



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ
ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ

**ΕΛΕΓΧΟΣ ΑΕΡΓΟΥ ΙΣΧΥΟΣ ΑΠΟ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑ ΓΙΑ
ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗ ΤΑΣΗΣ ΔΙΚΤΥΟΥ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΣΦΑΛΜΑΤΟΣ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Παναγιώτης Θ. Τσάκωνας

Επιβλέπων : Μαρία Γ. Ιωαννίδου

Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2010



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ
ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ

**ΕΛΕΓΧΟΣ ΑΕΡΓΟΥ ΙΣΧΥΟΣ ΑΠΟ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑ ΓΙΑ
ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗ ΤΑΣΗΣ ΔΙΚΤΥΟΥ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΣΦΑΛΜΑΤΟΣ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Παναγιώτης Θ. Τσάκωνας

Επιβλέπων : Μαρία Γ. Ιωαννίδου

Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την

.....
Μ. Γ. Ιωαννίδου
Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

.....
Ν. Θεοδώρου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Π. Τσαραμπάρης
Λέκτορας Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2010

.....
Παναγιώτης Θ. Τσάκωνας

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

Copyright © Παναγιώτης Θ. Τσάκωνας 2010
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Περίληψη

Τα τελευταία χρόνια, η ολοένα και αυξανόμενη αιολική διείσδυση στο δίκτυο μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας έχει οδηγήσει τους διαχειριστές του συστήματος στη θέσπιση αυστηρότερων τεχνικών απαιτήσεων όσον αφορά την ένταξη καινούριων αιολικών πάρκων. Οι σχεδιαστές των ανεμογεννητριών οφείλουν να συμβαδίσουν με τους νέους κανονισμούς και να προχωρήσουν στην ανάπτυξη καινούριων τεχνολογιών που θα επιτρέψουν την ένταξη μεγάλων αιολικών πάρκων στο διασυνδεδεμένο σύστημα.

Αντικείμενο αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι η ανάπτυξη σε περιβάλλον Simulink/Matlab, ενός μοντέλου ανεμογεννήτριας μεταβλητών στροφών με σύγχρονη γεννήτρια τυλιγμένου δρομέα, εφοδιασμένης με ένα καινούριο σύστημα ελέγχου του αντιστροφέα. Αρχικά θα αναλυθούν τα επιμέρους υποσυστήματα που απαρτίζουν την ανεμογεννήτρια και θα εξηγηθούν οι τεχνικές ελέγχου που χρησιμοποιούνται τόσο για την προστασία των συστημάτων αυτών σε υψηλές ταχύτητες ανέμου όσο για την εύρεση του σημείου μέγιστης απολαβής ισχύος (Maximum Power Point Tracking, MPPT) σε χαμηλότερες ταχύτητες ανέμου. Θα αναπτυχθεί το σύστημα ελέγχου του αντιστροφέα, το οποίο βασίζεται σε διανυσματικό έλεγχο του ρεύματος και της τάσης όπου τα τριφασικά μεγέθη μετασχηματίζονται στο στρεφόμενο πλαίσιο d-q, επιτρέποντας ευκολότερη ρύθμιση της εγχεόμενης ενεργού και αέργου ισχύος. Επίσης θα ενσωματωθούν σε αυτό νέοι ρυθμιστές που θα αξιοποιούν την άεργο ισχύ για ρύθμιση της τάσης στο σημείο κοινής σύνδεσης του αιολικού με το δίκτυο.

Στο συνέχεια θα διεξαχθούν προσομοιώσεις από τις οποίες θα εξεταστεί η ομαλή λειτουργία όλων των συστημάτων της ανεμογεννήτριας σε σταθερές και μεταβλητές συνθήκες ανέμου αλλά και κυρίως σε μεταβολές της τάσης του δικτύου σε περίπτωση σφάλματος. Για την τελευταία περίπτωση θα εξεταστεί εάν πληρούνται οι απαιτήσεις που θέτει ο γερμανικός κώδικας για την παροχή αέργου ρεύματος από αιολικό πάρκο κατά τη διάρκεια σφαλμάτων στο δίκτυο.

Τελικώς, θα αξιολογηθούν τα αποτελέσματα και θα προκύψουν συμπεράσματα για την συμπεριφορά της ανεμογεννήτριας υπό αυτές τις συνθήκες, προτείνοντας παράλληλα τρόπους για την αντιμετώπιση τυχόν προβλημάτων.

Λέξεις κλειδιά

Ανεμογεννήτρια μεταβλητών στροφών, σύγχρονη γεννήτρια τυλιγμένου δρομέα, μέθοδος ανεύρεσης βέλτιστης ισχύος, διανυσματικός έλεγχος, d-q πλαίσιο, ρυθμιστής στροφών, ρυθμιστής γωνίας βήματος πτερυγίων, ρυθμιστής τάσης, έλεγχος αντιστροφέα, άεργος ισχύς, βύθιση τάσης, κώδικες διασύνδεσης αιολικών

Abstract

In the last few years, the increasing penetration of wind energy generation in electricity transmission systems has pushed their operators to impose new technical requirements for new wind farms to be connected to the grid. Therefore wind turbine designers and engineers need to adapt to those new requirements by developing technologies that will allow connection of large wind farms to the transmission system.

The purpose of this diploma thesis is the development in Simulink/Matlab, of a variable speed wind turbine model with a new grid-side converter control system. To begin with, all wind turbine's subsystems will be analyzed and the control techniques used not only to protect those systems in high winds but also to track the maximum power point (MPPT) in lower winds, will be explained. The new grid-side converter control system that will be developed, is based on vector current and voltage control, where the 3-phase components are transformed into the synchronous-rotating dq reference frame, thus allowing easier management of active and reactive power. In addition to this, various controllers will be added which sufficiently manage the generated reactive power in order to adjust the voltage at the point of common coupling with the utility grid.

Furthermore, simulation results of the specific model are presented. Those simulations will test the performance of all wind turbine's components through constant and variable wind conditions but most important through voltage fluctuations in the event of fault in the grid. For the last case, it will be examined whether the model fulfills the requirements of the E.ON Netz grid code, referring to the support of grid voltage with additional reactive current during a voltage dip.

Finally, the simulation results are discussed. Conclusions will be summarized about the wind turbine behavior through those conditions, proposing at the same time new methods for solving any occurring problems.

Keywords

Variable speed wind turbine, synchronous generator, maximum power point tracking, vector control, d-q frame, speed regulator, pitch controller, voltage regulator, inverter control, voltage dip, grid code requirement

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την καθηγήτρια Ε.Μ.Π. κυρία Μαρία Γ. Ιωαννίδου για την άψογη συνεργασία που είχαμε κατά την διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας. Επίσης, θα ήθελα να την ευχαριστήσω για την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπό μου καθώς και για την δυνατότητα που μου πρόσφερε να παρουσιάσω ένα τόσο ενδιαφέρον αντικείμενο.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Κεφάλαιο 1 : Εισαγωγή.....	11
1.1 Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.....	11
1.2 Αιολική ενέργεια.....	12
1.3 Τεχνολογίες ανεμογεννητριών.....	15
1.3.1 Γενικά.....	15
1.3.2 Διαμόρφωση ηλεκτρικού μέρους ανεμογεννητριών.....	16
1.3.3 Διαμόρφωση συστημάτων μετατροπών ισχύος για Α/Γ με σύγχρονη γεννήτρια.....	20
1.4 Κυριότερες τεχνικές απαιτήσεις των κωδίκων για Α/Π.....	22
1.4.1 Ανοχή σε βυθίσεις τάσης και απόκριση σε καταστάσεις σφαλμάτων δικτύου.....	21
1.4.2 Απαιτήσεις για παροχή άεργου ρεύματος κατά τη διάρκεια σφάλματος.....	24
1.4.3 Απαιτήσεις παραγωγής άεργου ισχύος.....	26
1.5 Δομή διπλωματικής εργασίας.....	27
1.6 Συνεισφορά διπλωματικής εργασίας.....	28
Κεφάλαιο 2 : Μοντελοποίηση συστήματος Α/Γ μεταβλητών στροφών.....	29
2.1 Γενική περιγραφή του συστήματος.....	30
2.2 Μοντελοποίηση Αεροδυναμικού μέρους της Α/Γ.....	33
2.3 Μοντελοποίηση συστήματος μετάδοσης κίνησης.....	36
2.4 Σύγχρονη πολύ-πολική γεννήτρια με τύλιγμα διέγερσης.....	38
2.5 DC-DC μετατροπέας ανύψωσης τάσης	40
2.5.1 Ανίχνευση σημείου μέγιστης ισχύος (MPPT)	43
2.5.1.a Μέθοδος βασισμένη σε δεδομένες χαρακτηριστικές καμπύλες	44
2.5.1.b Μέθοδος βασισμένη σε μικρές μεταβολές (P&Os)	47
2.5.1.c Μέθοδος βασισμένη σε ασαφή λογική (Fuzzy Logic)	50
2.5.2 Παράσταση μοντέλου ρυθμιστή στροφών και ρυθμιστή γωνίας βήματος έλικας.....	53
2.6 DC-AC μετατροπέας στην πλευρά του δικτύου-GSC.....	57
2.6.1 Μέθοδος ημιτονοειδούς διαμόρφωσης εύρους παλμών (SPWM)	58
2.6.2 Παροχή ισχύος από τριφασικό αντιστροφέα	61

Κεφάλαιο 3 : Σχεδιασμός του συστήματος ελέγχου του αντιστροφέα.....	67
3.1 Μετασχηματισμός μεγεθών στο D-Q σύστημα συντεταγμένων.....	67
3.2 Σχεδιασμός συστήματος ελέγχου του αντιστροφέα.....	73
3.3 Έλεγχος παραγόμενης αέργου ισχύος.....	77
Κεφάλαιο 4 : Λειτουργικά χαρακτηριστικά μοντέλου ανεμογεννήτριας.....	89
4.1 Απόκριση A/Γ σε σταθερή αεροδυναμική ροπή.....	89
4.2 Απόκριση A/Γ σε βηματική αλλαγή της ταχύτητας του ανέμου.....	94
4.3 Απόκριση A/Γ σε μεταβλητές συνθήκες ανέμου.....	97
4.4 Χαρακτηριστικές καμπύλες A/Γ.....	99
4.5 Παραγωγή αέργου ισχύος σύμφωνα με τον γερμανικό κώδικα.....	103
4.6 Απόκριση A/Γ σε βηματική αλλαγή της εντολής αέργου ισχύος.....	106
Κεφάλαιο 5 : Υποστήριξη τάσης του δικτύου κατά τη διάρκεια σφάλματος..	111
5.1 Απόκριση A/Γ με $\Sigma.I=1$ για βύθιση τάσης κατά 10% και 50%.....	112
5.2 Παροχή αέργου ρεύματος από A/Π κατά τη διάρκεια βύθισης τάσης.....	118
5.2.1 Βύθιση τάσης κατά 0,1pu σε ονομαστική ισχύ εξόδου, $P_{A/\Pi}=10MW$	119
5.2.2 Βύθιση τάσης κατά 0,5pu σε ονομαστική ισχύ εξόδου, $P_{A/\Pi}=10MW$	121
5.2.3 Εμφάνιση υπέρτασης κατά 0,2pu σε ονομαστική ισχύ, $P_{A/\Pi}=10MW$	124
5.2.4 Βύθιση τάσης κατά 0,5pu για διαφορετική προτεραιότητα ρεύματος.....	126
5.2.5 Βύθιση τάσης κατά 0,5pu για διαφορετική ισχύ βραχυκυκλώσεως στο ζυγό 4.....	128
Κεφάλαιο 6 : Συμπεράσματα - Προοπτικές.....	131
6.1 Συμπεράσματα.....	131
6.2 Προοπτικές.....	132
Βιβλιογραφία.....	135

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το τελευταίο διάστημα παρατηρείται μια έντονη στροφή ,κυρίως των ανεπτυγμένων χωρών, προς την έρευνα και ανάπτυξη καινούριων τεχνολογιών που αποσκοπούν στην αξιοποίηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Οι λόγοι που συνδράμουν προς αυτή την κατεύθυνση ποικίλουν, αλλά στην πλειοψηφία τους έχουν ως στόχο την απεξάρτηση των χωρών αυτών από τα ορυκτά καύσιμα ,το οποίο συνεπάγεται οικονομικά και πολιτικά οφέλη για όποιον το επιτύχει.

Αυτή η αλλαγή στον τρόπο παραγωγής της ενέργειας, έχει ήδη αρχίσει να επηρεάζει τα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας ,και αυτό λόγω του μεγάλου βαθμού διείσδυσης μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής στο δίκτυο μέσης ή χαμηλής τάσης.

1.1 Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας

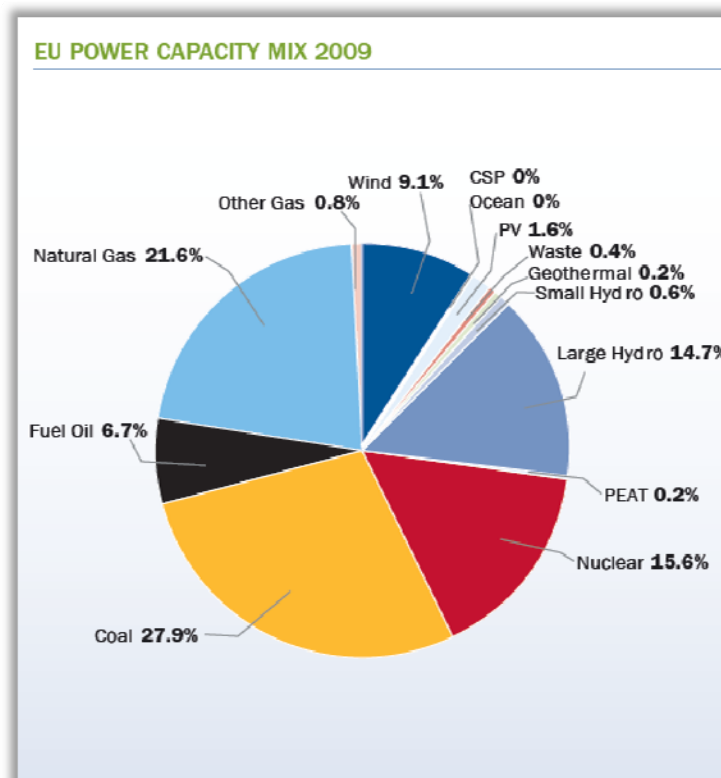
Ως Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) ορίζονται οι μορφές εκμεταλλεύσιμης ενέργειας που προέρχονται φυσικές πηγές όπως ο ήλιος ή η γεωθερμική ενέργεια, αλλά και από διάφορες φυσικές διαδικασίες , όπως ο άνεμος ή η κίνηση του νερού. Το βασικό χαρακτηριστικό τους είναι ότι τα αποθέματά τους είναι άφθονα και ανεξάντλητα. Για αυτό τον λόγο άλλωστε αποτελούν τις πρώτες μορφές ενέργειας που χρησιμοποίησε ο άνθρωπος, σχεδόν αποκλειστικά, μέχρι τις αρχές του 20ου αιώνα, οπότε και στράφηκε στην εντατική χρήση του άνθρακα και των υδρογονανθράκων. Το ενδιαφέρον για την ευρύτερη αξιοποίηση των ΑΠΕ, καθώς και για την ανάπτυξη αξιόπιστων και οικονομικά αποδοτικών τεχνολογιών που δεσμεύουν το δυναμικό τους παρουσιάστηκε αρχικά μετά την πρώτη πετρελαϊκή κρίση του 1979 και παγιώθηκε την τελευταία δεκαετία, μετά τη συνειδητοποίηση των παγκόσμιων περιβαλλοντικών προβλημάτων. Τα πλεονεκτήματα των ΑΠΕ και κυρίως η ουσιαστική συμβολή τους στην ενεργειακή απεξάρτηση της ανθρωπότητας από τους εξαντλήσιμους ενεργειακούς πόρους, επιτάσσουν αυτήν τη στροφή.

Για πολλές χώρες, οι ΑΠΕ αποτελούν μία σημαντική εγχώρια πηγή ενέργειας, με μεγάλες δυνατότητες ανάπτυξης σε τοπικό και εθνικό επίπεδο. Συνεισφέρουν σημαντικά στο ενεργειακό τους ισοζύγιο, συμβάλλοντας στη μείωση της εξάρτησης από το ακριβό και εισαγόμενο πετρέλαιο και στην ενίσχυση της ασφάλειας του ενεργειακού τους εφοδιασμού. Παράλληλα, συντελούν και στην προστασία του περιβάλλοντος, καθώς έχει πλέον διαπιστωθεί ότι ο ενεργειακός τομέας είναι ο πρωταρχικός υπεύθυνος για τη ρύπανση του περιβάλλοντος. Πραγματικά, σχεδόν το 95% της ατμοσφαιρικής ρύπανσης οφείλεται στην παραγωγή, το μετασχηματισμό και τη χρήση των συμβατικών καυσίμων (άνθρακας και πετρέλαιο). Φαίνεται συνεπώς ότι ο μόνος δυνατός τρόπος για να μπορέσει η Ευρωπαϊκή Ένωση να ανταποκριθεί στο φιλόδοξο στόχο που έχει θέσει, για σημαντικό περιορισμό των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα (CO₂), είναι να επιταχύνει την ανάπτυξη των ΑΠΕ.

Οι μορφές των ΑΠΕ στο ισοζύγιο ηλεκτρικής ενέργειας είναι :

- **Αιολική ενέργεια** : η κινητική ενέργεια που παράγεται από την ροή του ανέμου μετατρέπεται σε μηχανική ενέργεια και εν συνεχεία σε ηλεκτρική ενέργεια.
- **Ηλιακή ενέργεια** : αξιοποιείται μέσω τεχνολογιών που εκμεταλλεύονται το φάσμα ακτινοβολιών προερχόμενο από τον ήλιο. Οι τεχνολογίες χρησιμοποιούνται είναι :
 - *Ενεργητικά ηλιακά συστήματα* : μετατρέπουν την θερμική ενέργεια προερχόμενη από τον ήλιο σε μηχανική και εν συνεχεία σε ηλεκτρική.
 - *Φωτοβολταϊκά ηλιακά συστήματα* : μετατρέπουν την ηλιακή ενέργεια άμεσα σε ηλεκτρική.
- **Υδραυλική ενέργεια** : αξιοποιεί τις υδατοπτώσεις, με στόχο την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας .
- **Βιομάζα** : είναι αποτέλεσμα της φωτοσυνθετικής δραστηριότητας, που μετασχηματίζει την ηλιακή ενέργεια με μία σειρά διεργασιών των φυτικών οργανισμών χερσαίας ή υδρόβιας προέλευσης.
- **Γεωθερμική ενέργεια** : η θερμική ενέργεια που προέρχεται από το εσωτερικό της γης και μετατρέπεται σε ηλεκτρική αφού προηγουμένως έχει μετατραπεί σε μηχανική.
- **Αστικά Απορρίμματα:** η αξιοποίηση του ενεργειακού περιεχομένου τους είτε μέσω καύσης τους είτε μέσω της καύσης του μεθανίου που παράγεται κατά την φυσική αποσύνθεσή τους.
- **Ενέργεια από θαλάσσια κύματα:** εκμεταλλεύεται την δυναμική ενέργεια των θαλάσσιων κυμάτων και την μετατρέπει σε μηχανική η οποία μετασχηματίζεται σε ηλεκτρική.

Στο σχήμα 1.1 φαίνεται η συνεισφορά όλων των ενεργειακών μορφών στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στις χώρες της Ε.Ε. μέχρι τα τέλη του 2009 [1].



Σχήμα 1.1 : Συνεισφορά όλων των πηγών ενέργειας στην ηλεκτροπαραγωγή το 2009[1].

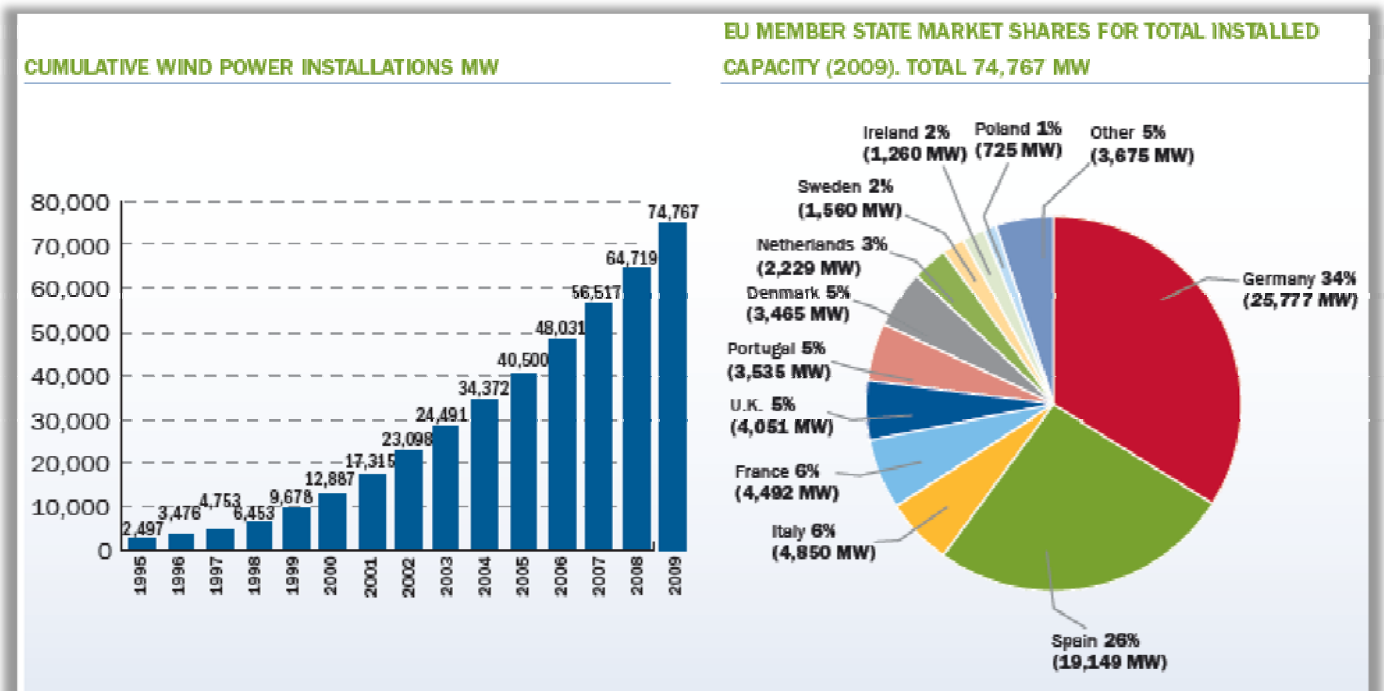
Όπως αναφέρθηκε, σε εθνικό επίπεδο οι ΑΠΕ συνεισφέρουν στην ενίσχυση της ενεργειακής ανεξαρτητοποίησης και της ασφάλειας του ενεργειακού εφοδιασμού. Σε τοπικό και περιφερειακό επίπεδο, λόγω της ευελιξίας τους, οδηγούν στην αποκέντρωση του ενεργειακού συστήματος, ανακουφίζοντας τα συστήματα υποδομών, μειώνοντας τις απώλειες μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας σε μεγάλες αποστάσεις και καταργώντας την ανάγκη για τεράστιες μονάδες παραγωγής. Επίσης η εγκατάσταση και λειτουργία συστημάτων αξιοποίησης ΑΠΕ δημιουργεί νέες θέσεις εργασίας και αποφέρει σημαντικά κέρδη στις τοπικές κοινότητες. Έτσι ενισχύονται οικονομικά και κοινωνικά υποβαθμισμένες περιοχές και προσελκύουν νέες επενδύσεις που μπορούν να συμβάλλουν περεταίρω στη τοπική ανάπτυξη. Τέλος η συνεργασία τους με συμβατικούς σταθμούς παραγωγής συμβάλει στην εξοικονόμηση των ορυκτών πόρων, ώστε αυτοί να μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε περιπτώσεις ανάγκης.

Παρόλα αυτά οι ΑΠΕ παρουσιάζουν χαμηλό συντελεστή απόδοσης, το οποίο συνεπάγεται την απαίτηση για μεγάλο σύνολο εγκαταστάσεων και άρα ένα μεγάλο αρχικό κόστος εφαρμογής σε μεγάλη επιφάνεια γης. Εξαιτίας του γεγονότος αυτού χρησιμοποιούνται ως συμπληρωματικές πηγές ενέργειας. Σε αυτό συμβάλει επίσης και η μεταβλητότητά τους όσον αφορά παραγόμενη ισχύ, όπως για παράδειγμα στα αιολικά πάρκα. Έτσι προς το παρόν οι μονάδες αυτές δεν μπορούν να διεισδύσουν σε μεγάλα ποσοστά στο δίκτυο διανομής. Τέλος η αναπτυσσόμενη τεχνολογία για την αξιοποίηση των ΑΠΕ είναι εξαιρετικά ακριβή σε σχέση με τις συμβατικές πηγές, κάτι που την καθιστά πρόνομο μόνο των ανεπτυγμένων χωρών και απαγορευμένο καρπό για χώρες υπανάπτυκτες.

1.2 Αιολική ενέργεια

Η αιολική ενέργεια αποτελεί σήμερα την ευρύτερα χρησιμοποιούμενη μορφή ΑΠΕ. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας της ήδη υπάρχουσας τεχνολογίας στον τομέα των ηλεκτρικών μηχανών και την ραγδαία ανάπτυξη των ηλεκτρονικών ισχύος που επέτρεψαν τη κατασκευή και λειτουργία μεγάλης ισχύος ανεμογεννητριών. Επίσης, η επανάσταση που επέφερε ο τομέας της πληροφορικής και υπολογιστών, οδήγησε στην βελτιστοποίηση των αεροδυναμικών μοντέλων ανεμογεννητριών και στον αποτελεσματικότερο έλεγχό τους, ώστε να γίνεται η μέγιστη εξαγωγή ισχύος από τον άνεμο και η τροφοδότησή της προς το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Επομένως, η εξαιρετική απόδοση των ανεμογεννητριών νέας τεχνολογίας σε σχέση με εγκαταστάσεις αξιοποίησης άλλων μορφών ΑΠΕ, τις καθιστά ιδανική επιλογή για επένδυση κεφαλαίων στο χώρο της πράσινης ενέργειας.

Ιδιαίτερα στην Ευρώπη, ο ετήσιος αριθμός καινούριων εγκαταστάσεων αξιοποίησης της αιολικής ενέργειας, αυξάνεται σταθερά τα τελευταία 15 χρόνια, από 472MW το 1994 στα 10.163MW το 2009. Σήμερα η συνολικά εγκατεστημένη ισχύς αιολικών πάρκων στην Ε.Ε. ανέρχεται στα 74.767MW, με το μεγαλύτερο ποσοστό 34% (25.777MW) να κατέχει η Γερμανία και να ακολουθεί η Ισπανία με 26% (19.149MW). Τα παραπάνω γίνονται περισσότερο κατανοητά στα ακόλουθα διαγράμματα (σχήμα 1.2) σύμφωνα με στατιστικές της ευρωπαϊκής επιτροπής αιολικής ενέργειας [1].



Σχήμα 1.2: Συνολική εγκατεστημένη αιολική ισχύς στην ΕΕ το 2009 [1].

Στην Ελλάδα, μια χώρα με τεράστιο αιολικό δυναμικό, οι κινήσεις όσον αφορά την αξιοποίησή του είναι λιγοστές και όσες υπάρχουν γίνονται με αργά βήματα λόγω των γραφειοκρατικών κωλυμάτων. Υπολογίζεται, σύμφωνα με συντηρητικές εκτιμήσεις, ότι η εκμετάλλευση του αιολικού δυναμικού της χώρας μπορεί να καλύψει έως και 15% των αναγκών της χώρας σε ηλεκτρική ενέργεια, συνεισφέροντας έτσι ουσιαστικά στο ενεργειακό ισοζύγιο της χώρας.

Μετά την υπογραφή του πρωτοκόλλου του Κιότο το 1997, η Ελλάδα, ως μέλος της Ε.Ε. ακολουθεί την ευρωπαϊκή πολιτική σχετικά με την μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Η πολιτική αυτή θέτει ως φιλόδοξο στόχο την επίτευξη ποσοστού 20% διείσδυσης των ΑΠΕ στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Για το λόγο αυτό δίνεται πληθώρα κινήτρων στους ανεξάρτητους παραγωγούς όπως επενδυτικές επιχορηγήσεις, εγγυημένη σύνδεση στο δίκτυο και μακροπρόθεσμα συμβόλαια. Έτσι στα τέλη του 2009, η Ελλάδα διαθέτει 1.087MW εγκατεστημένης αιολικής ισχύος, με 100MW περίπου να προστίθενται ετησίως [1], σε σχέση με τα 257MW συνολικής εγκατεστημένης αιολικής ισχύος το 2000. Η πρόοδος που έχει γίνει, για τα δεδομένα της χώρας μας, είναι αξιόλογη αλλά όχι αρκετή σύμφωνα με τους ρυθμούς άλλων χωρών της Ευρώπης. Κύρια εμπόδια αποτελούν αφενός οι χρονοβόρες διαδικασίες έκδοσης αδειών εγκατάστασης (που οφείλονται κυρίως στην έλλειψη χωροταξικού σχεδιασμού) και αφετέρου νομικά ζητήματα και αντιδράσεις τοπικών κοινωνιών. Από τεχνικής πλευράς, οι περιορισμοί διείσδυσης αιολικής ισχύος δημιουργούνται από τα όρια μεταφερόμενης ισχύος στο ηπειρωτικό δίκτυο και από τα όρια διείσδυσης στα νησιά. Ενδεχόμενη ηλεκτρική σύνδεση του νησιωτικού συστήματος με το ηπειρωτικό μπορεί να αυξήσει σημαντικά την αιολική διείσδυση εφόσον το αιολικό δυναμικό εκεί είναι μεγάλο.

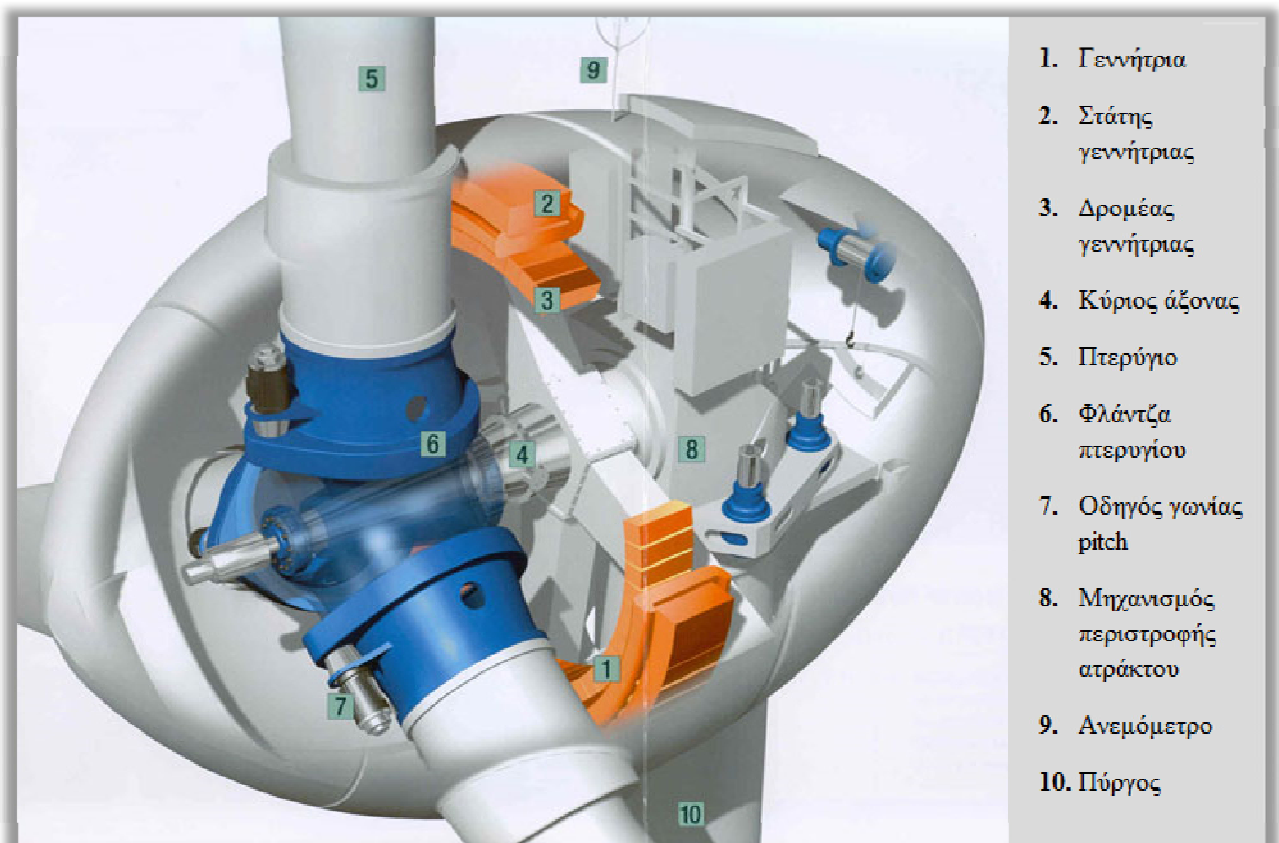
1.3 Τεχνολογίες ανεμογεννητριών

1.3.1 Γενικά

Η λειτουργία της ανεμογεννήτριας βασίζεται σε τρία επιμέρους τμήματα με τα οποία συντελείται η μετατροπή της ενέργειας του ανέμου σε αξιοποιήσιμη μορφή. Τα τμήματα αυτά είναι τα εξής [2]:

- ❖ **Το μηχανικό σύστημα :** περιλαμβάνει κυρίως τον ανεμοκινητήρα (A/K), το οποίο είναι υπεύθυνο για την μετατροπή της κινητικής ενέργειας του ανέμου σε μηχανική. Συνήθως μεταξύ του A/K και της γεννήτριας περιλαμβάνεται κιβώτιο ταχυτήτων για αύξηση των στροφών καθώς και συνδέσμους προς τον A/K ή και τη γεννήτρια.
- ❖ **Το ηλεκτρικό σύστημα :** περιλαμβάνει την γεννήτρια, που μετατρέπει την μηχανική ενέργεια στον άξονα σε ηλεκτρική και τον μετατροπέα ισχύος, ο οποίος παρεμβάλλεται μεταξύ της γεννήτριας και του δικτύου για έλεγχο της ροής ισχύος.
- ❖ **Το σύστημα ελέγχου:** το οποίο προσαρμόζει τη λειτουργία της A/Γ στις εκάστοτε συνθήκες του ανέμου και στις διακυμάνσεις των παραμέτρων του ηλεκτρικού δικτύου στο οποίο συνδέεται, επιτηρεί την ασφάλεια και μεγιστοποιεί την απόδοσή της. Η πολυπλοκότητα των συστημάτων ελέγχου παρουσιάζει συνεχή αύξηση και αποτελεί βασικό κριτήριο εξέλιξης των A/Γ. Πιο συγκεκριμένα οι βασικές λειτουργίες ελέγχου είναι οι ακόλουθες :
 - Οι λειτουργίες που αφορούν την εκκίνηση ή το σταμάτημα της A/Γ όταν η ταχύτητα ανέμου σταθεροποιηθεί άνω της ταχύτητας ένταξης V_{in} ή κάτω αυτής αντίστοιχα.
 - Οι λειτουργίες ελέγχου για τη μη υπέρβαση της ονομαστικής ισχύος της A/Γ, όταν η ταχύτητα του ανέμου υπερβεί ορισμένη τιμή. Ο έλεγχος αυτός γίνεται κυρίως στο αεροδυναμικό κομμάτι είτε με έλεγχο του βήματος της έλικας (pitch control) είτε με αεροδυναμικό έλεγχο (Stall control).
 - Οι λειτουργίες ελέγχου που αποσκοπούν στον προσανατολισμό της A/Γ κάθετα προς τη διεύθυνση του ανέμου.
 - Οι λειτουργίες και τα αντίστοιχα συστήματα ασφαλείας με τα οποία επιτυγχάνεται το σταμάτημα της περιστροφής της A/Γ και η στροφή των πτερυγίων της έλικας, όταν η ταχύτητα ανέμου φτάσει το όριο αντοχής της σε μηχανική καταπόνηση (ταχύτητα αποσύνδεσης V_{out}).
 - Λειτουργίες ελέγχου στροφών της ανεμογεννήτριας όταν αυτή είναι μεταβλητών στροφών και εφαρμόζεται το MPPT (Maximum Power Point Tracking).
 - Λειτουργίες που αφορούν τη διασύνδεση της A/Γ με το δίκτυο, όπου σε περιπτώσεις αιολικών πάρκων υπάρχει ένα κέντρο εποπτείας και ελέγχου (supervisory control center) το οποίο διασφαλίζει την ποιότητα και ποσότητα ισχύος που παρέχεται από το αιολικό πάρκο και είναι υπεύθυνο για την αποσύνδεσή του από το δίκτυο σε περιπτώσεις σφαλμάτων τάσης (π.χ. μονοφασικά ή τριφασικά βραχυκυκλώματα).

Η κατασκευή μιας ανεμογεννήτριας απαιτεί τις γνώσεις και τη συνεργασία πολλών τεχνολογικών πεδίων. Από τον σχεδιασμό και τη αεροδυναμική βελτιστοποίηση των πτερυγίων μέχρι και την κατασκευή των συστημάτων αυτομάτου ελέγχου της Α/Γ ,οδηγούν εύκολα στο συμπέρασμα ότι η πολυπλοκότητα μιας Α/Γ προσεγγίζει αυτής ενός σύγχρονου αεροπλάνου. Για αυτό τον λόγο άλλωστε, η τεχνογνωσία αυτή είναι αρκετά ακριβή και κατέχεται από χώρες τεχνολογικά προηγμένες. Στο ακόλουθο σχήμα φαίνονται σε γενικές γραμμές τα επιμέρους συστήματα μιας Α/Γ :



Σχήμα 1.3 : Εσωτερικό ανεμογεννήτριας Enercon E-40 600kW.

1.3.2 Διαμόρφωση ηλεκτρικού μέρους ανεμογεννητριών

Ανάλογα με τη διαμόρφωση του ηλεκτρικού μέρους των ανεμογεννητριών αυτές διακρίνονται στους ακόλουθους συνηθέστερους τύπους[3][4]:

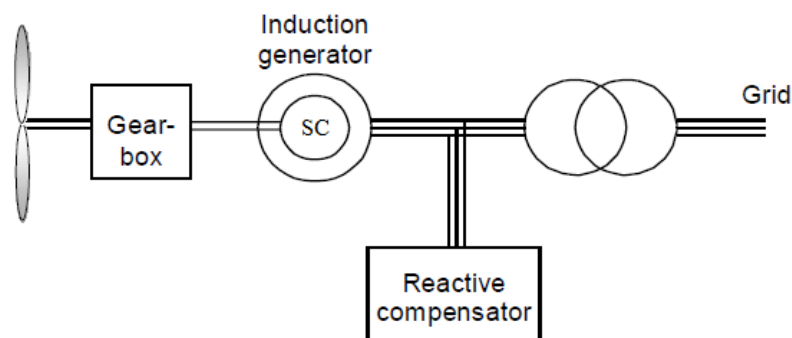
1. Σταθερών στροφών, με ασύγχρονη γεννήτρια (τύπου κλωβού) , απευθείας συνδεδεμένη στο δίκτυο, σχήμα 1.4. Ενίοτε γίνεται χρήση διπλής γεννήτριας για υψηλότερο συντελεστή ισχύος στις χαμηλές ταχύτητες ανέμου.
2. Σταθερών στροφών , με ασύγχρονη γεννήτρια τυλιγμένου δρομέα μεταβλητής αντίστασης, απευθείας συνδεδεμένης στο δίκτυο, σχήμα 1.5.

3. Μεταβλητών στροφών, διπλής τροφοδότησης με ασύγχρονη γεννήτρια (τυλιγμένου δρομέα), με σύστημα μετατροπών ισχύος AC/DC/AC μερικής ισχύος συνδεδεμένο στον δρομέα, σχήμα 1.6.
4. Μεταβλητών στροφών , με σύγχρονη πολυπολική γεννήτρια με τύλιγμα διεγέρσεως ή μόνιμο μαγνήτη, σχήμα 1.7.

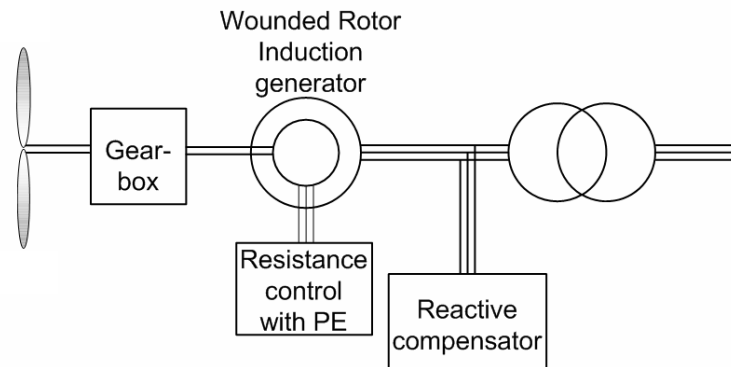
Ανεμογεννήτριες σταθερών στροφών

Μια ανεμογεννήτρια σταθερών στροφών, έχει το πλεονέκτημα ότι είναι απλή στην κατασκευή της, ελαφριά και αρκετά πιο φθηνή. Το μειωμένο κόστος οφείλεται αφενός στην έλλειψη μεγάλων μετατροπών ισχύος και αφετέρου στην ασύγχρονη γεννήτρια τύπου κλωβού, που είναι ευρέως διαδεδομένη. Το κόστος συντήρησης είναι και αυτό μειωμένο, ενώ η απουσία των μετατροπών ισχύος δίνει αξιοπιστία στο σύστημα. Οι ανεμογεννήτριες αυτού του τύπου όμως, παρουσιάζουν αρκετά μειονεκτήματα κυρίως γιατί πρέπει να λειτουργούν υπό σταθερές στροφές. Η απαίτηση αυτή καταπονεί μηχανικά το σύστημα, καθώς οι διαταραχές στην ροή του ανέμου οδηγούν σε διαταραχές της ροπής που εφαρμόζεται στον άξονα της γεννήτριας. Σε ασθενή δίκτυα οι διαταραχές αυτές συνεπάγονται διακυμάνσεις στην ισχύ εξόδου που μεταφράζονται άμεσα σε διαταραχές τάσης flicker. Επίσης , οι Α/Γ σταθερών στροφών αδυνατούν να ρυθμίσουν τον συντελεστή ισχύος καθώς καταναλώνουν άεργο ισχύ η οποία αντισταθμίζεται μερικώς με την εγκατάσταση πυκνωτών. Λόγω αυτών των ελαττωμάτων και λόγω των αυστηρών κριτηρίων σύνδεσης που επιβάλλουν σήμερα οι διαχειριστές του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας, η χρήση τους έχει εγκαταλειφθεί σε σημαντικό βαθμό.

Στη περίπτωση που χρησιμοποιείται γεννήτρια τυλιγμένου δρομέα, υπάρχει η δυνατότητα αύξησης ή μείωσης της ηλεκτρικής ροπής με έλεγχο του ρεύματος του πεδίου του δρομέα. Αυτό επιτυγχάνεται με τη προσθήκη εξωτερικών αντιστάσεων αλλά και με την προσθήκη ηλεκτρονικών ισχύος που μέσω PWM μπορούν να κάνουν δυναμικό έλεγχο ολίσθησης. Σαν αποτέλεσμα έχουμε βελτίωση της ποιότητας ισχύος και περιορισμό των μηχανικών καταπονήσεων, αλλά αυξημένο κόστος συντήρησης λόγω ύπαρξης των δακτυλίων. Ορισμένες εταιρίες , μάλιστα, έχουν καταφέρει να ενσωματώσουν τις αντιστάσεις και τα διακοπτικά στοιχεία εντός του δρομέα ,και έτσι η αποστολή των σημάτων για τους παλμούς των IGBT να γίνεται ασύρματα, εξαλείφοντας την ανάγκη για δακτυλίους.



Σχήμα 1.4 : Α/Γ σταθερών στροφών με ασύγχρονη γεννήτρια τύπου κλωβού.



Σχήμα 1.5 : A/Γ σταθερών στροφών με ασύγχρονη γεννήτρια τυλιγμένου δρομέα.

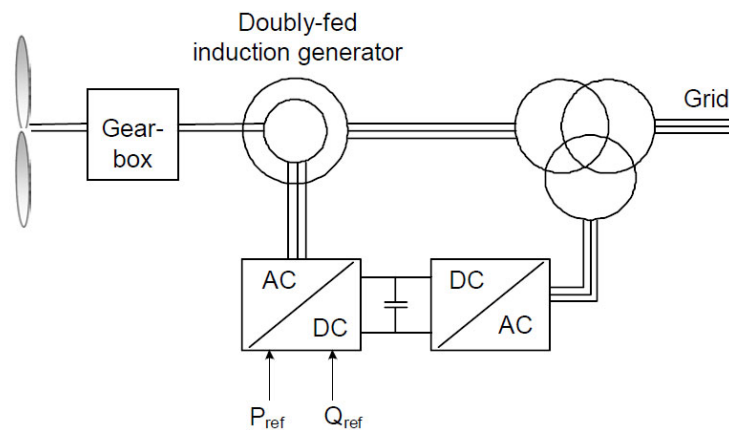
Ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών

Οι ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών είναι αυτές που προτιμούνται περισσότερο τον τελευταίο καιρό. Παρουσιάζουν αυξημένη ενεργειακή απόδοση, καθώς προσαρμόζοντας την ταχύτητα περιστροφής ανάλογα με αυτή του ανέμου γίνεται μέγιστη αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας. Η προσαρμογή αυτή μειώνει τις μηχανικές καταπονήσεις στα πτερύγια, το σύστημα μετάδοσης κίνησης και στο δομικό σύστημα. Επιπλέον δίνεται η δυνατότητα απαλλαγής του κιβωτίου ταχυτήτων, το οποίο απαιτεί συχνές συντηρήσεις. Η ποιότητα ισχύος είναι αρκετά βελτιωμένη καθώς δεν υπάρχουν διακυμάνσεις στην έξοδο και επίσης δίνεται η δυνατότητα ρύθμισης της τάσης (σε ασθενή δίκτυα) και συχνότητας (σε αυτόνομα συστήματα). Το τελευταίο πραγματοποιείται ελέγχοντας κατάλληλα τον μετατροπέα, ώστε να εγγείι άεργο ισχύ στο δίκτυο ανάλογα με τα επίπεδα τάσης του. Αυτή η λειτουργία είναι συναφής με εκείνη των συμβατικών σταθμών και εναρμονίζεται πλήρως με τα πρότυπα σχετικά με την ποιότητα ισχύος. Τέλος, το βασικό μειονέκτημά τους είναι πως, για να επιτευχθούν όλα τα παραπάνω, απαιτούνται ηλεκτρονικά ισχύος τα οποία είναι ακριβά και ευαίσθητα σε τυχόν σφάλματα.

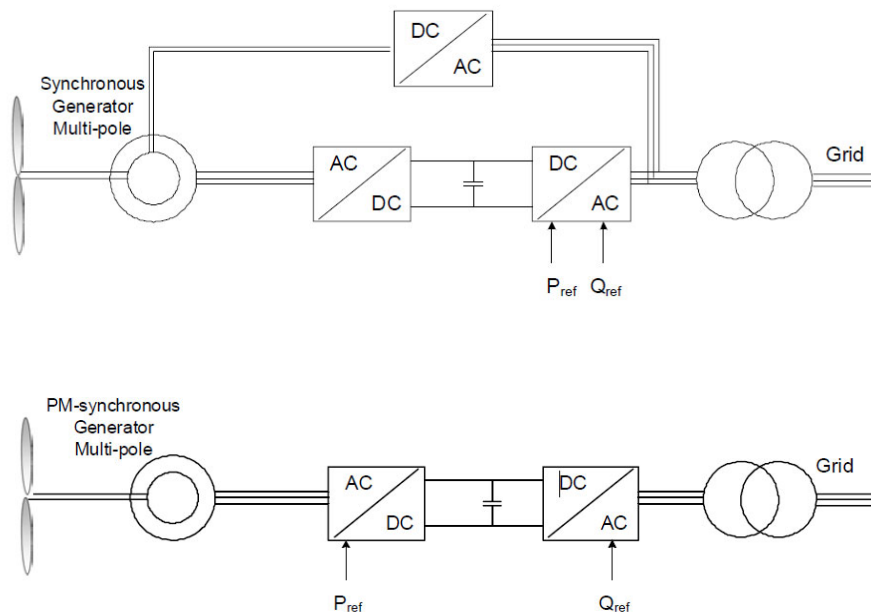
Μια από τις συνήθεις τοπολογίες A/Γ μεταβλητών στροφών είναι αυτή της ασύγχρονης γεννήτριας τυλιγμένου δρομέα διπλής τροφοδότησης, δηλαδή με τον μετατροπέα συνδεδεμένο στον δρομέα, σχήμα 1.6. Στην περίπτωση αυτή ο έλεγχος της γεννήτριας πραγματοποιείται μέσω ελέγχου του μέτρου και της συχνότητας των ρευμάτων που κυκλοφορούν στον δρομέα. Έτσι απαιτείται μετατροπέας μικρής σχετικά ισχύος που είναι πιο φθηνός, καθώς μόνο ένα μικρό μέρος της παραγόμενης ισχύος (περίπου το 1/3) μετάγεται μέσω αυτού, ενώ το υπόλοιπο μετάγεται κατευθείαν από τον στάτη της γεννήτριας στο δίκτυο. Το μειονέκτημα της διπλής τροφοδότησης είναι ότι η γεννήτρια είναι εκτεθειμένη στη δυναμική συμπεριφορά του δικτύου και με τη σειρά του αυτό είναι εκτεθειμένο σε διακυμάνσεις των ρευμάτων του στάτη με αποτέλεσμα μεγάλης ισχύος γεννήτριες να επηρεάζουν την συχνότητα σε ασθενή δίκτυα.

Το πρόβλημα της παραπάνω τοπολογίας εξαλείφεται όταν μεταξύ του δικτύου και του στάτη της γεννήτριας παρεμβάλλεται μετατροπέας ισχύος, όπως συμβαίνει στη σύγχρονη γεννήτρια

τυλιγμένου δρομέα ή μονίμων μαγνητών, σχήμα 1.7. Σε αυτή την περίπτωση οποιαδήποτε απότομη μεταβολή είτε από την πλευρά της γεννήτριας(π.χ. μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου) είτε από την πλευρά του δικτύου(π.χ. βύθιση τάσης) δεν επηρεάζει σημαντικά το άλλο κομμάτι. Αυτό συμβαίνει γιατί υπάρχει απομόνωση της τάσης και της συχνότητας του δικτύου από τα μεγέθη του στάτη. Όμως, η σύνδεση αυτή απαιτεί μεγάλο μετατροπέα από τον οποίο θα περάσει το 100% της παραγόμενης ισχύος, και επομένως εγείρονται προβλήματα κόστους και αξιοπιστίας των ηλεκτρονικών ισχύος. Επίσης η βαριά και πολύπλοκη γεννήτρια είναι ένα ακόμα μειονέκτημα αυτού του τύπου ανεμογεννητριών, το οποίο αντισταθμίζεται μερικώς με την απουσία κιβωτίου ταχυτήτων. Η Α/Γ μεταβλητών στροφών με σύγχρονη γεννήτρια μπορεί επίσης να μετάγει περισσότερη άεργο ισχύ και πιο αποτελεσματικά σε σχέση με μια ανεμογεννήτρια διπλής τροφοδότησης, πράγμα που γίνεται ολοένα σημαντικότερο σύμφωνα με τις απαιτήσεις κωδίκων για σύνδεση αιολικών πάρκων μεγάλης ισχύος.



Σχήμα 1.6 : Α/Γ μεταβλητών στροφών διπλής τροφοδότησης με ασύγχρονη γεννήτρια τυλιγμένου δρομέα.

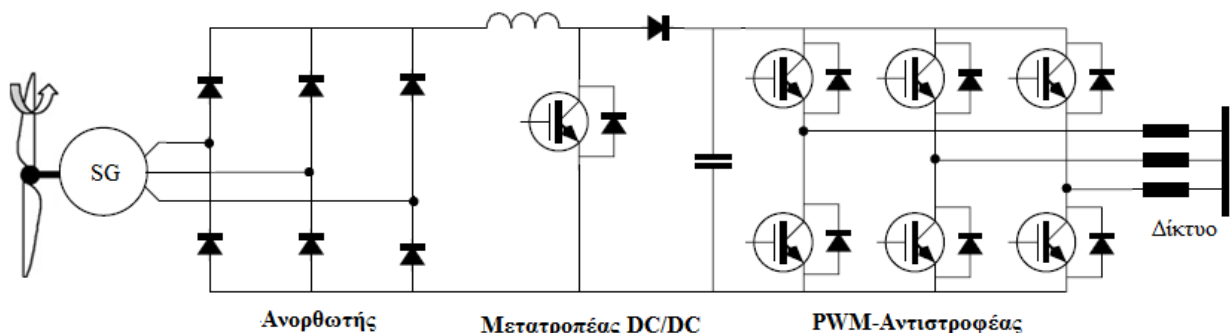


Σχήμα 1.7 : Α/Γ μεταβλητών στροφών με σύγχρονη γεννήτρια με τύλιγμα διεγέρσεως ή μονίμων μαγνητών.

1.3.3 Διαμόρφωση συστημάτων μετατροπών ισχύος για Α/Γ με σύγχρονη γεννήτρια

Οι μετατροπείς ισχύος που χρησιμοποιούνται για τη σύνδεση των ανεμογεννητριών στο δίκτυο είναι διαφόρων τύπων. Για Α/Γ με σύγχρονη γεννήτρια η διαμόρφωση γίνεται συνήθως με δυο τρόπους ανάλογα με τη διαμόρφωση του δρομέα[4][23]:

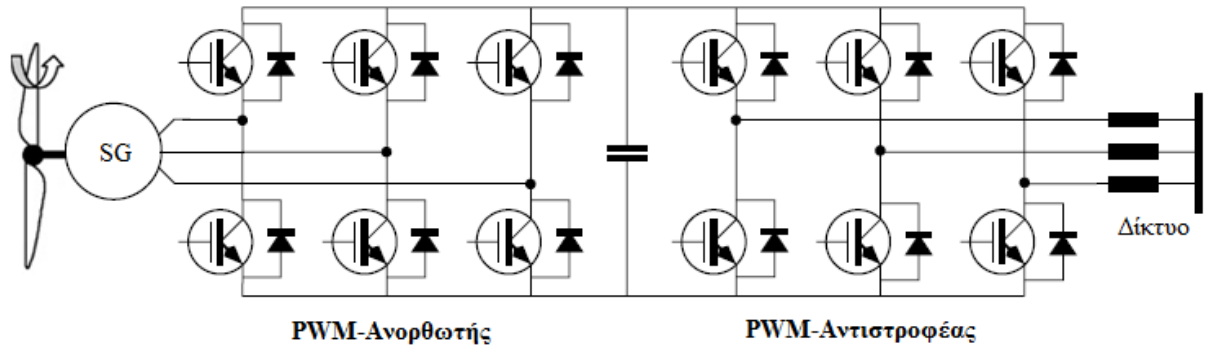
- **Τύλιγμα πεδίου στον δρομέα.** Το τύλιγμα αυτό τροφοδοτείται με συνεχές ρεύμα από το σύστημα διέγερσης. Ο δρομέας με την κίνησή του προκαλεί στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο το οποίο επάγει τριφασική εναλλασσόμενη τάση στον στάτη. Το πλεονέκτημα αυτής της κατηγορίας είναι ότι η τάση στα άκρα της γεννήτριας ελέγχεται από το σύστημα διέγερσης και συνεπώς μπορεί στην πλευρά της να συνδεθεί ένας απλός τριφασικός ανορθωτής διόδων. Μετά τον ανορθωτή συνδέεται ένας DC/DC μετατροπέας ανύψωσης τάσης (Boost DC-DC Converter or Chopper). Ο μετατροπέας αυτός ρυθμίζει το dc-ρεύμα στην έξοδο του ανορθωτή για έλεγχο της ηλεκτρικής ροπής στη γεννήτρια, και με αυτόν τον τρόπο οδηγεί την Α/Γ πάνω στην καμπύλη βέλτιστης αεροδυναμικής απόδοσης (MPPT-Maximum Power Point Tracking). Ο DC/AC μετατροπέας που βρίσκεται στην πλευρά του δικτύου (GSC-Grid side Converter) είναι υπεύθυνος για την μεταγωγή της παραγόμενης ενεργού ισχύος προς αυτό, διατηρώντας την dc τάση σταθερή. Η μορφή του παραπάνω συστήματος φαίνεται στο σχήμα 1.8.



Σχήμα 1.8 : Μετατροπέας AC/DC/AC με απλή ανόρθωση, μετατροπέα ανύψωσης τάσης και αντιστροφέα τύπου πηγής τάσης.

- **Μόνιμοι μαγνήτες στον δρομέα.** Η γεννήτρια διεγείρεται από τους μαγνήτες, η περιστροφή των οποίων επάγει την τάση στα άκρα του στάτη. Βασικό πλεονέκτημα είναι η απουσία απωλειών στον δρομέα, εξαιτίας της μη ύπαρξης των δακτυλίων και του ηλεκτρικού κυκλώματος που θα ήταν υπεύθυνο για τη διέγερση. Το μειονέκτημα αυτής της κατηγορίας είναι ότι δεν υπάρχει έλεγχος της διέγερσης, με αποτέλεσμα την αδυναμία διατήρησης σταθερής τάσης στον στάτη. Επίσης με αυτού του είδους τη γεννήτρια παρουσιάζονται προβλήματα κατά τον συγχρονισμό με το δίκτυο και η συμπεριφορά του σε περίπτωση σφάλματος είναι πιο δύσκαμπτη. Στη περίπτωση μόνιμων μαγνητών, ο μετατροπέας στη μεριά της γεννήτριας (MSC-Machine Side Converter) πρέπει να είναι τύπου πηγής τάσης. Η διάταξη αυτή είναι γνωστή και ως

“back-to-back converter”, όπως φαίνεται στο σχήμα 1.9. Η ροή ισχύος σε αυτή τη διαμόρφωση μπορεί να είναι αμφίπλευρη. Με τον ίδιο τρόπο που αναφέρθηκε προηγουμένως για τον GSC, για να επιτευχθεί βέλτιστος έλεγχος της ισχύος εξόδου πρέπει ο inverter να διατηρεί την dc-τάση του πυκνωτή σταθερή.



Σχήμα 1.9 : Μετατροπέας AC/DC/AC με σύνδεση back-to-back αντιστροφέων.

Η συναλλαγή ενεργού και άεργου ισχύος με το δίκτυο καθώς και η ρύθμιση της συχνότητας της παραγόμενης τάσης στη συχνότητα του δικτύου είναι ευθύνη του συστήματος ελέγχου του αντιστροφέα(GSC). Η dc-σύνδεση μεταξύ γεννήτριας και GSC, προσφέρει στη γεννήτρια τη δυνατότητα να λειτουργεί σε συχνότητα διαφορετική από αυτή του δικτύου ώστε να επιτυγχάνει MPPT. Επίσης η πλήρης απόζευξη μεταξύ γεννήτριας και δικτύου, καθιστά πιο εύκολο τον έλεγχο κατά τη διάρκεια βυθίσεων τάσης του δικτύου, καθώς τα μεταβατικά της γεννήτριας είναι μειωμένα[4].

1.4 Κυριότερες τεχνικές απαιτήσεις των κωδίκων για Α/Π

Η αυξανόμενη παραγωγή από Α/Π έχει οδηγήσει μερικές χώρες στην υψηλή διείσδυση της αιολικής ενέργειας στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτή η υψηλή διείσδυση έχει παρατηρηθεί τα τελευταία χρόνια σε χώρες όπως η Γερμανία, η Δανία και η Ισπανία (χώρες με υψηλό αιολικό δυναμικό και μεγάλη ευαισθησία στην εκμετάλλευση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας). Όσο οι διεισδύσεις αιολικής ισχύος στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας ήταν ακόμη χαμηλές, τα Α/Π αντιμετωπιζόνταν σαν αρνητικά φορτία, χωρίς ουσιαστική επίδραση στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Στη σημερινή πραγματικότητα όμως δίνεται περισσότερη προσοχή στην αλληλεπίδραση των Α/Π με τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτό οφείλεται στις διαφορές που παρουσιάζουν τα Α/Π σε σχέση με τους συμβατικούς σταθμούς παραγωγής.

Κύρια διαφορά των Α/Π από τους συμβατικούς σταθμούς είναι ότι η πηγή ενέργειας, ο άνεμος, είναι μεταβαλλόμενη και δύσκολα προβλέψιμη. Έτσι η ηλεκτρική ισχύς που παράγεται είναι συνάρτηση της τυχαίας ταχύτητας του ανέμου. Αντίθετα οι συμβατικοί σταθμοί μπορούν με ρυθμιστές στροφών να ελέγχουν τη ροή του καυσίμου και άρα και την παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος. Η μεταβλητότητα του ανέμου και η δυσκολία πρόβλεψής του επηρεάζουν τη δυνατότητα ενσωμάτωσής τους στα σημερινά συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, από άποψη αξιοπιστίας.

Επίσης, μια άλλη διαφορά των αιολικών πάρκων από τους συμβατικούς σταθμούς είναι η αντιμετώπιση σφαλμάτων που εμφανίζονται συχνά στο δίκτυο(π.χ. τριφασικά ή μονοφασικά σφάλματα κ.α.). Παλαιότερα σε περίπτωση τέτοιων διαταραχών, για λόγους προστασίας τους, οι Α/Γ έβγαιναν από την παραγωγή. Το τελευταίο καιρό όμως, λόγω της υψηλής αιολικής διείσδυσης(της τάξης αρκετών MW ανά Α/Π), μια τέτοια αποσύνδεση είναι απαγορευτική. Αυτό γιατί η απότομη αφαίρεση αυτών των σταθμών από την συνολική παραγωγή ισοδυναμεί με μια πολύ μεγάλη διαταραχή του ισοζυγίου παραγωγής και κατανάλωσης που μπορεί να οδηγήσει το σύστημα σε μεταβατική αστάθεια.

Επομένως, οι τεχνικές διαφορές από τη μια αλλά και το μεγάλο ποσοστό εγκατεστημένης ισχύος από Α/Π, οδήγησε πολλές χώρες στη ανάγκη για καθορισμό ειδικών απαιτήσεων από τα Α/Π. Αυτές οι απαιτήσεις αποτυπώνονται στους Κώδικες διαχείρισης του Συστήματος που εφαρμόζονται στις χώρες με υψηλές διεισδύσεις αιολικής ισχύος. Οι κοινές απαιτήσεις που διέπουν την πλειοψηφία των κωδίκων σε ότι αφορά τη σύνδεση αιολικών πάρκων στο σύστημα, αναφέρονται σε[5] :

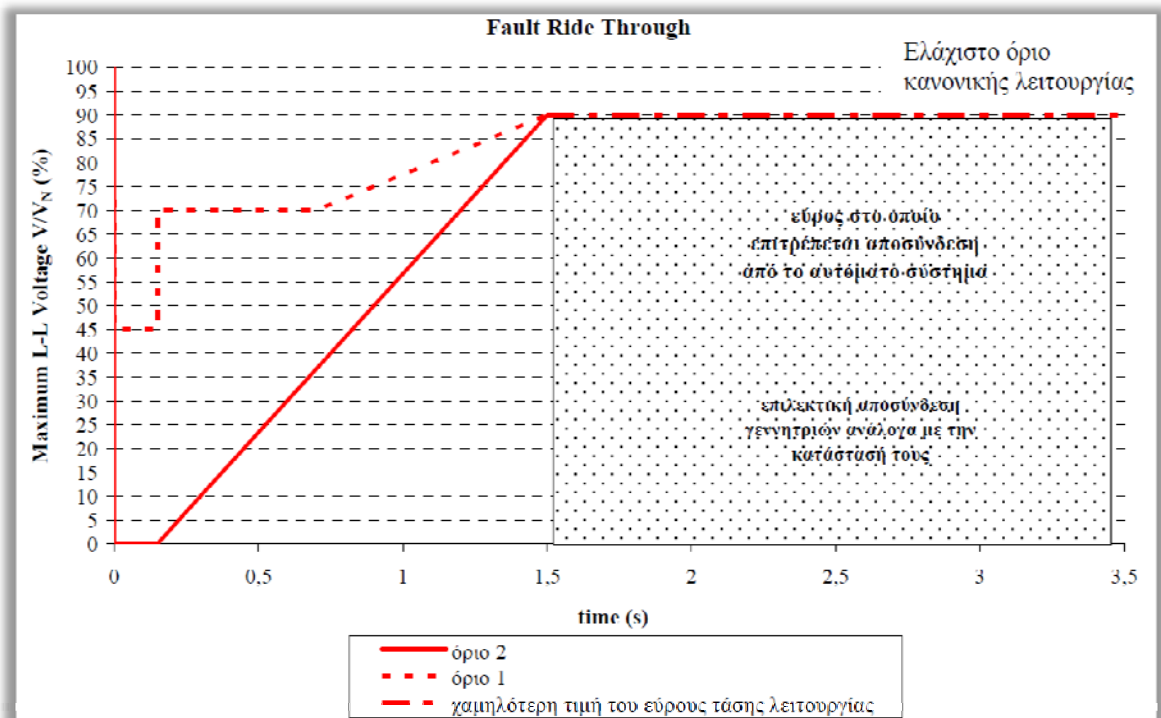
1. Ανοχή σε βυθίσεις τάσεις και απόκριση κατά τη διάρκεια και μετά την εκκαθάριση σφαλμάτων στο δίκτυο.
2. Έλεγχος ενεργού ισχύος και συχνότητας
3. Όρια τάσης και συχνότητας
4. Έλεγχος αέργου ισχύος και τάσης
5. Επικοινωνία, προστασία, μέτρηση και λοιπά τεχνικά και διαδικαστικά ζητήματα

Στην παρούσα εργασία δίνεται έμφαση στις απαιτήσεις 1 και 4, ιδιαίτερα όσον αφορά την δυνατότητα ελέγχου της αέργου ισχύος που παράγεται από το αιολικό πάρκο. Επίσης, θα επικεντρωθούμε στην νεότερη έκδοση του γερμανικού κώδικα της E.ON. , που έχει προκύψει λαμβάνοντας υπόψη την υπάρχουσα εμπειρία από τη μεγάλη διεύθυνση αιολικής ισχύος στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας. Ο κώδικας της E.ON. μπορεί να χαρακτηριστεί ως ο πιο λεπτομερής και πλήρης κώδικας.

1.4.1 Ανοχή σε βυθίσεις τάσης και απόκριση σε καταστάσεις σφαλμάτων δικτύου

Ένα βραχυκύκλωμα ή μια διαταραχή στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας έχει σαν αποτέλεσμα τη βύθιση τάσης σε μια ή περισσότερες φάσεις ανάλογα με το τύπο του βραχυκυκλώματος στο σημείο που συνέβη. Η διάρκεια της βύθισης τάσης είναι άμεση συνάρτηση του χρόνου λειτουργίας των συστημάτων προστασίας του συστήματος. Αυτοί οι χρόνοι κυμαίνονται από 0,1s ως λίγα δευτερόλεπτα, με συνηθέστερους χρόνους της τάξης των λίγων δεκάτων του δευτερολέπτου. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, οι ανεμογεννήτριες αποσυνδέονταν όταν η τερματική τάση έπεφτε σημαντικά κάτω από την ονομαστική τιμή, για λόγους προστασίας των ηλεκτρικών συστημάτων (κυρίως των ηλεκτρονικών ισχύος).

Αυτό, όπως είπαμε, δεν είναι αποδεκτό καθώς οι Α/Γ πρέπει να παραμένουν συνδεδεμένες στο δίκτυο, σε περίπτωση σφάλματος, για κάποιο χρονικό διάστημα το οποίο ορίζει ο εκάστοτε κώδικας. Οι απαιτήσεις αυτές είναι γνωστές ως **Fault Ride-Through (FRT)** ή **Low Voltage Ride-Through (LVRT) Capability** και εκφράζονται με τη μορφή καμπυλών τάσης-χρόνου. Στο σχήμα 1.10 φαίνεται η καμπύλη FRT που ορίζει ο γερμανικός κώδικας E.ON , στην περίπτωση συμμετρικών σφαλμάτων [5].



Σχήμα 1.10 : Απαιτήσεις FRT του γερμανικού Κώδικα για Α/Π [5] .

Στο διάγραμμα του Σχήματος 4, οποιαδήποτε διαταραχή της τάσης **πάνω** από τη γραμμή ορίου 1 **δεν** πρέπει να οδηγεί σε αποσύνδεση των Α/Γ. Για βυθίσεις οι οποίες εισέρχονται στην περιοχή μεταξύ των γραμμών ορίου 1 και 2 ισχύουν τα ακόλουθα [5]:

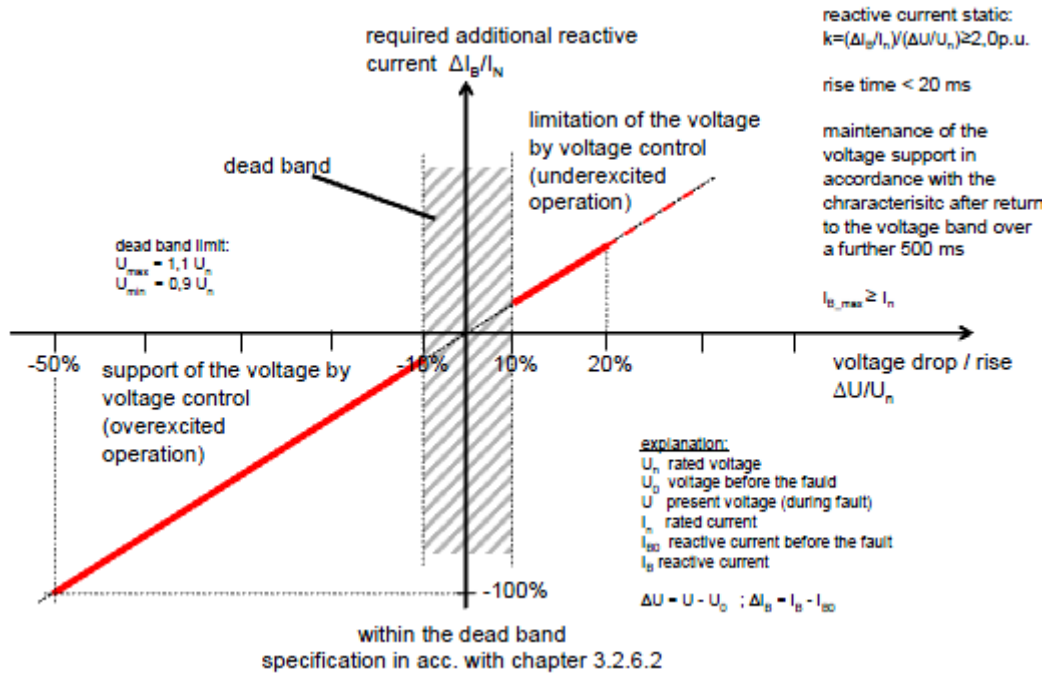
- Τα Α/Π πρέπει να υφίστανται τη βύθιση χωρίς να αποσυνδέονται από το δίκτυο. Εάν αυτό δε μπορεί να επιτευχθεί, είναι δυνατόν κατόπιν συμφωνίας με τον διαχειριστή να υιοθετηθεί ευνοϊκότερη γραμμή ορίου 2, εφόσον ταυτόχρονα μειωθεί σημαντικά ο χρόνος επανασύνδεσης μετά από την αναπόφευκτη αποσύνδεση (σε τιμές σημαντικά μικρότερες των 2 s) και ταυτόχρονα εξασφαλιστεί μια ελάχιστη έγχυση αέργου ισχύος κατά τη διάρκεια της αποσύνδεσης, ώστε να ικανοποιούνται οι απαιτήσεις του δικτύου.
- Εάν κατά τη διάρκεια του σφάλματος παρατηρείται αστάθεια των Α/Γ ή ενεργοποιείται το σύστημα προστασίας τους, μπορεί να συμφωνηθεί η δυνατότητα σύντομης αποσύνδεσής τους. Τότε, ο επανασυγχρονισμός με το δίκτυο πρέπει να πραγματοποιηθεί το πολύ εντός 2 s μετά την αποσύνδεση και η έγχυση ενεργού ισχύος πρέπει να αυξηθεί στην αρχική (προ του σφάλματος) τιμή με ρυθμό τουλάχιστον ίσο με 10% της ονομαστικής ισχύος της Α/Γ ανά s.

Για βυθίσεις τάσης που εισέρχονται στο τρίγωνο κάτω από τη γραμμή ορίου 2, είναι αποδεκτή η σύντομη αποσύνδεση των Α/Γ. Σε αυτήν την περίπτωση μπορεί κατ' εξαίρεση να συμφωνηθεί με τον διαχειριστή χρόνος επανασυγχρονισμού μεγαλύτερος από 2 s και ρυθμός αύξησης της ενεργού ισχύος μικρότερος του 10% της ονομαστικής ισχύος της Α/Γ ανά sec. Σταθμοί οι οποίοι δεν αποσυνδέονται από το δίκτυο κατά τη διάρκεια σφαλμάτων πρέπει να συνεχίζουν να παράγουν ενεργό ισχύ μετά την εκκαθάριση των σφαλμάτων, με ρυθμό ανάληψης ισχύος τουλάχιστον ίσο με 20% της ονομαστικής τους ισχύος ανά s. Επίσης όσοι δεν αποσυνδέονται πρέπει να παρέχουν ρεύμα βραχυκύκλωσης στο δίκτυο κατά τη διάρκεια του σφάλματος. Για βυθίσεις οι οποίες εισέρχονται στη γραμμοσκιασμένη περιοχή του Σχήματος 4 επιτρέπεται η αποσύνδεση Α/Γ από το αυτόματο σύστημα (προστασία απόζευξης), όπως αναφέρθηκε παραπάνω.

1.4.2 Απαιτήσεις για παροχή αέργου ρεύματος κατά τη διάρκεια σφάλματος

Σύμφωνα με τον γερμανικό κώδικα τα Α/Π πρέπει να υποστηρίζουν την τάση δικτύου με επιπλέον άεργο ρεύμα κατά τη διάρκεια βύθισής τάσης. Για να γίνει αυτό πρέπει ο έλεγχος της τάσης να γίνεται σύμφωνα με το σχήμα 1.11, σε περίπτωση πτώσης τάσης μεγαλύτερης του 10%. Τότε το άεργο ρεύμα εξόδου στη πλευρά ΧΤ του Μ/Σ γεννήτριας πρέπει να αυξηθεί με ρυθμό τουλάχιστον 2% του ονομαστικού ανά 1% απόκλιση της τάσης (ώστε για βύθιση 50% η αύξηση του αέργου ρεύματος να ισούται με 100% του ονομαστικού της γεννήτριας). Προφανώς, σε συνθήκες υπότασης η γεννήτρια θα παράγει άεργο ισχύ, ενώ σε υπέρταση θα καταναλώνει. Η ικανότητα παραγωγής αέργου ρεύματος της γεννήτριας πρέπει να είναι τουλάχιστον ίση με το ονομαστικό της ρεύμα, η δε αύξηση πρέπει να γίνει σε χρονικό διάστημα μικρότερο των 20 ms από τη στιγμή που θα ανιχνευθεί το σφάλμα. Διευκρινίζεται ότι το άεργο ρεύμα που παρέχεται για τη στήριξη τάσης είναι πρόσθετο και παρέχεται σε περίπτωση διαταραχών και όχι μόνιμης κατάστασης λειτουργίας. Επιπλέον μετά την επαναφορά της τάσης στην νεκρή ζώνη (dead band) πρέπει να συνεχίζεται η υποστήριξη τάσης για τα επόμενα 500ms. Τα μεταβατικά πρέπει επίσης να διαρκούν το πολύ 300ms μετά την επαναφορά της τάσης[5].

Η τάση, γενικά, μετράται στους ακροδέκτες της κάθε γεννήτριας. Τότε μια πτώση τάσης 50% στα άκρα της Α/Γ σημαίνει ακόμη μεγαλύτερη πτώση τάσης στο σημείο σύνδεσης. Σε περίπτωση που το αιολικό πάρκο είναι αρκετά μακριά από το σημείο σύνδεσης με το δίκτυο, η υποστήριξη τάσης δεν είναι αρκετά αποτελεσματική αν η μέτρηση γίνεται στα άκρα της Α/Γ. Σε αυτή την περίπτωση επιβάλλεται η μέτρηση της τάσης στο σημείο κοινής σύνδεσης με το δίκτυο και η υποστήριξη αυτής σε συνάρτηση με την μετρούμενη τιμή ¹. Συγκεκριμένα σε δίκτυο υπερ-υψηλής τάσης, ο έλεγχος τάσης μπορεί να απαιτείται να είναι συνεχής χωρίς νεκρή ζώνη σε κανονική λειτουργία.



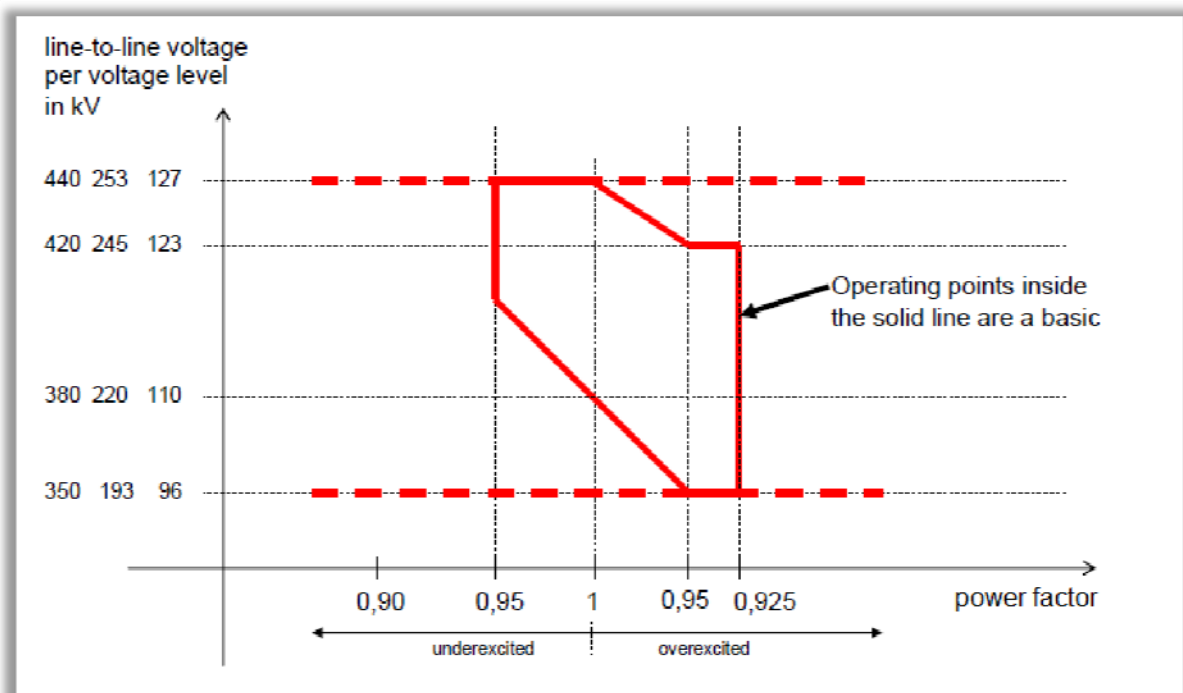
Σχήμα 1.11 : Απαιτήσεις γερμανικού Κώδικα για παροχή αέργου ρεύματος από το Α/Π κατά τη διάρκεια σφαλμάτων[5] .

¹ If the generating plant's generators are too far away from the grid connection point, resulting in the voltage support being ineffective, ENE requires measurement of the voltage dip at the grid connection point and the voltage support there as function of this measured value.

1.4.3 Απαιτήσεις παραγωγής αέργου ισχύος

Ο έλεγχος αέργου ισχύος είναι ένα σημαντικό θέμα για τους εξής λόγους : α) δεν επιτρέπουν όλες οι τεχνολογίες Α/Γ έλεγχο αέργου ισχύος β) Τα Α/Π εγκαθίστανται μακριά από το δίκτυο και είναι χαλαρά συνδεδεμένα με αυτό, άρα έχουν δυσκολία στη συμμετοχή στη ρύθμιση τάσης. Τα Α/Π καλούνται να αποκριθούν με παρόμοιο τρόπο όπως οι συμβατικοί σταθμοί στον έλεγχο αέργου ισχύος. Επίσης περιλαμβάνουν τη δυνατότητα για επιβολή τιμής αναφοράς (**setpoint**), από το Κέντρο Ελέγχου, για το ΣΙ ή την αέργο ισχύ στο σημείο σύνδεσης και τους χρόνους απόκρισης σε εντολές που αφορούν έλεγχο αέργου ισχύος. Γενικά οι απαιτήσεις αυτές σχετίζονται και με στατικά φαινόμενα (συνεχής παροχή αέργου στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας) και με δυναμικά φαινόμενα (δυναμική ικανότητα αέργου ισχύος)[5].

Σύμφωνα με τον γερμανικό Κώδικα της Ε.ΟΝ., οι απαιτήσεις αέργου ισχύος είναι κοινές για όλους τους σταθμούς παραγωγής και αναφέρονται στο σημείο σύνδεσης με το δίκτυο(ΣΣΔ). Επομένως, τα Α/Π πρέπει να μπορούν να λειτουργήσουν(όσον αφορά την ανταλλαγή αέργου ισχύος) σε κατάσταση «υπερδιέγερσης» και «υποδιέγερσης», δηλαδή παράγοντας και καταναλώνοντας, αντίστοιχα, αέργο ισχύ. Στο Σχήμα 1.12 φαίνεται το έγρος συντελεστών ισχύος συναρτήσει της τάσης του δικτύου (για τα διάφορα επίπεδα τάσης). Η περιοχή λειτουργίας που ορίζεται από την καμπύλη αυτή, είναι η **βασική απαίτηση**, η οποία ωστόσο μπορεί να τροποποιηθεί ή να επεκταθεί από τον Διαχειριστή του Συστήματος, λόγω τοπικών ιδιαιτεροτήτων ή ειδικών αναγκών. Επισημαίνεται ότι η καμπύλη αναφέρεται σε περιοχή συχνοτήτων μεταξύ 49.5 και 50.5 Hz.



Σχήμα 1.12 : Απαιτήσεις γερμανικού Κώδικα για παροχή αέργου ισχύος ανάλογα του επιπέδου τάσης, σε συχνότητες 49,5-50,5Hz, χωρίς περιορισμό της ενεργού ισχύος [5] .

Γενικά ,πρέπει να είναι δυνατόν ο σταθμός παραγωγής, μέσα σε μερικά λεπτά, να πετυχαίνει **σε ονομαστική ενεργό ισχύ εξόδου**, οποιαδήποτε τιμή Σ.Ι. του ζητηθεί, μέσα στο συμφωνημένο εύρος ρύθμισης του Σ.Ι.. Αυτή η διαδικασία πρέπει να είναι δυνατή όσο συχνά και να απαιτείται.

Εάν είναι αναγκαίο , το Α/Π επιβάλλεται να προμηθευτεί επιπλέον εξοπλισμό έτσι ώστε να είναι δυνατός ο έλεγχος αέργου ισχύος και τάσης.

Το σημείο λειτουργίας, σχετικά με την ανταλλαγή αέργου ισχύος στη μόνιμη κατάσταση, για δεδομένη παραγόμενη ενεργό ισχύ, καθορίζεται από την Ε.ΟΝ στο ‘συμβόλαιο σύνδεσης’, στις απαιτήσεις του δικτύου. Ο ορισμός του σημείου λειτουργίας αναφέρεται πιθανώς σε ένα από τα παρακάτω :

- Σε συντελεστής ισχύος($\Sigma.Ι.=\cos\phi$)
- Σε επίπεδο αέργου ισχύος (Q σε Mvar)
- Σε επίπεδο τάσης (U σε kV), οπότε το Α/Π μπορεί να πραγματοποιεί ενεργό ρύθμιση της τάσης στο σημείο σύνδεσής του, αν αυτό ζητηθεί

Τα σημεία λειτουργίας ορίζονται με τους ακόλουθους τρόπους:

- Συμφωνία για μια συγκεκριμένη τιμή ή, αν είναι αναγκαίο, ένα πρόγραμμα
- Online καθορισμός μιας τιμής αναφοράς (setpoint)

Στην περίπτωση online καθορισμού της τιμής αναφοράς, ο χρόνος απόκρισης του σταθμού ορίζεται σε 1min κατά μέγιστο.

Πρέπει να σημειωθεί ότι δεν επιτρέπονται βηματικές αλλαγές στην άεργο ισχύ μεγαλύτερες του 2.5% της ικανότητας στο σημείο σύνδεσης (grid connection capacity), για δίκτυα ΥΤ, και του 5% για δίκτυα ΥΥΤ, καθιστώντας έτσι προτιμητέα τη χρήση στατών αντισταθμιστών αέργου ισχύος (*Static Var Compensators – SVC*), για μεταβολή της αέργου ισχύος σε συνεχές εύρος τιμών, όταν η ικανότητα της ίδιας της Α/Γ δεν επαρκεί. Επιπλέον, σε περίπτωση σύνδεσης των Α/Π μέσω HVDC (off-shore Α/Π), όλη η απαιτούμενη άεργος ισχύς πρέπει να παράγεται στην πλευρά του δικτύου. Τέλος, είναι γενικά απαραίτητη η χρήση Μ/Σ ανύψωσης ΜΤ/ΥΤ με σύστημα αλλαγής τάσης υπό φορτίο (ΣΑΤΥΦ)[5].

Επίσης όταν το Α/Π δε λειτουργεί και τα βοηθητικά φορτία του τροφοδοτούνται από το δίκτυο πρέπει να λειτουργούν με συντελεστή ισχύος 0.95 επαγωγικό ως 1.

1.5 Δομή της διπλωματικής εργασίας

Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας είναι η ανάπτυξη σε περιβάλλον Simulink/Matlab, ενός μοντέλου ανεμογεννήτριας (2MW) μεταβλητών στροφών με σύγχρονη γεννήτρια τυλιγμένου δρομέα, εφοδιασμένης με ένα καινούριο σύστημα ελέγχου του αντιστροφέα.

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια επισκόπηση των επικρατέστερων τεχνολογιών που εφαρμόζονται στη σχεδίαση ανεμογεννητριών και περιγράφεται το πλαίσιο και οι απαιτήσεις του γερμανικού κώδικα της Ε.ΟΝ. όσον αφορά τη συμπεριφορά ενός αιολικού πάρκου κατά τη διάρκεια σφαλμάτων τάσης.

Στο δεύτερο κεφάλαιο αναλύονται εκτενώς τα υποσυστήματα του μοντέλου της Α/Γ. Γίνεται περιγραφή του αεροδυναμικού και του μηχανικού μέρους όπου με μια σειρά εξισώσεων, παρέχεται στην έξοδο η τελική μηχανική ροπή που ασκείται στον άξονα της γεννήτριας. Στη συνέχεια αναλύεται η λειτουργία του μετατροπέα ανύψωσης τάσης. Σε αυτό περιγράφεται επίσης η στρατηγική μέγιστης απολαβής ισχύος που ακολουθείται για τον έλεγχο των στροφών της Α/Γ και συγκρίνεται με άλλες στρατηγικές ελέγχου που χρησιμοποιούνται συχνά. Ακολουθεί η περιγραφή της λειτουργίας του ρυθμιστή στροφών και του ρυθμιστή γωνίας pitch των πτερυγίων. Στο τέλος του κεφαλαίου περιγράφεται η λειτουργία του τριφασικού αντιστροφέα, η μέθοδος SPWM και μελετάται δυνατότητα παροχής ισχύος σε σύνδεση με το δίκτυο.

Το τρίτο κεφάλαιο θα ασχοληθούμε κυρίως με τη σχεδίαση του συστήματος ελέγχου του αντιστροφέα. Συγκεκριμένα, αφού δοθεί το απαραίτητο θεωρητικό και μαθηματικό υπόβαθρο, περιγράφεται η διαδικασία κατασκευής του συστήματος ελέγχου, όπου ιδιαίτερη βαρύτητα δίνεται στο σύστημα ελέγχου της παραγόμενης άεργου ισχύος. Το τελευταίο μάλιστα προσαρμόστηκε κατάλληλα, ως ρυθμιστής τάσης στο σημείο κοινής σύνδεσης, ώστε να ικανοποιεί τις απαιτήσεις του γερμανικού κώδικα για παροχή άεργου ρεύματος κατά τη διάρκεια σφάλματος τάσης.

Στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται παρουσίαση της λειτουργίας του μοντέλου Α/Γ υπό σταθερές και μεταβλητές συνθήκες ανέμου. Καταγράφονται οι αποκρίσεις διάφορων ηλεκτρικών και μηχανικών μεγεθών της Α/Γ και εξετάζεται εάν καλύπτονται οι απαιτήσεις του γερμανικού κώδικα στην παραγωγή άεργου ισχύος.

Τέλος στο πέμπτο κεφάλαιο μελετάται η απόκριση της Α/Γ σε βύθιση και αύξηση της τάσης του δικτύου. Αξιολογείται η λειτουργία του ρυθμιστή τάσης του συστήματος ελέγχου του αντιστροφέα, με βάση ένα αιολικό πάρκο το οποίο υπόκειται σε διάφορα σφάλματα τάσης του δικτύου. Επίσης για κάθε σφάλμα τάσης ελέγχεται εάν το αιολικό πάρκο ικανοποιεί τις απαιτήσεις για παροχή άεργου ρεύματος που θέτει ο γερμανικός κώδικας.

1.6 Συνεισφορά της διπλωματικής εργασίας

Η συνεισφορά της εργασίας συνίσταται στην ανάπτυξη και περιγραφή ενός γρήγορου και αξιόπιστου μοντέλου Α/Γ μεταβλητών στροφών σε περιβάλλον Simulink/Matlab. Το μοντέλο παρέχει τη δυνατότητα προσομοίωσης όλων των επιμέρους συστημάτων της Α/Γ, ώστε να μελετάται κυρίως η δυναμική συμπεριφορά του συστήματος ελέγχου για μεγάλα χρονικά διαστήματα της τάξης των 10sec έως 2min. Έτσι μπορούν να μελετηθούν οι επιπτώσεις που έχουν στο σύστημα, οι διάφορες διαταραχές της τάσης του δικτύου και μπορούν να εξαχθούν συμπεράσματα για την καταλληλότητα των ελεγκτών που χρησιμοποιούνται. Παράλληλα, μπορούν να δοκιμαστούν νέα υποσυστήματα και ελεγκτές που επιτρέπουν την καλύτερη απόκριση των ανεμογεννητριών σε διαταραχές του δικτύου. Στην εργασία προστέθηκαν καινούριοι ελεγκτές με σκοπό τον καλύτερο και αποδοτικότερο έλεγχο της άεργου ισχύος, παρέχοντας τη δυνατότητα σε ένα αιολικό πάρκο να υποστηρίζει την τάση του δικτύου με άεργο ισχύ κατά τη διάρκεια σφάλματος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ ΣΤΡΟΦΩΝ

Οι ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών είναι ο πιο συχνά εγκατεστημένος τύπος ανεμογεννητριών. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, το ενδιαφέρον που παρουσιάζεται για τις Α/Γ μεταβλητών στροφών, οφείλεται στα αρκετά πλεονεκτήματα που προσφέρει, όπως η μειωμένη μηχανική καταπόνηση, η μεγαλύτερη απόδοση, η μείωση του ακουστικού θορύβου, και τελικά, η υψηλή ικανότητα ελέγχου που είναι κρίσιμη για την ενσωμάτωση στο δίκτυο μεγάλων αιολικών πάρκων. Η τεχνολογία που είχε καθιερωθεί για Α/Γ τέτοιου τύπου είναι αυτή με γεννήτρια επαγωγής διπλής τροφοδότησης, αλλά τον τελευταίο καιρό η σύγχρονη γεννήτρια εφοδιασμένη με πλήρη μετατροπέα ισχύος έχει αποδειχθεί ως μια αρκετά ελκυστική τεχνολογία. Συγκεκριμένα, δίνει το πλεονέκτημα για πλήρη έλεγχο της ταχύτητας από το 0% έως το 100% της σύγχρονης ταχύτητας, και υποστηρίζει πιο αποτελεσματικό έλεγχο της αέργου ισχύος. Εν συγκρίσει με την γεννήτρια διπλής τροφοδότησης, αυτός ο τύπος Α/Γ είναι ακόμη πιο αποδοτικός, και από ηλεκτρολογικής πλευράς είναι λιγότερο πολύπλοκος και πιο εύκολος στη κατασκευή του. Παρόλα αυτά έχει το μειονέκτημα ότι είναι πιο ακριβός.

Αντικείμενο αυτής της εργασίας είναι η μοντελοποίηση και η ανάλυση των επιμέρους συστημάτων μιας Α/Γ μεταβλητών στροφών εφοδιασμένης με σύγχρονη γεννήτρια τυλιγμένου δρομέα με πλήρη μετατροπέα ισχύος. Θα δοθεί ιδιαίτερη έμφαση στο κομμάτι ελέγχου του inverter στην πλευρά του δικτύου με κύριο άξονα τον έλεγχο του αέργου ρεύματος προς απαίτηση των κωδίκων σύνδεσης. Το αρχικό μοντέλο που χρησιμοποιούμε είναι διαθέσιμο στα demos του MATLAB/Simulink και περιλαμβάνει το αεροδυναμικό μέρος της Α/Γ, το μηχανικό, το ηλεκτρολογικό μαζί με κομμάτι του ελέγχου και το ηλεκτρικό δίκτυο στο οποίο είναι συνδεδεμένο. Στη συνέχεια ακολουθεί η αναλυτική περιγραφή των επιμέρους τμημάτων της συγκεκριμένης Α/Γ.

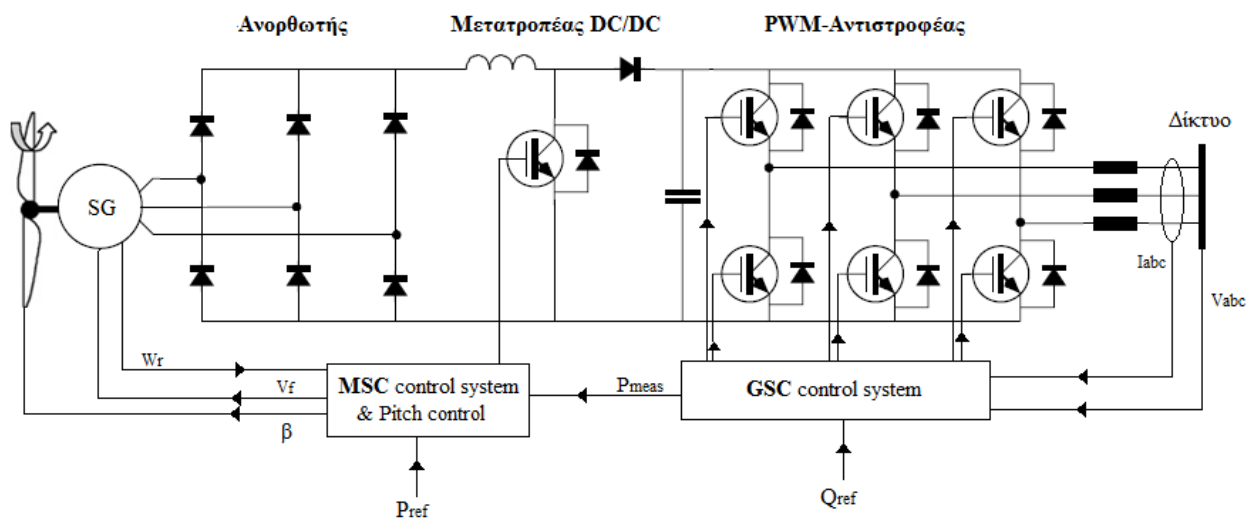
2.1 Γενική περιγραφή του συστήματος

Το μοντέλο ανεμογεννήτριας μεταβλητών στροφών που αναπτύχθηκε στην παρούσα εργασία αποτελείται από σύγχρονη γεννήτρια με τύλιγμα πεδίου. Βασικό πλεονέκτημα αυτού του είδους, είναι ότι μπορεί να κατασκευαστεί με μεγάλο αριθμό πόλων έτσι ώστε να λειτουργεί σε χαμηλές στροφές και να μην απαιτείται η παρεμβολή κιβωτίου ταχυτήτων μεταξύ του κύριου άξονα και του άξονα της γεννήτριας. Πολλές εταιρίες κατασκευής Α/Γ προβαίνουν στην κατασκευή τέτοιων γεννητριών, όπως η γερμανική Enercon (Enercon annular multipole generator).

Η γεννήτρια στην έξοδό της, ανάλογα με την ταχύτητα του δρομέα, παράγει τάση μεταβλητού πλάτους και συχνότητας. Έτσι, για να συνδεθεί στο δίκτυο μεταφοράς το οποίο λειτουργεί υπό τάση σταθερού πλάτους και συχνότητας, πρέπει να παρεμβληθεί μετατροπέας AC/DC/AC. Έτσι επιτυγχάνεται πλήρης απόζευξη της γεννήτριας από το δίκτυο δίνοντας τη δυνατότητα απομονωμένου ελέγχου της γεννήτριας και του αντιστροφέα (inverter) στην πλευρά του δικτύου.

Από την πλευρά της γεννήτριας συνδέουμε έναν τριφασικό μη ελεγχόμενο ανορθωτή AC/DC σε συνδυασμό με έναν DC/DC μετατροπέα ανύψωσης. Ο μετατροπέας αυτός αποτελεί το μετατροπέα στην πλευρά της μηχανής (MSC-Machine Side Converter). Βασική λειτουργία του μετατροπέα αυτού είναι ο έλεγχος του ρεύματος που διοχετεύεται στο στάτη της γεννήτριας για ρύθμιση της ηλεκτρικής ροπής. Στην ουσία ρυθμίζει τον αριθμό στροφών της γεννήτριας ώστε να επιτυγχάνεται MPPT (Maximum Power Point Tracking). Επίσης σε συνδυασμό με τον έλεγχο του βήματος των πτερυγίων (pitch control) μπορεί να ζητηθεί μείωση της παραγόμενης ισχύος σε μια τιμή αναφοράς.

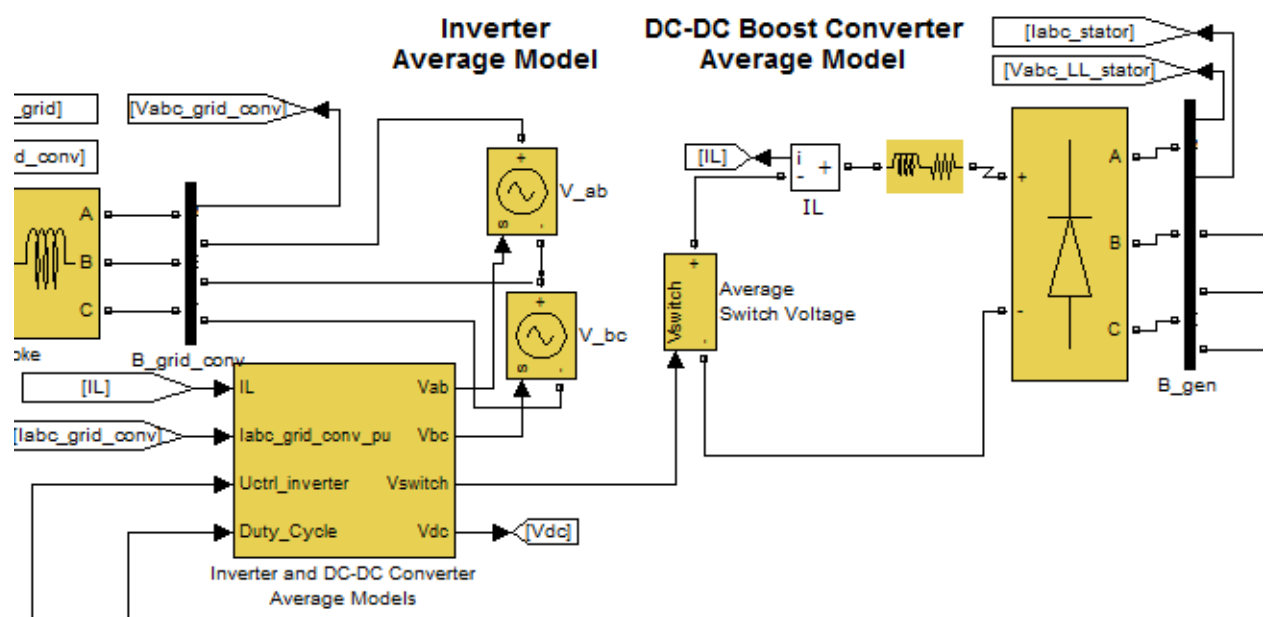
Μετά τον μετατροπέα DC/DC ακολουθεί ο μετατροπέας DC/AC στην πλευρά του δικτύου (GSC-Grid Side Converter). Ο μετατροπέας φροντίζει την βέλτιστη μεταγωγή ισχύος από τον DC/DC μετατροπέα προς το δίκτυο, διατηρώντας την τάση του dc-πυκνωτή σταθερή. Παράλληλα, ελέγχει την ανταλλαγή αέργου ισχύος με το δίκτυο είτε διατηρώντας μια συγκεκριμένη τιμή παραγόμενης ή καταναλισκόμενης αέργου ισχύος, είτε κάνοντας έλεγχο της τάσης του ζυγού που συνδέεται η Α/Γ. Συνολικά το ηλεκτρικό σύστημα παρουσιάζεται στο ακόλουθο σχήμα.



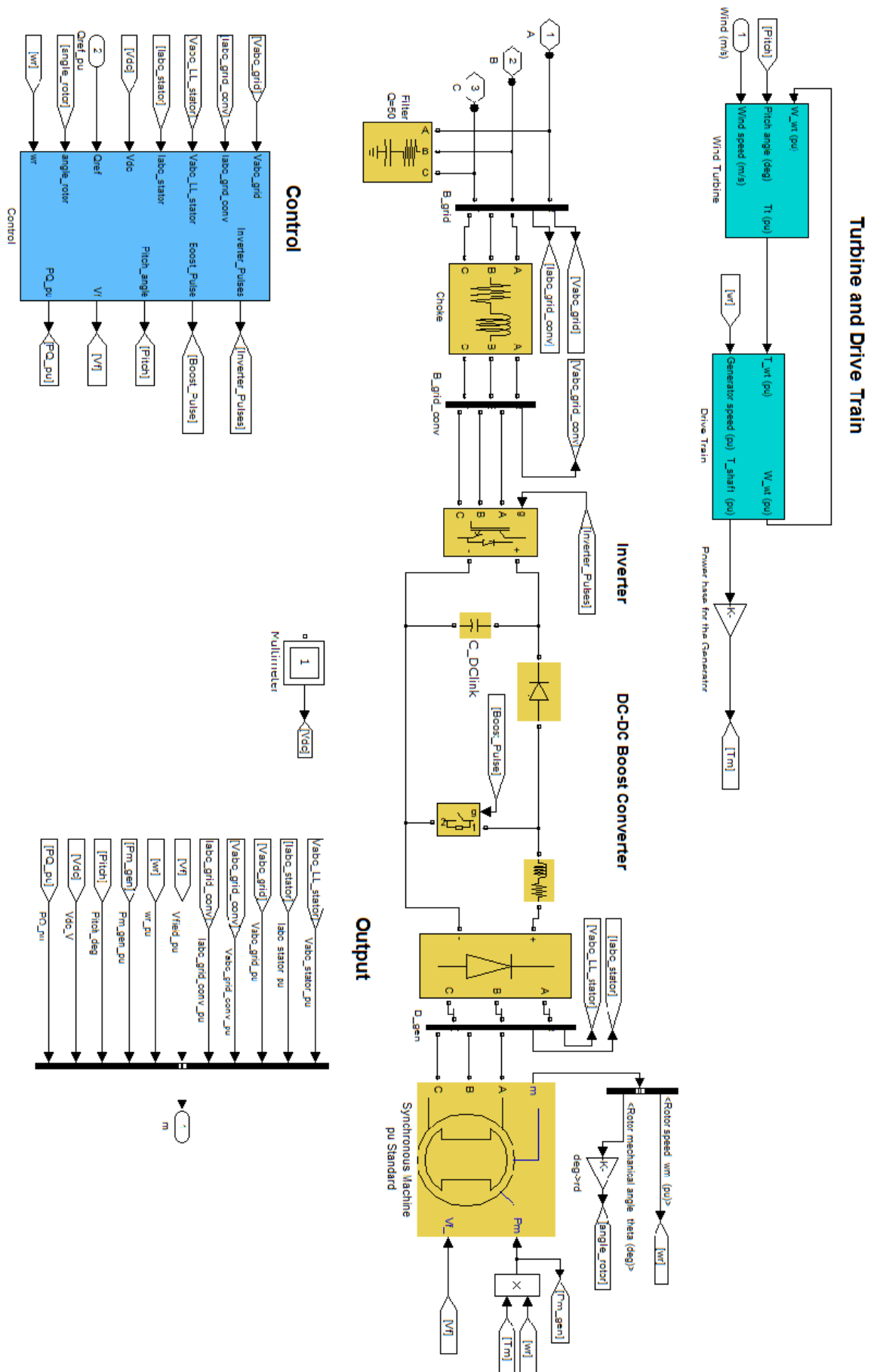
Σχήμα 2.1 : Α/Γ μεταβλητών στροφών με σύγχρονη γεννήτρια με τύλιγμα διεγέρσεως και πλήρη μετατροπέα ισχύος.

Στο σχήμα 2.3 φαίνεται, σε περιβάλλον Simulink/Matlab, το μοντέλο προσομοίωσης του παραπάνω συστήματος. Διακρίνεται το σύστημα ελέγχου της ανεμογεννήτριας, από το οποίο αναχωρούν οι εντολές για την τάση διέγερσης της γεννήτριας, τη γωνία βήματος της έλικας, και οι παλμοί προς τα IGBT του inverter και το IGBT του DC/DC μετατροπέα. Επίσης για την σύνδεση του inverter (GSC) με το δίκτυο, είναι απαραίτητη η ύπαρξη ενός φίλτρου (Low Pass Filter) προκειμένου να ελαττωθούν οι αρμονικές συνιστώσες υψηλής συχνότητας που προέρχονται από τη διαδικασία PWM που εκτελούν τα διακοπτικά στοιχεία του inverter. Επίσης εκτός από το ηλεκτρικό κομμάτι, προσομοιώνεται πολύ ικανοποιητικά και το αεροδυναμικό-μηχανολογικό μέρος της ανεμογεννήτριας που αφορά βέβαια τον ανεμοκινητήρα και τον άξονα μετάδοσης κίνησης.

Το μοντέλο αυτό προκειμένου να παρέχει ακριβή αποτελέσματα, όσο τα διακοπτικά στοιχεία (IGBT) λειτουργούν με διακοπτική συχνότητα 2000Hz και 3000Hz, πρέπει να διακριτοποιηθεί σε σχετικά μικρό βήμα(step time), της τάξης των 2 μsec . Έτσι είναι κατάλληλο για την μελέτη αρμονικών και την παρακολούθηση της δυναμικής συμπεριφοράς του συστήματος ελέγχου για μικρές χρονικές περιόδους προσομοίωσης(μερικά sec). Για να επιτύχουμε μεγαλύτερους χρόνους προσομοίωσης(10sec έως 2min) πρέπει ο GSC να αντικατασταθεί από ισοδύναμες πηγές τάσης οι οποίες θα παράγουν την εναλλασσόμενη τάση με μέση τιμή αυτής ενός κύκλου της διακοπτική συχνότητας. Παρόμοια μέθοδος πρέπει να χρησιμοποιηθεί και για την αντικατάσταση του IGBT του DC/DC μετατροπέα. Έτσι καταφέρνουμε να διακριτοποιήσουμε το σύστημα σε μεγαλύτερο step time(50 μsec ->πιο γρήγορη προσομοίωση) χωρίς να επηρεάζεται σημαντικά η δυναμική συμπεριφορά του συστήματος ελέγχου αλλά καθιστώντας το ακατάλληλο για μελέτη αρμονικών. Το τροποποιημένο σημείο του μοντέλου φαίνεται στο σχήμα 2.2. Στις προσομοιώσεις που θα ακολουθήσουν στα επόμενα κεφάλαια θα χρησιμοποιήσουμε το μοντέλο αυτό καθώς απαιτούνται μεγάλοι χρόνοι προσομοίωσης.



Σχήμα 2.2 : Αντικατάσταση του inverter και του IGBT του DC Boost converter από πηγές τάσης για ταχύτερο χρόνο προσομοίωσης (Average Model).



Σχήμα 2.3 : Γενικό μοντέλο προσομοίωσης Α/Γ σε περιβάλλον Matlab/Simulink(Detailed model).

2.2 Μοντελοποίηση Αεροδυναμικού μέρους της Α/Γ

Η βασική σχέση που εκφράζει την αεροδυναμική ισχύ που δέχεται ο ανεμοκινητήρας, υπολογίζεται από την εξίσωση [6] :

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

- όπου ρ : η πυκνότητα του αέρα ($\rho \approx 1,225 \text{ kg/m}^3$)
 A : η επιφάνεια του δρομέα ($A = \pi R^2$ σε m^2)
 V_w : η ταχύτητα του ανέμου (m/sec)
 C_p : ο αεροδυναμικός συντελεστής ισχύος

Παρατηρούμε ότι η αεροδυναμική ισχύς είναι συνάρτηση πολλών μεταβλητών. Πρακτικά αυτό που θεωρούμε σταθερό σε μια Α/Γ, είναι η πυκνότητα του αέρα ρ και η ακτίνα της έλικας R . Στην παραγωγή ισχύος συναρτήσει του χρόνου, αυτό που μεταβάλλεται είναι η ταχύτητα του ανέμου V_w και ο αεροδυναμικός συντελεστής C_p . Μάλιστα η αεροδυναμική ισχύς εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ταχύτητα του ανέμου ($P_w \sim V_w^3$), που συνεπάγεται σημαντικές διακυμάνσεις στην έξοδο της Α/Γ σε ταχείες μεταβολές του ανέμου. Ο αεροδυναμικός συντελεστής ισχύος είναι συνάρτηση της γωνίας pitch της έλικας β και του λόγου λ , που είναι ο λόγος της ταχύτητας του ακροπτερυγίου ως προς την ταχύτητα του ανέμου:

$$\lambda = \frac{R \cdot \omega_r}{V_w}$$

- όπου R : η ακτίνα της έλικας(m)
 ω_r : η γωνιακή ταχύτητα του δρομέα (rad/sec)

Η μέγιστη τιμή που μπορεί να πάρει το C_p είναι 0,59. Αυτό είναι απόρροια του νόμου του Betz, σύμφωνα με τον οποίο καμία ανεμογεννήτρια δεν μπορεί να αξιοποιήσει πάνω από 59,3% της κινητικής ενέργειας του ανέμου. Στην πράξη οι maximum τιμές του C_p που συναντάμε στις Α/Γ κυμαίνονται από 0,3 έως 0,5.

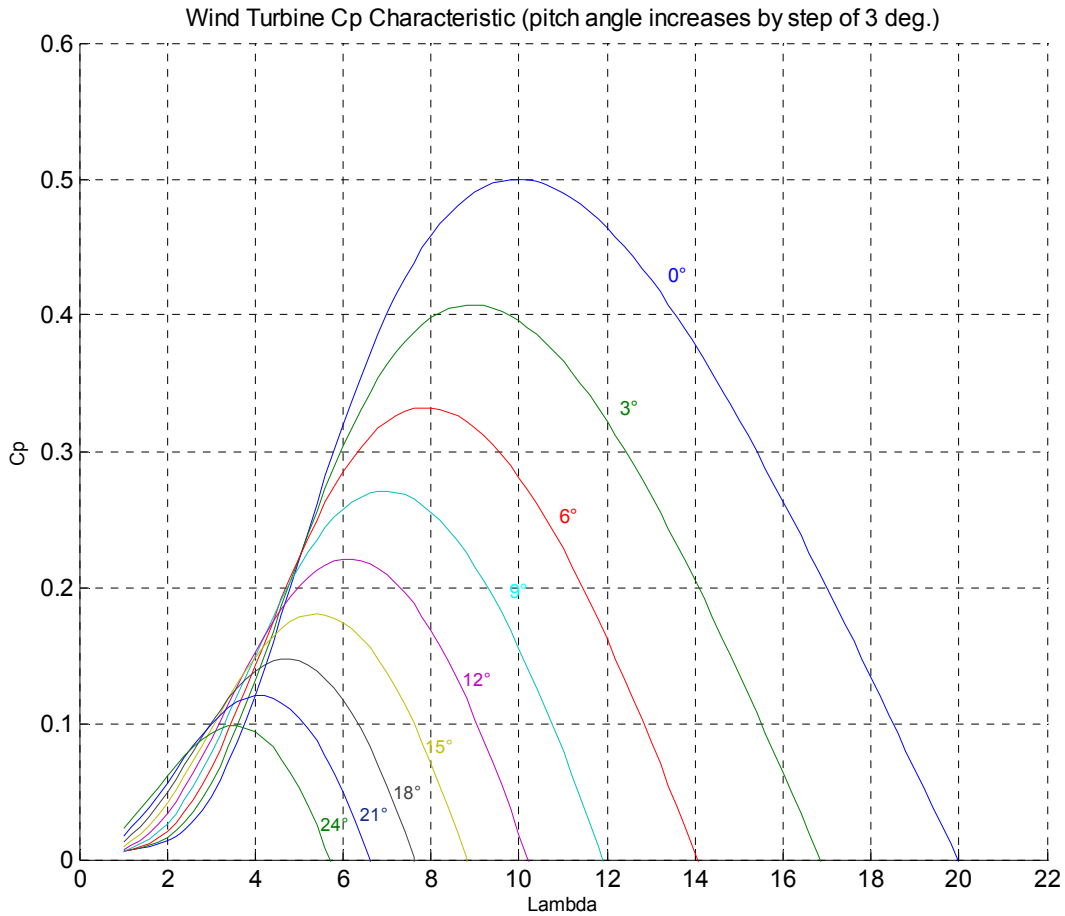
Στην παρούσα εργασία η συνάρτηση με την οποία προσεγγίζεται ο αεροδυναμικός συντελεστής είναι :

$$C_p(\lambda, \beta) = c_1 \cdot \left(c_6 \cdot \lambda + \left(-c_4 - c_3 \cdot (2.5 + \beta) + c_2 \cdot \left(\frac{1}{\lambda + c_7 \cdot (2.5 + \beta)} - \frac{c_8}{1 + (2.5 + \beta)^3} \right) \right) \right) \cdot e^{-c_5 \left(\frac{1}{\lambda + c_7 \cdot (2.5 + \beta)} - \frac{c_8}{1 + (2.5 + \beta)^3} \right)}$$

οι μεταβλητές c_1 έως c_8 είναι σταθερές και έχουν τιμή :

c₁	0.645	c₅	21
c₂	116	c₆	0.0912
c₃	0.4	c₇	0.08
c₄	5	c₈	0.035

Στο σχήμα 2.4 φαίνονται οι καμπύλες $C_p(\lambda)$ για διάφορες γωνίες pitch από 0° έως 24° .



Σχήμα 2.4 : Καμπύλες αεροδυναμικού συντελεστή C_p συναρτήσει του λόγου λ και της γωνίας βήματος β .

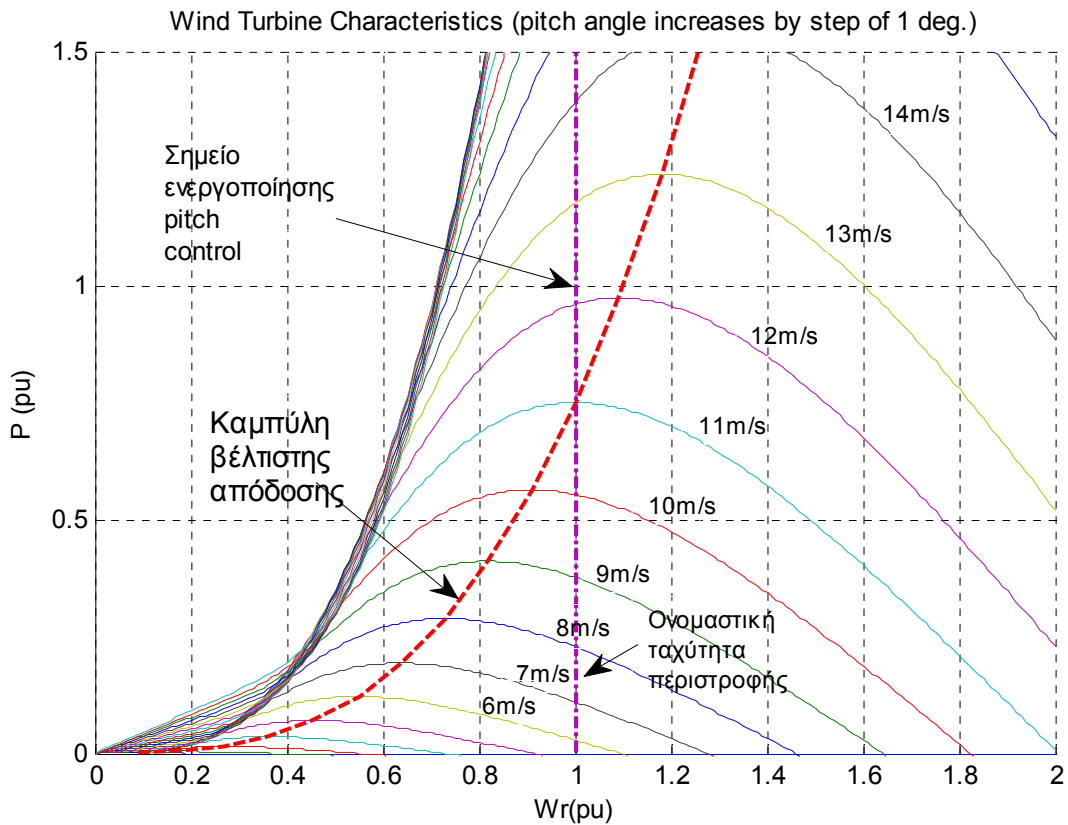
Από τις καμπύλες παρατηρούμε ,ότι για γωνία βήματος έλικας 0° , το σημείο (C_p , λ) που αντιστοιχεί στον μέγιστο αεροδυναμικό συντελεστή είναι :

$$(C_p^{\max}, \lambda_{opt}) = (0.5, 9.9495)$$

Το σημείο αυτό προκύπτει επίσης θέτοντας την παράγωγο της σχέσης $C_p(\lambda,0)$ ίση με το μηδέν.

Στη συνέχεια(σχήμα 2.5) ακολουθεί η χαρακτηριστική αεροδυναμικής ισχύος P_w συναρτήσει της γωνιακής ταχύτητας περιστροφής του δρομέα. Παρατηρούμε ότι για σταθερή ταχύτητα του ανέμου, η μέγιστη αεροδυναμική ισχύς που δύναται να απορροφηθεί βρίσκεται σε σημείο της καμπύλης βέλτιστης απόδοσης. Έτσι σε κάθε ταχύτητα ανέμου V_w αντιστοιχεί μια συγκεκριμένη ταχύτητα δρομέα ω_{opt} στην οποία η Α/Γ λειτουργεί με τον μέγιστο αεροδυναμικό συντελεστή C_p . Ο MPPT ελεγκτής είναι αυτός που ρυθμίζει την ταχύτητα του δρομέα στην τιμή ω_{opt} . Αυτό ισχύει για χαμηλές και μέσες ταχύτητες ανέμου, και συγκεκριμένα μέχρι τα 11m/s,όπου φτάνουμε στις ονομαστικές στροφές του δρομέα. Σε υψηλότερους ανέμους η ταχύτητα του δρομέα διατηρείται σταθερή στην ονομαστική τιμή και τα αεροδυναμικά χαρακτηριστικά των

πτερυγίων(pitch control) εξασφαλίζουν διατήρηση της ισχύος στη ονομαστική τιμή. Σε αυτή τη περιοχή η Α/Γ βρίσκεται σε επισφαλές σημείο, καθώς λόγω της αργής απόκρισης του pitch controler μια ριπή ανέμου μπορεί να προκαλέσει υπερτάχυνση και αύξηση ισχύος στα 1,25pu , με κίνδυνο βλάβης της γεννήτριας και των μετατροπέων. Για λόγους ασφαλείας οι ονομαστικές στροφές στο διάγραμμα είναι μικρότερες από τις στροφές που μπορεί να αντέξει το σύστημα.

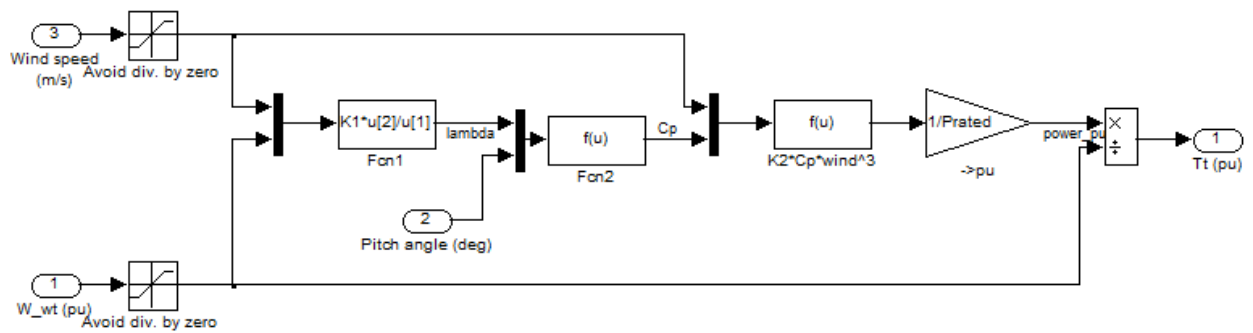


Σχήμα 2.5 : Χαρακτηριστικές ισχύος-ταχύτητας περιστροφής του δρομέα, για γωνία βήματος 0°.

Η Α/Γ που μοντελοποιήθηκε στην παρούσα εργασία έχει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά :

Χαρακτηριστικά Α/Γ	Τιμή
Ονομαστική ισχύς	2 MW
Διάμετρος πτερωτής	68 m
Ονομαστική ταχύτητα δρομέα	30 RPM
Ονομαστική ταχύτητα ανέμου	11 m/s
Ταχύτητα έναρξης (cut-in)	4 m/s
Ταχύτητα αποσύνδεσης (cut-out)	24 m/s

Βάσει των εξισώσεων που περιγράφουν το αεροδυναμικό μέρος της γεννήτριας προκύπτει το αντίστοιχο μοντέλο προσομοίωσης του ανεμοκινητήρα σε περιβάλλον Simulink/Matlab. Στο σχήμα 2.6 φαίνεται το εν λόγω υποσύστημα.

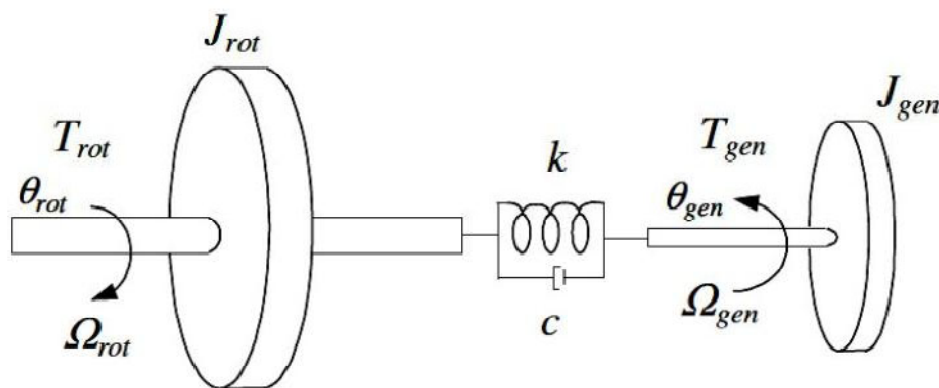


Σχήμα 2.6 : Μοντελοποίηση αεροδυναμικού μέρους της Α/Γ(Wind Turbine).

Σύμφωνα με το σχήμα , η ταχύτητα του ανέμου V_w , η γωνιακή ταχύτητα της πτερωτής ω_t και η γωνία βήματος έλικας(pitch angle) β , αποτελούν τις τρεις εισόδους του συστήματος. Από τις δυο πρώτες προκύπτει ο λόγος λ σύμφωνα με τη σχέση που αναφέρθηκε παραπάνω. Γνωρίζοντας το λ και την γωνία β , υπολογίζεται ο συντελεστής αεροδυναμικής ισχύος C_p . Από τον αρχικό τύπο, μπορούμε μέσω του λ και του C_p να υπολογίσουμε την αεροδυναμική ισχύ που μεταδίδεται στον άξονα. Διαιρώντας την αντίστοιχα με την γωνιακή ταχύτητα της πτερωτής ω_t βρίσκουμε την αναπτυσσόμενη μηχανική ροπή στον άξονα, που είναι και η έξοδος του μοντέλου. Όλες οι τιμές αποτελούν στιγμιαίες τιμές και τροφοδοτούνται από άλλα υποσυστήματα του μοντέλου. Η έξοδος του υποσυστήματος αυτού, δηλαδή η μηχανική ροπή του ανεμοκινητήρα, τροφοδοτεί την είσοδο του συστήματος μοντελοποίησης του άξονα της Α/Γ.

2.3 Μοντελοποίηση συστήματος μετάδοσης κίνησης

Στη παρούσα εργασία λαμβάνεται υπόψη και η πραγματική μηχανική ζεύξη φτερωτής-γεννήτριας, η οποία αναπαρίσταται με το ισοδύναμο μοντέλο δυο μαζών, σχήμα 2.7. Σε πολλές εργασίες χρησιμοποιείται μοντέλο μιας μάζας για την ζεύξη γεννήτριας-πτερωτής, το οποίο βέβαια δεν δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα ιδιαίτερα σε θέματα μεταβατικής σταθερότητας.

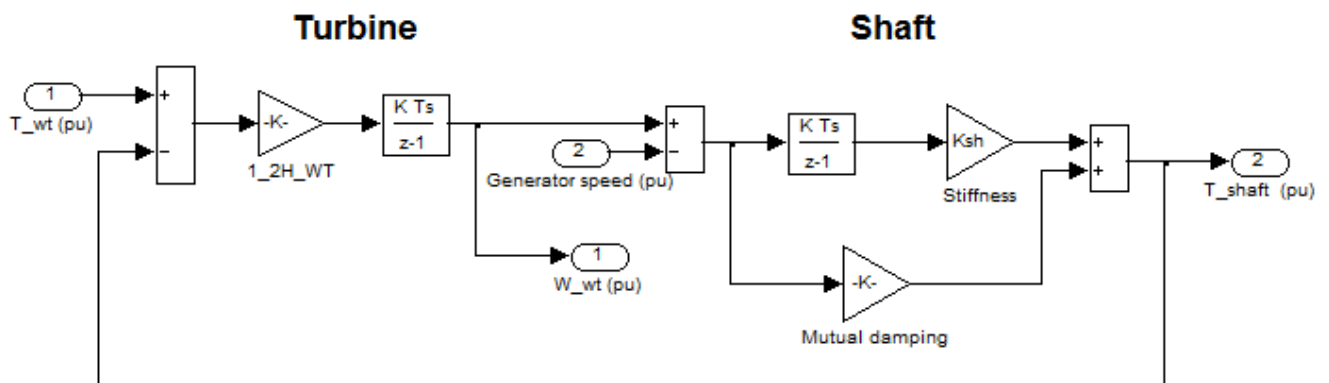


Σχήμα 2.7 : Σύστημα δυο μαζών για τη μοντελοποίηση του συστήματος μετάδοσης της Α/Γ.

Στο μοντέλο αυτό, όπως φαίνεται στο σχήμα, η μία μάζα J_{rot} αριστερά αναπαριστά την αδράνεια της πτερωτής, δηλαδή των τριών ελίκων μαζί με τον άξονα, ενώ η άλλη J_{gen} αναπαριστά την αδράνεια της γεννήτριας. Οι δύο αυτές μάζες συνδέονται μέσω ενός ελαστικού άξονα σκληρότητας k και σταθεράς απόσβεσης c . Στην πλευρά της πτερωτής ασκείται η αεροδυναμική ροπή στρέψης T_{rot} , ενώ από τη πλευρά της γεννήτριας ασκείται η ηλεκτρική ροπή T_{gen} αντίθετης φοράς. Λόγω της ελαστικότητας αυτής του άξονα, η Α/Γ είναι επιρρεπής σε ταλαντώσεις της γωνιακής ταχύτητας, κάθε φορά που η αεροδυναμική ροπή ή η ηλεκτρική ροπή μεταβάλλεται απότομα.

Εν συγκρίσει με τις συμβατικές σύγχρονες γεννήτριες, μια πολύ-πολική γεννήτρια έχει μεγάλο αριθμό πόλων που απαιτούν μεγάλη διάμετρο του δρομέα. Αυτό συνεπάγεται μια γεννήτρια με υψηλότερη αδράνεια. Γενικά ισχύει ότι η σκληρότητα k του άξονα μιας γεννήτριας, μειώνεται με την αύξηση του αριθμού των πόλων. Έτσι μια απότομη ροπή στρέψης στον άξονα που συνδέεται με μια πολύ-πολική γεννήτρια έχει μεγαλύτερη επίδραση στο ηλεκτρικό σύστημα. Είναι επομένως σημαντικό να αναπαρίσταται το μηχανικό σύστημα με το ισοδύναμο μοντέλο δύο μαζών που περιγράψαμε, προκειμένου η απόκριση της γεννήτριας και του μετατροπέα ισχύος να είναι πιο άμεση. Διακυμάνσεις, όπως αυτή μιας ριπής ανέμου, θα δημιουργούσαν ταλαντώσεις οι οποίες δεν θα μπορούσαν να αποσβεστούν αποτελεσματικά από το σύστημα. Μια αναπαράσταση ενός μοντέλου μιας μάζας θα αγνοούσε αυτές τις ταλαντώσεις[7].

Η απόσβεση των μηχανικών ταλαντώσεων μιας σύγχρονης γεννήτριας με τυλιγμένο δρομέα επιτυγχάνεται με τη χρήση σταθεροποιητή. Ο σταθεροποιητής δίνει ένα επιπρόσθετο σήμα στον ελεγκτή που ρυθμίζει την διέγερση της μηχανής, έτσι ώστε να προκύψει μια συνιστώσα ηλεκτρικής ροπής η οποία είναι σε φάση με την μεταβολή της γωνιακής ταχύτητας της γεννήτριας. Έτσι με μια αύξηση της γωνιακής ταχύτητας θα πρέπει να προκαλείται ταυτόχρονη αύξηση στην ηλεκτρική ροπή της γεννήτριας, προς αναίρεση της προηγούμενης αύξησης. Με άλλα λόγια η χρήση του σταθεροποιητή θα προκαλεί μια καθαρά θετική ροπή απόσβεσης στη συχνότητα των ταλαντώσεων που οφείλονται στον κινητήριο άξονα. Περισσότερα για το σύστημα αυτό θα αναφερθούν στη συνέχεια.



Σχήμα 2.8 : Μοντελοποίηση συστήματος μετάδοσης κίνησης της Α/Γ(Drive train).

Στο σχήμα 2.8, υπάρχει το διάγραμμα βαθμίδων του μοντέλου προσομοίωσης του συστήματος μετάδοσης κίνησης της Α/Γ. Η πρώτη είσοδος είναι η αεροδυναμική ροπή της πτερωτής T_{wt} , και είναι υπολογισμένη από το προηγούμενο υποσύστημα. Αυτή συγκρίνεται με την ροπή στον άξονα της γεννήτριας T_{shaft} , και η διαφορά τροφοδοτείται σε έναν ολοκληρωτή με κέρδος την σταθερά αδρανείας H της πτερωτής. Το αποτέλεσμα είναι η γωνιακή ταχύτητα της πτερωτής ω_{wt} , και αποτελεί την πρώτη έξοδο του συστήματος.

Η δεύτερη είσοδος είναι η γωνιακή ταχύτητα του άξονα της γεννήτριας w_e , η οποία συγκρίνεται με την προηγούμενη ω_{wt} της πτερωτής. Η διαφορά τους τροφοδοτεί έναν ΠΙ ελεγκτή με κέρδος ολοκλήρωσης τη σκληρότητα k και αναλογικό κέρδος την σταθερά απόσβεσης c . Το αποτέλεσμα είναι η ροπή στον άξονα της γεννήτριας T_{shaft} , και αποτελεί την δεύτερη έξοδο του συστήματος. Η ακόλουθες σχέσεις επιτάχυνσης αποδεικνύουν τα παραπάνω [7]:

$$T_{wt} - T_{shaft} = 2H \cdot \frac{d\omega}{dx} \Rightarrow \omega = \frac{1}{2H} \cdot \int (T_{wt} - T_{shaft}) dt$$

$$2J_{gen} \frac{dw_e}{dt} = T_{shaft} + k\theta_{rg} + c(w_{wt} - w_e)$$

2.4 Σύγχρονη πολύ-πολική γεννήτρια με τύλιγμα διέγερσης

Η γεννήτρια του συστήματος που εξετάζουμε είναι σύγχρονη πολύ-πολική με τύλιγμα διέγερσης. Η βιβλιοθήκη του Simulink έχει αρκετά μοντέλα προσομοίωσης σύγχρονης μηχανής, αλλά επιλέχθηκε αυτό σε pu standard, όπου οι είσοδοι και τα μετρούμενα μεγέθη δίνονται σε ανά μονάδα(pu). Το μοντέλο λαμβάνει υπόψη τα δυναμικά φαινόμενα του στάτη, του πεδίου διέγερσης και των τυλιγμάτων απόσβεσης. Το ισοδύναμο κύκλωμα αναπαρίσταται σε dq-πλαίσιο περιστρεφόμενο με τη γωνιακή ταχύτητα του δρομέα. Όλοι οι παράμετροι του δρομέα και τα ηλεκτρικά μεγέθη είναι ανηγμένα στον στάτη. Οι εξισώσεις που περιγράφουν το σύστημα αναφέρονται σε μεγέθη του d και q άξονα, και έχουν ως εξής:

$$V_d = R_s i_d + \frac{d\varphi_d}{dt} - \omega_R \varphi_q$$

$$V_q = R_s i_q + \frac{d\varphi_q}{dt} + \omega_R \varphi_d$$

$$V'_{fd} = R'_{fd} i'_{fd} + \frac{d\varphi'_{fd}}{dt}$$

$$V'_{kd} = R'_{kd} i'_{kd} + \frac{d\varphi'_{kd}}{dt}$$

$$V'_{kq1} = R'_{kq1} i'_{kq1} + \frac{d\varphi'_{kq1}}{dt}$$

$$V'_{kq2} = R'_{kq2} i'_{kq2} + \frac{d\varphi'_{kq2}}{dt}$$

όπου

$$\varphi_d = L_d i_d + L_{md} (i'_{fd} + i'_{kd})$$

$$\varphi_q = L_q i_q + L_{mq} i'_{kq}$$

$$\varphi'_{fd} = L'_{fd} i'_{fd} + L_{md} (i_d + i'_{kd})$$

$$\varphi'_{kd} = L'_{kd} i'_{kd} + L_{md} (i_d + i'_{fd})$$

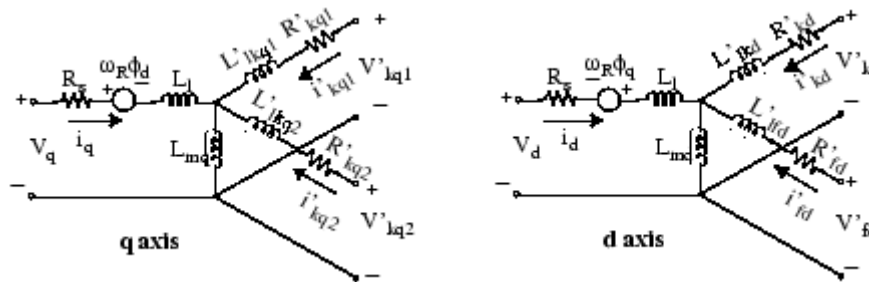
$$\varphi'_{kq1} = L'_{kq1} i'_{kq1} + L_{mq} i_q$$

$$\varphi'_{kq2} = L'_{kq2} i'_{kq2} + L_{mq} i_q$$

Τα σύμβολα που χρησιμοποιούνται αναφέρονται σε :

- D, q : d και q μέγεθος
- R, s : δρομέα και στάτη
- L, m : σκέδασης και μαγνήτισης
- F, k : τυλίγματος πεδίου και απόσβεσης

Το ηλεκτρικό μοντέλο φαίνεται στο σχήμα 2.8 :



Σχήμα 2.9 : Ηλεκτρικό μοντέλο μηχανής.

Η είσοδος του μοντέλου είναι η μηχανική ισχύς P_{m_gen} που εφαρμόζεται στον άξονα της γεννήτριας. Αυτή υπολογίζεται από τον πολλαπλασιασμό της μηχανικής ροπής T_{shaft} που υπολογίσαμε στο προηγούμενο κομμάτι επί την γωνιακή ταχύτητα του δρομέα της γεννήτριας ω_e . Τα μεγέθη έχουν ανά μονάδα τιμές. Η έξοδος της γεννήτριας συνδέεται, όπως αναφέρθηκε με τον τριφασικό ανορθωτή. Η ύπαρξη του ανορθωτή επιβάλλει την λειτουργία της γεννήτριας υπό μοναδιαίο συντελεστή ισχύος. Στην πραγματικότητα τα φαινόμενα μεταγωγής του ρεύματος εισάγουν μια φασική μετατόπιση του ρεύματος σε σχέση με την τάση, δηλαδή ο ανορθωτής καταναλώνει μικρή ποσότητα αέργου ισχύος. Επιπλέον η τάση εξόδου της γεννήτριας δεν επιβάλλεται από το σύστημα που αυτή συνδέεται αλλά προκύπτει από την ΗΕΔ και εμφανιζόμενες πτώσεις τάσης.[4]

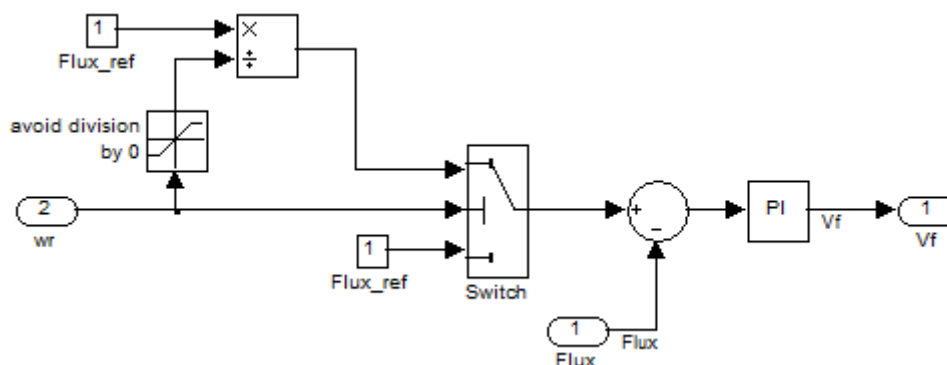
❖ Σύστημα διέγερσης

Εκτός από τον έλεγχο των ρευμάτων του στάτη της γεννήτριας από τον DC/DC μετατροπέα, είναι απαραίτητος και ο έλεγχος της τάσης στο τυλίγμα διέγερσης στον δρομέα. Γενικά υψηλή τάση διέγερσης αυξάνει την μέγιστη ηλεκτρική ροπή που μπορεί να παραχθεί από τη γεννήτρια αλλά αυξάνει επίσης και τις απώλειες σιδήρου. Έτσι, σε λειτουργία χαμηλών ταχυτήτων ανέμου, και επομένως χαμηλή ταχύτητα δρομέα, η τάση διέγερσης πεδίου μπορεί να μειωθεί καθώς οι απαιτήσεις ροπής είναι μικρές. Από την άλλη, σε υψηλές ταχύτητες ανέμου, απαιτείται υψηλή διέγερση ώστε η γεννήτρια να μπορεί να αναπτύξει την πλήρη ροπή[8].

Επίσης, για την απόσβεση των μηχανικών ταλαντώσεων είναι απαραίτητη η σχεδίαση ενός σταθεροποιητή, ο οποίος όπως αναφέρθηκε δίνει ένα επιπρόσθετο σήμα που ρυθμίζει ανάλογα

τη διέγερση της γεννήτριας. Το σήμα αυτό αναγκάζει την γεννήτρια να παράγει μια συνιστώσα ηλεκτρικής ροπής η οποία είναι σε φάση με την μεταβολή της γωνιακής ταχύτητας της. Έτσι με μια αύξηση της γωνιακής ταχύτητας θα πρέπει να προκαλείται ταυτόχρονη αύξηση στην ηλεκτρική ροπή της γεννήτριας, προς αναίρεση της προηγούμενης αύξησης. Με άλλα λόγια η χρήση του σταθεροποιητή θα προκαλεί μια καθαρά θετική ροπή απόσβεσης στη συχνότητα των ταλαντώσεων που οφείλονται στον κινητήριο άξονα.

Στην παρούσα εργασία, το σύστημα έλεγχου της τάσης του τυλίγματος διέγερσης είναι πιο απλό, σχήμα 2.10. Όσο η ταχύτητα του δρομέα βρίσκεται κάτω από την ονομαστική, φροντίζει ώστε η μαγνητική ροή στο στάτη να είναι ίση με την ονομαστική. Έτσι σε περίπτωση μείωσης των στροφών μειώνει αντίστοιχα και την τάση διέγερσης. Όταν η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα ξεπεράσει την ονομαστική του τιμή, τότε δρα βοηθητικά με το σύστημα ελέγχου της γωνίας pitch φρενάροντας τον δρομέα.



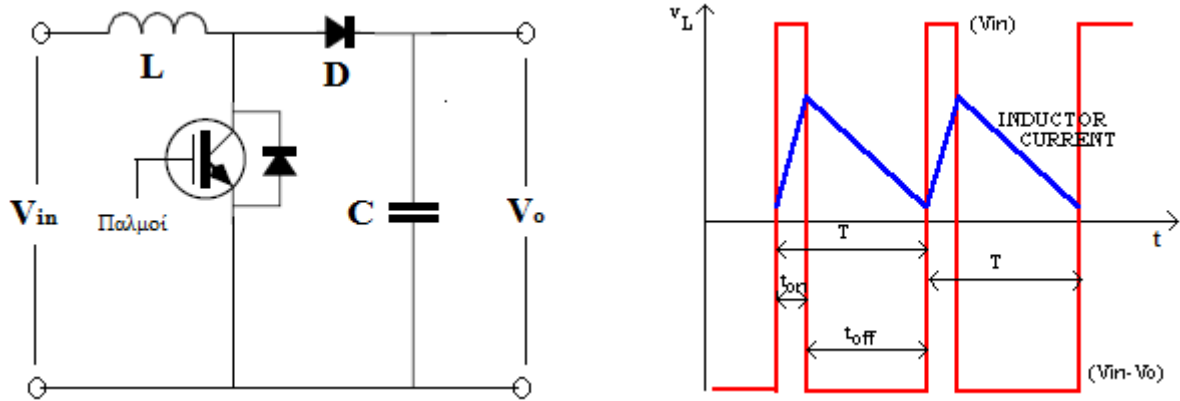
Σχήμα 2.10 : Σύστημα ελέγχου διέγερσης γεννήτριας(Excitation control system).

2.5 DC-DC μετατροπέας ανύψωσης τάσης

Οι μετατροπείς dc-dc χρησιμοποιούνται ευρέως σε σταθεροποιημένες dc τροφοδοσίες διακοπτικού τύπου και σε εφαρμογές dc κινητήριων συστημάτων. Η είσοδος αυτών των μετατροπέων είναι συχνά μια μη σταθεροποιημένη dc τάση, η οποία λαμβάνεται από ανόρθωση της τάσης του δικτύου ή μιας γεννήτριας. Οι dc-dc μετατροπείς χρησιμοποιούνται για τη μετατροπή της μη σταθεροποιημένης dc εισόδου σε μια ελεγχόμενη dc έξοδο[9].

Στο σύστημά μας ο μετατροπέας είναι τύπου ανύψωσης τάσης(DC-DC Boost Converter) και η τοπολογία του φαίνεται στο σχήμα 2.11α. Αποτελείται από μια συσκευή ισχύος διακοπτικής φύσεως, η οποία περιέχει δυο ημιαγωγικούς διακόπτες: μια δίοδο και ένα τρανζίστορ ισχύος (IGBT) με την αντιπαράλληλη δίοδό του. Επίσης περιλαμβάνει και δύο στοιχεία αποθήκευσης ενέργειας: ένα πηνίο και έναν πυκνωτή εξομάλυνσης. Ο ρόλος αυτού του μετατροπέα είναι η ανύψωση της dc τάσης σε υψηλότερο επίπεδο, λειτουργώντας σαν συνδεδετικός κρίκος ανάμεσα στην τριφασική μη ελεγχόμενη ανόρθωση στην πλευρά της γεννήτριας και τον αντιστροφέα στην πλευρά του δικτύου. Πιο συγκεκριμένα εφαρμόζοντας τεχνικές ελέγχου PWM, ρυθμίζεται

κατάλληλα το ρεύμα της γεννήτριας για να επιτύχει συγκεκριμένο αριθμό στροφών που θα εξασφαλίσουν ότι η Α/Γ θα λειτουργεί υπό βέλτιστο αεροδυναμικό συντελεστή.



Σχήμα 2.11: (α) Κύκλωμα dc-dc boost converter (β) Τάση και ρεύμα στο πηνίο του μετατροπέα σε λειτουργία συνεχούς ρεύματος.

Όπως υποδηλώνει το όνομά του, η τάση εξόδου είναι πάντα μεγαλύτερη από την τάση εισόδου. Όταν ο διακόπτης (IGBT) είναι κλειστός, η διόδος είναι ανάστροφα πολωμένη, απομονώνοντας έτσι την βαθμίδα εξόδου. Η είσοδος τότε παρέχει ενέργεια στο πηνίο. Όταν ο διακόπτης είναι ανοιχτός, η διόδος πολώνεται ορθά και η βαθμίδα εξόδου απορροφά ενέργεια από το πηνίο και από την έξοδο[9]. Η τάση του πηνίου δίνεται από τον τύπο :

$$V_L = L \frac{di_L}{dt} \quad (1)$$

Όταν το IGBT άγει (t_{on}), τότε η τάση του πηνίου ισούται με αυτή της τάσης εισόδου ($V_L=V_{in}$). Όταν το IGBT δεν άγει (t_{off}), τότε η τάση του πηνίου ισούται με την τάση εισόδου μείον την τάση εξόδου ($V_L=V_{in}-V_{out}$). Στην μόνιμη κατάσταση ισορροπίας και σε λειτουργία συνεχούς ρεύματος το ρεύμα στην αρχή και το τέλος της περιόδου T είναι ίδιο. Έτσι προκύπτει ότι το ολοκλήρωμα της τάσης του πηνίου στο διάστημα μια περιόδου ισούται με μηδέν. Άρα και η μέση τιμή της τάσης του πηνίου είναι μηδέν. Από το σχήμα 2.11β προκύπτει ότι :

$$V_{in} \cdot t_{on} + (V_{in} - V_o) \cdot t_{off} = 0 \quad (2)$$

Η μία περίοδος είναι :

$$T = t_{on} + t_{off} \quad (3)$$

και ο λόγος κατάτμησης (Duty cycle) είναι :

$$D = \frac{t_{on}}{T}$$

Διαιρώντας την (2) με T και χρησιμοποιώντας την (3) έχουμε :

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{T}{t_{off}} = \frac{1}{1-D}$$

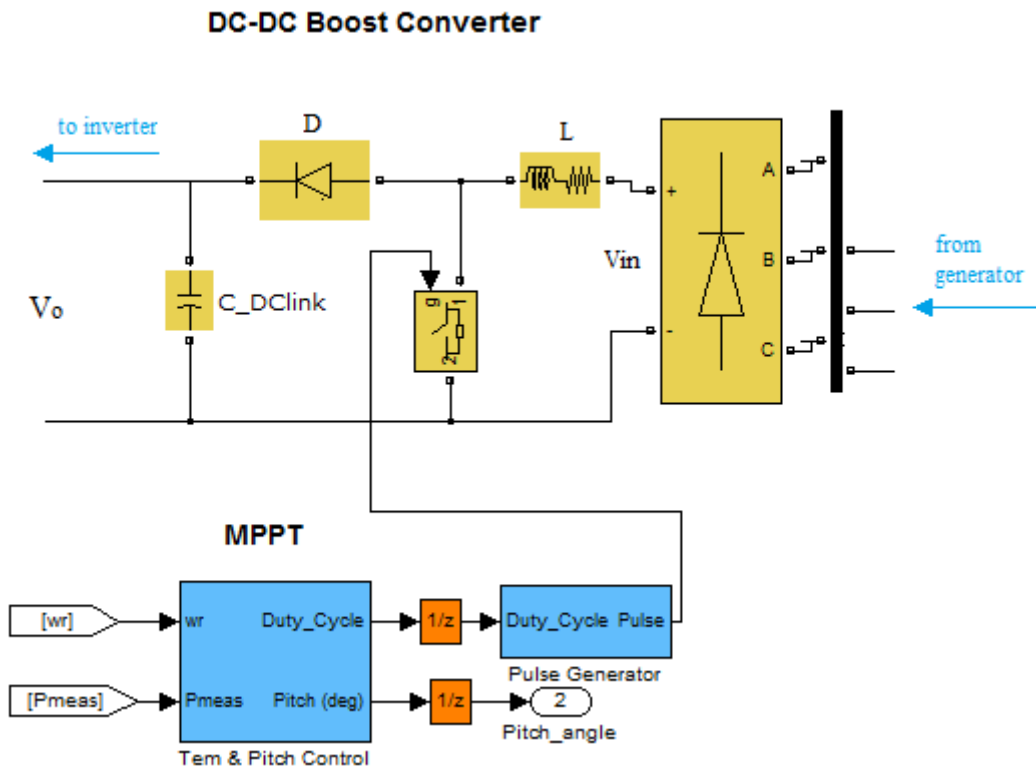
Θεωρώντας ότι οι απώλειες στο κύκλωμα είναι μηδενικές , $P_{in}=P_o$:

$$V_{in} \cdot I_{in} = V_o \cdot I_o$$

άρα :

$$\frac{I_o}{I_{in}} = (1-D) \tag{4}$$

Για το μοντέλο που μελετάμε, ο μετατροπέας ανύψωσης τάσης μαζί με τον τριφασικό μη ελεγχόμενο ανορθωτή γέφυρας διακρίνονται στο σχήμα 2.12. Οι δίοδοι του ανορθωτή περιλαμβάνουν κύκλωμα προστασίας R_s-C_s (R_s-C_s snubber) με τιμές αντίστασης $R_s=9,04\Omega$ και τιμή χωρητικότητας $C_s=110\mu F$. Παρομοίως ο ιδανικός διακόπτης του μετατροπέα ανύψωσης έχει αντίσταση snubber $10k\Omega$. Τα κυκλώματα εξωτερικής προστασίας(snubber) προστίθενται στον βασικό μετατροπέα ώστε να μειωθούν οι καταπονήσεις των ημιαγωγικών στοιχείων ισχύος σε ασφαλή επίπεδα[9]. Το πηνίο που χρησιμοποιήθηκε για τον μετατροπέα ανύψωσης, έχει αυτεπαγωγή $L_{boost}=1.2mH$ και αντίσταση $R_{boost}=5m\Omega$. Επίσης, ο πυκνωτής στο dc-bus έχει χωρητικότητα $C_{boost}=90mF$ και ο ελεγκτής του αντιστροφέα στην πλευρά του δικτύου φροντίζει ώστε η dc τάση στα άκρα του να παραμένει σταθερή στα 1100V. Στο σχήμα διακρίνεται επίσης και ο MPPT ελεγκτής ο οποίος παρέχει τους παλμούς για το διακοπτικό στοιχείο του dc-dc μετατροπέα. Περισσότερο για αυτό θα μιλήσουμε στη συνέχεια.



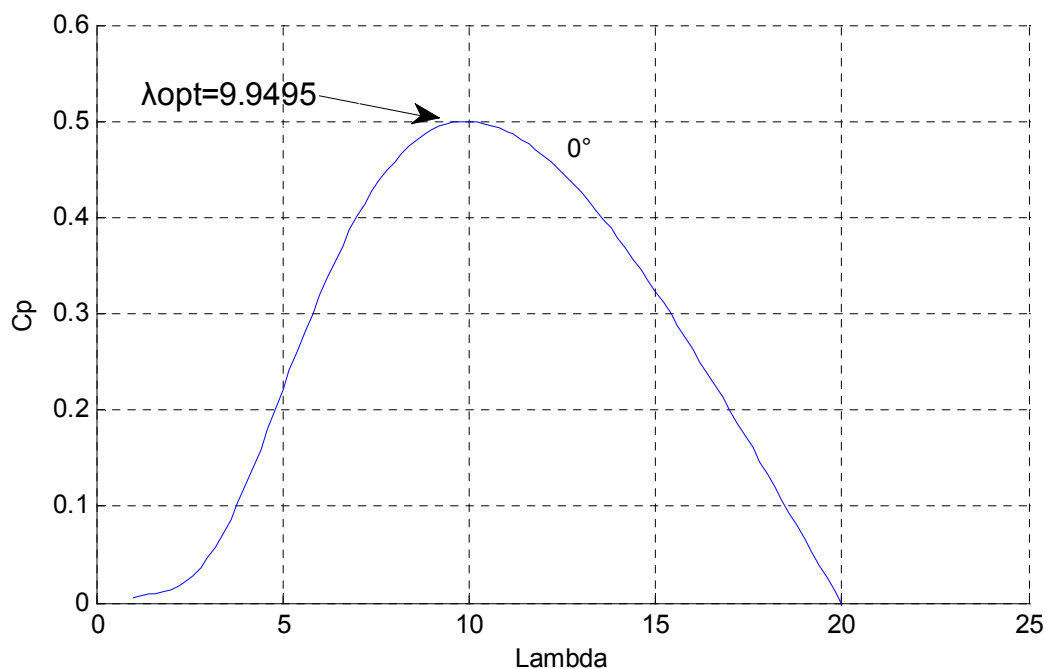
Σχήμα 2.12 : Προσομοίωση dc-dc μετατροπέα ανύψωσης.

2.5.1 Ανίχνευση σημείου μέγιστης ισχύος(MPPT)

Όπως επισημάνθηκε στο κεφάλαιο 2.2, ο ανεμοκινητήρας, ανάλογα με την ταχύτητα του ανέμου, ακολουθεί συγκεκριμένη χαρακτηριστική καμπύλη ισχύος-γωνιακής ταχύτητας(σχήμα 2.5). Για κάθε ταχύτητα ανέμου, η μέγιστη ισχύς που δύναται να παραχθεί από τον Α/Κ πραγματοποιείται όταν η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα ω_r εξασφαλίζει τον λόγο $\lambda=\lambda_{opt}$, δηλαδή για ταχύτητα ανέμου V_w ισχύει :

$$\lambda_{opt} = \frac{R \cdot \omega_r}{V_w}$$

Με άλλα λόγια η ανεμογεννήτρια πρέπει να ακολουθεί την καμπύλη βέλτιστης ισχύος, όπως δείχνει η διακεκομμένη κόκκινη γραμμή στο σχήμα 2.5. Έτσι οι αλγόριθμοι εύρεσης μέγιστης ισχύος προσπαθούν, για κάθε ταχύτητα ανέμου V_w , να διατηρήσουν τα σημεία λειτουργίας του συστήματος στο μέγιστο συντελεστή C_{pmax} .



Σχήμα 2.13 : Μεταβολή του C_p συναρτήσει του λ για μηδενική γωνία βήματος έλικας.

Μέχρι το σημείο που η Α/Γ φτάνει τις ονομαστικές της στροφές η κλίση των πτερυγίων είναι 0° και τα σημεία λειτουργίας βρίσκονται πάνω στην καμπύλη του σχήματος 2.13. Όταν ένα σημείο βρίσκεται στην περιοχή θετικής κλίσης της καμπύλης(αριστερά του λ_{opt}) τότε ο ελεγκτής αναλαμβάνει να το μετακινήσει προς τα δεξιά, και συγκεκριμένα στη μέγιστη τιμή του λόγου ταχύτητας των ακροπτερυγίων λ_{opt} . Για να το κάνει αυτό, σύμφωνα με τον προηγούμενο τύπο, πρέπει να δώσει εντολή για αύξηση των στροφών μέχρι το σημείο βέλτιστης απόδοσης.

Αντίστοιχα, εντολή μείωσης των στροφών πρέπει να δοθεί από τον ελεγκτή εάν το σημείο λειτουργίας βρίσκεται στη περιοχή αρνητικής κλίσης της καμπύλης.

Οι εντολές αύξησης ή μείωσης των στροφών είναι ουσιαστικά παλμοί PWM που στέλνονται από τον ελεγκτή προς το διακοπτικό στοιχείο (π.χ.IGBT) του μετατροπέα ανύψωσης τάσης. Οι παλμοί αυτοί καθορίζουν τον λόγο κατάτμησης D (duty cycle) του ημιαγωγικού στοιχείου και επομένως σύμφωνα με τον τύπο (4) ελέγχουν το ρεύμα της γεννήτριας. Έλεγχος του ρεύματος της γεννήτριας συνεπάγεται και έλεγχος της ηλεκτρικής της ροπής, και άρα της ταχύτητας περιστροφής του δρομέα.

Το σημείο μέγιστης ισχύος(Maximum Power Point) δύναται να ανιχνευθεί με διάφορες τεχνικές από τον ελεγκτή. Οι τεχνικές MPPT που απαντώνται σήμερα στην βιβλιογραφία είναι τρεις και μπορούν να χωριστούν στις εξής κατηγορίες :

- I. Εύρεση του MPP από δοσμένες χαρακτηριστικές καμπύλες.
- II. Εύρεση του MPP χωρίς τη χρήση χαρακτηριστικών καμπυλών. Οι δυο πιο σημαντικοί μέθοδοι είναι :
 - a. Έλεγχος μέσω συνεχών αλλαγών και συγκρίσεων (Perturbation and observation, P&O).
 - b. Έλεγχος βασισμένος σε ασαφή λογική (Fuzzy Logic Control)

Στην παρούσα εργασία θα χρησιμοποιηθεί η πρώτη τεχνική την οποία θα περιγράψουμε στην συνέχεια. Μετά θα αναφερθούμε περιληπτικά στις άλλες δυο τεχνικές[10].

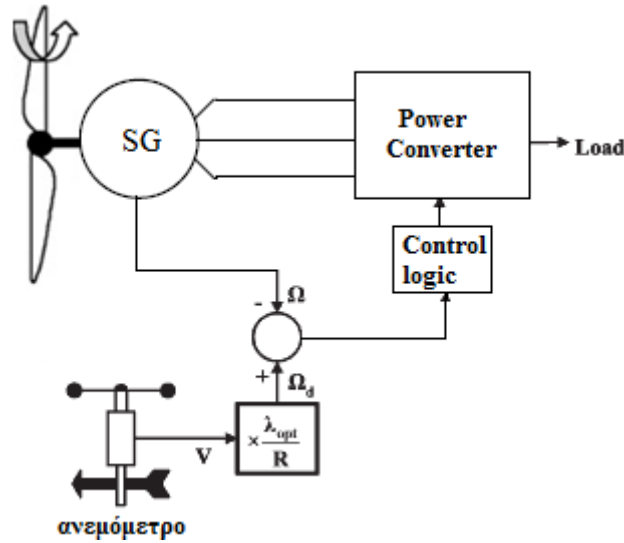
2.5.1.α Μέθοδος βασισμένη σε δεδομένες χαρακτηριστικές καμπύλες

Είναι η μέθοδος MPPT που χρησιμοποιείται πιο συχνά και βασίζεται στη γνώση της σχέσης $C_p(\lambda,\beta)$ που χαρακτηρίζει τον ανεμοκινητήρα ,όπως είδαμε στο κεφάλαιο 2.2. Από τη σχέση αυτή προκύπτουν οι χαρακτηριστικές καμπύλες ισχύος-στροφών(σχήμα 2.5) ή ροπής-στροφών, οι οποίες αποθηκεύονται σε ένα μικροεπεξεργαστή.

Γενικά γνωρίζοντας τη σχέση αεροδυναμικού συντελεστή C_p , το ζητούμενο είναι ποιο από τα μεγέθη της τύπου αεροδυναμικής ισχύος θα πρέπει να μετράμε. Το μετρούμενο μέγεθος θα αντιστοιχίζεται στην χαρακτηριστική καμπύλη που είναι αποθηκευμένη και θα προκύπτει η τιμή αναφοράς για ένα άλλο ελεγχόμενο μέγεθος. Γενικά υπάρχουν δύο λύσεις :

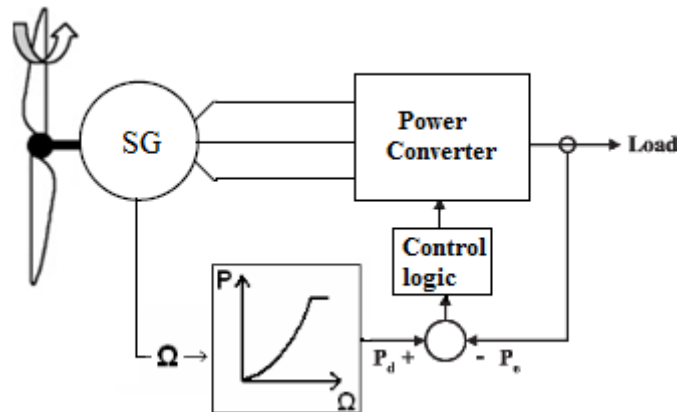
- **Μέτρηση ταχύτητας ανέμου :** γνωρίζοντας την ταχύτητα του ανέμου V_w , βρίσκουμε, μέσω του λόγου ταχύτητας ακροπερυγίου λ (ο οποίος είναι σταθερός και ίσος με την ιδανική τιμή $\lambda=\lambda_{opt}$), την απαιτούμενη ταχύτητα περιστροφής ω_{ref} . Επίσης, μπορούμε να βρούμε την απαιτούμενη ισχύ που πρέπει να παράγει το σύστημα P_{ref} , μέσω της σχέσης αεροδυναμικής ισχύος(για $C_p=C_{pmax}$). Τα μεγέθη αναφοράς που προκύπτουν συγκρίνονται με τα μετρούμενα και το σφάλμα χρησιμοποιείται ως εντολή για τον έλεγχο του dc-dc μετατροπέα. Η μέθοδος αυτή απαιτεί ανεμόμετρο για την μέτρηση της

ταχύτητας του ανέμου και δεν ενδείκνυται για Α/Γ μικρού μεγέθους. Στο σχήμα 2.14 φαίνεται η συγκεκριμένη λογική MPPT για γεννήτρια μονίμων μαγνητών.

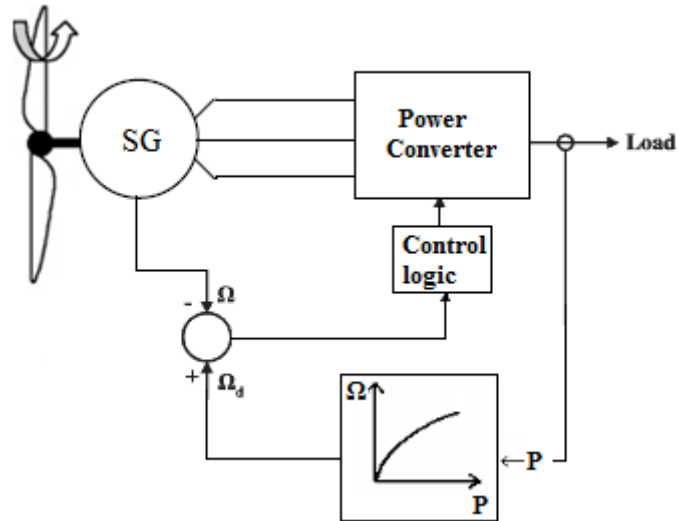


Σχήμα 2.14 : Έλεγχος στροφών γεννήτριας βασισμένος σε μετρήσεις ανέμου[11].

- Χωρίς μέτρηση της ταχύτητας του ανέμου :** σε αυτή την περίπτωση δεν απαιτείται γνώση της ταχύτητας του ανέμου. Αυτό που μετράται είναι η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα, από την οποία, μέσω της χαρακτηριστικής καμπύλης, προκύπτει η μέγιστη δυνατή ισχύς που δύναται να αποδοθεί P_{ref} . Αυτή συγκρίνεται με την ισχύ εξόδου της διάταξης και το σφάλμα χρησιμοποιείται ως εντολή για τον έλεγχο του μετατροπέα ο οποίος αναλαμβάνει να προσαρμόσει κατάλληλα τις στροφές της γεννήτριας. Η ισχύς δεν είναι κατά ανάγκη το μοναδικό μέγεθος που προκύπτει ως αναφορά. Αναλόγως αν μπορούμε να μετρήσουμε την ροπή ή το ρεύμα στη γεννήτρια, τότε το μέγεθος αναφοράς θα είναι η μέγιστη ροπή T_{ref} ή το μέγιστο ρεύμα I_{ref} αντίστοιχα. Στο σχήμα 2.15 φαίνεται η εν λόγω μέθοδος. Αντιστρόφως σε άλλα συστήματα, από την μετρούμενη ισχύ εξόδου υπολογίζεται η βέλτιστη ταχύτητα περιστροφής ω_{ref} . Αυτή συγκρίνεται με την παρούσα και το σφάλμα ταχύτητας είναι αυτό που χρησιμοποιείται για να ελέγξει τον μετατροπέα. Η τελευταία μέθοδος MPPT είναι αυτή που χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία(σχήμα 2.16).

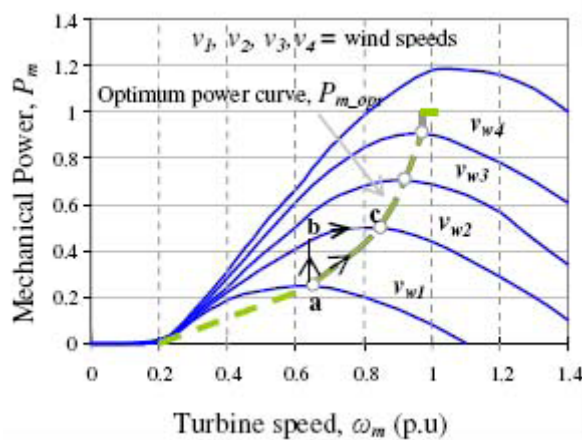


Σχήμα 2.15 : Έλεγχος στροφών γεννήτριας βασισμένο σε μετρήσεις της ταχύτητας περιστροφής του δρομέα[11].



Σχήμα 2.16 : Έλεγχος στροφών γεννήτριας βασισμένο σε μετρήσεις της ισχύος εξόδου[11].

Σε γενικές γραμμές η αναζήτηση του σημείου λειτουργίας μέγιστης ισχύος λειτουργεί όπως φαίνεται στο σχήμα 2.17. Έστω ότι η Α/Γ λειτουργεί στο σημείο ‘a’, και ο άνεμος έχει ταχύτητα V_{w1} . Στο σημείο αυτό η μηχανική ροπή T_m , που ασκείται στον άξονα ισούται με την ηλεκτρική ροπή της γεννήτριας T_e . Η ταχύτητα του ανέμου αυξάνει σε V_{w2} . Τότε το σημείο λειτουργίας της Α/Γ μετατοπίζεται στο σημείο ‘b’ όπου η μηχανική ροπή T_m αυξάνεται και η ηλεκτρική ροπή παραμένει σταθερή στο σημείο ‘a’. Η επιπλέον ισχύς, που οφείλεται σε αυτή τη διαφορά ροπών στον άξονα, οδηγεί την γεννήτρια σε επιτάχυνση. Η καινούρια ισχύς δίνει επίσης νέα μεγαλύτερη τιμή αναφοράς για την ταχύτητα περιστροφής. Η ισχύς αυξάνεται εκ νέου όπως και η γωνιακή ταχύτητα αναφοράς. Η διαδικασία συνεχίζεται, με το καινούριο σημείο να ακολουθεί την καμπύλη V_{w2} μέχρι το σημείο ‘c’ όπου οι 2 ροπές γίνονται ίσες. Η διαδικασία είναι παρόμοια όταν η ταχύτητα του ανέμου μειώνεται.



Σχήμα 2.17 : Διαδικασία αναζήτησης του σημείου μέγιστης ισχύος με βάση χαρακτηριστική καμπύλη.

2.5.1.β Μέθοδος ανεύρεσης του σημείου μέγιστης ισχύος μέσω μικρών μεταβολών(P&Os) [10],[11].

Η προηγούμενη μέθοδος MPPT παρόλο ότι χαρακτηρίζεται από την απλότητά της φέρει αρκετά μειονεκτήματα. Αυτά βασίζονται στο γεγονός ότι οι καμπύλες που χαρακτηρίζουν τον ανεμοκινητήρα δεν ταυτίζονται πάντα με τα πραγματικά χαρακτηριστικά του. Η ακρίβειά τους δεν είναι απόλυτη και μειώνεται με την γήρανση του μηχανολογικού μέρους. Λόγω αυτών των μειονεκτημάτων έχουν αναπτυχθεί μέθοδοι που δεν βασίζονται σε χαρακτηριστικές καμπύλες. Μία από αυτές είναι η μέθοδος ανεύρεσης του σημείου μέγιστης ισχύος μέσω μικρών μεταβολών(Perturbations and observations, P&Os).

Η μέθοδος ανίχνευσης σημείου μέγιστης ισχύος μέσω μικρών μεταβολών πετυχαίνει την εύρεση του επιθυμητού σημείου μέσω συνεχών αλλαγών και συγκρίσεων (perturbations and observations, P&Os). Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή λαμβάνονται ανά συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα μετρήσεις του ανορθωμένου ρεύματος, της τάσης της γεννήτριας και κατ' επέκταση της ισχύος εξόδου. Μέσω του dc/dc μετατροπέα ανυψωτή γίνονται αλλαγές του φορτίου άρα και της ισχύος εξόδου της γεννήτριας. Η νέα ισχύς μετράται και συγκρίνεται με την προηγούμενη τιμή. Ανάλογα με το αν η νέα τιμή της ισχύος είναι μικρότερη ή μεγαλύτερη ο μετατροπέας λαμβάνει κατάλληλη δράση ώστε να οδηγείται σε αύξηση της ισχύος εξόδου έως το μέγιστο.

Παρ' όλο που η ταχύτητα ανέμου μεταβάλλεται σχετικά γρήγορα με το χρόνο, η ισχύς που απορροφάται από την ανεμογεννήτρια μεταβάλλεται σχετικά αργά, λόγω της αργής απόκρισης που έχει το σύστημα ανεμοκινητήρα-γεννήτριας. Κατά συνέπεια το πρόβλημα της μεγιστοποίησης ισχύος χρησιμοποιώντας τον λόγο κατάτμησης D , μπορεί να λυθεί σύμφωνα με τον παρακάτω τύπο :

$$D_k = D_{k-1} + C_1 \cdot \frac{\Delta P_{k-1}}{\Delta D_{k-1}} \quad (5)$$

όπου το D_k και D_{k-1} είναι οι τιμές του λόγου κατάτμησης για τις επαναλήψεις k και $k-1$, αντίστοιχα (όπου ισχύει $0 < D_k < 1$) Το $\Delta P_{k-1}/\Delta D_{k-1}$ είναι η κλίση της ισχύος εξόδου στην επανάληψη $k-1$ και C_1 μια σταθερά που αντιπροσωπεύει το βήμα αλλαγής.

Προκειμένου να εξασφαλιστεί ότι αυτή η μέθοδος οδηγεί στη σύγκλιση του σημείου μέγιστης ισχύος σε οποιοδήποτε επίπεδο ταχύτητας ανέμου, είναι επαρκές να αποδειχθεί ότι η σχέση $P(D)$, που σχετίζει την ισχύ εξόδου και τον λόγο κατάτμησης D του dc/dc μετατροπέα, έχει ένα μοναδιαίο ακραίο σημείο που συμπίπτει με το αντίστοιχο σημείο μέγιστης ισχύος της χαρακτηριστικής ισχύος-στροφών. Γνωρίζουμε όμως ότι στα σημεία μέγιστης ισχύος θα ισχύει :

$$\frac{dP}{d\Omega} = 0 \quad (6)$$

όπου Ω είναι η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του δρομέα . Η σχέση (6) μπορεί να γραφτεί και ως εξής :

$$\frac{dP}{d\Omega} = \frac{dP}{dD} \cdot \frac{dD}{dV_{WG}} \cdot \frac{dV_{WG}}{d\Omega_e} \cdot \frac{d\Omega_e}{d\Omega} = 0 \quad (7)$$

όπου V_{WG} είναι η ανορθωμένη τάση εξόδου της γεννήτριας και Ω_e είναι η ηλεκτρική γωνιακή ταχύτητα της γεννήτριας.

Σε περίπτωση ανυψωτή μετατροπέα dc/dc, η τάση εισόδου της συσχετίζεται με την τάση εξόδου V_o και τον λόγο κατάτμησης D ως εξής:

$$V_{WG} = (1 - D) \cdot V_o \Leftrightarrow D = 1 - \frac{V_{WG}}{V_o}$$

$$\frac{dD}{dV_{WG}} = -\frac{1}{V_o} \neq 0 \quad (8)$$

Η ταχύτητα του δρομέα σχετίζεται με την ηλεκτρική γωνιακή ταχύτητα ως εξής :

$$\Omega_e = p \cdot \Omega$$

$$\frac{d\Omega_e}{d\Omega} = p > 0 \quad (9)$$

όπου p ο αριθμός ζευγαριών πόλων.

Η ανορθωμένη τάση εξόδου της γεννήτριας V_{WG} είναι ανάλογη προς τη φασική τάση V_{ph} , ενώ αυξάνεται η τιμή της καθώς αυξάνονται οι στροφές της γεννήτριας και άρα καταλήγουμε στις παρακάτω σχέσεις :

$$\frac{dV_{ph}}{d\Omega_e} > 0$$

και

$$\frac{dV_{WG}}{d\Omega_e} > 0 \quad (10)$$

Από τις σχέσεις (7),(8),(9) και (10) προκύπτει ότι :

$$\frac{dP}{dD} = 0$$

Που αποδεικνύει πως όντως έχει η σχέση $P(D)$, που σχετίζει την ισχύ εξόδου και τον λόγο κατάτμησης D του dc/dc μετατροπέα, έχει ένα μοναδιαίο ακραίο σημείο που συμπίπτει με το αντίστοιχο σημείο μέγιστης ισχύος της χαρακτηριστικής ισχύος-στροφών. Άρα η ρύθμιση του λόγου κατάτμησης D εξασφαλίζει σύγκλιση στο επιθυμητό σημείο υπό οποιαδήποτε ταχύτητα ανέμου.

Δεδομένου τώρα ότι η ρύθμιση του λόγου κατάτμησης D ακολουθεί την κατεύθυνση της κλίσης dP/dD , όταν $dP/dD > 0$ το D αυξάνεται, με αποτέλεσμα την μείωση της ταχύτητας και την

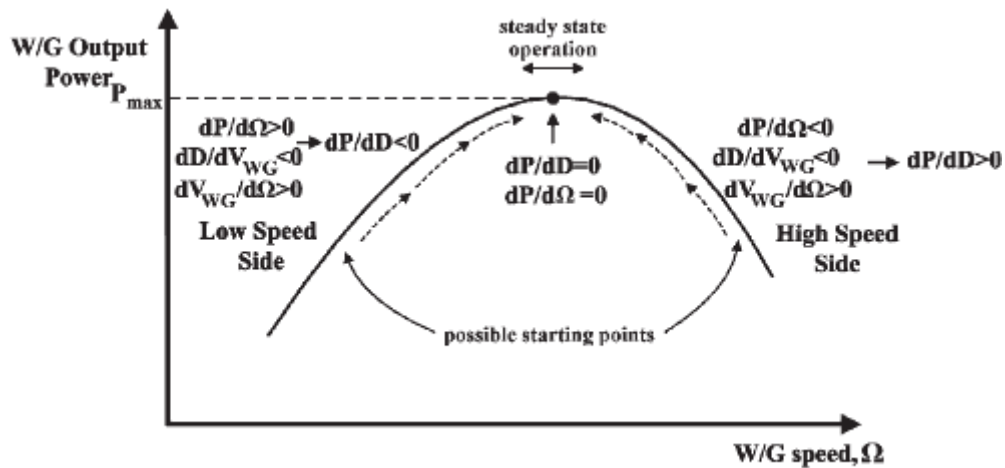
αύξηση της ισχύος, μέχρι να ανιχνευτεί το σημείο μέγιστης ισχύος. Ομοίως όταν $dP/dD < 0$, το D μειώνεται, η ταχύτητα αυξάνεται, μέχρι να ανιχνευτεί το σημείο μέγιστης ισχύος. Στο σχήμα 2.18 παρουσιάζεται διαγραμματικά η λειτουργία του αλγορίθμου ανίχνευσης σημείων μέγιστης ισχύος με μικρές αλλαγές.

Για να μειωθεί η επίδραση της ακρίβειας του αισθητήρα στη μέτρηση της παραγόμενης ισχύος, ο νόμος ελέγχου της σχέσης (5) έχει εφαρμοστεί βασιζόμενη σε αυξανόμενες μετρήσεις ισχύος, παρά σε απόλυτες μετρήσεις, ως εξής :

$$D_k = D_{k-1} + \Delta D_{k-1}$$

$$\Delta D_{k-1} = C_2 \cdot \text{sign}(\Delta D_{k-2}) \cdot \text{sign}(P_{in,k-1} - P_{in,k-2})$$

- όπου ΔD_{k-1} : είναι η αλλαγή του λόγου κατάτμησης στο βήμα k-1
- $P_{in,k-1}$: είναι η ισχύς εισόδου για τον μετατροπέα σε βήμα k-1
- $P_{in,k-2}$: είναι η ισχύς εισόδου για τον μετατροπέα σε βήμα k-2
- C_p : είναι σταθερά που καθορίζει την ταχύτητα και την ακρίβεια της σύγκλισης



Σχήμα 2.18 : Διαδικασία MPPT με χρήση αλγορίθμου P&O [11].

2.5.1.γ Μέθοδος ανεύρεσης του σημείου μέγιστης ισχύος βασισμένος σε ασαφή λογική (Fuzzy Logic)[3][10].

Μια άλλη μέθοδος MPPT που δεν προϋποθέτει την αποθήκευση χαρακτηριστικών καμπυλών, είναι αυτή που βασίζεται σε έλεγχο μέσω ασαφούς λογικής (Fuzzy logic Control). Ο P&O ελεγκτής να μην εξασφαλίζει ανεξάρτητη λειτουργία από τη βέλτιστη χαρακτηριστική καμπύλη, χωρίς ο έλεγχος να γίνεται ιδιαίτερα πολύπλοκος, αλλά πολλές φορές κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες λειτουργίας, όπως γρήγορες ριπές ανέμου, μπορεί να οδηγηθεί σε αποπροσανατολισμό και αδυναμία εντοπισμού του βέλτιστου σημείου λειτουργίας[24]. Οι αρχικοποιήσεις των παραμέτρων όπως το μέγεθος του βήματος αλλά και ο χρόνος είναι πολύ σημαντικές για την σωστή εκτέλεση του ελέγχου. 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. 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).

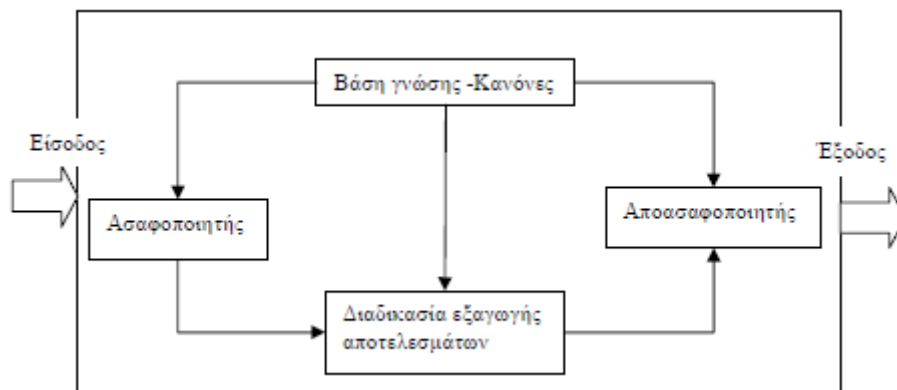
Η διαδικασία αναζήτησης του σημείου μέγιστης ισχύος από τον Fuzzy ελεγκτή είναι παρόμοια με αυτή του P&O, καθώς εκτελείται μέσω ρύθμισης του λόγου κατάτμησης D , η μεταβολή του οποίου έχει άμεση επίδραση στην ισχύ εξόδου της γεννήτριας. Το σύστημα μετρά την ισχύ εξόδου της ανεμογεννήτριας και την συγκρίνει με την αμέσως προηγούμενη. Αν είναι μεγαλύτερη τότε γίνεται μια μεταβολή του λόγου κατάτμησης D προς μια κατεύθυνση (αύξηση ή μείωση), αν είναι μικρότερη τότε η μεταβολή του D γίνεται προς την αντίθετη κατεύθυνση από την αμέσως προηγούμενη. Για να βρει ο ελεγκτής ποια ήταν η κατεύθυνση που είχε πριν την εντολή, εισάγεται στο σύστημα εκτός από τη μεταβολή της ισχύος εξόδου και η μεταβολή του λόγου κατάτμησης D . Έτσι ο ελεγκτής λειτουργεί σε μία λογική «αύξηση του λόγου D έως ότου η εντολή για αύξηση φέρει μείωση της ισχύος και μείωση του λόγου D οσότου η εντολή για μείωση φέρει πάλι μείωση της ισχύος».

Συμπερασματικά οι είσοδοι του ελεγκτή είναι οι ακόλουθες:

- ΔP_g : η μεταβολή της ισχύος εξόδου P_g την χρονική στιγμή t από την τιμή της τη χρονική στιγμή $t-1$, $\Delta P_g = P_g(t) - P_g(t-1)$.
- ΔD : η μεταβολή λόγου κατάτμησης D την χρονική στιγμή t από την τιμή της τη χρονική στιγμή $t-1$, $\Delta D = D(t) - D(t-1)$.

και η έξοδος του είναι :

- D : ο λόγος κατάτμησης του DC/DC μετατροπέα ανύψωσης τάσης.



Σχήμα 2.19 : Διαδικασία MPPT με χρήση αλγόριθμου P&O [10].

Ο ασαφής ελεγκτής μπορεί να χωριστεί σε τρεις μονάδες όπως φαίνεται στο Σχ. 2.19. Αυτά είναι:

1. **Ασαφοποιητής (Fuzzifier).** Στο στάδιο της ασαφοποίησης, ο ασαφοποιητής μετατρέπει τις φυσικές μεταβλητές της διαδικασίας σε ασαφείς. Οι είσοδοι του συστήματος ασαφοποιούνται, στην περιοχή ορισμού τους, από προκαθορισμένα ασαφή σύνολα με λεκτικές μεταβλητές. Πιο συγκεκριμένα οι συναρτήσεις συμμετοχής μετατρέπουν τις μεταβλητές εισόδου του ελεγκτή σε τιμές συμμετοχής από 0 ως 1. Για τον συγκεκριμένο ελεγκτή, οι συναρτήσεις συμμετοχής των εισόδων ΔP_g και ΔD επιλέχθηκαν τριγωνικές, για λόγους απλότητας και λιγότερου υπολογιστικού κόστους. Χρησιμοποιούνται επτά ασαφή σύνολα για κάθε μέγεθος με τις παρακάτω λεκτικές μεταβλητές: **NL(Negative Large)**, **NM(Negative Medium)**, **NS(Negative Small)**, **ZE(Zero)**, **PS(Positive Small)**, **PM(Positive Medium)**, **PL(Positive Large)**. Μιας συνάρτησης συμμετοχής, π.χ. του ΔP_g , φαίνεται στο σχήμα 2.20.
2. **Διαδικασία Εξαγωγής Αποτελεσμάτων (Inference Unit).** Η μονάδα λήψης αποφάσεων διεκπεραιώνει τις λειτουργίες εξαγωγής συμπερασμάτων στους ασαφείς κανόνες. Πραγματοποιεί μια εξονυχιστική ανίχνευση όλων των κανόνων στη βάση γνώσης, με σκοπό να υπολογίσει το βαθμό συμμετοχής. Οι κανόνες με μικρό βαθμό συμμετοχής συμβάλουν ελάχιστα στην τελική απόφαση, ενώ οι κανόνες με μεγάλο βαθμό συμμετοχής είναι κυρίαρχοι. Τα τελικά ασαφή σύνολα εξόδου εξαρτώνται από τον τύπο της συνεπαγωγής που θα επιλεγεί. Οι γνώσεις που απαιτούνται βρίσκονται στη βάση ασαφών κανόνων από τους **if-then** κανόνες που έχουν οριστεί. Παρακάτω παρουσιάζονται ενδεικτικά 7 από τους 49 κανόνες που χρησιμοποιεί ο ελεγκτής ενώ στον Πίνακα 2.20(β) συνοψίζονται και οι 49 κανόνες.

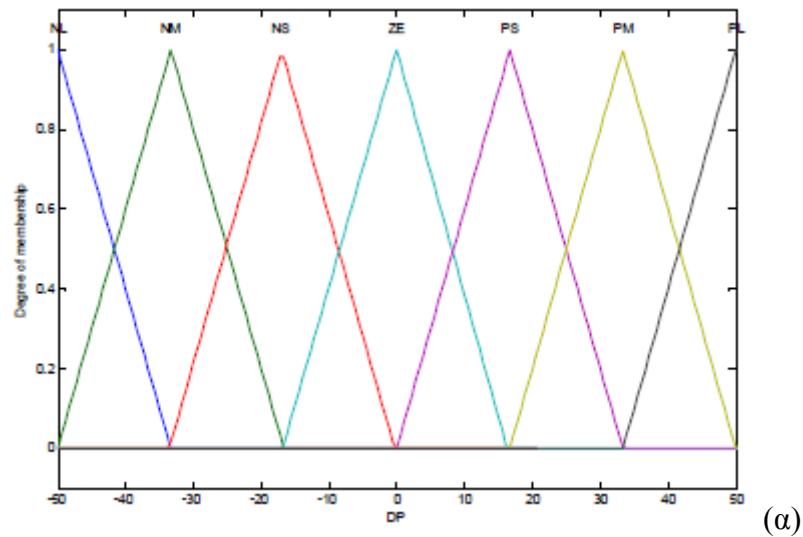
Ασαφείς κανόνες:

- 1^{ος} Κανόνας: If $_P_g$ is NL and $_D$ is NL, then D is NL.
- 2^{ος} Κανόνας: If $_P_g$ is NL and $_D$ is NM, then D is NL.
- 3^{ος} Κανόνας: If $_P_g$ is NL and $_D$ is NS, then D is NM.
- 4^{ος} Κανόνας: If $_P_g$ is NL and $_D$ is ZE, then D is PL.
- 5^{ος} Κανόνας: If $_P_g$ is NL and $_D$ is PS, then D is PM.
- 6^{ος} Κανόνας: If $_P_g$ is NL and $_D$ is PM, then D is PL.
- 7^{ος} Κανόνας: If $_P_g$ is NL and $_D$ is PL, then D is PL.

3. **Ο Αποασαφοποιητής (Defuzzifier).** Το τελευταίο βήμα του αλγορίθμου ενός ασαφούς ελεγκτή είναι η από-ασαφοποίηση της ασαφούς εισόδου σε σαφή τιμή, όπου χρησιμοποιώντας συγκεκριμένη μέθοδο λαμβάνεται η τιμή του λόγου κατάτμησης από το σύνολο των αποτελεσμάτων. Υπάρχουν διάφορες τεχνικές από-ασαφοποίησης. Εδώ θα πρέπει να αναφερθεί ότι τα ονόματα των μεθόδων ασαφοποίησης διαφέρουν από συγγραφέα σε συγγραφέα. Για αυτό το λόγο στις μεθόδους από-ασαφοποίησης πρέπει να δοθεί σημασία περισσότερο στον ορισμό της μεθόδου και όχι στο όνομα της. Οι συνηθέστερες μέθοδοι από-ασαφοποίησης είναι οι ακόλουθες:

- a. Αποασαφοποίηση μεγίστου (**Maximum defuzzifier**)
- b. Αποασαφοποίηση με μέσο όρο μεγίστων (**Mean of Maxima defuzzifier**)
- c. Αποασαφοποίηση κέντρου βάρους (**Center of Gravity**)

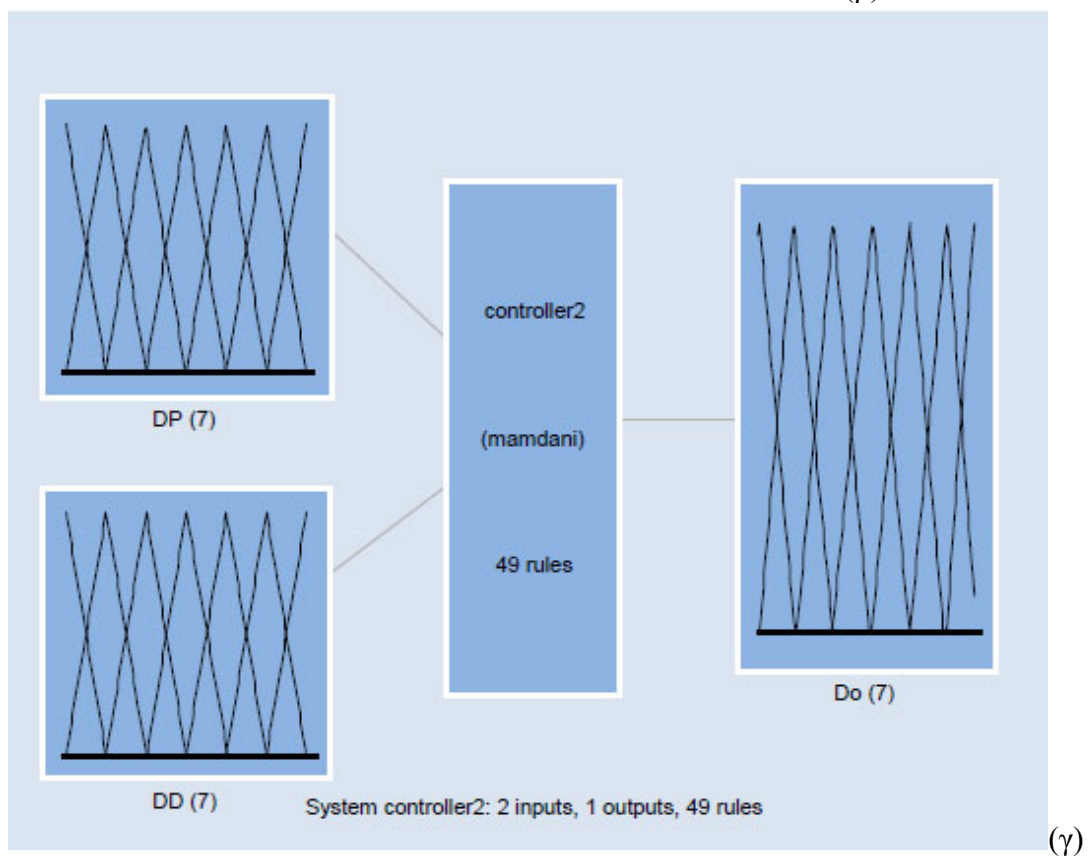
Το σχηματικό διάγραμμα του ασαφής ελεγκτή φαίνεται στο σχήμα 2.20(γ).



Σύνολο Ασαφών Κανόνων

ΔΔ/ΔP	NL	NM	NS	ZE	PS	PM	PL
NL	PL	PL	PM	NS	NM	NL	NL
NM	PL	PM	PS	NS	NS	NM	NL
NS	PM	PS	PS	ZE	NS	NS	NL
ZE	NL	NM	NS	ZE	PS	PM	PL
PS	NM	NS	NS	ZE	PS	PS	PM
PM	NL	NM	NS	PS	PS	PM	PL
PL	NL	NL	NM	PS	PM	PL	PL

(β)



Σχήμα 2.20 : (α) Συναρτήσεις συμμετοχής εισόδου ΔP_g , (β) Συνοπτικός πίνακας κανόνων ασαφή ελεγκτή (γ) Σχηματικό διάγραμμα ασαφή ελεγκτή[10].

2.5.2 Παράσταση μοντέλου ρυθμιστή στροφών και ρυθμιστή γωνίας βήματος έλικας

Σε αυτό το τμήμα της διάταξης ελέγχου εφαρμόζεται η στρατηγική μέγιστης απολαβής ισχύος MPPT και ο περιορισμός της ισχύος εξόδου P_o και της γωνιακής ταχύτητας περιστροφής ω_r σε ονομαστικά επίπεδα (1 pu). Σε γενικές γραμμές, όταν η διαθέσιμη αεροδυναμική ισχύς P_w ξεπερνάει τις αντοχές του εξοπλισμού (equipment rating) τότε η γωνία pitch της έλικας αυξάνεται προκειμένου να μειωθεί σε ονομαστικά επίπεδα η μηχανική ισχύς που μεταφέρεται στον άξονα. Σε περίπτωση που η διαθέσιμη αεροδυναμική ισχύς είναι κάτω από τα όρια αντοχής, τότε η γωνία pitch μηδενίζεται και η ταχύτητα του δρομέα ρυθμίζεται να έχει τέτοια τιμή ώστε να αποδίδεται η μέγιστη αεροδυναμική ισχύς που δύναται να παραχθεί στη συγκεκριμένη ταχύτητα ανέμου.

Αυτό που προκύπτει, είναι ότι ο παραπάνω έλεγχος πραγματοποιείται τόσο ηλεκτρικά όσο και αεροδυναμικά. Με άλλα λόγια, ο τρόπος που ο ελεγκτής διασφαλίζει τη λειτουργία της Α/Γ εντός ορίων αντοχής, γίνεται ηλεκτρικά με την αποστολή παλμών στον μετατροπέα ανύψωσης τάσης αλλά και αεροδυναμικά με την εντολή για αλλαγή της κλίσης των πτερυγίων.

Για να καταλάβουμε καλύτερα τον συνολικό έλεγχο, χωρίζουμε την λειτουργία της Α/Γ σε τρεις περιοχές ανάλογα με την αεροδυναμική ισχύ P_w και την ταχύτητα του δρομέα ω_r :

$$\omega_r < 1 \text{ pu}, P_w < 1 \text{ pu}$$

Σε αυτή την κατάσταση λειτουργίας η ταχύτητα του ανέμου βρίσκεται σε τέτοια επίπεδα ώστε η Α/Γ να λειτουργεί σε χαμηλότερα από τα ονομαστικά επίπεδα ισχύος P_w και ταχύτητας περιστροφής ω_r . Ο ελεγκτής πρέπει να φροντίζει ώστε το σημείο λειτουργίας της Α/Γ να βρίσκεται πάνω στην καμπύλη βέλτιστης απόδοσης (σημείο Α στο σχήμα 2.22). Εφαρμόζεται με άλλα λόγια στρατηγική MPPT. Η μέθοδος MPPT που ακολουθείται είναι, όπως αναφέραμε, εκείνη που βασίζεται σε χαρακτηριστικές καμπύλες, και πιο συγκεκριμένα η τελευταία μέθοδος στην οποία η μετρούμενη ισχύς εξόδου της Α/Γ αντιστοιχίζεται στην απαιτούμενη ταχύτητα δρομέα. Έτσι προκύπτει η ταχύτητα αναφοράς του δρομέα ω_{ref} , η οποία συγκρίνεται με την πραγματική και η διαφορά τους τροφοδοτείται σε έναν PI ελεγκτή (**Speed Regulator**). Από τον PI ελεγκτή προκύπτει ο λόγος κατάτμησης D (duty cycle) του ημιαγωγικού στοιχείου στον μετατροπέα ανύψωσης τάσης (dc-dc Boost). Με αυτόν τον τρόπο ελέγχεται η ταχύτητα του δρομέα, η οποία προσαρμόζεται στις εκάστοτε ανεμολογικές συνθήκες, διατηρώντας τον λόγο ταχύτητας ακροπτερυγίου λ στην ιδανική τιμή του, δηλαδή $\lambda = \lambda_{opt} = 9.9495$. Τα κέρδη του ελεγκτή PI είναι $K_p=3$ και $K_i=0.6$, ενώ η μέγιστη τιμή που μπορεί να πάρει το D είναι 0,7.

$$\omega_r=1 \text{ pu}, P_w < 1 \text{ pu}$$

Σε αυτή την περίπτωση, η ταχύτητα του ανέμου έχει τέτοια τιμή ώστε το μέγιστο P_{w_max} της αντίστοιχης χαρακτηριστικής καμπύλης $P_w-\omega_r$ να βρίσκεται σε γωνιακή ταχύτητα μεγαλύτερη από την ονομαστική. Η Α/Γ όμως, δεν επιτρέπεται να λειτουργήσει σε στροφές μεγαλύτερες από τις ονομαστικές και έτσι ο ελεγκτής θέτει ως γωνιακή ταχύτητα αναφοράς $\omega_{ref} = 1 \text{ pu}$. Επομένως το σημείο λειτουργίας της Α/Γ βρίσκεται στην τομή της καμπύλης $P_w-\omega_r$ με την κάθετο $\omega_{ref} = 1 \text{ pu}$ (σημείο Β στο σχήμα 2.22). Το σημείο αυτό βρίσκεται προφανώς αριστερά του μεγίστου της καμπύλης αυτής και έτσι δεν αποδίδεται η μέγιστη αεροδυναμική ισχύς. Επίσης η αποδιδόμενη αεροδυναμική ισχύς P_w ή ισχύς εξόδου της Α/Γ, είναι μικρότερη από την ονομαστική ισχύ ($P_w < 1 \text{ pu}$). Ο έλεγχος των στροφών γίνεται και πάλι με ηλεκτρικό τρόπο στέλνοντας την επιθυμητή τιμή του λόγου κατάτμησης D στον μετατροπέα ανύψωσης ώστε να διατηρούνται οι στροφές στην ονομαστική τους τιμή. Τέλος, είναι προφανές ότι ο λόγος ταχύτητας ακροπερυγίου λ δεν διατηρείται στην ιδανική τιμή του ($\lambda \neq \lambda_{opt}$), διότι :

$$\lambda = \frac{R \cdot \omega_r}{V_w} = k \cdot \frac{1}{V_w}$$

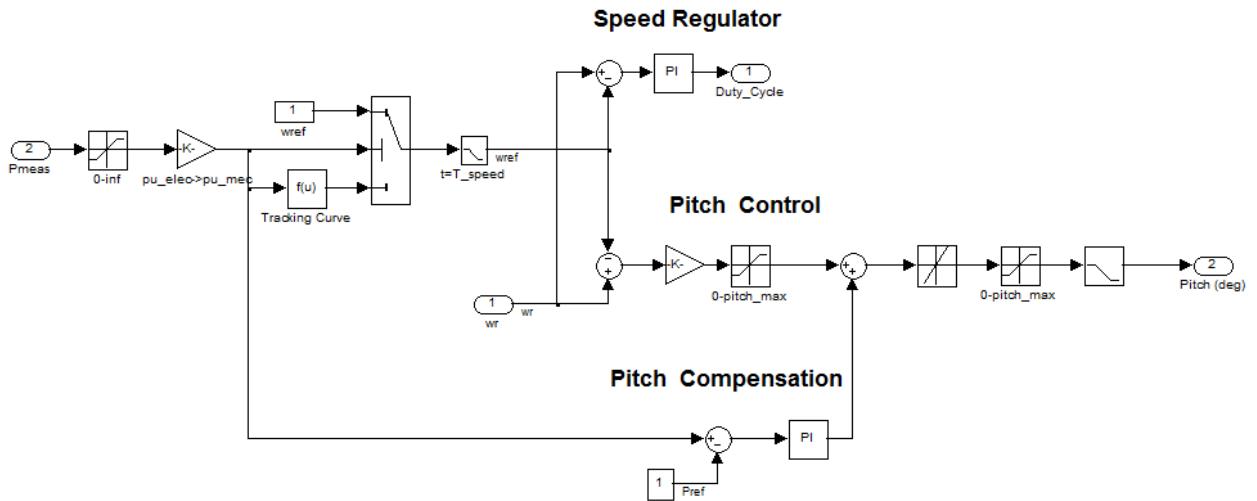
Αυτό συνεπάγεται ότι το λ θα μειώνεται με την αύξηση της ταχύτητας του ανέμου.

$$\omega_r=1 \text{ pu}, P_w = 1 \text{ pu}$$

Όταν η ταχύτητα του ανέμου είναι αρκετά υψηλή, και η αεροδυναμική ισχύς ξεπερνά σημαντικά τα ονομαστικά επίπεδα τότε βρισκόμαστε σε αυτή την κατάσταση λειτουργίας(σημείο Γ στο σχήμα 2.22). Αν και η ταχύτητα του δρομέα διατηρείται σε ονομαστική τιμή, η μείωση και μόνο του λ δεν είναι αρκετή για να κρατήσει την αποδιδόμενη ισχύ εντός των ορίων λειτουργίας. Από τον τύπο του αεροδυναμικού συντελεστή $C_p(\lambda, \beta)$, πρέπει να αυξηθεί και η γωνία βήματος έλικας β ώστε να μειωθεί περαιτέρω η αεροδυναμική ισχύς. Έτσι σε αυτή την περιοχή λειτουργίας επιδρά κυρίως ο αεροδυναμικός έλεγχος, που είναι υπεύθυνος να διατηρεί την ισχύ εξόδου της Α/Γ κάτω από 1 pu. Συγκεκριμένα, η μετρούμενη ισχύς εξόδου συγκρίνεται με την ονομαστική και σε περίπτωση που την ξεπεράσει η διαφορά τροφοδοτείται σε έναν PI ελεγκτή (**Pitch Compensation**). Η έξοδος του PI είναι η εντολή για τη γωνία βήματος β που απαιτείται ώστε η ισχύς εξόδου να είναι 1pu. Η τιμή της γωνίας pitch στέλνεται στο αεροδυναμικό μοντέλο το οποίο υπολογίζει την νέα αεροδυναμική ισχύ, δηλαδή την νέα μηχανική ροπή που ασκείται στον άξονα. Τα κέρδη του ελεγκτή PI είναι $K_p=1,5$ και $K_i=6$. Η μέγιστη γωνία βήματος β είναι 27° και ο μέγιστος ρυθμός μεταβολής της είναι $10^\circ/\text{sec}$.

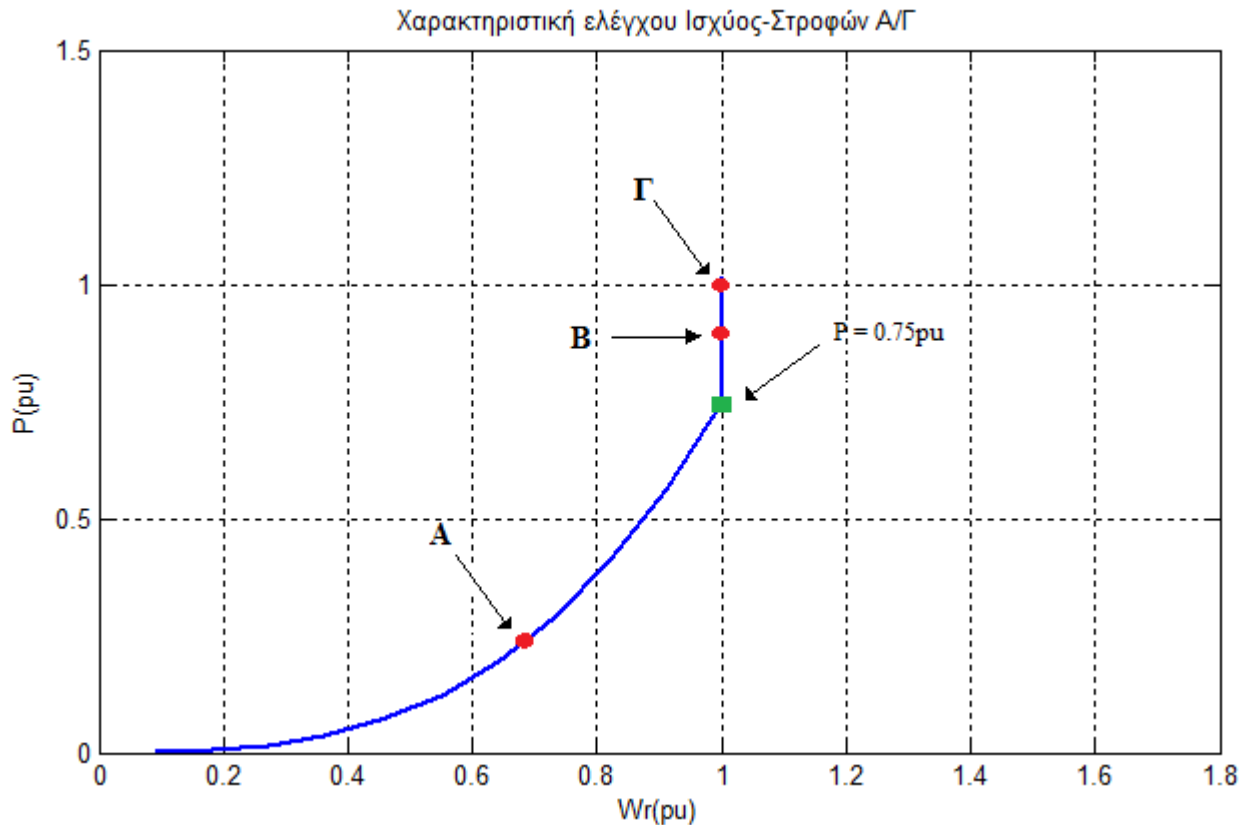
Αξίζει να τονιστεί ότι ο αεροδυναμικός έλεγχος μπορεί να δράσει βοηθητικά στον ηλεκτρικό έλεγχο σε περιπτώσεις απότομης **αύξησης** της γωνιακής ταχύτητας του δρομέα(όπως σε μεγάλες ριπές ανέμου ή σφάλματα στο δίκτυο μεταφοράς). Έτσι, η διαφορά ($\omega_r - \omega_{ref}$) που τροφοδοτεί τον

πρώτο PI ελεγκτή, τροφοδοτεί και ένα κέρδος K_{p_pitch} του οποίου η έξοδος αθροίζεται στην εκάστοτε τιμή γωνίας βήματος β (**Pitch Control**). Η δυναμική συμπεριφορά αυτού του συστήματος ελέγχου είναι σχετικά γρήγορη και μπορεί να έχει σημαντική επίδραση στα αποτελέσματα δυναμικών προσομοιώσεων. Το σύστημα ελέγχου στροφών και γωνίας βήματος έλικας φαίνεται συνολικά στο σχήμα 2.21.



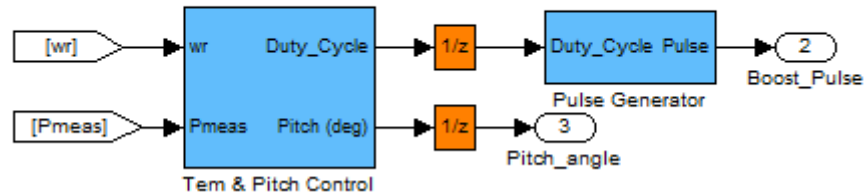
Σχήμα 2.21 : Σύστημα ρυθμιστή στροφών και γωνίας βήματος έλικας.

Η χαρακτηριστική ελέγχου ισχύος εξόδου – στροφών, που εφαρμόζει ο ρυθμιστής στροφών φαίνεται στο σχήμα 2.22.



Σχήμα 2.22 : Χαρακτηριστική ελέγχου στροφών γεννήτριας.

Speed Regulator & Pitch Control

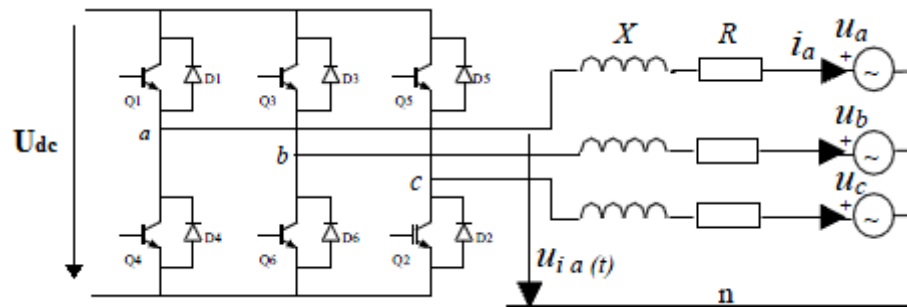


Σχήμα 2.23 : Μπλοκ ελέγχου στροφών και γωνίας βήματος έλικας.

Στο σχήμα 2.23 φαίνεται το μπλοκ ελέγχου το οποίο περιλαμβάνει εντός του το σύστημα ελέγχου που περιγράψαμε. Ο λόγος κατάτμησης D(duty cycle), που είναι η μία έξοδος του, διέρχεται πρώτα από την γεννήτρια παλμών η οποία παρέχει τους παλμούς με συγκεκριμένο D προς το μετατροπέα ανύψωσης τάσης. Η διακοπτική συχνότητα ορίζεται από τη συχνότητα της τριγωνικής κυματομορφής (Sawtooth frequency) και είναι 2000Hz.

2.6 DC-AC μετατροπέας στην πλευρά του δικτύου - GSC

Οι μετατροπείς dc-ac χρησιμοποιούνται σε κινητήρια συστήματα και σε ac τροφοδοτικά αδιάλειπτης λειτουργίας, όπου ο αντικειμενικός σκοπός είναι η παραγωγή μιας ημιτονοειδούς ac τάσης εξόδου, με ελεγχόμενες τόσο το πλάτος της όσο και τη συχνότητά της[9]. Στην εργασία αυτή ο μετατροπέας χρησιμοποιείται για την μετατροπή της dc τάσης στα άκρα του πυκνωτή του dc-dc μετατροπέα, σε τριφασική εναλλασσόμενη τάση, με μέτρο και συχνότητα αυτών της τάσης του δικτύου.



Σχήμα 2.24 : Σύνδεση αντιστροφέα στο δίκτυο.

Ο μετατροπέας αποτελείται από 6 IGBT με 6 αντιπαράλληλες διόδους που συνδέονται όπως φαίνεται στο σχήμα 2.24. Με την αποστολή κατάλληλων παλμών στα διακοπτικά στοιχεία, εξασφαλίζεται η μεταγωγή της ενεργού ισχύος που δίνει ο μετατροπέας ανύψωσης τάσης προς το δίκτυο, διατηρώντας την τάση του πυκνωτή σταθερή. Επειδή η ροή ισχύος γίνεται από την dc προς την ac πλευρά ο μετατροπέας λειτουργεί σαν αντιστροφέας (inverter). Επίσης, ένα βασικό χαρακτηριστικό είναι η δυνατότητα ρύθμισης του συντελεστή ισχύος με την παραγωγή ή κατανάλωση αέργου ισχύος. Αυτό τον καθιστά μια πηγή τάσης που δεν διαφέρει σημαντικά από μια σύγχρονη γεννήτρια σαν αυτές που χρησιμοποιούνται στους σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

Οι παλμοί οδήγησης μπορεί να προκύψουν είτε από ένα σύστημα ανοικτού βρόχου είτε από ένα σύστημα κλειστού βρόχου. Στην πρώτη περίπτωση οι παλμοί είναι απλά σήματα ελέγχου που δεν εξαρτώνται από κάποιο ελεγχόμενο μέγεθος. Στη δεύτερη περίπτωση υπάρχει ένας βρόχος ανάδρασης και οι παλμοί εξαρτώνται άμεσα από την έξοδο του αντιστροφέα. Στην παρούσα εργασία ο το σύστημα ελέγχου είναι κλειστού βρόχου καθώς μέσω της δειγματοληψίας της τάσης και του ρεύματος στην έξοδο του αντιστροφέα προκύπτουν οι κατάλληλοι παλμοί οδήγησης[4]. Η φιλοσοφία και η στρατηγική ελέγχου του αντιστροφέα θα συζητηθούν στο κεφάλαιο 3.

Στην έξοδο του αντιστροφέα τοποθετείται συνήθως και ένα φίλτρο LC για εξομάλυνση του ρεύματος και της τάσης εξόδου του. Οι αρμονικές ρεύματος και τάσης που προκύπτουν από τη διακοπτική λειτουργία των IGBT καθιστούν απαραίτητη την ύπαρξη φίλτρου ανάμεσα στον αντιστροφέα και το δίκτυο. Η μέτρηση της τάσης γίνεται στα άκρα του πυκνωτή και η μέτρηση του ρεύματος γίνεται πριν τον πυκνωτή και όχι μετά από αυτόν, για λόγους ευστάθειας του συστήματος ελέγχου.

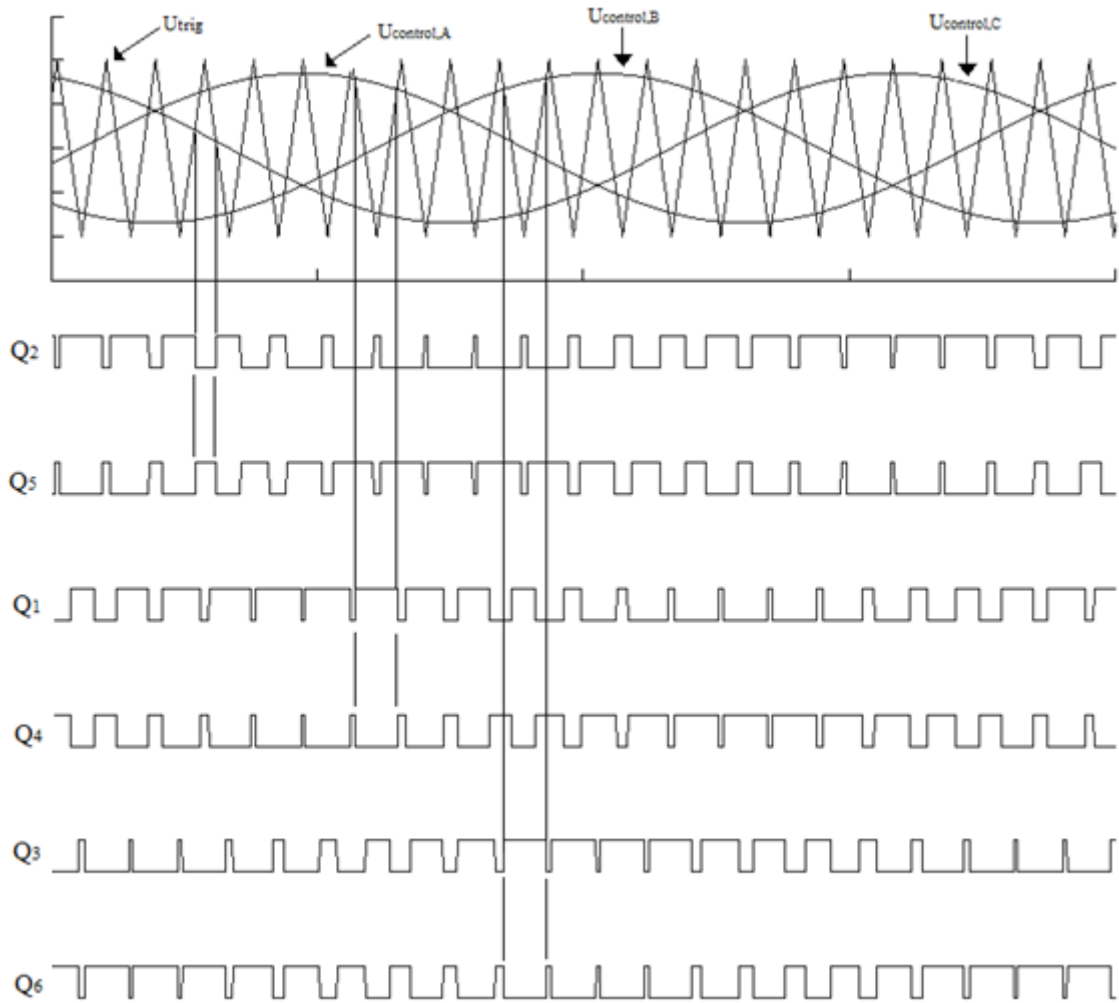
2.6.1 Μέθοδος ημιτονοειδούς διαμόρφωσης εύρους παλμών(SPWM)

Η μέθοδος ημιτονοειδούς διαμόρφωσης εύρους παλμών(Sinusoidal Pulse Width Modulation-SPWM) είναι μια από τις τεχνικές που χρησιμοποιούνται σήμερα για την εξάλειψη ή τη μείωση των αρμονικών που παράγονται από έναν αντιστροφέα. Αυτό είναι αναγκαίο διότι όσο μεγαλύτερη είναι η συχνότητα της πρώτης ανώτερης αρμονικής από τη συχνότητα της βασικής τόσο μικρότερο είναι και το φίλτρο εξόδου που πρέπει να χρησιμοποιηθεί. Δηλαδή το μέγεθος, το βάρος και το κόστος του φίλτρου εξαρτώνται άμεσα από το πλάτος και τη συχνότητα της πρώτης ανώτερης αρμονικής(κυριαρχούσα ανώτερη αρμονική) σε σχέση με το πλάτος και τη συχνότητα της βασικής αρμονικής. Έτσι αυτή η τεχνική PWM επιδιώκει την εξάλειψη αρμονικών με υψηλό ενεργειακό περιεχόμενο ώστε χρησιμοποιώντας μικρότερα και φθηνότερα φίλτρα εξόδου να απορροφώνται οι υπόλοιπες.

Πριν από την εξέταση της συμπεριφοράς της διαμόρφωσης SPWM, είναι απαραίτητο να οριστούν μερικοί όροι[12] :

- F_c : συχνότητα της τριγωνικής κυματομορφής U_{trig} καθορίζει τη συχνότητα με την οποία αλλάζουν κατάσταση οι διακόπτες του αντιστροφέα και λέγεται διακοπτική συχνότητα(Switching Frequency) ή συχνότητα μετάβασης.
- F_r : συχνότητα της κυματομορφής αναφοράς $U_{control}$, είναι η επιθυμητή θεμελιώδης συχνότητα της τάσης εξόδου του αντιστροφέα και ονομάζεται συχνότητα διαμόρφωσης(Modulating Frequency).
- $m_a = \frac{U_{control}}{U_{trig}}$: είναι ο λόγος τους πλάτους της κυματομορφής αναφοράς προς το πλάτος της τριγωνικής κυματομορφής και ονομάζεται συντελεστής διαμόρφωσης πλάτους(Amplitude Modulation Ratio).
- $m_f = \frac{F_c}{F_r}$: είναι ο λόγος της συχνότητας της τριγωνικής κυματομορφής προς τη συχνότητα της κυματομορφής αναφοράς και ονομάζεται συντελεστής διαμόρφωσης συχνότητας(Frequency Modulation Ratio) ή «κανονικοποιημένη συχνότητα» φορέα.

Σύμφωνα με την τεχνική SPWM, όπως αυτή παρουσιάζεται στο σχήμα 2.25, υπάρχουν τρεις κυματομορφές αναφοράς, μια για κάθε ζεύγος διακοπών στον αντιστροφέα, και μια τριγωνική κυματομορφή φορέα. Οι κυματομορφές αναφοράς δημιουργούνται από το κύκλωμα ελέγχου του αντιστροφέα και είναι αυτές που επιδιώκουμε να έχουμε στην έξοδο του φίλτρου. Οι κυματομορφές αναφοράς και η τριγωνική κυματομορφή συγκρίνονται μεταξύ τους μέσω ενός συγκριτή, στην έξοδο του οποίου προκύπτουν οι παλμοί οδήγησης των διακοπτικών στοιχείων. Πιο συγκεκριμένα, αν πάρουμε την κυματομορφή αναφοράς $U_{control,A}$, και τη συγκρίνουμε με την τριγωνική U_{trig} , τότε από τα σημεία τομής τους προκύπτουν οι κυματομορφές των Q_1 και Q_4 . Έτσι στις περιοχές όπου $U_{control,A} > U_{trig}$ ο συγκριτής δίνει παλμό έναυσης στο Q_1 και στις περιοχές όπου $U_{control,A} < U_{trig}$ ο συγκριτής δίνει παλμό έναυσης στο Q_4 . Επομένως η κυματομορφή των παλμών του Q_1 είναι αντίστροφη αυτής του Q_4 , διασφαλίζοντας ότι δεν πρόκειται ποτέ να άγουν και τα 2 ταυτόχρονα. Η ίδια διαδικασία ακολουθείται και για τις άλλες δυο φάσεις.



Σχήμα 2.25 : Ορισμός της τεχνικής SPWM

Ο συντελεστής διαμόρφωσης m_a καθορίζει τα σημεία τομής των κυματομορφών αναφοράς και του φορέα. Επομένως καθορίζει και το πλάτος της θεμελιώδους συνιστώσας της τάσης εξόδου του αντιστροφέα. Ανάλογα με τη τιμή του m_a διακρίνουμε και τις ακόλουθες περιπτώσεις[9] :

- Αν $m_a \in [0, 1]$: τότε βρισκόμαστε στη γραμμική περιοχή όπου η θεμελιώδης συνιστώσα μεταβάλλεται γραμμικά με τον λόγο διαμόρφωσης πλάτους. Το πλάτος της θεμελιώδους συνιστώσας σ' ένα από τα σκέλη του αντιστροφέα είναι :

$$\left(\hat{V}_{AN}\right)_1 = m_a \cdot \frac{V_d}{2}$$

Επομένως, η πολική rms τάση στη θεμελιώδη συχνότητα, εξαιτίας της διαφοράς φάσης των 120° μεταξύ των φασικών τάσεων μπορεί να γραφτεί ως :

$$V_{LL_1}(\text{πολική, rms}) = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} \cdot (\hat{V}_{AN})_1 \Leftrightarrow$$

$$V_{LL_1} = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} \cdot m_a \cdot \frac{V_d}{2}$$

$$m_a = \frac{V_{LL_1}}{V_d} \cdot 2 \cdot \sqrt{\frac{2}{3}}$$

- Αν $m_a \in [1, 3.24]$: τότε έχουμε υπερδιαμόρφωση καθώς το πλάτος των τάσεων ελέγχου επιτρέπεται να υπερβαίνει το πλάτος της τριγωνικής κυματομορφής. Σε αυτή τη μορφή λειτουργίας το πλάτος της θεμελιώδους δεν αυξάνεται γραμμικά με την τιμή του m_a . Η σχέση μεταξύ του πλάτους θεμελιώδους συνιστώσας και m_a εξαρτάται από τον λόγο διαμόρφωσης συχνότητας m_f και η κυματομορφή που προκύπτει είναι μια ενδιάμεση μορφή ανάμεσα σε SPWM και τετραγωνικό παλμό.
- Αν $m_a > 3.24$: τότε η αύξηση του λόγου m_a δεν συνεπάγεται καθόλου αύξηση του πλάτους της θεμελιώδους και έχουμε καθαρά τετραγωνικό παλμό:

$$\frac{V_{LL_1}}{V_d} = 0.78$$

Ο συντελεστής διαμόρφωσης είναι πολύ σημαντικό μέγεθος, αφενός γιατί καθορίζει το πλάτος της φασικής τάσης του μετατροπέα, και αφετέρου γιατί διαχωρίζει τις προηγούμενες περιοχές λειτουργίας. Όταν ο τριφασικός αντιστροφέας λειτουργεί στη γραμμική περιοχή, η μέγιστη τιμή που μπορεί να πάρει η τάση είναι για $m_a=1$. Έτσι, σύμφωνα με προηγούμενο τύπο, η μέγιστη ενεργός τιμή της πολικής τάσης εξόδου του αντιστροφέα είναι :

$$V_{LL_1} = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} \cdot \frac{V_d}{2}$$

Η επιλογή της συχνότητας μετάβασης F_c και του συντελεστή διαμόρφωσης συχνότητας m_f είναι καθοριστικά για την ελαχιστοποίηση της αρμονικής παραμόρφωσης της τάσης. Οι αρμονικές με υψηλή συχνότητα φιλτράρονται πιο εύκολα από τις αρμονικές με χαμηλή συχνότητα. Άρα είναι επιθυμητή η χρήση όσο το δυνατό ψηλότερων συχνοτήτων μετάβασης. Από την άλλη μεριά οι απώλειες μετάβασης στους διακόπτες του αντιστροφέα αυξάνουν ανάλογα προς τη συχνότητα του μετάβασης F_c . Επομένως στις περισσότερες εφαρμογές επιλέγεται συχνότητα μετάβασης χαμηλότερη των 6kHz ή υψηλότερη των 20kHz, ώστε να βρίσκεται έξω από το φάσμα ακουστικών συχνοτήτων[9]. Ανάλογα με την τιμή του m_f διακρίνουμε τις περιπτώσεις[9] :

- Μικρός m_f ($m_f < 21$) : τότε μιλάμε για συγχρονισμένη διαμόρφωση στην οποία η τριγωνική κυματομορφή φορέα και η κυματομορφή ελέγχου πρέπει να είναι συγχρονισμένα μεταξύ τους , δηλαδή να η τιμή του m_f να είναι ακέραια. Σε αντίθετη περίπτωση εμφανίζονται υποαρμονικές της θεμελιώδους συχνότητας που είναι

ανεπιθύμητες. Ειδικά για τριφασικό αντιστροφέα, ο m_f πρέπει να είναι περιττός ακέραιος για να εμφανίζονται μόνο περιττές αρμονικές και να εξαφανίζονται οι άρτιες.

- Μεγάλος m_f ($m_f > 21$) : τα πλάτη των υποαρμονικών σε αυτή την περίπτωση είναι μικρά και για αυτό μιλάμε πλέον για ασύγχρονη διαμόρφωση PWM, όπου η συχνότητα της τριγωνικής κυματομορφής διατηρείται σταθερή, ενώ η συχνότητα του $U_{control}$ μεταβάλλεται έχοντας ως αποτέλεσμα μη ακέραιες τιμές του m_f .

Οι αντιστροφείς που λειτουργούν με SPWM και φέρουν στην έξοδό τους το κατάλληλο φίλτρο παρέχουν τη δυνατότητα γρήγορου και αποδοτικού ελέγχου της ηλεκτρικής ισχύος. Έχοντας ως είσοδο μόνο τις κυματομορφές αναφοράς των τριών φάσεων, επιτρέπουν στο σύστημα ελέγχου (του inverter της Α/Γ στην προκειμένη περίπτωση) να ελέγχει άμεσα τη συχνότητα, το πλάτος της τάσης και του ρεύματος, καθώς επίσης και τον συντελεστή ισχύος, χωρητικό ή επαγωγικό.

Στην παρούσα εργασία η συχνότητα μετάβασης F_c ή διακοπτική συχνότητα είναι 3kHz. Επομένως για ένα δίκτυο 50~60Hz ο συντελεστής διαμόρφωσης συχνότητας είναι μεγάλος και έχουμε να κάνουμε με ασύγχρονη διαμόρφωση PWM.

2.6.2 Παροχή ισχύος από τριφασικό αντιστροφέα

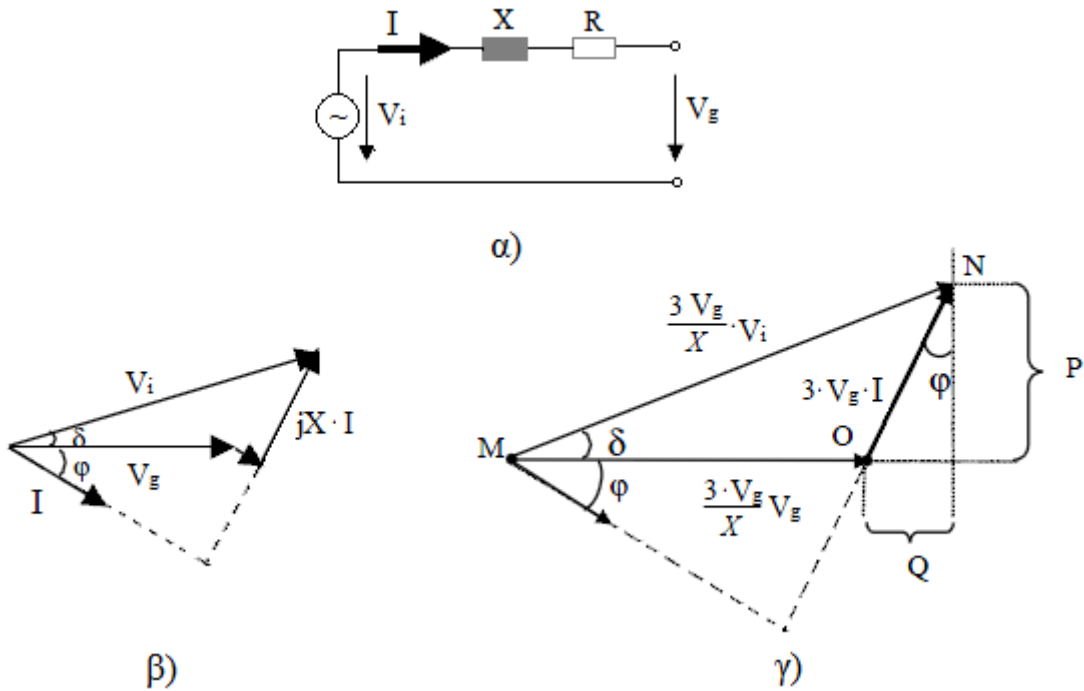
Το ισοδύναμο κύκλωμα ενός αντιστροφέα τύπου πηγής τάσης (VSI) συνδεδεμένου στο δίκτυο φαίνεται στο σχήμα 2.26α. Ο PWM αντιστροφέας μπορεί να θεωρηθεί ως μια ιδανική πηγή που παράγει τη θεμελιώδη τάση, καθώς οι αρμονικές αγνοούνται προς το παρόν. Το δίκτυο αναπαρίστανται από το ισοδύναμο Thevenin. Η αντίδραση αντικαθιστά την επαγωγική αντίδραση του δικτύου στο σημείο κοινής σύνδεσης(PCC) μαζί με την αντίδρασή του φίλτρου. Συνήθως η επαγωγική αντίδραση του φίλτρου είναι μεγαλύτερη από αυτή του δικτύου και έτσι η τελευταία αγνοείται. Η αντίσταση μπορεί επίσης να αγνοηθεί[13][14].

Το θεμελιώδες ρεύμα του μετατροπέα και η θεμελιώδης συνιστώσα της τάσης του ικανοποιούν τη σχέση :

$$\begin{aligned}\tilde{V}_i &= \tilde{V}_g + jX \cdot \tilde{I} \Leftrightarrow \\ \tilde{I} &= \frac{\tilde{V}_i - \tilde{V}_g}{jX}\end{aligned}$$

Το ανυσματικό διάγραμμα της παραπάνω σχέσης φαίνεται στο σχήμα 2.26β. Θεωρώντας ως άνυσμα αναφοράς την φασική τάση του δικτύου V_g , η μιγαδική ισχύς που εγχέεται στο δίκτυο υπολογίζεται ως :

$$S = P + j \cdot Q = 3V_g \tilde{I}^*$$



Σχήμα 2.26 : α) Ισοδύναμο κύκλωμα αντιστροφέα συνδεδεμένου στο δίκτυο β) Ανυσματικό διάγραμμα και γ) PQ ανυσματικό διάγραμμα[13].

Αφού αναλύσουμε τον τύπο του ρεύματος σε πραγματικό και φανταστικό μέρος, το συζυγές ρεύμα προκύπτει :

$$\tilde{I}^* = \left(\frac{\tilde{V}_i - \tilde{V}_g}{jX} \right)^* \Leftrightarrow$$

$$\tilde{I}^* = \frac{V_i \cdot \sin(\delta) + j(V_i \cos(\delta) - V_g)}{X}$$

Η μιγαδική ισχύς μπορεί να γραφτεί :

$$S = 3V_g \tilde{I}^* = 3V_g \cdot \frac{V_i \cdot \sin(\delta) + j(V_i \cos(\delta) - V_g)}{X} \Leftrightarrow$$

$$P + j \cdot Q = \frac{3V_g V_i \cdot \sin(\delta)}{X} + j \cdot \frac{3V_g (V_i \cos(\delta) - V_g)}{X}$$

Άρα η ενεργός και η άεργος ισχύς στο ΣΚΣ είναι :

$$P = \frac{3V_g V_i \cdot \sin(\delta)}{X} \quad (1)$$

$$Q = \frac{3V_g (V_i \cos(\delta) - V_g)}{X} \quad (2)$$

Πολλαπλασιάζοντας το κάθε άνυσμα του ανυσματικού διαγράμματος με τη γνωστή ποσότητα $3 \cdot V_g / X$, προκύπτει ένα P-Q σύστημα συντεταγμένων με αρχή το σημείο O στο άκρο του διανύσματος $3 \cdot V_g^2 / X$. Σε αυτή την απεικόνιση ο x-άξονας αναπαριστά την άεργο ισχύ που εγχέεται στο δίκτυο και ο y-άξονας την ενεργό ισχύ. Στο σχήμα 2.26γ φαίνεται το εν λόγω διάγραμμα. Η ανάλυση είναι σχεδόν ίδια με αυτή μιας σύγχρονης γεννήτριας.

Από τα παραπάνω προκύπτουν τα ακόλουθα :

- Ο αντιστροφέας μπορεί να εγχέει ή να απορροφά ενεργό και άεργο ισχύ εάν η γωνία ισχύος και η το πλάτος της τάσης είναι ελέγξιμα.
- Προκειμένου να εγχέεται ενεργός ισχύς στο δίκτυο πρέπει η τάση του αντιστροφέα να ηγείται της τάσης του δικτύου.
- Προκειμένου να εγχέεται άεργος ισχύς στο δίκτυο πρέπει η τάση του αντιστροφέα να έχει πλάτος μεγαλύτερο από αυτό της τάσης του δικτύου. Αυτό συμβαίνει για μικρές γωνίες δ , ώστε ο τύπος της αέργου να απλουστεύεται περισσότερο:

$$Q = \frac{3V_g(V_i - V_g)}{X}$$

Άρα για $V_i > V_g$, $Q > 0$ χωρητικός συντελεστής ισχύος.

Η ικανότητα του αντιστροφέα για παροχή μέγιστης ενεργού ή αέργου ισχύος καθορίζει και τα όρια λειτουργίας του. Αυτά επομένως, καθορίζουν και την ικανότητα της ανεμογεννήτριας σε ενεργό και άεργο ισχύ που δύναται να ανταλλάσει με το δίκτυο, και εξαρτώνται από τους ακόλουθους τρεις περιορισμούς[13] :

- 1) Την ονομαστική ενεργό ισχύ που η σύγχρονη γεννήτρια δύναται να παράγει:

$$P_{\max} = P_{\text{gen}}^{\text{rated}}$$

- 2) Το ονομαστικό ρεύμα των διακοπτικών στοιχείων του αντιστροφέα $I_{\text{inv,max}}$ και την ονομαστική τάση του δικτύου V_{nom} ή γενικά οποιοσδήποτε άλλος περιορισμός που μπορεί να θέτει κάποιο στοιχείο της Α/Γ ή του δικτύου(όπως π.χ. οι μετασχηματιστές ή οι αγωγοί του δικτύου μεταφοράς). Έτσι, η μέγιστη μιγαδική ισχύς που δύναται να παρέχει ο αντιστροφέας προς το δίκτυο περιορίζεται στην τιμή $S = 3V_{\text{nom}} \cdot I_{\text{inv,max}}$. Με άλλα λόγια, ο γεωμετρικός τόπος των ορίων λειτουργίας στο PQ σύστημα συντεταγμένων είναι ένας κύκλος με κέντρο την αρχή των αξόνων και ακτίνα $S_{g,\max}$:

$$P^2 + Q^2 = S_{g,\max}^2 = (3 \cdot V_{\text{nom}} \cdot I_{\text{inv,max}})^2$$

- 3) Τη μέγιστη ενεργό τιμή $V_{i,1}^{\text{rms}}$ της θεμελιώδους συνιστώσας της τάσης που παράγει ο αντιστροφέας. Αυτή εξαρτάται από το επίπεδο της dc-τάσης, από την τεχνική διαμόρφωσης που χρησιμοποιείται και από τη μέγιστη τιμή του συντελεστή διαμόρφωσης πλάτους m_a υπό σταθερές συνθήκες λειτουργίας. Αν θεωρήσουμε δεδομένους τους δυο τελευταίους παράγοντες η ικανότητα παραγωγής αέργου ισχύος εξαρτάται από την dc-τάση στην είσοδο του αντιστροφέα. Ο γεωμετρικός τόπος του

συγκεκριμένου περιορισμού είναι ένας κύκλος με κέντρο το $M\left(-\frac{3V_g^2}{X}, 0\right)$ και ακτίνα

$\rho = \frac{3V_g V_i}{X}$. Αυτό το αποδεικνύουμε στη συνέχεια .

Έτσι από τις προηγούμενες σχέσεις ενεργού και αέργου ισχύος στο σημείο κοινής σύνδεσης(ΣΚΣ) έχουμε :

$$P^2 = \left(\frac{3V_g V_i \cdot \sin(\delta)}{X}\right)^2 \Leftrightarrow P^2 = \left(\frac{3V_g V_i}{X}\right)^2 \cdot \sin^2(\delta)$$

και

$$Q^2 = \left(\frac{3V_g (V_i \cos(\delta) - V_g)}{X}\right)^2 \Leftrightarrow Q^2 = \left(\frac{3V_g V_i}{X}\right)^2 \cdot \cos^2(\delta) + \left(\frac{3V_g^2}{X}\right)^2 - 2 \cdot \frac{3V_g V_i \cos(\delta)}{X} \cdot \frac{3V_g^2}{X}$$

Αθροίζοντας κατά μέλη τις δυο προηγούμενες σχέσεις έχουμε :

$$P^2 + Q^2 = \left(\frac{3V_g V_i}{X}\right)^2 \cdot \sin^2(\delta) + \left(\frac{3V_g V_i}{X}\right)^2 \cdot \cos^2(\delta) + \left(\frac{3V_g^2}{X}\right)^2 - 2 \cdot \frac{3V_g V_i \cos(\delta)}{X} \cdot \frac{3V_g^2}{X} \Leftrightarrow$$

$$P^2 + Q^2 = \left(\frac{3V_g V_i}{X}\right)^2 + 2 \cdot \left(\frac{3V_g^2}{X}\right)^2 - \left(\frac{3V_g^2}{X}\right)^2 - 2 \cdot \frac{3V_g V_i \cos(\delta)}{X} \cdot \frac{3V_g^2}{X} \Leftrightarrow$$

$$P^2 + Q^2 + \left(\frac{3V_g^2}{X}\right)^2 + 2 \cdot \frac{3V_g^2}{X} \left(\frac{3V_g V_i \cos(\delta)}{X} - \frac{3V_g^2}{X}\right) = \left(\frac{3V_g V_i}{X}\right)^2 \stackrel{(2)}{\Leftrightarrow}$$

$$P^2 + Q^2 + \left(\frac{3V_g^2}{X}\right)^2 + 2 \cdot \frac{3V_g^2}{X} \cdot Q = \left(\frac{3V_g V_i}{X}\right)^2 \Leftrightarrow$$

$$P^2 + \left(Q + \frac{3V_g^2}{X}\right)^2 = \left(\frac{3V_g V_i}{X}\right)^2 \quad (3)$$

Η ενεργός(rms) τιμή της θεμελιώδους συνιστώσας της τάσης του αντιστροφέα έχει υπολογιστεί στην προηγούμενη παράγραφο ως :

$$V_i = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} \cdot m_a \cdot \frac{V_d}{2}$$

Επομένως η σχέση (3) μπορεί να γραφτεί ως :

$$P^2 + \left(Q + \frac{3V_g^2}{X}\right)^2 = \left(\frac{3\sqrt{3}}{2\sqrt{2}} \cdot m_a \cdot \frac{V_g V_d}{X}\right)^2 \quad (4)$$

Όπως φαίνεται από την εξίσωση (4), για σταθερή dc-τάση, η τιμή του συντελεστή διαμόρφωσης πλάτους m_a παίζει το ρόλο της διέγερσης πεδίου σε μια σύγχρονη γεννήτρια. Επίσης η ικανότητα σε ισχύ εξαρτάται άμεσα από την τάση του δικτύου.

Επιλογή τιμής της dc-τάσης εισόδου του αντιστροφέα[4]

Η επιλογή του επιπέδου της dc-τάσης του αντιστροφέα δεν γίνεται τυχαία αλλά σχετίζεται άμεσα με την μέγιστη ενεργό τιμή της πολικής τάσης που θέλουμε να αναπτύσσει στην έξοδο του. Έτσι, προκειμένου να εγχέεται άεργος ισχύς στο δίκτυο πρέπει η τάση του αντιστροφέα να έχει πλάτος μεγαλύτερο από αυτό της τάσης του δικτύου, δηλαδή :

$$V_i > V_g$$

Η ενεργός τιμή της πολικής τάσης του δικτύου είναι :

$$V_g^{LL} = \sqrt{3} \cdot V_g = 575V$$

Η μέγιστη ενεργός τιμή της πολικής τάσης του αντιστροφέα, σύμφωνα με τα προηγούμενα, είναι:

$$V_i^{LL} = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} \cdot \frac{V_d}{2}$$

Επομένως πρέπει :

$$\begin{aligned} V_i^{LL} > V_g^{LL} &\Leftrightarrow \\ \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} \cdot \frac{V_d}{2} > V_g^{LL} &\Leftrightarrow \\ V_d > 1,63299 \cdot V_g^{LL} \end{aligned}$$

Και για την παρούσα εργασία πρέπει :

$$\boxed{V_d > 938,97V}$$

Το επίπεδο dc-τάσης είναι στα 1100 Volt οπότε και τηρεί το παραπάνω κάτω όριο.

Στην παραγωγή άεργου ισχύος δεν συμβάλει μόνο η διαφορά $V_i - V_g$, αλλά και η επαγωγική αντίδραση X του φίλτρου στην έξοδο του αντιστροφέα. Όσο μεγαλύτερη είναι αυτή η αντίδραση τόσο μεγαλύτερη πρέπει να είναι η διαφορά $V_i - V_g$, και άρα τόσο υψηλότερο πρέπει να είναι το επίπεδο dc-τάσης προκειμένου να παράγουμε μια δεδομένη άεργο ισχύ. Μια μικρή τιμή αντίδρασης X δεν απαιτεί τόσο μεγάλο επίπεδο dc-τάσης αλλά αυξάνει τις αρμονικές ρεύματος και τάσης που περνάνε στο δίκτυο. Επομένως απαιτείται μια χρυσή τομή στην επιλογή της dc-τάσης και της αντίδρασης ώστε να παράγουμε την μέγιστη άεργο ισχύ που θέλουμε με τη χαμηλότερη αντίδραση οι κυματομορφές των ρευμάτων να προσεγγίζουν τις ημιτονοειδείς.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΤΟΥ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΑ

Ο αντιστροφέας αποτελεί, όπως αναφέραμε, τον συνδετικό κρίκο ανάμεσα στην ανεμογεννήτρια και το δίκτυο. Είναι υπεύθυνος για τη μεταβίβαση προς το δίκτυο της ενεργού ισχύος που παράγεται στη γεννήτρια, αλλά πρέπει επίσης να προσαρμόζεται κατάλληλα στις διάφορες διακυμάνσεις του δικτύου. Όλα αυτά αποτελούν τεχνικές απαιτήσεις που ορίζονται από τους κώδικες σύνδεσης, όπως περιγράφηκαν στο 1^ο κεφάλαιο. Για τον λόγο αυτό ο έλεγχος του αντιστροφέα είναι ένα από τα πιο σημαντικά κομμάτια κατά τον σχεδιασμό και την ανάπτυξη μιας Α/Γ.

3.1 Μετασχηματισμός μεγεθών στο D-Q σύστημα συντεταγμένων

Ο dq-μετασχηματισμός μετατρέπει τα τριφασικά μεγέθη από ένα abc σταθερό σύστημα συντεταγμένων στο dq στρεφόμενο σύστημα συντεταγμένων. Η χρησιμότητά του έγκειται στην απλοποίηση της ανάλυσης των ρευμάτων και των τάσεων σε τριφασικά συστήματα.

Για καλύτερη κατανόησή του, τον αναλύουμε σε δυο βήματα[27] :

- 1) Μετασχηματισμό από το σταθερό abc στο αβ σταθερό σύστημα συντεταγμένων (Μετασχηματισμός Clarke).
- 2) Μετασχηματισμό από το σταθερό διφασικό αβ στο περιστρεφόμενο dq (Μετασχηματισμός Park).

Έτσι ένα τριφασικό μέγεθος X_{abc} σε συνθήκες συμμετρίας μπορεί να γραφτεί διανυσματικά ως :

$$X_{abc} = [X_a \quad X_b \quad X_c]$$

όπου :

$$X_a = \sqrt{2} \widehat{X}_a \cos(\omega_e t + \varphi) = \operatorname{Re} \left\{ \sqrt{2} \widehat{X}_a e^{j(\omega_e t + \varphi)} \right\}$$

$$X_b = \sqrt{2} \widehat{X}_b \cos\left(\omega_e t + \varphi - \frac{2\pi}{3}\right) = \operatorname{Re} \left\{ \sqrt{2} \widehat{X}_b e^{j(\omega_e t + \varphi)} e^{-2\pi j/3} \right\}$$

$$X_c = \sqrt{2} \widehat{X}_c \cos\left(\omega_e t + \varphi + \frac{2\pi}{3}\right) = \operatorname{Re} \left\{ \sqrt{2} \widehat{X}_c e^{j(\omega_e t + \varphi)} e^{2\pi j/3} \right\}$$

Στο abc ακίνητο πλαίσιο αναφοράς, οι τρεις άξονες έχουν μεταξύ τους διαφορά γωνίας 120°. Για τη μετατροπή του X_{abc} στο αβ πλαίσιο, πολλαπλασιάζεται με την μήτρα $T_{abc-\alpha\beta}$:

$$T_{abc-\alpha\beta} = \begin{bmatrix} \frac{2}{3} & 0 & \frac{1}{3} \\ -\frac{1}{3} & \frac{\sqrt{3}}{3} & \frac{1}{3} \\ -\frac{1}{3} & -\frac{\sqrt{3}}{3} & \frac{1}{3} \end{bmatrix}$$

Συνεπώς :

$$X_{\alpha\beta 0} = \begin{bmatrix} X_\alpha & X_\beta & X_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_a & X_b & X_c \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{2}{3} & 0 & \frac{1}{3} \\ -\frac{1}{3} & \frac{\sqrt{3}}{3} & \frac{1}{3} \\ -\frac{1}{3} & -\frac{\sqrt{3}}{3} & \frac{1}{3} \end{bmatrix}$$

Η διαδικασία φαίνεται στο σχήμα 3.1α. Στο αβ ακίνητο πλαίσιο, οι άξονες είναι 2 και έχουν 90° διαφορά γωνίας.

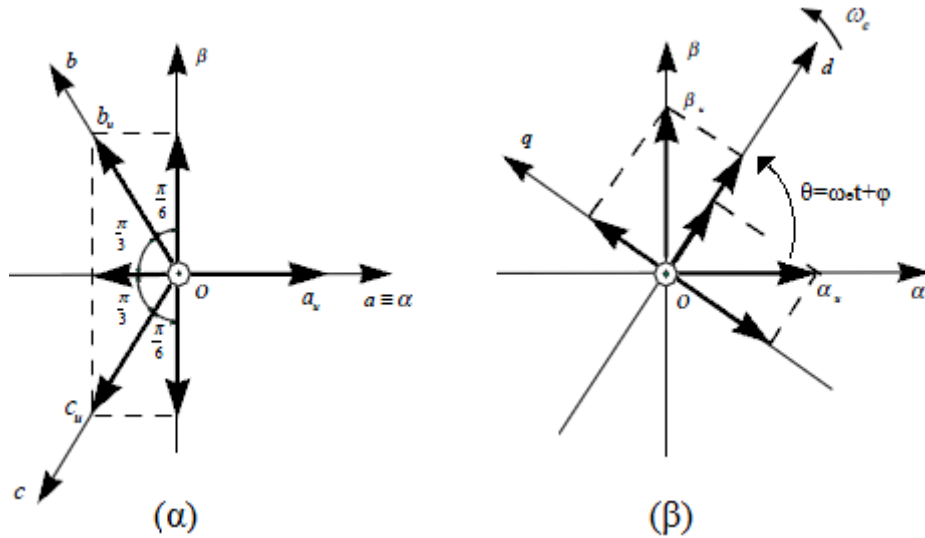
Για την μετατροπή από το αβ ακίνητο πλαίσιο αναφοράς στο περιστρεφόμενο dq-πλαίσιο αρκεί να πολλαπλασιάσουμε το διάνυσμα $X_{\alpha\beta 0}$ με την μήτρα μετατροπής $T_{\alpha\beta-dq}$:

$$T_{\alpha\beta-dq} = \begin{bmatrix} \cos(\omega_e t + \varphi) & -\sin(\omega_e t + \varphi) & 0 \\ \sin(\omega_e t + \varphi) & \cos(\omega_e t + \varphi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Συνεπώς :

$$X_{dq0} = \begin{bmatrix} X_d & X_q & X_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_\alpha & X_\beta & X_0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\omega_e t + \varphi) & -\sin(\omega_e t + \varphi) & 0 \\ \sin(\omega_e t + \varphi) & \cos(\omega_e t + \varphi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Η διαδικασία φαίνεται στο σχήμα 3.1β. Στο dq0 σύστημα αξόνων το dq-πλαίσιο περιστρέφεται με γωνιακή ταχύτητα ω_e και επομένως τα χρονομεταβλητά τριφασικά μεγέθη ανάγονται σε χρονικά αμετάβλητα μεγέθη(dc μεγέθη). Συνιστώσα στον άξονα 0 υπάρχει μόνο σε συνθήκες ασυμμετρίας.



Σχήμα 3.1 : α) Μετατροπή από abc σε αβ σύστημα συντεταγμένων β) Μετατροπή από αβ σε dq σύστημα συντεταγμένων[27].

Συνολικά η μήτρα μετατροπής τριφασικών μεγεθών από abc σε dq σύστημα συντεταγμένων είναι :

$$T_{abc-dq} = \frac{2}{3} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\omega_e t + \varphi) & -\sin(\omega_e t + \varphi) & \frac{1}{2} \\ \cos\left(\omega_e t + \varphi - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\omega_e t + \varphi - \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{2} \\ \cos\left(\omega_e t + \varphi + \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\omega_e t + \varphi + \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{2} \end{bmatrix}$$

άρα :

$$X_{dq0} = X_{abc} \cdot T_{abc-dq}$$

Η μήτρα του αντίστροφου μετασχηματισμού είναι :

$$T_{dq-abc} = \begin{bmatrix} \cos(\omega_e t + \varphi) & -\sin(\omega_e t + \varphi) & 1 \\ \cos\left(\omega_e t + \varphi - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\omega_e t + \varphi - \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \\ \cos\left(\omega_e t + \varphi + \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\omega_e t + \varphi + \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \end{bmatrix}$$

Τα διανύσματα της τάσης και του ρεύματος εκφράζονται στο πλαίσιο dq ως εξής :

$$\tilde{V}_{dq} = V_d + jV_q$$

$$\tilde{I}_{dq} = I_d + jI_q$$

όπου :

$$V_q = -\frac{2}{3} \left(V_a \sin(\omega_e t) + V_b \sin\left(\omega_e t - \frac{2\pi}{3}\right) + V_c \sin\left(\omega_e t + \frac{2\pi}{3}\right) \right)$$

$$V_d = \frac{2}{3} \left(V_a \cos(\omega_e t) + V_b \cos\left(\omega_e t - \frac{2\pi}{3}\right) + V_c \cos\left(\omega_e t + \frac{2\pi}{3}\right) \right)$$

$$V_0 = \frac{1}{3} (V_a + V_b + V_c)$$

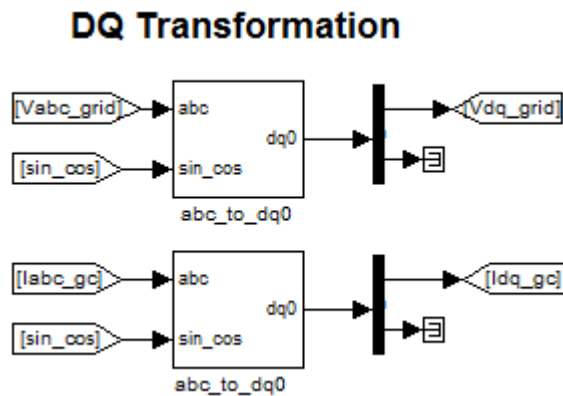
και

$$I_q = -\frac{2}{3} \left(I_a \sin(\omega_e t) + I_b \sin\left(\omega_e t - \frac{2\pi}{3}\right) + I_c \sin\left(\omega_e t + \frac{2\pi}{3}\right) \right)$$

$$I_d = \frac{2}{3} \left(I_a \cos(\omega_e t) + I_b \cos\left(\omega_e t - \frac{2\pi}{3}\right) + I_c \cos\left(\omega_e t + \frac{2\pi}{3}\right) \right)$$

$$I_0 = \frac{1}{3} (I_a + I_b + I_c)$$

Η γωνία φ που σχηματίζει ο άξονας d με τον a είναι μηδενική , φ=0. Επίσης, σε συνθήκες συμμετρίας η μηδενική συνιστώσα των μεγεθών δεν υπάρχει. Η μετατροπή γίνεται από block της βιβλιοθήκης του Simulink όπως φαίνεται στο σχήμα 3.2 :



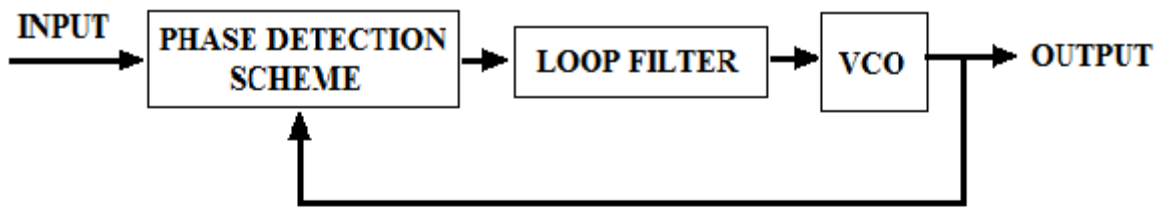
Σχήμα 3.2 : Μετατροπή της τάσης του δικτύου και του ρεύματος της Α/Γ στο περιστρεφόμενο dq-πλαίσιο.

Η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του dq-πλαισίου πρέπει να είναι ίδια με αυτή της περιστροφής των διανυσμάτων της τάσης του δικτύου ω_e . Έτσι είναι απαραίτητη η ύπαρξη ενός συστήματος ανίχνευσης της τρέχουσας συχνότητας δικτύου ώστε ο αντιστροφέας να μπορεί να συγχρονίζεται. Για το σκοπό αυτό υπάρχει το PLL(Phase-Locked Loop), το οποίο αποτελεί πλέον ένα απαραίτητο στοιχείο για τους ελεγκτές των περισσότερων ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος. Στο σχήμα 3.3α φαίνεται το διάγραμμα λειτουργίας ενός συμβατικού PLL

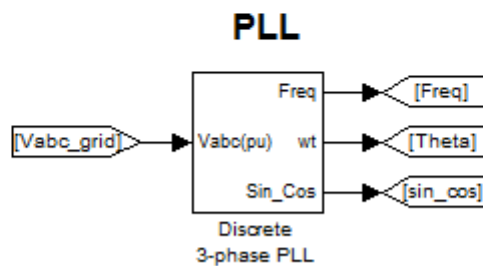
ενώ στο σχήμα 3.3β βλέπουμε το block υλοποίησής του στο Simulink. Οι έξοδοι του PLL είναι τρείς:

- η συχνότητα δικτύου, Freq.
- η γωνία $\theta = \omega \cdot t$ του dq-πλαισίου.
- τα ημίτονα και συνημίτονα της γωνίας, $\sin(\omega t)$ και $\cos(\omega t)$.

Τα ημίτονα και τα συνημίτονα χρησιμοποιούνται στους μετασχηματισμούς $abc \rightarrow dq$ ενώ η γωνία θ στον αντίστροφο μετασχηματισμό $dq \rightarrow abc$. Η συχνότητα είναι απαραίτητη για τον υπολογισμό της αντίδρασης $X = \omega L$ του φίλτρου εξόδου όπως θα δούμε στην συνέχεια.



(α)



(β)

Σχήμα 3.3 : α) διάγραμμα λειτουργίας ενός συμβατικού PLL β) Block υλοποίησης του PLL στο μοντέλο της ανεμογεννήτριας.

Τριφασική ισχύς στο dq-πλαίσιο

Η στιγμιαία ισχύς σε ένα τριφασικό σύστημα δίνεται ως [15] :

$$P(t) = v_a i_a + v_b i_b + v_c i_c = [v_a \quad v_b \quad v_c] \cdot [i_a \quad i_b \quad i_c]^T$$

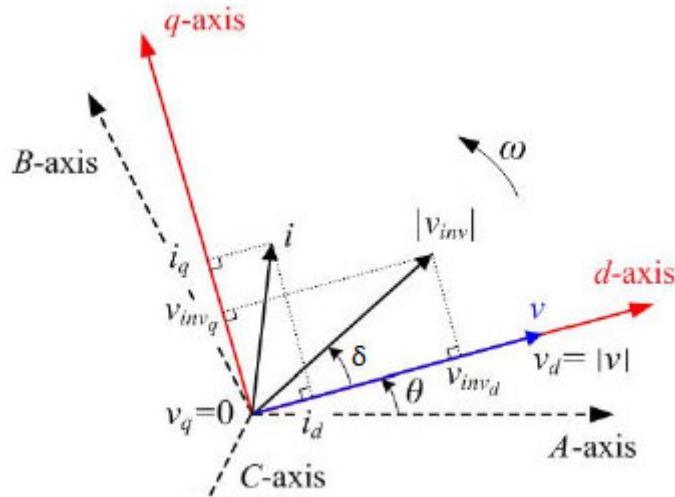
Με χρήση του μετασχηματισμού dq η τριφασική φαινόμενη ισχύς είναι:

$$\tilde{S} = \frac{3}{2} \tilde{V}_{dq} \tilde{I}_{dq}^* = \frac{3}{2} (V_d I_d + V_q I_q) + j \cdot \frac{3}{2} (V_q I_d - V_d I_q)$$

Άρα η ενεργός και η άεργος ισχύς μπορούν να εκφραστούν ως :

$$P = \frac{3}{2}(V_d I_d + V_q I_q)$$

$$Q = \frac{3}{2}(V_q I_d - V_d I_q)$$



Σχήμα 3.4 : Διανύσματα τάσης και ρεύματος στο στροφόμενο dq-πλαίσιο αναφοράς[15].

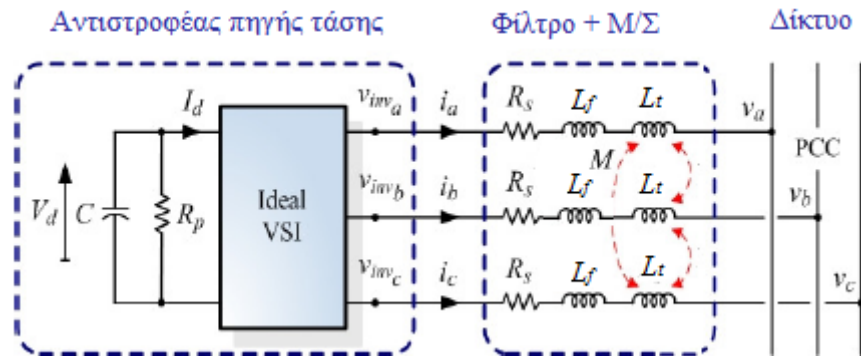
Θεωρώντας ότι το συνιστάμενο διάνυσμα της τάσης συμπίπτει με τον d άξονα, θα είναι $V_d = |V|$ και $V_q=0$. Οπότε οι τελικές σχέσεις ενεργού και άεργου ισχύος είναι :

$$P = \frac{3}{2}|V|I_d$$

$$Q = -\frac{3}{2}|V|I_q$$

Παρατηρούμε ότι στην ιδανική περίπτωση, όπου $V_q=0$, η ενεργός ισχύς είναι συνάρτηση της d-συνιστώσας του ρεύματος και η άεργος ισχύς είναι συνάρτηση της q-συνιστώσας του ρεύματος. Έτσι ελέγχοντας την κάθε μια συνιστώσα ξεχωριστά μπορούμε να ρυθμίσουμε την ενεργό και άεργο ισχύ που παράγει ο αντιστροφέας. Αν και στην πράξη $V_q \neq 0$, αλλά λόγω του ότι $V_q \rightarrow 0$, η επιρροή του δεν είναι μεγάλη και πρακτικά τα δυο μεγέθη υπολογίζονται όπως παραπάνω.

3.2 Σχεδιασμός του συστήματος ελέγχου του αντιστροφέα



Σχήμα 3.5 : Ισοδύναμο κύκλωμα αντιστροφέα συνδεδεμένου στο δίκτυο μέσω ενός φίλτρου και ενός μετασχηματιστή[16].

Εφόσον οι περισσότερες αρμονικές που παράγονται από τον αντιστροφέα φιλτράρονται από το φίλτρο εξόδου, ο αντιστροφέας μπορεί να θεωρηθεί σαν μια ιδανική πηγή τάσης[15][16]. Το ισοδύναμο κύκλωμα σύνδεσης του αντιστροφέα με το δίκτυο φαίνεται στο σχήμα 3.5. Σχεδόν πάντα μεταξύ του αντιστροφέα μιας Α/Γ και του δικτύου παρεμβάλλεται, εκτός του φίλτρου, και ένας μετασχηματιστής(για προσαρμογή του επιπέδου τάσης εξόδου με αυτής του δικτύου). Έτσι στο ισοδύναμο κύκλωμα λαμβάνονται υπόψη η αντίδραση σκέδασης L_t του Μ/Σ μαζί με την αντίδραση του φίλτρου L_f οι οποίες συνδέονται εν σειρά με την αντίσταση R_s που απεικονίζει τις συνολικές απώλειες των πηνίων του μετασχηματιστή και του φίλτρου. Επίσης λαμβάνεται υπόψη και η αλληλεπαγωγή M των τριών τυλιγμάτων του μετασχηματιστή αλλά και οι απώλειες R_p στον πυκνωτή C της dc πλευράς. Οι εξισώσεις που περιγράφουν το κύκλωμα προκύπτουν με απλή εφαρμογή του νόμου του Kirchhoff και χρησιμοποιώντας διανύσματα που αναπαριστούν τα τριφασικά μεγέθη τάσης και ρεύματος θα έχουν ως εξής[16] :

$$\begin{bmatrix} v_{inva} \\ v_{invb} \\ v_{invc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} + (R_s + sL_s) \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

όπου $s = \frac{d}{dt}$, $R_s = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix}$ και $L_s = \begin{bmatrix} L_f + L_t & M & M \\ M & L_f + L_t & M \\ M & M & L_f + L_t \end{bmatrix}$

Με την προϋπόθεση ότι το σύστημα δεν έχει συνιστώσες μηδενικής ακολουθίας, όλα τα ρεύματα και οι τάσεις μπορούν να μετασχηματιστούν στο στρεφόμενο dq-πλαίσιο αναφοράς. Έτσι το νέο σύστημα συντεταγμένων, ορίζεται με τον d-άξονα να ταυτίζεται με το συνιστάμενο

διάνυσμα της τάσης ($V_d = |V|$ και $V_q=0$), όπως φαίνεται στο σχήμα 3.4. Εφαρμόζοντας τον μετασχηματισμό abc-dq στα τριφασικά μεγέθη του ρεύματος και των τάσεων έχουμε :

$$\begin{bmatrix} v_{invd} - v_d \\ v_{invq} - v_q \\ v_{inv0} - v_0 \end{bmatrix} = T_{abc-dq} \begin{bmatrix} v_{inva} - v_a \\ v_{invb} - v_b \\ v_{invc} - v_c \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} = T_{abc-dq} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}$$

Αγνοώντας τις μηδενικές συνιστώσες των μεγεθών η εξίσωση (1) γίνεται :

$$\begin{bmatrix} v_{invd} \\ v_{invq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} + (R_s + sL'_s) \cdot \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\omega & 0 \\ 0 & \omega \end{bmatrix} \cdot L'_s \cdot \begin{bmatrix} i_q \\ i_d \end{bmatrix} \quad (2)$$

όπου $R_s = \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_s \end{bmatrix}$, $L'_s = \begin{bmatrix} L'_s & 0 \\ 0 & L'_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_f + L_t - M & 0 \\ 0 & L_f + L_t - M \end{bmatrix}$

και ω είναι η γωνιακή ταχύτητα της τάσης του δικτύου στη θεμελιώδη συχνότητα ($\omega=2\pi f$).

Όσον αφορά το στιγμιαίο ισοζύγιο ισχύος μεταξύ της dc και ac πλευράς έχουμε :

$$P_{ac} = P_{dc}$$

$$\frac{3}{2} (v_d^{inv} i_d + v_q^{inv} i_q) = -\frac{C_d}{2} V_d \cdot s V_d - \frac{V_d^2}{R_p} \quad (3)$$

Όπως επισημάνθηκε προηγουμένως, ο αντιστροφέας παράγει την AC τάση v_{inv} , από την DC V_d , μέσω της τεχνικής PWM που διεξάγεται στα διακοπτικά του στοιχεία. Έτσι, αν θεωρήσουμε ότι ο λόγος ανύψωσης του μετασχηματιστή είναι $a = n_2/n_1$ τότε η παραγόμενη από τον αντιστροφέα τάση στο PPC είναι :

$$v_{inv} = a \cdot m_a \cdot \frac{V_d}{2}$$

Από το σχήμα 3.4 οι d,q συνιστώσες της τάσης αυτής είναι :

$$\begin{bmatrix} v_{invd} \\ v_{invq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \delta \\ \sin \delta \end{bmatrix} \cdot v_{inv}$$

επομένως προκύπτει ότι:

$$\begin{bmatrix} v_{invd} \\ v_{invq} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} a \cdot m_a \begin{bmatrix} \cos \delta \\ \sin \delta \end{bmatrix} \cdot V_d \quad (4)$$

Ουσιαστικά μέσω των εξισώσεων (2), (3) και (4) προκύπτει η εξίσωση κατάστασης του συστήματος που θέλουμε να ελέγξουμε[15]:

$$s \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ \ddot{V}_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-R_s}{L'_s} & \omega & \frac{ma \cos \delta}{2L'_s} \\ -\omega & \frac{-R_s}{L'_s} & \frac{ma \sin \delta}{2L'_s} \\ -\frac{3}{2C} ma \cos \delta & -\frac{3}{2C} ma \sin \delta & -\frac{2}{R_p C} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ \ddot{V}_d \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \frac{|v|}{L'_s} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Η εξίσωση κατάστασης περιγράφει τη δυναμική συμπεριφορά του αντιστροφέα στο dq-πλαίσιο και θα αποτελέσει τη βάση για σχεδιασμό του συστήματος ελέγχου.

Παρατηρώντας την εξίσωση κατάστασης, αντιλαμβάνεται κανείς την αλληλεξάρτηση (cross-coupling), μέσω του ω , των δυο συνιστωσών i_d και i_q του ρεύματος εξόδου του αντιστροφέα. Για τον λόγο αυτό, προκειμένου να επιτύχουμε ανεξάρτητο έλεγχο της ενεργού και αέργου ισχύος, πρέπει με κάποιο τρόπο να ανεξαρτητοποιηθεί η μια συνιστώσα ρεύματος από την άλλη (decoupled current control) [16][17]. Αυτό επιτυγχάνεται παράγοντας τα σήματα ελέγχου x_1 και x_2 τα οποία προκύπτουν χρησιμοποιώντας συμβατικούς PI ελεγκτές με κατάλληλη ανατροφοδότηση των dq-συνιστωσών του ρεύματος εξόδου του αντιστροφέα (σχήμα 3.6). Έτσι τα i_d και i_q αντιστοιχούν απευθείας στα x_1 και x_2 βελτιώνοντας σημαντικά την απόδοση του συστήματος ελέγχου :

$$s \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{L'_s} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L'_s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \Leftrightarrow \begin{cases} x_1 = L'_s \cdot s i_d \\ x_2 = L'_s \cdot s i_q \end{cases}$$

ή διαφορετικά, μέσω PI ελεγκτών είναι:

$$x_1 = PI \{ i_d^{ref} - i_d \}$$

$$x_2 = PI \{ i_q^{ref} - i_q \}$$

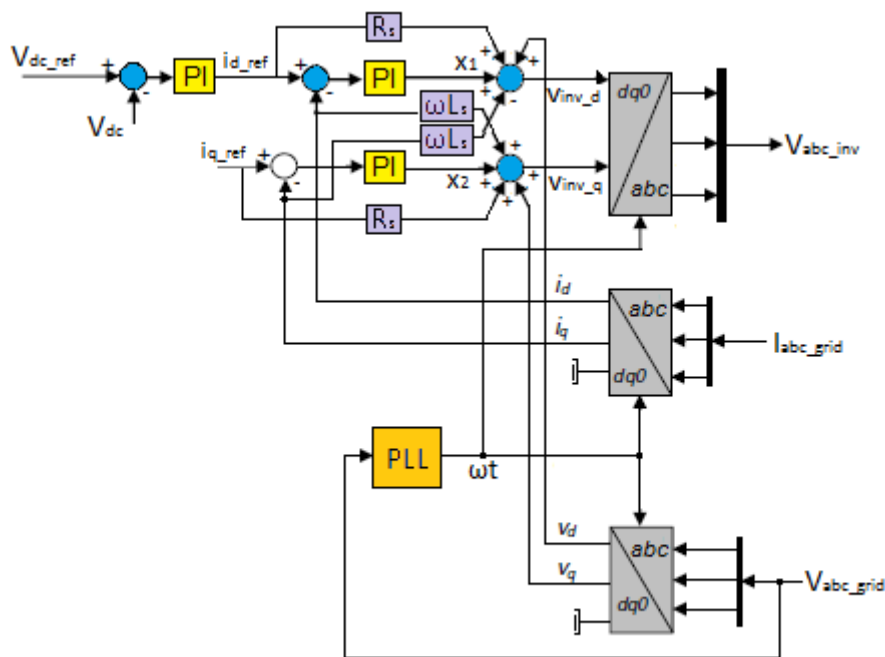
Επίσης, από την εξίσωση κατάστασης παρατηρούμε μια επιπλέον αλληλεξάρτηση των d,q συνιστωσών του ρεύματος με την τάση του πυκνωτή V_d . Αυτό το πρόβλημα απαιτεί τη διατήρηση της dc τάσης σε μια σταθερή τιμή, προκειμένου να μειωθεί η επίδραση της V_d στη δυναμική συμπεριφορά του συστήματος. Την λύση σε αυτό το πρόβλημα δίνει ένας άλλος PI ελεγκτής (σχήμα 3.6) που περιορίζει τις διακυμάνσεις τάσεως στην dc πλευρά του αντιστροφέα, με το να επιτρέπει μικρές μεταβολές στην ανταλλαγή ισχύος με το δίκτυο [15][16]. Έτσι προσπαθώντας να διατηρήσει την τάση σταθερή, ο PI ελεγκτής εξασφαλίζει τη μεταφορά της παραγόμενης ισχύος προς το δίκτυο. Συνεπώς, μια αύξηση της dc τάσης προμηνύει αύξηση της παραγόμενης ισχύος από την ανεμογεννήτρια και έτσι ο ελεγκτής αυξάνει την εντολή ρεύματος i_{d_ref} ώστε ο αντιστροφέας να μετάγει μεγαλύτερη ποσότητα ισχύος προς το δίκτυο. Το ακριβώς αντίστροφο συμβαίνει σε περίπτωση μείωσης της παραγόμενης ισχύος. Συνεπώς, η τιμή αναφοράς για την d-συνιστώσα του ρεύματος i_d που ελέγχει την παρεχόμενη ενεργό ισχύ είναι :

$$i_d^{ref} = PI \{V_{dc}^{ref} - V_{dc}\}$$

Επαναλαμβάνοντας τον τύπο (2), οι d,q συνιστώσες της τάσης αναφοράς του inverter δίνονται ως εξής :

$$\begin{aligned} v_d^{inv} &= v_d + R_s \cdot i_d + x_1 - \omega L_s \cdot i_q \\ v_q^{inv} &= v_q + R_s \cdot i_q + x_2 + \omega L_s \cdot i_d \end{aligned} \quad (5)$$

Η τάση δικτύου V_{abc_grid} θα δειγματοληπτείται πριν τον μετασχηματιστή ανύψωσης, επομένως λαμβάνουμε υπόψη μόνο την σύνθετη αντίσταση του φίλτρου ($Z_f = R_f + L_f$).



Σχήμα 3.6 : Γενικό διάγραμμα ελέγχου του αντιστροφέα της ανεμογεννήτριας.

Το γενικό διάγραμμα ελέγχου του αντιστροφέα, που δίνεται στο σχήμα 3.6, όπου μπορούμε να διακρίνουμε την διαδικασία ανεξαρτητοποίησης του ελέγχου των δυο συνιστωσών του ρεύματος i_d και i_q (decoupling feed-forward compensation). Πολλαπλασιάζοντας τον όρο ωL_s με την μετρούμενη τιμή του ρεύματος ($i_q(n-1)$ και $i_d(n-1)$ αντίστοιχα) δεν επηρεάζεται ο έλεγχος της εκάστοτε συνιστώσας από την άλλη [16][17][19].

Από το διάγραμμα μπορούμε ουσιαστικά, να διακρίνουμε 2 ελεγκτές :

1. Τον ελεγκτή της d-συνιστώσας της τάσης V_{inv_d} , που περιλαμβάνει δυο βρόχους ελέγχου. Έναν εξωτερικό βρόχο που κρατάει την dc-τάση στην ονομαστική τιμή, διασφαλίζοντας την ανταλλαγή ενεργού ισχύος με το δίκτυο, και θέτοντας το ρεύμα αναφοράς της d-συνιστώσας i_{d_ref} . Έναν εσωτερικό βρόχο που ρυθμίζει το ρεύμα i_d και ορίζει την τάση x_1 . Αυτή καθορίζει εν τέλη την τάση V_{inv_d} , αφού προστεθούν οι όροι απόζευξης.
2. Τον ελεγκτή της q-συνιστώσας της τάσης V_{inv_q} , που περιλαμβάνει επίσης δυο βρόχους ελέγχου. Έναν εξωτερικό βρόχο την υλοποίηση του οποίου θα αναλύσουμε παρακάτω, ο οποίος θέτει το ρεύμα αναφοράς της q-συνιστώσας i_{q_ref} , και έναν εσωτερικό βρόχο που ρυθμίζει το ρεύμα i_q και ορίζει την τάση x_2 . Αυτή καθορίζει με τον ίδιο τρόπο την q-συνιστώσα της τάσης εξόδου V_{inv_q} .

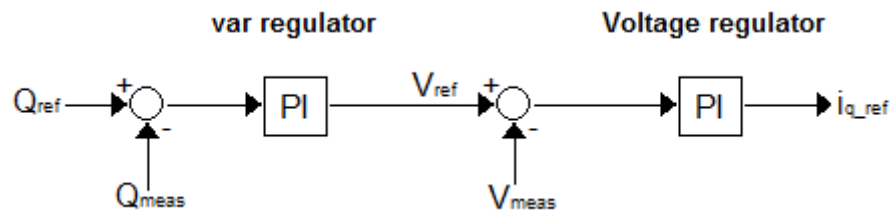
3.3 Έλεγχος της παραγόμενης αέργου ισχύος

Στην προηγούμενη παράγραφο είδαμε πως προέκυψε η τιμή αναφοράς για την d-συνιστώσα του ρεύματος εξόδου (i_{d_ref}) του αντιστροφέα, που σχετίζεται με την ενεργό ισχύ που μεταγεται προς το δίκτυο. Δεν προσδιορίσαμε όμως, πως προκύπτει η τιμή αναφοράς για την q-συνιστώσα i_{q_ref} η οποία ελέγχει την παραγόμενη άεργο ισχύ.

Όπως θα δούμε, ο τρόπος με τον οποίο ελέγχεται η άεργος ισχύς καθορίζει και την λειτουργία της ανεμογεννήτριας. Θεωρώντας πάντα ότι η παραγωγή ενεργού και αέργου ισχύος ελέγχονται ανεξάρτητα, διακρίνουμε δυο περιπτώσεις[18] :

- [1] **PQ λειτουργία (PQ node)** : Όταν η Α/Γ λειτουργεί σε PQ-node, ο αντιστροφέας ρυθμίζει την ποσότητα αέργου ισχύος που θα παρέχεται στο δίκτυο σε μια προκαθορισμένη τιμή αναφοράς Q_{ref} . Με άλλα λόγια, γίνεται προσαρμογή του συντελεστή ισχύος(ΣΙ) της Α/Γ στην απαιτούμενη τιμή από τον διαχειριστή του δικτύου.
- [2] **PV λειτουργία (PV node)** : Σε αυτή την κατάσταση λειτουργίας, ο αντιστροφέας προσπαθεί να προσαρμόσει την τάση στο σημείο κοινής σύνδεσης(ΣΚΣ) σε μια επιθυμητή τιμή αναφοράς V_{ref} . Αυτό επιτυγχάνεται ελέγχοντας κατάλληλα την άεργο ισχύ, ώστε η τάση στο ΣΚΣ να είναι η επιθυμητή.

Στη συνέχεια θα γίνει μια πιο εκτενής αναφορά στις δυο αυτές λειτουργίες καθώς και στον τρόπο υλοποίησής τους στο μοντέλο το οποίο εξετάζουμε[18].

❖ PQ node

Σχήμα 3.7 : Διάγραμμα ελέγχου του ρεύματος i_q του αντιστροφέα σε PQ node.

Το διάγραμμα ελέγχου του ρεύματος i_q σε αυτή την κατάσταση λειτουργίας φαίνεται στο σχήμα 3.7. Τα μετρούμενα μεγέθη είναι η τάση στην έξοδο του φίλτρου V_{meas} και η παραγόμενη από την ανεμογεννήτρια άεργος ισχύς Q_{meas} . Στη μετρούμενη άεργο ισχύ λαμβάνεται υπόψη και η άεργος ισχύς Q_{C_filter} που παράγει ο πυκνωτής του φίλτρου, η οποία είναι ανάλογη του τετραγώνου της τάσης. Έτσι σαν μετρούμενη άεργο ισχύ στην έξοδο της ανεμογεννήτριας θεωρούμε :

$$Q_{meas} = Q_{inv} + Q_{C_filter}$$

όπου Q_{inv} : η παραγόμενη από τον αντιστροφέα άεργος ισχύς

Όπως διακρίνεται λοιπόν από διάγραμμα ελέγχου, η τιμή αναφοράς Q_{ref} συγκρίνεται με την μετρούμενη Q_{meas} στην έξοδο της ανεμογεννήτριας. Το σφάλμα που προκύπτει, τροφοδοτείται σε έναν PI ελεγκτή ο οποίος παρέχει την τιμή V_{ref} που πρέπει να έχει η τάση στην έξοδο του φίλτρου. Αυτή η τιμή αναφοράς συγκρίνεται εν συνεχεία με την μετρούμενη τάση V_{meas} και η διαφορά που προκύπτει τροφοδοτεί τον δεύτερο PI ελεγκτή. Εν τέλει, αυτός παρέχει και το ζητούμενο, δηλαδή την απαιτούμενη q-συνιστώσα του ρεύματος του αντιστροφέα i_{q_ref} . Από το σημείο αυτό η λογική ελέγχου είναι γνωστή από την προηγούμενη παράγραφο (σχήμα 2.29) και το αποτέλεσμα θα είναι η παραγωγή της επιθυμητής αέργου ισχύος από την Α/Γ χωρίς να επηρεάζεται φυσικά η παραγόμενη ενεργός ισχύς.

Βέβαια, το εύρος της άεργου ισχύος που δύναται να παραχθεί από τον αντιστροφέα, περιορίζεται από διάφορους παράγοντες όπως εξηγήσαμε στην παράγραφο 2.6.2. Ένας από αυτούς είναι το μέγιστο ρεύμα $I_{inv,max}=1,1pu$ που μπορούν να αντέξουν τα διακοπτικά στοιχεία του αντιστροφέα. Έτσι πρέπει πάντα να ικανοποιείται η συνθήκη :

$$\sqrt{I_d^2 + I_q^2} \leq I_{inv,max}$$

Δεδομένου, ότι βασικό μέλημα του αντιστροφέα, είναι να μετάγει την ενεργό ισχύ που παράγεται προς το δίκτυο, θα πρέπει να δοθεί προτεραιότητα στην d-συνιστώσα του ρεύματος i_d (i_d -priority)[20]. Επομένως, αυτό που πρέπει να περιοριστεί είναι το ρεύμα i_q , ώστε το

συνολικό ρεύμα i_{inv} να μην ξεπερνάει την τιμή $I_{inv,max}$. Άρα, η συνθήκη που πρέπει να ικανοποιεί το ρεύμα i_q είναι :

$$\begin{aligned} I_q &\leq \sqrt{I_{inv,max}^2 - I_d^2} \Leftrightarrow \\ I_q &\leq \sqrt{1.1^2 - I_d^2} = I_{q,max} \end{aligned}$$

Συνεπώς αυτό που παρατηρούμε, είναι ότι η μέγιστη άεργος ισχύς, μπορεί να παραχθεί μόνο όταν η ενεργός ισχύς είναι η ελάχιστη ($i_d \approx 0$), δηλαδή μόνο όταν η Α/Γ λειτουργεί σε χαμηλές στροφές όπου η ταχύτητα ανέμου βρίσκεται κοντά στην ταχύτητα αποκοπής v_{cut-in} :

$$I_d^{min} \approx 0 \quad \Rightarrow \quad I_{q,max} = 1.1 pu$$

Αντιθέτως, το κατώτατο όριο στη μέγιστη άεργο ισχύ δίνεται όταν η Α/Γ αποδίδει την ονομαστική της ενεργό ισχύ. Βέβαια η ικανότητα σε ισχύ του αντιστροφέα είναι αρκετά μεγαλύτερη από την ονομαστική ισχύ της Α/Γ και έτσι υπάρχει ακόμα αρκετό περιθώριο για άεργο ρεύμα i_q :

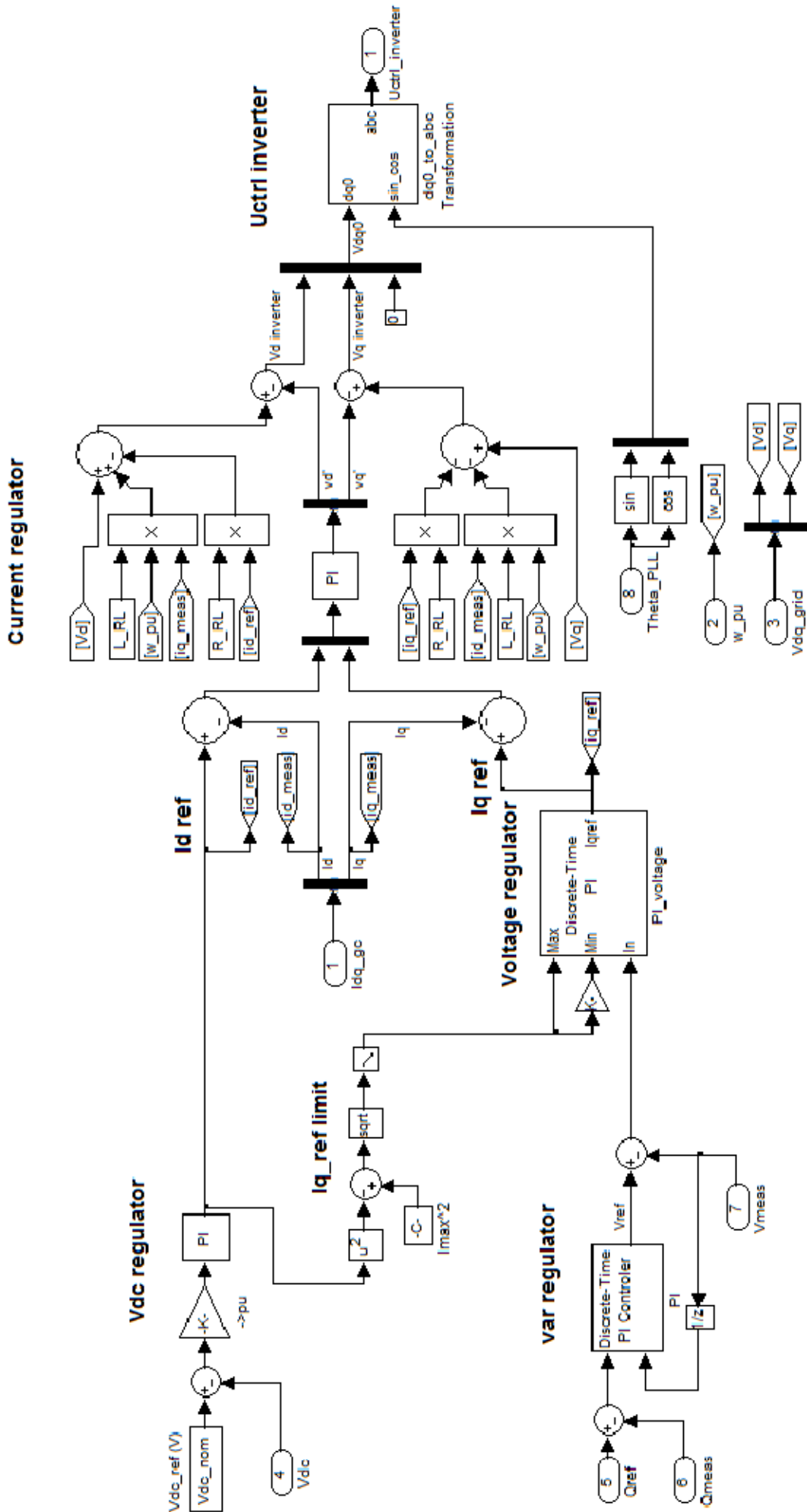
$$I_d^{max} \approx 0.9 \quad \Rightarrow \quad I_{q,max} = 0.63 pu$$

Αυτό σημαίνει ότι, ακόμα και όταν η Α/Γ λειτουργεί υπό ονομαστική ισχύ, μπορεί να παράγει σημαντική ποσότητα αέργου ισχύος χωρίς να χρειαστεί να μειώσει την ενεργό ισχύ της. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό διότι η μείωση της ενεργού ισχύος γίνεται, όπως αναφέραμε, μέσω του ελεγκτή της γωνίας pitch των πτερυγίων, ο οποίος θα φρενάρει τον ανεμοκινητήρα. Αυτή η διαδικασία εκτός του ότι είναι χρονοβόρα(1-2sec) απαιτεί ακόμα περισσότερο χρόνο για την επαναφορά της ταχύτητας του δρομέα στα προ-μείωσης της επίπεδα. Με την χρήση αντιστροφέων μεγαλύτερης ικανότητας ισχύος, αποφεύγονται τέτοιες καταστάσεις, παρέχοντας τη δυνατότητα ρύθμισης του Σ.Ι. για οποιαδήποτε P_{gen} δίχως να επηρεάζεται η ομαλή λειτουργία του υπόλοιπου κινητήριου μέρους της ανεμογεννήτριας.

Λαμβάνοντας υπόψη όλα όσα αναφέρθηκαν παραπάνω, το σύστημα ελέγχου του αντιστροφέα για λειτουργία PQ φαίνεται στο σχήμα 3.8 της επόμενης σελίδας. Εύκολα διακρίνουμε τα 4 υποσυστήματα που το απαρτίζουν:

- *Ρυθμιστής dc-τάσης - V_{dc} regulator* : Παρέχει το ρεύμα αναφοράς i_{d_ref} , το οποίο τροφοδοτείται στον ρυθμιστή ρεύματος. Είσοδος του ρυθμιστή είναι η μετρούμενη dc-τάση στον πυκνωτή του αντιστροφέα, V_{dc} . Αυτή συγκρίνεται με την τάση αναφοράς $V_{dc_ref} = 1100V$ και η διαφορά τροφοδοτείται σε έναν PI ελεγκτή αφού προηγουμένως μετατραπεί σε ανά μονάδα μέγεθος. Τα κέρδη του ελεγκτή είναι $K_p = 1.1$ και $K_i = 27.5$.
- *Ρυθμιστής άεργου ισχύος – var regulator* : παρέχει την τάση αναφοράς V_{ref} προς τον ρυθμιστή τάσης. Είσοδος του ρυθμιστή είναι η μετρούμενη άεργος ισχύς στην έξοδο της Α/Γ, Q_{meas} . Αυτή συγκρίνεται με την τιμή αναφοράς Q_{ref} , που είναι η εντολή αέργου ισχύος προς την Α/Γ. Τα μεγέθη βρίσκονται ήδη σε ανά μονάδα οπότε η διαφορά τους

Grid-side converter control system in PQ node



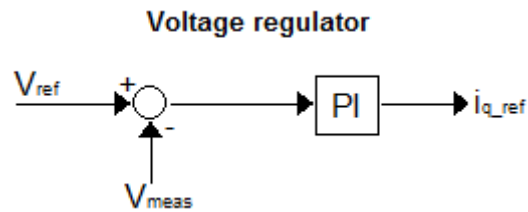
Σχήμα 3.8

τροφοδοτείται απευθείας προς τον ελεγκτή PI τα κέρδη του οποίου είναι $K_p=3$ και $K_i=0.05$.

- *Ρυθμιστής τάσης – Voltage regulator* : Παρέχει το ρεύμα αναφοράς i_{q_ref} , το οποίο τροφοδοτεί τον ρυθμιστή ρεύματος. Η μια είσοδος του ρυθμιστή είναι η μετρούμενη τάση V_{meas} στην έξοδο της Α/Γ η οποία αφού συγκριθεί με την τάση αναφοράς V_{ref} τροφοδοτεί τον ελεγκτή PI. Οι άλλες δυο είσοδοι καθορίζουν την μέγιστη και ελάχιστη τιμή ($i_q \leq |i_{q,max}|$) που μπορεί να πάρει το ρεύμα αναφοράς i_{q_ref} . Τα κέρδη του ελεγκτή είναι $K_p=1$ και $K_i=2$.
- *Ρυθμιστής ρεύματος – Current regulator* : Τα ρεύματα αναφοράς i_{d_ref} και i_{q_ref} συγκρίνονται με τα μετρούμενα i_d και i_q αντίστοιχα, και το σφάλμα τους διέρχεται από τον ελεγκτή PI με κέρδη $K_p=1$ και $K_i=50$. Η έξοδος του ελεγκτή είναι το διάνυσμα $X=[v_{d*}, v_{q*}]$. Η κάθε συνιστώσα του διανύσματος προστίθεται με τους κατάλληλους όρους της εξίσωσης που παρέχει την τάση του αντιστροφέα στην έξοδο της Α/Γ :

$$\begin{aligned} v_d^{inv} &= v_d + R_s \cdot i_d + v_d^* - \omega L_s \cdot i_q \\ v_q^{inv} &= v_q + R_s \cdot i_q + v_q^* + \omega L_s \cdot i_d \end{aligned} \quad v_d, v_q, i_d, i_q \leq 0$$

Στην έξοδο του συστήματος λαμβάνουμε τις κυματομορφές ελέγχου του αντιστροφέα $U_{ctrl_inverter}$. Αυτές θα τροφοδοτήσουν την γεννήτρια παλμών η οποία θα παράξει τους κατάλληλους παλμούς οδήγησης για τον αντιστροφέα.

❖ PV node

Σχήμα 3.9 : Διάγραμμα ελέγχου του ρεύματος i_q του αντιστροφέα σε PV node.

Όταν ο αντιστροφέας λειτουργεί σαν ρυθμιστής της τάσης του δικτύου (PV node), τότε το διάγραμμα ελέγχου του ρεύματος i_q είναι αυτό του σχήματος 3.9. Η μετρούμενη τάση V_{meas} μπορεί να είναι οποιαδήποτε τάση στο δίκτυο, αλλά συνήθως επιλέγεται να είναι αυτή στο σημείο κοινής σύνδεσης(ΣΚΣ) του αιολικού πάρκου με το δίκτυο. Βέβαια το σημείο κοινής σύνδεσης μπορεί να απέχει αρκετά χιλιόμετρα από το αιολικό πάρκο, με αποτέλεσμα η αποστολή της μετρούμενης τάσης να γίνεται ασύρματα. Σε αυτή τη περίπτωση ο έλεγχος γίνεται πιο δύσκολος εξαιτίας διάφορων παραγόντων, όπως η χρονική καθυστέρηση που εισάγουν τα τηλεπικοινωνιακά μέσα. Στην παρούσα εργασία, αν και το σημείο κοινής σύνδεσης απέχει 30km από το αιολικό πάρκο, δεν θα λάβουμε υπόψη αυτά τα προβλήματα.

Από το διάγραμμα ελέγχου παρατηρούμε ότι η μετρούμενη τάση συγκρίνεται με την τιμή αναφοράς και το σφάλμα περνάει σε ένα PI ελεγκτή. Αυτός παρέχει στην έξοδό του την απαιτούμενη d-συνιστώσα του ρεύματος του αντιστροφέα, i_{q_ref} . Από το σημείο αυτό η λογική ελέγχου είναι γνωστή από την προηγούμενη παράγραφο(σχήμα 3.6) και το αποτέλεσμα θα είναι η παραγωγή της κατάλληλης ποσότητας αέργου ισχύος ώστε η τάση στο ΣΚΣ να διατηρείται στην επιθυμητή τιμή.

Για να κατανοήσουμε καλύτερα την λογική αξιοποίησης της αέργου ισχύος για τη ρύθμιση της τάσης στο σημείο κοινής σύνδεσης, αρκεί να μελετήσουμε την εξίσωση που μας δίνει την εκατοστιαία πτώση τάσης στο σημείο αυτό :

$$\varepsilon_K (\%) = \frac{100}{V_n^2} \cdot (R_K \cdot P_w + X_K \cdot Q_w)$$

Όπου :

- V_n : η ονομαστική τάση του ΣΚΣ
- R_K : η συνολική ωμική αντίσταση από το άπειρο σύστημα μέχρι το ΣΚΣ
- X_K : η συνολική επαγωγική αντίσταση από το άπειρο σύστημα μέχρι το ΣΚΣ
- P_w : η ενεργός ισχύς που παράγει η Α/Γ
- Q_w : η άεργος ισχύς που παράγει η Α/Γ

Από τον τύπο προκύπτει ότι η τάση στο ΣΚΣ εξαρτάται τόσο από την παραγωγική ισχύ του αιολικού όσο και από την “ισχύ” του δικτύου στο ΣΚΣ. Το τελευταίο καθορίζεται από την ισχύ βραχυκύκλωσης του ΣΚΣ που είναι :

$$S_K = \frac{V_n^2}{|\tilde{Z}_K|} \Rightarrow S_K = \frac{V_n^2}{\sqrt{R_K^2 + X_K^2}}$$

όπου \tilde{Z}_K η ισοδύναμη σύνθετη αντίσταση στο ΣΚΣ : $\tilde{Z}_K = R_K + j \cdot X_K$

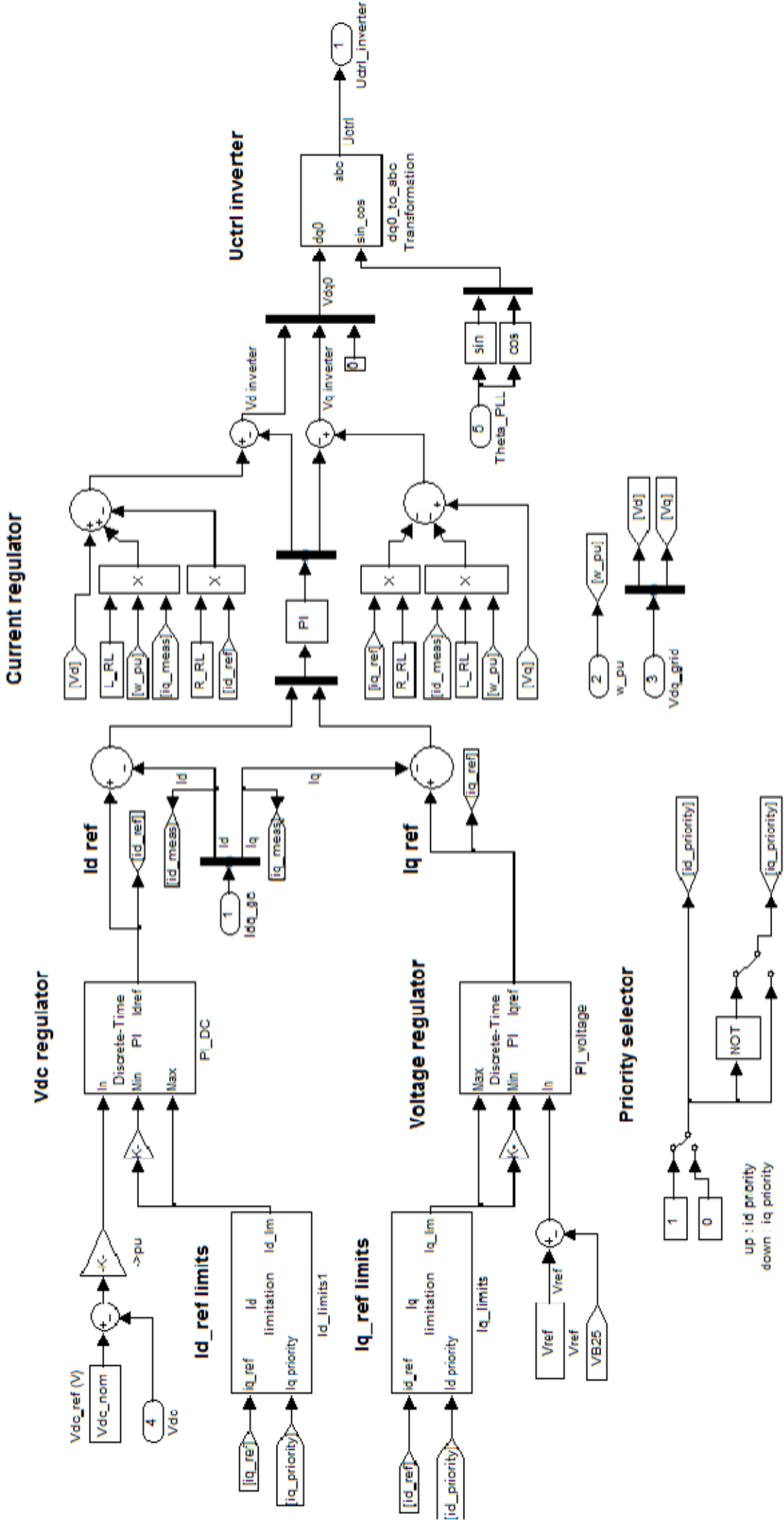
Παρατηρούμε ότι η “ισχύς” του δικτύου σε ένα σημείο του, είναι ανάλογη του τετραγώνου της ονομαστικής τάσης V_n και αντιστρόφως ανάλογη του μέτρου της σύνθετης αντίστασης Z_K . Ένα ισχυρό ΣΚΣ, που συνδυάζει μικρή σύνθετη αντίσταση και υψηλή τάση, θα απαιτεί επομένως μεγάλες τιμές ενεργού ή αέργου ισχύος (π.χ. από ένα αιολικό πάρκο) για να επηρεαστεί εν τέλει το επίπεδο της τάσης.

Επομένως, ένα αιολικό πάρκο θα πρέπει να έχει υπολογίσιμη ονομαστική ισχύ, ώστε σε ρόλο ρυθμιστή τάσης (PV node) να μπορεί εύκολα να προσαρμόζει το επίπεδο τάσης σε ένα ισχυρό ΣΚΣ.

Θεωρώντας ότι το αιολικό πάρκο έχει κατάλληλη ονομαστική ισχύ, από τον τύπο της εκατοστιαίας πτώσης τάσης $\varepsilon(\%)$ παρατηρούμε ότι το επίπεδο τάσης ανεβαίνει όταν έχουμε παραγωγή ενεργού ή αέργου ισχύος και κατεβαίνει όταν έχουμε μείωση της ενεργού ισχύος ή κατανάλωση αέργου ισχύος. Όταν επιθυμούμε λοιπόν να προσαρμόσουμε το επίπεδο τάσης σε συγκεκριμένη τιμή αρκεί να επέμβουμε σε μία τις δυο παραγωγές ισχύος. Δεδομένου ότι η ενεργός ισχύς δεν μπορεί να αυξηθεί κατά βούληση, και επίσης δεν είναι συνετό να μειωθεί για τεχνικούς και οικονομικούς λόγους, το μόνο που απομένει είναι να επέμβουμε στην άεργο ισχύ. Έτσι, σε περίπτωση πτώσης τάσης στο ΣΚΣ αρκεί ο αντιστροφέας να παράγει περισσότερο άεργο ισχύ, ώστε η αυτή να επανέλθει στην επιθυμητή τιμή. Το αντίστροφο, δηλαδή κατανάλωση αέργου ισχύος από τον αντιστροφέα, πρέπει να συμβεί κατά την αύξηση της τάσης. Βέβαια, σε μεγάλες βυθίσεις τάσης, η άεργος ισχύς που θα παραχθεί δεν αρκεί για να επαναφέρει την τάση στην αρχική της τιμή. Το ίδιο ισχύει και για πτώσεις τάσης πολύ μικρής διάρκειας, όπου ο αντιστροφέας λόγω της αργής απόκρισής του δεν προλαβαίνει να επαναφέρει την τάση. Παρόλαυτά, κατά την διάρκεια τέτοιων βυθίσεων, η επίτευξη έστω και ενός μικρού ποσοστού αύξησης, μπορεί να καθορίσει την αποσύνδεση ή όχι του αιολικού πάρκου από το δίκτυο. Αυτά θα συζητηθούν εκτενώς στο επόμενο κεφάλαιο σε συνδυασμό με τους κώδικες σύνδεσης.

Αυτή είναι σε γενικές γραμμές η λογική αξιοποίησης της αέργου ισχύος για ρύθμιση της τάσης στο ΣΚΣ με το δίκτυο. Όπως αναφέραμε προηγουμένως, ο αντιστροφέας παρέχει τη δυνατότητα παραγωγής ή κατανάλωσης μεγάλου εύρους αέργου ισχύος ακόμα και όταν η Α/Γ αποδίδει την ονομαστική της ισχύ. Έτσι υπο οποιαδήποτε συνθήκη λειτουργίας, οι Α/Γ του αιολικού πάρκου λειτουργώντας σε PV node συμβάλλουν στη ρύθμιση της τάσης του δικτύου απορροφώντας ή εγχέοντας άεργο ισχύ.

Grid-side converter control system in PV node



Σχήμα 3.10

Στο σχήμα 3.10 φαίνεται το σύστημα ελέγχου του αντιστροφέα για λειτουργία της A/Γ σε PV node. Τα υποσυστήματα που το απαρτίζουν είναι ίδια με το αντίστοιχο σύστημα ελέγχου για PQ node. Ο ρυθμιστής αέργου ισχύος (var regulator) που υπάρχει στον PQ έλεγχο, δεν είναι αναγκαίος εδώ, καθώς την τάση αναφοράς V_{ref} την παρέχουμε εμείς χειροκίνητα. Αυτή συγκρίνεται με την μετρούμενη τάση V_3 στο τέλος της γραμμής των 30km, και το σφάλμα τροφοδοτείται στον PI ελεγκτή του ρυθμιστή τάσης.

Βέβαια, όπως και στην λειτουργία PQ, το εύρος της αέργου ισχύος που δύναται να παραχθεί από τον αντιστροφέα, περιορίζεται από το μέγιστο ρεύμα $I_{inv,max}=1,1pu$ που μπορούν να αντέξουν τα διακοπτικά στοιχεία του αντιστροφέα. Έτσι πρέπει πάντα να ικανοποιείται η συνθήκη :

$$\sqrt{I_d^2 + I_q^2} \leq 1.1pu$$

Επομένως, μια από τις συνιστώσες ρεύματος πρέπει να περιοριστεί με βάση την τιμή της άλλης συνιστώσας. Αυτό καθορίζει και την προτεραιότητα ρεύματος στην λειτουργία PV[20] :

➤ I_d priority

Η τιμή του ρεύματος αναφοράς $i_{q,ref}$, που προκύπτει από την έξοδο του ρυθμιστή τάσης, δεν πρέπει να ξεπερνά τα όρια που θέτει η ανισότητα :

$$|i_{q,ref}| \leq \sqrt{1.1^2 - i_{d,ref}^2}$$

Δηλαδή

$$i_{q,ref}^{max} = \sqrt{1.1^2 - i_{d,ref}^2}$$

$$i_{q,ref}^{min} = -\sqrt{1.1^2 - i_{d,ref}^2}$$

Αντιθέτως, η τιμή του ρεύματος αναφοράς $i_{d,ref}$, που προκύπτει στην έξοδο του ρυθμιστή της dc-τάσης, έχει τη δυνατότητα να πάρει την μέγιστη τιμή του ρεύματος του αντιστροφέα :

$$i_{d,ref}^{max} = 1.1pu$$

$$i_{d,ref}^{min} = -1.1pu$$

➤ I_q priority

Η τιμή του ρεύματος αναφοράς $i_{d,ref}$, δεν πρέπει να ξεπερνά τα όρια που θέτει η ανισότητα :

$$|i_{d,ref}| \leq \sqrt{1.1^2 - i_{q,ref}^2}$$

Δηλαδή

$$i_{d,ref}^{max} = \sqrt{1.1^2 - i_{d,ref}^2}$$

$$i_{d,ref}^{min} = -\sqrt{1.1^2 - i_{d,ref}^2}$$

Σε αυτή τη περίπτωση, η τιμή του ρεύματος αναφοράς $i_{q,ref}$, έχει τη δυνατότητα να πάρει την μέγιστη τιμή του ρεύματος του αντιστροφέα :

$$i_{q,ref}^{max} = 1.1 pu$$

$$i_{q,ref}^{min} = -1.1 pu$$

➤ **no priority**

Αυτή τη φορά δεν τίθεται κάποιος περιορισμός ρεύματος προς όφελος του άλλου. Και οι δυο συνιστώσες ρεύματος μπορούν να πάρουν την μέγιστη τιμή 1.1pu, δηλαδή αυτή του μέγιστου ρεύματος του αντιστροφέα. Άρα :

$$i_{d,ref}^{max} = i_{q,ref}^{max} = 1.1 pu$$

$$i_{d,ref}^{min} = i_{q,ref}^{min} = -1.1 pu$$

Βέβαια σε περίπτωση που πάρουν και οι δυο την μέγιστη τιμή τότε έχουμε υπερφόρτωση του αντιστροφέα καθώς :

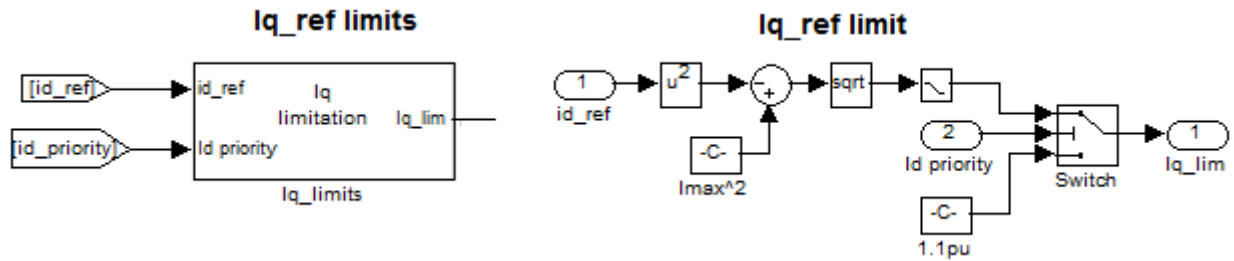
$$I_{inv} = \sqrt{1.1^2 + 1.1^2} \approx 1.56 pu$$

Στο σχήμα 3.10 διακρίνουμε τον επιλογέα προτεραιότητας (**Priority selector**). Αυτός παρέχει τα κατάλληλα σήματα έναυσης (I_d priority, I_q priority) στα μπλοκ υπολογισμού των ορίων των ρευμάτων αναφοράς (“ I_{d_ref} limits”, “ I_{q_ref} limits”). Τα σήματα έναυσης είναι λογικές μεταβλητές, δηλαδή μπορούν να πάρουν τιμές 0 ή 1. Ο παρακάτω πίνακας μας δίνει τα όρια που προκύπτουν για κάθε τιμή των σημάτων έναυσης.

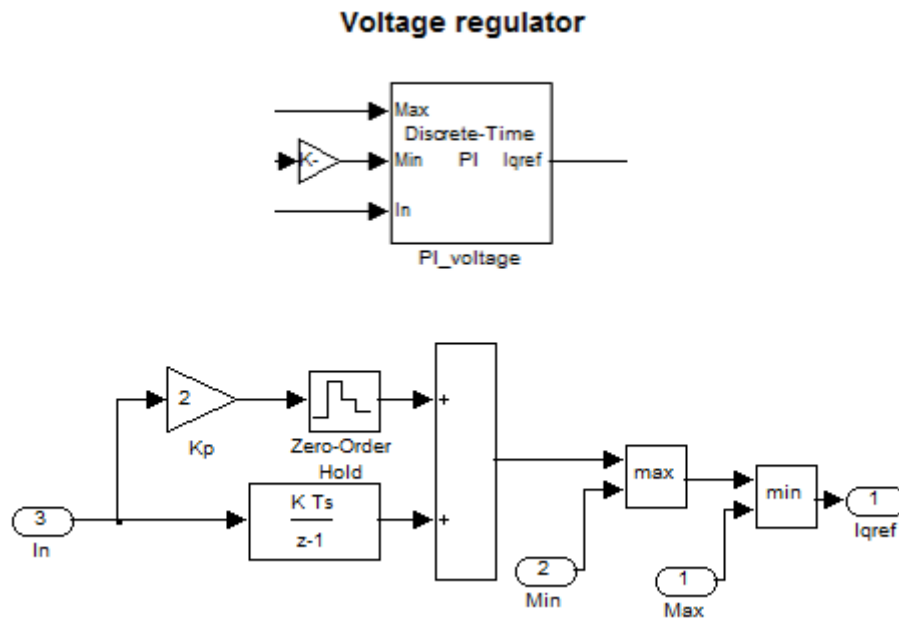
Priority	I_d priority logical value	I_q priority logical value	$ i_d $ maximum (pu)	$ i_q $ maximum (pu)
i_d priority	1	0	1.1	$\sqrt{1.1^2 - i_d^2}$
i_q priority	0	1	$\sqrt{1.1^2 - i_q^2}$	1.1
no priority	1	1	1.1	1.1

Πίνακας 1 .

Στο σχήμα 3.11 φαίνεται αναλυτικά ο τρόπος υπολογισμού των ορίων του i_q στο μπλόκ “ I_{q_ref} limits”. Τα όρια αυτά τίθενται στον PI ελεγκτή του ρυθμιστή τάσης κατά τρόπο που φαίνεται στο σχήμα 3.12. Η ίδια διαδικασία ακολουθείται και για τον υπολογισμό και την εφαρμογή των ορίων στο ρεύμα i_d του ρυθμιστή της dc-τάσης.



Σχήμα 3.11 : Μπλοκ υπολογισμού ορίων ρεύματος αναφοράς $i_{q,ref}$.



Σχήμα 3.12 : PI ελεγκτής του ρυθμιστή τάσης .

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

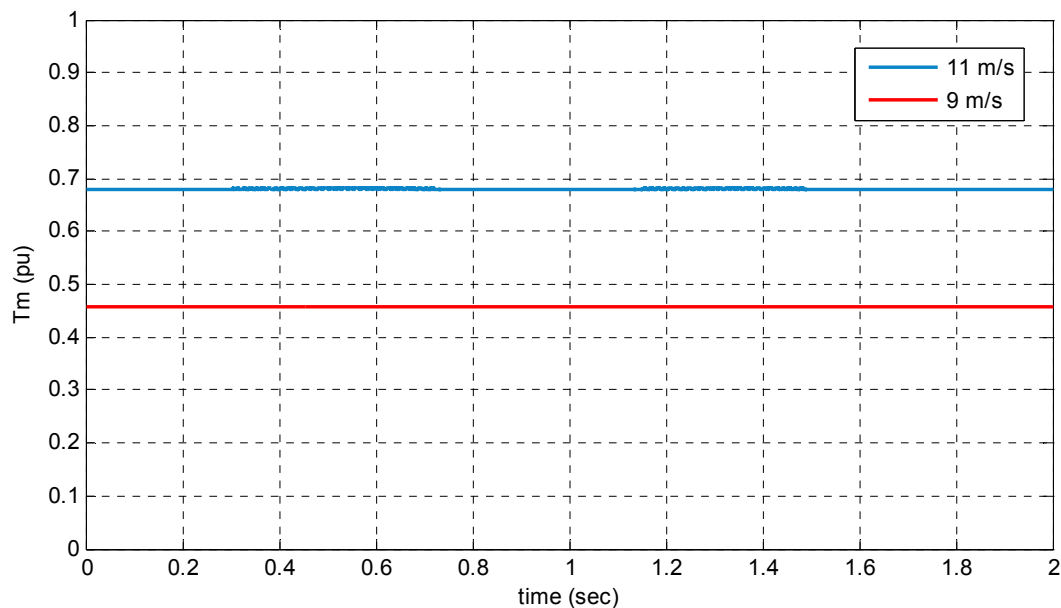
ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΟΥ **ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ**

Σε αυτό το κεφάλαιο θα γίνει παρουσίαση της λειτουργίας του μοντέλου Α/Γ σε σταθερές και μεταβλητές συνθήκες ανέμου. Θα καταγραφούν οι αποκρίσεις διάφορων ηλεκτρικών και μηχανικών μεγεθών της Α/Γ και θα επαληθευθούν οι χαρακτηριστικές καμπύλες που παρουσιάστηκαν στο 2^ο κεφάλαιο. Τέλος, θα μελετηθεί η ικανότητα του συστήματος σε παραγωγή ενεργού και αέργου ισχύος και θα εξεταστεί εάν καλύπτονται οι βασικές απαιτήσεις του γερμανικού κώδικα για παραγωγή αέργου ισχύος όπως αυτές παρουσιάστηκαν στο 1^ο κεφάλαιο. Στις προσομοιώσεις η ανεμογεννήτρια είναι συνδεδεμένη στο δίκτυο και θα λειτουργεί σε PQ node.

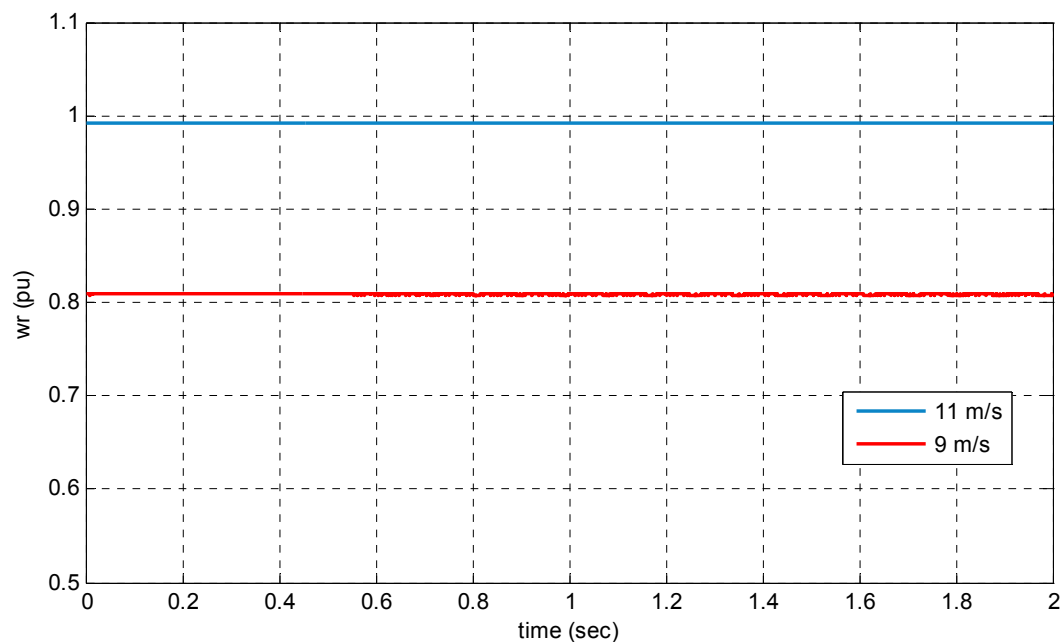
4.1 Απόκριση Α/Γ σε σταθερή αεροδυναμική ροπή

Όταν η ανεμογεννήτρια λειτουργεί υπό σταθερή ταχύτητα ανέμου, η μηχανική ροπή που ασκείται στον άξονα είναι σταθερή και το σύστημα θα ισορροπήσει σε μια μόνιμη κατάσταση. Όπως περιγράφηκαν στη παράγραφο 2.2 και 2.3, τα υποσυστήματα προσομοίωσης του αεροδυναμικού μέρους και του συστήματος μετάδοσης κίνησης, παρέχουν την μηχανική ροπή που ασκείται στον άξονα της γεννήτριας. Στο σχήμα 4.1 φαίνεται η μηχανική ροπή T_m για ταχύτητες ανέμου 9m/s και 11m/s, αφότου το σύστημα έχει φτάσει σε μια κατάσταση ισορροπίας. Η γωνιακή ταχύτητα του δρομέα συναρτήσει του χρόνου δίνεται σε ανά μονάδα στο σχήμα 4.2. Έτσι, για ταχύτητα ανέμου 9 m/s ο δρομέας περιστρέφεται με 0,81pu και η ροπή που ασκείται σε αυτόν είναι στα 0.45pu. Για ταχύτητα 11m/s, που είναι και η ονομαστική ταχύτητα, η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής φτάνει στα 1pu και η ροπή που ασκείται σε αυτόν είναι στα 0.7pu. Έτσι παρατηρούμε μια αύξηση της ροπής και της γωνιακής ταχύτητας σύμφωνα με τη χαρακτηριστική $P-w_T$ (σχήμα 2.22) που ακολουθεί ο ρυθμιστής στροφών της Α/Γ, με βάση τη

στρατηγική μέγιστης απολαβής ισχύος. Στο σχήμα 4.3, παρουσιάζεται η μετρούμενη ισχύς εξόδου της Α/Γ για τις διαφορετικές ταχύτητες ανέμου, επαληθεύοντας τα ανωτέρω.

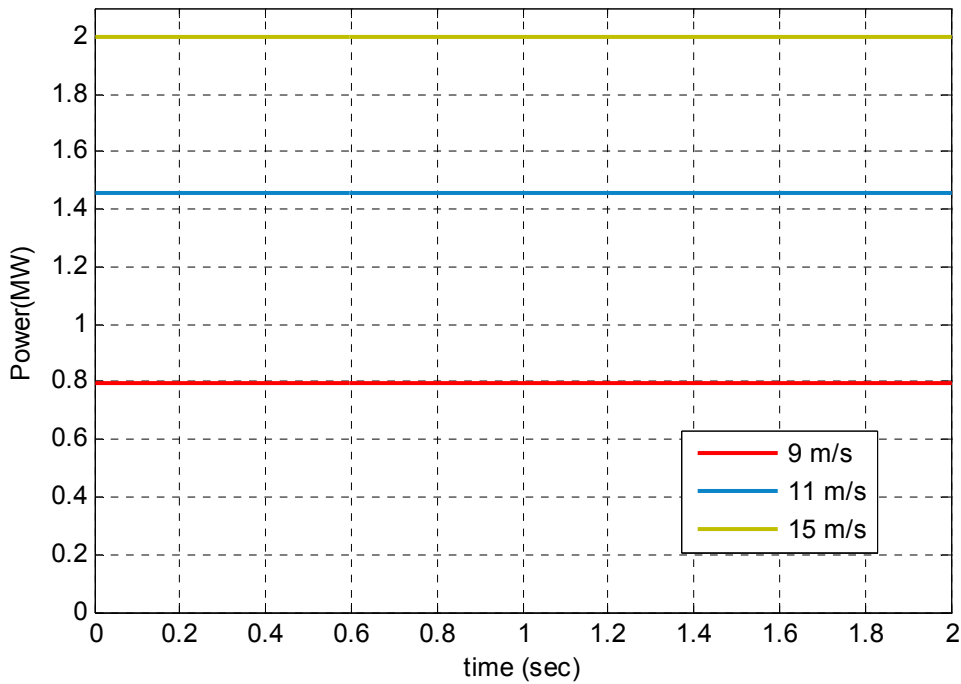


Σχήμα 4.1 : Μηχανική ροπή στον άξονα της γεννήτριας για $v_w=9\text{m/s}$ και $v_w=11\text{m/s}$.



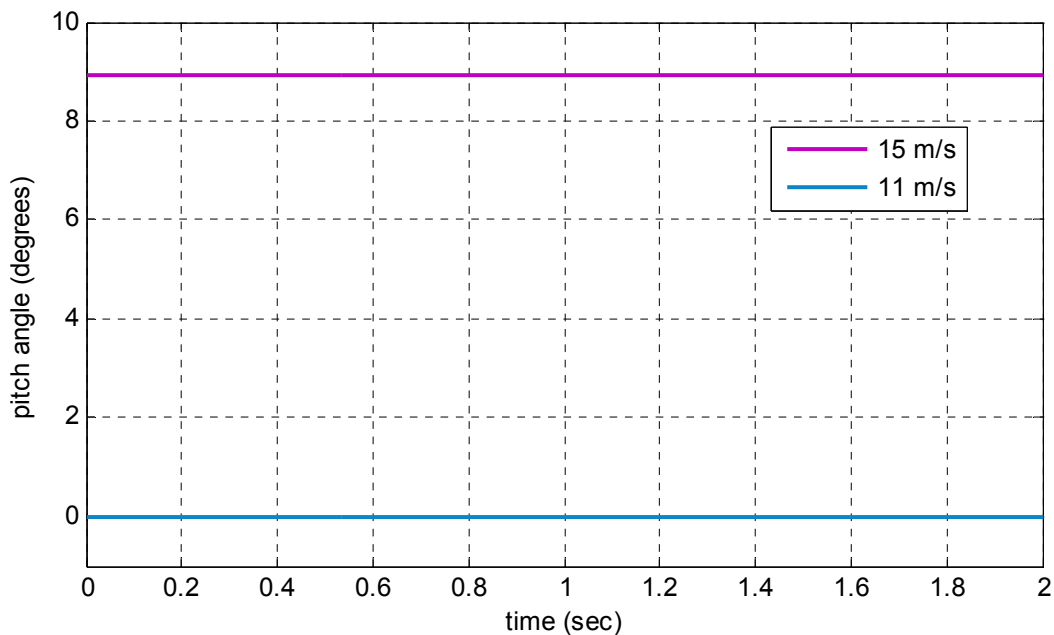
Σχήμα 4.2 : Γωνιακή ταχύτητα δρομέα για $v_w=9\text{m/s}$ και $v_w=11\text{m/s}$.

Βέβαια για ταχύτητες ανέμου μεγαλύτερες της ονομαστικής ($v_{nom}=11\text{m/s}$), η γωνιακή ταχύτητα δεν επιτρέπεται να αυξηθεί περισσότερο. Έτσι ο ρυθμιστής στροφών την κρατάει στο 1 pu μειώνοντας έτσι τον αεροδυναμικό συντελεστή C_p . Επίσης για ταχύτητες ανέμου που ωθούν το σύστημα σε παραγωγή ισχύος μεγαλύτερης των 2MW ο ρυθμιστής στροφών συνεργάζεται με τον ρυθμιστή γωνίας pitch, ώστε αλλάζοντας την κλίση των πτερυγίων να διατηρείται η παραγωγή στα 2MW. Στο σχήμα 4.4 φαίνεται η τιμή της γωνίας pitch για ταχύτητες ανέμου



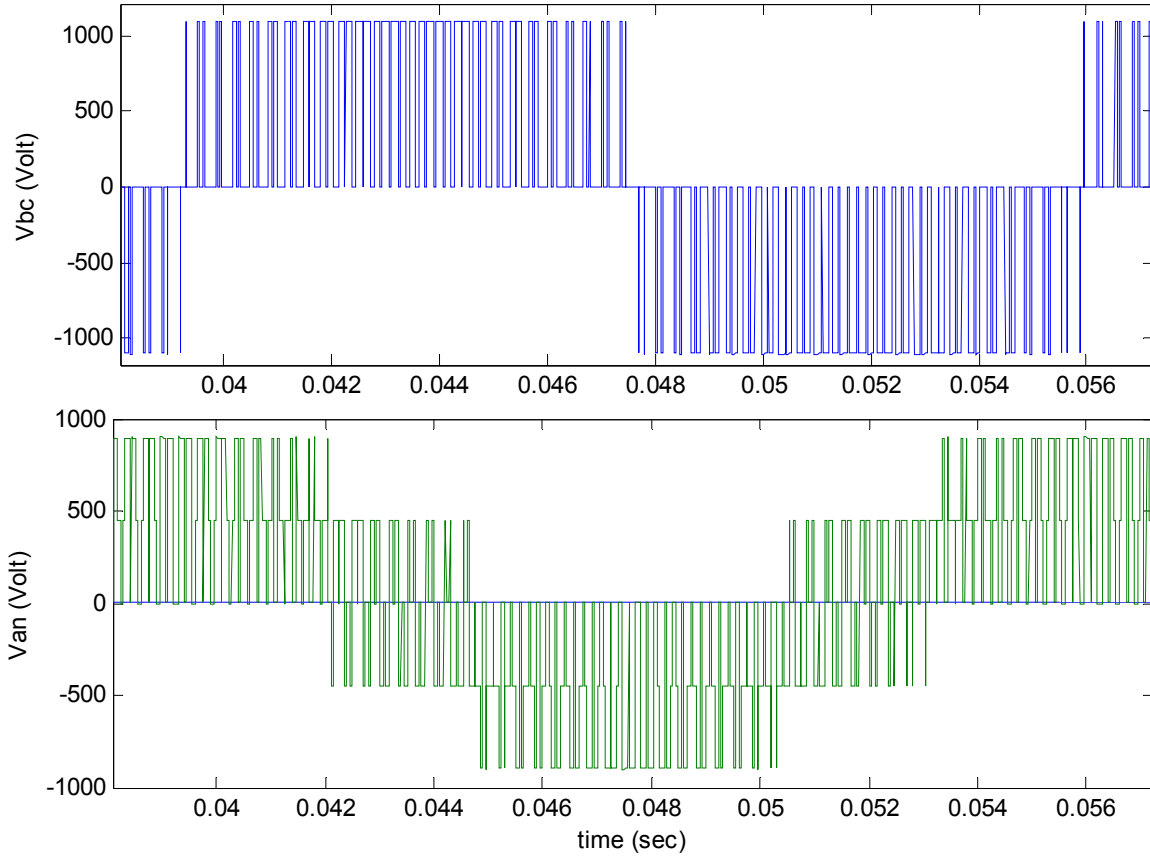
Σχήμα 4.3 : Ισχύς εξόδου Α/Γ για $v_w=9\text{m/s}$, $v_w=11\text{m/s}$ και $v_w=15\text{m/s}$.

11m/s και 15m/s. Στα 15 m/s η αεροδυναμική ισχύς για βήμα έλικας 0° είναι πάρα πολύ μεγάλη σε σχέση με την ονομαστική ισχύ εξόδου(σχήμα 2.5). Έτσι πρέπει να αυξηθεί το βήμα κατάλληλα ώστε η ισχύς να περιοριστεί στα ονομαστικά επίπεδα. Ο ρυθμιστής βρίσκει επομένως ότι για γωνία 9° η ισχύς εξόδου δεν ξεπερνά τα 2MW. Για οποιαδήποτε άλλη αύξηση της ταχύτητας του ανέμου η γωνία θα αυξηθεί αναλόγως.

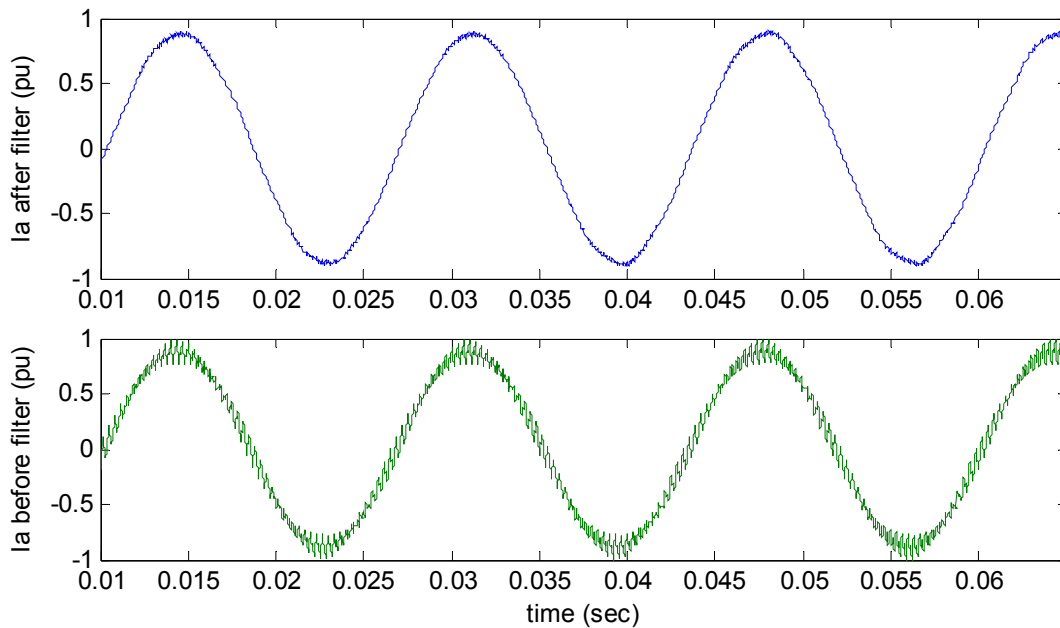


Σχήμα 4.4 : Γωνία περυγίων για $v_w=11\text{m/s}$ και $v_w=15\text{m/s}$.

Στο σχήμα 4.5 φαίνονται οι κυματομορφές της φασικής και πολικής τάσης στην έξοδο του αντιστροφέα και πριν το φίλτρο RLC. Η ταχύτητα του ανέμου είναι στα 15m/s και η διακοπτική συχνότητα των παλμών PWM είναι στα 3000Hz.

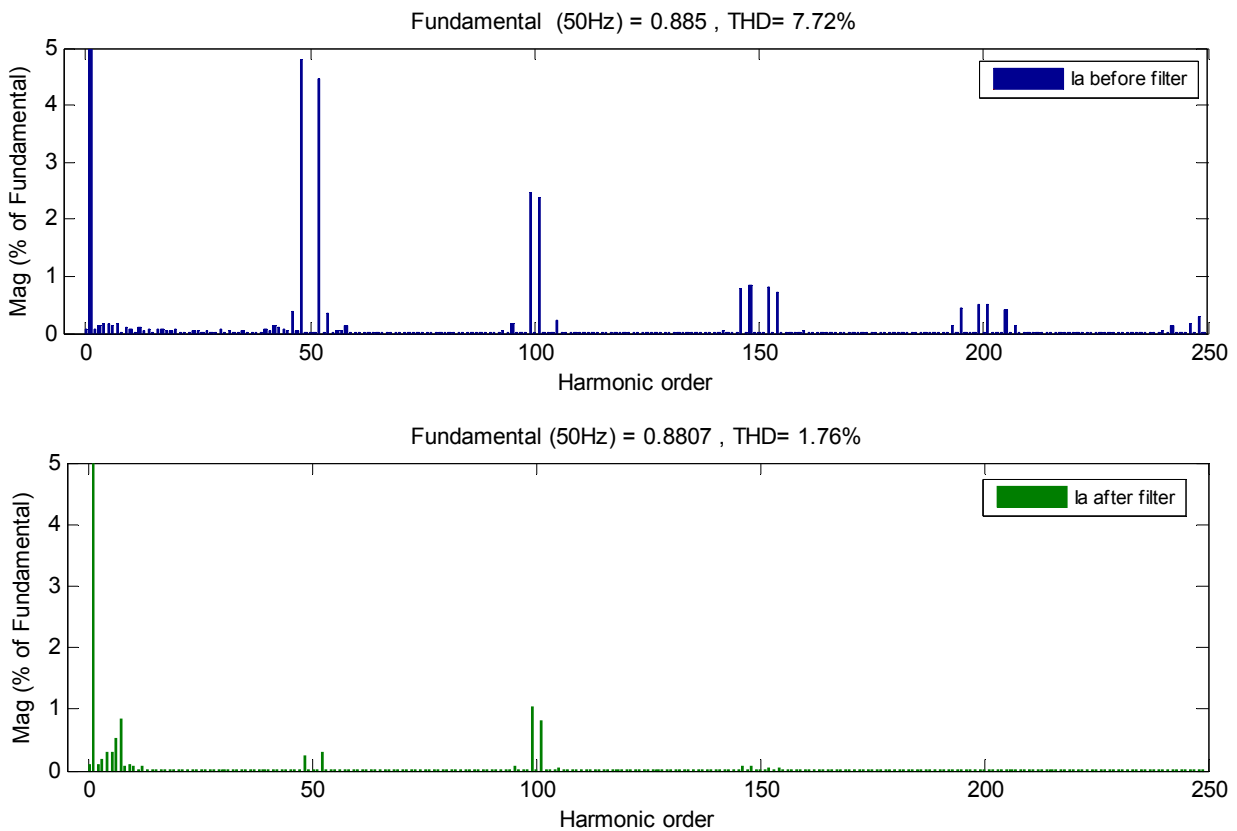


Σχήμα 4.5 : Φασική και πολική τάση αντιστροφέα για $v_w=15\text{m/s}$.



Σχήμα 4.6: Ρεύμα I_a πριν και μετά το φίλτρο $v_w=15\text{m/s}$.

Το ρεύμα μετά το φίλτρο παρουσιάζεται αρκετά βελτιωμένο ως προς το αρμονικό του περιεχόμενο. Αυτό φαίνεται τόσο μέσω των κυματομορφών (σχήμα 4.6) όσο και μέσω του φάσματος συχνοτήτων (σχήμα 4.7).

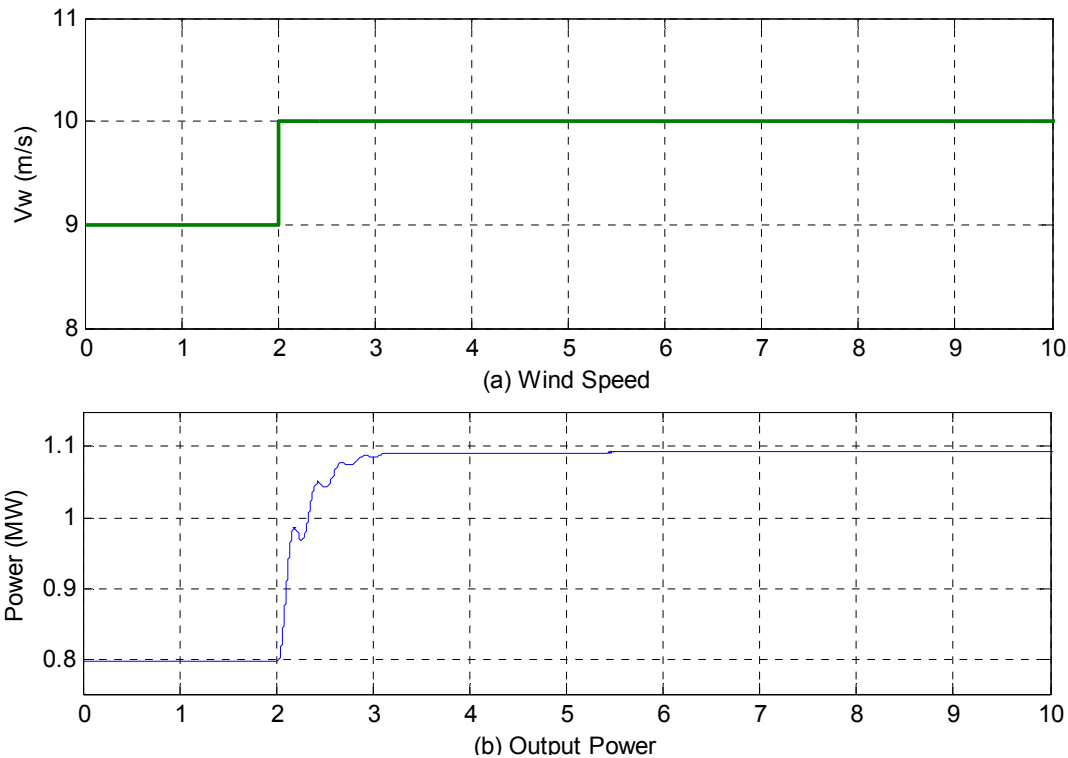


Σχήμα 4.7: Φάσμα συχνοτήτων ρεύματος φάσης i_a πριν και μετά το φίλτρο.

Κατά τη διάρκεια των μετρήσεων η εντολή για άεργο ισχύ είναι μηδενική ($Q_{ref}=0$), δηλαδή η A/Γ λειτουργούσε με μηδενικό συντελεστή ισχύος.

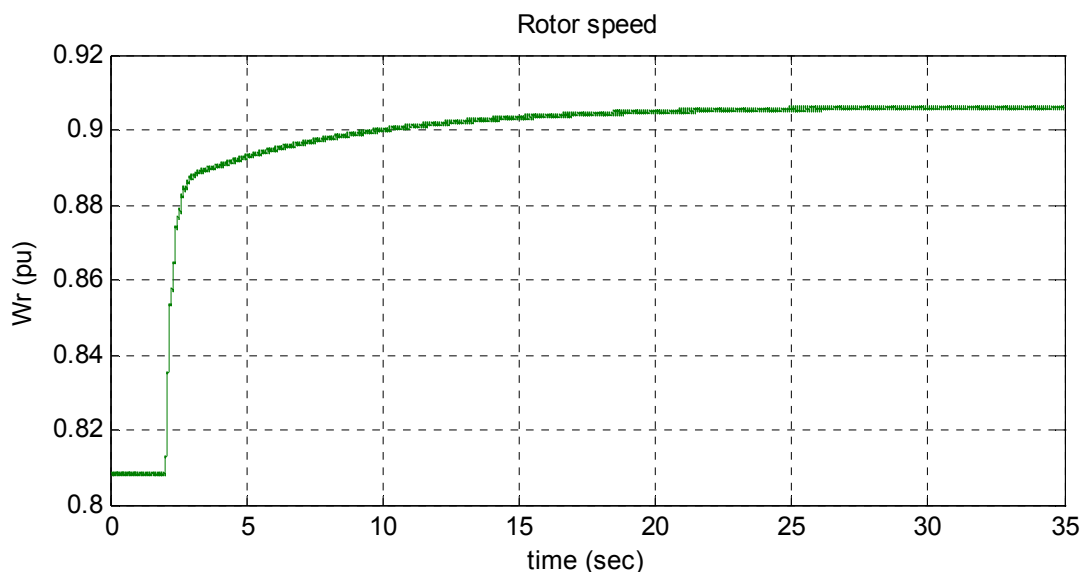
4.2 Απόκριση Α/Γ σε βηματική αλλαγή της ταχύτητας του ανέμου

Τη χρονική στιγμή $t=2\text{sec}$ η ταχύτητα του ανέμου αλλάζει βηματικά από 9m/s στα 10m/s . Η απόκριση της ισχύος εξόδου της ανεμογεννήτριας για αυτή τη βηματική αλλαγή φαίνεται στο σχήμα 4.8b. Παρατηρούμε ότι σε χρόνο όχι μεγαλύτερο από $1,5\text{ sec}$, η ισχύς εξόδου έχει σταθεροποιηθεί στην τιμή που αντιστοιχεί σε αυτή την ταχύτητα ανέμου.



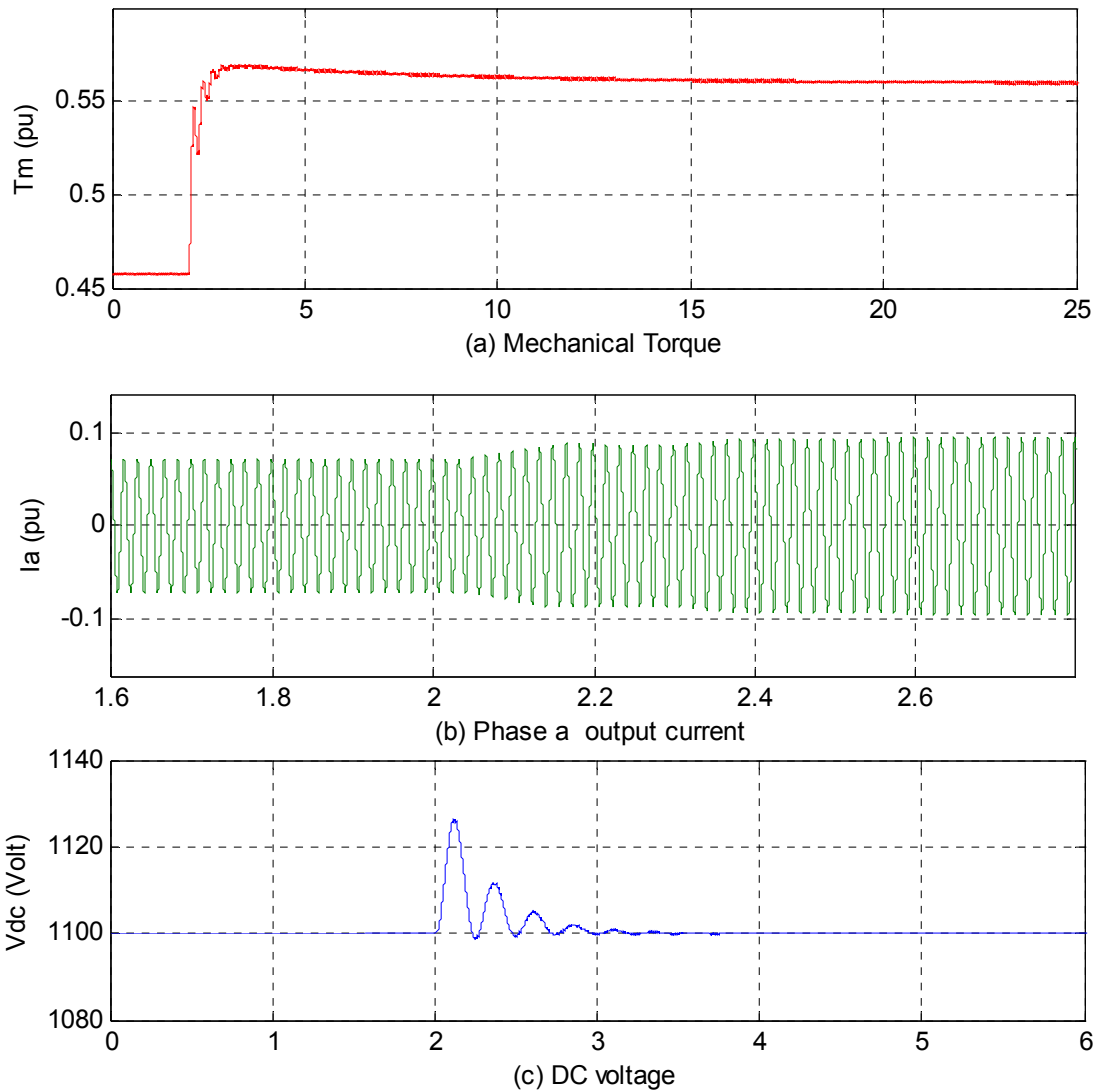
Σχήμα 4.8: Ισχύς εξόδου Α/Γ για βηματική της ταχύτητας ανέμου από 9m/s σε 10m/s .

Βέβαια, λόγω της αδράνειας του ανεμοκινητήρα και του συστήματος μετάδοσης κίνησης, η γωνιακή ταχύτητα του δρομέα αργεί πολύ περισσότερο να φτάσει σε σταθερή τιμή. Αυτό φαίνεται στο σχήμα 4.9, όπου η γωνιακή ταχύτητα σταθεροποιείται μετά τα 25 sec .



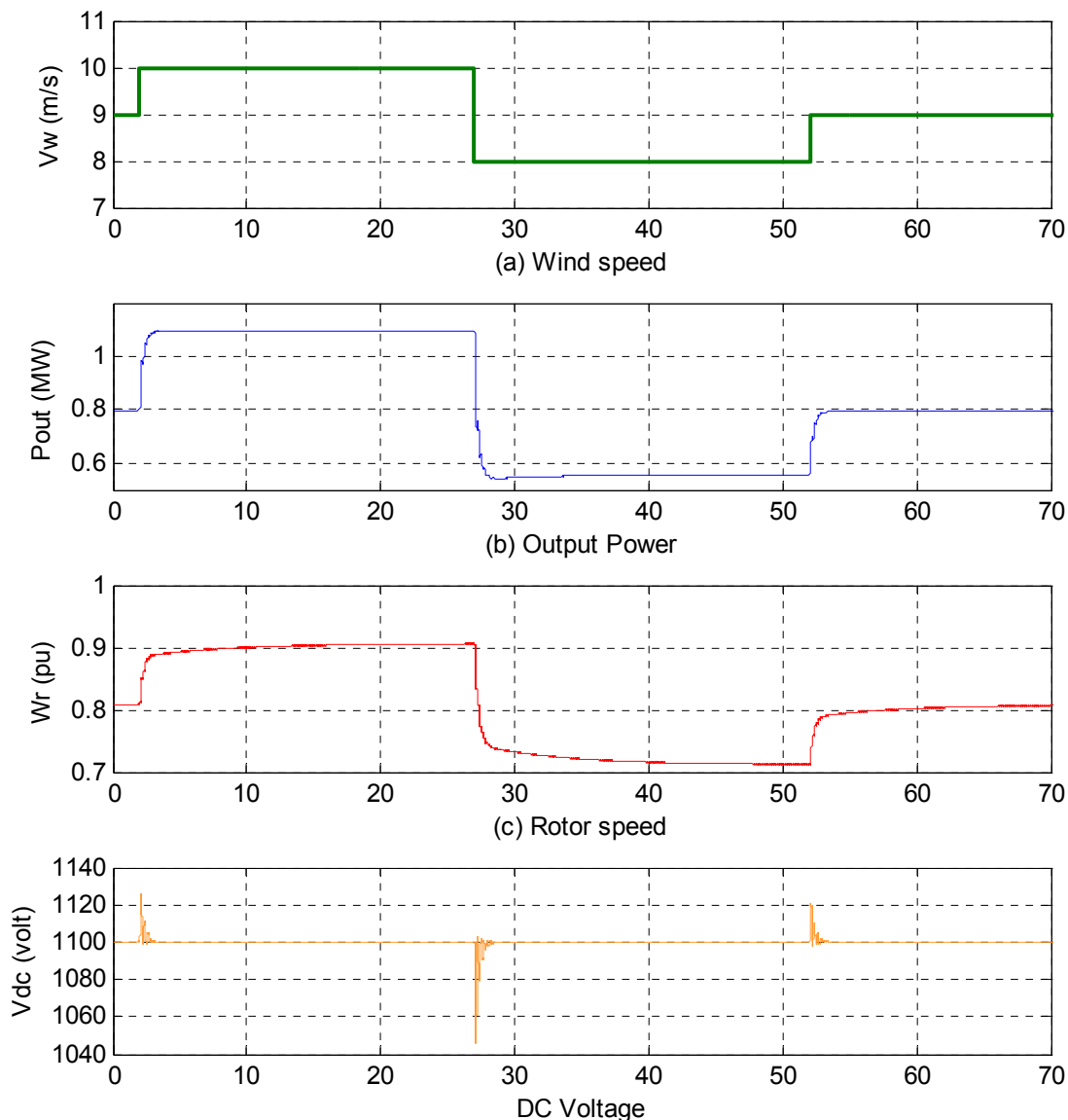
Σχήμα 4.9: Γωνιακή ταχύτητα δρομέα για βηματική της ταχύτητας ανέμου από 9m/s σε 10m/s .

Στο σχήμα 4.10 έχουμε τις αποκρίσεις (α) της μηχανικής ροπής T_m , (β) του ρεύματος I_a της μία φάσης στην έξοδο του φίλτρου και (γ) της τάσης V_{dc} του πυκνωτή του αντιστροφέα. Παρατηρούμε, ότι όπως και η γωνιακή ταχύτητα έτσι και η ροπή στον άξονα της γεννήτριας T_m σταθεροποιείται μετά τα 25sec. Επίσης, παρατηρούμε μια απότομη αύξηση της τάξης του 2% της dc-τάσης στην είσοδο του αντιστροφέα και την επαναφορά του στα ονομαστικά επίπεδα μετά από 1 sec. Στην ουσία αυτή είναι η προσπάθεια του ρυθμιστή V_{dc} (V_{dc} regulator) του συστήματος ελέγχου του αντιστροφέα, ώστε να μεταίγει την επιπλέον ισχύ που δέχεται από τον DC-DC μετατροπέα. Συγκεκριμένα, η αύξηση της παρεχόμενης ισχύος από τον DC-DC μετατροπέα θα αυξήσει στιγμιαία την τάση στα άκρα του πυκνωτή. Έτσι ο ρυθμιστής δίνει εντολή για αύξηση του ρεύματος i_d που ελέγχει όπως είπαμε την ενεργό ισχύ του αντιστροφέα. Τελικά, ο αντιστροφέας αυξάνει την παραγόμενη ενεργό ισχύ και η τάση στα άκρα του πυκνωτή επανέρχεται στην ονομαστική την τιμή. Αυτή ή αύξηση της ενεργού ισχύος συνεπάγεται βέβαια και αύξηση του ρεύματος, όπως δείχνει το σχήμα 4.10(b).



Σχήμα 4.10: (α) Μηχανική ροπή στον άξονα, (β) Ρεύμα φάσης α και (γ) τάση στην DC πλευρά του αντιστροφέα για βηματική μεταβολή της ταχύτητας ανέμου από 9m/s σε 10m/s.

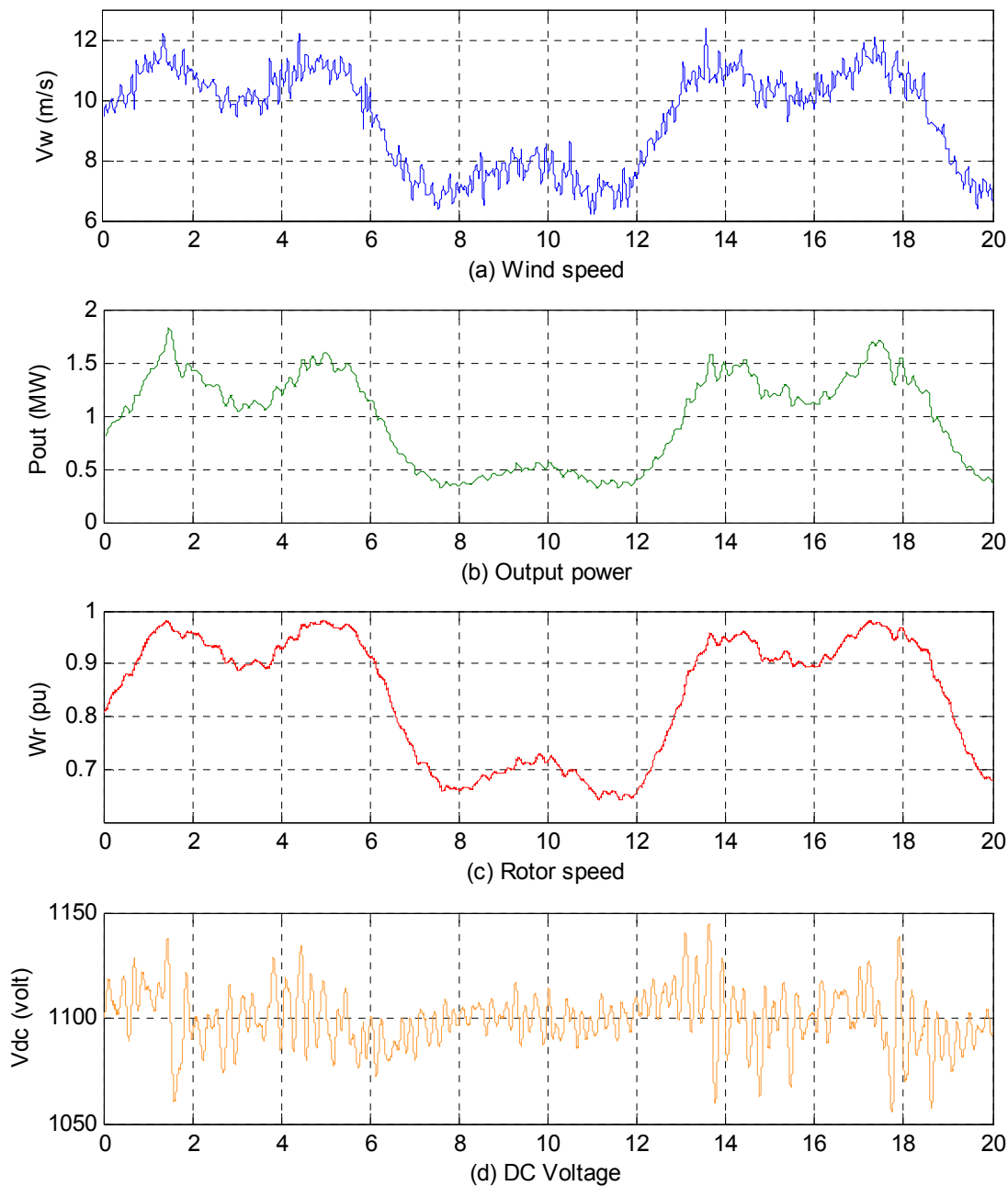
Στη συνέχεια ακολουθεί η απόκριση του συστήματος για βηματική μεταβολή της ταχύτητας ανέμου, από 9m/s σε 10m/s, από 10 m/s σε 8 m/s και από 8 m/s σε 9 m/s. Παρατηρούμε ότι κατά τη μετάβαση από τα 10m/s στα 8m/s, η τάση στα άκρα του πυκνωτή πέφτει κατά ανάλογο τρόπο με αυτόν που περιγράψαμε προηγουμένως. Δηλαδή, η μείωση της ισχύος που παρέχεται από τον dc-dc μετατροπέα προκαλεί πτώση τάσης στον πυκνωτή με αποτέλεσμα ο ελεγκτής να την επαναφέρει στην τιμή των 1100V μειώνοντας το ρεύμα i_d . Επίσης αυτό που παρατηρούμε είναι ότι μεταβολή αυτή είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη μεταβολή τάσης από τα 9 στα 10m/s. Αυτό είναι λογικό καθώς η μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου είναι διπλάσια και έτσι η μεταβολή της ισχύος είναι μεγαλύτερη. Για τη δεομένη μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου φαίνονται στο σχήμα 4.11 οι αποκρίσεις της ισχύος εξόδου, της γωνιακής ταχύτητας και της dc-τάσης.



Σχήμα 4.11: (α) Ταχύτητα ανέμου, (β) ισχύς εξόδου Α/Γ, (γ) γωνιακή ταχύτητα δρομέα και (δ) τάση στην DC πλευρά του αντιστροφέα για βηματική μεταβολή της ταχύτητας ανέμου από 9m/s σε 10m/s, από 10 m/s σε 8 m/s και από 8 m/s σε 9 m/s.

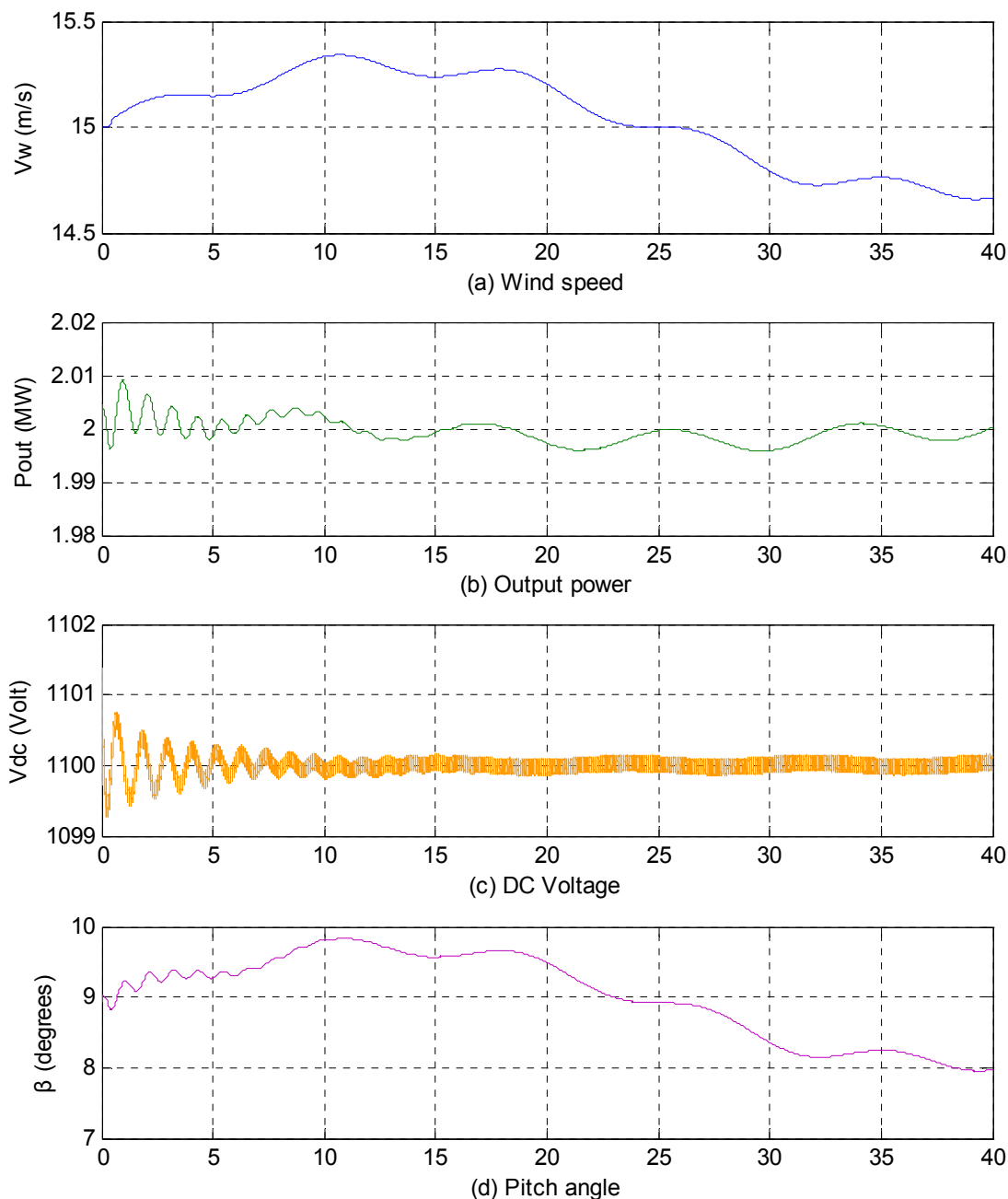
4.3 Απόκριση Α/Γ σε μεταβλητές συνθήκες ανέμου

Αυτή τη φορά η ταχύτητα του ανέμου δεν παραμένει σταθερή σε μια τιμή, αλλά μεταβάλλεται χρονικά. Έτσι προσομοιώνονται καλύτερα οι συνθήκες ανέμου που θα συναντήσει η Α/Γ στην πραγματικότητα, όπου μπορεί να υπάρχουν έντονες διακυμάνσεις στην ισχύ του ανέμου, οι οποίες φυσικά μεταφράζονται σε διακυμάνσεις αεροδυναμικής ισχύος στον άξονα της ανεμογεννήτριας. Στο σχήμα 4.12α δίνεται η χρονοσειρά ανέμου που θέσαμε σαν είσοδο στο μοντέλο της Α/Γ. Η ταχύτητα κυμαίνεται από τα 6,5m/s έως τα 12m/s αναπαριστώντας άνεμο της τάξης 5-6 Beaufort.



Σχήμα 4.12: (α) Ταχύτητα ανέμου, (β) ισχύς εξόδου Α/Γ, (γ) γωνιακή ταχύτητα δρομέα και (δ) τάση στην DC πλευρά του αντιστροφέα για συγκεκριμένη χρονοσειρά ανέμου.

Παρατηρούμε ότι το σύστημα λειτουργεί με γωνιακή ταχύτητα $\omega_r < 1\text{pu}$ και ισχύ εξόδου $P_w < 1\text{pu}$. Αυτό σημαίνει ότι ο ρυθμιστής στροφών φροντίζει ώστε το σημείο λειτουργίας της Α/Γ να βρίσκεται πάνω στην καμπύλη βέλτιστης απόδοσης (σχήμα 2.22). Έτσι προσαρμόζει κατάλληλα τις στροφές της γεννήτριας, ώστε για κάθε ταχύτητα ανέμου να επιτυγχάνεται η στρατηγική μέγιστης απολαβής ισχύος, MPPT. Αυτό φαίνεται στα σχήματα 4.12(β) και 4.12(γ) όπου η ισχύς εξόδου και η γωνιακή ταχύτητα ακολουθούν τον ρυθμό αύξησης και μεταβολής της ταχύτητας του ανέμου. Αξίζει να σημειωθεί ότι η εξομάλυνση της ενεργού ισχύος που παρατηρείται στην έξοδο οφείλεται στην αδράνεια των μηχανικών μερών. Επίσης, από το σχήμα 4.12γ φαίνεται και η δράση του Vdc ρυθμιστή ο οποίος, στην προσπάθειά του να κρατήσει σταθερή την dc-τάση στον πυκνωτή, μετάρει προς το δίκτυο την ισχύ που δέχεται ο αντιστροφέας στην είσοδό του.



Σχήμα 4.13: (α) Ταχύτητα ανέμου, (β) ισχύς εξόδου Α/Γ, (γ) τάση στην DC πλευρά του αντιστροφέα και (δ) γωνία βήματος έλικας για συγκεκριμένη χρονοσειρά ανέμου.

Όπως επισημάνθηκε στο κεφάλαιο 2.5.2, σε υψηλές ταχύτητες ανέμου, η Α/Γ είναι αναγκασμένη να λειτουργεί στις ονομαστικές της στροφές. Έτσι δεν είναι δυνατό να αποδοθεί η μέγιστη αεροδυναμική ισχύς καθώς, λόγω της σταθερής γωνιακής ταχύτητας του δρομέα, το λ , δηλαδή ο λόγος ταχύτητας ακροπτερυγίου, θα αποκλίνει από την ιδανική του τιμή λ_{opt} . Επίσης, η Α/Γ δεν πρέπει να παρέχει σε μόνιμη κατάσταση ισχύ μεγαλύτερη των 2MW. Για τον τελευταίο περιορισμό, σημαντικό ρόλο παίζει ο ρυθμιστής της γωνίας pitch των πτερυγίων (Pitch compensation).

Στο σχήμα 4.13α, δίνεται μια χρονοσειρά ανέμου η οποία ξεκινά από τα 15m/s και μεταβάλλεται σχετικά ομαλά γύρω από την τιμή αυτή. Η απόκριση του συστήματος φαίνεται στις επόμενες καμπύλες του σχήματος. Στο σχήμα 4.13δ βλέπουμε την μεταβολή της γωνίας pitch των πτερυγίων, η οποία ελέγχεται από τον PI ελεγκτή του pitch compensator. Λόγω της αδράνειας του ανεμοκινητήρα και της γεννήτριας, αλλά και λόγω των περιορισμών στον ρυθμό αύξησης της γωνίας, η απόκριση του ρυθμιστή δεν είναι τόσο γρήγορη όσο των υπόλοιπων συστημάτων ελέγχου της Α/Γ. Έτσι στο σχήμα 4.13β, βλέπουμε ότι ο ρυθμιστής δεν καταφέρνει πάντα να κρατήσει την ισχύ εξόδου κάτω από τα 2MW. Αυτό δεν αποτελεί πρόβλημα, γιατί η ικανότητα σε ισχύ του αντιστροφέα είναι μεγαλύτερη από 2MW, και έτσι θα μπορεί να αντέξει το παραπάνω ρεύμα. Για μεγαλύτερες, όμως, μεταβολές του ανέμου(τύρβη) η ισχύς μπορεί να αυξηθεί τόσο ώστε το ρεύμα του αντιστροφέα να φτάσει την οριακή του τιμή (1,1pu).

Αξίζει να σημειωθεί ότι για μεγάλες ταχύτητες ανέμου, και δεδομένου ότι $w_r=1pu$, ακόμα και μια μικρή ριπή ανέμου αυξάνει σημαντικά την αεροδυναμική ροπή που δέχεται ο άξονας(σχήμα 2.5). Η χρονοσειρά ανέμου που επιλέχθηκε, και μεν αντιπροσωπεύει άνεμο με μέση ταχύτητα ανέμου 15m/s (~7 Beaufort), αλλά οι διακυμάνσεις δεν υπερβαίνουν τα 0,5m/s. Για μεγαλύτερες και πιο απότομες μεταβολές του ανέμου ο ρυθμιστής pitch δεν προλαβαίνει να διατηρήσει την ισχύ στα 2MW, και οδηγεί το σύστημα σε αποσυντονισμό. Σε τέτοιες συνθήκες συνίσταται η ακινητοποίηση του ανεμοκινητήρα και η αποσύνδεση της Α/Γ από το δίκτυο.

4.4 Χαρακτηριστικές καμπύλες Α/Γ

Οι γνωστές χαρακτηριστικές καμπύλες μιας ανεμογεννήτριας είναι :

- Χαρακτηριστική ισχύος - ταχύτητας ανέμου: $P_{out} - V_w$.
- Χαρακτηριστική στροφών - ταχύτητας ανέμου: $W_r - V_w$.
- Χαρακτηριστική ισχύος - στροφών: $P_{out} - W_r$.
- Χαρακτηριστική αεροδυναμικού συντελεστή - ταχύτητας ανέμου : $C_p - V_w$
- Χαρακτηριστική γωνίας βήματος έλικας - ταχύτητας ανέμου : $\beta - V_w$

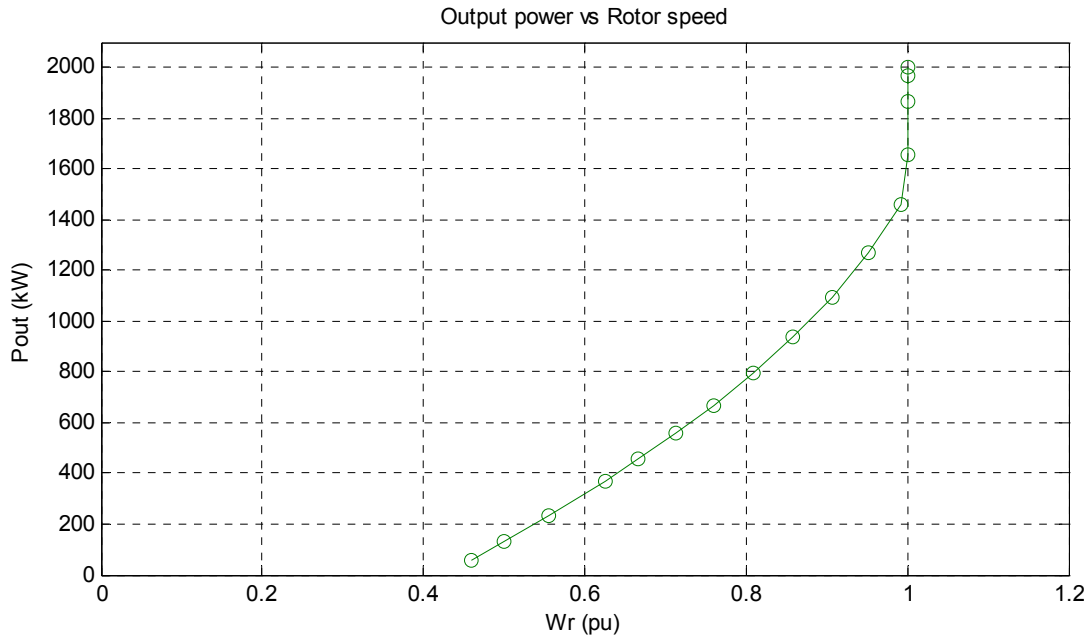
Τα σημεία των καμπυλών αυτών αφορούν την μόνιμη κατάσταση λειτουργίας και θα προκύψουν από διαδοχικές προσομοιώσεις, όπου κάθε φορά η ταχύτητα του ανέμου παραμένει σταθερή. Οι μετρήσεις θα γίνουν για όλο το εύρος λειτουργίας της Α/Γ, δηλαδή από την ταχύτητα ένταξης $v_{cut-in}=4m/s$ έως την ταχύτητα αποκοπής $v_{cut-out}=24m/s$. Για κάθε προσομοίωση καταγράφουμε τα

χαρακτηριστικά μεγέθη, αφού το σύστημα ισορροπήσει σε μια σταθερή τιμή. Στον πίνακα 2 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι τιμές των μεγεθών αυτών για τις διάφορες τιμές ανέμου.

Ταχύτητα ανέμου [m/s]	Ισχύς εξόδου [kW]	Ταχύτητα δρομέα [rpm]	Αεροδυναμικός συντελεστής C_p	Γωνία pitch [°]
4	55	0,46	0,445	0
5	129	0,500	0,491	0
6	232	0,555	0,499	0
7	372	0,625	0,499	0
7,5	460	0,667	0,499	0
8	558	0,712	0,499	0
8,5	670	0,759	0,500	0
9	796	0,808	0,500	0
9,5	937	0,858	0,500	0
10	1094	0,906	0,500	0
10,5	1267	0,952	0,500	0
11	1457	0,992	0,500	0
11,5	1659	1	0,498	0
12	1864	1	0,493	0
12,25	1968	1	0,489	0
12,5	2000	1	0,468	0,64
13	2000	1	0,416	2,52
14	2000	1	0,333	5,95
15	2000	1	0,271	8,92
16	2000	1	0,223	11,52
17	2000	1	0,186	13,81
18	2000	1	0,157	15,85
19	2000	1	0,133	17,68
20	2000	1	0,114	19,34
21	2000	1	0,099	20,84
22	2000	1	0,086	22,24
23	2000	1	0,075	23,49
24	2000	1	0,066	24,65

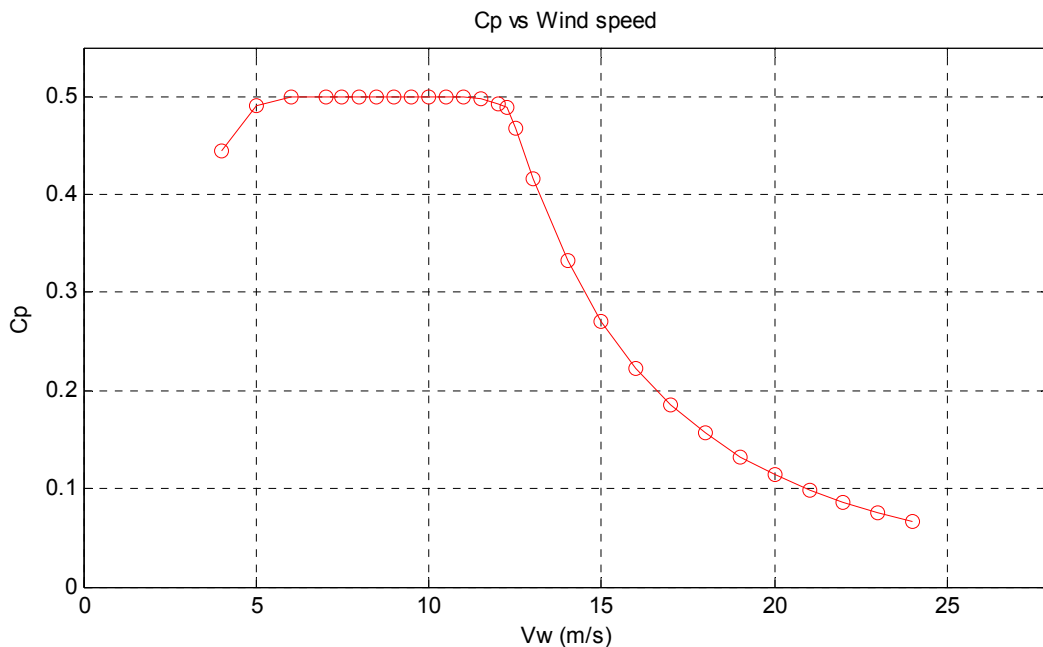
Πίνακας 2

Στη συνέχεια ακολουθούν οι χαρακτηριστικές καμπύλες που αναφέραμε στην αρχή. Από τη καμπύλη ισχύος-στροφών στο σχήμα 4.14, παρατηρούμε ότι τα σημεία λειτουργίας ακολουθούν ακριβώς την χαρακτηριστική ελέγχου του σχήματος 2.22. Όπως περιγράφηκε και στη παράγραφο 2.5.2, για ταχύτητες ανέμου χαμηλότερης της ονομαστικής $v_w=11\text{m/s}$, παρατηρούμε ότι η Α/Γ λειτουργεί με γωνιακή ταχύτητα χαμηλότερη της ονομαστικής. Αυτό επιτρέπει στον ρυθμιστή στροφών να λειτουργεί με MPPT στρατηγική, δηλαδή προσαρμόζοντας κατάλληλα τις στροφές της γεννήτριας να γίνεται μέγιστη εξαγωγή ισχύος από τον ανεμοκινητήρα. Αυτό φαίνεται και στη καμπύλη του σχήματος 4.15, όπου ο αεροδυναμικός συντελεστής C_p μεγιστοποιείται για $v_w \leq 11\text{m/s}$. Βέβαια για τις πολύ μικρές ταχύτητες ανέμου, δηλαδή για $v_w \leq 5\text{m/s}$ η χαρακτηριστική ελέγχου του σχήματος 2.22 δεν ταυτίζεται απόλυτα με την βέλτιστη χαρακτηριστική, του σχήματος 2.5, και έτσι ο C_p δεν μεγιστοποιείται.



Σχήμα 4.14: Χαρακτηριστική καμπύλη Ισχύος εξόδου – Γωνιακής ταχύτητας δρομέα.

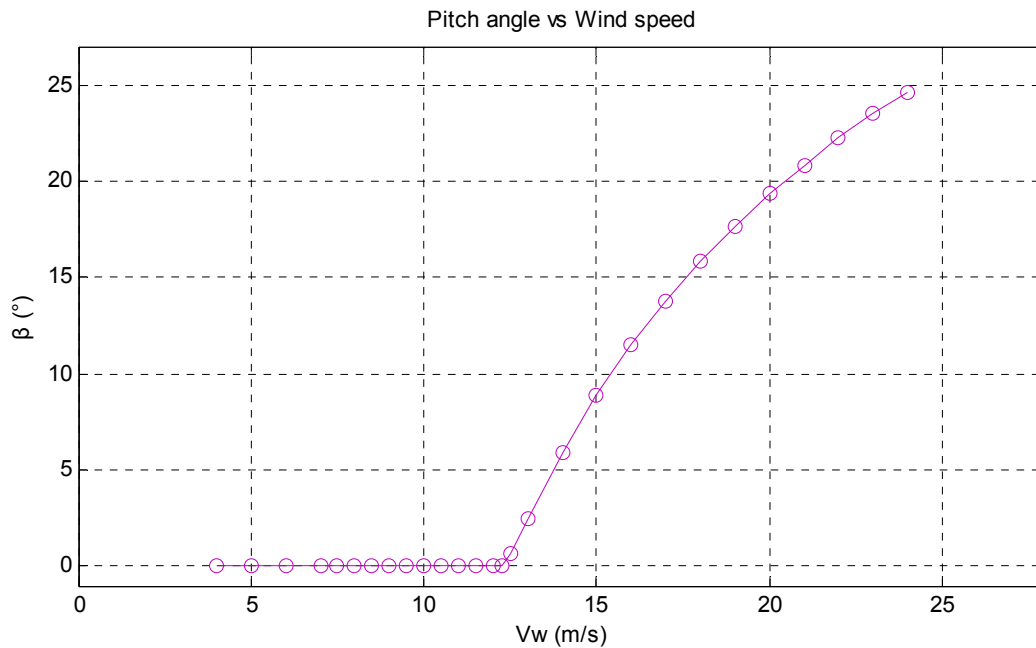
Όταν η ταχύτητα του ανέμου κυμαίνεται από τα 11m/s μέχρι περίπου τα 12.25m/s, ο ρυθμιστής στροφών είναι αναγκασμένος να διατηρεί την ταχύτητα του δρομέα στο 1pu. Σε αυτό το εύρος ταχυτήτων η ισχύς δεν ξεπερνά τα 2MW και η A/Γ βρίσκεται στο κατακόρυφο κομμάτι της χαρακτηριστικής ελέγχου. Η ανάγκη για διατήρηση των στροφών της γεννήτριας στο 1pu μειώνεται το λόγο ταχύτητας ακροπτερυγίου λ , με αποτέλεσμα ο αεροδυναμικός συντελεστής C_p να μειώνεται όσο αυξάνει η ταχύτητα του ανέμου.



Σχήμα 4.15: Χαρακτηριστική καμπύλη Αεροδυναμικού συντελεστή C_p – Ταχύτητας ανέμου.

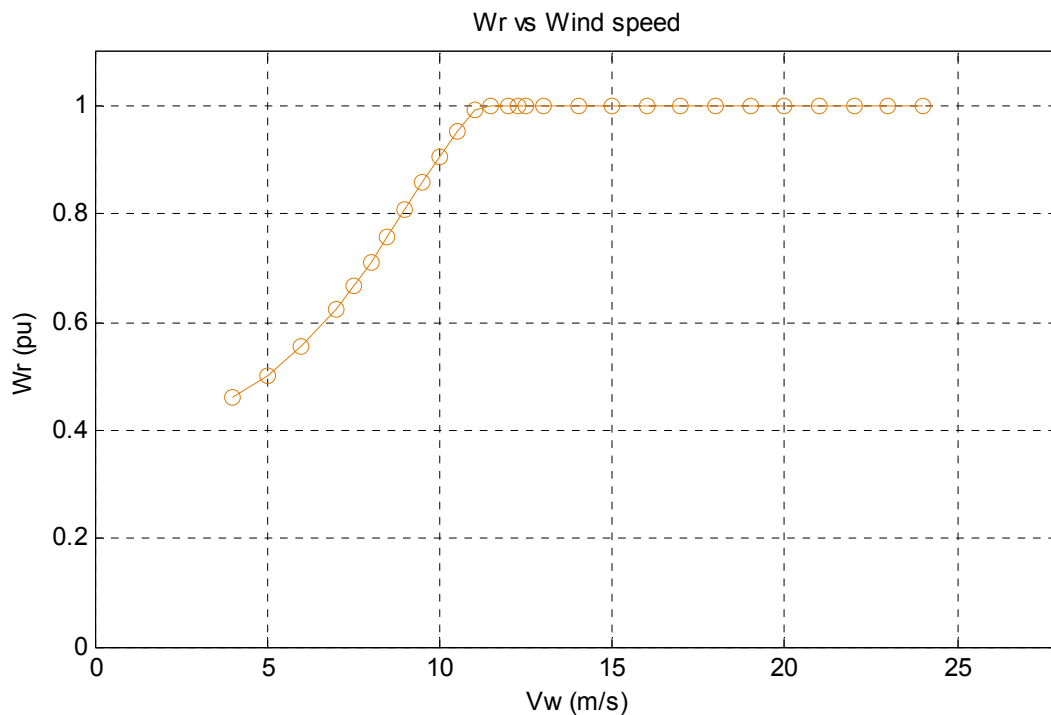
Όταν η ταχύτητα του ανέμου είναι μεγαλύτερη από 12.25m/s, τότε η ισχύς της A/Γ τείνει να ξεπεράσει τα 2MW. Ο ρυθμιστής pitch φροντίζει ώστε η ισχύς εξόδου να μην ξεπεράσει την τιμή αυτή αυξάνοντας κατάλληλα το βήμα της έλικας β . Στο σχήμα 4.16 βρίσκεται η καμπύλη

μεταβολής της γωνίας β των πτερυγίων, όπου παρατηρούμε ότι η γωνία αυξάνεται μέχρι την ταχύτητα αποκοπής $v_{\text{cut-out}}$. Λόγω της αύξησης της γωνίας, η αεροδυναμική του ανεμοκινητήρα αλλοιώνεται και έτσι αεροδυναμικός συντελεστής C_p μειώνεται ακόμα περισσότερο.

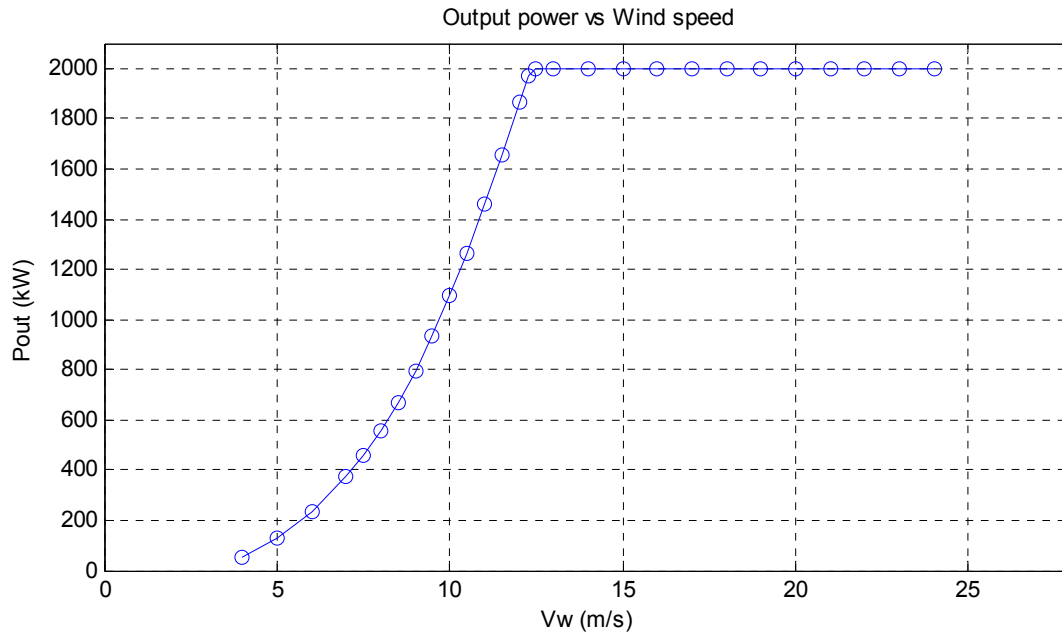


Σχήμα 4.16: Χαρακτηριστική καμπύλη Γωνίας βήματος έλικας – Ταχύτητας ανέμου.

Με βάση όλα τα παραπάνω προκύπτει η χαρακτηριστική στροφών-ταχύτητας ανέμου(σχήμα 4.17) και η χαρακτηριστική ισχύος- ταχύτητας ανέμου(σχήμα 4.18), με την τελευταία να παρουσιάζει τελικά και το μεγαλύτερο ενδιαφέρον.



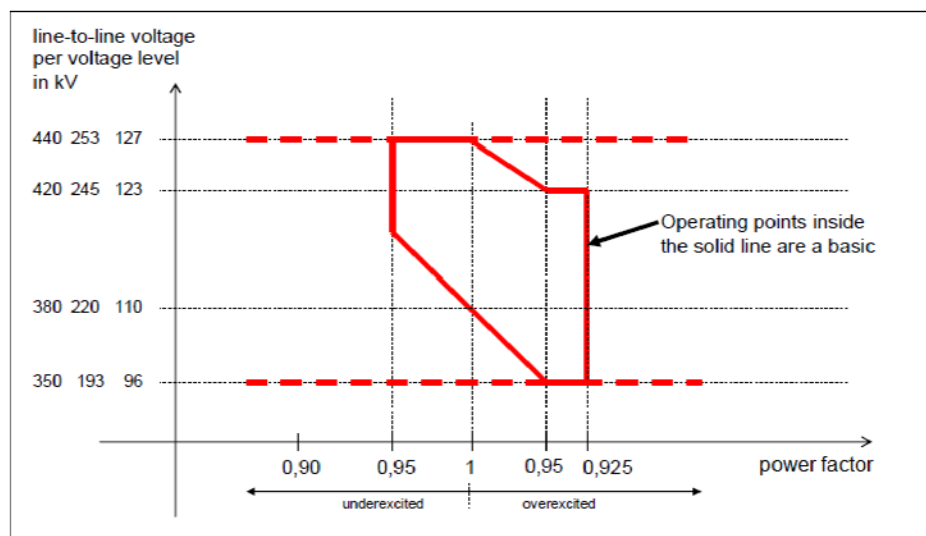
Σχήμα 4.17: Χαρακτηριστική καμπύλη Γωνιακής ταχύτητας δρομέα – Ταχύτητας ανέμου.



Σχήμα 4.18: Χαρακτηριστική καμπύλη Ισχύος εξόδου – Ταχύτητας ανέμου.

4.5 Παραγωγή αέργου ισχύος σύμφωνα με τον γερμανικό κώδικα

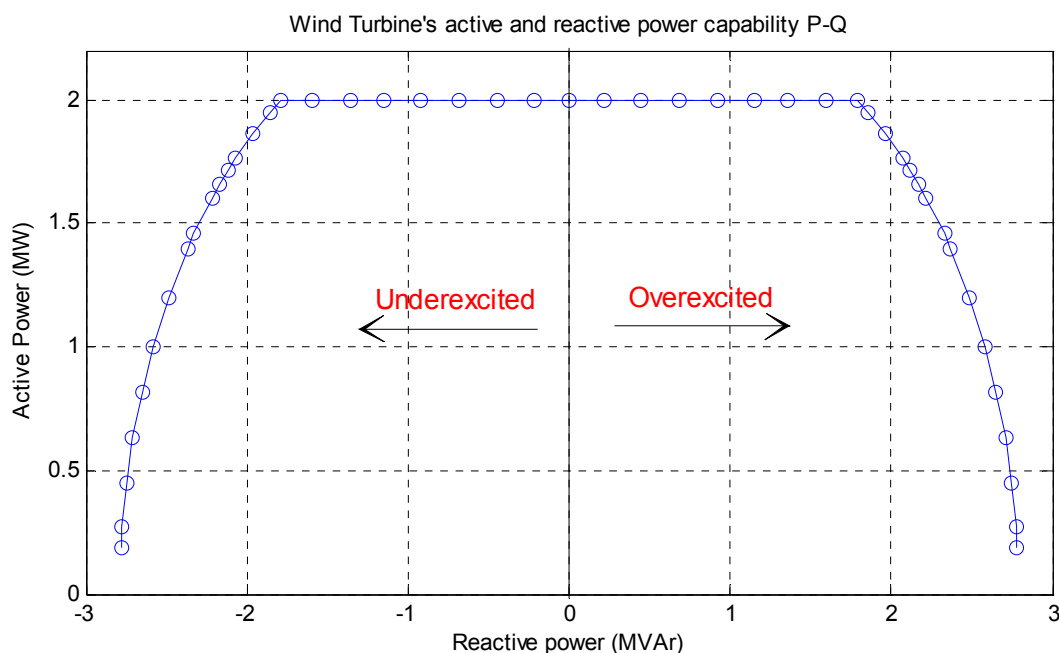
Ένα πλεονέκτημα του τύπου Α/Γ που μελετάμε είναι η μεγάλη ικανότητά του στη παραγωγή αέργου ισχύος. Σε σύγκριση με μια ανεμογεννήτρια διπλής τροφοδότησης, η γεννήτρια εδώ δεν είναι απευθείας συνδεδεμένη στο δίκτυο, καθώς μεταξύ τους παρεμβάλλονται τα απαραίτητα συστήματα ηλεκτρονικών ισχύος(μετατροπείς AC-DC, DC-DC και DC-AC). Έτσι η γεννήτρια όντας απομονωμένη από το δίκτυο, δεν περιορίζει την Α/Γ όσον αφορά το εύρος αέργου ισχύος που μπορεί να παραχθεί ή να απορροφηθεί. Τους περιορισμούς πλέον τους θέτει ο αντιστροφείας και συγκεκριμένα η αντοχή σε ρεύμα των διακοπτικών στοιχείων του.



Σχήμα 4.19 : Απαιτήσεις γερμανικού Κώδικα για παροχή αέργου ισχύος ανάλογα του επιπέδου τάσης.

Σύμφωνα με τα όσα αναφέρθηκαν στη παράγραφο 1.4.3, οι απαιτήσεις αέργου ισχύος για τον γερμανικό Κώδικα της Ε.ΟΝ., είναι κοινές για όλους τους σταθμούς παραγωγής και αναφέρονται στο σημείο σύνδεσης με το δίκτυο(ΣΣΔ). Επομένως, τα Α/Π πρέπει να μπορούν να λειτουργήσουν(όσον αφορά την ανταλλαγή αέργου ισχύος) σε κατάσταση «υπερδιέγερσης» και «υποδιέγερσης», δηλαδή παράγοντας και καταναλώνοντας, αντίστοιχα, αέργο ισχύ. Στο Σχήμα 4.19 φαίνεται το εύρος συντελεστών ισχύος συναρτήσει της τάσης του δικτύου (για τα διάφορα επίπεδα τάσης). Η περιοχή λειτουργίας που ορίζεται από την καμπύλη αυτή, είναι η **βασική απαίτηση**. Επίσης, πρέπει να είναι δυνατόν ο σταθμός παραγωγής, μέσα σε μερικά λεπτά, να πετυχαίνει **σε ονομαστική ενεργό ισχύ εξόδου**, οποιαδήποτε τιμή Σ.Ι. του ζητηθεί, μέσα στο συμφωνημένο εύρος ρύθμισης του Σ.Ι.. Αυτή η διαδικασία πρέπει να είναι δυνατή όσο συχνά και να απαιτείται.

Το μοντέλο της Α/Γ που μελετάμε έχει τη δυνατότητα ρύθμισης της αέργου ισχύος, μέσω μιας εισόδου Q_{ref} όπου θέτουμε την αέργου ισχύ, σε ανα μονάδα(pu), που θέλουμε να παράγει η Α/Γ. Αρχικά θα κατασκευάσουμε την καμπύλη **P-Q**, που μας δείχνει την ικανότητα της Α/Γ στην ταυτόχρονη παραγωγή ενεργού και αέργου ισχύος. Βέβαια, όπως περιγράψαμε στο 3^ο κεφάλαιο σε λειτουργία PQ mode η αέργου ισχύς περιορίζεται από την ενεργό ισχύ που παράγεται την στιγμή εκείνη. Έτσι, η ελάχιστη αέργου ισχύς που μπορεί να παραχθεί είναι όταν η Α/Γ παράγει την μέγιστη ενεργό ισχύ και η μέγιστη όταν η Α/Γ παράγει την ελάχιστη ενεργό ισχύ. Για να πάρουμε την καμπύλη P-Q, πρέπει για όλες τις τιμές ενεργού ισχύος που μπορεί να παράγει η Α/Γ(55kW έως 2000kW) να βρούμε πόση αέργου ισχύ δύναται να παραχθεί. Στο σχήμα 4.20 φαίνεται η καμπύλη P-Q της Α/Γ.



Σχήμα 4.20: Καμπύλη ενεργού αέργου ισχύος P-Q.

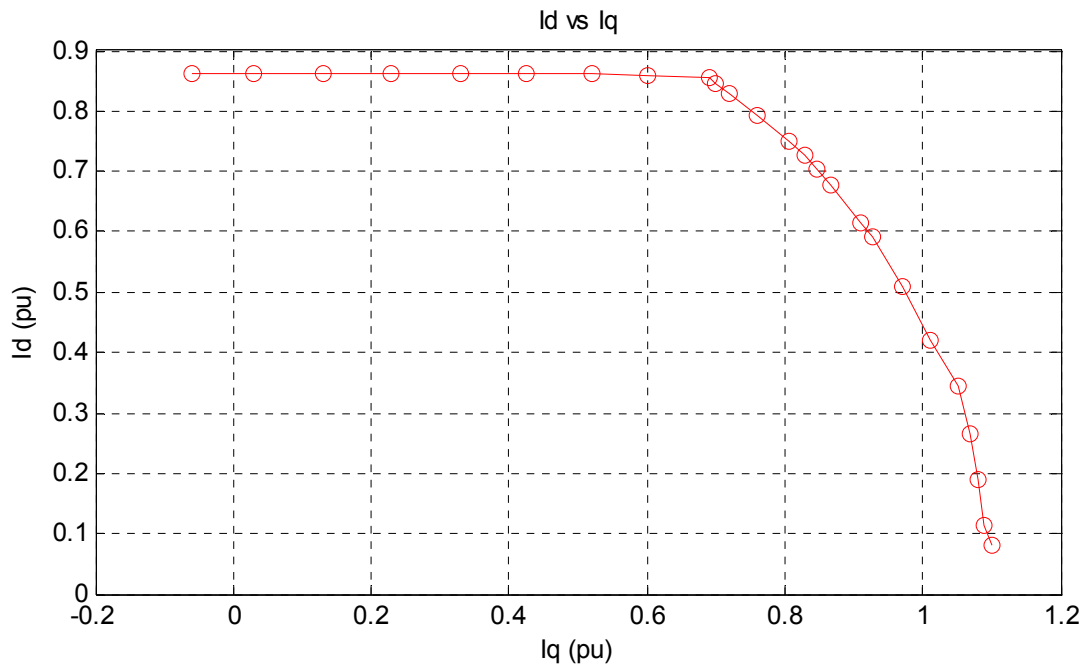
Από την καμπύλη P-Q, παρατηρούμε ότι η Α/Γ μπορεί να λειτουργήσει τόσο σε κατάσταση υπερδιέγερσης όσο και υποδιέγερσης. Η Α/Γ δεν μπορεί να λειτουργήσει πέρα των ορίων που θέτει η καμπύλη, καθώς δεν το επιτρέπει το μέγιστο ρεύμα $I_{inv,max}$ που μπορεί να αντέξει ο αντιστροφέας. Επίσης, είναι αξιοσημείωτη η ικανότητα της Α/Γ στην παραγωγή αέργου ισχύος ακόμα και όταν παράγει την ονομαστική της ισχύ(2MW). Αυτό βέβαια οφείλεται στον αντιστροφέα, του οποίου η ικανότητα σε ισχύ είναι μεγαλύτερη από την ονομαστική. Έτσι

παρέχεται η δυνατότητα ρύθμισης του ΣΙ ακόμα και όταν η Α/Γ παράγει τα ονομαστικά της MW. Από τον πίνακα 3, βλέπουμε ότι σε ονομαστική ισχύ εξόδου, δηλαδή $P=P_{\text{rated}}=2\text{MW}$, ο συντελεστής ισχύος μπορεί να ρυθμιστεί από 1 έως 0,745 χωρητικό. Επομένως ξεπερνά κατά πολύ την βασική απαίτηση των 0,925 που θέτει ο γερμανικός κώδικας, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.19. Κατά ανάλογο τρόπο, ο συντελεστής ισχύος της Α/Γ μπορεί να ρυθμιστεί από 1 έως 0,745 επαγωγικό, το οποίο καλύπτει την βασική απαίτηση των 0,95. Σε περίπτωση που η Α/Γ παράγει λιγότερη ενεργό ισχύ τότε το εύρος ρύθμισης του συντελεστή ισχύος είναι ακόμα μεγαλύτερο.

Στο σχήμα 4.21 φαίνονται τα όρια μεταβολής των ρευμάτων i_d και i_q . Παρατηρούμε πως το ρεύμα i_d , υπεύθυνο για την μεταγωγή ενεργού ισχύος, ποτέ δεν ξεπερνά τα 0,963 pu. Επίσης, από το πίνακα τιμών γίνεται αντιληπτό, το πόσο σημαντική είναι η άεργος ισχύς του πυκνωτή του φίλτρου, στον υπολογισμό της συνολικής αέργου ισχύος που παράγεται από το σύστημα. Αυτό είναι εμφανές στην περίπτωση μοναδιαίου συντελεστή ισχύος, όπου ο αντιστροφείας πρέπει να λειτουργήσει σε υποδιέγερση και να καταναλώσει την άεργο ισχύ που παράγει ο

Ενεργός ισχύς (MW)	Άεργος Ισχύς (MVA _r)	Σ.Ι.	Άεργος ισχύς αντιστροφείας (MVA _r)	Άεργος Ισχύς φίλτρου (MVA _r)	Τάση στα άκρα της Α/Γ	Ρεύμα I_q (pu)	Ρεύμα I_d (pu)	Συνολικό ρεύμα (pu)
2,000	0,000	1,000	-0,153	0,153	1,010	-0,060	0,863	0,87
2,000	0,222	0,994	0,067	0,155	1,016	0,030	0,863	0,86
2,000	0,450	0,976	0,290	0,157	1,022	0,130	0,863	0,87
2,000	0,680	0,947	0,520	0,158	1,027	0,230	0,863	0,89
2,000	0,920	0,908	0,760	0,160	1,034	0,330	0,863	0,92
2,000	1,150	0,867	0,990	0,162	1,040	0,425	0,863	0,96
2,000	1,360	0,827	1,200	0,164	1,045	0,520	0,863	1,01
2,000	1,600	0,781	1,420	0,165	1,050	0,600	0,858	1,05
2,000	1,790	0,745	1,620	0,167	1,056	0,690	0,854	1,10
2,000	1,793	0,745	1,620	0,167	1,056	0,700	0,846	1,10
1,950	1,860	0,724	1,690	0,167	1,057	0,720	0,830	1,10
1,864	1,960	0,689	1,790	0,168	1,059	0,760	0,793	1,10
1,762	2,070	0,648	1,900	0,169	1,061	0,805	0,750	1,10
1,715	2,115	0,630	1,945	0,170	1,062	0,830	0,728	1,09
1,659	2,168	0,608	2,000	0,170	1,063	0,845	0,704	1,10
1,600	2,218	0,585	2,000	0,170	1,064	0,866	0,678	1,10
1,460	2,330	0,531	2,150	0,170	1,066	0,910	0,615	1,10
1,400	2,369	0,509	2,196	0,171	1,067	0,927	0,592	1,10
1,200	2,480	0,436	2,308	0,172	1,069	0,970	0,510	1,10
1,000	2,580	0,361	2,407	0,173	1,070	1,010	0,420	1,09
0,820	2,650	0,296	2,477	0,173	1,071	1,050	0,345	1,11
0,630	2,710	0,226	2,537	0,173	1,071	1,070	0,265	1,10
0,450	2,750	0,161	2,577	0,173	1,071	1,080	0,190	1,10
0,270	2,775	0,097	2,602	0,173	1,071	1,090	0,115	1,10
0,190	2,783	0,068	2,610	0,173	1,071	1,097	0,080	1,10

Πίνακας 3. Λειτουργία Α/Γ σε υπερδιέγερση.



Σχήμα 4.21: Ρεύμα i_d συναρτήσει ρεύματος i_q .

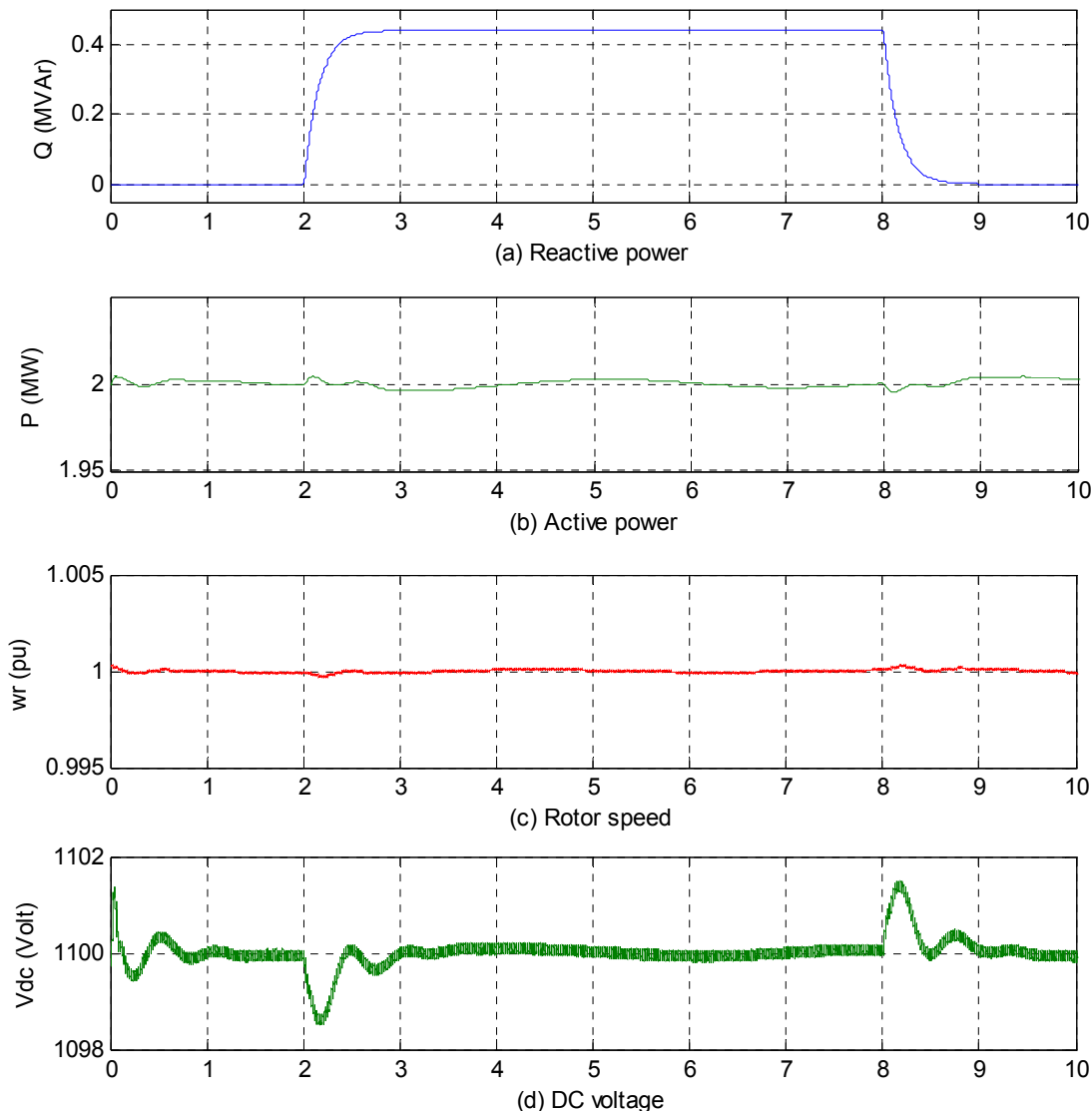
πυκνωτής. Επίσης, η εξάρτηση της αέργου ισχύος του πυκνωτή από την τάση του δικτύου είναι ένας ακόμη λόγος που πρέπει να την λάβουμε υπόψη. Με την αύξηση του ρεύματος, το επίπεδο της τάσης στην έξοδο της Α/Γ ανεβαίνει, αυξάνοντας έτσι τη παροχή αέργου ισχύος από τον πυκνωτή.

4.6 Απόκριση Α/Γ σε βηματική αλλαγή της εντολής αέργου ισχύος

Στη συνέχεια θα μελετήσουμε την απόκριση του συστήματος για βηματική αλλαγή στην εντολή αέργου ισχύος Q_{ref} , σε ονομαστική ισχύ εξόδου. Αρχικά την χρονική στιγμή $t=2\text{sec}$, αυξάνουμε την εντολή αέργου ισχύος από 0 σε 0,2pu, δηλαδή από 0 σε 0,44MVA_r. Στη συνέχεια την χρονική στιγμή $t=8\text{sec}$, μειώνουμε την εντολή ισχύος ξανά στα 0MVA_r. Στο σχήμα 4.22 φαίνεται η απόκριση του συστήματος στην εντολή αυτή. Βλέπουμε ότι η αέργος ισχύς γρήγορα, δηλαδή σε διάστημα 1sec, φτάνει την επιθυμητή τιμή των 0,44MVA_r. Επίσης, σε εξίσου ελάχιστο χρόνο επιστρέφει στα 0MVA_r. Έτσι διαπιστώνεται η άριστη λειτουργία του ρυθμιστή αέργου ισχύος (var regulator) του συστήματος ελέγχου του αντιστροφέα.

Στα υπόλοιπα σχήματα βλέπουμε την επίπτωση που έχει η εντολή αυτή στα άλλα μεγέθη του συστήματος, όπως είναι η ενεργός ισχύς, η γωνιακή ταχύτητα του δρομέα και η dc-τάση. Κανονικά τα μεγέθη αυτά δεν θα έπρεπε να επηρεάζονται καθόλου, αλλά η αύξηση της τάσης στην έξοδο της Α/Γ, λόγω της αύξησης του ρεύματος, επηρεάζει την ενεργό ισχύ που μπορεί να απορροφηθεί από το δίκτυο. Αυτό, φαίνεται στο σχήμα 4.22β και 4.22δ όπου την στιγμή $t=2\text{sec}$ η dc-τάση μειώνεται, δίνοντας στιγμιαία ενεργό ισχύ που δεν είναι διαθέσιμη από την Α/Γ. Τόσο ο V_{dc} ρυθμιστής όσο και ο pitch compensator προσπαθούν να προσαρμόσουν το σύστημα στο νέο επίπεδο τάσης. Με παρόμοιο τρόπο ανταποκρίνεται το σύστημα στη μείωση της αέργου ισχύος που παράγεται από την Α/Γ.

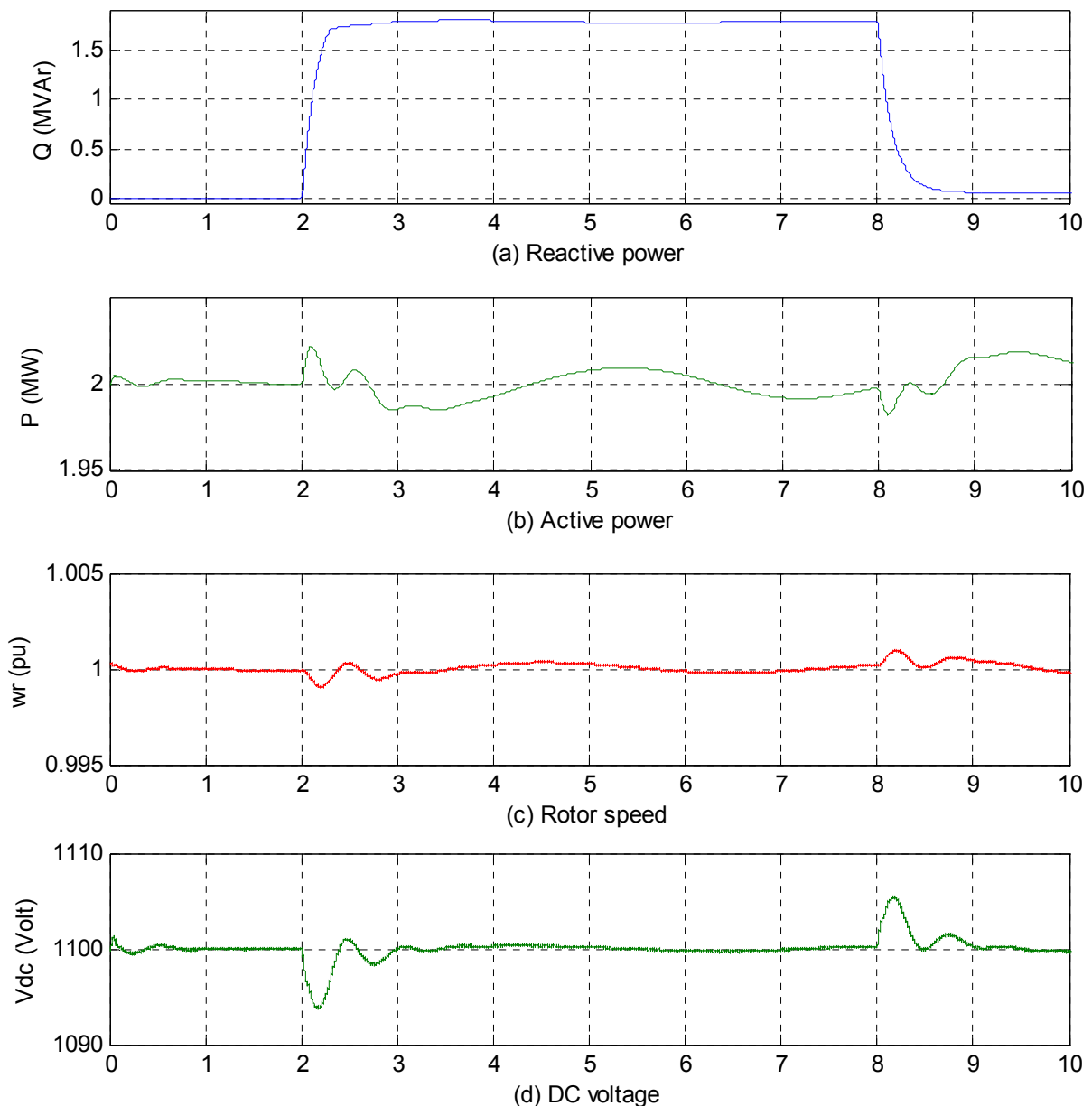
Όταν το βήμα αέργου ισχύος είναι μεγαλύτερο τότε η απόκριση του συστήματος είναι παρόμοια αλλά με μεγαλύτερες διακυμάνσεις. Πιο συγκεκριμένα, την χρονική στιγμή $t=2\text{sec}$, αυξάνουμε



Σχήμα 4.22: (α) Άεργος ισχύς (β) ενεργός ισχύς, (γ) γωνιακή ταχύτητα δρομέα και (δ) τάση στην DC πλευρά του αντιστροφέα για βηματική αλλαγή ($0\text{pu} \rightarrow 0.2\text{pu} \rightarrow 0\text{pu}$) του Q_{ref} .

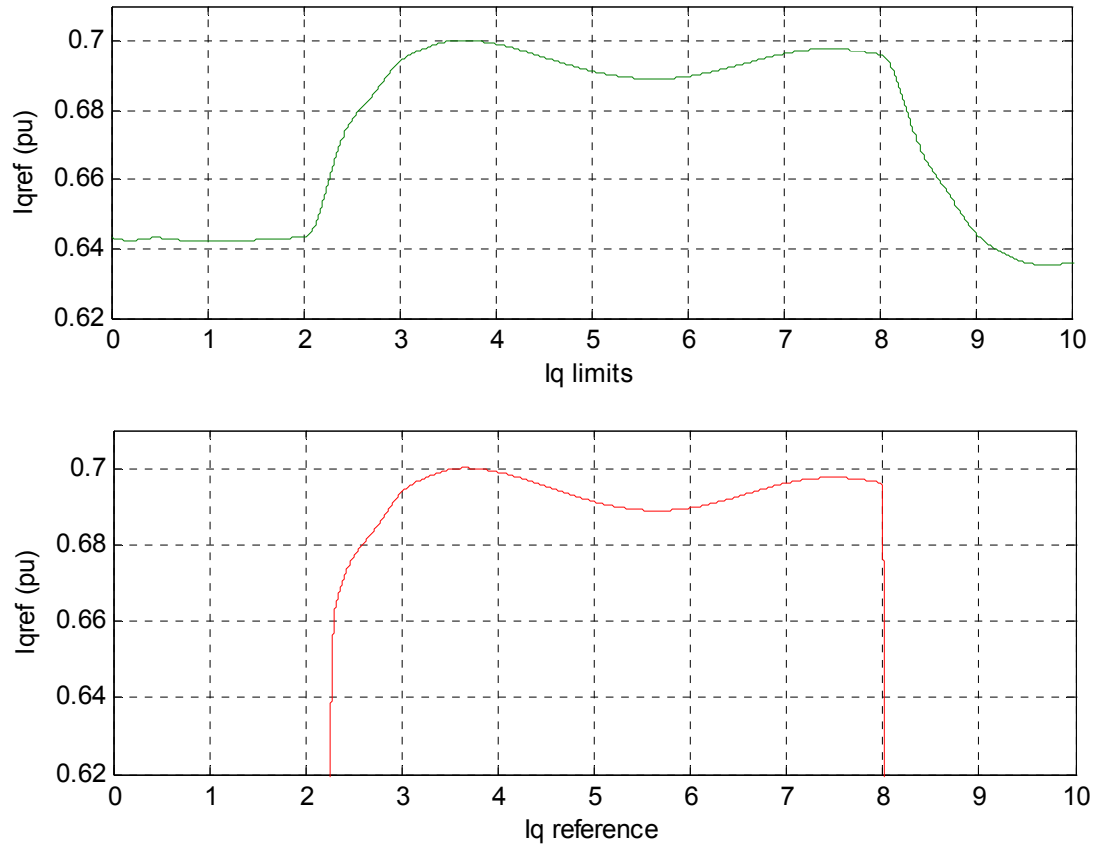
την εντολή αέργου ισχύος από 0 σε 0,9pu, δηλαδή από 0 σε 2MVA_r. Στη συνέχεια την χρονική στιγμή $t=8\text{sec}$, μειώνουμε την εντολή ισχύος ξανά στα 0MVA_r. Αυτό που παρατηρούμε στο σχήμα 4.23 είναι ότι η άεργος ισχύς ναι μεν αυξάνεται το ίδιο γρήγορα με πριν, αλλά δεν φτάνει τα 2MVA_r και παραμένει στα 1,79MVA_r. Αυτό συμβαίνει διότι η ενεργός ισχύς που παράγεται εκείνη τη στιγμή δεν επιτρέπει περαιτέρω αύξηση της αέργου ισχύος. Όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.24, το ρεύμα αναφοράς της q-συνιστώσας $i_{q,\text{ref}}$, έχει φτάσει την maximum τιμή, η οποία προκύπτει από τον το ρεύμα i_d . Έτσι φαίνεται ξεκάθαρα η προτεραιότητα στην παραγωγή ενεργού ισχύος (i_d priority).

Στις υπόλοιπες καμπύλες του σχήματος 4.23, βλέπουμε ότι οι διακυμάνσεις της ισχύος, της ταχύτητας του δρομέα και της dc-τάσης είναι μεγαλύτερες αλλά όχι ανησυχητικές. Πάραυτα, δεν συνίσταται από τον γερμανικό κώδικα η βηματική αλλαγή της άεργου ισχύος σε τέτοιο βαθμό.



Σχήμα 4.23: (α) Άεργος ισχύς (β) ενεργός ισχύς, (γ) γωνιακή ταχύτητα δρομέα και (δ) τάση στην DC πλευρά του αντιστροφέα για βηματική αλλαγή ($0\text{pu} \rightarrow 0.2\text{pu}$) του Q_{ref} .

Από όλα τα παραπάνω συμπεραίνουμε ότι η Α/Γ καλύπτει πλήρως τις απαιτήσεις του γερμανικού κώδικα για γρήγορη προσαρμογή του συντελεστή ισχύος. Η Α/Γ, και συγκεκριμένα το σύστημα ελέγχου του αντιστροφέα ήταν ικανό να ανταποκριθεί σε οποιαδήποτε μεταβολή της τιμής αναφοράς της άεργου ισχύος, όσο συχνά και αν αυτή απαιτείτο.



Σχήμα 4.24: στην DC πλευρά του αντιστροφέα για βηματική αλλαγή ($0\text{pu} \rightarrow 0.2\text{pu}$) του Q_{ref} .

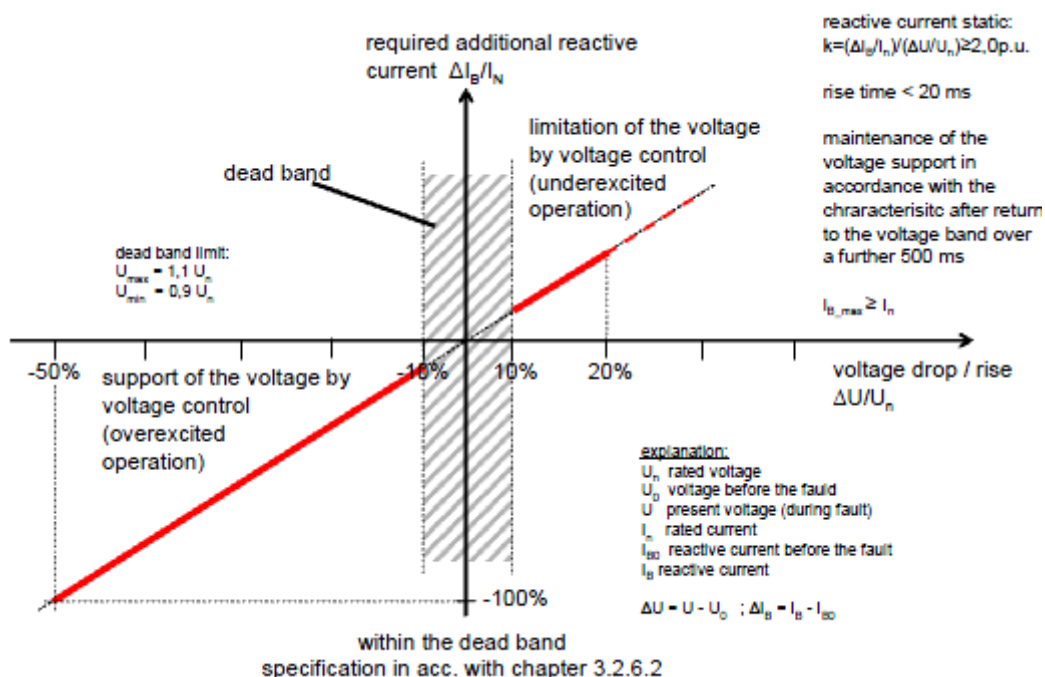
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗ ΤΗΣ ΤΑΣΗΣ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΣΦΑΛΜΑΤΟΣ

Σε αυτό το κεφάλαιο θα μελετήσουμε τη συμπεριφορά κατά τη διάρκεια σφάλματος στο δίκτυο, ενός αιολικού πάρκου ονομαστικής ισχύος 10MW που απαρτίζεται από 5 Α/Γ. Σύμφωνα με τον γερμανικό κώδικα, τα Α/Π πρέπει να υποστηρίζουν την τάση δικτύου με επιπλέον άεργο ρεύμα κατά τη διάρκεια βύθισής τάσης. Υπεύθυνος για την λειτουργία αυτή είναι ο ρυθμιστής τάσης του συστήματος ελέγχου του αντιστροφέα, ο οποίος διατηρεί την τάση στο σημείο κοινής σύνδεσης σε μια προκαθορισμένη τιμή. Όπως περιγράψαμε στην παράγραφο 3.3, σε περίπτωση που κάποιο σφάλμα στο δίκτυο οδηγήσει σε βύθιση της τάσης, ο ρυθμιστής θα προσπαθήσει να επαναφέρει την τάση στο ΣΚΣ αυξάνοντας την εντολή παραγωγής αέργου ισχύος. Έτσι το αιολικό πάρκο θα παρέχει άεργο ρεύμα μέχρι να καθαριστεί το σφάλμα από τα συστήματα προστασίας του δικτύου. Βέβαια, το αντίστροφο συμβαίνει, δηλαδή κατανάλωση αέργου ισχύος, όταν η τάση υπερβεί την τιμή αναφοράς.

Σύμφωνα με το σχήμα 5.1 η υποστήριξη του σφάλματος με άεργο ρεύμα πρέπει να γίνεται όταν η πτώση τάσης είναι μεγαλύτερη του 10%. Τότε το άεργο ρεύμα εξόδου στη πλευρά ΧΤ του Μ/Σ πρέπει να αυξηθεί με ρυθμό τουλάχιστον 2% του ονομαστικού ανά 1% απόκλιση της τάσης (ώστε για βύθιση 50% η αύξηση του αέργου ρεύματος να ισούται με 100% του ονομαστικού της γεννήτριας). Προφανώς, σε συνθήκες υπότασης η γεννήτρια θα παράγει άεργο ισχύ, ενώ σε υπέρταση θα καταναλώνει. Η ικανότητα παραγωγής αέργου ρεύματος της γεννήτριας πρέπει να είναι τουλάχιστον ίση με το ονομαστικό της ρεύμα, η δε αύξηση πρέπει να γίνει σε χρονικό διάστημα μικρότερο των 20 ms από τη στιγμή που θα ανιχνευθεί το σφάλμα. Διευκρινίζεται ότι το άεργο ρεύμα που παρέχεται για τη στήριξη τάσης είναι πρόσθετο και παρέχεται σε περίπτωση διαταραχών και όχι μόνιμης κατάστασης λειτουργίας. Επιπλέον μετά την επαναφορά της τάσης στην νεκρή ζώνη (dead band) πρέπει να συνεχίζεται η υποστήριξη τάσης για τα επόμενα 500ms. Τα μεταβατικά πρέπει επίσης να διαρκούν το πολύ 300ms μετά την επαναφορά της τάσης.

Στις προσομοιώσεις που θα ακολουθήσουν, θα δοκιμαστεί το μοντέλο για πτώσεις τάσης 10% και 50%. Αρχικά θα μελετηθούν οι επιπτώσεις που προκαλεί μια πτώση τάσης του δικτύου στα διάφορα μεγέθη του συστήματος της Α/Γ. Στη συνέχεια θα γίνουν δοκιμές σε αιολικό πάрко

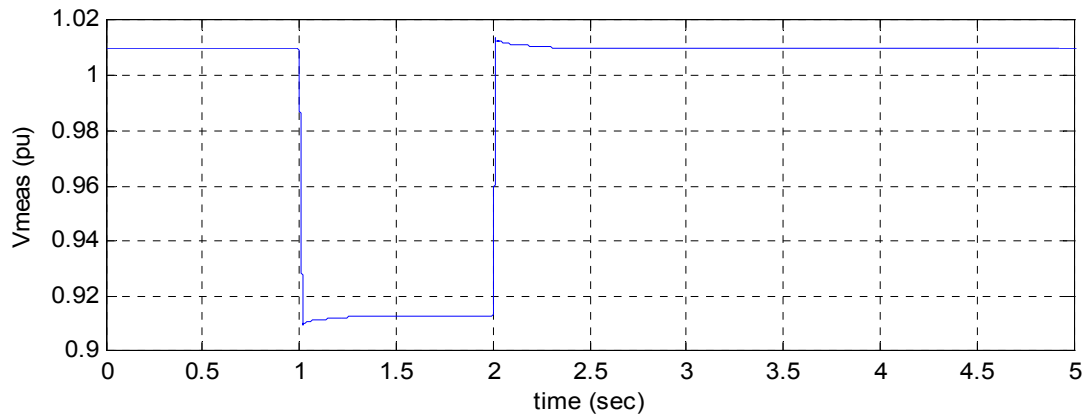


Σχήμα 5.1 : Απαιτήσεις γερμανικού Κώδικα για παροχή αέργου ρεύματος από το Α/Π κατά τη διάρκεια σφαλμάτων[5] .

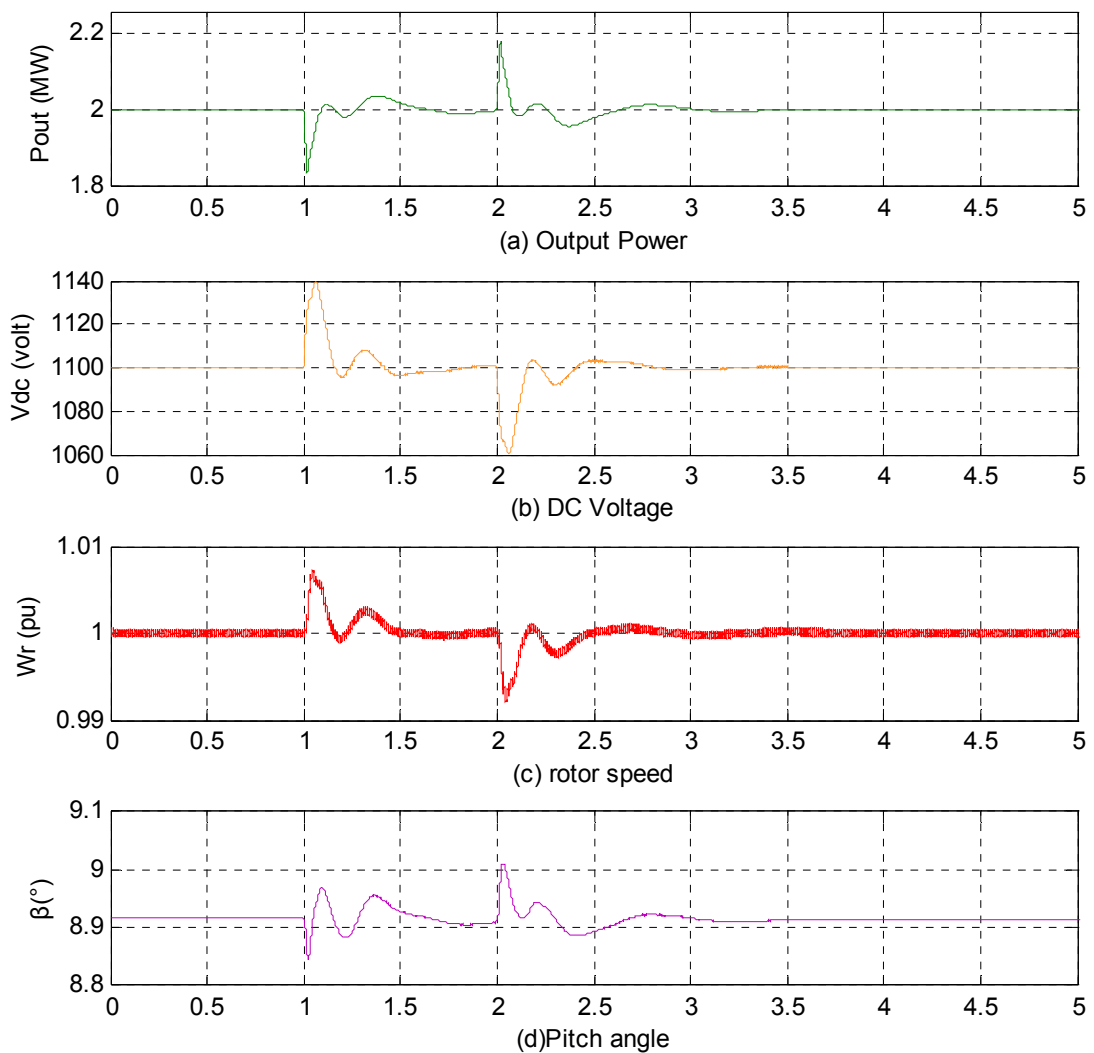
ισχύος $5 \times 2 = 10 \text{ MW}$, όπου για συγκεκριμένη βύθιση τάσης θα εξεταστεί η απόκριση του συστήματος όταν αυτό λειτουργεί σαν ρυθμιστής τάσης στο ΣΚΣ (PV node). Για κάθε βύθιση τάσης θα εξεταστεί η συνεισφορά του αιολικού σε άεργο ρεύμα και θα ελεγχθούν αν πληρούνται οι προϋποθέσεις που θέτει ο γερμανικός κώδικας σύμφωνα με το σχήμα 5.1. Η ίδια διαδικασία θα ακολουθηθεί και για υπέρταση 20% επί της ονομαστικής. Τέλος, θα εξετάσουμε τους παράγοντες που επηρεάζουν την ρύθμιση τάσης στο ΣΚΣ, όπως είναι η προτεραιότητα ρεύματος και η ισχύς βραχυκυκλώσεως, που επισημάναμε στο προηγούμενο κεφάλαιο.

5.1 Απόκριση Α/Γ με Σ.Ι.=1 για βύθιση τάσης κατά 10% και 50%.

Θεωρούμε 1 Α/Γ συνδεδεμένη στο δίκτυο η οποία λειτουργεί σε PQ node. Η ταχύτητα του ανέμου είναι 15m/s και η άεργος ισχύς αναφοράς είναι 0 MVA_r, που σημαίνει ότι η Α/Γ λειτουργεί με μοναδιαίο συντελεστή ισχύος και παράγει την ονομαστική της ισχύ 2MW. Τη χρονική στιγμή $t=1 \text{ sec}$ παρατηρείται βύθιση της τάσης κατά 10% της ονομαστικής τιμής η οποία διαρκεί 1sec. Η τάση στη έξοδο της Α/Γ είναι αυτή που φαίνεται στο σχήμα 5.2.



Σχήμα 5.2 : Τάση δικτύου στην έξοδο της Α/Γ για βύθιση κατά 10% της ονομαστικής και $P=P_{rated}$.



Σχήμα 5.3: (α) Ισχύς εξόδου Α/Γ , (β) τάση στην DC πλευρά του αντιστροφέα, (γ) γωνιακή ταχύτητα δρομέα και (δ) βήμα έλικας για βύθιση τάσης 10% επί της ονομαστικής και $P=P_{rated}$.

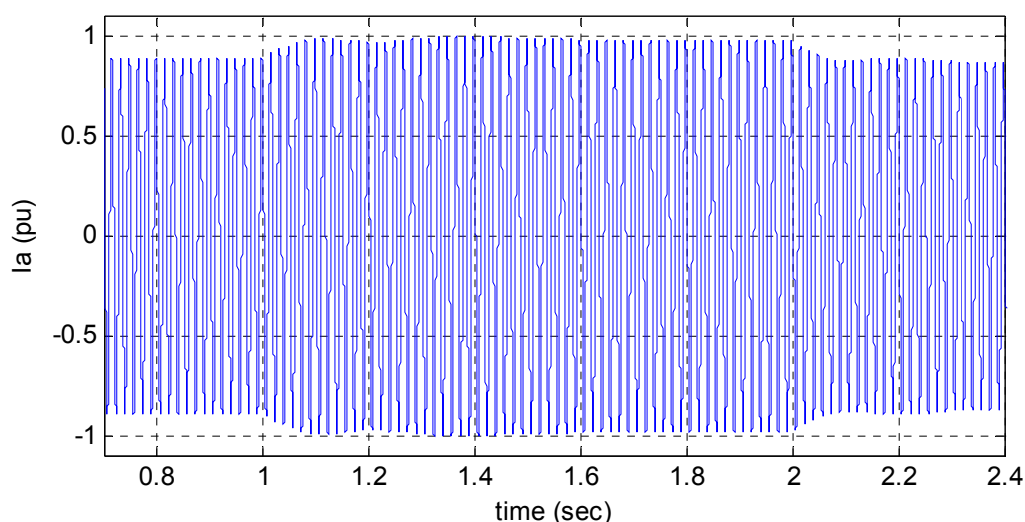
Η βύθιση της τάσης επηρεάζει άμεσα την λειτουργία της Α/Γ. Στο σχήμα 5.3α παρατηρούμε μια πτώση της ισχύος εξόδου τη χρονική στιγμή $t=1$ sec. Αυτό συμβαίνει γιατί η μείωση του επιπέδου της τάσης απαιτεί από τον αντιστροφέα να αυξήσει το ρεύμα ώστε η συνολική ισχύς να

επανέλθει στα 2MW. Από τον γνωστό τύπο της ισχύος, για μείωση της τάσης V , πρέπει να αυξηθεί το ρεύμα I ώστε η ισχύς να παραμείνει σταθερή :

$$P_{out} = 3 \cdot V \cdot I = 2 \text{ MW}$$

Όμως, η αύξηση του ρεύματος δεν γίνεται ακαριαία, όπως η μείωση της τάσης, και έτσι η ενεργός ισχύς εξόδου αναγκαστικά θα μειωθεί. Αναπόφευκτα, λοιπόν, με την μείωση της ισχύος εξόδου η περίσσεια ισχύς που παράγει η Α/Γ θα οδηγήσει στιγμιαία σε αύξηση της dc-τάσης στην είσοδο του αντιστροφέα. Ο ρυθμιστής dc-τάσης θα φροντίζει να σταθεροποιήσει την dc-τάση αυξάνοντας την εντολή ρεύματος, σχήμα 5.4. Λόγω αυτής της αύξησης αυξάνεται επίσης και η γωνιακή ταχύτητα του δρομέα (σχήμα 5.3γ), καθώς η ενεργός ισχύς που παράγει δεν μπορεί να απορροφηθεί πλήρως από το δίκτυο.

Μέχρι να ρυθμίσει ο Vdc-ρυθμιστής την παραγωγή ισχύος με βάση την νέα τάση δικτύου, οι διακυμάνσεις ισχύος που προκαλεί, οδηγούν σε διακυμάνσεις και της γωνίας pitch των πτερυγίων, όπως φαίνεται και στο σχήμα 5.3δ.



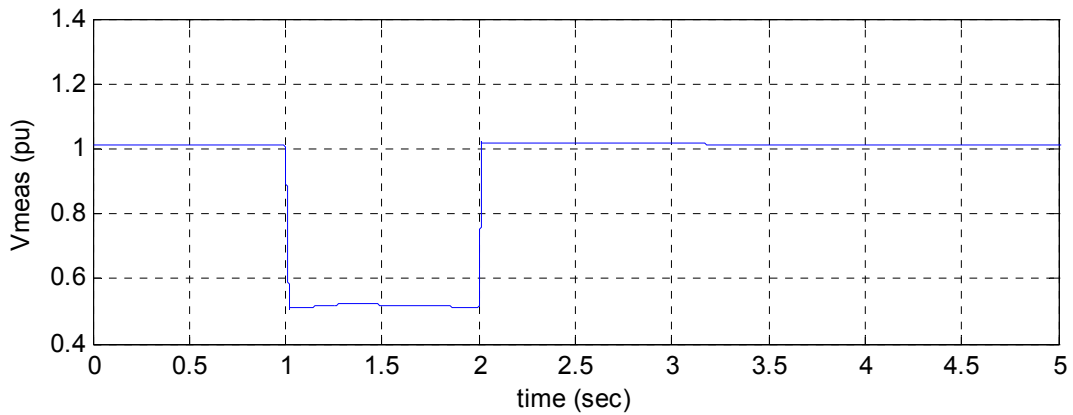
Σχήμα 5.4 : Ρεύμα φάσης α στην έξοδο της Α/Γ για βύθιση τάσης κατά 10% επί της ονομαστικής και $P=P_{rated}$.

Με βάση αυτά που αναφέραμε, το ακριβώς αντίστροφο συμβαίνει όταν η τάση του δικτύου επανέρχεται στην ονομαστική της τιμή. Τελικά το σύστημα επανέρχεται στη προ βύθισης κατάσταση μετά 1,5sec από την επαναφορά της τάσης.

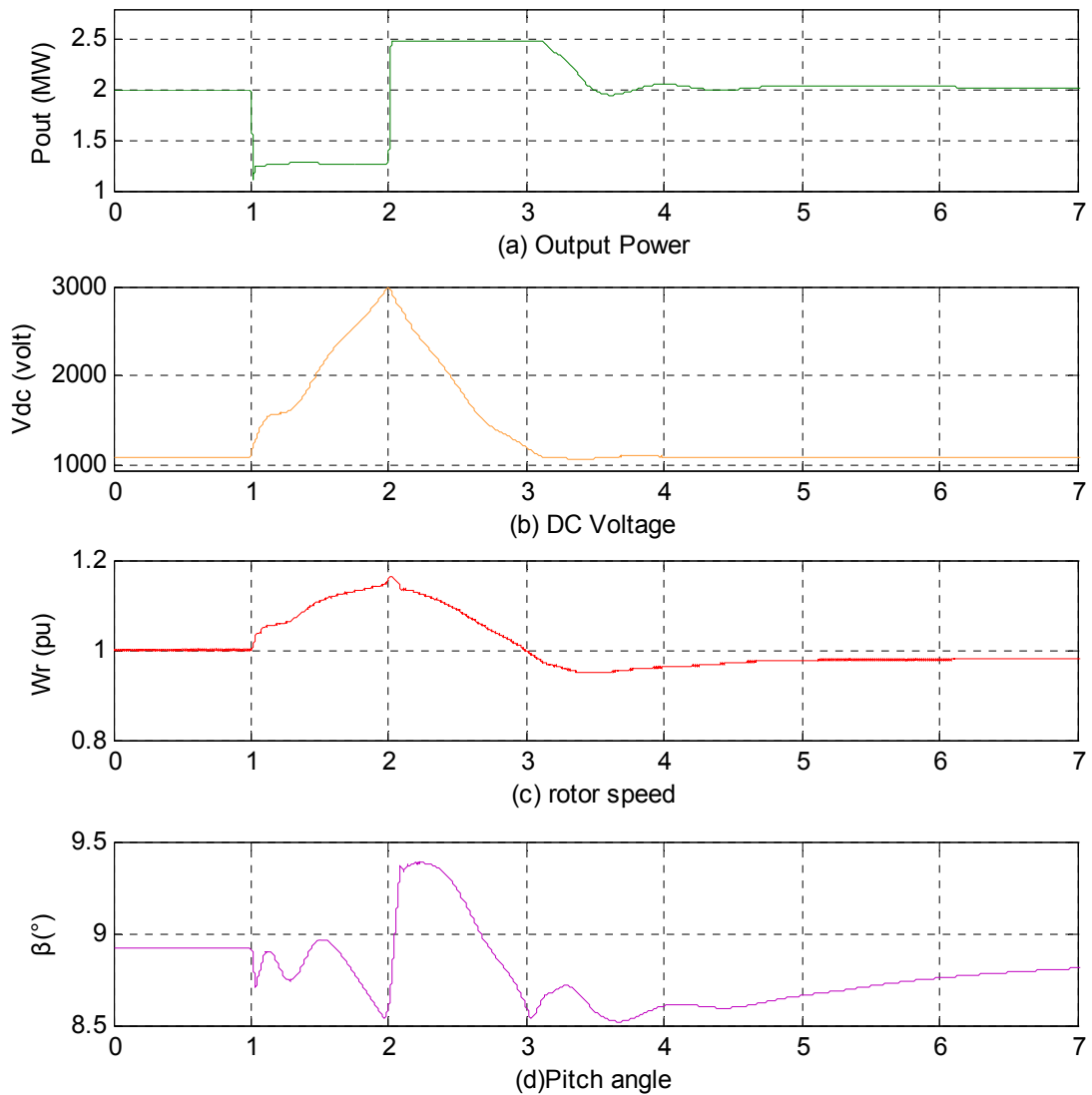
Στη συνέχεια θα εξετάσουμε το ενδεχόμενο η τάση να βυθιστεί κατά 50% της ονομαστικής. Η χρονική διάρκεια της βύθισης είναι επίσης 1sec. Στο σχήμα 5.5 φαίνεται η τάση του δικτύου στην έξοδο της Α/Γ.

Στο σχήμα 5.6 βλέπουμε ότι η επίδραση της βύθισης αυτής στην ανεμογεννήτρια είναι αρκετά πιο έντονη. Η ενεργός ισχύς τη στιγμή $t=1\text{sec}$ πέφτει μέχρι τα 1,1MW και μάλιστα κατά τη διάρκειά του σφάλματος δεν επανέρχεται στα 2MW αλλά παραμένει στα 1,25MW. Αυτό

συμβαίνει διότι το ρεύμα δεν μπορεί να αυξηθεί παραπάνω από τα 1,1pu, που είναι και το ονομαστικό ρεύμα του αντιστροφέα(σχήμα 5.7). Έτσι, ο V_{dc} -ρυθμιστής δεν μπορεί να μεταίγει



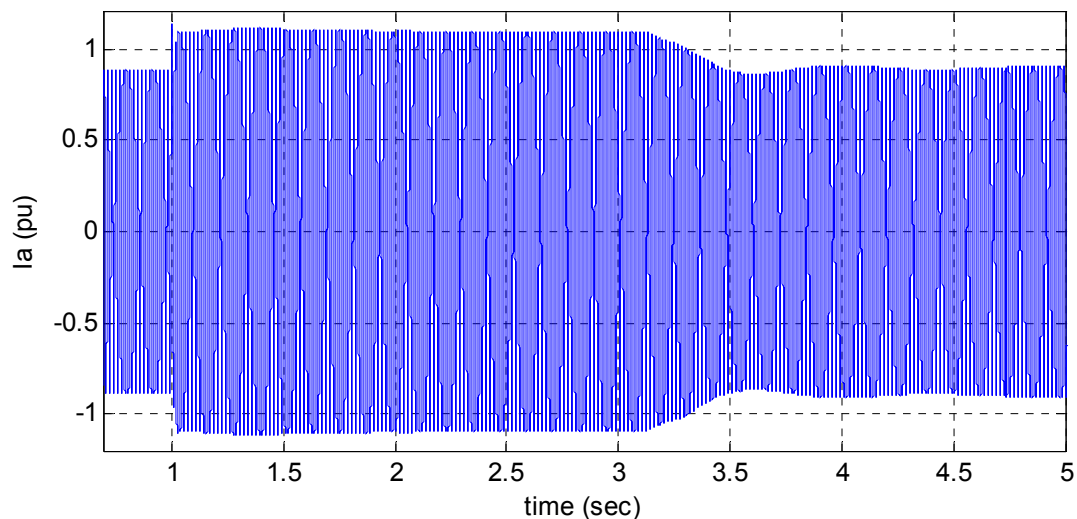
Σχήμα 5.5 : Τάση δικτύου στην έξοδο της Α/Γ για βύθιση κατά 50% της ονομαστικής και $P=P_{rated}$.



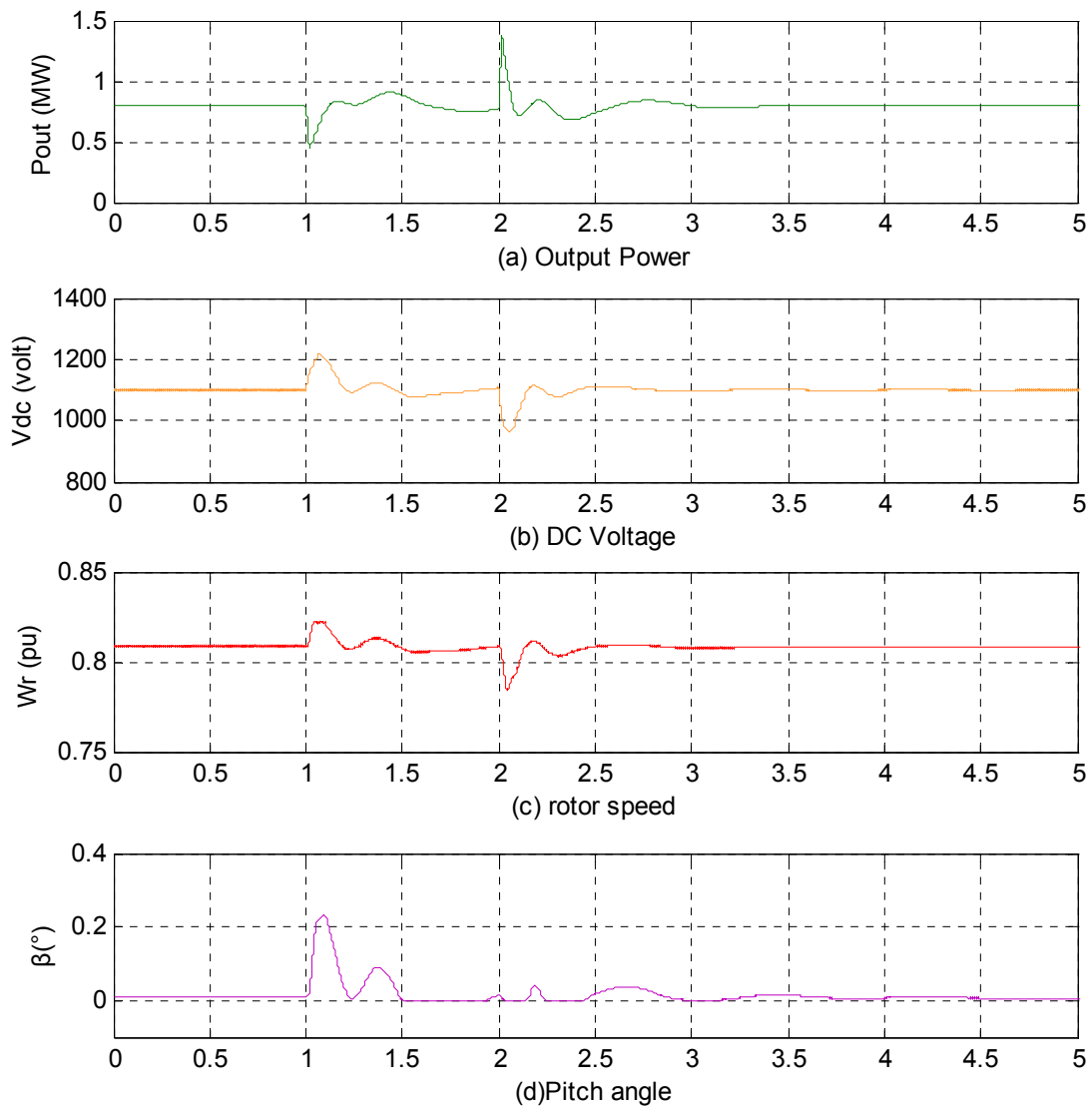
Σχήμα 5.6: (α) Ισχύς εξόδου Α/Γ , (β) τάση στην DC πλευρά του αντιστροφέα, (γ) γωνιακή ταχύτητα δρομέα και (δ) βήμα έλικας για βύθιση τάσης 50% επί της ονομαστικής και $P=P_{rated}$.

επιτυχώς την ισχύ που δέχεται, με αποτέλεσμα η dc τάση να αυξάνεται συνεχώς μέχρι να καθαριστεί το σφάλμα την χρονική στιγμή $t=2\text{sec}$. Η αύξηση της dc-τάσης οδηγεί σε επιτάχυνση της γεννήτριας (σχήμα 5.6γ), αποθηκεύοντας ουσιαστικά σε κινητική ενέργεια την ενέργεια που δεν μπορεί να διοχετευτεί στο δίκτυο. Μετά την εκκαθάριση του σφάλματος την χρονική στιγμή $t=2\text{sec}$, το ρεύμα παραμένει στα 1,1 pu με την ισχύ να αυξάνεται και να παραμένει στα 2.5MW, μέχρι τη στιγμή που η περίσσεια ενέργεια που συγκεντρώθηκε στον δρομέα να απελευθερωθεί στο δίκτυο και ο V_{dc} -ρυθμιστής να επαναφέρει το σύστημα στο αρχικό σημείο ισορροπίας.

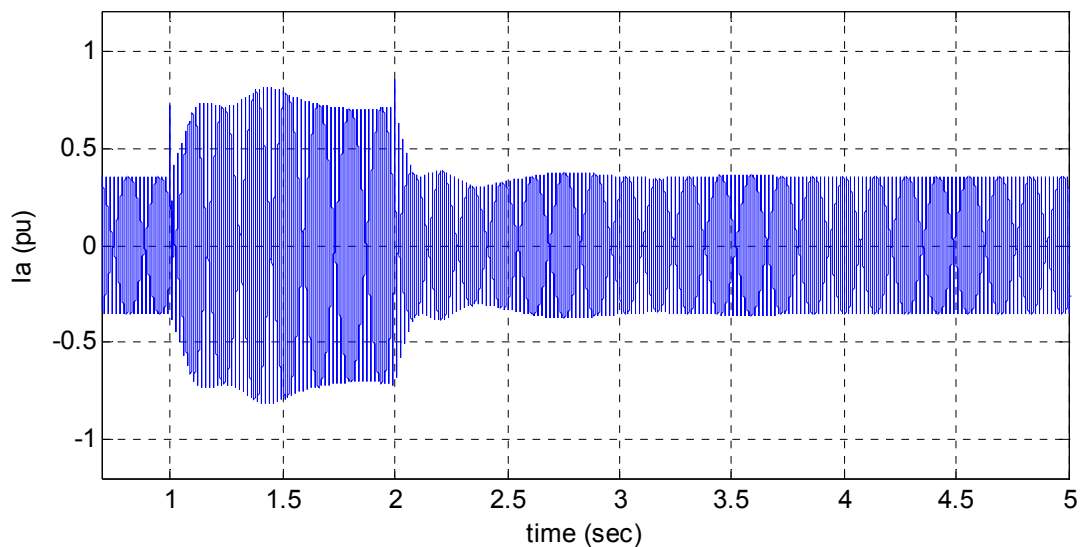
Το πρόβλημα λοιπόν, έγκειται στο γεγονός ότι η ισχύς που παράγει η Α/Γ, για τη δεδομένη ταχύτητα ανέμου, είναι αρκετά μεγάλη ώστε σε περίπτωση βύθισης της τάσης το ονομαστικό ρεύμα του αντιστροφέα (1,1pu) να μην αρκεί. Έτσι εάν η ισχύς που παράγει η Α/Γ είναι χαμηλότερη, τότε ο αντιστροφέας θα μπορέσει να την διοχετεύσει στο δίκτυο κατά τη διάρκεια πτώσης τάσης. Αυτό φαίνεται και στο σχήμα 5.8 όπου η ταχύτητα ανέμου είναι 9m/s και η Α/Γ παράγει 0,78MW, περίπου 40% της ονομαστικής. Για την ίδια πτώση τάσης, δηλαδή για πτώση



Σχήμα 5.7 : Ρεύμα φάσης α στην έξοδο της Α/Γ για βύθιση τάσης κατά 50% επί της ονομαστικής και $P=P_{\text{rated}}$.



Σχήμα 5.8: (α) Ισχύς εξόδου A/Γ , (β) τάση στην DC πλευρά του αντιστροφέα, (γ) γωνιακή ταχύτητα δρομέα και (δ) βήμα έλικας για βύθιση τάσης 50% επί της ονομαστικής και $P=0,4P_{rated}$.



Σχήμα 5.9 : Ρεύμα φάσης α στην έξοδο της A/Γ για βύθιση τάσης κατά 50% επί της ονομαστικής και $P=0,4P_{rated}$.

τάσης κατά 50% της ονομαστική και διάρκειας 1sec, η απόκριση είναι αρκετά καλύτερη και το σύστημα δεν υπερφορτώνεται.

Είναι προφανές ότι για ονομαστική ισχύ εξόδου, όσο μεγαλύτερη σε πλάτος και σε διάρκεια είναι η βύθιση τάσης, τόσο πιο επικίνδυνη για την Α/Γ είναι η παραμονή της στο δίκτυο. Ενώ το ρεύμα εξόδου μπορεί να μην ξεπερνά το 1,1pu, προστατεύοντας έτσι τον αντιστροφέα, η τάση στο πυκνωτή ανεβαίνει σε επικίνδυνα επίπεδα που μπορεί να οδηγήσουν στην καταστροφή του.

Η λύση στο πρόβλημα μπορεί να επιτευχθεί με δυο τρόπους :

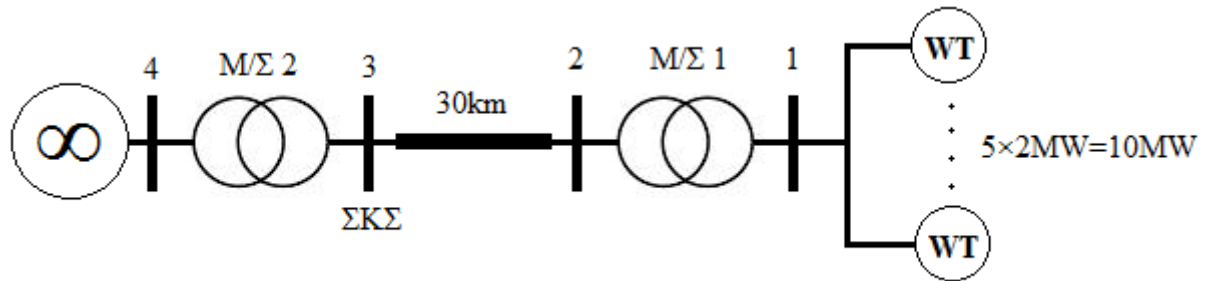
- a. Αποσύνδεση της Α/Γ από το δίκτυο μετά την εμφάνιση της βύθισης.
- b. Επέμβαση στον εξοπλισμό της Α/Γ, ώστε να μπορεί να ανταπεξέλθει χωρίς προβλήματα σε τέτοιες βυθίσεις τάσης.

Σύμφωνα με τα όσα αναφέραμε στο πρώτο κεφάλαιο, η πρώτη λύση δεν είναι πλέον εφικτή διότι ο διαχειριστής του δικτύου απαιτεί από μια Α/Γ να παραμείνει στο δίκτυο κατά τη διάρκεια βύθισης τάσης για όσο χρόνο ορίζει η καμπύλη Fault Ride Through του σχήματος 1.10. Έτσι, η δεύτερη λύση αποτελεί μονόδρομο με πιθανές αλλαγές είτε στην πλευρά του αντιστροφέα είτε στην πλευρά της dc-τάσης. Πιο συγκεκριμένα, η αύξηση της ονομαστικής ισχύος του αντιστροφέα, θα έδινε τη δυνατότητα παραγωγής ρεύματος μεγαλύτερου του 1,1pu, με αποτέλεσμα να γίνεται εφικτή η απόδοση της ονομαστικής ισχύος των 2MW σε χαμηλά επίπεδα τάσης. Αυτή η λύση όμως δεν είναι προσιτή, κυρίως για οικονομικούς λόγους, διότι το κόστος αντιστροφέων τέτοιας ισχύος είναι αρκετά μεγάλο. Μια λύση περισσότερο οικονομική θα ήταν η προσθήκη ενός συστήματος **dump load** στην dc πλευρά του αντιστροφέα, συνδεδεμένου παράλληλα στον πυκνωτή. Το σύστημα αυτό περιλαμβάνει ένα ωμικό φορτίο σε σειρά με έναν ημιαγωγικό διακόπτη IGBT. Στόχος του συστήματος αυτού είναι να μην επιτρέψει την dc τάση να ξεπεράσει κάποιο όριο ασφαλείας. Έτσι σε περίπτωση βύθισης της τάσης του δικτύου, όταν η dc τάση πάει να ξεπεράσει το όριο ασφαλείας, ο ημιαγωγικός διακόπτης άγει κατάλληλα ώστε το ωμικό φορτίο να καταναλώσει την περίσσεια ενέργεια που δεν μπορεί να απορροφηθεί από το δίκτυο. Έτσι η ανεμογεννήτρια προστατεύεται και μπορεί να επιστρέψει γρήγορα στην αρχική της κατάσταση ακόμα και όταν έχει αποσυνδεθεί από το δίκτυο.

5.2 Παροχή άεργου ρεύματος από Α/Π κατά τη διάρκεια βύθισης τάσης

Θεωρούμε αιολικό πάρκο ονομαστικής ισχύος 10MW αποτελούμενο από 5 Α/Γ σε λειτουργία ρύθμισης τάσης **PV node**. Το αιολικό πάρκο είναι διασυνδεδεμένο με ένα άπειρο ΣΗΕ ,μέσω ενός μετασχηματιστή ανύψωσης Μ/Σ1, μιας γραμμής μεταφοράς 30km και ενός δεύτερου μετασχηματιστή ανύψωσης Μ/Σ2, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.10. Το σημείο κοινής σύνδεσης με το δίκτυο θεωρείται ο ζυγός 3, από όπου γίνεται και η δειγματοληψία της τάσης για το σύστημα ελέγχου. Η ταχύτητα ανέμου είναι στα 15m/s που σημαίνει ότι κάθε Α/Γ παράγει 2MW και το πάρκο συνολικά παράγει την ονομαστική του ισχύ. Η τάση αναφοράς στο ζυγό 3 έχει

οριστεί στα 0,96pu, και το αιολικό πάρκο παράγει μια πολύ μικρή ποσότητα αέργου ισχύος(0,06MVA_r) ώστε να διατηρηθεί την τάση στη τιμή αυτή.



Σχήμα 5.10 : Αιολικό πάρκο ονομαστικής ισχύος 10MW συνδεδεμένο στο δίκτυο μέσω γραμμής μεταφοράς 30km.

5.2.1 Βύθιση τάσης κατά 0,1pu σε ονομαστική ισχύ εξόδου, $P_{AΠ}=10MW$

Αρχικά, θα εξετάσουμε την απόκριση του αιολικού πάρκου για βύθιση τάσης κατά 10% της ονομαστικής. Σύμφωνα με την καμπύλη Fault Ride Through του σχήματος 1.10 για βύθιση τάσης μικρότερης ή ίσης του 10% της ονομαστικής, δεν ορίζεται ελάχιστος χρόνος παραμονής της A/Γ στο δίκτυο και επομένως το αιολικό πάρκο πρέπει να παραμείνει συνδεδεμένο στο δίκτυο μέχρι να καθαριστεί το σφάλμα. Έτσι, για τη συγκεκριμένη προσομοίωση θεωρούμε ότι το σφάλμα διαρκεί 3sec. Επίσης, η ρύθμιση της τάσης του ζυγού 3 από το A/Π θα γίνεται με προτεραιότητα το άεργο ρεύμα, i_q priority.

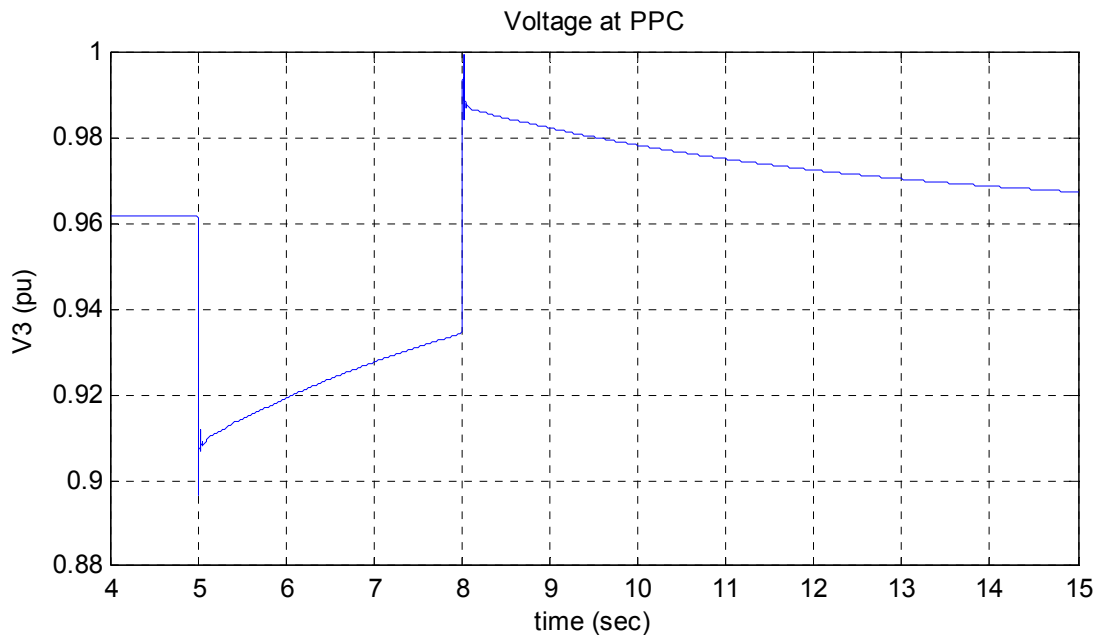
Πιο συγκεκριμένα, τη χρονική στιγμή $t=5sec$ παρατηρείται βύθιση της τάσης κατά 10% της ονομαστικής στο άπειρο ΣΗΕ που είναι συνδεδεμένο στο ζυγό 4. Η τάση στο ζυγό 3 φαίνεται στο σχήμα 5.11. Παρατηρούμε, ότι ενώ η τάση κανονικά θα έπρεπε να μειωθεί στο 0,86pu, στην πραγματικότητα δεν κατεβαίνει κάτω από τα 0,91pu και αυξάνεται σταδιακά κατά την διάρκεια του σφάλματος μέχρι να φτάσει τα 0,93pu στα 8sec. Αυτό οφείλεται στον ρυθμιστή τάσης, ο οποίος την στιγμή του σφάλματος αυξάνει την εντολή για παραγωγή αέργου ισχύος από τον αντιστροφέα της κάθε A/Γ. Έτσι, το άεργο ρεύμα αυξάνεται ακαριαία την στιγμή $t=5sec$, στα 0,21pu(σχήμα 5.12). Η αύξηση συνεχίζεται ομαλά μέχρι το τέλος του σφάλματος όπου το i_q έχει φτάσει τα 0,31pu. Η μέση μείωση της τάσης και η μέση αύξηση του αέργου ρεύματος είναι :

$$\frac{\Delta U}{U_n} = \frac{U - U_0}{U_n} = \frac{0,92 - 0,96}{1} \cdot 100\% = -4\%$$

$$\frac{\Delta I_q}{I_n} = \frac{I_q - I_{q0}}{I_n} = \frac{0,26 - (-0,05)}{1,1} \cdot 100\% = 28,2\%$$

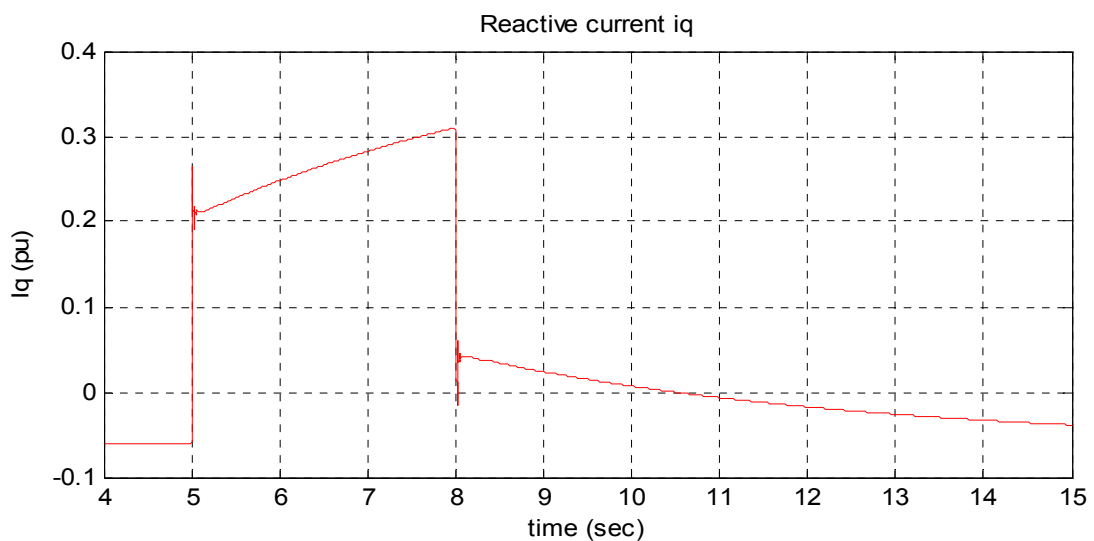
Από την καμπύλη του σχήματος 5.1 προκύπτει ότι για μείωση της τάσης κατά 4% βρισκόμαστε στη νεκρή ζώνη(dead band), οπότε δεν είναι απαραίτητη η αύξηση του αέργου ρεύματος. Πάραυτα το αιολικό πάρκο τροφοδοτεί με άεργο ρεύμα το σφάλμα ακόμα και αν δεν απαιτείται

από τον κώδικα. Επίσης, η αύξηση αυτή γίνεται σε διάστημα μικρότερο των 20ms που ορίζει ο κώδικας, όπως φαίνεται σε μεγέθυνση στο σχήμα 5.13.

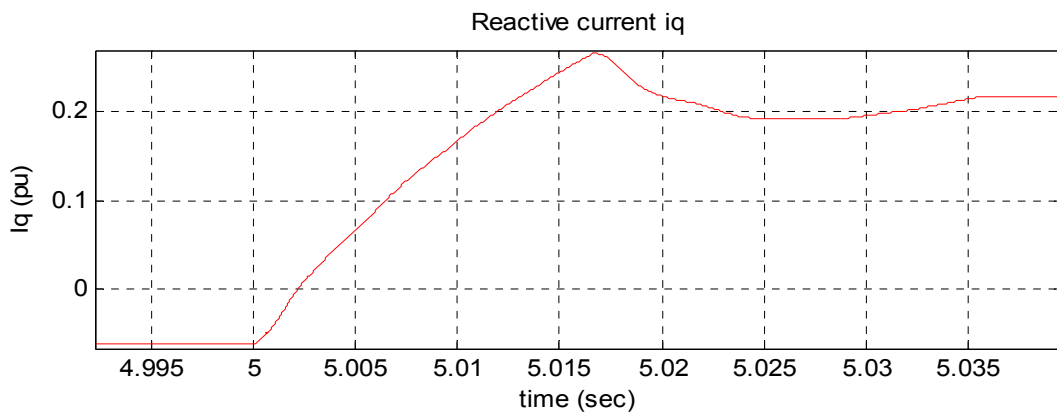


Σχήμα 5.11 : Τάση στο ΣΚΣ σε βύθιση τάσης κατά 0,1pu για $P_{A/Π}=10MW$.

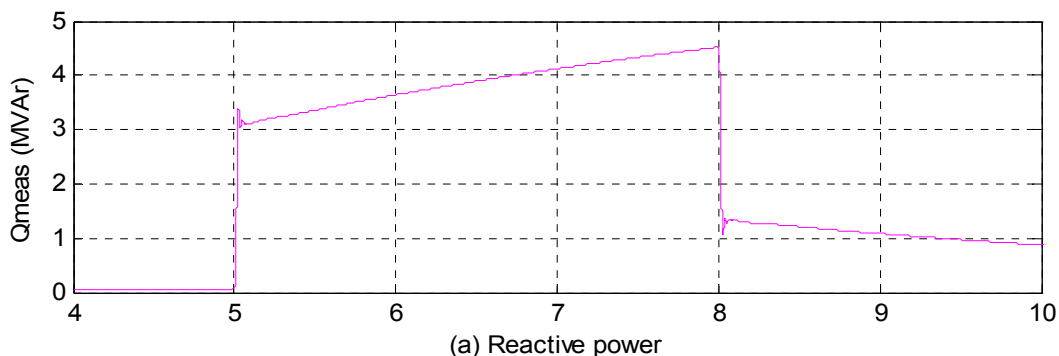
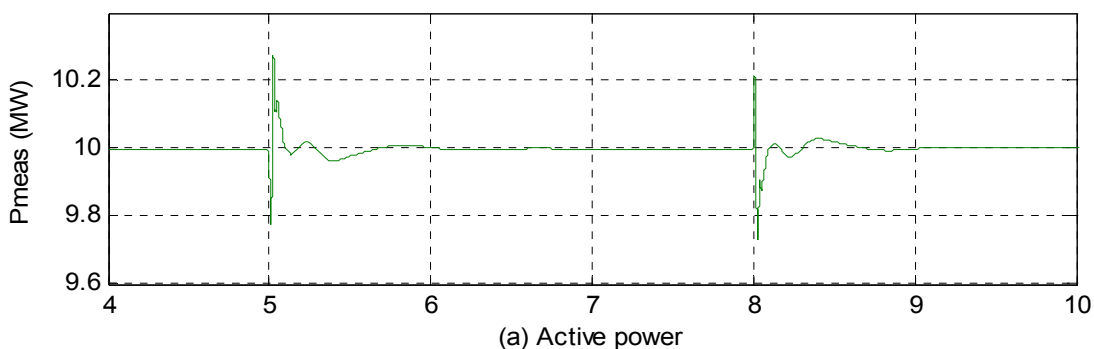
Στο σχήμα 5.14 είναι φανερή η αύξηση της άεργου ισχύος κατά τη διάρκεια του σφάλματος. Όσον αφορά την ενεργό ισχύ, αυτή μεταβάλεται κατά παρόμοιο τρόπο με αυτόν που περιγράψαμε την προηγούμενη παράγραφο. Η βασική διαφορά είναι ότι τα μεταβατικά έχουν μικρότερο πλάτος και διαρκούν λιγότερο, λόγω της αύξησης της αύξησης της τάσης που προκαλεί ο ρυθμιστής τάσης κατά τη διάρκεια του σφάλματος. Συνολικά λοιπόν, η επίδοση της Α/Γ κατά τη διάρκεια της βύθισης είναι αρκετά καλύτερη όταν λειτουργεί σε PV node.



Σχήμα 5.12 : Άεργο ρεύμα i_q σε βύθιση τάσης κατά 0,1pu, για $P_{A/Π}=10MW$.



Σχήμα 5.13 : Αύξηση αέργου ρεύματος σε βύθιση τάσης κατά 0,1pu, για $P_{A/\Pi}=10\text{MW}$.



Σχήμα 5.14 : (α) Ενεργός ισχύς και (β) άεργος ισχύς, για $P_{A/\Pi}=10\text{MW}$ και βύθιση τάσης κατά 0,1pu.

5.2.2 Βύθιση τάσης κατά 0,5pu σε ονομαστική ισχύ εξόδου, $P_{A/\Pi}=10\text{MW}$

Θα εξετάσουμε την απόκριση του αιολικού πάρκου για βύθιση τάσης κατά 50% της ονομαστικής. Σύμφωνα με την καμπύλη Fault Ride Through του σχήματος 1.10 για βύθιση τάσης κατά 50% της ονομαστικής, ο ελάχιστος χρόνος παραμονής της A/Γ στο δίκτυο είναι περίπου 0,9sec. Έτσι, για τη συγκεκριμένη προσομοίωση θεωρούμε ότι το σφάλμα διαρκεί 0,9sec. Επίσης, η ρύθμιση της τάσης του ζυγού 3 από το A/Π θα γίνεται με προτεραιότητα το άεργο ρεύμα, i_q priority.

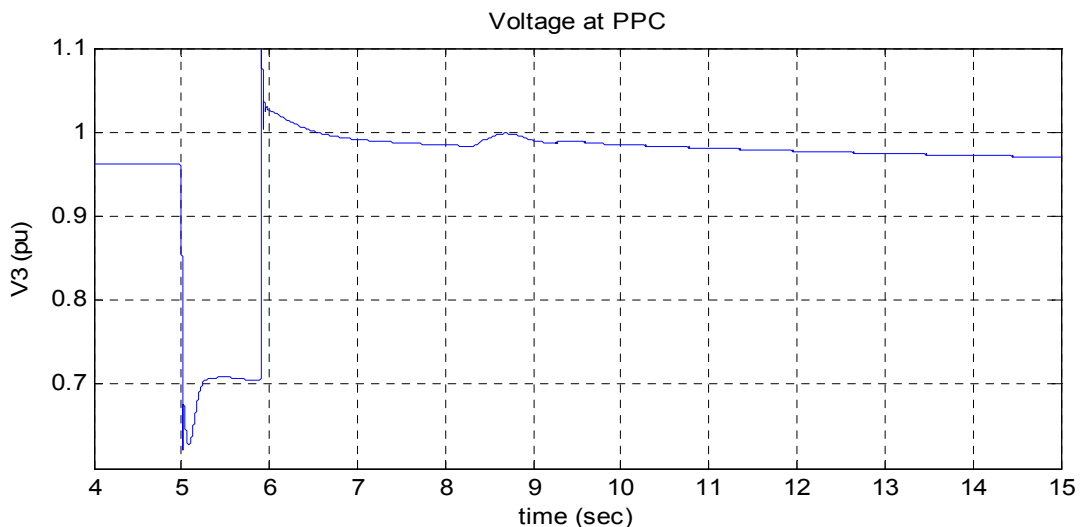
Πιο συγκεκριμένα, τη χρονική στιγμή $t=5\text{sec}$ παρατηρείται βύθιση της τάσης κατά 50% της ονομαστικής στο άπειρο ΣΗΕ που είναι συνδεδεμένο στο ζυγό 4. Η τάση στο ζυγό 3 φαίνεται στο σχήμα 5.15. Παρατηρούμε, ότι ενώ η τάση κανονικά θα έπρεπε να είχε πέσει στο 0,46pu, στην πραγματικότητα δεν κατεβαίνει κάτω από τα 0,63pu και το περισσότερο διάστημα της

βύθισης βρίσκεται στα 0,7pu. Έτσι βλέπουμε μια σημαντική βελτίωση της τάσης στο ζυγό 3 που οφείλεται στην ακαριαία αύξηση του άεργου ρεύματος στο 1,1pu μέχρις ότου αποσβεστεί το σφάλμα μετά από 0,9sec(σχήμα 5.16). Η μέση μείωση της τάσης και η μέση αύξηση του άεργου ρεύματος είναι :

$$\frac{\Delta U}{U_n} = \frac{U - U_0}{U_n} = \frac{0,7 - 0,96}{1} \cdot 100\% = -26\%$$

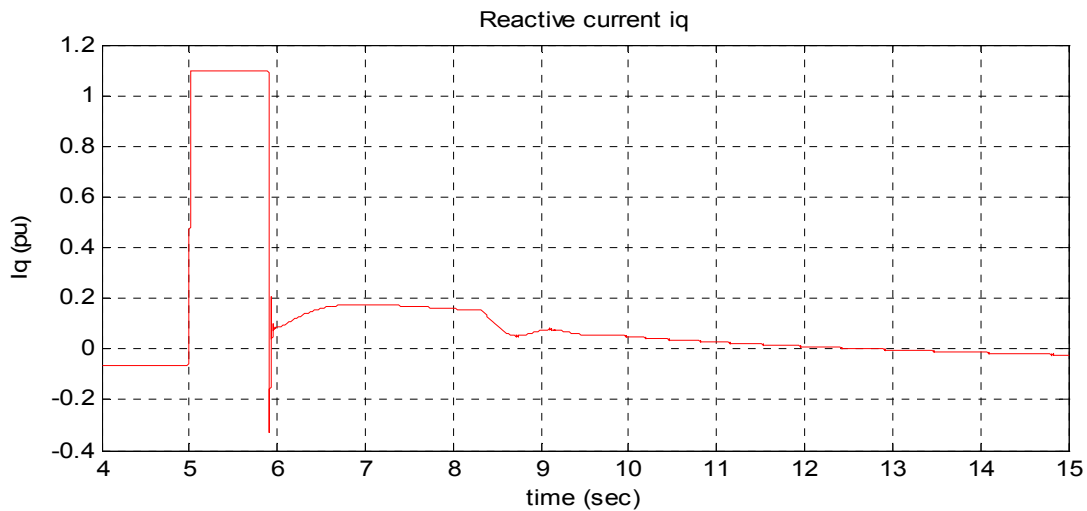
$$\frac{\Delta I_q}{I_n} = \frac{I_q - I_{q0}}{I_n} = \frac{1,1 - (-0,05)}{1,1} \cdot 100\% = 104,5\%$$

Από την καμπύλη του σχήματος 5.1 προκύπτει ότι για μείωση της τάσης στο ζυγό κατά 26%, η απαίτηση του γερμανικού κώδικα για αύξηση του άεργου ρεύματος είναι στο 52%. Επομένως το αιολικό πάρκο ξεπερνά κατά πολύ την βασική απαίτηση, εφόσον αυξάνει το άεργο ρεύμα κατά 104,5%. Επίσης, η αύξηση αυτή γίνεται σε διάστημα μικρότερο των 20ms που ορίζει ο κώδικας, όπως φαίνεται σε μεγέθυνση στο σχήμα 5.17.

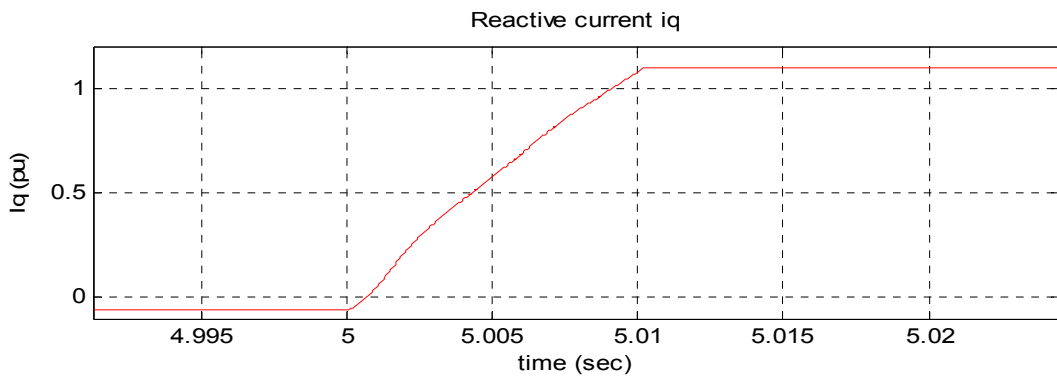


Σχήμα 5.15 : Τάση στο ΣΚΣ σε βύθιση τάσης κατά 0,5pu για $P_{ΑΠ}=10\text{MW}$.

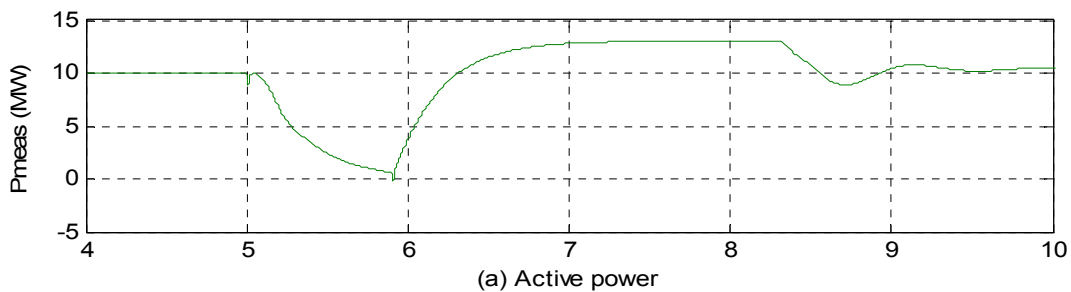
Στο σχήμα 5.18 είναι φανερή η αύξηση της άεργου ισχύος κατά τη διάρκεια του σφάλματος. Η προτεραιότητα που έχει δωθεί στο άεργο ρεύμα (i_q priority) αναγκάζει την ενεργό ισχύ να μειωθεί σχεδόν στο μηδέν μέχρι την λήξη της βύθισης. Φυσικά σε περίπτωση που υπήρχε προτεραιότητα στο ενεργό ρεύμα (i_d priority), η άεργος ισχύς δεν θα μπορούσε να αυξηθεί πέρα από το όριο που θα έθετε η ενεργός. Έτσι η ενεργός ισχύς δεν θα μηδενιζόταν.



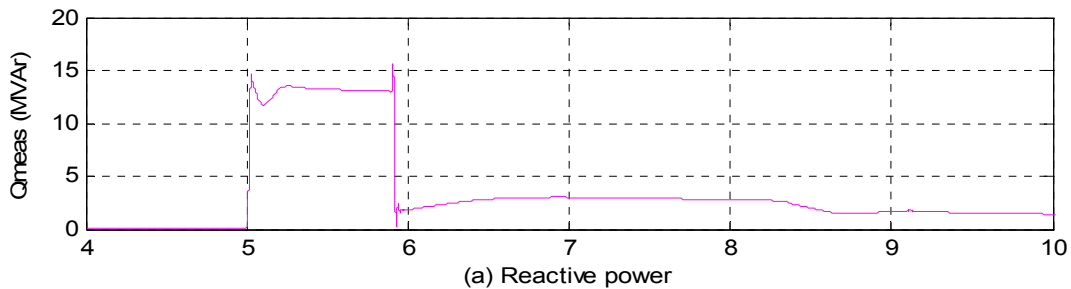
Σχήμα 5.16 : Άεργο ρεύμα i_q σε βύθιση τάσης κατά 0,5pu, για $P_{\Delta\Pi}=10\text{MW}$.



Σχήμα 5.17 : Αύξηση άεργου ρεύματος σε βύθιση τάσης κατά 0,5pu., για $P_{\Delta\Pi}=10\text{MW}$.



(a) Active power

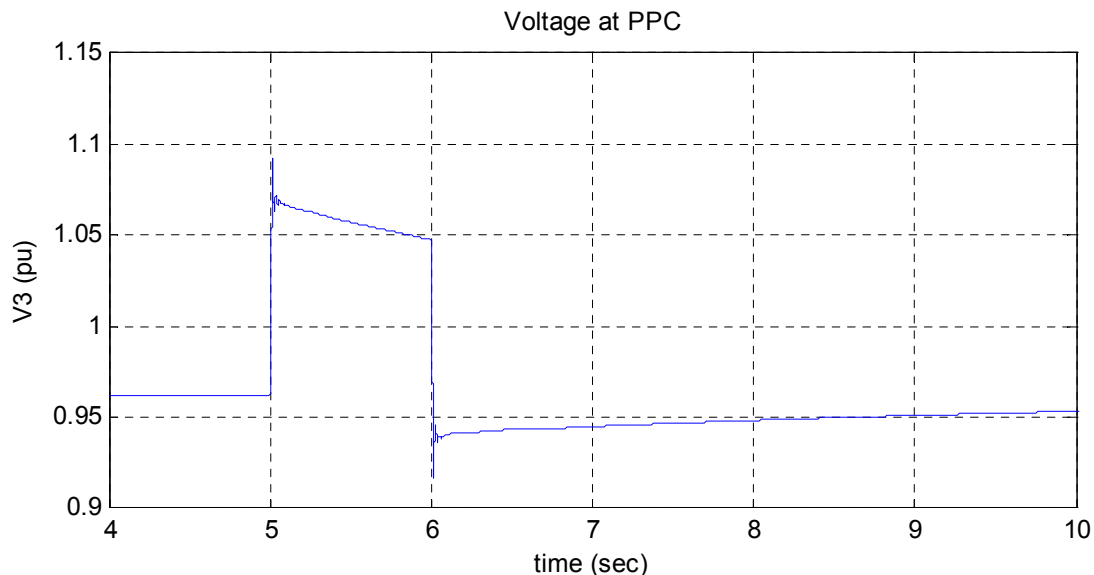


(a) Reactive power

Σχήμα 5.18 : (α) Ενεργός ισχύς και (β) άεργος ισχύς, για $P_{\Delta\Pi}=10\text{MW}$ και βύθιση τάσης κατά 0,5pu.

5.2.3 Εμφάνιση υπέρτασης κατά 0,2pu σε ονομαστική ισχύ εξόδου, $P_{\Delta\Pi}=10\text{MW}$

Θα εξετάσουμε την απόκριση του αιολικού πάρκου σε υπέρταση κατά 20% της ονομαστικής. Για τη συγκεκριμένη προσομοίωση θεωρούμε ότι το σφάλμα διαρκεί 1sec. Επίσης, η ρύθμιση της τάσης του ζυγού 3 από το Α/Π θα γίνεται με προτεραιότητα το άεργο ρεύμα, i_q priority.



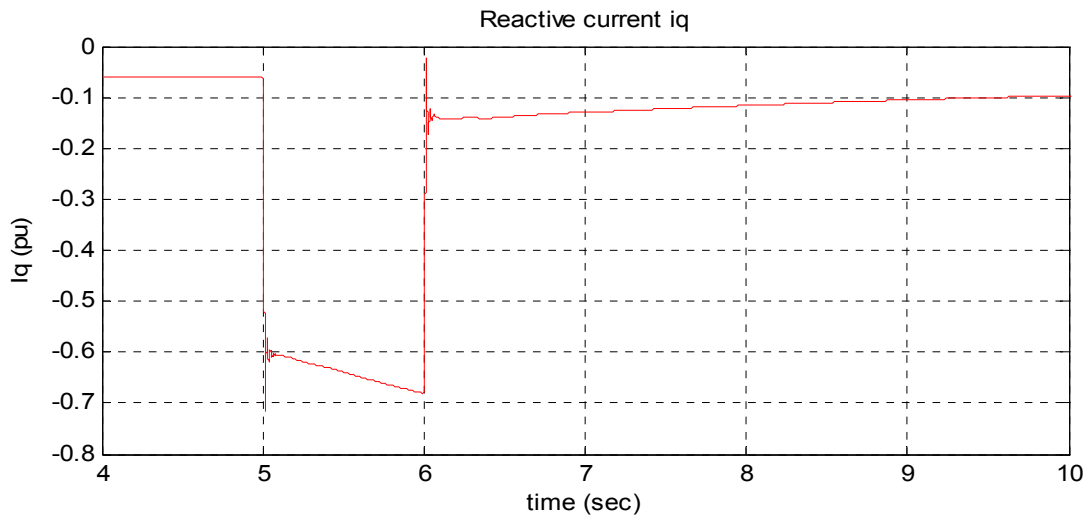
Σχήμα 5.22 : Τάση στο ΣΚΣ σε υπέρταση 0,2pu, για $P_{\Delta\Pi}=10\text{MW}$.

Πιο συγκεκριμένα, τη χρονική στιγμή $t=5\text{sec}$ παρατηρείται αύξηση της τάσης κατά 20% της ονομαστικής στο άπειρο ΣΗΕ που είναι συνδεδεμένο στο ζυγό 4. Η τάση στο ζυγό 3 φαίνεται στο σχήμα 5.22. Παρατηρούμε, ότι ενώ η τάση κανονικά θα έπρεπε να είχε αυξηθεί στο 1,16pu, στην πραγματικότητα δεν ανεβαίνει πάνω από τα 1,07pu και μειώνεται σταδιακά κατά την διάρκεια του σφάλματος μέχρι να φτάσει τα 1,05pu στα 8sec. Έτσι βλέπουμε μια βελτίωση της τάσης στο ζυγό 3, η οποία οφείλεται στην ακαριαία αύξηση του άεργου ρεύματος στο -0,6pu τη στιγμή $t=5\text{sec}$, η οποία συνεχίζεται ομαλά μέχρι τα -0,7 (σχήμα 5.23). Σημειώνεται ότι το αρνητικό πρόσημο στο ρεύμα υποδηλώνει ότι καταναλώνεται άεργος ισχύς, δηλαδή ότι ο Σ.Ι. είναι επαγωγικός. Η μέση αύξηση της τάσης και του άεργου ρεύματος είναι :

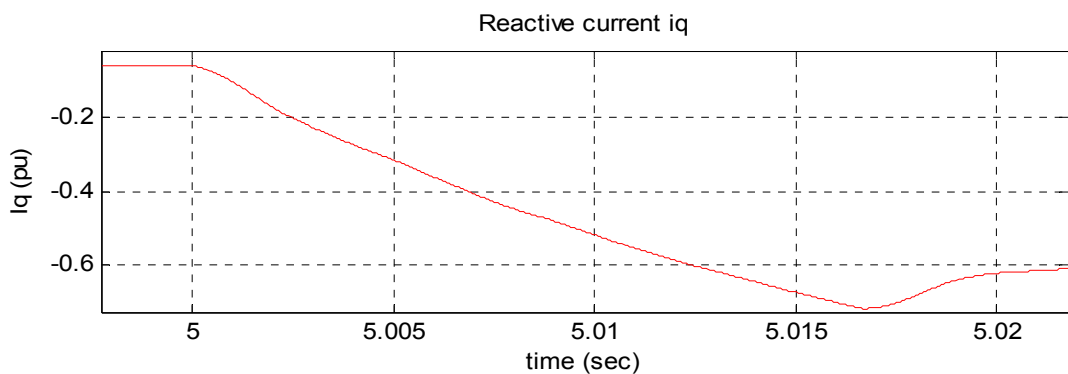
$$\frac{\Delta U}{U_n} = \frac{U - U_0}{U_n} = \frac{1,06 - 0,96}{1} \cdot 100\% = 10\%$$

$$\frac{\Delta I_q}{I_n} = \frac{I_q - I_{q0}}{U_n} = \frac{|-0,65 - (-0,05)|}{1,1} \cdot 100\% = 54,5\%$$

Από την καμπύλη του σχήματος 5.1 προκύπτει ότι για αύξηση της τάσης κατά 10%, η απαίτηση του γερμανικού κώδικα για αύξηση του άεργου ρεύματος είναι στο 2%. Επομένως το αιολικό πάρκο ξεπερνά κατά πολύ την βασική απαίτηση, εφόσον αυξάνει το άεργο ρεύμα κατά 54,5%. Επίσης, η αύξηση αυτή γίνεται σε διάστημα μικρότερο των 20ms που ορίζει ο κώδικας, όπως φαίνεται σε μεγέθυνση στο σχήμα 5.24.

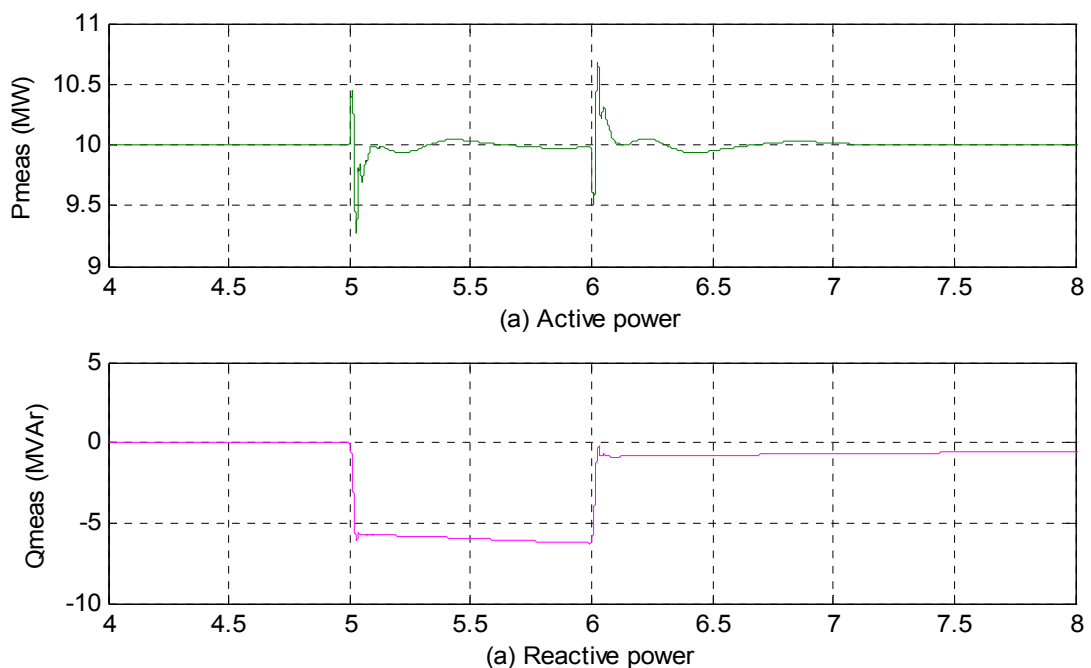


Σχήμα 5.23 : Άεργο ρεύμα σε υπέρταση 0,2pu, για $P_{\Delta\Pi}=10\text{MW}$.



Σχήμα 5.24 : Αύξηση άεργου ρεύματος σε υπέρταση 0,2pu, για $P_{\Delta\Pi}=10\text{MW}$.

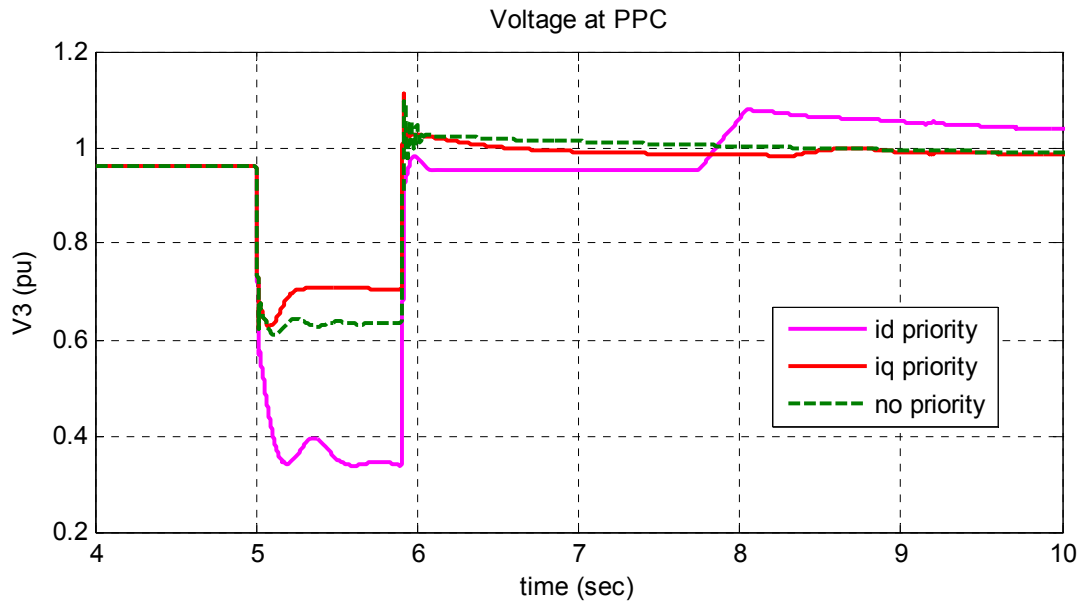
Όπως είναι αναμενόμενο για αύξηση της τάσης του δικτύου ο ρυθμιστής τάσης πρέπει να αυξήσει την κατανάλωση αέργου ισχύος από το αιολικό πάρκο. Αυτό φαίνεται και στο σχήμα 5.25α όπου η κατανάλωση αέργου αυξάνει στα 6MVA_r κατά τη διάρκεια του σφάλματος.



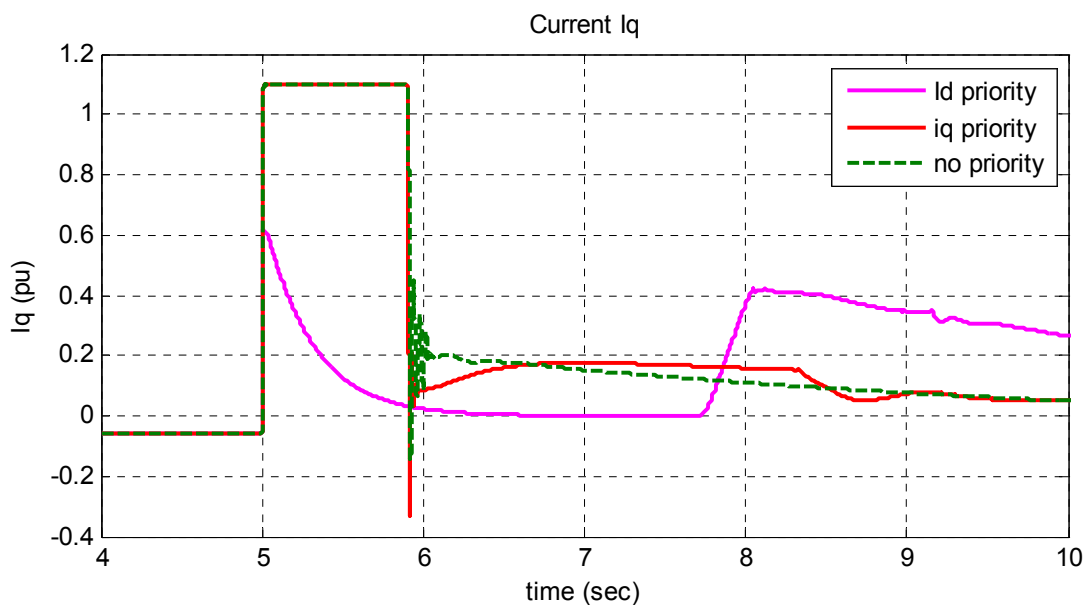
Σχήμα 5.25 : (α) Ενεργός ισχύς και (β) άεργος ισχύς, σε υπέρταση 0,2pu, για $P_{\Delta\Pi}=10\text{MW}$.

5.2.4 Βύθιση τάσης κατά 0,5pu, για διαφορετική προτεραιότητα ρεύματος

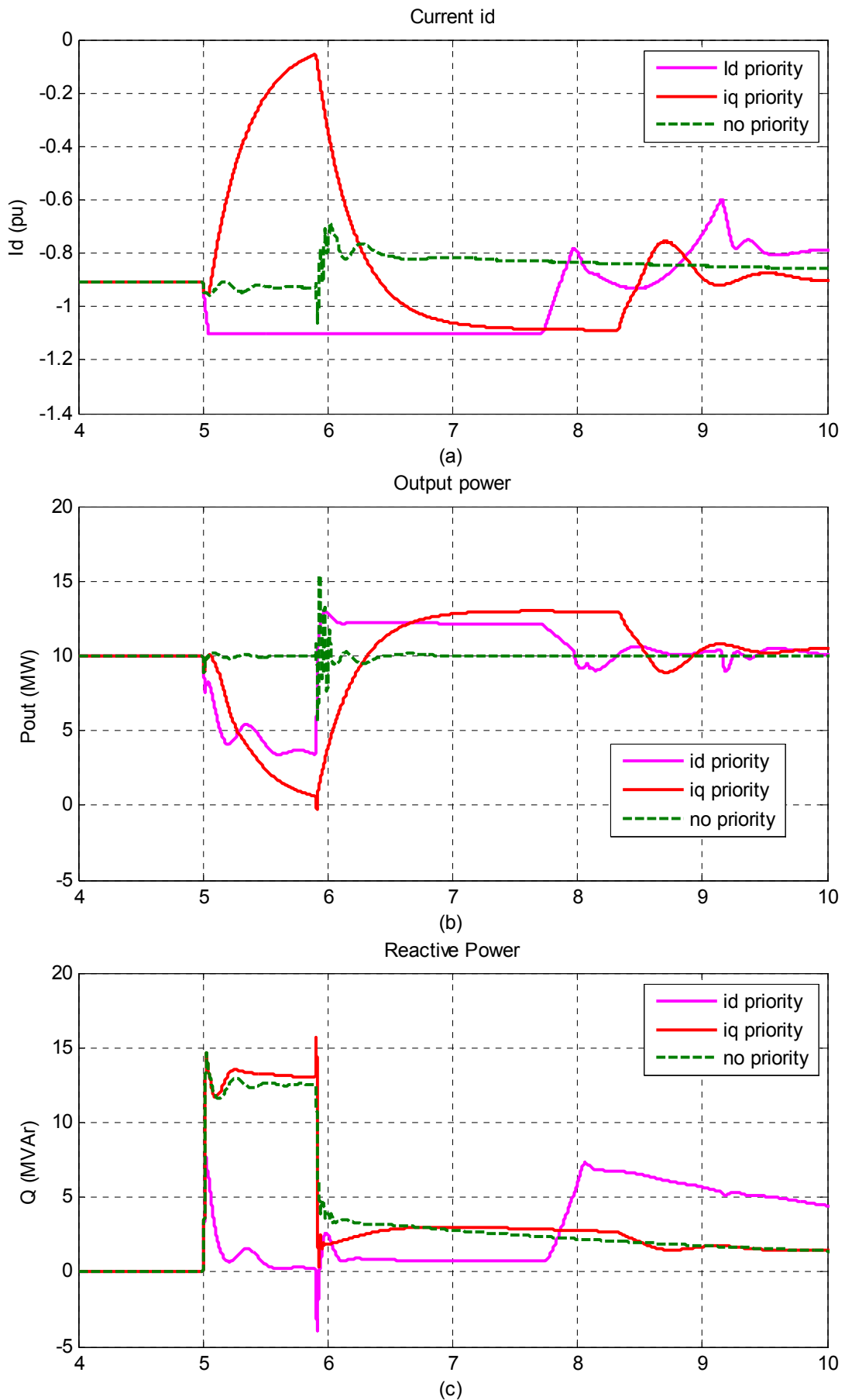
Στη συνέχεια για 50% βύθιση τάσης θα συγκρίνουμε τις κυματομορφές για λειτουργία του ρυθμιστή τάσης σε διαφορετικές προτεραιότητες ρεύματος. Στο κεφάλαιο 3 εξηγείται αναλυτικά η διαδικασία επιλογής προτεραιότητας.



Σχήμα 5.19 : Τάση στο ΣΚΣ για τα 3 είδη προτεραιότητας .



Σχήμα 5.20 : Άεργο ρεύμα για τα 3 είδη προτεραιότητας.



Σχήμα 5.21 : (α) I_d ρεύμα (<0) , (β) ενεργός ισχύς και (γ) άεργος ισχύς, για τα 3 είδη προτεραιότητας.

Από τα παραπάνω σχήματα παρατηρούμε ότι η καλύτερη απόκριση όσον αφορά τα μεταβατικά, είναι αυτή με no priority. Αρκεί να θυμίσουμε ότι σε αυτή την περίπτωση τα ρεύματα i_d και i_q δεν περιορίζουν το ένα το άλλο και έτσι το καθένα μπορεί να φτάσει μέχρι το 1,1pu. Όμως, το συνολικό ρεύμα σε περίπτωση βύθισης τάσης θα ξεπερνά κατά πολύ το 1,1pu θέτοντας σε κίνδυνο τα διακοπτικά στοιχεία του αντιστροφέα. Συνεπώς, συνειδητοποιεί κανείς η λειτουργία no priority δεν είναι εφικτή και ότι είναι απαραίτητο να τεθεί ένα όριο σε ένα από τα ρεύματα i_d και i_q .

Ανάμεσα στις δυο προτεραιότητες, i_d και i_q priority, η τελευταία είναι αυτή που καλύπτει απόλυτα τις απαιτήσεις του γερμανικού κώδικα για παροχή αέργου ρεύματος. Επίσης, κατά τη διάρκεια της βύθισης, το επίπεδο της τάσης στο σημείο κοινής σύνδεσης για i_q priority είναι αρκετά υψηλότερο σε σχέση με αυτό για i_d priority. Με άλλα λόγια, δίνοντας προτεραιότητα στην παραγωγή άεργου ενεργού ισχύος, δίνεται μεγαλύτερη ελευθερία στον ρυθμιστή τάσης. Έτσι, αυτός μπορεί να κάνει πιο αποτελεσματικά αυτό για το οποίο είναι προορισμένος, δηλαδή να ρυθμίζει την τάση στο ΣΚΣ.

Για όλους τους παραπάνω λόγους, η επιλογή προτεραιότητας στο ρεύμα i_q είναι επιτακτική όσον αφορά την παροχή άεργου ρεύματος κατά τη διάρκεια βύθισης τάσης στο δίκτυο.

5.2.5 Βύθιση τάσης κατά 0,5pu για διαφορετική ισχύ βραχυκυκλώσεως στο ζυγό 4

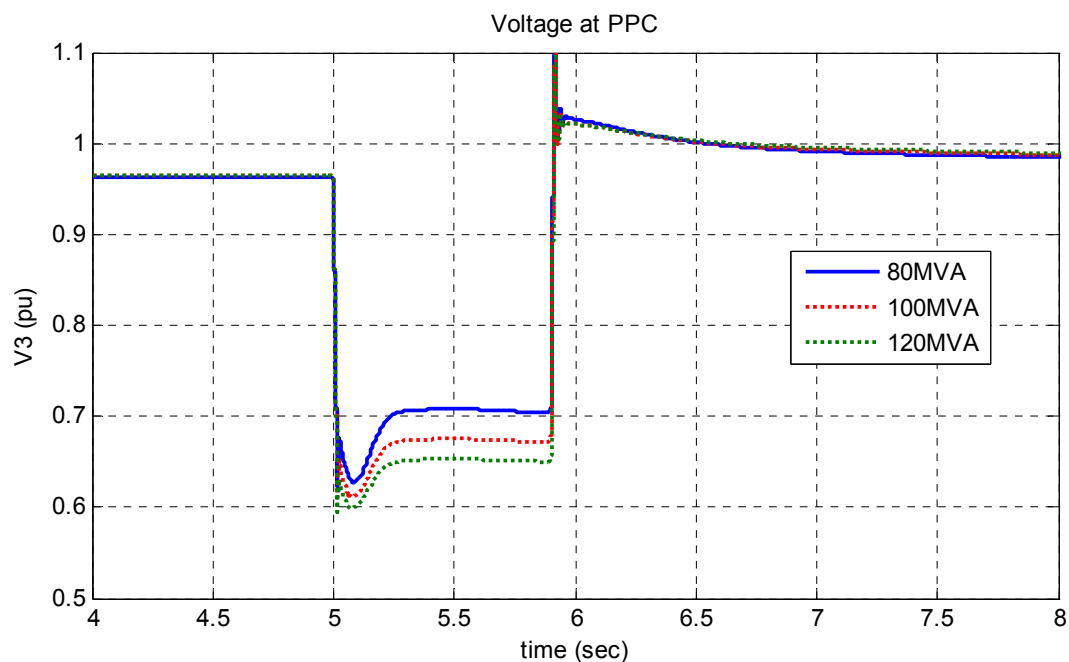
Σε αυτή την παράγραφο θα μελετήσουμε την επίδραση που έχει η ισχύς βραχυκύκλωσης του άπειρου ζυγού 4, όσον αφορά την υποστήριξη της τάσης του ΣΚΣ σε περίπτωση βύθισης. Στο κεφάλαιο 3 αναφέραμε ότι η ισχύς βραχυκύκλωσης σε ένα σημείο του δικτύου δηλώνει πόσο σθεναρό είναι το δίκτυο στο σημείο αυτό. Ουσιαστικά όσο μεγαλύτερη είναι η ισχύς βραχυκύκλωσης του ζυγού 4 τόσο πιο δύσκολο είναι για το Α/Π των 10MW να ρυθμίσει την τάση στο ΣΚΣ. Έτσι από τον τύπο 1, για δεδομένη τάση στο ζυγό, μεγαλύτερη ισχύς βραχυκυκλώσεως συνεπάγεται μικρότερο Z_K . Επομένως σύμφωνα με τον τύπο 2, μικρότερα R_K και X_K απαιτούν μεγαλύτερη ενεργό και άεργο ισχύ αντίστοιχα για να προκαλέσουν την ίδια μεταβολή στην τάση. Ακολουθούν οι τύποι που καθορίζουν την ισχύ βραχυκυκλώσεως και την μεταβολή της τάσης για ένα σημείο K του δικτύου :

$$S_K = \frac{V_n^2}{|\tilde{Z}_K|} \Rightarrow S_K = \frac{V_n^2}{\sqrt{R_K^2 + X_K^2}} \quad (1)$$

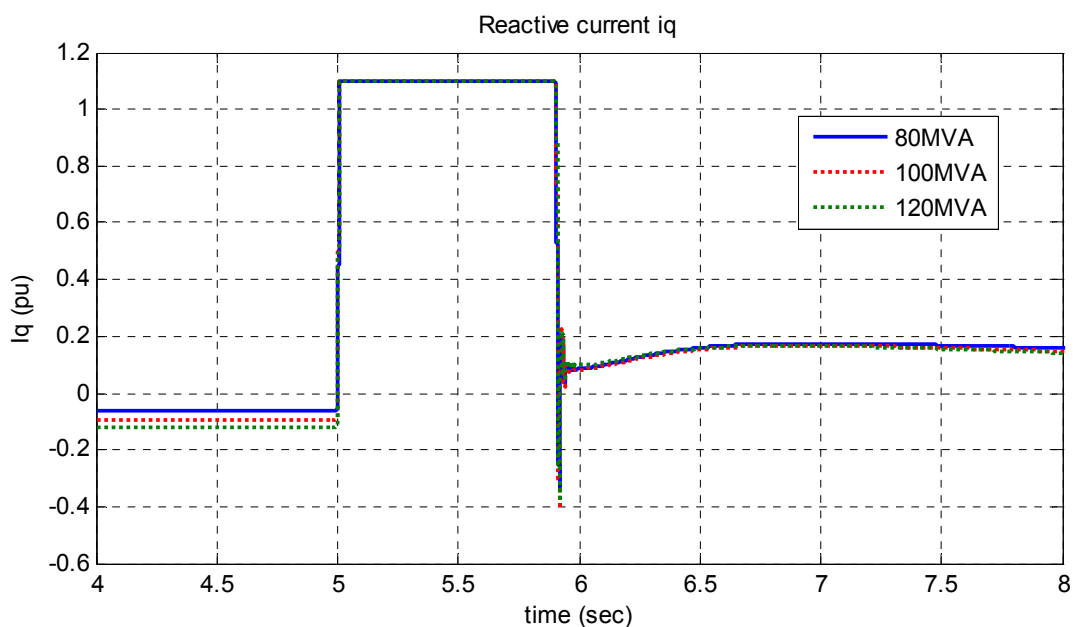
$$\varepsilon_K (\%) = \frac{100}{V_n^2} \cdot (R_K \cdot P_w + X_K \cdot Q_w) \quad (2)$$

Στις προσομοιώσεις που θα ακολουθήσουν, το Α/Π λειτουργεί σε PV node με i_d priority και αποδίδει την ονομαστική του ισχύ. Όπως και προηγουμένως, την χρονική στιγμή $t=5\text{sec}$ προκαλείται βύθιση τάσης κατά 0,5pu στο άπειρο ΣΗΕ που είναι συνδεδεμένο στο ζυγό 4. Στο

σχήμα 5.26 φαίνεται η βελτίωση του επιπέδου τάσης στη διάρκεια του σφάλματος, για ισχύ βραχυκυκλώσεως 80MVA, 100MVA και 120MVA. λόγω του ρυθμιστή τάσης του αιολικού.



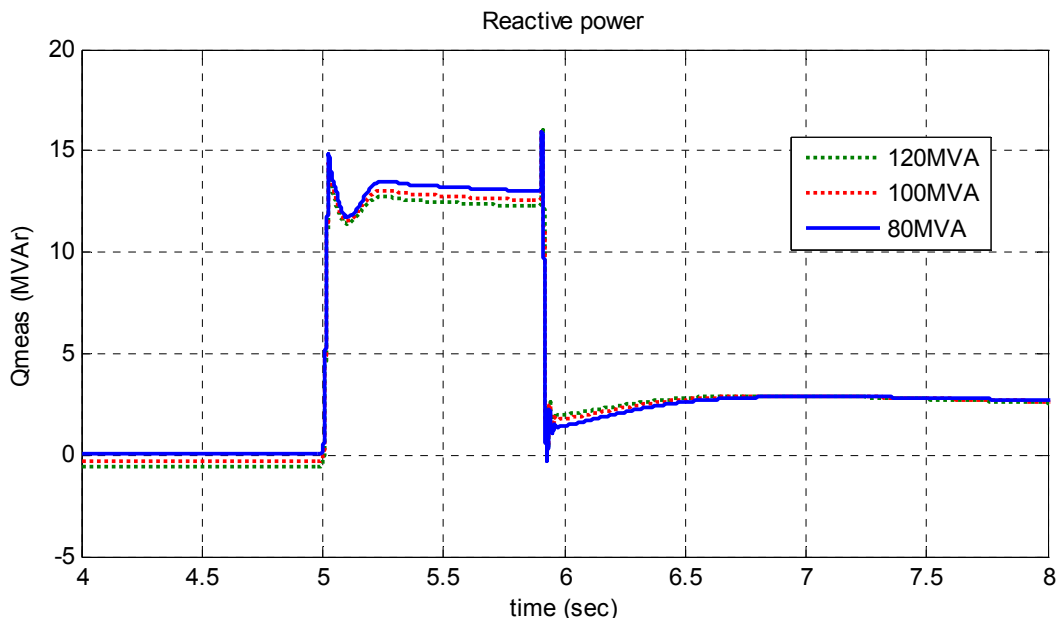
Σχήμα 5.26 : Τάση στο ΣΚΣ σε βύθιση 0,5pu, για ισχύ βραχυκύκλωσης 80MVA, 100MVA και 120MVA.



Σχήμα 5.27: Άεργο ρεύμα σε βύθιση 0,5pu, για ισχύ βραχυκύκλωσης 80MVA, 100MVA και 120MVA.

Όπως είναι αναμενόμενο, η τάση στο ΣΚΣ βελτιώνεται περισσότερο όταν το δίκτυο είναι πιο ασθενές, δηλαδή για $S_4=80\text{MVA}$. Συγκεκριμένα για ισχύ βραχυκύκλωσης 80MVA η βελτίωση της τάσης είναι κατά 5% μεγαλύτερη από αυτήν για ισχύ βραχυκύκλωσης 120MVA. Βέβαια,

αυτό δεν σημαίνει ότι ο ρυθμιστής τάσης δίνει εντολή για παραγωγή μεγαλύτερης ποσότητας αέργου ισχύος. Αυτό φαίνεται στα σχήματα 5.27 και 5.28 όπου το ρεύμα i_q και η αέργος ισχύς είναι τα ίδια και για τις τρεις ι.β. που εξετάζουμε. Στην ουσία αυτό που αλλάζει είναι το X_K , οπότε με την ίδια ποσότητα αέργου ισχύος προκύπτει και διαφορετική πτώση τάσης.



Σχήμα 5.28: Άεργος ισχύς A/Π σε βύθιση 0,5pu, για ισχύ βραχυκύκλωσης 80MVA, 100MVA και 120MVA.

Αξίζει να σημειωθεί ότι η βελτίωση της τάσης κατά τη διάρκεια σφάλματος είναι σχετική και εξαρτάται άμεσα από την ισχύ βραχυκύκλωσης στο ΣΚΣ. Επομένως, για ένα αιολικό πάρκο 10MW, η βελτίωση της τάσης που θα επιτύχει μπορεί να είναι ελάχιστη εάν αυτό είναι συνδεδεμένο σε ένα πάρα πολύ ισχυρό δίκτυο. Όμως, οι απαιτήσεις του κώδικα αναφέρονται στην παροχή αέργου ρεύματος και όχι στην βελτίωση της τάσης κατά τη διάρκεια σφάλματος. Το μοντέλο A/Γ που μελετάμε ανταποκρίνεται πλήρως στις απαιτήσεις αυτές ακόμα και όταν η τάση δεν βελτιωθεί καθόλου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ

6.1 Συμπεράσματα

Στη παρούσα διπλωματική εργασία αναπτύχθηκε ένα μοντέλο ανεμογεννήτριας μεταβλητών στροφών με σύγχρονη γεννήτρια τυλιγμένου δρομέα. Το μοντέλο υλοποιήθηκε και προσομοιώθηκε σε περιβάλλον Simulink/Matlab, και περιλαμβάνει όλα τα υποσυστήματα μιας ανεμογεννήτριας αυτής της τεχνολογίας. Πιο συγκεκριμένα αποτελείται, κατά σειρά σύνδεσης, από μια σύγχρονη γεννήτρια τυλιγμένου δρομέα, έναν ανορθωτή AC/DC, έναν μετατροπέα ανύψωσης DC/DC και έναν αντιστροφέα DC/AC. Επίσης περιλαμβάνει τη μοντελοποίηση του αεροδυναμικού και του μηχανικού μέρους της Α/Γ καθώς και τα συστήματα ελέγχου του μετατροπέα DC/DC, του αντιστροφέα DC/AC και της γωνίας pitch των πτερυγίων.

Στο 1^ο κεφάλαιο έγινε μια επισκόπηση των επικρατέστερων τεχνολογιών που εφαρμόζονται στη σχεδίαση ανεμογεννητριών και περιγράφηκε το πλαίσιο και οι απαιτήσεις του γερμανικού κώδικα της E.ON. όσον αφορά τη συμπεριφορά ενός αιολικού πάρκου κατά τη διάρκεια σφαλμάτων τάσης. Στο 2^ο κεφάλαιο αναλύονται εκτενώς τα υποσυστήματα του μοντέλου της Α/Γ. Σε αυτό περιγράφηκε επίσης η στρατηγική μέγιστης απολαβής ισχύος που ακολουθήθηκε για τον έλεγχο των στροφών της Α/Γ και συγκρίθηκε με άλλες στρατηγικές ελέγχου που χρησιμοποιούνται συχνά. Το 3^ο κεφάλαιο είναι αφιερωμένο στη σχεδίαση του συστήματος ελέγχου του αντιστροφέα. Συγκεκριμένα, αφού δόθηκε το απαραίτητο θεωρητικό και μαθηματικό υπόβαθρο, περιγράφηκε η διαδικασία κατασκευής του συστήματος ελέγχου, όπου ιδιαίτερη βαρύτητα δίνεται στο σύστημα ελέγχου της άεργου ισχύος. Το τελευταίο μάλιστα προσαρμόστηκε κατάλληλα, ως ρυθμιστής τάσης, ώστε να ικανοποιεί τις απαιτήσεις του γερμανικού κώδικα για παροχή άεργου ρεύματος κατά τη διάρκεια σφάλματος τάσης. Στο 4^ο κεφάλαιο έγινε η παρουσίαση της λειτουργίας του μοντέλου Α/Γ υπό σταθερές και μεταβλητές συνθήκες ανέμου. Καταγράφηκαν οι αποκρίσεις διάφορων ηλεκτρικών και μηχανικών μεγεθών της Α/Γ και εξετάστηκε εάν καλύπτονταν οι απαιτήσεις του γερμανικού κώδικα στην παραγωγή άεργου ισχύος. Τέλος στο 5^ο κεφάλαιο μελετήθηκε η απόκριση της Α/Γ σε βύθιση της τάσης του

δικτύου και αξιολογήθηκε η λειτουργία του ρυθμιστή τάσης του συστήματος ελέγχου του αντιστροφέα, με βάση ένα αιολικό πάρκο το οποίο υπόκειται σε διάφορα σφάλματα τάσης του δικτύου. Επίσης για κάθε σφάλμα τάσης ελέγχθηκε εάν το αιολικό πάρκο ικανοποιεί τις απαιτήσεις για παροχή άεργου ρεύματος που θέτει ο γερμανικός κώδικας.

Από τις προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν στο 4^ο κεφάλαιο προκύπτει ότι τα συστήματα ελέγχου ανταποκρίνονται αρκετά ικανοποιητικά στις μεταβολές των εισόδων του συστήματος. Για βηματικές αλλαγές αλλά και συχνά μεταβαλλόμενες τιμές στη ταχύτητα του ανέμου η απόκριση του ρυθμιστή στροφών είναι άμεση, πραγματοποιώντας τη στρατηγική MRPT για χαμηλές ταχύτητες ανέμου και διατηρώντας τις στροφές της γεννήτριας στην ονομαστική τιμή για υψηλές ταχύτητες ανέμου. Το ίδιο αποτελεσματικός σε υψηλές ταχύτητες ανέμου, είναι και ο ρυθμιστής της γωνίας pitch των πτερυγίων, αποτρέποντας την αύξηση της ισχύος εξόδου παραπάνω από το $1p_u$. Επίσης, ο V_{dc} ρυθμιστής ήταν το ίδιο αποτελεσματικός όσον αφορά την έγχυση της παραγόμενης ενεργού ισχύος προς το δίκτυο. Τέλος, από τις δοκιμές που έγιναν για την ικανότητα της ανεμογεννήτριας στην παραγωγή άεργου ισχύος, προέκυψε ότι καλύπτονται πλήρως οι απαιτήσεις του γερμανικού κώδικα. Η Α/Γ, και συγκεκριμένα το σύστημα ελέγχου του αντιστροφέα ήταν ικανό να ανταποκριθεί σε οποιαδήποτε μεταβολή της τιμής αναφοράς της άεργου ισχύος, όσο συχνά και αν απαιτείται. Σε γενικές γραμμές το σύστημα ελέγχου του αντιστροφέα το οποίο πραγματοποιεί διανυσματικό έλεγχο της τάσης και ρύθμιση του ρεύματος λειτούργησε σωστά κατά τη διάρκεια των δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν.

Στο 5^ο κεφάλαιο, οι προσομοιώσεις που έγιναν για τη μελέτη της συμπεριφοράς της Α/Γ σε PQ node, κατά τη διάρκεια βύθισης τάσης, έδειξαν ότι απαιτείται επιπλέον διάταξη για την αποφυγή των υπερτάσεων στα άκρα του πυκνωτή της dc πλευράς. Η αύξηση αυτή είναι αποτέλεσμα της σωστής λειτουργίας του συστήματος ελέγχου του αντιστροφέα και συγκεκριμένα του V_{dc} ρυθμιστή, ο οποίος δεν επιτρέπει στο ρεύμα εξόδου να ξεπεράσει το $1,1p_u$. Όσον τη λειτουργία του ρυθμιστή τάσης στο σημείο κοινής σύνδεσης με το δίκτυο, προέκυψε ότι καλύπτει με το παραπάνω τις απαιτήσεις του γερμανικού κώδικα για παροχή άεργου ρεύματος κατά τη διάρκεια σφάλματος. Τέλος έγινε σύγκριση των επιπτώσεων που έχει στη ρύθμιση της τάσης, η αλλαγή στην προτεραιότητα ρεύματος αλλά και η αλλαγή της ισχύος βραχυκυκλώσεως στο ΣΚΣ. Γενικώς, παρατηρήθηκε ότι, η παροχή άεργου ρεύματος είχε θετικά αποτελέσματα σχετικά με την βελτίωση του επιπέδου της τάσης κατά τη διάρκεια του σφάλματος, που σημαίνει ότι το αιολικό πάρκο μπορεί να παραμείνει συνδεδεμένο στο δίκτυο για μεγαλύτερο διάστημα σύμφωνα με την καμπύλη LVRT του γερμανικού κώδικα.

6.2 Προοπτικές

Αντικείμενο μελλοντικής ερευνητικής προσπάθειας μπορεί να αποτελέσει η ανάπτυξη και η προσθήκη στο μοντέλο ενός συστήματος dump load, όπως αυτό περιγράφηκε στο κεφάλαιο 5. Η παρουσία τέτοιας διάταξης στην dc πλευρά του αντιστροφέα θα αποτρέψει πιθανές υπερτάσεις στα άκρα του πυκνωτή, που οφείλονται κυρίως σε βυθίσεις τάσης και τον περιορισμό σε ρεύμα που θέτει ο αντιστροφέας. Έτσι, σε περίπτωση βύθισης τάσεως τα μεταβατικά θα είναι πολύ μικρότερα σε διάρκεια και ένταση. Ακόμα και σε περίπτωση που η

A/Γ αναγκαστεί να αποσυνδεθεί από το δίκτυο μετά από χρόνο που ορίζεται από την καμπύλη LVRT, θα πρέπει να είναι σε θέση να επανέλθει άμεσα στην προ βύθισης κατάσταση όταν καθαριστεί το σφάλμα.

Ένα άλλο σημαντικό θέμα αποτελεί η προσθήκη διάταξης που θα υπολογίζει το χρόνο παραμονής της ανεμογεννήτριας στο δίκτυο κατά τη διάρκεια βύθισης σύμφωνα με την καμπύλη LVRT που θα ορίζει ο εκάστοτε κώδικας. Έτσι μπορούν να εξεταστούν οι απαιτήσεις διάφορων κωδίκων σύνδεσης και να συγκριθεί η αυστηρότητά τους όσον αφορά την παραμονή της A/Γ στο δίκτυο κατά τη διάρκεια σφάλματος.

Μια πιο απαιτητική εργασία θα αποτελούσε η μελέτη των άλλων δυο στρατηγικών μέγιστης απολαβής ισχύος που χρησιμοποιούνται σε ελεγκτές MPPT. Συγκεκριμένα, θα μπορούσαν να αναπτυχθούν οι αλγόριθμοι P&O ή να χρησιμοποιηθούν fuzzy ελεγκτές οι οποίοι θα οδηγήσουν το σύστημα στο σημείο λειτουργίας όπου αποδίδεται η μέγιστη ισχύς από τον ανεμοκινητήρα. Συγκρίνοντας τις τρεις μεθόδους μεταξύ τους, μπορεί να προκύψει μια πιο καθαρή εικόνα όσον αφορά τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της κάθε μεθόδου.

Τέλος, θα μπορούσε να γίνει βελτιστοποίηση της μοντελοποίησης του αεροδυναμικού μέρους της ανεμογεννήτριας ώστε να λαμβάνεται υπόψη η εμφάνιση ανώτερων αρμονικών στην αεροδυναμική ροπή, που οφείλεται στη μεταβολή της ταχύτητας ανέμου με το ύψος(wind shear) και στο φαινόμενο σκίασης (tower shadow).

Βιβλιογραφία

- [1] Justin Wilkes, Jacopo Moccia, “Wind in power : 2009 European statistics”, The European energy association, February 2010.
- [2] Μιχ. Π. Παπαδόπουλος , “Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας από Ανανεώσιμες πηγές “, Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα 1997.
- [3] Μάριος Β. Ντρέκο, “Ανάλυση Λειτουργίας και Έλεγχος Συστήματος Ανεμογεννήτριας Μεταβλητών Στροφών Διασυνδεδεμένης στο Δίκτυο”, Διπλωματική Εργασία Ε.Μ.Π. Οκτώβριος 2009.
- [4] Σωτήριος Ι. Νάνου, “Μοντέλο Ανεμογεννήτριας με Πλήρη Μετατροπέα για Μελέτες Ευστάθειας”, Διπλωματική Εργασία Ε.Μ.Π. Ιούλιος 2009 .
- [5] Χρήστος Π. Πατσιούρας, “ Τεχνικές Απαιτήσεις Κωδίκων για τη Σύνδεση Μεγάλων Αιολικών Πάρκων στο Σύστημα”, Διπλωματική Εργασία Ε.Μ.Π. Σεπτέμβριος 2007.
- [6] Σταύρος Παπαθανασίου, “Ανανεώσιμες Πηγές ενέργειας”, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα 2008
- [7] Othman B.k Hasnaoui, Jamel Belhadj, Mohamed Elleuch, “Direct Drive PMSG Wind Turbine investigation-Low Voltage Ride Through capability Dynamic behavior in presence of grid disturbance”, Journal of Electrical Systems, August 2008.
- [8] Stauros B. Papaefthimiou, Stavros A. Papathanasiou, “Simulation and Control of a Variable Speed Wind Turbine with Synchronous Generator” Proc. ICEM 2006, Hania, Crete, Sept. 2006.
- [9] N. Mohan, T. Undelend, W. Robbins, “POWER ELECTRONICS Converters, Applications and Design” 3rd Edition, Εκδόσεις Τζιόλα.
- [10] Μαρία Σ. Ρώτα, “ Σύγκριση Κλασσικού και Ελέγχου βασισμένου σε Ασαφή λογική Ανεμογεννήτριας Μόνιμων Μαγνητών”, Διπλωματική Εργασία Ε.Μ.Π. Οκτώβριος 2008.
- [11] Eftichios Koutroulis and Kostas Kalaitzakis, “Design of a Maximum Power Tracking System for Wind-Energy-Conversion Applications”, IEEE Transactions on Industrial Electronics, April 2006.
- [12] Στέφανος Μανιάς, “Ηλεκτρονικά Ισχύος”, 6^η έκδοση, Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα 2007
- [13] Mónica Chinchilla, Santiago Arnaltes, Juan Carlos Burgos, “Control of Permanent-Magnet Generators Applied to Variable-Speed Wind Energy Systems Connected to the Grid”, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol 21, March 2006.
- [14] Mónica Chinchilla, Santiago Arnaltes, Juan Carlos Burgos, J.L. Rodríguez, “Power limits of grid-connected modern wind energy systems” Elsevier, Renewable energy, September 2005.

- [15] M.G. Molina, P.E. Mercado, "An new control strategy of variable speed wind turbine generator for three-phase grid-connected applications", Transmission and distribution Conference and Exposition Latin America, 2008 IEEE/PES
- [16] M.G. Molina, P.E. Mercado, "Control Design and Simulation of DSTACOM with Energy Storage for Power Quality Improvements" Transmission and distribution Conference and Exposition Latin America, 2006 IEEE/PES.
- [17] M.G. Molina, P.E. Mercado, "Modeling of a DSTATCOM with Ultra-Capacitor Energy Storage for Power Distribution System Applications" Transmission and distribution Conference and Exposition Latin America, 2008 IEEE/PES.
- [18] L.M. Fernandez, C.A. Garcia, F. Jurado, "Operating capability as a PQ/PV node of a direct-drive wind turbine based on a permanent magnet synchronous generator" Elsevier, Renewable energy, September 2009.
- [19] M. E. Haque, K. M. Muttaqi, M. Negnevitsky, "Control of a standalone variable speed wind turbine with a permanent magnet synchronous generator", Power and Energy society General Meeting – Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, 2008 IEEE.
- [20] M.B.C. Salles, K. Hameyer, J.R. Cardoso, W Freitas, "Dynamic analysis of wind turbines considering new grid code requirements", 18th International Conference on Electrical Machines, 2008 ICEM.
- [21] Nicholas W. Miller, William W. Price, Juan J. Sanchez-Gasca, "Dynamic modeling of GE 1.5 and 3.6 wind turbine generators" Version 3.0, GE Power Systems, October 2003.
- [22] I. Vechiu, H. Camblong, G. Tapia, B. Dakyo, O. Curea "Control of four leg inverter for hybrid power system applications with unbalanced load", Elsevier, Energy Conversion and Management, December 2006.
- [23] Md. Wasi Uddin, Md. Yiasin Sumon, Rajib Goswami, Md. Rahimul Hasan Asif , K. M. Rahman "Sensorless peak power point tracking system for small scale wind turbine generators", 1st International Conference on the Developments in Renewable Energy Technology (ICDRET), December 2009.
- [24] Xingjia Yao, Changchun Guo and Zuoxia Xing Yan Li, Shu Liu "Variable Speed Wind Turbine Maximum Power Extraction Based on Fuzzy Logic Control", International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics, August 2009.
- [25] Liang Ma, Wang Ran, Trillion Q. Z "Modeling and Control of three-phase Grid-connected Photovoltaic Inverter" 8th IEEE International Conference on control and Automation, Xiamen, China, June 2010.
- [26] Jamal A. Baroudi, Venkata Dinavahi, Andrew M. Knight "A review of power converter topologies for wind generators", Elsevier, Renewable energy, December 2006.

[27] Rotating (D-Q) Transformation and Space Vector Modulation Basic Principles URL:
<http://scholar.lib.vt.edu/theses/available/etd-031899-212402/unrestricted/APPENDIXES.PDF>