



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

**Προσομοίωση ανεμογεννήτριας μεταβλητών στροφών με
γεννήτρια επαγωγής διπλής τροφοδότησης και μελέτη
δυνατότητας παραμονής της σε λειτουργία κατά τη
διάρκεια βυθίσεων τάσης.**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ιωάννης Δ. Μάργαρης

Επιβλέπων: Νίκος Χατζηαργυρίου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2006



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

**Προσομοίωση ανεμογεννήτριας μεταβλητών στροφών με
γεννήτρια επαγωγής διπλής τροφοδότησης και μελέτη
δυνατότητας παραμονής της σε λειτουργία κατά τη
διάρκεια βυθίσεων τάσης.**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ιωάννης Δ. Μάργαρης

Επιβλέπων: Νίκος Χατζηαργυρίου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την

.....
Ν. Χατζηαργυρίου

.....
Κ. Βουρνάς

.....
Σ. Παπαθανασίου

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2006

.....

Ιωάννης Δ. Μάργαρης
Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός
και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright© Ιωάννης Δ. Μάργαρης 2006

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 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 το 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.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή κ. Ν.Χατζηαργυρίου για την εμπιστοσύνη που έχει δείξει στο πρόσωπο μου καθώς και για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ κατά τη διάρκεια της διπλωματικής μου με ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα. Η αίσθηση της συνεχούς επικοινωνίας και συνεργασίας ήταν καθοριστική για την πορεία της εργασίας.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον υποψήφιο διδάκτορα κ. Γ. Τσουράκη για την πολύτιμη συμβολή του και τις σημαντικές συμβουλές του που σε δύσκολες περιόδους με βοήθησαν να προχωρήσω την εργασία.

Τέλος, οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ στον υποψήφιο διδάκτορα και υπεύθυνο της διπλωματικής μου κ. Α. Τσουχνικά για τη συνεχή παρουσία του στην πορεία της έρευνας, την εμπιστοσύνη και την ενθάρρυνση με την οποία περιέβαλλε τη σχέση συνεργασίας και κυρίως για τις πολύτιμες επιστημονικές συμβουλές με τις οποίες έγινε δυνατή η ολοκλήρωση της εργασίας αυτής.

Ιωάννης Δ. Μάργαρης

Περίληψη

Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας είναι η προσομοίωση της λειτουργίας μιας ανεμογεννήτριας μεταβλητών στροφών με γεννήτρια επαγωγής διπλής τροφοδότησης και έλεγχο βήματος πτερυγίων, με τη βοήθεια του προγράμματος Matlab/Simulink© ed. 7.0.1. Παράλληλα μελετάται η συμπεριφορά της ανεμογεννήτριας κατά τη διάρκεια βραχυκυκλωμάτων με στόχο την αδιάκοπη παροχή ισχύος.

Αναλυτικότερα στο Κεφάλαιο1, γίνεται μια εισαγωγή στην έννοια των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας με εξειδίκευση στην αιολική ενέργεια. Παρουσιάζονται επίσης τυπικές διαμορφώσεις του ηλεκτρικού μέρους ανεμογεννητριών.

Στο Κεφάλαιο2, γίνεται μια παρουσίαση των διαφορετικών τρόπων μοντελοποίησης συστημάτων ανεμογεννητριών ανάλογα με το σκοπό της προσομοίωσης. Στη συνέχεια ακολουθεί αναλυτική περιγραφή του αεροδυναμικού υποσυστήματος με τις σχετικές καμπύλες ελέγχου. Γίνεται ανάλυση της μόνιμης κατάστασης της γεννήτριας επαγωγής διπλής τροφοδότησης. Επίσης δίνεται η βασική θεωρία των μηχανών επαγωγής με τις σχετικές εξισώσεις και ο μετασχηματισμός μεταξύ πλαισίων αναφοράς που εφαρμόζεται στην παρούσα εργασία.

Στο Κεφάλαιο3, παρουσιάζεται η στρατηγική ελέγχου της ανεμογεννήτριας και περιγράφεται αναλυτικά ο διανυσματικός έλεγχος που εφαρμόζεται.

Στο Κεφάλαιο 4, δίνονται οι διαφορετικοί τρόποι αρχικοποίησης του μοντέλου με έμφαση στον τρόπο που επιλέχθηκε.

Στο Κεφάλαιο 5, γίνεται μελέτη της επίδρασης των ανεμογεννητριών στην ευστάθεια του συστήματος καθώς και ανάλυση της απόκρισης των ανεμογεννητριών σε διαταραχές.

Στο Κεφάλαιο 6, μελετάται η παραμονή της Α/Γ σε λειτουργία κατά τη διάρκεια βύθισης της τάσης και αναλύονται κάποιοι τρόποι υλοποίησης της συγκεκριμένης ιδέας γύρω από τον τρόπο λειτουργίας των Α/Γ κατά τη διάρκεια βραχυκυκλώματος.

Στο Κεφάλαιο 7, δίνονται συνοψισμένα αποτελέσματα από δοκιμές που έγιναν με το μοντέλο που αναπτύχθηκε τόσο ως προς την απόκριση του συστήματος σε αλλαγές του ανέμου, όσο και ως προς την απόκριση σε συνθήκες βύθισης τάσης με παραμετρική μελέτη.

Τέλος, στο Κεφάλαιο 8, γίνονται σχόλια για τη λειτουργία και απόκριση του συστήματος που αναπτύχθηκε. Δίνονται, επίσης, κάποιες προτάσεις για τη συνέχιση της παρούσας εργασίας.

Λέξεις Κλειδιά

Ανεμογεννήτρια μεταβλητών στροφών, γεννήτρια επαγωγής διπλής τροφοδότησης, ελεγκτής γωνίας βήματος πτερυγίων, Matlab/Simulink© ed. 7.0.1, μετατροπέας, παραμονή σε λειτουργία κατά τη διάρκεια βύθισης τάσης, ενεργό κύκλωμα βραχυκύκλωσης δρομέα.

Abstract

The subject of this Diploma Thesis is the analysis and simulation of a variable speed, pitch controlled wind turbine equipped with a doubly fed induction generator using the software Matlab/Simulink©, ed. 7.0.1. Additionally, the voltage dip ride through of this wind turbine is studied with different alternatives.

In more detail, Chapter 1 is an introduction to renewable energy sources focusing on wind energy. Also, the basic electrical schemes of wind turbines used nowadays are described.

In Chapter 2, the different kinds of a wind turbine model, depending on the target of the research are presented. Detailed mathematical model of the aerodynamic system is described and analysis of the steady state operational characteristics of the doubly fed induction generator is included. In the end of the chapter, basic theory for the reference frame used in the developed model is discussed.

In Chapter 3, the control strategy and the vector control implied in the model is analyzed.

In Chapter 4, different methods of initialization are presented focusing on the method used in this thesis.

In Chapter 5, the impact of wind turbines and wind parks on transient stability is discussed.

In Chapter 6, the ride through capability of wind turbines is defined and several methods of implementation are presented.

In Chapter 7, the results from the simulations of the developed model under different wind conditions and voltage dips are given.

Finally, in Chapter 8, general comments on the operation and the results of the developed system are made. Some ideas are also given for the continuation of this Thesis.

Key Words

Variable speed wind turbine, doubly fed induction generator, pitch control, converter, Low Voltage Ride Through, active crowbar.

Πίνακας Περιεχομένων

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ	11
1.1 Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.	11
1.2 Εξέλιξη της παραγωγής ηλεκτρισμού από Αιολική ενέργεια.	17
1.3 Ανάπτυξη και στόχοι του τομέα αιολικής ενέργειας	23
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ	31
2.1 Κατηγορίες μοντέλων ανεμογεννητριών.	31
2.2 Αεροδυναμικό μέρος.	40
2.3 Ανεμογεννήτρια μεταβλητών στροφών με γεννήτρια επαγωγής διπλής τροφοδότησης.	51
2.4 Μετασχηματισμός εξισώσεων και θεωρία συστημάτων αναφοράς.	61
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΕΛΕΓΧΟΣ ΚΑΙ ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ	85
3.1 Εισαγωγή.	85
3.2 Μοντέλο δρομέα.	88
3.3 Μοντέλο γεννήτριας.	93
3.4 Μοντέλο του μετατροπέα.	93
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΑΡΧΙΚΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ	101
4.1 Εισαγωγή.	101
4.2 Ενσωμάτωση μοντέλου ανέμου ή μετρούμενες ακολουθίες ανέμου. ...	101
4.3 Μέθοδοι αρχικοποίησης.	102
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ Α/Γ ΚΑΙ ΤΩΝ Α/Π ΣΤΗ ΜΕΤΑΒΑΤΙΚΗ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ	109
5.1 Εισαγωγή.	109
5.2 Ορισμός ευστάθειας ΣΗΕ	109
5.3 Απόκριση των Α/Γ σε διαταραχές.	111
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΠΑΡΑΜΟΝΗ ΤΗΣ Α/Γ ΣΕ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΒΥΘΙΣΗΣ ΤΑΣΕΩΣ	117
6.1 Εισαγωγή.	117
6.2 Παραμονή της Α/Γ σε λειτουργία κατά τη διάρκεια βύθισης τάσεως σε σύστημα με γεννήτρια επαγωγής διπλής τροφοδότησης.	121
6.3 Λειτουργία LVRT σε άλλου είδους τοπολογίες.	128
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΤΗΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ ΕΠΑΓΩΓΗΣ ΔΙΠΛΗΣ ΤΡΟΦΟΔΟΤΗΣΗΣ	133
7.1 Εισαγωγή.	133
7.2 Απόκριση συστήματος σε μεταβολές του ανέμου.	134
7.3 Απόκριση του συστήματος σε συνθήκες βύθισης τάσης.	144
7.4 Απόκριση του συστήματος σε βύθιση της τάσης –σύγκριση αποτελεσμάτων με χρήση μοντέλου 5 ^{ης} και μοντέλου 3 ^{ης} τάξης.	169
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: ΓΕΝΙΚΑ ΣΧΟΛΙΑ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	179
ΑΝΑΦΟΡΕΣ	183

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

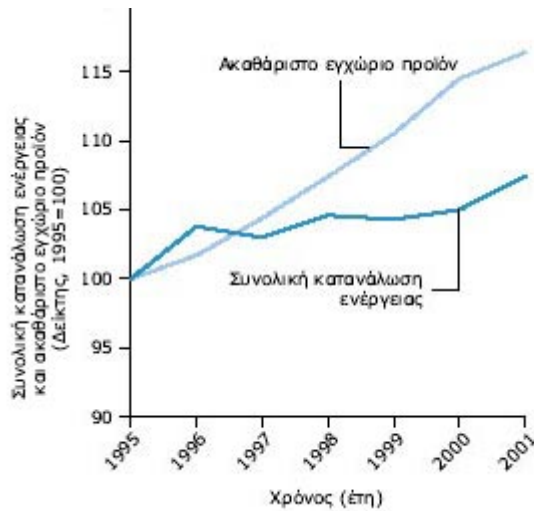
Εισαγωγή

1.1. Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας

1.1.1. Προμήθεια Ενέργειας

Η επάρκεια σε ηλεκτρική ενέργεια αποτελεί πλέον προαπαιτούμενο για τη λειτουργία των σύγχρονων κοινωνιών. Χρησιμοποιείται για να προμηθεύσει την ενέργεια που απαιτείται για τη λειτουργία πληροφοριακών και τηλεπικοινωνιακών τεχνολογιών, μεταφορές, φωτισμό, επεξεργασία φαγητών και αποθήκευση καθώς και μια μεγάλη ποικιλία από βιομηχανικές διαδικασίες, τομείς δηλαδή που αφορούν μια σύγχρονη κοινωνία. Ακριβώς επειδή λοιπόν η ενέργεια για πολλές από τις τεχνολογίες, συστήματα και δυνατότητες που συναπαρτίζουν τον ανεπτυγμένο κόσμο παρέχεται σαν ηλεκτρική ενέργεια μπορεί να προκύψει στο σημείο αυτό το σημείο σύνδεσης ανάμεσα στην κατανάλωση ενέργειας και στις ποικίλες διαδικασίες μιας κοινωνίας στις μέρες μας.

Έρευνα έχει δείξει ότι όντως υπάρχει σαφής σχέση ανάμεσα στην κατανάλωση της ενέργειας και την οικονομική ανάπτυξη, η οποία εκφράζεται σε δείκτες όπως η διάρκεια ζωής. Στο Σχήμα 1.1 η οικονομική ανάπτυξη, μετρημένη σε Ακαθάριστο Εγχώριο Προϊόν (ΑΕΠ), και η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα παρουσιάζονται γραφικά.



Σχήμα 1.1. Εξέλιξη ΑΕΠ και κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα. (Πηγή: www.energeia.gr)

Η σχέση ανάμεσα στην οικονομική και κοινωνική ανάπτυξη και την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας είναι αμφίδρομη. Η επάρκεια σε ηλεκτρισμό σαφώς τροφοδοτεί τη βιομηχανοποίηση καθώς αποτελεί ένα μέσο για την αντικατάσταση της ανθρώπινης δύναμης από άλλες μορφές ενέργειας, οι οποίες μετατρέπονται σε ηλεκτρική για μεταφορά, διανομή και κατανάλωση. Επιπλέον, παρέχεται η δυνατότητα για εφαρμογή σύγχρονων τεχνολογιών, όπως πληροφορική και τηλεπικοινωνιακές τεχνολογίες (ICT). Όλα αυτά λοιπόν οδηγούν σε μεγάλες βελτιώσεις στην παραγωγικότητα και άρα σε μία οικονομική ανάπτυξη. Αυτή η οικονομική ανάπτυξη με τη σειρά της δίνει τη δυνατότητα στους ανθρώπους να πληρώνουν το λογαριασμό ηλεκτρικού ρεύματος και να αγοράζουν αγαθά που καταναλώνουν ηλεκτρισμό, όπως τηλεόραση, υπολογιστές και ψυγεία, τα οποία προκαλούν αυξημένη κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας. Επομένως ο ηλεκτρισμός είναι μια αιτία αλλά παράλληλα και μια συνέπεια της οικονομικής και κοινωνικής ανάπτυξης.

Ο ηλεκτρισμός στην ουσία λοιπόν λειτουργεί σαν μεταφορέας ενέργειας. Παράγεται σε σταθμούς παραγωγής, στους οποίους μια πρωταρχική μορφή ενέργειας μετατρέπεται σε ηλεκτρική. Παραδείγματα τέτοιων πρωταρχικών μορφών ενέργειας είναι ορυκτά καύσιμα, τρεχούμενα νερά και πυρηνική ενέργεια. Ένα σημαντικό μειονέκτημα της παραγωγής ηλεκτρισμού από ορυκτά καύσιμα και την πυρηνική ενέργεια, που προς το παρόν παραμένουν σε παγκόσμιο επίπεδο οι πιο διαδεδομένες

πρωταρχικές μορφές ενέργειας, είναι τα αντίστροφα περιβαλλοντικά αποτελέσματα. Το φαινόμενο του θερμοκηπίου που προκαλείται από την αύξηση του CO₂ στην ατμόσφαιρα της γης και τα πυρηνικά απόβλητα αποτελούν προβλήματα που απασχολούν την ανθρωπότητα σήμερα. Επιπρόσθετα, τα αποθέματα σε ορυκτά καύσιμα και ουράνιο έχουν αρχίσει να εξαντλούνται. Οι χώρες οι οποίες δεν μπορούν να είναι επαρκείς σε αυτές τις πρωταρχικές πηγές ενέργειας είναι καταδικασμένες σε εξάρτηση από άλλες για τη προμήθεια των πόρων αυτών. Είναι προφανές ότι χώρες με μεγάλα αποθέματα στις πρωταρχικές μορφές ενέργειας έχουν συνήθως την τάση να χρησιμοποιούν αυτό ως μέσο για πολιτικό και οικονομικό έλεγχο των υπολοίπων. Παράδειγμα τέτοιων συνεπειών είναι η πολιτική και οικονομική κατάσταση στη Μέση Ανατολή.

Μεγάλοι υδροηλεκτρικοί σταθμοί που μετατρέπουν την δυναμική ενέργεια τρεχούμενο νερού σε ηλεκτρική αποτελούν σημαντική εναλλακτική σε σχέση με θερμικού και πυρηνικούς σταθμούς, από τη στιγμή που δεν έχουν τα μειονεκτήματα των πεπερασμένων αποθεμάτων, των εκπομπών ή των ραδιενεργών αποβλήτων. Παρ' όλα αυτά, είναι δύσκολο να ικανοποιηθεί η ζήτηση σε παγκόσμιο επίπεδο με μεγάλους ΥΗΣ. Στις ανεπτυγμένες χώρες ως επί το πλείστον το υδραυλικό δυναμικό ήδη χρησιμοποιείται. Προκειμένου να αυξηθεί το μερίδιο των υδροηλεκτρικών σταθμών στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, θα έπρεπε να κατασκευαστούν ΥΗΣ σε απόμακρες τοποθεσίες, οι οποίες σε πολλές περιπτώσεις είναι δύσκολο να προσεγγιστούν.

Επιπλέον η μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται εξαιρετικά δύσκολη, τόσο γιατί το κόστος και η πολυπλοκότητα του συστήματος μεταφοράς αυξάνεται χάρη στις μεγάλες αποστάσεις αλλά και γιατί σε κάποιες περιπτώσεις, πρέπει να διασχιστούν πολιτικά ασταθείς περιοχές με ζωντανό τον κίνδυνο του σαμποτάζ των γραμμών μεταφοράς. Τέλος, η κατασκευή φραγμάτων και τεχνητών λιμνών για τους ΥΗΣ πολλές φορές προκαλούν την καταστροφή των τοπικών οικοσυστημάτων ενώ μπορεί να οδηγήσουν σε αναγκαστική μετακίνηση κατοίκων. Επομένως τα μεγάλα υδροηλεκτρικά αν και υπερέχουν των θερμικών και πυρηνικών σταθμών ως προς το θέμα των εκπομπών και των αποθεμάτων, εν τούτοις έχουν άλλου είδους επιπλοκές ακόμη και στον περιβαλλοντικό τομέα.

Υπάρχουν λοιπόν άλλες τεχνολογίες παραγωγής ηλεκτρισμού οι οποίες χρησιμοποιούν ανανεώσιμες πρωτογενείς πηγές ενέργειας και οι οποίες γενικά δεν εμφανίζουν τα μειονεκτήματα της πυρηνικής και της θερμικής παραγωγής. Παραδείγματα αυτών είναι η ενέργεια από κύματα και παλίρροιες, η ηλιακή ενέργεια και η αιολική ενέργεια. Μέχρι σήμερα η συμβολή των πηγών αυτών στην κάλυψη της ζήτησης είναι γενικά αρκετά μετριοπαθής. Αυτό οφείλεται σε δύο βασικά μειονεκτήματα αυτών των τεχνολογιών. Το πρώτο είναι ότι ο ηλεκτρισμός που παράγουν έχει την τάση να είναι πιο ακριβός σε σύγκριση με τους συμβατικούς τρόπους παραγωγής που αναφέρθηκαν παραπάνω. Το δεύτερο είναι ότι σε πολλές περιπτώσεις, είναι πολύ λιγότερο ελέγξιμη η παραγωγή από ανανεώσιμες πηγές σε αντίθεση με τους κλασικούς τρόπους.

1.1.2. Προωθώντας τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

Όπως προκύπτει από τα παραπάνω, τα κύρια πλεονεκτήματα των συμβατικών μεθόδων παραγωγής (θερμικοί, πυρηνικοί και υδροηλεκτρικοί σταθμοί) είναι η τιμή του παραγόμενου ηλεκτρισμού, η ελεγχσιμότητα και η ευελιξία της εξόδου τους. Από την άλλη πλευρά, τα κύρια πλεονεκτήματα των ανανεώσιμων μορφών ενέργειας είναι η χρήση μιας απεριόριστης πρωτογενούς πηγής ενέργειας (όπως ηλιακή ακτινοβολία, άνεμος ή βιομάζα) και βέβαια οι σαφώς μικρότερες περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις. Παγκοσμίως, πολλές κυβερνήσεις έχουν την τάση να αξιολογούν καλύτερα τα πλεονεκτήματα των ανανεώσιμων μορφών ενέργειας. Έτσι υποστηρίζουν την αύξηση του μεριδίου των τελευταίων στην κάλυψη της ζήτησης με διάφορους τρόπους, οι οποίοι κυρίως αποσκοπούν στη μείωση και των δύο βασικών μειονεκτημάτων που προαναφέραμε-κόστος και μειωμένος έλεγχος.

Το μειονέκτημα του κόστους τις περισσότερες φορές μειώνεται με κάποια μορφή κρατικής επιχορήγησης. Ένα παράδειγμα είναι η πίεση που ασκείται στις ηλεκτρικές εταιρείες να αγοράζουν από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας σε μία εγγυημένη τιμή που δεν βασίζεται στην πραγματική τιμή της ενέργειας, αλλά η οποία υπολογίζεται έτσι ώστε η παραγωγική διαδικασία του σταθμού ανανεώσιμης πηγής ενέργειας να είναι κερδοφόρα.

Διακανονισμοί σαν και αυτόν θα οδηγήσουν σε μία γενική αύξηση της τιμής του ηλεκτρισμού, σαν αποτέλεσμα του οποίου όλοι οι καταναλωτές πληρώνουν το πρόσθετο κόστος του ηλεκτρισμού που παράγεται από τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, εκτός εάν οι ηλεκτρικές εταιρείες είναι σε θέση να πουλήσουν αυτήν την ενέργεια σαν πράσινη ενέργεια σε μια έξτρα τιμή.

Άλλο παράδειγμα είναι οι επιχορηγήσεις που δίνονται στους παραγωγούς, οι οποίες διαμοιράζουν την επιβάρυνση που σχετίζεται με τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας σε όλους τους φορολογούμενους. Μια ακόμη προσέγγιση του προβλήματος αυτού είναι μέσω της αυξημένης φορολογίας των συμβατικών μεθόδων παραγωγής ηλεκτρισμού, αυξάνοντας έτσι το κόστος παραγωγής τους, και άρα κάνοντας πιο εύκολο το πεδίο ανταγωνισμού για τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

Το μειονέκτημα της μη ελεγχιμότητας αντιμετωπίζεται με την εξαίρεση αυτών των σταθμών παραγωγής από τη διαδικασία ελέγχου της ισορροπίας του συστήματος. Όλοι οι παραγωγοί που θέλουν να συνδεθούν στο δίκτυο πρέπει να πληρούν τα λεγόμενα *κριτήρια σύνδεσης* της εταιρείας που ελέγχει το δίκτυο. Αυτά περιλαμβάνουν απαιτήσεις σχετικά με την αλληλεπίδραση μεταξύ γεννήτριας και δικτύου. Για να εξασφαλίζεται η ισορροπία μεταξύ παραγωγής και ζήτησης, που είναι απαραίτητη για την ισορροπία του συστήματος, μεταξύ άλλων στα παραπάνω κριτήρια περιλαμβάνεται και η δυνατότητα ελέγχου των γεννητριών. Παρ' όλα αυτά, κάποιες φορές οι ανανεώσιμες πηγές εξαιρούνται από αυτόν τον περιορισμό που έχει να κάνει με τον έλεγχο της παραγόμενης ενέργειας.

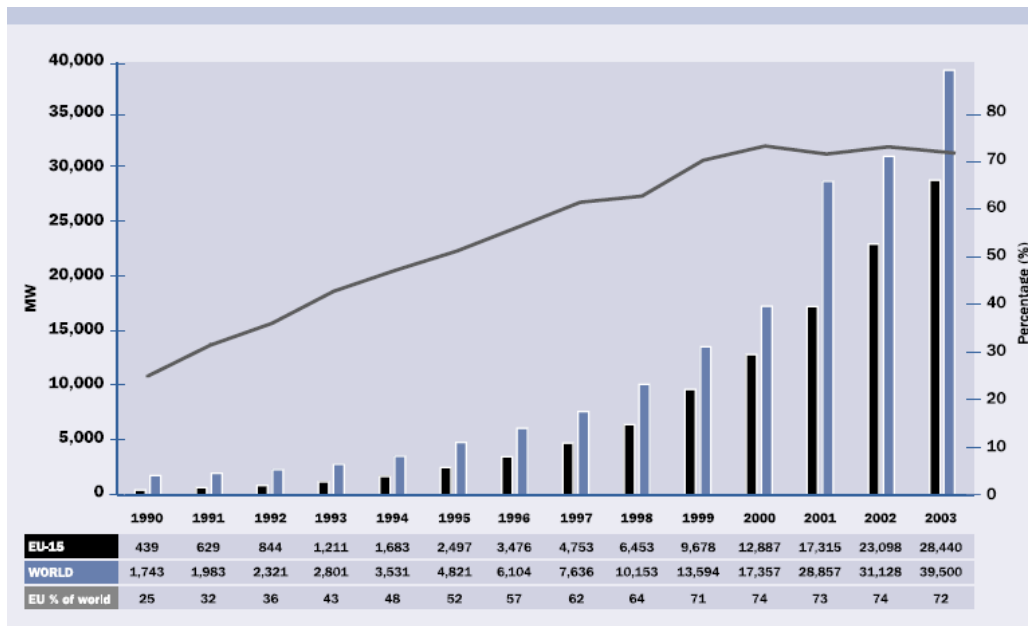
Με αυτόν τον τρόπο, το μειονέκτημα της μη ελεγχιμότητας ακυρώνεται, τουλάχιστον από την πλευρά του παραγωγού, ο οποίος δεν είναι υποχρεωμένος να λάβει πρόσθετα μέτρα για τον έλεγχο της παραγωγής προκειμένου να συνδεθεί στο δίκτυο, π.χ. μέσω συστήματος αποθήκευσης ή εφεδρικής γεννήτριας. Στην πραγματικότητα, το πρόβλημα μεταφέρεται στους διαχειριστές των ελεγχόμενων μονάδων, καθώς η τεχνική προαπαιτήση για ισορροπία μεταξύ ζήτησης και παραγωγής δεν επηρεάζεται από την αλλαγή των απαιτήσεων σύνδεσης.

1.1.3. Η Αιολική Ενέργεια σαν Ανανεώσιμη Πηγή

Μια τεχνολογία για την παραγωγή ηλεκτρισμού είναι η χρήση ανεμογεννητριών που μετατρέπουν την ενέργεια που μεταφέρει ο άνεμος σε ηλεκτρισμό. Ο άνεμος είναι μια ανεξάντλητη πρωτογενής πηγή ενέργειας ενώ επίσης άλλες περιβαλλοντικές επιδράσεις είναι περιορισμένες. Αν και επηρεάζουν το περιβάλλον οπτικά και επιφέρουν κάποιο θόρυβο, οι συνέπειες αυτών είναι μικρές και τα οικοσυστήματα φαίνονται να επηρεάζονται σε πολύ μικρό βαθμό. Επιπλέον, από τη στιγμή που αφαιρούνται, ο θόρυβος και η οπτική τους επιβάρυνση εξαφανίζονται άμεσα και δεν προκύπτουν μόνιμες περιβαλλοντικές αλλαγές.

Πολλά από τα στοιχεία της ανεμογεννήτριας μπορούν να ανακυκλωθούν. Το βασικό περιβαλλοντικό πρόβλημα που συνδέεται με την αιολική ενέργεια είναι τα πτερύγια της έλικας, τα οποία προς στιγμήν δεν μπορούν να ανακυκλωθούν αλλά χρησιμοποιούνται σε εσωτερικές εφαρμογές, όπως πεζοδρόμια δρόμων, μετά την αποσύνδεση και αποσυναρμολόγηση της ανεμογεννήτριας.

Όταν συγκρίνεται με άλλες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπως τα φωτοβολταϊκά ή η αιολική ενέργεια είναι μια σχετικά φθηνή πηγή ενέργειας. Για το λόγο αυτό, η προώθηση από πολλές κυβερνήσεις των ανανεώσιμων μορφών ενέργειας οδήγησε σε μεγάλη αύξηση την παραγωγή από αιολική ενέργεια. Παραδείγματα τέτοιων χωρών είναι η Γερμανία, η Δανία και η Ισπανία. Το Σχήμα 1.2 δείχνει την αύξηση της αιολικής ενέργειας κατά τη διάρκεια της τελευταίας δεκαετίας στις Η.Π.Α, την Ευρώπη και τον κόσμο. Όπως βλέπουμε, η εγκαταστημένη αιολική ισχύς παρουσιάζει μια σχεδόν εκθετική αύξηση: τα τελευταία πέντε χρόνια η ετήσια αύξηση είναι υψηλότερη από 30%. Ο βασικός λόγος για την παρατηρούμενη αυτή ανοδική πορεία της αιολικής ενέργειας είναι όπως προαναφέραμε το σχετικά χαμηλό κόστος παραγωγής σε σύγκριση με τις άλλες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.



Σχήμα 1.2. Εγκαταστημένη αιολική ισχύς σε Ευρώπη και τον κόσμο. (Πηγή: European Wind Energy Association – EWEA)

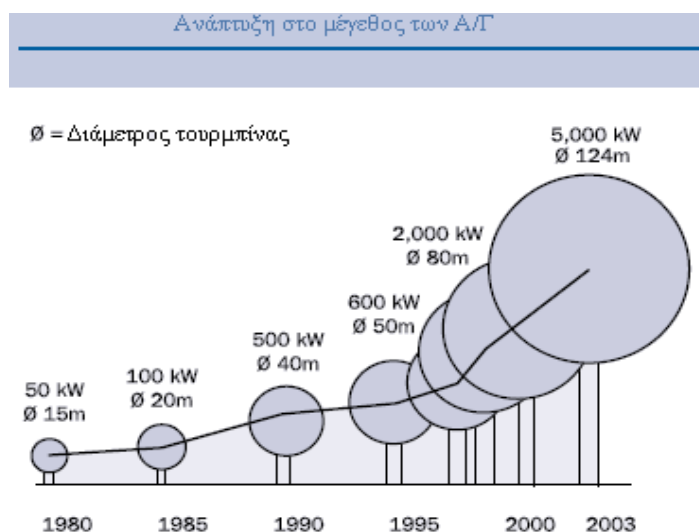
1.2. Εξέλιξη της Παραγωγής Ηλεκτρισμού από Αιολική Ενέργεια

1.2.1. Τεχνολογία Ανεμογεννήτριας

Αν και η αρχή λειτουργίας της ανεμογεννήτριας είναι απλή, εν τούτοις παραμένει ένα αρκετά σύνθετο σύστημα στο οποίο συνδυάζονται γνώσεις από πολλούς τομείς. Ο σχεδιασμός και η βελτιστοποίηση των πτερυγίων απαιτεί σύνθετες γνώσεις αεροδυναμικής: η δομή του άξονα οδήγησης καθώς και του πύργου της Α/Γ απαιτεί γνώσεις μηχανολογικές και δομικές ενώ το τμήμα των ελεγκτών και το σύστημα προστασίας γνώσεις ηλεκτρολογικές και συστημάτων αυτομάτου ελέγχου. Στο κομμάτι αυτό περιγράφουμε τις πρόσφατες τεχνολογικές ανακαλύψεις στον τομέα αυτό.

Δύο μεγάλες τεχνολογικές βελτιώσεις έχουν πρόσφατα επιτευχθεί στον τομέα της τεχνολογίας αιολικής παραγωγής. Πρώτα απ' όλα, έχει γίνει μια καθοριστική αύξηση στο μέγεθος με στόχο την περαιτέρω μείωση του κόστους παραγωγής: ο δρομέας της Α/Γ έχει γίνει πολύ μεγάλος και παράλληλα το τυπικό μέγεθος της κατασκευής. Για σύγχρονες Α/Γ της τάξης των MW, τόσο το ύψος της νασέλας όσο και η διάμετρος του δρομέα φτάνουν τα 100μ. Δηλαδή, σε κατακόρυφη τοποθέτηση, η άκρη του

περυγίου μπορεί να φτάσει τα 150μ. Η εξέλιξη της τάξης μεγέθους των Α/Γ που εισήχθησαν στην αγορά φαίνεται στο σχήμα 1.3.



Σχήμα 1.3. Μέγεθος και ισχύς των Α/Γ κατά την είσοδο στην αγορά. [2]

Η τάξη μεγέθους όμως και γενικά της εγκατάστασης έχει ήδη αυξηθεί. Η τάση είναι στο να κατασκευάζονται αιολικά πάρκα αντί για μεμονωμένες Α/Γ ή μικρές ομάδες Α/Γ. Αυτά τα πάρκα αποτελούνται από μερικές δεκάδες μέχρι εκατοντάδες Α/Γ. Μερικές φορές αυτά τα αιολικά πάρκα κατασκευάζονται σε παράκτιες εγκαταστάσεις. Οι λόγοι που οι Α/Γ οργανώνονται σε αιολικά πάρκα είναι κατ' αρχάς γιατί έτσι χρησιμοποιούνται σε μεγάλο βαθμό τοποθεσίες με καλή αιολική συμπεριφορά και επίσης η οπτική ενόχληση από τις Α/Γ περιορίζεται σε συγκεκριμένες περιοχές.

Η δεύτερη μεγάλη εξέλιξη στην τεχνολογία των Α/Γ είναι η μετάβαση από γεννήτρια σταθερών στροφών σε μεταβλητών. Όπως είναι προφανές, η διαφορά έγκειται στο ότι σε μία Α/Γ σταθερών στροφών, ο δρομέας της Α/Γ κινείται με σταθερή ταχύτητα ενώ στη μεταβλητών η ταχύτητα περιστροφής μπορεί να ποικίλλει και να ελέγχεται μέσα στα όρια σχεδιασμού. Τα συστήματα μεταβλητών στροφών είναι τεχνικά πιο πολύπλοκα απ' ότι τα σταθερών καθώς περιλαμβάνουν περισσότερα στοιχεία και χρειάζονται πιο σύνθετα συστήματα ελέγχου, γεγονός που τα καθιστά και πιο ακριβά. Παρ' όλα αυτά, έχουν επίσης πολλά πλεονεκτήματα σε σύγκριση με τα σταθερών στροφών, όπως αυξημένη ενεργειακή απόδοση, μείωση θορύβου και μηχανικού

φορτίου καθώς και καλύτερο έλεγχο αέργου και ενεργού ισχύος. Τα τελευταία χρόνια οι περισσότεροι κατασκευαστές έχουν περάσει στην παραγωγή του νέου είδους Α/Γ.

1.2.2. Σύνδεση των Α/Γ στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας

Αν και υπάρχουν αυτόνομα συστήματα Α/Γ που χρησιμοποιούν για παράδειγμα σύστημα αποθήκευσης της παραγόμενης ενέργειας σε μπαταρίες, η πλειοψηφία των Α/Γ είναι συνδεδεμένες στο δίκτυο. Η τάση λειτουργίας της γεννήτριας είναι γενικά χαμηλότερη από την τάση του δικτύου στο οποίο συνδέεται, γεγονός που δημιουργεί την ανάγκη ύπαρξης Μ/Σ ανύψωσης. Επιπλέον, κρίνεται απαραίτητη η ύπαρξη διακόπτη για την αποσύνδεση της Α/Γ σε περίπτωση βραχυκυκλώματος για την αποφυγή της λεγόμενης νησιδοποίησης, κατάσταση κατά την οποία ένα μικρό τμήμα του δικτύου λειτουργεί με τοπική ισορροπία μεταξύ παραγωγής και φορτίου, αλλά χωρίς σύνδεση στο κύριο σύστημα. Η κατάσταση αυτή λειτουργίας είναι ανεπιθύμητη καθώς προκύπτουν τάσεις και συχνότητες έξω από τα επιτρεπτά όρια καθώς και κίνδυνος για το τεχνικό προσωπικό που αναλαμβάνει την επισκευή του σφάλματος στη νησιδοποιημένη περιοχή.

Όταν οι Α/Γ είναι οργανωμένες σε μεγάλα Α/Π, προκύπτουν καινούργιες δυνατότητες γιατί είναι εφικτός ο ολοκληρωμένος σχεδιασμός τριών βασικών υποσυστημάτων του Α/Π: οι τουρμπίνες, η εσωτερική δομή στο αιολικό πάρκο και η σύνδεση στο δίκτυο. Επιπλέον, επειδή τα μεγάλα Α/Π παράγουν μεγαλύτερες ποσότητες ηλεκτρικής ενέργειας, συνδέονται σε υψηλότερα επίπεδα τάσης απ' ότι οι μεμονωμένες Α/Γ. Επειδή όμως τα δίκτυα Υ.Τ είναι λιγότερο πυκνά από τα δίκτυα Χ.Τ, συχνά πρέπει να καλυφθεί μεγάλη απόσταση μέχρι το σημείο σύνδεσης στο δίκτυο.

Σαν αποτέλεσμα, σε περίπτωση μεγάλων Α/Π, μια σύνδεση DC (συνεχούς ρεύματος) για τη σύνδεση του πάρκου στο δίκτυο μπορεί να είναι πιο συμφέρουσα. Οι απώλειες στις συμβατικές AC (εναλλασσομένου ρεύματος) συνδέσεις, και κατά συνέπεια το λειτουργικό κόστος, αυξάνονται πιο πολύ με το μήκος απ' ότι στην περίπτωση των DC συνδέσεων. Πάνω από ένα όριο απόστασης, η χρήση σύνδεσης συνεχούς ρεύματος παρά την αρχικά μεγαλύτερη επένδυση είναι προτιμητέα λόγω του χαμηλού λειτουργικού κόστους. Το τελευταίο οφείλεται στους μετατροπείς ισχύος που

χρησιμοποιούνται: τα καλώδια από μόνα τους είναι φθηνότερα σε DC απ' ό τι σε AC από τη στιγμή που απαιτούνται δύο αντί για τρία καλώδια και γιατί οι ανάγκες σε μόνωση είναι μικρότερες για την ίδια ονομαστική τάση. Επίσης, το άεργο ρεύμα σε ένα μεγάλο μήκος AC καλώδιο φαίνεται να θέτει τεχνικό όριο στο μήκος των AC συνδέσεων.

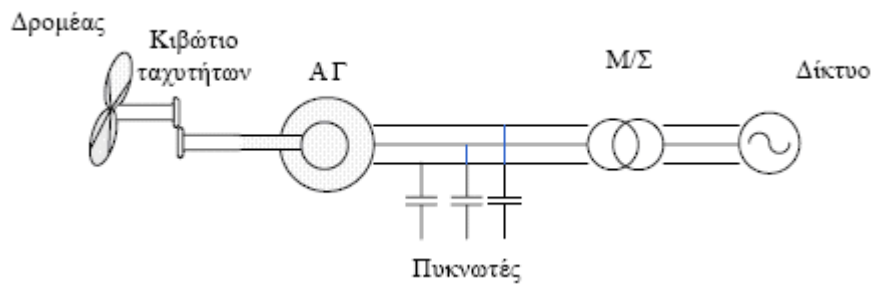
1.2.3. Τυπικές διαμορφώσεις ηλεκτρικού μέρους Α/Γ

Οι Α/Γ μπορούν να διακριθούν ανάλογα με τις αρχές λειτουργίας και ελέγχου τους. Επομένως, οι Α/Γ μπορούν να είναι:

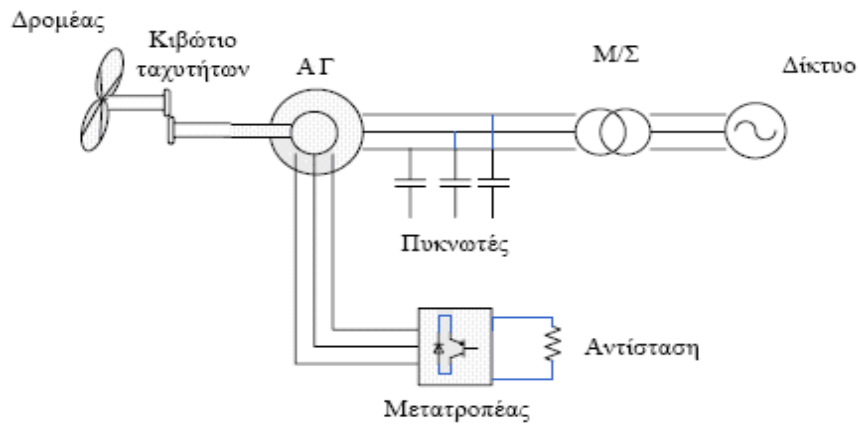
- 1) (i) *σταθερών στροφών (fixed speed)*, λειτουργώντας σε ένα στενό εύρος ταχύτητας περιστροφής λίγο πάνω από τη σύγχρονη ταχύτητα, ή (ii) *μεταβλητών στροφών (variable speed)*, λειτουργώντας σε μεγάλο εύρος ταχυτήτων πάνω και κάτω από τη σύγχρονη ταχύτητα. Στις μεταβλητών στροφών, η ταχύτητα περιστροφής βελτιστοποιείται με βάση την τιμή του εισερχόμενου ανέμου με στόχο την αύξηση της ενεργειακής απόδοσης.
- 2) (i) *σταθερού βήματος έλικας (fixed-pitch)*, όπου η γωνία βήματος δεν αλλάζει δυναμικά ή (ii) *μεταβλητού βήματος (variable pitch)*, π.χ. με έλεγχο της γωνίας βήματος έλικας. Στις Α/Γ με έλεγχο βήματος, η ισχύς εξόδου βελτιστοποιείται ρυθμίζοντας τη γωνία βήματος ανάλογα με την ταχύτητα ανέμου.
- 3) Οι Α/Γ είναι εφοδιασμένες με (i) γεννήτρια επαγωγής με βραχυκυκλωμένο δρομέα, (ii) γεννήτρια επαγωγής διπλής τροφοδότησης (ΓΕΔΤ) ελεγχόμενη από μετατροπείς συχνότητας (partial load), ή (iii) πολυπολική σύγχρονη γεννήτρια και μετατροπείς συχνότητας πλήρους φορτίου (full load).
- 4) (i) Απ' ευθείας συνδεδεμένες σε AC-δίκτυα ή (ii) συνδεδεμένες σε AC-δίκτυα μέσω μετατροπέων συχνότητας.
- 5) Πιθανά, περισσότερα κριτήρια διαχωρισμού μπορούν να εντοπιστούν.

Παρά τις διαφορές μεταξύ των διαφόρων ειδών, υπάρχουν κοινές λεπτομέρειες που χαρακτηρίζουν τις υπάρχουσες Α/Γ και την αλληλεπίδραση τους με το δίκτυο. Αυτό επιτρέπει την ταξινόμηση και συστηματοποίηση, γεγονός απαραίτητο για να προκύψουν ρεαλιστικά μοντέλα των Α/Γ με σκοπό την έρευνα στην ευστάθεια τάσης. Μερικά από τα πιο διαδεδομένα είδη διαμορφώσεων παρουσιάζονται στο Σχήμα 1.4.

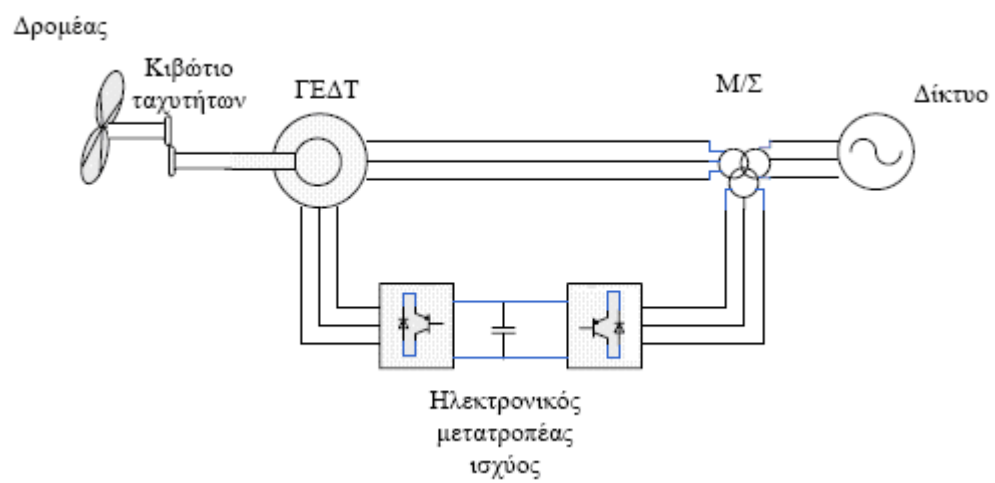
(α)



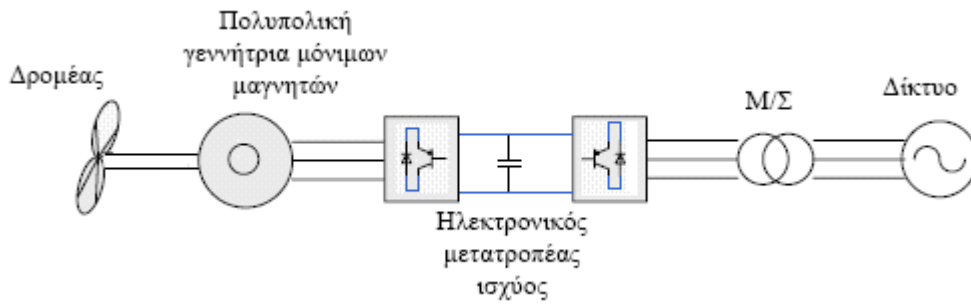
(β)



(γ)



(δ)



Σχήμα. 1.4. Τυπικές διαμορφώσεις ηλεκτρικού μέρους Α/Γ: (α)-η σταθερών στροφών Α/Γ εφοδιασμένη με γεννήτρια επαγωγής (no load compensated), (β)-η εν μέρει μεταβλητών στροφών Α/Γ εφοδιασμένη με γεννήτρια επαγωγής διπλής εξόδου με μεταβλητή αντίσταση δρομέα, (γ)- η μεταβλητών στροφών Α/Γ εφοδιασμένη με γεννήτρια επαγωγής διπλής τροφοδότησης ελεγχόμενη από μετατροπέα (back-to-back), (δ)- η μεταβλητών στροφών Α/Γ εφοδιασμένη με σύγχρονη γεννήτρια μόνιμων μαγνητών συνδεδεμένη στο δίκτυο μέσω μετατροπέα συχνότητας.

Στην παρούσα εργασία, θα αναλυθεί μια Α/Γ μεταβλητών στροφών, ελεγχόμενου βήματος εφοδιασμένη με γεννήτρια επαγωγής διπλής τροφοδότησης (ΓΕΔΤ). Η μηχανή επαγωγής είναι συνδεδεμένη στο δίκτυο με το στάτη καθώς και με το δρομέα μέσω του μετατροπέα συχνότητας (Σχήμα 1.4-διάταξη (γ)). Σε αυτή την κατάσταση λειτουργίας, η ισχύς μεταφέρεται από το στάτη στο δίκτυο και αποδίδεται στο δίκτυο ή προσφέρεται από το δίκτυο μέσω του κυκλώματος του δρομέα. Το κύκλωμα του δρομέα συνδέεται στο δίκτυο μέσω του μετατροπέα συχνότητας. Η γεννήτρια διεγείρεται μέσω του κυκλώματος του δρομέα από τον μετατροπέα στην πλευρά της μηχανής (rotor-side converter) και μπορεί να λειτουργήσει χωρίς ανταλλαγή αέργου ισχύος με το δίκτυο (reactive neutral). Επίσης, η άεργος ισχύς μπορεί να ελεγχθεί με χρήση του μετατροπέα στην πλευρά του δικτύου (grid-side converter).

Ο έλεγχος του μετατροπέα μπορεί να είναι τέτοιος ώστε η ΓΕΔΤ να ανταλλάξει λιγότερη άεργο ισχύ με το δίκτυο για έλεγχο τάσης σε συνθήκες μόνιμης κατάστασης. Το μηχανικό σύστημα τέτοιου είδους Α/Γ είναι παρόμοιο με των σταθερών στροφών. Η ταχύτητα περιστροφής έχει ένα εύρος από 8 έως 25 Σ.Α.Λ., γι' αυτό και ο χαρακτηρισμός «μεταβλητών στροφών». Οι Α/Γ μεταβλητών στροφών είναι συνήθως μεταβλητού βήματος έλικας για καλύτερη απόδοση. Οι μεγαλύτεροι κατασκευαστές

τέτοιου είδους είναι οι Vestas Wind Systems, G.E Wind, NEG-Micon, Nordex, Gamesa-Eolica, Tacke και πολλοί άλλοι. Πλέον η τάξη μεγέθους σε Α/Γ του είδους αυτού είναι 4-5MW. Η αρχή αυτή λειτουργίας φαίνεται να έχει μεγάλη απήχηση σε offshore εγκαταστάσεις Α/Π (Horns Rev-Western Denmark-Vestas Wind Systems) [1].

1.3. Ανάπτυξη και στόχοι του τομέα αιολικής ενέργειας

Τα τελευταία χρόνια ο τομέας της αιολικής ενέργειας έχει παρουσιάσει ταχείες αλλαγές. Είναι σαφής η αύξηση στις απαιτήσεις και στο ενδιαφέρον για παραγωγή ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές. Στη συνέχεια θα γίνει μια συνοπτική παρουσίαση της κατάστασης που επικρατεί σήμερα στην αιολική ενέργεια καθώς και των βασικών στόχων που έχουν τεθεί για τις επόμενες δεκαετίες από τα κράτη-μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης στα πλαίσια της προώθησης της αιολικής ενέργειας.

Η αιολική ενέργεια είναι μια σχετικά νέα σε ηλικία και γρήγορα επεκτεινόμενη βιομηχανία. Κατά την τελευταία δεκαετία, η παγκόσμια εγκαταστημένη ισχύς έχει αυξηθεί από 2.500 megawatts (MW) το 1992 σε πάνω από 40.000 MW στο τέλος του 2003, με ετήσιο ρυθμό αύξησης κοντά στο 30%. Περίπου τρία τέταρτα αυτής της ισχύος έχει εγκατασταθεί στην Ευρώπη. Τα επίπεδα διείσδυσης στον ηλεκτρικό τομέα έχουν φτάσει το 20% στη Δανία και περίπου 5% σε Γερμανία και Ισπανία. Η βόρεια Γερμανική πολιτεία του Schleswig-Holstein έχει 1.800 MW εγκαταστημένης αιολικής ισχύος, αρκετό για να ικανοποιήσει το 30% της ολικής ζήτησης ηλεκτρισμού στην περιοχή, ενώ στην περιοχή Navarra, στην Ισπανία, το 50% της κατανάλωσης καλύπτεται από αιολική ισχύ.

Αν η θετική πολιτική υποστήριξης συνεχιστεί, υπάρχουν προβλέψεις ότι η αιολική ενέργεια θα επιτύχει εγκαταστημένη ισχύ των 75.000 MW στην Ευρωπαϊκή Ένωση το 2010. Αυτό θα σήμαινε συμβολή στην προμήθεια ηλεκτρισμού της τάξης του 5.5%. Μέχρι το 2020, αυτή η σχέση αναμένεται να αυξηθεί σε πάνω από 12%, με την αιολική ισχύ να παρέχει ενέργεια ίση με την ζήτηση 195 εκατομμυρίων Ευρωπαίων οικιακών καταναλωτών.

Κατά τη διαδικασία εγκατάστασης αιολικού πάρκου, το πιο σημαντικό χαρακτηριστικό είναι η ταχύτητα του ανέμου. Με διπλασιασμό της μέσης ταχύτητας ανέμου, η ισχύς του ανέμου αυξάνεται με ένα συντελεστή κοντά στο 8, έτσι ώστε ακόμα και μικρές αλλαγές στην ταχύτητα του ανέμου μπορούν να παράγουν μεγάλες αλλαγές στην οικονομική απόδοση του αιολικού πάρκου. Σαν επεξήγηση, αν η μέση ταχύτητα ανέμου σε συγκεκριμένο σημείο αυξηθεί από 6 μέτρα ανά δευτερόλεπτο (m/s) σε 10 m/s, η ποσότητα της ενέργειας που παράγεται από το αιολικό πάρκο θα αυξηθεί πάνω από 130%. Λεπτομερής και αξιόπιστη πληροφόρηση για το πόσο δυνατά και προς ποια κατεύθυνση κινείται ο άνεμος, και πότε, είναι επομένως καίρια για κάθε προοπτική ανάπτυξης αιολικής ισχύος.

Η αρχική αποτίμηση του διαθέσιμου αιολικού δυναμικού σε κάποια τοποθεσία περιλαμβάνει τη μελέτη στοιχείων από κοντινούς μετεωρολογικούς σταθμούς και ειδικά λογισμικά υπολογιστών που είναι σε θέση να μοντελοποιήσουν την πηγή της αιολικής ισχύος. Για την υποστήριξη της διαδικασίας εθνικοί, τοπικοί και περιφερειακοί χάρτες αιολικού δυναμικού έχουν παραχθεί: αν και οι λεπτομέρειες διαφέρουν από χώρα σε χώρα, οι χάρτες αυτοί δείχνουν την αναμενόμενη μέση ταχύτητα ανέμου σε μια δοσμένη περιοχή. Αν η τοποθεσία είναι υποσχόμενη, διεξάγονται πιο λεπτομερείς μετρήσεις μέσω της ανέγερσης ενός ιστού ανεμομέτρου, που περιλαμβάνει έναν αριθμό από συσκευές - ανεμόμετρα για τη μέτρηση της ταχύτητας και της κατεύθυνσης του ανέμου σε διάφορα ύψη του ιστού.

Οι αποτιμήσεις της πηγής αιολικής ενέργειας εξελικτικά γίνονται όλο και πιο ακριβείς αναλύοντας περιορισμούς όπως τοπική γεωγραφία, οικονομικά, και εναλλακτική χρήση γης, ώστε να προκύψει μια συμφέρουσα πηγή.

Η εκμεταλλεύσιμη πηγή αιολικής ενέργειας σε ηπειρωτικό έδαφος υπολογίζεται συντηρητικά σε 600 TWh για την Ευρωπαϊκή Ένωση και για παράκτιες εγκαταστάσεις σε 3,000 TWh. Το άνω όριο αυτών υπερβαίνει κατά πολύ την ολική ηλεκτρική κατανάλωση των Ευρωπαϊκών χωρών. Ο Ευρωπαϊκός Αιολικός Χάρτης (European Wind Atlas) από το εθνικό ερευνητικό εργαστήριο της Δανίας, Risoe, δίνει μια καλή εικόνα για το δυναμικό της Ε.Ε.

Αν και κάποιες χώρες έχουν προχωρήσει στην εκμετάλλευση γρήγορα, τα περισσότερα Ευρωπαϊκά κράτη έχουν ακόμη αρκετό αιολικό δυναμικό ανεκμετάλλευτο. Υπάρχει επίσης αξιοπρόσεκτη δυναμική στα νέα μέλη κράτη και στη Ρωσία.

Ένα στοιχείο κλειδί για την επιτυχή διείσδυση της αιολικής ενέργειας είναι η επαρκής ολοκλήρωση στα πλαίσια του Ευρωπαϊκού ηλεκτρικού δικτύου μεταφοράς και διανομής. Σε σχέση με αυτό το ζήτημα πρέπει να δίνεται προσοχή στις τεχνικές και οικονομικές απαιτήσεις σε συνδυασμό με τους κανονισμούς των διαχειριστών των συστημάτων. Τα τρία βασικά ζητήματα είναι η σύνδεση στο δίκτυο, η λειτουργία και η αναβάθμιση του δικτύου και ο σχεδιασμός για εγκατάσταση μεγαλύτερης ισχύος.

Η μεγάλη αύξηση στη διείσδυση της αιολικής παραγωγής στο δίκτυο εγείρει μια σειρά από ζητήματα. Τα περισσότερα είναι θέματα πρακτικής συμπεριφοράς περισσότερο παρά μηχανικής υλοποίησης.

- Η ισχύς εξόδου ενός αιολικού πάρκου κυμαίνεται σε ένα βαθμό ανάλογα με τον άνεμο.
- Τα αιολικά πάρκα τοποθετούνται συχνά στο τέλος των γραμμών διανομής. Τα περισσότερα Ευρωπαϊκά δίκτυα έχουν σχεδιαστεί για ηλεκτρική παραγωγή από σχετικά μικρό αριθμό σταθμών, στέλνοντας ισχύ προς την περιφέρεια παρά προς την αντίθετη κατεύθυνση.
- Τα τεχνικά χαρακτηριστικά της αιολικής παραγωγής είναι διαφορετικά από τους συμβατικούς σταθμούς παραγωγής, γύρω από τους οποίους έχουν κατασκευαστεί τα υπάρχοντα συστήματα.

Η απαίτηση για τους διαχειριστές των δικτύων να ελέγξουν την αυξανόμενη είσοδο της «διανεμημένης παραγωγής» δεν πηγάζει μόνο από την αιολική ενέργεια. Περιβαλλοντικοί παράγοντες και η απελευθέρωση της αγοράς ηλεκτρισμού έχουν αυξήσει τελευταία το ενδιαφέρον για εμπορική παραγωγή μικρότερης κλίμακας. Ένας συνδυασμός ανάμεσα στη συμπεριφορά των εγκαταστάσεων και του δικτύου είναι απαραίτητος για να καλυφθούν αυτές οι ανάγκες.

Δύο σημαντικά ζητήματα σχετικά με την αιολική παραγωγή είναι η μεταβλητότητα και η προβλεψιμότητα. Η μεταβλητότητα της ισχύος εξόδου μιας μόνο Α/Γ είναι μικρή σε κλίμακα χρόνου μερικών λεπτών και, για αιολικά πάρκα κατά μήκος μιας μεγάλης περιοχής, είναι μικρή σε κλίμακα χρόνου μερικών ωρών. Πληροφόρηση υψηλού επιπέδου επιτρέπει στους διαχειριστές του συστήματος να καθορίζουν το βαθμό εφεδρείας. Οι τεχνικές πρόβλεψης του ανέμου είναι προς το παρόν σε αρχικό στάδιο ανάπτυξης, και κάθε βελτίωση εδώ μπορεί να βοηθήσει σημαντικά τους διαχειριστές να ελέγχουν την αιολική παραγωγή με τη μείωση και τον καθορισμό με ακρίβεια του σφάλματος πρόβλεψης.

Έχει προταθεί ότι θέματα ευστάθειας του συστήματος μπορούν να αναγερθούν αν η αιολική παραγωγή ξεπεράσει κάποιο όριο διείσδυσης. Τέτοιες ανησυχίες πρέπει να λάβουν υπ' όψιν τους τα πλεονεκτήματα, συμπεριλαμβανομένου της τοπικής ενίσχυσης του δικτύου και της δυνατότητας των Α/Γ μεταβλητών στροφών να συμβάλλουν στην ευστάθεια του συστήματος. Για την εξασφάλιση της ισορροπίας στο σύστημα έτσι ώστε να μπορεί να δεχθεί τη μεταβαλλόμενη ισχύ εξόδου των Α/Π, είναι διαθέσιμες στους διαχειριστές των συστημάτων μια σειρά από τεχνικές. Σε μια κατάσταση όπου πολύς άνεμος είναι διαθέσιμος, για παράδειγμα, ο διαχειριστής μπορεί να διατηρεί άλλους τύπους σταθμών παραγωγής σε χαμηλά επίπεδα εξόδου.

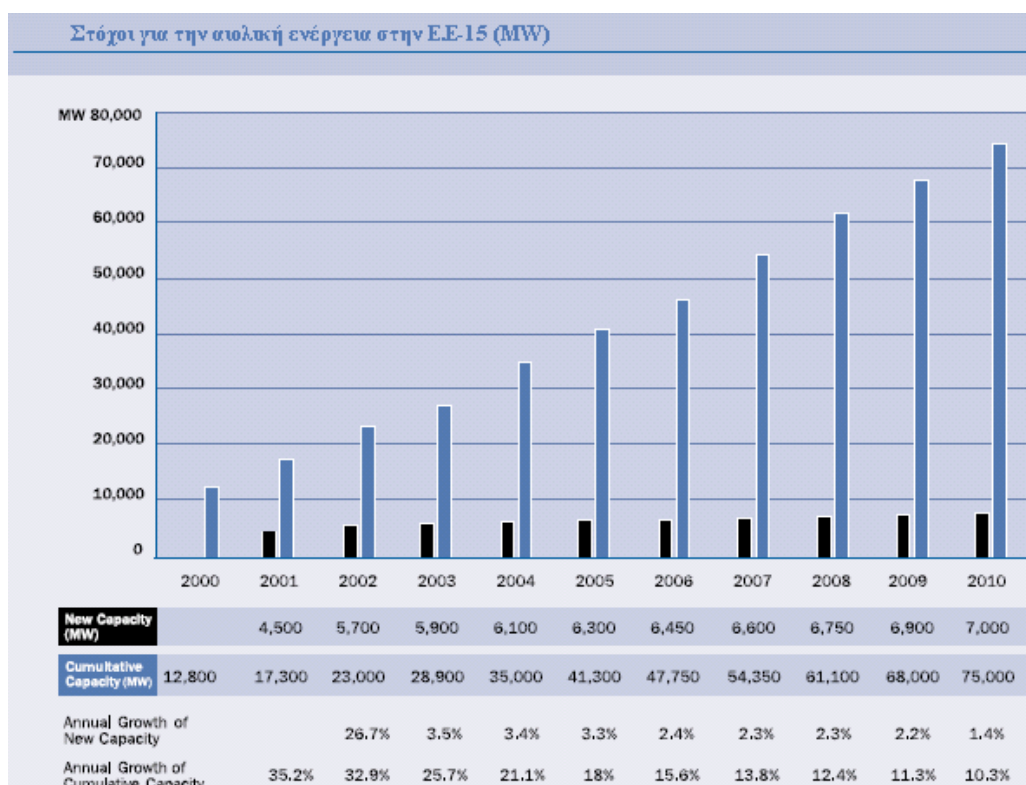
Άλλες λύσεις είναι πιθανόν να γίνουν εξαιρετικά σημαντικές καθώς η διείσδυση της αιολικής παραγωγής επεκτείνεται συνεχώς. Αυτές περιλαμβάνουν πρόβλεψη, διασυνδέσεις και αποθήκευση ηλεκτρισμού. Χρησιμοποιώντας τέτοιες τεχνικές, όπως επίσης και ενίσχυση του ίδιου του δικτύου, και αυξημένη γεωγραφική εξάπλωση της αιολικής ισχύος, είναι δυνατόν να εξασφαλιστεί πολύ υψηλό επίπεδο διείσδυσης στα Ευρωπαϊκά ηλεκτρικά συστήματα χωρίς επίδραση στην ποιότητα της παροχής.

Στόχοι για την αιολική ενέργεια

Σύμφωνα με αρμόδιους φορείς, όπως η EWEA, προβλέπεται ότι αν συνεχιστεί η πολιτική στήριξης, 75.000 MW αιολικής ισχύος θα μπορούσαν να έχουν εγκατασταθεί στην Ευρωπαϊκή Ένωση μέχρι το τέλος της δεκαετίας. Επίσης μέχρι το 2010, οι τελευταίες προβλέψεις από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή προτείνουν ότι η αιολική ενέργεια στην Ευρώπη μπορεί να φτάσει στο σύνολο τα 69.900 MW. Η

EWEA προβλέπει ένα σύνολο 180.000 MW μέχρι το 2020, από τα οποία τα 70.000 MW θα είναι σε παράκτιες εγκαταστάσεις.

Το 1997 η EWEA υιοθέτησε το στόχο που τέθηκε από το White Paper της Ευρωπαϊκής Επιτροπής πάνω στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας για 40.000 MW μέχρι το 2010. Τρία χρόνια αργότερα, η EWEA αναθεώρησε το στόχο της σε 60.000 MW μέχρι το 2010 και 150.000 MW μέχρι το 2020. Αυτές οι προβλέψεις αναθεωρήθηκαν τότε στα παραπάνω το 2003.



Σχήμα 1.5. Στόχοι για την αιολική ενέργεια στην Ευρώπη. [3]

Προβλέψεις για την παγκόσμια αγορά 2007-2012

Οι μελλοντικές συνθήκες της αγοράς είναι στην ουσία σενάρια που διαμορφώνονται από την ποικιλία των υποθέσεων και των στοιχείων που χρησιμοποιούνται. Εδώ θα παρουσιαστούν δύο σενάρια αγοράς: ένα τυπικό και ένα σύνθετο για τα έτη 2007-2012.

Μια αποτίμηση αγοράς με χρονικό ορίζοντα πέντε χρόνων θεωρείται γενικά ως πιο ακριβής πρόβλεψη. Πέρα από αυτό όμως, η δυνατότητα πρόβλεψης μειώνεται ιδιαίτερα γιατί οι καθοριστικοί παράγοντες είναι δύσκολο να προβλεφθούν με ακρίβεια.

- Υπό το *τυπικό* σενάριο, ο μέσος ετήσιος ρυθμός αύξησης φτάνει το 15% την περίοδο 2008-12 προσεγγίζοντας τα 160.900 MW.
- Υπό το *σύνθετο* σενάριο ο μέσος ετήσιος ρυθμός αύξησης φτάνει το 24% την περίοδο 2008-12 προσεγγίζοντας έτσι τα 311.000 MW παγκοσμίως.

Υπό το τυπικό σενάριο, οι Ευρωπαϊκές αγορές θα συνεχίσουν να επικρατούν. Ως βασικές αγορές θα παραμείνουν η Γερμανία και η Ισπανία, αν και σημαντικές αγορές θα εμφανιστούν σε Γαλλία, Αγγλία, Ολλανδία, Ιταλία και Σουηδία. Η πρόβλεψη για την αγορά υποδεικνύει μια ελαφρά επιβράδυνση της Ευρωπαϊκής αγοράς, αλλά μια αύξηση στη δραστηριότητα σε χώρες που δεν έχουν παίξει κάποιο ιδιαίτερο ρόλο μέχρι σήμερα. Θα υπάρξει σημαντική αύξηση στις Η.Π.Α. Νέες αγορές επίσης αναπτύσσονται στην Αυστραλία, την Ιαπωνία, τον Καναδά και την Ν.Αμερική. Συγκριτικά υπάρχει μικρή εγκαταστημένη ισχύς σε αυτές τις χώρες και επομένως, η δυναμική για μελλοντική αύξηση είναι μεγάλη. Άλλες χώρες που ξεκινούν σοβαρές επενδύσεις είναι ο Καναδάς, η Βραζιλία, η Τυνησία, η Κίνα, η Αίγυπτος, το Μαρόκο, οι Φιλιππίνες, η Τουρκία και το Βιετνάμ.

Οι σημαντικές διαφορές ανάμεσα στα δύο σενάρια για το 2012 υποδεικνύει το γεγονός ότι η ανάπτυξη της αγοράς για τον τομέα των αιολικών σε παγκόσμιο επίπεδο περιορίζεται από πολιτικές αποφάσεις. Αυτός ο περιορισμός μειώνει την ενδεχόμενη παγκόσμια αγορά το 2012 κατά 50% (βλέπε Σχήμα 1.6).

Περύληψη των Σεναρίων Αγοράς: Τυπικό και Σύνθετο (αθροιστική εγκαταστημένη ισχύς MW)		
Έτος	2007	2012
ΣΥΝΘΕΤΟ σενάριο- Ευρώπη	59,000	112,000
Μέσος ετήσιος ρυθμός αύξησης	20%	14%
ΣΥΝΘΕΤΟ σενάριο- παγκόσμια	106,000	311,000
Μέσος ετήσιος ρυθμός αύξησης	27%	24%
ΤΥΠΙΚΟ σενάριο- Ευρώπη	55,941	-
ΤΥΠΙΚΟ σενάριο - παγκόσμια	80,050	160,900
Μέσος ετήσιος ρυθμός αύξησης	20.6%	15%

Σχήμα 1.6. Σενάρια αγοράς: Τυπικό και Σύνθετο.[3]

Έρευνα και Ανάπτυξη (R&D)

Προγράμματα έρευνας και ανάπτυξης χρηματοδοτούμενα από την Ε.Ε έχουν δώσει μεγάλη ώθηση στην αιολική βιομηχανία τα τελευταία 20 χρόνια. Τα αποτελέσματα αυτών των προγραμμάτων περιλαμβάνουν την ανάπτυξη μεγάλων Α/Γ της τάξης των MW, τον πρώτο αιολικό χάρτη της Ευρώπης, και υποστήριξη για υποδειγματικά σχέδια όπως το πρώτο παράκτιο αιολικό πάρκο.

Τα μεγάλα βήματα στην τεχνολογία των αιολικών έχουν τις ρίζες τους σε τεράστιες προσπάθειες τόσο στην ιδιωτική βιομηχανία όσο και σε ερευνητικά ιδρύματα. Περαιτέρω έρευνα στην αιολική βιομηχανία είναι θεμελιώδης για να εξασφαλιστεί ότι η αιολική ισχύς θα φτάσει σε ένα σημείο όπου θα είναι πλέον πλήρως ανταγωνιστική με τις φθηνότερες εναλλακτικές [3].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Μοντελοποίηση της Διάταξης

2.1. Κατηγορίες μοντέλων Α/Γ

2.1.1. Εισαγωγή

Στο κομμάτι αυτό θα συζητηθούν διάφορα μοντέλα Α/Γ. Προς το παρόν περιλαμβάνεται μόνο το ηλεκτρικό κομμάτι και όχι το μηχανικό. Για το λόγο αυτό η διάκριση μεταξύ των μοντέλων γίνεται με βάση τις διαφορές ως προς την υλοποίηση του ηλεκτρικού μέρους. Κάθε κατηγορία μοντέλων μπορεί να συνδυαστεί με πολλές αναπαραστάσεις του μηχανικού κομματιού, ξεκινώντας από μία αλγεβρική σχέση μεταξύ ταχύτητας ανέμου και μηχανικής ισχύος συνδυασμένη με μία προσομοίωση των μαζών του άξονα και του δρομέα και φτάνοντας έως ένα λεπτομερές υψηλής τάξης δυναμικό μοντέλο του δρομέα, του άξονα και του κιβωτίου ταχυτήτων. Σε μια τέτοια περίπτωση η μέθοδος στοιχείων περυγίων (Blade Element Method) χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της μηχανικής ισχύος που παράγεται από τη ροή του ανέμου.

2.1.2. Θέματα μοντελοποίησης

Η πολυπλοκότητα των μοντέλων προσομοίωσης των ηλεκτροπαραγωγών Α/Γ πρέπει να συμβιβάζεται με τη φυσική αυτών των συστημάτων μετατροπής ενέργειας. Επιπλέον, η πολυπλοκότητα του μοντέλου εξαρτάται από το στόχο των ερευνών όπου θα χρησιμοποιηθούν τα μοντέλα. Τα μοντέλα επίσης πρέπει να είναι σε συμφωνία με το εργαλείο προσομοίωσης, το οποίο αντιστοιχεί στη διαδικασία υλοποίησης. Η επιλογή του εργαλείου προσομοίωσης εξαρτάται από το στόχο των ερευνών.

Μοντέλα βασισμένα στις καμπύλες ισχύος των Α/Γ

Το πρώτο είδος μοντέλου απαρτίζεται από μοντέλα που βασίζονται στην καμπύλη ισχύος της Α/Γ. Αυτό το είδος χρησιμοποιείται κατά κύριο λόγο για υπολογισμούς της ενέργειας που θα παραχθεί αν η συγκεκριμένη Α/Γ κατασκευασθεί σε κάποια τοποθεσία. Αυτή η τιμή με τη σειρά της μπορεί να χρησιμοποιηθεί για υπολογισμούς που έχουν να κάνουν με την οικονομική απόδοση του υπό συζήτηση επενδυτικού σχεδίου. Συνήθως στις περιπτώσεις αυτές λαμβάνονται υπ' όψιν τιμές ανέμου από μετρήσεις κάθε μισή ή μία ώρα για ένα αρκετά μεγάλο χρονικό διάστημα.

Μοντέλα τέτοιου είδους δεν είναι κατάλληλα για δυναμική προσομοίωση ηλεκτρικών συστημάτων, από τη στιγμή που δεν εμπεριέχουν καμία εξίσωση που περιγράφει τη δυναμική συμπεριφορά της Α/Γ ή την αλληλεπίδραση της με το δίκτυο. Επιπλέον, δε λαμβάνουν υπ' όψιν ότι στην περίπτωση των Α/Γ μεταβλητών στροφών η ισχύς που παράγεται σε μια συγκεκριμένη ταχύτητα ανέμου δεν εξαρτάται μόνο από την ταχύτητα ανέμου αλλά και από τις τιμές της ταχύτητας του δρομέα καθώς και από τη γωνία βήματος.

Ο μόνος τρόπος με τον οποίο μπορούν να πάρουν μέρος τέτοια μοντέλα σε δυναμικές προσομοιώσεις είναι μοντελοποιώντας την Α/Γ σαν σήμα ταχύτητας ανέμου ή μετρημένη ακολουθία τέτοιων τιμών μαζί με μία ελεγχόμενη πηγή ισχύος. Η καμπύλη ισχύος μπορεί κατόπιν να χρησιμεύσει στον υπολογισμό της παραγόμενης ισχύος σε κάποια ταχύτητα ανέμου. Παρ' όλα αυτά συνήθως παρατηρούνται ανακρίβειες.

Ένα τέτοιο μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την έρευνα αργών μεταβολών της τάσης σε κάποιο σημείο του δικτύου ή την συμπεριφορά άλλων γεννητριών του δικτύου κατά τη διακύμανση της ισχύος εξόδου της Α/Γ. Όμως δε μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την προσομοίωση βραχυκυκλωμάτων στο δίκτυο, ούτε στην περίπτωση των σταθερών στροφών, καθώς η γεννήτρια επαγωγής αντιδρά σε αλλαγές της συχνότητας ή της τάσης, ούτε στην περίπτωση των μεταβλητών στροφών καθώς οι ελεγκτές των μετατροπέων ισχύος θα αντιδράσουν αρκετά γρήγορα σε μία μεταβολή της τάσης ή της συχνότητας και γι' αυτό πρέπει να μοντελοποιηθούν και αυτοί.

Υπομεταβατικά μοντέλα

Μια άλλη κατηγορία μοντέλων είναι τα υπομεταβατικά. Ένα τέτοιο μοντέλο A/Γ σταθερών στροφών θα αποτελείται από κάποιου είδους προσομοίωση του μηχανικού κομματιού, από το οποίο για μια συγκεκριμένη ταχύτητα ανέμου προκύπτει η μηχανική ισχύς ή ροπή. Αυτή η τιμή μετά πρέπει να εισαχθεί σαν είσοδος σε ένα υπομεταβατικό μοντέλο γεννήτριας επαγωγής. Ένα τέτοιο μοντέλο γεννήτριας επαγωγής έχει τουλάχιστον πέντε μεταβλητές κατάστασης, τις ροές του στάτη και του δρομέα στον d και στον q άξονα και τη μηχανική ταχύτητα. Η μικρότερη σταθερά χρόνου σε αυτό το μοντέλο είναι της τάξης των 10 ms, ανάλογα με το μέγεθος της γεννήτριας. Αν χρησιμοποιηθεί σταθερό βήμα χρόνου για την προσομοίωση, θα πρέπει να είναι κάποιες φορές μικρότερο από αυτή τη σταθερά χρόνου, ανάλογα με τον αλγόριθμο που εφαρμόζεται στους υπολογισμούς, άρα περίπου ίσο με 1 ms.

Το πρώτο τμήμα των υπομεταβατικών μοντέλων A/Γ μεταβλητών στροφών είναι μια μετατροπή από ταχύτητα ανέμου σε μηχανική ισχύ ή ροπή. Ανάλογα με τον τύπο A/Γ που μοντελοποιείται, το αποτέλεσμα εφαρμόζεται σε ένα υπομεταβατικό μοντέλο γεννήτριας επαγωγής διπλής τροφοδότησης, το οποίο έχει τουλάχιστον πέντε μεταβλητές κατάστασης, ή ένα υπομεταβατικό μοντέλο μιας σύγχρονης μηχανής που έχει ομοίως πέντε (αν ληφθούν υπ' όψιν τα τυλίγματα απόσβεσης έχει εφτά ή οχτώ). Επιπλέον, απαιτούνται λεπτομερή μοντέλα των ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος περιλαμβάνοντας και τους ημιαγωγικούς διακόπτες. Τόσο οι έλεγχοι ρεύματος των μετατροπέων όσο και οι ελεγκτές της ροπής της γεννήτριας και της ενεργού και αέργου ισχύος που εγχύονται στο δίκτυο πρέπει να μοντελοποιηθούν. Η διακοπτική συχνότητα των ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος που χρησιμοποιούνται στις A/Γ ποικίλουν από 10 kHz για μικρές A/Γ μέχρι περίπου 1kHz για τις μεγάλες. Το μικρότερο χρονικό βήμα πρέπει να είναι κάποιες φορές μικρότερο από τη διακοπτική συχνότητα, οδηγώντας σε χρονικά βήματα της τάξης του 1ms έως 0.01ms, ανάλογα με το μέγεθος της A/Γ που μελετάται.

Τα ακόλουθα προβλήματα κάνουν την ολοκλήρωση των υπομεταβατικών μοντέλων στα λογισμικά προσομοίωσης των ηλεκτρικών συστημάτων πιο πολύπλοκη:

- Έχουν μεγάλη πολυπλοκότητα, ειδικότερα στην περίπτωση των μοντέλων μεταβλητών στροφών. Ειδικές γνώσεις των ηλεκτρονικών ισχύος και των συστημάτων ελέγχου είναι απαραίτητες για την ανάπτυξη των μοντέλων των μετατροπέων ισχύος και των ελεγκτών.
- Το χρονικό βήμα προσομοίωσης είναι πολύ μικρό ώστε τα μοντέλα αυτά να είναι πρακτικά χρήσιμα για την προσομοίωση μεγάλων ηλεκτρικών συστημάτων με πολλές Α/Γ και πολλές γεννήτριες και φορτία.
- Ο αριθμός των παραμέτρων που απαιτούνται για τον πλήρη προσδιορισμό των μοντέλων αυτών είναι μεγάλος, ενώ από την άλλη, η επίδραση μερικών από αυτές τις παραμέτρους στη συμπεριφορά των Α/Γ είναι μικρή και πολλές από τις παραμέτρους δεν είναι γνωστές στα πρώτα στάδια της ανάλυσης των ηλεκτρικών συστημάτων.

Επιπλέον, τα υπομεταβατικά μοντέλα δε συμβιβάζονται με ένα χαρακτηριστικό των λογισμικών προσομοίωσης ηλεκτρικών συστημάτων, δηλαδή τη μοντελοποίηση των δικτύων χρησιμοποιώντας πίνακα αγωγιμοτήτων. Αυτό έχει σαν συνέπεια ότι στις προσομοιώσεις μόνο μεγέθη της θεμελιώδους συχνότητας λαμβάνονται υπ' όψιν αγνοώντας τα υπομεταβατικά φαινόμενα. Για να προκύψει έτσι ένα συνεπές μοντέλου ολόκληρου του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας μαζί με τις Α/Γ, πρέπει να αμεληθούν οι ανώτερες αρμονικές. Για το λόγο αυτό, συνηθίζεται να αναπτύσσονται τα μεταβατικά ή δυναμικά μοντέλα.

Μεταβατικά ή δυναμικά μοντέλα

Γενικά ο στόχος των ερευνών είναι (i) ευστάθεια τάσης σε μεγάλα ηλεκτρικά συστήματα σε συνδυασμό με μεγάλη διεύδυση αιολικής ισχύος και (ii) αλληλεπίδραση ανάμεσα στις Α/Γ και το δίκτυο. Ουσιαστικά οι ηλεκτροπαραγωγές Α/Γ θα παρουσιαστούν σαν σύνθετα ηλεκτρομηχανικά συστήματα με αναπαράσταση των (i) ηλεκτρικών στοιχείων όπως γεννήτριες, μετατροπείς συχνότητας και τα συστήματα ελέγχου τους και (ii) μηχανικά τμήματα της κατασκευής όπως τομέας άξονα, δρομέας τουρμπίνας και ο έλεγχος τους. Τα μοντέλα των Α/Γ δεν πρέπει να είναι υπεραπλοποιημένα. Απ' την άλλη πλευρά, η αναπαράσταση ενός συγκεκριμένου τμήματος της κατασκευής θα πρέπει να έχει ένα στόχο και μία

εξήγηση ως προς το στόχο των ερευνών, και όχι μόνο γιατί αυτό το στοιχείο είναι παρόν στην κατασκευή. Πολύ λεπτομερειακά μοντέλα θα είναι πιο δύσκολο να περιγραφούν και να εξηγηθούν, οδηγούν σε αργές προσομοιώσεις και παράγουν πολλές εξόδους που δεν συμβάλλουν στην ανάλυση [21]. Αυτό θα μπορούσε επίσης να προκαλέσει σύγχυση ως προς τα αποτελέσματα. Με άλλα λόγια, η πολυπλοκότητα του μοντέλου και ο σκοπός των ερευνών πρέπει να είναι σε συμφωνία.

Η συνολική διάρκεια των δυναμικών συμπεριφορών που θα ερευνηθούν είναι της τάξης κάποιων δευτερολέπτων. Στις προσομοιώσεις, θα παρουσιαστεί ένα τριφασικό βραχυκύκλωμα στο δίκτυο δοσμένης διάρκειας συνήθως κοντά στα 200 ms. Όταν το σφάλμα εκκαθαριστεί, η τάση στο ηλεκτρικό σύστημα θα επανέλθει σχεδόν στα προκαθορισμένα όρια, το οποίο και σημαίνει ότι ούτε υποτάσεις αλλά ούτε και υπερτάσεις θα γίνουν δεκτές.

Σύμφωνα με τα παραπάνω λοιπόν, οι ακόλουθες απαιτήσεις έχουν τεθεί για το σχεδιασμό του δυναμικού μοντέλου της Α/Γ.

- 1) Τα δυναμικά μοντέλα πρέπει να προβλέπουν ικανοποιητικά ακριβείς τιμές της ενεργού και της αέργου ισχύος, καθώς και τη συμπεριφορά της τάσης. Αυτή η απαίτηση είναι καθοριστική και ανεξάρτητη από θέματα που σχετίζονται με τη λειτουργία της προστασίας.
- 2) Τα δυναμικά μοντέλα πρέπει να προβλέπουν ικανοποιητικά ακριβείς τιμές των μεγεθών που παρακολουθούνται από το σύστημα προστασίας. Αυτά είναι τόσο ηλεκτρικά μεγέθη (τάση, ρεύμα μηχανής, συχνότητα δικτύου, κτλ.) όσο και μηχανικά (για παράδειγμα η γωνιακή ταχύτητα του δρομέα της γεννήτριας).

Σχόλια: τα πιο συχνά βραχυκυκλώματα στα ηλεκτρικά δίκτυα μεταφοράς είναι μονοφασικά, δηλ. φάση-προς-γη. Επίσης, φάση-προς-φάση και δύο-φάσεις-προς-γη σφάλματα είναι πιο συχνά απ' ό τι τα τριφασικά σφάλματα. Άλλωστε τα τριφασικά βραχυκυκλώματα είναι πολύ πιο επώδυνα ως προς τη διατήρηση της ευστάθειας τάσης απ' ό τι τα υπόλοιπα είδη σφαλμάτων. Όταν η τάση επανέλθει μετά από ένα τριφασικό σφάλμα, πιθανότατα θα επανέλθει και μετά από όλα τα είδη σφαλμάτων.

- 3) Στην περίπτωση των μεταβλητών στροφών με γεννήτριες ελεγχόμενες από μετατροπείς, είτε ΓΕΔΤ (γεννήτρια επαγωγής διπλής τροφοδότησης) είτε γεννήτρια μόνιμων μαγνητών, η αναπαράσταση του μετατροπέα είναι εξαιρετικά σημαντική. Αυτό συμβαίνει γιατί αυτές οι Α/Γ συχνά βγαίνουν εκτός λειτουργίας λόγω διακοπής λειτουργίας των μετατροπέων. Με άλλα λόγια, η μεταβατική συμπεριφορά της γεννήτριας σε συνδυασμό με τη συμπεριφορά του μετατροπέα περιγράφει τη λειτουργία της Α/Γ κατά τη διάρκεια των μεταβατικών συμβάντων.
- 4) Το μοντέλο που θα χρησιμοποιηθεί πρέπει να είναι εξοπλισμένο με ένα συμπληρωματικό μοντέλο που αποσυνδέει τον πυκνωτή αντιστάθμισης, τη γεννήτρια, το μετατροπέα και την αλληλουχία διακοπής της Α/Γ. Χρήση των συμπληρωματικών μοντέλων προστασίας δεν είναι πάντα απαραίτητη στη περίπτωση των μεγάλων αιολικών πάρκων (κυρίως παράκτιες εγκαταστάσεις), γιατί υπερβαίνοντας τις ρυθμίσεις του συστήματος προστασίας θα επισημαίνεται ότι η λύση δε γίνεται δεκτή.
- 5) Η ακρίβεια του συστήματος προστασίας και ειδικά οι πληροφορίες ρύθμισης των ηλεκτρονόμων είναι επίσης πολύ σημαντικές.
- 6) Μετά την έξοδο τους από τη λειτουργία, οι Α/Γ περιμένουν για την επαναφορά της κανονικής λειτουργίας του δικτύου. Μετά από 15 λεπτά, όταν η κανονική λειτουργία του δικτύου εξασφαλίζεται, οι Α/Γ αρχίζουν την επανασύνδεση. Αυτή η συμπεριφορά εμφανίζει μεγάλο ενδιαφέρον για την ευστάθεια. Σαν συνέπεια, δεν υπάρχουν σαφείς απαιτήσεις για τα μοντέλα όσον αφορά τους υπολογισμούς της γεννήτριας όταν έχει προκύψει η αποσύνδεση.

Ξεκινώντας από ένα υπομεταβατικό μοντέλο, το αντίστοιχο μεταβατικό προκύπτει με τον ακόλουθο τρόπο:

- Στις Α/Γ σταθερών στροφών αλλά και στις μεταβλητών στροφών με μηχανή επαγωγής διπλής τροφοδότησης, οι όροι $d\psi/dt$ στις εξισώσεις τάσης του στάτη συνήθως αμελούνται.
- Στα μοντέλα Α/Γ μεταβλητών στροφών, ο μετατροπέας στην πλευρά δικτύου μοντελοποιείται συνήθως σαν ελεγχόμενη πηγή ρεύματος, εφοδιασμένη με

ελεγκτή ώστε μια τιμή αναφοράς για το ρεύμα δικτύου να καθορίζεται μέσα σε χρόνο περίπου 10ms.

Τα παραπάνω μέτρα λύνουν την ασυμβατότητα μεταξύ των υπομεταβατικών μοντέλων A/Γ μεταβλητών στροφών, των μοντέλων του δικτύου και των υπολοίπων γεννητριών στις προσομοιώσεις του ηλεκτρικού συστήματος. Παρ' όλα αυτά, τα τρία βασικά προβλήματα των μοντέλων A/Γ μεταβλητών στροφών, δηλαδή η πολυπλοκότητα των μοντέλων, το μικρό χρονικό βήμα προσομοίωσης και ο μεγάλος αριθμός των απαιτούμενων παραμέτρων δεν έχουν πλήρως λυθεί. Γι' αυτό πολλές φορές προτείνονται οι ακόλουθες επιπλέον απλουστεύσεις:

- Στο μοντέλο A/Γ μεταβλητών στροφών με μηχανή επαγωγής διπλής τροφοδότησης, οι όροι $d\psi/dt$ αμελούνται και στις εξισώσεις τάσης του δρομέα.
- Στο μοντέλο A/Γ μεταβλητών στροφών με σύγχρονη μηχανή απ' ευθείας συνδεδεμένη, οι όροι $d\psi/dt$ αμελούνται στις εξισώσεις τάσης και του στάτη και του δρομέα.
- Οι μετατροπείς ισχύος δεν μοντελοποιούνται πλέον σαν ελεγχόμενες πηγές τάσης, αλλά σαν ελεγχόμενες πηγές ρεύματος. Αυτό είναι δυνατό χάρη στην παράλειψη των όρων $d\psi/dt$ στις εξισώσεις τάσης, αφού πλέον στιγμιαίες αλλαγές ρεύματος δεν προκαλούν υψηλές υπερτάσεις όπως θα συνέβαινε αν είχαμε συμπεριλάβει τους όρους $d\psi/dt$.

Σαν αποτέλεσμα αυτών των απλουστεύσεων προκύπτει μια αλγεβρική εξίσωση ανάμεσα στη ροπή της γεννήτριας και το ρεύμα του δρομέα στις A/Γ με μηχανή επαγωγής διπλής τροφοδότησης και ανάμεσα στη ροπή της γεννήτριας και το ρεύμα του στάτη στις A/Γ με σύγχρονη μηχανή απ' ευθείας συνδεδεμένη.

Αυτή η παρατήρηση δίνει τη δυνατότητα για άλλη μία απλοποίηση. Όταν υπάρχει αλγεβρική σχέση ανάμεσα στη ροπή της γεννήτριας και το ρεύμα του στάτη ή του δρομέα, μια τιμή αναφοράς για τη ροπή μπορεί να επιτευχθεί άμεσα με την έγχυση του κατάλληλου ρεύματος στο στάτη ή στο δρομέα. Παρ' όλα αυτά σε αυτήν την περίπτωση δεν είναι απαραίτητο να διατηρηθούν οι εξισώσεις που περιγράφουν τη

γεννήτρια. Αντίθετα, η γεννήτρια μπορεί να μοντελοποιηθεί σαν πηγή ροπής, που αμέσως παράγει μια ροπή ίση με την τιμή αναφοράς που παράγεται από τον ελεγκτή.

Ένα σημαντικό πλεονέκτημα αυτής της προσέγγισης είναι ότι ανοίγει το δρόμο για τη μοντελοποίηση και των δύο ειδών Α/Γ μεταβλητών στροφών με ένα συνολικό μοντέλο Α/Γ μεταβλητών στροφών. Οι διαφορές στη συμπεριφορά των δύο ειδών γεννητριών αντισταθμίζονται από τους μετατροπείς ισχύος και τους ελεγκτές και το αποτέλεσμα είναι παρόμοιο όσον αφορά την αλληλεπίδραση με το δίκτυο και για τα δύο αυτά είδη των Α/Γ μεταβλητών στροφών, γεγονός που είναι και το βασικό σημείο ενδιαφέροντος στις δυναμικές προσομοιώσεις του ηλεκτρικού συστήματος.

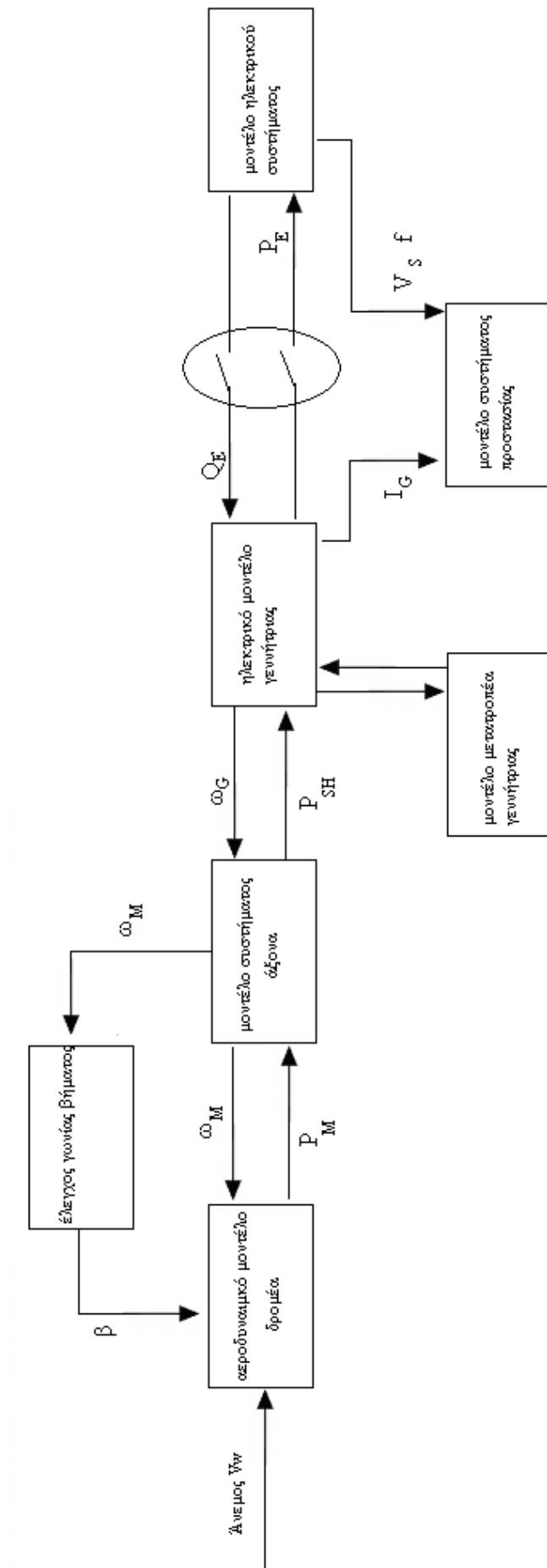
Το συνολικό αυτό μοντέλο που αναφέρθηκε πρέπει να συνδυαστεί με ένα κατάλληλο μοντέλο του δρομέα της Α/Γ περιλαμβάνοντας έλεγχο ταχύτητας δρομέα και έλεγχο γωνίας βήματος, με έλεγχο συντελεστή ισχύος ή τερματικής τάσης καθώς και μοντέλο του συστήματος προστασίας του μετατροπέα. Αλλιώς το προκύπτον μοντέλο είναι βασικά ένα μοντέλο βασισμένο στην καμπύλη ισχύος της Α/Γ, το οποίο δεν είναι κατάλληλο για τις περισσότερες αναλύσεις του ηλεκτρικού συστήματος [6].

2.1.3. Διάγραμμα λειτουργίας του δυναμικού μοντέλου

Το διάγραμμα λειτουργίας του δυναμικού μοντέλου της Α/Γ παρουσιάζεται στο σχήμα που ακολουθεί. Το μοντέλο περιλαμβάνει τα μπλοκ με αναπαράσταση των βασικών στοιχείων της Α/Γ.

- 1) Το αεροδυναμικό μοντέλο της Α/Γ. Ο εισερχόμενος άνεμος, V_w , θεωρείται σταθερός γιατί η διάρκεια των ερευνών είναι μικρή.
- 2) Το μοντέλο του συστήματος του άξονα, αναπαριστώντας πιθανές ταλαντώσεις ροπής στο σύστημα του άξονα.
- 3) Το ηλεκτρικό μοντέλο της γεννήτριας. Είναι ένα μεταβατικό μοντέλο.
- 4) Τον έλεγχο γωνίας βήματος και το σερβομηχανικό μοντέλο.
- 5) Τον μετατροπέα και τον έλεγχο του.
- 6) Το σύστημα προστασίας, αν θεωρηθεί απαραίτητο.

Τα επιμέρους αυτά μοντέλα και η σύνδεσή τους παρουσιάζονται παρακάτω:



2..2. Αεροδυναμικό Μέρος

2.2.1. Γενικές Σχέσεις

Το ποσοστό της μηχανικής ισχύος του ανέμου που είναι διαθέσιμο προς εκμετάλλευση, εξαρτάται από την ταχύτητά του ανέμου V_w , καθώς και από την ταχύτητα περιστροφής της έλικας ω_r , την ακτίνα R και τη σχεδίαση της πτερωτής. Η παραγόμενη στον άξονα μηχανική ισχύς P_m για ορισμένη μέση ταχύτητα ανέμου V_w δίνεται από την εξίσωση

$$P_m = \frac{1}{2} \rho A V_w^3 C_p(\lambda, \beta) \quad (2.2.1-1)$$

όπου ρ είναι η πυκνότητα του αέρα, η οποία συνήθως λαμβάνεται ίση με $1,25 \text{ kg/m}^3$, $A = \pi R^2$ είναι το εμβαδόν του 'κυκλικού δίσκου' που διαγράφει η έλικα, $C_p(\lambda, \beta)$ είναι ο αεροδυναμικός συντελεστής ισχύος, ο οποίος είναι συνάρτηση του λόγου

$$\lambda = \frac{R \omega_r}{V_w} \quad (2.2.1-2)$$

δηλαδή του λόγου της ταχύτητας περιστροφής του ακροπτερυγίου προς την ταχύτητα του ανέμου (tip speed ratio) και της γωνίας βήματος της έλικας, β .

Η εξίσωση 2.2.1-1 ισχύει όταν η ροή του ανέμου είναι σταθερή, κατάσταση που δεν υφίσταται στην πράξη. Οι απότομες μεταβολές του ανέμου είναι δυνατό να παράσχουν ισχύ κατά πολύ μεγαλύτερη ή μικρότερη από τη θεωρητικά υπολογιζόμενη, εξαιτίας των αεροδυναμικών φαινομένων, τα οποία δεν αποτελούν αντικείμενο της παρούσας μελέτης. Κατά μέσο όρο όμως, η σχέση 2.2.1-1 ισχύει, οπότε και υιοθετείται στη συνέχεια.

2.2.2. Αεροδυναμικά χαρακτηριστικά πτερυγίων

Ο αεροδυναμικός συντελεστής C_p των πτερυγίων της ανεμογεννήτριας αναπαριστά την ποσότητα της κινητικής ενέργειας που περιέχεται στον άνεμο που περιστρέφει την Α/Γ. Ο συντελεστής έχει αναπαρασταθεί με διάφορους τρόπους που παρουσιάζονται αντίστοιχα στα γραφήματα 2.1 και 2.2.

Η Α/Γ που μοντελοποιήθηκε στην παρούσα εργασία έχει παραμέτρους που παρατίθενται στον Πίνακα 2.1 που ακολουθεί:

Χαρακτηριστικά Α/Γ	Τιμή
Διάμετρος δρομέα	75 m
Περιοχή σάρωσης δρομέα	4418 m ²
Ταχύτητα δρομέα	9-21 rpm
Ονομαστική Ισχύς	2 MW
Ονομαστική ταχύτητα ανέμου	12 m/s
Ταχύτητα ανέμου εισόδου (cut in)	3.5 m/s
Ταχύτητα ανέμου αποκοπής (cut out)	25 m/s
Λόγος κιβωτίου ταχυτήτων	1: 100

Πίνακας 2.1. Χαρακτηριστικά Α/Γ.

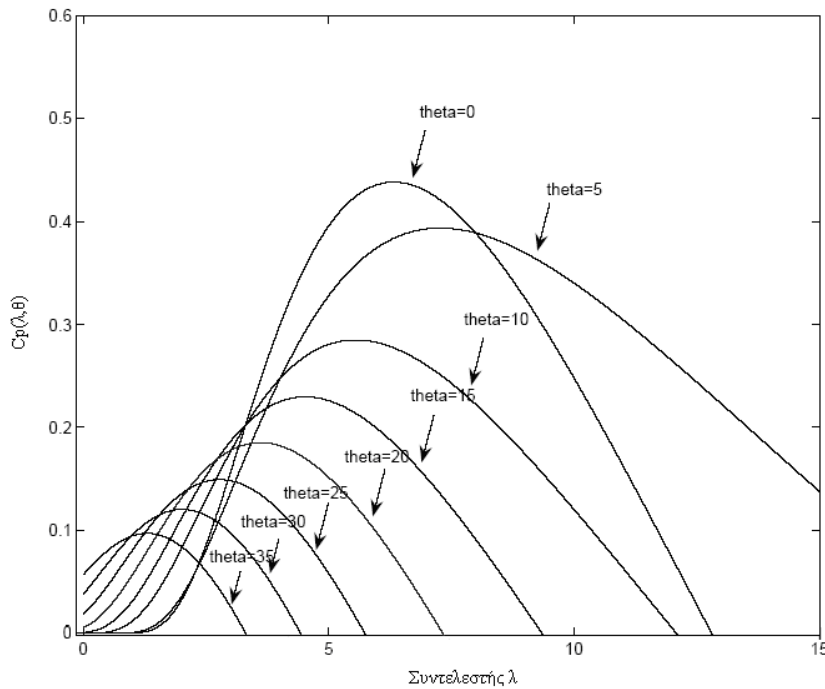
Ο αεροδυναμικός συντελεστής C_p των πτερυγίων της ανεμογεννήτριας προσεγγίζεται από τη συνάρτηση:

$$C_p(\lambda, \beta) = 0.22 \left(\frac{116}{\lambda_i} - 0.4\beta - 5 \right) e^{\frac{-12.5}{\lambda_i}} \quad (2.2.2-1)$$

όπου β η γωνία βήματος της έλικας, λ ο λόγος ταχύτητας ακροπτερυγίου και

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad (2.2.2-2)$$

Ο συντελεστής έχει αναπαρασταθεί με διάφορους τρόπους που παρουσιάζονται αντίστοιχα στα γραφήματα 2.1 και 2.2.



Γράφημα 2.1. Ο αεροδυναμικός συντελεστής ισχύος $C_p(\lambda)$ για διάφορες τιμές της γωνίας β .

Με τη βοήθεια του προγράμματος Matlab 7.0.1 και όπως προκύπτει από την παραπάνω γραφική παράσταση προκύπτει ότι η τιμή του β για την οποία επιτυγχάνεται η μέγιστη δυνατή τιμή του αεροδυναμικού συντελεστή, εντός του διαστήματος ρύθμισης $0^\circ - 35^\circ$, είναι $\beta=0^\circ$.

Για την εύρεση του μέγιστου αεροδυναμικού συντελεστή ισχύος που αντιστοιχεί σε αυτήν την τιμή της γωνίας έχουμε:

$$\frac{dC_p(\lambda,0)}{d\lambda} = 0 \Rightarrow$$

$$-\frac{638}{25 \cdot \lambda^2} \cdot \exp\left(-\frac{25}{2 \cdot \lambda} + 7/16\right) + \frac{25}{2} \cdot \frac{\left(\frac{638}{25 \cdot \lambda} - 1.9932\right)}{\lambda^2} \cdot \exp\left(\frac{-25}{2 \cdot \lambda} + \frac{7}{16}\right) = 0 \Rightarrow$$

$$\lambda_{opt} = 6.3250$$

Έτσι από τις εξισώσεις (2.2.2-1) και (2.2.2-2) προκύπτει:

$$C_p(\lambda_{opt},0) = 0.4382 \Rightarrow$$

$$C_{p\max} = 0.4382$$

Στην περιοχή ταχυτήτων ανέμου από V_{cut-in} μέχρι V_{nom} το βήμα της έλικας παραμένει σταθερό και ίσο με 0° . Στο παραπάνω διάστημα ταχυτήτων ανέμου η Α/Γ λειτουργεί θεωρητικά υπό συνθήκες μεγιστοποίησης της παραγόμενης αεροδυναμικής ισχύος με $\lambda_{opt}=6.3250$ και $C_{p,opt}=0.4382$.

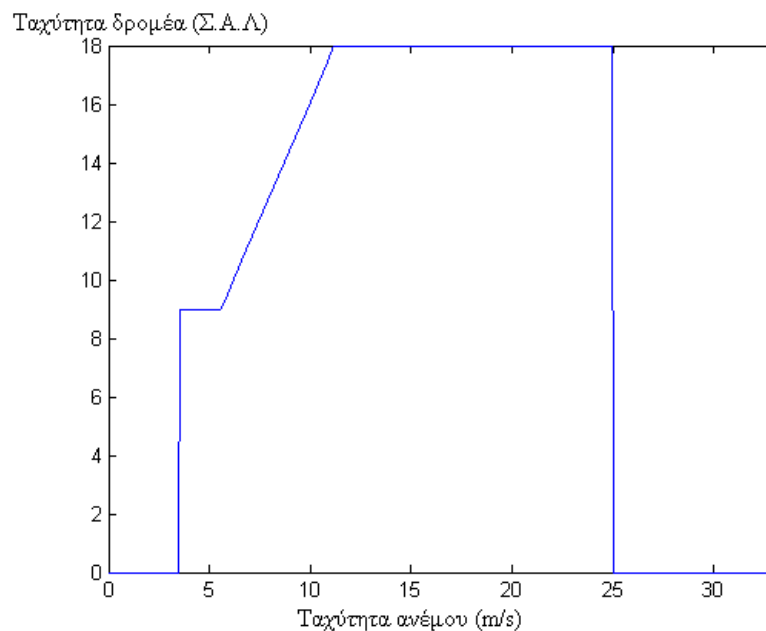
Για τη δεδομένη λοιπόν ανεμογεννήτρια με $C_{p,opt}$ και ονομαστική ταχύτητα ανέμου $V_{w,nom}=12$ m/s, η παραγόμενη μηχανική ισχύς προκύπτει από την εξίσωση (2.2.1-1) ίση με 2.049MW. Η ταχύτητα περιστροφής δρομέα της Α/Γ που αντιστοιχεί σε αυτό το σημείο λειτουργίας (η ονομαστική ταχύτητα περιστροφής) είναι 18 Σ.Α.Λ. Σε χαμηλές ταχύτητες ανέμου, η ταχύτητα περιστροφής διατηρείται στη μικρότερη τιμή της, που είναι 9 Σ.Α.Λ. Κατόπιν, η ταχύτητα αυξάνεται ανάλογα με την ταχύτητα ανέμου εξασφαλίζοντας συνθήκες μεγιστοποίησης της αεροδυναμικής ισχύος, δηλαδή $\lambda=\lambda_{opt}$.

Έχουμε λοιπόν:

$$\lambda_{opt} = \frac{\omega_{opt} R}{V_w} = \frac{2\pi N_r R}{60 V_w} \Rightarrow N_r = 1.611 \cdot V_w \quad (2.2.2-3)$$

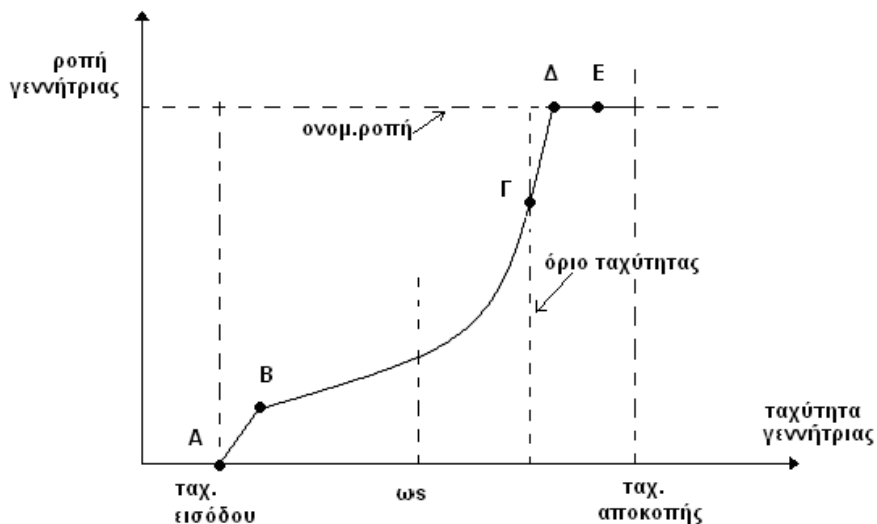
Όταν η ταχύτητα περιστροφής φτάσει την ονομαστική της τιμή (18 Σ.Α.Λ) διατηρείται σταθερή μέχρι η ταχύτητα του ανέμου πάρει την ονομαστική της τιμή. (12m/s). Αν η ταχύτητα ανέμου αυξηθεί περαιτέρω ενεργοποιείται ο μηχανισμός αλλαγής της γωνίας βήματος των πτερυγίων ώστε η παραγόμενη μηχανική ισχύς να μην υπερβαίνει την ονομαστική της τιμή. Η διαδικασία αυτή ελέγχου ακολουθείται μέχρι η ταχύτητα ανέμου να γίνει ίση με την ταχύτητα αποκοπής οπότε και η Α/Γ βγαίνει εκτός λειτουργίας για προστασία από πιθανή καταστροφή από ισχυρά ρεύματα ανέμου.

Έτσι η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα N_r συναρτήσει της ταχύτητας του ανέμου V_w προκύπτει ως εξής:



Γράφημα 2.3. Ταχύτητα περιστροφής N_r (Σ.Α.Λ) του δρομέα της Α/Γ συναρτήσει της ταχύτητας ανέμου V_w (m/s).

Η χαρακτηριστική ροπής-ταχύτητας, που εφαρμόστηκε για το μοντέλο του ελέγχου, έχει σχηματοποιηθεί στο Γράφημα 2.4.



Γράφημα 2.4. Χαρακτηριστική ροπής-ταχύτητας για έλεγχο της ανεμογεννήτριας.

Η μέθοδος ελέγχου που εφαρμόζεται έχει στόχο την εξασφάλιση της βέλτιστης ισχύος P_{opt} . Από τη στιγμή που η ταχύτητα του δρομέα ω_r είναι ανάλογη της ταχύτητας ανέμου V_w , η ισχύς αυξάνεται συναρτήσει του ω_r^3 και του V_w^3 , και η αντιστοιχούσα ροπή της γεννήτριας των ω_r^2 και V_w^2 [16]. Η βέλτιστη χαρακτηριστική για το μοντέλο μπορεί να προκύψει για βέλτιστη ροπή ως εξής [10] :

$$T_{opt} = K_{opt} \cdot \omega_r^2 \quad (2.2.2-4)$$

Για μέγιστη απόδοση ισχύος λοιπόν, η καμπύλη ροπή-ταχύτητα ακολουθεί την (2.2.2-4). Αυτό ισχύει μεταξύ των σημείων B και Γ. Μέσα σε αυτά τα όρια λειτουργίας, κατά τη διάρκεια χαμηλών-μέτριων ταχυτήτων ανέμου, η μέγιστη δυνατή ενέργεια εξασφαλίζεται από την ανεμογεννήτρια. Λόγω χαρακτηριστικών του μετατροπέα ισχύος, δεν συνηθίζεται πρακτικά να διατηρούμε λειτουργία βέλτιστης ισχύος από την ταχύτητα εισόδου (cut in) μέχρι την ονομαστική (nominal). Γι' αυτό, για χαμηλές ταχύτητες ανέμου το μοντέλο λειτουργεί σε σχεδόν σταθερή ταχύτητα περιστροφής (A-B). Η ταχύτητα περιστροφής επίσης περιορίζεται από το εμπόδιο του αεροδυναμικού θορύβου [16], όπου ο μετατροπέας επιτρέπει την αύξηση της ροπής, σε ουσιαστικά σταθερή ταχύτητα, μέχρι ονομαστική ροπή (Γ-Δ). Αν η ταχύτητα του ανέμου αυξηθεί περαιτέρω σε σημείο να υπερβεί την ονομαστική ροπή της ανεμογεννήτριας, ο έλεγχος ακολουθεί τη διαδρομή Δ-E, όπου η ηλεκτρομαγνητική

ροπή είναι σταθερή. Όταν το σύστημα φτάσει στο E, αναλαμβάνει ο έλεγχος γωνίας (pitch control) από τον έλεγχο ροπής για να περιορίσει την αεροδυναμική ισχύ εισόδου. Για πολύ υψηλές ταχύτητες ανέμου, ο έλεγχος γωνίας θα καθορίζει την ισχύ εισόδου μέχρι την ταχύτητα αποκοπής.

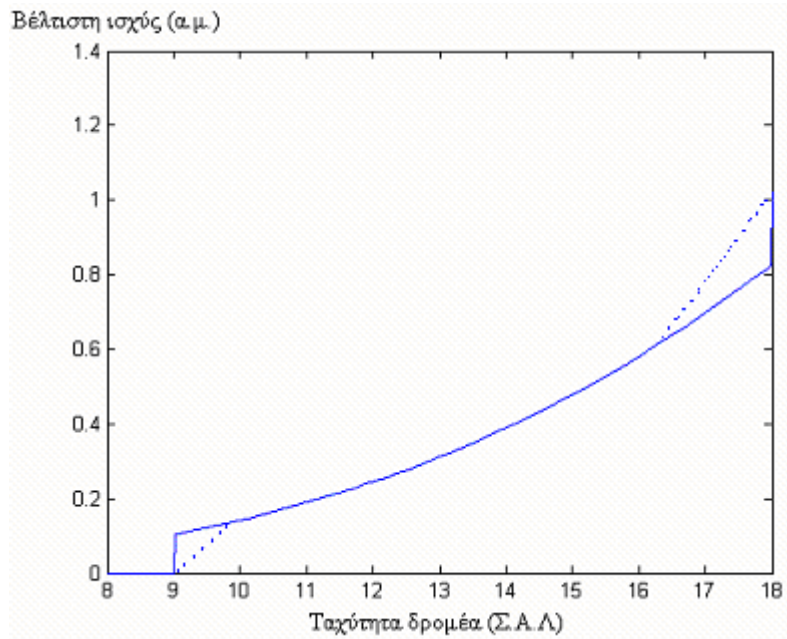
Άρα για ταχύτητες ανέμου ανάμεσα στην ελάχιστη (όπου $N_{r,min}=9$ Σ.Α.Λ.) και την ονομαστική (όπου $N_{r,nom}=18$ Σ.Α.Λ.) ισχύει η σχέση (2.2.2-3), η οποία προέκυψε, όπως προαναφέρθηκε, με λειτουργία υπό βέλτιστη ισχύ. Δηλαδή ισχύει:

$$\begin{aligned} N_r &= 1.611 \cdot V_w \Rightarrow \\ V_w &= \frac{N_r}{1.611} \end{aligned} \quad (2.2.2-5)$$

Ο αεροδυναμικός συντελεστής C_p είναι ίσος με $C_{p,opt}=0.4382$. Άρα η βέλτιστη παραγόμενη μηχανική ισχύς δίνεται από την εξίσωση (2.2.2-6):

$$\begin{aligned} P_{m,opt} &= \frac{1}{2} \rho A V_w^3 C_{p,opt} \Rightarrow \\ P_{m,opt} &= \frac{1}{2} \cdot 1.25 \cdot 4.418 \cdot \left(\frac{N_r}{1.611} \right)^3 \cdot 0.4382 \Rightarrow \\ P_{m,opt} &= 289,39 \cdot N_r^3 \end{aligned} \quad (2.2.2-6)$$

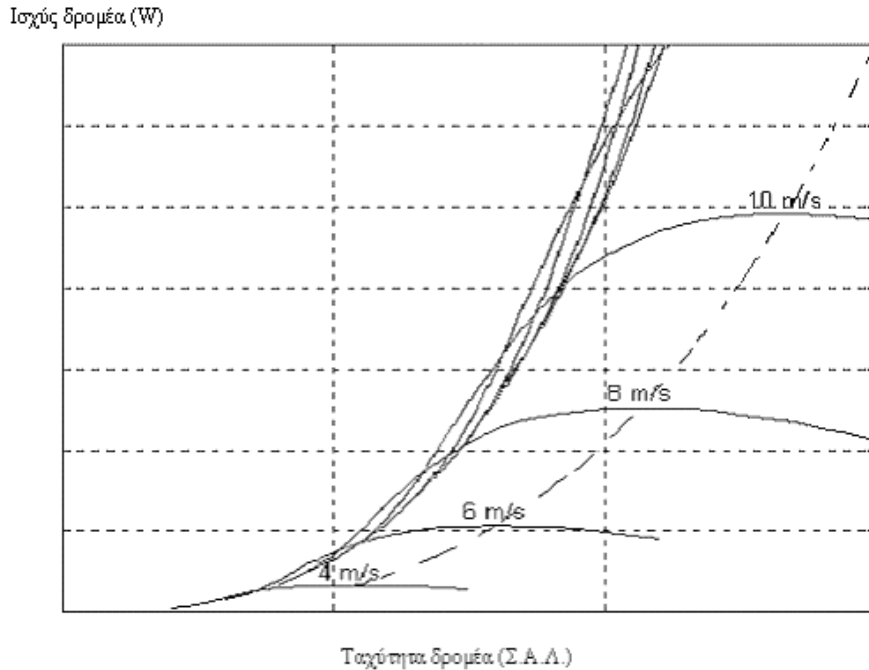
Παίρνοντας σαν βάση ισχύος $S_b=2$ MVA, προκύπτει η παρακάτω χαρακτηριστική ελέγχου των στροφών στο α.μ. σύστημα (η συνεχής γραμμή):



Γράφημα 2.5. Χαρακτηριστική ελέγχου στροφών.

Ελέγχοντας την ισχύ με βάση τη συνεχή γραμμή, παρ' όλα αυτά, δημιουργεί ορισμένα προβλήματα, διότι η επιθυμητή ισχύς δεν ορίζεται μονοσήμαντα σε μέγιστη και ελάχιστη ταχύτητα δρομέα και επειδή αν η ταχύτητα δρομέα μειωθεί από λίγο πάνω της ονομαστικής σε λίγο κάτω ή από λίγο κάτω της ελάχιστης σε λίγο πάνω, η αλλαγή στην παραγόμενη ισχύ θα είναι πολύ μεγάλη. Αυτό με τη σειρά του οδηγεί σε μεγάλες διακυμάνσεις ισχύος όταν η ταχύτητα του δρομέα είναι γύρω από την ονομαστική ή την ελάχιστη τιμή. Για την επίλυση των δυσκολιών αυτών, ακολουθήθηκε μία χαρακτηριστική ελέγχου παρόμοια με την προηγούμενη (συνεχής γραμμή) η οποία οδηγεί μεν σε μη βέλτιστη απόδοση αλλά επιλύει τα προαναφερθέντα προβλήματα. Αυτή η χαρακτηριστική ελέγχου διακρίνεται με τη διακεκομμένη γραμμή.

Μια τυπική χαρακτηριστική ανεμογεννήτριας με χαραγμένη την καμπύλη μέγιστης αεροδυναμικής ισχύος ως διακεκομμένη που αποδίδει το μέγιστο $C_{p,max}$ για κάθε ταχύτητα ανέμου παρατίθεται στο ακόλουθο Γράφημα.



Γράφημα 2.6. Καμπύλη ελέγχου μέγιστης αεροδυναμικής απόδοσης.

2.2.3. Χαρακτηριστική ελέγχου του βήματος της έλικας

Όσον αφορά τον έλεγχο της γωνίας βήματος των πτερυγίων της Α/Γ αναφέρθηκε παραπάνω ότι για ταχύτητες ανέμου κάτω από την ονομαστική $V_{w,nom}$ διατηρείται σταθερή και ίση με $\beta=0^\circ$ ενώ στη συνέχεια εξασφαλίζοντας σταθερή την παραγόμενη ισχύ και ίση με την ονομαστική $P_{m,nom}$, υπολογίζονται οι σωστές τιμές για τη γωνία βήματος. Πιο αναλυτικά ισχύει:

Για βέλτιστο αεροδυναμικό συντελεστή $C_{p,opt}$ και ονομαστική ταχύτητα ανέμου $V_{w,nom}=12$ m/s η παραγόμενη μηχανική ισχύς είναι ίση με $P_m=2.049$ MW. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω στην χαρακτηριστική ελέγχου στροφών του δρομέα της Α/Γ για ταχύτητες ανέμου μεγαλύτερες της ονομαστικής η ταχύτητα περιστροφής διατηρείται σταθερή:

$$N_{r,nom} = 18 \text{ Σ.Α.Λ}$$

Ο λόγος ταχύτητας περιστροφής του ακροπτερυγίου προς την ταχύτητα ανέμου δίνεται τότε από τη σχέση (2.2.3-1):

$$\lambda = \frac{R\omega_{r,nom}}{V_w} \Rightarrow \lambda = \frac{R \frac{2 \cdot \pi \cdot N_{r,nom}}{60}}{V_w} \Rightarrow \lambda = \frac{37.5 \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot 18}{60}}{V_w} \Rightarrow$$

$$\lambda = \frac{70.69}{V_w} \quad (2.2.3-1)$$

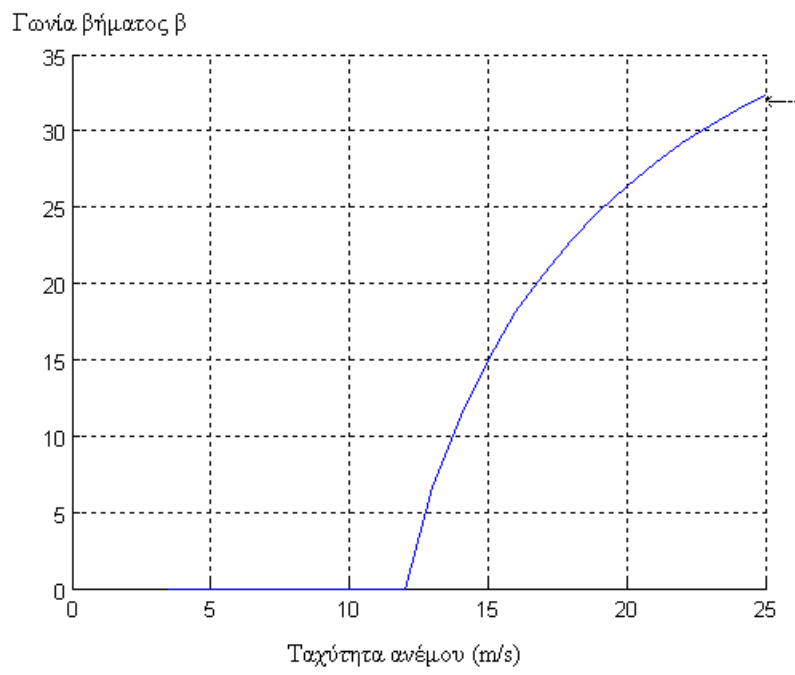
Για να εξασφαλιστεί ότι η παραγόμενη μηχανική ισχύς διατηρείται ίση με την ονομαστική, η γωνία βήματος πρέπει να παίρνει τις κατάλληλες τιμές ώστε:

$$P_m = P_{m,max} = \frac{1}{2} \rho A V_{w,nom}^3 C_{p,opt} \Rightarrow$$

$$\frac{1}{2} \cdot 1.25 \cdot 4.418 \cdot V_w^3 \cdot C_p(\lambda, \beta) = 2.049 MW \Rightarrow$$

$$V_w^3 \cdot C_p\left(\frac{70.69}{V_w}, \beta\right) = 742.04 \quad (2.2.3-2)$$

Προκύπτει η παραπάνω μη γραμμική εξίσωση ως προς τη γωνία βήματος β και με τη βοήθεια λογισμικού υπολογίζεται για κάθε ταχύτητα ανέμου, μεγαλύτερη της ονομαστικής $V_{w,nom}$, η απαιτούμενη τιμή της γωνίας β . Παρακάτω παρατίθεται γραφικά η σχέση μεταξύ της απαιτούμενης γωνία βήματος των πτερυγίων συναρτήσει της ταχύτητας ανέμου:

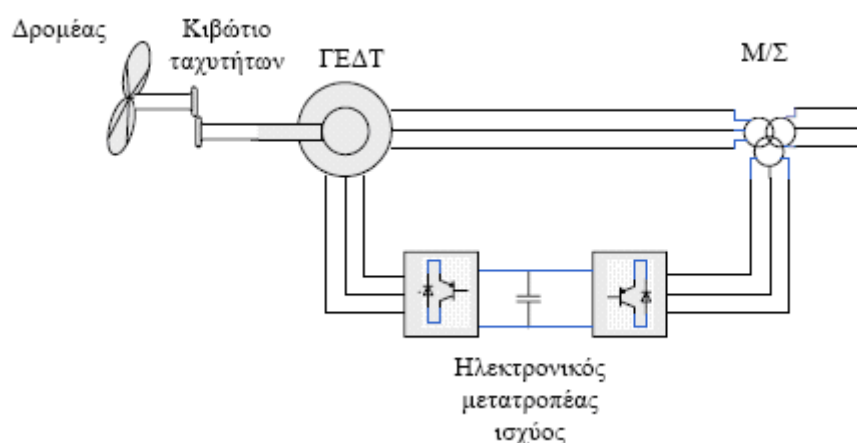


Γράφημα 2.7. Χαρακτηριστική ελέγχου γωνίας βήματος.

2.3. Ανεμογεννήτρια Μεταβλητών Στροφών με Γεννήτρια Επαγωγής Διπλής Τροφοδότησης

2.3.1. Εισαγωγή

Το σύστημα που παρουσιάζεται και γραφικά στο Σχήμα 2.3.1.1. που ακολουθεί, αποτελείται από μια Α/Γ συνδεδεμένη με μια γεννήτρια επαγωγής διπλής τροφοδότησης. Αυτό σημαίνει ότι ο στάτης είναι απ' ευθείας συνδεδεμένος στο δίκτυο ενώ το τύλιγμα του δρομέα συνδέεται στο μετατροπέα μέσω δαχτυλιδιών (slip rings). Αυτό το σύστημα είναι ιδιαίτερα δημοφιλές στον τομέα των Α/Γ μεταβλητών στροφών. Αυτό συμβαίνει κυρίως λόγω του ότι ο ηλεκτρονικός μετατροπέας ισχύος χειρίζεται μόνο ένα κλάσμα (20-30%) της ολικής ισχύος. Αυτό σημαίνει ότι οι απώλειες στον ηλεκτρονικό μετατροπέα ισχύος μπορούν να μειωθούν σε σύγκριση με σύστημα όπου ο μετατροπέας χειρίζεται την ολική ισχύ. Επιπλέον, το κόστος του μετατροπέα μειώνεται.

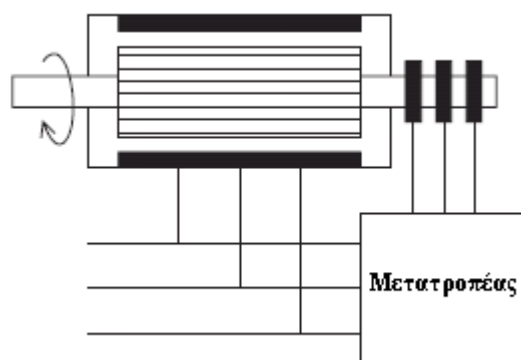


Σχήμα 2.3.1.1. Ανεμογεννήτρια μεταβλητών στροφών με γεννήτρια επαγωγής διπλής τροφοδότησης.

Υπάρχει μια παραλλαγή του συστήματος ΓΕΔΤ που χρησιμοποιεί ελεγχόμενες μεταβλητές εξωτερικές αντιστάσεις. Κάποια από τα μειονεκτήματα αυτής της μεθόδου είναι ότι καταναλώνεται ενέργεια σε αυτές τις εξωτερικές αντιστάσεις και ότι δεν είναι δυνατό να ελεγχθεί η άεργος ισχύς.

Κατασκευαστές, που παράγουν τέτοια συστήματα, για παράδειγμα, είναι οι DeWind, GE Wind Energy, Nordex, και η Vestas [12].

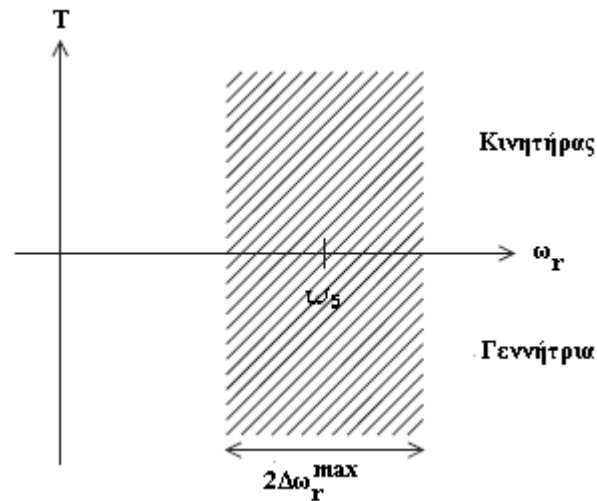
Για συστήματα μεταβλητής ταχύτητας με περιορισμένο εύρος ταχύτητας, π.χ $\pm 30\%$ της σύγχρονης ταχύτητας η γεννήτρια επαγωγής διπλής τροφοδότησης (ΓΕΔΤ) μπορεί να είναι μια ενδιαφέρουσα λύση. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, ο λόγος για αυτό είναι ότι ο ηλεκτρονικός μετατροπέας ισχύος χρειάζεται να χειριστεί ένα κλάσμα (20-30%) της ολικής ισχύος. Αυτό σημαίνει ότι οι απώλειες στον ηλεκτρονικό μετατροπέα ισχύος μπορούν να μειωθούν σε σύγκριση με σύστημα όπου ο μετατροπέας χειρίζεται την ολική ισχύ. Η αρχή λειτουργίας παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.3.1.2.



Σχήμα 2.3.1.2. Αρχή λειτουργίας της ΓΕΔΤ.

Ο μετατροπέας που συνδέεται ανάμεσα στο δρομέα και στον τερματικό ζυγό της Α/Γ αποτελείται από δύο μετατροπείς, δηλ. το μετατροπέα στην πλευρά της μηχανής και το μετατροπέα στην πλευρά του δικτύου, οι οποίοι συνδέονται μέσω της dc πλευράς τους. Στη διεθνή βιβλιογραφία το σχήμα αυτό των μετατροπέων είναι γνωστό ως back to back. Ανάμεσα στους δύο μετατροπείς τοποθετείται ένας πυκνωτής σαν αποθήκη ενέργειας, με στόχο να διατηρεί μικρές τις διακυμάνσεις στην τάση της συνεχούς σύνδεσης. Με το μετατροπέα στην πλευρά της μηχανής είναι δυνατό να ελεγχθεί η ροπή ή η ταχύτητα της ΓΕΔΤ και επίσης ο συντελεστής ισχύος στα τερματικά του στάτη, ενώ ο βασικός στόχος για το μετατροπέα από την πλευρά του δικτύου είναι ο έλεγχος της αέργου ισχύος που ανταλλάσσεται με το δίκτυο.

Το εύρος ταχύτητας της μηχανής επαγωγής διπλής τροφοδότησης φαίνεται στο Σχ. 2.3.1.3. Όπως επίσης φαίνεται στο σχήμα, η μηχανή μπορεί να λειτουργήσει τόσο ως κινητήρας αλλά και ως γεννήτρια με ένα εύρος στην ταχύτητα του δρομέα $\pm \Delta\omega_r^{\max}$ γύρω από τη σύγχρονη ταχύτητα, ω_s .

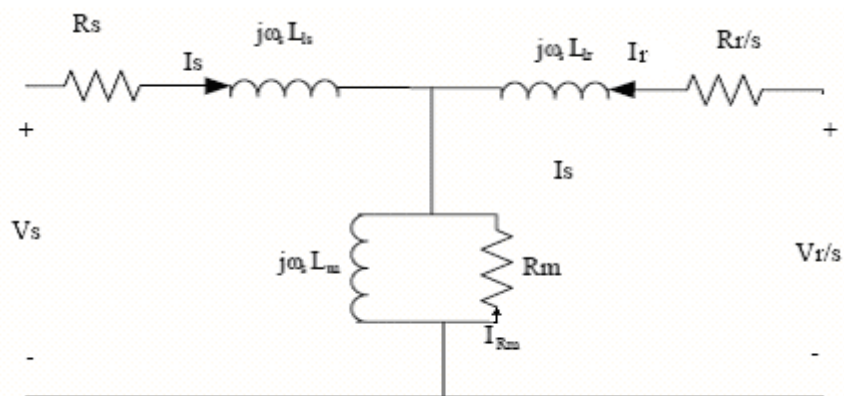


Σχήμα 2.3.1.3. Εύρος ταχύτητας στο διάγραμμα ροπής-ταχύτητας μιας ΓΕΔΤ.

Μια συνήθης εφαρμογή, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, για τις ΓΕΔΤ είναι οι ανεμογεννήτριες, από τη στιγμή που λειτουργούν σε ένα περιορισμένο εύρος ταχύτητας περίπου $\pm 30\%$. Άλλες εφαρμογές, εκτός από τις ανεμογεννήτριες, για τα συστήματα ΓΕΔΤ είναι, για παράδειγμα, συστήματα αποθήκευσης ενέργειας, αυτόνομα συστήματα ντήζελ ή στρεφόμενοι μετατροπείς που τροφοδοτούν ένα δίκτυο σιδηροδρόμων από ένα δίκτυο σταθερής συχνότητας.

2.3.2. Ισοδύναμο κύκλωμα μόνιμης κατάστασης της ΓΕΔΤ

Το ισοδύναμο κύκλωμα της γεννήτριας επαγωγής διπλής τροφοδότησης, λαμβάνοντας υπ' όψιν τις απώλειες μαγνήτισης, παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.3.2.1. Αυτό το ισοδύναμο κύκλωμα ισχύει για μια ισοδύναμη φάση σε Y και για υπολογισμούς μόνιμης κατάστασης. Στην περίπτωση που η ΓΕΔΤ είναι συνδεδεμένη κατά Δ , η μηχανή μπορεί ακόμα να εκφραστεί με το ισοδύναμο αυτό. Σε αυτήν την παράγραφο υιοθετείται η $j\omega$ -μέθοδος για τους υπολογισμούς.



Σχήμα 2.3.2.1. Ισοδύναμο κύκλωμα της ΓΕΑΤ.

Σημειώνεται εδώ ότι, αν η τάση του δρομέα, V_r , στο Σχήμα 2.3.2.1. βραχυκυκλωθεί, το ισοδύναμο κύκλωμα για την ΓΕΑΤ μετατρέπεται στο τυπικό ισοδύναμο κύκλωμα για μια μηχανή επαγωγής βραχυκυκλωμένου δρομέα. Εφαρμόζοντας τον νόμο τάσης του Kirchhoff στο κύκλωμα στο Σχήματος 2.3.2.1. προκύπτει

$$V_s = R_s I_s + j\omega_s L_{ls} I_s + j\omega_s L_m (I_s + I_r + I_{Rm}) \quad (2.3.2-1)$$

$$\frac{V_r}{s} = \frac{R_r}{s} I_r + j\omega_s L_{lr} I_r + j\omega_s L_m (I_s + I_r + I_{Rm}) \quad (2.3.2-2)$$

$$0 = R_m I_{Rm} + j\omega_s L_m (I_s + I_r + I_{Rm}) \quad (2.3.2-3)$$

όπου χρησιμοποιείται ο εξής συμβολισμός:

V_s	τάση στάτη	R_s	αντίσταση στάτη
V_r	τάση δρομέα	R_r	αντίσταση δρομέα
I_s	ρεύμα στάτη	R_m	αντίσταση μαγνήτισης
I_r	ρεύμα δρομέα	L_{ls}	επαγωγή σκέδασης στάτη
I_m	ρεύμα μαγνήτισης	L_{lr}	επαγωγή σκέδασης δρομέα
ω_s	συχνότητα στάτη	L_m	επαγωγή μαγνήτισης
s	ολίσθηση		

Η ολίσθηση s , ισούται με

$$s = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s}$$

όπου ω_r είναι η ταχύτητα του δρομέα. Επιπλέον, αν οριστούν η ροή διακένου, η ροή στάτη και δρομέα ως εξής

$$\Psi_m = L_m (I_s + I_r + I_{Rm}) \quad (2.3.2-4)$$

$$\Psi_s = L_{ls} I_s + L_m (I_s + I_r + I_{Rm}) = L_{ls} I_s + \Psi_m \quad (2.3.2-5)$$

$$\Psi_r = L_{lr} I_r + L_m (I_s + I_r + I_{Rm}) = L_{lr} I_r + \Psi_m \quad (2.3.2-6)$$

οι εξισώσεις που περιγράφουν το ισοδύναμο κύκλωμα μπορούν να ξαναγραφούν ως εξής:

$$V_s = R_s I_s + j\omega_s \Psi_s \quad (2.3.2-7)$$

$$\frac{V_r}{s} = \frac{R_r}{s} I_r + j\omega_s \Psi_r \quad (2.3.2-8)$$

$$0 = R_m I_{Rm} + j\omega_s \Psi_m \quad (2.3.2-9)$$

Οι απώλειες στις ωμικές αντιστάσεις της μηχανής επαγωγής είναι

$$P_{loss} = 3(R_s |I_s|^2 + R_r |I_r|^2 + R_m |I_m|^2) \quad (2.3.2-10)$$

ενώ είναι δυνατόν να εκφραστεί η ηλεκτρομηχανική ροπή, T_e , ως εξής

$$T_e = 3N_p \operatorname{Im}[\Psi_m I_r^*] = 3N_p \operatorname{Im}[\Psi_r I_r^*] \quad (2.3.2-11)$$

όπου N_p είναι ο αριθμός των ζευγών πόλων.

Ροή Ισχύος

Προκειμένου να ερευνηθεί η ροή ισχύος στο σύστημα της ΓΕΔΤ, η φαινόμενη ισχύς που παρέχεται στη ΓΕΔΤ μέσω του κυκλώματος του στάτη και του δρομέα πρέπει να καθοριστεί. Η φαινόμενη ισχύς S_s του στάτη και S_r του δρομέα μπορούν να βρεθούν ως εξής

$$S_s = 3V_s I_s^* = 3R_s |I_s|^2 + j3\omega_s L_{ls} |I_s|^2 + j3\omega_s \Psi_m I_s^* \quad (2.3.2-12)$$

$$S_r = 3V_r I_r^* = 3R_r |I_r|^2 + j3\omega_s L_{lr} |I_r|^2 + j3\omega_s s \Psi_m I_r^* \quad (2.3.2-13)$$

Τώρα, η ενεργός ισχύς του δρομέα και του στάτη καθορίζονται απλά:

$$P_s = \text{Re}[S_s] = 3R_s |I_s|^2 + 3R_m |I_{Rm}|^2 + 3\omega_s \text{Im}[\Psi_m I_r^*] \approx 3\omega_s \text{Im}[\Psi_m I_r^*] \quad (2.3.2-13)$$

$$P_r = \text{Re}[S_r] = 3R_r |I_r|^2 - 3\omega_s s \text{Im}[\Psi_m I_r^*] \approx -3\omega_s s \text{Im}[\Psi_m I_r^*] \quad (2.3.2-14)$$

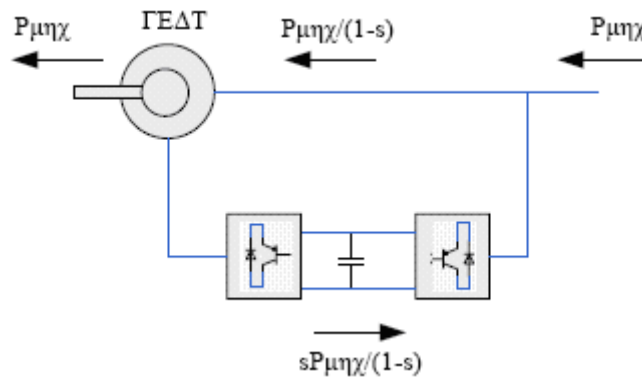
όπου οι προσεγγίσεις έχουν γίνει αμελώντας τις απώλειες στις αντιστάσεις και τις απώλειες μαγνήτισης. Από τις παραπάνω εξισώσεις η μηχανική ισχύς που παράγεται από την ΓΕΔΤ μπορεί να οριστεί ως το άθροισμα της ισχύος του στάτη και του δρομέα

$$P_{mech} = 3\omega_s \text{Im}[\Psi_m I_r^*] - 3\omega_s s \text{Im}[\Psi_m I_r^*] = 3 \text{Im}[\Psi_m I_r^*] \omega_s (1-s) \Rightarrow$$

$$P_{mech} = 3 \text{Im}[\Psi_m I_r^*] \omega_s \left(1 - \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s}\right) = 3 \text{Im}[\Psi_m I_r^*] \omega_r \quad (2.3.2-15)$$

Διαιρώντας την P_{mech} με τη μηχανική ταχύτητα του δρομέα, $\omega_m = \omega_r / N_p$, η παραγόμενη ηλεκτρομηχανική ροπή δίνεται από τον τύπο που έχουμε παραθέσει παραπάνω. Επιπλέον, αυτό σημαίνει ότι $P_s \approx P_{mech} / (1-s)$ και $P_r \approx -s P_{mech} / (1-s)$. Στο σχήμα που ακολουθεί μπορεί να φανεί πώς η μηχανική ισχύς διαιρείται μεταξύ των κυκλωμάτων του στάτη και του δρομέα και ότι εξαρτάται από την ολίσθηση. Έτσι, η ισχύς του δρομέα είναι περίπου ίση με το αντίθετο της ισχύος του στάτη πολλαπλασιασμένη με την ολίσθηση, δηλ $P_r \approx -s P_s$. Με αυτόν τον τρόπο

καταλήγουμε στο γνωστό συμπέρασμα ότι ο μετατροπέας που συνδέεται στο δρομέα μπορεί να διαστασιοποιηθεί σαν κλάσμα της ονομαστικής ισχύος της ΓΕΔΤ αν η μέγιστη ολίσθηση είναι χαμηλή.



Σχήμα 2.3.2.2. Ροή ισχύος σε σύστημα ΓΕΔΤ χωρίς απώλειες.

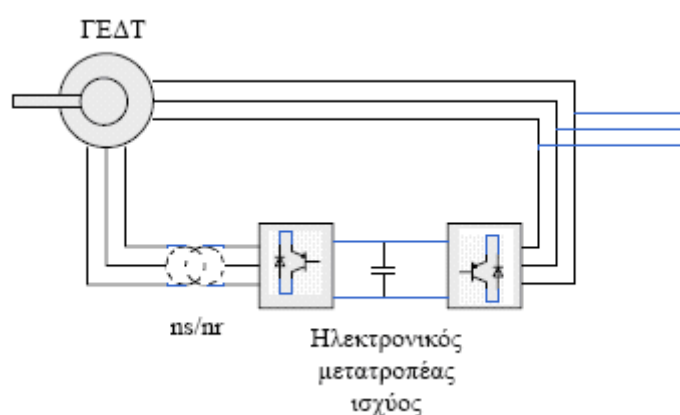
Ένα παράδειγμα για το πώς η ισχύς του στάτη και του δρομέα εξαρτώνται από την ολίσθηση φαίνεται στον Πίνακα 2.3.2.1. Μπορεί να φανεί στον πίνακα ότι ισχύς μέσω του μετατροπέα, δεδομένης της μηχανικής ισχύος, είναι υψηλότερη για θετική ολίσθηση ($\omega_r < \omega_s$). Αυτό οφείλεται στον παράγοντα $1/(1-s)$ στις εκφράσεις της ισχύος του δρομέα. Παρ' όλα αυτά, για μια Α/Γ, η κατάσταση δεν είναι όπως φαίνεται στον Πίνακα 2.3.2.1. Για μια Α/Γ, γενικά, σε χαμηλή μηχανική ισχύ η ολίσθηση είναι θετική και για υψηλή μηχανική ισχύ είναι αρνητική.

Ολίσθηση , s, [%]	Ταχύτητα δρομέα, ω_r , [α.μ]	Ισχύς δρομέα, P_r	Ισχύς στάτη, P_s
0.3	0.7	$-0.43 \cdot P_{μηχ}$	$1.43 \cdot P_{μηχ}$
0	1.0	0	$P_{μηχ}$
-0.3	1.3	$0.23 \cdot P_{μηχ}$	$0.77 \cdot P_{μηχ}$

Πίνακας 2.3.2.1. Παράδειγμα της ροής ισχύος για διαφορετικές ολισθήσεις στο σύστημα ΓΕΔΤ.

2.3.3. Λόγος τυλιγμάτων στάτη-προς-δρομέα

Από τη στιγμή που οι απώλειες στον ηλεκτρονικό μετατροπέα ισχύος εξαρτώνται από το ρεύμα μέσω των ημιαγωγικών στοιχείων, είναι σημαντικό να υπάρχει ένας λόγος τυλιγμάτων στάτη-προς-δρομέα της ΓΕΔΤ που ελαχιστοποιεί το ρεύμα στο δρομέα χωρίς να υπερβαίνεται η μέγιστη δυνατή τιμή τάσης δρομέα. Στο Σχήμα 2.3.3.1. ένας μετασχηματιστής τοποθετείται ανάμεσα στο κύκλωμα του δρομέα και του μετατροπέα. Ο μετασχηματιστής χρησιμοποιείται εδώ για να τονίσει και να δώσει έμφαση στο λόγο στάτη-προς-δρομέα, αλλά στην πραγματικότητα δεν υπάρχει.



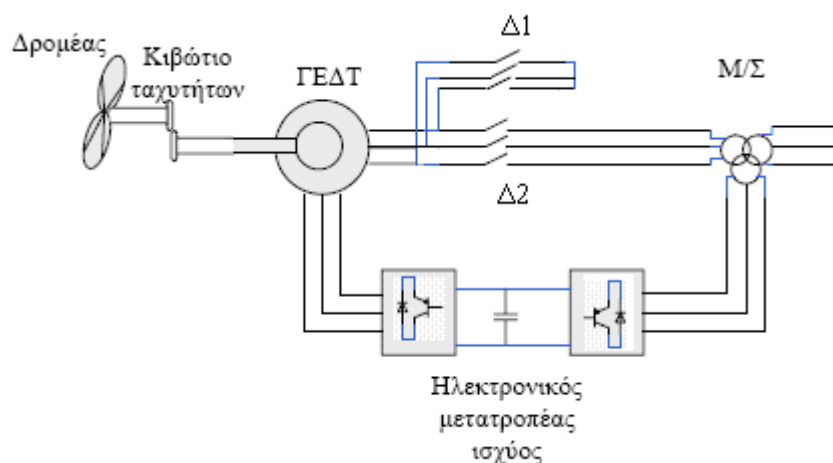
Σχήμα 2.3.3.1. Λόγος τυλιγμάτων στάτη-προς-δρομέα με «εικονικό» μετασχηματιστή

Για παράδειγμα, αν ο λόγος αυτός, n_s/n_r , είναι 0.4, το ρεύμα του δρομέα είναι περίπου 0.4 φορές μικρότερο από το ρεύμα το στάτη, αν το ρεύμα μαγνήτισης αμεληθεί. Επιπλέον, αν η ολίσθηση s της ΓΕΔΤ είναι 30%, η τάση του δρομέα θα είναι περίπου $V_r^{\text{δρομέα}} = s / (n_s / n_r) V_s = 0.3 / 0.4 V_s = 0.75 V_s$, δηλ. 75% της τάσης στάτη, γεγονός που δίνει τη δυνατότητα για δυναμικό έλεγχο. Σημειώνεται ότι η $V_r^{\text{δρομέα}} = (n_r / n_s) V_r$ είναι η πραγματική (φυσική) τάση δρομέα, ενώ V_r είναι η τάση δρομέα ανηγμένη στο κύκλωμα του στάτη. Σε αυτήν την εργασία, όλες οι μεταβλητές και παράμετροι είναι ανηγμένες στο κύκλωμα του στάτη, εκτός αν δηλώνεται διαφορετικά.

2.3.4. Τύποι ΓΕΔΤ

A. Βραχυκυκλωμένη ΓΕΔΤ

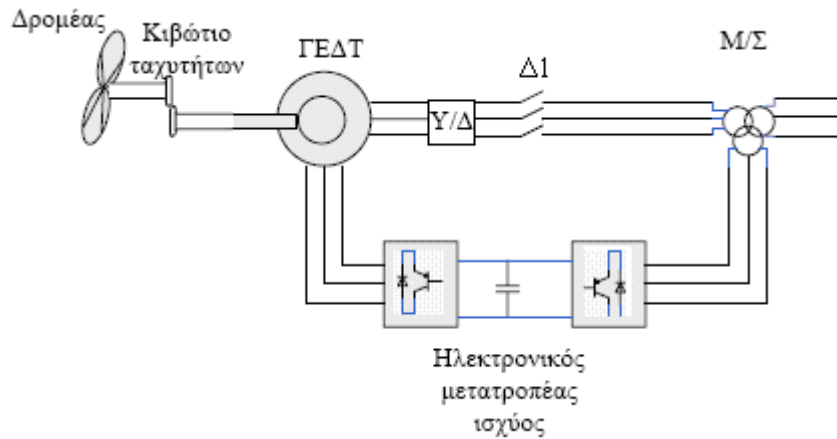
Το Σχήμα 2.3.4.1. δείχνει ένα διάγραμμα της βραχυκυκλωμένης ΓΕΔΤ. Στο σχήμα μπορεί να δει κανείς δύο διακόπτες. Ο διακόπτης $\Delta 2$ χρησιμοποιείται για να αποσυνδέσει την ανεμογεννήτρια από το δίκτυο και ο διακόπτης $\Delta 1$ χρησιμοποιείται για να βραχυκυκλώσει το στάτη της ΓΕΔΤ. Τώρα η γεννήτρια λειτουργεί σαν απλή γεννήτρια επαγωγής, εκτός από το γεγονός ότι ο μετατροπέας είναι συνδεδεμένος στο κύκλωμα του δρομέα αντί για το κύκλωμα του στάτη. Αυτό σημαίνει ότι, σε αυτή την κατάσταση λειτουργίας, η ΓΕΔΤ μπορεί να ελεγχθεί με παρόμοιο τρόπο σαν κανονική γεννήτρια επαγωγής. Για παράδειγμα, σε χαμηλές ταχύτητες ανέμου το επίπεδο της ροής στη γεννήτρια μπορεί να μειωθεί.



Σχήμα 2.3.4.1. Αρχή λειτουργίας της βραχυκυκλωμένης ΓΕΔΤ.

B. Υ-Δ-συνδεδεμένη ΓΕΔΤ

Το σχήμα 2.3.4.2. παρουσιάζει τη δομή μιας ΓΕΔΤ συνδεδεμένης σε Υ-Δ. Όπως φαίνεται και στο σχήμα, μια συσκευή για τη μετάβαση μεταξύ Υ και Δ έχει εισαχθεί στο κύκλωμα του στάτη.



Σχήμα 2.3.4.2. Αρχή λειτουργίας της ΓΕΔΤ συνδεδεμένης σε Y-Δ.

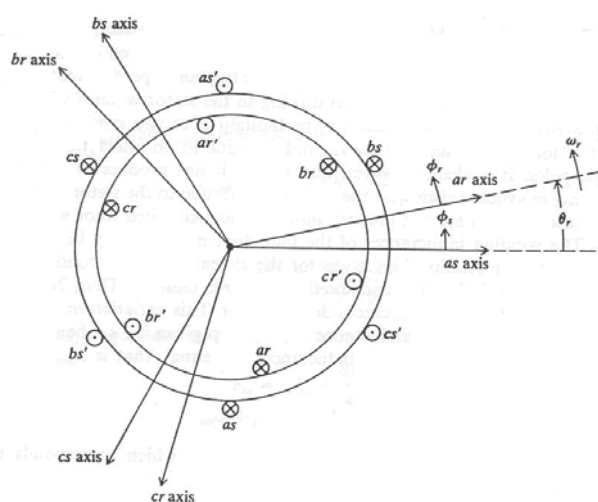
Πριν την μετάβαση από Y σε Δ (ή αντίθετα) η ισχύς της ανεμογεννήτριας μειώνεται στο μηδέν και ο διακόπτης Δ1 αποσυνδέει το κύκλωμα του στάτη από το δίκτυο. Μετά το κύκλωμα του στάτη συνδέεται σε Δ (ή σε Y) και η ανεμογεννήτρια συγχρονίζεται με το δίκτυο.

Οι δύο παραπάνω τύποι ΓΕΔΤ έχουν ως στόχο τη μείωση των απωλειών μαγνήτισης στη μηχανή επαγωγής και άρα την καλύτερη ενεργειακή αποδοχή του συστήματος. Έτσι στην περίπτωση της βραχυκυκλωμένης ΓΕΔΤ, σε χαμηλές ταχύτητες ανέμου βραχυκυκλώνεται ο στάτης και όλη η μηχανική ισχύς διοχετεύεται μέσω του μετατροπέα. Στην περίπτωση της Y-Δ-συνδεδεμένης ΓΕΔΤ, σε χαμηλές ταχύτητες ανέμου ακολουθείται σύνδεση Δ, ενώ σε υψηλές ταχύτητες χρησιμοποιείται η σύνδεση Y. Η ιδέα για αυτούς τους τρόπους προέκυψε από το σχήμα της απλής μηχανής επαγωγής που συνδέεται στο δίκτυο μέσω μετατροπέα στο κύκλωμα του στάτη. Εκεί υπάρχει η δυνατότητα σε χαμηλά φορτία να μειωθούν οι απώλειες μαγνήτισης εξασφαλίζοντας χαμηλότερο επίπεδο ροής μέσω του μετατροπέα. Στην τοπολογία όμως της ΓΕΔΤ η ροή του στάτη είναι άμεσα συνδεδεμένη με την τερματική τάση, καθώς ο στάτης συνδέεται απ' ευθείας στο δίκτυο.

2.4. Μετασχηματισμοί Εξισώσεων και Θεωρία Συστημάτων Αναφοράς

2.4.1. Θεωρία μηχανών επαγωγής

Η αλληλουχία των τυλιγμάτων μιας 2-πολικής, 3-φασικής, wye-συνδεδεμένης μηχανής επαγωγής φαίνεται στο Σχήμα 2.4.1.



Σχήμα 2.4.1. Αλληλουχία τυλιγμάτων μιας τυπικής μηχανής επαγωγής.

Τα τυλίγματα του στάτη είναι πανομοιότυπα με ισοδύναμες στροφές N_s και αντίσταση r_s . Τα τυλίγματα του δρομέα, τα οποία μπορεί να είναι συνδεδεμένα σε τυλιγμένο δρομέα ή σε κλωβό, μπορούν να προσεγγιστούν σαν πανομοιότυπα τυλίγματα με ισοδύναμες στροφές N_r και αντίσταση r_r . Το διάκενο αέρα μιας μηχανής επαγωγής είναι ομοιογενές και υποθέτουμε ότι τα τυλίγματα του στάτη και του δρομέα μπορούν να θεωρηθούν ως ημιτονοειδώς διανεμημένα τυλίγματα.

Στις περισσότερες εφαρμογές η μηχανή επαγωγής λειτουργεί ως κινητήρας με τα τυλίγματα στάτη συνδεδεμένα σε μία 3-φασική πηγή και τα τυλίγματα του δρομέα βραχυκυκλωμένα. Στην περίπτωση αυτή με συμμετρικά 3-φασικά ρεύματα να ρέουν στα τυλίγματα του στάτη, μια στρεφόμενη ΜΕΔ διακένου εγκαθιδρύεται, όπως στην περίπτωση της σύγχρονης μηχανής, η οποία στρέφεται σε ταχύτητα καθοριζόμενη από τη συχνότητα των ρευμάτων του στάτη και τον αριθμό των πόλων. Αν η

ταχύτητα του δρομέα είναι διαφορετική από την ταχύτητα της στρεφόμενης ΜΕΔ, συμμετρικά 3-φασικά ρεύματα θα εγχυθούν στα βραχυκυκλωμένα τυλίγματα του δρομέα. Η συχνότητα των ρευμάτων του δρομέα αντιστοιχεί στη διαφορά στην ταχύτητα της στρεφόμενης ΜΕΔ εξ' αιτίας των ρευμάτων του στάτη και της ταχύτητας του δρομέα. Τα εγχυόμενα ρεύματα του δρομέα δημιουργούν με τη σειρά τους μια ΜΕΔ διακένου η οποία στρέφεται σε σχέση με το δρομέα σε ταχύτητα αντιστοιχούσα στη συχνότητα των ρευμάτων του δρομέα. Η ταχύτητα της ΜΕΔ αυτής υπερτιθέμενη στην ταχύτητα του δρομέα είναι ίδια με την ταχύτητα της ΜΕΔ διακένου που εγκαθίσταται από τα ρεύματα που ρέουν στα τυλίγματα του στάτη. Αυτές οι δύο ΜΕΔ στρεφόμενες μαζί μπορούν να θεωρηθούν σαν δύο συγχρόνως στρεφόμενα ζεύγη μαγνητικών πόλων. Η ροπή παράγεται σαν αλληλεπίδραση των δύο αυτών πόλων. Είναι ξεκάθαρο πάντως πως ροπή δεν παράγεται όταν ο δρομέας στρέφεται σε συγχρονισμό με την ΜΕΔ διακένου λόγω των ρευμάτων του στάτη αφού στην περίπτωση αυτή δεν έχουμε ρεύμα στο κύκλωμα του δρομέα.

Οι αντιδράσεις επαγωγής της μηχανής επαγωγής μπορούν να εκφραστούν από τις γνωστές σχέσεις των επαγωγών για μία σύγχρονη μηχανή έκτυπων πόλων. Στην περίπτωση της μηχανής επαγωγής το διάκενο αέρα είναι ομοιογενές. Όλες οι αυτεπαγωγές του στάτη είναι ίσες μεταξύ τους, δηλαδή $L_{asas}=L_{bsbs}=L_{csbs}$ με

$$L_{asas}=L_{ls}+L_{ms} \quad (2.4.1-1)$$

όπου L_{ms} είναι η επαγωγή μαγνήτισης και μπορεί να εκφραστεί

$$L_{ms} = \left(\frac{N_s}{2}\right)^2 \frac{\pi\mu_o r l}{g} \quad (2.4.1-2)$$

όπου g είναι το μήκος του διακένου αέρα. Όμοια όλες οι αλληλεπαγωγές του στάτη είναι ίδιες. Για παράδειγμα:

$$L_{asbs} = -\frac{1}{2}L_{ms} \quad (2.4.1-3)$$

Ως συνέπεια οι αυτεπαγωγές του δρομέα είναι ίσες με $L_{arar}=L_{lr}+L_{mr}$ όπου η επαγωγή μαγνήτισης του δρομέα μπορεί να εκφραστεί

$$L_{mr} = \left(\frac{N_r}{2}\right)^2 \frac{\pi\mu_o rl}{g} \quad (2.4.1-4)$$

Εκφράσεις για τις αλληλεπαγωγές μεταξύ του στάτη και του δρομέα μπορούν να γραφούν έχοντας κατά νου τις αντίστοιχες από τη σύγχρονη μηχανή. Εδώ οι αλληλεπαγωγές L_{asar} , L_{bsbr} , L_{cscr} είναι ίσες με

$$L_{asar} = L_{sr} \cdot \cos \theta_r \quad (2.4.1-5)$$

Επίσης, οι L_{asbr} , L_{bscr} , L_{csar} είναι ίσες με

$$L_{asbr} = L_{sr} \cdot \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) \quad (2.4.1-6)$$

όπου

$$L_{sr} = \left(\frac{N_s}{2}\right)\left(\frac{N_r}{2}\right) \frac{\pi\mu_o rl}{g} \quad (2.4.1-7)$$

Τέλος, οι L_{ascr} , L_{bsar} , L_{csbr} είναι ίσες με

$$L_{ascr} = L_{sr} \cdot \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (2.4.1-8)$$

όπου

$$L_{ms} = \left(\frac{N_r}{2}\right)\left(\frac{N_s}{2}\right) \frac{\pi\mu_o rl}{g} \quad (2.4.1-9)$$

Οι εξισώσεις τάσης για τη μηχανή επαγωγής που φαίνεται στο Σχήμα 2.4.1 είναι:

$$V_{as} = r_s i_{as} + \frac{d\Psi_{as}}{dt} \quad (2.4.1-10)$$

$$V_{bs} = r_s i_{bs} + \frac{d\Psi_{bs}}{dt} \quad (2.4.1-11)$$

$$V_{cs} = r_s i_{cs} + \frac{d\Psi_{cs}}{dt} \quad (2.4.1-12)$$

$$V_{ar} = r_r i_{ar} + \frac{d\Psi_{ar}}{dt} \quad (2.4.1-13)$$

$$V_{br} = r_r i_{br} + \frac{d\Psi_{br}}{dt} \quad (2.4.1-14)$$

$$V_{cr} = r_r i_{cr} + \frac{d\Psi_{cr}}{dt} \quad (2.4.1-15)$$

όπου r_s είναι η αντίσταση κάθε τυλίγματος φάσης του στάτη και r_r η αντίσταση κάθε τυλίγματος φάσης του δρομέα. Οι πεπλεγμένες ροές μπορούν να γραφούν ακολουθώντας τη μορφή της Ψ_{as}

$$\Psi_{as} = L_{asas}i_{as} + L_{asbs}i_{bs} + L_{ascs}i_{cs} + L_{asar}i_{ar} + L_{asbr}i_{br} + L_{ascr}i_{cr} \quad (2.4.1-16)$$

Είναι εμφανής η πολυπλοκότητα των εξισώσεων τάσης λόγω της εξάρτησης των αλληλεπαγωγών μεταξύ στάτη και δρομέα (κυκλώματα σε σχετική κίνηση).

2.4.2. Θεωρία συστημάτων αναφοράς

2.4.2.1. Εισαγωγή

Μία αλλαγή μεταβλητών χρησιμοποιείται συχνά για να μειωθεί η πολυπλοκότητα των παραπάνω διαφορικών εξισώσεων. Σε αντίθεση με τις πρώτες μελέτες πάνω στην αλλαγή μεταβλητών, έγινε αργότερο κατανοητό ότι όλες οι αλλαγές μεταβλητών περιλαμβάνονται σε έναν μετασχηματισμό. Αυτός ο γενικός μετασχηματισμός αναφέρει τις μεταβλητές της μηχανής σε ένα σύστημα αναφοράς που στρέφεται με μία αυθαίρετη γωνιακή ταχύτητα. Ο μετασχηματισμός του Park, που έφερε την επανάσταση στην ανάλυση των ηλεκτρικών μηχανών, έχει τη μοναδική ιδιότητα να απαλείφει όλες τις εξαρτώμενες από το χρόνο επαγωγές από τις εξισώσεις τάσεις της σύγχρονης μηχανής οι οποίες οφείλονται σε (1) ηλεκτρικά κυκλώματα σε σχετική κίνηση και (2) ηλεκτρικά κυκλώματα με μεταβλητή μαγνητική αντίσταση.

Οι Park, Stanley, Kron και Brereton ανέπτυξαν αλλαγές μεταβλητών οι οποίες εφαρμόζονταν μόνο σε συγκεκριμένες εφαρμογές. Μόλις το 1965 σημειώθηκε ότι όλοι οι γνωστοί μετασχηματισμοί που χρησιμοποιούνταν στην ανάλυση ηλεκτρικών μηχανών επαγωγής περιλαμβάνονται σε έναν γενικό μετασχηματισμό που απαλείφει όλες τις εξαρτώμενες από χρόνο επαγωγές με το να εκφράζει τις μεταβλητές του στάτη και του δρομέα σε ένα πλαίσιο αναφοράς το οποίο μπορεί να περιστρέφεται σε οποιαδήποτε ταχύτητα είτε να παραμένει ακίνητο. Όλοι οι γνωστοί λοιπόν μετασχηματισμοί προκύπτουν θεωρώντας τη σωστή αντίστοιχη ταχύτητα περιστροφής στο γνωστό ως «αυθαίρετο σύστημα αναφοράς». Αργότερα σημειώθηκε επίσης ότι οι μεταβλητές του στάτη μιας σύγχρονης μηχανής θα μπορούσαν επίσης να

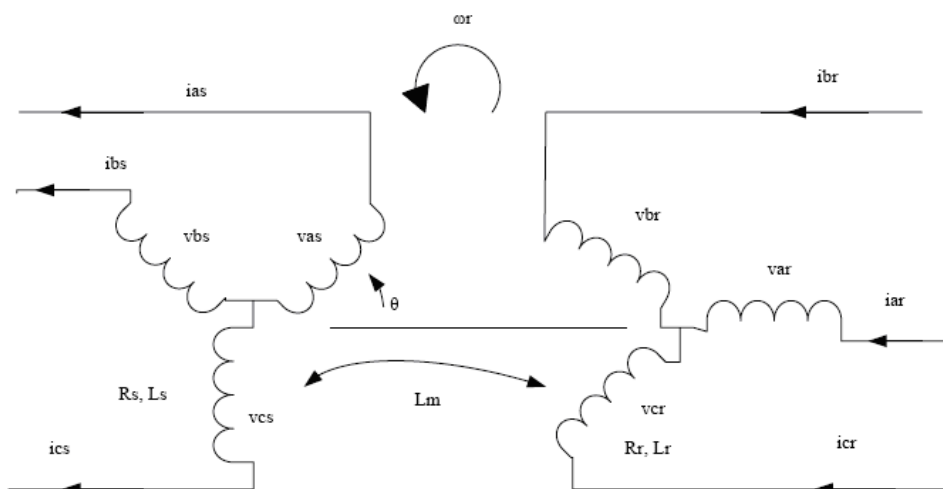
αναφερθούν στο αυθαίρετο σύστημα αναφοράς. Παρ' όλα αυτά στην περίπτωση των μηχανών επαγωγής τα πλεονεκτήματα είναι σαφώς μεγαλύτερα.

2.4.2.2. Εξισώσεις μετασχηματισμού-Αλλαγή μεταβλητών

Οι αρχές λειτουργίας της μηχανής επαγωγής που μοντελοποιείται (Γεννήτρια Επαγωγής Διπλής Τροφοδότησης) μπορούν να αναλυθούν με την κλασσική θεωρία των στρεφόμενων πεδίων και το dq-πλαίσιο. Για την ανάπτυξη του μοντέλου οι εξισώσεις που περιγράφουν μια μηχανή επαγωγής σε όρους φασικών μεταβλητών προκύπτουν με όλες τις μεταβλητές του δρομέα ανηγμένες στο στάτη. Οι εξισώσεις στη συνέχεια μετασχηματίζονται σε ένα dq σύστημα αναφοράς, το οποίο περιστρέφεται σε γωνιακή ταχύτητα ω_s (γωνιακή ταχύτητα πεδίου στάτη) κατά την κατεύθυνση της περιστροφής του δρομέα.

Βασικές εξισώσεις στο abc πλαίσιο

Το Σχήμα 2.4.2.2.1 δείχνει τα κυκλώματα που εμφανίζονται κατά την ανάλυση μιας μηχανής επαγωγής. Το κύκλωμα του στάτη αποτελείται από 3-φασικά τυλίγματα a_s , b_s και c_s διανεμημένα κατά 120° στο χώρο. Το κύκλωμα του δρομέα έχει διανεμημένα τυλίγματα a_r , b_r , και c_r . Η μηχανή ΓΕΔΤ έχει τα συμβατικά 3-φασικά τυλίγματα που καταλήγουν μέσω τριών δαχτυλιδιών στον άξονα έτσι ώστε να είναι δυνατή η σύνδεση με εξωτερικό κύκλωμα.



Σχήμα 2.4.2.2.1 Κυκλώματα του στάτη και του δρομέα.

Στο παραπάνω σχήμα, θ είναι η γωνία κατά την οποία ο άξονας της φάσης a_r των τυλιγμάτων του δρομέα προηγείται του άξονα της φάσης a_s του τυλίγματος του στάτη κατά την κατεύθυνση της περιστροφής. Με σταθερή γωνιακή ταχύτητα ω_r σε ηλεκτρικά ακτίνια/δευτερόλεπτο (rad/sec),

$$\theta = \omega_r t \quad (2.4.2.2-1)$$

Με σταθερή ολίσθηση s ,

$$\theta = (1-s)\omega_s t \quad (2.4.2.2-2)$$

όπου ω_s είναι η γωνιακή ταχύτητα του πεδίου του στάτη σε ηλεκτρικά rad/sec.

Θεωρήσεις κατά την ανάπτυξη του μοντέλου

1. Οι εξισώσεις της μηχανής εκφράζονται στο σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς (Synchronous reference frame) χρησιμοποιώντας τις συνιστώσες d (direct) και q (quadrature).
2. Ο q -άξονας θεωρείται σε προπορεία 90° από τον d -άξονα στην κατεύθυνση της περιστροφής.
3. Η συνιστώσα q της τάσης του στάτη, V_{qs} , που εμφανίζεται στο μοντέλο ισούται με την τερματική τάση του ζυγού της γεννήτριας και η V_{ds} ισούται με 0 (η θέση του άξονα d συμπίπτει με το μέγιστο της ροής του στάτη).
4. Χρησιμοποιείται σύμβαση κινητήρα, το οποίο σημαίνει ότι η ενεργός και η άεργος ισχύς έχουν θετικό πρόσημο όταν αντλούνται από το δίκτυο.

Έτσι, αμελώντας τον κορεσμό, την υστέρηση, και τα ρεύματα αυτεπαγωγής, και υποθέτοντας καθαρά ημιτονοειδή διανομή των κυμάτων της ροής, οι εξισώσεις της μηχανής μπορούν να γραφούν ως εξής [5, 29]:

Εξισώσεις τάσης στάτη:

$$V_{as} = R_s i_{as} + \frac{d}{dt} \psi_{as} \quad (2.4.2.2-3)$$

$$V_{bs} = R_s i_{bs} + \frac{d}{dt} \psi_{bs} \quad (2.4.2.2-4)$$

$$V_{cs} = R_s i_{cs} + \frac{d}{dt} \psi_{cs} \quad (2.4.2.2-5)$$

Εξισώσεις ροών στάτη:

$$\Psi_{as} = X_{ss} i_{as} + X_m i_{ar} \quad (2.4.2.2-6)$$

$$\Psi_{bs} = X_{ss} i_{bs} + X_m i_{br} \quad (2.4.2.2-7)$$

$$\Psi_{cs} = X_{ss} i_{cs} + X_m i_{cr} \quad (2.4.2.2-8)$$

Εξισώσεις τάσης δρομέα:

$$V_{ar} = R_r i_{ar} + \frac{d}{dt} \psi_{ar} \quad (2.4.2.2-9)$$

$$V_{br} = R_r i_{br} + \frac{d}{dt} \psi_{br} \quad (2.4.2.2-10)$$

$$V_{cr} = R_r i_{cr} + \frac{d}{dt} \psi_{cr} \quad (2.4.2.2-11)$$

Εξισώσεις ροών δρομέα:

$$\Psi_{ar} = X_{rr} i_{ar} + X_m i_{as} \quad (2.4.2.2-12)$$

$$\Psi_{br} = X_{rr} i_{br} + X_m i_{bs} \quad (2.4.2.2-13)$$

$$\Psi_{cr} = X_{rr} i_{cr} + X_m i_{cs} \quad (2.4.2.2-14)$$

Μετασχηματισμός εξισώσεων σε dq πλαίσιο

Οι εξισώσεις της μηχανής επαγωγής μετασχηματίζονται στο dq πλαίσιο χρησιμοποιώντας το μετασχηματισμό Park [5,29]. Τα ηλεκτρικά σήματα μετασχηματίζονται σε ένα στρεφόμενο πλαίσιο αναφοράς για τη διευκόλυνση της λύσης των εξισώσεων της μηχανής καθώς αυτές περιλαμβάνουν όρους επαγωγών που αλλάζουν με τη γωνία θ , η οποία με τη σειρά της αλλάζει με το χρόνο.

Όταν οι εξισώσεις του δρομέα και του στάτη αναφέρονται σε κοινό πλαίσιο αναφοράς η ζεύξη μεταξύ των αντίστοιχων κυκλωμάτων μπορεί ουσιαστικά να απαλειφθεί. Αυτό το κοινό πλαίσιο αναφοράς μπορεί να είναι μη περιστρεφόμενο, οπότε συνδέεται με το στάτη και ονομάζεται στάσιμο πλαίσιο αναφοράς (stator ή stationary reference frame). Εναλλακτικά, οι άξονες dq μπορούν να περιστρέφονται με την ίδια γωνιακή ταχύτητα με τα κυκλώματα του δρομέα, οπότε έχουμε το πλαίσιο

αναφοράς του δρομέα. Σε μερικές περιπτώσεις μπορεί ακόμη να είναι χρήσιμο να περιστρέφονται οι άξονες αυτοί συγχρόνως με ένα από τα διανύσματα που εκφράζουν την τάση του στάτη ή του δρομέα, το ρεύμα ή ακόμη και τη ροή. Σε αυτήν την περίπτωση οι άξονες λέμε ότι είναι προσαρτημένοι στο διάνυσμα.

Στην παρούσα εργασία οι εξισώσεις της ΓΕΔΤ μετασχηματίζονται στο σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς χρησιμοποιώντας SFO (Stator Flux Orientation)-η θέση δηλαδή του άξονα d συμπίπτει με το μέγιστο της ροής του στάτη. Ο άξονας q θεωρείται 90° σε προπορεία από τον άξονα d κατά την κατεύθυνση της περιστροφής. Έχοντας υπ' όψιν τους στρεφόμενους άξονες dq όπως ορίζονται στο Σχήμα 2.4.2.2.2. οι μεταβλητές a, b, και c πάνω στους άξονες του στάτη και του δρομέα μπορούν να μεταφερθούν στους dq άξονες χρησιμοποιώντας τους ακόλουθους πίνακες μετασχηματισμού:

Πίνακας μετασχηματισμού στάτη:

$$T_s = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta + 2\pi/3) \\ \sin \theta & \sin(\theta - 2\pi/3) & \sin(\theta + 2\pi/3) \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \quad (2.4.2.2-15)$$

Πίνακας μετασχηματισμού δρομέα:

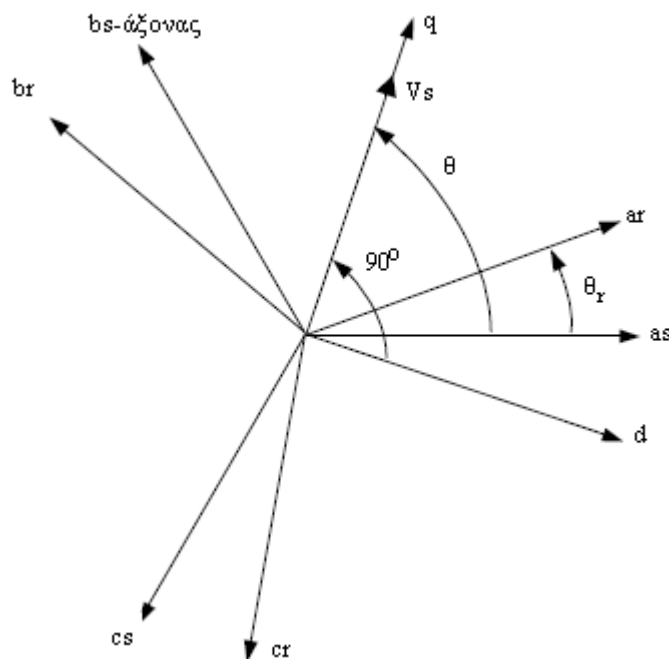
$$T_r = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(s\theta) & \cos(s\theta - 2\pi/3) & \cos(s\theta + 2\pi/3) \\ \sin(s\theta) & \sin(s\theta - 2\pi/3) & \sin(s\theta + 2\pi/3) \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \quad (2.4.2.2-16)$$

όπου $\theta = \omega_e t$ και ω_e η ηλεκτρική γωνιακή ταχύτητα με $\omega_e = 2 \cdot \pi \cdot f$. Πρέπει να σημειωθεί εδώ ότι η επιλογή του συντελεστή $\sqrt{2/3}$ είναι αυθαίρετη [30]. Ο σταθερής-ισχύος dq μετασχηματισμός που χρησιμοποιεί το συντελεστή $\sqrt{2/3}$ έχει επιλεγεί εδώ ώστε οι μετασχηματισμοί να είναι ίδιοι και για την τάση και για το ρεύμα, έτσι ώστε η ισχύς που υπολογίζεται στο dq σύστημα συνιστωσών να έχει την ίδια έκφραση όπως και στο σύστημα abc, δηλαδή:

$$P_s = V_{ds} \cdot i_{ds} + V_{qs} \cdot i_{qs} \quad (2.4.2.2-17)$$

$$Q_s = V_{qs} \cdot i_{ds} - V_{ds} \cdot i_{qs} \quad (2.4.2.2-18)$$

Όταν χρησιμοποιείται ο σταθερού πλάτους dq μετασχηματισμός τότε οι εξισώσεις (2.4.2.2-17) και (2.4.2.2-18) πρέπει να πολ/στούν με ένα συντελεστή 3/2.



Σχήμα 2.4.2.2.2. Διάγραμμα του πλαισίου SFO σε σχέση με το πλαίσιο abc.

Επειδή είναι πιο εύκολος ο χειρισμός τετραγωνικών πινάκων, ο συντελεστής $1/\sqrt{2}$ στους παραπάνω πίνακες μετασχηματισμού έχει επιλεγεί ώστε να ισχύει $T_s^{-1} = T_s^T$, δηλαδή:

$$T_s^{-1} = T_s^T = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 1/\sqrt{2} \\ \cos(\theta - 2\pi/3) & \sin(\theta - 2\pi/3) & 1/\sqrt{2} \\ \cos(\theta + 2\pi/3) & \sin(\theta + 2\pi/3) & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \quad (2.4.2.2-19)$$

Χρησιμοποιώντας τον πίνακα μετασχηματισμού του στάτη, η τάση του στάτη, όπως αυτή εκφράζεται στο πεδίο abc στις εξισώσεις (2.4.2.2-3) έως (2.4.2.2-5), μετασχηματίζεται στο πλαίσιο dq ως εξής:

$$\begin{aligned}
\begin{bmatrix} V_{qs} \\ V_{ds} \end{bmatrix} &= T_s \begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} = R_s \cdot T_s \cdot \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} + T_s \frac{d}{dt} \left\{ \begin{bmatrix} \Psi_{as} \\ \Psi_{bs} \\ \Psi_{cs} \end{bmatrix} \right\} \\
&= R_s \cdot T_s \cdot \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} + T_s \frac{d}{dt} \left\{ T_s^{-1} \begin{bmatrix} \Psi_{qs} \\ \Psi_{ds} \end{bmatrix} \right\} \\
&= R_s \cdot \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \end{bmatrix} + T_s \frac{d(T_s^{-1})}{dt} \begin{bmatrix} \Psi_{qs} \\ \Psi_{ds} \end{bmatrix} + T_s T_s^{-1} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Psi_{qs} \\ \Psi_{ds} \end{bmatrix} \\
\begin{bmatrix} V_{qs} \\ V_{ds} \end{bmatrix} &= R_s \cdot \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \end{bmatrix} + T_s \frac{d(T_s^{-1})}{dt} \begin{bmatrix} \Psi_{qs} \\ \Psi_{ds} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Psi_{qs} \\ \Psi_{ds} \end{bmatrix} \tag{2.4.2.2-20}
\end{aligned}$$

Με διαφορίση της εξίσωσης (2.4.2.2-19) έχουμε:

$$\frac{d(T_s^{-1})}{dt} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} -\omega_e \sin(\omega_e t) & \omega_e \cos(\omega_e t) \\ -\omega_e \sin(\omega_e t - 2\pi/3) & \omega_e \cos(\omega_e t - 2\pi/3) \\ -\omega_e \sin(\omega_e t + 2\pi/3) & \omega_e \cos(\omega_e t + 2\pi/3) \end{bmatrix} \tag{2.4.2.2-21}$$

οπότε:

$$T_s \frac{d(T_s^{-1})}{dt} \begin{bmatrix} \Psi_{qs} \\ \Psi_{ds} \end{bmatrix} = \omega_e \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Psi_{qs} \\ \Psi_{ds} \end{bmatrix} = \omega_e \begin{bmatrix} \Psi_{ds} \\ -\Psi_{qs} \end{bmatrix} \tag{2.4.2.2-22}$$

Με αντικατάσταση της εξ. 2.4.2.2-22 στην εξ. 2.4.2.2-20 και με αλλαγή 1^{ης} και 2^{ης} γραμμής:

$$\begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \end{bmatrix} = R_s \cdot \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \end{bmatrix} + \omega_e \begin{bmatrix} -\Psi_{qs} \\ \Psi_{ds} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Psi_{ds} \\ \Psi_{qs} \end{bmatrix} \tag{2.4.2.2-23}$$

Μετά από τις κατάλληλες τροποποιήσεις οι εξισώσεις της μηχανής στο α.μ σύστημα είναι:

Εξισώσεις τάσης στάτη:

$$V_{qs} = R_s \cdot i_{qs} + \frac{\omega_e}{\omega_b} \cdot \Psi_{ds} + \frac{p}{\omega_b} \cdot \Psi_{qs} \tag{2.4.2.2-24}$$

$$V_{ds} = R_s \cdot i_{ds} - \frac{\omega_e}{\omega_b} \cdot \Psi_{qs} + \frac{p}{\omega_b} \cdot \Psi_{ds} \quad (2.4.2.2-25)$$

όπου $p = \frac{d}{dt}$,

Εξισώσεις ρών στάτη:

$$\Psi_{ds} = X_{ss} \cdot i_{ds} + X_m \cdot i_{dr} \quad (2.4.2.2-26)$$

$$\Psi_{qs} = X_{ss} \cdot i_{qs} + X_m \cdot i_{qr} \quad (2.4.2.2-27)$$

Εξισώσεις τάσης δρομέα:

$$V_{dr} = R_r \cdot i_{dr} - \left(\frac{\omega_e - \omega_r}{\omega_b}\right) \cdot \Psi_{qr} + \frac{p}{\omega_b} \cdot \Psi_{dr} \quad (2.4.2.2-28)$$

$$V_{qr} = R_r \cdot i_{qr} + \left(\frac{\omega_e - \omega_r}{\omega_b}\right) \cdot \Psi_{dr} + \frac{p}{\omega_b} \cdot \Psi_{qr} \quad (2.4.2.2-29)$$

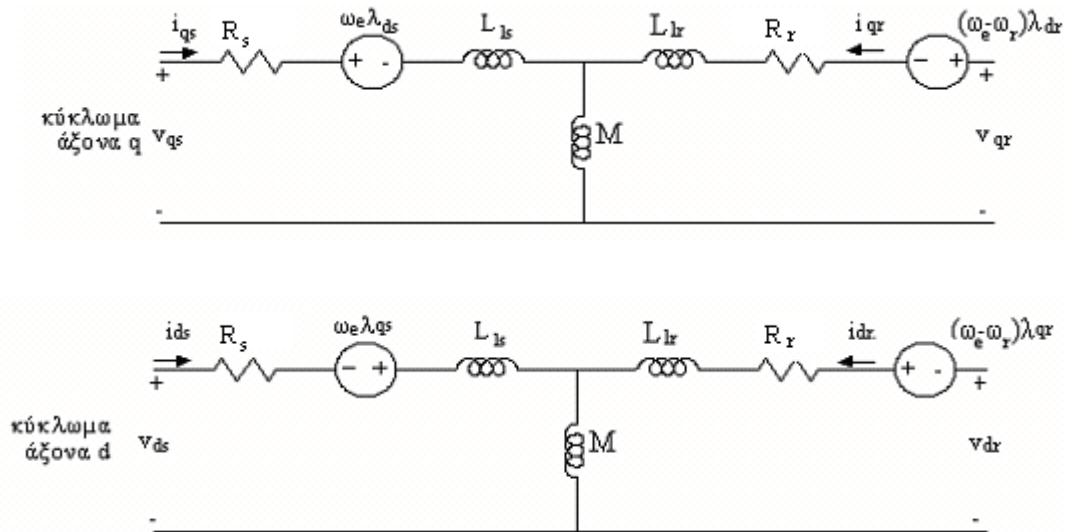
όπου $p = \frac{d}{dt}$,

Εξισώσεις ρών δρομέα:

$$\Psi_{qr} = X_{rr} \cdot i_{qr} + X_m \cdot i_{qs} \quad (2.4.2.2-30)$$

$$\Psi_{dr} = X_{rr} \cdot i_{dr} + X_m \cdot i_{ds} \quad (2.4.2.2-31)$$

Σαν αποτέλεσμα του πλαισίου SFO η συνιστώσα q της ροής του στάτη ισούται με 0 και η συνιστώσα d με την ολική ροή του στάτη. Επομένως η συνιστώσα q της τάσης του στάτη, V_{qs} , που εμφανίζεται στο μοντέλο ισούται με την τερματική τάση του ζυγού της γεννήτριας και η V_{ds} ισούται με 0 (αν αμελήσουμε την πτώση τάσης πάνω στην αντίσταση του στάτη η οποία είναι πολύ μικρή).



Σχήμα 2.4.2.2.3. Ισοδύναμα qd κυκλώματα γεννήτριας επαγωγής διπλής τροφοδότησης.

Επειδή οι παράμετροι των μηχανών δίνονται σχεδόν πάντα σε Ω ή ανηγμένες σε κάποια βασική αντίσταση (ανά μονάδα), οι εξισώσεις των τάσεων και των πεπλεγμένων ροών εκφράζονται συναρτήσει επαγωγικών αντιδράσεων (X) και όχι επαγωγών. Οι επαγωγικές αντιδράσεις προκύπτουν εάν οι επαγωγές (L) πολλαπλασιασθούν με τη βασική γωνιακή ταχύτητα ω_b και έχουν μονάδα το 1 Ω. Οι πεπλεγμένες ροές (λ) έχουν αντικατασταθεί από πεπλεγμένες ροές ανά δευτερόλεπτο (Ψ), που έχουν μονάδα το 1 Volt.

Εξισώσεις Ροπής

Αποδεικνύεται ότι η στιγμιαία ηλεκτρομαγνητική ροπή της γεννήτριας δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$T_e = \left(\frac{P}{2}\right) \left[(K_s)^{-1} i_{qd0s} \right]^T \frac{\partial}{\partial \theta_r} [L_{sr}] (K_s)^{-1} i^{qd0r} \quad (2.4.2.2-32)$$

Άλλες ισοδύναμες εκφράσεις είναι

$$T_e = \left(\frac{3}{2}\right) \left(\frac{P}{2}\right) (\lambda_{ds} i_{qs} - \lambda_{qs} i_{ds}) \quad (2.4.2.2-33)$$

και

$$T_e = \left(\frac{3}{2}\right) \left(\frac{P}{2}\right) \left(\frac{1}{\omega_b}\right) (\psi_{ds} i_{qs} - \psi_{qs} i_{ds}) \quad (2.4.2.2-34)$$

όπου η ροπή γράφεται συναρτήσει πεπλεγμένων ροών και ρευμάτων ή πεπλεγμένων ροών ανά δευτερόλεπτο και ρευμάτων αντίστοιχα.

Ανά Μονάδα Σύστημα

Είναι σύνηθες να εκφράζουμε τις παραμέτρους της μηχανής σε ανηγμένες ‘ανά μονάδα’ τιμές. Με επιλογή της βασικής ισχύος και της βασικής τάσης, όλες οι παράμετροι κανονικοποιούνται κάνοντας χρήση αυτών των τιμών.

Ως βασική ισχύς S_b επιλέγεται η ονομαστική ισχύς της γεννήτριας.

Ως βασική τάση για τις μεταβλητές abc επιλέγεται η ενεργός (rms) τιμή της φασικής τάσης ανοιχτοκύκλωσης, ενώ για τις μεταβλητές qd επιλέγεται το πλάτος της φασικής τάσης. Δηλαδή, εάν $V_{b(abc)}$ είναι η βασική τάση για τα μεγέθη abc, τότε

$$V_{b(qd)} = \sqrt{2} V_{b(abc)} \quad (2.4.2.2-35)$$

Η βασική ισχύς μπορεί τώρα να εκφραστεί ως

$$S_b = 3 V_{b(abc)} I_{b(abc)} \quad (2.4.2.2-36)$$

ή ισοδύναμα ως

$$S_b = \left(\frac{3}{2}\right) V_{b(qd)} I_{b(qd)} \quad (2.4.2.2-37)$$

Η βασική ένταση ρεύματος μπορεί να υπολογιστεί από τις παραπάνω σχέσεις.

Συνεπάγεται ότι η βασική αντίσταση μπορεί να εκφραστεί ως

$$Z_b = \frac{V_{b(abc)}}{I_{b(abc)}} = \frac{3V_{b(abc)}^2}{S_b} \quad (2.4.2.2-38)$$

ή ισοδύναμα

$$Z_b = \frac{V_{b(qd)}}{I_{b(qd)}} = \left(\frac{3}{2}\right) \frac{V_{b(qd)}^2}{S_b} \quad (2.4.2.2-39)$$

Οι εξισώσεις 2.4.2.2-24 ως 2.4.2.2-31 εκφρασμένες με βάση τις επαγωγικές αντιδράσεις μπορούν εύκολα να αναχθούν στο ‘ανά μονάδα’ σύστημα, διαιρώντας τις τάσεις με $V_{b(qd)}$, τις εντάσεις με $I_{b(qd)}$, και τις ωμικές αντιστάσεις και επαγωγικές αντιδράσεις με Z_b . Σημειώνεται ότι για να κανονικοποιηθεί η πεπλεγμένη ροή ανά δευτερόλεπτο αρκεί να διαιρεθεί με τη βασική τάση, αφού η μονάδα μέτρησής της είναι το 1 volt.

Αν και οι εξισώσεις των τάσεων δεν αλλάζουν μορφή με την αναγωγή τους στο ανά μονάδα σύστημα, η εξίσωση της ροπής μεταβάλλεται από τη διαδικασία αναγωγής. Η βασική ροπή ορίζεται ως

$$T_b = \frac{S_b}{\left(\frac{2}{P}\right)\omega_b} \quad (2.4.2.2-40)$$

όπου η βασική γωνιακή ταχύτητα ω_b αντιστοιχεί στην ονομαστική ή βασική (ηλεκτρική) συχνότητα της μηχανής.

Για παράδειγμα, η εξίσωση 2.4.2.2-34 με όλες τις ποσότητες εκφρασμένες ανά μονάδα γράφεται

$$T_e = \psi_{ds} i_{qs} - \psi_{qs} i_{ds} \quad (2.4.2.2-41)$$

Η εξίσωση της κίνησης του μηχανικού μέρους της μηχανής γράφεται

$$T_m - T_e = J \frac{d\omega_m}{dt} = J \left(\frac{2}{P}\right) \frac{d\omega_r}{dt} \quad (2.4.2.2-42)$$

όπου ω_m είναι η μηχανική γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του δρομέα, ω_r η αντίστοιχη ηλεκτρική ταχύτητα (σε rad/s) και J η ροπή αδρανείας (σε Kg·m²) του στρεφόμενου μηχανικού μέρους της διάταξης.

Η ανηγμένη σταθερά αδρανείας ορίζεται ως ακολούθως

$$H = \frac{\frac{1}{2} J \omega_{mb}^2}{S_b} = \frac{\frac{1}{2} \left(\frac{2}{P}\right)^2 J \omega_b^2}{S_b} \quad (2.4.2.2-43)$$

όπου ω_{mb} είναι η βασική μηχανική ταχύτητα. Η σταθερά αδρανείας έχει μονάδα το 1 sec.

Συνεπώς, λύνοντας ως προς J έχουμε

$$J = \frac{H \cdot S_b}{\frac{1}{2} \left(\frac{2}{P}\right)^2 \omega_b^2} = \frac{2H}{\left(\frac{2}{P}\right) \omega_b} \left[\frac{S_b}{\left(\frac{2}{P}\right) \omega_b} \right] = \frac{2H}{\left(\frac{2}{P}\right) \omega_b} T_b \quad (2.4.2.2-44)$$

και η εξίσωση κίνησης γράφεται

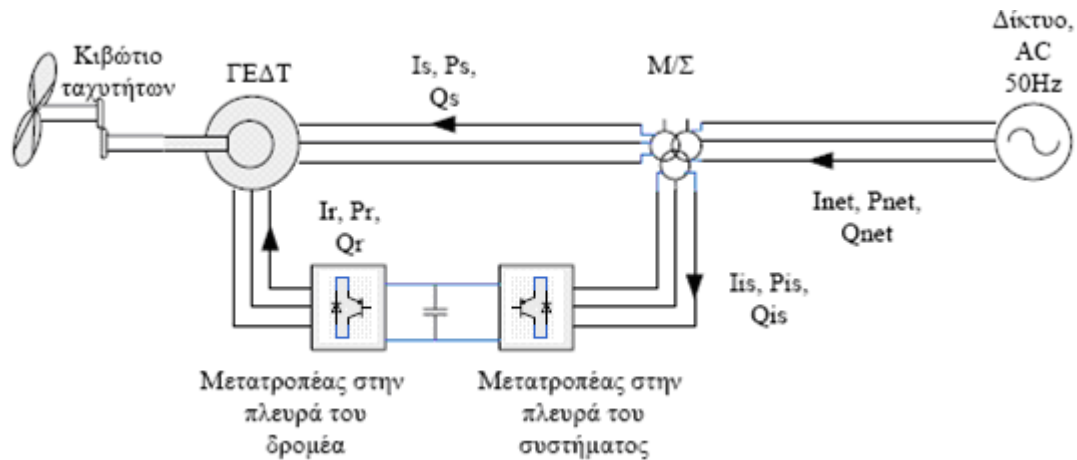
$$T_m - T_e = \frac{2H}{\left(\frac{2}{P}\right) \omega_b} T_b \left(\frac{2}{P}\right) \frac{d\omega_r}{dt} \Rightarrow \frac{T_m - T_e}{T_b} = 2H \frac{d(\omega_r / \omega_b)}{dt} \quad (2.4.2.2-45)$$

δηλαδή η εξίσωση κίνησης στο ανά μονάδα σύστημα είναι η

$$T_m - T_e = 2H \frac{d\omega_r}{dt} \quad (2.4.2.2-46)$$

όπου τώρα τα μεγέθη T_m , T_e , ω_r είναι εκφρασμένα ανά μονάδα.

2.4.2.3. Προσομοίωση στον Υπολογιστή



Σχήμα 2.4.2.3.1. Ισοδύναμο σχεδιάγραμμα μοντέλου.

Για την επίλυση από τον ηλεκτρονικό υπολογιστή των εξισώσεων και την προσομοίωση της λειτουργίας της μηχανής, είναι ανάγκη να γραφούν οι εξισώσεις στο χώρο κατάστασης, δηλαδή υπό τη γενική μορφή

$$\dot{x} = f(x, u, t)$$

όπου x είναι το διάνυσμα των μεταβλητών κατάστασης, u το διάνυσμα των εισόδων της μηχανής και t ο χρόνος.

Αν οι αμοιβαίες πεπλεγμένες ροές ανά δευτερόλεπτο στους q και d άξονες εκφραστούν ως

$$\Psi_{qr} = X_{rr} \cdot i_{qr} + X_m \cdot i_{qs} \quad (2.4.2.3-1)$$

$$\Psi_{dr} = X_{rr} \cdot i_{dr} + X_m \cdot i_{ds} \quad (2.4.2.3-2)$$

$$\Psi_{ds} = X_{ss} \cdot i_{ds} + X_m \cdot i_{dr} \quad (2.4.2.3-3)$$

$$\Psi_{qs} = X_{ss} \cdot i_{qs} + X_m \cdot i_{qr} \quad (2.4.2.3-4)$$

τότε από τις εξισώσεις (2.4.2.3-1) έως (2.4.2.3-4) προκύπτει

$$i_{qs} = \frac{1}{D} (X_{rr} \cdot \Psi_{qs} - X_m \cdot \Psi_{qr}) \quad (2.4.2.3-5)$$

$$i_{ds} = \frac{1}{D} (X_{rr} \cdot \Psi_{ds} - X_m \cdot \Psi_{dr}) \quad (2.4.2.3-6)$$

$$i_{qr} = \frac{1}{D}(-X_m \cdot \Psi_{qs} + X_{ss} \cdot \Psi_{qr}) \quad (2.4.2.3-7)$$

$$i_{dr} = \frac{1}{D}(-X_m \cdot \Psi_{ds} + X_{ss} \cdot \Psi_{dr}) \quad (2.4.2.3-8)$$

Επομένως, απαλείφοντας τις εντάσεις από τις εξισώσεις είναι

$$\frac{p}{\omega_b} \Psi_{qs} = V_{qs} - \frac{r_s \cdot X_{rr}}{D} \Psi_{qs} - \frac{\omega_s}{\omega_b} \Psi_{ds} + \frac{r_s \cdot X_m}{D} \Psi_{qr} \quad (2.4.2.3-9)$$

$$\frac{p}{\omega_b} \Psi_{ds} = V_{ds} - \frac{r_s \cdot X_{rr}}{D} \Psi_{ds} + \frac{\omega_s}{\omega_b} \Psi_{qs} + \frac{r_s \cdot X_m}{D} \Psi_{dr} \quad (2.4.2.3-10)$$

$$\frac{p}{\omega_b} \Psi_{qr} = V_{qr} + \frac{r_r \cdot X_m}{D} \Psi_{qs} - \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_b} \Psi_{dr} - \frac{r_r \cdot X_{ss}}{D} \Psi_{qr} \quad (2.4.2.3-11)$$

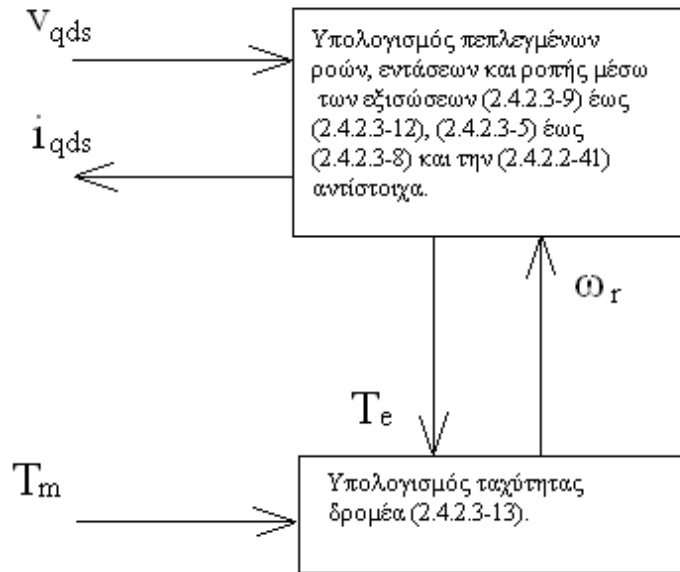
$$\frac{p}{\omega_b} \Psi_{dr} = V_{dr} + \frac{r_r \cdot X_m}{D} \Psi_{ds} + \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_b} \Psi_{qr} - \frac{r_r \cdot X_{ss}}{D} \Psi_{dr} \quad (2.4.2.3-12)$$

όπου $D = X_{ss} \cdot X_{rr} - X_m^2$, $X_{rr} = X_{lr} + X_m$, $X_{ss} = X_{ls} + X_m$.

Τέλος, χρειάζεται να γραφεί η εξίσωση κίνησης της μηχανής, η οποία σε ανά μονάδα τιμές είναι η

$$\omega_r = \frac{1}{2H} \int (T_m - T_e) dt \quad (2.4.2.3-13)$$

Με την ανωτέρω επεξεργασία οι εξισώσεις λειτουργίας της μηχανής έχουν έλθει στο χώρο κατάστασης. Ως μεταβλητές κατάστασης θεωρούνται οι πεπλεγμένες ροές ανά δευτερόλεπτο των τυλιγμάτων καθώς και η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του δρομέα. Οι εισοδοί του συστήματος είναι οι τάσεις των ακροδεκτών V_{as} , V_{bs} , V_{cs} ή ισοδύναμα οι τάσεις V_{qs} , V_{ds} καθώς και η μηχανική ροπή στον άξονα. Οι εξισώσεις είναι μη γραμμικές, αλλά η πολυπλοκότητά τους έχει μειωθεί σημαντικά. Ο υπολογιστής επιλύει τις εξισώσεις και υπολογίζει τις πεπλεγμένες ροές και τη γωνιακή ταχύτητα. Ακολουθώς, υπολογίζει τις εντάσεις της μηχανής βάσει των αντίστοιχων σχέσεων, δίνοντας τις εντάσεις ακροδεκτών της γεννήτριας i_{qs} , i_{ds} ή ισοδύναμα τις i_{as} , i_{bs} , i_{cs} . Σχηματικά, η ροή των σημάτων είναι η ακόλουθη.



Σχήμα 2.2.5-1. Σχηματική απεικόνιση του τρόπου επίλυσης των εξισώσεων.

Η προηγούμενη ανάλυση αφορά στο ‘πλήρες’ μοντέλο της γεννήτριας επαγωγής διπλής τροφοδότησης. Δεδομένου ότι οι μηχανές που μας ενδιαφέρουν δε διαθέτουν τυλίγματα αποσβέσεως στο δρομέα, το μοντέλο είναι τελικά πέμπτου βαθμού.

Τελικά, το μοντέλο είναι πέμπτου βαθμού, με τις ακόλουθες μεταβλητές κατάστασης: Ψ_{qs} , Ψ_{ds} , Ψ_{qr} , Ψ_{dr} , ω_r . Οι εξισώσεις που το περιγράφουν δίνονται εδώ συγκεντρωτικά, όπου όλα τα μεγέθη (τάσεις, εντάσεις, πεπλεγμένες ροές ανά δευτερόλεπτο, γωνιακή ταχύτητα δρομέα, αντιστάσεις, ροπή) είναι εκφρασμένα ανά μονάδα:

Πεπλεγμένες ροές:

$$\frac{p}{\omega_b} \Psi_{qs} = V_{qs} - \frac{r_s \cdot X_{rr}}{D} \Psi_{qs} - \frac{\omega_s}{\omega_b} \Psi_{ds} + \frac{r_s \cdot X_m}{D} \Psi_{qr} \quad (2.4.2.3-9)$$

$$\frac{p}{\omega_b} \Psi_{ds} = V_{ds} - \frac{r_s \cdot X_{rr}}{D} \Psi_{ds} + \frac{\omega_s}{\omega_b} \Psi_{qs} + \frac{r_s \cdot X_m}{D} \Psi_{dr} \quad (2.4.2.3-10)$$

$$\frac{p}{\omega_b} \Psi_{qr} = V_{qr} + \frac{r_r \cdot X_m}{D} \Psi_{qs} - \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_b} \Psi_{dr} - \frac{r_r \cdot X_{ss}}{D} \Psi_{qr} \quad (2.4.2.3-11)$$

$$\frac{p}{\omega_b} \Psi_{dr} = V_{dr} + \frac{r_r \cdot X_m}{D} \Psi_{qs} + \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_b} \Psi_{qr} - \frac{r_r \cdot X_{ss}}{D} \Psi_{dr} \quad (2.4.2.3-12)$$

Εντάσεις τυλιγμάτων:

$$i_{qs} = \frac{1}{D}(X_{rr} \cdot \Psi_{qs} - X_m \cdot \Psi_{qr}) \quad (2.4.2.3-13)$$

$$i_{ds} = \frac{1}{D}(X_{rr} \cdot \Psi_{ds} - X_m \cdot \Psi_{dr}) \quad (2.4.2.3-14)$$

$$i_{qr} = \frac{1}{D}(-X_m \cdot \Psi_{qs} + X_{ss} \cdot \Psi_{qr}) \quad (2.4.2.3-15)$$

$$i_{dr} = \frac{1}{D}(-X_m \cdot \Psi_{ds} + X_{ss} \cdot \Psi_{dr}) \quad (2.4.2.3-16)$$

όπου $D=X_{ss} \cdot X_{rr} - X_m^2$, $X_{rr}=X_{lr}+X_m$, $X_{ss}=X_{ls}+X_m$.

Κίνηση δρομέα:

$$T_e = \Psi_{qr} i_{dr} - \Psi_{dr} i_{qr} = \Psi_{ds} i_{qs} - \Psi_{qs} i_{ds} \quad (2.4.2.3-17)$$

$$\omega_r = \frac{1}{2H} \int (T_m - T_e) dt \quad (2.4.2.3-18)$$

Στο σημείο αυτό οι παραπάνω εξισώσεις μπορούν να συνδυαστούν για να υπολογιστεί η ολική ενεργός και άεργος ισχύς που παρέχεται από τη μηχανή επαγωγής διπλής τροφοδότησης. Έτσι προκύπτει

$$P = V_{ds} \cdot i_{ds} + V_{qs} \cdot i_{qs} + V_{dr} \cdot i_{qr} + V_{qr} \cdot i_{qr} \quad (2.4.2.3-19)$$

$$Q = V_{qs} \cdot i_{ds} - V_{ds} \cdot i_{qs} + V_{qr} \cdot i_{dr} - V_{dr} \cdot i_{qr} \quad (2.4.2.3-20)$$

Οι παράμετροι της γεννήτριας που μοντελοποιήθηκε συγκεντρώνονται στον παρακάτω πίνακα:

Παράμετρος	Τιμή α.μ.
Αντίδραση σκέδασης δρομέα X_{lr}	0.08
Αντίδραση σκέδασης στάτη X_{ls}	0.1
Αντίδραση μαγνήτισης X_m	3
Αντίσταση στάτη r_s	0.01
Αντίσταση δρομέα r_r	0.01

Πίνακας 2.4.2.3-1. Παράμετροι της μηχανής του μοντέλου.

Η επίδραση της αγνόησης των μεταβατικών του στάτη στη μοντελοποίηση

Αμελώντας τα μεταβατικά των ροών στις εξισώσεις του στάτη $\frac{d\Psi_{is}}{dt}$ (όπου i: d ή q συνιστώσα) είναι σύνηθες θέμα στις μελέτες ευστάθειας που περιλαμβάνουν τόσο σύγχρονες μηχανές όσο και μηχανές επαγωγής. Μεταξύ των πλεονεκτημάτων αυτής της απλοποίησης είναι τα μοντέλα μειωμένης τάξης (3^{ης} τάξης) που προκύπτουν, η εύκολη διασύνδεση με το μοντέλο του δικτύου, και μεγαλύτερα βήματα ολοκλήρωσης.

Με την αύξηση του αριθμών των Α/Γ με γεννήτριες επαγωγής διπλής τροφοδότησης (ΓΕΔΤ) σε πολλά ηλεκτρικά συστήματα έχουν προκύψει μοντέλα αυτών των γεννητριών που αμελούν επίσης και τα ηλεκτρομαγνητικά (EM) μεταβατικά του στάτη.

Η απλούστευση αυτή φαίνεται ακριβής όταν η ΓΕΔΤ λειτουργεί κοντά στη σύγχρονη ταχύτητα, διότι η συχνότητα του ρεύματος του δρομέα είναι κοντά στο μηδέν και το σημείο λειτουργίας της ΓΕΔΤ είναι παρόμοιο με αυτό μιας σύγχρονης γεννήτριας. Εν τούτοις η κατάσταση αλλάζει όσο η ταχύτητα απομακρύνεται από τη σύγχρονη.

Υπάρχει μεγάλη ποικιλία μελετών και προσομοιώσεων που καταλήγουν στο συμπέρασμα ότι τα επιχειρήματα που αναπτύσσονται για το αποτέλεσμα των μεταβατικών του στάτη στα μοντέλα των σύγχρονων γεννητριών είναι επίσης εφαρμόσιμα στα μοντέλα των ΓΕΔΤ. Σύμφωνα με αυτήν την άποψη λοιπόν τα μεταβατικά του στάτη στο μοντέλο της ΓΕΔΤ μπορούν να αγνοηθούν εξαιτίας των ακόλουθων [27]:

- Τα αποτελέσματα προσομοιώσεων σε συνθήκες βραχυκυκλώματος όταν η μηχανή λειτουργεί ακόμα και σε ταχύτητες διαφορετικές από τη σύγχρονη είναι παρόμοια από την πλευρά της ευστάθειας.
- Όσον αφορά την ταχύτητα του δρομέα της ΓΕΔΤ, τα αποτελέσματα είναι πιο συντηρητικά.

Στην περίπτωση της ΓΕΔΤ που μελετάται, όπου η ενεργός και η άεργος ισχύς ελέγχονται ανεξάρτητα η μία από την άλλη, η απλούστευση αυτή οδηγεί μόνο σε αγνόηση των μεταβατικών της θεμελιώδους συχνότητας (μεταβατικά των 50 Hz για την περίπτωση του ελληνικού ηλεκτρικού δικτύου) σε όλα τα ηλεκτρικά μεγέθη της ΓΕΔΤ. Αμελώντας τα μεταβατικά του στάτη στο μοντέλο της γεννήτριας είναι αποδεκτό μόνο για έρευνες ευστάθειας μικρού σήματος (small signal stability). Παράδειγμα μπορεί να είναι η εκτίμηση του επιπέδου flicker από Α/Γ συνδεδεμένη στο δίκτυο.

Εν τούτοις, μελέτες ευστάθειας με θέμα τις συνέπειες ενός βραχυκυκλώματος στο ηλεκτρικό σύστημα δε μπορούν να αντιμετωπισθούν σαν έρευνα μικρού σήματος, διότι η βύθιση τάσης κατά τη διάρκεια του σφάλματος δεν είναι απαραίτητα μικρή. Σε αυτήν την περίπτωση απαιτείται πιο λεπτομερής ανάλυση και προσεκτική επιχειρηματολογία.

Το βασικό επιχείρημα για την αγνόηση των μεταβατικών του στάτη σε μοντέλα ΓΕΔΤ που χρησιμοποιούνται σε τέτοιου είδους μελέτες είναι η εφαρμογή του ανεξάρτητου ελέγχου για την ενεργό και την άεργο ισχύ ή απλοποιήσεις με στόχο τη μείωση των υπολογιστικών χρόνων και της πολυπλοκότητας.

Το τελευταίο επιχείρημα από τα παραπάνω-που αφορά στην πολυπλοκότητα- είναι προφανώς αφύσικο, αλλά έχει συνδεθεί με την περίοδο που οι υπολογιστικές δυνατότητες ήταν μικρές-πολλά χρόνια πριν.

Η επιχειρηματολογία που αφορά την εφαρμογή του ανεξάρτητου ελέγχου φαίνεται να είναι πιο σχετική. Σε αυτήν την περίπτωση, η φυσική συμπεριφορά της ΓΕΔΤ έχει να κάνει περισσότερο με τη συμπεριφορά και τη δυνατότητα ελέγχου μιας σύγχρονης

μηχανής. Λεπτομερής ανάλυση για την αγνόηση των μεταβατικών του στάτη στην περίπτωση ερευνών ευστάθειας στα ηλεκτρικά συστήματα με σύγχρονες γεννήτριες μπορεί να βρεθεί στο [5].

Σε αυτές τις έρευνες, αναφέρεται παρόμοια ότι ενδεχόμενες ασυμφωνίες ανάμεσα στις ηλεκτρικές ιδιότητες της ΓΕΔΤ χρησιμοποιώντας μοντέλα 3^{ης} ή 5^{ης} τάξης θα έχουν μόνο ακαδημαϊκό ενδιαφέρον¹ αν και μόνο αν η προστασία του μετατροπέα από υπερεντάσεις δεν περιλαμβάνεται στις έρευνες. Ο μετατροπέας της ΓΕΔΤ, παρ' όλα αυτά, σχεδιάζεται συχνά για να χειρίζεται την ισχύ του δρομέα (και τη μαγνήτιση της γεννήτριας από το κύκλωμα του δρομέα) μόνο, σαν το βασικό πλεονέκτημα αυτής της εφαρμογής μεταβλητών στροφών. Από την άλλη πλευρά αυτό θα μπορούσε να κάνει το μετατροπέα να είναι το πιο ευαίσθητο κομμάτι της A/Γ διότι τα ρεύματα που διέρχονται μέσω του μετατροπέα είναι περιορισμένα (πρέπει να ληφθεί υπ' όψιν ότι τα IGBT's του μετατροπέα μπορούν να καταστραφούν από υπερεντάσεις). Ένας αριθμός από ηλεκτρικά μεγέθη όπως τα ρεύματα στο στάτη, στο δρομέα και στο μετατροπέα από την πλευρά του δικτύου, καθώς και η τάση παρακολουθούνται με στόχο την προστασία του μετατροπέα κατά τη διάρκεια διαταραχών σε ολόκληρο το δίκτυο.

Από σύγκριση αποτελεσμάτων μεταξύ των μοντέλων 3ης και 5ης τάξης, το μοντέλο 3ης τάξης γενικά προβλέπει χαμηλές τιμές για τα ρεύματα του στάτη και του δρομέα σαν αποτέλεσμα της αγνόησης των μεταβατικών θεμελιώδους συχνότητας. Οι ασυμφωνίες που προκύπτουν από την απλούστευση του μοντέλου εμφανίζονται όταν το βραχυκύκλωμα εφαρμόζεται στο δίκτυο και εξακολουθούν να υπάρχουν ακόμα και όταν το σφάλμα εκκαθαρίζεται.

1. Σημειώνεται ότι η τάξη του μοντέλου, 3^η έναντι 5^{ης}, της συμβατικής ασύγχρονης γεννήτριας δεν παίζει κανένα ρόλο όσον αφορά στη συμπεριφορά των ηλεκτρικών μεγεθών της γεννήτριας και την ευστάθεια. Η κατασκευάστρια εταιρεία Vestas έχει συμφωνήσει ότι η χρήση μοντέλων 3^{ης} τάξης για τη ΓΕΔΤ σε μελέτες ευστάθειας οδηγεί σε λάθος αποτελέσματα διότι τα μεταβατικά θεμελιώδους συχνότητας στη μηχανή αμελούνται. Αυτό είναι ένα έλλειμμα του μοντέλου μικρού σήματος και μπορεί να οδηγήσει σε παραπλανητικά συμπεράσματα όσον αφορά τη δράση του μετατροπέα-μπλοκάρισμα εξαιτίας υπερεντάσεων έναντι αδιάκοπης λειτουργίας. Με βάση την άποψη αυτή, το μοντέλο 5^{ης} τάξης της ΓΕΔΤ είναι, τουλάχιστον, απαραίτητο για σκοπούς μελετών τέτοιου είδους.

Αυτό σημαίνει ότι το απλουστευμένο μοντέλο της ΓΕΔΤ, όπου τα μεταβατικά αγνοούνται, μπορεί να οδηγήσει σε παραπλανητικά συμπεράσματα σε θέματα σχετικά με την δράση του μετατροπέα (προστασία και μπλοκάρισμα έναντι διαρκούς λειτουργίας) και, έπειτα, στο αποτέλεσμα ως προς μια δεδομένη περίπτωση μελέτης ευστάθειας.

Το γεγονός ότι ο μετατροπέας που συνδέεται στο ανοικτό κύκλωμα του δρομέα της ΓΕΔΤ περιέχει ηλεκτρονικά ισχύος, που απαιτούν προστασία έναντι ηλεκτρικών και θερμικών υπερεντάσεων/καταστροφών, διαφοροποιεί τη ΓΕΔΤ από άλλες συμβατικές (σύγχρονες ή επαγωγής) γεννήτριες με βραχυκυκλωμένο δρομέα. Το μοντέλο της ΓΕΔΤ πρέπει να παράγει σωστές συμπεριφορές για τα ρεύματα με στόχο την εκτίμηση του κινδύνου ενδεχόμενων καταστροφών των ηλεκτρονικών ισχύος του μετατροπέα, κυρίως τα IGBT's, και έπειτα, τη δράση του συστήματος προστασίας του μετατροπέα [4].

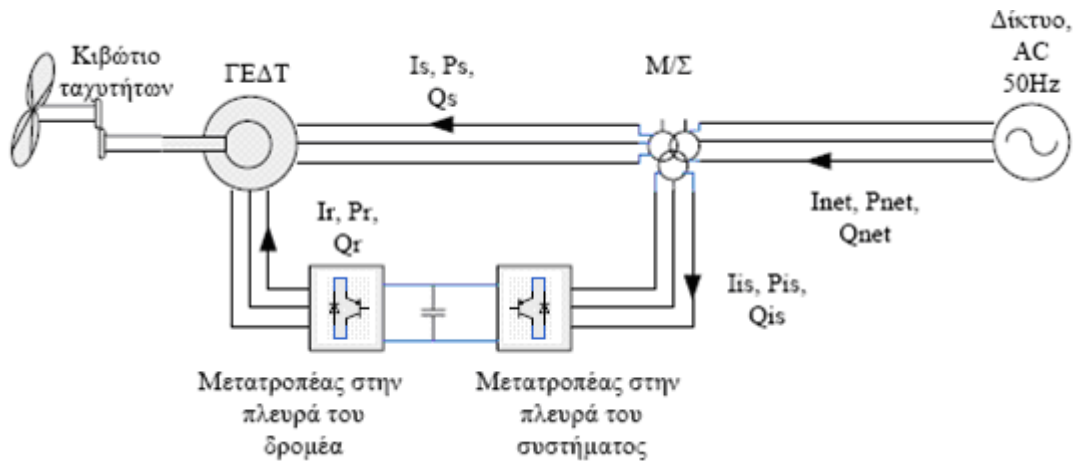
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Έλεγχος και Δυναμική Συμπεριφορά του Συστήματος

3.1. Εισαγωγή

Η γεννήτρια επαγωγής διπλής τροφοδότησης με AC-DC-AC μετατροπέα στο κύκλωμα του δρομέα έχει για πολύ καιρό αποτελέσει μια βασική μέθοδο για εφαρμογές υψηλής ισχύος που περιλαμβάνουν περιορισμένο εύρος ταχύτητας. Ο μετατροπέας ισχύος απαιτείται να χειρίζεται μόνο την ισχύ του δρομέα. Τεχνικές διανυσματικού ελέγχου για ανεξάρτητο έλεγχο ροπής και ρεύματος διέγερσης δρομέα είναι ευρέως γνωστές [14], ενώ στο [15], για παράδειγμα, έχει αποδειχθεί ότι μια στρατηγική διανυσματικού ελέγχου μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον ανεξάρτητο έλεγχο ενεργού και αέργου ισχύος που ανταλλάσσονται με το δίκτυο.

Πολλά συστήματα γεννητριών επαγωγής διπλής τροφοδότησης που έχουν ανακοινωθεί περιέχουν είτε έναν μετατροπέα (τροφοδοτούμενο από ρεύμα) [16,17] για την σύνδεση συνεχούς τάσης, είτε έναν κυκλομετατροπέα στο κύκλωμα του δρομέα [18-19]. Στο [16] περιγράφονται οι ρυθμίσεις ονομαστικής ταχύτητας, ο λόγος κιβωτίου, και τα ονομαστικά στοιχεία για τη μηχανή και τον μετατροπέα για αιολική παραγωγή με γεννήτρια επαγωγής διπλής τροφοδότησης. Στα [17], [20], έχουν παρουσιαστεί στρατηγικές που στοχεύουν στην μεγιστοποίηση της ηλεκτρικής ισχύος εξόδου από την ΓΕΔΤ.



Σχήμα 3.1.1. Διάγραμμα μοντέλου Α/Γ με ΓΕΔΤ.

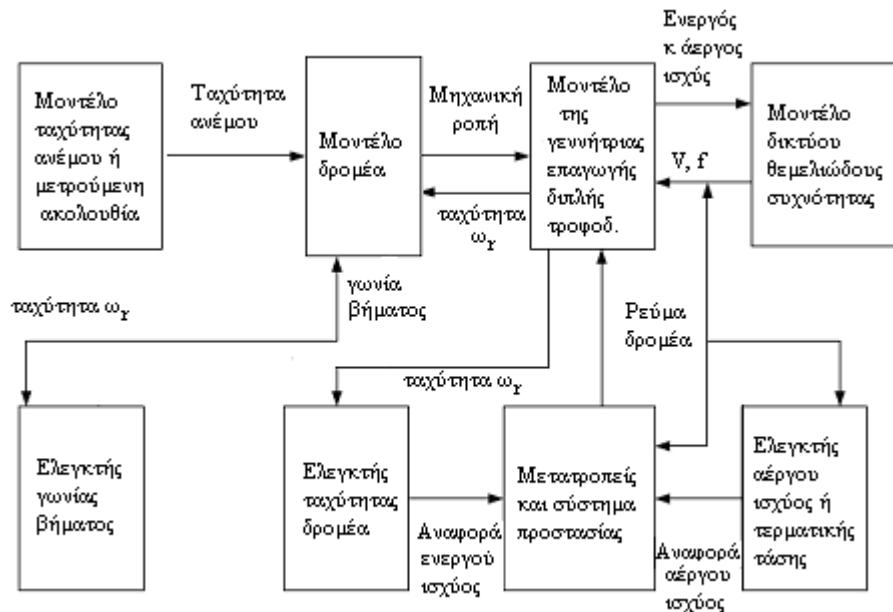
Στο παραπάνω σχήμα, παρουσιάζεται η δομή μιας ανεμογεννήτριας μεταβλητών στροφών με γεννήτρια επαγωγής διπλής τροφοδότησης. Το μοντέλο ανέμου συνήθως αποτελείται από ένα μπλοκ του οποίου η έξοδος είναι μια ακολουθία ταχύτητας ανέμου. Όπως συμβαίνει και στην Α/Γ σταθερών στροφών, αυτό το μπλοκ μπορεί να περιέχει είτε ένα μοντέλο ταχύτητας ανέμου είτε μια μετρούμενη ακολουθία ταχυτήτων ανέμου.

Στη συνέχεια, ακολουθούν ένα μοντέλο του δρομέα και ένα μοντέλο του δικτύου. Οι εισοδοί τους είναι η ταχύτητα ανέμου, η μηχανική ταχύτητα του δρομέα και η γωνία βήματος, η ροπή που προκύπτει από το δρομέα και το ρεύμα από το μετατροπέα και η άεργος και ενεργός ισχύς αντίστοιχα. Σε σχέση με το αντίστοιχο διάγραμμα που θα προέκυπτε για μια ανεμογεννήτρια σταθερών στροφών, επειδή η γεννήτρια επαγωγής διπλής τροφοδότησης είναι πιο σύνθετη, υπάρχουν κάποια επιπλέον στοιχεία, τα ακόλουθα [1]:

- Ένας ελεγκτής γωνίας βήματος, που ελέγχει τη γωνία βήματος του πτερυγίου βασισμένος στην πραγματική ταχύτητα του δρομέα, που είναι επομένως είσοδος στον ελεγκτή.
- Ένας ελεγκτής ταχύτητας του δρομέα, που καθορίζει ένα σημείο αναφοράς για την ενεργό ισχύ με βάση την πραγματική ταχύτητα του δρομέα, που επίσης είναι είσοδος στον ελεγκτή.
- Το μοντέλο των μετατροπέων και του συστήματος προστασίας, που ελέγχει το ρεύμα του δρομέα της γεννήτριας επαγωγής διπλής τροφοδότησης με βάση το

σημείο αναφοράς του ελεγκτή ταχύτητας δρομέα, τον ελεγκτή τάσης ή αέργου ισχύος και την πραγματική τιμή της θερματικής τάσης, τα οποία επομένως είναι όλα είσοδος σε αυτό το υποσύστημα.

Για κάθε ένα από τα υποσύνολα που παρουσιάζονται παραπάνω, τα μοντέλα παρουσιάζονται παρακάτω:



Σχήμα 3.1.2. Γενική δομή ενός μοντέλου ανεμογεννήτριας μεταβλητών στροφών με ΓΕΔΤ.

Σημειώνεται ότι δεν υπάρχει αναπαράσταση του άξονα στο μοντέλο της γεννήτριας επαγωγής διπλής τροφοδότησης. Ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών περιλαμβάνουν σύνθετους μετατροπείς, με σκοπό να ελαχιστοποιήσουν οποιαδήποτε αποτελέσματα από τον άξονα. Αν επρόκειτο να συμπεριληφθεί μοντέλο άξονα, αυτοί οι ελεγκτές θα έπρεπε επίσης να συμπεριληφθούν και πάλι αλλά αυτό το θέμα θεωρείται ότι δεν αφορά την παρούσα εργασία. Καθώς ο στόχος αυτών των ελεγκτών είναι η ελαχιστοποίηση της επίδρασης του άξονα, μπορεί επίσης να θεωρηθεί ότι αυτοί οι ελεγκτές είναι ιδανικοί, το οποίο είναι ισοδύναμο με το να αμεληθεί ο άξονας. Επομένως, η ηλεκτρική και μηχανική συμπεριφορά ανεμογεννητριών μεταβλητών στροφών είναι για ένα μεγάλο κομμάτι ανεξάρτητες. Άρα δεν είναι απαραίτητο να εισαχθεί μοντέλο του άξονα αν το βασικό θέμα ενδιαφέροντος είναι η απόκριση της ανεμογεννήτριας σε μεταβατικά φαινόμενα του ηλεκτρικού

συστήματος. Μετρήσεις που υποστηρίζουν αυτήν την υπόθεση μπορεί να βρει κανείς στη βιβλιογραφία [32,33].

3.2. Μοντέλο του δρομέα

Η μηχανική ισχύς που ο δρομέας εξάγει από τον άνεμο υπολογίζεται με βάση την εξίσωση (2.1.1-1), που επαναλαμβάνεται εδώ για διευκόλυνση:

$$P_w = \frac{\rho}{2} C_p (\lambda, \beta) A_r V_w^3 \quad (3.2-1)$$

Ο συντελεστής απόδοσης C_p δεν εξαρτάται μόνο από το λόγο ταχύτητας ακροπτερυγίου λ , αλλά και από τη γωνία βήματος β [μοίρες]. Αυτό προκύπτει διότι οι ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών θεωρούνται ότι είναι εξοπλισμένες με έναν ελεγκτή γωνίας βήματος, όπως συνήθως γίνεται.

Χρησιμοποιήθηκε μια αριθμητική προσέγγιση της καμπύλης C_p . Η γενική δομή της εξίσωσης είναι πανομοιότυπη με αυτή που δίνεται στο [7]. Παρ' όλα αυτά, αν και οι συντελεστές σε αυτήν αναφέρονται σε δρομέα ανεμογεννήτριας με έλεγχο γωνίας βήματος, η τιμή τους έχει αλλάξει με σκοπό να υπάρξει καλύτερη αριθμητική προσέγγιση των καμπυλών που δίνονται στη βιβλιογραφία των κατασκευαστών [1].

Ένας παράγοντας που δυσκολεύει τη χρήση της αριθμητικής προσέγγισης της καμπύλης C_p είναι ότι η ταχύτητα του δρομέα σε μόνιμη κατάσταση για συγκεκριμένη ποσότητα παραγόμενης ισχύος δεν δίνεται από τους κατασκευαστές. Αυτό αντιμετωπίστηκε θεωρώντας ότι η ταχύτητα του δρομέα είναι ίση με την ελάχιστη τιμή της σε μηδενική ισχύ και με την ονομαστική της τιμή σε ονομαστική ισχύ. Όταν καταστρώνεται το μοντέλο του ελεγκτή της ταχύτητας του δρομέα, οι τιμές της ταχύτητας του δρομέα ανάμεσα στην ελάχιστη και τη μέγιστη τιμή μπορούν να υπολογισθούν θεωρώντας ότι η ταχύτητα ελέγχεται με τέτοιο τρόπο ώστε να εξασφαλίζεται μέγιστη ενεργειακή απόδοση.

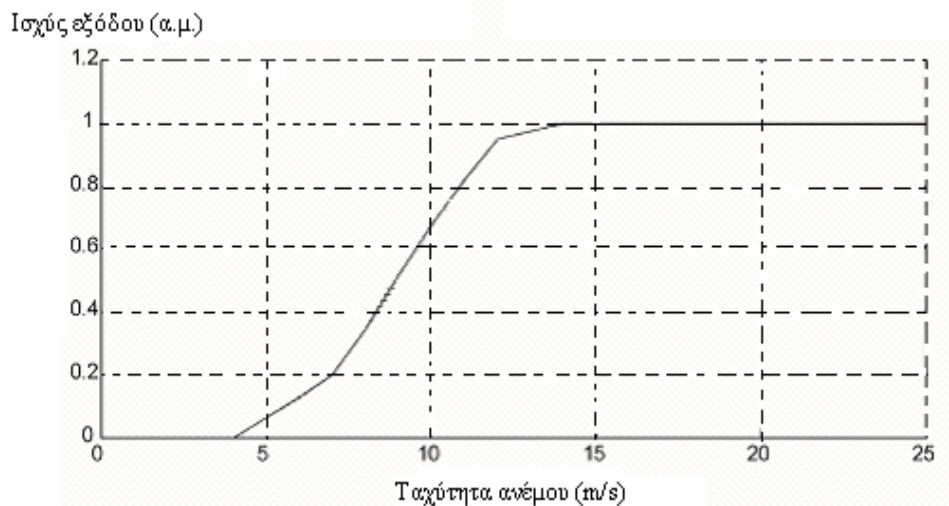
Η ακόλουθη εξίσωση χρησιμοποιήθηκε για την προσέγγιση της καμπύλης $C_p(\lambda, \beta)$:

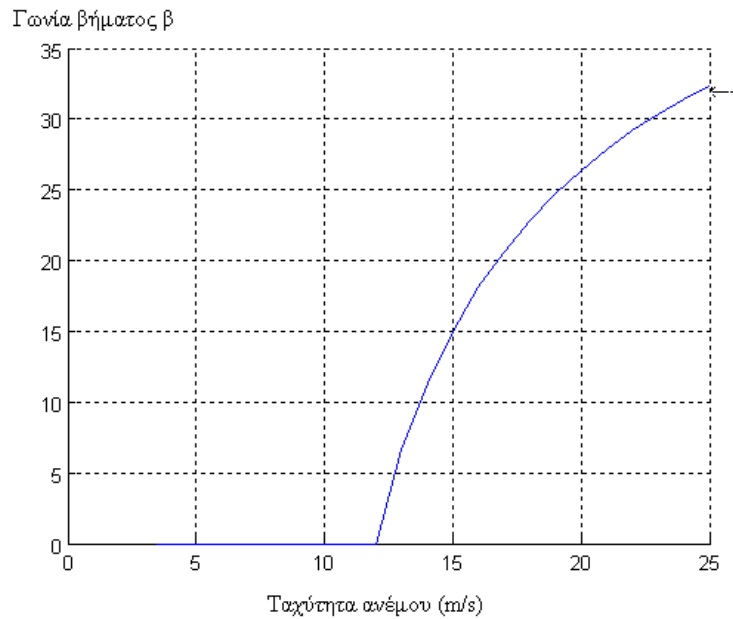
$$C_p(\lambda, \beta) = 0.22 \left(\frac{116}{\lambda_i} - 0.4\beta - 5 \right) e^{-\frac{12.5}{\lambda_i}} \quad (3.2-2)$$

όπου β η γωνία βήματος της έλικας, λ ο λόγος ταχύτητας ακροπτερυγίου προς ταχύτητα ανέμου και

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad (3.2-3)$$

Το άνω γράφημα του Σχήματος 3.2.1. που ακολουθεί δείχνει την καμπύλη ισχύος που προκύπτει όταν εφαρμόζεται η αριθμητική αυτή προσέγγιση. Στο κάτω γράφημα παρουσιάζεται η προσέγγιση της γωνίας βήματος. Σε αυτό το μοντέλο δρομέα δεν περιλαμβάνεται το φαινόμενο της σκίασης του πύργου, καθώς συμπεραίνεται από μετρήσεις στη βιβλιογραφία ότι αντανακλάται ελάχιστα στην παραγόμενη ισχύ [44, 45].



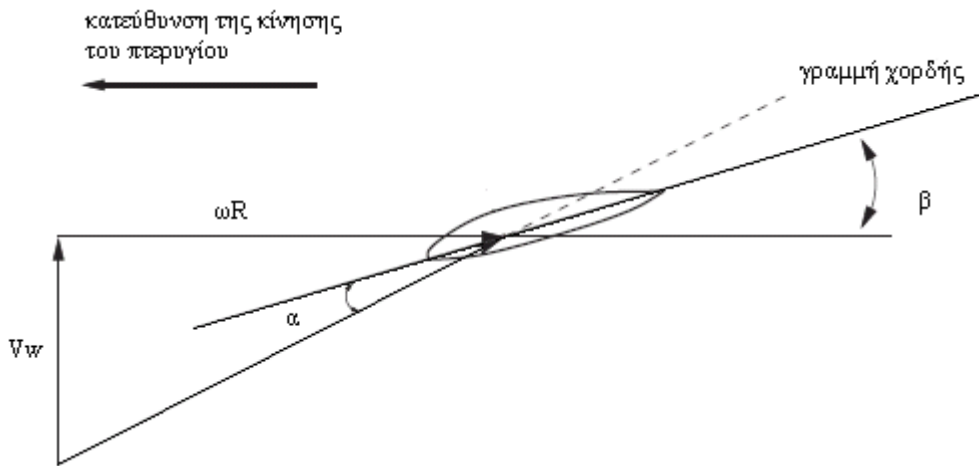


Σχήμα 3.2.1. Άνω γράφημα: αριθμητική προσέγγιση της καμπύλης ισχύος μιας ανεμογεννήτριας με έλεγχο γωνίας βήματος. Κάτω γράφημα: διακύμανση της γωνίας βήματος πάνω από την ονομαστική ταχύτητα ανέμου.

Ο τρόπος με τον οποίο γίνεται ο έλεγχος της γωνίας βήματος του πτερυγίου παρουσιάζεται στην επόμενη παράγραφο.

Έλεγχος γωνίας βήματος

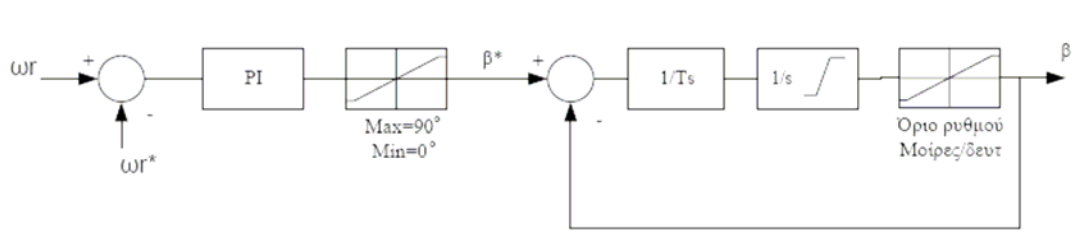
Στο παρακάτω σχήμα δίνεται η γεωμετρία του πτερυγίου σε σχέση με την κατεύθυνση κίνησής του και την ταχύτητα ανέμου ώστε να γίνει σαφής ο ορισμός της γωνίας βήματος του πτερυγίου, β .



Σχήμα 3.2.2. Σχεδιάγραμμα της γεωμετρίας του πτερυγίου.

Σύμφωνα με την παραπάνω σχέση του αεροδυναμικού συντελεστή, η τιμή του C_p μπορεί να μειωθεί με το να αυξηθεί η γωνία βήματος. Παρ' όλα αυτά, η γωνία βήματος δεν είναι σε θέση να λάβει αμέσως την τιμή που δίνει ο έλεγχος. Επομένως, για μια πιο ρεαλιστική προσομοίωση, ένας περιοριστής ρυθμού έχει εισαχθεί στο μοντέλο του ελεγκτή γωνίας βήματος. Στην παρούσα εργασία ο μέγιστος ρυθμός αλλαγής της γωνίας έχει τεθεί ίσος με 3 μοίρες/δευτερόλεπτο.

Επιπλέον, χρησιμοποιείται ένας αναλογικός-ολοκληρωτικός ολοκληρωτής που διατηρεί την ταχύτητα του δρομέα στην ονομαστική της τιμή. Λαμβάνεται τέλος υπ' όψιν, η σταθερά χρόνου T_s του σερβομηχανισμού που λειτουργεί για την υλοποίηση του ελέγχου. Το διάγραμμα του ελεγκτή της γωνίας βήματος δίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 3.2.3. Διάγραμμα ελέγχου γωνίας βήματος.

Στόχος του ελέγχου της γωνίας βήματος είναι ο περιορισμός της ταχύτητας του δρομέα. Για το λόγο αυτό, ο ελεγκτής είναι ενεργός μόνο κατά τη διάρκεια υψηλού

ανέμου (κατά μέση τιμή). Λόγω της αργής σχετικά απόκρισης του ελεγκτή γωνίας βήματος, η τιμή αναφοράς για τη γωνία δε μπορεί να επιτευχθεί με ακρίβεια κάθε στιγμή, ενώ είναι ακόμη σε αποδεκτό εύρος γύρω από την τιμή αναφοράς. Οι τιμές των σταθερών K_p (αναλογικό κέρδος) και K_i (ολοκληρωτική σταθερά) του PI ελεγκτή επιλέχθηκαν με στόχο τη μικρή, σχετικά, μεταβλητότητα στροφών και μηχανικών ροπών, με συνέπεια τις μικρότερες καταπονήσεις του μηχανικού συστήματος, για διάφορες ταχύτητες μεγαλύτερες της ονομαστικής. Οι τιμές που χρησιμοποιήθηκαν στο μοντέλο που αναπτύχθηκε ήταν $K_p=200$ και $K_i=60$ [22].

Σε όλους τους τύπους ανεμογεννητριών μεταβλητών στροφών, ο έλεγχος γωνίας βήματος είναι ένα βασικό χαρακτηριστικό για τη λειτουργία και τη μοντελοποίηση. Καθώς στη διαμόρφωση της γεννήτριας επαγωγής διπλής τροφοδότησης η ανεμογεννήτρια είναι περιορισμένη όσον αφορά το εύρος ταχύτητας λειτουργίας, ο έλεγχος αυτός λαμβάνει ιδιαίτερα πολύπλοκο ρόλο. Σε αυτόν τον τύπο Α/Γ, ο έλεγχος γωνίας βήματος δεν χρειάζεται αποκλειστικά για περιορισμό της ισχύος και της ταχύτητας, αλλά όταν εκτελείται ανάλογα, μπορεί να συμβάλλει στη μεγιστοποίηση της ισχύος που δεσμεύεται. Τα αεροδυναμικά χαρακτηριστικά του δρομέα, δηλαδή η τιμή του συντελεστή C_p , σαν συνάρτηση του λόγου ακροπερυγίου λ και της γωνίας βήματος β , πρέπει να είναι γνωστά για τον τύπο αυτό ελέγχου. Από άποψη ελέγχου είναι σημαντικό να γίνει αισθητό ότι η συνάρτηση του συντελεστή ισχύος είναι μια επιφάνεια στο (C_p, λ, β) -χώρο.

Στο [28] εξηγείται πώς μπορεί μια τέτοια επιφάνεια να μοντελοποιηθεί χρησιμοποιώντας μια Simulink S-function.

Δεν υπάρχει απλός αναλυτικός τρόπος για να εξαχθεί η καμπύλη ισχύος της ανεμογεννήτριας από την ταχύτητα ανέμου και τις πληροφορίες για το δρομέα. Τα στοιχεία για τον άνεμο και το δρομέα μπορούν να καθορίσουν τα πιθανά όρια για την ισχύ που είναι διαθέσιμη, αλλά η πραγματική ισχύς στην έξοδο θα είναι αποτέλεσμα της επιλεγμένης μεθόδου ελέγχου, καθώς και του κατά πόσο αυτή υλοποιείται ευφυώς. Η στρατηγική ελέγχου, από την άλλη μεριά, επηρεάζεται από ένα σύνθετο σύνολο παραγόντων, που περιλαμβάνουν τη δομική ισχύ, τη δυναμική συμπεριφορά και την ποιότητα ισχύος, μεταξύ άλλων. Επομένως, η στρατηγική ελέγχου είναι, ή

πρέπει να είναι, σε συνδυασμό με την ολική φιλοσοφία σχεδίασης της ανεμογεννήτριας.

3.3. Μοντέλο της γεννήτριας

Ένα μοντέλο γεννήτριας επαγωγής διπλής τροφοδότησης είναι παρόμοιο με αυτό της γεννήτριας επαγωγής τύπου κλωβού. Η πρώτη διαφορά είναι ότι τα τυλίγματα του δρομέα δεν είναι βραχυκυκλωμένα, δηλαδή η τάση του δρομέα δεν ισούται με μηδέν. Οι εξισώσεις τάσης της μηχανής στο σύγχρονο πλαίσιο έχουν παρατεθεί στο κεφ. 2.4 οπότε δεν κρίνεται σκόπιμη η επανάληψή τους σε αυτό το σημείο. Κατ' εξαίρεση, οι εξισώσεις που δίνουν την ενεργό P και άεργο Q ισχύ που παράγονται από τη μηχανή επαναλαμβάνονται εδώ για μια διευκρίνιση ως προς τον έλεγχο:

$$P = V_{ds} \cdot i_{ds} + V_{qs} \cdot i_{qs} + V_{dr} \cdot i_{qr} + V_{qr} \cdot i_{qr} \quad (3.3-1)$$

$$Q = V_{qs} \cdot i_{ds} - V_{ds} \cdot i_{qs} + V_{qr} \cdot i_{dr} - V_{dr} \cdot i_{qr} \quad (3.3-2)$$

Η ενεργός και η άεργος ισχύς που δίνονται στις παραπάνω σχέσεις δεν είναι απαραίτητα ίσες με τις ποσότητες που ανταλλάσσονται με το δίκτυο. Αυτό καθορίζεται από τη στρατηγική ελέγχου που ακολουθείται.

3.4. Μοντέλο των μετατροπέων

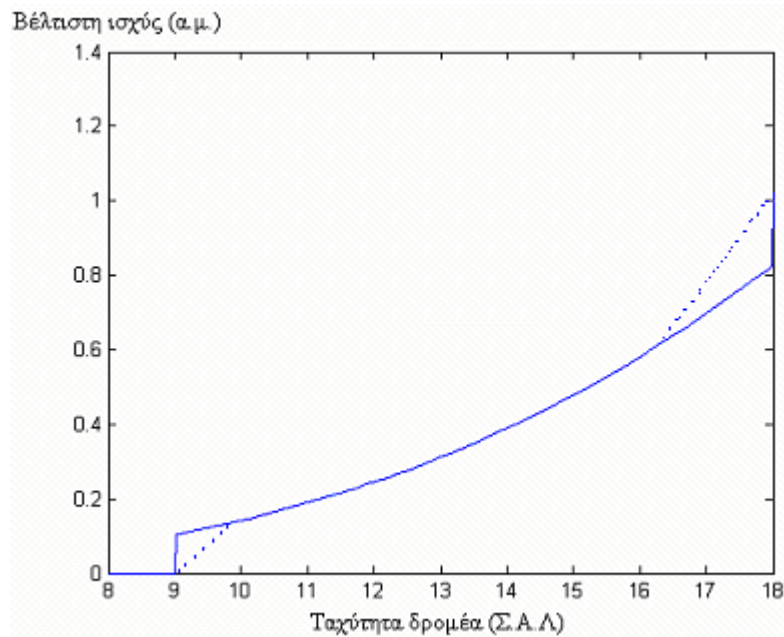
Σύμφωνα με την κλασική στρατηγική διανυσματικού ελέγχου που περιγράφεται στο [13], το πλαίσιο αναφοράς για τον διανυσματικό έλεγχο του μετατροπέα από την πλευρά του δρομέα είναι προσανατολισμένο κατά την θέση του διανύσματος ροής του στάτη.

Τα σημεία αναφοράς του ρεύματος προκύπτουν από τα σημεία αναφοράς της ενεργού και αέργου ισχύος. Το σημείο αναφοράς της ενεργού ισχύος παράγεται από τον ελεγκτή ταχύτητας δρομέα, με βάση την πραγματική τιμή της ταχύτητας του δρομέα. Το σημείο αναφοράς για την άεργο ισχύ παράγεται από τον ελεγκτή τερματικής τάσης ή συντελεστή ισχύος, με βάση τις πραγματικές τιμές της τερματικής τάσης ή του συντελεστή ισχύος αντίστοιχα. Αν αμεληθεί η αντίσταση του στάτη και θεωρηθεί

ότι ο άξονας-d συμπίπτει με το μέγιστο της ροής του στάτη, που οδηγεί στο να ισούται η V_{qs} με την τερματική τάση και η V_{ds} με μηδέν, η ηλεκτρική ροπή εξαρτάται από τη συνιστώσα q του ρεύματος δρομέα. Η ακόλουθη σχέση μεταξύ ηλεκτρικής ροπής και της συνιστώσας του ρεύματος i_{qr} προκύπτει από της εξισώσεις της μηχανής:

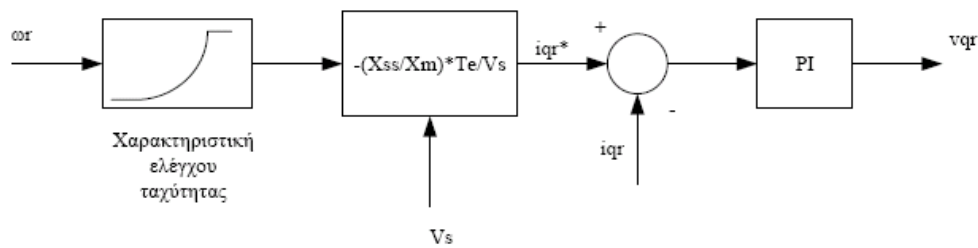
$$i_{qr} = -\frac{X_{ss}}{X_m} \frac{T_e}{V_s} \quad (3.4-1)$$

όπου V_s είναι η τερματική τάση. Χρησιμοποιώντας την πραγματική τιμή της ταχύτητας του δρομέα, ένα σημείο αναφοράς για την ηλεκτρική ροπή μπορεί να εξαχθεί από το σημείο αναφοράς της ενεργού ισχύος που παράγεται από τον ελεγκτή της ταχύτητας του δρομέα. Από τη μέτρηση της ταχύτητας του δρομέα, η ισχύς και η ροπή που αντιστοιχούν σε βέλτιστη λειτουργία προκύπτουν από τη χαρακτηριστική ελέγχου ταχύτητας που φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί.



Σχήμα 3.4.1. Χαρακτηριστική ελέγχου ταχύτητας.

Αυτή η καμπύλη προκύπτει από τη σχέση της P_w θέτοντας $C_p=C_{p,max}$ για όλες τις ταχύτητες ανέμου μέχρι την ονομαστική (η συνεχής γραμμή στο παραπάνω σχήμα). Παρ' όλα αυτά, με σκοπό να έχουμε μία-προς-μία σχέση μεταξύ ταχύτητας δρομέα και ισχύος, η καμπύλη που εφαρμόζεται είναι η διακεκομμένη στο Σχήμα 3.4.1.



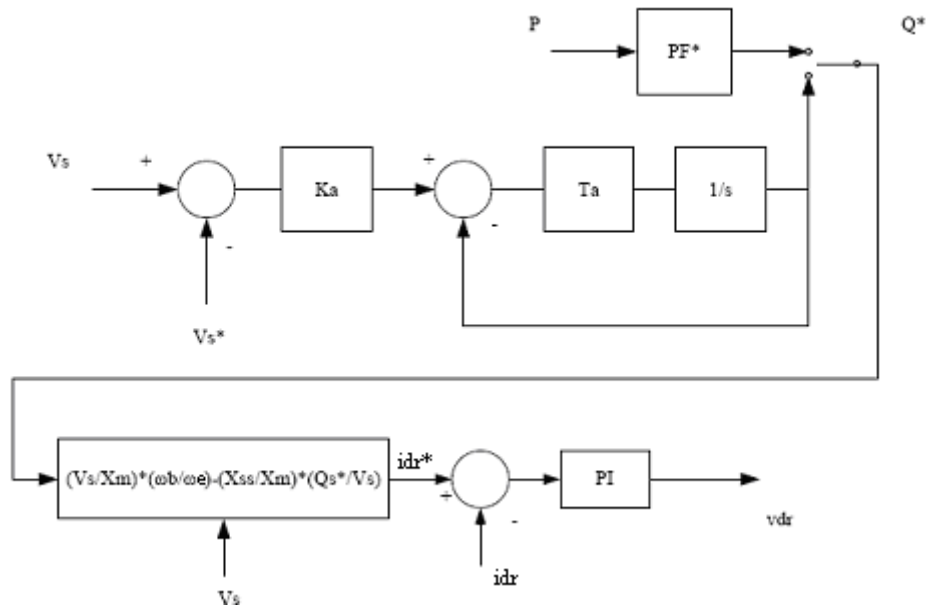
Σχήμα 3.4.2. Μοντελοποίηση του ελεγκτή ταχύτητας.

Η άεργος ισχύς που εισέρχεται στο στάτη της μηχανής εξαρτάται από την d-συνιστώσα του ρεύματος δρομέα. Χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις της μηχανής και πάλι αμελώντας την αντίσταση του στάτη και θεωρώντας ότι ο άξονας-d συμπίπτει με το μέγιστο της ροής του στάτη, μπορεί να αποδειχθεί ότι

$$i_{dr} = \frac{V_s}{X_m} \frac{\omega_b}{\omega_e} - \frac{X_{ss}}{X_m} \frac{Q_s}{V_s} \quad (3.4-2)$$

Χρησιμοποιώντας αυτήν την εξίσωση μπορεί να εξαχθεί ένα σημείο αναφοράς για το i_{dr} από το σημείο αναφοράς άεργου ισχύος που παράγεται από τον ελεγκτή συντελεστή ισχύος. Συνήθως, η μηχανή λειτουργεί με συντελεστή ισχύος μοναδιαίο. Μια ανεμογεννήτρια λοιπόν μεταβλητών στροφών με γεννήτρια επαγωγής διπλής τροφοδότησης είναι σε θέση να μεταβάλλει την άεργο ισχύ που ανταλλάσσει με το δίκτυο και άρα να παίρνει μέρος στον έλεγχο της τερματικής τάσης.

Έτσι, καθώς η αιολική ενέργεια στα ηλεκτρικά δίκτυα αυξάνει ολοένα και περισσότερο το μερίδιό της, γίνεται θεμιτό για τις ανεμογεννήτριες να παρέχουν έλεγχο τάσης. Όπως προκύπτει από την παραπάνω σχέση για την άεργο ισχύ, η άεργος που ανταλλάσσεται με το δίκτυο μπορεί να ελεγχθεί, δεδομένου ότι η διάσταση του ηλεκτρονικού μετατροπέα είναι αρκετή ώστε να υποστηρίξει την κυκλοφορία αέργου ρεύματος ακόμα και σε συνθήκες ονομαστικού ενεργού ρεύματος. Ο ελεγκτής που παρουσιάζεται στο παραπάνω σχήμα λειτουργεί λοιπόν είτε σε κατάσταση σταθερού συντελεστή ισχύος είτε σε κατάσταση Αυτόματου Ρυθμιστή Τάσης [22].



Σχήμα 3.4.3. Ελεγκτής αέργου ισχύος.

Πρέπει να σημειωθεί στο σημείο αυτό ότι οι πραγματικοί ελεγκτές τερματικής τάσης μπορούν να διαφέρουν από το παραπάνω μοντέλο. Παρ' όλα αυτά, αυτό ισχύει για όλα τα στοιχεία του ηλεκτρικού συστήματος: είναι ένα γενικό πρόβλημα στις προσομοιώσεις ηλεκτρικού συστήματος ότι η δομή και οι παράμετροι των μοντέλων των στοιχείων δεν είναι διαθέσιμα. Το πρόβλημα αυτό επίσης ενισχύεται από το γεγονός ότι τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων εξαρτώνται σε ένα βαθμό μόνο από την ακριβή δομή και τις παραμέτρους των επιμέρους ελεγκτών. Οι παράμετροι των παραμέτρων των παραπάνω PI ελεγκτών που χρησιμοποιήθηκαν είναι: $K_p=50$, $K_i=5$.

Για τον έλεγχο του μετατροπέα από την πλευρά του δικτύου χρησιμοποιείται ένα πλαίσιο αναφοράς συνδεδεμένο με το διάνυσμα της τερματικής τάσης V_s . Επομένως προκύπτουν οι ακόλουθες σχέσεις για την ενεργό και την άεργο ισχύ που ανταλλάσσονται με το δίκτυο:

$$P_{is} = v_{qs} \cdot i_{q_{is}} \quad (3.4-3)$$

$$Q_{is} = v_{qs} \cdot i_{d_{is}} \quad (3.4-4)$$

Συνήθως κατά τη λειτουργία του μετατροπέα εξασφαλίζεται ότι δεν ανταλλάσσεται άεργος ισχύς με το δίκτυο [23], οπότε ισχύει:

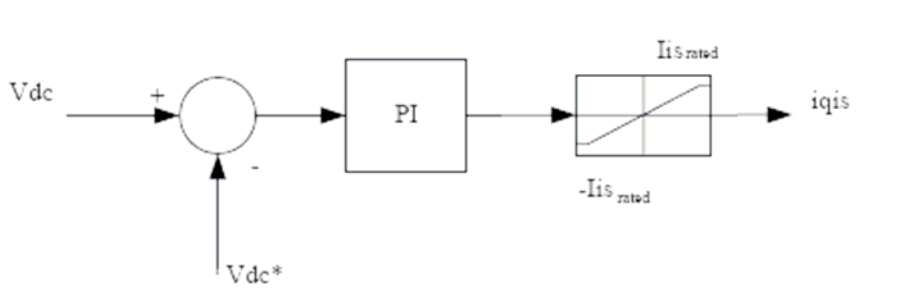
$$Q_{is} = 0 \Rightarrow i_{dis} = 0 \quad (3.4-5)$$

Η βασική λειτουργία του μετατροπέα από την πλευρά του δικτύου είναι η διατήρηση της συνεχούς τάσης σταθερή και ίση με την ονομαστική της τιμή (1 α.μ.).

Χρησιμοποιώντας την γνωστή σχέση για τους πυκνωτές, έχοντας μοντελοποιήσει την σύνδεση συνεχούς τάσης με χωρητικότητα C κατάλληλης τιμής προκύπτει:

$$C \frac{dV_{dc}}{dt} = \frac{P_{is} - P_r}{V_{dc}} \quad (3.4-6)$$

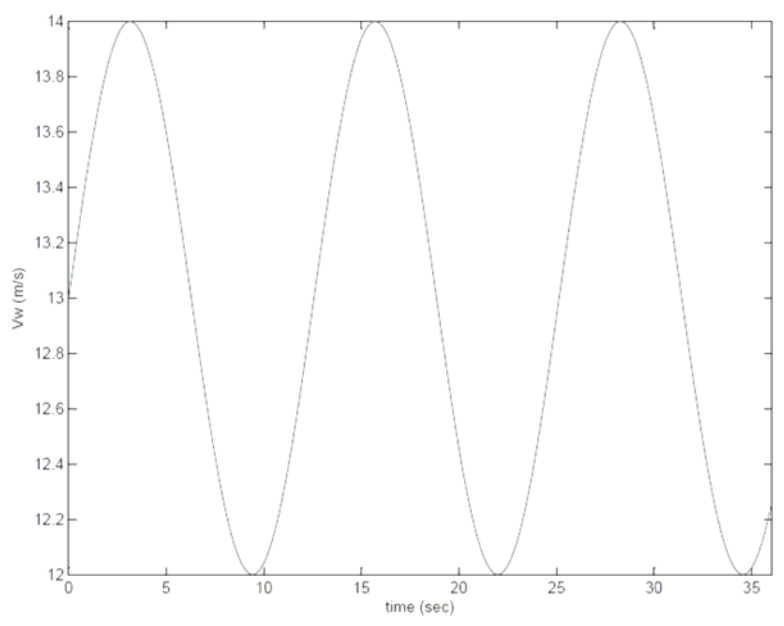
όπου με V_{dc} η τιμή της συνεχούς τάσης και P_r η ενεργός ισχύς που εισέρχεται στο κύκλωμα του δρομέα της γεννήτριας από το μετατροπέα στην πλευρά της μηχανής. Η τιμή της χωρητικότητας C έχει προκύψει μετά από κανονικοποίηση ($C=0.0014s$ σε δευτερόλεπτα – $4500\mu F$ για $1200V$ DC [22]). Ο ελεγκτής της συνεχούς τάσης που χρησιμοποιήθηκε είναι ένας αναλογικός-ολοκληρωτικός και σχηματικά δίνεται παρακάτω.



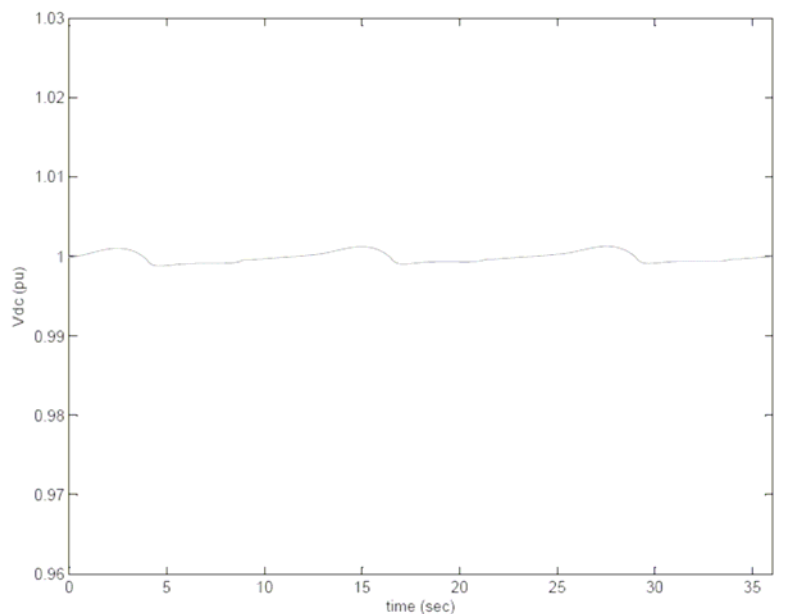
Σχήμα 3.4.4. Ελεγκτής DC τάσης.

Στο παραπάνω γράφημα σημειώνεται ο περιοριστής ρεύματος που εξασφαλίζει ότι το ρεύμα που εισέρχεται στον μετατροπέα δεν θα ξεπεράσει την ονομαστική αντοχή του. Οι παράμετροι του PI ελεγκτή που διακρίνεται στο παραπάνω σχήμα, δηλ. το

αναλογικό κέρδος K_p και η ολοκληρωτική σταθερά K_i επιλέγονται έτσι ώστε, κατά τις διαταραχές ανέμου και τερματικής τάσης, οι διακυμάνσεις της συνεχούς τάσης να είναι οι μικρότερες δυνατές, γεγονός που εξασφαλίζει ότι όση ισχύς παράγει η γεννήτρια τόση περνάει και στο δίκτυο. Στο μοντέλο χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές $K_p=50$ και $K_i=5$ [22]. Παρακάτω δίνεται η διακύμανση της συνεχούς τάσης για μια ημιτονοειδή χρονοσειρά ανέμου συχνότητας 0.5 rad/sec και πλάτους 1 m/s.



Σχήμα 3.4.5. Ημιτονοειδής χρονοσειρά ανέμου με συχνότητα 0.5 rad/sec και πλάτους 1 m/s .



Σχήμα 3.4.6. Διακύμανση της DC τάσης.

Αναπαράσταση του μετατροπέα

Υποθέτοντας ότι ο μετατροπέας λειτουργεί στη γραμμική του περιοχή, η AC τάση είναι ανάλογη της DC τάσης [10]. Σε φυσικές μονάδες:

$$V_r^{LL} = \frac{\sqrt{3}}{2 \cdot \sqrt{2}} m_1 V_{dc} \quad (3.4-7)$$

όπου V_r^{LL} είναι η rms πολική τάση του δρομέα και m_1 ο συντελεστής διαμόρφωσης ($0 \leq m_1 \leq 1$). Σε α.μ, έχουμε:

$$V_r = k m_1 V_{dc} \quad (3.4-8)$$

Όπου $k = \frac{1}{2 \cdot \sqrt{3}} \frac{V_{dc}^B}{V_{Br}^B}$ και V_{dc}^B και V_{Br}^B είναι οι τιμές βάσης για τη DC τάση και την

AC φασική τάση του δρομέα αντίστοιχα. Η μέγιστη τιμή V_r^{\max} υπολογίζεται από την παραπάνω σχέση θεωρώντας $m_1=1$. Σημειώνεται ότι η V_r^{\max} εξαρτάται γραμμικά από τη DC τάση.

Διαστασιολόγηση μετατροπέα

Τα ρεύματα του μετατροπέα πρέπει να είναι περιορισμένα για την προστασία των ημιαγωγικών διακοπών στον ηλεκτρονικό μετατροπέα ισχύος. Τα όρια των περιοριστών καθορίζονται δίνοντας την μέγιστη άεργο ισχύ που μπορεί να παράγει η ανεμογεννήτρια σε α.μ. Από αυτήν την τιμή και την ονομαστική ενεργό ισχύ, υπολογίζεται το ονομαστικό ρεύμα για ονομαστική τερματική τάση. Αυτός ο τρόπος καθορισμού των ορίων του ρεύματος είναι πιο φιλικός στον χρήστη από τον απ' ευθείας καθορισμό των ορίων των ρευμάτων.

Είναι επίσης δυνατόν να καθοριστεί και ένα ποσοστό υπερφόρτωσης και μια χρονική περίοδο κατά την οποία μπορεί ο μετατροπέας να είναι υπερφορτωμένος, διότι οι ηλεκτρονικοί μετατροπείς ισχύος μπορούν να έχουν μια περιορισμένη δυνατότητα υπερφόρτωσης, ανάλογα με τη σχεδίαση [24].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Αρχικοποίηση του μοντέλου

4.1. Εισαγωγή

Ένα σημαντικό πρόβλημα κατά την μοντελοποίηση των συστημάτων ανεμογεννητριών είναι η εύρεση του αρχικού σημείου λειτουργίας, δηλαδή ο υπολογισμός των αρχικών τιμών των μεταβλητών κατάστασης του μοντέλου οι οποίες υπολογίζονται με κάποιον αλγόριθμο. Ο αλγόριθμος αυτός βασίζεται σε κάποιες αρχικές παραδοχές για την λειτουργική κατάσταση της μηχανής. Υπάρχουν αρκετοί τρόποι προσέγγισης του ζητήματος της αρχικοποίησης, οι οποίοι θα παρουσιαστούν παρακάτω ενώ θα αναλυθεί εκτενέστερα και θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα από την αρχικοποίηση που εφαρμόστηκε στο μοντέλο που αναπτύχθηκε κατά τη διάρκεια της παρούσας εργασίας.

4.2. Ενσωμάτωση μοντέλου ανέμου ή μετρούμενες ακολουθίες ταχύτητας ανέμου

Τα μοντέλα ανεμογεννητριών συνήθως προσομοιώνονται με μετρούμενες ακολουθίες ταχύτητας ανέμου. Αυτή η προσέγγιση βέβαια δεν είναι η πλέον κατάλληλη για προσομοιώσεις με μεγάλο αριθμό ανεμογεννητριών που είναι συνδεδεμένες σε ένα ηλεκτρικό δίκτυο. Αυτό συμβαίνει γιατί κάθε εύρος ταχύτητας ανέμου και ένταση τύρβης πρέπει να μετρηθεί πριν την προσομοίωση, γεγονός που καθιστά απαραίτητη την εξασφάλιση και αποθήκευση μεγάλου όγκου πληροφοριών για τον άνεμο καθώς και την ανάπτυξη τρόπων επιλογής της κατάλληλης ακολουθίας ταχύτητας ανέμου από τις διαθέσιμες. Αντιθέτως, τα πλεονεκτήματα ενσωμάτωσης ενός μοντέλου ταχύτητας ανέμου είναι σημαντικά:

- Όταν ένας αριθμός ανεμογεννητριών συνδέεται σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας, δεν είναι ρεαλιστικό να θεωρηθεί ότι η ίδια ακριβώς ταχύτητα ανέμου εφαρμόζεται σε όλες. Επομένως, κάποια διαφοροποίηση πρέπει να

υπάρχει. Όταν χρησιμοποιούνται μετρούμενες ακολουθίες ταχύτητας ανέμου, αυτό θα μπορούσε να γίνει χρησιμοποιώντας διαφορετικές ακολουθίες για κάθε ανεμογεννήτρια, αλλά είναι ακόμα ευκολότερο να τυχαιοποιηθεί μια ακολουθία ταχύτητας ανέμου που παράγεται από ένα μοντέλο ανέμου.

- Η ευελιξία ενός μοντέλου ανέμου. Είναι θεμιτό γενικά να υπάρχει η δυνατότητα προσομοίωσης ακολουθιών ταχυτήτων ανέμου με μεταβαλλόμενο εύρος ταχυτήτων και έντασης τύρβης. Όταν μετρούμενες ακολουθίες ταχυτήτων ανέμου χρησιμοποιούνται σαν είσοδος στο μοντέλο, οι ακολουθίες με τιμές μέσα στο επιθυμητό εύρος ταχύτητας ανέμου και έντασης τύρβης πρέπει να έχουν μετρηθεί εκ των προτέρων και είτε να έχουν αποθηκευθεί σε υπολογιστή είτε να έχουν συμπεριληφθεί στο μοντέλο του ανέμου. Αυτό θα έκανε το μοντέλο της ανεμογεννήτριας σχετικά μη ευέλικτο και άβολο στη χρήση, που είναι ένα επιπλέον επιχείρημα για την χρήση μοντέλων ανέμου σε σχέση με την χρήση μετρούμενων ακολουθιών ανέμου.

Στην παρούσα εργασία θεωρείται ότι υπερβαίνει τα όρια ενδιαφέροντος η ενσωμάτωση μοντέλου ανέμου, αλλά παραμένει ένα από τα σημεία επέκτασης της παρούσας ανάλυσης. Στη συνέχεια λοιπόν η ταχύτητα ανέμου προσεγγίζεται με μια σταθερή τιμή.

4.3. Μέθοδοι αρχικοποίησης

Η αρχική λοιπόν ταχύτητα ανέμου μπορεί να υπολογιστεί από την ενεργό ισχύ που παράγεται από την ανεμογεννήτρια και δεν αλλάζει κατά την προσομοίωση. Για ανεμογεννήτριες σταθερών στροφών, όπως είναι γνωστό, υπάρχει μια σχεδόν ένα προς ένα σχέση μεταξύ ταχύτητας ανέμου και ενεργού ισχύος. Άρα το ζήτημα της αρχικοποίησης μπορεί εύκολα να αντιμετωπισθεί με το να υποτεθεί ότι η ταχύτητα ανέμου είναι είτε πάνω είτε κάτω από την τιμή στην οποία εμφανίζεται η μέγιστη παραγωγή ισχύος.

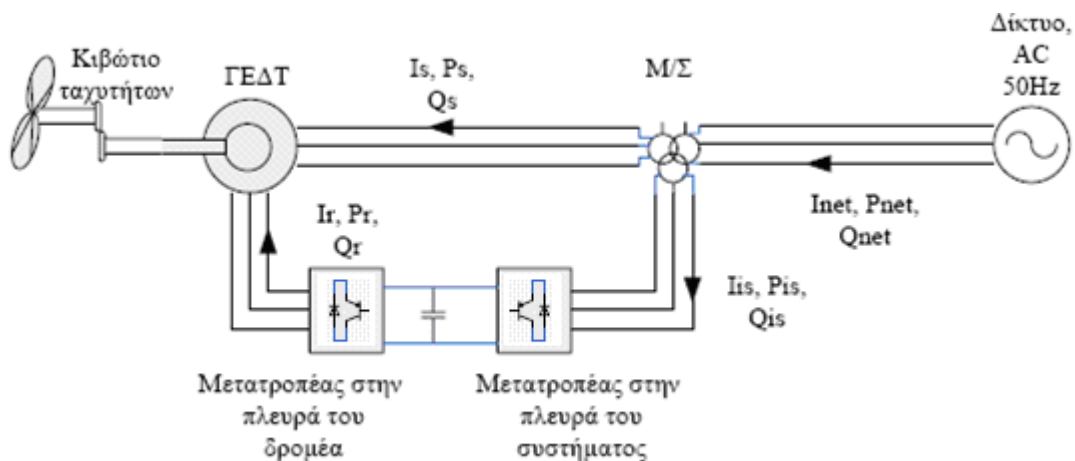
Στην περίπτωση όμως των ανεμογεννητριών μεταβλητών στροφών, μοναδική σχέση ανάμεσα στην ταχύτητα ανέμου και την παραγόμενη ισχύ υπάρχει μόνο πάνω από την ονομαστική ταχύτητα ανέμου. Πάνω από την τιμή αυτή, η ενεργός ισχύς είναι πάντα ίση με την ονομαστική τιμή. Επομένως, είτε η αρχική γωνία βήματος

περυγίων είτε η αρχική ταχύτητα ανέμου πρέπει να καθοριστούν έτσι ώστε να αρχικοποιηθεί το μοντέλο της ανεμογεννήτριας αν παράγει ονομαστική ισχύ στην εκτέλεση της ροής φορτίου.

Στο σημείο αυτό υπάρχουν οι δύο τρόποι αντιμετώπισης του ζητήματος της αρχικοποίησης. Σε πολλές έρευνες τα μοντέλα ανεμογεννητριών υπολογίζονται από την «έξοδο» (παραγωγή ενεργού και πιθανά άεργου ισχύος) προς την «είσοδο» (ταχύτητα ανέμου). Αυτό γίνεται για πολλά μοντέλα γεννητριών κατά την αρχικοποίηση, διότι σε αυτό το επίπεδο μόνο δεδομένα από τη ροή φορτίου, δηλ. παραγόμενη ενεργός και άεργος ισχύς και τερματική τάση, είναι διαθέσιμα και η τιμή των εσωτερικών μεταβλητών του μοντέλου πρέπει να προκύψει από αυτά, λαμβάνοντας υπ' όψιν τη δομή του μοντέλου [1].

Στην παρούσα εργασία η αρχικοποίηση έγινε με την αντίστροφη πορεία, δηλαδή από την «είσοδο» (ταχύτητα ανέμου) στην «έξοδο» (παραγόμενη ενεργός και άεργος ισχύς). Θεωρείται, δηλαδή, δεδομένη η αρχική ταχύτητα ανέμου και με χρήση των γνωστών εξισώσεων της μηχανής με τους μεταβατικούς όρους να έχουν αφαιρεθεί γίνεται ο υπολογισμός όλων των υπολοίπων μεταβλητών του μοντέλου.

Υπολογισμός αρχικού σημείου λειτουργίας



Σχήμα 4.3.1. Διάγραμμα λειτουργίας του μοντέλου.

Για τον υπολογισμό του αρχικού σημείου λειτουργίας του μοντέλου της ΓΕΔΤ που φαίνεται στο παραπάνω σχήμα πρέπει να λυθεί η ακόλουθη ομάδα μη γραμμικών αλγεβρικών εξισώσεων:

$$V_{qs} = R_s \cdot i_{qs} + \frac{\omega_e}{\omega_b} \cdot (X_{ss} \cdot i_{ds} + X_m \cdot i_{dr}) \quad (4.3-1)$$

$$V_{ds} = R_s \cdot i_{ds} - \frac{\omega_e}{\omega_b} \cdot (X_{ss} \cdot i_{qs} + X_m \cdot i_{qr}) \quad (4.3-2)$$

$$V_{qr} = R_r \cdot i_{qr} + \left(\frac{\omega_e - \omega_r}{\omega_b}\right) \cdot (X_{rr} \cdot i_{dr} + X_m \cdot i_{ds}) \quad (4.3-3)$$

$$V_{dr} = R_r \cdot i_{dr} - \left(\frac{\omega_e - \omega_r}{\omega_b}\right) \cdot (X_{rr} \cdot i_{qr} + X_m \cdot i_{qs}) \quad (4.3-4)$$

$$P = V_{ds} \cdot i_{ds} + V_{qs} \cdot i_{qs} + V_{dr} \cdot i_{qr} + V_{qr} \cdot i_{dr} \quad (4.3-5)$$

$$i_{dr} = \frac{V_s}{X_m} \frac{\omega_b}{\omega_s} - \frac{X_{ss}}{X_m} \frac{Q_s}{V_s} \quad (4.3-6)$$

$$i_{qr} = -\frac{X_{ss}}{X_m} \frac{T_e}{V_s} \quad (4.3-7)$$

όπου T_e είναι μια συνάρτηση της ταχύτητας ω_r γνωστή κατά τμήματα, σύμφωνα με την χαρακτηριστική ελέγχου ταχύτητας (βλέπε Κεφάλαιο 3 - Σχήμα 3.4.1). Ένας τρόπος για την αριθμητική επίλυση των παραπάνω εξισώσεων είναι ο εξής:

1. Θεωρώντας μία τιμή για την ταχύτητα ανέμου πάνω από την ονομαστική τιμή των 12m/s και αμελώντας τις απώλειες στον μετατροπέα και στις αντιστάσεις της μηχανής έχουμε ότι η μηχανική ισχύς είναι ίση με την ολική ενεργό ισχύ που εξάγεται από τη μηχανή και επομένως βρίσκεται και η γωνιακή ταχύτητα ω_r από την χαρακτηριστική ελέγχου ταχύτητας.
2. Τα ρεύματα i_{dr} και i_{qr} υπολογίζονται αντίστοιχα από τις εξισώσεις ελέγχου (4.3-6) και (4.3-7) αντίστοιχα, όπου θεωρείται ότι αρχικά η μηχανή έχει μηδενική ανταλλαγή αέργου ισχύος με το δίκτυο (μοναδιαίος συντελεστής ισχύος).
3. Οι εξισώσεις τάσης του στάτη (4.3-1) και (4.3-2) επιλύονται για τον υπολογισμό των ρευμάτων i_{qs} και i_{ds} , με τη σημείωση ότι ο q-άξονας του

σύγχρονου πλαισίου αναφοράς του μοντέλου έχει τοποθετηθεί πάνω στην τάση του στάτη και επομένως $V_{qs}=V_s$ και $V_{ds}=0$.

4. Οι τάσεις του δρομέα υπολογίζονται από τις εξισώσεις (4.3-3) και (4.3-4) αντίστοιχα.
5. Η αρχική γωνία βήματος των πτερυγίων που χρειάζεται για τον έλεγχο της γωνίας βρίσκεται από την καμπύλη ελέγχου της που έχει ήδη υπολογιστεί στο Κεφάλαιο 2.1.3.

Στον Πίνακα 4.3.1. δίνονται τα χαρακτηριστικά της ανεμογεννήτριας 2MW που μοντελοποιήθηκε. Τα χαρακτηριστικά της μηχανής επαγωγής διπλής τροφοδότησης δίνονται στον Πίνακα 4.3.2.

Χαρακτηριστικά Α/Γ	Τιμή
Διάμετρος δρομέα	75 m
Περιοχή σάρωσης δρομέα	4418 m ²
Ταχύτητα δρομέα	9-21 rpm
Ονομαστική Ισχύς	2 MW
Ονομαστική ταχύτητα ανέμου	12 m/s
Ταχύτητα ανέμου εισόδου (cut in)	3.5 m/s
Ταχύτητα ανέμου αποκοπής (cut out)	25 m/s
Λόγος κιβωτίου ταχυτήτων	1: 100

Πίνακας 4.3.1. Χαρακτηριστικά ανεμογεννήτριας.

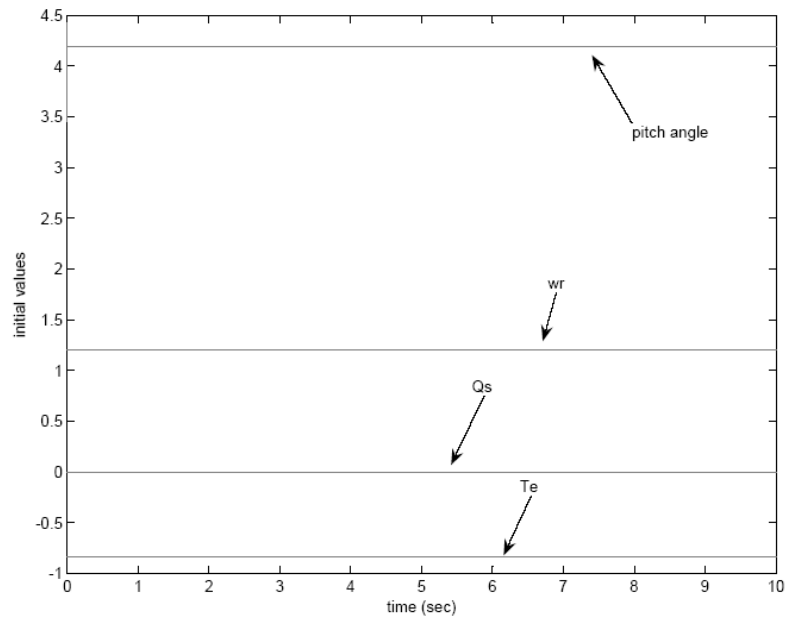
Χαρακτηριστικά ΓΕΔΤ	Τιμή
Αριθμός πόλων	4
Ταχύτητα γεννήτριας	900-2100 rpm
Επαγωγή μαγνήτισης L_m	3.0 α.μ.
Επαγωγή στάτη L_s	0.1 α.μ.
Επαγωγή δρομέα L_r	0.08 α.μ.
Αντίσταση στάτη R_s	0.01 α.μ.
Αντίσταση δρομέα R_r	0.01 α.μ.

Πίνακας 4.3.2. Χαρακτηριστικά της γεννήτριας επαγωγής διπλής τροφοδότησης.

Παίρνοντας λοιπόν σαν αρχική ταχύτητα ανέμου τα 13m/s ο παραπάνω αλγόριθμος αρχικοποίησης έδωσε τα εξής αποτελέσματα:

V_{qs0}	1	T_{e0}	-0.8403
V_{ds0}	0	Ψ_{ds0}	1.0083
Q_{tot0}	0	Ψ_{qs0}	2.6881e-005
P_{tot0}	-1	Ψ_{dr0}	1.0347
ω_{r0}	1.2	Ψ_{qr0}	0.1522
s_0	-0.2	V_{dr0}	0.0338
i_{ds0}	0.0027	V_{qr0}	-0.1983
i_{qs0}	-0.8333	P_{is0}	-0.1667
i_{dr0}	0.3333	P_{s0}	-0.8333
i_{qr0}	0.8611		

Πίνακας 4.3.3. Αποτελέσματα αλγορίθμου αρχικοποίησης με ταχύτητα ανέμου $V_w=13m/s$.



Γράφημα 4.3.1. Ενδεικτικές τιμές βασικών μεγεθών του συστήματος – (γωνιακή ταχύτητα (α.μ), γωνία βήματος περυγίων, άεργος ισχύς (α.μ), ηλεκτρομαγνητική ροπή (α.μ.)) σε μόνιμη κατάσταση.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Επίδραση των Α/Γ & των Α/Π στην ευστάθεια του ηλεκτρικού συστήματος

5.1. Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο ερευνάται η συμβολή της αιολικής παραγωγής στην ευστάθεια του ηλεκτρικού συστήματος. Πρώτα απ' όλα η έννοια της ευστάθειας αποσαφηνίζεται και ορίζεται. Στη συνέχεια αναλύεται το φαινόμενο της νησιδοποίησης που παρατηρείται συχνά στα ηλεκτρικά δίκτυα καθώς και οι δυσμενείς επιπτώσεις που προκύπτουν από αυτό.

5.2. Ορισμός ευστάθειας ΣΗΕ

Η ευστάθεια των ΣΗΕ ορίζεται από την ικανότητα του συστήματος, για ένα δεδομένο αρχικό λειτουργικό σημείο, να επανακάτα ένα αποδεκτό σημείο λειτουργίας μετά από μία διαταραχή, η οποία οδηγεί τις περισσότερες μεταβλητές του συστήματος κοντά στα όριά τους, ώστε το συνολικό σύστημα να παραμένει πρακτικά αμετάβλητο.

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

Σε ένα σύνολο σημείων ισορροπίας, ένα ΣΗΕ μπορεί να είναι ευσταθές για μία δεδομένη μεγάλη διαταραχή και ασταθές για μία άλλη. Όπως γίνεται κατανοητό, η σχεδίαση των ΣΗΕ με σκοπό τη διατήρηση της ευστάθειας σε κάθε πιθανό σενάριο διαταραχών είναι ασύμφορη τόσο από πρακτικής όσο και από οικονομικής πλευράς. Αντιθέτως, η σχεδίαση αυτή πραγματοποιείται λαμβάνοντας υπόψη μόνο τις

διαταραχές οι οποίες εμφανίζουν υψηλά ποσοστά εμφάνισης. Επομένως, η ευστάθεια μεγάλων διαταραχών αναφέρεται πάντα σε ένα συγκεκριμένο σενάριο διαταραχής.

Ένα ευσταθές σύνολο σημείων ισορροπίας έχει μία πεπερασμένη περιοχή έλξης και μάλιστα όσο μεγαλύτερη είναι η περιοχή αυτή, τόσο πιο εύρωστο θεωρείται το σύστημα σε μεγάλες διαταραχές. Η περιοχή έλξης των ευσταθών σημείων ισορροπίας μεταβάλλεται ανάλογα με τις λειτουργικές συνθήκες του εξεταζόμενου ΣΗΕ.

Εάν το δίκτυο αποκριθεί ευσταθώς μετά από μία διαταραχή, θα οδηγηθεί σε ένα νέο σημείο ισορροπίας, στο οποίο θα διατηρηθεί η ακεραιότητα του δικτύου, δηλαδή για παράδειγμα το σύνολο των γεννητριών και των φορτίων θα συνδέονται μεταξύ τους.

Ένα πλήθος γεννητριών και φορτίων είναι πιθανό να αποσυνδεθεί από το δίκτυο είτε εξαιτίας της απομόνωσης του εξοπλισμού που συνδέεται με το σφάλμα είτε λόγω της σκόπιμης απόρριψης ορισμένων διατάξεων προκειμένου να διατηρηθεί η συνέχεια της λειτουργίας του υπόλοιπου συστήματος. Στις περιπτώσεις σοβαρών διαταραχών σε διασυνδεδεμένα συστήματα, η επερχόμενη απομόνωση ορισμένων στοιχείων μπορεί να οδηγήσει στο διαχωρισμό του συστήματος σε δύο ή περισσότερες νησίδες (ανεξάρτητες μεταξύ τους), προκειμένου να ικανοποιηθεί όσο το δυνατόν μεγαλύτερο μέρος του φορτίου. Στη συνέχεια, η δράση των αυτόματων ελεγκτών του συστήματος σε συνδυασμό με τους ανθρώπινους χειρισμούς θα αποκαταστήσουν σταδιακά την ομαλή λειτουργία του συστήματος.

Σε αντίθετη περίπτωση, εάν δηλαδή το σύστημα αποδειχθεί ασταθές, θα οδηγηθεί σε διαδοχικές απώλειες των διατάξεων, με αποτέλεσμα τη σβέση ενός μεγάλου μέρους του συστήματος.

Όπως προαναφέρθηκε, τα ΣΗΕ υπόκεινται σε συνεχείς διακυμάνσεις μικρού πλάτους. Ωστόσο, στις μελέτες ευστάθειας θεωρείται ότι στο αρχικό σημείο λειτουργίας πριν την κατά περίπτωση εξεταζόμενη διαταραχή, το σύστημα βρίσκεται σε σημείο μονίμου καταστάσεως [37].

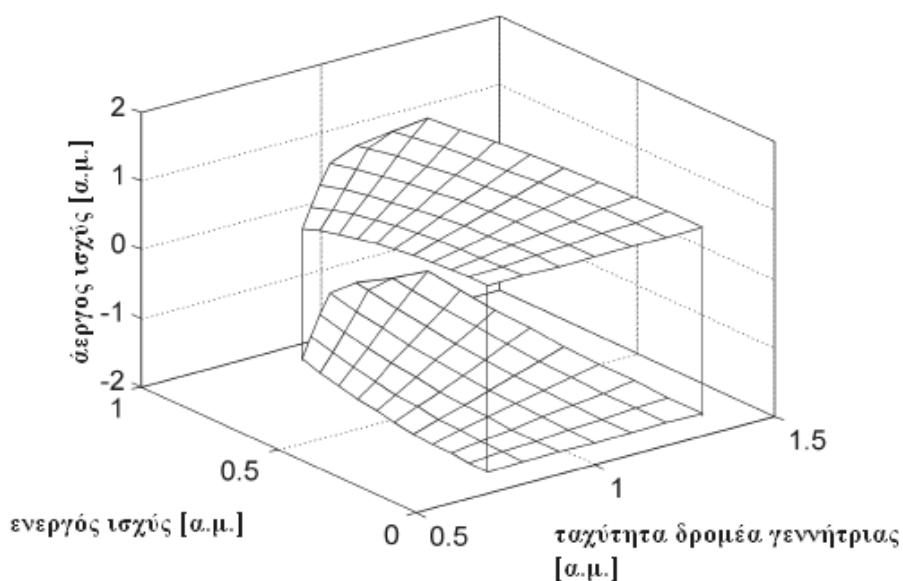
5.3. Απόκριση των Α/Γ σε διαταραχές

Οι διαφορές στην αρχή λειτουργίας και στα εγγενή χαρακτηριστικά ανάμεσα στα διάφορα είδη Α/Γ αντανακλώνται στις διαφορές ως προς την απόκριση σε μια διαταραχή των τερματικών ποσοτήτων της γεννήτριας. Μία εκτενής κατανόηση της μεταβατικής συμπεριφοράς των Α/Γ είναι θεμελιώδης για την εκτίμηση της συμβολής μεμονωμένων Α/Γ αλλά και αιολικών πάρκων στην ευστάθεια καθώς και για την έρευνα πάνω στα αίτια οποιασδήποτε αστάθειας μπορεί να παρατηρηθεί.

5.3.1. Α/Γ μεταβλητών στροφών με γεννήτρια επαγωγής διπλής τροφοδότησης

Στην τοπολογία αυτή όπως έχει προαναφερθεί δεν υπάρχει ένα προς ένα σχέση ανάμεσα στην άεργο ισχύ, την ενεργό ισχύ, την τερματική τάση και την ταχύτητα του δρομέα. Αντιθέτως έχει ένα εύρος λειτουργίας, μέσα στο οποίο μπορεί να λειτουργήσει σε οποιοδήποτε επιθυμητό σημείο. Αυτό συμβαίνει γιατί ο μετατροπέας τύπου πηγής τάσης αποσυνδέει την ηλεκτρική και τη μηχανική συμπεριφορά της γεννήτριας από την τάση του δικτύου και τη συχνότητα.

Από τις γνωστές εξισώσεις μπορεί να γίνει σαφές ότι η ροπή της γεννήτριας εξαρτάται απ' ευθείας από την συνιστώσα q του ρεύματος του δρομέα και η άεργος ισχύς από τη συνιστώσα d του ρεύματος δρομέα. Με άλλα λόγια ο μετατροπέας και οι ελεγκτές του καθορίζουν τη συμπεριφορά της γεννήτριας. Στο σχήμα που ακολουθεί, αναπαρίσταται το εύρος λειτουργίας της τυπικής Α/Γ με τη διαμόρφωση ΓΕΔΤ, θεωρώντας ονομαστική τερματική τάση.



*Σχήμα 5.3.1.1. Εύρος λειτουργίας γεννήτριας επαγωγής
διπλής τροφοδότησης σε τερματική τάση ίση με 1 α.μ.*

Οι δύο επιφάνειες που εμφανίζονται είναι τα όρια του εύρους λειτουργίας. Όταν η τερματική τάση διαφέρει από την ονομαστική της τιμή, η θέση και το σχήμα των επιφανειών αλλάζει. Η λειτουργία της μηχανής ως κινητήρα δεν έχει ληφθεί υπ' όψιν. Η ακριβής ποσοτική τιμή των ορίων λειτουργίας κυρίως εξαρτάται από:

- Τη διαστασιολόγηση ως προς τάση και ρεύμα του μετατροπέα ηλεκτρονικών ισχύος.
- Την παρουσία διακόπτη αστέρα/τρίγωνο στο τύλιγμα του δρομέα ή ενός Μ/Σ με σύστημα αλλαγής τάσης υπό φορτίο ανάμεσα στο τύλιγμα δρομέα και το μετατροπέα ισχύος, με σκοπό την καλύτερη λειτουργία του μετατροπέα σε χαμηλές ταχύτητες ανέμου.

Το παραπάνω σχήμα δίνει έμφαση στην παρατήρηση ότι μια γεννήτρια επαγωγής διπλής τροφοδότησης επιτρέπει έλεγχο αέργου ισχύος/τερματικής τάσης, διότι ένα εύρος τιμών αέργου ισχύος αντιστοιχεί σε μια δοσμένη τιμή ενεργού ισχύος και ταχύτητας δρομέα.

Όταν εμφανίζεται σφάλμα στο δίκτυο, η βύθιση τάσης και η αύξηση ρεύματος που ακολουθούν ως αποτέλεσμα εντοπίζονται άμεσα από το μετατροπέα ισχύος. Συνήθως, αυτό οδηγεί σε άμεση αποσύνδεση της Α/Γ ώστε να προστατευτούν τα ηλεκτρονικά ισχύος με ενεργοποίηση του διακόπτη ανάμεσα στην Α/Γ και το δίκτυο. Εξ' αιτίας της παρουσίας του ιδιαίτερα ευαίσθητου μετατροπέα ισχύος με μικρές θερμικές σταθερές, μια Α/Γ μεταβλητών στροφών με γεννήτρια επαγωγής διπλής τροφοδότησης είναι πολύ πιο ευαίσθητη σε βυθίσεις τάσης απ' ό τι μια Α/Γ σταθερών στροφών.

Αν η Α/Γ πρέπει να μείνει συνδεδεμένη κατά τη διάρκεια μιας βύθισης τάσης ή να επανασυνδεθεί αμέσως μετά την εκκαθάριση του σφάλματος, απαιτείται τροποποίηση κατάλληλη των ελεγκτών του μετατροπέα ισχύος ή/και του ίδιου του μετατροπέα. Η περίπτωση αυτή, που ήδη προβλέπεται από πολλούς διαχειριστές συστημάτων, θα αναλυθεί παρακάτω.

Όπως έχει συζητηθεί και παραπάνω, η μηχανική ταχύτητα του δρομέα και η συχνότητα του δικτύου είναι αποδεσμευμένα με τη λειτουργία του μετατροπέα ισχύος. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα μια βασική διαφορά ανάμεσα στη συμβατική σύγχρονη γεννήτρια ή μια A/Γ σταθερών στροφών στη μια πλευρά και μιας A/Γ μεταβλητών στροφών εφοδιασμένη με γεννήτρια επαγωγής διπλής τροφοδότησης στην άλλη. Αν η συχνότητα του δικτύου πέσει χάρη σε αστοχία μεταξύ παραγωγής και φορτίου, η μηχανική συχνότητα της γεννήτριας επαγωγής διπλής τροφοδότησης δεν αλλάζει, και δεν παρέχεται η αποθηκευμένη στη στρεφόμενη μάζα ενέργεια προς το δίκτυο, όπως θα συνέβαινε στην περίπτωση της απ' ευθείας συνδεδεμένης γεννήτριας στο δίκτυο. Επομένως, μια A/Γ μεταβλητών στροφών εφοδιασμένη με γεννήτρια επαγωγής διπλής τροφοδότησης δεν συμβάλλει ουσιαστικά στην ευστάθεια συχνότητας.

5.3.2. Προστασία της A/Γ και το φαινόμενο της νησιδοποίησης

Το φαινόμενο της νησιδοποίησης

Μέχρι τις τελευταίες εξελίξεις στο θέμα της εξασφάλισης παραμονής της A/Γ σε λειτουργία σε συνθήκες βύθισης τάσεως (διεθνώς χρησιμοποιείται ο όρος Low Voltage Ride Through) η συνήθης διαδικασία ήταν ότι οι A/Γ αποσυνδέονται όταν προκύψει κάποιο σφάλμα και επανασυνδέονται κάπου ανάμεσα σε μερικά λεπτά μέχρι ένα τέταρτο της ώρας μετά την ανάκαμψη της τάσης. Στην περίπτωση της λειτουργίας μεταβλητών στροφών, αυτό συνέβαινε για λόγους προστασίας του εξοπλισμού ηλεκτρονικών ισχύος, ιδιαίτερα ευαίσθητου σε μεγάλα ρεύματα. Παρ' όλα αυτά, αυτή η πρακτική εφαρμόζεται επίσης και σε A/Γ σταθερών στροφών αν και αυτό δεν είναι απαραίτητο για την προστασία της A/Γ: οι A/Γ σταθερών στροφών μπορούν να αντέξουν ρεύματα σφάλματος για κάποιο χρόνο, λόγω σχετικά μεγάλων θερμικών σταθερών της γεννήτριας.

Ο λόγος λοιπόν που όλες οι A/Γ αποσυνδέονταν άμεσα στην περίπτωση σφάλματος, ανεξάρτητα από τον τύπο της A/Γ και της ουσιαστικής δυνατότητας να αντέξει ένα ρεύμα σφάλματος, ήταν η αποφυγή της νησιδοποίησης. Η νησιδοποίηση αναφέρεται στην κατάσταση κατά την οποία ένα σχετικά μικρό δίκτυο αρχίζει να λειτουργεί

ανεξάρτητα από το ηλεκτρικό σύστημα μετά από την αποσύνδεση του λόγω διαταραχής, όπως ένα σφάλμα που οδηγεί σε απώλεια γραμμής ή Μ/Σ που προ σφάλματος συνέδεε το δίκτυο αυτό με το υπόλοιπο κύριο ηλεκτρικό σύστημα. Το ανεξάρτητα λειτουργόν δίκτυο αναφέρεται ως (ηλεκτρική) νησίδα.

Η νησιδοποίηση είναι σε πολύ μεγάλο βαθμό ανεπιθύμητη, καθώς στο νησιδοποιημένο δίκτυο οι τάσεις και οι συχνότητες δεν ελέγχονται πλέον από τους συμβατικούς μεγάλους σταθμούς παραγωγής. Αυτό θα μπορούσε να οδηγήσει σε μεγάλες διακυμάνσεις της τάσης και της συχνότητας από τις ονομαστικές τιμές, θέτοντας σε κίνδυνο τόσο τα στοιχεία του ίδιου του δικτύου όσο και τον εξοπλισμό του πελάτη. Η εμφάνιση επίσης της νησιδοποίησης απειλεί την προσωπική ασφάλεια των εργαζόμενων, διότι η υπόθεση, ότι οποιοδήποτε τμήμα του συστήματος που είναι αποσυνδεδεμένο από το κύριο δίκτυο δεν είναι φορτισμένο, πλέον δεν ισχύει.

Σημειώνεται ότι οι Α/Γ δεν είναι η μόνη τεχνολογία παραγωγής που μπορεί να οδηγήσει σε νησιδοποίηση. Αντιθέτως το φαινόμενο μπορεί να εμφανιστεί σε οποιαδήποτε κατάσταση κατά την οποία γεννήτριες συνδέονται σε δίκτυα χαμηλής και μέσης τάσης. Τέτοιου είδους παραγωγή συνήθως αναφέρεται ως διανεμημένη [8]. Εκτός από την αιολική παραγωγή, παραδείγματα είναι η ηλιακή και παραγωγή συνδυασμένου κύκλου θερμότητας και ηλεκτρισμού μικρής κλίμακας (CHP).

Συμπεριφορά Α/Γ και αιολικών πάρκων

Η συμπεριφορά των Α/Γ ανάλογα με το αν πρόκειται για σταθερών ή μεταβλητών στροφών είναι αρκετά διαφορετική όσον αφορά την απόκριση τους σε διαταραχές. Αυτό οφείλεται κυρίως στα εξής σημεία:

- Οι Α/Γ σταθερών στροφών είναι εφοδιασμένες με αεροδυναμικό έλεγχο stall, ενώ οι Α/Γ μεταβλητών στροφών αντίστοιχα με έλεγχο γωνίας βήματος (pitch). Έτσι, στην περίπτωση των τελευταίων, η μηχανική ισχύς που εξάγεται από τον άνεμο μπορεί να μειωθεί ώστε να περιοριστεί η επιτάχυνση κατά τη διάρκεια του σφάλματος, ενώ κάτι τέτοιο δεν είναι δυνατόν στην περίπτωση της λειτουργίας σταθερών στροφών.

- Οι A/Γ σταθερών στροφών βασίζονται σε απ' ευθείας συνδεδεμένες γεννήτριες επαγωγής τύπου κλωβού, οι οποίες πρέπει να επιβραδυνθούν και να επιστρέψουν στο σημείο μόνιμης λειτουργίας μετά από ένα σφάλμα. Αυτό οδηγεί σε μεγάλες απαιτήσεις σε άεργο ισχύ, που εμποδίζει την επαναφορά της τάσης και μπορεί να επιφέρει αστάθεια στην τάση. Η γεννήτρια στις A/Γ μεταβλητών στροφών συνδέεται στο δίκτυο μέσω ηλεκτρονικών ισχύος. Σαν αποτέλεσμα, η συχνότητα του δικτύου και η ταχύτητα του δρομέα είναι αποσυνδεδεμένες. Η ταχύτητα του δρομέα δεν επηρεάζεται λοιπόν από την επαναφορά της τάσης μετά από ένα σφάλμα. Αντιθέτως, ο μετατροπέας αναλαμβάνει το δρομέα και τον επαναφέρει στο σημείο μόνιμης λειτουργίας.
- Τα ηλεκτρονικά ισχύος στις A/Γ μεταβλητών στροφών είναι ιδιαίτερα ευαίσθητα σε υπερρεύματα και επομένως σε βυθίσεις τάσης. Μια σχετικά μικρή βύθιση τάσης μπορεί να οδηγήσει σε αποσύνδεση της A/Γ ώστε να προφυλαχθούν τα ηλεκτρονικά ισχύος. Η γεννήτρια επαγωγής τύπου κλωβού στις A/Γ σταθερών στροφών είναι λιγότερο ευαίσθητη σε υπερρεύματα, διότι οι θερμικές σταθερές χρόνου είναι μεγαλύτερες και μπορούν επομένως να αντέξουν βυθίσεις τάσης.

Η αποσύνδεση της μηχανικής ταχύτητας του δρομέα από τη συχνότητα του δικτύου στις A/Γ μεταβλητών στροφών σημαίνει ότι η ταχύτητα του δρομέα δεν επηρεάζεται από τη συχνότητα του δικτύου. Επομένως, σε αλλαγές της συχνότητας του δικτύου δεν αποθηκεύεται ούτε αποδεσμεύεται στρεφόμενη ενέργεια από την αδράνεια του δρομέα, κάτι που συμβαίνει σε γεννήτριες απ' ευθείας συνδεδεμένες στο δίκτυο.

Όταν η εσωτερική υποδομή του A/Π και η σύνδεση στο δίκτυο υλοποιούνται με συμβατική τεχνολογία εναλλασσομένου ρεύματος, η συμπεριφορά του A/Π καθορίζεται από τον τύπο της A/Γ που χρησιμοποιείται καθώς η υποδομή είναι παθητική. Αντίθετα, αν χρησιμοποιείται σύνδεση συνεχούς ρεύματος με το δίκτυο, οι A/Γ είναι αποσυνδεδεμένες ηλεκτρικά από το δίκτυο και οι δυνατότητες αέργου ισχύος και η απόκριση του A/Π σε σφάλματα ορίζεται από την τεχνολογία υλοποίησης της σύνδεσης και όχι από τον τύπο της A/Γ. Η σύνδεση συνεχούς ρεύματος μπορεί να είναι τύπου πηγής ρεύματος είτε τάσης με αντίστοιχες διαφορές στην ελεγχσιμότητα της αέργου ισχύος και της απόκρισης σε σφάλματα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

Παραμονή της Α/Γ σε Λειτουργία σε Συνθήκες Βύθισης Τάσεως

6.1. Εισαγωγή

Ο αριθμός των εγκαταστάσεων αιολικών πάρκων έχει αυξηθεί παγκοσμίως με πρωτοφανείς ρυθμούς. Σαν επακόλουθο, το μέσο μέγεθος των εγκαταστάσεων έχει αυξηθεί λόγω των μεγαλύτερων μηχανών. Το γεγονός αυτό αναγείρει την ανησυχία πώς εκτεταμένη απώλεια μηχανών μετά από μεγάλες διαταραχές στο δίκτυο θα μπορούσε να οδηγήσει σε διάδοση των ασταθειών και δυνητικά να προκαλέσει τοπικά ή ολικά κατάρρευση του συστήματος. Αυτό ανάγκασε πολλούς παραγωγούς να υιοθετήσουν την κατάλληλη τεχνολογία ώστε η Α/Γ να παραμένει σε λειτουργία σε συνθήκες βύθισης τάσης (στη διεθνή βιβλιογραφία χρησιμοποιείται ο όρος Low Voltage Ride Through - LVRT). Η απαίτηση αυτή προσθέτει βέβαια ένα επιπλέον κόστος διασύνδεσης στον κατασκευαστή και επηρεάζει τη συνολική επένδυση. Θα αναλυθεί παρακάτω πως οι βυθίσεις τάσης επηρεάζουν τη λειτουργία των γεννητριών καθώς οι τεχνικές απαιτήσεις για την αντιμετώπιση των δυσκολιών αυτών.

Καθώς η αιολική ενέργεια αυξάνει συνεχώς το ρόλο της στο ηλεκτρικό σύστημα επιφέρει σημαντικές μεταβολές στη μελέτη του τελευταίου. Ενώ λοιπόν σε χαμηλά επίπεδα διείσδυσης η επίδραση των αιολικών στη λειτουργία και την ευστάθεια του ηλεκτρικού συστήματος θεωρούνταν αμελητέα, η είσοδος νέων μεγάλων αιολικών πάρκων οδήγησε τους μελετητές στο να αναθεωρήσουν τις επιδράσεις. Αυτές οι αλλαγές καταλήγουν σταδιακά στην γενική απαίτηση, καθώς η βιομηχανία παγκοσμίως αυξάνεται, τα αιολικά πάρκα να υιοθετήσουν τις ίδιες λειτουργικές προδιαγραφές οι οποίες προς το παρόν αναφέρονται μόνο στους συμβατικούς σταθμούς παραγωγής.

Παραδοσιακά οι Α/Γ έχουν αντιμετωπιστεί ως διανεμημένη παραγωγή και επομένως είχε υιοθετηθεί η απαίτηση να βγαίνει η μηχανή εκτός λειτουργίας ακόμα και σε πολύ μικρές διαταραχές. Πρόσφατα, με λόγο την αύξηση στο μέγεθος και τον αριθμό των εγκαταστάσεων, πολλές εφαρμογές έχουν αναθεωρήσει την τακτική τους και πλέον απαιτούν από τις Α/Γ να υποστηρίζουν τις διαταραχές στο δίκτυο. Γενικά, οι κώδικες που ισχύουν προς το παρόν και καθορίζουν τη σύνδεση των Α/Γ μπορούν να περιγραφούν από τις παρακάτω απαιτήσεις: (α) δυνατότητα της Α/Γ να παραμένει σε λειτουργία σε συνθήκες βύθισης τάσης (β) δυνατότητα ελέγχου της αέργου ισχύος, και (γ) σε μικρότερο βαθμό τη δυνατότητα ελέγχου της ισχύος εξόδου του πάρκου.

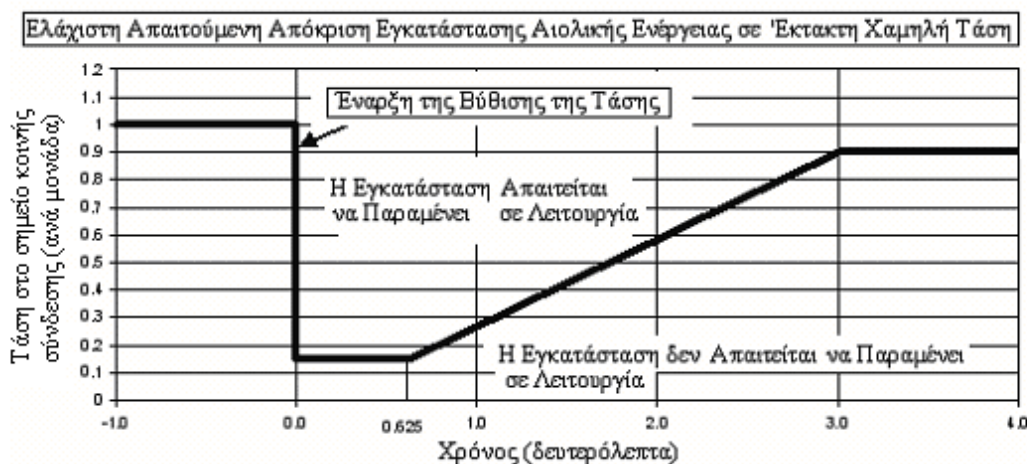
Πολλές Α/Γ είναι βασισμένες στις ασύγχρονες μηχανές, με ένα μεγάλο αριθμό να ακολουθεί την τοπολογία της απ' ευθείας σύνδεσης μηχανής επαγωγής τύπου κλωβού. Επομένως η αέργου ισχύς είναι ένα θέμα μεγάλου ενδιαφέροντος, όχι μόνο για λόγους αντιστάθμισης των απαιτήσεων του ίδιου του αιολικού πάρκου αλλά και με στόχο τη στήριξη της τάσης του δικτύου. Οι περισσότερες από τις απαιτήσεις ορίζουν τυπικά όρια μέσα στα οποία πρέπει να λειτουργεί το Α/Π [25]. Οι μέθοδοι ελέγχου της αέργου ισχύος αφήνονται στους σχεδιαστές και μπορεί να έχουν τη μορφή χωρητικών στοιχείων αντιστάθμισης, συσκευές βασισμένες σε μετατροπείς στατικής ισχύος (SVC, TSC, ή STATCOM) ή χρησιμοποιώντας μηχανές κατάλληλες για έλεγχο αέργου ισχύος, όπως η τοπολογία της γεννήτριας επαγωγής διπλής τροφοδότησης (DFIG).

Το θέμα του LVRT φαίνεται να είναι ιδιαίτερα σημαντικό σε θέματα διατήρησης ευστάθειας, ειδικά σε περιοχές με μεγάλη διείσδυση των αιολικών πάρκων. Πρόωρη έξοδος Α/Γ από τη λειτουργία λόγω ενεργοποίησης του συστήματος προστασίας σε περίπτωση τοπικών διαταραχών του δικτύου μπορεί να οδηγήσει με τη σειρά του σε ενίσχυση των αποτελεσμάτων της διαταραχής. Αυτό υποδεικνύει και την έντονη ανησυχία για διατήρηση της ευστάθειας του Α/Π και του συνδεδεμένου συστήματος κατά τη διάρκεια των εμφανιζόμενων διαταραχών του ηλεκτρικού συστήματος.

Το θέμα του ελέγχου της ισχύος εξόδου των Α/Π γίνεται ολοένα και πιο σημαντικό και η τάση είναι προς την κατεύθυνση ώστε οι εφαρμογές τελικά να απαιτούν από τις Α/Γ να λειτουργούν σε τρόπο ανάλογο των συμβατικών μονάδων παραγωγής. Αυτή η είναι μια απαίτηση που είναι ακόμα υποκείμενη σε πολύ έρευνα και ανάλυση καθώς

η αιολική ενέργεια συχνά αντιμετωπίζεται, μάλλον άδικα, σαν αναξιόπιστη από πλευράς παραγωγής ισχύος και ότι πρέπει να τηρείται μια μεγάλη στρεφόμενη εφεδρεία, σχεδόν ισοδύναμη με την εγκαταστημένη ισχύ. Παρ' όλα αυτά, μεγάλο κομμάτι από την έρευνα στην Ευρώπη προσπαθεί να αποδείξει το αντίθετο, ίσως σαν αποτέλεσμα αυστηρών προδιαγραφών πάνω στις απαιτήσεις του ελέγχου της ισχύος των Α/Γ εκεί.

Συνεχώς διαμορφώνονται τεχνικοί κανονισμοί που πρέπει να τηρούν οι εγκαταστάσεις αιολικής ενέργειας ως προς τη συμπεριφορά των Α/Γ σε περιπτώσεις βύθισης της τάσης λόγω σφάλματος στο δίκτυο. Η συνήθης μορφή αυτών περιλαμβάνει κάποιους περιορισμούς επιπέδου τάσης και χρονικών περιόδων με τη μορφή της καμπύλης που ακολουθεί. Κάθε εγκατάσταση, λοιπόν, αιολικής ενέργειας θα πρέπει να είναι σε θέση να παραμένει σε λειτουργία κατά τη διάρκεια διαταραχών της τάσης μέχρι τους χρόνους εκείνους και τα αντίστοιχα επίπεδα τάσης που δίνονται στο Σχήμα 6.1.1. Οι κανονισμοί αυτοί εφαρμόζονται σε τάση που μετράται στο σημείο κοινής σύνδεσης (PCC: point of common coupling).



Σχήμα 6.1.1. Συνήθης μορφή καμπύλης περιορισμού LVRT.

Η καμπύλη δείχνει το λόγο της πραγματικής προς την ονομαστική τιμή της τάσης στον κατακόρυφο άξονα, και το χρόνο στον οριζόντιο. Πριν το χρόνο 0.0, η τάση στο μετασχηματιστή είναι η ονομαστική τάση. Στο χρόνο 0.0 η τάση πέφτει. Αν η τάση παραμείνει σε επίπεδο μεγαλύτερο από 15 επί τοις εκατό της ονομαστικής τάσης για μια περίοδο που δεν υπερβαίνει τα 0.625 δευτερόλεπτα, η εγκατάσταση πρέπει να παραμείνει σε λειτουργία. Επιπλέον, αν η τάση επιστρέψει στο 90 επί τοις εκατό της

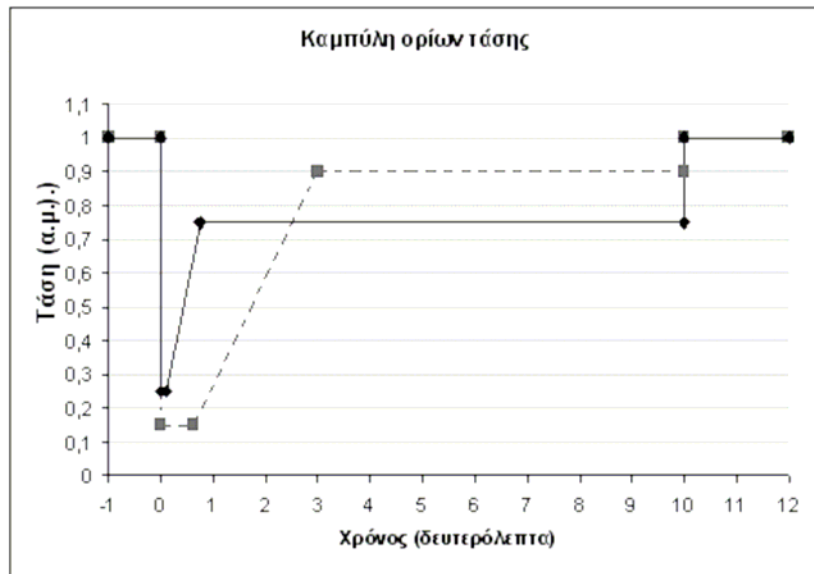
ονομαστικής τάσης μέσα σε 3 δευτερόλεπτα από τη βύθιση της τάσης (με την τάση να μην πέφτει ποτέ κάτω από την ελάχιστη τάση που δίνεται με τη συνεχή γραμμή στο Σχήμα 6.1.1.), η εγκατάσταση πρέπει να παραμένει σε λειτουργία. Ο πελάτης που συνδέεται δεν έχει το δικαίωμα να απενεργοποιήσει τον εξοπλισμό που εξασφαλίζει ότι η Α/Γ θα παραμείνει σε λειτουργία κατά τη διάρκεια βύθισης τάσης, όσο η αιολική εγκατάσταση είναι σε λειτουργία. Δύο χαρακτηριστικά-κλειδιά αυτού του κανονισμού είναι:

1. Μια εγκατάσταση αιολικής ενέργειας πρέπει να έχει δυνατότητα παραμονής σε λειτουργία για τάση μέχρι και 15 επί τοις εκατό της ονομαστικής τάσης γραμμής για 0.625 δευτερόλεπτα.
2. Μια εγκατάσταση αιολικής ενέργειας πρέπει να είναι σε θέση να λειτουργεί συνεχώς σε τάση 90 επί τοις εκατό της ονομαστικής τάσης γραμμής, μετρούμενη στην πλευρά υψηλής τάσης του μετασχηματιστή του υποσταθμού.

Σημειώνεται στο σημείο αυτό ότι οι τιμές που αναφέρονται παραπάνω ως προς το χρόνο και τα επίπεδα τάσης ανανεώνονται συνεχώς. Παρακάτω επισυνάπτονται δύο παραδείγματα κανονισμών της Δανίας και της Ιρλανδίας.

Κανονισμός Δανίας		Κανονισμός Ιρλανδίας	
Χρόνος [s]	Τάση [αμ]	Χρόνος [s]	Τάση [αμ]
0	1	0	1
0,1	0,25	0,625	0,15
0,75	0,75	3	0,9
10	0,75	10	0,9
10,01	1	10,01	1

Πίνακας 6.1.1. Κανονισμός χρόνος + τάση για Δανία και Ιρλανδία. [31]



Σχήμα 6.1.2. Καμπύλη ορίων τάσης – Κανονισμοί Δανίας (συνεχής καμπύλη) και Ιρλανδίας (διακεκομμένη καμπύλη). [31]

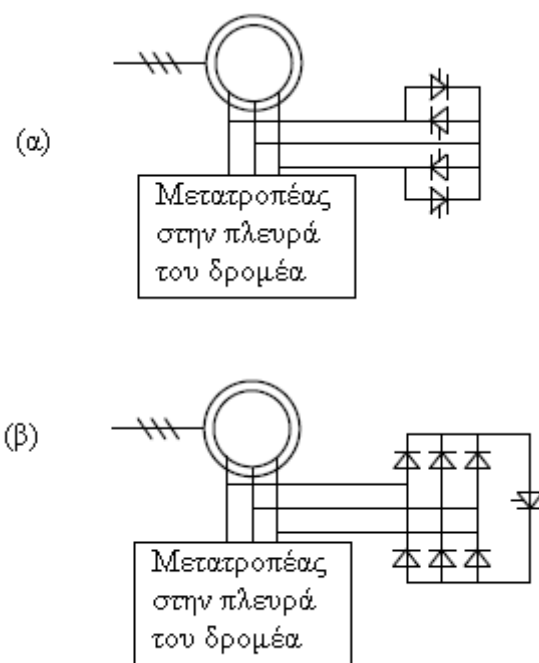
Στη διεθνή βιβλιογραφία έχουν προταθεί διάφοροι τρόποι υλοποίησης των παραπάνω ιδεών. Παρακάτω παρουσιάζονται κάποιες μέθοδοι για την εξασφάλιση της λειτουργίας της Α/Γ σε βύθιση τάσης, με έμφαση στη λειτουργία του ενεργού κυκλώματος βραχυκύκλωσης δρομέα (active crowbar).

6.2. Παραμονή της Α/Γ με γεννήτρια επαγωγής διπλής τροφοδότησης σε λειτουργία κατά τη διάρκεια βύθισης τάσης.

Κατά τη διάρκεια μεγάλων βυθίσεων τάσης στο δίκτυο στο οποίο συνδέεται μια γεννήτρια επαγωγής διπλής τροφοδότησης αναπτύσσονται υψηλά ρεύματα στο δρομέα, τα οποία αποτελούν ιδιαίτερο πρόβλημα για τα ευαίσθητα ημιαγωγικά στοιχεία των μετατροπέων. Η προστασία των τελευταίων ήταν και ο βασικός λόγος αποσύνδεσης των Α/Γ μέχρι τώρα σε περίπτωση ανίχνευσης υψηλών ρευμάτων ικανών να καταστρέψουν τα στοιχεία αυτά. Στις περισσότερες περιπτώσεις χρησιμοποιείται ένα κύκλωμα (γνωστό ως crowbar στη διεθνή βιβλιογραφία) για την προστασία του μετατροπέα. Το κύκλωμα αυτό περιορίζει τις τάσεις και προσφέρει έναν ασφαλή δρόμο για τα μεταβατικά ρεύματα, βραχυκυκλώνοντας το δρομέα.

Το κύκλωμα αυτό βραχυκύκλωσης του δρομέα μπορεί να κατασκευαστεί με πολλούς τρόπους. Για παράδειγμα, ο δρομέας μπορεί να βραχυκυκλωθεί με δύο ζεύγη

αντιπαράλληλα συνδεδεμένων θυρίστωρ τα οποία συνδέονται μεταξύ των φάσεων, Σχήμα 6.2.1(α). Μια άλλη εναλλακτική είναι η χρήση μιας γέφυρας διόδων για την ανόρθωση των φασικών ρευμάτων και ενός θυρίστωρ για τον έλεγχο της βραχυκύκλωσης, Σχήμα 6.2.1(β).

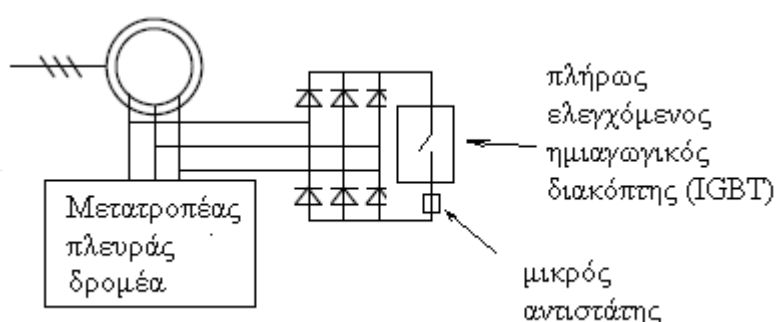


Σχήμα 6.2.1. Κυκλώματα βραχυκύκλωσης δρομέα (crowbar):
(α) με αντιπαράλληλα θυρίστωρ και (β) με γέφυρα διόδων.

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, συχνά η ανεμογεννήτρια δεν επιτρέπεται να αποσυνδέεται κατά τη διάρκεια μιας διαταραχής στο δίκτυο όπως μια βύθιση τάσης. Για μια επιτυχή λοιπόν λειτουργία του συστήματος, το βραχυκύκλωμα που προκύπτει από το κύκλωμα του crowbar πρέπει να αναιρεθεί πριν ο μετατροπέας στην πλευρά του δρομέα μπορεί να ξεκινήσει. Αυτό συνήθως είναι πρόβλημα για το κύκλωμα του Σχήματος 6.2.1(β), όπου το ρεύμα μέσω του θυρίστωρ είναι συνεχές και δεν επιτρέπει το σβήσιμο. Το κύκλωμα του Σχήματος 6.2.1(α) μπορεί ομοίως να έχει κάποια προβλήματα διότι τα ρεύματα δρομέα μπορεί να έχουν σημαντική DC συνιστώσα και άρα οι μηδενισμοί που θα οδηγούσαν σε αποκοπή τα θυρίστωρ δεν υπάρχουν όταν απαιτείται.

Επομένως χρειάζεται ένα κύκλωμα βραχυκύκλωσης του δρομέα το οποίο να είναι σε θέση να κόψει το ρεύμα βραχυκύκλωσης όποτε αυτό απαιτείται, δηλαδή ένα ενεργό κύκλωμα βραχυκύκλωσης δρομέα (active crowbar) [26].

Ο όρος ενεργό κύκλωμα βραχυκύκλωσης δρομέα (active crowbar) σημαίνει ένα σύστημα προστασίας των ηλεκτρονικών ισχύος από ρεύματα κατά τη διάρκεια σφαλμάτων στο συνδεδεμένο δίκτυο με έναν ημιαγωγικό διακόπτη που εκτός από την ενεργοποίηση του crowbar είναι σε θέση να το θέσει επίσης και εκτός λειτουργίας. Τυπικά το active crowbar αποτελείται από μία γέφυρα διόδων και ένα IGBT σαν πλήρως ελεγχόμενο ημιαγωγικό διακόπτη.



Σχήμα 6.2.2. Αρχή λειτουργίας του ενεργού κυκλώματος βραχυκύκλωσης δρομέα (active crowbar).

Είναι σύνηθες να υπάρχει ένας αντιστάτης με μικρή τιμή αντίστασης σε σειρά με το IGBT με σκοπό τον περιορισμό του εισερχόμενου ρεύματος στο δρομέα όταν το crowbar άγει.

Η ακολουθία λειτουργίας του κυκλώματος προστασίας για μια συμμετρική τριφασική βύθιση τάσης ξεκινάει όταν είτε το ρεύμα του δρομέα είτε η DC τάση αυξάνεται πέρα του ορίου προστασίας εξ' αιτίας της βύθισης. Προκειμένου να προστατευθούν οι μετατροπείς και ο πυκνωτής στη DC πλευρά από μεγάλες τάσεις και ρεύματα, το IGBT του crowbar θα αρχίσει να άγει και όλα τα IGBTs του μετατροπέα στην πλευρά του δρομέα θα περάσουν σε αποκοπή. Τότε το ρεύμα του δρομέα οδηγείται στη διαδρομή που περνάει μέσα από το crowbar.

Όταν το crowbar άγει η γεννήτρια συμπεριφέρεται σχεδόν σαν μια τυπική γεννήτρια επαγωγής που έχει μία μικρή εξωτερική αντίσταση συνδεδεμένη στο δρομέα (σχεδόν

ίση προς τα $2/3$ της αντίστασης του crowbar ανά φάση). Έτσι, 10 με 15 ms μετά την αρχική αύξηση της αέργου προς το δίκτυο η γεννήτρια αρχίζει να καταναλώνει άεργο ισχύ. Η άεργος ισχύς εξαρτάται από την ολίσθηση της γεννήτριας. Αν η ταχύτητα της γεννήτριας είναι μεγαλύτερη από τη σύγχρονη ταχύτητα θα συνεχίσει να παράγει ισχύ προς το δίκτυο. Αν όμως είναι μικρότερη τότε η γεννήτρια αρχίζει να καταναλώνει άεργο ισχύ. Παρ' όλα αυτά, συνήθως λόγω της χαμηλής τάσης του στάτη η άεργος και η ενεργός ισχύς της γεννήτριας είναι αρκετά χαμηλές αν και τα ρεύματα του στάτη είναι υψηλά.

Λόγω της χαμηλής αντίστασης του κυκλώματος του crowbar και της χαμηλής τάσης του στάτη η ροή της γεννήτριας μειώνεται γρήγορα. Τα ρεύματα του στάτη και του δρομέα παρόμοια μειώνονται. Συνήθως μετά από 60 με 100 ms το μετρούμενο ρεύμα του crowbar υποδεικνύει ότι το μεταβατικό φαινόμενο έχει παρέλθει αρκετά ώστε ο μετατροπέας να είναι σε θέση να το ελέγξει ξανά. Η τάση στη DC πλευρά έχει επίσης μειωθεί στα φυσιολογικά επίπεδα επειδή ο μετατροπέας στην πλευρά του δικτύου έχει τροφοδοτήσει αυτήν την πρόσθετη ενέργεια που είναι αποθηκευμένη στο πυκνωτή στο δίκτυο.

Στο επόμενο βήμα το IGBT του crowbar περνάει σε αποκοπή. Το ρεύμα του δρομέα επιστρέφει μετά στο μετατροπέα στην πλευρά του δρομέα. Τα IGBTs του μετατροπέα είναι ακόμα μπλοκαρισμένα, αλλά το ρεύμα του δρομέα βρίσκει το δρόμο μέσω των διόδων που είναι παράλληλα στα IGBTs. Αν η τάση που εφαρμόζεται στο δρομέα είναι τώρα χαμηλότερη από την τάση στην DC πλευρά, το ρεύμα του δρομέα θα μειωθεί γρήγορα στο μηδέν. Το ρεύμα του στάτη παρόμοια μειώνεται σε χαμηλά επίπεδα. Από τη στιγμή που το ρεύμα του δρομέα παραμένει κοντά στο μηδέν αρκετά για να καταστεί σίγουρο ότι το μεταβατικό έχει παρέλθει, ο μετατροπέας στην πλευρά του δρομέα μπορεί να ξεκινήσει ξανά.

Αν, παρ' όλα αυτά, το ρεύμα του δρομέα δε μειωθεί αρκετά γρήγορα, η DC τάση μπορεί να αυξηθεί στο επίπεδο αποκοπής προστασίας ξανά. Τότε ξαναδίνεται σήμα στο crowbar και μια νέα απόπειρα για σβήσιμο γίνεται όταν η DC τάση έχει μειωθεί στο φυσιολογικό ξανά. Έτσι, σε μεγάλες βυθίσεις τάσεις το crowbar μπορεί να άγει πολλές φορές πριν το ρεύμα του δρομέα τελικά σβήσει.

Όταν ο μετατροπέας στην πλευρά του δρομέα έχει επιτυχώς ξεκινήσει μπορεί να ελέγξει τη γεννήτρια να παράγει ενεργό και άεργο ισχύ στο δίκτυο. Συνήθως ο μετατροπέας αυτός θα ξεκινήσει 80 με 150 ms μετά τη βύθιση της τάσης. Η αύξηση στο ρεύμα της γεννήτριας πρέπει να είναι αρκετά αργή, ειδικά όταν η τάση στο δίκτυο κατά τη διάρκεια της βύθισης είναι κοντά στο μηδέν, γιατί τότε το μέτρο και η γωνία φάσης της τάσης στα τερματικά της γεννήτριας θα προσδιοριστεί σε μεγάλο βαθμό από την ίδια τη γεννήτρια, μια κατάσταση που μπορεί να οδηγήσει σε απώλειες του συγχρονισμού με το δίκτυο. Όταν το σφάλμα που προκάλεσε τη βύθιση τάσης εκκαθαρίζεται, η τάση του δικτύου θα αυξηθεί. Αυτή η αλλαγή θα εγχύσει άλλα μεταβατικά στο στάτη και το δρομέα. Παρ' όλα αυτά, το διακόπτης θα αποκόψει το ρεύμα σφάλματος σε κάθε φάση όταν το φασικό ρεύμα είναι κοντά στο μηδέν. Δηλαδή, η αύξηση στη τάση του δικτύου δεν είναι τόσο γρήγορη όσο η προηγούμενη μείωση .

Σε πολλές περιπτώσεις το προκύπτον μεταβατικό είναι τόσο χαμηλό που το crowbar δεν ενεργοποιείται καν. Η άεργος και η ενεργός ισχύς της γεννήτριας μπορούν κατόπιν να ελεγχθούν σύμφωνα με τους κώδικες και τις απαιτήσεις χωρίς καθυστέρηση. Αν τα μεταβατικά ενεργοποιήσουν το crowbar, η γεννήτρια θα ξεκινήσει συνήθως 50 με 100 ms μετά το συμβάν ενεργοποίησης.

Για ασύμμετρα σφάλματα η εφαρμογή αυτής της μεθόδου είναι σαφώς πιο δύσκολη. Ο λόγος είναι η αρνητική ακολουθία στην τάση του δικτύου που προκαλείται από την ασυμμετρία στις φασικές τάσεις. Μια σχετικά μικρή αρνητική ακολουθία στην τάση του στάτη μπορεί να προκαλέσει στο δρομέα μια τάση υψηλότερη από τη DC τάση. Λόγω λοιπόν της ύπαρξης των διόδων παράλληλα στα IGBTs του μετατροπέα από την πλευρά του δρομέα, το κύκλωμα του δρομέα θα τροφοδοτήσει με ρεύμα στην DC πλευρά ακόμα και αν τα IGBTs του μετατροπέα είναι μπλοκαρισμένα.

Σε αντίθεση με την παρερχόμενη μεταβατική κατάσταση στα συμμετρικά σφάλματα , η αρνητική ακολουθία θα συνεχίσει να υπάρχει μέχρι την εκκαθάριση του σφάλματος. Έτσι αν η ασυμμετρία είναι αρκετά υψηλή το ρεύμα του δρομέα θα συνεχίσει να αυξάνει την DC τάση προκαλώντας επαναλαμβανόμενες ακολουθίες ανοίγματος και κλεισίματος του crowbar. Το active crowbar θα λειτουργεί κατόπιν σαν κατατημητής (chopper) που ελέγχει την DC τάση.

Συνήθως ο μετατροπέας από την πλευρά της μηχανής δε μπορεί να ξεκινήσει κατά τη διάρκεια της βύθισης αν το περιεχόμενο σε αρνητική ακολουθία της τάσης του στάτη είναι μεγαλύτερο από 30 με 50% της ονομαστικής τάσης.

Όταν εκκαθαρίζεται το σφάλμα, ο μετατροπέας στην πλευρά του δρομέα μπορεί να ελέγξει τη γεννήτρια με τον φυσιολογικό τρόπο αν έχει καταφέρει να ξεκινήσει κατά τη διάρκεια της βύθισης. Αν το crowbar είναι ακόμη σε λειτουργία, το crowbar θα πρέπει να απενεργοποιηθεί προτού τεθεί σε κανονική λειτουργία ο μετατροπέας στην πλευρά του δρομέα.

Υπάρχουν πολλοί άλλοι εναλλακτικοί τρόποι σχεδίασης της προστασίας σε συνθήκες βύθισης τάσης σε γεννήτριες επαγωγής διπλής τροφοδότησης (DFIG). Μια τέτοια εναλλακτική είναι η διαστασιοποίηση του μετατροπέα από την πλευρά της μηχανής ώστε να μπορεί να χειριστεί το εισερχόμενο ρεύμα. Επειδή ο μετατροπέας στην πλευρά του στάτη δε μπορεί να χειριστεί την ισχύ με την οποία τροφοδοτείται η DC πλευρά από το δρομέα όταν η τάση του δικτύου είναι κοντά στο μηδέν, ένας αντιστάτης (resistor) ελεγχόμενος από IGBT απαιτείται για να καταναλώσει την επιπλέον ενέργεια στη DC πλευρά. Είναι προφανές ότι η απαιτούμενη μεγαλύτερη αντοχή του μετατροπέα σε ρεύμα αυξάνει το κόστος του εξοπλισμού.

Μια άλλη εναλλακτική έχει ημιαγωγικούς διακόπτες στο στάτη τα οποία αποσυνδέουν το στάτη παροδικά όταν ανιχνευθεί μεγάλο μεταβατικό ρεύμα [26]. Το βασικό μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι η μεγάλη πολυπλοκότητα του κυκλώματος και οι πρόσθετες απώλειες σε αυτούς τους διακόπτες που μειώνουν την απόδοση της γεννήτριας κατά την κανονική λειτουργία.

Μοντελοποίηση του active crowbar

Μία πρακτική λύση για την Α/Γ, που είναι εφοδιασμένη με ΓΕΔΤ, να παραμένει σε λειτουργία είναι το λεγόμενο active crowbar, που σύντομα παρουσιάστηκε παραπάνω. Για την υλοποίηση του active crowbar στο μεταβατικό μοντέλο της ΓΕΔΤ θεωρείται ότι είτε αν το ρεύμα του δρομέα είτε η DC τάση υπερβεί το όριο I_r^{\max} ή V_{dc}^{\max} αντίστοιχα, ο δρομέας αποσυνδέεται από το μετατροπέα στην πλευρά της μηχανής και βραχυκυκλώνεται μέσω μιας εξωτερικής αντίστασης R_c . Όσο το

crowbar είναι ενεργό, οι τάσεις V_{dr} και V_{qr} τίθενται στο μηδέν, και η αντίσταση R_c προστίθεται στην αντίσταση του δρομέα.

Κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του crowbar, το ρεύμα του δρομέα παρακολουθείται και όταν πέσει κάτω από την τιμή I_r^{\max} ενώ η DC τάση είναι επίσης κάτω από το όριο της, το crowbar απενεργοποιείται και το ρεύμα του δρομέα οδηγείται στο μετατροπέα ξανά. Τα IGBTs αυτού του μετατροπέα είναι ακόμη μπλοκαρισμένα, αλλά το ρεύμα περνάει μέσω των διόδων που είναι παράλληλες στα IGBTs. Με άλλα λόγια, ο μετατροπέας από την πλευρά του δρομέα λειτουργεί σαν τριφασικός ανορθωτής διόδων. Επομένως, κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου ισχύει η ακόλουθη γραμμική σχέση ανάμεσα στην DC τάση και την πολική rms τάση V_r (σε volts):

$$V_{dc} = \frac{3 \cdot \sqrt{2}}{\pi} V_r^{LL} \quad (6.2-1)$$

Σε α.μ είναι αντίστοιχα:

$$V_{dc} = \frac{3 \cdot \sqrt{3}}{\pi} \frac{1}{2k} V_r \quad (6.2-2)$$

όπου το k ορίστηκε παραπάνω. Οι δύο συνιστώσες της τάσης του δρομέα στον d και q άξονα μπορούν εύκολα να προκύψουν από την παραπάνω σχέση λαμβάνοντας υπ' όψιν ότι ο συντελεστής ισχύος στην AC πλευρά ενός ανορθωτή διόδων ισούται με μονάδα. Από τη στιγμή που η V_{dc} είναι μια μεταβλητή κατάσταση, η παραπάνω σχέση χρησιμοποιείται για να δώσει τις τάσεις V_{dr} και V_{qr} . Κάτω από αυτές τις συνθήκες λειτουργίας, το ρεύμα του δρομέα μειώνεται γρήγορα. Όταν φτάσει το μηδέν, η μηχανή μπορεί να περάσει σε κανονική λειτουργία, δηλ. οι V_{dr} και V_{qr} να παρέχονται από τους ελεγκτές ταχύτητας και αέργου ισχύος.

6.3. Λειτουργία LVRT σε άλλου είδους τοπολογίες

6.3.1. Τοπολογία με σύγχρονη γεννήτρια

Τα τελευταία χρόνια ο μεγαλύτερος προμηθευτής μονάδων ανεμογεννητριών με σύγχρονη γεννήτρια είναι η Enercon. Άλλοι κατασκευαστές αρχίζουν να προωθούν τέτοιες μονάδες. Αυτές οι μονάδες έχουν κυριαρχήσει στη Γερμανική αγορά, με περίπου τρία τέταρτα των Α/Γ στη Γερμανία να είναι τέτοιου σχεδιασμού από την Enercon.

Η ιδέα σε αυτήν την περίπτωση είναι να παραχθεί ενέργεια χρησιμοποιώντας είτε μια σύγχρονη γεννήτρια με ηλεκτρική διέγερση είτε μια σύγχρονη γεννήτρια μόνιμων μαγνητών. Αυτό έχει δύο βασικά πλεονεκτήματα:

1. Επιτρέπει σχεδιασμό χωρίς κιβώτιο. Αυτό αποφεύγει τη μηχανική πολυπλοκότητα των κιβωτίων και των υδραυλικών. Η γεννήτρια είναι απ' ευθείας συνδεδεμένη με την τουρμπίνα και στρέφεται σε οποιαδήποτε γωνιακή ταχύτητα απαιτείται. Η ηλεκτρική συχνότητα κατόπιν μετατρέπεται από έναν μετατροπέα (η διαμόρφωση που έχει ήδη αναφερθεί ως back-to-back) στη συχνότητα του δικτύου (50 ή 60 Hz). Στα σχέδια χωρίς κιβώτιο, συνήθως, η γεννήτρια έχει μια σαφώς μεγαλύτερη διάμετρο για να συμπεριλάβει ένα μεγάλο αριθμό από ζευγάρια πόλων (π.χ η Enercon E112, που είναι μια μονάδα 4.5 MW, έχει γεννήτρια με 84 πόλους).
2. Μέσα από τη χρήση ενός μετατροπέα συχνότητας η πλήρης ηλεκτρική έξοδος της γεννήτριας μπορεί να μετατραπεί από ένα μεγάλο εύρος συχνοτήτων στη συχνότητα του δικτύου.

Επιπλέον, με τη χρήση μετατροπέα τύπου πηγής τάσης, ο μετατροπέας στην πλευρά του δικτύου (πολλές φορές αναφέρεται και ως αντιστροφέας) μπορεί να ελέγξει ανεξάρτητα την ενεργό και την άεργο ισχύ. Με αυτόν τον τρόπο το ηλεκτρικό δίκτυο και η γεννήτρια είναι αποδεδειγμένα. Αυτά τα χαρακτηριστικά επιτρέπουν μεγαλύτερη ευελιξία και ευκολότερο έλεγχο ώστε να παρέχουν:

1. δυνατότητα της A/Γ να παραμένει σε λειτουργία σε συνθήκες βύθισης τάσης και
2. ρύθμιση τάσης και έλεγχο αέργου ισχύος σε κάθε A/Γ.

Για την επίτευξη της δυνατότητας για την A/Γ να παραμείνει σε λειτουργία σε βύθιση τάσης, ο μετατροπέας στην πλευρά του δικτύου (ή αντιστροφέας) μπορεί να εξασφαλίσει την αποκοπή των IGBT's όταν η τάση πέσει σε υπερβολικά χαμηλά επίπεδα και να είναι σε επιφυλακή για να επανέλθει σε λειτουργία μετά την εκκαθάριση του σφάλματος. Στην πλευρά της γεννήτριας, ο μετατροπέας (ή ανορθωτής) μπορεί να προσπεραστεί και ο στάτης να τροφοδοτήσει έναν αντιστάτη ώστε να αποφευχθεί υπερβολική επιτάχυνση της μηχανής.

Επιπλέον, από τη στιγμή που η γεννήτρια δε βλέπει απ' ευθείας τις χαμηλές τάσεις του δικτύου κατά τη διάρκεια ενός τέτοιου γεγονότος δεν υπάρχουν τόσο μεγάλα μεταβατικά ρεύματα στο στάτη ή το δρομέα της μηχανής.

Η ρύθμιση τάσης επιτυγχάνεται εύκολα με έναν μετατροπέα τύπου πηγής τάσης μέσω ελέγχου της σχετικής φάσης και πλάτους του διανύσματος της τάσης που παράγεται από το μετατροπέα σε σύγκριση με το διάνυσμα της τάσης του δικτύου. Αυτή η ιδέα δεν είναι διαφορετική από αυτήν που ήδη εφαρμόζεται σε συστήματα STATCOM και HVDC συστήματα τύπου πηγής τάσης.

6.3.2. Το σχέδιο Vestas Opti-Slip®

Μια άλλη τοπολογία μεταβλητών στροφών είναι αυτή που κατ' αρχάς χρησιμοποιήθηκε από τη Vestas. Η Vestas αναφέρεται σε αυτήν ως Opti-Slip®. Σε αυτό το σχέδιο η μονάδα παραγωγής είναι μια συμβατική μηχανή επαγωγής με μία τροποποίηση, ο δρομέας είναι εφοδιασμένος με μία εξωτερική μεταβλητή αντίσταση. Αυτή η αντίσταση ελέγχεται με ηλεκτρονικά ισχύος. Μεταβάλλοντας την αντίσταση του δρομέα η χαρακτηριστική ροπής-ταχύτητας της μονάδας μπορεί να ρυθμιστεί και άρα να δώσει τη δυνατότητα για ευσταθή λειτουργία της συμβατικής μηχανής επαγωγής για μεγάλο εύρος ταχυτήτων.

Σε πλήρες φορτίο, η μονάδα μπορεί συνήθως να λειτουργεί με ολίσθηση μεταξύ 2% και 10%. Αυτό είναι σαφώς μεγαλύτερο εύρος σε σύγκριση με μια συμβατική μηχανή επαγωγής, η οποία συνήθως βλέπει μεταβολή της ταχύτητας κατά ένα κλάσμα του 1% από κενό σε πλήρες φορτίο. Παρ' όλα αυτά, το εύρος ταχυτήτων είναι ακόμα μικρότερο απ' ότι άλλες τοπολογίες μεταβλητών στροφών, όπως οι μονάδες διπλής τροφοδότησης (doubly-fed) και οι σύγχρονες γεννήτριες (με ηλεκτρική διέγερση ή με μόνιμους μαγνήτες) με πλήρη μετατροπέα. Αυτές οι τελευταίες μονάδες μπορούν να έχουν εύρος ταχύτητας λειτουργίας με ολίσθηση από -30% έως +30%. Συνήθως η γεννήτρια λειτουργεί σε ολίσθηση μεταξύ 2% και 5%. Τότε στην περίπτωση μιας απότομης ριπής ανέμου, η Α/Γ μπορεί ακόμη να αυξήσει την ταχύτητά της σε σημείο που η ολίσθηση να φτάνει το 10% και έτσι να απορροφήσει κάποια από την πρόσθετη ενέργεια στη μορφή της αποθηκευμένης ενέργειας στον άξονα. Με αυτόν τον τρόπο το σχέδιο αυτό, σαν άλλα σχέδια μεταβλητών στροφών, μπορεί να προσφέρει καλύτερη ποιότητα ισχύος με λιγότερες βραχυπρόθεσμες διακυμάνσεις της ισχύος που μπορεί να οδηγήσουν σε flicker.

Αυτές οι μονάδες μεταβλητής αντίστασης δρομέα παραμένουν γεννήτριες επαγωγής χωρίς διέγερση πεδίου. Έτσι απορροφούν άεργο ισχύ από το σύστημα και απαιτούν πρόσθετα μέτρα αντιστάθμισης με το μορφή χωρητικότητων και/ή συστήματα στατών αντισταθμιστών αέργου ισχύος για την αναγκαία αντιστάθμιση κατά τη λειτουργία πλήρους φορτίου. Αυτές οι μονάδες μπορούν επίσης να εφοδιαστούν με συστήματα για εξασφάλιση της λειτουργίας υπό συνθήκες βύθισης τάσης.

Παρόμοια με συμβατικές γεννήτριες επαγωγής αυτό επιτυγχάνεται με συνδυασμό αλγορίθμων ελέγχου γωνίας βήματος πτερυγίων (που βοηθούν ώστε να απομακρύνεται η μηχανική ισχύς που ακολουθεί την εμφάνιση του σφάλματος) και συστημάτων αδιάκοπης παροχής (UPS) στην Α/Γ ώστε να λειτουργούν οι έλεγχοι κατά τα διάρκεια των σφαλμάτων. Επιπλέον, δυναμικές πηγές αέργου ισχύος όπως SVC ή STATCOM μπορεί πολλές φορές να απαιτούνται για να παρέχουν πρόσθετη υποστήριξη μετά την εκκαθάριση του σφάλματος ώστε να εξασφαλιστεί η σωστή ανάκαμψη της τάσης. Τα μεταβατικά ρεύματα του δρομέα κατά τη διάρκεια μεγάλων βυθίσεων τάσης συχνά ελέγχονται ώστε να προστατεύονται τα ηλεκτρονικά ισχύος στο κύκλωμα του δρομέα αυξάνοντας την αντίσταση του δρομέα στο μέγιστο. Αυτό έχει το πρόσθετο πλεονέκτημα της επιπεδοποίησης της καμπύλης ροπής-ταχύτητας

της μηχανής και άρα συμβάλλει στο να ελαχιστοποιείται η πιθανότητα να έχουμε φαινόμενα αστάθειας κατά τη διάρκεια σφαλμάτων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

Αποτελέσματα προσομοιώσεων με χρήση του μοντέλου της γεννήτριας επαγωγής διπλής τροφοδότησης.

7.1. Εισαγωγή

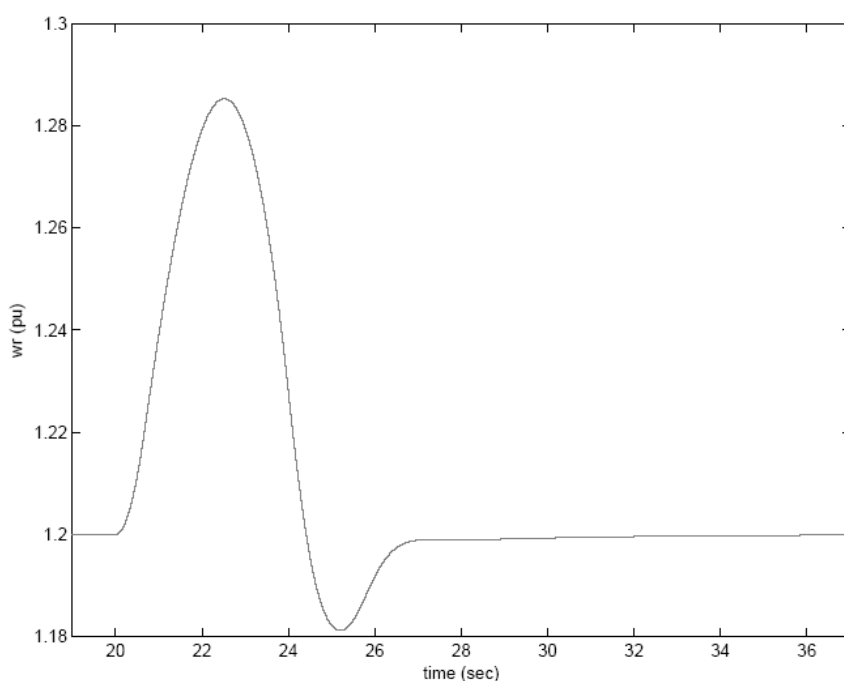
Στη συνέχεια θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα από προσομοιώσεις που έγιναν με τη χρήση του μοντέλου 5^{ης} τάξης της γεννήτριας επαγωγής διπλής τροφοδότησης που αναπτύχθηκε κατά τη διάρκεια της εργασίας. Έγινε προσπάθεια να προκύψουν συμπεράσματα για τη συμπεριφορά του συστήματος κάτω από διαφορετικές λειτουργικές συνθήκες με στόχο την όσο το δυνατόν πληρέστερη κατανόηση του συστήματος. Κατά τη διάρκεια της εργασίας αναπτύχθηκε επίσης και το μοντέλο 3^{ης} τάξης, με απαλοιφή των μεταβατικών του στάτη, έτσι ώστε να παρουσιαστούν εδώ και συγκριτικά αποτελέσματα μεταξύ των δύο μοντέλων.

Τα παρακάτω αποτελέσματα προέκυψαν με την προσομοίωση του μοντέλου της μηχανής με δεδομένα που παρουσιάζονται στους Πίνακες 4.3.1 και 4.3.2. Σε όλα τα γραφήματα η συνεχής γραμμή αναφέρεται στο μοντέλο 5^{ης} τάξης της μηχανής ενώ η διακεκομμένη στο μοντέλο 3^{ης} τάξης. Η βύθιση της τερματικής τάσης προβάλλεται ενδεικτικά σε κάποια από τα παραδείγματα που θα ακολουθήσουν. Η τερματική τάση σημειώνεται ότι δεν επανέρχεται πλήρως στην ονομαστική τιμή (1 α.μ) ενώ η μηχανή λειτουργεί με έλεγχο συντελεστή ισχύος. Η μηχανή αρχικά παράγει ονομαστική ενεργό ισχύ με μοναδιαίο συντελεστή ισχύος ($P=2 \text{ MW}$, $Q=0 \text{ MVar}$).

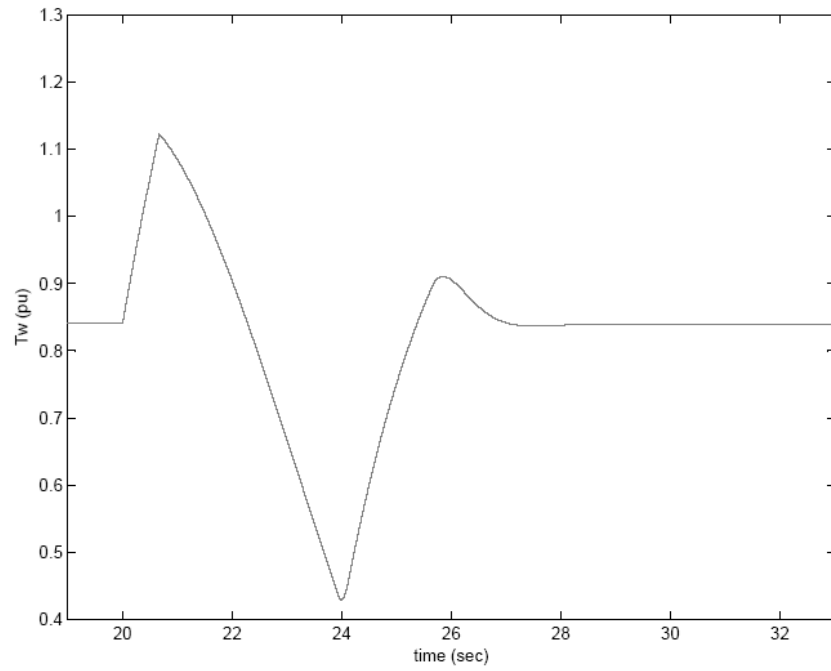
7.2. Απόκριση συστήματος σε μεταβολές του ανέμου.

7.2.1. Απόκριση του συστήματος σε αύξηση του ανέμου από την αρχική τιμή των 13m/s σε 15m/s με μέγιστο ρυθμό αλλαγής της γωνίας βήματος πτερυγίων 5°/sec.

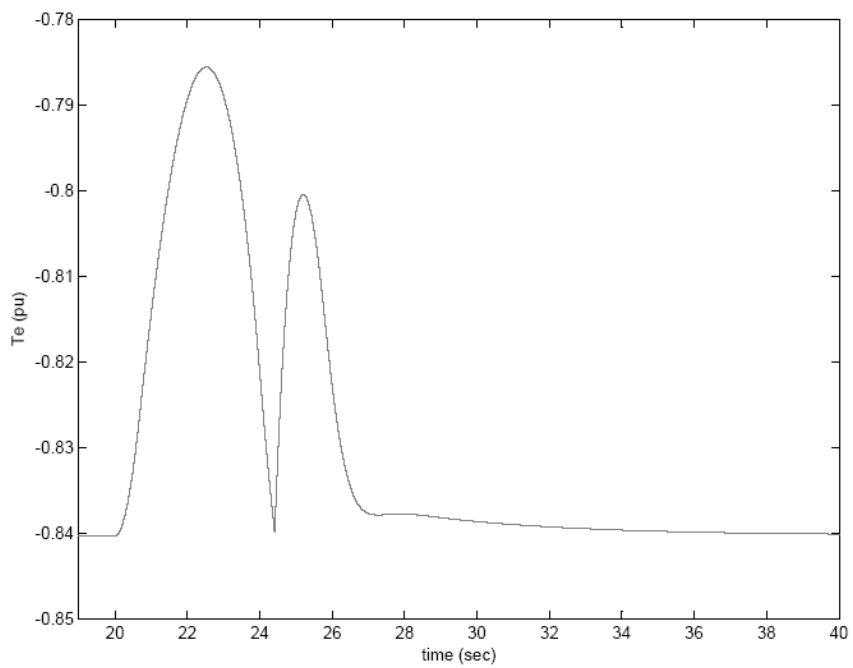
Στην προσομοίωση αυτή εφαρμόστηκε μια σταδιακή αύξηση της ταχύτητας του ανέμου από τα 13m/s στα 15m/s (με ρυθμό αύξησης 3m/s²) και παρατηρήθηκε η απόκριση των βασικών μεγεθών της Α/Γ (γωνιακή ταχύτητα περιστροφής δρομέα της Α/Γ, αεροδυναμική ροπή, ηλεκτρομαγνητική ροπή και γωνία αλλαγής κλίσης πτερυγίων).



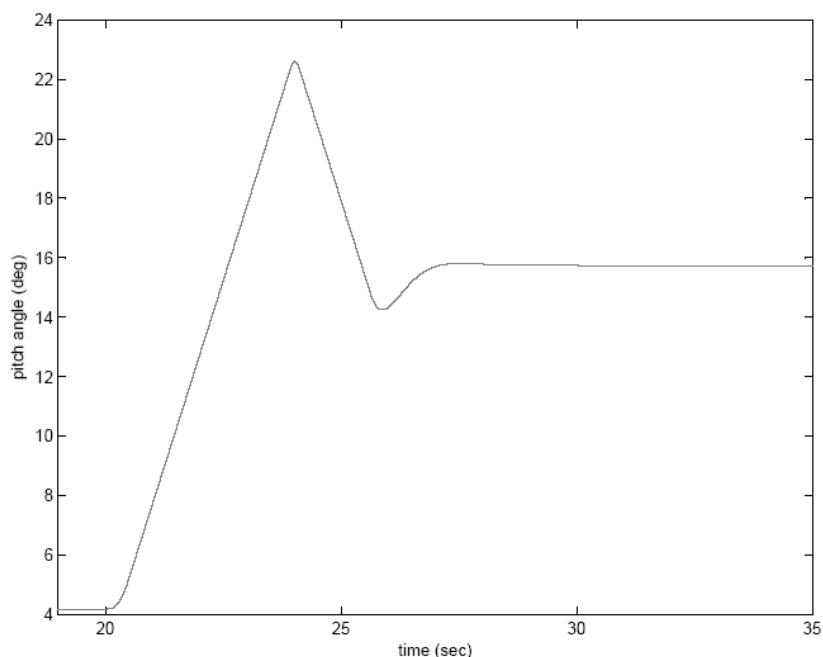
Γράφημα 7.2.1.1. Απόκριση γωνιακής ταχύτητας.



Γράφημα 7.2.1.2. Απόκριση αεροδυναμικής ροπής.



Γράφημα 7.2.1.3. Απόκριση ηλεκτρομαγνητικής ροπής.



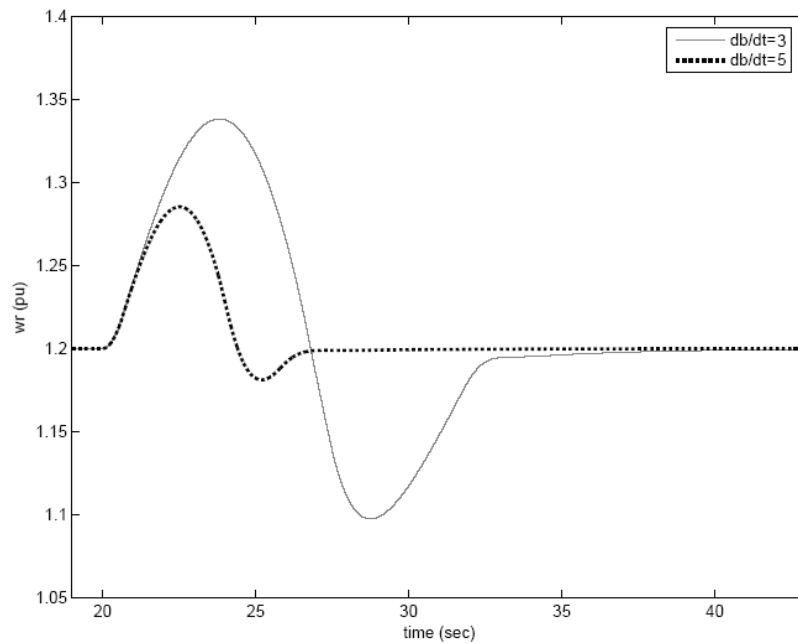
Γράφημα 7.2.1.4. Απόκριση γωνίας βήματος πτερυγίου.

Σημειώνεται ότι οι πιο πάνω αποκρίσεις καθορίζονται σε μεγάλο βαθμό ως προς το εύρος των ταλαντώσεων αλλά και ως προς τη διάρκεια τους, από την τιμή της σταθεράς αδρανείας H (sec).

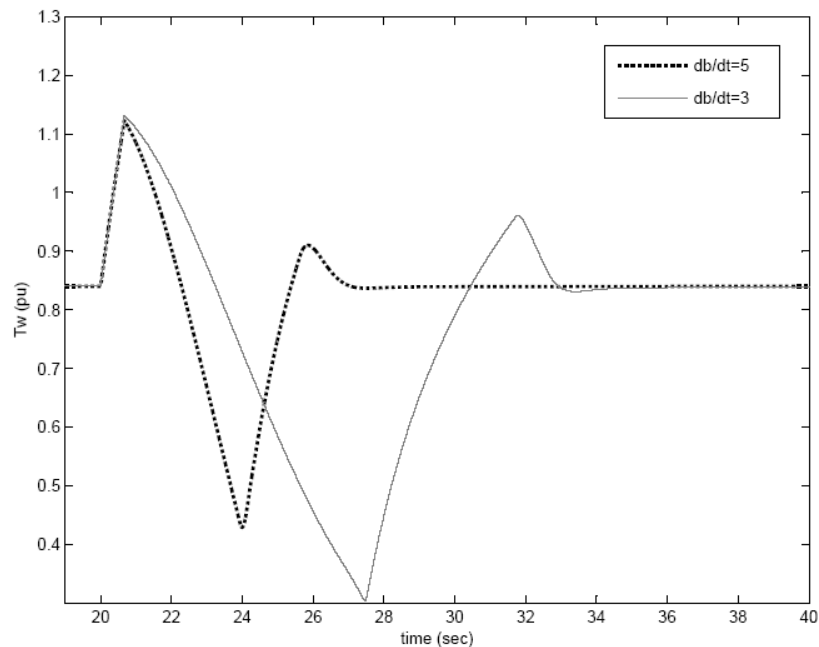
Τα συγκεκριμένα αποτελέσματα έχουν εξαχθεί με τιμή $H=2.5$ sec. Όπως προκύπτει λοιπόν, όταν αυξάνεται ο άνεμος, αυξάνεται αμέσως η προκύπτουσα αεροδυναμική ροπή με αποτέλεσμα να επιταχύνεται η μηχανή. Στη συνέχεια ενεργοποιείται ο έλεγχος γωνίας βήματος ώστε να περιοριστεί η ροπή σε τιμές κάτω από την ονομαστική και τελικά η γωνία ισορροπεί σε τιμή που αντιστοιχεί στην τελική ταχύτητα ανέμου 15m/s . Η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής επιστρέφει στο ίδιο σημείο ισοροπίας με τιμή 1.2 α.μ. από τη στιγμή που η ταχύτητα ανέμου υπερβαίνει την ονομαστική της ($V_{w,nom}=12\text{m/s}$), οπότε σύμφωνα με τη χαρακτηριστική ελέγχου που αναλύθηκε στην παράγραφο 2.2, η ταχύτητα περιστροφής διατηρεί την ονομαστική της τιμή ($\omega_{r,nom}=1.2$ α.μ.).

Η αύξηση της γωνίας βήματος των πτερυγίων περιορίζεται από τον περιοριστή ρυθμού ($5^\circ/\text{sec}$) που έχει εισαχθεί στο μοντέλο ελέγχου της γωνίας, αφού η γωνία δε μπορεί πραγματικά να λάβει την τιμή που δίνει ο έλεγχος άμεσα. Παρακάτω

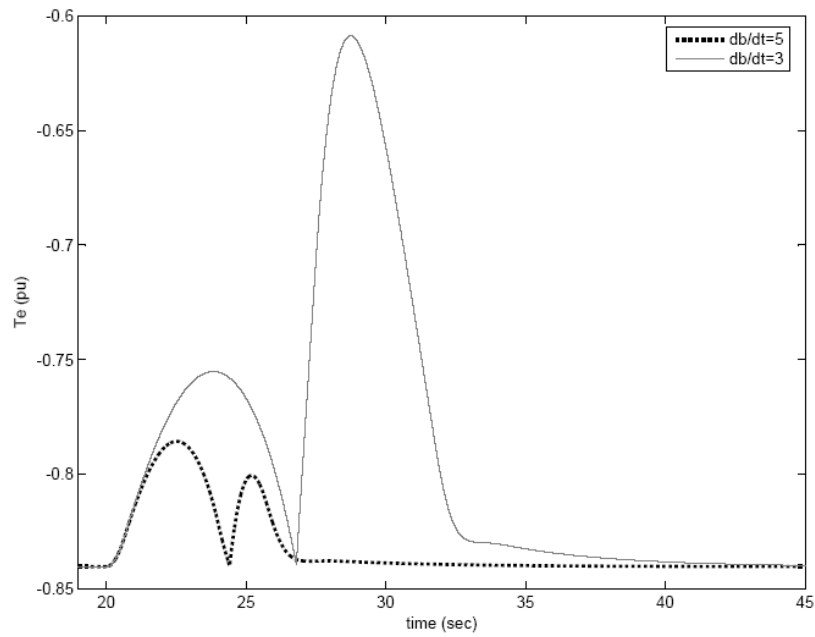
ακολουθούν συγκριτικά αποτελέσματα για την ίδια αύξηση στην ταχύτητα ανέμου αλλά με περιορισμό ρυθμού αλλαγής της γωνίας βήματος ίσο με $3^\circ/\text{sec}$.



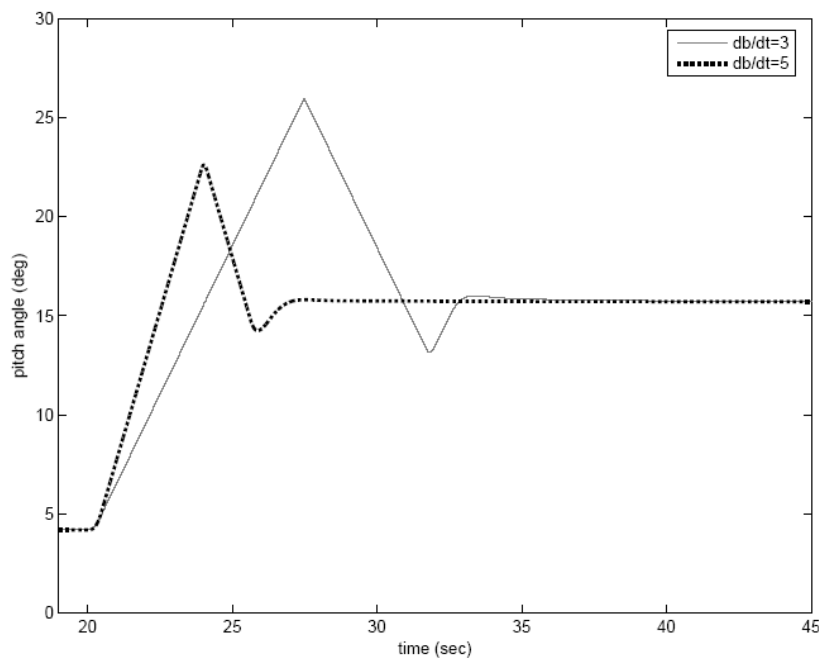
Γράφημα 7.2.1.5. Απόκριση γωνιακής ταχύτητας: Συγκριτικά αποτελέσματα με ρυθμό αλλαγής κλίσης πτερυγίων $5^\circ/\text{sec}$ (συνεχής γραμμή) και $3^\circ/\text{sec}$ (διακεκομμένη γραμμή) αντίστοιχα.



Γράφημα 7.2.1.6. Απόκριση αεροδυναμικής ροπής: Συγκριτικά αποτελέσματα με ρυθμό αλλαγής κλίσης πτερυγίων $5^\circ/\text{sec}$ (διακεκομμένη γραμμή) και $3^\circ/\text{sec}$ (συνεχής γραμμή) αντίστοιχα.



Γράφημα 7.2.1.7. Απόκριση ηλεκτρομαγνητικής ροπής: Συγκριτικά αποτελέσματα με ρυθμό αλλαγής κλίσης πτερυγίων $5^\circ/\text{sec}$ (διακεκομμένη γραμμή) και $3^\circ/\text{sec}$ (συνεχής γραμμή) αντίστοιχα.



Γράφημα 7.2.1.8. Απόκριση γωνίας βήματος: Συγκριτικά αποτελέσματα με ρυθμό αλλαγής κλίσης πτερυγίων $5^\circ/\text{sec}$ (διακεκομμένη γραμμή) και $3^\circ/\text{sec}$ (συνεχής γραμμή) αντίστοιχα.

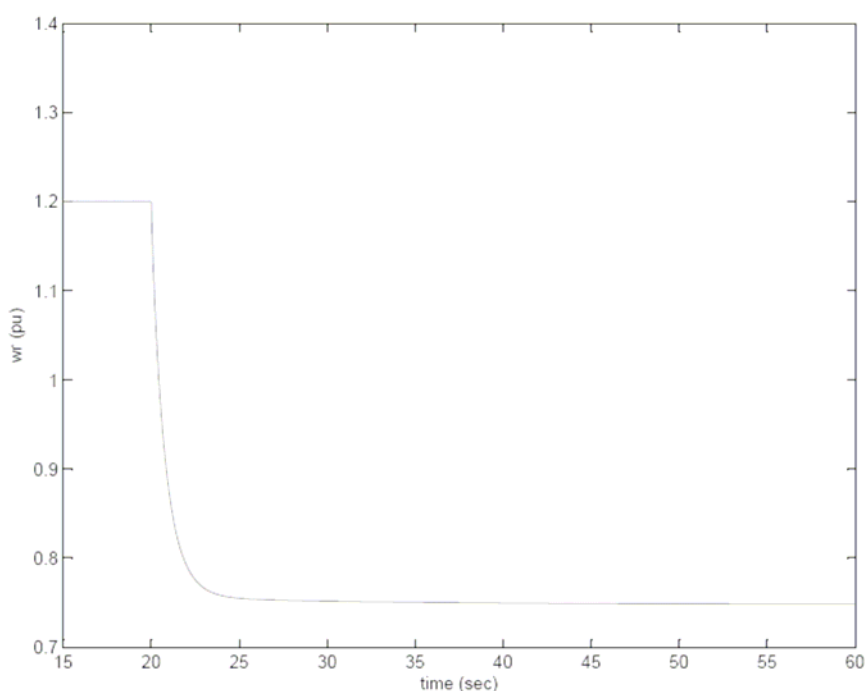
Όταν ο ρυθμός αλλαγής κλίσης των πτερυγίων είναι μικρότερος, δηλαδή η γωνία βήματος αργεί περισσότερο να πάρει την τιμή ελέγχου, οι αποκρίσεις των μεγεθών

της Α/Γ είναι χειρότερες από άποψη τόσο εύρους ταλαντώσεων όσο και διάρκειας του μεταβατικού φαινομένου. Επομένως, ένας σημαντικός κατασκευαστικός στόχος για την Α/Γ είναι ο μηχανισμός αλλαγής κλίσης των πτερυγίων να εξασφαλίζει όσο ο δυνατόν πιο γρήγορη απόκριση. Έτσι σε πιθανές απότομες αλλαγές του ανέμου, τα προκύπτοντα μεταβατικά θα είναι μικρότερης έκτασης.

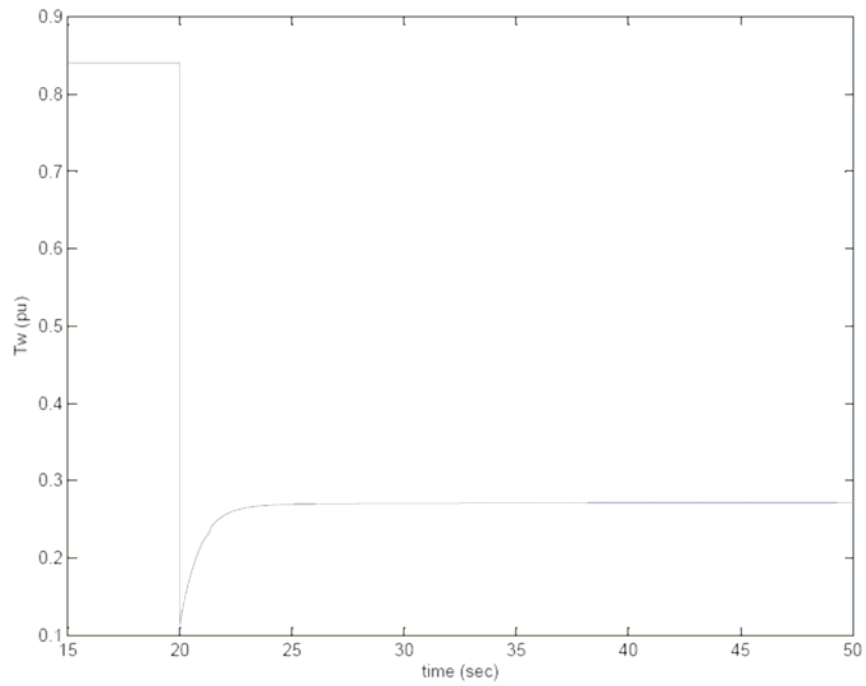
Σημειώνεται ότι στα αποτελέσματα προσομοιώσεων που ακολουθούν έχει επιλεγθεί για τον ρυθμό αλλαγής κλίσης των πτερυγίων η τιμή $3^\circ/\text{sec}$.

7.2.2. Απόκριση του συστήματος σε βηματική μείωση του ανέμου από την αρχική τιμή των 13m/s σε 7m/s.

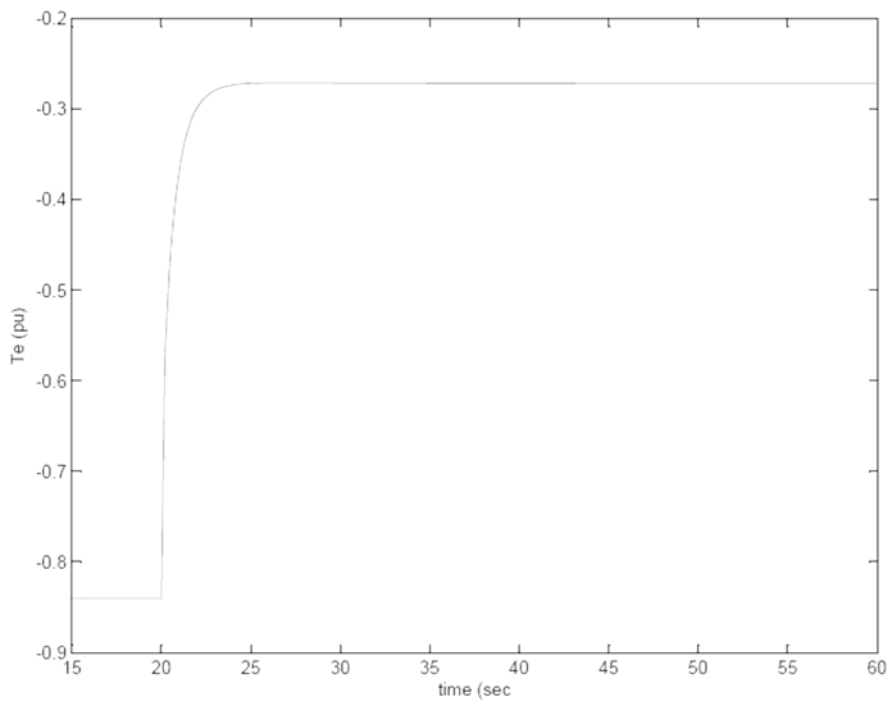
Στη συνέχεια εφαρμόστηκε μια βηματική μείωση στην ταχύτητα ανέμου από την αρχική τιμή των 13m/s στα 7m/s. Ακολουθούν τα αποτελέσματα των αποκρίσεων των βασικών μεγεθών της Α/Γ.



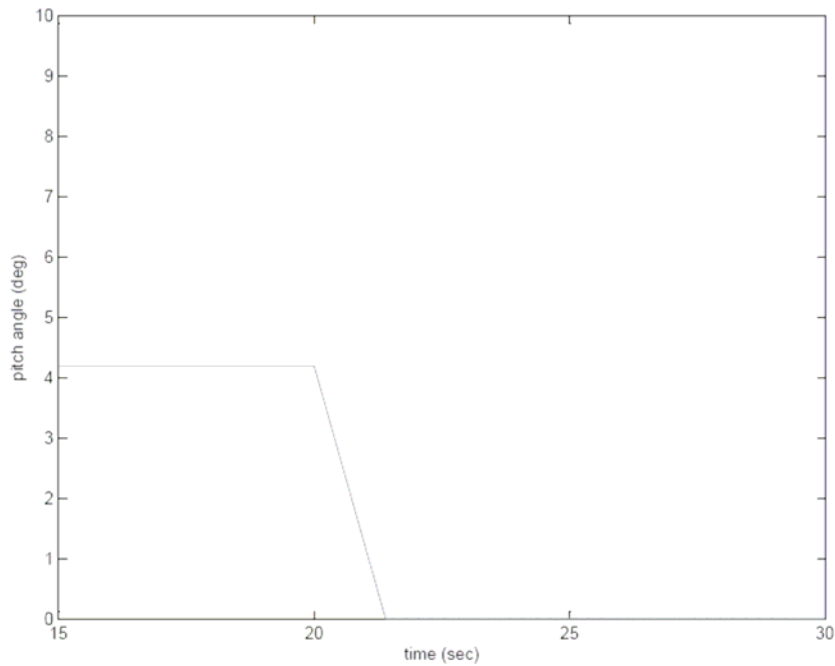
Γράφημα 7.2.2.1. Απόκριση γωνιακής ταχύτητας.



Γράφημα 7.2.2.2. Απόκριση αεροδυναμικής ροπής.



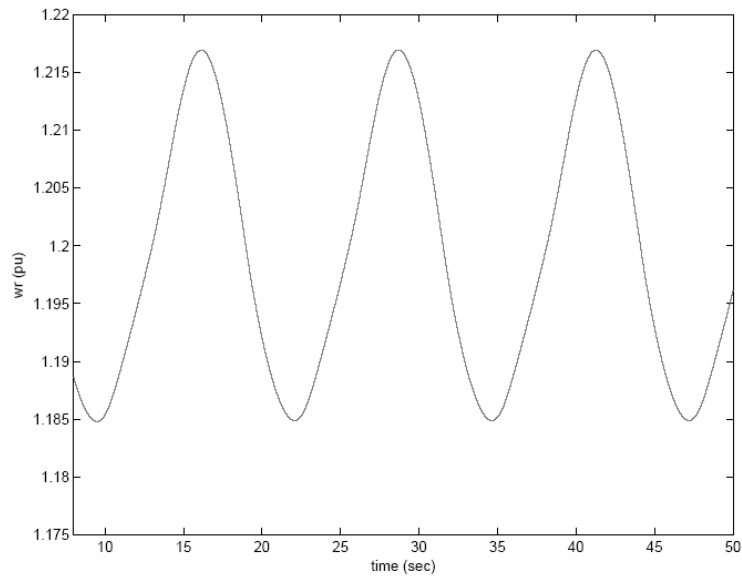
Γράφημα 7.2.2.3. Απόκριση ηλεκτρομαγνητικής ροπής.



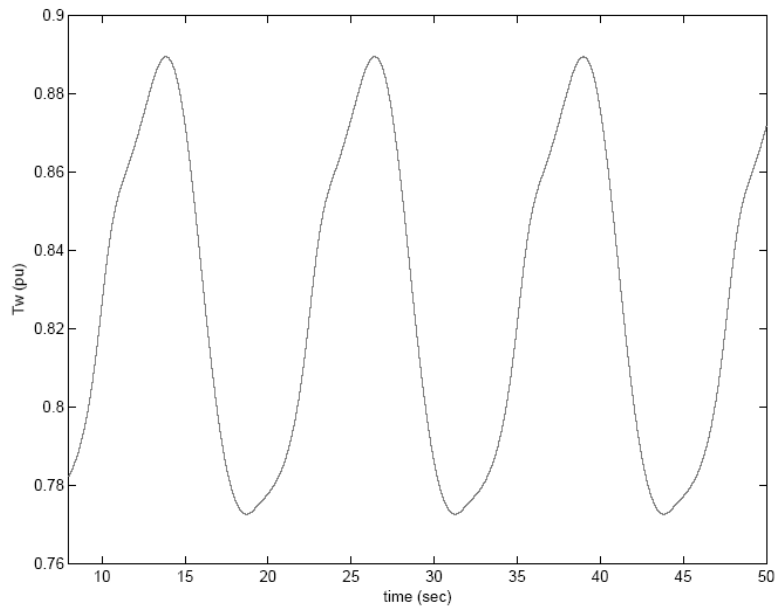
Γράφημα 7.2.2.4. Απόκριση γωνίας βήματος πτερυγίου.

Στην περίπτωση αυτή με την απότομη μείωση του ανέμου από τα 13m/s στα 7m/s έχουμε την ακόλουθη μείωση της αεροδυναμικής ροπής που οδηγεί στην επιβράδυνση της μηχανής. Ενεργοποιείται ο μηχανισμός ρύθμισης της γωνίας βήματος των πτερυγίων και μηδενίζει τελικά τη γωνία με στόχο τη μεγιστοποίηση της εξαγόμενης ισχύος. Όπως έχει αναλυθεί και στην παράγραφο 2.2, όταν η ταχύτητα ανέμου έχει τιμή μικρότερη από την ονομαστική της ($V_{w,nom}=12\text{m/s}$), η A/Γ λειτουργεί υπό συνθήκες βέλτιστης ισχύος δηλ. με βέλτιστο αεροδυναμικό συντελεστή ισχύος $C_{p,opt}$ έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η μέγιστη δυνατή παραγόμενη ισχύς. Η τιμή της γωνίας βήματος που αντιστοιχεί σε αυτές τις λειτουργικές συνθήκες είναι $\beta=0^\circ$. Η σταθερά αδρανείας είναι $H=3.6\text{sec}$.

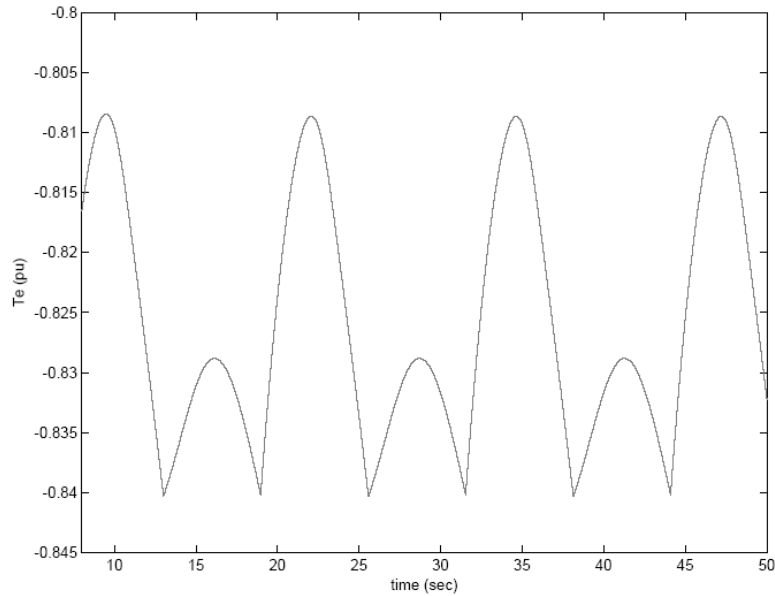
7.2.3. Απόκριση του συστήματος σε ημιτονοειδή χρονοσειρά ανέμου με μέση τιμή 13m/s, συχνότητα 0.5rad/sec και πλάτος 0.5m/s.



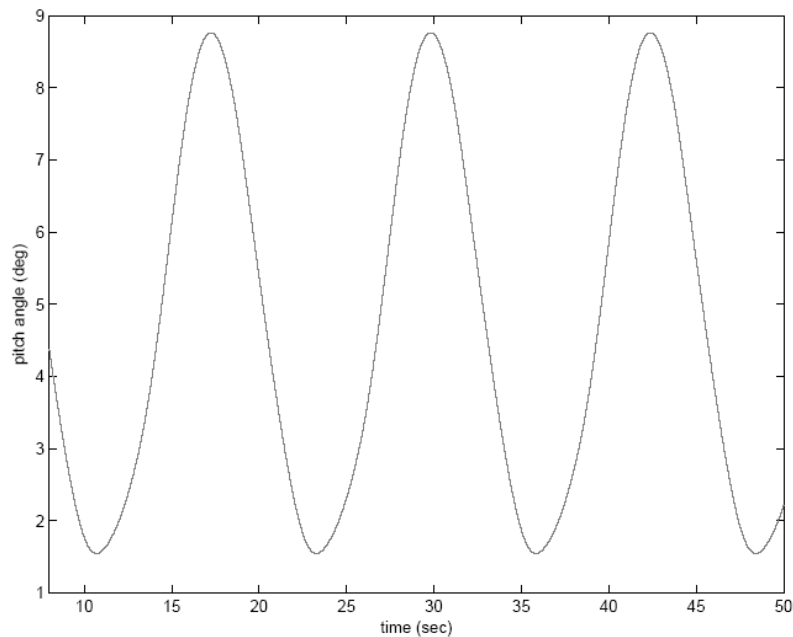
Γράφημα 7.2.3.1. Απόκριση γωνιακής ταχύτητας.



Γράφημα 7.2.3.2. Απόκριση αεροδυναμικής ροπής.



Γράφημα 7.2.3.3. Απόκριση ηλεκτρομαγνητικής ροπής.



Γράφημα 7.2.3.4. Απόκριση γωνίας βήματος πτερυγίων.

Στην περίπτωση αυτή η μεταβολή της ταχύτητας ανέμου είναι ιδιαίτερα γρήγορη με αποτέλεσμα να μην προλαβαίνει το σύστημα αλλαγής κλίσης των πτερυγίων να δώσει τη σωστή με βάση τον έλεγχο τιμή γωνίας. Έτσι όταν αυξάνεται ο άνεμος, αυξάνεται η αεροδυναμική ροπή με αποτέλεσμα να επιταχύνεται ο δρομέας της Α/Γ. Όταν γίνει αυτό, αναλαμβάνει το σύστημα αλλαγής κλίσης των πτερυγίων να αυξήσει τη γωνία βήματος αλλά στο μεταξύ ο άνεμος έχει ήδη αρχίσει να μειώνεται. Η

ηλεκτρομαγνητική ροπή ακολουθώντας τον έλεγχο που έχει αναλυθεί στο κεφάλαιο 3 της παρούσας εργασίας ακολουθεί τις μεταβολές της ταχύτητας του δρομέα.

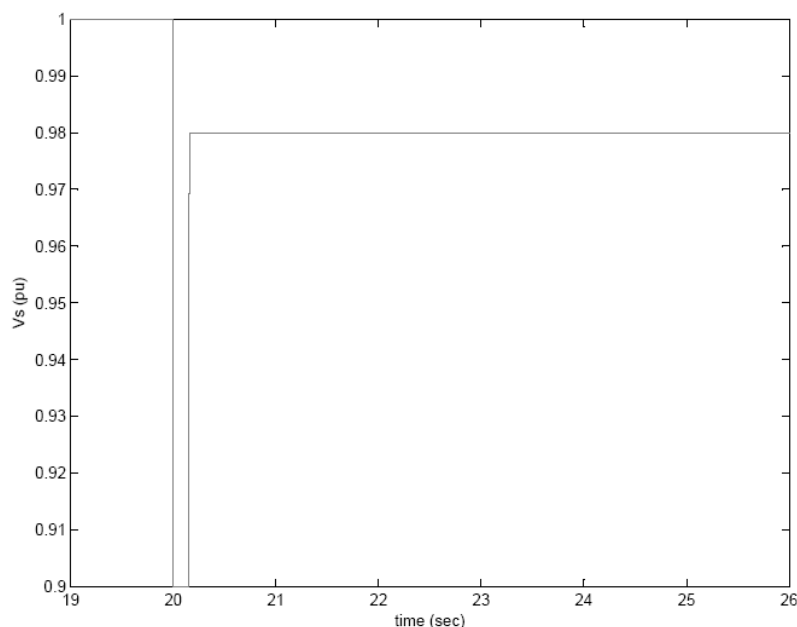
Η σταθερά αδρανείας είναι $H=3.6\text{sec}$.

7.3. Απόκριση του συστήματος σε συνθήκες βύθισης τάσης.

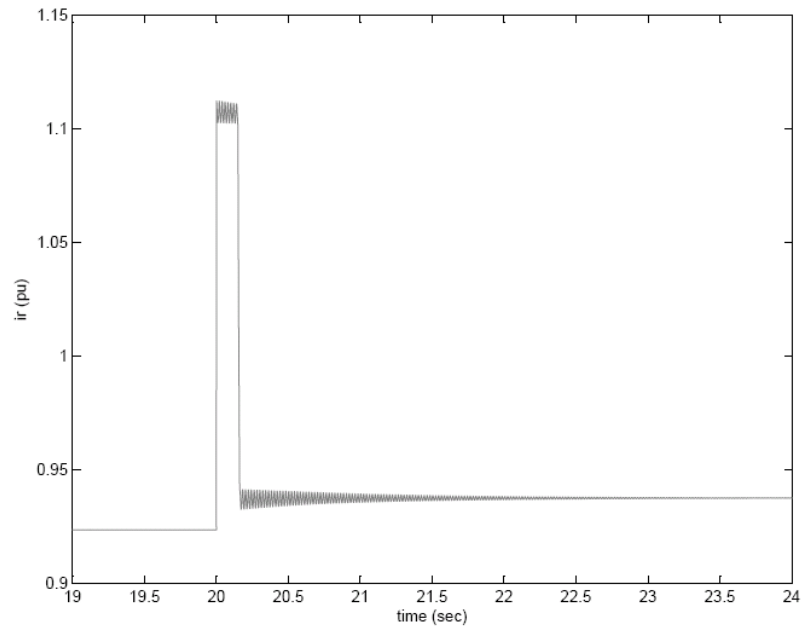
Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από προσομοιώσεις που έγιναν μελετώντας την απόκριση του συστήματος σε συνθήκες βύθισης της τερματικής τάσης. Με βάση τη μοντελοποίηση του active crowbar που περιγράφεται στην ενότητα 6.2 γίνεται παραμετρική μελέτη του προβλήματος για διάφορες τιμές της αντίστασης του crowbar.

7.3.1. Απόκριση του συστήματος σε μικρή βύθιση της τάσης.

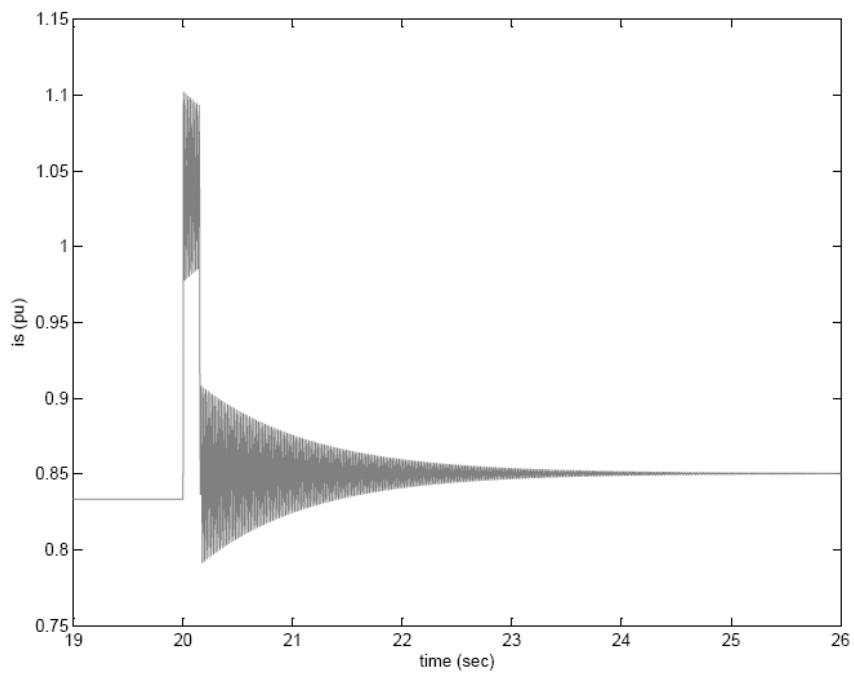
Στο συγκεκριμένο παράδειγμα εφαρμόζεται μια μικρή βύθιση τάσης στον τερματικό ζυγό της γεννήτριας η οποία δεν οδηγεί σε ενεργοποίηση του μηχανισμού crowbar.



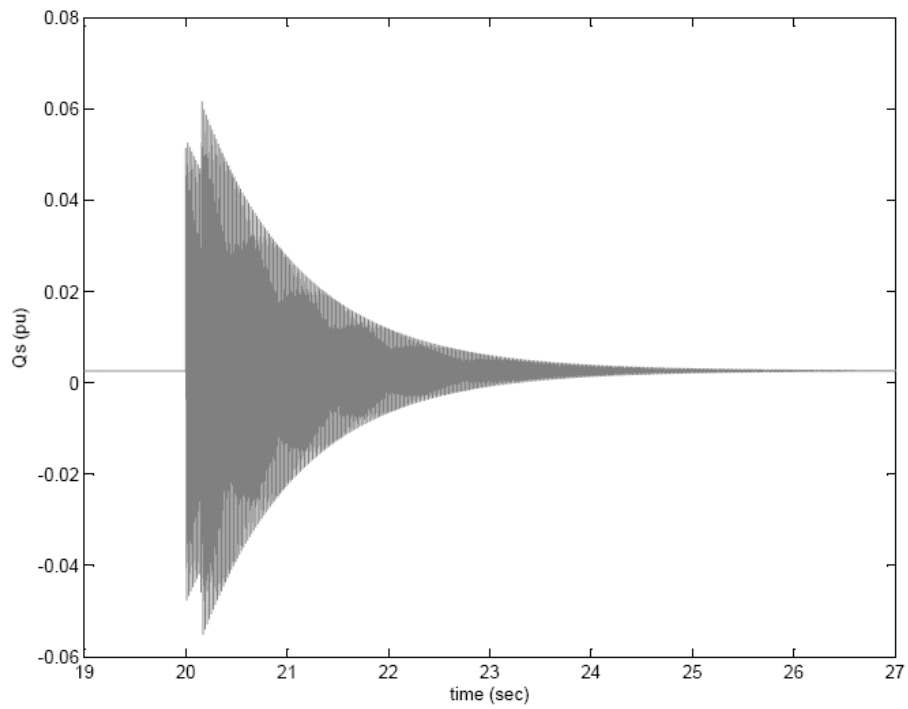
Γράφημα 7.3.1.1. Βύθιση της τάσης σε 0.9 α.μ. για 150ms.



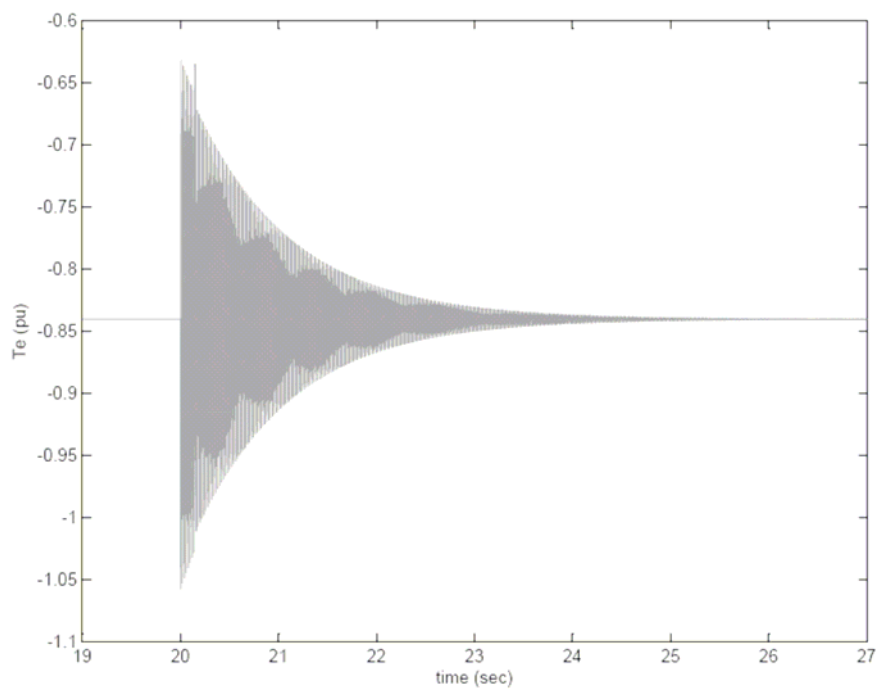
Γράφημα 7.3.1.2. Απόκριση ρεύματος δρομέα.



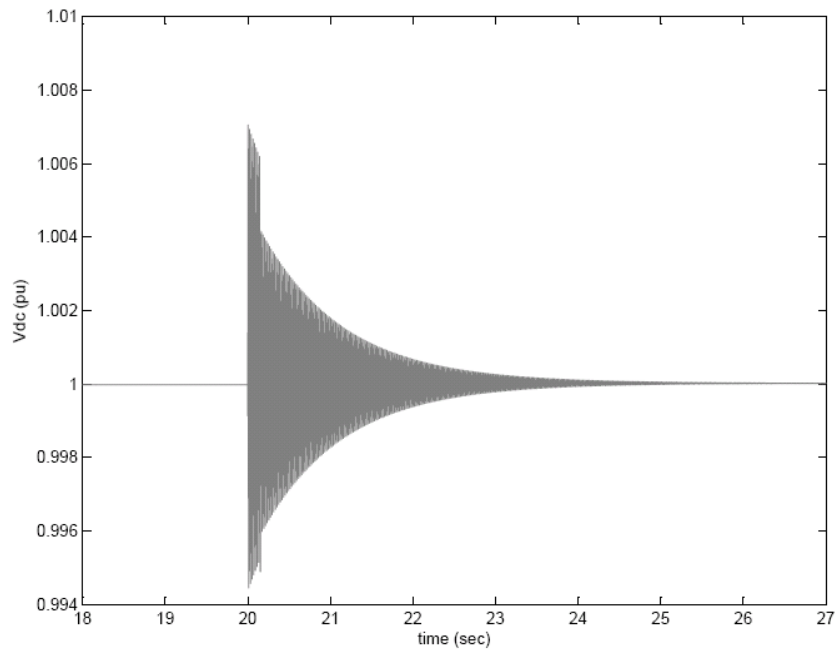
Γράφημα 7.3.1.3. Απόκριση ρεύματος στάτη.



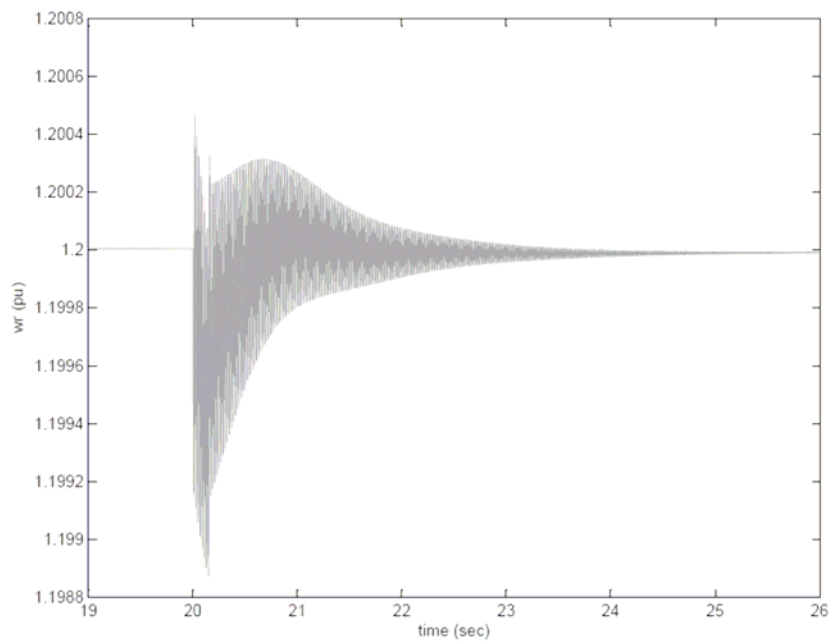
Γράφημα 7.3.1.4. Απόκριση αέργου ισχύος.



Γράφημα 7.3.1.5. Απόκριση ηλεκτρομαγνητικής ροπής.



Γράφημα 7.3.1.6. Απόκριση DC τάσης στο μετατροπέα.



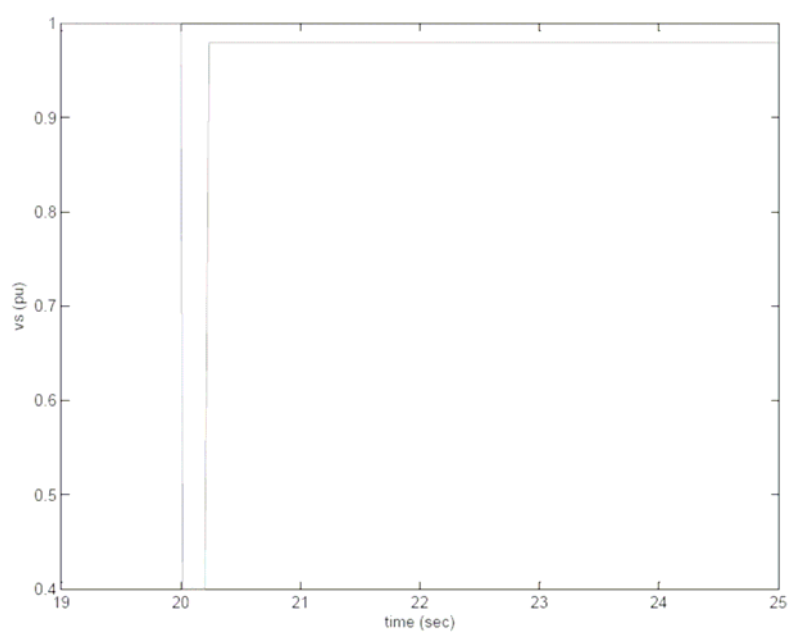
Γράφημα 7.3.1.7. Απόκριση γωνιακής ταχύτητας.

Λόγω μικρής βύθισης της τάσης δεν ενεργοποιείται ο μηχανισμός προστασίας του μετατροπέα οπότε η μηχανή συνεχίζει και λειτουργεί κανονικά με έλεγχο από το μετατροπέα. Όσο η τάση είναι χαμηλή τα ρεύματα αυξάνονται, προκαλώντας και τα μεταβατικά στην άεργο ισχύ και την ηλεκτρομαγνητική ροπή. Είναι ευδιάκριτες οι

ταλαντώσεις θεμελιώδους συχνότητας στα ηλεκτρικά μεγέθη της γεννήτριας, γεγονός που οφείλεται στην μοντελοποίηση της γεννήτριας με το μοντέλο 5^{ης} τάξης, δηλαδή με τα μεταβατικά του στάτη να συμπεριλαμβάνονται στο μοντέλο.

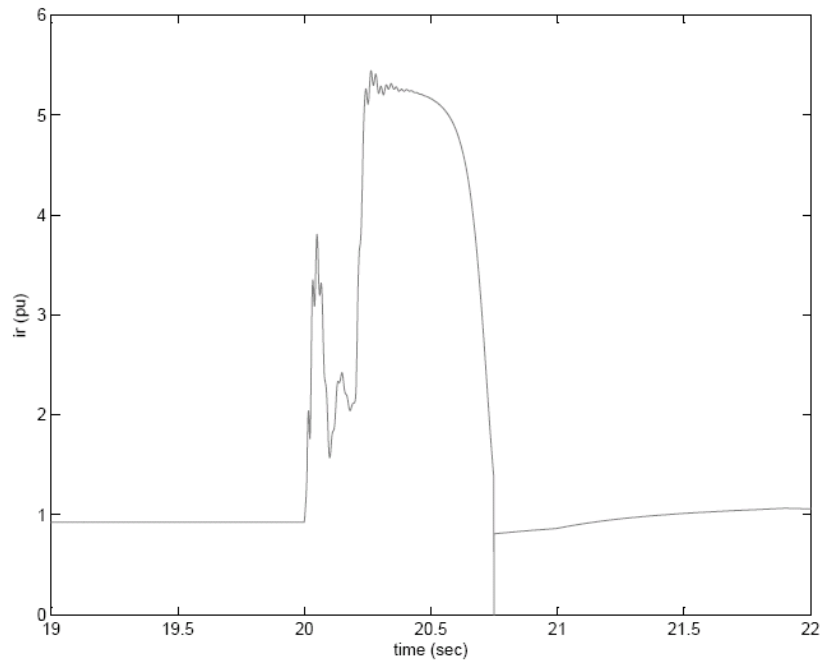
7.3.2. Απόκριση του συστήματος σε σημαντική βύθιση της τάσης-παραμετρική μελέτη.

Εδώ εφαρμόστηκε βύθιση στην τερματική τάση 0.4 α.μ. για 200ms (βλέπε Γράφημα 7.3.2.1.) και παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τρεις διαφορετικές τιμές της αντίστασης του crowbar.

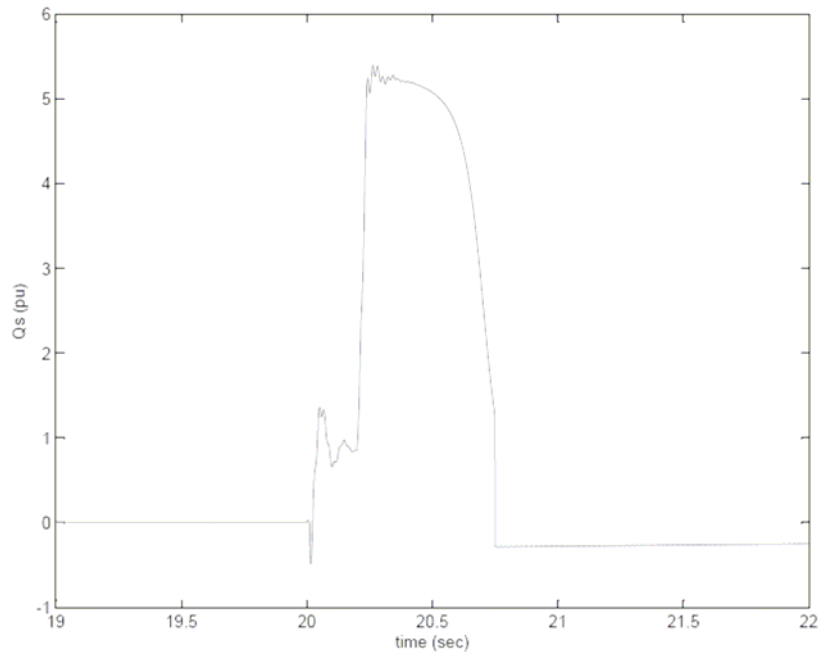


Γράφημα 7.3.2.1. Βύθιση της τάσης σε 0.4 α.μ. για 200ms.

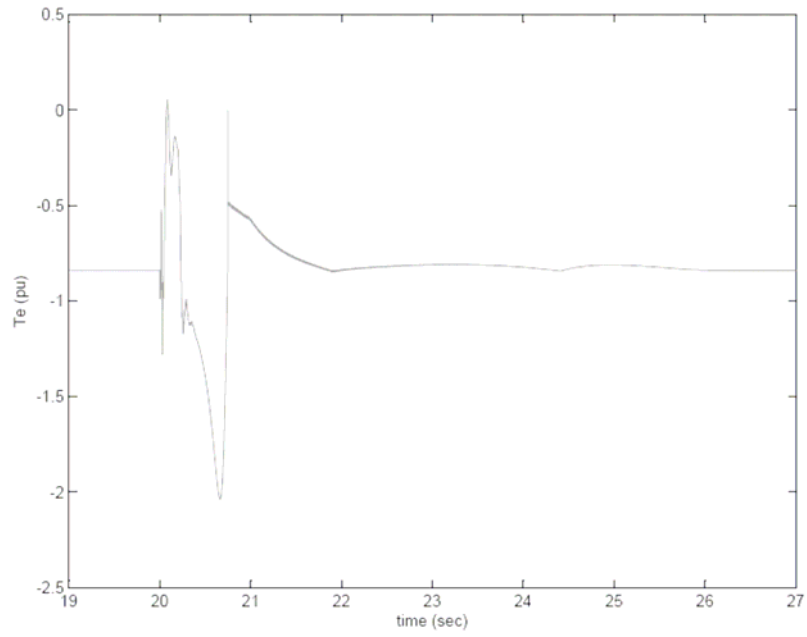
- $R_c=0.001$ α.μ.



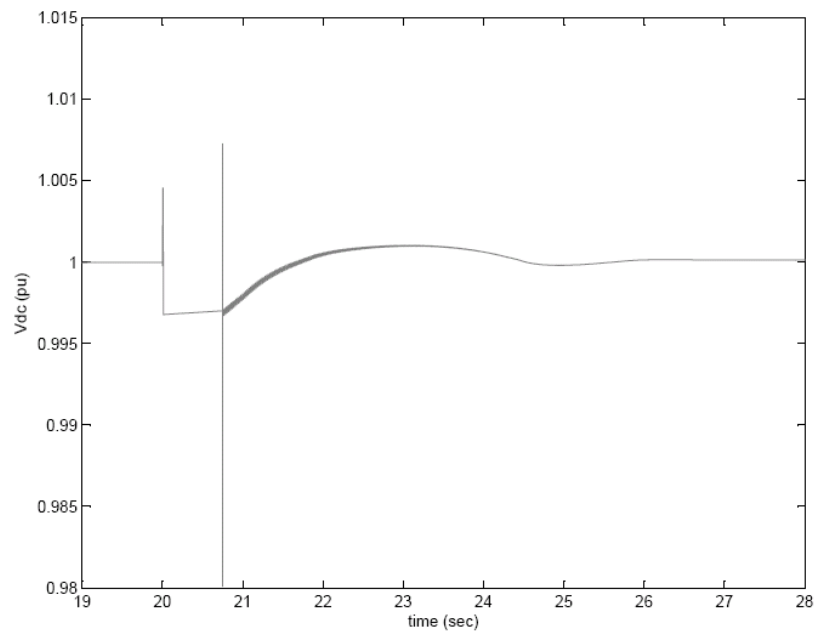
Γράφημα 7.3.2.2. Απόκριση ρεύματος δρομέα.



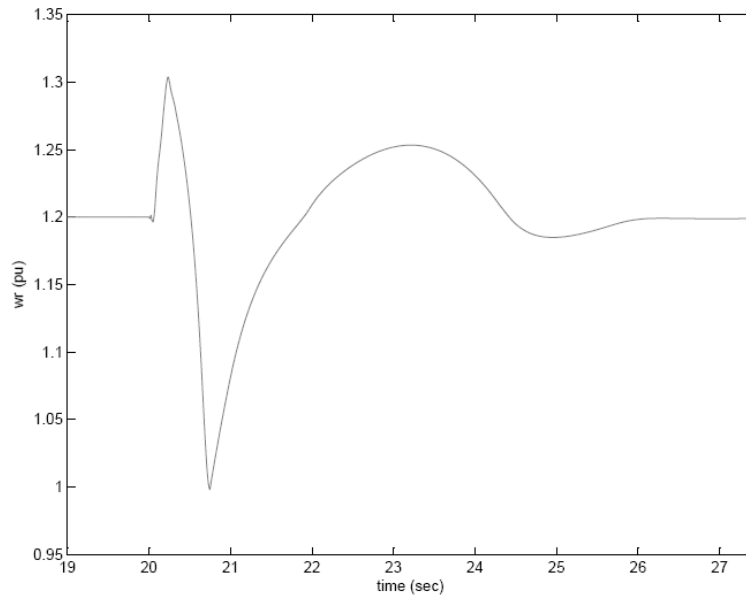
Γράφημα 7.3.2.3. Απόκριση αέργου ισχύος.



Γράφημα 7.3.2.4. Απόκριση ηλεκτρομαγνητικής ροπής.



Γράφημα 7.3.2.5. Απόκριση DC τάσης μετατροπέα.



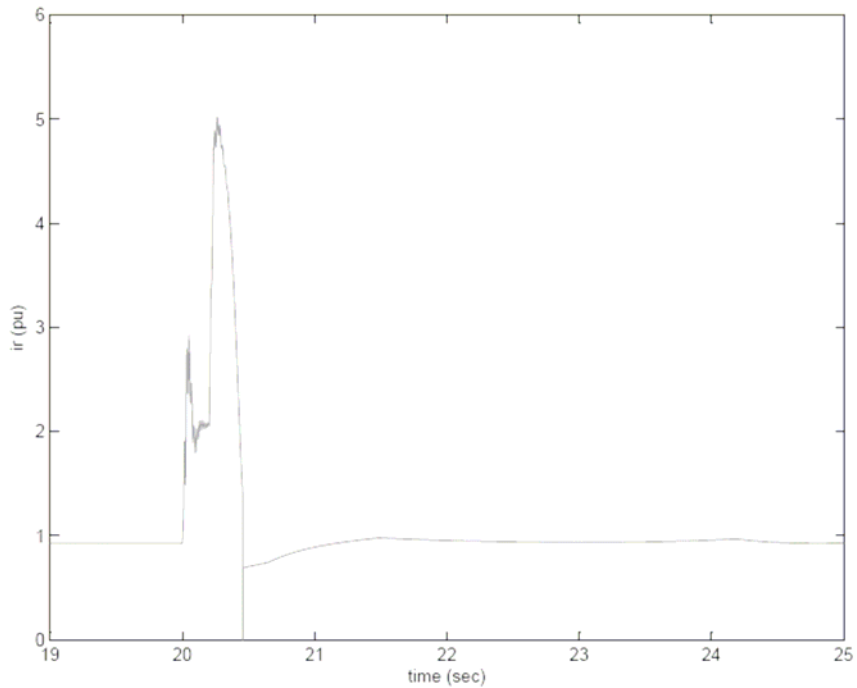
Γράφημα 7.3.2.6. Απόκριση γωνιακής ταχύτητας.

Αμέσως μετά την εμφάνιση του σφάλματος, το crowbar ενεργοποιείται εξ' αιτίας του υψηλού ρεύματος δρομέα. Όσο ο δρομέας είναι βραχυκυκλωμένος μέσω της αντίστασης του crowbar, η μηχανή συμπεριφέρεται σαν απλή μηχανή επαγωγής. Λόγω της μεγάλης ολίσθησης, η μεταβολή της αέργου ισχύος κατά τη διάρκεια του μεταβατικού φαινομένου είναι μεγάλη. Όταν το ρεύμα του δρομέα πέσει κάτω απ' τη μέγιστη τιμή, το crowbar απενεργοποιείται και ο μετατροπέας στην πλευρά του δρομέα συμπεριφέρεται σαν τριφασικός ανορθωτής διόδων. Το ρεύμα του δρομέα μειώνεται γρήγορα στο μηδέν και μετά η μηχανή επιστρέφει γρήγορα σε κανονική λειτουργία.

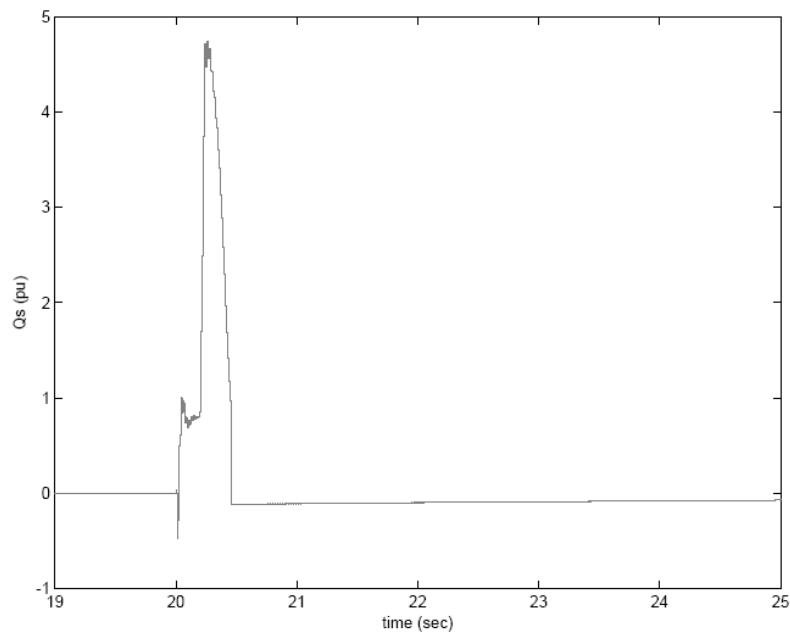
Κατά τη διάρκεια της φάσης σβέσης του ρεύματος δρομέα η DC τάση αυξομειώνεται, ενώ όταν η μηχανή επιστρέψει σε κανονική λειτουργία, η τάση επανέρχεται στην ονομαστική της τιμή μέσω της δράσης του PI ελεγκτή. Ο δρομέας επίσης επιταχύνεται καθώς η μεγάλη βύθιση της τάσης οδηγεί σε μείωση της ροής της μηχανής και επομένως της ηλεκτρομαγνητικής ροπής. Καθώς η ταχύτητα του δρομέα υπερβαίνει την προβλεπόμενη τιμή, ο έλεγχος της γωνίας βήματος αυξάνει την γωνία ώστε να εξάγεται λιγότερη ισχύ από τον άνεμο και να αποφεύγεται η επιτάχυνση του δρομέα. Αυτό οδηγεί στο μεταβατικό που διαρκεί αρκετά sec μετά την αποκατάσταση της τάσης.

- $R_c=0.01$ α.μ.

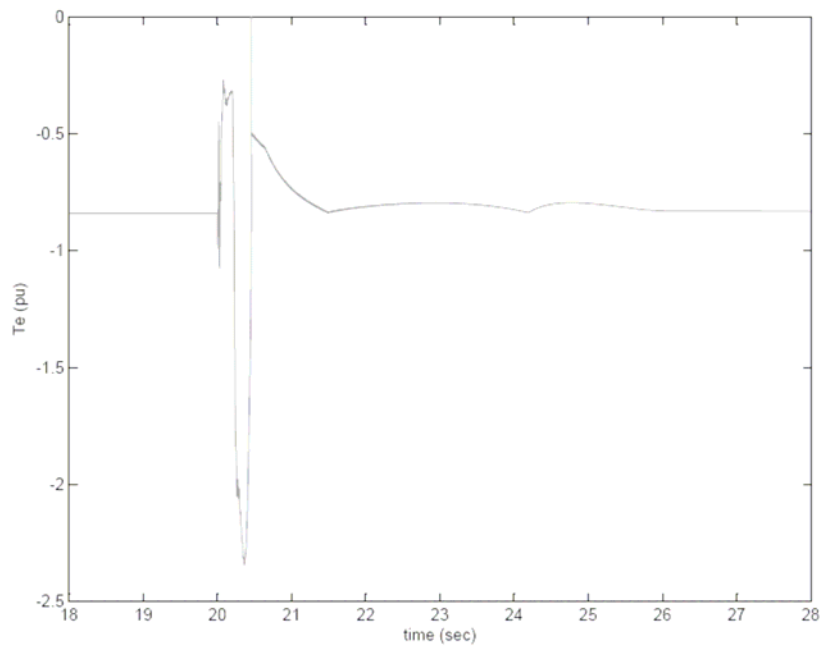
Αυξάνοντας την τιμή της αντίστασης του δρομέα, επιτυγχάνεται πιο γρήγορα η απενεργοποίηση του crowbar.



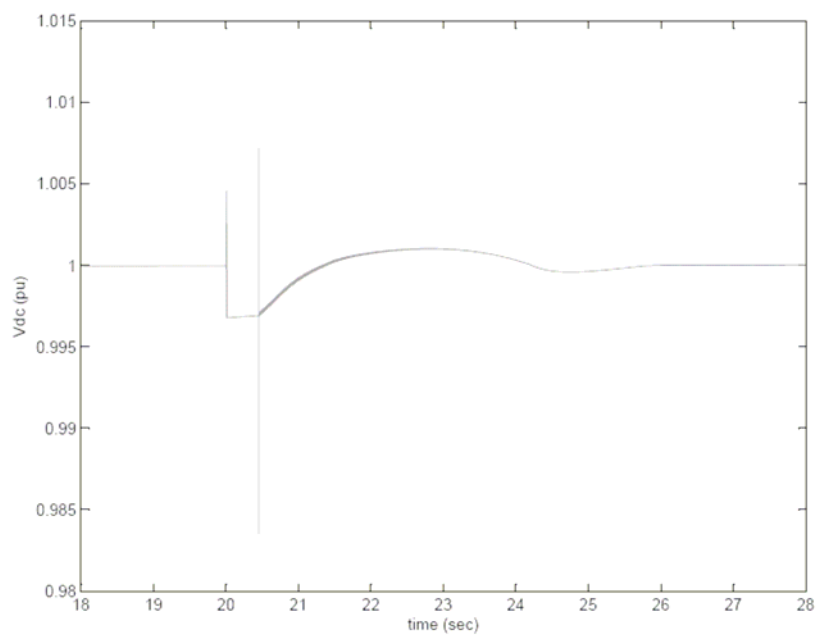
Γράφημα 7.3.2.7. Απόκριση ρεύματος δρομέα.



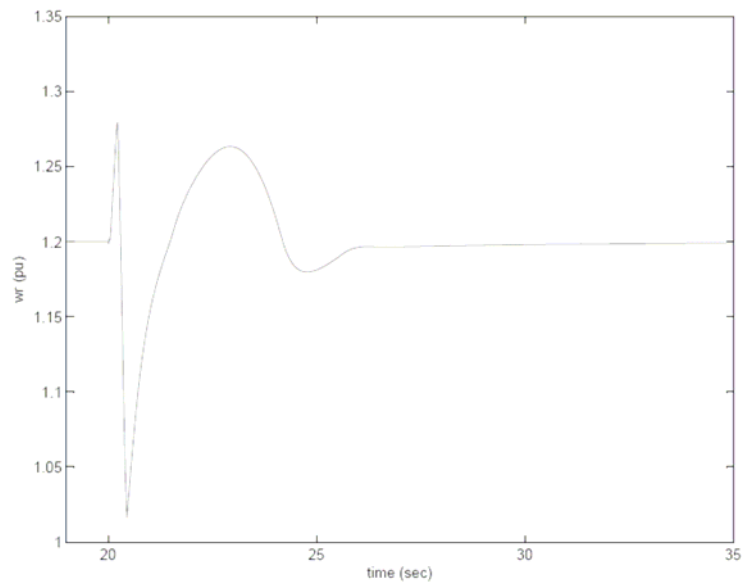
Γράφημα 7.3.2.8. Απόκριση αέργου ισχύος.



Γράφημα 7.3.2.9. Απόκριση ηλεκτρομαγνητικής ροπής.



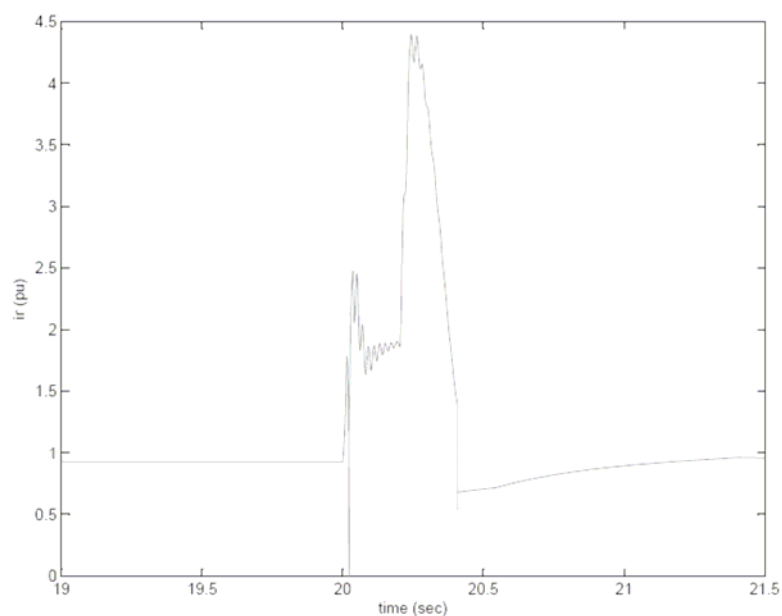
Γράφημα 7.3.2.10. Απόκριση DC τάσης μετατροπέα.



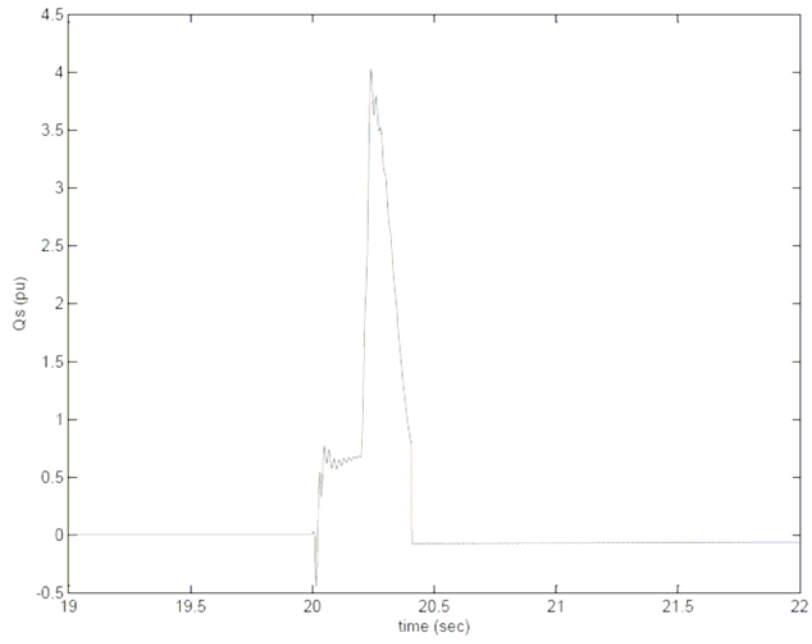
Γράφημα 7.3.2.11. Απόκριση γωνιακής ταχύτητας.

- $R_c=0.02$

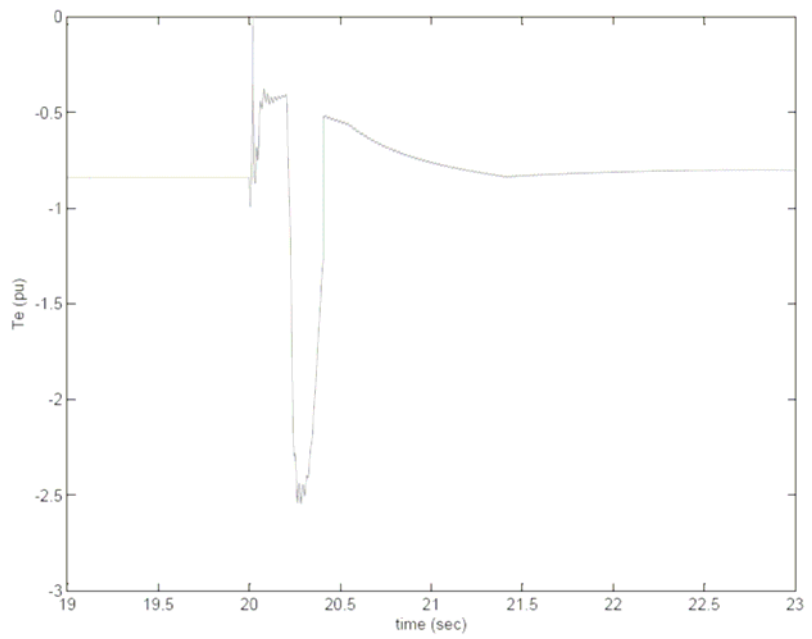
Με αυτή την τιμή της αντίστασης του crowbar, όπως φαίνεται και στα γραφήματα που ακολουθούν, το ρεύμα του δρομέα αποσβαίνεται πολύ γρήγορα. Έτσι μετά την απενεργοποίηση του crowbar την πρώτη φορά, το ρεύμα δρομέα αρχίζει να αυξάνεται και πάλι οδηγώντας σε δεύτερη ενεργοποίηση του crowbar οπότε ακολουθεί στη συνέχεια τη γνωστή λειτουργία που περιγράφεται παραπάνω.



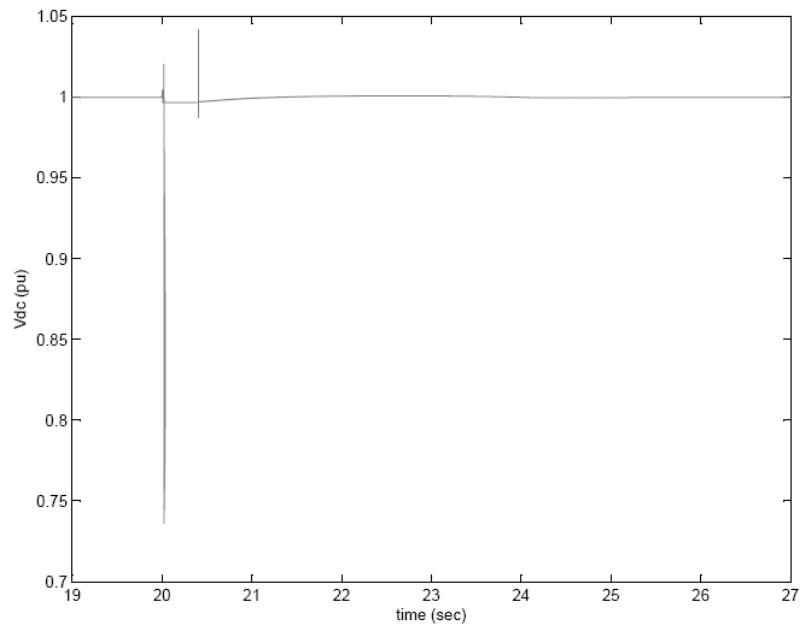
Γράφημα 7.3.2.12. Απόκριση ρεύματος δρομέα.



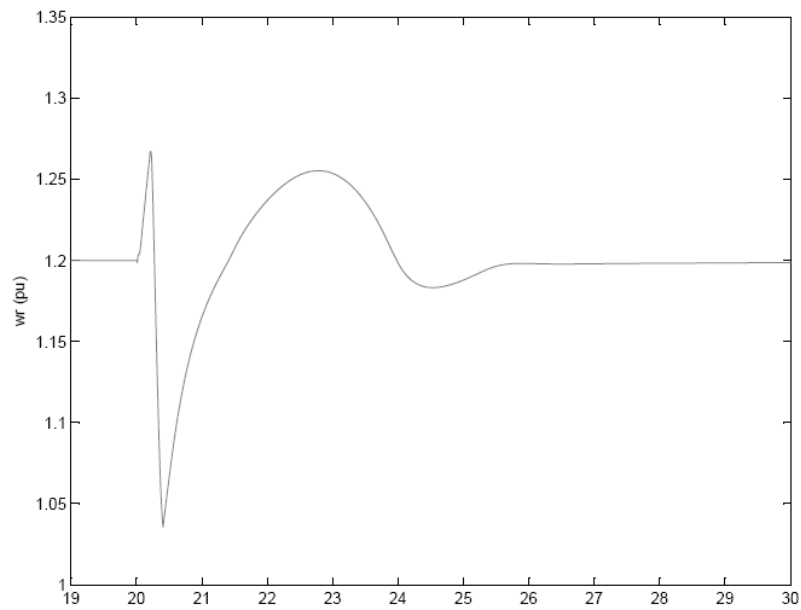
Γράφημα 7.3.2.13. Απόκριση αέργου ισχύος.



Γράφημα 7.3.2.14. Απόκριση ηλεκτρομαγνητικής ροπής.

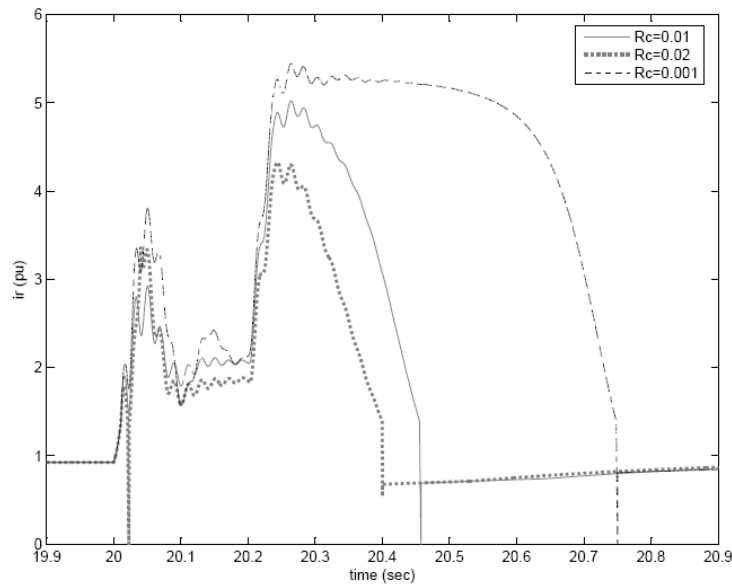


Γράφημα 7.3.2.15. Απόκριση DC τάσης μετατροπέα.



Γράφημα 7.3.2.16. Απόκριση γωνιακής ταχύτητας.

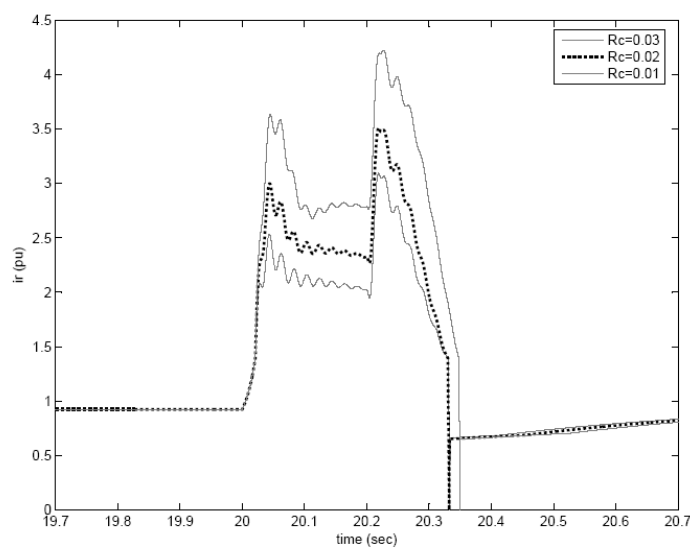
Συνδυάζοντας τα παραπάνω αποτελέσματα για την απόκριση του συστήματος ανάλογα με την αντίσταση του crowbar, μπορούμε να πάρουμε το παρακάτω διάγραμμα ως προς το ρεύμα του δρομέα.



Γράφημα 7.3.2.17. Απόκριση ρεύματος δρομέα για διάφορες τιμές της αντίστασης R_c .

7.3.3. Απόκριση του συστήματος σε βύθιση της τάσης-παραμετρική μελέτη.

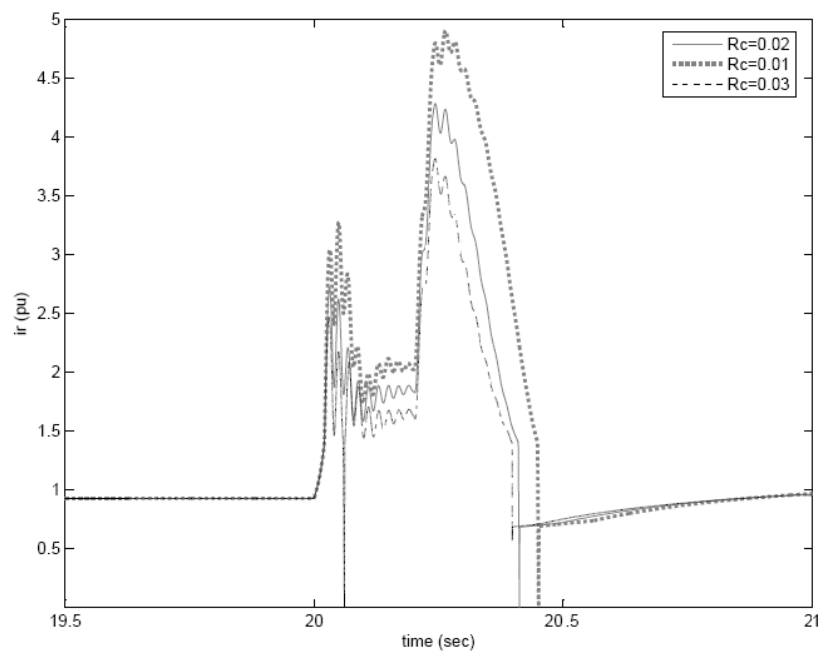
Για να γίνει πιο εμφανής ο ρόλος της τιμής της αντίστασης crowbar R_c στο χρόνο σβέσης του ρεύματος δρομέα εδώ επισυνάπτονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για βύθιση τάσης στα 0.6 α.μ. για 200ms όσον αφορά την τιμή του ρεύματος δρομέα.



Γράφημα 7.3.3.1. Απόκριση ρεύματος δρομέα για διάφορες τιμές της αντίστασης crowbar.

7.3.4. Απόκριση του συστήματος σε βύθιση της τάσης και σε υψηλό άνεμο- παραμετρική μελέτη.

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από τη λειτουργία του LVRT σε συνθήκες υψηλού ανέμου. Μέχρι τώρα όλα τα παραπάνω γραφήματα έχουν εξαχθεί για ταχύτητα ανέμου $V_w=13\text{m/s}$. Το διάγραμμα που ακολουθεί αφορά σύστημα που λειτουργεί σε συνθήκες ανέμου $V_w=17\text{m/s}$ και με βύθιση στην τερματική τάση σε 0.4 α.μ. για 200ms.

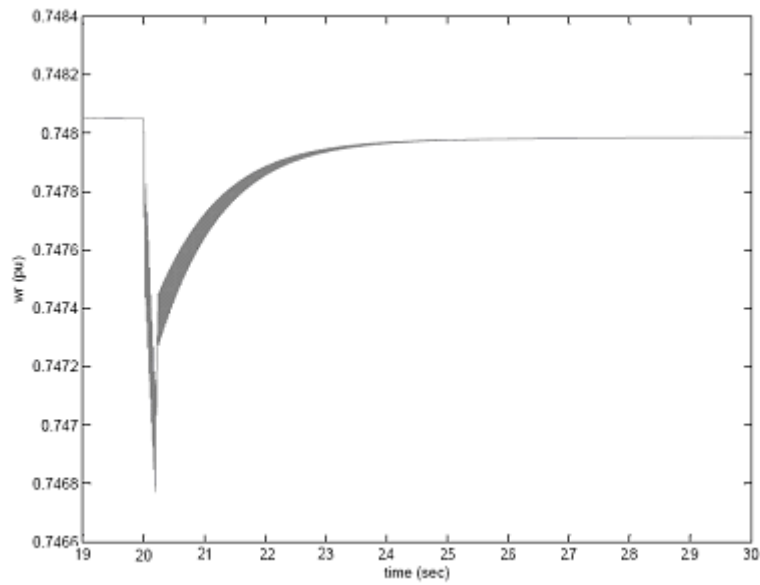


Γράφημα 7.3.4.1. Απόκριση ρεύματος δρομέα για διάφορες τιμές της αντίστασης R_c με ταχύτητα ανέμου $V_w=17\text{m/s}$.

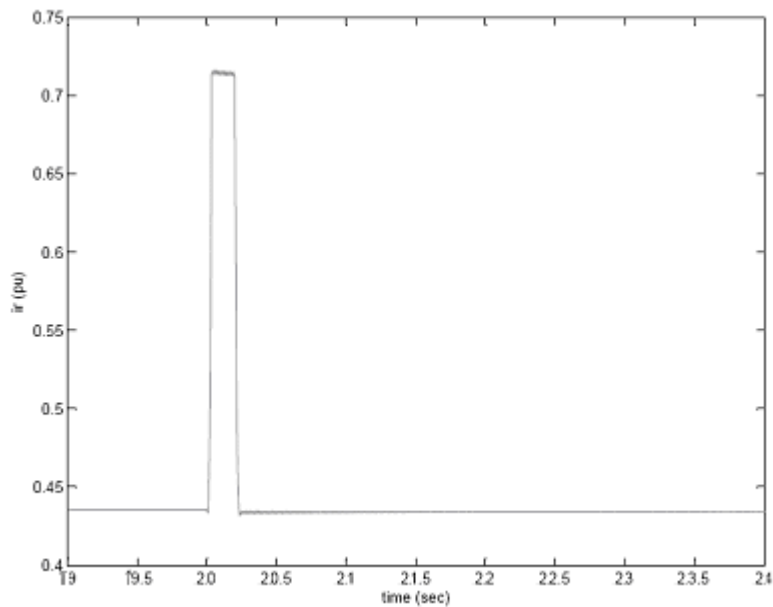
Προκύπτει δηλαδή από τα παραπάνω ότι η συμπεριφορά του συστήματος σε συνθήκες βύθισης τάσης είναι η ίδια ανεξάρτητα από την ταχύτητα ανέμου.

7.3.5. Απόκριση του συστήματος σε βύθιση της τάσης και σε χαμηλό άνεμο

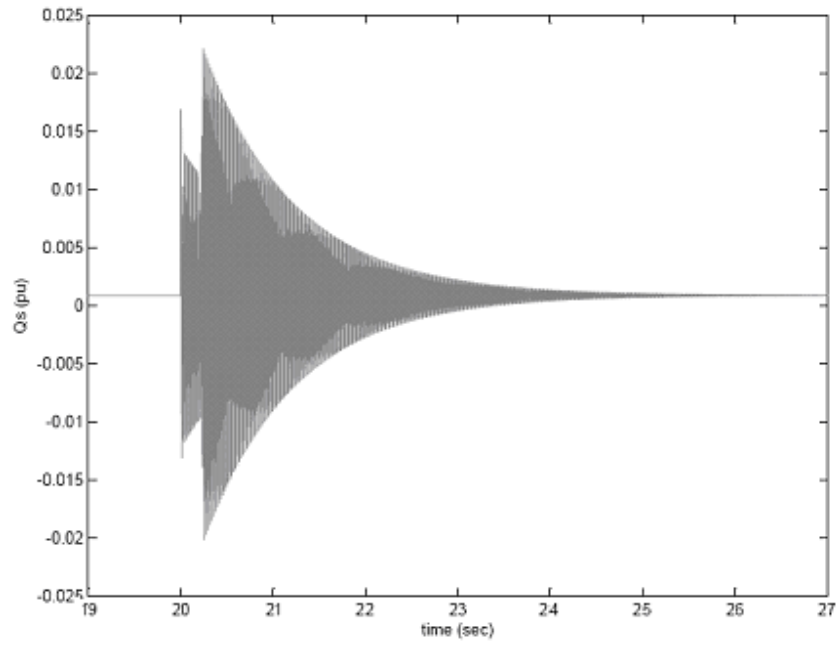
Εφαρμόζοντας την ίδια βύθιση τάσης αλλά σε χαμηλότερο άνεμο, $V_w=7\text{m/s}$, παίρνουμε τα παρακάτω αποτελέσματα.



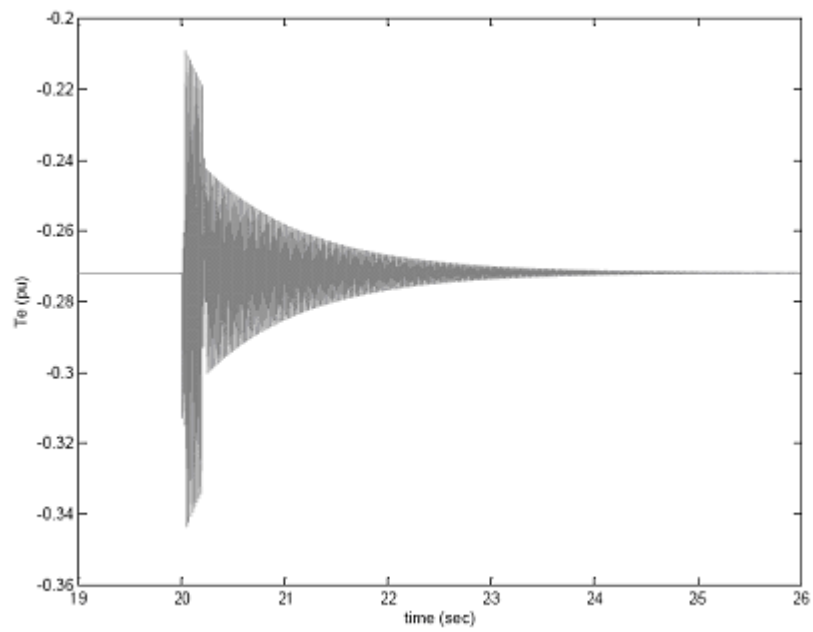
Γράφημα 7.3.5.1. Απόκριση γωνίας περιστροφής.



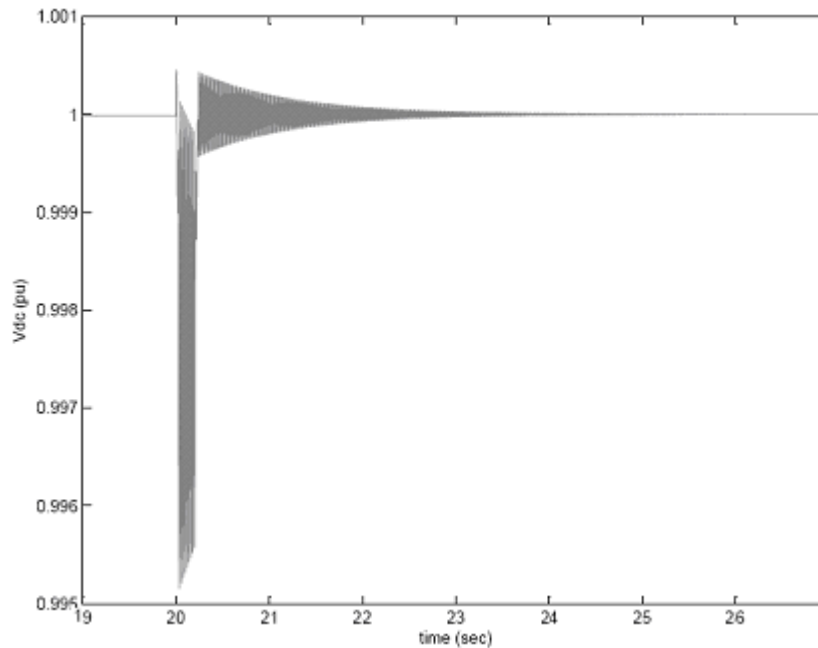
Γράφημα 7.3.5.2. Απόκριση ρεύματος δρομέα.



Γράφημα 7.3.5.3. Απόκριση αέργου ισχύος.



Γράφημα 7.3.5.4. Απόκριση ηλεκτρομαγνητικής ροπής.



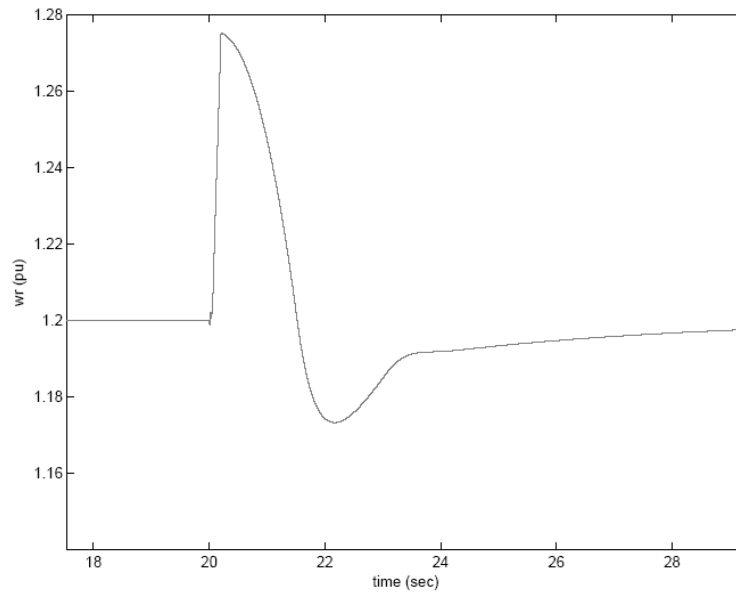
Γράφημα 7.3.5.5. Απόκριση DC τάσης μετατροπέα.

Προκύπτει δηλαδή, ότι αν και εφαρμόζεται η ίδια βύθιση τάσης δεν αναπτύσσεται υψηλό ρεύμα ώστε να υπάρχει κίνδυνος για τον μετατροπέα και ακολούθως να ενεργοποιηθεί ο μηχανισμός LVRT.

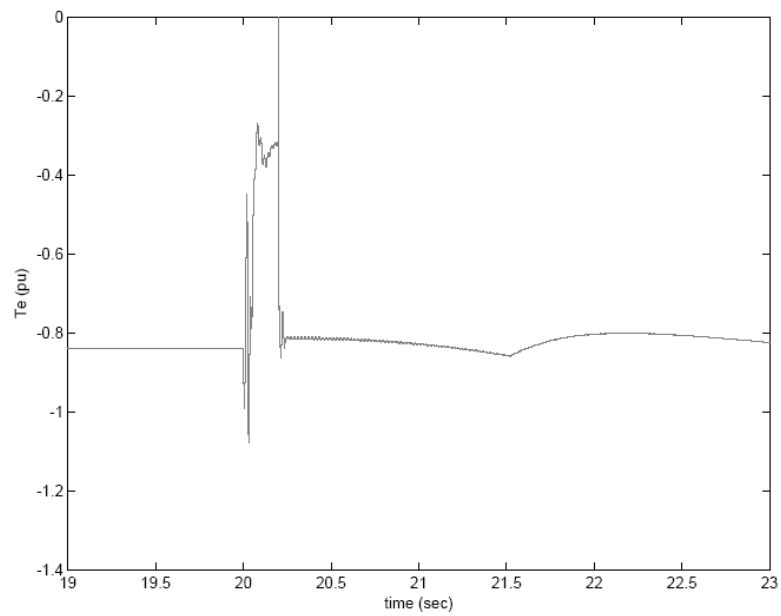
7.3.6. Απόκριση του συστήματος σε βύθιση της τάσης-λειτουργία του μηχανισμού προστασίας LVRT με χρονικό περιορισμό στο crowbar.

Όπως παρουσιάστηκε παραπάνω, σε σημαντικές βυθίσεις τάσης το σύστημα αντιδρά κάποιες φορές με πολλαπλά ανοίγματα του crowbar που είναι μη αποδεκτή λειτουργική κατάσταση. Στη βιβλιογραφία έχουν προταθεί κάποιες λύσεις για την αντιμετώπιση αυτού. Μια μέθοδος ελέγχου για την απενεργοποίηση του crowbar, που εξετάζεται εδώ, είναι η χρήση χρονικής καθυστέρησης πριν την απόπειρα για την επιστροφή σε λειτουργία μετατροπέα. Υποθέτοντας ότι, το crowbar αυτομάτως απενεργοποιείται κάποια ms μετά την ενεργοποίηση του με την προϋπόθεση βέβαια ότι οι τιμές του ρεύματος και της DC τάσης του μετατροπέα το επιτρέπουν, και ότι, οι δίοδοι του μετατροπέα μπορούν να αντέξουν τις υψηλές μεταβατικές τιμές του ρεύματος, παίρνουμε τις παρακάτω αποκρίσεις για βύθιση της τάσης στα 0.4 α.μ. για 200 ms.

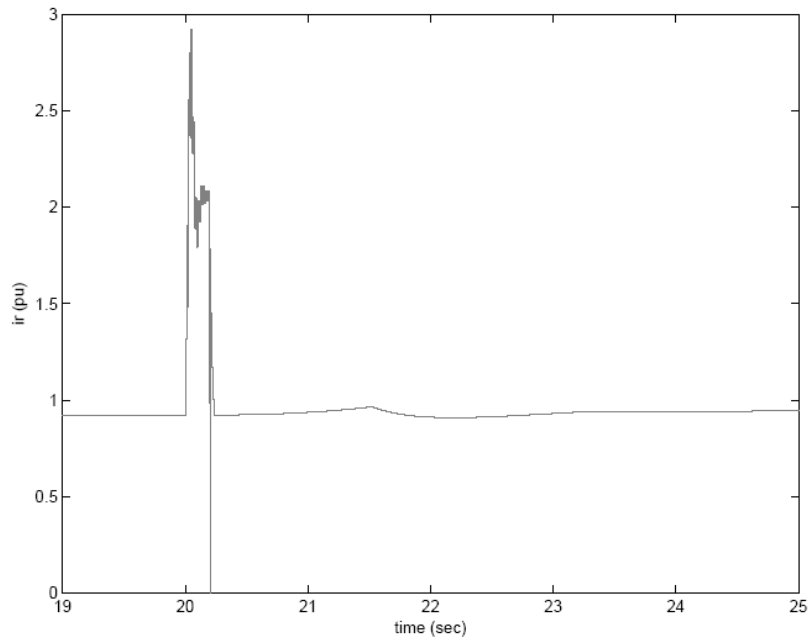
- Αντίσταση crowbar $R_c=0.01$ α.μ.



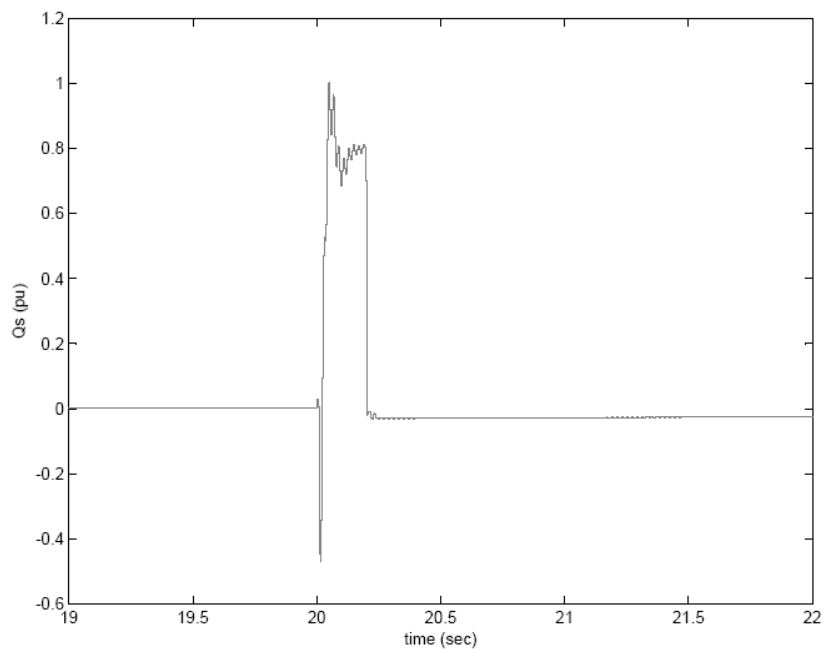
Γράφημα 7.3.6.1. Απόκριση γωνιακής ταχύτητας.



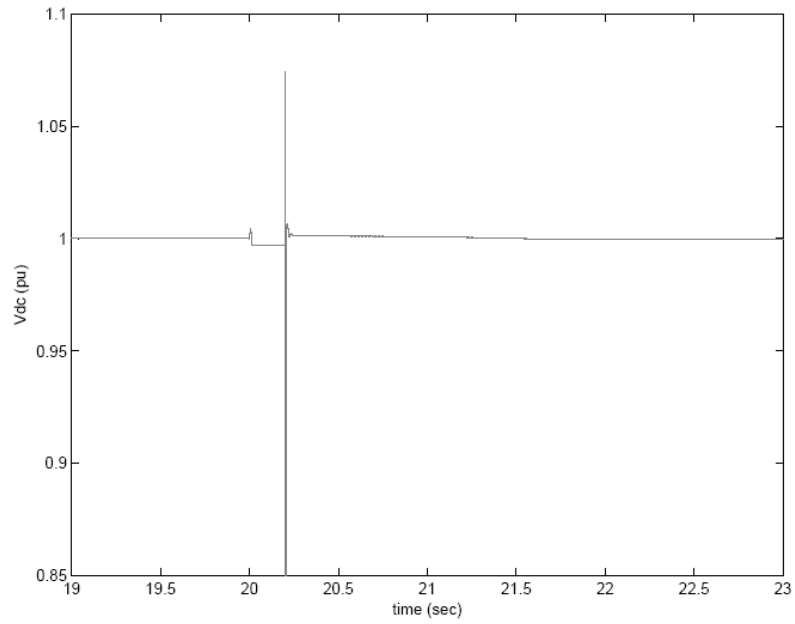
Γράφημα 7.3.6.2. Απόκριση ηλεκτρομαγνητικής ροπής.



Γράφημα 7.3.6.3. Απόκριση ρεύματος δρομέα.

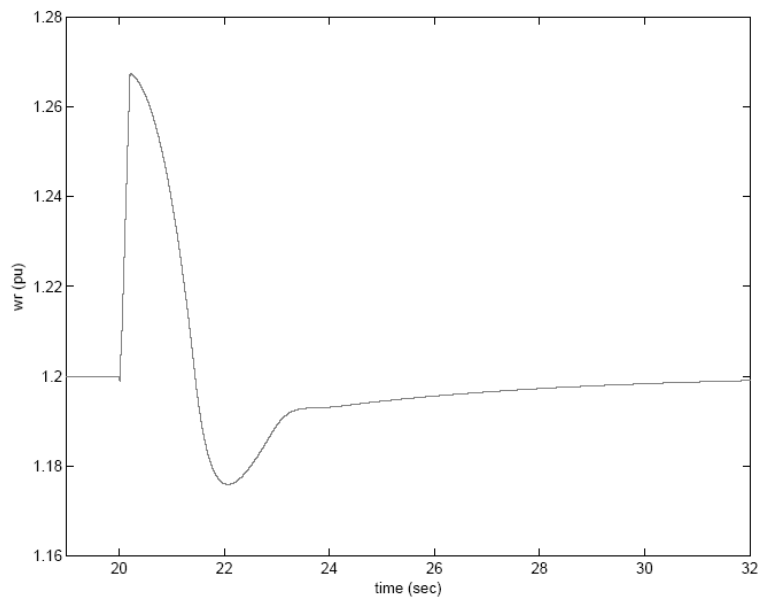


Γράφημα 7.3.6.5. Απόκριση αέργου ισχύος.

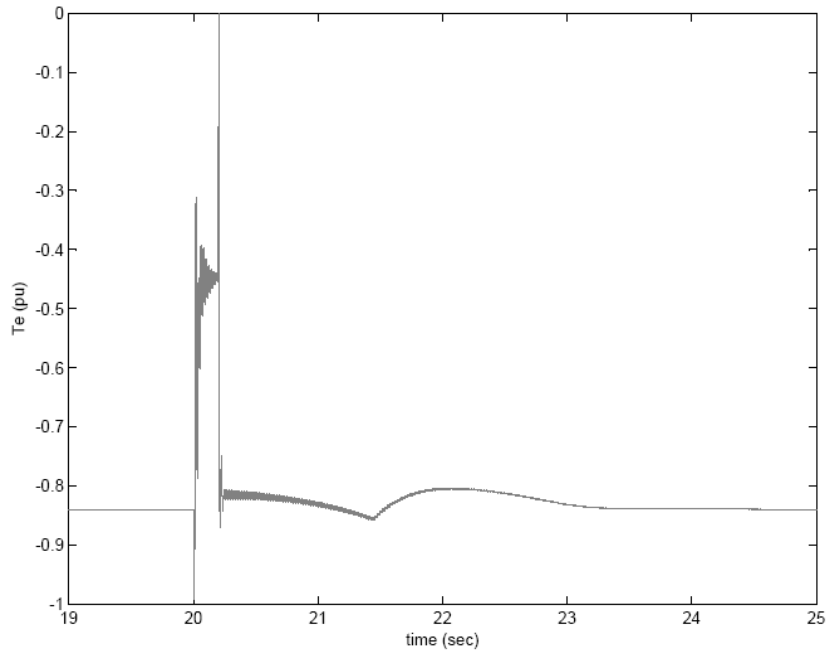


Γράφημα 7.3.6.6. Απόκριση DC τάσης μετατροπέα..

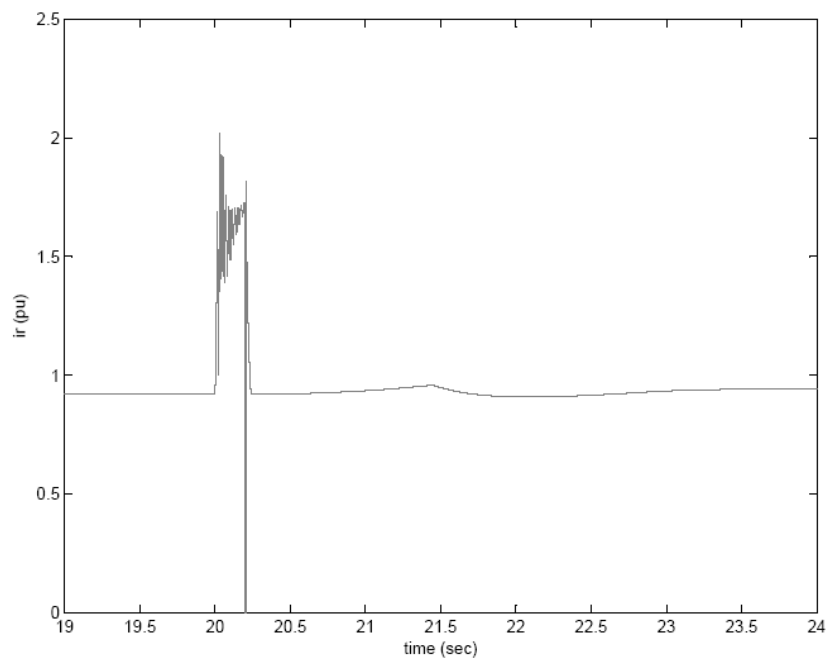
- Αντίσταση crowbar $R_c=0.03$ α.μ.



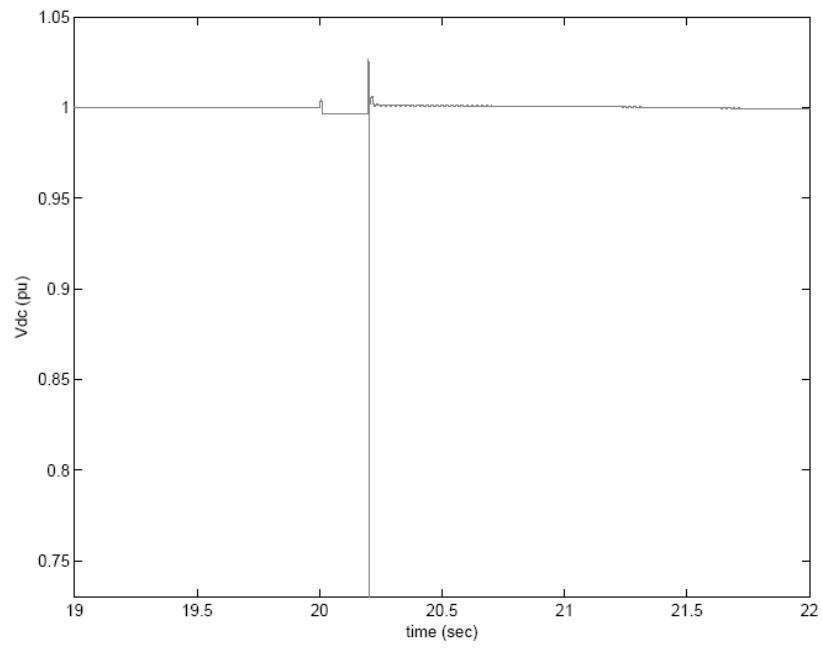
Γράφημα 7.3.6.6. Απόκριση γωνιακής ταχύτητας.



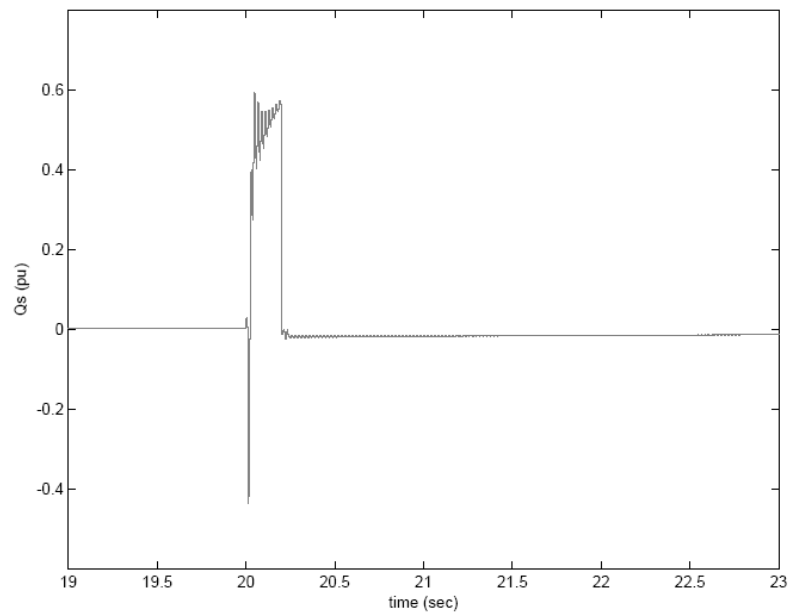
Γράφημα 7.3.6.7. Απόκριση ηλεκτρομαγνητικής ροπής.



Γράφημα 7.3.6.8. Απόκριση ρεύματος δρομέα.

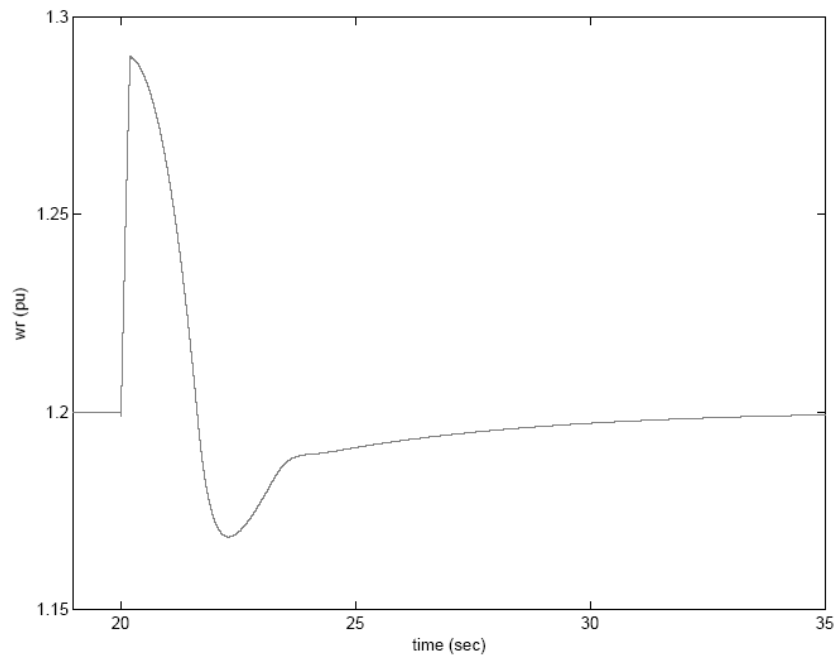


Γράφημα 7.3.6.9. Απόκριση DC τάσης μετατροπέα.

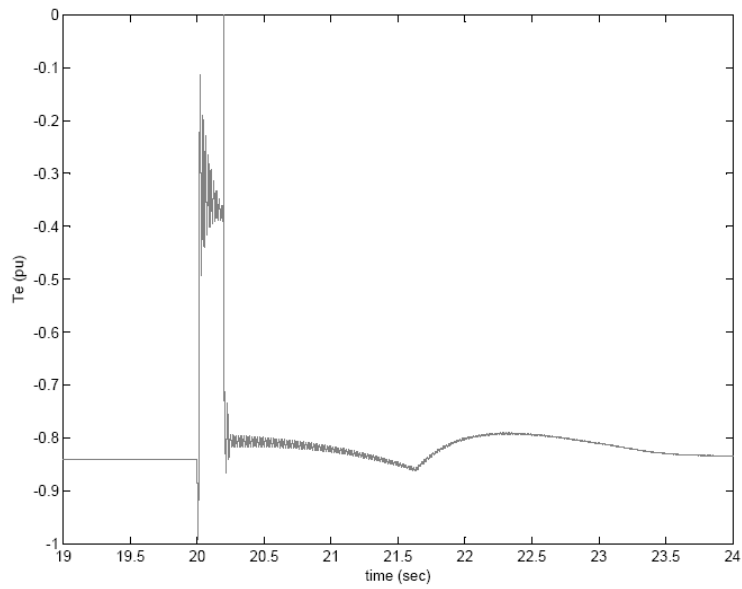


Γράφημα 7.3.6.10. Απόκριση αέργου ισχύος.

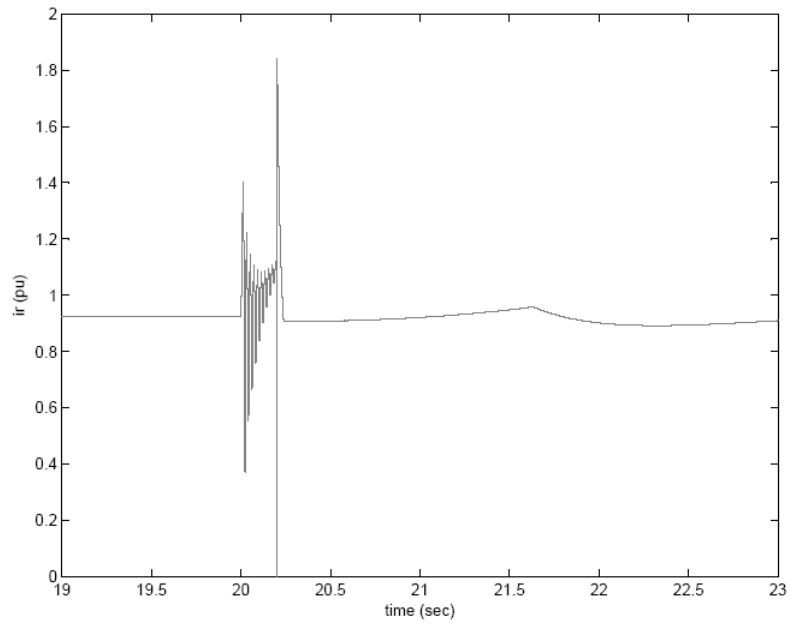
- Αντίσταση crowbar $R_c=0.08$ α.μ.



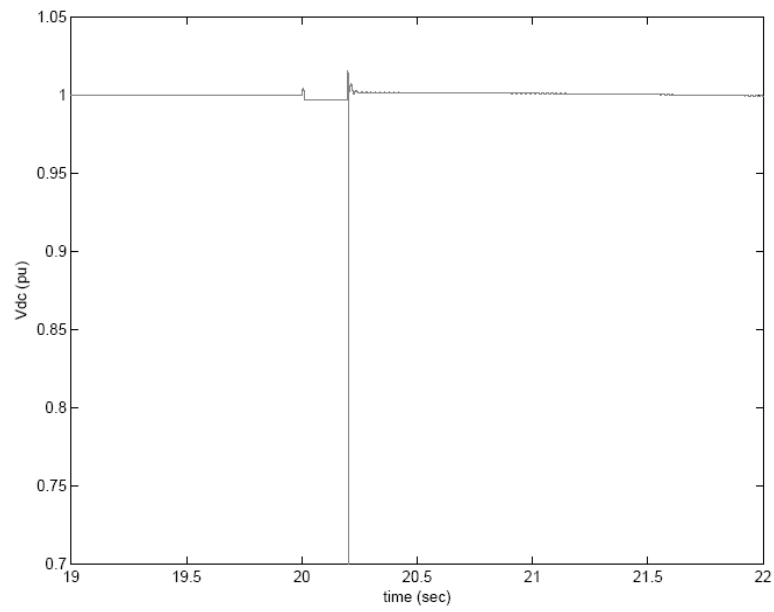
Γράφημα 7.3.6.11. Απόκριση γωνιακής ταχύτητας.



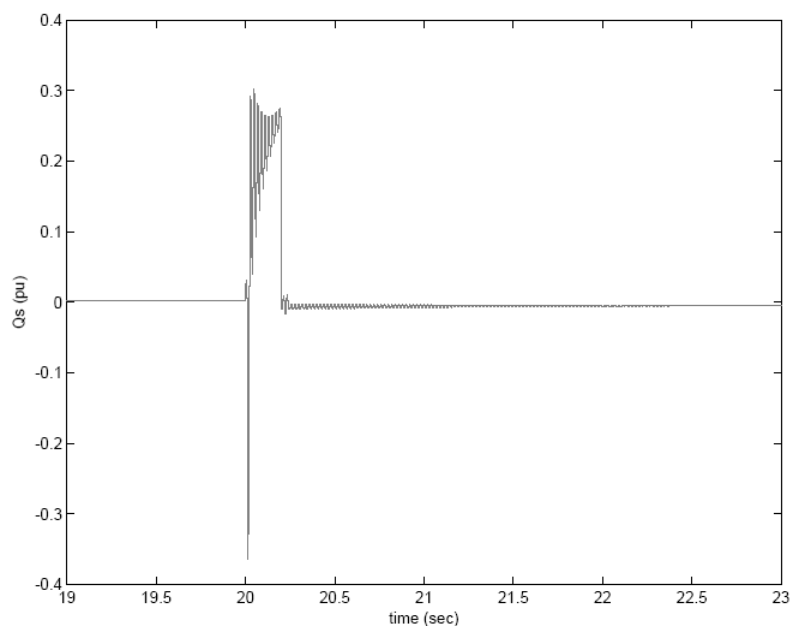
Γράφημα 7.3.6.12. Απόκριση ηλεκτρομαγνητικής ροπής.



Γράφημα 7.3.6.13. Απόκριση ρεύματος δρομέα.



Γράφημα 7.3.6.14. Απόκριση DC τάσης μετατροπέα.



Γράφημα 7.3.6.15. Απόκριση αέργου ισχύος.

7.4. Απόκριση του συστήματος σε βύθιση της τάσης –σύγκριση αποτελεσμάτων με χρήση μοντέλου 5^{ης} και μοντέλου 3^{ης} τάξης.

7.4.1. Εισαγωγή

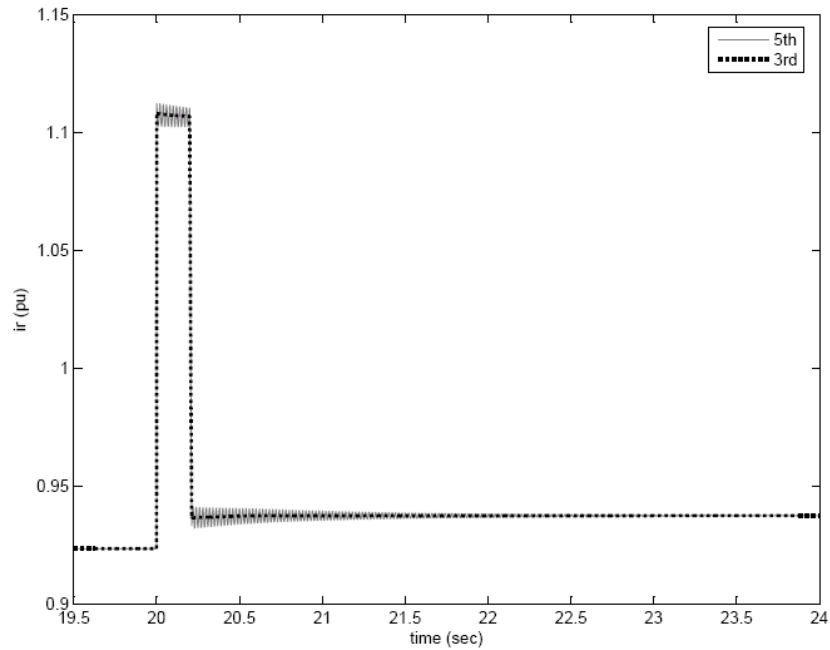
Σε προηγούμενη ενότητα της παρούσας εργασίας (βλέπε Ενότητα 2.4.2.3) είχε γίνει ένας σχολιασμός όσον αφορά τα μοντέλα 5^{ης} και 3^{ης} τάξης και το κατά πόσον επηρεάζουν τα συμπεράσματα των προσομοιώσεων ανάλογα με το στόχο της μελέτης. Στο σημείο αυτό επιχειρήθηκε να δοθούν κάποια αποτελέσματα προσομοιώσεων με βύθιση τάσης έτσι ώστε να προκύψουν συμπεράσματα γύρω από το ζήτημα αγνόησης των μεταβατικών του στάτη.

Σημειώνεται ότι τα αποτελέσματα που ακολουθούν έχουν ληφθεί από προσομοιώσεις, στις οποίες ο άνεμος είναι σταθερός και ίσος με την τιμή που είχε στην αρχικοποίηση, δηλαδή $V_w=13\text{m/s}$.

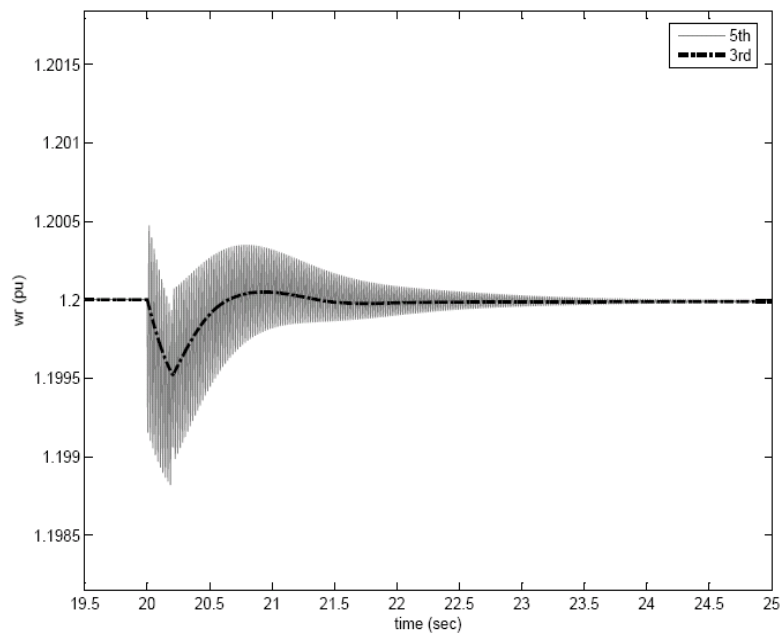
7.4.2. Απόκριση των δύο μοντέλων σε μικρή βύθιση τάσης.

Εφαρμόζοντας βύθιση τάσης στον τερματικό ζυγό σε 0.9 α.μ. για 200ms και έχοντας ρυθμίσει την αντίσταση του crowbar σε 0.01 α.μ. προέκυψαν τα παρακάτω

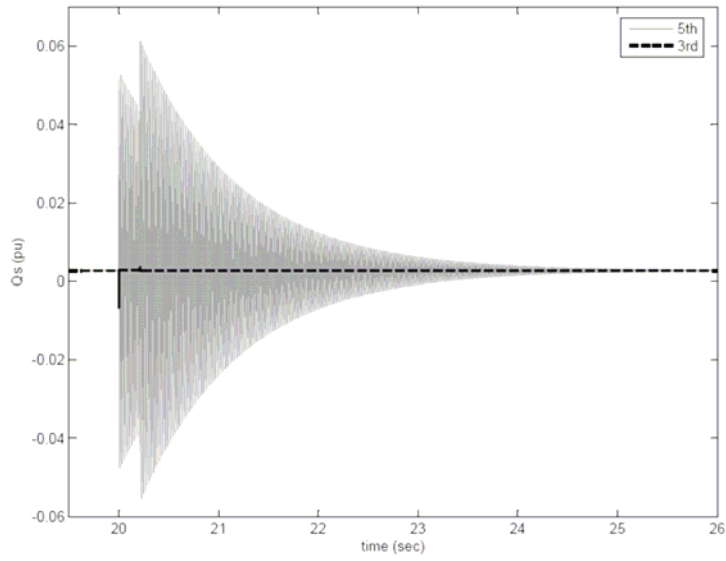
αποτελέσματα. Σημειώνεται ότι δεν έγινε ενεργοποίηση του συστήματος προστασίας καθώς τα αναπτυσσόμενα ρεύματα δεν πλησίασαν την κρίσιμη τιμή. Παρ' όλα αυτά, είναι ευδιάκριτα στα γραφήματα που ακολουθούν τα μεταβατικά των 50Hz στο μοντέλο 5^{ης} τάξης σε σχέση με το μοντέλο 3^{ης} τάξης.



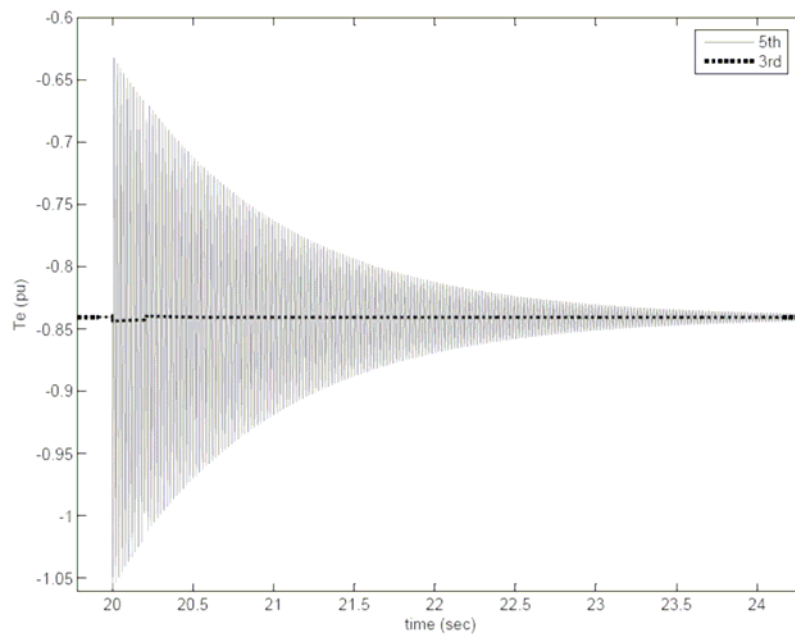
Γράφημα 7.4.2.1. Απόκριση ρεύματος δρομέα.



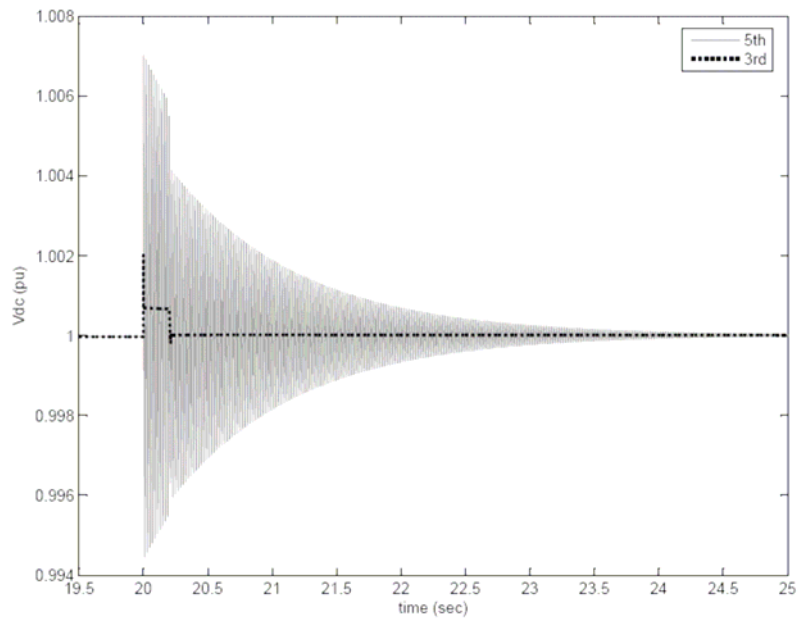
Γράφημα 7.4.2.2. Απόκριση γωνιακής ταχύτητας περιστροφής.



Γράφημα 7.4.2.3. Απόκριση αέργου ισχύος.



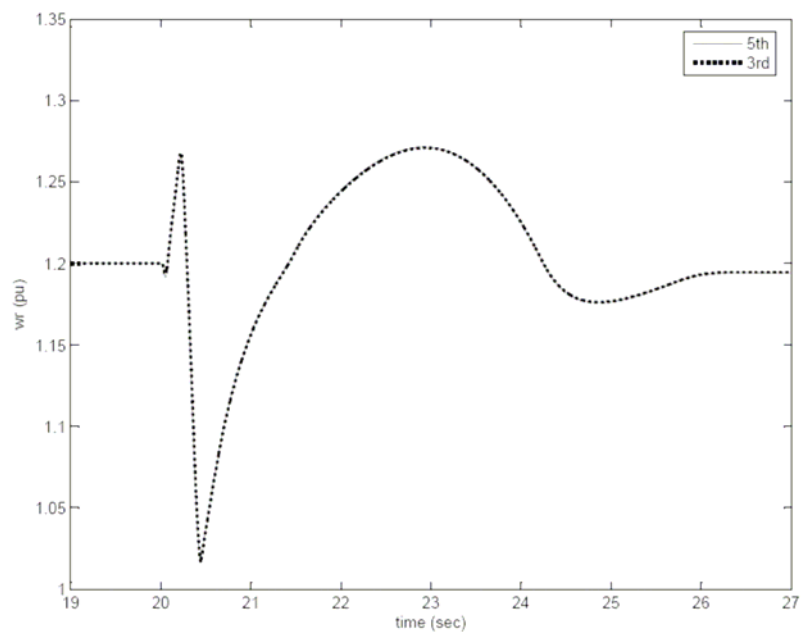
Γράφημα 7.4.2.4. Απόκριση ηλεκτρομαγνητικής ροπής.



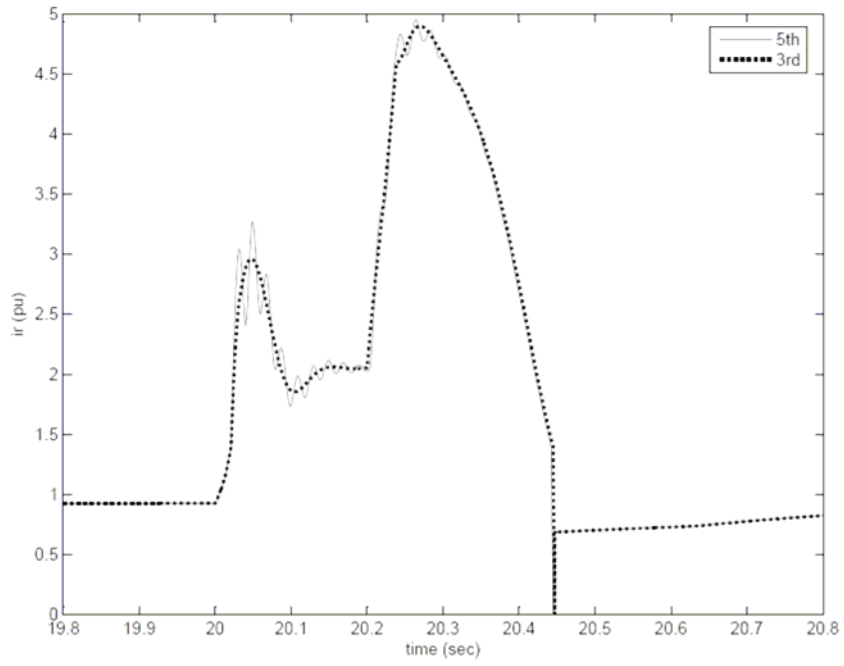
Γράφημα 7.4.2.5. Απόκριση DC τάσης του μετατροπέα.

7.4.3. Απόκριση των δύο μοντέλων σε σημαντική βύθιση τάσης.

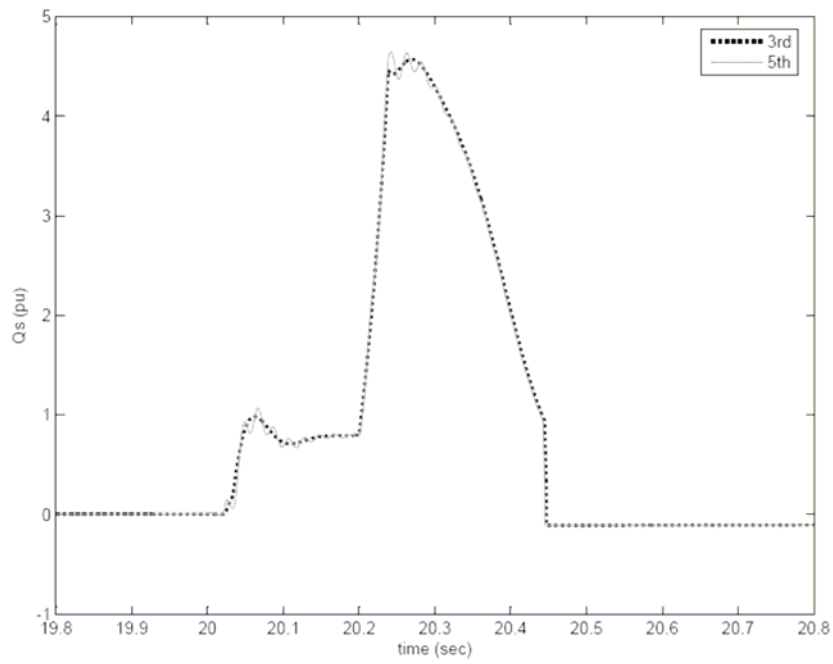
Εφαρμόζοντας βύθιση τάσης 0.4 α.μ για 200ms πήραμε τα παρακάτω αποτελέσματα για αντίσταση crowbar $R_c=0.01$ α.μ. Σε όποιο γράφημα κρίνεται απαραίτητο γίνεται μεγέθυνση κατάλληλη για να γίνουν εμφανές οι διαφοροποιήσεις μεταξύ των δύο μοντέλων.



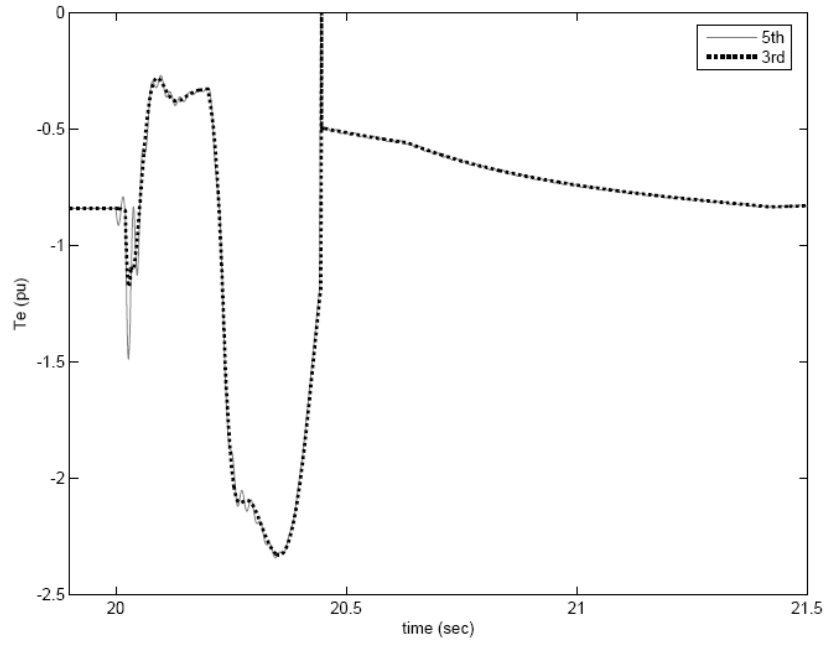
Γράφημα 7.4.3.1. Απόκριση γωνιακής ταχύτητας περιστροφής.



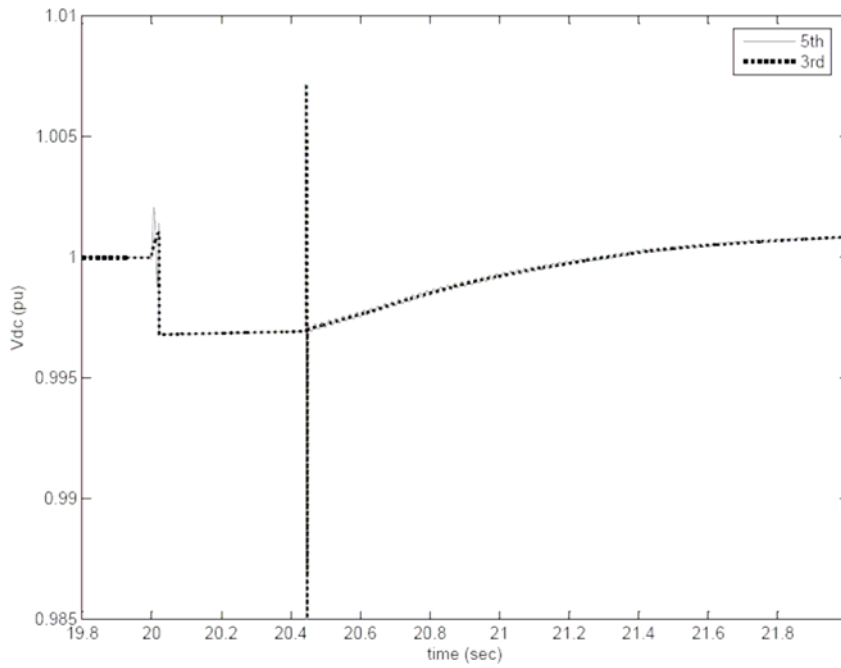
Γράφημα 7.4.3.2. Απόκριση ρεύματος δρομέα.



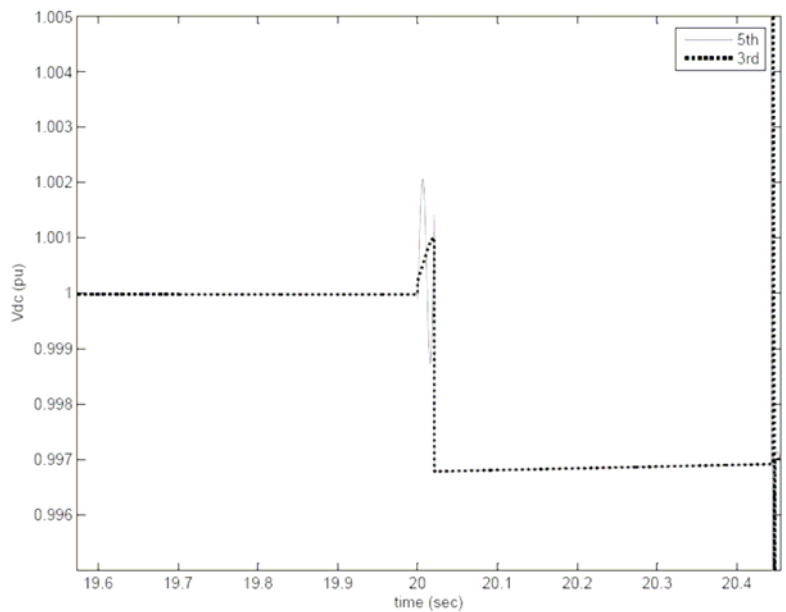
Γράφημα 7.4.3.3. Απόκριση αέργου ισχύος.



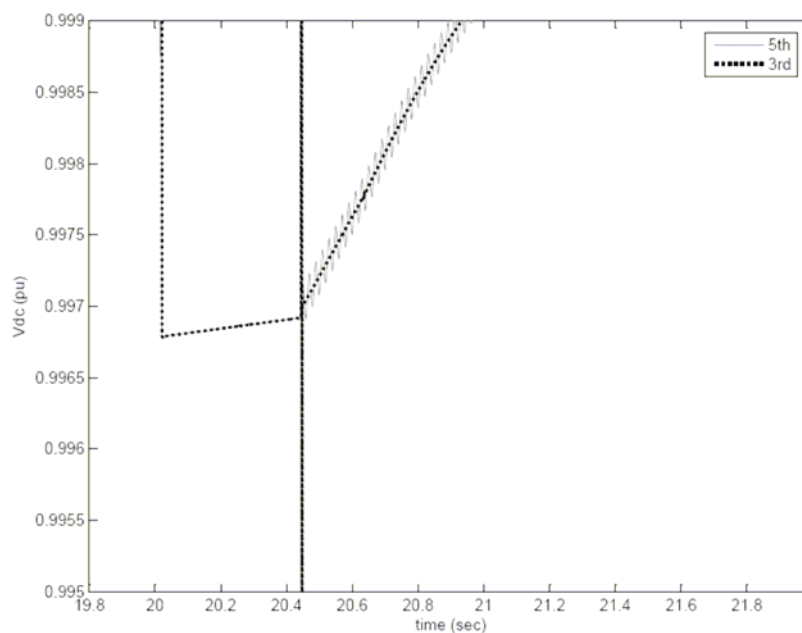
Γράφημα 7.4.3.4. Απόκριση ηλεκτρομαγνητικής ροπής.



Γράφημα 7.4.3.5. Απόκριση DC τάσης του μετατροπέα.

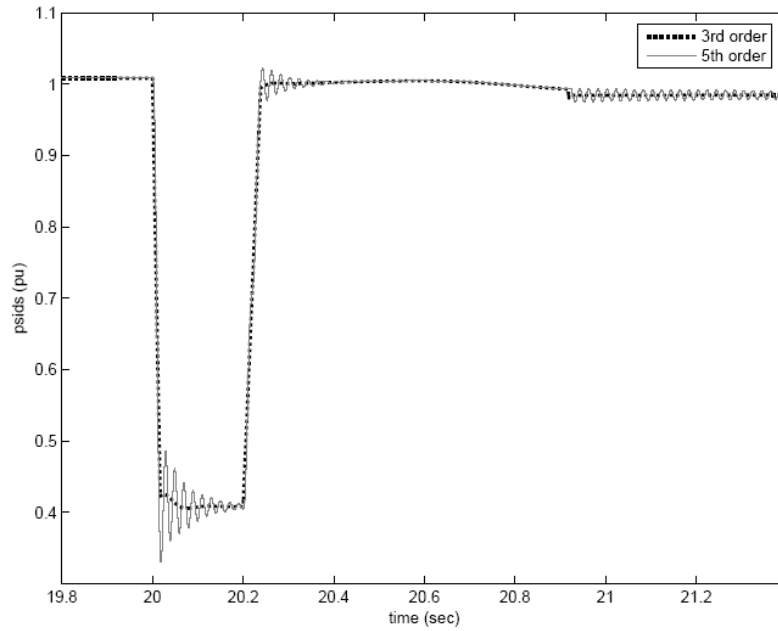


Γράφημα 7.4.3.6. Απόκριση DC τάσης του μετατροπέα - Μεγέθυνση στη χρονική στιγμή ενεργοποίησης του crowbar.



Γράφημα 7.4.3.7. Απόκριση DC τάσης του μετατροπέα- Μεγέθυνση στη χρονική στιγμή απενεργοποίησης του crowbar.

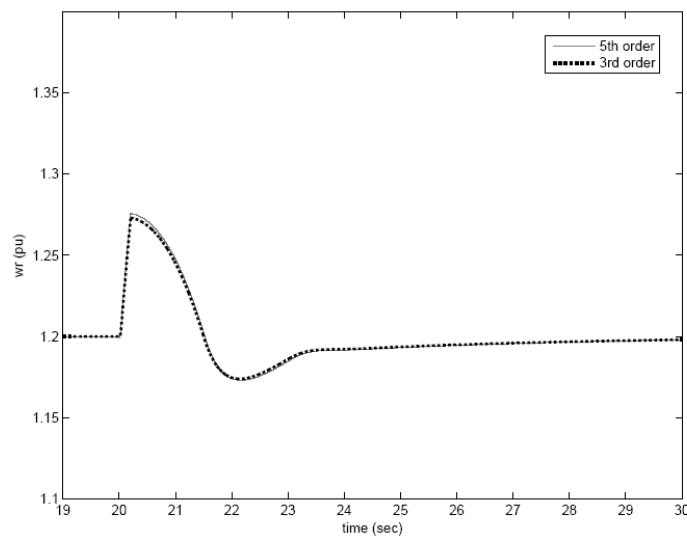
Στο παρακάτω γράφημα παρουσιάζεται η απόκριση της συνιστώσας της ροής του στάτη στον άξονα d. Φαίνονται ευδιάκριτα τα μεταβατικά θεμελιώδους συνιστώσας (50 Hz) που εμφανίζονται στο μοντέλο 5^{ης} τάξης.



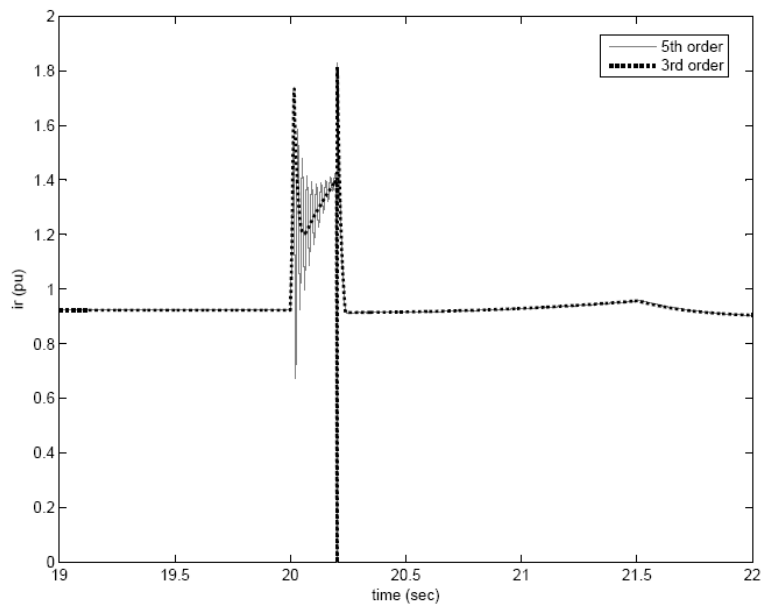
Γράφημα 7.4.3.8. Απόκριση συνιστώσας d της ροής του στάτη Ψ_s .

7.4.4. Απόκριση των δύο μοντέλων σε σημαντική βύθιση τάσης-λειτουργία του μηχανισμού προστασίας με χρονικό περιορισμό του crowbar.

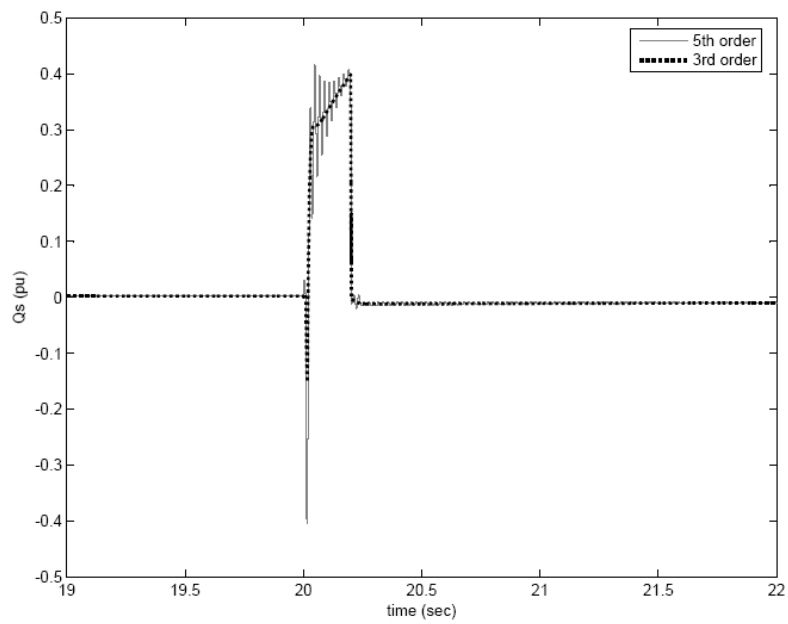
Όπως αναφέρθηκε και στην ενότητα 7.3.6., εδώ δοκιμάζεται η χρήση χρονικού περιορισμού στη λειτουργία του crowbar. Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για βύθιση τάσης που εφαρμόζεται και στα δύο μοντέλα στα 0.4 α.μ. για 200 ms.



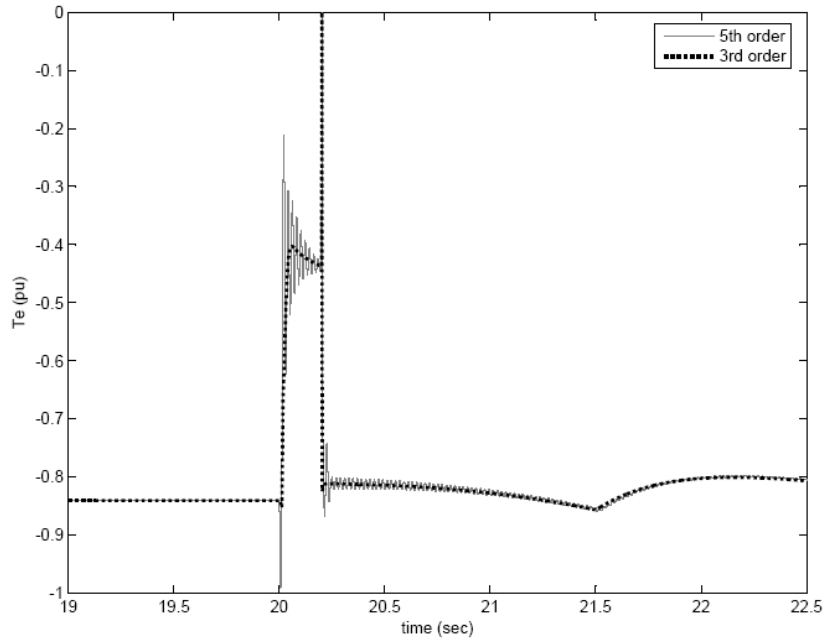
Γράφημα 7.4.4.1. Απόκριση γωνιακή ταχύτητας περιστροφής.



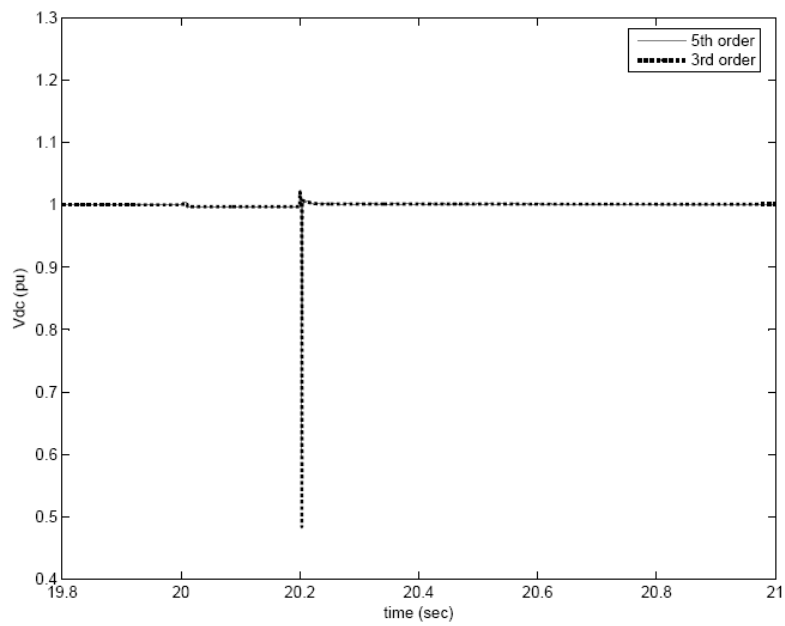
Γράφημα 7.4.4.2. Απόκριση ρεύματος δρομέα.



Γράφημα 7.4.4.3. Απόκριση αέργου ισχύος.



Γράφημα 7.4.4.4. Απόκριση ηλεκτρομαγνητικής ροπής.



Γράφημα 7.4.4.5. Απόκριση DC τάσης του μετατροπέα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8

Γενικά σχόλια και συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική προσομοιώθηκε και μελετήθηκε μια ανεμογεννήτρια μεταβλητών στροφών με γεννήτρια επαγωγής διπλής τροφοδότησης, με κιβώτιο ταχυτήτων και με ελεγκτή βήματος των πτερυγίων (γνωστό στη διεθνή βιβλιογραφία ως pitch control), με τη βοήθεια του λογισμικού Matlab/Simulink. Το πρώτο βασικό τμήμα της εργασίας ασχολείται με τη μοντελοποίηση και τα λειτουργικά χαρακτηριστικά μόνιμης κατάστασης της συγκεκριμένης ανεμογεννήτριας. Το δεύτερο κομμάτι ασχολείται με τις δυνατότητες του συστήματος που μοντελοποιήθηκε για παραμονή σε λειτουργία κατά τη διάρκεια βυθίσεων τάσης στον τερματικό ζυγό της γεννήτριας.

Έγινε ακριβής μαθηματική μοντελοποίηση του αεροδυναμικού μέρους της ανεμογεννήτριας και υλοποιήθηκε ο ελεγκτής του βήματος γωνίας των πτερυγίων. Οι παράμετροι του ελεγκτή διαπιστώθηκε ότι επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό την απόκριση του αεροδυναμικού μέρους σε μεταβολές του ανέμου. Με κριτήριο την καλύτερη δυνατή απόκριση του ελέγχου της γωνία κλίσης των πτερυγίων επιλέχθηκαν οι παράμετροι με τους οποίους τελικά μοντελοποιήθηκε το σύστημα

Οι εξισώσεις της μηχανής εκφράστηκαν σε dq πλαίσιο με βάση τις γνωστή θεωρία μετασχηματισμών και πλαισίων αναφοράς. Συμπεριλήφθησαν τα μεταβατικά του στάτη στις εξισώσεις της μηχανής δίνοντας το μοντέλο 5^{ης} τάξης της μηχανής, ενώ κατά τις προσομοιώσεις έγιναν και συγκρίσεις με τα αντίστοιχα αποτελέσματα του απλοποιημένου μοντέλου 3^{ης} τάξης. Υιοθετήθηκε η μέθοδος του διανυσματικού ελέγχου με κατάλληλα πλαίσια αναφοράς για κάθε έναν από τους δύο μετατροπείς που συνδέονται στο δρομέα της γεννήτριας επαγωγής διπλής τροφοδότησης.

Υλοποιήθηκε μια συγκεκριμένη στρατηγική ελέγχου της ταχύτητας του δρομέα. Συγκεκριμένα με βάση τη χαρακτηριστική ελέγχου ταχύτητας, η οποία προκύπτει με

κριτήρια βελτιστοποίησης της παραγόμενης ισχύος για κάθε ταχύτητα ανέμου μικρότερης της ονομαστικής και την πραγματική τιμή της ταχύτητας περιστροφής του δρομέα προκύπτει η τιμή αναφοράς για την ηλεκτρική ροπή που αναπτύσσεται. Αυτή με τη σειρά της δίνει την τιμή αναφοράς για τη μία από τις δύο συνιστώσες του ρεύματος του δρομέα (i_{qr}^*). Η άεργος ισχύς, από την άλλη πλευρά, που εισέρχεται στο στάτη της μηχανής εξαρτάται από την άλλη συνιστώσα του ρεύματος του δρομέα (i_{dr}). Η τιμή αναφοράς της άεργου ισχύος προκύπτει από τον τρόπο ελέγχου του μετατροπέα στην πλευρά του δικτύου (έλεγχος τερματικής τάσης ή έλεγχος συντελεστή ισχύος). Άρα η γεννήτρια επαγωγής διπλής τροφοδότησης είναι σε θέση να μεταβάλλει την άεργο ισχύ που ανταλλάσσει με το δίκτυο και άρα να συμβάλλει στον έλεγχο της τερματικής τάσης. Οι δοκιμές που έγιναν με το μοντέλο που αναπτύχθηκε έγιναν με τον ελεγκτή άεργου ισχύος σε κατάσταση σταθερού συντελεστή ισχύος (μοναδιαίος).

Με κατάλληλη επιλογή του πλαισίου αναφοράς για το μετατροπέα από την πλευρά του δικτύου εξασφαλίζεται ότι η άεργος που ανταλλάσσεται ανάμεσα στο μετατροπέα και το δίκτυο είναι μηδενική. Βασική λειτουργία του μετατροπέα αυτού είναι η διατήρηση της συνεχούς τάσης σε σταθερή τιμή. Οι τιμές των παραμέτρων του ελεγκτή της συνεχούς τάσης καθορίζουν την ποιότητα της απόκρισης του ελεγκτή αυτού. Με βάση τα αποτελέσματα προσομοιώσεων και κριτήριο τις μικρότερες δυνατές διακυμάνσεις της συνεχούς τάσης επιλέχθηκαν οι τιμές των παραμέτρων αυτών.

Το δεύτερο τμήμα της παρούσας διπλωματικής επιχειρεί να μελετήσει και να προσομοιώσει τις δυνατότητες του συγκεκριμένου ηλεκτρικού σχήματος (γεννήτρια επαγωγής διπλής τροφοδότησης) για παραμονή σε λειτουργία σε συνθήκες βύθισης τάσης. Οι απαιτήσεις πλέον στα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας, στα οποία συνδέονται ανεμογεννήτριες θέτουν ως σημαντικό όριο λειτουργίας οι ανεμογεννήτριες να παραμένουν σε λειτουργία κατά τη διάρκεια διαταραχών στο δίκτυο και να συμμετέχουν έτσι στη διατήρηση της ευστάθειας του συστήματος.

Η μέθοδος που αναπτύχθηκε και μοντελοποιήθηκε κατά τη διάρκεια της διπλωματικής είναι η βραχυκύκλωση του δρομέα της γεννήτριας με ειδικό ελεγχόμενο κύκλωμα (γνωστό στη διεθνή βιβλιογραφία ως active crowbar). Με τον

τρόπο αυτό τα υπερρεύματα που προκύπτουν κατά τη βύθιση της τάσης στον τερματικό ζυγό της γεννήτριας καταλήγουν στο κύκλωμα προστασίας, προστατεύοντας έτσι τα ηλεκτρονικά ισχύος του μετατροπέα από καταστροφή.

Έχοντας ως κριτήριο το μέγεθος του ρεύματος δρομέα και της συνεχούς τάσης μεταξύ των δύο μετατροπέων, ενεργοποιείται το κύκλωμα προστασίας όταν ανιχνευθούν τιμές μεγαλύτερες των κρισίμων και αντίστοιχα όταν το μεταβατικό παρέλθει επανέρχεται η κανονική λειτουργία του μετατροπέα. Εφαρμόστηκαν διάφορα είδη βύθισης τάσης, και ως προς το εύρος της βύθισης και ως προς τη διάρκεια της διαταραχής. Με παράμετρο την τιμή της αντίστασης του ειδικού κυκλώματος προστασίας βρέθηκαν οι βέλτιστες ρυθμίσεις για το κύκλωμα ανάλογα με το είδος της βύθισης. Σε κάποιες προσομοιώσεις ο τρόπος λειτουργίας του κυκλώματος προστασίας είχε ανεπιθύμητη συμπεριφορά, π.χ πολλαπλά ανοίγματα του κυκλώματος μέχρι την σβέση του μεταβατικού ρεύματος, γι' αυτό και επιχειρήθηκε η λειτουργία του συστήματος προστασίας με χρονικό περιορισμό. Τα ίδια φαινόμενα βύθισης προσομοιώθηκαν και σε διαφορετικές συνθήκες ανέμου.

Τέλος, για να επισημανθούν οι διαφορές στην απόκριση του συστήματος όταν αυτό μοντελοποιείται με το μοντέλο 5^{ης} ή 3^{ης} τάξης της γεννήτριας, πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις που παρουσιάζουν τα μεταβατικά θεμελιώδους συχνότητας που εμφανίζονται στα ηλεκτρικά μεγέθη της γεννήτριας όταν χρησιμοποιείται το μοντέλο 5^{ης} τάξης.

Αντικείμενο περαιτέρω διερεύνησης και συνέχειας της παρούσας διπλωματικής θα μπορούσε να είναι η εξέταση της ποιότητας ισχύος στην έξοδο του συστήματος (πτώσεις τάσης, flicker). Επίσης θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί μελέτη του συγκεκριμένου συστήματος όταν αυτό συνδέεται σε δίκτυο και διερεύνηση για την απόκριση του σε διαταραχές σε διάφορα σημεία του δοσμένου δικτύου. Επιπλέον θα μπορούσε να διερευνηθεί εναλλακτικός τρόπος ελέγχου των μετατροπέων και συγκριτική αντιπαράθεση με τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας. Τέλος θα μπορούσε να επιχειρηθεί βελτιστοποίηση της προσομοίωσης του αεροδυναμικού συστήματος, έτσι ώστε να λαμβάνονται υπ' όψιν και η εμφάνιση των ανωτέρων αρμονικών στην αεροδυναμική ροπή, που οφείλονται στη μεταβολή της ταχύτητας

του ανέμου με το ύψος (wind shear) και στο φαινόμενο σκίασης πύργου (tower shadow).

Αναφορές

- [1] J.G. Sloomweg, PhD. “*Wind Power- Modelling and Impact on Power System Dynamics*”, Delft University, 2003.
- [2] G.A.M van Kuik, “*Are wind turbines growing too fast?*”, 2001 European Wind Energy Conference and Exhibition, Copenhagen, Denmark, pp.69-72, 6 July 2001.
- [3] “*The Facts, An analysis of Wind Energy in the EU-25*”, Executive Summary, Wind Energy, EWEA.
- [4] V. Akhmatov, “*Modelling of variable-speed wind turbines with doubly-fed induction generators in short-term stability investigations*”. Proceedings of the 3rd Int. Workshop on Transmission Networks for Offshore Wind Farms, April 11-12, 2002.
- [5] P.Kundur, *Power system stability and control*, New York: McGraw-Hill, Inc., 1994.
- [6] J.G.Sloomweg, S.W.H. de Haan, H.Polinder, W.L. Kling, “*Modelling Wind Turbines in Power System Dynamic Simulations*”, Proceedings of the IEEE PES Summer Meeting, Vancouver, July 15-19, v.1, pp.22-26.
- [7] J.Arrilaga, N.R. Watson, *Computer modeling of electrical power systems*, J.Wiley & Sons, Ltd.:Chicester, 2nd edition, 2001.
- [8] T.Ackermann, G.Andersson, L.Soder, “*Distributed Generation: a definition, Electric Power Systems Research*”, v.57, n.3, April 2001, pp195-204.
- [9] M.Hausler, F.Ownman, “*AC or DC connecting offshore wind farms to the transmission grid*”, Proceedings of the Third International Workshop on Transmission Networks for Offshore Wind Farms, Stockholm, April 10-11, 2002.
- [10] *Erganzede Netzanschlussregeln fur Windenergieanlagen*, E-On Netz, 2001.

- [11] *Specifications for connecting wind farms to the transmission network*, Fredericia, DK: Eltra, 1999.
- [12] A. Petersson, PhD. “*Analysis, Modelling and Control of Doubly-Fed Induction Generators for Wind Turbines*”, Division of Electric Power Engineering, Chalmers University of Technology, Sweden 2005.
- [13] R.Pena, J.C.Clare, G.M.Asher: “*Doubly fed induction generator using back-to-back PWM converters and its application to variable speed wind-energy generation*”, Proc. Inst. Elect. Eng., Elect. Power Appl., vol. 143, no.3, pp 231-241, May 1996.
- [14] W.Leonhard, *Control of Electrical drives*, Springer-Verlag, 1985.
- [15] S.R.Jones, and R.Jones, “*Control strategy for sinusoidal supply side convertors*”, IEE Colloquium on Developments in real time control for induction motor drives, Digest 1993/024, February 1993.
- [16] G.A Smith, K.Nigim, and A.Smith, “*Wind-energy recovery by a static Scherbius induction generator*”, IEE Proc. C, , vol.128, no.6, pp. 317-324,1981.
- [17] M.Y.Uctug, I.Eskandarzadeh, and H.Ince, “*Modelling and output power optimisation of a wind turbine driven double output induction generator*”, IEE Proc. B, vol.141, no.2, 1994.
- [18] A.M.Walczyna, “*Torque and reactive power control of a double-fed induction machine*”, BICEM Proc., pp. 495-498, 1987.
- [19] P.G.Holmes, and N.A.Elsonbaty, “*Cycloconverter excited divided winding doubly fed machine as a wind power converter*”, IEE Proc. B, vol.131, no.2, pp. 61-69, 1984.
- [20] I.Cardici, and M.Ermis, “*Double-output induction generator operating at subsynchronous and supersynchronous speed: steady state performance optimisation and wind-energy recovery*”, IEE Proc. B, no.5, pp. 429-442, 1992.

- [21] V.Akhmatov, PhD. “Thesis *Analysis of dynamic behaviour of electric power systems with large amount of wind power*”, Electric Power Engineering, Orsted-DTU, Technical University of Denmark, April 2003.
- [22] G.Tsourakis, C.D.Vournas, “*Simulation of Low voltage ride through capability of wind turbines with Doubly Fed Induction generator*”, EWEC, March 2006.
- [23] J.G.Slootweg, H.Polinder, and W.L.Kling, “*Dynamic modeling of a wind turbine with doubly fed induction generator*”, presented at the IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, Vancouver, Canada, 15th-19th July 2001.
- [24] S.Arabi, P.Kundur, “*Stability modeling of storage devices in FACTS applications*”, 2001 IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, Vancouver, Canada, , v.2, pp.767-771, 15th-19th July 2001.
- [25] C.Abbey, B.Khodabakhchian, F Zhou., S.Dennetiere, J.Mahseredjian, G.Joos, “*Transient modelling of wind generator topologies*”, PST05-131, Inter. Conf. on Power Systems Transients (IPST '05), Montreal, Canada, June 19-23, 2005.
- [26] J.Niiranen, “*Voltage dip ride through of a doubly-fed generator equipped with an active crowbar*”, Proceedings of Nordic Wind Power Conference, March 2004.
- [27] Pablo Ledesma, Julio Usaola, “*Effect of Neglecting Stator Transients in Doubly Fed Induction Generators Models*”, IEEE Trans. Energy Conversion.,vol.19, no.2, June 2004.
- [28] A. Mullane, G. Lightbody, R. Yacamini and Grimes (ESB), “*The simulation and control of a grid connected variable speed wind turbine*” National University of Ireland, Cork, Ireland, Department of Electrical Engineering.
- [29] P.C. Krause, *Analysis of electric machinery*, McGraw-Hill, 1986.

- [30] J.Morren, H. Pierik, S.W.H. de Haan , and J.Bozelie, “*Grid interaction of offshore wind farms, Part 1: Models for dynamic simulation*”, Proceedings of the Norwegian Wind Power Conference, NWPC 04, 2004.
- [31] “*Response of generating units with low symmetrical short-circuit current component*”, Elsam report, WP9, UPWind, 2006.
- [32] T. Kruger, B. Andresen, “*Vestas OptiSpeed-advanced control strategy for variable speed wind turbines*”, European Wind Energy Conference, Copenhagen, Denmark, pp.983-986, July 2-6, 2001.
- [33] T. Petru, T. Thiringer, “*Active flicker reduction from a sea-based 2.5MW wind park connected to a weak grid*”, Nordic Workshop on Power and Industrial Electronics (NORpie/2000), Aalborg, Denmark, June 13-16, 2000.
- [34] A.K.Wallace, R. Spee, and G.C. Alexander, “*The brushless doubly-fed machine:its advantages, applications and design methods*”, in Sixth International Conference on Electrical Machines and Drives), Oxford, UK, pp. 511-517, 8-10 Sept., 1993.
- [35] S.Williamson, A.C. Ferreira, and A.K. Wallace, “*Generalised theory of the brushless doubly-fed machine, part 1:Analysis*”, IEE Proc. Electr.Power Appl., vol.144, no.2. pp111-122, March 1997.
- [36] D. Zhou and R.Spee, “*Field oriented control development for brushless doubly-fed machines*”, in Proc. IEEE Industry Applications Conference, vol.1, pp. 304-310, 6-10 Oct., 1996.
- [37] Ε.Γ. Ποταμιανάκης, διδακτορική διατριβή, “*Προσομοίωση και γραμμικοποίηση συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας για την ανάλυση βραχυπρόθεσμης ευστάθειας τάσης*”, Απρίλιος 2006, Αθήνα.