

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε.
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΩΝ ΠΗΓΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ»

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΓΓΡΑΣΙΑ

**ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΚΑΙ ΕΞΟΜΟΙΩΣΗ
ΥΒΡΙΔΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΠΟΥ ΠΕΡΙΛΑΜΒΑΝΕΙ
ΑΤΜΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΣΤΑΘΜΟ
ΚΑΙ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑ**



ΦΟΙΤΗΤΗΣ : ΠΑΠΑΖΑΦΕΙΡΟΠΟΥΛΟΣ ΧΑΡΑΛΑΜΠΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ : ΣΧΟΙΝΑΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ

ΠΑΤΡΑ 2016

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Το παρόν τεύχος αποτελεί τη Διπλωματική Εργασία που εκπονήθηκε στο Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα Σπουδών του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών Τ.Ε. του Τεχνολογικού Εκπαιδευτικού Ιδρύματος Δυτικής Ελλάδας, με τίτλο «Συστήματα Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας» και αναφέρεται στο σχεδιασμό, τον έλεγχο και την εξομοίωση ενός υβριδικού συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας αποτελούμενο από ανεμογεννήτρια και ατμοηλεκτρικό σταθμό. Η διείσδυση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας αυξάνεται παγκοσμίως καθώς επίσης και ο συνδυασμός τους με άλλες πηγές για την συμπαραγωγή ενέργειας.

Στην αρχή γίνεται μια επισκόπηση των διαφορετικών προέλευσης πηγών ενέργειας, από τις οποίες πηγές μπορεί να προέλθει ο συνδυασμός και η συμπαραγωγή. Έπεται η περιγραφή και η ανάπτυξη της θεωρίας που θα χρησιμοποιήσουμε για την εξομοίωση και τον επιδιωκόμενο έλεγχο, ενώ στο τέλος εξομοιώνουμε το σχεδιασμένο υβριδικό σύστημά μας με τα αποτελέσματά του. Η υλοποίηση της εξομοίωσης πραγματοποιήθηκε με το πρόγραμμα Matlab-Simulink.

Ευχαριστώ θερμά τον Επιβλέποντα Επίκουρο Καθηγητή μου κ. Νικόλαο Σχοινά του τμήματος Ηλεκτρολογίας στο Τ.Ε.Ι. Δυτικής Ελλάδας για την πολύτιμη βοήθειά του και καθοδήγηση που μου προσέφερε για την πραγματοποίηση της Εργασίας.

Ιδιαίτερα θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για την πολύτιμη και σημαντική στήριξη που μου παρείχαν καθόλα τη διάρκεια των σπουδών.

Παπαζαφειρόπουλος Χαράλαμπος
Μάρτιος 2016

Υπεύθυνη Δήλωση Φοιτητή: Ο κάτωθι υπογεγραμμένος φοιτητής έχω επίγνωση των συνεπειών του Νόμου περί λογοκλοπής και δηλώνω υπεύθυνα ότι είμαι συγγραφέας αυτής της Διπλωματικής Εργασίας, έχω δε αναφέρει στην Βιβλιογραφία μου όλες τις πηγές τις οποίες χρησιμοποίησα και έλαβα ιδέες ή δεδομένα. Δηλώνω επίσης ότι, οποιοδήποτε στοιχείο ή κείμενο το οποίο έχω ενσωματώσει στην εργασία μου προερχόμενο από Βιβλία ή άλλες εργασίες ή το διαδίκτυο, γραμμένο ακριβώς ή παραφρασμένο, το έχω πλήρως αναγνωρίσει ως πνευματικό έργο άλλου συγγραφέα και έχω αναφέρει ανελλιπώς το όνομά του και την πηγή προέλευσης.

Ο φοιτητής

(Όνοματεπώνυμο)

.....

(Υπογραφή)

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία αναφέρεται στο σχεδιασμό και την εξομοίωση ενός υβριδικού συστήματος παραγωγής ενέργειας αποτελούμενο από ανεμογεννήτρια και ατμοηλεκτρικό σταθμό καθώς τέτοιου είδους συστήματα βρίσκονται σε λειτουργία σε όλο τον κόσμο και μάλιστα με αυξητική τάση εγκατάστασης. Το υβριδικό σύστημα έχει ως επί το πλείστον την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με σκοπό την τροφοδότηση απομακρυσμένων περιοχών αλλά και βιομηχανικών εγκαταστάσεων απομακρυσμένες από το δίκτυο. Η ανάπτυξη του θέματος γίνεται σε έξι κεφάλαια.

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μία παρουσίαση των διαφορετικών πηγών προέλευσης της ενέργειας, που χρησιμοποιούνται σήμερα, και η οποία περιλαμβάνει ανανεώσιμες και μη ανανεώσιμες πηγές, ο συνδυασμός και η σύζευξη των οποίων μας δίνει το υβριδικό σύστημα. Αναφέρονται τα θετικά και αρνητικά της κάθε μιας. Επίσης γίνεται αναφορά στα υβριδικά συστήματα.

Στο δεύτερο κεφάλαιο αναπτύσσεται η θεωρία, το μαθηματικό μοντέλο του ατμοστροβίλου, ο ρυθμιστής ταχύτητας με τα δομικά διαγράμματα. Αναλύεται και παρουσιάζεται ο τρόπος εξαγωγής της συνάρτησης μεταφοράς του ατμοστροβίλου πολλών επιπέδων.

Στο τρίτο κεφάλαιο δίνονται λεπτομερώς και παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά της Επαγωγικής Γεννήτριας Διπλής Τροφοδοσίας, η οποία χρησιμοποιείται στην ανεμογεννήτρια. Περιγράφεται η ροή ισχύος ανάλογα την ολίσθηση, αναλύεται το μοντέλο της ανεμογεννήτριας και το ισοδύναμο σύστημα δύο μαζών για την περιγραφή του συστήματος μετάδοσης κίνησης. Επίσης δίνονται οι εξισώσεις ροής και τάσης, χρήσιμες για τους υπολογισμούς που θα λάβουν μέρος.

Στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται παρουσίαση και λεπτομερή αναφορά των ηλεκτρονικών ισχύος, τα οποία συνθέτουν το μετατροπέα της ανεμογεννήτριας. Γίνεται λεπτομερή αναφορά στον τρόπο που διαμορφώνεται το εύρος των παλμών, η μέθοδος που ακολουθείται και τι συμβαίνει σε τριφασικές εφαρμογές.

Το πέμπτο κεφάλαιο περιέχει το κομμάτι ελέγχου της ανεμογεννήτριας με τα απαραίτητα δομικά διαγράμματα. Αφού δοθεί στην αρχή το ισοδύναμο κύκλωμα ανά φάση της ανεμογεννήτριας, ακολουθεί η αναλυτική παρουσίαση των επί μέρους δομικών διαγραμμάτων τα οποία συνθέτουν, με τη βοήθεια εφαρμοσμένης θεωρίας συστημάτων αυτόματου ελέγχου, τις απαραίτητες εξισώσεις για τον έλεγχο των ρευμάτων από τη μεριά

του δικτύου και του ρότορα. Αναφορά γίνεται επίσης στον ελεγκτή κλίσης γωνίας των πτερυγίων.

Στο έκτο κεφάλαιο γίνεται ο σχεδιασμός του συστήματος και ο τρόπος μοντελοποίησης του. Αναλύεται και παρουσιάζεται η μοντελοποίηση του ατμοηλεκτρικού σταθμού και της ανεμογεννήτριας καθώς επίσης ο μαθηματικός σχεδιασμός των ελεγκτών που πρόκειται να χρησιμοποιήσουμε στην εξομοίωσή μας με τη βοήθεια του προγράμματος Matlab-Simulink. Στο τέλος του κεφαλαίου παρουσιάζεται η υλοποίηση δυο σεναρίων εξομοίωσης με τα αποτελέσματα και τα συμπεράσματα.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ ΠΕΡΙΛΗΨΗ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

| | |
|---|----|
| ΕΙΣΑΓΩΓΗ | 1 |
| 1. ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ | |
| 1.1 Γενικά | 4 |
| 1.2 Κύριοι σταθμοί παραγωγής | 4 |
| 1.2.1 Ατμοηλεκτρικοί σταθμοί | 5 |
| 1.2.2 Αεριοστροβιλικοί σταθμοί | 6 |
| 1.2.3 Σταθμοί συνδυασμένου κύκλου | 7 |
| 1.2.4 Πυρηνική ενέργεια | 8 |
| 1.2.5 Υδροηλεκτρικοί σταθμοί | 9 |
| 1.2.6 Ντιζελογεννήτριες | 10 |
| 1.3 Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας | 12 |
| 1.3.1 Ανεμογεννήτριες | 12 |
| 1.3.1.1 Ανεμογεννήτριες μη διασυνδεδεμένες με το δίκτυο | 12 |
| 1.3.1.2 Ανεμογεννήτριες διασυνδεδεμένες με το δίκτυο | 13 |
| 1.3.1.3 Μοντέλα ανεμογεννητριών | 13 |
| 1.3.2 Φωτοβολταϊκά | 14 |
| 1.3.2.1 Ηλιακό κύτταρο, πάνελ, συστοιχία | 15 |
| 1.3.2.2 Τύποι ηλιακών πάνελ | 15 |
| 1.3.2.3 Εφαρμογές ηλιακών κυττάρων | 16 |
| 1.3.3 Γεωθερμία | 16 |
| 1.3.3.1 Γεωθερμικά πεδία | 17 |
| 1.3.4 Βιομάζα | 18 |
| 1.3.5 Ενέργεια από παλίρροιες | 19 |
| 1.3.6 Κυψέλες καυσίμου | 20 |
| 1.4 Υβριδικά συστήματα | 21 |
| 2. ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΑΤΜΟΣΤΡΟΒΙΛΟΥ ΚΑΙ ΡΥΘΜΙΣΤΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ | |
| 2.1 Γενικά | 24 |
| 2.2 Μαθηματικό μοντέλο ατμοστροβίλου | 26 |
| 2.3 Μαθηματικό μοντέλο ρυθμιστή ταχύτητας | 28 |

3. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΕΠΑΓΩΓΙΚΗΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ ΔΙΠΛΗΣ ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑΣ

| | | |
|-----|---|----|
| 3.1 | Επαγωγική γεννήτρια διπλής τροφοδοσίας | 30 |
| 3.2 | Αναλυτική παρουσίαση ΕΓΔΤ | 31 |
| 3.3 | ΕΓΔΤ ως γεννήτρια σε υποσύγχρονες ταχύτητες | 34 |
| 3.4 | ΕΓΔΤ ως γεννήτρια σε υπερσύγχρονες ταχύτητες | 35 |
| 3.5 | Μοντέλο ανεμογεννήτριας | 35 |
| 3.6 | Σύστημα μετάδοσης κίνησης - Ισοδύναμο μοντέλο δύο μαζών | 38 |
| 3.7 | Μοντελοποίηση ΕΓΔΤ | 39 |
| 3.8 | Εξισώσεις ροής και τάσης | 40 |
| 3.9 | Ανά μονάδα σύστημα (p.u.) | 41 |

4. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΙΣΧΥΟΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ

| | | |
|-------|---|----|
| 4.1 | Υποσυστήματα μετατροπέα ισχύος | 43 |
| 4.1.1 | Ελεγκτής ανάδρασης | 44 |
| 4.1.2 | Διαμόρφωση εύρους παλμού | 45 |
| 4.1.3 | Τοπολογίες κυκλωμάτων μετατροπέων ισχύος | 46 |
| 4.1.4 | DC-link δίαυλος και διασύνδεση με εξωτερικά συστήματα ισχύος και φορτία | 47 |
| 4.2 | Ανάλυση πόλου ισχύος | 48 |
| 4.3 | Σήμα ελέγχου - λόγος κατάτμησης (duty cycle) | 49 |
| 4.4 | Διαμόρφωση εύρους παλμού πόλου ισχύος | 51 |
| 4.5 | Τριπολική μετατροπή για τριφασικές εφαρμογές | 53 |

5. ΕΛΕΓΧΟΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ

| | | |
|---------|---|----|
| 5.1 | Ανάλυση κατάστασης μόνιμης λειτουργίας ΕΓΔΤ με ισοδύναμο κύκλωμα ανά φάση | 57 |
| 5.1.1 | Ανάπτυξη ισοδύναμου κυκλώματος ανά φάση | 57 |
| 5.1.2 | Χαρακτηριστική ταχύτητας-ροπής για διαφορετικές τάσης ρότορα | 60 |
| 5.1.3 | Ανάλυση μόνιμης κατάστασης | 61 |
| 5.2 | Δυναμική ανάλυση ΕΓΔΤ και σχεδιασμός ελεγκτών | 66 |
| 5.2.1 | Αναφορές ενεργού και άεργου ισχύος | 66 |
| 5.2.2 | Μετατροπέας από τη μεριά του ρότορα | 69 |
| 5.2.2.1 | Αναφορές ρευμάτων ρότορα d-q άξονα | 71 |
| 5.2.2.2 | Σχεδιασμός ελεγκτή ρευμάτων βρόχου ρότορα | 73 |
| 5.2.3 | Μετατροπέας από τη μεριά του δικτύου | 75 |
| 5.2.4 | Έλεγχος τάσης DC-link | 79 |
| 5.3 | Ελεγκτής γωνίας κλίσης πτερυγίων | 80 |

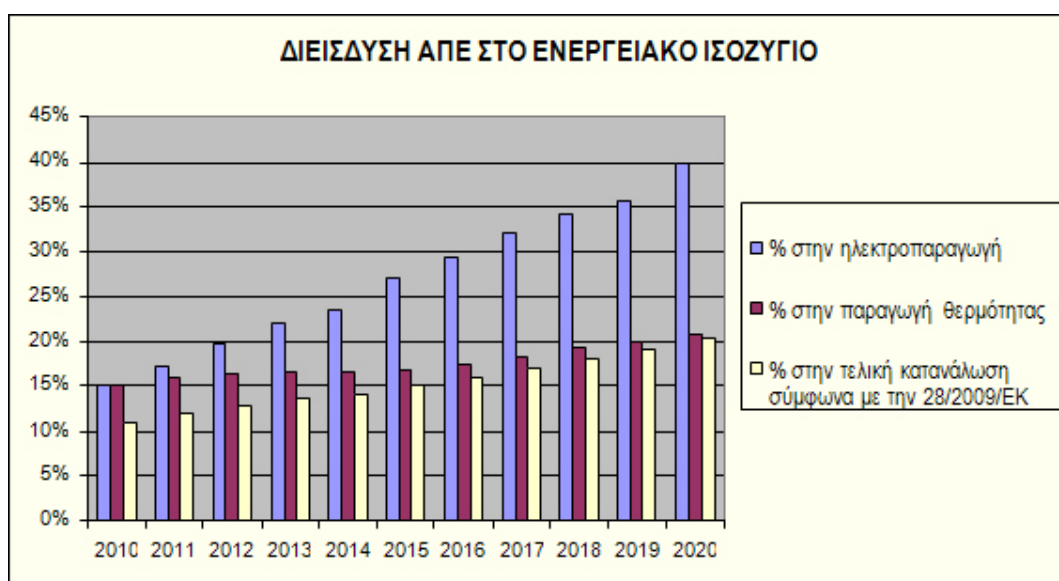
6. ΥΒΡΙΔΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ - ΑΤΜΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΣΤΑΘΜΟΥ

| | | |
|------------------------------|---|------------|
| 6.1 | Εισαγωγή | 83 |
| 6.2 | Περιγραφή και μοντελοποίηση ατμοηλεκτρικού συστήματος | 84 |
| 6.3 | Περιγραφή και μοντελοποίηση ανεμογεννήτριας | 85 |
| 6.4 | Γραμμικοποίηση συστήματος | 86 |
| 6.5 | Σχεδιασμός ελεγκτών | 89 |
| 6.6 | Εξομοίωση συστήματος | 92 |
| 6.6.1 | Σενάριο 1-Σχόλια | 92 |
| 6.6.2 | Σενάριο 2-Σχόλια | 96 |
| 6.7 | Συμπεράσματα | 100 |
| ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α | | 103 |
| ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β | | 103 |
| ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ | | 103 |

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

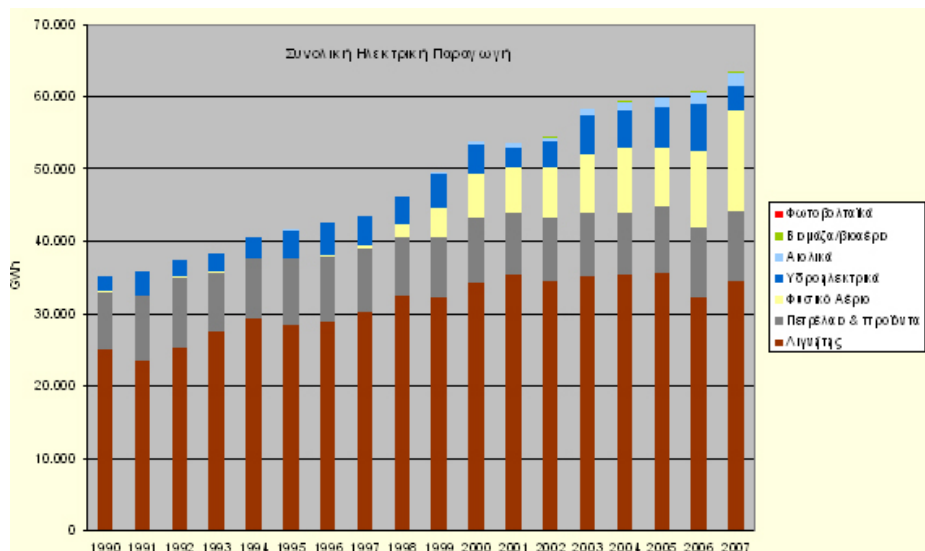
Από τότε που ανακαλύφθηκε ο ηλεκτρισμός, ο άνθρωπος εκτέλεσε άλματα τεχνολογικής προόδου. Ταυτόχρονα όμως υπήρξε και μεγάλη εξάρτηση με συνέπεια η καθημερινότητα και η επιβίωση του ανθρώπου να εξαρτάται από αυτόν. Αυτός είναι και ο λόγος για τον οποίο ήμαστε υποχρεωμένοι στο σχεδιασμό συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας (Σ.Η.Ε.) με μεγάλη σταθερότητα, καλής απόδοσης, και όσο το δυνατόν απαλλαγμένα από την κατανάλωση ορυκτών καυσίμων. Τις τελευταίες δεκαετίες η διείσδυση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (Α.Π.Ε.) αυξάνεται συνεχώς και ιδιαίτερα στις αναπτυσσόμενες χώρες, το ίδιο συμβαίνει και στην Ελλάδα.

Η Ελλάδα σύμφωνα με την Έκθεση του Εθνικού Σχεδίου Δράσης 20-20-20 για την επίτευξη της συμβολής των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας στην τελική κατανάλωση ενέργειας σε ποσοστό 20% έως το 2020 (που απορρέει από την Οδηγία 2009/28/ΕΚ, και περιλαμβάνει εκτιμήσεις για την εξέλιξη του ενεργειακού τομέα και τη διείσδυση των τεχνολογιών των ΑΠΕ έως το 2020) είναι υποχρεωμένη να εγκαταστήσει σταθμούς Α.Π.Ε. σύμφωνα με το Σχ.1 όπως αναφέρεται στην επίσημη ιστοσελίδα του Υπουργείου Περιβάλλοντος και Ενέργειας (Υ.Π.Ε.ΚΑ.) [10].



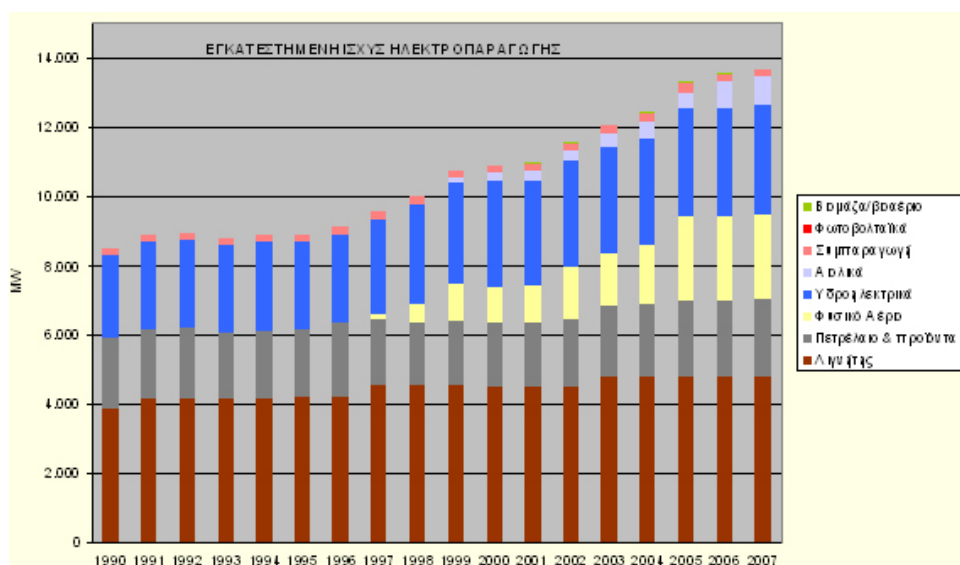
Σχήμα 1 : Εθνικό Σχέδιο Δράσης Ελλάδα 20-20-20 [10].

Στη χώρα μας η συνολική ηλεκτρική παραγωγή αποτυπώνεται στο Σχ.2 στο οποίο φαίνεται η σταδιακή αύξηση παραγωγής ενέργειας από μονάδες φυσικού αερίου και υδροηλεκτρικών σταθμών, με τα αιολικά να παραμένουν στάσιμα.



Σχήμα 2 : Συνολική ηλεκτρική παραγωγή [10].

Το ίδιο μπορούμε να παρατηρήσουμε και στο Σχ.3 όπου φαίνεται η εγκατεστημένη ισχύς ηλεκτροπαραγωγής. Το επιπλέον στοιχείο όμως που μπορούμε να αντλήσουμε είναι συμπαραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας που βρίσκεται σε μικρά επίπεδα.



Σχήμα 3 : Εγκατεστημένη ισχύς ηλεκτροπαραγωγής [10].

Σύμφωνα με την ιστοσελίδα του Διαχειριστή Ελληνικού Συστήματος Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΔΕΣΜΗΕ), υβριδικός λέγεται κάθε σταθμός παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ο οποίος σύμφωνα με τον [N.3468/2006,ΦΕΚ.Α'129, αρθ.2, §25 \[9\]](#) :

1. Χρησιμοποιεί μία τουλάχιστον μορφή ΑΠΕ
2. Η συνολική ενέργεια που απορροφά από το Δίκτυο σε ετήσια βάση, δεν υπερβαίνει το 30% της συνολικής ενέργειας που καταναλώνεται για την πλήρωση του συστήματος αποθήκευσης του σταθμού αυτού
3. Η μέγιστη ισχύς παραγωγής των μονάδων του σταθμού ΑΠΕ δεν μπορεί να υπερβαίνει την εγκατεστημένη ισχύ των μονάδων αποθήκευσης του σταθμού αυτού προσαυξημένη κατά 20%.

Στην Ελλάδα τέτοιοι σταθμοί δεν είναι ευρύτατα διαδεδομένοι αν και θα έπρεπε λόγω του γεωγραφικού ανάγλυφου να ισχύει το αντίθετο, μιας και είναι δύσκολη η ηλεκτροδότηση μέρους της νησιωτικής Ελλάδας που είναι δύσκολη η παρουσία του εθνικού δικτύου ηλεκτροδότησης. Υβριδικοί σταθμοί που συνδυάζουν ανεμογεννήτρια και ατμοηλεκτρικό σταθμό στην Ελλάδα υπάρχουν θεωρώντας το υβριδικό σύστημα ανεμογεννήτριας με ντίζελ μηχανή (wind-diesel), μιας και η μελέτη ντίζελ μηχανής με ατμοηλεκτρικό σταθμό είναι ίδια και γίνεται με τις ίδιες εξισώσεις και θεωρία. Τέτοια συστήματα είναι εγκατεστημένα στην Κύθνο (2.77MW diesel - 0.31MW wind) και στη Λήμνο (10.4MW diesel-1.14MW wind).

Αξίζει να σημειώσουμε το φιλόδοξο σχέδιο για τη δημιουργία του πρώτου υβριδικού σταθμού στην Ικαρία από τη Δ.Ε.Η. Ανανεώσιμες Α.Ε. και το οποίο θα αποτελείται από το αιολικό πάρκο Στραβοκουντούρας (2.7MW), το μικρό υδροηλεκτρικό σταθμό (ΜΥΗΣ) Προεσπέρας (3.1MW) και το ΜΥΗΣ Κάτω Προεσπέρας (1.05MW) συνολικής ισχύος 6.85 MW.

Υβριδικά συστήματα wind-diesel είναι ιδιαίτερα διαδεδομένα σε Αμερική και Αυστραλία αλλά και σε άλλες χώρες, για παράδειγμα τη Χιλή. Μια επίσης διαδεδομένη εφαρμογή αυτού του τύπου υβριδικού είναι σε περιοχές με ορυχεία (βόρειο Καναδά και Αργεντινή), όπου οι μηχανικοί εκμεταλλεύονται το αιολικό δυναμικό του βουνού εξόρυξης και το συνδυάζουν με ντίζελ μηχανή για την αναγκαία ηλεκτροδότηση του ορυχείου.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία το υβριδικό σύστημα είναι απομονωμένο, αντιμετωπίζεται ως έτσι και δεν απαιτεί την παρουσία συσκευών αποθήκευσης ενέργειας.

1. ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

1.1 ΓΕΝΙΚΑ

Οι συμβατικοί σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (Π.Η.Ε.) όπως θερμικοί και πυρηνικοί δεν είναι μια κατάλληλη λύση για την ηλεκτροδότηση απομακρυσμένων περιοχών εξαιτίας οικονομικών και τεχνικών παραγόντων. Εξάλλου περιβαλλοντολογικά προβλήματα όπως η εκπομπή καυσαερίων, το φαινόμενο του θερμοκηπίου τα οποία προκαλούνται από αυτές τις μονάδες, το υψηλό κόστος καυσίμων και κατασκευής αυτών των μονάδων παραγωγής, όπως επίσης η απόδοση και αξιοπιστία, είναι σοβαρά προβλήματα των συμβατικών σταθμών Π.Η.Ε.. Τα υβριδικά συστήματα είναι ένας εναλλακτικός τρόπος τροφοδοσίας απομακρυσμένων περιοχών με ηλεκτρική ενέργεια.

Το υβριδικό σύστημα υλοποιείται λειτουργικά, από την εφαρμογή πάνω από μιας μεθόδου παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (συμβατικών και ανανεώσιμων πηγών ενέργειας μαζί), για την τροφοδοσία μιας περιοχής ή ενός φορτίου με τη γενική έννοια του όρου. Η περιοχή αυτή είναι συνήθως απομακρυσμένη, και στην περίπτωση που έχουμε τη συμμετοχή τουλάχιστον μιας ανανεώσιμης πηγής ενέργειας στο υβριδικό σύστημα, αυτή θα πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπόψη για οικονομικούς λόγους. Ατμοηλεκτρικοί, αεριοστροβιλικοί και πυρηνικοί σταθμοί σαν συμβατική μονάδα Π.Η.Ε., ανεμογεννήτριες, φωτοβολταϊκά στοιχεία, κυψέλες καυσίμου και άλλες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (Α.Π.Ε.) χρησιμοποιούνται για την υλοποίηση ενός υβριδικού συστήματος. Εξάλλου η ενσωμάτωση των Α.Π.Ε. στα συμβατικά δίκτυα μπορούν να φέρουν αξιοπιστία, αποδοτικότητα στο φορτίο και επίσης το κόστος να μειωθεί δραστικά.

1.2 ΚΥΡΙΟΙ ΣΤΑΘΜΟΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

Η ηλεκτρική ενέργεια σε γενικές γραμμές παράγεται χρησιμοποιώντας συμβατικές μονάδες μη ανανεώσιμων πηγών όπως άνθρακα (λιγνίτη), πετρέλαιο, φυσικό αέριο και Ουράνιο. Οι δυνατότητες των μονάδων αυτών είναι πολύ μεγάλες, μιας και είναι υπεύθυνες για την τροφοδοσία μεγάλων περιοχών τεραστίων φορτίων. Η συνεχής τροφοδότηση με καύσιμα των μονάδων αυτών, δημιουργεί την ανάγκη για αναζήτηση σε εναλλακτικές μορφές ανανεώσιμων καυσίμων. Το κύριο κομμάτι

Π.Η.Ε. είναι η γεννήτρια, η οποία όταν συνδεθεί με ένα κινητήριο μηχανισμό θα παραχθεί ηλεκτρική ενέργεια. Ωστόσο ο τύπος του σταθμού Π.Η.Ε. καθορίζεται από το καύσιμο το οποίο είναι υπεύθυνο για τη δημιουργία του μηχανισμού κίνησης. Στους ατμοηλεκτρικούς σταθμούς αξιοποιείται το ορυκτό καύσιμο του λιγνίτη και η θερμογόνο δύναμή του, ενώ στους αεριοστροβιλικούς υγρών και αέριων καυσίμων όπως το πετρέλαιο, φυσικό αέριο και τα παράγωγά τους.

1.2.1 Ατμοηλεκτρικοί σταθμοί

Ο ατμός είναι ένα σημαντικό μέσο για την παραγωγή μηχανικής ενέργειας. Το πιο σημαντικό πλεονεκτήματα του ατμού είναι ότι μπορεί να ανυψώνεται από το νερό το οποίο είναι διαθέσιμο σε αφθονία, δεν αντιδρά πολύ με τα υλικά που εξοπλίζεται ένας σταθμός, και είναι σταθερός στην απαιτούμενη θερμοκρασία της μονάδας. Ένας ατμοηλεκτρικός σταθμός πρέπει να έχει ένα φούρνο (κλίβανο) για την καύση του καυσίμου, ατμοστρόβιλο, ένα λέβητα που περιέχει νερό, μία κύρια μονάδα ηλεκτρικής ενέργειας όπως η γεννήτρια για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, και δίκτυο σωληνώσεων για τη μεταφορά ατμού και νερού. Η θερμική ενέργεια του ατμού μετατρέπεται σε κινητική στον ατμοστρόβιλο και από εκεί σε ηλεκτρική στη γεννήτρια. Ο ατμός από τον ατμοστρόβιλο εισέρχεται στο συμπυκνωτή, μετατρέπεται σε υγρό νερό και επιστρέφει ξανά στο λέβητα έχοντας αυξημένη θερμοκρασία.

Ένας ατμοηλεκτρικός σταθμός χρησιμοποιεί τον ατμό (και όχι κάποιο ιδανικό αέριο) σαν φυσικό μέσο βασιζόμενος στον κύκλο του Rankine. Ο λιγνίτης μεταφέρεται με ταινίες στη μονάδα θραύσης όπου λιοτριβείται, αναμιγνύεται με αέρα και εισάγεται στο θάλαμο καύσης όπου καίγεται προς παραγωγή θερμότητας. Ποσότητες νερού μεταφέρονται με σωληνώσεις μέσα από το θάλαμο καύσης, το νερό άγει τη θερμότητα και μετατρέπεται σε ατμό υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας. Με αυτό τον τρόπο ο ατμός παράγεται στο λέβητα, προωθείται στο κινητήριο σύστημα (ατμοστρόβιλο), συμπυκνώνεται στο συμπυκνωτή και προωθείται στο λέβητα ξανά. Τα διάφορα είδη συστημάτων και εξαρτημάτων που χρησιμοποιούνται σε ένα ατμοηλεκτρικό σύστημα είναι λέβητας υψηλής πίεσης, κινητήριο σύστημα, συμπυκνωτές και πύργοι ψύξης, σύστημα χειρισμού του άνθρακα, σύστημα διαχείρισης τέφρας και σκόνης, μονάδα τροφοδότησης καθαρισμένου νερού, σύστημα αντλιών, προθερμαντήρας αέρα, σύστημα εξοικονόμησης καυσίμου, υπερθερμαντήρα, εναλλάκτες θερμότητας, δεξαμενές καυσίμων και νερού, εξατμιστές, εστίες καύσης καυσίμου, καύσιμα τα οποία μπορεί να είναι στερεά συνήθως λιγνίτης (λιθάνθρακες, πυρηνόξυλο).

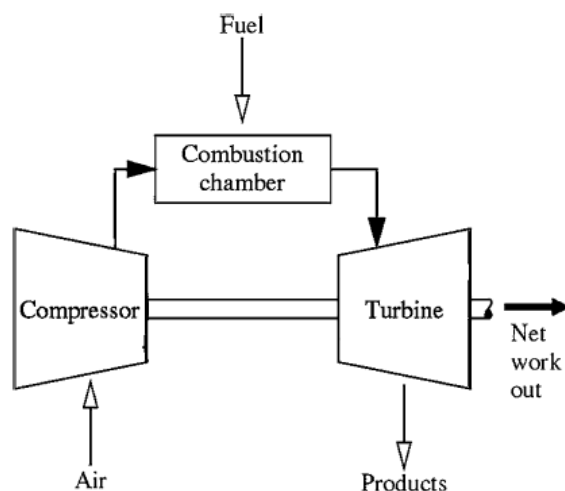
1.2.2 Αεριοστρόβιλοί σταθμοί

Ένας αεριοστρόβιλος αποτελείται από έναν συμπιεστή αέρα, ένα θάλαμο καύσης, στρόβιλο και τη γεννήτρια. Η αρχή λειτουργίας του είναι ίδια με του ατμοηλεκτρικού σταθμού μόνο που εδώ ο ατμός έχει αντικατασταθεί από καπναέρια τα οποία προέρχονται από την καύση μείγματος καυσίμου και αέρα. Ο αεριοστρόβιλος αποκτά την ισχύ του αξιοποιώντας την ενέργεια από την καύση του αερίου και του αέρα του οποίου η πίεση είναι υψηλή της τάξεως 4-10 bars. Αυτή η υψηλή πίεση παράγεται από το συμπιεστή που μπορεί να είναι φυγοκεντρική ή αξονική.

Ο συμπιεστής είναι ένα δοχείο υψηλής πίεσης που συμπιέζει τον αέρα, παράγει μια συνεχή ροή αέρα και ο οποίος αν είναι θερμός και η πίεση αυξημένη τότε η ορμή του κατά την εκτόνωση και επομένως η ενέργεια αυξάνεται. Ο θάλαμος καύσης στον οποίο οδηγείται ο συμπιεσμένος αέρας αναμειγνύεται με το καύσιμο (φυσικό αέριο), καίγεται και τα προϊόντα οδηγούνται στο στρόβιλο. Στο στρόβιλο εκτονώνονται τα αέρια προκαλώντας την περιστροφή και έτσι τη μηχανική ισχύ με την οποία η γεννήτρια παράγει ηλεκτρικό ρεύμα.

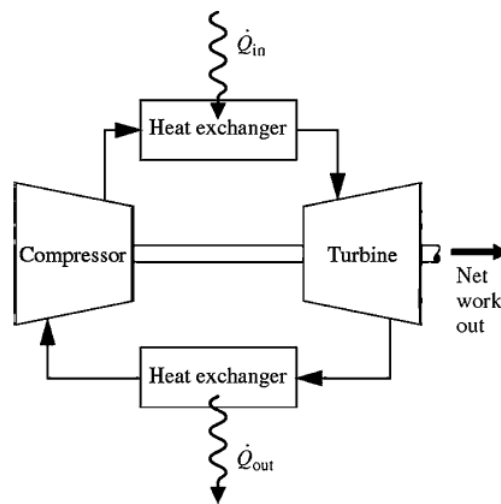
Υπάρχουν δύο τύποι αεριοστρόβιλων, του ανοικτού τύπου και του κλειστού όπως φαίνεται στα Σχ.1.1 και Σχ.1.2 αντίστοιχα ανάλογα με τη συνδεσμολογία που πραγματοποιείται [3].

Στο Σχ.1.1, ανοικτού κύκλου, ο συμπιεστής παίρνει ατμοσφαιρικό αέρα και αυξάνει την πίεση του. Θερμότητα προστίθεται στον θάλαμο καύσης καίγοντας το καύσιμο και αυξάνοντας και τη θερμοκρασία του αέρα. Το ζεστό και υψηλής πίεσης αέριο ρέει προς το στρόβιλο αφού τα καυσαέρια επιστρέφουν πίσω στην ατμόσφαιρα.



Σχήμα 1.1 : Ανοικτού τύπου αεριοστρόβιλος [3].

Στο Σχ.1.2 , κλειστού κύκλου, το εργαζόμενο μέσο (αέρας ή άλλο κατάλληλο αέριο) που εξέρχεται από το συμπιεστή, θερμαίνεται σε έναν θερμαντήρα από μια εξωτερική πηγή σε σταθερή πίεση. Στη συνέχεια ο υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας αέρας που είναι αποτέλεσμα του εξωτερικού θερμαντήρα διοχετεύεται στο στρόβιλο. Μετά το αέριο προερχόμενο από το στρόβιλο ψύχεται στην αρχική του θερμοκρασία με τη βοήθεια εξωτερικού συστήματος ψύξης πριν περάσει στο συμπιεστή και επομένως το εργαζόμενο ρευστό χρησιμοποιείται αδιάκοπα καθώς δε συμμετέχει στην καύση και επομένως αποφεύγεται η μηχανική και χημική διάβρωση του αεριοστρόβιλου από τα προϊόντα της καύσης. Αυτό έχει ως πλεονέκτημα τη χρησιμοποίηση και άλλων καυσίμων (άνθρακα, απόβλητα βιομηχανιών ή πόλεων, υγρών ή αέριων παραγόμενων από βιομάζα).



Σχήμα 1.2 : Κλειστού τύπου αεριοστρόβιλος[3].

1.2.3 Σταθμοί συνδυασμένου κύκλου

Στην τεχνολογία ανοικτού και κλειστού κύκλου, που περιγράφηκαν προηγουμένως, χάνεται σημαντική θερμική ενέργεια. Αν αυτή η ενέργεια μπορούσε να χρησιμοποιηθεί σε συνδυασμένου κύκλου συστήματα, η απόδοση αυτών των συστημάτων θα μπορούσε να ενισχυθεί σημαντικά. Η φιλοσοφία αυτών των συστημάτων είναι να χρησιμοποιήσουμε τη θερμότητα ενός ή περισσότερων αεριοστρόβιλων με σκοπό να παράγουμε ατμό σε έναν λέβητα ώστε να κινηθεί ένας ατμοστρόβιλος. Ο αέρας συμπιέζεται και αμέσως μετά αναμειγνύεται με το καύσιμο

στο θάλαμο καύσης του αεριοστροβίλου, όπου το μίγμα καίγεται. Τα καυσαέρια μετά την εκτόνωση τους στο στρόβιλο οδηγούνται σε ένα λέβητα, ο οποίος απάγει τη θερμότητά τους για την παραγωγή ατμού και έτσι κινεί το στρόβιλο. Υπάρχουν διάφοροι συνδυασμοί κύκλου ανάλογα με το μέρος και τις απαιτήσεις των κρατών, ακόμα και η πυρηνική ενέργεια θα μπορούσε να συνδυαστεί σε αυτού του είδους σταθμούς.

1.2.4 Πυρηνική ενέργεια

Η πυρηνική ενέργεια είναι μια σημαντική πηγή για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε πολλές χώρες. Το 2003, 19 χώρες εξαρτιόντουσαν από την πυρηνική ενέργεια για τουλάχιστον του 20% της ηλεκτρικής ενέργειας. Η Γαλλία είναι η χώρα που έχει το μεγαλύτερο μερίδιο (78,1%) της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από πυρηνικά. Αν και το ποσοστό με πυρηνικά καύσιμα της συνολικής παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας δεν είναι πολύ υψηλό (περίπου 20%), οι ΗΠΑ εξακολουθούν να είναι ο μεγαλύτερος παραγωγός στον κόσμο της ηλεκτρικής ενέργειας με τη χρήση πυρηνικών καυσίμων. Οι υψηλότερες τιμές των ορυκτών καυσίμων και η έναρξη ισχύος του Πρωτοκόλλου του Κιότο θα μπορούσε να οδηγήσει σε περισσότερη παραγωγή πυρηνικής ενέργειας. Στις αναδυόμενες οικονομίες, όπως η Κίνα και η Ινδία, η πυρηνική ισχύς αναμένεται να αυξηθεί. Ωστόσο, η τάση προς πυρηνική ενέργεια μπορεί να δυσκολέψει ή ακόμη και να αντιστραφεί για διάφορους λόγους. Η ασφάλεια του πυρηνικού σταθμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας εξακολουθεί να είναι η μεγαλύτερη ανησυχία καθώς και η αποθήκευση πυρηνικών αποβλήτων μπορεί πάντα να είναι ένα θέμα προς συζήτηση για τους οικολόγους και όχι μόνο. Επιπλέον, το πυρηνικό καύσιμο (ουράνιο) δεν είναι ανανεώσιμο καύσιμο.

Τα κύρια πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των σταθμών πυρηνικής ενέργειας είναι:

- Ο χώρος που καταλαμβάνει ένας πυρηνικός σταθμός είναι μικρότερος σε σύγκριση με άλλους συμβατικούς σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας του ίδιου μεγέθους.
- Ένα εργοστάσιο πυρηνικής ενέργειας καταναλώνει πολύ μικρή ποσότητα καυσίμου. Έτσι το κόστος μεταφοράς καυσίμων είναι μικρότερο και δεν χρειάζονται πλέον μεγάλες εγκαταστάσεις αποθήκευσης καυσίμων.
- Υπάρχει αυξημένη αξιοπιστία της λειτουργίας.
- Οι πυρηνικοί σταθμοί δεν επηρεάζονται από τις αντίξοες καιρικές συνθήκες.
- Οι πυρηνικοί σταθμοί είναι κατάλληλοι για να καλύψουν μεγάλες απαιτήσεις ισχύος και έχουν καλύτερη απόδοση σε υψηλότερους συντελεστές φορτίου (80-90%).

- Υλικές δαπάνες για μεταλλικές κατασκευές, σωληνώσεις, μηχανισμοί αποθήκευσης, είναι πολύ χαμηλότερες για ένα εργοστάσιο πυρηνικής ενέργειας από έναν σταθμό που έχει καύσιμο τον άνθρακα.
- Δεν απαιτείται μεγάλη ποσότητα νερού.
- Το αρχικό κόστος του πυρηνικού σταθμού είναι υψηλότερο σε σύγκριση με κάποιο υδροηλεκτρικής ενέργειας ή ατμοηλεκτρικό.
- Οι πυρηνικοί σταθμοί δεν είναι κατάλληλοι για διακυμάνσεις φορτίου.
- Ραδιενεργά απόβλητα, αν δεν αποθηκευτούν προσεκτικά, μπορεί να έχουν κακή επίδραση στην υγεία των εργαζομένων και άλλων πληθυσμών.
- Το κόστος συντήρησης της μονάδας είναι υψηλό.
- Απαιτεί εκπαιδευμένο και ειδικευμένο προσωπικό για τον χειρισμό των σταθμών αυτών.

1.2.5 Υδροηλεκτρικοί σταθμοί

Σήμερα η υδροηλεκτρική ενέργεια εξακολουθεί να είναι η μεγαλύτερη ανανεώσιμη πηγή ηλεκτρισμού παγκοσμίως. Το 2002 περισσότερο από το 18% που παρέχεται από ανανεώσιμες πηγές οφείλεται σε υδροηλεκτρικούς σταθμούς και η παγκόσμια υδροηλεκτρική παραγωγική ικανότητα αναμένεται να αυξηθεί ελαφρώς λόγω των μεγάλων υδροηλεκτρικών έργων στις αναδυόμενες οικονομίες. Αν και πρόκειται για καθαρή και ανανεώσιμη πηγή ενέργειας, εξακολουθούν να υπάρχουν και σήμερα προβλήματα. Τα μεγάλα φράγματα και ταμιευτήρες προκαλούν περιβαλλοντολογικές ανησυχίες στην κοινωνία.

Αν από ένα ύψος το νερό πέσει κατακόρυφα, αποκτά κινητική ενέργεια η οποία μπορεί να μετατραπεί σε έργο. Έχοντας το νερό αυτή την κινητική ενέργεια εισέρχεται σε υδροστρόβιλο και ο οποίος τη μετατρέπει σε περιστροφική κίνηση, περιστρέφοντας τον άξονα που μοιράζεται με τη γεννήτρια παράγοντας έτσι ηλεκτρική ενέργεια.

Υδροηλεκτρικοί σταθμοί βρίσκονται σε ποτάμια, ρέματα και κανάλια αλλά για μια πιο αξιόπιστη παροχή νερού απαιτούνται φράγματα. Τα φράγματα αποθηκεύουν νερό για μετέπειτα απελευθέρωση για σκοπούς όπως άρδευση, οικιακή χρήση και παραγωγή ενέργειας. Η δεξαμενή λειτουργεί πιο πολύ σαν μπαταρία καθώς το αποθηκευμένο νερό απελευθερώνεται όταν απαιτείται από το εκάστοτε φορτίο ηλεκτρική ενέργεια. Έχουν αρκετά υψηλό κόστος και μεγάλο χρόνο κατασκευής. Η παραγωγή ενέργειας μπορεί να παρουσιάζει διακυμάνσεις καθώς εξαρτάται από τις ετήσιες βροχοπτώσεις και χιονοπτώσεις. Λόγο της κατασκευής τους σε απομακρυσμένες περιοχές έχουν και υψηλό κόστος μεταφοράς υλικών επιβαρύνοντας το κατασκευαστικό κόστος. Στα θετικά τοποθετείται η ανεξάντλητη

πηγή ενέργειας που είναι το νερό. Η κατασκευή τους σχετίζεται και με άλλες ανθρώπινες δραστηριότητες όπως άρδευση και ύδρευση. Συμβάλουν στην αναβάθμιση των περιοχών κατασκευής τους, έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής και η οποία μπορεί να επιμηκυνθεί με στοχευόμενη ανανέωση μηχανολογικού εξοπλισμού και υψηλή αξιοπιστία παραγωγής.

1.2.6 Ντιζελογεννήτριες

Οι κινητήρες πετρελαίου και φυσικού αερίου ονομάζονται κινητήρες εσωτερικής καύσης. Στους κινητήρες εσωτερικής καύσης, η καύση γίνεται μέσα στον κινητήρα και τα προϊόντα της καύσης προκαλούν τη ροή του υγρού που δημιουργεί τη μηχανική ισχύ. Στους αεριοστροβίλους η καύση συμβαίνει σε άλλο θάλαμο και το θερμό υγρό που περιέχει θερμική ενέργεια προωθείται στην τουρμπίνα. Οι εμβολοφόροι κινητήρες πετρελαίου και φυσικού αερίου ανήκουν στην ίδια οικογένεια και έχουν μεγάλη ομοιότητα στην αρχή λειτουργίας και κατασκευής. Οι κινητήρες μετατρέπουν τη χημική ενέργεια του καυσίμου σε μηχανική ενέργεια.

Ένας κινητήρας πετρελαίου αποτελείται από τα παρακάτω εξαρτήματα :

- Κυλίνδρους, στους οποίους καύσιμο και αέρας συναντιούνται και πραγματοποιείται η καύση.
- Έμβολα, τα οποία δέχονται υψηλή πίεση από την εκτόνωση των προϊόντων της καύσης και με αυτό τον τρόπο τα έμβολα πραγματοποιούν γραμμική κίνηση.
- Συνδετική ράβδο, σύνδεση στροφαλοφόρου άξονα παλινδρομικής κίνησης σε περιστροφική.
- Συνδεδεμένο φορτίο, μηχανική κίνηση ή ηλεκτρική γεννήτρια.
- Κατάλληλες βαλβίδες για τον έλεγχο ροής του καυσίμου, αέρα, καυσαερίων, ψεκασμό καυσίμου και συστημάτων ανάφλεξης.
- Λιπαντικό σύστημα και σύστημα ψύξης.

Σε ένα σύστημα κινητήρα-γεννήτριας ο άξονας της γεννήτριας είναι συνδεδεμένος με τον άξονα του κινητήρα.

Οι κύριες διαφορές μεταξύ βενζινοκινητήρα και πετρελαιοκινητήρα είναι οι εξής:

- Ένας βενζινοκινητήρας προσλαμβάνει ποσότητες μίγματος καυσίμου και αέρα, το συμπιέζει και μετά αναφλέγεται με τη βοήθεια σπινθήρα (μπουζί). Ένας ντιζελοκινητήρας παίρνει αέρα, τον συμπιέζει και μετά ψεκάζει καύσιμο στον

συμπιεσμένο αέρα. Η θερμότητα του συμπιεσμένου αέρα προκαλεί αυθόρμητη ανάφλεξη του καυσίμου.

- Μια μηχανή βενζίνης συμπιέζει σε αναλογία 8:1 ως 12:1, ενώ μια μηχανή ντίζελ συμπιέζει σε αναλογία 14:1 έως 25:1. Η υψηλότερη αναλογία συμπίεσης του πετρελαιοκινητήρα οδηγεί σε καλύτερη απόδοση.

Ο κινητήρας Ντίζελ συνιστάται λόγω της μακροζωίας του, χαμηλότερο κόστος καυσίμων, χαμηλότερη κατανάλωση καυσίμου ανά κιλοβάτ (kW) που παράγεται, μικρότερη συντήρηση και μικρότερο κόστος στο σύστημα σπινθηρισμού, πιο στιβαρή και αξιόπιστη μηχανή.

Σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με ντίζελ εγκαθίστανται όπου η προσφορά σε άνθρακα και νερό δεν είναι αρκετή σε ικανοποιητικό επίπεδο, εκεί όπου η ισχύς παράγεται σε μικρές ποσότητες εκτάκτως και όπου χρειάζεται ένα σύστημα έκτακτης ανάγκης για συνέχιση της τροφοδοσίας φορτίου όπως στα νοσοκομεία.

Τα κυριότερα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των κινητήρων ντίζελ είναι :

- Περιορισμένη ανάγκη ψύξης με νερό.
- Απώλειες αναμονής είναι μικρότερες συγκριτικά με άλλους σταθμούς Π.Η.Ε.
- Χαμηλό κόστος καυσίμων.
- Γρήγορη εκκίνηση και σύνδεση με το φορτίο.
- Μικρότερους αποθηκευτικούς χώρους καυσίμου.
- Απλή διάταξη του σταθμού.
- Δεν υπάρχει πρόβλημα χειρισμού τέφρας.
- Απαιτείται λιγότερη επίβλεψη.
- Για μικρότερης ισχύος δυναμικότητα, οι σταθμοί με ντίζελ είναι πιο αποτελεσματικοί από τους ατμοηλεκτρικούς.
- Μπορούν να ανταποκριθούν σε διαφορετικά και με διακύμανση φορτία χωρίς δυσκολία.
- Το κόστος ανά κιλοβατώρα (kW) είναι συγκριτικά περισσότερο.
- Η διάρκεια ζωής της μονάδας παραγωγής είναι μικρότερη λόγω της συχνής συντήρησης.
- Ο θόρυβος είναι ένα πρόβλημα σε μονάδες Π.Η.Ε. ντίζελ.
- Μονάδες Π.Η.Ε. δε μπορούν να κατασκευαστούν σε μεγάλη κλίμακα.

1.3 ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Οι ενεργειακοί πόροι μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο ομάδες : μακροπρόθεσμοι ανανεώσιμοι πόροι και βραχυπρόθεσμοι. Μη ανανεώσιμες πηγές ενέργειας ή μακροπρόθεσμοι πόροι αποτελούνται από χαρακτηριστικά ενέργειας όπου η εμφάνισή τους είναι μεγάλη, καταναλώνονται σταδιακά και κάποια στιγμή τελειώνουν. Ωστόσο, βραχυπρόθεσμες ανανεώσιμες πηγές χαρακτηρίζονται από τη συνέχεια, τη σταθερότητα και μπορούν να απαντηθούν στη φύση ως βιομάζα, ενέργεια νερού, ενέργεια της θάλασσας, αιολική ενέργεια, ηλιακή ενέργεια, γεωθερμική κλπ.

Όσον αναφορά το υψηλό ποσοστό κατανάλωσης ενέργειας, τα ορυκτά και πυρηνικά καύσιμα δε μπορούν και δε πρέπει να είναι υπεύθυνα της ενεργειακής ζήτησης παγκόσμια. Επιπλέον τα ορυκτά καύσιμα εξαντλούνται και είναι αустηρά ακατάλληλα για το περιβάλλον εξαιτίας των εκπομπών ρύπων που έχουν και των αποβλήτων που ακολουθούν. Έτσι η χρησιμοποίηση άλλων πηγών ενέργειας, όπως οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, και η ανάπτυξή τους, επιβάλλεται και είναι αναπόφευκτη.

1.3.1 Ανεμογεννήτριες

Οι ανεμογεννήτριες (Α.Γ.) είναι μετατροπείς της κινητικής ενέργειας του ανέμου σε μηχανική και κατόπιν σε ηλεκτρική. Οι Α.Γ. με βάση την ηλεκτροπαραγωγή έχουν κατηγοριοποιηθεί σε δύο γενικά ομάδες, σε αυτές που είναι διασυνδεδεμένες με το δίκτυο (grid-connected) και μη διασυνδεδεμένες (stand alone). Στην παρούσα διπλωματική εργασία γίνεται εκτεταμένη παρουσίαση βασικών στοιχείων της επαγωγικής γεννήτριας διπλής τροφοδοσίας (τύπος Α/Γ) στα επόμενα κεφάλαια.

1.3.1.1 Ανεμογεννήτριες μη διασυνδεδεμένες με το δίκτυο

Αυτές του είδους Α.Γ. έχουν διαφορετικό είδος εφαρμογών, όπως την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε μακρινά σημεία όπου χρειάζεται αξιόπιστη πηγή ενέργειας, φόρτιση μπαταριών, θέρμανση νερού, ψύξη κτλ. Η διάμετρος του ρότορα μικρής Α.Γ. του οποίου η κύρια εφαρμογή είναι φόρτιση μπαταριών είναι μικρότερος των 5 μέτρων με ικανότητα 400 και 1000 Watt. Εφαρμογές ψύξης και θέρμανσης συνήθως χρησιμοποιούνται σε κατοικίες, και η ισχύς των Α.Γ. συνδέεται απευθείας

στο θερμαντικό φορτίο. Επιπλέον τέτοιες μονάδες μικρών Α.Γ. χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε απομακρυσμένα σημεία ως εφεδρική τροφοδοσία στις γεωργικές καλλιέργειες. Χρησιμοποιούνται επίσης με μπαταρίες και μπορούν να λειτουργήσουν μαζί με φωτοβολταϊκά και ντιζελοκινητήρες ως υβριδικά συστήματα μη διασυνδεδεμένα με το δίκτυο.

1.3.1.2 Ανεμογεννήτριες διασυνδεδεμένες με το δίκτυο

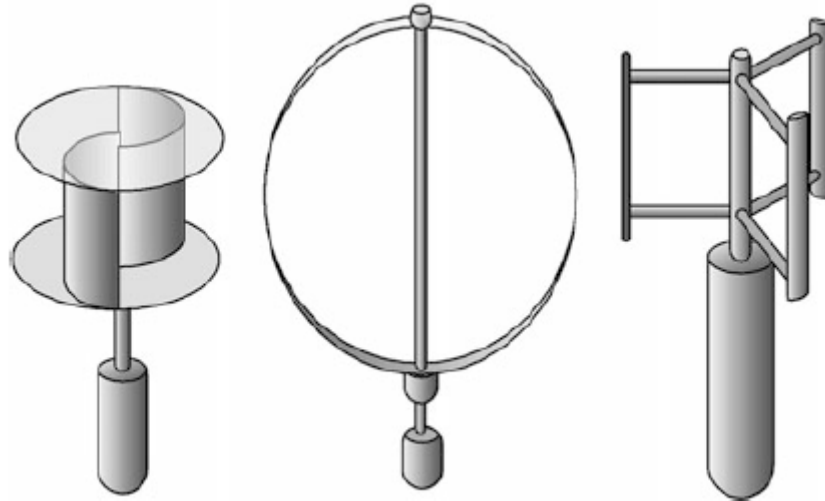
Ανεμογεννήτριες διασυνδεδεμένες με το δίκτυο μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο κατηγορίες, σε απευθείας σύνδεση με το δίκτυο και σε αιολικά πάρκα. Οι απευθείας σύνδεσης με το δίκτυο χρησιμοποιούνται για την παροχή ενέργειας σε κατοικίες, εμπορικές εφαρμογές, βιομηχανικές και σε γεωργικές καλλιέργειες. Η ικανότητα αυτών είναι της τάξης των 10 και 100 kW και εγκαθίστανται κοντά στο φορτίο. Η περίσσεια ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να πουληθεί στο διασυνδεδεμένο δίκτυο, ενώ όταν δεν υπάρχει αέρας και επομένως μη παραγωγή ενέργειας από την Α.Γ. , το φορτίο τροφοδοτείται (αγορά ενέργειας) από το διασυνδεδεμένο δίκτυο.

Επιπλέον η αύξηση ικανότητας των Α.Γ. έρχεται αντιμέτωπη με τεχνικά και οικονομικά προβλήματα. Επομένως η συγκέντρωση πολλών Α.Γ. σε ένα ορισμένο χώρο (αιολικό πάρκο) χρησιμοποιείται για την κατασκευή μιας αιολικής μονάδας μεγάλης ισχύος. Σήμερα κατασκευάζονται αιολικά πάρκα με δυναμικότητα άνω των 100 MW. Η ποσότητα της παραγόμενης ενέργειας σε ένα αιολικό πάρκο εξαρτάται από τον αριθμό των Α.Γ., τα χαρακτηριστικά τους και την ταχύτητα ανέμου. Σημαντικό είναι να τονίσουμε ότι για να αποφευχθεί το φαινόμενο σκιάς ανέμου, δηλαδή να μην φτάνει άνεμος σε μια Α.Γ. λόγω του ότι πραγματοποιεί πλήρη απομάστευση κάποια άλλη κοντινή, οι Α.Γ. εγκαθίστανται με μια συγκεκριμένη ελάχιστη απόσταση η μία από την άλλη.

1.3.1.3 Μοντέλα ανεμογεννητριών

Η γενική κατηγοριοποίηση των Α.Γ. βασίζεται στην κατεύθυνση του άξονα της τουρμπίνας. Η διεύθυνση του άξονα μπορεί να είναι οριζόντια ή κάθετη. Οι οριζόντιου τύπου κατηγοριοποιούνται με βάση των αριθμό των πτερυγίων σε τρεις γενικές κατηγορίες των δύο πτερυγίων, τριών πτερυγίων και πολλαπλών πτερυγίων. Στου οριζοντίου τύπου Α.Γ. η μεγαλύτερη ταχύτητα ανέμου οδηγεί και σε μικρότερο αριθμό πτερυγίων. Στου καθέτου άξονα, ο άξονας είναι κάθετος στην κατεύθυνση του ανέμου. Οι περισσότερες Α.Γ. καθέτου τύπου έχουν δύο πτερύγια και οι πιο κοινοί τύποι είναι οι Α.Γ Savonius, Darrius και Evans. Τα πτερύγια της Darrius είναι κατασκευασμένα από αλουμίνιο και είναι καμπυλωτά σαν λεπίδες ενώ της Savonius

αλλά και της Evans είναι ημισφαιρικές σαν καλάθια. Οι κάθετοι άξονα έχουν απλοποιημένη και εύκολη συντήρηση και επισκευή μιας και το παραγόμενο έργο μεταφέρεται με τον άξονα στο έδαφος όπου βρίσκεται και η γεννήτρια. Στο Σχ.1.3 παρουσιάζεται οι Α.Γ. Savonius (αριστερά), Darrieus(κέντρο) και Evans(δεξιά).



Σχήμα 1.3 : Ανεμογεννήτρια Savonius (αριστερά), Darrieus (κέντρο) και Evans (δεξιά) [3].

1.3.2 Φωτοβολταϊκά

Τα φωτοβολταϊκά πάνελ μετατρέπουν το ηλιακό φως απευθείας σε ηλεκτρική ενέργεια χάρη στις ιδιότητες του κύριου στοιχείου τους, το πυρίτιο, στοιχείο το οποίο βρίσκεται σε αφθονία στη γη. Η προσανατολισμένη κίνηση ηλεκτρονίων στα μέταλλα καλείται ηλεκτρικό ρεύμα, και μπορεί να προκληθεί με την παρουσία ενός ηλεκτρικού φορτίου στα ηλεκτρόνια της εξωτερικής στιβάδας του ατόμου. Τα άτομα του πυριτίου έχουν ένα ηλεκτρόνιο στην εξωτερική τους στιβάδα και μπορούν να γίνουν ασταθή σπάζοντας τον ομοιοπολικό δεσμό τους με την προσφορά κατάλληλης ενέργειας (από τον ήλιο) προκαλώντας αυτή την ροή και μετατόπιση ηλεκτρονίων που καλείται ηλεκτρικό ρεύμα. Ο ήλιος προσφέρει αυτή την ενέργεια και επομένως όταν οι ηλιακές ακτίνες πέσουν στο πυρίτιο κάποια ηλεκτρόνια ελευθερώνονται. Μόλις απελευθερωθούν τα ηλεκτρόνια με τη βοήθεια κλειστού κυκλώματος προκαλούν την ροή ηλεκτρικού ρεύματος. Είναι σημαντικό να τονίσουμε ότι το φως, και όχι η θερμότητα, από τον ήλιο είναι αυτό που προκαλεί την ροή ρεύματος και επομένως τα

φωτοβολταϊκά είναι αποτελεσματικά και σε κρύες χώρες όπως και στις θερμές εφόσον υπάρχουν πολλές ώρες φωτός ήλιου.

1.3.2.1 Ηλιακό κύτταρο, πάνελ, συστοιχία.

Ένα ηλιακό κύτταρο είναι μια ημιαγώγιμη δίοδος όταν διεγείρεται από το φως, παράγοντας ένα ηλεκτρόνιο (αρνητικό φορτίο) και μια οπή (θετικό φορτίο) στις αντίθετες πλευρές του κυττάρου. Το φορτίο συλλέγεται με σύρματα και στις δύο πλευρές του κυττάρου οδηγώντας το ηλεκτρικό ρεύμα στο ηλεκτρικό κύκλωμα. Ηλιακά κύτταρα σε σειρά αυξάνουν την τάση και σε παράλληλα το ρεύμα. Συνήθως μερικά τετραγωνικά εκατοστά παράγουν 1 W. Για την αύξηση ισχύος, μεγάλος αριθμός ηλιακών κυττάρων συνδέονται σε σειρά και παράλληλα σχηματίζοντας ένα ηλιακό πάνελ. Η ηλιακή συστοιχία ορίζεται ως μια ομάδα αρκετών πάνελ σε συνδυασμό σύνδεσης εν σειρά και παράλληλα με σκοπό τη δημιουργία απαιτούμενης τάσης και ρεύματος.

1.3.2.2 Τύποι ηλιακών πάνελ.

Υπάρχουν δύο βασικοί τύποι ηλιακών πάνελ :

- Κρυσταλλικού πυριτίου πάνελ που έχουν ένα κύριο στέρεο στρώμα πυριτίου ως ημιαγωγό. Στο πάνελ εφαρμόζεται από τη μια μεριά με γυαλί και από την άλλη με οξικό άλας αιθυλενίου βινυλίου (EVA), ένα συμπολυμερές του αιθυλενίου και του οξεικού βινυλίου. Τα κύτταρα του πάνελ προστατεύονται από την υγρασία και χρειάζονται να παραμείνουν δροσερά καθώς η απόδοσή τους πέφτει περίπου 0,5% για κάθε βαθμό Κελσίου πάνω από την θερμοκρασία δοκιμής του πάνελ που είναι 25 βαθμοί Κελσίου.
- Άμορφου πυριτίου λεπτής μεμβράνης ή φιλμ. Κατασκευαστικά και λόγω του άμορφου πυριτίου είναι εύκαμπτα πάνελ και το φιλμ εναποτίθεται σε ένα χαμηλού κόστους υπόστρωμα όπως γυαλί ή λεπτό φύλλο μετάλλου. Είναι πιο φθηνά από τα κρυσταλλικού πυριτίου και χρησιμοποιούνται λόγω της ευκαμψίας τους σε κτίρια, σκάλες και επιφάνειες όπου δεν είναι δυνατή η τοποθέτηση κρυσταλλικού πυριτίου.

1.3.2.3 Εφαρμογές ηλιακών κυττάρων

Ορισμένες κοινές εφαρμογές φωτοβολταϊκών ηλιακών κυττάρων αναφέρονται παρακάτω.

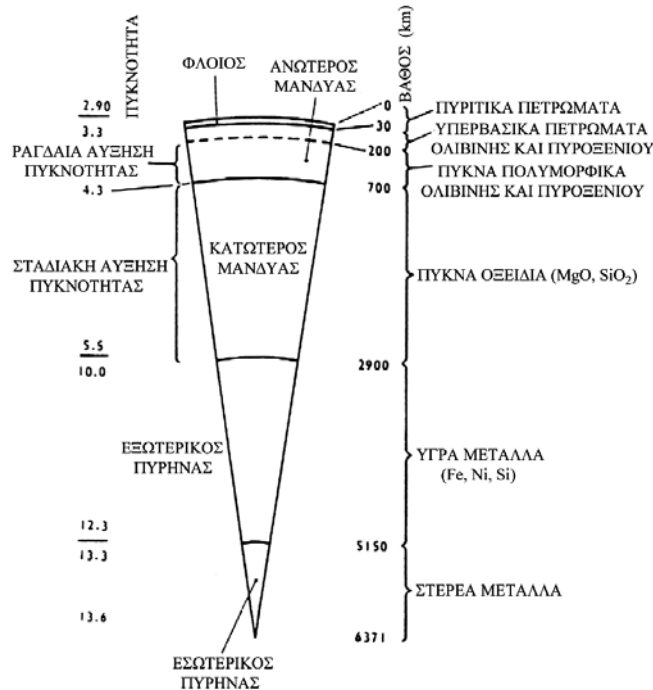
- Κουτιά ταχείας τηλεφωνικής κλήσης έκτακτης ανάγκης σε αυτοκινητόδρομο.
- Πλωτοί σημαντήρες Λιμενικής αρχής.
- Σταθμοί μετάδοσης κυμάτων σε βουνά.
- Εκτός ηλεκτρικού δικτύου αγροτικές κατοικίες και σπίτια.
- Σηματοδότηση σιδηροδρομικής γραμμής.
- Δορυφόρους και Διαστημικούς σταθμούς.
- Εξωτερικό φωτισμό.
- Αριθμομηχανές και ρολόγια.
- Τηλεπικοινωνίες και σταθμούς αναμετάδοσης σε βουνοκορφές.

1.3.3 Γεωθερμία

Η γεωθερμική ενέργεια ανήκει στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και προέρχεται από τη θερμότητα του μάγματος που υπάρχει στο εσωτερικό της γης και τα ραδιενεργά υλικά της. Σε αντίθεση με τις άλλες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (αιολική, ηλιακή, παλίρροιες) που εξαρτώνται από τις κλιματολογικές συνθήκες, είναι συνεχώς διαθέσιμη. Αυτό σημαίνει ότι μπορεί να είναι δυνατή η παραγωγή ηλεκτρισμού και θερμικής ενέργειας από γεωθερμικούς πόρους κάθε ώρα της ημέρας, ενώ οι άλλοι τύποι των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είναι διαθέσιμοι εποχικά ή κάτω από ειδικούς όρους κλιματολογικών συνθηκών.

Η γη είναι ζεστή στο εσωτερικό της και η αύξηση της θερμοκρασίας συναρτήσει του βάθους είναι περίπου σταθερή και ονομάζεται γεωθερμική βαθμίδα η οποία κυμαίνεται στα πρώτα χιλιόμετρα της λιθόσφαιρας από 20°C ως 50°C με τη μέση τιμή στους 33°C. Η ενέργεια αυτή σύμφωνα με το νόμο διάδοσης της θερμότητας από το θερμότερο μέρος (εσωτερικό της γης) προς το ψυχρότερο (επιφάνεια της γης) ονομάζεται γεωθερμία και διαδίδεται είτε μέσω της αγωγιμότητας των πετρωμάτων είτε από την κίνηση των ρευστών. Στην αστρική προέλευση της γης οφείλεται η θερμότητά της. Ο πυρήνας της υπολογίζεται ότι έχει θερμοκρασία περίπου 4.000°C και ο μανδύας 1.200 – 1.500°C όπως φαίνεται και από το Σχ.1.4 όπου απεικονίζεται η εσωτερική δομή της γης και οι θερμοκρασίες που επικρατούν από τον εσωτερικό πυρήνα μέχρι την επιφάνεια της. Από το ανώτερο τμήμα του μανδύα προέρχεται το μάγμα (λιωμένο πέτρωμα) που φθάνει μερικές φορές στην επιφάνεια της γης, δημιουργώντας τις εντυπωσιακές ηφαιστειακές εκρήξεις. Το υλικό που φθάνει στην επιφάνεια (μίγμα λειωμένων υλικών του μανδύα και της υπερκείμενης λιθόσφαιρας, αερίων και μερικών στερεοποιημένων πετρωμάτων) έχει θερμοκρασίες μεταξύ 600 και 1.100°C (ανάλογα με τη χημική σύσταση). Έτσι

μεταφέρονται μεγάλες ποσότητες θερμικής ενέργειας, που σπάνια διαχέονται στην ατμόσφαιρα και την επιφάνεια, με την έκρηξη. Συνήθως εγκλωβίζονται σε μικρό βάθος και κινητοποιούν μεγάλες ποσότητες υπεδάφικων ρευστών που θερμαίνονται ως τους 400°C και περισσότερο. Είναι σημαντικό να τονιστεί η διαφορά μεταξύ της γεωθερμικής βαθμίδας και της ροής θερμότητας, γιατί υψηλή θερμοκρασιακή (γεωθερμική) βαθμίδα δεν ταυτίζεται πάντα και με μεγάλη ροή θερμότητας.



Σχήμα 1.4 : Εσωτερική δομή και θερμοκρασίες που επικρατούν.

1.3.3.1 Γεωθερμικά πεδία

Οι γεωθερμικές πηγές μπορούν να ταξινομηθούν σε τέσσερες κύριες ομάδες πόρων.

- **Υδροθερμικά πεδία :** Τα θερμά νερά ή ατμοί που είναι αποθηκευμένα στα χαμηλά τμήματα της γης (100m-4500m) ονομάζονται υδροθερμικές πηγές. Οι υδροθερμικοί αυτοί πόροι μπορούν να παράγουν ηλεκτρική ενέργεια θα πρέπει να έχουν θερμοκρασία μεταξύ 90 και 350°C. Εκτιμάται ότι τα δύο τρίτα των πόρων αυτών έχουν θερμοκρασία μεταξύ 150 και 200°C. Το μεγαλύτερο μέρος των πόρων αυτών περιέχουν ξηρό ατμό ή ατμό χαμηλής περιεκτικότητας υγρού. Ωστόσο ο αριθμός των ξηρών πόρων υδροθερμικού ατμού είναι πολύ λιγότερος λόγω της ειδικής προϋπόθεσης σχηματισμού.
- **Υψηλής πίεσης στρώματα :** Οι πόροι αυτοί είναι πηγές που περιέχουν μεθάνιο αποθηκευμένο σε βαθιά στρώματα των 3000m-6000m κάτω από υψηλής πίεσης ιζηματογενή στρώματα. Η θερμοκρασία αυτή των στρωμάτων κυμαίνεται μεταξύ 90°C και 200°C.

- **Θερμά ξηρά πετρώματα :** Η κύρια ιδέα παραγωγής ηλεκτρισμού χρησιμοποιώντας θερμά ξηρά πετρώματα είναι η κατασκευή τεχνητής γεωθερμικής αντλίας. Για να κατασκευαστεί αυτή η αντλία, στην αρχή γίνονται δύο γεωτρήσεις (γεώτρηση τροφοδοσίας και γεώτρηση παραγωγική) σε αυτά τα πετρώματα σε βάθος 4000-5000m. Αμέσως μετά δημιουργούνται κάποιες ρωγμές με εκρήξεις ή υδραυλική πίεση. Στη συνέχεια οι δύο γεωτρήσεις συνδέονται έμμεσα μεταξύ τους διαμέσου των ρωγμών. Κρύο νερό διαχέεται στη μία γεώτρηση και ζεστός ατμός εξάγεται από την άλλη γεώτρηση. Ο ζεστός ατμός βράζει ένα δεύτερο ρευστό με χαμηλότερο σημείο βρασμού και η ηλεκτρική ενέργεια παράγεται διοχετεύοντας τον καυτό ατμό του δεύτερου ρευστού σε ένα στρόβιλο.

1.3.4 Βιομάζα

Σε γενικές γραμμές οι πόροι της βιομάζας αναφέρονται σε υλικά που προέρχονται από υποπροϊόντα και κατάλοιπα φυτικής, δασικής, ζωικής και αλιευτικής παραγωγής, παραπροϊόντα βιομηχανικής επεξεργασίας, στερεά (σκουπίδια) και υγρά (λύματα) αστικά απόβλητα . Πρόκειται δηλαδή για υλικά κυρίως φυτικής ή ζωικής προέλευσης και αντιμετωπίζονται ως ενεργειακοί πόροι. Η βιομάζα σχηματίζεται από τη φωτοσυνθετική μετατροπή της ηλιακής ενέργειας. Σε αντίθεση με τα ορυκτά καύσιμα που βρίσκονται σε συγκεκριμένες περιοχές, οι πόροι της βιομάζας είναι σε αποκεντρωμένη μορφή. Πόροι βιομάζας που είναι κατάλληλοι για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι το ξύλο, γεωργικά κατάλοιπα, φυτικά προϊόντα όπως το ζαχαροκάλαμο, βότανα που περιέχουν φυτικά έλαια, βότανα που περιέχουν υδρογονάνθρακα, βιομηχανικά και αγροτικά απόβλητα. Τρεις τεχνολογίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μετατροπή της βιομάζας σε ενέργεια και είναι η άμεση διαδικασία της καύσης, θερμοχημική (ξηρή μέθοδος) και βιοχημική (υγρή μέθοδος). Κάθε μία από τις οποίες χρησιμοποιούν αντιδραστήρες αεριοποίησης τύπου σταθερής κλίσης ή ρευστοποιημένης.

Η διαδικασία άμεσης καύσης είναι η απλούστερη τεχνολογία για τη μετατροπή της βιομάζας σε ενέργεια. Ωστόσο η βιομάζα σε αυτή την τεχνολογία έχει χαμηλό ενεργειακό περιεχόμενο και ως εκ τούτου η αποτελεσματικότητα είναι μικρότερη από αυτή των ορυκτών καυσίμων. Για να ενισχυθεί η θερμική απόδοση της βιομάζας, οι πρώτες ύλες υποβάλλονται σε επεξεργασία χρησιμοποιώντας θερμοχημική διαδικασία και διάφορα είδη βιοκαυσίμων παράγονται όπως ξυλάνθρακας (σε θερμοκρασία κάτω από 400°C), αιθανόλη και μεθάνιο (σε θερμοκρασία άνω των 1000°C). Τα παραγόμενα υλικά έχουν μεγαλύτερο ενεργειακό περιεχόμενο από ότι είχε η πρώτη ύλη. Στη βιοχημική διεργασία η πρώτη ύλη της βιομάζας μετατρέπεται σε βιοκαύσιμα χρησιμοποιώντας αναερόβια ζύμωση.

Διάφοροι τύποι σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας διατίθενται για τη μετατροπή της βιομάζας σε ηλεκτρική ενέργεια. Σε μεγάλους σταθμούς η βιομάζα χρησιμοποιείται ως καύσιμο πυροδότησης ενώ σε μικρότερους μπορεί να χρησιμοποιηθεί και ως μοναδικό καύσιμο. Σταθμοί με μηχανές εσωτερικής καύσης μονάδες θερμικές και φυσικού αερίου παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από βιομάζα, συνδυασμένου κύκλου, είναι από τα πιο διαδεδομένα για την παραγωγή ενέργειας με βιομάζα.

1.3.5 Ενέργεια από τις παλίρροιες

Οι τεχνολογίες των παλιρροιακών σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας είναι σχετικά πλήρεις. Ωστόσο αυτές οι τεχνολογίες έχουν μεγάλο κόστος κατασκευής λόγω του όγκου των εγκαταστάσεων. Γενικά για την παραγωγή ηλεκτρισμού από παλιρροϊκή ενέργεια υπάρχουν δύο διαφορετικές μέθοδοι. Στην πρώτη μέθοδο απαιτείται η κατασκευή φράγματος και ταμιευτήρα αποθήκευσης νερού, ενώ στη δεύτερη χρησιμοποιούνται τα παλιρροϊκά ρεύματα της θάλασσας και για αυτό δεν απαιτείται κατασκευή φράγματος. Η παλίρροια ως φαινόμενο της περιοδικής διακύμανσης της στάθμης της θάλασσας εκμεταλλεύεται την πλημμυρίδα (άνοδος της στάθμης) και την άμπωτη (κάθοδος της στάθμης) και εμφανίζεται από την έλξη της σελήνης και του ηλίου στη θάλασσα. Η σελήνη ασκεί τρεις φορές μεγαλύτερη έλξη από τον ήλιο λόγω της μικρότερης απόστασης από τη γη και το μεγαλύτερο φαινόμενο εμφανίζεται όταν ήλιος και σελήνη ευθυγραμμίζονται.

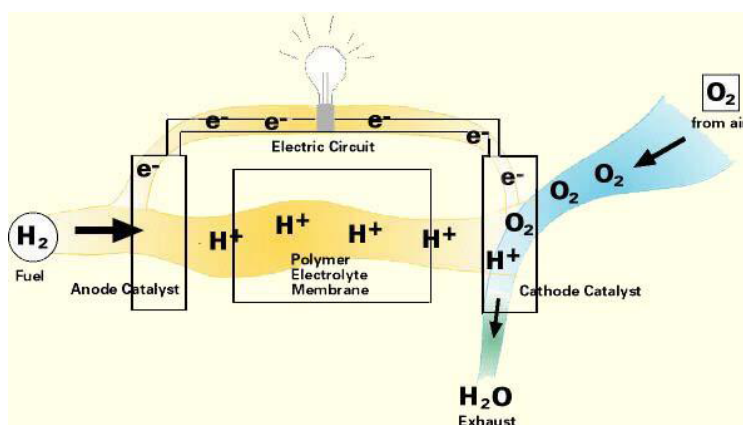
Υπάρχουν δύο τρόποι αξιοποίησης αυτής της ενέργειας :

- Μονή δεξαμενή : Με την κατασκευή ενός φράγματος δημιουργείται μια δεξαμενή και τοποθετούνται υδραυλικές μηχανές που τοποθετούνται κατά τις δύο διευθύνσεις, χρησιμοποιώντας ως υδατόπτωση τις μεταβολές της στάθμης της παλίρροιας.
- Διπλή δεξαμενή : Δημιουργούνται δύο δεξαμενές από τις οποίες η μία έχει υψηλότερη στάθμη από την άλλη ώστε να γίνεται εκμετάλλευση της ροής μεταξύ των δύο δεξαμενών.

Για να είναι αποδοτική όσο το δυνατόν η αξιοποίηση των παλιρροιών πρέπει το εύρος των παλιρροιών να είναι μεγάλο, ο όγκος του νερού που θα χρησιμοποιηθεί σημαντικός και να χρησιμοποιούνται ειδικά μέταλλα για την κατασκευή των μηχανών λόγω της διάβρωσης από το θαλασσινό νερό.

1.3.6 Κυψέλες καυσίμου

Η κυψέλη καυσίμου είναι μια ηλεκτροχημική συσκευή παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας η οποία λειτουργεί σαν μπαταρία, μετατρέποντας το υδρογόνο και οξυγόνο σε νερό και ηλεκτρικό ρεύμα. Η κοινή σε όλους μας μπαταρία έχει αποθηκευμένα τα χημικά της εσωτερικά και έτοιμα προς χρήση, το οποίο όμως σημαίνει ότι όταν αυτά τελειώσουν η μπαταρία αδειάζει σε αντίθεση με τις κυψέλες καυσίμου όπου η συνεχής ροή καύσιμου (υδρογόνο και οξυγόνο) στην κυψέλη παράγει το ηλεκτρικό ρεύμα και το οποίο διαρκεί όσο διαρκεί η ροή αυτή. Στο Σχ. 1.5 παρουσιάζεται μια κυψέλη καυσίμου και η οποία αποτελείται από :



Σχήμα 1.5 : Αναπαράσταση κυψέλης καυσίμου.

- Άνοδος : το αρνητικό ηλεκτρόδιο. Φέρνει σε επαφή τα ηλεκτρόνια, από τα μόρια υδρογόνου που εισέρχονται στην κυψέλη, τα οποία και θα χρησιμοποιηθούν μετά στο κύκλωμα του ρεύματος. Υπάρχουν χαραγμένα αυλάκια στον καταλύτη, ο οποίος είναι σε επαφή με την άνοδο, τα οποία αυλάκια είναι το σημείο επαφής του οξυγόνου με την άνοδο.
- Κάθοδος : το θετικό ηλεκτρόδιο. Φέρνει σε επαφή τα ηλεκτρόνια, από τα μόρια του οξυγόνου στα αυλάκια του καταλύτη όπως και στην άνοδο, και τα οποία ηλεκτρόνια συμμετέχουν στο κλειστό κύκλωμα ρεύματος. Συνδυάζει ιόντα υδρογόνου και οξυγόνου για το σχηματισμό νερού.
- Ηλεκτρολύτης : είναι μια μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων ή θετικά φορισμένων ιόντων και η οποία μπλοκάρει τα ηλεκτρόνια. Τοποθετείται ενδιάμεσα στα δύο ηλεκτρόδια. Είναι μια πορώδης επιφάνεια με σκοπό τη μεγιστοποίηση επαφής της πλάτινας με το υδρογόνο και οξυγόνο.

- Καταλύτης : είναι ένα υλικό το οποίο επιταχύνει την αντίδραση του υδρογόνου και του οξυγόνου στην άνοδο και τη κάθοδο. Συνήθως χρησιμοποιείται οξειδίο του τιτανίου.

Όταν το υδρογόνο εισέλθει στην κυψέλη στην άνοδο, μόρια υδρογόνου έρχονται σε επαφή με τον καταλύτη αναγκάζοντας να διασπαστεί σε δύο ιόντα υδρογόνου (θετικά ιόντα) και δύο ηλεκτρόνια. Τα ηλεκτρόνια διέρχονται από το εξωτερικό κύκλωμα φτάνοντας στην κάθοδο. Εκεί στην κάθοδο το οξυγόνο (συνήθως ατμοσφαιρικό) έρχεται σε επαφή με τον καταλύτη της καθόδου δίνοντας έτσι δύο ιόντα οξυγόνου (αρνητικά ιόντα) τα οποία έρχονται σε επαφή με τα ιόντα υδρογόνου που διέρχονται μέσα από τη μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων και με τη βοήθεια δύο ηλεκτρονίων σχηματίζουν νερό.

Υπάρχουν διάφοροι τύποι κυψελών καυσίμου όπως :

- PEM (Polymer Electrolyte Membrane) - Πολυμερικής μεμβράνης με εφαρμογές σε οχήματα, συστήματα συμπαραγωγής θερμότητας και ηλεκτρικού ρεύματος.
- DMFC (Direct Methanol Fuel Cell) - Μεθανόλης, έχει θερμοκρασία λειτουργίας 20-90°C και εφαρμογές όπως φορητές ηλεκτρονικές συσκευές χαμηλής ισχύος.
- PAFC (Phosphoric Acid Fuel Cell) - Φωσφορικού οξέος με θερμοκρασία λειτουργίας περίπου 220°C και εφαρμογές όπως μεγάλες μονάδες συμπαραγωγής των 200kW.
- SOFC (Solid Oxide Fuel Cell)-Στερεού οξειδίου με θερμοκρασία λειτουργίας 500-1000°C και κατάλληλες για μονάδες συμπαραγωγής από 2kW ως 5MW.
- MCFC (Molten Carbonate Fuel Cell)-Τηγμένου άνθρακα με θερμοκρασία λειτουργίας περίπου 650°C και κατάλληλες για μονάδες συμπαραγωγής από 2 kW ως 5 MW.

1.4 ΥΒΡΙΔΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

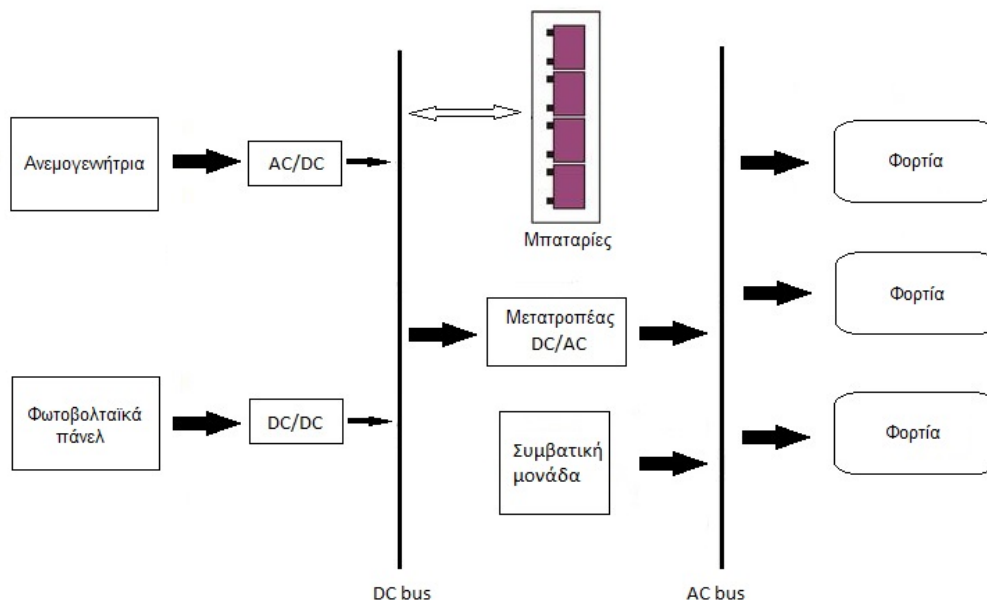
Τα υβριδικά συστήματα έχουν εφαρμογή κυρίως σε απομακρυσμένες περιοχές από το ηλεκτρικό δίκτυο αλλά και γενικότερα σε περιοχές όπου η χρησιμοποίηση μιας μορφής ανανεώσιμης πηγής ενέργειας ή περισσοτέρων σε συνδυασμό με μια συμβατική μονάδα παραγωγής ενέργειας μας οδηγεί στην

εξοικονόμηση καυσίμων της συμβατικής μονάδας. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό γιατί αν η περιοχή εγκατάστασης του υβριδικού συστήματος είναι πλούσια σε άνεμο ή ηλιακή ακτινοβολία, θα μας δώσει ένα υβριδικό σύστημα που η συμμετοχή του συμβατικού σταθμού περιορίζεται σημαντικά και κατά συνέπεια την εξοικονόμηση μεγάλων ποσοτήτων καυσίμων.

Τα υβριδικά συστήματα σύμφωνα και με την νομοθεσία του Ελληνικού κράτους που παρουσιάσαμε στην εισαγωγή αποτελούνται από μια τουλάχιστον πηγή Α.Π.Ε. και τα χαρακτηριστικά αποθήκευσης που αναφέραμε.

Σε αυτή την διπλωματική το υβριδικό σύστημά μας αποτελείται από μια ανεμογεννήτρια (ως πηγή Α.Π.Ε.) και μια συμβατική μονάδα (Ατμοηλεκτρικό σταθμό), χωρίς δηλαδή τη χρήση συστήματος αποθήκευσης.

Ένα γενικό μοντέλο υβριδικού συστήματος παρουσιάζεται στο Σχ.1.6. Αποτελείται από ανεμογεννήτρια, φωτοβολταϊκά και συμβατική μονάδα συνθέτοντας τον συνδυασμό του υβριδικού συστήματος. Περιλαμβάνει επίσης μπαταρίες αποθήκευσης και τους απαραίτητους μετατροπείς από εναλλασσόμενο σε συνεχές και από συνεχές σε εναλλασσόμενο. Το ρεύμα από την ανεμογεννήτρια μετατρέπεται σε συνεχές και αποθηκεύεται στις μπαταρίες ώστε εν συνεχεία να μπορεί να χρησιμοποιηθεί στο δίκτυο που τροφοδοτεί περνώντας πρώτα από τον μετατροπέα (DC/AC) και αντίστοιχα το ρεύμα από τα φωτοβολταϊκά περνώντας από το μετατροπέα φορτίζει και αυτό τις μπαταρίες. Μια συμβατική μονάδα υπάρχει στο σύστημά μας και η οποία τίθεται σε λειτουργία όταν το φορτίο το απαιτήσει ή όταν έχουμε απουσία ανέμου και ηλιακής ακτινοβολίας.



Σχήμα 1.6 : Γενικό μοντέλο Υβριδικού συστήματος.

Από τα παραπάνω μπορούμε να διαπιστώσουμε ότι μπορούν να προκύψουν πολλοί συνδυασμοί υβριδικών συστημάτων, σύμφωνα και με τα όσα αναφέραμε στις

προηγούμενες παραγράφους όπου παρουσιάσαμε τις συμβατικές μονάδες παραγωγής και ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, αν στη θέση της συμβατικής μονάδας τοποθετούσαμε μια μονάδα βιομάζας ή ενός ατμοηλεκτρικού σταθμού με ή χωρίς την παρουσία δεύτερης μορφής Α.Π.Ε..

Τα υβριδικά συστήματα παρουσιάζουν τα παρακάτω πλεονεκτήματα :

1. Αξιοπιστία εγκατάστασης μιας και συνυπάρχουν περισσότερες από μια πηγές παραγωγής ενέργειας.
2. Μείωση της χωρητικότητας αποθήκευσης ενέργειας, ειδικά στην περίπτωση που χρησιμοποιούνται διάφορες μορφές ΑΠΕ με συμπληρωματική συμπεριφορά.
3. Όσο το δυνατόν οικολογική συμπεριφορά αφού ελαχιστοποιούμε την κατανάλωση ορυκτών καυσίμων, ειδικά σε συστήματα που βασίζονται σε ΑΠΕ και δε συμμετέχουν συμβατικές μονάδες παραγωγής ενέργειας.

Παρουσιάζουν όμως και μειονεκτήματα όπως :

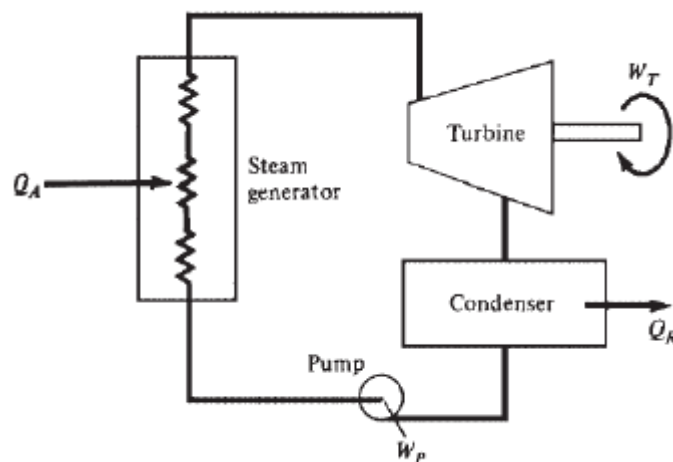
1. Υψηλό αρχικό κόστος εγκατάστασης.
2. Δε μπορούμε να αποφύγουμε τη χρήση ορυκτών καυσίμων στην περίπτωση που υπάρχει στο σύστημά μας συμβατική μονάδα παραγωγής ενέργειας.

Υβριδικά συστήματα χρησιμοποιούνται σε σταθμούς τηλεπικοινωνιών, συστήματα αφαλάτωσης νερού, άντλησης νερού, απομακρυσμένες κατοικήσιμες περιοχές, σε νησιά και σε ορυχεία.

2. ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΑΤΜΟΣΤΡΟΒΙΛΟΥ ΚΑΙ ΡΥΘΜΙΣΤΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ

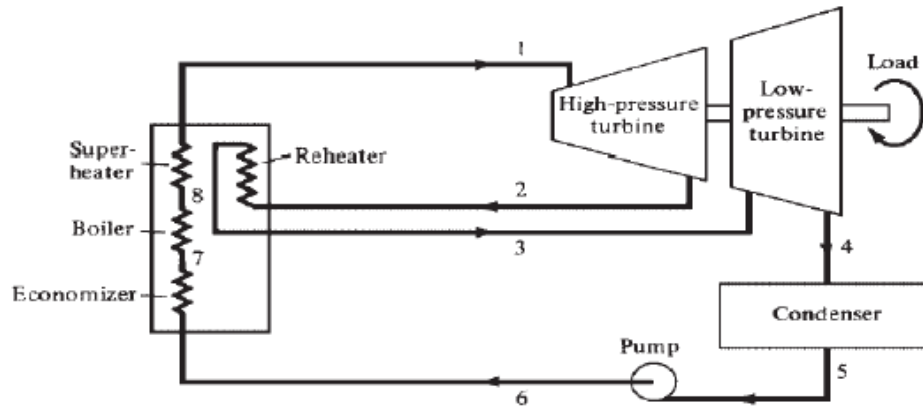
2.1 ΓΕΝΙΚΑ

Όπως αναφέραμε στο πρώτο κεφάλαιο ένας ατμοηλεκτρικός σταθμός βασίζεται στον κύκλο Rankine και αποτελείται από διάφορα εξαρτήματα και επιμέρους εγκαταστάσεις. Μια συνοπτική εικόνα του ατμοηλεκτρικού σταθμού και του κύκλου αυτού αποτυπώνεται με σχεδιάγραμμα ροής στο Σχ.2.1. Το νερό από την δεξαμενή τροφοδοσίας και με τη βοήθεια μιας αντλίας οδεύει προς τον ατμοπαραγωγό, όπου από εκεί ατμοποιείται και υπερθερμαίνεται. Από τον ατμοπαραγωγό και μετά από μια σειρά βαλβίδων ρύθμισης οδεύει προς τον στρόβιλο ο οποίος κινεί τη γεννήτρια. Το επόμενο βήμα είναι ο ατμός να εισαχθεί στο συμπυκνωτή όπου ψύχεται και υγροποιείται και τελικά ο ατμός με μια αντλία συμπυκνώματος να οδηγηθεί στην τροφοδοτική δεξαμενή.



Σχήμα 2.1 : Σχεδιάγραμμα ροής κύκλου Rankine.

Ένας τρόπος για να αυξήσουμε το βαθμό απόδοσης είναι με αναθέρμανση. Ο ατμός διοχετεύεται σε αναθερμαντή, του προσδίδεται θερμότητα, αυξάνεται η θερμοκρασία του και στη συνέχεια εκτονώνεται. Η περιγραφική αυτή διάταξη που αναφέραμε παρουσιάζεται στο Σχ.2.2. Η αναθέρμανση μπορεί να πραγματοποιηθεί σε μία ή περισσότερες βαθμίδες αυξάνοντας τη μέση θερμοκρασία πρόσδοσης θερμότητα του κύκλου και επομένως του βαθμού απόδοσης.



Σχήμα 2.2 : Σχεδιάγραμμα ροής με αναθέρμανση.

Ο υπερθερμαντήρας (superheater) σκοπεύει στην αύξηση της θερμοκρασίας του κορεσμένου ατμού και αποτελείται από ένα ή περισσότερα, σερπατίνες σωλήνων, τοποθετημένα σε διαφορετικά σημεία στη ροή καυσαερίων. Ανάμεσα των τμημάτων του υπερθερμαντήρα τοποθετούνται ψύκτες ατμού για τη ρύθμιση της θερμοκρασίας.

Ο αναθερμαντήρας (reheater) είναι μια επιφάνεια συναλλαγής θερμότητας και χρησιμοποιείται για την αναθέρμανση του ατμού στο τμήμα υψηλής πίεσης του ατμοστροβίλου. Κατασκευαστικά είναι παρόμοιος με τον υπερθερμαντήρα και η αύξηση της θερμοκρασίας του ατμού γίνεται μέχρι τη θερμοκρασία που έχει αυτός κατά την έξοδό του από τον υπερθερμαντήρα. Όπως και στον υπερθερμαντήρα έτσι και εδώ απαραίτητως είναι αναγκαία η ρύθμιση της θερμοκρασίας ατμού.

Ο προθερμαντήρας νερού ή οικονομητήρας (economizer) προθερμαίνει το νερό τροφοδοσίας του ατμοπαραγωγού πριν αυτό οδηγηθεί στο σύστημα ατμοποίησης. Οι οικονομητήρες αποτελούνται από συλλέκτες εισόδου-εξόδου και σερπαντίνες χαλυβδοσωλήνων.

Ο συμπυκνωτής (condenser) έχει ως στόχο να μετατρέψει τον ατμό εξόδου του στροβίλου σε νερό που ανατροφοδοτείται στον ατμοπαραγωγό. Ο λόγος που γίνεται επανατροφοδότηση του νερού, οφείλεται στο ότι το νερό είναι υψηλής καθαρότητας από την επεξεργασία που έχει υποστεί και θα ήταν ασύμφορο να πεταχτεί. Ένας επιπλέον λόγος είναι ότι όταν η συμπύκνωση γίνεται σε χαμηλή θερμοκρασία εμφανίζεται στον συμπυκνωτή υποπίεση που είναι ωφέλιμη για την απόδοση έργου στο στρόβιλο.

2.2 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΑΤΜΟΣΤΡΟΒΙΛΙΟΥ

Σύμφωνα με τον Wang Xi-Fan [8] και όπως φαίνεται και από το Σχ.2.3 ο όγκος του δοχείου είναι V (m^3) και η είσοδος και έξοδος της ροής του ατμού είναι Q_{in} και Q_{out} ($kg\ s^{-1}$) αντίστοιχα.

Έχουμε ότι :

$$\frac{dW}{dt} = V \frac{d\rho}{dt} = Q_{in} - Q_{out} \quad (2.1)$$

όπου W είναι η μάζα του ατμού στο δοχείο (kg) και ρ είναι η πυκνότητα του ατμού ($kg\ m^{-3}$).

Υποθέτοντας ότι η ροή εξόδου του ατμού είναι ανάλογη της πίεσης του ατμού στο δοχείο, έχουμε

$$Q_{out} = \frac{Q_N}{P_N} P \quad (2.2)$$

όπου P είναι πίεση ατμού στο δοχείο (kPa), P_N είναι η ονομαστική πίεση ατμού στο δοχείο (kPa), και Q_N είναι η ονομαστική παροχή ατμού έξω από το δοχείο ($kg\ s^{-1}$).

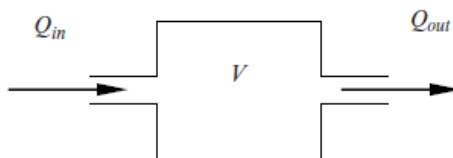
Με την θερμοκρασία ατμού στο δοχείο να είναι σταθερή , έχουμε

$$\frac{d\rho}{dt} = \frac{dP}{dt} \frac{\partial\rho}{\partial P} \quad (2.3)$$

όπου ο ρυθμός μεταβολής της πυκνότητας του ατμού με την πίεση, σε μια θερμοκρασία, $\partial\rho/\partial P$, μπορεί να ληφθεί από πίνακες και είναι σταθερός. Από την Εξ.(2.1) ως την Εξ.(2.3) και με μετασχηματισμό Laplace, καταλήγουμε

$$Q_{out} = \frac{1}{1 + sT_V} Q_{in} \quad (2.4)$$

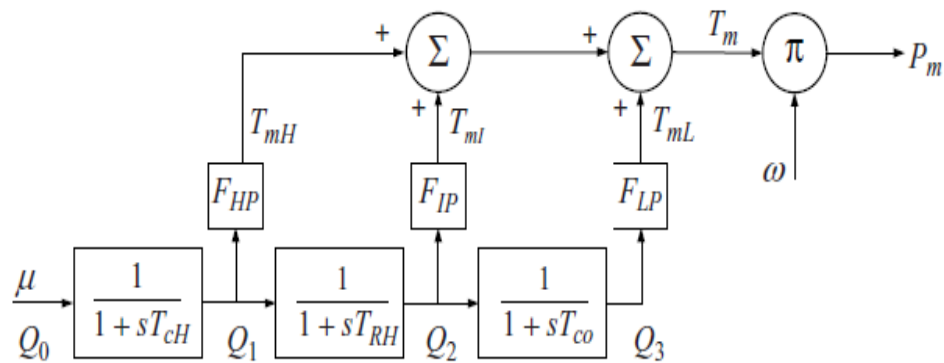
$$\text{όπου } T_V = \frac{P_N}{Q_N} V \frac{\partial\rho}{\partial P} \quad (2.5)$$



Σχήμα 2.3 : Δοχείο ατμού [8].

T_v ονομάζεται η σταθερά χρόνου της παροχής όγκου ατμού. Από την Εξ.(2.5) μπορούμε να δούμε ότι όσο μεγαλύτερο είναι το δοχείο, τόσο μεγαλύτερη είναι η χρονική σταθερά. Από την Εξ.(2.4) μπορούμε να δούμε ότι η ροή εισόδου αυξάνει (ή μειώνεται) , ενώ η ροή εξόδου όχι αμέσως εξαιτίας του ότι η πίεση μέσα στο δοχείο δε μπορεί να αυξηθεί (ή μειωθεί) ακαριαία. Αλλαγή της ροής εξόδου του ατμού υστερεί ως προς την είσοδο της ροής του ατμού.

Στην παρούσα εργασία θεωρούμε αμοστρόβιλο τριών επιπέδων του οποίου ένα δομικό διάγραμμα δίνεται στο Σχ.2.4



Σχήμα 2.4 : Δομικό διάγραμμα συνάρτησης μεταφοράς ενός αμοστρόβιλου πολλών επιπέδων [8].

Η παροχή ατμού στην έξοδο κάθε επιπέδου συνδέεται με την παροχή ατμού στην αντίστοιχη είσοδο από την Εξ.(2.4) και επομένως ισχύουν οι εξισώσεις Εξ.(2.6) για κάθε έξοδο.

$$\left. \begin{aligned} Q_1 &= \frac{1}{1+T_{cH}s} Q_0 \\ Q_2 &= \frac{1}{1+T_{RH}s} Q_1 \\ Q_3 &= \frac{1}{1+T_{co}s} Q_2 \end{aligned} \right\} \quad (2.6)$$

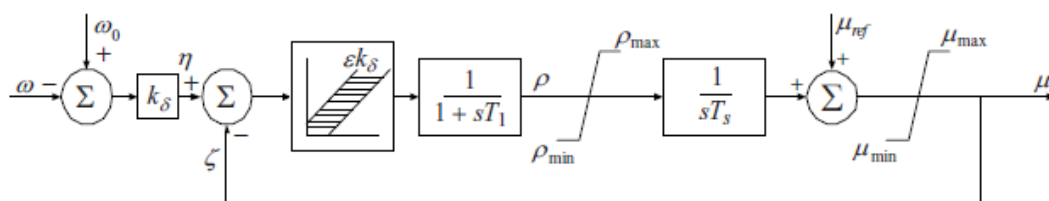
Η παροχή ατμού στην είσοδο του πρώτου επιπέδου Q_0 είναι ανάλογη προς τη θέση ανοίγματος της κύριας βαλβίδας ατμού μ_0 . Το κάθε επίπεδο συμβάλλει στην τελική μηχανική ροπή κατά ένα αντίστοιχο ποσοστό όπου στο παραπάνω σχήμα συμβολίζεται με F . Έτσι, έχουμε τα ποσοστά συμμετοχής στη συνολική ροπή F_{HP}, F_{IP}, F_{LP} αντίστοιχα για κάθε επίπεδο.

Τελικά έχουμε τις εξισώσεις Εξ.(2.7) όπου T_{mH}, T_{mI}, T_{mL} είναι η μηχανική ροπή εξόδου των HP, IP, LP στροβίλων αντίστοιχα, η ροή $Q_0 - Q_3$ φαίνεται στο Σχ.2.2. Το δομικό διάγραμμα της συνάρτησης μεταφοράς του παραπάνω μαθηματικού μοντέλου παρουσιάζεται στο Σχ.2.4.

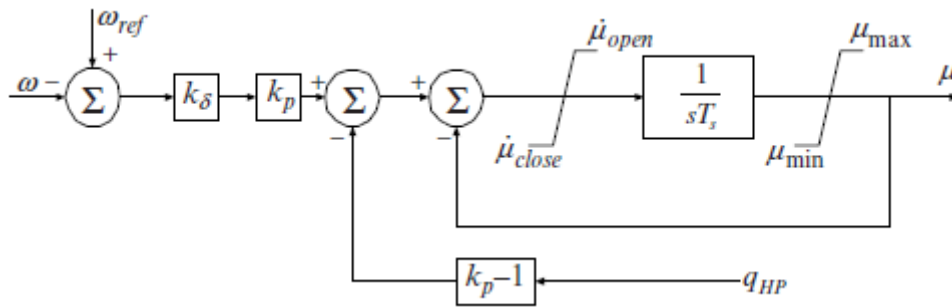
$$\left. \begin{aligned} \mu &= Q_0 \\ T_{mH} &= F_{HP} Q_1 \\ T_{mI} &= F_{IP} Q_2 \\ T_{mL} &= F_{LP} Q_3 \\ T_m &= T_{mH} + T_{mI} + T_{mL} \\ F_{HP} + F_{IP} + F_{LP} &= 1 \end{aligned} \right\} \quad (2.7)$$

2.3 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΡΥΘΜΙΣΤΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ

Οι ρυθμιστές ταχύτητας των ατμοστροβίλων μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε τρεις κατηγορίες, υδραυλικές, ηλεκτροϋδραυλικές, συχνότητα ισχύος δυναμικού ή βιομηχανικού τύπου ηλεκτροϋδραυλικές. Ένας υδραυλικός ρυθμιστής ταχύτητας ενός ατμοστροβίλου μπορεί να παρουσιαστεί με το δομικό διάγραμμα του Σχ.2.5 όπου η καθυστέρηση χρόνου σταθεράς T_1 αναπαριστά την βαλβίδα στον ρυθμιστή. Σε έναν ηλεκτροϋδραυλικό ρυθμιστή, η μονάδα χαμηλής ισχύος εξόδου στον υδραυλικό ρυθμιστή, δηλαδή το κομμάτι από την ταχύτητα μέτρησης στο σερβοκινητήρα, πραγματοποιείται με ένα ηλεκτρονικό κύκλωμα. Συγκρινόμενοι οι δύο αυτοί ρυθμιστές, ο ηλεκτροϋδραυλικός ρυθμιστής είναι καλύτερος από τον υδραυλικό σε εφαρμογές και ποιό ευέλικτος με γρηγορότερους χρόνους απόκρισης. Με σκοπό να έχουμε καλύτερη απόδοση και γραμμική απόκριση, η ανατροφοδότηση της ροής ατμού και η βαλβίδα του σερβοκινητήρα εισάγονται στον ηλεκτροϋδραυλικό ρυθμιστή. Το δομικό διάγραμμα φαίνεται στο Σχ.2.6.

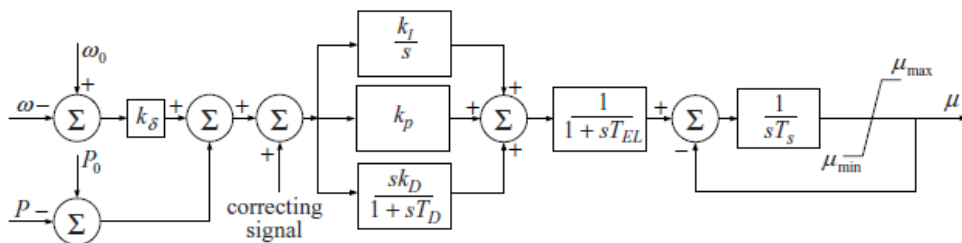


Σχήμα 2.5 : Δομικό διάγραμμα υδραυλικού ρυθμιστή ταχύτητας [8].



Σχήμα 2.6 : Δομικό διάγραμμα ηλεκτροϋδραυλικού ρυθμιστή ταχύτητας [8].

Το δομικό διάγραμμα του βιομηχανικού τύπου ηλεκτροϋδραυλικού ρυθμιστή παρουσιάζεται στο Σχ.2.7. Συγκρίνοντας συχνότητα και σήματα με τις αναφορές, λαμβάνεται ένα σήμα σφάλματος και στη συνέχεια ενισχύεται. Ένας PID ελεγκτής παίρνει το ενισχυμένο σήμα. Το ηλεκτρικό σήμα που δίνει μετατρέπεται σε ένα υδραυλικό σήμα από έναν ηλεκτροϋδραυλικό μετατροπέα που ενεργοποιεί ένα ηλεκτρονόμο και ένα σερβοκινητήρα για να ρυθμίσει την κύρια βαλβίδα του ατμοστροβίλου. Στο Σχ.2.7 k_p , k_i και k_d είναι ο αναλογικός, ολοκληρωτικός και διαφορικός έλεγχος αντίστοιχα, T_{EL} η σταθερά χρόνου του ηλεκτροϋδραυλικού ρυθμιστή και T_s η σταθερά χρόνου του ηλεκτρονόμου.



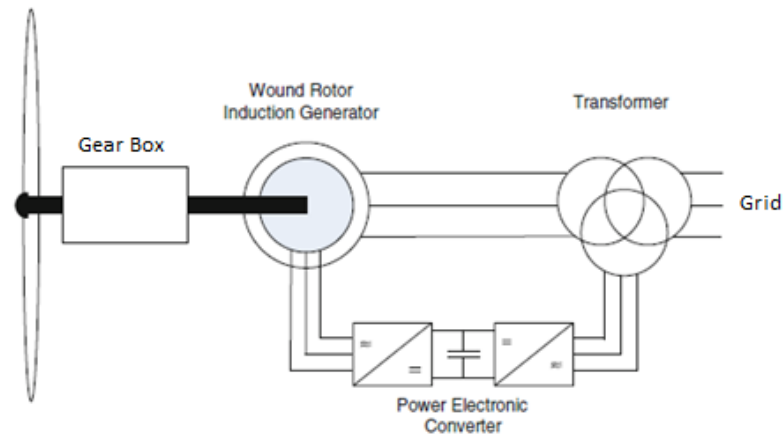
Σχήμα 2.7 : Δομικό διάγραμμα βιομηχανικού τύπου ηλεκτροϋδραυλικού ρυθμιστή ταχύτητας [8].

Τα τελευταία 20 χρόνια έχουν αναπτυχθεί ψηφιακοί ρυθμιστές ταχύτητας, στους οποίους η μονάδα λειτουργίας της κύριας βαλβίδας συνδέεται με έναν ψηφιακό ελεγκτή, μέσω μιας ψηφιακής-αναλογικής υβριδικής μονάδας. Ο έλεγχος πραγματοποιείται με λογισμικό. Ο ψηφιακός ρυθμιστής παρέχει μεγαλύτερη ευελιξία, περισσότερες και ολοκληρωμένες λειτουργίες από έναν ηλεκτροϋδραυλικό ρυθμιστή.

3. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΕΠΑΓΩΓΙΚΗΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ ΔΙΠΛΗΣ ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑΣ

3.1 ΕΠΑΓΩΓΙΚΗ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ ΔΙΠΛΗΣ ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑΣ

Η Επαγωγική Γεννήτρια Διπλής Τροφοδοσίας (ΕΓΔΤ) είναι μια γεννήτρια που χρησιμοποιείται στα αιολικά συστήματα. Η κατηγορία αυτή των γεννητριών είναι μια υποκατηγορία των μεταβλητών στροφών ανεμογεννητριών. Χρησιμοποιούνται επαγωγικές γεννήτριες δακτυλιοφόρου δρομέα με τον στάτη συνδεδεμένο απευθείας στο δίκτυο. Ένας μετατροπέας ισχύος δύο επιπέδων (back-to-back converter) συνδέεται με το ρότορα και το στάτη έχοντας στη μέση έναν πυκνωτή διασύνδεσης συνεχούς ρεύματος (DC-link ή DC-bus). Τα τυλίγματα του ρότορα συνδέονται με τη βοήθεια δακτυλίων ολίσθησης (slip ring) με το μετατροπέα από τη μεριά του ρότορα (Rotor Side Converter, RSC). Αυτή η μεριά του μετατροπέα συνδέεται μέσω του διαύλου συνεχούς ρεύματος με το μετατροπέα από τη μεριά του δικτύου (Grid Side Converter, GSC) και το τελευταίο με ένα μετασχηματιστή προς το δίκτυο. Η μηχανική ταχύτητα της μηχανής μπορεί να ελεγχθεί, ελέγχοντας τη λειτουργία του ρεύματος του ρότορα για διάφορες τιμές της συχνότητας. Η ισχύς της μηχανής είναι το άθροισμα της ισχύος από το στάτη και αυτής από το ρότορα (μέσα από το μετατροπέα) προς το δίκτυο. Ισχύς μεταφέρεται από το ρότορα, μέσα από το μετατροπέα, στο δίκτυο όταν η μηχανή λειτουργεί σε υπερσύγχρονες ταχύτητες (supersynchronous speeds). Όταν όμως η μηχανή λειτουργεί σε υποσύγχρονες ταχύτητες (subsynchronous speeds) ο ρότορας απορροφά πραγματική ισχύ από το δίκτυο (μέσα από το μετατροπέα), ενώ όταν η μηχανή λειτουργεί σε σύγχρονη ταχύτητα δε λαμβάνει χώρα καμία ανταλλαγή ισχύος μεταξύ ρότορα και δικτύου. Στο Σχ.3.1 παρουσιάζεται το σχεδιάγραμμα μιας ΕΓΔΤ.



Σχήμα 3.1 : Σχεδιάγραμμα επαγωγικής γεννήτριας διπλής τροφοδοσίας (ΕΓΔΤ).

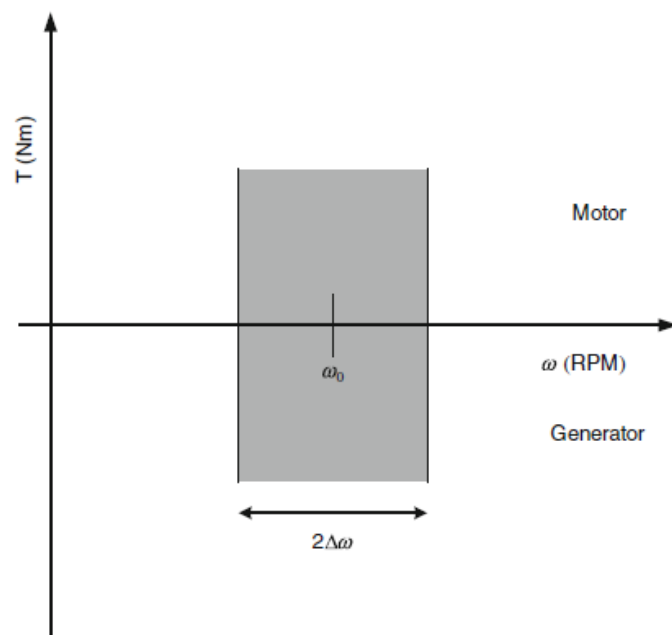
Οι επαγωγικές γεννήτριες διπλής τροφοδοσίας έχουν την ικανότητα να παρέχουν άεργο ισχύ στο δίκτυο από το στάτη. Αυτό επιτυγχάνεται αλλάζοντας τη διέγερση στον ευθύ άξονα d (direct-axis) του ρεύματος του ρότορα, ενώ ο άλλος άξονας ονομάζεται εγκάρσιος άξονας q (quadrature-axis). Μια μέθοδος διανυσματικού ελέγχου (vector control approach) χρησιμοποιείται για να διαχωρίσει το ρεύμα του ρότορα σε d -άξονα (παραγωγή ροής-flux production) και q -άξονα (παραγωγή ροπής-torque production). Έτσι κάθε ένας από αυτούς τους δύο όρους ελέγχονται ξεχωριστά. Ο συντελεστής ισχύος (power factor) της μηχανής ρυθμίζεται ελέγχοντας το ρεύμα στον d -άξονα, και η ηλεκτρική ροπή της μηχανής κρατείται σταθερή ελέγχοντας το ρεύμα στον q -άξονα.

Οι Επαγωγικές Γεννήτριες Διπλής Τροφοδοσίας τροφοδοτούν το δίκτυο και από το στάτη αλλά και από το ρότορα και για αυτό το λόγο πήραν αυτή την ονομασία. Οι ΕΓΔΤ αναφέρονται ως Doubly Fed Induction Generator (DFIG) στη διεθνή βιβλιογραφία και σήμερα είναι οι πιο διαδεδομένες σε χρήση στα αιολικά πάρκα.

3.2 ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΕΓΔΤ

Οι ΕΓΔΤ έχουν το πλεονέκτημα ότι απαιτούν ένα περιορισμένο μεταβλητό φάσμα στροφών $\pm 30\%$ της σύγχρονης ταχύτητας. Ως εκ τούτου, ο περιορισμός σε αυτό το εύρος της ταχύτητας είναι ότι ο μετατροπέας περιορίζεται σε ένα κλάσμα

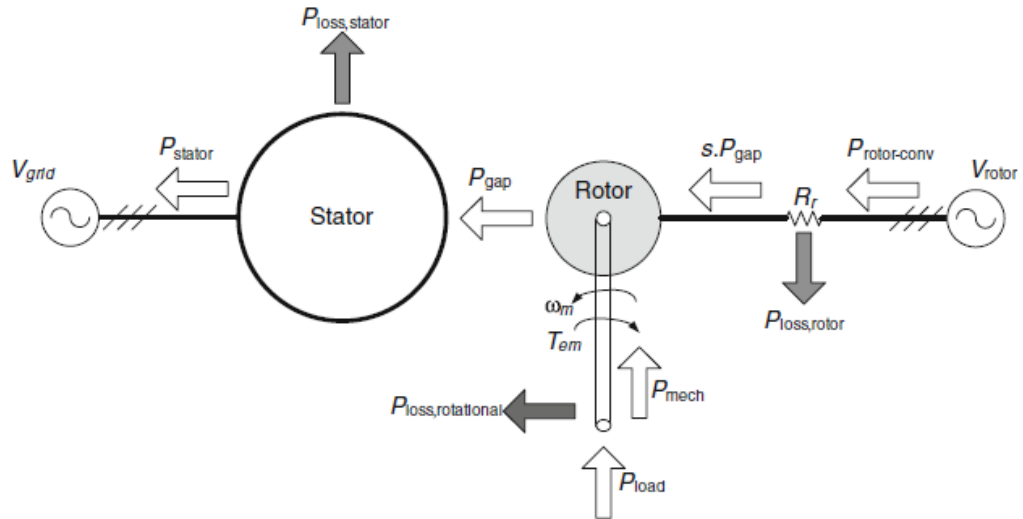
(20-30%) της συνολικής ισχύος. Αυτό συμβαίνει διότι από τη στιγμή που ο στάτης είναι διασυνδεδεμένος στο δίκτυο (σταθερή τάση, συχνότητα και ρεύματα) η ανταλλαγή ισχύος που συμβαίνει στο μετατροπέα ανάλογα με το αν βρίσκεται σε υποσύγχρονη ή υπερσύγχρονη (ολίσθηση θετική ή αρνητική αντίστοιχα) κατάσταση έχει τη μικρότερη συμμετοχή από πλευράς συνολικού ποσοστού ισχύος καθώς ο μετατροπέας από την πλευρά του ρότορα βελτιώνει συνεχώς τη λειτουργία του προσπαθώντας να πιάσει τη σύγχρονη ταχύτητα. Δηλαδή επειδή η ροή ισχύος του ρότορα είναι από αυτόν και προς το μετατροπέα, η διαστασιολόγησή του γίνεται με βάση την ολίσθηση της μηχανής και όχι της συνολικής ισχύος. Αυτό οδηγεί σε μείωση των απωλειών στα ηλεκτρονικά ισχύος του μετατροπέα σε σύγκριση με άλλα αιολικά συστήματα ανεμογεννητριών, ως εκ τούτου το κόστος του μετατροπέα είναι χαμηλότερο σε σύγκριση με άλλους τύπους ανεμογεννητριών. Όπως είδαμε οι ΕΓΔΤ συνδέονται άμεσα με το δίκτυο. Το κύκλωμα του ρότορα συνδέεται με δακτυλίου ολίσθησης σε ένα μετατροπέα ισχύος δύο επιπέδων (back-to-back converter) αποτελούμενο από δύο μετατροπείς, το μετατροπέα από την πλευρά της μηχανής και το μετατροπέα από τη πλευρά του δικτύου. Ένας πυκνωτής χρησιμοποιείται για την προσωρινή αποθήκευση ενέργειας μεταξύ των δύο μετατροπέων περιορίζοντας τις διακυμάνσεις της τάσης στο δίαυλο συνεχούς ρεύματος.



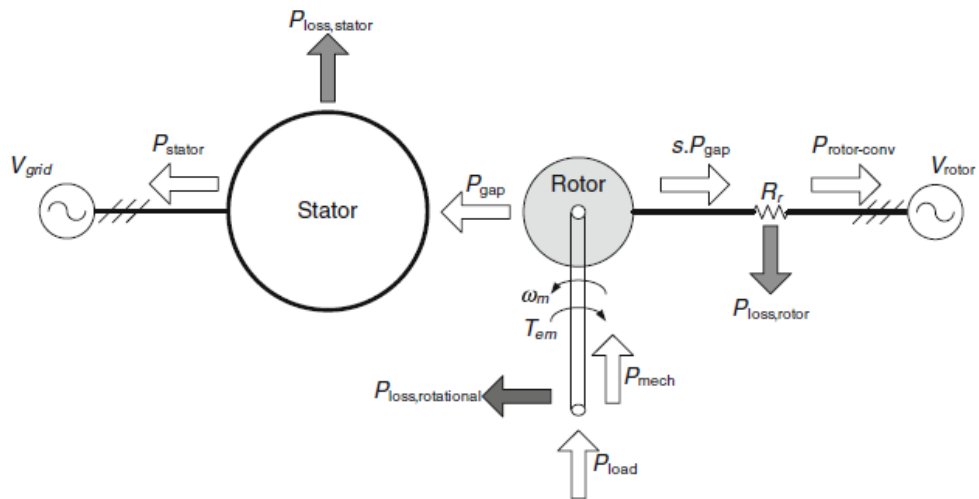
Σχήμα 3.2 : Χαρακτηριστική ροπής-ταχύτητας της ΕΓΔΤ [7].

Η ροπή ή η ταχύτητα της ΕΓΔΤ μπορεί να ελέγχεται από την πλευρά του μετατροπέα του ρότορα ενώ από την πλευρά του μετατροπέα του δικτύου ελέγχεται η τάση του δίαυλου συνεχούς ρεύματος. Στο Σχ. 3.2, μπορούμε να δούμε τη χαρακτηριστική ροπής-ταχύτητας της ΕΓΔΤ, η οποία μπορεί να λειτουργήσει είτε ως

κινητήρας είτε ως γεννήτρια, τόσο σε υποσύγχρονες όσο και υπερσύγχρονες ταχύτητες. Στην περίπτωση που η ΕΓΔΤ λειτουργεί σαν γεννήτρια σε υποσύγχρονη και υπερσύγχρονη ταχύτητα, η διαμόρφωση της ροής ισχύος απεικονίζονται στα Σχ.3.3 και Σχ.3.4 αντίστοιχα [7].



Σχήμα 3.3 : Ροή ισχύος της ΕΓΔΤ σε υποσύγχρονες ταχύτητες [7].



Σχήμα 3.4 : Ροή ισχύος της ΕΓΔΤ σε υπερσύγχρονες ταχύτητες [7].

3.3 ΕΓΔΤ ΩΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ ΣΕ ΥΠΟΣΥΓΧΡΟΝΕΣ ΤΑΧΥΤΗΤΕΣ

Το Σχ.3.3 απεικονίζει τη ροή ισχύος που λαμβάνει χώρα και τις απώλειες όταν η ΕΓΔΤ δρα ως γεννήτρια σε υποσύγχρονες ταχύτητες. Η ολίσθηση s είναι θετική και δίνεται από τον τύπο :

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s} \quad (3.1)$$

όπου :

n_r : ταχύτητα του ρότορα (rpm).

$n_s = \frac{120f}{p}$: σύγχρονη ταχύτητα (rpm).

f : ηλεκτρική συχνότητα του στάτη.

p : αριθμός πόλων.

$$n_r = (1-s)n_s = \left(1 - \frac{f_r}{f}\right)n_s \quad (3.2)$$

όπου :

f_r : συχνότητα ρεύματος ρότορα.

Η ηλεκτρομαγνητική ροπή T_{em} δίνεται από τον τύπο :

$$T_{em} = \frac{P_{gap}}{\omega_{syn}} \quad (3.3)$$

όπου :

P_{gap} : μεταφορά ισχύος μέσα από το διάκενο.

$\omega_{syn} = 2\pi f$: σύγχρονη συχνότητα σε radians/sec.

Η μηχανική ισχύς P_{mech} δίνεται από τον τύπο :

$$P_{mech} = (1-s)P_{gap} = \left(1 - \frac{f_r}{f}\right)P_{gap} \quad (3.4)$$

3.4 ΕΓΔΤ ΩΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ ΣΕ ΥΠΕΡΣΥΓΧΡΟΝΕΣ ΤΑΧΥΤΗΤΕΣ

Το Σχ.3.4 απεικονίζει τη ροή ισχύος που λαμβάνει χώρα και τις απώλειες όταν η ΕΓΔΤ δρα ως γεννήτρια σε υπερσύγχρονες ταχύτητες. Σε αυτή την περίπτωση η ολίσθηση s είναι αρνητική και δίνεται από τον τύπο :

$$n_r = (1-s)n_s = \left(1 + \frac{f_r}{f}\right)n_s \quad (3.5)$$

και η μηχανική ισχύς δίνεται από τον τύπο :

$$P_{mech} = (1-s)P_{gap} = \left(1 + \frac{f_r}{f}\right)P_{gap} \quad (3.6)$$

3.5 ΜΟΝΤΕΛΟ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ

Η μηχανική ισχύς η οποία απομαστεύεται από τον άνεμο και αξιοποιεί η ανεμογεννήτρια είναι μια σύνθετη συνάρτηση της ταχύτητας του ανέμου, της γωνίας κλίσης πτερυγίου και της ταχύτητας του άξονα. Η αλγεβρική εξίσωση που παρουσιάζεται παρακάτω περιγράφει τη μηχανική ισχύ που εξάγεται από τον άνεμο.

$$P_m = \frac{1}{2} \rho v_w^3 \pi r^2 C_p(\lambda) \quad (3.7)$$

όπου :

P_m : μηχανική ισχύς που εξάγεται από τον άνεμο και εκμεταλλεύεται από την ανεμογεννήτρια σε watts.

ρ : πυκνότητα του ανέμου σε kg/m^3 .

r : ακτίνα σάρωσης των πτερυγίων του ρότορα σε m.

v_w : ταχύτητα ανέμου σε m/s.

C_p : συντελεστής απόδοσης ή μηχανικός βαθμός απόδοσης της ανεμογεννήτριας.

λ : σχετική ταχύτητα του δρομέα, ο λόγος της ταχύτητας ακροπτερυγίου με εκείνη του ανέμου.

$$\lambda = \frac{\omega_t r}{v_w} \quad (3.8)$$

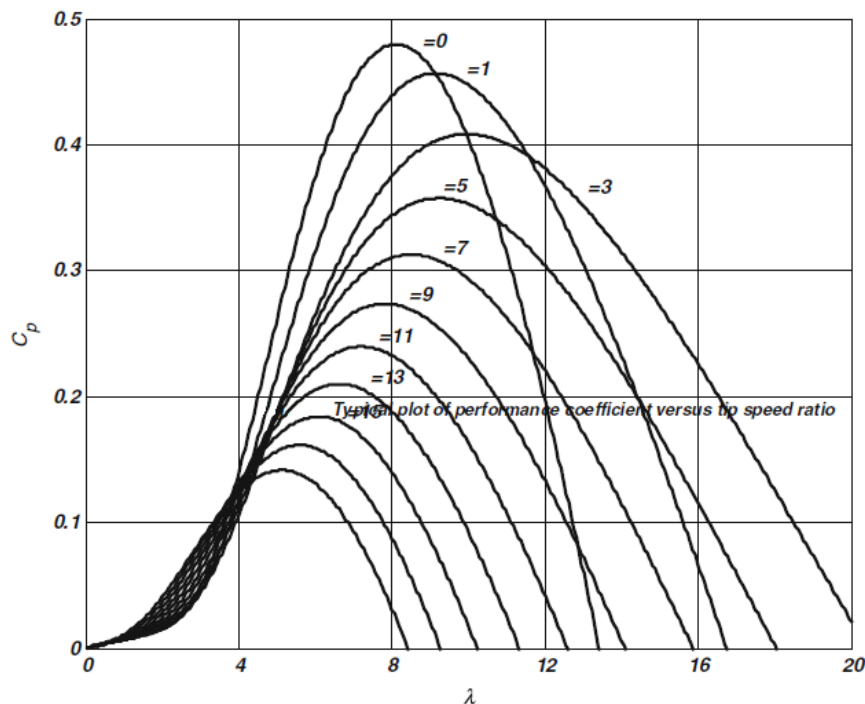
όπου :

ω_t : ταχύτητα πτερυγίων radians/s

Ο μηχανικός βαθμός απόδοσης εκφράζεται από την παρακάτω εξίσωση ως έκφραση του λ και της γωνίας κλίσης πτερυγίων β [6].

$$C_p = (0.44 - 0.0167\beta) \sin \frac{\pi(\lambda - 3)}{15 - 0.3\beta} - 0.00184(\lambda - 3)\beta \quad (3.9)$$

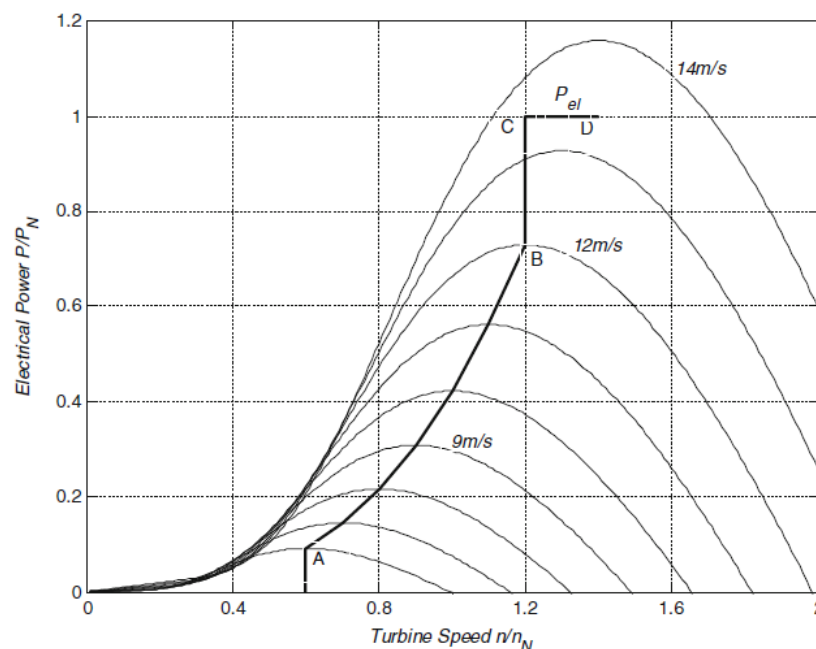
Για να μεγιστοποιηθεί η παραγωγή ενέργειας της Α/Γ από την προσπίπτουσα αέρια μάζα σε αυτή, η μόνη παράμετρος που μπορεί να ελεγχθεί από τη στιγμή που η πυκνότητα του αέρα, η ταχύτητα του ανέμου και η ακτίνα σάρωσης από τα πτερύγια είναι ποσότητες που δεν αλλάζουν και επομένως δεν μπορεί να γίνει έλεγχος, είναι ο συντελεστής απόδοσης C_p ο οποίος έχει μέγιστη θεωρητική τιμή 0,593 που διέπεται από νόμο του Bet'z. Ένα τυπικό διάγραμμα του C_p συναρτήσει του λόγου ταχύτητας ακροπτερυγίου λ φαίνεται στο Σχ.3.5 για διάφορες γωνίες των πτερυγίων [7].



Σχήμα 3.5 : Τυπικό διάγραμμα C_p συναρτήσει του λ [7].

Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε ο μηχανικός βαθμός απόδοσης C_p για μια δεδομένη γωνία πτερυγίων και ταχύτητας περιστροφής είναι μία μη γραμμική εξίσωση ως προς την ταχύτητα ανέμου. Ο μηχανικός βαθμός απόδοσης C_p παίρνει μέγιστη τιμή για μια συγκεκριμένη του λ και πέφτει στο μηδέν για χαμηλές τιμές του λ .

Σε χαμηλές και μεσαίες ταχύτητες ανέμου η γωνία των πτερυγίων ελέγχεται με σκοπό η Α/Γ να έχει βέλτιστη λειτουργία. Στην περιοχή υψηλών ταχυτήτων ανέμου η γωνία πτερυγίων ρυθμίζεται με τέτοιο ώστε να απολέσει μέρος της προσπίπτουσας ενέργειας. Μια Α/Γ σχεδιάζεται με τέτοιο τρόπο ώστε να πραγματοποιεί τη μέγιστη απομάστευση ενέργειας ανέμου στην περιοχή των 10 ως 15 m/s. Σε ταχύτητες μεγαλύτερες των 15 m/s οι Α/Γ συμπεριφέρονται με τρόπο ώστε να απολέσουν μέρος της ενέργειας του ανέμου, ρυθμίζοντας τη γωνία των πτερυγίων, και πέρα από τα 20-25 m/s διακόπτουν τη λειτουργία τους ώστε να αποφευχθεί η καταστροφή τους. Στις ΕΓΔΤ αυτό επιτυγχάνεται εφαρμόζοντας δυναμικό έλεγχο στη γωνία πτερυγίων. Ως αποτέλεσμα αυτού του ελέγχου η ταχύτητα της γεννήτριας προσαρμόζεται με βάση την ταχύτητα ανέμου δίνοντας τη μέγιστη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η λειτουργία του μέγιστου σημείου απόδοσης (maximum power point - MPP) έχει εφαρμογή σε ευρύ φάσμα ισχύος. Ένα τυπικό διάγραμμα καμπυλών ισχύος εξόδου σε συνάρτηση με την ταχύτητα της Α/Γ και της ταχύτητας ανέμου φαίνεται στο Σχ.3.6 [7].



Σχήμα 3.6 : Ηλεκτρική ισχύς εξόδου συναρτήσει ταχύτητας Α/Γ [7].

Από την Εξ. (3.8) μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι η ταχύτητα ακροπτερυγίου λ για μια δεδομένη ταχύτητα A/Γ παρουσιάζει διακυμάνσεις σε μεγάλο εύρος σε σχέση με την ταχύτητα ανέμου. Ωστόσο από την Εξ. (3.7) φαίνεται ότι η παραγωγή ισχύος μπορεί να μεγιστοποιηθεί εάν η A/Γ λειτουργεί στο μέγιστο C_p . Με στόχο να πετύχουμε μέγιστη παραγωγή ισχύος (μέγιστη απομάστευση ισχύος) η ταχύτητα περιστροφής του ρότορα θα πρέπει να ακολουθεί τις αλλαγές της ταχύτητας ανέμου. Οι ΕΓΔΤ έχουν τη δυνατότητα αυτή. Η ταχύτητα περιστροφής του ρότορα μπορεί να ελεγχθεί ελέγχοντας τη διαφορά μεταξύ της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος και της ωφελούμενης ενέργειας ανέμου (ενέργεια απομάστευσης). Με δυναμικό έλεγχο της γωνίας πτερυγίων, μπορεί να ελεγχθεί η ενέργεια που κάνει απομάστευση η A/Γ και με τη χρήση ηλεκτρονικών ισχύος μπορεί να ελεγχθεί η παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος. Αυτά τα βήματα ελέγχου μας οδηγούν στο να μπορούμε να ελέγξουμε τη ταχύτητα περιστροφής του ρότορα.

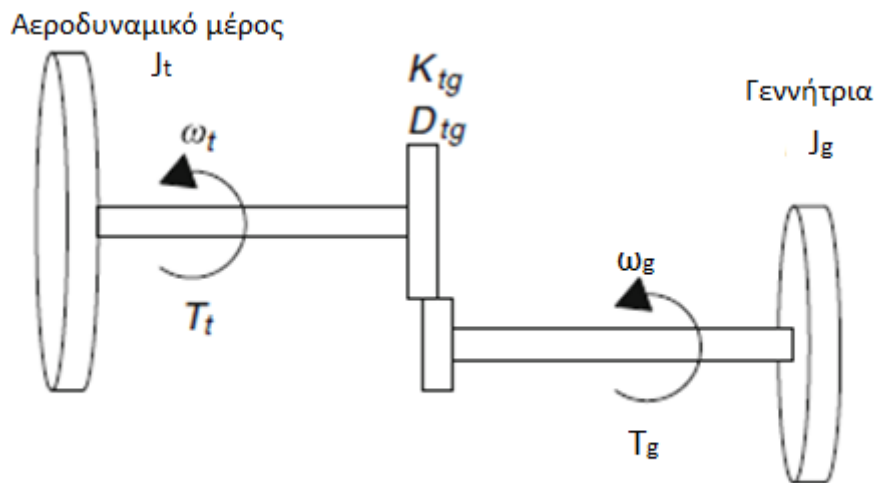
3.6 ΣΥΣΤΗΜΑ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ - ΙΣΟΔΥΝΑΜΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΔΥΟ ΜΑΖΩΝ

Ένα ισοδύναμο μοντέλο δύο μαζών Σχ.3.7 χρησιμοποιείται για την μοντελοποίηση του συστήματος μετάδοσης της κίνησης των A/Γ . Αποτελείται από δύο μέρη, τη μάζα στο αεροδυναμικό μέρος με ροπή αδράνειας J_t και τη μάζα από τη μεριά της γεννήτριας με ροπή γεννήτριας J_g . Η μάζα στο αεροδυναμικό μέρος αποτελείται από τη ροπή αδράνειας της πτερωτής και ενός μέρους του κιβωτίου ταχυτήτων, ενώ από τη μεριά της γεννήτριας, από τη μάζα του δρομέα της γεννήτριας, του άξονα υψηλών στροφών και του υπολοίπου μέρους κιβωτίου ταχυτήτων. Αυτές οι δύο μάζες συνδέονται με έναν ελαστικό άξονα χαμηλών στροφών που έχει ακαμψία K_{tg} και συντελεστή αμοιβαίας απόσβεσης D_{tg} . Σύμφωνα με το Vittal οι εξισώσεις κίνησης περιγράφονται από τους νόμους του Νεύτωνα και είναι οι ακόλουθες [7] :

$$\begin{aligned} T_g - D_{tg}(\omega_g - \omega_t) - K_{tg}(\theta_g - \theta_t) &= 2J_g \dot{\omega}_g \\ D_{tg}(\omega_g - \omega_t) + K_{tg}(\theta_g - \theta_t) - T_t &= 2J_t \dot{\omega}_t \end{aligned} \quad (3.10)$$

όπου ω_g και ω_t (ανά μονάδα p.u.) είναι η γωνιακή ταχύτητα της γεννήτριας και δρομέα αντίστοιχα ίδιας φοράς, $(\theta_g - \theta_t)$ η γωνία στρέψης του άξονα σύνδεσης και

T_t και T_g είναι η μηχανική ροπή του δρομέα και ηλεκτρική ροπή της γεννήτριας αντίστοιχα σε αντίθετες φορές.

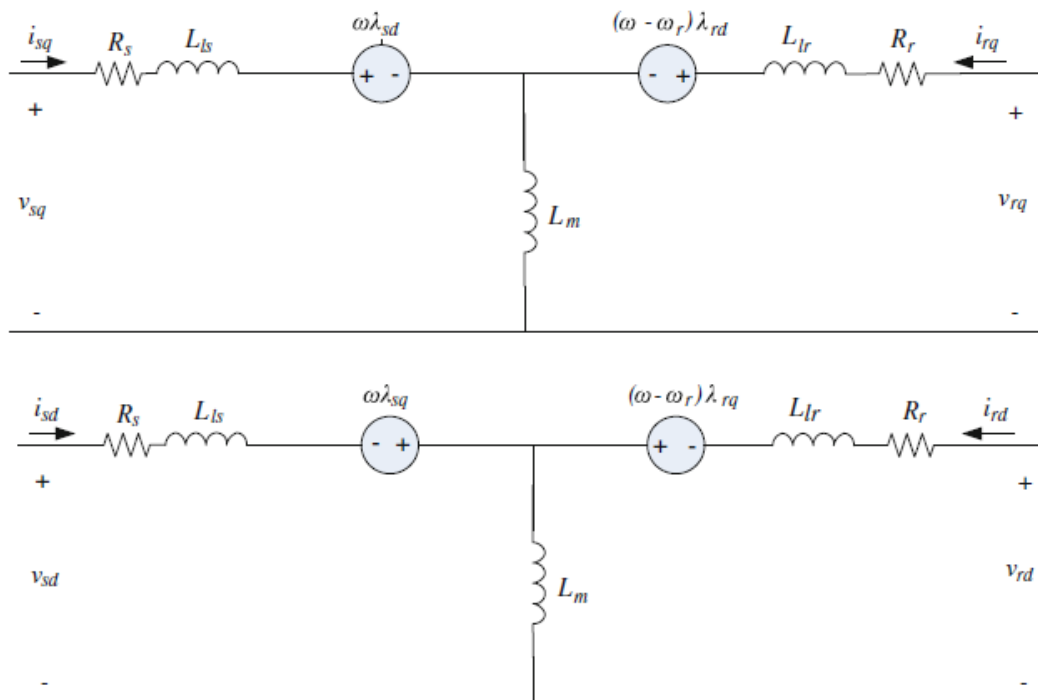


Σχήμα 3.7 : Ισοδύναμο μοντέλο δύο μαζών.

3.7 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΕΓΔΤ

Ένα ευρύτατα χρησιμοποιούμενο μαθηματικό μοντέλο της επαγωγικής γεννήτριας είναι ο μετασχηματισμός Park σε d-q άξονες αναφοράς και παρουσιάζεται παρακάτω. Το σχεδιάγραμμα του ισοδύναμου κυκλώματος του μοντέλου αυτού παρουσιάζεται στο Σχ.3.8. Εδώ v_{sq} and v_{sd} είναι οι τάσεις στο στάτη, v_{rq} και v_{rd} είναι οι τάσεις του ρότορα ανοιγμένες στην πλευρά του στάτη, λ_{sd} και λ_{sq} είναι οι πεπλεγμένες μαγνητικές ροές στον στάτη, λ_{rd} και λ_{rq} είναι οι πεπλεγμένες μαγνητικές ροές του ρότορα ανοιγμένες στην πλευρά του στάτη, i_{sd} και i_{sq} είναι τα ρεύματα του στάτη, i_{rd} και i_{rq} είναι τα ρεύματα του ρότορα ανοιγμένα στην πλευρά του στάτη, R_s είναι η αντίσταση του στάτη, R_r είναι η αντίσταση του ρότορα ανοιγμένη στη πλευρά του στάτη, L_{ls} και L_{lr} είναι η αυτεπαγωγή τυλίγματος στο στάτη και στον ρότορα ανοιγμένη στην πλευρά του στάτη αντίστοιχα, L_m είναι η αμοιβαία επαγωγή, ω είναι η γωνιακή ταχύτητα αναφοράς, και ω_r είναι η γωνιακή ταχύτητα του ρότορα. Κατά σύμβαση, ένα ρεύμα είναι θετικό εισερχόμενο στη μηχανή, και αρνητικό όταν

εγκαταλείπει τη μηχανή, και οι άξονες d-q αναφοράς προσδιορίζονται με τον q-άξονα να προπορεύεται του d-άξονα κατά 90° .



Σχήμα 3.8 : Ισοδύναμο κύκλωμα της ΕΓΔΤ [7].

3.8 ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΡΟΗΣ ΚΑΙ ΤΑΣΗΣ

Οι Εξ. (3.10) και (3.11) είναι εξισώσεις τάσης και πεπλεγμένης ροής της ΕΓΔΤ με όλες τις ποσότητες του ρότορα ανοιγμένες στην πλευρά του στάτη.

$$\begin{aligned}
 v_{sq} &= R_s i_{sq} + \omega \lambda_{sd} + \lambda_{sq} \\
 v_{sd} &= R_s i_{sd} - \omega \lambda_{sq} + \lambda_{sd} \\
 v_{rq} &= R_r i_{rq} + (\omega - \omega_r) \lambda_{rd} + \lambda_{rq} \\
 v_{rd} &= R_r i_{rd} - (\omega - \omega_r) \lambda_{rq} + \lambda_{rd}
 \end{aligned}
 \tag{3.11}$$

$$\begin{aligned}
\lambda_{sq} &= L_s i_{sq} + L_m i_{rq} \\
\lambda_{sd} &= L_s i_{sd} + L_m i_{rd} \\
\lambda_{rq} &= L_r i_{rq} + L_m i_{sq} \\
\lambda_{rd} &= L_r i_{rd} + L_m i_{sd}
\end{aligned}
\tag{3.12}$$

όπου $L_s = L_{ls} + L_m$ και $L_r = L_{lr} + L_m$

Η ηλεκτρομαγνητική ροπή της επαγωγικής γεννήτριας, θετική για λειτουργία κινητήρα και αρνητική για λειτουργία γεννήτριας, δίνεται από τον τύπο :

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{p}{2} L_m (i_{sq} i_{rd} - i_{sd} i_{rq}) \tag{3.13}$$

όπου p είναι ο αριθμός των πόλων.

3.9 ΑΝΑ ΜΟΝΑΔΑ ΣΥΣΤΗΜΑ (Α.Μ.)

Πίνακας 1. Βασικοί όροι επαγωγικής γεννήτριας.

| α/α | Μέγεθος | Έκφραση |
|-----|--------------------|---|
| 1 | v_{s-base} | Ονομαστική τιμή φασικής τάσης, V |
| 2 | i_{s-base} | Ονομαστική τιμή φασικού ρεύματος, A |
| 3 | f_{base} | Ονομαστική συχνότητα, Hz |
| 4 | ω_{base} | $2\pi f_{base}$, elec.rad/sec |
| 5 | ω_{m-base} | $\omega_{base} (2/p)$, mech.rad/sec |
| 6 | Z_{s-base} | v_{s-base} / i_{s-base} , Ω |
| 7 | L_{s-base} | $v_{s-base} / (i_{s-base} \omega_{base})$, H |
| 8 | Ψ_{s-base} | $v_{s-base} / \omega_{base}$, Wb-turns |
| 9 | $3-\Phi VA_{base}$ | $3/2(v_{s-base} i_{s-base})$, VA |
| 10 | Ροπή | $3/2(p/2)\Psi_{s-base} i_{s-base}$, N·m |

Οι βασικοί όροι της επαγωγικής γεννήτριας φαίνονται στο Πίν.1. Αξιοποιώντας αυτούς τους όρους όπως τάση, πεπλεγμένη ροή, και τις εξισώσεις ροπής μπορούμε να τις μετατρέψουμε σε μία κοινή βάση αναφοράς όπως συμβαίνει σε προσομοιώσεις συστημάτων μεγάλης ισχύος. Βασίζόμενοι στο ανά μονάδα σύστημα οι εξισώσεις τάσης, ροής και ροπής μπορούν να εκφραστούν ως εξής :

$$\begin{aligned}
 v_{sq} &= R_s i_{sq} + \omega \lambda_{sd} + \frac{1}{\omega_{base}} \dot{\lambda}_{sq} \\
 v_{sd} &= R_s i_{sd} - \omega \lambda_{sq} + \frac{1}{\omega_{base}} \dot{\lambda}_{sd} \\
 v_{rq} &= R_r i_{rq} + (\omega - \omega_r) \lambda_{rd} + \frac{1}{\omega_{base}} \dot{\lambda}_{rq} \\
 v_{rd} &= R_r i_{rd} - (\omega - \omega_r) \lambda_{rq} + \frac{1}{\omega_{base}} \dot{\lambda}_{rd}
 \end{aligned} \tag{3.14}$$

$$\begin{aligned}
 \lambda_{sq} &= L_s i_{sq} + L_m i_{rq} \\
 \lambda_{sd} &= L_s i_{sd} + L_m i_{rd} \\
 \lambda_{rq} &= L_r i_{rq} + L_m i_{sq} \\
 \lambda_{rd} &= L_r i_{rd} + L_m i_{sd}
 \end{aligned} \tag{3.15}$$

$$T_e = L_m (i_{sq} i_{rd} - i_{sd} i_{rq}) \tag{3.16}$$

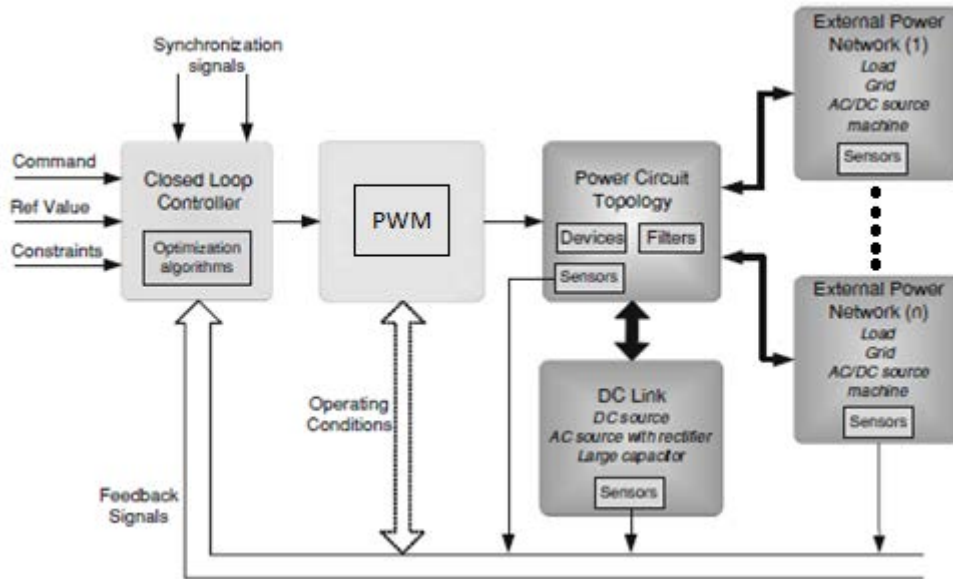
Εδώ όλες οι ποσότητες είναι εκφρασμένες στο ανά μονάδα σύστημα εκτός του όρου ω_{base} .

4.ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΙΣΧΥΟΣ

ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ

4.1 ΥΠΟΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑ ΙΣΧΥΟΣ

Οι μετατροπείς ισχύος των αιολικών συστημάτων βασίζονται σε μετατροπέα πηγής τάσης(Voltage Source Converter,VSC) και οι οποίοι χρησιμοποιούν μεθόδους διαμόρφωσης εύρους παλμού (Pulse Width Modulation,PWM). Το επίκεντρο αυτού του κεφαλαίου είναι η κατανόηση των βασικών αρχών λειτουργίας των μετατροπέων τάσης που χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές διασύνδεσης με το δίκτυο. Ένα VSC σύστημα είναι ένα κλειστού βρόγχου σύστημα με ελεγκτή ανάδρασης, το οποίο επιτυγχάνει έλεγχο και βελτιστοποίηση με μεγάλη ικανότητα απόδοσης μέσα από την εφαρμογή υψηλών διακοπτικών συχνοτήτων διαμόρφωσης παλμού. Η διακοπτική συχνότητα μπορεί να κυμαίνεται από μερικές εκατοντάδες Hz για εφαρμογές χαμηλής ισχύος ως μερικά MHz για χαμηλής ισχύος. Εφαρμογές που προϋποθέτουν την παρουσία τριφασικού δικτύου διανομής ηλιακών και αιολικών συστημάτων ενέργειας μερικών εκατοντάδων Hz ,εφαρμόζουν διακοπτικές συχνότητες μερικών kHz. Τα βασικά υποσυστήματα ενός VSC μετατροπέα ηλεκτρονικών ισχύος φαίνονται στο Σχ. 4.1[7]. Η ροή ισχύος μπορεί να είναι αμφίδρομη ανάμεσα στα επί μέρους υποσυστήματα και εξαρτάται από τις συνθήκες λειτουργίας και εφαρμογών. Στο μετατροπέα ισχύος μπορούν να διασυνδεθούν διάφορα εξωτερικά συστήματα. Για τις ΕΓΔΤ τα εξωτερικά συστήματα μπορεί να είναι το τριφασικό δίκτυο και τα τυλίγματα του ρότορα της επαγωγικής μηχανής. Τα κύρια υποσυστήματα αναφέρονται στις επόμενες ενότητες.



Σχήμα 4.1 : Υποσυστήματα ενός VSC [7].

4.1.1 Ελεγκτής ανάδρασης

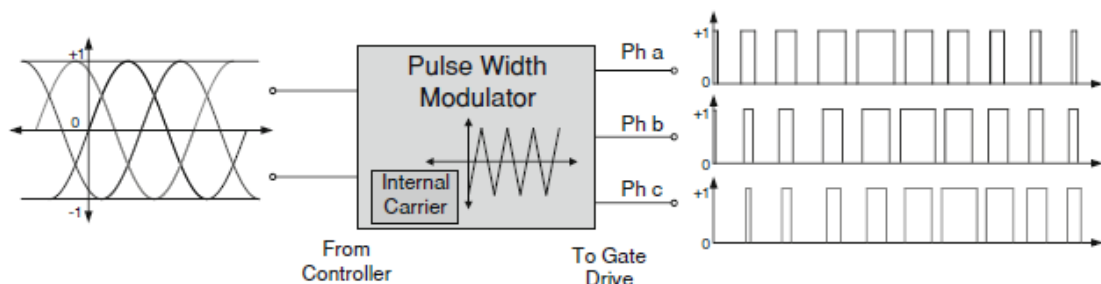
Ο ελεγκτής ανάδρασης είναι υπεύθυνος για την επίτευξη απαιτούμενου ελέγχου και βελτιστοποίηση συγκεκριμένων ενεργειών στις διάφορες εφαρμογές. Για τις εφαρμογές δικτύου ανανεώσιμων πηγών ενέργειας ο στόχος ελέγχου είναι η μεγιστοποίηση απομάστευσης ενέργειας από την πηγή κάτω από οποιεσδήποτε συνθήκες λειτουργίας, και ισχύς εξόδου στον επιθυμητό συντελεστή ισχύος, υποστήριξη δικτύου όπως παροχή άεργου ισχύος, ρύθμιση τάσης και σφάλματος. Ο σχεδιασμός του ελεγκτή καθορίζει τη δυναμική απόδοση και σταθερότητα της μετατροπής ισχύος του συστήματος.

Οι είσοδοι στον ελεγκτή περιλαμβάνουν εντολές ή σήματα αναφοράς τα οποία είναι από πριν προγραμματισμένα ή προέρχονται από κάποιο ανώτερο επίπεδο συστήματος, και διάφορα σήματα ανάδρασης (τάση, ρεύμα, ταχύτητα, ισχύς, συντελεστή ισχύος) από τα κυκλώματα του μετατροπέα, DC-link, και εξωτερικά συστήματα. Ο ελεγκτής χρησιμοποιεί το σφάλμα μεταξύ των εντολών σημάτων και των αντίστοιχων μετρούμενων μεγεθών για να δημιουργήσει κατάλληλα σήματα ελέγχου για να προχωρήσουν μετά στο διαμορφωτή εύρους παλμού. Το διάγραμμα του ελεγκτή περιλαμβάνει ρουτίνες συγχρονισμού (κλειστό βρόχο) και εντοπισμό μέγιστου σημείου ισχύος καθώς και άλλους αλγόριθμους βελτιστοποίησης. Ο συνολικός έλεγχος υλοποιείται με τη χρήση και άλλων κλειστών βρόχων ελέγχου. Σε

τελευταίας τεχνολογίας μετατροπείς χρησιμοποιούνται ψηφιακοί ελεγκτές, όπως μικροελεγκτές επεξεργαστές ψηφιακού σήματος για τον απαιτούμενο έλεγχο.

4.1.2 Διαμορφωτής εύρους παλμού

Η σχεδιαστική λογική του PWM σε γενικές γραμμές αναφέρεται στον έλεγχο της αναλογίας του κλάσματος του χρόνου ενός πόλου ισχύος ως προς τη συνολική περίοδο. Η λειτουργία του PWM είναι να δημιουργήσει τα σήματα για τα κυκλώματα εισόδου των διπολικών διακοπών οι οποίοι βασίζονται στον έλεγχο που παρέχεται από το μπλοκ ελέγχου σήματος. Ένα παράδειγμα παρουσιάζεται στο Σχ. 4.2 για έναν τριφασικό μετατροπέα[7].



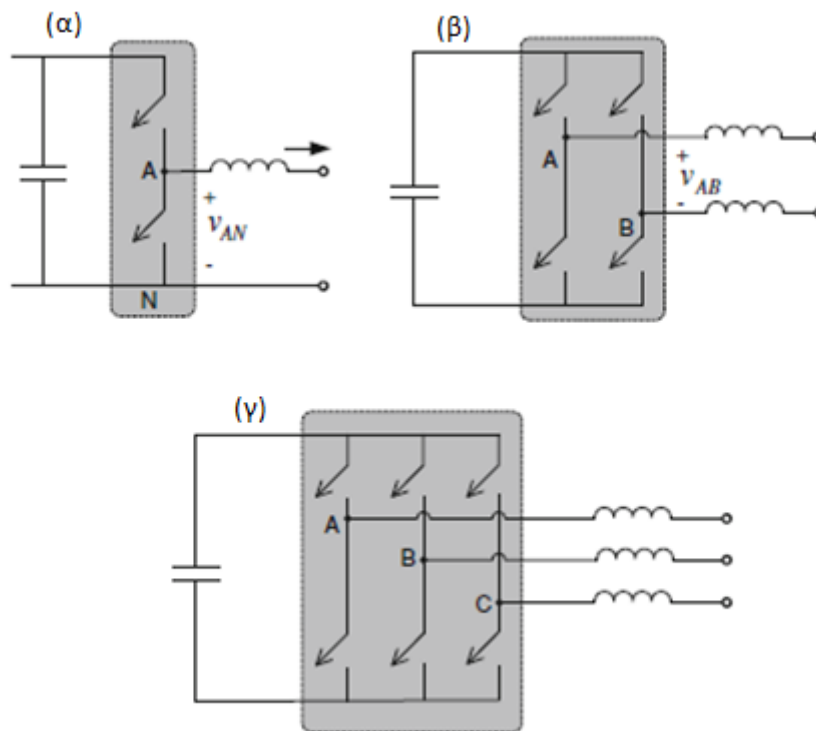
Σχήμα 4.2 : Σχεδιαστική λογική ενός PWM τριφασικού συστήματος [7].

Μια συνηθισμένη μέθοδος είναι αυτή με βάση το φορέα σήματος όπου ένα σήμα ελέγχου συγκρίνεται με ένα τριγωνικό σήμα προκειμένου να παράγουν παλμούς PWM. Η συχνότητα του τριγωνικού σήματος f_c πρέπει να είναι αρκετά μεγαλύτερη από τη συχνότητα του σήματος ελέγχου f_m . Για τριφασικούς μετατροπείς χρησιμοποιείται διανυσματικός έλεγχος.

Ο σχεδιασμός του PWM έχει σημαντικό ρόλο στην απόδοση του μετατροπέα στη μόνιμη κατάσταση. Η μέθοδος του PWM και η διακοπτική συχνότητα καθορίζουν την κυμάτωση υψηλής συχνότητας στην τάση εξόδου και τις κυματομορφές του ρεύματος και ως εκ τούτου το μέγεθος των φίλτρων που χρειάζονται για να καλύψουν την ποιότητα ισχύος που απαιτείται. Ο σχεδιασμός του PWM επηρεάζει επίσης τις απώλειες των διακοπών και επομένως τη μετατροπή ισχύος του συστήματος. Αξίζει να σημειωθεί ότι πιο ισχυροί μετατροπείς με μεγαλύτερο αριθμό διακοπών και βελτιωμένη ποιότητα ισχύος αρχίζουν επίσης να χρησιμοποιούνται σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

4.1.3 Τοπολογίες κυκλωμάτων μετατροπών ισχύος

Η τοπολογία των μετατροπών αναφέρεται κυρίως στον τρόπο όπου διάφοροι ημιαγώγιμοι διακόπτες ισχύος και παθητικά στοιχεία όπως πηνία, πυκνωτές και μετασχηματιστές, διαμορφώνονται με σκοπό να πραγματοποιηθούν διάφορες λειτουργίες. Υπάρχουν αρκετές τοπολογίες μετατροπών για διάφορες εφαρμογές όπως DC-DC, AC-DC, DC-AC και AC-AC. Εδώ επικεντρωνόμαστε σε τοπολογίες μετατροπών, γέφυρας δευτέρου επιπέδου (two-level bridge) οι οποίες περιλαμβάνουν α) ημιγέφυρα, β) πλήρης γέφυρα και γ) τριφασική γέφυρα όπως φαίνεται στο Σχ. 4.3,



Σχήμα 4.3 : Τοπολογίες μετατροπών ισχύος με έναν ή περισσότερους πόλους ισχύος, α) ημιγέφυρα β) πλήρης γέφυρα γ) τριφασική γέφυρα.

Ο πόλος ισχύος στο Σχ. 4.3.(α) αποτελείται από δύο ημιαγώγιμους διακόπτες που μαζί συνθέτουν έναν μονοπολικό διακόπτη διπλής επαγωγής (Single Pole Double Through Switch, SPDT). Οι διακόπτες ανοιγοκλείνουν μεμονωμένα σε κατάλληλες χρονικές στιγμές ελεγχόμενοι από έναν PWM. Επιπλέον τα κυκλώματα τους αποτελούνται από μεγάλους πυκνωτές για τη μείωση των παλμικών δονήσεων στο δίαυλο DC-link και L, LC ή LCL φίλτρα.

Για την καλύτερη ανάλυση και κατανόηση της λειτουργίας των μετατροπέων ισχύος υποθέτουμε ότι τα παθητικά στοιχεία είναι ιδανικά. Πρακτικά ωστόσο στην πραγματικότητα είναι μη ιδανικά γιατί εμφανίζονται απώλειες, όπως απώλειες μεταγωγής, αγωγιμότητας, πτώσεις τάσης και χρόνοι καθυστέρησης τα οποία επηρεάζουν την απόδοση του μετατροπέα.

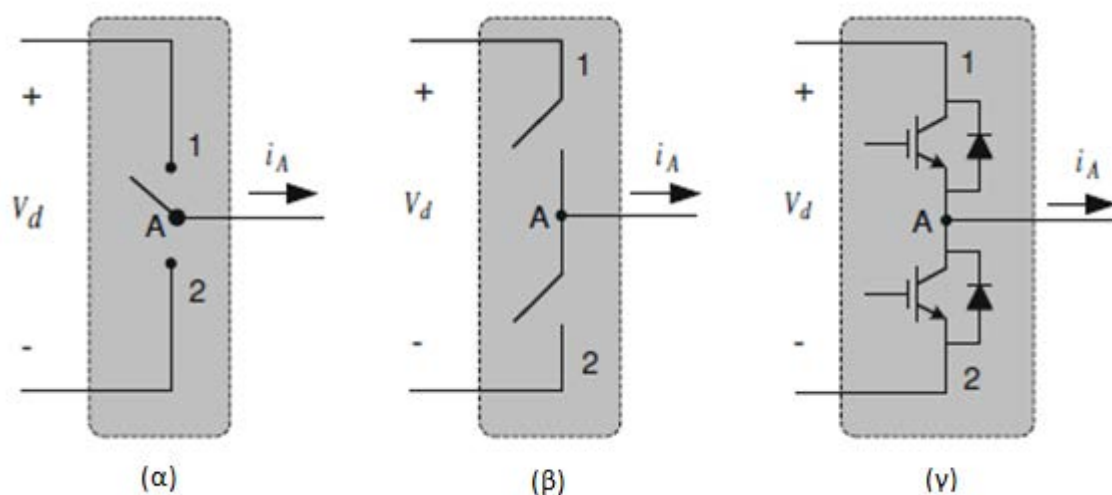
4.1.4 DC-link και διασύνδεση με εξωτερικά συστήματα ισχύος και φορτία

Οι VSC λειτουργούν με συνδυαστικό έλεγχο τάσεων χαμηλής συχνότητας στην έξοδο των πόλων ισχύος αλλάζοντας μια πηγή τάσης DC στους ακροδέκτες του πόλου ισχύος. Αυτή η πηγή τάσης είναι το DC-link ή DC-bus και μπορεί εφαρμοστεί με διάφορους τρόπους. Μπορεί να είναι μια πηγή συνεχούς ρεύματος από μπαταρία ή η έξοδος ενός AC-DC ανορθωτή από μια εναλλασσόμενη πηγή. Ωστόσο δεν είναι αναγκαίο να είναι μια πηγή ενεργούς ισχύος. Η μέση ισχύς που ανταλλάσσεται στο DC-link μπορεί να είναι θετική, αρνητική ή μηδέν. Σε πολλές περιπτώσεις το DC-link μπορεί να παραμείνει σταθερό με τη χρήση μεγάλων πυκνωτών και με τον πόλο ισχύος τροφοδοτούμενο με ενεργό ισχύ από το δίκτυο ώστε να αντισταθμίσει τις απώλειες στο DC-link.

Οι πόλοι ισχύος και οι μετατροπείς αποτελούνται από πολλούς πόλους ισχύος, και μπορούν να υποστηρίξουν την αμφίδρομη ροή ισχύος. Η στιγμιαία και μέση τιμή της τάσης ενός πόλου ισχύος μπορεί να είναι μονοπολική, αλλά το ρεύμα μέσα στον πόλο μπορεί να είναι αμφίδρομο έχοντας ως αποτέλεσμα την αμφίδρομη ροή ισχύος. Μετατροπείς με πολλαπλούς πόλους ισχύος μπορούν να υποστηρίξουν και διπολικές τάσεις και αμφίδρομα ρεύματα αποτελώντας ουσιαστικά πλήρη υποστήριξη και στα τέσσερα τεταρτημόρια ισχύος. Ο μετατροπέας ισχύος μπορεί να διασυνδεθεί με δύο ή περισσότερα εξωτερικά συστήματα ισχύος, όπως το ηλεκτρικό δίκτυο ή σε άλλη πηγή DC ή AC για να δώσει ή να απορροφήσει ισχύ αναλόγως τις συνθήκες λειτουργίας και τα φορτία. Αυτή η γενική ερμηνεία δίνεται για να τονιστεί το γεγονός ότι δεν υπάρχει σταθερή σχέση μεταξύ πηγής-άκρου και φορτίο-άκρου με τους ρόλους να αντιμετωπίζονται δυναμικά εξαρτώμενοι από τις συνθήκες λειτουργίας για κάποια δεδομένη χρονική στιγμή. Για παράδειγμα στις ΕΓΔΤ, η ροή ισχύος στα τυλίγματα του ρότορα μέσα από το κομμάτι μετατροπέα PWM που βλέπει το ρότορα είναι θετική κατά τη διάρκεια χαμηλών ταχυτήτων (υποσύγχρονες ταχύτητες) και η ροή ισχύος γίνεται από το DC-link στα τυλίγματα του ρότορα. Σε υψηλές ταχύτητες (υπερσύγχρονες ταχύτητες) η ροή ισχύος γίνεται από τα τυλίγματα του ρότορα προς το DC-link.

4.2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΟΛΟΥ ΙΣΧΥΟΣ

Ο πόλος ισχύος είναι ουσιαστικά ένας μονοπολικός, διπλής επαγωγής διακόπτης (SPDT switch). Από τη στιγμή που δεν υπάρχει ηλεκτρονικό ισοδύναμο ενός SPDT, υλοποιείται χρησιμοποιώντας δύο μονοπολικούς, μονής επαγωγής (Single Pole-Single Throw, SPST) διακόπτες. Καθένας από τους SPST υλοποιείται ηλεκτρονικά με το συνδυασμό από έναν ελεγχόμενο διακόπτη (ένα IGBT) και μια δίοδο. Στο Σχ.4.4 παρουσιάζεται η εκδοχή του διπλού SPDT και η ηλεκτρονική εφαρμογή του πόλου ισχύος. Ο συνδυασμός των δυο διακοπών και των δυο δίοδων παρουσιάζεται στο Σχ.4.4(γ) υποστηρίζοντας αμφίδρομο πολικό ρεύμα i_A .



Σχήμα 4.4 : α) SPDT, β) διπλός SPST, γ) ηλεκτρονική εφαρμογή

Υπάρχουν δυο κύριες προϋποθέσεις για τον πόλο ισχύος του VSC, η τάση μεταξύ θετικού και αρνητικού ακροδέκτη αναφερόμενη ως V_d στο Σχ.4.4 η οποία θα πρέπει να είναι ομαλή και μη παλλόμενη, και το ρεύμα μέσα από τον πόλο αναφερόμενο ως i_A στο Σχ.4.4 θα πρέπει να είναι ένα μη εναλλασσόμενο ρεύμα. Οι δυο διακόπτες του πόλου ισχύος εναλλάσσουν ρόλους (κλειστός-ανοικτός) σε υψηλές συχνότητες κάτω από ένα μοτίβο συμπληρωματικής εναλλαγής ρόλων. Όταν ο πάνω διακόπτης είναι ανοικτός (ON), ο κάτω είναι κλειστός (OFF) και αντίστροφα. Το σήμα ελέγχου που χρησιμοποιείται ως οδηγός του πόλου συμβολίζεται ως $q_A(t)$. Αυτό το σήμα οδηγεί την πύλη της μονάδας του επάνω διακόπτη, ενώ σε αντιστροφή ρόλων τον κάτω διακόπτη. Στην πράξη υπάρχει ένα μικρό νεκρό σημείο που λαμβάνεται υπόψη κατά το οποίο ένας διακόπτης από κλειστός τείνει να ανοίξει, με σκοπό να αποφευχθεί το ενδεχόμενο όπου δυο διακόπτες να είναι ταυτόχρονα ON ή

OFF οδηγώντας σε μεγάλα ρεύματα. Ωστόσο είναι κάτι που στην ανάλυσή μας για ευκολία παραλείπεται.

4.3 ΣΗΜΑ ΕΛΕΓΧΟΥ - ΛΟΓΟΣ ΚΑΤΑΤΜΗΣΗΣ (DUTY CYCLE)

Το σήμα ελέγχου προσδιορίζεται από τις παρακάτω συνθήκες (4.1) με αναφορά στο Σχ.4.4(β) :

Αν $q_A(t) = 1$ τότε ο επάνω διακόπτης είναι κλειστός και ο πόλος συνδέεται στη θέση 1, τότε $V_{AN}(t) = V_d$

Αν $q_A(t) = 0$, τότε ο κάτω διακόπτης είναι κλειστός και ο πόλος συνδέεται στη θέση 2, τότε

$$V_{AN}(t) = 0$$

(4.1)

Το Σχ.4.5 μας δείχνει ένα τυχαίο σήμα ελέγχου $q_A(t)$ και το αποτέλεσμα της $V_{AN}(t)$. Πρέπει να τονιστεί ότι από την προοπτική ελέγχου και σε ανάλυση επιπέδου συστήματος, σε σταθερή όσο και δυναμική κατάσταση, το ενδιαφέρον επικεντρώνεται περισσότερο σε μέσες τιμές διαφορετικών μεταβλητών του μετατροπέα. Η μέση τιμή (cycle by cycle average, CCA) της οποιασδήποτε μεταβλητής $x(t)$ ορίζεται σαν την μέση τιμή σε μία πλήρη περίοδο σήματος και συμβολίζεται με μια παύλα πάνω από τη μεταβλητή όπως φαίνεται στην Εξ.(4.2).

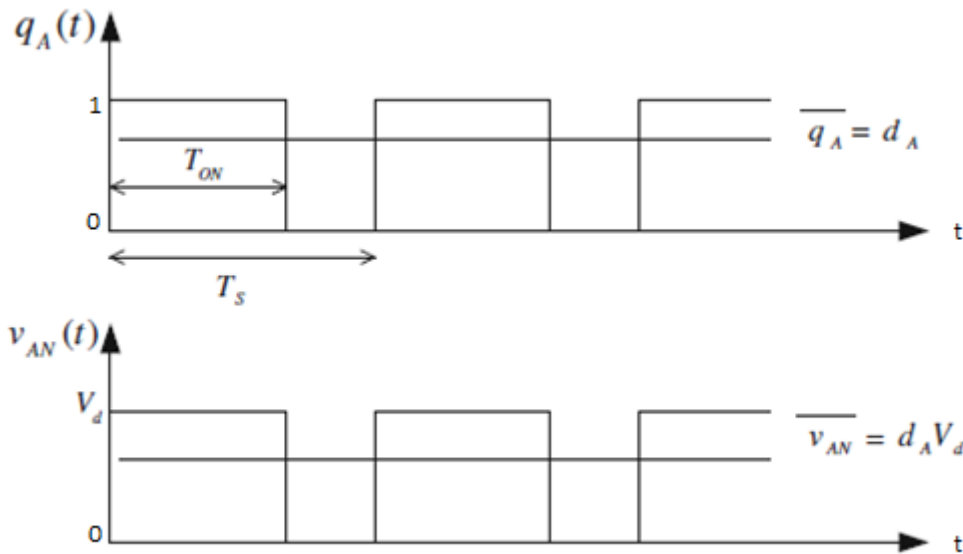
$$\bar{x}(t) = \frac{1}{T_s} \int_{t-T_s}^t x(\tau) d\tau \quad (4.2)$$

Ο λόγος κατάτμησης (duty cycle) ενός πόλου ισχύος για μια δεδομένη περίοδο σήματος αναφέρεται στο χρόνο για τον οποίο ισχύει ότι $q = 1$ ως προς τη συνολική περίοδο T_s . Αναφερόμενοι στο Σχ.4.5 ο λόγος κατάτμησης μπορεί να οριστεί σαν μια μεταβλητή $d(t)$ και η οποία ορίζεται ως ο λόγος της διάρκειας κατά την οποία ο διακόπτης είναι κλειστός ($T_{ON}(t)$) ως προς τη περίοδο T_s όπως φαίνεται και από την Εξ.(4.3) όπου ο χρόνος $T_{ON}(t)$ σαν συνεχόμενη μεταβλητή υποδηλώνει τη διάρκεια όπου $q = 1$ για τον χρόνο $t - T_s$.

$$d(t) = \frac{T_{ON}(t)}{T_s} \quad (4.3)$$

Η μέση τιμή του σήματος ελέγχου εξάγεται από την Εξ.(4.4) και είναι ίσο με το λόγο κατάμησης (duty cycle).

$$\bar{q}_A(t) = \frac{1}{T_s} \int_{t-T_s}^{t} q_A(\tau) d\tau = \frac{1}{T_s} \left[\int_{t-T_s}^{t-T_s+T_{ON}} 1 d\tau + \int_{t-T_s+T_{ON}}^t 0 d\tau \right] = \frac{T_{ON}(t)}{T_s} = d(t) \quad (4.4)$$



Σχήμα 4.5 : Σήμα ελέγχου και ισχύς εξόδου ενός πόλου ισχύος [7].

Από την Εξ. (4.1) και παρατηρώντας τις κυματομορφές του Σχ.4.5 η άμεση σχέση μεταξύ $q_A(t)$ και $V_{AN}(t)$ δηλώνεται στην Εξ.(4.5)

$$V_{AN}(t) = V_d q_A(t) \quad (4.5)$$

Λαμβάνοντας υπόψη ότι το V_d είναι μια συνεχής τάση, η μέση τιμή της $V_{AN}(t)$ μπορεί να εξαχθεί από την Εξ.(4.6)

$$\bar{V}_{AN}(t) = \bar{q}_A(t) V_d = d(t) V_d \quad (4.6)$$

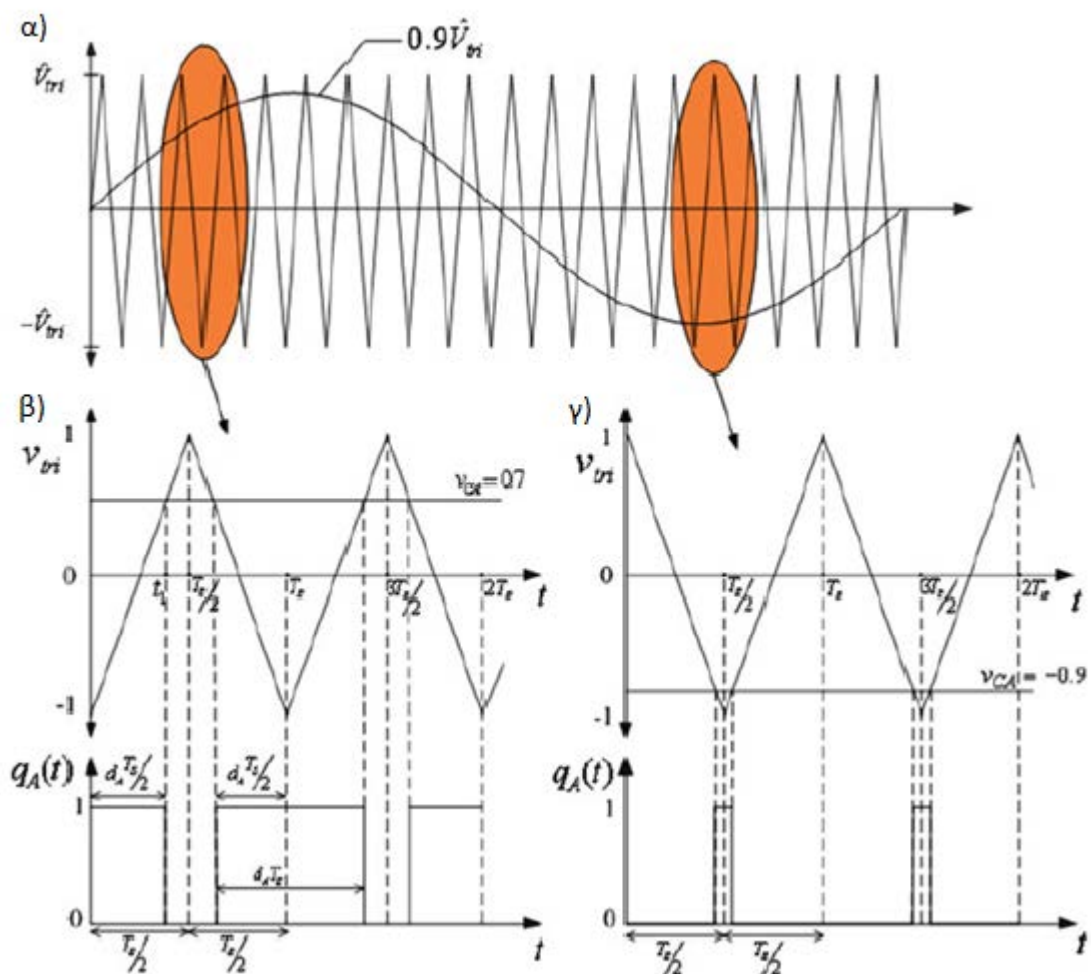
Ισοδύναμα το $\bar{V}_{AN}(t)$ μπορεί να προκύψει εφαρμόζοντας τον ορισμό του CCA που δώσαμε προηγουμένως στην στιγμιαία κυματομορφή του Σχ.4.5 δίνοντας πάλι την Εξ.(4.6).

4.4 ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΕΥΡΟΥΣ ΠΑΛΜΟΥ ΠΟΛΟΥ ΙΣΧΥΟΣ

Μια δημοφιλής μέθοδος PWM για την παραγωγή του σήματος ελέγχου $q_A(t)$ είναι αυτή με βάση τον φορέα σήματος. Σε αυτή τη μέθοδο ένα σήμα ελέγχου $V_{cA}(t)$ (φέρων σήμα ή σήμα αναφοράς) συγκρίνεται με μια τριγωνική κυματομορφή $V_{tri}(t)$ και τα σημεία τομής των δύο αυτών τάσεων καθορίζουν τις ακαριαίες αλλαγές στον πόλο ισχύος. Οι συνθήκες λειτουργίας του PWM περιγράφονται από τις Εξ. (4.7) και απεικονίζονται στο Σχ.4.6 [7].

$$q_A(t) = 1 \text{ για } V_{cA}(t) \geq V_{tri}(t) \tag{4.7}$$

$$q_A(t) = 0 \text{ για } V_{cA}(t) < V_{tri}(t)$$



Σχήμα 4.6 : Τριγωνική σύγκριση φορέα σήματος σε PWM [7].

Το Σχ.4.6(α) μας δείχνει την τριγωνική κυματομορφή με μέγιστη τιμή \bar{V}_{tri} να συγκρίνεται με μια ελεγχόμενη τάση όπου εδώ είναι ημιτονοειδής συνάρτηση. Η συχνότητα αυτής της τριγωνικής τάσης (φορέας) θα πρέπει να είναι κατά πολύ μεγαλύτερη από αυτή του ημιτονοειδούς σήματος ελέγχου (σήμα αναφοράς ή σήμα ελέγχου). Ο λόγος της συχνότητας του φορέα τριγωνικού σήματος προς το σήμα ελέγχου ονομάζεται δείκτης διαμορφώσεως σήματος και έχει υψηλή τιμή, συνήθως πάνω από 100. Τα Σχ.4.6(β,γ) παρουσιάζουν μια λεπτομερέστερη και διευρυμένη όψη του Σχ.4.6(α) που αντιστοιχεί σε δύο περιόδους θετικής και αρνητικής αντίστοιχα της ημιτονοειδούς κυματομορφής, με σκοπό να φανεί καθαρά η σύγκριση και το αποτέλεσμα των παλμών PWM. Αναφερόμενοι στο Σχ.4.6(β) το αυξανόμενο τμήμα της τριγωνικής κυματομορφής εκφράζεται ως :

$$V_{tri}(t) = -\bar{V}_{tri} + \frac{2\bar{V}_{tri}}{\left(\frac{T_s}{2}\right)} t, \quad 0 \leq t \leq \frac{T_s}{2} \quad (4.8)$$

Ο χρόνος t_1 για τον οποίο $V_{tri}(t)$ ισούται με το V_{cA} μπορεί να ληφθεί από την Εξ.(4.8) υποκαθιστώντας $t = t_1$ και $V_{tri} = V_{cA}$.

$$-\bar{V}_{tri} + \frac{2\bar{V}_{tri}}{\left(\frac{T_s}{2}\right)} t_1 = V_{cA} \quad (4.9)$$

$$t_1 = \left(\bar{V}_{tri} + V_{cA}\right) \frac{\left(\frac{T_s}{2}\right)}{2\bar{V}_{tri}} \quad (4.10)$$

Από το Σχ.4.6(β) t_1 είναι η διάρκεια για την οποία $q_A = 1$ στο μισό της περιόδου $T_s/2$. Χρησιμοποιώντας τον ορισμό της Εξ.(4.3) λόγος κατάτμησης $d(t)$ μπορεί να εξαχθεί με τη βοήθεια της Εξ.(4.10) όπως φαίνεται στην Εξ.(4.11), η οποία είναι μια σημαντική σχέση μεταξύ του λόγου κατάτμησης και του σήματος ελέγχου του πόλου.

$$d(t) = \frac{t_1}{\left(\frac{T_s}{2}\right)} = \frac{\left(\bar{V}_{tri} + V_{cA}(t)\right)}{2\bar{V}_{tri}} = \frac{1}{2} + \frac{1}{2\bar{V}_{tri}} V_{cA}(t) \quad (4.11)$$

Χρησιμοποιώντας τις Εξ. (4.6) και (4.11) η σχέση μεταξύ του σήματος ελέγχου και της μέσης τιμής ανά περίοδο τάσης εξόδου του πόλου ισχύος μπορεί να προκύψει όπως φαίνεται από την Εξ.(4.12) που ακολουθεί.

$$\bar{V}_{AN}(t) = d(t)V_d = \frac{V_d}{2} + \frac{V_d}{2\bar{V}_{tri}}V_{cA}(t) \quad (4.12)$$

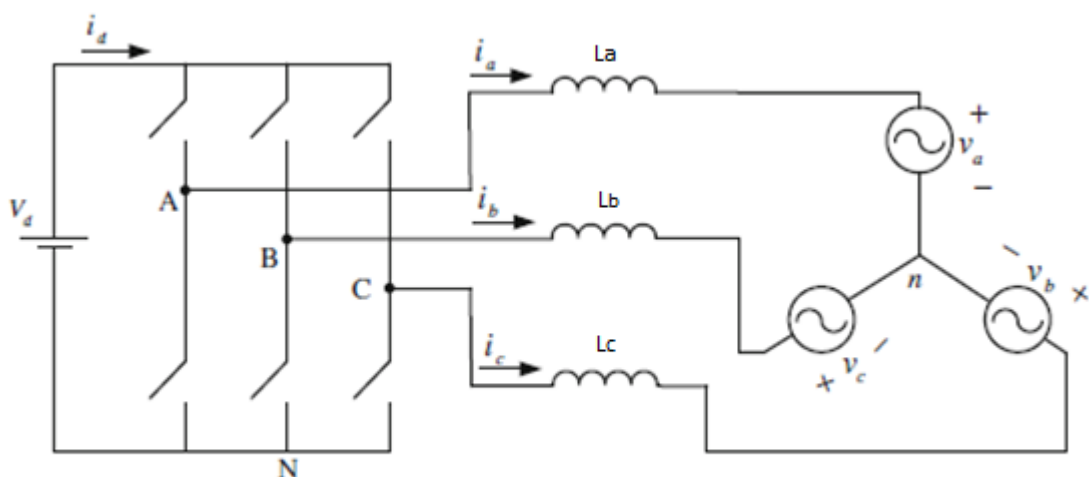
Για λόγους ευκολίας και απλότητας και χωρίς να χάνεται η ουσία, η κορυφή της τριγωνικής τάσης \bar{V}_{tri} θεωρείται μονάδα. Με αυτή την υπόθεση η τάση ελέγχου περιορίζεται να είναι $-1 \leq V_{cA}(t) \leq 1$ και η σχέση μεταξύ του σήματος τάσης και μέσης τιμής εξόδου τάσης του πόλου γίνεται :

$$\bar{V}_{AN}(t) = \frac{V_d}{2} + \frac{V_d}{2}V_{cA}(t) \quad (4.13)$$

Όπως φαίνεται και από την Εξ.(4.13) ο πόλος ισχύος ενισχύει την τάση ελέγχου V_{cA} με ένα συντελεστή $\frac{V_d}{2}$ και επίσης προσθέτει μια DC συνιστώσα αντιστάθμισης $\frac{V_d}{2}$.

4.5 ΤΡΙΠΟΛΙΚΟΙ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΙΣ ΓΙΑ ΤΡΙΦΑΣΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

Ο μετατροπέας τριών πόλων όπως φαίνεται στο Σχ.4.7 είναι μια συνηθισμένη τοπολογία σε DC-AC και AC-DC εφαρμογές. Αποτελεί σήμερα την πιο διαδεδομένη τοπολογία για τη διασύνδεση με το δίκτυο αιολικών ανεμογεννητριών με ΕΓΔΤ και μόνιμου μαγνήτη.



Σχήμα 4.7 : Τριπολικός μετατροπέας για τριφασικές εφαρμογές [7].

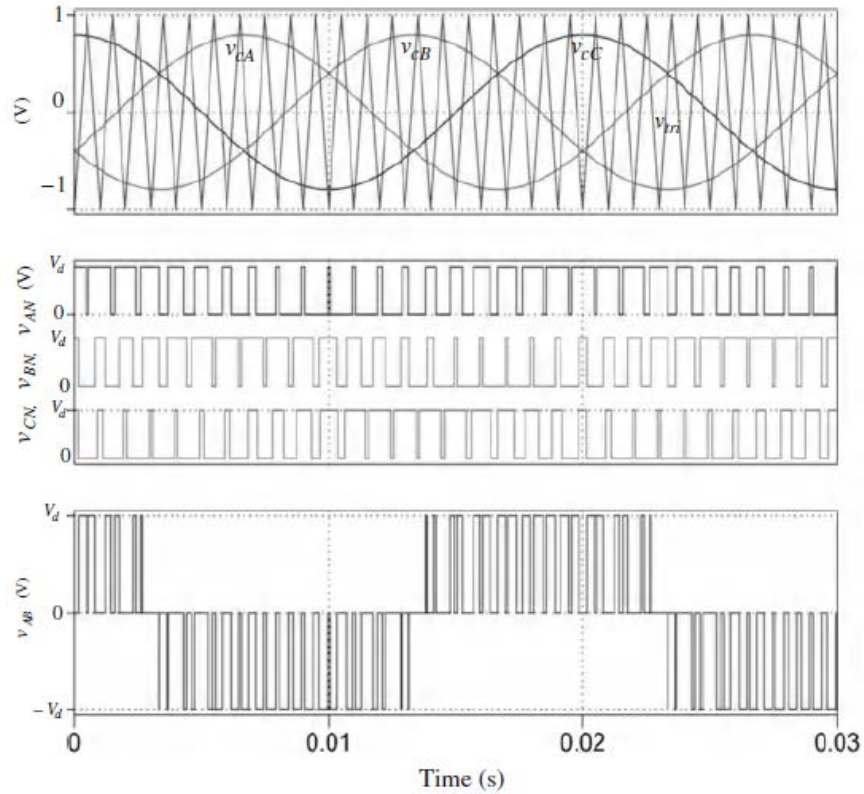
Οι περισσότερες εφαρμογές μετατροπεία τριών πόλων περιλαμβάνουν τη σύνθεση χαμηλής συχνότητας τριφασικών AC τάσεων από το DC-link. Η ροή ισχύος μπορεί να γίνεται από την πηγή AC προς το DC-link ή αντίστροφα με δυναμική εναλλαγή της κατεύθυνσης. Σε εφαρμογές κινητήρων η θεμελιώδης συχνότητα ποικίλει σε ένα μεγάλο εύρος από μηδέν έως και 100Hz. Σε φωτοβολταϊκές εφαρμογές αυτή η συχνότητα είναι του δικτύου των 50-60 Hz και σε αιολικές εφαρμογές η θεμελιώδης συχνότητα του μετατροπεία από τη μεριά του ρότορα κυμαίνεται από μερικά Hz ως μερικά δεκάδες Hz.

Σε μεθόδους παραγωγής ημιτονοειδούς διαμόρφωσης εύρους των παλμών (Sinusoidal Pulse Width Modulation-SPWM) με τριγωνική σύγκριση, ένας ελεγκτής παράγει τα τρία σήματα διαμόρφωσης, ένα για κάθε φάση, στην απαιτούμενη συχνότητα και με μια μετατόπιση φάσης των 120° όπως φαίνεται στις Εξ.(4.14). Αυτά τα τρία σήματα συγκρίνονται με μια κοινή τριγωνική κυματομορφή με σκοπό να λάβουμε το PWM παλμό για κάθε πόλο. Η διαδικασία της παραγωγής των PWM παλμών για τον τριπολικό μετατροπεία, οι προκύπτουσες τάσεις πόλων, και οι πολικές τάσεις παρουσιάζονται στο Σχ.4.8 [7].

$$\begin{aligned}
 V_{cA}(t) &= V_c \cos(\omega t)V \\
 V_{cB}(t) &= V_c \cos(\omega t - 120^\circ)V \\
 V_{cC}(t) &= V_c \cos(\omega t - 240^\circ)V
 \end{aligned}
 \tag{4.14}$$

όπου ω είναι η θεμελιώδης συχνότητα.

Παρακάτω δίνεται η μέση τιμή της τάσης για κάθε φάση. Υποθέτουμε ότι $V_{tri} = 1V$ και $V_c \leq 1V$.

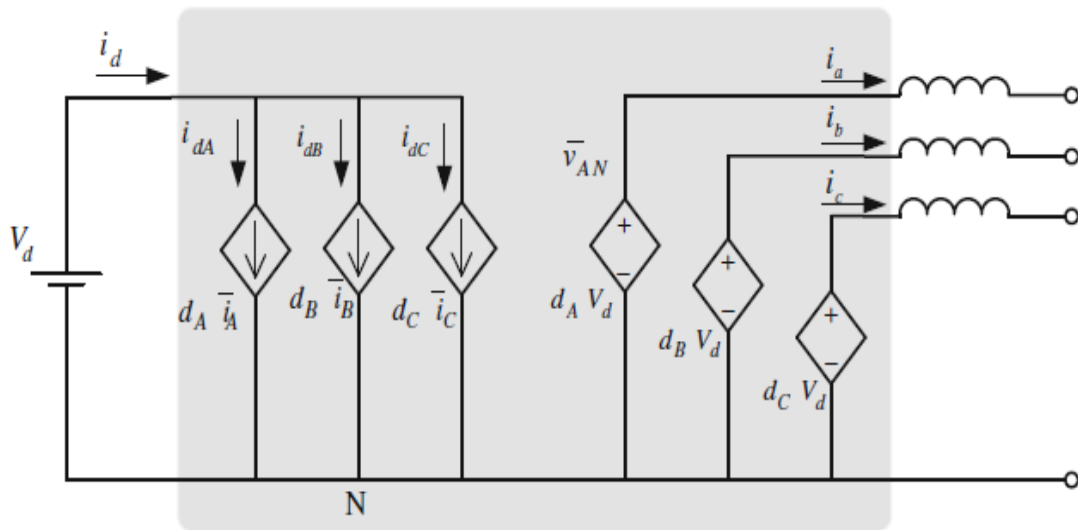


Σχήμα 4.8 : Διαμόρφωση εύρους παλμών τριών φάσεων με σύγκριση τριγωνικού σήματος [7].

$$\begin{aligned}
 \bar{V}_{AN}(t) &= \frac{V_d}{2} + \frac{V_d}{2} V_C \cos(\omega t) V \\
 \bar{V}_{BN}(t) &= \frac{V_d}{2} + \frac{V_d}{2} V_C \cos(\omega t - 120^\circ) V \\
 \bar{V}_{CN}(t) &= \frac{V_d}{2} + \frac{V_d}{2} V_C \cos(\omega t - 240^\circ) V
 \end{aligned}
 \tag{4.15}$$

Οι μέσες τιμές πολικών τάσεων μπορούν να εξαχθούν από τις Εξ.(4.15) λαμβάνοντας υπόψη τη διαφορά των αντίστοιχων τάσεων πόλων. Για παράδειγμα η μέση τιμή (πολική) \bar{V}_{AB} δίνεται από την Εξ.(4.16). Όπως διαπιστώνεται η DC συνιστώσα τάσης $\frac{V_d}{2}$ του κάθε πόλου δεν περιέχεται στις πολικές, και η μέγιστη πολική τιμή (μέση) που μπορεί να παραχθεί από τον τριπολικό μετατροπέα είναι $\frac{\sqrt{3}}{2} V_d$.

$$\bar{V}_{AB}(t) = \frac{V_d}{2} V_c [\cos(\omega t) - \cos(\omega t - 120^\circ)] = \frac{\sqrt{3}}{2} V_d V_c \cos(\omega t + 30^\circ) \text{ V} \quad (4.16)$$



Σχήμα 4.9 : Μοντέλο τριπολικού μετατροπέα [7].

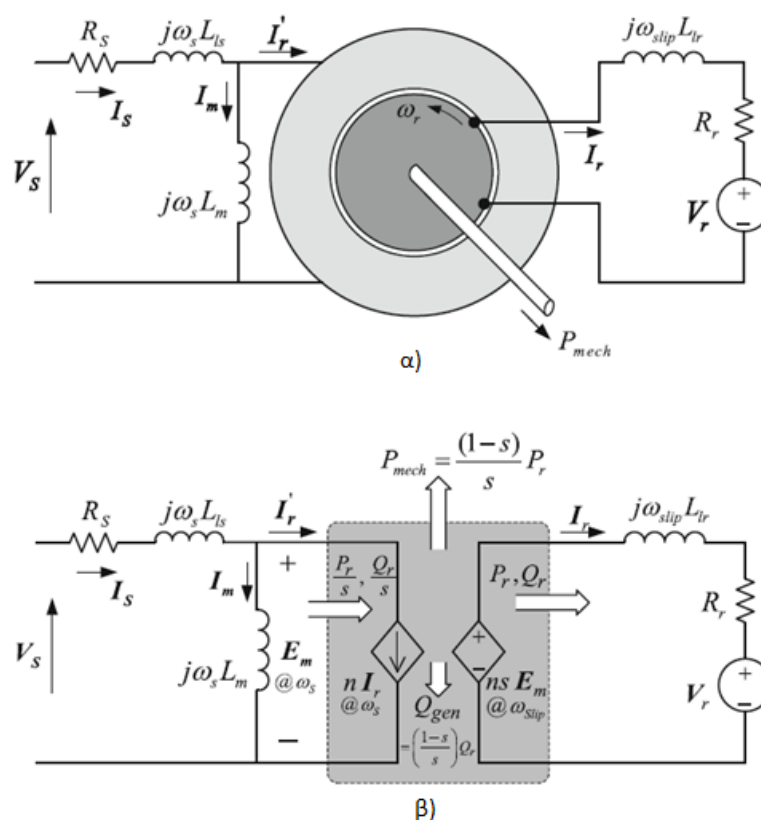
Το πλήρες μοντέλο τριπολικού μετατροπέα που παρουσιάζεται στο Σχ.4.9 και μπορεί να εξαχθεί από το μοντέλο του μονού πόλου. Το ρεύμα από το DC-link είναι το άθροισμα των επί μέρους ρευμάτων των τριών πόλων. Έχει μια DC συνιστώσα, μια συνιστώσα συχνότητας μεταγωγής και τις αρμονικές. Η κυματομορφή CCA του ρεύματος DC-link επομένως θα έχει μια μόνο DC τιμή που θα είναι η συνολική ισχύς διαιρούμενη με το μέγεθος τάσης του DC-link. Έτσι το μέγεθος χωρητικότητας των φίλτρων που θα χρειαστεί το DC-link θα είναι σημαντικά χαμηλότερο από του μονοφασικού μετατροπέα.

5.ΕΛΕΓΧΟΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ

5.1 ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΜΟΝΙΜΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΕΓΔΤ ΜΕ ΙΣΟΔΥΝΑΜΟ ΚΥΚΛΩΜΑ ΑΝΑ ΦΑΣΗ

5.1.1 Ανάπτυξη ισοδύναμου κυκλώματος ανά φάση

Στο Σχ.5.1 παρουσιάζεται το ισοδύναμο κύκλωμα μιας φάσης της επαγωγικής γεννήτριας. R_s και R_r είναι οι αντιστάσεις τυλιγμάτων στάτη και ρότορα αντίστοιχα, L_{ls} και L_{lr} οι αυτεπαγωγές τυλιγματος στάτη και ρότορα, και L_m η αμοιβαία επαγωγή ανοιγμένη στη μεριά του στάτη. V_s είναι η τάση δικτύου που εφαρμόζεται στο στάτη και V_r είναι η τάση που εφαρμόζεται στο ρότορα απο το μετατροπέα απο τη μεριά του ρότορα, και τα δύο ως διανύσματα. I_s και I_r είναι τα φασικά ρεύματα στάτη και ρότορα αντίστοιχα. Οι απώλειες πυρήνα θεωρούνται αμελητέες στο ισοδύναμο κύκλωμα.



Σχήμα 5.1 : Ανάπτυξη ισοδύναμου κυκλώματος ΕΓΔΤ ανά φάση [7].

Η συχνότητα των μεγεθών από τη μεριά του ρότορα (V_s, I_s, I_m) είναι ω_s rad/sec και η συχνότητα των μεγεθών του ρότορα (V_r, I_r) είναι $s\omega_s = \omega_{slip}$ rad/sec. Οι τάσεις επίσης κλιμακώνονται από έναν συντελεστή s . Ο στάτης είναι στάσιμος (στατικός) και για αυτό η γωνιακή ταχύτητα στο πεδίο ορισμού του είναι ω_s ενώ ο ρότορας περιστρέφεται σε γωνιακή ταχύτητα, και η γωνιακή ταχύτητα ως προς οποιοδήποτε πεδίο είναι $\omega_s - \omega_r = s\omega_s$. Επομένως, μεγέθη τάσης στο στάτη όταν αναφέρονται στη μεριά του ρότορα πολλαπλασιάζονται με συντελεστή s . Επί πλέον αν ο λόγος μετασχηματισμού τυλιγμάτων μεταξύ στάτη και ρότορα είναι $N_r/N_s = n$ τότε η τάση του ρότορα κλιμακώνεται από έναν επιπλέον συντελεστή n . Έτσι οι τάσεις όταν αναφέρονται στη μεριά του ρότορα πολλαπλασιάζονται από έναν συντελεστή ns όπως φαίνεται και στο Σχ.5.1(β)

Σε αντίθεση με τα μεγέθη τάσης, τα μεγέθη ρεύματος δεν κλιμακώνονται με τον συντελεστή s . Από τη στιγμή που μόνο οι τάσεις κλιμακώνονται με συντελεστή s και όχι τα ρεύματα, οι αντιστάσεις κλιμακώνονται με συντελεστή s όταν η μεταφορά είναι από τον στάτη στο ρότορα και $1/s$ όταν είναι από τον ρότορα στον στάτη.

Σε μια επαγωγική γεννήτρια η ισχύς που δημιουργείται από τα τυλίγματα του στάτη και του ρότορα δεν είναι ίδια, αποτέλεσμα που εξάγεται από το ότι μόνο η τάση έχει κλιμάκωση και όχι το ρεύμα, αλλά και από το ότι η τιμή της ισχύος (ενεργού και άεργου) από δύο διαφορετικές πηγές δεν είναι ίδια. Η ισχύς διακένου στα τυλίγματα του στάτη P_g και η ισχύς διακένου στα τυλίγματα του ρότορα P_r συσχετίζονται όπως φαίνεται στην παρακάτω Εξ. (5.1) και όπως φαίνεται και στο Σχ.5.1(β).

$$P_r = sP_g \quad (5.1)$$

Η διαφορά παραγόμενης ενεργούς ισχύος μεταξύ των τυλιγμάτων είναι η μηχανική ισχύς η οποία απορροφάται ή παράγεται ανάλογα με το αν η μηχανή λειτουργεί ως γεννήτρια ή κινητήρας όπως δίνεται από την Εξ.(5.2) και παρουσιάζεται στο Σχ.5.1(β). Αυτή είναι η απαιτούμενη ισχύς για να λειτουργήσει ο ρότορας σε ταχύτητα ω_r και σε ηλεκτρομαγνητική ροπή T_{em} .

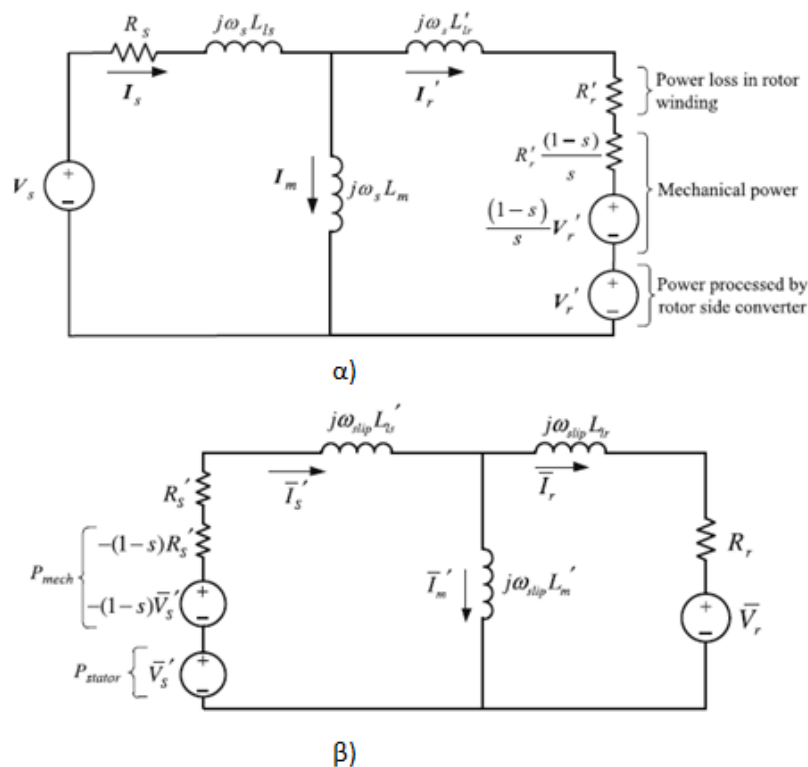
$$P_g - P_r = (1-s)P_g = \left(\frac{1-s}{s}\right)P_r = P_{mech} = \omega_r T_{em} \quad (5.2)$$

Παρόμοια έκφραση μπορεί να προκύψει για την άεργο ισχύ όπως φαίνεται στην Εξ.(5.3). Είναι μια σημαντική εξίσωση καθώς δείχνει ότι η άεργος ισχύς στο στάτη μπορεί να ελεγχθεί από μια μικρή έκχυση άεργου ισχύος στο ρότορα. Σε αντίθεση με την ενεργό ισχύ, όπου η διαφορά μεταξύ P_r και P_g είναι η μηχανική ισχύς που παράγεται ή απορροφάται, στην περίπτωση της άεργου ισχύος η διαφορά μεταξύ Q_r και Q_g προέρχεται από την ΕΓΔΤ.

$$Q_r = sQ_g$$

$$Q_g - Q_r = (1-s)Q_g = \left(\frac{1-s}{s}\right)Q_r = Q_{gen} \quad (5.3)$$

Με βάση τα παραπάνω, το ανά φάση ισοδύναμο κύκλωμα μπορεί προσδιοριστεί με αναφορά ως προς τη μεριά του ρότορα όπως φαίνεται στο Σχ.5.2(α) και ως προς τη μεριά του στάτη στο Σχ.5.2(β). Αυτά τα δύο ισοδύναμα κυκλώματα δίνουν παρόμοια αποτελέσματα, για μελέτες όμως συστημάτων ισχύος το κύκλωμα ως προς το στάτη είναι πιο εύκολο να χρησιμοποιηθεί καθώς μας δίνει απευθείας το ρεύμα, ενεργό και άεργο ισχύ που μπαίνει στο δίκτυο. Το άλλο κύκλωμα που έχει ως βάση αναφοράς το ρότορα έχει το πλεονέκτημα τη μη ανάγκη διαίρεσης αντίστασης ρότορα και τάση μετατροπέα με μηδέν όταν η ολίσθηση είναι μηδέν. Και στα δύο ισοδύναμα κυκλώματα, ο λόγος σπειρών στάτη και ρότορα έχει λογιστεί με κατάλληλες κλίμακες συντελεστών ώστε οι εξισώσεις να γίνουν πιο ευπροσάρμοστες. Για αυτό στο κύκλωμα με βάση αναφοράς το στάτη του Σχ.5.2(α) είναι : $V'_r = V_r/n$, $L'_{lr} = \frac{L_{lr}}{n^2}$ και $R' = \frac{R_r}{n^2}$ και στο κύκλωμα με βάση αναφοράς το ρότορα του Σχ.5.2(β) είναι : $V'_s = nV_s$, $L'_{ls} = n^2L_{ls}$ και $R'_s = n^2R_s$ όπου n είναι ο λόγος σπειρών ρότορα προς στάτη $\frac{N_r}{N_s}$.



Σχήμα 5.2 : Ισοδύναμο κύκλωμα ΕΓΔΤ ανά φάση α) με αναφορά στον στάτη και β) με αναφορά στον ρότορα [7].

Στο Σχ.5.2(α) η αντίσταση ρότορα ως προς τη μεριά του στάτη $\frac{R'_r}{s}$ και είναι το άθροισμα δύο συνιστωσών R'_r και $R'_r \frac{(1-s)}{s}$. Παρόμοια η επαγόμενη τάση $\frac{V'_r}{s}$ είναι το άθροισμα V'_r και $V'_r \frac{(1-s)}{s}$. Οι απώλειες ισχύος στην αντίσταση R'_r αντιστοιχούν στις απώλειες ισχύος του τυλίγματος ρότορα εξαιτίας του ρεύματος ρότορα, η ισχύς από την πηγή τάσης V'_r αντιστοιχεί στην πραγματική ισχύ (που απορροφάται ή προσδίδεται) από το μετατροπέα στη μεριά του ρότορα, και το άθροισμα της ισχύος στην αντίσταση $R'_r \frac{(1-s)}{s}$ και της πηγής τάσης $V'_r \frac{(1-s)}{s}$ αντιστοιχεί στην πραγματική μηχανική ισχύ και είναι σύμφωνη με την έκφραση μηχανικής ισχύος της Εξ.(5.2). Γι' αυτό, η έκφραση της συνολικής μηχανικής ισχύος λαμβάνοντας υπόψη και τις τρεις φάσεις, και της συνολικής ροπής δίνονται από τις Εξ. (5.4) και (5.5) αντίστοιχα.

$$P_{mech} = 3|I'_r|^2 R'_r \left(\frac{1-s}{s} \right) + 3R_e \left[V'_r \frac{(1-s)}{s} I_r^* \right] \quad (5.4)$$

$$T_{em} = \frac{P_{mech}}{\omega_r} = \frac{1}{\omega_r} \left[3|I'_r|^2 R'_r \left(\frac{1-s}{s} \right) + 3R_e \left[V'_r \frac{(1-s)}{s} I_r^* \right] \right] \quad (5.5)$$

5.1.2 Χαρακτηριστική ταχύτητας-ροπής για διαφορετικές τάσης ρότορα

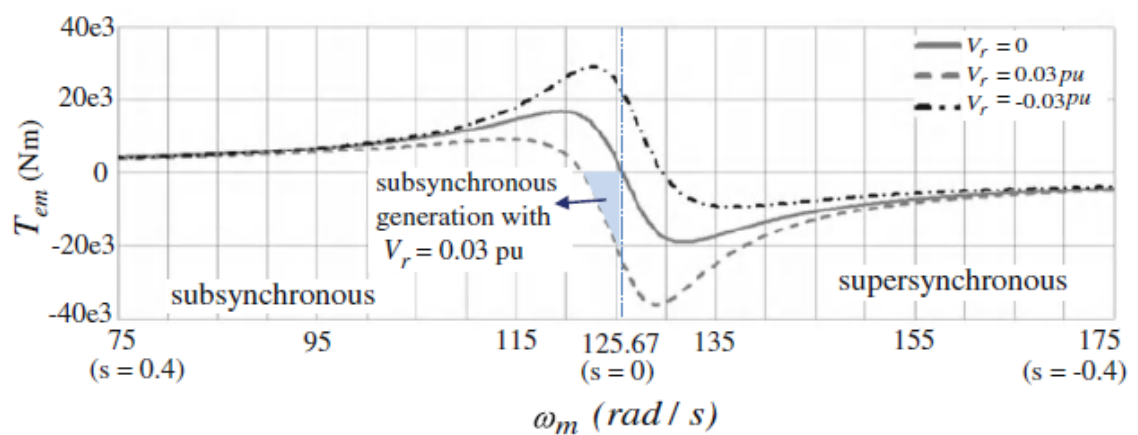
Το Σχ.5.3 αποτυπώνει τη χαρακτηριστική καμπύλη ταχύτητας-ροπής για ένα εύρος ολίσθησης από -0.4 ως 0.4. Η καμπύλη στη μέση με $V_r = 0$ είναι η ίδια με αυτή μιας επαγωγικής μηχανής κλειστού κλωβού (squirrel cage induction machine), με θετική ολίσθηση για υποσύγχρονη λειτουργία αποδίδοντας θετική ροπή και συνθήκη κινητήρα, και αρνητική ολίσθηση για υπερσύγχρονη λειτουργία αποδίδοντας αρνητική ροπή και συνθήκη γεννήτριας.

Τιμές για την καμπύλη του Σχ.5.3 μπορούν να προκύψουν χρησιμοποιώντας την Εξ.(5.5) για ολίσθηση που κυμαίνεται από -1 ως 1 σε τρεις διαφορετικές σταθερές τιμές τάσης μετατροπέα 0, 0.03 και -0.03 p.u.. Οι τάσεις του μετατροπέα τάσης είναι σε φάση με την τάση του στάτη σε αυτό το σχήμα και ο λόγος αναλογίας μεταξύ τυλιγμάτων στάτη και ρότορα είναι 1.

Το ρεύμα ρότορα που χρειάζεται για την Εξ.(5.5) μπορεί να προκύψει εφαρμόζοντας θεώρημα Thevenin στο ισοδύναμο κύκλωμα του Σχ.5.2(α). Το αποτέλεσμα του ρεύματος ρότορα ως συνάρτηση της ολίσθησης δίνεται στην παρακάτω Εξ.(5.6)

$$I_r'(s) = \frac{V_{Th} - \frac{V_r'}{s}}{\frac{R_r'}{s} + jX_{lr}' + Z_{Th}} \quad (5.6)$$

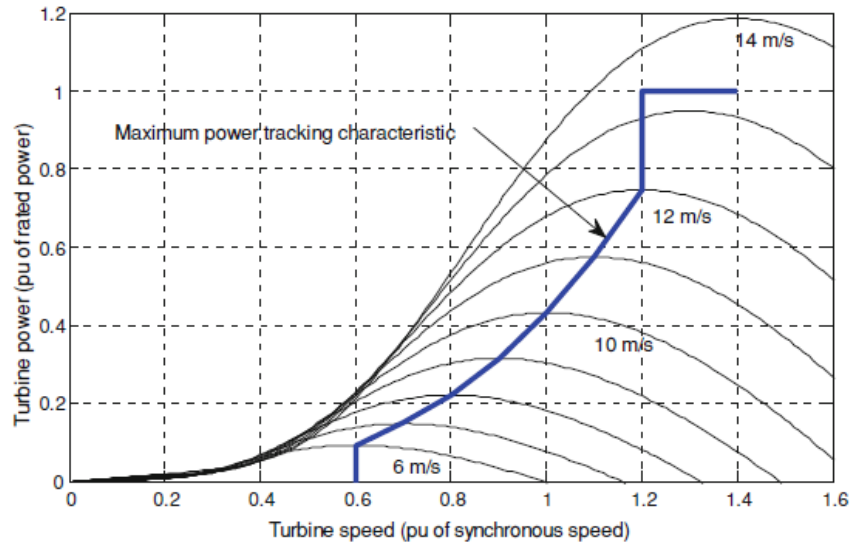
$$\text{όπου, } V_{Th} = \frac{jX_m}{R_s + j(X_{ls} + X_m)} V_s \quad \text{και} \quad Z_{Th} = jX_m \parallel (R_s + jX_{ls})$$



Σχήμα 5.3 : Χαρακτηριστική ροπής-ταχύτητας μιας ΕΓΔΤ [7].

5.1.3 Ανάλυση μόνιμης κατάστασης

Όπως έχουμε ήδη αναφέρει η Α/Γ μπορεί να λειτουργεί υπό συνθήκες μέγιστης δυνατής παραγόμενης ισχύος για κάθε ταχύτητα ανέμου. Στο Σχ.5.4 δίνονται τα χαρακτηριστικά μιας ΕΓΔΤ και τα σημεία μέγιστης ισχύος για ταχύτητες ανέμου 6 ως 14 m/sec. Όπως φαίνεται και από το Σχ.5.4 για κάθε ταχύτητα ανέμου, υπάρχει μια μοναδική ταχύτητα ρότορα για την οποία η ισχύς είναι μέγιστη. Η χαρακτηριστική καμπύλη λειτουργίας μέγιστου σημείου απόδοσης αντιστοιχεί στη λειτουργία της ΕΓΔΤ στη βέλτιστη ταχύτητα ρότορα για τις διάφορες τιμές ταχύτητας ανέμου.



Σχήμα 5.4 : Χαρακτηριστικά ανεμομνητήρα και σημεία μέγιστης ισχύος [7].

Όπως φαίνεται και από την Εξ.(3.7) η ισχύς είναι ανάλογη με την τρίτη δύναμη της ταχύτητας ανέμου. Ο συντελεστής ισχύος C_p διατηρείται σταθερός στη βέλτιστη τιμή του κρατώντας την ταχύτητα ακροπτερυγίου λ σταθερή. Έτσι η ταχύτητα ρότορα είναι περίπου ανάλογη της ταχύτητας ανέμου, δίνοντας με αυτό τον τρόπο την εξίσωση μεταξύ ταχύτητα ρότορα και ισχύος για τα μέγιστα σημεία της χαρακτηριστικής όπως φαίνεται και από την Εξ.(5.7)

$$P_{mech} = k_{opt} \omega_r^3 \quad (5.7)$$

Η σταθερά k_{opt} εξαρτάται από παραμέτρους όπως ταχύτητα ανέμου στην οποία βρίσκεται η ονομαστική ισχύ, σύγχρονη συχνότητα δικτύου, ολίσθηση στη μέγιστη ισχύ, αριθμό πόλων και αναλογία κιβωτίου ταχυτήτων. Η σταθερά k_{opt} δίνεται από την παρακάτω Εξ.(5.8) όπου $s|_{P_{max}}$ είναι η επιθυμητή τιμή ολίσθησης σε ονομαστική ισχύ και n είναι η απόδοση της ΕΓΔΤ στην ονομαστική ισχύ.

$$k_{opt} = \frac{P_{max}/n}{\left[\left(1 - s|_{P_{max}} \right) \omega_s \right]^3} \quad (5.8)$$

Υποθέτοντας συντελεστή ισχύος λειτουργίας μονάδα στους ακροδέκτες τυλίγματος του στάτη αρχικά, τα επόμενα βήματα δίνουν το απαιτούμενο μέγεθος και γωνία φάσης τάσης που θα πρέπει να εφαρμοστεί από το μετατροπέα στη μεριά του ρότορα, την ενεργό και άεργο ροή ισχύος μέσα από το μετατροπέα καθώς και τα ρεύματα ρότορα για ένα μεγάλο εύρος διακύμανσης ολίσθησης.

Αναφορικά με το Σχ.5.2(α)

$$I_s = \frac{P_s/3}{V_s} = \frac{nk_{opt}\omega_r^3}{3(1-s)} \frac{1}{V_s} \quad (5.9)$$

Στην Εξ.(5.9), η απόδοση της ΕΓΔΤ σε όλο το εύρος λειτουργίας υποθέτουμε ότι είναι σταθερή για την ευκολία της ανάλυσης. Οι αποδόσεις στο στάτη και στο ρότορα επίσης υποθέτουμε ότι είναι ίσες. Για το αντικείμενο της ανάλυσης αυτής, η μέθοδος που ακολουθείται δίνει αποτελέσματα που είναι πολύ κοντά με αυτά σύγκρισης πιο περίτεχνων και επαναληπτικών μεθόδων για τον υπολογισμό του I_s .

$$I'_r = I_s - I_m$$

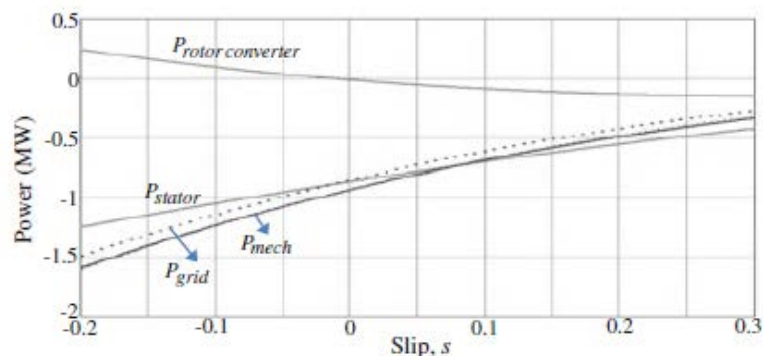
$$\text{όπου, } I_m = \frac{E_m}{jX_m} \text{ και}$$

$$E_m = V_s - I_s(R_s + jX_{ls}) \quad (5.10)$$

$$V'_r = s \left(E_m - I'_r \left(\frac{R'_r}{s} + jX'_{lr} \right) \right) \quad (5.11)$$

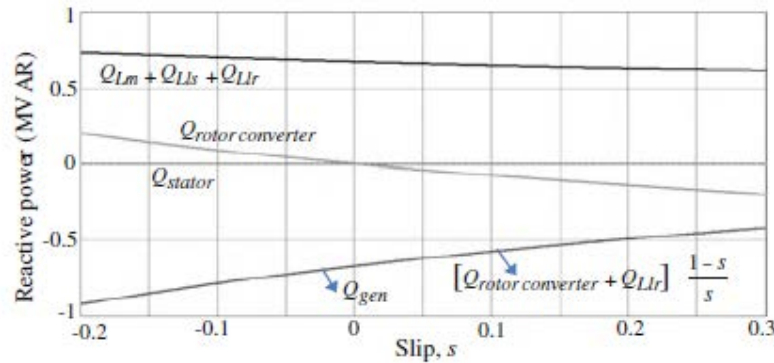
$$P_{r,conv} = 3\text{Re}(V_r I_r^*) \text{ και } Q_{r,conv} = 3\text{Im}(V_r I_r^*) \quad (5.12)$$

Στο Σχ.5.5 [7] παρουσιάζεται σε διάγραμμα η μηχανική ισχύς, ισχύς στάτη, ισχύς μετατροπέα από τη μεριά του ρότορα, και ισχύς από το δίκτυο για διάφορες τιμές ολίσθησης που κυμαίνεται από -0.2 (μέγιστη ισχύς) ως 0.3 (ελάχιστη ισχύς). Για την ισχύ μετατροπέα από τη μεριά του ρότορα, θετικές τιμές σημαίνει ροή ισχύος από το ρότορα προς το δίκτυο. Στο υπερσύγχρονο κομμάτι λειτουργίας ολίσθησης μεταξύ -0.2 και 0, η ισχύς του μετατροπέα από τη μεριά του ρότορα είναι θετική και έτσι ισχύς διαχέεται από το ρότορα προς το δίκτυο μέσα από το μετατροπέα ισχύος.



Σχήμα 5.5 : Ισχύς μηχανική, στάτη, δικτύου και μετατροπέα από τη μεριά του ρότορα για διάφορες τιμές ολίσθησης που αντιστοιχούν για μέγιστη απομάστευση ισχύος ανέμου σε συντελεστή ισχύος μονάδα [7].

Για το υποσύγχρονο κομμάτι λειτουργίας με ολίσθηση μεταξύ 0 και 0.3 η ισχύς του μετατροπέα από τη μεριά του ρότορα είναι αρνητική και έτσι ισχύς ρέει από το δίκτυο προς το ρότορα μέσα από το μετατροπέα της μεριάς του δικτύου. Πρέπει να σημειωθεί ότι εξαιτίας των μικρών απωλειών στο τύλιγμα του ρότορα, η μετάβαση από τη θετική σε αρνητική ισχύ στο μετατροπέα από τη μεριά του ρότορα λαμβάνει χώρα σε ολίσθηση -0.0013 και όχι σε τιμή μηδέν.



Σχήμα 5.6 : Άεργος ισχύ στην ΕΓΔΤ [7].

Η άεργος ισχύς του στάτη Q_{stator} , η άεργος ισχύς που απορροφάται από το μετατροπέα του ρότορα $Q_{rotor,converter}$, και η άεργος ισχύς που καταναλώνεται στη μαγνήτιση και στις αυτεπαγωγές τυλίγματος της ΕΓΔΤ, Q_L , μαζί με την εσωτερική παραγόμενη άεργο ισχύ της ΕΓΔΤ, Q_{gen} παρουσιάζονται στο Σχ.5.6 [7]. Η άεργος ισχύς Q_L που δίνεται από την Εξ.(5.13) κυριαρχείται από την άεργο ισχύ που καταναλώνεται από την αμοιβαία επαγωγή L_m , και έτσι δεν αλλάζει σημαντικά στο εύρος λειτουργίας όπως φαίνεται και από το Σχ.5.6

$$Q_L = Q_{L_m} + Q_{L_s} + Q_{L_r} = 3 \left[|I_m|^2 \omega_s L_m + |I_s|^2 \omega_s L_s + |I_r|^2 \omega_{slip} L_r \right] \quad (5.13)$$

Η εσωτερική παραγόμενη άεργος ισχύς Q_{gen} είναι ίση με το άθροισμα των άεργων ισχύων που καταναλώνονται από μαγνήτιση και αυτεπαγωγές τυλίγματος, την άεργο ισχύ που απορροφάται από το δίκτυο στους ακροδέκτες τυλίγματος του στάτη και από το μετατροπέα του ρότορα.

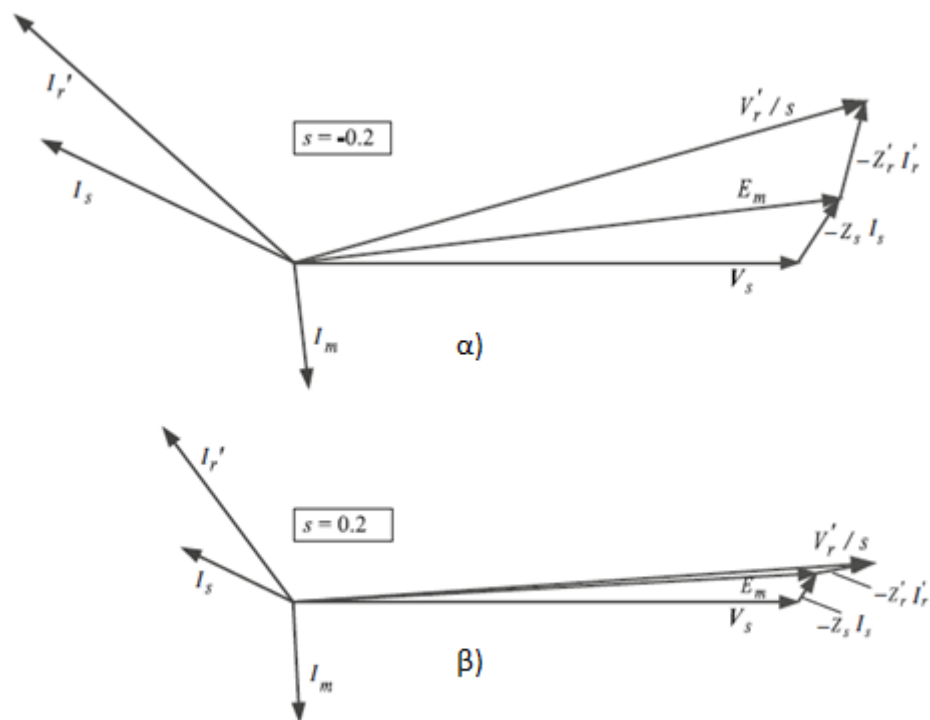
$$-Q_{gen} = Q_L + Q_{rotor,converter} - Q_{stator} \quad (5.14)$$

Έτσι με αυτά που αναφέρθηκαν στην ενότητα 5.1.1 η Q_{gen} δίνεται από την παρακάτω Εξ.(5.15).

$$Q_{gen} = \left(\frac{1-s}{s}\right) Q_{r,gap} = \left(\frac{1-s}{s}\right) (Q_{rotor,convertet} + Q_{Llr}) \quad (5.15)$$

$$= (1-s) Q_{s,gap} = (1-s) [Q_{stator} - Q_{Lm} - Q_{Lls}]$$

Στο Σχ.5.6 παρουσιάζεται η Q_{gen} από τις Εξ. (5.14) και (5.15). Να σημειωθεί ότι στο σχήμα αυτό φαίνεται ότι η ενέργεια που χρειάζεται ο μετατροπέας από τη μεριά του ρότορα είναι ένα κλάσμα της συνολικά απαιτούμενης άεργου ισχύος. Για λειτουργία με συντελεστή ισχύος μονάδα στο στάτη, απορροφά άεργο ισχύ κατά τη διάρκεια αρνητικής ολίσθησης, και αποδίδει άεργο ισχύ σε θετική ολίσθηση. Σε αντίθεση με την ενεργό ισχύ, όπου η ισχύς που απορροφάται από το μετατροπέα του ρότορα είναι ίση με την ισχύ που αποδίδει ο μετατροπέας από τη μεριά του δικτύου (αμελώντας τις απώλειες στον μετατροπέα), η άεργος ισχύς στους δυο μετατροπείς ρότορα και δικτύου είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους.



Σχήμα 5.7 : Φασικό διάγραμμα ΕΓΔΤ σε λειτουργία unity power factor στα τερματικά του στάτη **α)** υπερσύγχρονα και ολίσθηση -0.2 **β)** υποσύγχρονα και ολίσθηση +0.2

Στο Σχ.5.7(α) παρουσιάζεται το διανυσματικό διάγραμμα βασισμένο στο ισοδύναμο κύκλωμα του Σχ.5.2(α) και το οποίο αντιστοιχεί σε λειτουργία με συντελεστή ισχύος μονάδα, σε ολίσθηση -0.2 για υπερσύγχρονη λειτουργία της ονομαστικής τιμής. Το Σχ.5.7(β) δείχνει το διανυσματικό διάγραμμα σε ολίσθηση +0.2 και το οποίο αντιστοιχεί σε μικρότερη απομάστευση ισχύος από τον άνεμο. Να

σημειωθεί ότι η ποσότητα $\frac{V_r'}{s}$ παραμένει θετική και για υπερσύγχρονη και για υποσύγχρονη κατάσταση λειτουργίας εξαιτίας της κλιμάκωσης με s , αλλά η τάση του μετατροπέα ρότορα V_r αλλάζει πολικότητα ως προς την τάση του στάτη ανάλογα με την κατάσταση λειτουργίας.

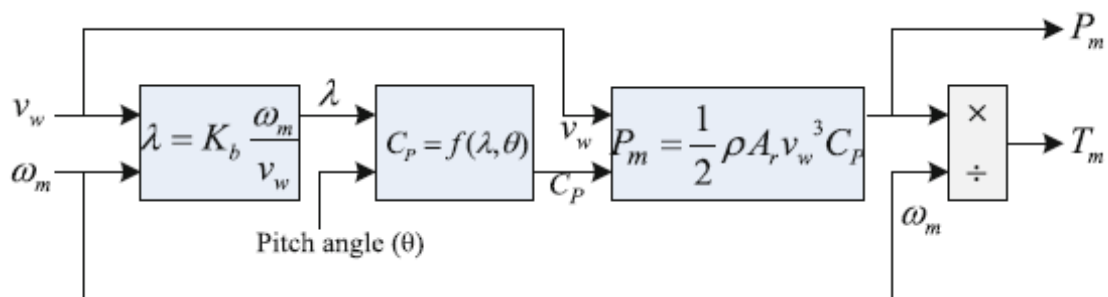
Για έναν αυθαίρετο συντελεστή ισχύος στο στάτη η Εξ.(5.9) μπορεί να τροποποιηθεί όπως φαίνεται στην Εξ.(5.16)

$$I_s = \frac{P_s/3}{V_s \cos(\theta_{I_s})} \angle \pm \theta_{I_s} = \frac{nk_{opt}\omega_r^3}{3(1-s)} \frac{1}{V_s \cos(\theta_{I_s})} \angle \pm \theta_{I_s} \quad (5.16)$$

5.2 ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΓΔΤ ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΕΛΕΓΚΤΩΝ

5.2.1 Αναφορές ενεργού και άεργου ισχύος

Η ροπή ή ενεργός ισχύς αναφοράς για τον έλεγχο της ΕΓΔΤ λαμβάνεται κυρίως από τον έλεγχο του ανεμοκινητήρα. Στόχος του ελέγχου είναι να μεγιστοποιήσει την απομάστευση ενέργειας από τον άνεμο κατά τη λειτουργία εντός του επιτρεπόμενου εύρους ταχυτήτων.

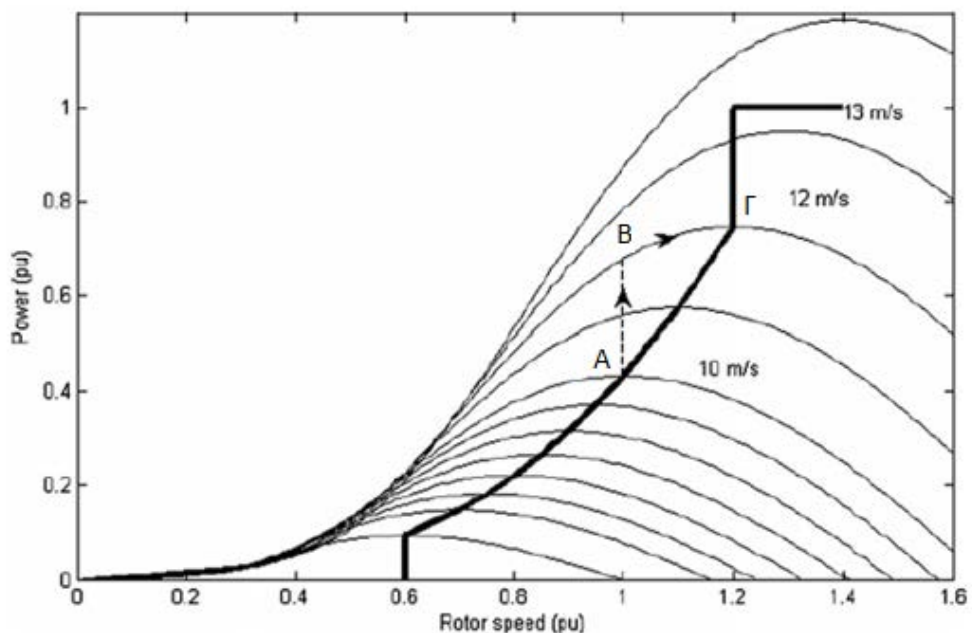


Σχήμα 5.8 : Μοντελοποίηση ισχύς ανέμου [7].

Όταν η διαθέσιμη ισχύς ανέμου είναι μεγαλύτερη από την ονομαστική ισχύ της Α/Γ, ο έλεγχος πτερυγίων ενεργοποιείται ώστε να περιορίσει την ισχύ και την ταχύτητα του ανεμοκινητήρα. Κάτω από την ονομαστική ισχύ, η ηλεκτρική ισχύς ή ροπή ελέγχεται με ποικίλους τρόπους ώστε να πετύχει ανίχνευση μέγιστου σημείου απόδοσης (maximum power tracking-MPP) όπως περιγράφεται παρακάτω.

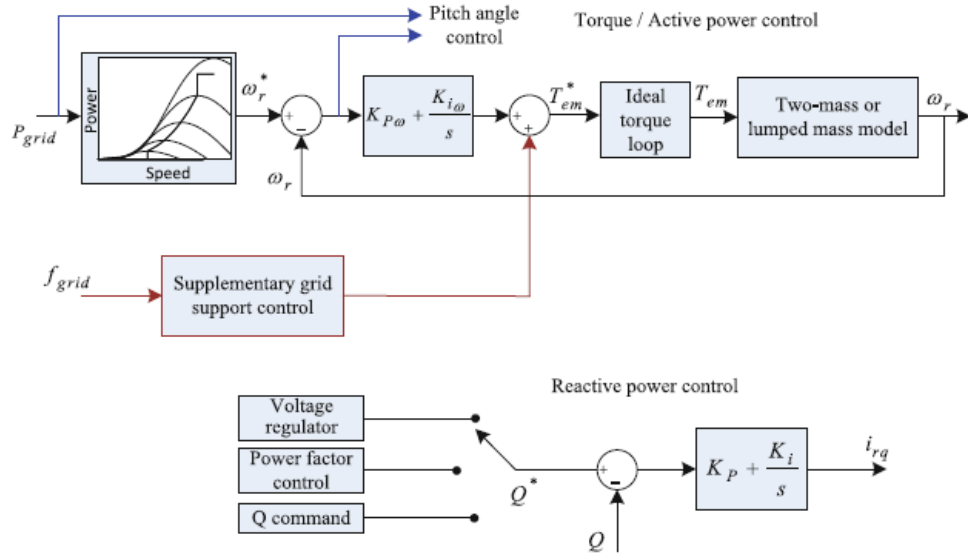
Η μοντελοποίηση της ισχύος ανέμου βασιζόμενη στην ταχύτητα ανέμου και τη γωνιακή ταχύτητα παρουσιάζεται στο Σχ.5.8 [7]. Η μηχανική ισχύς, που δίνεται από την Εξ.(3.7), εξαρτάται από τον συντελεστή C_p , ο οποίος είναι μια συνάρτηση της ταχύτητας ακροπτερυγίου λ για μια γωνία πτερυγίων β . Η ταχύτητα του ρότορα συνεχώς προσαρμόζεται, καθώς η ταχύτητα ανέμου διαρκώς αλλάζει, με σκοπό να κρατήσει το C_p σε βέλτιστη τιμή και την ισχύ εξόδου σε μέγιστη τιμή.

Έτσι, μία από τις μεθόδους ελέγχου είναι να δοθεί η εντολή ισχύος (power command) ως συνάρτηση της ταχύτητας ρότορα. Για παράδειγμα, ας υποθέσουμε το σημείο λειτουργίας A του Σχ.5.9 στην ταχύτητα ανέμου των 10 m/sec. Αν η ταχύτητα ανέμου αυξηθεί στα 12 m/sec, η ισχύς από τον άνεμο αυξάνεται όπως φαίνεται στο σημείο B ενώ η ηλεκτρική ισχύς εξόδου δεν έχει ακόμα αυξηθεί. Αυτό επιταχύνει την ταχύτητα του ρότορα, και έτσι και την εντολή power command. Το σημείο λειτουργίας μετατοπίζεται επάνω στην χαρακτηριστική αντιστοιχίζοντας τώρα το σημείο λειτουργίας των 12 m/sec μέχρι να φτάσει το σημείο Γ, όπου η ηλεκτρική ισχύς έχει αυξηθεί με τη μέγιστη δυνατή τιμή για ταχύτητα ανέμου 12 m/sec.



Σχήμα 5.9 : Παράδειγμα ελέγχου ανεμοκινητήρα [7].

Μια ισοδύναμη μέθοδος ελέγχου ανεμοκινητήρα είναι να λάβουμε την ταχύτητα αναφοράς του ρότορα από τη χαρακτηριστική καμπύλη ισχύος ως συνάρτηση της μετρήσιμης ηλεκτρικής ισχύος, και να ρυθμιστεί η ταχύτητα του ρότορα στην τιμή αναφοράς μέσα από έναν κλειστό βρόχο ελέγχου. Το δομικό διάγραμμα αυτού του ελέγχου παρουσιάζεται στο Σχ.5.10.



Σχήμα 5.10 : Παραγωγή αναφορών ροπής και άεργου ισχύος [7].

Ο σχεδιασμός του ελέγχου ταχύτητας $G_\omega(s)$ εξαρτάται από το μοντέλο που υποθέτουμε για το σύστημα μετάδοσης κίνησης, απλοϊκό ή ισοδύναμο δύο μαζών. Το μοντέλο δύο μαζών παρουσιάζεται στο Σχ. 5.11 από όπου η συνάρτηση μεταφοράς $\frac{\omega_r(s)}{T_{em}(s)}$ χρειάζεται στο σχεδιασμό του ελεγκτή βρόχου ταχύτητας όπως δίνεται στην Εξ.(5.17).

$$\frac{\omega_r(s)}{T_{em}(s)} = \frac{1}{(J_t + J_g)s} \frac{J_t s^2 + D_{tg}s + K_{tg}}{\frac{J_t J_g}{J_t + J_g} s^2 + D_{tg}s + K_{tg}} \quad (5.17)$$

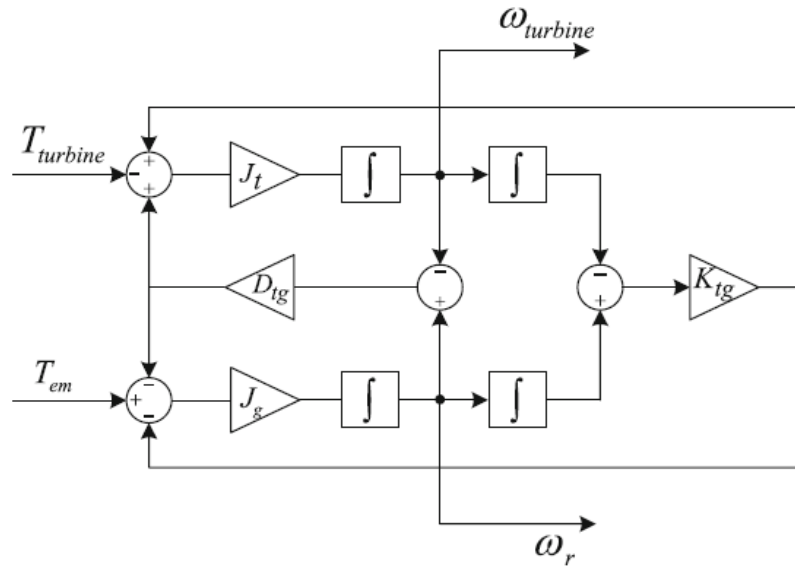
Αν χρησιμοποιείται το απλοϊκό μοντέλο σε ποιό απλοϊκές εξομοιώσεις, η συνάρτηση μεταφοράς απλοποιείται στην Εξ.(6.18).

$$\frac{\omega_r(s)}{T_{em}(s)} = \frac{1}{(J_t + J_g)s} \quad (5.18)$$

Η έξοδος του ελεγκτή ταχύτητας είναι η τιμή αναφοράς ροπής T_{em}^* , η οποία χρησιμοποιείται για την αναφορά του ρεύματος στον d άξονα. Για το σκοπό του σχεδιασμού βρόχου ταχύτητας η πραγματική ροπή T_{em} μπορεί να θεωρηθεί ιδανική T_{em}^* και ως εκ τούτου ο ελεγκτής ταχύτητας χρειάζεται μόνο για να αντισταθμίσει τη συνάρτηση μεταφοράς (5.17) ή (5.18).

Η αναφορά άεργου ισχύος λαμβάνεται από ένα βρόχο ρύθμισης τάσης ο οποίος ρυθμίζει την τάση στο σημείο διασύνδεσης με το δίκτυο ή από μια άμεση εντολή επιπέδου συστήματος για υποστήριξη άεργου ισχύος όπως φαίνεται στο

Σχ.5.10. Το σφάλμα στην άεργο ισχύ χρησιμοποιείται στον έλεγχο του ρεύματος q άξονα.

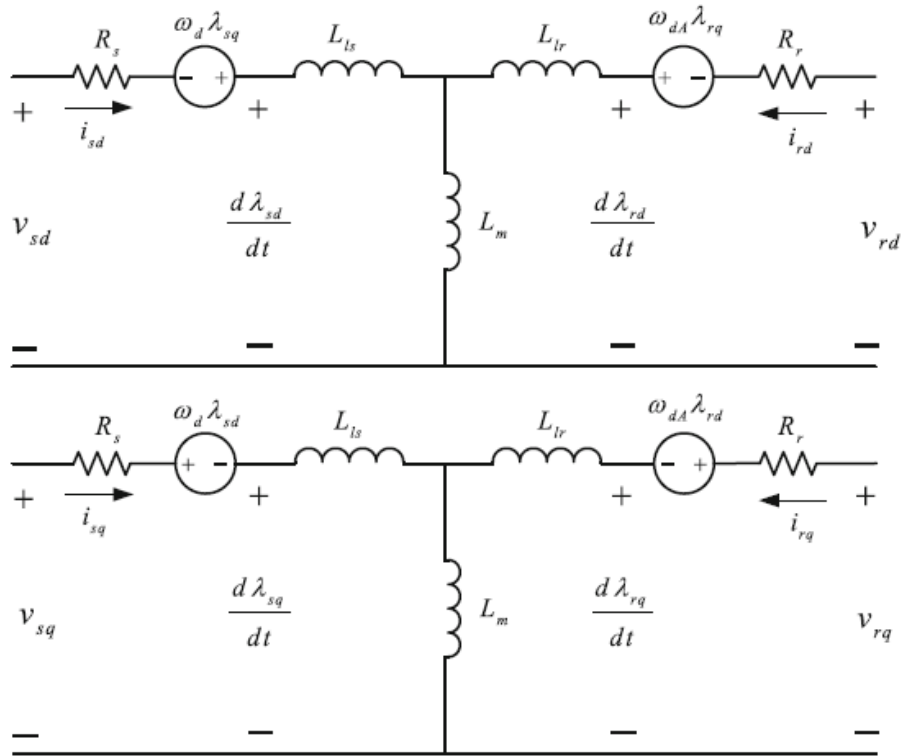


Σχήμα 5.11 : Δομικό διάγραμμα μοντέλου δύο μαζών [7].

5.2.2 Μετατροπές από τη μεριά του ρότορα

Ο έλεγχος του μετατροπέα από τη μεριά του ρότορα επιτυγχάνεται στο συγχρονισμένα περιστρεφόμενο πλαίσιο αναφοράς με τους άξονες d και q να περιστρέφονται στη συχνότητα δικτύου ω_s και με τον άξονα q να προπορεύεται του d άξονα 90° . Τα ισοδύναμα κυκλώματα της ΕΓΔΤ επανασχεδιάζονται στο Σχ. 5.12. Για το πλαίσιο αναφοράς ισχύει :

$$\begin{aligned} \omega_d &= \omega_s \\ \omega_{dA} &= \omega_s - \omega_m = \omega_{slip} \end{aligned} \tag{5.18}$$



Σχήμα 5.12 : Επανασχεδιασμένο ισοδύναμο κύκλωμα ΕΓΔΤ [7].

Για το σχεδιασμό ελεγκτών ανάδρασης του μετατροπέα ρότορα της ΕΓΔΤ είναι πιο βολικό να χρησιμοποιήσουμε το απλοποιημένο μοντέλο της ΕΓΔΤ. Αυτό παραμελεί τα μεταβατικά φαινόμενα στη ροή του στάτη αφού υποθέτει ότι αυτά είναι σταθερά. Αυτή είναι μια υπόθεση με σκοπό το σχεδιασμό ελεγκτών ροπής και άεργους ισχύος για το μετατροπέα ρότορα με μικρές διακυμάνσεις της τάσης δικτύου. Με αυτή την υπόθεση, οι δύο εξισώσεις τάσης στάτη (3.11) απλοποιούνται όπως παρουσιάζονται στις Εξ. (5.20) και (5.21) , ενώ οι εξισώσεις τάσης ρότορα (3.11) εξισώσεις ροής (3.12) και ροπής (3.13) διατηρούνται όπως έχουν στο απλοποιημένο μοντέλο.

$$v_{sd} = R_s i_{sd} - \omega_d \lambda_{sq} \quad (5.20)$$

$$v_{sq} = R_s i_{sq} - \omega_d \lambda_{sd} \quad (5.21)$$

Στον έλεγχο του dq πλαισίου αναφοράς υπάρχει η δυνατότητα ευθυγράμμισης του d ή q άξονα με το κατάλληλο συγχρονισμένα περιστρεφόμενο διάνυσμα. Τυπικά χρησιμοποιείται είτε ο προσανατολισμός της ροής του στάτη ή ο προσανατολισμός της τάσης του στάτη για τον έλεγχο της ΕΓΔΤ. Στον προσανατολισμό ροής του στάτη (flux oriented control,FOC) , ο d άξονας ευθυγραμμίζεται με το διάνυσμα ροής του στάτη $\vec{\lambda}_s$ έχοντας ως αποτέλεσμα $\lambda_{sq} = 0$ και $\lambda_{sd} = |\vec{\lambda}_s|$. Στον προσανατολισμό της τάσης του στάτη (voltage oriented control,VOC), ο d άξονας ευθυγραμμίζεται με το

διάνυσμα της τάσης του στάτη \vec{v}_s δίνοντας τις Εξ. (5.22) και (5.23). Ο VOC έχει το πλεονέκτημα ότι είναι σχετικά πιά εύκολο να ληφθεί και ευθυγραμμιστεί με το διάνυσμα της τάσης του στάτη από τις μετρούμενες φασικές τάσεις. Επίσης ο έλεγχος του μετατροπέα δικτύου τυπικά γίνεται χρησιμοποιώντας προσανατολισμό τάσης του στάτη καθιστώντας ευκολότερη την χρησιμοποίηση VOC για τον έλεγχο της πλευράς του ρότορα. Όταν η πτώση τάσης στις αντιστάσεις του στάτη αμελείται, οι δυο μεθοδολογίες συμπίπτουν. Και στις δυο μεθόδους, είναι δυνατόν η πλήρης αποσύνδεση του έλεγχου ενεργούς ισχύος (ή ροής) και άεργου ισχύος.

$$v_{sd} = \sqrt{\frac{2}{3}} |\vec{v}_s| \quad (5.22)$$

$$v_{sq} = 0$$

$$\lambda_{sd} \approx 0$$

$$\lambda_{sq} \approx -|\vec{\lambda}_s| \approx -\frac{v_{sd}}{\omega_s} \quad (5.23)$$

Ένας λόγος για τον οποίο $\frac{d\lambda_{sd}}{dt} \approx 0$ είναι ότι η διακοπτική συχνότητα των στοιχείων του μετατροπέα είναι τόσο μεγάλη που πρακτικά δεν υπάρχει μεταβολή στη μαγνητική ροή. Η διακοπτική συχνότητα μπορεί να είναι χιλιάδες φορές μέσα σε ένα δευτερόλεπτο, κάτι το οποίο καθιστά μηδέν τη μεταβολή της μαγνητικής ροής.

5.2.2.1 Αναφορές ρευμάτων ρότορα d-q άξονα

Η ηλεκτρομαγνητική ροπή, η ενεργός ισχύς που εισέρχεται στο δίκτυο, και η άεργος στον στάτη μπορούν να ελεγχθούν ελέγχοντας τα ρεύματα του ρότορα. Με τις παραδοχές τις Εξ. (5.23), ο VOC μπορεί να παρέχει αποσύνδεση έλεγχου ενεργού και άεργου ισχύος, με το ρεύμα i_{rd} να ελέγχει την ενεργό ισχύ και το ρεύμα i_{rq} να ελέγχει την άεργο ισχύ.

Χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις (3.12) τα ρεύματα άξονα d-q του στάτη, i_{sd} και i_{sq} λαμβάνονται τώρα όπως φαίνονται στις Εξ. (5.24) και (5.25)

$$i_{sd} = \frac{\lambda_{sd}}{L_s} - \frac{L_m}{L_s} i_{rd} \quad (5.24)$$

$$i_{sq} = \frac{\lambda_{sq}}{L_s} - \frac{L_m}{L_s} i_{rq} \quad (5.25)$$

Η ενεργός ισχύς στο στάτη στο πλαίσιο αναφοράς dq δίνεται από την Εξ. (5.26).

$$P_s = v_{sd}i_{sd} + v_{sq}i_{sq} \quad (5.26)$$

Για τον VOC όπου $v_{sq} = 0$ και $\lambda_{sd} = 0$ η Εξ. (5.26) απλοποιείται στην (5.27)

$$P_s = v_{sd}i_{sd} = v_{sd} \left(\frac{\lambda_{sd}}{L_s} - \frac{L_m}{L_s} i_{rd} \right) = -\frac{L_m}{L_s} v_{sd} i_{rd} \quad (5.27)$$

Όπως φαίνεται από την Εξ.(5.27) , η ενεργός ισχύς είναι τελείως ελεγχόμενη από το ρεύμα του d άξονα, και ανεξάρτητη της τιμής του ρεύματος q άξονα. Η έκφραση της ηλεκτρομαγνητικής ροπής της Εξ.(5.13) με VOC και χρησιμοποιώντας τις Εξ. (5.23) και (5.25) απλοποιείται και μετατρέπεται στην Εξ.(5.28). Και πάλι ο έλεγχος της ροπής περνά από τον έλεγχο του ρεύματος d άξονα και ανεξάρτητα από το ρεύμα του q άξονα.

$$\begin{aligned} T_{em} &= \frac{P}{2} L_m (i_{sq}i_{rd} - i_{sd}i_{rq}) = \frac{P}{2} L_m \left(\left(\frac{\lambda_{sq}}{L_s} - \frac{L_m}{L_s} i_{rq} \right) i_{rd} - \left(\frac{\lambda_{sd}}{L_s} - \frac{L_m}{L_s} i_{rd} \right) i_{rq} \right) \\ &= -\frac{P}{2} \frac{1}{\omega_s} \frac{L_m}{L_s} v_{sd} i_{rd} \end{aligned} \quad (5.28)$$

Η άεργος ισχύς στο dq πλαίσιο αναφοράς δίνεται από την Εξ.(5.29)

$$Q_s = v_{sq}i_{sd} - v_{sd}i_{sq} \quad (5.29)$$

Για VOC όπου $v_{sq} = 0$ και $\lambda_{sq} = -\frac{v_{sd}}{\omega_s}$ απλοποιείται στην Εξ.(5.30)

$$Q_s = -v_{sd}i_{sd} = -v_{sd} \left(\frac{\lambda_{sq}}{L_s} - \frac{L_m}{L_s} i_{rq} \right) = \frac{(v_{sd})^2}{\omega_{sd} L_s} + \frac{L_m}{L_s} v_{sd} i_{rq} \quad (5.30)$$

Και πάλι όπως φαίνεται και από την Εξ.(5.30) , η άεργος ισχύς εξαρτάται από την v_{sd} και i_{rq} μόνο , και η οποία είναι ανεξάρτητη του ρεύματος i_{rd} .

Από τη στιγμή που η ηλεκτρομαγνητική ροπή και η άεργος ισχύς στο στάτη ελέγχονται από τον έλεγχο των ρευμάτων i_{rd} και i_{rq} αντίστοιχα , τα ρεύματα αναφοράς i_{rd}^* και i_{rq}^* για το βρόχο ελέγχου ρευμάτων μπορούν να προέρχονται ανεξάρτητα και δίνονται από τις Εξ.(5.31) και (5.32). Το ρεύμα αναφοράς i_{rd}^*

προέρχεται από την εντολή ροπής T_{em}^* από τον βρόχο ελέγχου ταχύτητας μαζί με τον βρόχο ελέγχου υποστήριξης συχνότητας δικτύου (Σχ. 5.10), και από (5.28). Το ρεύμα αναφοράς i_{rq}^* προέρχεται από την εντολή άεργου ισχύος Q_s^* από το βρόχο ρύθμισης του στάτη ή ως απευθείας εντολή για άεργο ισχύ (Σχ. 5.10) και από την Εξ.(5.30).

$$i_{rd}^* = -\frac{2}{p} \omega_s \frac{L_s}{L_m} \frac{1}{v_{sd}} T_{em}^* \quad (5.31)$$

$$i_{rq}^* = \frac{L_s}{L_m} \frac{1}{v_{sd}} Q_s^* - \frac{v_{sd}}{\omega_s L_m} \quad (5.32)$$

5.2.2.2 Σχεδιασμός ελεγκτή ρευμάτων βρόχου ρότορα

Τα ρεύματα βρόχου του ρότορα q και d σχεδιάζονται και εφαρμόζονται ανεξάρτητα, δίνοντας τις αναφορές των τάσεων ρότορα q και d άξονα. Βασιζόμενος σε αυτές τις αναφορές, ο PWM του ρότορα παράγει τις τριφασικές τάσης ρότορα με τεχνική διαμόρφωσης εύρους παλμών με βάση τα διακριτά διανύσματα τάσης του αντιστροφέα (space vector PWM). Με σκοπό το σχεδιασμό των βρόχων ρευμάτων ρότορα, η συνάρτηση μεταφοράς μικρών σημάτων από την τάση ρότορα στο ρεύμα ρότορα πρέπει να αποδοθούν σε καθένα από τους d-q άξονες.

Από το ισοδύναμο κύκλωμα του Σχ.5.13, η τάση του d άξονα δίνεται από την Εξ.(5.33)

$$v_{rd} = R_r i_{rd} + \frac{d}{dt} (L_m i_{sd} + L_r i_{rd}) - \omega_{slip} (L_m i_{sq} + L_r i_{rq}) \quad (5.33)$$

Η υπόθεση ότι οι μεταβατικές ροές του στάτη αμελούνται στο απλοποιημένο μοντέλο συνεπάγεται τις Εξ.(5.34).

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \lambda_{sd} &= \frac{d}{dt} (L_s i_{sd} + L_m i_{rd}) = 0 \\ \therefore \frac{d}{dt} i_{sd} &= -\frac{L_m}{L_s} \frac{d}{dt} i_{rd} \end{aligned} \quad (5.34)$$

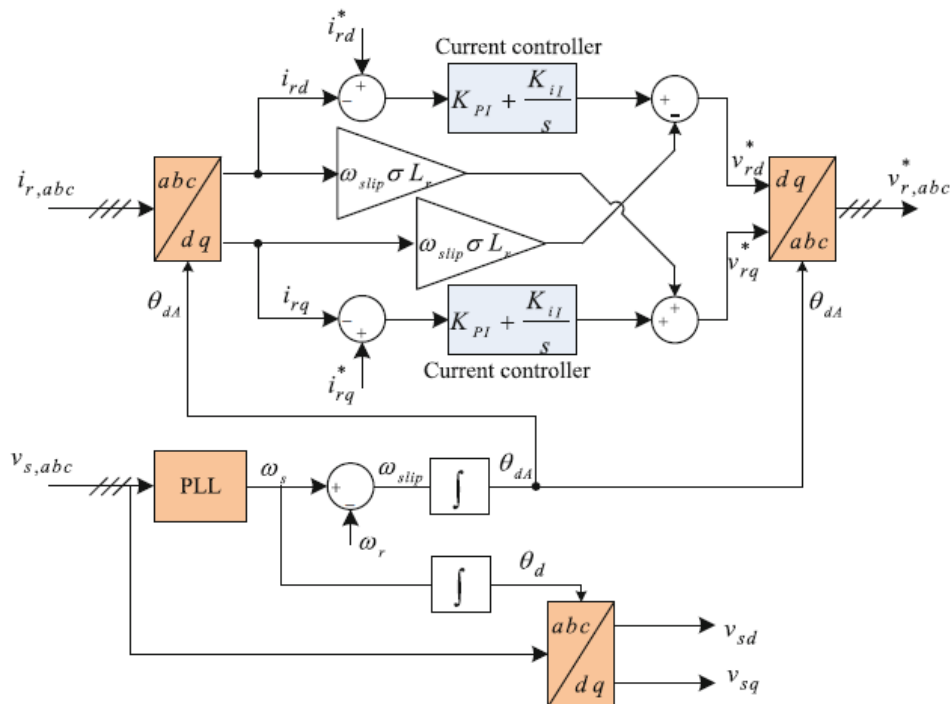
Αντικαθιστώντας (5.34) και (5.33)

$$v_{rd} = R_r i_{rd} + \sigma L_r \frac{d}{dt} i_{rd} - \omega_{slip} (L_m i_{sq} + L_r i_{rq}) \quad (5.35)$$

$$\text{όπου } \sigma = \left(1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r} \right)$$

Με συνδυασμό των προηγούμενων καταλήγουμε στην εξίσωση Εξ.(5.36), η οποία εκφράζει τη συνάρτηση μεταφοράς μεταξύ της τάσης στον d άξονα και του ρεύματος στον d άξονα.

$$v_{rd} = R_r i_{rd} + \sigma L_r \frac{d}{dt} i_{rd} - \omega_{slip} \sigma L_r i_{rq} - \omega_{slip} \frac{L_m}{L_s} \lambda_{sq} \quad (5.36)$$



Σχήμα 5.13 : Δομικό διάγραμμα ελέγχου του ρεύματος του ρότορα [7].

Ο τελευταίος όρος της Εξ.(5.36) αμελείται από τη στιγμή που το λ_{sq} θεωρείται σταθερό και ανεξάρτητο από τις αλλαγές του ρεύματος ρότορα στον d άξονα. Επιπλέον ο όρος $\omega_{slip} \sigma L_r i_{rq}$ στην Εξ.(5.36) τροφοδοτείται προς τα εμπρός όπως φαίνεται στο μπλοκ διάγραμμα του Σχ.5.13 το οποίο οδηγεί στη συνάρτηση μεταφοράς της Εξ.(5.37).

$$\frac{I_{rd}(s)}{V_{rd}(s)} = \frac{1}{R_r + s\sigma L_r} \quad (5.37)$$

Παρόμοια στην εξαγωγή της Εξ.(5.36), η τάση ρότορα του q άξονα μπορεί να εκφραστεί όπως:

$$v_{rq} = R_r i_{rq} + \sigma L_r \frac{d}{dt} i_{rq} + \omega_{slip} \sigma L_r i_{rd} + \omega_{slip} \frac{L_m}{L_s} \lambda_{sd} \quad (5.38)$$

Και πάλι υποθέτοντας μηδενική διαταραχή στο όρο λ_{sd} και τροφοδοτώντας προς τα εμπρός τον όρο $\omega_{slip} \sigma L_r i_{rd}$, η συνάρτηση μεταφοράς για το βρόχο ελέγχου του q άξονα μπορεί να ληφθεί όπως φαίνεται στην εξίσωση (5.39).

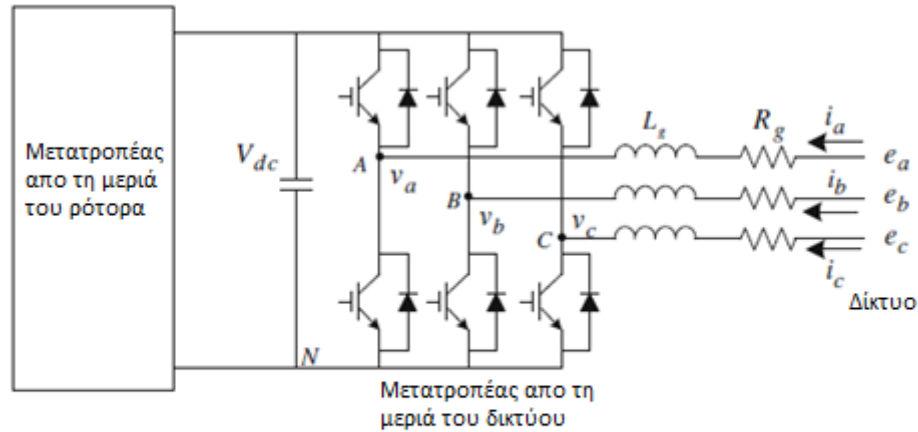
$$\frac{I_{rq}(s)}{V_{rq}(s)} = \frac{1}{R_r + s\sigma L_r} \quad (5.39)$$

5.2.3 Μετατροπέας από τη μεριά του δικτύου

Ο κύριος ρόλος του μετατροπέα από τη μεριά του δικτύου είναι να παρέχει έναν δρόμο για την ανταλλαγή αμφίδρομης ενεργού ισχύος, θετικής ή αρνητικής μεταξύ δικτύου και μετατροπέα ρότορα. Αυτό επιτυγχάνεται με ρύθμιση τάσης του DC-link. Σε υποσύγχρονη κατάσταση όταν ο μετατροπέας ρότορα απορροφά ισχύ από το DC-link, ο μετατροπέας δικτύου αντλεί ισχύ από το δίκτυο και τη διαχέει στο DC-link. Στην υπερσύγχρονη κατάσταση ο μετατροπέας δικτύου αντιστρέφει την κατεύθυνση ισχύος και τη διαχέει από το μετατροπέα ρότορα προς το δίκτυο. Σε μόνιμη κατάσταση το συνεχές ρεύμα που αντλείται από το μετατροπέα δικτύου είναι ίσο με το συνεχές ρεύμα προς το μετατροπέα ρότορα. Η άεργος ισχύς του μετατροπέα δικτύου μπορεί να ελεγχθεί ανεξάρτητα από την ανταλλαγή ενεργού ισχύος. Εξαιτίας του DC-link μεταξύ των δυο μετατροπέων, η παραγόμενη άεργος ισχύς από το μετατροπέα δικτύου είναι επίσης ανεξάρτητη από την παραγόμενη άεργο ισχύ από το μετατροπέα ρότορα. Αυτή η ικανότητα χρησιμοποιείται για να παρέχει επιπλέον άεργο ισχύ στο δίκτυο μέσα στα όρια του μετατροπέα.

Το σχεδιάγραμμα του μετατροπέα από τη μεριά του δικτύου διασυνδεδεμένο με το DC-link και τριφασικό δίκτυο περιλαμβάνοντας ένα επαγωγικό φίλτρο L_g με μια αντίσταση R_g παρουσιάζεται στο Σχ.5.14. Παρόμοια με το μετατροπέα από τη μεριά του ρότορα, ο έλεγχος του μετατροπέα από τη μεριά του δικτύου γίνεται στο περιστρεφόμενο πλαίσιο αναφοράς ευθυγραμμισμένο με το διάνυσμα τάσης δικτύου. Με σκοπό να προκύψουν στο σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς οι εξισώσεις, ορίζουμε το διάνυσμα τάσης δικτύου \underline{e} , διάνυσμα φασικής τάσης μετατροπέα (μέση τιμή) \underline{v} , και φασικό διάνυσμα ρεύματος \underline{i} , στην Εξ.(5.40)

$$\underline{e} = \begin{bmatrix} e_{an} \\ e_{bn} \\ e_{cn} \end{bmatrix} \quad \underline{v} = \begin{bmatrix} v_{an} \\ v_{bn} \\ v_{cn} \end{bmatrix} \quad \underline{i} = \begin{bmatrix} i_{an} \\ i_{bn} \\ i_{cn} \end{bmatrix} \quad (5.40)$$



Σχήμα 5.14 : Σχεδιάγραμμα μετατροπέα από τη μεριά του δικτύου.

Να σημειώσουμε ότι η μέση τιμή κάθε τάσης εξόδου του πόλου περιέχει μια DC συνιστώσα $V_{dc}/2$ και μια ελεγχόμενη AC συνιστώσα στη συχνότητα δικτύου. Το διάνυσμα τάσης \underline{v} αναπαριστά την AC συνιστώσα τάσης κάθε πόλου.

Ο πίνακας μετασχηματισμού \underline{T} , για την μετατροπή των abc ποσοτήτων στο πλαίσιο αναφοράς dq δίνεται από τον παρακάτω τύπο

$$\begin{bmatrix} x_d \\ x_q \end{bmatrix} = \underbrace{\sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\omega_s t) & \cos(\omega_s t - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\omega_s t - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin(\omega_s t) & -\sin(\omega_s t - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\omega_s t - \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix}}_{\underline{T}} \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \quad (5.41)$$

Το ρεύμα και τα δυο διανύσματα τάσης στο dq πλαίσιο αναφοράς συμβολίζονται όπως φαίνεται στις Εξ.(5.42).

$$\underline{e}_{dq} = \begin{bmatrix} e_d \\ e_q \end{bmatrix} \quad \underline{v}_{dq} = \begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} \quad \underline{i}_{dq} = \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} \quad (5.42)$$

Είναι εύκολο να καθορισθεί ο αποσυνδεδεμένος έλεγχος της ενεργού ισχύος P_g μέσα από τον έλεγχο του i_d και της άεργου ισχύος Q_g μέσα από τον έλεγχο προσανατολισμού τάσης δικτύου, όπου e_q είναι μηδέν και e_d ισούται με $\sqrt{3/2}$ φορές το πλάτος της φάσης τάσης του δικτύου.

$$P_g = e_d i_d + e_q i_q = e_d i_d \quad (5.43)$$

$$Q_g = e_d i_q - e_q i_d = -e_d i_q \quad (5.44)$$

Η αναφορά για την ενεργό ισχύ (βρόχου ελέγχου) έρχεται από τον ελεγκτή τάσης του DC-link, και η αναφορά της άεργου ισχύος (βρόχου ελέγχου) έρχεται από ένα επίπεδο εντολής άεργου ισχύος ή συντελεστού ισχύος. Οι αναφορές ρευμάτων d και q άξονα του μετατροπέα ρότορα μπορούν να ληφθούν από τις Εξ.(5.43) και (5.44). Η συνάρτηση μεταφοράς από τις τάσεις των d και q αξόνων στα αντίστοιχα ρεύματα χρειάζεται για το σχεδιασμό των βρόχων ρευμάτων και παρουσιάζεται παρακάτω. Οι βρόχοι ρευμάτων δημιουργούν την τάση αναφοράς διανύσματος για το διαμορφωτή εύρους παλμών του μετατροπέα δικτύου. Από το Σχ.5.14

$$\underline{e} = L_g \frac{d}{dt} \underline{i} + R_g \underline{i} + \underline{v} \quad (5.45)$$

Πολλαπλασιάζοντας και τις δυο μεριές τις Εξ.(5.45) με τον πίνακα μετασχηματισμού \underline{T} .

$$\underline{T} \underline{e} = L_g \underline{T} \frac{d}{dt} \underline{i} + R_g \underline{T} \underline{i} + \underline{T} \underline{v} \quad (5.46)$$

$$\underline{T} \frac{d}{dt} \underline{i} = \frac{d}{dt} [\underline{T} \underline{i}_{dq}] - \left[\frac{d}{dt} \underline{T}_{dq} \right] \underline{i} = \frac{d}{dt} \underline{i} - \omega_s \begin{bmatrix} i_q \\ -i_d \end{bmatrix} \quad (5.47)$$

Από τις Εξ.(5.46) και (5.47) έχουμε

$$\underline{e} = L_g \frac{d}{dt} \underline{i}_{dq} - \omega_s L_g \begin{bmatrix} i_q \\ -i_d \end{bmatrix} + R_g \underline{i}_{dq} + \underline{v}_{dq} \quad (5.48)$$

όπου τελικά καταλήγουμε :

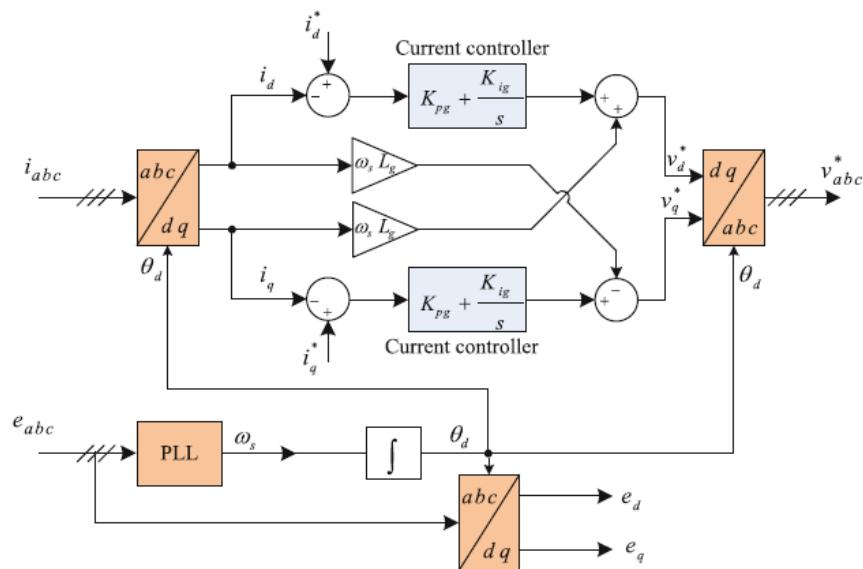
$$L_g \frac{d}{dt} i_d = e_d - R_g i_d - v_d + \omega_s L_g i_q \quad (5.49)$$

$$L_g \frac{d}{dt} i_q = e_q - R_g i_q - v_q - \omega_s L_g i_d = -R_g i_q - v_q - \omega_s L_g i_d \quad (5.50)$$

Παρόμοια με την τεχνική που εφαρμόστηκε στον έλεγχο των ρευμάτων του μετατροπέα από τη μεριά του ρότορα, οι όροι $\omega_s L_g i_q$ και $\omega_s L_g i_d$ μπορούν να τροφοδοτηθούν προς τα εμπρός όπως φαίνεται στο δομικό διάγραμμα του Σχ.5.15 [7]. Αυτό οδηγεί σε μια απλή πρώτου βαθμού έκφραση για την συνάρτηση μεταφοράς των τάσεων μετατροπέα σε πολικά ρεύματα όπως φαίνεται στις Εξ.(5.51) και (5.52) αγνοώντας τα μεταβατικά φαινόμενα στην τάση δικτύου.

$$\frac{i_d(s)}{v_d(s)} = \frac{-1}{R_g + sL_g} \quad (5.51)$$

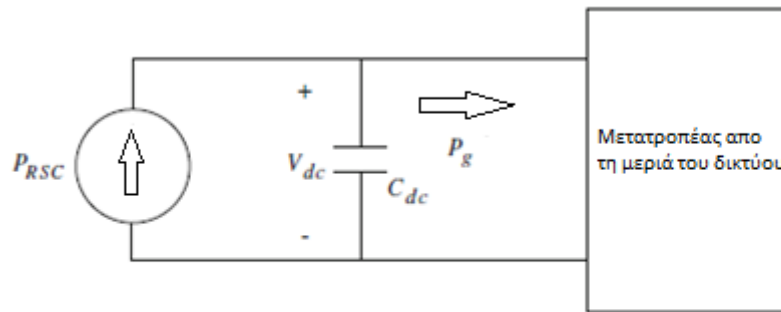
$$\frac{i_q(s)}{v_q(s)} = \frac{-1}{R_g + sL_g} \quad (5.52)$$



Σχήμα 5.15 : Δομικό διάγραμμα μετατροπέα από τη μεριά του δικτύου [7].

5.2.4 Έλεγχος τάσης DC-link

Ένας απλός τρόπος για ρύθμιση της τάσης DC-link σε εφαρμογές ΕΓΔΤ σε ένα γραμμικό μοντέλο, είναι ο έλεγχος του τετραγώνου της τάσης DC-link. Για το σκοπό του σχεδιασμού του ελεγκτή τάσης DC-link, η ισχύς από το μετατροπέα ρότορα στο DC-link μπορεί να θεωρηθεί σταθερή, P_{RSC} όπως φαίνεται στο Σχ.5.16.



Σχήμα 5.16 : Καταμερισμός ισχύος στο DC-link [7].

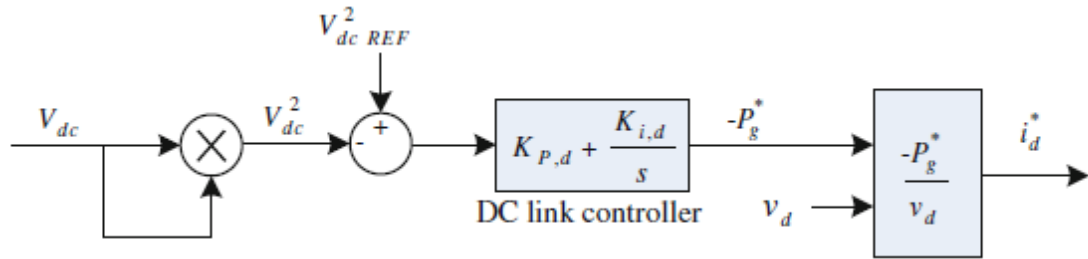
Η ισχύς P_g στο Σχ.5.16 αντιστοιχεί στη ροή ισχύος στο μετατροπέα από τη μεριά του δικτύου. Βασιζόμενοι στην ενέργεια που αποθηκεύεται στον πυκνωτή του DC-link, η διαφορά ισχύος μεταξύ δρομέα P_g και εισερχόμενης στο δίκτυο P_{RSC} είναι :

$$\frac{1}{2} C_{dc} \frac{d}{dt} (V_{dc}^2) = P_{RSC} - P_g \quad (5.53)$$

Θέτοντας V_{dc}^2 ως μεταβλητή ελέγχου και λαμβάνοντας υπόψη τη διαταραχή στην P_{RSC} να είναι μηδέν, το μοντέλο της (5.53) πλέον γίνεται όπως η Εξ.(5.54), και η οποία μπορεί να ελεγχθεί από έναν PI ελεγκτή.

$$\frac{V_{dc}^2(s)}{-P_g(s)} = \frac{2}{sC_{dc}} \quad (5.54)$$

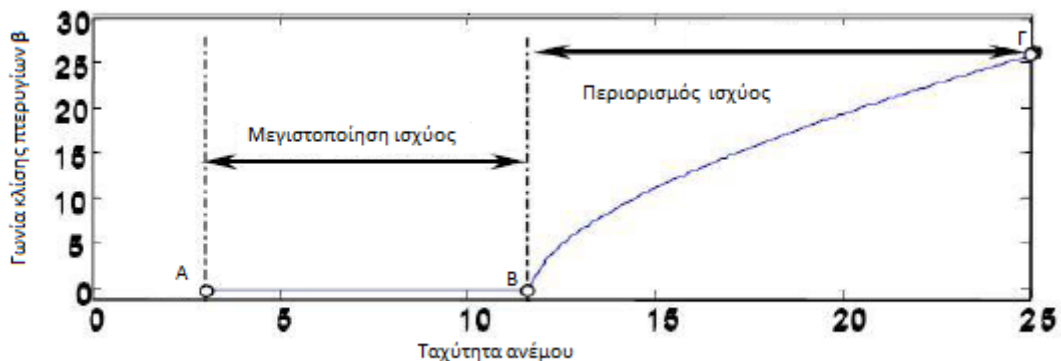
Το δομικό διάγραμμα για τη ρύθμιση τάσης του DC-link όπου το τετράγωνο της μετρούμενης τάσης του DC-link συγκρίνεται με μια αναφορά για την παραγωγή αναφοράς ενεργούς ισχύος. Έτσι έχουμε την αναφορά του $i_d^* = -P_g^* / e_d$ στο Σχ.5.17 [7].



Σχήμα 5.17 : Δομικό διάγραμμα ελέγχου τάσης του DC-link [7].

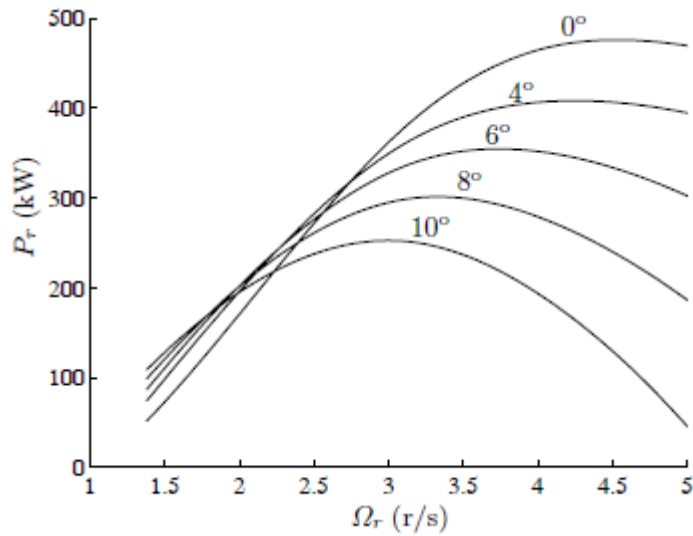
5.3 ΕΛΕΓΚΤΗΣ ΓΩΝΙΑΣ ΚΛΙΣΗΣ ΠΤΕΡΥΓΙΩΝ

Η γωνία κλίσης των πτερυγίων γενικά μπορεί να ελέγχει την ενέργεια που απομαστεύεται από τον άνεμο. Σε αυτόν τον έλεγχο, η γωνία πτερυγίων (pitch angle) μεταβάλλεται σε ταχύτητες μεγαλύτερες της ονομαστικής κατά τέτοιο τρόπο ώστε η ισχύς να περιορίζεται στην ονομαστική τιμή όταν η ταχύτητα ανέμου V_w είναι μεγαλύτερη της ονομαστικής V_{wn} . Έτσι, σε υψηλές ταχύτητες ανέμου η γωνία κλίσης πτερυγίων αρχίζει να έχει θετικές τιμές όπως φαίνεται και στο Σχ. 5.18.

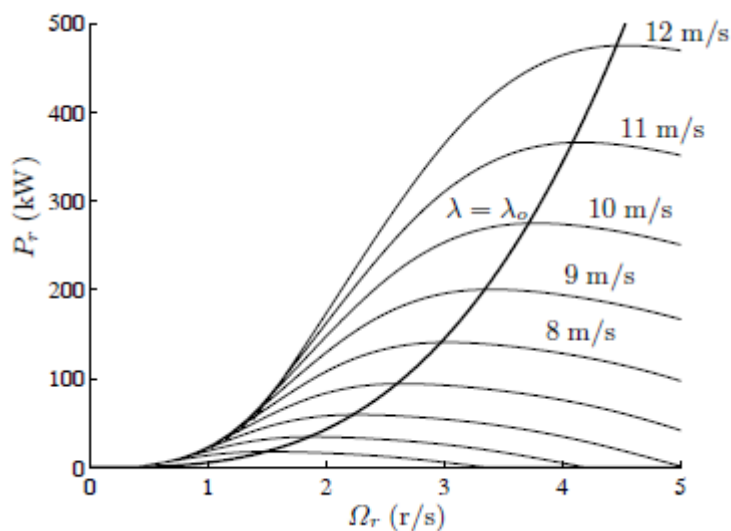


Σχήμα 5.18 : Ισχύς ανεμογεννήτριας συναρτήσει γωνίας κλίσης πτερυγίων για διάφορες ταχύτητες ανέμου.

Μέγιστη απομάστευση της κινητικής ενέργειας του ανέμου από την ανεμογεννήτρια έχουμε όταν η γωνία κλίσης των πτερυγίων είναι 0° και η σχετική ταχύτητα ακροπτερυγίου (λ) διατηρείται στη βέλτιστη τιμή. Αυτό επιτυγχάνεται με μεταβλητό αριθμό στροφών του δρομέα. Σε περίπτωση ελέγχου της ισχύος για ταχύτητες ανέμου μικρότερες της ονομαστικής η ισχύς μειώνεται με την αύξηση της γωνίας κλίσης πτερυγίων [2]. Τα παραπάνω απεικονίζονται στο Σχ.5.19 και στο Σχ. 5.20.

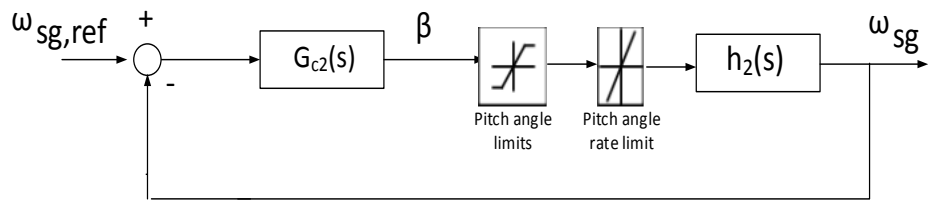


Σχήμα 5.19 : Ισχύς ανεμογεννήτριας συναρτήσει της γωνιακής ταχύτητας για διάφορες τιμές γωνίας κλίσης πτερυγίων [2].



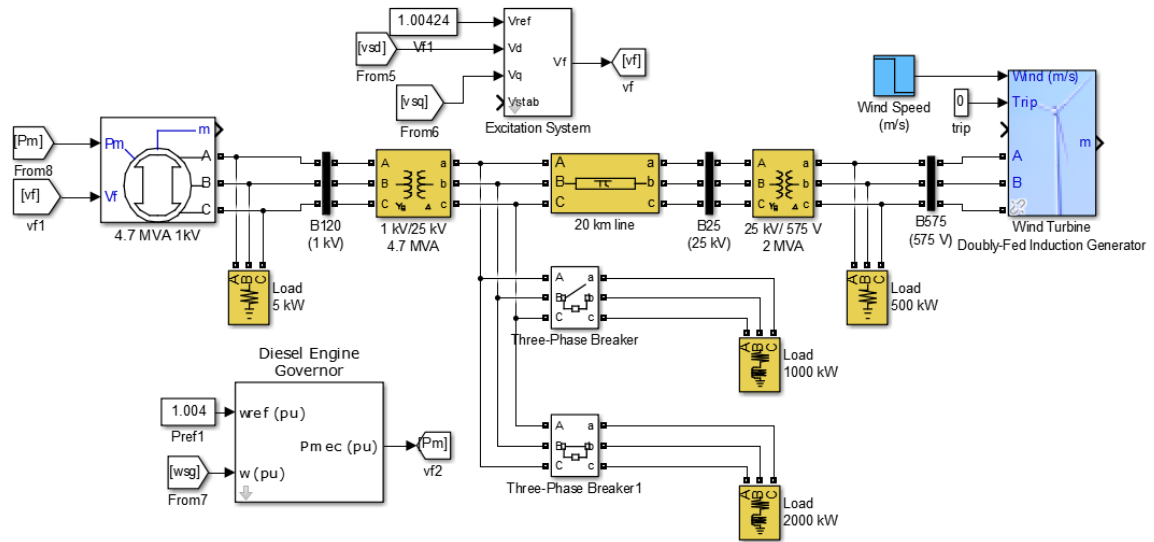
Σχήμα 5.20 : Ισχύς ανεμογεννήτριας συναρτήσει της γωνιακής ταχύτητας για βέλτιστη τιμή λ και διάφορες τιμές ταχύτητας ανέμου [2].

Η τεχνική που ακολουθείται για την σταθεροποίηση της ισχύος όταν $V_w > V_{wN}$ είναι η σύγκριση της ταχύτητας περιστροφής της γεννήτριας με την ονομαστική της τιμή (τιμή αναφοράς) και ο προσδιορισμός της γωνίας κλίσης β μέσω ενός PID ελεγκτή. Για πιο ρεαλιστική προσομοίωση χρησιμοποιείται περιοριστής τιμής για τη γωνία β και για το ρυθμό μεταβολής αυτής όπως φαίνεται και στο δομικό διάγραμμα του Σχ.5.21.



Σχήμα 5.21 : Δομικό διάγραμμα ελεγκτή γωνίας πτερυγίων (pitch control) [5].

σκοπό να πετύχουμε τον έλεγχο της ανεμογεννήτριας και του ΑΗΣ υλοποιώντας το με τη χρήση της θεωρίας Συστημάτων Αυτόματου Ελέγχου και του προγράμματος εξομοίωσης Simulink-Matlab. Μια απεικόνιση του σχεδιαστικού περιβάλλοντος Simulink που έλαβε μέρος στην εξομοίωση με τα δομικά διαγράμματα που χρησιμοποιήθηκαν παρουσιάζεται στο Σχ.6.2



Σχήμα 6.2 : Σχεδιαστικό περιβάλλον εξομοίωσης Simulink.

6.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΑΙ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΑΤΜΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Σύμφωνα με τη θεωρία που παρουσιάσαμε η συμπεριφορά του ΑΗΣ μπορεί να περιγραφεί με το μοντέλο τριών σταδίων του Σχ.(2.3) όπου T_{CH}, T_{RH}, T_{CO} , είναι οι σταθερές χρόνου για κάθε στάδιο αντίστοιχα με τιμές 0.3 , 5 , 0.5 αντίστοιχα και η έξοδος του κάθε σταδίου από την Εξ.(2.4) $Q_{out} = \frac{1}{1 + sT_V} Q_{in}$. Η μηχανική ροπή είναι ανάλογη της παροχής καυσίμου και στην περίπτωση μας, από τις Εξ.(2.7), έχουμε :

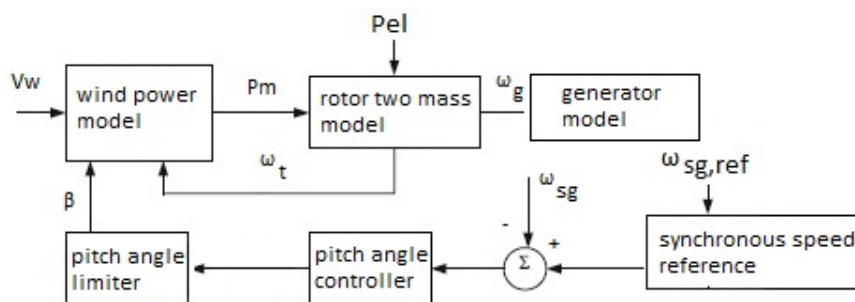
$$T_m = F_{HP} * Q_1 + F_{IP} * Q_2 + F_{LP} * Q_3 \quad (6.1)$$

Οι συντελεστές αναλογικότητας F_{HP}, F_{IP}, F_{LP} ισούται με 0.3 , 0.3 και 0.4 αντίστοιχα. Τελικά η συνάρτηση μεταφοράς, μετά από πράξεις, του αμοστροβίλου μεταξύ εξόδου T_m και εισόδου Q_o δίνεται από την εξίσωση :

$$G_1 = T_m = \frac{1.5s^2 + 3.6s + 2}{s^3 + 7.2s^2 + 11.4s + 2} \quad (6.2)$$

6.3 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΑΙ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ

Η ανεμογεννήτρια αποτελείται από μια Ε.Γ.Δ.Τ.. Όπως ξέρουμε από την θεωρία των ανεμογεννητριών, όταν η ταχύτητα ανέμου (V_w) είναι μικρότερη από την ονομαστική (V_{wN}) η Α/Γ θα πρέπει να πραγματοποιήσει μέγιστη απομαύστευση ενέργειας από τον άνεμο, γι' αυτό η γωνιακή ταχύτητα (ω_t) της Α/Γ πρέπει να εργάζεται σε συγκεκριμένη τιμή για κάθε ταχύτητα ανέμου ώστε η ταχύτητα ανεμοπτερυγίου λ να έχει τη βέλτιστη τιμή λειτουργίας και για αυτό το λόγο η Α/Γ λειτουργεί με μεταβλητές στροφές. Σε αυτό τον τρόπο λειτουργίας η γωνία πτερυγίων είναι μηδέν. Αυτό ισχύει όταν η Α/Γ είναι συνδεδεμένη σε ηλεκτρικό δίκτυο και επομένως όλη η ενέργεια διαχέεται στο δίκτυο. Στην περίπτωση υβριδικού συστήματος αυτό δεν ισχύει. Η γωνία πτερυγίων μπορεί να έχει θετική τιμή για κάθε ταχύτητα ανέμου ακόμα και όταν $V_w < V_{wN}$ και αυτό επειδή η ενέργεια του ανέμου πρέπει να προσαρμόζεται σύμφωνα με τις ανάγκες φορτίου κάθε χρονική στιγμή. Έτσι λοιπόν, για να έχουμε όσο το δυνατόν μια ρεαλιστική προσομοίωση του συστήματος και της συμπεριφοράς του, ο ελεγκτής της γωνίας πτερυγίων θα πρέπει να ανιχνεύει τη συχνότητα δικτύου σαν ένα δείκτη του κυμαινόμενου φορτίου. Ο ελεγκτής γωνίας πτερυγίων λοιπόν βασιζόμενος στη διαφορά γωνιακής ταχύτητας αναφοράς της σύγχρονης γεννήτριας ($\omega_{sg,ref}$) με την πραγματική που επικρατεί ω_{sg} , αποφασίζει για την αναγκαία ισχύ εξόδου και με αυτό τον τρόπο η γωνία των πτερυγίων ρυθμίζεται. Φυσικά για ταχύτητες ανέμου μεγαλύτερης της ονομαστικής, ο ελεγκτής γωνίας πτερυγίων επεμβαίνει με σκοπό τη σταθεροποίηση της ενέργειας. Η λειτουργία αυτή απεικονίζεται στο Σχ. 6.3



Σχήμα 6.3 : Περιγραφικό μοντέλο ελέγχου υβριδικού συστήματος [5].

Η μηχανική ισχύς η οποία σαρώνεται και αξιοποιείται από την ανεμογεννήτρια είναι μια σύνθετη συνάρτηση της ταχύτητας του ανέμου, της γωνίας κλίσης πτερυγίου και της ταχύτητας του άξονα. Η αλγεβρική εξίσωση παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 3 και η οποία επαναλαμβάνεται εδώ :

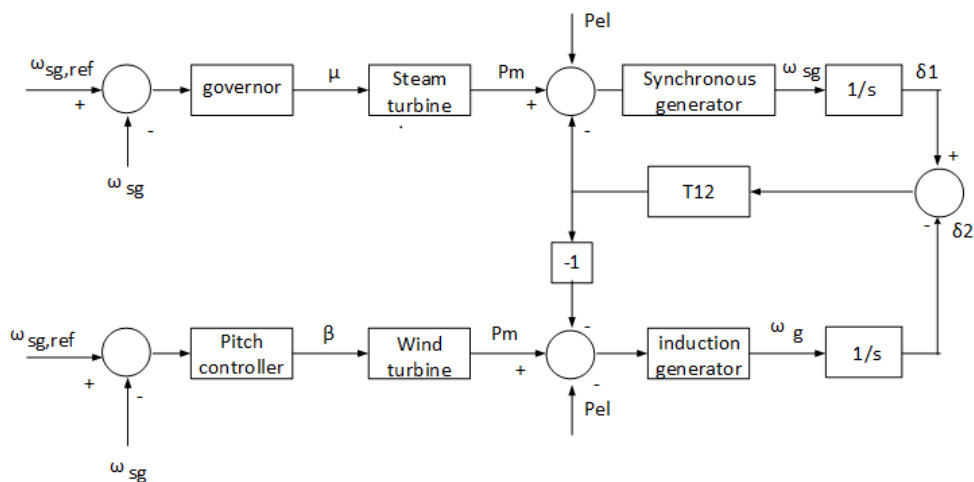
$$P_m = \frac{1}{2} \rho v_w^3 \pi r^2 C_p(\lambda) \quad (6.1)$$

Επίσης στο κεφάλαιο 3 παρουσιάσαμε το ισοδύναμο μοντέλο δύο μαζών και το οποίο θα χρησιμοποιήσουμε για την προσομοίωση του συστήματος μετάδοσης κίνησης της Α/Γ. Παρουσιάσαμε επίσης τις εξισώσεις που θα χρησιμοποιήσουμε και τις οποίες αναφέρουμε ξανά εδώ :

$$\begin{aligned} T_g - D_{tg}(\omega_g - \omega_t) - K_{tg}(\theta_g - \theta_t) &= 2J_g \dot{\omega}_g \\ D_{tg}(\omega_g - \omega_t) + K_{tg}(\theta_g - \theta_t) - T_t &= 2J_t \dot{\omega}_t \end{aligned} \quad (6.2)$$

6.4 ΓΡΑΜΜΙΚΟΠΟΙΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Για να σχεδιαστούν οι ελεγκτές έχει χρησιμοποιηθεί ένα γενικό μοντέλο που περιέχει και τις δύο γεννήτριες, όπως φαίνεται και στο Σχ.6.4. Το σύστημά μας αποτελείται από τον ατμοστρόβιλο (Steam turbine) του Α.Η.Σ. με τον ελεγκτή του (governor), τη γεννήτρια (Wind turbine) της Α/Γ με τον ελεγκτή της (Pitch controller) και τις γραμμές μεταφοράς μέσης τάσης με φασικές γωνίες δ_1, δ_2



Σχήμα 6.4 : Σχεδιάγραμμα ελέγχου των δύο γεννητριών [5].

Από την πρώτη εξίσωση της Εξ.(6.2) έχουμε :

$$T_g - D_{tg}(\omega_g - \omega_t) - K_{tg} \left(\frac{\omega_g}{s} - \frac{\omega_t}{s} \right) = 2H_g \dot{\omega}_g \Rightarrow T_g - D_{tg} \omega_g + D_{tg} \omega_t - \frac{K_{tg} \omega_g}{s} + \frac{K_{tg} \omega_t}{s} = 2H_g s \omega_g$$

$$\omega_g T_g - D_{tg} \omega_g^2 + D_{tg} \omega_t \omega_g - \frac{K_{tg} \omega_g^2}{s} + \frac{K_{tg} \omega_t \omega_g}{s} = 2H_g s \omega_g^2 \quad (6.3)$$

Με γραμμικοποίηση γύρω από το σημείο λειτουργίας ($\omega_{t_0} = 1,884 \text{ rad/sec}$, $\omega_{g_0} = 157 \text{ rad/sec}$) έχουμε :

$$\begin{aligned} \Delta P_{el} + \left(\frac{1}{s} K_{tg} \omega_{g_0} + D_{tg} \omega_{g_0} \right) \Delta \omega_t &= \\ = \left(4H_g s \omega_{g_0} + 2D_{tg} \omega_{g_0} - D_{tg} \omega_{t_0} + \frac{1}{s} K_{tg} 2\omega_{g_0} - \frac{1}{s} K_{tg} \omega_{t_0} \right) \Delta \omega_g & \end{aligned} \quad (6.4)$$

Από την δεύτερη εξίσωση της Εξ.(7.2) έχουμε :

$$\begin{aligned} D_{tg} (\omega_g - \omega_t) + K_{tg} \left(\frac{\omega_g}{s} - \frac{\omega_t}{s} \right) - T_t &= 2H_t \dot{\omega}_t \Rightarrow \\ D_{tg} \omega_g \omega_t - D_{tg} \omega_t^2 + \frac{1}{s} K_{tg} \omega_g \omega_t - \frac{1}{s} K_{tg} \omega_t^2 - \omega_t T_t &= 2H_t s \omega_t^2 \end{aligned} \quad (6.5)$$

Με γραμμικοποίηση έχουμε :

$$\begin{aligned} \left(D_{tg} \omega_{t_0} + \frac{1}{s} K_{tg} \omega_{t_0} \right) \Delta \omega_g - \Delta P_m &= \\ = \left(-D_{tg} \omega_{g_0} + 2D_{tg} \omega_{t_0} - \frac{1}{s} K_{tg} \omega_{g_0} + \frac{1}{s} K_{tg} 2\omega_{t_0} + 4H_t s \omega_{t_0} \right) \Delta \omega_t & \end{aligned} \quad (6.6)$$

Όπως αναφέραμε και στο κεφάλαιο 3 ο μηχανικός βαθμός απόδοσης C_p δίνεται από την Εξ.(3.9) όπως υπενθυμίζεται παρακάτω :

$$C_p = (0.44 - 0.0167\beta) \sin \frac{\pi(\lambda - 3)}{15 - 0.3\beta} - 0.00184(\lambda - 3)\beta \quad (6.7)$$

Με γραμμικοποίηση της Εξ.(7.1) που δίνει την μηχανική ισχύ έχουμε :

$$\Delta P_m = 286290 \Delta \omega_t - 92851 \Delta \beta \quad (6.8)$$

Στο σχεδιάγραμμα ελέγχου του Σχ.(7.3) το ηλεκτρικό φορτίο ΔP_{el} θεωρείται ως διαταραχή. Γι' αυτό το λόγο λαμβάνοντας υπόψη τις Εξ.(7.4),(7,6),(7,8) και τις τιμές των παραμέτρων από παράρτημα Α, εξάγουμε την επόμενη γραμμική εξίσωση :

$$\Delta \omega_g = 5.56 \frac{s(s + 96.15)}{s^4 + 43.72s^3 - 326.11s^2 + 2665.8s - 29592.37} \Delta \beta = G_3 \Delta \beta \quad (6.9)$$

Η Εξ.(6.9) μας δίνει την γωνιακή ταχύτητα της γεννήτριας της Α/Γ συναρτήσει της γωνίας κλίσης των πτερυγίων $\Delta\beta$.

Θέτουμε ως

$$5.56 \frac{s(s+96.15)}{s^4 + 43.72s^3 - 326.11s^2 + 2665.8s - 29592.37} = G_3 \quad (6.10)$$

Από το Σχ.(7.3) έχουμε :

$$\begin{aligned} \Delta\omega_{sg} &= G_2(\Delta P_m - \Delta P_{el} - T_{12}(\Delta\delta_1 - \Delta\delta_2)) \Rightarrow \\ \Delta\omega_{sg} &= G_2\Delta P_m - G_2\Delta P_{el} - G_2T_{12}\left(\frac{1}{s}\Delta\omega_{sg} - \frac{1}{s}\Delta\omega_g\right) \Rightarrow \\ \left(1 + \frac{1}{s}G_2T_{12}\right)\Delta\omega_{sg} &= G_1G_2\Delta\mu - G_2\Delta P_{el} + \frac{1}{s}G_2T_{12}\Delta\omega_g \Rightarrow \\ \Delta\omega_{sg} &= G_1G_2\left(1 + \frac{G_2T_{12}}{s}\right)^{-1}\Delta\mu + \frac{G_2T_{12}}{s}\left(1 + \frac{G_2T_{12}}{s}\right)^{-1}G_3\Delta\beta \end{aligned} \quad (6.11)$$

Η τελευταία σχέση μας δίνει τη γωνιακή ταχύτητα της σύγχρονης γεννήτριας του Α.Η.Σ. συναρτήσει του καυσίμου $\Delta\mu$ του ατμοστροβίλου και της γωνίας κλίσης των πτερυγίων της Α/Γ $\Delta\beta$. Έχει τη μορφή δηλαδή :

$$\Delta\omega_{sg} = h_1\Delta\mu + h_2\Delta\beta \quad (6.12)$$

όπου :

$$h_1 = G_1G_2\left(1 + \frac{G_2T_{12}}{s}\right)^{-1} \quad (6.13)$$

$$h_2 = \frac{G_2T_{12}}{s}\left(1 + \frac{G_2T_{12}}{s}\right)^{-1}G_3 \quad (6.14)$$

Η εξίσωση (6.12) δίνει τη σχέση μεταξύ εξόδου ω_{sg} (γωνιακή ταχύτητα σύγχρονης γεννήτριας ατμοστροβίλου) και των δύο εισόδων του συστήματος, του καυσίμου μ_o του ατμοστροβίλου και της γωνίας κλίσης β των πτερυγίων της Α/Γ. Αντιλαμβανόμαστε επομένως ότι ελέγχοντας αυτές τις δύο παραμέτρους, μπορούμε να έχουμε σταθερή συχνότητα και τάση στο υβριδικό σύστημα μας.

Η συνάρτηση μεταφοράς του Α.Η.Σ. λαμβάνεται ως $G_1(s) = \frac{K_p}{1+T_p s}$, και με αντικατάσταση των τιμών από παράρτημα Γ παίρνουμε ότι :

$$G_1(s) = \frac{100}{1+2.4s} \quad (6.15)$$

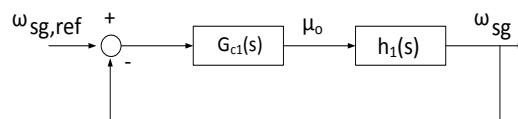
Όπως έχει ήδη αναφερθεί, μεταξύ των δύο πηγών ενέργειας υπάρχει γραμμή μεταφοράς μέσης τάσης. Επίσης είναι γνωστό ότι η ροή ισχύος P_{12} που ρέει από τη μία γραμμή μεταφοράς (με τάση V_1 και φάση δ_1) στην άλλη (με τάση V_2 και φάση δ_2) δίνεται από τον τύπο $P_{12} = \frac{V_1 V_2}{X} \sin \delta_{12}$, όπου δ_{12} είναι η διαφορά φάσης των γωνιών $\delta_1 - \delta_2$. Στο γραμμικοποιημένο μοντέλο ισχύει ότι $\sin \delta_{12} \approx \delta_{12}$ και επομένως $T_{12} = \frac{V_1 V_2}{X}$. Απο παράρτημα Β έχουμε ότι $T_{12} = 16,8$ ανά μονάδα. Αντικαθιστώντας τώρα τις Εξ.(6.2),(6.10),(6.15) στις Εξ(6.13),(6.14) προκύπτει ότι :

$$h_1(s) = \frac{360s^4 + 1014s^3 + 840s^2 + 200s}{5.76s^6 + 46.27s^5 + 4133s^4 + 30780s^3 + 58080s^2 + 27218s + 3360} \quad (6.16)$$

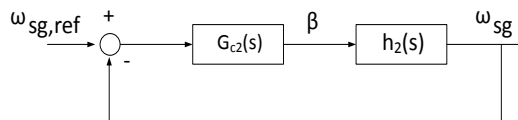
$$h_2(s) = \frac{0.03s}{s^3 - 7.75s^2 + 55.95s - 625.25} \quad (6.17)$$

6.5 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΕΛΕΓΚΤΩΝ

Από την παραπάνω ανάλυση, έχουμε δύο βρόχους για τον έλεγχο ισχύος για κάθε μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας όπως παρουσιάζονται στο Σχ.6.5α και Σχ.6.5β .

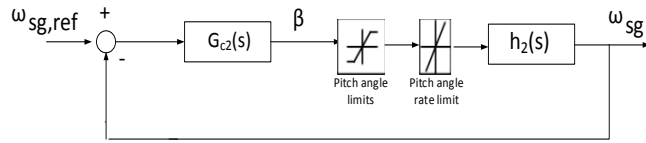


Σχήμα 6.5α : Κλειστός βρόχος ελέγχου Α.Η.Σ. [5].



Σχήμα 6.5β : Κλειστός βρόχος ελέγχου Α/Γ [5].

Πρέπει να σημειώσουμε ότι στην περίπτωση του ελεγκτή της Α/Γ έχει ληφθεί υπόψη ότι υπάρχουν όρια για την τιμή της γωνίας και του ρυθμού μεταβολής της γωνίας, όπως φαίνεται και στο Σχ.6.5γ, ώστε να προσεγγίσουμε το σύστημα όσο το δυνατόν στην πραγματικότητα.



Σχήμα 6.5γ : Ολοκληρωμένος κλειστός βρόχος ρύθμισης πτερυγίων A/G [5].

Για το σχεδιασμό επιλέγουμε PID ελεγκτές των οποίων ως γνωστό η συνάρτηση μεταφοράς είναι της μορφής $G(s) = \frac{K_D s^2 + K_P s + K_I}{s}$. Αυτοί οι ελεγκτές έχουν το πλεονέκτημα έναντι των υπόλοιπων ελεγκτών ότι είναι γρήγοροι (P=proportional, αναλογικός), κάνουν ακριβή ρύθμιση μηδενίζοντας το σφάλμα (I=integral, ολοκληρωτικός) και αντιδρούν στις μεταβολές της ελεγχόμενης μεταβλητής (D=derivative, διαφορικός). Η συνάρτηση μεταφοράς ανοιχτού βρόχου γίνεται :

για τον ελεγκτή G_{c1} του καυσίμου του Α.Η.Σ.

$$G_{c1}h_1(s) = \frac{(360s^4 + 1014s^3 + 840s^2 + 200s)(K_D s^2 + K_P s + K_I)}{(5.76s^6 + 46.27s^5 + 4133s^4 + 30780s^3 + 58080s^2 + 27218s + 3360)s} \quad (6.18)$$

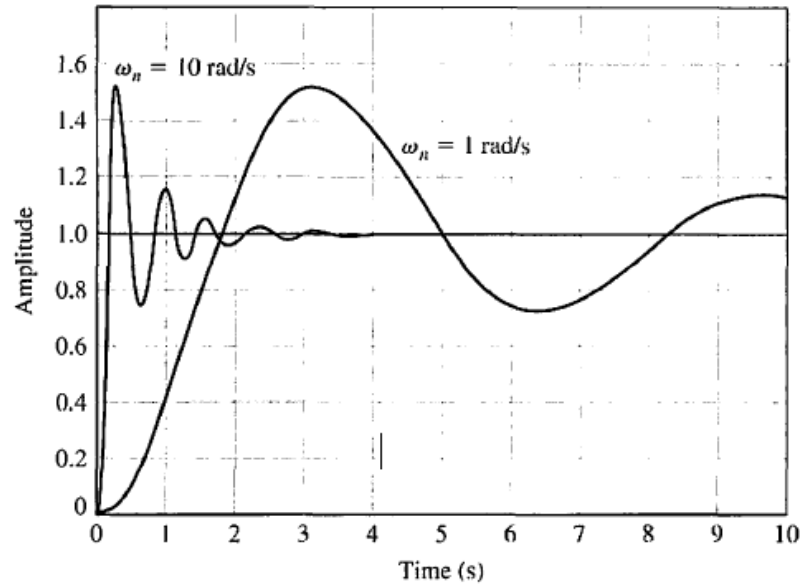
όμοια, για τον ελεγκτή G_{c2} της γωνίας κλίσης πτερυγίων της A/G

$$G_{c2}h_2(s) = \frac{0.03s(K_D s^2 + K_P s + K_I)}{(s^3 - 7.75s^2 + 55.95s - 625.25)s} \quad (6.19)$$

Σύμφωνα με τη θεωρία των Συστημάτων Αυτόματου Ελέγχου (Σ.Α.Ε.), το χαρακτηριστικό πολυώνυμο της συνάρτησης μεταφοράς ενός συστήματος κλειστού βρόχου 3ου βαθμού και 6ου βαθμού είναι της γενικής μορφής [4].

$$s^3 + 1.75\omega_n s^2 + 2.15\omega_n^2 s + \omega_n^3, \\ s^6 + 3.25\omega_n s^5 + 6.60\omega_n^2 s^4 + 8.6\omega_n^3 s^3 + 7.45\omega_n^4 s^2 + 3.95\omega_n^5 s + \omega_n^6 \quad (6.20)$$

Η παράμετρος ω_n ονομάζεται φυσική συχνότητα και καθορίζει σε μεγάλο βαθμό τη βηματική απόκριση του συστήματος. Στο Σχ.6.6 φαίνεται η βηματική απόκριση συστήματος δευτέρου βαθμού για δυο ακραίες τιμές της παραμέτρου ω_n .



Σχήμα 6.6 : βηματική απόκριση συστήματος για δυο ακραίες τιμές της παραμέτρου ω_n [4].

Σύμφωνα με το Σχ.6.6, το ω_n προσδιορίζει σε μεγάλο βαθμό την υπερύψωση του συστήματος. Μικρό ω_n σημαίνει μικρή υπερύψωση και μεγάλο χρόνο αποκατάστασης ισορροπίας του συστήματος. Αντίθετα, μεγάλο ω_n σημαίνει μεγάλη υπερύψωση και μικρό χρόνο αποκατάστασης ισορροπίας. Γι' αυτό το λόγο επιλέγουμε μια μέση τιμή για το ω_n ώστε να συνδυάσουμε γρήγορη αποκατάσταση ισορροπίας του συστήματος με όσο το δυνατόν μικρή υπερύψωση, να βρισκόμαστε δηλαδή σε ανεκτά όρια της συχνότητας, όχι περισσότερο από $\pm 1\%$ της ονομαστικής τιμής.

Έχοντας υπόψη τα χαρακτηριστικά πολυώνυμα των συστημάτων που δίνονται από τις Εξ.(6.18) και (6.19) και σε συνδυασμό με τις γενικές εξισώσεις 6.20, αν θέσουμε αυθαίρετη τιμή $\omega_n = 10$, προκύπτουν συστήματα εξισώσεων των οποίων η επίλυση μας δίνει τα K_p, K_I, K_D για τους δύο ελεγκτές. Έτσι έχουμε για τον ελεγκτή G_{c1} του καυσίμου του Α.Η.Σ : $K_p = -45, K_I = -21.71, K_D = -0.0001$ και για τον ελεγκτή G_{c2} της γωνίας κλίσης πτερυγίων της Α/Γ : $K_p = 9468, K_I = 110841, K_D = 958$
Είναι σημαντικό να τονίσουμε ότι το K_D του ελεγκτή G_{c1} και G_{c2} είναι πρακτικά μηδέν και ουσιαστικά έχουμε PI ελεγκτές. Στην εξομοίωση του συστήματος είτε λαμβάναμε υπόψη τα K_D των δυο ελεγκτών είτε όχι, τα αποτελέσματα δεν διαφοροποιούνταν. Λαμβάνοντας υπόψη πλέον τις τιμές των K_p, K_I, K_D οι Εξ.(6.18) και (6.19) έχουν τη μορφή

$$T_1(s) = \frac{-16200s^4 - 53445s^3 - 59814s^2 - 27236s - 4342}{5.76s^6 + 46.27s^5 + 4133s^4 + 30780s^3 + 58080s^2 + 27218s + 3360} \quad (6.21)$$

ανοιχτού βρόχου του Α.Η.Σ..

$$T_2(s) = \frac{28.74s^2 + 284s + 3325.23}{s^3 - 7.75s^2 + 55.95s - 625.25} \quad (6.22)$$

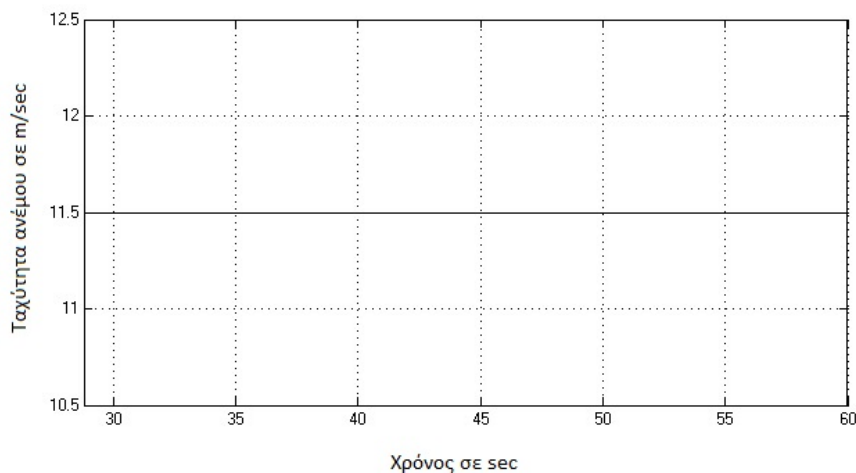
ανοιχτού βρόχου της Α/Γ.

6.6 ΕΞΟΜΟΙΩΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

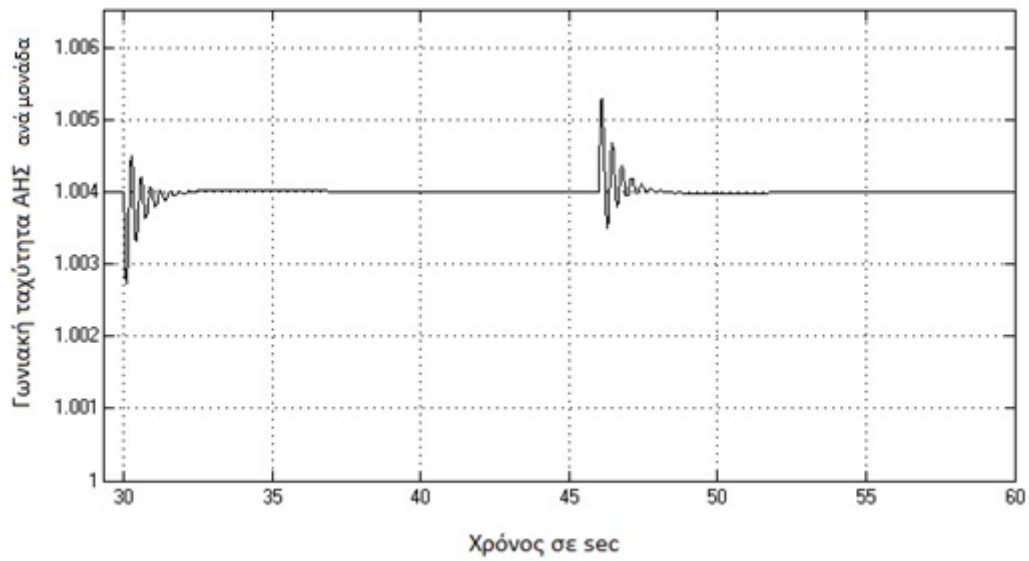
Στην ενότητα αυτή θα γίνει η προσομοίωση του συστήματος με εφαρμογή σε δύο σενάρια. Στο πρώτο σενάριο, το υβριδικό σύστημα θα κληθεί να τροφοδοτήσει το σύστημα με σταθερή ταχύτητα ανέμου (11,5 m/s) αλλά με μεταβολή του φορτίου από 2MW σε 3MW στα 30 sec και πάλι σε 2MW στα 46 sec. Στο δεύτερο σενάριο το σύστημά μας θα τροφοδοτήσει φορτίο 2MW και με ταχύτητα ανέμου που θα ξεκινάει από τα 9 m/s (35 sec) και θα φτάνει στα 11,5m/s (37,5 sec).

6.6.1 Σενάριο 1-Σχόλια

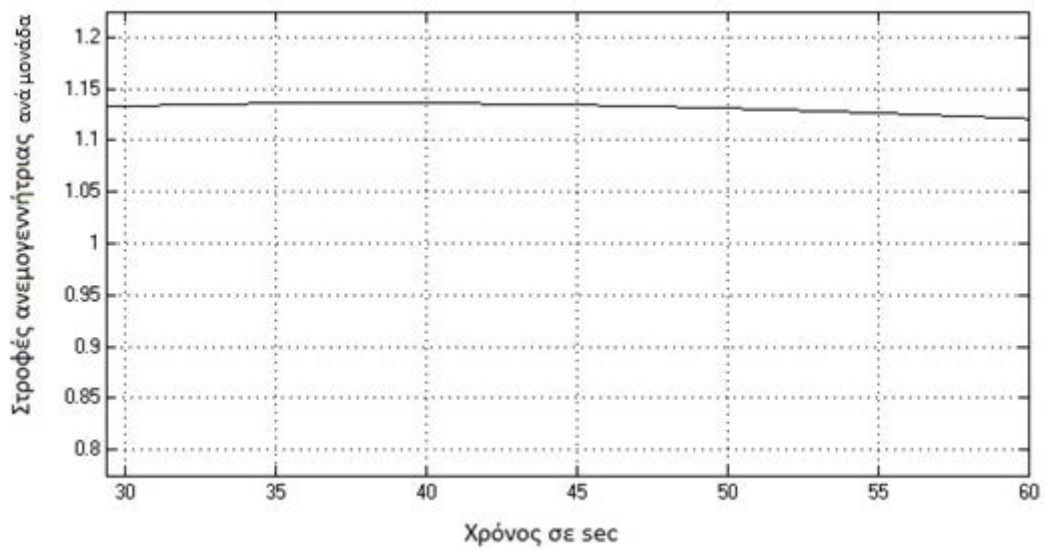
Παρουσίαση των διαγραμμάτων από την προσομοίωση.



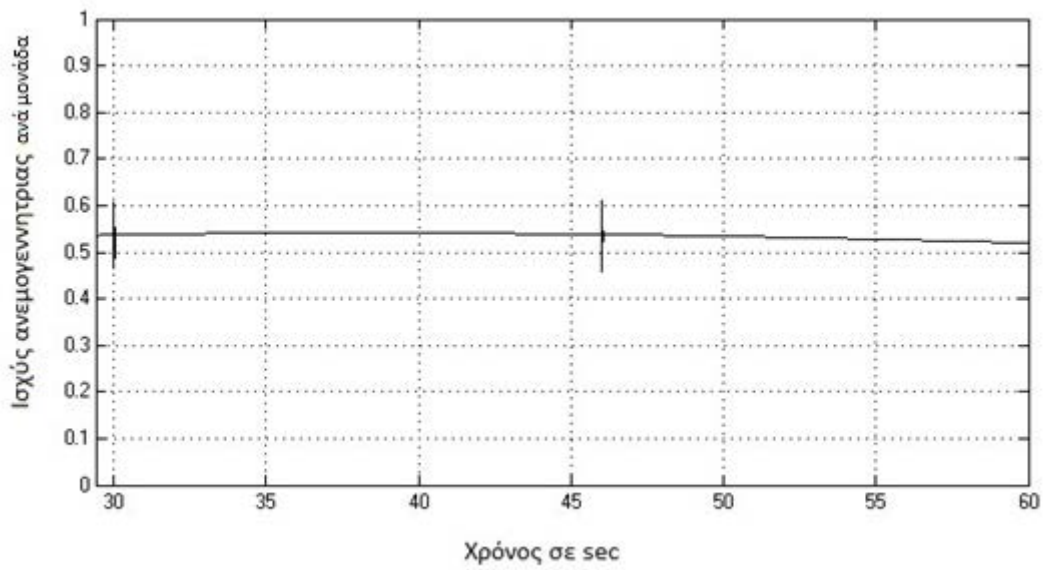
Σχήμα 6.7 : Ταχύτητα ανέμου (m/s).



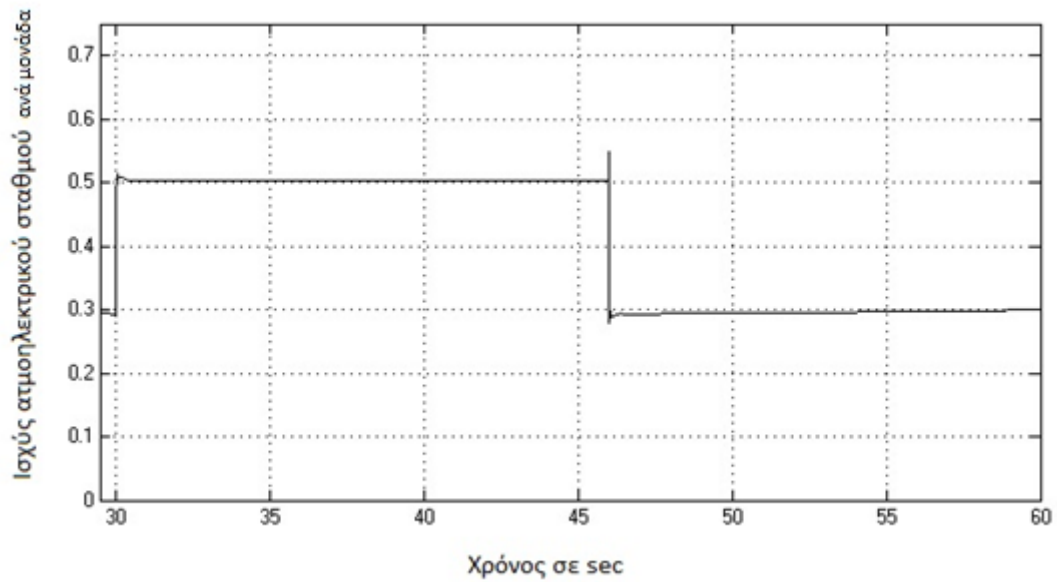
Σχήμα 6.8 : Γωνιακή ταχύτητα περιστροφής ρότορα ατμοστροβίλου ανά μονάδα.



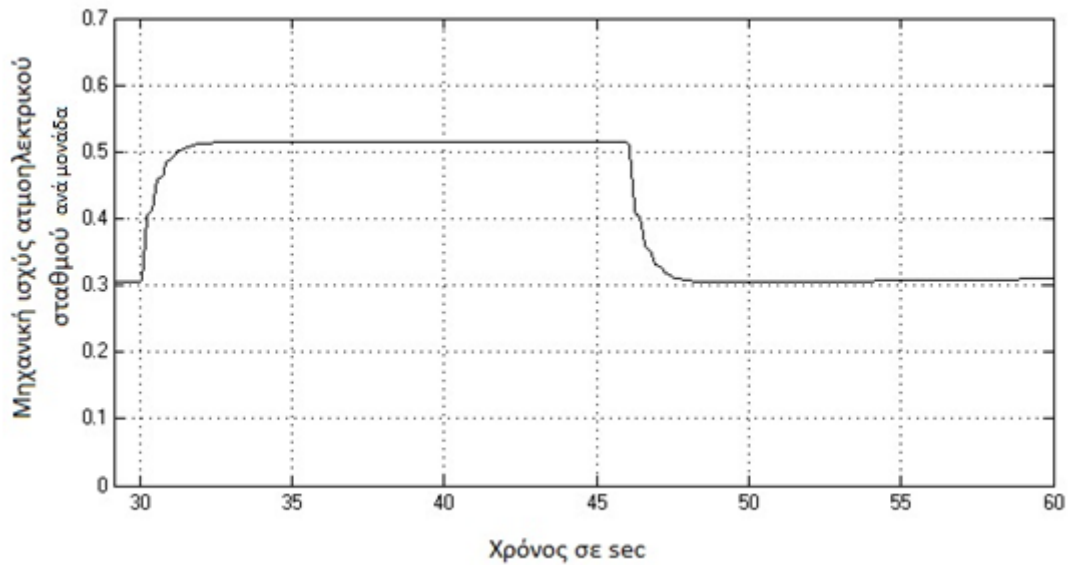
Σχήμα 6.9 : Γωνιακή ταχύτητα περιστροφής ρότορα Α/Γ ανά μονάδα.



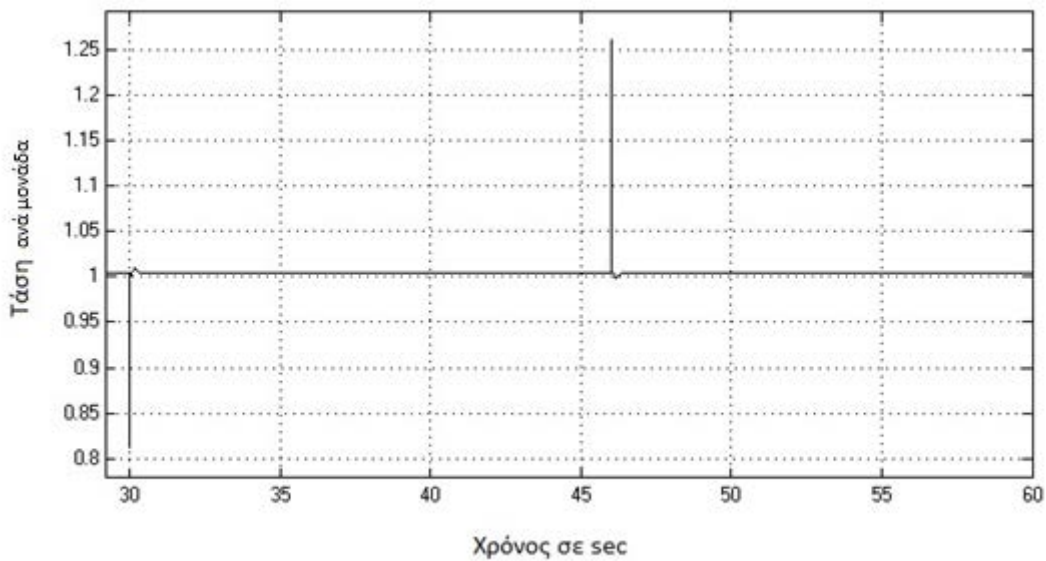
Σχήμα 6.10 : Παραγόμενη ισχύς ΑΓ ανά μονάδα.



Σχήμα 6.11 : Παραγόμενη ισχύς Α.Η.Σ. ανά μονάδα.



Σχήμα 6.12 : Μηχανική ισχύς Ατμοηλεκτρικού σταθμού ανά μονάδα.



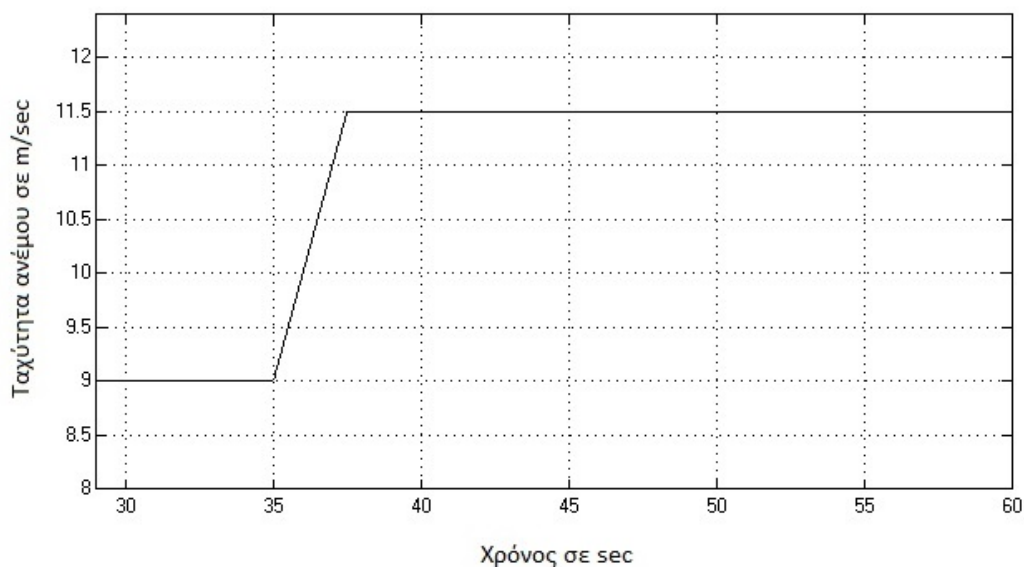
Σχήμα 6.13 : Τάση δικτύου ανά μονάδα.

Σαν επιβεβαίωση ευστάθειας του υβριδικού συστήματος θεωρούμε την τάση και τη συχνότητα. Η τάση όπως φαίνεται και από το Σχ.6.13 είναι σταθερή στο 1p.u. με διακυμάνσεις μόνο που εντοπίζονται στις αλλαγές φορτίου, χωρίς όμως να είναι δυσλειτουργικές μιας και ο χρόνος στον οποίο συμβαίνουν είναι τόσο μικρός ώστε να μη θέτει το δίκτυό μας σε κίνδυνο. Η συχνότητα του δικτύου θεωρείται σταθερή αφού υπεύθυνη για αυτή είναι η γωνία περιστροφής του Α.Η.Σ.. Η διακύμανσή της γωνίας

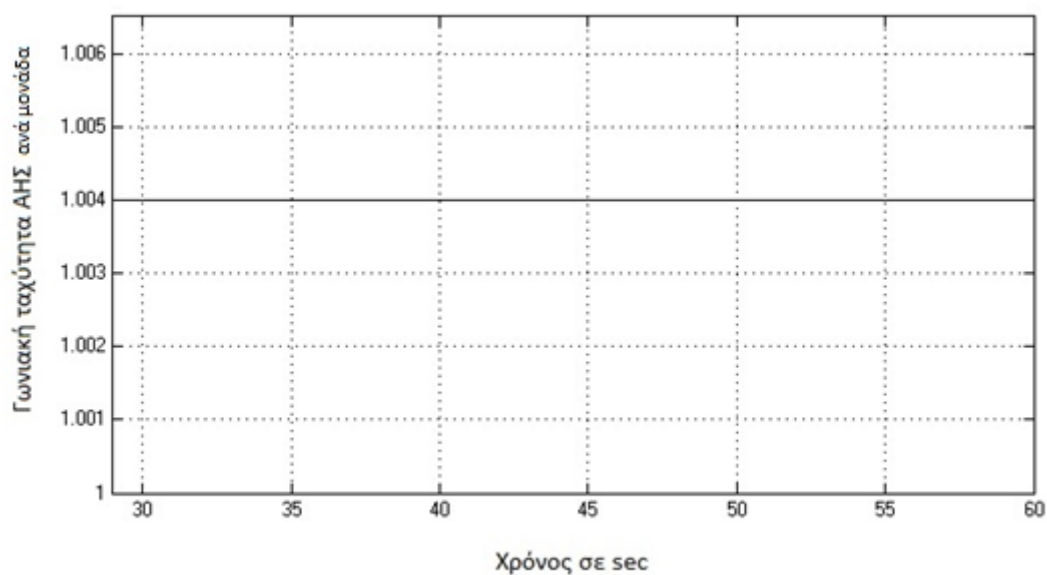
αυτής είναι ελάχιστη και μέσα στα όρια, θεωρείται σταθερή και υπεύθυνος για αυτή τη σταθερότητα είναι ο ελεγκτής G_{c1} . Η ισχύς που παράγεται από τον ΑΗΣ (Σχ.6.11) ξεκινά από τα 0,3 p.u. και αυξάνει στα 0,5 p.u. με την αύξηση του φορτίου για να μειωθεί και πάλι στα 0,3 p.u. όταν μειωθεί το φορτίο. Κατά τη διάρκεια αυτή η μηχανική ισχύς του Α.Η.Σ. (Σχ.6.12) ακολουθεί την αυξομείωση της ισχύος του Α.Η.Σ. Η ισχύς της Α/Γ (Σχ.6.10) ξεκινά στα 0,54 p.u. και παραμένει σχεδόν σταθερή κατά τη διάρκεια των μεταβολών. Οι στροφές της Α/Γ (Σχ. 6.9) παραμένουν περίπου σταθερές στα 1,13 p.u..

6.6.2 Σενάριο 2-Σχόλια

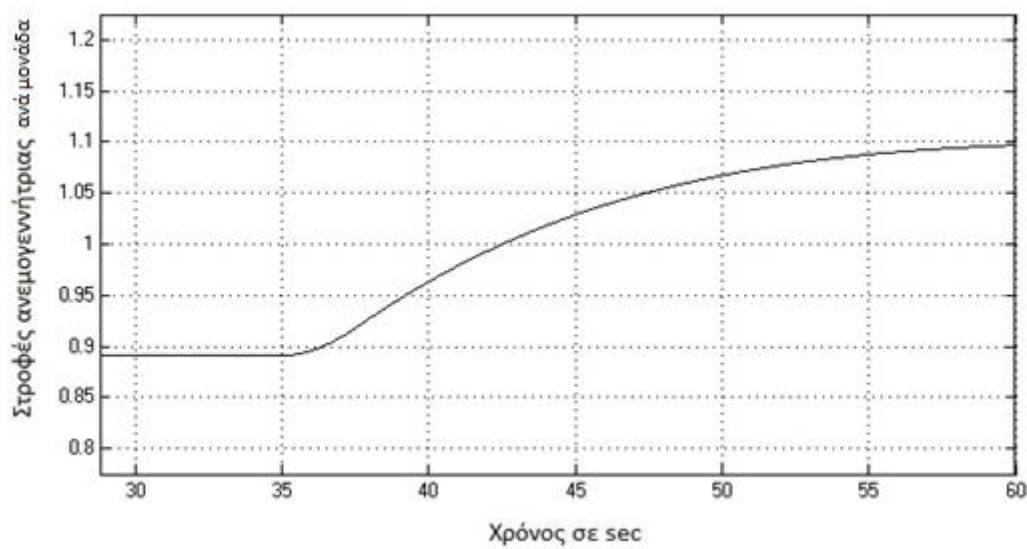
Παρουσίαση των διαγραμμάτων από τη προσομοίωση.



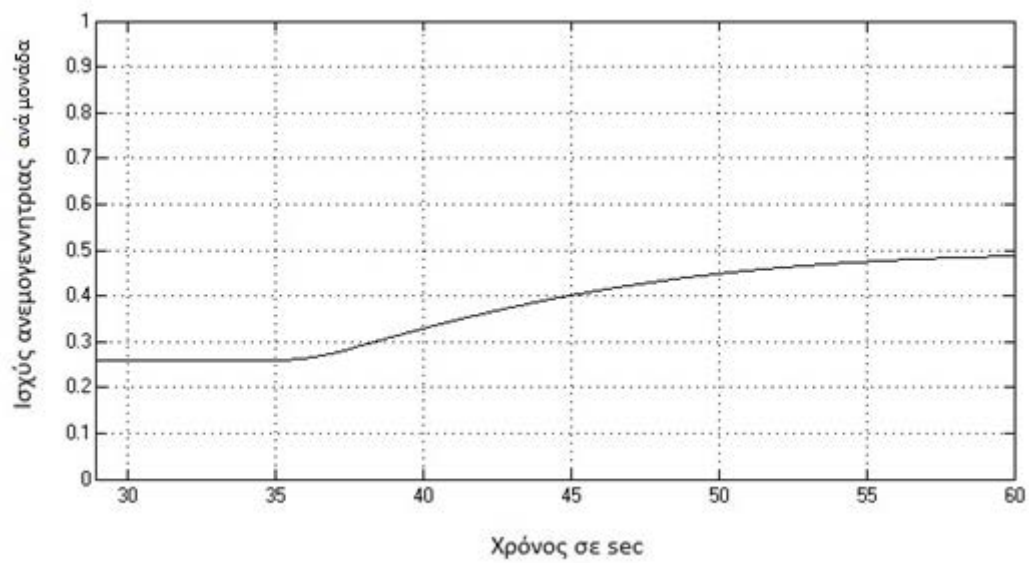
Σχήμα 6.14 : Ταχύτητα ανέμου (m/s).



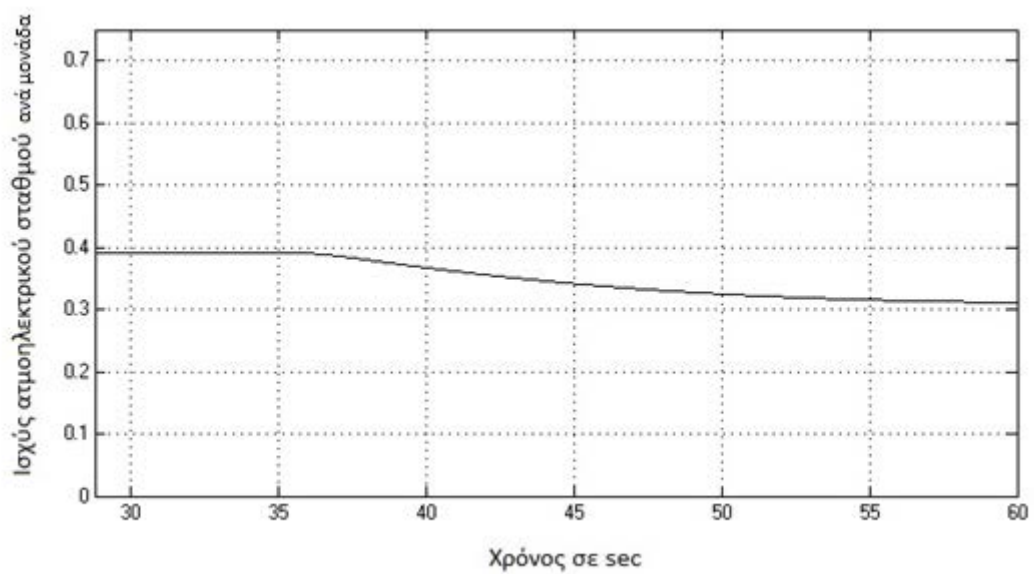
Σχήμα 6.15 : Γωνιακή ταχύτητα περιστροφής ρότορα ατμοστροβίλου ανά μονάδα.



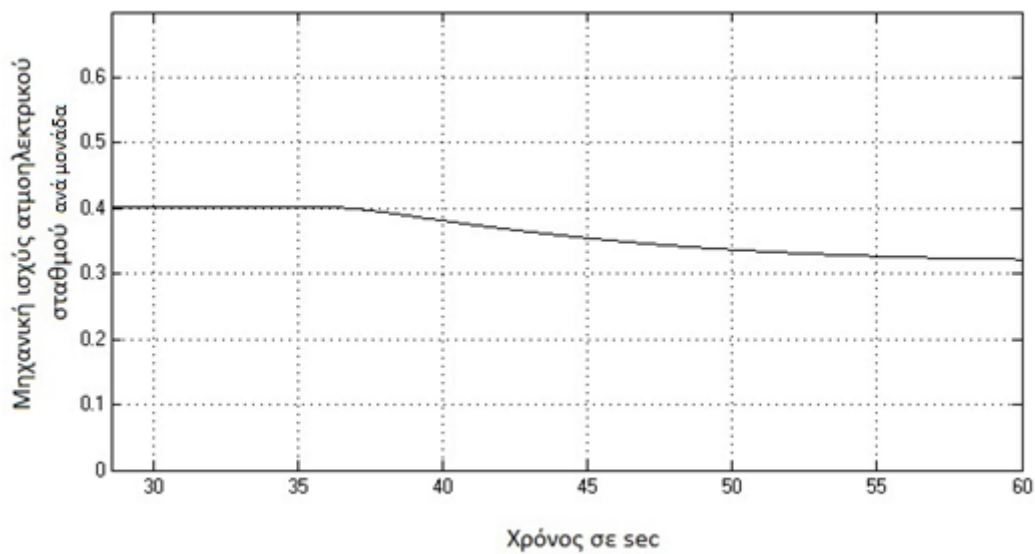
Σχήμα 6.16 : Γωνιακή ταχύτητα περιστροφής ρότορα Α/Γ ανά μονάδα.



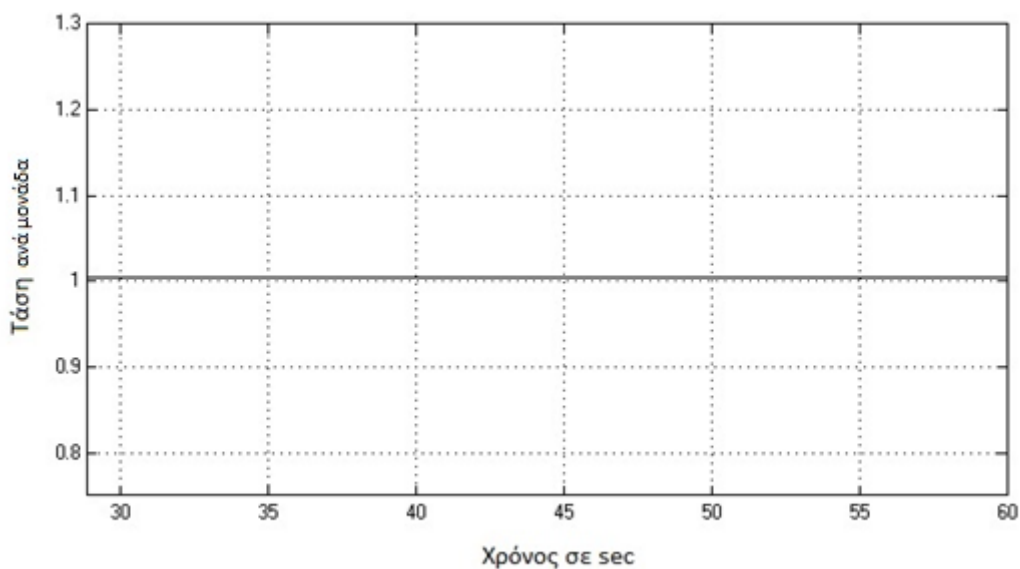
Σχήμα 6.17 : Παραγόμενη ισχύς Α/Γ ανά μονάδα.



Σχήμα 6.18 : Παραγόμενη ισχύς Α.Η.Σ. ανά μονάδα.



Σχήμα 6.19 : Μηχανική ισχύς Α.Η.Σ. ανά μονάδα.



Σχήμα 6.20 : Τάση δικτύου ανά μονάδα.

Στο δεύτερο σενάριο όπου έχουμε αύξηση βαθμιαία της ταχύτητας ανέμου (Σχ.6.14) σε σταθερό φορτίο βλέπουμε ότι η γωνιακή ταχύτητα του Α.Η.Σ. (Σχ.6.15) παραμένει σταθερή στο 1ρ.υ. όπως και η τάση του δικτύου (Σχ.6.20). Η ισχύς του Α.Η.Σ. (Σχ.6.18) που ξεκινά από τα 0,4ρ.υ. αρχίζει να μειώνεται βαθμιαία από τα 35 sec καταλήγοντας στα 0,3ρ.υ. στο τέλος, ενώ την ακριβώς αντίθετη συμπεριφορά έχει η ισχύς της Α/Γ (Σχ.6.17) και η οποία από τα 0,25ρ.υ. αρχίζει να αυξάνει φτάνοντας στα 0,5ρ.υ.. Η μηχανική ισχύ του Α.Η.Σ. (Σχ.6.19) ακολουθεί τη μείωση της ισχύος εξόδου του Α.Η.Σ..

6.7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία σχεδιάστηκε και εξομοιώθηκε ένα απομονωμένο υβριδικό σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας αποτελούμενο από ανεμογεννήτρια και ατμοηλεκτρικό σταθμό με στόχο τη δημιουργία ενός σταθερού και αξιόπιστου συστήματος με σταθερή τάση και συχνότητα.

Στην αρχή αφού έγινε μια εκτενή αναφορά στα υπάρχοντα συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και στα υβριδικά συστήματα, παρουσιάστηκε το μοντέλο πολλών σταδίων του ατμοστροβίλου του ατμοηλεκτρικού σταθμού που χρησιμοποιήθηκε για την εξαγωγή της συνάρτησης μεταφοράς του. Στη συνέχεια αποδόθηκε λεπτομερώς η επαγωγική γεννήτρια διπλής τροφοδοσίας και η θεωρία που χρησιμοποιήσαμε. Ακόμα έγινε λεπτομερή αναφορά στο μετατροπέα της γεννήτριας, κρίσιμο σημείο για να γίνει κατανοητή η παλμοδότηση των στοιχείων της και ο τρόπος παραγωγής παλμών. Ακολούθησε η σχεδίαση των PID ελεγκτών με τη θεωρία του κλασσικού ελέγχου που κρίθηκαν αναγκαίοι για τον έλεγχο του υβριδικού συστήματος. Οι ελεγκτές που σχεδιάστηκαν είναι απλής μορφής και εύκολο να υλοποιηθούν σε μικροεπεξεργαστή.

Τέλος, έγινε η εξομοίωση του μη γραμμικού συνολικού υβριδικού συστήματος στο πρόγραμμα Matlab-Simulink για την εκτίμηση της συμπεριφοράς του συστήματος. Τα αποτελέσματα παρουσιάστηκαν σε διαγράμματα.

Το υβριδικό μας σύστημα, με τη χρήση των προτεινόμενων ελεγκτών παρουσιάζει πολύ καλή συμπεριφορά όσον αφορά τη συχνότητα και την τάση υπό μεγάλες αλλαγές στην ταχύτητα του ανέμου και στο φορτίο.

Πρέπει να σημειώσουμε ότι η ονομαστική τιμή του ατμοηλεκτρικού σταθμού ήταν μεγαλύτερη του φορτίου. Η συμβατική μονάδα υπερκάλυπτε το φορτίο και αυτό ήταν ίσως ένας επιπλέον λόγος για τον οποίο το σύστημα επέδειξε τέτοια σταθερότητα. Κάτι όμως που δεν είναι κακό μιας και θέλουμε να έχουμε αξιόπιστη παραγωγή ενέργειας με σταθερή τάση και συχνότητα. Σαν προοπτική βελτίωσης και εξέλιξης του συστήματος θα μπορούσαμε να σχεδιάσουμε τους ελεγκτές με διαφορετικές μεθόδους και να χρησιμοποιήσουμε και άλλες σύγχρονες θεωρίες αυτομάτου ελέγχου, ώστε να πετύχουμε καλύτερη συμπεριφορά του συστήματος σε μεγάλο εύρος μεταβολών του φορτίου και του ανέμου.

Επιπλέον ως περαιτέρω έρευνα θα μπορούσαμε να δοκιμάσουμε την απόκριση του συστήματος σε περίπτωση πλήρους και απότομης αποκοπής της ανεμογεννήτριας από το δίκτυο. Επίσης, μπορούμε να δούμε την ελάχιστη ισχύ που θα πρέπει να έχει ο ατμοηλεκτρικός σταθμός θέτοντας όλους αυτούς τους στόχους που προαναφέραμε. Άλλωστε αυτός είναι και ένας από τους στόχους του υβριδικού συστήματος, να μπορέσουμε να τροφοδοτήσουμε απομακρυσμένες περιοχές όπου δεν υπάρχει δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας ή ακόμα και οικισμούς ή βιομηχανικές μονάδες με όσο το δυνατόν μεγαλύτερη συμμετοχή των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

Η καινοτομία της διπλωματικής αυτής εργασίας έγκειται στο γεγονός ότι προτάθηκε ένας καινούριος και διαφορετικός τρόπος ελέγχου και διατήρησης της συχνότητας και της τάσης του αυτόνομου υβριδικού συστήματος . Ο έλεγχος της γωνίας κλίσης των πτερυγίων, δεν οδηγείται από την ταχύτητα του ανέμου αλλά από την απόκλιση της ταχύτητας της σύγχρονης γεννήτριας από την ονομαστική της τιμή. Αυτό εξασφαλίζει τη διατήρηση τη συχνότητας σε όλες τις μεταβολές του φορτίου.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της μελέτης η υλοποίηση υβριδικών συστημάτων με συμμετοχή μονάδων ΑΠΕ είναι εφικτή. Ο έλεγχος των διαφόρων μονάδων του συστήματος μπορεί να εξασφαλίσει σταθερή τάση και συχνότητα στο φορτίο. Λαμβάνοντας υπόψη το γεγονός ότι η Ελλάδα είναι πλούσια σε αιολικό και ηλιακό δυναμικό, μπορούμε να διατυπώσουμε τη σκέψη ότι υπάρχουν οι καλύτεροι οιωνοί για τη μελέτη και εγκατάσταση υβριδικών συστημάτων σε περιοχές όπου η ηλεκτροδότηση είναι δύσκολη από το διασυνδεδεμένο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας όπως στη νησιωτική περιφέρεια της χώρας. Ο συνδυασμός ήλιου και αιολικού δυναμικού θα δώσει υβριδικά συστήματα με το ελάχιστο δυνατό ποσοστό συμμετοχής από μια συμβατική μονάδα. Το αποτέλεσμα θα μπορούσε να γίνει ακόμα πιο φιλικό προς το περιβάλλον αντικαθιστώντας τη συμβατική μονάδα με μια μονάδα βιομάζας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Abad, G., Lopez, J., Rodriguez, M.A., Marroyo, L., and Iwanski, G.: 'Doubly Fed Induction Machine' (IEEE Press, 2011).
2. Bianchi, F.D., Battista, H., and Mantz, R.J.: 'Wind Turbine Control Systems: Principles, Modeling and Gain Scheduling Design. - (Advances in Industrial Control)' (Springer, 2007).
3. Bizon N., Shayeghi H., and Mahdavi Tabatabaei N., 'Analysis, Control and Optimal Operations in Hybrid Power Systems, Advanced Techniques and Applications for Linear and Nonlinear Systems' (Springer, 2013).
4. Dorf, R.C., and Bishop, R.H.: 'Modern Control Systems' (Prentice-Hall, 2011, 12th end.).
5. Schinas, N., and Papazafeiropoulos, C.: 'State feedback and observer based control design of a hybrid system consisting of a steam power plant in cooperation with a doubly fed wind turbine', (has been accepted-under publish, 2016).
6. Schinas, N., and Vovos, N.: 'Digital Control of a Wind Turbine Supplying an Isolated Load in Cooperation with a Hydro Power Unit', Wind Engineering, 32, (6), pp. 587-601, 2008.
7. Vittal, V., and Ayyanar, R.: 'Grid Integration and Dynamic Impact of Wind Energy' (Springer, 2013).
8. Wang, X.F., Song, Y., and Irving, M.: 'Modern Power System Analysis' (Springer, 2008).
9. www.desmie.gr
10. www.ypeka.gr

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

A : Παράμετροι ανεμογεννήτριας

| | |
|--|-------------------------|
| Ροπή αδράνειας J_t | 800 kgm ² |
| Συντελεστής ακαμψίας K_{tg} | 12500 Nm/rad |
| Συντελεστής αμοιβαίας απόσβεσης D_{tg} | 130 Nms/rad |
| Ροπή αδράνειας J_g | 90 kgm ² |
| Ονομαστική ενεργός ισχύς P_N | 1.5 MW |
| Ονομαστική ηλεκτρική ροπή T_{eIN} or T_g | 9555 Nm |
| Τάση στάτη V_{SN} | 700 V |
| Ονομαστική ταχύτητα γεννήτριας η_{go} | 1500 rpm |
| Εύρος διακύμανσης ταχύτητας γεννήτριας | 900-2000 rpm |
| Ζεύγος πόλων | 2 |
| Διάμετρος πτερυγίων d | 60 m |
| Ονομαστική ταχύτητα ανέμου V_{wN} | 13 m/sec |
| Μέγιστος συντελεστής ισχύος A/Γ C_p | 0.44 |
| Πυκνότητα ανέμου | 1.125 kg/m ³ |
| Ονομαστική ταχύτητα A/K η_{to} | 18 rpm |
| Εύρος διακύμανσης ταχύτητας A/Γ | 9-18 rpm |

B : Παράμετροι γραμμής μέσης τάσης

| | |
|--|--------------------|
| Ονομαστική τάση V_N | 25 kV |
| Επαγωγική αντίσταση X_o | 2.917 Ω /km |
| Βάση αντίστασης Z_b για ισχύ 4.7 MVA | 133 Ω |
| Συνολικό μήκος | 20 km |

Γ : Παράμετροι σύγχρονης γεννήτριας ατμοηλεκτρικού

| | |
|--------------------------------|-----------|
| Ονομαστική ισχύς S_N | 4.7 MVA |
| Ονομαστική τάση στάτη V_{sN} | 1 kV |
| Ονομαστική συχνότητα f | 60 Hz |
| Συντελεστής αδράνειας H | 4.7 sec |
| Συντελεστής απωλειών F | 0.01 p.u. |
| Ζεύγος πόλων | 1 |

Abstract

This thesis presents a control strategy for a variable speed pitch-controlled wind turbine (WT) which supplies an autonomous system in cooperation with a small steam power unit. The WT consists of a doubly fed induction generator (DFIG) and operates in variable speed mode in order to maximize the power absorbed from the wind and minimize the amount of steam consumed by the steam power unit. The requirements from the control schemes are to deliver the total power from the WT to the isolated load under constant voltage and frequency and adjust suitably the power from the steam unit at the same time. There are two main controllers: the pitch controller of the WT, which drives the WT at such value of mechanical velocity that the proper amount of power from the wind is absorbed according to the existing load so that the requirements of the voltage and the frequency are realized. The second controller is responsible for the regulation of the corresponding amount of flow of steam mass into the steam turbine.

The controllers have been designed according to the classic theory based on the linearized model of the total hybrid system. The system has been tested with the real nonlinear model in SIMULINK software under two severe inputs: The first is a step change of the wind speed under constant load. The second is a step change of the 1/3 of the load under constant wind speed. Under both tests the controllers seem to cooperate very well and the variations of the voltage and the frequency are within acceptable limits.