



Σχήμα Π3. Δομή ελέγχου μετατροπέα στην πλευρά του δικτύου με ρύθμιση της τάσης εξόδου



Σχήμα Π4. Διανυσματικά διαγράμματα σε περίπτωση χωρητικού και επαγωγικού συντελεστή ισχύος αντίστοιχα

Η σχέση αυτή μεταξύ αέργου ισχύος και τάσεων καθορίζει και τη διαστασιολόγηση της DC τάσης, καθώς η θεμελιώδης συνιστώσα της τάσης \tilde{U}_f εξαρτάται από τη συνεχή τάση. Για σταθερή τιμή DC τάσης, η τάση φασική τάση εξόδου του μετατροπέα \tilde{U}_f έχει μέγιστη τιμή στην περίπτωση τετραγωνικής διαμόρφωσης, [MOH89]:

$$U_f = \frac{4 U_{dc,link}}{\pi \cdot 2} \Rightarrow \quad (Π23)$$

$$U_f^{rms} = \frac{U_f}{\sqrt{2}} = \frac{4}{2\pi\sqrt{2}} U_{dc,link} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} U_{dc,link} = 0.45 \cdot U_{dc,link}$$

Άρα για την περίπτωση χωρητικού συντελεστή ισχύος το κάτω όριο για τη DC τάση προκύπτει ως εξής:

$$U_f^{rms} > U_{gsc}^{rms} \Rightarrow 0.45 U_{dc,link} > U_{gsc}^{rms} \Rightarrow U_{dc,link} > 2.22 \cdot U_{gsc}^{rms} \quad (Π24)$$

Κατά την εφαρμογή ημιτονικής διαμόρφωσης, ο λόγος του σήματος ελέγχου προς το πλάτος του φέροντος σήματος, m_i , που καθορίζει το πλάτος της θεμελιώδους συνιστώσας της τάσης εξόδου του μετατροπέα πρέπει να είναι μικρότερος από 1. Επομένως:

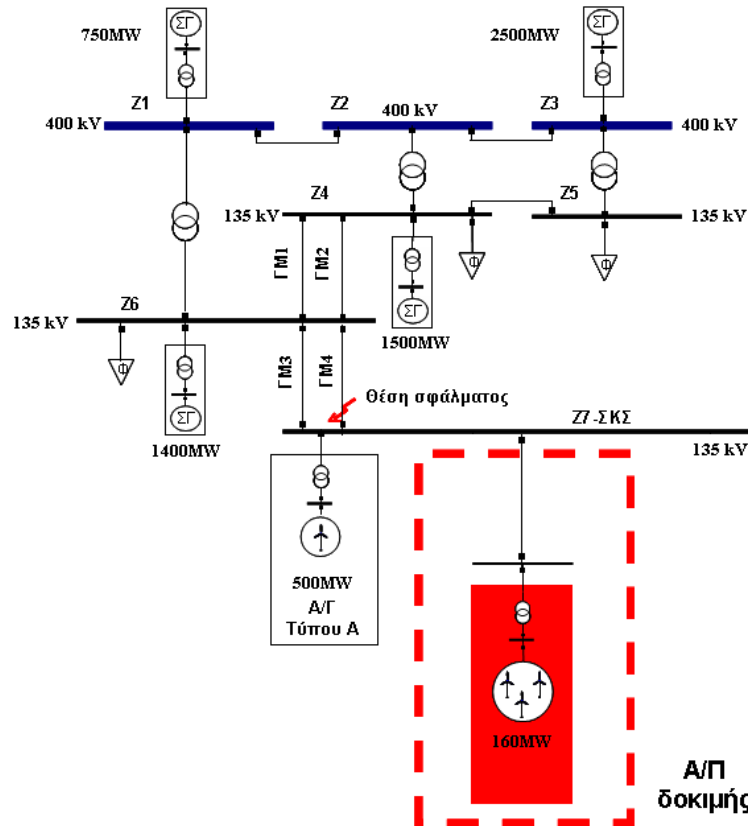
$$m_i < 1 \Rightarrow U_f < \frac{U_{dc,link}}{2} \Rightarrow U_f^{rms} < \frac{U_{dc,link}}{2\sqrt{2}} \quad (Π25)$$

Το αντίστοιχο κάτω όριο για τη DC τάση με χωρητικό συντελεστή ισχύος γίνεται:

$$U_{gsc}^{rms} < U_f^{rms} < \frac{U_{dc,link}}{2\sqrt{2}} \Rightarrow U_{dc,link} > 2\sqrt{2} \cdot U_{gsc}^{rms} \quad (Π26)$$

Π5. Γενικό μοντέλο συστήματος μεταφοράς

Η μελέτη της δυναμικής συμπεριφοράς των Α/Γ και η αλληλεπίδραση τους με τα ΣΗΕ απαιτεί ρεαλιστικά μοντέλα του συστήματος μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, όπου η τάση και η συχνότητα υπόκεινται σε μεταβολές κατά τη διάρκεια διαταραχών στο δίκτυο. Η διάθεση των απαραίτητων στοιχείων από τους διαχειριστές των συστημάτων μεταφοράς είναι συχνά αδύνατη για λόγους εταιρικού απορρήτου. Στην παρούσα διατριβή, οι προσομοιώσεις που αφορούν στον έλεγχο τάσης και τη δυνατότητα αδιάλλειπτου παροχής ισχύος για Α/Γ Τύπου Γ και Δ έγιναν με βάση το μοντέλο που έχει διαθέσει ο διαχειριστής του συστήματος μεταφοράς της Δανίας *Energinet.dk* για ερευνητικές και εκπαιδευτικές εργασίες. Το μοντέλο έχει αναπτυχθεί στο λογισμικό Power Factory και μια απλοποιημένη έκδοσή του δίνεται στο παρακάτω σχήμα. Λεπτομέρειες για το σύστημα δίνονται στα [AKH06a][AKH06b].



Σχήμα Π5. Απλοποιημένο μοντέλο συστήματος μεταφοράς Δανίας

Το σύστημα περιλαμβάνει ζυγούς τάσης 0.7 έως 400 kV, τέσσερις συμβατικούς σταθμούς παραγωγής, φορτία κατανάλωσης και ισοδύναμο μοντέλο για ένα Α/Π με Α/Γ Τύπου Α συνολικής ισχύος εγκατεστημένης ισχύος 500 MW. Οι Α/Γ του πάρκου αυτού λειτουργούν στο 60% της ονομαστικής τους ισχύος ενώ στο αρχικό μοντέλο περιλαμβάνεται και στατός αντισταθμιστής αέργου ισχύος (SVC) - σύστημα στήριξης της τάσης στο ΣΚΣ των αιολικών πάρκων. Στις μελέτες που παρουσιάζονται στη διατριβή το σύστημα αυτό έχει τεθεί εκτός λειτουργίας ώστε να διερευνηθεί η δυνατότητα παροχής αέργου ισχύος και στήριξης τάσης από τις Α/Γ Τύπου Γ ή Δ. Οι κεντρικοί σταθμοί παραγωγής περιλαμβάνουν σύγχρονες γεννήτριες με πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας. Το σύστημα έχει επεκταθεί με την εισαγωγή Α/Π 160 MW που αποτελείται από Α/Γ Τύπου Γ είτε Δ για τις μελέτες που γίνονται στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής. Στο παραπάνω σχήμα απεικονίζεται και η θέση του σφάλματος στη ΓΜ4 που προσομοιώνεται, πολύ κοντά στο ζυγό 7 που είναι το ΣΚΣ των Α/Π.

Το ΣΚΣ των Α/Π του συστήματος θεωρείται πολύ αδύναμο σημείο σύνδεσης. Η σχέση μεταξύ ενός AC συστήματος και νέων μονάδων που συνδέονται σε αυτό εκφράζεται με βάση τον ορισμό για το λόγο βραχυκύκλωσης, [KUN94]:

$$SCR = \frac{S_k}{P_{MW, rated}} \quad (\text{Π27})$$

όπου

SCR ο λόγος βραχυκύκλωσης στο σημείο σύνδεσης (*Short Circuit Ratio*)⁵

S_k η ισχύς βραχυκύκλωσης στο ΣΚΣ πριν την εγκατάσταση των Α/Π

$P_{MW, rated}$ η ονομαστική ισχύς της εγκατάστασης παραγωγής

Στην προκειμένη περίπτωση ο λόγος αυτός ισούται με:

$$SCR = \frac{1571 \text{ MVA}}{(500+160) \text{ MW}} = 2.4 < 3 \quad (\text{Π28})$$

ενδεικνύοντας ένα ασθενές σημείο σύνδεσης. Επιπλέον οι γραμμές μεταφοράς ΓΜ3 και ΓΜ4 που συνδέουν το ΣΚΣ με το υπόλοιπο σύστημα έχουν υψηλή τιμή επαγωγικής αντίστασης γεγονός που εξασθενεί το σύστημα. Ο λόγος R/X στο ΣΚΣ, που αποτελεί άλλον ένα κριτήριο ισχυρού ή όχι δικτύου, είναι ίσος με 0.14, γεγονός που ενδεικνύει ότι η σύνδεση ενός Α/Π στο σημείο αυτό θέτει κρίσιμα ζητήματα δυναμικής ευστάθειας. Οι συνθήκες αυτές αντιστοιχούν σε πολλές πραγματικές περιπτώσεις που καλούνται να χειριστούν οι διαχειριστές συστημάτων μεταφοράς, καθώς πολλά Α/Π συνδέονται στα όρια μεγάλων δικτύων, δηλ. σε κάποιο τοπικό ασθενές δίκτυο.

Π6. Τεχνικές συγκεντρωτικών μοντέλων

Το μοντέλο του Α/Π που χρησιμοποιείται για τις δοκιμές αποτελείται από 80 Α/Γ Τύπου Γ ή Δ των 2 MW και χρησιμοποιείται κατάλληλο συγκεντρωτικό μοντέλο, που ενώ μειώνει την πολυπλοκότητα και το χρόνο προσομοίωσης, εξασφαλίζει την ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Η διαδικασία χρήσης συγκεντρωτικών μοντέλων είναι συνήθης όταν διερευνάται η επίδραση μεγάλων Α/Π στη λειτουργία των ΣΗΕ, [KAZ03]. Οι 80 Α/Γ μοντελοποιούνται μέσω μιας ισοδύναμης Α/Γ με ονομαστική ισχύ τη συνολική ισχύ των 160 MW του Α/Π. Η τεχνική συγκεντρωποίησης (*aggregation method*) που εφαρμόστηκε και για τους τρεις τύπους Α/Γ (Α, Γ και Δ) στηρίζεται στον παράλληλο συνδυασμό όμοιων μεταξύ τους γεννητριών και Μ/Σ και στη κατάλληλη διαστασιολόγηση των υπόλοιπων συνιστωσών δηλ. των μετατροπέων ισχύος και της μηχανικής ισχύος του δρομέα της Α/Γ.

Για τις Α/Γ Τύπου Α, σταθερών στροφών δηλαδή με ασύγχρονη γεννήτρια, η μοντελοποίηση βασίζεται στην παραδοχή ότι οι διαφορές στην ταχύτητα περιστροφής είναι πρακτικά αμελητέες. Ως εκ τούτου, το συγκεντρωτικό μοντέλο είναι μια ισοδύναμη ασύγχρονη γεννήτρια με το άθροισμα των ροπών των επιμέρους γεννητριών να ασκείται στην ισοδύναμη αδράνεια:

$$\frac{d\omega_{r,eq}}{dt} \sum_i J_i = \sum_i T_{mech,i} - \sum_i T_{elec,i} \quad (\text{Π29})$$

Αντίστοιχα η μοντελοποίηση του αεροδυναμικού συστήματος για Α/Γ, Ν στον αριθμό, προκύπτει από την εξίσωση:

$$P_{rot,eq} = C_p (\lambda_{eq}, \beta) \left(\frac{1}{2} \rho \pi R^2 V_{w,eq}^3 \right) \quad (\text{Π30})$$

όπου

⁵ Ορίζεται επίσης ο λόγος $ESCR$ που περιλαμβάνει την επίδραση AC φίλτρων και πυκνωτών που τυχόν συνδέονται στο ΣΚΣ της μονάδας εγκατάστασης σε αντίθεση με τον λόγο SCR . Στην περίπτωση αυτή η σχέση (Π27) μεταβάλλεται εισάγοντας την ισχύ $S'_k = S_k - Q_c$, όπου Q_c η τιμή της τριφασικής θεμελιώδους αέργου ισχύος σε αμ της ισχύος $P_{MW, rated}$ που παράγεται από τον εξοπλισμό αέργου παροχής στον AC ζυγό της μονάδας εγκατάστασης για μοναδιαία τάση ζυγού, [ARR98].

$$V_{w,eq} = \frac{\sum_i V_{w,i}}{N} \quad (\text{Π31})$$

και

$$\lambda_{eq} = \frac{R\omega_{r,eq}}{V_{w,eq}} \quad (\text{Π32})$$

Ο έλεγχος γωνίας βήματος γίνεται μέσω ενός ισοδύναμου συστήματος από τη στιγμή που οι διακυμάνσεις στην ταχύτητα περιστροφής έχουν αμεληθεί.

Στην περίπτωση που προσομοιώνονται διακυμάνσεις ταχύτητας ανέμου, συνηθίζεται αντί για συγκεντρωτικό μοντέλο του αεροδυναμικού συστήματος, οι μηχανικές ροπές να υπολογίζονται από τα επιμέρους αεροδυναμικά συστήματα των Α/Γ. Η εξίσωση (Π29) εξακολουθεί να ισχύει τότε αλλά στη θέση της (Π30) χρησιμοποιούνται οι N εξισώσεις:

$$P_{rot,i} = C_p(\lambda_i, \beta) \left(\frac{1}{2} \rho \pi R^2 V_{w,i}^3 \right) \quad (\text{Π33})$$

Οι ταλαντώσεις που διεγείρονται στον άξονα μετάδοσης της κίνησης είναι ιδιαίτερα σημαντικές στην περίπτωση Α/Γ σταθερών στροφών, γι' αυτό και χρησιμοποιείται συγκεντρωτικό μοντέλο για την αδράνεια της γεννήτριας και όχι για τις αδράνεις των δρομέων των Α/Γ, εφαρμόζοντας το μοντέλο δύο μαζών.

Για τις Α/Γ μεταβλητών στροφών, Τύπου Γ και Δ , τα συγκεντρωτικά μοντέλα μπορούν να εφαρμοστούν εφόσον οι ταχύτητες ανέμου και οι ταχύτητες περιστροφής των δρομέων των επιμέρους Α/Γ θεωρούνται σχεδόν ίσες. Αυτό ισχύει σε περίπτωση αρχικών μελετών σχεδιασμού του δικτύου είτε σε μελέτες διερεύνησης θεμάτων βραχυπρόθεσμης μεταβατικής ευστάθειας, οπότε το μηχανικό σύστημα δεν επηρεάζει σημαντικά τις τάσεις και τις ροές ισχύος στο ΣΚΣ του Α/Π, [SLO02]. Ένας συμβιβασμός, που γίνεται ανάμεσα στο μειωμένο χρόνο προσομοίωσης και την επιδιωκόμενη ακρίβεια, είναι η χρήση συγκεντρωτικού μοντέλου για το ηλεκτρικό σύστημα (σύστημα ελέγχου, μετατροπείς και γεννήτριες) και η μοντελοποίηση των μηχανικών υποσυστημάτων των επιμέρους Α/Γ. Στην περίπτωση αυτή διατηρούνται τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά μέγιστης απολαβής ισχύος των Α/Γ καθώς και τα μη γραμμικά αεροδυναμικά χαρακτηριστικά. Επομένως εφαρμόζονται συγκεντρωτικά μοντέλα για τα ακόλουθα υποσυστήματα:

- Ηλεκτρικό μέρος γεννητριών
- Μετατροπείς ισχύος και αντίστοιχο σύστημα ελέγχου

Για τις επιμέρους Α/Γ του Α/Π μοντελοποιούνται αντιθέτως τα εξής:

- Αδράνεις γεννητριών
- Αεροδυναμικά υποσυστήματα
- Συστήματα ελέγχου γωνίας βήματος

Η συνολική ηλεκτρική ροπή προκύπτει από την ισοδύναμη γεννήτρια, οπότε πρέπει να κατανεμηθεί κατάλληλα στις επιμέρους Α/Γ. Στην παρούσα διατριβή χρησιμοποιήθηκε η παρακάτω κατανομή:

$$T_{e,i} = k_i T_{e,eq} \quad (\text{Π34})$$

όπου

$$k_i = \frac{P_{ref,i}}{P_{ref,tot}} \quad (\text{Π35})$$

είναι ο συντελεστής κατανομής με βάση το σήμα αναφοράς για την ενεργό ισχύ κάθε Α/Γ σε σχέση την ισχύ αναφοράς για το Α/Π. Η εξίσωση κίνησης για το δρομέα κάθε γεννήτριας προκύπτει τότε ως εξής:

$$\frac{d\omega_{r,i}}{dt} J_i = T_{mech,i} - k_i T_{elec} \quad (\text{Π36})$$

Στην περίπτωση που μοντελοποιούνται ΣΗΕ πολλών συνιστωσών επιλέγεται η χρήση συγκεντρωτικού μοντέλου και για το αεροδυναμικό υποσύστημα καθώς και για τις αδράνειες των γεννητριών προκειμένου η προσομοίωση να είναι δυνατή σε συνήθη υπολογιστικά συστήματα. Η παραπάνω μέθοδος ανάπτυξης συγκεντρωτικών μοντέλων έχει αποδειχθεί ιδιαίτερα κατάλληλη για μελέτες μεταβατικής ευστάθειας, όπως αυτές που παρουσιάζονται στην παρούσα διατριβή, [POL03].

Π7. Λογισμικά προσομοίωσης

Υπολογιστικά μοντέλα για τα ΣΗΕ χρησιμοποιούνται πέρα από καθαρά ερευνητικούς σκοπούς και από τους Διαχειριστές των δικτύων για να μελετήσουν τις ροές φορτίου, ευστάθεια τάσης μόνιμης κατάστασης και δυναμική συμπεριφορά όλων των συνιστωσών ενός ΣΗΕ. Τα σημερινά εργαλεία συμπεριλαμβάνουν εκτεταμένες δυνατότητες μοντελοποίησης με ποικιλία αλγορίθμων για σύνθετες μελέτες ενός δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας. Ενδεικτικά αναφέρουμε τα λογισμικά Power Factory (*DIgSILENT*), EMTP, EMTP-RV (*CEATI International Inc.*), PSS/E (*Siemens*), Simpow (*STR*), PSCAD/EMTDC (*Manitoba-HVDC Research Centre*), Matlab/Simulink [TAN03]. Παρ' όλα αυτά, στην πλειοψηφία των διαθέσιμων αυτών εργαλείων, τα αιολικά πάρκα δεν είναι ενσωματωμένα. Επομένως προκύπτει η ανάγκη ανάπτυξης κατάλληλων μοντέλων των ανεμογεννητριών και τις συναφούς τεχνολογίας και ενσωμάτωσής τους στα εργαλεία για την ανάλυση των ΣΗΕ.

Ημέρα		Λεπτό	Δευτερόλεπτο	Χιλιοστό του δευτερολέπτου
Διαθεσιμότητα αιολικού πάρκου	Ρύθμιση αποθήκευσης	Κατανομή ενεργού και αέργου ισχύος		Στήριξη τάσης κατά τη διάρκεια μεταβατικών φαινομένων στο δίκτυο
Πρόβλεψη παραγωγής	Ημερήσιες ρυθμίσεις	Δευτερεύουσα ρύθμιση συχνότητας	Πρωτεύουσα ρύθμιση Συχνότητας	Βραχυπρόθεσμη ευστάθεια
		Διακομάνσεις ταχύτητας ανέμου		
		Απόκριση μηχανικού συστήματος		
		Απόκριση ηλεκτρικού συστήματος		

Πίνακας Π1. Κλίμακες χρόνου και ενδεικτικά θέματα διερεύνησης, [MOR07][HOL07]

Μια γενική διάκριση ανάμεσα στα λογισμικά που χρησιμοποιούνται για την ανάλυση των ΣΗΕ βασίζεται στη μέθοδο προσομοίωσης των συνιστωσών που καθορίζεται από τη χρονική κλίμακα στη οποία μεταβάλλονται οι υπό διερεύνηση μεταβλητές του συστήματος, [ΣΟΥ09]. Τα μεταβατικά φαινόμενα στα ΣΗΕ πραγματοποιούνται σε μεγάλο χρονικό εύρος, που ποικίλλει από μερικά χιλιοστά του δευτερολέπτου (π.χ. κρουστικές υπερτάσεις), εκατοστά του δευτερολέπτου (π.χ. διακοπτικά μεταβατικά), μερικά δευτερόλεπτα (μεταβατική ευστάθεια, ταχεία κατάρευση τάσης) ή φαινόμενα μακράς διάρκειας σε εύρος λεπτών ή ακόμα και ωρών (π.χ. μακροπρόθεσμη ευστάθεια τάσης). Στον Πίνακα Π1 δίνονται ενδεικτικά θέματα διερεύνησης που επαφίονται της αιολικής τεχνολογίας και οι αντίστοιχες κλίμακες χρόνου.

Στην περίπτωση που μελετώνται αργά μεταβαλλόμενες μεταβλητές του συστήματος (π.χ. η συχνότητα), οι μεταβολές που πραγματοποιούνται σε μικρότερες χρονικές κλίμακες (π.χ. υπομεταβατικά φαινόμενα) θεωρούνται στιγμιαίες και δεν υπολογίζονται. Στα προγράμματα που αναλύουν συστήματα με μεγάλο αριθμό συνιστωσών και είναι κατάλληλα για την ανάλυση εκτεταμένων ΣΗΕ με μεγάλες σταθερές χρόνου (προγράμματα μεταβατικής ευστάθειας), η μοντελοποίηση του δικτύου γίνεται στην ημιτονεϊδή μόνιμη κατάσταση, δηλαδή χρησιμοποιούνται

μιγαδικές και αλγεβρικές εξισώσεις για τη μοντελοποίηση των επαγωγικών και χωρητικών αντιδράσεων των δικτύων. Η αναπαράσταση όλων των υπόλοιπων συνιστωσών του ΣΗΕ καθορίζεται αναλόγως και επιτυγχάνεται μικρότερη διάρκεια προσομοίωσης μέσω μεγάλων βημάτων ολοκλήρωσης. Το PSS/E είναι παράδειγμα τέτοιας προσέγγισης, γι' αυτό και χρησιμοποιείται ευρέως στην ανάλυση μεταβατικής ευστάθειας, ευστάθειας ταλαντώσεων ή μακροπρόθεσμης ευστάθειας των δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας. Η μεθοδολογία αυτή αναφέρεται ως προσομοίωση θεμελιώδους συχνότητας ή προσομοίωση ενεργών τιμών (RMS value).

Η δεύτερη κατηγορία λογισμικών (π.χ. EMTP-RV, αναλυτικά μοντέλα χρήστη στο Matlab/Simulink) υπολογίζει στιγμιαίες τιμές των μεταβλητών του συστήματος, επιλύοντας τις διαφορικές εξισώσεις που το περιγράφουν, χωρίς να αμελούνται τα μεταβατικά μικρής χρονικής κλίμακας. Η προσομοίωση ηλεκτρομαγνητικών μεταβατικών φαινομένων απαιτεί μικρό βήμα προσομοίωσης και επομένως δυσχαιρένει την προσομοίωση μεγάλων συστημάτων ή για μεγάλη διάρκεια. Ειδικότερα, κατά την προσομοίωση διατάξεων ηλεκτρονικών ισχύος, στην περίπτωση αυτή λαμβάνονται υπ' όψιν τα διακοπτικά φαινόμενα καθώς και τα επιμέρους επίπεδα ελέγχου τους. Τα μοντέλα των δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας περιλαμβάνουν τις διαφορικές εξισώσεις για τις επαγωγικές και χωρητικές αντιδράσεις και/ή εξισώσεις οδοντών κυμάτων για γραμμές μεταφοράς. Η προσέγγιση αυτή αναφέρεται ως προσομοίωση στιγμιαίων τιμών. Θέματα που σχετίζονται με μεταβατικά φαινόμενα των ηλεκτρικών δικτύων, όπως προβλήματα διακοπτικών ή κρουστικών υπερτάσεων, αρμονικές προκύπτουσες από διατάξεις ηλεκτρονικών ισχύος κ.α. προσεγγίζονται με την παραπάνω μεθοδολογία.

Η παρούσα εργασία δίνει έμφαση στη σχεδίαση ελέγχου των ανεμογεννητριών και την ανάλυση της απόκρισης τους υπό μεταβλητές συνθήκες ανέμου καθώς και σε αλληλεπίδραση με ηλεκτρικά μεταβατικά φαινόμενα στο δίκτυο. Το πεδίο αυτό έρευνας θέτει ένα χρονικό πλαίσιο μελέτης από χιλιοστά του δευτερολέπτου (ms) μέχρι λεπτά (min). Επιλέχθηκαν επομένως προγράμματα μεταβατικής ευστάθειας που επιτρέπουν την προσομοίωση διαταραχών σε εκτεταμένα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας και τη μελέτη της αλληλεπίδρασης με τις μονάδες αιολικής παραγωγής (ανεμογεννήτρια ή αιολικό πάρκο).

Λογισμικό DIGSILENT

Παράδειγμα ενός τέτοιου εργαλείου είναι το Power Factory από την εταιρεία DIGSILENT (*DIGSILENT GmbH, 2006*), [DIG06]. Το συγκεκριμένο λογισμικό είναι αντικειμενοστραφές (*object-oriented*) και προσφέρει μια ολοκληρωμένη προσέγγιση μοντέλων, δηλαδή, μοντέλα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για διαφορετικές κατηγορίες, όπως παραγωγή, μεταφορά, διανομή και βιομηχανικές εφαρμογές. Περιλαμβάνει ευρεία ποικιλία συναρτήσεων ανάλυσης συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας για μελέτες μόνιμου καταστάσεως, δυναμικών και μεταβατικών φαινομένων.

Η προσομοίωση στο πεδίο του χρόνου δίνει τη δυνατότητα για χρήση των μοντέλων δικτύου που αναφέρεται παραπάνω, επιτρέποντας μελέτες ευστάθειας μεγάλων συστημάτων που αποτελούνται από εκατοντάδες σταθμούς παραγωγής αλλά και λεπτομερειακές αναλύσεις μεταβατικών λαμβάνοντας υπ' όψιν μεταβατικά φαινόμενα των ηλεκτρικών δικτύων και διακοπτικές λειτουργίες των ηλεκτρονικών ισχύος. Μια συνδυασμένη προσέγγιση ακολουθείται συχνά σε μελέτες ενσωμάτωσης της αιολικής ενέργειας στα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας, σύμφωνα με την οποία γίνεται ταυτόχρονη προσομοίωση ενός τμήματος του δικτύου με μεταβατικό τριφασικό μοντέλο (π.χ. αιολικό πάρκο) και του υπολοίπου μέσω μοντέλου θετικής ακολουθίας (π.χ. εθνικό σύστημα μεταφοράς).

Η βιβλιοθήκη της βάσης δεδομένων του λογισμικού περιλαμβάνει μοντέλα ηλεκτρικών συνιστωσών των ΣΗΕ. Μοντέλα για γεννήτριες, κινητήρες, ελεγκτές, δυναμικά φορτία, και αρκετά παθητικά στοιχεία δικτύου (γραμμές, μετασχηματιστές), στατικά φορτία και συστοιχίες πυκνωτών) προσφέρονται για πολλά επίπεδα τάσης και ισχύος. Κατά τις προσομοιώσεις της παρούσας εργασίας, χρησιμοποιήθηκαν μοντέλα της ενσωματωμένης βιβλιοθήκης για την παράσταση των κλασικών συνιστωσών ενός ΣΗΕ. Επιπλέον, αρκετά στοιχεία ηλεκτρονικών ισχύος (όπως μετατροπείς, soft-starter κ.α.) έχουν υλοποιηθεί στο λογισμικό. Τα ενσωματωμένα μοντέλα μπορούν να αναφέρονται σε προκαθορισμένους ή καθορισμένους από το χρήστη τύπους δεδομένων. Οι τύποι, που έχουν κατασκευαστεί από το χρήστη μπορούν να αποθηκευθούν σε γενική (*global*) ή εσωτερική βάση δεδομένων.

Τα υπόλοιπα μοντέλα σχεδιάζονται και αναπτύσσονται από το χρήστη, όπως μοντέλα ανέμου, μηχανικά μοντέλα ανεμογεννήτριας, συστήματα ελέγχου. Για τη σχεδίαση αυτών προσφέρεται η δυναμική γλώσσα προγραμματισμού προσομοίωσης DSL, με την οποία μπορούν να τροποποιηθούν μοντέλα ήδη ενσωματωμένα είτε να σχεδιαστούν εξ' ολοκλήρου από την αρχή από το χρήστη. Σύνολα γραμμικών και μη γραμμικών διαφορικών εξισώσεων μπορούν να υλοποιηθούν, ενώ τα DSL μοντέλα μπορούν να αλληλεπιδράσουν με τα ενσωματωμένα μοντέλα από τη βιβλιοθήκη της βάσης δεδομένων και όλες τις συναρτήσεις του DIgSILENT, π.χ. ροή φορτίου, ανάλυση σφαλμάτων και ευστάθεια κ.τ.λ.

Όσον αφορά τους υπολογισμούς ροών φορτίου, η κατανομή ενεργού και άεργου ισχύος μπορεί να αναλυθεί με αλγόριθμο Newton-Raphson. Επιπλέον, η ροή φορτίου είναι το πρώτο βήμα για κάθε δυναμική προσομοίωση καθώς υπολογίζει τις αρχικές τιμές του μοντέλου. Με βάση έναν υπολογισμό ροής φορτίου, η συνάρτηση προσομοίωσης του DIgSILENT καθορίζει τις αρχικές συνθήκες όλων των στοιχείων του συστήματος υπό μελέτη ικανοποιώντας τη συνθήκη μηδενικής παραγωγού των μεταβλητών κατάστασης στην αρχή της προσομοίωσης, δηλ. σε ένα στατικό σημείο λειτουργίας (*stationary*).

Αρχικοποίηση στο DIgSILENT

Η αρχικοποίηση των ενσωματωμένων μοντέλων ηλεκτρικών συνιστωσών πραγματοποιείται μέσω διαδικασιών με βάση τους υπολογισμούς ροών φορτίου. Αντίθετα τα μοντέλα που αναπτύσσονται από το χρήστη πρέπει να αρχικοποιηθούν προσεκτικά για να εξασφαλισθεί η σωστή απόκριση υπό κανονικές και μεταβατικές συνθήκες και να αποφευχθούν πλασματικά ηλεκτρικά μεταβατικά (ακόμα και στην περίπτωση μεταβατικού συμβάντος στο δίκτυο). Μια μεταβατική προσομοίωση απαιτεί μικρά χρονικά βήματα και επομένως μεγάλο χρόνο προσομοίωσης. Οι προσομοιώσεις ΣΗΕ ξεκινούν με έναν υπολογισμό ροών φορτίου. Οι ροές φορτίου προσφέρουν τα δεδομένα μόνιμου καταστάσεως του συστήματος. Για αυτούς τους υπολογισμούς πρέπει να δοθούν από το χρήστη συγκεκριμένα δεδομένα εισόδου. Από τη στιγμή που εκτελείται η ροή φορτίου, και επομένως όλα τα ηλεκτρικά μοντέλα έχουν αρχικοποιηθεί, η αρχικοποίηση των μη-ηλεκτρικών μοντέλων και συνιστωσών μπορεί να ξεκινήσει. Το κεντρικό σημείο είναι η ακολουθία κατά την οποία πρέπει να αρχικοποιηθούν τα επιμέρους μοντέλα διαδοχικά. Σε περίπτωση μη σωστής αρχικοποίησης, οι τιμές των μεταβλητών κατάστασης των μοντέλων μεταβάλλονται κατά τη δυναμική προσομοίωση. Σε αυτήν την περίπτωση, απαιτείται αρκετός χρόνος ώστε να επανέλθουν σε μόνιμη κατάσταση, ενώ υπάρχει ο κίνδυνος να προκύψει αριθμητική αστάθεια πριν εξασφαλιστεί η μόνιμη κατάσταση. Αυτά τα μεταβατικά αρχικοποίησης είναι αθέμιτα στις δυναμικές προσομοιώσεις, ειδικά στην περίπτωση προσομοίωσης μεταβατικού συμβάντος στο δίκτυο, πριν επιτευχθεί η μόνιμη κατάσταση των μεταβλητών. Περισσότερες πληροφορίες για την αρχικοποίηση δίνονται στο αντίστοιχο κεφάλαιο μοντελοποίησης.

Λογισμικό PSS/E

Το υπολογιστικό πακέτο PSS/E (*Power System Simulator for Engineering*) παρέχει πλήθος ενεργειών που απαιτούνται για τη μελέτη και ανάλυση φαινομένων που παρατηρούνται στα συνεχώς αναπτυσσόμενα ΣΗΕ, [PSS08]. Αποτελεί ένα πλήρες εργαλείο προσομοίωσης το οποίο επιτρέπει τον έλεγχο και την επιλογή απαραίτητων ενεργειών για την ασφαλή λειτουργία του συστήματος. Το υπολογιστικό πακέτο SIEMENS PTI PSS/ETM (*Power System Simulator for Engineering*) χρησιμοποιείται, μεταξύ άλλων, στις μελέτες πολλών Διαχειριστών του Συστήματος Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας των Ευρωπαϊκών χωρών. Τα κυριότερα υποσυστήματα που περιλαμβάνει είναι:

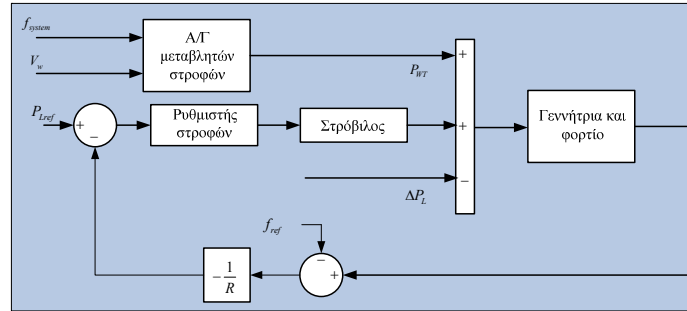
1. Ανάλυση Ροής Φορτίου. Είναι το βασικό σύστημα ανάλυσης του PSS/E. Χρησιμοποιείται για την ανάλυση ροής φορτίου εφαρμόζοντας τεχνικές επίλυσης μη γραμμικών προβλημάτων. Παράλληλα χρησιμοποιείται για την επεξεργασία των δεδομένων του συστήματος καθώς επίσης και για την εισαγωγή νέων.
2. Βέλτιστη Ροή Φορτίου. Το σύστημα αυτό επεκτείνει τη λογική της παραδοσιακής ροής φορτίου προς την κατεύθυνση βελτίωσης του προφίλ του συστήματος μεταφοράς. Αναζητεί την βέλτιστη κατεύθυνση προς την οποία το σύστημα βελτιώνει την απόδοσή του (π.χ. μείωση απωλειών γραμμών, ικανοποιητικότερα επίπεδα τάσεων, βέλτιστη παραγωγή μονάδων). Σκοπός της λειτουργίας αυτής είναι η αναζήτηση της λύσης εκείνης που θα ικανοποιεί τους περιορισμούς του συστήματος και ταυτόχρονα θα αυξάνει την αποδοτικότητά του ή θα μειώνει το κόστος λειτουργίας του.
3. Ανάλυση Σφαλμάτων (Συμμετρικές-Ασύμμετρες καταστάσεις). Ουσιαστικά αποτελεί μια επέκταση της ροής φορτίου και χρησιμοποιείται για την μελέτη της δυναμικής απόκρισης του συστήματος κατά την εκδήλωση σφαλμάτων, όπως βραχυκυκλώματα σε γραμμές (μονοφασικά, διφασικά, τριφασικά), άνοιγμα γραμμών και γενικά περίπλοκα ταυτόχρονα γεγονότα σε πολλαπλούς ζυγούς ή σημεία του συστήματος μεταφοράς.
4. Δυναμική προσομοίωση. Το PSS/E διαθέτει μια ευρεία γκάμα μοντέλων διάφορων στοιχείων του συστήματος (γεννήτριες, φορτία, συστήματα διέγερσης, σταθεροποιητές) που απαιτούνται για την μελέτη της δυναμικής του απόκρισης. Κάθε διαταραχή μπορεί να προσομοιωθεί (απώλεια μονάδων, σφάλματα, εκκίνηση κινητήρων, απώλεια συγχρονισμού), ενώ όλα τα μεγέθη που εμπλέκονται στα φαινόμενα μπορούν να παρακολουθούνται και να αναπαρίστανται σε διαγράμματα για περαιτέρω μελέτη και συγκρίσεις.

Λογισμικό Matlab/Simulink

Το λογισμικό Matlab/Simulink είναι από τα πιο διαδεδομένα λογισμικά μαθηματικής ανάλυσης και προσομοίωσης δυναμικών συστημάτων, γι' αυτό και δεν αναφερθούν εδώ περισσότερες λεπτομέρειες, [CHE97].

Π8. Απλουστευμένο μοντέλο A/Γ μεταβλητών στροφών και δικτύου για μελέτες συχνότητας

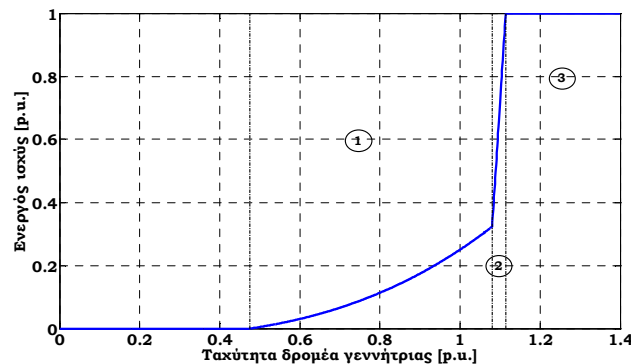
Το Σχήμα Π6 απεικονίζει το διάγραμμα του απλουστευμένου συστήματος που χρησιμοποιήθηκε κατά τις μελέτες συχνότητας στην ενότητα 8.7. Περιλαμβάνεται ο ρυθμιστής στροφών, η γεννήτρια, το φορτίο του συστήματος και το μοντέλο A/Γ μεταβλητών στροφών. Οι γεννήτριες του συστήματος μοντελοποιούνται ως μια γεννήτρια με βάση τη μέθοδο συγκεντρωτικών μοντέλων που περιγράφεται στο [MOR06]. Οι παράμετροι των επιμέρους ελεγκτών και μοντέλων, πχ. σταθερά χρόνου ρυθμιστή στροφών, σταθερά χρόνου στροβίλου, αδράνεια συστήματος, συντελεστής απόσβεσης συστήματος και στατισμός περιλαμβάνονται στον Πίνακα Π2.



Σχήμα Π6. Διάγραμμα απλουστευμένου συστήματος και Α/Γ μεταβλητών στροφών για μελέτες συχνότητας, ενότητα 8.7

Χρονική σταθερά ρυθμιστή στροφών
$T_G=0.1 \text{ sec}$
Χρονική σταθερά στροβίλου
$T_{PM}=30 \text{ sec}$
Αδρανειακή σταθερά
$M=16 \text{ αμ}$
Συντελεστής απόσβεσης
$D=4 \text{ αμ}$
Στατισμός συστήματος
$R=4\%$

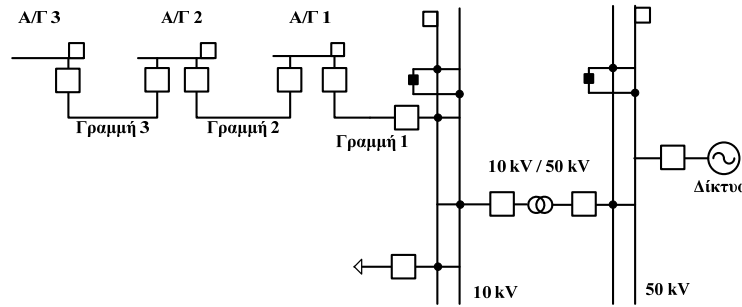
Πίνακας Π2. Βασικές παράμετροι απλουστευμένου συστήματος για μελέτες συχνότητας, ενότητα 8.7



Σχήμα Π7. Χαρακτηριστική ελέγχου στρατηγικής Μέγιστης Απολαβής Ισχύος στο απλουστευμένο μοντέλο Α/Γ μεταβλητών στροφών για μελέτες συχνότητας, ενότητα 8.7

Π9. Μοντέλο ελεγκτή στο επίπεδο του Α/Π για Α/Γ μεταβλητών στροφών

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζεται η λειτουργία του ελεγκτή στο επίπεδο του Α/Π για Α/Γ μεταβλητών στροφών που περιγράφεται στην ενότητα 8.4. Τα αποτελέσματα από το σύστημα της Ρόδου στο Κεφάλαιο 9 έχουν παραχθεί με τα συγκεντρωτικά μοντέλα Α/Π, που αναλύονται στην ενότητα Π6. Εν τούτοις για την πληρότητα της ανάλυσης ενσωματώνονται εδώ αποτελέσματα από τη λειτουργία του ελεγκτή στο επίπεδο του Α/Π για την περίπτωση τριών Α/Γ Τύπου Γ. Το μονογραμμικό διάγραμμα του Α/Π δίνεται στο Σχήμα Π8. Σημειώνεται ότι η υλοποίηση έχει γίνει στο DIGSILENT, [DIG06].

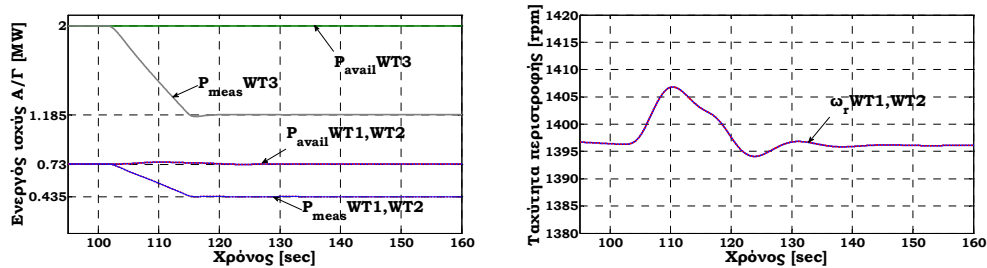


Σχήμα Π8. Μονογραμμικό διάγραμμα Α/Π με τρεις Α/Γ Τύπου Γ στο DIGSILENT

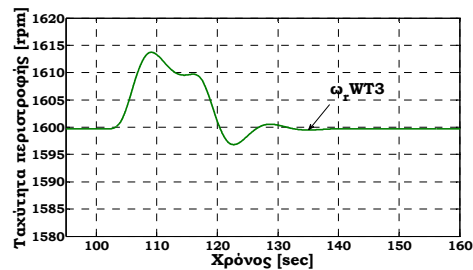
Στα Σχήματα Π9-Π10 δίνονται αποτελέσματα από την απλή περίπτωση σταθερής ταχύτητας ανέμου όπου δίνεται σήμα ελέγχου (πχ. από το διαχειριστή συστήματος) εφεδρείας τύπου *balance* 2 MW. Επομένως το σήμα για παραγωγή 2 MW από το Α/Π επιμερίζεται στις τρεις Α/Γ ανάλογα με τη διαθέσιμη ενεργό ισχύ με βάση τον τύπο (8.14) που επαναλαμβάνεται εδώ για χάρη διευκόλυνσης.

$$P_{ref}^{WT,i} = \frac{P_{avail}^{WT,i}}{P_{avail}^{WF}} \cdot P_{ref}^{WF} \quad (\text{Π37})$$

Η Α/Γ 3 που έχει διαθέσιμη ενεργό ισχύ (με βάση τον άνεμο) ίση με την ονομαστική της (2 MW) μειώνει την εξαγόμενη ενεργό ισχύ από τα 2 MW στα 1.18 MW, ενώ οι Α/Γ 1 και 2 μειώνουν την εξαγόμενη ισχύ από τα 0.73 MW στα 0.435 MW. Στα Σχήματα Π9-Π10 δίνονται τα αποτελέσματα για τις διακυμάνσεις στην ταχύτητα περιστροφής των επιμέρους Α/Γ κατά τη διάρκεια του σήματος εφεδρείας ενεργού ισχύος.

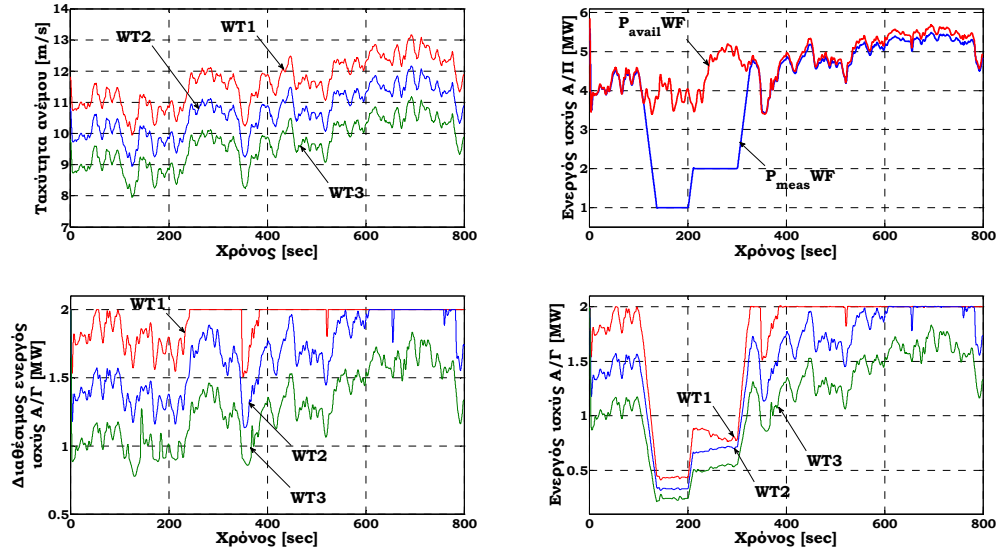


Σχήμα Π9. Διαθέσιμη και ενεργός ισχύς εξόδου Α/Γ Τύπου Γ και ταχύτητα περιστροφής Α/Γ 1 και 2



Σχήμα Π10. Ταχύτητα περιστροφής Α/Γ 3 Τύπου Γ

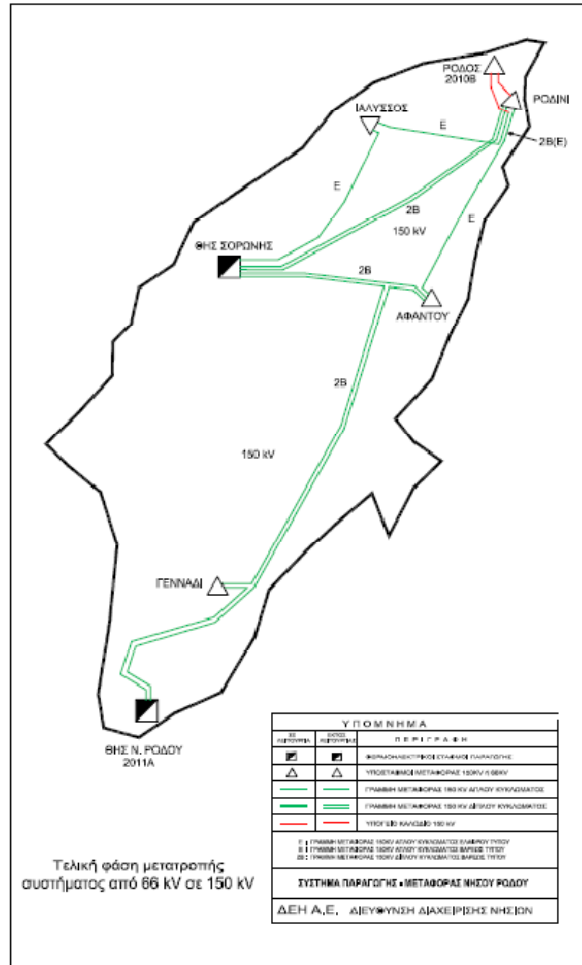
Σε στοχαστική ταχύτητα ανέμου προσομοιώθηκε η δυνατότητα παροχής εφεδρείας ενεργού ισχύος με ανάλογο καταμερισμό της ισχύος στις επιμέρους Α/Γ ανάλογα με τη διαθέσιμη (με βάση τον άνεμο) ενεργό ισχύ. Δίνονται, κατά σειρά, οι ταχύτητες ανέμου σε κάθε Α/Γ, η διαθέσιμη και παραγόμενη ενεργός ισχύς εξόδου του Α/Π και οι διαθέσιμες και παραγόμενες ενεργές ισχύεις των επιμέρους Α/Γ.



Σχήμα Π11. Ταχύτητες ανέμου στις Α/Γ του Α/Π, διαθέσιμη και παραγόμενη ενεργός ισχύς εξόδου του Α/Π, διαθέσιμες και παραγόμενες ενεργές ισχύεις για Α/Γ Τύπου Γ

Στα αποτελέσματα του Σχήματος Π11 απεικονίζεται η δυνατότητα παροχής εξωτερικού σήματος παροχής εφεδρείας ενεργού ισχύος τύπου *balance* με περιορισμό στο ρυθμό μεταβολής της ενεργού ισχύος. Τα πρώτα 100 sec το Α/Π δεν παρέχει εφεδρεία ενεργού ισχύος, οπότε οι Α/Γ παρέχουν τη μέγιστη ενεργό ισχύ υλοποιώντας τη στρατηγική Μέγιστης Απολαβής Ισχύος. Οι διαθέσιμες ενεργές ισχύεις δίνονται ως σήμα αναφοράς για την ενεργό ισχύ σε κάθε Α/Γ αντίστοιχα. Όσο το επιτρέπει ο περιοριστής ρυθμού μεταβολής ισχύος, η ενεργός ισχύς εξόδου κάθε Α/Γ ακολουθεί τη διαθέσιμη ενεργό ισχύ. Από τη χρονική στιγμή 100 sec μέχρι τα 200 sec δίνεται η εντολή για συνολική παραγωγή 1 MW και το σήμα επιμερίζεται στις επιμέρους Α/Γ. Προκύπτει ότι η Α/Γ 1 που έχει μικρότερη διαθέσιμη (με βάση τον άνεμο) ενεργό ισχύ παράγει λιγότερο από τις Α/Γ 2 και 3 στις οποίες η διαθέσιμη ενεργός ισχύς ισούται με την ονομαστική (εκτός από ένα μικρό χρονικό διάστημα που η Α/Γ 2 έχει μικρότερη διαθέσιμη ενεργό ισχύ). Μεταξύ των στιγμών 200 sec και 300 sec το σήμα παροχής εφεδρείας ενεργού ισχύος αυξάνεται στα 2 MW, καθορίζοντας τη συνολική παραγωγή του Α/Π. Στη συνέχεια, μετά τα 400 sec, το σήμα παροχής εφεδρείας απενεργοποιείται και οι Α/Γ επιστρέφουν σε κανονική λειτουργία παράγοντας ενεργό ισχύ ίση με τη διαθέσιμη.

Π10. ΣΗΕ Ρόδου



Σχήμα Π12. Σύστημα παραγωγής και μεταφοράς Ρόδου, [ΔΕΗ08]

Μονάδα Παραγωγής	Steam 1,2	Diesel 1,2	Diesel 3,4,5	Gas 1	Gas2	Gas 3	Gas 4	Diesel Ν.Ρόδου
Κατασκευαστής	DOLMEL-POLAND	BBE	PIELSTICK-ABB	THOMASSEN	FIAT	ABB	GE	ΝΕΕΣ
S_N (MVA)	20	15,35	29,35	26,75	39,8	26,25	47,5	19,5
cosφ	0,8	0,8	0,8	0,8	0,85	0,8	0,8	0,8
V_N (kV)	6,3	10	10	11	11	11	11,5	11
Εγκατεστημένη Ισχύς (MW)	15	12,28	23,48	24	36	21,32	28	15,6
Αποδιδόμενη καθαρή Ισχύς (MW)	14,2	11	22,8 (19)**	20	28	20	27,5	15
χ_{ls}	0,1064	0,23	0,172	0,172	0,118	0,11	0,12	0,175
χ_d	2,351	1,54	1,822	1,79	1,5	1,6	1,88	2,07
χ_q	2,25	0,89	1,09	1,09	1,45	0,76	1	1,04
χ_d'	0,215	0,46	0,351	0,199	0,175	0,24	0,3	0,35
χ_q'	0,45	0,35*	0,213*	0,4	0,35	0,48	0,34	0,236*
T_d	8,99	5,2	9,05	7,1	8,16	5,97	9,6	5,8
T_q	0,5	0,15*	0,2*	0,4	0,4	0,4	0,4	0,128*
H	3,82	2,45	1,674	3,18	3	2,5	1,5	1,33
R	0,05	0,04	0,04	0,04	0,06	0,04	0,04	0,04

* Παράμετροι για τις οποίες δεν υπήρχαν στοιχεία και ελήφθησαν τυπικές τιμές
 ** Οι μονάδες Diesel 3,4,5 δεν φορτίζονται πέραν των 19 MW

Πίνακας Π3. Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά γεννητριών συστήματος Ρόδου, [ΔΕΗ08]

	Πλήθος Α/Γ	Τύπος	Ισχύς ανά Α/Γ	Εγκατεστημένη Ισχύς (MW)	Υ/Σ Συνδεσης	Μήκος γραμμής (km)	Τύπος καλωδίου	Παρατηρήσεις
Διεθνής αιολική Ρόδου	13	Vestas Vestas V-52	850	11,05	Αφάντου	16	95mm Cu	
Eurowind	9	Enercon E70	2000	17,85	Γεννάδι	21	95mm Cu	+ ΜΣ Ανύψωσης 20/25 MVA - ιδιαίτερος ζυγός ΜΤ
Αειφορική Δωδεκανήσου	5	Enercon E40/E44/E2		3300	Αφάντου	5,5	95mm Cu	
Αιολικό Πάρκο Ρόδου	13	NEG MICON NM 900	900	11,7	Σόρωναη	38	2X95mm Cu ACSR	+ ΜΣ Ανύψωσης 20/25 MVA
ΔΕΗ Ανανεώσιμες	7	Vestas Vestas V-52	850	5,25	Γεννάδι	22	95mm Cu	

*Η σύνδεση των πάρκων γίνεται με αποκλειστική γραμμή Μέσης Τάσης

Πίνακας Π4. Δεδομένα Α/Π συστήματος Ρόδου, [ΑΕΗ08]

Μονάδα Παραγωγής	Steam 1,2	Diesel 1,2	Diesel 3,4,5	Gas 1	Gas2	Gas 3	Gas 4	Diesel N.Ρόδου
Κατασκευαστής	DOLMEL- POLAND	BBE	PIELSTICK- ABB	THOMASSE N	FIAT	ABB	GE	ΝΕΕΣ
Μοντέλο PSS/E	SCXS	SCXS	SCXS	SCXS	SCXS	SCXS	SCXS	SCXS
ΚΑ	55	100	100	50	50	50	50	100
ΤΑ	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
ΤΒ	15	10	10	15	15	15	15	10
ΤΕ	0,35	0,04	0,04	0,3	0,3	0,3	0,3	0,04
Vmax	0	0	0	0	0	0	0	0
Vmin	5,05	6,9	6,9	5,05	5,05	5,05	5,05	6,9

Πίνακας Π5. Δεδομένα Αυτόματων Ρυθμιστών Τάσης γεννητριών συστήματος Ρόδου, [ΑΕΗ08]

Ζήτηση Υποσταθμός	ΣΕΝΑΡΙΟ Α 2012 (Μέγιστο φορτίο)		ΣΕΝΑΡΙΟ Β 2012 (Μέγιστη παραγωγή αιολικών)		ΣΕΝΑΡΙΟ Γ 2012 (Μέγιστη διείσδυση αιολικών)	
	P (MW)	Q (MVar)	P (MW)	Q (MVar)	P (MW)	Q (MVar)
ΣΟΡΩΝΗ ΘΗΣ	17,80	9,85	12,89	7,13	6,34	3,51
ΙΑΛΥΣΣΟΣ	46,70	25,84	33,81	18,71	16,64	9,21
ΡΟΔΙΝΙ	61,60	34,08	44,59	24,67	21,95	12,15
ΑΦΑΝΤΟΥ	61,80	34,19	44,74	24,75	22,02	12,19
ΓΕΝΝΑΔΙ	12,60	6,97	9,12	5,05	4,49	2,48
ΡΟΔΟΣ	32,60	18,04	23,60	13,06	11,62	6,43
Σύνολο	233,10	128,97	168,75	93,37	83,06	45,97

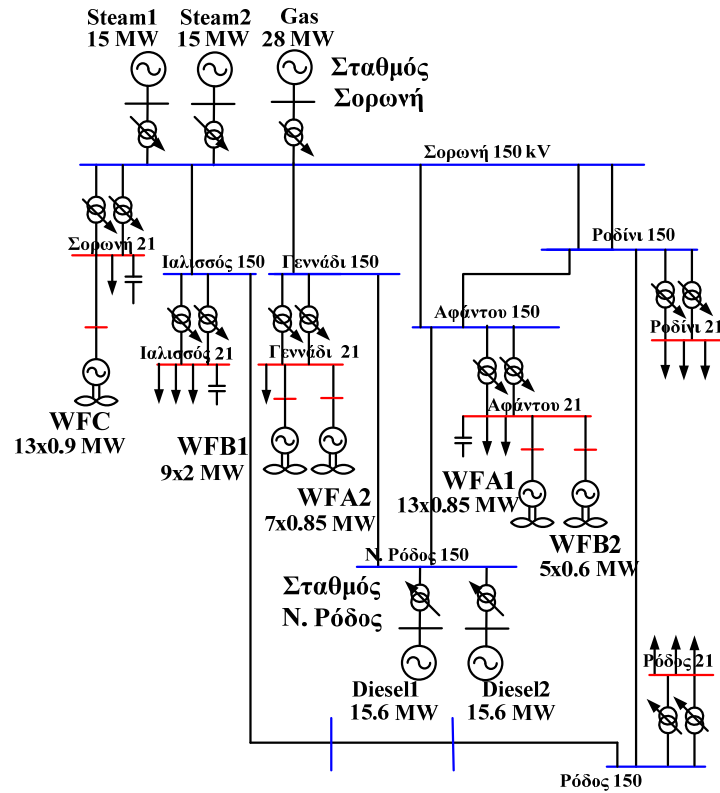
Πίνακας Π6. Σενάρια λειτουργίας συστήματος Ρόδου στο έτος αναφοράς 2012 - αποτελέσματα ενότητας 9.1-9.2, [ΑΕΗ08]

Μονάδα Παραγωγής	Κατασκευαστής	ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΦΟΡΤΙΟΥ					
		ΣΕΝΑΡΙΟ 1		ΣΕΝΑΡΙΟ 2		ΣΕΝΑΡΙΟ 3	
		Παραγόμενη Ισχύς (MW)	Στρεφόμενη εφεδρεία (MW)	Παραγόμενη Ισχύς (MW)	Στρεφόμενη εφεδρεία (MW)	Παραγόμενη Ισχύς (MW)	Στρεφόμενη εφεδρεία (MW)
Steam 1	DOLMEL-POLAND	14,20	0,00	12,50	1,70	14,20	0,00
Steam 2	"	14,20	0,00	12,50	1,70	14,20	0,00
Diesel 1	BBE	10,50	0,50	-	-	-	-
Diesel 2	"	10,50	0,50	-	-	-	-
Diesel 3	PIELSTICK-ABB	17,00	2,00	-	-	-	-
Diesel 4	"	17,00	2,00	-	-	-	-
Diesel 5	"	17,00	2,00	-	-	-	-
Gas 1	THOMASSEN	-	-	-	-	-	-
Gas2	FIAT	-	-	-	-	-	-
Gas 3	ABB	-	-	-	-	-	-
Gas 4	GE	19,78	7,72	13,36	14,14	15,35	12,15
N.Ροδος 1		13,50	1,50	12,86	2,14	7,50	7,50
N.Ροδος 2		13,50	1,50	12,86	2,14	7,50	7,50
N.Ροδος 3		13,50	1,50	12,86	2,14	-	-
N.Ροδος 4		13,50	1,50	12,86	2,14	-	-
N.Ροδος 5		13,50	1,50	12,86	2,14	-	-
N.Ροδος 6		13,50	1,50	12,86	2,14	-	-
N.Ροδος 7		13,50	1,50	12,86	2,14	-	-
N.Ροδος 8		13,50	1,50	-	-	-	-
Σύνολο παραγωγής θερμικών μονάδων και στρεφόμενης εφεδρείας		228,18	26,72	128,38	32,52	58,75	27,15
Αιολικό Πάρκο Ρόδου		1,75		10,61		6,63	
Αειφορική Δωδεκανήσου		0,49		2,99		1,87	
Διεθνής αιολική Ρόδου		1,65		10,02		6,26	
ΔΕΗ Ανανεώσιμες		0,89		5,40		3,37	
Eurowind		2,67		16,19		10,11	
Σύνολο παραγωγής αιολικών πάρκων		7,46		45,21		28,24	
ΣΥΝΟΛΑ		235,64		173,59		86,99	

Πίνακας Π7. Σχήμα παραγωγής συστήματος Ρόδου για το έτος αναφοράς 2012 – αποτελέσματα ενότητας 9.1-9.2, [ΔΕΗ08]

Ζήτηση Φορτίου	74.8 MW
Παραγωγή Θερμικών Σταθμών	35 MW
Διαθέσιμη Αιολική Ισχύς	40.34 MW

Πίνακας Π8. Σενάριο λειτουργίας αποτελεσμάτων ενότητας 9.3, [MAR10b]



Σχήμα Π13. Μονογραμμικό συστήματος Ρόδου για το σενάριο λειτουργίας ενόητας 9.3 (με κόκκινο χρώμα το δίκτυο 21 kV, με μπλε χρώμα το δίκτυο 150 kV) – με διαφορετικά χρώματα σημειώνονται τα επίπεδα τάσης στους ζυγούς του συστήματος, [MAR10b]

Αιολικό Πάρκο	Τύπος Α/Γ	Εγκαταστημένη Ισχύς MW)
WF A1	Τύπου Γ	13x0.85=11.05
WF A2	Τύπου Γ	7x0.85=5.95
WF B1	Τύπου Δ	9x2=18
WF B2	Τύπου Δ	5x0.6=3
WF C	Τύπου Α	13x0.9=11.7

Πίνακας Π9. Ισχύς και τύπος Α/Γ στα Α/Π στο ΣΗΕ Ρόδου για το σενάριο λειτουργίας ενόητας 9.3, [MAR10b]

Μονάδα	Εγκαταστημένη Ισχύς (MW)	Αδράνεια (MWsec/MVA)	Στατισμός R (pu)
Steam1,2	15	3.82	0.05
Gas	28	1.5	0.04
Diesel1,2	15.6	2	0.04

Πίνακας Π10. Βασικές παράμετροι θερμικών μονάδων παραγωγής για το σενάριο λειτουργίας ενόητας 9.3, [MAR10b]

Βιβλιογραφία

Κεφάλαιο 1

- [ACK05] T. Ackermann, *Wind Power in Power Systems*, John Wiley & Sons, 2005
- [AKH03a] V. Akhmatov, Ph.D dissertation, *Analysis of dynamic behaviour of electric power systems with large amount of wind power*, Electric Power Engineering, Ørsted- DTU, Technical University of Denmark, April 2003
- [CIG07] Cigre Report, *Modeling and dynamic behavior o wind generation as it relates to power system control and dynamic performance*, August 2007
- [EON06] E.ON Netz GmbH, *Grid Code - High and extra high voltage*, Bayreuth, Germany, April 2006
- [EWE09] EWEA, *Wind energy – The Facts: A guide to the technology, economics and future of wind power*, 2009
- [HEIO6] S. Heier, *Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems*, John Wiley & Sons, 2006
- [KUN94] P. Kundur, *Power System Stability and Control*, McGraw-Hill Professional, 1994
- [MAR09] I.D. Margaritis, J.C. Mantzaris, M.E. Karystianos, A.I. Tsouchnikas, C.D. Vournas, N.D. Hatzigiargyriou and I.C. Vitellas, “Methods for evaluating penetration levels of wind generation in autonomous systems”, IEEE PowerTech Conf., Bucharest, June 2009
- [SLO03] J.G. Slootweg, “Wind Power- Modelling and Impact on Power System Dynamics”, Ph.D dissertation, Delft University, 2003
- [WEH01] T. Burton, D. Sharpe, N. Jenkins and E. Bossanyi, *Wind Energy Handbook*, John Wiley & Sons, 2001

Κεφάλαιο 2

- [DAV61] A.G. Davenport, ‘The spectrum of horizontal gustiness near the ground in high winds’, Q. J. R. Meteorol. Soc. 87, pp. 194–211, 1961
- [HØJ90] J. Højstrup, S.E. Larsen and P.H. Madsen, ‘Power spectra of horizontal wind components in the neutral atmospheric boundary layer’, N.O. Jensen, L. Kristiansen, S.E. Larsen (Eds.), Ninth Symposium of Turbulence and Diffusion, American Meteorology Society, pp. 305–308, 1990
- [IEC01] IEC 61400-21, Ed.1: Wind turbine generator systems—Part 21: measurement and assessment of power quality characteristics of grid connected wind turbines, Final Draft International Standard 88/144/FDIS International Electrotechnical Commission, IEC 2001-07-01
- [LAN96] W. Langreder, ‘Models for Variable Speed Wind Turbines’, Master thesis, CREST, Loughborough University, UK, Risø National Laboratory, Denmark, 1996
- [ΠΑΠ97] Μ.Π. Παπαδόπουλος, Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, εκδ. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 1997
- [SHI72] M. Shinozuka, C.M. Jan, ‘Digital simulations of random processes and its applications’, J. Sound Vib., 25, (1), pp. 111–128, 1972
- [SØR02] P. Sørensen, A.D. Hansen and P.A.C. Rosas, ‘Wind models for simulation of power fluctuations from wind farms’, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 2002; 90: 1381–1402
- [SØR07] P. Sørensen, N.A. Cutululis, A. Viguera-Rodriguez, L.E. Jensen, J. Hjerrild, M.H. Donovan and H. Madsen, ‘Power fluctuations from large wind farms’, IEEE Trans. Power Systems 2007; 22 , 958-965

- [SØR08] P. Sørensen, N.A. Cutululis, A. Viguera-Rodriguez, H. Madsen, P. Pinson, L.E. Jensen, J. Hjerrild and M. Donovan, ‘Modelling of power fluctuations from large offshore wind farms’, *Wind Energy* 2008; 11, 29-43
- [SCH98] W. Schlez and D. Infield, ‘Horizontal, two point coherence for separations greater than the measurement height’, *Boundary-Layer Meteor.* 87, pp. 459–480, 1998
- [VAN57] I. Van der Hoven, ‘Power spectrum of horizontal wind speed in the frequency range from 0.0007 to 900 cycles per hour’, *J. Met.*, 14, 160–4, 1957
- [WEH01] T. Burton, D. Sharpe, N. Jenkins and E. Bossanyi, *Wind Energy Handbook*, John Wiley & Sons, 2001

Κεφάλαιο 3

- [AAB04] C. Aabo, “Advanced SCADA systems for Wind Power Plants”, poster presentation in EWEC 2004, London, 2004
- [CIU09] A.R. Ciupuliga, M. Gibescu, G. Fulli, A.L. Abbate and W.L. Kling, “Grid Connection of Large Wind Power Plants: a European Overview”, 8th International Workshop on Large-Scale Integration of Wind Power into Power Systems as well as on Transmission Networks for Offshore Wind Farms, 14-15 Oct. Bremen, Germany, 2009
- [DEN05] *Dena-Netzstudie*, www.deutsche-energie-agentur.de, Februar 2005
- [ERL05] I. Erlich, U. Bachmann, “Grid code requirements concerning connection and operation of wind turbines in Germany”, *Proc. of Power Engineering Society General Meeting*, 2005, vol. 2, pp.1253 – 1257, June 2005
- [ERL06] I. Erlich, W. Winter and A. Ditrach, “Advanced Grid Requirements for the Integration of Wind Turbines into the German Transmission System”, *Proc. of Power Engineering Society General Meeting*, pp.7, June 2006
- [EWE09] EWEA Working Group on Grid Code Requirements, *European Grid Code Requirements for Wind Power Generation*, Position Paper, www.ewea.org, 2009
- [ΠΑΠ91] Β. Κ. Παπαδιάς, Κ. Βουρνάς, *Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας και Έλεγχος Συχνότητας και Τάσεως*, Ε.Μ.Π., Αθήνα 1991
- [ΠΑΤ07] Χ. Πατσιούρας, *Τεχνικές απαιτήσεις κωδίκων για τη σύνδεση μεγάλων αιολικών πάρκων στο σύστημα*, Διπλωματική εργασία Ε.Μ.Π., 2007
- [SAY08] S.W. Saylor, “Wind Parks as Power Plants -2008”, Super Panel Session –Advances in Wind Energy Conversion, IEEE PES General Meeting, Pittsburgh, USA, 2008
- [SIN09] B. Singh and S.N. Singh, Wind Power Interconnection into the Power System: A Review of Grid Code Requirements, *The Electricity Journal*, Elsevier, vol. 22, Issue 5, pp. 54-63, June 2009

Κεφάλαιο 4

- [EWE09] EWEA, *Wind energy – The Facts: A guide to the technology, economics and future of wind power*, 2009
- [HAN07] A.D. Hansen and L. Hansen, “Wind Turbine Concept Market Penetration over 10 Years (1995-2004)”, *Wind Energy*, Volume 10, Issue 1, pp 81 – 97, 2007
- [HEI98] S. Heier, *Grid integration of wind energy conversion systems*, ISBN: 0-471-97143, 1998
- [HIL96] R.L. Hills, *Power from wind: a history of windmill technology*, Cambridge University Press, 1996
- [ISE07] ISET – Institut für Solare Energieversorgungstechnik, ‘Entwicklung der Windenergienutzung in Deutschland’, <http://reisi.iset.uni-kassel.de>, November 2007

[PIE04] J. Pierik, J. Morren, S. de Haan, T. van Engelen, E. Wiggelinkhuizen and J. Bozelie , “Dynamic models of wind farms for grid-integration studies”, Nordic Wind Power Conference NWPC, 1-2 March, Chalmers University, Sweden, 2004

[UPW09] www.upwind.eu

[VES09] www.vestas.com

[WAL98] A.K. Wallace and J.A. Oliver, “Variable –Speed Generation Controlled by Passive Elements”, International Conference in Electric Machines, Turkey, 1998

Κεφάλαιο 5

[AKH03b] V. Akhmatov, A.H. Nielsen, J.K. Pedersen, O. Nymann, “Variable-speed wind turbines with multipole synchronous permanent magnet generators. Part I. Modelling in dynamic simulation tools”, Wind Engineering, vol. 27, no. 6, pp 531-548, 2003.

[COR00] G.P. Corten, “Insects Cause Double Stall”, ECN-CX--00-018, Netherlands Energy Research Foundation ECN, www.ecn.nl, 2000

[COR01] G. Corten and H. Veldkamp, “Aerodynamics: Insects can halve wind-turbine power”, Nature, 412, pp. 41-42, 2001

[ELL04] G. Ellis, *Control System Design Guide: Using Your Computer to Understand and Diagnose Feedback Controllers*, Academic Press; 3rd edition, March, 2004

[FRE90] L.L. Freris, Wind Energy Conversion Systems, 1990

[GAI06] G. Gail, A.D. Hansen and T. Hartkopf, “Controller design and analysis of a variable speed wind turbine with doubly-fed induction generator”, EWEC 06, Athens, Greece, March 2006

[HAN02] A.D. Hansen, P. Soerensen, F. Blaabjerg and J. Bech, “Dynamic modelling of wind farm grid interaction”, Wind Engineering, vol. 26, No. 4, pp. 191-210, 2002

[HAN05] M.H. Hansen, A.D. Hansen, T.J. Larsen, S. Øye, P. Sørensen, P. Fuglsang, “Control design for a pitch regulated, variable speed wind turbine”, Risø report R-1500, Risø National Laboratory, Denmark, 2005

[HAN08] M.O.L. Hansen, *Aerodynamics of Wind Turbines*, Earthscan Publications Ltd.; 2nd edition, January 2008

[LEH98] M. Lehnhoff, G. Böhmeke and A. Trede, “Active-Stall / Passive-Stall Vergleich und Betriebsergebnisse”, aerodyn Energiesysteme GmbH, Husumer Schiffswerft, DEWEK’98 Tagungsband, p. 78-81, 1998

[JAU04] C. Jauch, A.D. Hansen, P. Sorensen and F. Blaabjerg, “Simulation Model of an Active-stall Fixed-speed Wind Turbine Controller”, Wind Engineering. Vol. 28, no. 2, pp. 177-196, 2004

[JOH85] G.L. Johnson, *Wind Energy Systems*, Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall INC., 1985

[ΜΠΑ04] Α. Μπαξεβάνη και Ν. Βλάχος, “Ανασκόπηση Μεθόδων Μελέτης Αεροελαστικότητας Μέρος Β: Εφαρμογές σε Ανεμογεννήτριες”, Τεχν. Χρον. Επιστ. Έκδ. ΤΕΕ, IV, τεύχ. 1-2, 2004

[ØYE91] S. Øye, “Dynamic stall - simulated as time lag of separation”, Proceedings of the 4th IEA Symposium on the Aerodynamics of Wind Turbines, McAnulty, K.F- (Ed.), Rome, Italy, 1991

[ΠΑΠ97] Σ. Παπαθανασίου, *Συμβολή στην Ανάλυση Ανεμογεννητριών Μεταβλητών Στροφών με Ασύγχρονη Γεννήτρια για την επιλογή του Ηλεκτρικού Σχήματος*, Διδακτορική Διατριβή Ε.Μ.Π., 1997

[RAO90] S.S. Rao, *Mechanical Vibrations*, Addison Wesley, 2nd ed., April 1990

[SAL03] S.K. Salman and A.L.J. Teo, “Windmill modeling consideration and factors influencing the stability of a grid-connected wind power-based embedded generator”, IEEE Transactions on Power Systems, vol.18, pp. 793–802, 2003

- [SLO01] J.G. Slootweg, H. Polinder and W.L. Kling, “Dynamic modeling of a wind turbine with direct drive synchronous generator and back to back voltage source converter and its control”, Proceedings of European Wind Energy Conference, 1014–1017, Copenhagen, 2001
- [SØR01] P. Sørensen, A.D. Hansen, L. Janosi, J. Bech and B. Bak-Jensen, “Simulation of interaction between wind farm and power system”, Risø-R-1281, Risø National Laboratory, 2001
- [SPR06] C.J. Spruce, “Power performance of active stall wind turbines with blade contamination,” proceedings of EWEC 2006, Athens, 2006

Κεφάλαιο 6

- [AKH02a] V. Akhmatov, “Modelling of variable-speed wind turbines with doubly-fed induction generators in short-term stability investigations”. Proceedings of the 3rd Int. Workshop on Transmission Networks for Offshore Wind Farms, April 11-12, 2002
- [AKH02b] V. Akhmatov, “Variable-speed wind turbines with doubly-fed induction generators. Part II: Power System Stability”, Wind Engineering, Vol. 26, No. 3, pp. 171-188, 2002
- [BOS97] B.K. Bose, *Power Electronics and Variable Frequency Drives –Technology and Applications*, IEEE Press, New York, 1997
- [ΓΚΙ08] Α.Β. Γκίκα, *Μοντελοποίηση ηλεκτρονικών μετατροπέων ευρέως χρησιμοποιούμενων σε ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών*, Διπλωματική Εργασία Ε.Μ.Π., 2008
- [DIT05] A. Dittrich and A. Stoen, “Comparison of fault ride-through strategies for wind turbines with dfim generators,” presented at the 11th Eur. Power Electron. Conf., Dresden, Germany, Sep. 2005
- [EKA03] J.B. Ekanayake, L. Holdsworth, X.G. Wu, N. Jenkins, “Dynamic Modeling of Doubly Fed Induction Generator Wind Turbines”, IEEE Transaction on Power Systems, vol. 18, no. 2, pp. 803-809, May 2003
- [ENG07] S. Engelhardt and A. Geniusz, “Optimised fault ride through performance for wind energy systems with doubly fed induction generator”, EWEC 2008, Brussels, Belgium, April 2007
- [ERL07] I. Erlich, H. Wrede, C. Feltes, “Dynamic Behavior of DFIG-Based Wind Turbines during Grid Faults”, Power Conversion Conference PCC '07, pp 1195- 1200, Nagoya, Japan, 2-5 April, 2007
- [ERT89] S. Ertem and Y. Baghzouz, “Simulation of induction machinery for power system studies”, IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 4, issue 1, pages 88-94, March 1989
- [HAN03] A.D. Hansen, C. Jauch, P. Sørensen, F. Iov and F. Blaabjerg, “Dynamic wind turbine models in power system simulation tool DIGSILENT”, Risoe Report R-1400(EN), Risø National Laboratory, Denmark, 2003
- [HAN05] A.D. Hansen, P. Sørensen, T. Lund and H. Bindner, “Reduced models of doubly fed induction generator system for wind turbine simulations” Wind Energy Journal, vol. 9, Issue 4, pp. 299 – 311, 2005
- [HOL03a] L. Holdsworth, X.G. Wu, J.B. Ekanayake and N. Jenkins, “Comparison of Fixed Speed and Doubly Fed Induction Wind Turbines during Power System Disturbances”, IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution, vol. 150, no. 3, pp. 343- 352, May 2003
- [IEE92] IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems, IEEE Standard 519-1992
- [KAN03] Φ. Κανέλλος, *Συμβολή στην Προσομοίωση και Αναγνώριση Ανεμογεννητριών με Ασύγχρονη Γεννήτρια για την Δημιουργία Μειωμένης Τάξης Ισοδυνάμων Μοντέλων*, Διδακτορική διατριβή Ε.Μ.Π., 2003
- [KAY06] M. Kayikçi, J.V. Milanović, “Assessing Transient Responses Of DFIG Based Wind Plants – The Influence Of Model Parameters And Simplifications”, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 23, no. 2, May 2008

- [KOV59] K.P. Kovacs and I. Racz, *Transiente Vorgänge in Wechselstrommaschinen–Band II*, Budapest: Verlag der Ungarischen Akademie der Wissenschaften, 1959
- [KRA86] P.C. Krause, *Analysis of Electric Machinery*, McGraw-Hill, 1986
- [KRA00] P.C. Krause, D. Wasynczuk and S. D. Sudhoff, *Analysis of Electric Machinery*, IEEE Press, 2000
- [LED04] P. Ledesma and J. Usaola, “Effect of Neglecting Stator Transients in Doubly Fed Induction Generators Models”, *IEEE Trans. Energy Conversion.*, vol.19, no.2, June 2004
- [LEO01] W. Leonhard, *Control of electrical drives*, Springer Verlag Stuttgart, ISBN: 3-540-41820-2, 3rd edition, 2001
- [LIN98] M. Lindgren, “Modeling and Control of Voltage Source Converters Connected to the Grid”, Ph.D, Chalmers University of Technology, Göteborg, 1998
- [MAP06] Ι.Δ. Μάργαρης, *Προσομοίωση ανεμογεννήτριας μεταβλητών στροφών με γεννήτρια επαγωγής διπλής τροφοδότησης και μελέτη δυνατότητας παραμονής της σε λειτουργία κατά τη διάρκεια βυθίσεων τάσης*, Διπλωματική Εργασία Ε.Μ.Π., 2006
- [MAR07] I.D. Margaritis, A.I. Tsouchnikas, N.D. Hatzigiorgiou, “Simulation of Doubly Fed Induction Generators Wind Turbines”, *EWEC 2007*, Milan, Italy, May 2007
- [MOH89] N. Mohan, T.M. Undeland and W.P. Robbins, *Power Electronics: converters, application and design*, John Wiley and Sons, 1989
- [MOR05] J. Morren and S.W.H. de Haan, “Ride through of wind turbines with doubly-fed induction generator during a voltage dip,” *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 20, no. 2, pp. 435–441, Jun. 2005
- [MOR07] J. Morren and S.W.H. de Haan, “Short-Circuit Current of Wind Turbines With Doubly Fed Induction Generator”, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 22, no. 1, pp. 174-180, March 2007
- [NIR04] J. Niiranen, “Voltage Dip Ride Through of Doubly-Fed Generator Equipped with Active Crowbar”, *Nordic Wind Power Conference*, Göteborg, Sweden, p.7, March 2004
- [NIR06] J. Niiranen, “Second Generation Active Crowbar for Doubly Fed Generators”, *Nordic Wind Power Conference NWPC*, Espoo, Finland, May 2006
- [NOV98] D.W. Novotny and T.A. Lipo, *Vector control and dynamics of AC drivers*, Oxford University Press, 1998
- [ONG98] Chee-Mun Ong, *Dynamic Simulation of Electric Machinery using Matlab/Simulink*, Prentice Hall PTR, 1998
- [PEN96] R. Pena, J.C. Clare and G.M. Asher, “Doubly-fed induction generator using back-to-back PWM converters and its application to variable speed wind energy generation”, *IEE proceedings on electronic power application*, 143(3), pp. 231-241, 1996
- [PER04] A. Perdana, O. Carlson, and J. Persson, “Dynamic response of grid connected wind turbine with doubly fed induction generator during disturbances”, presented at the *Nordic Workshop Power Ind. Electron. (NORPIE 2004)*, Trondheim, Norway, 2004
- [PET05] A. Petersson, T. Thiringer, L. Harnefors and T. Petru, “Modeling and Experimental Verification of Grid Interaction of a DFIG Wind Turbine”, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 20, no. 4, pp. 878-886, Dec. 2005
- [ΠΑΠ95] Μ.Π. Παπαδόπουλος, *Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας – Ηλεκτρομηχανική Μετατροπή*, Ε.Μ.Π., 1995
- [POL03] M. Poller, “Doubly-fed induction machine models for stability assessment of wind farms”, *IEEE Power tech Conference*, Bologna, Italy, 2003

- [POU03] P. Pourbeik, R.J. Koessler, D.L. Dickmader and W. Wong, "Integration of large wind farms into utility grids (part 2 - performance issues)", IEEE Power Engineering Society General Meeting, vol. 3, July 2003
- [ROW95] T.M. Rowan, R. J. Kerkman and D. Leggate, "A simple on line adaptation for indirect field orientation of an induction machine", IEEE Trans. on Ind. Elec., vol. 42, pages 129-198, April 1995
- [SEM06] S. Seman, *Transient performance analysis of wind-power induction generators*, PhD thesis, Helsinki University of Technology, Department of Electrical and Communications Engineering, Laboratory of Electromechanics, Espoo, Finland, 2006.
- [SER93a] L. Serrano-Iribarnegaray, "The modern space-phasor theory, part I: Its coherent formulation and its advantages for transient analysis of converter-fed AC machine", European Transactions on Electrical Power, vol. 3, no. 2, pp. 171-180, 1993
- [SER93b] L. Serrano-Iribarnegaray, "The modern space-phasor theory, Part II: Comparison with the generalized machine theory and the space-vector theory", European Transactions on Electrical Power, vol. 3, no. 3, pp. 213-219, 1993
- [SET07] P. La Seta and P. Schegner, "Comparison of stabilizing methods for doubly-fed induction generators for wind turbines", International Conference on Future Power Systems, pp. 6, Nov. 2005
- [SUN04] T. Sun, Ph.D. dissertation, *Power Quality of grid-connected wind turbines with DFIG and their interaction with the grid*, Aalborg Univ., Denmark, 2004
- [TSO03] G. Tsourakis, *Induction-Machine Based Wind Energy Conversion Systems: Modeling and Applications*, Diploma Thesis, Universite de Liege, Belgium, 2003
- [VIC91] M.S. Vicatos, J.A. Tegopoulos, "Transient state analysis of a doubly-fed induction generator under three phase short circuit", IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 6, no. 1, pp. 62-68, Mar. 1991

Κεφάλαιο 7

- [ACH03] S.Achilles and M. Poller, "Direct drive synchronous machine models for stability assessment of wind farms," in Proc. of 4th International Workshop on Large-Scale Integration of Wind Power and transmission Networks for Offshore Wind Farms, Billund, Denmark, October 20-21, 2003
- [AKH03] V. Akhmatov, A.H. Nielsen, J.K. Pedersen, O. Nymann, "Variable-speed wind turbines with multipole synchronous permanent magnet generators. Part I. Modelling in dynamic simulation tools", Wind Engineering, Volume 27, No. 6, pp 531-548, 2003
- [AKH05a] V. Akhmatov, "Full-load Converter Connected Asynchronous Generators for MW Class Wind Turbines", Wind Engineering, Volume 29, No. 4, pp 341-351, 2005
- [BAN08] D. Bang, H. Polinder, G. Shrestha and J.A. Ferreira, "Review of Generator Systems for Direct-Drive Wind Turbines", European Wind Energy Conference & Exhibition, Belgium, March-April 2008
- [BEH05] R.M. Behnke and E. Muljadi, "Reduced order dynamic model for variable-speed wind turbine with synchronous generator and full power conversion topology", presented at the International Conference on Future Power Systems, November 2005
- [BOR97] B.S. Borowy and Z.M. Salameh, "Dynamic response of a stand-alone wind energy conversion system with battery energy storage to a wind gust", IEEE Transaction on Energy Conversion, vol. 12, Issue 1, pp. 73 – 78, 1997
- [ENG07] S. Engström and S. Lindgren, "Design of NewGen direct-drive generator for demonstration in a 3.5 MW wind turbine", EWEC (European Wind Energy Conference & Exhibition), Milan, Italy, May 7-10, 2007

- [HAN07] A.D. Hansen and G. Michalke, “Modelling and control of variable speed multipole PMSG wind turbine”, submitted to Wind Energy, 2007
- [HOE87] M.J. Hoeijmakers, “A simple model of a synchronous machine with diode rectifier using state variables”, Proceedings International Symposium on Modeling and Simulation of Electrical Machines, Converters and Power Systems, Laval University, Quebec, Canada, pp. 191-199, 24-25 August, 1987
- [HOE91] M.J. Hoeijmakers, “Synchronous machine with rectifier for wind turbines”, IEA 21th meeting of experts – Electrical systems for wind turbines with constant and variable speed, Göteborg, Sweden, October 7-8, Project Management for Biology, Energy, Ecology (BEO) Research Centre Jülich (KFA), pp. 51-61, 1991
- [KRA00] P.C. Krause, O. Wasynczuk, S. D. Sudhoff, "Analysis of Electric Machinery", IEEE Press, New York 2000
- [LI08] S. Li and T.A. Haskew, “Characteristic Study of Vector-Controlled Direct Driven Permanent Magnet Synchronous Generator in Wind Power Generation”, Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, pp. 1-9, 20-24 July 2008
- [MAP90] Ν.Γ. Μαράτος, *Τεχνικές Βελτιστοποίησης*, εκδόσεις Ε.Μ.Π., 1990
- [MAR09a] I.D. Margaritis, A.I. Tsouchnikas and N.D. Hatzigiorgiou, “Modeling and Control Capabilities of Variable Speed Wind Turbines with Direct Drive Synchronous Generator”, under review in IEEE Trans.on Power Systems, 2009
- [MAR09b] I.D. Margaritis, A.I. Tsouchnikas and N.D. Hatzigiorgiou, “Modeling and LVRT capabilities of variable speed WTs equipped with doubly fed induction and direct drive synchronous generator”, EWEC 2009, Marseille, France, March 2009
- [MCD06] A.S. McDonald, M.A. Mueller and H. Polinder, “Comparison of generator topologies for direct- drive wind turbines including structural mass”, in Proc. of the International Conference on Electrical Machines (ICEM), pp. 360.1-7, September 2006
- [MIC07] G. Michalke, A. Hansen and T. Hartkopf, “Control strategy of a variable speed wind turbine with multipole permanent magnet synchronous generator”, European Wind Energy Conference EWEC, Milan, Italy, 2007
- [MOH89] N. Mohan, T.M. Undeland and W.P. Robbins, *POWER ELECTRONICS: Converters, Applications and Designs*, John Wiley & Sons, 1989
- [ΠΑΠ85] Β. Κ. Παπαδιάς, *Ανάλυση Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας –Τόμος 1 Μόνιμη Κατάσταση Λειτουργίας*, Ε.Μ.Π., Αθήνα 1985
- [ROB07] E. Robles, J.L. Villate, S. Ceballos, I. Gabiola, I. Zubia, “Power electronics solutions for grid connection of wind farms”, European Wind Energy Conference EWEC, Milan, Italy, 2007
- [SVE05] D. Svechkarenko, “Simulations and control of direct driven permanent magnet synchronous generator”, Nordic PHD course on Wind Power, Smola, Norway, www.Elkraft.ntnu.no/smola2005/Topics/18.pdf, pp.1-5, June 2005
- [VUT98] T.V. Cutsem and C.D. Vournas, *Voltage Stability of Electric Power Systems*, Kluwer Academic Publishers, 1998
- [ΦΑΡ06] Ε. Φαραντάτος, *Μοντέλο Ανεμογεννήτριας Μεταβλητών Στροφών με Σύγχρονη Γεννήτρια για Μελέτες Ενστάθειας*, Διπλωματική εργασία, Ε.Μ.Π., Οκτώβριος 2006

Κεφάλαιο 8

- [AKB10] M. Akbari and S. M. Madani, “Participation of DFIG Based Wind Turbines in Improving Short Term Frequency regulation”, 18th Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE), pp. 874 – 879, 2010.

- [AKH05b] V. Akhmatov, J.P. Kjaergaard and H. Abildgaard, “Announcement of The Large offshore Wind Farm Horns Rev B and experience from prior projects in Denmark, European Wind Energy Conference EWEC-2004, London, Great Britain, Nov. 2005.
- [ALM05] R.G. de Almeida and J.A.P. Lopes, “Primary frequency control participation provided by doubly fed induction wind generators”, 15th PSCC, Liege, 22-26 August 2005.
- [ALM06] R.G. de Almeida, E.D. Castronuovo and J.A.P. Lopes, “Optimum Generation Control in Wind Parks When Carrying Out System Operator Requests”, IEEE Trans. Power Systems, 21, (2), May 2006.
- [ALM07] R.G. de Almeida and J.A.P. Lopes, “Participation of Doubly Fed Induction Wind Generators in System Frequency Regulation, IEEE Trans. Power Systems, 22, (3), August 2007.
- [BHA10] P. Bhatt, R. Roy and S.P. Ghoshal, “Dynamic Active Power Support by Doubly Fed Induction Generator for Frequency Control, PMAPS 2010.
- [CHA10] L.R. Chang-Chien, W.T. Lin and Y.C. Yin, “Enhancing Frequency Response Control by DFIGs in the High Wind Penetrated Power Systems”, IEEE Trans. Power Systems, 2010.
- [CHR01] P. Christiansen, K.K. Jørgensen and A.G. Sørensen, “Grid Connection and Remote Control for the Horns Rev 150 MW Offshore Wind Farm in Denmark”, 1st International Workshop on Transmission Networks for Offshore Wind Farms, Stockholm, Sweden, March 2001.
- [CON08] J.F. Conroy and R. Watson, “Frequency Response Capability of Full Converter Wind Turbine Generators in Comparison to Conventional Generation”, IEEE Trans. on Power Systems, vol.23, no.2, May 2008.
- [ΔΕΗ08] Τεχνική έκθεση, “Ανάπτυξη μοντέλων για τη δυναμική προσομοίωση αυτόνομων νησιωτικών συστημάτων με παρουσία μονάδων ΑΠΕ και την εκτίμηση του ορίου ασφαλούς αιολικής διείσδυσης”, ΔΕΗ Α.Ε.-ΕΠΙΣΕΥ, ΕΜΠ, Αθήνα, Μάρτιος 2008.
- [ΔΕΗ10] Κώδικας Διαχείρισης Μη Διασυνδεδεμένων Νησιών – Πρόταση της ΔΕΗ Α.Ε. ως Διαχειριστή Μη Διασυνδεδεμένων Νησιών, διαθέσιμο στο διαδίκτυο - www.rae.gr/K2/Consult_KDMN/Code_MDN.pdf, 2010.
- [ΔΕΣ10] Εγχειρίδιο Κατανομής, Έκδοση 2.0, ΔΕΣΜΗΕ, www.desmie.gr/.../Εγχειρίδιο%20Κατανομής%20version%202_0%2020100907.pdf, 2010.
- [DIN08] M. Bhuiyan and D. Sundaram, Comparing and evaluating frequency response characteristics of conventional power plant with wind power plant, M.Sc. Thesis, Department of Energy and Environment, Chalmers University of Technology, Goteborg, Sweden, 2008.
- [DOH10] R. Doherty, A. Mullane, G.L. Nolan, D.J. Burke, A. Bryson and M. O’Malley, “An Assessment of the Impact of Wind Generation on System Frequency Control”, IEEE Trans. Power Systems, 25, (1), February 2010.
- [ZER10] A. Zertek, G. Verbic and M. Pantos, “Participation of DFIG Wind Turbines in Frequency Control Ancillary Service by Optimized Rotational Kinetic Energy”, 7th International Conference on the European Energy Market, pp. 1 – 6, 2010.
- [EIS07] S.A. Eisen, *Real Time Estimation of Possible Production at Nysted*, M.Sc Thesis, Technical University of Denmark, Department of Mechanical Engineering, Section of Fluid Mechanics, September 2007.
- [EKA03] J.B. Ekanayake, L. Holdsworth, X.G.Wu and N. Jenkins, “Dynamic modelling of doubly fed induction generator wind turbines”, IEEE Trans. on Power Systems, vol. 18, pp. 803–809, 2003.
- [EKA04] J. Ekanayake and N. Jenkins, “Comparison of the response of doubly fed and fixed speed induction generator wind turbines to changes in network frequency”, IEEE Trans. Energy Conversion, 2004, 19, (4), pp. 800–802.
- [ENE04] Energinet.dk, “Wind Turbines Connected to Grids with Voltage above 100kV”, Technical regulation TF 3.2.5, www.energinet.dk, 2004.

- [ENE10] Enercon magazine for wind energy, *WINDBLATT*, www.enercon.de, issue 03, 2010.
- [HAN93] L.N. Hannett, A. Khan, “Combustion Turbine Dynamic Model Validation from Tests, IEEE Trans. on Power Systems, vol.8, 1993.
- [HAN10] X. Han, Y. Cheng, Z. Wu and J. Wang, “Research on Frequency Regulation of Power System Containing Wind Farm, IEEE 11th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems (PMAPS), pp. 60 – 64, 2010.
- [HOL03] L. Holdsworth, X.G. Wu, J.B. Ekanayake and N. Jenkins, “Comparison of fixed speed and doubly fed induction wind turbines during power system disturbance”, IEE Proceedings. Generation, Transmission and Distribution, pp. 343–352, 2003.
- [HOL04] L. Holdsworth, J.B. Ekanayake and N. Jenkins, “Power system frequency response from fixed speed and doubly fed induction generator based wind turbines”, *Wind Energy J.*, vol. 7, pp. 21-35, 2004.
- [JOH06] M. Johan, W. Sjoerd, L. Wil J. and Ferreira, “Wind turbines emulating inertia and supporting primary frequency control”, *IEEE Trans. Power Syst.*, 2006, 21, (1), pp. 433–434.
- [JOH10] A. Johnson, “Requirements for System Inertia”, Grid Code Frequency Response Working Group, System Technical Performance, http://www.nationalgrid.com/NR/rdonlyres/0CB79B5E-BCA2-475D-8A60-E58EF28CF9F3/42128/SimulatedInertia_080710M.pdf, nationalgrid 2010.
- [KAK03] N. Kakimoto, K. Baba, “Performance of Gas Turbine-Based Plants During Frequency Drops”, *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 18, No 3, August 2003.
- [KRI03] J.R. Kristoffersen and P.Christiansen, “Horns Rev offshore wind farm: its main controller and remote control system”, *Wind Engineering J.*, vol. 27, no. 5, pp. 351-360, 2003.
- [LAL04] G. Lalor, J. Ritchie, S. Rourke, D. Flynn, and M. O’Malley, “Dynamic frequency control with increasing wind generation,” in Proc. IEEE Power Eng. Society General Meeting, Denver, CO, Jun. 2004.
- [LAL05] G. Lalor, A. Mullane and M. O’Malley, “Frequency Control and Wind Turbine Technologies”, *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 20, no. 4, 2005.
- [MAL04] M. O’Malley, “System integration of wind turbines in Ireland”, Proceedings of 44th IEA topical expert meeting: System integration of wind turbines. Dublin November 2004.
- [MAR09c] I.D. Margaris, A.D. Hansen, P. Sørensen and N.D. Hatziargyriou, “Investigating power control in autonomous power systems with increasing wind power penetration”, 8th International Workshop on Large-Scale Integration of Wind Power into Power Systems as well as on Transmission Networks for Offshore Wind Farms, Bremen, Germany, October 2009.
- [MAR10a] I.D. Margaris, A.D. Hansen, N.A. Cutululis, P. Sørensen and N.D. Hatziargyriou, “Impact of Wind Power in Autonomous Power Systems - Power Fluctuations – Modeling and Control Issues”, *Wind Energy J.* 2010, published online: DOI: 10.1002/we.417.
- [MAR10b] I.D. Margaris, A.D. Hansen, P. Sørensen, S.A. Papathanassiou and N.D. Hatziargyriou, “Frequency control in autonomous power systems with high wind power penetration”, υπό κρίση στο *IEEE Trans. on Sustainable Energy J.*, 2011.
- [McG10] M. McGovern. “Spain leads the way on reserve power capability”, *Windpower Monthly Magazine*, 09 November 2010.
- [MOR06] J. Morren, S.W.H. de Haan, W.L. Kling and J.A. Ferreira, “Wind turbines emulating inertia and supporting primary frequency control”, *IEEE Trans. on Power Systems J.*, vol. 21, no.1, pp. 433-434, 2006.
- [MUL05] A. Mullane and M. O’Malley, “The Inertial Response of Induction-Machine-Based Wind Turbines”, *IEEE Trans. on Power Systems*, vol.20, 2005.

- [NAR09] E.V. Naranjo, A. Sumper, O.G. Bellmunt, A. J. Ferre and M.M. Rojas, “Design of a pitch control of a wind turbine to improve system frequency response”, 13th European Conference on Power Electronics and Applications, pp. 1 – 11, 2009.
- [NYS11] Nysted Havmøllepark, www.nystedhavmoellepark.dk, 2011.
- [RAM07a] G. Ramtharan, J.B. Ekanayake and N. Jenkins, “Frequency support from doubly fed induction generator wind turbines”, IET Renewable Power Generation, vol. 1, (1), pp. 3- 9, 2007.
- [RAM07b] G. Ramtharan, N. Jenkins and O. Anaya-Lara, “Modelling and control of synchronous generators for wide-range variable-speed wind turbines”, Wind Energy 2007; 10 (3): pp. 231-246. DOI: 10.1002/we.219.
- [RAM07c] G. Ramtharan, J.B. Ekanayake and N. Jenkins, “Support for Spinning Reserve from DFIG based wind turbines”, Second International Conference on Industrial and Information Systems, ICIIS 2007, 8 – 11 August 2007, Sri Lanka.
- [ROW83] W. I. Rowen, “Simplified Mathematical Representations of Heavy Duty Gas Turbines”, Trans.Amer.Soc.Mech.Eng. vol. 105, pp.865-869, Oct. 1983.
- [SAY06] S.W. Saylor, “Wind Parks as Power Plants”, 2006 PES General Meeting, Montreal, Canada, June 18-22, 2006.
- [SEN07] T. Senjyu, T. Kaneko, A. Yona, N. Urasaki, T. Funabashi, F. Yamada and S. Sugimoto, “Output Power Control for Large Wind Power Penetration in Small Power System”, IEEE Power Eng. Soc. Gen. Meeting, 24-28 June 2007.
- [SØR09] P. Sørensen, I. Margaritis, L. Zeni, A. Rudolph and J. Munster-Swendsen, “Frequency control in power systems with large scale wind power”, Workshop on Wind Power and Flexible Load Control in Systems with Large Scale Wind Power, October 28, 2009, Risø DTU, Roskilde, Denmark.
- [SUW07] A. Suwannarat, B. Bak-Jensen, Z. Chen, H. Nielsen, J. Hjerrild, P. Sorensen, A.D. Hansen, “Power System Operation with Large Scale Wind Power Integration”, Power Tech, 2007 IEEE Lausanne , pp. 671-676, 1-5 July 2007.
- [TAN05] J.O.G. Tande, K. Uhlen and T. Gjengedal, “Options for Large Scale Integration of Wind Power, IEEE Power Tech, St.Petersburg, Russia, Jun. 2005.
- [TAR09] G.C. Tarnowski, P.C. Kjaer, P. Sørensen and J. Østergaard, “Study on variable speed wind turbines capability for frequency response”, European Wind Energy Conference EWEC, Marseille, pp. 16-19, 2009.
- [TAR10a] G.C. Tarnowski, “Coordinated frequency control of wind turbines in power systems with high wind power penetration”, Industrial PhD project, http://www.dtu.dk/upload/centre/cet/det_sker/08/powerevent20081126/presentation_05-freqcontroldfig_powerevent20081126_gct.pdf, 2011.
- [TAR10b] G.C. Tarnowski, P.C. Kjar, P.E. Sorensen and J. Ostergaard, “Variable speed wind turbines capability for temporary over-production”. Power and Energy Society General Meeting. PES '09, IEEE, 2009.
- [TAV10] N. Taveira, “Grid codes in isolated systems, consequences for manufacturers”, Enercon GmbH, 2010.
- [THO03] K. Thomsen, “Operation and control of large wind turbines and wind farms – design load basis”, Risø I-1967(EN), Roskilde, April 2003.
- [WIN11] WindINERTIA™ Control, GE Energy fact sheet, http://www.ge-energy.com/businesses/ge_wind_energy/en/downloads/GEA17210.pdf, 2011.

Κεφάλαιο 9

[MAR10c] I.D. Margaris, A.D. Hansen, P. Sørensen and N.D. Hatziaegyriou, “Dynamic Security Issues in Autonomous Power Systems with increasing Wind Power Penetration”, *Electric Power Systems Research (EPSR) J.*, vol. 81, (4), April 2011, pp. 880-887.

Παράρτημα

[AKH06a] V. Akhmatov, A.H. Nielsen, “A small test model for the transmission grid with a large offshore wind farm for education and research at Technical University of Denmark”, *Wind Engineering*, Volume 3, No. 3, 2006

[AKH06b] V. Akhmatov, T. Lund, A.D. Hansen, P. Soerensen, A.H. Nielsen, ”A Reduced Wind ower Grid Model For Research and Education”, *Proceedings of the 6th International Workshop on Large-Scale Integration of Wind Power and Transmission Networks for Offshore Wind Farms*, Delft, The Netherlands, pp. 173-180, 26–28 October 2006

[ARR98] J. Arrillaga and B. Smith, *AC-DC power system analysis*, IET, 1998

[CHE97] C.-M. Ong, *Dynamic Simulations of Electric Machinery: Using MATLAB/SIMULINK*, Prentice Hall PTR, 1997

[DIG06] DIgSILENT GmbH. DIgSILENT technical documentation—PowerFactory, 2006

[HOL07] H. Holttinen, “State-of-the-art of design and operation of power systems with large amounts of wind power – summary of IEA Wind collaboration”, *Workshop on Integration Studies*, Tuesday 8th May, 2007, European Wind Energy Conference EWEC, Milan–Italy, May 2007

[KAZ03] Y.A. Kazachkov, J.W. Feltes and R. Zavadil “Modeling Wind Farms for Power System Stability Studies”, *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, July 13-17, 2003, Toronto, Canada

[MOR07] A. Morales, “Advanced Grid Requirements for the Integration of Wind Farms into the Spanish Transmission System”, *European Wind Energy Conference EWEC*, Milan–Italy, May 2007

[POL03] M. Pöller, S. Achilles, “Aggregated Wind Park Models for Analyzing Power System Dynamics”, *Forth International Workshop on Large Scale Integration of Wind Power and Transmission Networks*, 20th and 21st October, Billund, Denmark, 2003.

[PSS08] PSS/E-30 Program Operation Manual, Siemens Power Technologies Inc, 2008

[ΣΟΥ09] Ν. Σουλτάνης, *Συμβολή στον έλεγχο και στην προσομοίωση συστημάτων ισχύος χαμηλής τάσης με διεσπαρμένη παραγωγή*, Διδακτορική διατριβή Ε.Μ.Π., Αθήνα 2009.

[SLO02] J.G. Slootweg, S.W.H. de Haan, H. Polinder, W.L. Kling, “Aggregated Modelling of Wind Parks with Variable Speed Wind Turbines in Power System Dynamics Simulations” *Proceedings of the 14th Power Systems Computation Conference*, Sevilla, 2002

[TAN03] J.O.G. Tande, “Grid Integration of Wind Farms”, *Wind Energy*, Volume 6, Issue. 3, pp. 281-295, 2003

Δημοσιεύσεις του συγγραφέα

Συνέδρια-Παρουσιάσεις

I.D. Margaris, A. Tsouchnikas and N. Hatziargyriou, “Simulation of Doubly Fed Induction Generators Wind Turbines”, EWEC 2007, Milan, Italy, May 2007

I.D. Margaris, “Simulation of Doubly Fed Induction Generator WTs-LVRT”, ReDiPS, NTUA, Athens, Greece, 2007

I.D. Margaris, “Electrification in isolated regions of Mexico - Renewable Energy for Rural Health Clinics”, Microgrids 08 Symposium, Kythnos, Greece, June 2008

I.D. Margaris, A. Tsouchnikas and N. Hatziargyriou, “Model and Simulation Results of a DC/DC Boost converter in a W/T equipped with Synchronous Generator”, 5th Mediterranean Conference and Exhibition on Power Generation, Transmission, Distribution and Energy Conversion (MedPower 2008), Thessaloniki, Greece, November 2008

I.D. Margaris, A. Tsouchnikas and N. Hatziargyriou, “Modeling and LVRT capabilities of variable speed WTs equipped with doubly fed induction and direct drive synchronous generator”, EWEC 2009, Marseille, France, March 2009

I.D. Margaris, “Power and frequency control in island grids”, Risø National Laboratory-DTU workshop on Frequency Control and Demand Side System Services in Systems with Large Scale Wind Power, Roskilde, Denmark, April 2009

P. Sørensen, I.D. Margaris, L. Zeni, A. Rudolph, J. M.-Swendsen, “Frequency control in power systems with large scale wind power”, Risø National Laboratory-DTU workshop on Frequency Control and Demand Side System Services in Systems with Large Scale Wind Power, Roskilde, Denmark, April 2009

I.D. Margaris, J.C. Mantzaris, M.E. Karystianos, A.I. Tsouchnikas, C.D. Vournas, N.D. Hatziargyriou and I.C. Vitellas, “Methods for evaluating penetration levels of wind generation in autonomous systems”, IEEE PowerTech Conf., Bucharest, June 2009

I.D. Margaris, “Evolution of wind turbine technology related to electrical grid reforms”, Papyrus workshop, Cultural and historical digital libraries dynamically mined from news archives, NKUA, Athens, Greece, September 2009

I.D. Margaris, A.D. Hansen, P. Sørensen and N.D. Hatziargyriou, “Investigating power control in autonomous power systems with increasing wind power penetration”, 8th International Workshop on Large-Scale Integration of Wind Power into Power Systems as well as on Transmission Networks for Offshore Wind Farms, Bremen, Germany, October 2009

E. Loukarakis, I. Margaris and P. Moutis, “Frequency Control Support and Participation Methods Provided by Wind Generation”, Electrical Power and Energy Conference, IEEE Canada, 22-23 October 2009

I.D. Margaris, A.D. Hansen, N.A. Cutululis, P. Sørensen and N.D. Hatziargyriou, “Dynamic security issues of autonomous power systems with increasing wind power penetration”, EWEC 2010, Warsaw, Poland, April 2010

I.D. Margaris and N. Hatziargyriou, “Power Systems and Modern Wind Power Technology – Modeling and Control Issues”, 4th International Conference from Scientific Computing to Computational Engineering, Athens, Greece, July 2010

I.D. Margaris and N.D. Hatziargyriou, “Direct Drive Synchronous Generator Wind Turbine Models for Power System Studies”, 7th Mediterranean Conference and Exhibition on Power Generation, Transmission, Distribution and Energy Conversion (MedPower 2010), Agia Napa, Cyprus, 7-10 November 2010

Γ.Δ. Μάργαρης και Ν.Δ. Χατζηαργυρίου, “Διερεύνηση λειτουργίας μη διασυνδεδεμένων συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας με αυξανόμενη διείσδυση αιολικής ενέργειας”, RENES 2010, Αθήνα, Ελλάδα, Μάιος 2010

S. Araposthathis, F. Tsaglioti, K. Vlantoni, I. D. Margaris, V. Aggelopoulou and A. Tympas, “Power and resistance from nuclear plants to wind parks: A history of the Greek experience”, ICOHTEC Conference, Tampere, Finland, 10-15th August, 2010

I.D. Margaris, A.I. Tsouchnikas, N.D. Hatziargyriou, “Modeling and Control Capabilities of Variable Speed Wind Turbines with Direct Drive Synchronous Generator”, EWEC 2011, Brussels, Belgium, March 2011

Δημοσιεύσεις με διαδικασία αξιολόγησης από ομότιμους (peer reviewed papers)

I.D. Margaris, A.D. Hansen, N.A. Cutululis, P. Sørensen and N.D. Hatziargyriou, “Impact of Wind Power in Autonomous Power Systems - Power Fluctuations – Modeling and Control Issues”, Wind Energy J. 2010, published online: DOI: 10.1002/we.417, vol. 14, (1), pp. 133-153, 2011

I.D. Margaris, A.D. Hansen, P. Sørensen and N.D. Hatziargyriou, “Illustration of Modern Wind Turbine Ancillary Services”, Wind Energy issue of Energies Journal (MDPI), vol. 3, (6), DOI: 10.3390/en3061290, pp. 1290-1302, 2010

I.D. Margaris, A. Tsouchnikas and N. Hatziargyriou, “Modeling and Fault Ride-Through Capability of Doubly Fed Induction Generator Wind Turbines”, accepted for publication in Handbook of Wind Power Systems, ed. Springer, 2011

I.D. Margaris, A.D. Hansen, P. Sørensen and N.D. Hatziargyriou, “Dynamic Security Issues in Autonomous Power Systems with increasing Wind Power Penetration”, Electric Power Systems Research (EPSR) J., vol. 81, (4), April 2011, pp. 880-887

I.D. Margaris, A.D. Hansen, N.A. Cutululis, P. Sørensen and N.D. Hatziargyriou, “Operation and control of wind farms in non-interconnected power systems”, chapter in book *Wind Farm / Book 2*, InTech Publishers, April 2011

I.D. Margaris, S.A. Papathanassiou, A.D. Hansen, P. Sørensen and N.D. Hatziargyriou “Frequency control in autonomous power systems with high wind power penetration”, under review in IEEE Transactions on Sust. Energy, May 2011

L. Zeni, A. Rudolph, J. M. Swendsen, I.D. Margaris, A.D. Hansen, P. Sørensen, “Virtual inertia for variable speed wind turbines”, under review in Wind Energy J., May 2011