

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

**Σχεδιασμός και προσομοίωση της λειτουργίας στο
SIMULINK/MATLAB δίπτερης ανεμογεννήτριας ισχύος
40KW/60KW/80KW**



Σταμάτιος Α. Μπάρδης

Εξεταστική επιτροπή:

Γεώργιος Σταυρακάκης

Κωνσταντίνος Καλαϊτζακης

Αντώνιος Τσικαλάκης

Καθηγητής Π.Κ (Επιβλέπων)

Καθηγητής Π.Κ

Διδάσκων 407 Π.Κ

Χανιά Νοέμβριος 2010

Περίληψη

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

Επιπλέον η κερδοσκοπία δεν μπορεί να κατανοήσει ότι η γη και το περιβάλλον δεν χρειάζονται ισχυρές μεγάλες παραγωγικές μονάδες, αλλά πολλές μικρές παραγωγές, ώστε να μην καταστρέφεται το περιβάλλον.

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται την ανάπτυξη, σχεδίαση και προσομοίωση μιας δίπτερης ανεμογεννήτριας μικρής ισχύος (έως 80 KW) . Η ανεμογεννήτρια είναι εφοδιασμένη με σύγχρονη γεννήτρια μονίμων μαγνητών καθώς η ταχύτητα του ανέμου είναι μεταβαλλόμενη και φυσικά μη προβλέψιμη, έτσι η γεννήτρια θα πρέπει να έχει καλή δυναμική απόκριση σε μεταβολές των σημάτων εντολής ταχύτητας και να προσαρμόζεται γρήγορα και αποτελεσματικά στις νέες συνθήκες λειτουργίας.

Περιγράφονται στην διπλωματική οι λόγοι που οδήγησαν στην αλματώδη ανάπτυξη των ανεμογεννητριών ως ανανεώσιμη πηγή ενέργειας αλλά και τα χαρακτηριστικά της. Εν συνεχεία παρουσιάζονται οι πιο γνωστοί τύποι ανεμογεννητριών ,που χρησιμοποιούν οι σύγχρονοι κατασκευαστές, σε ηλεκτρομηχανολογικό επίπεδο.

Έπειτα παρουσιάζουμε τον τρόπο υλοποίησης του μοντέλου, καθώς και οι έλεγχοι που έχουμε χρησιμοποιήσει για να λειτουργεί σωστά το σύστημα, και τέλος ορισμένα παραδείγματα για να δείξουμε την λειτουργία του.

Ευχαριστίες

Ευχαριστώ θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή της διπλωματικής εργασίας κ. Γεώργιο Σταυρακάκη καθηγητή του Πολυτεχνείου Κρήτης για την ευκαιρία που μου πρόσφερε να ασχοληθώ με την παρούσα διπλωματική εργασία. Η καθοδήγησή του σε όλα τα στάδια εκπόνησης της ήταν πολύτιμη.

Επιπλέον θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Αντώνιο Τσικαλάκη για τις πολύτιμες γνώσεις και υποδείξεις που μου προσέφερε τόσο στην εκπόνηση της εργασίας όσο και στα πλαίσια του μαθήματος Εισαγωγή στην Ενεργειακή Τεχνολογία Ι.

Λέξεις κλειδιά

Ανεμογεννήτριες, Σύγχρονη γεννήτρια μονίμων μαγνητών, ηλεκτρονικοί μετατροπείς ισχύος, έλεγχος ρεύματος, PWM, μεταβλητών στροφών, σύστημα ελέγχου.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ.....	9
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ.....	10
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 : ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	11
1.1 Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας	11
1.2 Αιολική ενέργεια.....	13
1.2.1 Μέση τιμή της ταχύτητας του ανέμου-Χαρακτηριστικά ανέμου.....	13
1.2.2 Κατανομή Πιθανότητας της μέσης τιμής της ταχύτητας του ανέμου-κατανομή Weibull.....	15
1.2.3 Ανατάραξη του αέρα.	16
1.3 Ανεμογεννήτριες.....	17
1.3.1 Ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα.....	17
1.3.2 Ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα.....	17
1.3.3 Παραγωγή ισχύος.....	19
1.3.4 Διάκριση ανεμογεννητριών με βάση το ηλεκτρικό μέρος.....	20
1.3.4.1 Ανεμογεννήτριες σταθερών στροφών με ασύγχρονη γεννήτρια...	21
1.3.4.2 Ανεμογεννήτριες σταθερών στροφών με ασύγχρονη γεννήτρια με μεταβλητή αντίσταση δρομέα.	22
1.3.4.3 Ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών με ασύγχρονη γεννήτρια διπλής τροφοδότησης.....	23
1.3.4.4 Ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών με σύγχρονη γεννήτρια .	24
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 : ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΞΕΤΑΖΟΝΤΑΙ ΓΙΑ ΤΗΝ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ.....	26
2.1 Εισαγωγή	26
2.2 Αεροδυναμική σχεδίαση Α/Γ οριζόντιου άξονα.....	26
2.2.1 Θεωρία δίσκου ενέργειας.....	27
2.3 Σύγχρονη Γεννήτρια Μονίμων Μαγνητών.....	28
2.3.1. Εισαγωγή.....	28
2.3.2. Εξισώσεις Τάσεων – Μετασχηματισμός του Park.....	29
2.3.3 Εξισώσεις Ροπής.....	33
2.3.4 Πλεονεκτήματα - Μειονεκτήματα ΣΓΜΜ	34
2.4 Μετατροπείς Ισχύος	34
2.4.1 Τεχνικές Pulse Width Modulation για τριφασικό μετατροπέα πηγής τάσης.....	35
2.4.2 Παρουσίαση των τεχνικών CC.....	36
2.4.3 Έλεγχος Ρεύματος σε Ζώνη Υστέρησης.....	37

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 : ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΗΣ ΓΕΝΙΚΕΥΜΕΝΗΣ ΔΟΜΗΣ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΚΑΙ ΤΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ	40
3.1 Εισαγωγή	40
3.2 Generator side control	41
3.2.1 Στόχος ελέγχου στην πλευρά της γεννήτριας	42
3.3 Grid Side Control	43
3.3.1 Ελεγκτής ρεύματος.....	44
3.3.2 Έλεγχος της DC τάσης και της ισχύς	44
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 : ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΤΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΤΗΣ Α/Γ ΣΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΤΟΥ MATLAB/SIMULINK	47
4.1 Εισαγωγή	47
4.2 Αεροδυναμική σχεδίαση Α/Γ.....	47
4.3 Λειτουργία και έλεγχος της σύγχρονης γεννήτριας μονίμων μαγνητών.....	50
4.4 Λειτουργία του αντιστροφέα και έλεγχος της Α/Γ στην πλευρά του δικτύου	53
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 : ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΓΓΡΑΦΗΣ ΤΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ.....	55
5.1 Εισαγωγή	55
5.2 Παράδειγμα 1	56
5.3 Παράδειγμα 2.....	60
5.4 Παράδειγμα 3.....	64
5.5 Παράδειγμα 4.....	68
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ.....	73
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	74
Π.1 Μετασχηματισμός Park	74
Π.1.1 Ανάλυση στο ακίνητο πλαίσιο dq0	74
Π.1.2 Ανάλυση στο στρεφόμενο πλαίσιο dq0.....	75
Π.1.3 Ισχύς εκφρασμένη στο dq πλαίσιο	78
Π.2 Σχεδίαση με αντισταθμιστές PID.....	79
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ ΚΑΙ ΑΝΑΦΟΡΕΣ.....	81

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1.1 Ιστόγραμμα και συνάρτηση Weibull για την κατανομή πιθανότητας της ταχύτητας του ανέμου.	15
Σχήμα 1.2 Ανεμογεννήτρια οριζόντιου άξονα.	18
Σχήμα 1.3 Ανεμογεννήτρια κάθετου άξονα.	18
Σχήμα 1.4 Η άτρακτος μιας δίπτερης Α/Γ.	19
Σχήμα 1.5 Διάγραμμα ισχύος συνάρτηση ταχύτητας περιστροφής.	20
Σχήμα 1.6 Διάταξη ανεμογεννήτριας σταθερών στροφών με ασύγχρονη γεννήτρια	21
Σχήμα 1.7 Διάταξη ανεμογεννήτριας σταθερών στροφών με ασύγχρονη γεννήτρια μεταβλητής αντίστασης δρομέα.	23
Σχήμα 1.8 Διάταξη ανεμογεννήτριας μεταβλητών στροφών με ασύγχρονη γεννήτρια διπλής τροφοδότησης.	24
Σχήμα 1.9 Διάταξη ανεμογεννήτριας μεταβλητών στροφών με σύγχρονη γεννήτρια	25
Σχήμα 2.1 Συντελεστές Ισχύος για διάφορους τύπους ανεμοκινητήρων	26
Σχήμα 2.2 Ροϊκός σωλήνας δρομέα Α/Γ	27
Σχήμα 2.3 Διάγραμμα γεννήτριας μονίμων μαγνητών	29
Σχήμα 2.4 Μετασχηματισμός στατικών κυκλωμάτων.	31
Σχήμα 2.5 Ισοδύναμο qd0 κυκλώματα γεννήτριας μονίμων μαγνητών	32
Σχήμα 2.6 Τριφασικός voltage source PWM converter	35
Σχήμα 2.7 PWM open loop voltage control	35
Σχήμα 2.8 PWM closed loop-current control	36
Σχήμα 2.9 Μπλοκ διάγραμμα του current controlled PWM converter	36
Σχήμα 2.10 Μπλοκ ελεγκτή με open loop PWM	37
Σχήμα 2.11 Μπλοκ On-Off ελεγκτή	37
Σχήμα 2.12 Τεχνικές Current Control CC	37
Σχήμα 2.13 Αρχή λειτουργίας ελέγχου ρεύματος σε ζώνη υστέρησης	38
Σχήμα 3.1 Αιολικό σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας με διατάξεις ηλ. Ισχύος	40
Σχήμα 3.2 Μπλοκ διάγραμμα του generator side control	41
Σχήμα 3.3 Μηχανικής ισχύς-ταχύτητας περιστροφής για κάθε ταχύτητα ανέμου	43
Σχήμα 3.4 Μπλοκ διάγραμμα του grid side control	43
Σχήμα 3.5 Έλεγχος ρεύματος της φάσης α με τον έλεγχο υστέρησης	44
Σχήμα 3.6 Έλεγχος ρεύματος της φάσης α με την χρησιμοποίηση φέροντος και PI ελεγκτή. Αν $u_a^* - u_{\Delta} > 0$ τότε $\text{pulse}A1=1$ και αν $u_a^* - u_{\Delta} < 0$ τότε $\text{pulse}A1=0$	44
Σχήμα 3.7 Ροή ενεργού ισχύος κατά τη λειτουργία του μετατροπέα ως αντιστροφέα	45
Σχήμα 3.8 Η DC πλευρά του μετατροπέα	45
Σχήμα 4.1 Αεροδυναμικό μέρος Α/Γ	47
Σχήμα 4.2 Εσωτερική υλοποίηση αεροδυναμικού μέρους	47
Σχήμα 4.3 Γραφική παράσταση όπως μας την δίνει το MATLAB/SIMULINK της μηχανικής ισχύς συναρτήσει της γωνιακής ταχύτητας της γεννήτριας	48
Σχήμα 4.4 Παράμετροι του μπλοκ Wind Turbine	49
Σχήμα 4.5 Γραφική παράσταση συντελεστή ισχύος συναρτήσει του λ και της γωνίας κλίσης β	49
Σχήμα 4.6 Αναπαράσταση της ΣΓΜΜ και του ελέγχου της	50
Σχήμα 4.7 Εσωτερική σχεδίαση της Σύγχρονης Σχεδίασης Μονίμων Μαγνητών	51
Σχήμα 4.8 Παράμετροι της γεννήτριας στην καρτέλα Configuration	51
Σχήμα 4.9 Ηλεκτρικές παράμετροι της γεννήτριας	52
Σχήμα 4.10 Hysteresis Current Control στην πλευρά της γεννήτριας	52
Σχήμα 4.11 αναπαράσταση της σύνδεσης της Α/Γ στο δίκτυο	53
Σχήμα 4.12 Hysteresis Current Control στην πλευρά του δικτύου	54

Σχήμα 4.13 Τριφασικός μετατροπέας πηγής τάσης	54
Σχήμα 5.1 Μηχανική ισχύς συναρτήσει γωνιακής ταχύτητας	56
Σχήμα 5.2 Μηχανική ισχύς ανεμογεννήτριας	56
Σχήμα 5.3 Έλεγχος γωνιακής ταχύτητας	57
Σχήμα 5.4 Έλεγχος DC τάσης	57
Σχήμα 5.5 PWM CC στην πλευρά της γεννήτριας	58
Σχήμα 5.6 PWM CC στην πλευρά του δικτύου	58
Σχήμα 5.7 Ισχύς του φορτίου	58
Σχήμα 5.8 Ισχύς που προσφέρει το δίκτυο	59
Σχήμα 5.9 Ισχύς που προσφέρει η Α/Γ	59
Σχήμα 5.10 Άθροισμα ενεργών & άεργων ισχύων που παρέχει το δίκτυο και η Α/Γ	59
Σχήμα 5.11 Μηχανική ισχύς συναρτήσει γωνιακής ταχύτητας	60
Σχήμα 5.12 Μηχανική ισχύς ανεμογεννήτριας	60
Σχήμα 5.13 Έλεγχος γωνιακής ταχύτητας	61
Σχήμα 5.14 Έλεγχος DC τάσης	61
Σχήμα 5.15 PWM CC στην πλευρά της γεννήτριας	62
Σχήμα 5.16 PWM CC στην πλευρά του δικτύου	62
Σχήμα 5.17 Ισχύς του φορτίου	62
Σχήμα 5.18 Ισχύς που προσφέρει το δίκτυο	63
Σχήμα 5.19 Ισχύς που προσφέρει η Α/Γ	63
Σχήμα 5.20 Άθροισμα ενεργών & άεργων ισχύων που παρέχει το δίκτυο και η Α/Γ	63
Σχήμα 5.21 Μηχανική ισχύς συναρτήσει γωνιακής ταχύτητας	64
Σχήμα 5.22 Μηχανική ισχύς ανεμογεννήτριας	64
Σχήμα 5.23 Έλεγχος γωνιακής ταχύτητας	65
Σχήμα 5.24 Έλεγχος DC τάσης	65
Σχήμα 5.25 PWM CC στην πλευρά της γεννήτριας	66
Σχήμα 5.26 PWM CC στην πλευρά του δικτύου	66
Σχήμα 5.27 Ισχύς του φορτίου	66
Σχήμα 5.28 Ισχύς που προσφέρει το δίκτυο	67
Σχήμα 5.29 Ισχύς που προσφέρει η Α/Γ	67
Σχήμα 5.30 Άθροισμα ενεργών & άεργων ισχύων που παρέχει το δίκτυο και η Α/Γ	67
Σχήμα 5.31 Μηχανική ισχύς συναρτήσει γωνιακής ταχύτητας	68
Σχήμα 5.32 Μηχανική ισχύς ανεμογεννήτριας	69
Σχήμα 5.33 Έλεγχος γωνιακής ταχύτητας	69
Σχήμα 5.34 Έλεγχος DC τάσης	70
Σχήμα 5.35 PWM CC στην πλευρά της γεννήτριας	70
Σχήμα 5.36 PWM CC στην πλευρά του δικτύου	70
Σχήμα 5.37 Ισχύς του φορτίου	71
Σχήμα 5.38 Ισχύς που προσφέρει το δίκτυο	71
Σχήμα 5.39 Ισχύς που προσφέρει η Α/Γ	71
Σχήμα 5.40 Άθροισμα ενεργών & άεργων ισχύων που παρέχει το δίκτυο και η Α/Γ	72
Σχήμα Π.1 Ακίνητο πλαίσιο dq0	74
Σχήμα Π.2 Σύστημα μοναδιαίας τροφοδότησης με PID ελεγκτή	80

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1.1 Πρόβλεψη εγκατεστημένης ισχύς από ΑΠΕ για το τρέχον έτος 2010.	12
Πίνακας 1.2 Πρόβλεψη εγκατεστημένης ισχύς από ΑΠΕ για το έτος 2020.	12
Πίνακας 1.3 Πίνακας υπολογισμού μήκους τραχύτητας ανάλογα με την κατηγορία τραχύτητας.	14
Πίνακας Π.1 Χαρακτηριστικά των ελεγκτών P, I και D	80

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 : ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας

Εδώ και τριάντα περίπου χρόνια παρατηρούμε μια προσπάθεια, κυρίως από τις αναπτυγμένες χώρες, να επενδύουν αρκετούς πόρους, αρκετό χρόνο καθώς και αξιόλογες επιστημονικές έρευνες στον τομέα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Αυτό συμβαίνει λόγω του έντονου προβληματισμού για τη μείωση των αποθεμάτων των συμβατικών μορφών ενέργειας (επικείμενη εξάντληση πετρελαίου σε μερικές δεκαετίες, ενώ έχουν ξεκινήσει αρκετές χώρες να χρησιμοποιούν το φυσικό αέριο), την αύξηση της ρύπανσης του περιβάλλοντος και το φαινόμενο του θερμοκηπίου.

Επομένως οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) καταλαμβάνουν συνεχώς αυξανόμενο μερίδιο στην παγκόσμια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Είναι πλέον αποδεκτό πως για να καλυφθούν οι σύγχρονες ενεργειακές ανάγκες πρέπει να διασφαλισθεί μια πολυμορφία στην ενεργειακή παραγωγή. Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας πρέπει να ξεφύγει από τα καθιερωμένα στάνταρ και τους κλασσικούς τρόπους και να στραφεί σε νέες μεθόδους που θα είναι περισσότερο φιλικόι προς το περιβάλλον και θα εξασφαλίζουν χαμηλό κόστος παραγωγής.

Επίσης οι ΑΠΕ είναι εγχώριες πηγές ενέργειας και συνεισφέρουν στην ενίσχυση της ενεργειακής ανεξαρτητοποίησης και της ασφάλειας του ενεργειακού εφοδιασμού σε εθνικό επίπεδο. Συμβάλλουν και στην αποκέντρωση του ενεργειακού συστήματος εφόσον είναι γεωγραφικά διάσπαρτες και η εκμετάλλευσή τους πρέπει να γίνει στη θέση όπου εμφανίζονται. Έτσι δίνεται η δυνατότητα κάλυψης των ενεργειακών αναγκών σε τοπικό και περιφερειακό επίπεδο, ανακουφίζοντας τα συστήματα υποδομής και μειώνοντας τις απώλειες από τη μεταφορά ενέργειας. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό και για τα οικονομικά οφέλη της εθνικής οικονομίας αφού συχνά μπορούν να βασιστούν σε επενδύσεις μέσα στην ίδια την χώρα, σε αντίθεση με τις αυξημένου κόστους εισαγωγές ενέργειας.

Οι κυριότερες ΑΠΕ που εμφανίζονται σε παγκόσμιο επίπεδο αλλά και στην Ελλάδα είναι η αιολική ενέργεια που προέρχεται από τον άνεμο, η ηλιακή ενέργεια και τα φωτοβολταϊκά συστήματα που προέρχονται από την εκμετάλλευσή του ήλιου, η βιομάζα που προέρχεται από την καύση της βιομάζας και την χρησιμοποίησή της ως καύσιμη ύλη, η γεωθερμική ενέργεια που προέρχεται από την θερμότητα που υπάρχει κάτω από την επιφάνεια της γης, η υδροηλεκτρική ενέργεια που προέρχεται από την πτώση του νερού από κάποιο ύψος, η ενέργεια από την θάλασσα αξιοποιώντας τις παλίρροιες και τα κύματα και τέλος το υδρογόνο και τα στοιχεία καυσίμου όπου εκμεταλλευόμαστε το υδρογόνο, που αποτελεί το πλέον διαδεδομένο στοιχείο στην φύση και τα στοιχεία καυσίμου που παράγουν ηλεκτρική ενέργεια καταναλώνοντας υδρογόνο σαν καύσιμο.

Αξίζει να σημειώσουμε πως οι περισσότερες ΑΠΕ προέρχονται άμεσα ή έμμεσα από τον ήλιο. Πιο συγκεκριμένα για την ηλιακή ενέργεια που προέρχεται από την άμεση εκμετάλλευσή του ήλιου. Ο άνεμος που εκμεταλλεύεται η αιολική ενέργεια προέρχεται από την διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ ισημερινού και πόλων και διαφορά στην προσπίπτουσα ακτινοβολία. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την συνεχή κίνηση αέριων μαζών από τους πόλους προς τον ισημερινό και αντίστροφα. Επιπλέον με την περιστροφή της γης έχουμε την κίνηση των ψυχρών μαζών προς τα Δυτικά και των θερμών σε μεγαλύτερο ύψος προς τα ανατολικά. Ο ήλιος και ο άνεμος βοηθούν στην εξάτμιση του νερού βοηθώντας έμμεσα τις ΑΠΕ που σχετίζονται με τα υδροηλεκτρικά και την ενέργεια από την θάλασσα. Τέλος με τον ήλιο και το νερό, έχουμε βλάστηση και με αυτόν τον τρόπο αναπτύσσεται η ενέργεια από βιομάζα.

Ο στόχος της ευρωπαϊκής Λευκής Χάρτας του 1997 για το περιβάλλον είναι η μεγάλη αύξηση του μεριδίου των ΑΠΕ στη συνολική κατανάλωση ενέργειας για το τρέχον έτος και μέχρι το έτος 2020 . Οι αντίστοιχοι μεμονωμένοι στόχοι για κάθε τύπο ΑΠΕ δίνονται στον Πίνακα 1.1. [1,2,3]

1997 Eurostat	1997 Eurostat	2001 Eurostat	AGR * 1997-2001	Directive Target 2010	AGR * needed 2001-2010
Type of Energy	TWh	TWh	%	TWh	%
Total Renewable Energies	338.3	408.5	4.8	675	5.7
Total Electricity consumption	2,426	2,671	2.4	3,068	1.6
Renewables Share %	13.9	15.3	-	22.1	-

* Annual Growth Rate

Πίνακας 1.1 Πρόβλεψη εγκατεστημένης ισχύς από ΑΠΕ για το τρέχον έτος 2010

Type of energy	1995 Eurostat	2001 Eurostat	AGR * 1995-2001	Projection 2010	AGR * 2001-2010	Projection 2020	AGR * 2010-2020
1. Wind	2.5 GW	17.2 GW	37.9 %	75 GW	17.8 %	180 GW	9.1 %
2. Hydro	87.1 GW	91.7 GW	0.9 %	100 GW	1.0 %	109 GW	0.9 %
3. Photovoltaics	0.04 GWp	0.26 GWp	36.6 %	3GWp	31.2 %	35 GWp	27.8 %
4. Biomass	6.1 GWe	8.7 GWe	6.1 %	27 GWe	13.4 %	54 GWe	7.1 %
5. Geothermal	0.5 GW	0.65 GW	4.5 %	1 GW	4.9 %	2 GW	7.1 %

Πίνακας 1.2 Πρόβλεψη εγκατεστημένης ισχύς από ΑΠΕ για το έτος 2020

Έχουν γίνει αρκετές μελέτες σχετικά με το θέμα της παρούσας διπλωματικής εργασίας, όπως παρουσιάζονται στο τέλος της εργασίας στην βιβλιογραφία, που αφορούν κυρίως μοντελοποίηση τρίπτερης ανεμογεννήτριας τόσο με σύγχρονη γεννήτρια όσο και ασύγχρονη γεννήτρια διπλής επαγωγής που αναλύουμε παρακάτω. Επίσης έχει γίνει και σχετική μελέτη αναφορικά με τον τρόπο ελέγχου της. Στην εργασία μας θα παρουσιάσουμε την προσομοίωση μιας δίπτερης ανεμογεννήτριας μικρής ισχύος.

1.2 Αιολική ενέργεια

Ο άνεμος, από μακρό-μετεωρολογική άποψη, είναι η κίνηση αερίων μαζών στην ατμόσφαιρα. Αυτή η κίνηση προκύπτει κυρίως από διαφορές της θερμοκρασίας στην ατμόσφαιρα, οι οποίες οφείλονται στην διαφοροποίηση της θέρμανσης από τον ήλιο. Η ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας της γης που απορροφάται από τον ήλιο διαφοροποιείται ανάλογα με το γεωγραφικό πλάτος, έτσι δημιουργούνται θερμοκρασιακές διαφορές και κατά συνέπεια βάρυνση της πίεσης, η οποία μαζί με την κεντρομόλο και την δύναμη Coriolis, που σχετίζονται με την περιστροφή της γης, προκαλούν την κίνηση των αερίων μαζών

Η χαμηλότερη περιοχή της ατμόσφαιρας, στην οποία βρίσκονται και οι περισσότερες κατασκευές, ονομάζεται ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα. Σε αυτό, η κίνηση του αέρα επιβραδύνεται από δυνάμεις τριβής και μεγάλα εμπόδια στην επιφάνεια της γης καθώς και από φαινόμενα που οφείλονται στον στροβιλισμό. Ο στροβιλισμός, ο οποίος μπορεί να είναι μηχανικής ή και θερμικής προέλευσης, προκαλεί απότομες μεταβολές στην ταχύτητα του ανέμου σε ένα μεγάλο εύρος συχνοτήτων και πλατών, γνωστές ως ριπές.

1.2.1 Μέση τιμή της ταχύτητας του ανέμου-Χαρακτηριστικά ανέμου.

Προκειμένου να διαχωριστούν οι μεταβολές της ταχύτητας του ανέμου που οφείλονται στον στροβιλισμό από τις πιο αργές, που οφείλονται σε μακρομετεωρολογικά φαινόμενα, χρησιμοποιείται το μέγεθος της μέσης τιμής της ταχύτητας του ανέμου, $\bar{V}$, που δίνεται από την εξίσωση :

$$\bar{V} = \frac{1}{T} * \int_{t_0}^{t_0+T} v(t) dt$$

Όπου, $v(t)$ η στιγμιαία τιμή της ταχύτητας του ανέμου και T το χρονικό διάστημα στο οποίο γίνεται η ολοκλήρωση ώστε να υπολογιστεί η μέση τιμή.

Όπως προαναφέρθηκε, ο άνεμος στο ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα επιβραδύνεται από την τραχύτητα του εδάφους. Τα χαμηλότερα στρώματα του αέρα επιβραδύνουν στην συνέχεια αυτά που βρίσκονται πάνω από αυτά και έτσι οδηγούμαστε σε μια διαφοροποίηση της μέσης τιμής της ταχύτητας του ανέμου με το ύψος. Οι συνηθέστερες εξισώσεις που περιγράφουν την μέση τιμή της ταχύτητας του ανέμου συναρτήσει του ύψους στο ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα, $V(z)$, είναι οι ακόλουθες :

Εκθετική διανομή :

$$V(z) = V_r \left(\frac{z}{z_r} \right)^a$$

Όπου,

z το ύψος από την επιφάνεια του εδάφους

V_r η μέση τιμή της ταχύτητας του ανέμου στο ύψος αναφοράς z_r

a ο εκθέτης Hellman, που εξαρτάται από την τραχύτητα της επιφάνειας του Εδάφους και δίνεται από τη σχέση :

$$a = \frac{0.37 - 0.88 * \ln(V(z_1))}{1 - 0.088 * \ln\left(\frac{z_1}{10}\right)}, \quad 0.08 \leq a \leq 0.45$$

Λογαριθμική διανομή :

$$\frac{V(z)}{V(z_1)} = \frac{\ln((z - z^*) / z_0)}{\ln((z_1 - z^*) / z_0)}$$

Όπου,

z το ύψος από το έδαφος

z_1 το ύψος αναφοράς

z_0 το μήκος τραχύτητας της περιοχής

z^* το ύψος μετατόπισης μηδενικού σημείου (συνήθως $z^* = 0$)

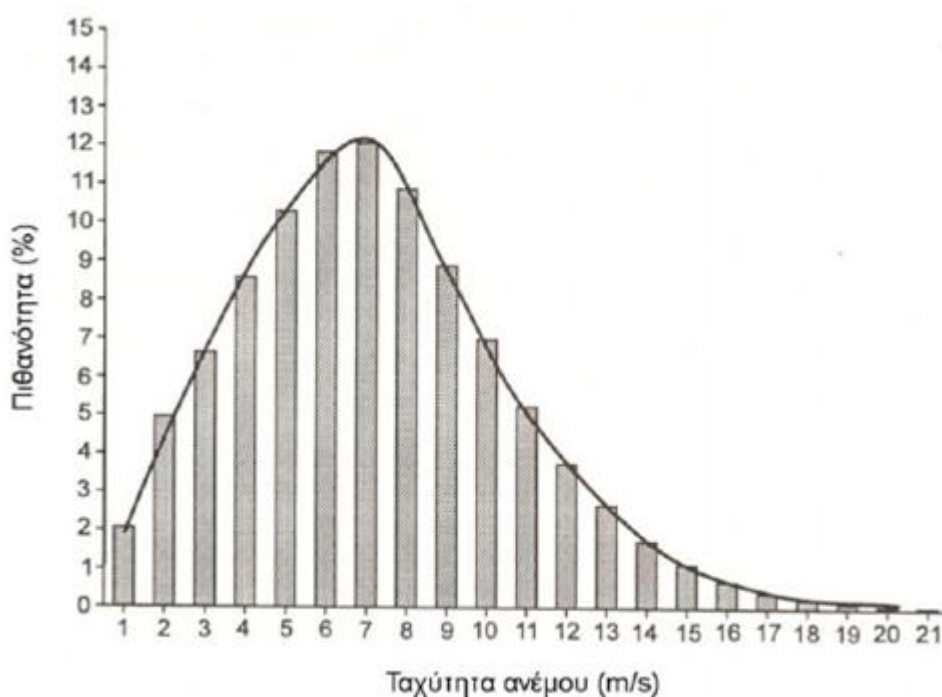
Η τυπική τιμή της παραμέτρου z_0 δίνεται από τον κάτωθι πίνακα:

Πίνακας 1.3 Πίνακας υπολογισμού μήκους τραχύτητας ανάλογα με την κατηγορία τραχύτητας.

Κατηγορία Τραχύτητας	Τύπος Εδάφους	Μήκος τραχύτητας (m)
0	Πηλώδες, Πάγος	10^{-5} - $3*10^{-5}$
0	Ήρεμη θάλασσα	$2*10^{-4}$ - $3*10^{-4}$
0	Αμμώδες	10^{-4} - 10^{-3}
0	χιονοκαλυμμένο επίπεδο έδαφος	$4.9*10^{-3}$
1	Χερσαίο	10^{-3} -0.01
1	Χλορέο	0.017
1	Επίπεδο ακαλλιέργητο	0.021
2	Χαμηλή βλάστης, Στέπα	0.032
2	Υψηλά χόρτα	0.039
2	Σιτοβολώνες	0.045
2	Καλλιέργειες	0.064
2	Θαμνώδες έδαφος	0.1-0.3
2	Δάση με χαμηλά δέντρα	0.05-0.1
3	Δάση με υψηλά δέντρα	0.2-0.9
3	Προαστιακές περιοχές	1-2
3	Πόλεις	1-4

1.2.2 Κατανομή Πιθανότητας της μέσης τιμής της ταχύτητας του ανέμου-κατανομή Weibull.

Ένα τυπικό ιστόγραμμα της μέσης τιμής της ταχύτητας του ανέμου φαίνεται στο Σχ. 2.1. Ένα τέτοιο ιστόγραμμα προκύπτει από την καταγραφή δεδομένων αρκετών ετών και εκφράζει πιθανότητα ή το κλάσμα του χρόνου, όπου η ταχύτητα του ανέμου ανήκει στο διάστημα που δίνεται από το πλάτος των στηλών. Στο ιστόγραμμα του Σχ. 2.1 τα δεδομένα παρουσιάζονται με βήμα 1m/s. Το άθροισμα του ύψους των στηλών είναι ίσο με 1 ή 100%. Εάν το πλάτος των στηλών γίνει μεγαλύτερο, το ιστόγραμμα γίνεται μια συνεχής συνάρτηση του χρόνου, η οποία ονομάζεται συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας.



Σχήμα 1.1 Ιστόγραμμα και συνάρτηση Weibull για την κατανομή πιθανότητας της ταχύτητας του ανέμου.

Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας μπορεί να προσεγγισθεί με τη κατανομή Weibull, που δίνεται από την εξίσωση :

$$P(V) = \frac{k}{c} * \left(\frac{V}{c} \right)^{k-1} * e^{-\left(\frac{V}{c} \right)^k}$$

Όπου,

$P(V)$ η συχνότητα εμφάνισης της ταχύτητας ανέμου V

c παράμετρος κλίμακας

k παράμετρος σχήματος ($1 < k < 3$)

1.2.3 Ανατάραξη του αέρα.

Η ανατάραξη του αέρα, μπορεί να ορισθεί σαν η "διακύμανσή" του γύρω από την μέση τιμή:

$$V'(t) = V(t) - \bar{V}$$

Η διακύμανση της ταχύτητας του αέρα γύρω από την μέση τιμή, μπορεί να περιγραφεί από την διακύμανση σ_v^2 και ορίζεται ως :

$$[V'(t)]^2 = \sigma_v^2 = \frac{1}{T} * \int [V(t) - \bar{V}]^2 dt, \quad \text{για } T = 10 \text{ min}$$

Μέτρο της μεταβλητότητας της ανατάραξης αποτελεί η έντασή της I και ορίζεται :

$$I = \frac{\sigma_v}{\bar{V}}$$

Όπου, σ_v τυπική απόκλιση.

Η παραπάνω αποτελεί, την πειραματική τιμή της έντασης της ανατάραξης. Μπορεί επίσης να προσδιοριστεί και θεωρητικά με τον εξής τύπο :

$$I = \begin{cases} \frac{1}{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)}, z \leq 0.2m \\ \frac{0.78 - 0.14 * \ln(z_0)}{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)}, z > 0.2m \end{cases}$$

Όπου,

z_0 είναι η τοπική τραχύτητα της περιοχής
 z το ύψος από το έδαφος

Μέσα στο ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα σε σταθερό ύψος από το έδαφος, η μεταβλητότητα γενικά αυξάνεται όσο αυξάνεται η ταχύτητα του ανέμου. Παρόλα αυτά, καθώς η μεταβλητότητα μεταβάλλεται λιγότερο έντονα με το ύψος από το έδαφος απ' ότι η μέση τιμή της ταχύτητας του ανέμου, η ένταση της ανατάραξης συνήθως μικραίνει όσο αυξάνεται το ύψος.[1,2]

1.3 Ανεμογεννήτριες

Οι αιολικές μηχανές είναι κατασκευές επινοημένες από τον άνθρωπο, με σκοπό την εκμετάλλευση της κινητικής ενέργειας του ανέμου, μέρος της οποίας μετατρέπουν σε στρεφόμενη μηχανική ενέργεια. Εάν η μηχανική ενέργεια χρησιμοποιηθεί απευθείας με κατάλληλο μηχανισμό για άντληση ή άλεση τότε η αιολική μηχανή συνήθως λέγεται ανεμόμυλος. Εάν η μηχανική ενέργεια μετατραπεί σε ηλεκτρική τότε η μηχανή λέγεται ανεμογεννήτρια (Α/Γ). Στην παρούσα εργασία θα μελετήσουμε τις ανεμογεννήτριες δυο πτερυγίων εφοδιασμένες με γεννήτρια μονίμων μαγνητών για ισχύ εύρους από 20KW έως 100KW. Θα εξηγήσουμε παρακάτω πως δουλεύει αυτή η γεννήτρια.

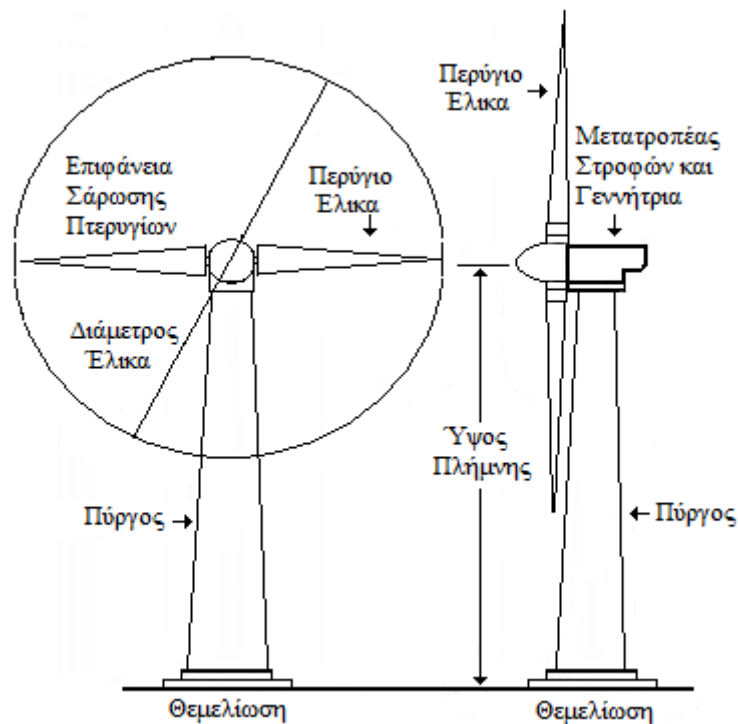
Οι ανεμογεννήτριες μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σύμφωνα με τον προσανατολισμό του άξονά τους σε σχέση με τη ροή του ανέμου, σε **Α/Γ κατακόρυφου άξονα** και σε **Α/Γ οριζόντιου άξονα**.

1.3.1 Ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα

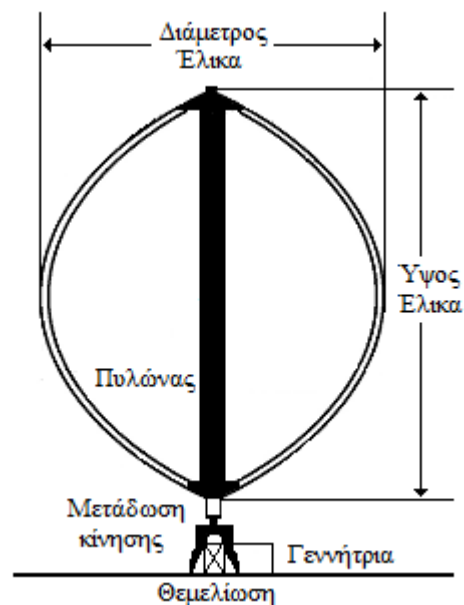
Ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα ονομάζονται οι ανεμογεννήτριες οι οποίες περιστρέφονται γύρω από έναν άξονα οριζόντιο ως προς το επίπεδο του εδάφους. Στο Σχήμα 1.1 παρουσιάζεται ένα τυπικό παράδειγμα ανεμογεννήτριας αυτού του είδους. Οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα πρέπει να διαθέτουν σύστημα προσανατολισμού ως προς την κατεύθυνση του ανέμου. Με την χρήση αυτού του συστήματος ανά πάσα στιγμή η επιφάνεια σάρωσης των πτερυγίων της ανεμογεννήτριας είναι κάθετη στην κατεύθυνση του ανέμου με αποτέλεσμα να επιτυγχάνεται η μετάδοση κίνησης στον άξονα περιστροφής. Αυτό το είδος ανεμογεννήτριας είναι το πιο διαδεδομένο και εμφανίζεται σε πολλές κατηγορίες ανάλογα με τον αριθμό των φτερών(μονόπτερη, δίπτερη, τρίπτερη και πολύπτερη). Παρουσιάζουν υψηλό αεροδυναμικό συντελεστή, και γενικά μπορούν να δώσουν μεγάλες τιμές ισχύος στην έξοδο τους(από μερικά Watt μέχρι κάποια MW). Το μειονέκτημα είναι πως το κόστος κατασκευής και συντήρησης είναι αρκετά δαπανηρό. Επίσης η ανεμογεννήτρια που θα μελετήσουμε στην παρούσα εργασία θα είναι δίπτερη Α/Γ οριζόντιου άξονα.

1.3.2 Ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα

Ανεμογεννήτριες κάθετου άξονα ονομάζονται οι ανεμογεννήτριες οι οποίες περιστρέφονται γύρω από έναν άξονα κάθετος προς το επίπεδο του εδάφους. Στο Σχήμα 1.2 παρουσιάζεται ένα τυπικό παράδειγμα ανεμογεννήτριας αυτού του είδους. Στις ανεμογεννήτριες κάθετου άξονα δεν χρειάζεται σύστημα προσανατολισμού ως προς την κατεύθυνση του ανέμου γιατί οι ανεμογεννήτριες αυτές από τον τρόπο κατασκευής τους μπορούν να περιστρέφονται με ανέμους κάθε κατεύθυνσης. Ένα άλλο πλεονέκτημα είναι πως το κιβώτιο ταχυτήτων και η γεννήτρια μπορούν να τοποθετηθούν κοντά στο έδαφος, έτσι είναι εύκολα προσβάσιμα και δεν χρειάζεται πυλώνας στήριξης. Τα μειονεκτήματα είναι πως η ταχύτητα του ανέμου στο επίπεδο του εδάφους είναι χαμηλή και ως εκ τούτου δεν έχουν υψηλή απόδοση. Επίσης η ροπή εκκίνησής τους είναι χαμηλή και δεν εκκινούν μόνες τους (χρειάζονται να λειτουργήσουν σαν κινητήρες στην αρχή παίρνοντας ρεύμα από το δίκτυο).



Σχήμα 1.2 Ανεμογεννήτρια οριζόντιου άξονα.



Σχήμα 1.3 Ανεμογεννήτρια κάθετου άξονα.

Στο σχήμα 1.1 βλέπουμε τα βασικά δομικά στοιχεία μιας Α/Γ οριζόντιου άξονα (πύργος, δρομέας, η άτρακτος όπου υπάρχουν τα συστήματα προσανατολισμού και πέδησης, το κιβώτιο ταχυτήτων αν υπάρχει, και η γεννήτρια). Στο σχήμα 1.3 φαίνονται με μεγαλύτερη λεπτομέρεια τα διάφορα δομικά στοιχεία της ατράκτου μιας Α/Γ. Σε αυτό βλέπουμε ότι η Α/Γ αποτελείται από τα δύο πτερύγια του ρότορα (1), την πλήμνη του ρότορα (2), το τροφοδοτικό αξονικών εμβολοφόρων αντλιών (3a), το μέρος που επιτυγχάνεται το yawing control (3b), το μέρος που επιτυγχάνεται ο έλεγχος βήματος των πτερυγίων (3c), τα φρένα (3d), ο περιορισμός ροπής

στρέψεων(3e), το κιβώτιο ταχυτήτων όπου αν η γεννήτρια είναι μονίμων μαγνητών δεν θα υπάρξει(4), η γεννήτρια(5) και ο πύργος(6).



Σχήμα 1.4 Η άτρακτος μιας δίπτερης Α/Γ.

1.3.3 Παραγωγή ισχύος

Όπως συμβαίνει με όλα τα συστήματα μετατροπής ενέργειας η Α/Γ δεσμεύει ένα μέρος της κινητικής ενέργειας του ανέμου. Το κλάσμα :

$$C_p = \frac{P_{mech}}{P_{wind}}$$

δείχνει το μέρος της ισχύος του ανέμου (P_{wind}) που μετατρέπεται από την Α/Γ σε μηχανική (P_{mech}). Το κλάσμα αυτό λέγεται αεροδυναμικός συντελεστής ισχύος και συμβολίζεται με C_p . Η εξίσωση της αεροδυναμικής μετατροπής ισχύος μιας Α/Γ (P_{mech}) δίνεται από την εξίσωση :

$$P_{mech} = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 C_p V_w^3 \eta$$

Όπου ,

ρ είναι η πυκνότητα του αέρα που είναι εγκατεστημένη η Α/Γ

R είναι η ακτίνα της πτερωτής

V_w είναι η ταχύτητα του ανέμου

η είναι η απόδοση της Α/Γ , μπορεί να θεωρηθεί και ίσο με τη μονάδα

C_p είναι ο συντελεστής ισχύος και είναι συνάρτηση των λ, β , $C_p(\lambda, \beta)$

Και λ είναι ο λόγος ταχύτητας ακροπτερυγίου (tip speed ratio)

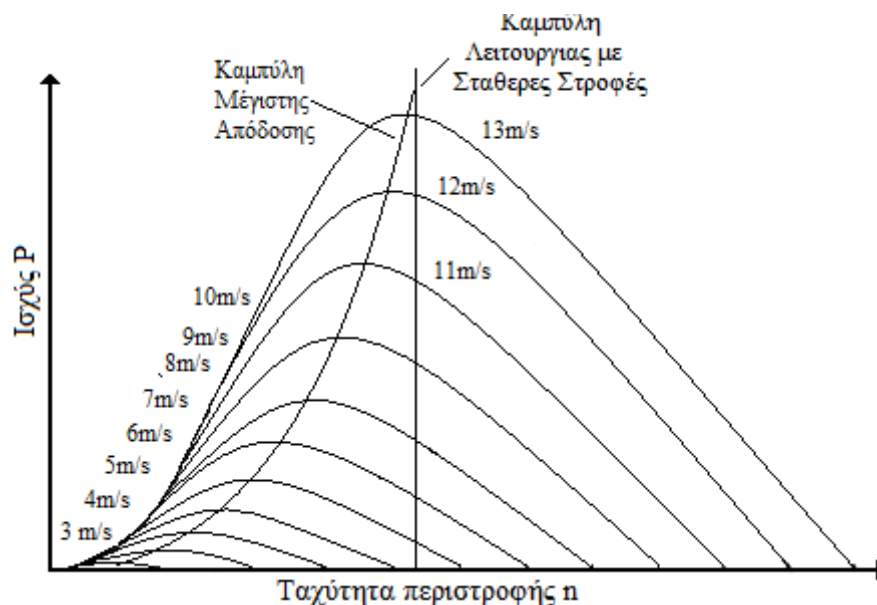
$$\lambda = \frac{\omega * R}{V_w}$$

ω η γωνιακή ταχύτητα του ρότορα.

$$\omega = \frac{2 * \pi * n}{60}$$

Η μέγιστη τιμή που μπορεί να λάβει ο αεροδυναμικός συντελεστής ισχύος C_p ορίζεται από το όριο του Betz και είναι ίση με 59%. Αυτό το όριο εκφράζει την μέγιστη δυνατή ισχύ που μπορεί να δεσμεύσει μια ανεμογεννήτρια από την μέγιστη διαθέσιμη αιολική ισχύ.

Η γωνιακή ταχύτητα ω δίνεται από τον παραπάνω τύπο όπου n ταχύτητα περιστροφής σε στροφές ανά λεπτό (RPM). Έτσι ο C_p μπορεί να εκφραστεί σαν συνάρτηση και των στροφών της μηχανής. Κατ' επέκταση η προσλαμβανόμενη από την ανεμογεννήτρια ισχύς μπορεί να παρουσιαστεί συνάρτηση της ταχύτητας περιστροφής για δεδομένη ταχύτητα ανέμου. Αυτό φαίνεται στο Σχήμα 1.4. Σε αυτό το σχήμα αν ενωθούν όλα τα σημεία στα οποία η ισχύς μεγιστοποιείται δηλαδή τα σημεία στο οποία ο μεγιστοποιείται ο C_p προκύπτει η καμπύλη μέγιστης απόδοσης της ανεμογεννήτριας.[2,6,12]



Σχήμα 1.5 Διάγραμμα ισχύος συνάρτηση ταχύτητας περιστροφής.

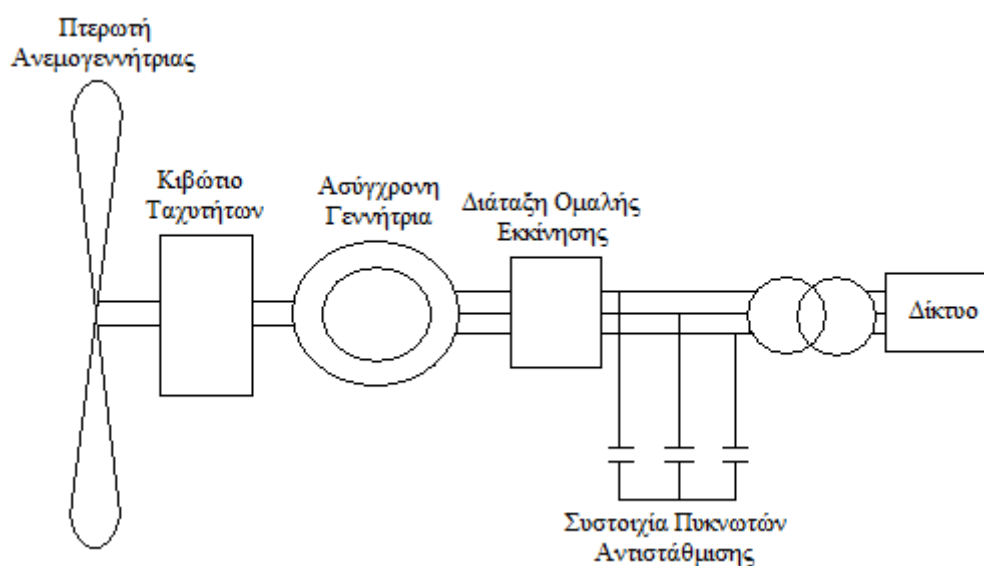
1.3.4 Διάκριση ανεμογεννητριών με βάση το ηλεκτρικό μέρος

Οι Α/Γ σήμερα χωρίζονται κυρίως σε μεταβλητών και σταθερών στροφών αναφορικά με την χρήση ή όχι ηλεκτρικών μετατροπέων. Σε αντίθεση με τις Α/Γ σταθερών στροφών που συνδέονται απ' ευθείας στο δίκτυο, οι Α/Γ μεταβλητών στροφών χρησιμοποιούν διατάξεις ηλεκτρονικών ισχύος για την σύνδεσή τους. Τα δύο προαναφερθέντα είδη Α/Γ έχουν το καθένα τα μειονεκτήματα και τα πλεονεκτήματά του.

1.3.4.1 Ανεμογεννήτριες σταθερών στροφών με ασύγχρονη γεννήτρια

Οι ανεμογεννήτριες αυτές ονομάζονται σταθερών στροφών γιατί ο ρομέας της ανεμογεννήτριας στρέφεται με σταθερό αριθμό στροφών ανεξάρτητα της ταχύτητας του ανέμου. Η ταχύτητα περιστροφής είναι πολύ κοντά στην σύγχρονη, συγκεκριμένα η ολίσθηση είναι μόνο 1% έως 2%. Για να επιτευχθεί αυτό η πτερωτή και ο ρομέας της γεννήτριας συνδέονται μέσω ενός κιβωτίου ταχυτήτων το οποίο αυξάνει την ταχύτητα περιστροφής και μειώνει την ροπή ανάλογα με την αναλογία στροφών. Επίσης χρησιμοποιείται αεροδυναμικός έλεγχος ροπής του ρομέα τύπου stall. Όμως υπάρχουν και μοντέλα με δυνατότητα ελέγχου βήματος των πτερυγίων τύπου pitch. Επίσης η γεννήτρια που χρησιμοποιούν οι μηχανές αυτού του είδους είναι ασύγχρονη συνήθως τύπου κλωβού (Squirrel Cage Induction Generator, SCIG).

Η λειτουργία σταθερών στροφών επιτρέπει την απευθείας σύνδεση αυτών των ανεμογεννητριών στο δίκτυο. Όμως για τον περιορισμό των μεταβατικών φαινομένων που παρουσιάζονται κατά την ζεύξη είναι απαραίτητη η ύπαρξη διάταξης ομαλής εκκίνησης (stall-starter). Επίσης λόγω του ότι οι ασύγχρονες γεννήτριες απορροφούν μεγάλα ποσά άεργου ισχύος από το δίκτυο για την εγκατάσταση του απαραίτητου μαγνητικού πεδίου ο συντελεστής ισχύος που διαμορφώνεται υπό ονομαστικές συνθήκες λειτουργίας είναι περίπου 0.9. Έτσι είναι αναγκαία εγκατάσταση συστοιχίας πυκνωτών αντιστάθμισης στην έξοδο της γεννήτριας. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται διόρθωση του συντελεστή ισχύος σε τιμές μεγαλύτερες του 0.95 επαγωγικό. Στο Σχήμα 1.6 παρουσιάζεται η διάταξη μια ανεμογεννήτριας αυτού του τύπου.



Σχήμα 1.6 Διάταξη ανεμογεννήτριας σταθερών στροφών με ασύγχρονη γεννήτρια.

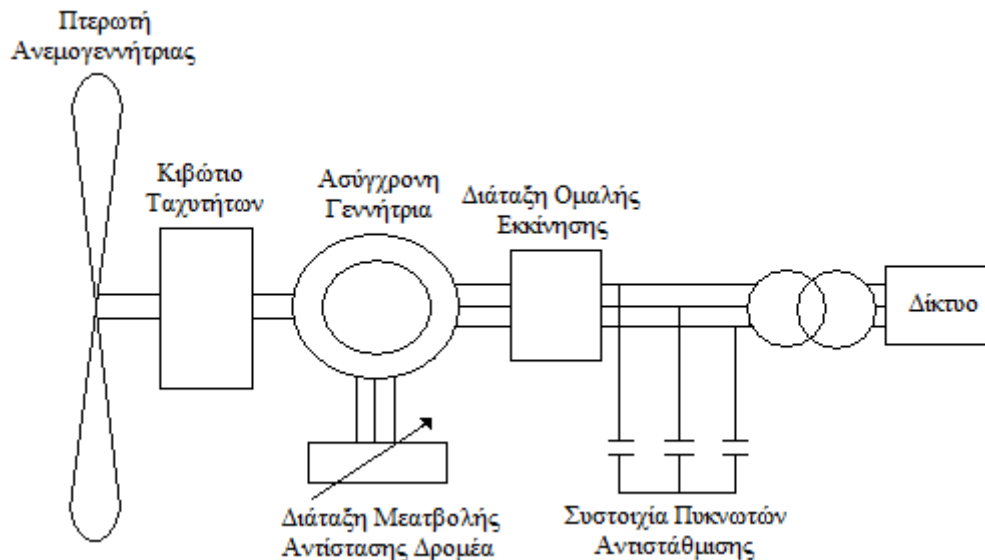
Για βελτίωση της απόδοσης και χαμηλότερο θόρυβο σε μικρές ταχύτητες ανέμου μπορούν να χρησιμοποιηθούν ασύγχρονες γεννήτριες δύο ταχυτήτων. Σε αυτές τις περιπτώσεις ο ανεμοκινητήρας συνδέεται σε δύο ασύγχρονες γεννήτριες, μια μικρή και μια μεγάλη, μέσω κιβωτίου ταχυτήτων. Η μικρή γεννήτρια έχει χαμηλό σύγχρονο αριθμό στροφών και η μεγάλη γεννήτρια έχει μεγαλύτερο σύγχρονο αριθμό στροφών. Σε αυτά τα συστήματα είναι δυνατόν να υπάρχει μια γεννήτρια με δύο τυλίγματα όπου το κάθε τύλιγμα διαθέτει διαφορετικό αριθμό πόλων.

Οι ανεμογεννήτριες σταθερών στροφών με ασύγχρονη γεννήτρια χαρακτηρίζονται από πολλά πλεονεκτήματα. Το σημαντικότερο πλεονέκτημα είναι η απευθείας σύνδεση τους στο δίκτυο χωρίς την χρήση ηλεκτρονικών ισχύος. Χάρης αυτό οι ανεμογεννήτριες αυτές χαρακτηρίζονται από απλότητα, χαμηλά έξοδα συντήρησης και μικρό κόστος. Επίσης το βάρος είναι μικρότερο σε σχέση με του άλλους τύπους. Ακόμα αυτές οι ανεμογεννήτριες χαρακτηρίζονται από στιβαρότητα στην κατασκευή τους και από αξιοπιστία κατά την λειτουργία τους. Τα πλεονεκτήματα αυτά ανέδειξαν αυτές τις ανεμογεννήτριες ως τον πιο διαδεδομένο τύπο ανεμογεννήτριας στην περασμένη δεκαετία. Ακόμα και σήμερα αντιπροσωπεύουν σημαντικό ποσοστό της εγκατεστημένης ισχύος.

Επίσης οι ανεμογεννήτριες σταθερών στροφών με ασύγχρονη γεννήτρια χαρακτηρίζονται και από σημαντικά μειονεκτήματα. Ένα από τα πιο σημαντικά μειονεκτήματα είναι ότι επειδή χρησιμοποιούνται ασύγχρονες μηχανές η ζήτηση σε άεργο ισχύ από το δίκτυο είναι μεγάλη με αποτέλεσμα αναπτύσσεται μικρός συντελεστής ισχύος. Ακόμα στις ανεμογεννήτριες αυτού του είδους εμφανίζεται αυξημένη μεταβλητότητα στην ισχύ εξόδου. Αυτό γίνεται γιατί διατηρώντας σταθερή ταχύτητα δεν μπορούν να απορροφηθούν οι διακυμάνσεις της ισχύος του ανέμου. Ακόμα ο έλεγχος της ισχύος εξόδου είναι σημαντικά αργός αφού η μοναδική δυνατότητα ελέγχου βασίζεται στη ρύθμιση των πτερυγίων της πτερωτής που μπορεί να πραγματοποιηθεί παθητικά (stall) ή ενεργητικά (pitch). Ακόμα ένα μειονέκτημα είναι ότι αναπτύσσονται σημαντικά μεταβατικά φαινόμενα κατά την διαδικασία της ζεύξης και απόζευξης.

1.3.4.2 Ανεμογεννήτριες σταθερών στροφών με ασύγχρονη γεννήτρια με μεταβλητή αντίσταση δρομέα.

Πρόκειται για μια παραλλαγή του είδους ανεμογεννήτριας που περιγράφηκε στην παράγραφο 1.3.4.1. Το είδος γεννήτριας που χρησιμοποιείτε σε αυτές τις περιπτώσεις είναι ασύγχρονη γεννήτρια τυλιγμένου δρομέα (Wound Rotor Induction Generator, WRIG). Η ιδιαιτερότητα αυτού του τύπου είναι ότι χρησιμοποιούνται διατάξεις ηλεκτρονικών ισχύος για την μεταβολή της αντίστασης του δρομέα της γεννήτριας. Στο Σχήμα 1.7 παρουσιάζεται η διάταξη αυτού του τύπου. Αυτό αποτελεί το σημαντικότερο πλεονέκτημα αυτού του τύπου καθώς έτσι μπορεί να μεταβληθεί η ταχύτητα περιστροφής από -10% έως 10%. Με αυτόν τον τρόπο σε περιπτώσεις ριπών ανέμου, όπου η ταχύτητα του ανέμου μπορεί να είναι έως και 5m/s μεγαλύτερη από τα συνηθισμένα επίπεδα ανέμου, μπορεί να επιτευχθεί βελτίωση της παραγόμενης ισχύος και να μειωθεί η μηχανική φόρτιση της μηχανής. Τέλος ο έλεγχος των πτερυγίων γίνεται με σύστημα μεταβολής της κλίσης των πτερυγίων (pitch).



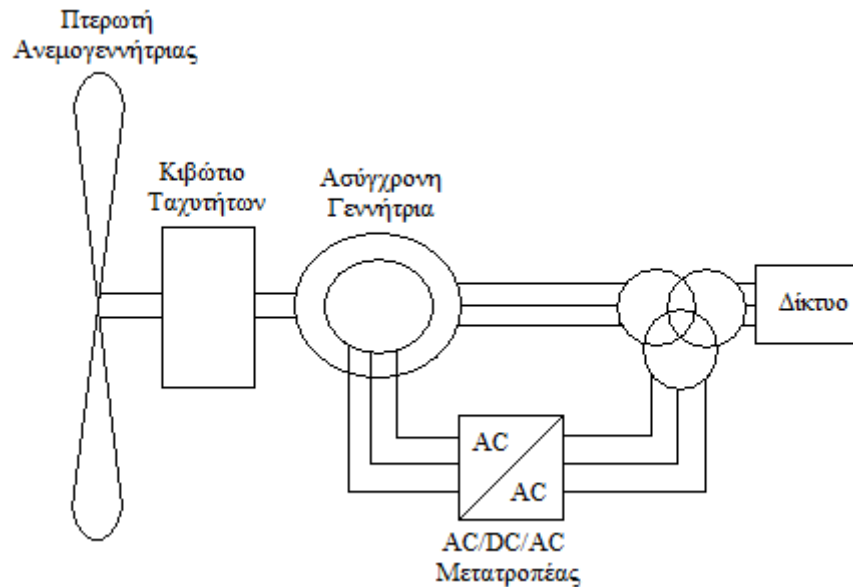
Σχήμα 1.7 Διάταξη ανεμογεννήτριας σταθερών στροφών με ασύγχρονη γεννήτρια μεταβλητής αντίστασης δρομέα.

1.3.4.3 Ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών με ασύγχρονη γεννήτρια διπλής τροφοδότησης

Αυτό το είδος ανεμογεννήτριας χρησιμοποιεί ασύγχρονη γεννήτρια τυλιγμένου δρομέα στην οποία τόσο ο στάτης όσο και ο δρομέας συνδέονται στο δίκτυο. Ο στάτης συνδέεται απευθείας, όπως στις κλασικές ανεμογεννήτριες σταθερών στροφών με ασύγχρονη γεννήτρια. Αντίθετα ο δρομέας συνδέεται μέσω ψηκτρών και ενός μετατροπέα AC/DC/AC. Στο Σχήμα 1.8 παρουσιάζεται η διάταξη μια ανεμογεννήτριας αυτού του τύπου. Χάρis σε αυτό το σύστημα, η γεννήτρια μπορεί να μεταβάλει την ταχύτητα περιστροφής από -30% έως +30% σε σχέση με την σύγχρονη ταχύτητα περιστροφής. Ο έλεγχος της ταχύτητας περιστροφής του δρομέα σε ταχύτητες ανέμου μικρότερες της ονομαστικής πραγματοποιείται έμμεσα, μέσω του ελέγχου ροπής της γεννήτριας. Σε υψηλότερες ταχύτητες ανέμου, η ισχύς της γεννήτριας διατηρείται στην ονομαστική της τιμή και ο έλεγχος της ταχύτητας περιστροφής γίνεται από το σύστημα μεταβολής της κλίσης των πτερυγίων (pitch).

Το πιο σημαντικό πλεονέκτημα αυτού του συστήματος είναι πώς ο αντιστροφέας που χρησιμοποιείται δεν χρειάζεται πάνω από το 30% της ονομαστικής ισχύος της ανεμογεννήτριας. Αυτό συνεπάγεται μεγάλη μείωση του κόστους και των απωλειών ενέργειας. Ένα άλλο σημαντικό πλεονέκτημα είναι το ότι με την χρήση ανεμογεννητριών αυτού του είδους επιτυγχάνεται βελτιωμένη ενεργειακή απόδοση και μειώνεται η μεταβλητότητα της ισχύος εξόδου. Τα πλεονεκτήματα αυτά είναι ο λόγος για τον οποίο αυτές οι ανεμογεννήτριες αντιπροσωπεύουν ένα σημαντικό κομμάτι της εγκατεστημένης ισχύς στις μέρες μας.

Το σημαντικότερο μειονέκτημα αυτού του τύπου ανεμογεννήτριας είναι πως λόγω της χρήσης ηλεκτρονικών ισχύος στην διάταξη της αυξάνεται σε μεγάλο βαθμό η πολυπλοκότητα που την χαρακτηρίζει.



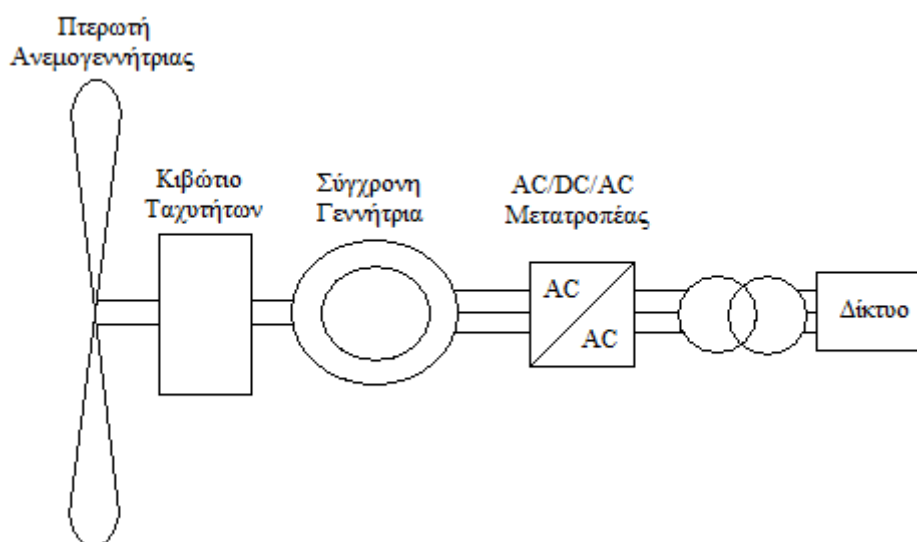
Σχήμα 1.8 Διάταξη ανεμογεννήτριας μεταβλητών στροφών με ασύγχρονη γεννήτρια διπλής τροφοδότησης.

1.3.4.4 Ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών με σύγχρονη γεννήτρια

Για τις ανεμογεννήτριες αυτού του τύπου χρησιμοποιείται σύγχρονη γεννήτρια. Ο στάτης αυτής της γεννήτριας συνδέεται στο δίκτυο μέσω AC/DC/AC μετατροπέα. Ο μετατροπέας αυτός μπορεί να διαμορφώσει στην τάση εξόδου την επιθυμητή συχνότητα δηλαδή την συχνότητα του δικτύου. Έτσι μια ανεμογεννήτρια αυτού του είδους μπορεί να λειτουργεί με μεταβαλλόμενη συχνότητα και κατ' επέκταση με μεταβαλλόμενη ταχύτητα περιστροφής. Στο Σχήμα 1.9 παρουσιάζεται η διάταξη μια ανεμογεννήτριας αυτού του τύπου.

Η σύγχρονη γεννήτρια που χρησιμοποιείται μπορεί να διαθέτει διέγερση συνεχούς ρεύματος ή διέγερση μόνιμων μαγνητών που θα ασχοληθούμε στην παρούσα διπλωματική εργασία. Επίσης με την χρήση σύγχρονων γεννητριών με μεγάλο αριθμό πόλων επιτυγχάνονται χαμηλές ταχύτητες περιστροφής του δρομέα της γεννήτριας, γεγονός που επιτρέπει τη χρήση κιβωτίου ταχυτήτων μικρού λόγου. Σε περιπτώσεις όπου ο αριθμός πόλων είναι ακόμα μεγαλύτερος μπορεί να μην χρησιμοποιηθεί κιβώτιο ταχυτήτων. Αυτό έχει σημαντικά οφέλη όπως η μείωση του κόστους, του βάρους, και των αναγκών συντήρησης.

Ο μετατροπέας AC/DC/AC που χρησιμοποιείται χωρίζεται σε δυο ελεγχόμενους μετατροπείς πηγής τάσης. Στην πλευρά της γεννήτριας υπάρχει ο three-phase full-bridge voltage-source rectifier όπου ανορθώνει την τάση που παράγει η γεννήτρια. Έπειτα ο ανορθωτής συνδέεται με έναν πυκνωτή, και εφόσον η τάση έχει γίνει σταθερή, μετατρέπεται μέσω ενός three-phase full-bridge voltage-source inverter σε τριφασική τάση και ρεύμα με ρυθμιζόμενη συχνότητα και πλάτος ανάλογα με το δίκτυο. Η τεχνική διαμόρφωσης πλάτους εύρους παλμών που χρησιμοποιούμε είναι η Hysteresis band current control PWM



Σχήμα 1.9 Διάταξη ανεμογεννήτριας μεταβλητών στροφών με σύγχρονη γεννήτρια.

Το πιο σημαντικό πλεονέκτημα αυτών των ανεμογεννητριών είναι η δυνατότητα ελέγχου της ενεργού και άεργου ισχύος εξόδου. Επίσης ένα πολύ σημαντικό πλεονέκτημα είναι ότι για τις περιπτώσεις όπου δεν χρησιμοποιείται κιβώτιο ταχυτήτων, λόγω χρήσης πολλών πόλων, οι ανεμογεννήτριες αυτού του είδους έχουν ελαττωμένο κόστος, βάρος και έξοδα συντήρησης. Ακόμα εξασφαλίζονται λιγότερες καταπονήσεις με αποτέλεσμα να διευρύνεται ο χρόνος ζωής τους. Τα επίπεδα του θορύβου είναι επίσης μειωμένα για αυτές τις περιπτώσεις. Αυτά τα πλεονεκτήματα έχουν αναδείξει τις ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών με σύγχρονη γεννήτρια μόνιμων μαγνητών ως τον πιο δημοφιλή τύπο ανεμογεννήτριας στις μέρες μας. Ο ρυθμός ανάπτυξης αυτού του τύπου ανεμογεννήτριας είναι αρκετά μεγάλος ώστε στο μέλλον να αντιπροσωπεύει το μεγαλύτερο μέρος της εγκατεστημένης παραγωγής.

Τα μειονεκτήματα αυτού του τύπου επικεντρώνονται στην πολυπλοκότητα που εισάγει στις διατάξεις η χρησιμοποίηση ηλεκτρονικών ισχύος. Επίσης η χρησιμοποίηση ηλεκτρονικών ισχύος έχει ως αποτέλεσμα την εκπομπή αρμονικών στο δίκτυο με αποτέλεσμα σε πολλές περιπτώσεις να είναι αναγκαία η τοποθέτηση ειδικών φίλτρων αποκοπής αρμονικών. [4,5]

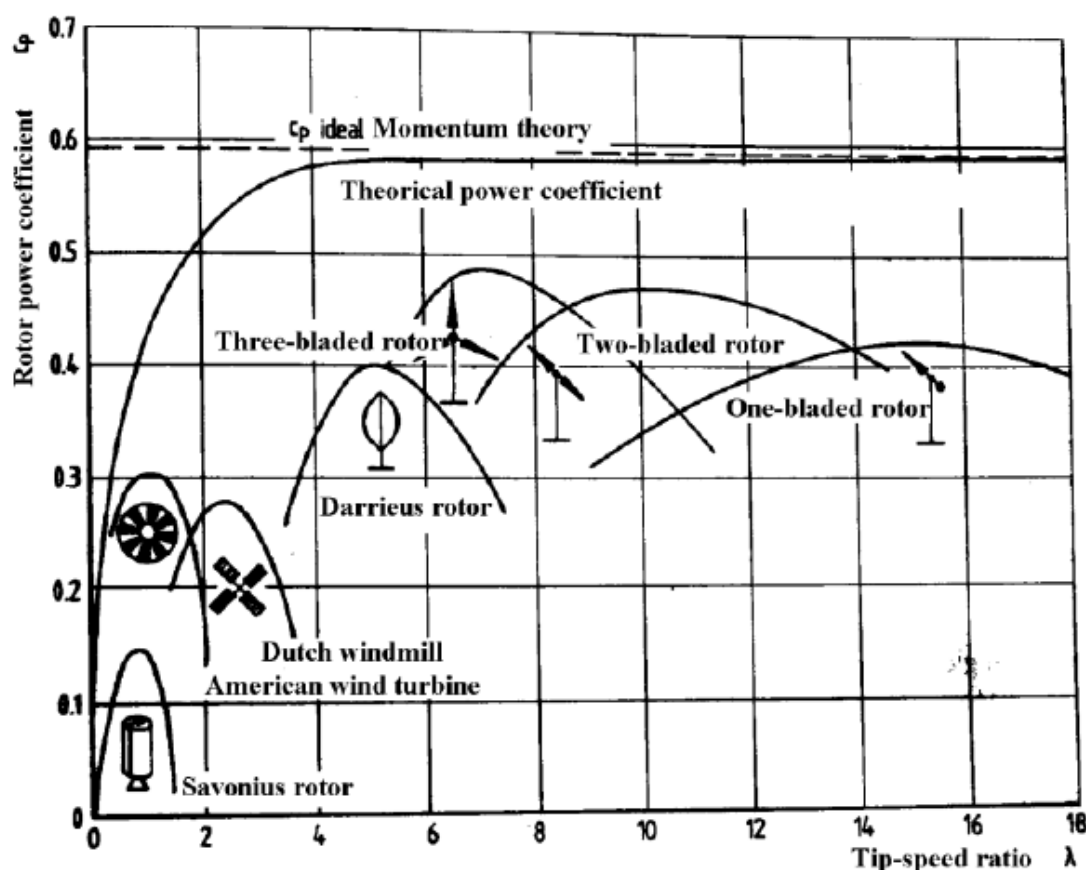
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 : ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΞΕΤΑΖΟΝΤΑΙ ΓΙΑ ΤΗΝ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ

2.1 Εισαγωγή

Όπως αναφέραμε και στο κεφάλαιο 1 μια ανεμογεννήτρια αποτελείται από πολλά μέρη. Επομένως για να μπορέσουμε να μοντελοποιήσουμε μια τέτοια διάταξη θα πρέπει να λάβουμε υπόψη μας θέματα που αφορούν ηλεκτρολογικής και ηλεκτρονικής φύσεως. Επίσης θα πρέπει να εξετάσουμε και το μηχανολογικό κομμάτι της Α/Γ, δηλαδή ποια η αεροδυναμική συμπεριφορά της σε σχέση με τον άνεμο.

2.2 Αεροδυναμική σχεδίαση Α/Γ οριζόντιου άξονα

Αναφέραμε στο κεφάλαιο 1 κάποια πράγματα σχετικά με τον αεροδυναμικό συντελεστή ισχύος C_p και πως εξαρτάται από το tip speed ratio λ . Στο σχήμα 2.1 φαίνεται η σχέση των 2 συντελεστών για διάφορους τύπους ανεμογεννητήριων.



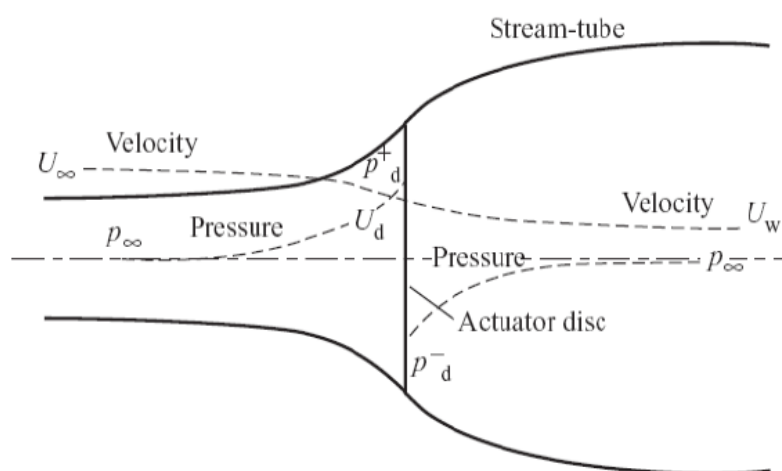
Σχήμα 2.1 Συντελεστές Ισχύος για διάφορους τύπους ανεμοκινητήρων

Παρατηρούμε ότι η δίπτερη ανεμογεννήτρια εμφανίζει για μεγαλύτερο λ μεγαλύτερο συντελεστή ισχύος από μια τρίπτερη ανεμογεννήτρια. Αυτός είναι και ένας από τους λόγους που προτιμάτε η δίπτερη Α/Γ σε χαμηλότερες ταχύτητες ανέμου απ' ό τι η τριπτερη. Επίσης παρατηρούμε πως λειτουργεί σε σχετικά μεγάλο

εύρος τιμών του λ σε σχέση με την A/Γ τύπου Savonius ή Darrieus. Αυτό αποτελεί και μειονέκτημα, επειδή σημαίνει πως δύσκολα μπορεί να ελεγχθεί και να προβλεφτεί η λειτουργία της σε τόσο μεγάλο εύρος του λ . Για τον ίδιο ακριβώς λόγο είναι ακόμη δυσκολότερο να ελεγχθεί η μονόπτερη A/Γ , μιας και εμφανίζει υψηλό συντελεστή ισχύος για μεγαλύτερο εύρος του λ . Να σημειώσουμε, πως η τριπτερη A/Γ εμφανίζει υψηλό συντελεστή ισχύος για $\lambda \in (5.9, 10.5)$, και αυτός είναι ο λόγος που επιλέγεται συχνά η τρίπτερη έναντι των άλλων A/Γ . Επίσης ο συντελεστής ισχύος έχει μικρή διακύμανση σε σχέση με τις πολύπτερες A/Γ .

Στην πράξη μια A/Γ χρησιμοποιείται για να μετατρέψει την κινητική ενέργεια από τον άνεμο σε χρήσιμη κινητική ενέργεια. Η θεωρία δίσκου ενέργεια και η θεωρία των πτερυγίων συνδυάζονται σε μια θεωρία που να επιτρέπει τον υπολογισμό των συντελεστών απόδοσης μιας A/Γ .

Στο σχήμα 2.2 φαίνεται η τυπική μεταβολή των μεγεθών της αξονικής ταχύτητας και πίεσης του ανέμου κατά μήκος του άξονα του ροϊκού σωλήνα.



Σχήμα 2.2 Ροϊκός σωλήνας δρομέα A/Γ

2.2.1 Θεωρία δίσκου ενέργειας

Από την μηχανική των ρευστών έχουμε πως η ωστική δύναμη προσδιορίζεται από τον τύπο $(U_\infty - U_d)\rho A_d U_d$. Υπάρχει διατήρηση ενέργειας του ρευστού (εξίσωση Bernoulli) στους 2 ανεξάρτητους υποχώρους πριν και μετά το δίσκο μέσα στο ροϊκό σωλήνα όχι όμως και μεταξύ των 2 υποχώρων γιατί ο δίσκος αφαιρεί ενέργεια από το ρευστό. Αφαιρώντας τις ενεργειακές σχέσεις του Bernoulli που αφορούν στον υποχώρο ανάντη και κατόντη από τον δρομέα προκύπτει η εξίσωση:

$$F = (p_d^+ - p_d^-)A_d = 2\rho A_d U_\infty^2 \alpha(1 - \alpha)$$

Όπου α είναι ο συντελεστής αξονικής επαγωγής. Όπως έχει αναφερθεί στο 1ο κεφάλαιο ο συντελεστής ισχύος C_p προσδιορίζεται ως ο λόγος της μηχανικής ισχύς που απορροφά η A/Γ προς την ισχύ του αέρα. Επίσης προσδιορίζεται και από την εξίσωση $C_p = 4\alpha(1 - \alpha)^2$ και η μέγιστη τιμή του C_p ονομάζεται όριο Betz και υπολογίζεται όταν $dC_p/d\alpha = 0$ και εμφανίζει ακρότατο όταν $\alpha = 1/3$. Επίσης έχουμε και τον συντελεστή αντίστασης που προκύπτει από την σχέση $C_T = 4\alpha(1 - \alpha)$. Το όριο Betz μειώνεται λόγω της περιστροφής, τον πεπερασμένο αριθμό πτερυγίων και τον συντελεστή αντίστασης C_d (drag coefficient) του πτερυγίου.

Μια πιο ειδική μορφή του συντελεστή ισχύος που σχετίζει και τον λόγο ταχύτητας ακροπερυγίου λ είναι ο κάτωθι τύπος :

$$C_P = \frac{8}{\lambda^2} \int_0^{\lambda} a' (1-a) \lambda_r^3 d\lambda_r$$

όπου οι συντελεστές a , a' υπολογίζονται από την θεωρία Blade element momentum theory ,BEM.

Ένας πιο γενικός τύπος που χρησιμοποιείται επίσης για τον υπολογισμό του συντελεστή ισχύος σε περίπτωση που δεν γνωρίζουμε τον συντελεστή αξονικής επαγωγής είναι ο εξής :

$$C_P(\lambda, \beta) = c_1 \left(\frac{c_2}{\lambda_i} - c_3 \beta - c_4 \right) e^{-\frac{c_5}{\lambda_i}} + c_6 \lambda$$

Όπου

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

β είναι η γωνία βήματος των περυγίων και με τον κατάλληλο έλεγχο αλλάζει έτσι ώστε να επιτυγχάνουμε τον μέγιστο αεροδυναμικό συντελεστή ισχύος, ανάλογα με την κατεύθυνση του ανέμου.

$c_1..c_6$ είναι οι συντελεστές της εξίσωσης μπορούν να πάρουν οποιαδήποτε τιμή ώστε να ικανοποιούν την καμπύλη ισχύος μιας δίπτερης ανεμογεννήτριας. Στα παραδείγματά μας είναι $c_1=0.341, c_2=116, c_4=5, c_5=21, c_6=0.0036$ και υπολογίστηκαν από την καμπύλη ισχύος της Windflow 500. Είτε δίνονται από τον κατασκευαστή, είτε υπολογίζονται από την καμπύλη ισχύος [1,2,7,11,12]

2.3 Σύγχρονη Γεννήτρια Μονίμων Μαγνητών

2.3.1. Εισαγωγή

Η σύγχρονη γεννήτρια με μόνιμους μαγνήτες διαφέρει από μια κοινή σύγχρονη γεννήτρια, καθ' ότι δε διαθέτει τύλιγμα διέγερσης. Το πεδίο διέγερσης της μηχανής δημιουργείται από τη συστοιχία των μονίμων μαγνητών, οι οποίοι βρίσκονται τοποθετημένοι περιμετρικά στην επιφάνεια του δρομέα, ώστε να δημιουργούν ακτινικό μαγνητικό πεδίο.

Οι μόνιμοι μαγνήτες δημιουργούν μια μαγνητεγερτική δύναμη στο διάκενο, η οποία έχει χωρικά ημιτονοειδή μορφή. Με άλλα λόγια, το μαγνητικό πεδίο στο διάκενο παρίσταται με τη θεμελιώδη συνιστώσα της χωρικής του διανομής. Η απλουστευτική αυτή παραδοχή επιτρέπει την εφαρμογή της γενικευμένης θεωρίας των ηλεκτρικών μηχανών.

Το μοντέλο που τελικά προσδιορίζεται και χρησιμοποιείται στις προσομοιώσεις είναι το πλήρες μοντέλο μιας σύγχρονης γεννήτριας μονίμων μαγνητών, το οποίο επιτρέπει τον υπολογισμό της απόκρισης της μηχανής για οποιαδήποτε μεταβολή των μεταβλητών εισόδου.

2.3.2. Εξισώσεις Τάσεων – Μετασχηματισμός του Park

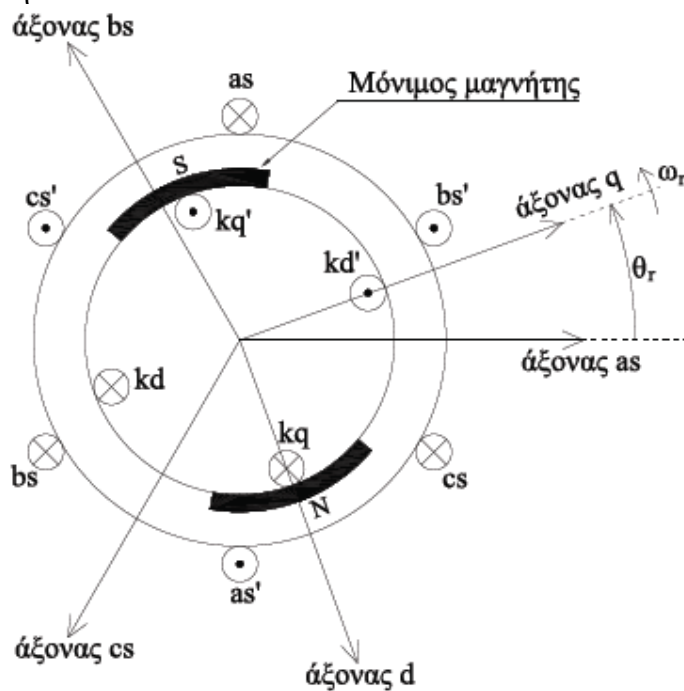
Τα τυλίγματα των τριών φάσεων του στάτη είναι όμοια μεταξύ τους. Το κάθε ένα έχει N_s ισοδύναμα ελίσματα και ωμική αντίσταση r_s . Στο σχήμα 2.3 σημειώνονται οι μαγνητικοί άξονες των τυλιγμάτων του στάτη με a_s, b_s, c_s . Επίσης, εισάγονται ο εγκάρσιος άξονας (άξονας q - quadrature) και ο ευθύς άξονας (άξονας d - direct). Ο άξονας q είναι ο άξονας του τυλίγματος αποσβέσεως kq , ενώ ο άξονας d ταυτίζεται με τον άξονα του μαγνητικού πεδίου των μονίμων μαγνητών και του τυλίγματος αποσβέσεως kd . Ο άξονας q , για τη θετική φορά περιστροφής, λαμβάνεται να προηγείται κατά 90° του άξονα d . Η γωνία του δρομέα θ_r μετράται ως προς τον άξονα του πηνίου a_s .

προς τον άξονα του πηνίου a_s .

Ο δρομέας στη γενικότερη περίπτωση διαθέτει δύο βραχυκυκλωμένα τυλίγματα αποσβέσεως, αλλά δεν έχει τυλίγμα πεδίου. Τα τυλίγματα αποσβέσεως εν γένει αντιπροσωπεύουν τις οδούς των ρευμάτων εξ επαγωγής στο δρομέα. Τα ρεύματα είναι δυνατό να ρέουν είτε σε τυλίγματα κλωβού, όμοια με τα τυλίγματα κλωβού των μηχανών επαγωγής, είτε στο σίδηρο του δρομέα. Επομένως, τα τυλίγματα αποσβέσεως χρησιμοποιούνται παράλληλα για τη μοντελοποίηση των απωλειών σιδήρου λόγω δινορρευμάτων. Τα τυλίγματα αποσβέσεως έχουν ισοδύναμα ελίσματα N_{kq}, N_{kd} και αντιστάσεις R_{kq}, R_{kd} .

Οι εντάσεις του στάτη θεωρούνται συμβατικά εξερχόμενες από τους ακροδέκτες της μηχανής, δηλαδή ακολουθείται η γνωστή σύμβαση γεννήτριας για τη γραφή των εξισώσεων. Συνεπώς, με τη δεδομένη θετική φορά των μαγνητικών αξόνων, αρνητικές πεπλεγμένες ροές προκύπτουν από θετικά ρεύματα στο στάτη.

Στο παρακάτω απεικονίζεται ένα διάγραμμα απλουστευμένης διπολικής γεννήτριας μονίμων μαγνητών. Οι άξονες a_s, b_s, c_s σχεδιάζονται στην κατεύθυνση αρνητικών πεπλεγμένων ροών σε σχέση με τη θεωρούμενη θετική φορά των ρευμάτων του στάτη.



Σχήμα 2.3 Διάγραμμα γεννήτριας μονίμων μαγνητών

Με δεδομένο ότι οι επαγωγές των τυλιγμάτων της μηχανής είναι συναρτήσεις της γωνίας του δρομέα θ και, επομένως, της γωνιακής ταχύτητας ω , οι διαφορικές εξισώσεις των τάσεων είναι μη γραμμικές και οι συντελεστές των μεταβλητών είναι χρονικά μεταβαλλόμενοι. Επιπλέον, η ταχύτητα του δρομέα είναι συνάρτηση της ηλεκτρομαγνητικής ροπής, η οποία προκύπτει από γινόμενα εντάσεων. Προφανώς, η επίλυση των εξισώσεων είναι εξαιρετικά πολύπλοκη, και καθίσταται αναγκαία η χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή για τον υπολογισμό της μεταβατικής απόκρισης του συνδυασμού του ηλεκτρικού με το μηχανικό μέρος.

Ο μετασχηματισμός του Park συμβάλλει στην απλοποίηση των εξισώσεων, μετατρέποντας τους χρονικά μεταβαλλόμενους συντελεστές σε χρονικά αμετάβλητους. Σύμφωνα με το μετασχηματισμό του Park, οι εξισώσεις των τάσεων του σταθερού τριφασικού τυλίγματος του στάτη μετασχηματίζονται στους στρεφόμενους άξονες qd του δρομέα.

Στη γενικότερη περίπτωση, η αλλαγή των μεταβλητών, που συνιστά ένα μετασχηματισμό των τριφασικών μεταβλητών ενός *στατικού* κυκλώματος (abcs) σε μεταβλητές ενός στρεφόμενου συστήματος αναφοράς (qd0s), γράφεται:

$$\begin{aligned} f_{qd0s} &= K_s f_{abcs} \\ (f_{qd0s})^T &= [f_{qs} \quad f_{ds} \quad f_{0s}] \\ K_s &= \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \sin \theta & \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix} \\ \theta &= \int_0^t \omega(\xi) d\xi + \theta(0) \end{aligned}$$

Ο αντίστροφος μετασχηματισμός επιτυγχάνεται με τον τύπο :

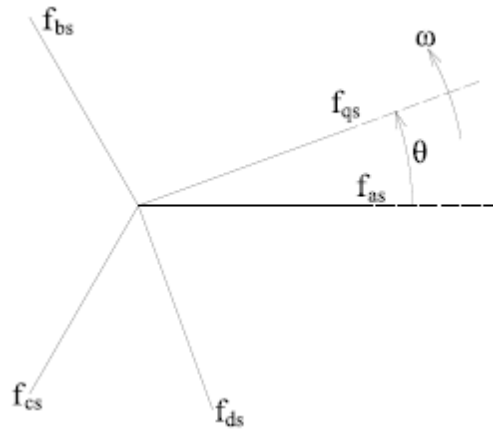
$$f_{abcs} = K_s^{-1} f_{qd0s}$$

Και κάνει χρήση του πίνακα :

$$K_s = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 1 \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \end{bmatrix}$$

Στις εξισώσεις αυτές, το σύμβολο f συμβολίζει τάση, ένταση, ή πεπλεγμένη ροή. Ο εκθέτης T συμβολίζει τον ανάστροφο (Transpose) ενός πίνακα. Ο δείκτης s γράφεται γιατί ο μετασχηματισμός αφορά μεταβλητές στατικών (stationary) κυκλωμάτων. Η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής των αξόνων είναι αυθαίρετη, και

μπορεί να είναι οποιαδήποτε συνάρτηση του χρόνου, αρκεί η γωνία θ να είναι συνεχής.



Σχήμα 2.4 Μετασχηματισμός στατικών κυκλωμάτων. Οι ορθογώνιοι άξονες qd στρέφονται με γωνιακή ταχύτητα ω . Τα μεγέθη f_{qs} , f_{ds} μπορεί να θεωρηθεί ότι 'προσανατολίζονται' κατά μήκος των αξόνων q, d. Τα f_{as} , f_{bs} , f_{cs} μπορεί να θεωρηθούν ως μεγέθη με προσανατολισμό τους στατικούς άξονες as, bs, cs. Σύμφωνα με το μαθηματικό ορισμό του μετασχηματισμού, τα f_{qs} , f_{ds} προκύπτουν με ανάλυση των συνιστωσών f_{as} , f_{bs} , f_{cs} στους άξονες q και d αντίστοιχως.

Ο μετασχηματισμός του Park αποτελεί μια ειδική περίπτωση του μετασχηματισμού $abcs \rightarrow qd0s$, όπου η γωνιακή ταχύτητα του στρεφόμενου πλαισίου λαμβάνεται ίση με τη γωνιακή ταχύτητα του δρομέα. Ο άξονας d ταυτίζεται με τον άξονα του μαγνητικού πεδίου των μαγνητών. Αφού εφαρμοσθεί ο μετασχηματισμός, οι ισοδύναμες εξισώσεις στο σύστημα qd0 γράφονται:

$$v_{qs} = -r_s i_{qs} + \frac{d\lambda_{qs}}{dt} + \omega_r \lambda_{ds}$$

$$v_{ds} = -r_s i_{ds} + \frac{d\lambda_{ds}}{dt} - \omega_r \lambda_{qs}$$

$$v_{0s} = -r_s i_{0s} + \frac{d\lambda_{0s}}{dt}$$

$$0 = r'_{kq} i'_{kq} + \frac{d\lambda'_{kq}}{dt}$$

$$0 = r'_{kd} i'_{kd} + \frac{d\lambda'_{kd}}{dt}$$

Ο δείκτης s αναφέρεται σε μεγέθη του στάτη. Τα τονισμένα μεγέθη είναι μεγέθη των τυλιγμάτων του δρομέα, ανηγμένα με τον κατάλληλο λόγο ελιγμάτων στην πλευρά του στάτη. Τα βραχυκυκλωμένα κυκλώματα αποσβέσεως έχουν μηδενική τάση.

Οι πεπλεγμένες ροές των τυλιγμάτων q, d του στάτη και kq , kd του δρομέα δίνονται από τις σχέσεις:

$$\lambda_{qs} = -L_{ls}i_{qs} + L_{mq}(-i_{qs} + i'_{kq})$$

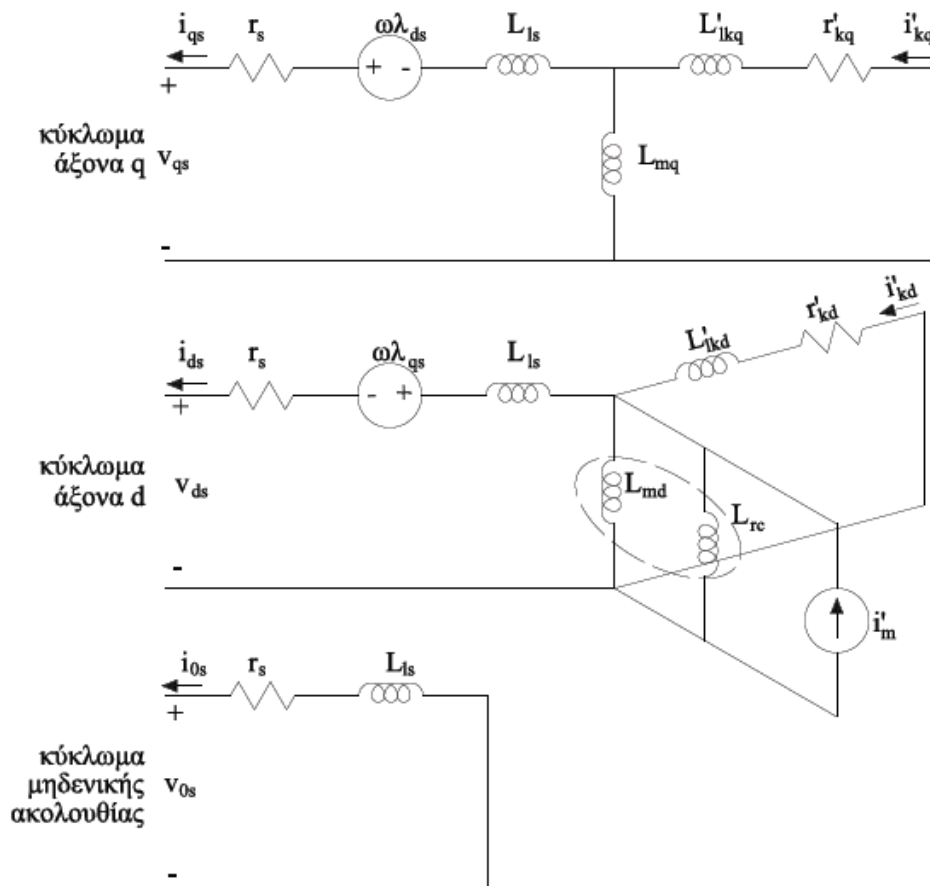
$$\lambda_{ds} = -L_{ls}i_{ds} + L_{md}(-i_{ds} + i'_{kd} + i'_m)$$

$$\lambda_{0s} = -L_{ls}i_{0s}$$

$$\lambda'_{kq} = L'_{lkq}i'_{kq} + L_{mq}(-i_{qs} + i'_{kq})$$

$$\lambda'_{kd} = L'_{lkd}i'_{kd} + L_{md}(-i_{ds} + i'_{kd} + i'_m)$$

Στο σχήμα 2.5 απεικονίζονται τα ισοδύναμα qd0 κυκλώματα της γεννήτριας μόνιμων μαγνητών, τα οποία προκύπτουν από τις προηγούμενες εξισώσεις. Το κύκλωμα του άξονα d περιέχει το ισοδύναμο κατά Norton μοντέλο των μόνιμων μαγνητών, το οποίο παριστάνεται με μία πηγή έντασης i'_m και μια επαγωγή L_{rc} συνδεδεμένες παράλληλα με τον κλάδο της αλληλεπαγωγής μαγνήτισης L_{md} . Η ένταση i'_m είναι ανάλογη του μαγνητικού πεδίου που δημιουργούν οι μόνιμοι μαγνήτες. Η επαγωγή L_{rc} (recoil line) καθορίζεται από τα χαρακτηριστικά του βρόχου υστέρησης του μαγνητικού υλικού. Για τους σκοπούς της μοντελοποίησης, μπορεί να θεωρηθεί ο παράλληλος συνδυασμός της L_{rc} με την L_{md} , ο οποίος συμβολίζεται πάλι με L_{md} .



Σχήμα 2.5 Ισοδύναμα qd0 κυκλώματα γεννήτριας μόνιμων μαγνητών

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

$$v_{qs} = -r_s \dot{i}_{qs} + \frac{1}{\omega_b} \frac{d\psi_{qs}}{dt} + \frac{\omega_r}{\omega_b} \psi_{ds}$$

$$v_{ds} = -r_s \dot{i}_{ds} + \frac{1}{\omega_b} \frac{d\psi_{ds}}{dt} + \frac{\omega_r}{\omega_b} \psi_{qs}$$

$$v_{0s} = -r_s \dot{i}_{0s} + \frac{1}{\omega_b} \frac{d\psi_{0s}}{dt}$$

$$0 = -r_{kq} \dot{i}_{kq} + \frac{1}{\omega_b} \frac{d\psi'_{kq}}{dt}$$

$$0 = -r_{kd} \dot{i}_{kd} + \frac{1}{\omega_b} \frac{d\psi'_{kd}}{dt}$$

Όπου

$$\psi_{qs} = -X_{ls} \dot{i}_{qs} + X_{mq} (-\dot{i}_{qs} + \dot{i}'_{kq})$$

$$\psi_{ds} = -X_{ls} \dot{i}_{ds} + X_{md} (-\dot{i}_{ds} + \dot{i}'_{kd} + \dot{i}'_m)$$

$$\psi_{0s} = -X_{ls} \dot{i}_{0s}$$

$$\psi'_{kq} = -X'_{lkq} \dot{i}'_{kq} + X_{mq} (-\dot{i}_{qs} + \dot{i}'_{kq})$$

$$\psi'_{kd} = -X'_{lkd} \dot{i}'_{kd} + X_{md} (-\dot{i}_{ds} + \dot{i}'_{kd} + \dot{i}'_m)$$

Οι πεπλεγμένες ροές (λ) έχουν αντικατασταθεί από πεπλεγμένες ροές ανά δευτερόλεπτο (ψ), που έχουν μονάδα το 1 volt.

2.3.3 Εξισώσεις Ροπής

Αποδεικνύεται ότι η στιγμιαία ηλεκτρομαγνητική ροπή της γεννήτριας δίνεται από την ακόλουθη σχέση, εκφρασμένη ως γινόμενο εντάσεων:

$$T_e = \frac{3}{2} \left(\frac{P}{2} \right) \left[L_{md} (-\dot{i}_{ds} + \dot{i}'_m + \dot{i}'_{kd}) \dot{i}_{qs} - L_{mq} (-\dot{i}_{qs} + \dot{i}'_{kq}) \dot{i}_{ds} \right]$$

Άλλες ισοδύναμες εκφράσεις είναι :

$$T_e = \frac{3}{2} \left(\frac{P}{2} \right) \lambda_{ds} \dot{i}_{qs} - \lambda_{qs} \dot{i}_{ds}$$

και

$$T_e = \frac{3}{2} \left(\frac{P}{2} \right) \left(\frac{1}{\omega_b} \right) \psi_{ds} \dot{i}_{qs} - \psi_{qs} \dot{i}_{ds}$$

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

2.3.4 Πλεονεκτήματα - Μειονεκτήματα ΣΓΜΜ

Η επιλογή της γεννήτριας που θα χρησιμοποιηθεί σε συνδυασμό με την ανεμοτουρμπίνα, πρέπει να ικανοποιεί κάποια κριτήρια, τα οποία εξαρτώνται από τη συγκεκριμένη εφαρμογή. Όπως είναι γνωστό η ταχύτητα του ανέμου είναι μεταβαλλόμενη και φυσικά μη προβλέψιμη, έτσι η γεννήτρια πρέπει να έχει πολύ καλή δυναμική απόκριση σε μεταβολές των σημάτων μεταβολής ταχύτητας και να προσαρμόζεται γρήγορα και αποτελεσματικά στις νέες συνθήκες λειτουργίας, έτσι ώστε να παίρνει την επιθυμητή ταχύτητα περιστροφής για την επίτευξη της βέλτιστης λειτουργίας, ανάλογα με την ταχύτητα του ανέμου. Επιλέχθηκε στη συγκεκριμένη εργασία η σύγχρονη γεννήτρια μονίμων μαγνητών κυλινδρικών πόλων(PMSG). Μεταξύ των σημαντικών πολλών πλεονεκτημάτων που έχει έναντι των επαγωγικών γεννητριών, είναι η πολύ καλή και γρήγορη δυναμική απόκριση. Άλλα σημαντικά πλεονεκτήματα που έχει είναι ο υψηλός βαθμός απόδοσης, η μεγάλη πυκνότητα ροπής ανά όγκο μηχανής, η μικρή αδράνεια, και η σχετικά ικανοποιητική τιμή του συντελεστή ισχύος. Ένα ακόμη πολύ σημαντικό πλεονέκτημα είναι η δυνατότητα ελέγχου του συντελεστή ισχύος, μέσω της ρύθμισης του πεδίου της μηχανής και χωρίς να είναι απαραίτητη η εγκατάσταση πυκνωτών αντιστάθμισης. Η μηχανή που θα χρησιμοποιηθεί είναι πολυπολική. Αυτό σημαίνει πως δεν θα χρειαστεί να εγκαταστήσουμε κιβώτιο ταχυτήτων επιτυγχάνοντας έτσι την μείωση του κόστους και του βάρους, τη βελτίωση της αξιοπιστίας και την ελάττωση του θορύβου. Μειονεκτήματα είναι το υψηλό κόστος των υλικών των μονίμων μαγνητών και η μεταβολή των μαγνητικών τους χαρακτηριστικών με την πάροδο του χρόνου.[8,9,10,13]

2.4 Μετατροπείς Ισχύος

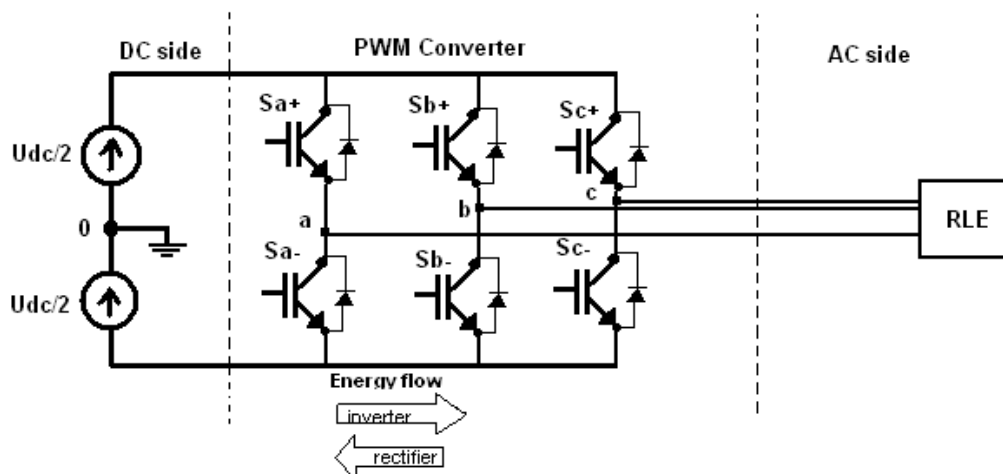
Οι μετατροπείς ισχύος είναι διατάξεις που μετατρέπουν την ηλεκτρική ισχύ από μια μορφή σε άλλη χρησιμοποιώντας ηλεκτρονικούς διακόπτες που κατασκευάζονται από ημιαγωγούς. Τέτοιοι μετατροπείς χρησιμοποιούνται πολύ συχνά, σε οικιακές και σε βιομηχανικές εφαρμογές. Το ευρύ φάσμα εφαρμογών των μετατροπέων, οδήγησε τα τελευταία χρόνια σε έρευνα και ανάπτυξη στην περιοχή των Ηλεκτρονικών Ισχύος, προκειμένου να κατασκευαστούν μετατροπείς με βελτιωμένα χαρακτηριστικά. Σήμερα οι μετατροπείς που κατασκευάζονται έχουν χαμηλότερες απώλειες, καλύτερη ποιότητα ισχύος, παρέχουν αυξημένες δυνατότητες ελέγχου, είναι οικονομικότεροι και διαθέσιμοι για εφαρμογές μεγάλης ισχύος. Στην κατασκευή νέων μετατροπέων και γενικά στην ανάπτυξη του κλάδου των Ηλεκτρονικών Ισχύος βοήθησαν δύο τεχνολογίες, η τεχνολογία των υλικών και η μικροηλεκτρονική. Με την πρόοδο στην τεχνολογία των υλικών δημιουργήθηκαν νέοι ημιαγωγοί διακόπτες με βελτιωμένες δυνατότητες, ενώ χάρη στη μικροηλεκτρονική υλοποιήθηκαν ελεγκτές, αναλογικοί ή ψηφιακοί, που ελέγχουν αποτελεσματικά τη ροή της ηλεκτρικής ισχύος. Μαζί με την πρόοδο στον κλάδο των Ηλεκτρονικών Ισχύος και άρα τη γενικευμένη χρήση των μετατροπέων ισχύος, δημιουργήθηκαν νέα πρότυπα και νέοι κανονισμοί για τη λειτουργία των μετατροπέων. Στα πρότυπα αυτά εναρμονίστηκαν οι κατασκευαστές, και έτσι σήμερα μπορούμε να πούμε ότι οι μετατροπείς, εκτός των άλλων πλεονεκτημάτων τους, είναι

και συμβατοί με τα πρότυπα και ασφαλείς για το δίκτυο ή τον εξοπλισμό στον οποίο συνδέονται.

2.4.1 Τεχνικές Pulse Width Modulation για τριφασικό μετατροπέα πηγής τάσης

Οι μετατροπείς ισχύος χρησιμοποιούν τη λειτουργία που λέγεται switch mode operation, όπου κάθε ημιαγωγός ισχύος ελέγχεται από την ON/OFF κατάσταση. Αυτό οδηγεί σε διαφορετικές τεχνικές διαμορφώσεις εύρους παλμών pulse width modulation(PWM), που αποτελεί την βασική τεχνική διαχείρισης στους μετατροπείς ισχύος. Στους σύγχρονους μετατροπείς η PWM αποτελεί μι υψηλής διαδικασία που έχει εύρος από μερικά kh(motor control) μέχρι αρκετά Mh(resonant converters για τροφοδοτικά).

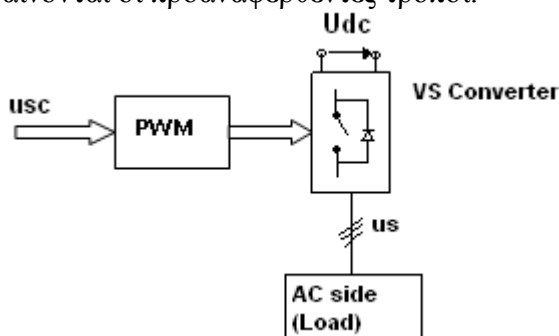
Στον τριφασικό μετατροπέα που φαίνεται στην εικόνα 2.6 τα φασικά ρεύματα εξαρτώνται μόνο από την διαφορά μεταξύ των φασικών τάσεων.



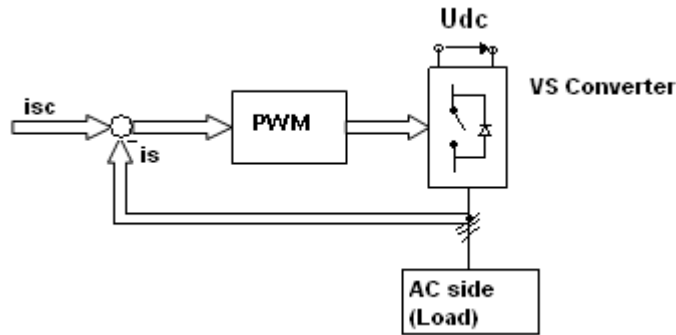
Σχήμα 2.6 Τριφασικός voltage source PWM converter

Στη βιομηχανία οι μετατροπείς ισχύος χρησιμοποιούνται με 2 τρόπους. Είτε ως αντιστροφείς(inverter) είτε ως ανορθωτές(rectifier). Στον αντιστροφή η ενέργεια μετατρέπεται από την dc πλευρά στην ac.Χρησιμοποιείται σε μηχανές μεταβλητών στροφών και σε AC τροφοδοτικά(UPS). Στον ανορθωτή η ενέργεια μετατρέπεται από την ac στην dc πλευρά και χρησιμοποιείται σε τροφοδοτικά με μοναδιαίο συντελεστή ισχύος.

Οι πιο συνηθισμένοι τρόποι που χρησιμοποιούμε την PWM μέθοδο σε τριφασικό μετατροπέα, κάνουν χρήση είτε την τάση είτε το ρεύμα από την ac πλευρά. Στα σχήματα 2.7 και 2.8 φαίνονται οι προαναφερθέντες τρόποι.



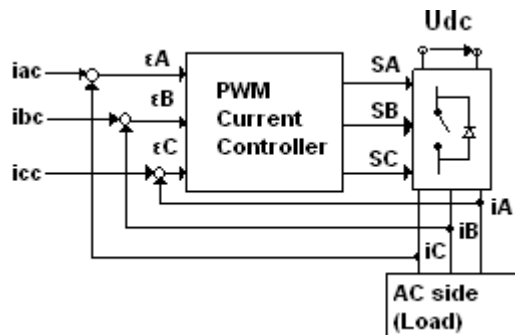
Σχήμα 2.7 PWM open loop voltage control



Σχήμα 2.8 PWM closed loop-current control

Στην παρούσα διπλωματική εργασία θα χρησιμοποιήσουμε την μέθοδο του κλειστού βρόχου ελέγχου ρεύματος PWM, closed-loop PWM current control (σχήμα 2.8)

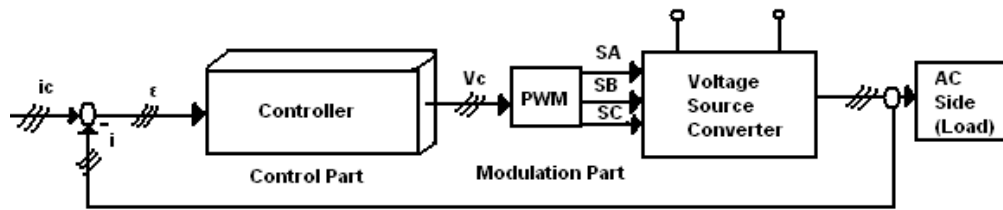
Οι περισσότερες εφαρμογές των 3phase voltage source PWM converters, έχουν μια δομή ελέγχου που περιλαμβάνει ένα εσωτερικό current feedback loop. Σε αντίθεση με το open loop voltage PWM converter. Οι current controlled PWM (CC PWM) converters έχουν κάποια πλεονεκτήματα, όπως η μεγάλη ακρίβεια στον έλεγχο των κυματομορφών ρεύματος, καλή δυναμική απόκριση και απόρριψη υπερφόρτωσης. Η βασική ιδέα ελέγχου του CC PWM Converter είναι να αναγκάσουμε τα ρεύματα φορτίου να ακολουθήσουν τα ρεύματα αναφοράς. Όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.9. Πραγματοποιείται η σύγκριση των ρευμάτων και η διαφορά διαμορφώνεται από τον PWM CC παράγοντας τις καταστάσεις μεταγωγής (switching states) SA, SB, SC και να λειτουργήσει σωστά ο converter. Γενικά ο CC κάνει 2 δουλειές. Το error compensation (παράγοντας τα ε_A , ε_B , ε_C) και τη διαμόρφωση-modulation (καθορίζει τις μεταβλητές κατάστασης switching states). Τη λειτουργία που περιγράψαμε φαίνεται στο κάτωθι σχήμα



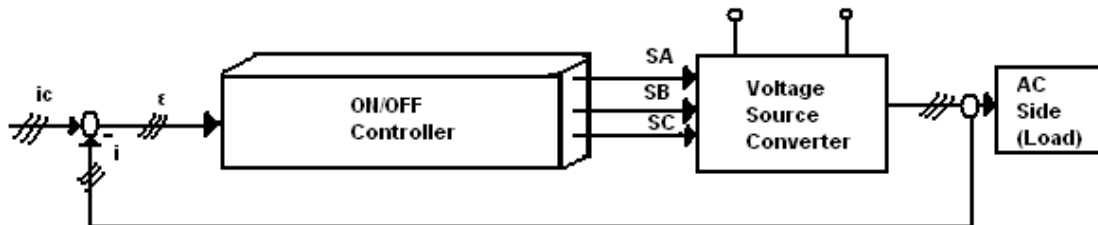
Σχήμα 2.9 Μπλοκ διάγραμμα του current controlled PWM converter

2.4.2 Παρουσίαση των τεχνικών CC

Οι τεχνικές των CC μπορούν να χωριστούν σε διάφορους τρόπους. Οι δυο βασικότερες τεχνικές είναι οι ελεγκτές με μπλοκ ανοιχτού βρόχου PWM (open loop PWM block) και οι ON/OFF ελεγκτές που φαίνονται στο σχήμα 2.10 και 2.11 αντίστοιχα.



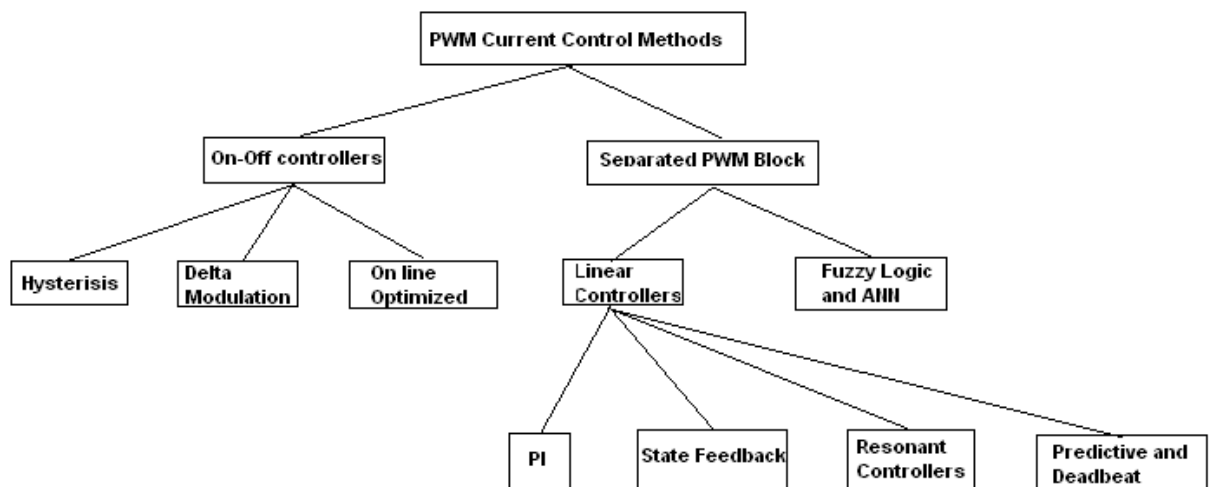
Σχήμα 2.10 Μπλόκ ελεγκτή με open loop PWM



Σχήμα 2.11 Μπλόκ On-Off ελεγκτή

Η διαφορά τους είναι πως στους ON/OFF ελεγκτές τα μέρη control και modulation γίνονται σε ένα βήμα και δεν υπάρχει ξεχωριστός ελεγκτής όπως στον open loop PWM controller που γίνεται σε δυο ξεχωριστά βήματα.

Στο σχήμα 2.12 φαίνονται όλες οι τεχνικές CC. Στην παρούσα διπλωματική εργασία θα χρησιμοποιήσουμε τον ON/OFF ελεγκτή με υστέρηση.

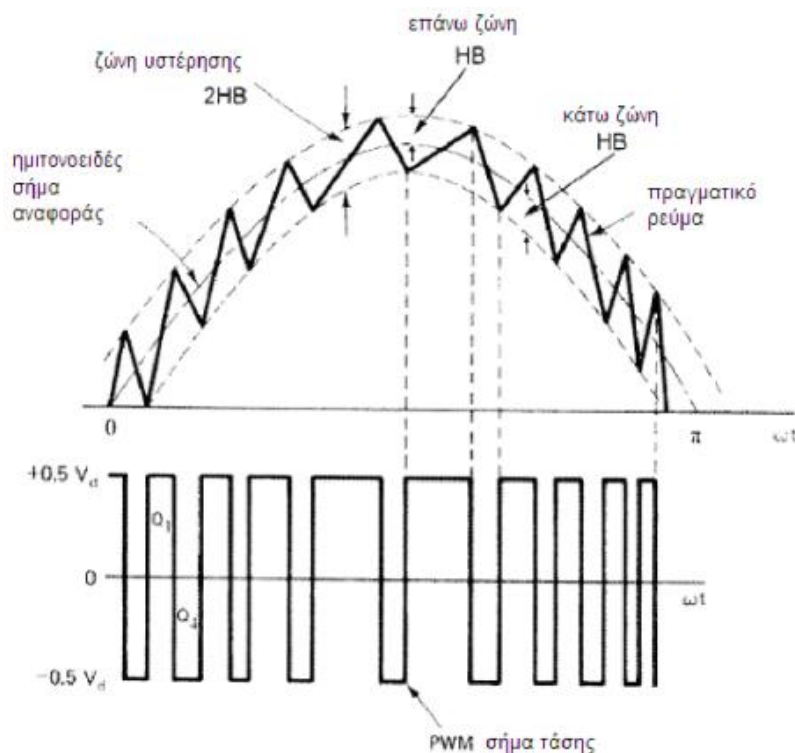


Σχήμα 2.12 Τεχνικές Current Control CC

2.4.3 Έλεγχος Ρεύματος σε Ζώνη Υστέρησης

Οι μετατροπείς πηγής τάσης με PWM έλεγχο του ρεύματος χρησιμοποιούνται ευρύτατα στα ac κινητήρια συστήματα υψηλής απόδοσης. Όταν στους ac κινητήρες επιβάλλονται αντί για τις τάσεις τα ρεύματα, εξαλείφεται η επίδραση των αντιστάσεων και αυτεπαγωγών σκέδασης. Έτσι ο έλεγχος της μηχανής απλοποιείται σημαντικά και η δυναμική της συμπεριφορά βελτιώνεται.

Η ουσία του ελέγχου έγκειται στο ανοιγό-κλείσιμο των διακοπών με τέτοιο τρόπο ώστε το ρεύμα εξόδου της κάθε φάσης να παραμένει μέσα σε μία προκαθορισμένη ζώνη υστέρησης (ζώνη ανοχής) πάνω ή κάτω από την τιμή αναφοράς του.



Σχήμα 2.13 Αρχή λειτουργίας ελέγχου ρεύματος σε ζώνη υστέρησης

Στο σχήμα 2.13 εξηγείται παραστατικά η αρχή λειτουργίας της μεθόδου για τον μετατροπέα του σχήματος 2.6. Το κύκλωμα ελέγχου δημιουργεί την ημιτονοειδή κυματομορφή του πραγματικού ρεύματος της κάθε φάσης. Καθώς το ρεύμα υπερβαίνει το άνω όριο, ο πάνω διακόπτης S_{a+} του μετατροπέα ανοίγει και ο κάτω διακόπτης S_{a-} κλείνει. Αποτέλεσμα, η τάση εξόδου του μετατροπέα να γίνεται αρνητική και το ρεύμα μειώνεται. Όταν το ρεύμα διασχίζει το κάτω όριο, ο κάτω διακόπτης S_{a-} ανοίγει και ο κάτω S_{a+} κλείνει. Όσο το ρεύμα παραμένει μέσα στη ζώνη, οι διακόπτες, οι διακόπτες δεν αλλάζουν κατάσταση. Όσο μικρότερη είναι η ζώνη, τόσο μικρότερη είναι η διακύμανση του ρεύματος, αλλά τόσο μεγαλύτερη είναι η διακοπτική συχνότητα. Είναι επιθυμητό να βρεθεί μια βέλτιστη ζώνη που διατηρεί ισορροπία μεταξύ διακύμανσης ρεύματος και απωλειών του μετατροπέα εξαιτίας υψηλής διακοπτικής συχνότητας. Σε χαμηλές ταχύτητες της μηχανής, εξαιτίας της χαμηλής αντί-ΗΕΔ, δεν υπάρχει δυσκολία στην παρακολούθηση του ρεύματος αναφοράς. Όμως σε υψηλές ταχύτητες ο ελεγκτής ρεύματος θα κορεσθεί σε ένα μέρος του κύκλου, θα εμφανισθούν ανώτερες αρμονικές και ο έλεγχος ρεύματος κινδυνεύει να χαθεί. Η παραπάνω μέθοδος είναι αρκετά διαδεδομένη επειδή είναι απλή στην εφαρμογή και ταχύτατης δυναμικής απόκρισης. Το βασικό της μειονέκτημα όμως είναι η αδύνατη εκ των προτέρων γνώση της διακοπτικής συχνότητας. Υπάρχει περίπτωση αυτή να γίνει πολύ υψηλή με αποτέλεσμα αυξημένες

διακοπτικές απώλειες του μετατροπέα. Γενικά η συχνότητα είναι ελάχιστη στις κορυφές του ac ρεύματος και μέγιστη στα σημεία τομής με το 0. Ακόμη η διακοπτική συχνότητα εξαρτάται από τις αυτεπαγωγές της μηχανής και τη ταχύτητα περιστροφής για δεδομένη ζώνη υστέρησης.[14,15]

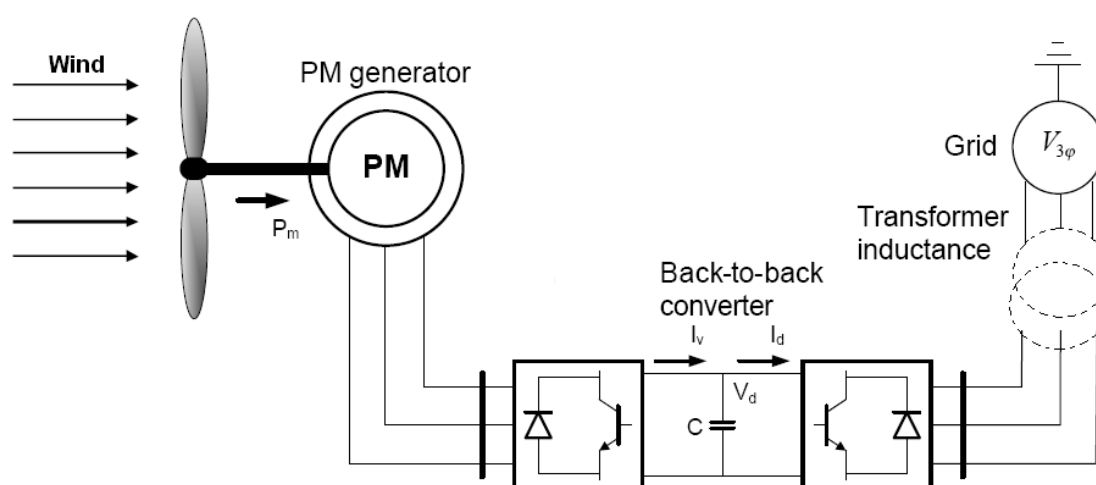
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 : ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΗΣ ΓΕΝΙΚΕΥΜΕΝΗΣ ΔΟΜΗΣ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΚΑΙ ΤΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ

3.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο θα παρουσιάσουμε τα βήματα και τη δομή που χρησιμοποιούμε για την μοντελοποίηση της ανεμογεννήτριας. Δεν θα μπορούμε σε λεπτομέρειες υλοποίησης της δομής, αλλά θα γίνει μια γενική περιγραφή για τον έλεγχο και την χρησιμότητα του κάθε μπλοκ που χρησιμοποιούμε στο MATLAB. Στην αρχή θα αναλυθεί η διαδικασία κατασκευής της πλευράς που βρίσκεται η γεννήτρια(generator side control) και τον έλεγχο που πραγματοποιείται σε αυτήν την πλευρά όπου βρίσκεται και ο ανορθωτής. Έπειτα θα αναλυθεί η διαδικασία της κατασκευής και του ελέγχου της πλευράς του δικτύου(grid side control) όπου βρίσκεται και ο αντιστροφέας.

Το γενικό μοντέλο υλοποίησης φαίνεται στο σχήμα 3.1. Παρατηρούμε ότι η σύγχρονη γεννήτρια μονίμων μαγνητών της ανεμοτουρμπίνας συνδέεται με έναν back-to-back converter (ο ανορθωτής και ο αντιστροφέας) όπου υπάρχει και ο dc link πυκνωτής ανάμεσα για να εξουδετερώνει τις διακυμάνσεις. Η έξοδος του μετατροπέα μπορεί να συνδεθεί είτε με έναν μετασχηματιστή μέσης τάσης είτε απευθείας στο δίκτυο.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία δεν μας χρειάζεται ο μετασχηματιστής, διότι επικεντρωνόμαστε κυρίως στην μοντελοποίηση της ανεμογεννήτριας και όχι τόσο στην ανάλυση και τους τρόπους διασύνδεσης μιας ανεμογεννήτριας στο δίκτυο. Η τριφασική γέφυρα (ανορθωτής και μετατροπέας) που θα χρησιμοποιήσουμε αποτελείται από 6 IGBT που μπορούν να προσφέρουν δυνατότητα λειτουργίας στους μετατροπείς σε υψηλές συχνότητες και μεγάλες ισχύεις. Με τις διατάξεις των ηλεκτρονικών ισχύος είναι δυνατή η σύνδεση της ανεμογεννήτριας ή των ανεμογεννητριών στο δίκτυο με τις μικρότερες δυνατές καταπονήσεις τόσο του δικτύου όσο και του συστήματος των ανεμογεννητριών. Σημαντικό ρόλο στο σχεδιασμό του μετατροπέα ενός τέτοιου συστήματος παίζουν τα χαρακτηριστικά στοιχεία της γεννήτριας και του δικτύου.

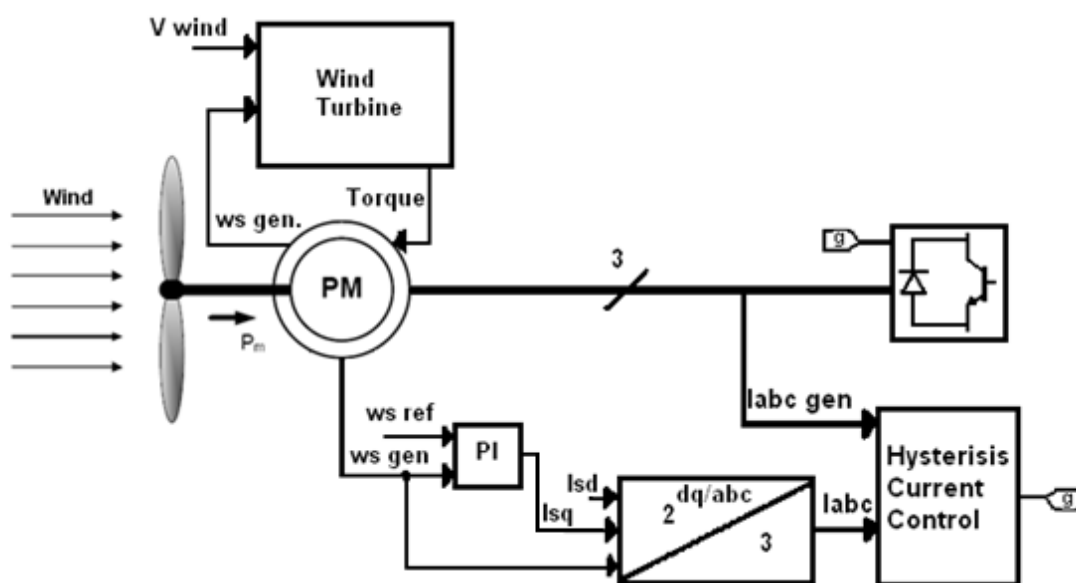


Σχήμα 3.1 Αιολικό σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας με διατάξεις ηλεκτρονικών ισχύος

3.2 Generator side control

Το μοντέλο δέχεται ως είσοδο την ταχύτητα του ανέμου, όπου κατά την διάρκεια λειτουργίας της γεννήτριας και εκτέλεσης του μοντέλου, ο χρήστης μπορεί να επέμβει και να αλλάξει την ταχύτητα του ανέμου σε επιτρεπτά όρια. Με την γωνιακή ταχύτητα της γεννήτριας, την ταχύτητα του ανέμου και τις άλλες παραμέτρους που εξηγήσαμε στην αεροδυναμική σχεδίαση της Α/Γ, παράγεται η ισχύς P_{mech} που θα μας δώσει η ανεμοτουρμπίνα. Διαιρώντας την ισχύ με την γωνιακή ταχύτητα προκύπτει η ροπή T ($T = P_{mech}/\omega$) με την οποία είναι σε θέση να λειτουργήσει η γεννήτρια. Έπειτα η ροπή μπαίνει ως είσοδος στη γεννήτρια μονίμων μαγνητών. Αυτός ο υπολογισμός της μηχανικής ισχύς από τον άνεμο, και της ροπής γίνεται από το μπλοκ Wind Turbine.

Η γεννήτρια συνδέεται με έναν τριφασικό ανορθωτή λόγω του ότι στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας απαιτείται η μετατροπή ηλεκτρικής ενέργειας από τριφασική εναλλασσόμενη σε συνεχή (AC/DC). Τέτοια συστήματα απαιτούνται στα αιολικά πάρκα όπου, όταν συνήθως η γεννήτρια ή οι γεννήτριες του πάρκου είναι τριφασικές σύγχρονες, μετατρέπουν την τριφασική τάση η οποία δεν έχει σταθερό πλάτος και συχνότητα σε συνεχή. Έτσι η τάση εξόδου που παράγεται από την γεννήτρια ανορθώνεται από τον inverter για να φορτίσει τον DC link πυκνωτή. Η παλμοδότηση των IGBT (του ανορθωτή) θα προκύψει από την διαδικασία και τον έλεγχο του Hysteresis Current Control (όπου έχουμε αναφερθεί στο κεφάλαιο 2). Το ρεύμα αναφοράς που χρησιμοποιεί η διαδικασία Hysteresis CC προκύπτει από το ρεύμα ροπής I_{sq} της γεννήτριας. Το ρεύμα ροπής προκύπτει από την διαφορά της γωνιακής ταχύτητας της γεννήτριας και της επιθυμητής γωνιακής ταχύτητας που θα θέλαμε να είχε. Η διαφορά περνάει μέσα από έναν PI ελεγκτή και μας δίνει το I_{sq} . Έπειτα με το ρεύμα ροπής, το ρεύμα πεδίου I_{sd} που το θεωρούμε μηδέν (θα εξηγήσουμε παρακάτω για ποιο λόγο συμβαίνει αυτό) και την γωνιακή ταχύτητα της γεννήτριας παράγεται το τριφασικό ρεύμα αναφοράς I_{abc} . Το ρεύμα αναφοράς σε συνδυασμό με το ρεύμα που μας δίνει η γεννήτρια είναι οι είσοδοι του Hysteresis CC για την παραγωγή των παλμών του ανορθωτή. Στο σχήμα 3.2 παρουσιάζεται η γενική μορφή του generator side control.



Σχήμα 3.2 Μπλοκ διάγραμμα του generator side control

3.2.1 Στόχος ελέγχου στην πλευρά της γεννήτριας

Ο κύριος στόχος του ελέγχου στην πλευρά της γεννήτριας είναι ο έλεγχος της μηχανικής γωνιακής ταχύτητας της γεννήτριας, έτσι ώστε να επιτευχθεί η μέγιστη απολαβή μηχανικής ενέργειας που μπορούμε να πάρουμε από τον άνεμο. Έπειτα το ρεύμα ροπής που παράγεται από τον ΠΙ ελεγκτή ταχύτητας, βλέπουμε στην παρακάτω σχέση πως σχετίζεται με την ηλεκτρομαγνητική ροπή. Όπως έχουμε αναφέρει στο κεφάλαιο 2, η ηλεκτρομαγνητική ροπή εκφράζεται από τη σχέση

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

Όπου:

P ο αριθμός των πόλων της μηχανής

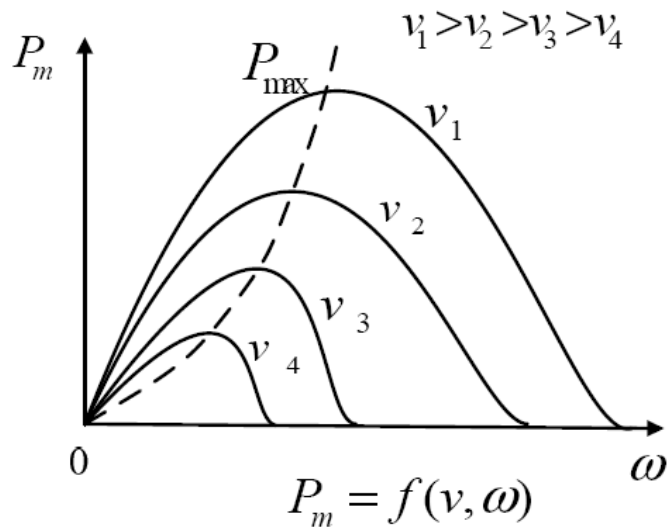
λ_{ds} , λ_{qs} οι πεπλεγμένες μαγνητικές ροές της μηχανής

i_q , i_d τον d,q-άξονα του ρεύματος αντίστοιχα και είναι το ρεύμα ροπής και ρεύμα πεδίου αντίστοιχα.

Θα θεωρήσουμε το ρεύμα πεδίου μηδενικό ($i_d=0$) για να εγγυηθούμε μοναδιαίο συντελεστή ισχύος στην πλευρά της γεννήτριας και μεγιστοποίηση της ροπής για το ελάχιστο δυνατό ρεύμα στάτορα. Επομένως με αυτόν τον τρόπο η ηλεκτρομαγνητική ροπή θα ελέγχεται πλήρως από το ρεύμα ροπής i_q . Επιπλέον, επιλέγοντας μηδενικό ρεύμα πεδίου, οδηγούμαστε σε πιο ασφαλή λειτουργία των μαγνητών, γιατί δεν επηρεάζονται άμεσα από τις μεταβολές του φορτίου και συνεπώς από τις συνθήκες φόρτισης της μηχανής. Όπως είναι γνωστό, για θετικό ρεύμα πεδίου οι μαγνήτες μαγνητίζονται και για αρνητικό απομαγνητίζονται. Έτσι όταν $i_d=0$, ούτε μαγνητίζονται και συνεπώς δεν καταναλώνεται επιπλέον ρεύμα, αλλά ούτε και απομαγνητίζονται ώστε να κινδυνεύει η λειτουργία τους.

Το ρεύμα ροπής i_q που απαιτείται στο μετασχηματισμό dq για την παραγωγή των τριών ρευμάτων αναφοράς (μπλοκ dq/abc στο σχήμα 3.2) παράγεται όπως αναφέραμε και προηγουμένως από τη σύγκριση της γωνιακής ταχύτητας αναφοράς με την πραγματική γωνιακή ταχύτητα περιστροφής της γεννήτριας (και κατά συνέπεια της τουρμπίνας αφού έχουν την ίδια ταχύτητα περιστροφής) σε έναν ΠΙ ελεγκτή ταχύτητας. Στον ελεγκτή ταχύτητας που υλοποιείται με τον ΠΙ ελεγκτή η επιλογή των παραμέτρων K_p , K_i γίνεται με τον εξής τρόπο : Αρχικά αυξάνουμε το ολοκληρωτικό κέρδος κρατώντας το αναλογικό σε μια σχετικά μικρή τιμή. Με αυτόν τον τρόπο αυξάνεται η ταχύτητα ανόδου και μεγαλώνει η υπερύψωση. Επιλέγεται ως βέλτιστη τιμή για το κέρδος K_i , εκείνη για την οποία επιτυγχάνεται η προσέγγιση της τιμής αναφοράς με ικανοποιητικό χρόνο ανόδου και διατηρείται σταθερή. Εν συνεχεία αυξάνεται το αναλογικό κέρδος έτσι ώστε να μειωθεί η υπερύψωση μέσα σε αποδεκτά όρια ανάλογα με την ακρίβεια που θέλουμε.

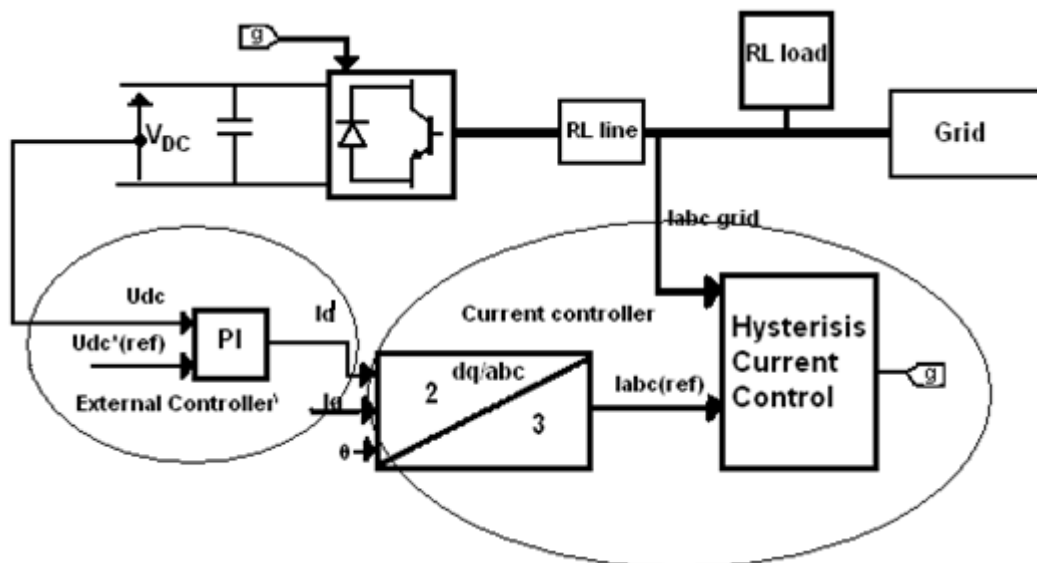
Η ταχύτητα αναφοράς είναι εκείνη που θα μας δώσει ο κατασκευαστής της ανεμογεννήτριας. Διαφορετικά για περισσότερη ακρίβεια της ταχύτητας αναφοράς, θα μπορούσε να προέλθει από τον έλεγχο εύρεσης μέγιστου σημείου λειτουργίας (MPPT). Ο έλεγχος εφαρμόζεται στην ηλεκτρική ισχύ εξόδου του ανορθωτή, και η εύρεση του μέγιστου σημείου λειτουργίας βρίσκεται από τις χαρακτηριστικές καμπύλες μηχανικής ισχύς-ταχύτητας περιστροφής ανεμοτουρμπίνας για κάθε ταχύτητα του ανέμου όπως φαίνεται στο σχήμα 3.3.[16,17,18]



Σχήμα 3.3 μηχανικής ισχύς-ταχύτητας περιστροφής για κάθε ταχύτητα ανέμου

3.3 Grid Side Control

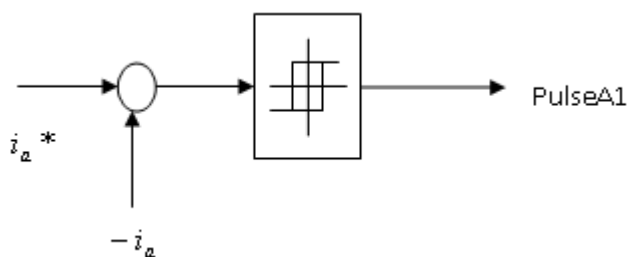
Η σύνδεση της ανεμογεννήτριας με το δίκτυο γίνεται μέσω του αντιστροφέα (inverter). Πιο συγκεκριμένα ο ανορθωτής συνδέεται με έναν πυκνωτή που χρησιμοποιείται για να εξουδετερώνει τις διακυμάνσεις της τάσης που μπορούν να υπάρχουν. Ο πυκνωτής συνδέεται με τον inverter, ο οποίος δεν συνδέεται απευθείας στο δίκτυο, αλλά με μια γραμμή μεταφοράς RL και στο φορτίο που στην περίπτωση μας θα είναι μια αντίσταση R και ένα πηνίο L. Όσον αφορά το κομμάτι ελέγχου στην πλευρά του δικτύου, χωρίζεται σε δυο ξεχωριστούς ελεγκτές. Ο εξωτερικός ελεγκτής ελέγχει την DC τάση και ως εκ τούτου την ενεργό και άεργο ισχύ που εγχέεται στο δίκτυο. Τα ρεύματα αναφοράς που δημιουργούνται από τον εξωτερικό ελεγκτή, τα χρησιμοποιεί ο δεύτερος, δηλαδή ο εσωτερικός ελεγκτής ρεύματος. Στην ουσία ο εσωτερικός ελεγκτής ρεύματος είναι εκείνος που θα δημιουργήσει τους παλμούς και να λειτουργήσει ο αντιστροφέας. Στο σχήμα 3.4 παρουσιάζεται η γενική μορφή του grid side control.



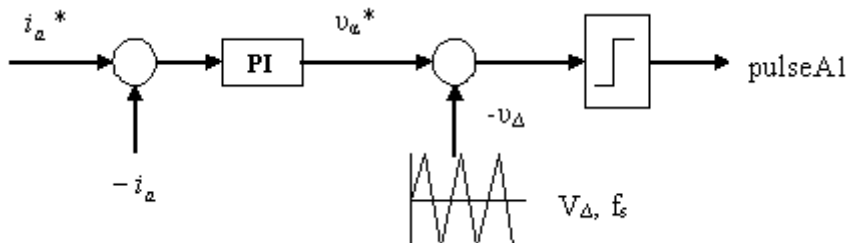
Σχήμα 3.4 Μπλοκ διάγραμμα του grid side control

3.3.1 Ελεγκτής ρεύματος

Όπως είχαμε αναφέρει και στο κεφάλαιο 2, υπάρχουν αρκετοί τρόποι για να ελέγξεις το ρεύμα και να παλμοδοτήσεις τους μετατροπείς ισχύος. Ο πρώτος είναι ο έλεγχος με υστέρηση ρεύματος και ο δεύτερος είναι με την τεχνική σύγκρισης ράμπας. Οι δυο τεχνικές φαίνονται στα σχήματα 3.5 και 3.6 αντίστοιχα. Στην παρούσα εργασία θα υλοποιήσουμε τον έλεγχο με υστέρηση ρεύματος που έχει αναλυθεί και στο κεφάλαιο 2.



Σχήμα 3.5 Έλεγχος ρεύματος της φάσης α με τον έλεγχο υστέρησης



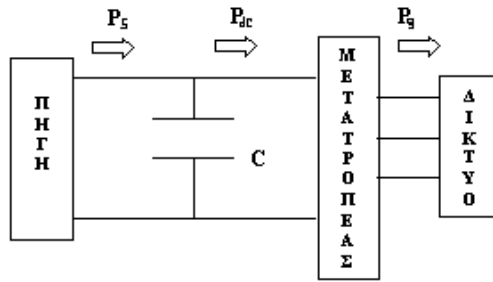
Σχήμα 3.6 Έλεγχος ρεύματος της φάσης α με την χρησιμοποίηση φέροντος και PI ελεγκτή.

Αν $u_a^* - u_{\Delta} > 0$ τότε $\text{pulseA1} = 1$ και αν $u_a^* - u_{\Delta} < 0$ τότε $\text{pulseA1} = 0$

3.3.2 Έλεγχος της DC τάσης και της ισχύος

Η DC τάση του μετατροπέα, στην πραγματικότητα δεν είναι σταθερή, αλλά εξαρτάται από τη διαθέσιμη ισχύ στην DC πλευρά και τη ζητούμενη ισχύ από το δίκτυο. Επομένως ο έλεγχος της DC τάσης υλοποιήθηκε για να καθορίσει την ισχύ που μπορεί να δώσει ο μετατροπέας στο δίκτυο, ώστε η DC τάση να παραμένει σταθερή.

Η ισχύς που εισέρχεται στον μετατροπέα από την DC πλευρά μπορεί να προέρχεται είτε από μπαταρία είτε από άλλη πηγή. Αν χρησιμοποιείται μπαταρία τότε η DC τάση παραμένει συνεχώς σταθερή. Αν όμως χρησιμοποιείται άλλη πηγή, όπως ένας μετατροπέας DC/DC ή ένας μετατροπέας AC/DC (που έχουμε στην περίπτωση μας), η τάση δεν έχει συνεχώς σταθερή τιμή και γι' αυτό το λόγο χρησιμοποιούμε έναν πυκνωτή, ο οποίος συμπεριφέρεται ως πηγή τάσης και επιπλέον εξομαλύνει τις μεταβολές της. Στην πραγματικότητα η DC τάση δεν μπορεί να είναι ποτέ σταθερή και θα παρουσιάζει κάποια διακύμανση ανάλογα με την ισχύ που εισέρχεται προς και εξέρχεται από την DC πλευρά. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η ροή της ενεργού ισχύος από τον αντιστροφέα.



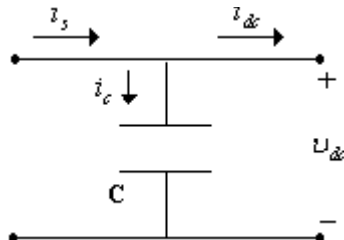
Σχήμα 3.7 Ροή ενεργού ισχύος κατά τη λειτουργία του μετατροπέα ως αντιστροφέα

Έστω ότι η ισχύς που μπορεί να δώσει η πηγή είναι P_s και η ισχύς που απαιτεί το δίκτυο είναι P_g . Θα θεωρήσουμε ότι η ισχύς που φτάνει στο δίκτυο είναι ίση με την ισχύ που εισέρχεται στον αντιστροφέα, δηλαδή $P_{dc}=P_g$, επειδή οι απώλειες του μετατροπέα είναι αμελητέες. Αν $P_{dc}>P_s$ ο πυκνωτής θα εκφορτιστεί δίνοντας μέρος της ισχύος του στο δίκτυο. Αν $P_s>P_{dc}$ τότε το πλεόνασμα της ισχύος από την πηγή θα φορτίσει τον πυκνωτή. Έτσι ο πυκνωτής καθώς φορτίζεται και εκφορτίζεται μεταβάλλει την DC τάση του.

Προκειμένου λοιπόν να επιτύχουμε μια σταθερή DC τάση θα χρησιμοποιήσουμε ένα σύστημα ελέγχου που να ρυθμίζει την ισχύ P_{dc} (στην περίπτωση μας θα ρυθμίζει το ρεύμα που εξαρτάται από την ενεργό ισχύ) που εισέρχεται στον μετατροπέα και θα επιλέξουμε μία κατάλληλη τιμή χωρητικότητας για τον πυκνωτή ώστε η διακύμανση της DC τάσης να είναι μέσα σε καθορισμένα ελάχιστα όρια. Πρακτικά όσο μεγαλύτερη είναι η χωρητικότητα τόσο μικρότερη είναι η διακύμανση στην τάση.

Έστω i_s το ρεύμα της πηγής (s:source), i_c το ρεύμα του πυκνωτή (c:capacitor) και i_{dc} το DC ρεύμα εισόδου του μετατροπέα (όλες οι τιμές είναι στιγμιαίες). Για το ρεύμα του πυκνωτή ισχύει η παρακάτω σχέση και φαίνεται στο σχήμα 3.8 :

$$i_c = C \frac{du_{dc}}{dt} \Rightarrow i_c = sCu_{dc} \quad \text{οπου } s = d/dt$$



Σχήμα 3.8 Η DC πλευρά του μετατροπέα

Από τον πρώτο νόμο του Kirchhoff στον κόμβο του πυκνωτή ισχύει :

$$C \frac{du_{dc}}{dt} = i_c = i_s - i_{dc} \Rightarrow sCu_{dc} = i_s - i_{dc} \Rightarrow u_{dc} = \frac{i_s - i_{dc}}{sC}$$

Επομένως από την παραπάνω σχέση προκύπτει η πραγματική τιμή της DC τάσης, η οποία προστίθεται στο αντίθετο της επιθυμητής τιμής. Το σφάλμα εισέρχεται σε έναν PI ελεγκτή, τα κέρδη K_p και K_i του οποίου έχουν υπολογιστεί με την μέθοδο που χρησιμοποιήσαμε και στην πλευρά ελέγχου της γεννήτριας. Η έξοδος του ελεγκτή είναι το επιθυμητό ρεύμα $i_d^* = I^* \cos \phi$, όπου από την γωνία που θα πάρουμε από τον επιθυμητό συντελεστή ισχύος θα υπολογίσουμε το $i_q^* = I^* \sin \phi$. Η συσχέτιση της ενεργού και άεργου ισχύος με τα ρεύματα i_d, i_q αναλύονται στο παράρτημα που βρίσκεται στο τέλος της εργασίας. Εν συνεχεία από το μπλοκ dq/abc που φαίνεται και στο σχήμα 3.4 θα λειτουργήσει ο ελεγκτής ρεύματος για να παλμοδοτήσει τον αντιστροφέα (inverter).

Η τιμή της DC τάσης που θέλουμε να έχει ο πυκνωτής δεν είναι αυθαίρετη, αλλά υπολογίζεται ανάλογα με την τιμή της τάσης που μας μετريέται στην πλευρά του αντιστροφέα. Άρα θα εξαρτάται και από την τάση εξόδου του αντιστροφέα. [20,21]

Έτσι η τιμή της τάσης δίνεται από τον παρακάτω τύπο :

$$V_{dc}^* = 2V_{i,peak} = 2\sqrt{\frac{2}{3}}V_{i,line-line}$$

Λαμβάνοντας υπόψη και την RL line που υπάρχει στην έξοδο του αντιστροφέα, αλλά και τις διακυμάνσεις του δικτύου, θα πρέπει να θεωρήσουμε λίγο μεγαλύτερη την τάση, της τάξης του 110% της ονομαστικής τιμής.

Έτσι αν ο αντιστροφέας συνδέεται σε ένα δίκτυο 400V η τάση του αντιστροφέα μπορεί να φτάσει έως τα 440 V.

$$\text{Άρα η απαιτούμενη τάση θα είναι : } V_{dc}^* = 2\sqrt{\frac{2}{3}}440V \approx 720V$$

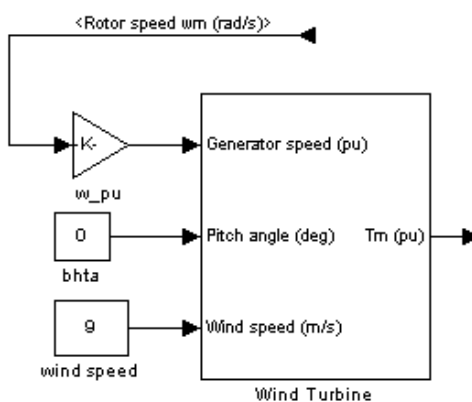
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 : ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΤΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΤΗΣ Α/Γ ΣΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΤΟΥ MATLAB/SIMULINK

4.1 Εισαγωγή

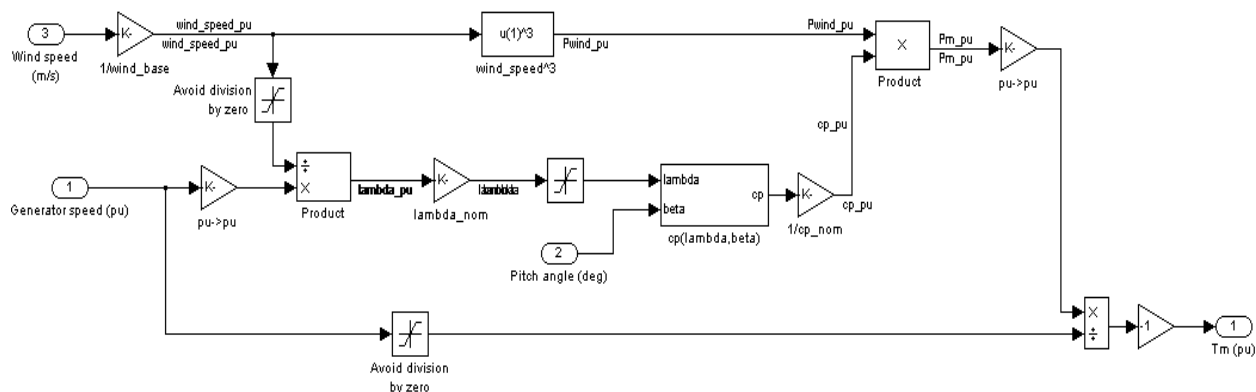
Σε αυτό το κεφάλαιο θα παρουσιάσουμε αναλυτικά την διαδικασία κατασκευής του μοντέλου και πως αυτό λειτουργεί. Επίσης, θα παρουσιάσουμε και τον τρόπο υλοποίησης του ελέγχου της ανεμογεννήτριας που περιγράψαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Επιπλέον θα δείξουμε πως ο χρήστης μπορεί να εισάγει τις δικές του παραμέτρους για την ανεμοτουρμπίνα, την γεννήτρια και τα ηλεκτρονικά ισχύος που χρησιμοποιεί. Στο τέλος θα παρουσιάσουμε μερικά παραδείγματα για να δείξουμε πως δουλεύει η ανεμογεννήτρια και θα δείξουμε τα διαγράμματα ανά περίπτωση. Η προσομοίωση της ανεμογεννήτριας και το κομμάτι ελέγχου της έγινε στο περιβάλλον του MATLAB/SIMULINK, που αποτελεί ένα σχεδιαστικό περιβάλλον κατάλληλο για προσομοιώσεις και μοντελοποιήσεις διαφόρων συστημάτων

4.2 Αεροδυναμική σχεδίαση Α/Γ

Η αεροδυναμική σχεδίαση της Α/Γ αποτελεί ίσως και το σημαντικότερο κομμάτι της σχεδίασης, εφόσον έχουμε την παραγωγή της ισχύος από τον άνεμο. Το μπλοκ φαίνεται στο σχήμα 4.1 (Wind Turbine) ενώ η εσωτερική υλοποίηση έτσι όπως μας την δίνει το Matlab/Simulink φαίνεται στο σχήμα 4.2



Σχήμα 4.1 Αεροδυναμικό μέρος Α/Γ

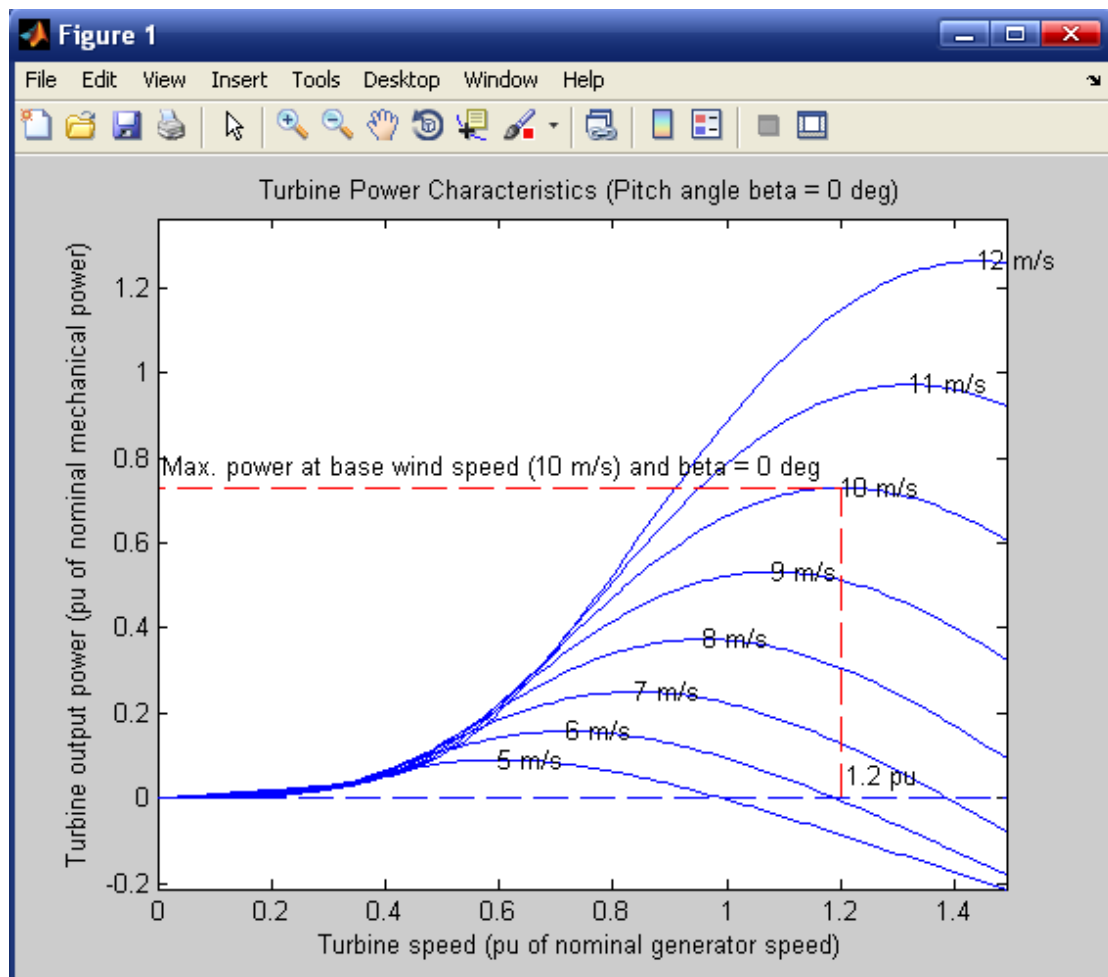


Σχήμα 4.2 Εσωτερική υλοποίηση αεροδυναμικού μέρους

Παρατηρούμε ότι έχει ως είσοδο την ταχύτητα περιστροφής της γεννήτριας εκφρασμένη σε p.u. τιμή, και ως βάση της ταχύτητας παίρνουμε την ονομαστική ταχύτητα περιστροφής της γεννήτριας. Επίσης ως δεύτερη είσοδο έχει την γωνία των πτερυγών (που προέρχεται από το pitch control) όπου για την συγκεκριμένη εργασία την θεωρούμε πάντα μηδενική εφόσον δεν υλοποιούμε το pitch control. Ως Τρίτη είσοδο έχει την ταχύτητα του ανέμου. Η έξοδος του είναι η ροπή εκφρασμένη σε p.u. τιμή, η οποία πολλαπλασιάζεται με την βάση της ονομαστικής ροής, για να δώσει την πραγματική τιμή ροπής με την οποία θα δουλέψει η γεννήτρια.

Στο εσωτερικό του μπλοκ εφαρμόζουμε την θεωρία και τον τύπο υπολογισμού της μηχανικής ισχύς που αναφέραμε στο κεφάλαιο 2. Η ροπή όπως έχει αναφερθεί υπολογίζεται ως $T = P_{\text{mech}} / \omega_{\text{gen}}$. Παρατηρούμε πως υπάρχουν οι κατάλληλοι έλεγχοι ώστε να αποφευχθούν οι διαιρέσεις με το μηδέν κατά τους υπολογισμούς.

Στο σχήμα 4.3 παρουσιάζεται μια τυπική μεταβολή της μηχανικής ισχύς (με τυχαίες παραμέτρους) εξόδου της τουρμπίνας (σε p.u. τιμή με βάση την ονομαστική μηχανική ισχύ) συναρτήσει της ταχύτητας περιστροφής της τουρμπίνας (σε p.u. τιμή με βάση την ονομαστική ταχύτητα περιστροφής).



Σχήμα 4.3 Γραφική παράσταση όπως μας την δίνει το MATLAB/SIMULINK της μηχανικής ισχύς συναρτήσει της γωνιακής ταχύτητας της γεννήτριας

Οι παράμετροι που δίνονται ως είσοδο στο αεροδυναμικό μέρος φαίνονται στο παρακάτω σχήμα. Βλέπουμε πως στο πρώτο πεδίο εισάγουμε την μηχανική ισχύ που θέλουμε να παράγει η γεννήτριά μας σε Watt, και στο δεύτερο πεδίο, η βάση ισχύος που θα έχει, που θα καθορίζεται από την μηχανική ισχύ και τον συντελεστή ισχύος. Στο τρίτο πεδίο εισάγουμε την βάση της ταχύτητας του ανέμου. Στο τέταρτο πεδίο φαίνεται η p.u. τιμή της μηχανικής ισχύς για την γωνιακή ταχύτητα περιστροφής επίσης σε p.u.τιμή που διακρίνεται στο πέμπτο πεδίο. Τέλος στο τελευταίο πεδίο εισάγουμε την γωνία κλίσης των πτερυγίων, και η συμπεριφορά του συντελεστή ισχύος ανάλογα με αυτήν την γωνία φαίνεται στο σχήμα 4.5

Parameters

Nominal mechanical output power (W):

Base power of the electrical generator (VA):

Base wind speed (m/s):

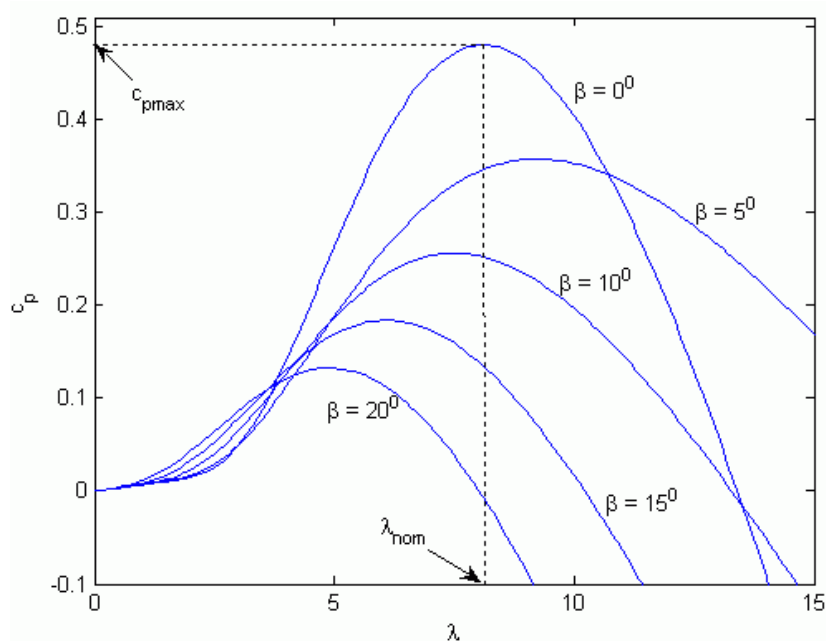
Maximum power at base wind speed (pu of nominal mechanical power):

Base rotational speed (p.u. of base generator speed):

Pitch angle beta to display wind-turbine power characteristics (beta >=0) (deg):

☐ Display wind turbine power characteristics

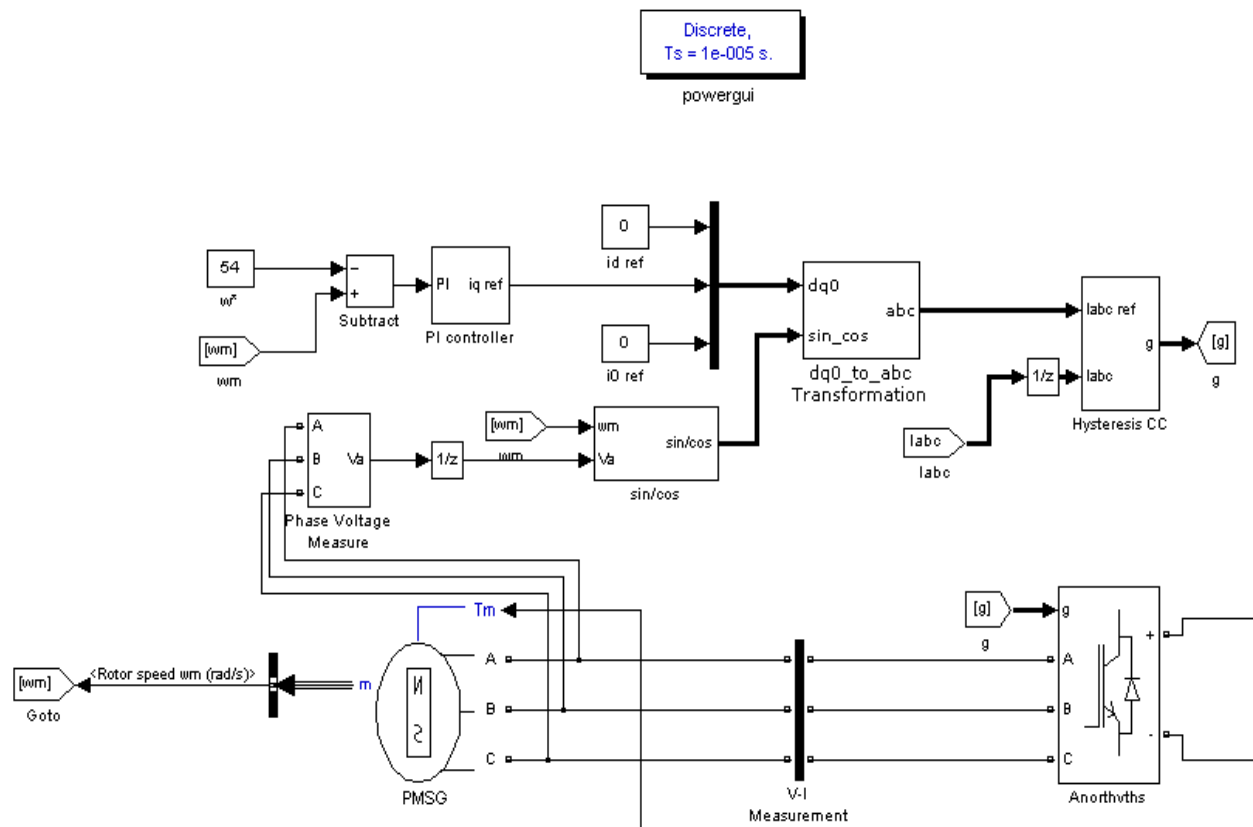
Σχήμα 4.4 Παράμετροι του μπλοκ Wind Turbine



Σχήμα 4.5 Γραφική παράσταση συντελεστή ισχύος συναρτήσει του λ και της γωνίας κλίσης β

4.3 Λειτουργία και έλεγχος της σύγχρονης γεννήτριας μονίμων μαγνητών

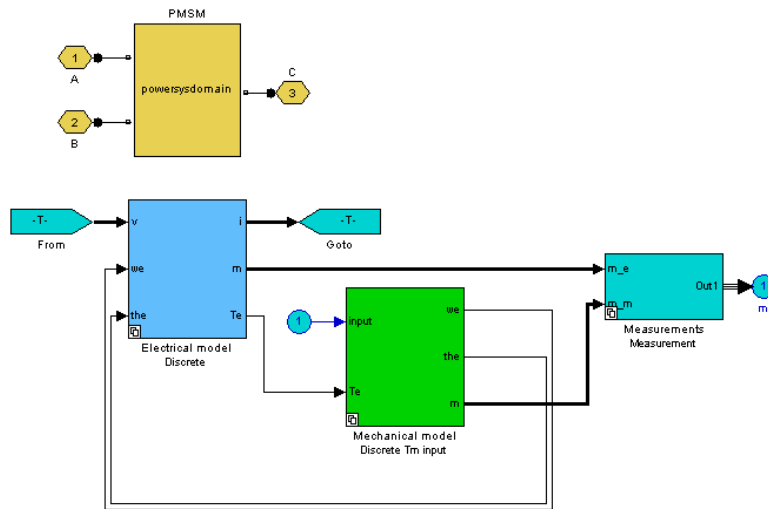
Η πλευρά όπου υπάρχει η γεννήτρια με την οποία παράγεται το ρεύμα από την ροπή του άξονα της Α/Γ, η ανορθωτική διάταξη και ο έλεγχος της (όπου έχουμε αναλύσει στο προηγούμενο κεφάλαιο πως υλοποιείται) φαίνεται στο παρακάτω σχήμα



Σχήμα 4.6 Αναπαράσταση της ΣΓΜΜ και του ελέγχου της

Η μοντελοποίηση θα γίνει σε διακριτό χρόνο (διότι εμπεριέχονται στοιχεία που λειτουργούν σε διακριτό χρόνο όπως οι μετατροπείς ισχύος), και πιο συγκεκριμένα ο χρόνος sample time θα είναι $T_s = 1e-5$ sec

Όπως παρατηρούμε το μπλοκ PMSG αντιστοιχεί στη σύγχρονη γεννήτρια μονίμων μαγνητών και το οποίο δεν σχεδιάστηκε αλλά αποτελεί έτοιμο μπλοκ από το SimPower Systems του Simulink. Το εσωτερικό του μπλοκ PMSG φαίνεται στην εικόνα 4.7. Επίσης παρατηρούμε πως η έξοδος του είναι η γωνιακή ταχύτητα της γεννήτριας την οποία χρησιμοποιεί το αεροδυναμικό μέρος (για να υπολογίσει την μηχανική ισχύ) καθώς και το κομμάτι ελέγχου.



Σχήμα 4.7 Εσωτερική σχεδίαση της Σύγχρονης Σχεδίασης Μονίμων Μαγνητών

Στην καρτέλα Configuration θα επιλέξουμε την μορφή της ηλεκτρεγερτικής δύναμης με την οποία θα λειτουργήσει η γεννήτρια, καθώς και την είσοδο που έχει. Πιο συγκεκριμένα η κυματομορφή της ηλεκτρεγερτικής δύναμης θα είναι ημιτονοειδής, και η είσοδος όπως θα διαλέξουμε την ροπή όπως έχουμε αναφερθεί, και η άλλη επιλογή ήταν η γωνιακή ταχύτητα που δεν μας συμφέρει να χρησιμοποιήσουμε σε αυτήν την εφαρμογή.

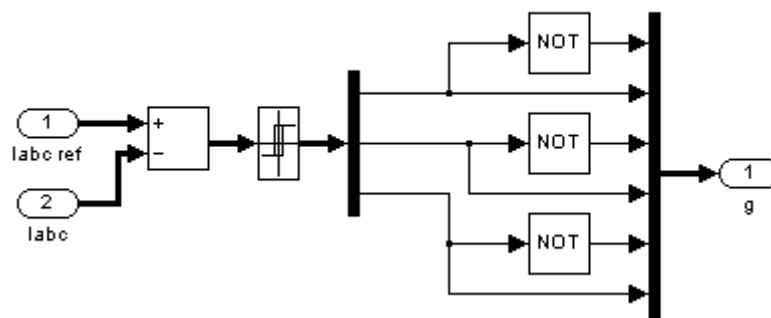
Σχήμα 4.8 Παράμετροι της γεννήτριας στην καρτέλα Configuration

Οι ηλεκτρικές παράμετροι της γεννήτριας φαίνονται στο σχήμα 4.9. Στο πρώτο πεδίο εισάγουμε την αντίσταση του στάτη της γεννήτριας, στο δεύτερο πεδίο τις σύγχρονες αντιδράσεις κατά τον d-άξονα και q-άξονα αντίστοιχα. Επειδή πρόκειται για μηχανή κυλινδρικού δρομέα αυτές οι δυο ποσότητες θα είναι ίσες. Στο τρίτο πεδίο επιλέγουμε την επιλογή της δημιουργίας της ροής από τους μαγνήτες και στο επόμενο εισάγουμε την τιμή της μαγνητικής ροής. Στο προτελευταίο πεδίο εισάγουμε την αδράνεια που θα δημιουργείται, την ηλεκτρομαγνητική ροπή και τον αριθμό ζευγών των πόλων της γεννήτριας. Στο τελευταίο πεδίο εισάγουμε τις αρχικές συνθήκες της μηχανικής γωνιακής ταχύτητας και γωνίας, καθώς και το αρχικό ρεύμα του στάτορα που θα είναι μηδέν. Να παρατηρήσουμε πως το ρεύμα I_c ισούται με $I_c = -I_a - I_b$ και για αυτόν τον λόγο δεν χρειάζεται να εισάγουμε την τιμή του.

Configuration	Parameters	Advanced
Stator phase resistance R_s (ohm):		
2.8750		
Inductances [$L_d(H)$ $L_q(H)$]:		
[8.5e-3,8.5e-3]		
Specify: Flux linkage established by magnets (V.s)		
Flux linkage established by magnets (V.s):		
0.175		
Voltage Constant (V_{peak} L-L / krpm):		
126.966		
Torque Constant ($N.m / A_{peak}$):		
1.05		
Inertia, friction factor, pole pairs [$J(kg.m^2)$ $F(N.m.s)$ $p()$]:		
[0.0008 0.001 4]		
Initial conditions [$\omega_m(rad/s)$ $\theta_m(deg)$ $i_a, i_b(A)$]:		
[0,0, 0,0]		

Σχήμα 4.9 Ηλεκτρικές παράμετροι της γεννήτριας

Όσον αφορά τον έλεγχο της ταχύτητας βρίσκεται πάνω από το μπλοκ της γεννήτριας. Εκεί συγκρίνονται η επιθυμητή γωνιακή ταχύτητα και η πραγματική της γεννήτριας και παράγεται το ρεύμα ροπής i_q . Όπου σε συνδυασμό με το ρεύμα πεδίου ($i_d=0$) και το ρεύμα i_0 (το οποίο πάντοτε ισούται με μηδέν $i_0=0$) και την γωνία ροπής του στάτη (που υπολογίζεται με την βοήθεια του μπλοκ $\sin/\cos$ και χρησιμοποιεί και την γωνιακή ταχύτητα αλλά και την φάση της τάσης V_a) έχουμε την παραγωγή του ρεύματος αναφοράς I_{abc_ref} . Με την βοήθεια του κυκλώματος Hysteresis CC υπολογίζονται οι παλμοί με του οποίους δουλεύει ο ανορθωτής, και απεικονίζεται στο σχήμα 4.6



Σχήμα 4.10 Hysteresis Current Control στην πλευρά της γεννήτριας

4.4 Λειτουργία του αντιστροφέα και έλεγχος της Α/Γ στην πλευρά του δικτύου

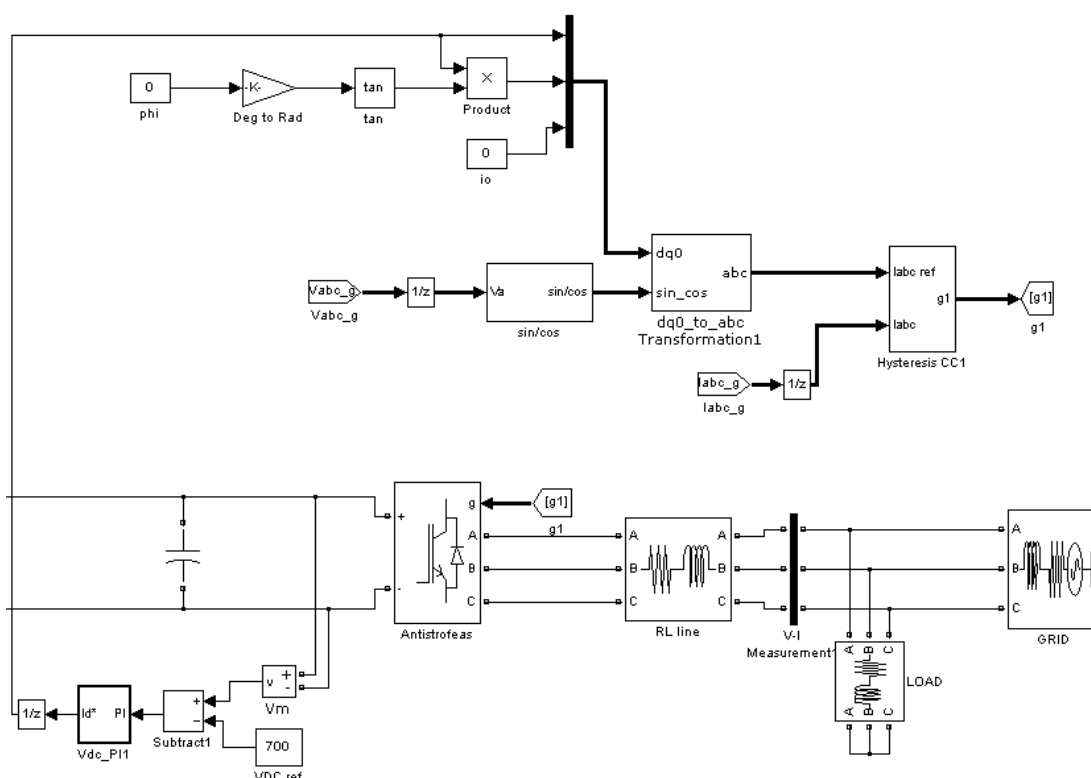
Η ανεμογεννήτρια συνδέεται στο δίκτυο, και επίσης τροφοδοτεί και ένα φορτίο όπως διακρίνεται στο σχήμα 4.7 (μπλοκ GRID και LOAD αντίστοιχα)

Επίσης πριν από το φορτίο διακρίνεται και η γραμμή μεταφοράς που αντιστοιχεί στο μπλοκ RL line. Επιπλέον διακρίνεται ο έλεγχος της DC τάσης του πυκνωτή και το Hysteresis Current Control σύμφωνα με την διαδικασία που αναπτύχθηκε αναλυτικά στο κεφάλαιο 3. Παρατηρούμε πως το ρεύμα i_d παράγεται από την έξοδο του ΠΙ ελεγκτή, και το ρεύμα i_q υπολογίζεται με την τιμή του i_d και την γωνία φ που θέλουμε να έχει η φαινόμενη ισχύς που θα παράγει η Α/Γ. Πιο συγκεκριμένα το i_q ισούται :

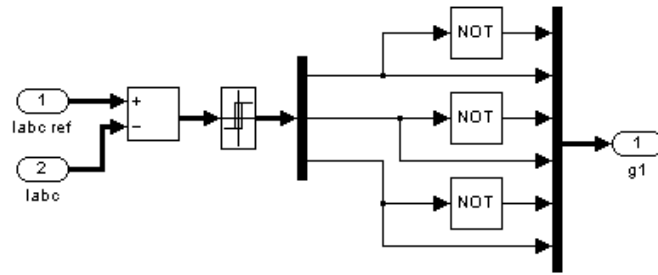
$$i_q = i_d \tan(\varphi)$$

Όπως παρατηρούμε το ρεύμα μπορεί να μας δώσει πληροφορίες σχετικά με τον επιθυμητό συντελεστή ισχύος που παράγει η ανεμογεννήτρια, και υπολογίζεται ως $\Sigma I = \cos(\varphi)$. Στο παράρτημα 1 παρουσιάζουμε την θεωρία με την οποία σχετίζεται το ρεύμα με τον συντελεστή ισχύος καθώς και την διαδικασία μετάβασης από το abc στο dq πλαίσιο αναφοράς

Με την βοήθεια της τάσης του δικτύου υπολογίζουμε την γωνία που θα χρησιμοποιηθεί για να γίνει ο μετασχηματισμός του ρεύματος από dq σε abc συνιστώσες. Έπειτα σύμφωνα με το Hysteresis Current Controller που παρουσιάζεται στο σχήμα 4.8 παράγονται οι παλμοί με τους οποίους θα λειτουργήσει ο αντιστροφέας.

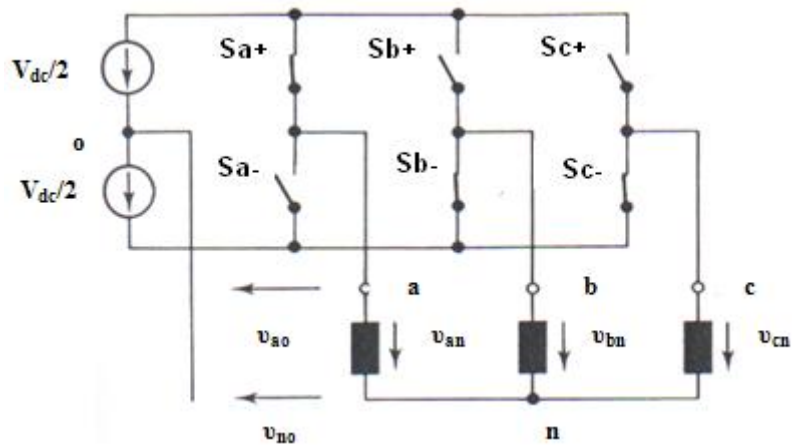


Σχήμα 4.11 αναπαράσταση της σύνδεσης της Α/Γ στο δίκτυο



Σχήμα 4.12 Hysteresis Current Control στην πλευρά του δικτύου

Παρατηρούμε πως η διαδικασία με την οποία παράγονται οι παλμοί είναι αυτή που περιγράψαμε και στο κεφάλαιο 2. Δηλαδή κάθε διακόπτης του αντιστροφέα αντιστοιχεί σε έναν από τους 6 παλμούς που φαίνονται στο σχήμα 4.12. Παρατηρώντας τους δυο πάνω διακόπτες βλέπουμε πως κάθε φορά το σήμα λαμβάνει το αντίθετο του άλλου. Αυτή είναι και η επιθυμητή συμπεριφορά που θέλουμε να υπάρχει, καθώς εάν ο πάνω διακόπτης Sa^+ του σχήματος 4.13 είναι κλειστός τότε ο Sa^- θα πρέπει να είναι ανοικτός. Και στα άλλα δυο ζεύγη διακοπών παρατηρούμε πως υπάρχει αυτή η ανάστροφη σχέση



Σχήμα 4.13 Τριφασικός μετατροπέας πηγής τάσης

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 : ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΓΓΡΑΦΗΣ ΤΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

5.1 Εισαγωγή

Θα παρουσιάσουμε μερικά παραδείγματα της προσομοίωσης μας για διάφορες ταχύτητες ανέμου, και πιο συγκεκριμένα για $u=8\text{m/s}$, και $u=12\text{m/s}$. Επίσης θα έχουμε και μικρές διακυμάνσεις των ταχυτήτων καθώς και απότομες μεταβολές. Θα εξετάσουμε πως συμπεριφέρεται η ανεμογεννήτρια για διάφορες τιμές της γωνίας κλίσης των πτερυγίων. Επίσης στην αρχή η άεργος ισχύς που προσφέρει το σύστημά μας είναι μηδενικό. Στην συνέχεια θα δώσουμε την δυνατότητα στο σύστημα να δίνει και άεργο ισχύ, και όπως θα δούμε, το αποτέλεσμα θα είναι να μειώσουμε την προσφορά άεργου ισχύος του δικτύου.

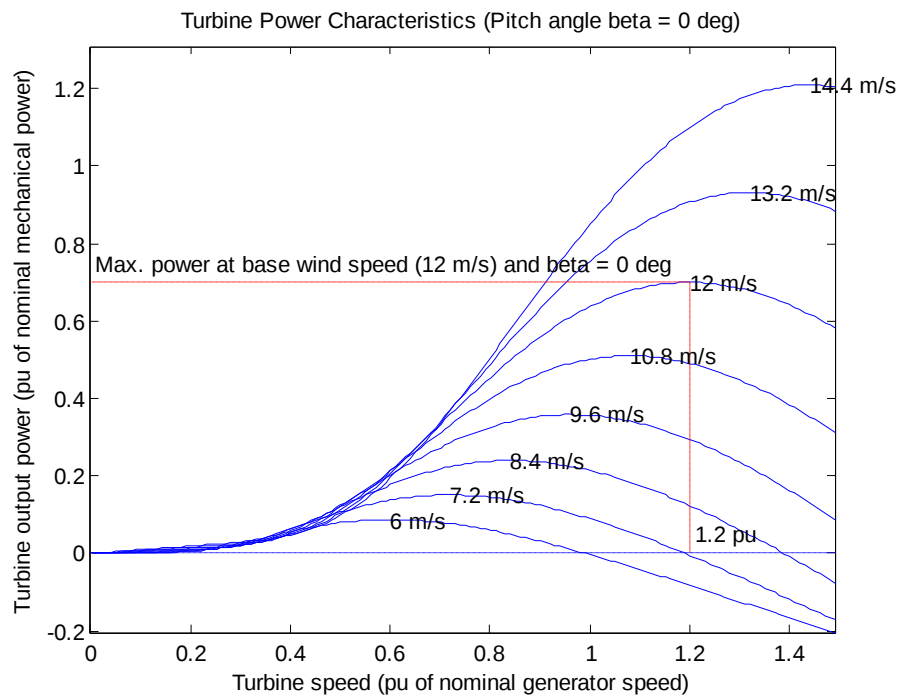
Τα διαγράμματα τα οποία θα παρουσιάσουμε είναι η παραγόμενη μηχανική ισχύς της ανεμοτουρμπίνας, καθώς και της ροπής που παράγεται από το μπλοκ Wind Turbine. Η ροπή όπως θα παρατηρήσουμε θα είναι αρνητική καθώς δουλεύουμε με σύγχρονη γεννήτρια μονίμων μαγνητών επομένως για να εκκινήσει θα χρειαστεί αρνητική ροπή. Επιπλέον θα δούμε και τα αποτελέσματα του έλεγχου της ταχύτητας, και πιο συγκεκριμένα πως η γωνιακή ταχύτητα της γεννήτριας φθάνει στην επιθυμητή τιμή.. Παρουσιάζονται τα ρεύματα αναφοράς και της γεννήτριας με τα οποία θα λειτουργήσει ο Hysteresis CC. Το ίδιο θα παρουσιάσουμε και την πλευρά του αντιστροφέα, με την διαφορά πως το ρεύμα της γεννήτριας θα αντικατασταθεί με το ρεύμα του συστήματος που βρίσκεται συνδεδεμένο στο δίκτυο. Εξετάζουμε και την ισχύ που παράγεται στην έξοδο του πρώτου μετατροπέας ισχύος, δηλαδή του ανορθωτή, για να δούμε πόση απώλεια ισχύος είχαμε σε σχέση με την παραγόμενη μηχανική ισχύς. Όσον αφορά την πλευρά του αντιστροφέα, θα παρουσιάσουμε την απόκριση του συστήματος κατά τον έλεγχο της DC τάσης. Τέλος παρουσιάζονται οι γραφικές παραστάσεις που αφορούν την ισχύ στην έξοδο του συστήματος του αντιστροφέα, την ισχύ που παρέχει το δίκτυο, αλλά και την ισχύ που ζητάει το φορτίο. Στην έξοδο του συστήματος του αντιστροφέα η ισχύς που παράγεται έχει αρνητικό πρόσημο διότι η διάταξη με την οποία είναι τοποθετημένα τα όργανα μέτρησης αντιλαμβάνονται τη ροή ισχύος αντίθετη με τη συμβατική φορά, όπου συμβατική φορά λαμβάνεται η φορά ισχύος από το δίκτυο προς το σύστημα και το φορτίο. Γενικά για τα παραδείγματά μας θα θεωρήσουμε την τάση του δικτύου ίση με $V=400\text{V}$, έτσι σε όλα τα παραδείγματα, η επιθυμητή DC τάση υπολογίζεται σύμφωνα με τον τύπο που αναφέραμε στο κεφάλαιο .

$$\text{Άρα η απαιτούμενη τάση θα είναι : } V_{dc}^* = 2\sqrt{\frac{2}{3}} 440\text{V} \approx 720\text{V}$$

Επειδή όμως η τάση του δικτύου μας δεν παρουσιάζει διακυμάνσεις, θα θεωρήσουμε την τάση $V_{dc}=700\text{V}$.

5.2 Παράδειγμα 1

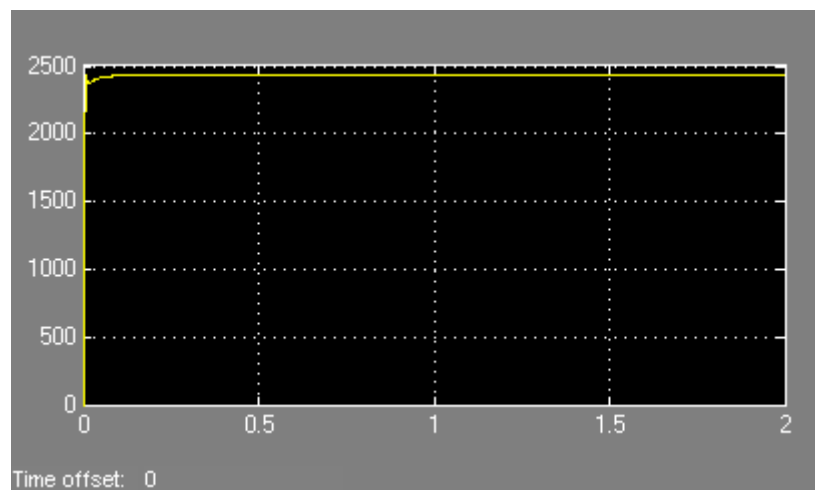
Σε αυτό το παράδειγμα, η γεννήτρια θα δουλεύει με σταθερή ταχύτητα, και μηδενική γωνία κλίσης των πτερυγίων. Η ονομαστική ισχύς που θα παράγει η γεννήτρια θα είναι 3.7 KW και η άεργος ισχύ στην έξοδο του συστήματος θα είναι μηδέν. Η πραγματική μηχανική ισχύς που παράγεται από την Α/Γ θα είναι μικρότερη από 3.7KW διότι στην μέγιστη ταχύτητα εισόδου ($u=12\text{m/s}$) έχει απόδοση 73% το σύστημα όπως φαίνεται και από το κάτωθι διάγραμμα. Επομένως η παραγόμενη ισχύς θα είναι περίπου $P_{\text{mech}} = 3700 \cdot 0.7 = 2590 \text{ W}$



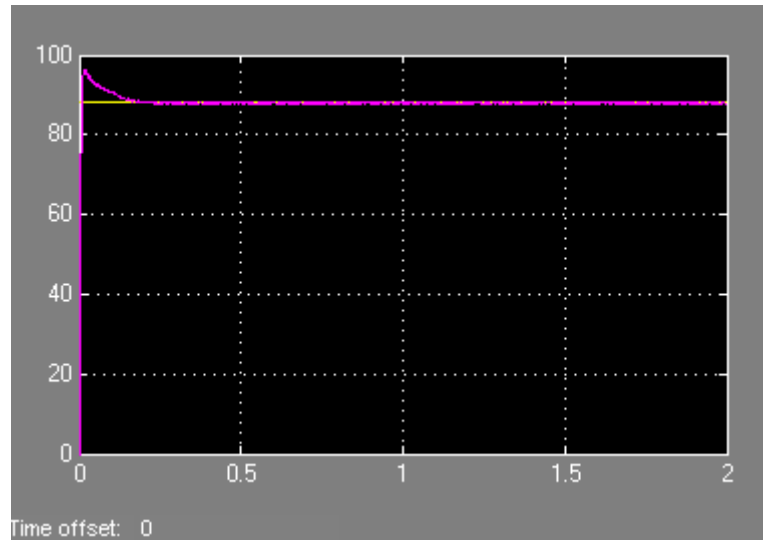
Σχήμα 5.1 Μηχανική ισχύς συναρτήσει γωνιακής ταχύτητας

Η γωνιακή ταχύτητα της Α/Γ είναι 700rpm και η επιθυμητή γωνιακή ταχύτητα τίθεται όπως φαίνεται και στο διάγραμμα σε $1.2 \cdot 700 = 840\text{rpm}$.

Η ισχύς εξόδου φαίνεται στο σχήμα 5.2, και στο σχήμα 5.3 φαίνεται ο έλεγχος της ταχύτητας που εφαρμόζουμε στο σύστημα.



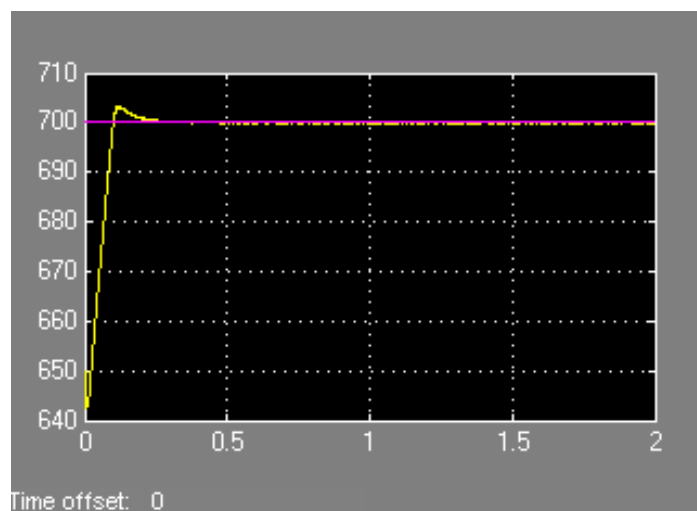
Σχήμα 5.2 Μηχανική ισχύς ανεμογεννήτριας



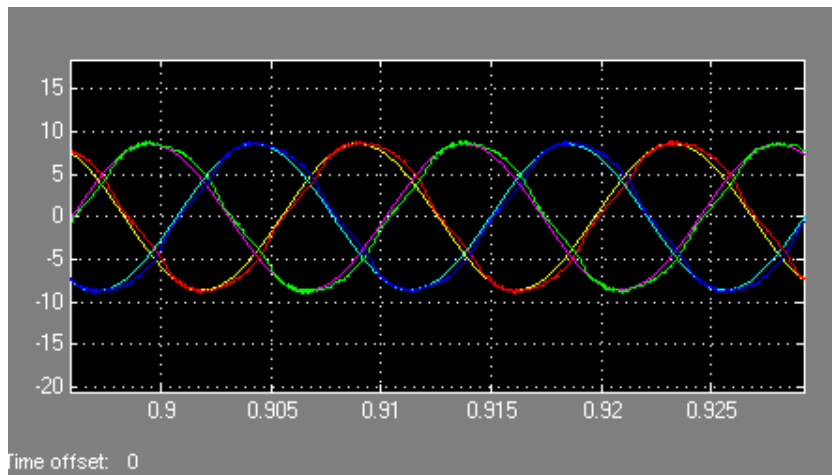
Σχήμα 5.3 Έλεγχος γωνιακής ταχύτητας

Ο έλεγχος της DC τάσης που πραγματοποιούμε φαίνεται στο σχήμα 5.4 και παρατηρούμε πως το σύστημα έρχεται σε ισορροπία έπειτα από χρόνο προσομοίωσης $t=0.1$ simulation time κάτι που μπορούμε να παρατηρήσουμε και στις παραπάνω γραφικές παραστάσεις. Έτσι η τάση λόγω του PI ελέγχου που πραγματοποιείται στην έξοδο του συστήματος ανόρθωσης, ισορροπεί στη ζητούμενη τάση που είναι 700 V εφόσον η τάση του δικτύου είναι 400V.

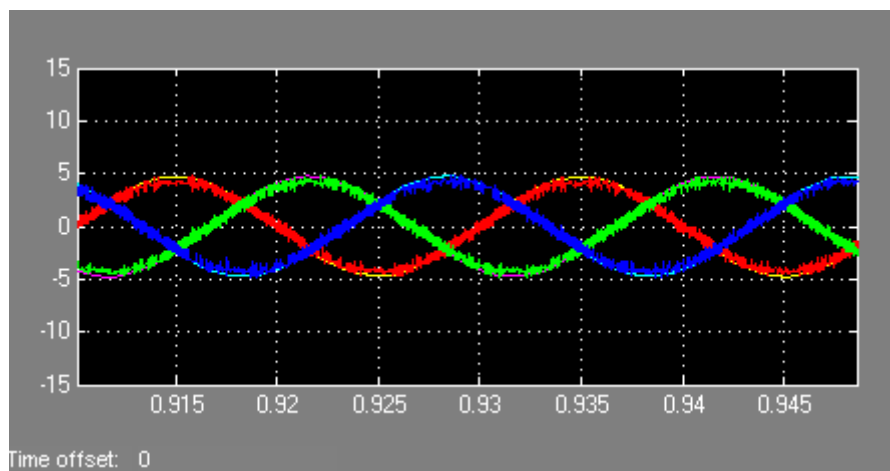
Στα σχήματα 5.4 και 5.5 παρουσιάζουμε το αποτέλεσμα του ελέγχου ρεύματος στην πλευρά της γεννήτριας και στην πλευρά του δικτύου αντίστοιχα και διακρίνονται οι ζώνες υστέρησης και τα ρεύματα των τριών φάσεων που ακολουθούν με ακρίβεια τις τρεις αναφορές, όπως αυτές παράγονται μέσω του μετασχηματισμού d-q.



Σχήμα 5.4 Έλεγχος DC τάσης

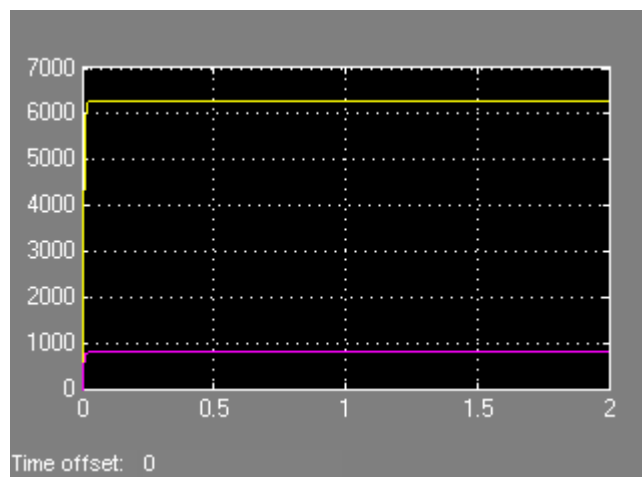


Σχήμα 5.5 PWM CC στην πλευρά της γεννήτριας

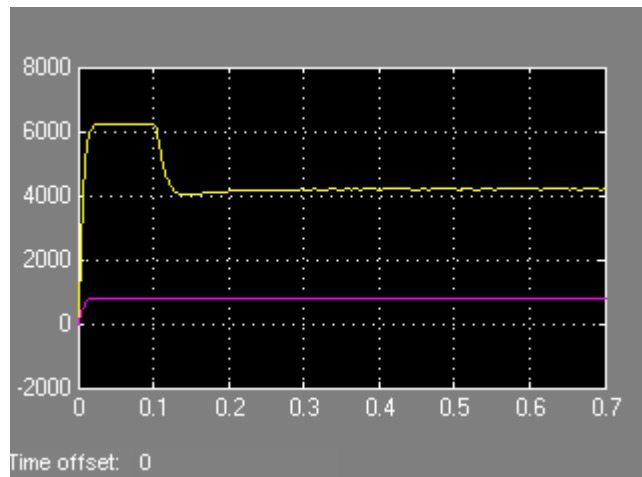


Σχήμα 5.6 PWM CC στην πλευρά του δικτύου

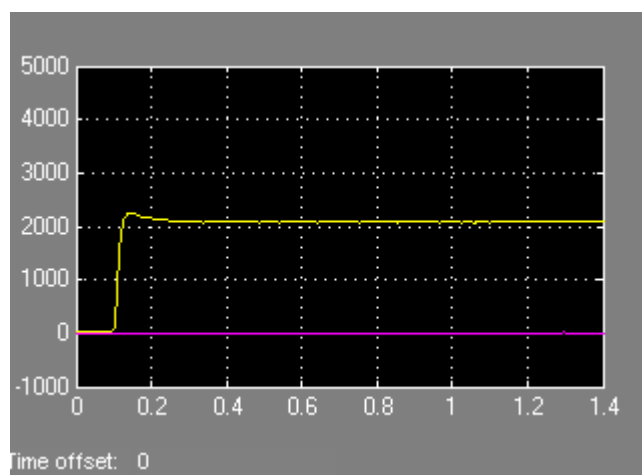
Η ζητούμενη ισχύ (ενεργό και άεργο) που ζητάει το φορτίο που έχουμε συνδέσει στην έξοδο του αντιστροφέα φαίνεται στο σχήμα 5.6. Το φορτίο αποτελείται από μια αντίσταση και ένα πηνίο. Στις εικόνες 5.7 και 5.8 φαίνονται τα ποσά της ισχύς που δίνει το δίκτυο και η A/Γ αντίστοιχα. Η αστάθεια που υπάρχει μέχρι να ισορροπήσει το σύστημα διακρίνεται καθώς μέχρι $t=0.1$ simulation time, το δίκτυο δίνει το σύνολο της ισχύος που χρειάζεται το δίκτυο, και έπειτα η ανεμογεννήτρια δίνει μέρος της ισχύος που χρειάζεται το φορτίο



Σχήμα 5.7 Ισχύς του φορτίου

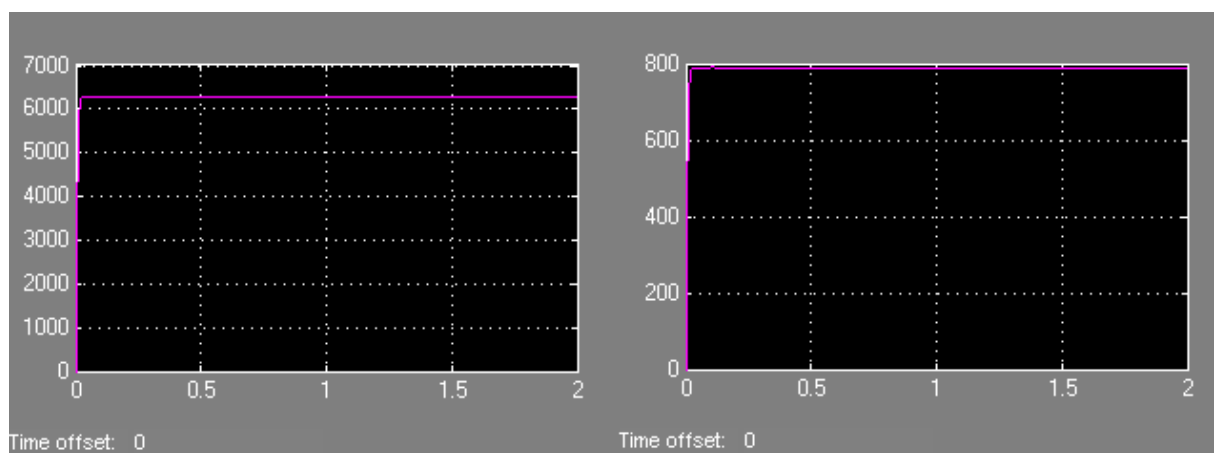


Σχήμα 5.8 Ισχύς που προσφέρει το δίκτυο



Σχήμα 5.9 Ισχύς που προσφέρει η Α/Γ

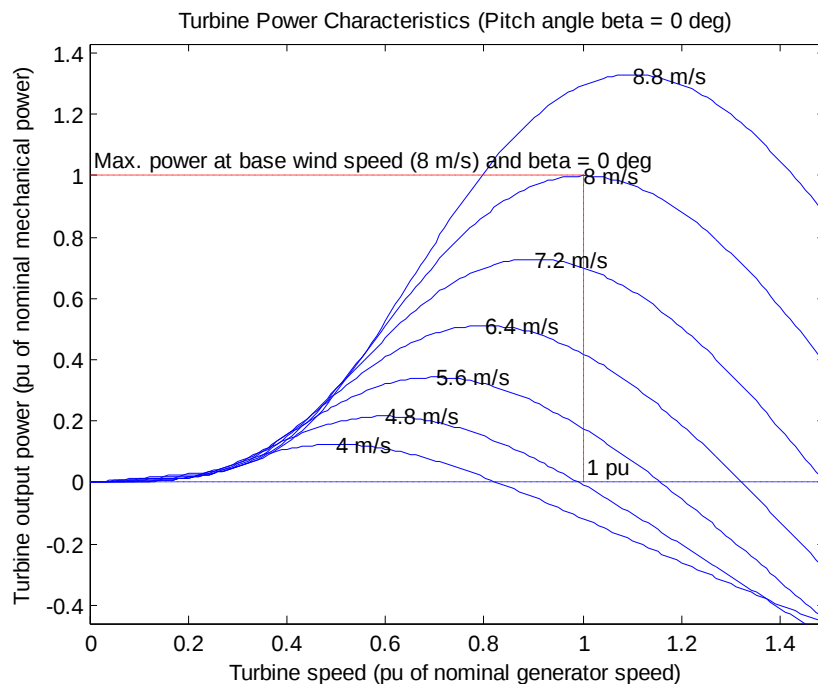
Τέλος το άθροισμα της ενεργού ισχύος που προσφέρει το δίκτυο και η Α/Γ, καθώς και το άθροισμα της άεργου ισχύος που προσφέρει το δίκτυο και η Α/Γ απεικονίζονται στο σχήμα 5.9. Όπως διακρίνουμε η ισχύεις είναι ίσες με αυτές που αναπαρίστανται στην γραφική παράσταση 5.6



Σχήμα 5.10 Άθροισμα ενεργών και άεργων ισχύων που παρέχει το δίκτυο και η Α/Γ

5.3 Παράδειγμα 2

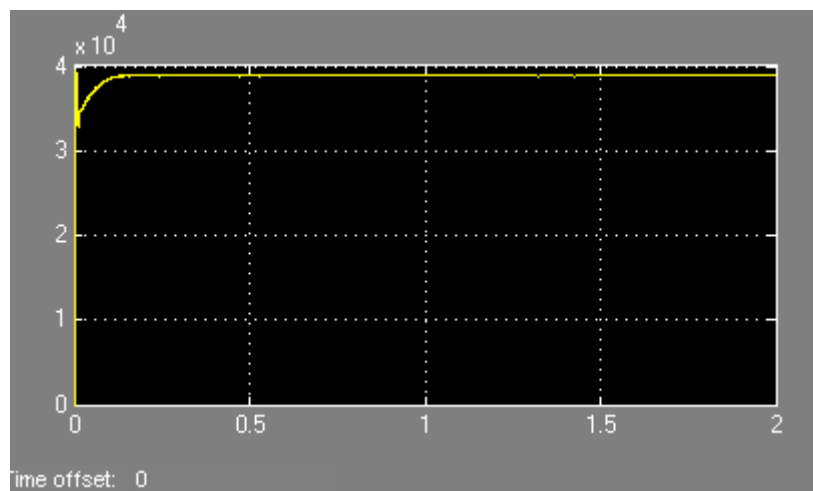
Σε αυτό το παράδειγμα, η γεννήτρια θα δουλεύει με σταθερή ταχύτητα, και μηδενική γωνία κλίσης των πτερυγίων. Η ονομαστική ισχύς που θα παράγει η γεννήτρια θα είναι 40 KW και θα παρέχει άεργο ισχύ στο φορτίο, θέτοντας την γωνία $\varphi = -18^\circ$ στον έλεγχο ρεύματος του δικτύου, και έτσι το i_q δεν θα είναι μηδέν. Η πραγματική μηχανική ισχύς που παράγεται από την Α/Γ θα είναι λίγο μικρότερη από 40KW παρόλο στην μέγιστη ταχύτητα εισόδου ($u=8\text{m/s}$) έχει απόδοση 100% το σύστημα όπως φαίνεται και από το κάτωθι διάγραμμα.



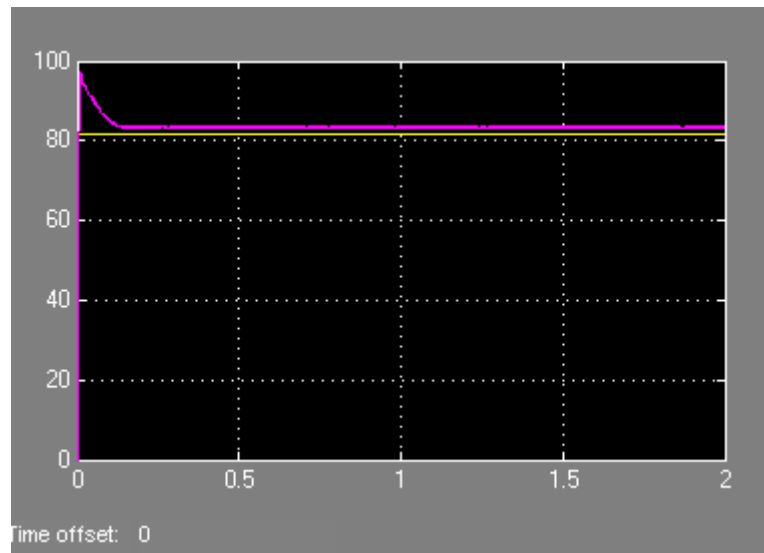
Σχήμα 5.11 Μηχανική ισχύς συναρτήσει γωνιακής ταχύτητας

Η γωνιακή ταχύτητα της Α/Γ είναι 1200rpm και η επιθυμητή γωνιακή ταχύτητα τίθεται όπως φαίνεται και στο διάγραμμα σε 1200rpm.

Η ισχύς εξόδου φαίνεται στο σχήμα 5.12, και στο σχήμα 5.13 φαίνεται ο έλεγχος της ταχύτητας που εφαρμόζουμε στο σύστημα.



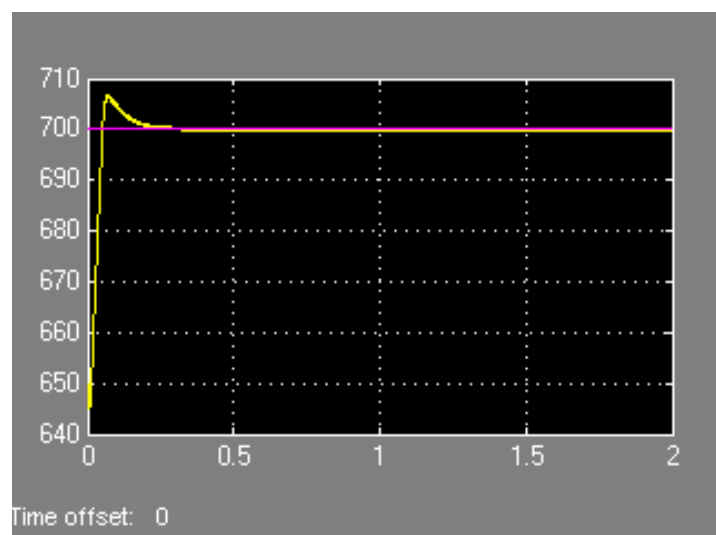
Σχήμα 5.12 Μηχανική ισχύς ανεμογεννήτριας



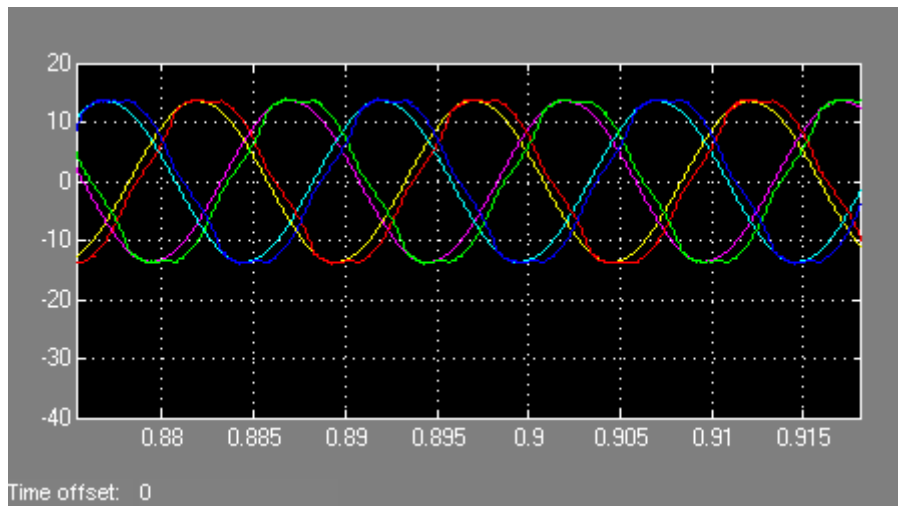
Σχήμα 5.13 Έλεγχος γωνιακής ταχύτητας

Ο έλεγχος της DC τάσης που πραγματοποιούμε φαίνεται στο σχήμα 5.14 και παρατηρούμε πως το σύστημα έρχεται σε ισορροπία έπειτα από χρόνο προσομοίωσης $t=0.1$ simulation time κάτι που μπορούμε να παρατηρήσουμε και στις παραπάνω γραφικές παραστάσεις. Έτσι η τάση λόγω του PI ελέγχου που πραγματοποιείται στην έξοδο του συστήματος ανόρθωσης, ισορροπεί στη ζητούμενη τάση που είναι 700 V εφόσον η τάση του δικτύου είναι 400V.

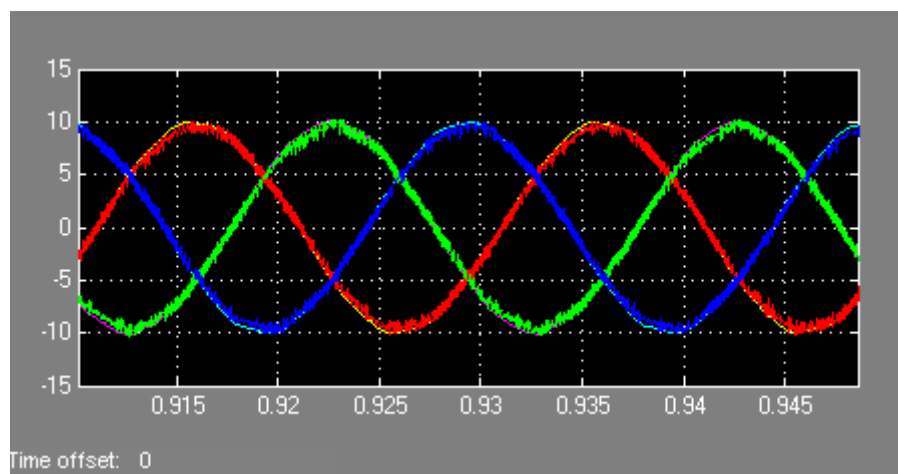
Στα σχήματα 5.15 και 5.16 παρουσιάζουμε το αποτέλεσμα του ελέγχου ρεύματος στην πλευρά της γεννήτριας και στην πλευρά του δικτύου αντίστοιχα και διακρίνονται οι ζώνες υστέρησης και τα ρεύματα των τριών φάσεων που ακολουθούν με ακρίβεια τις τρεις αναφορές, όπως αυτές παράγονται μέσω του μετασχηματισμού d-q.



Σχήμα 5.14 Έλεγχος DC τάσης

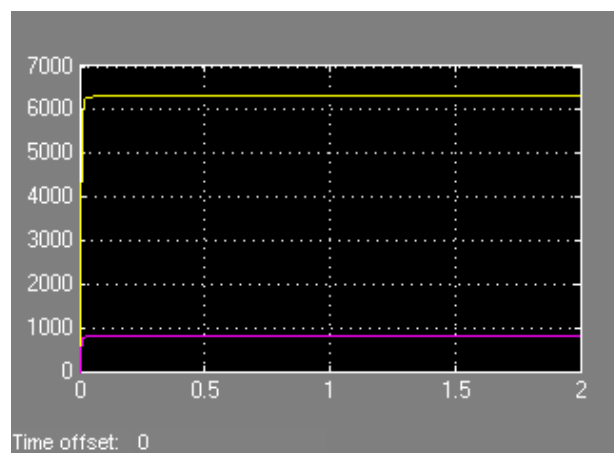


Σχήμα 5.15 PWM CC στην πλευρά της γεννήτριας

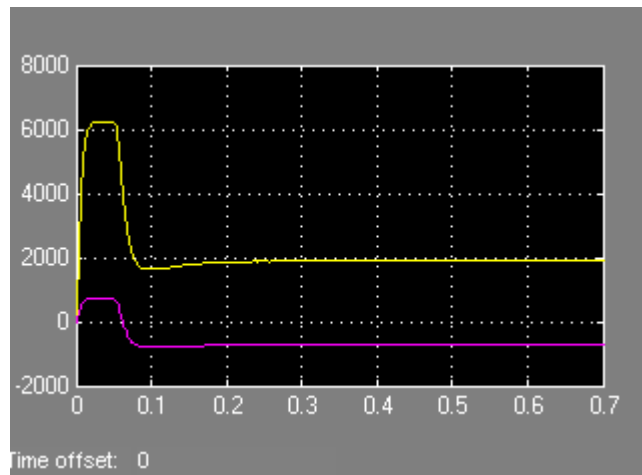


Σχήμα 5.16 PWM CC στην πλευρά του δικτύου

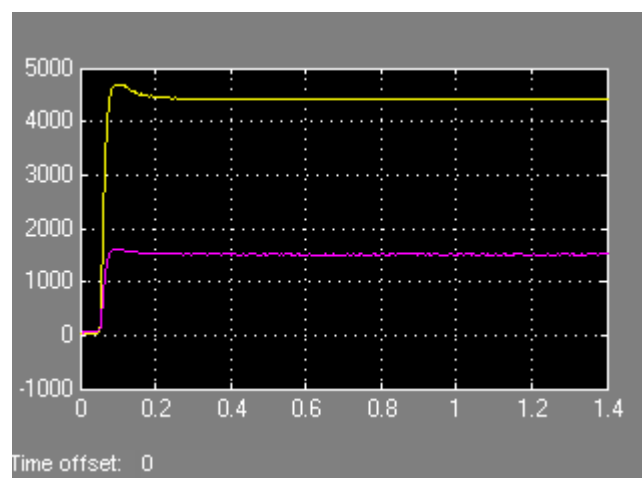
Η ζητούμενη ισχύ (ενεργό και άεργο) που ζητάει το φορτίο που έχουμε συνδέσει στην έξοδο του αντιστροφέα φαίνεται στο σχήμα 5.17. Το φορτίο αποτελείται από μια αντίσταση και ένα πηνίο. Στις εικόνες 5.18 και 5.19 φαίνονται τα ποσά της ισχύς που δίνει το δίκτυο και η Α/Γ αντίστοιχα. Η αστάθεια που υπάρχει μέχρι να ισορροπήσει το σύστημα διακρίνεται καθώς μέχρι $t=0.1$ simulation time, το δίκτυο δίνει το σύνολο της ισχύος που χρειάζεται το δίκτυο, και έπειτα η ανεμογεννήτρια δίνει μέρος της ισχύος που χρειάζεται το φορτίο



Σχήμα 5.17 Ισχύς του φορτίου



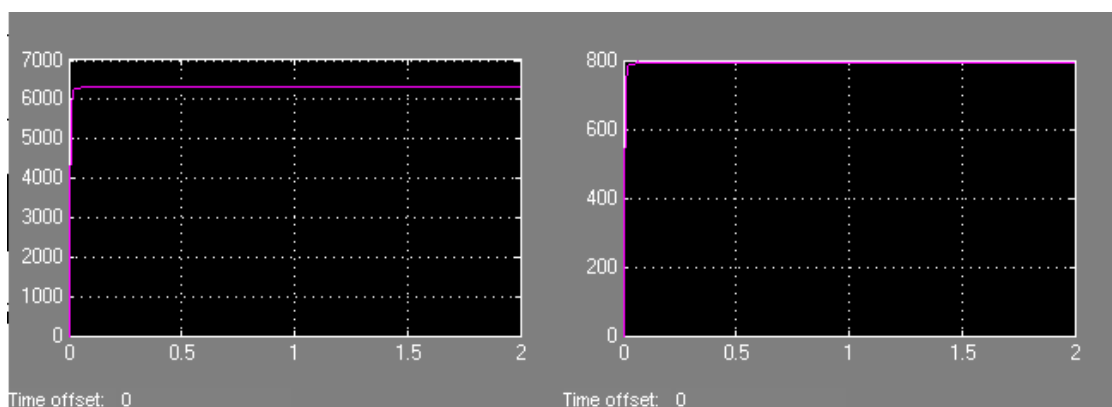
Σχήμα 5.18 Ισχύς που προσφέρει το δίκτυο



Σχήμα 5.19 Ισχύς που προσφέρει η Α/Γ

Παρατηρούμε πως η Α/Γ προσφέρει μεγαλύτερο μέρος ενεργού ισχύος σε σχέση με το προηγούμενο παράδειγμα, κάτι που περιμέναμε εφόσον παράγει μεγαλύτερη ισχύ. Επίσης καλύπτει πλήρως τις απαιτήσεις άεργου ισχύος του φορτίου.

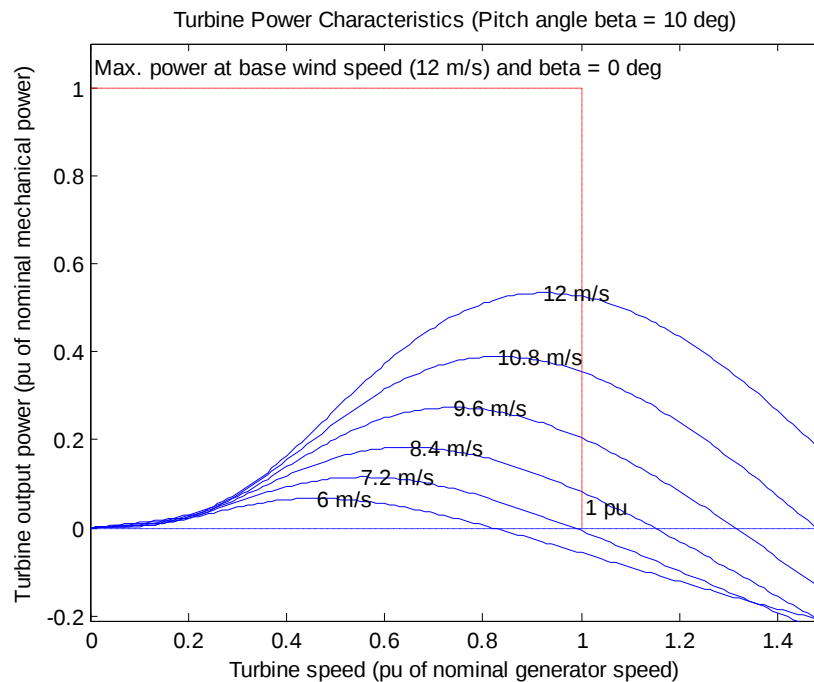
Τέλος το άθροισμα της ενεργού ισχύος που προσφέρει το δίκτυο και η Α/Γ, καθώς και το άθροισμα της άεργου ισχύος που προσφέρει το δίκτυο και η Α/Γ απεικονίζονται στο σχήμα 5.20. Όπως διακρίνουμε η ισχύεις είναι ίσες με αυτές που αναπαρίστανται στην γραφική παράσταση 5.17



Σχήμα 5.20 Άθροισμα ενεργών και άεργων ισχύων που παρέχει το δίκτυο και η Α/Γ

5.4 Παράδειγμα 3

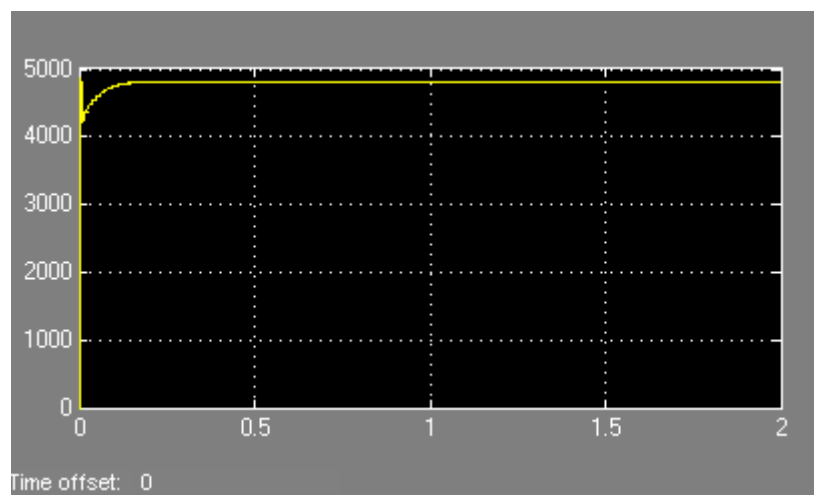
Σε αυτό το παράδειγμα, η γεννήτρια θα δουλεύει με σταθερή ταχύτητα, και γωνία κλίσης των πτερυγίων $\beta=10^0$. Η ονομαστική ισχύς που θα παράγει η γεννήτρια θα είναι 30 KW και η άεργος ισχύς στην έξοδο του συστήματος θα είναι μηδέν. Η πραγματική μηχανική ισχύς που παράγεται από την Α/Γ θα είναι μικρότερη από 30KW η γωνία των πτερυγίων της δεν θα είναι μηδέν και δεν λειτουργεί στην ονομαστική της ταχύτητα που είναι $u=12\text{m/s}$, αλλά θα λειτουργήσει στα 8m/s , και ως εκ τούτου όπως φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα, η πραγματική ισχύς που θα μας παρέχει θα είναι πολύ μικρότερη και περίπου $30\text{KW} \cdot 0.17 = 5100\text{W}$.



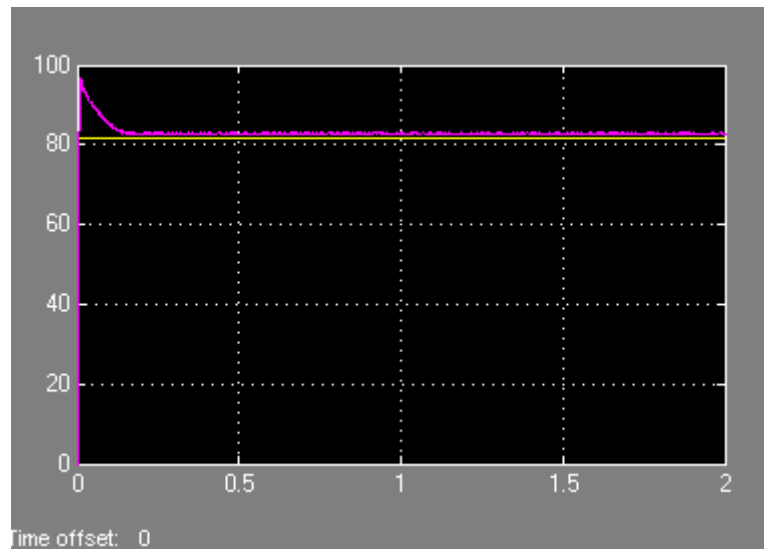
Σχήμα 5.21 Μηχανική ισχύς συναρτήσει γωνιακής ταχύτητας

Η γωνιακή ταχύτητα της Α/Γ είναι 1200rpm και η επιθυμητή γωνιακή ταχύτητα τίθεται όπως φαίνεται και στο διάγραμμα σε $0.65 \cdot 1200 = 780\text{rpm}$.

Η ισχύς εξόδου φαίνεται στο σχήμα 5.22, και στο σχήμα 5.23 φαίνεται ο έλεγχος της ταχύτητας που εφαρμόζουμε στο σύστημα.



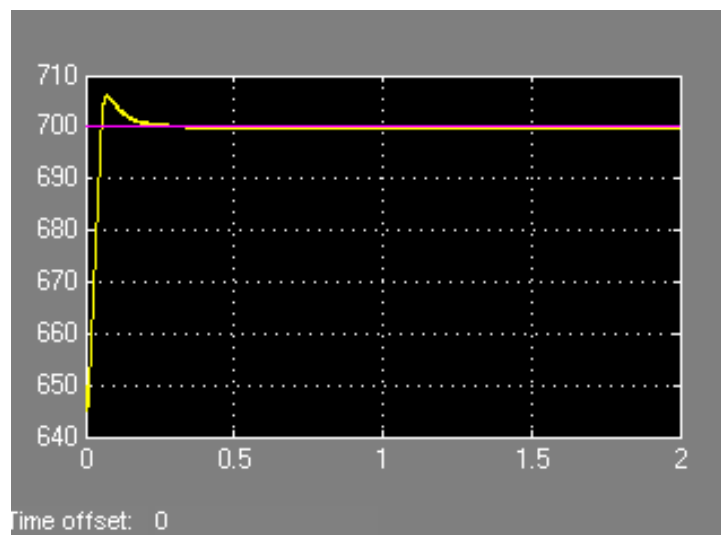
Σχήμα 5.22 Μηχανική ισχύς ανεμογεννήτριας



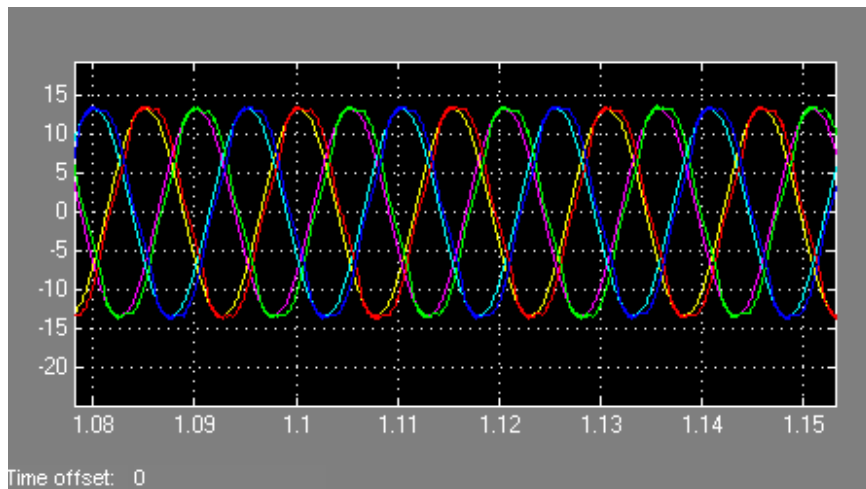
Σχήμα 5.23 Έλεγχος γωνιακής ταχύτητας

Ο έλεγχος της DC τάσης που πραγματοποιούμε φαίνεται στο σχήμα 5.24 και παρατηρούμε πως το σύστημα έρχεται σε ισορροπία έπειτα από χρόνο προσομοίωσης $t=0.1$ simulation time κάτι που μπορούμε να παρατηρήσουμε και στις παραπάνω γραφικές παραστάσεις. Έτσι η τάση λόγω του PI ελέγχου που πραγματοποιείται στην έξοδο του συστήματος ανόρθωσης, ισορροπεί στη ζητούμενη τάση που είναι 700 V εφόσον η τάση του δικτύου είναι 400V.

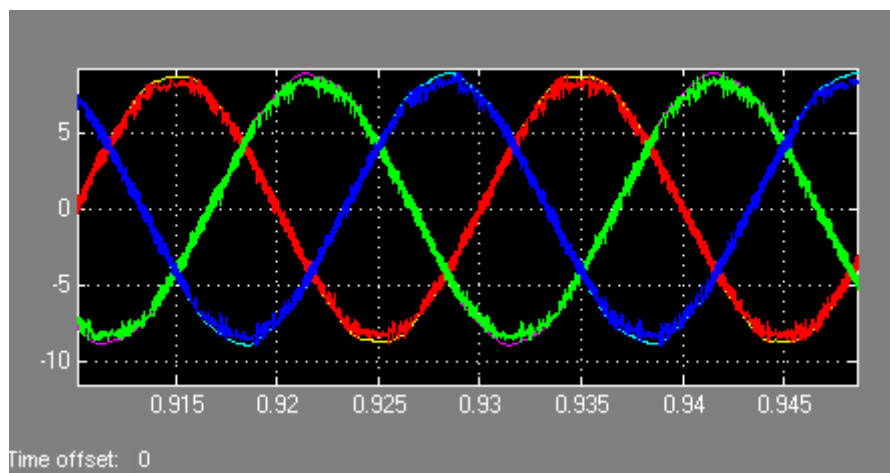
Στα σχήματα 5.25 και 5.26 παρουσιάζουμε το αποτέλεσμα του ελέγχου ρεύματος στην πλευρά της γεννήτριας και στην πλευρά του δικτύου αντίστοιχα και διακρίνονται οι ζώνες υστέρησης και τα ρεύματα των τριών φάσεων που ακολουθούν με ακρίβεια τις τρεις αναφορές, όπως αυτές παράγονται μέσω του μετασχηματισμού d-q.



Σχήμα 5.24 Έλεγχος DC τάσης

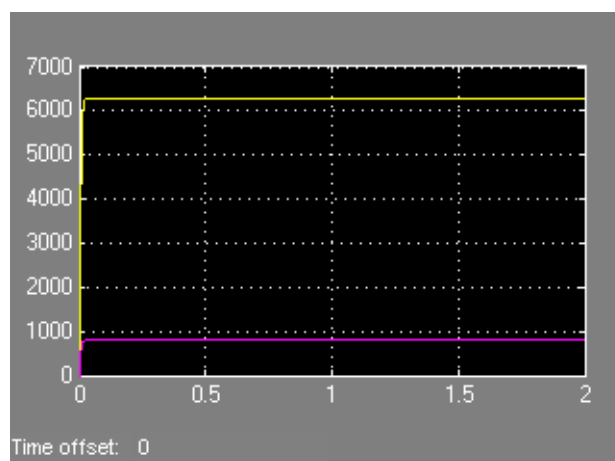


Σχήμα 5.25 PWM CC στην πλευρά της γεννήτριας

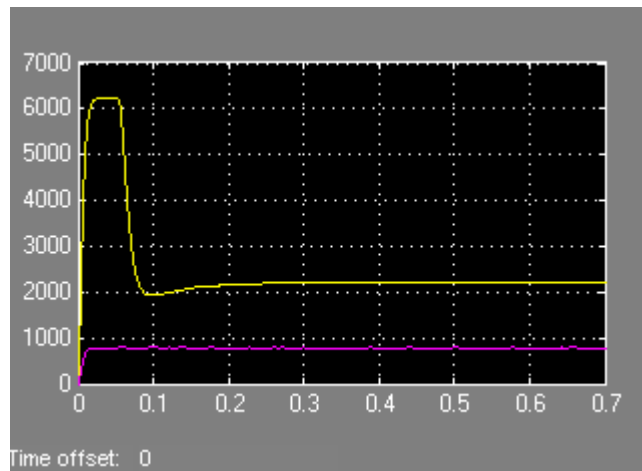


Σχήμα 5.26 PWM CC στην πλευρά του δικτύου

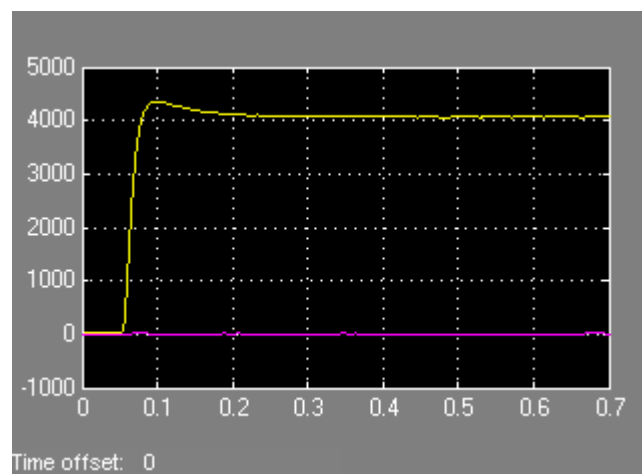
Η ζητούμενη ισχύ (ενεργό και άεργο) που ζητάει το φορτίο που έχουμε συνδέσει στην έξοδο του αντιστροφέα φαίνεται στο σχήμα 5.27. Το φορτίο αποτελείται από μια αντίσταση και ένα πηνίο. Στις εικόνες 5.28 και 5.29 φαίνονται τα ποσά της ισχύος που δίνει το δίκτυο και η A/Γ αντίστοιχα. Η αστάθεια που υπάρχει μέχρι να ισορροπήσει το σύστημα διακρίνεται καθώς μέχρι $t=0.1$ simulation time, το δίκτυο δίνει το σύνολο της ισχύος που χρειάζεται το δίκτυο, και έπειτα η ανεμογεννήτρια δίνει μέρος της ισχύος που χρειάζεται το φορτίο



Σχήμα 5.27 Ισχύς του φορτίου

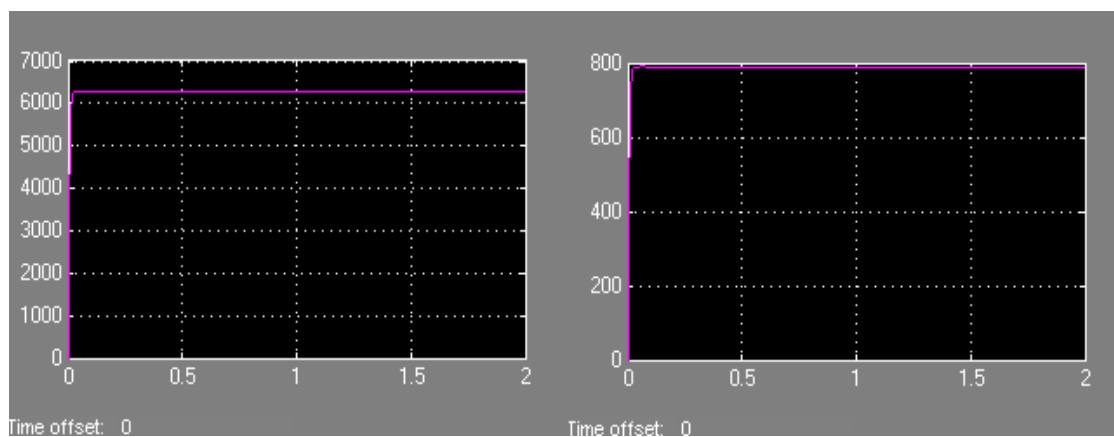


Σχήμα 5.28 Ισχύς που προσφέρει το δίκτυο



Σχήμα 5.29 Ισχύς που προσφέρει η Α/Γ

Τέλος το άθροισμα της ενεργού ισχύος που προσφέρει το δίκτυο και η Α/Γ, καθώς και το άθροισμα της άεργου ισχύος που προσφέρει το δίκτυο και η Α/Γ απεικονίζονται στο σχήμα 5.30. Όπως διακρίνουμε η ισχύεις είναι ίσες με αυτές που αναπαρίστανται στην γραφική παράσταση 5.27

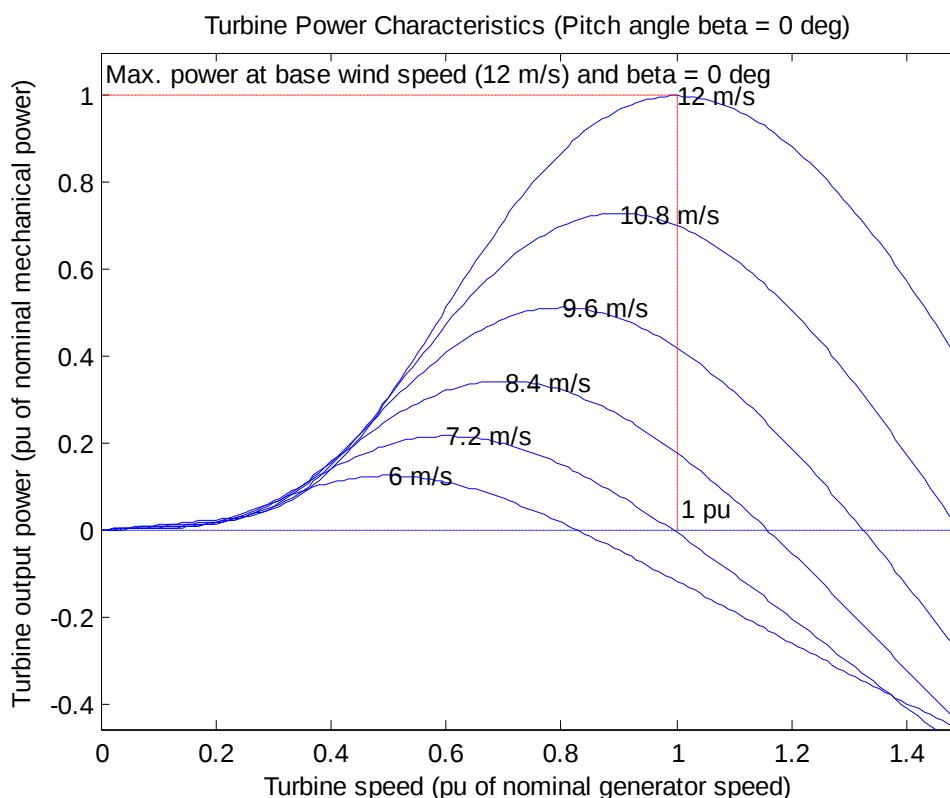


Σχήμα 5.30 Άθροισμα ενεργών και άεργων ισχύων που παρέχει το δίκτυο και η Α/Γ

5.5 Παράδειγμα 4

Σε αυτό το παράδειγμα, η γεννήτρια θα δουλεύει με σταθερή ταχύτητα, και γωνία κλίσης των πτερυγίων θα είναι μηδενική. Η ονομαστική ισχύς που θα παράγει η γεννήτρια θα είναι 6 KW και η άεργος ισχύς στην έξοδο του συστήματος θα είναι μηδέν. Η πραγματική μηχανική ισχύς που παράγεται από την Α/Γ θα είναι μικρότερη από 6KW και ο λόγος είναι ότι δεν θα δουλεύει στην ονομαστική της ταχύτητα που είναι 12m/s αλλά η ταχύτητα θα αλλάζει

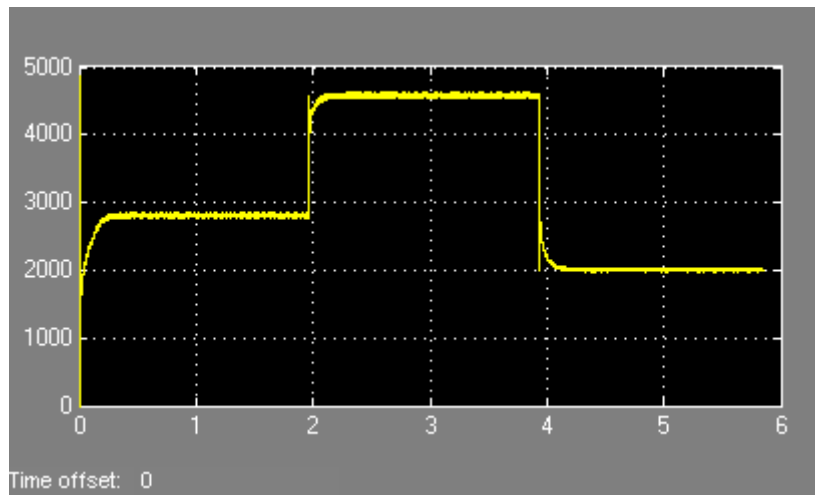
Τα δεδομένα της ταχύτητας που θα εισάγουμε σε αυτό το παράδειγμα είναι πραγματικά και πρόκειται για την Κύθνο και έχουν μετρηθεί σε ωριαία μεταβολή. Αν θεωρήσουμε τον χρόνο προσομοίωσης $t=1$ ότι αντιστοιχεί σε 15 λεπτά, τότε η ταχύτητα του ανέμου τα 30 πρώτα λεπτά θα είναι 10.3m/s, τα επόμενα 30min θα ανέβει σε 11.1m/s και στα τελευταία 30 λεπτά θα πέσει στα 9.9m/s. Στο παρακάτω σχήμα βλέπουμε πως τη χαρακτηριστική καμπύλη της ανεμογεννήτριας όχι όμως ως προς την ταχύτητα του ανέμου, αλλά ως προς την γωνιακή της ταχύτητα.



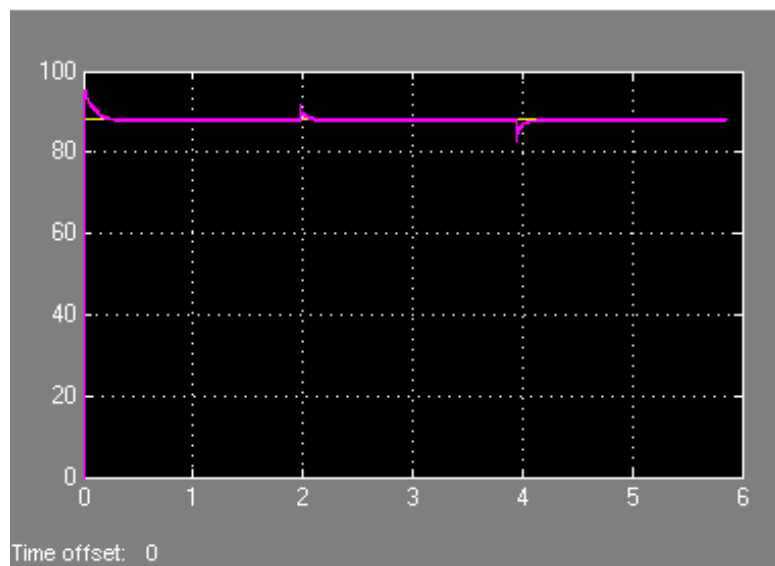
Σχήμα 5.31 Μηχανική ισχύς συναρτήσει γωνιακής ταχύτητας

Η γωνιακή ταχύτητα της Α/Γ είναι 700rpm και η επιθυμητή γωνιακή ταχύτητα τίθεται $700 \cdot 1.2 = 840$ rpm, για να δούμε την συμπεριφορά του συστήματος σε μεγαλύτερη γωνιακή.

Η ισχύς εξόδου φαίνεται στο σχήμα 5.32, και στο σχήμα 5.33 φαίνεται ο έλεγχος της ταχύτητας που εφαρμόζουμε στο σύστημα.



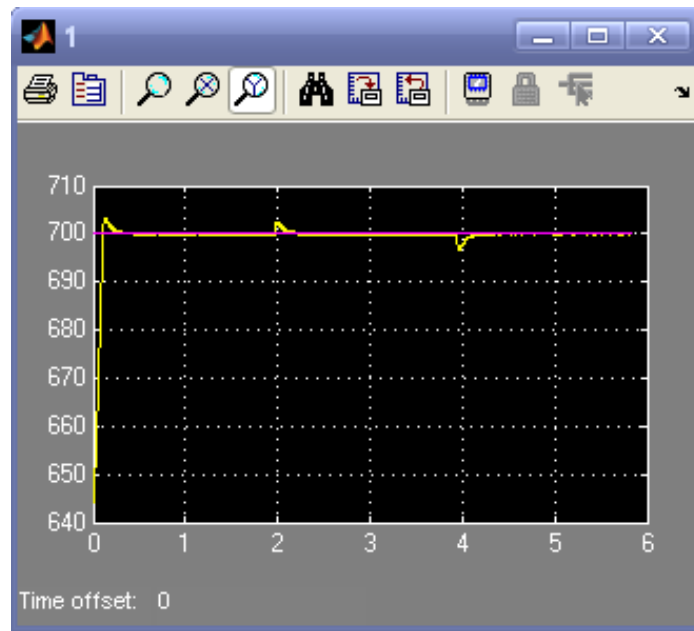
Σχήμα 5.32 Μηχανική ισχύς ανεμογεννήτριας



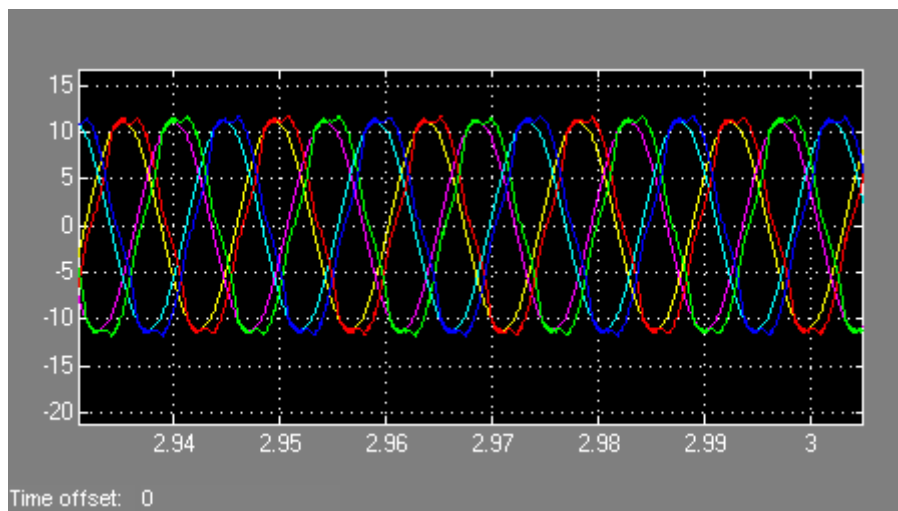
Σχήμα 5.33 Έλεγχος γωνιακής ταχύτητας

Ο έλεγχος της DC τάσης που πραγματοποιούμε φαίνεται στο σχήμα 5.34 και παρατηρούμε πως το σύστημα έρχεται σε ισορροπία έπειτα από χρόνο προσομοίωσης $t=0.1$ simulation time κάτι που μπορούμε να παρατηρήσουμε και στις παραπάνω γραφικές παραστάσεις. Έτσι η τάση λόγω του PI ελέγχου που πραγματοποιείται στην έξοδο του συστήματος ανόρθωσης, ισορροπεί στη ζητούμενη τάση που είναι 700 V εφόσον η τάση του δικτύου είναι 400V. Επίσης παρατηρούμε τις μικρές διακυμάνσεις τόσο στο σχήμα 5.33 όσο και στο σχήμα 5.34 οι οποίες οφείλονται στην αλλαγή της ταχύτητας του ανέμου. Μεγαλώνοντας την ταχύτητα, για μικρό χρονικό διάστημα ανεβαίνει η γωνιακή ταχύτητα και η τάση του dc-link, αλλά λόγω του ελέγχου που πραγματοποιείται ξανά επανέρχεται στο επιθυμητό αποτέλεσμα.

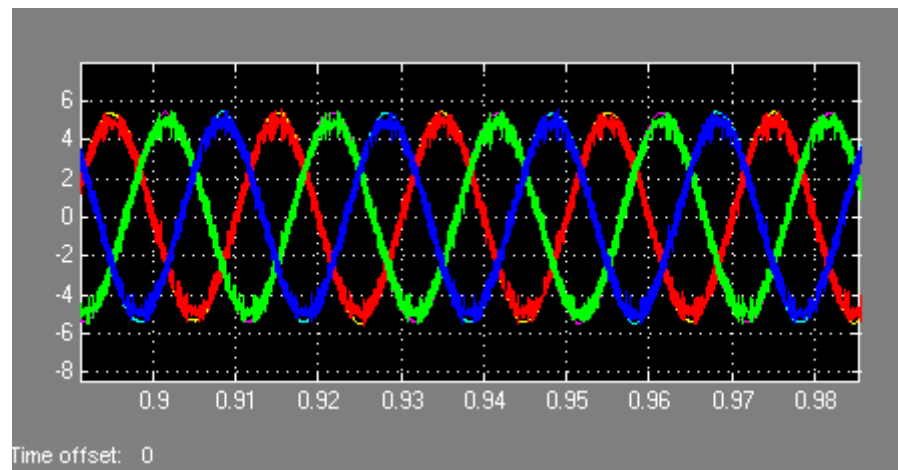
Στα σχήματα 5.35 και 5.36 παρουσιάζουμε το αποτέλεσμα του ελέγχου ρεύματος στην πλευρά της γεννήτριας και στην πλευρά του δικτύου αντίστοιχα και διακρίνονται οι ζώνες υστέρησης και τα ρεύματα των τριών φάσεων που ακολουθούν με ακρίβεια τις τρεις αναφορές, όπως αυτές παράγονται μέσω του μετασχηματισμού d-q.



Σχήμα 5.34 Έλεγχος DC τάσης

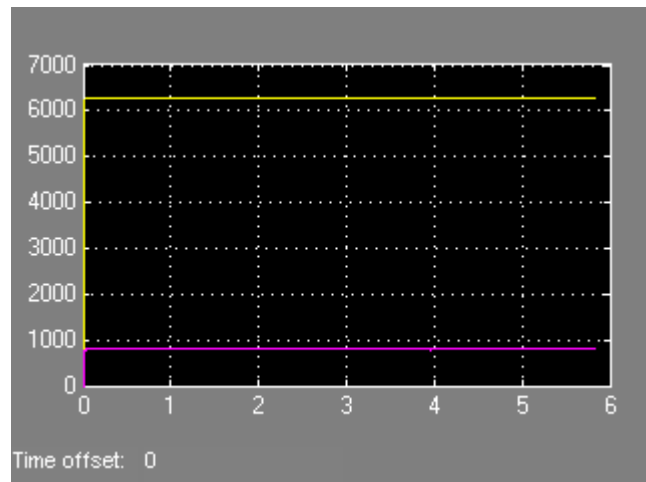


Σχήμα 5.35 PWM CC στην πλευρά της γεννήτριας

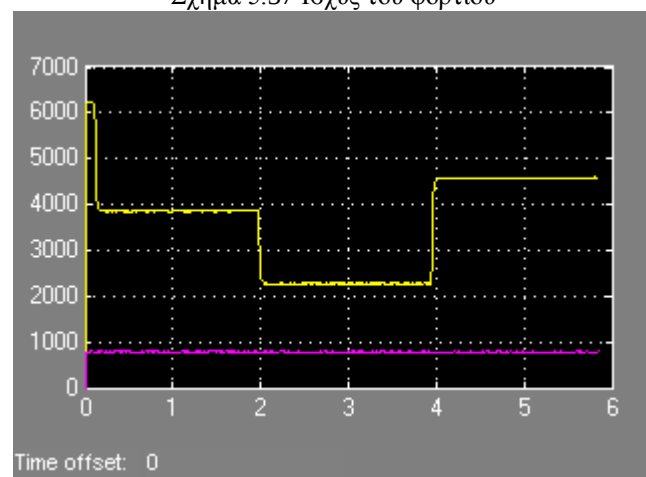


Σχήμα 5.36 PWM CC στην πλευρά του δικτύου

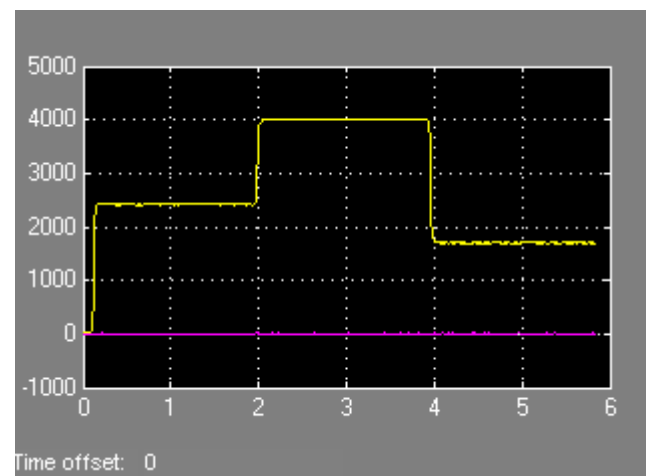
Η ζητούμενη ισχύ (ενεργό και άεργο) που ζητάει το φορτίο που έχουμε συνδέσει στην έξοδο του αντιστροφέα φαίνεται στο σχήμα 5.37. Το φορτίο αποτελείται από μια αντίσταση και ένα πηνίο. Στις εικόνες 5.38 και 5.39 φαίνονται τα ποσά της ισχύς που δίνει το δίκτυο και η Α/Γ αντίστοιχα. Η αστάθεια που υπάρχει μέχρι να ισορροπήσει το σύστημα διακρίνεται καθώς μέχρι $t=0.1$ simulation time, το δίκτυο δίνει το σύνολο της ισχύος που χρειάζεται το δίκτυο, και έπειτα η ανεμογεννήτρια δίνει μέρος της ισχύος που χρειάζεται το φορτίο



Σχήμα 5.37 Ισχύς του φορτίου

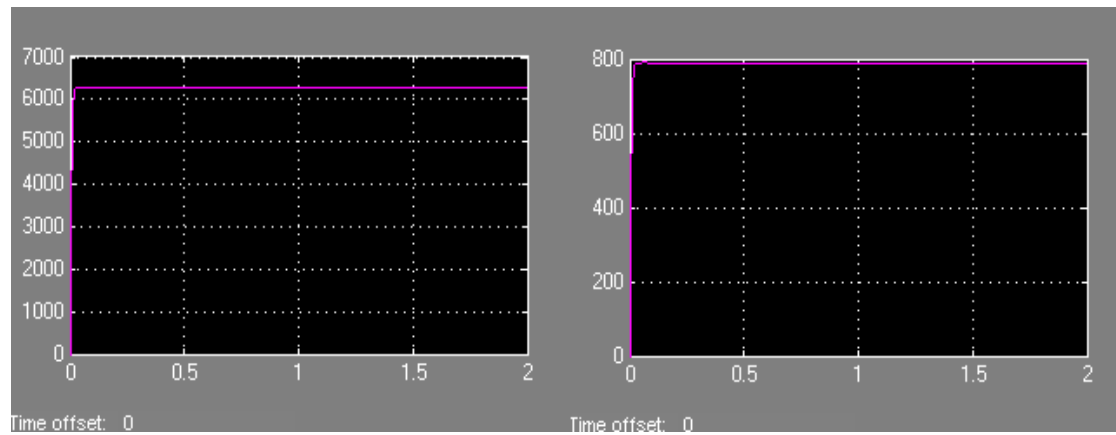


Σχήμα 5.38 Ισχύς που προσφέρει το δίκτυο



Σχήμα 5.39 Ισχύς που προσφέρει η Α/Γ

Τέλος το άθροισμα της ενεργού ισχύος που προσφέρει το δίκτυο και η A/Γ, καθώς και το άθροισμα της άεργου ισχύος που προσφέρει το δίκτυο και η A/Γ απεικονίζονται στο σχήμα 5.40. Όπως διακρίνουμε η ισχύεις είναι ίσες με αυτές που αναπαρίστανται στην γραφική παράσταση 5.37



Σχήμα 5.40 Άθροισμα ενεργών και άεργων ισχύων που παρέχει το δίκτυο και η A/Γ

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία προσομοιώθηκε μέσω του MATLAB2010a/SIMULINK ένα δυναμικό μοντέλο πραγματικού χρόνου, μιας δίπτερης ανεμογεννήτριας μεταβλητών στροφών με σύγχρονη γεννήτρια μονίμων μαγνητών. Παρουσιάσαμε και μοντελοποιήσαμε ολόκληρο το σύστημα. Το αεροδυναμικό του μέρος, τους μετατροπείς ισχύος (ανορθωτής και αντιστροφέας) που χρησιμοποιεί, το σύστημα ελέγχου της και τη σύνδεση του με το δίκτυο χαμηλής τάσης.

Όσον αφορά την συμπεριφορά της ανεμογεννήτριας, μας παρείχε γρήγορη απόκριση στην απότομη αλλαγή της ταχύτητας του ανέμου, τόσο στην έξοδο του δικτύου όσο και στα κομμάτια του ελέγχου. Τέλος παρουσιάσαμε και την ανταλλαγή έργου ισχύος του συστήματος μας με το δίκτυο.

Υπάρχουν τομείς στην εργασία, όπου θα μπορούσε να υποστεί περαιτέρω μελλοντική διερεύνηση με σκοπό, την βέλτιστη λειτουργία της ανεμογεννήτριας και παρακολούθηση της συμπεριφοράς της τόσο στην αλλαγή του τρόπου ελέγχου της όσο και μέρη από τα οποία αποτελείτο.

Πιο συγκεκριμένα, μπορεί να χρησιμοποιηθεί διαφορετικός τύπος γεννήτριας, όπως ασύγχρονη γεννήτρια διπλής επαγωγής. Στο κομμάτι ελέγχου PWM, μπορούν να χρησιμοποιηθούν άλλες τεχνικές, όπως Carrier-Based PWM (Sinusoidal PWM, CB-PWM with Zero Sequence Signal ZSS) και Space Vector Modulation (SVM). Επιπλέον μεγάλη ανάπτυξη και έρευνα υπάρχει τα τελευταία χρόνια στα Νευρωνικά δίκτυα (Neural Networks) και στον Έλεγχο με Ασαφή Λογική (Fuzzy Logic) για τα ηλεκτρονικά ισχύος. Τέλος μπορούμε να κάνουμε δοκιμές για να παρατηρήσουμε την συμπεριφορά της ανεμογεννήτριας όταν είναι συνδεδεμένη με ένα ασταθές δίκτυο.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Π.1 Μετασχηματισμός Park

Π.1.1 Ανάλυση στο ακίνητο πλαίσιο dq0

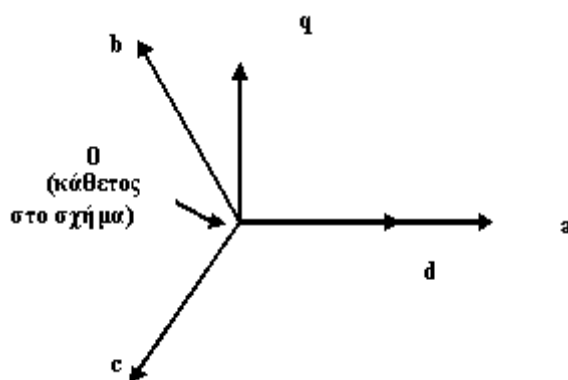
Στα φορτία με ασύνδετο ουδέτερο, παθητικά ή ενεργητικά, τα τρία ρεύματα των φάσεων έχουν σύμφωνα με το 1^ο νόμο του Kirchhoff άθροισμα μηδέν:

$$i_a + i_b + i_c = 0$$

Οπότε το ένα από τα τρία ρεύματα των φάσεων προκύπτει από τα άλλα δύο: π.χ. $i_c = -i_a - i_b$. Δηλαδή για τη γνώση των ρευμάτων του φορτίου χρειάζονται δύο μόνο στιγμιαίες τιμές. Εναλλακτικά αντί να χρησιμοποιηθούν οι φάσεις a και b μπορεί να γίνει ανάλυση των ρευμάτων σε άξονες d και q κάθετους μεταξύ τους και να χρησιμοποιηθούν οι συνιστώσες i_d και i_q . Η ανάλυση σε άξονες dq μπορεί να γενικευτεί ακόμα και όταν $i_a + i_b + i_c \neq 0$. Τότε εκτός από τις d και q συνιστώσες προκύπτει και τρίτη συνιστώσα i_0 η οποία είναι κάθετη στο επίπεδο dq.

Η ίδια ακριβώς ανάλυση σε συνιστώσες dq0 μπορεί να γίνει και για τις φασικές τάσεις των φορτίων. Μάλιστα σε περίπτωση συμμετρικού τριφασικού φορτίου ισχύει $v_{an} + v_{bn} + v_{cn} = 0$ οπότε πάλι δεν υπάρχει συνιστώσα v_0 . Προφανώς η μηδενική συνιστώσα εμφανίζεται όταν υπάρχει ομοιοπολική ακολουθία τάσεων.

Αρχικά η ανάλυση γίνεται σε πλαίσιο στο οποίο οι άξονες d και q είναι ακίνητοι, δηλαδή δε στρέφονται. Από σύμβαση θεωρούμε ότι ο d άξονας ταυτίζεται με τη φάση a. Ο q άξονας είναι τοποθετημένος στις 90^ο αριστερόστροφα του d άξονα και το εξωτερικό γινόμενο $d \times q$ δίνει τον μηδενικό άξονα.



Σχήμα Π.1 Ακίνητο πλαίσιο dq0

Η ανάλυση οποιουδήποτε μεγέθους f όπως ρεύματος, τάσης, μαγνητικής ροής ή φορτίου στο dq0 πλαίσιο αναφοράς γίνεται μέσω του μετασχηματισμού :

$$\begin{pmatrix} f_d^s \\ f_q^s \\ f_0^s \end{pmatrix} = T_{dq0} \begin{pmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{pmatrix} \quad \text{όπου} \quad T_{dq0} = \begin{pmatrix} \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} \\ 0 & \frac{1}{\sqrt{3}} & -\frac{1}{\sqrt{3}} \\ \frac{\sqrt{2}}{3} & \frac{\sqrt{2}}{3} & \frac{\sqrt{2}}{3} \end{pmatrix}$$

Ενώ ο αντίστροφος μετασχηματισμός είναι :

$$\begin{pmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{pmatrix} = T_{dq0}^{-1} \begin{pmatrix} f_d^s \\ f_q^s \\ f_0^s \end{pmatrix} \quad \text{όπου} \quad T_{dq0}^{-1} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix}$$

Ο εκθέτης 's' είναι το αρχικό γράμμα της λέξης stationary (=ακίνητο).

Όταν ισχύει $f_a + f_b + f_c = 0$ τότε δεν υπάρχει μηδενική συνιστώσα οπότε η τρίτη σειρά του πίνακα T_{dq0} και η τρίτη στήλη του T_{dq0}^{-1} μπορούν να παραληφθούν. Επιπλέον η πρώτη σειρά του πίνακα T_{dq0} απλοποιείται διότι

$$f_q^s = \frac{2}{3} f_a - \frac{1}{3} f_b - \frac{1}{3} f_c = f_a - \frac{1}{3} (f_a + f_b + f_c) = f_a.$$

Συνεπώς οι πίνακες μετασχηματισμού απλοποιούνται σε :

$$T_{dq} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sqrt{3}} & -\frac{1}{\sqrt{3}} \end{pmatrix}$$

$$T_{dq}^{-1} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{pmatrix}$$

Στην περίπτωση αυτή οι d, q συνιστώσες στη βιβλιογραφία αναφέρονται ως α , β .

Π.1.2 Ανάλυση στο στρεφόμενο πλαίσιο dq0

Πολύ συχνά είναι χρήσιμο να γίνεται αλλαγή μεταβλητών του ρεύματος και της τάσης σε ένα στρεφόμενο πλαίσιο dq0. Ένας τέτοιος μετασχηματισμός χρησιμοποιείται όπως θα δούμε παρακάτω όταν προσομοιώνονται συστήματα ελέγχου που γενικά αποτελούν πολύπλοκες διαδικασίες.

Το πλαίσιο αναφοράς μπορεί να στρέφεται με οποιαδήποτε σταθερή ή μεταβλητή γωνιακή ταχύτητα. Επειδή ακριβώς η γωνιακή ταχύτητα του πλαισίου αναφοράς είναι αυθαίρετη μπορεί να επιλεγεί έτσι, ώστε οι προκύπτουσες μεταβλητές να είναι οι δυνατόν απλούστερες και το σύστημα εξισώσεων να είναι βολικό στην εφαρμογή του.

Η μέθοδος αλλαγής των τριφασικών μεταβλητών στο αυθαίρετο πλαίσιο αναφοράς μπορεί να εκφραστεί ως εξής :

$$\begin{pmatrix} f_d(\vartheta) \\ f_q(\vartheta) \\ f_0 \end{pmatrix} = T_{dq0}(\vartheta) \begin{pmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{pmatrix}$$

Όπου

$$T_{dq0}(\vartheta) = \frac{2}{3} \begin{pmatrix} \cos \vartheta & \cos(\vartheta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\vartheta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin \vartheta & -\sin(\vartheta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\vartheta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix}$$

Ο αντίστροφος μετασχηματισμός είναι :

$$\begin{pmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{pmatrix} = T_{dq0}^{-1}(\vartheta) \begin{pmatrix} f_d(\vartheta) \\ f_q(\vartheta) \\ f_0 \end{pmatrix} \quad \text{όπου} \quad T_{dq0}^{-1}(\vartheta) = \begin{pmatrix} \cos \vartheta & -\sin \vartheta & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\vartheta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\vartheta - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\vartheta + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\vartheta + \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix}$$

$\vartheta = \int_0^t \omega(\tau) d\tau + \vartheta(0)$: η γωνία του άξονα d με τον άξονα της φάσης a.

$\vartheta(0)$: η αρχική γωνία του άξονα d με τον άξονα της φάσης a.

Για $\vartheta = 0$ καταλήγουμε στο μετασχηματισμό σε ακίνητο πλαίσιο, δηλαδή στις αρχικές σχέσεις).

Συνηθίζεται η σταθερά του πίνακα T_{dq0} να είναι το $\sqrt{\frac{2}{3}}$ αντί το $\frac{2}{3}$ γιατί τότε ο μετασχηματισμός μετατρέπεται σε ορθογώνιος. Δηλαδή ο ανάστροφος του πίνακα T_{dq0} είναι και αντίστροφος του. Εδώ ο μετασχηματισμός θα χρησιμοποιείται όπως αναφέρεται και θα ισχύουν οι σχέσεις :

$$T^T = \frac{2}{3}T^{-1}$$

$$(T^{-1})^T = \frac{3}{2}T$$

Η χρησιμότητα του μετασχηματισμού dq0 θα αναδειχθεί με το παρακάτω παράδειγμα όπου θα γίνει μετασχηματισμός της τριφασικής μεταβλητής f σε δύο περιπτώσεις: Α. όταν η f είναι θετικής ακολουθίας και Β. όταν η f είναι αρνητικής ακολουθίας (F είναι το πλάτος της μεταβλητής). Η κυκλική ταχύτητα του στρεφόμενου πλαισίου είναι σταθερή και ίση με ω_{dq} ενώ η αρχική γωνία του άξονα d με τον άξονα της φάσης a $\vartheta(0) = 0$.

$$\text{A. } \begin{cases} f_a = F \cos(\omega t + \phi) \\ f_b = F \cos(\omega t - 2\pi/3 + \phi) \\ f_c = F \cos(\omega t + 2\pi/3 + \phi) \end{cases} \Rightarrow T \begin{cases} f_d = F \cos((\omega - \omega_{dq})t + \phi) \\ f_q = F \sin((\omega - \omega_{dq})t + \phi) \\ f_0 = 0 \end{cases}$$

- Για ακίνητο πλαίσιο: $\omega_{dq}=0 \Rightarrow \begin{cases} f_d = F \cos(\omega t + \phi) \\ f_q = F \sin(\omega t + \phi) \end{cases}$

- Για πλαίσιο συγχρονισμένο με τη θετική ακολουθία της f :

$$\omega_{dq}=\omega \Rightarrow \begin{cases} f_d = F \cos \phi \\ f_q = F \sin \phi \end{cases} \quad (\text{II.1})$$

$$\text{B. } \begin{cases} f_a = F \cos(\omega t + \phi) \\ f_b = F \cos(\omega t + 2\pi/3 + \phi) \\ f_c = F \cos(\omega t - 2\pi/3 + \phi) \end{cases} \Rightarrow T \begin{cases} f_d = F \cos((\omega + \omega_{dq})t + \phi) \\ f_q = -F \sin((\omega + \omega_{dq})t + \phi) \\ f_0 = 0 \end{cases}$$

- Για ακίνητο πλαίσιο: $\omega_{dq}=0 \Rightarrow \begin{cases} f_d = F \cos(\omega t + \phi) \\ f_q = -F \sin(\omega t + \phi) \end{cases}$

- Για πλαίσιο συγχρονισμένο με τη θετική ακολουθία της f :

$$\omega_{dq}=\omega \Rightarrow \begin{cases} f_d = F \cos(2\omega t + \phi) \\ f_q = -F \sin(2\omega t + \phi) \end{cases} \quad (\text{II.2})$$

Με το μετασχηματισμό dq οι μεταβλητές μειώθηκαν από τρεις σε δύο. Έτσι μπορούμε να παραστήσουμε τη μεταβλητή f σαν μιγαδικό αριθμό, δηλαδή με τη μορφή: $\tilde{f} = f_d + j \cdot f_q = F e^{j\theta}$

όπου όταν η f είναι θετικής ακολουθίας ισχύει $\theta = (\omega - \omega_{dq})t + \phi$

ενώ όταν η f είναι αρνητικής ακολουθίας ισχύει $\theta = -[(\omega + \omega_{dq})t + \phi]$.

Στην περίπτωση που το πλαίσιο είναι συγχρονισμένο με τη θετική ακολουθία της f , δηλαδή $\omega_{dq}=\omega$, από τις σχέσεις (II.1) και (II.2) προκύπτει ότι αν η f είναι θετικής ακολουθίας το $\tilde{f}$ είναι ένα σταθερό με το χρόνο διάνυσμα, ενώ αν η f είναι

αρνητικής ακολουθίας το $\tilde{f}$ ένα διάνυσμα που στρέφεται με διπλάσια συχνότητα 2ω . Το συμπέρασμα αυτό μπορεί να διαπιστωθεί και γραφικά αφού όταν η f είναι θετικής ακολουθίας, πλαίσιο και f στρέφονται και τα δύο αριστερόστροφα, οπότε η f είναι ακίνητη ως προς το πλαίσιο, ενώ όταν η f είναι αρνητικής ακολουθίας, το πλαίσιο στρέφεται αριστερόστροφα και η f δεξιόστροφα με την ίδια ταχύτητα, οπότε η f ως προς το πλαίσιο έχει διπλάσια ταχύτητα.

Ο μετασχηματισμός dq, όπως μπορέσαμε να διαπιστώσουμε, μπορεί να διαχωρίσει τη θετική και την αρνητική ακολουθία μιας τριφασικής μεταβλητής αφού η κάθε ακολουθία μπορεί να αναπαρασταθεί με ένα διαφορετικό διάνυσμα. Αν για παράδειγμα έχουμε μία ασύμμετρη τάση, μπορούμε με το μετασχηματισμό να διαπιστώσουμε πόσο είναι το πλάτος της θετικής και της αρνητικής ακολουθίας, αφού το πλάτος της θετικής ακολουθίας θα εμφανίζεται ως DC μέγεθος, ενώ το πλάτος της αρνητικής ακολουθίας θα έχει μια ταλάντωση 2ω .

Αλλά ακόμα και όταν δεν υπάρχουν ασυμμετρίες ο μετασχηματισμός παίζει σπουδαίο ρόλο. Αν μετασχηματίσουμε το ρεύμα σε πλαίσιο αναφοράς που στρέφεται με $\omega_{dq}=\omega$ και επιπλέον είναι ευθυγραμμισμένο με τη τάση, τότε σύμφωνα με τη σχέση (Π.1) θα προκύψουν δύο ρεύματα που το μέτρο τους σχετίζεται με την άεργο και ενεργό ισχύ. Πράγματι το $I_q = I \cdot \sin\phi$ είναι το πλάτος του άεργου ρεύματος ενώ το $I_d = I \cdot \cos\phi$ είναι το πλάτος του ενεργού ρεύματος. Δηλαδή ο μετασχηματισμός dq εκτός του ότι απλοποίησε σημαντικά τις μεταβλητές του ρεύματος, μας έδωσε την πληροφορία του συντελεστή ισχύος.

Π.1.3 Ισχύς εκφρασμένη στο dq πλαίσιο

Η μιγαδική ισχύς εκφράζεται ως εξής :

$$\begin{aligned}\tilde{S} &= \frac{3}{2} \tilde{v}_{dq} \tilde{i}_{dq}^* = \frac{3}{2} (v_d + j.v_q) \cdot (i_d + j.i_q)^* \\ &= \frac{3}{2} (v_d + j.v_q) \cdot (i_d - j.i_q) = \frac{3}{2} [(v_d i_d + v_q i_q) + j \cdot (v_q i_d - v_d i_q)] \\ \Rightarrow p(t) = P &= \frac{3}{2} (v_d i_d + v_q i_q) \\ \Rightarrow q(t) = Q &= \frac{3}{2} (v_q i_d - v_d i_q)\end{aligned}$$

Ο συντελεστής $3/2$ που υπάρχει στην εξίσωση (2.14) οφείλεται στην επιλογή της σταθεράς που χρησιμοποιήθηκε κατά το μετασχηματισμό.

Η στιγμιαία ισχύς είναι ίση με την ενεργό ισχύ εφόσον το τριφασικό σύστημα τάσεων και ρευμάτων είναι συμμετρικό. Αν το σύστημα δεν είναι συμμετρικό θα ισχύει

$$\begin{aligned}P &= \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{3}{2} u_d i_d + u_q i_q dt \quad \text{και} \\ Q &= \frac{1}{T} \int_0^T q(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{3}{2} u_q i_d - u_d i_q dt\end{aligned}$$

Η ισχύς που προέκυψε στο πλαίσιο dq είναι ίση με την ισχύ στο πλαίσιο abc, παραμένει δηλαδή αναλλοίωτη. Πράγματι, η συνολική στιγμιαία ισχύς μπορεί να εκφραστεί μέσω των abc μεταβλητών ως εξής:[13]

$$p_{abc} = v_a i_a + v_b i_b + v_c i_c = (v_a \ v_b \ v_c) \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix} = [v_{abc}]^T \cdot [i_{abc}]$$

$$\text{Όπου } [v_{abc}]^T = (v_a \ v_b \ v_c) \text{ και } [i_{abc}]^T = (i_a \ i_b \ i_c)$$

$$\begin{aligned} \text{Οπότε } p_{abc} &= [v_{abc}]^T \cdot [i_{abc}] = \\ &= (T^{-1}[v_{dq}])^T (T^{-1}[i_{dq}]) \\ &= [v_{dq}]^T (T^{-1})^T T^{-1}[i_{dq}] \\ &= [v_{dq}]^T \frac{3}{2} T T^{-1} [i_{dq}] \\ &= \frac{3}{2} [v_{dq}]^T [i_{dq}] \\ &= \frac{3}{2} (v_d \ v_q) \begin{pmatrix} i_d \\ i_q \end{pmatrix} \\ &= \frac{3}{2} (v_d i_d + v_q i_q) = p_{dq} \end{aligned}$$

Π.2 Σχεδίαση με αντισταθμιστές PID

Οι αντισταθμιστές ή ρυθμιστές ή ελεγκτές PID έχουν την γενική μορφή :

$$G_C(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + sK_d$$

Όπου οι παράμετροι K_p , K_i και K_d αντιστοιχούν στον Αναλογικό (Proportional), ολοκληρωτικό (Integral) και Διαφορικό (Derivative) όρο. Ειδικές περιπτώσεις των PID ελεγκτών είναι οι PI ρυθμιστές και οι PD ρυθμιστές. Στην διπλωματική χρησιμοποιήσαμε τους PI ελεγκτές διότι διαπιστώθηκε πως το σύστημα είχε καλύτερη απόκριση με αυτούς τους ελεγκτές. Παρ' όλα αυτά θα μελετήσουμε τον PID ελεγκτή, αλλά στην διπλωματική αγνοούμε τον διαφορικό όρο και δουλεύουμε μόνο με τον PI ελεγκτή.

Η χρησιμοποίηση του αναλογικού ελεγκτή (K_p) έχει ως αποτέλεσμα την ελάττωση του χρόνου ανύψωσης και την μείωση, αλλά ποτέ την εξάλειψη του μόνιμου σφάλματος. Ο ολοκληρωτικός έλεγχος (K_i) θα εξαλείψει το μόνιμο σφάλμα αλλά θα χειροτερέψει την μεταβατική απόκριση (αριθμός των ταλαντώσεων μέχρι την τελική ισορροπία του συστήματος). Ο διαφορικός έλεγχος (K_d) θα έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της σταθερότητας του συστήματος, μειώνοντας την υπερύψωση και βελτιώνοντας την μεταβατική απόκριση. Τα αποτελέσματα της επίδρασης καθενός από τους ελεγκτές K_p , K_i και K_d σε ένα σύστημα κλειστού βρόχου, συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα

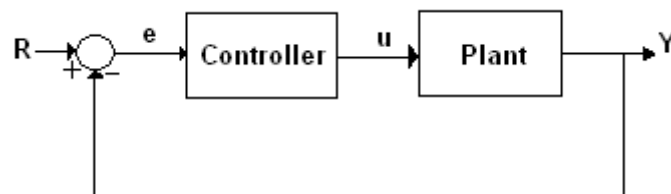
Αντίδραση Ελεγκτή	Χρόνος Ανύψωσης	Υπερύψωση	Χρόνος Αποκατάστασης	Μόνιμο Σφάλμα
Kp	Μείωση	Αύξηση	Μικρή Αλλαγή	Μείωση
Ki	Μείωση	Αύξηση	Αύξηση	Εξάλειψη
Kd	Μικρή Αλλαγή	Μείωση	Μείωση	Μικρή Αλλαγή

Πίνακας Π.1 Χαρακτηριστικά των ελεγκτών P,I και D

Ο αντισταθμιστής δουλεύει σε σύστημα κλειστού βρόγχου, χρησιμοποιώντας το σχήμα Π.1. Η μεταβλητή (e) αντιπροσωπεύει το σφάλμα παρακολούθησης, δηλαδή την διαφορά ανάμεσα στην τιμή της επιθυμητής εισόδου (R) και σε εκείνη της πραγματικής εξόδου (Y). Αυτό το σήμα σφάλματος (e) θα σταλεί στον PID controller και ο ελεγκτής θα υπολογίσει το ολοκλήρωμα αυτού του σήματος. Το σήμα (u) αμέσως μετά τον ελεγκτή είναι ίσο με το αναλογικό κέρδος (Kp) επί την τιμή του σφάλματος, συν το ολοκληρωτικό κέρδος (Ki) επί το ολοκλήρωμα του σφάλματος, συν το διαφορικό κέρδος (Kd) επί την παράγωγο του σφάλματος

$$u = K_p e + K_i \int e dt + K_d \frac{de}{dt}$$

Το σήμα αυτό θα σταλεί στο σύστημα προς έλεγχο και στη συνέχεια θα λάβουμε ένα νέο σήμα εξόδου (Y). Η νέα έξοδος (Y) θα σταλεί ξανά πίσω στο αισθητήριο για να ανιχνεύσει και αυτό με τη σειρά του το νέο σήμα σφάλματος (e). Ο ελεγκτής θα πάρει αυτό το νέο σήμα σφάλματος και θα υπολογίσει ξανά την παράγωγο και το ολοκλήρωμα και η ίδια διαδικασία θα επαναλαμβάνεται συνέχεια.[22,23]



Σχήμα Π.2 Σύστημα μοναδιαίας τροφοδότησης με PID ελεγκτή

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ ΚΑΙ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- [1] Γ. Μπεργελές Καθηγητής Ε.Μ.Π. «Ανεμοκινητήρες».
- [2] Γεώργιος Σταυρακάκης Καθηγητής Πολυτεχνείου Κρήτης «Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας» Σημειώσεις Π.Κ.
- [3] European Renewable Energy Council, «Renewable Energy Target for Europe». Ηλεκτρονική τοποθεσία : <http://www.euractiv.com/en/energy/eu-renewable-energy-policy/article-117536>
- [4] Μάριος Β. Ντρέκο «Ανάλυση Λειτουργίας και Έλεγχος Συστήματος Ανεμογεννήτριας Μεταβλητών Στροφών Διασυνδεδεμένης στο Δίκτυο.», Διπλωματική εργασία, Αθήνα Οκτώβριος 2009
- [5] Βαγρόπουλος Ι Στυλιανός «Ανάλυση, μοντελοποίηση και έλεγχος ανεμογεννήτριας διπλής τροφοδότησης στάτη και δρομέα», Διπλωματική εργασία, Θεσσαλονίκη, Ιούλιος 2010
- [6] Ευάγγελος Σ. Ευαγγελάτος «Ανάπτυξη και υλοποίηση γενικευμένης μεθοδολογίας βέλτιστης χωροθέτησης αιολικών πάρκων», Διπλωματική εργασία, Χανιά, Σεπτέμβριος 2010
- [7] Gomez G. Carlos, Macias G. Bulmaro, Azucena C. Honorato, Palomino M. Amparo.«Design of a 3.5 meters Rotor Two Bladed Horizontal Axis Wind Turbine»
- [8] Chee-Mun-Ong «Dynamic simulation of Electric Machinery using MATLAB/SIMULINK»
- [9] A.B. Dehkordi, A.M. Gole, T.L Maguire «Permanent Magnet Synchronous Machine Model for Real- Time Simulation»
- [10] Grenier, D., L.-A. Dessaint, O. Akhrif, Y. Bonnassieux, and B. LePioufle, "Experimental Nonlinear Torque Control of a Permanent Magnet Synchronous Motor Using Saliency," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 44, No. 5, October 1997, pp.680-687.
- [11] Siegfier Heier «Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems», Οκτώβριος 2004
- [12] Thomas Ackermann «Wind Power in Power Systems»
- [13] Γαβριήλ Β. Γιαννακόπουλος Καθηγητής Π. Πατρών, Νικόλαος Α. Βοβός Καθηγητής Π. Πατρών «Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας», Θεσσαλονίκη 2008.
- [14] Marian P.Kazmierkowski, R. Krishnan, Frede Blaabjerg «Control in Power Electronics, Selected Problems»

- [15] Φώτιος Ν. Γάκης «Έλεγχος Αντιστροφών Ισχύος Μονάδων Διανεμημένης Παραγωγής που συνδέονται στο Δίκτυο», Διπλωματική Εργασία, Αθήνα, Σεπτέμβριος 2005
- [16] Derong Luo, Yanzhao Sun, Shoudao Huang, Keyuan Huang «Control of Direct-Drive Permanent-Magnet Wind Power System Connected to Grid» College of Electrical & Information Engineering, Human University
- [17] Ευάγγελος Ι. Δημαράκης «Dynamic Study of a System consisting of two Terminal Boost controlled Synchronous Generators for Variable Speed Wind Turbines» Διπλωματική Εργασία, Αθήνα, Ιούλιος 2008
- [18] Jamel Belhadj, Xavier Roboam «Investigation of Different Methods to Control a Small Variable-Speed Wind Turbine with PMSM Drives»
- [20] Stefanos B. Papaefthimiou, Stavros A. Papathanassiou «Simulation and Control of a Variable Speed Wind Turbine with Synchronous Generator»
- [21] Fotios N. Gakis, Stavros A. Papathanassiou «Simple control schemes for grid-connected three-phase voltage-source inverters of DG units»
- [22] Π.Ν. Παρασκευόπουλος Καθηγητής Ε.Μ. Πολυτεχνείου «Συστήματα Αυτομάτου Ελέγχου Θεωρία και Εφαρμογές», Αθήνα 2007
- [23] Richard C. Dorf, Robert H. Bishop «Σύγχρονα Συστήματα Αυτομάτου Ελέγχου»