



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ
ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ

ΕΙΔΗ & ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ ΣΕ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ ΚΑΙ ΑΙΟΛΙΚΑ ΠΑΡΚΑ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ Α. ΚΑΝΑΚΑΡΗΣ

Επιβλέπων : Μαρία Γ. Ιωαννίδου
Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάρτιος 2013



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ
ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ

ΕΙΔΗ & ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ ΣΕ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ ΚΑΙ ΑΙΟΛΙΚΑ ΠΑΡΚΑ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ Α. ΚΑΝΑΚΑΡΗΣ

Επιβλέπων : Μαρία Γ. Ιωαννίδου
Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή

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

.....
Ν. Θεοδώρου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Π. Τσαραμπάρης
Λέκτορας Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάρτιος 2003

.....
ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ Α. ΚΑΝΑΚΑΡΗΣ

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

© 2013 – All rights reserved

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

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

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζει και αναλύει τους τύπους των γεννητριών που υπάρχουν και χρησιμοποιούνται σήμερα στις ανεμογεννήτριες παγκοσμίως.

Με τις τεχνολογίες να έχουν ωριμάσει για τη μεγάλης κλίμακας παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τον άνεμο, τις ενεργειακές αγορές να έχουν αποδείξει ότι οι επενδύσεις στον συγκεκριμένο κλάδο είναι βιώσιμες και δελεαστικές και με τις δεσμεύσεις των αναπτυγμένων χωρών για μείωση των ρύπων προβλέπεται, τουλάχιστον για την επόμενη δεκαετία, θεαματική άνοδος στο ρυθμό εγκατάστασης αιολικών πάρκων.

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μία εισαγωγή στην αιολική ενέργεια, τα μέρη που αποτελούν μια ανεμογεννήτρια και τα είδη ανεμογεννητριών που χρησιμοποιούντε τα τελευταία χρόνια.

Στο δεύτερο κεφάλαιο αναλύεται η μηχανή επαγωγής ή αλλιώς ασύγχρονη μηχανή. Η ανεμογεννήτρια τύπου Α και τύπου Β και οι τεχνικές ελέγχου της μηχανής επαγωγής.

Στο τρίτο κεφάλαιο αναλύεται η μηχανή επαγωγής διπλής τροφοδοσίας (DFIG) που είναι από τις συμαντικότερες κατηγορίες μηχανών που χρησιμοποιούνται στις ανεμογεννήτριες μέχρι και σήμερα

Στο τέταρτο κεφάλαιο αναλύονται οι σύγχρονες μηχανές που χρησιμοποιούνται στις ανεμογεννήτριες, τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα και στο πέμπτο και τελευταίο κεφάλαιο γίνονται κάποιες παρατηρήσεις και βγαίνουν κάποια συμπεράσματα για την σημερινή κατάσταση και για το ποιές μηχανές χρησιμοποιούντε και ποιά η τάση για το μέλλον.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ

Ανεμογεννήτρια, αιολική ενέργεια, γεννήτρια επαγωγής, γεννήτρια επαγωγής διπλής τροφοδοσίας, σύγχρονές μηχανές, τεχνικές ελέγχου, μετατροπέας.

ABSTRACT

This project examines and analyzes the types of generators that exist and are used today in wind turbines worldwide.

It is known that development of technology has developed to the large-scale production of electricity sake of wind and energy markets which have proved that investment in this particular sector is viable and attractive. In addition, the commitments of developed countries have reduced emissions, at least for the past decade; it has an effect on a significant increase in the proportion of installation of wind farms.

The first chapter is an introduction to wind energy. The parts are consisted of wind turbine and the types of wind turbines that used in the recent years.

The second chapter analyzes the induction machine or otherwise asynchronous machine. The turbine types A and B and the control techniques of the induction machine.

The third chapter cites the Doubly-fed induction machine (DFIG), which is very valuable for the types of machines that used in wind turbines up today.

The fourth chapter presents the modern machinery that is used in wind turbines and focuses on the drawbacks and the benefits of them. To conclude, the fifth, and final, chapter makes some observations and some conclusions on the current situation. In this way, it is detected which machines used and what is the trend for the future.

KEY WORDS

wind turbines, wind energy, asynchronous machine, Doubly-fed induction machine, DFIG, Synchronous machines, control techniques, converter

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Στο σημείο αυτό, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την καθηγήτρια του τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Η/Υ του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου κυρία Μαρία Γ. Ιωαννίδου για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε με την ανάθεση αυτής της διπλωματικής εργασίας. Την ευχαριστώ, επίσης, για την αρμονική συνεργασία που είχαμε και για την καθοδήγησή της.

Πάνω απ' όλα όμως θα ήθελα να ευχαριστήσω μέσα απο την καρδιά μου τους γονείς μου που χωρίς την συμπαράστασή τους και την αγάπη τους δεν θα είχα καταφέρει τίποτα μέχρι τώρα.

Στους γονείς μου...

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο: ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΚΑΙ ΤΙΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ.....	1
--	---

1.1 ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΗΛ. ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΠΟ ΤΟΝ ΑΝΕΜΟ.....	1
---	---

1.2 ΓΕΝΙΚΑ ΓΙΑ ΤΙΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ.....	3
---	---

1.3 ΤΥΠΟΙ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ.....	4
--------------------------------	---

1.4 ΔΟΜΗ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ.....	5
-------------------------------	---

1.5 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΣΤΑΘΕΡΩΝ ΚΑΙ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ ΣΤΡΟΦΩΝ.....	7
---	---

1.6 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ - ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΕΝΑΝΤΙ ΑΛΛΩΝ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΩΝ ΠΗΓΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	10
--	----

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο: ΜΗΧΑΝΕΣ ΕΠΑΓΩΓΗΣ ΣΕ ΑΙΟΛΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ.....	11
---	----

2.1 ΜΟΝΤΕΛΟ ΕΠΑΓΩΓΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΗΣ.....	11
-------------------------------------	----

2.2 ΜΗΧΑΝΗ ΕΠΑΓΩΓΗΣ ΩΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ.....	12
---------------------------------------	----

2.3 ΜΗΧΑΝΗ ΕΠΑΓΩΓΗΣ ΒΡΑΧΥΚΥΚΛΩΝΜΕΝΟΥ ΚΛΩΒΟΥ – Α/Γ ΤΥΠΟΥ Α.....	14
--	----

2.4 ΜΗΧΑΝΗ ΕΠΑΓΩΓΗΣ ΔΑΚΤΥΛΙΟΦΟΡΟΥ ΔΡΟΜΕΑ - Α/Γ ΤΥΠΟΥ Β.....	19
---	----

2.4.1 ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΙΣ ΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΗ ΣΤΑ ΑΚΡΑ ΤΗΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ.....	20
--	----

2.5 ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΜΗΧΑΝΗΣ ΕΠΑΓΩΓΗΣ.....	22
--	----

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο: ΜΗΧΑΝΕΣ ΕΠΑΓΩΓΗΣ ΔΙΠΛΗΣ ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑΣ (DFIG) ΣΕ ΑΙΟΛΙΚΑ ΠΑΡΚΑ - Α/Γ ΤΥΠΟΥ C.....	25
---	----

3.1 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ ΔΙΠΛΗΣ ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑΣ (DFIG).....	25
---	----

3.1.1 ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑΣ ΙΣΧΥΟΣ.....	26
-------------------------------	----

3.1.2 ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΟΙ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΙΣ ΙΣΧΥΟΣ back-to-back	27
--	----

3.1.3 ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑΣ back-to-back ΒΑΣΙΣΜΕΝΟΣ ΣΕ ΤΟΠΟΛΟΓΙΑ VSC ΔΥΟ ΕΠΙΠΕΔΩΝ.....	27
--	----

3.1.4 ΣΥΣΤΗΜΑ ΠΛΕΥΡΑΣ ΔΙΚΤΥΟΥ	28
-------------------------------------	----

3.1.5	ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑΣ, ΕΠΑΓΩΓΙΚΟ ΦΙΛΤΡΟ ΚΑΙ ΜΟΝΤΕΛΟ ΤΑΣΗΣ ΔΙΚΤΥΟΥ	29
3.1.6	ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑΣ ΠΛΕΥΡΑΣ ΡΟΤΟΡΑ ΚΑΙ ΦΙΛΤΡΟ dv/dt	30
3.1.7	ΣΥΝΔΕΣΗ DC.....	33
3.2	ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ ΔΙΠΛΗΣ ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑΣ (DFIG).....	34
3.2.1	ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΗΣ DFIG.....	36
3.2.2	ΕΛΕΓΧΟΣ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑ ΣΤΗΝ ΠΛΕΥΡΑ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ.....	36
3.2.3	ΕΛΕΓΚΤΗΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΣΤΗΝ ΠΛΕΥΡΑ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ.....	40
3.2.4	ΕΛΕΓΚΤΗΣ ΤΑΣΗΣ	41
3.2.5	ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΕΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΣΕ ΕΠΙΠΕΔΟ ΜΗΧΑΝΗΣ	42
3.2.5.1	ΕΛΕΓΧΟΣ ΑΕΡΓΟΥ ΙΣΧΥΣ.....	42
3.3	ΔΙΑΝΥΣΜΑΤΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ	46
3.3.1	ΒΡΟΧΟΙ ΕΛΕΓΧΟΥ ΡΕΥΜΑΤΟΣ.....	50
3.3.1.1	ΜΟΝΑΔΑ ΒΡΟΧΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ.....	51
3.3.2	ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΙ ΠΛΑΙΣΙΩΝ ΑΝΑΦΟΡΑΣ.....	54
3.3.2.1	ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΣ ΡΟΗΣ.....	55
3.3.2.2	ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΣ ΤΑΣΗΣ ΔΙΚΤΥΟΥ.....	55
3.3.2.3	ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΩΝ.....	55
3.3.3	ΠΛΗΡΕΣ ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΛΕΓΧΟΥ.....	56
3.4	ΦΙΛΤΡΑ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΥ ΑΡΜΟΝΙΚΩΝ ΣΥΝΙΣΤΩΣΕΩΝ ΡΕΥΜΑΤΟΣ.....	58
3.5	ΣΥΝΔΕΣΗ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ DFIG ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ.....	59
3.5.1	ΚΩΔΙΚΟΙ ΔΙΚΤΥΟΥ.....	62
3.5.2	ΠΑΡΑΜΟΝΗ Α/Γ ΣΕ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΒΥΘΙΣΕΩΝ ΤΑΣΗΣ.....	63
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο: ΣΥΓΧΡΟΝΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ ΣΕ ΑΙΟΛΙΚΑ ΠΑΡΚΑ- ΤΥΠΟΥ Δ.....		68
4.1	ΣΥΓΧΡΟΝΗ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ.....	68
4.2	ΣΥΓΧΡΟΝΗ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ ΣΕ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ.....	69
4.2.1	ΣΥΓΧΡΟΝΗ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ ΔΑΚΤΥΛΙΟΦΟΡΟΥ ΔΡΟΜΕΑ (WRSG).....	70
4.2.2	ΣΥΓΧΡΟΝΗ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ ΜΟΝΙΜΟΥ ΜΑΓΝΗΤΗ (PMSG).....	70
4.3	ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑ ΜΕ ΣΥΓΧΡΟΝΗ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ ΚΑΙ ΠΛΗΡΗ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑ	71
4.3.1	ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΛΕΓΧΟΥ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ ΤΥΠΟΥ Δ1.....	73
4.3.2	ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΛΕΓΧΟΥ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ ΤΥΠΟΥ Δ2.....	74

4.4	ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ ENERCON	75
4.4.1	ΧΑΜΗΛΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ	77
4.4.2	ΑΥΤΟΜΑΤΗ ΕΝΑΡΞΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ	77
4.5	ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ - ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΣΥΓΧΡΟΝΗΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ ENERCON	79
4.5.1	ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ	79
4.5.2	ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ	80
	<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο</u>: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ- ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ	81
	<u>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</u> :.....	87



1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΙΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ

1.1 ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΗΛ. ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΠΟ ΤΟΝ ΑΝΕΜΟ

Τα τελευταία χρόνια, κερδίζει όλο και περισσότερο έδαφος η ιδέα ότι η παραγωγή ενέργειας πρέπει να εξετάζεται, σε συνδυασμό με τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις που έχουν οι διάφοροι τρόποι παραγωγής ενέργειας. Όλο και περισσότεροι άνθρωποι, δεν δέχονται πια μια οποιαδήποτε ανάπτυξη, αλλά θέλουν την λεγόμενη αειφόρο ανάπτυξη, την ανάπτυξη που μπορεί να συνεχιστεί, την ανάπτυξη με την οποία καλύπτονται οι σημερινές ανάγκες χωρίς να βλάπτεται η δυνατότητα των επερχομένων γενεών να καλύψουν και αυτές τις δικές τους ανάγκες. Αυτή η απαίτηση της αειφόρου ανάπτυξης από τη μια, και από την άλλη οι διάφορες διαταραχές, οι διάφορες ανωμαλίες, οι διάφορες ασυνέχειες στη διαθεσιμότητα των συμβατικών καυσίμων ή και στην τιμή των συμβατικών καυσίμων υπαγορεύουνε κατά μονοσήμαντο τρόπο την αξιοποίηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο μεγαλύτερο δυνατό βαθμό.

Η αιολική ενέργεια είναι πρώτα απ' όλα μια θυγατρική μορφή της ηλιακής ενέργειας αφού το 2% περίπου της ηλιακής ενέργειας που προσπίπτει στη γη μετατρέπεται σε κινητική ενέργεια των αερίων μαζών. Πρόκειται για μηχανική ενέργεια υψηλής ποιότητας που προσφέρεται για μετατροπή σε ηλεκτρική ενέργεια ή σε χρήσιμη μηχανική ενέργεια. Αυτό το 2% της ηλιακής ενέργειας που μετατρέπεται σε κινητική ενέργεια των αερίων μαζών είναι πρακτικά άφθονη ενέργεια, είναι εκατοντάδες φορές μεγαλύτερη από τις ενεργειακές ανάγκες της ανθρωπότητας, αλλά βέβαια δεν είναι όλη χρησιμοποιήσιμη. Μικρό ποσοστό αυτής της ενέργειας αντιστοιχεί σε μεγάλης ταχύτητα ανέμους, όπου σε κατάλληλες θέσεις στην επιφάνεια της γης είναι άμεσα αξιοποιήσιμη. Αυτό όμως το ποσοστό σε απόλυτα νούμερα δεν είναι καθόλου αμελητέο.

Τα πλεονεκτήματα της αιολικής ενέργειας, είναι λίγο πολύ γνωστά:

- Είναι ιδιαίτερα φιλική στο περιβάλλον, δεν εκπέμπει κανένα συντελεστή ρύπανσης (CO₂, NO₂, κλπ) που να συντελεί στο φαινόμενο του θερμοκηπίου, ή να δημιουργεί

την όξινη βροχή. Εδώ δεν υπάρχουν ραδιενεργά κατάλοιπα ούτε οιωνίζουσες ακτινοβολίες όπως με την πυρηνική ενέργεια.

- Είναι οικονομική, με την έννοια ότι δεν χρειάζεται πολύ ενέργεια για να κατασκευαστούν οι αιολικές μηχανές. Στην τυπική περίπτωση, μια συνηθισμένη αιολική μηχανή, τοποθετημένη σε μια καλή θέση, μετά από ένα χρόνο λειτουργίας παράγει περισσότερη ενέργεια από την ενέργεια που ξοδεύτηκε για την κατασκευή της. Και επιπλέον κάθε κιλοβατώρα που παράγεται με αιολική ενέργεια και δεν παράγεται π.χ. με καύση άνθρακος, εξοικονομεί περίπου ένα κιλό διοξειδίου του άνθρακος που δεν εκλύεται στην ατμόσφαιρα.
- Με το να είναι ανανεώσιμη και επομένως ανεξάντλητη, συντελεί στην εξοικονόμηση των κοιτασμάτων των ορυκτών καυσίμων (πράγμα που δεν είναι καθόλου αμελητέο)
- Έχει ελάχιστες απαιτήσεις από πλευράς εκτάσεως, γης (μεταξύ των πυλώνων των ηλιακών μηχανών, η έκταση μπορεί να χρησιμοποιείται για άλλες χρήσεις γεωργικές ή κτηνοτροφικές)
- Οι επιδράσεις στις πανίδα είναι πρακτικώς αμελητέες, η αισθητική επίδραση στο τοπίο είναι γενικώς παραδεκτή (και σε κάποιες περιπτώσεις αρεστή)
- Ο θόρυβος των οποίων προκαλούν οι αιολικές μηχανές είναι χαμηλότερος από τον θόρυβο που προκαλεί κάθε άλλη μηχανή της ίδιας ισχύος κ.λ.π.

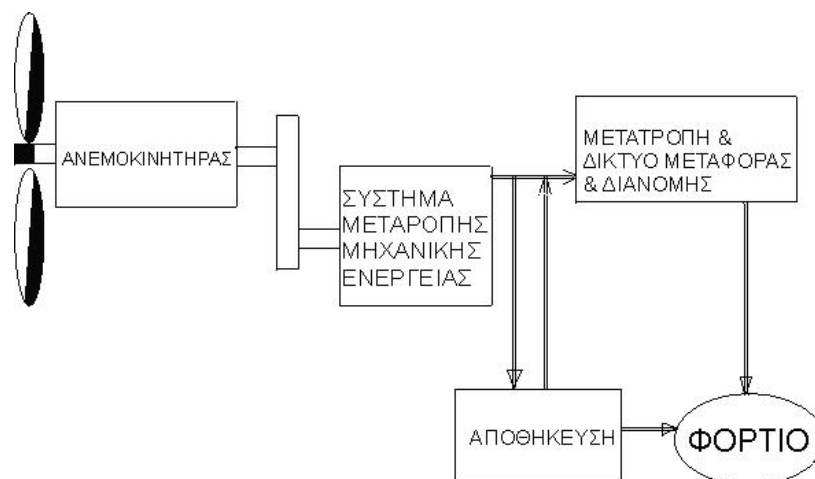
Σαν μειονεκτήματά της αιολικής ενέργειας μπορούμε να αναφέρουμε τα παρακάτω:

-Είναι γνωστό ότι ο άνεμος δεν φυσάει συνεχώς, είναι μια διακοπτόμενη πηγή ενέργειας .

Μια πρώτη λύση είναι να την χρησιμοποιούμε μόνο όταν φυσάει. Αυτό μπορεί να γίνει σε ορισμένες χρήσεις π.χ. για την αφαλάτωση του θαλασσινού νερού, ή για την άντληση νερού για άρδευση αλλά δεν μπορεί να γίνει για όλες τις χρήσεις. Μια δεύτερη λύση είναι να αποθηκεύει κανένας την ενέργεια που παράγεται από τον άνεμο και αυτό μπορεί να γίνει για μικρά μεν συστήματα με ηλεκτρικούς συσσωρευτές , με μπαταρίες, μετατρέποντας την αιολική ενέργεια σε ηλεκτρική , ή για μεγαλύτερα συστήματα που μπορεί να την αποθηκεύουμε αν οι αιολικές εγκαταστάσεις λειτουργούν σε συνδυασμό με κάποιο υδροηλεκτρικό έργο.

1.2 ΓΕΝΙΚΑ ΓΙΑ ΤΙΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ

Ο ανεμοκινητήρας από την εποχή της εμφάνισης του μέχρι σήμερα έχει περάσει από πολλά στάδια εξέλιξης, τόσο ως προς τον τύπο του (οριζοντίου ή κάθετου άξονα) όσο και ως προς τα υποσυστήματα του (περυγία, κιβώτιο ταχυτήτων, πύργος, αυτοματισμοί, γεννήτρια κ.α.). Εξελίξεις έχουν επίσης σημειωθεί και στον τρόπο δέσμησης, αξιοποίησης, αποθήκευσης ή μεταφοράς της ενέργειας του ανέμου που μετατρέπεται από την ανεμογεννήτρια σε άλλη μορφή ενέργειας. Μια εικόνα των βασικών μερών που αποτελούν μια διάταξη εκμετάλλευσης της αιολικής ενέργειας καθώς και της ροής ενέργειας παρουσιάζεται στο σχήμα 1.1. Η διάταξη αυτή είναι μια γενική περίπτωση όπου η κινητική ενέργεια του ανέμου μετατρέπεται σε μηχανικό έργο με τη βοήθεια αεροδυναμικής διάταξης (π.χ. μιας έλικας). Αυτό το μηχανικό έργο μπορεί να είναι εκμεταλλεύσιμο επί τόπου ή να χρειαστεί να μετατραπεί σε μια άλλη μορφή ενέργειας και να μεταφερθεί στον τόπο της ζήτησης.



Σχήμα 1.1 . Σχηματική αναπαράσταση εγκατάστασης εκμετάλλευσης της αιολικής ενέργειας

Παραδείγματα εκμετάλλευσης της παραγόμενης ενέργειας επί τόπου είναι αυτό της παραγωγής υδρογόνου με ηλεκτρόλυση του νερού που μπορεί να αποθηκευτεί, μεταφερθεί, και να καεί ως αέριο καύσιμο με μηδαμινή επιβάρυνση του περιβάλλοντος . Στη δεύτερη που είναι και πιο ευρέως διαδεδομένη είναι αυτή της

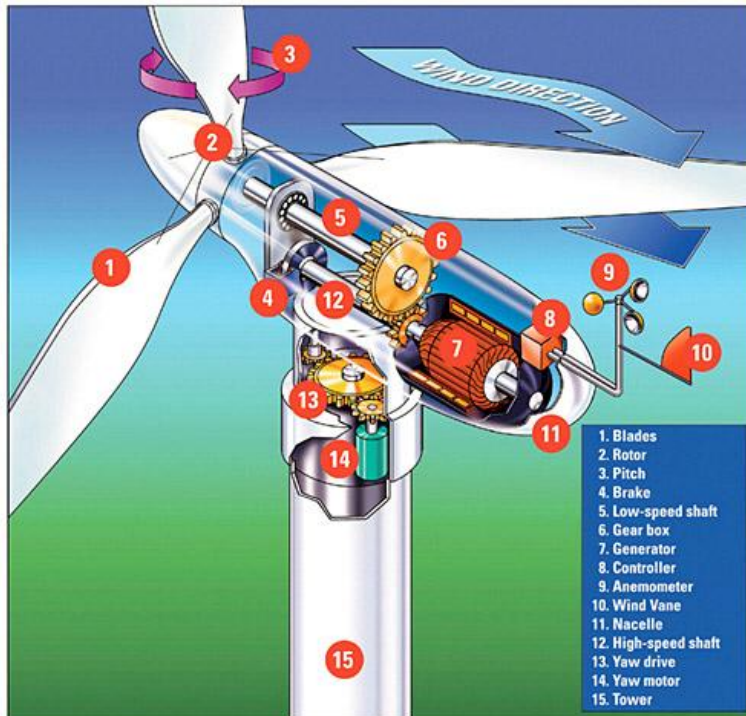
μετατροπής της μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική ενέργεια λόγω της εύκολης μεταφοράς αλλά και της δυνατότητας που έχει να μετατρέπεται σε οποιαδήποτε άλλη μορφή θέλουμε. Βέβαια οι μεγάλες διακυμάνσεις της ενέργειας του ανέμου με το χρόνο πολλές φορές έχουν χρονική ασυμφωνία με την ζήτηση ενέργειας με αποτέλεσμα την αναγκαιότητα της αποθήκευσης της ενέργειας για τις χρονικές στιγμές στις οποίες η ισχύς του ανέμου πέφτει κάτω από ένα όριο.

1.3 ΤΥΠΟΙ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ

Μέχρι σήμερα έχουν επινοηθεί και λειτουργήσει από αρχαιότατων χρόνων περισσότεροι τύποι ανεμομηχανών από οποιαδήποτε άλλο τύπο εφεύρεσης. Οι ανεμοκινητήρες μπορούν να ταξινομηθούν σύμφωνα με τον προσανατολισμό των αξόνων τους σε σχέση με τη ροή του ανέμου σε:

- 1) Οριζοντίου άξονα (Head on) στους οποίους ο άξονας περιστροφής του δρομέα είναι παράλληλος προς την κατεύθυνση του ανέμου.
- 2) Οριζοντίου άξονα (Cross Wind) στους οποίους ο άξονας περιστροφής είναι παράλληλος προς την επιφάνεια της Γης αλλά κάθετος στην κατεύθυνση του ανέμου.
- 3) Κάθετου άξονα στους οποίους ο άξονας περιστροφής είναι κάθετος στην επιφάνεια της γης όπως και στην ροή του ανέμου (Savonius, Darrieus, Giromill κ.α) . Επίσης έχουν επινοηθεί και άλλοι τύποι ανεμομηχανών όπως αυτοί του ηλιακού φωτός, Venturi, με διάχυτο ή συγκεντρωτή, αεροτομής και Magnus κ.α.

1.4 ΔΟΜΗ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ



1. Πτερύγια: Τα πτερύγια ‘συλλαμβάνουν’ τον αέρα και μεταφέρουν την ισχύ του στην κεφαλή του ρότορα. Σε μια μοντέρνα ανεμογεννήτρια 1000kW κάθε πτερύγιο έχει μήκος 27 m και είναι σχεδιασμένο περίπου όπως ένα φτερό αεροπλάνου.

2. Κεφαλή: Η κεφαλή του ρότορα είναι συνδεδεμένη με το διαφορικό χαμηλής ταχύτητας της ανεμογεννήτριας

4. Φρένο

5. Διαφορικό χαμηλών ταχυτήτων: Το διαφορικό χαμηλών ταχυτήτων συνδέει την κεφαλή του ρότορα με το κιβώτιο ταχυτήτων. Σε ανεμογεννήτρια 1000 kW ο ρότορας περιστρέφεται σχετικά αργά, περίπου 19 με 30 περιστροφές ανά λεπτό (rpm). Το διαφορικό περιέχει σωλήνες για το υδραυλικό σύστημα ώστε να μπορεί να λειτουργήσει το αεροδυναμικό φρένο.

6. Κιβώτιο ταχυτήτων: Το κιβώτιο ταχυτήτων έχει το διαφορικό χαμηλών στροφών από αριστερά και μεταφέρει την κίνηση στο διαφορικό υψηλών στροφών (από δεξιά) κάνοντάς το να περιστρέφεται με ταχύτητα 50 φορές μεγαλύτερη από αυτή του διαφορικού χαμηλών στροφών.

7. Ηλεκτρική γεννήτρια: Η ηλεκτρική γεννήτρια είναι μια σύγχρονη ή μια ασύγχρονη γεννήτρια. Στις τελευταίες ανεμογεννήτριες η μέγιστη ηλεκτρική ισχύς είναι μεταξύ 600 και 3000 kW

8. Ηλεκτρονικός ελεγκτής: Περιέχει ένα υπολογιστή που παρακολουθεί διαρκώς την κατάσταση της ανεμογεννήτριας και ελέγχει τον μηχανισμό περιστροφής. Σε κάθε περίπτωση επιλοκής, π.χ. υπερθέρμανση του κιβωτίου ταχυτήτων ή της γεννήτριας, σταματά αυτόματα την ανεμογεννήτρια και καλεί τον υπολογιστή του ελεγκτή της ανεμογεννήτριας μέσω μιας τηλεφωνικής σύνδεσης.

9-10. Ανεμόμετρο & ανεμοδείκτης: Το ανεμόμετρο και ο ανεμοδείκτης χρησιμοποιούνται για να μετρούν την ένταση και τη διεύθυνση του ανέμου. Τα ηλεκτρικά σήματα του ανεμόμετρου χρησιμοποιούνται από τον ηλεκτρονικό ελεγκτή της ανεμογεννήτριας για να αρχίσει την λειτουργία της όταν η ταχύτητα του ανέμου ξεπεράσει μια ελάχιστη τιμή. Ο υπολογιστής σταματά τη λειτουργία της ανεμογεννήτριας αυτόματα αν η ταχύτητα του ανέμου υπερβεί ένα ανώτατο όριο προκειμένου να προστατεύσει την ανεμογεννήτρια και το περιβάλλον αυτής. Τα σήματα του ανεμοδείκτη χρησιμοποιούνται από τον ηλεκτρονικό ελεγκτή της ανεμογεννήτριας για να στρέφει αυτήν απέναντι στον άνεμο, μέσω του μηχανισμού περιστροφής.

11. Κουβούκλιο: Το κουβούκλιο περιέχει όλα τα βασικά στοιχεία της ανεμογεννήτριας, συμπεριλαμβανομένου του κιβωτίου ταχυτήτων, και της ηλεκτρικής γεννήτριας. Πρόσβαση στο εσωτερικό της ανεμογεννήτριας επιτρέπεται μέσω του πύργου. Αριστερά από το κουβούκλιο φαίνονται στο Σχ.3.2 τα κινούμενα μέρη της ανεμογεννήτριας (τα πτερύγια και η κεφαλή).

12. Διαφορικό υψηλών ταχυτήτων: Το διαφορικό υψηλών ταχυτήτων περιστρέφεται περίπου με 1500 στροφές ανά λεπτό (rpm) και οδηγεί την ηλεκτρική γεννήτρια. Το διαφορικό είναι εξοπλισμένο με ένα δισκόφρενο σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης. Το μηχανικό φρένο χρησιμοποιείται σε περίπτωση που το αεροδυναμικό φρένο υποστεί βλάβη ή η ανεμογεννήτρια επισκευάζεται.

13-14. Μηχανισμός περιστροφής: Ο μηχανισμός περιστροφής χρησιμοποιεί ηλεκτρικές μηχανές (κινητήρας περιστροφής) για να στρέφει το κουβούκλιο απέναντι στον άνεμο. Ο μηχανισμός περιστροφής ελέγχεται από ηλεκτρονικό ελεγκτή ο οποίος αντιλαμβάνεται τη διεύθυνση του ανέμου χρησιμοποιώντας τον ανεμοδείκτη.

15. Πύργος: Ο πύργος της ανεμογεννήτριας στηρίζει το κουβούκλιο και τα κινούμενα μέρη της. Γενικά είναι πλεονέκτημα ο πύργος να είναι ψηλός, αφού οι ταχύτητες του ανέμου αυξάνονται όσο απομακρύνεται από το έδαφος. Μια σύγχρονη ανεμογεννήτρια 1000 kW θα έχει ένα πύργο μεταξύ 50 και 80 μέτρων (το ύψος ενός κτιρίου 17 έως 27 ορόφων).

16. Μονάδα ψύξης: Η μονάδα ψύξης περιέχει ένα ηλεκτρικό ανεμιστήρα που χρησιμοποιείται για να ψύχει την ηλεκτρική γεννήτρια. Επιπλέον περιέχει μια μονάδα ψύξης με λάδι η οποία χρησιμοποιείται για να ψύχει το λάδι στο κιβώτιο ταχυτήτων. Μερικές ανεμογεννήτριες έχουν υδρόψυκτες γεννήτριες.

17. Υδραυλικό σύστημα: Το υδραυλικό σύστημα χρησιμοποιείται για να επαναφέρει τα αεροδυναμικά φρένα της ανεμογεννήτριας.

1.5. ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΣΤΑΘΕΡΩΝ ΚΑΙ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ ΣΤΡΟΦΩΝ

Λειτουργία σταθερών στροφών

Οι ανεμογεννήτριες σταθερών στροφών αποτελούν τις «συμβατικές» ανεμογεννήτριες του παρελθόντος που όμως ακόμα και σήμερα αποτελούν το σημαντικότερο κομμάτι από τις ήδη λειτουργούσες ανεμογεννήτριες. Μπορούν να χρησιμοποιούν είτε γεννήτριες επαγωγής είτε σύγχρονες γεννήτριες, με τις πρώτες όμως να χρησιμοποιούνται σχεδόν αποκλειστικά λόγω σημαντικών μειονεκτημάτων που παρουσιάζουν οι δεύτερες, όπως η ιδιαίτερα αυξημένη ταλαντωτικότητα της απόκρισής τους σε συνθήκες μεταβαλλόμενου ανέμου και το αυξημένο κόστος και βάρος τους. Οι ανεμογεννήτριες αυτές χρωστάνε τη μεγάλη εξάπλωσή τους κυρίως στο μικρό τους κόστος, αφού για τη σύνδεσή τους με το δίκτυο δε χρειάζεται να παρεμβάλλονται ηλεκτρονικοί μετατροπείς, των οποίων το κόστος είναι πολύ σημαντικό. Η σύνδεση αυτή γίνεται απευθείας, με αποτέλεσμα η ταχύτητα του δρομέα να είναι σταθερή και πρακτικά ίση με τη σύγχρονη, με αποκλίσεις της τάξης περίπου του 1%, δηλαδή όσο και η ολίσθηση ονομαστικής λειτουργίας. Επίσης, οι ανεμογεννήτριες αυτού του είδους παρουσιάζουν και τα πλεονεκτήματα της εξαιρετικής απλότητας, της εξαιρετικής αξιοπιστίας, καθώς και των μηδενικών αναγκών συντήρησής τους. Παράλληλα όμως, η λειτουργία των σταθερών στροφών

παρουσιάζει και κάποια πολύ σημαντικά μειονεκτήματα, τα σημαντικότερα από τα οποία παρουσιάζονται παρακάτω :

- Λειτουργία με μη βέλτιστο αεροδυναμικό συντελεστή
- Αυξημένη μεταβλητότητα ισχύος εξόδου
- Χαμηλός συντελεστής ισχύος εξόδου
- Μεταβατικά φαινόμενα εκκίνησης και ζεύξης – απόζευξης

Όλα τα προαναφερθέντα σημαντικά προβλήματα, έπαιξαν καθοριστικό ρόλο στη στροφή τόσο του επιστημονικού ενδιαφέροντος όσο και των κατασκευαστών προς τις ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών, οι οποίες φαίνονται να δίνουν εάν όχι ριζική, τουλάχιστον ικανοποιητική λύση σε πολλά από τα παραπάνω.

Λειτουργία μεταβλητών στροφών

Η ιδέα των μεταβλητών στροφών, στηρίζεται στις αρχές λειτουργίας ενός σφονδύλου. Όταν παρατηρείται αύξηση της αεροδυναμικής ισχύος, μέρος της μετατρέπεται σε κινητική αποκόπτοντας με αυτόν τον τρόπο τις γρήγορες μεταβολές της. Η αντίστροφη λειτουργία συμβαίνει κατά τη μείωση της ταχύτητας του ανέμου. Για να είναι η απόδοση της ανεμογεννήτριας βέλτιστη, πρέπει η ταχύτητα περιστροφής των πτερυγίων να είναι ανάλογη της ταχύτητας του ανέμου. Αυτός ο τρόπος λειτουργίας απαιτεί σημαντική μεταβολή της ταχύτητας περιστροφής των πτερυγίων. Κάτι τέτοιο πήγε παλαιότερα να πραγματοποιηθεί με διάφορες μεθόδους, όπως με χρήση υδραυλικών συστημάτων ή κιβωτίων ταχυτήτων μεταβαλλόμενου λόγου, αλλά αργότερα οι μέθοδοι αυτοί εγκαταλείφθηκαν.

Τη θέση των παραπάνω μεθόδων πήρανε τα συστήματα ηλεκτρονικών μετατροπέων συχνότητας τα οποία έχουνε λίγες απώλειες και είναι αρκετά αξιόπιστα. Τα συστήματα αυτά παρεμβάλλονται ανάμεσα στο δίκτυο και στην ηλεκτρική γεννήτρια και έτσι η ταχύτητα περιστροφής αποδεσμεύεται από τη σταθερή συχνότητα του δικτύου και είναι δυνατή η μεταβολή της εντός ευρέων ορίων.

Οι ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών έχουν αρχίσει να κυριαρχούν στην αγορά λόγω των σημαντικών πλεονεκτημάτων που παρουσιάζουν, μερικά εκ των οποίων παρουσιάζονται συνοπτικά παρακάτω :

- Βελτιστοποίηση ενεργειακής απόδοσης της ανεμογεννήτριας
- Εξομάλυνση της μεταβλητότητας των μηχανικών ροπών
- Περιορισμός καταπονήσεων – μεγαλύτερη διάρκεια ζωής
- Μείωση τυχαίας μεταβλητότητας της ισχύος εξόδου
- Περιορισμός ταχέων διακυμάνσεων της τάσης (flicker)
- Δυνατότητα μείωσης ενεργού ισχύος εξόδου
- Δυνατότητα ελέγχου αέργου ισχύος εξόδου
- Χαμηλά επίπεδα θορύβου
- Διευκόλυνση διαδικασιών εκκίνησης

Τα μειονεκτήματα των ανεμογεννητριών μεταβλητών στροφών, μπορούν να τοποθετηθούν κυρίως στον οικονομικό τομέα. Πιο συγκεκριμένα, τα χρησιμοποιούμενα ηλεκτρονικά ισχύος που είναι απαραίτητα για τη σύνδεση τέτοιου τύπου ανεμογεννητριών στο δίκτυο, επιβαρύνουν κατά πολύ το κόστος τους, μιας και αυτά αντιπροσωπεύουν από οικονομικής πλευράς το μεγαλύτερο μέρος του ηλεκτρολογικού εξοπλισμού. Εκτός από τα οικονομικά μειονεκτήματα της λειτουργίας των μεταβλητών στροφών, κρίνεται απαραίτητο να σταθούμε και σε μερικά ακόμη που ενδεικτικά αναφέρονται παρακάτω :

- Αυξημένη πολυπλοκότητα
- Έγχυση αρμονικών συχνοτήτων στο δίκτυο
- Εγκατάσταση φίλτρων
- Παραμόρφωση ρευμάτων γεννήτριας – αύξηση απωλειών

Όμως, τα παραπάνω προβλήματα καθώς και το πρόβλημα του κόστους, αναμένεται να επιλυθούν σε σημαντικό βαθμό τα επόμενα χρόνια χάρη στην πρόοδο της τεχνολογίας των ηλεκτρονικών ισχύος, η οποία θα επιτρέψει τόσο τη σταδιακή μείωση του κόστους τους, όσο και τη βελτίωση των λειτουργικών τους

χαρακτηριστικών, γεγονότα που θα κάνουν τις ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών ακόμη πιο ελκυστικές και ενδιαφέρουσες.

1.6 ΣΥΝΗΘΕΙΣ ΤΥΠΟΙ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ

Αυτή τη στιγμή, οι περισσότεροι και μεγαλύτεροι παραγωγοί ανεμογεννητριών στον κόσμο κατασκευάζουν μεταβλητής ταχύτητας ανεμογεννήτριες, με έλεγχο γωνίας βήματος πτερυγίων. Ο πιο συχνά χρησιμοποιούμενος τύπος γεννήτριας είναι οι επαγωγικές γεννήτριες, ενώ σε πολύ μικρό ποσοστό, που όμως τελευταία παρουσιάζει κάποιες αυξητικές τάσεις, χρησιμοποιούνται σύγχρονες γεννήτριες με μόνιμο μαγνήτη. Σήμερα, στη διεθνή αγορά των ανεμογεννητριών, κυρίαρχος τύπος ανεμογεννήτριας (σε ποσοστό μεγαλύτερο του 70%) είναι αυτός με διπλά τροφοδοτούμενη επαγωγική μηχανή (DFIG), με μεταβλητή ταχύτητα και μεταβλητό έλεγχο γωνίας κλίσης των πτερυγίων. Γενικά, για ισχείς της τάξης των MW, μία ανεμογεννήτρια μπορεί να εξοπλιστεί με οποιονδήποτε τύπο τριφασικής γεννήτριας.

Στις ανεμογεννήτριες χρησιμοποιούνται, επομένως, οι εξής τύποι γεννητριών :

1. Ασύγχρονη (επαγωγική) γεννήτρια :
2. Επαγωγική γεννήτρια βραχυκυκλωμένου κλωβού (SCIG)
3. Επαγωγική γεννήτρια δακτυλιοφόρου δρομέα (WRIG) :
 - i. OptiSlip επαγωγική γεννήτρια (OSIG)
 - ii. Διπλά τροφοδοτούμενη επαγωγική γεννήτρια (DFIG).
4. Σύγχρονη γεννήτρια :
 - I. Γεννήτρια βραχυκυκλωμένου δρομέα (WRSG)
 - II. Γεννήτρια μόνιμου μαγνήτη (PMSG).

2. ΜΗΧΑΝΕΣ ΕΠΑΓΩΓΗΣ ΣΕ ΑΙΟΛΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

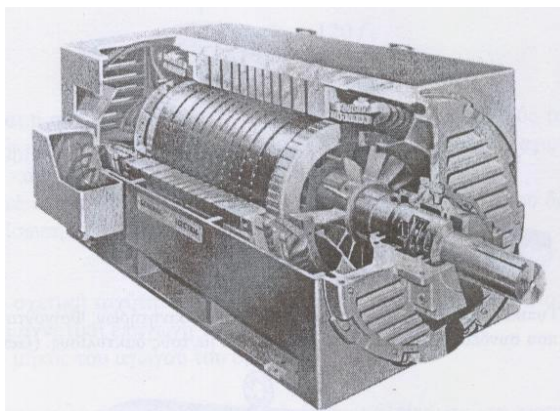


2.1 ΜΟΝΤΕΛΟ ΕΠΑΓΩΓΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΗΣ

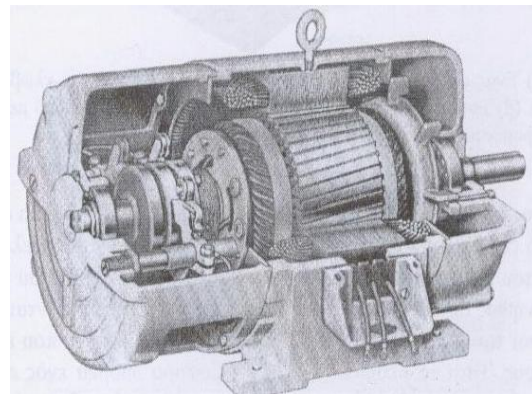
Η (ασυγχρονη) επαγωγική μηχανή ή αλλιώς ο επαγωγικός κινητήρας, διότι αρχικά είχε σχεδιαστεί ως ένα ηλεκτρικό μοτέρ, είναι η συνηθέστερα χρησιμοποιούμενοι καλύπτοντας ένα ευρύτατο φάσμα εφαρμογών, με απαιτήσεις ισχύος που ξεκινούν απο μερικά κλάσματα του Watt και φτάνουν μέχρι εκατομύρια Watt. Στην πραγματικότητα, το 1/3 της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας στον κόσμο, χρησιμοποιείται για εφαρμογές όπου χρειάζεται να μετατρέπουν την ηλεκτρική ενέργεια σε μηχανική ενεργεια (λειτουργία των κινητήρων επαγωγής οδήγησης μηχανών σε εργοστάσια, ανεμιστήρες, ανελκυστήρες κτλ.

Η ονομασία αυτής της κατηγορίας μηχανής προέρχεται απο το γεγονός ότι η τάση στο δρομέα, η οποία παράγει το ρεύμα διέγερσης και κατ' επέκταση, το πεδίο του δρομέα επάγεται στα τυλίγματα του, χωρίς να προσφέρεται απο κάποια εξωτερική ηλεκτρική πηγή. Ανάλογα στα τυλίγματα του, ο οποίος κατασκευάζεται απο δυναμοελάσματα για την ελαχιστοποίηση των απωλειων λόγω δινορευμάτων, διαχωρίζονται σε δύο κατηγορίες:

Σε αυτούς με **δρομέα βραχυκυκλωμένου κλωβού** (ο πιο κοινος τύπος) (σχήμα 1) και σε αυτούς με **δακτυλιοφόρο δρομέα** (σχημα 2)



Σχήμα 1. Επαγωγικός κινητήρας βραχυκυκλωμένου κλωβού σε τομή.



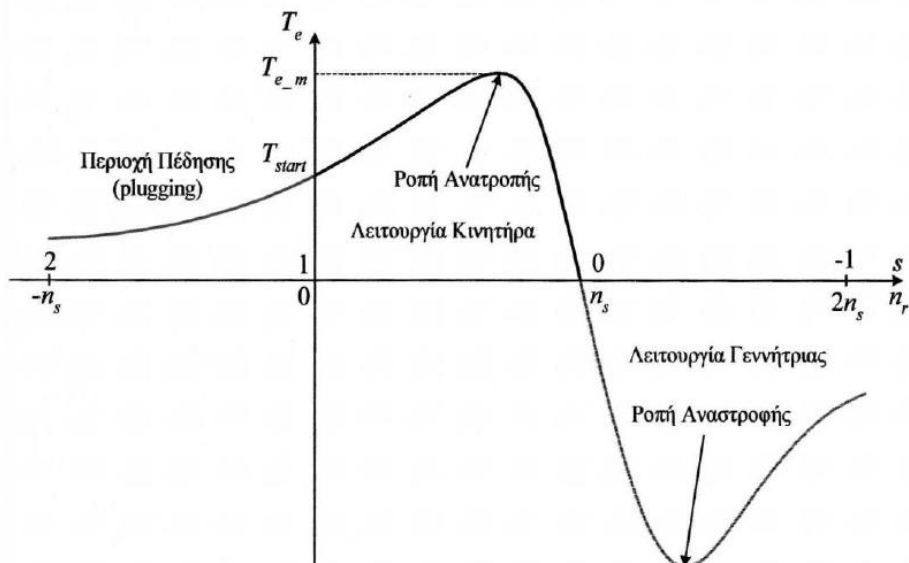
Σχήμα 2. επαγωγικός κινητήρας δακτυλιοφόρου δρομέα σε τομή

Αυτο που πρέπει να τονιστεί σε αυτο το σημείο είναι οτι η αρχή λειτουργίας και των δύο παραπάνω τύπων είναι ακριβώς η ίδια. Ο ασύγχρονος τριφασικός κινητήρας αποτελεί μια συσκευή ηλεκτρομηχανικής μετατροπής ενέργειας.

Η αρχή λειτουργίας βασίζεται στο ότι το τύλιγμα του στάτη τροφοδοτείται με συμμετρικά τριφασικά εναλλασόμενα ρεύματα. Το τύλιγμα του δρομέα αναπτύσει ρεύματα εξ' επαγωγής σε συχνότητα διαφορετική απο την συχνότητα του στάτη. Έτσι το στρεφόμενο πεδίο που παράγουν τα ρεύματα περιστρέφεται ως προς τον δρομέα με την ταχύτητα ολίσθησης και έχει τελικά την ίδια ταχύτητα περιστροφής με το πεδίο του στάτη. Τα δύο πεδία παραμένουν λοιπόν ακίνητα το ένα ως προς το άλλο και έχουμε συνθήκες για ανάπτυξη σταθερής ροπής.

2.2 ΜΗΧΑΝΗ ΕΠΑΓΩΓΗΣ ΩΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ

Μια μηχανή επαγωγής λειτουργεί ως κινητήρας αλλά και ως γεννητρια. Αυτό αποτυπώνεται στην παρακάτω χαρακτηριστική με βάση την περιοχή λειτουργίας της μηχανής. Παρατηρούμε πως όσο μεγαλύτερη είναι η αντίσταση του δρομέα σε τόσο μικρότερη ταχύτητα θα έχουμε μέγιστη ροπή.



Η επαγωγική μηχανή λειτουργεί ως γεννήτρια όταν στρέφεται απο μια κινητήρια μηχανή με ταχύτητα μεγαλύτερη της σύγχρονης ταχύτητας. Η τριφασική ισχύς που παράγει η επαγωγική γεννήτρια, εξαρτάται απο την ροπή που εφαρμόζει η κινητήρια μηχανη. Η ροπή αυτη πρέπει να είναι μικρότερη απο μια μέγιστη τιμή, η οποία ονομάζεται ροπή αναστροφής (push over torque). Η ροπή αναστροφής είναι μεγαλύτερη απο την ροπή ανατροπής. Η ταχύτητα της γεννήτριας αυξάνεται υπερβατικά, όταν η επιβαλόμενη ροπή γίνει μεγαλύτερη απο την ροπή αναστροφής.

Μία μηχανή επαγωγής όπως είναι γνώστό δεν έχει ανεξάρτητη διέγερση. Για να λειτουργήσει μια μηχανή επαγωγής ως γεννητρια θα πρέπει να συνδεθεί με ένα τριφασικό σύστημα εναλασσύμενης τάσεως, απο το οποίο θα αποροφά άεργο ισχύ για την ανάπτυξη του μαγνητικού πεδίου. Συνήθως συνδέοντε στο ηλεκτρικό δίκτυο, το οποίο τις τροφοδοτεί με την αναγκαία άεργο ισχύ και ρυθμίζει την τάση εξόδου τους.

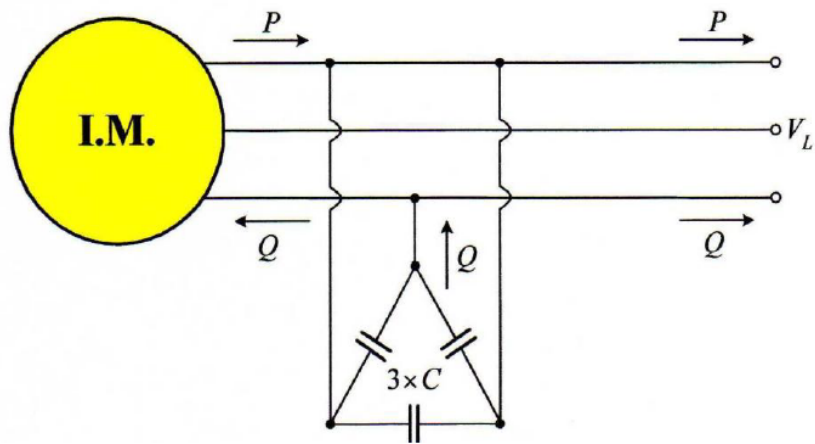
Η κυριότερη εφάρμογή τους είναι στις ανεμογεννητριες, οι οποίες συνδέοντε στο ηλεκτρικό δίκτυο. Στην περιπτωση αυτή η επαγωγική μηχανή προσφέρει απλή κατασκευή και την δυνατότητα περιστροφής της με ταχύτητα η οποία μπορεί να μεταβάλεται.

Οι σημαντικότεροι παράμετροι για την επαγωγική μηχανή είναι οι εξής:

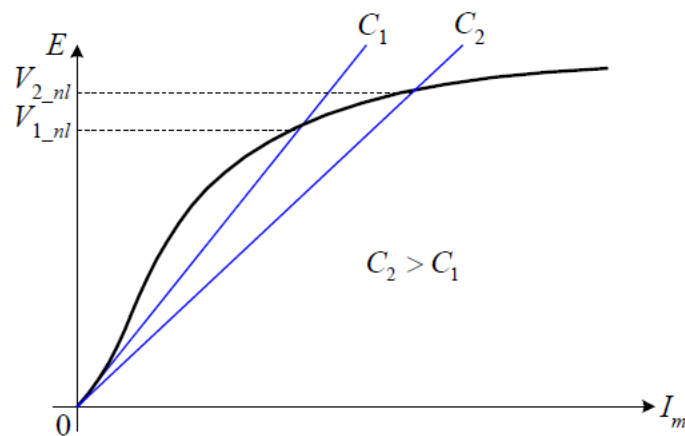
- Αντίσταση του στάτη R_s (stator)
- Αυτεπαγωγή του στάτη L_s (stator)
- Αντίσταση του δρομέα R_r (stator)
- Αυτεπαγωγή του δρομέα L_r (stator)
- Λόγος σπειρών του στάτη ως προς του δρομέα (N_s/N_f (effective))
- Αριθμός πόλων (Number of Poles P)
- Ροπή αδράνειας (Moment of Inertia)

-ΑΥΤΟΝΟΜΟ ΣΥΣΤΗΜΑ-

Μπορούμε να εκτελέσουμε μια ασύγχρονη γεννήτρια σε ένα αυτόνομο σύστημα μόνο αν το εφοδιάσουμε με πυκνωτές που θα παρέχουν την άεργο ισχύ που θέλουμε και το απαραίτητο ρεύμα μαγνήτισης (σχήμα 4). Απαιτείται επίσης να υπάρχει μια παραμένουσα μαγνήτιση στον δρομέα, δηλαδή περίπου το μαγνητισμό που απομένει κατα την εκκίνηση του στροβίλου. Διαφορετικά θα χρειαστεί μπαταρία και ηλεκτρονικά ισχύος ή μια μικρή γεννητρια ντίζελ για να ξεκινήσει το σύστημα.



Σχήμα 4. Χρήση πυκνωτών για την παραγωγή άεργου ισχύος σε αυτόνομο σύστημα.



Σχήμα 5. Καθορισμός της τάσης εξόδου της επαγωγικής γεννήτριας, η οποία λειτουργεί αυτονομα απο την τομή της καμπύλης μαγνήτισης και της χαρακτηριστικής τάσης-ρευματος των πυκνωτών.

2.3 ΜΗΧΑΝΗ ΕΠΑΓΩΓΗΣ ΒΡΑΧΥΚΥΚΛΩΜΕΝΟΥ ΚΛΩΒΟΥ-

Α/Γ ΤΥΠΟΥ Α

Η γεννήτρια βραχυκυκλωμένου κλωβού (squirrel cage induction generator) αποτελείται απο μπάρες χαλκού λίγο μεγαλύτερες σε μήκος απο τον δρομέα που

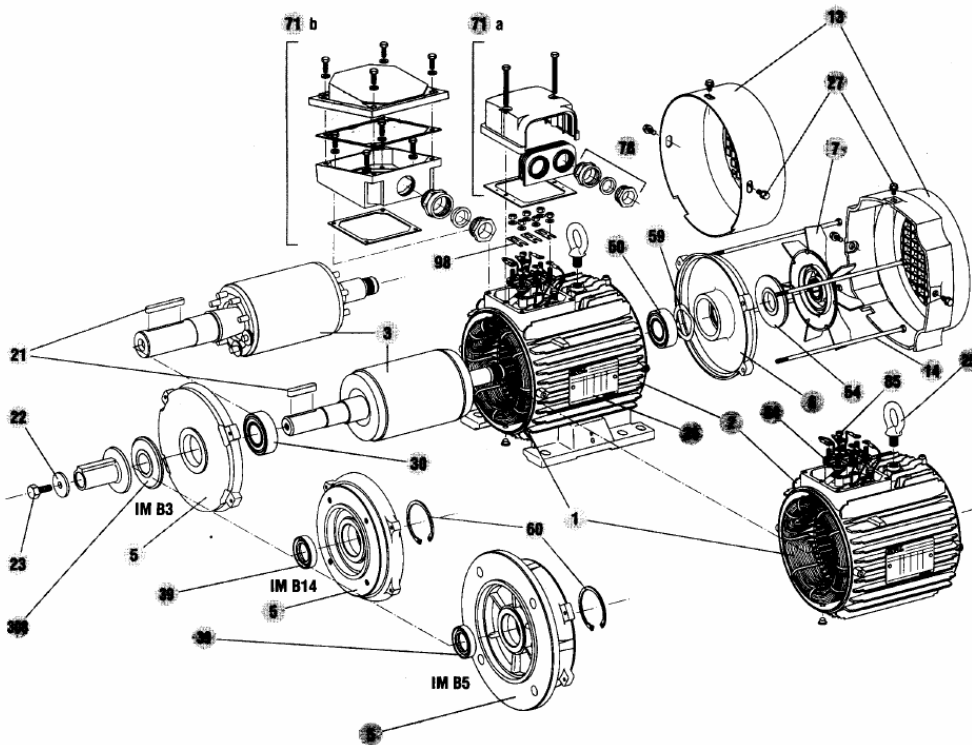
τοποθετούνται μέσα σε εγκοπές του κλωβού, ενώ οι άκρες των μπαρών συγκολλούνται σε δύο χάλκινους ακροδακτύλιους, για να είναι όλες οι μπάρες βραχυκυκλωμένες μεταξύ τους. Η ονομασία βραχυκυκλωμένος κλωβός προήλθε από την κατασκευή που θυμίζει κλειστό κλουβί.



Εικόνα 2.3.1: Εσωτερικό γεννήτριας βραχ. κλωβού



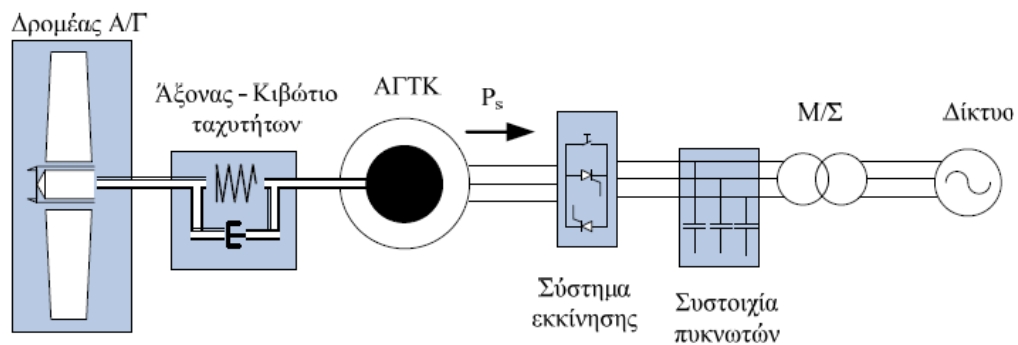
Εικόνα 2.3.2: Αναπαράσταση Δρομέα



Τριφασική επαγωγική μηχανή με βραχυκυκλωμένο κλωβό. (α) Διακρίνονται τα παρακάτω μέρη:
 1-Πτερύγια ψύξης του στάτη, 2-Ελάσματα του στάτη και το τύλιγμα, 3-Δρομέας, 4-Άξονας,
 5-9-Κέλυφος, 6-7- Ρουλεμάν, 8-Ανεμιστήρας, 10-Κιβώτιο ηλεκτρικής σύνδεσης. (β) Λεπτομερής
 σχεδιαστική καταγραφή των επιμέρους τμημάτων της μηχανής

-ΣΤΑΘΕΡΩΝ ΣΤΡΟΦΩΝ-

Στο παρακάτω σχήμα (σχήμα 2.3.3) απεικονίζεται ένα ευρέως χρησιμοποιούμενο και πλέον συμβατικός τύπος ανεμογεννήτριας χρησιμοποιώντας ασύγχρονη γεννήτρια βραχυκυκλωμένου κλωβού η οποία συνδέεται μέσω μετασχηματιστή στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Μια συστοιχία πυκνωτών παρέχει την αναγκαία αντιστάθμιση άεργου ισχύος και η συμβατότητα με το δίκτυο επιτυγχάνεται μέσω ενός εκκινήτη ομαλής εκκίνησης (soft starter)



Σχήμα 2.3.3: Ανεμογεννήτρια με γεννήτρια τύπου κλωβού, κιβώτιο ταχυτήτων και απ' ευθείας συνδεση στο δίκτυο

Παρατηρούμε πως η γεννητρια όντας απ' ευθείας και χωρίς την μεσολάβηση μετατροπέα συνδεδεμένη στο δίκτυο, λειτουργεί σε σταθερές στροφές. Η ολίσθηση της μηχανής επιτρέπει μικρές διακυμάνσεις στην ταχύτητα που ομαλοποιούν την χαρακτηριστική ροπής-ταχύτητας.

Η απόδοση της ανεμογεννητριας μεγιστοποιείται σε συγκεκριμένη ταχύτητα ανέμου. Για την αύξηση της απόδοσης η γεννητρια είναι συχνά εφοδιασμένη με δύο ομάδες τυλιγμάτων. Το ένα χρησιμοποιείται στις χαμηλές ταχύτητες ανέμου (συνήθως 8 ζεύγη πόλων) και το άλλο για υψηλές ταχύτητες ανέμου (4 ή 6 ζεύγη πόλων).

Τα πλεονεκτήματα της συγκεκριμένης διάταξης είναι η απλή σχεδίαση, το χαμηλό κόστος, η αξιόπιστη λειτουργία και η ανθεκτικότητα ενώ η ελεγχιμότητα είναι ένα απο τα μειονεκτήματα της διότι είναι περιορισμένη. Έτσι οι διακυμάνσεις στην ταχύτητα του ανέμου μεταφράζονται σε διακυμάνσεις της μηχανικής ροπής και της ηλεκτρικής ισχύος που αποδίδεται στο δίκτυο. Το αποτέλεσμα αυτων των διακυμάνσεων είναι η απορρόφηση άεργου ισχύος απο την γεννήτρια είναι κυμαινόμενη αυξάνοντας τις απώλειες γραμμών και τις μεταβολές στην τάση. Έτσι η ανεμογεννήτρια σταθερών στροφών εμφανίζει τα εξής βασικά μειονεκτήματα:

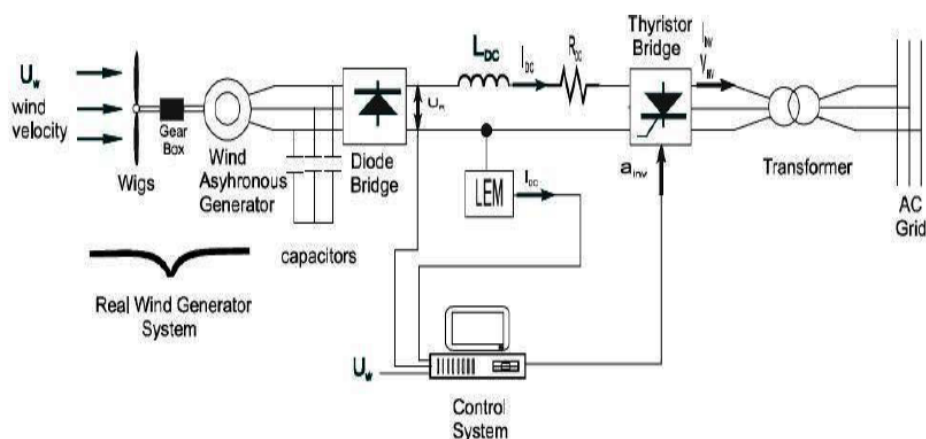
- Παρουσιάζει μειωμένη ενεργειακή απόδοση επειδή δεν υποστηρίζει έλεγχο ταχύτητας
- Μη ελέγξιμη κατανάλωση έργου ισχύος και μειωμένος έλεγχος ποιότητα ισχύος
- Απαιτείται ενισχυμένη τήριξη των μηχανικών μερών της ανεμογεννήτριας για την αποφυγή καταπονήσεων σε περίπτωση ρυπών ανέμου

-ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ ΣΤΡΟΦΩΝ-

Οι ασύγχρονες γεννήτριες βραχυκυκλωμένου κλωβού μπορούν να λειτουργήσουν με μεταβλητό αριθμό στροφών εάν χρησιμοποιήσουμε μετατροπείς πηγής τάσης ή πηγής ρεύματος.

• Μετατροπέας πηγής τάσης με θυρίστορ

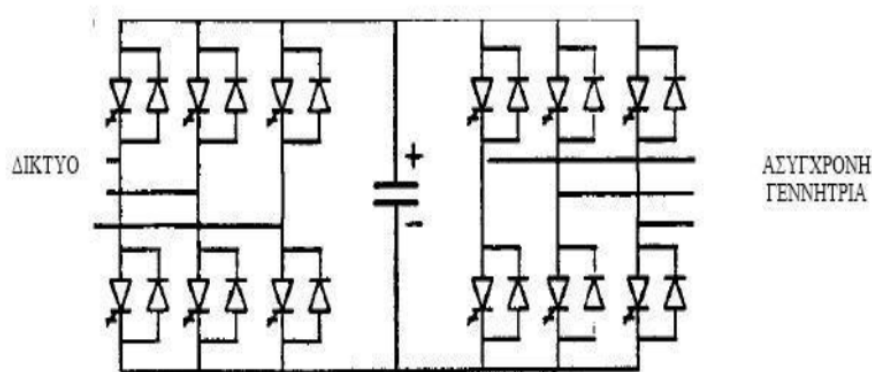
Ο πιο απλός μετατροπέας που χρησιμοποιείται είναι ο μετατροπέας πηγής τάσης που αποτελείται από ένα από αντιστροφέα με θυρίστορ και μεταγωγή από την τάση δικτύου και συνδέεται στην πλευρά του δικτύου, μαζί με ένα μη ελεγχόμενο ανορθωτή διόδων.



Αυτή η τεχνική στηρίζεται στην ρύθμιση της γωνίας έναυσης των θυρίστορ ώστε να αρχίζει η αγωγή τους όταν η γεννήτρια έχει επιταχυνθεί αποκτώντας ταχύτητα τέτοια ώστε η τάση εξόδου του ανορθωτή να είναι μεγαλύτερη από την τάση του δικτύου.

Η ταχύτητα, το ρεύμα και η ισχύς αυξάνονται με σχεδόν σταθερό συντελεστή ισχύος καθώς αυξάνεται η ταχύτητα ανέμου. Αυτός ο μετατροπέας μπορεί να αποτελείται από θυρίστορ GTO ώστε να μπορούν να λειτουργήσουν σε ισχύς της τάξεως των MW και τα οποία προοπτικά αντικαθίστανται με στοιχεία IGBT εξαιτίας της αύξησης της ονομαστικής τάσης και του ρεύματος αυτών. Τα προβλήματα που παρουσιάζει αυτή η διάταξη είναι λόγω της αυτοδιέγερσης των πυκνωτών και των ανεπιθύμητων συντονισμών σε χαμηλές ταχύτητες ανέμου. Ακόμα ο έλεγχος της τάσης δεν είναι εύκολος με τους πυκνωτές σταθερού μεγέθους.

- **Μετατροπείς πηγής τάσης PWM**



Σχήμα 2.5: σύστημα με 2 μετατροπείς τάσης

Η συγκεκριμένη τεχνική χρησιμοποιείται αρκετά συχνά και περιέχει δύο όμοιους μετατροπείς πηγής τάσης PWM όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα (σχήμα 2.5).

Η χρήση αυτού του μετατροπέα στην έξοδο εξασφαλίζει δυνατότητα ροής ισχύος προς τις δύο κατευθύνσεις και ελαχιστοποιεί την αρμονική παραμόρφωση των ρευμάτων εξόδου. Έτσι έχουμε έλεγχο της άεργου ισχύος του συστήματος. Ο μετατροπέας στην πλευρά της γεννήτριας περιορίζει τις αρμονικές των ρευμάτων και της ροπής της μηχανής και επιτρέπει την βελτιστοποίηση της δυναμικής απόκρισης της ανεμογεννήτριας. Αποτελείται από θυρίστορ GTO για μεγάλες γεννήτριες τα οποία τείνουν να αντικατασταθούν με ηλεκτρονικά ισχύος IGBT. Το κόστος είναι λίγο υψηλό και οριακά συμφέρουν για τέτοιου είδους εφαρμογές.

2.4 ΜΗΧΑΝΗ ΕΠΑΓΩΓΗΣ ΔΑΚΤΥΛΙΟΦΟΡΟΥ ΔΡΟΜΕΑ - Α/Γ ΤΥΠΟΥ Β

Η γεννήτρια επαγωγής δακτυλιοφόρου δρομέα αποτελείται από ένα τριφασικό τύλιγμα παρόμοιο με αυτό του στάτη. Το τύλιγμα αυτό ισοκατανέμεται στις εγκοπές του στάτη και τα άκρα του συνδέονται σε τρεις δακτύλιους, τους λεγόμενους δακτύλιους ολίσθησης (slip-rings) που περιστρέφονται μαζί με τον δρομέα. Οι περιστρεφόμενοι δακτύλιοι και οι σχετικές μ' αυτούς ψήκτρες μας επιτρέπουν να συνδέουμε εξωτερικές αντιστάσεις σε σειρά με το τύλιγμα του δρομέα. Οι αντιστάσεις αυτές χρησιμοποιούνται κατά την εκκίνηση, ενώ υπο συνθήκες κανονικής λειτουργίας οι τρεις ψήκτρες βραχυκυκλώνονται.

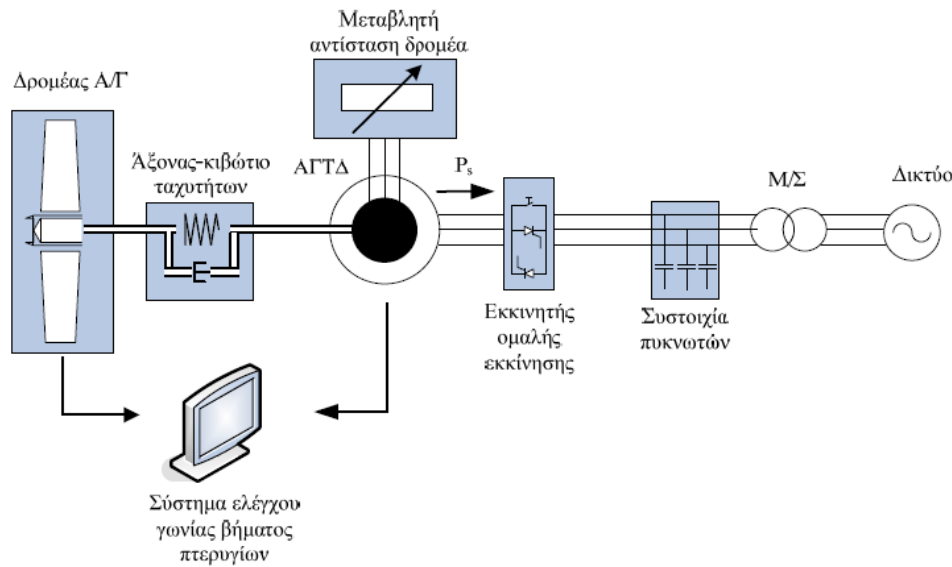


Εικόνα 2.4.1: δρομέας και στάτης



Εικόνα 2.4.2: δρομείς με εμφανείς τους δακτύλιους ολίσθησης

Οι ανεμογεννήτριες με γεννήτριες επαγωγής δακτυλιοφόρου δρομέα εισάχθηκαν στην αγορά από τον κατασκευαστή *Vestas Wind System* στα μέσα της δεκαετίας του '90 με την ονομασία *optislip*. Η διαμόρφωση της είναι ίδια με αυτή με βραχυκυκλωμένο κλωβο.

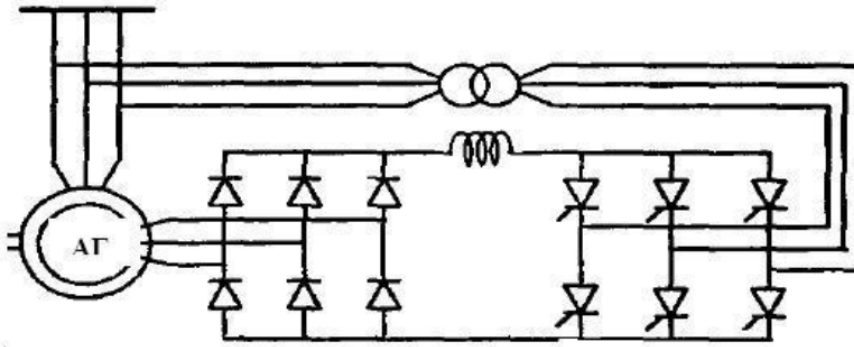


Σχήμα 2.4.3: Ανεμογεννήτρια τύπου Β

Σε αυτήν την περίπτωση χρησιμοποιείται μια ασύγχρονη γεννήτρια τυλιγμένου δρομέα με εξωτερική ρυθμιζόμενη αντίσταση δρομέα που επιτρέπει την περιορισμένη λειτουργία μεταβλητών στροφών σε εύρος 0-10% πάνω από την σύγχρονη ταχύτητα. Η ολίσθηση της γεννήτριας λαμβάνει μεγαλύτερες τιμές επιφέροντας όμως αυξημένες ωμικές απώλειες στις πρόσθετες αντιστάσεις. Η ρύθμιση των εξωτερικών αντιστάσεων γίνεται είτε μέσω ενός οπτικά ελεγχόμενου μετατροπέα που είναι τοποθετημένος στο δρομέα της γεννήτριας είτε μέσω παθητικών στοιχείων. Αυτή η οπτική σύνδεση αναιρεί την ανάγκη για ακριβή δακτυλίδια ολίσθησης που απαιτούν συντήρηση. Οι απαιτήσεις σε άεργο ισχύ ικανοποιούνται από συστοιχία πυκνωτών αντιστάθμισης στον τερματικό ζυγό. Εφαρμόζεται συνήθως ο έλεγχος γωνίας βήματος πτερυγίων για τον περιορισμό της αεροδυναμικής ισχύος σε ταχύτητες ανέμου μεγαλύτερες της ονομαστικής, σε αντίθεση με την χρήση γεννητριών με βραχυκυκλωμένο κλωβο.

2.4.1 ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΙΣ ΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΗ ΣΤΑ ΑΚΡΑ ΤΗΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ

Ένας μετατροπέας μπορεί να αποτελείται από ένα μη ελεγχόμενο ανορθωτή διόδων στο δρομέα και ένα αντιστροφέα στην έξοδο. (βλεπε σχήμα 2.4.4)



Σχήμα 2.4.4: Α/Γ με γεννήτρια δακτυλιοφόρου δρομέα με μετατροπέα

Μέσω του παραπάνω κυκλώματος γίνεται ανάκτηση της ισχύος ολίσθησης και επιστροφή της στο δίκτυο. Η χρησιμοποίηση τέτοιου είδους γεννήτριας έχει το μειονέκτημα του υψηλού κόστους με μεγαλύτερες απαιτήσεις ως προς την συντήρηση και την λειτουργία της. Η απαίτηση όμως για χρήση απλών τοπολογιών μετατροπέων μικρότερης ισχύος έχει το πλεονέκτημα της απλής και φθηνής λύσης, που δεν δίνει λύση στα προβλήματα των αρμονικών στο δίκτυο.

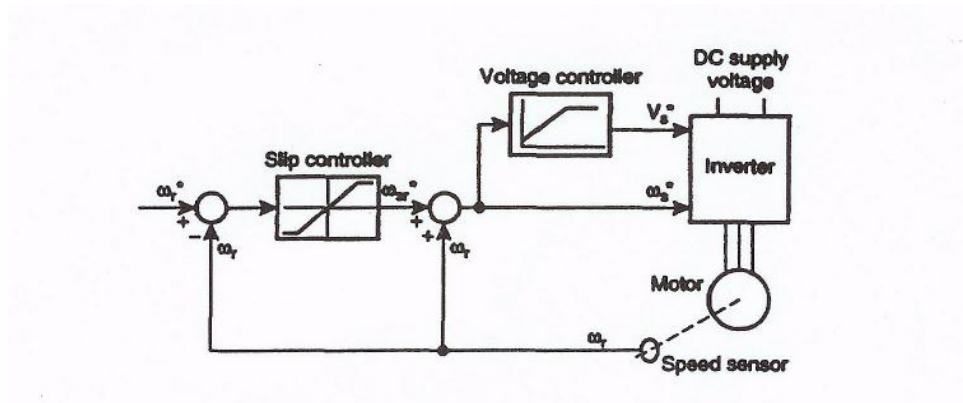
Κάποιοι άλλοι μετατροπείς είναι η χρήση ελεγχόμενου μετατροπέα με θυρίστορ ή μετατροπέα πηγής ρεύματος ή και σύστημα διπλών μετατροπέων PWM. Σε αυτές τις περιπτώσεις μπορεί η γεννήτρια να λειτουργήσει σε οποιαδήποτε ταχύτητα με κατάλληλη διαστασιολόγηση του μετατροπέα και παρουσιάζει άριστα χαρακτηριστικά ελέγχου και ρύμιση του συντελεστή φορτίου με ταυτόχρονη μείωση των αρμονικών.

Γίνεται επίσης να χρησιμοποιηθεί κυκλομετατροπέας για την διασύνδεση μεταξύ του δρομέα και του δικτύου, ο οποίος δίνει την δυνατότητα μεταφοράς της ισχύος και προς τις δύο κατευθύνσεις. Η περιοχή λειτουργίας της γεννήτριας επεκτείνεται και σε στροφές κάτω από την σύγχρονη και είναι δυνατός ο έλεγχος της άεργους ισχύος εξόδου. Είναι απλή λύση για μεγάλες ανεμογεννήτριες αλλά είναι μεγάλο το κόστος του κυκλομετατροπέα.

2.5 ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΜΗΧΑΝΗΣ ΕΠΑΓΩΓΗΣ

A. Βαθμωτός έλεγχος

Για να δημιουργήσουμε την υψηλότερη δυνατή ροπή, θα πρέπει να διατηρηθεί η ροή σταθερή και κοντά στην ονομαστική της τιμή, καθώς μεταβάλλονται οι λειτουργικές καταστάσεις του κινητήρα. Προκειμένου να λειτουργεί στο μέγιστο επίπεδο ροής, θα πρέπει να ρυθμιστούν οι δυο ελεγχόμενες παράμετροι, η τάση τροφοδοσίας του στάτη V_s και η συχνότητα ω_s για κάθε κατάσταση λειτουργίας. Μια απλή διάταξη ελέγχου V/F φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί. Η σχέση ανάμεσα στην τάση τροφοδοσίας και στη



Έλεγχος ταχύτητας με σταθερό λόγο V/F

συχνότητα είναι γραμμική εκτός από τις μικρές ταχύτητες. Μια ανύψωση τάσης παρέχεται σε χαμηλές ταχύτητες για να αντισταθμίσει την αντίσταση του στάτη. Αφού η συχνότητα εξαρτάται άμεσα από την ταχύτητα η μόνη μεταβλητή που είναι διαθέσιμη για έλεγχο είναι η V_s .

B. Διανυσματικός έλεγχος

Όπως είναι γνωστό, το πολύπλοκο μαθηματικό μοντέλο της ασύγχρονης μηχανής δεν ευνοεί την ανάπτυξη συμβατικών τεχνικών ελέγχου για τον έλεγχο της λόγω της μη γραμμικότητάς του και των επαγωγισμοτήτων της μηχανής, που μεταβάλλονται καθώς αυτή στρέφεται. Η θεωρία του διανυσματικού ελέγχου βασίζεται στην αξιοποίηση του μετασχηματισμού του Park με τον οποίο επιτυγχάνεται η

απλοποίηση του μοντέλου της μηχανής σε ένα σύστημα εξισώσεων με σταθερούς συντελεστές. Στόχος του διανυσματικού ελέγχου είναι η διατήρηση γωνίας 90° μεταξύ των πεδίων του στάτη και του δρομέα του επαγωγικού κινητήρα, ούτως ώστε να διατηρείται σταθερή κατά μετρό η ροή διακένου και η ροπή του κινητήρα να ελέγχεται με ανεξάρτητο τρόπο. Αν ο άξονας d του σύγχρονα στρεφόμενου πλαισίου αναφοράς τοποθετηθεί ώστε να βρίσκεται σε κάθε χρονική στιγμή στην κατεύθυνση της στρεφόμενης με σύγχρονη ταχύτητα ροής του μαγνητικού πεδίου (στάτη, δρομέα ή διακένου), τότε η συνιστώσα q της ροής αυτής μηδενίζεται. Με άλλα λόγια, ο άξονας d του πλαισίου αναφοράς ορίζεται από τη θέση της μαγνητικής ροής στάτη, δρομέα ή διακένου, ανάλογα με την επιλογή της συγκεκριμένης εφαρμογής. Έτσι απαλείφεται η μια από τις μεταβλητές κατάστασης (η συνιστώσα q της μαγνητικής ροής) με αποτέλεσμα να απλοποιηθούν σημαντικά οι εξισώσεις που περιγράφουν τη λειτουργία του κινητήρα.

Με χρήση του μετασχηματισμού Park επιτυγχάνεται η ανάλυση του πραγματικού τριφασικού συστήματος σε δύο άξονες $-d$ και $-q$ κάθετους μεταξύ τους. Επιπλέον προκύπτει και ο τρίτος άξονας -0 ο οποίος για συμμετρική λειτουργία έχει μηδενικές τιμές και παραλείπεται συνήθως στο διανυσματικό έλεγχο. Η γωνία θ που φαίνεται στην παραπάνω εξίσωση είναι η γωνία που σχηματίζει ο άξονας $-d$, του νέου συστήματος αναφοράς, με τον άξονα $-a$ του τριφασικού συστήματος. Για το διανυσματικό έλεγχο η θ επιλέγεται πάντα έτσι ώστε το νέο σύστημα αναφοράς να περιστρέφεται με τη σύγχρονη ταχύτητα. Το πλεονέκτημα που προκύπτει από την επιλογή αυτή είναι ότι τα εναλλασσόμενα μεγέθη του πραγματικού συστήματος μετασχηματίζονται σε συνεχείς ποσότητες στο προκύπτον σύστημα $d-q$ κι έτσι είναι εύκολο πλέον να εφαρμοστούν για αυτές οι γνωστές τεχνικές του ελέγχου.

Στη βιβλιογραφία του διανυσματικού ελέγχου διακρίνουμε τρεις βασικούς τύπους ελέγχου, ανάλογα με τον προσανατολισμό του συστήματος αναφοράς :

- α) Διανυσματικός έλεγχος με προσανατολισμό στο πεδίο του στάτη
- β) Διανυσματικός έλεγχος με προσανατολισμό στο πεδίο του δρομέα
- γ) Διανυσματικός έλεγχος με προσανατολισμό στο πεδίο του διακένου

Ο τρόπος με τον οποίο υπολογίζεται η μαγνητική ροή και γίνεται ο προσανατολισμός του συστήματος αναφοράς έχει μεγάλη σημασία στο διανυσματικό έλεγχο, διότι από την ακρίβεια με την οποία θα γίνει ο προσανατολισμός εξαρτάται και η ποιότητα του

ελέγχου. Με βάση τον τρόπο με τον οποίο γίνεται ο προσανατολισμός του συστήματος αναφοράς διακρίνουμε δύο κατηγορίες διανυσματικού ελέγχου :

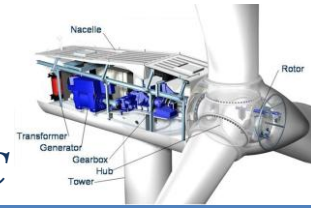
α) άμεσος διανυσματικός έλεγχος, όταν χρησιμοποιούνται αισθητήρες ή οι τερματικές ποσότητες της μηχανής σε συνδυασμό με το μαθηματικό μοντέλο της για να υπολογιστεί το διάνυσμα του πεδίου, με βάση το οποίο γίνεται ο προσανατολισμός του συστήματος αναφοράς.

β) έμμεσος έλεγχος, όταν χρησιμοποιείται η συχνότητα ολίσθησης για να γίνει ο προσανατολισμός με το πεδίο.

Όπως φαίνεται καθαρά από τα παραπάνω, είναι δυνατό να διακρίνουμε έξι διαφορετικούς τύπους διανυσματικού ελέγχου. Κάποιοι από αυτούς χρησιμοποιούνται πιο συχνά στην πράξη εξαιτίας κυρίως του γεγονότος ότι παρουσιάζουν λιγότερες δυσκολίες στην υλοποίησή τους. Αυτοί είναι ο άμεσος έλεγχος με προσανατολισμό στο πεδίο του στάτη και ο έμμεσος έλεγχος με προσανατολισμό στο πεδίο του δρομέα.

Ο συνδυασμός της επιστήμης των ηλεκτρονικών ισχύος και του αυτομάτου ελέγχου, καθώς και η ραγδαία εξέλιξη της ψηφιακής τεχνολογίας, οδήγησε τα τελευταία χρόνια σε μια διαρκή βελτίωση της αξιοπιστίας των υπαρχουσών τεχνικών διανυσματικού ελέγχου. Με τη χρήση των τεχνικών αυτών αυξάνεται δραματικά η αξιοπιστία των ηλεκτροκινητηρίων συστημάτων που χρησιμοποιούν ασύγχρονες μηχανές, με αποτέλεσμα να τείνουμε στην επικράτησή τους έναντι των κινητηρίων συστημάτων συνεχούς ρεύματος σε ένα ευρύτατο φάσμα εφαρμογών.

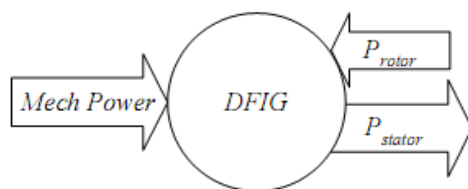
3. ΜΗΧΑΝΕΣ ΕΠΑΓΩΓΗΣ ΔΙΠΛΗΣ ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑΣ (DFIG) ΣΕ ΑΙΟΛΙΚΑ ΠΑΡΚΑ - ΑΓ ΤΥΠΟΥ C



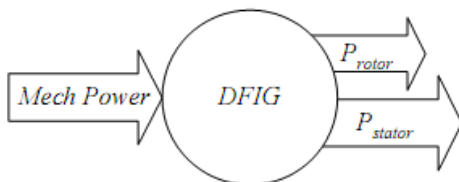
3.1 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ ΔΙΠΛΗΣ ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑΣ (DFIG)

Οι ανεμογεννήτριες με επαγωγική γεννήτρια διπλής τροφοδοσίας (Double Fed Induction Generator – DFIG) αποτελούνται από μία επαγωγική γεννήτρια δακτυλιοφόρου δρομέα (Wound Rotor Induction Generator – WRIG) με τα τυλίγματα του στάτη να συνδέονται μέσω δακτυλιδιών σε ένα ΕΡ/ΣΡ/ΕΡ (back-to-back) μετατροπέα που προσφέρει έλεγχο στα τέσσερα τεταρτημόρια, δηλαδή δυνατότητα αμφίδρομης ροής ισχύος.

Ο όρος διπλή τροφοδότηση οφείλεται στο γεγονός ότι οι τάσεις στο στάτη τροφοδοτούνται από το δίκτυο, ενώ οι τάσεις στο δρομέα τροφοδοτούνται από τον μετατροπέα ισχύος. Το σύστημα αυτό επιτρέπει οδήγηση με μεταβλητές στροφές σε αρκετά μεγάλο εύρος, ωστόσο αυτό περιορίζεται σε ένα $\pm 30\%$.



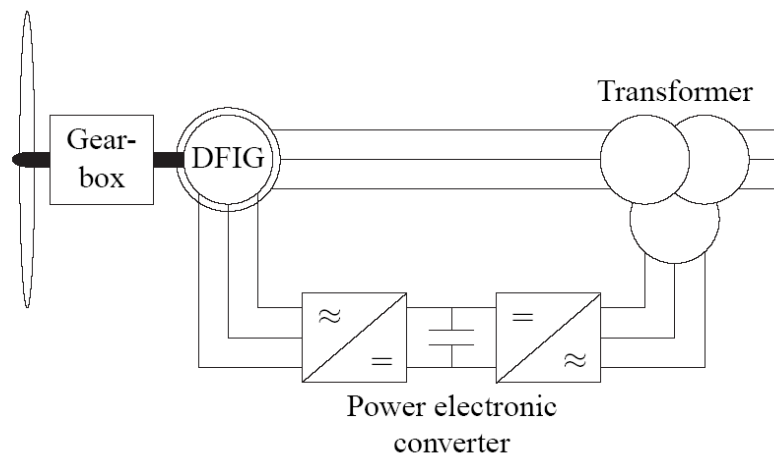
(a) $\omega < \omega_0$



(b) $\omega > \omega_0$

Σχήμα 3.1.1: Ροή ισχύος για μικρότερη (a) και μεγαλύτερη (b) από την σύγχρονη ταχύτητα

Το σύστημα που φαίνεται στο σχήμα 3.1.2 αποτελείται από μία ανεμογεννήτρια με DFIG. Το σύστημα αυτό έχει γίνει πολύ δημοφιλές τελευταία διότι εδώ ο μετατροπέας χειρίζεται μόνο ένα κλάσμα 20-30% της συνολικής ισχύος. Έτσι οι απώλειες στον ηλεκτρονικό μετατροπέα μπορούν να μειωθούν σε σχέση με ένα σύστημα του οποίου ο μετατροπέας έχει χειριστεί τη συνολική ισχύ. Επίσης το κόστος του μετατροπέα μειώνεται.



Σχήμα 3.1.2 . Ανεμογεννήτρια μεταβλητής ταχύτητας με DFIG

3.1.1 ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑΣ ΙΣΧΥΟΣ

Ο μετατροπέας ισχύος αποτελείται από δύο επιμέρους μετατροπείς. Το μετατροπέα από την πλευρά του δρομέα (Rotor side converter- RSC) και τον μετατροπέα από την πλευρά του δικτύου (Line side converter- LSC), καθένας από τους οποίους ελέγχεται ανεξάρτητα. Έχουμε τη κλασική τοπολογία AC/DC/AC με τη δημιουργία DC Link στη μέση με την βοήθεια πυκνωτή. Και οι δύο μετατροπείς έχουν την δυνατότητα να λειτουργούν ως ανορθωτές ή αντιστροφεείς και γι' αυτό παραπάνω αναφέραμε έλεγχο τεσσάρων τεταρτημορίων.

Η βασική ιδέα του RSC είναι ο έλεγχος της ενεργής και άεργου ισχύος ελέγχοντας το ρεύμα που εγχέουμε στον δρομέα, ενώ η κύρια εργασία του LSC είναι ο έλεγχος της τάσης του DC κλάδου. Πέρα από τις βασικές λειτουργίες του κάθε μετατροπέα, η στρατηγική έλεγχου επιτρέπει στον κάθε μετατροπέα να ρυθμίζει κατά βούληση την

άεργο ισχύ. Τόσο σε υπερσύγχρονη όσο και σε υποσύγχρονη λειτουργία, ο στάτης τροφοδοτεί με ενέργεια το δίκτυο.

3.1.2 ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΟΙ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΙΣ ΙΣΧΥΟΣ **back-to-back**

Στο σημείο αυτό, θα αναλύσουμε τις βασικές έννοιες που σχετίζονται με τον μετατροπέα **back-to-back** (που είναι γνωστός και ως *αντιστρεπτός (reversible)* ή *αμφίδρομος (bidirectional)*), τόσο από την πλευρά του δικτύου, όσο κι από την πλευρά του δρομέα. Έτσι, θα ασχοληθούμε με τον ίδιο τον μετατροπέα, αλλά και με τα στενά συνδεδεμένα στοιχεία με αυτόν, όπως είναι τα φίλτρα, η σύνδεση DC και ο έλεγχος (μόνο από την πλευρά δικτύου).

Συγκεκριμένα, περιγράφεται ο κλασικός και κοινά χρησιμοποιούμενος δύο-επιπέδων μετατροπέας πηγής τάσης (VTC), εξετάζεται το μοντέλο του και κατόπιν, δίνεται με μία σύντομη περιγραφή των φίλτρων που χρησιμοποιούνται για τον περιορισμό ανεπιθύμητων και αναπόφευκτων επιπτώσεων των μετατροπέων πηγής τάσης (διακυμάνσεις ρευμάτων, dv/dt , κλπ.). Αυτές οι πτυχές μελετώνται για τον μετατροπέα από πλευράς δρομέα και από πλευράς δικτύου.

Είναι δυνατό να καταλάβει κανείς τα πλεονεκτήματα και τους περιορισμούς της παροχής για την DFIG, χάρη στη χρήση του μετατροπέα **back-to-back**.

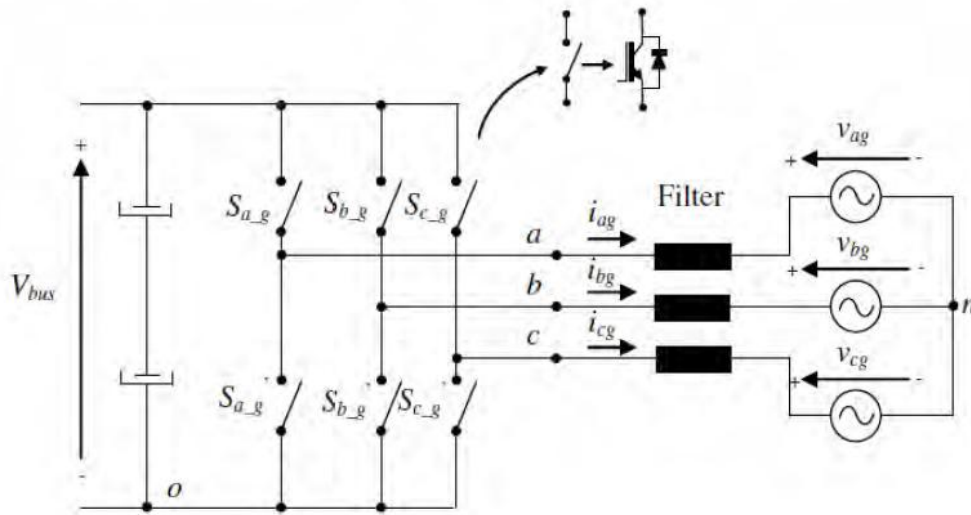
3.1.3 ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑΣ **back-to-back** ΒΑΣΙΣΜΕΝΟΣ ΣΕ ΤΟΠΟΛΟΓΙΑ VSC ΔΥΟ ΕΠΙΠΕΔΩΝ

Στο σημείο αυτό, θα περιγράψουμε τις πιο σημαντικές πτυχές ενός μετατροπέα **back-to-back**, που είναι βασισμένος στον ευρέως χρησιμοποιούμενο μετατροπέα δύο-επιπέδων. Επιπλέον, περιγράφονται οι μετατροπείς και των δύο πλευρών.

3.1.4 ΣΥΣΤΗΜΑ ΠΛΕΥΡΑΣ ΔΙΚΤΥΟΥ

Το σύστημα από πλευράς δικτύου απαρτίζεται από : τον μετατροπέα πλευράς δικτύου, το φίλτρο πλευράς δικτύου και την τάση δικτύου. Το παρακάτω σχήμα (**Σχήμα 3.1.3**) απεικονίζει ένα απλοποιημένο μοντέλο του συστήματος πλευράς δικτύου. Μπορούμε να διακρίνουμε τα παρακάτω στοιχεία :

- Ο μετατροπέας από πλευράς δικτύου μοντελοποιείται με ιδανικούς δικατευθυντικούς ή αμφίδρομους διακόπτες. Μετατρέπει τάση και ρεύματα από DC σε AC, ενώ η ανταλλαγή ισχύος μπορεί να γίνεται κι από τις δύο κατευθύνσεις, από AC σε DC (λειτουργία ανορθωτή) και από DC σε AC (λειτουργία αναστροφέα). Ο ιδανικός διακόπτης κανονικά δημιουργείται από έναν ελεγχόμενο ημιαγωγό με μία δίοδο αντιπαράλληλα, για να επιτρέπει τη ροή του ρεύματος και στις δύο κατευθύνσεις. Στην περίπτωση τη δική μας, ο ελεγχόμενος ημιαγωγός που χρησιμοποιείται είναι ένα διπολικό τρανζίστορ μονωμένης πύλης (IGBT). Επίσης, να σημειωθεί ότι αντιμετωπίζουμε τους ελεγχόμενους διακόπτες ιδανικά, χωρίς να λάβουμε υπόψη πραγματικά χαρακτηριστικά, όπως χρόνος μεταγωγής (switching time) ή πτώσεις τάσης.
- Το φίλτρο πλευράς δικτύου κανονικά αποτελείται από τουλάχιστον τρεις αυτεπαγωγές (L), που είναι η σύνδεση μεταξύ κάθε φάσης εξόδου του μετατροπέα και της τάσης δικτύου. Όταν είναι αναγκαία η απαίτηση ενός υψηλού φίλτρου, κάθε αυτεπαγωγή μπορεί να συνοδεύεται από έναν πυκνωτή (LC) ή ακόμη από έναν πυκνωτή και μία ακόμη αυτεπαγωγή (LCL).
- Η τάση του δικτύου κανονικά παρέχεται μέσω ενός μετασχηματιστή. Αυτή η τάση AC υποτίθεται ότι είναι ισορροπημένη και ημιτονοειδής, υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας. Η επίδραση του μετασχηματιστή ή των συνθέτων αντιστάσεων δικτύου αγνοούνται στην περίπτωσή μας.



Σχήμα 3.1.3 Απλοποιημένο μοντέλο μετατροπέα, φίλτρου και δικτύου

3.1.5 ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑΣ, ΕΠΑΓΩΓΙΚΟ ΦΙΛΤΡΟ ΚΑΙ ΜΟΝΤΕΛΟ ΤΑΣΗΣ ΔΙΚΤΥΟΥ

Από το σχήμα 3.1.3, όπου αναπαρίσταται το μοντέλο του συστήματος από πλευράς δικτύου, διακρίνουμε ότι ένα τριφασικό φίλτρο είναι τοποθετημένο μεταξύ της τάσης δικτύου και των εξόδων του μετατροπέα.

Μία απλή και αξιόπιστη λύση υιοθετεί ένα επαγωγικό φίλτρο, τοποθετώντας μία αυτεπαγωγή σε κάθε φάση. Η τάση δικτύου μοντελοποιείται ως μία ιδανική τριφασική ισορροπημένη τάση. Το τριφασικό σύστημα μπορεί να μοντελοποιηθεί ως τρία ανεξάρτητα, αλλά ισορροπημένα, μονοφασικά συστήματα (Σχήμα 3.1.4). Ας σημειωθεί ότι οι τάσεις εξόδου AC του μετατροπέα, που αναφέρονται στο ουδέτερο σημείο, φέρουν τον χαρακτηριστικό δείκτη 'f'.

Έτσι, οι ηλεκτρικές εξισώσεις του συστήματος είναι οι παρακάτω :

$$v_{af} = R_f i_{ag} + L_f \frac{di_{ag}}{dt} + v_{ag}$$

$$v_{bf} = R_f i_{bg} + L_f \frac{di_{bg}}{dt} + v_{bg}$$

$$v_{cf} = R_f i_{cg} + L_f \frac{di_{cg}}{dt} + v_{cg}$$

Όπου

L_f : η αυτεπαγωγή του φίλτρου πλευράς δικτύου (σε H)

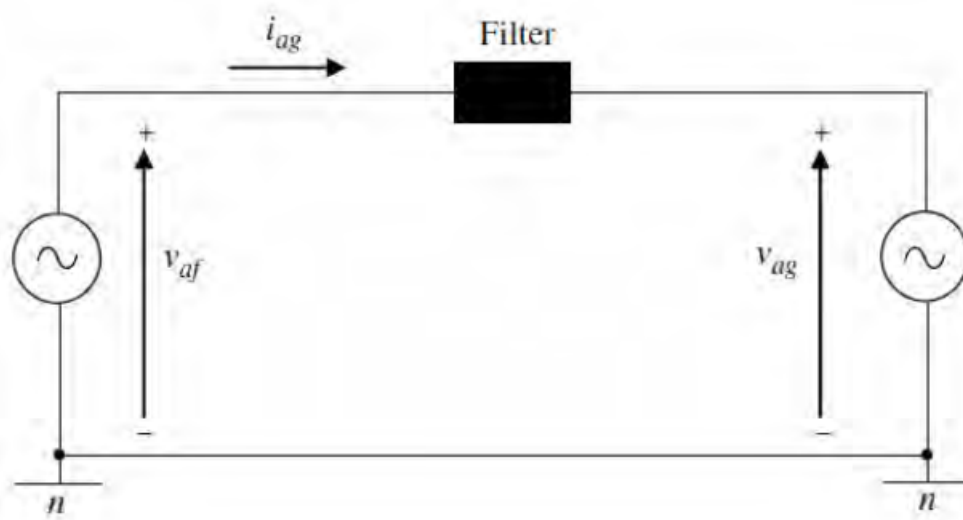
R_f : η ωμική αντίσταση του φίλτρου πλευράς δικτύου (σε Ω)

v_{ag} , v_{bg} , v_{cg} : τάσεις δικτύου (σε V), με ωs : ηλεκτρική γωνιακή ταχύτητα (σε rad/s)

i_{ag} , i_{bg} , i_{cg} : ρεύματα που ρέουν μέσα από την έξοδο του μετατροπέα πλευράς δικτύου (σε A)

v_{af} , v_{bf} , v_{cf} : τάσεις εξόδου του μετατροπέα, που αναφέρονται στο ουδέτερο σημείο του φορτίου n (σε V).

Οι ιδανικές ημιτονοειδείς τάσεις του δικτύου δημιουργούνται σε σταθερό πλάτος και συχνότητα.

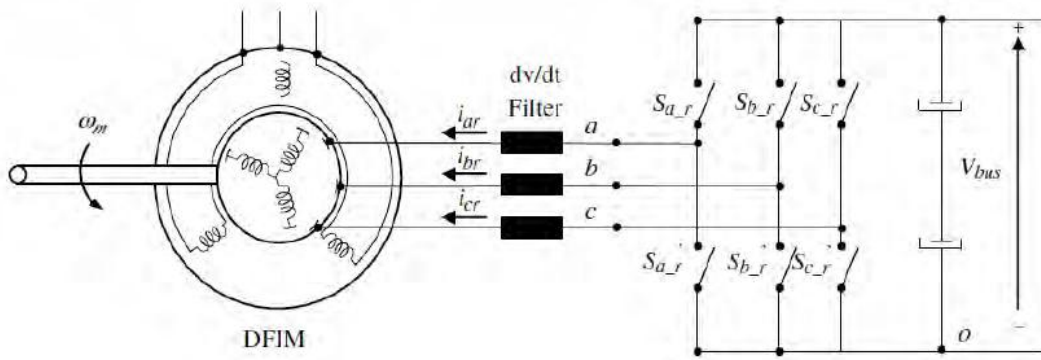


Σχήμα 3.1.4 Απλοποιημένο ισοδύναμο μονοφασικό κύκλωμα δικτύου (α φάσης)

3.1.6 ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑΣ ΠΛΕΥΡΑΣ ΡΟΤΟΡΑ ΚΑΙ ΦΙΛΤΡΟ dv/dt

Ο μετατροπέας πλευράς δρομέα που εφοδιάζει τον δρομέα της DFIG, σε γενικές γραμμές, είναι ίσος με τον μετατροπέα πλευράς δικτύου, όπως παρουσιάστηκε στην προηγούμενη παράγραφο. Το επόμενο σχήμα (**Σχήμα 3.1.5**) απεικονίζει τον μετατροπέα και το φίλτρο dv/dt , που χρησιμοποιείται για τον εφοδιασμό του δρομέα της DFIG. Στην περίπτωση αυτή, επίσης, ένας δύο-επιπέδων VSC τροφοδοτεί τον δρομέα. Μεταξύ του δρομέα και του μετατροπέα, γενικά, ένα φίλτρο dv/dt είναι τοποθετημένο, με στόχο κυρίως να προστατέψει

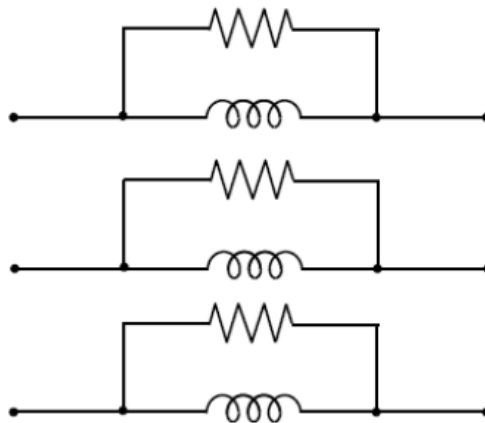
τη μηχανή από τις επιβλαβείς επιπτώσεις του μετατροπέα πηγής τάσης, όπως χωρητικά ρεύματα διαρροής, κατευθυνόμενα ρεύματα και αυξημένη πίεση στην μόνωση του κινητήρα.



Σχήμα 3.1.5 Μετατροπέας πλευράς ρότορα και φίλτρο dv/dt που εφοδιάζει τον ρότορα στη μηχανή

Ο μετατροπέας πλευράς δρομέα συνδέεται με τον μετατροπέα πλευράς δικτύου μέσω της σύνδεσης DC. Το φίλτρο dv/dt προσπαθεί κυρίως να μετριάσει τις βηματικές τάσεις στα τερματικά του δρομέα της μηχανής, που έρχονται από τον μετατροπέα. Ο συνδυασμός τριών, κυρίως, παραγόντων προσδιορίζει πόσο επιβλαβείς είναι οι επιδράσεις στην μηχανή, που το φίλτρο dv/dt τείνει να αμβλύνει. Αυτοί οι παράγοντες είναι : ο τύπος των βημάτων τάσης που παράγονται από τον μετατροπέα, τα χαρακτηριστικά και το μήκος του καλωδίου που χρησιμοποιείται για την σύνδεση του μετατροπέα και της μηχανής και τέλος, τα χαρακτηριστικά της μηχανής που παρέχεται. Η εξασθένιση των βηματικών τάσεων μπορεί να επιτευχθεί, γενικά, από διάφορους τύπους φίλτρων.

Ως εκ τούτου, μία πιθανή λύση για να μετριάσθούν οι υπερτάσεις στα τερματικά του κινητήρα είναι να τοποθετηθεί μία ωμική αντίσταση και μία αυτεπαγωγή παράλληλα στην έξοδο του μετατροπέα (**Σχήμα 3.8**). Η ωμική αντίσταση μετριάζει την αντανάκλαση στο καλώδιο, ενώ η αυτεπαγωγή είναι απαραίτητη, προκειμένου να μειώσει την πτώση τάσης και τις απώλειες, που οφείλονται στις χαμηλές συχνότητες. Αυτό το φίλτρο αποτελείται γενικά από δύο παθητικά στοιχεία. Ωστόσο, μερικοί συγγραφείς προτείνουν την αναπαραγωγή της επίδρασης της ωμικής αντίστασης, αυξάνοντας τις απώλειες ισχύος της αυτεπαγωγής, αποφεύγοντας την ανάγκη μίας φυσικής ωμικής αντίστασης.

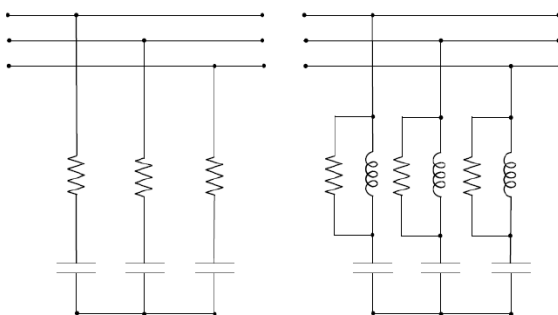


Σχήμα 3.1.6 Το φίλτρο dv/dt στην έξοδο του μετατροπέα

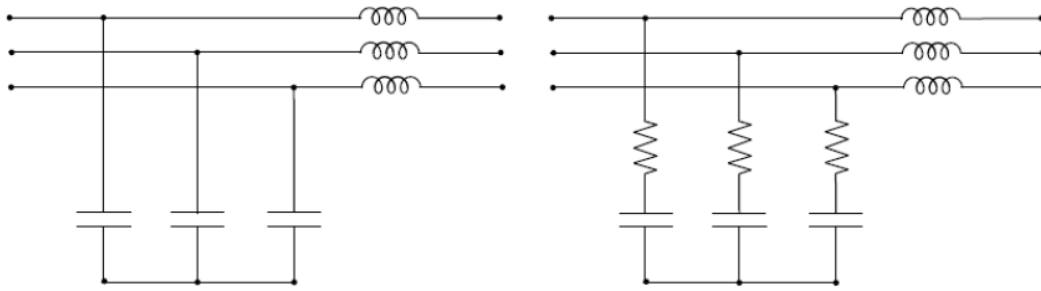
Φίλτρα, των οποίων ο στόχος είναι να ζευγαρώσουν την σύνθετη αντίσταση εισόδου του κινητήρα με την σύνθετη αντίσταση του καλωδίου, τοποθετούνται κανονικά στα τερματικά του κινητήρα. Μεταξύ διαφόρων λύσεων, είναι πιθανό να τοποθετηθεί ένα RC ή ένα RLC φίλτρο, όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα (**Σχήμα 3.1.7**).

Τέλος, στην έξοδο του μετατροπέα είναι, επίσης, δυνατό να τοποθετηθούν δίκτυα φίλτρου, όπως φαίνεται στο επόμενο σχήμα (**Σχήμα 3.1.8**), για να μειωθεί το dv/dt στον ίδιο τον μετατροπέα.

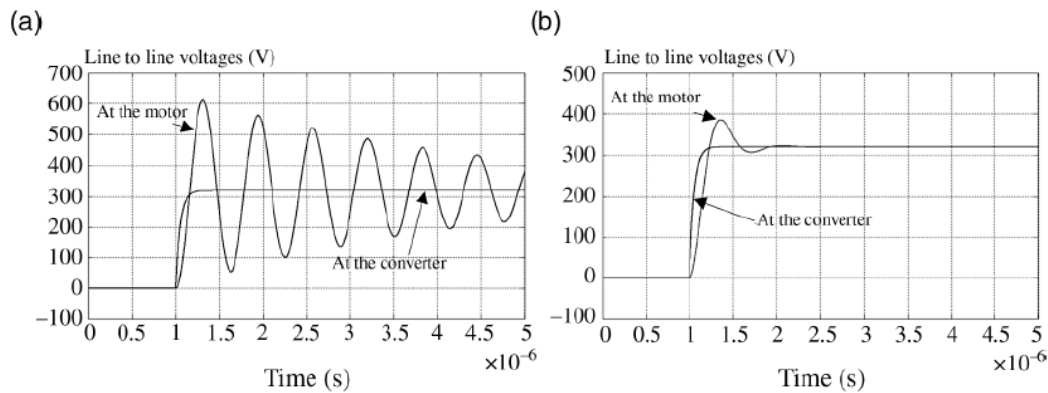
Ως εκ τούτου, η επίδραση που παράγει την συμπερίληψη ενός φίλτρου dv/dt απεικονίζεται γραφικά (**Σχήμα 3.1.9**). Είναι δυνατό να δούμε, χωρίς το φίλτρο, πώς η υπέρταση που προκύπτει στα τερματικά του κινητήρα είναι πολύ σημαντική, ενώ χάρη στην συμπερίληψη του ίδιου του φίλτρου, αυτή η υπέρταση μειώνεται.



Σχήμα 3.1.7 Πιθανά φίλτρα για το ζευγάρι των συνθέτων αντιστάσεων στα τερματικά του κινητήρα



Σχήμα 3.1.8 Το φίλτρο dv/dt στην έξοδο του μετατροπέα



Σχήμα 3.1.9 Η επίδραση του φίλτρου dv/dt πάνω στην τάση, στα τερματικά του κινητήρα : (a) υπερτάσεις χωρίς φίλτρο και (b) μείωση των υπερτάσεων, χάρη στη συμπερίληψη του φίλτρου

3.1.7 ΣΥΝΔΕΣΗ DC

Το DC μέρος του μετατροπέα back-to-back τυπικά λέγεται *σύνδεση DC*. Χάρη στην ενέργεια που αποθηκεύεται σε έναν πυκνωτή (ή συνδυασμό μερικών πυκνωτών), προσπαθεί να διατηρήσει μία σταθερή τάση στα τερματικά του. Είναι η σύνδεση μεταξύ των μετατροπέων της πλευράς του δικτύου και της πλευράς του δρομέα. Το παρακάτω σχήμα (Σχήμα 3.1.10) δείχνει ένα πιθανό απλοποιημένο μοντέλο μίας σύνδεσης DC. Αποτελείται από έναν πυκνωτή παράλληλα με μία υψηλή ωμική αντίσταση.

Προκειμένου να αντλήσουμε το μοντέλο της σύνδεσης DC, πρέπει να υπολογισθεί η τάση διαύλου DC. Αυτή η τάση είναι εξαρτημένη από το ρεύμα μέσω του πυκνωτή :

$$V_{bus} = \frac{1}{C_{bus}} \int i_c dt$$

Το ρεύμα μέσω του πυκνωτή μπορεί να βρεθεί από τη σχέση :

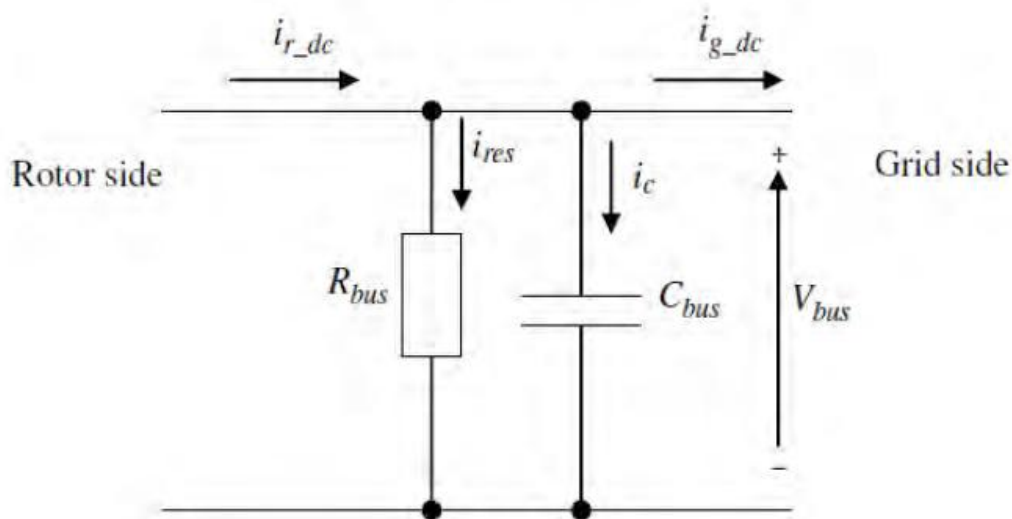
$$i_c = i_{r_dc} - i_{g_dc} - i_{res}$$

Όπου

i_{res} : το ρεύμα μέσω της ωμικής αντίστασης (σε A)

i_{g_dc} : το ρεύμα DC που ρέει από τη σύνδεση DC στο δίκτυο (σε A)

i_{r_dc} : το ρεύμα DC που ρέει από το δρομέα στη σύνδεση DC (σε A).



Σχήμα 3.1.10 Σύστημα σύνδεσης DC

3.2 ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ ΔΙΠΛΗΣ ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑΣ (DFIG)

Ο στόχος του συστήματος ελέγχου της Α/Γ μεταβλητής ταχύτητας με DFIG είναι :

1. Να ελέγχει την ισχύ που παρέχεται από την Α/Γ ώστε να βρει το βέλτιστο σημείο λειτουργίας,
2. Να περιορίσει την ισχύ σε περίπτωση υψηλών ταχυτήτων ανέμου,
3. Να ελέγχει την άεργη ισχύ που ανταλλάσσεται μεταξύ της Α/Γ και του δικτύου.

Κάθε ένα σύστημα της Α/Γ περιέχει υποσυστήματα (αεροδυναμικό, μηχανικό, ηλεκτρικό) με διαφορετικές τάξεις σταθερών χρόνου. Αυτή η διαφορά στις σταθερές χρόνου γίνεται ακόμα μεγαλύτερη στην περίπτωση Α/Γ μεταβλητής ταχύτητας, λόγω του σύνθετου ηλεκτρικού συστήματος εξαιτίας του μετατροπέα ισχύος. Το πολύπλοκο ηλεκτρικό σύστημα απαιτεί ακόμα πιο πολύπλοκο σύστημα ελέγχου.

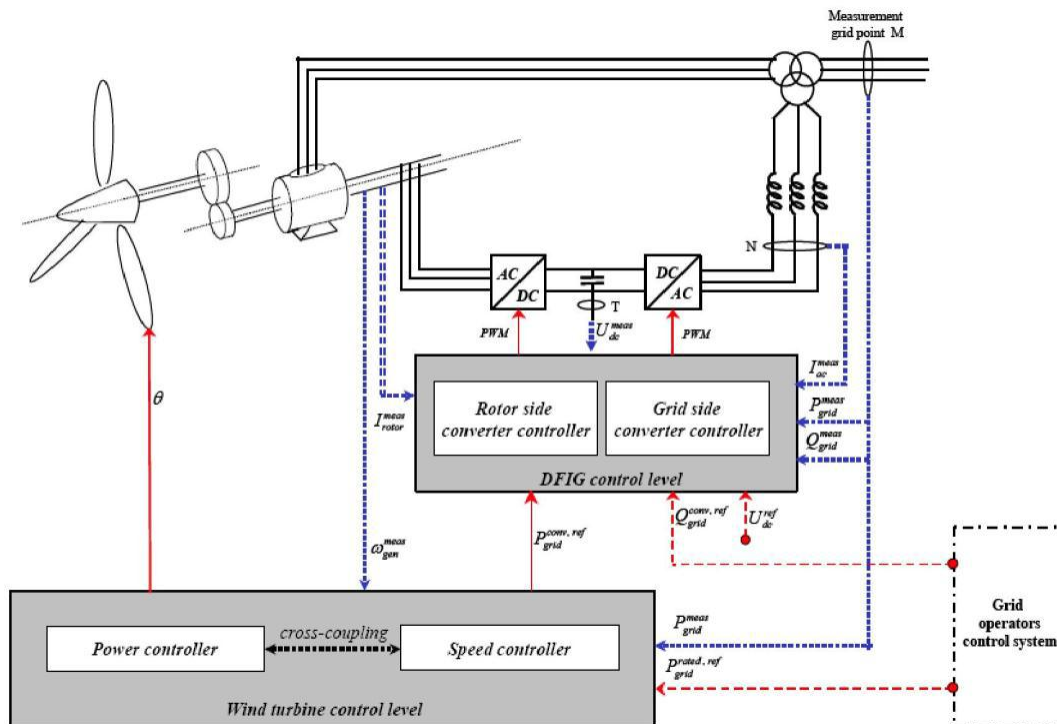
Στο σχήμα 3.2.1 φαίνεται το συνολικό σύστημα ελέγχου για Α/Γ μεταβλητής ταχύτητας με DFIG το οποίο περιλαμβάνει:

α) Έλεγχος DFIG

β) Έλεγχος Α/Γ

Ο έλεγχος της DFIG με γρήγορη δυναμική περιέχει τον ηλεκτρικό έλεγχο των μετατροπέων ισχύος και τον έλεγχο της DFIG και έχει ως σκοπό τον ανεξάρτητο έλεγχο της ενεργής και άεργης ισχύς της ΑΓ.

Ο έλεγχος της Α/Γ με χαμηλή δυναμική επιβλέπει τον έλεγχο βήματος περυγίων καθώς και τον ηλεκτρικό έλεγχο της DFIG. Παρέχει μια γωνία βήματος αναφοράς θ ευθέως στον μηχανισμό κίνησης των περυγίων και ένα σήμα ισχύος αναφοράς για τον έλεγχο της DFIG.



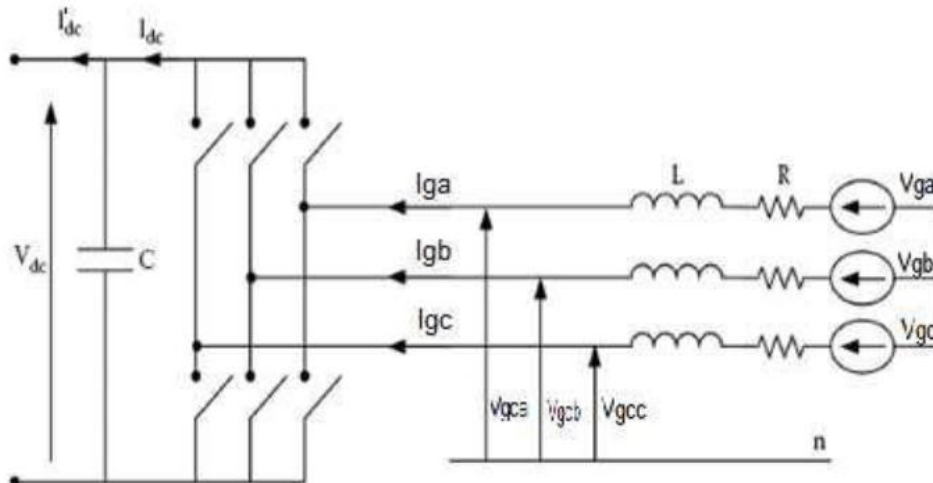
Σχήμα. 3.2.1 Συνολικό σύστημα ελέγχου για Α/Γ μεταβλητής ταχύτητας με DFIG

3.2.1 ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΗΣ DFIG

Ο έλεγχος της DFIG περιέχει το γρήγορο ηλεκτρικό έλεγχο της γεννήτριας επαγωγής. Εν συντομία, οι διανυσματικές τεχνικές ελέγχου επιτρέπουν την απόξευση ελέγχου της ενεργής και άεργης ισχύος. Αυτές οι τεχνικές βασίζονται στην έννοια του ελέγχου d-q σε διαφορετικά πλαίσια αναφοράς, όπου η τάση και το ρεύμα αλληλεπιδρούν στα διακριτά στοιχεία που σχετίζονται με την ενεργή και άεργη ισχύ.

3.2.2 ΕΛΕΓΧΟΣ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑ ΣΤΗΝ ΠΛΕΥΡΑ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ

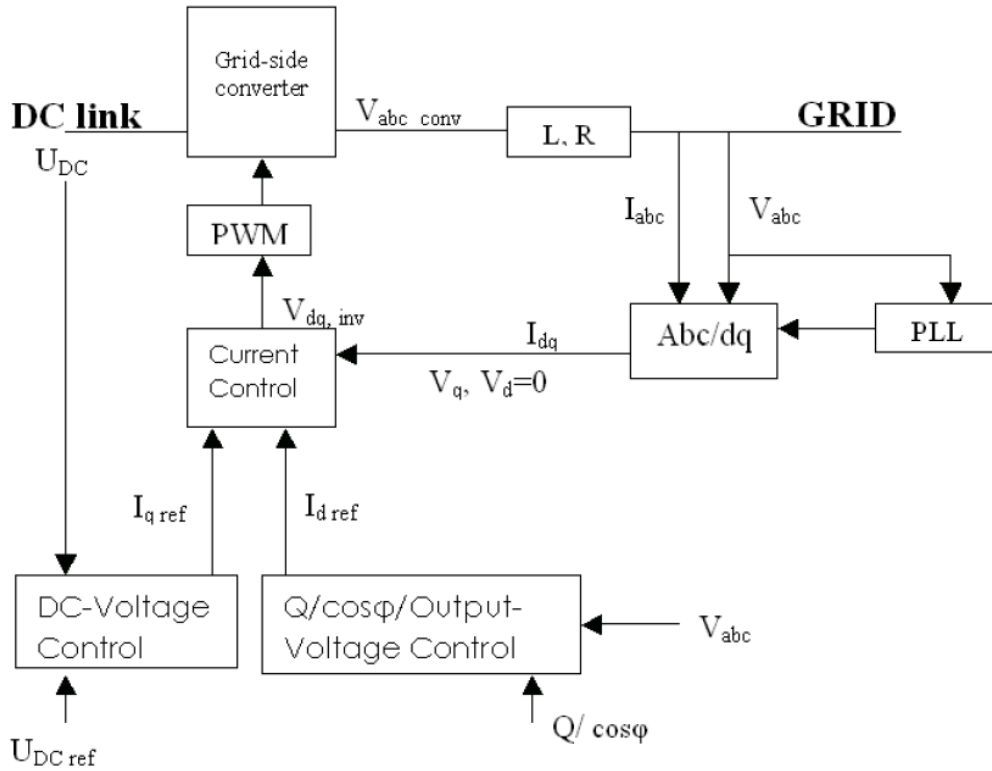
Ο μετατροπέας τάσης στην πλευρά του δικτύου χρησιμοποιεί ένα φίλτρο ισχύος με σκοπό να μειώσει τις αρμονικές ρεύματος. Στόχος του μετατροπέα στην πλευρά του στάτη είναι να κρατήσει την dc-link τάση σε μια τιμή άσχετα με την ποσότητα και την κατεύθυνση της ισχύος του δρομέα και να εγγυηθεί μια λειτουργία του μετατροπέα μηδενική άεργη ισχύ. Αυτό σημαίνει ότι ο μετατροπέας στην πλευρά του δικτύου ανταλλάσσει ενεργή ισχύ μόνο με το δίκτυο και επομένως η μετάδοση της άεργης ισχύος από την γεννήτρια επαγωγής διπλής τροφοδοσίας στο δίκτυο γίνεται μόνο μέσω του στάτη. Η dc τάση και η άεργη ισχύ ελέγχονται έμμεσα από τον έλεγχο του ρεύματος του μετατροπέα στην πλευρά του δικτύου.



Σχημα 3.2.2: Σχηματικό διάγραμμα μετατροπέα ισχύος στην πλευρά του δικτύου.

Επιπλέον, αυτός ο μετατροπέας περιλαμβάνει τρεις ελεγκτές, οι οποίοι με σειρά από τον εσωτερικό προς τον εξωτερικό επικαλυπτόμενο βρόγχο είναι οι εξής : ελεγκτής ρεύματος, ελεγκτής συνεχούς τάσης, και τέλος ελεγκτής άεργου ισχύος. Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι οι τρεις αυτοί ελεγκτές είναι PI γιατί το ηλεκτρικό σύστημα στην πλευρά του δικτύου περιλαμβάνει μόνο εξισώσεις πρώτης τάξης.

Ο τελευταίος ελεγκτής περιλαμβάνει τρεις καταστάσεις λειτουργίας. Υπάρχει δηλαδή η δυνατότητα επιλογής είτε του ελέγχου της άεργου ισχύος, είτε του ελέγχου του συντελεστή ισχύος, είτε της εξερχόμενης από τον μετατροπέα τάσης. Ο ελεγκτής της πλευράς του δικτύου παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα. Τα VSCs αποτελούνται από έξι διόδους και έξι IGBTs που ελέγχονται από έναν έλεγχο PWM (διαμόρφωση πλάτους παλμού).

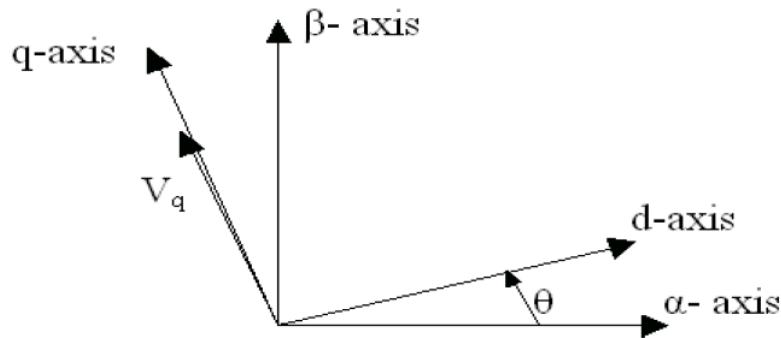


Σχήμα 3.2.3: Μοντέλο ελέγχου του μετατροπέα στην πλευρά του δικτύου.

Η εξίσωση της τάσης κατά μήκος των στοιχείων L και R που συνδέουν τον μετατροπέα με το δίκτυο εναλλασσόμενης τάσης είναι

$$V_{abc_{conv}} = RI_{abc} + L \frac{dI_{abc}}{dt} + V_{abc} \quad (3.1)$$

Η εξίσωση αυτή μετασχηματίζεται σε ένα σύστημα αναφοράς το οποίο περιστρέφεται με την σύγχρονη ταχύτητα $\omega=2\pi f$, χρησιμοποιώντας τον μετασχηματισμό Park. Ο έλεγχος του μετατροπέα από την πλευρά του δικτύου (GSC grid side control) αποτελείται από έναν ταχύ εσωτερικό βρόχο, που ελέγχει τα ρεύματα δια μέσω του φίλτρου δικτύου και έναν εξωτερικό, βραδύτερο βρόχο που ελέγχει την DC σύνδεση. Η επιλογή είναι τέτοια ώστε ο άξονας q του περιστρεφόμενου με την σύγχρονη ταχύτητα πλαισίου αναφοράς, να είναι προσανατολισμένος με την τάση V_q . Αυτό σημαίνει ότι η τάση V_d θα είναι μηδέν και μιας και το πλάτος της τάσεως τροφοδοσίας είναι σταθερό, θα είναι σταθερή και η τάση V_q .



Σχήμα 3.2.4: Αρχικό σύστημα αναφοράς και d, q άξονες.

Επομένως η εξίσωση με βάση τους νέους d, q άξονες γίνεται

$$V_{d_{conv}} = RI_d + L \frac{dI_d}{dt} - \omega I_q \quad (3.2)$$

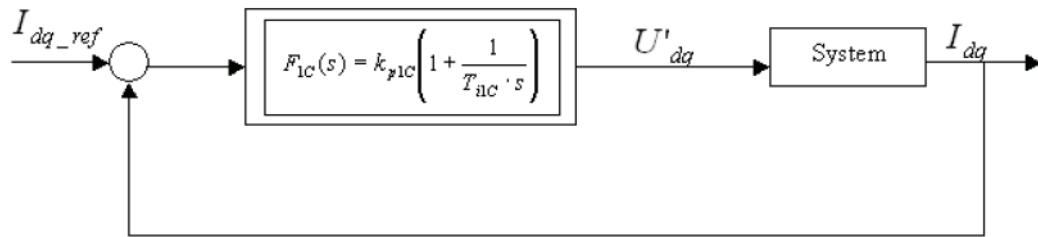
$$V_{q_{conv}} = RI_q + L \frac{dI_q}{dt} + \omega I_d + V_q$$

Αμελώντας τις απώλειες λόγω της διακοπτικής λειτουργίας του μετατροπέα, καθώς επίσης και τις απώλειες της μηχανής και του ίδιου του μετατροπέα, η εξίσωση εξισορρόπησης της ενεργού ισχύος μεταξύ της εναλλασσόμενης και της συνεχούς πλευράς του μετατροπέα είναι:

$$P_{DC} = U_{DC}I_{DC} = P_{AC} = \frac{3}{2}V_qI_q \quad (3.3)$$

Ο έλεγχος της ισχύος του PWM επιτυγχάνεται με τον ελεγκτή ρεύματος (current controller)

3.2.3 ΕΛΕΓΚΤΗΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΣΤΗΝ ΠΛΕΥΡΑ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ



Σχήμα 3.2.5 : Κλειστός βρόγχος- Διάγραμμα του ελεγκτή ρεύματος

Οι εξισώσεις του ελεγκτή ρεύματος με βάση την σχέση 3.2 είναι:

$$V_{d \text{ conv}} = U'_d - \omega I_q \quad (3.4)$$

$$V_{q \text{ conv}} = U'_q + \omega I_d + V_q$$

Για να αποξεύξουμε τις δυο συνιστώσες του ρεύματος δικτύου:

$$U'_d = R I_d + L \frac{dI_d}{dt} \quad (3.5)$$

$$U'_q = R I_q + L \frac{dI_q}{dt}$$

Με βάση το σχήμα 3.2.5 και χρησιμοποιώντας τον IMC έλεγχο, πρέπει να υπολογιστούν οι συντελεστές του ελεγκτή δηλαδή το αναλογικό κέρδος και η εσωτερική σταθερά χρόνου της PI εξίσωσης.

$$F_{1C} = K_{P1C} \left(1 + \frac{1}{T_{i1C} s} \right), \text{ με } K_{P1C} = a_{1C} L \text{ και } T_{i1C} = \frac{L}{R} \quad (3.6)$$

Το a_{1C} αντιστοιχεί στο εύρος ζώνης του συστήματος κλειστού βρόχου και συνδέεται με το χρόνο αύξησης t_{rise} [10%-90%] του συστήματος κλειστού βρόχου σύμφωνα με την σχέση , $a_{1C}t_{r1C} = \ln(9)$ που ισχύει για το σύστημα πρώτης τάξης.

3.2.4 ΕΛΕΓΚΤΗΣ ΤΑΣΗΣ

Ο έλεγχος της τάσης είναι απαραίτητος προκειμένου να εξασφαλιστεί ορθή λειτουργία των μετατροπέων και επομένως, του συνόλου της ανεμογεννήτριας. Επιπλέον ο μετατροπέας τάσης στην πλευρά του δικτύου χρησιμοποιείται ως διεπαφή με το AC σύστημα στην πλευρά του δικτύου και επιτυγχάνεται ισορροπία ισχύος μεταξύ της DC πλευράς και της πλευράς του δικτύου. Η στρατηγική του ελέγχου αυτού είναι να ρυθμίσουμε την τάση της DC σύνδεσης μέσω του PI ελεγκτή, ο οποίος ελεγκτής ουσιαστικά επεμβαίνει στην αποθηκευόμενη ενέργεια στον πυκνωτή στην DC πλευρά. Τρόπος απλοποίησης του ελεγκτή είναι η γραμμικοποίηση της ανάδρασης, δηλαδή οι μη γραμμικές δυναμικές εξισώσεις της DC σύνδεσης μεταφέρονται σε ένα ισοδύναμο γραμμικό σύστημα, όπου μπορούν να εφαρμοστούν τεχνικές γραμμικού ελέγχου. Η ισορροπία ισχύος μπορεί να γραφτεί ως:

$$P_{DC} - \frac{d(E_{DC})}{dt} = P_{\alpha\pi} + P_{AC} \quad (3.7)$$

Όπου $P_{DC} = U_{DC}I_{DC}$ είναι η ισχύς που μεταφέρεται προς το κύκλωμα του δρομέα

$E_{DC} = \frac{1}{2}CU_{DC}^2$ είναι η αποθηκευμένη ενέργεια του πυκνωτή

$P_{\alpha\pi}$ είναι οι απώλειες στον μετατροπέα

$P_{AC} = \frac{3}{2}V_qI_q$ είναι η ισχύς που μεταφέρεται προς το δίκτυο.

Εάν οι απώλειες του μετατροπέα θεωρηθούν μικρές και αμεληθούν, παρατηρούμε γραμμικότητα μεταξύ του ρεύματος I_q και $\frac{d w_c}{dt}$. Η ισχύς που μεταφέρεται προς το κύκλωμα του δρομέα μπορεί να μοντελοποιηθεί σαν την ισχύ από μια αντίσταση R . Έχουμε λοιπόν:

$$P_{DC} = U_{DC}I_{DC} = -\frac{U_{DC}^2}{R} = -\frac{2E_{DC}}{RC} \quad (3.8)$$

Η αντίσταση υπολογίζεται γνωρίζοντας την τάση και το ρεύμα στην DC πλευρά. Όταν οι απώλειες αμελούνται η σχέση 3.7 γίνεται

$$-\frac{2E_{DC}}{RC} - \frac{d(E_{DC})}{dt} = \frac{3}{2}V_q I_q \quad (3.9)$$

Από την παραπάνω σχέση είναι προφανές ότι η dc τάση μπορεί να ελεγχθεί μέσω του ρεύματος I_q .

3.2.5 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΕΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΣΕ ΕΠΙΠΕΔΟ ΜΗΧΑΝΗΣ

Ο μετατροπέας στην πλευρά του δικτύου επιτρέπει την επιλογή τριών διαφορετικών τρόπων ελέγχου. Χάρη στην χρησιμοποίηση του διανυσματικού ελέγχου μπορούν να ρυθμιστούν η άεργος ισχύς, ο συντελεστής ισχύος ή η τάση εξόδου. Ο χειριστής απαιτεί η άεργος ισχύς να είναι μηδενική στο σημείο κοινής ζεύξης (PCC), πράγμα το οποίο αντιστοιχεί σε μοναδιαίο συντελεστή ισχύος. Ο έλεγχος της τάσης έχει σκοπό να ελέγξει το πλάτος της τάσης εξόδου του αντιστροφέα. Ο χρήστης έχει την δυνατότητα να επιλέξει ποια κατάσταση ελέγχου επιθυμεί κατά την διάρκεια της λειτουργίας και να μεταβεί από την μία κατάσταση στην άλλη.

3.2.5.1 ΕΛΕΓΧΟΣ ΑΕΡΓΟΥ ΙΣΧΥΣ

Ο διανυσματικός έλεγχος για την οδήγηση της DFIG δίνει μεγάλη ευελιξία και πολλές δυνατότητες σχετικά με την ρύθμιση της άεργους ισχύος. Τόσο σε steady-state καταστάσεις, όσο και σε περιπτώσεις σφαλμάτων η DFIG μπορεί να συνεισφέρει με πού αποτελεσματικό τρόπο στην ευστάθεια του δικτύου στο οποίο εντάσσεται. Ίσως μαζί με την ικανότητα για παραμονή στο δίκτυο ακόμα και σε σοβαρά σφάλματα του δικτύου, να είναι οι δύο κύριοι λόγοι για τους οποίους η

συγκεκριμένη ανεμογενήτρια έχει γίνει τόσο δημοφιλής στην αγορά των αιολικών συστημάτων τα τελευταία χρόνια.

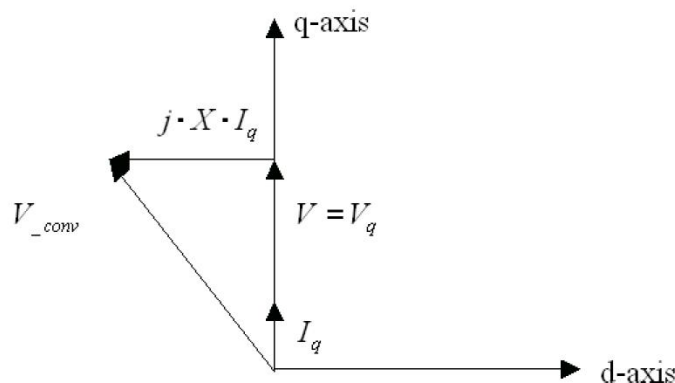
Ωστόσο, το θέμα της κατανομής της άεργου ισχύος ή του βέλτιστου τρόπου διαχείρισης της σε ένα σύστημα βρίσκεται επί τάπητος, με τις διάφορες στρατηγικές εέγχου να εξετάζονται διεξοδικά. Τουλάχιστον σε επίπεδο steady-state (σταθερής κατάστασης) ο έλεγχος της άεργου ισχύος αποτελεί διαδικασία βελτιστοποίησης με κύριο γνώμονα την μείωση των απωλειών.

Όπως βλέπουμε και στο σχήμα 3.2.3 ο άξονας q της αναφοράς ρεύματος I_q είναι η έξοδος του ελεγκτή τάσης. Εδώ ο d άξονας χρησιμοποιείται για να ελέγξει την άεργο ισχύ, τον συντελεστή ισχύος ή την τάση εξόδου. Οι εκφράσεις για την ενεργό και την άεργο ισχύ στους d, q άξονες είναι:

$$P_{AC} = \frac{3}{2} V_q I_q$$

$$Q_{AC} = \frac{3}{2} V_q I_d$$

Επομένως ο d άξονας καθορίζει πόση ποσότητα άεργου ισχύος διαβιβάζεται στο δίκτυο. Ανάλογα με το πόση ποσότητα άεργου ισχύος χρειάζεται στο σημείο ζεύξης (PPC), συγκεκριμένη ποσότητα I_d διοχετεύεται στο σύστημα. Το παρακάτω σχήμα (3.10) δείχνει την διανυσματική απεικόνιση του συστήματος όταν το I_d είναι μηδέν, όταν δεν ρέει καθόλου άεργος ισχύς στο δίκτυο και παραλείπουμε και την αντίσταση του φίλτρου R.

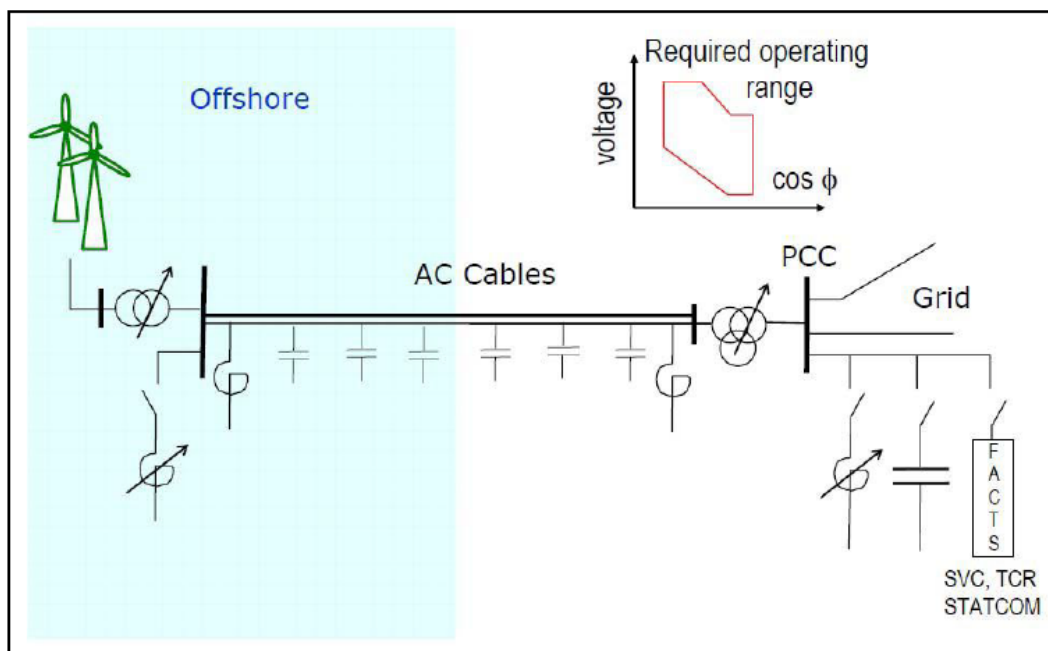


Σχήμα 3.2.6 Διανυσματική αναπαράσταση του συστήματος όταν $I_d=0$

Εάν η απαιτούμενη άεργος ισχύς είναι Q τότε πρέπει να διοχετευτεί ρεύμα ίσο με

$$I = \frac{Q}{\frac{3}{2}V_q}$$

Στην συνέχεια θα δανειστούμε ένα παράδειγμα όπου θεωρούμε ένα off-shore αιολικό πάρκο το οποίο συνδέεται στο δίκτυο μέσω ενός υποβρύχιου καλωδίου και θεωρούμε επίσης ότι ο διαχειριστής του δικτύου απαιτεί στο σημείο κοινής σύνδεσης (PCC) του πάρκου, συντελεστή ισχύος ίσος με την μονάδα.

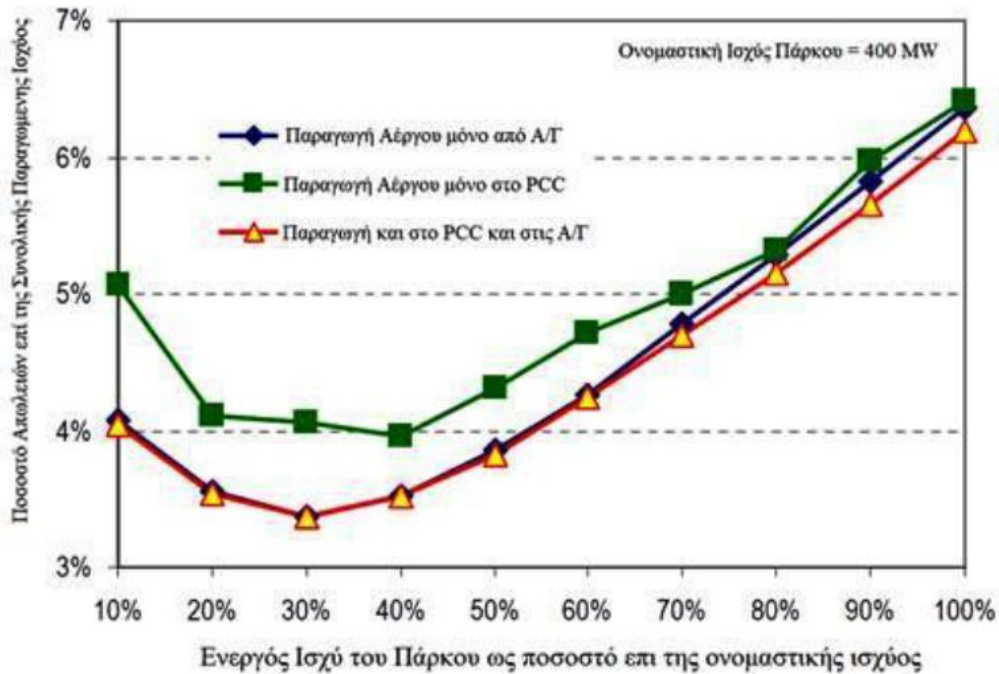


Στο ισοζύγιο ισχύος άρα και συνεπακόλουθα στην ρύθμιση της τάσης μπορούν να συμμετέχουν όπως φαίνεται και στην παραπάνω εικόνα

- Το υποβρυχιο καλώδιο το οποίο είναι πηγή άεργης ισχύος
- Μετασχηματιστής με διακόπτες On Load
- Συστοιχίες πυκνωτών και πηνίων
- Διάφορα Facts, συνήθως SVC και STATCOM
- Ανεμογεννήτριες DFIG

Στην ίδια αναφορά, φαίνεται ότι η αποτελεσματικότερη στρατηγική ελέγχου της τάσης είναι η συμμετοχή όλων των δυνατών μέσων, ούτε δηλαδή μόνο των ανεμογεννητριών, ούτε μόνο των μέσων ρύθμισης στο PCC. Αυτό άλλωστε είναι κάτι

που αναμέναμε, μιάς και η αντιστάθμιση έχει καλύτερα αποτελέσματα όταν γίνεται επι μέρους τοπικά παράκαπου κεντρικά.



Σε άλλα δίκτυα που δεν έχουν τόσο αυστηρές απαιτήσεις ούτε τον παραπάνω εξοπλισμό, οι ανεμογεννήτριες καλούνται να αναλάβουν κυρίαρχο ρόλο στο ισοζύγιο αέργου ισχύος.

Η GFIG έχει τη δυνατότητα να τροφοδοτήσει ή να απορροφήσει την αέργο απο το δίκτυο απο 2 δρόμους

- I. Μέσω του στάτη της μηχανής, με έλεγχο του μετατροπέα απο την πλευρά του δρομέα (RSC)
- II. Απευθείας μέσω του μετατροπέα στην πλευρά του δικύου (LSC)

Συνήθως προτεραιότητα στην ρύθμιση της αέργου δίνεται στον RSC. Η αέργος που απορροφάται απο τον RSC στη συχνότητα ολίσθησης $f_2 = sf_1$ μεγενθύνεται στην πλευρα του στάτη στη συχνότητα f_1 . Η αέργος που μετράμε στα δακτυλίδια του δρομέα είναι μικρότερη απο αυτη που μετράμε στους ακροδέκτες του στάτη. Γι' αυτό τον λόγο είναι προτιμότερο αν θέλουμε να παράγουμε μια συγκεκριμένξ ποσότητα αέργου ισχύος να την δίνουμε μέσω RSC και όχι του LSC.

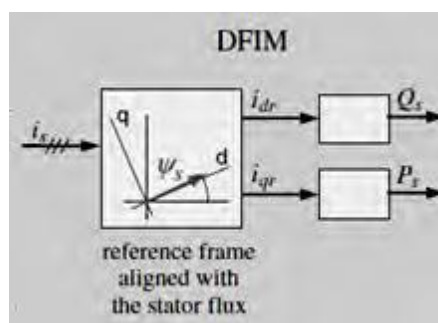
Από την άλλη όμως η παροχή άεργου απο τον RSC πρέπει να περάσει μέσα απο την μηχανή και να βγεί έπειτα στην έξοδο της γεννήτριας ενώ με τον LSC είναι πιο άμεση.

Ο LSC τώρα συμμετέχει κατα βούληση και αυτός στη ρύθμιση τόσο σε σταθερές καταστάσεις, όσο και σε σφάλματα. Ειδικά σε σφάλματα η συμμετοχή του ίσως είναι ζωτικής σημασίας.

Έτσι η επαρκής διαστασιολόγηση των μετατροπέων είναι ζήτημα οικονομοτεχνικής μελέτης. Συμπερασματικά το θέμα της ρύθμισης της άεργου ισχύος σε μια ανεμογεννήτρια με DFIG απαιτεί προσεκτικό σχεδιασμό και σωστή διαστασιολόγηση των μετατροπέων. Επίσης απαιτείται μια λογική στρατηγική κατανομής της άεργου ισχύος στους δύο μετατροπείς.

3.3 ΔΙΑΝΥΣΜΑΤΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ

Στον διανυσματικό έλεγχο της DFIG, οι συνιστώσες των αξόνων d και q του ρεύματος δρομέα είναι ρυθμιζόμενες. Εάν χρησιμοποιηθεί ένα πλαίσιο αναφοράς προσανατολισμένο με την ροή στάτη, η ενεργός και άεργος ροή ισχύος του στάτη μπορεί να ελεγχθεί ανεξάρτητα, μέσω του εγκάρσιου και του συνεχούς ρεύματος, αντίστοιχα (σχήμα 5.3.1)



Οι γενικές εκφράσεις της μηχανής DFIG, μπορούν να απλοποιηθούν, χρησιμοποιώντας ένα πλαίσιο αναφοράς ευθυγραμμισμένο με την ροή στάτη. Υπό τον προσανατολισμό της ροής στάτη, η σχέση μεταξύ του ρεύματος και των ροών μπορεί να γραφτεί ως εξής :

$$i_{ds}L_s + i_{dr}L_m = \psi_s \quad (3.31)$$

$$i_{qs}L_s + i_{qr}L_m = 0 \quad (3.32)$$

Χρησιμοποιώντας τις παραπάνω εξισώσεις, η σχέση μεταξύ των ρευμάτων ρότορα και στάτη θα είναι :

$$i_{ds} = \frac{\Psi_s}{L_s} - \frac{L_m}{L_s} i_{dr} \quad (3.33)$$

$$i_{qs} = -\frac{L_m}{L_s} i_{qr}$$

Στην σταθερή κατάσταση, η ροή στάτη είναι ανάλογη με την τάση δικτύου V_g . Αγνοώντας την μικρή πτώση στην αντίσταση στάτη, έχουμε :

$$v_{ds} = 0 \quad (3.34)$$

$$v_{qs} = V_g \approx \omega_s \Psi_s$$

Επομένως, όταν προσανατολίζουμε τον ευθύ άξονα με την ροή στάτη, η τάση ευθυγραμμίζεται με τον εγκάρσιο άξονα. Η ενεργός και άεργος ροή ισχύος στον στάτη μπορεί, τότε, θα γραφεί ως εξής :

$$P_s = \frac{3}{2} v_{qs} i_{qs} \quad (3.36)$$

$$Q_s = \frac{3}{2} v_{qs} i_{ds}$$

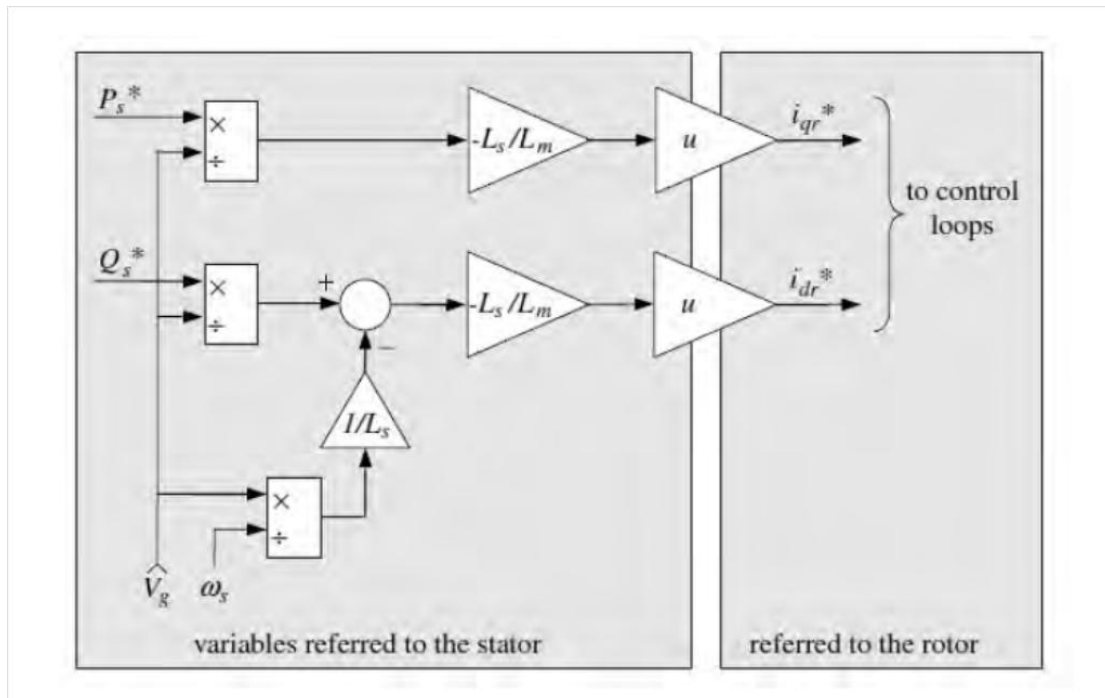
Συνδυάζοντας αυτές τις εξισώσεις με την εξίσωση (3.33), παίρνουμε :

$$P_s = -\frac{3}{2} V_g \frac{L_m}{L_s} i_{qr}$$

$$Q_s = \frac{3}{2} V_g \frac{\Psi_s}{L_s} - \frac{3}{2} V_g \frac{L_m}{L_s} i_{dr} = \frac{3}{2} \frac{V_g^2}{\omega_s L_s} - \frac{3}{2} V_g \frac{L_m}{L_s} i_{dr}$$

Οι παραπάνω εξισώσεις δείχνουν καθαρά ότι, υπό τον προσανατολισμό της ροής στάτη, οι ενεργές και άεργες ισχύεις είναι αποσυνδεδεμένες και μπορούν να ελεγχθούν μέσω των ρευμάτων δρομέα. Μέσω του ευθέως ρεύματος, μπορούμε να ελέγξουμε την ενεργό ισχύ, ενώ η άεργος ισχύς μπορεί να ελεγχθεί μέσω του εγκάρσιου ρεύματος. Χρησιμοποιώντας την ανωτέρω εξίσωση, τα ρεύματα αναφοράς μπορούν να υπολογιστούν από τις επιθυμητές ισχύεις, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα

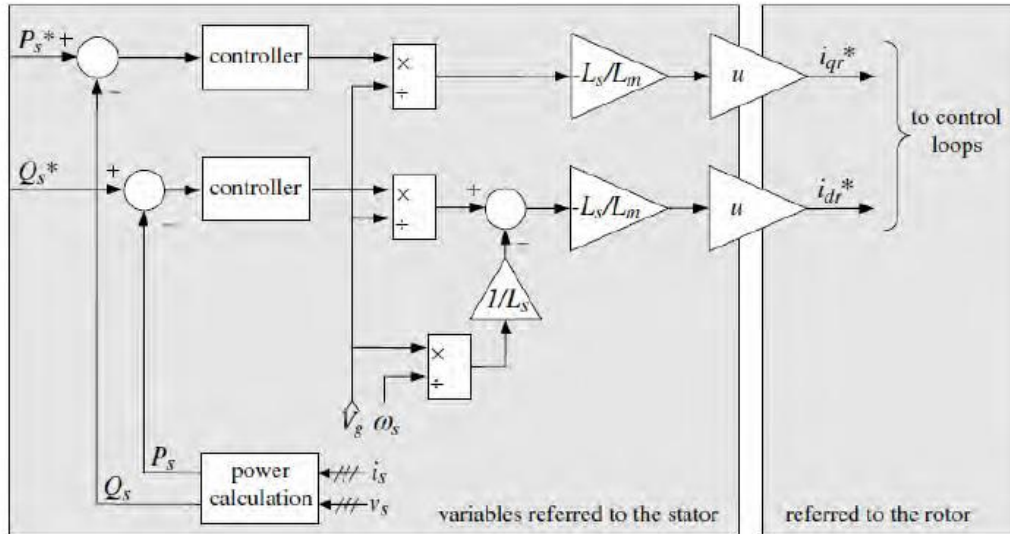
(Σχήμα 3.3.1). Ύστερα, χρησιμοποιούνται βρόχοι ελέγχου, για να εξασφαλίσουν ότι τα πραγματικά ρεύματα ακολουθούν αυτές τις αναφορές.



Σχήμα 3.3.1: Υπολογισμός των ρευμάτων αναφοράς

Οι προηγούμενες σχέσεις δεν είναι τελείως ακριβείς, αφού η επίδραση των αντιστάσεων στάτη έχει αγνοηθεί. Οι πραγματικές ισχείς στάτη δεν θα είναι ακριβώς οι επιθυμητές τιμές. Για να διορθωθεί αυτό το λάθος, ακόμη κι αν δεν είναι πολύ σχετικό, καθώς και άλλα, που οφείλονται σε ανακρίβειες στις τιμές των παραμέτρων της μηχανής (L_s , L_m , λόγος περιελίξεων, κλπ.), συνήθως προστίθενται δύο εξωτερικοί βρόχοι ισχύος : ο πρώτος βρόχος που ρυθμίζει την ενεργό ισχύ, μέσω του ευθέως ρεύματος i_{dr} και ο δεύτερος βρόχος που ρυθμίζει την άεργο ισχύ, μέσω του ευθέως ρεύματος. Στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 3.3.2) παρουσιάζεται μία γραφική απεικόνιση, που περιλαμβάνει αυτή την επιλογή.

Με αυτούς τους εξωτερικούς βρόχους ισχύος επιτυγχάνεται ένας ακριβής έλεγχος της ροής ισχύος στον στάτη, παρά την ανακρίβεια στις παραμέτρους της μηχανής ή τις μικρές αποκλίσεις του πλαισίου αναφοράς.



Σχήμα 3.3.2 Υπολογισμός αναφοράς, που περιλαμβάνει εξωτερικούς βρόχους ισχύος

Συνήθως, δεν επιθυμούμε να ελέγχουμε την ισχύ του στάτη, αλλά την ηλεκτρομαγνητική ροπή που παράγεται από την μηχανή. Εάν, όμως, έχουμε μία τέτοια περίπτωση, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τη σχέση μεταξύ της ροπής, της ροής στάτη και του ρεύματος ρότορα,

$$T_{em} = -\frac{3}{2}p \frac{L_m V_g}{L_s \omega_s} i_{qr}$$

Έτσι, η ηλεκτρομαγνητική ροπή είναι απευθείας ελεγχόμενη από το εγκάρσιο ρεύμα. Εναλλακτικά, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε αυτή την έκφραση, για να υπολογίσουμε την μηχανική ισχύ :

$$P_{mec} = -\frac{3}{2}p \frac{L_m V_g}{L_s \omega_s} i_{qr} \omega_m = -\frac{3}{2}p \frac{L_m}{L_s} V_g (1-s) i_{qr}$$

Συγχωνεύοντας αυτή την έκφραση με την εξίσωση (5.36), βρίσκουμε τη σχέση μεταξύ της ισχύος του στάτη και της μηχανικής ισχύος :

$$P_{mec} = (1-s)P_s$$

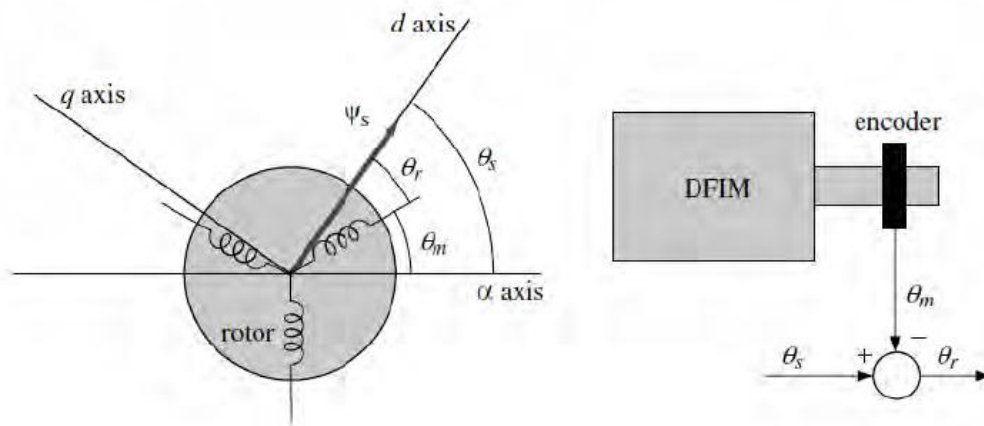
Χρησιμοποιώντας αυτή την τελευταία έκφραση, είναι δυνατόν να μεταφράσουμε οποιαδήποτε αναφορά της ηλεκτρομαγνητικής ροπής σε μία αναφορά της ισχύος του στάτη, για να εισαχθεί στα σχήματα (3.3.3) και (3.3.4):

$$P_s = \frac{1}{1-s} P_{mec} = \frac{\omega_s}{\omega_m} P_{mec} = \omega_s T_{em}$$

3.3.1 ΒΡΟΧΟΙ ΕΛΕΓΧΟΥ ΡΕΥΜΑΤΟΣ

Από την στιγμή που υπολογιστούν τα ρεύματα αναφοράς ρότορα, ο μετατροπέας ρότορα πρέπει να εξασφαλίσει ότι τα πραγματικά ρεύματα παρακολουθούν αυτές τις αναφορές. Γενικά, ο μετατροπέας ρότορα είναι ένας τριφασικός αναστροφέας, που καθορίζει την τάση στα άκρα του ρότορα, αλλά όχι τα ρεύματα. Οι βρόχοι ελέγχου πρέπει τότε να ενσωματωθούν, για να εξασφαλίσουν ότι τα ρεύματα ακολουθούν αποτελεσματικά τις αναφορές τους.

Παρόλο που είναι δυνατόν να εφαρμοστούν τέτοιοι βρόχοι ελέγχου, σε οποιοδήποτε πλαίσιο αναφοράς, η πιο πρακτική λύση είναι να χρησιμοποιηθεί το ίδιο πλαίσιο αναφοράς, όπως στις εντολές, δηλαδή ευθυγραμμισμένο με τη ροή d-άξονα του στάτη. Επιπροσθέτως, κατά μήκος αυτού του άξονα, οι μεταβλητές είναι σταθερές κατά την σταθερή κατάσταση, γεγονός που βοηθάει τη ρύθμιση των ρευμάτων.



Σχήμα 3.3.3 Υπολογισμός των γωνιών για τους μετασχηματισμούς Park

Οι τάσεις που υπολογίζονται με αυτό τον τρόπο, αναφέρονται ως ένα σύγχρονο σύστημα αναφοράς. Ο αναστροφέας ρότορα απαιτεί η τάση για κάθε μία από τις τρεις φάσεις να υπολογίζεται από v_{dr} και v_{qr} , μέσω του αντίστροφου μετασχηματισμού

Η τάση στα τερματικά του ρότορα αντιστοιχεί στο άθροισμα της πτώσης τάσης στην αντίσταση R_r και της τάσης που επάγεται από τη ροή του ρότορα :

$$v_{dr} = R_r i_{dr} - \omega_r \Psi_{qr} + \frac{d}{dt} \Psi_{dr}$$

$$v_{qr} = R_r i_{qr} - \omega_r \Psi_{dr} + \frac{d}{dt} \Psi_{qr}$$

Η σχέση μεταξύ αυτής της ροής του ρότορα και των ρευμάτων ρότορα είναι :

$$\Psi_{dr} = \left(L_r - \frac{L_m^2}{L_s} \right) i_{dr} + \frac{L_m}{L_s} \Psi_{ds}$$

$$\Psi_{qr} = \left(L_r - \frac{L_m^2}{L_s} \right) i_{qr}$$

Η σχέση μεταξύ των τάσεων ρότορα και των ρευμάτων είναι :

$$v_{dr} = R_r i_{dr} - \omega_r \sigma L_r i_{qr} + \sigma L_r \frac{d}{dt} i_{dr} + \frac{L_m}{L_s} \frac{d}{dt} \Psi_{ds}$$

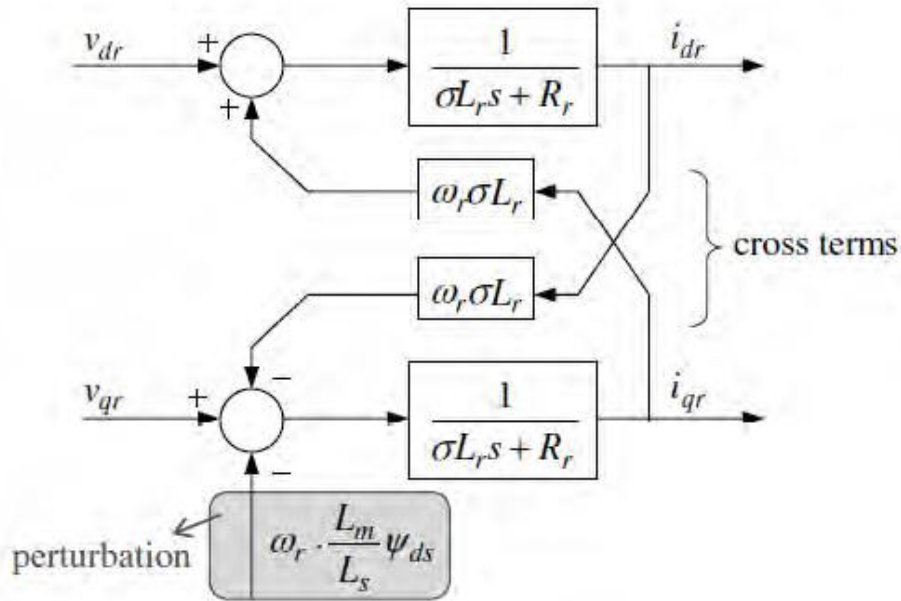
$$v_{qr} = R_r i_{qr} - \omega_r \sigma L_r i_{dr} + \sigma L_r \frac{d}{dt} i_{qr} + \omega_r \frac{L_m}{L_s} \Psi_{ds}$$

Όπου σ είναι ο συντελεστής διαρροής της μηχανής.

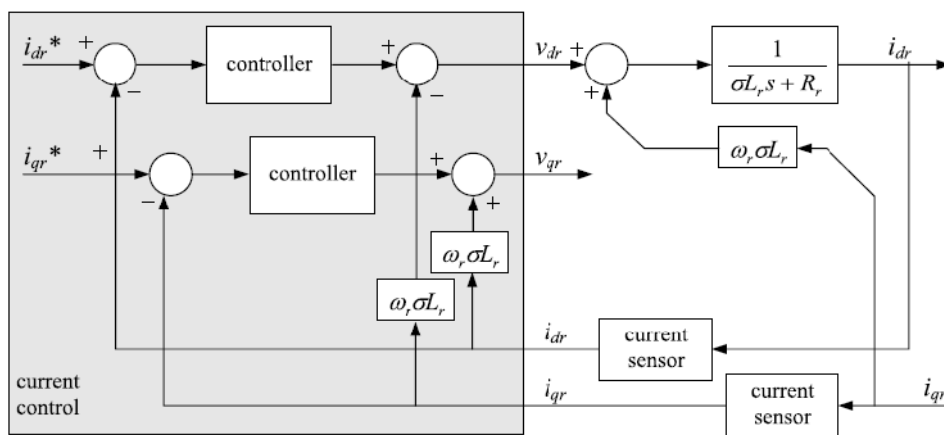
Κατά τη διάρκεια τακτικής λειτουργίας, όταν η τάση δικτύου είναι σταθερή σε πλάτος, η παράγωγος της ροής Ψ_{ds} είναι μηδέν και επομένως, ο τελευταίος όρος της πρώτης εξίσωσης εξαφανίζεται (σημείωση: αυτή δεν είναι η περίπτωση κατά τη διάρκεια βύθισης τάσης). Οι εξισώσεις που προκύπτουν αναπαρίστανται γραφικά στο παρακάτω σχηματικό διάγραμμα (**Σχήμα 3.3.5**).

Από πλευράς ελέγχου, ο όρος $(\omega_r L_m / L_s) \Psi_{ds}$ είναι μία διαταραχή, αφού εξαρτάται από τη ροή στάτη (δηλαδή την τάση δικτύου), μία εξωτερική μεταβλητή ανεξάρτητη του βρόχου. Καθώς είναι σταθερά, θα αποζημιωθεί εύκολα από τον ελεγκτή. Οι όροι που απεικονίζονται στη μέση του σχήματος, είναι γνωστοί ως *όροι σταυρού* (cross

terms). Αυτοί οι όροι εμφανίζονται, επειδή το πλαίσιο αναφοράς στρέφεται υπό διαφορετική ταχύτητα, από τα τερματικά του ρότορα. Παρόλο που αυτοί οι όροι είναι σταθεροί, υπό μόνιμο καθεστώς και δεν επηρεάζουν την λειτουργία των βρόχων ελέγχου, συχνά εκτιμούνται και αντισταθμίζονται από τον έλεγχο, για να μειώσουν αισθητά τις αρνητικές του επιδράσεις, σε μεταβατικά στάδια (Σχήμα 3.3.6).

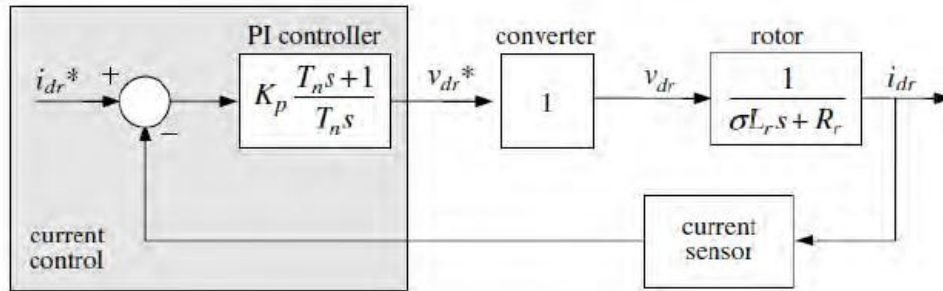


Σχήμα 3.3.5 Εγκατάσταση του βρόχου ελέγχου ρεύματος



Σχήμα 3.3.6 Βρόχος ελέγχου ρεύματος, με αντισταθμίσεις τροφοδοσίας προς τα εμπρός, των όρων σταυρού

Αντισταθμίζοντας τους όρους σταυρού, ο βρόχος ελέγχου απλοποιείται σημαντικά. Και οι δύο άξονες είναι πλέον πανομοιότυποι και η εγκατάστασή τους έχει τώρα μειωθεί σε πρώτης τάξης συνάρτηση μεταφοράς συν, τελικά, μία συνάρτηση μεταφοράς φίλτρου αισθητήρα ρεύματος (Σχήμα 3.3.7).



Σχήμα 3.3.7 Σχηματικό διάγραμμα του συστήματος ελέγχου ρεύματος

3.3.2 ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΙ ΠΛΑΙΣΙΩΝ ΑΝΑΦΟΡΑΣ

Η βάση του διανυσματικού ελέγχου είναι να αναφέρει τα ρεύματα ρότορα σε ένα σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς, προσανατολισμένο έτσι ώστε ο d-άξονάς του να είναι ευθυγραμμισμένος με τη ροή στάτη. Όπως εξηγήθηκε παραπάνω, στην σταθερή κατάσταση, αυτό είναι σχεδόν ισοδύναμο με την ευθυγράμμιση του q-άξονα με την τάση στάτη, επειδή η ροή έχει στραφεί 90° σε σχέση με τον στάτη. Έτσι, υπάρχουν δύο επιλογές, για να ευθυγραμμιστεί ο άξονας : να εκτιμήσουμε τη ροή και να ευθυγραμμίσουμε τον d-άξονα σε αυτή, ή να ευθυγραμμίσουμε τον q-άξονα με την τάση και να καθυστερήσουμε κατά 90° τον d-άξονα. Η πρώτη επιλογή λέγεται *προσανατολισμός ροής* και η δεύτερη επιλογή λέγεται *προσανατολισμός τάσης* (επίσης γνωστή και ως *προσανατολισμός ροής δικτύου*).

3.3.2.1 ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΣ ΡΟΗΣ

Ο προσανατολισμός ροής ήταν η πρώτη και παραμένει η κλασική επιλογή για τον έλεγχο της DFIM. Κάνει εκτίμηση της ροής της μηχανής και ευθυγράμμιση του d-άξονα του πλαισίου αναφοράς σε αυτό. Αρχικά, χρησιμοποιούταν ο προσανατολισμός ροής αέρα-διακένου. Πρόσφατα, υιοθετήθηκε ο προσανατολισμός ροής στάτη. Η τρέχουσα βιβλιογραφία βασίζεται κυρίως στην τελευταία αυτή επιλογή και επίσης, στις πρώτες προτάσεις χρήσης της DFIM για την παραγωγή αιολικής ισχύος.

3.3.2.2 ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΣ ΤΑΣΗΣ ΔΙΚΤΥΟΥ

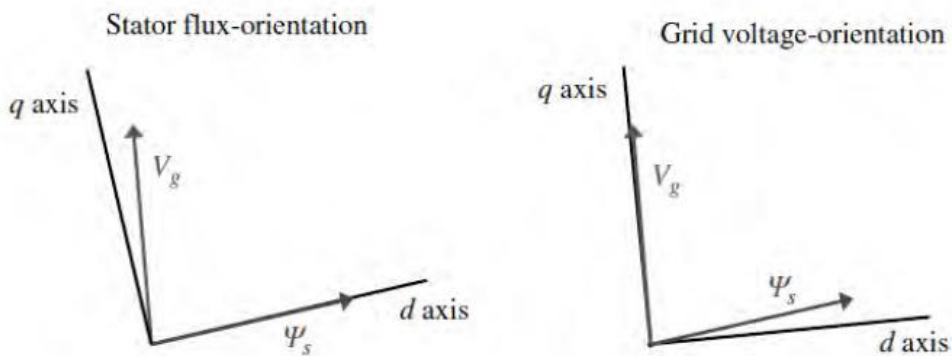
Αυτή η επιλογή μετράει τις τάσεις στάτη και ευθυγραμμίζει τον q-άξονα με το χωρικό διάνυσμα τάσης. Ο d-άξονας θα στραφεί 90ο από αυτόν. Ένας κλειδωμένος βρόχος φάσης (PLL) προστίθεται συνήθως, για να επιτύχει την θεμελιώδη γωνία και να μειώσει τις επιρροές των αρμονικών τάσης. Λέγεται επίσης και προσανατολισμός ροής δικτύου.

3.3.2.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΩΝ

Και οι δύο επιλογές είναι αρκετά παρόμοιες, εάν η τάση του στάτη και η αντίστοιχη ροή του είναι σταθερές, που σημαίνει ότι στρέφονται συγχρονισμένα, με σταθερό πλάτος. Υπό αυτές τις συνθήκες, η ροή μετατοπίζεται 90ο από την τάση δικτύου. Εάν η αντίσταση στάτη είναι μηδενική, το σφάλμα ευθυγράμμισης θα είναι ακριβώς 90ο, κάνοντας και τα δύο πλαίσια αναφοράς να συμπίπτουν. Στην πράξη, η πτώση τάσης που οφείλεται στην αντίσταση στάτη, είναι πολύ μικρή, σε σύγκριση με την ολική τάση της μηχανής, ιδίως για τις μηχανές υψηλής ισχύος, επειδή οι πρόσφατες μηχανές έχουν την τάση να είναι πιο επαγωγικές και λιγότερο αντιστατικές, με την ανύψωση της ισχύος και της τάσης (**Σχήμα 3.3.8**).

Σε κάθε περίπτωση, δεν υπάρχει καμία διαφορά μεταξύ των δύο τεχνικών αναφοράς, υπό μόνιμη κατάσταση λειτουργίας.

Ωστόσο, εμφανίζονται διαφορές κατά τη διάρκεια μεταβατικών σταδίων. Υπό αυτές τις συνθήκες, πιθανότατα ως αποτέλεσμα των ξαφνικών αλλαγών στην τάση του στάτη, η φασική μετατόπιση μεταξύ της ροής και της τάσης μπορεί να μην είναι η ίδια, όπως κατά την μόνιμη κατάσταση λειτουργίας. Στην πραγματικότητα, το πλάτος ροής και ακόμη και η ταχύτητα περιστροφής διαφέρουν σημαντικά, κατά τη διάρκεια μίας βύθισης τάσης. Παρόλα αυτά, τέτοιες εξαιρετικές περιπτώσεις δεν έχουν απαραίτητα διαφορές μεταξύ των δύο τεχνικών προσανατολισμού. Για παράδειγμα, διαφορές μπορεί να εμφανιστούν ακόμη και κατά τη διάρκεια σταθερών περιπτώσεων, όπου η τάση δικτύου είναι απόλυτα σταθερή. Εάν ο διανυσματικός έλεγχος εφαρμοστεί σε ένα πλαίσιο αναφοράς προσανατολισμού ροής, ο έλεγχος μπορεί να γίνει ασταθής, ανάλογα τη συνιστώσα d-άξονα του ρεύματος. Βάσει βιβλιογραφίας, μπορεί να αποδειχθεί ότι ο προσανατολισμός τάσης είναι πάντα σταθερός, ενώ ο προσανατολισμός ροής μπορεί να αποσταθεροποιήσει έναν διανυσματικό έλεγχο.



Σχήμα 3.3.8 Προσανατολισμός πλαισίου αναφοράς

3.3.3 ΠΛΗΡΕΣ ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΛΕΓΧΟΥ

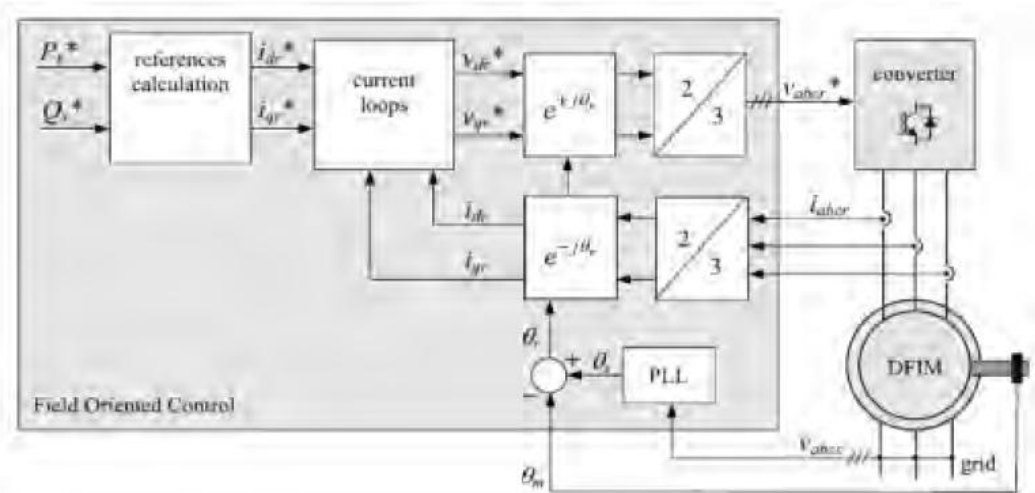
Σε προηγούμενες παραγράφους παρουσιάστηκαν τα διάφορα μέρη ενός κλασσικού διανυσματικού ελέγχου για μία DFIM :

- Παραγωγή των αναφορών : υπολογισμοί ρεύματος αναφοράς από την επιθυμητή ενεργή και άεργο ισχύ του στάτη

- Βρόχοι ελέγχου ρεύματος
- Μετασχηματισμοί πλαισίου αναφοράς.

Το παρακάτω σχήμα (**Σχήμα 3.3.9**) δείχνει ένα σχηματικό διάγραμμα μπλοκ των διασυνδέσεων μεταξύ όλων αυτών των μερών. Η πλήρης δομή ελέγχου πρέπει, επίσης, να περιλαμβάνει συμπληρωματικά θέματα, όπως η εκκίνηση (start-up) της μηχανής.

Το σχήμα 3.3.9 απεικονίζει έναν έλεγχο, όπου το πλαίσιο αναφοράς προσανατολίζεται χρησιμοποιώντας την τάση δικτύου, αντί για την ροή στάτη. Αυτή η επιλογή έγινε, προκειμένου να προλάβουμε προβλήματα σταθερότητας, τα οποία θα συζητηθούν στη επόμενο κεφάλαιο. Η γωνία που χρησιμοποιείται στους μετασχηματισμούς επιτυγχάνεται, έτσι, από τις μετρήσεις της τάσης του δικτύου, χρησιμοποιώντας έναν βρόχο κλειδωμένης φάσης.



Σχήμα 3.3.9 Σχηματικό διάγραμμα του συστήματος διανυσματικού ελέγχου

Όπως είδαμε, ο διανυσματικός έλεγχος στηρίζεται στην υπόθεση ότι η τάση του δικτύου είναι σταθερή και η ροή του στάτη είναι ένα χωρικό διάνυσμα, που στρέφεται με σταθερή ταχύτητα 90ο πριν την τάση. Αυτή η υπόθεση είναι σωστή στην σταθερή κατάσταση (steady state), αλλά όχι στην περίπτωση βύθισης τάσης. Κατά τη διάρκεια μία μεταβατικής τάσης, μία φυσική ροή (αρνητική, όπως στην περίπτωση ανισορροπιών) εμφανίζεται στο στάτη, γεγονός που μπορεί να επηρεάσει τον προβληματισμό του πλαισίου αναφοράς. Επιπρόσθετα, αυτή η ροή επάγει

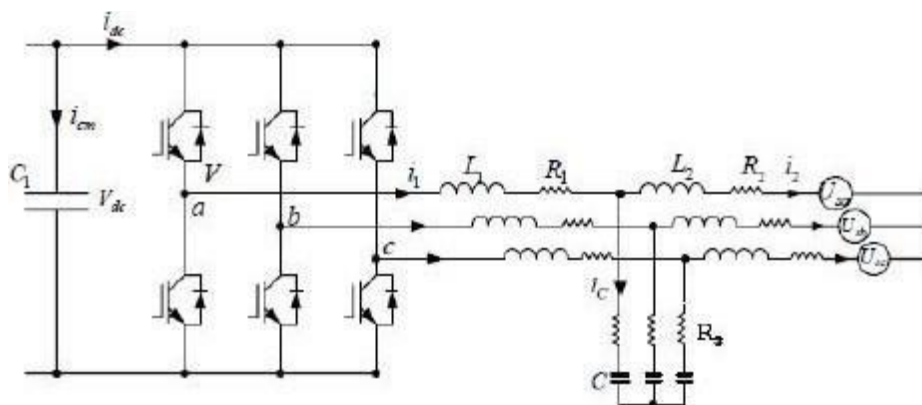
μεγάλες τάσεις στα τερματικά του δρομέα, γεγονός που μπορεί να προκαλέσει τον κορεσμό του μετατροπέα πλευράς δρομέα. Η επιλογή, επομένως, του προσανατολισμού του πλαισίου αναφοράς είναι πολύ σημαντική, για τον διανυσματικό έλεγχο υπό βυθίσεις τάσεων.

3.4 ΦΙΛΤΡΑ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΥ ΑΡΜΟΝΙΚΩΝ ΣΥΝΙΣΤΩΣΕΩΝ ΡΕΥΜΑΤΟΣ

Εξαιτίας της διακοπτικής λειτουργίας των ηλεκτρονικών στοιχείων των αντιστροφών στο δίκτυο, εγχύονται σε αυτό ρεύματα που περιέχουν υψηλή συχνότητα αρμονικών συνιστώσεων. Έτσι, είναι απαραίτητη η χρήση κατωδιαβατικών φίλτρων που καταστέλλουν αυτές τις αρμονικές. Οι δύο τοπολογίες είναι οι εξής:

1. Το φίλτρο απλού επαγωγέα L
2. Το φίλτρο επαγωγέα – πυκνωτή - επαγωγέα LCL

Το φίλτρο L μπορεί να εφαρμοστεί εύκολα, εξαιτίας της απλής δομής του, αλλά απαιτείται μεγαλύτερη επαγωγή ή υψηλότερη διακοπτική συχνότητα για να επιτευχθεί η επιθυμητή εξασθένηση της κυμάτωσης. Το LCL φίλτρο προκαλεί μεγαλύτερη εξασθένηση των αρμονικών υψηλής συχνότητας, αλλά έχει το μειονέκτημα του δυσκολότερου σχεδιασμού και του πιο πολύπλοκου ελέγχου. Στο πιο κάτω σχήμα παρουσιάζεται ένας μετατροπέας πηγής τάσης, η έξοδος του οποίου συνδέεται στο δίκτυο μέσω LCL φίλτρου.

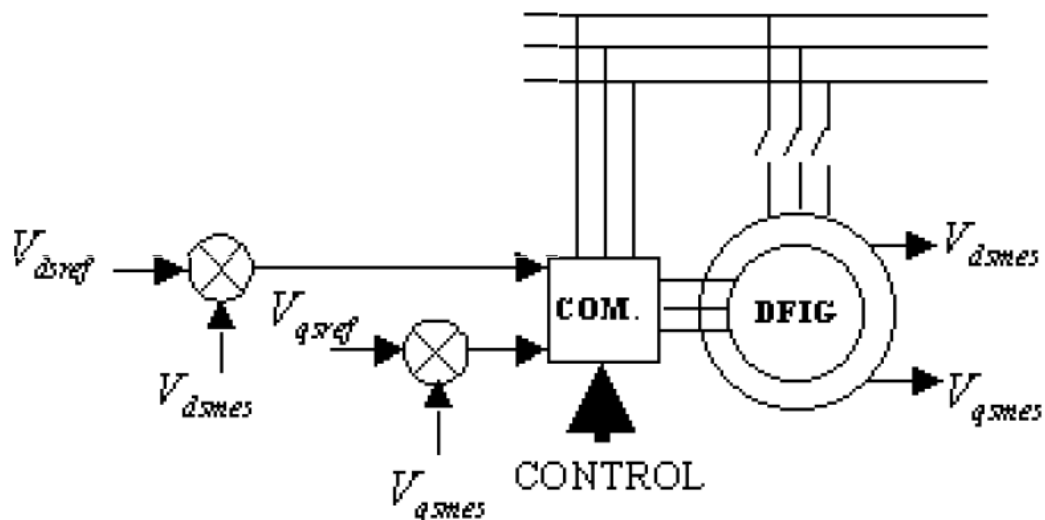


Μετατροπέας πηγής τάσης που συνδέεται μέσω φίλτρου LCL

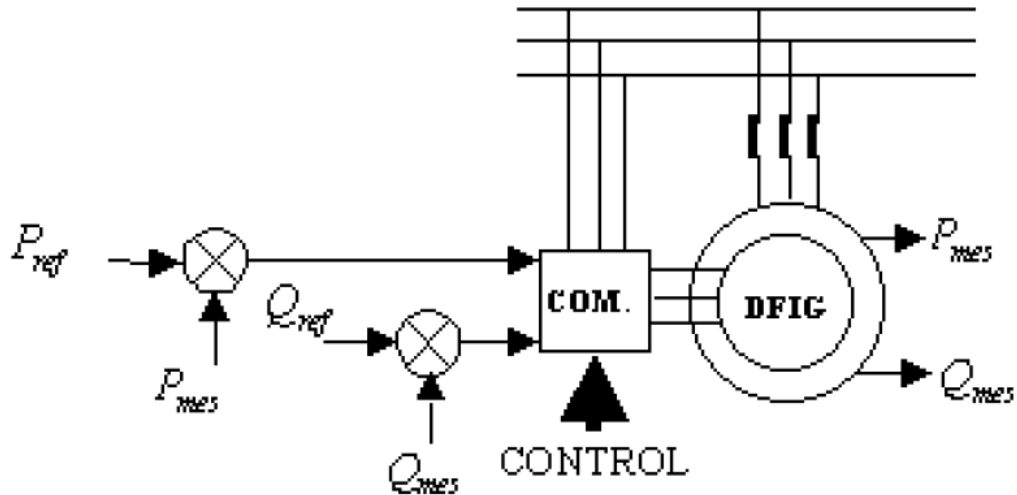
Στην πλευρά του πυκνωτή συνδέεται μια πηγή συνεχούς ρεύματος, όπως η έξοδος μιας φωτοβολταϊκής συστοιχίας ή ενός κύτταρου ή η ανορθωμένη έξοδος εναλλασσόμενης πηγής, όπως μια ανεμογεννήτρια.

3.5 ΣΥΝΔΕΣΗ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ DFIG ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ

Καθώς συνδέεται η DFIG με το δίκτυο, η σύνδεση πρέπει να γίνει σε 3 βήματα, τα οποία παρουσιάζονται παρακάτω. Το πρώτο βήμα είναι ο έλεγχος (χρήση ελεγκτή) των τάσεων στάτη με τις τάσεις δικτύου σαν αναφορά (σχήμα 3.5.1). Το δεύτερο βήμα είναι η σύνδεση του στάτη με το δίκτυο. Στο βαθμό που οι τάσεις των δυο έχουν συγχρονιστεί, η σύνδεση μπορεί να γίνει χωρίς προβλήματα. Όταν η σύνδεση επιτευχθεί, το τρίτο βήμα είναι ο έλεγχος της ισχύος (ελεγκτής) ανάμεσα στο στάτη και στο δίκτυο (σχήμα 3.5.2).

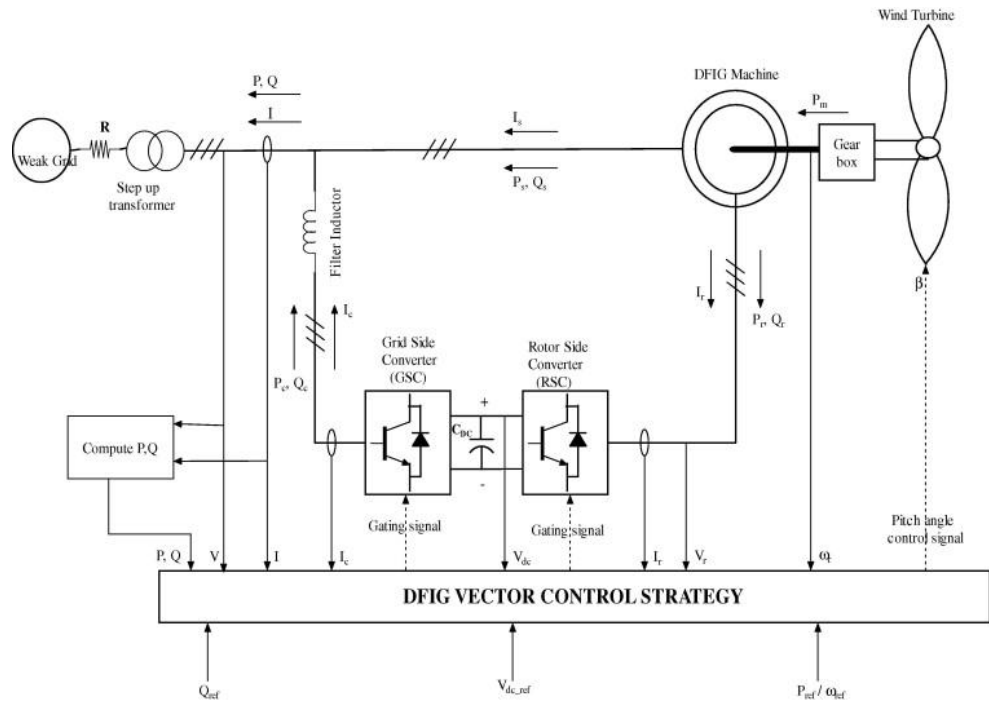


Σχήμα 3.5.1 Πρώτο βήμα της σύνδεσης της DFIG στο δίκτυο



Σχήμα 3.5.2 . Τρίτο βήμα στη σύνδεση του DFIG με το δίκτυο

Στο σχήμα 3.5.3 βλέπουμε την απ'ευθείας σύνδεση του στάτη της ανεμογεννήτριας στο τριφασικό δίκτυο και τα τυλίγματα του δρομέα συνδεδεμένα μέσω δακτύλιων ολίσθησης και ψυκτρών σε έναν μετατροπέα ισχύος AC/DC/AC. Ο πυκνωτής μεταξύ των δύο μετατροπέων σταθεροποιεί την τάση. Οι μετατροπείς ελέγχουν την τάση του δρομέα κατά πλάτος και κατά φάση και ως εκ τούτου χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο της ενεργούς και άεργους ισχύος. Το σύστημα αυτό επιτρέπει την λειτουργία μεταβλητής ταχύτητας σε ένα μεγάλο αλλά περιορισμένο ευρος. Έτσι η ισχύς που πρέπει να διαχειριστεί ο μετατροπέας να είναι περίπου 30% της ονομαστικής ισχύος της γεννήτριας.



Σχήμα 3.5.3 Σύνδεση του DFIG με το δίκτυο

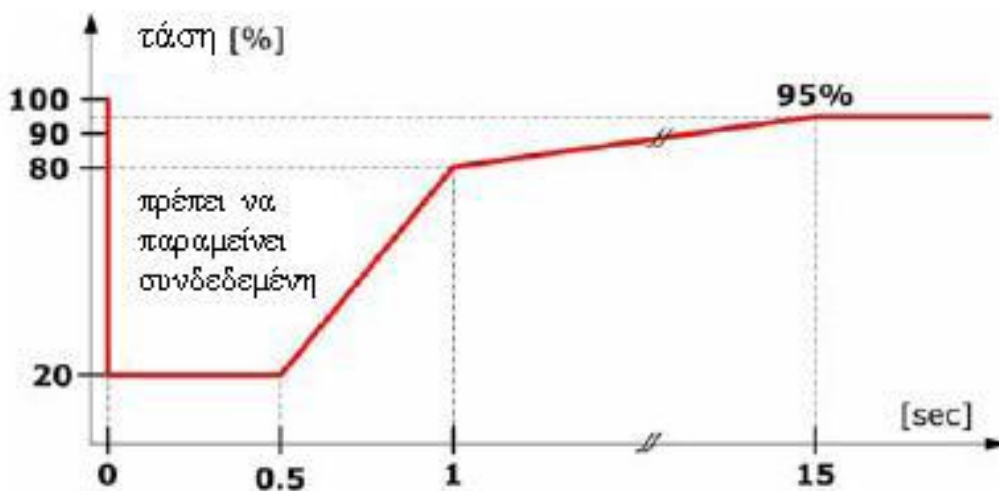
Πρέπει να σημειωθεί ότι, επειδή το εύρος της ταχύτητας είναι περιορισμένο, η επαγόμενη τάση είναι ένα κλάσμα αυτής του δικτύου και συγκεκριμένα εξαρτάται από το λόγο των τυλιγμάτων μεταξύ του δρομέα και του στάτη. Η τάση του ζυγού συνεχούς ρεύματος είναι σχετικά χαμηλή. Το σύστημα αυτό χρησιμοποιείται για να επιτευχθεί ένα μεγάλο εύρος λειτουργίας από την υποσύγχρονη μέχρι την υπερσύγχρονη λειτουργία, δηλαδή η γεννήτρια να λειτουργεί και με θετική και με αρνητική ολίσθηση. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί στην περίπτωση που ο μετατροπέας ισχύος μπορεί να λειτουργήσει με ροή ισχύος και προς τις δύο κατευθύνσεις. Αυτός είναι και ο λόγος που χρησιμοποιείται η τοπολογία του AC/DC/AC μετατροπέα διπλής κατεύθυνσης.

Η παρουσία του μετατροπέα επιτρέπει στην γεννήτρια DFIG μια πιο ευέλικτη λειτουργία σε σχέση με την γεννήτρια βραχυκυκλωμένου κλωβού. Επίσης πετυχαίνει απόζευξη της μηχανικής από την ηλεκτρική συχνότητα μέσω ρευμάτων μεταβλητής συχνότητας στο δρομέα. Μέσω δακτυλίων ο μετατροπέας τροφοδοτεί τα τυλίγματα του δρομέα με τάση μεταβλητού πλάτους και συχνότητας και έτσι μπορεί να επιτευχθεί έλεγχος της άεργου ισχύος. Ακόμα ο μετατροπέας ισχύος μπορεί να μαγνητίσει τη μηχανή μέσα από το κύκλωμα του δρομέα, ανεξάρτητα από την τάση του δικτύου.

3.5.1 ΚΩΔΙΚΟΙ ΔΙΚΤΥΟΥ

Η αύξηση της διείσδυσης της αιολικής ενέργειας στα ηλεκτρικά συστήματα κατά την διάρκεια των τελευταίων χρόνων, δημιούργησε νέες προκλήσεις στους διαχειριστές των δικτύων, οι οποίοι οφείλουν να διασφαλίζουν την αξιόπιστη και ασφαλή λειτουργία τους. Σαν αποτέλεσμα, σε όλο και περισσότερες χώρες αναθεωρούνται οι κώδικες των δικτύων, ειδικά όσον αφορά την αιολική ενέργεια. Για την αιολική ισχύ, αυτοί οι κώδικες απαιτούν μια συμπεριφορά με αρκετές λειτουργίες ελέγχου. Μια από αυτές τις λειτουργίες, είναι η ικανότητα παραμονής των Α/Γ σε λειτουργία κατά την διάρκεια βυθίσεων της τάσης.

Οι κανονισμοί που επιβάλλονται στα αιολικά πάρκα, όσο αφορά την συμπεριφορά τους σε περιπτώσεις βύθισης της τάσης γίνονται όλο και πιο αυστηροί. Μέχρι πριν λίγα χρόνια όταν η τάση έπεφτε κάτω από το 85% της ονομαστικής της τιμής, οι Α/Γ ετίθεντο εκτός συστήματος. Οι κανονισμοί έχουν συνήθως τη μορφή μιας καμπύλης όπως αυτής του σχήματος 3.4.4



Σχήμα 3.4.4. Κανονισμός παραμονής σε λειτουργία κατά τη διάρκεια βυθίσεων τάσης

Στον κατακόρυφο άξονα φαίνεται η τάση στο σημείο κοινής σύνδεσης, σαν ποσοστό της ονομαστικής. Πριν την χρονική στιγμή μηδέν, η τάση είχε την ονομαστική της τιμή. Την χρονική στιγμή μηδέν η τάση αρχίζει να βυθίζεται. Αν παραμείνει σε τιμή μεγαλύτερη του 20% της ονομαστικής της τιμής, για χρόνο μικρότερο του μισού

δευτερόλεπτο, η Α/Γ οφείλει να παραμείνει σε λειτουργία και συνδεδεμένη με το δίκτυο. Το ίδιο οφείλει να κάνει, εαν η τάση επιστρέψει στο 80% της ονομαστικής στο επόμενο μίσο δευτερόλεπτο και στο 95% μέχρι το δεκατο πέμπτο δευτερόλεπτο απο την αρχή του σφάλματος, χωρίς όμως να έχει πέσει ποτέ κάτω απο την ελάχιστη τάση που δίνεται με την συνεχή γραμμή.

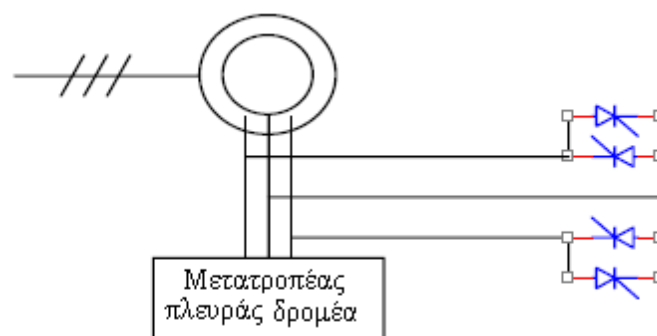
Ο κανονισμός αυτός ισχύει στην Ισπανία απο τον Οκτώβριο του 2006. Η επιλογή μας αυτη οφείλεται στο γεγονός, οτι σε αυτη τη χώρα η αιολική ενέργεια είναι απο τις μεγαλύτερες στον κόσμο και στο ότι το μεγαλύτερο ποσοστό των εγκατεστημένων Α/Γ, οδηγούν ασύγχρονες γεννήτριες DFIG.

Οι κώδικες μερικών χωρών περιγράφουν, ότι τα αιολικά πάρκα οφείλουν να στηρίζουν το δίκτυο, παράγοντας άεργο ισχύ κατά την διάρκεια των σφαλμάτων, για ταχύτερη αποκατάσταση της τάσης του δικτύου. Στην Ισπανία, τα αιολικά πάρκα οφείλουν να σταματήσουν την απορρόφηση άεργου ισχύος μέσα σε 100ms απο την έναρξη της πτώσης τάσης και να είναι ικανά να παράγουν άεργο ισχύ μέσα σε 150ms απο το τέλος του σφάλματος.

3.5.2 ΠΑΡΑΜΟΝΗ Α/Γ ΣΕ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΒΥΘΙΣΕΩΝ ΤΑΣΗΣ

Η Α/Γ μεταβλητών στροφών σε διάταξη με ασύγχρονη μηχανή διπλής τροφοδότησης (DFIG), χρησιμοποιείται ήδη σε μεγάλα αιολικά πάρκα. Το μεγάλο της πλεονέκτημα είναι οικονομικό και οφείλεται στο ότι ο μετατροπέας που χρησιμοποιεί, έχει ονομαστικό μέγεθος ίσο με το 1/3 περίπου της ονομαστικής ισχύος της Α/Γ. Όμως αυτο το οικονομικό πλεονέκτημα γίνεται τεχνικό μειονέκτημα σε συνθήκες σφάλματος δικτύου, καθώς ο ηλεκτρονικός μετατροπέας πρέπει να προστατευτεί απο τα υψηλά δημιουργούμενα ρεύματα του δρομέα. Επίσης πρέπει να ελεγχθεί η ταχύτητα του ρότορα της Α/Γ, για να αποφευχθούν υπερταχύνσεις, κατι που είναι εφικτό με τον έλεγχο της γωνίας βήματος πτερυγίων. Στη διάταξη που μελετάμε, μεταξύ του δικτύου και του στάτη παρεμβάλλεται μόνο ο μετασχηματιστής ανύψωσης τάσης. Έτσι μια βύθιση στην τάση του δικτύου έχει σαν συνέπεια την ελάττωση της ηλεκτρομαγνητικής ροπής της μηχανής. Επειδή η μηχανική ροπή δεν μειώνεται ή μειώνεται πολυ πιο αργά, με τη λειτουργία του ελέγχου γωνίας κλίσης

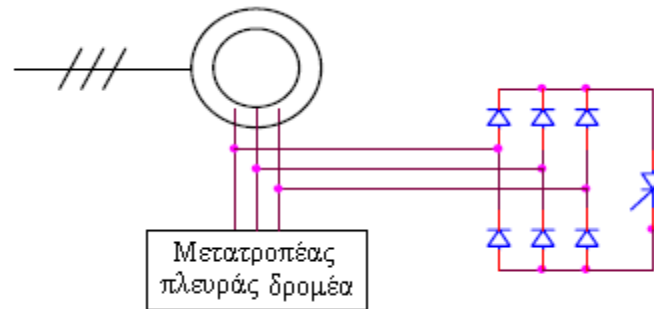
των πτερυγίων, δημιουργείται μια αύξηση στην ταχύτητα της γεννήτριας. Επιπλέον, η μεταφορά της ισχύος προς το δίκτυο με μειωμένη την τάση, οδηγεί σε αύξηση των ρευμάτων του στάτη. Η μαγνητική σύζευξη μεταξύ στάτη και δρομέα, θα έχει ως αποτέλεσμα να δημιουργηθούν υψηλά επαγόμενα ρεύματα και τάσεις στα τυλίγματα του δρομέα. Όμως, ο ηλεκτρονικός μετατροπέας είναι συνδεδεμένος σε σειρά με τα τυλίγματα του δρομέα και τα υψηλά ρεύματα μπορεί να καταστρέψουν τους διακόπτες. Απο την άλλη, λόγω της χαμηλής τάσης του δικτύου, ο μετατροπέας απο την πλευρά του δικτύου δεν μπορεί να μεταφέρει την ισχύ που δέχεται απο τον μετατροπέα στην πλευρα της μηχανής προς το δίκτυο και η επιπροσθετη ενέργεια φορτίζει τον πυκνωτη διασύνδεσης, με αποτέλεσμα την απότομη αύξηση της τάσης του. Είναι απαραίτητο λοιπόν να προστατεύσουμε τον μετατροπέα απο υπερρεύματα και τον δρομέα όπως και τον πυκνωτή απο υπερτάσεις. Το σύστημα προστασίας παρακολουθεί κάποια σήματα, συνήθως το ρεύμα του δρομέα και την τάση του πυκνωτή και εάν τουλάχιστον ένα απο αυτα υπερβεί την προκαθορισμένη τιμή, ενεργοποιείται η προστασία. Αυτη η προστασία συνήθως είναι ένα κύκλωμα που βραχυκυκλώνει τα τυλίγματα του δρομέα με μια μικρή αντίσταση, ενώ συγχρόνως ο μετατροπέας απο την πλευρα της μηχανής αποσυνδέεται απο τον δρομέα και οι διακόπτες απενεργοποιούνται. Αυτο το κύκλωμα βραχυκύκλωσης του δρομέα, μπορεί να αποτελείται απο δύο ζεύγη αντιπαράλληλα συνδεδεμένα θυρίστορ, τα οποία συνδέονται μεταξύ των φάσεων.



Κύκλωμα βραχυκύκλωσης δρομέα (crowbar) με αντιπαράλληλα θυρίστορ.

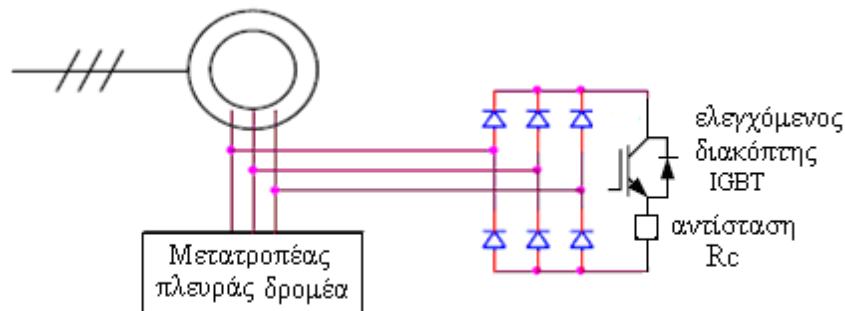
Το κύκλωμα βραχυκύκλωσης δρομέα με γέφυρα διόδων στο παρακάτω σχήμα είναι προτιμότερο, γιατί χρησιμοποιεί λιγότερα θυρίστορ και ελέγχεται ευκολότερα. Το πρόβλημα που δημιουργείται με την χρήση των δύο αυτων κυκλωμάτων, είναι ότι οταν το σφάλμα εκκαθαριστεί, δεν είναι δυνατή η συνέχιση της λειτουργίας του

συστήματος, και αυτο διότι δεν μπορεί να εξασφαλιστεί η απενεργοποίηση αυτών των κυκλωμάτων.

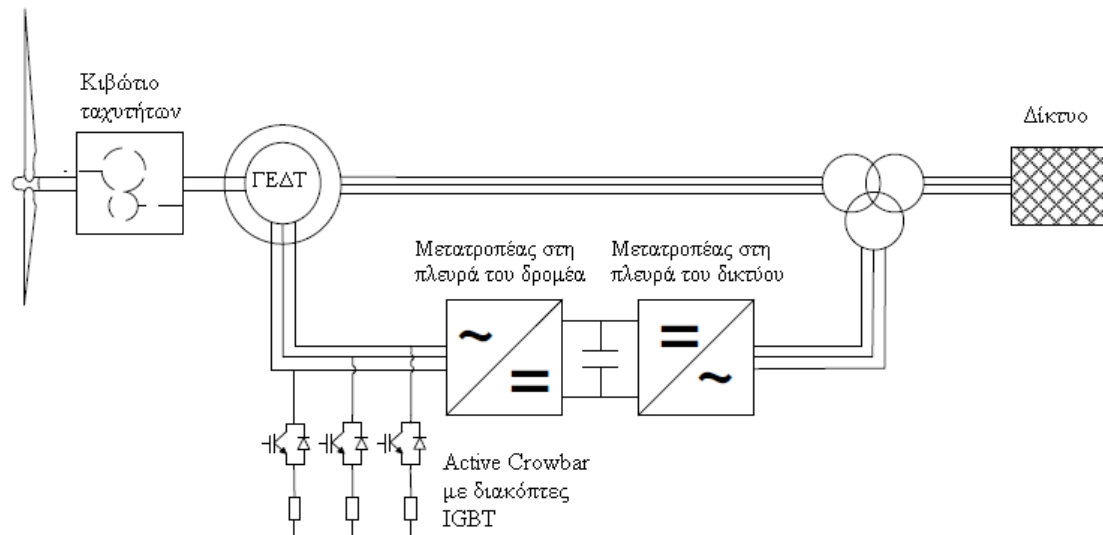


Κύκλωμα βραχυκύκλωσης δρομέα (crowbar) με γέφυρα διόδων.

Χρειάζεται λοιπόν ένα κύκλωμα βραχυκύκλωσης του δρομέα, το οποίο να είναι δυνατόν να απενεργοποιείται όποτε απαιτείται. Ένα τέτοιο κύκλωμα είναι το ενεργό κύκλωμα βραχυκύκλωσης του δρομέα (active crowbar), το οποίο φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Ενεργό κύκλωμα δρομέα (active crowbar).

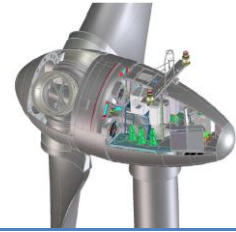


Γεννήτρια επαγωγής διπλής τροφοδότησης με ενεργό κύκλωμα βραχυκύκλωσης δρομέα (Active Crowbar) για την προστασία των μετατροπέων ισχύος κατά τη διάρκεια διαταραχών του δικτύου.

Σε αυτό, ο διακόπτης είναι πλήρως ελεγχόμενος ημιαγωγικός διακόπτης, όπως ένα IGBT. Σε σειρά με αυτόν υπάρχει μια μικρή αντίσταση για τον περιορισμό των ρευμάτων, όταν το κύκλωμα άγει. Την στιγμή που θα ανιχνευθεί η πτώση της τάσης και θα ενεργοποιηθεί το κύκλωμα βραχυκύκλωσης ο μετατροπέας προς την πλευρά της μηχανής απσυνδέεται από τον δρομέα και οι διακόπτες οδηγούνται σε αποκοπή. Έτσι χάνεται ο έλεγχος ενεργού ισχύος του στάτη. Ο δρομέας βραχυκυκλώνεται, και όσο παραμένει σε αυτή την κατάσταση, η γεννήτρια συμπεριφέρεται σαν συμβατική μηχανή βραχυκυκλωμένου κλωβού με αυξημένη αντίσταση δρομέα. Εάν κατά την στιγμή του βραχυκυκλώματος η μηχανή λειτουργούσε στην υποσύγχρονη περιοχή, τότε μετά την ενεργοποίηση της βραχυκυκλώσεως θα συμπεριφέτεται σαν ασύγχρονος κινητήρας, καταναλώνοντας ενεργό και άεργο ισχύ. Εάν ευρίσκετο στην υπερσύγχρονη περιοχή θα συμπεριφερθεί σαν ασύγχρονη γεννήτρια, καταναλώνοντας και πάλι άεργο ισχύ. Η ποσότητα της άεργου ισχύος που καταναλώνει και στις δυο περιπτώσεις, είναι ανάλογη της ολίσθησης της μηχανής την στιγμή του σφάλματος.

Αποτα παραπάνω συμπεραίνουμε, ότι πρέπει να επαναφέρουμε τον έλεγχο όσο το δυνατόν γρηγορότερα, έτσι ώστε να σταματήσει η κατανάλωση άεργου ισχύος και να αρχίσει η παραγωγή της για την στήριξη του δικτύου, σύμφωνα με τους κανονισμούς.

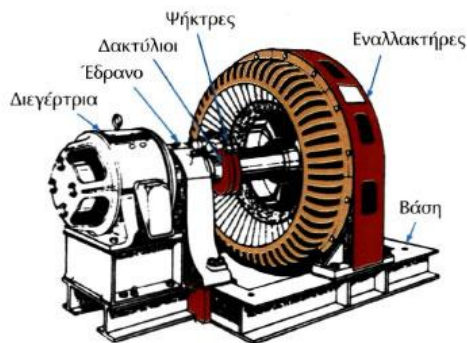
Η τιμή της αντίστασης R_c πρέπει να είναι αρκετά μεγάλη, ώστε να περιορίζει γρήγορα τα ρεύματα του δρομέα, αλλά όχι τόσο που να προκαλεί υπερτάσεις και κυρίως υψηλά μεταβατικά ρεύματα, όταν ο μετατροπέας επανασυνδεθεί. Συνήθως χρησιμοποιούνται τιμές από 0,01 έως 0,05 της βάσης αντίστασης. Ένα άλλο συμπέρασμα που βγάζουμε είναι πως η δυσκολότερη περίπτωση είναι η λειτουργία με πλήρες φορτίο. Τότε, και υπο ονομαστική ταχύτητα ανέμου και τουρμπίνας, τα ρεύματα του δρομέα είναι τα μεγαλύτερα για κανονική λειτουργία. Μεγαλύτερη είναι και η ολίσθηση, άρα και η άεργος ισχύς που θα απορροφάται κατά την διάρκεια της ενεργοποίησης του ενεργού κυκλώματος βραχυκύκλωσης δρομέα. Αυτή είναι η χειρότερη περίπτωση. Μάλιστα, σε αρκετές χαμηλότερες ταχύτητες ανέμου, άρα και ρευμάτων δρομέα, δεν ενεργοποιείται το κύκλωμα βραχυκύκλωσης και το σύστημα συνεχίζει την λειτουργία του, μόνο με την βοήθεια του συστήματος ελέγχου.



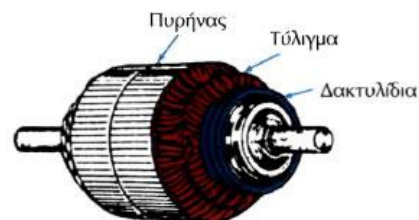
4. ΣΥΓΧΡΟΝΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ ΣΕ ΑΙΟΛΙΚΑ ΠΑΡΚΑ-ΤΥΠΟΣ Δ

4.1 ΣΥΓΧΡΟΝΗ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ

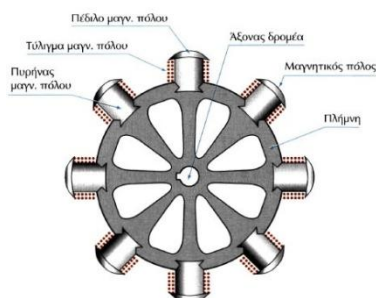
Για την λειτουργία των σύγχρονων γεννητριών που ονομάζονται και εναλλακτήρες απαραίτητη προϋπόθεση είναι η τροφοδοσία του τυλίγματος του δρομέα με συνεχές ρεύμα. Καθώς περιστρέφεται ο δρομέας, που είναι πρακτικά ένας μεγάλος στρεφόμενος ηλεκτρομαγνήτης, λόγω κάποιας κινητήριας μηχανής, περιστρέφεται μαζί του και το παραγόμενο μαγνητικό πεδίο, επάγοντας τριφασική τάση στο τύλιγμα του στάτη. Ο δρομέας μπορεί να είναι είτε κυλινδρικός, είτε έκτυπων πόλων και είναι κατασκευασμένος από δυναμοελάσματα. Οι κυλινδρικοί δρομείς φέρουν αυλακώσεις όπου τοποθετούνται τα τυλίγματα και χρησιμοποιούνται κυρίως σε γεννήτριες μέχρι τεσσάρων πόλων. Αντίθετα σε γεννήτριες με περισσότερους πόλους επιλέγονται δρομείς έκτυπων πόλων.



Σχήμα 4.1. Σύγχρονη γεννήτρια.



Σχήμα 4.2. Δρομέας εναλλακτήρα.



Σχήμα 4.3. Μαγνητικοί πόλοι οκταπολικού εναλλακτήρα.

Η τροφοδοσία του δρομέα με συνεχές ρεύμα μπορεί να πραγματοποιηθεί με δύο τρόπους: α) από εξωτερική πηγή συνεχούς ρεύματος, οπότε στο στρεφόμενο δρομέα προσαρμόζονται ψήκτρες και δακτυλίδια, β) από πηγή συνεχούς ρεύματος τοποθετημένη στον άξονα της μηχανής. Στην πρώτη περίπτωση, καθένα από τα δύο άκρα του τυλίγματος του δρομέα αντιστοιχεί σε ένα δακτυλίδι, οπότε μέσω ψηκτρών επιτυγχάνεται η συνεχής τροφοδοσία του κύκλωματος. Τα μειονεκτήματα αυτής της λύσης σχετίζονται με τη φθορά των ψηκτρών (λόγο τριβής), καθώς με την πτώση τάσης πάνω σ' αυτές, η οποία μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικές απώλειες ισχύος. Στη δεύτερη περίπτωση, το ρεύμα του δρομέα προέρχεται από μια διεγερτρία μηχανή, η οποία είναι μικρή γεννήτρια ΕΡ. Το κύκλωμα διέγερσης της τελευταίας τροφοδοτείται από το στάτη της κύριας γεννήτριας και το κύκλωμα οπλισμού της βρίσκεται πάνω στον άξονα του δρομέα. Η τριφασική έξοδος της διεγέρτριας ανορθώνεται από τριφασικό ανορθωτή και το συνεχές ρεύμα που προκύπτει διαρρέει το κύκλωμα διέγερσης της κύριας γεννήτριας. Με τον τρόπο αυτό αποφεύγονται τα μειονεκτήματα του πρώτου τρόπου τροφοδοσίας, αφού δεν εμπλεκονται μηχανικά τμήματα.

4.2 ΣΥΓΧΡΟΝΗ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ ΣΕ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ

Παρά το γεγονός ότι μια σύγχρονη γεννήτρια είναι πολύ πιο ακριβή και πιο πολύπλοκη μηχανικά από μια ασύγχρονη επαγωγική γεννήτρια έχει το πλεονέκτημα ότι δεν χρειάζεται να της δίνεται το ρεύμα μαγνήτισης από το κύκλωμα του στάτη. Έτσι, το μαγνητικό της πεδίο δημιουργείται από τη χρήση μόνιμων μαγνητών ή μέσω συμβατικών τυλιγμάτων στο δρομέα. Επιπλέον, μπορεί να γίνει χρήση της χωρίς την ύπαρξη κιβωτίου ταχυτήτων, αρκεί να έχει επαρκές μεγάλο αριθμό πόλων.

Η σύγχρονη γεννήτρια είναι η πιο κατάλληλη για έλεγχο πλήρους ισχύος και μπορεί να λειτουργήσει σε ανεμογεννήτρια με μεταβλητή ταχύτητα. Ο ηλεκτρονικός μετατροπέας ισχύος με τον οποίο συνδέεται στο δίκτυο η σύγχρονη γεννήτρια έχει ως πρώτο στόχο να κάνει απόσβεση των διαταραχών της ισχύος που οφείλονται στις ριπές του ανέμου και των μεταβατικών φαινομένων που έρχονται από το δίκτυο.

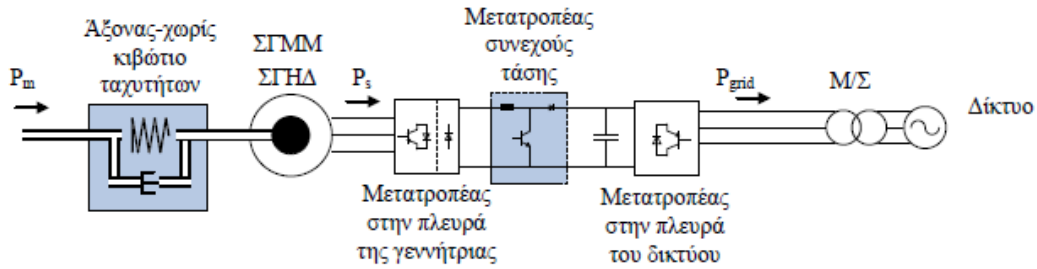
Οι σύγχρονες γεννήτριες μόνιμου μαγνήτη έχουν υψηλότερη απόδοση από τις ασύγχρονες επαγωγικές γεννήτριες διότι είναι αυτοδιεγειρούμενες και συνεπώς η διέγερση παρέχεται χωρίς καμιά επιπλέον παροχή ενέργειας.

Ωστόσο, τα υλικά τατασκευής των μόνιμων μαγνητών είναι εξαιρετικά ακριβά, δημιουργούν δυσκολία κατά την επεξεργασία τους στην τελική κατασκευή και είναι ευαίσθητα σε υψηλές θερμοκρασίες, με συνέπεια να απαιτείται σύστημα ψύξης. Επιπλέον, η χρήση διέγερσης με μόνιμο μαγνήτη απαιτεί τη χρήση ένος ηλεκτρομικού μετατροπέα ισχύος πλήρους κλίμακας για την προσαρμογή της τάσης και της συχνότητας της γεννήτριας στη τάση και στη συχνότητα της γραμμής αντίστοιχα. Αυτό προσδίδει επιπρόσθετο κόστος στην ανεμογεννήτρια. Η σύγχρονη φύση τους μπορεί να δημιουργήσει προβλήματα κατά την εκκίνηση, τον συγχρονισμό, την ρύθμιση της τάσης αλλά μπορεί επίσης να προκαλέσει δύσκαμπτη συμπεριφορά στην περίπτωση μη σταθερού αέρα. Πρέπει ωστόσο να αναφερθεί ότι οι ανεμογεννήτριες με σύγχρονες γεννήτριες μόνιμου μαγνήτη μπορούν να παράγουν ισχύ σε οποιαδήποτε ταχύτητα και επομένως να δουλέψουν σε μεταβλητές ταχύτητες.

4.3 ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑ ΜΕ ΣΥΓΧΡΟΝΗ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ ΚΑΙ ΠΛΗΡΗ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑ

Σε αυτό το κεφάλαιο θα μελετήσουμε το ηλεκτρικό σύστημα και ο έλεγχος της Α/Γ τύπου Δ, ο οποίος τα τελευταία χρόνια χρησιμοποιείται με ολοένα και αυξανόμενο ρυθμό. Έχουμε τις δύο παραλλαγές του τύπου Δ:

1. Πολυπολική σύγχρονη γεννήτρια ηλεκτρικής διέγερσης, χωρίς κιβώτιο ταχυτήτων και σύνδεση στο δίκτυο μέσω ανορθωτή διόδων στην πλευρά της γεννήτριας, μετατροπέα συνεχούς τάσης, και αντιστροφέα διακοπτικών στοιχείων IGBTs στην πλευρά του δικτύου – [Τύπος Δ1]
2. Πολυπολική σύγχρονη γεννήτρια μόνιμων μαγνητών, χωρίς κιβώτιο ταχυτήτων και σύνδεση στο δίκτυο μέσω πλήρους μετατροπέα πηγής τάσης διακοπτικών στοιχείων IGBTs – [Τύπος Δ2]



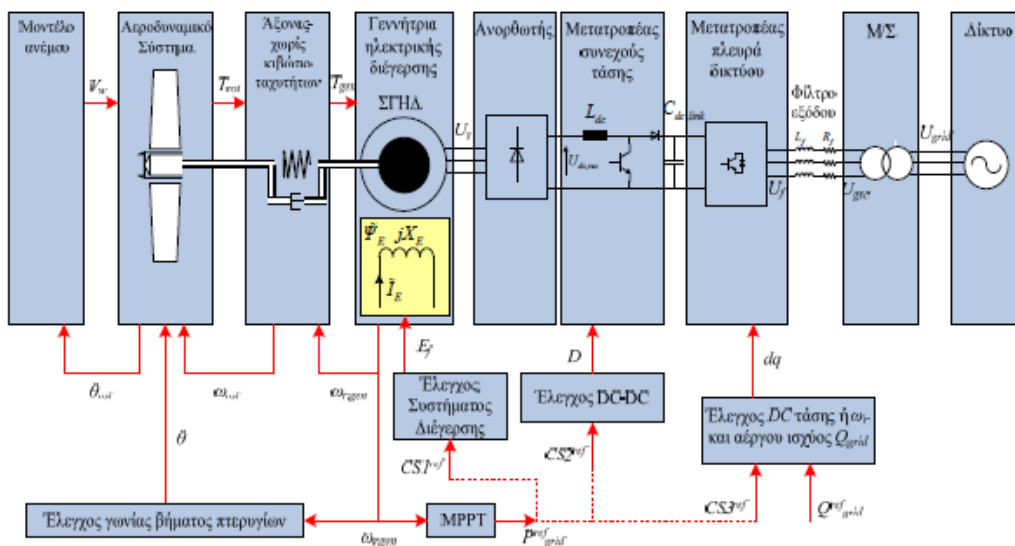
Σχήμα 4.4. Ηλεκτρική διαμόρφωση ανεμογεννήτριας Τύπου Δ

Και στις δύο περιπτώσεις, ο μετατροπέας αποδεσμεύει την ταχύτητα της γεννήτριας από τη συχνότητα του δικτύου και εξασφαλίζει τη λειτουργία μεταβλητών στροφών. Η άεργος ισχύς επίσης που παρέχεται στο δίκτυο από το μετατροπέα είναι ανεξάρτητη από το σημείο λειτουργίας άεργου ισχύος της γεννήτριας. Η πολυπολική σύγχρονη γεννήτρια εξαλείφει την ανάγκη χρήσης κιβωτίου ταχυτήτων, αποφεύγοντας το αυξημένο βάρος, κόστος, απώλειες και ανάγκες συντήρησης. Σαν βασικά πλεονεκτήματα του Τύπου Δ1, αναφέρονται το μειωμένο κόστος λόγω χρήσης απλού ανορθωτή διόδων στην πλευρά της γεννήτριας, οι μειωμένες απώλειες, οι αυξημένες δυνατότητες ελέγχου που προσφέρει το σύστημα διέγερσης και η μειωμένη πολυπλοκότητα της ηλεκτρομαγνητικής κατασκευής. Το σύστημα παρουσιάζει εγγενώς μη γραμμικότητες παράγοντας αρμονικές στο ρεύμα της διάταξης. Μια εναλλακτική διαμόρφωση που χρησιμοποιεί θυρίστορ καταναλώνει άεργο ισχύ και παράγει υψηλότερες ακόμα αρμονικές. Ο συνδυασμός που επιλέγεται στον Τύπο Δ1 έχει πολύ χαμηλότερο ολικό κόστος από μια ισοδύναμη ασύγχρονη γεννήτρια με μετατροπέα IGBT. Αντίθετα, ο Τύπος Δ2 έχει χρησιμοποιηθεί πιο μαζικά από την αιολική βιομηχανία, κυρίως λόγω της αυξημένης απόδοσης και στιβαρής κατασκευής της σύγχρονης γεννήτριας μονίμων μαγνητών. Παρ' όλα αυτά το υψηλό κόστος για τα υλικά των μονίμων μαγνητών και η σταθερή διέγερση που δεν μεταβάλλεται ανάλογα με το σημείο λειτουργίας της ανεμογεννήτριας, αποτελούν σοβαρά μειονεκτήματα του τύπου αυτού.

4.3.1 ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΛΕΓΧΟΥ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ ΤΥΠΟΥ Δ1

Στο Σχήμα 4.5 παρουσιάζεται το σχήμα ελέγχου της Α/Γ Τύπου Δ1, που περιλαμβάνει το αεροδυναμικό, το μηχανικό και το ηλεκτρικό σύστημα. Το σύστημα ελέγχου περιλαμβάνει τον ελεγκτή γωνίας βήματος περυγίων, το σύστημα διέγερσης, τον έλεγχο του μετατροπέα DC-DC και τον έλεγχο του μετατροπέα στην πλευρά του δικτύου. Κατά τη διάρκεια της παρούσας διατριβής αναπτύχθηκαν διάφοροι τρόποι ελέγχου και συντονισμού των παραπάνω συστημάτων.

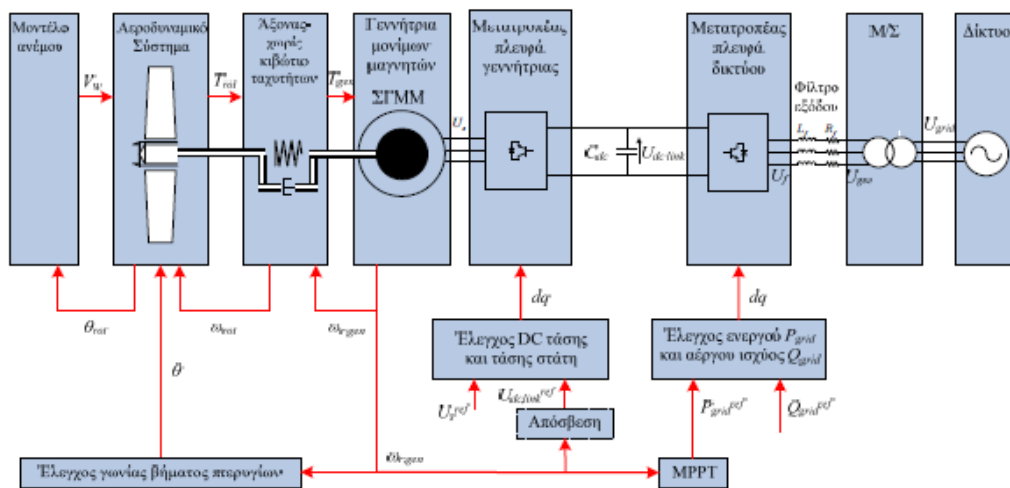
Τα σήματα CSI^{ref} , $i=1,2,3$, που εμφανίζονται στο σχήμα αναφέρονται σε μεγέθη του συστήματος όπως τάση ακροδεκτών γεννήτριας, συνεχής τάση $U_{dc,link}$ κ.α. τα οποία ποικίλλουν ανάλογα με το συγκεκριμένο σχήμα ελέγχου που ακολουθείται. Η στρατηγική Μέγιστης Απολαβής Ισχύος (*Maximum Power Point tracking-MPPT*) παρέχει το σήμα αναφοράς για την ενεργό ισχύ P^{ref}_{grid} , και υλοποιείται είτε στο σύστημα ελέγχου της διέγερσης είτε του μετατροπέα συνεχούς τάσης είτε του μετατροπέα στην πλευρά του δικτύου.



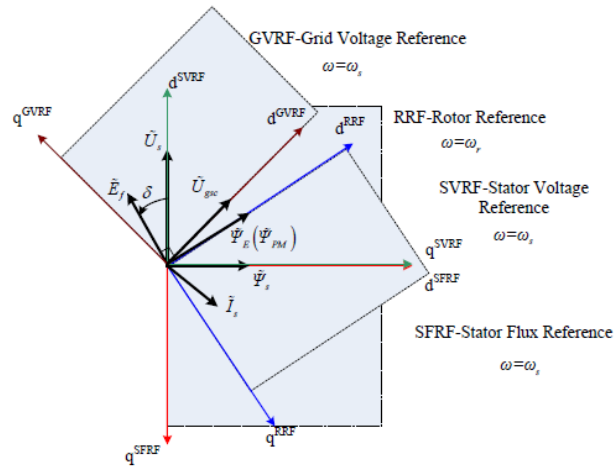
Σχήμα 4.5. Βασική διαμόρφωση ελέγχου μοντέλου ανεμογεννήτριας Τύπου Δ1

4.3.2 ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΛΕΓΧΟΥ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ ΤΥΠΟΥ Δ2

Στην περίπτωση της Α/Γ Τύπου Δ2 ο έλεγχος αφορά στους δύο μετατροπείς σε διαμόρφωση *back-to-back* και στο συντονισμό τους με τον έλεγχο γωνίας βήματος περυγίων. Το σύστημα ελέγχου του Σχήματος 4.6 διαφοροποιείται σημαντικά σε σχέση με τον Τύπο Δ1, που περιγράφεται παραπάνω, γι' αυτό και αντιμετωπίζεται ξεχωριστά. Τα πλαίσια αναφοράς που χρησιμοποιούνται δίνονται στο Σχήμα 4.7. Συμπεριλαμβάνεται και το σύστημα απόσβεσης ταλαντώσεων στη ταχύτητα του δρομέα.



Σχήμα 4.6. Βασική διαμόρφωση ελέγχου μοντέλου ανεμογεννήτριας Τύπου Δ2



Σχήμα 4.7. Πλαίσια αναφοράς που χρησιμοποιούνται στα μοντέλο Α/Γ Τύπου Δ1 και Δ2

4.4 ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ ENERCON

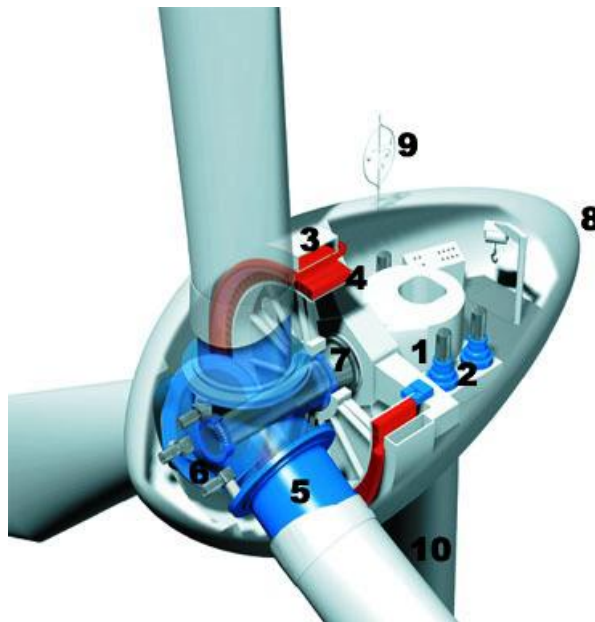
Η *ENERCON* προσφέρει ένα μοναδικό σχεδιασμό ανεμογεννήτριας, ο οποίος είναι ο πιο εξελιγμένος σε όλο τον κόσμο, όσον αφορά την τεχνολογία των ανεμογεννητριών. Οι ανεμογεννήτριες της *ENERCON* δεν έχουν κιβώτιο ταχυτήτων. Οι γεννήτριες που χρησιμοποιούν είναι σύγχρονες, αργής μεταβλητής ταχύτητας, με συνεχόμενη ρύθμιση των στροφών και είναι αποδοτικότερες σε σχέση με τις επαγωγικές (ασύγχρονες).

Η νέα γεννήτρια, που αναπτύχθηκε ειδικά για την *E-40* συνδέεται απ' ευθείας στον δρομέα. Ακόμη και σε ταχύτητα *38rpm* αυτή η γεννήτρια παράγει την ονομαστική ισχύ *600 kW*. Για να επιτευχθεί αυτό, αναπτύχθηκε μια ειδική πολυπολική μηχανή που βασίζεται στις αρχές λειτουργίας των σύγχρονων γεννητριών. Έγινε μια πιο προχωρημένη ανάπτυξη του κλασσικού μοντέλου της σύγχρονης μηχανής με αποτέλεσμα να επιτευχθεί μια υψηλή σε βαθμό απόδοση ηλεκτρογεννήτρια, που συνδυάζεται με το χαμηλό βάρος της. Εκτός από την υψηλή απόδοση της μηχανής μεγάλη διάρκεια ζωής εξασφαλίζεται λόγω του ειδικού και εξεζητημένου σχεδιασμού της. Ο στάτης καλύπτεται με ένα πρώτο αντιδιαβρωτικό στρώμα μέχρι να ολοκληρωθεί ο ελασματοποιημένος πυρήνας και πριν εισαχθούν τα τυλίγματα στις σχισμές.

Η μόνωση των σχισμών είναι ένας συνδυασμός υλικών μονώσεων. Αυτό το υλικό μόνωσης αποτελείται από 3 στρώματα. Το εσωτερικό στρώμα είναι ένα ηλεκτρικά μονωμένο φύλλο, ενώ το εξωτερικό στρώμα αποτελείται από χαρτί αρμιδιού. Αυτός ο

συνδυασμός έχει σαν αποτέλεσμα την χαμηλή απορρόφηση της υγρασίας και την καλή θερμική και χημική αντίσταση. Ο χάλκινος αγωγός καλύπτεται με κύριο στρώμα υψηλής θερμικής αντίστασης. Ο χαλκός προστατεύεται επιπρόσθετα με ένα επίστρωμα με βάση πολυαμιδαιμίδη. Η όλη μόνωση αποτελείται από τον συνδυασμό δύο (2) διαφορετικών βερνικωμένων στοιχείων. Σύμφωνα μ' αυτή την τεχνική επιστρώσεων παρέχεται μια καλύτερη προστατευτική κάλυψη για το χάλκινο αγωγό. Η εμποτισμένη ρητίνη που χρησιμοποιείται, είναι ένα στοιχείο ρητίνης βασισμένο πάνω στην ακόρεστη πολυεστεριμίδη.

Συγχρόνως, ολόκληρος ο στάτης είναι διαποτισμένος με ρητίνη που γίνεται σε ειδικά διαμορφωμένο μηχάνημα. Κατά την διάρκεια της διεργασίας, ο αέρας που περιέχεται στα τυλίγματα, απορροφάται με αντλία κενού έτσι ώστε να επιτρέπει στην ρητίνη να διεισδύσει μέχρι τα μικρότερα κενά που υπάρχουν στα τυλίγματα. Μετά η ρητίνη στερεοποιείται σε ένα φούρνο βαφής. Τέλος τα τυλίγματα καλύπτονται με ένα ειδικό επιπρόσθετο βερνίκι, που προστατεύει τα τυλίγματα του χαλκού έναντι μηχανικής αντοχής και διεισδύσεως υγρασίας. Με την τήρηση των παραπάνω αναφερομένων διαδικασιών, εξασφαλίζεται μεγάλος χρόνος ζωής της γεννήτριας.



1. Γεννήτρια
2. Στατής γεννήτριας
3. Ροτορας γεννήτριας
4. Κύριος άξονας
5. Πτερωτες
6. Φλατσα - βάση πτερωτής
7. Κινητηρας έλεγχου του Pitch Control
8. Κύριος φορέας (Yaw drive)
9. Ανεμομετρο
10. Πυργος

4.4.1 ΧΑΜΗΛΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ

Η *ENERCON* έχει σχεδιάσει την πλήμνη και τα πτερύγια έτσι ώστε ο δρομέας της ανεμογεννήτριας να είναι πολύ ελαφρύτερος απ' ό,τι σε άλλες κατασκευές και άρα, η αρχική τιμή της αδράνειας να είναι πολύ χαμηλή. Εξ' αιτίας αυτού και της δυνατότητας ρύθμισης των πτερύγιων, η ανεμογεννήτρια ξεκινάει να παράγει ενέργεια, σε πολύ χαμηλή ταχύτητα ανέμου $2,5 \text{ m/s}$, ενώ όλες οι άλλες ανεμογεννήτριες ξεκινούν να παράγουν ενέργεια στα 4m/s . Επομένως οι ανεμογεννήτριες της *ENERCON* έχουν το πλεονέκτημα παραγωγής περισσότερης ενέργειας απ' ό,τι άλλες ανεμογεννήτριες στις χαμηλές ταχύτητες ανέμου.

4.4.2 ΑΥΤΟΜΑΤΗ ΕΝΑΡΞΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

Αν σε διαστήματα τριών (3) λεπτών μετρηθεί ταχύτητα, που είναι κατάλληλη για την λειτουργία της ανεμογεννήτριας και ο αισθητήρας του συστήματος ελέγχου δεν δείχνει κάποιο σφάλμα στα εξαρτήματα, τότε αρχίζει η αυτόματη διαδικασία έναρξης λειτουργίας. Η παραγωγή της ανεμογεννήτριας αρχίζει αυτόματα, όταν η ταχύτητα ανέμου έχει φτάσει στην χαμηλότερη τιμή του εύρους των ταχυτήτων λειτουργίας.

- **Αυτόματη θέση ρυθμίσεως και ελέγχου.**

Μετά από μια επιτυχή έναρξη λειτουργίας η ανεμογεννήτρια μπαίνει στην αυτόματη θέση ρυθμίσεως και ελέγχου. Οι αισθητήρες των εξαρτημάτων συνεχίζουν να ελέγχουν τις παραμέτρους που αφορούν:

1. Μετρήσεις για ασφαλή λειτουργία - παύση λειτουργίας - καταστάσεις κινδύνου κ.λ.π.

Κατά την διάρκεια της αυτόματης θέσης ρυθμίσεως και ελέγχου πάνω από την ονομαστική ταχύτητα ανέμου η ταχύτητα του ρότορα διατηρείται σε ονομαστική περιοχή στροφών ($18\text{-}38,5 \text{ σ.α.λ}$) με την ρύθμιση της γωνίας προσβολής του πτερυγίου. Οι απαιτούμενες αλλαγές στις γωνίες του πτερυγίου καθορίζονται από τις μετρήσεις ταχύτητας και επιτάχυνσης. Επιπλέον η γωνία του πτερυγίου ήδη ελέγχεται

κατά την διάρκεια των φάσεων όπου οι ταχύτητες ανέμου είναι μικρότερες της ονομαστικής ταχύτητας.

2. Παύση λειτουργίας της ανεμογεννήτριας.

Αν η ανεμογεννήτρια σταματήσει είτε χειροκίνητα είτε από το σύστημα ελέγχου η γωνία των πτερυγίων ρυθμίζεται στις 90° και η μηχανή χαμηλώνει τις στροφές, μέχρι να έρθει περίπου σε θέση αναμονής. Όταν πραγματοποιείται παύση της λειτουργίας, το φρένο δεν λειτουργεί και το σύστημα προσανεμισμού της ατράκτου παραμένει σε λειτουργία. Η διαδικασία σταματήματος της ανεμογεννήτριας προέρχεται από:

1. Χειροκίνητο σταμάτημα.
2. Έλλειψη ανέμου.
3. Η ταχύτητα ανέμου βρίσκεται στο μέγιστο όριο λειτουργίας.
4. Η γωνία των πτερυγίων βρίσκεται στο όριο.
5. Περιστροφή των καλωδίων.
6. Σφάλμα (βλάβη) σε μονάδες τροφοδοσίας.
7. Σήμα υψηλής θερμοκρασίας.
8. Σφάλμα (βλάβη) σε μη σχετικά-ασφαλή εξαρτήματα.

• Σφάλμα δικτύου.

Σε περίπτωση σφάλματος δικτύου, ενεργοποιείται η διαδικασία παύσης κινδύνου με την βοήθεια της ταχείας ρύθμισης του βήματος των πτερυγίων. Η πέδη συγκρατήσεως δεν ενεργοποιείται και τα πτερύγια περιστρέφονται ελεύθερα.

• Μείωση παραγωγής ισχύος.

Η μείωση ή η απόρριψη παραγωγής από την γεννήτρια, υλοποιείται με την ρύθμιση της γωνίας προσβολής των πτερυγίων, μέσω του συστήματος αυτόματου ελέγχου και ρυθμίσεως.

• Υπερτάχυνση.

Αν ο δρομέας φτάσει σε 28% Υπερτάχυνση ένας ηλεκτρομηχανικός διακόπτης Υπερτάχυνση ενεργοποιεί την διαδικασία " *emergency stop*" (παύσης λειτουργίας κινδύνου) με την ταχεία ρύθμιση του βήματος των πτερυγίων. Απαιτείται διάγνωση πριν την επανέναρξη της μηχανής.

- **Άμεση παύση λειτουργίας.**

Αν ενεργοποιηθεί ο διακόπτης κινδύνου στην άτρακτο ή στη βάση του πύργου, τότε η διαδικασία άμεσης πεδήσεως *emergency stop* μπαίνει σε λειτουργία με γρήγορη ρύθμιση της γωνίας του βήματος των πτερυγίων και με ενεργοποίηση της πέδης συγκρατήσεως. Το σύστημα περιστροφής της ατράκτου τίθεται εκτός λειτουργίας.

- **Ανιχνευτής ταλάντωσης.**

Ο ανιχνευτής ταλάντωσης αναγνωρίζει μεγάλες ταλαντώσεις της ατράκτου και ενεργοποιεί τη διαδικασία άμεσης παύσης λειτουργίας με γρήγορη ρύθμιση της γωνίας των πτερυγίων.

- **Μηχανική ασφάλεια δρομέα.**

Για να τεθεί σε λειτουργία η μηχανική ασφάλεια του δρομέα, πρέπει τα πτερύγια να είναι σε θέση αεροδυναμικής πέδης. Στη συνέχεια ο δρομέας τίθεται σε ακινησία μέσω της πέδης συγκρατήσεως και η άτρακτος στρέφεται προς τη διεύθυνση του ανέμου. Αν η ανεμογεννήτρια πρόκειται να παραμείνει σταματημένη με τον δρομέα ασφαλισμένο, πρέπει να ενεργοποιηθεί το αυτόματο σύστημα περιστροφής της ατράκτου. Η χειροκίνητη επέμβαση στη μηχανική ασφάλεια του δρομέα, αυτόματα ενεργοποιεί τη διαδικασία πέδης λειτουργίας κινδύνου με ταχεία ρύθμιση του βήματος των πτερυγίων.

4.5 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ - ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΣΥΓΧΡΟΝΗΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ ENERCON

4.5.1 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ

Η *ENERCON* έχει σημαντικά πλεονεκτήματα σε σύγκριση με την κλασική διάταξη κιβώτιο ταχυτήτων-ασύγχρονη γεννήτρια που έχουν παρουσιάσει κατά καιρούς οι μεγαλύτεροι κατασκευαστές ανεμογεννητριών. Το γεγονός ότι μειώθηκαν σημαντικά

τα κινητά μέρη είναι σημαντικό πλεονέκτημα το οποίο καθορίζει άλλες παραμέτρους, όπως διάρκεια ζωής, απόδοση κτλ. Έτσι ο βαθμός απόδοσης της γεννήτριας αυξήθηκε σημαντικά εφ' όσον δεν υπάρχουν πλέον οι απώλειες ενέργειας στην μετάδοση της κίνησης. Τα πτερύγια μαζί με το hub (πλήμνη) δίνουν απ' ευθείας κίνηση στο δρομέα της γεννήτριας. Σε όλη την περιοχή λειτουργίας από $10kW$ έως την ονομαστική ισχύ των $500kW$ ο βαθμός απόδοσης της γεννήτριας είναι 94% . Επίσης το κόστος συντήρησης μειώθηκε αφού δεν υπάρχει το γνωστό σύστημα αύξησης στροφών (κιβώτιο ταχυτήτων) το οποίο απαιτεί συχνή συντήρηση. Ανά τακτά χρονικά διαστήματα χρειάζεται στο κιβώτιο ταχυτήτων συμπλήρωση ή αλλαγή του λαδιού που υπάρχει μέσα στο κιβώτιο. Εάν για κάποιο λόγο δεν γίνει η σωστή συντήρηση τότε είναι ανασφαλή η σωστή λειτουργία του συστήματος. Μάλιστα αρκετά συχνά το σύστημα αυτό θέλει εξ' ολοκλήρου αλλαγή επειδή φθείρεται από την συνεχή λειτουργία με κρουστικά φορτία λόγω του ευμετάβλητου της ισχύος του ανέμου.

4.5.2 ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ

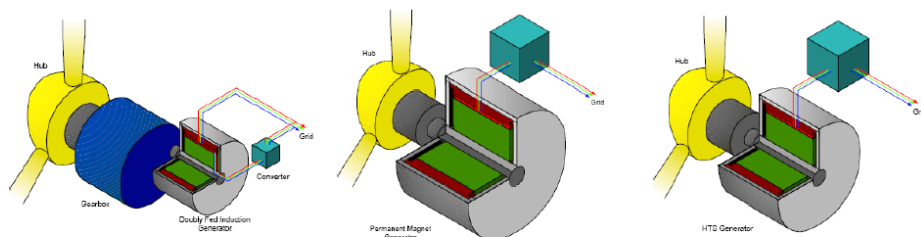
Ένα από τα λίγα μειονεκτήματα που παρουσιάζει είναι ότι λόγω του ότι επιβαρύνεται η πλήμνη και με το βάρος του ρότορα της γεννήτριας καθώς και λόγω της μεγάλης μάζας που αποκτάει η πλήμνη οι ροπές αδράνειας και οι δυνάμεις που αναπτύσσονται είναι μεγάλες με αποτέλεσμα να απαιτείται γερή κατασκευή. Σε αυτό συντελεί το κατάλληλα σχεδιασμένο *main pin*. *Main pin* ονομάζεται εκείνο το τμήμα της *E-40* το οποίο εδράζει το κινητό μέρος της *E-40* επάνω στο σταθερό μέρος. Για τον υπολογισμό των εντάσεων που ασκούνται στο *main pin* διαιρέθηκε σε 62.000 κομμάτια. Ο σκοπός της σχεδίασης του *main pin* ήταν να μειωθούν όσο το δυνατό οι απότομες μεταβολές των ασκούμενων δυνάμεων καθώς και η ομαλή κατανομή των δυνάμεων.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ- ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

Στόχος της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας ήταν να παρουσιαστούν και να αναδειχθούν οι τύποι των γεννητριών που χρησιμοποιούνται σε ανεμογεννήτριες τα τελευταία χρόνια.

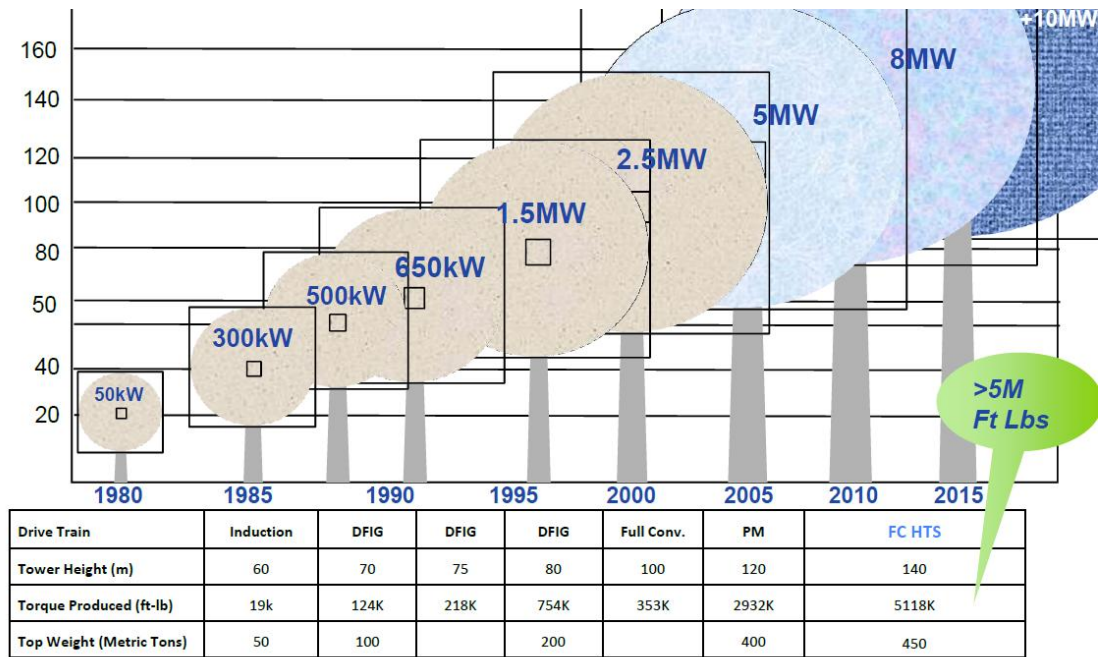
Η αύξηση της διείσδυσης της αιολικής ενέργειας στα ηλεκτρικά συστήματα, η αξιόπιστη και ασφαλή λειτουργία και η ανάγκη για εύκολη διαχείριση και συντήρηση των ανεμογεννητριων είναι οι κυριότεροι λόγοι για την επιλογή μιας γεννήτριας σε ένα αιολικό πάρκο.

Ανάλογα με το τι μας ταιριάζει στις ανάγκες μας και τις απαιτήσεις μας επιλέγουμε και το ανάλογο τύπο ανεμογεννήτριας. Τα τελευταία χρόνια δύο είναι οι κύριοι τύποι ανεμογεννήτριας. Με ασύγχρονες μηχανές διπλής τροφοδότησης (DFIG) και οι σύγχρονες μηχανές τύπου Epercon (DD- PMSG). Παρακάτω βλέπουμε 2 πίνακες με συγκριτικά αποτελέσματα στο πέρας των χρόνων.



	Doubly Fed Induction (Geared)	Full Conversion PM (Geared or no Gear)	Full Conversion HTS (Direct Drive)
History:	~1990	~2000	~2010
Usage:	1.5 to 3MW	2 to 4MW	5 to +10MW
Benefits:	Low Cost Mature Technology	Good Power Quality, possibility of no gear	Great power quality, efficient at all loads, small, light, no gear
Drawback:	Poor Power Quality, Gear Failures	Large/Heavy - difficult to transport	In Development
Cost Energy*:	1.0	.9	.8

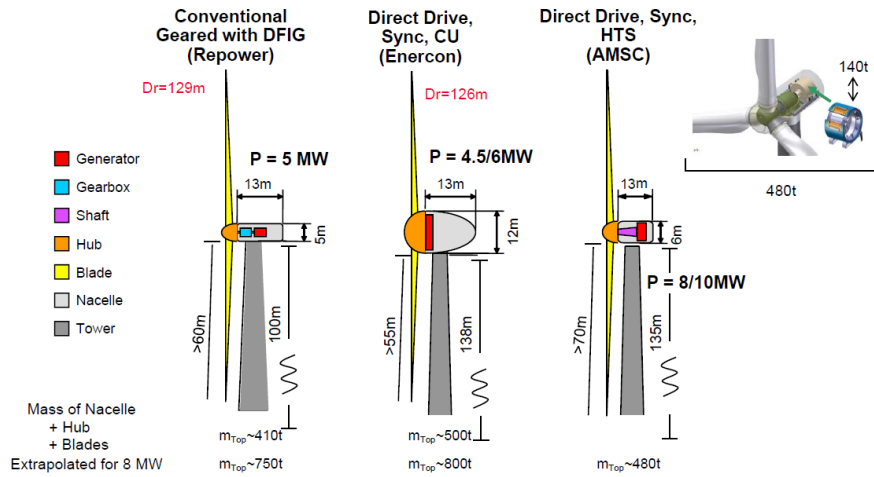
*relative; onshore about 5¢/kwh, offshore about 10¢/kwh



Σήμερα, υπάρχει μια τάση διαφοροποίησης σχετικά με την μετάδοση κίνησης (drive-train) στις ανεμογεννήτριες. Όχι μόνο ο αριθμός των κατασκευαστών έχει αυξηθεί αλλά και ο αριθμός των ανεμογεννητριών έχει αυξηθεί αρκετά.

Εκτός από την Enercon, οι περισσότεροι από τους κατασκευαστές χρησιμοποιούν το ίδιο σύστημα μετάδοσης κίνησης με κιβώτιο ταχυτήτων στις τουρμπίνες τους και χρησιμοποιούν κατά κύριο λόγο επαγωγικές μηχανές (IG) και επαγωγικές μηχανές διπλής τροφοδότησης (DFIG). Αυτή η κατάσταση αλλάζει. Μεταξύ των 10 κορυφαίων κατασκευαστών του 2010, η Enercon και η Goldwind που χρησιμοποιούν την άμεση μετάδοση κίνησης με σύγχρονες γεννήτριες για αρκετά χρόνια, έτσι και οι εταιρίες όπως η Vestas, η GE, η Siemens, η United Power και η Gamesa έχουν ανακοινώσει την παραγωγή στροβίλων που αποκλίνει από το κλασικό σύστημα μετάδοσης κίνησης.

Παρακάτω βλέπουμε όλους τους τύπους γεννητριών με τα θετικά τους και τα αρνητικά τους. Η μεγαλύτερη προσοχή καταβάλλεται στις σύγχρονες μηχανές με απευθείας σύνδεση (DD) και τις σύγχρονες μηχανές μόνιμου μαγνήτη (PMSG).



Manufacturer	Country	rotor diameter [m]	rated power [MW]	generator type
Enercon	D	126	6 (7.5)	EESG
		112	4.5	
		101	2/2.3/3	
		82	2/2.3	
		70-71	1.8/2/2.3	
Vensys/Goldwind	CHN/D	70	1.5	PMSG
		100	2.5	
		-	6*	
Siemens	DK	120	6	PMSG
		113	2.3	
		101	3	
Leitwind	I	101	3	PMSG
		70	2	
		80	1.8	
GE	USA	113	4.1	PMSG
Lagerwey	NL	90	2.5	PMSG
EWT	NL	90	2	PMSG
MTorres	SP	-	2.5	EESG
		-	1.65	
Nordex	D	150	6*	PMSG
Alstom	F	150	6*	PMSG
XEMC Darwind	CHN	115	5	PMSG
AVANTIS/Hyundai	KOR	-	2.5	PMSG

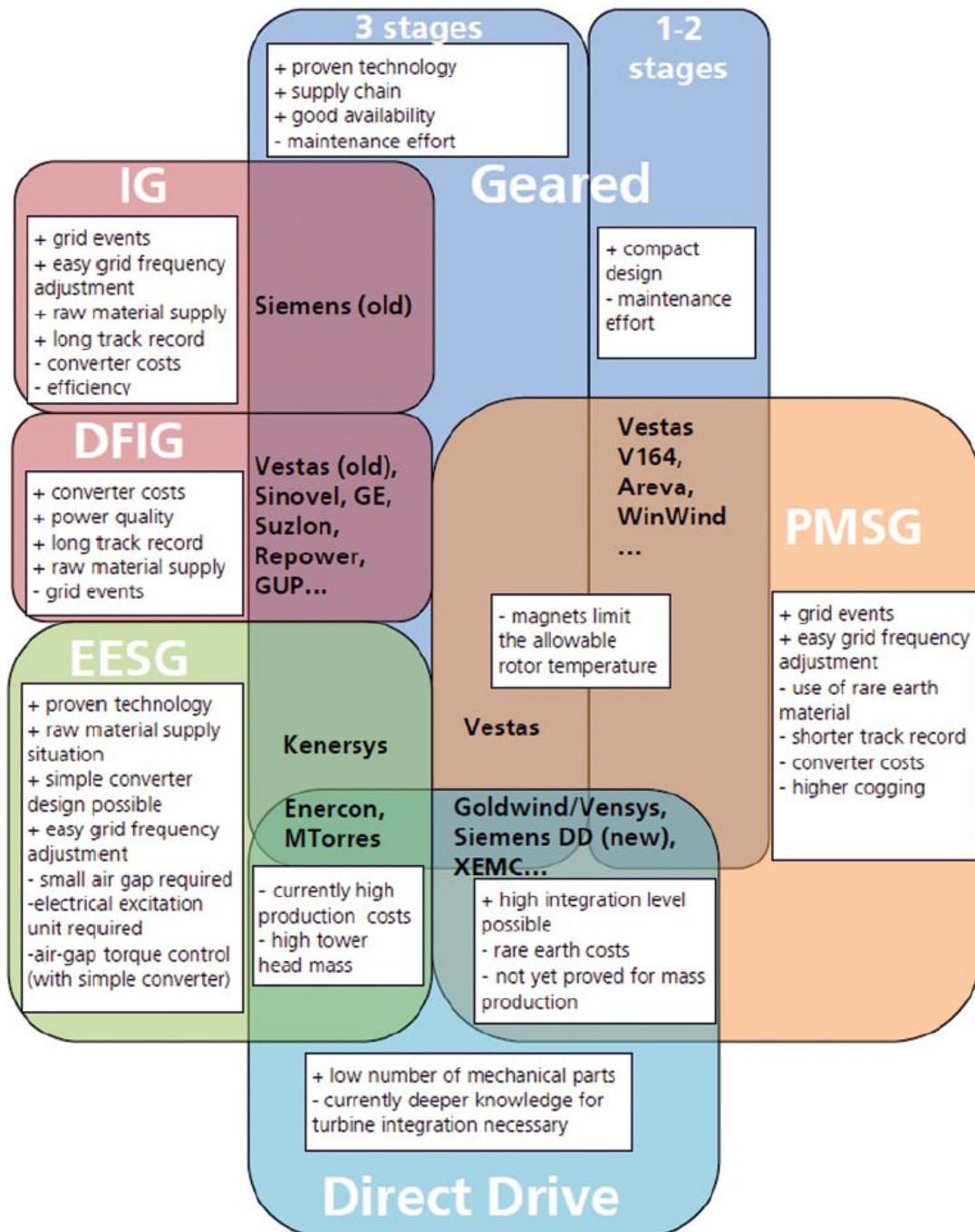
* turbine type introduced or announced, but still no prototype

Figure 1: Direct Drive turbines with more than 1.5 MW of rated power

list of abbreviations

- IG induction generator
- DFIG doubly-fed induction generator
- EESG electrical excited synchronous generator
- PMSG permanent magnet synchronous generators

- DD direct drive
- PM permanent magnet
- HTS high-temperature superconductor



(+ marks "drivers", - marks "constrains")

Χερσαίες εφαρμογές:

Η χερσαία εφαρμογή αιολικής ενέργειας μπορεί να θεωρηθεί ως μία σχετικά ώριμη επιχείρηση. Το κόστος- ευαισθησία των χερσαίων ανεμογεννητριών θα αυξάνεται συνεχώς. Στο εγγύς μέλλον, ο μέσος όρος του μεγέθους των ανεμογεννητριών θα πρέπει να περιορίζεται σε περίπου 3MW.

Η κυρίαρχη αντίληψη για τις χερσαίες ανεμογεννήτριες στο παρελθόν ήταν οι επαγωγικές γεννήτριες διπλής τροφοδότησης (DFIG). Υπάρχουν βέβαια κάποια πλεονεκτήματα των σύγχρονων μηχανών (PMSG) που δεν πρέπει να παραμεληθούν. Το κύριο πλεονέκτημα είναι η ελαφρώς μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα της γεννήτριας και καλύτερη συμβατότητα με το δίκτυο.

Προφανώς οι DD ανεμογεννήτριες έχουν μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα στο μηχανικό σύστημα μετάδοσης της κίνησης, καθώς και στο 2- 3% υψηλότερη απόδοση της γεννήτριας. Όμως το κόστος επένδυσης για τα συστήματα PMSG και DD είναι σαφώς μεγαλύτερο από το DFIG σύστημα. Ακόμα και αν τα DD και PMSG γίνουν φθηνότερα στο μέλλον λόγω αύξησης της παραγωγής και ενός υψηλότερου επιπέδου αυτοματοποίησης, τα αποτελέσματα αυτά πιθανώς δεν θα αντισταθμίζουν το πλεονέκτημα κόστους των συστημάτων DFIG.

Υπεράκτιες εφαρμογές:

Οι απαιτήσεις για τις υπεράκτιες εφαρμογές διαφέρουν από τις απαιτήσεις στις χερσαίες ανεμογεννήτριες και αυτό οφείλεται στην διαφορά κόστους. Οι δαπάνες για επισκευή και συντήρηση στην θάλασσα είναι σημαντικά υψηλότερη απ' ό,τι στην ξηρά. Βλάβες μπορούν να οδηγήσουν σε απώλειες παράγωγής. Κατά συνέπεια η υψηλή αξιοπιστία μιας ανεμογεννήτριας και η εξελιγμένες εφαρμογές είναι αναπόφευκτες. Λόγο αυτού του γεγονότος, οι σύγχρονες μηχανές με απευθείας συνδεση (DD) και με μόνιμους μαγνήτες (PMSG) φαίνεται να έχουν τουλάχιστον ένα πλεονέκτημα αλλά εξακολουθούν να κατέχουν ένα μικρό κομμάτι στις εφαρμογές. Η βλάβη του κιβώτιου ταχυτήτων φαίνεται να είναι ένα θέμα αξιοπιστίας στις υπεράκτιες εφαρμογές.

Πρόσφατα ανακοινώθηκαν υπεράκτιες ανεμογεννήτριες, για παράδειγμα από την Siemens, XEMC Darwind, Nordex, με σύγχρονες γεννήτριες με απευθείας σύνδεση με μόνιμους μαγνήτες (DD PMSG). Ορισμένοι όμως άλλοι όπως Sinorel, Repower και Bard προσανατολίζουν σε επαγωγική γεννήτρια DFIG. Παρ' όλα αυτά η σημερινή τάση για DD PMSG υπεράκτιες ανεμογεννήτριες γίνεται εμφανής.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. **Μαρία Γ. Ιωαννίδου**, «Συστήματα Ελέγχου Ηλεκτρικών Μηχανών», ΕΜΠ, Αθήνα 2003
2. **Μιχάλης Π. Παπαδόπουλος**, ‘Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας’, ΕΜΠ, Αθήνα 1997
3. **Ιωάννης Α. Τεγόπουλος**, ‘Ηλεκτρικές Μηχανές Τόμος Β’, Εκδόσεις Συμμετρία 1991
4. **Στέφανος Ν. Μανίας**, ‘Ηλεκτρονικά Ισχύος’, Εκδόσεις Συμμετρία 2000
5. **Σ. Παπαθανασίου**: « Συμβολή στην ανάλυση ανεμογεννητριών μεταβλητών στροφών με ασύγχρονη γεννήτρια για την επιλογή του ηλεκτρικού σχήματος», Διδακτορική διατριβή 1997
6. **Ν. Δ. Χατζηαργυρίου, Σ.Α Παπαθανασίου**, «Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας», Αθήνα 2005
7. **Γ. Μπεργελές**, «Ανεμοκινητήρες», Εκδόσεις Συμμετρία Αθήνα 1990
8. **Κ. Βουρνάς, Γ. Κονταξής**, «Εισαγωγή στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας», Αθήνα 1997
9. **Χ.Γ Κουτρούλης**, «Ηλεκτρική προστασία ανεμογεννητριών»
10. **Ξυπτεράς Γ.**, «Ηλεκτρικές μηχανές, μηχανές συνεχούς ρεύματος και ασύγχρονες μηχανές», Τόμος Ι’, Εκδόσεις ΖΗΤΗ 1999
11. **Ξ. Κουτίβα**, «Έλεγχος διασύνδεσης ΕΡ/ΣΡ/ΕΡ με μετατροπείς πηγής τάσης, με σκοπό την βελτιωμένη απόκριση αιολικού πάρκου που τροφοδοτεί ασθενές σήμα», Διατριβή, 2007
12. **Γιάννη Δ. Μάργαρη**, « Μοντελοποίηση ανεμογεννητριών για τη μελέτη δυναμικών φαινομένων σε συνθήκες αυξημένης αιολικής διεύθυνσης» Διδακτορική διατριβή, 2011
13. **Stephen J. Chapman**, ‘Ηλεκτρικές Μηχανές DC-AC’, Εκδόσεις Τζιόλα 2003
14. **Hans Rostoen, Tore Undeland, Terje Gjengedal**, ‘Doubly fed induction generator in wind turbine’
15. **F. Poitiers, M. Machmoum, R. Le Doeuff and M.E. Zaim**. «Control of a doubly-fed induction generator for wind energy conversion systems. A. Petersson, PhD. “Analysis, Modelling and Control of Doubly-Fed Induction Generators for Wind Turbines”, Division of Electric Power Engineering, Chalmers University of Technology», Sweden 2005.
16. **Gary L. Johnson**, «Wind energy systems. Electronic edition». October 2006
17. **A.D. Hansen and L. Hansen**, «Wind Turbine Concept Market Penetration over 10 Years (1995-2004) », 2007
18. **Tony Burton, David Sharpe, Nick Jenkins, Ervin Bossanyi**, “Wind Energy Handbook”, John Wiley & Sons Ltd, 2001.
19. **S. Heier**, «Grid integration of wind energy conversion systems», ISBN: 0-471-97143, 1998
20. **A.K. Wallace and J.A. Oliver**, «Variable –Speed Generation Controlled by Passive Elements», International Conference in Electric Machines, Turkey, 1998
21. **Theodore Wildi**, «ELECTRICAL MACHINES, DRIVES, AND POWER SYSTEMS», 6th Edition

22. **F.Poitiers , M.Machmoum , R. Le Doeuff and M.E.Zaim** , «Control of a doubly-fed induction generator for wind energy conversion systems», GE44-LARGE , Ecole Polytechnique de l'Universite de Nantes , Saint Nazaire , France
23. Wind energy in Europe. European Wind Energy Association. Available at <http://www.ewea.org>.
24. **P. Kundur**, «*Power System Stability and Control*», McGraw Hill, 1994.
25. **D r. - I n g J a n W e n s k e**, «Special Report Direct Drives and drive-train development trends»
26. **Daniel McGahn –Senior Vice President**, «DIRECT DRIVE GENERATIONS High Temperature Superconductor Based Machines
27. Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΚΑΠΕ), www.cres.gr
28. ENERCON «DIALOGUE ENERGY FOR THE WORD».
29. ΦΥΛΛΑΔΙΟ ENERCON «WIND BLAD» ΕΚΔΟΣΕΙΣ 01-06/2001.
30. ΦΥΛΛΑΔΙΟ ENERCON «INSTALLATION ABROAD».