



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

Συμβολή της Αιολικής Διείσδυσης στην Ευστάθεια
των Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Γιώργου Τσουράκη

Αθήνα, Μάρτιος 2010



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

Συμβολή της Αιολικής Διείσδυσης στην Ευστάθεια των Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Γιώργου Τσουράκη

Διπλ. Μηχανολόγου Μηχανικού ΕΜΠ (2001)
DEA en Réseaux d'Énergie Electrique ULg (2003)

Συμβουλευτική Επιτροπή: Κωνσταντίνος Βουρνάς (επιβλέπων)
Νικόλαος Χατζηαργυρίου
Σταύρος Παπαθανασίου

Εγκρίθηκε από την επταμελή εξεταστική επιτροπή στις 12 Μαρτίου 2010.

.....
Κ. Βουρνάς
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Ν. Χατζηαργυρίου
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Σ. Παπαθανασίου
Επ. Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Γ. Κορρές
Αν. Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Ε. Παπαδόπουλος
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Ε. Διαλυνάς
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Γρ. Παπαγιάννης
Επ. Καθηγητής
ΑΠΘ

Η διατριβή αυτή υποστηρίχτηκε από την υποτροφία του Ιδρύματος Κρατικών Υποτροφιών με ειδίκευση “Τεχνολογία Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας” και σύμφωνα με τη σύμβαση με αριθμό 4162 της 1^{ης} Φεβρουαρίου 2004.

.....

Γιώργος Τσουράκης
Δρ. Μηχανικός ΕΜΠ

Copyright © Γιώργος Τσουράκης, 2010.
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 διατριβή ασχολείται με την παράσταση των ανεμογεννητριών σε μελέτες ευστάθειας Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ) και με τη συμβολή τους στην ευστάθεια ΣΗΕ, κυρίως στη βραχυπρόθεσμη ευστάθεια τάσης και την ευστάθεια μικρών διαταραχών. Μεγαλύτερη έμφαση δίνεται στις ανεμογεννήτριες με Ασύγχρονη Γεννήτρια Διπλής Τροφοδότησης (ΑΓΔΤ), οι οποίες είναι σήμερα οι πιο διαδεδομένες. Αρκετά συμπεράσματα όμως αφορούν και στην άλλη κατηγορία ανεμογεννητριών μεταβλητών στροφών, με μετατροπέα πλήρους ισχύος.

Στο πλαίσιο της διατριβής αναπτύχθηκαν μία σειρά από μοντέλα για ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών, κατάλληλα για μελέτες ευστάθειας ΣΗΕ, με βάση και την πλούσια βιβλιογραφία των τελευταίων χρόνων (παράλληλη με την ανάπτυξη της αιολικής ενέργειας διεθνώς). Τα μοντέλα αναπτύχθηκαν σε περιβάλλον Matlab/Simulink και στο πλαίσιο του προγράμματος WHSSP του εργαστηρίου ΣΗΕ του ΕΜΠ για προσομοιώσεις ΣΗΕ. Καθώς τα μοντέλα αναπαριστούν τις ανεμογεννήτριες με διαφορετικά επίπεδα λεπτομέρειας, διερευνήθηκαν οι διάφορες παραδοχές που γίνονται στα μοντέλα και η επίδρασή τους στην ευστάθεια.

Με τα μοντέλα αυτά εξετάζεται η αδιάλειπτη λειτουργία των ανεμογεννητριών σε βυθίσεις τάσης, μία βασική απαίτηση πλέον των διαχειριστών συστημάτων μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, προκειμένου να μπορεί να αυξάνεται η αιολική διείσδυση χωρίς να τίθεται σε κίνδυνο η δυναμική ασφάλεια των ΣΗΕ. Διερευνάται επίσης πώς μπορεί να αναπαρασταθεί με ικανοποιητική ακρίβεια η συμπεριφορά των ανεμογεννητριών στις μελέτες ευστάθειας κατά τη διάρκεια βυθίσεων της τάσης που προκαλούνται από μεγάλες διαταραχές.

Στη συνέχεια, εξετάζεται η συμβολή αιολικών πάρκων με ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών στη βραχυπρόθεσμη ευστάθεια τάσης. Μέσω προσομοιώσεων σε μικρά δοκιμαστικά συστήματα, αλλά και σε παραλλαγή του συστήματος της Ν. Εύβοιας, συμπεραίνεται ότι οι ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών βελτιώνουν την ευστάθεια τάσης σε σχέση με τις ανεμογεννήτριες σταθερών στροφών με μηχανές επαγωγής. Η θετική επίδραση είναι πιο σημαντική όταν γίνεται πλήρης αξιοποίηση της δυνατότητάς τους για άεργη υποστήριξη.

Μεγάλο μέρος της διατριβής αφορά στην ευστάθεια μικρών διαταραχών. Καταρχάς εξετάζεται η ευστάθεια μίας ανεμογεννήτριας με ΑΓΔΤ σε σύνδεση με άπειρο ζυγό. Αναλύεται η ευστάθεια ελέγχου των στροφών και προσδιορίζονται οι ρυθμοί απόκρισης που εισάγει στο ΣΗΕ η ΑΓΔΤ. Χρησιμοποιώντας ένα μοντέλο με λεπτομερείς βρόχους ελέγχου με βάση δεδομένα συγκεκριμένου κατασκευαστή, διαπιστώνεται ότι μπορεί να εισάγεται σημαντική δυναμική από το βρόχο ελέγχου της αέργου ισχύος. Αναλύεται η ευστάθεια του συγκεκριμένου βρόχου και διατυπώνονται γενικοί κανόνες.

Στη συνέχεια γίνεται ανάλυση της ευστάθειας μικρών διαταραχών ενός διασυνδεδεμένου ΣΗΕ με τοπική σύγχρονη γεννήτρια για διάφορες συνθήκες λειτουργίας και επίπεδα αιολικής διείσδυσης. Διαπιστώνεται ότι γενικά η επίδραση της αιολικής διείσδυσης είναι θετική, δηλαδή αυξάνεται η απόσβεση της διασυνδεδετικής ταλάντωσης. Για τις περιπτώσεις που εμφανίζονται αρνητικές αλληλεπιδράσεις προτείνεται ρύθμιση του βρόχου αέργου ισχύος. Γίνεται εφαρμογή στο Ελληνικό Διασυνδεδεμένο Σύστημα, όπου εξετάζεται η επίδραση υψηλής

αιολικής διείσδυσης στην ευστάθεια μικρών διαταραχών, χρησιμοποιώντας ένα μοντέλο με λεπτομερή αναπαράσταση των συστημάτων της ΝΑ Ευρώπης. Διαπιστώνεται μικρή θετική επίδραση στις διασυνδεδετικές ταλαντώσεις και γίνεται ρύθμιση του βρόχου αέργου ισχύος των ανεμογεννητριών για τη βελτίωση της ευστάθειάς του.

Τέλος γίνεται εισαγωγή και ανάλυση ενός αιολικού σταθεροποιητή για αύξηση της απόσβεσης των ταλαντώσεων διασύνδεσης. Γίνεται σχεδίαση και εφαρμογή του αιολικού σταθεροποιητή σε δύο δοκιμαστικά συστήματα που εμφανίζουν μη αποσβενύμενες ταλαντώσεις και επιτύγχανεται η ικανοποιητική σταθεροποίησή τους.

Λέξεις κλειδιά

Ευστάθεια συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας, αιολική ενέργεια, ασύγχρονη γεννήτρια διπλής τροφοδότησης, ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών, ευστάθεια τάσης, ευστάθεια μικρών διαταραχών, διασυνδεδετικές ταλαντώσεις, αιολικός σταθεροποιητής ΣΗΕ.

ABSTRACT

The subjects of this thesis is modelling of wind generators for power system stability studies and their impact on power system stability, mainly short-term voltage stability and small-signal stability. Emphasis is given on Doubly Fed Asynchronous Generator (DFAG) which is the most popular scheme used today in wind generators. However, many conclusions refer to the other important category of full-converter variable-speed wind generators.

Different models for variable speed wind turbines were developed, appropriate for power system stability studies, based on the rich literature of recent years (parallel to international wind power development). The models were developed in Matlab/Simulink and in the frame of the power system simulation program WHSSP of the Electric Energy Systems Lab of NTUA. As the models represent wind generators in different level of detail, the various model assumptions are investigated, as well as their effect on stability.

The models are used to investigate the low voltage ride-through capability of wind generators, a basic demand by transmission system operators, so that wind power penetration can increase without jeopardizing power system dynamic security. Modelling of the wind generator behavior during severe voltage sags, assuming low voltage ride-through capability is also investigated.

Next, the contribution of variable-speed wind generators to short-term voltage stability is examined. Simulations in small test power systems and in the Evia network show that variable-speed wind generators improve voltage stability compared to constant-speed wind generators. The positive impact is most important when their reactive support capability is fully utilized.

A large part of the thesis concerns small-signal stability. First, the stability of a DFAG - infinite bus system is investigated. Speed control stability is analyzed and the DFAG response modes are specified. Using a DFAG model with detailed control loops, based on manufacturer data, it is ascertained that the reactive power control loop can introduce important dynamics. Stability of the specific control loop is analyzed and general rules are outlined.

Next, a typical interconnected power system with local conventional power generation is investigated for various operating conditions and wind power penetration levels. As a general remark, the effect of wind power penetration is positive, i.e. damping of the interarea oscillation increases. For the cases where negative interaction occurs, it is shown that it can be avoided by the proposed tuning of the wind parks reactive power control loop.

The impact of DFAG dynamic models on small-signal stability of the Hellenic Interconnected system is also investigated in cooperation with the Hellenic Transmission System Operator (HTSO). At the examined operating point, a small positive impact on interarea oscillations is observed and appropriate tuning of the DFAG reactive power control loop is

proposed, when necessary, to improve its stability.

Finally, the thesis introduces and analyzes a power system stabilizer for wind generators (Wind PSS) to improve damping of interarea oscillations. The proposed controller is simple and similar to those proposed in the literature to emulate inertia in autonomous power systems. In the thesis the Wind PSS is designed to increase damping of sustained oscillations in two test systems with satisfactory results.

Key words

Power system stability, wind power, Doubly-Fed Asynchronous Generator, variable-speed wind generators, voltage stability, small-signal stability, interarea oscillations, Wind PSS.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η διατριβή αυτή ξεκίνησε τον Νοέμβριο του 2003 και ολοκληρώθηκε τον Μάρτιο του 2010.

Θέλω, καταρχάς, να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα Καθηγητή ΕΜΠ κ. Κώστα Βουρνά για την πολύπλευρη υποστήριξή του όλο αυτό το διάστημα. Υποστήριξη που έπαιξε τον βασικό ρόλο στη διαμόρφωση ενός πλαισίου ακαδημαϊκής ελευθερίας, το οποίο είχα την τύχη, αλλά και την ευθύνη να αξιοποιήσω όσο μπορώ. Ειδικά οι επιστημονικές του υποδείξεις και η διαθεσιμότητά του να παρακολουθήσει σε βάθος κάθε βήμα της ερευνητικής προσπάθειας συνέβαλαν καθοριστικά στο περιεχόμενο και την ολοκλήρωση της διατριβής.

Στη συνέχεια, θέλω να ευχαριστήσω τον Dr. Thierry Van Cutsem, Καθηγητή στο Πανεπιστήμιο της Λιέγης. Η συνεργασία μαζί του, κυρίως στο πλαίσιο του μεταπτυχιακού στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας, αποτέλεσε πηγή έμπνευσης για αυτή τη διατριβή. Ευχαριστώ, επίσης, τον Καθηγητή ΕΜΠ κ. Νίκο Χατζηαργυρίου και τον Επίκουρο Καθηγητή ΕΜΠ κ. Σταύρο Παπαθανασίου, μέλη της τριμελούς συμβουλευτικής επιτροπής, για τη βοήθειά τους.

Ευχαριστώ πολύ τους Δρ. μηχανικούς ΕΜΠ Γιώργο Μάνο, Μιχάλη Καρυστιανό και Βασίλη Νικολαΐδη, τους/τις υποψήφιους διδάκτορες Αίγλη Μέτσιου, Μαρία Κοτλίδα, Βαγγέλη Φαραντάτο, Γιάννη Μάντζαρη και Χαράλαμπο Λάμπρου, καθώς και τον ηλεκτρολόγο μηχανικό ΕΜΠ Σωτήρη Νάνου με τους οποίους συνεργαστήκαμε κατά καιρούς στο πλαίσιο της διατριβής.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω στον Δρ. μηχανικό ΕΜΠ Μανόλη Ποταμιανάκη, ο οποίος στη διατριβή του ανέπτυξε το λογισμικό WHSSP, που χρησιμοποιήθηκε συστηματικά και σε αυτή τη διατριβή, καθώς και στον Δρ. μηχανικό Νίκο Σακελλαρίδη, πολύτιμο συμπαραστάτη σε προβλήματα της στοιχειοθεσίας με το \LaTeX .

Ευχαριστώ πολύ, επίσης, τον μηχανικό του ΔΕΣΜΗΕ και Δρ. μηχανικό ΕΜΠ Βασίλη Νομικό με τον οποίο συνεργαστήκαμε στο πλαίσιο της διατριβής με αφορμή ερευνητικές συνεργασίες του ΕΜΠ με τον ΔΕΣΜΗΕ.

Ακόμη, ευχαριστώ τον παραλίγο μηχανολόγο μηχανικό ΕΜΠ Αρίστο Γιαννόπουλο για την επιμέλεια μέρους του κειμένου.

Τέλος, ευχαριστώ όσους και όσες με στήριξαν όλα αυτά τα χρόνια, ανεξάρτητα από το αν είχαν άμεση εμπλοκή με τη διατριβή, και ιδιαίτερα τους γονείς μου.

*G. T.
Αθήνα, Μάρτιος 2010*

Περιεχόμενα

1	Εισαγωγή	1
1.1	Αιολική ενέργεια και ηλεκτροπαραγωγή	1
1.2	Ευστάθεια ΣΗΕ	2
1.3	Τεχνικά χαρακτηριστικά ανεμογεννητριών	3
1.4	Απαιτήσεις από διαχειριστές συστημάτων μεταφοράς	7
1.4.1	Αδιάλειπτη λειτουργία σε βυθίσεις τάσης	7
1.4.2	Έλεγχος ενεργού ισχύος και συχνότητας	9
1.4.3	Έλεγχος τάσης και αέργου ισχύος	10
1.5	Επισκόπηση βιβλιογραφίας	10
1.5.1	Αναπαράσταση αιολικών πάρκων σε μελέτες ευστάθειας ΣΗΕ	10
1.5.2	Αιολική ενέργεια και ευστάθεια ΣΗΕ	13
1.6	Αντικείμενο και δομή διατριβής	16
2	Περιγραφή ανεμογεννητριών μεταβλητών στροφών και συστημάτων ελέγχου	19
2.1	Πτερωτή	19
2.2	Έλεγχος στροφών για μέγιστη απολαβή ισχύος	19
2.3	Έλεγχος γωνίας βήματος πτερυγίων	20
2.4	Σύστημα μετάδοσης κίνησης	22
2.5	Ασύγχρονη Γεννήτρια Διπλής Τροφοδότησης (ΑΓΔΤ)	22
2.5.1	Εξισώσεις ασύγχρονης μηχανής διπλής τροφοδότησης	23
2.5.2	Ενέργεια, ισχύς και ροπή	24
2.5.2.1	Οιονεί ημιτονοειδής κατάσταση	26
2.5.2.2	Μόνιμη κατάσταση	27
2.5.3	Διανυσματικός έλεγχος	27
2.5.4	Έλεγχος μετατροπέα πλευράς δρομέα	29
2.5.5	Έλεγχος μετατροπέα πλευράς δικτύου και δυναμική DC πυκνωτή	30
2.6	Γεννήτρια με πλήρη μετατροπέα	31
2.7	Αδιάλειπτη λειτουργία σε βυθίσεις τάσης	32
3	Μοντέλα ανεμογεννητριών μεταβλητών στροφών	37
3.1	Λογισμικό προσομοίωσης WHSSP	37
3.2	Μοντέλα ανεμογεννητριάς διπλής τροφοδότησης με απλοποιημένους βρόχους ελέγχου	39
3.2.1	“Αλγεβρικό” μοντέλο	41
3.2.2	“Μεταβατικό” μοντέλο	41
3.2.3	Παράσταση ρυθμιστών μετατροπέα πλευράς δρομέα	42
3.2.4	Παράσταση μετατροπέα πλευράς δικτύου και πυκνωτή συνεχούς	44
3.2.5	Παράσταση ρυθμιστή γωνίας βήματος	44

3.2.6	Παράσταση συστήματος μετάδοσης κίνησης και πτερωτής	45
3.2.7	Επίλυση του προβλήματος αρχικοποίησης	46
3.2.8	Όρια λειτουργίας	47
3.3	Μοντέλο ανεμογεννήτριας διπλής τροφοδότησης με λεπτομερείς βρόχους ελέγχου	48
3.4	Γενικευμένο απλοποιημένο μοντέλο ανεμογεννητριών μεταβλητών στροφών ...	53
4	Ευστάθεια ΑΓΔΤ σε σύνδεση με άπειρο ζυγό	59
4.1	Ευστάθεια ελέγχου στροφών	59
4.2	Ρυθμοί απόκρισης μοντέλου ΑΓΔΤ με απλοποιημένους βρόχους ελέγχου	63
4.2.1	Μεταβολή ιδιοτιμής της εξίσωσης κίνησης με το σημείο λειτουργίας ...	63
4.2.2	Επιλογή κερδών ρυθμιστή βήματος πτερυγίων	64
4.2.3	Ρύθμιση ελεγκτών μεταβατικού μοντέλου	68
4.3	Ρυθμοί απόκρισης μοντέλου με λεπτομερείς βρόχους ελέγχου	70
4.3.1	Προσομοίωση στο PSS/E και επαλήθευση μοντέλου Simulink	70
4.3.2	Επίδραση καθυστέρησης βρόχου κλειδώματος φάσης	73
4.4	Ευστάθεια ελέγχου αέργου ισχύος	75
4.4.1	Έλεγχος συντελεστή ισχύος	75
4.4.2	Έλεγχος τάσης	77
5	Αδιάλειπτη λειτουργία σε βυθίσεις τάσης	83
5.1	Ενεργός διάταξη βραχυκύκλωσης δρομέα	83
5.1.1	Περιγραφή λειτουργίας	83
5.1.2	Προσομοιώσεις με απομονωμένη ΑΓΔΤ	85
5.1.3	Προσομοίωση σε σύστημα ΑΓΔΤ - άπειρος ζυγός	90
5.2	Απόκριση γενικευμένου μοντέλου σε προσομοιώσεις βραχυκυκλωμάτων	96
5.2.1	Σύγκριση γενικευμένου μοντέλου ΑΓΔΤ με μεταβατικό μοντέλο με ενεργό διάταξη βραχυκύκλωσης	96
5.2.2	Ανεμογεννήτριες με ΑΓΔΤ και πλήρη μετατροπέα με και χωρίς άεργη υποστήριξη	98
6	Επίδραση ανεμογεννητριών μεταβλητών στροφών στην ευστάθεια τάσης	101
6.1	Μικρό διασυνδεδεμένο ΣΗΕ	101
6.1.1	Περιορισμένη τοπική στήριξη τάσης	101
6.1.2	Προσομοιώσεις βραχυκυκλωμάτων	106
6.1.3	Σύγκριση αποκρίσεων μοντέλων ΑΓΔΤ και πλήρους μετατροπέα	109
6.2	Εφαρμογή στο ΣΗΕ της Ν. Εύβοιας	113
6.2.1	Περιγραφή του συστήματος	113
6.2.2	Αποτελέσματα προσομοιώσεων	114
7	Επίδραση αιολικής διείδυσης στην ευστάθεια μικρών διαταραχών	119
7.1	Μικρό διασυνδεδεμένο ΣΗΕ με μεταβλητή συμβατική παραγωγή	119
7.1.1	Περιγραφή του συστήματος	119
7.1.2	Περίπτωση με συμβατική μονάδα μεταβλητών MVA	122
7.1.3	Περίπτωση με συμβατική μονάδα σταθερών MVA	128
7.2	Μικρό διασυνδεδεμένο ΣΗΕ με σταθερή συμβατική παραγωγή	129
7.2.1	Περιγραφή του συστήματος	130
7.2.2	Επίδραση αύξησης της αιολικής παραγωγής	131
7.2.3	Ροπή απόσβεσης σύγχρονης γεννήτριας	132

7.2.4	Επίδραση μεταβολής ενεργού ισχύος	133
7.2.5	Επίδραση μεταβολής αέργου ισχύος	135
7.3	Εφαρμογή στο Ελληνικό διασυνδεδεμένο σύστημα	136
7.3.1	Περιγραφή συστήματος	137
7.3.2	Ηλεκτρομηχανικοί ρυθμοί ταλάντωσης Βαλκανικού Συστήματος	138
7.3.3	Ρύθμιση του ελέγχου αέργου ισχύος της ΑΓΔΤ	142
8	Εισαγωγή αιολικού σταθεροποιητή ΣΗΕ	145
8.1	Αιολικός σταθεροποιητής ΣΗΕ	145
8.2	Εφαρμογή αιολικού σταθεροποιητή σε μικρό διασυνδεδεμένο σύστημα	147
8.3	Εφαρμογή αιολικού σταθεροποιητή σε αυτόνομο σύστημα δύο περιοχών	149
8.3.1	Περιγραφή συστήματος δύο περιοχών	149
8.3.2	Επίδραση αύξησης αιολικής διείσδυσης	151
8.3.3	Σχεδιασμός αιολικού σταθεροποιητή	153
8.3.4	Αποτελέσματα προσομοιώσεων	157
9	Συμπεράσματα - Συμβολή - Προοπτικές	161
9.1	Ανακεφαλαίωση και συμπεράσματα	161
9.2	Συμβολή της διατριβής και προοπτικές	166
A	Παράμετροι μοντέλων	169
A.1	Παράμετροι μοντέλων ΑΓΔΤ με απλοποιημένους βρόχους ελέγχου	169
A.2	Παράμετροι μοντέλου ΑΓΔΤ με λεπτομερείς βρόχους ελέγχου	170
A.3	Παράμετροι γενικευμένου μοντέλου ανεμογεννητριών μεταβλητών στροφών ...	171
B	Σχεδίαση σταθεροποιητή με τη μέθοδο ολοκληρωτικών υπολοίπων	173
B.1	Ελεγχιμότητα και παρατηρησιμότητα ρυθμού απόκρισης	173
B.2	Συνάρτηση μεταφοράς και ολοκληρωτικά υπόλοιπα	174
B.3	Σχεδίαση σταθεροποιητή	175
	Βιβλιογραφία	177
	Δημοσιεύσεις	187

Κατάλογος Συντμήσεων

α.μ.	:	Ανά μονάδα
ΑΓΔΤ	:	Ασύγχρονη Γεννήτρια Διπλής Τροφοδότησης
ΑΡΤ	:	Αυτόματος Ρυθμιστής Τάσης
ΔΕΣΜΗΕ	:	Διαχειριστής Ελληνικού Συστήματος Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας
ΕΜΠ	:	Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Μ/Σ	:	Μετασχηματιστής
ΜΤ	:	Μέση Τάση
ΣΑΤΥΦ	:	Σύστημα Αλλαγής Τάσης Υπό Φορτιό
ΣΗΕ	:	Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας
ΥΤ	:	Υψηλή Τάση
ΧΤ	:	Χαμηλή Τάση
Ε.ΟΝ	:	E.ON Netz GmbH, Διαχειριστής Συστήματος Μεταφοράς (Γερμανία)
DFAG	:	Doubly Fed Asynchronous Generator
FACTS	:	Flexible AC Transmission Systems
FC	:	Full Converter
HVDC	:	High Voltage Direct Current
REE	:	Red Eléctrica de España (Διαχειριστής Ισπανικού συστήματος μεταφοράς)
PSS	:	Power System Stabilizer
PSS/E	:	Power System Simulator for Engineering (Siemens-PTI)
STATCOM	:	Static Synchronous Compensator
SVC	:	Static Var Compensator
WHSSP	:	Wind-Hybrid Systems Simulation Package

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

1.1 Αιολική ενέργεια και ηλεκτροπαραγωγή

Τα τελευταία χρόνια η αιολική ενέργεια παρουσιάζει ραγδαία ανάπτυξη με αποτέλεσμα να σημειώνονται όλο και υψηλότερα επίπεδα διείσδυσης σε αρκετά Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ). Στη Δανία περίπου 20% της ηλεκτρικής ενέργειας προέρχεται από την αιολική και στη Γερμανία 7%. Στην Ισπανία και την Πορτογαλία, συστήματα με περιορισμένη διασύνδεση με την υπόλοιπη Ευρώπη, το αντίστοιχο ποσοστό είναι 11%. Η Ιρλανδία, ένα αυτόνομο σύστημα, παράγει το 9% της ηλεκτρικής της ενέργειας από αιολικά. Στην Ελλάδα, μέχρι σήμερα, υψηλά ποσοστά αιολικής διείσδυσης έχουν σημειωθεί στα αυτόνομα νησιωτικά συστήματα, όπως της Κρήτης (περίπου 14% της ηλεκτρικής ενέργειας).

Όπως κάθε πηγή ενέργειας, η αιολική ενέργεια έχει ιδιαίτερα χαρακτηριστικά και η υψηλή συμμετοχή της στα ΣΗΕ επιφέρει αλλαγές σε όλα τα σχετικά θέματα και όλες τις χρονικές κλίμακες: από τον σχεδιασμό ανάπτυξης του ΣΗΕ έως την οικονομική κατανομή και την εκτίμηση δυναμικής ασφάλειας. Χαρακτηριστική ιδιαιτερότητα είναι η μη αποθήκευση της πρωτογενούς πηγής ενέργειας. Λόγω αυτού οι ανεμογεννήτριες αντικαθιστούν περισσότερο ενέργεια και λιγότερο εγκατεστημένη ισχύ. Βασικά και προφανή οφέλη τους είναι η μείωση της κατανάλωσης καυσίμων και των αντίστοιχων ρύπων. Η υψηλή αιολική διείσδυση αυξάνει την αξία της αποθήκευσης της ενέργειας στα ΣΗΕ (μετά τη μετατροπή της σε ηλεκτρική) και της διαχείρισης του φορτίου. Σημαντική ιδιαιτερότητα είναι επίσης η χρήση διαφορετικών συστημάτων ηλεκτρομηχανικής μετατροπής ενέργειας σε σχέση με τις σύγχρονες γεννήτριες των συμβατικών μονάδων παραγωγής, των οποίων τα χαρακτηριστικά και η συμπεριφορά έχει μελετηθεί επί δεκαετίες.

Είναι προφανές ότι στη διαδικασία αύξησης της αιολικής διείσδυσης στα ΣΗΕ απαιτείται κατάλληλη αναπαράσταση των αιολικών πάρκων στις μελέτες ευστάθειας και διερεύνηση των επιπτώσεων στην ασφάλεια των συστημάτων. Αξίζει να σημειωθεί, σαν γενική παρατήρηση όμως, ότι η “επίπτωση της αιολικής παραγωγής στην ασφάλεια και τη λειτουργία των ΣΗΕ”, δεν είναι μία στατική, μονόδρομη διαδικασία, αλλά δυναμική και αμφίδρομη.

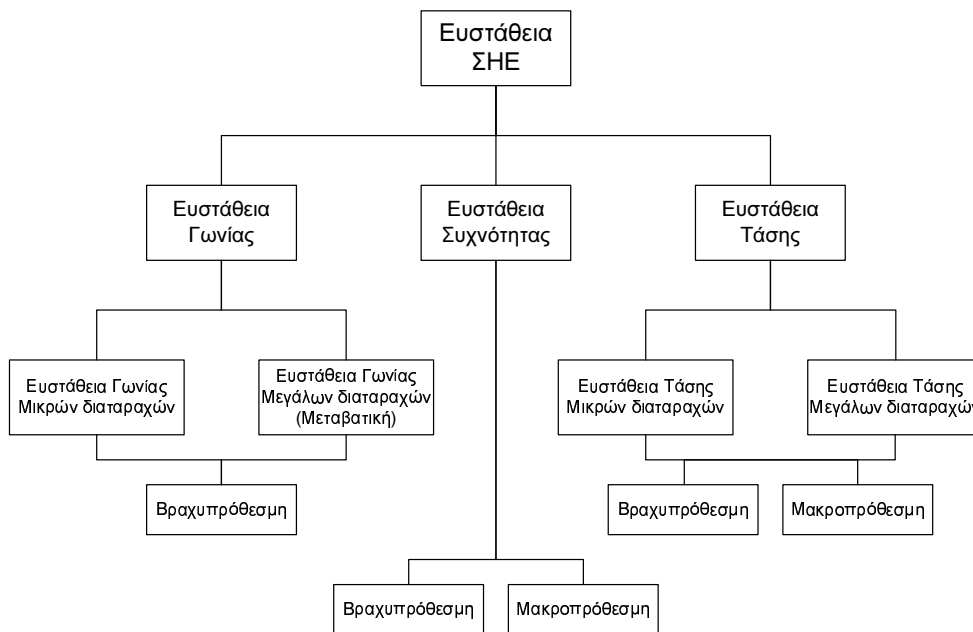
Χαρακτηριστικό είναι ότι τα πρώτα χρόνια της ανάπτυξης της αιολικής ενέργειας, οι ανεμογεννήτριες αντιμετωπίζονταν καθαρά σαν “αρνητικά φορτία”, είχαν δηλαδή τις ίδιες υποχρέωσεις με τους καταναλωτές οι οποίες αφορούσαν κυρίως σε ζητήματα ποιότητας ισχύος στο δίκτυο διανομής όπου συνδέονταν κυρίως (π.χ. αρμονικές, αντιστάθμιση αέργου ισχύος). Στη συνέχεια, καθώς αυξήθηκε η αιολική ισχύς (συνολικά, αλλά και σε κάθε αιολικό πάρκο ξεχωριστά), η επίδρασή της άρχισε να γίνεται αισθητή στα συστήματα μεταφοράς. Έτσι ξεκίνησε μια διαδικασία αλληλεπίδρασης μεταξύ των ΣΗΕ, των κανονισμών για τα αιολικά πάρκα που εκδίδουν οι διαχειριστές και των κατασκευαστών των ανεμογεννητριών.

Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή

Για παράδειγμα, αρχικά οι ανεμογεννήτριες αποσυνδέονταν από το δίκτυο σε περίπτωση εμφάνισης ενός βραχυκυκλώματος για λόγους δικής τους προστασίας και δεδομένου ότι δεν είχαν υποχρέωση να παραμείνουν συνδεδεμένες. Σύντομα έγινε φανερό ότι το γεγονός αυτό έθετε περιορισμό στη στιγμιαία αιολική διείσδυση, αφού ένα βραχυκύκλωμα μπορούσε να προκαλέσει την ξαφνική απώλεια τεράστιας ποσότητας ισχύος. Για το λόγο αυτό από το 2000 περίπου, όταν εμφανίστηκαν οι πρώτοι κανονισμοί που επέβαλαν ορισμένες υποχρεώσεις στα αιολικά πάρκα που συνδέονται στο σύστημα μεταφοράς [elt00,eon01], μια βασική υποχρέωση είναι η *αδιάλειπτη λειτουργία σε βύθιση τάσης ή αδιάλειπτη λειτουργία σε σφάλμα* (Low Voltage Ride-Through η Fault Ride Through), γεγονός που οδήγησε τους κατασκευαστές ανεμογεννητριών στην ανάπτυξη της κατάλληλης τεχνολογίας.

1.2 Ευστάθεια ΣΗΕ

Η ευστάθεια ενός ΣΗΕ ορίζεται από την ικανότητα του συστήματος, για ένα δεδομένο αρχικό λειτουργικό σημείο, να επανακτά ένα αποδεκτό σημείο λειτουργίας μετά από μία διαταραχή, ώστε το συνολικό σύστημα να παραμένει πρακτικά αμετάβλητο [iee02].



Σχήμα 1.1: Κατηγοριοποίηση ευστάθειας ΣΗΕ [iee02]

Η μελέτη ευστάθειας των ΣΗΕ διευκολύνεται σημαντικά διαχωρίζοντας τα φαινόμενα της ευστάθειας σε κατάλληλες κατηγορίες, όπως φαίνεται στο Σχ. 1.1. Η κατηγοριοποίηση των φαινομένων ευστάθειας των ΣΗΕ ακολουθεί τα παρακάτω κριτήρια [Kun94]:

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

Οι κατηγορίες της ευστάθειας ΣΗΕ ανάλογα με τη φύση των εμπλεκόμενων φαινομένων είναι οι εξής [Kun94, iee02]:

- Η *ευστάθεια γωνίας* αναφέρεται στην ικανότητα των σύγχρονων μηχανών ενός διασυνδεδεμένου συστήματος να παραμένουν σε συγχρονισμό με το δίκτυο μετά από μία διαταραχή. Η ευστάθεια αυτού του είδους εξαρτάται από την ικανότητα κάθε σύγχρονης μηχανής να διατηρεί ή να αποκαθιστά την ισορροπία μεταξύ της αναπτυσσόμενης ηλεκτρομαγνητικής και της μηχανικής ροπής εισόδου.
- Η *ευστάθεια συχνότητας* αναφέρεται στην ικανότητα ενός ΣΗΕ να διατηρεί τη συχνότητά του εντός ενός προκαθορισμένου εύρους τιμών μετά από μία διαταραχή, η οποία διαταράσσει το συνολικό ισοζύγιο μεταξύ παραγόμενης και καταναλισκόμενης ισχύος.
- Η *ευστάθεια τάσης* αναφέρεται στην ικανότητα του συστήματος να διατηρεί αποδεκτές τιμές τάσεων σε όλους τους ζυγούς όταν υποβάλλεται σε μία διαταραχή από ένα δεδομένο αρχικό σημείο λειτουργίας. Ο συνήθης ορισμός για την αστάθεια τάσης είναι ότι αυτή προκαλείται από την απόπειρα του φορτίου (μέσω της δυναμικής του συμπεριφοράς) να αυξήσει την ισχύ, που καταναλώνει, πέρα από τη φυσική ικανότητα μεταφοράς του συνδυασμένου συστήματος παραγωγής και μεταφοράς [vCV98].

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

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

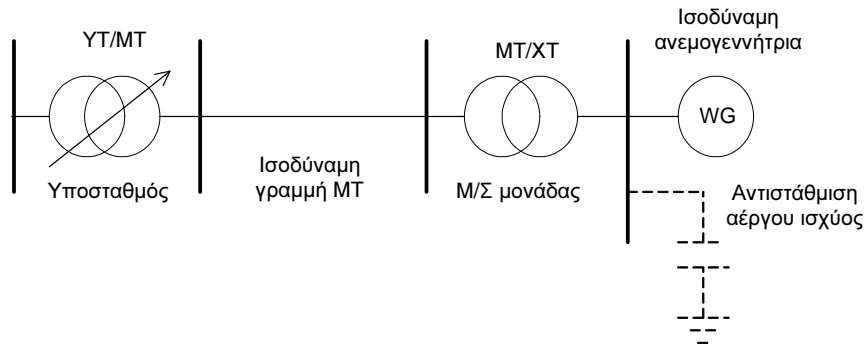
Τέλος, συνήθίζεται η ευστάθεια να διαχωρίζεται με βάση την κινητήρια δύναμη των μηχανισμών αστάθειας σε *οδηγούμενη από την παραγωγή* (ευστάθεια γωνίας και συχνότητας) και *οδηγούμενη από το φορτίο* (ευστάθεια τάσης) [vCV98]. Σημειώνεται ότι στη βραχυπρόθεσμη χρονική κλίμακα δεν υπάρχει πάντα ξεκάθαρος διαχωρισμός μεταξύ των δύο παραπάνω ειδών, καθώς και ότι η διάκριση της κινητήριας δύναμης της αστάθειας δεν αποκλείει τη συμμετοχή των υπόλοιπων συνιστωσών του συστήματος.

1.3 Τεχνικά χαρακτηριστικά ανεμογεννητριών

Όπως είναι γνωστό, οι ανεμογεννήτριες εγκαθίστανται με τη μορφή αιολικών πάρκων (ή αιολικών σταθμών παραγωγής). Μία τυπική μεγάλη ανεμογεννήτρια σήμερα έχει δυναμικότητα από 850 kW έως και 5 MW και τα αιολικά πάρκα που υπάρχουν ή σχεδιάζονται στην Ελλάδα σήμερα είναι περίπου από 5 έως 50 MW, αν και υπάρχουν σχέδια και για υπεράκτια πάρκα εκατοντάδων MW.

Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή

Στις μελέτες σε επίπεδο συστήματος συνήθως χρησιμοποιείται μία ισοδύναμη ανεμογεννήτρια για μία ομάδα ανεμογεννητριών που θεωρούνται συναφείς (coherent). Η ομαδοποίηση (aggregation) γίνεται κατά κανόνα σε επίπεδο ενός αιολικού πάρκου ή και περισσότερων γειτονικών πάρκων. Το Σχ. 1.2 δείχνει μια τυπική αναπαράσταση ενός αιολικού πάρκου σε ροή φορτίου. Ανάλογα με τον τύπο της ανεμογεννήτριας μπορεί να χρησιμοποιείται αντιστάθμιση



Σχήμα 1.2: Τυπική αναπαράσταση αιολικού πάρκου σε ροή φορτίου

αέργου ισχύος. Όπως κάθε μεμονωμένη ανεμογεννήτρια, έτσι και η ισοδύναμη συνδέεται στον αντίστοιχο μετασχηματιστή χαμηλής/μέσης τάσης. Η γραμμή μέσης τάσης είναι ισοδύναμη του δικτύου μέσης τάσης εντός και εκτός του αιολικού πάρκου μέχρι τον υποσταθμό μέσης/υψηλής τάσης.

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

Ένα πλεονέκτημα των ανεμογεννητριών μεταβλητών στροφών είναι ότι, καθώς η ταχύτητα περιστροφής ρυθμίζεται ανάλογα με την ταχύτητα του ανέμου, επιτυγχάνεται αυξημένη ενεργειακή απόδοση. Σημαντική είναι, επίσης, η μείωση της μηχανικής καταπόνησης σε σύγκριση με τη λειτουργία σταθερών στροφών, όπου οι διακυμάνσεις του ανέμου μετατρέπονται σε ανάλογες διακυμάνσεις της ροπής. Ακόμη, οι αυξημένες δυνατότητες ελέγχου που διαθέτουν οι ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών, βοηθούν στην ευκολότερη ικανοποίηση των απαιτήσεων των διαχειριστών ΣΗΕ.

Οι ανεμογεννήτριες διακρίνονται, επίσης, με βάση τη μέθοδο περιορισμού της ισχύος στην ονομαστική της τιμή στην περιοχή λειτουργίας με υψηλές ταχύτητες ανέμου. Οι παλαιότερες, κυρίως, ανεμογεννήτριες σταθερών στροφών διαθέτουν παθητικό αεροδυναμικό έλεγχο, δηλαδή η γεωμετρία των πτερυγίων είναι σταθερή και χρησιμοποιείται το αεροδυναμικό φαινόμενο της απώλειας στήριξης (stall effect) για τον περιορισμό της ισχύος στις υψηλές ταχύτητες ανέμου. Η απώλεια στήριξης εμφανίζεται καθώς μεταβάλλεται η γωνία προσπτώσης του ανέμου στα πτερύγια (angle of attack) αυξανόμενης της ταχύτητας του ανέμου. Οι νεότερες ανεμογεννήτριες διαθέτουν σύστημα μεταβολής της γωνίας βήματος των πτερυγίων (pitch control), οπότε μειώνουν την ισχύ, μειώνοντας τη γωνία πρόσπτωσης και άρα τον αεροδυναμικό συντελεστή. Υπάρχει επίσης ο ενεργός αεροδυναμικός έλεγχος (active stall control), κατά τον οποίο η γωνία βήματος μεταβάλλεται στην αντίθετη κατεύ-

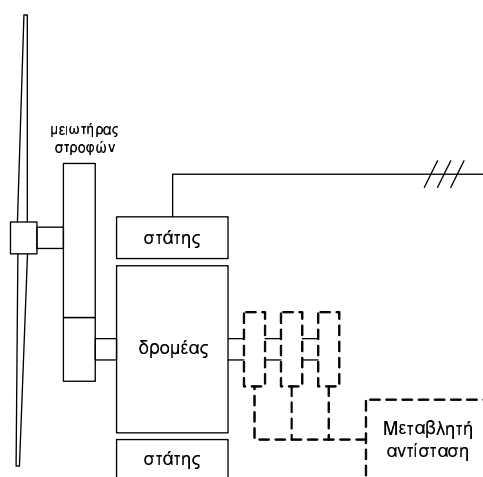
θυνση, ώστε η γωνία πρόσπτωσης να αυξηθεί και να μειωθεί ο αεροδυναμικός συντελεστής με την εκδήλωση της απώλεια στήριξης.

Οι βασικές κατηγορίες των πιο ευρέως διαδομένων ανεμογεννητριών, με βάση τη διαμόρφωση του συστήματος ηλεκτρομηχανικής μετατροπής, είναι οι εξής (σε παρένθεση η εκτίμηση του μεριδίου στην παγκόσμια αγορά το 2005 [ewe05]):

1. Σταθερών στροφών με γεννήτρια επαγωγής βραχυκυκλωμένου δρομέα (30 %)
2. Ημι-μεταβλητών στροφών με γεννήτρια επαγωγής με μεταβλητή αντίσταση δρομέα (10 %)
3. Μεταβλητών στροφών με ασύγχρονη γεννήτρια διπλής τροφοδότησης (45 %)
4. Μεταβλητών στροφών με πλήρη μετατροπέα (15 %)

Η πρώτη κατηγορία προέρχεται από την πρώτη “γενιά” ανεμογεννητριών η οποία χρησιμοποιεί απλές γεννήτριες επαγωγής, συνήθως κλωβού, απευθείας συνδεδεμένες στο δίκτυο (βλ. Σχ. 1.3). Επειδή η πτερωτή στρέφεται με σχετικά χαμηλή ταχύτητα περιστροφής, χρησιμοποιείται, επίσης, μειωτήρας στροφών. Αρκετές ανεμογεννήτριες αυτού του είδους δουλεύουν σε δύο ταχύτητες. Η χαμηλή ταχύτητα που χρησιμοποιείται στις χαμηλές ταχύτητες ανέμου έχει ως αποτέλεσμα καλύτερη απόδοση και μειωμένο θόρυβο. Δεδομένου ότι οι γεννήτριες επαγωγής καταναλώνουν άεργο ισχύ, στα αιολικά πάρκα με ανεμογεννήτριες σταθερών στροφών χρησιμοποιούνται διατάξεις αντιστάθμισης (π.χ. πυκνωτές) για τη ρύθμιση του συντελεστή ισχύος.

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



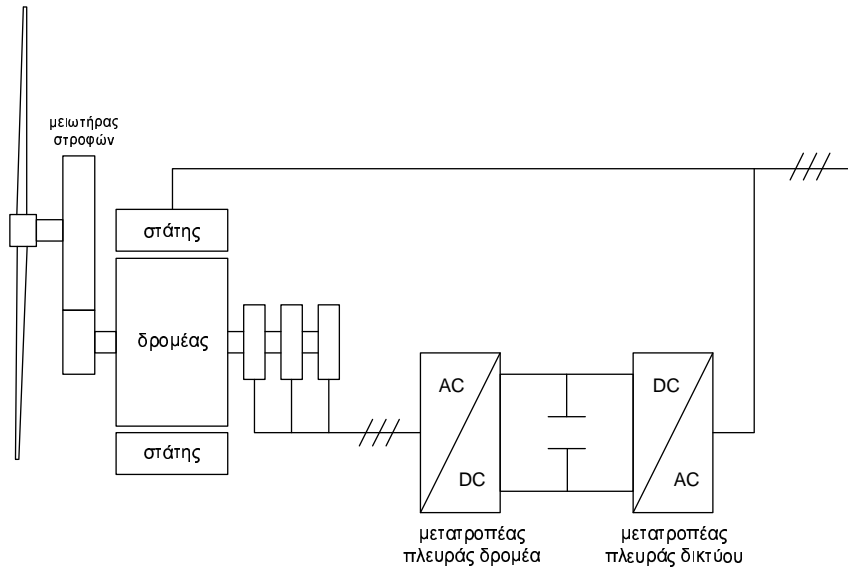
Σχήμα 1.3: Ανεμογεννήτρια με γεννήτρια επαγωγής

Η τρίτη κατηγορία είναι η πιο διαδεδομένη σήμερα. Η Ασύγχρονη Γεννήτρια Διπλής Τροφοδότησης (ΑΓΔΤ)¹ είναι μια ασύγχρονη μηχανή τυλιγμένου δρομέα της οποίας και ο

¹Χρησιμοποιείται ο όρος “ασύγχρονη γεννήτρια διπλής τροφοδότησης” (Doubly Fed Asynchronous Generator), αντί για “γεννήτρια επαγωγής διπλής τροφοδότησης” (Doubly Fed Induction Generator), δεδομένου ότι το μαγνητικό πεδίο της μηχανής δεν παράγεται ουσιαστικά εξ επαγωγής αλλά από μια εναλλασσόμενη τάση πεδίου [cig07].

Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή

στάτης και ο δρομέας συνδέονται στο δίκτυο. Ο μεν στάτης απευθείας, όπως στις κλασικές μηχανές επαγωγής, ο δε δρομέας μέσω ψηκτρών και ενός μετατροπέα συχνότητας όπως φαίνεται στο Σχ. 1.4. Ο μετατροπέας αποτελείται από δύο μετατροπείς πηγής τάσης με

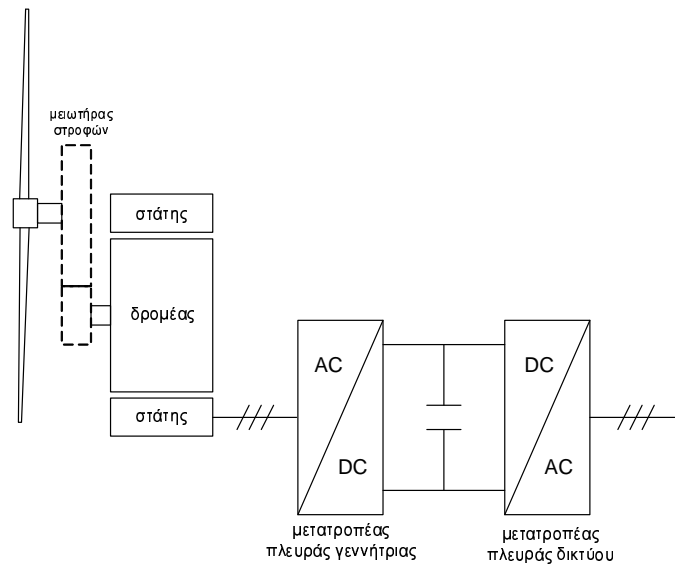


Σχήμα 1.4: Ανεμογεννήτρια με ασύγχρονη γεννήτρια διπλής τροφοδότησης (ΑΓΔΤ)

διαμόρφωση εύρους παλμών (Pulse Width Modulation) η οποίοι έχουν κοινή DC πλευρά. Λειτουργώντας το κύκλωμα του δρομέα σε μεταβλητή συχνότητα, επιτυγχάνεται μεταβλητή μηχανική ταχύτητα περιστροφής. Η συνολική ενεργός ισχύς της μηχανής είναι το άθροισμα της ισχύος που διοχετεύεται στο δίκτυο από τον στάτη και -μέσω του μετατροπέα- από τον δρομέα. Δεδομένου ότι μόνο ένα μέρος της συνολικής ισχύος περνάει από το μετατροπέα, αυτός είναι μειωμένης ονομαστικής ισχύος (περίπου 25-30%) και άρα μειωμένου κόστους σε σχέση με ένα μετατροπέα πλήρους ισχύος.

Εκτός από τις στροφές, ο μετατροπέας πλευράς δρομέα ρυθμίζει την άεργο ισχύ που παράγει η μηχανή από το στάτη. Ο μετατροπέας πλευράς δικτύου ρυθμίζει το ενεργό ρεύμα, που εγχέει στο δίκτυο, έτσι ώστε η DC τάση να παραμένει σταθερή και μπορεί επίσης να παρέχει άεργο ισχύ. Συνήθως ο μετατροπέας πλευράς δικτύου λειτουργεί με μοναδιαίο συντελεστή ισχύος και η απαιτούμενη άεργος ισχύς παρέχεται από το μετατροπέα πλευράς δρομέα.

Στην τέταρτη κατηγορία των ανεμογεννητριών με πλήρη μετατροπέα (βλ. Σχ. 1.5) σήμερα χρησιμοποιούνται κυρίως σύγχρονες γεννήτριες για την ηλεκτρομηχανική μετατροπή (ο μετατροπέας ισχύος απεμπλέκει πλήρως τη συχνότητα της γεννήτριας από τη συχνότητα του δικτύου). Οι σύγχρονες γεννήτριες μπορούν να έχουν τύλιγμα διέγερσης ή να είναι μόνιμων μαγνητών και επιτρέπουν την αποφυγή του κιβωτίου ταχυτήτων. Στην περίπτωση αυτή η γεννήτρια έχει μεγάλο αριθμό πόλων και μεγαλύτερη διάμετρο. Ένα διαδεδομένο σχήμα, σήμερα, χρησιμοποιεί γεννήτρια με τύλιγμα διέγερσης και ανορθωτή διόδων στην πλευρά της γεννήτριας. Σε άλλα σχήματα χρησιμοποιείται PWM μετατροπέας στην πλευρά της γεννήτριας, οπότε η γεννήτρια μπορεί να είναι μηχανή επαγωγής. Ο PWM μετατροπέας πλευράς δικτύου ρυθμίζει την ενεργό και την άεργο έγχυση στο δίκτυο. Ο έλεγχος στροφών πραγματοποιείται μέσω της ρύθμισης της ενεργού έγχυσης του μετατροπέα πλευράς δικτύου, ο οποίος επίσης ρυθμίζει την παραγωγή/κατανάλωση άεργου ισχύος.



Σχήμα 1.5: Ανεμογεννήτρια με μετατροπέα πλήρους ισχύος

1.4 Απαιτήσεις από διαχειριστές συστημάτων μεταφοράς

Τα πρώτα χρόνια της ανάπτυξης της αιολικής ενέργειας (δεκαετία του 1980), οι ανεμογεννήτριες αντιμετωπίζονταν καθαρά σαν “αρνητικά φορτία”, είχαν δηλαδή τις ίδιες υποχρεώσεις με τους καταναλωτές προς το δίκτυο, οι οποίες αφορούσαν κυρίως ζητήματα ποιότητας ισχύος. Καθώς αυξανόταν η αιολική διείσδυση και όλο και μεγαλύτερα αιολικά πάρκα συνδέονταν στην υψηλή τάση, ξεκίνησε μία αλληλεπίδραση των ανεμογεννητριών με τα συστήματα μεταφοράς και τους διαχειριστές τους.

Από τους πρώτους κώδικες, που εμφανίστηκαν για αιολικά πάρκα τα οποία συνδέονται στο σύστημα μεταφοράς, ήταν ο κώδικας της ELTRA στη Δανία γύρω στο 2000 [elt00]. Έκτοτε, όλα τα συστήματα με σημαντική αιολική παραγωγή έχουν κώδικες τέτοιου είδους. Λόγω του ότι αυτοί οι κανονισμοί είναι κατά κανόνα διαφορετικοί για κάθε σύστημα, οι κατασκευαστές προσαρμόζουν ανάλογα τις ανεμογεννήτριες. Έχει ξεκινήσει, όμως, προσπάθεια για εναρμόνιση των κανονισμών σε ευρωπαϊκό επίπεδο [ewi07]. Μία πρόσφατη επισκόπηση των κανονισμών για τα αιολικά πάρκα που εφαρμόζονται από διαχειριστές διάφορων ΣΗΕ στον κόσμο γίνεται στην εργασία [TP09].

Στη συνέχεια αναφέρονται συνοπτικά ορισμένες βασικές απαιτήσεις για αιολικά πάρκα από διαχειριστές συστημάτων μεταφοράς. Σημειώνεται, επίσης, ότι ορισμένοι διαχειριστές απαιτούν κατάλληλα δυναμικά μοντέλα από τα αιολικά πάρκα (από ένα μέγεθος και πάνω).

1.4.1 Αδιάλειπτη λειτουργία σε βυθίσεις της τάσης

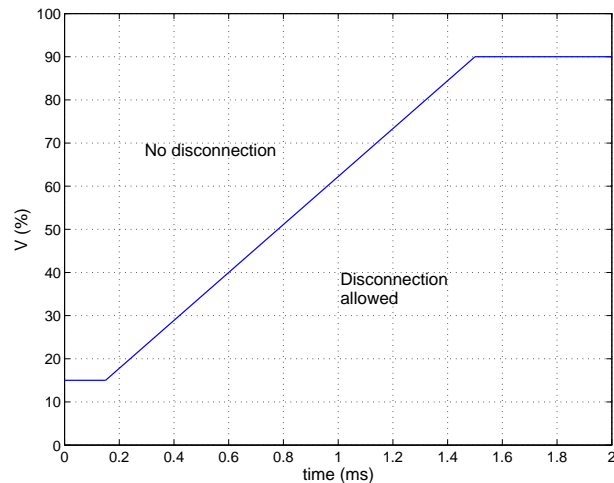
Μέχρι πριν λίγα χρόνια, οι ανεμογεννήτριες αποσυνδέονταν από το σύστημα σε περιπτώσεις βύθισης της τάσης. Οι ίδιες οι ανεμογεννήτριες και τα αιολικά πάρκα ήταν σχετικά μικρού μεγέθους και συνήθως συνδέονταν στο δίκτυο MT. Δεδομένου ότι η απώλεια λίγων MW δεν ήταν σημαντική, η αποσύνδεση ήταν ενδεδειγμένη για την αποφυγή ανεπιθύμητων καταστάσεων όπως η τροφοδότηση ηλεκτρικών νησίδων που μπορεί να σχηματιστούν μετά την εκκαθάριση κάποιου σφάλματος.

Καθώς η αιολική ενέργεια αναπτύσσεται κατά τρόπο πρωτοφανή σε αρκετά συστήματα,

Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή

έγινε γρήγορα κατανοητό ότι αυτή η συμπεριφορά έθετε ένα όριο στην αιολική διείδυση, καθώς ένα βραχυκύκλωμα οδηγούσε σε απώλεια όλο και μεγαλύτερης αιολικής παραγωγής. Προκειμένου λοιπόν να συνεχιστεί η αύξηση της αιολικής διείδυσης, μια από τις απαιτήσεις από τα αιολικά πάρκα στους σχετικούς κώδικες είναι η αδιάλειπτη λειτουργία σε βυθίσεις τάσης.

Η απαίτηση αυτή προσδιορίζεται από καμπύλες τάσης - χρόνου, όπως αυτή του Ελληνικού κώδικα που φαίνεται στο Σχ. 1.6. Η χρονική στιγμή $t=0$ στο διάγραμμα αναφέρεται στην

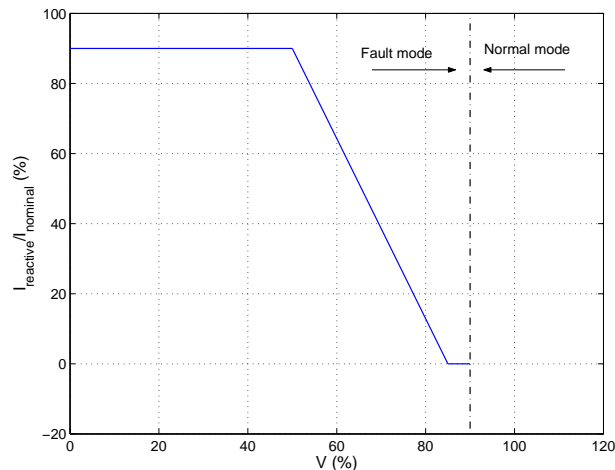


Σχήμα 1.6: Καμπύλη απαίτησης αδιάλειπτης λειτουργίας υπό χαμηλή τάση [gre08]

έναρξη της βύθισης της τάσης και το επίπεδο της τάσης αναφέρεται στην πλευρά υψηλής τάσης του μετασχηματιστή σύνδεσης του αιολικού πάρκου. Εφόσον η τάση παραμένει πάνω από το όριο που φαίνεται στο Σχ. 1.6, το αιολικό πάρκο (αιολική μονάδα παραγωγής) πρέπει να παραμείνει συνδεδεμένο και να συνεχίσει να παράγει ενεργό ισχύ μετά την εκκαθάριση των σφαλμάτων, με ρυθμό ανάληψης ισχύος τουλάχιστον ίσο με 20% της ονομαστικής του ισχύος ανά δευτερόλεπτο.

Αντίστοιχη καμπύλη έχουν πλέον όλοι οι κώδικες των συστημάτων με σημαντική αιολική διείδυση. Η συγκεκριμένη μορφή της καμπύλης διαφέρει, ανάλογα με τις ιδιαιτερότητες του κάθε συστήματος.

Αρκετοί κώδικες επίσης απαιτούν παραγωγή αέργου ισχύος κατά τη διάρκεια της βύθισης, για την υποστήριξη της τάσης. Στο Σχ. 1.7 φαίνεται η σχετική προδιαγραφή του Ισπανικού Κώδικα. Στον οριζόντιο άξονα φαίνεται η τάση ως ποσοστό της ονομαστικής. Όταν αυτή πέσει κάτω από το ελάχιστο όριο κανονικής λειτουργίας (δεν προσδιορίζεται συγκεκριμένα στον κώδικα), και μέχρι το 85%, η αιολική μονάδα δεν πρέπει να καταναλώνει άεργο ισχύ. Κάτω από το 85% το ελάχιστο απαιτούμενο άεργο ρεύμα (για παραγωγή αέργου ισχύος) αυξάνεται γραμμικά μέχρι το 90% του ονομαστικού ρεύματος, όταν η τάση πέσει στο 50%. Το άεργο ρεύμα που ορίζεται με τον τρόπο αυτό από τον συγκεκριμένο Κώδικα για την περίπτωση τριφασικού βραχυκύκλωματος, πρέπει να πραγματοποιηθεί εντός 150 ms από τη στιγμή έναρξης της βύθισης της τάσης και εντός 150 ms από την εκκαθάριση του σφάλματος. Κατά τη διάρκεια αυτών των 150 ms επιτρέπεται, εντός ορίων, η κατανάλωση αέργου ισχύος. Η αντίστοιχη προδιαγραφή του Κώδικα του διαχειριστή Ε.ΟΝ στη Γερμανία είναι πιο αυστηρή (20 ms).



Σχήμα 1.7: Ελάχιστο απαιτούμενο άεργο ρεύμα σε περίπτωση σφάλματος [esp06]

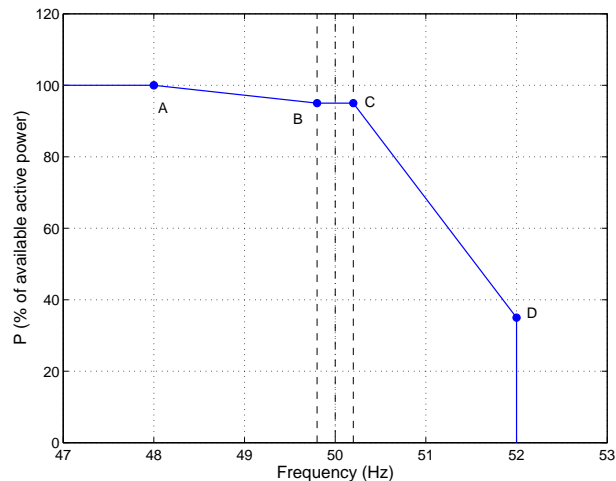
1.4.2 Έλεγχος ενεργού ισχύος και συχνότητας

Στο παρελθόν, η συνήθης αντιμετώπιση των ανεμογεννητριών προέβλεπε την άμεση αποσύνδεσή τους σε περίπτωση ακόμα και μικρών αποκλίσεων της συχνότητας από την ονομαστική της τιμή. Σήμερα, επιβάλλεται κατά κανόνα η παραμονή τους σε συνεχή λειτουργία εντός σημαντικών περιθωρίων διακύμανσης της συχνότητας (π.χ. 47,5 - 51,5 Hz [eop06]). Ακόμα, οφείλουν να παραμένουν σε λειτουργία σε περίπτωση αποκλίσεων της συχνότητας εντός ορισμένων χρονικών ορίων. Τα όρια που επιβάλλονται εξαρτώνται από τις ανάγκες και τις ιδιαιτερότητες κάθε συστήματος.

Σε πολλά συστήματα με μεγάλη αιολική διείδυση, οι σχετικοί κώδικες απαιτούν δυνατότητες ελέγχου της ενεργού ισχύος κυρίως των μεγαλύτερων αιολικών σταθμών. Τέτοιες δυνατότητες, διάθεσιμες στον διαχειριστή του συστήματος μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, μπορεί να είναι:

- Μείωση της παραγωγής σε συγκεκριμένη μέγιστη τιμή. Επίσης μπορεί να καθορίζεται ο ρυθμός μείωσης της ισχύος.
- Περιορισμός του ρυθμού αύξησης της ισχύος του αιολικού πάρκου.
- Λειτουργία του αιολικού πάρκου υπό εφεδρεία ισχύος, δηλαδή μείωση της παραγωγής σε σχέση με τη μέγιστη δυνατή.

Ακόμη, η ισχύς των αιολικών πάρκων μπορεί να μεταβάλλεται συναρτήσει των μεταβολών της συχνότητας του συστήματος μέσω κατάλληλου ρυθμιστή, όπως στην ενδεικτική καμπύλη του Σχ. 1.8 από τον κώδικα του Ιρλανδικού συστήματος. Όπως φαίνεται στο σχήμα, έξω από τη νεκρή ζώνη κανονικής λειτουργίας, το αιολικό πάρκο συμμετέχει στην πρωτεύουσα ρύθμιση, παρόμοια με τις συμβατικές μονάδες παραγωγής. Για να μπορέσει να αυξήσει την παραγωγή σε περίπτωση υποσυχνότητας, το αιολικό πάρκο θα πρέπει να διαθέτει την απαραίτητη εφεδρεία ισχύος, δηλαδή να παράγει σε κανονική λειτουργία λιγότερο από το μέγιστο δυνατό. Σημειώνεται ότι στην περίπτωση του Ιρλανδικού συστήματος, τα σημεία A, B, C, D του σχήματος ορίζονται καταρχάς σε συμφωνία με το διαχειριστή του συστήματος πριν τη λειτουργία του πάρκου και επιτρέπεται η μεταβολή τους από τον διαχειριστή κατά τη λειτουργία του πάρκου.



Σχήμα 1.8: Καμπύλη μεταβολής της ενεργού παραγωγής αιολικών σταθμών συναρτήσει της συχνότητας του συστήματος [eir09]

1.4.3 Έλεγχος τάσης και αέργου ισχύος

Στο παρελθόν, όταν οι ανεμογεννήτριες ήταν κατά κανόνα σταθερών στροφών με μηχανές επαγωγής, η συνήθης απαίτηση αφορούσε στη διατήρηση του συντελεστή ισχύος των αιολικών πάρκων σε σχετικά υψηλές τιμές, προκειμένου να αποφεύγεται η αυξημένη κατανάλωση αέργου ισχύος από αυτούς.

Σήμερα υπάρχουν ανάλογες απαιτήσεις αλλά με σημαντικά διευρυμένα όρια δυνατής ρύθμισης του συντελεστή ισχύος, τόσο σε επαγωγικές όσο και σε χωρητικές τιμές. Επιπλέον, το εύρος ρύθμισης του συντελεστή ισχύος συχνά συναρτάται με την ενεργό ισχύ του σταθμού ή/και την τάση του συστήματος στο σημείο σύνδεσης του σταθμού.

Η δυνατότητα ελέγχου της αέργου ισχύος των ανεμογεννητριών επιτρέπει πολλούς εναλλακτικούς τρόπους ρύθμισης:

- Διατήρηση σταθερού συντελεστή ισχύος
- Υλοποίηση χαρακτηριστικής ρύθμισης βάσει της τάσης του συστήματος
- Διατήρηση αέργου ισχύος αναφοράς με εντολές από το κέντρο κατανομής
- Ενεργός ρύθμιση της τάσης είτε στο σημείο σύνδεσης είτε σε πιο απομακρυσμένα σημεία

Η απαίτηση υλοποίησης συστήματος ενεργού ρύθμισης της τάσης από τα αιολικά πάρκα περιλαμβάνεται πλέον σε αρκετούς κώδικες συστήματος.

1.5 Επισκόπηση βιβλιογραφίας

1.5.1 Αναπαράσταση αιολικών πάρκων σε μελέτες ευστάθειας ΣΗΕ

Υπάρχουν πολλές εργασίες στη βιβλιογραφία, που αφορούν στο θέμα της παράστασης των αιολικών πάρκων σε μελέτες ευστάθειας ΣΗΕ, δεδομένου ότι ως μονάδες παραγωγής είναι

σχετικά νέες και παρουσιάζουν ιδιαιτερότητες, κυρίως ότι κατά κανόνα δεν χρησιμοποιούν σύγχρονες γεννήτριες απευθείας συνδεδεμένες στο δίκτυο.

Για την αναπαράσταση των ανεμογεννητριών σταθερών στροφών με γεννήτριες επαγωγής κλωβού, συνήθως το γνωστό μοντέλο μειωμένης τάξης της μηχανής επαγωγής [Kun94, KWS00] θεωρείται κατάλληλο για μελέτες ευστάθειας ΣΗΕ (με τη συνήθη παραδοχή της οιο-νεί ημιτονοειδούς κατάστασης) [SPK03, RFB02]. Για το μηχανικό μέρος συνιστάται μοντέλο δύο στρεφόμενων μαζών, προκειμένου να αναπαριστάται ο στρεπτικός ρυθμός ταλάντωσης του άξονα [HN82], ο οποίος έχει συνήθως συχνότητα περίπου 1-2 Hz [ΠαΣ97, AK02].

Σε περίπτωση που χρησιμοποιείται ενεργός αεροδυναμικός έλεγχος (active stall συνήθως), πρέπει να αναπαριστάται κατάλληλα, όπως συνήθως ο έλεγχος βήματος στις ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών [JSN07]. Ορισμένοι κατασκευαστές εφαρμόζουν γρήγορη μείωση της μηχανικής ισχύος μέσω του ενεργού αεροδυναμικού ελέγχου, για την επίτευξη αδιάλειπτης λειτουργίας σε βυθίσεις τάσης [cig07].

Όσον αφορά στην ΑΓΔΤ, η λειτουργία της και ο διανυσματικός έλεγχος περιγράφεται αναλυτικά στην εργασία [PCA96]. Με βάση το διανυσματικό έλεγχο σε πλαίσιο ευθυγραμμισμένο με τη μαγνητική ροή του στάτη ή με την τερματική τάση, πραγματοποιείται ανεξάρτητος έλεγχος ροπής (ενεργού ισχύος) και αέργου ισχύος.

Η εργασία [LSE07] υπολογίζει το διάγραμμα ικανότητας φόρτισης (PQ) μίας ανεμογεννήτριας με ΑΓΔΤ. Στις εργασίες [AJ08, KM07] εξετάζονται οι δυνατότητες ελέγχου της αέργου ισχύος της ΑΓΔΤ με συνδυασμούς του ελέγχου του μετατροπέα πλευράς δρομέα και του μετατροπέα πλευράς δικτύου. Στην αναφορά [KM07] υποδεικνύεται ότι ο μετατροπέας πλευράς δικτύου της ΑΓΔΤ μπορεί να λειτουργεί ως STATCOM (Static Synchronous Compensator), υποστηρίζοντας την τάση, ακόμα και όταν η ανεμογεννήτρια είναι κατά τα άλλα εκτός λειτουργίας λόγω χαμηλών ταχυτήτων ανέμου.

Στην εργασία [Nii04] επιβεβαιώνεται με πειραματικές μετρήσεις και προσομοίωση με λεπτομέρες μοντέλο (με διακοπτικό μοντέλο για τους μετατροπείς) η λύση της ενεργού διάταξης βραχυκύκλωσης, που χρησιμοποιείται από αρκετούς κατασκευαστές για την ανοχή των ΑΓΔΤ σε βυθίσεις τάσης. Η εργασία [MdH05] εξετάζει τη λειτουργία της ενεργού διάταξης βραχυκύκλωσης με ένα μοντέλο της ΑΓΔΤ όπου λαμβάνονται υπόψη τα μεταβατικά του στάτη και οι μετατροπείς αναπαριστώνται σαν πηγές τάσης. Στην εργασία [HMS07] προτείνεται η λειτουργία του μετατροπέα πλευράς δικτύου της ΑΓΔΤ ως STATCOM κατά τη διάρκεια του βραχυκύκλωματος, όταν έχει ενεργοποιηθεί η διάταξη βραχυκύκλωσης του δρομέα και η ΑΓΔΤ δε μπορεί να παρέχει άεργο ισχύ στο δίκτυο από το στάτη, όπως κατά τη διάρκεια της κανονικής λειτουργίας.

Στην αναφορά [EWD06] παρουσιάζεται μια εναλλακτική μέθοδος για την αδιάλειπτη λειτουργία της ΑΓΔΤ σε περίπτωση σφάλματος, που συνίσταται στη χρήση ημιαγωγικών διακοπών στο στάτη, οι οποίοι διακόπτουν το ρεύμα βραχυκύκλωσης εντός 10 ms μετά την εμφάνιση του βραχυκύκλωματος και αποσυνδέουν προσωρινά (200-300 ms) το στάτη από το δίκτυο. Η τεχνική αυτή της “βραχείας αποσύνδεσης” (short term interruption) μπορεί να είναι αποδεκτή από κώδικες δικτύου.

Στις εργασίες [XRT06, LQH09] εξετάζονται βελτιωμένες μέθοδοι ελέγχου του μετατροπέα πλευράς δρομέα της ΑΓΔΤ που βασίζονται στην εισαγωγή αντισταθμιστικών όρων στον έλεγχο του ρεύματος του δρομέα. Στην πρόσφατη αναφορά [EG09] παρουσιάζονται μετρήσεις από δοκιμές αδιάλειπτης λειτουργίας σε συνθήκες σφάλματος μιας ΑΓΔΤ. Ο μετατροπέας πλευράς δρομέα παραμένει σε κανονική λειτουργία και χρησιμοποιείται πρόσθετη μεταβλητή αντίσταση (dc-chopper) για την αποφυγή υπερφόρτισης του πυκνωτή συνεχούς.

Όσον αφορά στις ανεμογεννήτριες με πλήρη μετατροπέα, όπως αναφέρθηκε, υπάρχουν αρκετές παραλλαγές για το ηλεκτρικό σχήμα. Στην εργασία [APP00] εξετάζεται με λε-

Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή

πομερές μοντέλο η λειτουργία μιας γεννήτριας με μόνιμους μαγνήτες σε συνδυασμό με μετατροπέα συχνότητας, όπως αυτός του Σχ. 1.5. Ο έλεγχος στροφών γίνεται ρυθμίζοντας, μέσω του μετατροπέα ανύψωσης, το ρεύμα της γεννήτριας, ενώ η DC τάση του PWM μετατροπέα πλευράς δικτύου ελέγχεται μέσω της έγχυσης ενεργού ισχύος στο δίκτυο. Στην εργασία [PP06] εξετάζεται με λεπτομερές μοντέλο ο μετατροπέας συχνότητας του Σχ. 1.5 σε συνδυασμό με γεννήτρια με τύλιγμα διέγερσης. Ο έλεγχος των στροφών και της DC τάσης γίνεται όπως στην αναφορά [APP00], ενώ η ρύθμιση της διέγερσης γίνεται ώστε να ελαχιστοποιούνται οι απώλειες της γεννήτριας. Στην εργασία [Jau07] χρησιμοποιείται, επίσης, γεννήτρια με τύλιγμα διέγερσης, αλλά χωρίς μετατροπέα ανύψωσης της τάσης, καθώς θεωρείται ότι η DC τάση ρυθμίζεται από το σύστημα διέγερσης. Ο έλεγχος στροφών υλοποιείται μέσω της ρύθμισης της ενεργού έγχυσης του μετατροπέα πλευράς δικτύου.

Στις εργασίες [Akh06, MHH07], σε συνδυασμό με σύγχρονη γεννήτρια μόνιμων μαγνητών, χρησιμοποιείται PWM μετατροπέας και στις δύο πλευρές του μετατροπέα συχνότητας. Με τον τρόπο αυτό εξασφαλίζεται πλήρης έλεγχος της γεννήτριας. Συγκεκριμένα η δυνατότητα ελέγχου της αέργου ισχύος του μετατροπέα πλευράς γεννήτριας χρησιμοποιείται για να ρυθμίζεται η τερματική τάση της γεννήτριας σε επιθυμητό επίπεδο. Στις εργασίες [Jau07, MHH07] εξετάζονται, επίσης, πρόσθετοι βρόχοι ελέγχου του μετατροπέα για την αύξηση της απόσβεσης της στρεπτικής ταλάντωσης του άξονα της γεννήτριας. Εφόσον χρησιμοποιείται μετατροπέας PWM και στην πλευρά της γεννήτριας, μπορεί να χρησιμοποιηθεί μηχανή επαγωγής αντί για σύγχρονη γεννήτρια, όπως στις εργασίες [ΠαΣ97, NAT07].

Επίσης, στην εργασία [WH07] αναφέρεται ότι οι μετατροπείς εμπορικών ανεμογεννητριών πλήρους μετατροπέα, μπορούν να λειτουργούν σε μόνιμη βάση ως STATCOM, ανεξάρτητα από το αν η ανεμογεννήτρια είναι εκτός λειτουργίας λόγω χαμηλών ταχυτήτων ανέμου.

Υπάρχουν αρκετές εργασίες για την αναπαράσταση της ΑΓΔΤ σε μελέτες ευστάθειας, όπως οι [SPK01a, Akh02, EHW03, MSGP03, Pöl03, LU05, LML06, cig07, EKF07]. Σε αρκετές από αυτές ο μετατροπέας πλευράς δρομέα αναπαριστάται σαν πηγή ρευμάτος (τα μεταβατικά του δρομέα αμελούνται), δεδομένου ότι στην πράξη οδηγεί το ρεύμα στην επιθυμητή τιμή πολύ γρήγορα σε σχέση με τη χρονική κλίμακα, που ενδιαφέρει στις μελέτες ευστάθειας SHE [SPK01a, MSGP03, LU05, cig07].

Στις μελέτες ευστάθειας χρησιμοποιούνται, κατά κανόνα, μοντέλα με μια ισοδύναμη ανεμογεννήτρια για ένα αιολικό πάρκο ή μια ομάδα ανεμογεννητριών. Στη βιβλιογραφία υπάρχουν αρκετές αναφορές για μεθόδους αναγωγής των αιολικών πάρκων σε ισοδύναμα μοντέλα, π.χ. [SdHP02, PV03a, MPE08]. Όσον αφορά στην αεροδυναμική μετατροπή ισχύος, στην εργασία [PSG06] προτείνεται ένα απλοποιημένο μοντέλο.

Ανάλογα και με τις απαιτήσεις του διαχειριστή του δικτύου, οι κατασκευαστές εφαρμόζουν διαφορετικά σχήματα ελέγχου των μετατροπέων για την εξασφάλιση της ικανότητας αδιάλειπτης λειτουργίας υπό χαμηλή τάση. Εφόσον αυτά έχουν αντίκτυπο στη χρονική κλίμακα που ενδιαφέρει τις μελέτες ευστάθειας, θα πρέπει να συμπεριλαμβάνονται στα αντίστοιχα μοντέλα. Στην εργασία [EKF07] εξετάζεται η αναπαράσταση της ΑΓΔΤ με ενεργό διάταξη βραχυκύκλωσης για μελέτες ευστάθειας δικτύου. Μέσω προσομοιώσεων βραχυκυκλωμάτων, γίνεται σύγκριση μεταξύ ενός μοντέλου μειωμένης τάξης (χωρίς τα μεταβατικά του στάτη) και ενός μοντέλου που προσεγγίζει το πλήρες αλλά μπορεί ταυτόχρονα να ενταχθεί σε πρόγραμμα προσομοίωσης με την υπόθεση της οιονεί ημιτονοειδούς κατάστασης.

Για τις μελέτες ευστάθειας, σημαντικό ρόλο μπορεί να παίζουν οι κεντρικοί ρυθμιστές των αιολικών πάρκων. Η εργασία [KYH07] προτείνει ένα ρυθμιστή για τον έλεγχο της τάσης στο σημείο κοινής σύνδεσης ενός αιολικού πάρκου με ΑΓΔΤ. Ένα διαφορετικό σχήμα ελέγχου της αέργου ισχύος ενός αιολικού πάρκου προτείνεται στην εργασία [FWK08], ενώ στην εργασία [CHE04] ο έλεγχος αέργου ισχύος της ΑΓΔΤ συνδυάζεται με τον έλεγχο του

ΣΑΤΥΦ του τοπικού υποσταθμού. Σε υπεράκτια (offshore) αιολικά πάρκα χρησιμοποιείται συχνά σύνδεση με HVDC, οπότε ο αντίστοιχος ελεγκτής είναι κομβικής σημασίας για τη δυναμική του ΣΗΕ [BBGL07].

Στην εργασία [MSGP03] παρουσιάζεται συνοπτικά ένα μοντέλο για αιολικά πάρκα με ΑΓΔΤ, με βάση δεδομένα συγκεκριμένου κατασκευαστή. Το μοντέλο αυτό, που παρουσιάζεται αναλυτικά στο [cig07], είναι ενταγμένο σε εμπορικά προγράμματα προσομοίωσης ΣΗΕ, όπως το PSS/E [KSP06a,KSP06b]. Παραλλαγή του μοντέλου αυτού και αντίστοιχο μοντέλο για τις ανεμογεννήτριες με πλήρη μετατροπέα χρησιμοποιούνται ως γενικευμένα (generic) μοντέλα από το Western Electricity Coordinating Council (WECC) στις ΗΠΑ [gen06] και περιλαμβάνεται στο πρόγραμμα προσομοίωσης PSS/E (WT2 στην έκδοση 30 [Kaz07] και WT3G1 στην έκδοση 31 [pss09]). Επαλήθευση (validation) του μοντέλου της ΑΓΔΤ με μετρήσεις από ένα αιολικό πάρκο παρουσιάζεται στην εργασία [ME08]. Στην εργασία [RLM08] παρουσιάζεται ένα απλοποιημένο γενικευμένο μοντέλο για ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών που έχει αναπτύξει ο διαχειριστής του Ισπανικού συστήματος μεταφοράς (REE). Το μοντέλο αυτό είναι απλοποιημένο, καθώς στοχεύει στις ανάγκες των διαχειριστών στις μελέτες σχεδιασμού ΣΗΕ, όπου ελάχιστα δεδομένα είναι διαθέσιμα για τα αιολικά πάρκα που σχεδιάζεται να εγκατασταθούν. Τα μοντέλα αυτά παρουσιάζονται λεπτομερώς στο Κεφ. 3, καθώς χρησιμοποιούνται και σε αυτή τη διατριβή.

Γενικά, δεν υπάρχει ακόμα ευρεία συμφωνία για την αναπαράσταση των αιολικών πάρκων σε μελέτες ευστάθειας ΣΗΕ και συνεχίζονται οι προσπάθειες για συγκερασμό των απαιτήσεων για απλότητα και ακρίβεια με τυποποιημένα μοντέλα, αντίστοιχα αυτών που χρησιμοποιούνται για τις συμβατικές μονάδες [cig07, CSM07, PCE09].

Στην αναφορά [CSM07] περιγράφεται γλαφυρά η εμπειρία του διαχειριστή του Ιρλανδικού συστήματος μεταφοράς (EirGrid) με χρήση μοντέλων από κατασκευαστές. Σημειώνεται ότι κανένα από τα 20 μοντέλα που έχει λάβει η EirGrid δεν έχει επαληθευτεί σε αντιπαραβολή με μετρήσεις και παρουσιάζονται προβλήματα που εμφανίστηκαν σε σχέση με τη χρονική κλίμακα των μοντέλων, την αρχικοποίηση κ.α. Επίσης αναφέρονται δυσκολίες της επαλήθευσης των μοντέλων με μετρήσεις.

1.5.2 Αιολική ενέργεια και ευστάθεια ΣΗΕ

Σημαντικό ζήτημα για την ευστάθεια συχνότητας, κυρίως των αυτόνομων (π.χ. νησιωτικών) ΣΗΕ είναι η συμπεριφορά των ανεμογεννητριών σε μεταβολές της συχνότητας. Οι εργασίες [MO05, LMO05] δείχνουν ότι, σε αντίθεση με τις μηχανές επαγωγής των ανεμογεννητριών σταθερών στροφών, οι ΑΓΔΤ ή οι ανεμογεννήτριες πλήρους μετατροπέα γενικά δεν εισάγουν αδράνεια στο σύστημα όταν είναι σε τυπική λειτουργία μέγιστης απολαβής ισχύος. Σε περίπτωση διαταραχής της συχνότητας, οι μετατροπείς προσαρμόζουν γρήγορα την ισχύ εξόδου των ανεμογεννητριών μεταβλητών στροφών στην ισχύ αναφοράς. Στις εργασίες [LMO05, MPdH06] προτείνονται απλοί ρυθμιστές που μπορούν να προσδώσουν χαρακτηριστικά αδράνειας στις ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών, χρησιμοποιώντας μεταβατικά την ενέργεια που είναι αποθηκευμένη στη στρεφόμενη μάζα των ανεμογεννητριών. Στην εργασία [UTK08] εξετάζεται επίσης η δυνατότητα προσωρινής αύξησης της ενεργού ισχύος, που αποδίδει μια ανεμογεννήτρια μεταβλητών στροφών στο δίκτυο, σε περίπτωση σοβαρής διαταραχής της συχνότητας. Για την (βηματική) αύξηση της ισχύος χρησιμοποιείται η κινητική ενέργεια του δρομέα της ανεμογεννήτριας, ο οποίος επιβραδύνεται κατά τη διαδικασία αυτή. Η συνολική ενέργεια, που αποδίδεται στο δίκτυο, περιορίζεται από την ελάχιστη ταχύτητα περιστροφής του δρομέα. Στις εργασίες [HEJ04, dAP07] εξετάζεται ο έλεγχος των ανεμογεννητριών μεταβλητών στροφών με τρόπο που να κάνει δυνατή την πλήρη συμμετοχή

Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή

τους στην πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας, καθώς θεωρείται ότι σε κανονική λειτουργία παράγουν ισχύ λιγότερη από τη μέγιστη δυνατή. Ο σχεδιασμός του κεντρικού ρυθμιστή ενός αιολικού πάρκου με δυνατότητα συμμετοχής στη ρύθμιση συχνότητας εξετάζεται στην εργασία [HSI06].

Είναι γνωστό ότι οι μηχανές επαγωγής είναι επιρρεπείς σε αστάθεια τάσης [vCV98]. Στην εργασία [AKN03] εξετάζεται η βραχυπρόθεσμη ευστάθεια τάσης ενός μεγάλου αιολικού πάρκου με ανεμογεννήτριες επαγωγής σε περίπτωση βραχυκυκλώματος στο σύστημα μεταφοράς και προτείνονται διάφορες μέθοδοι για την αδιάλειπτη λειτουργία υπό χαμηλή τάση όπως: δυναμική αέργος υποστήριξη με SVC (Static Var Compensator), μεταβατική αύξηση της αντίστασης του δρομέα, μεταβατική μείωση της μηχανικής ισχύος με μεταβολή της γωνίας των πτερυγίων.

Στην εργασία [PTU02] εξετάζεται η χρήση SVC για την ασφαλή διείσδυση μεγάλης αιολικής παραγωγής με γεννήτριες επαγωγής σε ένα ασθενές τοπικό δίκτυο, όσον αφορά στη μακροπρόθεσμη ευστάθεια τάσης. Η εργασία [UT07b] δείχνει ότι η δυνατότητα των ανεμογεννητριών μεταβλητών στροφών να ελέγχουν την τάση, μπορεί να αυξήσει τη μέγιστη μεταφερόμενη ισχύ και να βελτιώσει τη μακροπρόθεσμη ευστάθεια τάσης, όπως ένα SVC ή ένα STATCOM.

Η εργασία [VSA09] προτείνει μια μέθοδο για την εκτίμηση ασφάλειας τάσης που να λαμβάνει υπόψη τη μεταβλητότητα της αιολικής παραγωγής. Επίσης δείχνει ότι η λειτουργία με όρια στο συντελεστή ισχύος (όπως απαιτείται τώρα από αρκετούς διαχειριστές συστήματος), μπορεί να οδηγήσει σε υπερβολικά συντηρητική εκτίμηση των ορίων μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος, ενώ η χρήση του διαγράμματος ικανότητας φόρτισης της ΑΓΔΤ έχει ως αποτέλεσμα σημαντική αύξηση των ορίων μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος χωρίς επιπλέον κόστος εγκατάστασης. Επίσης στην εργασία [VOK10] παρουσιάζεται μία μεθοδολογία κατάλληλη για εκτίμηση της ασφάλειας τάσης μεγάλων ΣΗΕ με μεγάλη αιολική παραγωγή και συμπεραίνεται ότι η κατάλληλη χρήση των δυνατοτήτων ελέγχου της ΑΓΔΤ βελτιώνει τα όρια ευστάθειας τάσης.

Στην εργασία [NPZ04] διαπιστώνεται ότι οι ΑΓΔΤ, που χρησιμοποιούνται ευρέως σήμερα στα νέα αιολικά πάρκα, έχουν καλύτερη επίδραση στη μεταβατική ευστάθεια των σύγχρονων γεννητριών του συστήματος σε σχέση με τις γεννήτριες επαγωγής. Η εργασία [ESP05] εστιάζει σε ζητήματα μεταβατικής ευστάθειας σε σχέση με την υψηλή διείσδυση αιολικής παραγωγής με ΑΓΔΤ και γενικότερα ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών. Όταν η αιολική παραγωγή είναι σχετικά συγκεντρωμένη σε μια περιοχή του συστήματος, προκαλείται μεγάλη μεταβολή στις ροές ισχύος και, κατά κανόνα, υψηλότερη ροή στις διασυνδέσεις. Σαν αποτέλεσμα, οι κρίσιμοι χρόνοι εκκαθάρισης μπορεί να μειωθούν σημαντικά και να απαιτηθούν πρόσθετες γραμμές. Επίσης, συμπεραίνεται ότι, σε σχέση με τις συμβατικές σύγχρονες γεννήτριες, οι ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών με ικανότητα αδιάλειπτης παροχής υπό χαμηλή τάση, έγχυσης αέργου ισχύος και, ιδανικά, γρήγορου ελέγχου της τάσης, μπορούν να βελτιώσουν τα όρια μεταβατικής ευστάθειας.

Η εργασία [UT07b] δείχνει ότι κατά τη διάρκεια ενός βραχυκυκλώματος στο δίκτυο και αμέσως μετά την εκκαθάρισή του, εφόσον οι ανεμογεννήτριες που βρίσκονται κοντά σε μία συμβατική σύγχρονη γεννήτρια εγχείουν ενεργό ρεύμα υπό μοναδιαίο συντελεστή ισχύος, μειώνουν την ωμική αντίσταση που “βλέπει” η σύγχρονη γεννήτρια και άρα μειώνουν τη μεταβατική ευστάθεια της γεννήτριας. Αντίθετα, η έγχυση αέργου ρεύματος από τις ανεμογεννήτριες υποστηρίζει την τάση και βελτιώνει τη μεταβατική ευστάθεια των γειτονικών σύγχρονων γεννητριών, όπως υποδεικνύει και η εργασία [UTK07], όπου συμπεραίνεται ότι τα αιολικά πάρκα, που ικανοποιούν τις απαιτήσεις του κώδικα του διαχειριστή συστήματος Ε.ΟΝ για άεργη υποστήριξη του δικτύου σε περίπτωση πτώσης της τάσης, έχουν πιο

θετική επίδραση στη μεταβατική ευστάθεια του συστήματος σε σχέση με την παραδοσιακή λειτουργία μοναδιαίου συντελεστή ισχύος. Επίσης, η ίδια εργασία δείχνει ότι αν οι ανεμογεννήτριες χρησιμοποιήσουν μεγαλύτερο μετατροπέα για έγχυση περισσότερου ενεργού ρεύματος, αφού εκπληρώσουν τις υποχρεώσεις του κώδικα για άεργο ρεύμα (προκειμένου π.χ. να υποβοηθήσουν την αδιάλειπτη λειτουργία σε βυθίσεις τάσης), η μεταβατική ευστάθεια των γειτονικών συμβατικών μονάδων χειροτερεύει.

Στην εργασία [GVH09] εξετάζεται η μεταβολή στη μεταβατική ευστάθεια και στην ευστάθεια μικρών διαταραχών λόγω της υποκατάστασης συμβατικών μονάδων από αιολική παραγωγή με ΑΓΔΤ και της αντίστοιχης μεταβολής των ροών ισχύος. Η ανάλυση εστιάζει στη μεταβολή της αδράνειας και δεν εξετάζει επιπτώσεις λόγω υποκατάστασης μονάδων με σταθεροποιητές ισχύος ή τυχόν αλληλεπίδραση συστημάτων ελέγχου των ΑΓΔΤ με τη ροπή απόσβεσης γειτονικών γεννητριών. Για το συγκεκριμένο μεγάλο σύστημα που εξετάζεται, συμπεραίνεται ότι η υψηλή διείσδυση ΑΓΔΤ έχει και θετικές και αρνητικές επιδράσεις.

Η επίδραση των ανεμογεννητριών μεταβλητών στροφών στις ηλεκτρομηχανικές ταλαντώσεις έχει εξεταστεί στην εργασία [SK03], χρησιμοποιώντας ένα μοντέλο με απλοποιημένους βρόχους ελέγχου (δεν εισάγουν ταλαντωτικούς ρυθμούς απόκρισης) για τις ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών και θεωρώντας ότι είναι σε λειτουργία σταθερού συντελεστή ισχύος. Συμπεραίνεται ότι η αιολική παραγωγή τείνει να αυξάνει την απόσβεση των ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων μεταξύ μιας σύγχρονης γεννήτριας και ενός μεγάλου συστήματος και των ταλαντώσεων διασύνδεσης (interarea oscillations), ενώ η επίδραση στις ενδοσυστημικές ταλαντώσεις (intra-area oscillations) δεν είναι σημαντική.

Στην εργασία [UT07a] εξετάζεται η επίδραση των ανεμογεννητριών μεταβλητών στροφών στις ηλεκτρομηχανικές ταλαντώσεις του δοκιμαστικού συστήματος Nordic32. Χρησιμοποιείται μοντέλο σταθερή ισχύος για τις ανεμογεννήτριες σε λειτουργία σταθερού συντελεστή ισχύος και παραλλαγή με μικρή χρονική καθυστέρηση για την έγχυση κατάλληλου άεργου ρεύματος για τη ρύθμιση της τάσης του αιολικού πάρκου (λειτουργία STATCOM). Συμπεραίνεται ότι η λειτουργία των αιολικών πάρκων με ρύθμιση τάσης μπορεί είτε να αυξήσει είτε να μειώσει την απόσβεση των ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων, σε σχέση με τη λειτουργία σταθερού συντελεστή ισχύος. Μελέτες ευαισθησίας στην εργασία [VSG08] δείχνουν ότι η απόσβεση των ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων στο σύστημα της Νέας Ζηλανδίας δεν επηρεάζεται ουσιαστικά από μεγάλη αιολική παραγωγή.

Στην εργασία [SGMP04] χρησιμοποιείται ένα πιο λεπτομερές μοντέλο για τις ΑΓΔΤ, αντίστοιχο με αυτό που παρουσιάζεται στην ενότητα 3.3 αυτής της εργασίας, και συμπεραίνεται ότι η αντικατάσταση συμβατικής παραγωγής από αιολικά πάρκα με ΑΓΔΤ βελτιώνει την ευστάθεια της ταλάντωσης μεταξύ των δύο περιοχών ενός συστήματος. Ανάλογο μοντέλο χρησιμοποιείται και στην εργασία [HNU05], όπου διαπιστώνεται πως η αντικατάσταση συμβατικής παραγωγής από αιολικά πάρκα με ΑΓΔΤ έχει μικρή αρνητική επίδραση στην απόσβεση μια ταλάντωσης διασύνδεσης ενός διασυνδεδεμένου συστήματος. Στην εργασία [MBP07], όπου επίσης χρησιμοποιείται αντίστοιχο μοντέλο, γίνονται προσομοιώσεις σε ένα μικρό αδύναμο δίκτυο και συμπεραίνεται ότι οι ΑΓΔΤ εισάγουν περισσότερη απόσβεση σε σχέση με μία συμβατική γεννήτρια. Στην εργασία [FMO08] συμπεραίνεται ότι ο βρόχος ελέγχου άεργου ισχύος του μοντέλου αυτού εισάγει την πιο σημαντική δυναμική που μπορεί να επηρεάσει τις διασυνδετικές ταλαντώσεις.

Οι μετατροπείς ηλεκτρονικών ισχύος, που χρησιμοποιούνται στις ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών, προσφέρουν δυνατότητες για συμβολή των ανεμογεννητριών στην απόσβεση των ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων, με βάση και την προηγούμενη εμπειρία με διατάξεις ευέλικτων συστημάτων μεταφοράς (Flexible AC Transmission Systems, FACTS) όπως SVC και STATCOM, οι οποίες με πρόσθετους βρόχους ελέγχου, μπορούν να εισά-

Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή

γουν απόσβεση σε διασυνδεδετικές ταλαντώσεις, αντίστοιχα με τους σταθεροποιητές ισχύος των σύγχρονων μηχανών [MCR03].

Στην εργασία [SA93] διερευνώνται αντίστοιχες δυνατότητες των μετατροπέων συνεχούς ρεύματος υψηλής τάσης (HVDC) και, συγκεκριμένα, η απόσβεση αργών (διασυνδεδετικών) ταλαντώσεων ενός απλού συστήματος δύο γεννητριών με διαμόρφωση της (κατανάλωσης) ενεργού και αέργου ισχύος ενός HVDC που βρίσκεται σε ενδιάμεσο σημείο. Συμπεραίνεται ότι η διαμόρφωση της ενεργού ισχύος είναι αποτελεσματική όταν το HVDC βρίσκεται πιο κοντά σε κάποια από τις δύο μηχανές και ότι πρέπει να είναι σε φάση με την ταχύτητα της γεννήτριας αυτής. Αντίθετα, η διαμόρφωση της αέργου ισχύος είναι πιο αποτελεσματική όταν γίνεται κοντά στο μέσο της ηλεκτρικής απόστασης των δύο γεννητριών και πρέπει να είναι σε φάση με την χρονική παράγωγο της τερματικής τάσης.

Η εργασία [MH98] δείχνει ότι αν ο σταθεροποιητικός βρόχος ενός SVC έχει ρυθμιστεί για να εισάγει απόσβεση στον πιο κρίσιμο ρυθμό ενός συστήματος χρησιμοποιώντας στατικά μοντέλα για τα φορτία, η δυναμική των φορτίων μπορεί να οδηγήσει τελικά σε χειρότερηση της απόσβεσης ταλαντώσεων. Η εργασία επίσης δείχνει ότι μετά από πρόσθετη στιβαρή (robust) ρύθμιση ενός σταθεροποιητικού βρόχου, αυτός μπορεί να προσφέρει σημαντικά βελτιωμένη απόσβεση των ταλαντώσεων παρά την πιθανή αβεβαιότητα παραμέτρων των φορτίων.

Στην εργασία [HALJ06] εξετάζεται η χρήση ενός σταθεροποιητή ισχύος, αντίστοιχου με αυτούς που χρησιμοποιούνται συνήθως στις σύγχρονες γεννήτριες [Kun94, Rog00], στον βρόχο ενεργού ισχύος μιας ΑΓΔΤ. Στην εργασία [Jau07] προτείνεται παρόμοιος σταθεροποιητής στο βρόχο ενεργού ισχύος μιας ανεμογεννήτριας πλήρους μετατροπέα ενώ στην εργασία [FMB10] χρησιμοποιείται και ο βρόχος αέργου ισχύος. Στην εργασία [LG07] παρουσιάζεται ένας πολύ απλός σταθεροποιητής για ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών: ένα σήμα ανάλογο με την απόκλιση της συχνότητας του δικτύου προστίθεται στην αναφορά της ενεργού ισχύος. Στην εργασία [MFO09] εξετάζεται το κλασικό σύστημα δύο περιοχών με τέσσερις συμβατικές γεννήτριες που παρουσιάζει διασυνδεδετικές ταλαντώσεις. Θεωρώντας ένα σημαντικό επίπεδο αιολικής διεύθυνσης, συμπεραίνεται ότι ο βρόχος ενεργού ισχύος της ΑΓΔΤ είναι προτιμότερος σε σχέση με τον βρόχο αέργου ισχύος για εισαγωγή απόσβεσης στην διασυνδεδετική ταλάντωση και σχεδιάζεται αντίστοιχος σταθεροποιητής για την απόσβεση του συγκεκριμένου ρυθμού ταλάντωσης.

1.6 Αντικείμενο και δομή διατριβής

Η διατριβή ασχολείται με την παράσταση των αιολικών πάρκων σε μελέτες ευστάθειας ΣΗΕ και με τη συμβολή τους στην ευστάθεια ΣΗΕ, κυρίως στη βραχυπρόθεσμη ευστάθεια τάσης και την ευστάθεια γωνίας μικρών διαταραχών. Προτείνονται μέτρα για την αποφυγή προβλημάτων ταλαντώσεων στο βρόχο ρύθμισης αέργου ισχύος ανεμογεννητριών μεταβλητών στροφών ή αρνητικής αλληλεπίδρασης του βρόχου αυτού με ηλεκτρομηχανικούς ρυθμούς ταλάντωσης. Επίσης, προτείνεται και σχεδιάζεται ένας αιολικός σταθεροποιητής ΣΗΕ για την εισαγωγή απόσβεσης στις ηλεκτρομηχανικές ταλαντώσεις διασύνδεσης.

Η ανάπτυξη των μοντέλων αυτής της εργασίας έγινε στο πλαίσιο του υπολογιστικού πακέτου WHSSP, το οποίο έχει αναπτυχθεί σε περιβάλλον Matlab/Simulink και είναι κατάλληλο για δυναμικές προσομοιώσεις και ανάλυση ευστάθειας σε μικρού και μεσαίου μεγέθους μεγέθους, αυτόνομα ή διασυνδεδεμένα, συστήματα [PV03b, Ποτ06]. Το WHSSP αποτελεί μέρος του εκπαιδευτικού λογισμικού του εργαστηρίου ΣΗΕ του ΕΜΠ, που έχει αναπτυχθεί σε συνεργασία με το Πανεπιστήμιο της Λιέγης [VPM04].

Για τις ανεμογεννήτριες με απλές μηχανές επαγωγής προσαρμόστηκε και χρησιμοποιείται το μοντέλο που αναπτύχθηκε σε προηγούμενη εργασία στο Πανεπιστήμιο της Λιέγης [Tso03]

σύμφωνα και με όσα αναφέρθηκαν σχετικά στην ενότητα 1.5.

Στο Κεφ. 2 περιγράφονται οι ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών και τα σχετικά συστήματα ελέγχου, με έμφαση στις ανεμογεννήτριες διπλής τροφοδότησης, για τις οποίες διατυπώνονται οι σχετικές εξισώσεις.

Στο Κεφ. 3 παρουσιάζονται τα μοντέλα που αναπτύχθηκαν στο πλαίσιο αυτής της εργασίας. Καταρχάς, τα μοντέλα της ΑΓΔΤ με απλοποιημένους βρόχους ελέγχου (“αλγεβρικό” και “μεταβατικό” μοντέλο) με βάση τις εξισώσεις τάσης των μηχανών επαγωγής, παρόμοια με αντίστοιχα της βιβλιογραφίας. Στη συνέχεια, ένα μοντέλο της ΑΓΔΤ με λεπτομερείς βρόχους ελέγχου, όπως έχει δημοσιευτεί από συγκεκριμένο κατασκευαστή (GE) και τέλος ένα γενικευμένο μοντέλο ανεμογεννητριών μεταβλητών στροφών, που έχει δημοσιεύσει ο διαχειριστής του Ισπανικού συστήματος μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας (REE).

Στο Κεφ. 4 εξετάζεται η ευστάθεια μίας ανεμογεννήτριας με ΑΓΔΤ σε σύνδεση με άπειρο ζυγό. Καταρχάς, αναλύεται η ευστάθεια ελέγχου των στροφών, η οποία αφορά γενικότερα στις ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών. Στη συνέχεια, εξετάζονται σταδιακά οι ρυθμοί απόκρισης του μοντέλου ΑΓΔΤ με απλοποιημένους βρόχους ελέγχου και επιλέγονται τα κέρδη των ρυθμιστών του. Έπειτα εξετάζεται το μοντέλο της ΑΓΔΤ με λεπτομερείς βρόχους ελέγχου. Επαληθεύεται το μοντέλο που αναπτύχθηκε στο πλαίσιο αυτής της εργασίας σε αντιπαραβολή με το αντίστοιχο μοντέλο του προγράμματος PSS/E και προσδιορίζονται οι ρυθμοί απόκρισης που εισάγει. Διαπιστώνεται ότι η κύρια δυναμική προκαλείται από το βρόχο ελέγχου της αέργου ισχύος, ο οποίος εισάγει ένα ταλαντωτικό ρυθμό απόκρισης. Στη συνέχεια αναλύεται η ευστάθεια του συγκεκριμένου βρόχου και διατυπώνονται γενικοί κανόνες.

Στο Κεφ. 5 εξετάζεται η αδιάλειπτη λειτουργία των ΑΓΔΤ σε βυθίσεις τάσης. Με κατάλληλη προσαρμογή του μεταβατικού μοντέλου της ΑΓΔΤ, διερευνάται η αρχή λειτουργίας της ενεργού διατάξης βραχυκύκλωσης του δρομέα που χρησιμοποιείται από κατασκευαστές για την εξασφάλιση της αδιάλειπτης λειτουργίας της ΑΓΔΤ σε συνθήκες βύθισης της τάσης. Επίσης, εξετάζεται η αναπαράσταση της λειτουργίας αυτής της διάταξης σε μελέτες ευστάθειας ΣΗΕ με τη βοήθεια προσομοιώσεων βραχυκυκλωμάτων σε σύστημα μίας ΑΓΔΤ σε σύνδεση με άπειρο ζυγό. Τέλος, γίνονται αντίστοιχες προσομοιώσεις με το γενικευμένο μοντέλο και σύγκριση των μοντέλων.

Στη συνέχεια, στο Κεφ. 6 εξετάζεται η συμβολή αιολικών πάρκων με ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών στη βραχυπρόθεσμη ευστάθεια τάσης γειτονικών πάρκων με μηχανές επαγωγής (ανεμογεννήτριες σταθερών στροφών). Γίνονται προσομοιώσεις σε παραλλαγές ενός μικρού διασυνδεδεμένου συστήματος με τοπική σύγχρονη γεννήτρια και αιολικά πάρκα, τα οποία στο βασικό σενάριο διαθέτουν όλα μηχανές επαγωγής, καθώς και σε παραλλαγή του συστήματος της Ν. Ευβοίας.

Στο Κεφ. 7 γίνεται ανάλυση της ευστάθειας μικρών διαταραχών διασυνδεδεμένου ΣΗΕ με τοπική σύγχρονη γεννήτρια για διάφορες συνθήκες λειτουργίας και επίπεδα αιολικής διείσδυσης με ΑΓΔΤ. Εξετάζεται η συμβολή της μεταβολής της ενεργού και της αέργου ισχύος της ΑΓΔΤ, χρησιμοποιώντας το μοντέλο με λεπτομερείς βρόχους ελέγχου και προτείνεται ρύθμιση του βρόχου αέργου ισχύος για αντιμετώπιση των αρνητικών αλληλεπιδράσεων. Επίσης, γίνεται εφαρμογή στο ελληνικό διασυνδεδεμένο σύστημα, όπου εξετάζεται η επίδραση υψηλής αιολικής διείσδυσης στην ευστάθεια μικρών διαταραχών του ελληνικού συστήματος, χρησιμοποιώντας ένα μοντέλο με λεπτομερή αναπαράσταση των συστημάτων της ΝΑ Ευρώπης.

Στο Κεφ. 8 γίνεται εισαγωγή, ανάλυση και σχεδίαση ενός αιολικού σταθεροποιητή για αύξηση της απόσβεσης των ταλαντώσεων διασύνδεσης. Γίνεται εφαρμογή σε δύο δοκιμαστικά συστήματα, που εμφανίζουν μη αποσβενόμενες ταλαντώσεις, και επιτύγχανεται η ικανοποιη-

Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή

τική σταθεροποίησή τους.

Στο Κεφ. 9 γίνεται ανακεφαλαίωση της διατριβής, συνοψίζονται τα συμπεράσματα και διατυπώνεται η συμβολή της. Επίσης, αναφέρονται προοπτικές παραπέρα συνέχισης της σχετικής έρευνας.

Κεφάλαιο 2

Περιγραφή ανεμογεννητριών μεταβλητών στροφών και συστημάτων ελέγχου

2.1 Πτερωτή

Η ισχύς P_w ενός ρεύματος αέρα διατομής A ομοιόμορφης στιγμιαίας ταχύτητας V_w και πυκνότητας ρ υπολογίζεται από τη σχέση [Μπε00]

$$P_w = \frac{1}{2} \rho A V_w^3 \quad (2.1)$$

Ο λόγος της μηχανικής ισχύος P_m που παρέχει η πτερωτή προς την διαθέσιμη ισχύ του ανέμου ορίζει τον αεροδυναμικό συντελεστή ισχύος C_p . Επομένως είναι

$$P_m = P_w \cdot C_p = \frac{1}{2} \rho A V_w^3 C_p \quad (2.2)$$

Ο συντελεστής ισχύος C_p είναι συνάρτηση της γωνία βήματος των πτερυγίων β και της ταχύτητας ακροπτερυγίου λ , η οποία ορίζεται ως

$$\lambda = \frac{\omega_m R}{V_w} \quad (2.3)$$

όπου ω_m είναι η μηχανική ταχύτητα περιστροφής της πτερωτής (σε rad/s) και R είναι η ακτίνα της.

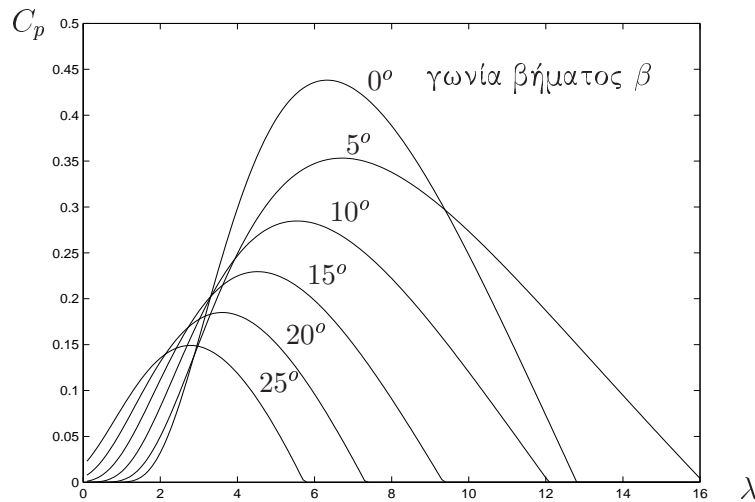
Σημειώνεται ότι το C_p δεν είναι αυστηρά ο βαθμός απόδοσης του δρομέα, αφού αναφέρεται σε ισχύ που δεν είναι εκμεταλλεύσιμη στο σύνολό της. Η μέγιστη θεωρητική τιμή του C_p είναι 16/27 (59%) (όριο του Betz).

Στο Σχ. 2.1 φαίνονται καμπύλες του αεροδυναμικού συντελεστή ισχύος C_p συναρτήσει της ταχύτητας ακροπτερυγίου λ με παράμετρο τη γωνία βήματος β , όπου έχουν χρησιμοποιηθεί στοιχεία από το Παράρτημα Α.

Η στατική αυτή σχέση για την αεροδυναμική μετατροπή της ισχύος γενικά θεωρείται αρκετή για μελέτες ευστάθειας και χρησιμοποιείται ευρέως στα σχετικά μοντέλα, π.χ. [SPK01a, MSGP03, LU05, LML06]. Στην εργασία [PSG06] προτείνεται ένα απλοποιημένο μοντέλο με λιγότερες απαιτήσεις για αεροδυναμικά δεδομένα.

2.2 Έλεγχος στροφών για μέγιστη απολαβή ισχύος

Ο βασικός στόχος του ελέγχου της ταχύτητας περιστροφής είναι η ανεμογεννήτρια να λειτουργεί με τον μέγιστο αεροδυναμικό συντελεστή C_p (βλ. Σχ. 2.1) στις χαμηλές ταχύτητες



Σχήμα 2.1: Καμπύλες $C_p - \lambda$ με παράμετρο τη γωνία βήματος β

ανέμου (κάτω από την ονομαστική) και να παράγει σταθερή ισχύ στις υψηλές ταχύτητες ανέμου. Στις υψηλές ταχύτητες ανέμου, η ταχύτητα περιστροφής κρατείται σταθερή και το επιθυμητό αποτέλεσμα επιτυγχάνεται σε συνδυασμό με τον έλεγχο της γωνίας βήματος των πτερυγίων (βλ. ενότητα 2.3).

Σύμφωνα με το Σχ. 2.1, προκειμένου η ανεμογεννήτρια να λειτουργεί με το μέγιστο C_p , η γωνία βήματος κρατείται σταθερή στην ελάχιστη τιμή της. Επίσης απαιτείται η ταχύτητα ακροπτερυγίου λ να παραμένει σταθερή και ίση με τη βέλτιστη τιμή της. Επομένως η αναλογία στροφών - ταχύτητας ανέμου πρέπει να είναι σταθερή και, άρα, από την (2.2) προκύπτει ότι η συνάρτηση στροφών - ισχύος για βέλτιστη λειτουργία είναι της μορφής $P_m^* = c \cdot \omega_r^3$, όπου c σταθερά ανάλογη του μέγιστου συντελεστή ισχύος.

Στο Σχ. 2.2 φαίνεται με συνεχή γραμμή η καμπύλη στροφών - ισχύος για βέλτιστη απόδοση που προκύπτει χρησιμοποιώντας τα δεδομένα μιας συγκεκριμένης ανεμογεννήτριας, τα οποία δίνονται στο Παράρτημα Α. Ως βάση για τις ανά μονάδα τιμές της ισχύος έχει ληφθεί η ονομαστική ισχύς P_{nom} της ανεμογεννήτριας.

Ο έλεγχος της ταχύτητας περιστροφής γίνεται συνήθως με μία από τις εξής μεθόδους:

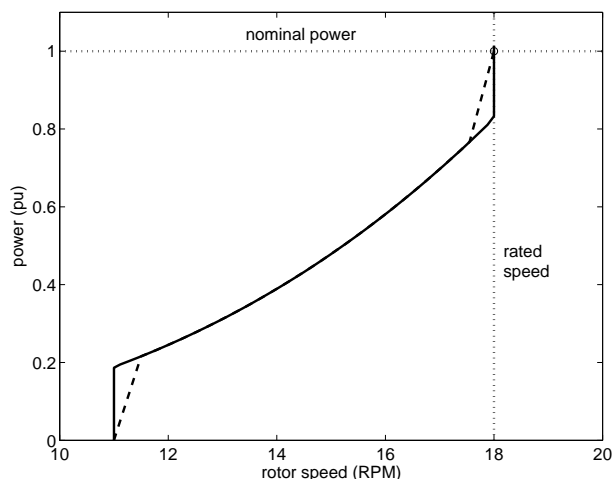
- χρησιμοποιώντας μέτρηση της ισχύος εξόδου
- χρησιμοποιώντας μέτρηση της ταχύτητας περιστροφής.

Στην πρώτη περίπτωση από τη μέτρηση της ισχύος εξόδου και τη χαρακτηριστική ελέγχου του Σχ. 2.2 προκύπτει η ταχύτητα αναφοράς, η οποία μετά εισάγεται σε ένα ελεγκτή με έξοδο την ενεργό ισχύ ή/και την ηλεκτρομαγνητική ροπή αναφοράς. Στη δεύτερη περίπτωση, η ισχύς αναφοράς ή/και η ροπή αναφοράς προκύπτει από τη μέτρηση της ταχύτητας περιστροφής και τη χαρακτηριστική ελέγχου του Σχ. 2.2. Επειδή όμως σε αυτή την περίπτωση χρειάζεται μια ένα-προς-ένα σχέση μεταξύ στροφών και ισχύος, μπορεί να χρησιμοποιηθεί τροποποιημένη καμπύλη, παρόμοια με τη διακεκομμένη που φαίνεται στο ίδιο σχήμα.

2.3 Έλεγχος γωνίας βήματος πτερυγίων

Όπως αναφέρθηκε προηγούμενα, στις υψηλές ταχύτητες ανέμου απαιτείται η ισχύς της ανεμογεννήτριας να παραμένει σταθερή (ίση με την ονομαστική). Στις ανεμογεννήτριες που

Κεφάλαιο 2. Περιγραφή ανεμογεννητριών μεταβλητών στροφών και συστημάτων ελέγχου



Σχήμα 2.2: Χαρακτηριστική ελέγχου στροφών-ισχύος

διαθέτουν μηχανισμό ελέγχου της γωνίας βήματος των πτερυγίων αυτό επιτυγχάνεται είτε αυξάνοντας είτε μειώνοντας τη γωνία βήματος (βλ. Σχ. 2.1). Στη δεύτερη περίπτωση προκαλείται αποκόλληση της ροής και απώλεια στήριξης (stall), γι' αυτό η μέθοδος αυτή είναι γνωστή ως "active stall control". Η πρώτη μέθοδος είναι γνωστή ως "pitch control". Στη συνέχεια υποθέτουμε ότι χρησιμοποιείται η πρώτη μέθοδος.

Ο έλεγχος της γωνίας βήματος και η αναπαράστασή του εξαρτώνται από την υλοποίηση του ελέγχου των στροφών για μέγιστη απολαβή ισχύος. Εάν ο έλεγχος στροφών/ισχύος γίνεται με βάση την ενεργό ισχύ εξόδου, τότε προκύπτει ταχύτητα αναφοράς, τότε ο ρυθμιστής της γωνίας βήματος μπορεί να αναπαρασταθεί με ένα αναλογικό - ολοκληρωματικό ελεγκτή με έξοδο την επιθυμητή γωνία βήματος και είσοδο το σφάλμα της ταχύτητας περιστροφής από την ταχύτητα αναφοράς [cig07]. Σε αυτή την περίπτωση, η γωνία βήματος θα μπορεί να μεταβάλλεται και στην περιοχή λειτουργίας με ταχύτητα ανέμου κάτω της ονομαστικής και άρα να συμμετέχει (από την πλευρά της μηχανικής ισχύος/ροπής) στον έλεγχο στροφών. Προκειμένου όμως να εξασφαλίζεται ότι στη μόνιμη κατάσταση σε αυτή την περιοχή λειτουργίας, η γωνία βήματος θα έχει την ελάχιστη τιμή (ώστε να μπορεί να επιτευχθεί ο μέγιστος αεροδυναμικός συντελεστής ισχύος), χρειάζεται και ένας επιπλέον βρόχος "αντιστάθμισης" (pitch compensation). Αυτού του είδους ο έλεγχος χρησιμοποιείται στο μοντέλο που περιγράφεται στην παράγραφο 3.3.

Σε κάθε περίπτωση, και κυρίως εάν δεν προκύπτει ταχύτητα αναφοράς από τον έλεγχο στροφών/ισχύος, μπορεί να χρησιμοποιηθεί το σφάλμα από τη μέγιστη ταχύτητα περιστροφής, οπότε στις χαμηλές ταχύτητες ανέμου (όπου το σφάλμα είναι αρνητικό αλλά δεν πρέπει να "διορθωθεί") η γωνία βήματος είναι περιορισμένη στην ελάχιστη τιμή της [Pöl03, LU05]. Αυτός ο έλεγχος υλοποιείται στο μοντέλο της παραγράφου 3.2.

Στην εργασία [SPK03] χρησιμοποιείται αναλογικός έλεγχος της γωνίας βήματος με είσοδο τη διαφορά της ταχύτητας περιστροφής από τη μέγιστη, με το σκεπτικό ότι μια μικρή υπερτάχυνση της ανεμογεννήτριας μπορεί να επιτραπεί και δεδομένου ότι η μηχανή δεν βρίσκεται ποτέ σε μόνιμη κατάσταση, ο μηδενισμός του μόνιμου σφάλματος από τον ολοκληρωματικό έλεγχο δεν προσφέρει κάτι.

2.4 Σύστημα μετάδοσης κίνησης

Οι ηλεκτρικές μηχανές λειτουργούν κατά κανόνα σε μεγαλύτερες ταχύτητες περιστροφής σε σχέση με τις ταχύτητες περιστροφής της πτερωτής μιας ανεμογεννήτριας. Στις ανεμογεννήτριες με ΑΓΔΤ, χρησιμοποιείται μειωτήρας στροφών, όπως και στις ανεμογεννήτριες σταθερών στροφών. Στις ανεμογεννήτριες με πλήρη μετατροπέα, συχνά χρησιμοποιείται μεγάλος αριθμός πόνων οπότε μπορεί και να αποφεύγεται εντελώς ο μειωτήρας.

Λόγω του ότι οι ανεμογεννήτριες με ΑΓΔΤ διαθέτουν μειωτήρα στροφών, ο άξονας χαμηλών στροφών εμφανίζεται αρκετά ελαστικός όταν τα μεγέθη του ανάγονται στην πλευρά υψηλών στροφών, καθώς ο συντελεστής ελαστικότητας διαιρείται με το τετράγωνο του λόγου των στροφών [HN82, ΠαΜ97]. Ο στρεπτικός ρυθμός ταλάντωσης του άξονα έχει συχνότητα συνήθως από 1 έως 2 Hz [ΠαΣ97, ΑΚ02].

Όμως και στην περίπτωση των ανεμογεννητριών με πλήρη μετατροπέα, μπορεί ο άξονας χαμηλών στροφών να εμφανίζεται αρκετά ελαστικός όταν τα μεγέθη του ανάγονται στην πλευρά υψηλών στροφών, διότι η ελαστικότητα του ισοδύναμου άξονα με δύο στρεφόμενες μάζες είναι αντιστρόφως ανάλογη του τετραγώνου τόσο του λόγου του μειωτήρα στροφών όσο και του αριθμού των πόνων της γεννήτριας [Kun94, Akh03]. Επιπλέον, στις σύγχρονες γεννήτριες οι οποίες χρησιμοποιούνται συνήθως στις ανεμογεννήτριες πλήρους μετατροπέα, δεν υπάρχει σχετική κίνηση μεταξύ στάτη και δρομέα, οπότε δεν μπορεί να παραχθεί απόσβεση με βάση τον μηχανισμό που λειτουργούν τα τυλίγματα απόσβεσης στις κλασικές σύγχρονες γεννήτριες που είναι συνδεδεμένες απευθείας στο δίκτυο [ΜΗΗ07, Jau07].

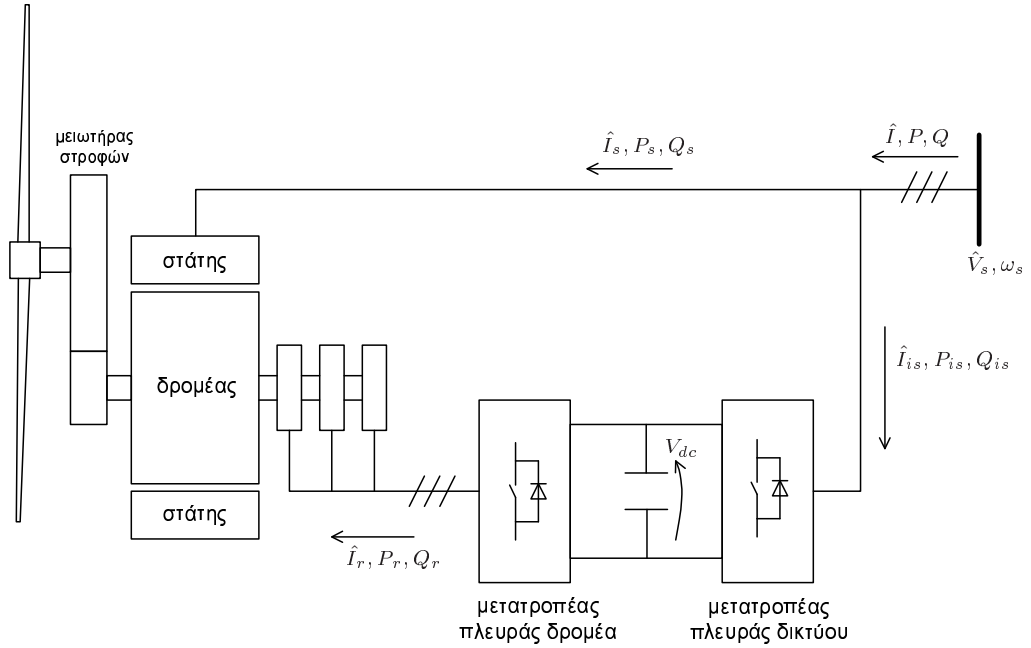
Για τους παραπάνω λόγους, σε μελέτες ευστάθειας ΣΗΕ μπορεί να είναι σκόπιμη η παράσταση του μηχανικού μέρους με δύο στρεφόμενες μάζες (αντί του συνηθισμένου μοντέλου με μια στρεφόμενη μάζα), προκειμένου να εμφανίζεται ο στρεπτικός ρυθμός ταλάντωσης του άξονα. Σε αυτή την περίπτωση όμως θα πρέπει να ληφθεί υπόψη το γεγονός ότι στον έλεγχο της γεννήτριας υπάρχει βρόχος ενεργού απόσβεσης, όπως π.χ. αυτοί που προτείνονται στις εργασίες [Jau07, ΜΗΗ07] για ανεμογεννήτριες με πλήρη μετατροπέα. Αυτό μπορεί να γίνει χρησιμοποιώντας κατάλληλο συντελεστή απόσβεσης στο μηχανικό μοντέλο των δύο μαζών [cig07].

Στην εργασία [SPK03] χρησιμοποιείται μηχανικό μοντέλο άξονα με μια στρεφόμενη μάζα, θεωρώντας ότι οι μηχανικές και οι ηλεκτρικές ιδιότητες των ανεμογεννητριών μεταβλητών στροφών είναι τελείως αποζευγμένες λόγω του μετατροπέα ηλεκτρονικών ισχύος.

2.5 Ασύγχρονη Γεννήτρια Διπλής Τροφοδότησης (ΑΓΔΤ)

Όπως αναφέρθηκε στο Κεφ.1, η πιο διαδεδομένη διάταξη ηλεκτρομηχανικής μετατροπής που χρησιμοποιείται σήμερα στις ανεμογεννήτριες είναι οι Ασύγχρονες Γεννήτριες Διπλής Τροφοδότησης (ΑΓΔΤ - Doubly Fed Asynchronous Generator). Η Ασύγχρονη Γεννήτρια Διπλής Τροφοδότησης (ΑΓΔΤ) είναι μια ασύγχρονη μηχανή τυλιγμένου δρομέα της οποίας τόσο ο στάτης όσο και ο δρομέας συνδέονται στο δίκτυο. Ο μεν στάτης απευθείας, όπως στις κλασικές μηχανές επαγωγής, ο δε δρομέας μέσω ψηκτρών και ενός μετατροπέα συχνότητας, όπως φαίνεται στο Σχ. 2.3.

Ο μετατροπέας συχνότητας αποτελείται από δύο μετατροπείς πηγής τάσης (PWM) η οποίοι έχουν κοινή DC πλευρά. Λειτουργώντας το κύκλωμα του δρομέα σε μεταβλητή συχνότητα, επιτυγχάνεται μεταβλητή μηχανική ταχύτητα περιστροφής. Η συνολική ενεργός ισχύς της μηχανής είναι το άθροισμα της ισχύος από τον στάτη και -μέσω του μετατροπέα- από τον δρομέα. Δεδομένου ότι μόνο ένα μέρος της συνολικής ισχύος περνάει από το μετατροπέα, αυτός είναι μειωμένης ονομαστικής ισχύος (περίπου ένα τρίτο της συνολικής)



Σχήμα 2.3: Βασική διάταξη της ΑΓΔΤ

και άρα μειωμένου κόστους σε σχέση με ένα μετατροπέα πλήρους ισχύος. Σημειώνεται ότι μεταξύ του μετατροπέα πλευράς δικτύου και του τερματικού ζυγού της μηχανής μπορεί να υπάρχει μετασχηματιστής, ο οποίος δεν εμφανίζεται στο Σχ. 2.3.

2.5.1 Εξισώσεις ασύγχρονης μηχανής διπλής τροφοδότησης

Η δυναμική των ασύγχρονων μηχανών περιγράφεται από τις γνωστές εξισώσεις τάσης στο σύγχρονο πλαίσιο, οι οποίες γράφονται ως εξής με σύμβαση κίνητρα (σε α.μ.) [KWS00]:

$$v_{ds} = R_s i_{ds} - \omega_s \psi_{qs} + \frac{1}{\omega_b} \frac{d\psi_{ds}}{dt} \quad (2.4)$$

$$v_{qs} = R_s i_{qs} + \omega_s \psi_{ds} + \frac{1}{\omega_b} \frac{d\psi_{qs}}{dt} \quad (2.5)$$

$$v_{os} = R_s i_{os} + \frac{d\psi_{os}}{dt} \quad (2.6)$$

$$v_{dr} = R_r i_{dr} - (\omega_s - \omega_r) \psi_{qr} + \frac{1}{\omega_b} \frac{d\psi_{dr}}{dt} \quad (2.7)$$

$$v_{qr} = R_r i_{qr} + (\omega_s - \omega_r) \psi_{dr} + \frac{1}{\omega_b} \frac{d\psi_{qr}}{dt} \quad (2.8)$$

$$v_{or} = R_r i_{or} + \frac{d\psi_{or}}{dt} \quad (2.9)$$

όπου:

- v, i και ψ συμβολίζουν τάση, ρεύμα και πεπλεγμένη μαγνητική ροή ανά δευτερόλεπτο αντίστοιχα.
- οι δείκτες s και r συμβολίζουν μεγέθη στάτη και δρομέα αντίστοιχα.

Κεφάλαιο 2. Περιγραφή ανεμογεννητριών μεταβλητών στροφών και συστημάτων ελέγχου

- ω_s και ω_r είναι η ηλεκτρική γωνιακή ταχύτητα της τάσης του στάτη και ηλεκτρική γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του δρομέα αντίστοιχα.
- ω_b είναι η βασική (ονομαστική) ηλεκτρική γωνιακή ταχύτητα του συστήματος (rad/s).
- R συμβολίζει ωμική αντίσταση.

Ο άξονας q προπορεύεται κατά 90° του άξονα d . Το φαινόμενο του μαγνητικού κορεσμού αμελείται και η ωμική αντίσταση του δρομέα θεωρείται σταθερή (ανεξάρτητη της συχνότητας ολίσθησης). Ο συντελεστής $1/\omega_b$ εμφανίζεται επειδή στο ανά μονάδα σύστημα όλα τα μεγέθη είναι σε ανα μονάδα εκτός από τον χρόνο.

Οι πεπλεγμένες μαγνητικές ροές ανά δευτερόλεπτο γράφονται συναρτήσει των ρευμάτων ως εξής:

$$\begin{bmatrix} \psi_{ds} \\ \psi_{qs} \\ \psi_{os} \\ \psi_{dr} \\ \psi_{qr} \\ \psi_{or} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{ss} & 0 & 0 & X_M & 0 & 0 \\ 0 & X_{ss} & 0 & 0 & X_M & 0 \\ 0 & 0 & X_{os} & 0 & 0 & 0 \\ X_M & 0 & 0 & X_{rr} & 0 & 0 \\ 0 & X_M & 0 & 0 & X_{rr} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & X_{or} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{os} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \\ i_{or} \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

όπου:

- X_M είναι η αντίδραση μαγνήτισης της μηχανής.
- $X_{ss} = X_M + X_{ls}$ είναι η σύγχρονη αντίδραση του στάτη.
- $X_{rr} = X_M + X_{lr}$ είναι η σύγχρονη αντίδραση του δρομέα.
- X_{ls} και X_{lr} είναι η αντίδραση σκέδασης του στάτη και του δρομέα αντίστοιχα.
- X_{os} και X_{or} είναι οι αντιδράσεις των τυλιγμάτων os και or .

2.5.2 Ενέργεια, ισχύς και ροπή

Η ισχύς που απορροφά ο στάτης είναι:

$$P_s = v_{ds}i_{ds} + v_{qs}i_{qs} + v_{os}i_{os}$$

η οποία, χρησιμοποιώντας τις (2.4-2.6) γίνεται:

$$P_s = (R_s i_{ds}^2 + R_s i_{qs}^2 + R_s i_{os}^2) + \frac{1}{\omega_b} \left(i_{ds} \frac{d\psi_{ds}}{dt} + i_{qs} \frac{d\psi_{qs}}{dt} + i_{os} \frac{d\psi_{os}}{dt} \right) + \omega_s (\psi_{ds}i_{qs} - \psi_{qs}i_{ds}) \quad (2.11)$$

Ο πρώτος όρος στο δεξί μέρος αναπαριστά τις θερμικές απώλειες στάτη P_{Js} και ο δεύτερος τη μεταβολή της μαγνητικής ενέργειας στα τυλίγματα του στάτη. Επομένως ο τρίτος όρος αναπαριστά την ισχύ διακένου P_g που μεταφέρεται από το στάτη στο δρομέα:

$$P_g = \omega_s (\psi_{ds}i_{qs} - \psi_{qs}i_{ds}) \quad (2.12)$$

Ο ισολογισμός ισχύος του δρομέα είναι:

$$P_g + P_r = P_l + P_{Jr} + \frac{1}{\omega_b} \frac{dW_{mr}}{dt} + \frac{1}{\omega_b} \frac{dW_k}{dt} \quad (2.13)$$

Κεφάλαιο 2. Περιγραφή ανεμογεννητριών μεταβλητών στροφών και συστημάτων ελέγχου

όπου P_r είναι η ενεργός ισχύς από το μετατροπέα πλευράς δρομέα, P_l είναι η μηχανική ισχύς που αποδίδεται στο φορτίο, P_{Jr} είναι οι θερμικές απώλειες του δρομέα, W_{mr} είναι η μαγνητική ενέργεια στα τυλίγματα του δρομέα και W_k είναι η κινητική ενέργεια των στρεφόμενων μαζών.

Η ισχύς P_r γράφεται:

$$P_r = v_{dr}i_{dr} + v_{qr}i_{qr} + v_{or}i_{or}$$

και αντικαθιστώντας τις τάσεις από τις εξισώσεις (2.7-2.9) προκύπτει:

$$P_r = (R_r i_{dr}^2 + R_r i_{qr}^2 + R_r i_{or}^2) + \frac{1}{\omega_b} \left(i_{dr} \frac{d\psi_{dr}}{dt} + i_{qr} \frac{d\psi_{qr}}{dt} + i_{or} \frac{d\psi_{or}}{dt} \right) + (\omega_s - \omega_r)(\psi_{dr}i_{qr} - \psi_{qr}i_{dr})$$

Ο πρώτος όρος στο δεξί μέλος αναπαριστά τις ωμικές απώλειες του δρομέα P_{Jr} και ο δεύτερος τη μεταβολή της μαγνητικής ενέργειας στα τυλίγματα του δρομέα. Δηλαδή:

$$P_r = P_{Jr} + \frac{1}{\omega_b} \frac{dW_{mr}}{dt} + (\omega_s - \omega_r)(\psi_{dr}i_{qr} - \psi_{qr}i_{dr}) \quad (2.14)$$

Επίσης ισχύει:

$$P_l + \frac{1}{\omega_b} \frac{dW_k}{dt} = \omega_r T_e \quad (2.15)$$

που είναι η ισχύς που μεταφέρεται μέσω της ηλεκτρομαγνητικής ροπής T_e .

Αντικαθιστώντας την ισχύ P_g από τη σχέση (2.12) και εισάγοντας τις (2.14) και (2.15) στην (2.13), προκύπτει:

$$\omega_r T_e = (\omega_s - \omega_r)(\psi_{dr}i_{qr} - \psi_{qr}i_{dr}) + \omega_s(\psi_{ds}i_{qs} - \psi_{qs}i_{ds})$$

Έχουμε επίσης:

$$\psi_{ds}i_{qs} - \psi_{qs}i_{ds} = (X_{ss}i_{ds} + X_M i_{dr})i_{qs} - (X_{ss}i_{qs} + X_M i_{qr})i_{ds} = X_M(i_{dr}i_{qs} - i_{qr}i_{ds})$$

και

$$\begin{aligned} \psi_{dr}i_{qr} - \psi_{qr}i_{dr} &= (X_{rr}i_{dr} + X_M i_{ds})i_{qr} - (X_{rr}i_{qr} + X_M i_{qs})i_{dr} = X_M(i_{ds}i_{qr} - i_{qs}i_{dr}) \\ &= -(\psi_{ds}i_{qs} - \psi_{qs}i_{ds}) \end{aligned}$$

Προκύπτουν άρα οι τρεις παρακάτω εκφράσεις της ροπής:

$$T_e = \psi_{qr}i_{dr} - \psi_{dr}i_{qr} = \psi_{ds}i_{qs} - \psi_{qs}i_{ds} = X_M(i_{qs}i_{dr} - i_{ds}i_{qr}) \quad (2.16)$$

Από τις εξισώσεις (2.13, 2.16) προκύπτει και η παρακάτω απλή έκφραση για την ισχύ διακένου:

$$P_g = \omega_s T_e \quad (2.17)$$

Και από τις εξισώσεις (2.14, 2.16, 2.17) προκύπτει για την ισχύ του μετατροπέα πλευράς δρομέα:

$$P_r = P_{Jr} + \frac{1}{\omega_b} \frac{dW_{mr}}{dt} - \frac{(\omega_s - \omega_r)}{\omega_s} P_g \quad (2.18)$$

Σημειώνεται ότι η συνολική ενεργός ισχύς που απορροφά η μηχανή είναι:

$$P = P_s + P_{is} \quad (2.19)$$

όπου P_{is} είναι η ενεργός ισχύς που απορροφά από το δίκτυο ο μετατροπέας πλευράς δικτύου. Ο ισολογισμός ισχύος στον DC πυκνωτή, αμελώντας τις απώλειες των μετατροπέων είναι:

$$P_r + \frac{1}{\omega_b} \frac{dW_c}{dt} = P_{is} \quad (2.20)$$

όπου W_c είναι η ενέργεια του πυκνωτή.

2.5.2.1 Οιονεί ημιτονοειδής κατάσταση

Υποθέτοντας συμμετρική κατάσταση, η ενεργός και η άεργος ισχύς που απορροφά ο στάτης γράφονται:

$$P_s = v_{ds}i_{ds} + v_{qs}i_{qs} \quad (2.21)$$

$$Q_s = v_{qs}i_{ds} - v_{ds}i_{qs} \quad (2.22)$$

Όπως αναφέρθηκε, στην περίπτωση της ΑΓΔΤ, για τη συνολική ισχύ της μηχανής, λαμβάνεται υπόψη και η ενεργός και άεργος ισχύς του μετατροπέα πλευράς δικτύου, δηλ. ισχύει η εξίσωση (2.19) για την ενεργό ισχύ και η αντίστοιχη εξίσωση για την άεργο ισχύ:

$$Q = Q_s + Q_{is} \quad (2.23)$$

όπου Q_{is} η άεργος ισχύς που απορροφά ο μετατροπέας πλευράς δικτύου. Η ενεργός και άεργος ισχύς του μετατροπέα πλευράς δικτύου γράφονται:

$$P_{is} = v_{ds}i_{dis} + v_{qs}i_{qis} \quad (2.24)$$

$$Q_{is} = v_{qs}i_{dis} - v_{ds}i_{qis} \quad (2.25)$$

όπου i_{dis} και i_{qis} είναι οι συνιστώσες του ρεύματος του μετατροπέα πλευράς δικτύου στο σύγχρονο πλαίσιο dq .

Σύμφωνα με την υπόθεση της οιονεί ημιτονοειδούς κατάστασης που γίνεται συνήθως στις μελέτες ευστάθειας ΣΗΕ, τα μεταβατικά του στάτη αμελούνται, δηλ. αμελούνται οι όροι $d\psi_{ds}/dt$ και $d\psi_{qs}/dt$ στις Εξ. (2.4) και (2.5) αντίστοιχα. Αμελώντας επιπλέον τις ωμικές απώλειες ($R_s=0$), από τις (2.4) και (2.5) προκύπτει:

$$\psi_{ds} = \frac{v_{qs}}{\omega_s} \quad (2.26)$$

$$\psi_{qs} = -\frac{v_{ds}}{\omega_s} \quad (2.27)$$

Για τις συνιστώσες της πεπλεγμένης μαγνητικής ροής του στάτη ισχύουν επίσης από την (2.10):

$$\psi_{ds} = X_{ss}i_{ds} + X_M i_{dr} \quad (2.28)$$

$$\psi_{qs} = X_{ss}i_{qs} + X_M i_{qr} \quad (2.29)$$

Απαλείφοντας τα ρεύματα του στάτη από τις (2.21, 2.22) χρησιμοποιώντας τις (2.28)-(2.29) και εισάγοντας τις (2.26, 2.27), η ενεργός και η άεργος ισχύς του στάτη γράφονται:

$$P_s = -\frac{X_M}{X_{ss}}(v_{ds}i_{dr} + v_{qs}i_{qr}) \quad (2.30)$$

$$Q_s = \frac{V_s^2}{X_{ss}\omega_s} + \frac{X_M}{X_{ss}}(v_{ds}i_{qr} - v_{qs}i_{dr}) \quad (2.31)$$

Εισάγοντας τις (2.24, 2.25) και (2.30, 2.31) στις (2.19) και (2.23), η συνολική ενεργός και άεργος ισχύς που απορροφά η μηχανή γράφονται:

$$P = -v_{ds} \left(\frac{X_M}{X_{ss}}i_{dr} - i_{dis} \right) - v_{qs} \left(\frac{X_M}{X_{ss}}i_{qr} - i_{qis} \right) \quad (2.32)$$

$$Q = \frac{V_s^2}{X_{ss}\omega_s} + v_{ds} \left(\frac{X_M}{X_{ss}}i_{qr} - i_{qis} \right) - v_{qs} \left(\frac{X_M}{X_{ss}}i_{dr} - i_{dis} \right) \quad (2.33)$$

Με ανάλογο τρόπο, η ηλεκτρομαγνητική ροπή γράφεται:

$$T_e = -\frac{X_M}{\omega_s X_{ss}}(v_{qs}i_{qr} + v_{ds}i_{dr}) \quad (2.34)$$

2.5.2.2 Μόνιμη κατάσταση

Στη μόνιμη κατάσταση ισχύει για το στάτη από την (2.11):

$$P_s = P_{J_s} + P_g$$

Για το δρομέα από την (2.18):

$$P_r = P_{J_r} - sP_g$$

και από την (2.13)

$$P_g + P_r - P_{J_r} = P_l$$

Επομένως:

$$P_g(1 - s) = P_l$$

Στη μόνιμη κατάσταση και αμελώντας τις ωμικές απώλειες, από την (2.11) είναι για την ενεργό ισχύ του στάτη:

$$P_s = P_{s \rightarrow r}$$

και από την (2.18) για την ενεργό ισχύ του μετατροπέα πλευράς δρομέα:

$$P_r = -\frac{(\omega_s - \omega_r)}{\omega_s} P_s = -sP_s \quad (2.35)$$

όπου s η ολίσθηση της μηχανής. Επίσης είναι:

$$P_r = P_{is}$$

Άρα η συνολική ενεργός ισχύς που απορροφά η ασύγχρονη μηχανή διπλής τροφοδότησης είναι:

$$P = P_s + P_{is} = (1 - s)P_s \quad (2.36)$$

Επομένως, υποθέτοντας λειτουργία γεννήτριας:

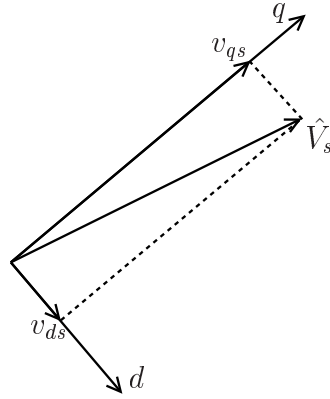
- για υποσύγχρονη ταχύτητα, ο μετατροπέας συχνότητας μεταφέρει ισχύ από το δίκτυο στο δρομέα
- για υπερσύγχρονη ταχύτητα, ο μετατροπέας συχνότητας μεταφέρει ισχύ από το δρομέα στο δίκτυο

Παρατηρούμε λοιπόν, ότι το εύρος στροφών στο οποίο λειτουργεί η ΑΓΔΤ καθορίζει τη μέγιστη ισχύ που περνά από το μετατροπέα.

2.5.3 Διανυσματικός έλεγχος

Στην παράγραφο αυτή εξάγουμε τις βασικές εξισώσεις της μεθόδου διανυσματικού ελέγχου που χρησιμοποιείται συνήθως στις ΑΓΔΤ σύμφωνα και με τη βιβλιογραφία [PCA96,SPK01a].

Το πλαίσιο για το διανυσματικό έλεγχο μπορεί να είναι ευθυγραμμισμένο είτε με την πεπλεγμένη μαγνητική ροή του στάτη είτε με την τερματική τάση. Αμελώντας τα μεταβατικά του στάτη, όπως συνήθως στις μελέτες ευστάθειας ΣΗΕ και την ωμική αντίσταση του στάτη, τα δύο πλαίσια ταυτίζονται. Θεωρώντας λοιπόν ότι ο άξονας d του σύγχρονου πλαισίου αναφοράς βρίσκεται επί του διανύσματος της πεπλεγμένης ροής του στάτη $\vec{\Psi}_s$ και άρα (με



Σχήμα 2.4: Σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς

τις παραδοχές που αναφέρθηκαν παραπάνω) ο άξονας q του Σχ. 2.4 συμπίπτει με το διάνυσμα της τερματικής τάσης \hat{V}_s , προκύπτει $v_{ds} = 0$, $v_{qs} = V_s$, οπότε από την (2.34) είναι:

$$T_e = -\frac{X_M}{\omega_s X_{ss}} V_s i_{qr} \Rightarrow i_{qr} = -\frac{X_{ss} \omega_s}{X_M V_s} T_e \quad (2.37)$$

και από την (2.31):

$$Q_s = \frac{V_s^2}{X_{ss} \omega_s} - \frac{X_M}{X_{ss}} V_s i_{dr} \Rightarrow i_{dr} = \frac{V_s}{X_M \omega_s} - \frac{X_{ss} Q_s}{X_M V_s} \quad (2.38)$$

δηλαδή η συνιστώσα i_{qr} του ρεύματος του δρομέα είναι ανάλογη της ηλεκτρομαγνητικής ροπής και η συνιστώσα i_{dr} καθορίζει την άεργο ισχύ που απορροφά/παράγει ο στάτης. Ο πρώτος όρος στο δεξί μέρος της εξίσωσης (2.38) είναι το ρεύμα που απαιτείται για τη μαγνήτιση της μηχανής.

Επομένως, ρυθμίζοντας κατάλληλα τις συνιστώσες i_{qr} και i_{dr} μέσω του μετατροπέα πλευράς δρομέα, επιτυγχάνεται η επιθυμητή ροπή (και άρα η συνολική ενεργός ισχύς) και άεργος ισχύς του στάτη αντίστοιχα.

Εφόσον οι μετατροπείς που χρησιμοποιούνται είναι τύπου πηγής τάσης, η ρύθμιση μπορεί να γίνει με τη χρήση δύο PI ελεγκτών, έξοδος των οποίων είναι οι τάσεις v_{qr} και v_{dr} αντίστοιχα. Όπως φαίνεται από τις (2.7-2.8) και (2.10), υπάρχει σύζευξη μεταξύ των δυο βρόχων ελέγχου, η οποία μπορεί να αποφευχθεί χρησιμοποιώντας κατάλληλους όρους αντιστάθμισης.

Όσον αφορά στον έλεγχο του μετατροπέα πλευράς δικτύου, χρησιμοποιώντας το ίδιο σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς (με τον άξονα q επί του διανύσματος της τερματικής τάσης) και αμελώντας οποιαδήποτε ενδιάμεση σύνθετη αντίσταση (\hat{Z} στο Σχ. 2.3), προκύπτουν οι παρακάτω εξισώσεις για την ισχύ που απορροφά από το δίκτυο:

$$P_{is} = V_s i_{qis} \quad (2.39)$$

$$Q_{is} = V_s i_{dis} \quad (2.40)$$

Ελέγχοντας επομένως το ρεύμα στους άξονες d και q , ελέγχεται η άεργος και η ενεργός ισχύς αντίστοιχα. Ο μετατροπέας πλευράς δικτύου λειτουργεί ουσιαστικά σαν STATCOM, αλλά και με ενεργό συνιστώσα ρεύματος. Η ενεργός ισχύς ελέγχεται έτσι ώστε η DC τάση του πυκνωτή να διατηρείται σταθερή ενώ συνήθως ο μετατροπέας πλευράς δικτύου δουλεύει με μοναδιαίο συντελεστή ισχύος [AJ08].

Εφόσον χρησιμοποιούνται μετατροπείς τύπου πηγής τάσης, η ρύθμιση γίνεται με τη χρήση δύο PI ελεγκτών, έξοδος των οποίων είναι οι τάσεις v_{qis} και v_{dis} αντίστοιχα.

Η υλοποίηση του διανυσματικού ελέγχου μέσω των δύο μετατροπών εξαρτάται φυσικά από τον κατασκευαστή της ανεμογεννήτριας. Σε κάθε περίπτωση χρειάζεται μια εκτίμηση της γωνίας της τερματικής τάσης, η οποία μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση ενός “βρόχου κλειδώματος φάσης” (Phase Locked Loop, PLL). Επίσης απαιτείται μέτρηση της γωνίας του δρομέα, προκειμένου να γίνει η μετατροπή από το πλαίσιο dq του διανυσματικού ελέγχου σε πραγματικές μεταβλητές στο δρομέα.

Στη συνέχεια θα εξετάσουμε σχήματα ελέγχου που εμφανίζονται στη βιβλιογραφία για μοντέλα ΑΓΔΤ για μελέτες ευστάθειας ΣΗΕ.

2.5.4 Έλεγχος μετατροπέα πλευράς δρομέα

Έλεγχος στροφών/ισχύος

Προκειμένου για την υλοποίηση της στρατηγικής μέγιστης απολαβής ισχύος, ο μετατροπέας πλευράς δρομέα καλείται να υλοποιήσει το κατάλληλο ρεύμα i_{qr} , προκειμένου να επιτευχθεί η ροπή/ισχύς αναφοράς. Εφόσον ο μετατροπέας πλευράς δρομέα αναπαριστάται ως ελεγχόμενη πηγή τάσης, τότε κατά κανόνα η τάση v_{qr} οδηγείται από ένα PI ρυθμιστή με είσοδο το σφάλμα της πραγματικής τιμής της συνιστώσας i_{qr} του ρεύματος δρομέα σε σχέση με την τιμή αναφοράς i_{qr}^* , λαμβάνοντας ενδεχομένως υπόψη και κατάλληλους όρους αντιστάθμισης.

Σύμφωνα και με όσα αναφέρθηκαν στην ενότητα 2.2, ο έλεγχος μπορεί να βασίζεται είτε σε μέτρηση της ταχύτητας περιστροφής είτε στην ενεργό ισχύ που παράγει η ανεμογεννήτρια χρησιμοποιώντας τη διακεκομμένη ή τη συνεχή καμπύλη του Σχ. 2.2 αντίστοιχα. Στην πρώτη περίπτωση, η επιθυμητή τιμή του ρεύματος i_{qr} μπορεί να προκύπτει απλά από την ροπή αναφοράς χρησιμοποιώντας τη σχέση (2.37). Αυτός ο τύπος ελέγχου για τη ροπή χρησιμοποιείται στις εργασίες [SPK01a, EHW03].

Σε μερικές εργασίες όπου η ισχύς αναφοράς προκύπτει από τη μέτρηση της ταχύτητας περιστροφής χρησιμοποιείται έλεγχος κλειστού βρόχου της ενεργού ισχύος, δηλαδή ένας ακόμα PI ελεγκτής με είσοδο το σφάλμα της παραγόμενης ισχύος σε σχέση με την επιθυμητή και έξοδο το ρεύμα αναφοράς i_{qr}^* [Pöl03, Akh02]. Ο ελεγκτής αυτός είναι αρκετά αργός σε σχέση με τον ελεγκτή που οδηγεί την τάση v_{qr} .

Στην εργασία [LU05], όπως και στο μοντέλο που εξετάζεται στην ενότητα 3.3, ο έλεγχος γίνεται αντίστροφα: από τη μέτρηση της ηλεκτρικής ισχύος και την καμπύλη ελέγχου στροφών - ισχύος εξάγεται η ταχύτητα αναφοράς και το σφάλμα της ταχύτητας εισάγεται σε ένα PI ρυθμιστή που οδηγεί το i_{qr}^* . Σε αυτή την περίπτωση, ο ρυθμιστής είναι αρκετά αργός ώστε να μην υπάρχει υπερβολική μηχανική φόρτιση της μηχανής.

Τέλος σημειώνεται ότι εκτός από τον συνήθη έλεγχο μέγιστης απολαβής ισχύος, μπορεί να υπάρχουν παραλλαγές ή πρόσθετες λειτουργίες που να εμπλέκονται με τον έλεγχο ισχύος, οι οποίες θα πρέπει να αναπαρασταθούν κατάλληλα, όπως για παράδειγμα η συμμετοχή του αιολικού πάρκου στον έλεγχο συχνότητας, ενδεχομένως μέσω κατάλληλου κεντρικού ρυθμιστή που συνεργάζεται με τους ρυθμιστές κάθε ανεμογεννήτριας [HSI06].

Έλεγχος αέργου ισχύος

Ο έλεγχος αέργου ισχύος βασίζεται στο γεγονός ότι με τη συνιστώσα i_{dr} του ρεύματος του δρομέα μπορεί να ελεγχθεί η άεργος ισχύς του στάτη Q_s , σύμφωνα με τη σχέση (2.38). Αναπαριστώντας τον μετατροπέα πλευράς δρομέα σαν ελεγχόμενη πηγή τάσης και θεωρώντας γνωστή την επιθυμητή τιμή του ρεύματος i_{dr}^* σχηματίζεται το σφάλμα σε σχέση με την πραγματική του τιμή και εισάγεται σε έναν PI ελεγκτή που οδηγεί την τάση v_{dr} , λαμβάνοντας ενδεχομένως υπόψη και κατάλληλους όρους αντιστάθμισης.

Ο έλεγχος αέργου ισχύος χρησιμοποιείται κατά κανόνα με στόχο ένα από τα παρακάτω:

Κεφάλαιο 2. Περιγραφή ανεμογεννητριών μεταβλητών στροφών και συστημάτων ελέγχου

- σταθερή άεργος ισχύς
- σταθερός συντελεστής ισχύος
- έλεγχος τάσης

Σημειώνεται ότι μπορεί να χρησιμοποιείται συνδυασμός των παραπάνω, όπως στο μοντέλο της ενότητας 3.3, όπου π.χ. μπορεί να επιτυγχάνεται σταθερός συντελεστής ισχύος μέσω μεταβολής της αναφοράς της τερματικής τάσης.

Αντίστοιχα με τον έλεγχο στροφών, το ρεύμα αναφοράς i_{dr}^* μπορεί να είναι η έξοδος ενός ΠΙ ελεγκτή με είσοδο την άεργο ισχύ αναφοράς [Akh02,Pöl03]. Εναλλακτικά το ρεύμα αναφοράς i_{dr}^* που αντιστοιχεί στην άεργο ισχύ αναφοράς Q_s^* μπορεί επίσης να υπολογίζεται απευθείας από την σχέση (2.38) και τις μετρήσεις τερματικής τάσης και συχνότητας, όπως στην εργασία [EKF07].

Στις εργασίες [SPK01a,EHW03] χρησιμοποιείται ένας συνδυασμός των παραπάνω επιλογών, όπου το ρεύμα αναφοράς i_{dr}^* προκύπτει από το άθροισμα:

1. του ρεύματος που απαιτείται για τη μαγνήτιση της μηχανής, το οποίο υπολογίζεται αναλυτικά από τον πρώτο όρο της σχέσης (2.38) με βάση μέτρηση της τερματικής τάσης
2. της εξόδου ενός αναλογικού ρυθμιστή της τερματικής τάσης

Τέλος σημειώνεται ότι ο έλεγχος άεργου ισχύος εκτός από το επίπεδο της κάθε ανεμογεννήτριας μπορεί να γίνεται και σε επίπεδο αιολικού πάρκου από κατάλληλο ρυθμιστή, ο οποίος δίνει σε κάθε ανεμογεννήτρια μία ξεχωριστή τιμή για την άεργο ισχύ [MSGP03,FWK08].

2.5.5 Έλεγχος μετατροπέα πλευράς δικτύου και δυναμική DC πυκνωτή

Χρησιμοποιώντας το ίδιο σύγχρονο dq πλαίσιο με τον έλεγχο του μετατροπέα πλευράς δρομέα (με τον άξονα q επί της τερματικής τάσης) ισχύουν οι σχέσεις (2.39-2.40). Συνήθως ο μετατροπέας πλευράς δικτύου λειτουργεί με μοναδιαίο συντελεστή ισχύος [SPK01a, Akh02, eig07], δηλαδή η συνιστώσα του ρεύματος i_{dis} κρατείται μηδενική.

Η συνιστώσα i_{qis} ελέγχεται έτσι ώστε η DC τάση V_{dc} να κρατείται στην ονομαστική της τιμή (1 αμ). Η διαφορική εξίσωση του DC πυκνωτή είναι:

$$C \frac{dV_{dc}}{dt} = \frac{P_{is} - P_r}{V_{dc}} \quad (2.41)$$

όπου C είναι η κανονικοποιημένη χωρητικότητα του πυκνωτή (σε s).

Η ενεργός ισχύς P_r από τον μετατροπέα πλευράς δρομέα προς τον δρομέα είναι:

$$P_r = v_{dr}i_{dr} + v_{qr}i_{qr} \quad (2.42)$$

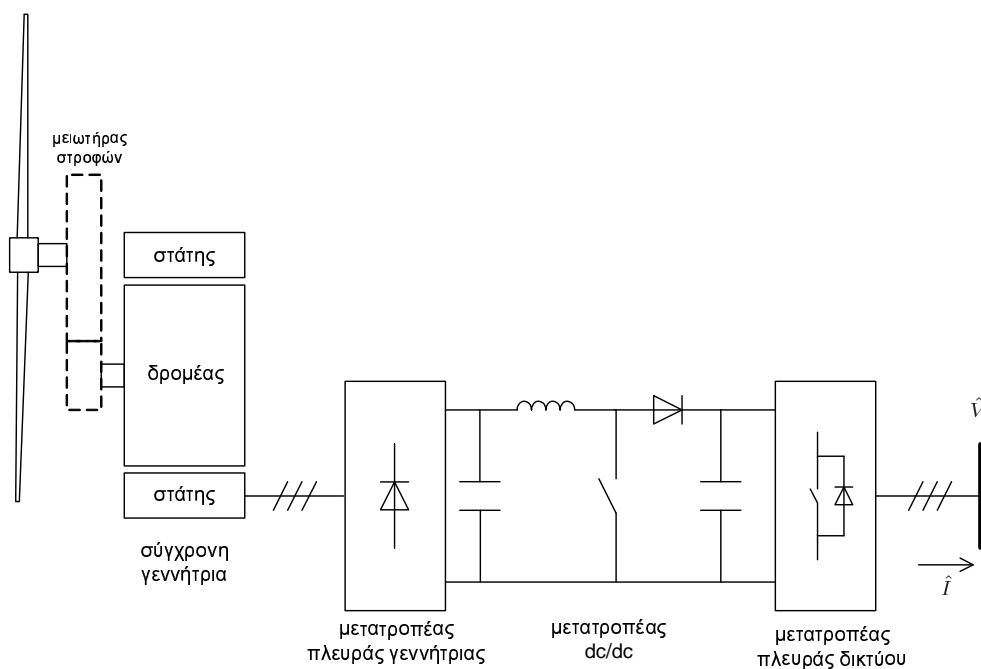
Καθώς η ενεργός ισχύς P_{is} από το δίκτυο στο μετατροπέα είναι ανάλογη του i_{qis} , σύμφωνα με τη σχέση (2.39), η επιθυμητή τιμή για τη συνιστώσα i_{qis} μπορεί να είναι η έξοδος ενός ΠΙ ελεγκτή με είσοδο το σφάλμα της DC τάσης από την τιμή αναφοράς, όπως στην εργασία [LU05].

Αν η δυναμική του πυκνωτή αμεληθεί (η DC τάση θεωρείται σταθερή) όπως στις εργασίες [SPK01a, Akh02, EHW03], τότε είναι απλά :

$$i_{qis} = \frac{P_r}{V_s} \quad (2.43)$$

2.6 Γεννήτρια με πλήρη μετατροπέα

Ένα διαδεδομένο ηλεκτρικό σχήμα για τις ανεμογεννήτριες με πλήρη μετατροπέα είναι με χρήση σύγχρονης γεννήτριας με τύλιγμα διέγερσης και μετατροπέα συχνότητας όπως αυτός που φαίνεται στο Σχ. 2.5: με ανορθωτή διόδων στην πλευρά της γεννήτριας, μετατροπέα ανύψωσης της συνεχούς τάσης (boost converter) και PWM μετατροπέα στην πλευρά του δικτύου [PA03, PP06]. Το σχήμα αυτό επιτρέπει την αποφυγή του κιβωτίου ταχυτήτων,



Σχήμα 2.5: Σύγχρονη γεννήτρια με πλήρη μετατροπέα

δηλαδή η περρωτή και ο δρομέας της γεννήτριας να βρίσκονται στον ίδιο άξονα. Στην περίπτωση αυτή η γεννήτρια έχει μεγάλο αριθμό πόλων και μεγαλύτερη διάμετρο.

Όπως και στην περίπτωση του μετατροπέα πλευράς δικτύου της ΑΓΔΤ που αναφέρθηκε στην παράγραφο 2.5.5, ο μετατροπέας PWM του Σχ. 2.5 ρυθμίζει ξεχωριστά το ενεργό και το άεργο ρεύμα που εγχέεται στο δίκτυο χρησιμοποιώντας το σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς ευθυγραμμισμένο με την τερματική τάση. Αντίστοιχα με τις σχέσεις (2.39, 2.40), είναι:

$$P = V i_q \quad (2.44)$$

$$Q = V i_d \quad (2.45)$$

όπου $\hat{I} = i_d + j i_q$, είναι το ρεύμα που εγχέει ο μετατροπέας στο δίκτυο.

Σε ένα διαδεδομένο σχήμα ελέγχου, το ενεργό ρεύμα αναφοράς προκύπτει από την καμπύλη ελέγχου των στροφών, όπως αυτή του Σχ. 2.2, προκειμένου για την υλοποίηση της στρατηγικής μέγιστης απολαβής ισχύος [PA03]. Σε αυτή την περίπτωση ο μετατροπέας ανύψωσης της DC τάσης κρατά σταθερή την τάση του DC πυκνωτή.

Στην εργασία [PP06], όπου εξετάζεται με λεπτομερές τριφασικό μοντέλο ο μετατροπέας συχνότητας του Σχ. 2.5 σε συνδυασμό με σύγχρονη γεννήτρια με σύστημα διέγερσης, ο έλεγχος στροφών γίνεται ρυθμίζοντας το ρεύμα του στάτη της σύγχρονης γεννήτριας μέσω του μετατροπέα ανύψωσης, ενώ η τάση του DC πυκνωτή κρατείται σταθερή, ρυθμίζοντας

κατάλληλα την έγχυση ενεργού ισχύος από τον PWM μετατροπέα στο δίκτυο. Επίσης η ρύθμιση της διέγερσης γίνεται ώστε να ελαχιστοποιούνται οι απώλειες της γεννήτριας. Υψηλές τιμές της τάσης διέγερσης αυξάνουν τη μέγιστη ηλεκτρική ροπή της γεννήτριας, αλλά οδηγούν και σε υψηλές απώλειες σιδήρου. Έτσι για λειτουργία σε χαμηλές ταχύτητες ανέμου, και άρα σε χαμηλές ταχύτητες περιστροφής, η τάση διέγερσης μπορεί να μειωθεί αφού δε χρειάζεται μεγάλη ροπή. Αντίθετα, για υψηλές ταχύτητες ανέμου, χρειάζονται υψηλές τιμές της τάσης διέγερσης, έτσι ώστε να μπορεί να παραχθεί μεγάλη ροπή.

Μοντέλα αυτού του είδους ανεμογεννητριών με διάφορες μεθόδους ελέγχου, αναπτύχθηκαν στο Simulink στο πλαίσιο της εργασίας [Φαρ06], όπου υπάρχει λεπτομερής περιγραφή τους. Αποτελέσματα αυτής της διερεύνησης δημοσιεύτηκαν στην εργασία [TFV06]. Μία μέθοδος που εξετάστηκε έγκειται στον έλεγχο στροφών μέσω της ρύθμισης της ενεργού έγχυσης του μετατροπέα πλευράς δικτύου, ενώ η συνεχής τάση ρυθμίζεται από το σύστημα διέγερσης της γεννήτριας. Σε αυτή την περίπτωση και εφόσον η διάθεσιμη τάση διέγερσης είναι αρκετή, δεν απαιτείται μετατροπέας ανύψωσης της τάσης. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται και στην εργασία [Jau07]. Εξετάστηκε επίσης παραλλαγή του προηγούμενου σχήματος με σταθερή διέγερση (π.χ. λόγω περιορισμού), οπότε ο έλεγχος της συνεχούς τάσης γίνεται από το μετατροπέα ανύψωσης. Μια τρίτη μέθοδος που εξετάστηκε είναι η ρύθμιση της DC τάσης από το μετατροπέα πλευράς δικτύου, ενώ ο έλεγχος των στροφών γίνεται από το σύστημα διέγερσης της γεννήτριας.

Μια παραλλαγή του ηλεκτρικού σχήματος είναι με σύγχρονη γεννήτρια μόνιμων μαγνητών. Στην εργασία [APP00] εξετάζεται με λεπτομερές τριφασικό μοντέλο η λειτουργία μιας γεννήτριας με μόνιμους μαγνήτες σε συνδυασμό με μετατροπέα συχνότητας όπως αυτός του Σχ. 2.5. Στις εργασίες [Akh06, MHH07], σε συνδυασμό με σύγχρονη γεννήτρια μόνιμων μαγνητών χρησιμοποιείται PWM μετατροπέας και στις δύο πλευρές του μετατροπέα συχνότητας. Με τον τρόπο αυτό εξασφαλίζεται πιο πλήρης έλεγχος της γεννήτριας. Συγκεκριμένα η δυνατότητα ελέγχου της αέργου ισχύος του μετατροπέα πλευράς γεννήτριας χρησιμοποιείται για να ρυθμίζεται η τερματική τάση της γεννήτριας σε επιθυμητό επίπεδο. Εφόσον χρησιμοποιείται μετατροπέας PWM και στην πλευρά της γεννήτριας, μπορεί να χρησιμοποιηθεί και μηχανή επαγωγής, όπως στις εργασίες [ΠαΣ97, NAT07].

Σε κάθε περίπτωση, για τις μελέτες ευστάθειας ΣΗΕ, το πιο σημαντικό είναι η συμπεριφορά του μετατροπέα πλευράς δικτύου, επομένως το ακριβές ηλεκτρικό σχήμα της διάταξης μπορεί να μην έχει ιδιαίτερη σημασία στο βαθμό που δεν επηρεάζει τις εγχύσεις ενεργού και άεργου ρεύματος του μετατροπέα στο δίκτυο. Από την άλλη, οι βρόχοι ελέγχου της ανεμογεννήτριας (ή του αιολικού πάρκου) που επηρεάζουν σημαντικά τη συμπεριφορά του μετατροπέα, θα πρέπει να αναπαριστώνται κατάλληλα.

2.7 Αδιάλειπτη λειτουργία σε βυθίσεις τάσης

Μέχρι πριν μερικά χρόνια, η συνήθης πρακτική για τις ανεμογεννήτριες σε περίπτωση βύθισης της τάσης ήταν η αποσύνδεση από το δίκτυο. Λόγω του ότι δεν αντιπροσώπευαν σημαντικό μέρος της παραγωγής, η πρακτική αυτή ήταν άλλωστε ενδεδειγμένη και για την αποφυγή τροφοδότησης ανεπιθύμητων ηλεκτρικών “νησίδων” μετά την εκκαθάριση του σφάλματος [KS02, Akh02, cig07]. Καθώς η αιολική ενέργεια έφτασε σε υψηλά επίπεδα συμμετοχής σε αρκετά συστήματα, έγινε γρήγορα κατανοητό ότι αυτή η συμπεριφορά έθετε ένα όριο στην αιολική διείσδυση, καθώς ένα βραχυκύκλωμα οδηγούσε σε απώλεια όλο και μεγαλύτερης αιολικής παραγωγής. Προκειμένου λοιπόν να συνεχιστεί η αύξηση της αιολικής διείσδυσης, μια από τις νέες απαιτήσεις από τα αιολικά πάρκα είναι η αδιάλειπτη λειτουργία υπό χαμηλή τάση ή αδιάλειπτη λειτουργία σε συνθήκες σφάλματος (Low Voltage Ride-Through ή Fault-

Ride-Through), όπως αναφέρθηκε στο Κεφ. 1. Σημειώνεται ότι παραμένει γενικά η ανάγκη αποφυγής της νησιδοποίησης (ανάλογα και με τη σύνδεση κάθε πάρκου στο δίκτυο και την ύπαρξη γειτονικών φορτίων), η οποία μπορεί να επιτυγχάνεται με εξειδικευμένες προστασίες (anti-islanding protection).

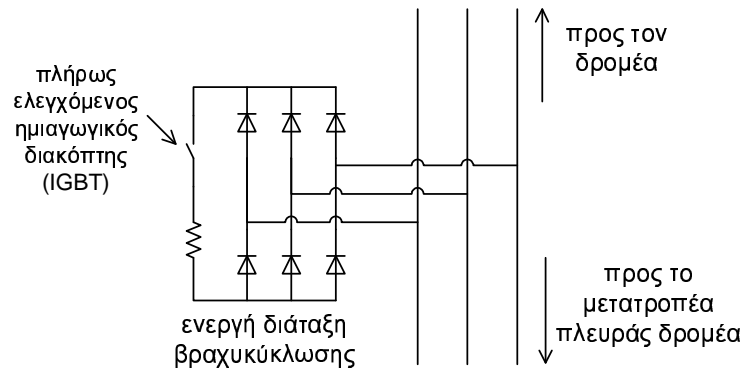
Με τον παλαιότερο σχεδιασμό των ανεμογεννητριών μεταβλητών στροφών, η αποσύνδεση συνέβαινε στην πράξη για τους εξής κυρίως λόγους:

- Στην περίπτωση των ανεμογεννητριών διπλής τροφοδότησης, λόγω της σύνδεσης του στάτη στο δίκτυο οι απότομες μεταβολές της τάσης προκαλούν μεταβατικά φαινόμενα στα τυλίγματα του στάτη και του δρομέα, δεδομένης της τάσης της πεπλεγμένης ροής να παραμένει σταθερή. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση υπερτάσεων και υπερεντάσεων στα κυκλώματα του δρομέα, στις οποίες είναι γενικά ευαίσθητοι οι μετατροπείς ισχύος στην πλευρά του δρομέα. Για την προστασία τους τα IGBT του μετατροπέα σβήνουν και ο μετατροπέας ισχύος ανορθώνει το ρεύμα με τις διόδους, με αποτέλεσμα την ακαριαία αύξηση της τάσης συνεχούς και την υπερφόρτιση του πυκνωτή εξαιτίας και της περιορισμένης δυνατότητας του μετατροπέα πλευράς δικτύου να διοχετεύσει ενεργό ισχύ στο δίκτυο λόγω της χαμηλής τάσης.
- Στην περίπτωση των ανεμογεννητριών με πλήρη μετατροπέα δεν υπάρχει ηλεκτρική σύζευξη της γεννήτριας με το δίκτυο και άρα αυτή δεν επηρεάζεται από απότομες μεταβολές της τάσης. Το πρόβλημα σε περίπτωση βύθισης της τάσης είναι ουσιαστικά η διαχείριση της περίσσειας ισχύος, καθώς ο μετατροπέας στην πλευρά του δικτύου δε μπορεί να διοχετεύσει αρκετή ενεργό ισχύ στο δίκτυο είτε συνεχίσει να λειτουργεί είτε όχι κατά τη διάρκεια του σφάλματος, με αποτέλεσμα τον κίνδυνο υπερφόρτισης του DC πυκνωτή ή/και την επιτάχυνση του δρομέα.

Για τους παραπάνω λόγους, αμέσως μετά την ανίχνευση βραχυκυκλώματος, οι ανεμογεννήτριες αποσυνδέονταν από το σύστημα και ακινητοποιούνταν. Αργότερα, εφόσον η τάση είχε επανέλθει σε κανονικό επίπεδο, γινόταν επανεκκίνηση και επανασύνδεση. Τα τελευταία χρόνια, ανάλογα και με τις απαιτήσεις των διαχειριστών των συστημάτων μεταφοράς, εφαρμόζονται και διερευνούνται διάφορες λύσεις για την εξασφάλιση της αδιάλειπτης λειτουργίας των ανεμογεννητριών σε συνθήκες βύθισης της τάσης.

Μια λύση για τις ανεμογεννήτριες με ΑΓΔΤ είναι η χρήση ενεργού διάταξης βραχυκύκλωσης του δρομέα (active crowbar) [SNA06, cig07, EKF07]. Η διάταξη βραχυκύκλωσης ονομάζεται ενεργός με την έννοια ότι μπορεί να απενεργοποιηθεί μετά από λίγο και η μηχανή να επιστρέψει σε κανονική λειτουργία (σε αντίθεση με τις παλαιότερες διατάξεις βραχυκύκλωσης, όπου η ενεργοποίησή τους δρομολογούσε και την αποσύνδεση τουλάχιστον του στάτη από το δίκτυο). Αφού ενεργοποιηθεί η διάταξη βραχυκύκλωσης, η μηχανή συμπεριφέρεται σαν μία κλασική ασύγχρονη μηχανή βραχυκυκλωμένου δρομέα με εξωτερική αντίσταση δρομέα. Για μερικά χιλιοστά του δευτερολέπτου αποδίδει από τον στάτη μεγάλη ποσότητα αέργου ισχύος (φάση απομαγνητίσης) και στη συνέχεια καταναλώνει άεργο ισχύ. Εντωμεταξύ, ο μετατροπέας πλευράς δικτύου μπορεί να παρέχει το μέγιστο δυνατό άεργο ρεύμα στο δίκτυο εφόσον υπάρχει κατάλληλη πρόβλεψη [HMS07].

Μια τυπική ενεργός διάταξη βραχυκύκλωσης δρομέα αποτελείται από ένα ανορθωτή διόδων συνδεδεμένο παράλληλα στο δρομέα, στην DC πλευρά του οποίου υπάρχει ένα IGBT (βλ. Σχ. 2.6). Συνήθως υπάρχει και μια αντίσταση σε σειρά με το τρανζίστορ, προκειμένου να περιορίζεται το ρεύμα του δρομέα, όταν η διάταξη ενεργοποιείται [cig07]. Σε άλλα σχήματα, χρησιμοποιείται ανορθωτής με θυρίστορ, στην DC πλευρά του οποίου βρίσκεται η αντίσταση [MdH05, EKF07]. Η λειτουργία της ενεργού διάταξης βραχυκύκλωσης εξετάζεται στην ενότητα 5.1.



Σχήμα 2.6: Ενεργός διάταξη βραχυκύκλωσης δρομέα ΑΓΔΤ

Μια άλλη λύση είναι η χρήση ημιαγωγικών διακοπών στο στάτη, οι οποίοι διακόπτουν το ρεύμα βραχυκύκλωσης εντός 10 ms μετά την εμφάνιση του βραχυκυκλώματος και αποσυνδέουν το στάτη από το δίκτυο [EWD06,cig07]. Ακολουθεί βεβαιασμένη απομαγνήτιση της μηχανής, για την οποία απαιτείται ειδικός εξοπλισμός (διατάξεις βραχυκύκλωσης σε στάτη και δρομέα). Ο μετατροπέας πλευράς δικτύου παραμένει συνδεδεμένος στο δίκτυο και παρέχει τη μέγιστη δυνατή άεργο ισχύ. Μετά την απομαγνήτιση της μηχανής, ο μετατροπέας πλευράς δρομέα ξανατίθεται σε κανονική λειτουργία. Ακόμα κι αν η τερματική τάση παραμένει χαμηλή, ο στάτης συγχρονίζεται με το δίκτυο και στη συνέχεια η ανεμογεννήτρια μπορεί να επιστρέψει σε κανονική λειτουργία και να παρέχει ενεργό και άεργο ισχύ εντός των ορίων για το ρεύμα των μετατροπέων. Η αποσύνδεση του στάτη διαρκεί περίπου 200-300 ms. Η λύση αυτή έχει αρκετά πλεονεκτήματα, όπως ότι περιορίζονται τα μεταβατικά φαινόμενα των πρώτων κύκλων μετά τη διαταραχή, αλλά είναι πιο ακριβή λόγω του πρόσθετου εξοπλισμού.

Άλλη εναλλακτική είναι η χρήση μεγαλύτερου μετατροπέα πλευράς δρομέα, ώστε να αντέχει το υψηλό ρεύμα, και μεταβλητής αντίστασης (dc-chopper) παράλληλα με τον πυκνωτή [cig07]. Προφανώς η ανάγκη για υψηλότερο ονομαστικό ρεύμα για τον μετατροπέα πλευράς δρομέα αυξάνει το κόστος του εξοπλισμού. Σύμφωνα με την αναφορά [EFF09] τέτοιου τύπου λύσεις εφαρμόζονται πλέον από πολλούς κατασκευαστές, οπότε η διάταξη βραχυκύκλωσης είναι απαραίτητη μόνο σε περιπτώσεις εσωτερικών σφαλμάτων της μηχανής. Στη βιβλιογραφία προτείνονται επίσης τεχνικές για την επίτευξη αδιάλειπτης λειτουργίας υπό χαμηλή τάση της ΑΓΔΤ που βασίζονται στην εισαγωγή αντισταθμιστικών όρων στον έλεγχο του ρεύματος του δρομέα, όπως π.χ. στις εργασίες [XRT06,LQH09]. Στην πρόσφατη εργασία [EG09] παρουσιάζονται μετρήσεις από δοκιμές αδιάλειπτης λειτουργίας σε συνθήκες σφάλματος μιας ΑΓΔΤ. Στη δοκιμή με συμμετρικό βραχυκύκλωμα, η τερματική τάση της γεννήτριας πέφτει στο 9% της ονομαστικής. Ο μετατροπέας πλευράς δρομέα παραμένει σε λειτουργία κατά τη διάρκεια του σφάλματος και χρησιμοποιείται πρόσθετη μεταβλητή αντίσταση (dc-chopper) για την αποφυγή υπερφόρτισης του πυκνωτή συνεχούς. Μετά το πρώτο μεταβατικό, η μηχανή επανέρχεται σε κανονική λειτουργία και αποδίδει άεργο ρεύμα στο δίκτυο, σύμφωνα με τις απαιτήσεις του Κώδικα του διαχειριστή E.ON στη Γερμανία.

Στις ανεμογεννήτριες με πλήρη μετατροπέα, η αδιάλειπτη λειτουργία σε συνθήκες βύθισης της τάσης είναι απλούστερη, λόγω της πλήρους ηλεκτρικής απόζευξης από το δίκτυο. Στην αναφορά [WH07] παρουσιάζονται μετρήσεις από στερεό βραχυκύκλωμα στο σημείο σύνδεσης του αιολικού πάρκου (οπότε η τερματική τάση της ανεμογεννήτριας δεν είναι εντελώς μηδενική), όπου ο μετατροπέας παραμένει σε λειτουργία και αποδίδει μέγιστο ρεύμα. Για την αποφυγή υπερτάχυνσης της γεννήτριας και την προστασία του DC πυκνωτή, ο ανορθωτής

Κεφάλαιο 2. Περιγραφή ανεμογεννητριών μεταβλητών στροφών και συστημάτων ελέγχου

μπορεί να παρακαμφθεί και ο στάτης να τροφοδοτήσει μια αντίσταση.

Σε κάθε περίπτωση, είτε στις ΑΓΔΤ είτε στις ανεμογεννήτριες πλήρους μετατροπέα, η γρήγορη δράση του ρυθμιστή της γωνίας βήματος των πτερυγίων βοηθάει επίσης για την αδιάλειπτη λειτουργία υπό χαμηλή τάση, περιορίζοντας τη μηχανική ροπή και άρα την επιτάχυνση του δρομέα.

Στις μεγάλες βυθίσεις τάσης, το ρεύμα των μετατροπέων περιορίζεται από το μέγιστο (μεταβατικό) όριό του. Ανάλογα με τις απαιτήσεις του κώδικα μπορεί να απαιτείται συγκεκριμένη έγχυση άεργου ρεύματος, οπότε γίνεται κατάλληλη αναπροσαρμογή της ενεργού και άεργου συνιστώσας του ρεύματος ανάλογα με το επίπεδο της τάσης. Επίσης, είναι γνωστό ότι το ρεύμα που μπορεί να εγχυθεί σε ένα ζυγό του δικτύου έχει κάποιο όριο (ευστάθειας) που συμπίπτει με τη μέγιστη μεταφερόμενη ισχύ. Η πτώση τάσης κατά τη διάρκεια κάποιου σφάλματος μπορεί να κάνει το όριο αυτό συγκρίσιμο με το μέγιστο ρεύμα που μπορεί να παρέχει ο μετατροπέας. Ιδιαίτερα στην περίπτωση που επιλεγεί από τον κατασκευαστή να μη δίνει μόνο άεργο ρεύμα η ανεμογεννήτρια κατά τη διάρκεια του σφάλματος, το όριο ευστάθειας μπορεί να γίνει πιο περιοριστικό από το μέγιστο ρεύμα του μετατροπέα [ESE09,Νάν09].

Κεφάλαιο 2. Περιγραφή ανεμογεννητριών μεταβλητών στροφών και συστημάτων ελέγχου

Κεφάλαιο 3

Μοντέλα ανεμογεννητριών μεταβλητών στροφών

3.1 Λογισμικό προσομοίωσης WHSSP

Τα μοντέλα αυτής της εργασίας αναπτύχθηκαν σε περιβάλλον MATLAB/Simulink στο πλαίσιο του πακέτου WHSSP (Wind Hybrid System Simulation Package). Το WHSSP είναι ένα λογισμικό δυναμικής προσομοίωσης ΣΗΕ σε MATLAB/Simulink που χρησιμοποιείται στο εργαστήριο ΣΗΕ του ΕΜΠ και αναπτύχθηκε αρχικά στην εργασία [Ποτ06], όπου και περιγράφεται αναλυτικά. Είναι κατάλληλο για δυναμικές προσομοιώσεις και μελέτες ευστάθειας μικρών έως μεσαίων διασυνδεδεμένων ή αυτόνομων δικτύων. Το WHSSP αναπτύχθηκε αρχικά σε Matlab 5.3. Προκειμένου να χρησιμοποιηθεί με νεότερες εκδόσεις της Matlab (6.5 και 7), έγινε κατάλληλη μετατροπή του αρχικού μοντέλου για τα Συστήματα Αλλαγής Τάσης Υπό Φορτίο (ΣΑΤΥΦ) στο πλαίσιο αυτής της εργασίας.

Η δομή του WHSSP βασίζεται στο εκπαιδευτικό λογισμικό προσομοίωσης ΣΗΕ που χρησιμοποιείται στο Πανεπιστήμιο της Λιέγης και στο ΕΜΠ [VPM04]. Όπως συνηθίζεται στα προγράμματα για μελέτες ευστάθειας ΣΗΕ, βασίζεται στην υπόθεση της *οιονεί ημιτονοειδούς κατάστασης*, σύμφωνα με την οποία:

- Αμελούνται τα μεταβατικά του στάτη των σύγχρονων και ασύγχρονων μηχανών.
- Αμελούνται τα ηλεκτρομαγνητικά μεταβατικά φαινόμενα του δικτύου.
- Θεωρείται πλήρης συμμετρία στις τρεις φάσεις.

Με βάση τα παραπάνω, η δυναμική του συστήματος θεωρείται μια αλληλουχία ημιτονοειδών καταστάσεων: το πλάτος και η γωνία κάθε τάσης ή ρεύματος μεταβάλλονται σχετικά αργά σε σχέση με τη βασική συχνότητα (50 ή 60 Hz).

Καθώς η γωνιακή ταχύτητα των δρομέων των σύγχρονων μηχανών δεν απομακρύνεται αισθητά από τη σύγχρονη ταχύτητα περιστροφής, η επίδραση της μεταβολής της στις τάσεις ταχύτητας των μηχανών και στις επαγικές αντιδράσεις και χωρητικές αγωγιμότητες συνήθως αμελείται. Επειδή όμως το WHSSP χρησιμοποιείται και για αυτόνομα συστήματα, στα οποία η διακύμανση της συχνότητας μπορεί να λάβει σοβαρές τιμές, θεωρείται ότι τόσο το δίκτυο όσο και τα τυλίγματα του στάτη των μηχανών λειτουργούν σε (κοινή) συχνότητα ω_{sys} η οποία ισούται με το σταθμισμένο μέσο όρο των σύγχρονων γεννητριών του δικτύου [Ποτ06]. Σημειώνεται επίσης ότι στο WHSSP αμελούνται φαινόμενα κορεσμού.

Κεφάλαιο 3. Μοντέλα ανεμογεννητριών μεταβλητών στροφών

Η υπόθεση της οιονοεί ημιτονοειδούς κατάστασης επιτρέπει την παράσταση του δικτύου μέσω της μήτρας αγωγιμοτήτων, οπότε οι εξισώσεις του δικτύου γράφονται ως εξής:

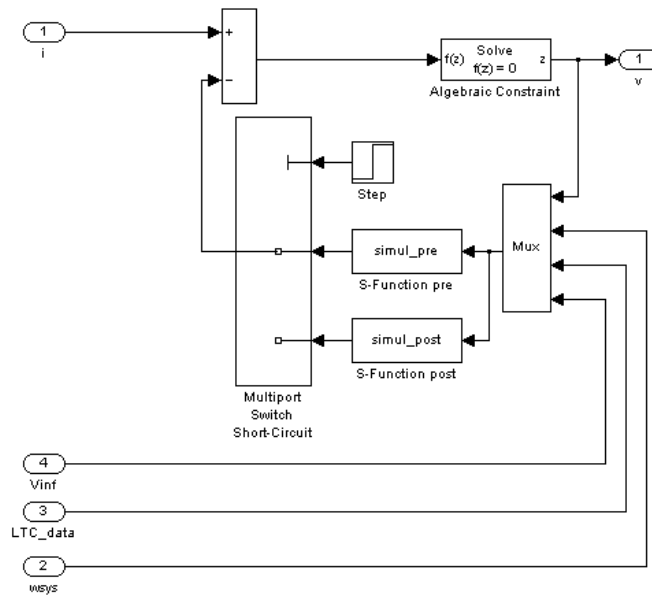
$$\hat{\mathbf{I}} = \mathbf{Y}\hat{\mathbf{V}} \quad (3.1)$$

όπου:

- $\hat{\mathbf{I}}$ είναι το διάνυσμα των παραστατικών μιγαδικών αριθμών των εγχεόμενων στο δίκτυο ρευμάτων,
- $\hat{\mathbf{V}}$ είναι το διάνυσμα των παραστατικών μιγαδικών αριθμών των τάσεων στους ζυγούς του δικτύου,
- \mathbf{Y} είναι ο μιγαδικός πίνακας αγωγιμοτήτων του δικτύου.

Στη γενική περίπτωση, η μιγαδική σχέση (3.1) είναι μη γραμμική, καθώς τα εγχεόμενα ρεύματα εξαρτώνται μέσω μη γραμμικών σχέσεων από τις τάσεις των αντίστοιχων ζυγών, καθώς και από τις μεταβλητές κατάστασης των δυναμικών συνιστωσών του συστήματος.

Στην εργασία αυτή χρησιμοποιείται μια απλή (αν και σχετικά χρονοβόρα υπολογιστικά) μέθοδος για την επίλυση των εξισώσεων του δικτύου με βάση το μπλοκ “algebraic constraint” του Simulink, όπως φαίνεται στο Σχ. 3.1. Το μπλοκ αυτό βρίσκει αριθμητικά κατάλληλη τιμή για την έξοδό του (στην προκειμένη περίπτωση το διάνυσμα των τάσεων) ώστε η είσοδος να είναι ίση με μηδέν.



Σχήμα 3.1: Επίλυση εξισώσεων δικτύου στο Simulink

Ο πίνακας αγωγιμοτήτων υπολογίζεται σε κάθε χρονικό βήμα από μια S-function όπως φαίνεται στο Σχ. 3.1 διότι μεταβάλλεται τουλάχιστον εν μέρει. Επίσης μέσω ενός διακόπτη, μπορεί να γίνει σε προκαθορισμένη χρονική στιγμή αλλαγή σε άλλη S-function, προκειμένου να προσομοιωθεί κάποια διαταραχή μέσω προκαθορισμένης μεταβολής του πίνακα αγωγιμοτήτων.

Στην περίπτωση διασυνδεδεμένου συστήματος με σταθερή τοπολογία ο πίνακας αγωγιμοτήτων αποτελείται από ένα σταθερό και ένα μεταβαλλόμενο τμήμα. Το σταθερό τμήμα, το οποίο υπολογίζεται από το πρόγραμμα αρχικοποίησης του WHSSP που επιλύει την αρχική ροή φορτίου, περιλαμβάνει την επίδραση στο δίκτυο α) των γραμμών μεταφοράς και διανομής, β) των μετασχηματιστών με σταθερό λόγο μετασχηματισμού, γ) των φορτίων σταθερής αγωγιμότητας και δ) των στατών πυκνωτών. Από την άλλη πλευρά, το μεταβαλλόμενο μέρος του πίνακα αγωγιμοτήτων κατασκευάζεται σε κάθε χρονική στιγμή προσομοίωσης από το πρόγραμμα επίλυσης δικτύου, λαμβάνοντας υπόψη α) τα δυναμικά αυτορυθμιζόμενα φορτία, β) τους μετασχηματιστές που είναι εξοπλισμένοι με σύστημα αλλαγής τάσης υπό φορτίο (ΣΑΤΥΦ), γ) τους αυτόματους μηχανισμούς ζεύξης-απόζευξης στατών πυκνωτών και δ) τα στατά συστήματα αέργου αντιστάθμισης. Στο παράδειγμα του Σχ. 3.1 φαίνεται η είσοδος από τα ΣΑΤΥΦ (LTC).

Στην περίπτωση αυτόνομου συστήματος, λόγω του ότι η συχνότητα ω_{sys} δεν παραμένει κατ' ανάγκη σταθερή στην ονομαστική της τιμή, μεταβάλλονται ευθέως ανάλογα με τη συχνότητα αυτή όλες οι επαγωγικές αντιδράσεις και οι χωρητικές αγωγιμότητες των επιμέρους διατάξεων. Επομένως, ο συνολικός πίνακας αγωγιμοτήτων θα πρέπει να υπολογίζεται εξ ολοκλήρου από το πρόγραμμα επίλυσης δικτύου σε κάθε χρονικό βήμα προσομοίωσης.

Κάθε συνιστώσα του συστήματος (σύγχρονες γεννήτριες, κινητήρες επαγωγής, μη γραμμικά φορτία όπως τα μοντέλα ανεμογεννητριών που περιγράφονται σε αυτό το Κεφάλαιο) έχει ως είσοδο το στοιχείο του διανύσματος της τάσης \hat{V} που αντιστοιχεί στην τάση $\hat{V}_k = v_{kx} + jv_{ky}$ του ζυγού k στον οποίο θεωρείται συνδεδεμένη η συνιστώσα, όπου xy το σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς του συστήματος. Έξοδος είναι το εγχεόμενο ρεύμα $\hat{I}_k = i_{kx} + ji_{ky}$, το οποίο αποτελεί το αντίστοιχο στοιχείο του διανύσματος \hat{I} .

3.2 Μοντέλα ανεμογεννητριάς διπλής τροφοδότησης με απλοποιημένους βρόχους ελέγχου

Στο Σχ. 3.2 φαίνεται η δομή των μοντέλων με απλοποιημένους βρόχους ελέγχου που παρουσιάζονται σε αυτή την ενότητα. Με διακεκομμένη γραμμή φαίνονται τα μέρη του μοντέλου που μπορεί να παραληφθούν, ανάλογα με τις επιλογές που γίνονται κατά τη μοντελοποίηση. Όπως θα δούμε στη συνέχεια, η βασική επιλογή είναι μεταξύ του “αλγεβρικού” και του “μεταβατικού” μοντέλου, δηλαδή αν αμελούνται ή όχι τα μεταβατικά του δρομέα. Όταν χρησιμοποιείται το μεταβατικό μοντέλο, όπου χρησιμοποιούνται οι διαφορικές εξισώσεις των μαγνητικών ροών του δρομέα, οι ρυθμιστές του μετατροπέα πλευράς δρομέα έχουν ως έξοδο τις συνιστώσες v_{dr} και v_{qr} της τάσης του δρομέα. Στην περίπτωση που χρησιμοποιείται το αλγεβρικό μοντέλο, οι έξοδοι είναι απευθείας οι συνιστώσες i_{dr} και i_{qr} του ρεύματος του δρομέα.

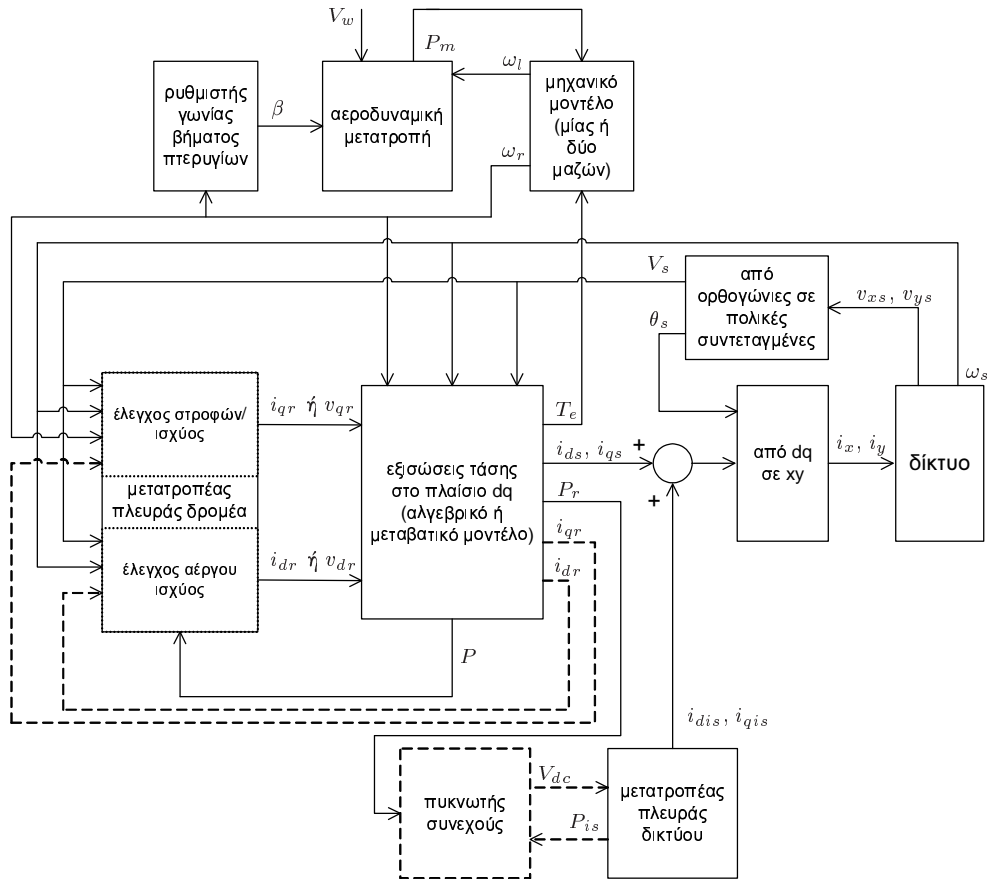
Επίσης η δυναμική του πυκνωτή στο σύνδεσμο DC μπορεί να αμεληθεί, ενώ η συχνότητα του στάτη ω_s ισούται με τη συχνότητα του συστήματος ω_{sys} .

Ως σύγχρονο σύγχρονο dq πλαίσιο για το μοντέλο της μηχανής χρησιμοποιείται το πλαίσιο με τον άξονα q επι του διανύσματος της τερματικής τάσης (βλ. υποενότητα 2.5.3). Επομένως είναι:

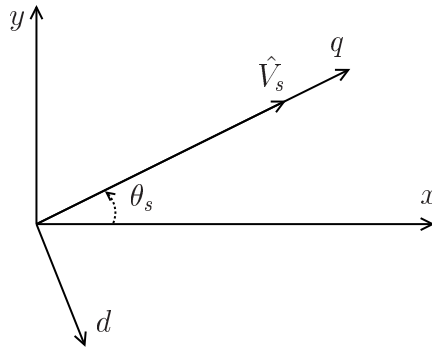
$$v_{ds} = 0, \quad v_{qs} = V_s$$

Ο συγχρονισμός του πλαισίου dq με τη γωνία θ_s της τερματικής τάσης ως προς το σύγχρονο πλαίσιο xy του δικτύου θεωρείται ακαριαίος, επομένως τα πλαίσια είναι όπως φαίνεται στο Σχ. 3.3.

Κεφάλαιο 3. Μοντέλα ανεμογεννητριών μεταβλητών στροφών



Σχήμα 3.2: Δομή μοντέλων ΑΓΔΤ με απλοποιημένους βρόχους ελέγχου



Σχήμα 3.3: Σύγχρονα πλαίσια αναφοράς

Το συνολικό ρεύμα που αποδίδεται από το δίκτυο στη μηχανή (χρησιμοποιείται σύμβαση κινητήρα) είναι:

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{ds} + i_{dis} \\ i_{qs} + i_{qis} \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

και η έγχυση ρεύματος από τη μηχανή στο δίκτυο στο σύγχρονο xy πλαίσιο του συστήματος είναι:

$$\begin{bmatrix} i_x \\ i_y \end{bmatrix} = -\frac{S_{nom}}{S_{base}} \begin{bmatrix} i_d \cdot \cos(\theta_s - \pi/2) - i_q \cdot \sin(\theta_s - \pi/2) \\ i_q \cdot \sin(\theta_s - \pi/2) + i_d \cdot \cos(\theta_s - \pi/2) \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

όπου θ_s η γωνία της τερματικής τάσης στο xy πλαίσιο, S_{nom} η ονομαστική φαινόμενη ισχύς

της ΑΓΔΤ και S_{base} η βάση ισχύος του ΣΗΕ.

3.2.1 “Αλγεβρικό” μοντέλο

Επειδή ο έλεγχος ρεύματος από τον μετατροπέα πλευράς δρομέα γίνεται πολύ γρήγορα σε σχέση με τις χρονικές κλίμακες που ενδιαφέρουν στις μελέτες ευστάθειας ΣΗΕ, μπορεί να γίνει η παραδοχή του ακαριαίου ελέγχου, δηλ. ο μετατροπέας πλευράς δρομέα αναπαριστάται σαν πηγή ρεύματος [SPK01a,Pöl03,LU05,cig07]. Οι τιμές για τις συνιστώσες i_{dr} και i_{qr} είναι έξοδοι των ρυθμιστών που ελέγχουν την άεργο ισχύ και τη ροπή αντίστοιχα. Η παράσταση των ρυθμιστών του μετατροπέα πλευράς δρομέα περιγράφεται στην υποενότητα 3.2.3.

Με τις παραπάνω υποθέσεις και παραλείποντας τα τυλίγματα 0, αφού ασχολούμαστε με συμμετρικές καταστάσεις, οι εξισώσεις τάσης της μηχανής (2.4-2.9) γίνονται αλγεβρικές:

$$v_{ds} = R_s i_{ds} - \omega_s (X_{ss} i_{qs} + X_M i_{qr}) \quad (3.4)$$

$$v_{qs} = R_s i_{qs} + \omega_s (X_{ss} i_{ds} + X_M i_{dr}) \quad (3.5)$$

$$v_{dr} = R_r i_{dr} - (\omega_s - \omega_r) (X_M i_{qs} + X_{rr} i_{qr}) \quad (3.6)$$

$$v_{qr} = R_r i_{qr} + (\omega_s - \omega_r) (X_M i_{ds} + X_{rr} i_{dr}) \quad (3.7)$$

όπου χρησιμοποιούνται τα ρεύματα αντί των ροών, σύμφωνα με την (2.10).

Δεδομένου ότι η ταχύτητα του δρομέα είναι μεταβλητή κατάστασης, οι εξισώσεις (3.4-3.7) λύνονται ως προς i_{ds} , i_{qs} , v_{dr} και v_{qr} κατά την προσομοίωση του μοντέλου. Επειδή σε αυτή την παραλλαγή του μοντέλου, όλες οι εξισώσεις τάσης της μηχανής είναι αλγεβρικές, στη συνέχεια θα αναφερόμαστε σε αυτό ως “αλγεβρικό”.

3.2.2 “Μεταβατικό” μοντέλο

Στην περίπτωση που αμελούνται μόνο τα μεταβατικά του στάτη, οι εξισώσεις τάσης του στάτη (2.4-2.5) μπορούν να γραφούν ως εξής:

$$v_{ds} = R_s i_{ds} - X' i_{qs} + E'_d \quad (3.8)$$

$$v_{qs} = X' i_{ds} + R_s i_{qs} + E'_q \quad (3.9)$$

όπου $X' = \omega_s (X_{ss} - \frac{X_M^2}{X_{rr}})$ είναι η μεταβατική αντίδραση και

$$E'_d = -\omega_s \frac{X_M}{X_{rr}} \psi_{qr} \quad E'_q = \omega_s \frac{X_M}{X_{rr}} \psi_{dr}$$

είναι ΗΕΔ ανάλογες των μαγνητικών ροών του δρομέα στους άξονες d και q . Οι ηλεκτρικές εξισώσεις κατάστασης είναι οι εξισώσεις τάσης του δρομέα (2.7-2.8):

$$\frac{d}{dt} \psi_{dr} = \omega_b (-R_r i_{dr} + (\omega_s - \omega_r) \psi_{qr} + v_{dr}) \quad (3.10)$$

$$\frac{d}{dt} \psi_{qr} = \omega_b (-R_r i_{qr} - (\omega_s - \omega_b) \psi_{dr} + v_{qr}) \quad (3.11)$$

όπου οι τάσεις v_{qr} και v_{dr} είναι οι έξοδοι των αντίστοιχων ΠΙ ρυθμιστών, δηλαδή ο μετατροπέας πλευράς δρομέα αναπαριστάται σαν πηγή τάσης. Επίσης, από την (2.10) ισχύουν:

$$\psi_{dr} = X_M i_{ds} + X_{rr} i_{dr} \quad (3.12)$$

$$\psi_{qr} = X_M i_{qs} + X_{rr} i_{qr} \quad (3.13)$$

Κεφάλαιο 3. Μοντέλα ανεμογεννητριών μεταβλητών στροφών

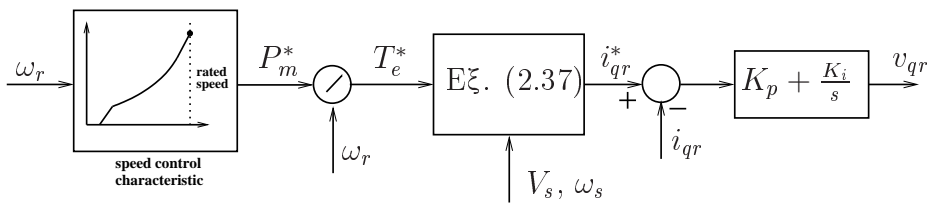
Δεδομένου ότι οι E'_d και E'_q είναι ανάλογες των μεταβλητών κατάστασης, κατά την προσομοίωση οι εξισώσεις (3.8) και (3.9) λύνονται ως προς τα ρεύματα i_{ds} , i_{qs} και οι συνιστώσες του ρεύματος του δρομέα i_{dr} , i_{qr} υπολογίζονται από τις σχέσεις (3.12) και (3.13).

Επειδή σε αυτή την παραλλαγή του μοντέλου αναπαριστώνται τα μεταβατικά του δρομέα, στη συνέχεια θα αναφερόμαστε σε αυτό ως “μεταβατικό”. Στο Κεφ. 4, γίνεται επέκταση του μοντέλου ώστε να προσομοιώνεται η μεταβατική μετατροπή της μηχανής σε βραχυκύκλωμένου δρομέα με τη χρήση ενεργού διάταξης βραχυκύκλωσης (active crowbar).

3.2.3 Παράσταση ρυθμιστών μετατροπέα πλευράς δρομέα

Ρυθμιστής στροφών

Για τον έλεγχο των στροφών θεωρείται ότι η ροπή αναφοράς T_e^* προκύπτει από τη μέτρηση της ταχύτητας περιστροφής ω_r και την καμπύλη ελέγχου των στροφών (βλ. Σχ. 2.2), όπως φαίνεται στο Σχ. 3.4. Η αναφορά της συνιστώσας του ρεύματος δρομέα i_{qr}^* προκύπτει



Σχήμα 3.4: Μοντέλο ρυθμιστή στροφών

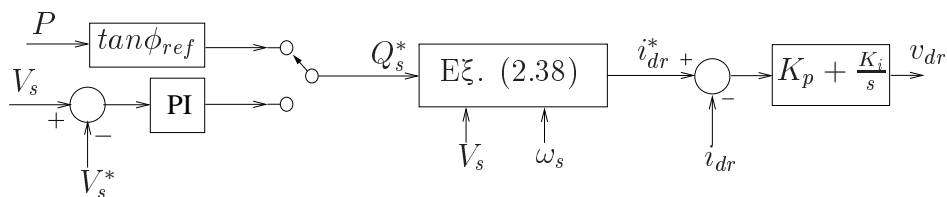
από τη σχέση (2.37) και τις μετρήσεις τερματικής τάσης και συχνότητας (έλεγχος ανοιχτού βρόχου). Στη συνέχεια, εφόσον χρησιμοποιείται το μεταβατικό μοντέλο, η τιμή αναφοράς i_{qr}^* εισάγεται σε ένα ΠΙ ελεγκτή που οδηγεί την τάση v_{qr} . Εάν χρησιμοποιείται το αλγεβρικό μοντέλο, ο ΠΙ ελεγκτής παρακάμπτεται.

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, αυτού του είδους ο ελεγκτής χρειάζεται μια ένα-προς-ένα σχέση μεταξύ της ταχύτητας περιστροφής και της ισχύος αναφοράς P_m^* . Για το λόγο αυτό στο μοντέλο χρησιμοποιείται η διακεκομμένη καμπύλη του Σχ. 2.2. Στις υψηλές ταχύτητες ανέμου, η ταχύτητα περιστροφής κρατείται στην ονομαστική της τιμή από τον έλεγχο γωνίας βήματος των πτερυγίων. Όταν η ταχύτητα ω_r ξεπερνά μεταβατικά την ονομαστική, η ροπή T_e^* κρατείται στη μέγιστη τιμή της.

Έλεγχος αέργου ισχύος

Εφόσον χρησιμοποιείται το μεταβατικό μοντέλο, η τιμή αναφοράς i_{dr}^* εισάγεται σε ένα ΠΙ ελεγκτή που οδηγεί την τάση v_{dr} , όπως φαίνεται στο Σχ. 3.5. Εάν χρησιμοποιείται το αλγεβρικό μοντέλο, ο ΠΙ ελεγκτής παρακάμπτεται και η έξοδος του ρυθμιστή αέργου ισχύος είναι απευθείας το ρεύμα i_{dr} . Ο ρυθμιστής αέργου ισχύος μπορεί να κρατά σταθερό το συντελεστή ισχύος της μηχανής ή να ελέγχει την τερματική τάση. Το ρεύμα αναφοράς i_{dr}^* που αντιστοιχεί στην άεργο ισχύ αναφοράς Q_s^* υπολογίζεται από την σχέση (2.38) και τις μετρήσεις τερματικής τάσης και συχνότητας, όπως φαίνεται στο Σχ. 3.5. Μπορεί όμως να χρησιμοποιηθεί και ΠΙ ρυθμιστής με έξοδο το ρεύμα αναφοράς i_{dr}^* και είσοδο το σφάλμα της αέργου ισχύος ή της τάσης. Σημειώνεται ότι, σύμφωνα με την (2.38) η οποία επαναλαμβάνεται εδώ για ευκολία (σχέση 3.14),

$$Q_s = \frac{V_s^2}{X_{ss}\omega_s} - \frac{X_M}{X_{ss}} V_s i_{dr} \Rightarrow i_{dr} = \frac{V_s}{X_M \omega_s} - \frac{X_{ss}}{X_M} \frac{Q_s}{V_s} \quad (3.14)$$



Σχήμα 3.5: Μοντέλο ρυθμιστή αέργου ισχύος

απαιτείται αύξηση του ρεύματος i_{dr} για να επιτευχθεί μείωση της καταναλισκόμενης αέργου ισχύος.

Περιορισμός ρεύματος και τάσης δρομέα

Το ρεύμα δρομέα που ζητείται από τους δύο βρόχους ελέγχου (ροπής και αέργου ισχύος) δεν πρέπει να ξεπερνά το ονομαστικό ρεύμα του μετατροπέα. Ο περιορισμός των ρευμάτων αναφοράς i_{dr}^* και i_{qr}^* γίνεται δίνοντας προτεραιότητα είτε στον έλεγχο ροπής είτε στον έλεγχο αέργου ισχύος.

Εφόσον ο μετατροπέας μοντελοποιείται σαν πηγή τάσης, ο αντίστοιχος περιορισμός γίνεται για τις τάσεις ώστε η τάση V_r να μην ξεπερνά τη μέγιστη τάση V_r^{max} που μπορεί να παρέχει ο μετατροπέας.

Θεωρώντας ότι ο PWM μετατροπέας λειτουργεί στη γραμμική περιοχή, η εναλλασσόμενη τάση είναι ανάλογη της συνεχούς [MUR89]:

$$V_r^{LL} = \frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{2}} m_1 V_{dc} \quad (3.15)$$

όπου V_r^{LL} είναι η ενεργός τιμή της πολικής τάσης του δρομέα και με m_1 συμβολίζεται το πλάτος διαμόρφωσης ($0 \leq m_1 \leq 1$). Σε ανά μονάδα έχουμε:

$$V_r = k m_1 V_{dc} \quad (3.16)$$

όπου

$$k = \frac{1}{2\sqrt{3}} \frac{V_{dc}^B}{V_r^B}$$

και V_{dc}^B και V_r^B είναι οι βάσεις της συνεχούς τάσης και της εναλλασσόμενης τάσης του δρομέα αντίστοιχα. Θεωρείται ότι η V_r^{max} προκύπτει όταν είναι $m_1 = 1$ στην (3.16). Σημειώνεται ότι η V_r^{max} εξαρτάται γραμμικά από την συνεχή τάση, η οποία μπορεί να μεταβάλλεται εφόσον ληφθεί υπόψη στο μοντέλο η δυναμική του DC πυκνωτή.

Θεωρώντας ότι η ονομαστική τάση V_r^{rated} προκύπτει για ονομαστική DC τάση (1 αμ) και για $m_1 = 1$, από την Εξ. (3.16) προκύπτει (σε ανα μονάδα):

$$k = V_r^{rated} \quad (3.17)$$

Στο Simulink οι έξοδοι v_{qr} και v_{dr} των βρόχων ελέγχου περιορίζονται σύμφωνα με τα παραπάνω (δίνοντας προτεραιότητα είτε στον έλεγχο στροφών είτε στον έλεγχο αέργων). Επίσης τίθεται όριο στους ολοκληρωτές των PI ελεγκτών ($\pm V_r^{rated}$) προκειμένου να περιορίζεται το φαινόμενο “wind-up”, δηλαδή η αύξηση της τιμής της μεταβλητής κατάστασης του ολοκληρωτή πριν τον περιοριστή.

3.2.4 Παράσταση μετατροπέα πλευράς δικτύου και πυκνωτή συνεχούς

Δεδομένου ότι στις μελέτες ευστάθειας τα μεταβατικά του στάτη αμελούνται, αμελούνται και τα μεταβατικά του κλάδου μεταξύ του μετατροπέα πλευράς δικτύου και του τερματικού ζυγού της μηχανής (M/Σ ή/και φίλτρο). Επίσης αμελούνται και οι απώλειες στον κλάδο αυτό. Ως αποτέλεσμα ο μετατροπέας πλευράς δικτύου αναπαριστάται σαν πηγή ρεύματος και η συνολική έγχυση της ΑΓΔΤ στο δίκτυο προκύπτει από το άθροισμα του ρεύματος αυτού και του ρεύματος του στάτη.

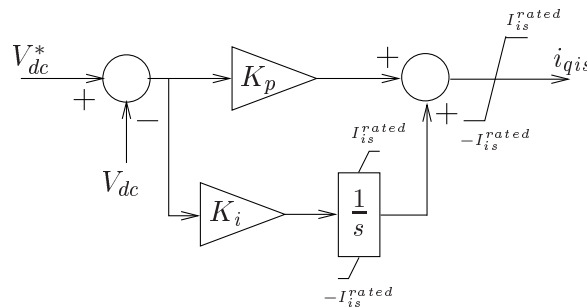
Σύμφωνα και με όσα αναφέρθηκαν στην παράγραφο 2.5.5, στο πλαίσιο dq , το ρεύμα i_{dis} του μετατροπέα πλευράς δικτύου καθορίζει την άεργο ισχύ και το ρεύμα i_{qis} την ενεργό ισχύ. Θεωρώντας λειτουργία μοναδιαίου συντελεστή ισχύος είναι:

$$i_{dis} = 0 \quad (3.18)$$

Στο μοντέλο μπορεί να επιλεγεί αν θα γίνει παράσταση της δυναμικής του DC πυκνωτή ή αν η DC τάση θα θεωρηθεί σταθερή. Στην πρώτη περίπτωση χρησιμοποιείται η διαφορική (2.41) που επαναλαμβάνεται εδώ:

$$C \frac{dV_{dc}}{dt} = \frac{P_{is} - P_r}{V_{dc}} \quad (3.19)$$

και ο PI ελεγκτής που φαίνεται στο Σχ. 3.6 για τον έλεγχο της DC τάσης. Λόγω της (3.18), το i_{qis} μπορεί να φτάσει το ονομαστικό ρεύμα του μετατροπέα I_{is}^{rated} .



Σχήμα 3.6: Έλεγχος DC τάσης

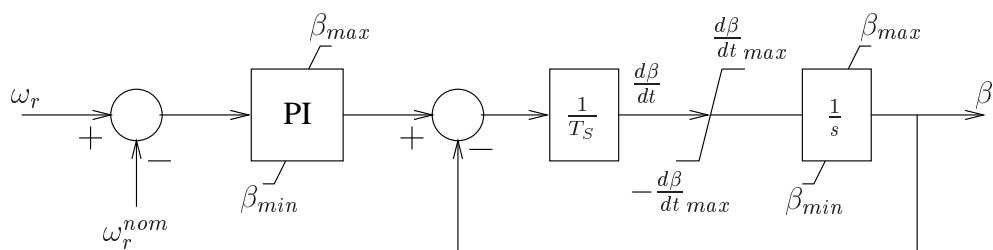
Η δυναμική του πυκνωτή μπορεί να αμεληθεί στο μοντέλο, οπότε η DC τάση θεωρείται σταθερή και η συνιστώσα i_{qis} είναι:

$$i_{qis} = \frac{P_r}{V_s} \quad (3.20)$$

3.2.5 Παράσταση ρυθμιστή γωνίας βήματος

Για την παράσταση του ρυθμιστή της γωνίας βήματος χρησιμοποιείται το σφάλμα από τη μέγιστη (ονομαστική) ταχύτητα περιστροφής ω_r^{nom} και έξοδος είναι η γωνία βήματος. Η γωνία βήματος είναι περιορισμένη στην ελάχιστη τιμή της όσο η ταχύτητα περιστροφής είναι κάτω από την ονομαστική.

Εκτός από την έξοδο του PI ελεγκτή, τα όρια της γωνίας βήματος έχουν τεθεί και στον ολοκληρωτή του, προκειμένου να αποφεύγεται το φαινόμενο wind-up. Όπως φαίνεται στο Σχ. 3.7, λαμβάνεται υπόψη ότι η γωνία βήματος μπορεί να μεταβάλλεται με περιορισμένο ρυθμό, καθώς και η σταθερά χρόνου του σερβομηχανισμού του ελέγχου βήματος.



Σχήμα 3.7: Μοντέλο ρυθμιστή γωνίας βήματος πτερυγίων

3.2.6 Παράσταση συστήματος μετάδοσης κίνησης και πτερωτής

Το μηχανικό μοντέλο άξονα με δύο στρεφόμενες μάζες περιγράφεται από το παρακάτω σύστημα (με σύμβαση κινητήρα):

$$2H_r \frac{d\omega_r}{dt} = T_e - T_{sh} \quad (3.21)$$

$$2H_l \frac{d\omega_l}{dt} = T_{sh} - T_m \quad (3.22)$$

$$\frac{d\Delta\theta}{dt} = \omega_b(\omega_r - \omega_l) \quad (3.23)$$

$$T_{sh} = K_{sh}\Delta\theta + D_{sh}(\omega_r - \omega_l) \quad (3.24)$$

όπου:

- H_r και H_l είναι οι ανηγμένες σταθερές αδρανείας του δρομέα της γεννήτριας και της πτερωτής αντίστοιχα (s).
- ω_r και ω_l είναι η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα της γεννήτριας και του ανεμοκινητήρα αντίστοιχα.
- T_e , T_m και T_{sh} είναι η ηλεκτρομαγνητική, η μηχανική και η ροπή του άξονα αντίστοιχα.
- $\Delta\theta$ είναι η γωνιακή παραμόρφωση του άξονα.
- K_{sh} και D_{sh} είναι οι συντελεστές ελαστικότητας και απόσβεσης του άξονα αντίστοιχα.

Η μηχανική ισχύς P_m υπολογίζεται από την (3.25),

$$P_m = \frac{1}{2} \rho A V_w^3 C_p \quad (3.25)$$

χρησιμοποιώντας την ταχύτητα ω_l , τη γωνία β , την ταχύτητα του ανέμου και τον αεροδυναμικό συντελεστή C_p , π.χ. με μια αναλυτική σχέση της μορφής (A.1). Η μηχανική ροπή είναι απλά:

$$T_m = -\frac{P_m}{\omega_l} \quad (3.26)$$

όπου έχει ληφθεί υπόψη ότι οι εξισώσεις του μοντέλου είναι με σύμβαση κινητήρα.

Στην περίπτωση που χρησιμοποιείται μοντέλο άξονα με μια στρεφόμενη μάζα, η εξίσωση επιτάχυνσης είναι:

$$2H \frac{d\omega_r}{dt} = T_e - T_m \quad (3.27)$$

Κεφάλαιο 3. Μοντέλα ανεμογεννητριών μεταβλητών στροφών

όπου H είναι η συνολική ανηγμένη σταθερά αδράνειας (s).

Σημειώνεται ότι όταν χρησιμοποιείται μοντέλο δύο στρεφόμενων μαζών, η ταχύτητα που χρησιμοποιείται για τα μοντέλα των ελεγκτών στροφών και βήματος περυγίων είναι η ταχύτητα ω_r του δρομέα της ΑΓΔΤ.

3.2.7 Επίλυση του προβλήματος αρχικοποίησης

Για την αρχικοποίηση των μοντέλων θεωρούνται γνωστά τα μεγέθη της τερματικής τάσης, της ενεργού και της αέργου ισχύος της μηχανής, π.χ. από μια ροή φορτίου. Υποθέτοντας, με βάση και τα όσα αναφέρθηκαν στην παράγραφο 3.2.3, ότι ο ελεγκτής του μετατροπέα πλευράς δρομέα χρησιμοποιεί τις εξισώσεις (2.37) και (2.38) και ότι ο μετατροπέας πλευράς δικτύου λειτουργεί με μοναδιαίο συντελεστή ισχύος, οι εξισώσεις της ΑΓΔΤ στη μόνιμη κατάσταση μπορούν να γραφούν ως εξής:

$$v_{ds} = R_s i_{ds} - (X_{ss} i_{qs} + X_M i_{qr}) \quad (3.28)$$

$$v_{qs} = R_s i_{qs} + (X_{ss} i_{ds} + X_M i_{dr}) \quad (3.29)$$

$$v_{dr} = R_r i_{dr} - (1 - \omega_r) (X_M i_{qs} + X_{rr} i_{qr}) \quad (3.30)$$

$$v_{qr} = R_r i_{qr} + (1 - \omega_r) (X_M i_{ds} + X_{rr} i_{dr}) \quad (3.31)$$

$$P = v_{ds} i_{ds} + v_{qs} i_{qs} + v_{dr} i_{dr} + v_{qr} i_{qr} \quad (3.32)$$

$$i_{qr} = -\frac{X_{ss} T_e^*(\omega_r)}{X_M V_s} \quad (3.33)$$

$$i_{dr} = \frac{V_s}{X_M} - \frac{X_{ss} Q_s}{X_M V_s} \quad (3.34)$$

όπου έχει ληφθεί $\omega_s = 1$ αμ και η (3.34) ισχύει κατά προσέγγιση, αφού έχει προκύψει με την υπόθεση ότι οι ωμικές απώλειες του στάτη είναι αμελητέες. Η T_e είναι συνάρτηση της ω_r , σύμφωνα με τη χαρακτηριστική ελέγχου των στροφών του Σχ. 2.2.

Εκτός από την (3.34) που ορίζει απευθείας το ρεύμα i_{dr} από τα δεδομένα της ροής φορτίου, το σύστημα (3.28-3.33) είναι μη-γραμμικό με αγνώστους τα μεγέθη i_{ds} , i_{qs} , i_{qr} , v_{dr} , v_{qr} , ω_r . Προκειμένου να λυθεί αριθμητικά (με την εντολή `fsolve` της Matlab), βρίσκεται μια αρχική εκτίμηση της λύσης ως εξής:

1. Η μηχανική ισχύς θεωρείται ίση με την δεδομένη συνολική ενεργό ισχύ που παράγεται από τη μηχανή και επομένως η ταχύτητα του δρομέα προκύπτει από τη χαρακτηριστική ελέγχου των στροφών του Σχ. 2.2.
2. Η συνιστώσα i_{qr} του ρεύματος του δρομέα υπολογίζεται από την (3.33).
3. Τα ρεύματα του στάτη i_{ds} και i_{qs} υπολογίζονται από τις εξισώσεις τάσης του στάτη (3.28) και (3.29). Ο άξονας q του σύγχρονου πλαισίου λαμβάνεται επί του διανύσματος της τερματικής τάσης, και άρα είναι: $v_{qs} = V_s$ και $v_{ds} = 0$.
4. Τέλος οι τάσεις του δρομέα υπολογίζονται απευθείας από τις (3.30) και (3.31).

Μετά την αριθμητική επίλυση του συστήματος (3.28-3.33), η μηχανική ισχύς της ανεμογεννήτριας υπολογίζεται από τη ροπή, όπως αυτή προκύπτει από τη σχέση (2.16), και την ταχύτητα περιστροφής. Από τη μηχανική ισχύ και την ταχύτητα περιστροφής και με βάση τα αεροδυναμικά χαρακτηριστικά της ανεμογεννήτριας, υπολογίζεται η ταχύτητα του ανέμου με την εντολή `fzero` της matlab, αφού η σχέση (3.25) είναι μη γραμμική.

Στην περίπτωση που η μηχανή παράγει ονομαστική ισχύ, για να υπολογιστεί η αρχική ταχύτητα του ανέμου δίδεται και η γωνία βήματος, αφού η ανεμογεννήτρια παράγει ονομαστική ισχύ όχι μόνο με την ονομαστική ταχύτητα του ανέμου, αλλά και παραπάνω. Επίσης σε αυτή την περίπτωση θεωρείται δεδομένο ότι η ταχύτητα περιστροφής είναι ίση με τη μέγιστη. Με αυτό τον τρόπο, εκτός από το i_{dr} , ορίζεται εξαρχής και η ταχύτητα ω_r και το i_{qr} , επομένως το σύστημα (3.28-3.32) έχει 5 εξισώσεις και 4 αγνώστους ($i_{ds}, i_{qs}, v_{dr}, v_{qr}$), δηλαδή είναι υπερπροσδιορισμένο. Έτσι, σε αυτή την περίπτωση, οι 4 άγνωστοι υπολογίζονται απλά από τα βήματα 3 και 4 της παραπάνω προσέγγισης και προκύπτει ένα μικρό σφάλμα στην ενεργό ισχύ (της τάξης του 0,7%).

Τέλος σημειώνεται ότι, αντί της (3.34) μπορεί να χρησιμοποιηθεί η παρακάτω εξίσωση για την άεργο ισχύ του στάτη:

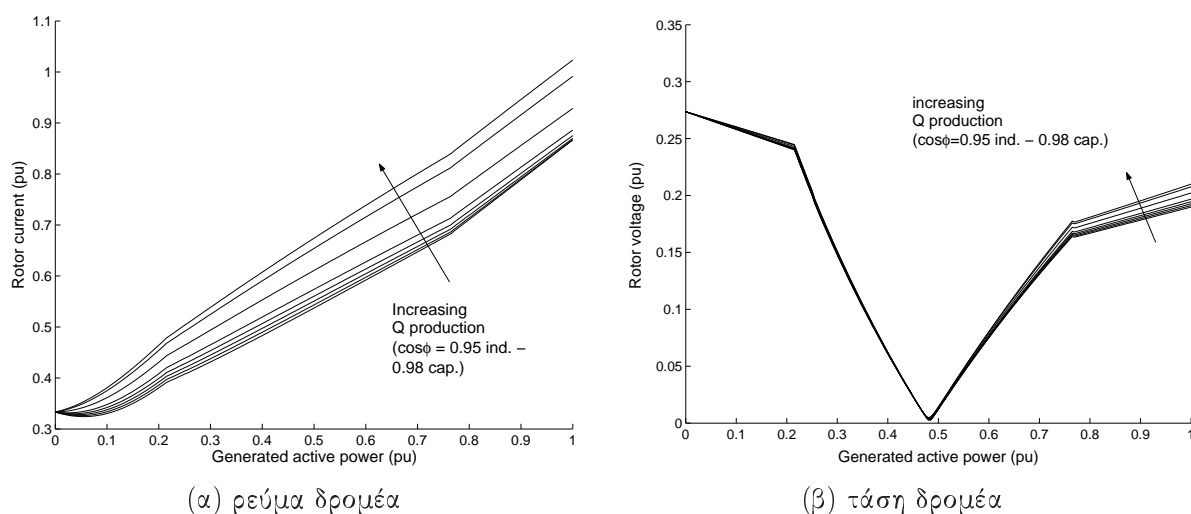
$$Q_s = v_{qs}i_{ds} - v_{ds}i_{qs} \quad (3.35)$$

Κάνοντας πάλι την υπόθεση ότι η μηχανική ισχύς ισούται με τη δεδομένη ενεργό ισχύ, η ταχύτητα του δρομέα προκύπτει από τη χαρακτηριστική ελέγχου των στροφών του Σχ. 2.2 και η (3.35) μαζί με τις (3.28-3.32) αποτελούν ένα σύστημα έξι εξισώσεων με έξι αγνώστους: $i_{ds}, i_{qs}, i_{dr}, i_{qr}, v_{dr}, v_{qr}$ [SPK01b]. Το μη-γραμμικό αυτό σύστημα επιδέχεται αναλυτική λύση, η οποία όμως δεν είναι τόσο απλή όσο στην προηγούμενη προσέγγιση.

3.2.8 Όρια λειτουργίας

Για να βρούμε τα όρια του μετατροπέα της ΑΓΔΤ εφαρμόζουμε τον αλγόριθμο αρχικοποίησης σε όλο το εύρος ενεργού και άεργου ισχύος υποθέτοντας ονομαστική τερματική τάση.

Χρησιμοποιώντας τις παραμέτρους της ανεμογεννήτριας του Παραρτήματος Α, την (διακεκομμένη) καμπύλη στροφών-ισχύος του Σχ. 2.2 και υποθέτοντας ότι η μηχανή μπορεί να λειτουργήσει υπό ονομαστική τάση και ονομαστική ενεργό ισχύ με συντελεστή ισχύος από 0,95 επαγωγικό έως 0,98 χωρητικό (με βάση στοιχεία από μία μηχανή Vestas V52 - 850 kW), προκύπτουν καμπύλες όπως αυτές του Σχ. 3.8α για το ρεύμα του δρομέα και οι καμπύλες Σχ. 3.8β για την τάση του δρομέα. Ως βάση για το ανά μονάδα σύστημα έχει χρησιμοποιηθεί η ονομαστική ενεργός ισχύς P_{nom} .



Σχήμα 3.8: Μεταβολή του ρεύματος και της τάσης του δρομέα με το σημείο λειτουργίας της ΑΓΔΤ

Κεφάλαιο 3. Μοντέλα ανεμογεννητριών μεταβλητών στροφών

Παρατηρούμε ότι το ρεύμα δρομέα λαμβάνει τη μέγιστη τιμή του στο σημείο λειτουργίας με μέγιστη παραγωγή ενεργού και αέργου ισχύος (στο συγκεκριμένο παράδειγμα $I_r^{maxPQ}=1.02$ α.μ.). Αυτή η τιμή λαμβάνεται ως το κανονικό ρεύμα συνεχούς λειτουργίας μετατροπέα πλευράς δρομέα I_r^{rated} :

$$I_r^{rated} = I_r^{maxPQ} \quad (3.36)$$

Η ενεργός ισχύς που ρέει από το δρομέα προς το δίκτυο μέσω του μετατροπέα σε αυτό το σημείο λειτουργίας είναι $P_r^{maxPQ}=0,16$ α.μ. Η μέγιστη τιμή του ρεύματος στάτη αντίθετα είναι μέγιστη για μέγιστη παραγωγή ενεργού και μέγιστη κατανάλωση αέργου ισχύος, αφού ο ελάχιστος επαγωγικός συντελεστής ισχύος έχει θεωρηθεί μικρότερος από τον ελάχιστο χωρητικό (και ο μετατροπέας πλευράς δικτύου θεωρείται ότι λειτουργεί πάντα με μοναδιαίο συντελεστή ισχύος). Αυτή προκύπτει ίση με 0,9 α.μ.

Η τάση του δρομέα έχει μεγαλύτερες τιμές για χαμηλή παραγωγή ενεργού ισχύος (όταν η ταχύτητα του δρομέα είναι χαμηλή), ανεξάρτητα από την αέργο παραγωγή. Παρατηρείται λοιπόν ότι:

- Η μέγιστη τιμή του ρεύματος του δρομέα καθορίζει τη μέγιστη παραγωγή ενεργού και αέργου ισχύος.
- Η μέγιστη τιμή της τάσης του δρομέα καθορίζει το εύρος της ταχύτητας του δρομέα.

Λαμβάνοντας ονομαστική φαινόμενη ισχύ του μετατροπέα ίση με το 30% της ονομαστικής ισχύος της μηχανής, δηλαδή $S_r^{rated} = 0,3$ α.μ. ως προς την ισχύ P_{nom} , έχουμε για τη μέγιστη επιτρεπόμενη τάση μόνιμης λειτουργίας:

$$V_r^{rated} = S_r^{rated} I_r^{rated} \quad (3.37)$$

οπότε προκύπτει $V_r^{rated}=0,293$ α.μ., η οποία είναι αρκετή όπως φαίνεται από το Σχ. 3.8β.

Ο μετατροπέας πλευράς δικτύου θεωρείται ίσης ισχύος (S_r^{rated}). Με κατάλληλο λόγο σπειρών στάτη/δρομέα ή/και κατάλληλο μετασχηματιστή οι δύο μετατροπείς μπορούν να είναι ίδιοι. Δεδομένου ότι ο μετατροπέας πλευράς δικτύου πρέπει να φτιάχνει τάση που να αντιστοιχεί στην τερματική τάση της μηχανής, στο μοντέλο λαμβάνεται μέγιστη τάση μόνιμης λειτουργίας του μετατροπέα πλευράς δικτύου V_{is}^{rated} ίση με 1,1 α.μ. Το κανονικό ρεύμα συνεχούς λειτουργίας του μετατροπέα πλευράς δικτύου είναι επομένως:

$$I_{is}^{rated} = S_r^{rated} / V_{is}^{rated} \quad (3.38)$$

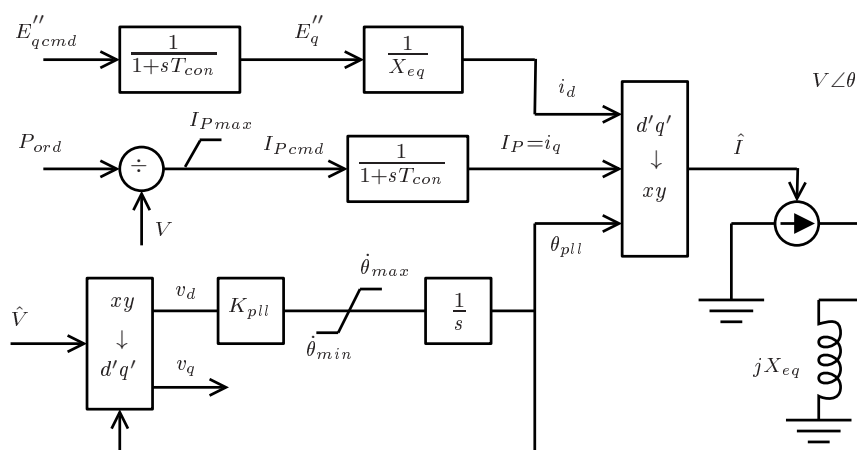
3.3 Μοντέλο ανεμογεννήτριας διπλής τροφοδότησης με λεπτομερείς βρόχους ελέγχου

Σε αυτή την ενότητα περιγράφεται ένα μοντέλο κατάλληλο για την αναπαράσταση ενός αιολικού πάρκου με ανεμογεννήτριες διπλής τροφοδότησης και το οποίο αναπτύχθηκε στο πλαίσιο αυτής της διατριβής σε περιβάλλον Matlab/Simulink ακολουθώντας το παράρτημα Β της αναφοράς [eig07]. Το μοντέλο αυτό έχει λεπτομερή παράσταση των ελεγκτών ενεργού και αέργου ισχύος, με βάση το σχεδιασμό συγκεκριμένου κατασκευαστή (GE) [MSGP03]. Καθώς το μοντέλο αυτό συμπεριλαμβάνεται στο πρόγραμμα PSS/E (έκδοση 30 [KSP06a, KSP06b]) έγινε επαλήθευση του μοντέλου Simulink, η οποία παρουσιάζεται στην παράγραφο 4.3.1.

Παραλλαγή του μοντέλου αυτού χρησιμοποιείται ως γενικευμένο (generic) μοντέλο από το WECC [gen06,PCE09] και επίσης περιλαμβάνεται στο πρόγραμμα προσομοίωσης PSS/E

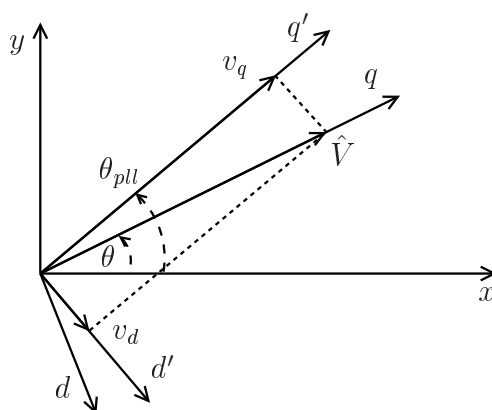
(WT2 στην έκδοση 30 [Kaz07] και WT3G1 στην έκδοση 31 [pss09]). Το γενικευμένο μοντέλο είναι ισοδύναμο με το μοντέλο της GE, εφόσον χρησιμοποιηθούν οι κατάλληλες παραμέτροι. Στην εργασία [ME08] παρουσιάζεται σύγκριση αποκρίσεων του μοντέλου με μετρήσεις από πραγματικό αιολικό πάρκο.

Στο Σχ. 3.9 φαίνεται το μπλοκ διάγραμμα του μοντέλου της ΑΓΔΤ. Οι παράμετροι του σχήματος, μαζί με τις υπόλοιπες παραμέτρους του μοντέλου, δίνονται στον Πίνακα Α.3 του Παραρτήματος Α. Αν και τα μεταβατικά του δρομέα αμελούνται (όπως στο αλγεβρικό



Σχήμα 3.9: Μοντέλο ΑΓΔΤ με βρόχο κλειδώματος φάσης

μοντέλο της παραγράφου 3.2.1), στο μοντέλο χρησιμοποιούνται δύο μικρές χρονικές καθυστερήσεις ($T_{con}=20$ ms) που αναπαριστούν την καθυστέρηση των αντίστοιχων βρόχων ελέγχου. Επίσης λαμβάνεται υπόψη η καθυστέρηση στην ευθυγράμμιση του dq πλαισίου με την τερματική τάση (βλ. παράγραφο 2.5.3). Στο Σχ. 3.10 το πλαίσιο που καθορίζεται από το βρόχο κλειδώματος φάσης (PLL) του μετατροπέα συμβολίζεται με $d'q'$ και συμπίπτει με το πλαίσιο dq στη μόνιμη κατάσταση, όταν είναι $\theta_{pll} = \theta$, $v_d = 0$ and $v_q = V$.



Σχήμα 3.10: Σύγχρονα πλαίσια αναφοράς

Η αντίδραση X_{eq} είναι η ισόδυναμη αντίδραση Norton όταν η ΑΓΔΤ αναπαριστάται σαν ελεγχόμενη πηγή ρεύματος. Αντίστοιχα, η E''_q είναι μια ισόδυναμη τάση που ελέγχει την έγχυση αέργου ισχύος της ΑΓΔΤ (βλ. πιο αναλυτικά παρακάτω). Τέλος, P_{ord} είναι η έγχυση ενεργού ισχύος που ζητείται από τον έλεγχο στροφών. Η συνολική έγχυση ρεύματος

Κεφάλαιο 3. Μοντέλα ανεμογεννητριών μεταβλητών στροφών

στο δίκτυο είναι στο πλαίσιο $d'q'$ του PLL:

$$\hat{I}_{tot} = \frac{E_q''}{X_{eq}} + jI_P - \frac{\hat{V}}{jX_{eq}}$$

απ' όπου:

$$\hat{I}_{tot} = \frac{E_q'' - v_q}{X_{eq}} + j \left(I_P + \frac{v_d}{X_{eq}} \right) \quad (3.39)$$

Η ενεργός και άεργος ισχύς προκύπτουν ως:

$$P = v_d \frac{E_q''}{X_{eq}} + v_q I_P \quad (3.40)$$

$$Q = -\frac{V^2}{X_{eq}} - v_d I_P + v_q \frac{E_q''}{X_{eq}} \quad (3.41)$$

Στη μόνιμη κατάσταση (οπότε είναι $\theta_{pll} = \theta$ στο Σχ. 3.10), το ρεύμα I_P καθορίζει την ενεργό ισχύ και η τάση E_q'' την άεργο ισχύ. Συγκρίνοντας τις δύο παραπάνω σχέσεις με τις (2.32) και (2.33), μπορούμε να αντιστοιχίσουμε το ρεύμα I_P στον όρο $\left(\frac{X_M}{X_{ss}} i_{qr} - i_{qis} \right)$ και τον όρο E_q''/X_{eq} στον όρο $\left(\frac{X_M}{X_{ss}} i_{dr} - i_{dis} \right)$. Η αντιστοίχιση αυτή υποθέτει ότι στο μοντέλο που εξετάζεται σε αυτή την ενότητα, εκτός από τα μεταβατικά στάτη και δρομέα, αμελούνται και οι ωμικές (ή άλλες) απώλειες. Επίσης θεωρείται ότι η συχνότητα του δικτύου δεν απομακρύνεται σημαντικά από την ονομαστική της τιμή.

Σημειώνεται ότι, όπως αναφέρθηκε στην ενότητα 2.5, με το διανυσματικό έλεγχο των μετατροπέων πλευράς δρομέα και πλευράς δικτύου, οι συνιστώσες του ρεύματος των μετατροπέων (τέσσερις συνολικά) ελέγχουν τέσσερα μεγέθη: ηλεκτρομαγνητική ροπή ή συνολική ενεργός ισχύς, άεργος ισχύς στάτη, ενεργός ισχύς μετατροπέα πλευράς δικτύου, άεργος ισχύς μετατροπέα πλευράς δικτύου. Η συνολική ενεργός ισχύς και η ενεργός ισχύς του μετατροπέα πλευράς δικτύου όμως, δεν είναι ανεξάρτητα μεγέθη (ομοίως και οι αντίστοιχες συνιστώσες ρεύματος): εφόσον θεωρηθεί σταθερή η τάση του DC πυκνωτή, η ενεργός ισχύς του μετατροπέα πλευράς δικτύου ισούται με την ενεργό ισχύ του μετατροπέα πλευράς δρομέα, η οποία είναι περίπου ανάλογη της ισχύος του στάτη και της ολίσθησης (βλ. σχέση 2.35). Στο συγκεκριμένο μοντέλο που εξετάζεται σε αυτή την ενότητα αμελούνται τα μεταβατικά του δρομέα και η δυναμική του πυκνωτή και η γεννήτρια και οι δύο μετατροπείς εξετάζονται σαν ενιαίο σύνολο. Έτσι, ομαδοποιούνται οι συνιστώσες που ελέγχουν την ενεργό ισχύ και αυτές που ελέγχουν την άεργο, δηλαδή υπάρχουν δύο ελεγχόμενα μεγέθη αντί για τέσσερα.

Στο πλαίσιο $d'q'$ είναι για την πηγή Norton:

$$\hat{I}_{NO} = \frac{E_q''}{X_{eq}} + jI_P = I_{NO} e^{j\phi}, \quad (3.42)$$

όπου ϕ η φάση του ρεύματος Norton. Σημειώνεται ότι η φάση είναι μηδέν στη μόνιμη κατάσταση όταν το ρεύμα έχει μόνο άεργη συνιστώσα, λόγω του ότι έχει επιλεγεί να βρίσκεται ο άξονας q επί της τερματικής τάσης. Στο σύγχρονο πλαίσιο xy του δικτύου είναι:

$$\hat{I}_{NO} = I_{NO} e^{j(\phi + \theta_{pll} - 90)} \quad (3.43)$$

και η αντίστοιχη τάση Thevenin είναι:

$$\hat{V}_{TH} = jX_{eq} \cdot \hat{I}_{NO} = X_{eq} I_{NO} e^{j(\phi + \theta_{pll})} \quad (3.44)$$

Επομένως, το μοντέλο μπορεί να ειπωθεί ως μια τάση πίσω από μια ισοδύναμη αντίδραση και οι συνιστώσες της τάσης αυτής (μέτρο και γωνία) δε μπορούν να αλλάξουν ακαριαία, καθώς εξαρτώνται μόνο από μεταβλητές κατάστασης (και όχι από αλγεβρικές μεταβλητές).

Αν το PLL θεωρηθεί ακαριαίο, τότε $\theta_{pll} = \theta$ και η έγχυση ρεύματος στο δίκτυο είναι (στο πλαίσιο dq):

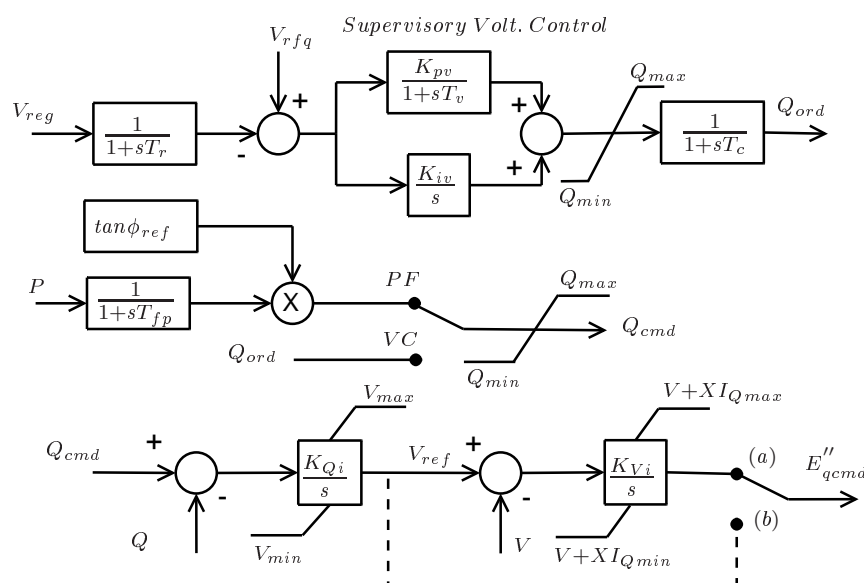
$$\hat{I}_{tot} = \frac{E_q''}{X_{eq}} + jI_P - \frac{V}{X_{eq}} \quad (3.45)$$

Η παραγόμενη ενεργός και άεργος ισχύς είναι αντίστοιχα:

$$P = VI_P \quad (3.46)$$

$$Q = V \frac{E_q'' - V}{X_{eq}} \quad (3.47)$$

Στο Σχ. 3.11 φαίνεται ο ελεγκτής αέργου ισχύος. Ο έλεγχος μπορεί να είναι είτε



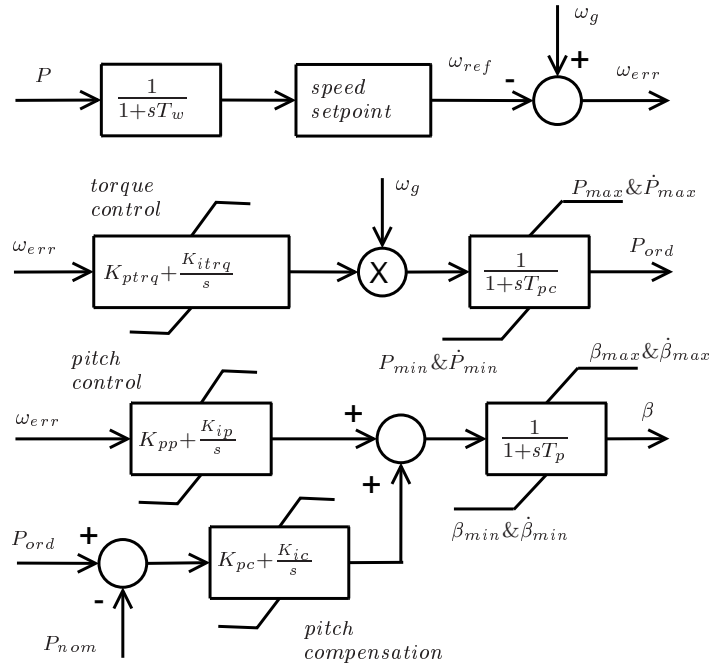
Σχήμα 3.11: Έλεγχος αέργου ισχύος

συντελεστή ισχύος (Power Factor, PF) είτε τάσης (Voltage Control, VC). Και στις δύο περιπτώσεις, η άεργος ισχύς Q_{cmd} που ζητείται να παράγει η ΑΓΔΤ είναι η τιμή αναφοράς για ένα ολοκληρωματικό ελεγκτή. Αν ο δεύτερος διακόπτης του Σχ. 3.11 είναι στη θέση (a), η έξοδος V_{ref} του ολοκληρωτή (αναφορά για την τερματική τάση της ΑΓΔΤ) είναι η είσοδος ενός δεύτερου ολοκληρωματικού ελεγκτή, ο οποίος οδηγεί το E''_{qcmd} . Αυτός ο έλεγχος της τερματικής τάσης (Terminal Voltage Control, TVC) των ανεμογεννητριών μπορεί να είναι σημαντικός για την επίτευξη καλής απόκρισης της τάσης σε περιπτώσεις τοπικών σφαλμάτων ή άλλων διαταραχών. Επομένως είναι πιθανό ότι ο διαχειριστής ενός αιολικού πάρκου θα επιλέξει να τον ενεργοποιήσει, γεγονός που θα πρέπει να ληφθεί υπόψη στο μοντέλο. Σε αντίθετη περίπτωση, ο βρόχος του ελέγχου της τερματικής τάσης μπορεί να παρακαμφθεί (διακόπτης στη θέση b). Σημειώνεται ότι αυτή η επιλογή (να παρακαμφθεί ο βρόχος) δεν υπάρχει στο μοντέλο που δημοσιεύτηκε στο παράρτημα Β του [sig07], αλλά υπάρχει στην παραλλαγή του μοντέλου που αναφέρεται ως γενικευμένο από το WECC [gen06] και έχει επίσης ενσωματωθεί στο πρόγραμμα προσομοίωσης PSS/E (generic type-3 wind turbine-generator model [Kaz07, pss09]).

Κεφάλαιο 3. Μοντέλα ανεμογεννητριών μεταβλητών στροφών

Στη περίπτωση ελέγχου τάσης (VC), το Q_{cmd} προέρχεται από ένα απλοποιημένο μοντέλο του ελεγκτή ολόκληρου του αιολικού πάρκου (Supervisory Voltage Controller).

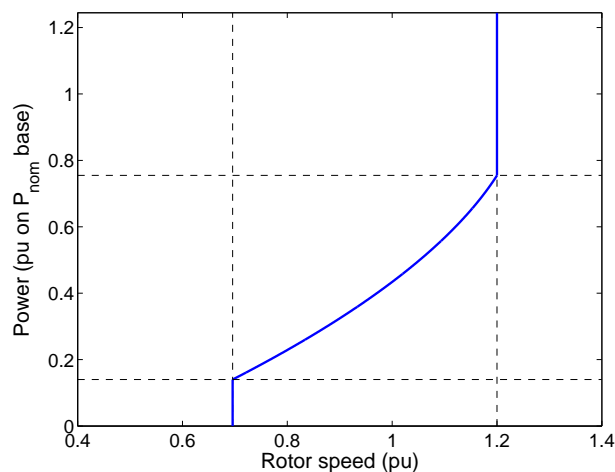
Οι βρόχοι ελέγχου της ταχύτητας και της γωνίας βήματος φαίνονται στο Σχ. 3.12. Ο



Σχήμα 3.12: Ελεγκτές ταχύτητας και γωνίας βήματος

έλεγχος στροφών γίνεται με βάση μέτρηση της παραγόμενης ενεργού ισχύος P . Η ταχύτητα αναφοράς ω_{ref} προκύπτει από την καμπύλη ελέγχου των στροφών του Σχ. 3.13 ακολουθώντας αργά ($T_w = 5$ s) τις μεταβολές της ισχύος. Η καμπύλη του Σχ. 3.13 μεταξύ ελάχιστης και μέγιστης ταχύτητας ορίζεται ως εξής:

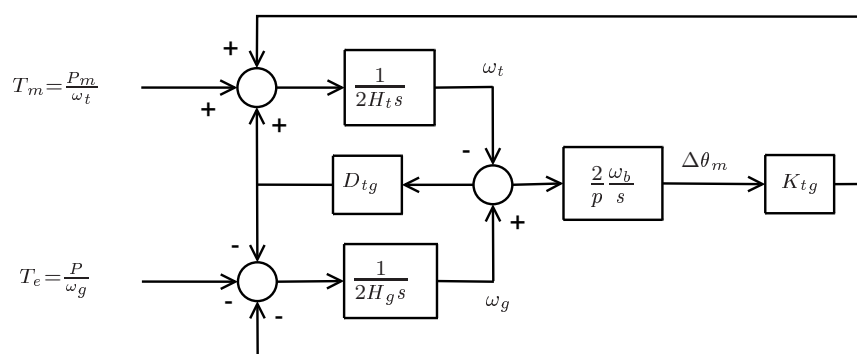
$$\omega_{ref} = -0.67P^2 + 1.42P + 0.51 \quad (3.48)$$



Σχήμα 3.13: Καμπύλη ελέγχου στροφών

Ο ρυθμιστής της γωνίας βήματος (pitch control) είναι ένας PI ελεγκτής με έξοδο την επιθυμητή γωνία βήματος και είσοδο το σφάλμα της ταχύτητας περιστροφής από την ταχύτητα αναφοράς. Επομένως, η γωνία βήματος μπορεί να μεταβάλλεται και στην περιοχή λειτουργίας με ταχύτητα ανέμου κάτω της ονομαστικής και άρα να συμμετέχει (από την πλευρά της μηχανικής ισχύος/ροπής) στον έλεγχο στροφών. Προκειμένου να εξασφαλίζεται ότι στη μόνιμη κατάσταση σε αυτή την περιοχή λειτουργίας, η γωνία βήματος θα έχει την ελάχιστη τιμή (ώστε να μπορεί να επιτευχθεί ο μέγιστος αεροδυναμικός συντελεστής ισχύος), χρησιμοποιείται και ένας επιπλέον βρόχος αντιστάθμισης (pitch compensation). Σε μόνιμη λειτουργία με ισχύ κάτω της ονομαστικής, το σφάλμα του PI ελεγκτή αντιστάθμισης είναι αρνητικό και η γωνία βήματος περιορίζεται στην ελάχιστη τιμή της.

Για το μηχανικό μέρος χρησιμοποιείται το μοντέλο δύο στρεφόμενων μαζών του Σχ. 3.14 (με επιλογή για μοντέλο μίας στρεφόμενης μάζας), ανάλογο του μοντέλου της παραγράφου 3.2.6. Η ταχύτητα του δρομέα της ΑΓΔΤ συμβολίζεται με ω_g και η ταχύτητα του δρομέα του ανεμοκινητήρα με ω_t (σε α.μ.). Σημειώνεται ότι σε αυτό το μοντέλο, η γωνιακή



Σχήμα 3.14: Μοντέλο δύο στρεφόμενων μαζών

παραμόρφωση του άξονα ($\Delta\theta_m$) είναι σε μηχανικά rad.

Η μηχανική ισχύς υπολογίζεται από τη σχέση (3.25). Η μηχανική και η ηλεκτρομαγνητική ροπή υπολογίζονται απλά διαιρώντας τη μηχανική και την ηλεκτρική ισχύ με τις ταχύτητες ω_t και ω_g αντίστοιχα, δεδομένου ότι αμελούνται οι απώλειες.

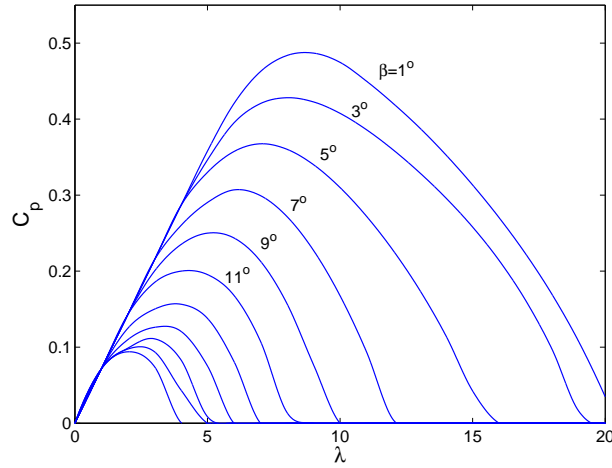
Στο Σχ. 3.15 φαίνονται οι καμπύλες $C_p(\lambda)$ (βλ. ενότητα 2.1) όπως προκύπτουν από τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται στο μοντέλο για τον υπολογισμό του αεροδυναμικού συντελεστή ισχύος C_p από την ταχύτητα ακροπερυγίου λ και την γωνία βήματος β .

3.4 Γενικευμένο απλοποιημένο μοντέλο ανεμογεννητριών μεταβλητών στροφών

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζεται ένα γενικευμένο μοντέλο για την απλοποιημένη αναπαράσταση αιολικών πάρκων με ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών για μελέτες ευστάθειας ΣΗΕ το οποίο αναπτύχθηκε στο πλαίσιο αυτής της εργασίας στο Matlab/Simulink με βάση το γενικευμένο μοντέλο που προτείνεται στην εργασία [RLM08] και το οποίο έχουν αναπτύξει οι διαχειριστές του Ισπανικού και του Πορτογαλικού συστήματος μεταφοράς σε συνεργασία με την Ισπανική ένωση αιολικής ενέργειας. Το μοντέλο αυτό διαθέτει και ο ΔΕΣΜΗΕ σε μορφή μοντέλου χρήστη στο πρόγραμμα προσομοίωσης PSS/E.

Όπως φαίνεται στο Σχ. 3.16, το μοντέλο αναπαριστά την ανεμογεννήτρια (ΑΓΔΤ ή πλήρους μετατροπέα) με μία ελεγχόμενη πηγή ρεύματος.

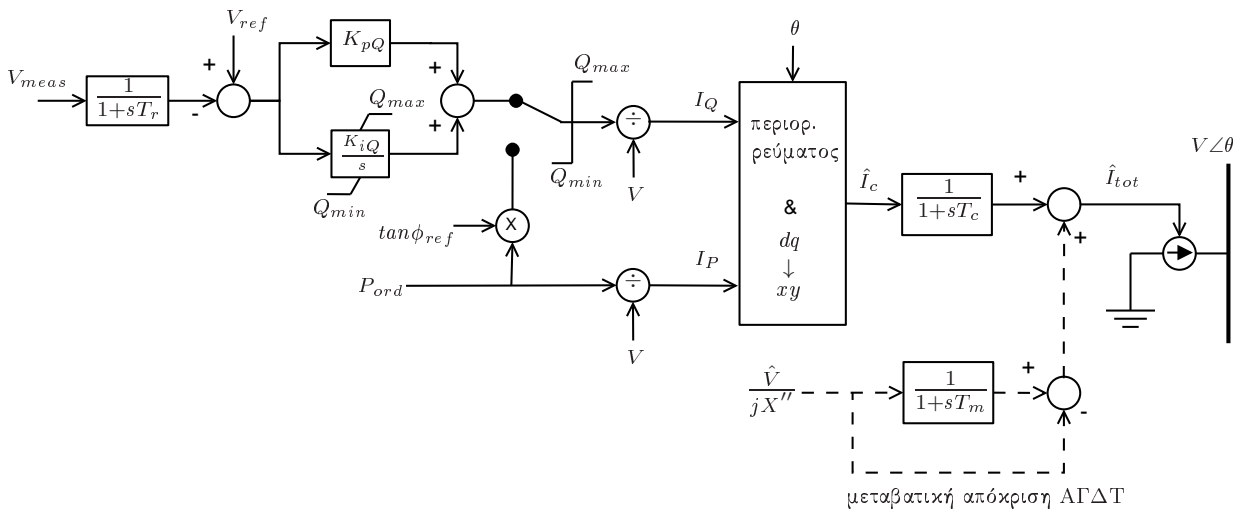
Κεφάλαιο 3. Μοντέλα ανεμογεννητριών μεταβλητών στροφών



Σχήμα 3.15: C_p συναρτήσει του λ με παράμετρο το β

Με την εξαίρεση του μπλοκ “μεταβατική απόκριση ΑΓΔΤ”, στο οποίο θα αναφερθούμε παρακάτω, το ρεύμα θεωρείται πλήρως ελεγχόμενο από τον μετατροπέα και καθορίζεται από τους ελεγχτές ενεργού και αέργου ισχύος και τους περιορισμούς που επιβάλλονται από το μέγεθος του μετατροπέα και τη διαστασιολόγηση της μονάδας γενικότερα, αλλά και από την ικανοποίηση απαιτήσεων του διαχειριστή του δικτύου π.χ. για έγχυση αέργου ισχύος για υπόστηριξη της τάσης σε περίπτωση βραχυκυκλώματος. Επίσης, ο περιορισμός του εγχεόμενου ενεργού ρεύματος μπορεί να είναι απαραίτητος σε περιπτώσεις μεγάλης βύθισης της τάσης και για λόγους ευστάθειας της μονάδας [ESE09, Νάν09]. Αντίστοιχα με το Σχ. 3.9 το μοντέλο έχει μια μικρή χρονική καθυστέρηση T_c για την υλοποίηση του ρεύματος.

Για τις ανεμογεννήτριες πλήρους μετατροπέα, το μοντέλο είναι αντίστοιχο με αυτό που προτείνεται στο [cig07] και βασίζεται στο γεγονός ότι σε αυτού του είδους τις ανεμογεννήτριες, ο μετατροπέας συχνότητας απεμπλέκει πλήρως τη γεννήτρια από το δίκτυο και αυτό που έχει περισσότερη σημασία από την πλευρά του δικτύου είναι η συμπεριφορά του μετατροπέα.



Σχήμα 3.16: Γενικευμένο μοντέλο ανεμογεννητριών μεταβλητών στροφών

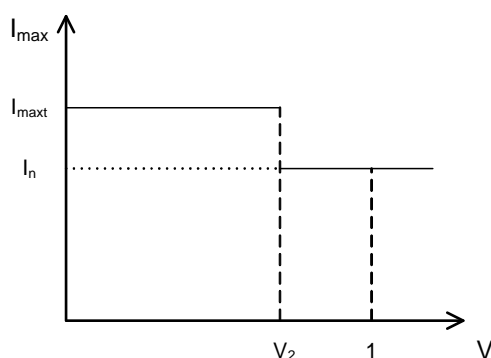
Όσον αφορά στην ΑΓΔΤ, όπως είδαμε στην ενότητα 3.3, αμελώντας τις απώλειες και θεωρώντας ότι η συχνότητα του δικτύου δεν απομακρύνεται από την ονομαστική της τιμή, αυτή μπορεί να αναπαρασταθεί όπως φαίνεται στο Σχ. 3.9. Αμελώντας επιπλέον το σφάλμα του PLL ή θεωρώντας ότι ο έλεγχος γίνεται με τρόπο που δεν επηρεάζεται από το σφάλμα αυτό (βλ. παράγραφο 4.3.2), η ΑΓΔΤ μπορεί να αναπαρασταθεί επίσης ως μια ελεγχόμενη πηγή ενεργού και άεργου ρεύματος, θεωρώντας ότι ο μετατροπέας ρυθμίζει το ρεύμα του δρομέα έτσι ώστε να επιτυγχάνεται η επιθυμητή συνολική έγχυση ρεύματος της μηχανής. Αντίστοιχη προσέγγιση ακολουθείται σε νεότερη έκδοση του μοντέλου της GE στο PSS/E (W3G2U στο [pss09]).

Το γεγονός όμως ότι ο στάτης είναι απευθείας συνδεδεμένος στο δίκτυο σημαίνει ότι η μηχανή παρουσιάζει μεταβατική απόκριση σε περίπτωση απότομης μεταβολής της τερματικής τάσης. Για την αναπαράσταση της μεταβατικής συμπεριφοράς της ΑΓΔΤ χρησιμοποιείται το αντίστοιχο μπλοκ που φαίνεται με διακεκομμένη γραμμή στο Σχ. 3.16. Σημειώνεται ότι όταν μοντελοποιείται η ΑΓΔΤ, η έξοδος του μπλοκ αυτού προστίθεται στην έξοδο του μπλοκ κανονικής λειτουργίας.

Όσον αφορά στον περιοριστή ρεύματος, στο μοντέλο διακρίνονται δύο καταστάσεις λειτουργίας ανάλογα με το επίπεδο της τερματικής τάσης V της ανεμογεννήτριας:

- Η κανονική κατάσταση, όταν είναι $V \geq (1 - \Delta V)$.
- Η κατάσταση σφάλματος, όταν είναι $V < (1 - \Delta V)$.

Ο περιοριστής ρεύματος καταρχάς εξασφαλίζει ότι το συνολικό ρεύμα δεν ξεπερνά το μέγιστο επιτρεπόμενο με βάση την ονομαστική φαινόμενη ισχύ της μηχανής ($I_n=1$ α.μ. σε βάση S_{nom}). Επίσης μπορεί να θεωρηθεί ότι μια μεγαλύτερη τιμή του συνολικού ρεύματος (I_{maxt}) είναι ανεκτή για ένα μικρό χρονικό διάστημα. Στο Σχ. 3.17 φαίνεται η γενική μορφή του μέγιστου συνολικού ρεύματος συναρτήσει της τάσης. Σημειώνεται ότι δεν χρησιμοποιείται



Σχ. 3.17: Μέγιστο ρεύμα συναρτήσει της τάσης

χρονικός περιορισμός, δεδομένου ότι αν η βύθιση της τάσης ξεπεράσει τα όρια που τίθενται από την καμπύλη τάσης χρόνου που ορίζεται για την αδιάλειπτη λειτουργία υπό χαμηλή τάση (βλ. Σχ. 1.6), η μονάδα θα πρέπει ούτως ή άλλως να απομονωθεί από το σύστημα. Εφόσον ληφθεί $I_{maxt} > I_n$, θεωρείται ότι το μεταβατικό όριο είναι ανεκτό για το διάστημα που ορίζει ο κώδικας του συστήματος ότι η μονάδα πρέπει να παραμείνει σε λειτουργία.

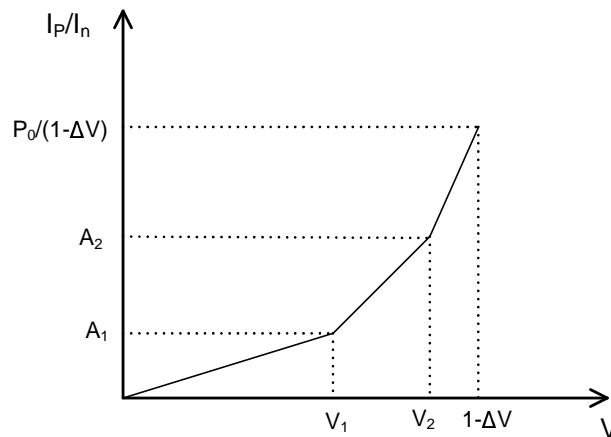
Ο περιορισμός του ρεύματος γίνεται έτσι ώστε να ισχύει η σχέση:

$$\sqrt{I_P^2 + I_Q^2} \leq I_{max} \quad (3.49)$$

Κεφάλαιο 3. Μοντέλα ανεμογεννητριών μεταβλητών στροφών

Στην κανονική κατάσταση λειτουργίας δίνεται προτεραιότητα στο ενεργό ρεύμα, ενώ σε περίπτωση βύθισης της τάσης στο άεργο.

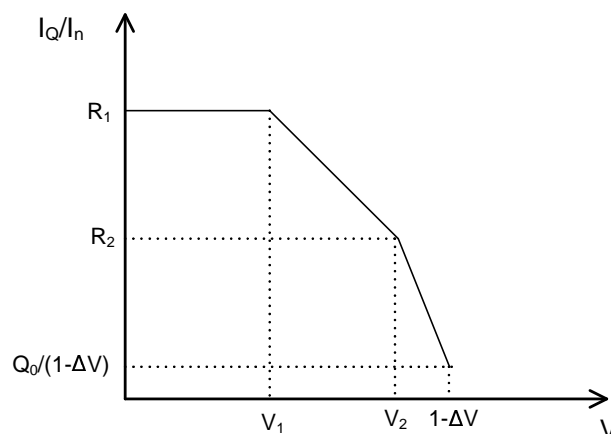
Εκτός από τον περιορισμό αυτό όμως, εφαρμόζεται ξεχωριστός περιορισμός για το ενεργό και το άεργο ρεύμα, ανάλογα με το επίπεδο της τάσης. Οι περιορισμοί αυτοί εξαρτώνται από τις απαιτήσεις του συστήματος για έγχυση άεργου ρεύματος από τις ανεμογεννήτριες σε περιπτώσεις βύθισης τάσης. Στο Σχ. 3.18 φαίνεται η καμπύλη του μέγιστου ενεργού ρεύματος συναρτήσει της τάσης. Τα δεδομένα της τμηματικά γραμμικής καμπύλης του



Σχήμα 3.18: Μέγιστο ενεργό ρεύμα συναρτήσει της τάσης

Σχ. 3.18 πρέπει να επιλεγούν με τρόπο ώστε να υπάρχει κατάλληλο περιθώριο για ικανοποίηση των απαιτήσεων σε άεργο ρεύμα.

Στην περίπτωση που δεν ασκείται έλεγχος τάσης και η μονάδα είναι σε λειτουργία σταθερού συντελεστή ισχύος (ή σταθερού άεργου ρεύματος) στην κανονική κατάσταση, τότε, στην κατάσταση σφάλματος ($V < 1 - \Delta V$), το άεργο ρεύμα ορίζεται από καμπύλη της μορφής του Σχ. 3.19. Εφόσον ασκείται έλεγχος τάσης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί περιορισμός



Σχήμα 3.19: Άεργο ρεύμα συναρτήσει της τάσης

για το άεργο ρεύμα με μορφή καμπύλης όπως του Σχ. 3.19 ή και να χρησιμοποιηθεί όλο το διαθέσιμο άεργο ρεύμα, όπως αυτό υπολογίζεται από την (3.49) μετά από τον περιορισμό του ενεργού ρεύματος.

Κεφάλαιο 3. Μοντέλα ανεμογεννητριών μεταβλητών στροφών

Στο μοντέλο του Σχ. 3.16 η ενεργός ισχύς αναφοράς P_{ord} είναι σταθερή και δεν υπάρχει αναπαράσταση του μηχανικού μέρους της ανεμογεννήτριας. Αυτό η απλοποίηση βασίζεται στις παρακάτω υποθέσεις:

- Η ταχύτητα του ανέμου θεωρείται σταθερή για τα λίγα δευτερόλεπτα που διαρκεί μια προσομοίωση μεταβατικής ευστάθειας.
- Αμελείται τυχόν μεταβολή του P_{ord} που μπορεί να προκληθεί από μεταβολή της ταχύτητας περιστροφής του δρομέα. Για παράδειγμα σε περίπτωση απότομης βύθισης της τάσης του δικτύου, η ανεμογεννήτρια δε μπορεί να διοχετεύσει όλη την απαραίτητη ισχύ με αποτέλεσμα την επιτάχυνση του δρομέα.
- Αμελείται η στρεπτική ταλάντωση του άξονα.

Τέλος ο έλεγχος του άεργου ρεύματος εξαρτάται από το είδος του ρυθμιστή που χρησιμοποιείται. Στο Σχ. 3.16 υπάρχουν δύο επιλογές απλών ρυθμιστών είτε για λειτουργία σταθερού συντελεστή ισχύος, είτε για έλεγχο της τάσης (είτε στο ζυγό της γεννήτριας είτε σε απομακρυσμένο σημείο).

Κεφάλαιο 4

Ευστάθεια ΑΓΔΤ σε σύνδεση με άπειρο ζυγό

4.1 Ευστάθεια ελέγχου στροφών

Στην ενότητα αυτή εξετάζεται η ευστάθεια του ελέγχου στροφών της ΑΓΔΤ και γενικότερα των ανεμογεννητριών μεταβλητών στροφών.

Στο Σχ. 4.1 φαίνονται καμπύλες μηχανικής ισχύος ανεμογεννητριών συναρτήσει της ταχύτητας περιστροφής για διάφορες τιμές της ταχύτητας του ανέμου. Οι καμπύλες του Σχ. 4.1α αναφέρονται σε μια ανεμογεννήτρια με αεροδυναμικό έλεγχο (stall control) και του Σχ. 4.1β σε μια ανεμογεννήτρια με έλεγχο γωνίας βήματος για γωνία βήματος $\beta = 0$. Ο αεροδυναμικός συντελεστής ισχύος C_p στην περίπτωση της ανεμογεννήτριας με αεροδυναμικό έλεγχο υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση [ΠαΣ97]:

$$C_p(\lambda) = \begin{cases} \sum_{i=0}^2 a_i \lambda^i, & 1,5 \leq \lambda < 3,636 \\ \sum_{i=0}^6 b_i \lambda^i, & 3,636 \leq \lambda < 10,42 \end{cases} \quad (4.1)$$

όπου:

$$\begin{aligned} a_0 &= 7,5917 \cdot 10^{-2} & b_0 &= -1,2150 & b_4 &= 1,1819 \cdot 10^{-2} \\ a_1 &= -8,9375 \cdot 10^{-2} & b_1 &= 1,1623 \cdot 10^{-1} & b_5 &= -7,5199 \cdot 10^{-4} \\ a_2 &= 3,3800 \cdot 10^{-2} & b_2 &= 2,7703 \cdot 10^{-1} & b_6 &= 1,9033 \cdot 10^{-5} \\ & & b_3 &= -8,9540 \cdot 10^{-2} & & \end{aligned}$$

Στην περίπτωση της ανεμογεννήτριας με έλεγχο της γωνίας βήματος, ο αεροδυναμικός συντελεστής ισχύος υπολογίζεται από τη σχέση (Α.1) [SPK01a] που επαναλαμβάνεται εδώ:

$$C_p(\lambda, \beta) = 0,22 \left(\frac{116}{\lambda_i} - 0,4\beta - 5 \right) e^{-\frac{12,5}{\lambda_i}} \quad (4.2)$$
$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0,08\beta} - \frac{0,035}{\beta^3 + 1}$$

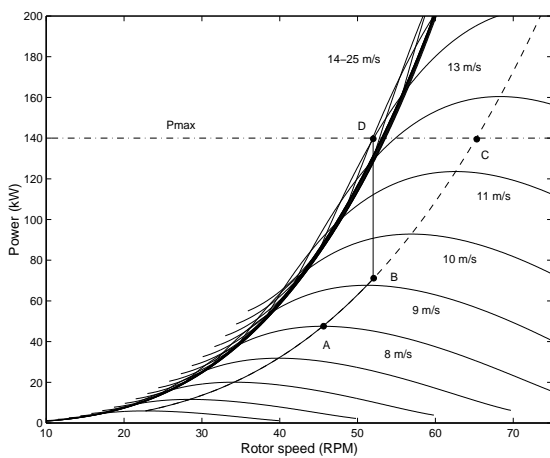
Οι υπόλοιπες παράμετροι που χρησιμοποιούνται για τις καμπύλες του Σχ. 4.1 φαίνονται στον Πίνακα 4.1.

Παρατηρείται η περιοχή απώλειας στήριξης στο Σχ. 4.1α που υποδηλώνει ότι για λειτουργία σταθερών στροφών, η ισχύς περιορίζεται στις υψηλές ταχύτητες ανέμου μέσω της αεροδυναμικής. Ενώνοντας τα μέγιστα των καμπυλών ισχύος λαμβάνουμε την καμπύλη στροφών-ισχύος για βέλτιστη απόδοση (καμπύλη ABC). Στο Σχ. 4.2 φαίνονται οι καμπύλες στροφών-ροπής που αντιστοιχούν στο Σχ. 4.1. Για ταχύτητες περιστροφής μέχρι την

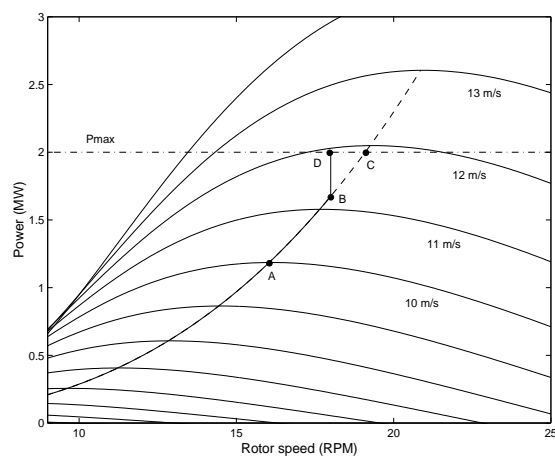
Κεφάλαιο 4. Ευστάθεια ΑΓΔΤ σε σύνδεση με άπειρο ζυγό

Πίνακας 4.1: Χαρακτηριστικά εξεταζόμενων ανεμογεννητριών

	ανεμογεννήτρια με αεροδυναμικό έλεγχο	ανεμογεννήτρια με έλεγχο γωνίας βήματος
διάμετρος δρομέα (m)	75	20
πυκνότητα αέρα (kg/m^3)	1,25	1,225
ονομαστική ισχύς (kW)	140	2000
αριθμός πόλων	4	4
λόγος μειωτήρα στροφών	1:26	1:100
ονομαστική ταχύτητα περιστροφής (ΣΑΛ)	52	18

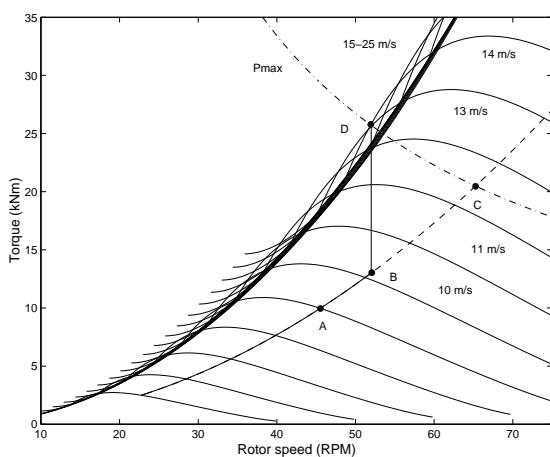


(α) Ανεμογεννήτρια με αεροδυναμικό έλεγχο

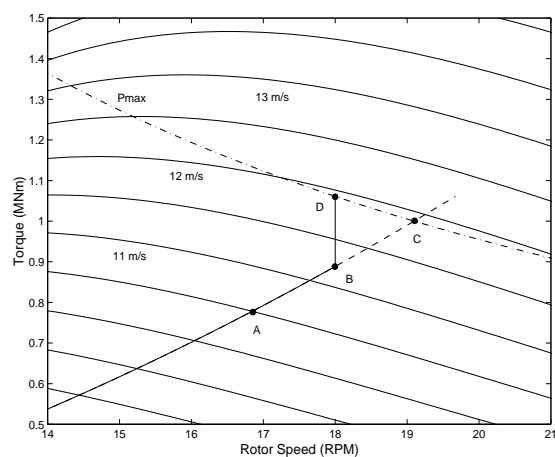


(β) Ανεμογεννήτρια με έλεγχο βήματος

Σχήμα 4.1: Καμπύλες μηχανικής ισχύος ανεμογεννήτριας συναρτήσει της ταχύτητας περιστροφής



(α) Ανεμογεννήτρια με αεροδυναμικό έλεγχο



(β) Ανεμογεννήτρια με έλεγχο βήματος

Σχήμα 4.2: Καμπύλες ροπής συναρτήσει της ταχύτητας περιστροφής

ονομαστική τιμή, η ταχύτητα ελέγχεται ώστε να ακολουθεί τη χαρακτηριστική βέλτιστης απόδοσης.

Έστω ότι το σύστημα βρίσκεται σε ισορροπία επί της καμπύλης βέλτιστης απόδοσης με παραγωγή χαμηλότερη της ονομαστικής, π.χ. στο σημείο A στα Σχ. 4.1 και 4.2. Μπορούμε να εξετάσουμε την ευστάθεια μικρών διαταραχών αυτού του σημείου λειτουργίας υποθέτοντας μικρές αποκλίσεις από την ισορροπία [LC00].

Θεωρώντας ακαριαίο τον έλεγχο του ρεύματος του δρομέα από το μετατροπέα πλευράς δρομέα, καθώς και ότι η ηλεκτρομαγνητική ροπή που καλείται να παράγει η ΑΓΔΤ προκύπτει από τη χαρακτηριστική ελέγχου των στροφών με βάση τη μετρούμενη ταχύτητα του δρομέα, η ΑΓΔΤ μπορεί να θεωρηθεί ως πηγή ροπής. Οι παραδοχές αυτές αντιστοιχούν στο αλγεβρικό μοντέλο της παραγράφου 3.2.1.

Η θεωρούμενη κατάσταση ισορροπίας αντιστοιχεί στο σημείο a του Σχ. 4.3α. Υποθέτουμε ότι η ταχύτητα του ανέμου είναι σταθερή, αλλά η ταχύτητα του δρομέα μειώνεται ελαφρά σε ω_m^b . Η μηχανική ροπή είναι τώρα T_b , ενώ η ηλεκτρομαγνητική ροπή, ακολουθώντας την χαρακτηριστική μέγιστου C_p , γίνεται $T_b' < T_b$. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ο δρομέας να επιταχυνθεί και να επιστρέψει στο σημείο a. Αντίστοιχα, μια μικρή αύξηση της ταχύτητας του δρομέα, θα οδηγήσει σε επιβράδυνση του δρομέα. Επομένως αν η ταχύτητα του δρομέα μεταβληθεί από την αρχική της τιμή ω_m^a , ο ανεμοκινητήρας επιστρέφει στο αρχικό σημείο λειτουργίας και άρα το σύστημα είναι ευσταθές.

Προκύπτει επομένως η συνθήκη ευστάθειας του ελέγχου στροφών της ανεμογεννήτριας:

$$\frac{\partial T_e}{\partial \omega_m} > \frac{\partial T_m}{\partial \omega_m} \quad (4.3)$$

δηλαδή η κλίση της χαρακτηριστικής της ηλεκτρομαγνητικής ροπής πρέπει να είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη κλίση της χαρακτηριστικής της μηχανικής ροπής (δεδομένου ότι η μηχανική ροπή επιταχύνει και η ηλεκτρομαγνητική επιβραδύνει το δρομέα). Αυτό άλλωστε προκύπτει και από τη διαφορική εξίσωση επιτάχυνσης (4.4), όπου όμως χρησιμοποιείται σύμβαση κινητήρα, δηλαδή η μηχανική ροπή επιβραδύνει (αντίστοιχα με την εξίσωση επιτάχυνσης 3.27):

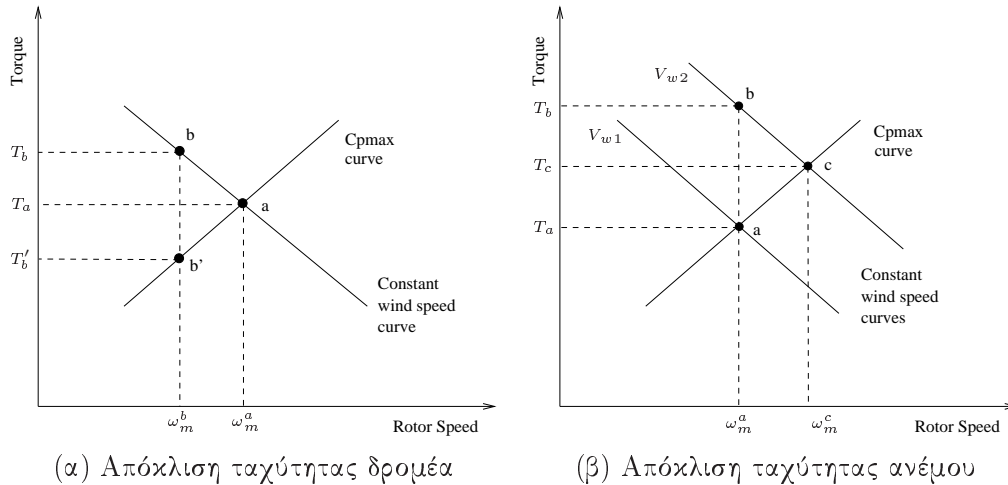
$$I \frac{d\omega_m}{dt} = T_e - T_m \quad (4.4)$$

Στην (4.4) με I συμβολίζεται η συνολική ροπή αδρανείας των στρεφόμενων μαζών.

Στη συνέχεια εξετάζεται η κατάσταση που φαίνεται στο Σχ. 4.3β. Ενώ το σύστημα βρίσκεται σε ισορροπία στο σημείο a, η ταχύτητα του ανέμου αυξάνεται απότομα (βηματικά) σε V_{w2} . Αμέσως μετά από αυτή τη διαταραχή, η ταχύτητα του δρομέα δεν έχει ακόμα αλλάξει λόγω της αδρανείας του δρομέα και, επομένως, η ηλεκτρομαγνητική ροπή παραμένει ίση με T_a , ενώ η μηχανική ροπή είναι $T_b > T_a$ και άρα ο δρομέας επιταχύνει. Καθώς η ταχύτητα του δρομέα αυξάνεται, η μηχανική ροπή μειώνεται, ενώ η ηλεκτρομαγνητική ροπή αυξάνεται ακολουθώντας τη χαρακτηριστική ελέγχου. Τελικά το σύστημα βρίσκει ένα νέο σημείο ισορροπίας στο σημείο c, δηλαδή παραμένει πάνω στη χαρακτηριστική ελέγχου των στροφών.

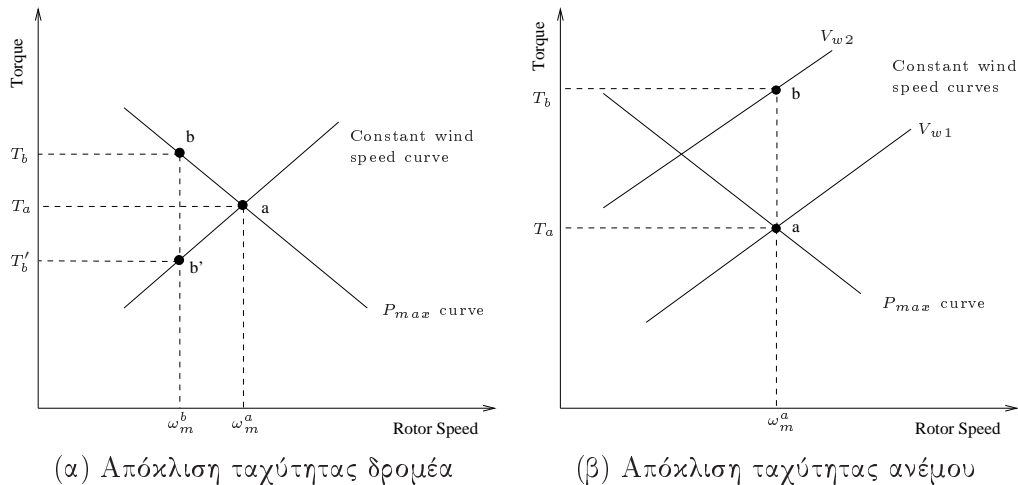
Σε υψηλές ταχύτητες ανέμου, αφού η ταχύτητα του δρομέα έχει φτάσει στην ονομαστική της τιμή, φαίνεται λογικό καταρχάς να ακολουθηθεί η καμπύλη BCD στα Σχ. 4.1 και 4.2, προκειμένου να εξασφαλιστεί η μέγιστη απολαβή ενέργειας. Εάν όμως ακολουθηθεί η καμπύλη σταθερής ισχύος P_{max} στην περιοχή CD, κοντά στο D, η δυναμική της ανεμογεννήτριας μπορεί να γίνει ασταθής, δεδομένου ότι, όπως φαίνεται στο Σχ. 4.2 (πιο έντονα στο Σχ. 4.2α), η κλίση της καμπύλης μέγιστης ισχύος έχει μικρότερη κλίση από την καμπύλη σταθερής ταχύτητας ανέμου.

Κεφάλαιο 4. Ευστάθεια ΑΓΔΤ σε σύνδεση με άπειρο ζυγό



Σχήμα 4.3: Ευστάθεια του ελέγχου στροφών επί της καμπύλης βέλτιστης απόδοσης

Ο μηχανισμός της αστάθειας σε αυτή την περίπτωση μπορεί να περιγραφεί με τη βοήθεια του Σχ. 4.4. Έστω η κατάσταση του Σχ. 4.4α, όπου το σύστημα αρχικά λειτουργεί στο σημείο *a*. Υποθέτοντας μικρή μείωση της ταχύτητας σε ω_m^b , η μηχανική ροπή γίνεται T_b' , ενώ η ηλεκτρομαγνητική ροπή αυξάνεται σε $T_b > T_b'$. Επομένως, η ταχύτητα του δρομέα μειώνεται και άλλο και το σύστημα είναι ασταθές. Αν η ταχύτητα του ανέμου αυξηθεί απότομα τότε, όπως φαίνεται στο Σχ. 4.4β, η μηχανική ροπή γίνεται μεγαλύτερη από την ηλεκτρομαγνητική, ο δρομέας επιταχύνει και η επιταχύνουσα ροπή αυξάνεται, δηλαδή το σύστημα είναι πάλι ασταθές.



Σχήμα 4.4: Αστάθεια του ελέγχου στροφών επί της καμπύλης βέλτιστης απόδοσης

Για την αποφυγή αυτού του είδους της αστάθειας, μια συνηθισμένη στρατηγική ελέγχου στις υψηλές ταχύτητες ανέμου, είναι να διατηρείται η ταχύτητα δρομέα σταθερή στην ονομαστική της τιμή, δηλαδή να ακολουθείται η ευθεία BD στα Σχ. 4.1 και 4.2. Σε αυτή την περίπτωση όμως, η ροπή δεν ορίζεται μονοσήμαντα για ονομαστική ταχύτητα περιστροφής και η επιθυμητή ηλεκτρομαγνητική ροπή δε μπορεί να προσδιοριστεί απευθείας από τη μέτρηση της ταχύτητας περιστροφής όπως προηγουμένως. Αυτή η στρατηγική ελέγχου μπορεί

να πραγματοποιηθεί με έναν PI ελεγκτή που κρατά σταθερή την ταχύτητα του δρομέα. Εναλλακτικά, η ευθεία BD μπορεί να τροποποιηθεί ελαφρά ώστε να έχει πεπερασμένη κλίση, όπως φαίνεται στο Σχ. 4.5 με διακεκομμένη γραμμή.

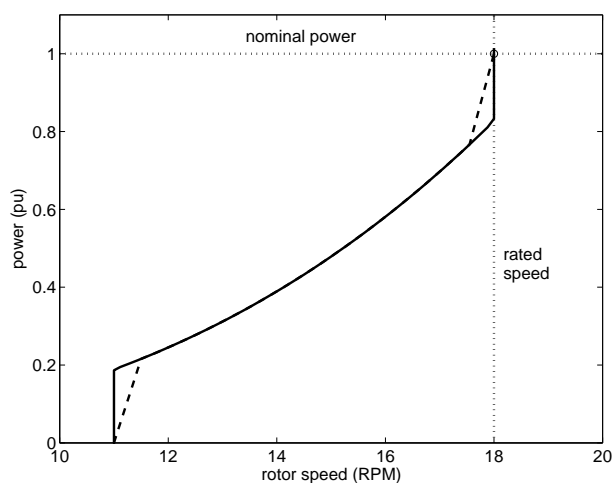
4.2 Ρυθμοί απόκρισης μοντέλου ΑΓΔΤ με απλοποιημένους βρόχους ελέγχου

4.2.1 Μεταβολή ιδιοτιμής της εξίσωσης κίνησης με το σημείο λειτουργίας

Θεωρούμε το αλγεβρικό μοντέλο της ΑΓΔΤ (βλ. παράγραφο 3.2.1) σε λειτουργία σταθερού (μοναδιαίου) συντελεστή ισχύος, με μοντέλο μιας στρεφόμενης μάζας και με σταθερή ονομαστική τερματική τάση.

Στο Σχ. 4.5 επαναλαμβάνεται με συνεχή γραμμή η καμπύλη στροφών - ισχύος για βέλτιστη απόδοση που προκύπτει χρησιμοποιώντας τα δεδομένα της ανεμογεννήτριας του Παραρτήματος Α.

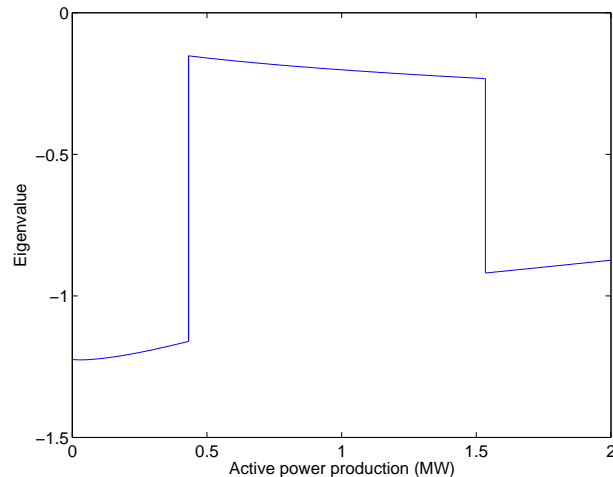
Στο Σχ. 4.5 ως βάση για την ανά μονάδα τιμή της ισχύος έχει ληφθεί η ονομαστική ισχύς P_{nom} της ανεμογεννήτριας). Οι στροφές είναι σε ΣΑΛ στην πλευρά της πτερωτής και η σύγχρονη ταχύτητα αντιστοιχεί σε 15 ΣΑΛ.



Σχήμα 4.5: Χαρακτηριστική ελέγχου στροφών-ισχύος

Με τις παραδοχές που έχουν γίνει (σταθερή τερματική τάση, “αλγεβρικό” μοντέλο, μία στρεφόμενη μάζα) και για παραγωγή κάτω της ονομαστικής (οπότε ο έλεγχος της γωνίας βήματος είναι ανενεργός), προκύπτει ένα σύστημα με μόνη μεταβλητή κατάστασης την ταχύτητα περιστροφής. Στο Σχ. 4.6 φαίνεται η μεταβολή της αντίστοιχης ιδιοτιμής με το σημείο λειτουργίας.

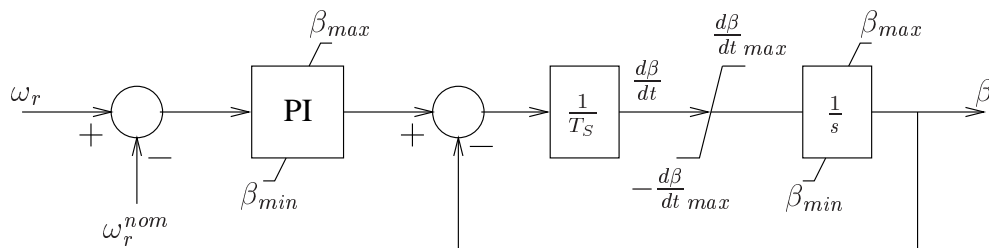
Διαπιστώνεται ότι, όπως αναμενόταν με βάση τα συμπεράσματα της ενότητας 4.1, το σύστημα είναι ευσταθές σε όλο το εύρος λειτουργίας. Επίσης, συγκρίνοντας με το Σχ. 4.5, παρατηρείται ότι ο εκθετικός ρυθμός απόκρισης είναι πιο γρήγορος όσο μεγαλύτερη είναι η κλίση της χαρακτηριστικής ροπής-στροφών. Αυτό είναι βέβαια αναμενόμενο αφού η ιδιοτιμή του συστήματος προκύπτει από τη διαφορά των κλίσεων των χαρακτηριστικών ηλεκτρομαγνητικής και μηχανικής ροπής.



Σχήμα 4.6: Μεταβολή ιδιοτιμής εξίσωσης κίνησης με το σημείο λειτουργίας

4.2.2 Επιλογή κερδών ρυθμιστή βήματος πτερυγίων

Για ταχύτητες ανέμου άνω της ονομαστικής, ο ρυθμιστής στροφών θεωρείται σε λειτουργία σταθερής ροπής (ίση με τη μέγιστη). Εισάγουμε στο αλγεβρικό μοντέλο (με το οποίο προέκυψε το Σχ. 4.6) τον ελεγκτή της γωνίας βήματος των πτερυγίων, όπως απεικονίζεται στο Σχ. 3.7 και επαναλαμβάνεται στο Σχ. 4.7, θεωρώντας τη χρονική σταθερά του σερβομηχανισμού ίση με $T_S = 0,5$ s. Για να επιλέξουμε τα κέρδη του PI ρυθμιστή της γωνίας βήματος,



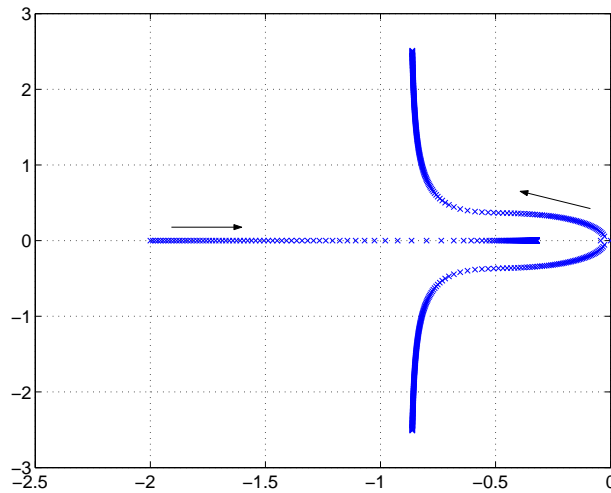
Σχήμα 4.7: Μοντέλο ρυθμιστή γωνίας βήματος

Πίνακας 4.2: Παράμετροι ρυθμιστή γωνίας βήματος

T_S	$\frac{d\beta}{dt}_{max}$	β_{min}	β_{max}
0,5 s	3°/s	0°	30°

κατασκευάζουμε τον τόπο ρίζων που φαίνεται στο Σχ. 4.8 για αναλογικό κέρδος K_p^p από 0 έως 300, θεωρώντας για το ολοκληρωματικό κέρδος $K_i^p = 0,3 \cdot K_p^p$ και ότι η γωνία βήματος στο σημείο ισορροπίας όπου γίνεται η γραμμικοποίηση είναι $\beta = 1^\circ$.

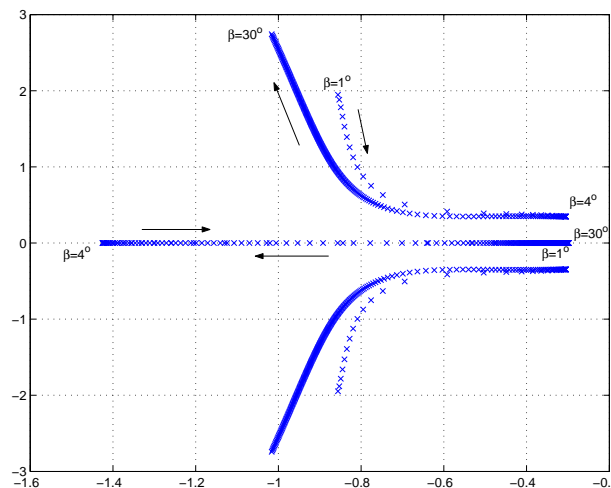
Παρατηρούμε ότι ο πόλος ανοιχτού βρόχου που βρίσκεται στο -0,044 συναντιέται με τον πόλο του PI ρυθμιστή (που ξεκινάει από το μηδέν) και προκύπτει ένας ταλαντωτικός ρυθμός που κινείται προς τα αριστερά, καθώς αυξάνεται το κέρδος. Σημειώνεται ότι ο πόλος ανοιχτού



Σχήμα 4.8: Τόπος ριζών μοντέλου ΑΓΔΤ για K_p^p από 0 έως 300. $K_i^p = 0,3K_p^p$ και $\beta = 1^\circ$

βρόχου αντιστοιχεί στην ιδιοτιμή του Σχ. 4.6 για παραγωγή 2 MW, αλλά με λειτουργία σταθερής ροπής, δηλ. οριζόντια χαρακτηριστική ροπής-στροφών. Εντωμεταξύ ο πόλος από την χρονική σταθερά του σερβομηχανισμού (στο -2) κινείται προς τα δεξιά τείνοντας στο μηδενικό στο -0,3 που έχει προκύψει από τον ΡΙ ρυθμιστή, αφού είναι $K_i^p = 0,3 \cdot K_p^p$.

Για την επιλογή του κέρδους πρέπει να ληφθεί υπόψη η συμπεριφορά και σε άλλα σημεία λειτουργίας, με διαφορετική γωνία βήματος, δεδομένου ότι η σχέση μεταξύ της μηχανικής ισχύος και της γωνίας βήματος είναι μη γραμμική. Για κέρδος $K_p^p = 200$ έχουμε ικανοποιητική απόσβεση σε ένα μεγάλο εύρος λειτουργίας, όπως φαίνεται στο Σχ. 4.9. Σημειώνεται



Σχήμα 4.9: Τόπος ριζών μοντέλου ΑΓΔΤ για $K_p^p = 200$ και β από 1° έως 30°

ότι τα αποτελέσματα είναι ίδια αν θεωρηθεί μοντέλο δύο μαζών (βλ. παράγραφο 3.2.6). Με τις παραμέτρους του Πίνακα 4.3 (όπου η σταθερά αδρανείας έχει μοιραστεί στο δρομέα της ΑΓΔΤ και το δρομέα της πτερωτής με αναλογία 1:4 αντίστοιχα) προκύπτει στρεπτικός ρυθμός ταλάντωσης του άξονα με συχνότητα 1,9 Hz και λόγο απόσβεσης περίπου $\zeta=0,1$. Οι ιδιοτιμές καθώς και οι συντελεστές συμμετοχής και τα δεξιά ιδιοδιανύσματα δίνονται στον

Κεφάλαιο 4. Ευστάθεια ΑΓΔΤ σε σύνδεση με άπειρο ζυγό

Πίνακας 4.3: Παράμετροι μηχανικού μοντέλου δύο στρεφόμενων μαζών

H_r	H_l	K_{sh}	D_{sh}
0,65 s	2,59 s	0,5 αμ	2,5 αμ

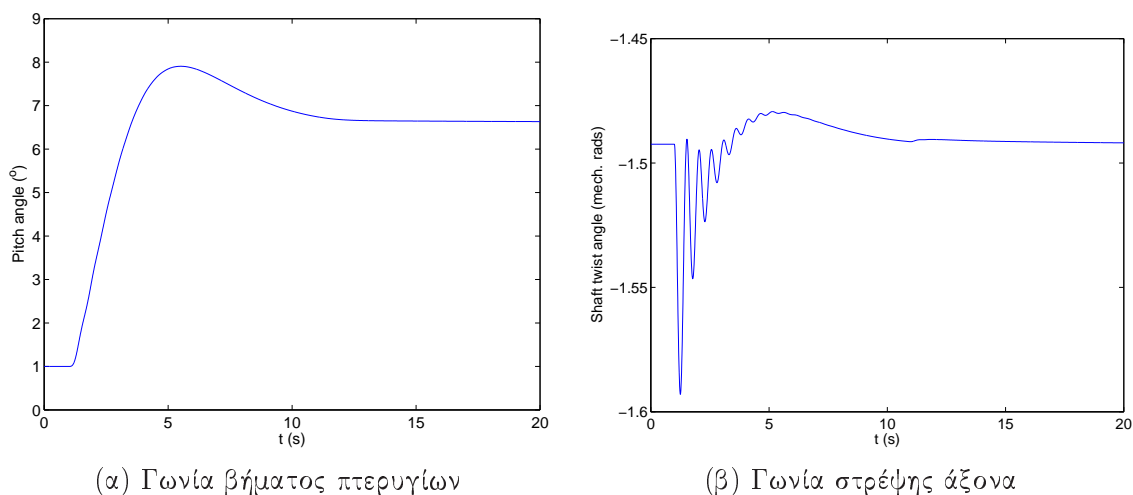
Πίνακα 4.4 για $\beta = 1^\circ$.

Πίνακας 4.4: Ιδιοτιμές και ιδιοδιανύσματα μοντέλου ΑΓΔΤ για $\beta = 1^\circ$

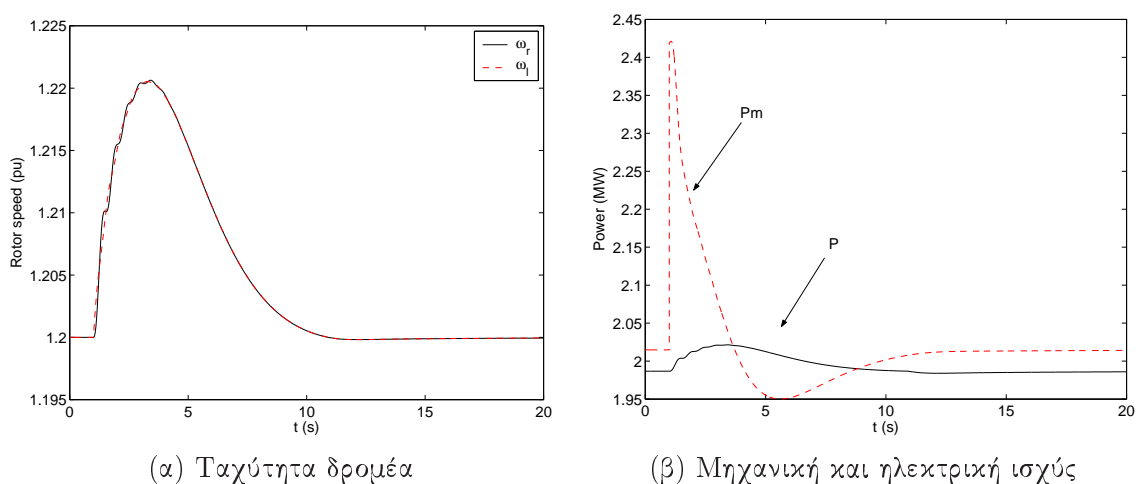
Ρυθμός	Μεταβλητές κατάστασης	Συντελεστές συμμετοχής	Δεξιό ιδιοδιάνυσμα
$-1,181 \pm j 12,04$ $f = 1,92$ Hz $\zeta = 9,8$ %	$\Delta\theta_m$	1,00	$0,68 \angle -8^\circ$
	ω_r	0,79	$0,02 \angle 88^\circ$
	ω_l	0,17	$0,00 \angle -92^\circ$
	β	0,04	$0,72 \angle 0^\circ$
	PI β	0,00	$0,11 \angle -8^\circ$
$-0,887 \pm j 1,98$ $f = 0,32$ Hz $\zeta = 41,0$ %	$\Delta\theta_m$	0,03	$0,03 \angle 1^\circ$
	ω_r	0,19	$0,01 \angle 68^\circ$
	ω_l	0,84	$0,01 \angle 67^\circ$
	β	1,00	$0,99 \angle 0^\circ$
	PI β	0,15	$0,16 \angle -46^\circ$
$-0,332$ $T = 3,01$ s	$\Delta\theta_m$	0,00	$0,00 \angle 180^\circ$
	ω_r	0,02	$0,01 \angle 180^\circ$
	ω_l	0,10	$0,01 \angle 180^\circ$
	β	0,02	$0,13 \angle 180^\circ$
	PI β	1,00	$0,99 \angle 0^\circ$

Στα Σχ. 4.10α και 4.10β φαίνεται η απόκριση της γωνίας βήματος των πτερυγίων και της γωνιακής παραμόρφωσης του άξονα αντίστοιχα σε μια βηματική αύξηση της ταχύτητας του ανέμου κατά 1 m/s, από 12,3 m/s (τιμή που προέκυψε από την αρχικοποίηση με ονομαστική ισχύ και γωνία βήματος 1°) σε 13,3 m/s. Στα Σχ. 4.11α-4.11β φαίνονται οι αντίστοιχες αποκρίσεις της ταχύτητας του δρομέα (ω_r η ταχύτητα της γεννήτριας και ω_l η ταχύτητα της πτερωτής) και της ισχύος (μηχανικής και ηλεκτρικής). Από τα αποκρίσεις παρατηρούμε ότι η βηματική αύξηση της ταχύτητας του ανέμου προκαλεί αντίστοιχα βηματική αύξηση της μηχανικής ισχύος, δεδομένου ότι χρησιμοποιείται η στατική σχέση (3.25). Από την άλλη η ηλεκτρομαγνητική ροπή και ισχύς δε μεταβάλλεται εφόσον δε μεταβληθεί η ταχύτητα του δρομέα της ΑΓΔΤ (βλ. Σχ. 3.4). Σαν αποτέλεσμα, οι ταχύτητες του δρομέα της ΑΓΔΤ και της πτερωτής αυξάνονται και ταλαντώνονται μεταξύ τους λόγω της ελαστικότητας του άξονα. Η ταλάντωση αυτή συχνότητας περίπου 2 Hz (όπως είδαμε στην ανάλυση ιδιοτιμών) φαίνεται καθαρά στη γωνία στρέψης του άξονα, εμφανίζεται όμως και στην απόκριση της ηλεκτρικής ισχύος. Σημειώνεται ότι καθώς το μοντέλο έχει απλοποιημένους βρόχους ελέγχου, οι μεταβολές της ταχύτητας του δρομέα της ΑΓΔΤ “περνάνε” απευθείας στην ηλεκτρική ισχύ (βλ. Σχ. 3.4).

Στη συνέχεια, υπό την επίδραση του ρυθμιστή της γωνίας βήματος, η μηχανική ισχύς μειώνεται και τελικά οι ταχύτητες και η ηλεκτρική ισχύς επιστρέφουν στην ονομαστική τους τιμή. Σημειώνεται ότι η διαφορά μεταξύ μηχανικής και ηλεκτρικής ισχύος στο Σχ. 4.11β οφείλεται στις ωμικές απώλειες του στάτη και του δρομέα της ΑΓΔΤ. Επίσης, η ηλεκτρική



Σχήμα 4.10: Απόκριση της γωνίας βήματος και της γωνιακής παραμόρφωσης του άξονα σε βηματική αύξηση της ταχύτητας του ανέμου



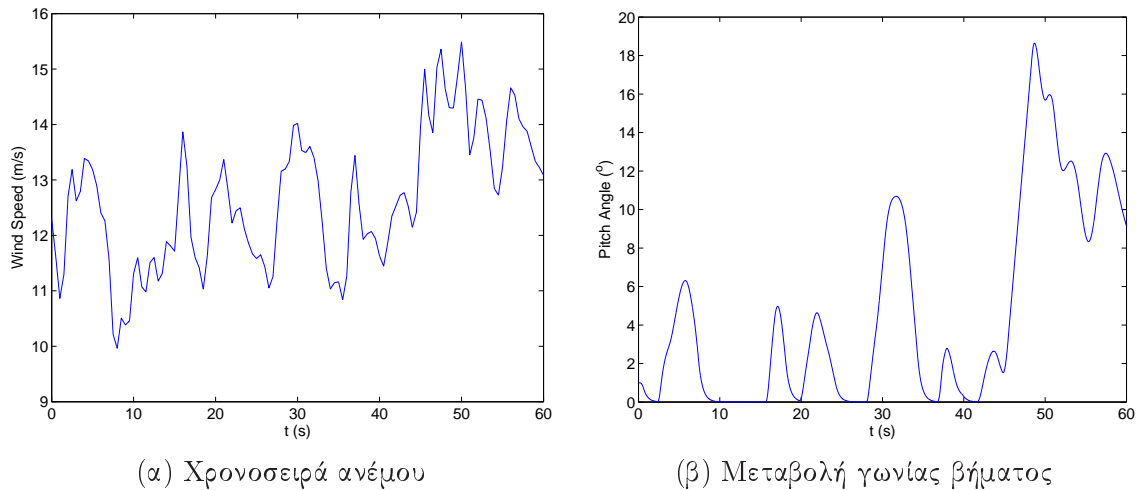
Σχήμα 4.11: Απόκριση ταχύτητας δρομέα και ισχύος σε βηματική αύξηση της ταχύτητας του ανέμου

ισχύς αρχικά είναι λίγο μικρότερη από 2 MW (1,99 MW), λόγω του σφάλματος που εισάγει στην αρχικοποίηση η υπόθεση ότι η ανεμογεννήτρια δουλεύει σε ονομαστικές στροφές (βλ. παράγραφο 3.2.7).

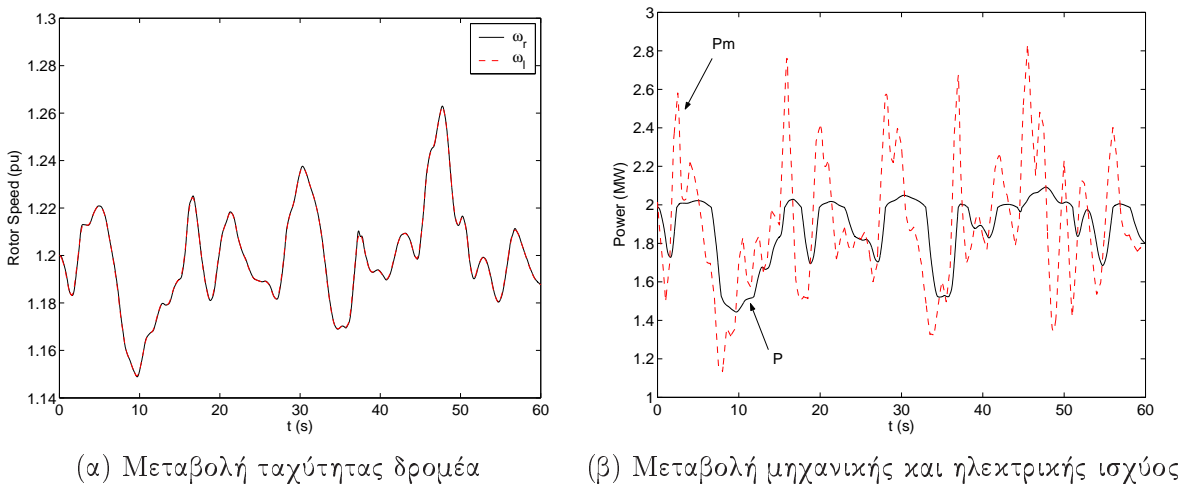
Στη συνέχεια εξετάζεται η απόκριση του μοντέλου σε μια χρονοσειρά ανέμου, η οποία έχει παραχθεί με τη μεθοδολογία που περιγράφεται στο [ΠαΣ97] και παραμέτρους $z_0 = 0,05$ m (παραμέτρος τραχύτητας εδάφους) και $z = 75$ m (ύψος στο οποίο υπολογίζεται η ταχύτητα του ανέμου). Η χρονοσειρά φαίνεται στο Σχ. 4.12α. Η ταχύτητα του ανέμου παίρνει τιμές κυρίως πάνω, αλλά και κάτω από την ονομαστική (12 m/s). Στα Σχ. 4.12β και 4.13α-4.13β φαίνονται οι αντίστοιχες αποκρίσεις της γωνίας βήματος των πτερυγίων, της ταχύτητας του δρομέα και της ισχύος.

Παρατηρούμε από την απόκριση της ισχύος, ότι η ανεμογεννήτρια λειτουργεί ως βαθυπερατό φίλτρο, πράγμα αναμενόμενο λόγω της αδράνειας της πτερωτής και του δρομέα και του γεγονότος ότι η ηλεκτρική ισχύς ακολουθεί τις μεταβολές της ταχύτητας περιστροφής.

Κεφάλαιο 4. Ευστάθεια ΑΓΔΤ σε σύνδεση με άπειρο ζυγό



Σχήμα 4.12: Χρονοσειρά ανέμου και αντίστοιχη απόκριση της γωνίας βήματος πτερυγίων



Σχήμα 4.13: Απόκριση ταχύτητας δρομέα και ισχύος σε χρονοσειρά ταχύτητας ανέμου

Με τις παραπάνω δοκιμές διαπιστώνεται ότι το μοντέλο του ρυθμιστή της γωνίας βήματος λειτουργεί ικανοποιητικά.

4.2.3 Ρύθμιση ελεγκτών μεταβατικού μοντέλου

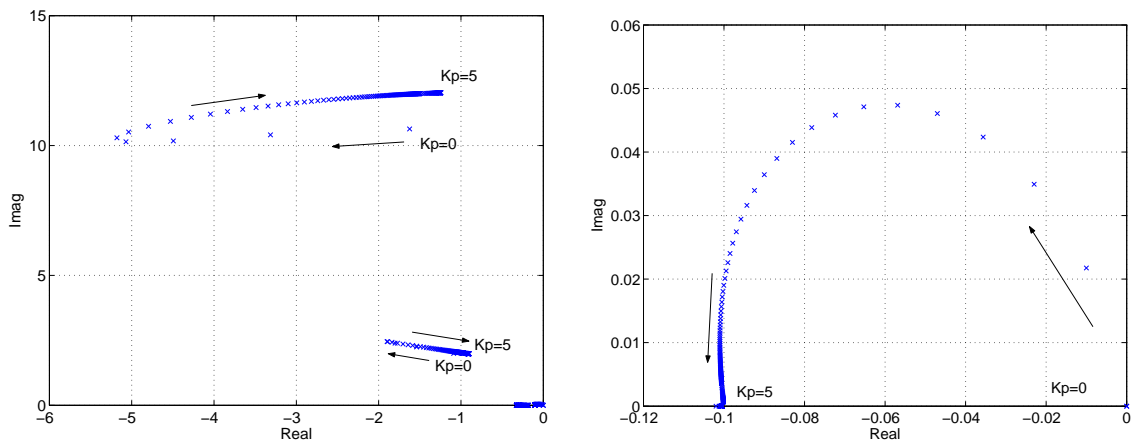
Όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 3.2.2, το μεταβατικό μοντέλο της ΑΓΔΤ περιλαμβάνει τις διαφορικές των ροών του δρομέα και τους αντίστοιχους PI ελεγκτές που οδηγούν τις συνιστώσες της τάσης του δρομέα στους άξονες d και q . Το μοντέλο αυτό χρησιμοποιήθηκε σε αυτή την εργασία κυρίως επειδή δίνει τη δυνατότητα για προσομοίωση βραχυκυκλώματος και συγκεκριμένα με λειτουργία ενεργού διάταξης βραχυκύκλωσης του δρομέα, οπότε μεταβατικά η μηχανή μετατρέπεται σε βραχυκυκλωμένο δρομέα (βλ. ενότητα 5.1). Όπως θα δούμε στη συνέχεια, χρησιμοποιήθηκαν αρκετά μεγάλα κέρδη, ώστε το μοντέλο που προκύπτει να είναι ισοδύναμο με το αλγεβρικό κατά την κανονική λειτουργία της ΑΓΔΤ. Κατ' επέκταση δεν κρίθηκε απαραίτητο να προστεθούν οι κατάλληλοι όροι αντιστάθμισης για την απόζευξη των δύο βρόχων ελέγχου.

Πίνακας 4.5: Ιδιοτιμές μεταβατικού μοντέλου ΑΓΔΤ για $\beta = 1^\circ$ και $K_i = 0,1 \cdot K_p$

Μεταβλητές κατάστασης ρυθμού απόκρισης	Αλγεβρικό μοντέλο	$K_p=1$	$K_p=5$
ψ_{dr}, ψ_{qr}		$-1789 \pm j 31,89$	$-8877 \pm j 407,4$
V_{dc}		-706,2	-3531
$\Delta\theta_m, \omega_r, \omega_l$	$-1,181 \pm 12,04$	$-1,5 \pm j 12$	$-1,245 \pm j 12,03$
$\beta, \omega_l, \omega_r, \text{PI } \beta$	$-0,887 \pm 1,98$	$-0,968 \pm j 2,01$	$-0,903 \pm j 1,98$
PI β	-0,332	-0,303	-0,3258
PI $i_{dr}, \text{PI } i_{qr}$		$-0,1 \pm j 0$	$-0,1 \pm j 0$
PI V_{dc}		-0,1	-0,1

Στη συνέχεια εξετάζουμε το μεταβατικό μοντέλο της ΑΓΔΤ με τους ελεγχτές όπως παρουσιάζονται στην παράγραφο 3.2.3. Επίσης αναπαριστάται η δυναμική του πυκνωτή συνεχούς και η τάση του ρυθμίζεται από έναν ΠΙ ρυθμιστή, σύμφωνα και με όσα αναφέρθηκαν στην παράγραφο 3.2.4. Χρησιμοποιείται ο ρυθμιστής γωνίας βήματος των πτερυγίων όπως σχεδιάστηκε στην παράγραφο 4.2.2, δηλαδή με κέρδη $K_p^p=200$ και $K_i^p=60$. Τέλος, χρησιμοποιείται μοντέλο δύο στρεφόμενων μαζών, όπως στην παράγραφο 4.2.2.

Συνολικά στο μοντέλο υπάρχουν 9 μεταβλητές κατάστασης και τρεις ΠΙ ρυθμιστές (δύο για τις συνιστώσες του ρεύματος του δρομέα και ένας για τη συνεχή τάση). Θεωρούμε ότι τα κέρδη είναι ίδια και στους τρεις ρυθμιστές με σταθερή αναλογία $K_i = 0,1 \cdot K_p$, όπου K_i το ολοκληρωματικό και K_p το αναλογικό κέρδος. Αυξάνοντας σταδιακά το κέρδος K_p και για τους τρεις ρυθμιστές, προκύπτει ο τόπος ριζών του Σχ. 4.14. Επίσης στον Πίνακα



Σχήμα 4.14: Τόπος ριζών μεταβατικού μοντέλου ΑΓΔΤ για K_p από 0 έως 5 και $K_i = 0,1 \cdot K_p$

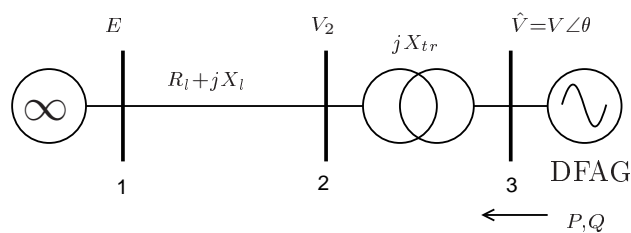
4.5 φαίνονται οι ιδιοτιμές για δύο τιμές του K_p . Συγκρίνοντας με το αλγεβρικό μοντέλο, παρατηρούμε ότι ουσιαστικά για τιμές του κέρδους K_p κοντά στο 5, το μεταβατικό μοντέλο είναι ισοδύναμο με το αλγεβρικό. Σημειώνεται ότι οι τρεις πόλοι που εμφανίστηκαν λόγω των ολοκληρωτών των τριών ΠΙ ελεγκτών που προστέθηκαν στο σύστημα ακυρώνονται με τα αντίστοιχα μηδενικά στο -0,1.

4.3 Ρυθμοί απόκρισης μοντέλου με λεπτομερείς βρόχους ελέγχου

4.3.1 Προσομοίωση στο PSS/E και επαλήθευση μοντέλου Simulink

Σε αυτή την παράγραφο παρουσιάζεται η επαλήθευση του μοντέλου με λεπτομερή παράσταση των ελεγκτών για την ανεμογεννήτρια (αιολικό πάρκο) με ΑΓΔΤ που παρουσιάστηκε στην ενότητα 3.3 και που αναπτύχθηκε στο Simulink στο πλαίσιο αυτής της εργασίας. Η επαλήθευση έγινε συγκρίνοντας αποκρίσεις και ιδιοτιμές με το αντίστοιχο μοντέλο στο πρόγραμμα PSS/E (έκδοση 30 [KSP06a]).

Το σύστημα που χρησιμοποιείται αποτελείται από ένα αιολικό πάρκο με ΑΓΔΤ που συνδέεται σε άπειρο ζυγό όπως φαίνεται στο Σχ. 4.15. Το αιολικό παρκό αναπαριστάται



Σχήμα 4.15: Σύστημα μιας ΑΓΔΤ - άπειρου ζυγού

με μια ισοδύναμη μηχανή και ένα μετασχηματιστή, δηλ. αμελείται η ισοδύναμη σύνθετη αντίσταση του εσωτερικού δικτύου του πάρκου. Οι παράμετροι του συστήματος δίνονται στον Πίνακα 4.6. S_{nom} και P_{nom} είναι η ονομαστική φαινόμενη και ενεργός ισχύς αντίστοιχα της ΑΓΔΤ, ενώ P_0 και Q_0 είναι η ενεργός και άεργος παραγωγή της ΑΓΔΤ στο θεωρούμενο σημείο λειτουργίας. Οι σύνθετες αντιστάσεις δίνονται σε α.μ. σε βάση S_{nom} . Δεδομένου ότι

Πίνακας 4.6: Παράμετροι του συστήματος μιας ΑΓΔΤ - άπειρου ζυγού

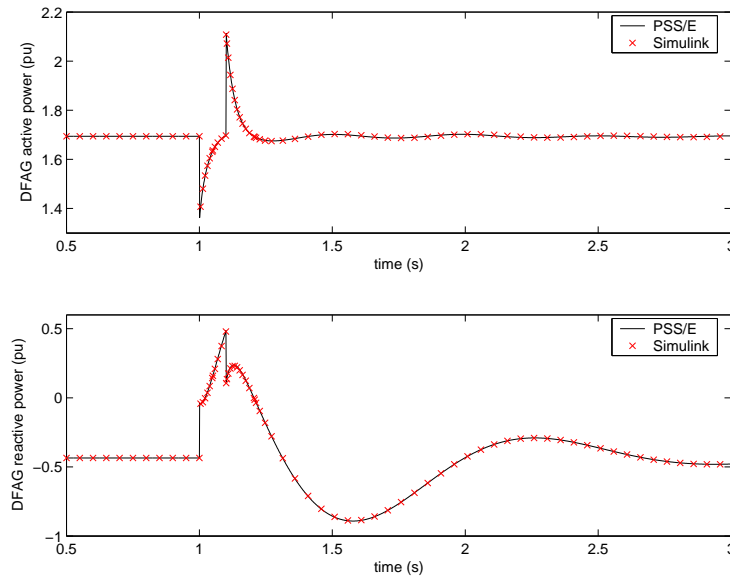
S_{nom} (MVA)	P_{nom} (MW)	P_0 (MW)	Q_0 (MVar)
213,4	192	169,4	-43,6
R_l	X_l	X_{tr}	E
0,02	0,0243	0,0557	1,0164

ο Πίνακας A.3 με τις παραμέτρους του μοντέλου της ΑΓΔΤ αναφέρεται σε ανεμογεννήτρια ισχύος 1,5 MW, το αιολικό πάρκο θεωρείται ότι αποτελείται από 128 όμοιες μηχανές.

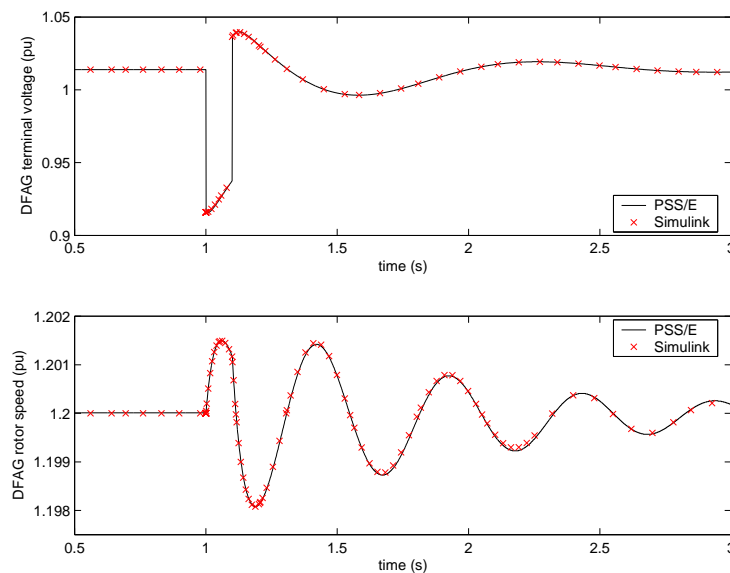
Η διαταραχή που προσομοιώνεται είναι ένα τριφασικό βραχυκύκλωμα στο ζυγό 2 με αντίδραση προς γη ίση με 0,1 α.μ. σε βάση 100 MVA. Το βραχυκύκλωμα διατηρείται για 100 ms και η ΑΓΔΤ είναι σε λειτουργία σταθερού συντελεστή ισχύος με έλεγχο της τερματικής τάσης, (επιλογές PF και (a) στο Σχ. 3.11), ενώ η ταχύτητα ανέμου θεωρείται σταθερή.

Σημειώνεται ότι καθώς στο συγκεκριμένο μοντέλο αμελούνται (και) τα μεταβατικά του δρομέα με την υπόθεση ότι ο μετατροπέας ελέγχει πλήρως το ρεύμα, δεν αναπαριστάται με ακρίβεια η συμπεριφορά της μηχανής σε βραχυκύκλωμα. Αυτή η παρατήρηση συμβαδίζει με τις διαφορές που παρουσιάζονται στην εργασία [ME08] μεταξύ προσομοίωσης και μετρήσεων από μία απότομη πτώσης τάσης σε ένα αιολικό πάρκο. Η προσομοίωση σε αυτή την παράγραφο έχει στόχο τη διέγερση των ρυθμών απόκρισης, προκειμένου να γίνει η επαλήθευση του μοντέλου που αναπτύχθηκε στο Simulink. Στο Σχ. 4.16 φαίνονται οι αποκρίσεις της

ενεργού και της αέργου ισχύος της ΑΓΔΤ και στο Σχ. 4.17 οι αποκρίσεις της τερματικής τάσης και της ταχύτητας του δρομέα. Παρατηρούμε ότι υπάρχει ταύτιση των αποκρίσεων μεταξύ PSS/E και Simulink.



Σχήμα 4.16: Παραγωγή ενεργού και αέργου ισχύος της ΑΓΔΤ



Σχήμα 4.17: Τερματική τάση και ταχύτητα δρομέα της ΑΓΔΤ

Η αντίστοιχη σύγκριση των ιδιοτιμών φαίνεται στον Πίνακα 4.7. Στο κάτω τμήμα του Πίνακα είναι οι ιδιοτιμές που σχετίζονται με τη γωνία βήματος. Επειδή στο Simulink η γωνία βήματος περιορίζεται στην ελάχιστη τιμή της κατά την προσομοίωση, ο έλεγχος βήματος και ο ελεγκτής αντιστάθμισης βήματος είναι ανενεργοί και οι σχετικές ιδιοτιμές δεν υπολογίζονται. Σημειώνεται επίσης, ότι στο PSS/E η γωνία βήματος αρχικοποιείται στις 0,704 μοίρες, ενώ στο Simulink, καθώς το σφάλμα εισόδου του ελεγκτή αντιστάθμισης γωνίας

Πίνακας 4.7: Ιδιοτιμές μοντέλου ΑΓΔΤ με έλεγχο συντελεστή ισχύος

PSS/E		Simulink		Ρυθμός απόκρισης
Πραγμ.	Φαντ.	Πραγμ.	Φαντ.	
-1,124	12,50	-1,127	12,50	στρεπτική ταλάντωση άξονα
-1,696	4,64	-1,690	4,64	έλεγχος αέργου ισχύος
-0,165	0,23	-0,189	0,19	έλεγχος στροφών
-51,084		-51,084		καθυστέρηση $T_{con} (I_P)$
-47,348		-47,356		καθυστέρηση $T_{con} (E''_q)$
-27,966		-27,976		καθυστέρηση γωνίας PLL
-17,219		-17,224		καθυστέρηση T_{pc}
-0,200		-0,200		καθυστέρηση T_w
-3,322	0,01	-3,324		καθυστέρηση γωνίας βήματος & φίλτρο P, T_p
-0,035				αντιστάθμιση γωνίας βήματος
0,000				ολοκληρωτής ελέγχου γωνίας βήματος

βήματος είναι αρνητικό (βλ. Σχ. 3.12), η γωνία βήματος περιορίζεται στην ελάχιστη τιμή της (0 μοίρες).

Οι ταλαντωτικοί ρυθμοί απόκρισης της ΑΓΔΤ είναι:

- Ο στρεπτικός ρυθμός του άξονα με συχνότητα 1,9 Hz και λόγο απόσβεσης $\zeta = 9\%$. Αυτός ο ρυθμός φαίνεται καθαρά στην απόκριση της ταχύτητας του δρομέα (Σχ. 4.17), διακρίνεται όμως και στην απόκριση της ενεργού ισχύος (Σχ. 4.16).
- Ο ρυθμός ελέγχου αέργου ισχύος με συχνότητα 0,74 Hz και λόγο απόσβεσης $\zeta = 34\%$. Αυτός ο ρυθμός προκύπτει από τους δύο ολοκληρωτές σε σειρά στον ελεγκτή αέργου ισχύος (βλ. Σχ. 3.11) και εμφανίζεται στη σχετικά αργή, ταλαντωτική απόκριση της αέργου ισχύος της ΑΓΔΤ (Σχ. 4.16) και την αντίστοιχη ταλάντωση της τάσης (Σχ. 4.17).
- Ο ρυθμός ελέγχου στροφών που είναι πολύ αργός (0,03 Hz) και με μεγάλη απόσβεση ($\zeta = 70\%$).

Ο στρεπτικός ρυθμός και ο ρυθμός ελέγχου αέργων βρίσκονται στο εύρος των ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων των σύγχρονων γεννητριών (0,1-2 Hz) [Kun94], γεγονός που υποδεικνύει ότι υπάρχει ενδεχόμενο αλληλεπίδρασης. Όσον αφορά στους πραγματικούς ρυθμούς, αυτοί είναι γρήγοροι και ευσταθείς.

Οι ιδιοτιμές με την ΑΓΔΤ με έλεγχο τάσης (επιλογή VC στο Σχ. 3.11) φαίνονται στον Πίνακα 4.8. Η ελεγχόμενη τάση είναι αυτή του ζυγού 2 του Σχ. 4.15. Σε αυτή την περίπτωση υπάρχουν τρεις ιδιοτιμές που σχετίζονται με τον έλεγχο της αέργου ισχύος: Ο ταλαντωτικός ρυθμός ελέγχου αέργων από την αλληλεπίδραση των δύο ολοκληρωτών σε σειρά (ο οποίος έχει χαμηλότερη απόσβεση σε σχέση με την περίπτωση με έλεγχο συντελεστή ισχύος) και μια αργή πραγματική ιδιοτιμή που αντιστοιχεί στον πιο αργό έλεγχο τάσης του αιολικού πάρκου (Supervisory voltage control).

Από τη σύγκριση των αποκρίσεων και των ιδιοτιμών, μπορούμε να συμπεράνουμε ότι το μοντέλο στο Simulink έχει υλοποιηθεί με επαρκή ακρίβεια και αναπαριστά ικανοποιητικά τη δυναμική συμπεριφορά του συγκεκριμένου μοντέλου ΑΓΔΤ.

Πίνακας 4.8: Ιδιοτιμές του μοντέλου ΑΓΔΤ με έλεγχο τάσης

PSS/E		Simulink		Ρυθμός απόκρισης
Πραγμ.	Φαντ.	Πραγμ.	Φαντ.	
-1,124	12,50	-1,127	12,50	στρεπτική ταλάντωση άξονα
-0,729	4,95	-0,732	4,95	έλεγχος αέργου ισχύος
-0,165	0,23	-0,189	0,19	έλεγχος ταχύτητας
-51,085		-51,084		καθυστέρηση $T_{con} (I_P)$
-47,329		-47,336		καθυστέρηση $T_{con} (E_q'')$
-27,945		-27,956		καθυστέρηση γωνίας PLL
-22,806		-22,793		καθυστέρηση T_r
-16,941		-16,937		καθυστέρηση T_{pc}
-15,134		-15,201		καθυστέρηση T_v
-10,881		-10,821		καθυστέρηση T_c
-0,200		-0,200		καθυστέρηση T_w
-0,087		-0,088		έλεγχος τάσης πάρκου
-3,320				καθυστέρηση γωνίας βήματος
-0,036				αντιστάθμιση γωνίας βήματος
0,000				ολοκληρωτής ελέγχου γωνίας βήματος

4.3.2 Επίδραση καθυστέρησης βρόχου κλειδώματος φάσης

Όπως είδαμε, στο μοντέλο με τους λεπτομερείς βρόχους ελέγχου αναπαριστάται ο βρόχος κλειδώματος φάσης, οπότε λαμβάνεται υπόψη η καθυστέρηση στην εκτίμηση της γωνίας της τερματικής τάσης. Η καθυστέρηση αυτή έχει σημασία εφόσον ο έλεγχος δεν γίνεται στο πλαίσιο που ορίζει η στιγμιαία γωνία του βρόχου κλειδώματος φάσης.

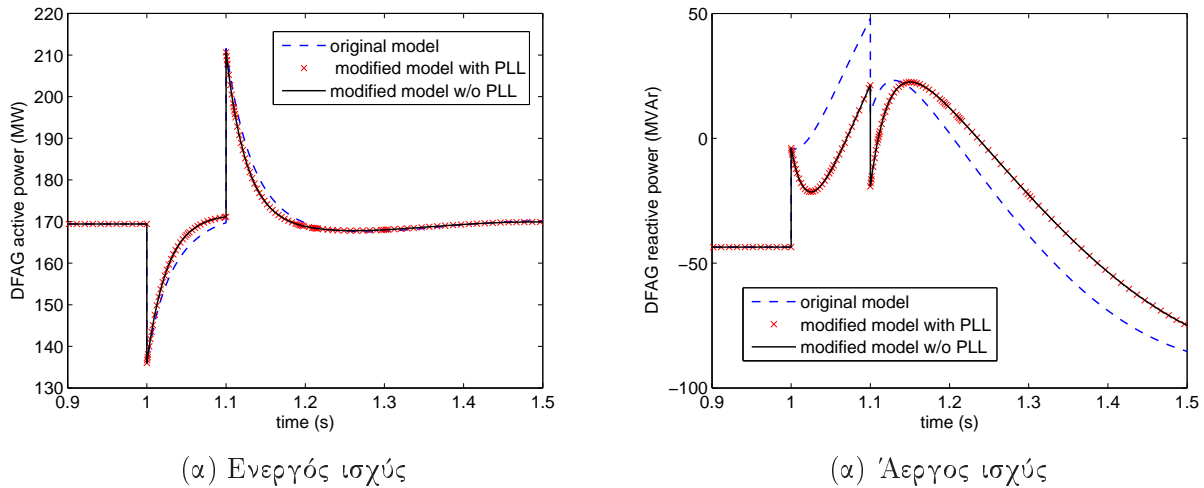
Για παράδειγμα, όπως είδαμε από τις εξισώσεις (3.40, 3.41), το ρεύμα I_P αντιστοιχεί στον όρο $\left(\frac{X_M}{X_{ss}} i_{qr} - i_{qis}\right)$, όπου οι συνιστώσες i_{qr} και i_{qis} αναφέρονται στον άξονα q' του πλαισίου που ορίζει η γωνία του βρόχου κλειδώματος φάσης στο Σχ. 3.10, αφού για το μετασχηματισμό στο σύγχρονο πλαίσιο του δικτύου χρησιμοποιείται αυτή η γωνία. Η επιθυμητή τιμή όμως του I_P προκύπτει διαιρώντας απλά την επιθυμητή ενεργό ισχύ P_{ord} με το μέτρο της τερματικής τάσης, δηλαδή σε πλαίσιο που θεωρείται ευθυγραμμισμένο με την τερματική τάση. Αν στον έλεγχο μπορεί να χρησιμοποιηθεί το ίδιο πλαίσιο (που ορίζει η γωνία του βρόχου κλειδώματος φάσης), τότε το σφάλμα της γωνίας δε θα παίζει ρόλο.

Στη συνέχεια θα δείξουμε ότι δεν υπάρχει επίδραση του PLL, εφόσον μετατρέψουμε το μοντέλο με λεπτομερείς βρόχους ελέγχου ως εξής:

1. Η έξοδος του ρυθμιστή αέργου ισχύος του Σχ. 3.11 είναι η επιθυμητή άεργος ισχύς Q^* αντί του E_{qcmd}'' . Σημειώνεται ότι η επιθυμητή άεργος ισχύς Q^* δεν είναι η Q_{cmd} του Σχ. 3.11, αλλά η άεργος ισχύς που καλείται να διοχετεύσει στο δίκτυο το μοντέλο της ΑΓΔΤ του Σχ. 3.9. Βέβαια σε αυτή την περίπτωση θα μπορούσαμε να παρακάμψουμε τους δύο ολοκληρωτές του Σχ. 3.11 (με τα κέρδη K_{Qi} , K_{Vi}), αλλά αυτό δεν έχει σημασία για το σκοπό αυτής της δοκιμής και επίσης προτιμήθηκε να μείνει το σχήμα ελέγχου όσο το δυνατόν πλησιέστερα στο πρωτότυπο.
2. Τα E_{qcmd}'' και I_{Pcmd} υπολογίζονται από τις σχέσεις (3.40, 3.41), λαμβάνοντας υπόψη και την άεργο ισχύ που καταναλώνεται στην εγκαρσία αντίδραση X_{eq} .
3. Οι καθυστερήσεις T_{con} έπονται του μετασχηματισμού στο πλαίσιο xy του δικτύου.

Κεφάλαιο 4. Ευστάθεια ΑΓΔΤ σε σύνδεση με άπειρο ζυγό

Στα Σχ. 4.3.2α και 4.3.2β φαίνονται αποκρίσεις της ενεργού και αέργου ισχύος αντίστοιχα της ΑΓΔΤ. Οι αποκρίσεις με τη διακεκομμένη γραμμή είναι ίδιες με αυτές του Σχ. 4.16 και αντιστοιχούν στο αρχικό μοντέλο. Οι άλλες δύο καμπύλες σε κάθε σχήμα αντιστοιχούν στο μοντέλο μετά τις τροποποιήσεις που αναφέρθηκαν για τον έλεγχο με και χωρίς μοντέλο του βρόχου κλειδώματος φάσης. Στη δεύτερη περίπτωση, ο βρόχος θεωρείται ακαριαίος. Δεδομένου ότι οι δύο καμπύλες ταυτίζονται, πράγματι το σφάλμα του PLL στην εκτίμηση της γωνίας της τερματικής τάσης δεν έχει σημασία μετά τις τροποποιήσεις που αναφέρθηκαν.



Σχήμα 4.18: Σύγκριση αποκρίσεων μοντέλου ΑΓΔΤ με και χωρίς PLL

Σημειώνεται ότι αυτός ο τύπος ελέγχου χρησιμοποιεί την ισοδύναμη αντίδραση X_{eq} και όχι μόνο ηλεκτρικά μεγέθη (π.χ. τερματική τάση και ρεύμα), όπως ο έλεγχος των μετατροπέων που είναι απευθείας συνδεδεμένοι στο δίκτυο [Νάν09]. Στη συνέχεια χρησιμοποιείται το αρχικό μοντέλο με την παράσταση του βρόχου κλειδώματος φάσης.

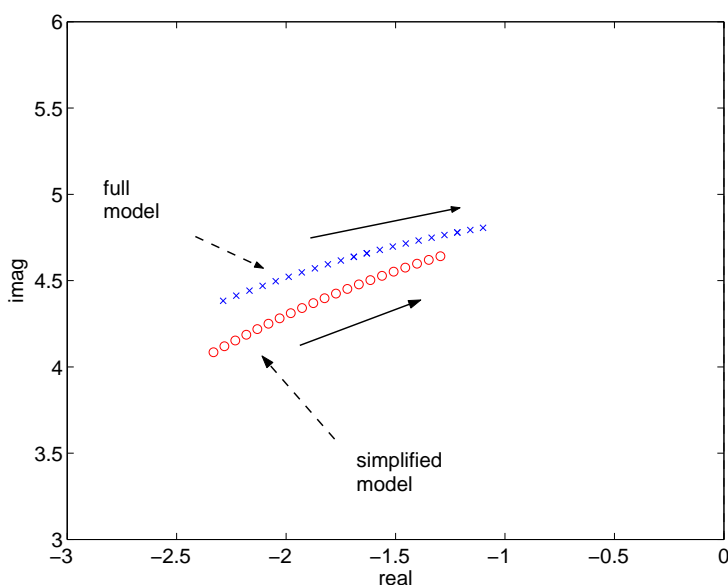
4.4 Ευστάθεια ελέγχου αέργου ισχύος

Στην παράγραφο 4.3.1 έγινε επαλήθευση του μοντέλου Simulink της ΑΓΔΤ με λεπτομερείς βρόχους ελέγχου και είδαμε τους ρυθμούς απόκρισης του μοντέλου αυτού. Το σύστημα που χρησιμοποιήθηκε ήταν το σύστημα μηχανή - άπειρος ζυγός του Σχ. 4.15.

Στην ενότητα αυτή εξετάζουμε την επίδραση της ισχύος βραχυκύκλωσης του σημείου σύνδεσης του αιολικού πάρκου στις ιδιοτιμές της ΑΓΔΤ, μειώνοντας σταδιακά τη σύνθετη αντίσταση της γραμμής διασύνδεσης του Σχ. 4.15 από 200% έως 0% της αρχικής της τιμής (δηλαδή αυξάνεται η ισχύς βραχυκύκλωσης στο σημείο σύνδεσης του αιολικού πάρκου), χωρίς να αλλάξουμε τίποτα άλλο σε σχέση με το αρχικό σημείο λειτουργίας που εξετάστηκε στην παράγραφο 4.3.1. Σε όλες τις περιπτώσεις, ο έλεγχος της τερματικής τάσης της ΑΓΔΤ (βλ. Σχ. 3.11) θεωρείται ενεργός, οπότε η ΑΓΔΤ εισάγει στο σύστημα τον ταλαντωτικό ρυθμό ελέγχου αέργου ισχύος που είδαμε στην παράγραφο 4.3.1.

4.4.1 Έλεγχος συντελεστή ισχύος

Θεωρώντας τη μηχανή σε λειτουργία ρύθμισης σταθερού συντελεστή ισχύος με ενεργοποιημένο τον έλεγχο τερματικής τάσης και μειώνοντας τη σύνθετη αντίσταση της γραμμής, λαμβάνουμε τον τόπο ριζών του συστήματος, γραμμικοποιώντας αριθμητικά το σύστημα. Στο Σχ. 4.19 φαίνεται ότι η ιδιοτιμή του ταλαντωτικού ελέγχου αέργου ισχύος κινείται προς τα δεξιά (με μπλε x). Ο ρυθμός του άξονα και ο ρυθμός ελέγχου των στροφών δεν μετακινούνται και δεν εμφανίζονται στο σχήμα. Στη συνέχεια διερευνάται ο μηχανισμός μείωσης



Σχήμα 4.19: Μεταβολή ιδιοτιμής του ταλαντωτικού ρυθμού ελέγχου αέργου ισχύος καθώς μειώνεται η σύνθετη αντίσταση της γραμμής από 200% σε 0% της αρχικής της τιμής. Λειτουργία ρύθμισης του συντελεστή ισχύος.

της απόσβεσης της ταλάντωσης ελέγχου αέργων καθώς η ΑΓΔΤ πλησιάζει τον άπειρο ζυγό με τη χρήση ενός απλοποιημένου μοντέλου, το οποίο επιτρέπει αναλυτική γραμμικοποίηση.

Αμελώντας τις καθυστερήσεις και υποθέτοντας σταθερή ταχύτητα ανέμου, η μηχανή παράγει ουσιαστικά σταθερή ενεργό ισχύ, ενώ ο έλεγχος της αέργου ισχύος περιγράφεται από τις παρακάτω διαφορικές εξισώσεις, οι οποίες προκύπτουν από το Σχ. 3.11.

Κεφάλαιο 4. Ευστάθεια ΑΓΔΤ σε σύνδεση με άπειρο ζυγό

Ολοκληρωματικός έλεγχος αέργου ισχύος αναφοράς:

$$\dot{V}_{ref} = K_{Qi}(Q_{cmd} - Q) \quad (4.5)$$

Ολοκληρωματικός έλεγχος τερματικής τάσης:

$$\dot{E}_q'' = K_{Vi}(V_{ref} - V) \quad (4.6)$$

Ισχύει επίσης η αλγεβρική σχέση (3.47) μεταξύ Q , V και E_q'' , εφόσον αμελείται και η καθυστέρηση του PLL:

$$Q = V \frac{E_q'' - V}{X_{eq}} \quad (4.7)$$

Αφού ελέγχεται ο συντελεστής ισχύος και η ενεργός ισχύς είναι σταθερή, τότε η Q_{cmd} είναι σταθερή (βλ. Σχ. 3.11). Αντικαθιστώντας την (4.7) στην (4.5) το σύστημα γίνεται:

$$\begin{aligned} \dot{V}_{ref} &= -\frac{K_{Qi}}{X_{eq}} (VE_q'' - V^2) + K_{Qi}Q_{cmd} \\ \dot{E}_q'' &= K_{Vi}(V_{ref} - V) \end{aligned}$$

Γραμμικοποιώντας γύρω από το σημείο ισορροπίας, προκύπτει ο πίνακας κατάστασης:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{K_{Qi}}{X_{eq}}V_o - \frac{K_{Qi}}{X_{eq}}(E_{qo}'' - 2V_o)\frac{\partial V}{\partial E_q''}\Big|_o \\ K_{Vi} & -K_{Vi}\frac{\partial V}{\partial E_q''}\Big|_o \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

Παρατηρούμε ότι η ευαισθησία $\partial V/\partial E_q''$ είναι ανάλογη της απόσβεσης του δευτεροβάθμιου συστήματος με τον πίνακα κατάστασης της (4.8). Επίσης αυξανόμενου του K_{Qi} αυξάνεται η φυσική συχνότητα της ταλάντωσης.

Ορίζοντας $R = R_l$ και $X = X_l + X_{tr}$, γράφουμε τη γνωστή διτετράγωνη εξίσωση για το δίκτυο του Σχ. 4.15:

$$(V^2)^2 - [2(PR + QX) + E^2]V^2 + (R^2 + X^2)(P^2 + Q^2) = 0 \quad (4.9)$$

Αντικαθιστώντας το Q από την (4.7) στην (4.9) προκύπτει:

$$\begin{aligned} f(V, E_q'') &= [X_{eq}^2 + X(X_{eq} + X) + R^2]V^4 - [X_{eq}X + 2(R^2 + X^2)E_q''V^3 \\ &+ [E_q''^2(R^2 + X^2) - X_{eq}(2PR + E^2)]V^2 + X_{eq}^2(R^2 + X^2)P^2 = 0 \end{aligned} \quad (4.10)$$

Γράφοντας το ολικό διαφορικό της παραπάνω σχέσης f

$$df = \frac{\partial f}{\partial V}dV + \frac{\partial f}{\partial E_q''}dE_q'' = 0$$

παίρνουμε την παρακάτω σχέση για την ευαισθησία της τάσης ως προς το σήμα ελέγχου:

$$\frac{dV}{dE_q''} = -\frac{\partial f/\partial E_q''}{\partial f/\partial V} = \frac{N}{D} \quad (4.11)$$

όπου:

$$N = -2V^2(R^2 + X^2)E_q'' + 2V^3(R^2 + X^2) + 2V^3XX_{eq}$$

Πίνακας 4.9: Ιδιοτιμές απλοποιημένου μοντέλου ΑΓΔΤ με ρύθμιση του συντελεστή ισχύος

Ρυθμός	Απλοποιημένο μοντέλο	Πλήρες μοντέλο
έλεγχος αέργου ισχύος	$-1,824 \pm j 4,40$	$-1,690 \pm j 4,64$

και

$$D = 4V^3[X_{eq}^2 + 2XX_{eq} + R^2 + X^2] - 6V^2E_q''[X_{eq}X + R^2 + X^2] + 2V[E_q''^2(R^2 + X^2) - X_{eq}^2(2PR + E^2)]$$

Όπως φαίνεται στον Πίνακα 4.9, το μιγαδικό ζευγάρι ιδιοτιμών που προκύπτει με το απλοποιημένο μοντέλο είναι αρκετά κοντά στην αντίστοιχη ιδιοτιμή του πλήρους μοντέλου. Στο Σχ. 4.19 φαίνεται ότι, όπως και στο πλήρες μοντέλο, ο ρυθμός ελέγχου αέργου ισχύος του απλοποιημένου μοντέλου μετακινείται προς τα δεξιά καθώς μειώνεται η σύνθετη αντίσταση της γραμμής και αυξάνεται η ισχύς βραχυκύκλωσης στο σημείο σύνδεσης του αιολικού πάρκου.

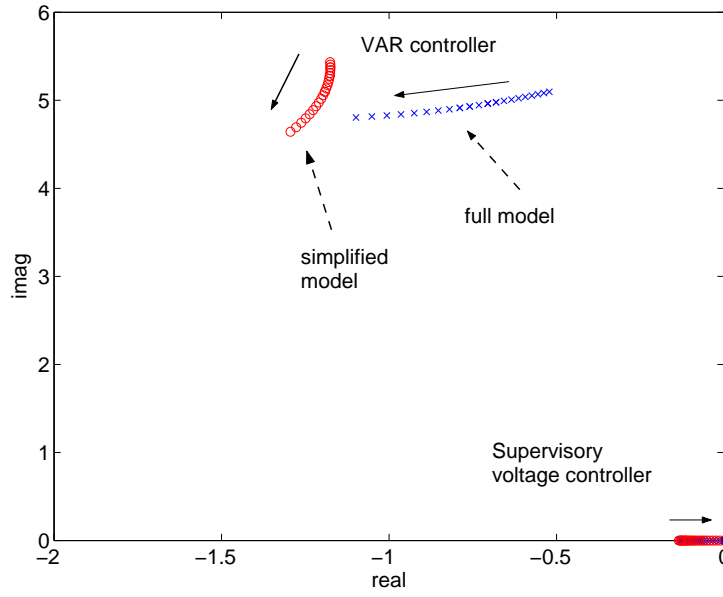
Καθώς το σύστημα ισχυροποιείται, η τερματική τάση της ΑΓΔΤ επηρεάζεται λιγότερο από το E_q'' . Επομένως η ευαισθησία $\partial V/\partial E_q''$ μειώνεται, άρα μειώνεται και η απόσβεση του συστήματος, όπως φαίνεται από την (4.8). Στο όριο, θέτοντας $\Delta V=0$ στο Σχ. 3.11 (απευθείας σύνδεση σε ισχυρό δίκτυο) προκύπτει ένας αρμονικός ταλαντωτής χωρίς απόσβεση. Παρατηρώντας άλλωστε τη σχέση (4.11), βλέπουμε ότι όταν η σύνθετη αντίσταση $R + jX$ τείνει στο μηδέν, η απόσβεση τείνει επίσης στο μηδέν. Σημειώνεται ότι στο Σχ. 4.19 μεταβάλλεται μόνο η σύνθετη αντίσταση της γραμμής, δηλαδή στην οριακή περίπτωση (0%), υπάρχει μόνο το X_{tr} του μετασχηματιστή της ανεμογεννήτριας. Και σε αυτή την περίπτωση όμως, ο λόγος απόσβεσης είναι περίπου 22% με χρόνο αποκατάστασης περίπου 4 s.

4.4.2 Έλεγχος τάσης

Θεωρούμε τώρα το μοντέλο σε λειτουργία ελέγχου τάσης (ο διακόπτης στο VC στο Σχ. 3.11), δηλαδή ο ρυθμιστής τάσης του αιολικού πάρκου (Supervisory voltage controller) ρυθμίζει την τάση του ζυγού 2 στο Σχ. 4.15. Ο έλεγχος της τερματικής τάσης της ανεμογεννήτριας παραμένει ενεργοποιημένος (διακόπτης στο (a) στο Σχ. 3.11). Μειώνοντας πάλι τη σύνθετη αντίσταση της γραμμής από 200% έως 0% της αρχικής της τιμής υπολογίζουμε τον τόπο ριζών του συστήματος, μέρος του οποίου φαίνεται στο Σχ. 4.20 (με μπλε x). Αυτή τη φορά, η πραγματική ιδιοτιμή του ρυθμιστή τάσης του αιολικού πάρκου πλησιάζει τον φανταστικό άξονα, καθώς η ΑΓΔΤ πλησιάζει τον άπειρο ζυγό. Παρατηρούμε ότι σε αυτή την περίπτωση, η ιδιοτιμή του ταλαντωτικού ρυθμού ελέγχου αέργου ισχύος της ΑΓΔΤ μετακινείται προς τα δεξιά για αυξανόμενη σύνθετη αντίσταση της γραμμής. Επομένως, στην περίπτωση ελέγχου τάσης, υπάρχει δυνατότητα μειωμένης ευστάθειας για ισχυρή διασύνδεση (πραγματική ιδιοτιμή), κυρίως όμως για ασθενή διασύνδεση (ταλαντωτικός ρυθμός). Οι ρυθμοί του άξονα και του ελέγχου στροφών παραμένουν πάλι ανεπηρέαστοι.

Στη συνέχεια θα χρησιμοποιήσουμε πάλι ένα απλοποιημένο μοντέλο για την περίπτωση με έλεγχο τάσης. Αμελώντας πάλι τις μικρές καθυστερήσεις και υποθέτοντας σταθερή ταχύτητα ανέμου, η μηχανή παράγει σταθερό ενεργό ισχύ. Από το Σχ. 3.11, μπορούμε να γράψουμε

Κεφάλαιο 4. Ευστάθεια ΑΓΔΤ σε σύνδεση με άπειρο ζυγό



Σχήμα 4.20: Μεταβολή των ιδιοτιμών ελέγχου αέργου ισχύος καθώς μειώνεται η σύνθετη αντίσταση της γραμμής από 200% σε 0% της αρχικής της τιμής. Λειτουργία ελέγχου τάσης.

τις διαφορικές εξισώσεις του απλοποιημένου μοντέλου:

$$\dot{V}_{ref} = K_{Qi}(Q_{cmd} - Q) \quad (4.12)$$

$$\dot{E}_q'' = K_{Vi}(V_{ref} - V) \quad (4.13)$$

$$\dot{x} = K_{iv}(V_{rfq} - V_2) \quad (4.14)$$

$$\dot{Q}_{cmd} = \frac{1}{T_c}(Q_{ord} - Q_{cmd}) \quad (4.15)$$

όπου η τάση V_2 είναι αυτή του ζυγού 2 του Σχ. 4.15 η οποία ελέγχεται στη συγκεκριμένη περίπτωση. Η χρονική σταθερά T_c δεν έχει παραληφθεί γιατί είναι αρκετά μεγάλη ($T_c=0,15$ s).

Οι αλγεβρικές εξισώσεις που συμπληρώνουν το σύστημα είναι:

$$K_{pv}(V_{rfq} - V_2) + x - Q_{ord} = 0 \quad (4.16)$$

$$Q - V \frac{E_q'' - V}{X_{eq}} = 0 \quad (4.17)$$

$$P^2 X_{tr}^2 + (Q X_{tr} - V^2)^2 - V^2 V_2^2 = 0 \quad (4.18)$$

$$V^4 - V^2 [E^2 + 2(PR + QX)] + (R^2 + X^2)(P^2 + Q^2) = 0 \quad (4.19)$$

όπου η (4.16) προκύπτει από το Σχ. 3.11 με τις υποθέσεις που έχουν γίνει, η (4.16) είναι η αλγεβρική σχέση (3.47) μεταξύ Q , V και E_q'' , η οποία ισχύει εφόσον αμελείται η καθυστέρηση του PLL και οι (4.18) και (4.19) προκύπτουν από το δίκτυο. Αντικαθιστώντας την (4.17) στην (4.19) προκύπτει πάλι η σχέση (4.10) η οποία συνδέει την τάση V με την E_q'' και από την οποία υπολογίστηκε πριν η ευαισθησία $\partial V / \partial E_q''$. Αντικαθιστώντας την (4.17) στην (4.19)

και λαμβάνοντας υπόψη την (4.10), προκύπτει:

$$g(V_2, V, E_q'') = V^4 \left[1 + \left(\frac{X_{tr}}{X_{eq}} \right)^2 + 2 \frac{X_{tr}}{X_{eq}} \right] - V^3 2 \frac{X_{tr}}{X_{eq}} E_q'' \left(1 + \frac{X_{tr}}{X_{eq}} \right) - V^2 V_2^2 + V^2 \left(\frac{X_{tr}}{X_{eq}} \right)^2 E_q''^2 + P^2 X_{tr}^2 = 0 \quad (4.20)$$

Το ολικό διαφορικό της Σχ. 4.20 γράφεται:

$$\frac{\partial g}{\partial V_2} dV_2 + \left(\frac{\partial g}{\partial E_q''} + \frac{\partial g}{\partial V} \frac{dV}{dE_q''} \right) dE_q'' = 0$$

απ' όπου προκύπτει:

$$\frac{dV_2}{dE_q''} = - \frac{\frac{\partial g}{\partial E_q''} + \frac{\partial g}{\partial V} \frac{dV}{dE_q''}}{\frac{\partial g}{\partial V_2}} \quad (4.21)$$

όπου:

$$\frac{\partial g}{\partial E_q''} = -V^3 2 \frac{X_{tr}}{X_{eq}} \left(1 + \frac{X_{tr}}{X_{eq}} \right) + 2V^2 \left(\frac{X_{tr}}{X_{eq}} \right)^2 E_q'' \quad (4.22)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial g}{\partial V} &= 4V^3 \left[1 + \left(\frac{X_{tr}}{X_{eq}} \right)^2 + 2 \frac{X_{tr}}{X_{eq}} \right] - 6V^2 \frac{X_{tr}}{X_{eq}} E_q'' \left(1 + \frac{X_{tr}}{X_{eq}} \right) \\ &\quad - 2V \left[V_2^2 - \left(\frac{X_{tr}}{X_{eq}} \right)^2 E_q''^2 \right] \end{aligned} \quad (4.23)$$

$$\frac{\partial g}{\partial V_2} = -2V_2 V^2 \quad (4.24)$$

Το σύστημα των διαφορικών εξισώσεων (4.12-4.15) γράφεται:

$$\dot{V}_{ref} = K_{Qi} Q_{cmd} - \frac{K_{Qi}}{X_{eq}} V E_q'' + \frac{K_{Qi}}{X_{eq}} V^2 \quad (4.25)$$

$$\dot{E}_q'' = K_{Vi} V_{ref} - K_{Vi} V \quad (4.26)$$

$$\dot{x} = K_{iv} V_{rfq} - K_{iv} V_2 \quad (4.27)$$

$$\dot{Q}_{cmd} = \frac{K_{pv}}{T_c} V_{rfq} - \frac{K_{pv}}{T_c} V_2 + \frac{1}{T_c} x - \frac{1}{T_c} Q_{cmd} \quad (4.28)$$

και γραμμικοποιώντας προκύπτει ο παρακάτω πίνακας κατάστασης:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & A_{12} & 0 & K_{Qi} \\ K_{Vi} & -K_{Vi} \frac{\partial V}{\partial E_q''} & 0 & 0 \\ 0 & -K_{iv} \frac{\partial V_2}{\partial E_q''} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{K_{pv}}{T_c} \frac{\partial V_2}{\partial E_q''} & \frac{1}{T_c} & -\frac{1}{T_c} \end{bmatrix} \quad (4.29)$$

όπου:

$$A_{12} = -\frac{K_{Qi}}{X_{eq}} V - E_q'' \frac{K_{Qi}}{X_{eq}} \frac{\partial V}{\partial E_q''} + 2V \frac{K_{Qi}}{X_{eq}} \frac{\partial V}{\partial E_q''} \quad (4.30)$$

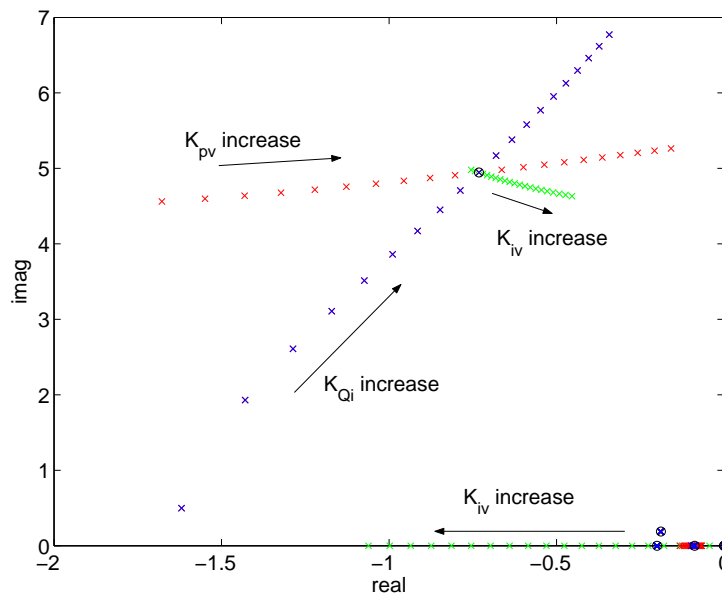
Πίνακας 4.10: Ιδιοτιμές απλοποιημένου μοντέλου ΑΓΔΤ με έλεγχο τάσης

Ρυθμός απόκρισης	Απλοποιημένο μοντέλο	Πλήρες μοντέλο
έλεγχος αέργου ισχύος	$-1,192 \pm j5,10$	$-0,732 \pm j 4,95$
καθυστέρηση T_c (Q_{cmd})	-7,844	-10,821
έλεγχος τάσης πάρκου	-0,088	-0,088

Με το μοντέλο αυτό βρίσκουμε τις ιδιοτιμές του Πίνακα 4.10 για το αρχικό σημείο λειτουργίας. Επίσης, στο Σχ. 4.20 φαίνονται οι ρυθμοί ελέγχου αέργων του απλοποιημένου μοντέλου καθώς η σύνθετη αντίσταση της γραμμής μειώνεται από 200% σε 0% της αρχικής της τιμής. Συγκρίνοντας με το πλήρες μοντέλο, διαπιστώνεται ότι αν και η προσέγγιση δεν είναι τόσο ακριβής όσο στην περίπτωση ρύθμισης του συντελεστή ισχύος, οι ιδιοτιμές είναι αρκετά κοντά και η μεταβολή τους παρόμοια και προς την ίδια κατεύθυνση.

Όσον αφορά στην πραγματική ιδιοτιμή του ρυθμιστή τάσης του αιολικού πάρκου, όπως βλέπουμε στον πίνακα κατάστασης της (4.29), καθώς ελαττώνεται η σύνθετη αντίσταση της γραμμής, μικραίνει η ευαισθησία $\partial V_2 / \partial E_q''$ και γίνεται μηδέν όταν ο άπειρος ζυγός ταυτιστεί με το ζυγό 2. Σε αυτή την περίπτωση ο πίνακας κατάστασης έχει μια μηδενική σειρά και, άρα, μια μηδενική ιδιοτιμή.

Στη συνέχεια, εξετάζουμε την επίδραση μεταβολής των κερδών K_{pv} και K_{iv} του ρυθμιστή τάσης του αιολικού πάρκου και του κέρδους K_{Qi} του βρόχου ελέγχου αέργου ισχύος κάθε ανεμογεννήτριας (βλ. Σχ 3.11), χρησιμοποιώντας το πλήρες μοντέλο. Στο Σχ. 4.21 φαίνεται ο τόπος ριζών (κυρίως η μεταβολή του ταλαντωτικού ρυθμού ελέγχου αέργου ισχύος) καθώς αυξάνεται το ένα από τα τρία κέρδη κάθε φορά. Το σημείο τομής των κλάδων (σημειωμένο με κύκλο) αντιστοιχεί στις αρχικές παραμέτρους του Πίνακα Α.3. Τα κέρδη μεταβάλλονται



Σχήμα 4.21: Μεταβολή των ιδιοτιμών ελέγχου αέργου ισχύος για μεταβολή κερδών της ρύθμισης αέργου ισχύος. Λειτουργία ελέγχου τάσης.

ως εξής:

- Το κέρδος K_{pv} από 0 έως 2 φορές πάνω από την αρχική τιμή (0 έως 36).

- Το κέρδος K_{iv} από 0,1 έως 10 φορές πάνω από την αρχική τιμή (0,05 έως 50).
- Το κέρδος K_{Qi} από 0,1 έως 2 φορές πάνω από την αρχική τιμή (0,05 έως 2).

Η επίδραση του ολοκληρωματικού κέρδους K_{iv} του ρυθμιστή τάσης του πάρκου είναι πιο μικρή, γι' αυτό και έγινε αναλογικά σημαντικότερη αύξηση, προκειμένου να φανεί η κατεύθυνση μεταβολής της ιδιοτιμής στο σχήμα. Παρατηρούμε ότι για σημαντική αύξηση του κέρδους, η επίδραση είναι αρνητική για την απόσβεση, ενώ μείωση του κέρδους δεν επιφέρει ουσιαστική βελτίωση της απόσβεσης. Αντίθετα, η μεταβολή του αναλογικού κέρδους K_{pv} έχει άμεση επίδραση, και συγκεκριμένα η μείωση του κέρδους επιφέρει αύξηση της απόσβεσης. Η συχνότητα όμως του ταλαντωτικού ρυθμού ελέγχου της αέργου ισχύος μεταβάλλεται ελάχιστα.

Μεταβάλλοντας το κέρδος K_{Qi} , παρατηρούμε ότι μεταβάλλονται σημαντικά τόσο η συχνότητα όσο και η απόσβεση. Όπως και στην περίπτωση ρύθμισης του συντελεστή ισχύος που εξετάστηκε στην υποπαράγραφο 4.4.1, η μείωση του K_{Qi} επιφέρει μείωση της συχνότητας. Στην περίπτωση αυτή, επιπλέον ο ρυθμός μετακινείται και προς τα αριστερά καθώς μειώνεται η συχνότητα και αυξάνεται σημαντικά η απόσβεση.

Οι υπόλοιπες ιδιοτιμές δεν επηρεάζονται από τις μεταβολές των κερδών που εξετάστηκαν, εκτός από την πραγματική ιδιοτιμή του ολοκληρωτή του ΠΙ ρυθμιστή της τάσης του πάρκου, η οποία μετακινείται σημαντικά προς τα αριστερά όταν αυξάνεται το ολοκληρωματικό κέρδος K_{iv} , όπως είναι άλλωστε αναμενόμενο, αφού έτσι μειώνεται η σχετική χρονική σταθερά.

Από την παραπάνω ανάλυση γίνεται σαφές ότι σε κάθε περίπτωση ρύθμισης της τάσης του αιολικού πάρκου ο έλεγχος αέργων πρέπει να ρυθμιστεί ανάλογα με το εκάστοτε σύστημα (ασθενής ή ισχυρή διασύνδεση) στο οποίο συνδέεται το αιολικό πάρκο με κατάλληλη προσαρμογή των κερδών.

Κεφάλαιο 4. Ευστάθεια ΑΓΔΤ σε σύνδεση με άπειρο ζυγό

Κεφάλαιο 5

Αδιάλειπτη λειτουργία σε βυθίσεις τάσης

5.1 Ενεργός διάταξη βραχυκύκλωσης δρομέα

Είναι σαφές ότι για την ακριβή αναπαράσταση των φαινομένων που λαμβάνουν χώρα κατά τη λειτουργία της ενεργού διάταξης βραχυκύκλωσης χρειάζονται λεπτομερή μοντέλα που να λαμβάνουν υπόψη τα μεταβατικά του στάτη. Όσον αφορά στις μελέτες ευστάθειας ΣΗΕ, όπου γίνεται η υπόθεση της οιονεί ημιτονοειδούς κατάστασης, μπορεί καταρχάς να μην έχει μεγάλη σημασία να προσομοιωθεί η λειτουργία της διάταξης βραχυκύκλωσης, δεδομένου ότι το χρονικό διάστημα μεταξύ της εκκαθάρισης του σφάλματος και της απενεργοποίησης της διάταξης βραχυκύκλωσης είναι κατά κανόνα μεταξύ 5 και μερικών δεκάδων ms [cig07].

Η αναπαράσταση όμως της ΑΓΔΤ χωρίς τα μεταβατικά του δρομέα και η υπόθεση ότι το μόνο που περιορίζει την κανονική λειτουργία είναι το μέγεθος του μετατροπέα, μπορεί να δώσει υπεραισιόδοξα αποτελέσματα, ιδιαίτερα εφόσον χρησιμοποιείται η ενεργός διάταξη βραχυκύκλωσης, οπότε η γεννήτρια μετατρέπεται για ένα διάστημα σε γεννήτρια επαγωγής. Για το λόγο αυτό, στο πλαίσιο αυτής της διατριβής διερευνήθηκε η αρχή λειτουργίας της ενεργού διάταξης βραχυκύκλωσης και ο τρόπος αναπαράστασης της σε προσομοιώσεις οιονεί ημιτονοειδούς κατάστασης.

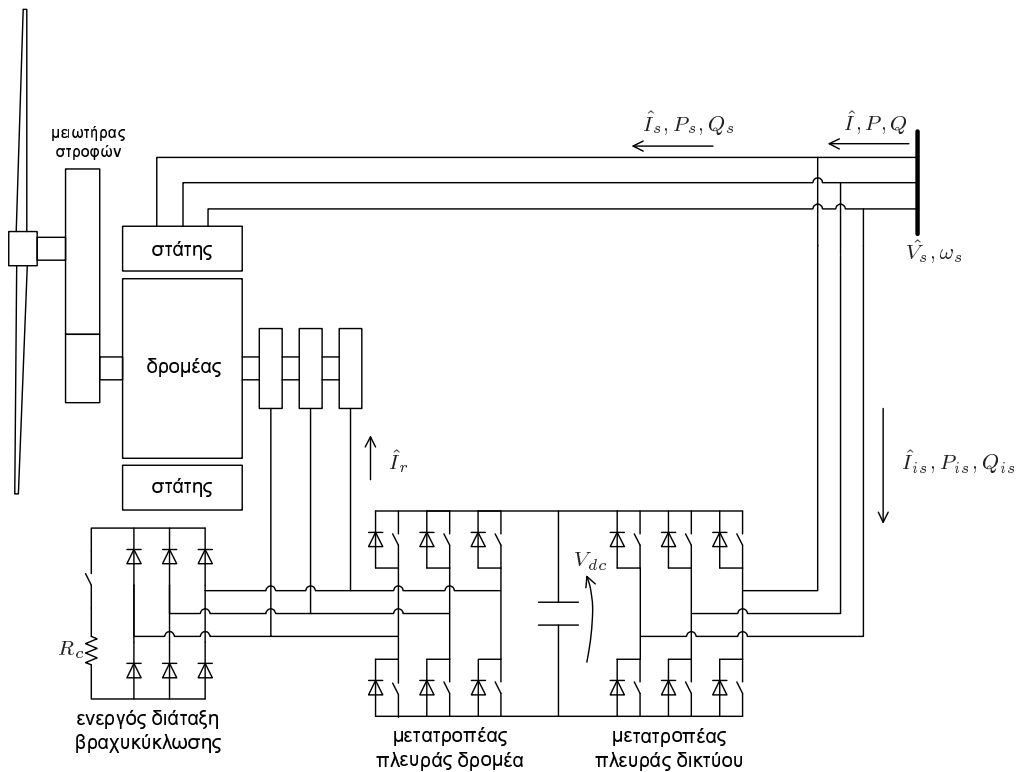
5.1.1 Περιγραφή λειτουργίας

Καταρχάς θα περιγράψουμε τη λειτουργία της ενεργού διάταξης βραχυκύκλωσης στην περίπτωση συμμετρικού τριφασικού σφάλματος, όπως αναφέρεται στο [cig07]. Στο Σχ. 5.1, φαίνεται η δομή της ΑΓΔΤ με ενεργό διάταξη βραχυκύκλωσης.

Στην περίπτωση που μια απότομη πτώση τάσης προκαλέσει αύξηση του ρεύματος του δρομέα ή της DC τάσης πάνω από το όριο αποσύνδεσης, το τρανζίστορ της διάταξης βραχυκύκλωσης ενεργοποιείται (άγει) και όλα τα τρανζίστορ του μετατροπέα πλευράς δρομέα μπλοκάρονται (σταματούν να άγουν). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το ρεύμα του δρομέα να περνά από τη διάταξη βραχυκύκλωσης.

Αφού ενεργοποιηθεί η διάταξη βραχυκύκλωσης, η μηχανή συμπεριφέρεται σαν μια κλασική ασύγχρονη γεννήτρια με εξωτερική αντίσταση δρομέα. Για 10-15 ms αποδίδει στο δίκτυο μεγάλη ποσότητα αέργου ισχύος (φάση απομαγνήτισης) και στη συνέχεια καταναλώνει άεργο ισχύ. Η ενεργός ισχύς εξαρτάται από την τιμή της ολίσθησης τη στιγμή του βραχυκυκλώματος. Αν η μηχανή έχει υπερσύγχρονη ταχύτητα, θα συνεχίσει να αποδίδει ορισμένη ενεργό ισχύ στο δίκτυο. Αν η ταχύτητα είναι μικρότερη από τη σύγχρονη, η μηχανή αρχίζει να καταναλώνει ενεργό ισχύ. Καθώς βέβαια η τερματική τάση βρίσκεται πολύ χαμηλά λόγω του σφάλματος, η ενεργός και η άεργος ισχύς της μηχανής είναι πολύ χαμηλές, αν και

Κεφάλαιο 5. Αδιάλειπτη λειτουργία σε βυθίσεις τάσης



Σχήμα 5.1: ΑΓΔΤ με ενεργό διάταξη βραχυκύκλωσης

τα ρεύματα του στάθης είναι υψηλά.

Λόγω της χαμηλής σύνθετης αντίστασης του κυκλώματος της διάταξης βραχυκύκλωσης και της χαμηλής τερματικής τάσης, η μαγνητική ροή μειώνεται γρήγορα. Τα ρεύματα στάθης και δρομέα επίσης μειώνονται. Μετά από περίπου 60-100 ms, διαπιστώνεται από το μετρούμενο ρεύμα της διάταξης βραχυκύκλωσης ότι το μεταβατικό φαινόμενο έχει ατονήσει αρκετά και άρα ο μετατροπέας πλευράς δρομέα μπορεί να ελέγξει και πάλι το ρεύμα. Η DC τάση έχει επίσης πέσει σε κανονικό επίπεδο, εφόσον ο μετατροπέας πλευράς δικτύου έχει διοχετεύσει την επιπλέον ενέργεια του DC πυκνωτή στο δίκτυο.

Στο επόμενο βήμα, το τρανζίστορ της διάταξης βραχυκύκλωσης σβήνει με αποτέλεσμα το ρεύμα του δρομέα να κατευθύνεται πάλι στο μετατροπέα πλευράς δρομέα. Τα τρανζίστορ του μετατροπέα πλευράς δρομέα είναι ακόμα απενεργοποιημένα, αλλά το ρεύμα περνάει από τις διόδους που βρίσκονται παράλληλα στα τρανζίστορ. Αν η τάση που επάγεται τώρα στο δρομέα είναι μικρότερη από την τάση του πυκνωτή (ανηγμένη στην AC πλευρά του μετατροπέα πλευρά δρομέα), το ρεύμα του δρομέα γρήγορα μηδενίζεται. Το ρεύμα του στάθης επίσης πέφτει σε χαμηλή τιμή. Αφού το ρεύμα του δρομέα παραμείνει κοντά στο μηδέν για αρκετό χρόνο, ώστε να είναι σίγουρο ότι το μεταβατικό φαινόμενο έχει τελειώσει, ο μετατροπέας πλευράς δρομέα μπορεί να ξανατεθεί σε λειτουργία.

Αν όμως το ρεύμα του δρομέα δε μειωθεί αρκετά γρήγορα, η DC τάση μπορεί να ανέβει πάλι και να ξεπεράσει το όριο αποσύνδεσης. Τότε η διάταξη βραχυκύκλωσης δρομέα επανενεργοποιείται και γίνεται νέα προσπάθεια σβέσης όταν η DC τάση έχει επιστρέψει σε κανονικό επίπεδο. Επομένως, σε μεγάλες πτώσεις τάσης, η διάταξη βραχυκύκλωσης μπορεί να ενεργοποιηθεί αρκετές φορές πριν το ρεύμα του δρομέα μηδενιστεί.

Αφού ο μετατροπέας πλευράς δρομέα ξαναξεκινήσει να λειτουργεί, μπορεί να ελέγξει

την ενεργό και άεργο παραγωγή της γεννήτριας. Συνήθως, ο μετατροπέας πλευράς δρομέα ξεκινά 80-150 ms μετά την έναρξη της βύθισης και το ονομαστικό ρεύμα της γεννήτριας είναι διαθέσιμο 200-400 ms μετά την έναρξη της βύθισης. Το ρεύμα της γεννήτριας πρέπει να αυξάνεται αρκετά αργά, ειδικά όταν η τάση του δικτύου είναι κοντά στο μηδέν κατά τη διάρκεια της βύθισης, διότι τότε το μέτρο και η γωνία της τερματικής τάσης της μηχανής θα καθορίζονται κυρίως από την ίδια τη γεννήτρια, κατάσταση που μπορεί να προκαλέσει απώλεια του συγχρονισμού με το δίκτυο.

Όταν το σφάλμα στο οποίο οφείλεται η πτώση τάσης εκκαθαριστεί, η τάση του δικτύου θα αυξηθεί. Αυτή η μεταβολή θα προκαλέσει άλλο ένα μεταβατικό φαινόμενο στον στάτη και το δρομέα της γεννήτριας. Παρόλ' αυτά, ο διακόπτης θα κόψει το ρεύμα του βραχυκυκλώματος σε κάθε φάση, όταν το ρεύμα της φάσης είναι κοντά στο μηδέν. Κατά συνέπεια, η άνοδος της τάσης του δικτύου δεν είναι τόσο γρήγορη όσο ήταν η πτώση. Σε πολλές περιπτώσεις το προκαλούμενο μεταβατικό φαινόμενο είναι τόσο ήπιο που η διάταξη βραχυκύκλωσης δεν ενεργοποιείται καθόλου. Η ενεργός και άεργος παραγωγή της γεννήτριας μπορούν στη συνέχεια να ρυθμιστούν σύμφωνα με τις απαιτήσεις του κώδικα του δικτύου χωρίς καθυστέρηση. Στην περίπτωση που το μεταβατικό ενεργοποιήσει τη διάταξη βραχυκύκλωσης, η γεννήτρια θα ξεκινήσει περίπου 50-100 ms μετά από τη στιγμή της ενεργοποίησης.

5.1.2 Προσομοιώσεις με απομονωμένη ΑΓΔΤ

Σε αυτή την παράγραφο παρουσιάζονται ορισμένα αποτελέσματα της διερεύνησης της αρχής λειτουργίας της ενεργού διατάξης βραχυκύκλωσης δρομέα και πώς αυτή μπορεί να αναπαρασταθεί σε προσομοιώσεις με την παραδοχή της ημιτονοειδούς κατάστασης. Χρησιμοποιείται το μεταβατικό μοντέλο με απλοποιημένους βρόχους ελέγχου (βλ. Κεφ. 3) με μία στρεφόμενη μάζα και τις αντίστοιχες παραμέτρους του Παραρτήματος Α.

Οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν στον ρυθμιστή γωνίας βήματος καθώς και στους υπόλοιπους ρυθμιστές δίνονται στον Πίνακα 5.1. Για την περίπτωση ρύθμισης τάσης χρησιμοποιήθηκε αναλογικός ρυθμιστής με κέρδος K_a και χρονική καθυστέρηση T_a . Ελλείψει σχετικών στοιχείων, για να εκτιμηθεί η κανονικοποιημένη χωρητικότητα C του πυκνωτή συνεχούς (που δίνεται στον Πίνακα 5.1), θεωρείται ότι η ενέργεια που αποθηκεύεται στον πυκνωτή υπό ονομαστική τάση συνεχούς είναι ίση με $P_r^{maxPQ} \cdot \Delta t$, όπου $\Delta t = 0,01$ s και P_r^{maxPQ} η ενεργός ισχύς που περνάει από το μετατροπέα για μέγιστη παραγωγή ενεργού και άεργου ισχύος από τη μηχανή (βλ. παράγραφο 3.2.8). Για τη συγκεκριμένη μηχανή και υποθέτοντας τάση συνεχούς 1200 V, η τιμή αυτή αντιστοιχεί σε φυσικές μονάδες σε πυκνωτή 4400 μ F.

Πίνακας 5.1: Παράμετροι ρυθμιστών ανεμογεννήτριας με ΑΓΔΤ

K_p	K_i	K_a	T_a	C	$\frac{dB}{dt}_{max}$	T_S	K_p^p	K_i^p
50	5	100	0,01 s	0,0014 s	3°/s	0,25 s	200	60

Για την προσομοίωση της ενεργού διατάξης βραχυκύκλωσης του δρομέα θεωρείται ότι αν το ρεύμα του δρομέα ή η συνεχής τάση ξεπεράσει το στιγμιαίο όριο I_r^{max} και V_{dc}^{max} αντίστοιχα, ο δρομέας βραχυκυκλώνεται μέσω της εξωτερικής αντίστασης R_c . Οι σχετικές παράμετροι δίνονται στον Πίνακα 5.2. Η τιμή του μέγιστου ρεύματος συνεχούς λειτουργίας του μετατροπέα πλευράς δρομέα I_r^{rated} υπολογίζεται από τα ονομαστικά μεγέθη της ΑΓΔΤ, σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν στην παράγραφο 3.2.8.

Πίνακας 5.2: Παράμετροι μοντέλου ενεργού διάταξης βραχυκύκλωσης δρομέα

I_r^{max}	V_{dc}^{max}	R_c
$1,5 I_r^{rated}$	1,5 α.μ.	0,01 α.μ.

Κατά την προσομοίωση, οι τάσεις του δρομέα v_{dr} και v_{qr} μηδενίζονται και η αντίσταση της διάταξης βραχυκύκλωσης R_c προστίθεται στην αντίσταση του δρομέα στις διαφορικές εξισώσεις (3.10-3.11).

Όταν το ρεύμα του δρομέα επιστρέφει σε αρκετά χαμηλό επίπεδο (κάτω από I_r^{max}), ενώ η DC τάση έχει επίσης κανονική τιμή, θεωρείται ότι η διάταξη βραχυκύκλωσης απενεργοποιείται. Όπως αναφέρεται στην παράγραφο 5.1.1, το ρεύμα κατευθύνεται στον μετατροπέα πλευράς δρομέα και περνά από τις διόδους, καθώς τα τρανζίστορ είναι ακόμα απενεργοποιημένα. Η κατάσταση αυτή μοντελοποιήθηκε στο Simulink θεωρώντας ότι ο μετατροπέας λειτουργεί σαν ανορθωτής διόδων και ότι επομένως ισχύει η γνωστή γραμμική σχέση μεταξύ της DC τάσης και της πολικής τάσης V_r (σε Volt) [MUR89]:

$$V_{dc} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} V_r^{LL} \quad (5.1)$$

και σε ανά μονάδα:

$$V_{dc} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} \frac{1}{2k} V_r \quad (5.2)$$

όπου το k έχει οριστεί στην (3.16) και η V_{dc} είναι μεταβλητή κατάστασης σύμφωνα με την (3.19). Οι συνιστώσες v_{dr} και v_{qr} της τάσης του δρομέα υπολογίζονται λαμβάνοντας επίσης υπόψη ότι ο συντελεστής ισχύος είναι μοναδιαίος στην περίπτωση ανορθωτή διόδων (αμελώντας την μεταγωγή). Επίσης αφαιρείται η επιπλέον αντίσταση της διάταξης βραχυκύκλωσης R_c από την αντίσταση του δρομέα.

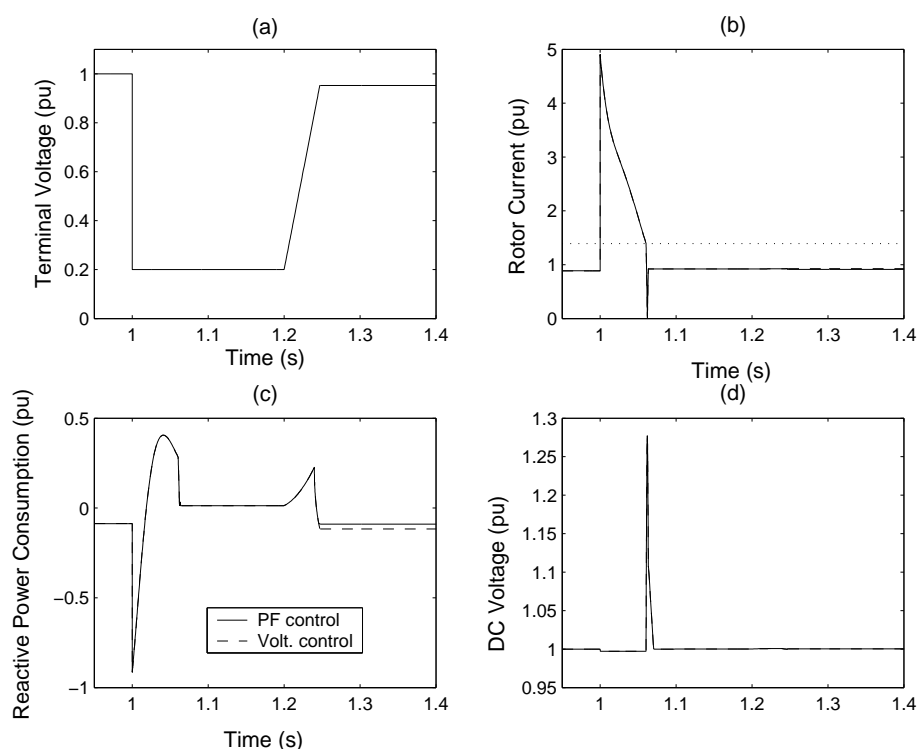
Όταν το ρεύμα του δρομέα μηδενιστεί, ο μετατροπέας πλευράς δρομέα ξανατίθεται σε κανονική λειτουργία, χωρίς να λαμβάνεται υπόψη κάποια καθυστέρηση. Σημειώνεται ότι στον περιορισμό των αναφορών των ρευμάτων δρομέα (i_{dr}^* , i_{qr}^*), προτεραιότητα δίνεται στον έλεγχο στροφών.

Λόγω του ότι χρησιμοποιήθηκε μοντέλο μίας στρεφόμενης μάζας, εισάγεται κάποιο σφάλμα, κυρίως κατά τη φάση που η μηχανή λειτουργεί με βραχυκυκλωμένο δρομέα και άρα δεν εισάγεται απόσβεση από το μετατροπέα πλευράς δρομέα στο στρεπτικό ρυθμό ταλάντωσης του άξονα. Στις προσομοιώσεις αυτές όμως εστιάζουμε στην λειτουργία της διάταξης βραχυκύκλωσης του δρομέα και την αναπαράστασή της. Στην παράγραφο 5.1.3 χρησιμοποιείται μοντέλο δύο μαζών.

Στις γραφικές παραστάσεις που ακολουθούν, η συνεχής γραμμή χρησιμοποιείται για την λειτουργία της μηχανής με σταθερό συντελεστή ισχύος και η διακεκομμένη για τη λειτουργία με έλεγχο τάσης. Ο μετατροπέας πλευράς δικτύου θεωρείται ότι λειτουργεί διαρκώς με μοναδιαίο συντελεστή ισχύος. Το προφίλ της τάσης που εφαρμόζεται στον τερματικό ζυγό της μηχανής εμφανίζεται μαζί με τα αντίστοιχα αποτελέσματα της προσομοίωσης. Θεωρείται ότι η τερματική τάση αποκαθίσταται πιο ομαλά σε τιμή χαμηλότερη από την αρχική.

Στο Σχ. 5.2 φαίνονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης πτώσης τάσης στα 0,2 α.μ. για 200 ms. Η μηχανή αρχικά παράγει ονομαστική ενεργό ισχύ με συντελεστή ισχύος 0,995 χωρητικό ($P=-2$ MW, $Q=-0,2$ MVar). Αμέσως μετά την εμφάνιση του σφάλματος, η διάταξη βραχυκύκλωσης του δρομέα ενεργοποιείται λόγω υπερέντασης. Όσο ο δρομέας είναι

βραχυκυκλωμένος, η μηχανή συμπεριφέρεται σαν απλή γεννήτρια επαγωγής και καταναλώνει άεργο ισχύ μετά τη φάση απομαγνήτισης. Λόγω της υψηλής τιμής της ολίσθησης (-0,2 για ονομαστική παραγωγή ισχύος, όπως φαίνεται στο Σχ. 4.5), η κατανάλωση αέργου ισχύος είναι υψηλή. Όταν το ρεύμα του δρομέα πέσει κάτω από την μέγιστη τιμή (περίπου 80 ms μετά την εμφάνιση του σφάλματος), η διάταξη βραχυκύκλωσης απενεργοποιείται και ο μετατροπέας πλευράς δρομέα συμπεριφέρεται ως τριφασικός ανορθωτής διόδων. Το ρεύμα δρομέα γρήγορα μηδενίζεται και αμέσως μετά η μηχανή ξανατίθεται σε κανονική λειτουργία. Κατά την φάση σβέσης του ρεύματος του δρομέα, η DC τάση αυξάνεται γρήγορα, διότι ο μετατροπέας πλευράς δικτύου δε μπορεί να διοχετεύσει την ενέργεια που συσσωρεύεται στον πυκνωτή εξαιτίας της χαμηλής ακόμα τάσης του δικτύου.



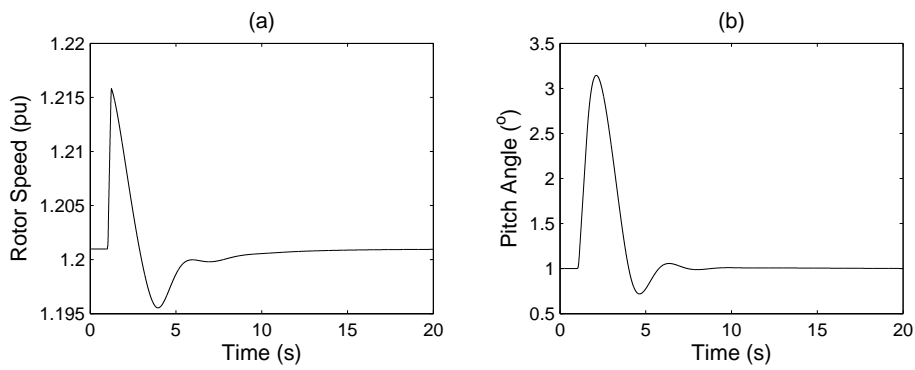
Σχήμα 5.2: Βραχυπρόθεσμη απόκριση της ΑΓΔΤ με ενεργό διάταξη βραχυκύκλωσης δρομέα σε πτώση τάσης 0,8 α.μ.

Στο Σχ. 5.3 βλέπουμε ότι ο δρομέας επιταχύνεται καθώς η μεγάλη πτώση τάσης προκαλεί μείωση της ηλεκτρομαγνητικής ροπής της μηχανής. Καθώς η ταχύτητα περιστροφής ξεπερνά την ονομαστική της τιμή, ο ελεγκτής βήματος των πτερυγίων αυξάνει τη γωνία β , με αποτέλεσμα τη μείωση της μηχανικής ισχύος και τελικά την επιβράδυνση.

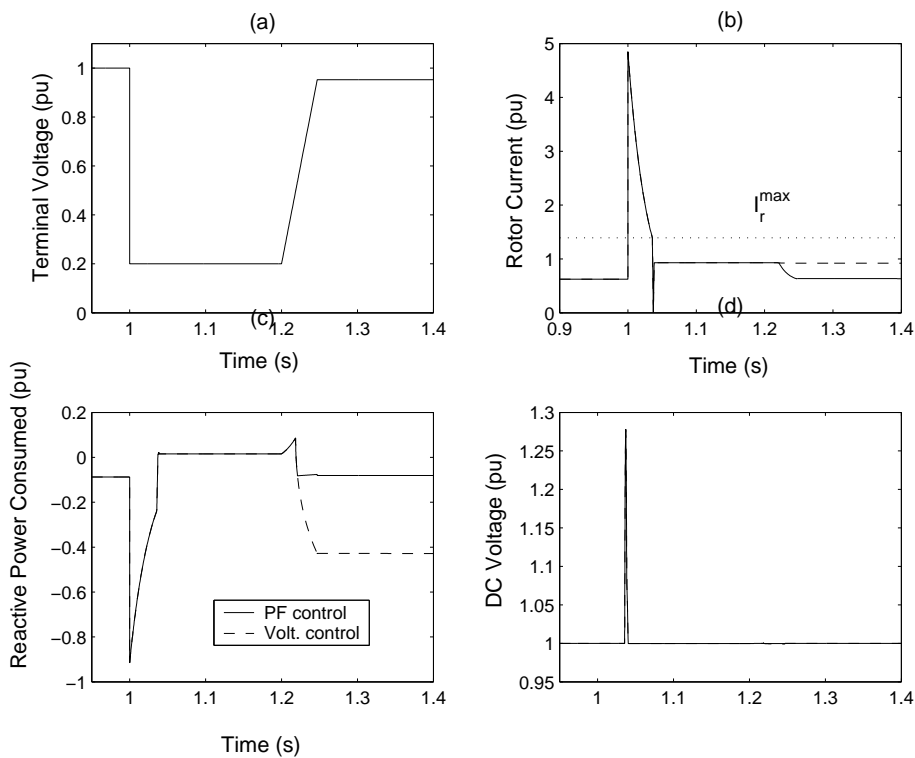
Στο Σχ. 5.4 φαίνεται η απόκριση στην ίδια πτώση τάσης κατά 0,8 α.μ., αλλά με τη μηχανή να παράγει αρχικά τη μισή από την ονομαστική ενεργό ισχύ. Στην περίπτωση αυτή, η παραγωγή αέργου ισχύος στην περίπτωση ελέγχου τάσης είναι μεγαλύτερη. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι λόγω της χαμηλότερης ενεργού παραγωγής, υπάρχει μεγαλύτερο περιθώριο στο ρεύμα του δρομέα για παραγωγή αέργου ισχύος. Κατά τη διάρκεια της βύθισης της τάσης, δεν υπάρχει διαφορά στην άεργο ισχύ, λόγω του ότι ο περιορισμός του ρεύματος του δρομέα γίνεται με προτεραιότητα στην ανάπτυξη ροπής.

Στο Σχ. 5.5 φαίνεται η απόκριση της μηχανής στην περίπτωση μιας μικρότερης πτώσης τάσης (κατά 0,4 α.μ.) για 200 ms. Σε αυτή την περίπτωση, το ρεύμα του δρομέα παραμένει

Κεφάλαιο 5. Αδιάλειπτη λειτουργία σε βυθίσεις τάσης



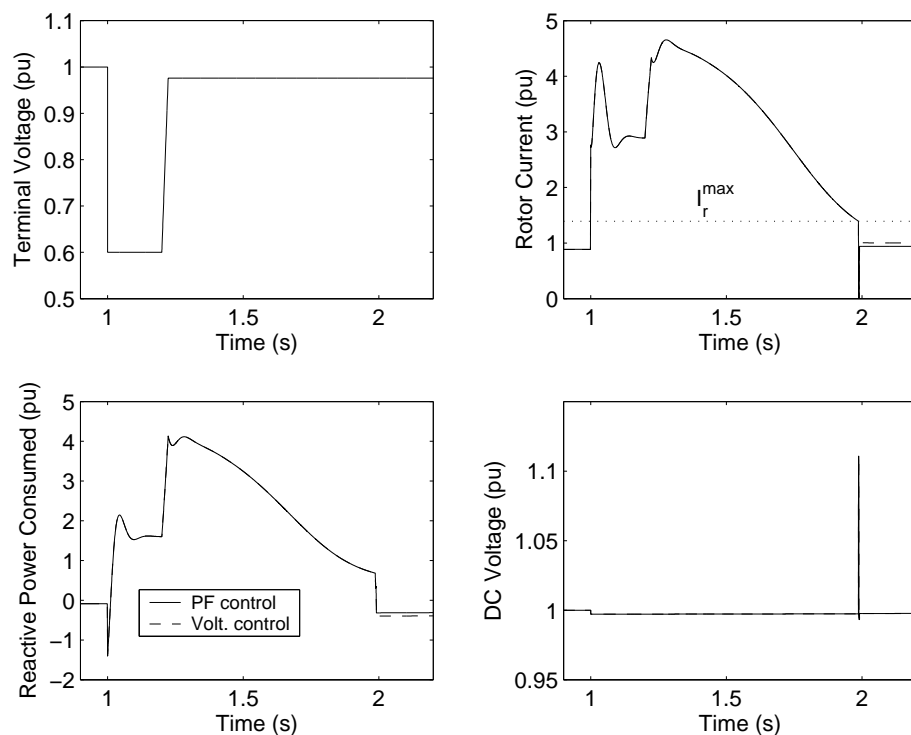
Σχήμα 5.3: Μακροπρόθεσμη απόκριση της ταχύτητας περιστροφής και της γωνίας βήματος σε πτώση τάσης 0,8 α.μ.



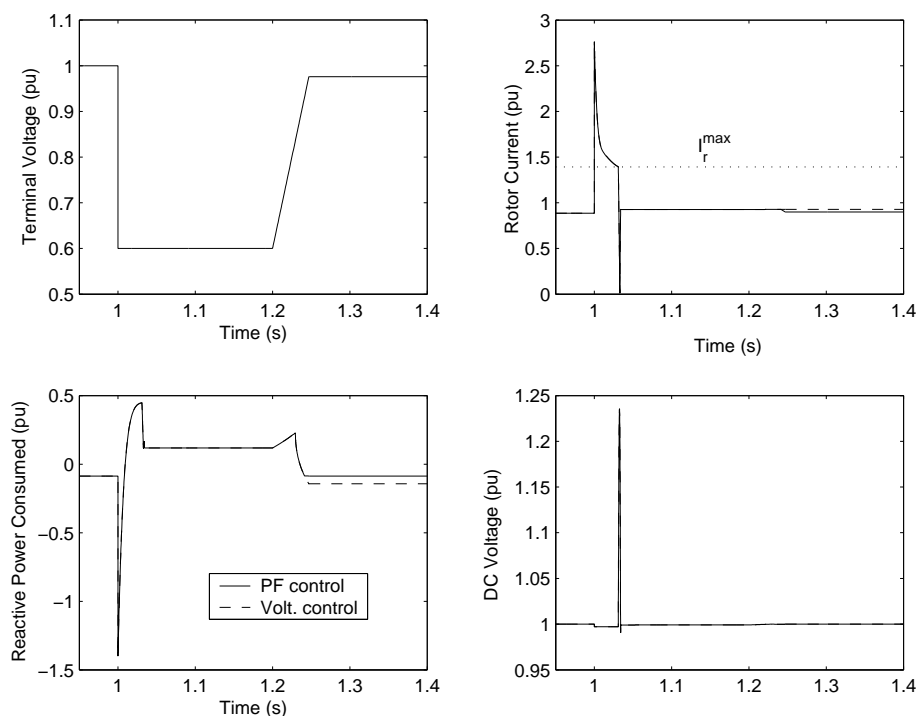
Σχήμα 5.4: Απόκριση ΑΓΔΤ με ενεργό διάταξη βραχυκύκλωσης δρομέα σε πτώση τάσης 0,8 α.μ. Περίπτωση με μειωμένη αρχική παραγωγή ισχύος.

σε τιμή μεγαλύτερη της μέγιστης μέχρι μετά την εκκαθάριση του βραχυκυκλώματος με αποτέλεσμα η μηχανή να λειτουργεί για περίπου 1 s με τη διάταξη βραχυκύκλωσης δρομέα ενεργοποιημένη. Αν και η μηχανή παραμένει στο δίκτυο, καθώς μπορεί να θεωρηθεί ότι ο δρομέας μπορεί να αντέξει το υψηλό ρεύμα, η συμπεριφορά αυτή είναι ανεπιθύμητη, καθώς δεν υπάρχει δυνατότητα ελέγχου της αέργου ισχύος της ΑΓΔΤ, ακριβώς την ώρα που αυτή χρειάζεται στο σύστημα.

Αυξάνοντας την αντίσταση της διάταξης βραχυκύκλωσης, η απενεργοποίηση της τελευταίας, μπορεί να επιτευχθεί πολύ γρήγορα, όπως στην περίπτωση της μεγάλης πτώσης τάσης. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης θεωρώντας ότι $R_c=0,07$ α.μ. φαίνονται στο Σχ. 5.6.



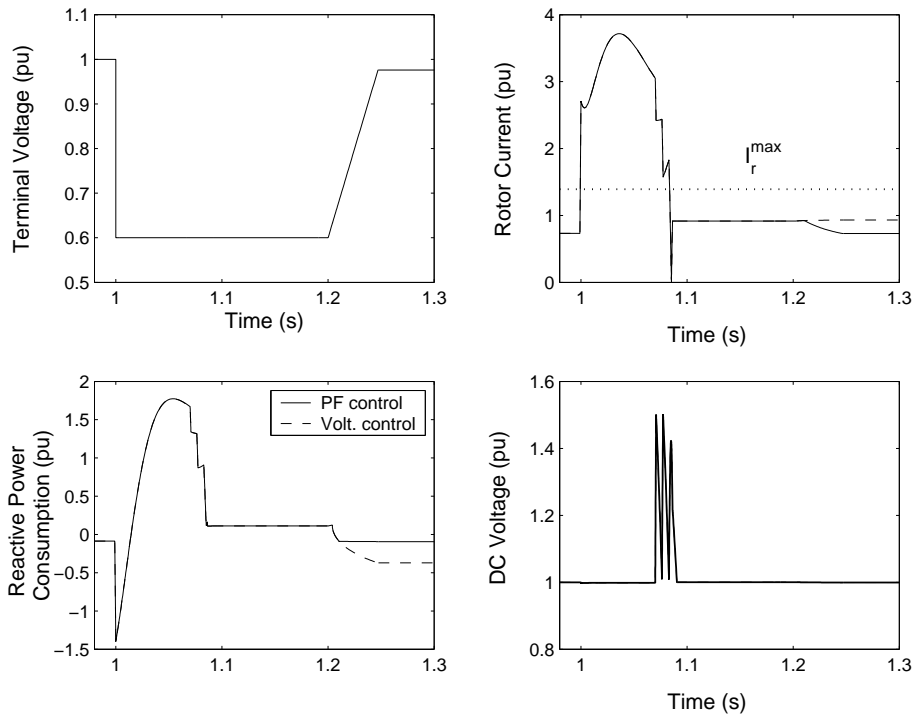
Σχήμα 5.5: Απόκριση της ΑΓΔΤ με ενεργό διάταξη βραχυκύκλωσης δρομέα σε πτώση τάσης 0,4 α.μ.



Σχήμα 5.6: Απόκριση της ΑΓΔΤ με ενεργό διάταξη βραχυκύκλωσης δρομέα σε πτώση τάσης 0,4 α.μ., με $R_c=0,07$ α.μ.

Κεφάλαιο 5. Αδιάλειπτη λειτουργία σε βυθίσεις τάσης

Στη συνέχεια εξετάζεται η χρήση μιας σταθερής χρονικής καθυστέρησης για την απενεργοποίηση της διάταξης βραχυκύκλωσης. Υποθέτοντας ότι η διάταξη βραχυκύκλωσης απενεργοποιείται 70 ms μετά από την ενεργοποίησή της και ότι οι διόδοι του μετατροπέα πλευράς δρομέα αντέχουν την μεταβατική υψηλή τιμή του ρεύματος, λαμβάνουμε την απόκριση του Σχ. 5.7. Σε αυτή την περίπτωση, μόλις ο μετατροπέα πλευράς δρομέα μεταβεί



Σχήμα 5.7: Απόκριση της ΑΓΔΤ με ενεργό διάταξη βραχυκύκλωσης δρομέα σε πτώση τάσης 0,4 α.μ. Απενεργοποίηση διάταξης βραχυκύκλωσης μετά από 70 ms.

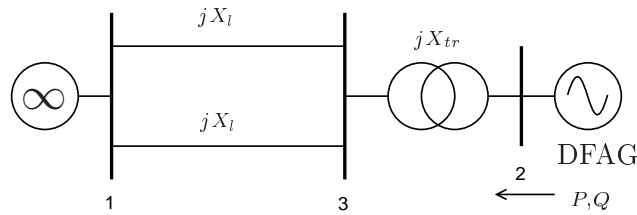
σε λειτουργία ανορθωτή διόδων, η συνεχής τάση φτάνει στη μέγιστη τιμή της πριν μηδενιστεί το ρεύμα. Ως εκ τούτου, η διάταξη βραχυκύκλωσης επανενεργοποιείται, ο δρομέας βραχυκυκλώνεται, ο πυκνωτής αποφορτίζεται και όταν η συνεχής τάση επιστρέφει στην τιμή αναφοράς, γίνεται εκ νέου απόπειρα να μηδενιστεί το ρεύμα του δρομέα. Με την τρίτη απόπειρα, το ρεύμα μηδενίζεται και η μηχανή ξανατίθεται σε κανονική λειτουργία.

Προφανώς οι πολλαπλές ενεργοποιήσεις της διάταξης βραχυκύκλωσης μπορούν να αποφευχθούν, αν ο πυκνωτής είναι μεγαλύτερης χωρητικότητας ή αν χρησιμοποιηθεί μεταβλητή αντίσταση (chopper) για την απορρόφηση της πλεονάζουσας ενέργειας.

5.1.3 Προσομοίωση σε σύστημα ΑΓΔΤ - άπειρος ζυγός

Στη συνέχεια περιγράφεται η προσομοίωση ενός βραχυκυκλώματος που εμφανίζεται τη χρονική στιγμή $t=1$ s στο ζυγό 3 του μικρού συστήματος του Σχ. 5.8, με αντίδραση προς γη $X_{sc}=0,01$ α.μ. (σε βάση S_{nom} της ανεμογεννήτριας). Η ΑΓΔΤ θεωρείται σε λειτουργία σταθερού (μοναδιαίου) συντελεστή ισχύος όπως και ο μετατροπέας πλευράς δικτύου. Το βραχυκύκλωμα εκκαθαρίζεται μετά από 120 ms με το άνοιγμα της μίας γραμμής. Οι παράμετροι του συστήματος δίνονται στον Πίνακα 5.3.

Χρησιμοποιείται το μεταβατικό μοντέλο με απλοποιημένους βρόχους ελέγχου (βλ. Κεφ. 3) με δύο στρεφόμενες μάζες και τις αντίστοιχες παραμέτρους του Παραρτήματος Α. Οι πα-



Σχήμα 5.8: Σύστημα μίας ΑΓΔΤ σε άπειρο ζυγό

Πίνακας 5.3: Παράμετροι του συστήματος στο Σχ. 5.8 (α.μ. σε βάση S_{nom})

P	Q	X_l	X_{tr}	V_1
0,89	0	0,1125	0,0557	1,00

ράμετροι των ελεγκτών του μοντέλου δίνονται στον Πίνακα 5.4. Σημειώνεται ότι η γωνία βήματος των περυγίων αρχικοποιείται στο $\beta_0=1^\circ$.

Πίνακας 5.4: Παράμετροι ρυθμιστών ανεμογεννήτριας με ΑΓΔΤ

$\frac{dB}{dt_{max}}$	T_S	K_p^p	K_i^p	K_p	K_i
$3^\circ/s$	0,5 s	200	60	5	0,5

Για την προσομοίωση της ενεργού διατάξης βραχυκύκλωσης του δρομέα θεωρείται ότι αν το ρεύμα του δρομέα ή η DC τάση ξεπεράσουν το στιγμιαίο όριο I_r^{max} και V_{dc}^{max} αντίστοιχα, ο δρομέας βραχυκυκλώνεται μέσω της εξωτερικής αντίστασης R_c . Οι σχετικές παράμετροι δίνονται στον Πίνακα 5.5. Αυτή τη φορά χρησιμοποιείται υψηλότερη τιμή για την αντίσταση

Πίνακας 5.5: Παράμετροι μοντέλου ενεργού διάταξης βραχυκύκλωσης δρομέα

I_r^{max}	V_{dc}^{max}	R_c
$1,5 I_r^{rated}$	1,5 α.μ.	0,10 α.μ.

R_c ($R_c = 10R_r$, όπου R_r η αντίσταση του δρομέα), προκειμένου να εξασφαλιστεί ο περιορισμός του ρεύματος (βλ. παράγραφο 5.1.2). Εναλλακτικά μπορεί να θεωρηθεί αρκετά μεγάλος πυκνωτής ή/και μεταβλητή αντίσταση παράλληλα με τον πυκνωτή (chopper).

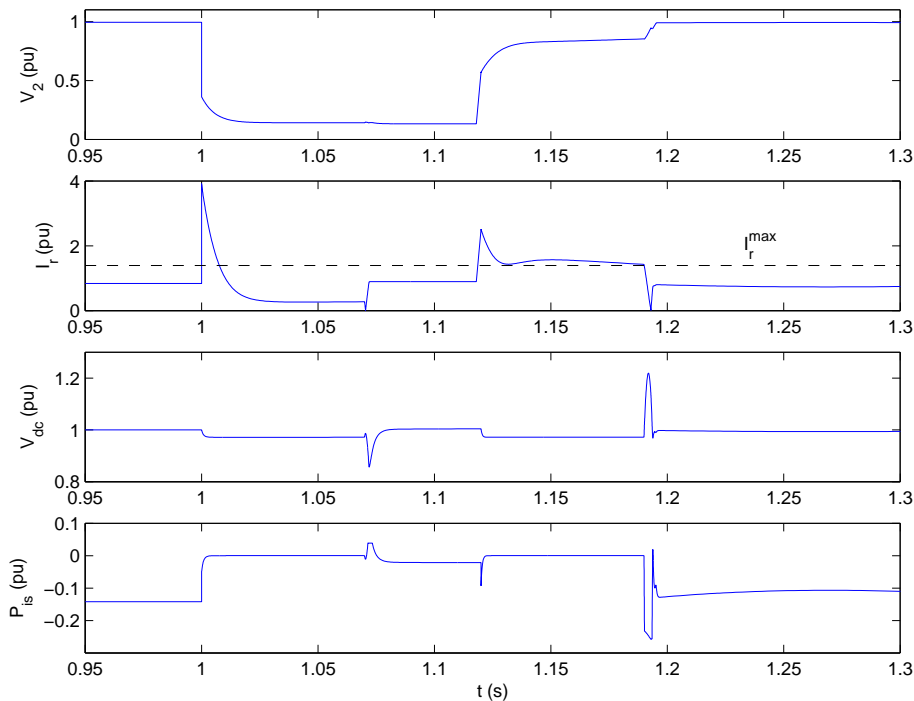
Επίσης χρησιμοποιείται μοντέλο δύο στρεφόμενων μαζών με τις παραμέτρους του Πίνακα 5.6. Όπως αναφέρθηκε στην ενότητα 4.2.2, με τις παραμέτρους αυτές η συχνότητα του στρεπτικού ρυθμού ταλάντωσης είναι περίπου 1,9 Hz και ο λόγος απόσβεσης $\zeta=0,1$. Κατά την αναπαράσταση της λειτουργίας της ενεργού διάταξης βραχυκύκλωσης (όπως περιγράφηκε στην παράγραφο 5.1.2), όταν η μηχανή λειτουργεί με βραχυκυκλωμένο δρομέα, η απώλεια της απόσβεσης που εισάγει σε κανονική λειτουργία ο μετατροπέας πλευράς δρομέα στο στρεπτικό ρυθμό ταλάντωσης του άξονα, αναπαριστάται μηδενίζοντας την παράμετρο απόσβεσης στην εξίσωση της ροπής του άξονα (3.24).

Για την απενεργοποίηση της διάταξης βραχυκύκλωσης χρησιμοποιείται χρονικό κριτήριο (70 ms), ενώ και πάλι αμελείται η όποια καθυστέρηση για την επανεκκίνηση της κανονικής

Πίνακας 5.6: Παράμετροι μηχανικού μοντέλου δύο στρεφόμενων μαζών

H_r	H_l	K_{sh}	D_{sh}
0,65 s	2,59 s	0,50 α.μ.	2,5 α.μ.

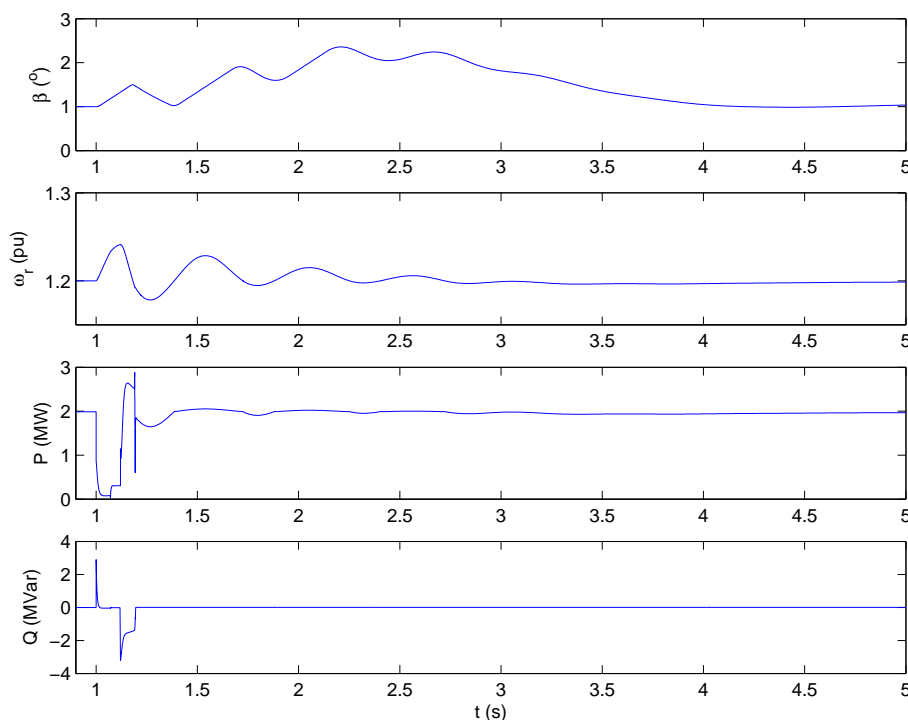
λειτουργίας του μετατροπέα πλευράς δρομέα μετά το μηδενισμό του ρεύματος του δρομέα. Στο Σχ. 5.9 φαίνονται οι αποκρίσεις της τερματικής τάσης της ΑΓΔΤ, του ρεύματος του δρομέα, της DC τάσης και της ενεργού ισχύος του μετατροπέα πλευράς δικτύου P_{is} (με σύμβαση κινητήρα, δηλαδή η ισχύς είναι θετική όταν κατευθύνεται από το δίκτυο προς τον μετατροπέα). Πριν το σφάλμα η μηχανή παράγει ονομαστική ενεργό ισχύ, επομένως δουλεύει σε υπερσύγχρονες στροφές και άρα το P_{is} είναι αρνητικό.



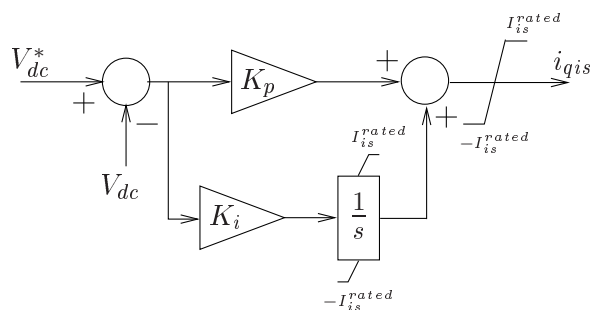
Σχήμα 5.9: Βραχυπρόθεσμη απόκριση της ΑΓΔΤ με απενεργοποίηση της διάταξης βραχυκύκλωσης πριν την εκκαθάριση του σφάλματος.

Στο Σχ. 5.10 βλέπουμε την απόκριση της γωνίας βήματος β των πτερυγίων, της ταχύτητας ω_r του δρομέα της ΑΓΔΤ, καθώς και της παραγωγής ενεργού και αέργου ισχύος της ΑΓΔΤ. Στις αποκρίσεις -κυρίως της ταχύτητας και της γωνίας βήματος, αλλά και της ενεργού ισχύος- φαίνεται ο στρεπτικός ρυθμός ταλάντωσης του άξονα. Επίσης στην απόκριση της γωνίας βήματος φαίνεται ο περιορισμός του ρυθμού μεταβολής της.

Όπως φαίνεται στο Σχ. 5.9, με την εμφάνιση του σφάλματος το ρεύμα του δρομέα ξεπερνά το μέγιστο όριο, με αποτέλεσμα την ενεργοποίηση της διάταξης βραχυκύκλωσης. Καθώς ο δρομέας βραχυκυκλώνεται, η ισχύς P_r από τον μετατροπέα πλευράς δρομέα προς το δρομέα μηδενίζεται ακαριαία. Επειδή το ενεργό ρεύμα του μετατροπέα πλευράς δικτύου είναι έξοδος του ΠΙ ελεγκτή της DC τάσης (όπως φαίνεται στο Σχ. 3.6 που επαναλαμβάνεται στο Σχ. 5.11 για ευκολία), δεν μηδενίζεται ακαριαία και συνεχίζει να αποδίδει ισχύ στο δίκτυο με αποτέλεσμα να πέσει λίγο η DC τάση. Με την πτώση της DC τάσης, το σφάλμα



Σχήμα 5.10: Μακροπρόθεσμη απόκριση της ΑΓΔΤ με απενεργοποίηση της διάταξης βραχυκύκλωσης πριν την εκκαθάριση του σφάλματος.



Σχήμα 5.11: Έλεγχος DC τάσης

$(V_{dc}^* - V_{dc})$ γίνεται θετικό, όπως και η έξοδος του αναλογικού τμήματος του ρυθμιστή. Η έξοδος του ολοκληρωτικού τμήματος του ρυθμιστή παραμένει αρνητική και μετά από πολύ λίγο το άθροισμα τους δίνει μηδέν (άρα είναι $P_{is}=0$). Λόγω όμως του ότι είναι και $P_r=0$, σύμφωνα με την (2.41) η DC τάση σταματά να μεταβάλλεται και ο PI ρυθμιστής ισορροπεί.

Το ρεύμα του δρομέα πέφτει πολύ γρήγορα κάτω από τη μέγιστη τιμή (λιγότερο από 10 ms μετά την έναρξη του σφάλματος), οπότε αν χρησιμοποιούνταν για την απενεργοποίηση της διάταξης βραχυκύκλωσης τα ίδια κριτήρια με την ενεργοποίηση, το αποτέλεσμα θα ήταν υπερβολικά αισιόδοξο. Όπως φαίνεται στο Σχ. 5.9 ο μετατροπέας πλευράς δρομέα επιστρέφει σε κανονική λειτουργία αμέσως μετά το προκαθορισμένο χρονικό διάστημα των 70 ms. Κατά την επανεκκίνηση, για ένα μικρό διάστημα ο μετατροπέας πλευράς δρομέα αποδίδει ενέργεια στο κύκλωμα του δρομέα και ο πυκνωτής αποφορτίζεται. Καθώς ο PI ρυθμιστής της DC τάσης προσπαθεί να την επαναφέρει, ενεργοποιείται για πολύ λίγο ο περιοριστής του ρεύματος

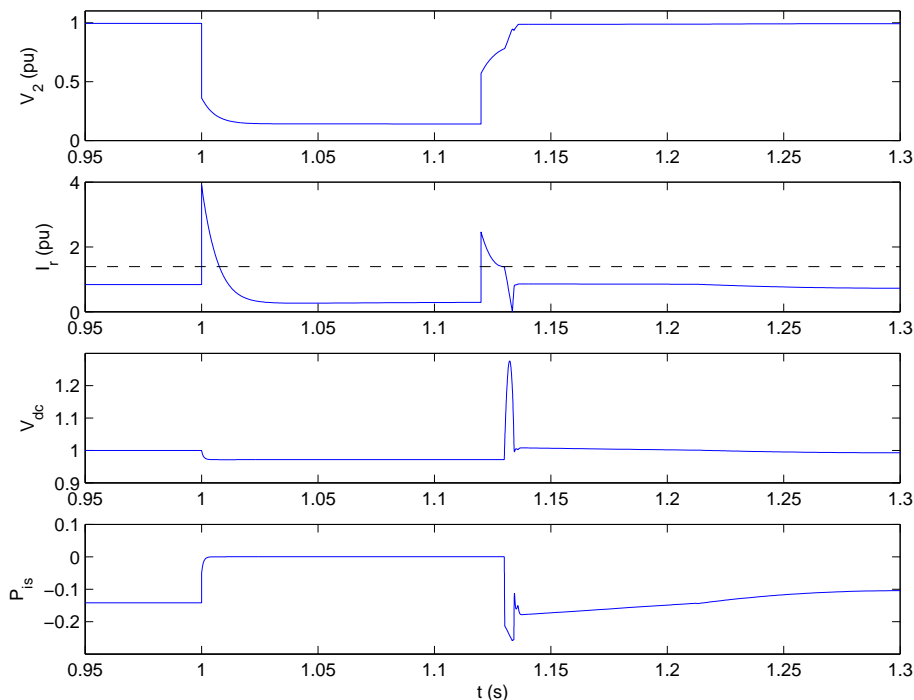
Κεφάλαιο 5. Αδιάλειπτη λειτουργία σε βυθίσεις τάσης

του μετατροπέα πλευράς δικτύου.

Η ΑΓΔΤ τίθεται επομένως σε κανονική λειτουργία κατά τη διάρκεια του βραχυκλώματος. Το ρεύμα του δρομέα περιορίζεται στην ονομαστική τιμή του (I_r^{rated}) και δίνεται προτεραιότητα στη συνιστώσα i_{qr} που ρυθμίζει την ροπή. Καθώς ο δρομέας έχει υπερταχυνθεί, ζητείται μέγιστη ροπή από την ΑΓΔΤ. Με την εκκαθάριση του βραχυκυκλώματος τη χρονική στιγμή $t=1,120$ s, εκδηλώνεται νέο μεταβατικό το οποίο ενεργοποιεί ξανά τη διάταξη βραχυκύκλωσης, αφού το ρεύμα του δρομέα ξεπερνά τη μέγιστη τιμή. Μετά από άλλα 70 ms, η διάταξη βραχυκύκλωσης απενεργοποιείται και κατά τη φάση μηδενισμού του ρεύματος του δρομέα η DC τάση αυξάνεται. Για να επιστρέψει η τελευταία σε κανονική τιμή, αυξάνεται μεταβατικά και η ισχύς που αποδίδεται από τον μετατροπέα πλευράς δικτύου προς το δίκτυο.

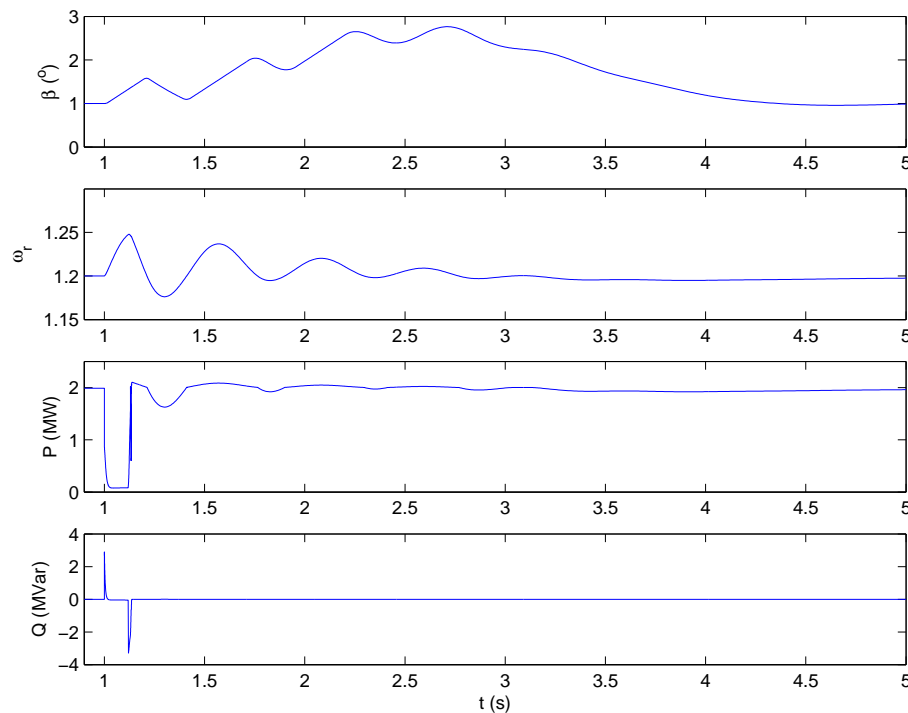
Όπως αναφέρθηκε νωρίτερα, συνήθως η διάταξη βραχυκύκλωσης δεν ενεργοποιείται με την εκκαθάριση του σφάλματος, γιατί η επιστροφή της τάσης στην πράξη δεν είναι τόσο αποτομη, όσο η πτώση της [cig07]. Από την άλλη, ο μετατροπέας πλευράς δρομέα δεν επιστρέφει τόσο γρήγορα σε κανονική λειτουργία μετά το μηδενισμό του ρεύματος του δρομέα, όπως υποτέθηκε στην προσομοίωση.

Στη συνέχεια γίνεται η υπόθεση ότι ο δρομέας παραμένει βραχυκυκλωμένος καθόλη τη διάρκεια του σφάλματος. Στην προσομοίωση η διαδικασία απενεργοποίησης ξεκινά 130 ms μετά την ενεργοποίηση (η οποία πρακτικά ταυτίζεται με τη στιγμή εφαρμογής του σφάλματος). Στο σχήμα 5.12 φαίνονται οι αντίστοιχες αποκρίσεις της τερματικής τάσης της ΑΓΔΤ, του ρεύματος του δρομέα, της DC τάσης και της ενεργού ισχύος P_{is} του μετατροπέα πλευράς δικτύου. Στο σχήμα 5.13 εμφανίζονται οι αποκρίσεις της γωνίας βήματος, της ταχύτητας του δρομέα της ΑΓΔΤ, της ενεργού και της αέργου ισχύος.



Σχήμα 5.12: Βραχυπρόθεσμη απόκριση της ΑΓΔΤ με απενεργοποίηση της διάταξης βραχυκύκλωσης μετά την εκκαθάριση του σφάλματος.

Στην αναφορά [EKF07] εξετάζεται η αναπαράσταση της ΑΓΔΤ με ενεργό διάταξη βραχυκύκλωσης για μελέτες ευστάθειας δικτύου. Μέσω προσομοιώσεων βραχυκυκλωμάτων, γίνεται σύγκριση μεταξύ ενός μοντέλου μειωμένης τάξης (χωρίς μεταβατικά στάτη) και ενός



Σχήμα 5.13: Μακροπρόθεσμη απόκριση της ΑΓΔΤ με απενεργοποίηση της διάταξης βραχυκύκλωσης μετά την εκκαθάριση του σφάλματος.

μοντέλου που προσεγγίζει το πλήρες αλλά μπορεί ταυτόχρονα να ενταχθεί σε πρόγραμμα προσομοίωσης με την παραδοχή της ημιτονοειδούς κατάστασης.

Η αλληλουχία των καταστάσεων της μηχανής είναι παρόμοια με αυτή που μοντελοποιήθηκε σε αυτή τη διατριβή, με βασική διαφορά ότι μετά την απενεργοποίηση της διάταξης βραχυκύκλωσης ο δρομέας αναπαριστάται ανοιχτοκυκλωμένος για 50 περίπου ms. Καθώς η φάση κατά την οποία ο δρομέας είναι βραχυκυκλωμένος διαρκεί περίπου 60-70 ms, η μηχανή επιστρέφει σε κανονική λειτουργία περίπου 120 ms μετά την έναρξη του βραχυκυκλώματος. Το βραχυκύκλωμα που προσομοιώνεται διαρκεί 300 ms, επομένως η μηχανή επιστρέφει σε κανονική λειτουργία πριν την εκκαθάρισή του.

Δεδομένου ότι κάθε φάση διαρκεί συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, και κάνοντας την υπόθεση ότι κατά το μεταβατικό της εκκαθάρισης του σφάλματος η διάταξη βραχυκύκλωσης δεν ενεργοποιείται¹, οι συγγραφείς οδηγούνται καταρχάς στο συμπέρασμα ότι η χρήση του λεπτομερούς μοντέλου χρειάζεται για ένα μικρό διάστημα μόνο, αμέσως μετά την εμφάνιση του βραχυκυκλώματος, προκειμένου να αποφασιστεί σωστά η ενεργοποίηση της διάταξης βραχυκύκλωσης. Πηγαίνοντας ένα βήμα παραπέρα, διαπιστώνουν ότι “τα βραχυκυκλώματα που οδηγούν σε μεγάλη βύθιση της τάσης θα συνεπάγονται πάντα την ενεργοποίηση της διάταξης βραχυκύκλωσης” και συμπεραίνουν ότι το μοντέλο μειωμένης τάξης είναι αρκετό για τις μελέτες ευστάθειας.

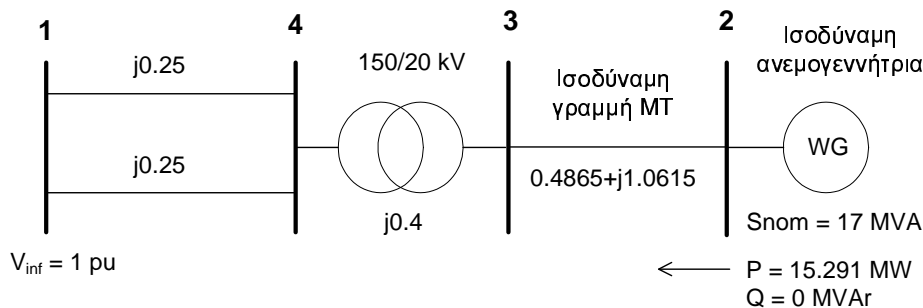
Από τα παραπάνω επιβεβαιώνεται ότι η πιο κατάλληλη αναπαράσταση της ενεργού διάταξης βραχυκύκλωσης σε πρόγραμμα προσομοίωσης με την παραδοχή ημιτονοειδούς κατάστασης είναι με προδιαγεγραμμένη αλληλουχία καταστάσεων της μηχανής. Δηλαδή η απενεργοποίηση της διάταξης γίνεται μετά από συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Επίσης μπορεί

¹ Λόγω του ότι το μεταβατικό είναι πιο ήπιο στην πραγματικότητα, αλλά και επειδή “οι κατασκευαστές προσπαθούν να σχεδιάζουν τον μετατροπέα έτσι ώστε να αποφεύγεται μια δεύτερη ενεργοποίηση της διάταξης βραχυκύκλωσης κατά την φάση επιστροφής της τάσης” [EKF07].

να χρησιμοποιηθεί ένα σχετικά ευαίσθητο όριο για το ρεύμα του δρομέα προκειμένου να εξασφαλιστεί ότι το μοντέλο είναι από την “ασφαλή πλευρά” όσον αφορά στην ενεργοποίηση της διάταξης βραχυκύκλωσης αμέσως μετά την εμφάνιση βραχυκύκλωματος.

5.2 Απόκριση γενικευμένου μοντέλου σε προσομοιώσεις βραχυκυκλωμάτων

Σε αυτή την ενότητα εξετάζουμε την αναπαράσταση της συμπεριφοράς της ΑΓΔΤ σε βραχυκυκλώματα με το γενικευμένο μοντέλο της ενότητας 3.4 και τις αντίστοιχες παραμέτρους που δίνονται στο Παράρτημα Α. Στο Σχ. 5.14 φαίνεται το δοκιμαστικό σύστημα που χρησιμοποιήθηκε και οι παράμετροι της ροής φορτίου. Οι σύνθετες αντιστάσεις του συστήματος είναι σε α.μ. σε βάση 100 MVA και ο λόγος του μετασχηματιστή έχει ληφθεί μοναδιαίος. Οι



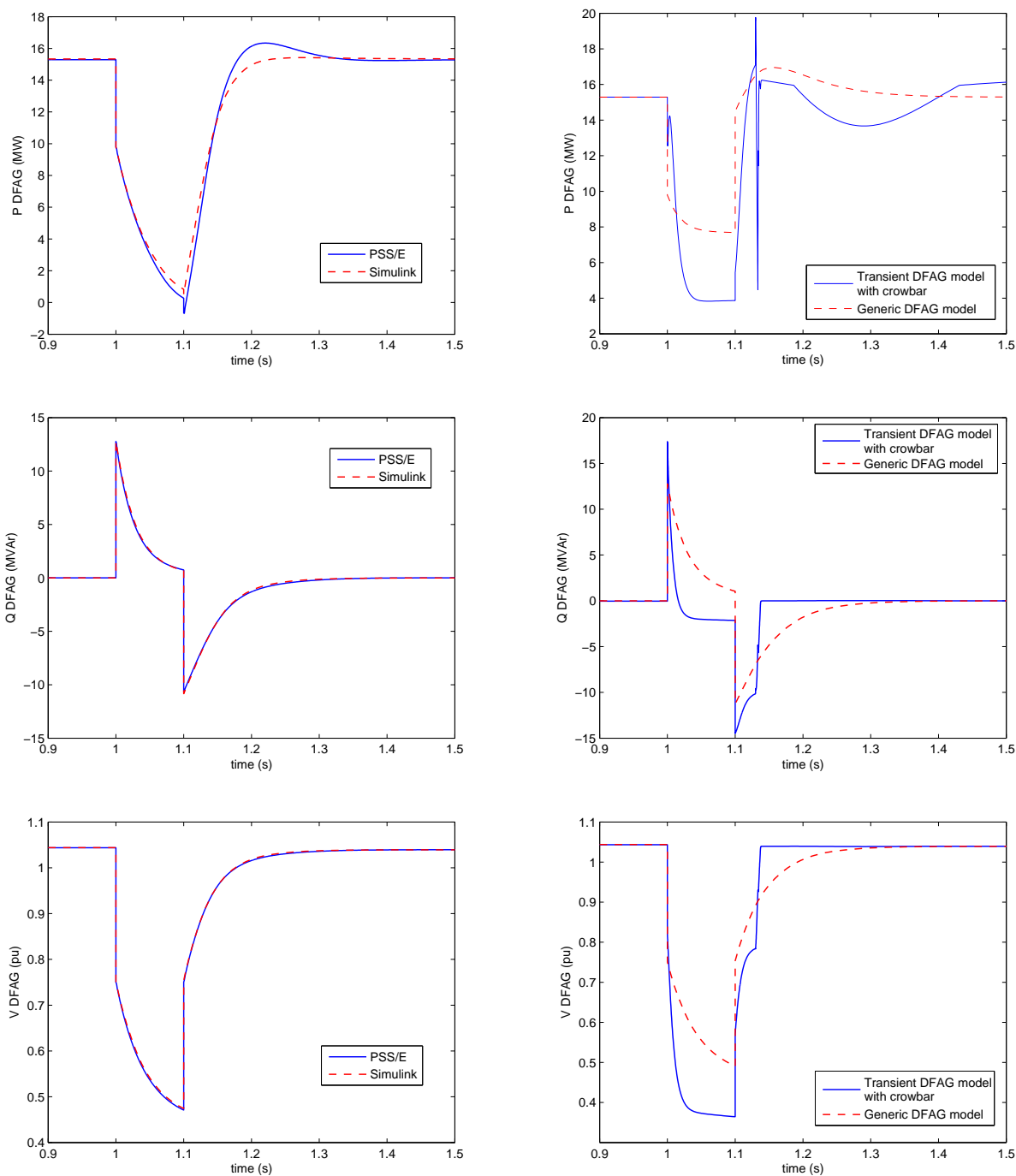
Σχήμα 5.14: Σύστημα ισοδύναμης ανεμογεννήτριας σε άπειρο ζυγό

ανεμογεννήτριες του αιολικού πάρκου αναπαριστώνται με μία ισοδύναμη μηχανή. Το σύνολο των σύνθετων αντιστάσεων μέχρι τον υποσταθμό 150/20 kV (μετασχηματιστής ανύψωσης της ανεμογεννήτριας, εσωτερικό δίκτυο μέσης τάσης του πάρκου, κλπ.) συμπεριλαμβάνονται στην ισοδύναμη γραμμή μέσης τάσης του Σχ. 5.14.

5.2.1 Σύγκριση γενικευμένου μοντέλου ΑΓΔΤ με μεταβατικό μοντέλο με ενεργό διάταξη βραχυκύκλωσης

Καταρχάς γίνεται επαλήθευση του γενικευμένου μοντέλου που αναπτύχθηκε στο Simulink με το αντίστοιχο μοντέλο του διαχειριστή του Ισπανικού συστήματος (REE) στο PSS/E, το οποίο διαθέτει ο ΔΕΣΜΗΕ. Η επαλήθευση έγινε στο πλαίσιο του ερευνητικού προγράμματος [ΕΜΠ10]. Σε αυτή την προσομοίωση θεωρείται ότι το αιολικό πάρκο διαθέτει ΑΓΔΤ και ότι η ισοδύναμη ανεμογεννήτρια κρατά σταθερό συντελεστή ισχύος στον τερματικό της ζυγό τόσο σε κανονική λειτουργία, όσο και κατά τη διάρκεια του σφάλματος, δηλ. δεν χρησιμοποιείται η καμπύλη του Σχ. 3.19 για την υποστήριξη της τάσης κατά τη διάρκεια της βύθισης.

Η διαταραχή που προσομοιώνεται είναι συμμετρικό τριφασικό βραχυκύκλωμα τη χρονική στιγμή $t=1$ s στο ζυγό 4 με σύνθετη αντίσταση $0 + j0,1$ προς γη. Το σφάλμα διατηρείται για 100 ms και εκκαθαρίζεται με το άνοιγμα της μίας γραμμής 1 – 4. Στο Σχ. 5.15α φαίνονται οι αποκρίσεις στο PSS/E και στο Simulink της ενεργού ισχύος, της αέργου ισχύος και της τερματικής τάσης της ΑΓΔΤ. Διαπιστώνουμε ότι, εκτός από τη μικρή διαφορά στην ενεργό ισχύ οι αποκρίσεις ταυτίζονται. Η διαφορά πιθανότατα οφείλεται σε διαφορετική υλοποίηση



(α) Επαλήθευση μοντέλου

(β) Σύγκριση με μεταβατικό μοντέλο

Σχήμα 5.15: Επαλήθευση γενικευμένου μοντέλου ΑΓΔΤ και σύγκριση με μεταβατικό μοντέλο με ενεργό διάταξη βραχυκύκλωσης

του περιοριστή του ενεργού ρεύματος στα δύο λογισμικά, αλλά είναι σχετικά μικρή, επομένως μπορούμε να συμπεράνουμε ότι το μοντέλο στο Simulink αναπαριστά επαρκώς το μοντέλο.

Στη συνέχεια προσομοιώνουμε την ίδια διαταραχή χρησιμοποιώντας για την ΑΓΔΤ το μεταβατικό μοντέλο με απλοποιημένους βρόχους ελέγχου και ενεργό διάταξη βραχυκύκλωσης. Στο Σχ. 5.15β φαίνονται οι αποκρίσεις αυτού του μοντέλου μαζί με τις αντίστοιχες αποκρίσεις του γενικευμένου μοντέλου. Προκειμένου να είναι συγκρίσιμα τα αποτελέσματα,

Κεφάλαιο 5. Αδιάλειπτη λειτουργία σε βυθίσεις τάσης

στο γενικευμένο μοντέλο δε γίνεται περιορισμός του ενεργού ρεύματος σύμφωνα με την καμπύλη του Σχ. 3.18. Επίσης, όπως και στην προηγούμενη προσομοίωση, θεωρείται ότι η ανεμογεννήτρια λειτουργεί συνέχεια με σταθερό συντελεστή ισχύος. Στο μεταβατικό μοντέλο η απενεργοποίηση της διάταξης βραχυκύκλωσης γίνεται μετά από 130 ms, δηλαδή 30 ms μετά την εκκαθάριση του βραχυκύκλωματος και ενώ η τάση έχει επανέλθει περίπου στο 80%.

Αν και τα μοντέλα είναι πολύ διαφορετικά, ποιοτικά οι αποκρίσεις μοιάζουν στην αναπαράσταση της φάσης απομαγνήτισης με την εμφάνιση του βραχυκύκλωματος και επαναμαγνήτισης αμέσως μετά την εκκαθάριση του σφάλματος. Συμπεριφορά που οφείλεται στην απευθείας σύνδεση του στάτη στο δίκτυο και είναι αναμενόμενη, ανεξάρτητα από το αν χρησιμοποιείται ενεργός διάταξη βραχυκύκλωσης του δρομέα για την επίτευξη αδιάλειπτης λειτουργίας της μηχανής.

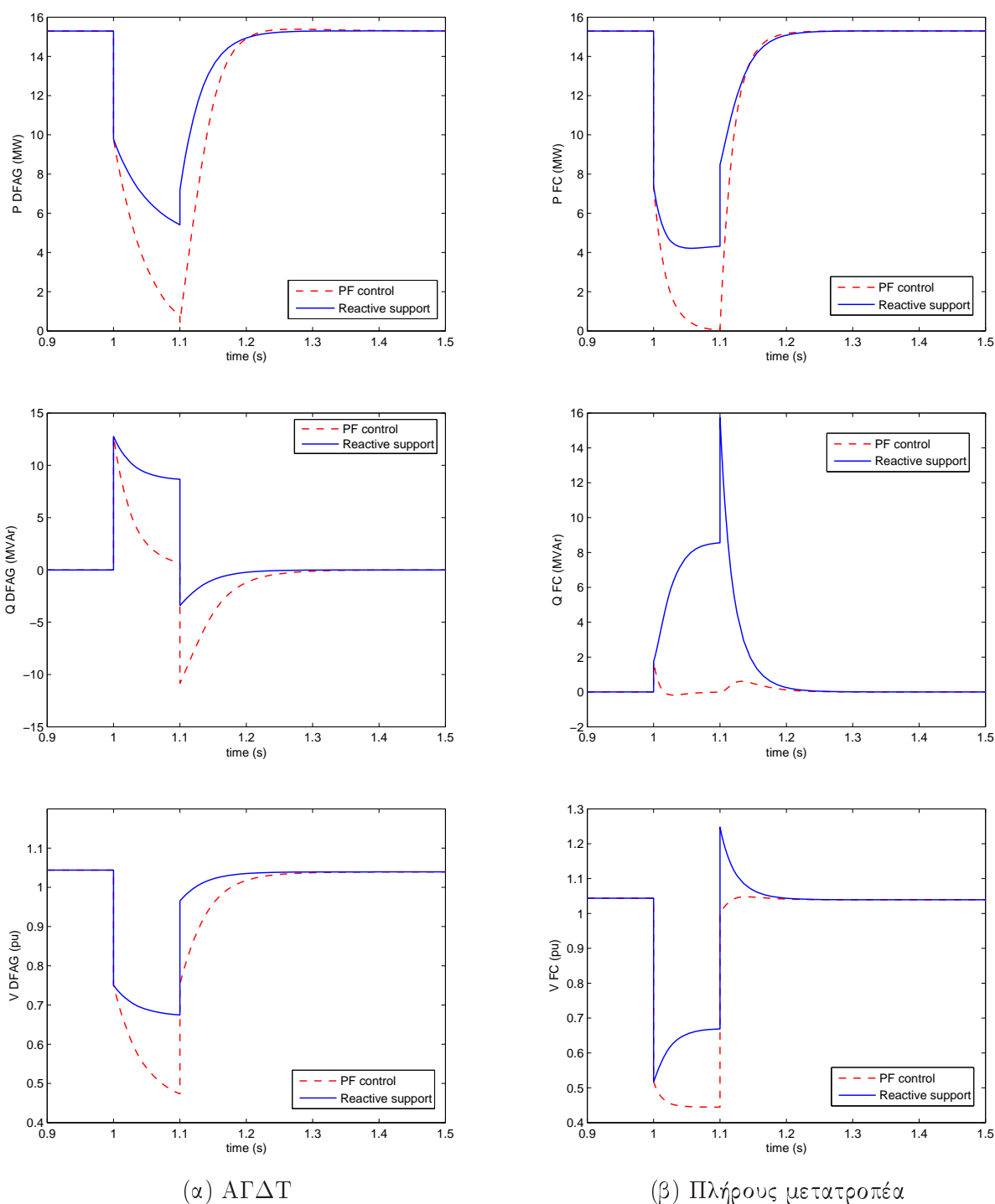
Το γενικευμένο μοντέλο δεν αναπαριστά το μηχανικό μέρος της ανεμογεννήτριας και έτσι η στρεπτική ταλάντωση του άξονα της ΑΓΔΤ, η οποία διακρίνεται στην απόκριση της ενεργού ισχύος του μεταβατικού μοντέλου, δεν εμφανίζεται στο γενικευμένο. Επίσης, στο γενικευμένο μοντέλο η μεταβατική συμπεριφορά απλά υπερτίθεται στην κανονική λειτουργία, στην οποία επιστρέφει το μοντέλο μετά την ολοκλήρωση της μεταβατικής απόκρισης. Έτσι, σε όλη τη διάρκεια του σφάλματος, η άεργος ισχύς είναι θετική. Αντίθετα, στο μεταβατικό μοντέλο η μηχανή αναπαριστάται ως μηχανή επαγωγής βραχυκυκλωμένου δρομέα κατά τη διάρκεια του σφάλματος, γι' αυτό και μετά τη φάση απομαγνήτισης που διαρκεί λίγα ms αρχίζει να καταναλώνει άεργο ισχύ. Καθώς μάλιστα η παραγωγή ενεργού ισχύος ήταν αρχικά σχεδόν ίση με την ονομαστική, η ολίσθηση της μηχανής επαγωγής είναι περίπου -20%, γεγονός που σημαίνει αυξημένη κατανάλωση αέργου ισχύος. Σαν αποτέλεσμα, η τάση στο μεταβατικό μοντέλο πέφτει περισσότερο, με συνέπεια την μείωση και της παραγόμενης ενεργού ισχύος.

Είναι προφανές ότι στο μεταβατικό μοντέλο έχουν γίνει αρκετές παραδοχές, όπως ο χρόνος απενεργοποίησης της διάταξης βραχυκύκλωσης κ.α. (βλ. ενότητα 5.1). Επίσης έχει υποθεθεί ότι ο μετατροπέας πλευράς δικτύου παραμένει σε κανονική λειτουργία με μοναδιαίο συντελεστή ισχύος σε όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης, αν και θα μπορούσε να συνεισφέρει με άεργο ρεύμα. Επομένως, το μεταβατικό μοντέλο μπορεί να είναι πιο ακριβές, αλλά με την προϋπόθεση ότι είναι διαθέσιμες οι απαραίτητες παράμετροι.

5.2.2 Ανεμογεννήτριες με ΑΓΔΤ και πλήρη μετατροπέα με και χωρίς άεργη υποστήριξη

Τέλος, εξετάζουμε αποκρίσεις του γενικευμένου μοντέλου για την ίδια διαταραχή για δύο περιπτώσεις: α) λειτουργία σταθερού συντελεστή ισχύος και β) άεργος υποστήριξη κατά τη διάρκεια του σφάλματος σύμφωνα με την καμπύλη του Σχ. 3.19. Στο Σχ. 5.16 φαίνονται οι αντίστοιχες αποκρίσεις (α) για την περίπτωση της ΑΓΔΤ και (β) για την περίπτωση ανεμογεννήτριας με πλήρη μετατροπέα.

Καταρχάς διαπιστώνουμε ότι η άεργος υποστήριξη από τις ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών έχει ως αποτέλεσμα σημαντική στήριξη της τάσης, γεγονός με ευεργετικές συνέπειες για τη βραχυπρόθεσμη ευστάθεια του συστήματος: Υποστηρίζοντας την τάση βελτιώνεται η μεταβατική ευστάθεια των σύγχρονων μηχανών, όπως και η βραχυπρόθεσμη ευστάθεια τάσης των μηχανών επαγωγής. Επίσης, υποθέτοντας ότι οι ανεμογεννήτριες αποσυνδέονται εφόσον η τάση βγει εκτός των ορίων μίας ορισμένης καμπύλης τάσης-χρόνου σύμφωνα με τις απαιτήσεις αδιάλειπτης λειτουργίας σε βυθίσεις τάσης (όπως π.χ. του Σχ. 1.6), η υποστήριξη της τάσης από μέρους τους συνεπάγεται και μειωμένες απώλειες αιολικής παραγωγής



Σχήμα 5.16: Αποκρίσεις γενικευμένου μοντέλου με έλεγχο συντελεστή ισχύος και άεργο υποστήριξη κατά τη διάρκεια του σφάλματος

σε περιπτώσεις σημαντικών διαταραχών.

Παρατηρούμε επίσης διαφορές στις αποκρίσεις μεταξύ των δύο τεχνολογιών που οφείλονται στη θεμελιώδη διαφορά της απευθείας σύνδεσης του στάτη στο δίκτυο στην περίπτωση της ΑΓΔΤ. Λόγω της απομαγνήτισης, αμέσως μετά τη βηματική μείωση της τάσης λόγω του σφάλματος, η παραγωγή άεργου ισχύος είναι μεγαλύτερη στην περίπτωση της ΑΓΔΤ. Στη συνέχεια το άεργο ρεύμα τείνει στην προγραμματισμένη τιμή του και στις δύο περιπτώσεις

Κεφάλαιο 5. Αδιάλειπτη λειτουργία σε βυθίσεις τάσης

(α και β) μέχρι το νέο μεταβατικό της εκκαθάρισης του σφάλματος. Τώρα η επαναμαγνήτιση μέσω του στάτη της ΑΓΔΤ προκαλεί κατανάλωση αέργου ισχύος. Αντίθετα, στην περίπτωση του πλήρους μετατροπέα, η βηματική αύξηση της τάσης προκαλεί αντίστοιχη μεταβολή στην παραγωγή αέργου ισχύος, καθώς το ρεύμα δεν έχει προλάβει να μεταβληθεί. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την περαιτέρω αύξηση της τάσης σε τιμή πάνω από 120% της ονομαστικής. Στην πράξη, με μία τόσο υψηλή τιμή της τάσης ο μετατροπέας μπορεί να βγει προσωρινά εκτός λειτουργίας (π.χ. για 50 ms). Αν και ο ίδιος ο μετατροπέας μπορεί να προστατευτεί αποτελεσματικά, ενδεχομένως να είναι προτιμότερο να μειωθεί το άεργο ρεύμα που εγγχεί κατά τη βύθιση της τάσης, ώστε να αποφευχθούν τέτοιου είδους υπερτάσεις με την εκκαθάριση του σφάλματος. Πάντως το μεταβατικό κατά την εκκαθάριση είναι γενικά πιο ήπιο, καθώς ο διακόπτης θα κόψει το ρεύμα του βραχυκυκλώματος σε κάθε φάση, όταν το ρεύμα της φάσης είναι κοντά στο μηδέν.

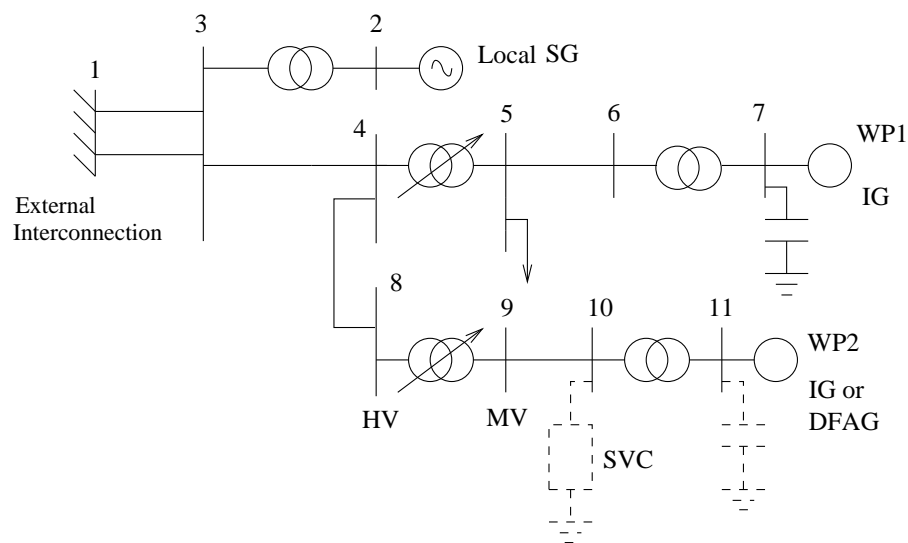
Κεφάλαιο 6

Επίδραση ανεμογεννητριών μεταβλητών στροφών στην ευστάθεια τάσης

6.1 Μικρό διασυνδεδεμένο ΣΗΕ

6.1.1 Περιορισμένη τοπική στήριξη τάσης

Στην παράγραφο αυτή εξετάζεται η επίδραση των ΑΓΔΤ στη βραχυπρόθεσμη ευστάθεια τάσης με τη βοήθεια του δοκιμαστικού συστήματος που φαίνεται στο Σχ. 6.1. Αποτελείται από μια τοπική συμβατική μονάδα παραγωγής ονομαστικής ισχύος 140 MW με σύγχρονη γεννήτρια και από δύο αιολικά πάρκα δυναμικότητας 100 MW (WP1) και 50 MW (WP2). Στο βασικό σενάριο θεωρείται ότι τα δύο αιολικά πάρκα διαθέτουν ανεμογεννήτριες σταθερών στροφών (γεννήτριες επαγωγής) με παθητικό αεροδυναμικό έλεγχο (σταθερή γεωμετρία πτερυγίων). Κάθε αιολικό πάρκο αναπαριστάται από μια ισοδύναμη ανεμογεννήτρια και ένα μετασχηματιστή ΧΤ/ΜΤ σταθερής λήψης. Οι μετασχηματιστές διανομής είναι εξοπλισμένοι με Σύστημα Αλλαγής Τάσης Υπό Φορτίο (ΣΑΤΥΦ) και το σύστημα έχει σχετικά αδύναμη σύνδεση με ένα ΣΗΕ πολύ μεγαλύτερό του μέσω δύο ίδιων γραμμών μεταφοράς. Το τοπικό φορτίο που βρίσκεται στο ζυγό 5 θεωρείται σταθερής αγωγιμότητας με κατανάλωση 26,97 MW και 5,75 MVar υπό ονομαστική τάση.



Σχήμα 6.1: Δοκιμαστικό διασυνδεδεμένο σύστημα με μια συμβατική μονάδα και δύο αιολικά πάρκα

Κεφάλαιο 6. Επίδραση ανεμογεννητριών μεταβλητών στροφών στην ευστάθεια τάσης

Τα χαρακτηριστικά των γραμμών μεταφοράς και των μετασχηματιστών δίνονται στους Πίνακες 6.1 και 6.2 αντίστοιχα.

Πίνακας 6.1: Παράμετροι γραμμών μεταφοράς (α.μ. σε βάση 100 MVA)

Ζυγοί	R	X	B
1-3 (α)	0,02646	0,12510	0,00000
1-3 (β)	0,02646	0,12510	0,00000
3-4	0,01560	0,06747	0,04428
4-8	0,01560	0,06747	0,04428
5-6	0,10750	0,18000	0,00000
9-10	0,10750	0,18000	0,00000

Πίνακας 6.2: Παράμετροι μετασχηματιστών (α.μ. σε βάση 100 MVA)

Ζυγοί	R	X	B	r_0
4-5	0,00410	0,11743	0,00000	0,90000
8-9	0,00410	0,12950	0,00000	0,92500
3-2	0,00250	0,07222	0,00000	1,05000
6-7	0,00000	0,05083	0,00000	1,01400
10-11	0,00000	0,10167	0,00000	1,01300

Η σύγχρονη γεννήτρια της συμβατικής μονάδας παραγωγής αναπαριστάται με μοντέλο τέταρτης τάξης, οι παράμετροι του οποίου δίνονται στον Πίνακα 6.3. Επίσης είναι εξοπλισμένη

Πίνακας 6.3: Παράμετροι σύγχρονης γεννήτριας συμβατικής μονάδας

S_{nom} (MVA)	176,5	X'_d	0,408
f_{nom} (Hz)	50	X'_q	0,257
R_s	0,000	$T_{d0'}$ (s)	5,842
X_{ls}	0,200	$T_{q0'}$ (s)	0,187
X_d	1,759	H (s)	4,0
X_q	1,720	D	0,0

με Αυτόματο Ρυθμιστή Τάσης (APT) τύπου AC4 κατά IEEE και Σύστημα Προστασίας Υπερδιέγερσης (ΣΠΥ) αθροιστικού τύπου με αναλογική μονάδα ελέγχου για τον περιορισμό υπερδιεγέρσεων [Kun94]. Το μοντέλα της σύγχρονης γεννήτριας, του APT, του ΣΠΥ και των ΣΑΤΥΦ που χρησιμοποιούνται περιγράφονται στο [Ποτ06]. Οι παράμετροι του APT και του ΣΠΥ που χρησιμοποιούνται δίνονται στον Πίνακα 6.4, όπου I_{fd}^{lim} είναι η μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή συνεχούς λειτουργίας του ρεύματος πεδίου και I_{fd}^{max} η μέγιστη μεταβατική τιμή. Το ρεύμα πεδίου περιορίζεται με πολύ μικρή σταθερή χρονική καθυστέρηση T_{en} στην τιμή I_{fd}^{max} . Προκειμένου να εξεταστεί μια περίπτωση αστάθειας τάσης στη βραχυπρόθεσμη

Πίνακας 6.4: Παράμετροι APT και ΣΠΥ σύγχρονης γεννήτριας συμβατικής μονάδας (α.μ.)

APT	K_A 25	T_A (s) 0,5	T_C (s) 1,0	T_B (s) 12,0	V_{Imin} -10	V_{Imax} 10	E_{fmin} 0	E_{fmax} 5
ΣΠΥ	I_{fd}^{lim} 2,00	I_{fd}^{max} 2,35	T_{en} (s) 0,20	K_P 10				

χρονική κλίμακα, το μεταβατικό όριο I_{fd}^{max} του ρεύματος πεδίου έχει τεθεί σχετικά χαμηλά. Η επίδραση του στροβίλου αμελείται, με αποτέλεσμα η μηχανική ροπή εισόδου της σύγχρονης γεννήτριας να θεωρείται σταθερή. Οι παράμετροι των ΣΑΤΥΦ (κοινοί και για τα δύο ΣΑΤΥΦ) δίνονται στον Πίνακα 6.5, όπου:

Πίνακας 6.5: Παράμετροι ΣΑΤΥΦ

V_{max} (αμ)	V_{min} (αμ)	r_{max}	r_{min}	Δr	T_m (s)	T_d (s)
1,03	1,01	1,075	0,875	0,00625	20	10

- V_{max} και V_{min} είναι αντίστοιχα το άνω και το κάτω όριο της νεκρής ζώνης του ΣΑΤΥΦ.
- r_{max} και r_{min} είναι αντίστοιχα ο μέγιστος και ο ελάχιστος λόγος μετασχηματισμού.
- Δr είναι το βήμα μεταβολής του λόγου μετασχηματισμού.
- T_m είναι η χρονική καθυστέρηση για την πρώτη αλλαγή λήψης.
- T_d είναι η χρονική καθυστέρηση μεταξύ δύο μεταβολών του λόγου μετασχηματισμού.

Η αναπαράσταση των ανεμογεννητριών σταθερών στροφών γίνεται σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν στην ενότητα 1.5. Το μοντέλο που χρησιμοποιείται έχει αναπτυχθεί σε παλαιότερη εργασία που έχει εκπονηθεί στο Πανεπιστήμιο της Λιέγης [Tso03] και έχει προσαρμοστεί στο λογισμικό WHSSP. Χρησιμοποιείται κατάλληλη αντιστάθμιση (η οποία θεωρείται ότι παραμένει σταθερή κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης) ώστε το πάρκο να λειτουργεί με συντελεστή ισχύος 0,95 επαγωγικό στο αρχικό σημείο λειτουργίας. Οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν είναι από την εργασία [SPK03]. Στον Πίνακα 6.6 βρίσκονται οι παράμετροι των μηχανών επαγωγής, όπου χρησιμοποιείται το μοντέλο δύο στρεφόμενων μαζών της παραγράφου 3.2.6. Στον Πίνακα 6.7 βρίσκονται οι παράμετροι της ανεμογεννήτριας σταθερών

Πίνακας 6.6: Παράμετροι μηχανών επαγωγής (α.μ.)

f_{nom} (Hz)	R_s	X_{ls}	X_m	R_r	X_{lr}	H_r (s)	H_l (s)	K_{sh}	D_{sh}
50	0,01	0,1	3,0	0,01	0,08	0,5	2,5	0,3	0

στροφών, ενώ για τον υπολογισμό του αεροδυναμικού συντελεστή ισχύος χρησιμοποιούνται οι ακόλουθες εξισώσεις:

Πίνακας 6.7: Χαρακτηριστικά ανεμογεννήτριας σταθερών στροφών

Ονομαστική Ισχύς P_{nom}	2 MW
Διάμετρος Δρομέα	75 m
Ονομαστική ταχύτητα ανέμου	15 m/s
Λόγος μειωτήρα στροφών	1:89
Πυκνότητα αέρα ρ	1,225 kg/m ²

$$C_p(\lambda) = 0,44 \left(\frac{125}{\lambda_i} - 6,94 \right) e^{-\frac{16,5}{\lambda_i}} \quad (6.1)$$

όπου

$$\lambda_i = \left(\frac{1}{\lambda} + \frac{0,002}{1} \right)^{-1} \quad (6.2)$$

Στο θεωρούμενο σημείο λειτουργίας, τα αιολικά πάρκα παράγουν ονομαστική ενεργό ισχύ, με συντελεστή ισχύος 0,95 επαγωγικό. Η σύγχρονη γεννήτρια παράγει ονομαστική ενεργό ισχύ και κρατά την τερματική της τάση ίση με 1,04 α.μ. Η τάση του άπειρου ζυγού λαμβάνεται ίση με 1,04 α.μ. Το σύστημα εξάγει ενεργό ισχύ και εισάγει άεργο ισχύ από τη διασύνδεση.

Η διαταραχή που συνίσταται στην απώλεια της μιας από τις δύο γραμμές διασύνδεσης τη χρονική στιγμή $t=20$ s, προσομοιώνεται θεωρώντας τέσσερις διαφορετικές περιπτώσεις για το πάρκο WP2:

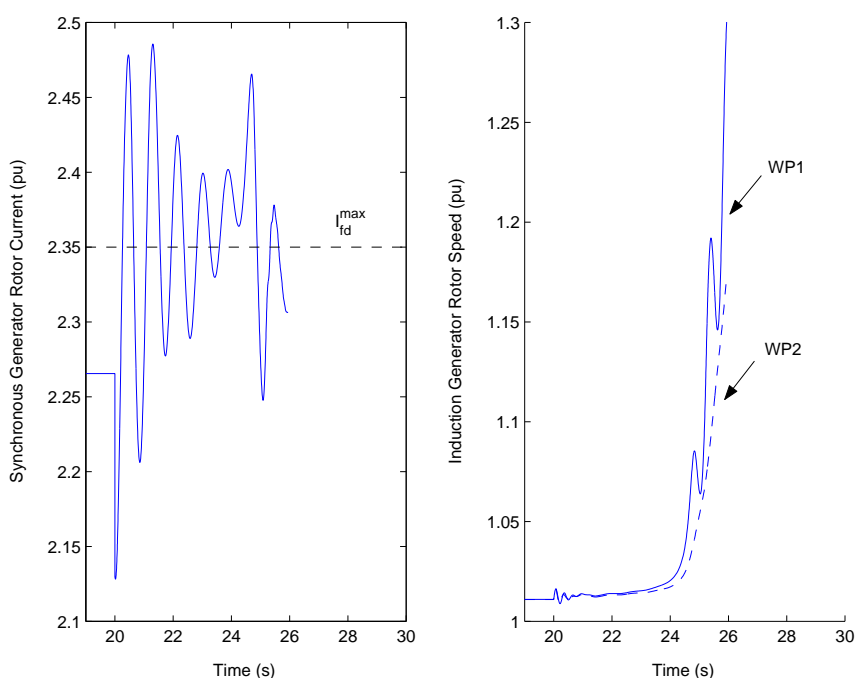
1. Διαθέτει ανεμογεννήτριες σταθερών στροφών με παθητικό αεροδυναμικό έλεγχο, όπως το πάρκο WP1.
2. Διαθέτει ανεμογεννήτριες σταθερών στροφών με παθητικό αεροδυναμικό έλεγχο, όπως το πάρκο WP1, αλλά υπάρχει και ένα στατό σύστημα αέργου αντιστάθμισης (SVC) ονομαστικής δυναμικότητας 8 MVAR στο ζυγό MT μετά το M/Σ ανύψωσης του WP2, το οποίο ρυθμίζει την τάση του ζυγού αυτού.
3. Διαθέτει ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών με έλεγχο γωνίας βήματος των πτερυγίων και ΑΓΔΤ που ρυθμίζει το συντελεστή ισχύος.
4. Διαθέτει ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών με έλεγχο γωνίας βήματος των πτερυγίων και ΑΓΔΤ που ρυθμίζει την τερματική της τάση.

Για την ανεμογεννήτρια με ΑΓΔΤ χρησιμοποιείται παραλλαγή του μεταβατικού μοντέλου της ενότητας 3.2 με απλοποιημένους βρόχους ελέγχου και με τις παραμέτρους του Παραρτήματος Α. Οι παράμετροι των ρυθμιστών (ροπής/στροφών, αέργου ισχύος, γωνίας βήματος πτερυγίων) που χρησιμοποιήθηκαν δίνονται στον Πίνακα 6.8. Τα κέρδη των PI ρυθμιστών των ρευμάτων του δρομέα είναι πολύ υψηλά, οπότε το μοντέλο είναι πρακτικά ισοδύναμο με το αντίστοιχο αλγεβρικό. Η τάση του πυκνωτή συνεχούς θεωρείται σταθερή και χρησιμοποιείται μοντέλο μίας στρεφόμενης μάζας. Ο έλεγχος του συντελεστή ισχύος ή της τάσης γίνεται με έναν απλό ολοκληρωματικό ελεγκτή με μοναδιαίο κέρδος, η έξοδος του οποίου είναι η αναφορά του ρεύματος i_{dr} . Η είσοδος αναφοράς του ολοκληρωματικού ρυθμιστή είναι η επιθυμητή άεργος ισχύς στην περίπτωση ελέγχου του συντελεστή ισχύος και η επιθυμητή τερματική τάση στην περίπτωση ελέγχου της τάσης.

Πίνακας 6.8: Παράμετροι ρυθμιστών ανεμογεννήτριας με ΑΓΔΤ

$\frac{dB}{dt}_{max}$	T_S	K_p^p	K_i^p	K_p	K_i
$3^\circ/s$	0,5 s	100	6	50	100

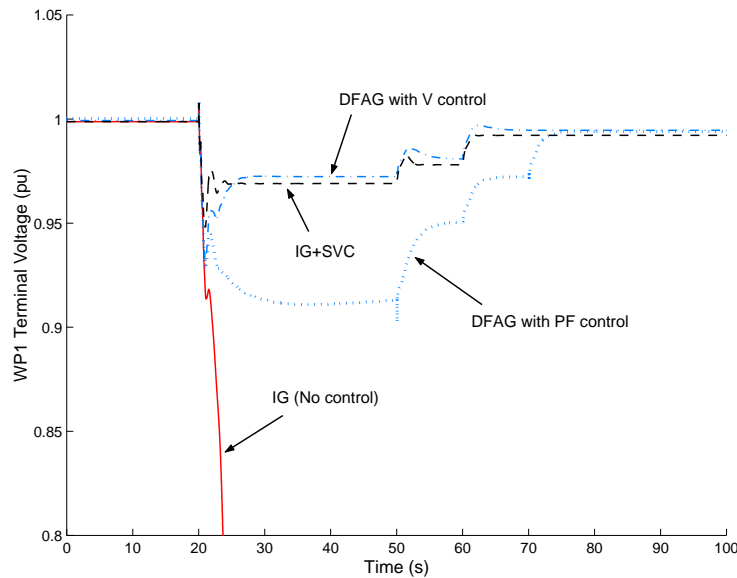
Οι προσομοιώσεις έγιναν με το λογισμικό WHSSP, σε Matlab 5.3. Στο Σχ. 6.2 φαίνεται η μεταβολή του ρεύματος του πεδίου της σύγχρονης γεννήτριας και η ταχύτητα του δρομέα κάθε ισοδύναμης μηχανής επαγωγής των δύο αιολικών πάρκων για την πρώτη περίπτωση. Καθώς το ρεύμα πεδίου της σύγχρονης γεννήτριας περιορίζεται, χάνεται η δυνατότητα υποστήριξης της τάσης. Η πτώση της τάσης έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της μέγιστης ροπής (ροπής ανατροπής) της μηχανής επαγωγής και την απώλεια βραχυπρόθεσμου σημείου ισορροπίας [vCV98].



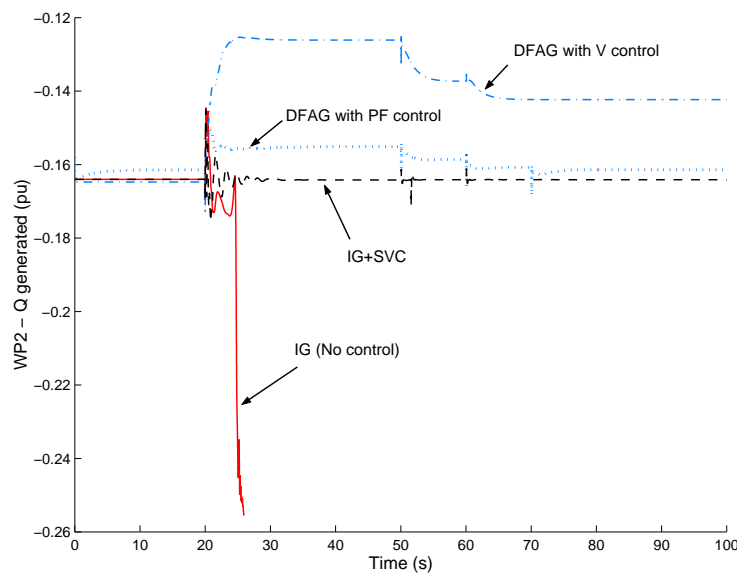
Σχήμα 6.2: Περίπτωση (1): Ρεύμα διέγερσης σύγχρονης γεννήτριας και ταχύτητα δρομέα μηχανών επαγωγής

Κατά συνέπεια, οι γεννήτριες επαγωγής υπερταχύνονται και οι τάσεις καταρρέουν (π.χ. η τερματική τάση του πάρκου WP1 για την περίπτωση αυτή φαίνεται με συνεχή γραμμή στο Σχ. 6.3). Στο Σχ. 6.3 και στο Σχ. 6.4 φαίνεται η μεταβολή της τερματικής τάσης του αιολικού πάρκου WP1 και της παραγωγής άεργου ισχύος του πάρκου WP2 αντίστοιχα, για τις τέσσερις διαφορετικές περιπτώσεις.

Στη δεύτερη περίπτωση, η εισαγωγή του SVC καθιστά το σύστημα ευσταθές. Το ίδιο συμβαίνει αν, αντί για μηχανές επαγωγής, χρησιμοποιηθούν ΑΓΔΤ στο πάρκο WP2. Στην περίπτωση αυτή το σύστημα είναι ευσταθές χωρίς να υπάρχει ανάγκη για επιπλέον γρήγορη άεργη αντιστάθμιση από SVC. Σημειώνεται ότι στην περίπτωση που οι ΑΓΔΤ κάνουν έλεγχο του συντελεστή ισχύος, η τάση δεν επιστρέφει σε κανονικά επίπεδα παρά μόνο μετά τη λειτουργία των ΣΑΤΥΦ.



Σχήμα 6.3: Τερματική τάση του πάρκου WP1 για τις τέσσερις περιπτώσεις



Σχήμα 6.4: Παραγωγή αέργου ισχύος του πάρκου WP2 για τις τέσσερις περιπτώσεις

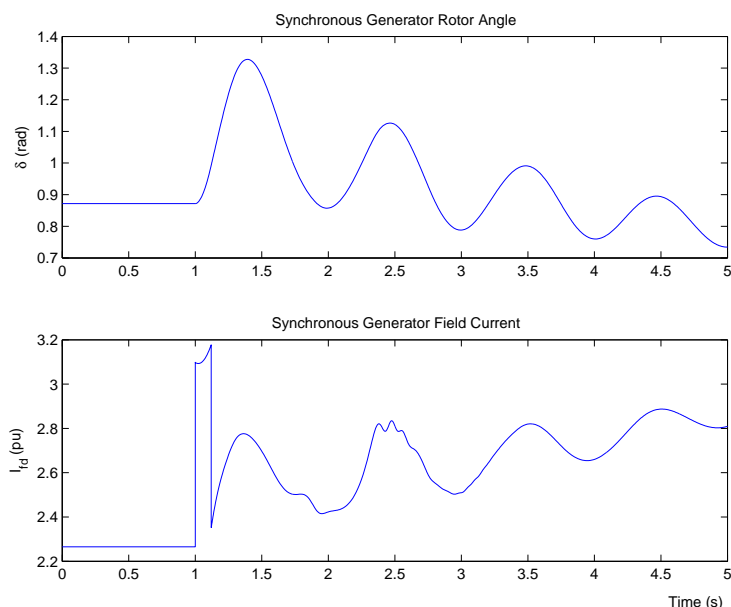
6.1.2 Προσομοιώσεις βραχυκυκλωμάτων

Στην παράγραφο αυτή προσομοιώνεται ένα τριφασικό συμμετρικό βραχυκύκλωμα στο σύστημα της παραγράφου 6.1.1, με τη διαφορά ότι δεν λαμβάνεται υπόψη το σύστημα προστασίας υπερδιέγερσης της σύγχρονης γεννήτριας. Το βραχυκύκλωμα εμφανίζεται τη χρονική στιγμή $t=1$ s στο ζυγό 3, με αντίδραση προς γη 0,05 αμ και εκκαθαρίζεται μετά από 120 ms με το άνοιγμα της μιας γραμμής 1-3.

Στην πρώτη προσομοίωση θεωρείται πάλι ότι και τα δύο αιολικά πάρκα διαθέτουν μηχανές επαγωγής. Στο Σχ. 6.5 φαίνεται η απόκριση της γωνίας του δρομέα και του ρεύματος διέγερσης της σύγχρονης γεννήτριας. Διαπιστώνεται ότι η γεννήτρια παραμένει σε συγχρονισμό, ενώ το ρεύμα διέγερσης αυξάνεται προσπαθώντας να κρατήσει την τάση.

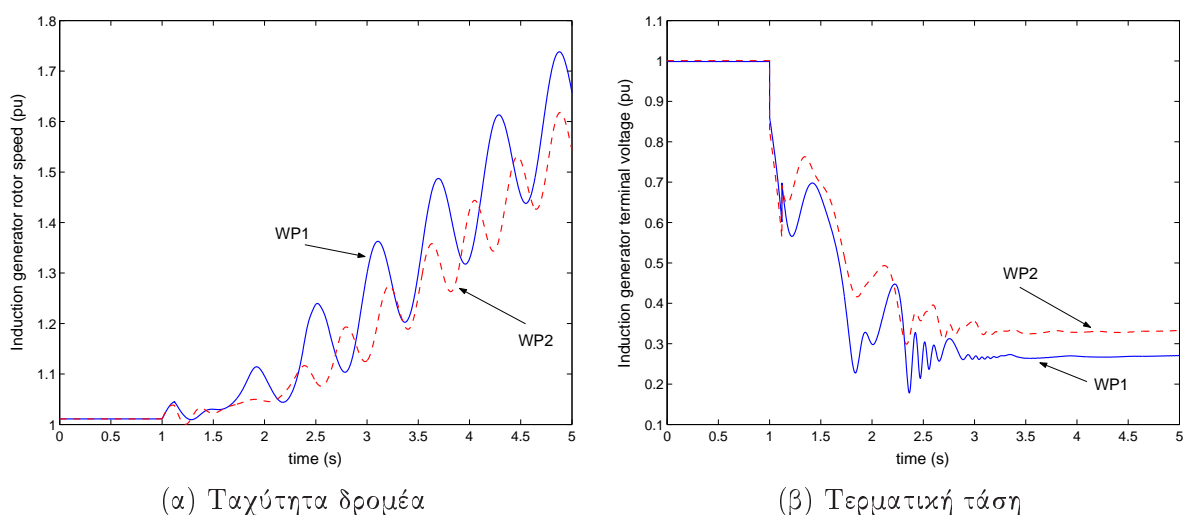
Στο Σχ. 6.6 φαίνονται οι αποκρίσεις της ταχύτητας δρομέα και της τερματικής τάσης

Κεφάλαιο 6. Επίδραση ανεμογεννητριών μεταβλητών στροφών στην ευστάθεια τάσης



Σχήμα 6.5: Γωνία δρομέα και ρεύμα διέγερσης της σύγχρονης γεννήτριας

των δύο μηχανών επαγωγής. Οι δρομείς συνεχίζουν να επιταχύνονται μετά την εκκαθάριση του σφάλματος και οι τάσεις καταρρέουν. Πρόκειται για το γνωστό είδος βραχυπρόθεσμης αστάθειας τάσης των μηχανών επαγωγής λόγω απώλειας έλξης του ευσταθούς σημείου ισορροπίας [vCV98]. Αν η διάρκεια του βραχυκυκλώματος ήταν αρκετά μικρή (μικρότερη από τον κρίσιμο χρόνο εκκαθάρισης) οι δρομείς των μηχανών επαγωγής θα επιβραδύνονταν μετά την εκκαθάριση και θα κατέληγαν στο (νέο) ευσταθές σημείο ισορροπίας. Αυτού του είδους η βραχυπρόθεσμη ευστάθεια τάσης των μηχανών επαγωγής είναι ανάλογη με τη μεταβατική ευστάθεια των σύγχρονων γεννητριών.



(α) Ταχύτητα δρομέα

(β) Τερματική τάση

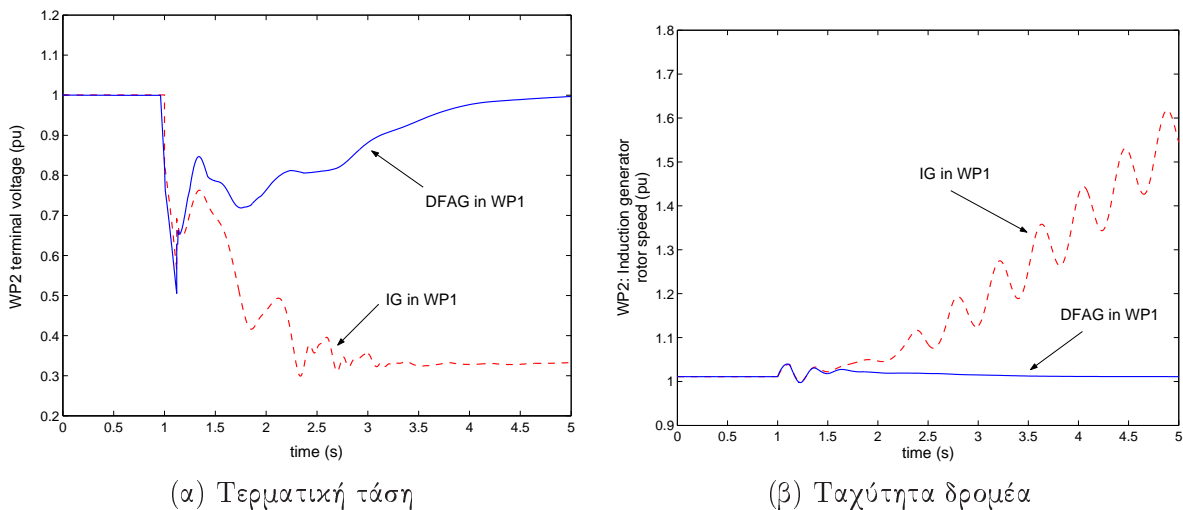
Σχήμα 6.6: Αποκρίσεις των αιολικών πάρκων όταν διαθέτουν και τα δύο μηχανές επαγωγής

Στη δεύτερη προσομοίωση, το αιολικό πάρκο WP1 θεωρείται ότι διαθέτει ΑΓΔΤ, οι οποίες είναι εξοπλισμένες με ενεργό διάταξη βραχυκύκλωσης για την εξασφάλιση αδιάλειπτης λειτουργίας σε βυθίσεις τάσης. Η αναπαράσταση της λειτουργίας της ενεργού διάταξης

Κεφάλαιο 6. Επίδραση ανεμογεννητριών μεταβλητών στροφών στην ευστάθεια τάσης

βραχυκύκλωσης γίνεται με το μεταβατικό μοντέλο με απλοποιημένους βρόχους ελέγχου, όπως στο σύστημα ΑΓΔΤ - άπειρος ζυγός της παραγράφου 5.1.3. Στην προσομοίωση η διαδικασία απενεργοποίησης της διάταξης βραχυκύκλωσης ξεκινά 130 ms μετά την ενεργοποίηση. Ο περιορισμός του ρεύματος και της τάσης του δρομέα αφού η μηχανή επανέλθει σε κανονική λειτουργία γίνεται με προτεραιότητα στον έλεγχο στροφών, ενώ θεωρείται ότι ο μετατροπέας πλευράς δικτύου λειτουργεί συνεχώς με μοναδιαίο συντελεστή ισχύος, δηλ. δε συνεισφέρει με παραγωγή αέργου ισχύος στη φάση του βραχυκυκλώματος. Ο ρυθμιστής αέργου ισχύος μέσω του μετατροπέα πλευράς δρομέα θεωρείται σε λειτουργία σταθερού συντελεστή ισχύος. Προκειμένου για τη σύγκριση μόνο της δυναμικής συμπεριφοράς μεταξύ μηχανών επαγωγής και ΑΓΔΤ, ο συντελεστής ισχύος του πάρκου WP1 στη μόνιμη κατάσταση θεωρείται 0,95 επαγωγικός, όπως στην περίπτωση με τις γεννήτριες επαγωγής.

Στο Σχ. 6.7 φαίνονται συγκριτικά η απόκριση της τερματικής τάσης και της ταχύτητας του δρομέα της ισοδύναμης μηχανής επαγωγής του αιολικού πάρκου WP2 όταν το αιολικό πάρκο WP1 διαθέτει μηχανές επαγωγής και όταν διαθέτει ΑΓΔΤ. Όπως βλέπουμε, στην

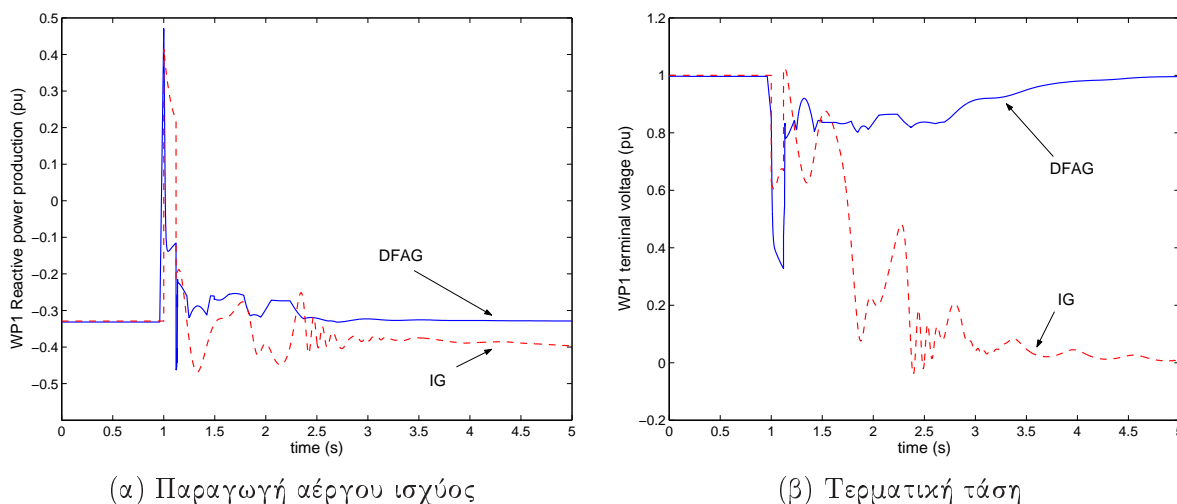


Σχήμα 6.7: Αποκρίσεις αιολικού πάρκου WP2 στις περιπτώσεις που το πάρκο WP1 διαθέτει μηχανές επαγωγής (IG) και ΑΓΔΤ (DFAG)

περίπτωση που το πάρκο WP1 διαθέτει ΑΓΔΤ με ενεργό διάταξη βραχυκύκλωσης δρομέα, το σύστημα είναι ευσταθές.

Στο Σχ. 6.8 φαίνονται συγκριτικά η απόκριση της αέργου ισχύος και της τερματικής τάσης του αιολικού πάρκου WP1 όταν αυτό διαθέτει μηχανές επαγωγής (ασταθής περίπτωση) και όταν διαθέτει ΑΓΔΤ (ευσταθής περίπτωση). Στην περίπτωση με ΑΓΔΤ ο δρομέας βραχυκυκλώνεται (οπότε η μηχανή μετατρέπεται σε μηχανή επαγωγής) αμέσως αφού εκδηλωθεί το σφάλμα. Λόγω της σχετικά μεγάλης αντίστασης που έχει υποθεθεί για τη διάταξη βραχυκύκλωσης, το ρεύμα του δρομέα μειώνεται πιο γρήγορα σε σχέση με την περίπτωση της μηχανής επαγωγής, γι' αυτό και η παραγωγή αέργου ισχύος είναι μικρότερη κατά τη διάρκεια του σφάλματος και η τάση μειώνεται περισσότερο. Μετά την εκκαθάριση του σφάλματος όμως, η ΑΓΔΤ επιστρέφει σε κανονική λειτουργία και η αέργος ισχύς (παραγωγή) αυξάνεται γρήγορα, προκειμένου να μείνει σταθερός ο συντελεστής ισχύος, σε αντίθεση με τη μηχανή επαγωγής.

Συμπερασματικά, εκτός του ότι παραμένουν οι ίδιες σε λειτουργία μετά το βραχυκύκλωμα, σε σχέση με τις ανεμογεννήτριες σταθερών στροφών οι ΑΓΔΤ ενισχύουν την βραχυπρόθεσμη ευστάθεια τάσης των κοντινών μηχανών επαγωγής υποστηρίζοντας την τάση. Αντί-



Σχήμα 6.8: Αποκρίσεις αιολικού πάρκου WP1 στις περιπτώσεις που διαθέτει μηχανές επαγωγής (IG) και ΑΓΔΤ (DFAG)

στοιχο συμπέρασμα μπορεί να ειπωθεί και για τη μεταβατική ευστάθεια γειτονικών σύγχρονων γεννητριών λόγω της αναλογίας των δύο ειδών ευστάθειας. Σημειώνεται ότι εξετάστηκε μια σχετικά δυσμενής περίπτωση, καθώς για την αδιάλειπτη λειτουργία σε συνθήκες σφάλματος χρησιμοποιήθηκε ενεργός διάταξη βραχυκύκλωσης (η οποία παρέμεινε ενεργοποιημένη κατά τη διάρκεια του σφάλματος, δεδομένου βέβαια και ότι αυτό ήταν μικρής διάρκειας) και η ΑΓΔΤ δεν παρείχε άεργη υποστήριξη κατά τη διάρκεια της βύθισης της τάσης από τον μετατροπέα πλευράς δικτύου.

6.1.3 Σύγκριση αποκρίσεων μοντέλων ΑΓΔΤ και πλήρους μετατροπέα

Σε αυτή την ενότητα χρησιμοποιείται σύστημα παρόμοιο με αυτό που χρησιμοποιήθηκε στην παράγραφο 6.1.1 (βλ. Σχ. 6.1). Οι διαφορές ανάμεσα στα δύο συστήματα φαίνονται στον Πίνακα 6.9.

Πίνακας 6.9: Διαφορές συστήματος σε σχέση με το σύστημα της παραγράφου 6.1.1

Σύνθετη αντίσταση κάθε διασυνδετικής γραμμής (α.μ.)	0,0344+j0,1626
Αρχικός λόγος μετασχηματισμού (r_0) του ΣΑΤΥΦ 8-9	0,9875
Λόγος μετασχηματισμού Μ/Σ 6-7	1,00
Λόγος μετασχηματισμού Μ/Σ 10-11	1,02
Συντελεστής ισχύος της ισοδύναμης γεννήτριας του αιολικού πάρκου WP2	1,00

Στο αρχικό σημείο λειτουργίας, τα αιολικά πάρκα παράγουν ονομαστική ισχύ, όπως και η τοπική συμβατική μονάδα η οποία κρατάει την τερματική της τάση ίση με 1,02. Η τάση του άπειρου ζυγού είναι επίσης ίση με 1,02. Η διαταραχή που προσομοιώνεται είναι η απώλεια της μιας από τις δύο γραμμές διασύνδεσης τη χρονική στιγμή $t=5$ s.

Για τις ανεμογεννήτριες του αιολικού πάρκου WP2 θεωρούνται οι εξής περιπτώσεις:

1. Σταθερών στροφών με μηχανές επαγωγής, όμοιες με αυτές του πάρκου WP1

Κεφάλαιο 6. Επίδραση ανεμογεννητριών μεταβλητών στροφών στην ευστάθεια τάσης

2. Μεταβλητών στροφών με ΑΓΔΤ

3. Μεταβλητών στροφών με πλήρη μετατροπέα

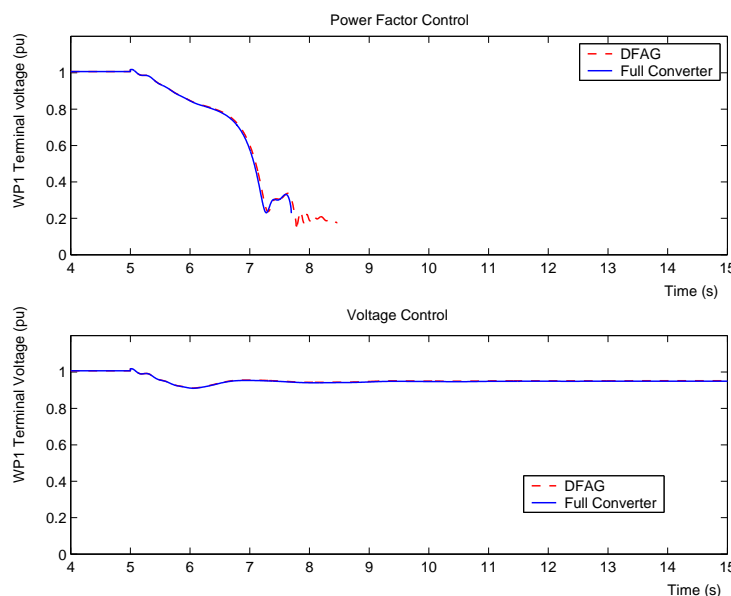
Για την ΑΓΔΤ, χρησιμοποιείται το αλγεβρικό μοντέλο με απλοποιημένους βρόχους ελέγχου της ενότητας 3.2 με τις παραμέτρους του Παραρτήματος Α και με μοντέλο άξονα με δύο στρεφομένες μάζες. Για την ανεμογεννήτρια με πλήρη μετατροπέα χρησιμοποιείται το γενικευμένο μοντέλο της ενότητας της ενότητας 3.4, χωρίς περιοριστή ρεύματος. Η καθυστέρηση των 20 ms για την υλοποίηση του ρεύματος αναφοράς (βλ. Σχ. 3.16) προστέθηκε και στο μοντέλο της ΑΓΔΤ. Σημειώνεται ότι στις προσομοιώσεις δεν έχουν ληφθεί υπόψη περιορισμοί ρεύματος των ανεμογεννητριών. Οι προσομοιώσεις έγιναν σε Matlab 6.5.

Στην πρώτη περίπτωση που το πάρκο WP2 διαθέτει μηχανές επαγωγής, όπως το πάρκο WP1, το σύστημα είναι ασταθές, όπως στην αντίστοιχη περίπτωση της παραγράφου 6.1.1. Σε καθεμία από τις περιπτώσεις με ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών, γίνονται δύο προσομοιώσεις, ανάλογα με το είδος ελέγχου αέργου ισχύος που ασκούν:

- με σταθερό συντελεστή ισχύος
- με αναλογικό έλεγχο τάσης (κέρδος 10)

Οι δύο παραπάνω περιπτώσεις αντιστοιχούν στις δύο επιλογές του ρυθμιστή αέργου ισχύος του Σχ. 3.5 για την ΑΓΔΤ και του Σχ. 3.16 για την ανεμογεννήτρια πλήρους μετατροπέα. Στην περίπτωση ελέγχου της τάσης έχει προστεθεί καθυστέρηση για την μέτρηση της τάσης (100 ms) και στο μοντέλο της ΑΓΔΤ.

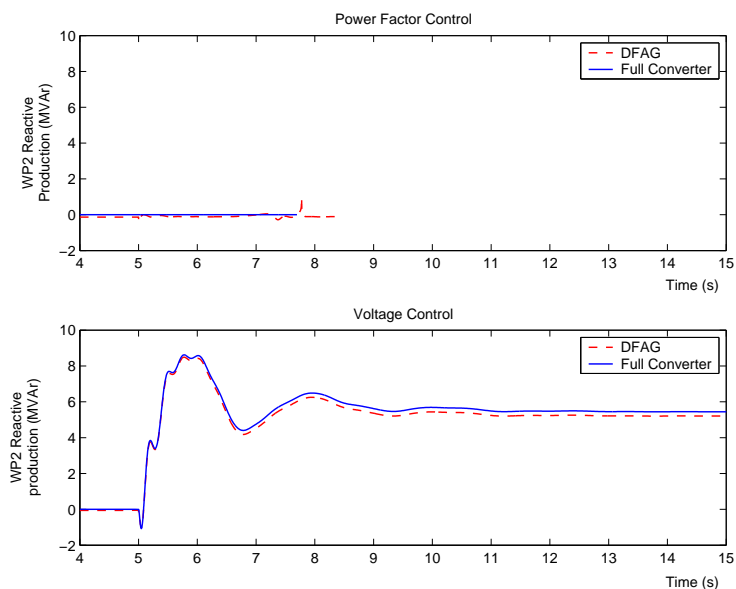
Στο Σχ. 6.9 φαίνεται η τερματική τάση του πάρκου WP1 και στο Σχ. 6.10 η παραγωγή αέργου ισχύος του πάρκου WP2 στις περιπτώσεις που χρησιμοποιούνται ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών στο πάρκο WP2. Επίσης στο Σχ. 6.11 φαίνεται το ρεύμα που εγχέεται από το πάρκο WP2 στο σύστημα στις αντίστοιχες περιπτώσεις.



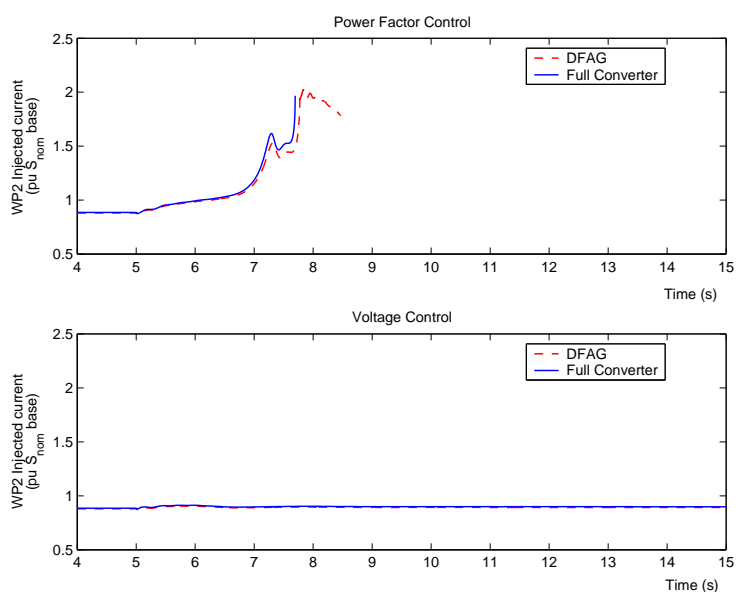
Σχήμα 6.9: Περίπτωση με ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών στο πάρκο WP2: τερματική τάση του WP1 όταν το WP2 κάνει έλεγχο συντελεστή ισχύος (πάνω) και έλεγχο τάσης (κάτω)

Από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων προκύπτει ότι:

Κεφάλαιο 6. Επίδραση ανεμογεννητριών μεταβλητών στροφών στην ευστάθεια τάσης



Σχήμα 6.10: Περίπτωση με ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών στο πάρκο WP2: παραγωγή αέργου ισχύος του WP2 για έλεγχο συντελεστή ισχύος (πάνω) και έλεγχο τάσης (κάτω)



Σχήμα 6.11: Περίπτωση με ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών στο πάρκο WP2: εγχεόμενο ρεύμα από το πάρκο WP2 για έλεγχο συντελεστή ισχύος (πάνω) και έλεγχο τάσης (κάτω)

- Το σύστημα παραμένει ασταθές στην περίπτωση που οι ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών κάνουν έλεγχο συντελεστή ισχύος, ακόμα και με την υπόθεση απεριόριστου ρεύματος (βλ. Σχ. 6.11).
- Το σύστημα είναι ευσταθές στην περίπτωση με έλεγχο τάσης, ενώ η απαιτούμενη άεργος παραγωγή είναι χαμηλή και επομένως εντός των ορίων πραγματικών ανεμογεννητριών. Επομένως οι ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών μπορούν να αυξήσουν σημαντικά τα όρια αιολικής διείσδυσης σε ασθενή δίκτυα με περιορισμούς ευστάθειας τάσης, εφόσον εξιοποιηθούν οι δυνατότητές τους για έλεγχο της τάσης.

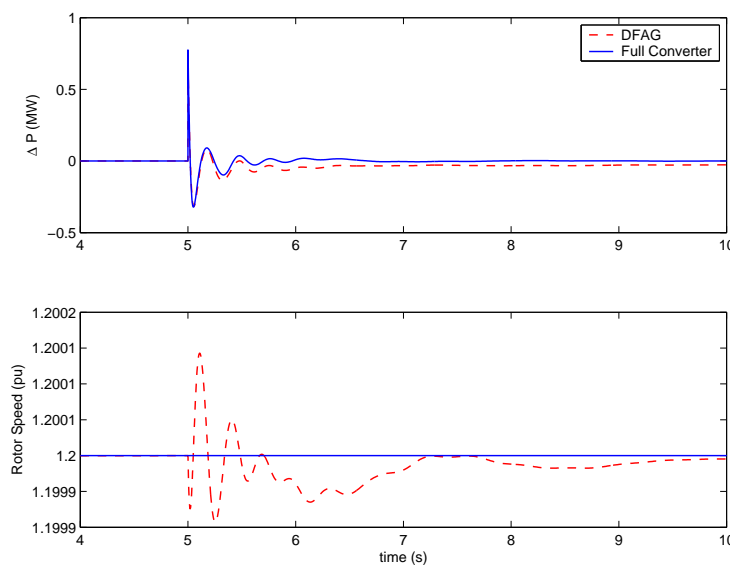
Κεφάλαιο 6. Επίδραση ανεμογεννητριών μεταβλητών στροφών στην ευστάθεια τάσης

- Οι αποκρίσεις των μοντέλων ΑΓΔΤ και πλήρους μετατροπέα είναι ουσιαστικά ίδιες.

Το τρίτο συμπέρασμα μπορεί να εξηγηθεί ως εξής:

- Ο έλεγχος του ρεύματος θεωρείται σχεδόν ακαριαίος (με την ίδια μικρή καθυστέρηση).
- Ο ελεγκτής αέργου ισχύος αναπαριστάται με ισοδύναμο τρόπο στις δύο περιπτώσεις. Είτε σε ρύθμιση συντελεστή ισχύος, είτε σε ρύθμιση τάση, ο ελεγκτής υπολογίζει μία τιμή για την άεργο ισχύ (άεργος ισχύς αναφοράς). Στη συνέχεια θεωρείται ότι υλοποιείται πολύ γρήγορα η κατάλληλη συνιστώσα του ρεύματος δρομέα στην ΑΓΔΤ (i_{dr}) ή η αντίστοιχη συνιστώσα του πλήρους μετατροπέα (i_Q).
- Το ενεργό ρεύμα προσαρμόζεται πολύ γρήγορα στις μεταβολές της τάσης, με αποτέλεσμα να εγχέεται η ενεργός ισχύς αναφοράς και η μεταβολή της ταχύτητας του δρομέα (στην περίπτωση της ΑΓΔΤ, όπου αναπαριστάται το μηχανικό μέρος) να είναι πολύ μικρή. Έτσι, ο στρεπτικός ρυθμός ταλάντωσης του άξονα της ΑΓΔΤ δεν μεταβάλλει ουσιαστικά την απόκριση.

Η τελευταία παρατήρηση επαληθεύεται από τις αποκρίσεις που φαίνονται στο Σχ. 6.12 από την περίπτωση με έλεγχο τάσης. Η ταχύτητα του δρομέα μεταβάλλεται ελάχιστα στην περίπτωση



Σχήμα 6.12: Περίπτωση με ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών στο πάρκο WP2 και έλεγχο τάσης: μεταβολή της ενεργού ισχύος του πάρκου WP2 (πάνω) και ταχύτητα δρομέα (κάτω)

της ΑΓΔΤ, γεγονός που δεν επηρεάζει σημαντικά την απόκριση της ενεργού ισχύος. Οι ταλαντώσεις που εμφανίζονται στην ενεργό ισχύ, οφείλονται στους άλλους ρυθμούς του συστήματος: τον στρεπτικό ρυθμό του άξονα της ανεμογεννήτριας σταθερών στροφών και στον ηλεκτρομηχανικό ρυθμό της σύγχρονης γεννήτριας.

Η μικρή διαφορά μεταξύ των αποκρίσεων εξηγείται από το ότι στο μοντέλο της ΑΓΔΤ λαμβάνονται υπόψη οι απώλειες στις εξισώσεις τάσης, αλλά έχουν αμεληθεί για την εξαγωγή της σχέσης (2.38) που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της τιμής της συνιστώσας i_{dr} του ρεύματος του δρομέα.

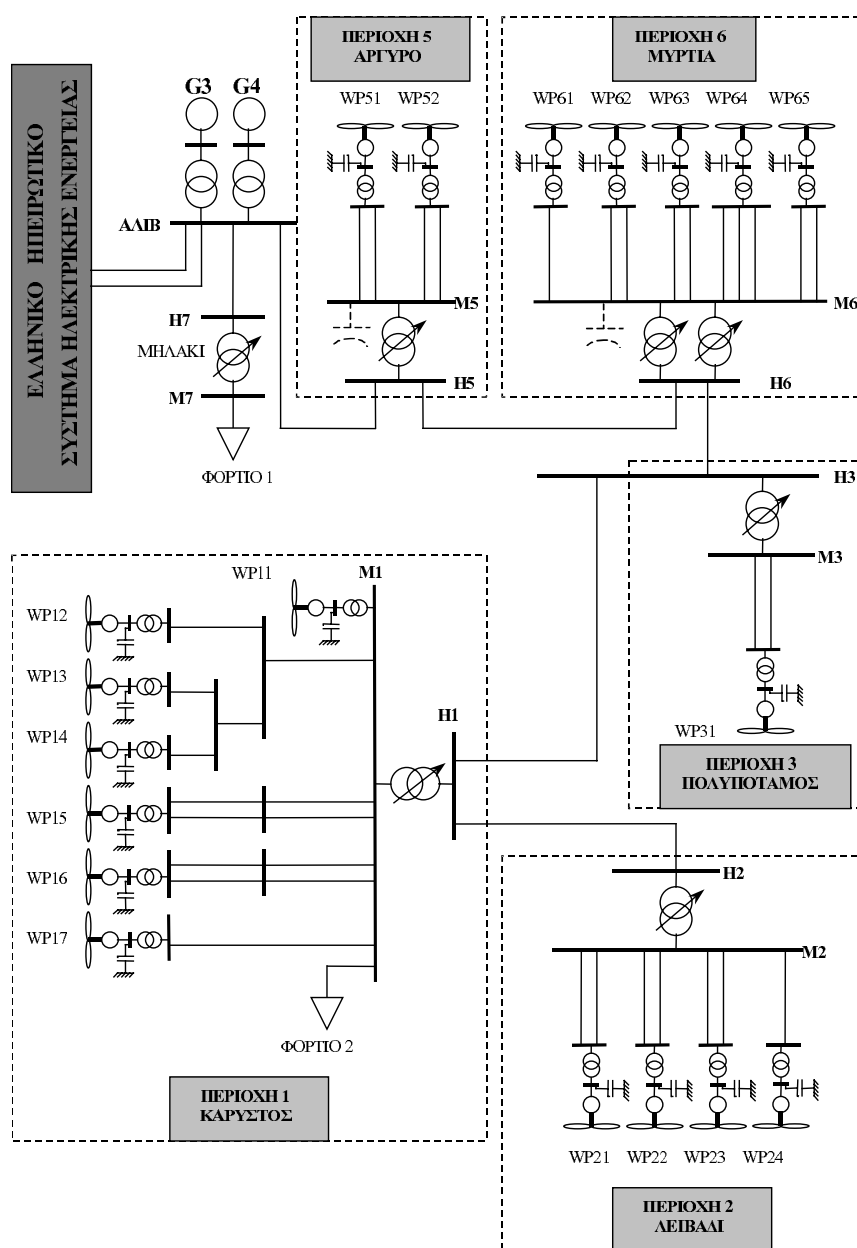
Φυσικά η συνολική συμπεριφορά κάθε ανεμογεννήτριας εξαρτάται από τις δυνατότητες φόρτισης, ιδίως των μετατροπέων. Εκτός όμως από την περίπτωση απότομων πτώσεων

τάσης, δύο ανεμογεννήτριες διαφορετικής τεχνολογίας (ΑΓΔΤ ή πλήρους μετατροπέα) αλλά με ίδια ονομαστική ισχύ και με τους ίδιους περιορισμούς αέργου ισχύος θα έχουν την ίδια συμπεριφορά, εφόσον έχουν αντίστοιχο σύστημα ελέγχου, όπως είδαμε σε αυτή την ενότητα.

6.2 Εφαρμογή στο ΣΗΕ της Ν. Εύβοιας

6.2.1 Περιγραφή του συστήματος

Στην παράγραφο αυτή εξετάζεται από πλευράς βραχυπρόθεσμης ευστάθειας ένα προσεγγιστικό ρεαλιστικό μοντέλο του ηλεκτρικού δικτύου της Νότιας Εύβοια για το έτος 2001 [VMP01, Ποτ06]. Το ισοδύναμο μονογραμμικό διάγραμμα του εξεταζόμενου συστήματος φαίνεται στο Σχ. 6.13.



Σχήμα 6.13: Μονογραμμικό διάγραμμα συστήματος Ν. Εύβοιας

Κεφάλαιο 6. Επίδραση ανεμογεννητριών μεταβλητών στροφών στην ευστάθεια τάσης

Το δίκτυο του Σχ. 6.13 αποτελείται από έναν τοπικό συμβατικό σταθμό παραγωγής συνολικής δυναμικότητας 280 MW, 19 αιολικά πάρκα συνολικής εγκατεστημένης ισχύος 200 MW με απλές μηχανές επαγωγής και δύο συγκεντρωμένα τοπικά φορτία. Ο τοπικός συμβατικός σταθμός βρίσκεται στο Αλιβέρι και αποτελείται από δύο σύγχρονες γεννήτριες ονομαστικής ισχύος 140 MW η καθεμία.

Τα αιολικά πάρκα βρίσκονται στις περιοχές Αργυρό, Μυρτιά, Πολυπόταμος, Κάρυστος και Λειβάδι. Υπάρχουν 6 Υ/Σ 150/20 kV με 7 Μ/Σ με ΣΑΤΥΦ για τον έλεγχο της ΜΤ και μια γραμμή μεταφοράς 150 kV Αλιβέρι – Λειβάδι. Η διασύνδεση του δικτύου της Ν. Εύβοιας με το ηπειρωτικό σύστημα αποτελείται από δύο εναέριες γραμμές και δύο υποβρύχια καλώδια των 150 kV. Η συνολική ικανότητα μεταφοράς είναι περίπου 800 MW. Για την ανάλυση του συστήματος χρησιμοποιήθηκαν 2 παράλληλες γραμμές διασύνδεσης αντί των πραγματικών. Η συνολική ισοδύναμη αγωγιμότητα των 2 γραμμών υπολογίστηκε από την ισχύ βραχυκύκλωσης του ζυγού ΥΤ στο Αλιβέρι.

Κάθε αιολικό πάρκο αναπαριστάται από μια ισοδύναμη ανεμογεννήτρια. Στον τερματικό ζυγό κάθε αιολικού πάρκου έχουν εγκατασταθεί πυκνωτές αντιστάθμισης για να ρυθμίζουν το συντελεστή ισχύος του ζυγού στη μόνιμη κατάσταση ώστε να είναι 0,95 επαγωγικός (οι ανεμογεννήτριες καταναλώνουν άεργο ισχύ). Κατά την προσομοίωση, η αγωγιμότητα του πυκνωτή κάθε ισοδύναμης ανεμογεννήτριας θεωρήθηκε σταθερή.

Τα δύο τοπικά φορτία λαμβάνονται ως φορτία σταθερής αγωγιμότητας. Η κατανάλωσή τους για ονομαστική τάση είναι 26,97 MW και 5,75 MVA_r για το φορτίο 1 και 10,97 MW και 6,8 MVA_r για το φορτίο 2.

Τα δεδομένα του συστήματος μεταφοράς-διανομής, καθώς επίσης και τα δυναμικά στοιχεία όλων των μηχανών (σύγχρονες γεννήτριες και ασύγχρονες ανεμογεννήτριες) βρίσκονται στην έκθεση της μελέτης "Ανάλυση ασφάλειας ηλεκτρικού δικτύου Νότιας Εύβοιας με μέγιστη αιολική παραγωγή", η οποία εκπονήθηκε το Φεβρουάριο του 2001 στο πλαίσιο σύμβασης μεταξύ της ΔΕΗ και του ΕΠΙΣΕΥ.

Για την προσομοίωση του συστήματος χρησιμοποιείται το λογισμικό WHSSP σε Matlab 5.3. Για τη σύγχρονη γεννήτρια χρησιμοποιείται το μοντέλο τέταρτης τάξης, εφοδιασμένο με ΑΡΤ και ΣΠΥ και με σταθερή μηχανική ροπή, όπως στην εφαρμογή της παραγράφου 6.1.1. Για τις ανεμογεννήτριες σταθερών στροφών χρησιμοποιείται μοντέλο αντίστοιχο με της παραγράφου 6.1.1 και με τις παραμέτρους του Πίνακα 6.7. Χρησιμοποιείται μοντέλο με μία στρεφόμενη μάζα με το σκεπτικό ότι, ελλείψει στοιχείων για μοντέλο δύο μαζών και για τις ανάγκες των προσομοιώσεων τέτοιου είδους, το πιο λεπτομερές μοντέλο δύο μαζών δεν προσφέρει κάτι περισσότερο.

6.2.2 Αποτελέσματα προσομοιώσεων

Στο αρχικό σημείο λειτουργίας όλες οι γεννήτριες (συμβατικές και ανεμογεννήτριες) παράγουν την ονομαστική ισχύ τους. Στην κατάσταση αυτή:

- Το ηπειρωτικό σύστημα απορροφά ενεργό ισχύ 417 MW από το σύστημα της Ν. Εύβοιας, ενώ υποστηρίζει το τελευταίο με 97 MVA_r αέργου ισχύος.
- Κάθε σύγχρονη γεννήτρια παράγει 140 MW και 76 MVA_r.
- Οι μηχανισμοί ΣΑΤΥΦ των υποσταθμών ΜΤ/ΥΤ στις περιοχές της Καρύστου και του Λειβαδίου βρίσκονται στο κάτω όριο του λόγου μετασχηματισμού τους, δηλαδή αδυνατούν να αποκαταστήσουν τις αντίστοιχες ρυθμιζόμενες τάσεις σε ενδεχόμενο πτώσης αυτών.

Η μελέτη που παρουσιάστηκε στο [VMP01] έδειξε ότι δεν εμφανίζεται μακροπρόθεσμη αστάθεια τάσης του συστήματος, ακόμα και για πολύ ισχυρές διαταραχές όπως η απώλεια μίας σύγχρονης γεννήτριας, ακολουθούμενη από απώλεια της μίας από τις δύο ισοδύναμες γραμμές διασύνδεσης. Αυτό οφείλεται κυρίως στο ότι τα ΣΑΤΥΦ των Υ/Σ στους οποίους συνδέονται τα αιολικά πάρκα έχουν χρόνο για να ρυθμίσουν την τάση, με αποτέλεσμα να μειώνεται η άεργος κατανάλωση πριν από την ενεργοποίηση του περιοριστή διέγερσης της απομένουσας σύγχρονης γεννήτριας. Αυτά τα αποτελέσματα οδήγησαν στο συμπέρασμα ότι οι κλασικοί πυκνωτές αντιστάθμισης ήταν αρκετοί για να κρατήσουν το σύστημα ευσταθές, αφήνοντας στις σύγχρονες μηχανές ένα ευρύτερο περιθώριο άεργης υποστήριξης και ότι δεν απαιτείται πρόσθετη δυναμική άεργη υποστήριξη.

Στη συνέχεια θεωρείται μια μικρή παραλλαγή του προαναφερόμενου κρίσιμου σεναρίου διπλής διαταραχής, η οποία εξετάστηκε στην εργασία [Ποτ06], προκειμένου να ληφθεί υπόψη η επίδραση της βαθμίδας μείωσης του ρεύματος πεδίου της γεννήτριας G3 στη μέγιστη μεταβατική του τιμή. Συγκεκριμένα, το θεωρούμενο σενάριο αποτελείται από τις ακόλουθες απλές διαταραχές:

- Τη χρονική στιγμή $t=10$ s η σύγχρονη γεννήτρια G4 τίθεται εκτός λειτουργίας.
- Τη χρονική στιγμή $t=50$ s σημειώνεται απώλεια της μίας από τις δύο ισοδύναμες διασυνδετικές γραμμές YT.

Προκειμένου να διερευνηθεί ο κίνδυνος εμφάνισης αστάθειας τάσης στη βραχυπρόθεσμη χρονική κλίμακα, υποθέτουμε μια σχετικά μικρή τιμή για τη μέγιστη επιτρεπόμενη υπερδιέγερση της σύγχρονης γεννήτριας ότι το I_{max} έχει μία αρκετά χαμηλή τιμή (2,45 αμ για 100 ms) για την οποία το σύστημα είναι ασταθές μετά από τη διπλή διαταραχή που περιγράφηκε παραπάνω. Σε αυτό το σημείο πρέπει να σημειωθεί ότι αυτό γίνεται σαν ερευνητική άσκηση και δεν αντιστοιχεί στην ασφάλεια του πραγματικού συστήματος.

Η δυναμική συμπεριφορά του συστήματος προσομοιώθηκε σε τρεις περιπτώσεις:

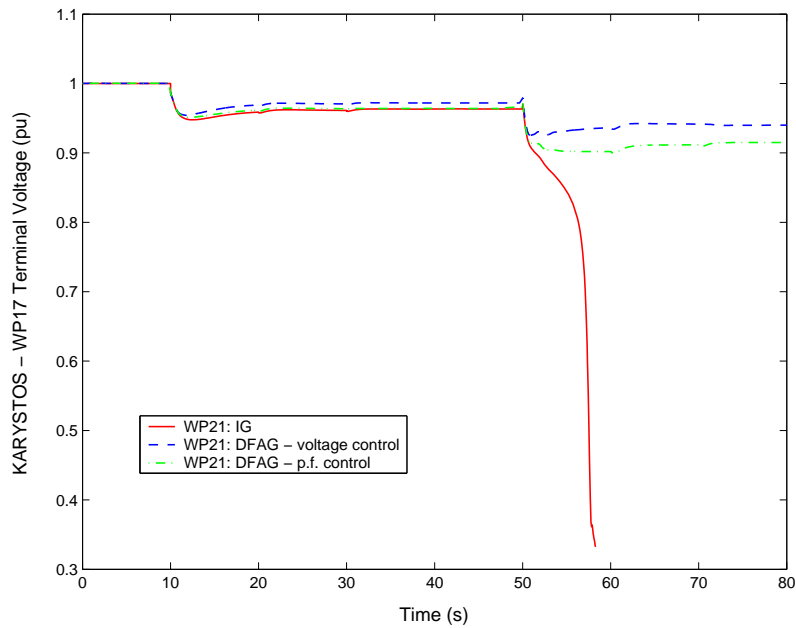
1. Όλα τα αιολικά πάρκα διαθέτουν απλές μηχανές επαγωγής.
2. Το πάρκο WP21 διαθέτει ανεμογεννήτριες διπλής τροφοδότησης με ρύθμιση της τάσης.
3. Το πάρκο WP21 διαθέτει ανεμογεννήτριες διπλής τροφοδότησης με ρύθμιση του συντελεστή ισχύος.

Για τη μηχανή επαγωγής διπλής τροφοδότησης χρησιμοποιήθηκε το αλγεβρικό μοντέλο (βλ. παράγραφο 3.2.1) που αντιστοιχεί στο μοντέλο της παραγράφου 6.1.1 και με τις παραμέτρους του Παραρτήματος Α. Προκειμένου να μη μεταβληθεί το αρχικό σημείο λειτουργίας, η ΑΓΔΤ θεωρείται ότι λειτουργεί με τον ίδιο συντελεστή ισχύος (0,95 επαγωγικό), όπως η μηχανή επαγωγής την οποία αντικαθιστά, δηλαδή αρχικά καταναλώνει άεργο ισχύ.

Όπως φαίνεται από τα αποτελέσματα (συνεχής γραμμή στα Σχ. 6.14-6.17), στην πρώτη περίπτωση, αμέσως μετά την απώλεια της γραμμής διασύνδεσης, έχουμε βραχυπρόθεσμη αστάθεια τάσης.

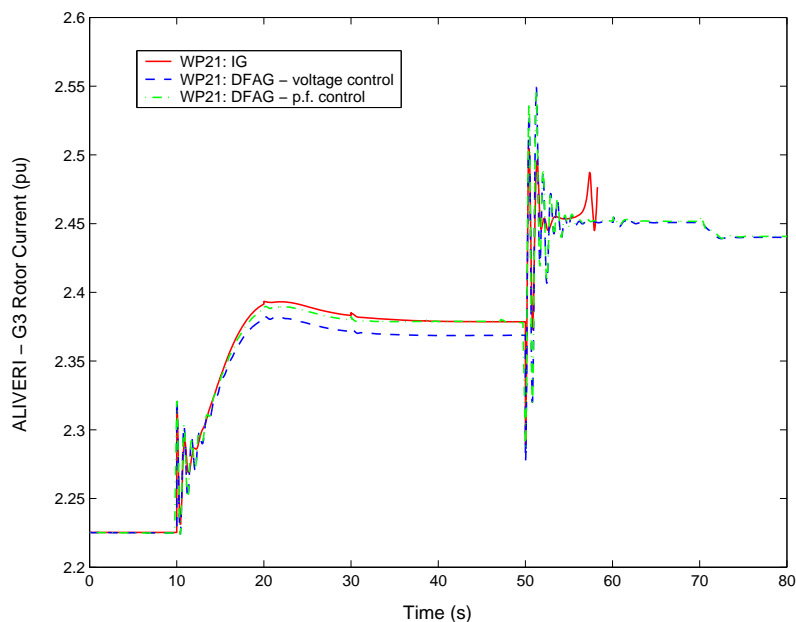
Η απώλεια της γραμμής δυσχεραίνει την εισαγωγή αέργου ισχύος από το ηπειρωτικό σύστημα, και η μία τοπική γεννήτρια φτάνει στο βραχυπρόθεσμο όριο διέγερσης προσπαθώντας να κρατήσει την τάση. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την άμεση ενεργοποίηση του περιοριστή διέγερσης (Σχ.6.15), την πτώση της τάσης σε όλους τους ζυγούς (Σχ. 6.14), την απώλεια σημείου ισορροπίας των γεννητριών επαγωγής, την επιτάχυνσή τους (Σχ. 6.16), την αύξηση κατανάλωσης αέργου ισχύος (Σχ. 6.17) και τελικά την κατάρρευση τάσης του συστήματος (Σχ. 6.14). Στην πράξη κάθε ανεμογεννήτρια διαθέτει προστασία ταχύτητας, η οποία θα

Κεφάλαιο 6. Επίδραση ανεμογεννητριών μεταβλητών στροφών στην ευστάθεια τάσης



Σχήμα 6.14: Τερματική τάση στο πάρκο WP17 στην Κάρυστο

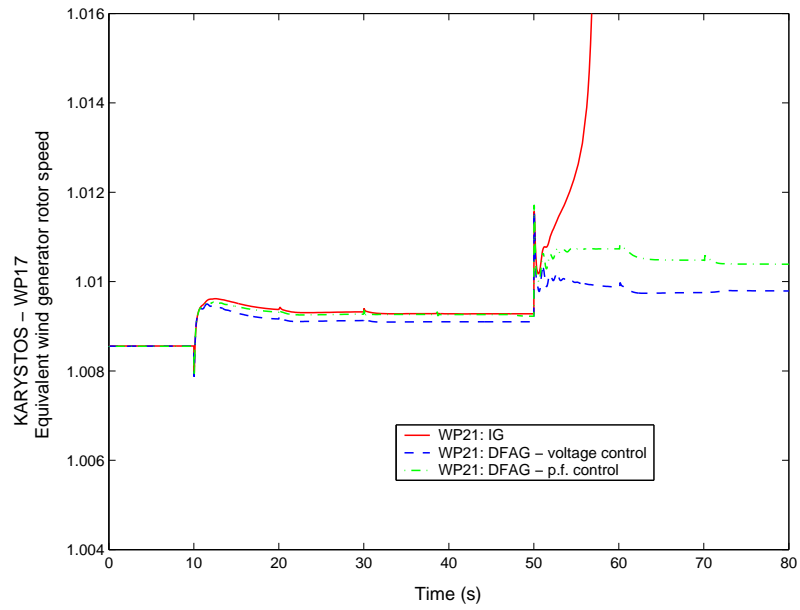
ενεργοποιηθεί από την αστάθεια, θα την αποσυνδέσει από το δίκτυο και το φρένο ασφαλείας θα σταματήσει το δρομέα. Όμως αυτό σημαίνει ότι θα χαθεί το σύνολο της αιολικής παραγωγής, την ώρα που το σύστημα τη χρειάζεται περισσότερο (μετά την απώλεια της μίας σύγχρονης γεννήτριας).



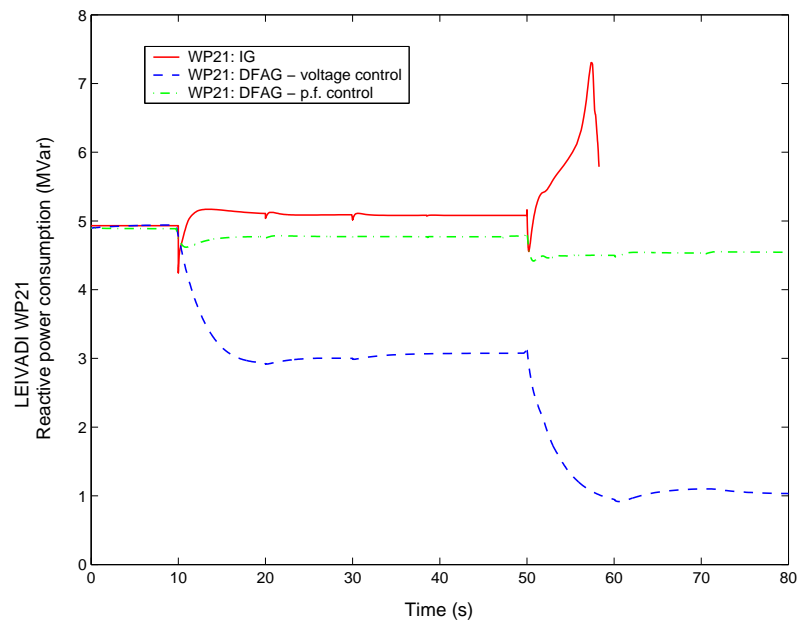
Σχήμα 6.15: Ρεύμα διέγερσης της σύγχρονης γεννήτριας G3

Όπως φαίνεται στα Σχ. 6.14-6.17, στις περιπτώσεις (b) και (c) η ασύγχρονη γεννήτρια διπλής τροφοδότησης παρέχει την απαραίτητη δυναμική άεργη υποστήριξη (μειώνει την κατανάλωση αέργου ισχύος) και η αστάθεια τάσης αποφεύγεται. Βλέπουμε λοιπόν ότι στο συγκεκριμένο σύστημα η αντικατάσταση ενός μικρού μέρους της αιολικής παραγωγής από

Κεφάλαιο 6. Επίδραση ανεμογεννητριών μεταβλητών στροφών στην ευστάθεια τάσης



Σχήμα 6.16: Ταχύτητα δρομέα της ισοδύναμης Α/Γ του πάρκου WP17 στην Κάρυστο



Σχήμα 6.17: Κατανάλωση αέργου ισχύος από το αιολικό πάρκο WP21

ανεμογεννητρίες μεταβλητών στροφών με ΑΓΔΤ εξασφαλίζει την ευστάθεια του συστήματος.

Κεφάλαιο 7

Επίδραση ανεμογεννητριών με ΑΓΔΤ στην ευστάθεια μικρών διαταραχών

7.1 Μικρό διασυνδεδεμένο ΣΗΕ με μεταβλητή συμβατική παραγωγή

Σε αυτή την ενότητα εξετάζεται με το λογισμικό WHSSP (βλ. ενότητα 3.1) ένα μικρό διασυνδεδεμένο σύστημα, προκειμένου να διερευνηθεί η επίδραση της αύξησης διείσδυσης αιολικών πάρκων με ΑΓΔΤ στις ταλαντώσεις διασυνδέσεων (inter-area oscillations) μεταξύ μίας (ισοδύναμης) σύγχρονης γεννήτριας και ενός μεγάλου συστήματος, καθώς και ο βαθμός αλληλεπίδρασης άλλων ρυθμών του συστήματος.

Η αύξηση της αιολικής διείσδυσης συνοδεύεται από μείωση της συμβατικής παραγωγής σε αντίθεση με την προσέγγιση της ενότητας 7.2, όπου η συμβατική παραγωγή παραμένει σταθερή και μεταβάλλεται το φόρτιο.

7.1.1 Περιγραφή του συστήματος

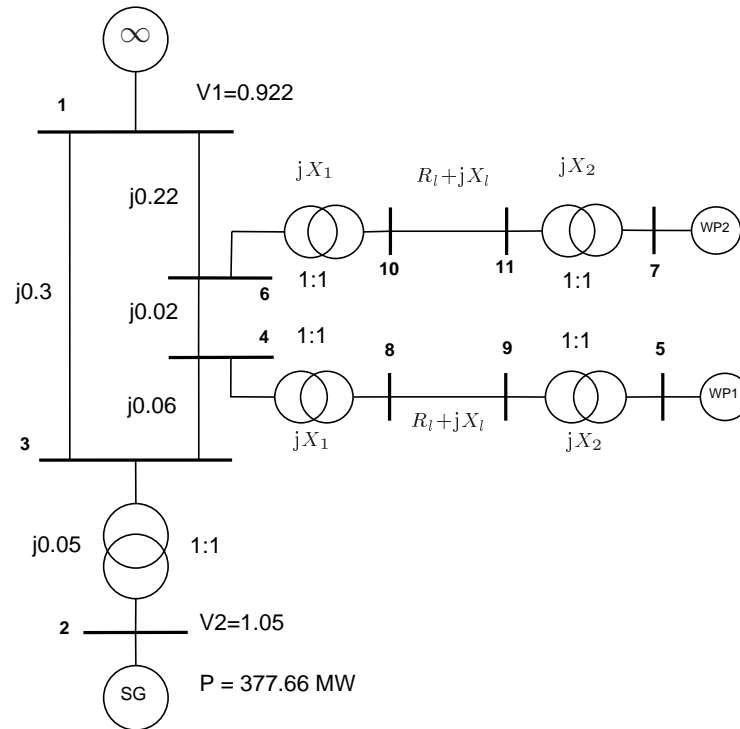
Το μονογραμμικό διάγραμμα του εξεταζόμενου συστήματος φαίνεται στο Σχ. 7.1, όπου οι σύνθετες αντίστασεις δίνονται σε α.μ. σε βάση 100 MVA. Ο συμβατικός σταθμός παραγωγής συνδέεται με ένα μεγάλο ΣΗΕ (που αναπαριστάται ως άπειρος ζυγός) μέσω ενός μετασχηματιστή σταθερού λόγου και μίας γραμμής μεταφοράς ΥΤ διπλού κυκλώματος. Στους ζυγούς ΥΤ 4 και 6 συνδέονται αιολικά πάρκα με ΑΓΔΤ. Κάθε αιολικό πάρκο αναπαριστάται με μια ισοδύναμη ανεμογεννήτρια και ένα μετασχηματιστή και συνδέεται στον αντίστοιχο ζυγό ΥΤ (π.χ. στο ζυγό 4 για το αιολικό πάρκο WP1) με μια γραμμή ΜΤ και έναν υποσταθμό ΜΤ/ΥΤ. Οι παράμετροι της γραμμής και των Μ/Σ δίνονται στον Πίνακα 7.1 σε α.μ. στη βάση της ονομαστικής φαινόμενης ισχύς του αιολικού πάρκου. Στο αρχικό σημείο λειτουργίας, το οποίο ορίζεται από τα στοιχεία που δίνονται στο Σχ. 7.1, η αιολική διείσδυση είναι μηδενική και τα πάρκα θεωρούνται αποσυνδεδεμένα.

Πίνακας 7.1: Στοιχεία ακτινικής σύνδεσης αιολικού πάρκου (ανά μονάδα στη βάση S_{nom} του πάρκου)

X_1	R_l	X_l	X_2
0,06	0,02	0,0243	0,0557

Η σύγχρονη γεννήτρια του συμβατικού σταθμού παραγωγής αναπαριστάται με μοντέλο

Κεφάλαιο 7. Επίδραση αιολικής διείσδυσης στην ευστάθεια μικρών διαταραχών



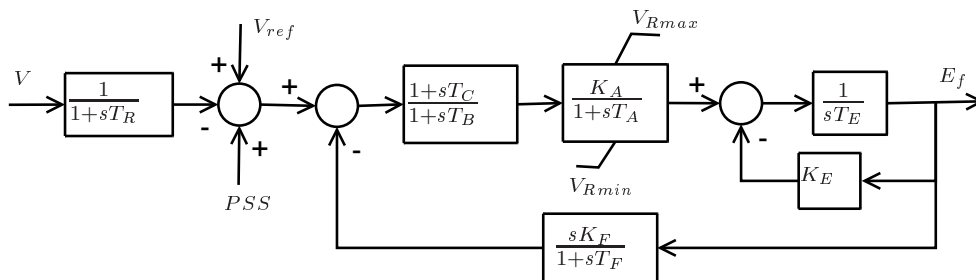
Σχήμα 7.1: Μικρό διασυνδεδεμένο σύστημα ($S_{base}=100$ MVA)

τέταρτης τάξης (με ένα τύλιγμα απόσβεσης στον εγκάρσιο άξονα). Οι παράμετροι του μοντέλου της σύγχρονης γεννήτριας δίνονται στον Πίνακα 7.2. Το σύστημα διέγερσης της

Πίνακας 7.2: Παράμετροι σύγχρονης γεννήτριας

S_{nom}	P_{nom}	X_{ls}	X_d	X_q	X'_d	X'_q	$T'_{d0}(s)$	$T'_{q0}(s)$	$H (s)$
468 MVA	377,66 MW	0,13	2,3	2,2	0,26	0,44	6,54	0,69	4,97

σύγχρονης γεννήτριας αναπαριστάται με το μοντέλο Αυτόματου Ρυθμιστή Τάσης (APT) IEEE τύπου DC1A και αμελείται η επίδραση του μαγνητικού κορεσμού. Το αντίστοιχο δομικό διάγραμμα φαίνεται στο Σχ. 7.2 και οι σχετικές παράμετροι στον Πίνακα 7.3. Το σήμα



Σχήμα 7.2: Δομικό διάγραμμα APT τύπου DC1A κατά IEEE

PSS προέρχεται από ένα απλό μοντέλο σταθεροποιητή ΣΗΕ (Power System Stabilizer) με

Κεφάλαιο 7. Επίδραση αιολικής διείδυσης στην ευστάθεια μικρών διαταραχών

την παρακάτω συνάρτηση μεταφοράς:

$$\frac{PSS(s)}{\omega_r(s)} = \frac{s}{s+c} \frac{1+s\alpha\tau}{1+s\tau} K_{PSS} \quad (7.1)$$

όπου ω_r είναι η ταχύτητα (σε α.μ.) του δρομέα της σύγχρονης γεννήτριας. Οι ιδιοτιμές του

Πίνακας 7.3: Παράμετροι APT και σταθεροποιητή

T_R	0,01 s	T_B	0 s	T_C	0 s
T_A	0,04 s	K_A	50	V_{Rmax}	6,172 α.μ.
V_{Rmin}	-6,172 α.μ.	T_E	0,03 s	K_E	1
K_F	0,02	T_F	1 s	c	0,1 rad/s
τ	0,0697 s	α	14,043	K_{PSS}	3,535

συστήματος στο αρχικό σημείο λειτουργίας (χωρίς αιολικά πάρκα) δίνονται στον Πίνακα 7.4.

Πίνακας 7.4: Ιδιοτιμές αρχικού σημείου λειτουργίας (χωρίς αιολική παραγωγή)

Πραγμ.	Φαντ.	f (Hz)	ζ	Ρυθμός
-28,850	26,54	4,22	0,736	APT
-0,178	3,80	0,60	0,046	ηλεκτρομηχανική ταλάντωση ΣΓ
-99,310				APT, μέτρηση τερματικής τάσης
-12,100				σταθεροποιητής ΣΓ
-3,627				τύλιγμα πεδίου ΣΓ
-2,999				τύλιγμα απόσβεσης ΣΓ
-1,291				APT, διαφορική ανάδραση
-0,100				φίλτρο απαλοιφής σταθεροποιητή ΣΓ

Τα αιολικά πάρκα με ΑΓΔΤ θεωρείται ότι λειτουργούν με μοναδιαίο συντελεστή ισχύος. Κάθε αιολικό πάρκο αναπαριστάται με μία ισοδύναμη μηχανή και ένα M/Σ και παράγει ενεργό ισχύ $P=0,8$ α.μ. στη βάση των ονομαστικών MVA του. Η αιολική παραγωγή αυξάνεται σταδιακά, αυξάνοντας την ονομαστική φαινόμενη ισχύ των αιολικών πάρκων. Η παραγωγή ενεργού ισχύος της συμβατικής μονάδας μειώνεται αντίστοιχα. Σημειώνεται ότι για αιολική διείδυση 0-45 MW θεωρείται ότι μόνο το αιολικό πάρκο WP1 είναι συνδεδεμένο στο σύστημα. Για μεγαλύτερες τιμές της αιολικής ισχύος, θεωρούνται δύο όμοια πάρκα με ίση παραγωγή.

Αφού η αιολική παραγωγή αντικαθιστά συμβατική ισχύ, η επίδρασή της πρέπει να διερευνηθεί σε δύο βήματα. Πρώτα εξετάζεται η επίδραση της μείωσης της συμβατικής παραγωγής μοντελοποιώντας τα αιολικά πάρκα σαν αρνητικά φορτία είτε σταθερής αγωγιμότητας είτε σταθερής ισχύος. Σημειώνεται ότι το μοντέλο σταθερής ισχύος μπορεί να θεωρηθεί ισοδύναμο με μοντέλο ανεμογεννήτριας μεταβλητών στροφών με απλοποιημένους βρόχους ελέγχου σε λειτουργία σταθερού συντελεστή ισχύος, όπως στο [SK03]. Στη συνέχεια χρησιμοποιείται το μοντέλο της ΑΓΔΤ με λεπτομερείς βρόχους ελέγχου (ενότητα 3.3) με τις παραμέτρους του Πίνακα Α.3 και εξετάζεται η επίδραση των ανεμογεννητριών με ΑΓΔΤ τόσο σε λειτουργία σταθερού συντελεστή ισχύος, όσο και σε λειτουργία ελέγχου τάσης (επιλογές PF και VC αντίστοιχα στο Σχ. 3.11). Και στις δύο περιπτώσεις θεωρείται ενεργοποιημένος ο έλεγχος της τερματικής τάσης (διακόπτης στο (a) στο Σχ. 3.11).

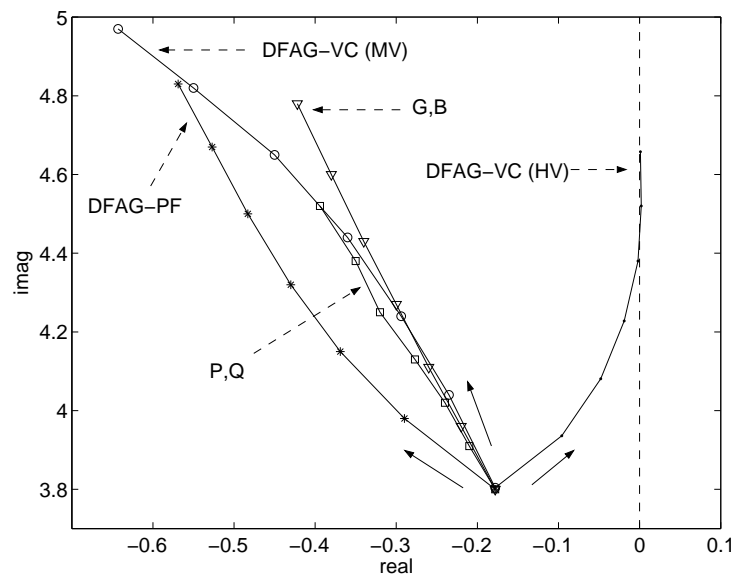
Στην περίπτωση ελέγχου τάσης, εξετάζονται δύο υποπεριπτώσεις:

- Το πάρκο κρατάει σταθερή την τάση του ζυγού MT αμέσως μετά το μετασχηματιστή του (δηλ. του ζυγού 9 για το αιολικό πάρκο WP1).
- Το πάρκο κρατάει σταθερή την τάση του ζυγού YT του υποσταθμού σύνδεσης (δηλ. του ζυγού 4 για το αιολικό πάρκο WP1).

Σε όλες τις περιπτώσεις η μείωση της συμβατικής παραγωγής γίνεται είτε με μείωση των MVA μιας μονάδας με σταθερό ποσοστό φόρτισης (παράγραφος 7.1.2) και στη συνέχεια με μείωση της φόρτισης μιας μονάδας σταθερών MVA (παράγραφος 7.1.3). Η πρώτη θεώρηση αντιστοιχεί στην περίπτωση αποσύνδεσης συμβατικών μονάδων προκειμένου να απορροφηθεί η αιολική παραγωγή, ενώ στη δεύτερη περίπτωση οι συμβατικές μονάδες παραμένουν συνδεδεμένες με μειωμένη παραγωγή, οπότε η αδράνεια του συστήματος παραμένει σταθερή.

7.1.2 Περίπτωση με συμβατική μονάδα μεταβλητών MVA

Σε αυτή την περίπτωση θεωρείται ότι η ονομαστική φαινόμενη ισχύς της τοπικής σύγχρονης γεννήτριας μειώνεται παράλληλα με την ενεργό παραγωγή της (έτσι ώστε να παράγει συνέχεια την ονομαστική ενεργό ισχύ της) καθώς η αιολική παραγωγή αυξάνεται. Στο Σχ. 7.3 φαίνεται η αντίστοιχη μεταβολή του ηλεκτρομηχανικού ρυθμού της σύγχρονης γεννήτριας (άνω μιγαδικό ημιπίεδο).



Σχήμα 7.3: Ηλεκτρομηχανικός ρυθμός για αυξανόμενη αιολική διείσδυση (0-90 MW) και συμβατική μονάδα με μειούμενα MVA

Σε όλες σχεδόν τις περιπτώσεις (πλην μίας) η μεταβολή είναι παρόμοια: η συχνότητα και η απόσβεση αυξάνονται με την αιολική διείσδυση. Αυτή η συμπεριφορά είναι αναμενόμενη, καθώς η αδράνεια του συστήματος, όπως και η σύνθετη αντίσταση που βλέπει η σύγχρονη γεννήτρια, μειώνονται με τη μείωση της φαινόμενης ισχύος της γεννήτριας [Kun94]. Σημειώνεται ότι η απόσβεση και η συχνότητα είναι σημαντικά μεγαλύτερες στην περίπτωση ρύθμισης του συντελεστή ισχύος σε σχέση με το μοντέλο σταθερής ισχύος (το οποίο είναι ισοδύναμο με λειτουργία σταθερού συντελεστή ισχύος αν η δυναμική των βρόχων ελέγχου θεωρηθεί ακαριαία). Επομένως η υπεραπλούστευση των μοντέλων μπορεί να οδηγήσει σε αρκετά διαφορετικά αποτελέσματα, αν και πιο συντηρητικά (μικρότερη απόσβεση), τουλάχιστον σε συστήματα παρόμοια με αυτό που εξετάζεται εδώ.

Κεφάλαιο 7. Επίδραση αιολικής διεύθυνσης στην ευστάθεια μικρών διαταραχών

Στην περίπτωση όμως που οι ΑΓΔΤ ελέγχουν την τάση του ζυγού ΥΤ, ο ηλεκτρομηχανικός ρυθμός γίνεται ασταθής όταν η αιολική διεύθυνση ξεπεράσει ένα επίπεδο (περίπου 60 MW). Όπως θα δούμε, αυτό οφείλεται σε αλληλεπίδραση της σύγχρονης γεννήτριας με τις ΑΓΔΤ.

Στη συνέχεια εξετάζονται πιο αναλυτικά οι τρεις περιπτώσεις με το μοντέλο ΑΓΔΤ. Στον Πίνακα 7.5 παρουσιάζεται ένα παράδειγμα των κυρίαρχων ιδιοτιμών του συστήματος (με πραγματικό μέρος αλγεβρικά μεγαλύτερο από -5) για την περίπτωση που οι ΑΓΔΤ βρίσκονται σε λειτουργία ελέγχου του συντελεστή ισχύος. Οι ρυθμοί απόκρισης έχουν

Πίνακας 7.5: Κυρίαρχες ιδιοτιμές για αιολική διεύθυνση 90 MW (έλεγχος συντελεστή ισχύος, σύγχρονη γεννήτρια με μειωμένα MVA)

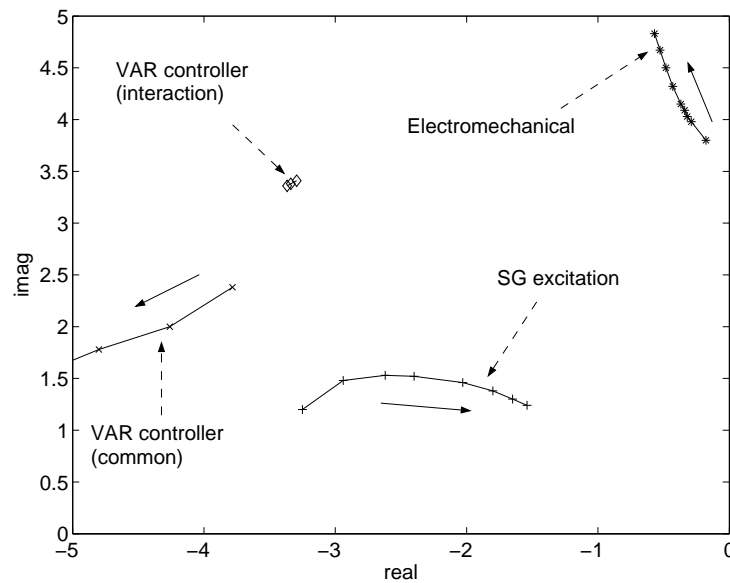
Πραγμ.	Φαντ.	f (Hz)	ζ	Ρυθμός
-1,065	12,52	1,99	0,085	κοινός στρεπτ. ταλαντ. ανεμογεννητριών
-1,095	12,51	1,99	0,087	αλληλεπίδρασης στρεπτ. ταλαντ. ανεμογεννητριών
-0,570	4,82	0,76	0,117	ηλεκτρομηχανική ταλάντωση ΣΓ
-3,367	3,36	0,53	0,708	αλληλεπίδρασης ελέγχου αέργου ισχύος ΑΓΔΤ
-1,535	1,24	0,20	0,779	διέγερση ΣΓ
-0,191	0,19	0,03	0,715	κοινός ελέγχου ταχύτητας ανεμογεννητριών
-0,191	0,19	0,03	0,715	αλληλεπίδρασης ελέγχου ταχύτητας ανεμογεννητριών
-4,780				τύλιγμα απόσβεσης ΣΓ
-3,333				καθυστέρηση T_p φίλτρου P ΑΓΔΤ WP1
-3,333				καθυστέρηση T_p φίλτρου P ΑΓΔΤ WP2
-1,189				ΑΡΤ ΣΓ (βρόχος ανάδρασης)
-0,200				καθυστέρηση T_w ΑΓΔΤ WP1
-0,200				καθυστέρηση T_w ΑΓΔΤ WP2
-0,100				φίλτρο απαλοιφής σταθεροποιητή ΣΓ

χαρακτηριστεί με βάση τους αντίστοιχους συντελεστές συμμετοχής και τα δεξιά ιδιοδιανύσματα. Στην περίπτωση “κοινού” ρυθμού, οι αντίστοιχες μεταβλητές κατάστασης των ανεμογεννητριών ταλαντώνονται σε φάση, ενώ στην περίπτωση ρυθμού “αλληλεπίδρασης”, ταλαντώνονται με διαφορά φάσης 180° . Για παράδειγμα, ο Πίνακας 7.6 δείχνει τμήματα των δεξιών ιδιοδιανυσμάτων των στρεπτικών ρυθμών ταλάντωσης των αξόνων (ρυθμοί 1 και 2 του Πίνακα 7.5). Συγκεκριμένα, στον πίνακα εμφανίζονται μόνο τα στοιχεία των ιδιοδιανυσμάτων που αντιστοιχούν στη γωνία παραμόρφωσης $\Delta\theta_m$ των αξόνων των δύο ΑΓΔΤ. Από τα στοιχεία αυτά προκύπτει ότι ο ρυθμός 1 είναι ο “κοινός” και ο ρυθμός 2 ο ρυθμός “αλληλεπίδρασης”.

Πίνακας 7.6: Παράδειγμα ανάλυσης ρυθμών στρεπτικών ταλαντώσεων ανεμογεννητριών

Ρυθμός	Μεταβλητή κατάσταση	Συντελεστής συμμετοχής	Δεξιό ιδιοδιάνυσμα
$-1,065 \pm j 12,52$ (κοινός)	$\Delta\theta_m$ DFAG1	0,86	$0,511 \angle 180^\circ$
	$\Delta\theta_m$ DFAG2	1,00	$0,548 \angle 180^\circ$
$-1,095 \pm j 12,51$ (αλληλεπίδρασης)	$\Delta\theta_m$ DFAG1	1,00	$0,589 \angle 180^\circ$
	$\Delta\theta_m$ DFAG2	0,86	$0,544 \angle 1^\circ$

Στο Σχ. 7.4 φαίνεται η μεταβολή των κυρίαρχων ιδιοτιμών του συστήματος στην περίπτωση που οι ΑΓΔΤ ελέγχουν το συντελεστή ισχύος. Παρατηρούμε ότι δεν υπάρχει αλλη-



Σχήμα 7.4: Κυρίαρχες ιδιοτιμές για αιολική διείδυση 0-90 MW. Συμβατική μονάδα με μειωμένα MVA, αιολικά πάρκα ως ΑΓΔΤ με έλεγχο συντελεστή ισχύος.

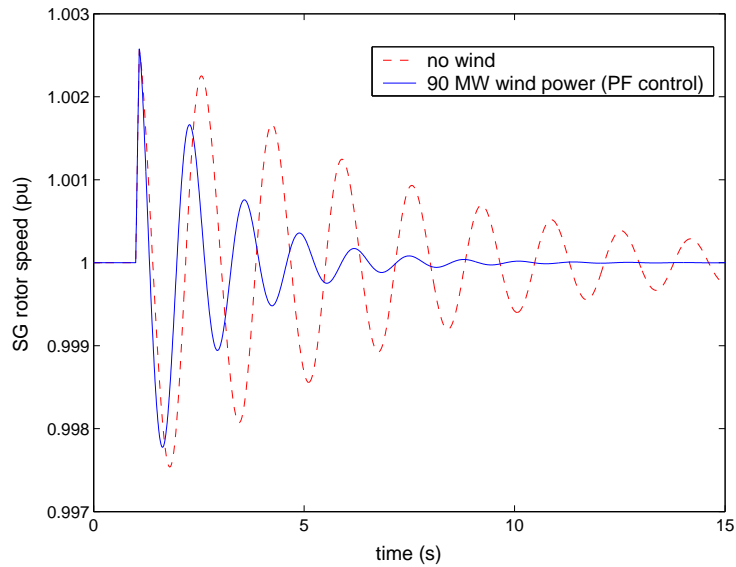
λεπίδραση μεταξύ του ηλεκτρομηχανικού ρυθμού και των ρυθμών ελέγχου αέργου ισχύος των ΑΓΔΤ. Οι ιδιοτιμές των ρυθμών ελέγχου αέργου ισχύος έχουν μεγάλη απόσβεση και κινούνται προς τα αριστερά, καθώς αυξάνεται η αιολική διείδυση. Αυτή η μετατόπιση είναι σύμφωνη με το Σχ. 4.19: καθώς αυξάνεται η ονομαστική ισχύς των αιολικών πάρκων, το υπόλοιπο σύστημα εμφανίζεται λιγότερο ισχυρό. Σημειώνεται ότι η απόσβεση της ιδιοτιμής που σχετίζεται με τη διεύερση της σύγχρονης γεννήτριας μειώνεται. Αυτό συναντάται συχνά με την αλλαγή παραμέτρων, όταν χρησιμοποιείται σταθεροποιητής ισχύος [Rog00]. Ενδεχομένως να πρέπει να ρυθμίζεται ξανά ο σταθεροποιητής για μεγάλη αιολική διείδυση.

Στο Σχ. 7.5 φαίνεται η απόκριση της ταχύτητας της σύγχρονης γεννήτριας μετά από ένα τριφασικό αυτοεκκαθαριζόμενο σφάλμα στο ζυγό 3 τη χρονική στιγμή $t=1$ s (σύνθετη αντίσταση προς γη $0+j0,1$ α.μ.). Η προσομοίωση της διαταραχής έχει γίνει στο αρχικό σημείο λειτουργίας (χωρίς αιολική παραγωγή) και για 90 MW αιολική παραγωγή, όπου οι ΑΓΔΤ κρατάνε σταθερό συντελεστή ισχύος. Οι προσομοιώσεις επιβεβαιώνουν την σημαντική αύξηση της απόσβεσης και της συχνότητας που υπολογίστηκαν με την ανάλυση ιδιοτιμών.

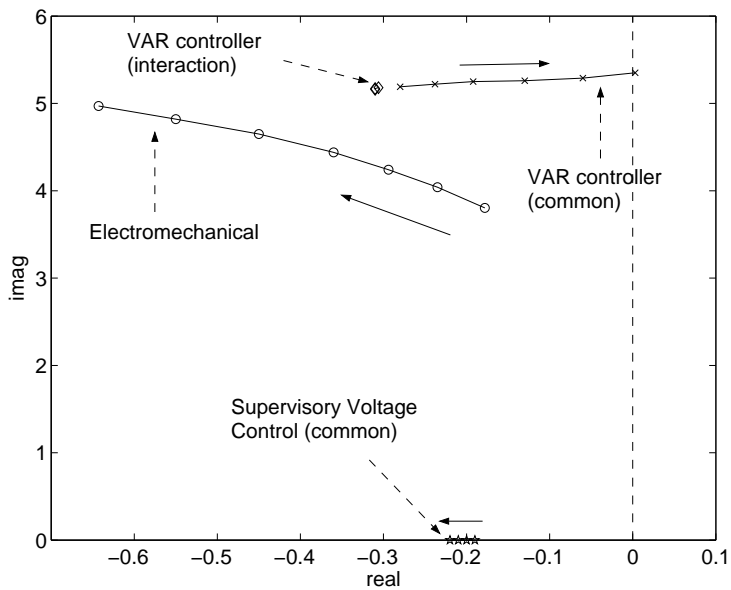
Στο Σχ. 7.6 φαίνεται η μεταβολή των κυρίαρχων ιδιοτιμών, όταν οι ΑΓΔΤ ελέγχουν την τάση στους αντίστοιχους ζυγούς ΜΤ. Σε σχέση με το Σχ. 7.4, η ιδιοτιμή του ελέγχου αέργου ισχύος έχει μικρότερη απόσβεση, γεγονός που συμφωνεί με τα αποτελέσματα στο σύστημα ΑΓΔΤ - άπειρος ζυγός (ενότητα 4.4). Παρατηρούμε ότι η συχνότητα της είναι πολύ κοντά στη συχνότητα του ηλεκτρομηχανικού ρυθμού, γεγονός που μπορεί να προκαλέσει αλληλεπίδραση μεταξύ των δύο ρυθμών, αν και στη συγκεκριμένη περίπτωση αυτό δε συμβαίνει.

Παρατηρώντας το Σχ. 4.20, είναι αναμενόμενο ότι στο Σχ. 7.6 η ιδιοτιμή του ρυθμιστή αέργων μετατοπίζεται προς τα δεξιά: Καθώς αυξάνεται η αιολική διείδυση (και τα MVA του αιολικού πάρκου) αυξάνεται και η σύνθετη αντίσταση του συστήματος, όπως φαίνεται από την πλευρά του πάρκου. Μετά από ένα επίπεδο αιολικής διείδυσης (περίπου 30 MW), ο ρυθμός ελέγχου αέργων γίνεται κυρίαρχος και στα 90 MW περίπου, γίνεται ασταθής. Η πραγματική ιδιοτιμή που σχετίζεται με τον έλεγχο τάσης του αιολικού πάρκου κινείται προς τα αριστερά (από -0,19 για 15 MW σε -0,22 για 90 MW). Αυτό επίσης μπορεί να θεωρηθεί αναμενόμενο

Κεφάλαιο 7. Επίδραση αιολικής διεύθυνσης στην ευστάθεια μικρών διαταραχών



Σχήμα 7.5: Απόκριση ταχύτητας δρομέα σύγχρονης γεννήτριας σε βραχυκύκλωμα

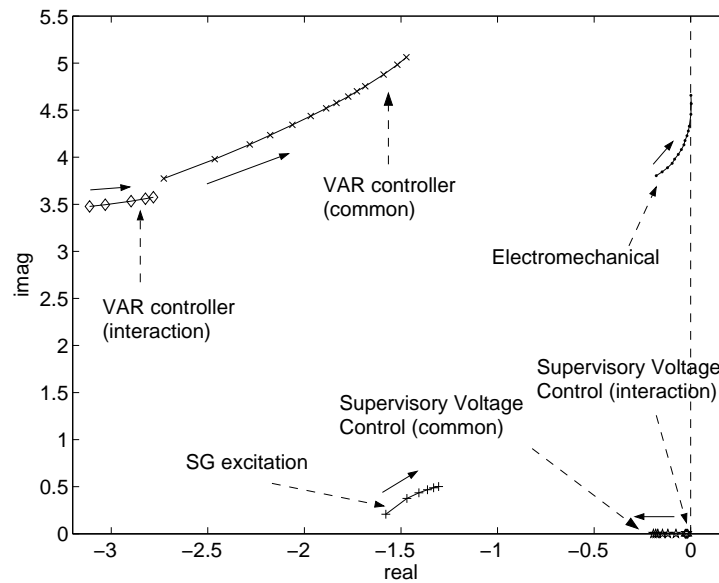


Σχήμα 7.6: Κυριάρχες ιδιοτιμές για αιολική διεύθυνση 0-90 MW. Συμβατική μονάδα με μειωμένα MVA, αιολικά πάρκα ως ΑΓΔΤ που ελεγχουν την τάση στο ζυγό ΜΤ.

από την αντίστοιχη μετακίνηση στο Σχ. 4.20. Ο αντίστοιχος ρυθμός αλληλεπίδρασης μένει περίπου σταθερός γύρω στο -0,18 (δεν εμφανίζεται στο Σχ. 7.6).

Στο Σχ. 7.7 φαίνεται η μεταβολή των κυριάρχων ιδιοτιμών όταν οι ΑΓΔΤ ελέγχουν την τάση στους αντίστοιχους ζυγούς ΥΤ. Καταρχάς, καθώς το σημείο ελέγχου της τάσης μετατοπίστηκε πλησιέστερα στον άπειρο ζυγό, το σύστημα, όπως φαίνεται από την ΑΓΔΤ, ισχυροποιήθηκε και η ιδιοτιμή του ρυθμιστή αέργων κινήθηκε προς τα αριστερά σε σχέση με το Σχ. 7.6, ενώ ο κοινός ρυθμός ελέγχου της τάσης του αιολικού πάρκου κινήθηκε προς τα δεξιά (βλ. Σχ. 4.20).

Και σε αυτή την περίπτωση, καθώς η αιολική διεύθυνση αυξάνεται (και το σύστημα γίνεται λιγότερο ισχυρό, όπως φαίνεται από τα αιολικά πάρκα), ο ρυθμός ελέγχου αέργων κινείται



Σχήμα 7.7: Κυριάρχες ιδιοτιμές για αιολική διείδυση 0-90 MW. Συμβατική μονάδα με μειωμένα MVA, αιολικά πάρκα ως ΑΓΔΤ που ελεγχουν την τάση στο ζυγό YT.

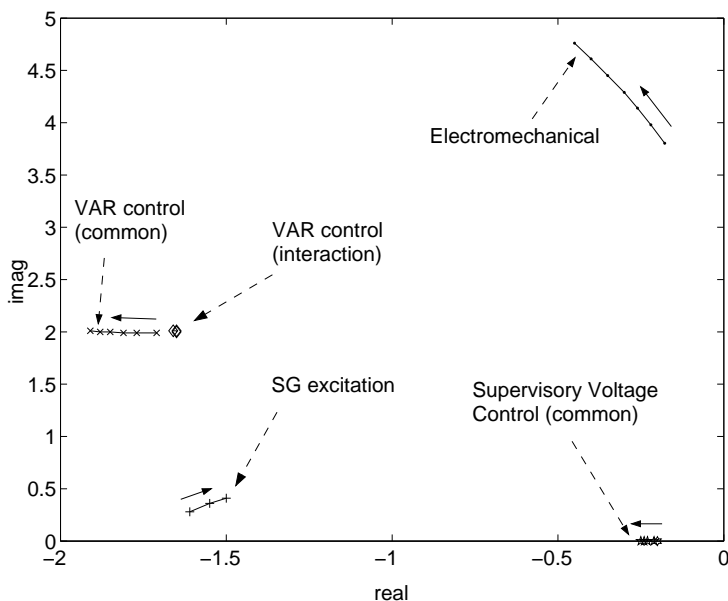
προς τα δεξιά. Τώρα όμως, εμφανίζεται έντονη αλληλεπίδραση με τον ηλεκτρομηχανικό ρυθμό, ο οποίος κινείται επίσης προς τα δεξιά και γίνεται ασταθής για περίπου 60 MW αιολικής παραγωγής.

Ο κοινός ρυθμός του ελέγχου τάσης του αιολικού πάρκου (supervisory voltage control) μετακινείται από το -0,08 για 15 MW στο -0,19 για 90 MW και ο αντίστοιχος ρυθμός αλληλεπίδρασης από το -0,02 για 60 MW, στο -0,03 για 90 MW. Σε σχέση με την περίπτωση που η τάση ελέγχεται στο ζυγό MT, ο ρυθμός αλληλεπίδρασης του ελέγχου τάσης του αιολικού πάρκου μετακινήθηκε σημαντικά προς τα δεξιά. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί με τη μείωση της ηλεκτρικής απόστασης μεταξύ των ζυγών όπου ελέγχεται η τάση. Στο όριο, οι PI ελεγκτές των τάσεων των δύο πάρκων, θα έπεφταν σε αστάθεια προσπαθώντας να ελέγξουν την τάση στον ίδιο ζυγό.

Η αστάθεια του ρυθμού ηλεκτρομηχανικής ταλάντωσης που παρατηρείται στην περίπτωση αυτή (έλεγχος τάσης στο ζυγό YT) ή του ρυθμού αέργου ισχύος που παρατηρήθηκε στην προηγούμενη περίπτωση (ρύθμιση τάσης στο ζυγό MT), μπορεί να αποφευχθεί με κατάλληλη ρύθμιση των παραμέτρων του βρόχου ελέγχου αέργων της ΑΓΔΤ. Για παράδειγμα, στην περίπτωση με έλεγχο της τάσης στο ζυγό MT, αν το κέρδος K_{Qi} (βλ. Σχ. 3.11) μειωθεί από το 0,5 στο 0,1, τότε η μεταβολή των ιδιοτιμών γίνεται όπως φαίνεται στο Σχ. 7.8. Παρόμοια με την περίπτωση με έλεγχο του συντελεστή ισχύος (βλ. τον πίνακα κατάστασης της (4.8)), η συχνότητα του ταλαντωτικού ρυθμού ελέγχου των αέργων μειώνεται με μείωση του K_{Qi} . Ο κοινός ρυθμός του ελέγχου τάσης του αιολικού πάρκου (supervisory voltage control) μετακινείται από το -0,21 για 15 MW στο -0,25 για 90 MW και ο αντίστοιχος ρυθμός αλληλεπίδρασης παραμένει γύρω στο -0,2.

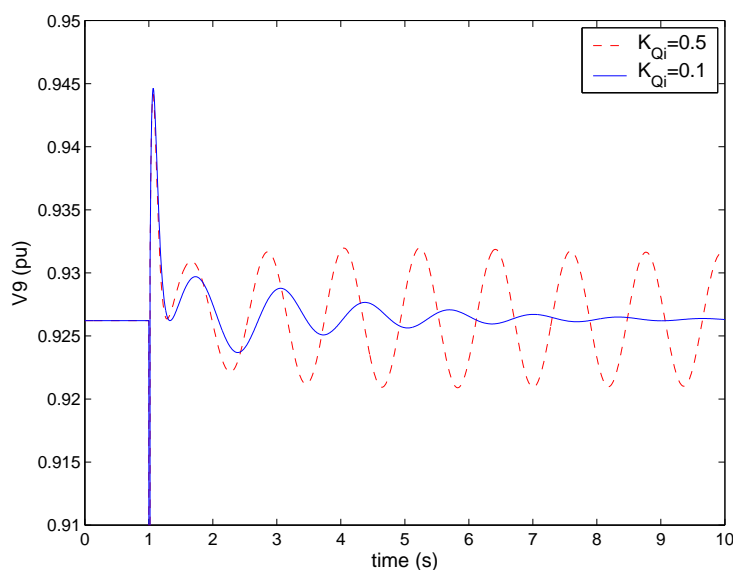
Στο Σχ. 7.9 φαίνεται με προσομοίωση, για την περίπτωση που οι ΑΓΔΤ ελέγχουν την τάση στους ζυγούς MT και για αιολική παραγωγή 90 MW, η αστάθεια του ρυθμού ελέγχου αέργου ισχύος με τις αρχικές παραμέτρους και η σταθεροποίηση του με την αλλαγή του κέρδους K_{Qi} . Στην περίπτωση με $K_{Qi}=0,1$, στην απόκριση της τάσης κυριαρχεί ο ηλεκτρομηχανικός ρυθμός που είναι κυρίαρχος, όπως φαίνεται στο Σχ. 7.8. Η διαταραχή που προσομοιώνεται είναι αυτοεκκαθαριζόμενο σφάλμα στο ζυγό 3 τη στιγμή $t=1$ s (αντίσταση

Κεφάλαιο 7. Επίδραση αιολικής διείσδυσης στην ευστάθεια μικρών διαταραχών



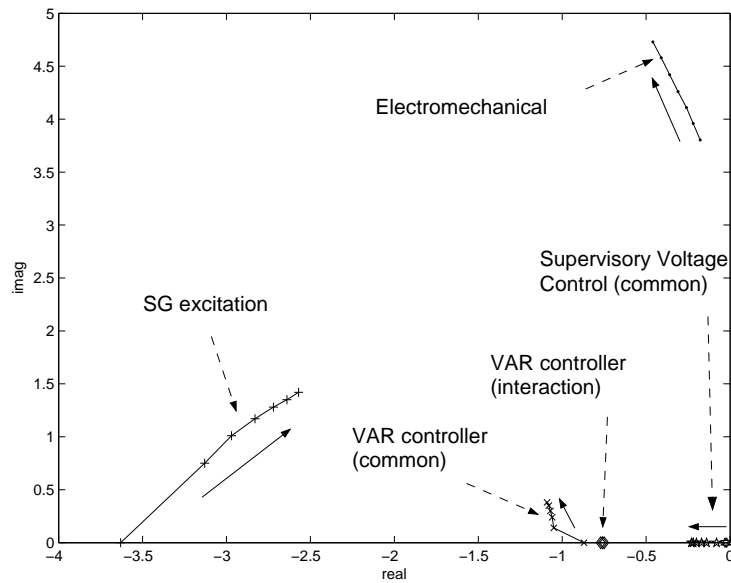
Σχήμα 7.8: Κυριάρχες ιδιοτιμές για αιολική διείσδυση 0-90 MW. Συμβατική μονάδα με μειωμένα MVA, αιολικά πάρκα ως ΑΓΔΤ που ελεγχουν την τάση στο ζυγό ΜΤ, $K_{Qi}=0,1$.

προς γη $0+j0,2$ α.μ. στα 100 MVA).

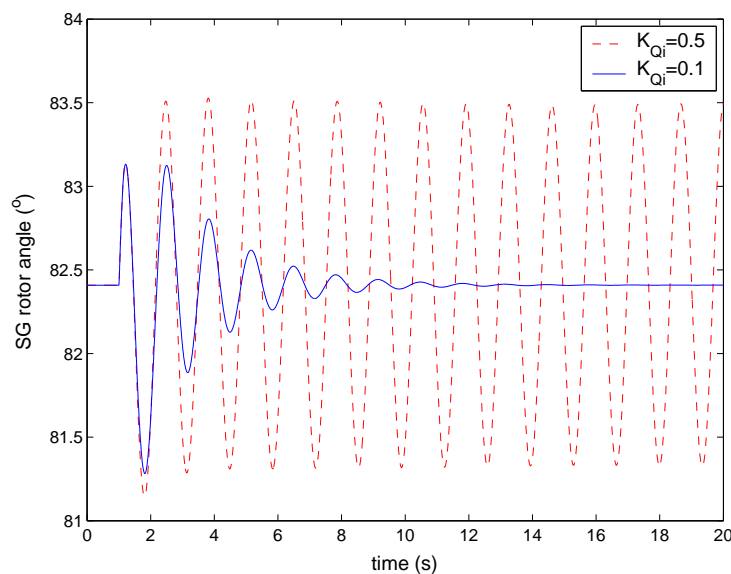


Σχήμα 7.9: Απόκριση τάσης ζυγού 9 μετά από βραχυκύκλωμα. Οι ΑΓΔΤ ελέγχουν την τάση στους ζυγούς ΜΤ.

Μείωση του κέρδους K_{Qi} έχει παρόμοια σταθεροποιητική επίδραση στην περίπτωση που οι ΑΓΔΤ ελέγχουν την τάση στους αντίστοιχους ζυγούς ΥΤ: Καθώς μειώνεται η συχνότητα του ρυθμού ελέγχου αέργου ισχύος της ΑΓΔΤ, απομακρύνεται από τη συχνότητα της ηλεκτρομηχανικής ταλάντωσης και απόφευγεται η αλληλεπίδραση. Η αντίστοιχη μεταβολή των ιδιοτιμών με την αύξηση της αιολικής διείσδυσης φαίνεται στο Σχ. 7.10 Στο Σχ. 7.11 φαίνεται η απόκριση της γωνίας του δρομέα της σύγχρονης γεννήτριας σε σφάλμα, για 90 MW αιολική παραγωγή. Όπως υποδηλώνεται από την ιδιοτιμή του ηλεκτρομηχανικού ρυθ-



Σχήμα 7.10: Κυριάρχες ιδιοτιμές για αιολική διεύθυνση 0-90 MW. Συμβατική μονάδα με μειωμένα MVA, αιολικά πάρκα ως ΑΓΔΤ που ελεγχουν την τάση στο ζυγό ΥΤ, $K_{Qi}=0,1$.

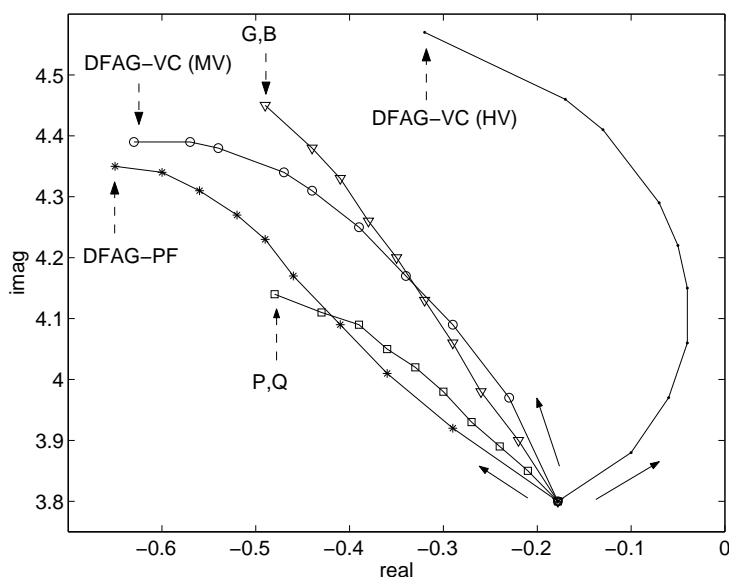


Σχήμα 7.11: Απόκριση γωνίας δρομέα σύγχρονης γεννήτριας σε βραχυκύκλωμα. Οι ΑΓΔΤ ελέγχουν την τάση στους ζυγούς ΥΤ.

μού που βρίσκεται στο δεξιό ημιεπίπεδο, το αρχικό σημείο λειτουργίας (με $K_{Qi}=0,5$) είναι οριακά ασταθές στις μικρές διαταραχές.

7.1.3 Περίπτωση με συμβατική μονάδα σταθερών MVA

Σε αυτή την περίπτωση, η ονομαστική φαινόμενη ισχύς της τοπικής σύγχρονης γεννήτριας παραμένει σταθερή, αλλά η ενεργός παραγωγή της μειώνεται. Στο Σχ. 7.12 φαίνεται η μεταβολή του ηλεκτρομηχανικού ρυθμού της σύγχρονης γεννήτριας, καθώς αυξάνεται η αιολική διεύθυνση. Όπως και στην παράγραφο 7.1.2, η μεταβολή είναι παρόμοια σε όλες τις περι-



Σχήμα 7.12: Ηλεκτρομηχανικός ρυθμός για αυξανόμενη αιολική διείσδυση (0-90 MW), με συμβατική μονάδα σταθερών MVA και για διάφορες επιλογές μοντελοποίησης των αιολικών πάρκων

πτώσεις πλην μίας: Η συχνότητα και η απόσβεση αυξάνονται με την αύξηση της αιολικής διείσδυσης.

Αυτή η συμπεριφορά του ηλεκτρομηχανικού ρυθμού της σύγχρονης γεννήτριας είναι αναμενόμενη όταν δεν υπάρχει αλληλεπίδραση με τη δυναμική των ανεμογεννητριών: Καταρχάς μπορεί να γίνει μια εκτίμηση της συχνότητας των ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων με το κλασικό μοντέλο της σύγχρονης γεννήτριας (2ης τάξης), από το οποίο προκύπτει η παρακάτω σχέση [Kun94]:

$$\omega_n = \sqrt{K_S \frac{\omega_b}{2H}} \quad (7.2)$$

όπου H είναι η ανηγμένη σταθερά αδρανείας της γεννήτριας και K_S είναι ο συντελεστής συγχρονισμού. Καθώς μειώνεται η ενεργός παραγωγή της σύγχρονης γεννήτριας, μειώνεται και η γωνία του δρομέα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να αυξηθεί ο συντελεστής συγχρονισμού, άρα και η συχνότητα των ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων. Επίσης είναι σύνηθες η μείωση της ενεργού παραγωγής να οδηγεί σε θετική επίδραση του APT στη ροπή απόσβεσης [Kun94]. Παρατηρούμε ότι στην περίπτωση που η ΑΓΔΤ ελέγχει την τάση του ζυγού ΥΤ, η απόσβεση του ηλεκτρομηχανικού ρυθμού μειώνεται για ενδιάμεση αιολική διείσδυση. Επομένως, τα αποτελέσματα είναι παρόμοια με την περίπτωση της παραγράφου 7.1.2, αλλά λιγότερο έντονα.

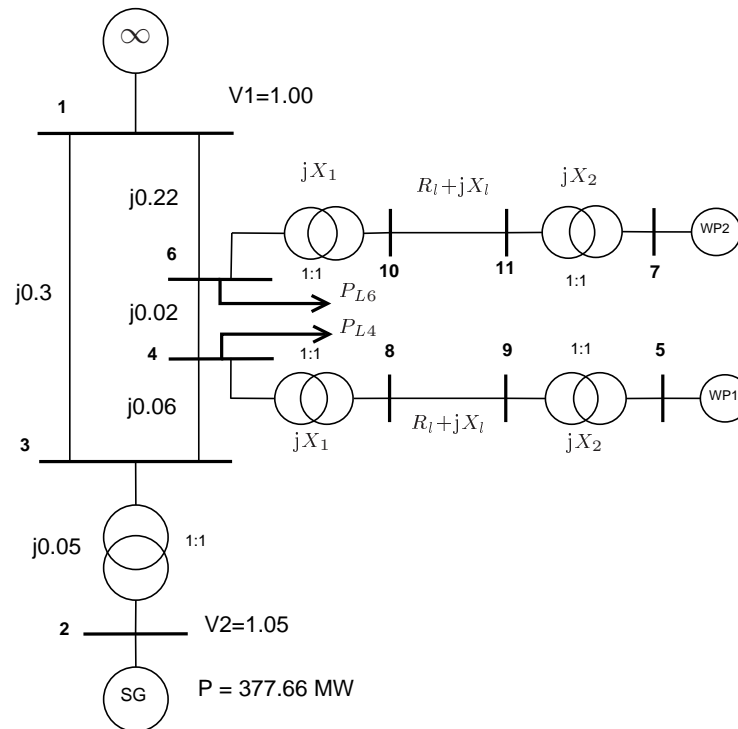
7.2 Μικρό διασυνδεδεμένο ΣΗΕ με σταθερή συμβατική παραγωγή

Σε αυτή την ενότητα εξετάζεται ένα σύστημα παρόμοιο με της ενότητας 7.1, όπου όμως η αιολική διείσδυση αυξάνεται παράλληλα με το φορτίο του συστήματος. Με τον τρόπο αυτό, η συμβατική μονάδα παραγωγής παραμένει ανεπηρέαστη κατά την αύξηση της αιολικής διείσδυσης και οι τυχόν μεταβολές στη συχνότητα και την απόσβεση των ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων οφείλονται στην αλληλεπίδραση της δυναμικής της συμβατικής μονάδας και

των ανεμογεννητριών. Αντίστοιχη προσέγγιση ακολουθείται και στη μελέτη του ελληνικού διασυνδεδεμένου συστήματος που παρουσιάζεται στην ενότητα 7.3.

7.2.1 Περιγραφή του συστήματος

Το μονογραμμικό διάγραμμα του συστήματος φαίνεται στο Σχ. 7.13, όπου οι σύνθετες αντιστάσεις δίνονται στη βάση των 100 MVA. Κάθε αιολικό πάρκο αναπαριστάται από μία



Σχήμα 7.13: Μικρό διασυνδεδεμένο σύστημα με σταθερή συμβατική παραγωγή

ΑΓΔΤ και ένα μετασχηματιστή XT/MT με κατάλληλη φαινόμενη ισχύ και συνδέεται στην υψηλή τάση (π.χ. ζυγός 4 για το WP1) μέσω μίας γραμμής μέσης τάσης και μετασχηματιστή MT/YT. Οι σύνθετες αντιστάσεις των στοιχείων αυτών δίνονται στον Πίνακα 7.7 σε α.μ. στην ονομαστική φαινόμενη ισχύ του πάρκου S_{nom} . Οι ΑΓΔΤ θεωρείται ότι λειτουργούν

Πίνακας 7.7: Στοιχεία ακτινικής σύνδεσης αιολικού πάρκου (α.μ. στη βάση S_{nom} του πάρκου)

X_1	R_l	X_l	X_2
0,06	0,02	0,0248	0,0552

με μοναδιαίο συντελεστή ισχύος και κάθε πάρκο παράγει ενεργό ισχύ $P=0,8$ α.μ. στα ονομαστικά MVA του.

Η σύγχρονη γεννήτρια της συμβατικής μονάδας παραγωγής αναπαριστάται με μοντέλο τέταρτης τάξης και παραμέτρους ίδιες με της γεννήτριας της ενότητας 7.1. Η μηχανική ισχύς θεωρείται σταθερή. Για τον APT χρησιμοποιείται μοντέλο DC1A κατά IEEE με τις παραμέτρους του Πίνακα 7.8, αμελώντας φαινόμενα κορέσμου [Kun94]. Τα φορτία θεωρούνται σταθερές αγωγιμότητες.

Πίνακας 7.8: Παράμετροι APT

T_R	0,01 s	T_B	0 s	T_C	0 s
T_A	0,04 s	K_A	30	V_{Rmax}	6,172 α.μ.
V_{Rmin}	-6,172 α.μ.	T_E	0,03 s	K_E	1
K_F	0,02	T_F	1 s		

Πίνακας 7.9: Αρχικές τιμές των φορτίων

P_{L4}	P_{L6}
283 MW	95 MW

Για τα αιολικά πάρκα χρησιμοποιείται το μοντέλο της ΑΓΔΤ με λεπτομερείς βρόχους ελέγχου που παρουσιάστηκε στην παράγραφο 3.3. Οι παραμέτροι του μοντέλου είναι από τον Πίνακα Α.3. Το μοντέλο της ΑΓΔΤ χρησιμοποιείται με τις τέσσερις δυνατές επιλογές για τη δομή του ελέγχου αέργου ισχύος (βλ. Σχ. 3.11):

- Έλεγχος συντελεστή ισχύος (PF) με έλεγχο της τερματικής τάσης (TVC)
- Έλεγχος συντελεστή ισχύος (PF) χωρίς έλεγχο της τερματικής τάσης (w/o TVC)
- Έλεγχος τάσης του πάρκου (VC) με έλεγχο της τερματικής τάσης (TVC)
- Έλεγχος τάσης του πάρκου (VC) χωρίς έλεγχο της τερματικής τάσης (w/o TVC)

Στις περιπτώσεις με έλεγχο τάσης, κρατείται σταθερή η τάση του ζυγού μετά το M/Σ της μονάδας (δηλ. του ζυγού 9 για το WP1).

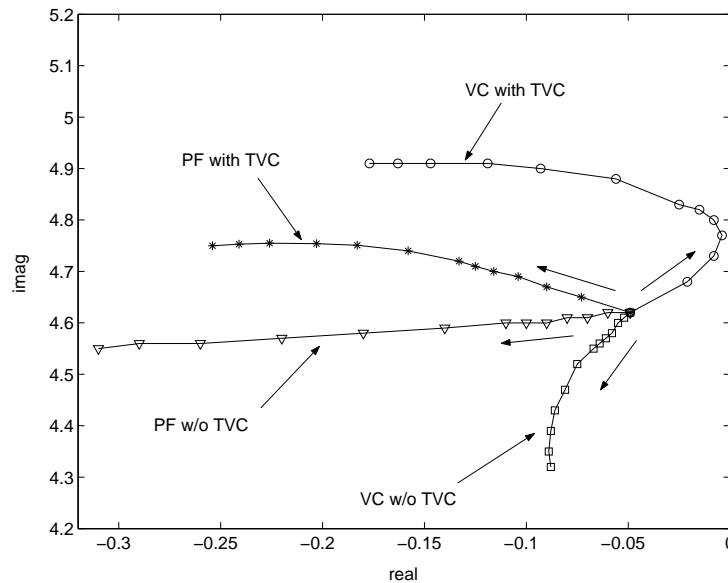
7.2.2 Επίδραση αύξησης της αιολικής παραγωγής

Η αιολική παραγωγή αυξάνεται σταδιακά, αυξάνοντας την ονομαστική ισχύ των αιολικών πάρκων. Τα φορτία στους ζυγούς 4 και 6 αυξάνονται ανάλογα, ενώ η παραγωγή της συμβατικής μονάδας παραμένει σταθερή. Με τον τρόπο αυτό, η σύγχρονη γεννήτρια παραμένει πρακτικά στο ίδιο σημείο λειτουργίας για όλα τα επίπεδα αιολικής διείσδυσης και, άρα, η όποια μεταβολή παρατηρηθεί στην ηλεκτρομηχανική ταλάντωση οφείλεται μόνο σε αλληλεπίδραση με τη δυναμική των ΑΓΔΤ.

Σημειώνεται ότι μέχρι 45 MW αιολικής παραγωγής, θεωρείται ότι είναι συνδεδεμένο μόνο το πάρκο WP1. Για μεγαλύτερη αιολική παραγωγή, θεωρούνται δύο όμοια πάρκα με ίση παραγωγή. Στο αρχικό σημείο λειτουργίας, το οποίο περιγράφεται από τις παραμέτρους που δίνονται στο Σχ. 7.13 και τα φορτία του Πίνακα 7.9, η αιολική παραγωγή είναι μηδενική.

Στο Σχ. 7.14 φαίνεται η μεταβολή της ιδιοτιμής του ηλεκτρομηχανικού ρυθμού καθώς αυξάνεται η αιολική παραγωγή. Με έλεγχο του συντελεστή ισχύος, η απόσβεση του ηλεκτρομηχανικού ρυθμού αυξάνεται σημαντικά με την αιολική διείσδυση, ενώ η συχνότητα μένει πρακτικά σταθερή. Όταν χρησιμοποιείται ο έλεγχος τάσης, η συμπεριφορά του ρυθμού αλλάζει σημαντικά, ανάλογα και με το αν είναι ενεργοποιημένος ο έλεγχος της τερματικής τάσης.

Χωρίς έλεγχο της τερματικής τάσης, η απόσβεση αυξάνεται, ενώ η συχνότητα μειώνεται. Όταν είναι ενεργοποιημένος ο έλεγχος της τερματικής τάσης, η απόσβεση αρχικά μειώνεται



Σχήμα 7.14: Ιδιοτιμή η/μ ρυθμού για αυξανόμενη αιολική παραγωγή (0-380 MW). Παράμετρος ο τύπος ελέγχου της αέργου ισχύος.

και, όταν η αιολική παραγωγή φτάσει τα 45 MW, σχεδόν μηδενίζεται. Στη συνέχεια, η απόσβεση αρχίζει να αυξάνεται κατά τρόπο παρόμοιο με την περίπτωση ελέγχου του συντελεστή ισχύος και η συχνότητα αυξάνεται λίγο.

Όπως και στην ενότητα 7.1, και σε αυτή την περίπτωση φαίνεται ότι η διεύθυνση αιολικών πάρκων με ΑΓΔΤ έχει γενικά θετική επίδραση με την εξαίρεση ορισμένων περιπτώσεων, όταν γίνεται έλεγχος τάσης.

Στο Σχ. 7.15 φαίνεται η μεταβολή των κυρίαρχων ιδιοτιμών όταν οι ΑΓΔΤ ρυθμίζουν την τάση (του ζυγού MT) με ενεργοποιημένο και τον έλεγχο της τερματικής τους τάσης. Βλέπουμε ότι για υψηλή αιολική διεύθυνση ο ρυθμός ελέγχου αέργων γίνεται κυρίαρχος. Η συμπεριφορά είναι παρόμοια με αυτή στα Σχ. 7.6, 7.7. Και εδώ η αρνητική αλληλεπίδραση μπορεί να αποφευχθεί, ρυθμίζοντας τον έλεγχο αέργου ισχύος ώστε η συχνότητα του ρυθμού ελέγχου αέργων να είναι αρκετά μακριά από τη συχνότητα ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων.

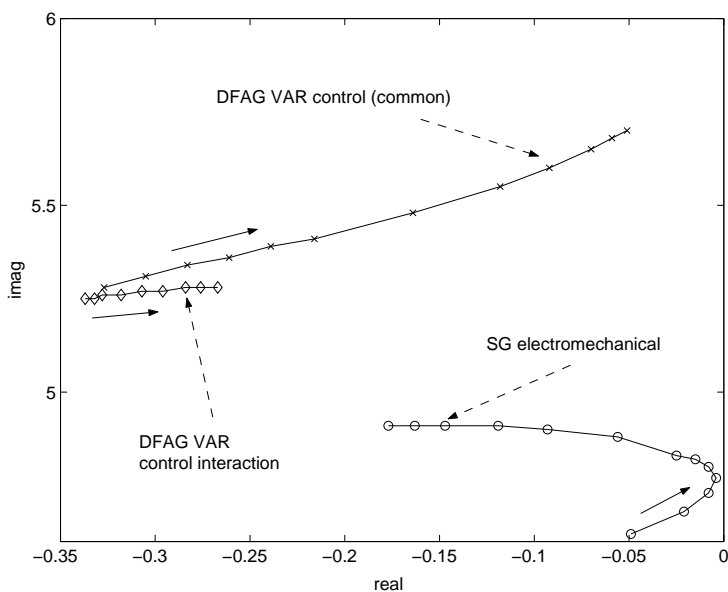
7.2.3 Ροπή απόσβεσης σύγχρονης γεννήτριας

Στον πίνακα 7.10 φαίνεται η ροπή απόσβεσης της σύγχρονης γεννήτριας για την περίπτωση των 45 MW αιολικής παραγωγής. Η συμμετοχή στην απόσβεση υπολογίζεται από το μοντέλο

Πίνακας 7.10: Ιδιοτιμή ηλεκτρομηχανικού ρυθμού και ροπή απόσβεσης της σύγχρονης γεννήτριας για 45 MW αιολικής παραγωγής

Μοντέλο	η/μ ιδιοτιμή	$\frac{\Delta T_d}{\Delta \omega_r}$
Χωρίς ΑΓΔΤ	-0,050 ± j4, 615	0,187
PF με TVC	-0,104 ± j4, 689	1,254
VC με TVC	-0,004 ± j4, 765	-0,732
PF χωρίς TVC	-0,083 ± j4, 605	0,848
VC χωρίς TVC	-0,058 ± j4, 580	0,350

του συστήματος του Σχ. 7.13 παίρνοντας στο Matlab/Simulink την συνάρτηση μεταφοράς



Σχήμα 7.15: Κυρίαρχες ιδιοτιμές για αυξανόμενη αιολική παραγωγή (0-380 MW). Οι ΑΓΔΤ ρυθμίζουν την τάση του ζυγού MT και ο έλεγχος της τερματικής τάσης είναι ενεργοποιημένος.

ανοιχτού βρόχου $G(s) = \Delta T_e / \Delta \omega_r(s)$ της σύγχρονης γεννήτριας, όπου T_e είναι η ηλεκτρομαγνητική ροπή και ω_r είναι η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα [DC69].

Για να υπολογιστεί η συνάρτηση ανοιχτού βρόχου $G(s)$, θέτουμε τη σταθερά αδρανείας H σε μια πολύ μεγάλη τιμή (ή, ισοδύναμα, ανοίγουμε το βρόχο της εξίσωσης κίνησης στο Simulink). Το πραγματικό μέρος του $G(j\omega_{e/m})$ (όπου $\omega_{e/m}$ είναι η συχνότητα της ηλεκτρομηχανικής ταλάντωσης) είναι η συνιστώσα της ροπής απόσβεσης:

$$T_d = \text{Re} \{ G(j\omega_{e/m}) \} \quad (7.3)$$

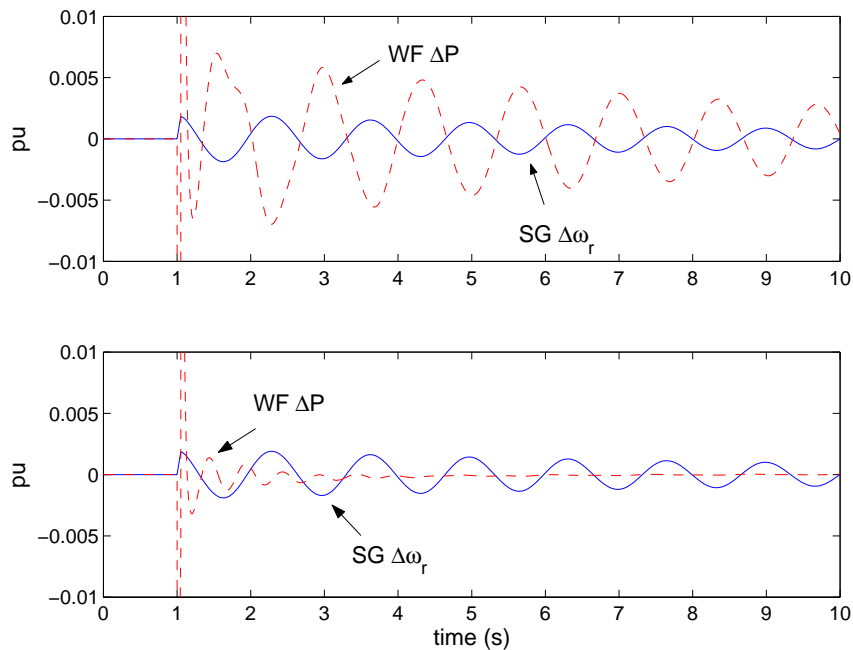
Όπως φαίνεται στη δεύτερη στήλη του Πίνακα 7.10, η ροπή απόσβεσης που οφείλεται στην ΑΓΔΤ είναι θετική σε όλες τις περιπτώσεις εκτός από όταν η ΑΓΔΤ κάνει έλεγχο τάσης (VC) με ενεργό τον έλεγχο της τερματικής τάσης (TVC). Σε αυτή την περίπτωση, το σύστημα είναι και πάλι οριακά ευσταθές, λόγω της μηχανικής απόσβεσης που υπάρχει στο μοντέλο.

7.2.4 Επίδραση μεταβολής ενεργού ισχύος

Σε αυτή την παράγραφο, εξετάζουμε τη μεταβολή της ενεργού ισχύος της ΑΓΔΤ κατά τη διάρκεια μεταβατικών φαινομένων του συστήματος, καθώς και την επίδρασή της στη ροπή απόσβεσης της σύγχρονης γεννήτριας.

Στο σύστημα του Σχ. 7.13 και στην περίπτωση με 45 MW από ΑΓΔΤ με έλεγχο συντελεστή ισχύος μέσω ελέγχου της τερματικής τάσης, προσομοιώνεται τριφασικό σφάλμα στο ζυγό 3. Στο Σχ. 7.16 φαίνεται η απόκριση της ενεργού ισχύος του αιολικού πάρκου που φτάνει στο ζυγό 4 μαζί με την απόκριση της απόκλισης της ταχύτητας του δρομέα της σύγχρονης γεννήτριας για τις εξής δύο περιπτώσεις:

- (a) Το PLL μοντελοποιείται όπως φαίνεται στο Σχ. 3.9.
- (b) Το PLL υποτίθεται ότι λειτουργεί ακαριαία, δηλαδή ακολουθεί τη γωνία της τερματικής τάσης χωρίς καθυστέρηση.



Σχήμα 7.16: Ενεργός ισχύς ΑΓΔΤ (α.μ. στη βάση 100 MVA) και ταχύτητα δρομέα σύγχρονης γεννήτριας με (a) και χωρίς μοντέλο PLL (b)

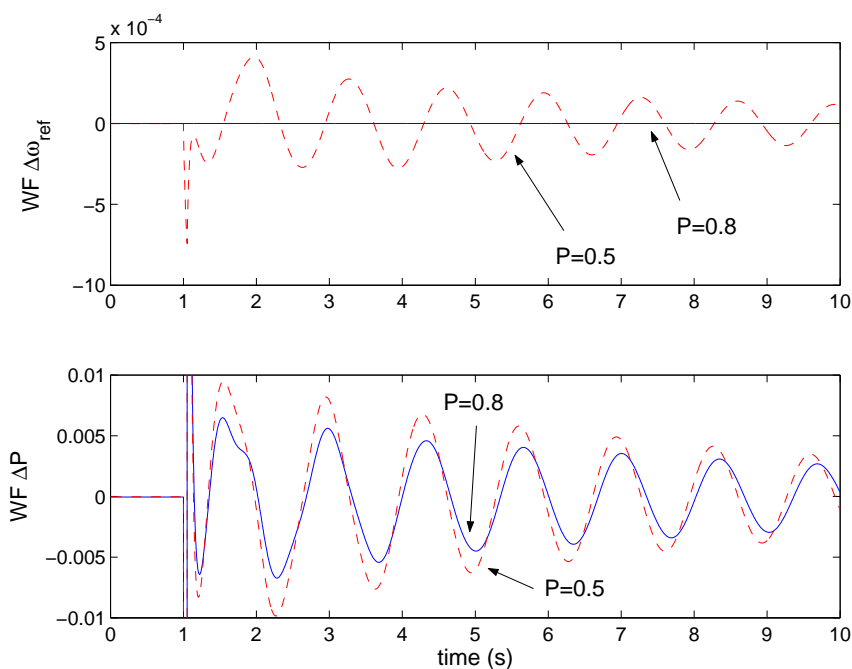
Συγκρίνοντας τις περιπτώσεις (a) και (b), βλέπουμε ότι η ταλάντωση της ενεργού ισχύος της ΑΓΔΤ προκύπτει από τη μοντελοποίηση του PLL.

Σημειώνεται ότι καθώς μειώνεται η ενεργός ισχύς που παράγεται από το αιολικό πάρκο, η παραγόμενη ισχύς της σύγχρονης γεννήτριας αυξάνεται, επιβραδύνοντας το δρομέα της. Επομένως, όταν η ενεργός ισχύς των ανεμογεννητριών και η ταχύτητα του δρομέα της σύγχρονης γεννήτριας ταλαντώνεται σε αντίθεση φάσης, όπως στο Σχ. 7.16a, προκύπτει θετική ροπή απόσβεσης. Ο συλλογισμός αυτός προϋποθέτει ότι η σύγχρονη γεννήτρια και τα αιολικά πάρκα έχουν την ίδια ηλεκτρική συχνότητα και ταλαντώνονται ως προς ένα εξωτερικό σύστημα. Επομένως ισχύει για ταλαντώσεις διασύνδεσης.

Στο εξεταζόμενο σημείο λειτουργίας του Σχ. 7.16 ($P=0,8$ α.μ.), η ΑΓΔΤ λειτουργεί με μέγιστη ταχύτητα δρομέα και η ταχύτητα αναφοράς ω_{ref} είναι σταθερή. Όπως φαίνεται στο Σχ. 7.17, αν υποθεθεί ότι οι ανεμογεννήτριες λειτουργούν με χαμηλότερη ταχύτητα ανέμου, η ω_{ref} συμμετέχει στην ηλεκτρομηχανική ταλάντωση, με αποτέλεσμα το πλάτος ταλάντωσης της ενεργού ισχύος της ΑΓΔΤ να είναι λίγο μεγαλύτερο. Αυτό οφείλεται στη θετική ανάδραση που φαίνεται στο πάνω μέρος του Σχ. 3.4: αύξηση του P οδηγεί σε αύξηση του P_{ord} .

Όπως φαίνεται, η διάδοση της διαταραχής μέσω του βρόχου ω_{ref} έχει επίσης μικρό αντίκτυπο στην απόκριση της ενεργού ισχύος της ΑΓΔΤ κατά τη διάρκεια των ηλεκτρομηχανικών μεταβατικών. Παρόλ' αυτά, τόσο αυτός όσο και το PLL συνεισφέρουν θετικά στην απόσβεση των ταλαντώσεων διασύνδεσης. Δείχνουν επίσης έναν απλό τρόπο για την αύξηση της απόσβεσης των ταλαντώσεων με την τεχνητή αύξηση της μεταβολής της ενεργού ισχύος μέσω ενός αιολικού σταθεροποιητή, ο οποίος εισάγεται στο Κεφ. 8.

Στον Πίνακα 7.11 φαίνεται η ιδιοτιμή της ηλεκτρομηχανικής ταλάντωσης για 45 MW αιολικής παραγωγής και τις τέσσερις διαφορετικές επιλογές για τη δομή του ρυθμιστή αέργου ισχύος τόσο με το πλήρες μοντέλο όσο και αμελώντας το PLL. Όπως φαίνεται, η μοντελοποίηση του PLL έχει μικρή (έως καθόλου), αλλά πάντα θετική συμβολή στην απόσβεση



Σχήμα 7.17: Μεταβολή της ταχύτητας αναφοράς $\Delta\omega_{ref}$ (άνω γράφημα) και ΔP (κάτω γράφημα) για δύο διαφορετικά σημεία λειτουργίας

της ηλεκτρομηχανικής ταλάντωσης. Επομένως, η συνολική συμβολή εξαρτάται κυρίως από την αλληλεπίδραση του βρόχου ελέγχου της αέργου ισχύος της ΑΓΔΤ με τη δυναμική της σύγχρονης γεννήτριας. Αυτό το συμπέρασμα συμφωνεί με τα αποτελέσματα της ενότητας 7.1 και με τα συμπεράσματα της εργασίας [FMO08].

Πίνακας 7.11: Ιδιοτιμή ηλεκτρομηχανικού ρυθμού με και χωρίς PLL

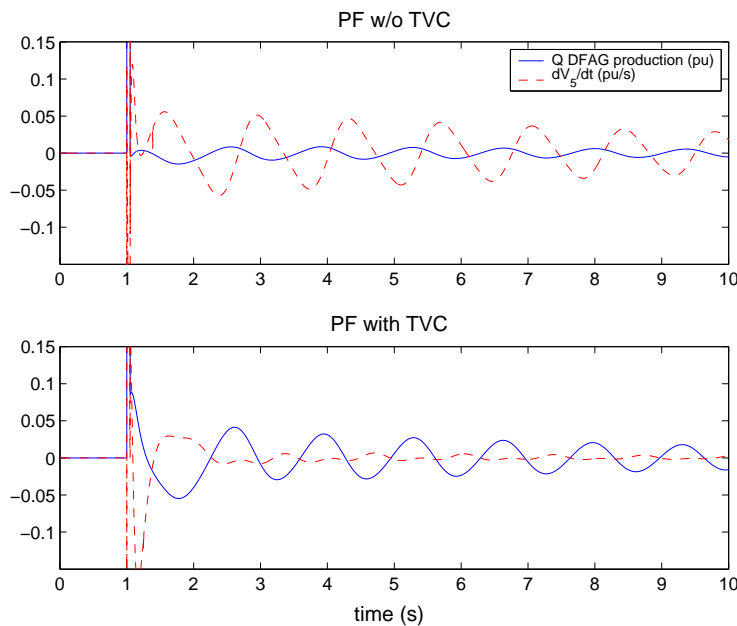
Μοντέλο	με PLL	χωρίς PLL
Χωρίς ΑΓΔΤ	$-0,050 \pm j4,615$	$-0,050 \pm j4,615$
PF με TVC	$-0,104 \pm j4,689$	$-0,089 \pm j4,694$
VC με TVC	$-0,004 \pm j4,765$	$-0,004 \pm j4,759$
PF χωρίς TVC	$-0,083 \pm j4,605$	$-0,057 \pm j4,605$
VC χωρίς TVC	$-0,058 \pm j4,580$	$-0,029 \pm j4,583$

7.2.5 Επίδραση μεταβολής αέργου ισχύος

Σε αυτή την παράγραφο εξετάζουμε τη μεταβολή της αέργου ισχύος της ΑΓΔΤ κατά τη διάρκεια μεταβατικών φαινομένων του συστήματος. Στην αναφορά [SA93] εξετάζεται η συμβολή ενός HVDC (ή άλλης ελεγχόμενης πηγής ενεργού και αέργου ισχύος) στην απόσβεση της διασυνδετικής ταλάντωσης σε ένα απλό σύστημα δύο περιοχών με το κλασικό μοντέλο για τις σύγχρονες γεννήτριες (σταθερή ΗΕΔ πίσω από αντίδραση). Σύμφωνα με τα συμπεράσματα της εργασίας αυτής, εάν η παραγόμενη αέργου ισχύς από την ελεγχόμενη πηγή είναι σε αντίθεση φάση με την παράγωγο της τερματικής τάσης (κάτι που συμβαίνει π.χ. αν ο ρυθμιστής της ελεγχόμενης πηγής ασκεί ολοκληρωματικό έλεγχο της τάσης), τότε η συμβολή στην απόσβεση είναι θετική. Επίσης συμπεραίνεται ότι μεταβολή της αέργου ισχύος είναι πιο

αποδοτική στην αύξηση της απόσβεσης της διασυνδεδετικής ταλάντωσης, όσο πιο κοντά στη μέση της ηλεκτρικής απόστασης μεταξύ των δύο γεννητριών βρίσκεται η ρυθμιζόμενη πηγή.

Για το σημείο λειτουργίας που εξετάστηκε και στην προηγούμενη παράγραφο (45 MW αιολικής παραγωγής), φαίνεται στο Σχ. 7.18 η μεταβολή της παραγωγής αέργου ισχύος από την ΑΓΔΤ, μαζί με την παράγωγο της τερματικής της τάσης για την περίπτωση ελέγχου του συντελεστή ισχύος χωρίς (άνω γράφημα) και με έλεγχο της τερματικής τάσης (κάτω γράφημα). Στο Σχ. 7.18 φαίνονται τα αντίστοιχα γραφήματα για την περίπτωση με έλεγχο



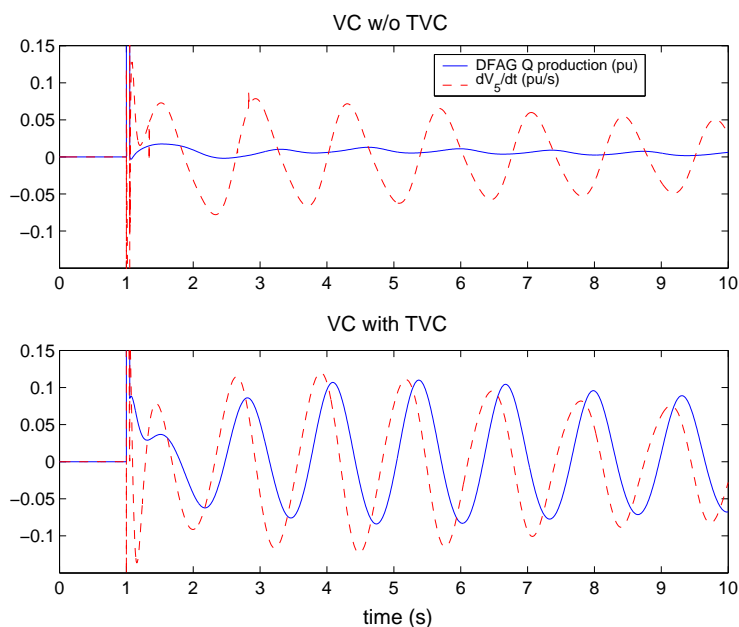
Σχήμα 7.18: Παραγωγή αέργου ισχύος και παράγωγος τερματικής τάσης ΑΓΔΤ. Περιπτώσεις με έλεγχο του συντελεστή ισχύος: Χωρίς (άνω γράφημα) και με έλεγχο της τερματικής τάσης (κάτω γράφημα).

τάσης.

Παρατηρούμε ότι στην περίπτωση ελέγχου του συντελεστή ισχύος χωρίς έλεγχο της τερματικής τάσης, η παραγωγή αέργου ισχύος της ΑΓΔΤ είναι σχεδόν σε αντίθεση φάσης με την παράγωγο της τερματικής τάσης, αν και γενικά, στις τρεις πρώτες περιπτώσεις η μεταβολή της αέργου ισχύος είναι μικρή και δε μπορεί να βγει κάποιο ασφαλές συμπέρασμα. Στην τέταρτη περίπτωση όμως, (έλεγχος τάσης πάρκου με ενεργοποιημένο τον έλεγχο τερματικής τάσης της ΑΓΔΤ) η παραγωγή αέργου ισχύος είναι σχεδόν σε φάση με την παράγωγο της τερματικής τάσης, δηλαδή η μεταβολή της αέργου ισχύος της ΑΓΔΤ αναμένεται να συμβάλει αρνητικά στην απόσβεση της ηλεκτρομηχανικής ταλάντωσης, κάτι που επιβεβαιώνεται από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων.

7.3 Εφαρμογή στο Ελληνικό διασυνδεδεμένο σύστημα

Σε αυτή την ενότητα εξετάζεται η επίδραση της προγραμματιζόμενης υψηλής αιολικής διείσδυσης στις ταλαντώσεις διασύνδεσης του Ελληνικού διασυνδεδεμένου συστήματος. Τα δεδομένα του συστήματος που χρησιμοποιήθηκαν δόθηκαν από το Διαχειριστή Ελληνικού Συστήματος Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας, στο πλαίσιο ερευνητικού προγράμματος με το εργαστήριο ΣΗΕ του ΕΜΠ [ΕΜΠ07] και χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα προσομοίωσης



Σχήμα 7.19: Παραγωγή αέργου ισχύος και παράγωγος τερματικής τάσης ΑΓΔΤ. Περιπτώσεις με έλεγχο τάσης: Χωρίς (άνω γράφημα) και με έλεγχο της τερματικής τάσης (κάτω γράφημα).

PSS/E (έκδοση 30 [pss05]). Σημειώνεται ότι τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται εδώ είναι διαφορετικά, λόγω διαφορετικής παράστασης των αιολικών πάρκων.

7.3.1 Περιγραφή συστήματος

Το μοντέλο του συστήματος περιλαμβάνει το σύστημα μεταφοράς υψηλής τάσης (ΥΤ) και υπερυψηλής τάσης (ΥΥΤ) της Ελλάδας, καθώς και το σύστημα ΥΥΤ όλων των υπόλοιπων χωρών της Νοτιοανατολικής Ευρώπης (μέρος της UCTE - Union for the Coordination of Transmission of Electricity)¹, δηλαδή της Βαλκανικής χερσονήσου (βλ. Σχ. 7.20). Πρόκειται για επικαιροποίηση του μοντέλου που αναπτύχθηκε στα [MMV04, NKV07]. Το Αλβανικό σύστημα θεωρείται χωρισμένο στα δύο, με το ένα τμήμα του συνδεδεμένο ακτινικά με την Ελλάδα. Όλες οι μονάδες παραγωγής στο μοντέλο της ΝΑ Ευρώπης αναπαριστώνται με λεπτομερή μοντέλα συμπεριλαμβάνοντας στροβίλους, ρυθμιστές στροφών και συστήματα διέγερσης. Υπάρχουν επίσης σταθεροποιητές σε 14 γεννήτριες εκτός του Ελληνικού Συστήματος. Τα φορτία αναπαριστώνται ως σταθερές αγωγιμότητες.

Στο θεωρούμενο σημείο λειτουργίας, το συνολικό φορτίο στο Ελληνικό διασυνδεδεμένο σύστημα είναι περίπου 12 GW, το οποίο είναι πρόβλεψη για το μέγιστο φορτίο του 2012. Περίπου 2700 MW παράγονται από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) (2540 MW από αιολικά πάρκα και 160 MW από μικρά υδροηλεκτρικά, βιομάζα και συμπαραγωγή). Η πλειονότητα των αιολικών πάρκων αναμένεται να διαθέτει μηχανές με ασύγχρονες γεννήτριες διπλής τροφοδότησης (περίπου 1890 MW). Άλλα 293 MW παράγονται από ανεμογεννήτριες σταθερών στροφών με απλές γεννήτριες επαγωγής και τα υπόλοιπα 357 MW από μονάδες με πλήρη μετατροπέα. Κάθε αιολικό πάρκο (ή και περισσότερα που συνδέονται στον ίδιο ζυγό ΥΤ) αναπαριστάται με μία ισοδύναμη ανεμογεννήτρια. Το σύνολο των παθητικών

¹Σήμερα η ENTSO-E (European Network of Transmission System Operators for Electricity) έχει αναλάβει όλες τις λειτουργίες των 6 Ευρωπαϊκών ενώσεων διαχειριστών συστημάτων μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, συμπεριλαμβανομένης της UCTE.



Σχήμα 7.20: Διασυνδέσεις YYT στο σύστημα της ΝΑ Ευρώπης.

στοιχείων από την ισοδύναμη ανεμογεννήτρια έως τον ζυγό YT (μετασχηματιστές, γραμμές MT, δίκτυο MT του πάρκου) αναπαριστάται με μία ισοδύναμη σύνθετη αντίσταση. θεωρείται επίσης ότι κάθε (ισοδύναμο) αιολικό πάρκο εγγείει ισχύ με συντελεστή ισχύος 0,95 χωρητικό (καταναλώνει άεργο ισχύ) στο ζυγό YT.

Τα αιολικά πάρκα με ανεμογεννήτριες πλήρους μετατροπέα καθώς και όλες οι μικρές μονάδες ΑΠΕ (< 10 MW) αναπαριστώνται ως εγχύσεις σταθερής ισχύος. Περίπου 84 MW από ΑΠΕ αναπαριστώνται ως μικρές συμβατικές μονάδες (μικρά υδρολεκτρικά, βιομάζα, συμπαραγωγή) και για τα αιολικά πάρκα με ανεμογεννήτριες σταθερών στροφών χρησιμοποιείται μοντέλο απλής μηχανής επαγωγής. Για τα αιολικά πάρκα με ΑΓΔΤ χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο με λεπτομερείς βρόχους ελέγχου (βλ. ενότητα 3.3) με τις παραμέτρους των Πινάκων Α.3 και Α.4 του Παραρτήματος Α.

7.3.2 Ηλεκτρομηχανικοί ρυθμοί ταλάντωσης Βαλκανικού Συστήματος

Στο σενάριο αναφοράς, οι ΑΓΔΤ αναπαριστώνται σαν αρνητικές σταθερές αγωγιμότητες. Με τον τρόπο αυτό, ουσιαστικά αλληλοαναιρούνται με ένα μέρος του φορτίου του συστήματος. Στη συνέχεια εξετάζεται η επίδραση των διάφορων παραλλαγών του μοντέλου της ΑΓΔΤ με λεπτομερείς βρόχους ελέγχου, κατά τρόπο παρόμοιο με το μικρό σύστημα της ενότητας 7.2.

Οι ιδιοτιμές υπολογίστηκαν με τη ρουτίνα υπολογισμού ιδιοτιμών του PSS/E (LSYSAN). Η ρουτίνα χρησιμοποιεί αριθμητική μέθοδο για τον υπολογισμό των ιδιοτιμών, η οποία βασίζεται σε μικρή διαταραχή των μεταβλητών κατάστασης [pss05]. Από δοκιμές που έγιναν πρόέκυψε το συμπέρασμα ότι η ρουτίνα δε διαχειρίζεται κατάλληλα τα όρια που υπάρχουν στα διάφορα δυναμικά μοντέλα (π.χ. σταθεροποιητές ή ρυθμιστές τάσης των σύγχρονων γεννητριών), με αποτέλεσμα να είναι απαραίτητη η αφαίρεσή τους.

Οι ηλεκτρομηχανικοί ρυθμοί με χαμηλή απόσβεση (πραγματικό μέρος στα δεξιά του -0.45 s^{-1}) εμφανίζονται στον Πίνακα 7.12 για την περίπτωση αναπαράστασης των ΑΓΔΤ ως σταθερές αγωγιμότητες. Στη συνέχεια θα εστιάσουμε στους δύο ρυθμούς διασύνδεσης του

Πίνακα 7.12, που έχουν και τις χαμηλότερες συχνότητες, δηλαδή τους Νο. 7 και Νο. 8. Ο τελευταίος αφορά τη διασύνδεση του συνολικού συστήματος της ΝΑ Ευρώπης με το υπόλοιπο σύστημα της UCTE και έχει συχνότητα κοντά στα 0,2 Hz. Από την άλλη, ο ρυθμός Νο. 7 αναφέρεται στην ταλάντωση του Ελληνικού συστήματος ως προς το υπόλοιπο σύστημα της ΝΑ Ευρώπης και έχει συχνότητα περίπου 0,55 Hz. Ο χαρακτηρισμός των ρυθμών έγινε με

Πίνακας 7.12: Ρυθμοί ταλάντωσης για αναπαράσταση των ΑΓΔΤ ως σταθερές αγωγιμότητες ($h=0,01$)

No.	Ιδιοτιμές	ζ	Hz	Ρυθμός
1	$-0,391 \pm j9,53$	0,041	1,52	Τοπικός VHSES1K
2	$-0,415 \pm j7,86$	0,053	1,25	Τοπικός JHBBAS G1-G2
	$-0,415 \pm j7,86$	0,053	1,25	Τοπικός JHBBAS G3-G4
3	$-0,397 \pm j7,78$	0,051	1,24	Τοπικός JHBBAS G12-G34
4	$-0,408 \pm j7,69$	0,053	1,22	Διατοπικός GR POLUF-ALOUUM
5	$-0,359 \pm j6,18$	0,058	0,98	Διατοπικός GR KOM-MEG
6	$-0,403 \pm j5,38$	0,075	0,86	Διατοπικός AL-GR
7	$-0,423 \pm j3,45$	0,122	0,55	Διασύνδεσης GR
8	$-0,329 \pm j1,29$	0,248	0,20	Διασύνδεσης UCTE

βάση τα δεξιά ιδιοδιανύσματα και συγκεκριμένα με βάση τη φάση των στοιχείων των δεξιών ιδιοδιανυσμάτων που αντιστοιχούν στις γωνίες των δρομέων των σύγχρονων γεννητριών. Έτσι, στο δεξιό ιδιοδιάνυσμα του ρυθμού Νο. 7 φαίνεται ότι οι μονάδες του Ελληνικού συστήματος ταλαντώνονται περίπου σε φάση μεταξύ τους ως προς τις υπόλοιπες μονάδες του συστήματος, ενώ στο δεξιό ιδιοδιάνυσμα του ρυθμού Νο. 8 ταλαντώνονται περίπου σε φάση όλες οι μονάδες του συστήματος της Βαλκανικής.

Στο σημείο αυτό σημειώνεται επίσης ότι τα αποτελέσματα της γραμμικοποίησης στο PSS/E μπορεί να εξαρτώνται αρκετά από το μέγεθος της διαταραχής που χρησιμοποιείται, όπως παρουσιάζεται αναλυτικά στην εργασία [MTK08]. Τα αποτελέσματα του Πίνακα 7.12 είναι για μέγεθος διαταραχής $h=10^{-2}$. Ενδεικτικά, δίνονται τα αποτελέσματα για τους δύο ρυθμούς διασύνδεσης για $h=10^{-3}$ στον Πίνακα 7.13. Παρατηρούμε ότι τα αποτελέσματα

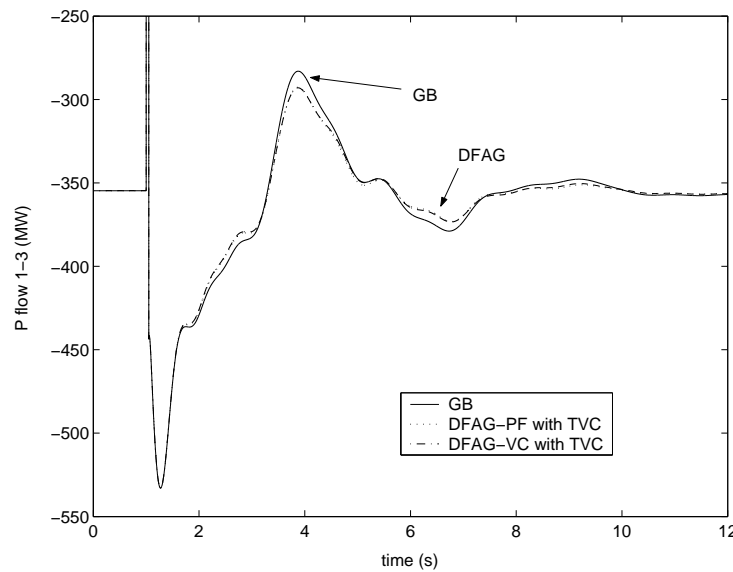
Πίνακας 7.13: Ρυθμοί ταλάντωσης για αναπαράσταση των ΑΓΔΤ ως σταθερές αγωγιμότητες ($h=0,001$)

No.	Ιδιοτιμές	ζ	Hz	Ρυθμός
7	$-0,456 \pm j3,48$	0,130	0,55	Διασύνδεσης GR
8	$-0,386 \pm j1,33$	0,279	0,21	Διασύνδεσης UCTE

είναι αρκετά κοντά, αλλά και ότι η απόσβεση που υπολογίζεται με την αριθμητική μέθοδο γραμμικοποίησης του PSS/E είναι σχετικά ευαίσθητη στο μέγεθος της διαταραχής. Στη συνέχεια θα χρησιμοποιήσουμε και τη μέθοδο Prony για υπολογισμό της συχνότητας και της απόσβεσης των ρυθμών από τις αποκρίσεις του πλήρους (μη γραμμικού) μοντέλου [HDS90].

Όπως φαίνεται στον Πίνακα 7.12, ο ρυθμός διασύνδεσης UCTE έχει μεγάλη απόσβεση για τις δεδομένες συνθήκες του συστήματος. Στο Σχ. 7.21 φαίνεται η ροή ισχύος μεταξύ της ΝΑ Ευρώπης και της υπόλοιπης UCTE μετά από ένα τριφασικό σφάλμα κοντά σε αυτή τη διασύνδεση. Όπως φαίνεται, η επίδραση των ΑΓΔΤ του Ελληνικού συστήματος στο ρυθμό διασύνδεσης UCTE είναι μικρή και τείνει να αυξήσει κατά τι την απόσβεση, σε σχέση με την

περίπτωση στατικής αναπαράστασης της αιολικής παραγωγής με ΑΓΔΤ (ένδειξη GB στο Σχ. 7.21).

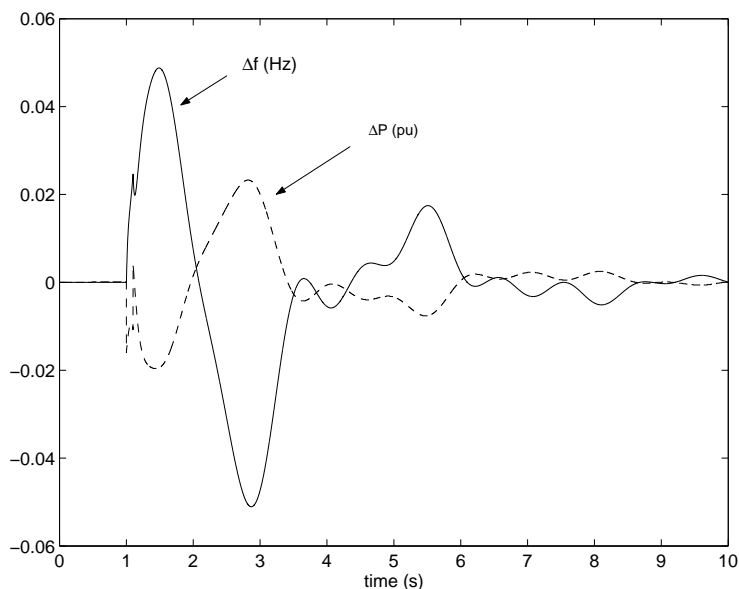


Σχήμα 7.21: Ροή ισχύος μεταξύ NA Ευρώπης και υπόλοιπης UCTE μετά από τριφασικό βραχυκύκλωμα

Στο Σχ. 7.22 φαίνονται, για την ίδια διαταραχή, οι αποκρίσεις της ενεργού ισχύος και της τοπικής συχνότητας (bus frequency) για ένα αιολικό πάρκο που αναπαριστάται ως ΑΓΔΤ. Παρατηρούμε ότι η ενεργός ισχύς ταλαντώνεται σε αντίθεση φάσης με την τοπική συχνότητα, όσον αφορά στο ρυθμό διασύνδεσης UCTE (0,2 Hz), όπως άλλωστε αναμενόταν από τις προσομοιώσεις του μικρού συστήματος της ενότητας 7.2. Η σύγκριση με το Σχ. 7.16α δείχνει ότι η γενική τάση που παρατηρήθηκε στο μικρό σύστημα εμφανίζεται και στις αποκρίσεις ενός ρεαλιστικού μοντέλου ενός μεγάλου συστήματος. Όπως αναφέρθηκε στην ενότητα 7.2, η ταλάντωση της ενεργού ισχύος της ΑΓΔΤ, οφείλεται στην αναπαράσταση της καθυστέρησης του PLL.

Στη συνέχεια εξετάζεται πιο αναλυτικά η επίδραση της αιολικής παραγωγής, και ιδιαίτερα της μοντελοποίησης των ΑΓΔΤ, στο ταλαντωτικό ρυθμό διασύνδεσης του Ελληνικού συστήματος, ο οποίος έχει χαμηλότερη, αν και επίσης ικανοποιητική, απόσβεση σε σχέση με το ρυθμό διασύνδεσης UCTE. Στον Πίνακα 7.14 φαίνονται η συχνότητα και ο λόγος απόσβεσης του ρυθμού αυτού ανάλογα με τις επιλογές που χρησιμοποιούνται στο μοντέλο της ΑΓΔΤ. Όπως φαίνεται, το μοντέλο ΑΓΔΤ δεν επηρεάζει τη συχνότητα της ταλάντωσης, αλλά όλες οι παραλλαγές του μοντέλου της ΑΓΔΤ τείνουν να αυξήσουν την απόσβεση του εξεταζόμενου ρυθμού διασύνδεσης. Παρατηρείται επίσης ότι η αναπαράσταση των ΑΓΔΤ ως αρνητικά φορτία σταθερής ισχύος δεν αλλάζει ουσιαστικά τα αποτελέσματα.

Στο Σχ. 7.23 φαίνεται η ταλάντωση της ενεργού ισχύος μιας γραμμής διασύνδεσης του Ελληνικού συστήματος μετά από ένα τριφασικό βραχυκύκλωμα κοντά στο ένα άκρο της. Εκτός από την περίπτωση που οι ΑΓΔΤ αναπαριστώνται ως σταθερές αγωγιμότητες, εμφανίζονται οι αποκρίσεις με χρήση του μοντέλου ΑΓΔΤ με ρύθμιση είτε του συντελεστή ισχύος των ΑΓΔΤ είτε της τάσης του αιολικού πάρκου. Και στις δύο περιπτώσεις θεωρείται ενεργοποιημένος ο έλεγχος της τερματικής τάσης των ΑΓΔΤ. Η επίδραση του μοντέλου των αιολικών πάρκων σε αυτή την ταλάντωση συχνότητας 0,55 Hz είναι εμφανής και συμβαδίζει με τις ιδιοτιμές που υπολογίστηκαν με γραμμικοποίηση του συστήματος και εμφανίζονται



Σχήμα 7.22: Ζυγός 98500: Ενεργός ισχύς ΑΓΔΤ και τοπική συχνότητα

Πίνακας 7.14: Ρυθμός διασύνδεσης GR

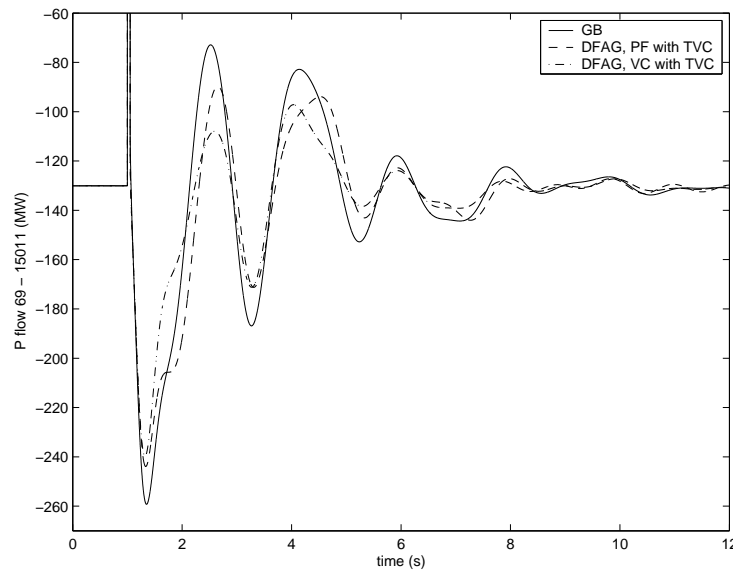
Μοντέλο ΑΓΔΤ	Γραμμικοποίηση ($h=0,01$)		Prony	
	f (Hz)	ζ	f (Hz)	ζ
GB	0,55	0,122	0,55	0,133
PQ	0,56	0,119	0,55	0,133
DFAG-PF w/o TVC	0,55	0,146	0,55	0,156
DFAG-PF with TVC	0,54	0,134	0,55	0,145
DFAG-VC w/o TVC	0,55	0,151	0,55	0,165
DFAG-VC with TVC	0,55	0,140	0,55	0,150
DFAG-VC with TVC, $K_{Qi} = 0,1$	0,54	0,141	0,54	0,155

στον Πίνακα 7.14.

Οι αποκρίσεις του Σχ. 7.23, καθώς και οι αντίστοιχες αποκρίσεις για τις υπόλοιπες ρυθμίσεις του ελέγχου αέργου ισχύος των ΑΓΔΤ αναλύθηκαν με τη μέθοδο Prony, τα αποτελέσματα της οποίας επίσης εμφανίζονται στον Πίνακα 7.14. Αν και υπάρχουν ορισμένες διαφορές από τα αποτελέσματα της γραμμικοποίησης, η γενική τάση είναι εμφανώς ίδια.

Επομένως, μπορούμε να συμπεράνουμε ότι για το Ελληνικό διασυνδεδεμένο σύστημα, η αυξημένη διεύθυνση αιολικής παραγωγής δεν αναμενεται να προκαλέσει προβλήματα στις ταλαντώσεις διασύνδεσης. Αντίθετα, όλες οι περιπτώσεις που εξετάστηκαν δείχνουν ότι η αυξημένη αιολική παραγωγή εισάγει θετική απόσβεση στους ρυθμούς διασύνδεσης που εξετάστηκαν (0,2 και 0,55 Hz). Και πάλι, αυτό επιβεβαιώνει τα αποτελέσματα της ανάλυσης που έγινε στα μικρά συστήματα των ενοτήτων 7.1 και 7.2.

Σημειώνεται τέλος, ότι η παράκαμψη του ελέγχου τερματικής τάσης (ο διακόπτης στη θέση b στο Σχ.3.11) βελτιώνει ακόμα περισσότερο την απόσβεση όπως φαίνεται στον Πίνακα 7.14. Επομένως η απόσβεση μπορεί να υπερεκτιμηθεί με αυτό το μοντέλο, αν οι πραγματικές ανεμογεννήτριες λειτουργούν με έλεγχο της τερματικής τάσης.



Σχήμα 7.23: Ενεργός ισχύς σε γραμμή διασύνδεσης του Ελληνικού συστήματος μετά από τριφασικό βραχυκύκλωμα

7.3.3 Ρύθμιση του ελέγχου αέργου ισχύος της ΑΓΔΤ

Αν και στο Ελληνικό διασυνδεδεμένο σύστημα η απόσβεση των ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων προέκυψε επαρκής για μεγάλη αιολική διείσδυση, στις προσομοιώσεις εμφανίστηκαν μερικά προβλήματα ταλαντώσεων, όταν το μοντέλο της ΑΓΔΤ χρησιμοποιήθηκε με την επιλογή ελέγχου τάσης (του πάρκου) με ενεργό και τον έλεγχο της θερματικής τάσης (κάθε ανεμογεννήτριας).

Σε αυτή την περίπτωση, κάθε αιολικό πάρκο εισάγει ένα ταλαντωτικό ρυθμό ελέγχου αέργου ισχύος (βλ. π.χ. Σχ. 7.15). Μερικοί από τους ρυθμούς αυτούς στο Ελληνικό διασυνδεδεμένο σύστημα εμφανίζονται με χαμηλή απόσβεση και συχνότητες κοντά σε αυτή του ενδοσυστημικού ρυθμού AL-GR (μεταξύ 0,8 και 0,9 Hz). Στον Πίνακα 7.15 και στη στήλη $K_{Qi} = 0,5$ (αρχική ρύθμιση) φαίνονται οι δέκα ρυθμοί ελέγχου αέργου ισχύος ΑΓΔΤ με τη μικρότερη απόσβεση. Οι συχνότητες τους κυμαίνονται από 0,83 έως 0,89 Hz. Η ιδιοτιμή

Πίνακας 7.15: Ρυθμοί ελέγχου αέργων ΑΓΔΤ με μικρή απόσβεση

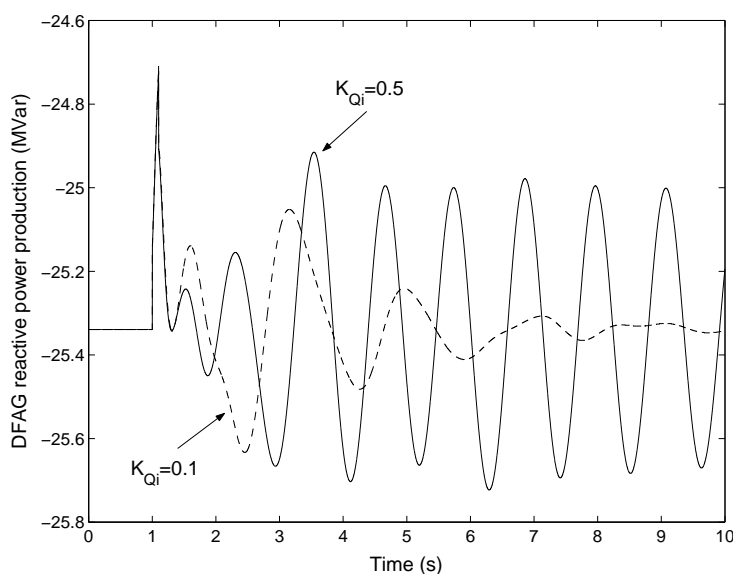
$K_{Qi} = 0,5$	$K_{Qi} = 0,1$
$-0,097 \pm j5,62$	$-1,418 \pm j1,92$
$-0,144 \pm j5,51$	$-1,424 \pm j1,94$
$-0,148 \pm j5,49$	$-1,426 \pm j1,93$
$-0,207 \pm j5,42$	$-1,427 \pm j1,94$
$-0,233 \pm j5,39$	$-1,430 \pm j1,94$
$-0,248 \pm j5,37$	$-1,436 \pm j1,95$
$-0,306 \pm j5,29$	$-1,437 \pm j1,96$
$-0,344 \pm j5,25$	$-1,439 \pm j1,96$
$-0,340 \pm j5,25$	$-1,439 \pm j1,94$
$-0,384 \pm j5,22$	$-1,442 \pm j1,95$

με τη μικρότερη απόσβεση ($-0,097 \pm j5,62$) συνδέεται κυρίως με την ισοδύναμη ΑΓΔΤ

του ζυγού 98531, όπως προκύπτει από τους αντίστοιχους συντελεστές συμμετοχής. Αυτή η ισοδύναμη ΑΓΔΤ είναι από τις μεγαλύτερες του συστήματος ($S_{nom}=127$ MVA). Στο βαθμό που δεν υπάρχει αλληλεπίδραση με τους άλλους ρυθμούς του συστήματος, η μικρή απόσβεση έχει να κάνει με την ισχύ βραχυκύκλωσης στο σημείο σύνδεσης της ισοδύναμης ΑΓΔΤ. Αντίστοιχα με το Σχ. 7.6, ένα αιολικό πάρκο με μεγαλύτερη ονομαστική ισχύ “βλέπει” μεγαλύτερη σύνθετη αντίσταση προς το σύστημα, με αποτέλεσμα ο ρυθμός ελέγχου αέργου ισχύος να βρίσκεται σχετικά πιο δεξιά (βλ. Σχ. 4.20).

Για να αντιμετωπίσουμε το πρόβλημα, χρησιμοποιούμε την ίδια μέθοδο όπως στις ενότητες 7.1 και 7.2. Μειώνοντας το κέρδος K_{Qi} (βλ. Σχ. 3.11) θα μειώσουμε τη συχνότητα του ρυθμού ελέγχου των αέργων, έτσι ώστε να απομακρυνθεί από τον ηλεκτρομηχανικό ρυθμό. Όπως φαίνεται στον Πίνακα 7.15, μετά τη μείωση του K_{Qi} από 0,5 σε 0,1 σε όλα τα αιολικά πάρκα με ΑΓΔΤ, η συχνότητα του ρυθμού ελέγχου αέργων μειώνεται και η απόσβεσή του αυξάνεται σημαντικά. Οι υπόλοιποι ρυθμοί του συστήματος δεν επηρεάζονται ιδιαίτερα από αυτή την αλλαγή.

Τα αποτελέσματα αυτά διασταυρώθηκαν με προσομοιώσεις στο πεδίο του χρόνου. Προσομοιώθηκε η ίδια διαταραχή όπως στο Σχ. 7.22, χρησιμοποιώντας το μοντέλο του συστήματος όπου όλες οι ΑΓΔΤ αναπαριστώνται με το πλήρες μοντέλο ΑΓΔΤ με έλεγχο τάσης και ενεργό τον έλεγχο θερματικής τάσης. Στο Σχ. 7.24 φαίνεται η απόκριση της παραγωγής αέργου ισχύος της ΑΓΔΤ στο ζυγό 98531 (σε αυτή αντιστοιχεί η ιδιοτιμή του Πίνακα 7.15 με τη μικρότερη απόσβεση στην περίπτωση με $K_{Qi}=0,5$) και για τις δύο τιμές του K_{Qi} . Είναι εμφανής είναι η ριζική βελτίωση της απόκρισης μετά τη μείωση του K_{Qi} . Αντίστοιχες



Σχήμα 7.24: Άεργος ισχύς ΑΓΔΤ στο ζυγό 98531

ταλαντώσεις παρατηρούνται στις τάσεις. Όπως φαίνεται στον Πίνακα 7.14 (γραμμή με $K_{Qi}=0,1$), αυτή η αλλαγή του κέρδους δεν προκαλεί αξιόλογες μεταβολές της συχνότητας ή της απόσβεσης του ρυθμού διασύνδεσης.

Είναι λογικό να υποθέσουμε ότι ένα αιολικό πάρκο, στο βαθμό που μπορεί να αναπαρασταθεί με το συγκεκριμένο μοντέλο (ενδεχομένως οι βρόχοι ελέγχου να είναι αρκετά διαφορετικοί), θα είναι κατάλληλα ρυθμισμένο ώστε να μην προκαλεί τέτοιου είδους ταλαντώσεις στην τάση. Επομένως, εφόσον χρησιμοποιείται τέτοιου είδους μοντέλο για τα αιολικά πάρκα, θα πρέπει να είναι ρυθμισμένο κατάλληλα.

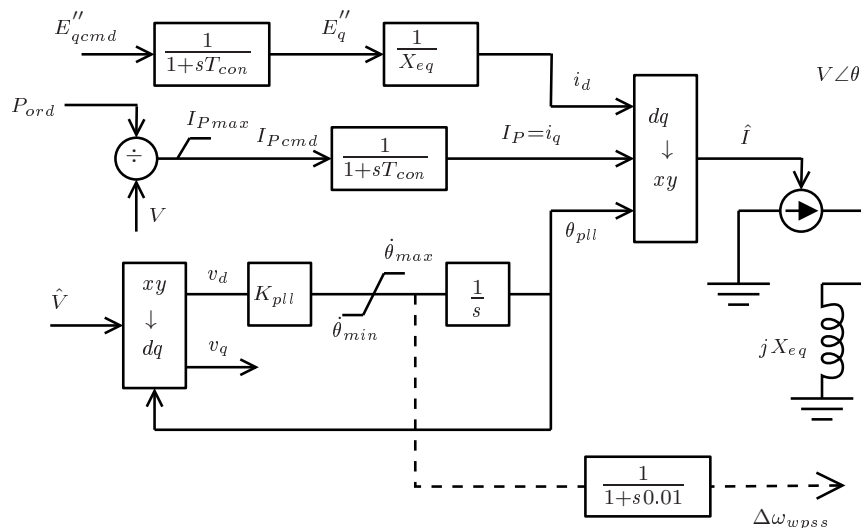
Κεφάλαιο 8

Εισαγωγή αιολικού σταθεροποιητή ΣΗΕ

8.1 Αιολικός σταθεροποιητής ΣΗΕ

Όπως αναφέρθηκε στην ενότητα 7.2, η θετική συνεισφορά στην απόσβεση των ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων που παρατηρήθηκε στο Σχ. 7.16, όταν η παραγόμενη ισχύς από την ανεμογεννήτρια έχει διαφορά φάσης 180° από το σφάλμα συχνότητας, μπορεί να ενισχυθεί ώστε να αποτελέσει μια σημαντική πηγή απόσβεσης. Σε αυτή την κατεύθυνση, ένα βοηθητικό σήμα ΔP_{wpss} , ανάλογο της απόκλισης της συχνότητας, μπορεί να αφαιρεθεί από την ισχύ αναφοράς P_{ord} της ΑΓΔΤ, περίπου όπως προτείνεται στην εργασία [LG07].

Προσθέτοντας τον προτεινόμενο ελεγκτή στο μοντέλο της ΑΓΔΤ με λεπτομερείς βρόχους ελέγχου της ενότητας 3.3, τα μοντέλα γεννήτριας/μετατροπέα (Σχ. 3.9) και ρυθμιστή στροφών (Σχ. 3.12) γίνονται όπως φαίνεται στα Σχ. 8.1 και 8.2 αντίστοιχα, όπου ο προτεινόμενος σταθεροποιητής σχεδιάζεται με διακεκομμένη γραμμή.

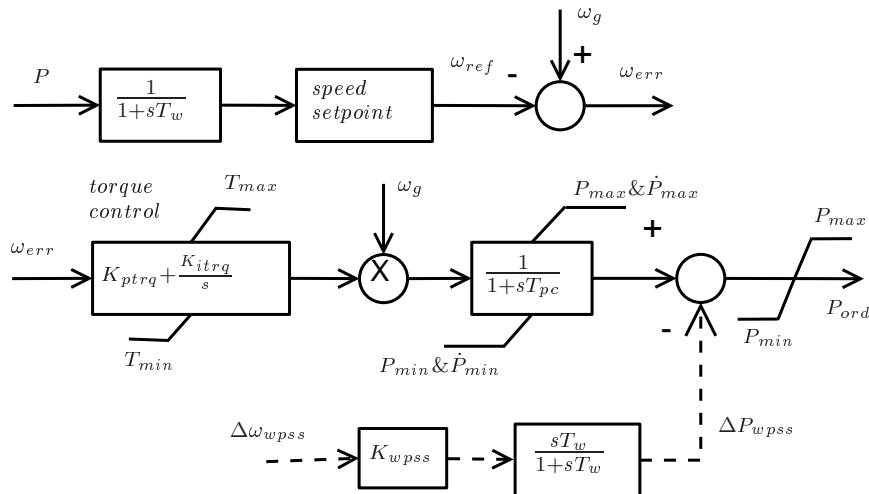


Σχήμα 8.1: Μοντέλο γεννήτριας/μετατροπέα

Για την υλοποίηση του σταθεροποιητή χρησιμοποιείται ένα φίλτρο απαλοιφής. Ο ρυθμός μεταβολής της γωνίας του PLL (θ_{pll}) χρησιμοποιείται ως ένα διαθέσιμο σήμα εισόδου, ισοδύναμο με τη συχνότητα του ζυγού της ΑΓΔΤ. Επίσης λαμβάνεται υπόψη μια μικρή καθύστερηση της μέτρησης. Έτσι, η συνολική συνάρτηση μεταφοράς του ρυθμιστή είναι:

$$\frac{\Delta P_{wpss}}{\theta_{pll}} = K_{wpss} \cdot \frac{1}{1 + 0,01s} \cdot \frac{sT_W}{1 + sT_W} \quad (8.1)$$

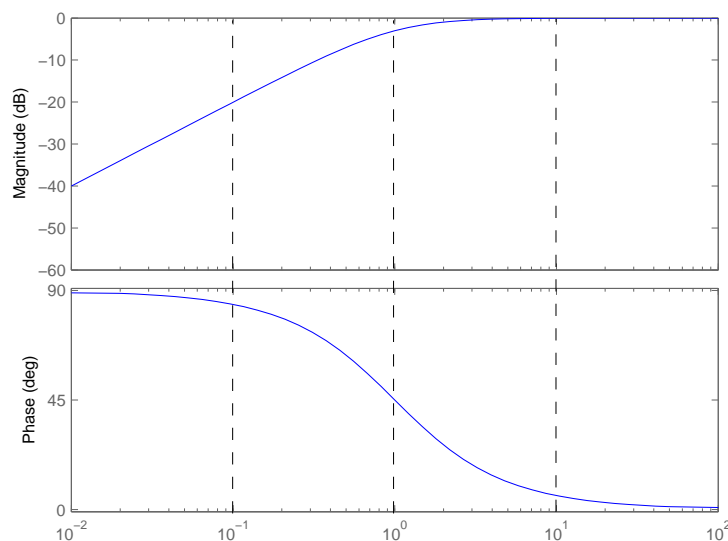
Κεφάλαιο 8. Εισαγωγή αιολικού σταθεροποιητή ΣΗΕ



Σχήμα 8.2: Έλεγχος ταχύτητας ΑΓΔΤ με προσθήκη αιολικού σταθεροποιητή ΣΗΕ

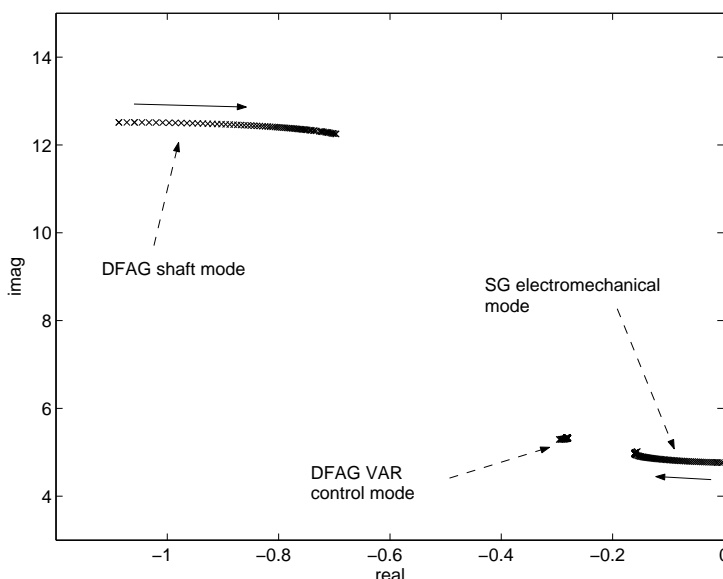
Με τον τρόπο αυτό, μια αύξηση της συχνότητας θα προκαλέσει μείωση της παραγόμενης ενεργού ισχύος της ΑΓΔΤ και, άρα, αύξηση της ενεργού ισχύος της σύγχρονης γεννήτριας (προκειμένου να καλυφτεί το φορτίο) η οποία θα επιβραδύνει το δρομέα της. Αυτού του τύπου ο ρυθμιστής επίσης εισάγει ισοδύναμη αδράνεια σε αυτόνομα συστήματα [EJ04, LMO05]. Σημειώνεται ότι ο προτεινόμενος σταθεροποιητής θα πρέπει να εγκατασταθεί σε κάθε ανεμογεννήτρια ενός αιολικού πάρκου.

Όπως φαίνεται στο διάγραμμα Bode του φίλτρου απαλοιφής (στο Σχ. 8.3), η φάση που εισάγει το φίλτρο είναι σχεδόν μηδέν και το κέρδος ίσο με ένα για κυκλική συχνότητα πάνω από $10/T_w$ (rad/s). Προκειμένου να είναι ενεργό το φίλτρο στις χαμηλές συχνότητες (έως



Σχήμα 8.3: Διάγραμμα Bode φίλτρου απαλοιφής για $T_w=1$ s

0,1 Hz), η σταθερά χρόνου T_w μπορεί να ληφθεί ίση π.χ. με 20 s.



Σχήμα 8.4: Τόπος ριζών μικρού διασυνδεδεμένου συστήματος για κέρδος αιολικού σταθεροποιητή από 0 έως 1.

8.2 Εφαρμογή αιολικού σταθεροποιητή σε μικρό διασυνδεδεμένο σύστημα

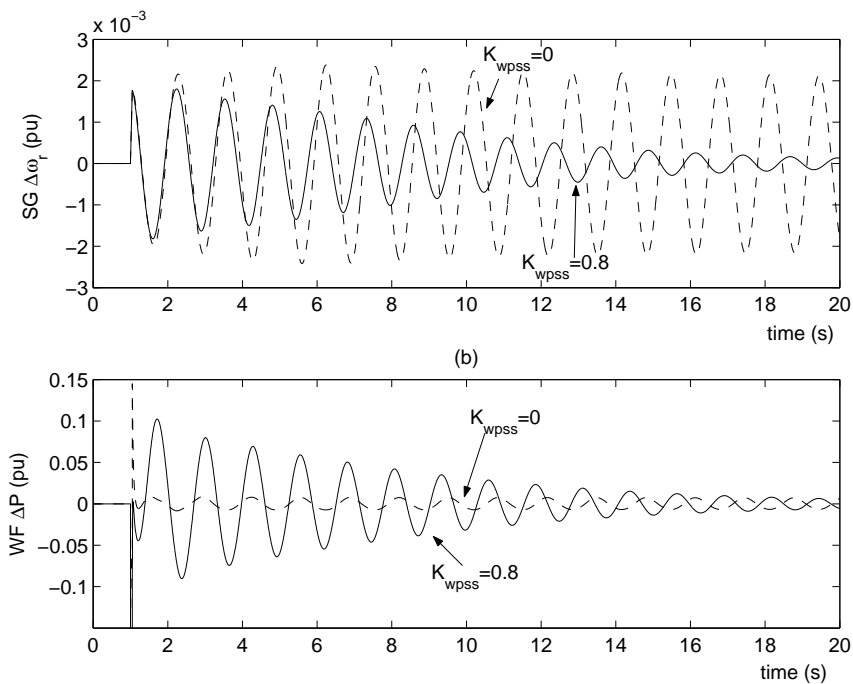
Στην ενότητα αυτή εξετάζουμε την εισαγωγή του αιολικού σταθεροποιητή της ενότητας 8.1 στο σύστημα της ενότητας 7.2. Η αιολική παραγωγή του συστήματος του Σχ. 7.13 είναι 45 MW (το αιολικό πάρκο WP2 δεν είναι συνδεδεμένο) και η ισοδύναμη ΑΓΔΤ του πάρκου WP1 ρυθμίζει την τάση του ζυγού 9 με ενεργοποιημένο και τον έλεγχο της τερματικής της τάσης. Στην περίπτωση αυτή ο ηλεκτρομηχανικός ρυθμός έχει τη μικρότερη απόσβεση όπως φαίνεται στο Σχ. 7.14 και στον Πίνακα 7.10. Η συχνότητα του ηλεκτρομηχανικού ρυθμού είναι $\omega_{e/m} = 4,765 \text{ rad/s}$ (0,76 Hz). Με $T_w = 20 \text{ s}$ ο σταθεροποιητής εισάγει μηδενική φάση στη συχνότητα της ηλεκτρομηχανικής ταλάντωσης, άρα και καθαρή ροπή απόσβεσης.

Υπενθυμίζεται ότι το αιολικό πάρκο λειτουργεί με $P = 0,8$ α.μ., επομένως η ονομαστική φαινόμενη ισχύς του είναι $S_{nom} = 56,25 \text{ MVA}$. Με βάση τις παραμέτρους του Πίνακα Α.3, η ονομαστική ενεργός ισχύς P_{nom} του πάρκου προκύπτει περίπου ίση με 50 MW.

Στον τόπο ριζών του Σχ. 8.4 φαίνεται η μεταβολή των κυρίαρχων ιδιοτιμών του συστήματος καθώς το κέρδος του σταθεροποιητή αυξάνεται σταδιακά από 0 έως 1. Σημειώνεται ότι το σήμα $\dot{\theta}_{PLL}$ είναι σε rad/s. Είναι φανερό η σημαντική αύξηση της απόσβεσης του ηλεκτρομηχανικού ρυθμού (ταλάντωση διασύνδεσης) με την εισαγωγή του σταθεροποιητή. Ταυτόχρονα παρατηρείται μείωση της απόσβεσης του ρυθμού στρεπτικής ταλάντωσης του άξονα, γεγονός που μπορεί να περιορίζει τις επιτρεπόμενες τιμές του κέρδους του σταθεροποιητή. Με βάση τον τόπο ριζών επιλέγεται η τιμή $K_{wps} = 0,8$. Οι αντίστοιχες ιδιοτιμές του ηλεκτρομηχανικού ρυθμού και του στρεπτικού ρυθμού ταλάντωσης του άξονα της ΑΓΔΤ φαίνονται στον Πίνακα 8.1. Η μείωση της απόσβεσης του στρεπτικού ρυθμού δεν είναι αμελητέα και, σε κάθε περίπτωση, η εφαρμογή του σταθεροποιητή θα πρέπει να εξεταστεί από τη σκοπιά της ίδιας της μηχανής με λεπτομερέστερα μοντέλα που, μεταξύ άλλων, συμπεριλαμβάνουν τον βρόχο που χρησιμοποιείται συχνά στον έλεγχο της ΑΓΔΤ για την αύξηση της απόσβεσης του στρεπτικού ρυθμού [sig07]. Στο μοντέλο που χρησιμοποιείται σε αυτή την εργασία, η συνολική απόσβεση του άξονα έχει αναπαρασταθεί απλά με ένα συντελεστή

Πίνακας 8.1: Ιδιοτιμες ηλεκτρομηχανικού και στρεπτικού ρυθμού με και χωρίς σταθεροποιητή

Ηλεκτρομηχανικός ρυθμός	K_{wpss}	Ιδιοτιμή	Συχνότητα	Απόσβεση
	0	$-0,004 \pm j4,765$	0,76 Hz	0,09 %
	0,8	$-0,151 \pm j4,971$	0,79 Hz	3,03 %
Στρεπτικός ρυθμός	K_{wpss}	Ιδιοτιμή	Συχνότητα	Απόσβεση
	0	$-1,087 \pm j12,51$	1,99 Hz	8,65 %
	0,8	$-0,730 \pm j12,27$	1,95 Hz	5,94 %



Σχήμα 8.5: (a) Απόκλιση της ταχύτητας δρομέα της σύγχρονης γεννήτριας και (b) απόκλιση της παραγωγής ενεργού ισχύος του αιολικού πάρκου μετά από βραχυκύκλωμα με και χωρίς αιολικό σταθεροποιητή

απόσβεσης, δεδομένου ότι αφορά σε μελέτες ευστάθειας του συστήματος (βλ. ενότητα 3.3).

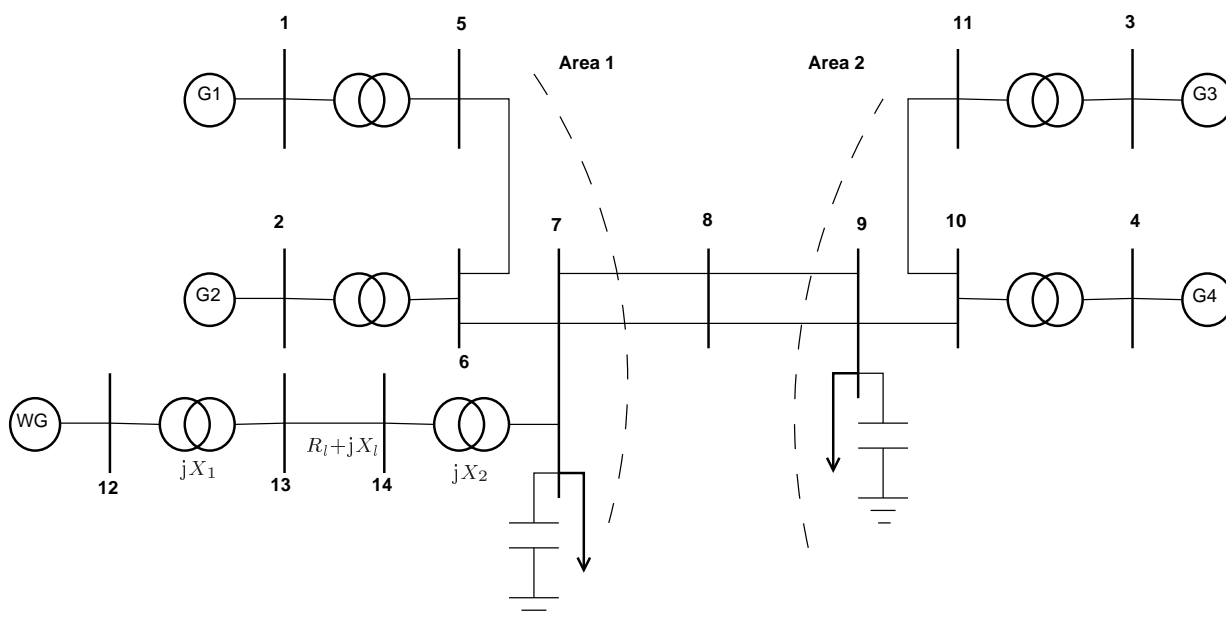
Στο Σχ. 8.5 φαίνονται αποτελέσματα προσομοιώσεων στο συγκεκριμένο σύστημα με $K_{wpss} = 0,8$ και χωρίς σταθεροποιητή ($K_{wpss} = 0$). Η διαταραχή που προσομοιώνεται είναι τριφασικό αυτοεκκαθαριζόμενο βραχυκύκλωμα στο ζυγό 3, διάρκειας 50 ms με σύνθετη αντίσταση $0+j0,1$ (αμ στα 100 MVA). Παρατηρούμε ότι ο σταθεροποιητής εισάγει μια ταλάντωση στην ενεργό ισχύ του αιολικού πάρκου που προκαλεί σημαντική αύξηση της απόσβεσης των ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων. Χωρίς τον σταθεροποιητή, η απόσβεση της ταλάντωσης του δρομέα είναι αμελητέα, ενώ με την εισαγωγή του σταθεροποιητή, η ταλάντωση αποσβένεται εντός 10 s περίπου. Το εύρος της ταλάντωσης της ενεργού ισχύος του αιολικού πάρκου είναι έως 10 MW, δηλ. περίπου 20% της ονομαστικής ισχύος P_{nom} .

Η παραπάνω ανάλυση δείχνει ότι ο σταθεροποιητής (8.1), μπορεί να συνεισφέρει σημαντικά σε απόσβεση των ταλαντώσεων διασύνδεσης, καθώς η μεταβολή της ενεργού ισχύος των αιολικών πάρκων έχει άμεσο αντίθετο αποτέλεσμα στην ενεργό ισχύ (και ροπή) των ταλαντούμενων σύγχρονων γεννητριών της περιοχής. Σημειώνεται ότι ο ρυθμιστής αυτός βασίζεται σε απλές φυσικές παρατηρήσεις και δεν απαιτεί σχεδιασμό ειδικών φίλτρων

αντιστάθμισης φάσης όπως συμβαίνει σε άλλες βιβλιογραφικές αναφορές [HALJ06, MP07, MJO09, FMB10].

8.3 Εφαρμογή αιολικού σταθεροποιητή σε αυτόνομο σύστημα δύο περιοχών

8.3.1 Περιγραφή συστήματος δύο περιοχών



Σχήμα 8.6: Σύστημα δύο περιοχών.

Στο Σχ. 8.6, φαίνεται ένα σύστημα δύο περιοχών που χρησιμοποιείται συχνά στη βιβλιογραφία για μελέτες ταλαντώσεων διασύνδεσης και ρύθμιση σταθεροποιητών ισχύος [KRK91, Kun94, Rog00], στο οποίο θα προσθέσουμε ένα αιολικό πάρκο στο ζυγό 7. Οι τέσσερις συμβατικές μονάδες (G1, G2, G3, G4) είναι θερμικές, εξοπλισμένες με σύγχρονες γεννήτριες και ατμοστροβίλους τριών βαθμίδων.

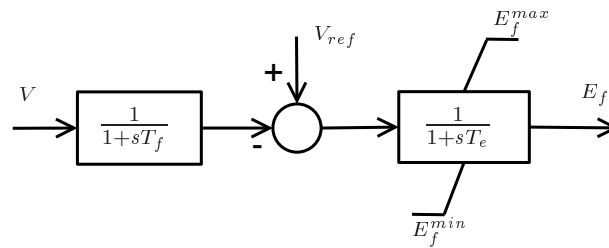
Κάθε σύγχρονη γεννήτρια αναπαριστάται στο πρόγραμμα WHSSP (βλ. ενότητα 3.1) με μοντέλο έκτης τάξης με τις παραμέτρους του Πίνακα 8.2. Για τον APT κάθε σύγχρονης

Πίνακας 8.2: Παράμετροι σύγχρονων γεννητριών

X_{dd}	1,8	X_{ff}	1,71233	X_{d1d1}	1,69548	M_d	1,6
X_{qq}	1,7	X_{q1q1}	2,46372	X_{q2q2}	1,55466	M_q	1,5
R_f	$5,846691 \cdot 10^{-4}$	R_{d1}	0,0172111	R_{q1}	0,0240840	R_{q2}	0,0230836
H	6,5 s	P_{nom}	850 MW	S_{nom}	900 MVA	f_N	50 Hz

γεννήτριας χρησιμοποιείται το απλό μοντέλο που φαίνεται στο Σχ. 8.7. Το κέρδος του APT είναι G . Οι παράμετροι του APT δίνονται στον Πίνακα 8.3. Στον ίδιο Πίνακα δίνονται οι παράμετροι του μοντέλου ατμοστροβίλου (τριών βαθμίδων) και του ρυθμιστή στροφών

Κεφάλαιο 8. Εισαγωγή αιολικού σταθεροποιητή ΣΗΕ



Σχήμα 8.7: Μοντέλο APT.

Πίνακας 8.3: Παράμετροι APT, ατμοστροβίλων και ρυθμιστών στροφών

T_f	0,05 s	T_e	0,10 s	G	50
E_f^{max}	6	E_f^{min}	0		
T_{CH}	0,2 s	T_{RH}	4 s	T_{CO}	0,3 s
F_{HP}	0,4	F_{IP}	0,3	F_{LP}	0,3
R	4%	T_{SM}	0,1 s		

ακολουθώντας το συμβολισμό του [Kun94]. Τα φορτία και η άεργη αντιστάθμιση (πυκνωτές) αναπαριστώνται ως σταθερές αγωγιμότητες.

Στον Πίνακα 8.4 δίνονται οι παράμετροι των γραμμών του συστήματος. Οι Μ/Σ των

Πίνακας 8.4: Στοιχεία γραμμών (α.μ. στα 100 MVA)

Ζυγός αναχώρησης	Ζυγός άφιξης	Αριθμός κυκλώματος	R (α.μ.)	X (α.μ.)	B (α.μ.)
5	6	1	0,0025	0,025	0,04375
6	7	1	0,001	0,01	0,0175
7	8	1	0,01100	0,11000	0,19250
7	8	2	0,01100	0,11000	0,19250
8	9	1	0,01100	0,11000	0,19250
8	9	2	0,01100	0,11000	0,19250
9	10	1	0,00100	0,01000	0,01750
10	11	1	0,00250	0,02500	0,04375

συμβατικών μονάδων έχουν σύνθετη αντίσταση $0+j0,15$ α.μ. σε βάση 900 MVA.

Στο αρχικό σημείο λειτουργίας, δεν υπάρχει αιολική παραγωγή και η περιοχή 1 εξάγει 400 MW στην περιοχή 2. Τα αποτελέσματα του προγράμματος ροής φορτίου στο αρχικό σημείο λειτουργίας φαίνεται στον Πίνακα 8.5.

Οι κυρίαρχες ιδιοτιμές (πραγματικό μέρος αλγεβρικά μεγαλύτερο από $-0,9 \text{ s}^{-1}$) στο αρχικό σημείο λειτουργίας φαίνονται στον Πίνακα 8.6. Καθώς οι σύγχρονες γεννήτριες είναι όμοιες και το σύστημα συμμετρικό, οι δύο τοπικοί ρυθμοί βρίσκονται πολύ κοντά ο ένας στον άλλον. Ο ρυθμός διασύνδεσης είναι ασταθής με τα συγκεκριμένα μοντέλα και παράμετρος των Πινάκων 8.2-8.5.

Πίνακας 8.5: Αρχικό σημείο λειτουργίας

Ζυγός	Διάνυσμα Τάσης		Παραγωγή		Κατανάλωση		Αντιστάθμιση
	V (α.μ.)	θ ($^\circ$)	P_G (MW)	Q_G (MVA _r)	P_L (MW)	Q_L (MVA _r)	Q_C (MVA _r)
1	1,03	26,8	699,4	178,7	0,0	0,0	0,0
2	1,01	17,1	700,0	219,6	0,0	0,0	0,0
3	1,03	0,1	719,0	168,9	0,0	0,0	0,0
4	1,01	-10,1	700,0	184,9	0,0	0,0	0,0
5	1,01	20,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
6	0,98	10,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
7	0,97	2,0	0,0	0,0	967,0	100,0	200,0
8	0,95	-11,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
9	0,98	-25,2	0,0	0,0	1.767,0	100,0	350,0
10	0,99	-16,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
11	1,01	-6,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Πίνακας 8.6: Κυρίαρχες ιδιοτιμές αρχικού σημείου λειτουργίας (χωρίς αιολική παραγωγή)

Ιδιοτιμή	Απόσβεση (ζ)	Ρυθμός
$-0,420 \pm j6, 32$	0,066	τοπική ηλεκτρομηχανική ταλάντωση G1-G2
$-0,411 \pm j6, 37$	0,064	τοπική ηλεκτρομηχανική ταλάντωση G3-G4
$+0,107 \pm j3, 47$	-0,031	ηλεκτρομηχανική ταλάντωση διασύνδεσης
$-0,483 \pm j0, 58$	0,643	έλεγχος συχνότητας συστήματος
-0,243		} ρυθμοί αλληλεπίδρασης μεταξύ ατμοστροβίλων
-0,247		
-0,247		

8.3.2 Επίδραση αύξησης αιολικής διείσδυσης

Στην ενότητα αυτή, εξετάζεται η επίδραση της αύξησης της αιολικής διείσδυσης στο σύστημα του Σχ. 8.6, αυξάνοντας σταδιακά την παραγωγή ενός αιολικού πάρκου που συνδέεται στο ζυγό 7 του συστήματος.

Το πάρκο αναπαριστάται με μια ισοδύναμη ανεμογεννήτρια και συνδέεται στο ζυγό 7 μέσω Y/Σ MT/YT με αντίδραση X_1 , ισοδύναμη γραμμική MT με σύνθετη αντίσταση $R_l + jX_l$ και M/Σ XT/MT της ισοδύναμης ανεμογεννήτριας με αντίδραση X_2 . Οι παράμετροι σύνδεσης δίνονται στον Πίνακα 8.7 σε α.μ. στη βάση S_{nom} του αιολικού πάρκου.

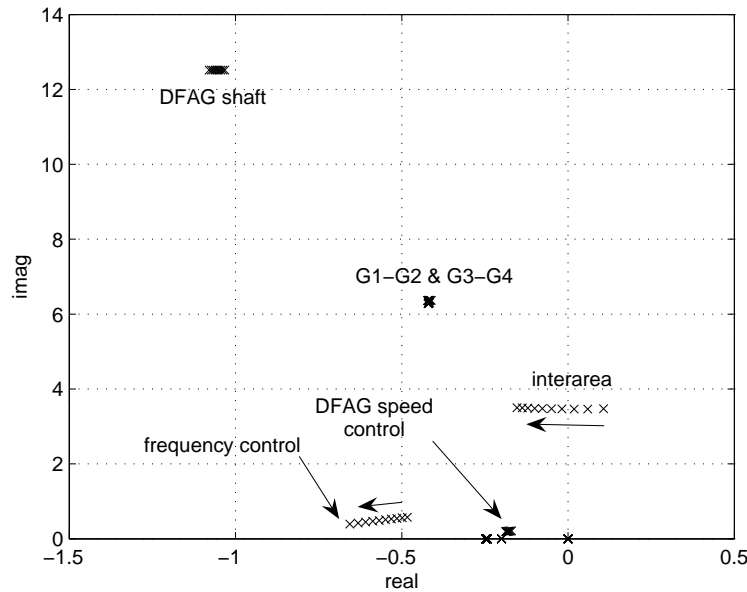
Πίνακας 8.7: Παράμετροι σύνδεσης σε α.μ. στη βάση S_{nom} της ισοδύναμης ΑΓΔΤ

P_0	Q_0	X_1	R_l	X_l	X_2
0,8	0	0,10	0,01	0,03	0,05

Η παραγωγή του αιολικού πάρκου θεωρείται ότι είναι σταθερά $P_0=0,8$ α.μ. στη βάση S_{nom} του πάρκου, οπότε η αύξηση της αιολικής παραγωγής υλοποιείται αυξάνοντας το μέγεθος (S_{nom}) του πάρκου. Σε κάθε βήμα αύξησης της αιολικής παραγωγής, αυξάνεται ισόποσα το ενεργό φορτίο στο ζυγό 7, επομένως δε διαταρράσσεται η αρχική διασυνδυετική ροή ισχύος. Ο συντελεστής ισχύος θεωρείται μοναδιαίος ($Q_0=0$ MVA_r στο ζυγό 12 της ΑΓΔΤ).

Κεφάλαιο 8. Εισαγωγή αιολικού σταθεροποιητή ΣΗΕ

Το αιολικό πάρκο θεωρείται ότι αποτελείται από ανεμογεννήτριες με ΑΓΔΤ και χρησιμοποιείται το μοντέλο με λεπτομερείς βρόχους ελέγχου (βλ. ενότητα 3.3). Θεωρώντας ότι ο ρυθμιστής αέργου ισχύος της ΑΓΔΤ του Σχ. 3.11 είναι σε λειτουργία σταθερού συντελεστή ισχύος με ενεργοποιημένη την επιλογή ελέγχου της τερματικής τάσης, σχεδιάζουμε τον τόπο ριζών καθώς το μέγεθος του αιολικού πάρκου αυξάνεται σταδιακά έτσι ώστε η αιολική παραγωγή να αυξάνεται από 0 έως 450 MW, στο Σχ. 8.8. Στον Πίνακα 8.8 φαίνονται οι κυρίαρχες ιδιοτιμές για παραγωγή 450 MW. Παρατηρούμε ότι η ιδιοτιμή του ρυθμού δια-



Σχήμα 8.8: Τόπος ριζών για αιολική διεύθυνση 0-450 MW. ΑΓΔΤ με έλεγχο συντελεστή ισχύος.

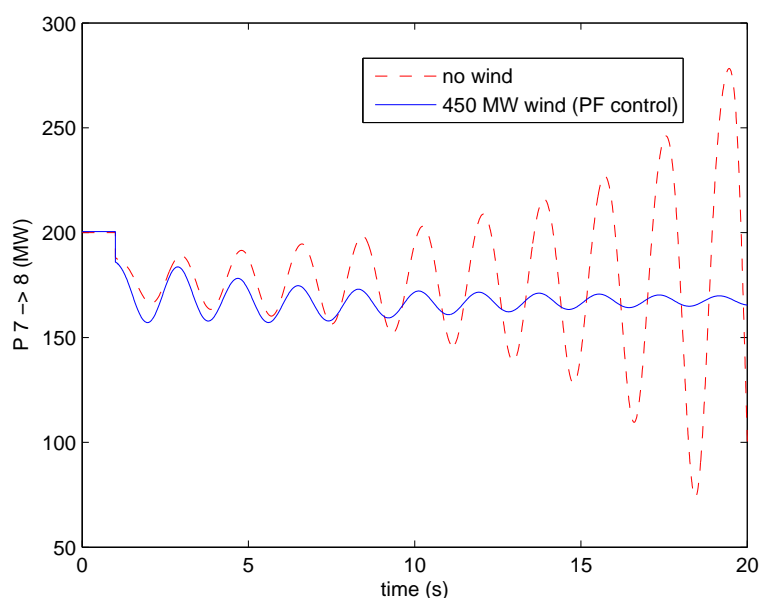
Πίνακας 8.8: Κυρίαρχες ιδιοτιμές για 450 MW αιολικής παραγωγής με έλεγχο συντελεστή ισχύος

Ιδιοτιμή	Απόσβεση (ζ)	Ρυθμός
$-1,032 \pm j12,51$	0,082	στρεπτική ταλάντωση άξονα ΑΓΔΤ
$-0,421 \pm j6,28$	0,067	τοπική ηλεκτρομηχανική ταλάντωση G1-G2
$-0,422 \pm j6,36$	0,066	τοπική ηλεκτρομηχανική ταλάντωση G3-G4
$-0,153 \pm j3,50$	0,043	ηλεκτρομηχανική ταλάντωση διασύνδεσης
$-2,000 \pm j0,95$	0,904	έλεγχος αέργου ισχύος ΑΓΔΤ
$-0,656 \pm j0,39$	0,859	έλεγχος συχνότητας συστήματος
$-0,170 \pm j0,21$	0,630	έλεγχος στροφών ΑΓΔΤ
-0,247		} ρυθμοί αλληλεπίδρασης μεταξύ ατμοστροβίλων ταχύτητα αναφοράς ΑΓΔΤ
-0,247		
-0,242		
-0,2		

σύνδεσης κινείται προς τα αριστερά, όπως και αυτή του ρυθμού συχνότητας του συστήματος. Από την άλλη, η αύξηση της αιολικής παραγωγής δε φαίνεται να επηρεάζει τους τοπικούς ηλεκτρομηχανικούς ρυθμούς. Ο ταλαντωτικός ρυθμός ελέγχου αέργου ισχύος της ΑΓΔΤ είναι αρκετά αριστερά στο μιγαδικό επίπεδο και δεν φαίνεται στο Σχ. 8.8. Σημειώνεται

ότι, καθώς δεν υπάρχει άπειρος ζυγός, δεν υπάρχει αναφορά για τις γωνίες των σύγχρονων γεννητριών και έτσι εμφανίζεται μια τετριμμένη ιδιοτιμή στο μηδέν.

Η σταθεροποίηση του ρυθμού διασύνδεσης με την αύξηση της αιολικής παραγωγής (με έλεγχο του συντελεστή ισχύος) φαίνεται και από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων του Σχ. 8.9. Η διαταραχή που προσομοιώνεται τη χρονική στιγμή $t=1$ s είναι βηματική αύξηση κατά 10 % της αγωγιμότητας του φορτίου στο ζυγό 7.



Σχήμα 8.9: Ροή ισχύος στη μία γραμμή διασύνδεσης.

Στο Σχ. 8.10 φαίνεται πάλι ο τόπος ριζών καθώς η παραγωγή του αιολικού πάρκου αυξάνεται σταδιακά από 0 έως 450 MW, αλλά τώρα οι ΑΓΔΤ ασκούν έλεγχο τάσης στο ζυγό 7 (επιλογή VC στο Σχ. 3.11) με ενεργοποιημένο και τον έλεγχο της τερματικής τους τάσης (επιλογή (a) στο Σχ. 3.11). Στον Πίνακα 8.9 φαίνονται οι ιδιοτιμές για παραγωγή 450 MW. Ο ρυθμός ελέγχου συχνότητας κινείται πάλι προς τα αριστερά, αλλά, όπως στα συστήματα που εξετάστηκαν στο Κεφ. 7, στην περίπτωση αυτή υπάρχει αλληλεπίδραση του ρυθμού διασύνδεσης με το ρυθμό ελέγχου αέργου ισχύος της ΑΓΔΤ, με αποτέλεσμα ο πρώτος να κινείται προς τα δεξιά και να αποσταθεροποιείται ακόμα περισσότερο.

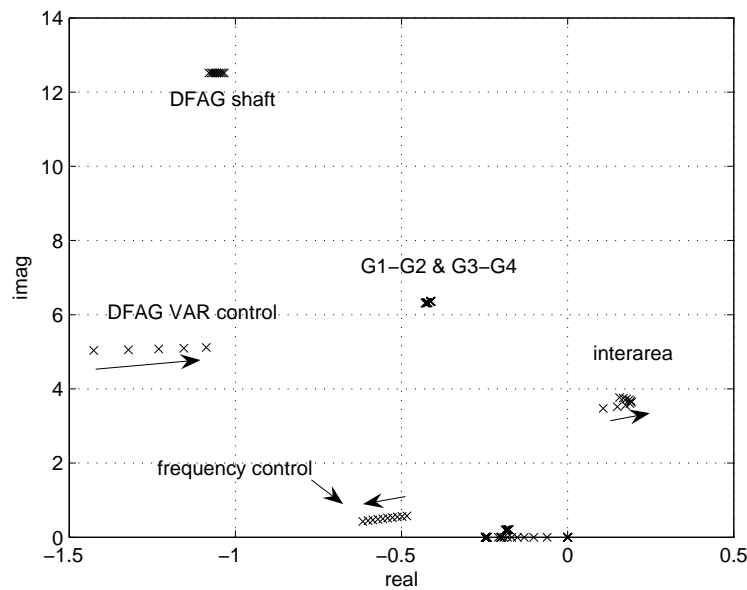
Μειώνοντας το κέρδος K_{Qi} στον ελεγκτή αέργου ισχύος της ΑΓΔΤ, όπως και στις αντίστοιχες περιπτώσεις του Κεφ. 7, ο τόπος ριζών γίνεται όπως φαίνεται στο Σχ. 8.11 και οι αντίστοιχες ιδιοτιμές για παραγωγή 450 MW δίνονται στον Πίνακα 8.10. Βλέπουμε ότι η αλληλεπίδραση αποφεύγεται σε αυτή την περίπτωση και η αύξηση της αιολικής διείσδυσης έχει θετική επίδραση στο ρυθμό διασύνδεσης, ο οποίος όμως παραμένει, οριακά έστω, ασταθής ακόμα και για 450 MW αιολικής παραγωγής.

8.3.3 Σχεδιασμός αιολικού σταθεροποιητή

Σε αυτή την παράγραφο εξετάζουμε την προσθήκη του σταθεροποιητή της ενότητας 8.1 στην περίπτωση του συστήματος του Σχ. 8.6 με αιολική παραγωγή 450 MW και έλεγχο τάσης με χαμηλό κέρδος $K_{Qi}=0,1$.

Για να επιλέξουμε τη σταθερά χρόνου T_w του φίλτρου απαλοιφής σχεδιάζουμε τον τόπο ριζών για τιμές του T_w από 0 έως 5 στο Σχ. 8.12. Οι αρχικές ιδιοτιμές ($T_w=0$) σημειώνονται

Κεφάλαιο 8. Εισαγωγή αιολικού σταθεροποιητή ΣΗΕ



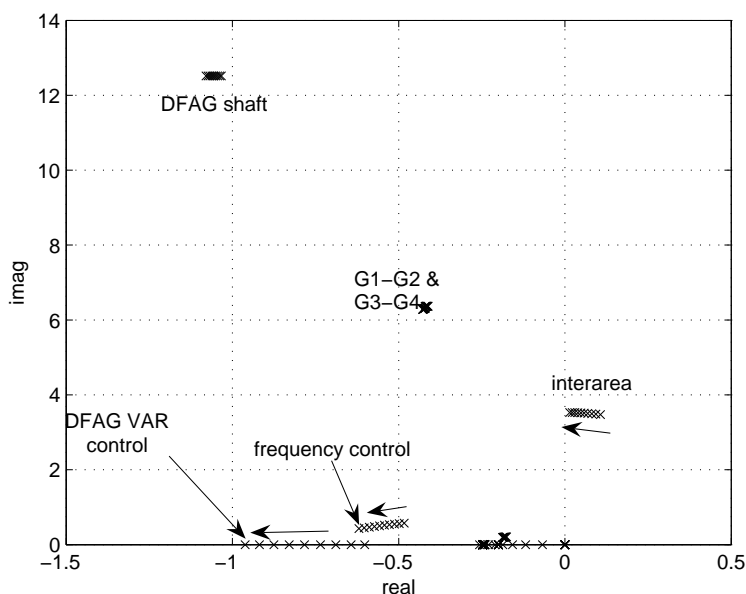
Σχήμα 8.10: Τόπος ριζών για αιολική διείσδυση 0-450 MW. ΑΓΔΤ με έλεγχο τάσης ($K_{Qi}=0,5$).

Πίνακας 8.9: Κυρίαρχες ιδιοτιμές για 450 MW αιολικής παραγωγής με έλεγχο τάσης ($K_{Qi} = 0,5$)

Ιδιοτιμή	Απόσβεση (ζ)	Ρυθμός
$-1,033 \pm j12,52$	0,082	στρεπτική ταλάντωση άξονα ΑΓΔΤ
$-0,429 \pm j6,31$	0,068	τοπική ηλεκτρομηχανική ταλάντωση G1-G2
$-0,413 \pm j6,35$	0,065	τοπική ηλεκτρομηχανική ταλάντωση G3-G4
$-1,087 \pm j5,12$	0,208	έλεγχος αέργου ισχύος ΑΓΔΤ
$+0,156 \pm j3,77$	-0,041	ηλεκτρομηχανική ταλάντωση διασύνδεσης
$-0,616 \pm j0,43$	0,823	έλεγχος συχνότητας συστήματος
$-0,175 \pm j0,21$	0,644	έλεγχος στροφών ΑΓΔΤ
-0,247		} ρυθμοί αλληλεπίδρασης
-0,247		
-0,242		μεταξύ αμοστροβίλων
-0,208		έλεγχος τάσης αιολικού πάρκου
-0,2		ταχύτητα αναφοράς ΑΓΔΤ

με κύκλο. Παρατηρούμε ότι για όλες τις τιμές του T_w ο ρυθμός διασύνδεσης κινείται προς τα αριστερά. Υπάρχει επίσης μια μικρή θετική επίδραση στον τοπικό ρυθμό ταλάντωσης της περιοχής του αιολικού σταθμού (G1-G2).

Από την άλλη, η απόσβεση του στρεπτικού ρυθμού ταλάντωσης του άξονα της ΑΓΔΤ μειώνεται, όπως και στην περίπτωση που εξετάστηκε στην ενότητα 8.2. Όπως αναφέρθηκε, καθώς αυτό αφορά στην ίδια τη μηχανή, πρέπει να εξεταστεί με λεπτομερέστερα μοντέλα. Σε αυτό το (αυτόνομο) σύστημα μειώνεται επίσης η απόσβεση του ρυθμού ελέγχου της συχνότητας συστήματος. Η αρνητική αυτή επίδραση μπορεί να εξηγηθεί από το γεγονός ότι, προκειμένου να εισάγει απόσβεση στην ταλάντωση διασύνδεσης, ο σταθεροποιητής εισάγει μια ταλάντωση στην παραγωγή της ΑΓΔΤ, η οποία δυσχεραίνει τον έλεγχο της συχνότητας του συστήματος. Προκειμένου να μειώσουμε αυτή την αρνητική επίδραση, μπορούμε να



Σχήμα 8.11: Τόπος ριζών για αιολική διεύθυνση 0-450 MW. ΑΓΔΤ με έλεγχο τάσης ($K_{Qi}=0,1$).

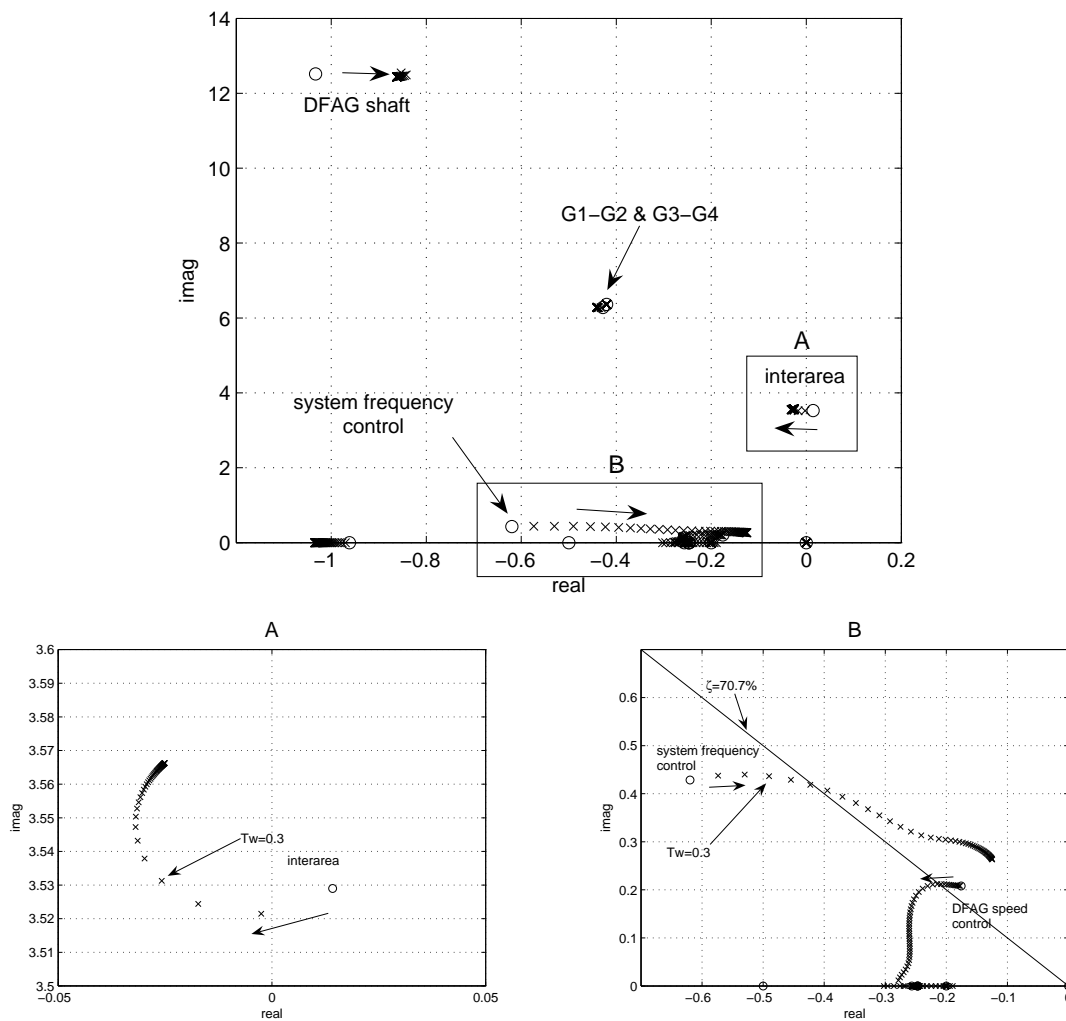
Πίνακας 8.10: Κυρίαρχες ιδιοτιμές για 450 MW αιολικής παραγωγής με έλεγχο τάσης ($K_{Qi} = 0,1$)

Ιδιοτιμή	Απόσβεση (ζ)	Ρυθμός
$-1,033 \pm j12,51$	0,082	στρεπτική ταλάντωση άξονα ΑΓΔΤ
$-0,428 \pm j6,28$	0,068	τοπική ηλεκτρομηχανική ταλάντωση G1-G2
$-0,420 \pm j6,36$	0,066	τοπική ηλεκτρομηχανική ταλάντωση G3-G4
$+0,014 \pm j3,53$	-0,040	ηλεκτρομηχανική ταλάντωση διασύνδεσης
$-0,620 \pm j0,43$	0,823	έλεγχος συχνότητας συστήματος
$-0,176 \pm j0,21$	0,645	έλεγχος στροφών ΑΓΔΤ
-0,962		έλεγχος αέργων ΑΓΔΤ
-0,257		έλεγχος τάσης αιολικού πάρκου
-0,248		} ρυθμοί αλληλεπίδρασης μεταξύ ατμοστροβίλων ταχύτητα αναφοράς ΑΓΔΤ
-0,247		
-0,246		
-0,2		

επιλέξουμε μια σχετικά χαμηλή τιμή για το T_w , έτσι ώστε η συχνότητα αποκοπής $1/T_w$ να βρίσκεται μεταξύ της συχνότητας του ρυθμού διασύνδεσης και της συχνότητας του ρυθμού ελέγχου της συχνότητας του συστήματος, δηλ. μεταξύ 3,5 και 0,5 rad/s. Με βάση και τον τόπο ριζών του Σχ. 8.12, επιλέγεται η τιμή $T_w=0,3$ s. Με μεγαλύτερη τιμή, το όφελος στην απόσβεση του ρυθμού διασύνδεσης είναι μάλλον ασήμαντο, ενώ ταυτόχρονα η χαμηλή τιμή του T_w αφήνει μεγαλύτερο σχετικά περιθώριο αύξησης του κέρδους, αφού η επίδραση στο ρυθμό ελέγχου συχνότητας είναι μικρότερη.

Μπορούμε να επιβεβαιώσουμε την επιλογή του T_w υπολογίζοντας το ολοκληρωτικό υπόλοιπο του ρυθμού διασυνδεδειγμένων ταλαντώσεων (βλ. Παράρτημα Β). Θέτοντας στο μοντέλο Simulink ως είσοδο το ΔP_{ord} της ΑΓΔΤ και έξοδο το θ_{PLL} (έξοδος και είσοδος του στα-

Κεφάλαιο 8. Εισαγωγή αιολικού σταθεροποιητή ΣΗΕ



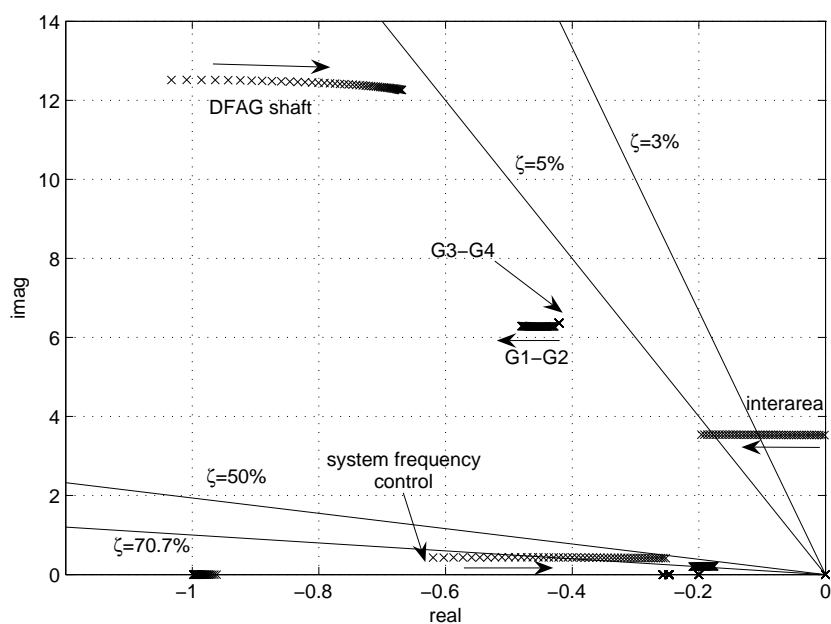
Σχήμα 8.12: Τόπος ριζών για $K_{wpss}=0,1$ και T_w από 0 έως 5.

θεροποιητή αντίστοιχα, βλ. Σχ. 8.2 και Σχ. 8.1) ορίζεται η συνάρτηση μεταφοράς $G(j\omega)$. Στη Matlab, μετά τη γραμμικοποίηση του μοντέλου γύρω από το σημείο ισορροπίας που εξετάζουμε, μπορούμε να υπολογίσουμε τους πόλους και τα ολοκληρωτικά υπόλοιπα της συνάρτησης μεταφοράς $G(j\omega)$ με την εντολή `residue`. Το ολοκληρωτικό υπόλοιπο που αντιστοιχεί στην ιδιοτιμή του ρυθμού διασυνδεδειγμένων ταλαντώσεων με θετικό φανταστικό μέρος $(-0,014+j3,53)$ είναι:

$$R = 0,382 - j0,397$$

δηλαδή έχει γωνία περίπου -45° . Το φίλτρο απαλοιφής εισάγει φάση $+45^\circ$ στη συχνότητα αποκοπής (βλ. διάγραμμα Bode στο Σχ. 8.3), η οποία με $T_w=0,3$ είναι $c = 1/T_w = 3,33$ rad/s. Δεδομένου ότι η συχνότητα αυτή είναι πολύ κοντά στη συχνότητα του ρυθμού διασύνδεσης και λαμβάνοντας υπόψη την αρνητική ανάδραση ($+180^\circ$), συμπεραίνουμε ότι ο ρυθμός διασύνδεσης θα κινηθεί υπό γωνία 180° περίπου.

Με την τιμή αυτή για το T_w σχεδιάζουμε τον τόπο ριζών για κέρδος K_{wpss} από 0 έως 0,5 στο Σχ. 8.13 (σημειώνεται ότι το σήμα θ_{PLL} είναι σε rad/s). Βλέπουμε ότι με κέρδος 0,5 ο ρυθμός διασύνδεσης έχει λόγο απόσβεσης πάνω από 5 %, ενώ ο λόγος απόσβεσης του ρυθμού ελέγχου συχνότητας παραμένει πάνω από το όριο του 50 %. Ταυτόχρονα έχει μειωθεί



Σχήμα 8.13: Τόπος ριζών για $T_w=0,3$ και K_{wps} από 0 έως 0,5.

η απόσβεση του στρεπτικού ρυθμού ταλάντωσης του άξονα της ΑΓΔΤ και έχει αυξηθεί η απόσβεση του τοπικού ηλεκτρομηχανικού ρυθμού της περιοχής 1 (μεταξύ των γεννητριών G1 και G2). Επιλέγουμε λοιπόν την τιμή 0,5 για το κέρδος του σταθεροποιητή, μιας και αυτή αντιστοιχεί σε ικανοποιητική απόσβεση της ταλάντωσης διασύνδεσης, ενώ περαιτέρω αύξηση του κέρδους θα είχε ως αποτέλεσμα η απόσβεση του ρυθμού ελέγχου συχνότητας να πέσει κάτω από 50 %.

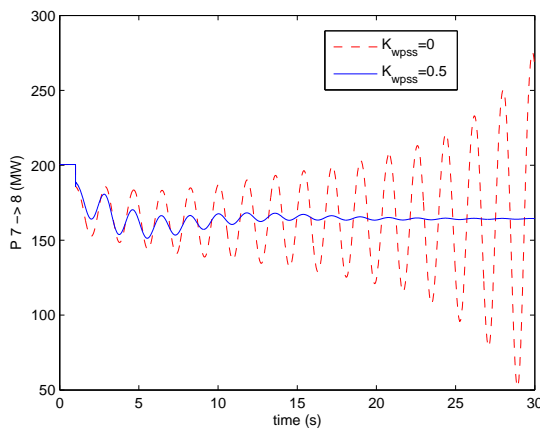
8.3.4 Αποτελέσματα προσομοιώσεων

Στο Σχ. 8.14 φαίνονται αποκρίσεις του συστήματος όταν προσομοιώνεται βηματική αύξηση κατά 10 % της αγωγιμότητας του φορτίου στο ζυγό 7 τη χρονική στιγμή $t=1$ s για τις περιπτώσεις με και χωρίς σταθεροποιητή. Στην απόκριση της ενεργού ισχύος της ΑΓΔΤ (Σχ. 8.14β) βλέπουμε καθαρά την ταλάντωση που εισάγει ο σταθεροποιητής, η οποία έχει ως αποτέλεσμα τη σταθεροποίηση της ταλάντωσης διασύνδεσης.

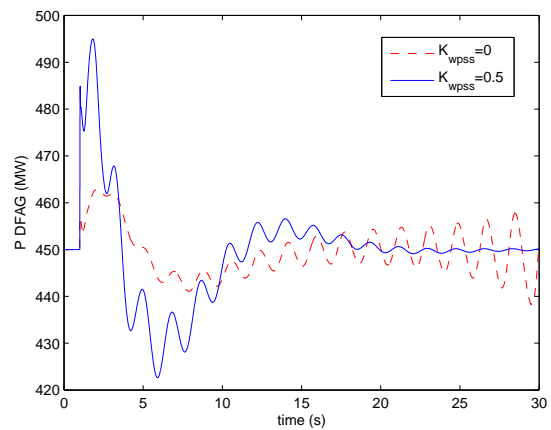
Η ακαριαία μεταβολή της ενεργού ισχύος της ΑΓΔΤ αμέσως μετά την αύξηση του φορτίου οφείλεται στην ακαριαία μεταβολή των τάσεων λόγω της διαταραχής (ακαριαία λόγω του ότι αμελούνται τα ταχέα μεταβατικά του δικτύου). Μόλις αυξάνεται το φορτίο στο ζυγό 7, η γωνία της τάσης του ζυγού αυτού μειώνεται απότομα για να μειωθεί η εξαγωγή ισχύος προς την περιοχή 2. Η γωνία της τερματικής τάσης της ΑΓΔΤ ακολουθεί επίσης ακαριαία τη συμπεριφορά αυτή, όμως η γωνία του PLL δεν έχει προλάβει να αλλάξει και κρατά την τιμή πριν από τη διαταραχή. Το αποτέλεσμα είναι η ενεργός ισχύς να αυξηθεί. Δεδομένου ότι η χρονική σταθερά που έχει χρησιμοποιηθεί στο φίλτρο μέτρησης του ρυθμού μεταβολής της γωνίας του PLL (βλ. Σχ. 8.1) είναι πολύ μικρή (10 ms), ο σταθεροποιητής εισάγει στην προσομοίωση επιπλέον, ουσιαστικά ακαριαία, αύξηση της ενεργού ισχύος περίπου 30 MW.

Στη συνέχεια εξετάζουμε την επίδραση του σταθεροποιητή στη συχνότητα του συστήματος. Στο Σχ. 8.15α φαίνεται η απόκριση της συχνότητας συστήματος που αντιστοιχεί στα αποτελέσματα του Σχ. 8.14. Ως συχνότητα του συστήματος λαμβάνεται ο μέσος όρος

Κεφάλαιο 8. Εισαγωγή αιολικού σταθεροποιητή ΣΗΕ



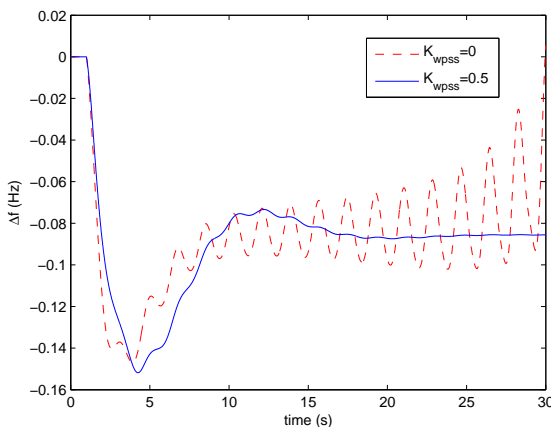
(α) Διασυνδεδετική ροή (στη μία γραμμή)



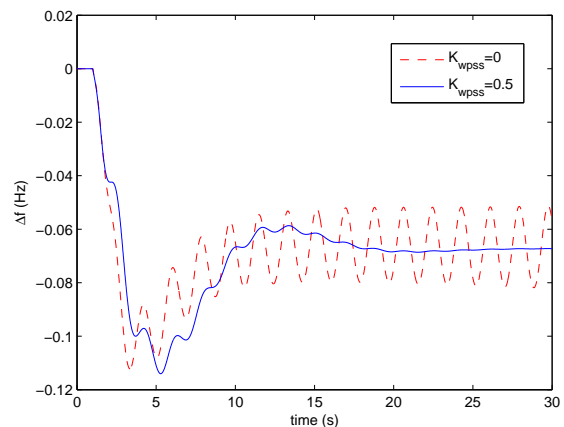
(β) Παραγωγή ενεργού ισχύος ΑΓΔΤ

Σχήμα 8.14: Αποκρίσεις σε βηματική αύξηση κατά 10 % του φορτίου στο ζυγό 7

των ταχυτήτων των τεσσάρων σύγχρονων γεννητριών, αφού αυτές έχουν ίση αδράνεια. Στο Σχ. 8.15β φαίνεται η απόκριση της συχνότητας συστήματος στην περίπτωση που αυξάνεται απότομα κατά 10 % η αγωγιμότητα του φορτίου στο ζυγό 9. Παρατηρούμε ότι ο σταθε-



(α) Απόκριση για αύξηση φορτίου στο ζυγό 7



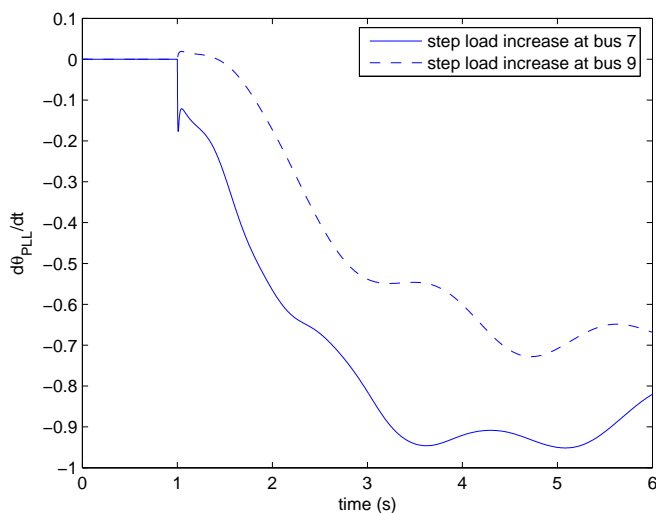
(β) Απόκριση για αύξηση φορτίου στο ζυγό 9

Σχήμα 8.15: Αποκρίσεις συχνότητας συστήματος

ροποιητής εισάγει αδράνεια στο σύστημα, ιδίως όταν η διαταραχή γίνεται στην περιοχή του αιολικού πάρκου: Αμέσως μετά τη διαταραχή, η συχνότητα πέφτει με μικρότερη κλίση στην περίπτωση που είναι ενεργοποιημένος ο σταθεροποιητής. Σημειώνεται ότι ο σχεδιασμός του σταθεροποιητή έγινε με στόχο την απόσβεση του ταλαντωτικού ρυθμού διασύνδεσης και όχι την εισαγωγή ισοδύναμης αδράνειας. Διακρίνεται επίσης η μείωση της απόσβεσης του ρυθμού ελέγχου συχνότητας, η οποία πάντως παραμένει σε ικανοποιητικά επίπεδα.

Η μεγαλύτερη επίδραση του σταθεροποιητή στην αδράνεια, όταν η διαταραχή συμβαίνει στην περιοχή του αιολικού πάρκου είναι αναμενόμενη: Όπως φαίνεται από την απόκριση του ρυθμού μεταβολής της γωνίας του PLL (ο οποίος είναι μια καλή εκτίμηση της συχνότητας του ζυγού της ΑΓΔΤ) στο Σχ. 8.16, όταν η διαταραχή γίνεται στην περιοχή 1, οι σύγχρονες γεννήτριες της περιοχής αυτής αναλαμβάνουν το μεγαλύτερο μέρος της αύξησης του φορτίου,

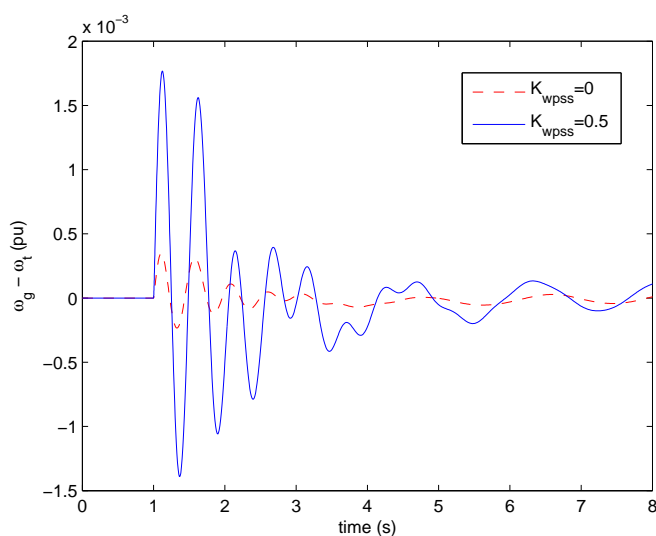
με αποτέλεσμα η τοπική συχνότητα (και η συχνότητα του ζυγού της ΑΓΔΤ) να πέσει. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, ο σταθεροποιητής να αυξήσει την παραγωγή της ΑΓΔΤ. Όταν



Σχήμα 8.16: Ρυθμός μεταβολής γωνίας PLL ($K_{wps} = 0,5$)

η διαταραχή γίνεται στην περιοχή 2, πέφτει η τοπική συχνότητα της περιοχής 2, ενώ η συχνότητα της περιοχής 1 αρχικά ανεβαίνει λίγο, λόγω της ταλάντωσης διασύνδεσης. Σε αυτή την περίπτωση ο σταθεροποιητής δεν επιδρά τόσο άμεσα προς όφελος της συχνότητας του συστήματος.

Τέλος, καθώς στις προηγούμενες αποκρίσεις δε φαίνεται ο στρεπτικός ρυθμός ταλάντωσης του άξονα της ΑΓΔΤ, στο Σχ. 8.17 παρατίθεται η απόκριση της διαφοράς μεταξύ των ταχυτήτων περιστροφής των δύο στρεφόμενων μαζών της ΑΓΔΤ (με και χωρίς σταθεροποιητή). Εδώ φαίνεται καθαρά ο στρεπτικός ρυθμός ταλάντωσης με συχνότητα περίπου 2 Hz.



Σχήμα 8.17: Διαφορά ταχυτήτων των δύο στρεφόμενων μαζών της ΑΓΔΤ.

Αν και η απόσβεσή του μειώνεται λόγω της δράσης του σταθεροποιητή, σε κάθε περίπτωση

Κεφάλαιο 8. Εισαγωγή αιολικού σταθεροποιητή ΣΗΕ

η ταλάντωση αυτή σβήνει μετά από 5 δευτερόλεπτα. Στη συνέχεια κυριαρχεί ο ηλεκτρομηχανικός ρυθμός ταλάντωσης με συχνότητα περίπου 0,5 Hz. Ενδεχομένως λοιπόν να μην απαιτείται κάποιο ιδιαίτερο μέτρο για την αύξηση της απόσβεσης του στρεπτικού ρυθμού, αν και, όπως αναφέρθηκε η μείωση της απόσβεσης πρέπει να εξεταστεί με λεπτομερέστερα μοντέλα και από τη σκοπιά του κατασκευαστή.

Κεφάλαιο 9

Συμπεράσματα - Συμβολή - Προοπτικές

9.1 Ανακεφαλαίωση και συμπεράσματα

Σε αυτή τη διατριβή εξετάστηκε η παράσταση των αιολικών πάρκων σε μελέτες ευστάθειας ΣΗΕ και η συμβολή τους στην ευστάθεια των ΣΗΕ, κυρίως στη βραχυπρόθεσμη ευστάθεια τάσης και την ευστάθεια γωνίας μικρών διαταραχών. Μεγαλύτερη έμφαση δόθηκε στην παράσταση ανεμογεννητριών με Ασύγχρονες Γεννήτριες Διπλής Τροφοδότησης (ΑΓΔΤ), οι οποίες είναι σήμερα οι πιο διαδεδόμενες. Αρκετά συμπεράσματα όμως αφορούν και στην άλλη κατηγορία ανεμογεννητριών μεταβλητών στροφών, με μετατροπέα πλήρους ισχύος.

Αρχικά, έγινε περιγραφή των ανεμογεννητριών μεταβλητών στροφών εστιάζοντας στα θέματα που αφορούν σε μελέτες ευστάθειας ΣΗΕ. Διατυπώθηκαν οι εξισώσεις της ΑΓΔΤ, οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν για την ανάπτυξη σχετικών μοντέλων. Συνολικά, στο πλαίσιο της διατριβής, υλοποιήθηκαν τα εξής μοντέλα ανεμογεννητριών (αιολικών πάρκων), κατάλληλα για μελέτες ευστάθειας ΣΗΕ, όπου γίνεται η παραδοχή της οιονεί ημιτονοειδούς κατάστασης:

- Μοντέλα ΑΓΔΤ με απλοποιημένους βρόχους ελέγχου. Τα μοντέλα αυτά βασίζονται σε μοντέλα των κλασικών μηχανών επαγωγής (βραχυκυκλωμένου δρομέα) τα οποία επεκτάθηκαν κατάλληλα. Ο μετατροπέας πλευράς δρομέα της ΑΓΔΤ αναπαριστάται είτε σαν πηγή τάσης (μεταβατικό μοντέλο), είτε σαν πηγή ρεύματος (αλγεβρικό μοντέλο).
- Μοντέλο ΑΓΔΤ με λεπτομερείς βρόχους ελέγχου, όπως έχει δημοσιευτεί από συγκεκριμένο κατασκευαστή (GE). Στο μοντέλο αυτό, όπως στο αλγεβρικό, αμελούνται τα μεταβατικά του δρομέα.
- Γενικευμένο μοντέλο ανεμογεννητριών μεταβλητών στροφών που έχει δημοσιεύσει ο διαχειριστής του Ισπανικού συστήματος μεταφοράς. Στο γενικευμένο μοντέλο αμελείται εντελώς το μηχανικό μέρος και χρησιμοποιούνται απλοποιημένοι βρόχοι ελέγχου.

Τα μοντέλα αναπτύχθηκαν σε Matlab/Simulink και χρησιμοποιήθηκαν με το πρόγραμμα προσομοίωσης WHSSP του εργαστηρίου ΣΗΕ του ΕΜΠ, που είναι κατάλληλο για προσομοιώσεις μικρών έως μεσαίων αυτόνομων ή διασυνδεδεμένων συστημάτων. Στο πλαίσιο της διατριβής, το WHSSP προσαρμόστηκε ώστε να είναι συμβατό με τις νέες εκδόσεις της Matlab (π.χ. αλλαγή του μοντέλου ΣΑΤΥΦ). Για το μοντέλο με λεπτομερείς βρόχους ελέγχου και το γενικευμένο έγινε επαλήθευση με τα αντίστοιχα μοντέλα για το πρόγραμμα PSS/E της Siemens/PTI.

Στη διατριβή έγινε ανάλυση της ευστάθειας της ΑΓΔΤ σε σύνδεση με άπειρο ζυγό. Καταρχάς, διερευνήθηκε ο έλεγχος στροφών των ανεμογεννητριών μεταβλητών στροφών και

Κεφάλαιο 9. Συμπεράσματα - Συμβολή - Προοπτικές

διατυπώθηκε η συνθήκη ευστάθειάς του. Στη συνέχεια, εξετάστηκαν λεπτομερώς οι ρυθμοί απόκρισης του μοντέλου ΑΓΔΤ με απλοποιημένους βρόχους ελέγχου και επελέγησαν τα κέρδη των ρυθμιστών του.

Με προσομοίωση και γραμμικοποίηση του μοντέλου της ΑΓΔΤ με λεπτομερείς βρόχους ελέγχου, διαπιστώθηκε ότι εισάγει ρυθμούς ταλάντωσης στο εύρος συχνοτήτων των μελετών ευστάθειας ΣΗΕ (0,1 - 10 Hz). Οι πιο σημαντικοί ρυθμοί απόκρισης είναι ο στρεπτικός ρυθμός ταλάντωσης του άξονα της ΑΓΔΤ και οι ρυθμοί απόκρισης από τον βρόχο ελέγχου της αέργου ισχύος. Η αναπαράσταση του βρόχου κλειδώματος φάσης (PLL), αντίθετα, εισάγει έναν αρκετά γρήγορο εκθετικό ρυθμό απόκρισης. Διαπιστώθηκε, επίσης, ότι με διαφορετική μέθοδο για τον διανυσματικό έλεγχο, η καθυστέρηση του PLL μπορεί να μην εισάγει σφάλμα.

Η ευστάθεια του βρόχου αέργου ισχύος του μοντέλου με λεπτομερείς βρόχους ελέγχου εξετάστηκε για την περίπτωση ρύθμισης του συντελεστή ισχύος της ισοδύναμης ανεμογεννήτριας και για την περίπτωση ρύθμισης της τάσης του αιολικού πάρκου. Και στις δύο περιπτώσεις υπάρχει ένας ταλαντωτικός ρυθμός απόκρισης, καθώς υπάρχουν δύο ολοκληρωτές σε σειρά. Στην περίπτωση ελέγχου της τάσης του πάρκου, υπάρχει και ένας εκθετικός ρυθμός απόκρισης. Για τη μελέτη αυτή χρησιμοποιήθηκαν και απλοποιημένα μοντέλα, τα οποία γραμμικοποιήθηκαν αναλυτικά και βοήθησαν στην κατανόηση των παραμέτρων που επηρεάζουν την ευστάθεια.

1. Στην περίπτωση ελέγχου του συντελεστή ισχύος, η αύξηση της ισχύος διασύνδεσης μειώνει την απόσβεση. Στο όριο, αν η γεννήτρια συνδεθεί απευθείας σε άπειρο ζυγό προκύπτει ένας αρμονικός ταλαντωτής.
2. Στην περίπτωση με έλεγχο τάσης, ο έλεγχος αέργου ισχύος μπορεί να γίνει ασταθής είτε για ισχυρό (πραγματική ιδιοτιμή) είτε για ασθενές σύστημα (ζεύγος μιγαδικών ιδιοτιμών).

Διερευνήθηκε, επίσης, η επίδραση της μεταβολής των ρυθμίσιμων κερδών του βρόχου ελέγχου αέργου ισχύος και προτάθηκαν κατάλληλες ρυθμίσεις για την αύξηση της απόσβεσης ή/και τη μεταβολή της συχνότητας της ταλάντωσης.

Στη συνέχεια, εξετάστηκε η αδιάλειπτη λειτουργία της ΑΓΔΤ σε περίπτωση βύθισης τάσης. Διερευνήθηκε με το μεταβατικό μοντέλο της ΑΓΔΤ η αρχή λειτουργίας της ενεργού διάταξης βραχυκύκλωσης δρομέα (active crowbar), η οποία εφαρμόζεται από κατασκευαστές για την αδιάλειπτη λειτουργία υπό χαμηλή τάση της ΑΓΔΤ. Αν και τα μεταβατικά φαινόμενα που οδηγούν στην ενεργοποίηση της διάταξης βραχυκύκλωσης δεν αναπαριστώνται λεπτομερώς, το θέμα εξετάστηκε με στόχο την αναπαράσταση της λειτουργίας της ενεργού διάταξης βραχυκύκλωσης σε προσομοιώσεις με την παραδοχή της οιονεί ημιτονοειδούς κατάστασης.

Επίσης, έγιναν αντίστοιχες προσομοιώσεις βραχυκυκλώματος χρησιμοποιώντας το γενικευμένο μοντέλο και σύγκριση μεταξύ των δύο μοντέλων (μεταβατικό και γενικευμένο). Η χρήση του μεταβατικού μοντέλου, προκειμένου να μπορεί να γίνεται η μεταγωγή σε μηχανή βραχυκυκλωμένου δρομέα, επιβαρύνει αρκετά την προσομοίωση και απαιτεί αρκετές παραμέτρους. Διαπιστώθηκε ότι το γενικευμένο μοντέλο χρησιμοποιεί μία απλουστευμένη παράσταση της μεταβατικής συμπεριφοράς της ΑΓΔΤ, η οποία δίνει ποιοτικά αντίστοιχα αποτελέσματα με το μεταβατικό μοντέλο με τη διάταξη βραχυκύκλωσης.

Εξετάστηκε η συμβολή των αιολικών πάρκων με ανεμογεννήτριες μεταβλητών τροφών στην ευστάθεια τάσης με προσομοιώσεις σε δίκτυα με μειωμένη τοπική άεργο υποστήριξη. Εξετάστηκε η περίπτωση που η αστάθεια τάσης στο βασικό σενάριο προκαλείται λόγω περιορισμού της ικανότητας άεργης υποστήριξης της τοπικής σύγχρονης γεννήτριας (απώλεια

ευσταθούς σημείου ισορροπίας) και η περίπτωση που η αστάθεια προκαλείται λόγω απώλειας έλξης του ευσταθούς σημείου ισορροπίας μετά από βραχυκύκλωμα. Διαπιστώθηκε ότι η εγκατάσταση αιολικών πάρκων με ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών μπορεί να βελτιώσει σημαντικά τη βραχυπρόθεσμη ευστάθεια τάσης. Η θετική επίδραση είναι πιο σημαντική όταν οι ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών ασκούν έλεγχο τάσης σε σχέση με την περίπτωση λειτουργίας σταθερού συντελεστή ισχύος. Το συμπέρασμα αυτό προέκυψε από προσομοιώσεις τόσο σε μικρά διασυνδεδεμένα συστήματα όσο και σε παραλλαγή του συστήματος της Ν. Εύβοιας.

Στη συνέχεια, εξετάστηκε η επίδραση υψηλής αιολικής διείσδυσης με ΑΓΔΤ στην ευστάθεια των ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων διασυνδεδεμένων ΣΗΕ χρησιμοποιώντας αρχικά ένα τυπικό σύστημα μίας τοπικής σύγχρονης γεννήτριας διασυνδεδεμένης με ένα πολύ μεγάλο σύστημα. Στο συγκεκριμένο σύστημα διαπιστώθηκε ότι η υψηλή διείσδυση έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση τόσο της συχνότητας όσο και της απόσβεσης της ταλάντωσης διασύνδεσης, εφόσον δεν υπάρχει δυναμική των ανεμογεννητριών, δηλαδή όταν χρησιμοποιήθηκε μοντέλο αρνητικού φορτίου (σταθερής αγωγιμότητας ή σταθερής ισχύος) για τις ανεμογεννήτριες. Το αποτέλεσμα αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι με την αύξηση της αιολικής παραγωγής είτε μειώνεται η φόρτιση της σύγχρονης γεννήτριας (όταν αυτή θεωρείται σταθερής ονομαστικής ισχύος) είτε μειώνεται το μέγεθός της (ενώ η φόρτισή της παραμένει σταθερή).

Χρησιμοποιώντας το μοντέλο της ΑΓΔΤ με λεπτομερείς βρόχους ελέγχου στο ίδιο σύστημα και αυξάνοντας σταδιακά την αιολική διείσδυση κρατώντας σταθερές τις παραμέτρους του μοντέλου, διαπιστώθηκε ότι στις περιπτώσεις με έλεγχο του συντελεστή ισχύος η συμβολή ήταν θετική σε όλες τις περιπτώσεις (αύξηση της απόσβεσης της ηλεκτρομηχανικής ταλάντωσης). Από την άλλη, στην περίπτωση με έλεγχο τάσης εμφανίστηκαν περιπτώσεις αρνητικής αλληλεπίδρασης, δηλαδή για ορισμένα επίπεδα διείσδυσης μειώθηκε η απόσβεση του ηλεκτρομηχανικού ρυθμού ταλάντωσης. Πιο συγκεκριμένα, με τις αρχικές παραμέτρους στον ελεγκτή αέργου ισχύος, η υψηλή διείσδυση ΑΓΔΤ με έλεγχο τάσης είχε ως αποτέλεσμα την μείωση της απόσβεσης του ηλεκτρομηχανικού ρυθμού ταλάντωσης ή ακόμα και την αποσταθεροποίησή του. Η αρνητική αυτή επίδραση, ωστόσο, έγινε δυνατό να αντιμετωπιστεί με κατάλληλη ρύθμιση του ελεγκτή αέργου ισχύος.

Εξετάστηκε, επίσης, η συμβολή της περιοδικής μεταβολής (διαμόρφωσης) της ενεργού και της αέργου ισχύος της ΑΓΔΤ στις ταλαντώσεις διασύνδεσης. Η μεταβολή της ενεργού ισχύος έχει θετική συμβολή εάν είναι σε αντίθεση φάσης με την τοπική συχνότητα: Μείωση της αιολικής παραγωγής όταν επιταχύνονται οι τοπικές σύγχρονες γεννήτριες βοηθά στην επιβράδυνση των τελευταίων. Όσον αφορά στην περιοδική μεταβολή της παραγόμενης αέργου ισχύος, στο σύστημα που εξετάστηκε τα αποτελέσματα συμφωνούν γενικά με την αρχή που αναφέρεται στη βιβλιογραφία: έχει θετική συμβολή εφόσον είναι σε αντίθεση φάσης με την παράγωγο της τάσης.

Αντίστοιχη μελέτη έγινε σε συνεργασία με τον ΔΕΣΜΗΕ για το Ελληνικό διασυνδεδεμένο σύστημα με αναπαράσταση των συστημάτων της Βαλκανικής χερσονήσου (χωρίς διασύνδεση με την Τουρκία). Εξετάστηκε η επίδραση της δυναμικής που μπορεί να εισάγει η υψηλή αιολική διείσδυση στην Ελλάδα, όπου τα περισσότερα αιολικά πάρκα που σχεδιάζονται προβλέπεται να διαθέτουν ΑΓΔΤ. Για αυτά χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο με λεπτομερείς βρόχους ελέγχου και με διάφορες επιλογές για το βρόχο ελέγχου της αέργου ισχύος. Παρατηρήθηκε μικρή θετική συμβολή στην ταλάντωση διασύνδεσης του Ελληνικού συστήματος, ενώ η μειωμένη απόσβεση μερικών ταλαντώσεων, που παρατηρήθηκαν στην τάση ορισμένων αιολικών πάρκων στην περίπτωση με έλεγχο τάσης, αυξήθηκε ικανοποιητικά με κατάλληλη ρύθμιση του βρόχου αέργου ισχύος.

Τέλος, εξετάστηκε η θετική συμβολή, που μπορεί να προσφέρει στην απόσβεση των δια-

Κεφάλαιο 9. Συμπεράσματα - Συμβολή - Προοπτικές

συνδεδειγμένων ταλαντώσεων, η εισαγωγή του αιολικού σταθεροποιητή που προτείνεται σε αυτή τη διατριβή. Ο αιολικός σταθεροποιητής χρησιμοποιεί τη δυνατότητα γρήγορης μεταβολής της ενεργού ισχύος που προσφέρουν οι μετατροπείς των ανεμογεννητριών μεταβλητών στροφών, καθώς και την αδράνεια των στρεφόμενων μαζών. Παρόμοιος ρυθμιστής προτείνεται στη βιβλιογραφία για εισαγωγή ισοδύναμης αδράνειας από τις ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών σε αυτόνομα συστήματα. Χρησιμοποιώντας το μοντέλο ΑΓΔΤ με λεπτομερείς βρόχους ελέγχου, σχεδιάστηκε ο προτεινόμενος αιολικός σταθεροποιητής σε δύο τυπικά συστήματα με σημαντική αιολική παραγωγή: σε ένα με μία τοπική σύγχρονη γεννήτρια διασυνδεδεμένη σε ένα πολύ μεγάλο ΣΗΕ και σε ένα αυτόνομο σύστημα δύο περιοχών με τέσσερις σύγχρονες γεννήτριες. Και στις δύο περιπτώσεις, η εισαγωγή του αιολικού σταθεροποιητή οδήγησε σε σημαντική αύξηση της απόσβεσης των διασυνδεδειγμένων ταλαντώσεων, χωρίς να εισάγει σημαντικές παρενέργειες.

Συνοπτικά, τα βασικά συμπεράσματα της διατριβής είναι τα εξής:

- Στα μοντέλα ΑΓΔΤ συχνά αμελούνται τα μεταβατικά του δρομέα. Η παραδοχή αυτή βασίζεται στο γεγονός ότι η ρύθμιση του ρεύματος του δρομέα γίνεται πολύ γρήγορα σε σχέση με τη χρονική κλίμακα που ενδιαφέρει στις μελέτες ευστάθειας (περίπου από 0,1 έως 10 s για τη βραχυπρόθεσμη δυναμική), καθώς οι μετατροπείς λειτουργούν σε συχνότητες της τάξης του kHz. Εφόσον, επιπλέον, θεωρηθεί ότι το ρεύμα του δρομέα ελέγχεται ώστε να επιτευχθεί το κατάλληλο ρεύμα στο στάτη, ο συνδυασμός γεννήτριας και μετατροπέα της ΑΓΔΤ μπορεί υπό προϋποθέσεις (βλ. παρακάτω) να μοντελοποιηθεί με μία πηγή ρεύματος με ελεγχόμενες συνιστώσες ενεργού και άεργου ρεύματος, απευθείας συνδεδεμένη στο δίκτυο.
- Λόγω της απευθείας σύνδεσης του στάτη της ΑΓΔΤ στο δίκτυο, η υπόθεση της ακαριαίας ρύθμισης του ρεύματος από τον μετατροπέα δεν είναι έγκυρη σε περίπτωση απότομης μεταβολής της τάσης του δικτύου. Εάν ο μετατροπέας παραμένει σε κανονική λειτουργία σε τέτοιες περιπτώσεις και μπορεί να παράγει την απαραίτητη τάση για τον έλεγχο του ρεύματος, τότε το σφάλμα από την υπόθεση του ακαριαίου ελέγχου του ρεύματος αφορά ουσιαστικά στο πρώτο ρεύμα βραχυκύκλωσης, επομένως δεν είναι σημαντικό για τις μελέτες ευστάθειας. Στην πράξη, όμως, ο μετατροπέας υπόκειται σε περιορισμούς και μπορεί να χάνει, έστω μερικά, τον έλεγχο του ρεύματος σε περίπτωση βραχυκύκλωματος ή ακόμα και να βγαίνει προσωρινά εκτός λειτουργίας. Οι κατασκευαστές αντιμετωπίζουν αυτό το θέμα με διάφορες μεθόδους, προκειμένου οι ανεμογεννήτριες με ΑΓΔΤ να είναι σε θέση να ικανοποιούν τις απαιτήσεις που θέτουν οι σχετικοί Κώδικες Συστήματος. Ανάλογα με τη μέθοδο που χρησιμοποιείται, μπορεί να επηρεάζεται σημαντικά η συμπεριφορά της μηχανής στις χρονικές κλίμακες που ενδιαφέρουν στις μελέτες ευστάθειας και, άρα, θα πρέπει να αναπαριστάται κατάλληλα.
- Όπως διαπιστώθηκε με το μοντέλο της ΑΓΔΤ με λεπτομερείς βρόχους ελέγχου, η πιο σημαντική δυναμική από τους βρόχους ελέγχου μπορεί να προέλθει από τον έλεγχο άεργου ισχύος. Ο έλεγχος ενεργού ισχύος είναι, γενικά, αρκετά αργός. Για να εμφανίζεται, όμως, και ο ρυθμός στρεπτικής ταλάντωσης είναι γενικά απαραίτητο για την παράσταση της συγκεκριμένης μηχανής το μηχανικό μοντέλο με δύο μάζες και οι βρόχοι ελέγχου ενεργού και άεργου ισχύος.
- Στο μοντέλο με λεπτομερείς βρόχους ελέγχου λαμβάνεται υπόψη η καθυστέρηση της παρακολούθησης της γωνίας της τερματικής τάσης από τον βρόχο κλειδώματος φάσης (PLL). Είδαμε ότι ανάλογα με τη μέθοδο του διανυσματικού ελέγχου, η καθυστέρηση

του PLL μπορεί να μην εισάγει σφάλμα. Σε κάθε περίπτωση, είναι πολύ μικρή και μπορεί να αμεληθεί στις μελέτες ευστάθειας.

- Η αναπαράσταση της ενεργού διάταξης βραχυκύκλωσης είναι πιο συμβατή με την παραδοχή της ημιτονοειδούς κατάστασης όταν γίνεται με προδιαγεγραμμένη αλληλουχία καταστάσεων της μηχανής. Δηλαδή, η απενεργοποίηση της διάταξης να γίνεται μετά από συγκεκριμένο χρονικό διάστημα (της τάξης των 100 ms). Επίσης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα σχετικά ευαίσθητο όριο για το ρεύμα του δρομέα, προκειμένου να εξασφαλιστεί ότι το μοντέλο είναι από την “ασφαλή πλευρά” όσον αφορά στην ενεργοποίηση της διάταξης βραχυκύκλωσης αμέσως μετά την εμφάνιση βραχυκύκλωματος.
- Το γενικευμένο μοντέλο επιτυγχάνει μία αρκετά αντιπροσωπευτική αναπαράσταση των ανεμογεννητριών μεταβλητών στροφών και είναι πιο συντηρητικό (ασφαλές) σε σχέση με το μοντέλο με λεπτομερείς βρόχους ελέγχου, όσον αφορά στη συμπεριφορά στο βραχυκύκλωμα. Σημειώνεται, όμως, ότι το γενικευμένο μοντέλο έχει αναπτυχθεί ουσιαστικά με την υπόθεση ότι στη χειρότερη περίπτωση τα αιολικά πάρκα ικανοποιούν (οριακά) τον Κώδικα διαχείρισης του συστήματος. Επίσης, λόγω της μεγάλης απλούστευσης δεν αναπαριστά τον ρυθμό στρεπτικής ταλάντωσης του άξονα και τη δυναμική που μπορεί να εισάγει ο βρόχος ελέγχου αέργου ισχύος. Επομένως, ανάλογα με το σκοπό της μελέτης, πρέπει να εξετάζονται οι παραδοχές που γίνονται σε κάθε μοντέλο, προκειμένου να χρησιμοποιείται το κατάλληλο. Για παράδειγμα, σε μελέτες σχεδιασμού ΣΗΕ, όπου υπάρχουν ελάχιστα στοιχεία για τα αιολικά πάρκα, το γενικευμένο μοντέλο είναι αρκετά ικανοποιητικό. Γενικότερα, όμως, δεν υποκαθιστά πλήρως τα μοντέλα με λεπτομερείς βρόχους ελέγχου.
- Η εγκατάσταση αιολικών πάρκων με ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών μπορεί να βελτιώσει σημαντικά τη βραχυπρόθεσμη ευστάθεια τάσης γειτονικών πάρκων με ανεμογεννήτριες σταθερών στροφών (ή άλλων μηχανών επαγωγής). Η θετική επίδραση είναι πιο σημαντική όταν οι ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών ασκούν έλεγχο τάσης σε σχέση με τη λειτουργία σταθερού συντελεστή ισχύος. Σημειώνεται ότι σε αντίθεση με τις ανεμογεννήτριες σταθερών στροφών, για τις ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών που κάνουν ρύθμιση τάσης δεν υπάρχει όριο διείσδυσης λόγω ευστάθειας τάσης.
- Ο βρόχος ελέγχου αέργου ισχύος μπορεί να έχει μειωμένη ευστάθεια αν δεν ρυθμιστεί κατάλληλα, είτε σε περίπτωση ισχυρής είτε σε περίπτωση ασθενούς διασύνδεσης. Αυτό, όμως, δεν είναι πολύ πιθανό να εμφανιστεί στην πράξη για μεμονωμένα πάρκα, αφού μπορεί κανείς να υποθέσει ότι ο ελεγκτής αέργου ισχύος θα ρυθμιστεί σωστά κατά την κατασκευή του αιολικού πάρκου σε μια ορισμένη τοποθεσία. Παρόλ’ αυτά, καθώς αλλάζουν οι συνθήκες (π.χ. ισχυροποιείται το σύστημα, εγκαθίστανται νέα πάρκα, κλπ.), μπορεί να χρειάζεται εκ νέου ρύθμιση. Ταυτόχρονα, η ευαισθησία του βρόχου αυτού σημαίνει ότι η χρήση του μοντέλου με λεπτομερείς βρόχους ελέγχου χωρίς κατάλληλη ρύθμιση μπορεί να οδηγήσει σε λανθασμένα συμπεράσματα.
- Η επίδραση της αιολικής διείσδυσης με ΑΓΔΤ στις ταλαντώσεις διασύνδεσης ήταν γενικά θετική στα συστήματα που εξετάστηκαν, δηλαδή παρατηρήθηκε αύξηση της απόσβεσης. Η αύξηση της απόσβεσης οφείλεται είτε σε αλλαγή των συνθηκών της ισοδύναμης σύγχρονης γεννήτριας καθώς αυξάνεται η αιολική παραγωγή είτε στην επίδραση του βρόχου αέργου ισχύος των ΑΓΔΤ. Η αρνητική επίδραση που εμφανίστηκε σε περιπτώσεις με ρύθμιση της τάσης του αιολικού πάρκου, μπορεί να αποφευχθεί με κατάλληλη ρύθμιση του βρόχου ελέγχου αέργου ισχύος. Αν και η πιθανότητα μιας

Κεφάλαιο 9. Συμπεράσματα - Συμβολή - Προοπτικές

τέτοιας αλληλεπίδρασης είναι αρκετά μικρή σήμερα, μπορεί να αυξηθεί στο μέλλον εφόσον αυξηθεί σημαντικά η αιολική διείσδυση χωρίς κατάλληλες μελέτες σε επίπεδο συστήματος.

- Στην περίπτωση ρύθμισης του συντελεστή ισχύος, το μοντέλο σταθερής έγχυσης ισχύος (ισοδύναμο αν οι βρόχοι ελέγχου θεωρηθούν ακαριαίοι) έδωσε πιο συντηρητικά αποτελέσματα στα συστήματα που εξετάστηκαν ως προς την ευστάθεια μικρών διαταραχών.
- Η υποκατάσταση συμβατική παραγωγής από αιολική έχει ως αποτέλεσμα υψηλότερη συχνότητα ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων διασύνδεσης. Επομένως, καθώς το σύστημα γίνεται πιο ευέλικτο με την αύξηση της αιολικής διείσδυσης, η συχνότητα κάθε ταλάντωσης διασύνδεσης κυμαίνεται σε μεγαλύτερο εύρος. Η παράμετρος αυτή πρέπει να ληφθεί υπόψη π.χ. για τη ρύθμιση των σταθεροποιητών που διαθέτουν οι σύγχρονες γεννήτριες, καθώς και για τη διερεύνηση εισαγωγής απόσβεσης στις ταλαντώσεις διασύνδεσης από την πλευρά της αιολικής παραγωγής.
- Ο αιολικός σταθεροποιητής, που προτείνεται σε αυτή τη διατριβή, εισάγει σημαντική αύξηση στην απόσβεση των διασυνδεδειγμένων ταλαντώσεων, χωρίς ιδιαίτερες αρνητικές παρενέργειες. Είναι πολύ απλός στη σχεδίαση και έχει δομή αντίστοιχη με ρυθμιστές που προτείνονται για την εισαγωγή αδράνειας από τις ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών.

9.2 Συμβολή της διατριβής και προοπτικές

Η συμβολή της διατριβής συνοψίζεται στα εξής:

- Ανάπτυξη μοντέλων ανεμογεννητριών μεταβλητών στροφών για μελέτες ευστάθειας και εμβάθυνση στην ανάλυση δυναμικής συμπεριφοράς των ανεμογεννητριών στη χρονική κλίμακα ευστάθειας ΣΗΕ. Αναπτύχθηκαν μοντέλα της ασύγχρονης γεννήτριας διπλής τροφοδότησης (ΑΓΔΤ) με απλοποιημένους βρόχους ελέγχου (μεταβατικό και αλγεβρικό) και δύο μοντέλα από τη βιβλιογραφία: Ένα μοντέλο ΑΓΔΤ με λεπτομερείς βρόχους ελέγχου, όπως έχει δημοσιευτεί από συγκεκριμένο κατασκευαστή (GE), και ένα γενικευμένο μοντέλο για ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών που έχει δημοσιευτεί από τον διαχειριστή του Ισπανικού συστήματος μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας (REE).
- Επισκόπηση και σύγκριση εξισώσεων εγγερόμενης ενεργού και αέργου ισχύος από διάφορα μοντέλα ΑΓΔΤ, ώστε να εξακριβωθούν οι ομοιότητες και οι παραδοχές κάθε μοντέλου. Ανάδειξη και αξιολόγηση διαφορών στις μελέτες ευστάθειας λόγω των διαφορετικών παραδοχών.
- Διερεύνηση της λειτουργίας σε συνθήκες σφάλματος των ΑΓΔΤ με ενεργό διάταξη βραχυκύκλωσης δρομέα (active crowbar) και της παράστασής της σε μελέτες ευστάθειας ΣΗΕ. Προσομοιώσεις με το μεταβατικό μοντέλο και λεπτομερής σύγκριση των αποκρίσεων με τις αποκρίσεις άλλων μοντέλων ΑΓΔΤ.
- Ανάλυση μέσω προσομοιώσεων της επίδρασης των ανεμογεννητριών μεταβλητών στροφών στη βραχυπρόθεσμη ευστάθεια τάσης των μηχανών επαγωγής και εξακρίβωση της συμβολής τους.

- Θεωρητική ανάλυση ευστάθειας του βρόχου ελέγχου αέργου ισχύος του μοντέλου ΑΓΔΤ με διαδοχικούς ολοκληρωτές στο βρόχο ρύθμισης της αέργου ισχύος και διατύπωση γενικών κανόνων.
- Λεπτομερής ανάλυση ευστάθειας μικρών διαταραχών διασυνδεδεμένου ΣΗΕ με τοπική σύγχρονη γεννήτρια για διάφορες συνθήκες λειτουργίας και επίπεδα αιολικής διείδυσης με ΑΓΔΤ. Εξαγωγή γενικών συμπερασμάτων και ανάδειξη της συμβολής του βρόχου αέργου ισχύος των ανεμογεννητριών μεταβλητών στροφών στην απόσβεση των διασυνδεδεικτών ταλαντώσεων.
- Διερεύνηση επίδρασης υψηλής αιολικής διείδυσης στην ευστάθεια μικρών διαταραχών του ελληνικού διασυνδεδεμένου συστήματος και πρόταση ρυθμίσεων για την αποφυγή ταλαντώσεων στο βρόχο ρύθμισης αέργου ισχύος των ΑΓΔΤ.
- Εισαγωγή, ανάλυση και σχεδίαση αιολικού σταθεροποιητή για αύξηση της απόσβεσης των ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων διασύνδεσης, μέσω κατάλληλης περιοδικής μεταβολής (διαμόρφωσης) της ενεργού ισχύος των ανεμογεννητριών. Εφαρμογή του αιολικού σταθεροποιητή με ικανοποιητικά αποτελέσματα για αύξηση της ασθενούς απόσβεσης διασυνδεδεικτών ταλαντώσεων σε δύο δοκιμαστικά συστήματα.

Από τις προοπτικές για συνέχιση της έρευνας αυτής της διατριβής, σημειώνουμε:

- Ανάλυση και ανάπτυξη μοντέλων ανεμογεννητριών και αιολικών πάρκων για μελέτες ευστάθειας: ανάλυση μοντέλων κατασκευαστών ανεμογεννητριών, ανάλυση και ανάπτυξη γενικευμένων μοντέλων ανεμογεννητριών, ανάπτυξη μεθόδων αναγωγής αιολικών πάρκων σε ισοδύναμα συγκεντρωτικά (aggregate) μοντέλα.
- Παραπέρα διερεύνηση της συμβολής του βρόχου αέργου ισχύος των ανεμογεννητριών στην ευστάθεια των ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων.
- Παραπέρα ανάλυση ευστάθειας ΣΗΕ με υψηλή αιολική διείδυση (ευστάθεια γωνίας, συχνότητας, τάσης). Ειδικότερα για την ευστάθεια των ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων μεγάλων συστημάτων: συστηματική σχεδίαση αιολικού σταθεροποιητή ή/και ρύθμιση βρόχου αέργου ισχύος των ανεμογεννητριών σε συνδυασμό με σταθεροποιητές σύγχρονων γεννητριών.

Παράρτημα Α

Παράμετροι μοντέλων

Α.1 Παράμετροι μοντέλων ΑΓΔΤ με απλοποιημένους βρόχους ελέγχου

Τα χαρακτηριστικά της ανεμογεννήτριας με ΑΓΔΤ που εξετάζεται με τα μοντέλα με απλοποιημένους βρόχους ελέγχου δίνονται στους Πίνακες Α.1 και Α.2 και βασίζονται σε δεδομένα από την εργασία [SPK01a]. Δεδομένου ότι η γεννήτρια είναι τετραπολική και ο λόγος του

Πίνακας Α.1: Χαρακτηριστικά ανεμογεννήτριας με ΑΓΔΤ

Διάμετρος Δρομέα	75 m
Ονομαστική ταχύτητα ανέμου	12 m/s
Ταχύτητα περιστροφής	11-21 ΣΑΛ
Ονομαστική ταχύτητα περιστροφής	18 ΣΑΛ
Λόγος μειωτήρα στροφών	1:100
Αριθμός πόλων	4
Συνολική ροπή αδράνειας	$5,9 \cdot 10^6 \text{ kg m}^2$
Πυκνότητα αέρα ρ	1,225 kg/m ³
Ονομαστική Ισχύς P_{nom}	2 MW
Ονομαστική φαινόμενη ισχύς S_{nom}	2,25 MVA
Ανηγμένη σταθερά αδρανείας H (στα 2,25 MVA)	3,24 s

μειωτήρα στροφών είναι 1:100, προκύπτει ότι η σύγχρονη ταχύτητα ανηγμένη στην πλευρά της έλικας είναι 15 ΣΑΛ.

Πίνακας Α.2: Παράμετροι ΑΓΔΤ

Αριθμός πόλων	4
Αντίδραση μαγνήτισης X_M	3,0 αμ
Αντίδραση σκέδασης στάτη X_{ls}	0,10 αμ
Αντίδραση σκέδασης δρομέα X_{lr}	0,08 αμ
Ωμική αντίσταση στάτη R_s	0,01 αμ
Ωμική αντίσταση δρομέα R_r	0,01 αμ

Παράρτημα Α. Παράμετροι μοντέλων

Για τον αεροδυναμικό συντελεστή ισχύος, χρησιμοποιείται η αναλυτική σχέση:

$$C_p(\lambda, \beta) = 0,22 \left(\frac{116}{\lambda_i} - 0,4\beta - 5 \right) e^{\frac{-12,5}{\lambda_i}} \quad (\text{A.1})$$

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0,08\beta} - \frac{0,035}{\beta^3 + 1}$$

Η μέγιστη τιμή του C_p είναι $C_p^{max}=0,43821$ για $\beta = 0$ και $\lambda=6,325$. Δεδομένου ότι από τη σχέση (A.1) μπορεί να προκύψουν αρνητικές τιμές, όταν αυτή χρησιμοποιείται σε δυναμικό μοντέλο, τίθεται ο περιορισμός $C_p \geq 0$.

A.2 Παράμετροι μοντέλου ΑΓΔΤ με λεπτομερείς βρόχους ελέγχου

Στον Πίνακα A.3 δίνονται οι παράμετροι του μοντέλου ΑΓΔΤ με λεπτομερείς βρόχους ελέγχου για ανεμογεννήτρια 1,5 MW του κατασκευαστή GE [cig07, KSP06a]. Οι ανά μονάδα

Πίνακας A.3: Παράμετροι μοντέλου ΑΓΔΤ με λεπτομερείς βρόχους ελέγχου

S_{nom}	1,667 MVA	P_{nom}	1,5 MW	ω_b	100π
T_{con}	0,02 s	X_{eq}	0,8	K_{pll}	30
$\dot{\theta}_{max}$	0,1 ω_b	$\dot{\theta}_{min}$	-0,1 ω_b	T_w	5 s
K_{ptrq}	3,0	K_{itrq}	0,6	T_{pc}	0,05 s
K_{pp}	150	K_{ip}	25	K_{pc}	3,33
K_{ic}	33,3	P_{max}	1,12	P_{min}	0,1
β_{max}	27°	β_{min}	0°	$\dot{\beta}_{max}$	10°/s
$\dot{\beta}_{min}$	-10°/s	T_r	0,05 s	T_v	0,05 s
K_{pv}	18	K_{iv}	5	T_c	0,15 s
$T_p = T_{fp}$	0,3 s	Q_{max}	0,296	Q_{min}	-0,436
V_{max}	1,1	V_{min}	0,9	K_{Qi}	0,5
XI_{Qmax}	0,40	XI_{Qmin}	-0,50	K_{Vi}	40
H_g	0,962 s	H_t	3,395 s	D_{tg}	2,344
K_{tg}	1,387	p	4	ρ	1,225 kg/m ³
R	35,25 m	λόγος μειωτήρα	1:90		

τιμές είναι σε βάση S_{nom} . Σημειώνεται ότι η τιμή για το κέρδος K_{Qi} είναι αυτή που αναφέρεται στο [cig07] ότι χρησιμοποιείται στην Ευρώπη είτε σε έλεγχο συντελεστή ισχύος είτε σε έλεγχο τάσης (επιλογές PF και VC αντίστοιχα στο Σχ. 3.11), ενώ παράλληλα ασκείται έλεγχος της τερματικής τάσης (επιλογή (a) στο Σχ. 3.11). Αναφέρονται επίσης και άλλες τιμές που χρησιμοποιούνται στη Β. Αμερική (0,1 και 0,001). Επίσης αναφέρεται ότι τα συγκεκριμένα κέρδη του ρυθμιστή τάσης του αιολικού πάρκου (K_{pv} , K_{iv}) είναι γενικά ικανοποιητικά για σύνδεση σε ζυγό με ισχύ βραχυκύκλωσης πέντε φορές (ή παραπάνω) την ονομαστική ισχύ του πάρκου, αλλά ρυθμίζονται και ανάλογα με την εκάστοτε εγκατάσταση.

Στον Πίνακα A.4 δίνονται οι παράμετροι του μοντέλου από το [Kaz07] που διαφέρουν από αυτές του Πίνακα A.3 για την ίδια ανεμογεννήτρια της GE.

Πίνακας Α.4: Διαφορετικές παράμετροι μοντέλου ΑΓΔΤ με λεπτομερείς βρόχους ελέγχου (σε σχέση με τα δεδομένα του Πίνακα Α.3)

T_{fp}	0,05 s	H_g	0,619 s	H_t	4,331 s
D_{tg}	1,5 s	K_{tg}	0,882		

Α.3 Παράμετροι γενικευμένου μοντέλου ανεμογεννητριών μεταβλητών στροφών

Στον Πίνακα Α.5 δίνονται οι παράμετροι του γενικευμένου μοντέλου που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτή την εργασία.

Πίνακας Α.5: Παράμετροι γενικευμένου μοντέλου ανεμογεννητριών μεταβλητών στροφών (α.μ.)

T_c	20 ms	T_m	20 ms	X''	0,3
V_1	0,5	V_2	0,85	ΔV	0,07
A_1	0	A_2	0,8	R_1	0,9
R_2	0,6	I_{maxt}	1,0		

Παράρτημα Α. Παράμετροι μοντέλων

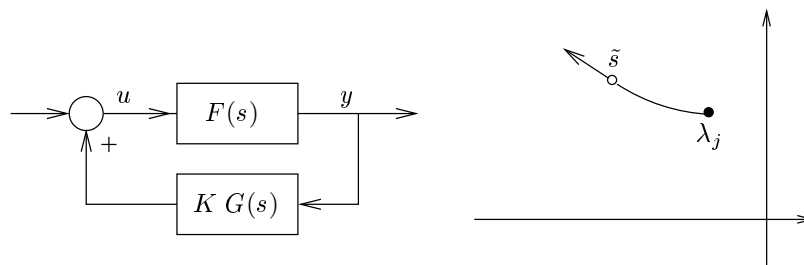
Παράρτημα Β

Σχεδίαση σταθεροποιητή με τη μέθοδο ολοκληρωτικών υπολοίπων

Σε αυτό το παράρτημα περιγράφεται η μέθοδος των ολοκληρωτικών υπολοίπων για τον σχεδιασμό ενός ρυθμιστή αντιστάθμισης φάσης [vCu02].

B.1 Ελεγχξιμότητα και παρατηρησιμότητα ρυθμού απόκρισης

Υποθέτουμε ότι ένας ρυθμιστής παρατηρεί την έξοδο y του συστήματος και μεταβάλλει την είσοδο u . Μετά από γραμμικοποίηση σε ένα σημείο ισορροπίας, το σύστημα (χωρίς το



Σχήμα B.1: Σύστημα με αντιστάθμιση και μέρος του τόπου ριζών.

ρυθμιστή) περιγράφεται από τις παρακάτω εξισώσεις:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{b}u \quad (\text{B.1})$$

$$y = \mathbf{c}^T \mathbf{x} + du \quad (\text{B.2})$$

Στη συνέχεια υποθέτουμε ότι όλες οι ιδιοτιμές λ_i του Ιακωβιανού πίνακα \mathbf{A} είναι διακριτές. Το αριστερό και δεξιό ιδιοδιάνυσμα του \mathbf{A} (\mathbf{v}_i και \mathbf{w}_i αντίστοιχα) ορίζονται ως εξής:

$$\begin{aligned} \mathbf{A}\mathbf{v}_i &= \lambda_i \mathbf{v}_i \\ \mathbf{w}_i^T \mathbf{A} &= \lambda_i \mathbf{w}_i^T \quad \text{ή} \quad \mathbf{A}^T \mathbf{w}_i = \lambda_i \mathbf{w}_i \end{aligned}$$

όπου όλα τα διανύσματα είναι πίνακες-στήλες. Επίσης σχηματίζουμε τους πίνακες:

$$\mathbf{V} = [\mathbf{v}_1 \quad \dots \quad \mathbf{v}_n] \quad \mathbf{W} = \begin{bmatrix} \mathbf{w}_1^T \\ \dots \\ \mathbf{w}_n^T \end{bmatrix}$$

Παράρτημα Β. Σχεδίαση σταθεροποιητή με τη μέθοδο ολοκληρωτικών υπολοίπων

Το ιδιοδιάνυσμα \mathbf{v}_i (\mathbf{w}_i) είναι ορθογώνιο ως προς τα \mathbf{w}_j (\mathbf{v}_j), των υπόλοιπων ιδιοτιμών

$$\mathbf{v}_i^T \mathbf{w}_j = 0 \quad \forall i \neq j$$

και μπορούμε να κανονικοποιήσουμε τα ιδιοδιανύσματα έτσι ώστε:

$$\mathbf{v}_i^T \mathbf{w}_i = 1 \quad \forall i$$

Μπορούμε επομένως να γράψουμε:

$$\mathbf{V}^{-1} = \mathbf{W} \quad \mathbf{W}^{-1} = \mathbf{V}$$

Οι πίνακες \mathbf{V} και \mathbf{W} διαγωνοποιούν τον \mathbf{A} :

$$\mathbf{V}^{-1} \mathbf{A} \mathbf{V} = \mathbf{W} \mathbf{A} \mathbf{V} = \text{diag}(\lambda_i) = \mathbf{\Lambda}$$

όπου $\mathbf{\Lambda} = \text{diag}(\lambda_i)$ είναι ο διαγώνιος πίνακας των ιδιοτιμών του συστήματος. Εκτελούμε την ακόλουθη αλλαγή μεταβλητών:

$$\mathbf{x}^* = \mathbf{W} \mathbf{x} \quad \text{with} \quad \mathbf{x}^*(0) = \mathbf{x}_o^* = \mathbf{W} \mathbf{x}_o$$

και αντικαθιστώντας το \mathbf{x} με $\mathbf{W}^{-1} \mathbf{x}^*$ στις εξισώσεις (B.1) και (B.2) έχουμε:

$$\begin{aligned} \mathbf{W}^{-1} \dot{\mathbf{x}}^* &= \mathbf{A} \mathbf{W}^{-1} \mathbf{x}^* + \mathbf{b} u \\ y &= \mathbf{c}^T \mathbf{W}^{-1} \mathbf{x}^* + d u \end{aligned}$$

και άρα:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}^* &= \mathbf{W} \mathbf{A} \mathbf{W}^{-1} \mathbf{x}^* + \mathbf{W} \mathbf{b} u = \mathbf{x}^* + \mathbf{W} \mathbf{b} u \\ y &= \mathbf{c}^T \mathbf{V} \mathbf{x}^* + d u \end{aligned}$$

Συμπεραίνουμε ότι:

- Ο i -οστός ρυθμός είναι ελέγξιμος μέσω του u αν και μόνο αν $(\mathbf{W} \mathbf{b})_i \neq 0 \Leftrightarrow \mathbf{w}_i^T \mathbf{b} \neq 0$
- Ο i -οστός ρυθμός είναι παρατηρήσιμος μέσω του y αν και μόνο αν $(\mathbf{c}^T \mathbf{V})_i \neq 0 \Leftrightarrow \mathbf{c}^T \mathbf{v}_i \neq 0$

B.2 Συνάρτηση μεταφοράς και ολοκληρωτικά υπόλοιπα

Η συνάρτηση μεταφοράς $F(s)$ μεταξύ της εισόδου u και της εξόδου y μπορεί να γραφτεί ως εξής:

$$\begin{aligned} F(s) &= \mathbf{c}^T \mathbf{V} (s \mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1} \mathbf{W} \mathbf{b} + d \\ &= \left[\mathbf{c}^T \mathbf{v}_1 \quad \dots \quad \mathbf{c}^T \mathbf{v}_n \right] \text{diag} \left(\frac{1}{s - \lambda_i} \right) \begin{bmatrix} \mathbf{w}_1^T \mathbf{b} \\ \vdots \\ \mathbf{w}_n^T \mathbf{b} \end{bmatrix} + d \\ &= \sum_i \frac{\mathbf{c}^T \mathbf{v}_i \mathbf{w}_i^T \mathbf{b}}{s - \lambda_i} + d \\ &= \sum_i \frac{R_i}{s - \lambda_i} + d \end{aligned} \tag{B.3}$$

R_i είναι το ολοκληρωτικό υπόλοιπο του i -οστού ρυθμού. Ένα ολοκληρωτικό υπόλοιπο με μικρή τιμή υποδεικνύει ότι είτε η ελεγχσιμότητα είτε η παρατηρησιμότητα του ρυθμού από τον ρυθμιστή είναι μικρή. Μαθηματικά, ένα ολοκληρωτικό υπόλοιπο έχει μικρή τιμή όταν ένα μηδενικό της συνάρτησης μεταφοράς $F(s)$ είναι κοντά στον πόλο του εξεταζόμενου ρυθμού. Πράγματι, από την (B.3) έχουμε:

$$R_i = \lim_{s \rightarrow \lambda_i} (s - \lambda_i) F(s)$$

και γράφοντας την $F(s)$ σε μορφή παραγόντων:

$$R_i = \lim_{s \rightarrow \lambda_i} (s - \lambda_i) \frac{\prod_{k=1}^m (s - z_k)}{\prod_{j=1}^n (s - \lambda_j)} = \lim_{s \rightarrow \lambda_i} \frac{\prod_{k=1}^m (s - z_k)}{\prod_{j \neq i}^n (s - \lambda_j)}$$

Η τιμή αυτής της έκφρασης μειώνεται καθώς ένα μηδενικό z_i πλησιάζει το λ_i .

B.3 Σχεδίαση σταθεροποιητή

Τέλος εξετάζουμε το σύστημα του Σχ. Β.1 σε κλειστό βρόχο. Στόχος είναι η επιλογή των K και $G(s)$ ώστε να σταθεροποιηθεί η ιδιοτιμή λ_c . Η συνάρτηση μεταφοράς κλειστού βρόχου του συστήματος του Σχ. Β.1 είναι:

$$\frac{F(s)}{1 - KF(s)G(s)}$$

Αν \tilde{s} είναι ένας πόλος του συστήματος κλειστού βρόχου, ικανοποιεί την παρακάτω σχέση:

$$1 - KF(\tilde{s})G(\tilde{s}) = 0$$

η οποία γράφεται ως εξής, αφού αντικαταστήσουμε την $F(s)$ με τη σχέση (B.3):

$$1 - K \left[\sum_i \frac{R_i}{\tilde{s} - \lambda_i} + d \right] G(\tilde{s}) = 0$$

και διαχωρίζοντας την ιδιοτιμή λ_c που θέλουμε να σταθεροποιήσουμε από τις υπόλοιπες:

$$1 - K \sum_{i \neq j} \frac{R_i}{\tilde{s} - \lambda_i} G(\tilde{s}) - K \frac{R_c}{\tilde{s} - \lambda_c} G(\tilde{s}) - KdG(\tilde{s}) = 0 \quad (\text{B.4})$$

Στον τόπο ριζών του συστήματος κλειστού βρόχου, υπάρχει ένας κλάδος που ξεκινά από το λ_c (αφού είναι ένας από τους πόλους του συστήματος ανοιχτού βρόχου). Έστω ένας πόλος \tilde{s} πάνω σε αυτό τον κλάδο. Καθώς το κέρδος K μειώνεται και πλησιάζει στο μηδέν, ο πόλος \tilde{s} τείνει στο λ_c ενώ ο δεύτερος και ο τέταρτος όρος της (B.4) μηδενίζονται. Επομένως μένει:

$$1 - R_c G(\lambda_c) \lim_{K \rightarrow 0} \frac{K}{\tilde{s} - \lambda_c} = 0 \Rightarrow$$

$$\lim_{K \rightarrow 0} \frac{\tilde{s} - \lambda_c}{K} = R_c G(\lambda_c)$$

Το αριστερό μέρος αυτής της εξίσωσης είναι ένας μιγαδικός αριθμός, ο οποίος αντιστοιχεί, στο μιγαδικό επίπεδο, σε ένα διάνυσμα με αρχή στο λ_c που εφάπτεται στον κλάδο του τόπου

Παράρτημα Β. Σχεδίαση σταθεροποιητή με τη μέθοδο ολοκληρωτικών υπολοίπων

ριζών. Άρα, για μέγιστη σταθεροποίηση, πρέπει αυτός ο κλάδος να ξεκινά από το λ_j με γωνία 180 μοιρών. Με άλλα λόγια, πρέπει να είναι:

$$R_j G(\lambda_j) = \text{αρνητικός πραγματικός}$$

Για να πετύχουμε αυτό το στόχο, πρέπει να επιλέξουμε την $G(s)$ έτσι ώστε:

$$\angle G(\lambda_j) = \pm 180^\circ - \angle R_j \quad (\text{B.5})$$

Σημειώνεται ότι αυτό το αποτέλεσμα ισχύει για μικρές μεταβολές του K : Καθώς το K αυξάνεται, ο κλάδος του τόπου ριζών μπορεί να στραφεί προς το δεξιό ημιεπίπεδο. Άλλωστε οι άλλες ιδιοτιμές (ικανοποιητικές αρχικά) μπορεί να αρχίσουν να κινούνται προς τα δεξιά. Αυτό συμβαίνει ιδιαίτερα όταν υπάρχουν μηδενικά της $F(s)$ κοντά στον φανταστικό άξονα, ή και στο δεξιό ημιεπίπεδο.

Στην πράξη, αφού επιλεγεί η $G(s)$ έτσι ώστε να ικανοποιείται η (B.5), σχεδιάζουμε τον τόπο ριζών του συστήματος κλειστού βρόχου αυξάνοντας σταδιακά το κέρδος K και επιλέγουμε την πιο ικανοποιητική τιμή του K .

Βιβλιογραφία

- [EMΠ07] Τελική έκθεση για το ερευνητικό έργο *Ανάλυση Ευστάθειας Διασυνδεδεμένου Συστήματος υπό μεγάλη Αιολική Διείσδυση και Αξιολόγηση Μεταβατικής Συμπεριφοράς Ανεμογεννητριών σε βυθίσεις τάσεως*. ΕΜΠ, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Η/Υ, Τομέας Ηλ. Ισχύος, Νοε. 2007.
- [EMΠ10] Τελική έκθεση για το ερευνητικό έργο *Ανάλυση μοντέλων δυναμικής συμπεριφοράς αιολικών πάρκων στο Ελληνικό Διασυνδεδεμένο Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας*. ΕΠΙΣΕΥ, Φεβ. 2010.
- [Μπε00] Γ. ΜΠΕΡΓΕΛΕΣ. *Ανεμοκινητήρες*. Εκδόσεις Συμείων, 2000.
- [Νάν09] Σ. Ι. ΝΑΝΟΥ. *Μοντέλο ανεμογεννήτριας με πλήρη μετατροπέα για μελέτες ευστάθειας*. Διπλωματική Εργασία. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Υπολογιστών, Ιουλ. 2009.
- [ΠαΜ97] Μ. ΠΑΠΑΔΟΠΟΥΛΟΣ. *Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας από Ανανεώσιμες Πηγές*. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Υπολογιστών, 1997.
- [ΠαΣ97] Σ. Α. ΠΑΠΑΘΑΝΑΣΙΟΥ. *Συμβολή στην Ανάλυση Ανεμογεννητριών Μεταβλητών Στροφών με Ασύγχρονη Γεννήτρια για την Επιλογή του Ηλεκτρικού Σχήματος*. Διδακτορική Διατριβή. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Υπολογιστών, Φεβ. 1997.
- [Ποτ06] Ε. Γ. ΠΟΤΑΜΙΑΝΑΚΗΣ. *Προσομοίωση και Γραμμικοποίηση Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας για την Ανάλυση Βραχυπρόθεσμης Ευστάθειας Τάσης*. Διδακτορική Διατριβή. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Υπολογιστών, Απρίλιος 2006.
- [Φαρ06] Ε. Μ. ΦΑΡΑΝΤΑΤΟΣ. *Μοντέλο Ανεμογεννήτριας Μεταβλητών Στροφών Με Σύγχρονη Μηχανή Για Μελέτες Ευστάθειας*. Διπλωματική Εργασία. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Υπολογιστών, Οκτ. 2006.
- [AJ08] C. ABBEY AND G. JOOS. A systematic approach to design and operation of a doubly fed induction generator. *Electric Power Systems Research*, vol. 78, no. 3, pp. 399–408, Mar. 2008.
- [AK02] V. ΑΚΗΜΑΤΟΒ AND H. ΚΝΟΥΣΕΝ. An aggregate model of a grid-connected, large-scale, offshore wind farm for power stability investigations - importance of windmill mechanical system. *Int. Journal of Electric Power & Energy Systems*, vol. 24, no. 9, pp. 709–717, Nov. 2002.

Βιβλιογραφία

- [Akh02] V. AKHMATOV. Modelling of variable-speed wind turbines with doubly-fed induction generators in short-term stability investigations. In *Proc. of the 3rd Int. Workshop on Transmission Networks for Offshore Wind Farms*, Stockholm, Sweden, Apr. 2002.
- [Akh03] V. AKHMATOV. *Analysis of Dynamic Behaviour of Electric Power Systems with Large Amount of Wind Power*. PhD thesis, Electric Power Engineering, Ørsted-DTU, Technical University of Denmark, 2003.
- [Akh06] V. AKHMATOV. Modelling and ride-through capability of variable speed wind turbines with permanent magnet generators. *Wind Energy*, vol. 9, no. 4, pp. 313–326, Jul./Aug. 2006.
- [AKN03] V. AKHMATOV, H. KNUDSEN, A. H. NIELSEN, J. K. PEDERSEN, AND N. K. POULSEN. Modelling and transient stability of large wind farms. *Int. Journal of Electric Power & Energy Systems*, vol. 25, no. 2, pp. 123–144, Feb. 2003.
- [APP00] D. C. ALIPRANTIS, S. A. PAPATHANASSIOU, M. P. PAPADOPOULOS, AND A. G. KLADAS. Modeling and control of a variable-speed wind turbine equipped with permanent magnet synchronous generator. In *Proc. of the ICEM'00*, Helsinki, Finland, Aug. 2000.
- [BBGL07] S. V. BOZHKO, R. BLASCO-GIMENEZ, R. LI, J. C. CLARE, AND G. M. ASHER. Control of offshore dfig-based wind farm grid with line-commutated hvdc connection. *IEEE Trans. Energy Conversion*, vol. 22, no. 1, pp. 71–78, Mar. 2007.
- [CHE04] P. CARTWRIGHT, L. HOLDSWORTH, J. B. EKANAYAKE, AND N. JENKINS. Co-ordinated voltage control strategy for a doubly-fed induction generator (dfig)-based wind farm. *IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib.*, vol. 151, no. 4, pp. 495–502, Jul. 2004.
- [cig07] Modeling and dynamic behavior of wind generation as it relates to power system control and dynamic performance. CIGRE Technical Brochure n.328, WG C4.601, P. Pourbeik (convener), Aug. 2007.
- [CSM07] Y. COUGHLAN, P. SMITH, A. MULLANE, AND M. O'MALLEY. Wind turbine modelling for power system stability analysis—a system operator perspective. *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 22, no. 3, pp. 929–936, Aug. 2007.
- [dAP07] R. G. DE ALMEIDA AND J. A. PEÇAS LOPES. Participation of doubly fed induction wind generators in system frequency regulation. *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 22, no. 3, pp. 944–950, Aug. 2007.
- [DC69] F. P. DEMELLO AND C. CONCORDIA. Concepts of synchronous machine stability as affected by excitation control. *IEEE Trans. Power Apparatus and Systems*, vol. 88, no. 4, pp. 316–329, Apr. 1969.
- [EFF09] S. ENGELHARDT, C. FELTES, J. FORTMANN, J. KRETSCHMANN, AND I. ERLICH. Reduced order model of wind turbines based on doubly-fed induction

- generators during voltage imbalances. In *Proc. of 8th International Workshop on Large-Scale Integration of Wind Power into Power Systems*, Bremen, Germany, Oct. 2009.
- [EG09] S. ENGELHARDT AND A. GENIUSZ. Measurements of doubly fed induction generator with optimised fault ride through performance. In *Proc. of EWEC*, Marseille, France, Mar. 2009.
- [EHW03] J. B. EKANAYAKE, L. HOLDSWORTH, X. WU, AND N. JENKINS. Dynamic modeling of doubly fed induction generator wind turbines. *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 18, no. 2, pp. 803–809, May 2003.
- [eir09] Grid code - version 3.3 (wind grid code only). EIRGRID, Jan. 2009.
- [EJ04] 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*, vol. 19, no. 4, pp. 800–802, Dec. 2004.
- [EKF07] I. ERLICH, J. KRETSCHMANN, J. FORTMANN, S. MUELLER-ENGELHARDT, AND H. WREDE. Modeling of wind turbines based on doubly-fed induction generators for power system stability studies. *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 22, no. 3, pp. 909–919, Aug. 2007.
- [elt00] Specifications for connecting wind farms to the transmission network, 2nd edition. elt1999-411a. ELTRA Transmission System Planning, Apr. 2000.
- [eon01] Supplementary grid connection regulations for wind energy converters. supplementary technical and organisational regulations for connecting wind energy converters to the grid within the e.on netz gmbh regulatory zone. E.ON Netz GmbH, 2001.
- [eon06] Grid code - high and extra high voltage. E.ON Netz GmbH, Apr. 2006.
- [ESE09] I. ERLICH, F. SHEWAREGA, S. ENGELHARDT, J. KRETSCHMANN, J. FORTMANN, AND F. KOCH. Effect of wind turbine output current during faults on grid voltage and the transient stability of wind parks. In *Proc. of IEEE PES Gen. Meeting*, Calgary, Canada, Jul. 2009.
- [esp06] P.O. 12.3. Requisitos de respuesta frente a huecos de tensión de las instalaciones eólicas. Resolución de 4 octubre de 2006, de la Secretaría General de Energía, España.
- [ESP05] C. EPING, J. STENZEL, M. PÖLLER, AND H. MÜLLER. Impact of large scale wind power on power system stability. In *Proc. of the 5th Int. Workshop on Large-Scale Integration of Wind Power and Transmission Networks for Offshore Wind Farms*, Glasgow, Scotland, Feb. 2005.
- [EWD06] I. ERLICH, W. WINTER, AND A. DITTRICH. Advanced grid requirements for the integration of wind turbines into the german transmission system. In *Proc. of IEEE PES Gen. Meeting*, Montreal, Canada, Jun. 2006.

Βιβλιογραφία

- [ewe05] Large-scale integration of wind energy in the european power supply. Technical report, European Wind Energy Association, 2005. http://www.ewea.org/fileadmin/ewea_documents/documents/publications/grid/051215_Grid_report.pdf.
- [ewi07] European wind integration study (ewis). towards a successful integration of wind power into european electricity grids. Technical report, European Transmission System Operators, 2007. <http://www.etso-net.org/upload/documents/Final-report-EWIS-phase-I-approved.pdf>.
- [FMB10] R. D. FERNÁNDEZ, R. J. MANTZ, AND P. E. BATTAIOTTO. Wind farm control for stabilisation of electrical networks based on passivity. *Int. Journal of Control*, vol. 83, no. 1, pp. 105–114, Jan. 2010.
- [FMO08] L. FAN, Z. MIAO, AND D. OSBORN. Impact of doubly fed wind turbine generation on inter-area oscillation damping. In *Proc. of IEEE PES Gen. Meeting*, Pittsburgh, USA, Jul. 2008.
- [FWK08] J. FORTMANN, M. WILCH, F. W. KOCH, AND I. ERLICH. A novel centralised wind farm controller utilising voltage control capability of wind turbines. In *Proc. of 16th PSCC*, Glasgow, Scotland, Jul. 2008.
- [gen06] *Generic Type-3 Wind Turbine-Generator Model for Grid Studies*. WECC Wind Generator Modeling Group, Sep. 2006.
- [gre08] Τροποποίηση Διατάξεων του Κώδικα Διαχείρισης του Συστήματος και Συναλλαγών Ηλεκτρικής Ενέργειας (Αποφ.Υπ.Ανάπτυξης Δ5/ΗΛ/Β/Φ.1.10/1086/10413/13-5-2008, ΦΕΚ Β/937/21-05-2008).
- [GVH09] D. GAUTAM, V. VITTAL, AND T. HARBOUR. Impact of increased penetration of dfig-based wind turbine generators on transient and small signal stability of power systems. *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 24, no. 3, pp. 1426–143, Aug. 2009.
- [HALJ06] F. M. HUGHES, O. ANAYA-LARA, N. JENKINS, AND G. STRBAC. A power system stabilizer for dfig-based wind generation. *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 21, no. 2, pp. 763–772, May 2006.
- [HDS90] J. HAUER, C. DEMEURE, AND L. SCHARF. Initial results in prony analysis of power system response signals. *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 5, no. 1, pp. 80–89, Feb. 1990.
- [HEJ04] 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*, vol. 7, no. 1, pp. 21–35, Jan./Mar. 2004.
- [HMS07] A. D. HANSEN, G. MICHALKE, P. SØRENSEN, T. LUND, AND F. IOV. Coordinated voltage control of dfig wind turbines in uninterrupted operation during grid faults. *Wind Energy*, vol. 10, no. 1, pp. 51–68, Jan./Feb. 2007.
- [HN82] E. N. HINRICHSEN AND P. J. NOLAN. Dynamics and stability of wind turbine generators. *IEEE Trans. Power Apparatus and Syst.*, vol. 101, no. 8, pp. 340–349, Aug. 1982.

- [HNU05] E. HAGSTRØM, I. NORHEIM, AND K. UHLEN. Large-scale wind power integration in norway and impact on damping in the nordic grid. *Wind Energy*, vol. 8, no. 3, pp. 375–384, Jul./Sep. 2005.
- [HSI06] A. D. HANSEN, P. SØRENSEN, F. IOV, AND F. BLAABJERG. Centralised power control of wind farm with doubly fed induction generator. *Renewable Energy*, vol. 31, no. 7, pp. 935–951, Jun. 2006.
- [iee02] Definition and classification of power system stability. IEEE/CIGRE Joint Task Force on Stability Terms and Definitions, Aug. 2002.
- [Jau07] C. JAUCH. Transient and dynamic control of a variable speed wind turbine with synchronous generator. *Wind Energy*, vol. 10, no. 3, pp. 247–269, May/Jun. 2007.
- [JSN07] C. JAUCH, P. SØRENSEN, I. NORHEIM, AND C. RASMUSSEN. Simulation of the impact of wind power on the transient fault behavior of the nordic power system. *Electric Power Systems Research*, vol. 77, no. 2, pp. 135–144, Feb. 2007.
- [Kaz07] Y. KAZACHKOV. *PSS/E Generic WT3 Wind Model*. Siemens-PTI, 2007.
- [KM07] M. KAYIKÇI AND J. V. MILANOVIĆ. Reactive power control strategies for dfig-based plants. *IEEE Trans. Energy Conversion*, vol. 22, no. 2, pp. 389–396, Jun. 2007.
- [KRK91] M. KLEIN, G. J. ROGERS, AND P. KUNDUR. A fundamental study of inter-area oscillations in power systems. *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 6, no. 3, pp. 914–921, Aug. 1991.
- [KS02] W. L. KLING AND J. G. SLOOTWEG. Wind turbines as power plants. In *Proc. of IEEE/CIGRE workshop on Wind Power and the Impacts on Power Systems*, Oslo, Norway, Jun. 2002.
- [KSP06a] Y. KAZACHKOV, S. STAPLETON, AND K. PATIL. *PSS/E Wind Modeling User Guide, Issue 2.0.0*. Siemens-PTI, 2006.
- [KSP06b] Y. KAZACHKOV, S. STAPLETON, AND K. PATIL. *PSS/E Wind Modeling User Guide, Issue 3.0.0*. Siemens-PTI, 2006.
- [Kun94] P. KUNDUR. *Power System Stability and Control*. McGraw-Hill, New York, 1994.
- [KWS00] P. C. KRAUSE, O. WASYNCZUK, AND S. D. SUDHOFF. *Analysis of Electric Machinery*. IEEE Press, New York, 2000.
- [KYH07] H.-S. KO, G.-G. YOON, AND W.-P. HONG. Active use of dfig-based variable-speed wind-turbine for voltage regulation at a remote location. *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 22, no. 4, pp. 1916–1925, Nov. 2007.
- [LC00] W. E. LEITHEAD AND B. CONNOR. Control of variable speed wind turbines: design task. *Int. Journal of Control*, vol. 73, no. 13, pp. 1189–1212, Sep. 2000.

Βιβλιογραφία

- [LG07] P. LEDESMA AND C. GALLARDO. Contribution of variable-speed wind farms to damping of power system oscillations. In *Proc. of IEEE PowerTech*, Lausanne, Switzerland, July 2007.
- [LML06] Y. LEI, A. MULLANE, G. LIGHTBODY, AND R. YACAMINI. Modeling of the wind turbine with a doubly fed induction generator for grid integration studies. *IEEE Trans. Energy Conversion*, vol. 21, no. 1, pp. 257–264, Mar. 2006.
- [LMO05] G. LALOR, A. MULLANE, AND M. O’MALLEY. Frequency control of wind turbine technologies. *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 20, no. 4, pp. 1905–1913, Nov. 2005.
- [LQH09] J. LIANG, W. QIAO, AND R. G. HARLEY. Direct transient control of wind turbine driven dfig for low voltage ride-through. In *Proc. of Power Electronics and Machines in Wind Applications, PEMWA*, Jun. 2009.
- [LSE07] T. LUND, P. SØRENSEN, AND J. EEK. Reactive power capability of a wind turbine with doubly fed induction generator. *Wind Energy*, vol. 10, no. 4, pp. 379–394, Jul./Aug. 2007.
- [LU05] P. LEDESMA AND J. USAOLA. Doubly fed induction generator model for transient stability analysis. *IEEE Trans. Energy Conversion*, vol. 20, no. 2, pp. 388–297, Jun. 2005.
- [MBP07] E. MULJADI, C. P. BUTTERFIELD, B. PARSONS, AND A. ELLIS. Effect of variable speed wind turbine generator on stability of a weak grid. *IEEE Trans. Energy Conversion*, vol. 22, no. 1, pp. 29–36, Mar. 2007.
- [MCR03] N. MITHULANANTHAN, C. A. CANIZARES, J. REEVE, AND G. J. ROGERS. Comparison of pss, svc, and statcom controllers for damping power system oscillations. *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 18, no. 2, pp. 786–792, May 2003.
- [MdH05] J. MORREN AND S. W. H. DE HAAN. Ridethrough of wind turbines with doubly-fed induction generator during a voltage dip. *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 20, no. 2, pp. 435–441, Jun. 2005.
- [ME08] E. MULJADI AND A. ELLIS. Validation of wind power plant dynamic models. In *Proc. of IEEE PES Gen. Meeting*, Jul. 2008.
- [MFO09] Z. MIAO, L. FAN, D. OSBORN, AND S. YUVARAJAN. Control of dfig-based wind generation to improve interarea oscillation damping. *IEEE Trans. Energy Conversion*, vol. 24, no. 2, pp. 415–422, Jun. 2009.
- [MH98] J. V. MILANOVIĆ AND I. A. HISKENS. Damping enhancement by robust tuning of svc controllers in the presence of load parameters uncertainty. *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 13, no. 4, pp. 1298–1303, Nov. 1998.
- [MHH07] G. MICHALKE, A. D. HANSEN, AND T. HARTKOPF. Control strategy of a variable speed wind turbine with multipole permanent magnet synchronous generator. In *Proc. of EWECE*, Milan, Italy, May 2007.

- [MJO09] C. MARTINEZ, G. JOOS, AND B. T. OOI. Power system stabilizers in variable speed wind farms. In *Proc. of IEEE PES Gen. Meeting*, Calgary, Canada, Jul. 2009.
- [MMV04] P. MIKSA, S. MIJAILOVIC, Z. VUJASINOVIC, J. KABOURIS, AND C. D. VOURNAS. Evaluation of transfer capabilities in the 2nd ucte zone. In *Proc. of 12th IEEE MELECON*, vol. 3, 881–884, Dubrovnik, May 2004.
- [MO05] A. MULLANE AND M. J. O'MALLEY. The inertial-response of induction-machine based wind-turbines. *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 20, no. 3, pp. 1496–1503, Aug. 2005.
- [MP07] A. MENDONÇA AND J. A. PEÇAS LOPES. Simultaneous tuning of power system stabilizers installed in dfig-based wind generation. In *Proc. of IEEE PowerTech*, Lausanne, Switzerland, Jul. 2007.
- [MPdH06] J. MORREN, J. PIERIK, AND S. W. DE HAAN. Inertial response of variable speed wind turbines. *Electric Power Systems Research*, vol. 76, no. 11, pp. 980–987, Jul. 2006.
- [MPE08] E. MULJADI, S. PASUPULATI, A. ELLIS, AND D. KOSTEROV. Method of equivalencing for a large wind power plant with multiple turbine representation. In *Proc. of IEEE PES Gen. Meeting*, Jul. 2008.
- [MSGP03] N. W. MILLER, J. J. SANCHEZ-GASCA, AND W. W. PRICE. Dynamic modeling of ge 1.5 and 3.6 mw wind turbine-generators for stability simulations. In *Proc. of IEEE PES Gen. Meeting*, Toronto, Canada, Jul. 2003.
- [MTK08] A. METSIOU, G. TSOURAKIS, M. KOTLIDA, AND C. D. VOURNAS. Effect of increased wind power penetration on interarea oscillations using eigenanalysis and prony techniques. In *Proc. of MedPower*, Thessaloniki, Greece, Nov. 2008.
- [MUR89] N. MOHAN, T. M. UNDELAND, AND W. P. ROBBINS. *Power Electronics: Converters, Applications and Design*. Wiley, 1989.
- [NAT07] J. N. NIELSEN, V. AKHMATOV, J. THISTED, E. GRØNDAHL, P. EGEDAL, M. N. FRYDENBJERG, AND K. H. JENSEN. Modelling and fault-ride-through tests of siemens wind power 3.6 mw variable-speed wind turbines. *Wind Engineering*, vol. 31, no. 6, pp. 441–452, Dec. 2007.
- [Nii04] J. NIIRANEN. Voltage dip ride through of a doubly fed generator equipped with an active crowbar. In *Proc. of Nordic Wind Power Conference*, Göteborg, Sweden, Mar. 2004.
- [NKV07] B. M. NOMIKOS, M. A. KOTLIDA, AND C. D. VOURNAS. Interarea oscillations and tie-line transients in the hellenic interconnected system. In *Proc. of IEEE PowerTech*, Lausanne, Switzerland, Jul. 2007.
- [NPZ04] M. V. A. NUNES, J. A. PEÇAS LOPES, H. H. ZÜRN, U. H. BEZERRA, AND R. G. ALMEIDA. Influence of the variable-speed wind generators in transient stability margin of the conventional generators integrated in electrical grids. *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 19, no. 4, pp. 692–701, Dec. 2004.

Βιβλιογραφία

- [Pöl03] M. A. PÖLLER. Doubly-fed induction machine models for stability assessment of wind farms. In *Proc. of IEEE PowerTech*, Bologna, Italy, Jun. 2003.
- [PA03] M. PÖLLER AND S. ACHILLES. 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, Oct. 2003.
- [PCA96] 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 Proc.-Electr. Power Appl.*, vol. 143, no. 3, pp. 231–241, May 1996.
- [PCE09] R. PIWKO, E. CAMM, A. ELLIS, E. MULJADI, R. ZAVADIL, R. WALLING, M. O’MALLEY, G. IRWIN, AND S. SAYLORS. A whirl of activity. *IEEE power & energy magazine*, 2009.
- [PP06] S. B. PAPAETHIMIOU AND S. A. PAPATHANASSIOU. Simulation and control of a variable speed wind turbine with synchronous generator. In *Proc. of ICEM*, Chania, Greece, Sep. 2006.
- [PSG06] W. W. PRICE AND J. J. SANCHEZ-GASCA. Simplified wind turbine generator aerodynamic models for transient stability studies. In *Proc. of IEEE PES PSCE*, Atlanta, USA, Nov. 2006.
- [pss05] *PSS/E 30.2 Program Operation Manual & Program Application Guide*. Siemens-PTI, 2005.
- [pss09] *PSS/E 31.1 Wind Model Library*. Siemens-PTI, 2009.
- [PTU02] M. P. PÁLSSON, T. TØFTEVAAG, K. UHLEN, AND J. O. G. TANDE. Large-scale wind power integration and voltage stability limits in regional networks. In *Proc. of IEEE PES Summer Meeting*, Jul. 2002.
- [PV03a] E. G. POTAMIANAKIS AND C. D. VOURNAS. Aggregation of wind farms in distribution networks. In *Proc. of EWEC*, Madrid, Spain, Jun. 2003.
- [PV03b] E. G. POTAMIANAKIS AND C. D. VOURNAS. Modeling and simulation of small hybrid power systems. In *Proc. of IEEE Power Tech*, Bologna, Italy, 2003.
- [RFB02] J. M. RODRÍGUEZ, J. L. FERNÁNDEZ, D. BEATO, R. ITURBE, J. USAOLA, P. LEDESMA, AND J. R. WILHELMI. Incidence on power system dynamics of high penetration of fixed speed and doubly fed wind energy systems: Study of the spanish case. *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 17, no. 4, pp. 1089–1095, Nov. 2002.
- [RLM08] F. RODRIGUEZ-BOBADA, P. LEDESMA, S. MARTÍNEZ, L. CORONADO, AND E. PRIETO. Simplified wind generator model for transmission system operator planning studies. In *Proc. of 7th Int. Workshop on Large Scale Integration of Wind Power and on Transmission Networks for Offshore Wind Farms*, Madrid, Spain, May 2008.

- [Rog00] G. ROGERS. *Power System Oscillations*. Kluwer, Norwell, MA, 2000.
- [SA93] T. SMED AND G. ANDERSSON. Utilising hvdc to damp power oscillations. *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 8, no. 2, pp. 620–627, Apr. 1993.
- [SdHP02] J. G. SLOOTWEG, S. W. H. DE HAAN, H. POLINDER, AND W. L. KLING. Aggregated modelling of wind parks with variable speed wind turbines in power system dynamics simulations. In *Proc. of 14th PSCC*, Sevilla, Spain, Jun. 2002.
- [SGMP04] J. J. SANCHEZ-GASCA, N. W. MILLER, AND W. W. PRICE. A modal analysis of a two-area system with significant wind power penetration. In *Proc. of IEEE Power Syst. Conf. and Exposition*, Oct. 2004.
- [SK03] J. G. SLOOTWEG AND W. L. KLING. The impact of large scale wind power generation on power system oscillations. *Electric Power Systems Research*, vol. 67, no. 1, pp. 9–20, October 2003.
- [SNA06] S. SEMAN, J. NIIRANEN, AND A. ARKKIO. Ride-through analysis of doubly fed induction wind-power generator under unsymmetrical network disturbance. *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 21, no. 4, pp. 1782–1789, Nov. 2006.
- [SPK01a] J. G. SLOOTWEG, H. POLINDER, AND W. L. KLING. Dynamic modelling of a wind turbine with doubly fed induction generator. In *Proc. of IEEE PES Summer Meeting*, Vancouver, Canada, Jun. 2001.
- [SPK01b] J. G. SLOOTWEG, H. POLINDER, AND W. L. KLING. Initialization of wind turbine models in power system dynamics simulations. In *Proc. of IEEE PowerTech Conf.*, 2001.
- [SPK03] J. G. SLOOTWEG, H. POLINDER, AND W. L. KLING. Representing wind turbine electrical generating systems in fundamental frequency simulations. *IEEE Trans. Energy Conversion*, vol. 18, no. 4, pp. 516–524, Dec. 2003.
- [TFV06] G. TSOURAKIS, E. FARANTATOS, AND C. D. VOURNAS. Generic model and control modes for a full-converter synchronous wind generator. In *Proc. of ICEM*, Chania, Greece, Sep. 2006.
- [TP09] M. TSILI AND S. PAPATHANASSIOU. A review of grid code technical requirements for wind farms. *IET Renewable Power Generation*, vol. 3, no. 3, pp. 308–3332, Sep. 2009.
- [Tso03] G. TSOURAKIS. Induction-machine based wind energy conversion systems: Modeling and applications. DEA (MSc) Thesis, Department of Electrical Engineering and Computer Science, University of Liege, Sep. 2003.
- [UT07a] N. R. ULLAH AND T. THIRINGER. Effect of operational modes of a wind farm on the transient stability of nearby generators and on power oscillations: a nordic grid study. *Wind Energy*, vol. 11, no. 1, pp. 63–73, Jan./Feb. 2007.
- [UT07b] N. R. ULLAH AND T. THIRINGER. Variable speed wind turbines for power system stability enhancement. *IEEE Trans. Energy Conversion*, vol. 22, no. 1, pp. 52–60, Mar. 2007.

Βιβλιογραφία

- [UTK07] N. R. ULLAH, T. THIRINGER, AND D. KARLSSON. Voltage and transient stability support by wind farms complying with the e.on netz grid code. *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 22, no. 4, pp. 1647–1656, Nov. 2007.
- [UTK08] N. R. ULLAH, T. THIRINGER, AND D. KARLSSON. Temporary primary frequency control support by variable speed wind turbines. *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 23, no. 2, pp. 601–612, May 2008.
- [vCu02] T. VAN CUTSEM. Systèmes électriques de puissance ii (aspects dynamiques). Notes du cours ELEC 047, Département d'Electricité, Electronique et Informatique, Université de Liège, Mar. 2002.
- [vCV98] T. VAN CUTSEM AND C. D. VOURNAS. *Voltage Stability of Electric Power Systems*. Kluwer, Norwell, MA, 1998.
- [VMP01] C. D. VOURNAS, G. A. MANOS, E. G. POTAMIANAKIS, AND J. KABOURIS. Voltage security assessment of greek interconnected power system with large wind penetration. In *Proc. of EWEC*, Copenhagen, Denmark, Jul. 2001.
- [VOK10] E. VITTAL, M. O'MALLEY, AND A. KEANE. A steady-state voltage stability analysis of power systems with high penetrations of wind. *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 25, no. 1, pp. 433–442, Feb. 2010.
- [VPM04] C. D. VOURNAS, E. G. POTAMIANAKIS, C. MOORS, AND T. VAN CUTSEM. An educational simulation tool for power system control and stability. *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 19, no. 1, pp. 48–55, Feb. 2004.
- [VSA09] P. VIJAYAN, S. SARKAR, AND V. AJJARAPU. A novel voltage stability assessment tool to incorporate wind variability. In *Proc. of IEEE PES General Meeting*, Calgary, Canada, Jul. 2009.
- [VSG08] D. VOWLES, C. SAMARASINGHE, M. GIBBARD, AND G. ANCELL. Effect of wind generation on small-signal stability - a new zealand example. In *Proc. of IEEE PES Gen. Meeting*, 2008.
- [WH07] S. WACHTEL AND S. HARTGE. Technical and economical benefits of wind energy converters with facts capabilities for power systems and the grid integration of wind power. In *Proc. of EWEC*, Milan, May 2007.
- [XRT06] D. XIANG, L. RAN, P. J. TAVNER, AND S. YANG. Control of a doubly fed induction generator in a wind turbine during grid fault ride-through. *IEEE Trans. Energy Conversion*, vol. 21, no. 3, pp. 652–662, Sep. 2006.

Δημοσιεύσεις

- G. TSOURAKIS, E. POTAMIANAKIS AND C. D. VOURNAS. Eliminating Voltage Instability Problems in Wind Parks by Using Doubly Fed Induction Generators. In *Proc. of the European Wind Energy Conference*, London, UK, Nov. 2004.
- Γ. ΤΣΟΥΡΑΚΗΣ, Ε. ΠΟΤΑΜΙΑΝΑΚΗΣ ΚΑΙ Κ. ΒΟΥΡΝΑΣ. Αντιμετώπιση προβλημάτων αστάθειας τάσης με χρήση ανεμογεννητριών διπλής τροφοδότησης. *Πρακτικά 3ου Εθνικού Συνεδρίου “Η Εφαρμογή των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας”*, Αθήνα, Φεβ. 2005.
- G. TSOURAKIS AND C. D. VOURNAS. Modelling, Control and Stability of Wind Turbines with Doubly Fed Induction Generator. In *Proc. of CIGRE Symposium “Power Systems with Dispersed Generation”*, Athens, Greece, Apr. 2005.
- G. TSOURAKIS AND C. D. VOURNAS. Simulation of Low Voltage Ride Through Capability of Wind Turbines with Doubly Fed Induction Generators. In *Proc. of the European Wind Energy Conference*, Athens, Greece, Mar. 2006.
- G. TSOURAKIS, E. FARANTATOS AND C. D. VOURNAS. Generic Model and Control Modes for a Full-Converter Synchronous Wind Generator. In *Proceedings of the XVII International Conference on Electrical Machines ICEM2006*, Chania, Greece, Sep. 2006.
- P. POURBEIK (CONVENER) ET AL. Modeling and dynamic behavior of wind generation as it relates to power system control and dynamic performance. Technical Brochure N. 328, C4.601 working group, Aug. 2007.
- A. METSIU, G. TSOURAKIS, M. KOTLIDA AND C. D. VOURNAS. Effect of Increased Wind Power Penetration on Interarea Oscillations Using Eigenanalysis and Prony Techniques. In *Proc. of Med Power*, Thessaloniki, Nov. 2008.
- G. TSOURAKIS, B. M. NOMIKOS AND C. D. VOURNAS. Effect of wind parks with doubly fed asynchronous generators on small-signal stability. *Electric Power Systems Research*, vol. 79, no. 1, pp. 190–200, Jan. 2009.
- G. TSOURAKIS, B. M. NOMIKOS AND C. D. VOURNAS. Contribution of doubly fed wind generators on oscillation damping. *IEEE Trans. Energy Conv.*, vol. 24, no. 3, pp. 783–791, Sep. 2009.
- Γ. ΤΣΟΥΡΑΚΗΣ, Κ. ΒΟΥΡΝΑΣ, Β. ΝΟΜΙΚΟΣ, Φ. ΚΑΝΕΛΛΟΣ, Ι. ΚΑΜΠΟΥΡΗΣ. Ανάλυση Δυναμικής Ευστάθειας του Ελληνικού Διασυνδεδεμένου Συστήματος σε Συνθήκες Μεγάλης Αιολικής Διείσδυσης. *Πρακτικά 4ου Εθνικού Συνεδρίου “Η Εφαρμογή των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας”*, Αθήνα, Μάιος 2010.

Δημοσιεύσεις

- G. TSOURAKIS AND C. D. VOURNAS. A Controller for Wind Generators to increase damping of power oscillations. In *Proceedings of the IEEE Int. Symp. Circuits and Systems*, Paris, France, May-Jun. 2010.

□