



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

**Ανάλυση Λειτουργίας και Έλεγχος Συστήματος Ανεμογεννήτριας
Μεταβλητών Στροφών Διασυνδεδεμένης στο Δίκτυο.**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Μάριος Β. Ντρέκο

Επιβλέπων: Αντώνιος Γ. Κλαδάς
Καθηγητής

Αθήνα, Οκτώβριος 2009



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

**Ανάλυση Λειτουργίας και Έλεγχος Συστήματος Ανεμογεννήτριας
Μεταβλητών Στροφών Διασυνδεδεμένης στο Δίκτυο.**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Μάριος Β. Ντρέκο

Επιβλέπων: Αντώνιος Γ. Κλαδάς
Καθηγητής

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 19^η Οκτωβρίου 2009.

.....
Αντώνιος Γ. Κλαδάς
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Στ. Ν. Μανιάς
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Στ. Παπαθανασίου
Επ. Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Οκτώβριος 2009

.....
Μάριος Β.Ντρέκο

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

Copyright © Μάριος Β.Ντρέκο 2009

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Περίληψη

Η αιολική ενέργεια αποτελεί μια από τις πλέον διαδεδομένες μορφές ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Η όλο και αυξανόμενη ανάπτυξη ανεμογεννητριών στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας δημιουργεί νέες απαιτήσεις ως προς τη λειτουργία των ανεμογεννητριών. Βασική επιδίωξη των αιολικών συστημάτων αποτελεί η κατά το δυνατό αδιάλειπτη σύνδεση τους στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας και η ικανότητα λειτουργίας τους ακόμα και σε περιπτώσεις διαταραχών που λαμβάνουν χώρα σε αυτό.

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται την ανάπτυξη ενός δυναμικού μοντέλου εργαστηριακού συστήματος ανεμογεννήτριας μεταβλητών στροφών διασυνδεδεμένης στο δίκτυο. Η εργαστηριακή διάταξη που εξετάζεται αποτελείται από ένα κινητήρα ΣΡ (DC) ο οποίος προσομοιώνει τη λειτουργία του ανεμοκινητήρα και περιστρέφει μία γεννήτρια μονίμων μαγνητών. Ένας μετατροπέας ανύψωσης τάσης (boost converter) χρησιμοποιείται για να ανυψώσει την τάση και να πραγματοποιήσει τη διαδικασία εύρεσης του σημείου μέγιστης ισχύος (maximum power point tracking, MPPT) ενώ ένας αντιστροφέας τύπου πηγής τάσης αναλαμβάνει τη διασύνδεση με το δίκτυο. Μελετώνται τρεις διαφορετικές μεθοδολογίες ελέγχου MPPT ενώ όσον αφορά στον έλεγχο του αντιστροφέα, χρησιμοποιείται διανυσματικός έλεγχος σε στρεφόμενο πλαίσιο στον άξονα (d-q) επιτρέποντας την εύκολη ρύθμιση της εγχεόμενης ενεργού και άεργου ισχύος.

Εκτός από την ανάλυση ομαλής λειτουργίας του συστήματος, προσομοιώνεται η λειτουργία σε περιπτώσεις βύθισης της τάσης του δικτύου. Στη περίπτωση αυτή προτείνεται κατάλληλη τροποποίηση του ελέγχου του αντιστροφέα ώστε να παρακολουθεί την τάση του δικτύου επιτρέποντας την αδιάλειπτη διασυνδεδεμένη λειτουργία της διάταξης υπό συγκεκριμένες συνθήκες διαταραχών. Οι συνθήκες αυτές εξαρτώνται από τις δυνατότητες του αντιστροφέα και από τα όρια αντοχής που θέτουν τα διεθνή πρότυπα.

Λέξεις κλειδιά

Ανεμογεννήτριες, Σύγχρονη γεννήτριας μονίμων μαγνητών, Μέθοδος ανεύρεσης σημείου βέλτιστης ισχύος, Διανυσματικός έλεγχος σε στρεφόμενο πλαίσιο στον άξονα (d-q), Ελεγκτής προστασίας, Βύθιση της τάσης του δικτύου, Διεθνή πρότυπα.

Abstract

Recently, the use of wind energy conversion systems is increasing on a worldwide scale. The growing use of wind turbines in power grids requires for new operational standards. Issues like Voltage Ride Through capability and power quality are of primary concern.

In this thesis, a dynamic model of a laboratory permanent magnet synchronous generator interconnected to the grid is developed. The laboratory system consists of a DC machine used to emulate the wind turbine and rotate a permanent magnet synchronous generator, a boost DC/DC converter acting as a maximum power point tracker (MPPT) for the generator's output power and a DC/AC three phase inverter for grid connection. Grid connection is achieved using classical SPWM technique allowing for both active and reactive power flows. Regarding the MPPT process three different control schemes are studied while regarding grid connection a d-q controller is applied allowing for easy adjustment of both active and reactive power flows as well as voltage ride-through capability according to international standards.

Using the model developed, simulations are undergone both in normal grid voltage conditions and under various voltage dips. Towards this, an improved d-q controller is implemented in order to ensure stable operation and provide Fault Ride Through capability.

Key words

Wind turbines, Permanent Magnet Synchronous Generator, Maximum Power Point Trackers, Vector control, protection, Fault Ride Through capability

Ευχαριστίες

Ευχαριστώ θερμά τον επιβλέποντα της διπλωματικής εργασίας κ. Αντώνιο Κλαδά, Καθηγητή Ε.Μ.Π. για τη ευκαιρία που μου πρόσφερε να ασχοληθώ με την παρούσα εργασία. Η καθοδήγηση του σε όλα τα στάδια εκπόνησης της ήταν για μένα πολύτιμη. Θα ήθελα ακόμη να ευχαριστήσω τον Υπ. Δρ. Χαράλαμπο Πάτσιο για τη συνεχή υποστήριξη και βοήθεια του κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας. Τέλος καθοριστική ήταν η συμβολή του Δρ. Αντωνίου Χανιώτη ο οποίος έχει αναπτύξει το ηλεκτρονικό κύκλωμα και με βοήθησε να εξοικειωθώ με τη διάταξη.

Πίνακας Περιεχομένων

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή.....	10
1.1 Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.....	10
1.2 Αιολική Ενέργεια.....	11
1.3 Όρια διείσδυσης αιολικής ενέργειας.....	12
1.4 Τεχνολογίες ανεμογεννητριών.....	14
1.4.1 Επικρατέστερες διαμορφώσεις ηλεκτρικού μέρους ανεμογεννητριών.....	14
1.4.2 Συνήθειες τοπολογίες μετατροπέων σε συστήματα ανεμογεννητριών	17
1.5 Απαιτήσεις κωδίκων για τη σύνδεση Α/Γ στο δίκτυο.....	18
1.5.1 Ανοχή σε βυθίσεις τάσης και αποκρίσεις σε περίπτωση βύθισης τάσης του δικτύου.....	19
1.6 Δομή της εργασίας.....	20
1.7 Συνεισφορά της εργασίας.....	21
Κεφάλαιο 2: Μοντελοποίηση υποσυστημάτων Α/Γ που μελετήθηκε.....	23
2.1 Γενική περιγραφή μοντέλου συστήματος.....	23
2.2 Αεροδυναμικό μέρος	25
2.2.1 Μοντελοποίηση αεροδυναμικού μέρους	27
2.3 Σύγχρονη γεννήτρια μόνιμων μαγνητών.....	28
2.3.1 Μοντελοποίηση σύγχρονης γεννήτριας μόνιμων μαγνητών	32
2.4 Μετατροπέας ανύψωσης τάσης.....	34
2.4.1 Μοντελοποίηση μετατροπέα ανύψωσης τάσης.....	36
2.5 Ελεγκτές ανεύρεσης βέλτιστου σημείου λειτουργίας	37
2.5.1 Ελεγκτής ανεύρεσης βέλτιστου σημείου λειτουργίας μέσω χαρακτηριστικής καμπύλης λειτουργίας.....	39
2.5.2 Ελεγκτής ανεύρεσης βέλτιστου σημείου λειτουργίας μέσω μικρών μεταβολών.....	41
2.5.3 Ελεγκτής ανεύρεσης βέλτιστου σημείου λειτουργίας βασισμένη σε ασαφή λογική.....	45
2.6 Τριφασικός αντιστροφέας πηγής τάσης.....	48
2.6.1 Ελεγκτής αντιστροφέα τύπου πηγής τάσης.....	49
2.6.2 Μοντέλο προσομοίωσης του ελεγκτή αντιστροφέα	52
Κεφάλαιο 3: Λειτουργικά χαρακτηριστικά και πειραματική επιβεβαίωση του μοντέλου	55
3.1 Αρχικοποίηση του μοντέλου της γεννήτριας και απόκριση μόνιμης κατάστασης για σταθερή αεροδυναμική ροπή.....	55

3.2	Αποκρίσεις μοντέλου μετατροπέα ανύψωσης τάσης για σταθερή αεροδυναμική ροπή.....	59
3.3	Αποκρίσεις μοντέλου Αντιστροφέα για σταθερή αεροδυναμική ροπή.....	62
3.4	Αποκρίσεις μοντέλου συστήματος για βηματική μεταβολή της αεροδυναμικής ροπής και σε χρονοσειρά ανέμου.....	68
Κεφάλαιο 4: Απόκριση σε διαταραχές της τάσης του δικτύου.....		75
4.1	Διαταραχές στη πλευρά του δικτύου.....	75
4.1.1	Αποκρίσεις μοντέλου ανεμογεννήτριας σε διαταραχές δικτύου.....	76
4.2	Σχεδίαση συστήματος ελέγχου ανεμογεννήτριας για έλεγχο σε βύθιση της τάσης του δικτύου.....	85
4.3	Συνεισφορά συστήματος ελέγχου στην βελτίωση της απόκρισης και συγκρίσεις αποτελεσμάτων.....	90
Κεφάλαιο 5: Συμπεράσματα.....		97
5.1	Κυριότερα συμπεράσματα εργασίας.....	97
5.2	Σημεία προαγωγής της επιστήμης.....	99
5.3	Εργασίες για περαιτέρω διερεύνηση.....	100
Βιβλιογραφία.....		101

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας

Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται μια έντονη διάθεση, ιδιαίτερα από την πλευρά των περισσότερο ανεπτυγμένων χωρών, για επένδυση χρόνου και πόρων στην έρευνα και αξιοποίηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Λόγοι όπως η ρύπανση του περιβάλλοντος, το φαινόμενο του θερμοκηπίου, οι ανθυγιεινές συνθήκες ζωής στα μεγάλα αστικά κέντρα αλλά και η διαφαινόμενη από κάποιους εξάντληση των ορυκτών καυσίμων σε συνδυασμό με την αυξανόμενη ενεργειακή ζήτηση, συνηγορούν προς τη χάραξη της παραπάνω στρατηγικής. Είναι πλέον αποδεκτό πως για να καλυφθούν οι σύγχρονες ενεργειακές ανάγκες πρέπει να διασφαλισθεί μια πολυμορφία στην ενεργειακή παραγωγή. Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας πρέπει να ξεφύγει από τα καθιερωμένα στάνταρ και τους κλασσικούς τρόπους και να στραφεί σε νέες μεθόδους που θα είναι περισσότερο φιλικό προς το περιβάλλον και θα εξασφαλίζουν χαμηλό κόστος παραγωγής.

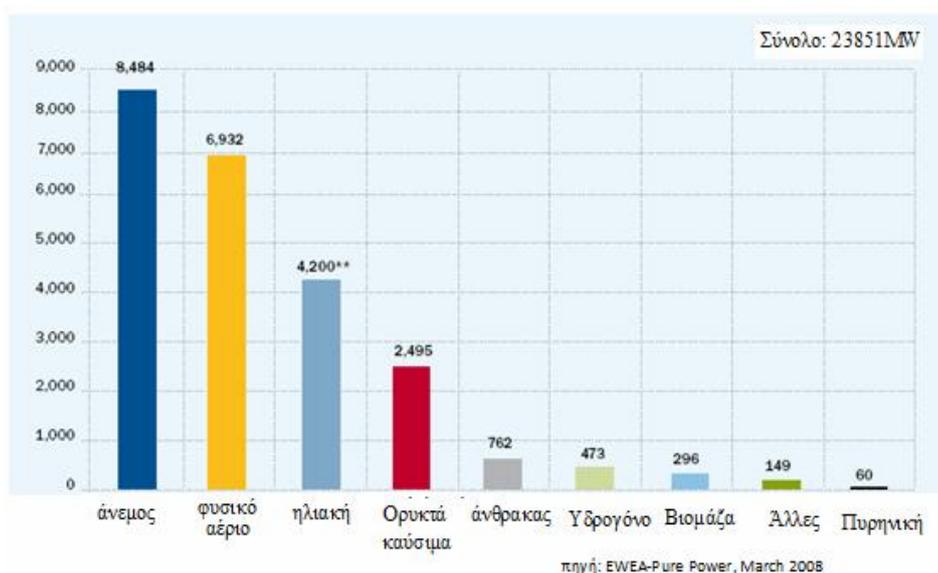
Λύση στις νέες αυτές προκλήσεις αποτελούν οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ). Αντίθετα με τις παραδοσιακές πρωτογενείς πηγές όπως το πετρέλαιο, το μαζούτ και το λιγνίτη, οι ΑΠΕ αναπληρώνονται μέσω των φυσικών κύκλων και θεωρούνται πρακτικά ανεξάντλητες. Ο ήλιος, ο άνεμος, η γεωθερμία, τα ποτάμια, οι οργανικές ύλες, όπως το ξύλο και ακόμη τα απορρίμματα οικιακής και γεωργικής προέλευσης, είναι πηγές ενέργειας, που η προσφορά τους δεν εξαντλείται ποτέ. Εξάλλου, η αξιοποίησή τους για την παραγωγή ενέργειας δεν επιβαρύνει το περιβάλλον. Η Ελλάδα διαθέτει αξιόλογο δυναμικό ΑΠΕ, οι οποίες μπορούν να προσφέρουν μια πραγματική εναλλακτική λύση για την κάλυψη μέρους των ενεργειακών μας αναγκών, συνεισφέροντας στη μείωση της εξάρτησης από συμβατικά καύσιμα, στην ελάττωση του φαινομένου του Θερμοκηπίου, στη δημιουργία νέων θέσεων εργασίας και στην ανάπτυξη αποκεντρωμένων περιοχών.

Οι ΑΠΕ αποτελούν εγχώριες πηγές ενέργειας και συνεισφέρουν στην ενίσχυση της ενεργειακής ανεξαρτητοποίησης και της ασφάλειας του ενεργειακού εφοδιασμού σε εθνικό επίπεδο. Σαν πηγές ενέργειας είναι διάσπαρτες γεωγραφικά και οδηγούν στην αποκέντρωση του ενεργειακού συστήματος, δίνοντας τη δυνατότητα κάλυψης των ενεργειακών αναγκών σε τοπικό και περιφερειακό επίπεδο, ανακουφίζοντας έτσι τα συστήματα υποδομής και μειώνοντας τις απώλειες από τη μεταφορά ενέργειας. Προσφέρουν τη δυνατότητα ορθολογικής αξιοποίησης των ενεργειακών πόρων

καλύπτοντας ένα ευρύ φάσμα των ενεργειακών αναγκών των χρηστών. Έχουν συνήθως χαμηλό λειτουργικό κόστος που δεν επηρεάζεται από τις διακυμάνσεις της διεθνούς οικονομίας και ειδικότερα των τιμών των συμβατικών καυσίμων. Οι εγκαταστάσεις εκμετάλλευσης των ΑΠΕ έχουν σχεδιαστεί για να καλύπτουν τις ανάγκες των χρηστών τόσο σε μικρή κλίμακα όσο και σε μεγάλη, έχουν μικρή διάρκεια κατασκευής, επιτρέποντας τη γρήγορη ανταπόκριση της προσφοράς προς τη ζήτηση ενέργειας. Τέλος μπορούν να αποτελέσουν σε πολλές περιπτώσεις πυρήνα για την αναζωογόνηση οικονομικά και κοινωνικά υποβαθμισμένων περιοχών και πόλο για την τοπική ανάπτυξη και προώθηση αναλόγων επενδύσεων.

1.2 Αιολική Ενέργεια

Η αιολική ενέργεια αποτελεί το στυλοβάτη των ΑΠΕ , τουλάχιστον στην Ευρώπη όπως φαίνεται και από το σχήμα 1.1 που δείχνει τη νέα εγκατεστημένη αιολική ισχύ κατά το 2008. Στη χώρα μας οι επικρατούσες συνθήκες στο Αιγαίο, στο Κρητικό και στο Καρπάθιο πέλαγος, στις ανατολικές ακτές της κεντρικής και νότιας Χώρας, στη Β. Κρήτη και στα Δωδεκάνησα καθ' όλη τη διάρκεια του έτους ευνοούν την εμφάνιση ανέμων σημαντικής εντάσεως, ικανής να διατηρεί σε λειτουργία ανεμογεννήτριες για μεγάλα χρονικά διαστήματα. Έτσι, ευνοείται η εγκατάσταση αιολικών πάρκων που συνήθως συνδέονται σε δίκτυα μέσης και υψηλής τάσης ανάλογα με την εγκατεστημένη ισχύ τους. Παρόμοιες συνθήκες ισχύουν και στο εσωτερικό της χώρας και ιδιαίτερα στις ορεινές περιοχές. Οι συνθήκες στις περιοχές αυτές είναι αρκετά ευνοϊκές διότι υπάρχει συνεχής πνοή καλής ποιότητας ανέμου, ελάχιστες μέρες άπνοιας και ανυπαρξία τυφώνων. Ενδεικτικά παρουσιάζουμε στον Ελλαδικό χώρο τις συγκεντρώσεις αιολικής παραγωγής, σχήμα 1.2 , από επίσημα στοιχεία του ΔΕΣΜΗΕ [21].



Σχήμα 1.1
Εγκατεστημένη ισχύς στην ΕΕ το 2008

**ΑΙΟΛΙΚΑ ΠΑΡΚΑ
ΣΕ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ
ΣΤΟ ΔΙΑΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΟ
ΣΥΣΤΗΜΑ**

ΣΕ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ (Φεβ. 2009):

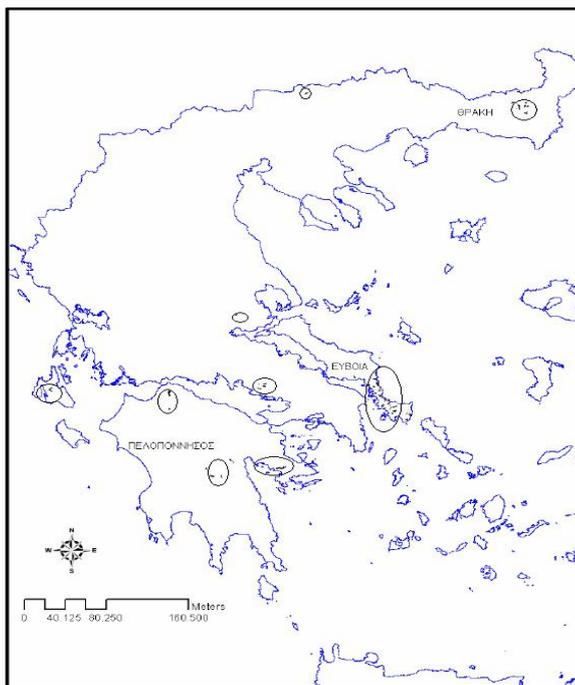
67 Α/Π ισχύος 831 MW (733 Α/Γ)

Κυρίως σε

Εύβοια: 212 MW

Θράκη : 197 MW

Πελοπόννησο: 249 MW



*πηγή ΔΕΣΜΗΕ

[21]

Σχήμα 1.2

Συγκεντρώσεις αιολικής παραγωγής στην Ελλάδα

1.3 Όρια διείσδυσης αιολικής ενέργειας.

Σήμερα στην Ελλάδα με την αιχμή να είναι περίπου 10.5 GW και τη ζήτηση 54 TWh η διείσδυση των ΑΠΕ φτάνει στο 8% [21]. Συγκεκριμένα σύμφωνα με επίσημα στοιχεία που παίρνουμε από το ΔΕΣΜΗΕ για τον Φεβρουάριο 2009, στην Ελλάδα λειτουργούν 67 αιολικά πάρκα ισχύος 831 MW (733 Α/Γ) όπως φαίνεται στο σχήμα 1.3. Τα νούμερα αυτά είναι πολύ μακριά από το στόχο του 20% που έχει θέσει η Ε.Ε και 18% που είναι ο στόχος της Ελλάδας μέχρι το 2010. Όσον αφορά το μέλλον, η όλο και αυξανόμενη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας σε συνδυασμό με τη συνεχόμενη ανάπτυξη των δικτύων μεταφοράς και διανομής και τη διασύνδεση των νησιών, θα δώσει τη δυνατότητα περαιτέρω διείσδυσης των ΑΠΕ στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας. Το ερώτημα που τίθεται είναι αν υπάρχουν όρια διείσδυσης των ΑΠΕ και από τι καθορίζονται αυτά.

Ένα σύγχρονο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας οφείλει να παρέχει στους καταναλωτές του ηλεκτρική ισχύ αποδεκτής ποιότητας. Η «ποιότητα» ισχύος που παρέχεται χαρακτηρίζεται ως «αποδεκτή» όταν τηρούνται τα χαρακτηριστικά της τάσης που ορίζουν οι εθνικοί και διεθνείς κανονισμοί [23]. Με βάση αυτές τις γενικές αρχές πρέπει να γίνεται η σύνδεση μονάδων παραγωγής στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας, ώστε αφενός μεν να μην προκαλούνται ενοχλήσεις στους λοιπούς καταναλωτές και

αφετέρου να υπάρχει συμβατότητα μεταξύ του δικτύου διανομής και των εγκαταστάσεων των παραγωγών.

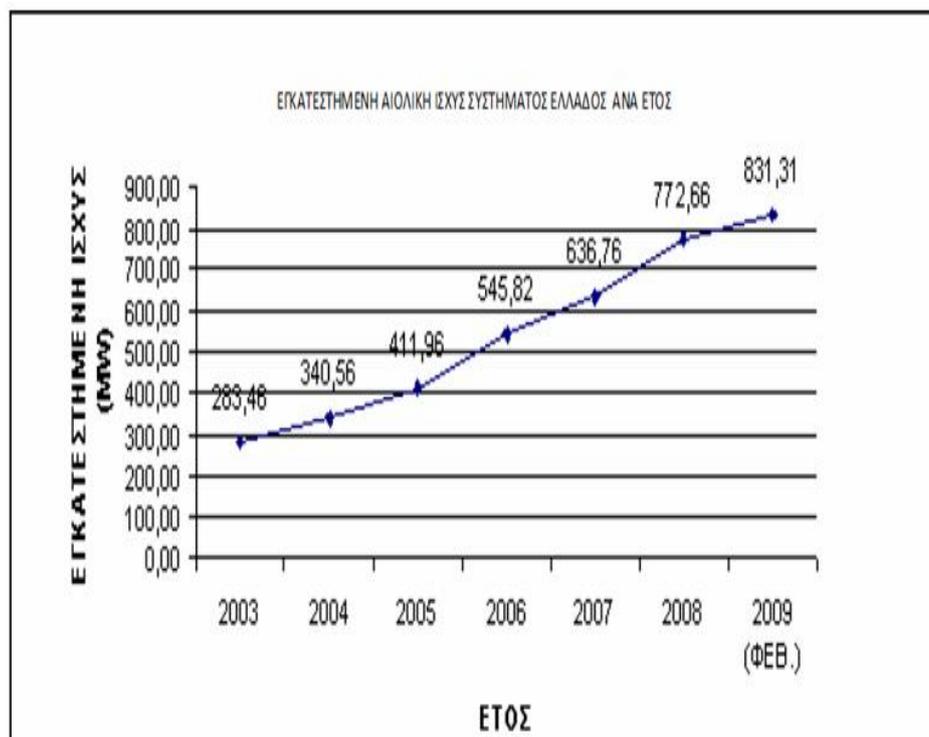
Στη περίπτωση αιολικών πάρκων που συνδέονται σε ασθενή και μη διασυνδεδεμένα ηλεκτρικά συστήματα υπάρχουν κάποιοι περιορισμοί διείσδυσης. Οι περιορισμοί αυτοί σχετίζονται με τα τεχνικά ελάχιστα των συμβατικών μονάδων παραγωγής αλλά και περιορισμούς που εξασφαλίζουν την ευστάθεια του ηλεκτρικού συστήματος [2].

Στα μη διασυνδεδεμένα νησιά, που τροφοδοτούνται στη πλειονότητα από πετρελαϊκές μονάδες υπάρχουν κάποιοι τεχνικοί περιορισμοί που πηγάζουν από την λειτουργία των ίδιων των μονάδων. Οι μονάδες αυτές δεν μπορούν να υποφορτιστούν κάτω από ένα όριο ισχύος που τίθεται από τους κατασκευαστές τους [21] για λόγους οικονομικούς αλλά και ορθής λειτουργίας. Τα όρια ελάχιστης παραγωγής των συμβατικών μονάδων σε συνδυασμό με την εκάστοτε ζήτηση δημιουργούν κάποια όρια μέγιστης διείσδυσης αιολική ισχύος, τα οποία ονομάζονται τεχνικά ελάχιστα των συμβατικών μονάδων παραγωγής.

Ένα χαρακτηριστικό των ανεμογεννητριών είναι η διακύμανση της ισχύος εξόδου τους. Η διακύμανση αυτή οφείλεται κατά ένα μεγάλο μέρος στη τυχαιότητα της ταχύτητας του ανέμου και κατά ένα μικρό μέρος στη μικρή βύθιση που παρατηρείται στην αεροδυναμική ροπή κάθε φορά που το πτερύγιο περνά από το πύργο. Η μικρή αυτή βύθιση αποτελεί αιτία εισαγωγής flicker στην ισχύ εξόδου[21]. Σε αυτόνομα συστήματα όταν οι μεταβολές αυτές είναι μεγάλες, δεδομένου ότι το φορτίο παραμένει σταθερό, παρατηρείται διακύμανση στη συχνότητα των αυτόνομων συστημάτων, η οποία οφείλει να ρυθμίζεται από τους ρυθμιστές στροφών του σταθμού. Ακόμα και σε διασυνδεδεμένα συστήματα, μεγάλες αποκλίσεις συχνότητας εξαιτίας απώλειας της αιολικής παραγωγής, ειδικά όταν καλύπτει σημαντικό μερίδιο της ζήτησης του συστήματος, μπορεί να οδηγήσει ακόμα και σε κίνδυνο ευστάθειας του συστήματος. Το φαινόμενο αυτό είναι σύνηθες όταν παρουσιαστεί ένα σφάλμα στο δίκτυο αλλά και όταν παρουσιάζονται μεγάλες ταχύτητες ανέμου που υπερβαίνουν την ταχύτητα αποσύνδεσης των ανεμογεννητριών. Για τους λόγους αυτούς εκτός από τους τεχνικούς περιορισμούς διείσδυσης αιολικής παραγωγής, υπάρχουν και οι δυναμικοί περιορισμοί που εξασφαλίζουν την ευστάθεια του συστήματος.

Είναι φανερό λοιπόν ότι η διείσδυση της αιολικής ενέργειας ιδιαίτερα σε μη διασυνδεδεμένα και ασθενή δίκτυα είναι περιορισμένη από τεχνικούς και δυναμικούς περιορισμούς. Οι περιορισμοί αυτοί θέτουν κάποια όρια μέγιστης διείσδυσης αιολικής παραγωγής. Στη περίπτωση των τεχνικών περιορισμών, τα όρια καθορίζονται συνάρτηση της παραγωγής των συμβατικών σταθμών παραγωγής αλλά και της εκάστοτε ζήτησης. Όσον αφορά όμως τους δυναμικούς περιορισμούς, γίνονται προσπάθειες αύξησης των ορίων τους βελτιώνοντας τη τεχνολογία των ανεμογεννητριών και τον τρόπο με τον οποίο λειτουργούν σε περιπτώσεις σφαλμάτων του δικτύου.

Προς αυτή τη κατεύθυνση η σχεδίαση των Α/Γ γίνεται με τρόπο ώστε να είναι περισσότερο ευέλικτες ως προς την λειτουργία τους, ιδιαίτερα σε διαταραχές, παρέχοντας αδιάλειπτη παροχή ηλεκτρικής ισχύος κατά τη διάρκεια σφαλμάτων και όσο είναι δυνατό να αποφεύγεται η αποσύνδεση τους. Συγκεκριμένα η σχεδίαση των Α/Γ θα πρέπει να εξασφαλίζει [19] ικανότητα αδιάλειπτης λειτουργίας σε σφάλματα δικτύου αλλά και βυθίσεις τάσης, ικανότητα ρύθμισης και υποστήριξης τάσης σε Ευρωπαϊκό επίπεδο, συμμετοχή όσο το δυνατό στη ρύθμιση συχνότητας, κρατώντας κάποια εφεδρεία στη παραγωγή και τέλος πρόβλεψη της ταχύτητας του ανέμου.



*πηγή ΔΕΣΜΗΕ [21]

Σχήμα 1.3

Εγκατεστημένη αιολική ισχύς στην Ελλάδα ανά έτος

1.4 Τεχνολογίες ανεμογεννητριών

1.4.1 Επικρατέστερες διαμορφώσεις ηλεκτρικού μέρους ανεμογεννητριών

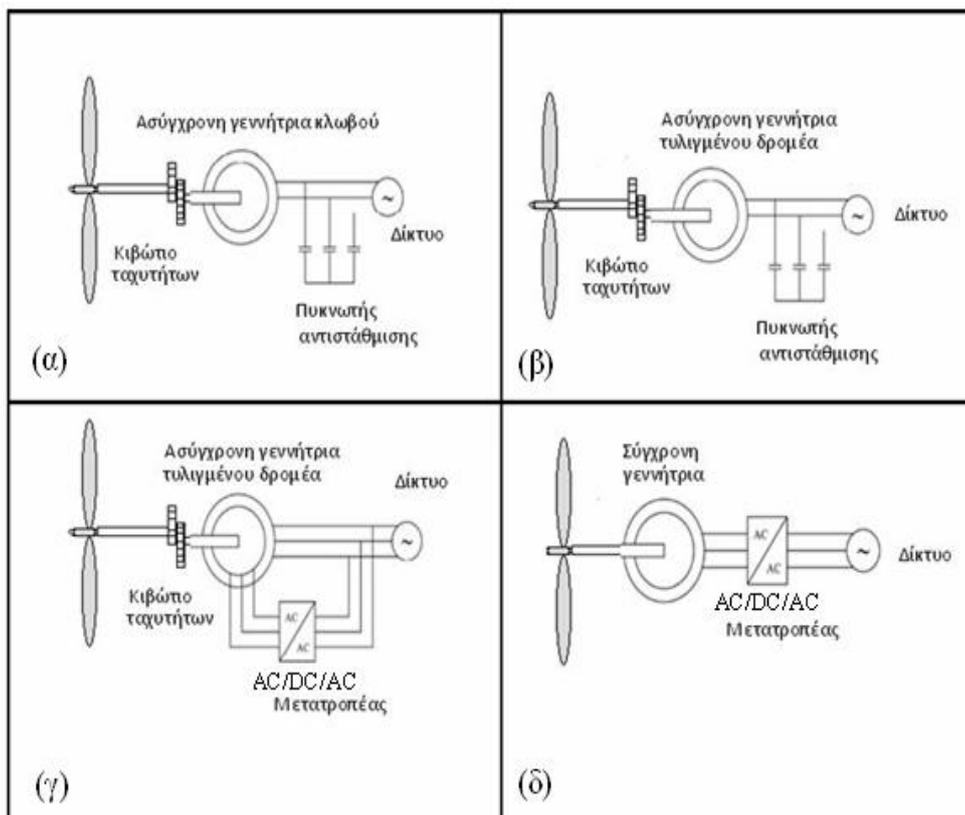
Υπάρχουν διάφοροι τύποι ανεμογεννητριών αναφορικά με την διαμόρφωση του ηλεκτρικού μέρους τους κάθε ένας με διαφορετικά χαρακτηριστικά και διαφορετικά πλεονεκτήματα λειτουργίας. Οι κύριοι τύποι διακρίνονται σε [8] :

1. Σταθερών στροφών, με ασύγχρονη γεννήτρια κλωβού, απ' ευθείας συνδεδεμένη στο δίκτυο(σχήμα1.4.α)

2. Περιορισμένης λειτουργίας μεταβλητών στροφών, με ασύγχρονη γεννήτρια τυλιγμένου δρομέα μεταβλητής αντίστασης, απ' ευθείας συνδεδεμένη στο δίκτυο(σχήμα1.4.β) .

3. Μεταβλητών στροφών με ασύγχρονη γεννήτρια διπλής τροφοδότησης (σχήμα1.4.γ).

4. Μεταβλητών στροφών με σύγχρονη γεννήτρια με τύλιγμα διεγέρσεως ή μόνιμο μαγνήτη(σχήμα1.4.δ)



Σχήμα 1.4

*Επικρατέστερες διαμορφώσεις ηλεκτρικού μέρους Ανεμογεννητριών
 (α) A/G σταθερών στροφών με ασύγχρονη γεννήτρια τύπου κλωβού, (β) A/G σταθερών στροφών με ασύγχρονη γεννήτρια τυλιγμένου δρομέα, (γ) A/G μεταβλητών στροφών με ασύγχρονη γεννήτρια τυλιγμένου δρομέα διπλής τροφοδότησης, (δ) A/G μεταβλητών στροφών με σύγχρονη γεννήτρια και μετατροπέα EP/ΣP/EP στο στάτη .*

Η ανεμογεννήτρια σταθερών στροφών ,σχήμα1.4.α , έχει ως βασικό πλεονέκτημα το μικρό κόστος, το μικρό βάρος και γενικά την απλότητα στην κατασκευή. Η μείωση του κόστους οφείλεται αφενός στην έλλειψη μετατροπέα και αφετέρου στην ίδια τη γεννήτρια που χρησιμοποιεί η οποία είναι μια συνηθισμένη ασύγχρονη γεννήτρια τύπου κλωβού. Η απουσία μετατροπέα δίνει αξιοπιστία στη κατασκευή ενώ παράλληλα οι ανάγκες συντήρησης είναι μειωμένες. Βασικό μειονέκτημα των ανεμογεννητριών σταθερών στροφών είναι το γεγονός ότι δεν υπάρχει δυνατότητα ρύθμισης των στροφών της ανάλογα με την ταχύτητα του ανέμου. Αυτό έχει ως συνέπεια οποιαδήποτε μεταβολή στην ταχύτητα του ανέμου να μεταφράζεται σε αντίστοιχη μεταβολή της μηχανικής ροπής στον άξονα με συνέπεια τη παρουσία

έντονων μηχανικών καταπονήσεων που φθείρουν το σύστημα. Ένα άλλο σημαντικό μειονέκτημα της Α/Γ σταθερών στροφών είναι ότι λόγω της έλλειψης ηλεκτρονικών ισχύος δεν μπορεί να συμβάλει στην ρύθμιση της αέργου ισχύος που ανταλλάσει με το δίκτυο με συνέπεια να είναι απαραίτητη η σύνδεση πυκνωτών στην έξοδο ώστε να κάνουν αντιστάθμιση της αέργου ισχύος που απορροφούν. Αυτό έχει συνέπεια την αδυναμία λειτουργίας κάτω από τις νέες συνθήκες που επιβάλλουν οι νέοι κανονισμοί λειτουργίας των αιολικών πάρκων που συνδέονται στα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας. Όσον αφορά την ισχύ εξόδου, παρουσιάζει έντονη διακύμανση με αποτέλεσμα εκπομπές flicker τάσης, που περιορίζουν την σύνδεση μεγάλης ποσότητας ισχύος σε ασθενή δίκτυα. Λόγω αυτών των ατελειών η χρήση τους τα τελευταία χρόνια έχει εγκαταλειφθεί με εξαίρεση κάποιες ειδικές περιπτώσεις[23].

Πολλές φορές χρησιμοποιείται ασύγχρονη γεννήτρια τυλιγμένου δρομέα παρέχοντας τη δυνατότητα μεταβάλλοντας την αντίσταση του δρομέα, να ελέγχουμε την ηλεκτρική ροπή, δυναμικός έλεγχος της γεννήτριας, σχήμα 1.4.β. Με τον τρόπο αυτό ελέγχουμε την γεννήτρια δίνοντας τη δυνατότητα αλλαγής των στροφών της κατά την διάρκεια ριπών ανέμου. Αυτό, αφενός μεν μας περιορίζει σε κάποιο βαθμό τις μηχανικές καταπονήσεις, αφετέρου βελτιώνει την ποιότητα ισχύος που παίρνουμε στην έξοδο.

Πέρα από τις Α/Γ σταθερών στροφών οι πιο συνήθεις και πλέον συχνά εφαρμόσιμες στην κατασκευή αιολικών πάρκων είναι οι Α/Γ μεταβλητών στροφών, σχήμα 1.4.γ-δ. Οι Α/Γ μεταβλητών στροφών παρουσιάζουν αυξημένη ενεργειακή απόδοση με μέγιστη αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας. Αυτό οφείλεται στην μεταβολή της γωνιακής ταχύτητας περιστροφής ανάλογα με την ταχύτητα του ανέμου. Εξαιτίας αυτού υπάρχει μειωμένη μηχανική καταπόνηση τόσο στα περύγια όσο και στο σύστημα μετάδοσης της κίνησης, απαλειφή του κιβωτίου ταχυτήτων, μείωση του ακουστικού θορύβου και προσαρμογή της ανεμογεννήτριας στις τοπικές ανεμολογικές συνθήκες.

Ένα άλλο χαρακτηριστικό πλεονέκτημα των Α/Γ μεταβλητών στροφών είναι το γεγονός ότι μπορούν να παρέχουν στο δίκτυο καλύτερης ποιότητας ηλεκτρική ισχύ. Επίσης υπάρχει δυνατότητα ρύθμισης του συντελεστή ισχύος ανάλογα με τις απαιτήσεις του δικτύου. Αυτό πραγματοποιείται ελέγχοντας κατάλληλα τον μετατροπέα ώστε ανάλογα με τα επίπεδα της τάσης του δικτύου, να γίνεται κατάλληλη έγχυση αέργου ισχύος. Αυτή η λειτουργία είναι συναφής με εκείνη των συμβατικών σταθμών και εναρμονίζεται πλήρως με τα νέα πρότυπα που αναφέρονται στη ποιότητα ισχύος[...].

Μια συνήθης διαμόρφωση ηλεκτρικού μέρους ανεμογεννήτριας μεταβλητών στροφών είναι εκείνη με ασύγχρονη γεννήτρια τυλιγμένου δρομέα και διπλή τροφοδότηση με μετατροπέα συνδεδεμένο στο δρομέα, σχήμα 1.4.γ. Στη περίπτωση αυτής της ηλεκτρικής διαμόρφωσης, υπάρχει δυνατότητα ελέγχου των στροφών ρυθμίζοντας κατάλληλα τη συχνότητα των ρευμάτων που κυκλοφορούν στο δρομέα. Ο τύπος αυτός έχει όλα τα παραπάνω πλεονεκτήματα ανεμογεννήτριας μεταβλητών στροφών. Επιπλέον αποτελείται από μια συνηθισμένη γεννήτρια και ένα μικρό και σχετικά φθινό μετατροπέα. Βασικό μειονέκτημα της διπλής τροφοδότησης είναι το γεγονός ότι ο στάτης της ασύγχρονης γεννήτριας είναι άμεσα συνδεδεμένος στο δίκτυο, έτσι σε οποιαδήποτε βύθιση τάσης είναι εκτεθειμένος στη δυναμική συμπεριφορά του δικτύου. Αυτό δεν ισχύει στη διαμόρφωση του σχήματος 1.4.γ,

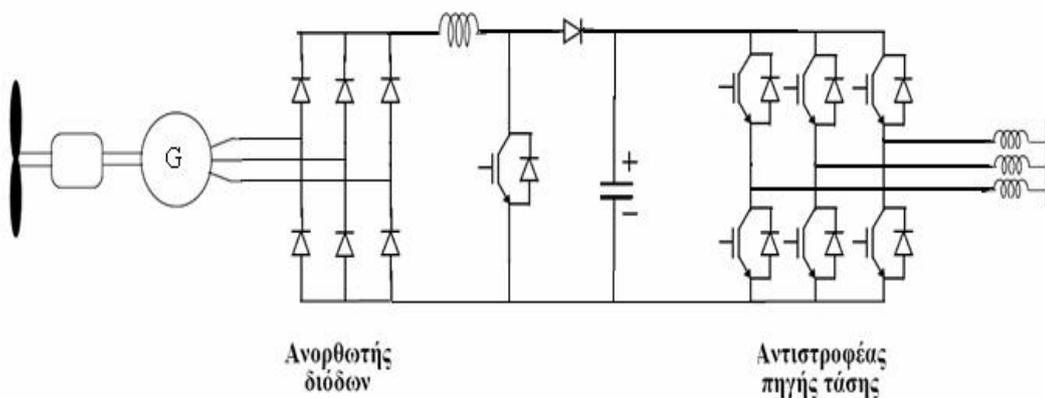
όπου υπάρχει απομόνωση της συχνότητας του δικτύου και των μεγεθών του στάτη μέσω του μετατροπέα ανύψωσης τάσης.

Η Α/Γ μεταβλητών στροφών με σύγχρονη γεννήτρια και μετατροπέα ΕΡ/ΣΡ/ΕΡ, σχήμα 1.4.δ , είναι κατάλληλη για σύνδεση στο δίκτυο δεδομένου ότι οι ραγδαίες μεταβολές της ταχύτητας περιστροφής είτε εξαιτίας του ανέμου είτε από κάποια διαταραχή στο δίκτυο , μπορούν εύκολα να εξομαλυνθούν από το δρομέα της και οποιαδήποτε μεγάλο ρεύμα που ίσως θα προκληθεί αποσβένεται από το μαγνητικό κύκλωμα του πυρήνα χωρίς τον κίνδυνο απομαγνητισμού, ειδικά σε σύγχρονες γεννήτριες μόνιμου μαγνήτη [10] . Επίσης δεν διαθέτει κιβώτιο ταχυτήτων, επιτυγχάνοντας έτσι μείωση του κόστους και του βάρους, βελτίωση της αξιοπιστίας και ελάττωση του θορύβου.

Μειονέκτημα της διαμόρφωσης του σχήματος 1.4.δ είναι η μεγάλη και βαριά γεννήτρια που χρησιμοποιεί. Επίσης από το μετατροπέα της μεταφέρεται το 100% της παραγόμενης ισχύος σε αντίθεση με την ασύγχρονη διπλής τροφοδότησης που μόνο το 1/3 περίπου της παραγόμενης ισχύος περνάει από το μετατροπέα . Το γεγονός ότι όλη η ισχύς μεταφέρεται από το μετατροπέα περιορίζει κάπως την λειτουργία του συστήματος ιδιαίτερα σε μη φυσιολογικές καταστάσεις λειτουργίας και συγκεκριμένα την ικανότητα αδιάλειπτης παροχής ισχύος.

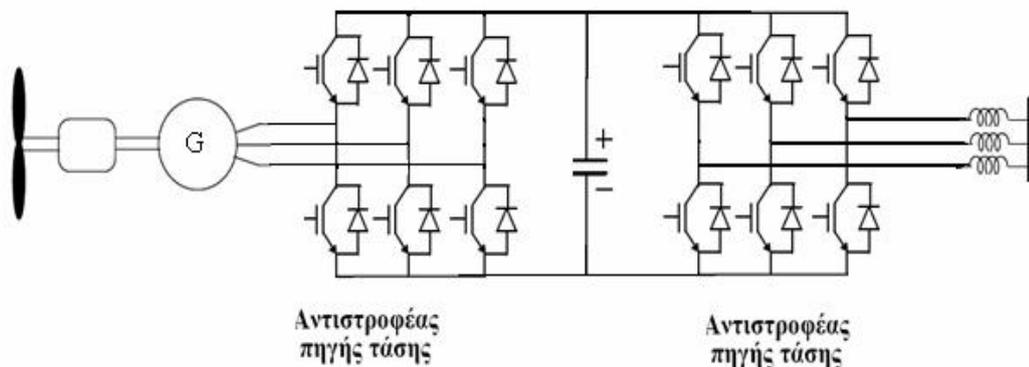
1.4.2 Συνήθειες τοπολογίες μετατροπέων σε συστήματα ανεμογεννητριών

Υπάρχουν διάφοροι τύποι μετατροπέων που βρίσκουν εφαρμογή σε ανεμογεννήτριες οποίες συνδέονται στο δίκτυο .Το σχήμα 1.5 δείχνει μια ανεμογεννήτρια μόνιμων μαγνητών συνδεδεμένη στο δίκτυο μέσω μιας τριφασικής ανόρθωσης , ενός μετατροπέα ΣΡ/ΣΡ και ενός αντιστροφέα. Ο μετατροπέας ΣΡ/ΣΡ χρησιμοποιείται για τον έλεγχο στροφών της ανεμογεννήτριας με τέτοιο τρόπο ώστε να παίρνουμε στην έξοδο την μέγιστη δυνατή ηλεκτρική ισχύ(Maximum Power Point Tracking). Η συνεχής τάση της γεννήτριας ανορθώνεται μέσω του ανορθωτή διόδων και στη συνέχεια ο μετατροπέας ΣΡ/ΣΡ ελέγχει το ρεύμα ελέγχοντας παράλληλα την ηλεκτρική ροπή οδηγώντας με τον τρόπο αυτό την ανεμογεννήτρια πάνω στην καμπύλη βέλτιστης αεροδυναμικής απόδοσης. Αναλυτική παρουσίαση του συστήματος θα γίνει στο επόμενο κεφάλαιο.



Σχήμα 1.5
μετατροπέας EP/ΣP/EP με απλή ανόρθωση, μετατροπέα ανύψωσης τάσης και αντιστροφέα τύπου πηγής τάσης.

Μια δεύτερη τοπολογία είναι η σύνδεση δύο όμοιων μετατροπέων τύπου πηγής τάσης (VSI – PWM). Η διάταξη αυτή είναι γνωστή και ως «back-to-back» μετατροπέας, σχήμα 1.6. Ο μετατροπέας από την πλευρά της γεννήτριας λειτουργεί ως ανόρθωση ενώ ο μετατροπέας από την πλευρά του δικτύου ως αντιστροφέας. Η ροή ισχύος σε αυτή τη διαμόρφωση μπορεί να είναι αμφίπλευρη. Για να επιτευχθεί βέλτιστος έλεγχος της ισχύος εξόδου η συνεχής τάση πρέπει να ανορθωθεί σε επίπεδα υψηλότερα από τη τάση του δικτύου. Η ροή ισχύος προς το δίκτυο ελέγχεται από τον αντιστροφέα με τέτοιο τρόπο ώστε να κρατάτε η τάση του πυκνωτή σταθερή, ενώ ο έλεγχος του μετατροπέα της γεννήτριας γίνεται έτσι ώστε να οδηγούμε τη γεννήτρια σε ταχύτητες περιστροφής που να δίνουν βέλτιστη λειτουργία [9].



Σχήμα 1.6
μετατροπέας EP/ΣP/EP με σύνδεση back-to-back αντιστροφέων.

1.5 Απαιτήσεις κωδίκων για τη σύνδεση Α/Γ στο δίκτυο

Με την όλο και αυξανόμενη διείσδυση των αιολικών πάρκων που σε χώρες όπως η Γερμανία, η Ισπανία και η Δανία φτάνουν στο 20%, υπήρξε η ανάγκη θέσπισης κάποιων κανόνων και κωδίκων για την σύνδεση Α/Π στα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας. Η διαφορά των αιολικών πάρκων με τους συμβατικούς σταθμούς είναι η διαφορετική πρωτογενής πηγή ενέργειας που στη περίπτωση της πρώτης είναι μη ελεγχόμενη και δύσκολα προβλέψιμη. Ένα άλλο σημείο διαφοροποίησης των συμβατικών σταθμών παραγωγής είναι ότι αποτελούνται από σύγχρονες γεννήτριες και βοηθητικά συστήματα αυτομάτου ελέγχου, ρυθμιστές τάσης και στροφών, που δίνουν την δυνατότητα παροχής καλής ποιότητας ισχύος κρατώντας την τάση στα επιτρεπτά όρια. Όσον αφορά τη συχνότητα, ακόμα και αν θεωρήσουμε ότι ο συμβατικός σταθμός δεν είναι διασυνδεδεμένος, λειτουργεί δηλαδή σε ένα μικρό αυτόνομο δίκτυο, υπάρχει δυνατότητα ρύθμισης φορτίου συχνότητας από τους ρυθμιστές στροφών του σταθμού.

Σε ένα ηλεκτρικό σύστημα που έχει συνδεθεί κάποιο αιολικό πάρκο, η μεταβλητότητα που παρουσιάζει η ισχύς εξόδου μεταφράζεται σε μεταβολές της συχνότητας του δικτύου, δεδομένου ότι η ζήτηση είναι σταθερή. Στο κεφάλαιο 1.3 αναφέραμε ότι οι μεταβολές αυτές οδηγούν σε περιορισμό της αιολικής διείσδυσης σε επίπεδα που δεν επηρεάζεται η φυσιολογική λειτουργία του συστήματος. Για τον λόγο αυτό τα αιολικά πάρκα κατά το παρελθόν αντιμετωπιζόνταν ως αρνητικά φορτία τα οποία σε περιπτώσεις διαταραχών έβγαιναν από την παραγωγή. Κάτι τέτοιο σε περίπτωση μικρής διείσδυσης ήταν εφικτό χωρίς προβλήματα μεταβατικής ευστάθειας. Σε περίπτωση όμως μεγάλης διείσδυσης που όπως είπαμε φτάνει και το 20% η απότομη αφαίρεση αυτών των σταθμών από την συνολική παραγωγή ισοδυναμεί με μια πολύ μεγάλη διαταραχή που μπορεί να οδηγήσει το σύστημα σε μεταβατική αστάθεια οδηγώντας ακόμα και σε μερικό ή ολικό μπλάκ άουτ. Συνεπώς για την διασφάλιση της ομαλής και ασφαλούς λειτουργίας των συστημάτων αλλά και για να γίνει εφικτή η όλο και μεγαλύτερη διείσδυση των Α/Π στην συνολική παραγωγή, τίθενται αυτομάτως απαιτήσεις για συμμετοχή των αιολικών σταθμών στον έλεγχο και τη ρύθμιση του συστήματος, στο πρότυπο των συμβατικών μονάδων που υποκαθιστούν.

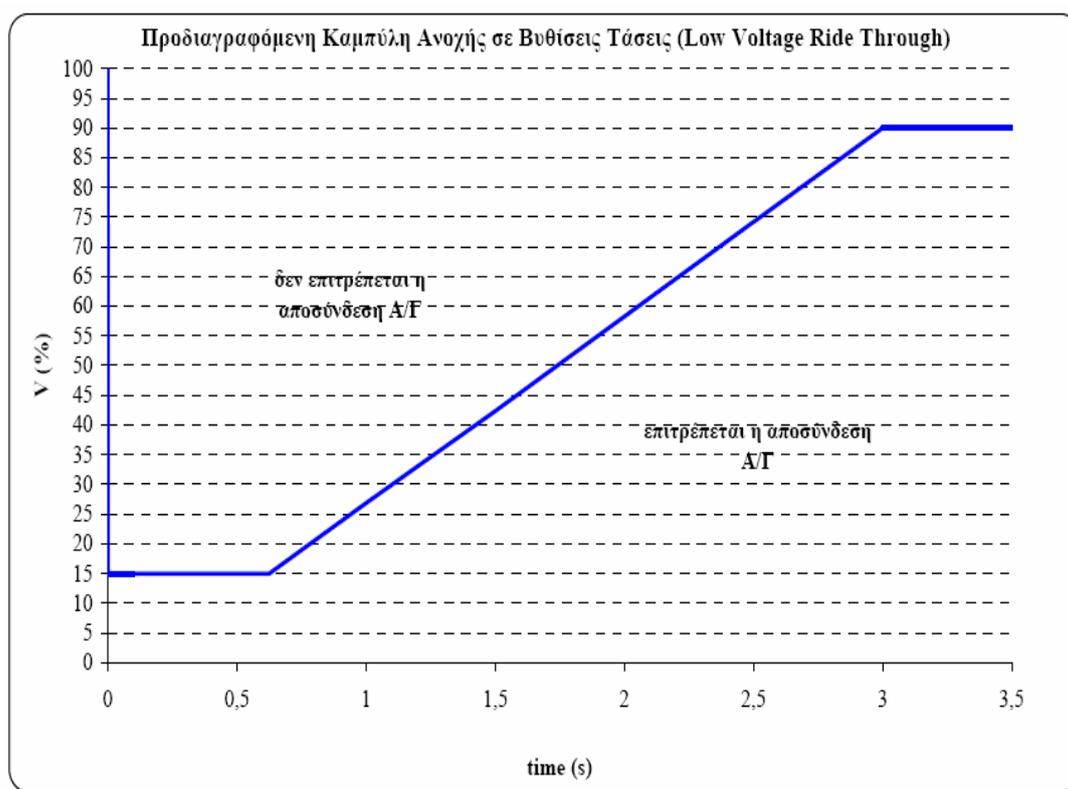
1.5.1 Ανοχή σε βυθίσεις τάσης και αποκρίσεις σε περίπτωση βύθισης τάσης του δικτύου.

Σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας η εμφάνιση ενός σφάλματος σε ένα σημείο έχει ως επακόλουθο την βύθιση της τάσης σε απομακρυσμένες από το σημείο του σφάλματος περιοχές. Η διάρκεια τέτοιων βυθίσεων μπορεί να ποικίλει από 100ms έως 1-2sec. Η αντιμετώπιση τέτοιων διαταραχών από συμβατικές μονάδες παραγωγής είναι η παραμονή τους στο δίκτυο και η υποστήριξη της τάσης μέσω των ρυθμιστών τάσεως που επεμβαίνουν κατευθείαν στη διέγερση του συστήματος. Σε αντίθεση με τους συμβατικούς σταθμούς παραγωγής, αυτό που μέχρι σήμερα γινόταν όταν είχαμε μια βύθιση στην τάση ενός Α/Π ήταν η άμεση απομάκρυνση του από το δίκτυο. Αυτή η αντιμετώπιση δεν είχε καμία επίπτωση στο σύστημα δεδομένου ότι η διείσδυση ήταν μικρή και απώλεια της ισχύος αφενός δεν δημιουργούσε διαταραχή στο σύστημα και αφετέρου αντισταθμιζόνταν από τους συμβατικούς σταθμούς παραγωγής, ενώ συνέτρεχαν και τεχνικοί λόγοι που η άμεση απομάκρυνση των Α/Γ ήταν προτιμότερη και επιβεβλημένη.

Με την αυξανόμενη διείσδυση των Α/Π στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας και την εγκατάσταση σταθμών αιολικής παραγωγής που φτάνουν έως και δεκάδες MW, η εμφάνιση τέτοιων διαταραχών και η άμεση απομάκρυνση των σταθμών από το δίκτυο θα έχει σημαντική επίπτωση στη μεταβατική ευστάθεια του δικτύου, λόγω της έλλειψης ισοζυγίου παραγωγής κατανάλωσης, που μπορεί να οδηγήσει ακόμα και σε ολική απώλεια ισχύος. Για τον λόγο αυτό υιοθετούνται νέοι σύγχρονοι κώδικες που περιγράφουν την συμπεριφορά των Α/Π σε τέτοιες διαταραχές. Οι κώδικες προβλέπουν συγκεκριμένες και αυστηρές απαιτήσεις για την ικανότητα παραμονής των Α/Γ σε λειτουργία υπό συνθήκες βύθισης της τάσης οι οποίες είναι γνωστές και ως (Fault Ride Through, FRT) ή (Low Voltage Ride Through, LVRT) και εκφράζονται υπό τη μορφή καμπύλης τάσης χρόνου. Στο σχήμα 1.5.1 φαίνεται η μορφή μιας τυπικής καμπύλης τάσης χρόνου .

Σύμφωνα με την καμπύλη αυτή, για βυθίσεις τάσης πάνω από το όριο που προδιαγράφεται, οι Α/Γ πρέπει να παραμένουν συνδεδεμένες στο δίκτυο ενώ η αποσύνδεση τους είναι επιτρεπτή μόνο σε βυθίσεις κάτω από το όριο. Η καμπύλη του σχήματος 1.5.1 όπως είπαμε είναι μια τυπική καμπύλη, η μορφή της οποίας εξαρτάται από τις ιδιαιτερότητες του κάθε συστήματος και για το λόγο αυτό κάθε χώρα έχει θεσπίσει δικές τις καμπύλες που περιγράφουν πλήρως την συμπεριφορά των Α/Π πάρκων που είναι συνδεδεμένα στο δίκτυο της.

Τέλος οι απαιτήσεις FRT που περιγράφονται αναλυτικά στους κώδικες δεν εξαντλούνται στις καμπύλες βύθισης τάσης, επιπλέον επιβάλλεται η ταχεία επαναφορά της ενεργού και αέργου ισχύος εξόδου του σταθμού στα προ της διαταραχής επίπεδα αμέσως μετά την επάνοδο της τάσης στα κανονικά επίπεδα λειτουργίας. Σε ορισμένους κώδικες επιβάλλεται η αυξημένη παραγωγή αέργου ισχύος από τις Α/Γ κατά τη διάρκεια της διαταραχής προκειμένου να γίνει υποστήριξη της τάσης συστήματος, συμπεριφορά που είναι όμοια με την υπερδιέγερση των συμβατικών σύγχρονων γεννητριών που πραγματοποιείται από τους αυτόματους ρυθμιστές τάσης σε περίπτωση σφάλματος.



Σχήμα 1.7

Τυπική καμπύλη προδιαγραφών της ανοχής σε βυθίσεις της τάσης του δικτύου

1.6 Δομή της εργασίας

Αντικείμενο μελέτης της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί η μελέτη μιας ανεμογεννήτριας μικρής ισχύος (2.5kW) με σύγχρονη γεννήτρια μόνιμου μαγνήτη διασυνδεδεμένης στο δίκτυο. Πιο συγκεκριμένα αναπτύσσεται ένα δυναμικό μοντέλο που προσομοιώνει τη λειτουργία της ανεμογεννήτριας και αναλύονται τα επιμέρους υποσυστήματα της μαζί με τους αντίστοιχους ελεγκτές. Εξετάζεται η λειτουργική συμπεριφορά της ανεμογεννήτριας τόσο σε ομαλές συνθήκες λειτουργίας όσο και σε διαταραχές όπως βυθίσεις της τάσης του δικτύου. Τέλος, υλοποιείται ελεγκτής που έχει ως σκοπό τον έλεγχο του συστήματος κάτω από αυτές τις συνθήκες σύμφωνα με τα διεθνή πρότυπα [28]. Συγκρίνονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης με πειραματικά σε διάταξη που περιλαμβάνει σύγχρονη μηχανή μόνιμων μαγνητών, η οποία έχει κατασκευαστεί και λειτουργεί στο εργαστήριο ηλεκτρικών μηχανών και ηλεκτρονικών ισχύος του ΕΜΠ. Η εργασία αναπτύσσεται σε 5 κεφάλαια.

Στο πρώτο κεφάλαιο πραγματοποιήθηκε μια επισκόπηση των αιολικών συστημάτων και των τεχνολογιών που εφαρμόζονται στα συστήματα των ανεμογεννητριών.

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζεται αναλυτικά η μοντελοποίηση του συστήματος της ανεμογεννήτριας μεταβλητών στροφών με σύγχρονη γεννήτρια επιφανειακών μόνιμων μαγνητών. Γίνεται περιγραφή του αεροδυναμικού μέρους της με τις αντίστοιχες εξισώσεις από τις οποίες προκύπτει και το αντίστοιχο μοντέλο. Στη συνέχεια αναλύεται η λειτουργία του μετατροπέα ανύψωσης αλλά και του αντιστροφέα καθώς και των αντίστοιχων ελεγκτών τους. Πιο συγκεκριμένα, σχεδιάστηκε ελεγκτής ανεύρεσης του βέλτιστου σημείου λειτουργίας που χρησιμοποιεί τη βέλτιστη χαρακτηριστική καμπύλη ροπής στροφών ο οποίος στη συνέχεια ενσωματώθηκε στο μετατροπέα ανύψωσης τάσης. Επιπλέον, εξετάστηκαν και ενσωματώθηκαν δύο ακόμη ελεγκτές ανεύρεσης βέλτιστου σημείου λειτουργίας βασισμένοι σε μεθοδολογίες που προτείνονται στη βιβλιογραφία[22]: Ένας ελεγκτής βασισμένος σε συνεχείς αλλαγές και συγκρίσεις και ένας ελεγκτής που χρησιμοποιεί τεχνικές ασαφούς λογικής. Τέλος σχεδιάστηκε ελεγκτής ο οποίος είναι υπεύθυνος για την λειτουργία του αντιστροφέα τύπου πηγής τάσης που πραγματοποιεί διανυσματικό έλεγχο τάσης και ρύθμιση ρεύματος επιτρέποντας τον έλεγχο της άεργου ισχύος που ανταλλάσσει με το δίκτυο.

Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων του μοντέλου προσομοίωσης τόσο σε σταθερή ταχύτητα ανέμου και κατά συνέπεια και σταθερή αεροδυναμική ροπή, όσο και σε βηματική μεταβολή της ταχύτητας ανέμου. Τα αποτελέσματα σχολιάζονται και συγκρίνονται με αντίστοιχα πειραματικά προς επιβεβαίωση της ακριβείας τους. Τέλος εξετάζεται η απόκριση σε συγκεκριμένη χρονοσειρά ανέμου και διερευνάται η ακρίβεια των αποτελεσμάτων.

Στο τέταρτο κεφάλαιο θεωρώντας σταθερή αεροδυναμική ροπή, επιβάλλονται διαταραχές στην τάση του δικτύου με σκοπό να παρατηρηθεί ο τρόπος με τον οποίο αντιδρούν τα υποσυστήματα της ανεμογεννήτριας αλλά και οι επιμέρους ελεγκτές. Οι διαταραχές που εξετάζονται αφορούν σε βυθίσεις της τάσης διαφορετικών τιμών και

διάρκειας ακριβώς όπως επιβάλλουν τα πρότυπα δοκιμών των ανεμογεννητριών [28]. Αφού καταγραφεί η απόκριση και εντοπιστούν προβλήματα και ατέλειες των ελεγκτών προτείνεται ένας νέος ελεγκτής προστασίας υπότασης- υπερέυματος. Αυτός ο ελεγκτής αναγνωρίζει τέτοιες διαταραχές και ελέγχει την λειτουργία της ανεμογεννήτριας βάσει των ορίων αντοχής σε βύθιση της τάσης.

Στο πέμπτο κεφάλαιο συγκεντρώνονται τα κυριότερα συμπεράσματα της διπλωματικής εργασίας και επισημαίνονται τα στοιχεία καινοτομίας της. Επίσης αναφέρονται θέματα τα οποία ανέδειξε η παρούσα διπλωματική εργασία και τα οποία θα μπορούσαν να αποτελέσουν αντικείμενο μελλοντικής ερευνητικής διερεύνησης. Τέλος παρατίθεται η βιβλιογραφία της εργασίας.

1.7 Συνεισφορά της εργασίας

Η συνεισφορά της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η σχεδίαση ενός δυναμικού μοντέλου πραγματικού χρόνου στο περιβάλλον SIMULINK/MATLAB που προσομοιώνει τη λειτουργία μιας ανεμογεννήτριας μεταβλητών στροφών διασυνδεδεμένης στο δίκτυο, η οποία χρησιμοποιεί σύγχρονη γεννήτρια επιφανειακών μόνιμων μαγνητών. Το μοντέλο προσομοιώνει αναλυτικά όλα τα επιμέρους υποσυστήματα της ανεμογεννήτριας μαζί με τους επιμέρους ελεγκτές. Ένα νέο χαρακτηριστικό του παραπάνω μοντέλου είναι η ικανότητα ενσωμάτωσης στους αντίστοιχους μετατροπείς ισχύος, ελεγκτών που χρησιμοποιούν διάφορες τεχνικές ελέγχου που συναντώνται στη βιβλιογραφία. Εκτός των προαναφερομένων, η διαμόρφωση του μοντέλου επιτρέπει τη μελέτη των επιπτώσεων που έχουν στο σύστημα οι διάφορες διαταραχές της τάσης του δικτύου. Έτσι μπορούν να εξαχθούν συμπεράσματα για τη δυναμική συμπεριφορά του συστήματος και για την καταλληλότητα των ελεγκτών που χρησιμοποιούνται. Τα συμπεράσματα που βγαίνουν θεωρούνται χρήσιμα στη σχεδίαση και τη κατασκευή των ανεμογεννητριών και μπορούν να αποτελέσουν αντικείμενο περαιτέρω μελέτης. Τέλος, προτείνεται ένας νέος ελεγκτής ο οποίος αναλαμβάνει τη διαχείριση του συστήματος της ανεμογεννήτριας σε καταστάσεις μη ομαλής λειτουργίας, εξασφαλίζοντας την προστασία των ημιαγωγικών στοιχείων του μετατροπέα αλλά και την κατά το δυνατόν αδιάλειπτη λειτουργία της σύμφωνα με τις προβλέψεις των προτύπων [26].

Κεφάλαιο 2

Μοντελοποίηση υποσυστημάτων Α/Γ που μελετήθηκε

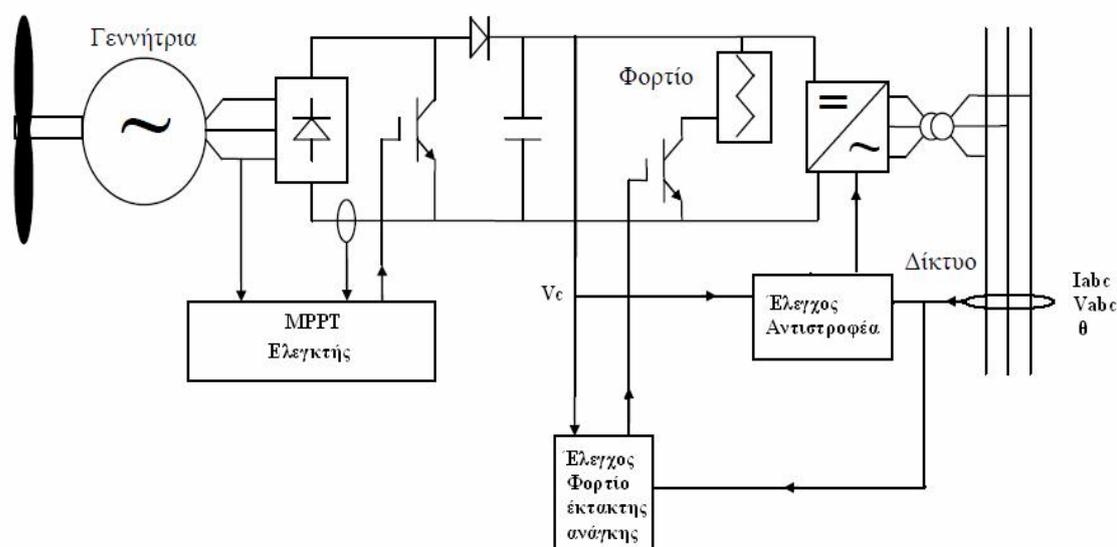
Εισαγωγή

Όπως περιγράφηκε και σε παραπάνω κεφάλαιο οι ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών έχουν επικρατήσει έναντι των σταθερών στροφών στην αγορά των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Αντικείμενο αυτής εργασίας είναι η μοντελοποίηση μιας ανεμογεννήτριας μεταβλητών στροφών με σύγχρονη γεννήτρια μόνιμου μαγνήτη και η ανάλυση της λειτουργίας του σε απομονωμένη αλλά και διασυνδεδεμένη λειτουργία. Μεταξύ άλλων μελετάται η επίδραση των διαταραχών της τάσης του δικτύου στο σύστημα της ανεμογεννήτριας και καταγράφονται οι αντίστοιχες αποκρίσεις. Για τη μελέτη αυτή σχεδιάστηκε μοντέλο στο περιβάλλον του Simulink/Matlab που περιλαμβάνει λεπτομερώς το αεροδυναμικό μέρος της ανεμογεννήτριας και το ηλεκτρικό μαζί με τους ελεγκτές του και το δίκτυο στο οποίο είναι συνδεδεμένο. Η σχεδίαση βασίστηκε κατά κύριο λόγο στη προσπάθεια να προσομοιωθεί η διάταξη του εργαστηρίου έτσι ώστε να υπάρχει πειραματική επιβεβαίωση του μοντέλου.

2.1 Γενική περιγραφή μοντέλου συστήματος

Το σύστημα που προσομοιώθηκε και αναλύθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία είναι μια ανεμογεννήτρια μεταβλητών στροφών με σύγχρονη γεννήτρια μόνιμου μαγνήτη ονομαστικής ισχύος 2.5 kW. Η ονομαστική τάση της γεννήτριας είναι 220V φασική, η ονομαστική συχνότητα 80 Hz και διαθέτει 12 ζεύγη πόλων. Λόγω του μεγάλου αριθμού των πόλων δεν χρησιμοποιείται κιβώτιο ταχυτήτων περιορίζοντας τις μηχανικές καταπονήσεις και τον αριθμό των βλαβών [5]. Η τάση στην έξοδο της γεννήτριας ανορθώνεται μέσω μιας τριφασικής μη ελεγχόμενης γέφυρας απλών διόδων. Στη συνέχεια η ανορθωμένη τάση εφαρμόζεται στο μετατροπέα ανύψωσης τάσης (DC – DC Boost Converter). Η λειτουργία του μετατροπέα ανύψωσης είναι ο έλεγχος του ρεύματος εξόδου του ανορθωτή κατά συνέπεια και του ρεύματος της γεννήτριας και εν τέλει της αναπτυσσόμενης από αυτή ροπής. Παράλληλα ο μετατροπέας ανύψωσης λειτουργεί και ως διασύνδεση της τάσης της γεννήτριας, η οποία μεταβάλλεται με την ταχύτητα του ανέμου και της συνεχής τάσης που εφαρμόζεται στην είσοδο του αντιστροφέα. Στη συνέχεια στην έξοδο του μετατροπέα ανύψωσης τάσης υπάρχει ένας αντιστροφέας τύπου πηγής τάσης (Voltage source Inverter, VSI), όπου έχει ως στόχο να μετάγει την ισχύ προς το δίκτυο. Ο έλεγχος του αντιστροφέα πραγματοποιείται από έναν ελεγκτή ο οποίος διατηρεί την συνεχή τάση του πυκνωτή εισόδου σταθερή. Στο σχήμα 2.1 φαίνεται η διάταξη που αναλύθηκε.

Για τη μελέτη του συγκεκριμένου συστήματος είναι αναγκαία η σχεδίαση κάποιου μοντέλου που προσομοιώνει πλήρως την λειτουργία του. Ήδη στην αναφορά [7] έχει αναπτυχθεί μοντέλο το οποίο περιγράφει με πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα την απομονωμένη λειτουργία του συστήματος της Α/Γ μεταβλητών στροφών με γεννήτρια μόνιμων μαγνητών. Η λειτουργία του βασίζεται στη περιγραφή του συστήματος θεωρώντας εξισώσεις που περιγράφουν τα μεγέθη με μέσες τιμές μικρής περιόδου. Το μοντέλο αυτό δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα για μελέτες που έχουν κυρίως να κάνουν με τη σχεδίαση ελεγκτών ισχύος του συστήματος της Α/Γ και τη σύγκριση των αποκρίσεων τους.



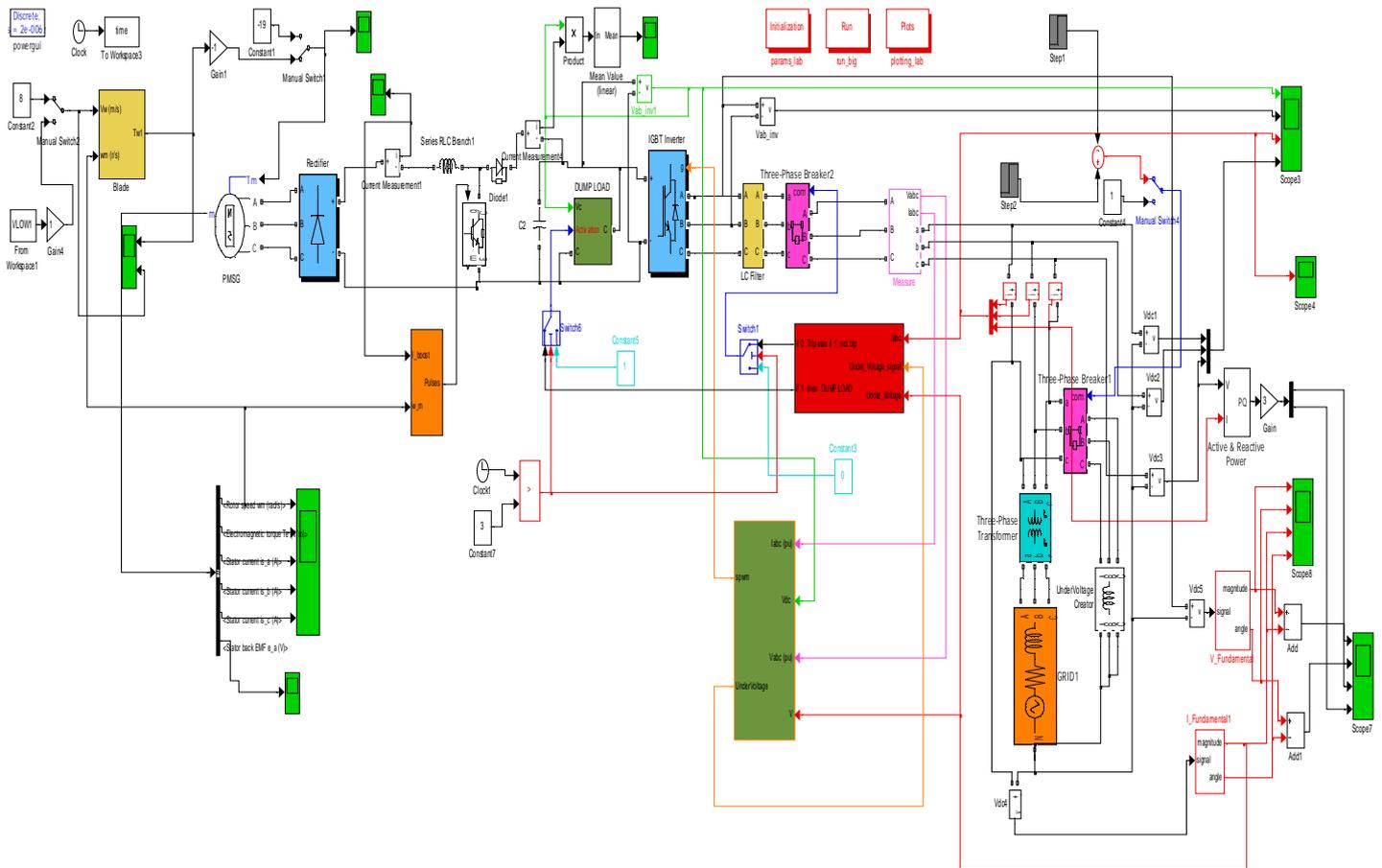
Σχήμα 2.1

Σύστημα ανεμογεννήτριας μεταβλητών στροφών με σύγχρονη γεννήτρια επιφανειακών μόνιμων μαγνητών

Μειονέκτημα της μοντελοποίησης αυτής είναι αφενός μεν η έλλειψη σύνδεσης της ανεμογεννήτριας στο δίκτυο καθώς και η απουσία αντιστροφέα και αφετέρου η αδυναμία μελέτης δυναμικών φαινομένων. Όσο μικρή και να είναι η περίοδος που υπολογίζεται η μέση τιμή των μεγεθών, είναι αδύνατο να προσομοιωθούν δυναμικά φαινόμενα, ιδιαίτερα αν αυτά λαμβάνουν χώρα από την πλευρά του δικτύου. Κύριος λόγος είναι το γεγονός το μοντέλο αυτό θεωρεί ως είσοδο τη ταχύτητα του ανέμου και δίνει ως έξοδο ενεργό ισχύ στο απομονωμένο φορτίο. Δεν υπάρχει δηλαδή κάποιο είδος ανατροφοδότησης της τάσης του δικτύου στο σύστημα και επομένως ο τρόπος που αυτή επηρεάζει τη λειτουργία του. Για το λόγο αυτό και με σκοπό να μελετηθούν τέτοια δυναμικά φαινόμενα, σχεδιάστηκε νέο μοντέλο, πραγματικού χρόνου που προσομοιώνει τη συμπεριφορά του συστήματος της Α/Γ συνδεδεμένης στο δίκτυο.

Το μοντέλο που σχεδιάστηκε στο περιβάλλον Simulink/Matlab είναι πραγματικού χρόνου, πράγμα που σημαίνει ότι μπορούν να μελετηθούν οι στιγμιαίες τιμές των υπό μελέτη μεγεθών και όχι μόνο οι μέσες τιμές τους. Περιλαμβάνει όλα τα υποσυστήματα της Α/Γ, όπως προσομοίωση του αεροδυναμικού μέρους, της

σύγχρονης γεννήτριας, του μετατροπέα ανύψωσης τάσης, του αντιστροφέα τύπου πηγής τάσης συνδεδεμένου στο δίκτυο καθώς και όλων των ελεγκτών. Υπάρχει άμεση αλληλεπίδραση της λειτουργίας των υποσυστημάτων, αυτό σημαίνει ότι η λειτουργία του ενός επηρεάζει άμεσα και τα άλλα λειτουργώντας μαζί σαν ενιαίο σύνολο όπως γίνεται στο φυσικό σύστημα. Είναι μοντέλο διακριτού χρόνου και αυτό πέρα από την σχετικά γρήγορη απόκριση, δίνει την δυνατότητα να χρησιμοποιηθούν οι ελεγκτές που έχουν ήδη αναπτυχθεί[22]. Στο σχήμα 2.2 παρουσιάζεται το μοντέλο της παρούσας εργασίας.



Σχήμα 2.2
Μοντέλο προσομοίωσης συστήματος ανεμογεννήτριας μεταβλητών στροφών

2.2 Αεροδυναμικό μέρος

Η αεροδυναμική ισχύς του ανέμου που μετατρέπεται σε μηχανική από τον ανεμοκινητήρα υπολογίζεται από την πολύ γνωστή εξίσωση [11].

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

Όπου

R : η ακτίνα και ω_R η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής της έλικας του ανεμοκινητήρα
 ρ : πυκνότητα του αέρα, λαμβάνεται στη παρούσα εργασία 1.25Kg/m^3

Η πυκνότητα του αέρα συνδέεται με την μάζα του κινούμενου αέρα, m από τη σχέση

$$m = \rho A V_w \quad (2.2)$$

A : η επιφάνεια που διαπερνά κάθετα ο άνεμος και συγκεκριμένα $A = \pi R^2$

β : η γωνία pitch της έλικας

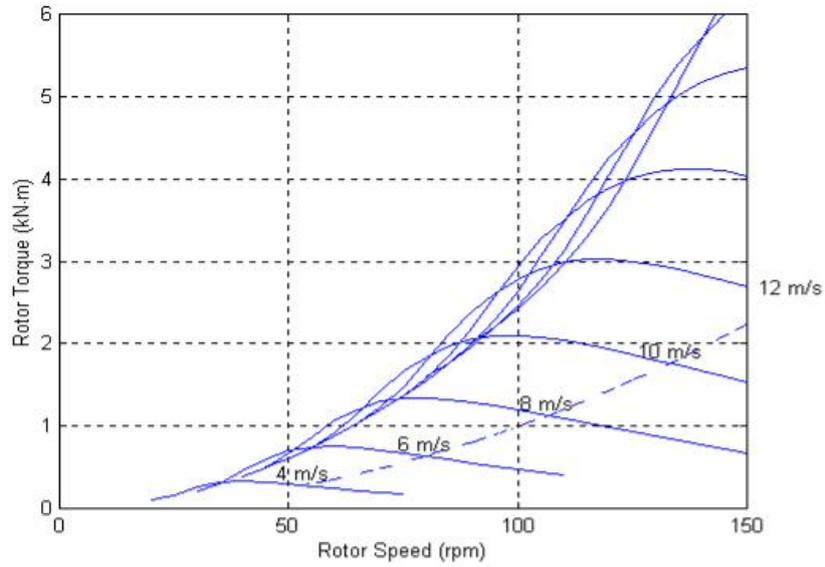
$C_p(\lambda, \beta)$: ο αεροδυναμικός συντελεστής ισχύος ο οποίος είναι συνάρτηση του λόγου ταχυτήτων:

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

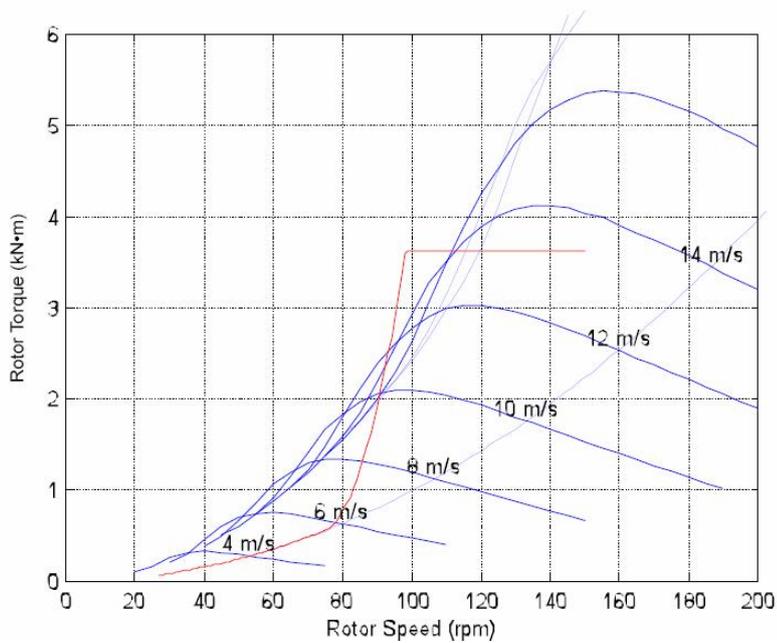
Η μέγιστη τιμή του $C_p(\lambda, \beta)$ σύμφωνα με την απόδειξη του A.Betz είναι 0.593, εξαιτίας όμως του γεγονότος ότι υπάρχουν πάντα αεροδυναμικές απώλειες οι συνήθεις τιμές που συναντά κανείς στη πράξη είναι από 0.3 ως 0.5. Για κάθε ταχύτητα ανέμου υπάρχει ένα αντίστοιχο λ για το οποίο ο αεροδυναμικός συντελεστής λαμβάνει τη μέγιστη τιμή του μεγιστοποιώντας την παραγόμενη ηλεκτρική ισχύ. Έτσι για βέλτιστο αεροδυναμικό συντελεστή και διαφορετικές ταχύτητες περιστροφής σχηματίζονται χαρακτηριστικές ισχύος – στροφών. Αντίστοιχες χαρακτηριστικές συσχετίζουν και τη ροπή με τις στροφές και προκύπτουν από τη σχέση

$$T_m = \frac{P_m}{\omega_R} \quad (2.4)$$

Στο σχήμα 2.3 παρουσιάζονται οι χαρακτηριστικές ροπής – στροφών του ανεμοκινητήρα για διαφορετικές ταχύτητες ανέμου. Η μέγιστη ισχύς στις καμπύλες αυτές εμφανίζεται σε σημεία που το γινόμενο της ροπής επί των στροφών μεγιστοποιείται. Συνδυάζοντας αυτά τα σημεία εξάγουμε τη βέλτιστη χαρακτηριστική ροπής στροφών. Η χαρακτηριστική αυτή καμπύλη αποτελεί το ίχνος πάνω στο οποίο θα πρέπει να λειτουργήσει το σύστημα ώστε να λαμβάνετε στη έξοδο τη μέγιστη δυνατή ισχύ που μπορεί απορροφηθεί από τον άνεμο. Κάτι τέτοιο βέβαια ισχύει για χαμηλές ισχύς. Σε μεγάλες ισχύς το σύστημα για λόγους ασφάλειας πρέπει να περιορίζει τις στροφές του κάτω από τις ονομαστικές. Αυτό πρέπει να γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε οποιαδήποτε ριπή ανέμου να μην οδηγήσει σε υπερτάχυνση. Για τον λόγο αυτό συνηθίζεται να χρησιμοποιείται μια άλλη χαρακτηριστική, την κόκκινη όπως αυτή που φαίνεται στο σχήμα 2.4. Η καμπύλη αυτή αποτελείται από δύο τμήματα, το πρώτο τμήμα έχει χαμηλή κλίση και ακολουθεί την βέλτιστη παραγωγή ισχύος ενώ το δεύτερο τμήμα είναι απότομο και περιορίζει την ταχύτητα κάτω από τις ονομαστικές στροφές.



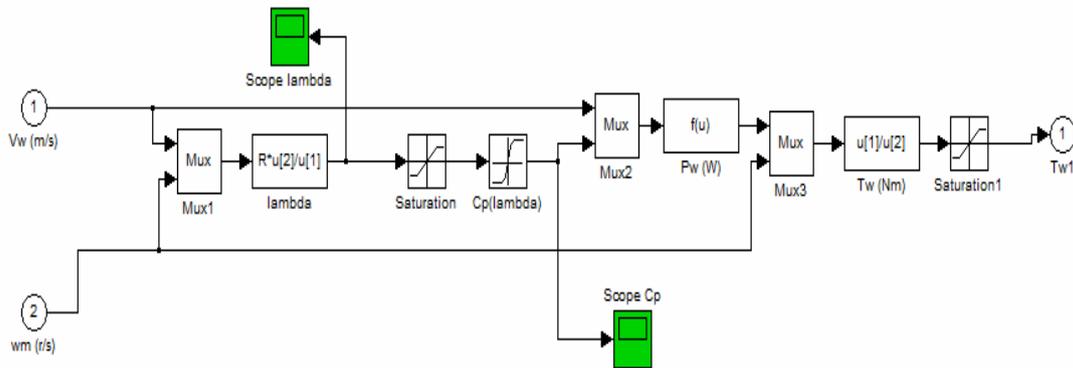
Σχήμα 2.3
Χαρακτηριστική ροπής στροφών - Ιδανική



Σχήμα 2.4
Χαρακτηριστική ροπής στροφών για έλεγχο – Μη ιδανική

2.2.1 Μοντελοποίηση αεροδυναμικού μέρους

Βάσει των εξισώσεων που περιγράφουν το αεροδυναμικό μέρος της Α/Γ κατασκευάστηκε και το αντίστοιχο μοντέλο στο περιβάλλον του SIMULINK/MATLAB.



Σχήμα 2.5
Μοντέλο προσομοίωσης του αεροδυναμικού μέρους της ανεμογεννήτριας

Όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.5, η ταχύτητα ανέμου και η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής αποτελούν τις εισόδους του μοντέλου. Με βάση τις στιγμιαίες τιμές αυτών των μεγεθών υπολογίζεται από τη σχέση 2.3 ο στιγμιαίος λόγος ταχυτήτων, θεωρώντας για τιμή της ακτίνας της έλικας R ίση με 1.25m. Στη συνέχεια από το στιγμιαίο λόγο ταχυτήτων με την βοήθεια ενός πίνακα (lookup table) αντιστοιχείται η τιμή του αεροδυναμικού συντελεστή. Σημειώνεται ότι για την προσομοίωση η γωνία της έλικας είναι μηδενική αφού το σύστημα δεν διαθέτει ρυθμιστή της κλίσης της γωνίας των πτερυγίων (pitch control). Συνηθίζεται σε Α/Γ μικρής ισχύος να μην υπάρχει ελεγκτής pitch, συναντάτε κυρίως σε μεγάλες ανεμογεννήτριες και χρησιμοποιείται για πέδη αλλά και για να ρυθμίζει την αεροδυναμική ισχύ στα ονομαστικά μεγέθη όταν η ταχύτητα ανέμου ξεπερνά την ονομαστική. Με δεδομένα λοιπόν τα μεγέθη αυτά σε κάθε χρονική στιγμή υπολογίζεται η αεροδυναμική ροπή που ασκείται στον άξονα της γεννήτριας από τη σχέση 2.1 και 2.4.

Συνοψίζοντας δημιουργήθηκε ένα υποσύστημα που δέχεται εισόδους την ταχύτητα ανέμου και τη γωνιακή ταχύτητα περιστροφής και εμφανίζει στη έξοδο σε κάθε χρονική στιγμή τη ροπή που εφαρμόζεται στον άξονα της γεννήτριας. Η έξοδος του υποσυστήματος τροφοδοτείται στη συνέχεια στο υποσύστημα της γεννήτριας όπως φαίνεται στο σχήμα 2.2 .

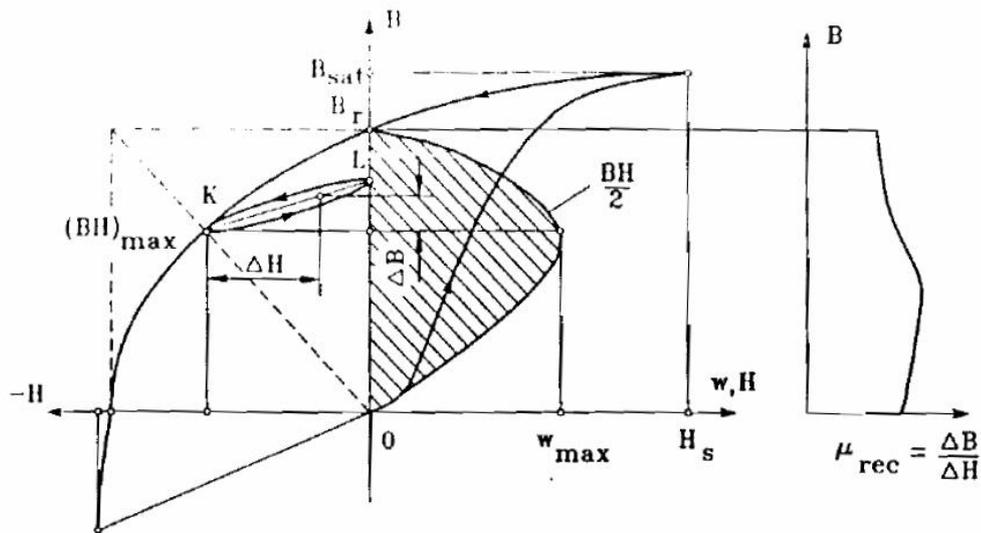
2.3 Σύγχρονη γεννήτρια μόνιμων μαγνητών

Τα πρώτα συστήματα που χρησιμοποιούσαν μόνιμους μαγνήτες ως διέγερση σε μηχανές αναπτύχθηκαν από το 19^ο αιώνα , J.Henry (1831) , H. Pixii (1832) , F.Watkins (1835) [11]. Λόγω της χαμηλής ποιότητας των μαγνητικών υλικών η απόδοση τέτοιων συστημάτων δεν ήταν ιδιαίτερα αποδοτική. Τα συστήματα αυτά εμφάνιζαν προβλήματα απομαγνήτισης σε έντονες πεδιακές μεταβολές με αποτέλεσμα το ενδιαφέρον γρήγορα να στραφεί σε συστήματα ηλεκτρομαγνητικής διέγερσης . Στις μέρες μας με την εξέλιξη της επιστήμης των υλικών και την χρήση κράματος από νεοδύμιο κατασκευάστηκαν μόνιμοι μαγνήτες που παρουσιάζουν μεγάλη σταθερότητα στα χαρακτηριστικά τους, πράγμα που τα έκανε ιδιαίτερα ελκυστικά λόγω των μεγάλων πλεονεκτημάτων που δίνουν στα συστήματα ηλεκτροκίνησης .

Στον αντίποδα της τεχνολογίας των μόνιμων μαγνητών βρίσκονται οι μηχανές επαγωγής οι οποίες αποτέλεσαν την ατμομηχανή της ηλεκτροκίνησης τον 20 αιώνα. Σήμερα εξαιτίας της μεγάλης προόδου που πραγματοποιήθηκε στους τομείς των ηλεκτρονικών ισχύος και των συστημάτων ελέγχου η χρήση τους εντατικοποιήθηκε. Βασικό πλεονέκτημα αυτών των μηχανών είναι το χαμηλό κόστος τους και η σχετικά απλή κατασκευή σε συνδυασμό με την αξιοπιστία που προσφέρουν. Μειονέκτημα τους αποτελεί το μικρό διάκενο και η λειτουργία υπό χαμηλότερο συντελεστή ισχύος συγκριτικά με τις σύγχρονες μηχανές μόνιμων μαγνητών[14].

Συγκρίνοντας τους δύο τύπους μηχανών για χρήση σε συστήματα μετατροπής της αιολικής ενέργειας σε ηλεκτρική, η σύγχρονη γεννήτρια μόνιμων μαγνητών θεωρείται ως η καταλληλότερη λύση για ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών[10]. Τα κύρια πλεονεκτήματα είναι της είναι [14] : Καλύτερη απόδοση δεδομένου ότι δεν υπάρχει ηλεκτρική σύνδεση στο δρομέα με αποτέλεσμα μειωμένες απώλειες, ανάπτυξη μεγαλύτερης ροπής ή μεγαλύτερης ισχύος εξόδου ανά μονάδα. Τέλος η δυναμική συμπεριφορά είναι καλύτερη στις μηχανές μόνιμου μαγνήτη λόγω της μεγαλύτερης πυκνότητας μαγνητικής ροής στο διάκενο.

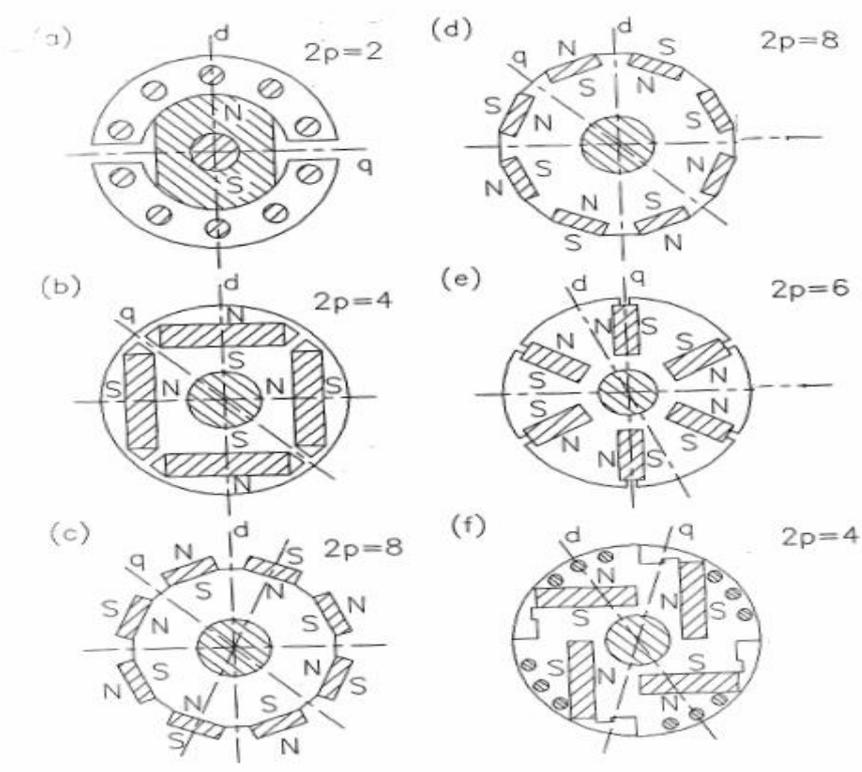
Η σύγχρονη γεννήτρια μόνιμων μαγνητών (Permanent Magnet Synchronous Generator, PMSG) μπορεί να παράγει μαγνητική ροή στο διάκενο χωρίς κανένα σύστημα διέγερσης ούτε ηλεκτρομαγνητική μετατροπή. Όπως κάθε άλλο φερομαγνητικό υλικό, η σύγχρονη γεννήτρια μόνιμων μαγνητών περιγράφεται από ένα $B - H$ βρόγχο υστέρησης. Συγκεκριμένα ο βρόχος αυτός στις μηχανές αυτού του τύπου είναι πεπλατυσμένος όπως δείχνει και το ακόλουθο σχήμα. Η αρχή λειτουργίας των μηχανών μόνιμων μαγνητών περιγράφεται από το τμήμα της καμπύλης μαγνητίσεως που βρίσκεται στο δεύτερο τεταρτημόριο, γνωστή και ως απομαγνητίζουσα καμπύλη. Στη περίπτωση που μια ανάστροφη πυκνότητα μαγνητικής ροής εφαρμόζεται στην ήδη υπάρχουσα, η συνολική πυκνότητα μαγνητικής ροής πέφτει ώσπου τελικά φτάνει στο σημείο K , σχήμα 2.6. Εν συνεχεία όταν η ανάστροφη αυτή ροή αφαιρεθεί τότε, η πυκνότητα μαγνητικής ροής επιστρέφει στο σημείο που ήταν αρχικά (σημείο L) κατά μήκος ενός μικρού βρόγχου υστέρησης. Με τον τρόπο αυτό βλέπουμε ότι η εφαρμογή ενός ανάστροφου πεδίου έχει ως συνέπεια την μείωση του παραμένοντα μαγνητισμού. Επαναλαμβάνοντας την ίδια διαδικασία εκ νέου παρατηρούμε ότι θα έχουμε ξανά μείωση της πυκνότητας μαγνητικής ροής σε σημείο αρκετά κοντά στο K όπως και πριν. Ο μικρός αυτός βρόχος υστέρησης μπορεί να αντικατασταθεί από μια γραμμή την οποία ονομάζουμε χαρακτηριστική απομαγνήτισης και έχει μια κλίση που ονομάζεται διαφορική διαπερατότητα. Όσο το πλάτος του επιβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου H δεν ξεπερνά την μέγιστη τιμή που αντιστοιχεί στο σημείο K , ο μόνιμος μαγνήτης θεωρείται ότι παραμένει ικανοποιητικά «μόνιμος» ως προς το μαγνητικό πεδίο του[14]. Σε περίπτωση που ένα μεγαλύτερο πεδίο H , εφαρμοστεί τότε η μείωση της συνολικής πυκνότητας μαγνητικής ροής θα είναι μικρότερη του σημείου K .



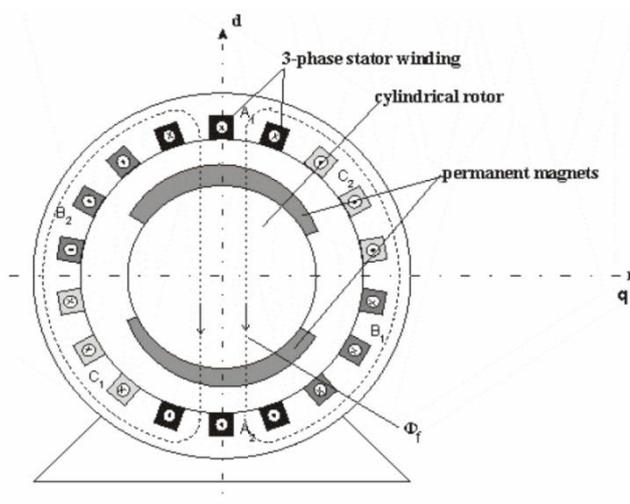
Σχήμα 2.6

Τυπική μορφή βρόγχου υστέρησης μηχανής μόνιμων μαγνητών

Οι δύο συνηθέστεροι τύποι μηχανών μόνιμων μαγνητών είναι αυτές με ομοιόμορφο στρεφόμενο, ημιτονοειδές κατανομημένο πεδίο στάτη και οι διακοπτικοί, τραπεζοειδής (με πεδίο στο στάτη το οποίο εναλλάσσεται διακοπτικά σε διακριτά βήματα). Κατασκευαστικά οι μηχανές μόνιμων μαγνητών ποικίλουν, στο σχήμα 2.7 φαίνονται μερικές τοπολογίες που εφαρμόζονται στην κατασκευή του δρομέα τέτοιων μηχανών. Τα τυλίγματα του στάτη είναι τοποθετημένα μέσα σε αύλακες. Στη παρούσα εργασία η γεννήτρια που χρησιμοποιείται σαν δοκίμιο αποτελείται από ένα ομοιόμορφο στρεφόμενο, ημιτονοειδές κατανομημένο πεδίο στάτη, είναι ονομαστικής ισχύος 2.5 KW, ονομαστικής φασικής τάσης 220 V, ονομαστικής συχνότητας 80Hz και διαθέτει 12 ζεύγη πόλων. Κατασκευαστικά ο δρομέας του αποτελείται από ένα σιδηροπυρήνα ο οποίος μπορεί να είναι συμπαγής είτε να αποτελείται από φύλλα σιδήρου. Λεπτοί μόνιμοι μαγνήτες είναι τοποθετημένοι στην επιφάνεια του πυρήνα. Εναλλασσόμενοι μαγνήτες αντίθετης μαγνητικής φοράς παράγουν πυκνότητα ροής ακτινικής κατεύθυνσης διαμέσου του διακένου.



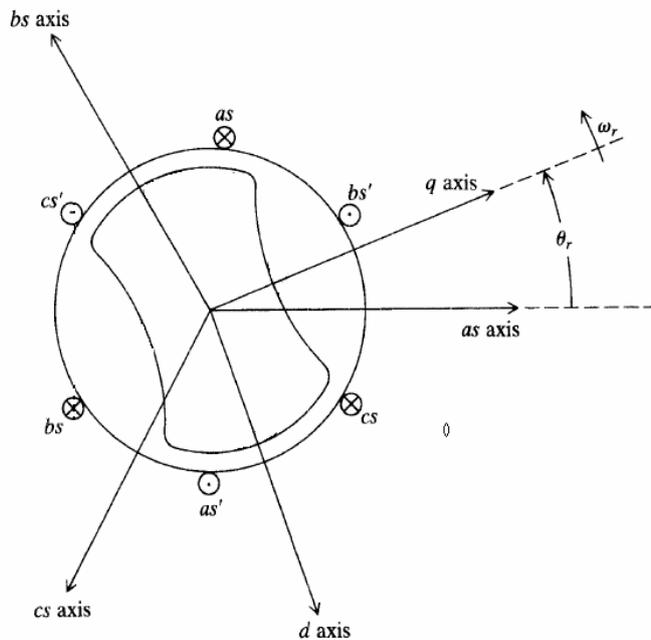
Σχήμα 2.7
 Συνήθειες τοπολογίες που εφαρμόζονται στην κατασκευή του δρομέα μηχανών μόνιμων μαγνητών.



Σχήμα 2.8
 Τοπολογία του δοκιμίου της μηχανής μόνιμων μαγνητών.

2.3.1 Μοντελοποίηση σύγχρονης γεννήτριας μόνιμων μαγνητών

Η γεννήτρια της παρούσας εργασίας μοντελοποιήθηκε χρησιμοποιώντας το μοντέλο σύγχρονης γεννήτριας μόνιμων μαγνητών του SIMULINK/MATLAB . Το μοντέλο αυτό προσομοιώνει την λειτουργία της γεννήτριας χρησιμοποιώντας ένα d-q πλαίσιο που περιστρέφεται με την γωνιακή ταχύτητα του δρομέα όπως φαίνεται στο σχήμα 2.9 . Επίσης όλες οι παράμετροι του μοντέλου έχουν συμπληρωθεί με βάση τις παραμέτρους του δοκιμίου που υπάρχει στο εργαστήριο. Οι εξισώσεις γενικευμένης θεωρίας που περιγράφουν το μοντέλο της γεννήτριας [15] είναι ακόλουθες.



Σχήμα 2.9

Στρεφόμενο στον άξονα(d-q) πλαίσιο αναφοράς στο οποίο περιγράφονται οι εξισώσεις γενικευμένης θεωρίας της μηχανής μόνιμων μαγνητών

$$\begin{cases} V_{sd} = -R_s i_{sd} - \frac{d\lambda_{sd}}{dt} + \omega_r \lambda_{sq} \\ V_{sq} = -R_s i_{sq} - \frac{d\lambda_{sq}}{dt} + \omega_r \lambda_{sd} \end{cases} \quad (2.5)$$

όπου $\lambda_{sd}, \lambda_{sq}$ είναι οι d και q πυκνότητες της μαγνητικής ροής στο διάκενο και δίνονται από τις σχέσεις

$$\begin{cases} \lambda_{sd} = L_s i_s + \psi_{PM} \\ \lambda_{sq} = L_s i_{sq} \end{cases} \quad (2.6)$$

ψ_{PM} , είναι η μαγνητική ροή του μόνιμου μαγνήτη . Η ηλεκτρομαγνητική ροπή δίνεται από την ακόλουθη σχέση.

$$T_e = \frac{m_s n_p}{2} (\lambda_{sq} i_{sd} - \lambda_{sd} i_{sq}) \quad (2.7)$$

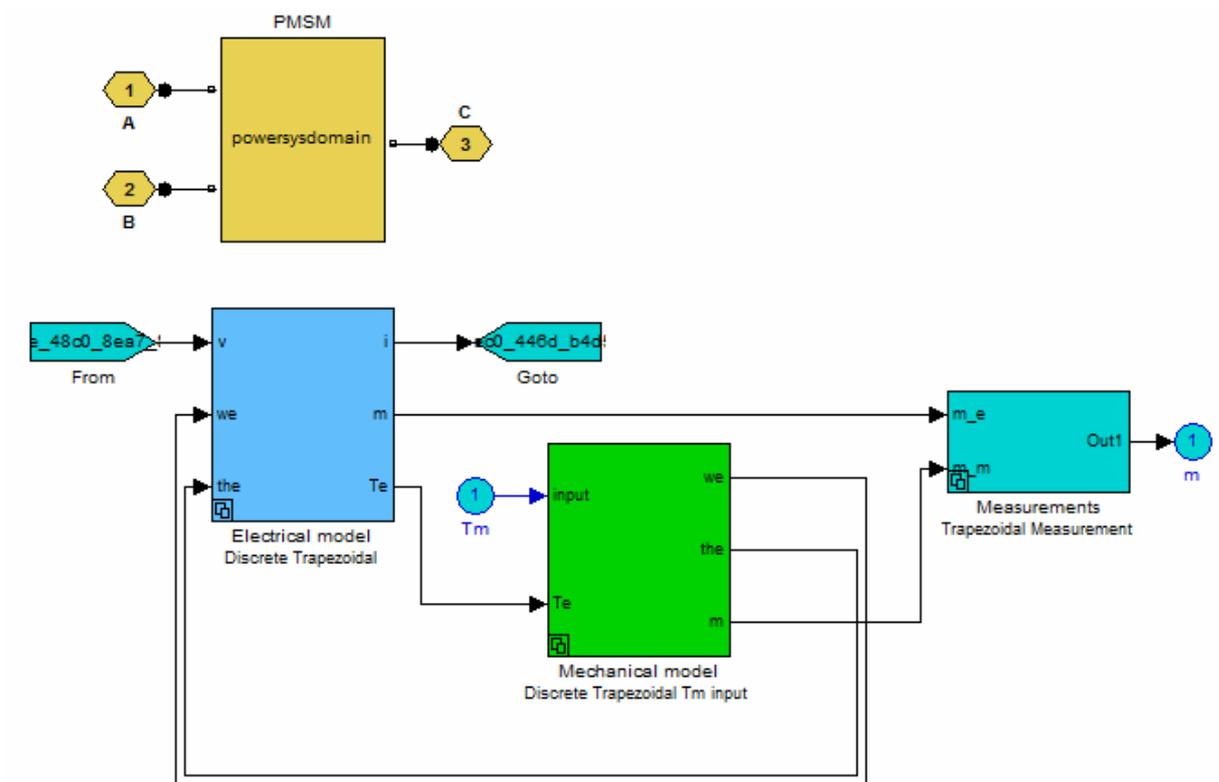
Όπου m_s είναι ο αριθμός των φάσεων και n_p ο αριθμός των ζευγών πόλων. Από την 2.6 και τις 2.7 παίρνουμε την τελική εξίσωση της ηλεκτρομαγνητικής ροπής.

$$T_e = -\frac{m_s m_p}{2} \psi_{PM} i_{sq} - K_c i_{sq} \quad K_c \sqrt{2} I_s \sin(\delta) \quad (2.8)$$

Όπου K_c είναι η σταθερά της ηλεκτρομαγνητικής ροπής, δ είναι η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ του ρεύματος τυμπάνου (I_s) και του d άξονα.

$$\left\{ \begin{array}{l} i_{sd} = \frac{-V_{sd} + \omega_r L_s i_{sq}}{L_s s + R_s} \\ i_{sq} = \frac{-V_{sq} + \omega_r L_s i_{sd} - \omega_r \psi_{PM}}{L_s s + R_s} \\ T_e = -K_c i_{sq} \\ \omega_r = \frac{n_p}{J s + B} (T_T - T_e) \\ \theta_r = \frac{\omega_s}{s} \end{array} \right. \quad (2.9)$$

Οι εξισώσεις 2.9 περιγράφουν το μοντέλο της γεννήτριας μόνιμων μαγνητών όπως στο Simulink /Matlab, σχήμα 210. Για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας το μοντέλο τροποποιήθηκε αλλάζοντας τις παραμέτρους του με στόχο να προσομοιώνει στο μέγιστο δυνατό την σύγχρονη γεννήτρια μόνιμων μαγνητών που υπάρχει στο εργαστήριο ηλεκτρικών μηχανών και ηλεκτρονικών ισχύος. Για τη συγκεκριμένη γεννήτρια η αντίσταση του στάτη είναι 2.872Ω , η επαγωγή είναι 8.5mH και η ροπή αδράνειας 1.32 Kg m^2 .

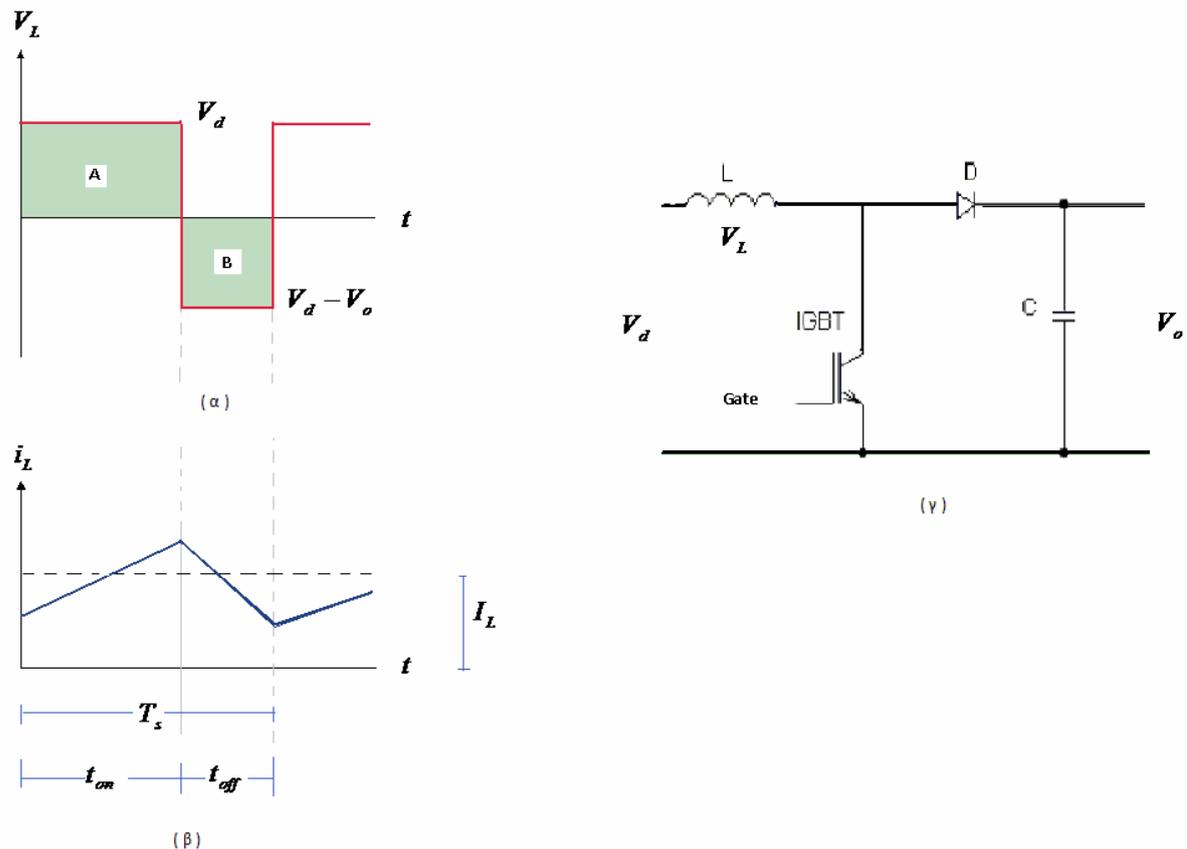


Σχήμα 2.10

Μοντέλο προσομοίωσης σύγχρονης γεννήτριας μονίμων μαγνητών μη ημιτονοειδούς ΗΕΔ.

2.4 Μετατροπέας ανύψωσης τάσης

Μετά την ανόρθωση της εναλλασσόμενης τάσης εξόδου από μια τριφασική μη ελεγχόμενη γέφυρα, ακολουθεί ο μετατροπέας ανύψωσης τάσης ΣΡ/ΣΡ . Ο μετατροπέας μετατρέπει την συνεχή τάση στην έξοδο της ανόρθωσης πάλι σε ΣΡ μεγαλύτερης τιμής. Αποτελείται από ένα IGBT, μία δίοδο, ένα πηνίο και ένα πυκνωτή συνδεδεμένο στην έξοδο. Ο ρόλος του μετατροπέα ανύψωσης τάσης είναι όπως αναφέρει και το όνομα του η ανύψωση της τάσης που λαμβάνεται από την ανόρθωση. Με τον τρόπο αυτό ελέγχεται το ρεύμα της γεννήτριας και εν τέλει οι στροφές της ώστε να προσλαμβάνεται η μέγιστη δυνατή ισχύς που μπορεί να αποδοθεί από τον ανεμοκινητήρα υπό συγκεκριμένες συνθήκες ανέμου. Ο έλεγχος αυτός στις ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών πραγματοποιείται συνήθως από ελεγκτές ανεύρεσης βέλτιστου σημείου λειτουργίας που [16] περιγράφονται αναλυτικά σε επόμενη παράγραφο. Η τοπολογία του μετατροπέα ανύψωσης, ΣΡ/ΣΡ boost Converter, είναι αυτή του σχήματος 2.11.γ .



Σχήμα 2.11

(α) τάση του πηνίου του μετατροπέα ανύψωσης (β) ρεύμα του πηνίου του μετατροπέα ανύψωσης (γ)Κύκλωμα μετατροπέα ανύψωσης τάσης

Όπως υπονοείται και από το όνομα του , η τάση εξόδου V_o είναι μεγαλύτερη από την τάση εισόδου V_d . Όταν το IGBT στοιχείο άγει, η διάδος είναι ανάστροφα πολωμένη , απομονώνοντας την έξοδο οπότε η ενέργεια που έρχεται από την είσοδο του μετατροπέα αποθηκεύεται στο πηνίο. Μόλις το στοιχείο σταματήσει να άγει, τότε η διάδος πολώνεται θετικά με αποτέλεσμα η αποθηκευμένη ενέργεια του πηνίου να περνά προς την έξοδο [17] .

Το ρεύμα του μετατροπέα μπορεί να είναι συνεχές ή διακοπόμενο ανάλογα με τις παραμέτρους του μετατροπέα και τον συχνότητα αγωγής του IGBT. Οι κυριότερες σχέσεις που περιγράφουν πλήρως τη λειτουργία του μετατροπέα περιγράφονται παρακάτω.

$$V_L = L \frac{d}{dt} i_L$$

(2.10)

Από την πολύ γνωστή σχέση (2.10) αν ολοκληρώσουμε και τα δύο μέλη της σε μια περίοδο T_s , προκύπτει η μέση τιμή της τάσης στα άκρα του πηνίου του μετατροπέα ανύψωσης, σχέση (2.11). Δεδομένου ότι η ενέργεια δεν χάνεται αλλά ούτε και καταναλώνεται, το ρεύμα στην αρχή της περιόδου θα είναι ίσο με εκείνο στο τέλος της περιόδου, σχήμα 2.11.β και η μέση τιμή της τάσης του πηνίου κατά την διάρκεια μιας περιόδου θα είναι μηδέν.

$$\int_0^{T_s} V_L dt = L \int_0^{T_s} di_L = L[i_L(T_s) - i_L(0)] = 0$$

(2.11)

Επίσης από το σχήμα 2.11.β ,ισχύει:

$$T_s = t_{on} + t_{off}$$

(2.12)

Θεωρώντας ότι δεν υπάρχουν απώλειες στο μετατροπέα η σχέση (2.11) υπονοεί ότι το χωρίο A, σχήμα 2.11.α, ισούται με το χωρίο B και έτσι προκύπτει η σχέση:

$$V_d t_{on} + (V_d - V_0) t_{off} = 0$$

(2.13)

Όπου t_{on} είναι το χρονικό διάστημα αγωγής και t_{off} είναι το διάστημα μη αγωγής. Αν διαιρέσουμε την (2.13) ως προς την περίοδο T_s παίρνουμε την σχέση που συνδέει την τάση εισόδου και εξόδου .

$$\frac{V_0}{V_d} = \frac{T_s}{t_{off}} = \frac{1}{1-D}$$

(2.14)

Επίσης δεδομένου ότι η ισχύς εισόδου θεωρείται ίση με της εξόδου (δεν υπάρχουν απώλειες) τότε

$$V_d I_d = V_0 I_0$$

(2.15)

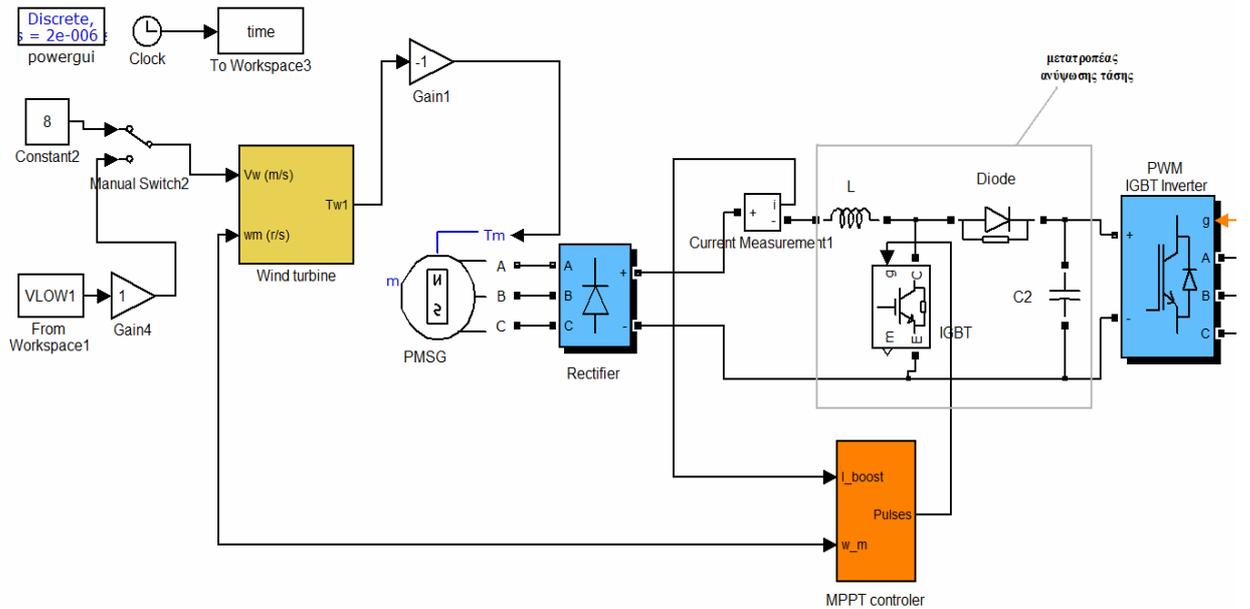
Από την σχέση (3.4.6) και (3.4.5) προκύπτει

$$\frac{I_0}{I_d} = 1 - D$$

(2.16)

2.4.1 Μοντελοποίηση μετατροπέα ανύψωσης τάσης

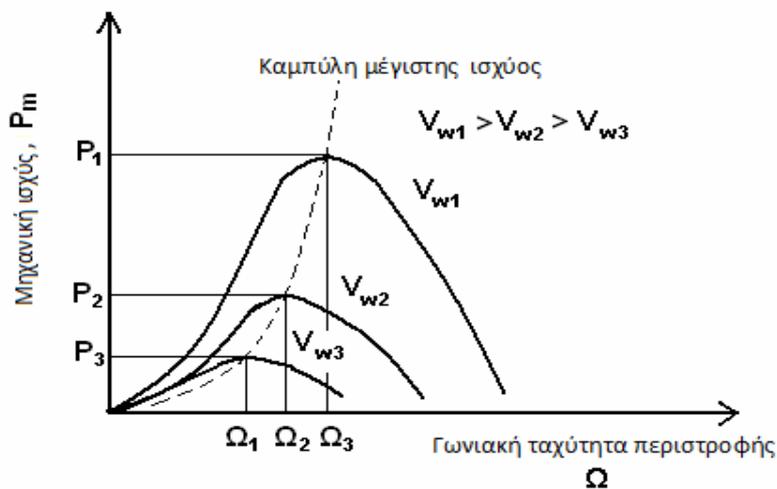
Το μοντέλο του μετατροπέα φαίνεται στο σχήμα 2.12 . Το IGBT που χρησιμοποιήθηκε έχει αντίσταση αγωγής 0.01Ω και μηδενική αυτεπαγωγή. Η τάση ορθής πόλωσης θεωρήθηκε $0.8V$ και η αντίσταση snubber $100k\Omega$. Ο έλεγχος γίνεται από τον αντίστοιχο ελεγκτή του οποίου τη λειτουργία του θα παρουσιάσουμε αναλυτικά σε ακόλουθη παράγραφο. Το πηνίο που χρησιμοποιήθηκε έχει τιμή $10mH$ και σε συνδυασμό με την αυτεπαγωγή της γεννήτριας επιτυγχάνεται εξομάλυνση του ρεύματος και λιγότερες διακοπτικές συχνότητες. Ο πυκνωτής έχει χωρητικότητα $5mF$ ώστε να γίνεται κατάλληλη εξομάλυνση της τάσης και σε συνεργασία με τον ελεγκτή του αντιστροφέα διατηρεί την τάση σταθερή σε τιμή $650V$.



Σχήμα 2.12
Μοντέλο προσομοίωσης μετατροπέα ανύψωσης τάσης

2.5 Ελεγκτές ανεύρεσης του σημείου λειτουργίας που μεγιστοποιεί την παραγόμενη ισχύ

Στο κεφάλαιο 2.2 αναφέρθηκε ότι η Α/Γ απορροφά τη μέγιστη δυνατή αιολική ισχύ για δεδομένη ταχύτητα ανέμου όταν το γινόμενο ροπής επί στροφών μεγιστοποιείται. Τα σημεία αυτά διαμορφώνουν μια καμπύλη πάνω στην οποία επιδιώκεται η λειτουργία της Α/Γ για κάθε ταχύτητα ανέμου. Η διαδικασία ελέγχου ονομάζεται Maximum Power Point Tracking, MPPT και στο σχήμα 2.13 φαίνεται η καμπύλη μέγιστης ισχύος πάνω στην οποία οφείλει να λειτουργεί η Α/Γ. Ο έλεγχος πραγματοποιείται από ελεγκτές που ρυθμίζουν τις στροφές της Α/Γ ακολουθώντας συγκεκριμένες τεχνικές.

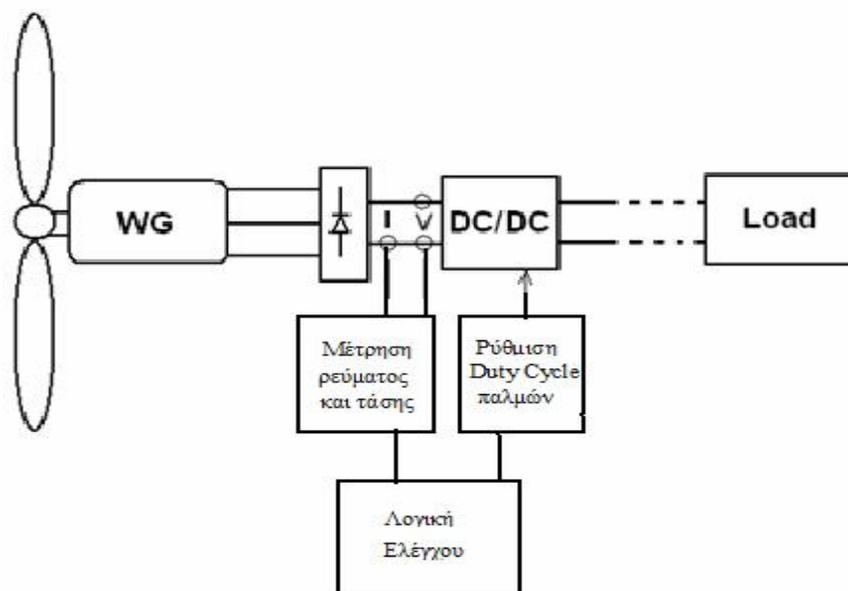


Σχήμα 2.13

Χαρακτηριστική καμπύλη ισχύος στροφών

Οι ελεγκτές αυτοί ονομάζονται MPPT ελεγκτές και χρησιμοποιούν διάφορους αλγόριθμους ανεύρεσης του σημείου μέγιστης ισχύος λειτουργίας. Αρχή λειτουργίας των αλγορίθμων αυτών είναι ο έλεγχος των στροφών της Α/Γ με τέτοιο τρόπο ώστε για κάθε ταχύτητα ανέμου το σύστημα να λειτουργεί με μέγιστο αεροδυναμικό συντελεστή $C_p(\max)$, συνήθως τιμής 0.5. Για διαφορετικές ταχύτητες ανέμου, ανάλογα με την λειτουργική κατάσταση που θα βρεθεί το σύστημα, δηλαδή ανάλογα με το αν βρίσκεται σε σημεία αριστερά ή δεξιά της καμπύλης μέγιστης ισχύος του σχήματος 2.13 ο ελεγκτής οφείλει εν τέλει να το οδηγήσει σε σημεία λειτουργίας που βρίσκονται πάνω στην βέλτιστη καμπύλη[9].

Ο έλεγχος πραγματοποιείται ελέγχοντας το ρεύμα της γεννήτριας και εν τέλη την ηλεκτρική της ροπή. Για το λόγο αυτό συνηθίζεται να χρησιμοποιείται ένας μετατροπέας ανύψωσης τάσης όπως αυτός που περιγράφηκε στη παράγραφο 2.4.1 του οποίου την λειτουργία ελέγχει ο ελεγκτής ανεύρεσης βέλτιστου σημείου λειτουργίας. Ανάλογα, λοιπόν, με το λόγω κατάτμησης του ημιαγωγικού στοιχείου, λαμβάνεται διαφορετικό ρεύμα στην έξοδο και κατά συνέπεια και στην είσοδο του αντιστροφέα. Η ρύθμιση αυτή στο ρεύμα σημαίνει και ρύθμιση αντίστοιχα της ηλεκτρικής ροπής της γεννήτριας. Έτσι τελικά επιτυγχάνεται ρύθμιση των στροφών του άξονα της Α/Γ. Στο σχήμα 2.14 φαίνεται το σύστημα ελέγχου των στροφών της Α/Γ.



Σχήμα 2.14

Σύστημα ελέγχου Α/Γ μεταβλητών στροφών για την ανεύρεση του βέλτιστου σημείου λειτουργίας.

Οι MPPT ελεγκτές εφαρμόζουν διάφορους αλγόριθμους ανεύρεσης του σημείου μέγιστης ισχύος. Οι τεχνικές που απαντώνται σήμερα στη βιβλιογραφία μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε δύο μεγάλες κατηγορίες. Στην πρώτη βρίσκονται τεχνικές που βασίζονται σε δεδομένες χαρακτηριστικές καμπύλες λειτουργίας[18],[19] ενώ στη

δεύτερη κατηγορία, τεχνικές που η αναζήτηση του σημείου βέλτιστης λειτουργίας γίνεται χωρίς προγενέστερη γνώση των χαρακτηριστικών καμπυλών. Τέτοιες μέθοδοι είναι ο έλεγχος μέσω συνεχών αλλαγών και συγκρίσεων (Perturbation and Observation, P&O) και έλεγχοι μέσω ασαφής λογικής οι οποίοι θα συζητηθούν σε παραγράφους που ακολουθούν.

2.5.1 Ελεγκτής ανεύρεσης του σημείου μέγιστης ισχύος

Ο έλεγχος μέσω δεδομένων χαρακτηριστικών καμπύλων λειτουργίας είναι η συνηθέστερη μέθοδος ελέγχου. Η χαρακτηριστική καμπύλη, όπως αυτή του σχήματος 2.15, βρίσκεται αποθηκευμένη σε ένα μικροεπεξεργαστή. Η ταχύτητα περιστροφής της γεννήτριας, Ω , μετράται και αντιστοιχίζεται σε μια συγκεκριμένη ροπή αναφοράς T_{ref} , μέσω της σχέσης 2.17 και εν τέλει σε ένα ρεύμα αναφοράς. Το ρεύμα αυτό συγκρίνεται με το πραγματικό ρεύμα στην είσοδο του μετατροπέα ανύψωσης τάσης. Από το σφάλμα της σύγκρισης προκύπτει το Duty Cycle βάσει του ημιαγωγικού στοιχείου του μετατροπέα.

$$T_{ref} = \frac{C}{\lambda_{opt}^3} \frac{1}{2} \rho \pi R^5 \Omega^2 \quad (2.17)$$

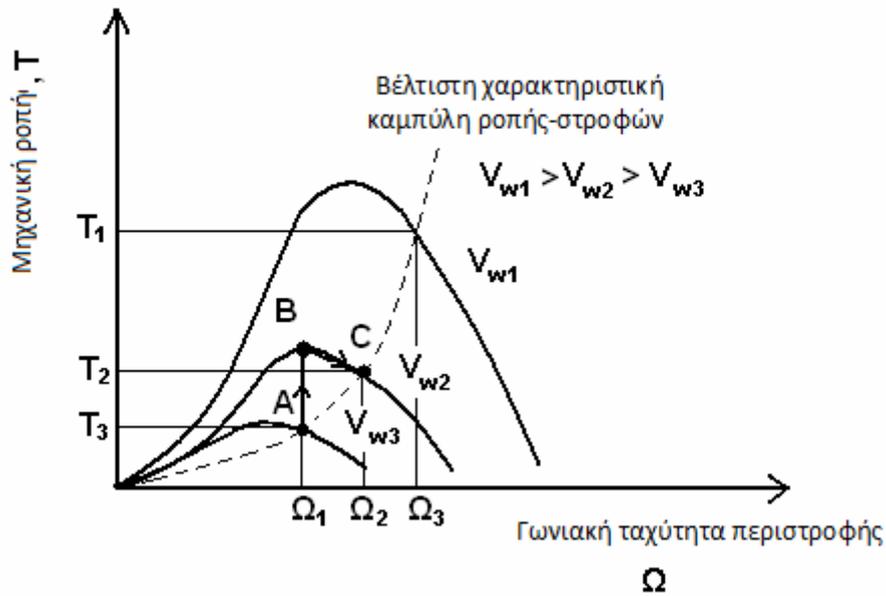
Στο σχήμα 2.16 φαίνεται το δομικό διάγραμμα λειτουργίας ενός τέτοιου ελεγκτή. Από το δομικό διάγραμμα φαίνεται ότι η αντιστοίχιση της γωνιακής ταχύτητας στην ροπή αναφοράς γίνεται μέσω ενός πίνακα ,Look up table. Στη συνέχεια μέσω του κέρδους K_1 λαμβάνεται το ρεύμα αναφοράς βάσει του οποίου γίνεται η σύγκριση με το ρεύμα του μετατροπέα ανύψωσης.

$$I_{ref} = T_{ref} K_1 \quad (2.19)$$

Από το σφάλμα της σύγκρισης του ρεύματος του μετατροπέα και του ρεύματος αναφοράς υπολογίζεται ο λόγος κατάτμησης D .

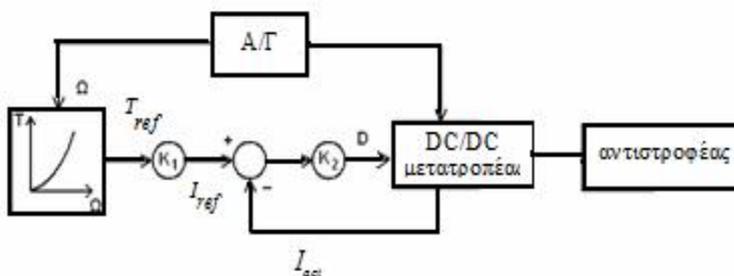
$$I_{err} = I_{ref} - I_{act} \quad (2.18)$$

$$D = \int I_{err} dt K_2 \quad (2.20)$$



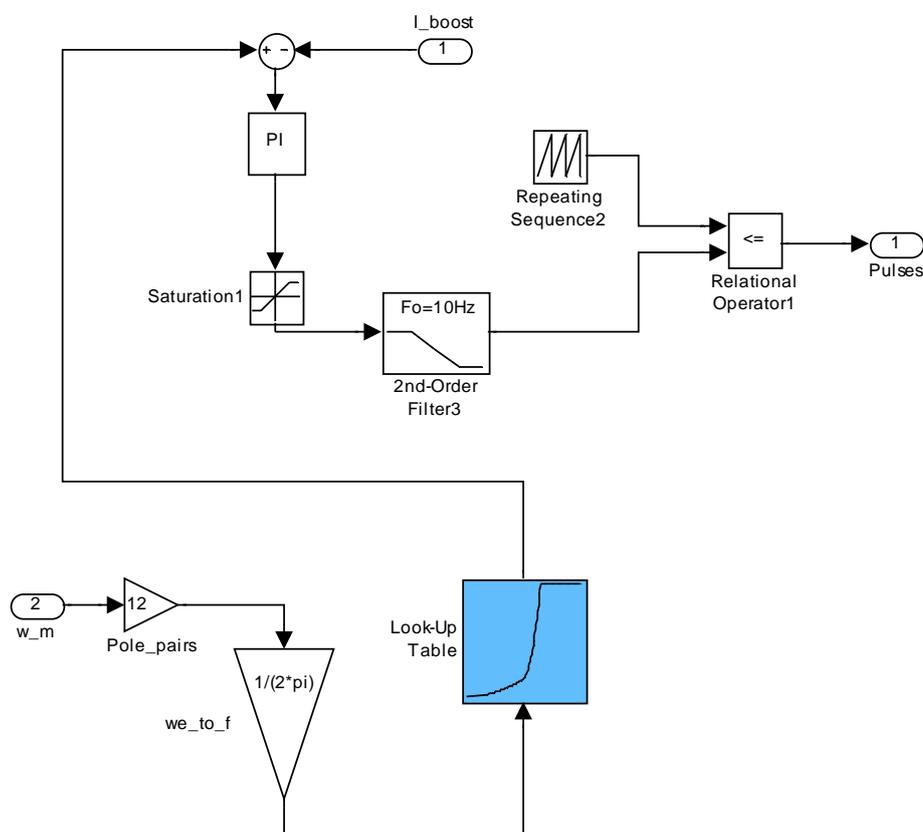
Σχήμα 2.15
Χαρακτηριστική καμπύλη ροπής στροφών

Στο σχήμα 2.15 δίνεται ένα παράδειγμα μιας τέτοιας διαδικασίας. Έστω πως ο άνεμος πνέει με ταχύτητα V_{w3} και η ροπή της γεννήτριας T_g ισορροπεί με αυτή του ανεμοκινητήρα T_m στο σημείο A. Σε κάποια χρονική στιγμή ο άνεμος αλλάζει την ταχύτητά του σε V_{w2} και η T_m περνάει στο σημείο B αλλά η T_g διατηρείται στο A. Η ταχύτητα της γεννήτριας αυξάνεται σύμφωνα με τη διαφορά $(T_m - T_g)$ μέχρις ότου η δύο ροπές γίνουν ίσες. Ο έλεγχος βέλτιστης ροπής φροντίζει να προσαρμόσει το φορτίο της γεννήτριας έτσι ώστε η T_g να ακολουθήσει τη χαρακτηριστική βέλτιστης ροπής μέχρις ότου επέλθει νέα ισορροπία του συστήματος στο σημείο C.



Σχήμα 2.16
Έλεγχος βασισμένος σε δεδομένες χαρακτηριστικές καμπύλες

Η προσομοίωση του παραπάνω ελεγκτή φαίνεται στο σχήμα 2.17 , συγκεκριμένα η καμπύλη ροπής-στροφών μετατράπηκε σε σχέση ρεύματος – συχνότητας αφού, όπως εξηγείται στην αναφορά [7], η ροπή και το ανορθωμένο ρεύμα της γεννήτριας μονίμων μαγνητών έχουν περίπου γραμμική εξάρτηση. Η αντιστοίχιση στροφών σε ηλεκτρική συχνότητα γίνεται μέσω του αριθμού πόλων της μηχανής. Η μορφή της καμπύλης που χρησιμοποιήθηκε στα προσομοιωμένα και πειραματικά μοντέλα φαίνεται στο σχήμα 2.3 .Στην έξοδο του λαμβάνεται το I_{ref} το οποίο όπως είπαμε συγκρίνεται με το ρεύμα του μετατροπέα ανύψωσης . Το σφάλμα αυτό ενισχύεται και ολοκληρώνεται και αφού περάσει από ένα περιοριστή στη συνέχεια φιλτράρεται . Το φιλτραρισμένο σήμα συγκρίνεται με ένα τριγωνικό σήμα που κάνει τη διαμόρφωση PWM και δίνει τους παλμούς έναυσης του IGBT . Η συχνότητα του τριγωνικού σήματος είναι 2KHz για την παρούσα εργασία . Το κέρδος του PI είναι 0.22 ενώ η σταθερά ολοκλήρωσης 0.8 .



Σχήμα 2.17

Μοντέλο ελεγκτή MPPT βασισμένου στη βέλτιστη χαρακτηριστική καμπύλη λειτουργίας.

2.5.2 Ελεγκτής ανεύρεσης του σημείου μέγιστης ισχύος μέσω μικρών μεταβολών.

Η εξάρτηση του MPPT ελεγκτή από την βέλτιστη καμπύλη λειτουργίας παρουσιάζει σημαντικά μειονεκτήματα. Η καμπύλη μπορεί να αλλάξει μορφή εξαιτίας της

γήρανσης του μηχανικού συστήματος[25] ενώ είναι άμεσα εξαρτημένη από τον υπολογισμό των αρχικών συνθηκών. Λόγω αυτών των μειονεκτημάτων, έχουν γίνει προσπάθειες για τη σχεδίαση MRPT ελεγκτών οι οποίες είναι ανεξάρτητες από την βέλτιστη καμπύλη λειτουργίας. Σε τέτοιου είδους εφαρμογές [25],[26], ο έλεγχος MRPT πραγματοποιεί συνεχείς συγκρίσεις και μεταβολές της ισχύος εξόδου προς αναζήτηση σημείου λειτουργίας με τη μέγιστη παραγόμενη ισχύ. Αυτοί οι ελεγκτές είναι γνωστοί και ως ελεγκτές ανεύρεσης βέλτιστου σημείου λειτουργίας μέσω μικρών μεταβολών (perturbations and observations ,P&Os).

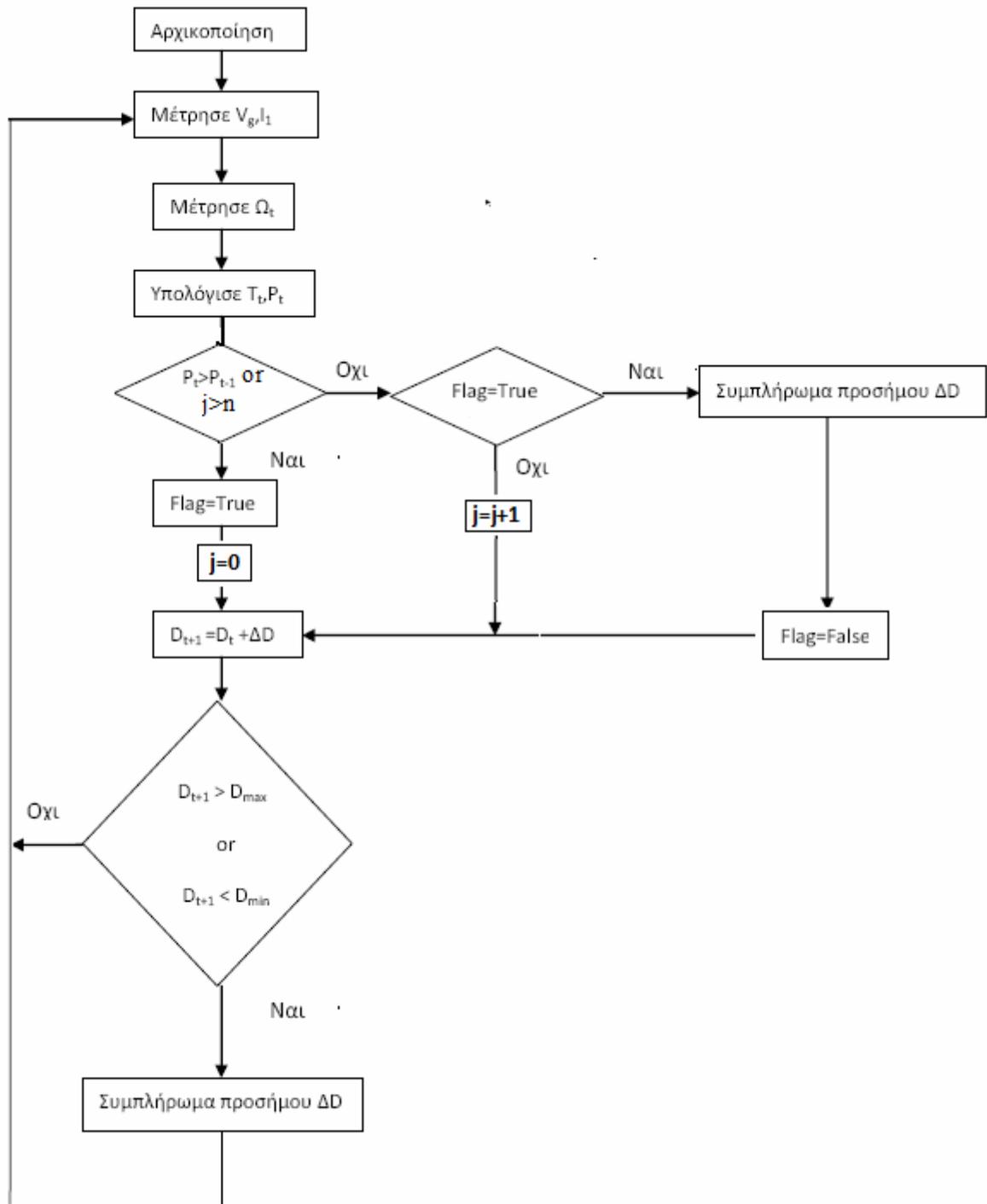
Ο αλγόριθμος ανεύρεσης του σημείου λειτουργίας σε αυτή την περίπτωση δίνεται[16] από το σχήμα 2.17 . Μετά την αρχικοποίηση, μετρούνται η τάση V_{dc} και το ρεύμα I_{dc} στην είσοδο του μετατροπέα ανύψωσης και υπολογίζεται η ενεργός ισχύς, P_t . Η τιμή αυτή που υπολογίστηκε, συγκρίνεται με την προηγούμενη P_{t-1} . Στη περίπτωση που η ισχύς P_t είναι μεγαλύτερη από την P_{t-1} τότε το πρόσημο ΔD παραμένει ίδιο και απλά προστίθεται στο D_t ενώ η διαδικασία επαναλαμβάνεται. Σε αντίθετη περίπτωση που η ισχύς P_t είναι μικρότερη από την P_{t-1} το ΔD αλλάζει πρόσημο. Σε κάθε περίπτωση, εάν η τιμή D_t λαμβάνει μέγιστη ή ελάχιστη τιμή, D_{max} και D_{min} αντίστοιχα , το πρόσημο του ΔD θα συνεχίζει να συμπληρώνεται.

Η εξίσωση 2.21 αποτελεί τον κανόνα μεταβολής του D_t όπου το D_t και D_{t-1} είναι οι τιμές του λόγου κατάτμησης για τις επαναλήψεις t και $t-1$, αντίστοιχα (όπου ισχύει $0 < D_t < 1$). Το $\Delta P_{t-1}/\Delta D_{t-1}$ είναι η κλίση της ισχύος εξόδου στην επανάληψη $t-1$ και C_1 μια σταθερά που αντιπροσωπεύει το βήμα αλλαγής. Το πιο κάτω διάγραμμα ροής δείχνει την λογική ελέγχου του ελεγκτή.

$$D_t = D_{t-1} + C_1 \frac{\Delta P_{t-1}}{\Delta D_{t-1}} \quad (2.21)$$

Η γενική φιλοσοφία του P&O ελεγκτή είναι ότι για να επιτύχουμε το σημείο μέγιστης ισχύος θα πρέπει να μεταβληθεί (αύξηση ή μείωση) το Duty Cycle προς μία κατεύθυνση μέχρι η ενεργός ισχύς να μειωθεί και η κατεύθυνση αντιστραφεί. Παρόλα αυτά έχει παρατηρηθεί [16] ότι στο τυπικό αλγόριθμο του P&O μπορεί να αλλάξει το πρόσημο του ΔD σαν αποτέλεσμα κάποιας ήδη καταγεγραμμένης μείωσης ισχύος. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ο χρόνος μεταξύ δυο διαδοχικών αποκρίσεων όσο και το βήμα ΔD έχουν καθοριστική σημασία για την ορθή λειτουργία του. Ο ακριβής υπολογισμός τους αποτελεί μια κοπιαστική διαδικασία λόγω της μεγάλης διαφοράς των σταθερών χρόνου μεταξύ μηχανικού και ηλεκτρικού συστήματος. Μη ακριβής υπολογισμός των παραπάνω μπορεί να οδηγήσει το σύστημα σε υποβέλτιστη λειτουργία ή ακόμα και σε αποπροσανατολισμό.

Προς βελτιστοποίηση του αλγορίθμου [25] δίνεται νέος αλγόριθμος [16] στον οποίο έχει προστεθεί μια βοηθητική μεταβλητή, η flag, που αποτρέπει την αλλαγή πρόσημο προτού πραγματοποιηθεί μια πραγματική αύξηση ενεργού ισχύος. Επίσης, ένας μετρητής j , εξασφαλίζει ότι το σύστημα δεν θα πέσει σε βρόχο επανάληψης προς μια κατεύθυνση. Έτσι εάν το πρόσημο του D_t παραμείνει χωρίς αλλαγή μετά από n επαναλήψεις μειώνοντας την ισχύ, τότε η σημαία γίνεται ‘‘true’’ επιτρέποντας στο πρόσημο να εφαρμοστεί ανεξαρτήτου μέτρησης της ισχύος.



Σχήμα 2.18
Διάγραμμα ροής αλγορίθμου P&O ελεγκτή

Για την προσομοίωση του παραπάνω ελεγκτή δημιουργήσαμε κώδικα που μετρά την ανορθωμένη τάση V_c και το ανορθωμένο ρεύμα I_1 της γεννήτριας στην είσοδο του μετατροπέα ανύψωσης τάσης και υπολογίζει τη στιγμιαία ισχύ P_t . Η τιμή αυτή συγκρίνεται με την αμέσως προηγούμενη τιμή P_{t-1} . Αν είναι μεγαλύτερη τότε γίνεται μια μικρή μεταβολή στο D προς μία κατεύθυνση (αύξηση ή μείωση), η οποία μεταβολή έχει άμεση επίδραση στο ρεύμα του ανυψωτή άρα και στην ισχύ. Αν είναι

μικρότερη τότε η μεταβολή του D γίνεται προς την αντίθετη κατεύθυνση από την αμέσως προηγούμενη. Έτσι ο ελεγκτής λειτουργεί σε μία λογική «αύξηση της ισχύος ωστόσο η εντολή για αύξηση του D φέρει μείωση και μείωση της ισχύος ωστόσο η εντολή για μείωση του D φέρει και πάλι μείωση». Παρακάτω φαίνεται ο αλγόριθμος υλοποίησης της μεθόδου ανίχνευσης μέγιστης ισχύος μέσω μικρών μεταβολών. Ο αλγόριθμος της μεθόδου ανίχνευσης σημείου μέγιστης ισχύος παρουσιάζεται στο σχήμα 2.18 ενώ ακολουθεί ο κώδικας που τον υλοποιεί.

```
function y = fcn(u)
    %u: D2 (ratio)
    %y: D1 (ratio)

    persistent filtered_power;
    if isempty(filtered_power) filtered_power = 0.0;
    end;
    persistent power_old
    if isempty(power_old) power_old = 0.0;
    end;
    persistent grid_power
    if isempty(grid_power) grid_power = 0;
    end;
    persistent i
    if isempty(i) i = 0;
    end;
    persistent j
    if isempty(j) j = 0;
    end;
    persistent Delta_PWM_changeable
    if isempty(Delta_PWM_changeable) Delta_PWM_changeable = 1;
    end;
    persistent Delta_PWM
    if isempty(Delta_PWM) Delta_PWM = 10.24;
    end;
    persistent PWM1_f
    if isempty(PWM1_f) PWM1_f = 0.0;
    end;
    %Delay_P=400; %Hardcoding :-(
    Delay_P=200; %Hardcoding :-(

    grid_power = u * 1024 * 1.054283212884;

    %filtered_power=0.9933*filtered_power+0.0067*grid_power;    %//150 samples
    %filtered_power=filtered_power + (grid_power-filtered_power)/300;    %//150
    %samples x subsample
    filtered_power=filtered_power + (grid_power-filtered_power)/800;    %//150
    %samples - Hardcoding :-(
    i=i+1;
    %if (i>200) {
    if i>Delay_P
        i=0;
        if power_old>filtered_power
            if Delta_PWM_changeable==1
                Delta_PWM=-Delta_PWM;
                Delta_PWM_changeable=0;
            else j=j+1;
            end;
        end;
        if power_old<filtered_power || j>4
            Delta_PWM_changeable=1;
            j=0;
        end;
        power_old=filtered_power;
```

```

PWM1_f = PWM1_f + Delta_PWM;

if PWM1_f>850.0
    PWM1_f=850.0;
    Delta_PWM=-Delta_PWM;
end;
if PWM1_f< 0.0
    PWM1_f= 0.0;    %// E[0,850]
    Delta_PWM=-Delta_PWM;
end;
end;

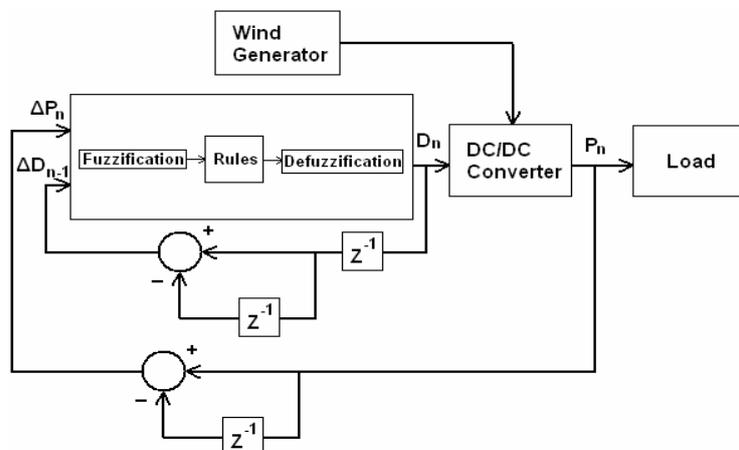
if i==0 y = Delta_PWM / 1024;
else y=0;
end;

```

2.5.3 Ελεγκτής ανεύρεσης του σημείου μέγιστης ισχύος βασισμένη σε ασαφή λογική

Ο P&O ελεγκτής εξασφαλίζει ανεξάρτητη λειτουργία από τη βέλτιστη χαρακτηριστική καμπύλη χωρίς ο έλεγχος να γίνεται ιδιαίτερα πολύπλοκος. Πολλές φορές όμως κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες λειτουργίας, όπως γρήγορες ριπές ανέμου, μπορεί να οδηγηθεί σε αποπροσανατολισμό και αδυναμία εντοπισμού του βέλτιστου σημείου λειτουργίας. Οι αρχικοποιήσεις των παραμέτρων όπως το μέγεθος του βήματος αλλά και ο χρόνος είναι πολύ σημαντικές για την σωστή εκτέλεση του ελέγχου[27]. Δεν είναι λίγες οι περιπτώσεις που ο P&O ελεγκτής έχει αποτύχει να λειτουργήσει επιτυχώς σε έντονες μεταβολές της ταχύτητας του ανέμου ως αποτέλεσμα κακής αρχικοποίησης[20]. Προς αποφυγή τέτοιων δυσκολιών είναι δυνατός ο συνδυασμός του P&O ελεγκτή με την ασαφή λογική. Αποτέλεσμα αυτής της προσπάθειας είναι ο ελεγκτής ασαφούς λογικής (Fuzzy Logic Controller).

Η φιλοσοφία λειτουργίας του Fuzzy ελεγκτή, σχήμα 2.19, είναι παρόμοια με εκείνη του P&O, με την έννοια ότι πραγματοποιεί συνεχείς μεταβολές του Duty Cycle προκειμένου να εντοπίσει το σημείο βέλτιστης λειτουργίας. Όπως και ο P&O έτσι και ο Fuzzy χρησιμοποιώντας κατάλληλη λογική έλεγχου επιδρά στη μεταβολή του λόγου κατάτμησης D.



Σχήμα 2.19
Δομικό διάγραμμα Fuzzy ελεγκτή.

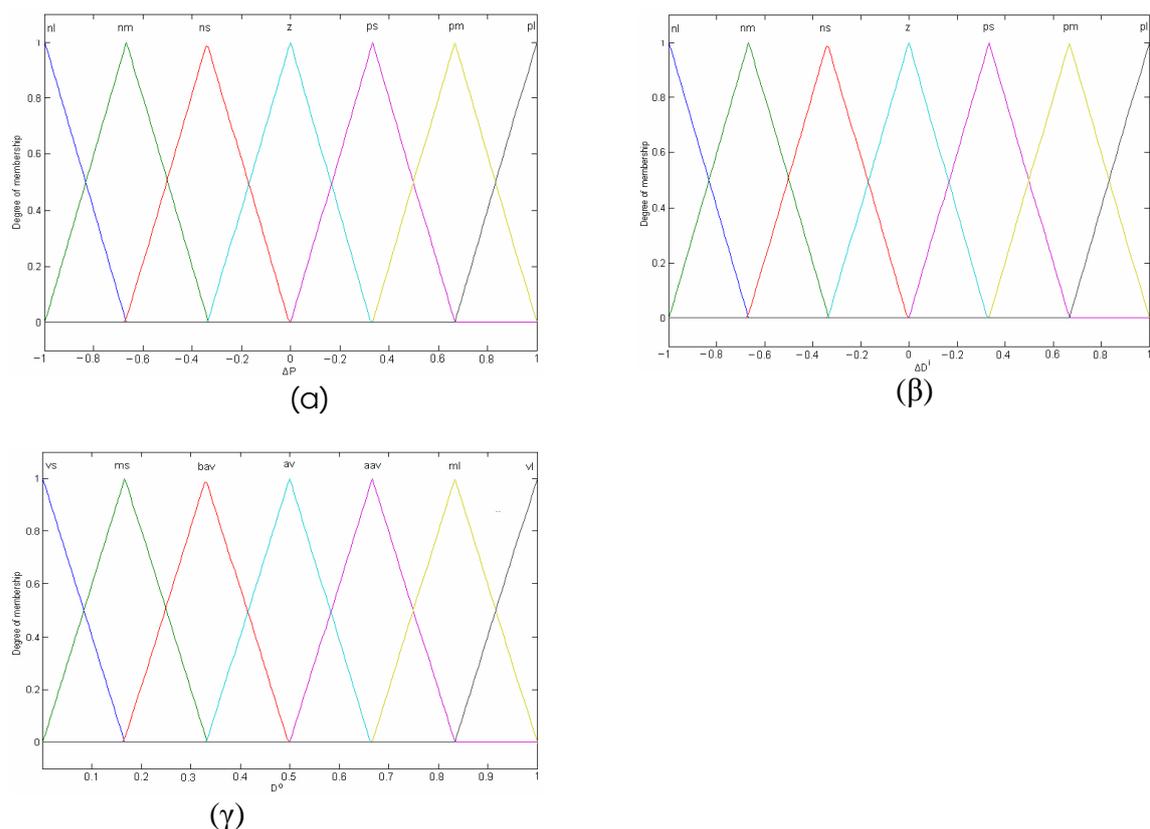
Ο αλγόριθμος ανίχνευσης μέγιστου σημείου λειτουργίας περιλαμβάνει τρεις χωριστές διαδικασίες. Αρχικά πραγματοποιείται η διαδικασία της ασαφοποίησης, δηλαδή του καθορισμού των εισόδων και των εξόδων της συνάρτησης συμμετοχής, όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.19. Στη συνέχεια πραγματοποιείται η εξαγωγή των αποτελεσμάτων και τέλος η διαδικασία της αποσαφοποίησης όπου χρησιμοποιώντας συγκεκριμένη μέθοδο λαμβάνεται η τιμή του λόγου κατάτμησης από το σύνολο των αποτελεσμάτων.

Κατά τη διαδικασία της ασαφοποίησης, οι συναρτήσεις συμμετοχής μετατρέπουν τις μεταβλητές εισόδου του ελεγκτή σε τιμές συμμετοχής από 0 ως 1. Για τον συγκεκριμένο ελεγκτή[24], οι συναρτήσεις συμμετοχής επιλέχτηκαν τριγωνικές, σχήμα 2.20, για λόγους απλότητας και λιγότερου υπολογιστικού κόστους. Οι εισοδοί που χρησιμοποιήθηκαν είναι οι διακυμάνσεις της ισχύος εξόδου, ΔP_n , μεταξύ των συμβάντων n και $n-1$ αλλά και οι μεταβολές του λόγου κατάτμησης, ΔD_{n-1} μεταξύ των συμβάντων $n-1$ και $n-2$, σχέσεις 2.21 .

$$\Delta P_n = P_n - P_{n-1}$$

$$\Delta D_n^i = D_{n-1}^o - D_{n-2}^o$$

(2.21)

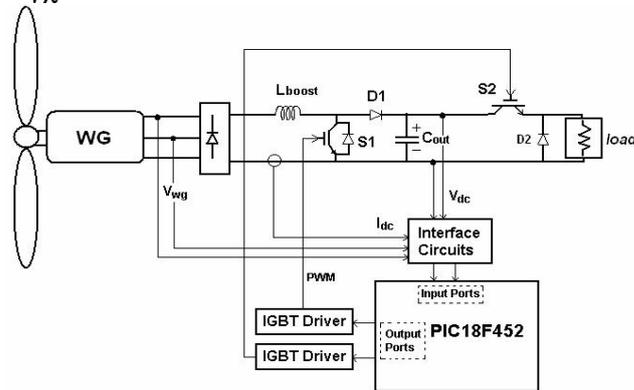


Σχήμα 2.20

(α) συνάρτηση συμμετοχής ΔP . (β) συνάρτηση συμμετοχής ΔD^i (γ) συνάρτηση συμμετοχής D^o

Κατά την διαδικασία εξαγωγής των αποτελεσμάτων, ο Fuzzy ελεγκτής πρέπει να αποφασίζει κάθε φορά τον καλύτερο τρόπο ελέγχου του φυσικού συστήματος. Η

απόφαση παίρνεται με την ασαφή διαδικασία εξαγωγής αποτελεσμάτων. Οι γνώσεις που απαιτούνται βρίσκονται στη βάση ασαφών κανόνων από τους if-then κανόνες που έχουν οριστεί. Στο πίνακα 1.2 συνοψίζονται οι κανόνες στους οποίους υπακούει η ασαφή λογική ελέγχου.



Σχήμα 2.21
Fuzzy ελεγκτής

Πίνακας 2.1 – Κανόνες ασαφής λογικής

$\Delta D_n / \Delta P_n$	nl	nm	ns	z	ps	pm	pl
nl	vl	vl	ml	bav	ms	vs	vs
nm	vl	ml	aav	bav	bav	ms	vs
ns	ml	aav	aav	av	bav	bav	vs
z	vs	ms	bav	av	aav	ml	vl
ps	ms	bav	bav	av	aav	aav	ml
pm	vs	ms	bav	aav	aav	ml	vl
pl	vs	vs	ms	aav	ml	vl	vl

Όπου είσοδοι : nl = negative large, nm = negative medium, ps = positive small, ns = negative small,
pm = positive medium, pl = positive large, z = zero

Έξοδοι : vs = very small, av = average, ms = medium small, aav = above average ,bav = below average
ml = medium large, vl = very large

Ακολουθεί στη συνέχεια ο κώδικας υλοποίησης της ασαφούς λογικής.

```
function D1= fcn(D2)

% D2: duty cycle 2 (ratio)
% f: frequency (Hz)
% Iout: target current

persistent PWM1_f;
if isempty(PWM1_f) PWM1_f = 0.0;
end;
persistent old_PWM1_f;
```

```

if isempty(old_PWM1_f) old_PWM1_f = 0.0;
end;
persistent old_old_PWM1_f;
if isempty(old_old_PWM1_f) old_old_PWM1_f = 0.0;
end;
persistent filtered_PWM1;
if isempty(filtered_PWM1) filtered_PWM1 = 0.0;
end;
persistent PWM2_f;
if isempty(PWM2_f) PWM2_f = 0.0;
end;
persistent old_PWM2_f;
if isempty(old_PWM2_f) old_PWM2_f = 0.0;
end;
persistent filtered_PWM2;
if isempty(filtered_PWM2) filtered_PWM2 = 0.0;
end;
persistent i
if isempty(i) i = 0;
end;

subsample=2, % hardcoding :-(
i=i+1;

if i==subsample
    i=0;

    PWM2_f = 1024 * D2;
    filtered_PWM2 = filtered_PWM2 + ( PWM2_f - filtered_PWM2 ) / 1;

    dPWM2_f = filtered_PWM2 - old_PWM2_f ;
    old_PWM2_f = filtered_PWM2;

    dPWM1_f = old_PWM1_f - old_old_PWM1_f;

    zero = 200;

    if dPWM2_f < -100 dPWM2_f = -100;
    end;
    if dPWM2_f > 100 dPWM2_f = 100;
    end;
    if dPWM1_f>400 dPWM1_f=400;
    end;
    if dPWM1_f<-400 dPWM1_f=-400;
    end;

    PWM1_f = 450 + dPWM2_f * (dPWM1_f + zero) / 20;

    old_PWM1_f = PWM1_f;
    old_old_PWM1_f = old_PWM1_f;

    filtered_PWM1 = filtered_PWM1 + ( PWM1_f - filtered_PWM1 ) / 50;
end;

D1 = filtered_PWM1/1024;

```

2.6 Τριφασικός Αντιστροφείας πηγής τάσης

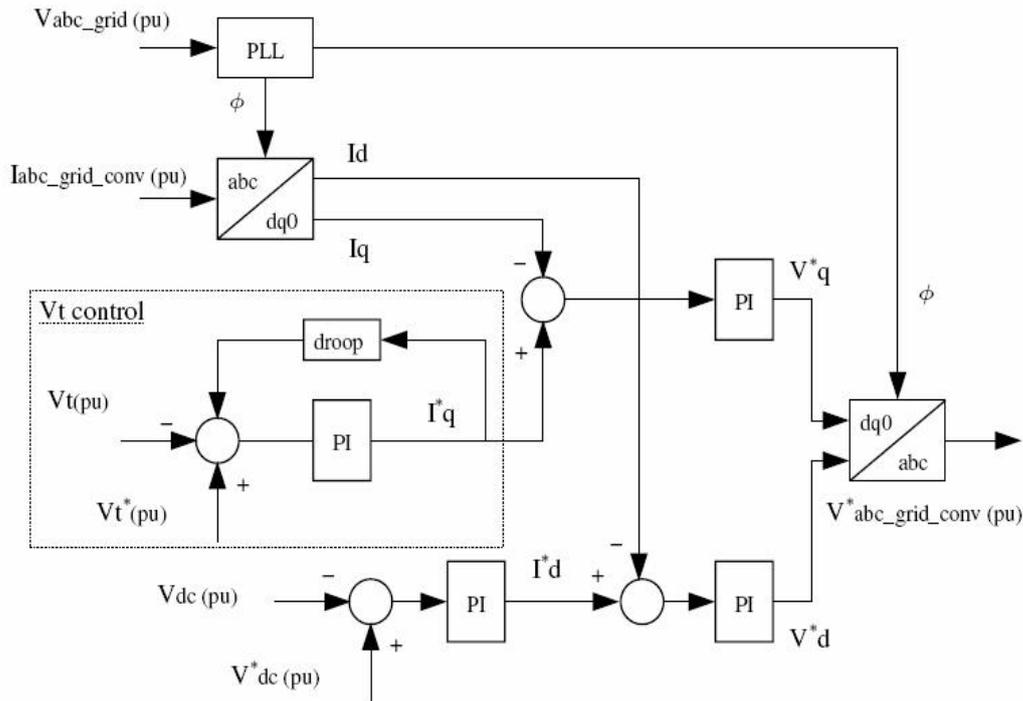
Ο SPWM τριφασικός αντιστροφείας τύπου πηγής τάσης είναι ο μετατροπέας ισχύος που μετατρέπει την dc τάση της εξόδου του μετατροπέα ανύψωσης σε εναλλασσόμενη μεταβλητού πλάτους. Αποτελείται από 6 IGBTs και αντιπαράλληλες

διόδους που επιτρέπουν την αγωγή από το φορτίο προς την είσοδο σε περίπτωση που ο συντελεστής ισχύος είναι διάφορος της μονάδας. Στόχος του είναι να μεταγει την ισχύ που δίνει ο μετατροπέας ανύψωσης στο δίκτυο κρατώντας σταθερή την τάση του πυκνωτή στην είσοδο. Αυτό το καταφέρνει χρησιμοποιώντας διανυσματικό έλεγχο της τάσης και ρύθμιση ρεύματος, διαδικασία που υλοποιεί ο αντίστοιχος ελεγκτής που περιγράφεται στη παράγραφο 2.5.1 . Ένα άλλο χαρακτηριστικό είναι η ικανότητα ρύθμισης του συντελεστή ισχύος τόσο σε επαγωγικό όσο και σε χωρητικό. Η ρύθμιση αυτή γίνεται σχετικά εύκολα μέσω του ελεγκτή του και προσομοιώνει την λειτουργία των συμβατικών σταθμών παραγωγής.

2.6.1 Ελεγκτής του αντιστροφέα τύπου πηγής τάσης

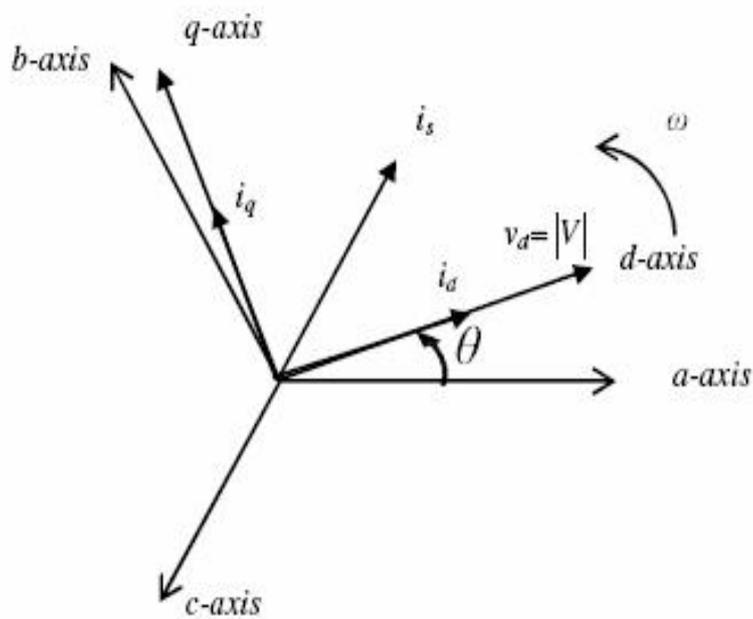
Ο έλεγχος του αντιστροφέα όπως είπαμε πραγματοποιείται από κατάλληλο ελεγκτή ο οποίος λειτουργεί εφαρμόζοντας διανυσματικό έλεγχο τάσης και ρύθμιση ρεύματος. Με τη μέθοδο αυτή καταφέρνει να κρατήσει σταθερή, σε συγκεκριμένη τιμή, την τάση του πυκνωτή εγγέοντας ενεργό ισχύ στο δίκτυο . Με σταθερή την συνεχή τάση, οι διακυμάνσεις του ρεύματος λόγω του ελεγκτή του μετατροπέα ανύψωσης, θα συνεπάγονται έμμεσα σε διακυμάνσεις της ενεργού ισχύος. Στην πραγματικότητα οι εντολές για αύξηση ή μείωση ισχύος δεν δίνονται άμεσα από τον ελεγκτή του αντιστροφέα, αλλά από τον ελεγκτή του μετατροπέα ανύψωσης. Ο ελεγκτής του αντιστροφέα απλώς κάνει έγχυση ενεργού ισχύος στο δίκτυο ανάλογα με την μεταβολή της τιμής της τάσης που βλέπει στην είσοδο του. Εκτός από την έγχυση ενεργού ισχύος υπάρχει η δυνατότητα ρύθμισης και της άεργου που ανταλλάσσεται με το δίκτυο.

Έστω, λοιπόν, ότι το σύστημα λειτουργεί σε κάποια κατάσταση, εγγέοντας στο δίκτυο συγκεκριμένη ισχύ αντίστοιχη αυτής της ταχύτητας ανέμου. Εάν μια ριπή ανέμου δώσει περισσότερη αεροδυναμική ροπή τότε λόγω της λειτουργίας του MPPT ελεγκτή θα υπάρξει αύξηση του ρεύματος που θα πηγαίνει προς τον αντιστροφέα ανεβάζοντας την τάση στο πυκνωτή. Μόλις ο ελεγκτής αντιληφθεί αυτή την ανύψωση θα κάνει κατάλληλη ρύθμιση των παλμών αγωγής του αντιστροφέα ώστε εκείνος να ανεβάσει τα επίπεδα ενεργού ισχύος που παράγει. Εν τέλει η συνεχής τάση θα επιστρέψει σε φυσιολογικά επίπεδα και ο αντιστροφέας θα εγγεί στο δίκτυο αυτή τη φορά μεγαλύτερες ποσότητες ενεργού ισχύος. Αντίστροφη είναι η διαδικασία που θα ακολουθηθεί αν υπάρξει μείωση της ταχύτητας ανέμου. Στο σχήμα 2.22 φαίνεται το δομικό διάγραμμα του ελεγκτή.



Σχήμα 2.22
Δομικό διάγραμμα του ελεγκτή αντιστροφέα

Η αρχή λειτουργίας του ελεγκτή βασίζεται σε διανυσματικό έλεγχο της τάσης που παράγει ο αντιστροφέας ώστε να γίνεται κατάλληλη ρύθμιση ρεύματος που εγχέεται στο δίκτυο. Ο διανυσματικός έλεγχος πραγματοποιείται σε ένα στρεφόμενο πλαίσιο το οποίο περιστρέφεται με τη γωνιακή ταχύτητα της τάσης του δικτύου. Συγκεκριμένα, δειγματοληπούμε την τάση του δικτύου από την οποία λαμβάνουμε τη γωνιακή ταχύτητα περιστροφής των τριών διανυσμάτων της. Αυτή η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής αποτελεί την ταχύτητα περιστροφής του στρεφόμενου πλαισίου στο οποίο γίνεται ο έλεγχος. Τα τριφασικά ρεύματα από την πλευρά του δικτύου αναλύονται και αυτά με τη σειρά τους στο συγκεκριμένο πλαίσιο όπως φαίνεται στο σχήμα 5.4 . Όπως είναι φυσικό από τη στιγμή που το πλαίσιο περιστρέφεται με την γωνιακή ταχύτητα της τάσης του δικτύου, ο d άξονας θα συμπίπτει με το συνιστάμενο διάνυσμα της τάσης τάση V και κατά συνέπεια θα ισχύει ότι $|V| = v_d$ ενώ $v_q = 0$ όπως φαίνεται στο σχήμα 2.23 .



Σχήμα 2.23
Στρεφόμενο στον άξονα (d-q) πλαίσιο αναφοράς

Επίσης είναι γνωστό ότι η στιγμιαία τιμή της ενεργού ισχύος στο τριφασικό σύστημα δίνεται από τη σχέση

$$P(t) = v_a i_a + v_b i_b + v_c i_c \quad (2.5.1.1)$$

Αν μετασχηματιστεί στο συγκεκριμένο d - q πλαίσιο τότε θα έχουμε τις ακόλουθες σχέσεις

$$P = \frac{3}{2} (v_d i_d + v_q i_q) \quad (2.5.1.2)$$

$$Q = \frac{3}{2} (v_d i_q + v_q i_d) \quad (2.5.1.3)$$

Για το συγκεκριμένο πλαίσιο αναφοράς όπου $|V| = v_d$ ενώ $v_q = 0$ θα πάρουμε τις τελικές σχέσεις που δίνουν την ενεργό και την άεργο ισχύ.

$$P = \frac{3}{2} |V| i_d \quad (2.5.1.4)$$

$$Q = \frac{3}{2}|V|i_q$$

(2.5.1.5)

Είναι φανερό από τις σχέσεις αυτές ότι για το συγκεκριμένο πλαίσιο αναφοράς η ενεργός και η άεργος ισχύς που μεταφέρονται από τον αντιστροφέα στο δίκτυο είναι συνάρτηση των d και q συνιστωσών του ρεύματος. Για το λόγο αυτό ελέγχοντας τις συνιστώσες αυτές με κάποιο ελεγκτή είναι δυνατή η ρύθμιση της ενεργού και άεργου ισχύος. Εκ πρώτης όψεως ο έλεγχος της ενεργού και άεργου ισχύος φαίνεται να είναι ανεξάρτητος. Στη πράξη όμως κάτι τέτοιο δεν ισχύει γιατί οποιαδήποτε ρύθμιση γίνει στο ένα από τα δύο μεγέθη έχει ως επακόλουθο και στο άλλο κάτι που θα φανεί και από τις αποκρίσεις.

Για να διατηρήσει την τάση του πυκνωτή στη είσοδο σταθερή ο ελεγκτής διαβάζει την στιγμιαία τιμή της dc τάσης και την συγκρίνει με την ιδανική που επιθυμούμε, στην περίπτωση μας 650V. Το σφάλμα από την σύγκριση αυτή περνάει μέσα από έναν PI ελεγκτή στην έξοδο του οποίου παίρνουμε ένα σήμα το οποίο δείχνει ποιο πρέπει να είναι το ρεύμα της d συνιστώσας που θα κρατήσει την τάση σταθερή, το οποίο ονομάζεται ρεύμα αναφοράς I_d^* , σχήμα 2.22. Το ρεύμα αυτό θα συγκριθεί με το πραγματικό ρεύμα της d συνιστώσας το οποίο λαμβάνεται από το μετασχηματισμό d q . Το αποτέλεσμα της σύγκρισης αφού περαστεί από έναν PI ελεγκτή αποτελεί το σήμα αναφοράς της d συνιστώσας της τάσης, V_d^* .

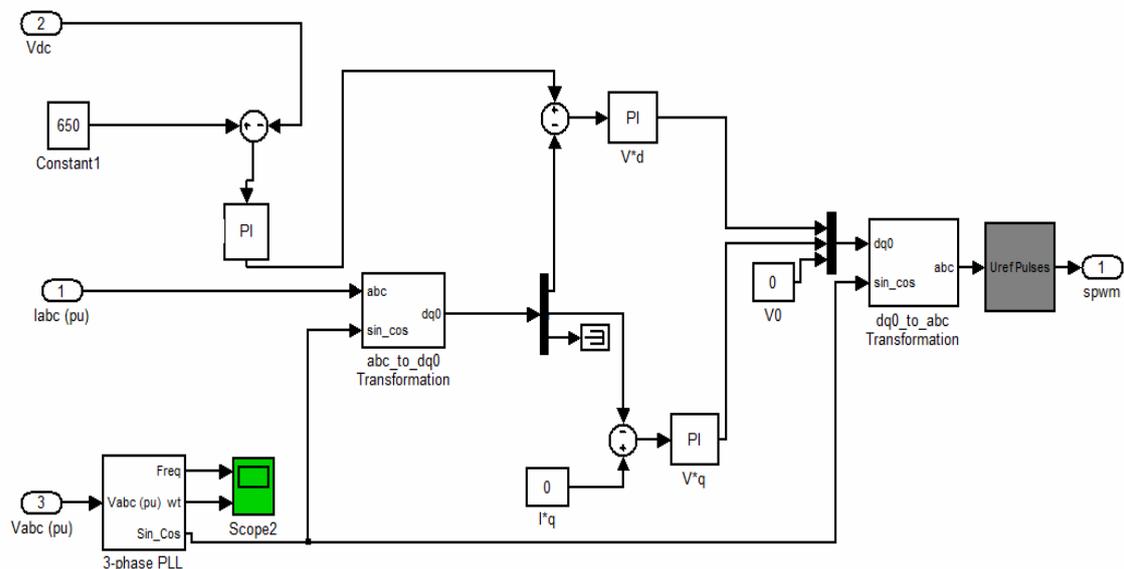
Με ανάλογο τρόπο μπορεί να γίνει ρύθμιση ή παρακολούθηση της τάσης εξόδου του αντιστροφέα και κατά συνέπεια και υποστήριξη του δικτύου με άεργο ισχύ σε περίπτωση που χρειαστεί. Στη περίπτωση αυτή η τάση αναφοράς V_t^* συγκρίνεται με την πραγματική V_t και το σφάλμα της σύγκρισης αφού περαστεί από ένα PI ελεγκτή αποτελεί το ρεύμα της q συνιστώσας, το οποίο ονομάζεται ρεύμα αναφοράς I_q^* . Στη παρούσα εργασία θα θεωρηθεί το I_q^* ως σταθερά και ίση με μηδέν. Έτσι για διάφορες τιμές, θετικές ή αρνητικές που θα δίνουμε στο I_q^* θα έχουμε διαφορετική άεργο ισχύ (επαγωγική ή χωρητική ανάλογα). Για $I_q^* = 0$ η άεργος ισχύς είναι μηδενική. Στη συνέχεια η τιμή I_q^* συγκρίνεται με την πραγματική τιμή I_q και το αποτέλεσμα της σύγκρισης αφού περαστεί από έναν PI ελεγκτή αποτελεί το σήμα αναφοράς της q συνιστώσας της τάσης, V_q^* . Τέλος, οι τάσεις αναφοράς V_d^* και V_q^* μετασχηματίζονται σε $V_{abc_grid_conv}^*$ οι οποίες είναι οι επιθυμητές τάσεις στην έξοδο και στέλνονται στη PWM γεννήτρια.

Ένα άλλο πολύ σημαντικό χαρακτηριστικό του παραπάνω ελεγκτή είναι η στιγμιαία ταύτιση ως προς τη συχνότητα και την αλληλουχία των φάσεων της τάσης του δικτύου με την τάση στην έξοδο του αντιστροφέα. Η ιδιότητα αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι το στρεφόμενο πλαίσιο στο οποίο γίνεται ο έλεγχος, περιστρέφεται με τη συχνότητα της τάσης του δικτύου και έτσι τόσο η τάση όσο και το ρεύμα που θα δίνει ο αντιστροφέας θα έχουν την ίδια συχνότητα και την ίδια αλληλουχία φάσεων με τα αντίστοιχα μεγέθη του δικτύου. Αυτό που μεταβάλλεται είναι το μέτρο της τάσης του

αντιστροφή και η γωνία « δ » σε σχέση με την τάση του δικτύου. Αυτά τα δύο όμως είναι στη πράξη και τα μεγέθη που ρυθμίζουν την ενεργό και την άεργο ισχύ πράγμα που είναι ζητούμενα στο σύστημα.

2.6.2 Μοντέλο προσομοίωσης ελεγκτή αντιστροφέα

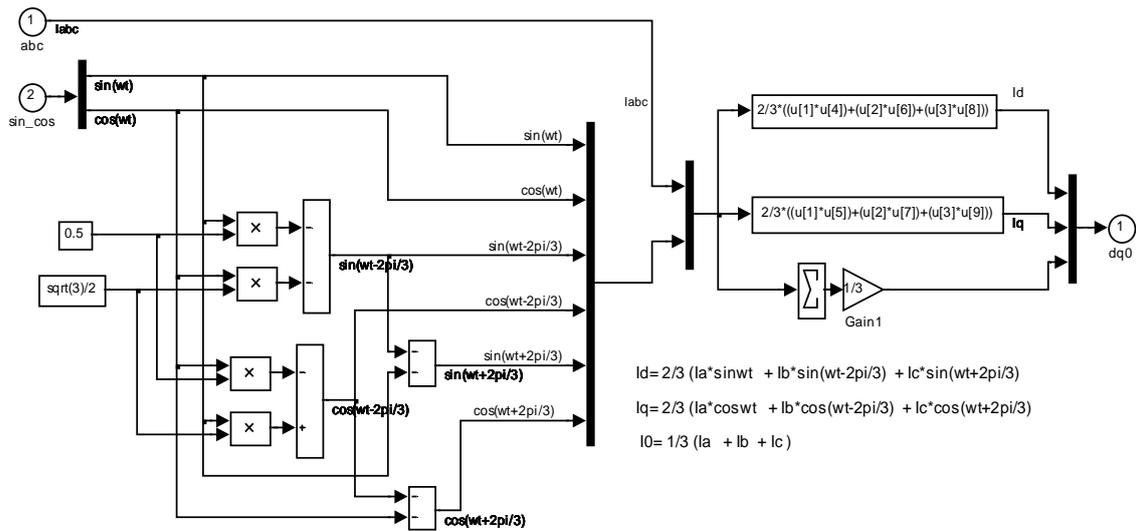
Το μοντέλο προσομοίωσης φαίνεται στο σχήμα 2.24 όπου ένα PLL (Phase Locked Loop) δίνει την γωνιακή ταχύτητα περιστροφής των τριών φασικών διανυσμάτων των τάσεων του δικτύου. Με βάση την γωνιακή ταχύτητα των τάσεων του δικτύου συγχρονίζουμε και το στρεφόμενο διανυσματικό πλαίσιο στο οποίο θα μετασχηματίσουμε την τάση και το ρεύμα εξόδου. Στην έξοδο του ελεγκτή γίνεται η αντιστροφή διαδικασία όπου οι V_d^* και V_q^* συνιστώσες της τάσης θα μετασχηματιστούν στα σήματα διαμόρφωσης των παλμών αγωγής του αντιστροφέα.



Σχήμα 2.24

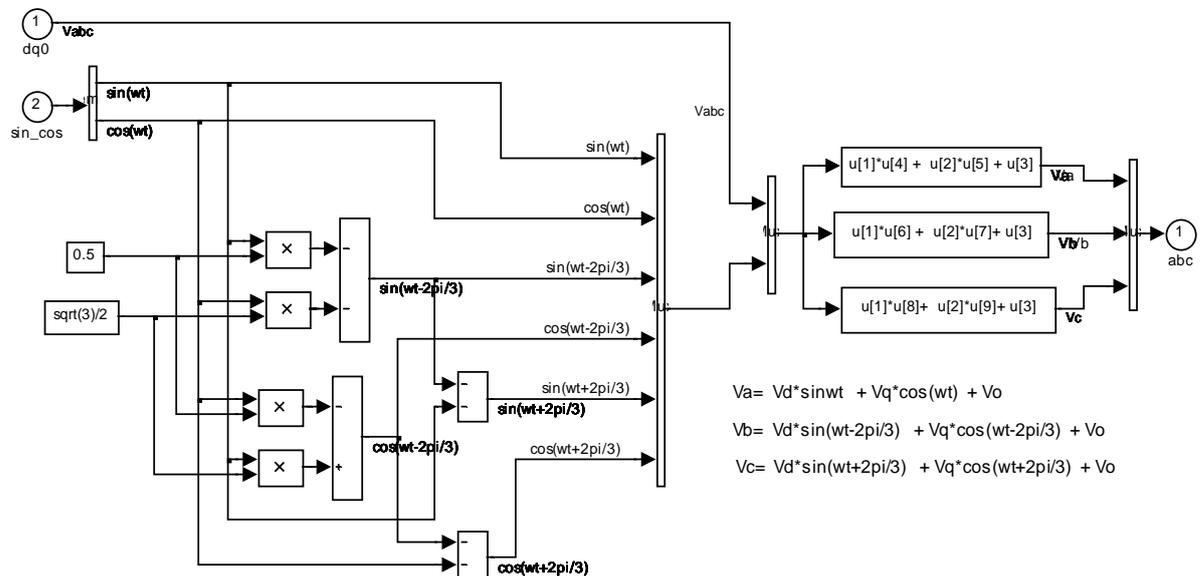
Μοντέλο προσομοίωσης του ελεγκτή του αντιστροφέα

Ο μετασχηματισμός των abc τριφασικών μεγεθών στο d-q πλαίσιο γίνεται χρησιμοποιώντας μετασχηματισμό Park, όπως φαίνεται στη ρουτίνα του σχήματος 2.25. Η ρουτίνα δέχεται στην είσοδο τις στιγμιαίες τιμές του ρεύματος και την γωνιακή ταχύτητα περιστροφής, ω , και βάσει των εξισώσεων μετασχηματίζει τα μεγέθη στο d-q πλαίσιο. Η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής είναι αυτή της τάσης του δικτύου, έτσι επιτυγχάνουμε το συγχρονισμό του πλαισίου αναφοράς με τη γωνιακή ταχύτητα περιστροφής της τάσης του δικτύου.



Σχήμα 2.25
Υπορουτίνα υλοποίησης του μετασχηματισμού Park.

Ο μετασχηματισμός από d-q σε abc πραγματοποιείται από τη ρουτίνα του σχήματος 2.26 σύμφωνα με τις αντίστροφες σχέσεις του Park.



Σχήμα 2.26
Υπορουτίνα υλοποίησης του αντίστροφου μετασχηματισμού Park

Στη συνέχεια το σφάλμα της στιγμιαίας τιμής της τάσης από την τάση αναφοράς των 650 V τροφοδοτείται σε έναν PI ελεγκτή. Το κέρδος του οποίου είναι 0.0011 ενώ η σταθερά ολοκλήρωσης έχει τιμή 20, σχήμα 2.19 . Η έξοδος του PI συγκρίνεται εκ νέου με την πραγματική τιμή της d συνιστώσας του ρεύματος και το αποτέλεσμα της

σύγκρισης τροφοδοτείται σε δεύτερο PI κέρδος 10 και σταθερά ολοκλήρωσης 10. Ο τρίτος PI, $V \cdot q$, έχει κέρδος 100 και σταθερά ολοκλήρωσης 110.

Το σύστημα ελέγχου του αντιστροφέα δίνει στην έξοδο του τρία ημίτονα με διαφορά φάσης 120° που είναι τα ημίτονα διαμόρφωσης του αντιστροφέα. Τα σήματα αυτά τροφοδοτούνται με την σειρά τους σε μια γεννήτρια παλμών SPWM που λειτουργεί με διακοπτική συχνότητα 1950Hz. Οι παλμοί της γεννήτριας αντιστοιχίζονται στη συνέχεια στο κατάλληλο IGBT του αντιστροφέα.

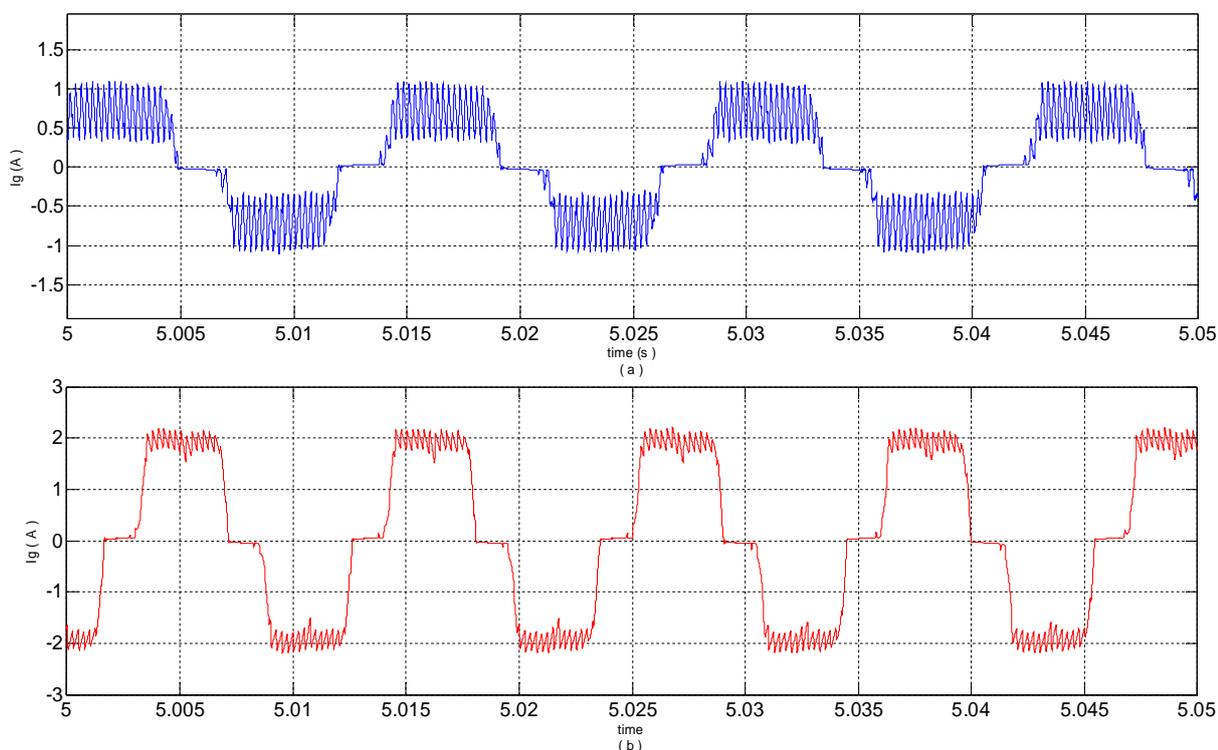
Κεφάλαιο 3

Λειτουργικά χαρακτηριστικά και πειραματική επιβεβαίωση του μοντέλου

Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται παρουσίαση της λειτουργίας του μοντέλου σε σταθερή ταχύτητα ανέμου, δηλαδή σταθερή αεροδυναμική ροπή στον άξονα της γεννήτριας. Παρουσιάζονται οι αποκρίσεις των ηλεκτρικών μεγεθών της γεννήτριας και του μετατροπέα ΕΡ/ΣΡ/ΕΡ. Οι αποκρίσεις αυτές θα συγκριθούν με πειραματικά αποτελέσματα που ήδη υπάρχουν για να διαπιστωθεί η ορθότητα τους.

3.1 Αρχικοποίηση του μοντέλου της γεννήτριας και απόκριση μόνιμης κατάστασης για σταθερή αεροδυναμική ροπή

Για δεδομένη ταχύτητα ανέμου το αεροδυναμικό μέρος δίνει μια σταθερή μηχανική ροπή στον άξονα της γεννήτριας. Από τη στιγμή που δεν έχουμε καμία μεταβολή στην τιμή της ροπής τελικά το σύστημα θα ισορροπήσει σε μια μόνιμη κατάσταση στην οποία θα γίνει καταγραφή όλων των ηλεκτρικών μεγεθών της γεννήτριας. Συγκεκριμένα καταγράφονται τα ρεύματα στο στάτη, η ηλεκτρική ροπή, η μηχανική γωνιακή ταχύτητα περιστροφής και η συχνότητα του ρεύματος που αναπτύσσεται. Τα ρεύματα του στάτη στη μόνιμη κατάσταση για ταχύτητες ανέμου 6 m/s και 10 m/s και αφού έχει επέλθει μόνιμη κατάσταση παρουσιάζονται στο σχήμα 3.1.



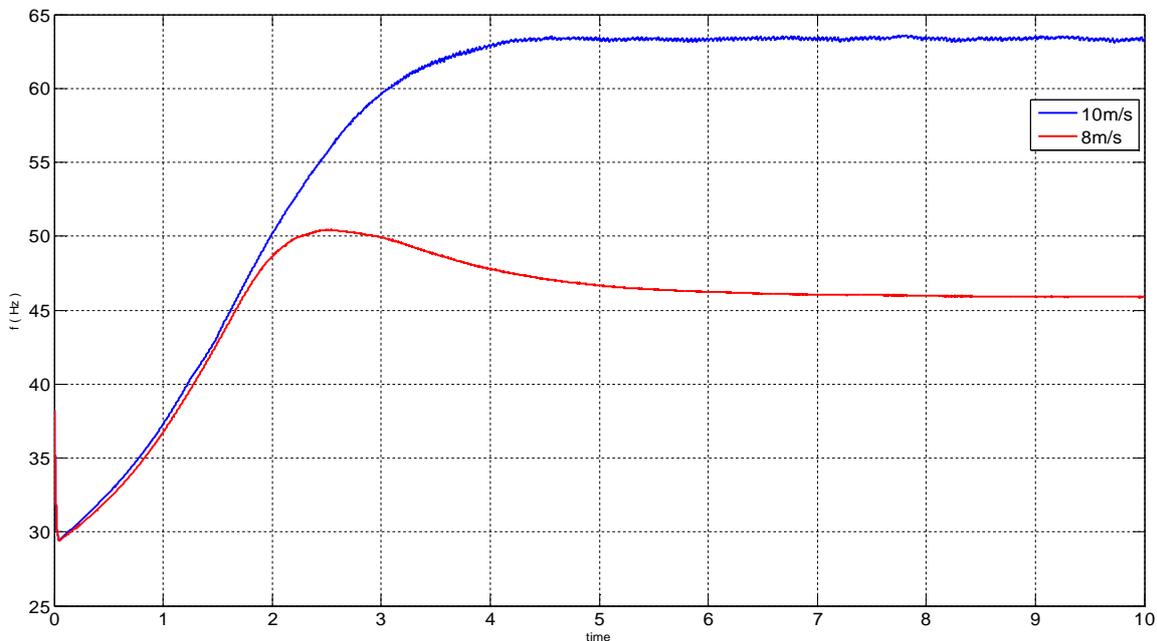
Σχήμα 3.1

Προσομοίωση - Στιγμιαίο ρεύμα στη φάση a του στάτη της γεννήτριας για ταχύτητα ανέμου

(α) 6 m/s (β) 10 m/s όπως δίνεται από το μοντέλο προσομοίωσης.

Η μηχανική ροπή που αντιστοιχεί σε ταχύτητα 6 m/s είναι 11.8 Nm ενώ για ταχύτητα ανέμου 10 m/s φτάνει στα 28Nm, όπως δίνεται από το υποσύστημα που προσομοιώνει την αεροδυναμική των πτερυγίων. Παρατηρώντας τα ρεύματα αυτά σημειώνεται ότι για 6 m/s η μέγιστη τιμή τους φτάνει στα 1A και βασική αρμονική συχνότητα 47Hz ενώ για 10 m/s , 2A και βασική αρμονική 63Hz αντίστοιχα. Τα ρεύματα αυτά δεν είναι ακριβώς ημιτονοειδή και έχουν και κάποιες υψίσυχνες αρμονικές λόγω του διακοπτικού στοιχείου του μετατροπέα ανύψωσης τάσης που λειτουργεί με συχνότητα 4 KHz.

Τη χρονική στιγμή που ξεκινάει η προσομοίωση επιβάλλεται στον άξονα της γεννήτριας αεροδυναμική ροπή που είναι συνάρτηση της ταχύτητας του ανέμου. Για δεδομένη και σταθερή ροπή θα χρειαστεί κάποιο χρονικό διάστημα ώστε το σύστημα να συγκλίνει στη μόνιμη κατάσταση. Στο σχήμα 3.2 φαίνεται η αριθμητική σύγκλιση της συχνότητας των ρευμάτων του στάτη της γεννήτριας στη μόνιμη κατάσταση και για τις δύο ταχύτητες ανέμου . Αυτή η σύγκλιση είναι απόρροια τόσο της αρχικοποίησης του μοντέλου όσο και της αδράνειας της γεννήτριας.

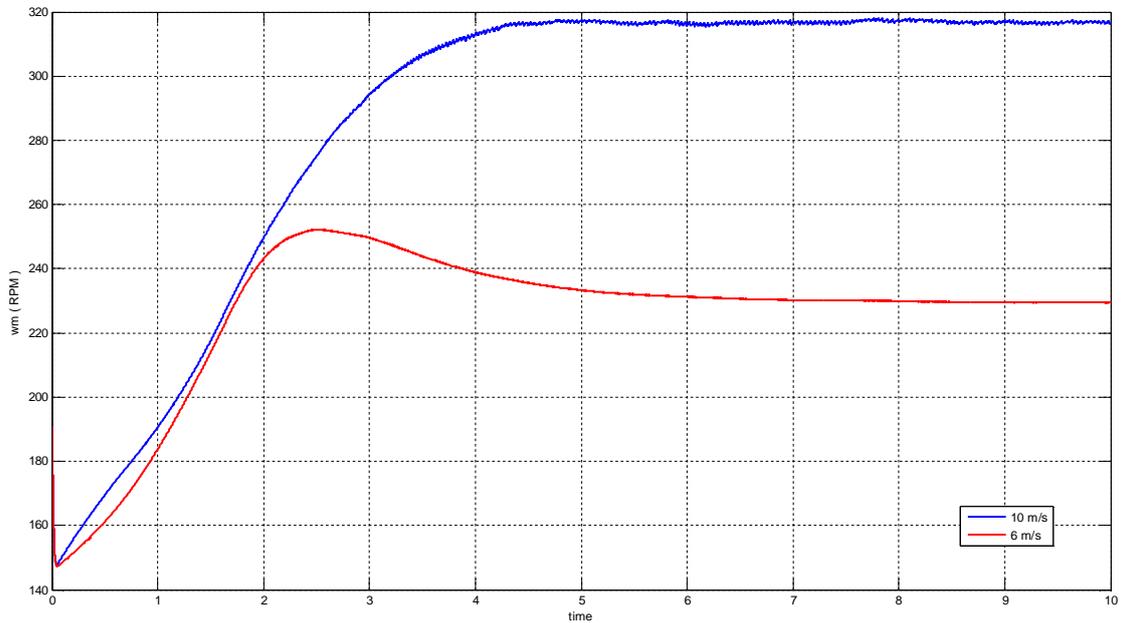


Σχήμα 3.2

Προσομοίωση - Αριθμητική σύγκλιση συχνότητας των ρευμάτων της γεννήτριας με σταθερή ταχύτητα ανέμου , για 6 m/s και 10 m/s όπως δίνεται από το μοντέλο προσομοίωσης.

Όπως έχουμε ήδη αναφέρει και σε προηγούμενο κεφάλαιο, ένα από τα πλεονεκτήματα που έχει η χρήση της σύγχρονης γεννήτριας σε συνδυασμό με μετατροπείς ΕΡ/ΣΡ/ΕΡ είναι η αποσύζευξη της συχνότητας της γεννήτριας από εκείνη του δικτύου. Η γεννήτρια δεν περιορίζει πλέον τις στροφές της και μπορεί ανάλογα με την αεροδυναμική ροπή που εφαρμόζεται στον άξονα να παράγει στο στάτη ρεύματα με συχνότητα διαφορετική από εκείνη του δικτύου, πράγμα που φαίνεται και από τις αποκρίσεις στα σχήματα 3.2 . Ο έλεγχος των στροφών της γεννήτριας γίνεται με συγκεκριμένη μεθοδολογία. Υπεύθυνος για τη ρύθμιση των στροφών είναι ο ελεγκτής

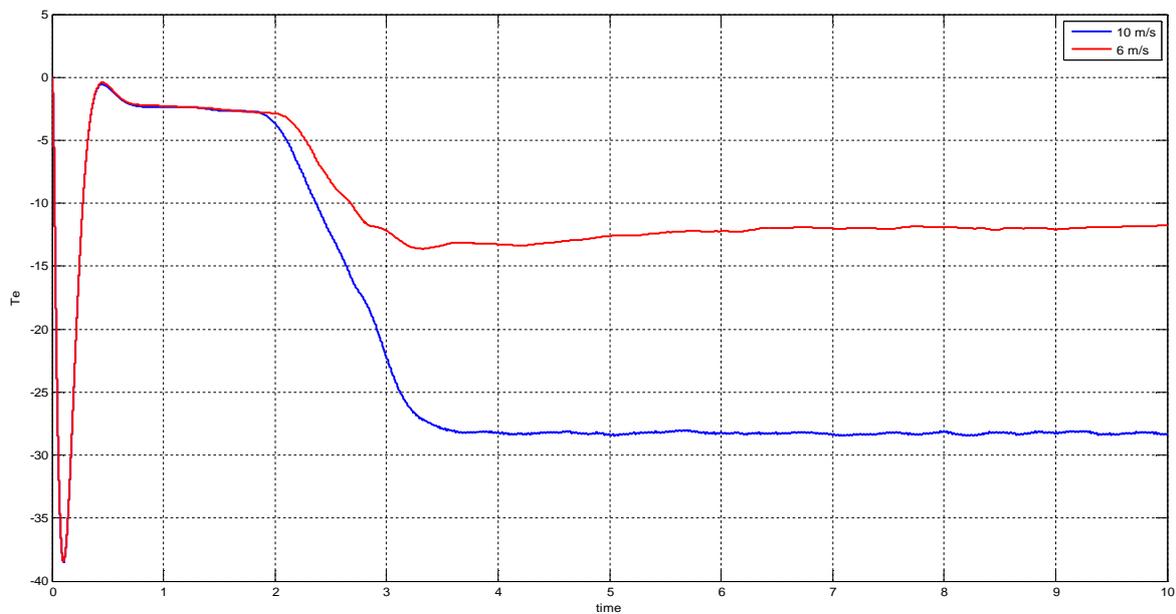
ανεύρεσης βέλτιστου σημείου λειτουργίας, MPPT, που περιγράφηκε στη παράγραφο 2.5 . Οι γωνιακές ταχύτητες περιστροφής της γεννήτριας στις παραπάνω ταχύτητες ανέμου φαίνονται στο σχήμα 3.3



Σχήμα 3.3

Προσομοίωση - Αριθμητική σύγκλιση της γωνιακής ταχύτητες περιστροφείς σε ΣΑΛ για 6m/s και 10m/s όπως δίνεται από το μοντέλο προσομοίωσης

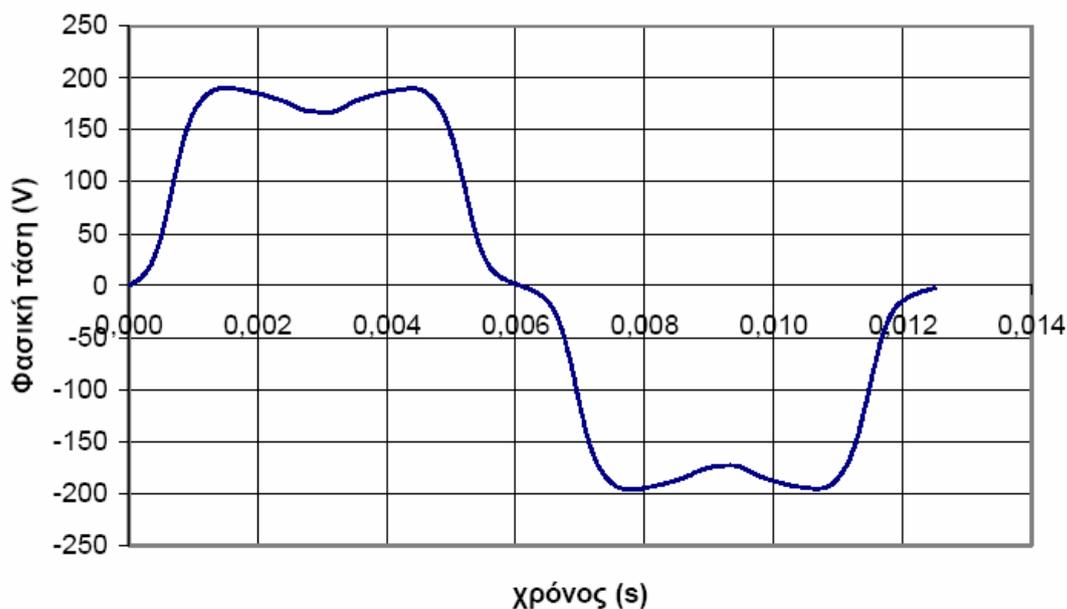
Για τις ίδιες ταχύτητες ανέμου (6m/s και 10m/s) η ηλεκτρική ροπή της γεννήτριας δίνεται από το σχήμα 3.4 .



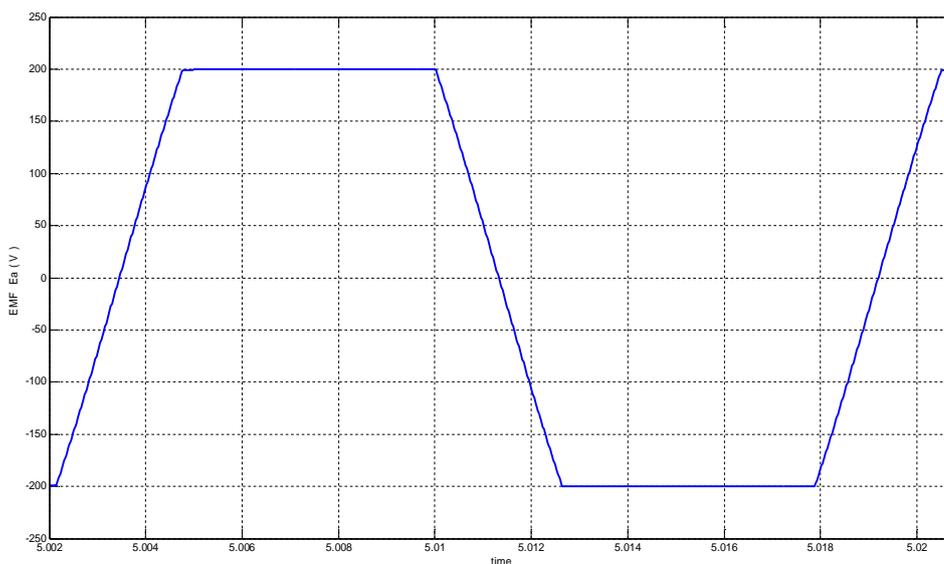
Σχήμα 3.4

Προσομοίωση - Αριθμητική σύγκλιση της ηλεκτρική ροπή γεννήτριας σε Nm για 6m/s και 10m/s όπως δίνεται από το μοντέλο προσομοίωσης

Ανάλογη με την ταχύτητα περιστροφής του άξονα της γεννήτριας είναι και τα επίπεδα της ηλεκτρεγερτικής δύναμης που επάγεται στο στάτη. Στο σχήμα 3.5 φαίνεται η πειραματική τιμή της τάσης κενού φορτίου για 400 ΣΑΛ όπως μετρήθηκε από το δοκίμιο που υπάρχει στο εργαστήριο. Για να προσομοιωθεί αυτή η τάση και να έχουμε ένα μοντέλο γεννήτριας μονίμων μαγνητών που θα πλησιάζει όσο είναι δυνατό τη συμπεριφορά του δοκιμίου θεωρούμε την μορφή αυτή τραπεζοειδή ρυθμίζοντας τις παραμέτρους έτσι ώστε να πάρουμε τραπεζοειδή τάση στα ίδια επίπεδα με αυτή του εργαστηρίου. Στο σχήμα 3.6 φαίνεται για τις ίδιες ταχύτητες περιστροφής η τάση κενού φορτίου που δίνει το μοντέλο της γεννήτριας.



Σχήμα 3.5
Πειραματική τιμή τάσης κενού φορτίου γεννήτριας για 400 ΣΑΛ.

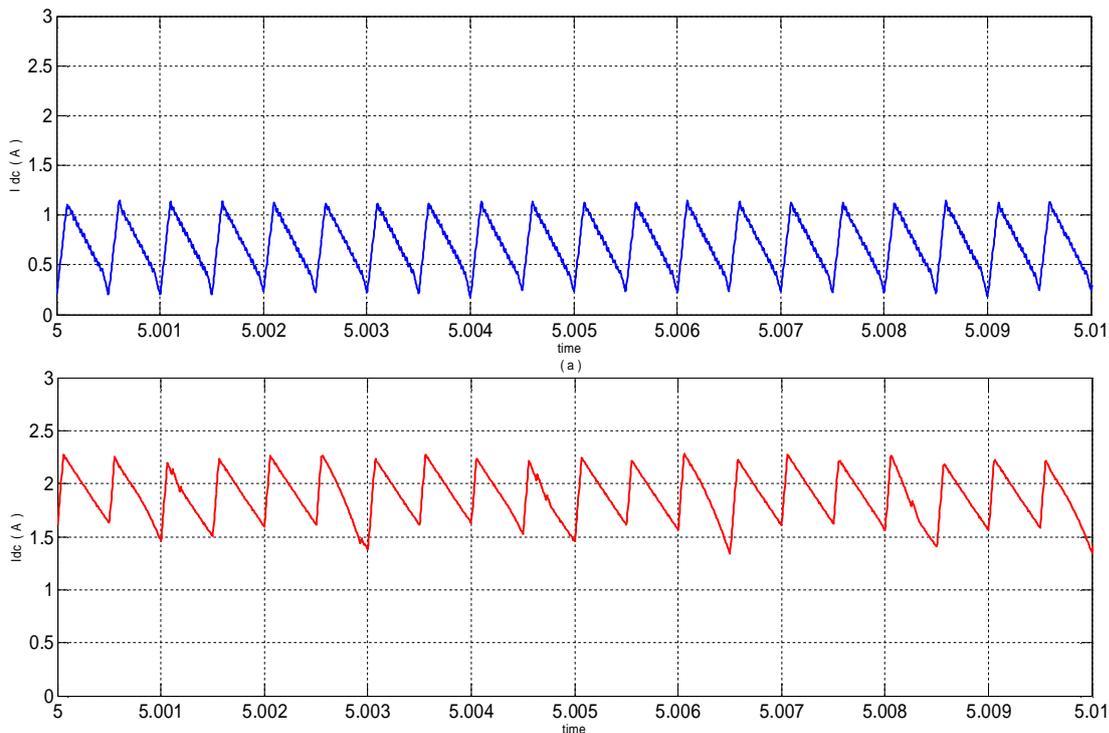


Σχήμα 3.6
Προσομοίωση - Τιμή της τάσης κενού φορτίου γεννήτριας για 400 ΣΑΛ, όπως δίνεται από το μοντέλο προσομοίωσης

3.2 Αποκρίσεις μοντέλου μετατροπέα ανύψωσης τάσης για σταθερή αεροδυναμική ροπή.

Για τις ίδιες ταχύτητες ανέμου, στη παράγραφο αυτή θα καταγράψουμε τις αποκρίσεις του μετατροπέα ανύψωσης τάσης. Ο μετατροπέας λειτουργεί σε συνεργασία με τον ελεγκτή ανεύρεσης βέλτιστου σημείου λειτουργίας που περιγράφηκε στη παράγραφο 2.4 . Για την παρούσα εργασία και τις προσομοιώσεις που ακολουθούν έχει χρησιμοποιηθεί ο ελεγκτής που βασίζεται σε δεδομένες χαρακτηριστικές καμπύλες λειτουργίας.

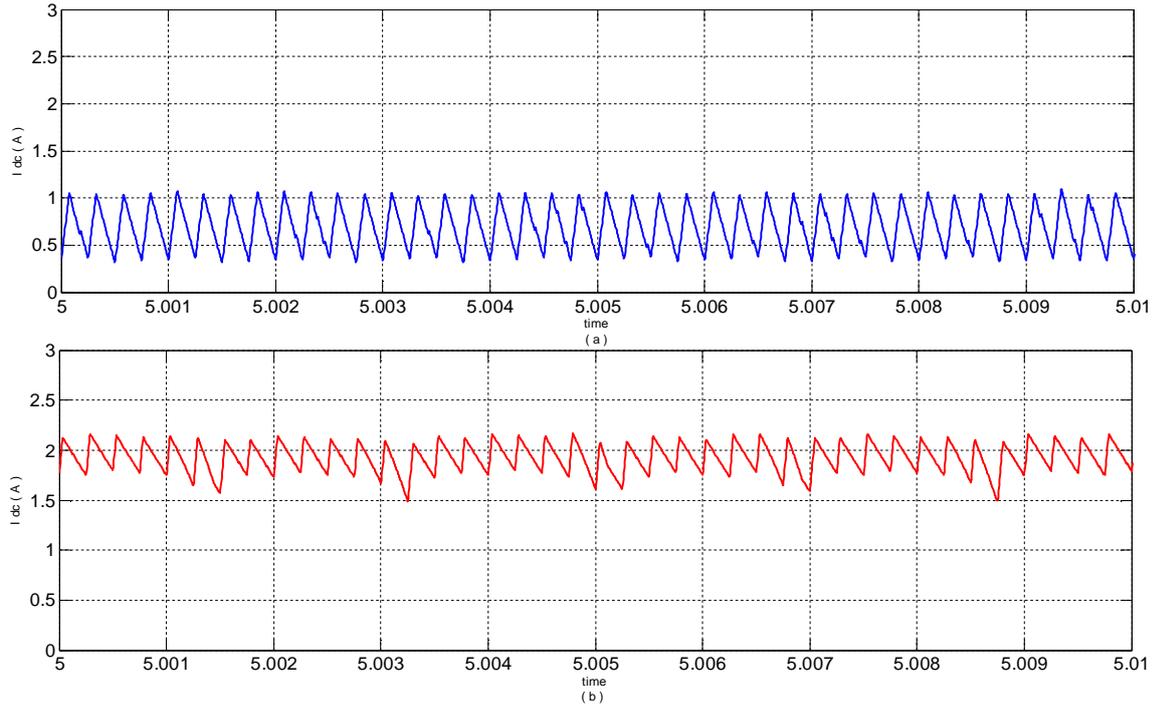
Το μέγεθος που ενδιαφέρει ιδιαίτερα, σε ότι αφορά τον μετατροπέα ανύψωσης είναι το ρεύμα, λόγω της σύνδεσης που έχει με την ενεργό ισχύ και εν τέλει την ποιότητα ισχύος που παρέχεται. Το ρεύμα αυτό όπως γνωρίζουμε περιλαμβάνει κάποιες υψηλής συχνότητας διακοπτικές συχνότητες που οφείλεται στην αγωγή του IGBT. Για τις ανάγκες της προσομοίωσης θεωρήθηκε διακοπτική συχνότητα 2kHz και 4kHz.



Σχήμα 3.7

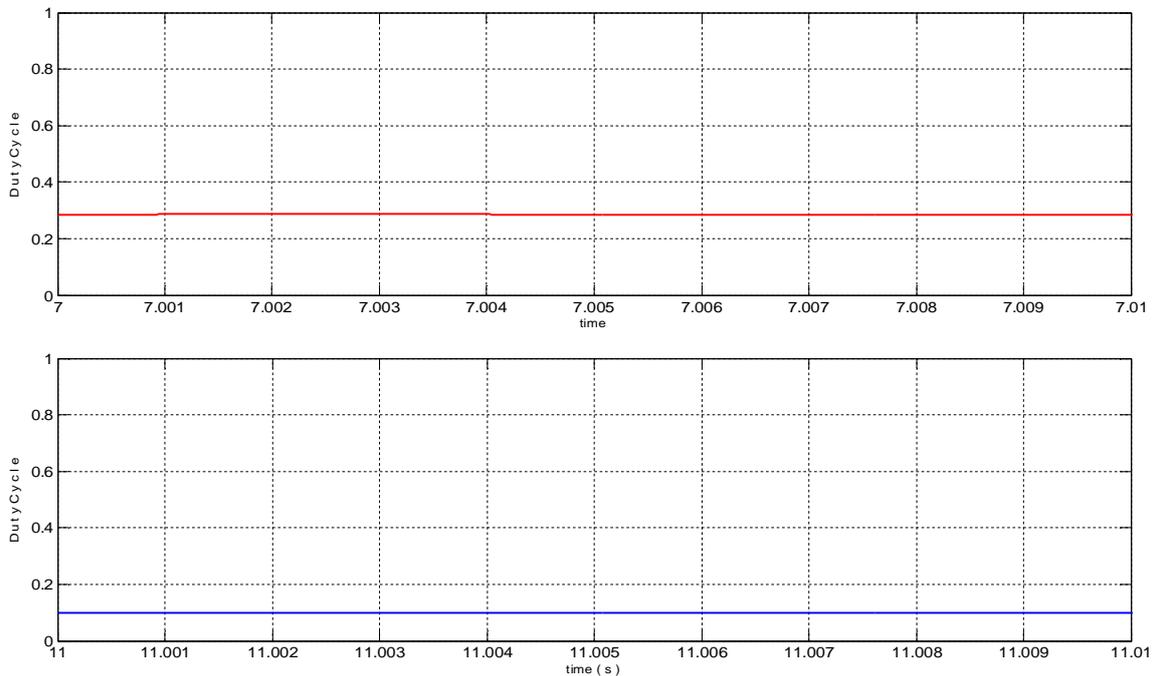
Προσομοίωση - Ρεύμα μετατροπέα ανύψωσης για 2kHz διακοπτική συχνότητα (α)6m/s και (β)10m/s όπως δίνεται από το μοντέλο προσομοίωσης

Παρατηρώντας το σχήμα 3.8, για 2kHz, το ρεύμα και στις δύο ταχύτητες ανέμου είναι συνεχές. Οι διακυμάνσεις του κυμαίνονται στα 0.7A και για τις δύο ταχύτητες ανέμου . Εάν αυξήσουμε την διακοπτική συχνότητα σε 4kHz, τότε αναμένεται να μειωθεί η διακύμανση του ρεύματος λόγω του μικρότερου διαστήματος αγωγής του IGBT . Στο σχήμα 3.8 φαίνεται η βελτίωση αυτή και στις δύο ταχύτητες ανέμου.



Σχήμα 3.8

Προσομοίωση - Ρεύμα μετατροπέα ανύψωσης για 4kHz διακοπτική συχνότητα (α)6m/s και (β)10m/s , όπως δίνεται από το μοντέλο προσομοίωσης

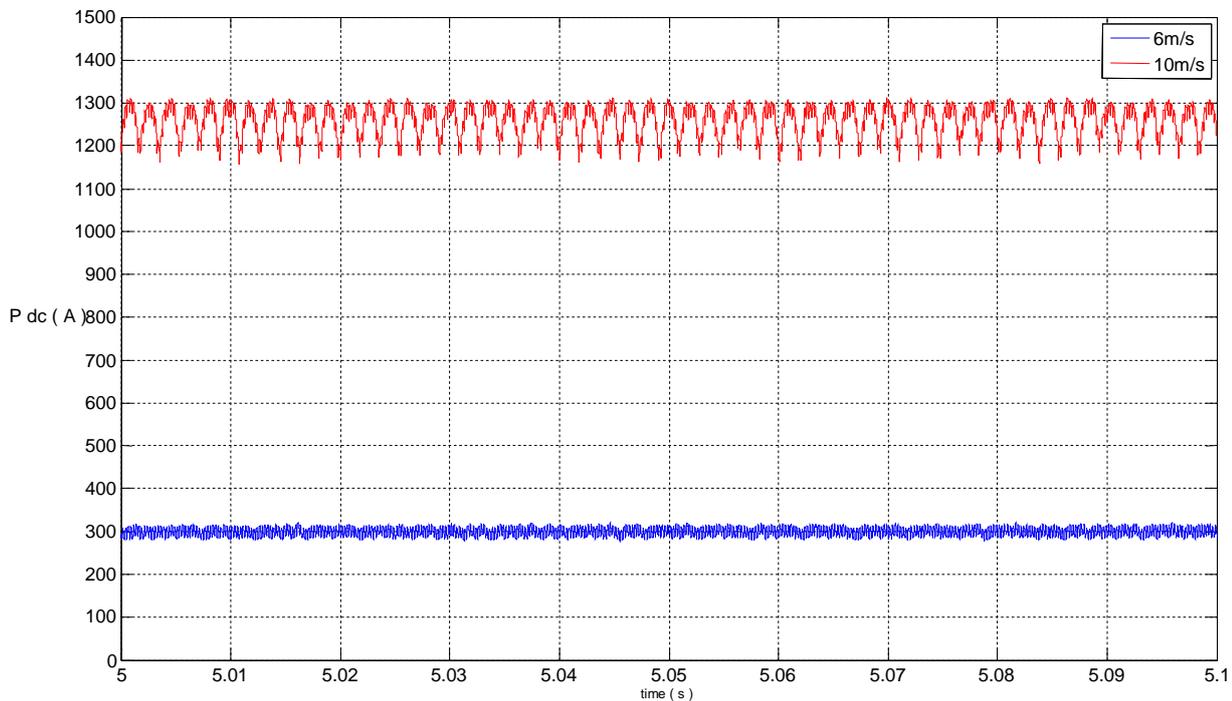


Σχήμα 3.9

Προσομοίωση - Λόγος κατάτμησης (α) 6m/s και (β)10 m/s, όπως δίνεται από το μοντέλο προσομοίωσης

Για τα ρεύματα του σχήματος 3.8 , η τιμή του λόγου κατάτμησης του μετατροπέα ανύψωσης φαίνεται στο σχήμα 3.9. Τέλος τα επίπεδα ενεργού ισχύος που

μεταφέρονται μέσω του μετατροπέα ανύψωσης τάσης προς τον αντιστροφέα, για τις ίδιες ταχύτητες ανέμου, καταγράφονται και παρουσιάζονται στο σχήμα 3.10.

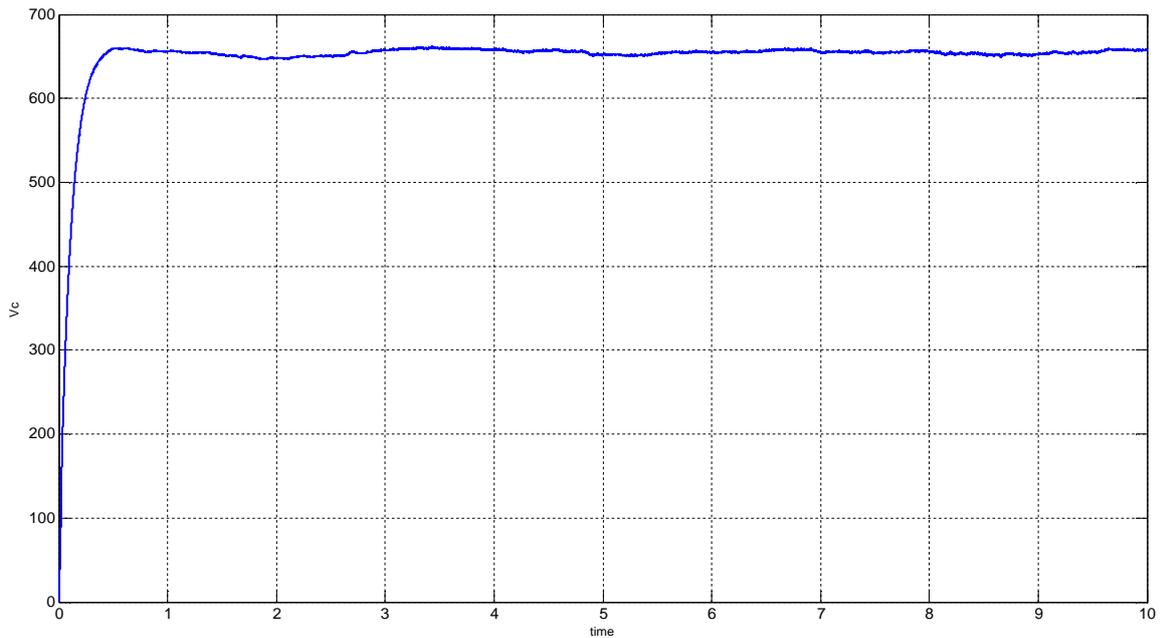


Σχήμα 3.10

Προσομοίωση - Ενεργός ισχύς που μεταφέρεται μέσω του μετατροπέα ανύψωσης τάσης, για 4kHz, 6m/s και 10 m/s

3.3 Αποκρίσεις μοντέλου Αντιστροφέα για σταθερή αεροδυναμική ροπή

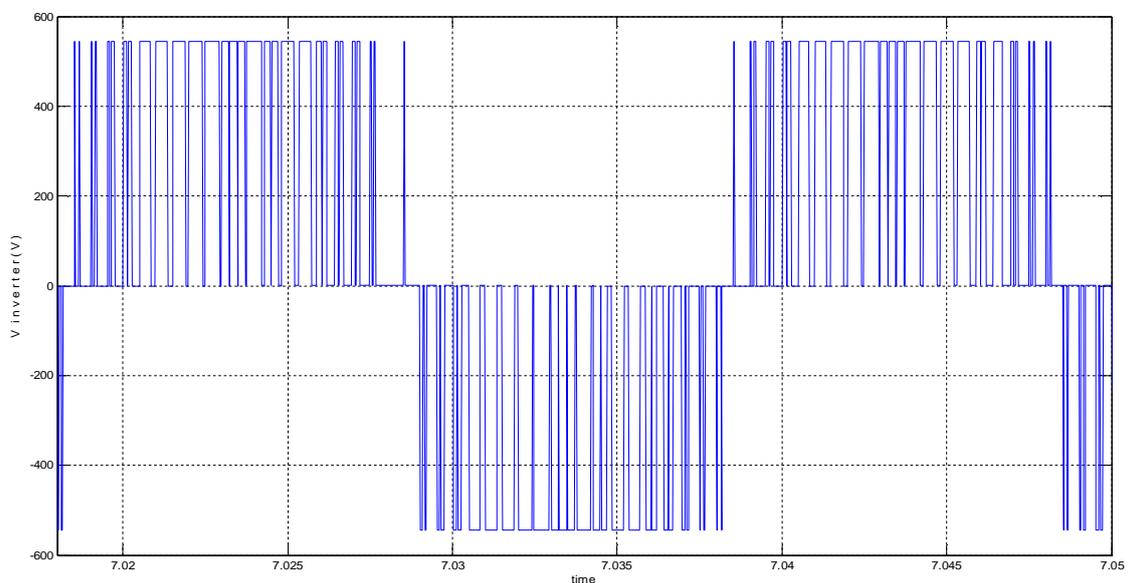
Όπως περιγράψαμε αναλυτικά στο κεφάλαιο 2.5 , ο αντιστροφέας μετατρέπει την dc τάση σε εναλλασσόμενη μεταβλητής τιμής. Επίσης αποτελεί και το μέσο σύνδεσης του συστήματος της ανεμογεννήτριας στο δίκτυο διατηρώντας την τάση στην είσοδο του σταθερή όπως περιγράφηκε στο κεφάλαιο 2.5.1 . Ως αποτέλεσμα του ελέγχου, για ταχύτητα ανέμου 6 m/s φαίνεται στο σχήμα 3.11 ότι η τάση του πυκνωτή στην είσοδο διατηρείται σταθερή σε τιμή 650V σε όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης.



Σχήμα 3.11

Προσομοίωση - Αριθμητική σύγκλιση της στιγμιαίας τιμής της συνεχούς τάσης στην είσοδο του αντιστροφέα για σταθερή αεροδυναμική ροπή

Η στιγμιαία τιμή της τάσης εξόδου του αντιστροφέα φαίνεται στο σχήμα 3.12 όπου οι SPWM παλμοί είναι ακριβώς όπως ορίζει η ορθή λειτουργία του.



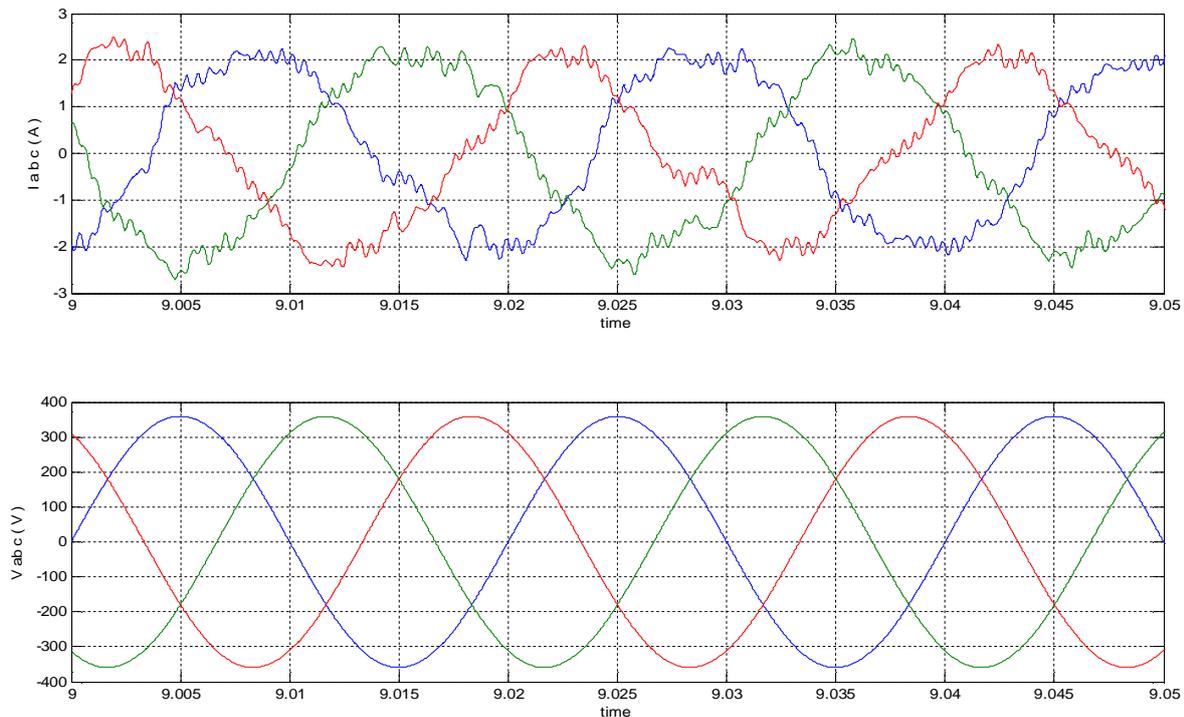
Σχήμα 3.12

Προσομοίωση - Στιγμιαία τιμή τάσης εξόδου αντιστροφέα,

Ο συγκεκριμένος αντιστροφέας εκτός από την έγχυση ενεργού ισχύος στο δίκτυο έχει την ικανότητα ρύθμισης και της άεργου ισχύος που ανταλλάσει με αυτό. Η ρύθμιση γίνεται από τον ελεγκτή με τον τρόπο που περιγράφηκε στη παράγραφο 2.5 . Γίνεται αντιληπτό από τα λεγόμενα ότι ο συντελεστής ισχύος του αντιστροφέα μπορεί να

ρυθμίζεται ανάλογα με τις απαιτήσεις του δικτύου. Τα όρια ρύθμισης του συντελεστή ισχύος είναι καθορισμένα σε σημείο που να μη επηρεάζεται σημαντικά η ενεργός ισχύς του.

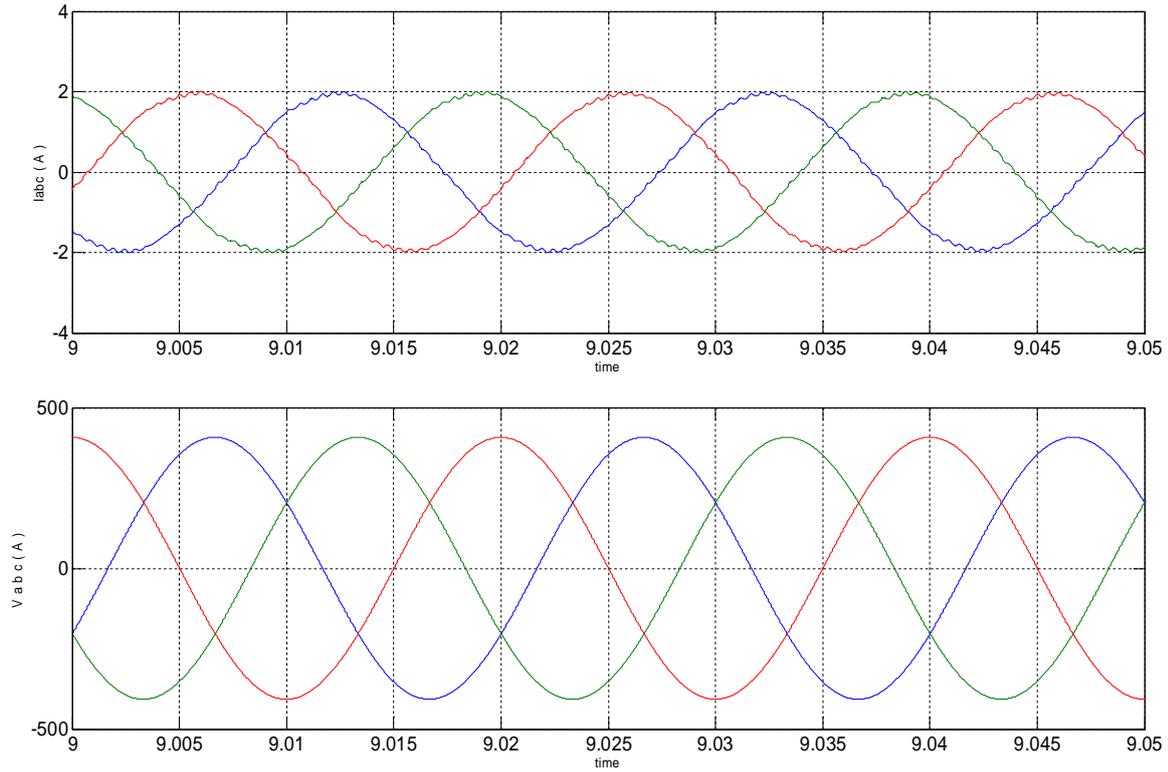
Αρχικά ρυθμίζεται ο αντιστροφέας έτσι ώστε να λειτουργεί με συντελεστή ισχύος έντονα επαγωγικό. Αυτό πραγματοποιείται κάνοντας κατάλληλη ρύθμιση της φ συνιστώσας του ρεύματος όπως δείξαμε στη παράγραφο 2.5. Στο σχήμα 3.13 φαίνεται το ρεύμα στην έξοδο του φίλτρου του αντιστροφέα για ταχύτητα ανέμου 6m/s.



Σχήμα 3.13

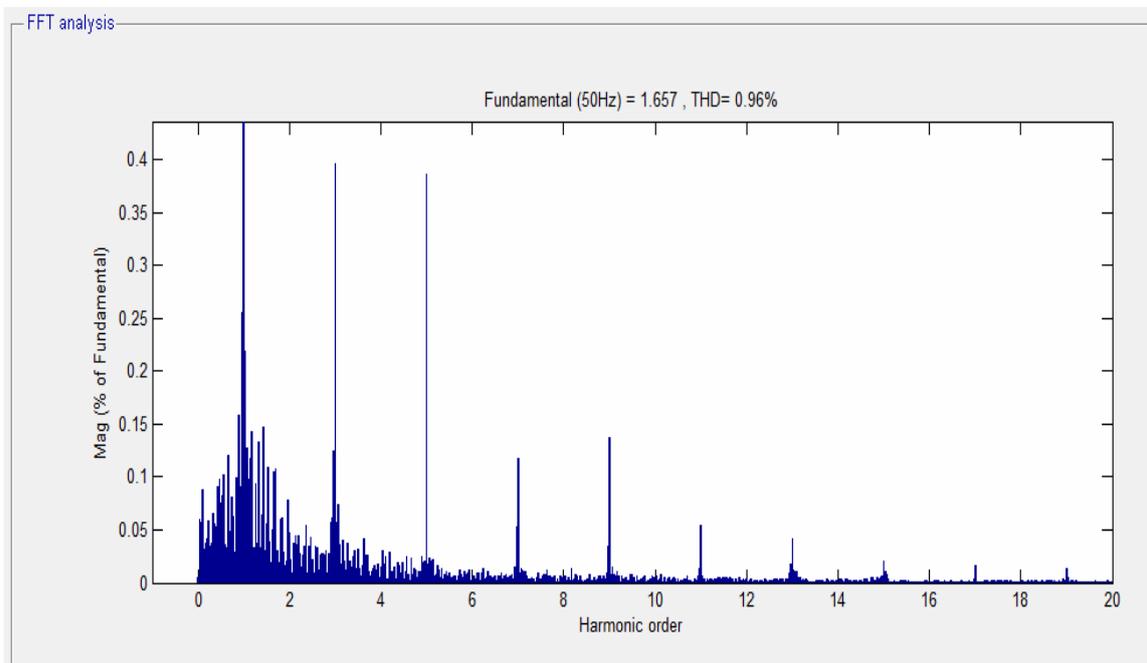
Προσομοίωση - Ρεύματα και τάσεις στην έξοδο του αντιστροφέα για 6 m/s ανέμου, συντελεστή ισχύος επαγωγικό

Από την μορφή του ρεύματος παρατηρείται ότι υπάρχουν ανώτερης τάξης αρμονικές συνιστώσες, για το λόγω αυτό θεωρήθηκε αναγκαίο να γίνει τοποθέτηση μεγαλύτερου φίλτρου στην έξοδο του αντιστροφέα με μικρότερη συχνότητα αποκοπής. Η επιλογή του φίλτρου πρέπει να γίνει με τρόπο ώστε να μην επηρεάζεται η λειτουργία του αντιστροφέα υπό χωρητικό συντελεστή ισχύος. Αυτό γιατί εάν επιλέξουμε αρκετά μεγάλο πηνίο τότε λόγω της κατανάλωσης άεργου ισχύος είναι αδύνατη η λειτουργία υπό χωρητικό συντελεστή ισχύος όταν το επιθυμήσουμε. Επιλέχθηκε για το λόγο αυτό πηνίο 30mH και τα αποτελέσματα της βελτίωσης παρουσιάζονται στο σχήμα 3.14 ενώ στο σχήμα 3.15 φαίνεται το φάσμα συχνοτήτων του.



Σχήμα 3.14

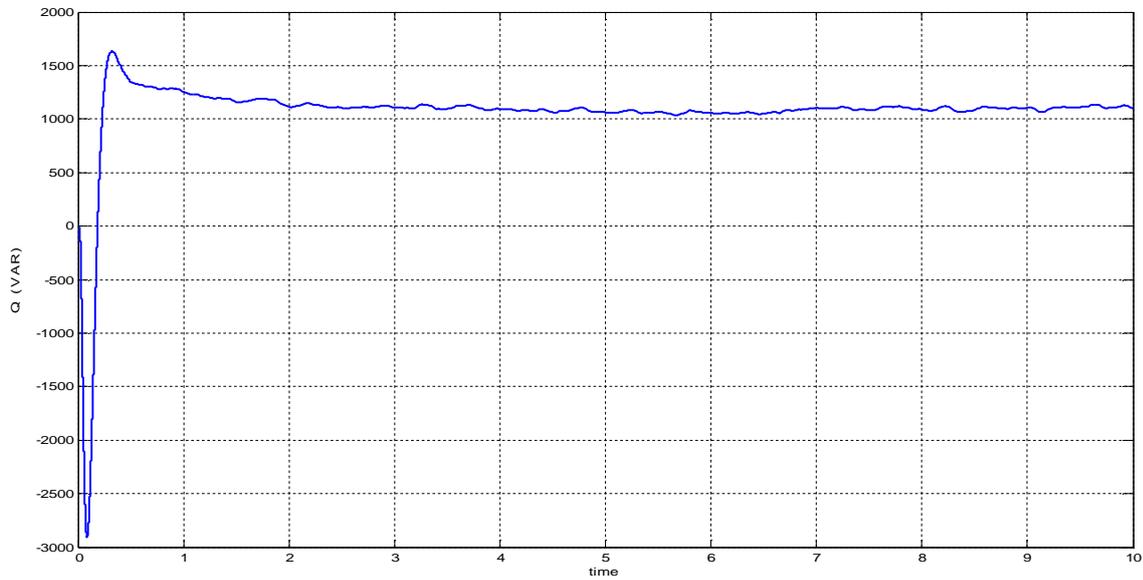
Προσομοίωση - Ρεύματα και τάσεις στην εξόδου του αντιστροφέα για 6 m/s ανέμου, συντελεστή ισχύος επαγωγικό



Σχήμα 3.15

Φάσμα συχνοτήτων ρεύματος εξόδου φίλτρου για 6 m/s ανέμου, συντελεστή ισχύος επαγωγικό.

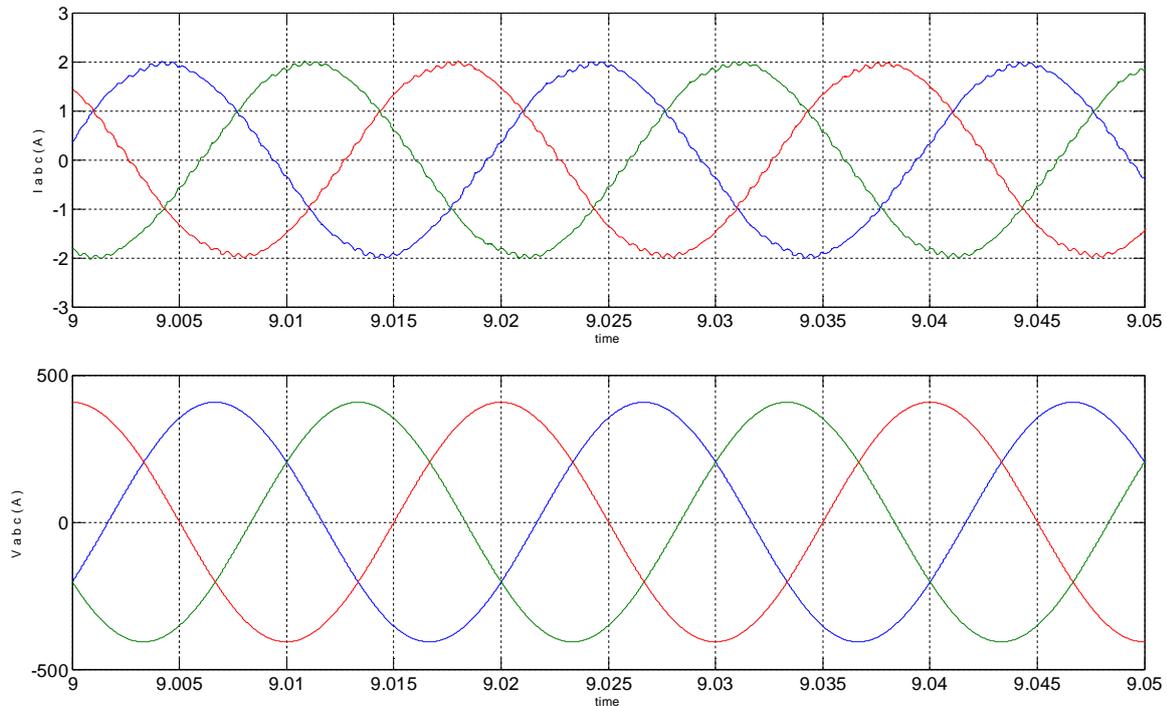
Από τις αποκρίσεις αυτές είναι φανερό ότι η τάση προηγείται του ρεύματος, δηλώνοντας σαφώς τον επαγωγικό συντελεστή ισχύος. Όσον αφορά στα επίπεδα της άεργου ισχύος που απορροφά ο αντιστροφέας, ανέρχεται στα 1100 VAR, σχήμα 3.16.



Σχήμα 3.16

Προσομοίωση - Στιγμαία τιμή αέργου ισχύος που απορροφά από το δίκτυο

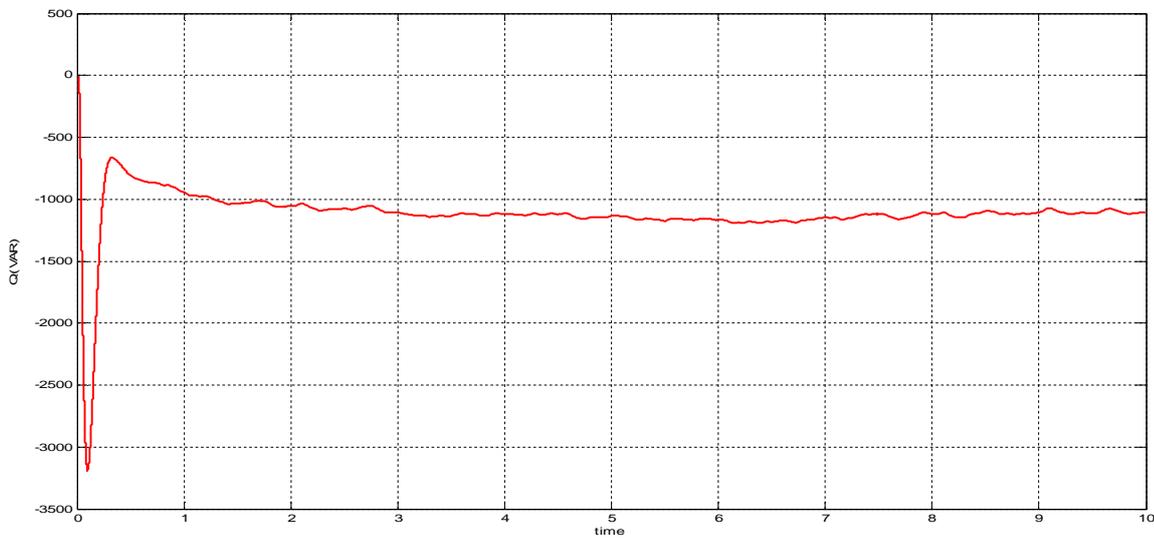
Για συντελεστή ισχύος έντονα χωρητικό, ο αντιστροφές έχει την ικανότητα να εγγείει στο δίκτυο άεργο ισχύ και με τον τρόπο αυτό κάνει υποστήριξη της τάσης χωρίς να σταματά την έγχυση ενεργού ισχύος, συγκεκριμένα θα έχουμε αντίστοιχες αποκρίσεις τάσης και ρεύματος όπως φαίνονται στο σχήμα 3.17.



Σχήμα 3.17

Προσομοίωση - Ρεύματα και τάσεις στην εξόδου του αντιστροφέα για 6 m/s ανέμου

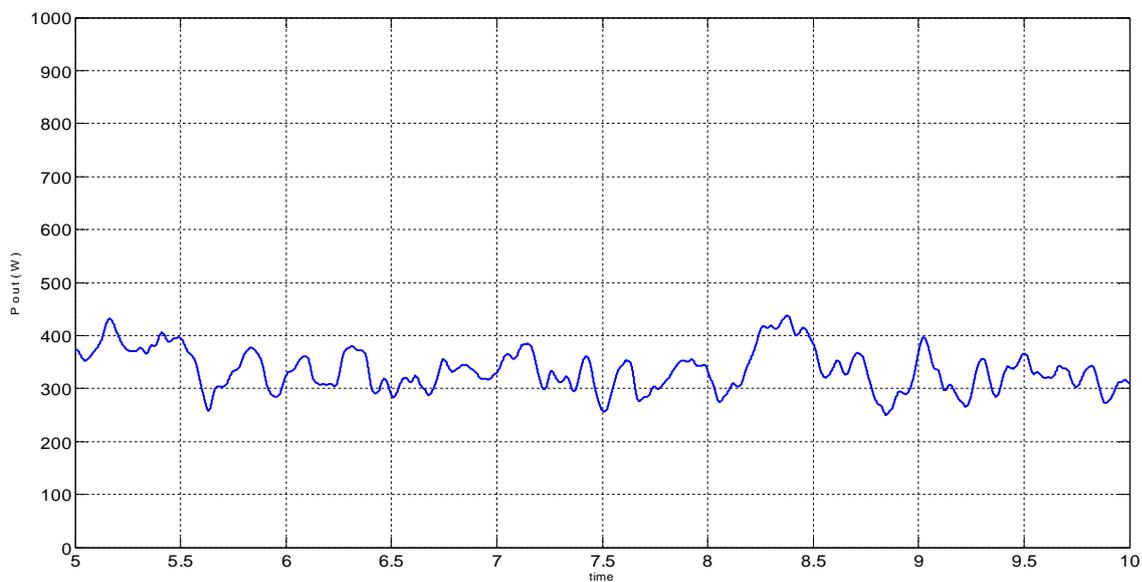
Η μέγιστη άεργος ισχύς που εγχέεται στο δίκτυο χωρίς να επηρεάζει σημαντικά την ενεργό είναι:



Σχήμα 3.18

Προσομοίωση - Στιγμαία τιμή άεργου ισχύος που απορροφά από το δίκτυο

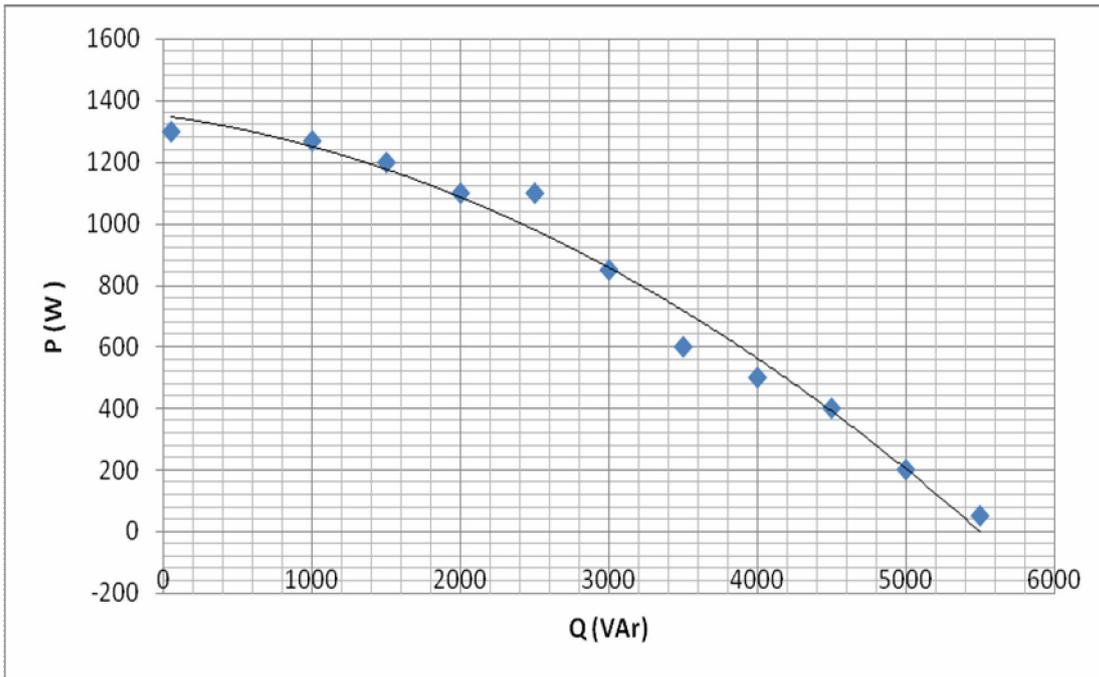
Ενώ η στιγμιαία τιμή της ενεργού ισχύος φαίνεται στο σχήμα 3.19.



Σχήμα 3.19

Προσομοίωση - Στιγμαία τιμή της ενεργού ισχύος στην έξοδο του φίλτρου για 6m/s

Για να εξάγουμε κάποια καμπύλη που σχετίζει την ενεργό και άεργο ισχύ πραγματοποιήθηκαν δοκιμές πάνω στο μοντέλο, καταγράφηκαν κάποιες τιμές ενεργού και άεργου ισχύος, για χωρητικό συντελεστή ισχύος. Οι δοκιμές αυτές έγιναν για ταχύτητα ανέμου 10 m/s ρυθμίζοντας την ποσότητα έγχυσης άεργου ισχύος, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.20.



Σχήμα 3.20

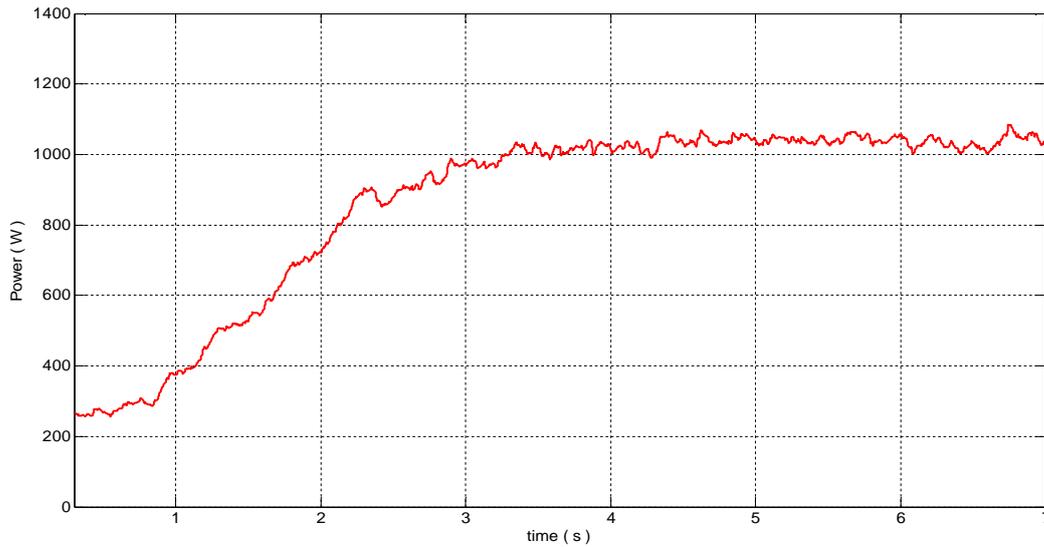
Εξάρτηση ενεργού ισχύος από την ρύθμιση της άεργου για χωρητικό συντελεστή ισχύος και ταχύτητα ανέμου 10m/s.

Από την καμπύλη, φαίνεται ότι η έγχυση άεργου ισχύος στο δίκτυο χωρίς σημαντική επίπτωση στην ενεργό γίνεται μέχρι 1000VAr. Αύξηση της τιμής της άεργο πέρα του σημείου αυτού θα οδηγήσει σε μείωση της παραγόμενης ενεργού ισχύος.

3.4 Αποκρίσεις μοντέλου συστήματος για βηματική μεταβολή της αεροδυναμικής ροπής και σε χρονοσειρά ανέμου

Στη παράγραφο αυτή θα παρουσιάσουμε τη συμπεριφορά του συστήματος σε βηματικές μεταβολές της ταχύτητας του ανέμου. Σε πρώτο στάδιο γίνεται δοκιμή για βηματική μεταβολή της ταχύτητας ανέμου από τα 6 στα 9 m/s , καταγράφονται οι αποκρίσεις του αεροδυναμικού συντελεστή C_p προς επιβεβαίωση της ορθότητας του MPPT ελεγκτή καθώς και της ισχύος εξόδου. Σε δεύτερο στάδιο εισάγουμε στο σύστημα κάποια κυματομορφή ανέμου και καταγράφουμε τις αποκρίσεις.

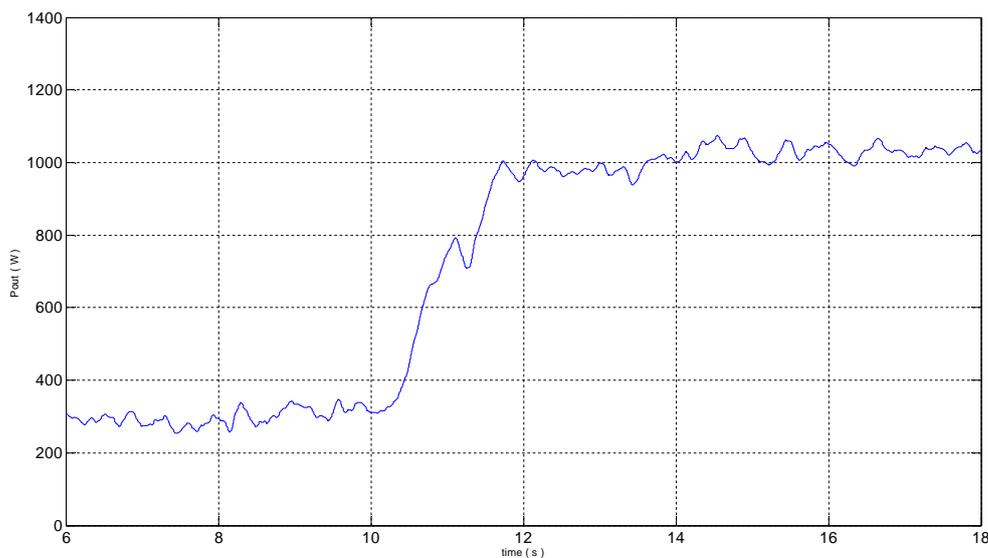
Από πειραματικές μετρήσεις που έγιναν σε απομονωμένο σύστημα (και όχι σε σύστημα που είναι συνδεδεμένο στο δίκτυο μέσω αντιστροφέα) η ενεργός ισχύς εξόδου για μια βηματική μεταβολή από τα 6 m/s στα 9 m/s πάνω σε μια αντίσταση 87.5 Ω μετρήθηκε και καταγράφηκε στο σχήμα 3.21. Η χαρακτηριστική καμπύλη που χρησιμοποιήθηκε στο πείραμα είναι εκείνη της ιδανικής καμπύλης (σχήμα2.2).



Σχήμα 3.21

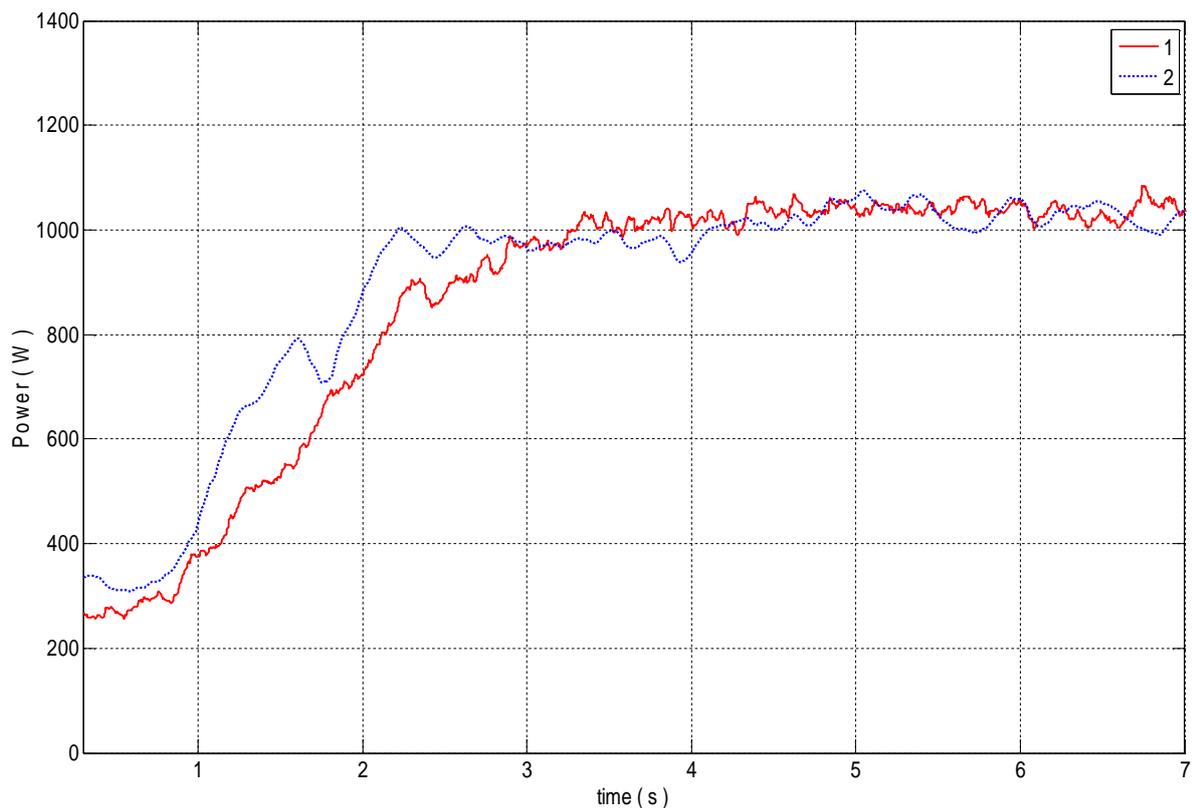
Πειραματική ενεργός ισχύς μετρούμενη σε απομονωμένο φορτίο για βηματική μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου από 6 σε 9 m/s.

Για να συγκρίνουμε την πειραματική αυτή απόκριση με το μοντέλο που αναπτύχθηκε, πραγματοποιείται η ίδια βηματική μεταβολή στην ταχύτητα του ανέμου. Μετράται η ενεργός ισχύς που αποδίδει ο αντιστροφέας συνδεδεμένος στο δίκτυο. Για χρόνο 10sec γίνεται η μετάβαση από 6 m/s στα 9 m/s. Αυτό που πρέπει να σημειωθεί είναι ότι στον έλεγχο του μετατροπέα ανύψωσης τάσης και συγκεκριμένα στον ελεγκτή που κάνει MPPT η χαρακτηριστική καμπύλη που χρησιμοποιήθηκε στο πείραμα είναι η ιδανική και όχι η χαρακτηριστική του σχήματος 2.3 που λαμβάνει υπόψη και τη προστασία του συστήματος από υπερταχύνσεις. Για ιδανική χαρακτηριστική ροπής στροφών η ενεργός ισχύς που εγχέεται στο δίκτυο είναι εκείνη του σχήματος 3.22.



Σχήμα 3.22

Προσομοίωση - Ενεργός ισχύς μοντέλου προσομοίωσης μετρούμενη στην έξοδο του αντιστροφέα για βηματική μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου από 6 σε 9 m/s.

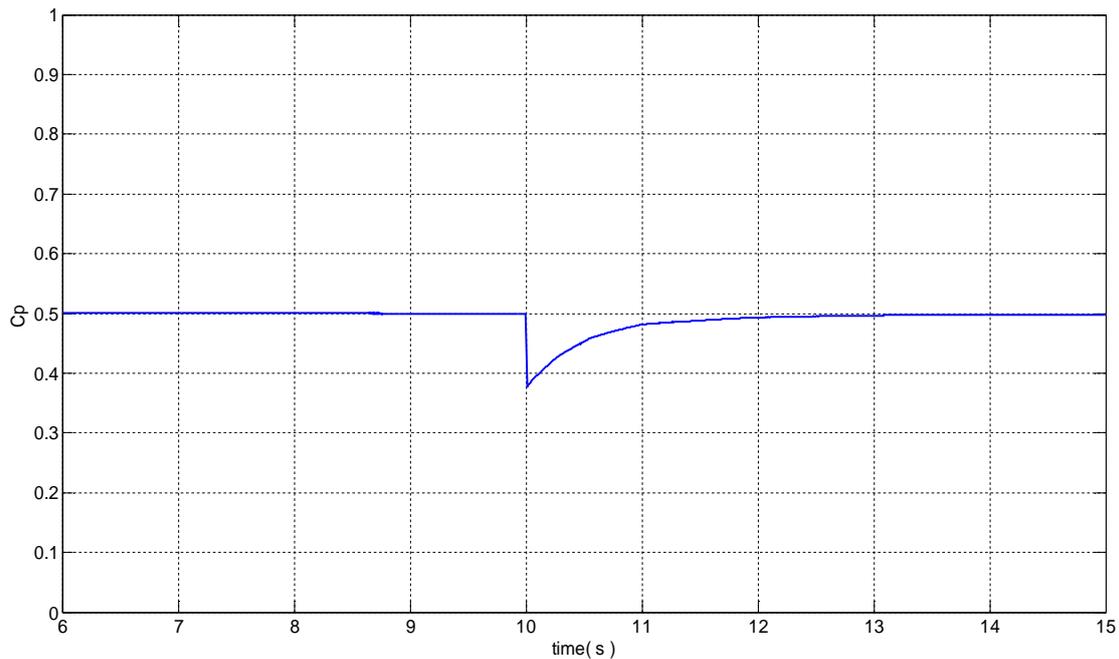


Σχήμα 3.23

Σύγκριση πειραματικής ενεργού ισχύος και απόκριση μοντέλου προσομοίωσης για μια βηματική μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου από 6 σε 9 m/s, (1)πειραματική,(2)αποτέλεσμα της προσομοίωσης.

Εάν και η πειραματική απόκριση, όπως αναφέραμε και πιο πάνω, είναι για την ίδια γεννήτρια συνδεδεμένη σε απομονωμένο φορτίο ενώ το σύστημα που μοντελοποιήθηκε είναι συνδεδεμένο μέσω αντιστροφέα στο δίκτυο οι αποκρίσεις της είναι και ποσοτικά πολύ κοντά. Η διαφορά είναι 50–60W και οφείλεται κυρίως στις απώλειες του αντιστροφέα. Ένα άλλο πολύ σημαντικό μέγεθος είναι οι χρονικές σταθερές, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.23 ο χρόνος που διαρκεί το μεταβατικό ταυτίζεται μεταξύ πειραματικών αποκρίσεων και των αποκρίσεων που δίνει το μοντέλο. Ο χρόνος αυτός είναι της τάξης των 4 sec, χρόνος λογικός, για να μεταβεί το σύστημα από τη μια κατάσταση στην άλλη.

Ένα άλλο στοιχείο που δείχνει την ορθή λειτουργία του ελεγκτή MPPT είναι η καταγραφή του αεροδυναμικού συντελεστή C_p πριν και μετά την βηματική μεταβολή. Δεδομένου ότι έχει χρησιμοποιηθεί η ιδανική χαρακτηριστική καμπύλη το σύστημα θα πρέπει και στις δύο ταχύτητες ανέμου να λειτουργεί με βέλτιστο αεροδυναμικό συντελεστή που στην περίπτωση μας είναι 0.5. Στο σχήμα 3.24 φαίνεται η στιγμιαία τιμή του C_p που επιβεβαιώνει τα λεγόμενα.

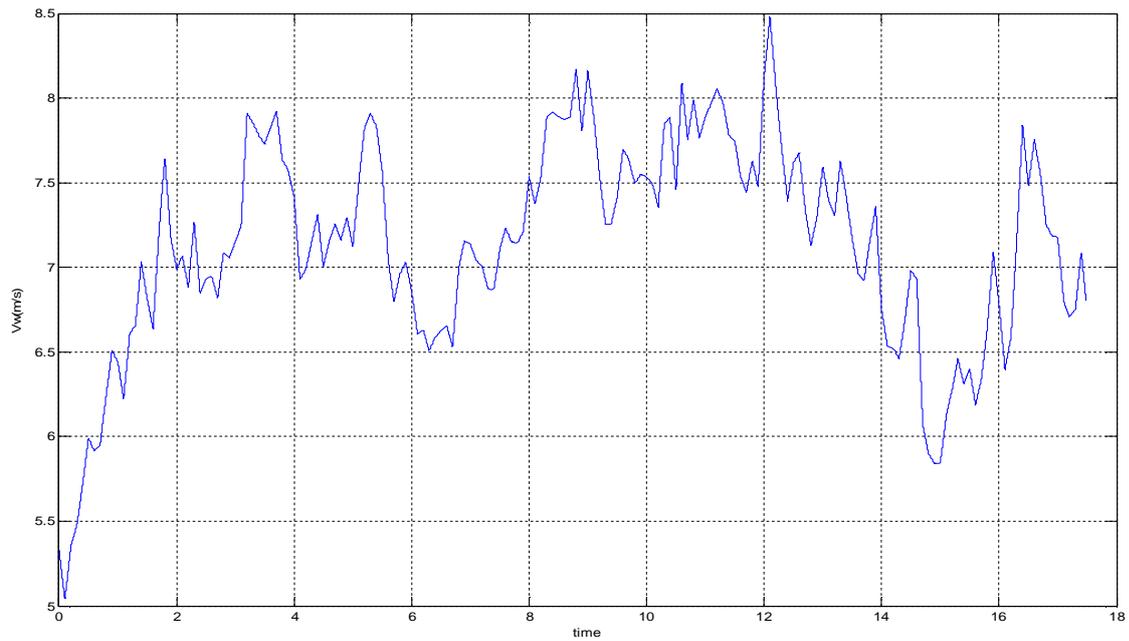


Σχήμα 3.24

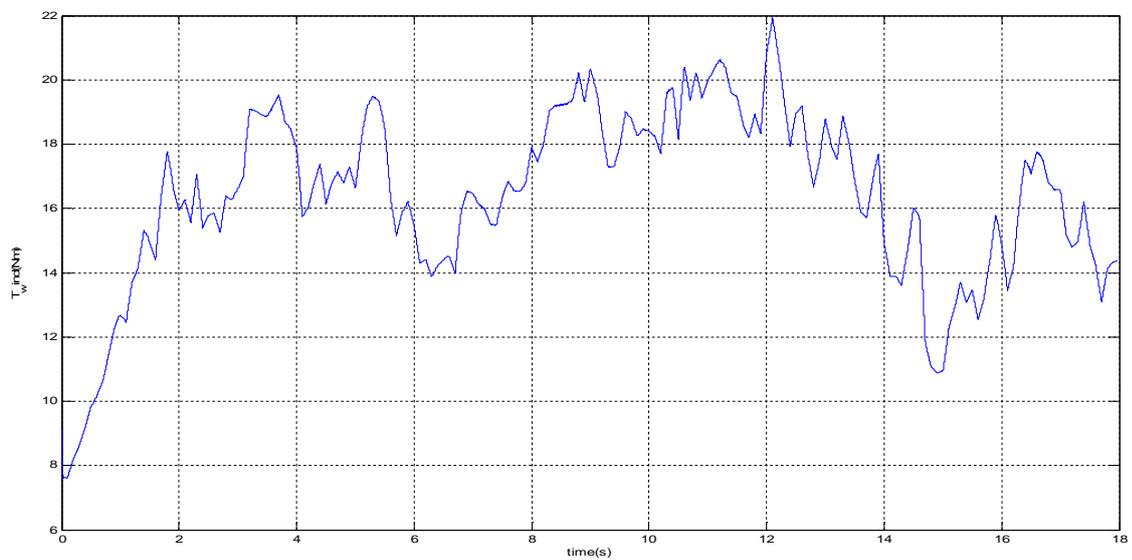
Προσομοίωση - Μεταβολή C_p για βηματική μεταβολή ταχύτητας ανέμου από 6 σε 9 m/s

Παρατηρεί κανείς ότι μόλις η ταχύτητα ανέμου μεταβεί στη τιμή των 9 m/s , ο αεροδυναμικός συντελεστής C_p της γεννήτριας θα μειωθεί στο 0.38, πράγμα λογικό γιατί η αύξηση της ταχύτητας του ανέμου οδηγεί το σύστημα σε άλλο σημείο λειτουργίας που όμως δεν είναι βέλτιστο. Στη συνέχεια ο MPPT ελεγκτής αναλαμβάνει την ανεύρεση του νέου σημείου λειτουργίας ελέγχοντας την ηλεκτρική ροπή της γεννήτριας, με τρόπο που περιγράφηκε στο αντίστοιχο κεφάλαιο. Μετά από 3sec η τιμή του C_p παίρνει τη μέγιστη τιμή του αποδίδοντας μέγιστη ισχύ.

Στη συνέχεια θα εισάγουμε στο αεροδυναμικό υποσύστημα μια χρονοσειρά ανέμου και θα καταγράψουμε την απόκριση που δίνει το μοντέλο. Η χρονοσειρα ανέμου είναι εκείνη του σχήματος 3.25 . Το υποσύστημα του σχήματος 2.4 δέχεται στην είσοδο του την χρονοσειρά αυτή και παράγει την αντίστοιχη αεροδυναμική ροπή στον άξονα της γεννήτριας (σχήμα 3.26).

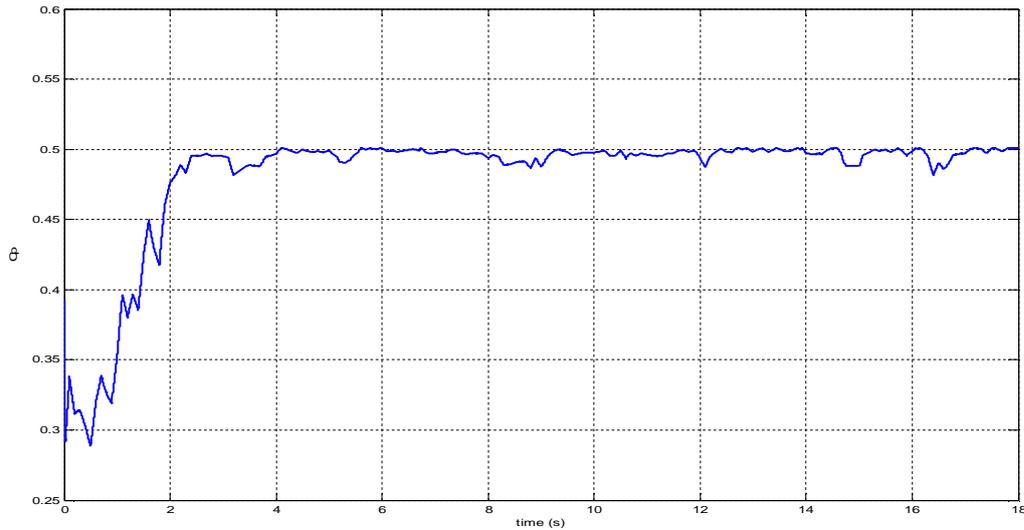


Σχήμα 3.25
Μετρούμενη χρονοσειρά ταχύτητας ανέμου .



Σχήμα 3.26
Προσομοίωση - αεροδυναμική ροπή που εφαρμόζεται στον άξονα της γεννήτριας για την παραπάνω χρονοσειρά ανέμου.

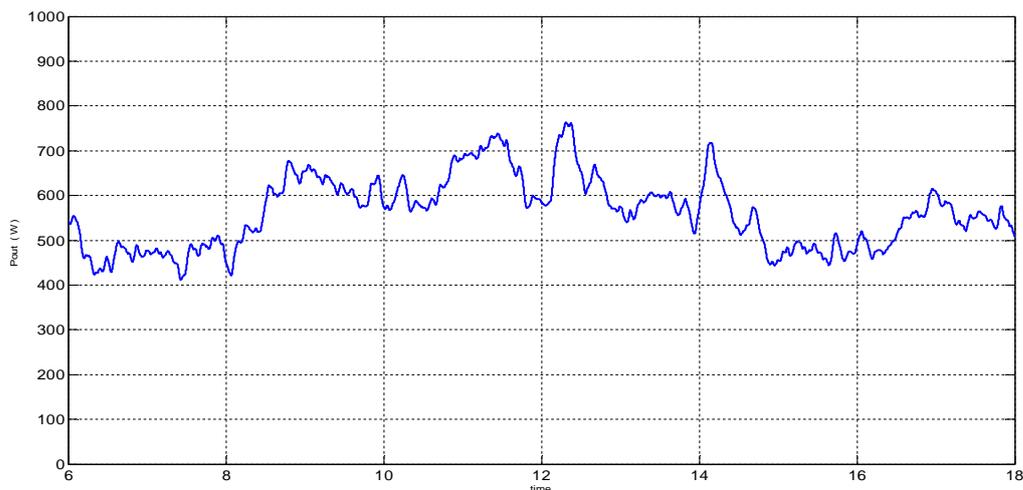
Ο αεροδυναμικός συντελεστής C_p (για ιδανική χαρακτηριστική ροπής στροφών) κατά την διάρκεια της παραπάνω χρονοσειράς ανέμου είναι :



Σχήμα 3.27

Προσομοίωση - Μεταβολή C_p για πραγματική χρονοσειρά της ταχύτητας του ανέμου

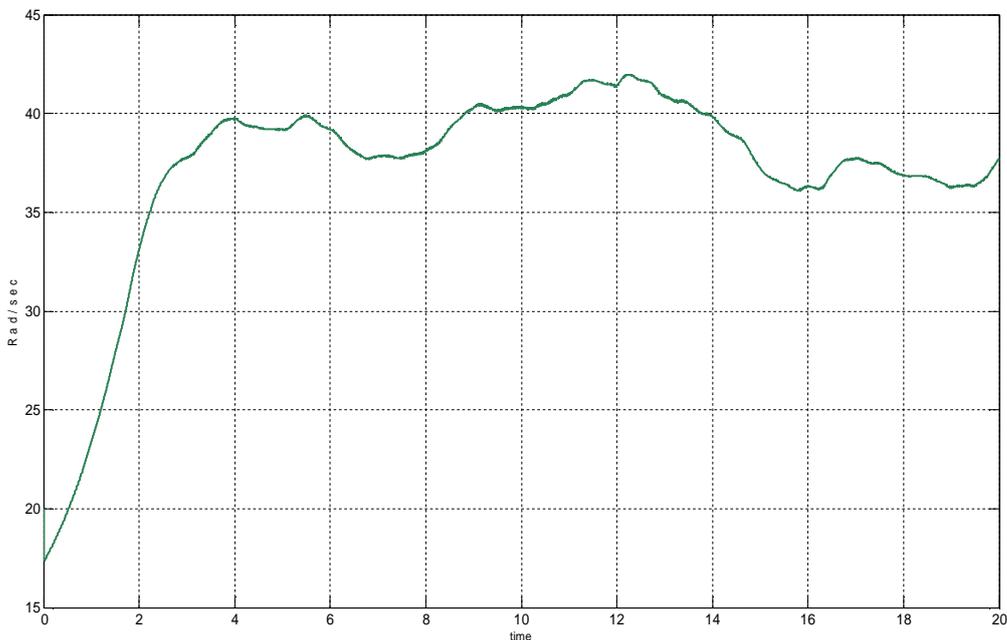
Παρατηρούμε ότι η ΑΓ λειτουργεί με βέλτιστο αεροδυναμικό συντελεστή για την παραπάνω κυματομορφή ανέμου αφού χρησιμοποιήθηκε η βέλτιστη χαρακτηριστική καμπύλη, πράγμα που δηλώνει την ορθή λειτουργία του MPPT ελεγκτή. Στη συνέχεια στο σχήμα 3.28 εικονίζεται η ισχύς στην έξοδο του αντιστροφέα. Παρατηρούμε ότι εκτός από τις μεταβολές λόγω της ταχύτητας του ανέμου, υπάρχουν και κάποιες έντονες διακυμάνσεις λόγω της διακοπτικής συχνότητας του μετατατροπέα ανύψωσης.



Σχήμα 3.28

Προσομοίωση - Ισχύς εξόδου αντιστροφέα για χρονοσειρά

Οι στροφές της γεννήτριας όπως αυτές μεταβάλλονται κατά την κυματομορφή ανέμου φαίνεται στο σχήμα 3.29.



Σχήμα 3.29

Προσομοίωση - Γωνιακή ταχύτητα γεννήτριας για χρονοσειρά ανέμου.

Συνοψίζοντας παρατηρούμε ότι το μοντέλο που αναπτύχθηκε για να προσομοιώσει την λειτουργία της Α/Γ δίνει αποτελέσματα τα οποία είναι κοντά στα αντίστοιχα πειραματικά που διαθέτουμε . Συγκεκριμένα τόσο οι χρόνοι απόκρισης όσο και τα μεγέθη της ισχύος εξόδου ταυτίζονται σε ικανοποιητικό βαθμό με τα αντίστοιχα πειραματικά . Αυτό που πρέπει να παρατηρήσουμε είναι πώς τα πειραματικά αποτελέσματα αφορούν την διάταξη ενός απομονωμένου φορτίου , δηλαδή δεν περιλαμβάνουν αντιστροφέα και δίκτυο οπότε οποιαδήποτε απόκλιση είναι δικαιολογημένη βάσει της επίδρασης που έχει ο αντιστροφέας.

Απόκριση σε διαταραχές της τάσης του δικτύου

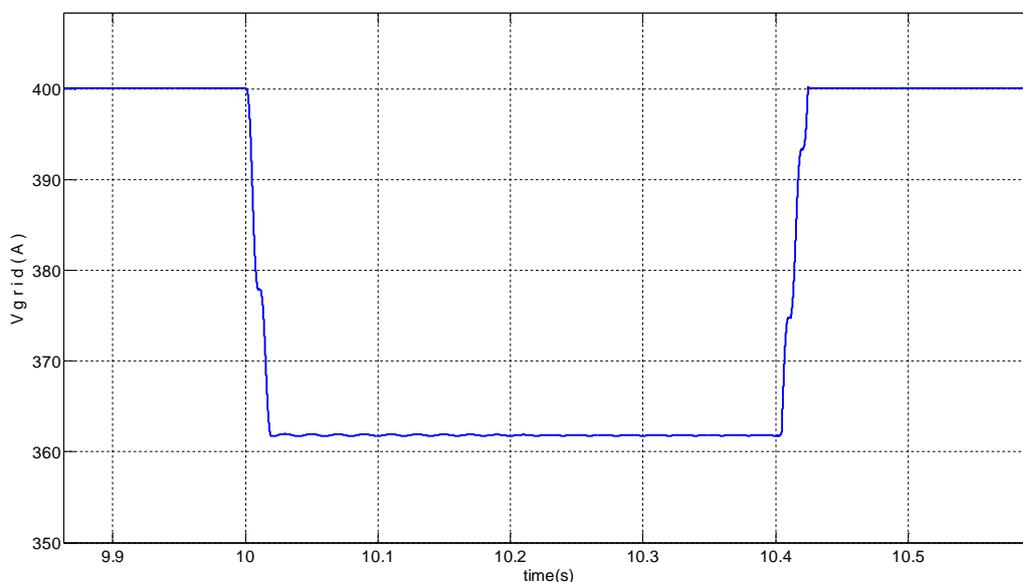
4.1 Διαταραχές στη πλευρά του δικτύου.

Στο παρόν κεφάλαιο θα γίνει μια εκτενής παρουσίαση των αποκρίσεων του μοντέλου προσομοίωσης συστήματος ανεμογεννήτριας μεταβλητών στροφών κάτω από συγκεκριμένες διαταραχές της τάσης του δικτύου. Οι διαταραχές αυτές θα κατηγοριοποιηθούν σύμφωνα με τα πρότυπα δοκιμών πιστοποίησης της συμβατότητας των ανεμογεννητριών [26]. Σύμφωνα με τα πρότυπα τα συστήματα των ανεμογεννητριών υποβάλλονται σε συμμετρική βύθιση της τάσης του δικτύου σε τιμή 0.9 και 0.5 της ονομαστικής διάρκειας 400ms.

Αφού γίνει πλήρης καταγραφή όλων των μεγεθών του μοντέλου στις συγκεκριμένες διαταραχές θα σχεδιαστεί σύστημα προστασίας που θα λειτουργεί σύμφωνα με τα πρότυπα (Fault Ride Through, FRT) και (Low Voltage Ride Through, LVRT) [26]. Το σύστημα προστασίας αποτελείται από ένα ελεγκτή προστασίας υπερέυματος-υπότασης σε συνδυασμό με κατάλληλη λειτουργία του ελεγκτή του αντιστροφέα. Εκτενής παρουσίαση και ανάλυση τους θα γίνει σε ακόλουθο κεφάλαιο.

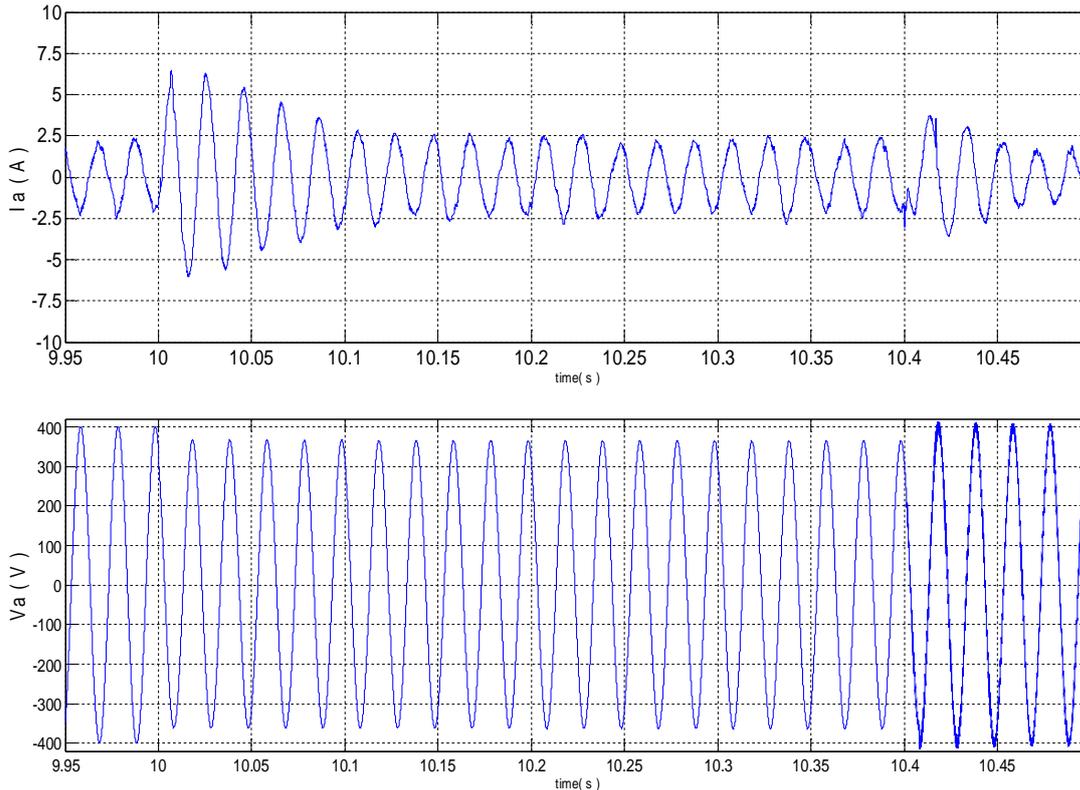
4.1.1 Αποκρίσεις μοντέλου ανεμογεννήτριας σε διαταραχές δικτύου.

Αρχικά θα πραγματοποιηθεί μια συμμετρική βύθιση της τάσης του δικτύου στο 0.9 της ονομαστικής τιμής με διάρκεια 400ms, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.1. Η χρονική στιγμή που πραγματοποιείται η βύθιση είναι τα 10sec, στο σχήμα 4.2 εικονίζεται η απόκριση του ρεύματος εξόδου του αντιστροφέα στην αντίστοιχη βύθιση.



Σχήμα 4.1

Προσομοίωση - Τάση δικτύου για συμμετρική βύθιση στο 0.9 της ονομαστικής τιμής .

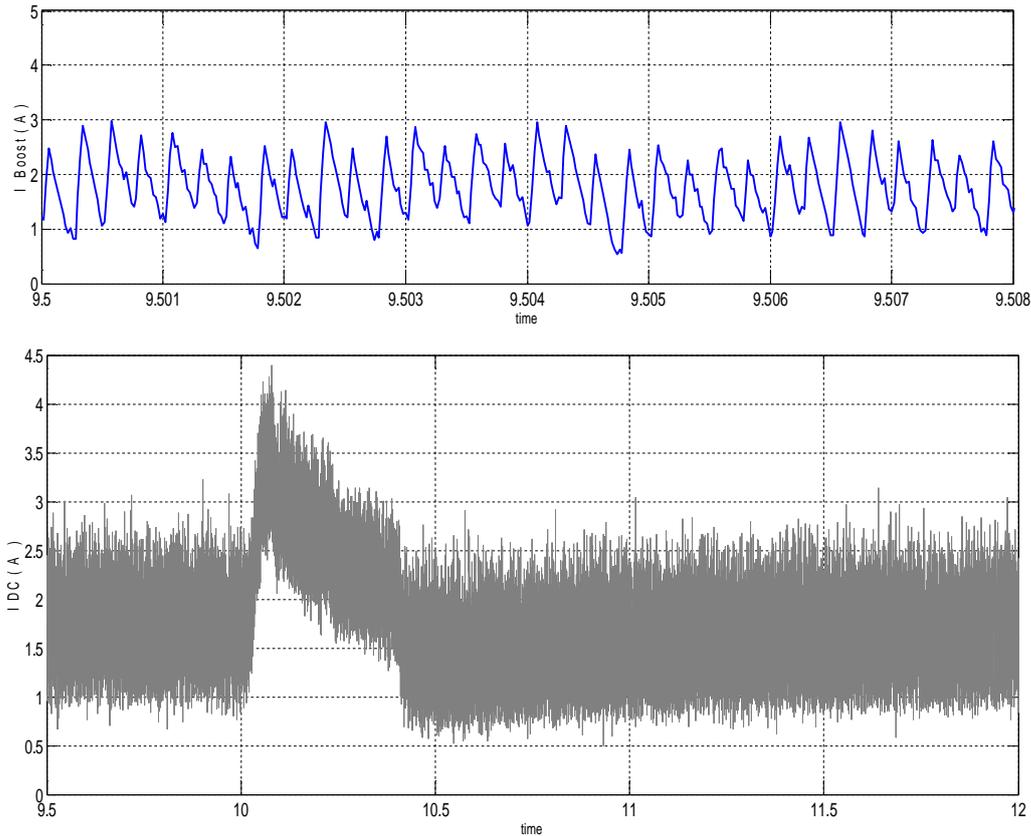


Σχήμα 4.2

Προσομοίωση - (α) Στιγμιαία τιμή ρεύματος φάσης a, στην έξοδο του φίλτρου του αντιστροφέα (β)στιγμιαία τιμή τάσης δικτύου.

Από την απόκριση του σχήματος 4.2 παρατηρείται ότι αποτέλεσμα της βύθισης της τάσης είναι η αύξηση του ρεύματος στην έξοδο του αντιστροφέα, η αύξηση του ρεύματος ανέρχεται στα 6.5A, διπλάσια δηλαδή από το ρεύμα κανονικής λειτουργίας . Ενώ η βύθιση της τάσης έχει διάρκεια 400ms , το μεταβατικό ρεύμα διαρκεί 100ms και πέρα του χρόνου αυτού η τιμή του ρεύματος επανέρχεται στα προ της βύθισης επίπεδα. Όταν γίνει η αποκατάσταση της τάσης, για χρόνο 10.4s υπάρχει εκ νέου ένα μεταβατικό ρεύμα με μέγιστη τιμή 2.7A και διάρκεια 50ms. Το ρεύμα αυτό οφείλεται στη μεγάλη γωνία δ μεταξύ της τάσης του αντιστροφέα και της τάσης του δικτύου.

Στη συνέχεια θα εξετάσουμε την επίδραση της διαταραχής και στα άλλα υποσυστήματα χωριστά. Αρχικά στο σχήμα 4.3 εικονίζεται το ρεύμα του μετατροπέα ανύψωσης κατά την διάρκεια της διαταραχής. Όπως γνωρίζουμε το ρεύμα αυτό είναι διακοπτικό με συχνότητα 4kHz. Παρατηρούμε ότι την χρονική στιγμή 10sec που πραγματοποιείται η βύθιση, εκτός από την αύξηση του ρεύματος εξόδου του αντιστροφέα έχουμε και αύξηση στο ρεύμα του μετατροπέα ανύψωσης. Το ρεύμα εξακολουθεί να είναι συνεχές ενώ η αύξηση φτάνει στα 4A .

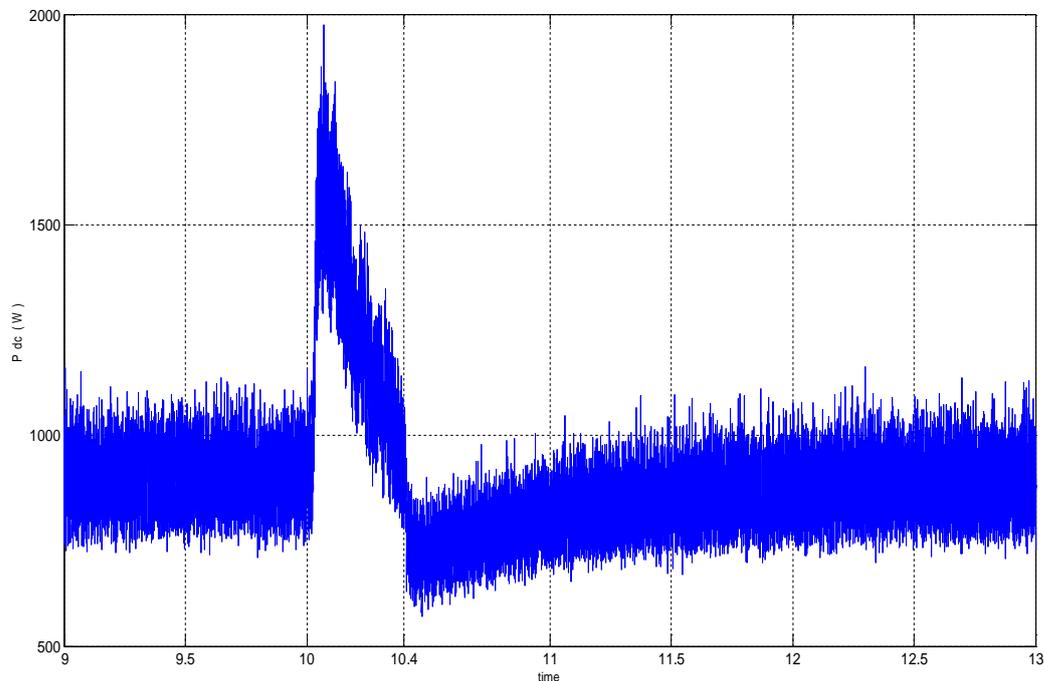


Σχήμα 4.3

Προσομοίωση - Στιγμαιαία τιμή του ρεύματος του μετατροπέα ανύψωσης, για συμμετρική βύθιση της τάσης στο 0.9 της ονομαστικής τιμής

Η συνεχής αγωγή του μετατροπέα ανύψωσης σε συνδυασμό με το γεγονός ότι η τάση είναι και αυτή συνεχής, έχει ως αποτέλεσμα η αύξηση αυτή του ρεύματος του μετατροπέα ανύψωσης να συνοδεύεται από αντίστοιχη αύξηση στην ενεργό ισχύ που διακινείται μέσω αυτού προς το δίκτυο, σχήμα 4.4. Το ερώτημα που τίθεται είναι γιατί το σύστημα μόλις γίνει η βύθιση της τάσης αυξάνει την έγχυση ενεργού ισχύος. Ο λόγος είναι η κακή λειτουργία του ελεγκτή του αντιστροφέα ο οποίος βασίζει την λειτουργία του στα ρεύματα εξόδου. Συγκεκριμένα τα ρεύματα του αντιστροφέα αποτελούν feedback στο σύστημα ελέγχου οπότε η εκδήλωση κάποιας υπερέντασης αποπροσανατολίζει την λειτουργία του ελεγκτή. Όπως αναφέραμε και στο αντίστοιχο κεφάλαιο τα ρεύματα αυτά αφού μετασηματιστούν σε κατάλληλο d q πλαίσιο αναφοράς συγκρίνονται με τα αντίστοιχα επιθυμητά ώστε να ρυθμίζουν ενεργό και άεργο ισχύ. Έτσι λοιπόν η εκδήλωση υπερέντασης ως αποτέλεσμα της βύθισης της τάσης μεταφράζεται σε μεγάλες τιμές των d q συνιστωσών του ελεγκτή, οι οποίες δίνουν λανθασμένη εντολή στο αντιστροφέα να αυξήσει την παραγωγή ενεργού και άεργου ισχύος. Αυτή είναι η αιτία που το σύστημα σε μια βύθιση της τάσης αυξάνει ακαριαία την ενεργό ισχύ που εγχέει στο δίκτυο πράγμα παράδοξο για την συνήθη λειτουργία σε τέτοιες περιπτώσεις. Στο σχήμα 4.4 παρουσιάζεται η ενεργός ισχύς που

διακινείται από το μετατροπέα ανύψωσης μέσω του αντιστροφέα στο δίκτυο κατά την διάρκεια της βύθισης.



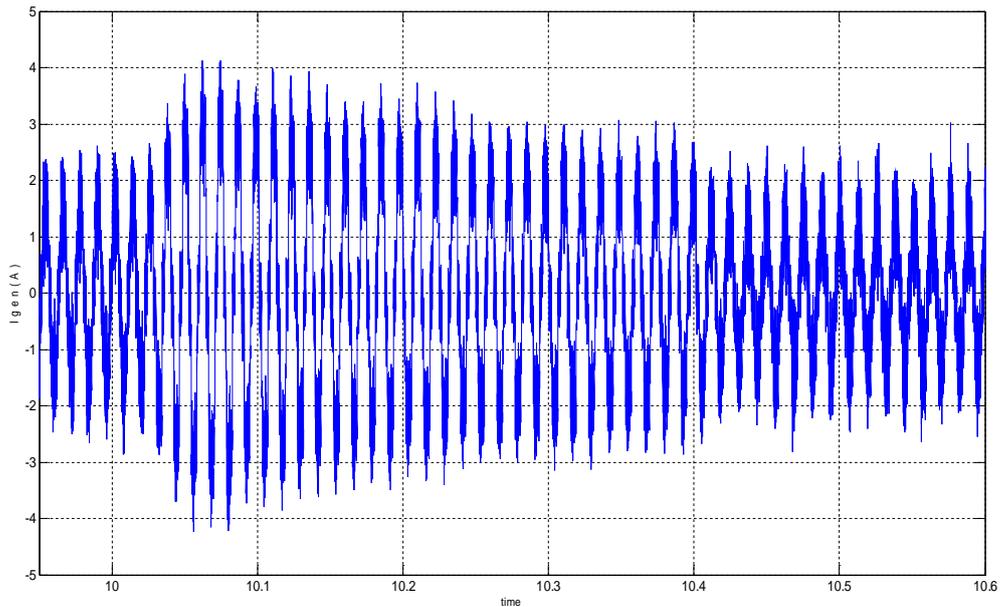
Σχήμα 4.4

Προσομοίωση - Ενεργός ισχύς που διακινείται από το μετατροπέα ανύψωσης , για συμμετρική βύθιση της τάσης στο 0.9 της ονομαστικής τιμής .

Αυτή η ενεργός ισχύς τροφοδοτείται από την γεννήτρια οδηγώντας σε αύξηση του ρεύματος του στάτη, αύξηση της ηλεκτρικής ροπής και μείωση των στροφών δεδομένου ότι η μηχανική ροπή στον άξονα δεν αυξάνεται. Στο σημείο αυτό πρέπει να σημειωθεί ότι πριν την διαταραχή το σύστημα λειτουργεί με βέλτιστο αεροδυναμικό συντελεστή C_p παρέχοντας την μέγιστη ισχύ που απορροφάται από τον άνεμο. Μόλις γίνει η διαταραχή του δικτύου, λόγω εσφαλμένης λειτουργίας του ελεγκτή του αντιστροφέα, δίνεται εντολή αύξησης της έγχυσης ενεργού ισχύος χωρίς όμως αυτή να μπορεί να υποστηριχθεί. Αποτέλεσμα είναι να μειωθούν οι στρόφους της γεννήτριας και να φύγει το σύστημα από το σημείο βέλτιστης λειτουργίας με αποτέλεσμα μείωση και της προσλαμβανόμενης από τον άνεμο αεροδυναμικής ροπής. Εν τέλει το σύστημα επιβραδύνεται με συνέπεια τη πτώση της τάσης της γεννήτριας και, προφανώς, του μετατροπέα ανύψωσης.

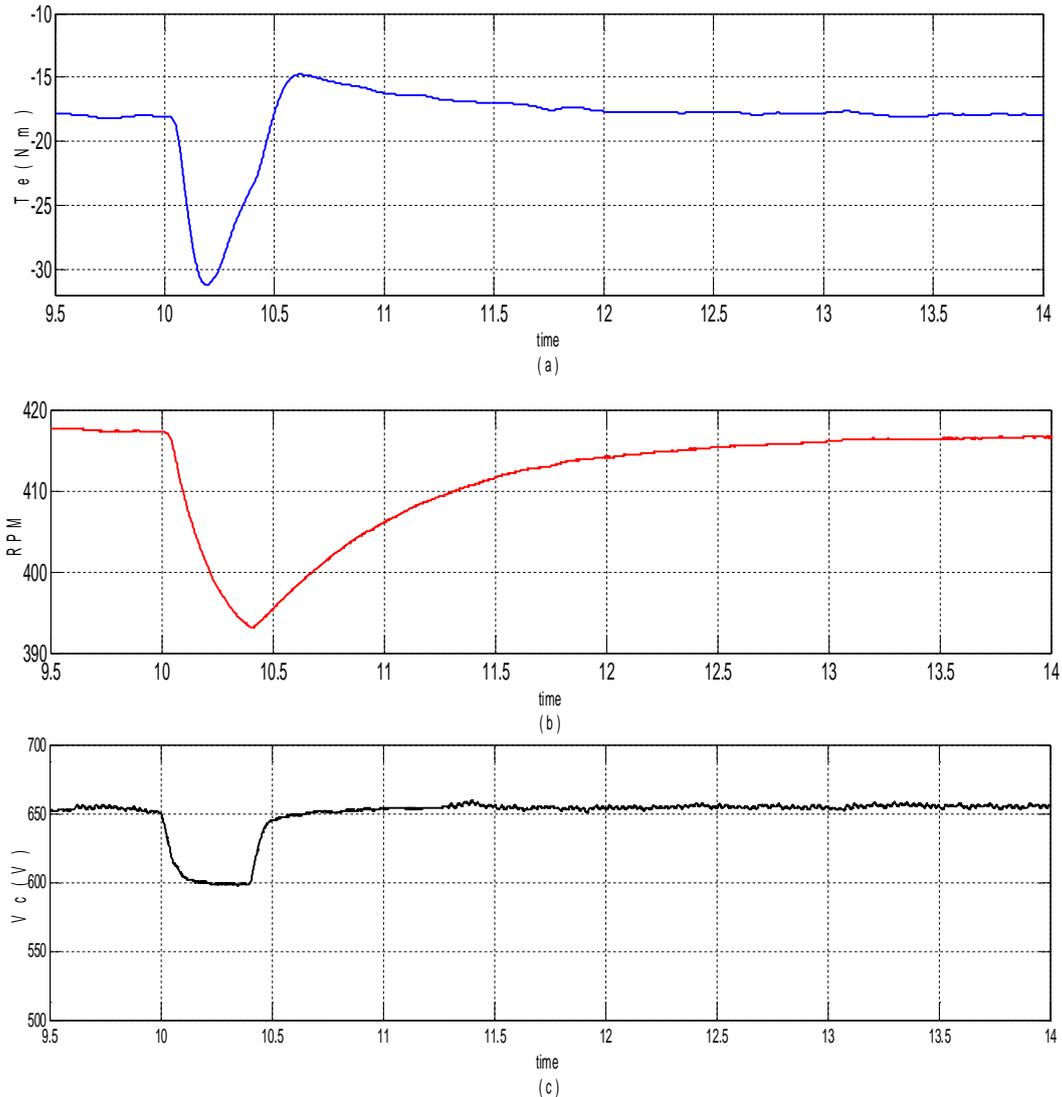
Στο σχήμα 4.5 εικονίζεται η μεταβολή του ρεύματος της γεννήτριας κατά την διάρκεια της εκδήλωσης της διαταραχής όπως δόθηκε από το μοντέλο προσομοίωσης. Παρατηρούμε ότι πριν τη διαταραχή το ρεύμα κανονικής λειτουργίας είναι 2.5A ενώ

την χρονική στιγμή που γίνεται η βύθιση της τάσης του δικτύου το ρεύμα σχεδόν διπλασιάζεται . Η μεταβολή αυτή διαρκεί όσο χρόνο και η βύθιση, 400ms, ενώ στη συνέχεια με την εκκαθάριση της διαταραχής το ρεύμα πέφτει σε μικρότερη τιμή από ότι στα προ της βύθισης επίπεδα. Αυτό είναι λογικό διότι η αύξηση παραγωγής ενεργού ισχύος από τη γεννήτρια έχει ως αποτέλεσμα την μείωση των στροφών της όπως εξηγήσαμε στην πιο πάνω παράγραφο. Τέλος στο σχήμα 4.6 φαίνεται η ηλεκτρική ροπή της γεννήτριας, οι στροφές της και η τάση του πυκνωτή.



Σχήμα 4.5

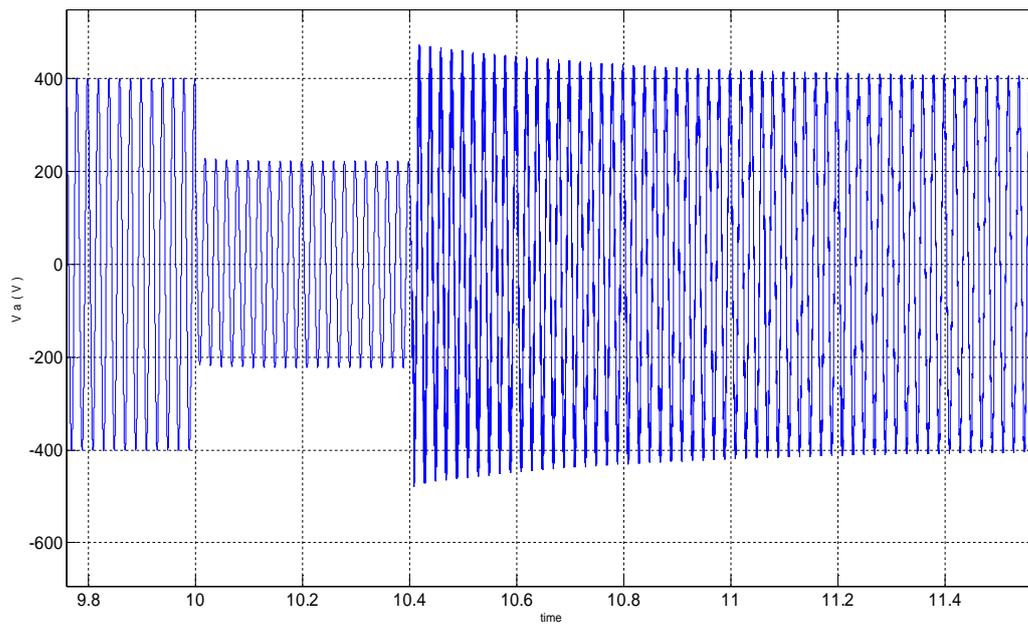
Προσομοίωση - Ρεύμα της φάσης a του στάτη της γεννήτριας, για συμμετρική βύθιση της τάσης του δικτύου στο 0.9 της ονομαστικής τιμής.



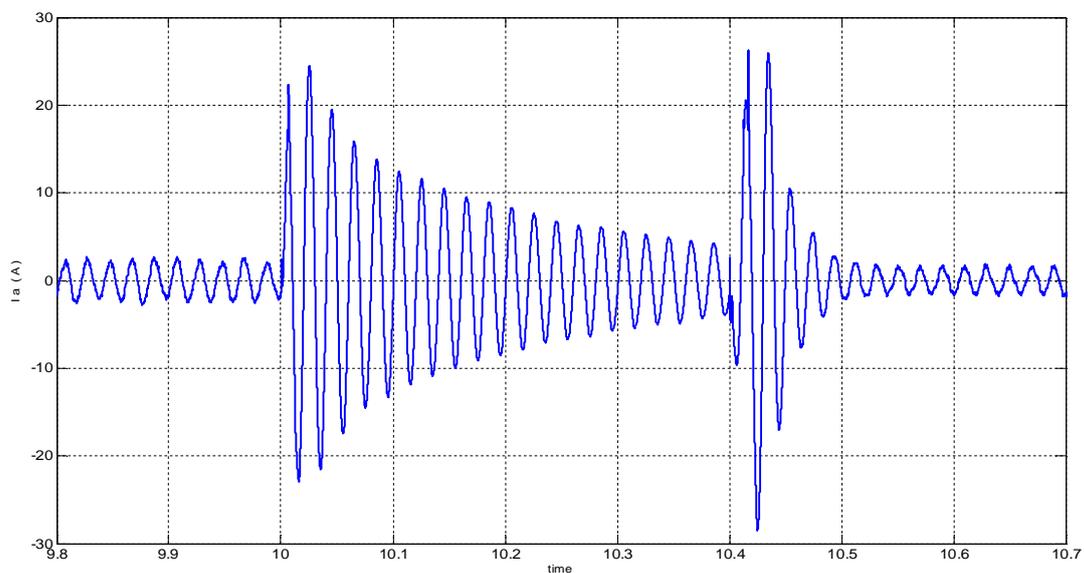
Σχήμα 4.6

Προσομοίωση - (α) Ηλεκτρική ροπή γεννήτριας (β) στροφές γεννήτριας (γ) τάση πυκνωτή αντιστροφέα για συμμετρική βύθιση της τάσης στο 0.9 της ονομαστικής της τιμής.

Για μεγαλύτερη βύθιση, όπως τριφασική συμμετρική βύθιση της τάσης του δικτύου στο 0.5 της ονομαστικής τιμής διάρκειας 400ms στο σχήμα 4.8 εικονίζεται το ρεύμα εξόδου του αντιστροφέα. Από την απόκριση φαίνεται ότι σε μια σημαντική βύθιση της τάσης, όπως εκείνη στο 0.5 της ονομαστικής τιμής, τα ρεύματα που αναπτύσσονται είναι πολύ μεγαλύτερα ικανά να οδηγήσουν στη καταστροφή των ημιαγωγικών στοιχείων. Μεγάλα ρεύματα αναπτύσσονται επίσης και κατά την επαναφορά της τάσης στην ονομαστική της τιμή δηλώνοντας την απώλεια συγχρονισμού και την αύξηση της γωνίας δ , μεταξύ της τάσης του αντιστροφέα και της τάσης του δικτύου .

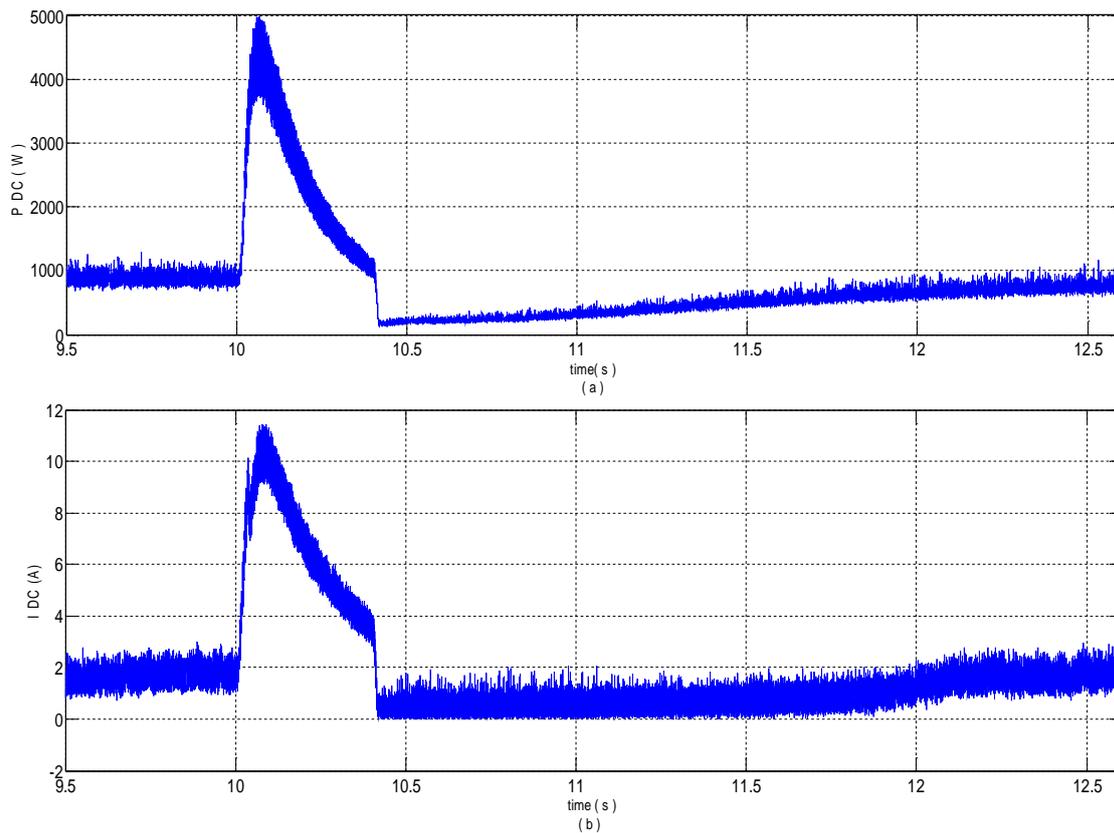


Σχήμα 4.7
 Προσομοίωση - Τριφασική συμμετρική βύθιση της τάσης του δικτύου στο 0.5 της ονομαστικής τιμής .



Σχήμα 4.8
 Προσομοίωση - Ρεύμα φάσης a, στην έξοδο του αντιστροφέα για βύθιση της τάσης στο 0.5 της ονομαστικής τιμής

Είναι φανερό πως ένα σημαντικό πρόβλημα του συστήματος είναι η υπερένταση που εμφανίζονται στο μετατροπέα ανύψωσης με την εκδήλωση κάποιας διαταραχής στο δίκτυο ως αποτέλεσμα λάθος εντολής του ελεγκτή και απώλεια του ελέγχου. Στο σχήμα 4.9.β εικονίζονται το ρεύμα και η ενεργός ισχύς στο μετατροπέα ανύψωσης κατά την διάρκεια της διαταραχής .

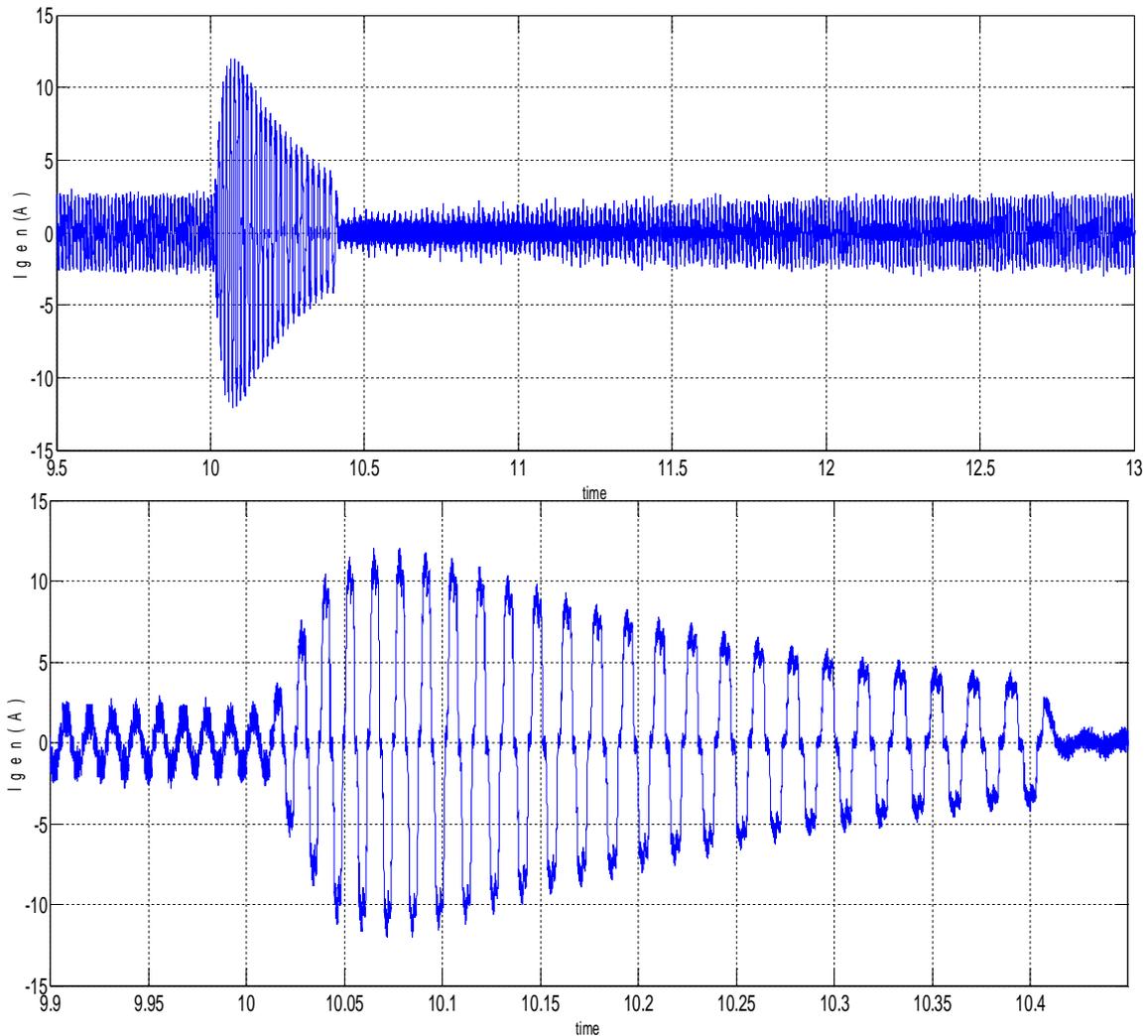


Σχήμα 4.9

Προσομοίωση - (α)Στιγμιαία τιμή της ενεργού ισχύος που διέρχεται από το μετατροπέα ανύψωσης(β)στιγμιαίο ρεύμα του μετατροπέα ανύψωσης ,για βύθιση της τάσης του δικτύου στο 0.5 της ονομαστικής τιμής.

Συγκριτικά με την προηγούμενη περίπτωση που η βύθιση ήταν μικρότερη , παρατηρούμε ότι η αύξηση της ισχύος είναι ακόμα μεγαλύτερη γεγονός αναμενόμενο διότι έχουμε μεγαλύτερα ρεύματα, σχήμα 4.7 , μεγαλύτερη d συνιστώσα και ανεξέλεγκτη εντολή ενεργού ισχύος από τον ελεγκτή . Επίσης όταν επανέλθει η τάση για χρόνο 10.4sec, το σύστημα παράγει χαμηλότερη ισχύ από ότι πριν, σχήμα 4.9.α, λογικό διότι αφενός έχουν μειωθεί οι στροφές και έχει πέσει κατά πολύ η ηλεκτρική ροπή και αφετέρου έχουμε φύγει από το σημείο βέλτιστης αεροδυναμικής ισχύος.

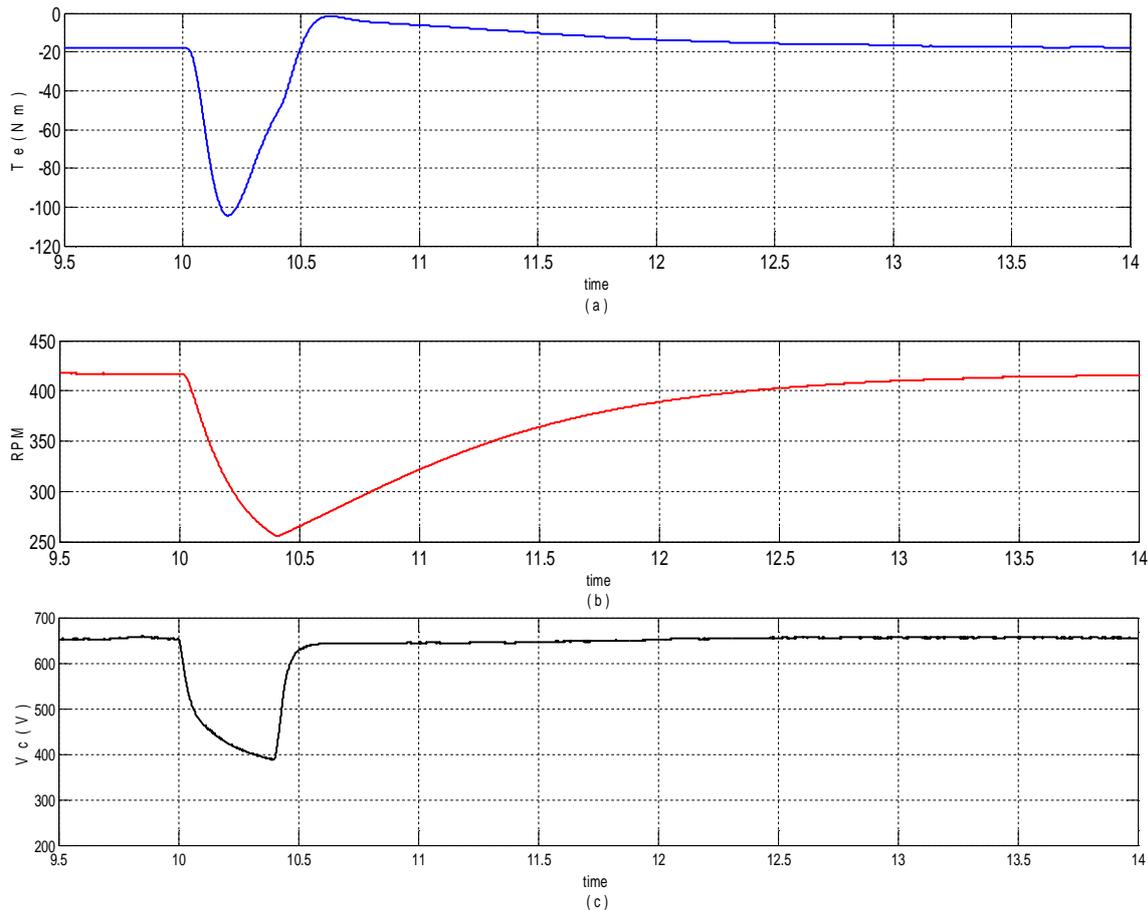
Στο σημείο αυτό προς αποφυγή παρεξήγησης πρέπει να τονίσουμε ότι ο ελεγκτής του αντιστροφέα είναι σχεδιασμένος να παρακολουθεί την τάση του πυκνωτή και να την κρατά σταθερή επεμβαίνοντας κατάλληλα στην d συνιστώσα του ρεύματος και εν τέλει στην έγχυση ενεργού ισχύος. Από το σχήμα 2.19 του ελεγκτή είναι φανερό ότι κακή δειγματοληψία ή ρεύματα μη φυσιολογικής λειτουργίας οδηγούν σε σφαλμένο έλεγχο, έγχυση μεγάλης ποσότητας ενεργού ισχύος με αποτέλεσμα τη μείωση των στροφών της γεννήτριας, μείωση της τάσης της και εν τέλει μείωση της τάσης του μετατροπέα ανύψωσης και του πυκνωτή. Στο σχήμα 4.10 φαίνεται το ρεύμα της γεννήτριας για την συγκεκριμένη βύθιση.



Σχήμα 4.10

Προσομοίωση - Ρεύμα της φάσης a του στάτη της γεννήτριας, για βύθιση τάσης του δικτύου στο 0.5 της ονομαστικής τιμής

Λόγω του μεγέθους της διαταραχής, τα ρεύματα που αναπτύσσονται είναι πολύ μεγάλα και φτάνουν μέχρι και 5 φορές το ρεύμα κανονικής λειτουργίας. Αυτό έχει ως συνέπεια η γεννήτρια να δίνει όλη την ενεργό ισχύ που ζητείται από το μετατροπέα ανύψωσης και που μπορεί να δώσει με συνέπεια να μειώνει κατά πολύ οι στροφές της, σχήμα 4.11.β. Μείωση των στροφών συνεπάγεται μείωση της τάσης της και εν τέλει μείωση της τάσης του μετατροπέα. Στο σχήμα 4.11 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά η ηλεκτρική ροπή, οι στροφές και η τάση του μετατροπέα ανύψωσης.



Σχήμα 4.11

Προσομοίωση - (α) Ηλεκτρική ροπή γεννήτριας (β) στροφές γεννήτριας (γ) τάση πυκνωτή στην είσοδο του αντιστροφέα για συμμετρική βύθιση της τάσης στο 0.5 της ονομαστικής της τιμής.

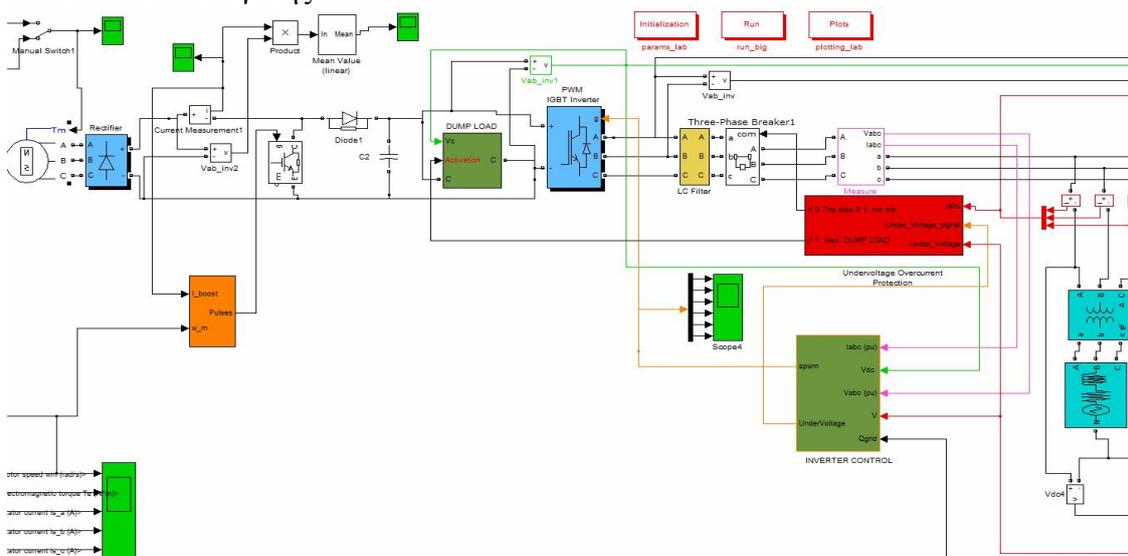
Γίνεται φανερό από το παραπάνω ότι ο συγκεκριμένος ελεγκτής ενώ δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα με σταθερή την τάση του δικτύου, σε περιπτώσεις που υπάρχει κάποια διαταραχή αποτυγχάνει και χάνει τον έλεγχο του συστήματος. Για το λόγο αυτό είναι αναγκαίο να γίνουν κάποιες αλλαγές οι οποίες θα του δίνουν τη δυνατότητα περιορισμού τέτοιων προβλημάτων .

Μέχρι σήμερα καταστάσεις βύθισης της τάσης του δικτύου και διαταραχές μεγάλης διάρκειας οδηγούσαν σε αποσύνδεση της ανεμογεννήτριας ώστε να αποφεύγονται τέτοια φύσης φαινόμενα φαινόμενα. Σύμφωνα όμως με τα νέα πρότυπα και τους κώδικες [26] οι ανεμογεννήτριας είναι υποχρεωμένες να μένουν συνδεδεμένες στο δίκτυο για χρόνο που καθορίζεται αυστηρά από τις καμπύλες ανοχής σε βυθίσεις της τάσης όπως εκείνη του σχήματος 1.7. Το πρόβλημα που δημιουργείται είναι ότι αφενός μεν επιθυμούμε να κρατάμε τις ανεμογεννήτριας συνδεδεμένες στο δίκτυο αφετέρου αυτό πρέπει να γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε να μην απειλείται η ομαλή λειτουργία τους, περιορίζοντας φαινόμενα όπως υπερεντάσεις και υποστροφές και απώλεια του ελέγχου. Επίσης μετά την αποκατάσταση της διαταραχής είναι επιθυμητή η όσο το δυνατό γρήγορη παραγωγή ισχύος στα ίδια με πριν επίπεδα.

Με στόχο να υλοποιηθεί αυτή η απαίτηση στην επόμενη παράγραφο σχεδιάζεται και υλοποιείται ελεγκτής ο οποίος παρακολουθεί την τάση του δικτύου και επιτρέπει την παραμονή της ανεμογεννήτριας στο δίκτυο για όσο χρόνο επιβάλλουν οι καμπύλες ανοχής. Ο ελεγκτής λειτουργεί σε συνεργασία με τον ελεγκτή του αντιστροφέα ο οποίος βελτιώνεται με στόχο να περιορίζει στο μέγιστο δυνατό την υπερένταση που εμφανίζεται όταν λαμβάνει χώρα κάποια βύθιση στη τάση. Επίσης σε περίπτωση που ο χρόνος διάρκειας της βύθισης είναι μεγαλύτερος από τα όρια ανοχής τότε πραγματοποιεί άμεση αποσύνδεση από το δίκτυο και μεταγωγή σε απομονωμένη λειτουργία μέσω ενός φορτίου έκτακτης ανάγκης.

4.2 Σχεδίαση συστήματος ελέγχου ανεμογεννήτριας για έλεγχο σε περίπτωση βύθισης της τάσης του δικτύου.

Στη προηγούμενη παράγραφο έγινε λόγος για την ανάγκη παραμονής της ανεμογεννήτριας στο δίκτυο όσο χρόνο επιβάλλουν τα πρότυπα ανοχής σε βύθιση της τάσης. Σε αυτή τη παράγραφο θα παρουσιαστεί ο ελεγκτής undervoltage – overcurrent ο οποίος παρακολουθεί σε πραγματικό χρόνο την τάση και ανάλογα με την βύθιση υπολογίζει ποίος είναι ο χρόνος παραμονής της ανεμογεννήτριας στο δίκτυο. Μόλις ο χρόνος αυτός περάσει και η βύθιση εξακολουθεί να υφίσταται τότε αποσυνδέει την ανεμογεννήτρια από το δίκτυο. Μεταξύ άλλων ο ελεγκτής παρακολουθεί το ρεύμα που διέρχεται από τα IGBTs και αν αυτό για οποιοδήποτε λόγο ξεπερνά την επιτρεπτή τιμή προκαλεί άμεση αποσύνδεση ανεξαρτήτου χρόνου παραμονής. Κατά την διάρκεια που υφίσταται η βύθιση της τάσης, ο συγκεκριμένος ελεγκτής δίνει σήμα στον ελεγκτή του αντιστροφέα ο οποίος περιορίζει με τη σειρά του, όσον είναι δυνατό, τα ρεύματα ελέγχοντας κατάλληλα την αγωγή των IGBTs. Αν χρειαστεί να γίνει αποσύνδεση τότε ο ελεγκτής «ενεργοποιεί» το φορτίο έκτακτης ανάγκης και ανοίγει το διακόπτη. Έτσι το σύστημα περνάει σε απομονωμένη λειτουργία και μόλις η διαταραχή σταματήσει να υφίσταται συνδέεται εκ νέου στο δίκτυο εκπληρώνοντας τις συνθήκες συγχρονισμού. Στο σχήμα 4.12 φαίνεται το σύστημα της ανεμογεννήτριας και τα υποσυστήματα τα οποία ελέγχει ο undervoltage – overcurrent ελεγκτής.



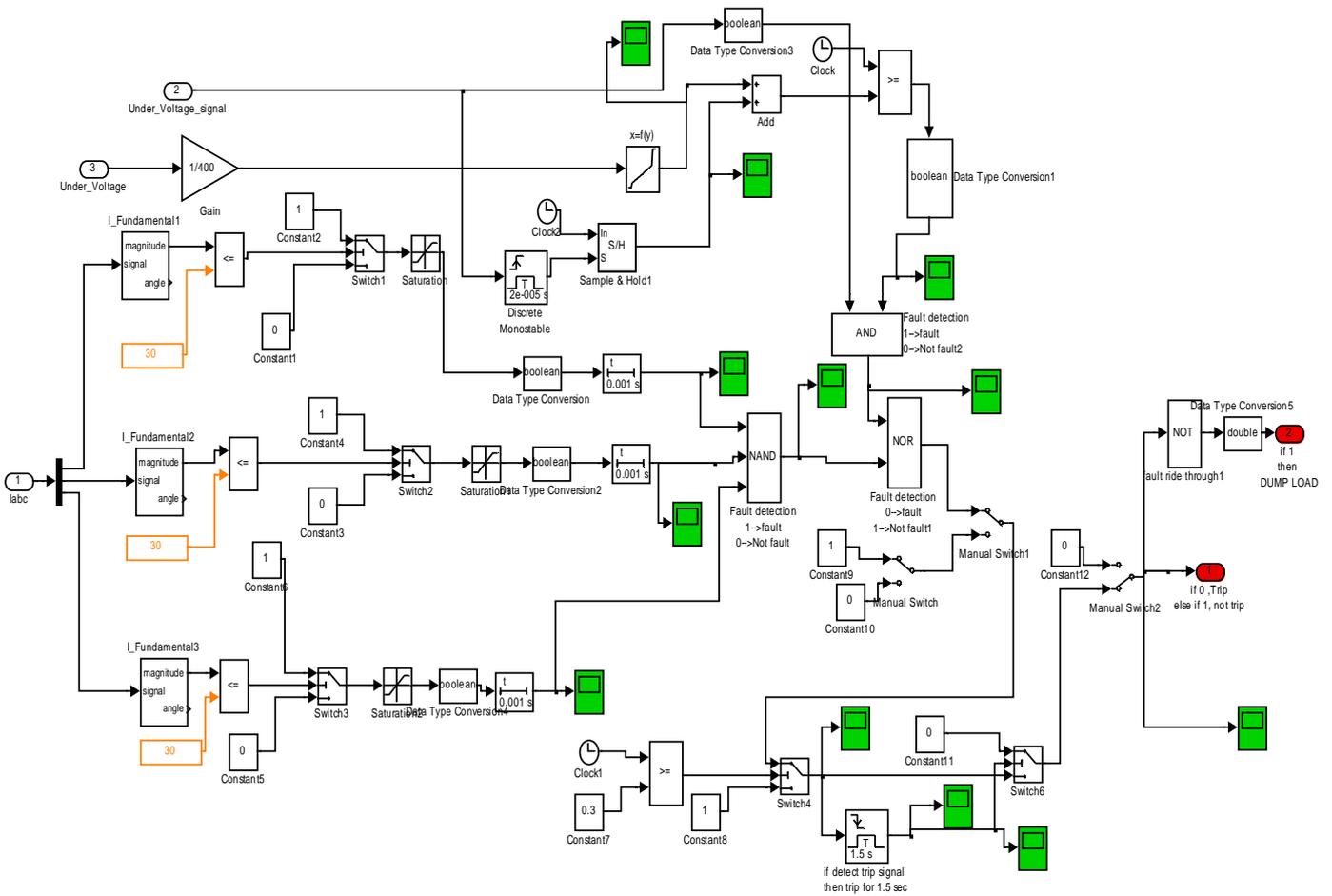
Σχήμα 4.12
θέση ελεγκτή προστασίας στο μοντέλο προσομοίωσης

Στο σχήμα 4.13 φαίνεται το δομικό διάγραμμα του συγκεκριμένου ελεγκτή. Είσοδοι του είναι η στιγμιαία τιμή των ρευμάτων του αντιστροφέα, η τάση του δικτύου και ένα λογικό σήμα που δηλώνει την ύπαρξη βύθισης της τάσης. Το ρεύμα κάθε φάσης συγκρίνεται με μια μέγιστη τιμή που θεωρείται ότι μπορεί να αντέξει το IGBT. Όσον η τιμή του ρεύματος κάθε φάσης είναι κάτω από αυτό το όριο τότε σε κάθε μια είσοδο της πύλης NAND θα υπάρχει λογικό 1 και επομένως στην έξοδο της πύλης λογικό 0. Επίσης όσο το Undervoltage signal είναι 0, δηλαδή δεν έχει εντοπιστεί κάποια βύθιση της τάσης, η έξοδος της πύλης AND θα είναι 0. Επομένως η πύλη NOR θα έχει ως έξοδο 1. Αυτή η τιμή οδηγείται στο διακόπτη όπου για τιμή 1 είναι κλειστός ενώ για τιμή 0 ανοίγει και αποσυνδέει το σύστημα.

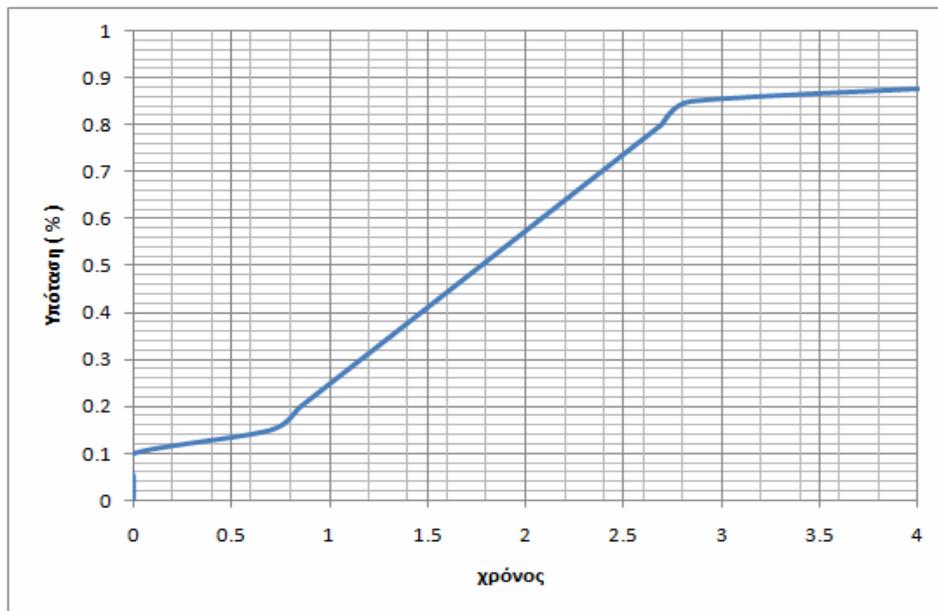
Στη περίπτωση που γίνει κάποια βύθιση τάσης, τότε η μεταβλητή Under_Voltage_signal θα μεταβληθεί από το λογικό 0 στο λογικό 1. Έτσι η μια από τις δύο εισόδους της πύλης AND θα είναι 1 ενώ η άλλη θα γίνει 1 μόλις περάσει ο χρόνος στον οποίο το σύστημα πρέπει να είναι συνδεδεμένο στο δίκτυο. Συγκεκριμένα, ο Discrete Monostable όταν το σήμα Under_Voltage_signal αλλάξει από 0 σε 1 θα δώσει ένα μικρό παλμό ο οποίος ενεργοποιεί το Sample & Hold και κρατάει σε μια μνήμη τον χρόνο που έγινε η βύθιση της τάσης σε δευτερόλεπτα. Παράλληλα με την βοήθεια ενός Look up table αντιστοιχίζεται η τιμή της τάσης σε χρόνο σύμφωνα με την καμπύλη του σχήματος 4.14. Στην έξοδο του Look up table λαμβάνεται σε sec ο χρόνος παραμονής ο οποίος θα προστεθεί στο χρόνο που έγινε το σφάλμα. Στην έξοδο του αθροιστή θα λάβουμε την χρονική στιγμή που θα γίνει η αποσύνδεση. Όταν το ρολόι γίνει μεγαλύτερο ή ίσο από το χρόνο αυτό τότε και η δεύτερη είσοδος της πύλης AND θα γίνει 1 και η έξοδος της πύλης θα δώσει λογικό 1 ενώ η NOR λογικό 0 και ο διακόπτης θα αποσυνδέσει την ανεμογεννήτρια από το δίκτυο. Όλα αυτά όσο εξακολουθεί να λαμβάνει χώρα η βύθιση της τάσης. Μόλις η τάση επανέλθει, η πρώτη είσοδος της AND θα λάβει λογικό 0 και ο διακόπτης θα είναι κλειστός ανεξαρτήτων χρόνων.

Εάν για κάποιο λόγο δεν υπάρχει βύθιση της τάσης και εμφανιστεί κάποια υπερένταση, τότε η έξοδος της NAND θα γίνει 1 και η πύλη NOR ανεξαρτήτου τι γίνεται στην άλλη είσοδο της θα βγάλει στην έξοδο 0 και θα ανοίγει τον διακόπτη, αποσυνδέοντας την ανεμογεννήτριας λόγω υπερέντασης ενεργοποιώντας παράλληλα και το φορτίο έκτακτης ανάγκης.

Είναι φανερό από τα λεγόμενα ότι ο συγκεκριμένος ελεγκτής υλοποιεί δύο πράγματα, πρώτον πρωτεύον προστασία από υπερένταση και δεύτερον ανίχνευση βύθισης τάσης και παραμονή στο δίκτυο με βάση τα όρια ανοχής της καμπύλης 4.14. Σημειώνεται ότι η καμπύλη αυτή αποτελεί μια τυπική καμπύλη ανοχής βύθισης τάσης και όχι συγκεκριμένη καμπύλη από πρότυπο κάποιας χώρας. Σε περίπτωση που απαιτηθεί κάτι τέτοιο είναι πολύ εύκολο να εισάγουμε στο Look up table τη νέα καμπύλη.

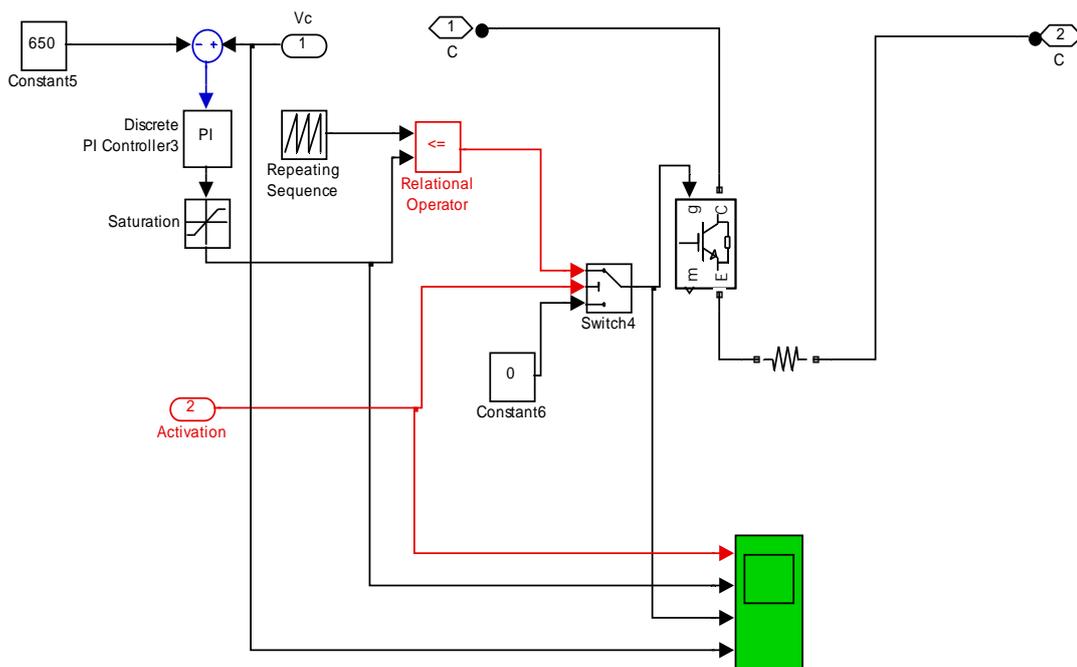


Σχήμα 4.13
Δομικό διάγραμμα ελεγκτή undervoltage -Overcurrent



Σχήμα 4.14
Τυπική καμπύλη ορίου ανοχής σε βύθιση τάσης

Όπως αναφέραμε πιο πάνω εάν απαιτηθεί η αποσύνδεση της ανεμογεννήτριας από το δίκτυο τότε το σύστημα περνάει σε απομονωμένη λειτουργία. Αυτό το επιτυγχάνει με την βοήθεια του φορτίου έκτακτης ανάγκης, Dump Load. Η διάταξη αυτή περιλαμβάνει ένα ωμικό φορτίο, αντίστασης 80Ω συνδεδεμένο με ένα IGBT. Η αγωγή του IGBT γίνεται με στόχο να διατηρείται σταθερή η τάση του πυκνωτή ώστε το σύστημα να ξανασυνδεθεί άμεσα στο δίκτυο όταν γίνει η αποκατάσταση της τάσης του δικτύου. Για το λόγο αυτό η στιγμιαία τιμή της τάσης του πυκνωτή συγκρίνεται με την επιθυμητή, το σφάλμα περνάει από έναν PI ελεγκτή και αποτελεί το Duty cycle των PWM παλμών του IGBT. Στο σχήμα 4.15 φαίνεται το δομικό διάγραμμα του φορτίου έκτακτης ανάγκης. Με το Dump Load αποφεύγεται η ανύψωση της τάσης στο πυκνωτή του αντιστροφέα και η υπερτάχυνση της γεννήτριας όταν πραγματοποιείται κάποια βύθιση στη τάση ή αποσύνδεση του συστήματος της ανεμογεννήτριας από το δίκτυο, δεδομένου ότι η ηλεκτρική ισχύς της γεννήτριας δεν θα έχει που να καταναλωθεί. Τέλος επειδή η τάση του πυκνωτή, οι στροφές και η ενεργός ισχύς της γεννήτριας διατηρούνται σε κανονικά επίπεδα λειτουργίας θα υπάρξει ταχύτερη επανένταξη της ανεμογεννήτριας όταν αυτό απαιτηθεί σε επίπεδα ίδια με εκείνα προ της διαταραχής .

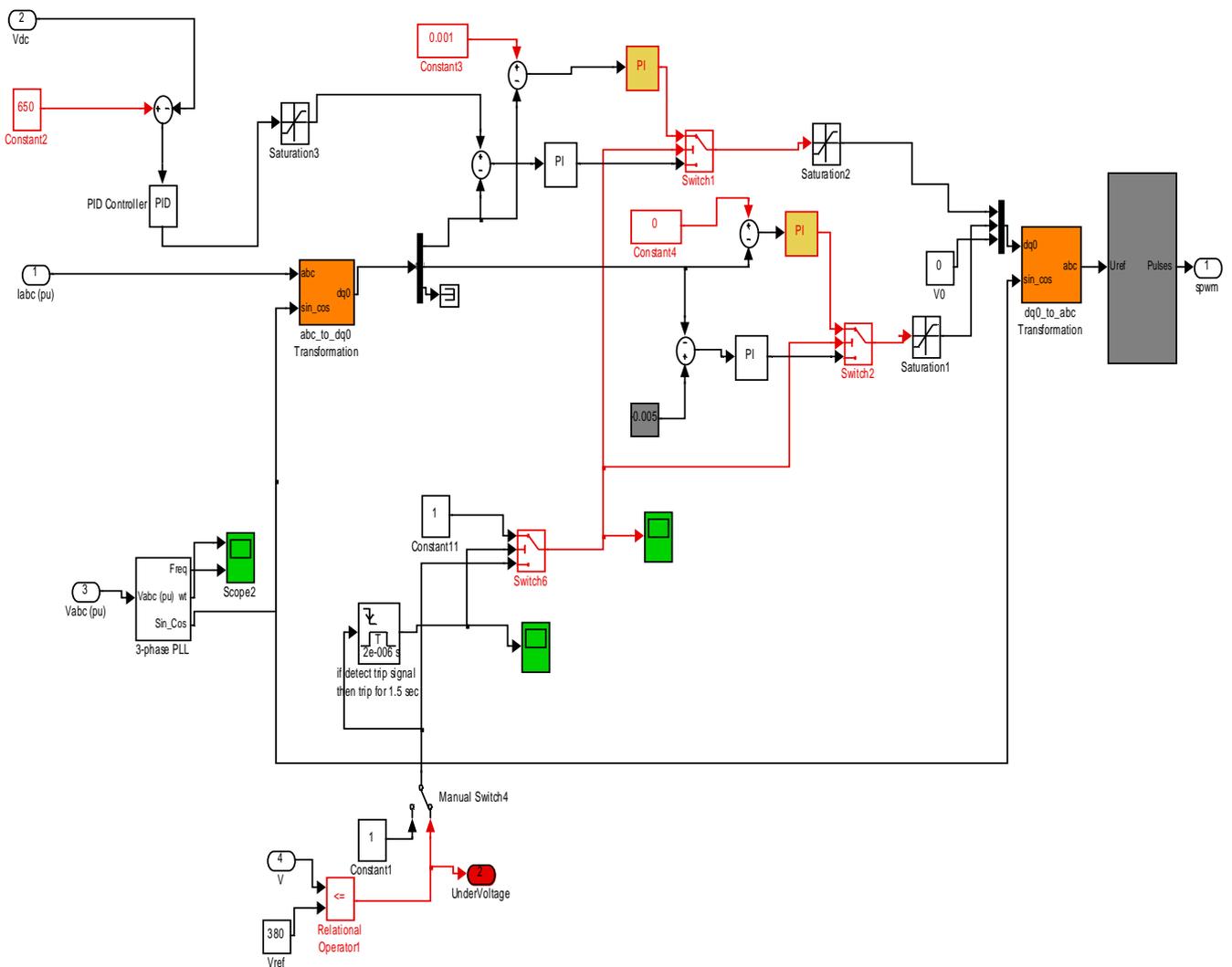


Σχήμα 4.15
Φορτίο έκτακτης ανάγκης, *Dump Load*

Τέλος, κατά την διάρκεια της βύθισης ο ελεγκτής του αντιστροφέα περνάει σε ασφαλή λειτουργία μειώνοντας τα ρεύματα στην έξοδο του. Όπως περιγράψαμε αναλυτικά και στο αντίστοιχο κεφάλαιο η λειτουργία του βασίζεται στη τάση του δικτύου και στα ρεύματα στην έξοδο τα οποία ανατροφοδοτούνται. Στη περίπτωση

που πραγματοποιηθεί κάποια βύθιση της τάσης, η ακαριαία αύξηση των ρευμάτων θα επηρεάσει την ομαλή λειτουργία του. Για το λόγο αυτό προτείνεται η αναπροσαρμογή αυτού του ελεγκτή με εκείνου του σχήματος 4.16.

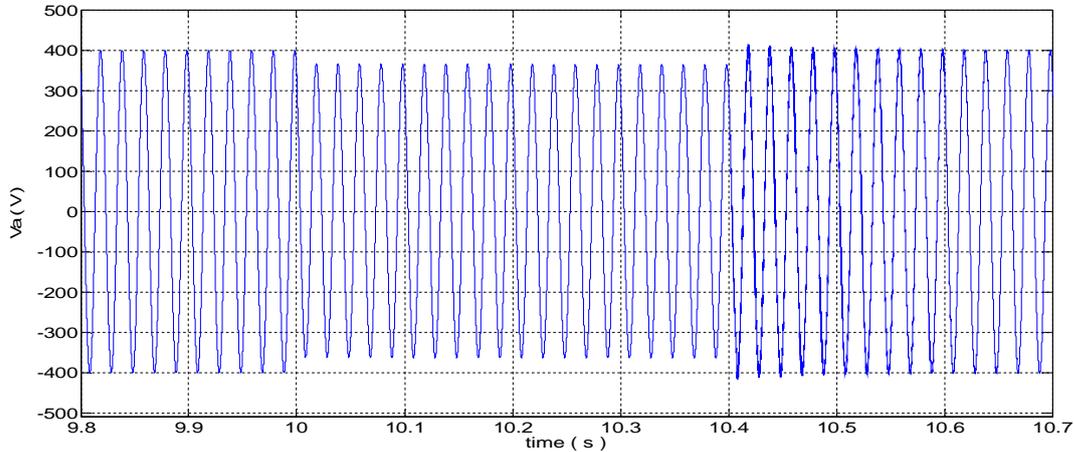
Συγκεκριμένα όταν εντοπιστεί κάποια βύθιση της τάσης τότε ο ελεγκτής θα σταματήσει να λειτουργεί με τον τρόπο που λειτουργούσε προ της βύθισης, και θα περάσει σε λειτουργία ελέγχου ρεύματος. Πιο συγκεκριμένα, υπάρχει ένας εμφωλευμένος βρόγχος ο οποίος μόλις ανιχνευτεί βύθιση πραγματοποιεί έλεγχο της d και της q συνιστώσας του ρεύματος, διατηρώντας το ρεύμα κατά την διάρκεια της βύθισης σταθερό. Μόλις η τάση επανέλθει τότε ο ελεγκτής περνάει σε κανονική λειτουργία εγχέοντας στο δίκτυο την ισχύ που λαμβάνει από το μετατροπέα ανύψωσης.



Σχήμα 4.16
Αναπροσαρμοσμένος ελεγκτής του αντιστροφέα

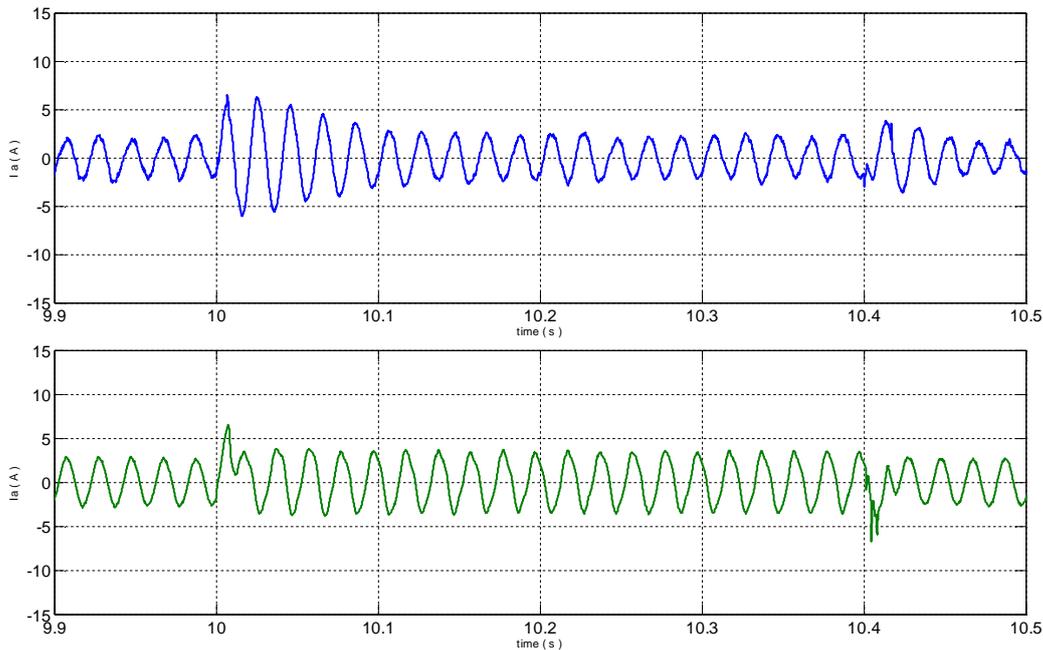
4.3 Συνεισφορά συστήματος ελέγχου στην βελτίωση της απόκρισης

Βάσει των αλλαγών που πραγματοποιήθηκαν στο ελεγκτή του αντιστροφέα αλλά και την εισαγωγή στο σύστημα του ελεγκτή προστασίας θα πραγματοποιήσουμε τις ίδιες διαταραχές με πριν και θα καταγράψουμε τα αποτελέσματα. Στο σχήμα 4.18 φαίνεται το ρεύμα του αντιστροφέα όταν η τάση μεταβαίνει στο 0.9 της ονομαστικής της τιμής για 400ms.



Σχήμα 4.17

Προσομοίωση – βύθιση της τάσης του δικτύου στο 0.9 της ονομαστικής τιμής

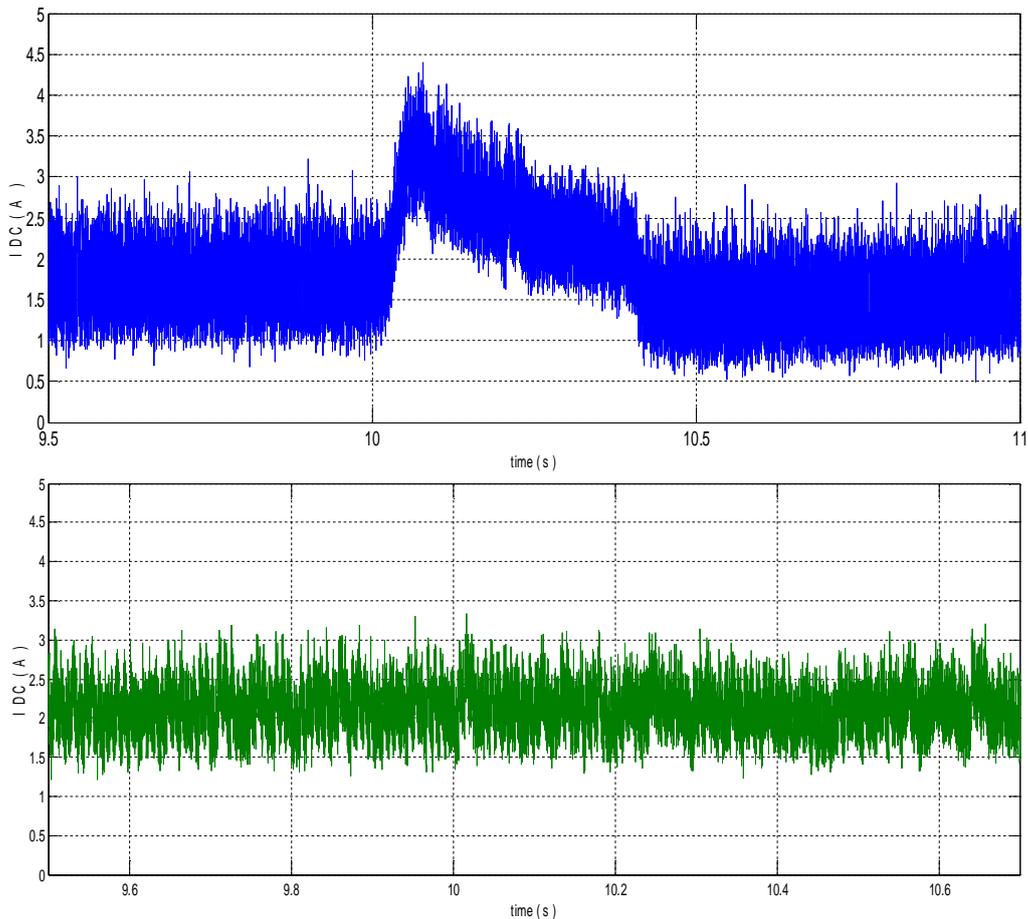


Σχήμα 4.18

Προσομοίωση - Ρεύμα στη έξοδο της Α/Γ για βύθιση της τάσης του δικτύου στο 0.9 της ονομαστικής τιμής (α) με τον συμβατικό ελεγκτή (β) με τον αναπροσαρμοσμένο ελεγκτή.

Αρχικά από τη καμπύλη του σχήματος 4.14 βλέπουμε ότι για αυτή τη διαταραχή το σύστημα δεν πρέπει να αποσυνδεθεί από το δίκτυο διότι ο χρόνος είναι μικρότερος από το μέγιστο χρόνο παραμονής, ο οποίος είναι 4sec. Επίσης, όπως είπαμε και πριν μόλις ο ελεγκτής του αντιστροφέα αντιληφθεί την βύθιση της τάσης σταματάει να δειγματοληπτεί τα ρεύματα στην έξοδο του και πραγματοποιεί έλεγχο ρεύματος. Με

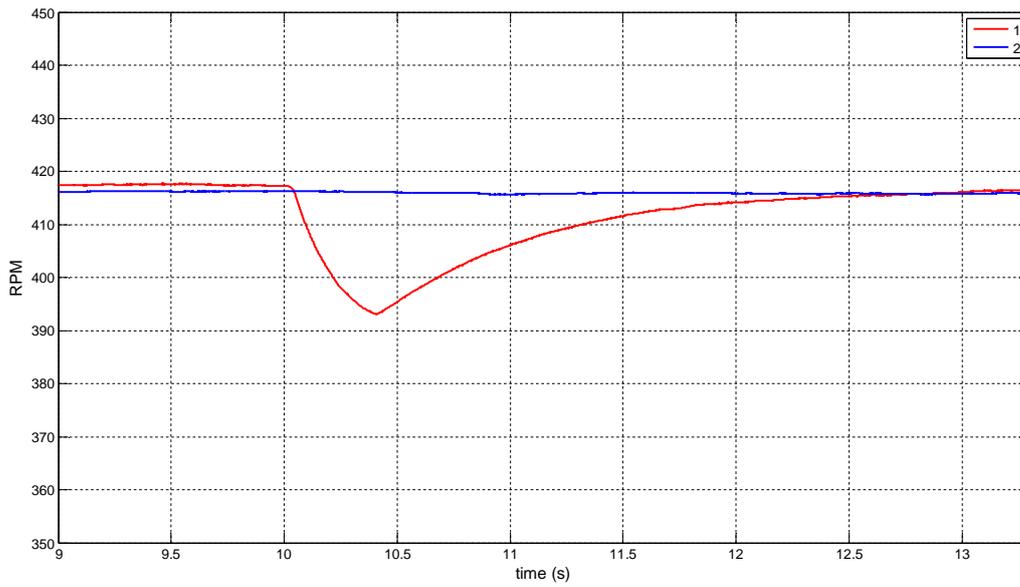
τον τρόπο αυτό διατηρεί τα ρεύματα στην ονομαστική τιμή. Στο σχήμα 4.18 παρατηρούμε ότι μόλις πραγματοποιηθεί η βύθιση ο αντιστροφέας κρατάει το ρεύμα σε τιμή ίση με το ρεύμα κανονικής λειτουργίας, σε όλη τη διάρκεια της διαταραχής. Τελικά καταφέρνει να περιορίσει την αύξηση του ρεύματος στο μετατροπέα ανύψωσης και κατά συνέπεια μειώνει την αύξηση της ενεργού ισχύος προς το δίκτυο. Στο σχήμα 4.19 εικονίζεται το ρεύμα του μετατροπέα ανύψωσης πριν και μετά αναπροσαρμογή του ελεγκτή.



Σχήμα 4.19

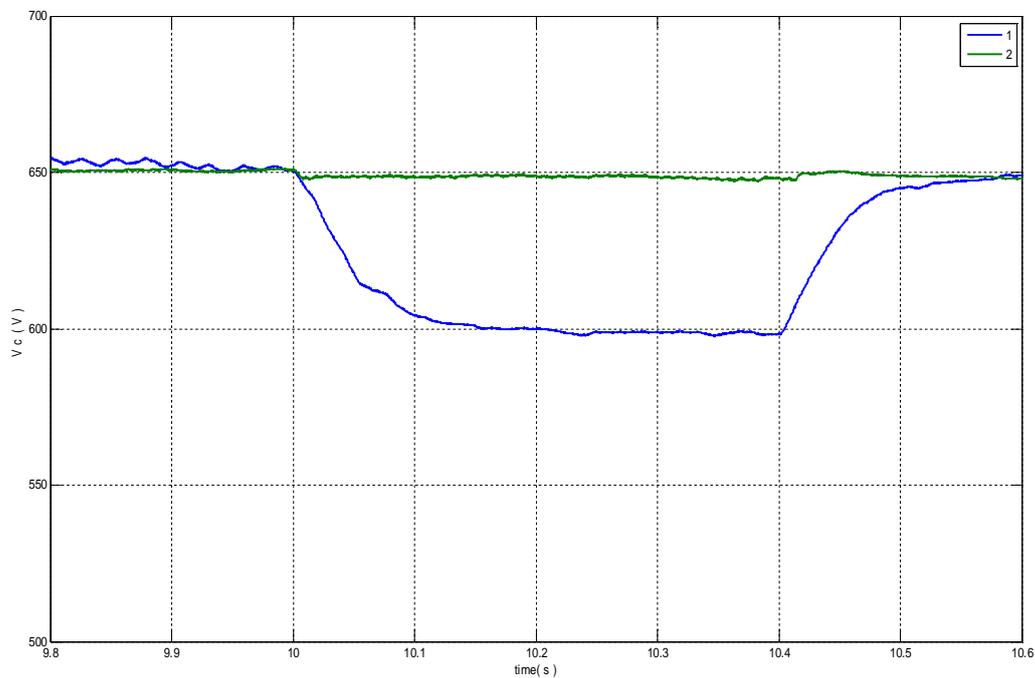
Προσομοίωση - Ρεύμα μετατροπέα ανύψωσης για βύθιση της τάσης στο 0.9 της ονομαστικής τιμής (α) με τον αναπροσαρμοσμένο ελεγκτή (β) με τον απλό ελεγκτή.

Σε μια βύθιση της τάσης στο 0.9 της ονομαστικής τιμής, δεδομένου ότι λόγω προστασίας το ρεύμα στην έξοδο του αντιστροφέα περιορίζεται στην ονομαστική τιμή, παρατηρείται μείωση της εγχεόμενης ισχύος προς το δίκτυο. Η ισχύς που δεν μπορεί να καταναλωθεί στο δίκτυο, καταναλώνεται στο φορτίο έκτακτης ανάγκης. Με τον τρόπο αυτό το ισοζύγιο παραγωγής κατανάλωσης διατηρείται πάντα σταθερό και έτσι οι στροφές της γεννήτριας όσο και η τάση του πυκνωτή στην είσοδο του αντιστροφέα παραμένουν αμετάβλητες κατά την διάρκεια της διαταραχής.



Σχήμα 4.20

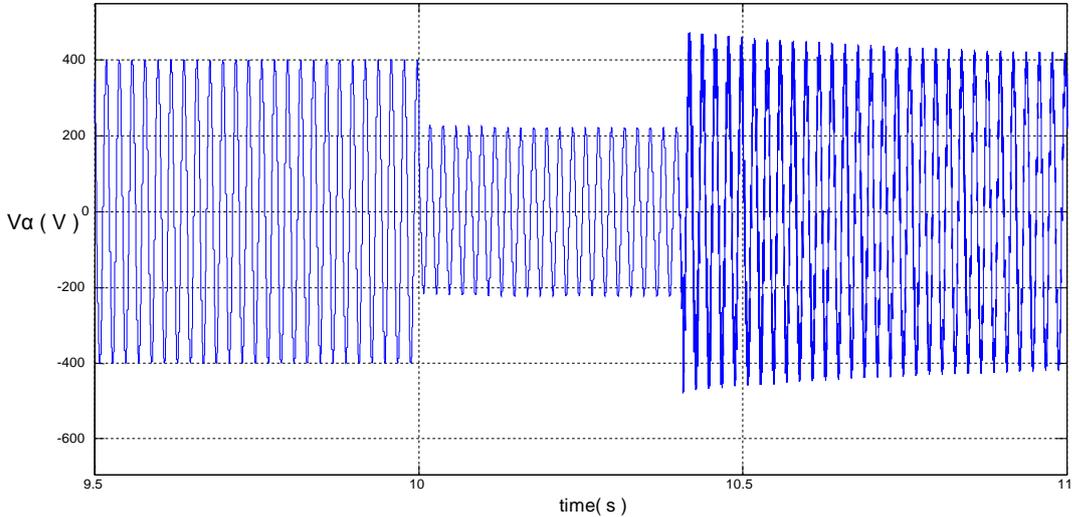
Προσομοίωση - Στροφές της γεννήτριας για βύθιση της τάσης στο 0.9 της ονομαστικής τιμής (1) με τον συμβατικό ελεγκτή και (2) με τον αναπροσαρμοσμένο ελεγκτή.



Σχήμα 4.21

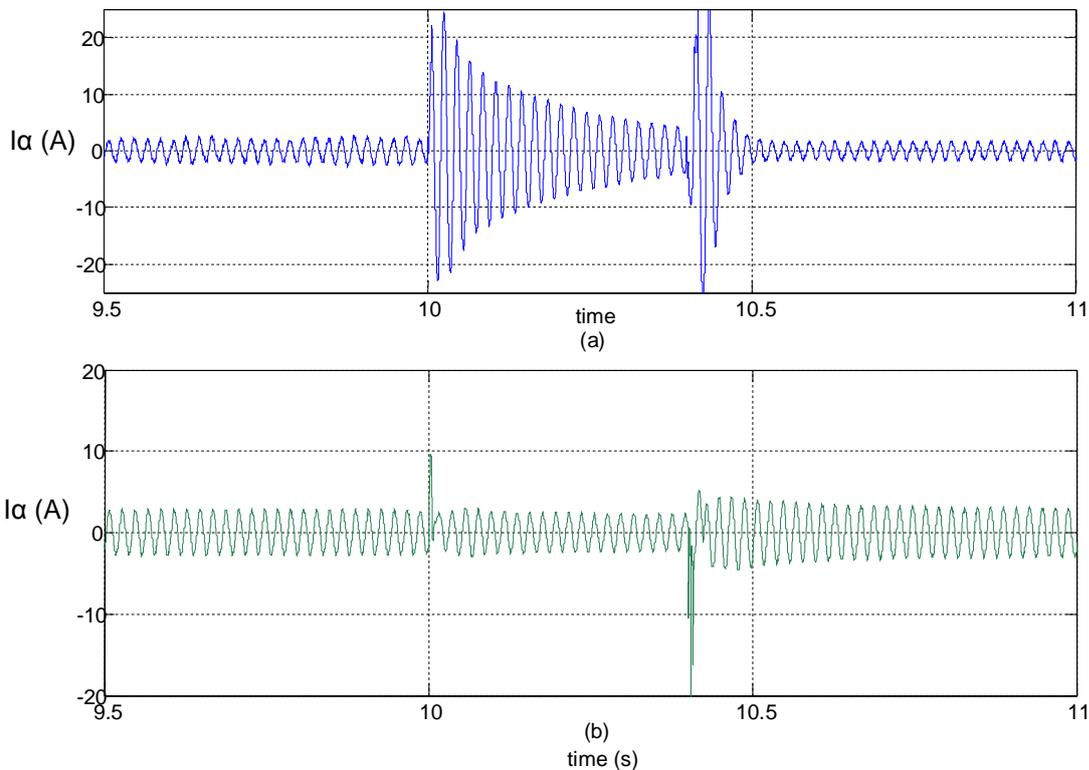
Προσομοίωση - Τάση του πυκνωτή για βύθιση της τάσης δικτύου στο 0.9 της ονομαστικής τιμής (1) με τον συμβατικό ελεγκτή (2) με τον αναπροσαρμοσμένο ελεγκτή.

Στη συνέχεια θα εξετάσουμε πώς αντιδρά το σύστημα της ανεμογεννήτριας σε μια βύθιση της τάσης στο 0.5 της ονομαστικής τιμής διάρκειας 400ms, σχήμα 4.24. Από την καμπύλη του σχήματος 4.14 για βύθιση διάρκειας 0.4sec η ανεμογεννήτρια οφείλει να παραμένει διασυνδεδεμένη στο δίκτυο. Στο σχήμα 4.22 φαίνεται το ρεύματα του αντιστροφέα κατά την διάρκεια της βύθισης.



Σχήμα 4.22

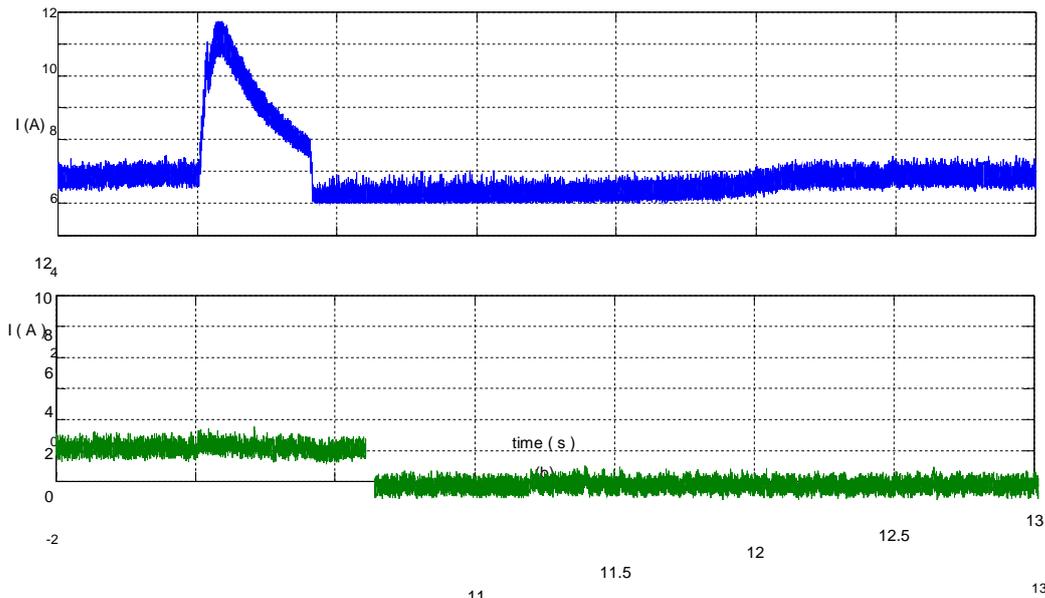
Προσομοίωση - βύθιση της τάσης του δικτύου στο 0.5 της ονομαστικής τιμής .



Σχήμα 4.23

Προσομοίωση - Ρεύμα αντιστροφέα για βύθιση της τάσης του δικτύου στο 0.5 της ονομαστικής τιμής , (α) με τον απλό ελεγκτή (β) με τον αναπροσαρμοσμένο ελεγκτή.

Συγκρίνοντας τις αποκρίσεις παρατηρούμε ότι ο ελεγκτής καταφέρνει να περιορίσει το ρεύμα στην ονομαστική τιμή. Μια σημαντική βελτίωση αποτελεί η τιμή του μεταβατικού ρεύματος που εκδηλώνεται όταν η τάση επιστρέφει στην ονομαστική της τιμή. Αυτή η βελτίωση οφείλεται στο γεγονός ότι με την σταθεροποίηση του ρεύματος, σταθεροποιείται και η τάση του αντιστροφέα οπότε και η γωνία δ μεταξύ τάσης δικτύου και αντιστροφέα. Τέλος στο σχήμα 4.24 φαίνεται το ρεύμα του μετατροπέα ανύψωσης τάσης εξαιτίας της διαταραχής. Δεδομένου ότι το ρεύμα στη έξοδο του αντιστροφέα διατηρείται σταθερό σε συνδυασμό με το γεγονός ότι ενεργοποιείται το φορτίο έκτακτης ανάγκης ώστε να διατηρεί την τάση του πυκνωτή σταθερή το ρεύμα μετατροπέα ανύψωσης θα παραμείνει σταθερό κατά την διάρκεια της διαταραχής.

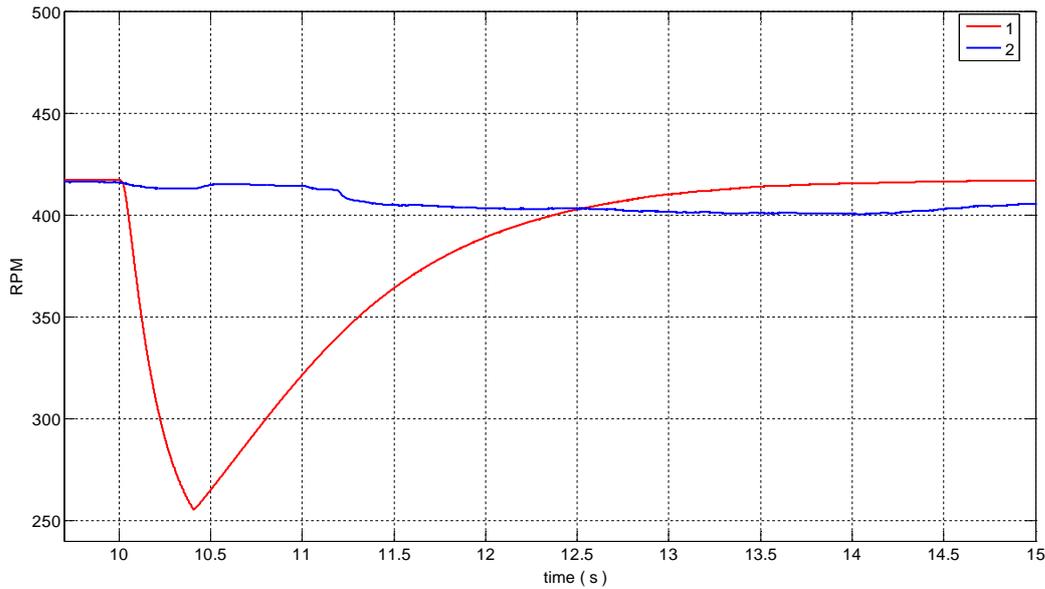


Σχήμα 4.24

Προσομοίωση ¹⁰ Ρεύμα μετατροπέα ανύψωσης για βύθιση της τάσης του δικτύου στο ^{9.5} 0.5 της ονομαστικής τιμής, (α) με τον συμβατικό ελεγκτή (β) με τον αναπροσαρμοσμένο ελεγκτή

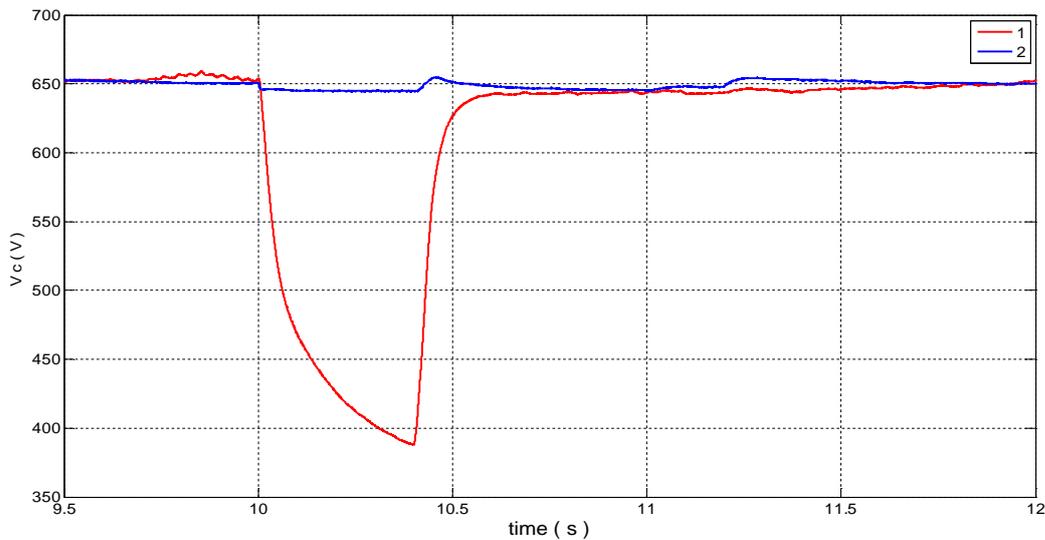
Μια άλλη παρατήρηση σχετικά με το σχήμα 4.24 είναι το γεγονός ότι διατηρώντας το ρεύμα στο μετατροπέα ανύψωσης τάσης σταθερό, ως απόρροια του περιορισμού του ρεύματος του αντιστροφέα, το σύστημα μετά την εκκαθάριση της διαταραχής μπορεί να δώσει αμέσως την μέγιστη ενεργό ισχύ του, επιστρέφοντας πολύ σύντομα στα προ της διαταραχής επίπεδα παραγωγής. Αυτό γίνεται διότι κρατώντας το ισοζύγιο παραγωγής και κατανάλωσης επιτυγχάνεται η διατήρηση των στροφών της γεννήτριας σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας.

Πιο συγκεκριμένα, στο σχήμα 4.25 εικονίζεται η μεταβολή των στροφών της γεννήτριας κατά την διάρκεια της βύθισης. Από το σχήμα φαίνεται ότι οι στροφές διατηρούνται σταθερές ενώ το μόνιμο σφάλμα που εμφανίζεται αμέσως μετά την εκκαθάριση είναι μικρό και οφείλεται κυρίως στα κέρδη των ελεγκτών του φορτίου έκτακτης ανάγκης.



Σχήμα 4.25

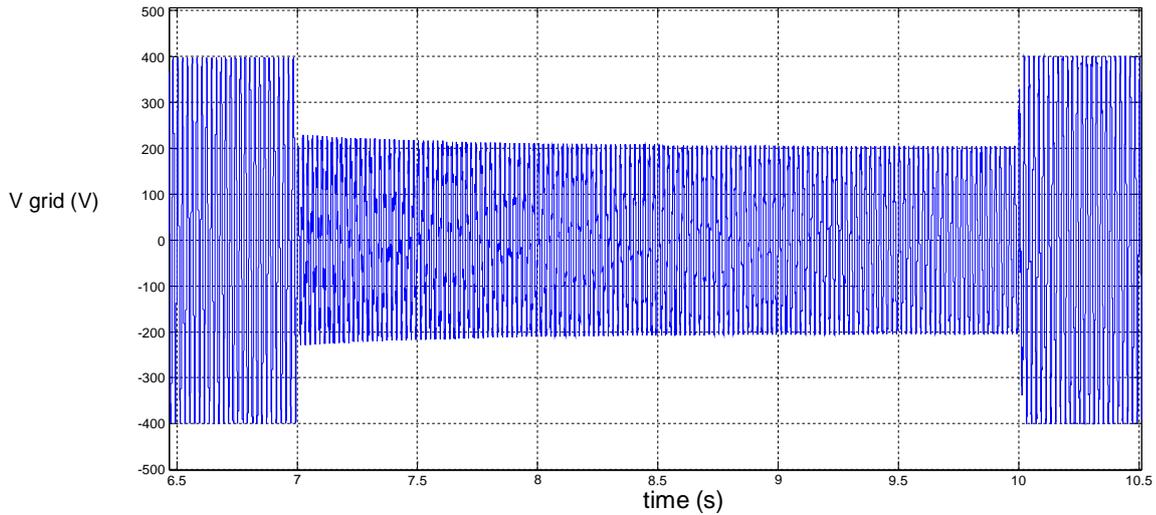
Προσομοίωση - Γωνιακή ταχύτητα της γεννήτριας για βύθιση στο 0.5 της ονομαστικής τιμής(1) με τον συμβατικό ελεγκτή (2) με τον αναπροσαρμοσμένο.



Σχήμα 4.26

Προσομοίωση – Τάση στη είσοδο του αντιστροφέα για βύθιση της τάσης δικτύου στο 0.5 της ονομαστικής τιμής(1) με τον συμβατικό ελεγκτή (2) με τον αναπροσαρμοσμένο.

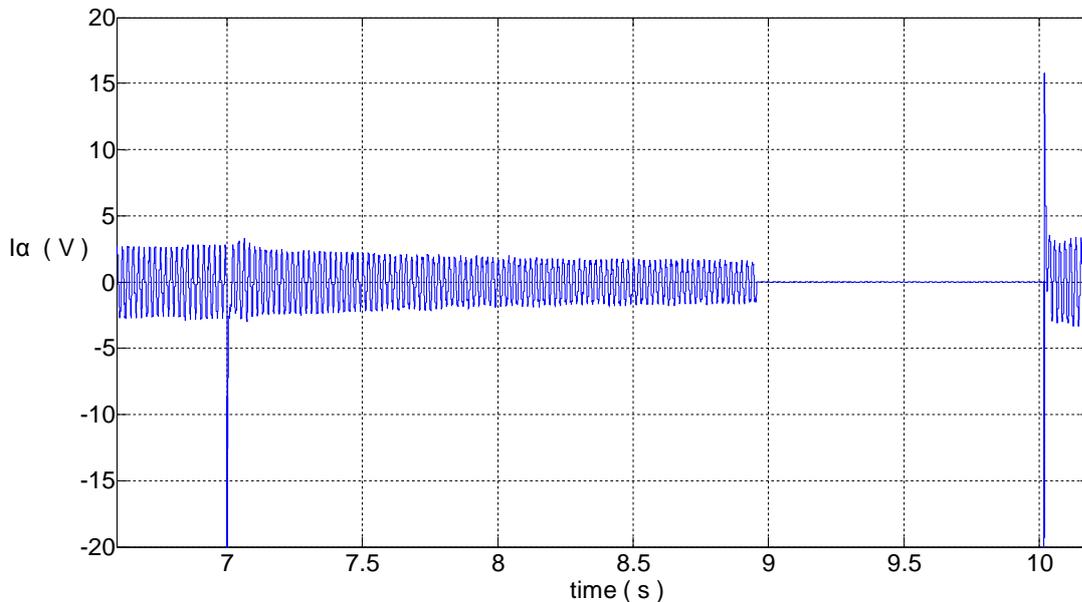
Τέλος θα θεωρήσουμε μια βύθιση της τάσης στο 0.5 της ονομαστικής τιμής διάρκειας 3sec. Ο χρόνος αυτός είναι μεγαλύτερος από τα όρια αντοχής που επιβάλλει η τυπική καμπύλη και το σύστημα οφείλει να μείνει συνδεδεμένο για χρόνο που επιβάλουν τα όρια και στη συνέχεια μπορεί να αποσυνδεθεί εφόσον ικανοποιηθούν και ενώ φυσικά η βύθιση εξακολουθεί να υφίσταται. Στο σχήμα 4.27 παρουσιάζεται η μορφή της τάσης του δικτύου όπου φαίνεται το επίπεδο και η διάρκεια της βύθισης.



Σχήμα 4.27

Προσομοίωση - Βύθιση της τάσης του δικτύου στο 0.5 της ονομαστικής τιμής διάρκειας 3sec.

Για την βύθιση αυτή η τιμή του ρεύματος στην έξοδο του φίλτρου φαίνεται στο σχήμα 4.28. Από την απόκριση είναι φανερό ότι ο ελεγκτής του αντιστροφέα περιορίζει το ρεύμα και μένει συνδεδεμένος για χρόνο 1.9sec που επιβάλλει το όριο αντοχής. Στη συνέχεια αποσυνδέει την ανεμογεννήτρια από το δίκτυο και λειτουργεί δίνοντας την ενεργό ισχύ του στο φορτίο έκτακτης ανάγκης. Μόλις η τάση του δικτύου επανέλθει ο διακόπτης φορτίου της Α/Γ κλείνει και το σύστημα εξακολουθεί να εγγχεί ενεργό ισχύ στο δίκτυο.



Σχήμα 4.28

Προσομοίωση - Ρεύμα στη έξοδο του φίλτρου για βύθιση της τάσης του δικτύου στο 0.5 της ονομαστικής τιμής για 3sec.

Συμπεράσματα

5.1 Κυριότερα συμπεράσματα εργασίας

Στην παρούσα διπλωματική εργασία προσομοιώθηκε μέσω ενός δυναμικού μοντέλου πραγματικού χρόνου που υλοποιήθηκε στο περιβάλλον SIMULINK/MATLAB η λειτουργία μιας εργαστηριακής ανεμογεννήτριας μεταβλητών στροφών με σύγχρονη γεννήτρια μόνιμων μαγνητών. Πιο συγκεκριμένα, η ανεμογεννήτρια αποτελείται από μια σύγχρονη γεννήτρια επιφανειακών μόνιμων μαγνητών που συνδέεται στο δίκτυο χαμηλής τάσης μέσω ενός ΕΡ/ΣΡ/ΕΡ(ΑC/DC/ΑC) μετατροπέα. Στο πρώτο κεφάλαιο έγινε μια επισκόπηση των επικρατέστερων τεχνολογιών που εφαρμόζονται στη σχεδίαση ανεμογεννητριών και περιγράφηκε το πλαίσιο και οι απαιτήσεις των κωδικών για τη σύνδεση Α/Γ στο δίκτυο εξετάζοντας ιδιαίτερα τα προτεινόμενα όρια ανοχής σε βυθίσεις της τάσης του δικτύου. Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζονται και αναλύονται τα υποσυστήματα της ανεμογεννήτριας και ο τρόπος με τον οποίο μοντελοποιείται η λειτουργία τους. Πιο αναλυτικά, μοντελοποιήθηκε το αεροδυναμικό μέρος, η σύγχρονη γεννήτρια μόνιμων μαγνητών, ο μετατροπέας ανύψωσης τάσης και ο αντιστροφέας που συνδέει την ανεμογεννήτρια στο δίκτυο. Σχεδιάστηκε ελεγκτής ανεύρεσης του βέλτιστου σημείου λειτουργίας που χρησιμοποιεί τη βέλτιστη χαρακτηριστική καμπύλη ροπής στροφών, ο οποίος στη συνέχεια ενσωματώθηκε στο μετατροπέα ανύψωσης τάσης. Τέλος, σχεδιάστηκε ελεγκτής που πραγματοποιεί διανυσματικό έλεγχο τάσης και ρύθμιση του ρεύματος, ο οποίος είναι υπεύθυνος για την λειτουργία του αντιστροφέα τύπου πηγής τάσης. Σκοπός του τελευταίου είναι η έγχυση στο δίκτυο της ενεργού ισχύος που λαμβάνεται από το μετατροπέα ανύψωσης τάσης, διατηρώντας την τάση του πυκνωτή στην είσοδο σταθερή και η ρύθμιση της άεργου ισχύος που ανταλλάσσεται με το δίκτυο. Στο τρίτο κεφάλαιο αφού ενσωματώθηκαν στο μοντέλο οι παραπάνω ελεγκτές, πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις κάτω από διαφορετικές λειτουργικές συνθήκες και έγινε πειραματική επιβεβαίωση. Πιο συγκεκριμένα, εξετάστηκε η λειτουργία του μοντέλου σε βηματικές μεταβολές της ροπής αλλά και σε πραγματική χρονοσειρά ανέμου. Τέλος, στο τέταρτο κεφάλαιο, μελετήθηκαν οι επιπτώσεις που έχουν στην ανεμογεννήτρια οι διαταραχές της τάσης του δικτύου. Για το λόγο αυτό εξετάστηκε η λειτουργία του συστήματος σε περιπτώσεις διαφορετικής συμμετρικής βύθισης της τάσης του δικτύου σε επίπεδα που προτείνονται από τις δοκιμές συμβατότητας των ανεμογεννητριών [26].

Από την ανάλυση που πραγματοποιήθηκε στο τρίτο κεφάλαιο και ιδιαίτερα από τις αποκρίσεις συμπεραίνεται ότι τόσο ο ΜΡΡΤ ελεγκτής όσο και ο ελεγκτής του αντιστροφέα, ο οποίος πραγματοποιεί διανυσματικό έλεγχο της τάσης και ρύθμιση

του ρεύματος, δίνει αρκετά ικανοποιητικά αποτελέσματα πολύ κοντά στα πειραματικά. Πιο συγκεκριμένα, για βηματική μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου από τα 6m/s στα 9m/s, κατά συνέπεια βηματική μεταβολή της αεροδυναμικής ροπής συμπεραίνεται ότι το σύστημα της ανεμογεννήτριας λειτουργεί με βέλτιστο αεροδυναμικό συντελεστή C_p (σε τιμή 0.5), απορροφώντας τη μέγιστη αεροδυναμική ισχύ των πτερυγίων. Στη συνέχεια συγκρίνοντας την απόκριση της ενεργού ισχύος του μοντέλου προσομοίωσης με την αντίστοιχη πειραματική για την ίδια μεταβολή ροπής συμπεραίνεται ότι τόσο τα επίπεδα της ενεργού ισχύος όσο και η χρονική σταθερά (που είναι 4.5sec) για αιφνίδια μετάβαση από τα 6m/s στα 9m/s ταυτίζονται. Το γεγονός αυτό αναδεικνύει ότι το μοντέλο προσομοίωσης που αναπτύχθηκε προσφέρει ικανοποιητική ακρίβεια. Επιπλέον, εξετάστηκε η ρύθμιση της άεργου ισχύος που πραγματοποιεί ο ελεγκτής του αντιστροφέα και προσδιορίστηκαν τα όρια της ανταλλαγής άεργου ισχύος σε σχέση με την παραγόμενη ενεργό ισχύ.

Από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων του τέταρτου κεφαλαίου, συμπεραίνεται ότι, σε βύθιση της τάσης του δικτύου στο μισό της ονομαστικής τιμής, στο σύστημα αναπτύσσονται ρεύματα τα οποία τόσο στη πλευρά του δικτύου όσο και στο μετατροπέα ανύψωσης υπερβαίνουν κατά πολύ το ρεύμα κανονικής λειτουργίας. Η αύξηση των ρευμάτων στην έξοδο του αντιστροφέα αποπροσανατολίζει τον συμβατικό ελεγκτή, ο οποίος την αντιλαμβάνεται ως εντολή αύξησης της ενεργού ισχύος που εγχέεται στο δίκτυο, την οποία προφανώς το σύστημα δεν μπορεί να τροφοδοτήσει αφού ήδη πριν τη διαταραχή βρισκόταν στο σημείο μέγιστης αποδιδόμενης ισχύος. Η επιπλέον ενεργός ισχύς παρέχεται από μείωση της κινητικής ενέργειας του δρομέα με αποτέλεσμα τη μείωση των στροφών της γεννήτριας, τη μείωση της τάσης της και εν τέλει τη μείωση της τάσης του μετατροπέα ανύψωσης. Ποσοτικά, κατά την παραπάνω βύθιση η ποσοστιαία μείωση των στροφών είναι 40% και η ποσοστιαία μείωση της τάσης του μετατροπέα ανύψωσης είναι 38%.

Για να αντιμετωπιστούν τέτοια φαινόμενα και να προστατευθεί το σύστημα, σε ένα πρώτο βήμα σχεδιάστηκε κατάλληλος ελεγκτής προστασίας που ελέγχει το διακόπτη φορτίου. Επίσης αναπροσαρμόστηκε η λειτουργία του ελεγκτή του αντιστροφέα έτσι ώστε να περιορίζεται κατά το δυνατόν το ρεύμα εξόδου του. Συγκρίνοντας τα νέα αποτελέσματα βγαίνει το συμπέρασμα ότι για την ίδια βύθιση τάσης δικτύου το ρεύμα εξόδου του αντιστροφέα περιορίστηκε στο διπλάσιο της ονομαστικής λειτουργίας. Παρατηρείται μικρότερη αύξηση του ρεύματος του μετατροπέα ανύψωσης τάσης, το οποίο φτάνει στο διπλάσιο της τιμής κανονικής λειτουργίας ενώ η ποσοστιαία μείωση των στροφών της γεννήτριας περιορίζεται στο 2%. Σε περίπτωση που η διαταραχή διαρκέσει περισσότερο από το χρόνο που επιβάλουν τα όρια αντοχής, το σύστημα αποσυνδέεται από το δίκτυο και περνάει σε λειτουργία απομονωμένου φορτίου. Μια τέτοια περίπτωση παρουσιάζεται στο σχήμα 3.31, για βύθιση τάσης δικτύου 50% διάρκειας 3 δευτερολέπτων. Συνοψίζοντας, συμπεραίνεται ότι με την αναπροσαρμογή του ελεγκτή του αντιστροφέα που προτείναμε πραγματοποιήθηκε σχετική βελτίωση της απόκρισης του συστήματος σε βυθίσεις της τάσης του δικτύου. Εάν ο αντιστροφέας διαθέτει ικανότητα αντοχής σε

ελεγχόμενη υπερένταση, η ανεμογεννήτρια παραμένει διασυνδεδεμένη και επιστρέφει στα προ της διαταραχής επίπεδα παραγωγής μόλις επανέλθει η τάση του δικτύου.

Ανακεφαλαιώνοντας, η εργασία παρουσίασε δυναμικό μοντέλο ανεμογεννήτριας μεταβλητών στροφών με σύγχρονη γεννήτρια μόνιμων μαγνητών, θεωρώντας τη μη ημιτονοειδή ΗΕΔ, κατάλληλο για τη μελέτη της διασυνδεδεμένης λειτουργίας με το ηλεκτρικό δίκτυο. Η βελτιστοποίηση της παραγόμενης ισχύος από το αεροδυναμικό μέρος, επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας κατάλληλο ελεγκτή ανεύρεσης βέλτιστου σημείου λειτουργίας. Υιοθετώντας τεχνική διανυσματικού ελέγχου στον αντιστροφέα, επιτυγχάνεται, αφενός έλεγχος της ενεργού ισχύος διατηρώντας την τάση του ζυγού ΣΡ σταθερή, αφετέρου διατήρηση της άεργου ισχύος στα επιθυμητά επίπεδα. Τέλος, προτείνεται νέος τροποποιημένος έλεγχος του αντιστροφέα, προκειμένου να παραταθεί η διασυνδεδεμένη λειτουργία της ανεμογεννήτριας σε περιπτώσεις βύθισης της τάσης του δικτύου, σύμφωνα με τα διεθνή πρότυπα, υπό την προϋπόθεση αντοχής σε ελεγχόμενη υπερένταση.

5.2 Σημεία προαγωγής της επιστήμης

Η διπλωματική εργασία περιλαμβάνει τα παρακάτω καινοτομικά στοιχεία:

- Ανάπτυξη ενός μοντέλου αναπαράστασης μιας διασυνδεδεμένης ανεμογεννήτριας μεταβλητών στροφών με σύγχρονη γεννήτρια επιφανειακών μόνιμων μαγνητών. Το μοντέλο αυτό επιτρέπει τη θεώρηση της μη ημιτονοειδούς ΗΕΔ της γεννήτριας και την μελέτη των επιμέρους υποσυστημάτων της ανεμογεννήτριας σε πραγματικό χρόνο αλλά και των αντίστοιχων ελεγκτών τους τόσο σε ομαλή όσο και σε διαταραγμένη λειτουργία.
- Εξέταση της απόκρισης του συστήματος της ανεμογεννήτριας και της λειτουργίας των ελεγκτών της σε βυθίσεις της τάσης του δικτύου, σύμφωνα με τα προβλεπόμενα από τα διεθνή πρότυπα.
- Σχεδίαση νέου ελεγκτή προστασίας που σε περίπτωση διαταραχών επιφέρει τη διαχείριση του συστήματος της ανεμογεννήτριας σύμφωνα με τα τιθέμενα όρια αντοχής σε βυθίσεις της τάσης του δικτύου για ελεγχόμενες τιμές υπερρευματών αντιστροφέα [26].

5.3 Εργασίες για περαιτέρω διερεύνηση

Με την ολοκλήρωση της εργασίας αυτής αναδείχθηκαν τα ακόλουθα σημεία τα οποία χρήζουν περαιτέρω διερεύνησης:

- Πειραματική επιβεβαίωση των χαρακτηριστικών του ελεγκτή του αντιστροφέα που προτείναμε ο οποίος επιτρέπει περιορισμό του ρεύματος και της άεργου ισχύος σε περιπτώσεις βύθισης της τάσης του δικτύου.
- Διερεύνηση της συμπεριφοράς του προτεινόμενου ελεγκτή αλλά και των υποσυστημάτων της ανεμογεννήτριας σε περιπτώσεις ασυμμετρίας στο δίκτυο.

Βιβλιογραφία

- [1] Μ. Ντρέκο, Χ. Πάτσιος, Α. Χανιώτης, Α. Κλαδάς “Ανάλυση Λειτουργίας και Έλεγχος Συστήματος Ανεμογεννήτριας Μεταβλητών Στροφών Διασυνδεδεμένης στο Δίκτυο” Ελληνική επιτροπή CIGRE, σύνοδος Αθήνα 2009.
- [2] Σ. ΜΑΝΙΑΣ, “Ηλεκτρονικά Ισχύος”, Εκδόσεις Συμμεών, 2007.
- [3] Σταύρου Παπαθανασίου “Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας”
- [4] T. Ackermann, “Wind Power in Power Systems”. John Wiley & Sons, Ltd., 2005.
- [5] F. Blaabjerg, R. Teodorescu, M. Liserre, A. V. Timbus, , “Overview of Control and Grid Synchronization for Distributed Power Generation Systems” IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 53, issue 5, pp. 1398-1409, October 2006.
- [6] J. M. Carrasco, L. G. Franquelo, J. T. Bialasiewicz, E. Galván, R. C. P. Guisado, Á. M. Prats, J. I. León, and N. Moreno-Alfonso, “Power-Electronic Systems for the Grid Integration of Renewable Energy Sources: A Survey” IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 53, no. 4, pp. 1002-1016, August 2006.
- [7] P. Rodriguez, A. V. Timbus, R. Teodorescu, M. Liserre, F. Blaabjerg, “Flexible Active Power Control of Distributed Power Generation Systems During Grid Faults” IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 54, issue 5, pp. 2583-2592, October 2007.
- [8] H. Sloopweg, E. de Vries, “Fixed vs. Variable”, Renewable Energy World, January-February 2003
- [9] L. H. Hansen, L. Helle, F. Blaabjerg, E. Ritchie, S. Munk-Nielsen, H. Bindner, P. Sørensen, B. Bak-Jensen, “Conceptual survey of generators and power electronics for wind turbines”, Risø National Laboratory, Roskilde, Denmark, December 2001.
- [10] Α. Χανιώτης, Διδακτορική διατριβή “ανάπτυξη, προσομοίωση και κατασκευή συστήματος ελέγχου ανεμογεννήτριας μεταβλητών στροφών με γεννήτρια μόνιμων μαγνητών για απομονωμένη και διασυνδεδεμένη λειτουργία”
- [11] J. G. Slootweg; H. Polinder; W. L. Kling, “Representing Wind Turbine Electrical Generating Systems in Fundamental Frequency Simulations”, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 18, no.4, pp. 516–524, 2003.
- [12] Siegfried Heier, “*Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems*”, 2nd ed., John Wiley & Sons, England, 2006.
- [13] Polinder, H.; van der Pijl, F.F.A.; de Vilder, G.-J.; Tavner, P.J.; “Comparison of direct-drive and geared generator concepts for wind turbines”, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 21, no. 3, pp.

725-733, 2006

- [14] “Permanent Magnet Motor Technology design and” Jacek F. Gieras , Mitchel Wing.
- [15] Kinnunen J., Pyrhonen J., Liukkonen O., Kurronen P., “Analysis of directly network connected non-salient pole permanent magnet synchronous machines” Proc. International Symposium on Industrial Electronics, pp. 2217-2222 ISIE 2006, 9-3 July 2006, Montreal, Canada.
- [16] ‘A Comparison of Maximum Power Point Tracking Control Techniques for Low Power Variable Speed Wind-Generators ’ C. Patsios, A. Chaniotis, M. Rotas, A. Kladas
- [17] Mohan-Undeland-Robbins ‘Power Electronics’
- [18] V. Valtchev, A. Bossche, J. Ghijselen, and J. Melkebeek, “Autonomous renewable energy conversion system,” *Renew. Energy*, vol. 19, no. 1, pp. 259–275, Jan. 2000.
- [19] S. Kim, and E. Kim, “PSCAD/EMTDC – Based modeling and analysis of a gearless variable speed wind turbine”, *IEEE Trans. On Energy Conversion*, Vol. 22, no. 2, pp. 421-430, June 2007.
- [20] Prentice Hall “ Modern Power Electronics And Ac Drives” , Bimal K .Bose
- [21] I. Καμπούρης, Διευθυντής ανάπτυξης συστήματος ΔΕΣΜΗΕ “ Εφαρμογές και προβλήματα διείσδυσης μεγάλης κλίμακας, Χαλκίδα 2009 ’ ’
- [22] F.Santjer, “The New Philosophy for Grid Connection and how to Verify the Behaviour of Wind Farms,” in *EWEC 2004*, London, November 2004.
- [23] ΕΛΟΤ EN 61000.03.03:1996 Ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα (EMC) – Μέρος 3 : Όρια-Τμήμα2: όρια εκπομπής για αρμονικές ρεύματος
- [24] Μ.Σ. Ρώτα “Σύγκριση Κλασσικού και Ελέγχου Βασισμένου σε Ασαφή Λογική Ανεμογεννήτριας Μονίμων Μαγνητών”
- [25] E. Koutroulis, and K. Kalaitzakis, “Design of a maximum power tracking system for Wind-Energy-Conversion applications”, *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, Vol. 53, no. 2, pp. 486-494, April 2006.
- [26] N. Yamamura, M. Ishida, and T. Hori, “A simple wind power generating system with permanent magnet type synchronous generator”, *IEEE International Conf. on Power Electronics and Drive Systems, PEDS '99*, Hong Kong , July 1999.

[27] C. Patsios, A. Chaniotis, A. Kladas, “A hybrid maximum power point tracking system for grid-connected variable speed wind-generators” *Power Electronics Specialists Conference*, 2008. PESC 2008. IEEE 15-19, June 2008, p.p. 1749 – 1754.

[28] Σ. Παπαθανασίου, Μ. Τσίλη “Τεχνικές απαιτήσεις για τη σύνδεση αιολικών σταθμών στα συστήματα ηλεκτρική ενέργειας – Επισκόπηση κωδίκων άλλων χωρών και διαθέσιμων τεχνολογιών” ΕΜΠ-ΕΠΙΣΕΥ

