



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

**ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ**

**ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΚΑΙ  
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ**

**ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΙΟΛΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ  
ΜΕ ΑΣΥΓΧΡΟΝΗ ΜΗΧΑΝΗ ΔΙΠΛΗΣ ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑΣ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**SAMAN SALARPOUR**

**Επιβλέπουσα : Μαρία Γ. Ιωαννίδου, Καθηγήτρια ΕΜΠ**

Αθήνα, Φεβρουάριος 2012



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

**ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ**

**ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΚΑΙ  
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ**

**Ανάλυση Αιολικών Συστημάτων  
Με Ασύγχρονη Μηχανή Διπλής Τροφοδοσίας**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**SAMAN SALARPOUR**

**Επιβλέπουσα : Μαρία Γ. Ιωαννίδου, Καθηγήτρια ΕΜΠ**

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την. <sup>η</sup> Ιανουαρίου 2012.

Μαρία Ιωαννίδου    Νικόλαος Θεόδωρου    Παναγιώτης Τσαραμπάρης  
Καθηγήτρια ΕΜΠ    Καθηγητής ΕΜΠ    Λέκτορας ΕΜΠ

Αθήνα, Φεβρουάριος 2012

.....

SAMAN SALARPOUR

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

Copyright © SAMAN SALARPOUR Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται την ανάλυση και τον έλεγχο της ασύγχρονης γεννήτριας και της διπλά τροφοδοτούμενης ασύγχρονης μηχανής (DFIG) που χρησιμοποιείται σε αιολικά συστήματα. Τα πρώτα κεφάλαια, αναφέρονται κάποια στοιχεία απαραίτητα για την κατανόηση του αντικειμένου και των προβλημάτων, και ακολουθεί η ενασχόληση με την ασύγχρονη(επαγωγική) γεννήτρια διπλής τροφοδοσίας. Αφού αναλυθεί η μηχανή, εξάγονται οι εξισώσεις λειτουργίας αυτής και του μετατροπέα και τέλος εφαρμόζονται οι απαραίτητοι έλεγχοι για την επίτευξη της επιθυμητής συμπεριφοράς της μηχανής σε διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας.

Σε αιολικά συστήματα με τέτοιου τύπου μηχανής θα γίνει έλεγχος ισχύος. Για να γίνει αυτό, αρχικά παράγεται ένα πρότυπο της επαγωγικής μηχανής διπλής τροφοδοσίας (DFIG) σε σύστημα δύο αξόνων (d-q). Στην συνέχεια περιγράφεται η διαδικασία σύνδεσης του συστήματος με το δίκτυο. Ακολουθεί ο έλεγχος της ενεργού και άεργου ισχύος. Για να επιτευχθεί ο έλεγχος της ενεργού και της άεργου ισχύος του στάτη η οποία ανταλλάσσεται ανάμεσα στην DFIG και το δίκτυο, παρουσιάζεται μια μέθοδος διανυσματικού ελέγχου.

## ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ

Αιολική ενέργεια, Ανεμογεννήτρια μεταβλητών στροφών, Γεννήτρια επαγωγής διπλής τροφοδότησης, Ελεγκτής γωνίας βήματος πτερυγίων, Μετατροπέας, Ηλεκτρονικά ισχύος.

## **ABSTRACT**

The present work starts with an introduction to the renewable energy sources (RES). After that it shows the analysis and the control of the doubly – fed induction generator that is used in wind turbines. The first chapters, are reported certain essential elements for the comprehension of object and its problems. After the presentation of the generator and its parts, the mathematical model and the operational equations give further orientation. Power control will be applied on this type of wind turbine. This can be achieved using the basic model of the generator and the d-q axis. Grid connection will be analyzed too. The power control and power flow between the generator and the grid have chosen to be studied.

## **KEY WORDS**

Wind energy, Variable speed wind turbine, Doubly fed induction generator, Pitch control, converter, electronic force.

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Θα ήθελα να εκφράσω την ειλικρινή ευγνωμοσύνη μου στην επιβλέπουσα καθηγήτριά μου Μ. Γ. Ιωαννίδου, καθηγήτρια της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών Ε.Μ.Π., για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε με την ανάθεση αυτής της διπλωματικής εργασίας, καθώς και για την προσπάθεια που καταβάλει να μεταδώσει τις γνώσεις και την νοοτροπία του μηχανικού προς τους φοιτητές της.

Τέλος, οφείλω να ευχαριστήσω την οικογένειά μου που με στήριξε και με στηρίζει όλα αυτά τα χρόνια και που χωρίς την πολύτιμη παρουσία της δε θα είχα καταφέρει τίποτα από όσα έχω μέχρι σήμερα επιτύχει.



## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Περίληψη	3
Λέξεις κλειδιά	3
Abstract	4
Key words	4
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	10
1.1.Αιολική ενέργεια	10
1.2.Μέρη ανεμογεννήτριας	15
1.3.Κατηγορίες της ανεμογεννήτριας	16
1.4.Κριτήρια για την κατάλληλη θέση εγκατάστασης ενός αιολικού πάρκου	17
1.5.Ένταξη του περιβαλλοντικού κόστους στο κόστος παραγωγής ηλεκτρισμού	19
1.6.Περιβαλλοντικές επιδράσεις σε επιμέρους τομείς	19
2. ΑΣΥΓΧΡΟΝΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ	25
2.1.Εισαγωγή	25
2.2.Ιστορική αναδρομή...	25
2.3.Κατασκευαστικά στοιχεία	26
2.3.1.Στάτης	27
2.3.2.Δρομέας	28
2.4.Μόνιμη κατάσταση λειτουργίας	29
2.4.1.Ταχύτητα της επαγωγικής μηχανής	29
2.4.2.Στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο	30
2.5.Εξαγωγή ισοδύναμου κυκλώματος	34



2.5.1. Ανάλυση ισοδύναμου κυκλώματος	38
2.6. Χαρακτηριστική ροπής – στροφών	42
3. ΑΙΟΛΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ	46
3.1. Μέθοδοι λειτουργίας ανεμογεννητριών	46
3.1.1. Σταθερής ταχύτητας ανεμογεννήτριες	46
3.1.2. Ανεμογεννήτριες μεταβλητής ταχύτητας	47
3.1.3 Ανεμογεννήτριες μεταβλητής ταχύτητας με DFIG	52
3.1.4. Pitch control (έλεγχος μεταβολής της κλίσης των πτερυγίων)	56
3.2. Είδη αιολικών πάρκων	60
3.2.1. Χερσαία αιολικά πάρκα (on shore)	60
3.2.2. Αιολικά πάρκα κοντά στην ακτή	60
3.2.3. Παράκτια αιολικά πάρκα (off shore)	61
3.3. Λειτουργία αιολικών πάρκων	62
4. ΑΣΥΓΧΡΟΝΗ (ΕΠΑΓΩΓΙΚΗ) Α/Γ ΔΙΠΛΗΣ ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑΣ (DFIG)	65
4.1. Επαγωγική γεννήτρια διπλής τροφοδοσίας (DFIG)	65
4.1.1. Ισοδύναμο κύκλωμα DFIG	65
4.1.2. Μετατροπέας ισχύος	68
4.1.3. Μείωση απωλειών μαγνήτισης	69
4.2. Πλεονεκτήματα – μειονεκτήματα της DFIG	70
4.3. Διανυσματικός έλεγχος – δυναμικές εξισώσεις	71
4.3.1 Η αναπαράσταση των δύο αξόνων (M/Σ PARK)	73
4.3.2 Δυναμικό μοντέλο σε στατό πλαίσιο αναφοράς	76
4.3.3 Διανυσματικό μοντέλο σε σύγχρονα στρεφόμενο πλαίσιο αναφοράς	77

4.3.4. Η ισχύς στο πλαίσιο d-q	79
4.3.5. Τύποι διανυσματικού ελέγχου	80
4.4. Μοντέλα χώρου κατάστασης – έλεγχος συστήματος	81
4.4.1 Διανυσματική περιγραφή της DFIG στο χώρο κατάστασης μοντέλα)	81
4.4.2 Φίλτρο AC ( $R_f L_f$ ) και DC πυκνωτής : περιγραφή στο d-q	86
4.4.3. Έλεγχος της DFIG	89
4.4.3.1 Έλεγχος από την πλευρά του δρομέα (RSC)	89
4.4.3.2 Έλεγχος από την πλευρά του δικτύου (GSC)	92
4.3.3 Ελεγκτής PI	95
4.4.4 Γραμμή μεταφοράς	97
Συμπεράσματα	101
Βιβλιογραφία	102

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

### 1.1 ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

Η εκμετάλλευση της Αιολικής Ενέργειας γίνεται σχεδόν αποκλειστικά με μηχανές που μετατρέπουν την ενέργεια του ανέμου σε ηλεκτρική και ονομάζονται ανεμογεννήτριες. Κατατάσσονται σε δύο βασικές κατηγορίες :

1. Τις ανεμογεννήτριες με οριζόντιο άξονα
2. Τις ανεμογεννήτριες με κατακόρυφο άξονα



Αιολικό πάρκο ονομάζεται η συστοιχία πολλών ανεμογεννητριών και μπορεί να λειτουργήσει σαν μια μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

Η συστηματική εκμετάλλευση του πολύ αξιόλογου αιολικού δυναμικού της Ελλάδας θα συμβάλει:

- Στην αύξηση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με ταυτόχρονη εξοικονόμηση σημαντικών συμβατικών καυσίμων, που συνεπάγεται συναλλαγματικά οφέλη.
- Σε σημαντικό περιορισμό της ρύπανσης του περιβάλλοντος, αφού έχει υπολογιστεί ότι η παραγωγή ηλεκτρισμού μιας μόνο ανεμογεννήτριας ισχύος 550 KW σε ένα χρόνο, υποκαθιστά την ενέργεια που παράγεται από την καύση 2700 βαρελιών πετρελαίου δηλαδή αποτροπή της

εκπομπής 735 τόνων διοξειδίου του άνθρακα ετησίως καθώς και δύο τόνων άλλων ρύπων.

- Στη δημιουργία πολλών νέων θέσεων εργασίας, αφού εκτιμάται ότι για κάθε νέο Mw Αιολικής ενέργειας δημιουργούνται 14 νέες θέσεις εργασίας.

Η κινητική ενέργεια που οφείλεται στη μετακίνηση μαζών αέρα της ατμόσφαιρας, είναι γνωστή σαν αιολική ενέργεια. Η αιολική ενέργεια αποτελεί μια έμμεση μορφή της ηλιακής ενέργειας, γι' αυτό κατατάσσεται στην κατηγορία των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Η εκμετάλλευση του ανέμου αποτελεί τον αρχαιότερο τρόπο άντλησης ενέργειας από το περιβάλλον. Η πρώτη χρήση αιολικής ενέργειας έγινε στη ναυσιπλοΐα, ενώ οι πρώτοι ανεμόμυλοι χρησιμοποιήθηκαν για άλεσμα δημητριακών και άντληση νερού. Η πρώτη εμφάνιση των ανεμόμυλων(κατακόρυφου άξονα) καταγράφεται τον 6<sup>ο</sup> έως τον 9<sup>ο</sup> αιώνα μ.Χ. στην Περσία, ενώ η πρώτη γραπτή αναφορά γίνεται στην Κίνα το 13<sup>ο</sup> αιώνα μ.Χ. Στην Ευρώπη αναπτύχθηκαν διάφορα είδη ανεμόμυλων(οριζοντίου άξονα) από το 13<sup>ο</sup> αιώνα και πιθανόν οι νερόμυλοι να αποτέλεσαν πρότυπο για την κατασκευή τους. Το 17<sup>ο</sup> αιώνα η «τεχνολογία» μεταφέρεται στην Αμερική όπου χρησιμοποιούνται για την άντληση νερού οι ανεμόμυλοι. Το 1888 στο Cleveland του Ohio έχουμε την κατασκευή του πρώτου ανεμόμυλου για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Σήμερα η Δανία, χώρα πλούσια σε αιολικό δυναμικό, έχει τα πρωτεία στην κατασκευή αλλά και στη χρήση ανεμογεννητριών. Και άλλες χώρες όμως έχουν αρχίσει και αναπτύσσουν ραγδαία την τεχνολογία των ανεμογεννητριών. Η χρήση των ανεμόμυλων στην Ελλάδα, χρονολογείται από το 13<sup>ο</sup> αιώνα. Το 1960 υπήρχαν 10000 ανεμόμυλοι στο οροπέδιο του Λασιθίου, 2500 στην υπόλοιπη Κρήτη και 600 στη Ρόδο.



**Παλαιοί ανεμόμυλοι στην Χίο (Ελλάδα)**

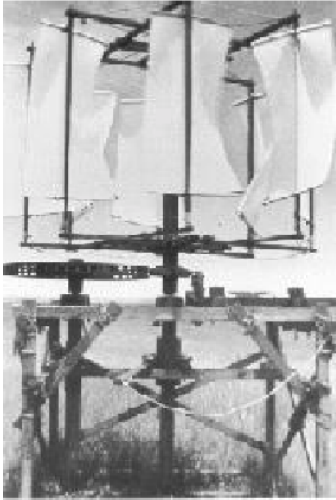


**Ένας κατεστραμμένος ανεμόμυλος και μία σύγχρονη ανεμογεννήτρια. Η συνέχεια της ιστορίας του ανθρώπου και οι προσπάθειες εκμετάλλευσης της αιολικής ενέργειας.**

Η ανομοιόμορφη ακτινοβολία της ηλιακής ενέργειας στην επιφάνεια της Γης, προκαλεί ανομοιόμορφη θέρμανση της ατμόσφαιρας, καθώς και των γήινων και υδάτινων μαζών, γεγονός που οφείλεται κυρίως σε δύο λόγους. Καταρχήν, στο ότι η Γη χωρίζεται σε δύο πλευρές, στην πλευρά που βλέπει ο ήλιος και στην πλευρά που δεν βλέπει ο ήλιος, καθώς και στο ότι η ηλιακή ακτινοβολία είναι μεγαλύτερη κοντά στον ισημερινό παρά στους πόλους.

Τα παραπάνω έχουν ως αποτέλεσμα τη δημιουργία θερμοκρασιακών διαφορών καθώς και διαφορών στην πίεση, με συνέπεια, οι αέρινες μάζες, που περιέρχονται μεταξύ της ζώνης του ισημερινού και των πόλων αλλά και μεταξύ της πλευράς που βλέπει ο ήλιος και της πλευράς που δεν βλέπει ο ήλιος, να τίθενται σε κίνηση. Στην κίνηση των αέρινων μαζών συμβάλλει όμως και η περιστροφή της Γης, καθώς και η κλίση του άξονα περιστροφής της Γης στο επίπεδο, ( το οποίο δημιουργείται από την περιστροφική κίνηση της Γης γύρω από το ήλιο) η οποία οδηγεί σε εποχιακά ρεύματα αέρος.

Αντίγραφο του πρώτου  
Περσικού μύλου



Μεσογειακός



Αμερικάνικος  
(18<sup>ος</sup> αιώνας)



Δανικός



Ολλανδικός



Αγγλικός



Στη συνέχεια παρατηρείται η εμφάνιση πεδίων υψηλής και χαμηλής πίεσης. Επειδή η Γη γυρίζει, οι μάζες αέρος που ρέουν από το υψηλής πίεσης πεδίο στο χαμηλής πίεσης πεδίο, εκτίθενται στην επιρροή της βαρυτικής δύναμης που προέρχεται από την περιστροφή της Γης. Για το λόγο αυτό δεν ρέουν κατευθείαν στον προορισμό τους. Κυρίως δημιουργούνται στρόβιλοι στο βόρειο και νότιο ημισφαίριο, με διαφορετική φορά περιστροφής. Στο βόρειο ημισφαίριο οι μάζες αέρος εισρέουν, ενάντια στη φορά του ρολογιού, σε ένα πεδίο χαμηλής πίεσης, ενώ εκρέουν, με τη φορά του ρολογιού, από ένα πεδίο υψηλής πίεσης. Στο νότιο ημισφαίριο συμβαίνει ακριβώς το αντίθετο.

Σ' αυτές τις παγκόσμιες διαταραχές προστίθενται και τοπικές επιρροές, οι οποίες αναπτύσσουν τους ανέμους. Εξαιτίας της διαφοράς που υπάρχει μεταξύ του νερού και του εδάφους σχετικά με την περιεκτικότητά τους σε θερμότητα, το έδαφος θερμαίνεται πιο γρήγορα απ' το νερό και επίσης, λόγω των παραγόμενων διαφορών πίεσης, φυσάει ένας άνεμος απ' το νερό προς το έδαφος, κατά τη διάρκεια της μέρας. Κατά τη διάρκεια της νύχτας, το έδαφος ψύχεται πιο γρήγορα απ' ότι το νερό και το φαινόμενο αντιστρέφεται. Επιπλέον ο άνεμος μπορεί να αναπτυχθεί πάνω απ' το νερό ανενόχλητα, έτσι ώστε σε πολλές παραθαλάσσιες περιοχές να έχουμε τακτικά πολύ ισχυρούς ανέμους. Συχνά συμβαίνει επίσης να δημιουργούνται ισχυρά αέρια ρεύματα λόγω ανομοιομορφίας του εδάφους(κτίρια, βουνά κ. λ. π).

Η δύναμη του ανέμου στα κατώτερα στρώματα του αέρα εξαρτάται από τα υπάρχοντα τοπικά στοιχεία εκεί. Το νερό, το λιβάδι, το δάσος ή η κάλυψη με οικοδομές και καλλιέργειες, περιγράφουν την τριβή του αέρα στην επιφάνεια της Γης. Αυτό το φαινόμενο οδηγεί στη μείωση της ταχύτητας του ανέμου και αυτό εξαρτώμενο πάντα απ' το ύψος πάνω από το έδαφος.

Σε ειδικές περιπτώσεις όπου ο άνεμος είναι πολύ ισχυρός, έχουμε την εμφάνιση ανεμοθυελλών, οι οποίες στην ακραία τους μορφή οδηγούν σε καταστροφές της φύσης καθώς και σε καταστροφές ανθρωπίνων κατασκευών. Συχνά αυτές οι καταστροφές αφορούν και τον άνθρωπο είτε έμμεσα είτε άμεσα. Κάνουν την εμφάνισή τους σε συγκεκριμένες περιοχές της Γης εποχιακά, σε συνδυασμό πάντα με άλλους καιρικούς παράγοντες. Σε μεμονωμένες περιπτώσεις μπορούν να εμφανιστούν και σε άλλες περιοχές.

Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται μια θεαματική άνοδος της εγκατεστημένης ηλεκτρικής ισχύος από ανεμογεννήτριες στη Ελλάδα. Όπως ήταν αναμενόμενο όμως, ο μεγάλος ρυθμός ανάπτυξης συνοδεύτηκε από αντιδράσεις και ανησυχίες της κοινωνίας για τις πιθανές επιπτώσεις των ανεμογεννητριών στο περιβάλλον. Εκφράστηκαν πολλοί φόβοι και ενστάσεις, κάποιες υπερβολικές και κάποιες άλλες άξιες προσοχής, σχετικά με την εγκατάσταση ανεμογεννητριών ή αιολικών πάρκων. Για να μην υπάρχουν λοιπόν τέτοιου είδους προβλήματα, θα πρέπει να φροντίσει η κοινωνία για την αντικειμενική πληροφόρηση των επιπτώσεων αλλά και των οφελών της αιολικής ενέργειας. Η αλλαγή του κλίματος αποτελεί μια από τις μεγαλύτερες απειλές της ανθρωπότητας. Το «φαινόμενο του θερμοκηπίου» οφείλεται και στην παραγωγή καυσίμων από τα συμβατικά καύσιμα. Η ανάπτυξη των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και ειδικά της αιολικής, θα μπορούσε να λύσει μακροπρόθεσμα αυτό το πρόβλημα.

Η εκμετάλλευση του πολύ αξιόλογου αιολικού δυναμικού έχει πάρα πολλά πλεονεκτήματα. Αρχικά, ο άνεμος είναι μια ανεξάντλητη πηγή ενέργειας η οποία μάλιστα παρέχεται και δωρεάν. Δεν επιβαρύνει το περιβάλλον με επικίνδυνα αέρια, μονοξείδιο του άνθρακα, διοξείδιο του θείου, καρκινογόνα μικροσωματίδια και άλλες βλαβερές ουσίες, όπως συμβαίνει με τους σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας οι οποίοι λειτουργούν με συμβατικά καύσιμα. Επίσης η αιολική ενέργεια είναι μια ενεργειακή επιλογή φιλική προς το περιβάλλον γιατί προστατεύει τη Γη, καθώς κάθε μία κιλοβατώρα που παράγεται από τον άνεμο αντικαθιστά μία κιλοβατώρα που παράγεται από συμβατικούς σταθμούς και ρυπαίνει την ατμόσφαιρα με αέρια του θερμοκηπίου. Και τέλος ενισχύει την ενεργειακή ανεξαρτησία ενώ ταυτόχρονα βοηθά στην αποκέντρωση του ενεργειακού συστήματος μειώνοντας τις απώλειες μεταφοράς ενέργειας. Το μόνο μειονέκτημα του ανέμου είναι ότι είναι μεταβλητός και αυτό προκαλεί πρόβλημα στην αξιοπιστία της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας. Για το λόγο αυτό απαιτείται πολλές φορές ο συνδυασμός της αιολικής ενέργειας με άλλες πηγές ενέργειας.

## **1.2 ΜΕΡΗ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ**

Στη σημερινή εποχή η εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας γίνεται σχεδόν αποκλειστικά με μηχανές οι οποίες μετατρέπουν την ενέργεια του ανέμου σε ηλεκτρική και ονομάζονται ανεμογεννήτριες.

Μια ανεμογεννήτρια αποτελείται από τα παρακάτω μέρη:

- Ο πύργος, ο οποίος αποτελείται από 2 ή 3 συνδεδεμένα τμήματα, έχει κυλινδρική μορφή και κατασκευάζεται από χάλυβα. Μοιάζει με τους πύργους που στηρίζουν τα φώτα σε εθνικούς δρόμους ή σε μεγάλα γήπεδα.
- Ο θάλαμος, ο οποίος περιέχει μέσα τα μηχανικά υποσυστήματα, δηλαδή τον κύριο άξονα, το σύστημα πέδησης, το κιβώτιο ταχυτήτων και την ηλεκτρογεννήτρια.
- Τα ηλεκτρονικά συστήματα ελέγχου ασφαλούς λειτουργίας είναι υπεύθυνα για την ασφαλή και εύρυθμη λειτουργία των ανεμογεννητριών σε όλες τις συνθήκες και αποτελούνται συνήθως από ένα ή περισσότερα υποσυστήματα μικροελεγκτών.
- Τα πτερύγια τα οποία είναι κατασκευασμένα από σύνθετα υλικά και σχεδιασμένα με τέτοιο τρόπο, ώστε να αντέχουν σε καταπονήσεις μεγάλου μεγέθους.



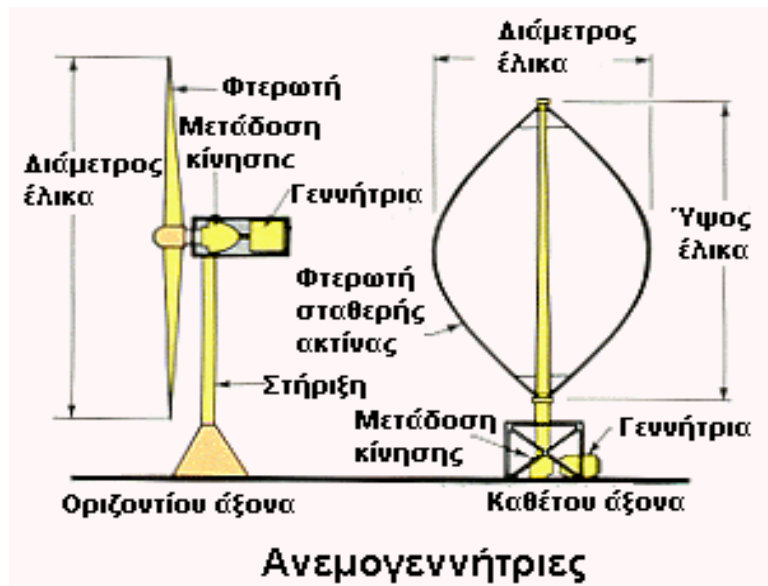


**Αιολικό πάρκο (Α/Π)**

Θα μπορούσε να συμπεριληφθεί στα εξαρτήματα λειτουργίας της ανεμογεννήτριας και ο μετασχηματιστής, ο οποίος είναι εγκατεστημένος δίπλα στην ανεμογεννήτρια και μοιάζει με τους μετασχηματιστές που είναι εγκατεστημένοι πάνω στους στύλους της ΔΕΗ. Αυτός ο μετασχηματιστής μετατρέπει την χαμηλή τάση της ανεμογεννήτριας σε μέση τάση προκειμένου να μεταφερθεί η ηλεκτρική ενέργεια από το δίκτυο της ΔΕΗ.

### **1.3 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΤΗΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ**

Οι ανεμογεννήτριες κατατάσσονται σε δύο βασικές κατηγορίες. Στις ανεμογεννήτριες με οριζόντιο άξονα και σε αυτές που έχουν κατακόρυφο άξονα. Οι οριζοντίου άξονα είναι εκείνες των οποίων ο δρομέας είναι τύπου έλικας και ο άξονάς τους μπορεί να περιστρέφεται συνεχώς παράλληλα προς τον άνεμο. Οι κατακόρυφου άξονα είναι εκείνες των οποίων ο άξονας παραμένει σταθερός. Οι κατακόρυφου άξονα έχουν τα πλεονεκτήματα ότι δεν χρειάζονται σύστημα προσανατολισμού και η ηλεκτρική τους γεννήτρια είναι στο έδαφος. Αντίθετα έχουν τα μειονεκτήματα ότι εκμεταλλεύονται μικρότερες ταχύτητες ανέμων αφού είναι κοντά στο έδαφος, έχουν μικρότερο συντελεστή ισχύος και η στερέωσή τους στο έδαφος απαιτεί εγκαταστάσεις που καταλαμβάνουν μεγάλο εμβαδόν.



#### 1.4 ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΑΤΑΛΛΗΛΗ ΘΕΣΗ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΕΝΟΣ ΑΙΟΛΙΚΟΥ ΠΑΡΚΟΥ

Το υψηλό αιολικό δυναμικό της εξεταζόμενης περιοχής δεν αποτελεί το μόνο κριτήριο για την επιλογή της. Άλλοι παράμετροι που θα πρέπει να συμπεριληφθούν στην εξέταση είναι:

1. Τα γειτονικά δίκτυα με τη ΔΕΗ ανάλογης ισχύος και η ύπαρξη δρόμων πρόσβασης.
2. Αποστάσεις από τις κοντινότερες κοινότητες.
3. Το αρχαιολογικό ενδιαφέρον για την εξεταζόμενη περιοχή.
4. Η θέση της ανεμογεννήτριας σε σχέση με τους αναμεταδότες της ΕΡΤ και του ΟΤΕ.
5. Αποστάσεις από τα αεροδρόμια.
6. Ειδικά προγράμματα περιβαλλοντικής προστασίας (NATURA, RAMSAR, κλπ.)



**Φώτο Αιολικού Πάρκου**

Αν και οι Α/Γ και γενικότερα τα αιολικά πάρκα ανήκουν στην κατηγορία των μορφών παραγωγής ενέργειας που είναι φιλικές προς το περιβάλλον οι περιβαλλοντικές τους επιπτώσεις πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά την διαδικασία σχεδίασης τους. Την τελευταία δεκαετία προέκυψε ένας αριθμός προβλημάτων σχετικά με την αποδοχή των αιολικών πάρκων από το ευρύ κοινό. Αυτό οφείλεται κατά κύριο λόγο στην ραγδαία αύξηση του αριθμού και του μεγέθους των Α/Γ που εγκαθίστανται, σε συνδυασμό με την ολοένα και μεγαλύτερη ευαισθητοποίηση του κοινού σε περιβαλλοντικά θέματα. Σε πολλές περιπτώσεις η εγκατάσταση αιολικών πάρκων συνάντησε δυσκολίες με τους περιοίκους και συνεπώς με τις τοπικές αρχές, πράγμα που οδήγησε σε καθυστερήσεις ή ακόμα και σε ακυρώσεις των σχετικών κάθε φορά προγραμμάτων.

Σχετική έρευνα στο θέμα της αποδοχής των αιολικών πάρκων οδήγησε στο συμπέρασμα ότι αν και τα αιολικά πάρκα είναι η πλέον δημοφιλής τεχνολογία παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας σε σχέση είτε με συμβατικούς σταθμούς είτε ακόμα και με άλλες ήπιες μορφές ενέργειας, υπάρχουν σημαντικές αντιδράσεις από άτομα που μένουν σε περιοχές κοντά στις οποίες θα τοποθετηθούν τα αιολικά πάρκα, πράγμα που έχει ως αποτέλεσμα να είναι υψηλός ο χαρακτηριστικός δείκτης NIMBY (Not In My Back Yard). Έχει λοιπόν εξαχθεί ως συμπέρασμα ότι ο κύριος λόγος για την αντίδραση αυτή είναι ως επί το πλείστον η οπτική όχληση των Α/Γ, καθώς και ο θόρυβος που αυτές παράγουν και γι' αυτό το λόγο προτείνεται ο σχεδιασμός των αιολικών πάρκων με αισθητικά κριτήρια τα οποία και θα λαμβάνουν υπόψη τους όχι μόνο την αισθητική της Α/Γ αλλά και το πώς το αιολικό πάρκο συνδυάζεται

με το ανάγλυφο καθώς και τα χαρακτηριστικά της περιοχής εγκατάστασης του. Είναι επίσης σημαντικό να ενημερώνονται οι περίοικοι για την μελλοντική όψη της περιοχής τους και να εγκρίνουν την εγκατάσταση ή όχι του πάρκου στο στάδιο της σχεδίασής του.

### **1.5 ΕΝΤΑΞΗ ΤΟΥ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΟΥ ΚΟΣΤΟΥΣ ΣΤΟ ΚΟΣΤΟΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΣΜΟΥ**

Η ανάγκη αποτίμησης των πραγματικών επιπτώσεων από την παραγωγή ενέργειας στην οικονομία, την ανάπτυξη, την υγεία και το περιβάλλον εισήγαγε την έννοια του **ολικού ενεργειακού κόστους παραγωγής**, το οποίο ορίζεται ως το άθροισμα του κοινωνικού και του περιβαλλοντικού κόστους αντίστοιχα.

Το **κοινωνικό κόστος** περιλαμβάνει τις άμεσες επιδοτήσεις από την πολιτεία προς τις εταιρείες παραγωγής, καθώς και τις έμμεσες επιδοτήσεις, όπως φοροεκπτώσεις, απαλλαγές από Φ.Π.Α., εξαγωγή και απώλεια συναλλάγματος κ.τ.λ.

Το **περιβαλλοντικό κόστος** αποτιμά τις επιπτώσεις στην υγεία των πολιτών και την ποιότητα ζωής τους από την παραγωγή ενέργειας αν ληφθούν υπόψη επιπτώσεις όπως το φαινόμενο της όξινης βροχής, το "νέφος" στις πόλεις, τα ραδιενεργά απόβλητα, η ρύπανση της θάλασσας και τα πυρηνικά ατυχήματα. Το μεγαλύτερο όμως και ταυτόχρονα το ουσιαστικότερο περιβαλλοντικό κόστος είναι αυτό του "φαινομένου του θερμοκηπίου" το οποίο απειλεί να δημιουργήσει μη αναστρέψιμα φυσικά φαινόμενα στον πλανήτη και να προκαλέσει την καταστροφή του γήινου οικοσυστήματος. Από όσα αναφέρθηκαν έως εδώ τίθεται η ανάγκη εκτίμησης του ολικού κόστους παραγωγής ενέργειας, έτσι ώστε η κάθε κοινωνία να είναι σε θέση να χαράξει την ενεργειακή της πολιτική βασισμένη πάνω σε αντικειμενικά κριτήρια.

### **1.6 ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ ΣΕ ΕΠΙΜΕΡΟΥΣ ΤΟΜΕΙΣ**

Παρακάτω παρουσιάζεται η επίδραση από τις Α/Γ σε ένα σύνολο από περιβαλλοντικούς παράγοντες οι οποίοι είναι: η αισθητική επίδραση, τα επίπεδα θορύβου, η επίδραση στο οικοσύστημα, στη χρήση της γης, οι ηλεκτρομαγνητικές επιδράσεις καθώς και το περιβαλλοντικό κέρδος από τη χρήση Α/Γ.

Είναι γνωστό ότι οι κορυφογραμμές αποτελούν τον ιδανικό χώρο εγκατάστασης Α/Γ. Η θέση αυτή όμως καθιστά τις Α/Γ ορατές από μεγάλες

αποστάσεις. Εδώ υπεισέρχεται ο παράγοντας της αισθητικής επίδρασης μιας και η εικόνα που παρουσιάζουν αυτές θεωρείται από πολλούς αρμονική, από άλλους αδιάφορη και από μια μικρή μερίδα ανθρώπων ενοχλητική. Στην Ολλανδία οι σχετικές μελέτες και δημοσιοποιήσεις κατέδειξαν ότι η πλειοψηφία των κατοίκων προτιμά μικρό αριθμό Α/Γ σε κάθε περιοχή με ονομαστική ισχύ που δεν ξεπερνά το 1 MW. Οι τριπτέρυγες Α/Γ δίδουν ένα αισθητικά αρμονικότερο αποτέλεσμα στον ορίζοντα και η περιστροφή των πτερυγίων γίνεται ευκολότερα αποδεκτή.

Ο χρωματισμός των πύργων στήριξης και των πτερυγίων παίζει πρωτεύοντα ρόλο στην εναρμόνιση με τον περιβάλλοντα χώρο. Το λευκό χρώμα έχει επικρατήσει πλήρως έχοντας σαν εναλλακτική λύση το ανοικτό γκρι. Επίσης οι ολόσωμοι πύργοι στήριξης είναι από πλευράς αισθητικής και ασφάλειας προτιμότεροι.

Πλέον οι σύγχρονες ανεμογεννήτριες κατασκευάζονται με τέτοιο τρόπο ώστε να είναι πολύ ήσυχες και με συνεχείς βελτιώσεις τους, γίνονται όλο και περισσότερο αθόρυβες. Ο θόρυβος αντιμετωπίζεται είτε με επέμβαση στην πηγή είτε με επέμβαση στη διαδρομή του. Για παράδειγμα ο μηχανικός θόρυβος μπορεί να τον μειωθεί με εξαρχής σχεδίαση είτε τοποθετώντας στο κέλυφος της κατασκευής εσωτερική ηχομονωτική επένδυση, με επέμβαση δηλαδή στην πηγή. Ενώ με επέμβαση στη διαδρομή του, αντιμετωπίζεται με αντικραδασμικά πέλματα στήριξης και ηχομονωτικά πετάσματα. Αντίστοιχα ο αεροδυναμικός θόρυβος μπορεί να ελαττωθεί αν τα πτερύγια της ανεμογεννήτριας σχεδιαστούν με μεγάλη προσοχή.

Ο θόρυβος που προέρχεται από μια σύγχρονη ανεμογεννήτρια σε απόσταση 200 μέτρων και οποίος γίνεται αντιληπτός, είναι σε επίπεδο μικρότερος από το θόρυβο περιβάλλοντος που αντιστοιχεί σε μια μικρή επαρχιακή πόλη, οπότε δεν αποτελεί πηγή ενόχλησης. Επίσης, με βάση το νόμο, πρέπει οι ανεμογεννήτριες να εγκαθίστανται σε ελάχιστη απόσταση 500 μέτρων από τους οικισμούς, γεγονός που έχει ως αποτέλεσμα το επίπεδο του θορύβου να είναι ακόμη πιο χαμηλό και πλέον να αντιστοιχεί στο επίπεδο αυτό ενός ήσυχου καθιστικού δωματίου. Τέλος, οι ανεμογεννήτριες λειτουργούν σε ταχύτητες τέτοιες που ο φυσικός θόρυβος του ανέμου να υπερκαλύπτει τον οποιοδήποτε θόρυβο που προέρχεται από αυτές. Επομένως τα αιολικά πάρκα σε ουδεμία περίπτωση δεν προκαλούν αύξηση του θορύβου εκτός των ορίων τους και ιδιαίτερα σε κατοικημένες περιοχές και επίσης, σε καμία περίπτωση δεν εκθέτουν τους ανθρώπους σε θόρυβο τέτοιο ώστε να αποτελεί ενόχληση για αυτούς. Μια επίσκεψη σε κάποιο αιολικό πάρκο κάποια μέρα που οι ανεμογεννήτριες βρίσκονται σε κανονική λειτουργία, σίγουρα θα ήταν ένας εύκολος και

αποτελεσματικός τρόπος για να πεισθεί κανείς για το ζήτημα του θορύβου των ανεμογεννητριών.

Σε ότι αφορά τα επίπεδα θορύβου οι Α/Γ σε σύγκριση με άλλες βιομηχανικές μονάδες παραγωγής ενέργειας είναι ήσυχες κατασκευές με χαμηλά επίπεδα θορύβου. Ο θόρυβος προέρχεται από 2 πηγές. Τα πτερύγια που κατά την περιστροφή τους προκαλούν αεροδυναμικό θόρυβο και από τα μηχανικά μέρη, όπως είναι το κιβώτιο ταχυτήτων και η γεννήτρια.

Το επίπεδο θορύβου είναι ανάλογο με το μέγεθος της ονομαστικής ισχύος της Α/Γ αλλά εξαρτάται και από τη φιλοσοφία της κατασκευής. Διεθνή πρότυπα στον τομέα αυτό δεν υπάρχουν. Η Ε.Ε. έχει αναθέσει σε ομάδα εμπειρογνομόνων τη σύνταξη προδιαγραφών στα πλαίσια του κοινοτικού προγράμματος Joule II. Οι περισσότερες χώρες δέχονται επίπεδα θορύβου μετρημένα σε απόσταση 200 m από τις Α/Γ, έως 45 dB(A). Οι περισσότεροι άνθρωποι δείχνουν περισσότερη ευαισθησία σε θέματα θορύβου παρά σε οπτική επαφή. Η κοινωνική αποδοχή της αιολικής ενέργειας θα εξαρτηθεί από τα επίπεδα θορύβου. Στον πίνακα 1 φαίνονται χαρακτηριστικά επίπεδα θορύβου για διάφορα οχήματα καθώς και περιοχές.

Πηγή	dB(A)
Όρια πόνου	140
Αεριοθούμενο στα 200 μέτρα	105
Τρυπάνι (κομπρεσέρ) στα 7 μέτρα	96
Φορτηγό με ταχύτητα 50 km/h στα 100 μέτρα	65
Μεγάλο γραφείο σε ώρα εργασίας	60
Αυτοκίνητο με ταχύτητα 65 km/h στα 100 μέτρα	55
ΑΙΟΛΙΚΟ ΠΑΡΚΟ στα 350 μέτρα	35-45 35
Ήσυχο υπνοδωμάτιο	20-40
Αγροτική περιοχή την νύχτα	0
Όριο ακοής	0-130

### Χαρακτηριστικά επίπεδα θορύβου

Οι κατασκευαστές Α/Γ πρέπει να σχεδιάζουν τις μηχανές τους λαμβάνοντας

σοβαρά υπόψη το επίπεδο θορύβου. Οι Α/Γ τοποθετούνται συνήθως σε αγροτικές περιοχές όπου τα επίπεδα θορύβου κυμαίνονται από 30 έως 35 dB(A). Από μελέτες που έχουν γίνει στην Ευρώπη συμπεραίνεται ότι μια αύξηση του θορύβου έως και 10 dB(A) δεν προκαλεί παράπονα ή δυσφορία. Η τεχνολογία σήμερα μπορεί να κατασκευάσει "αθόρυβες" Α/Γ.

Ένα άλλο πιθανό πρόβλημα είναι το αν οι ανεμογεννήτριες δημιουργούν προβλήματα ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών. Αυτό αναφέρθηκε κυρίως γιατί οι ανεμογεννήτριες πολλές φορές, βρίσκονται σε θέσεις ίδιες με ήδη υπάρχοντες ραδιοφωνικούς σταθμούς ή σταθμούς τηλεόρασης και επίσης, λόγω πιθανών ηλεκτρομαγνητικών εκπομπών που αναπτύσσουν οι ίδιες.

Είναι γνωστό ότι, τυχόν παρεμβολές εμποδίων που μπορεί να υπάρχουν μεταξύ πομπού και δέκτη, είναι δυνατόν να επηρεάζουν τη διάδοση των εκπομπών στις συχνότητες του ραδιοφώνου ή της τηλεόρασης. Τέτοιου είδους πρόβλημα μπορούν να προκαλέσουν τα πτερύγια των ανεμογεννητριών τα οποία λόγω της κίνησής τους μπορεί να προκαλέσουν αυξομείωση σήματος λόγω αντανάκλασεων. Οι πρώτες ανεμογεννήτριες της αγοράς οι οποίες είχαν μεταλλικά πτερύγια δημιουργούσαν πολύ έντονα προβλήματα αυτής της κατηγορίας. Τώρα πλέον οι ανεμογεννήτριες σύγχρονων προδιαγραφών κατασκευάζονται με πτερύγια από συνθετικά υλικά, και έτσι επηρεάζουν ελάχιστα τη διάδοση εκπομπών στις συχνότητες ραδιοφώνου και τηλεόρασης. Σύμφωνα με την ελληνική νομοθεσία, η άδεια για την εγκατάσταση ενός αιολικού πάρκου δίνεται μόνο εφόσον τηρούνται κάποιες ελάχιστες αποστάσεις από ραδιοτηλεοπτικούς και τηλεπικοινωνιακούς σταθμούς. Από την άλλη τα περισσότερα προβλήματα παρεμβολών μπορούν πλέον να προληφθούν ή και να διορθωθούν. Η πρόληψη γίνεται με το σωστό σχεδιασμό από την αρχή και τη σωστή χωροθέτηση. Αντίστοιχα η διόρθωση γίνεται με μια σειρά από μικρά και απλά τεχνικά μέτρα όπως για παράδειγμα η εγκατάσταση επιπλέον αναμεταδοτών και έχουν και μικρό σχετικά κόστος. Τέλος, αξίζει να αναφερθεί ότι σε πολλές ευρωπαϊκές χώρες οι πύργοι των ανεμογεννητριών χρησιμοποιούνται για την εγκατάσταση κεραιών προς διευκόλυνση υπηρεσιών επικοινωνιών και φυσικά δεν αποτελούν κανένα απολύτως εμπόδιο.

Τώρα όσον αφορά τις εκπεμπόμενες ακτινοβολίες, τα μόνα υποσυστήματα που θα μπορούσαμε να πούμε ότι «εκπέμπουν» ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία χαμηλού επιπέδου, λαμβάνοντας υπόψη πώς είναι κατασκευασμένη η ανεμογεννήτρια, είναι ο μετασχηματιστής μέσης τάσης και η ηλεκτρογεννήτρια. Το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο της ηλεκτρογεννήτριας περιορίζεται σε μια πολύ μικρή απόσταση γύρω από το κέλυφός της που είναι

τοποθετημένο τουλάχιστον 40-50 μέτρα πάνω από το έδαφος και είναι εξαιρετικά ασθενές. Με βάση αυτό καταλαβαίνει κανείς ότι στην ουσία δεν υφίσταται πραγματικά θέμα έκθεσης στην ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, ούτε καν στη βάση της ανεμογεννήτριας. Από την άλλη ο μετασχηματιστής είναι συνήθως κλεισμένος σε μεταλλικό υπόστεγο ή περιβάλλεται από περίφραξη ασφαλείας. Η περίφραξη αυτή βρίσκεται σε τέτοια απόσταση έτσι ώστε το επίπεδο της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας να είναι αμελητέο. Έτσι λοιπόν με βεβαιότητα πια, μπορούμε να πούμε ότι όλα όσα λέγονται και ακούγονται για εκπομπή ραδιενέργειας ή ακτινοβολιών άλλου τύπου από τις ανεμογεννήτριες δεν ευσταθούν.

Το θέμα στο οποίο έχει δοθεί αρκετά μεγάλη δημοσιότητα, είναι τα αισθητικά προβλήματα και η προσβολή του φυσικού τοπίου από τις ανεμογεννήτριες.

Η οπτική όχληση είναι κάτι υποκειμενικό και δύσκολα μπορούν να τεθούν κοινά αποδεκτοί κανόνες. Από έρευνες σε χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης προκύπτει ότι κάποιος που είναι ευνοϊκά διατεθειμένος απέναντι στην ανάπτυξη της αιολικής ενέργειας, αποδέχεται τις ανεμογεννήτριες και οπτικά πολύ πιο εύκολα από κάποιον που είναι αρνητικός εξ αρχής. Από τις ίδιες μελέτες, προκύπτει είναι πιο αποδεκτά από αισθητικής άποψης σε ανθρώπους που είναι ενημερωμένοι για τα οφέλη που προέρχονται από τη χρήση τους. Αν κάνουμε μια απλή σύγκριση μεταξύ ενός θερμικού σταθμού παραγωγής και ενός αιολικού πάρκου, είναι φανερό ότι η οπτική όχληση που προκύπτει από το πρώτο είναι εμφανώς και αντικειμενικά πολύ μεγαλύτερη. Δεδομένου βεβαίως ότι οι ανεμογεννήτριες είναι κατ' ανάγκη ορατές από απόσταση, είναι σημαντικό να λαμβάνονται υπόψη οι ιδιαιτερότητες κάθε τύπου εγκατάστασης και να γίνεται προσπάθεια ενσωμάτωσής τους στο τοπίο.

Έρευνες έχουν αποδείξει, ότι δεν υπάρχει καμία ένδειξη ότι τα αιολικά πάρκα επιβαρύνουν τη γεωργία ή την κτηνοτροφία. Οι αγροτικές δραστηριότητες μπορούν να συνεχίζονται ανενόχλητα και μετά την εγκατάσταση κάποιου αιολικού πάρκου, αν ληφθεί υπόψη ότι περίπου το 99% της γης που φιλοξενεί το αιολικό πάρκο είναι διαθέσιμο και για άλλες χρήσεις. Τα αιολικά πάρκα εγκαθίστανται συνήθως σε ορεινές περιοχές με θαμνώδη βλάστηση διότι εκεί έχουμε υψηλότερες ταχύτητες του ανέμου και εκεί ακριβώς ευνοείται η εγκατάστασή τους. Στις περιοχές αυτές η γη χρησιμεύει για τη βοσκή αιγοπροβάτων η οποία μπορεί να συνεχιστεί χωρίς κανένα πρόβλημα και μετά την εγκατάσταση του αιολικού πάρκου. Μάλιστα, έχει παρατηρηθεί σε μερικά αιολικά πάρκα ότι οι ανεμογεννήτριες έλκουν τα αιγοπρόβατα που επωφελούνται από τη δροσιά της σκιάς που προσφέρουν οι πύργοι τους.



Τέλος, άλλο ένα θέμα τέθηκε προς συζήτηση και αυτό είναι, το αν οι ανεμογεννήτριες έχουν επιπτώσεις στον πληθυσμό των πουλιών.

Πολλές φορές έχουμε δει πουλιά, καθώς πετούν, να συγκρούονται με κτίρια και άλλες σταθερές κατασκευές. Μελέτες που έχουν γίνει όμως σε πολλές ευρωπαϊκές χώρες όπως στη Γερμανία, στην Ολλανδία, στη Δανία και στην Αγγλία, έδειξαν ότι οι ανεμογεννήτριες δεν προκαλούν ιδιαίτερο πρόβλημα. Συγκεκριμένα, στο συνολικό αριθμό πουλιών που σκοτώνονται ετησίως, μόνο 20 θάνατοι οφείλονται σε ανεμογεννήτριες, ενώ 1500 θάνατοι οφείλονται στους κυνηγούς και 2000 σε πρόσκρουση με οχήματα και τις γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Βέβαιο είναι ότι το θέμα της προστασίας του πληθυσμού των πουλιών σε προστατευόμενες περιοχές, πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά τη φάση σχεδιασμού και χωροθέτησης του αιολικού πάρκου.

Συνοψίζοντας, πρέπει να κατανοήσουμε, ότι οι οποιεσδήποτε επιπτώσεις από τις ανεμογεννήτριες είναι άμεσα «ορατές» και αφετέρου μπορούμε να τις ελαχιστοποιήσουμε με σωστό προσχεδιασμό. Αντίθετα, οι επιπτώσεις της θερμικής ή πυρηνικής παραγωγής ενέργειας αργούν να φανούν, είναι μακροπρόθεσμες και ελαχιστοποιούνται πολύ λίγο έως καθόλου. Εντέλει θα πρέπει να παραδεχτούμε ότι εφόσον πρέπει να παράγουμε ηλεκτρική ενέργεια, είναι προτιμότερο να την παράγουμε με τρόπο ακίνδυνο και χωρίς επιπτώσεις προς το περιβάλλον.

Από τεχνολογικής και οικονομικής άποψης, η αιολική ενέργεια είναι η πιο ώριμη μορφή ανανεώσιμης και «καθαρής» ενέργειας. Διότι συμβάλλει αποτελεσματικά στην αποτροπή κλιματικών αλλαγών και ταυτόχρονα προσφέρει πολλά κοινωνικά, οικονομικά και περιβαλλοντικά οφέλη. Τα σημαντικότερα από τα οφέλη της αιολικής ενέργειας είναι η συμβολή της στην αύξηση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με ταυτόχρονη εξοικονόμηση σημαντικών συμβατικών καυσίμων, που συνεπάγεται συναλλαγματικά οφέλη. Επίσης συμβάλλει στο σημαντικό περιορισμό της ρύπανσης του περιβάλλοντος, αφού έχει υπολογιστεί ότι η παραγωγή ηλεκτρισμού μιας μόνο ανεμογεννήτριας ισχύος 550 kW σε ένα χρόνο, υποκαθιστά την ενέργεια που παράγεται από την καύση 2700 βαρελιών πετρελαίου, δηλαδή αποτροπή της εκπομπής 735 περίπου τόνων CO<sub>2</sub> ετησίως καθώς και 2 τόνων άλλων ρύπων. Και τέλος συμβάλλει στη δημιουργία πολλών νέων θέσεων εργασίας, αφού εκτιμάται ότι για κάθε νέο Μεγαβάτ αιολικής ενέργειας δημιουργούνται 14 νέες θέσεις εργασίας.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2**

### **ΑΣΥΓΧΡΟΝΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ**

#### **2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Οι ασύγχρονες μηχανές ή με άλλα λόγια επαγωγικές μηχανές αποτελούν τις πιο διαδεδομένες μηχανές στα βιομηχανικά συστήματα κίνησης και στις περισσότερες οικιακές εφαρμογές. Η απλή κατασκευή τους, το χαμηλό κόστος, η ελάχιστη συντήρηση και η απευθείας σύνδεση τους στο εναλλασσόμενο δίκτυο είναι τα κύρια πλεονεκτήματα των μηχανών επαγωγής.

Στο εμπόριο διατίθενται διάφορα είδη επαγωγικών μηχανών καθένα για διαφορετική εφαρμογή. Αν και οι επαγωγικές μηχανές είναι εύκολες στο σχεδιασμό και την κατασκευή σε σχέση με τις μηχανές συνεχούς ρεύματος, ο έλεγχος της ροπής και της ταχύτητας που απαιτείται σε αρκετές εφαρμογές απαιτεί μεγαλύτερη κατανόηση του σχεδιασμού και των χαρακτηριστικών της μηχανής και τις καθιστά σε πολλές περιπτώσεις πιο πολύπλοκες από τις μηχανές συνεχούς ρεύματος.

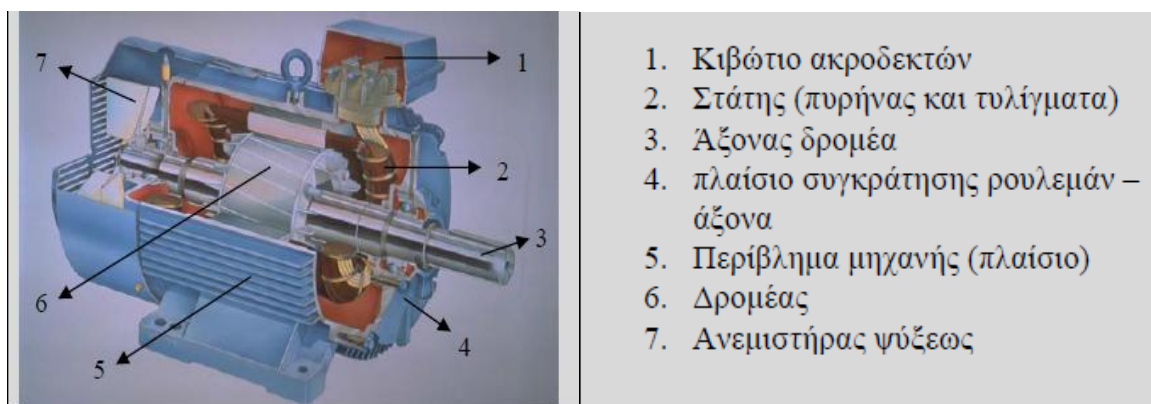
#### **2.2 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ**

Η ιστορία της επαγωγικής μηχανής τοποθετείται στα τέλη της δεκαετίας του 1880 όπου δύο εφευρέτες που πειραματίζονταν ανεξάρτητα, με το εναλλασσόμενο ρεύμα, σε μια εποχή όπου κυριαρχούσε το συνεχές ρεύμα, ανακάλυψαν την έννοια του στρεφόμενου μαγνητικού πεδίου. Ο λόγος για τον Ιταλό Galileo Ferraris (1847–1897) ο οποίος κατά τη διάρκεια των πειραμάτων του ανακάλυψε ότι δύο εναλλασσόμενα ρεύματα ίδιας συχνότητας αλλά διαφορετικής αρχικής φάσης παράγουν στο χώρο ένα στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο και για τον Nicola Tesla (1856–1943) ο οποίος όμως πειραματιζόταν με τρία εναλλασσόμενα ρεύματα και το 1891 εξέδωσε άρθρο όπου εξηγούσε θεωρητικά τη θεμελίωση του τρόπου λειτουργίας του επαγωγικού κινητήρα. Ο πρώτος επαγωγικός κινητήρας με ικανοποιητική

συμπεριφορά κατασκευάστηκε από τον Ρώσο-Γερμανό Michael Dolivo-Dobrowolsky (1862 – 1919) το έτος 1889 ενώ πιστεύεται ότι το πρώτο επαγωγικό τύμπανο κατασκευάστηκε από τον Tesla ήδη από το 1883. Έκτοτε οι επαγωγικές μηχανές στηρίζονται στις θεωρίες του Faraday και του Tesla χωρίς καμιά ραγδαία εξέλιξη ως προς την δομή της κατασκευής τους παρά μόνο βελτιώσεις επιδόσεων, αποδόσεων και όγκου κατασκευής.

### **2.3 ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ**

Όπως οι περισσότερες μηχανές, μια επαγωγική μηχανή διαθέτει ένα σταθερό εξωτερικό μέρος, που ονομάζεται στάτης και ένα δρομέα ο οποίος περιστρέφεται στο εσωτερικό με ένα προσεκτικά κατασκευασμένο διάκενο αέρος μεταξύ των δύο. Το σχήμα 2.3.1 είναι μια τομή της μηχανής όπου φαίνονται τα κύρια κατασκευαστικά στοιχεία της.



**Σχήμα 2.3.1**

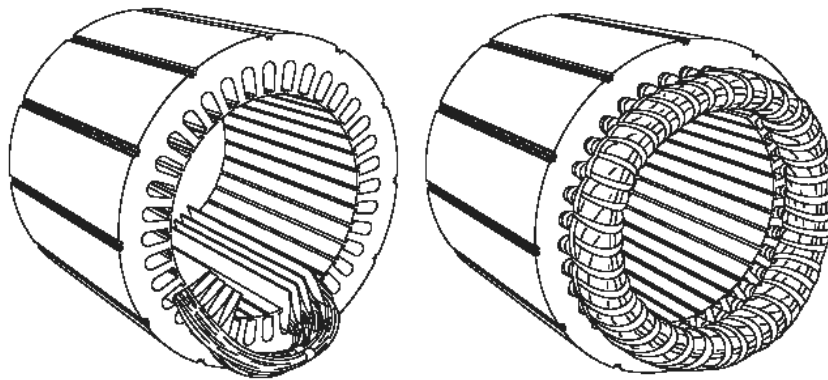
Πρακτικά όλες οι μηχανές χρησιμοποιούν την περιστροφή ενός μαγνητικού πεδίου για την κίνηση του δρομέα τους. Η τριφασική επαγωγική μηχανή εναλλασσόμενου ρεύματος είναι ο μόνος τύπος μηχανής όπου το στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο παράγεται φυσικά στο στάτη λόγω της φύσης της τροφοδοσίας. Οι μηχανές συνεχούς ρεύματος εξαρτώνται είτε από μηχανική είτε από ηλεκτρονική μετατροπή για τη δημιουργία στρεφόμενων μαγνητικών πεδίων ενώ η μονοφασική επαγωγική μηχανή εναλλασσόμενου ρεύματος εξαρτάται από επιπρόσθετα ηλεκτρικά στοιχεία.

Στο εσωτερικό κάθε μηχανής σχηματίζονται δύο σύνολα ηλεκτρομαγνητικών πεδίων. Στην επαγωγική μηχανή εναλλασσόμενου ρεύματος το ένα σύνολο

σχηματίζεται στο στάτη λόγω της τροφοδοσίας που συνδέεται στα τυλίγματα του. Η εναλλασσόμενη μορφή της τροφοδοσίας επάγει μια ηλεκτρομαγνητική δύναμη (ΗΜΔ) στο δρομέα σύμφωνα με το νόμο του Lenz και έτσι δημιουργείται το δεύτερο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο (εξ ου και το όνομα επαγωγική μηχανή). Η αλληλεπίδραση των δύο αυτών ηλεκτρομαγνητικών πεδίων παράγει ροπή. Ως αποτέλεσμα η μηχανή περιστρέφεται στην κατεύθυνση της παραγόμενης ροπής.

### 2.3.1 ΣΤΑΤΗΣ

Ο στάτης είναι κατασκευασμένος από λεπτά φύλλα αλουμινίου ή σιδήρου τα οποία συνδέονται μεταξύ τους ώστε να σχηματίσουν ένα κοίλο κύλινδρο, τον πυρήνα του στάτη, με αυλακώσεις όπως φαίνεται στο σχήμα 2.3.1.1.

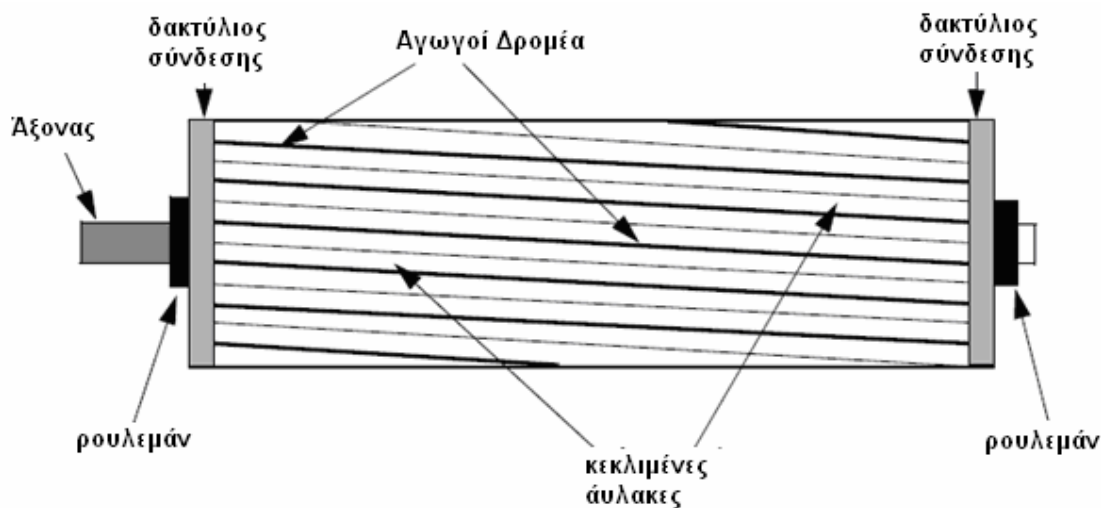


**Σχήμα 2.3.1.1: Τυπικό σχήμα στάτη.**

Στις αυλακώσεις αυτές εισάγονται πηνία από μονωμένα καλώδια. Κάθε ομάδα πηνίων μαζί με το κομμάτι του πυρήνα που περιτυλίγει, σχηματίζει έναν ηλεκτρομαγνήτη (ζεύγος πόλου) όταν εφαρμοστεί εναλλασσόμενη τροφοδοσία. Ο αριθμός των πόλων μιας επαγωγικής μηχανής εναλλασσόμενου ρεύματος εξαρτάται από την εσωτερική σύνδεση των τυλιγμάτων του στάτη. Τα τυλίγματα του στάτη συνδέονται κατευθείαν στην τροφοδοσία και εσωτερικά συνδέονται ούτως ώστε κατά την εφαρμογή εναλλασσόμενης τροφοδοσίας να δημιουργείται στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο.

### 2.3.2 ΔΡΟΜΕΑΣ

Ο δρομέας είναι κατασκευασμένος από αρκετά, λεπτά φύλλα μετάλλου, με κατανομημένες ράβδους αλουμινίου ή χαλκού στην περιφέρεια του. Στον πιο διαδεδομένο τύπο δρομέα (δρομέας κλωβού) οι ράβδοι συνδέονται στις άκρες τους μηχανικά αλλά και ηλεκτρικά με τη χρήση δακτυλίων. Σχεδόν το 90% των επαγωγικών μηχανών έχουν δρομέα κλωβού λόγω της απλής και εύκολης κατασκευής του. Ο δρομέας αποτελείται από ένα κυλινδρικό πυρήνα από φύλλα μετάλλου με διαμήκεις παράλληλες αύλακες που φέρουν τους αγωγούς. Κάθε αύλακα φέρει ράβδο από αλουμίνιο, χαλκό ή κράμα. Οι ράβδοι είναι μονίμως βραχυκυκλωμένοι και στα δύο άκρα, μέσω των δακτυλίων όπως το σχήμα 1.3.2.1. Αυτή η απλή κατασκευή είναι ο κλωβός με κεκλιμένες ράβδους, που δίνει στο δρομέα το όνομα του.



**Σχήμα 2.3.2.1 δρομέας κλωβού με κεκλιμένες ράβδους**

Οι αύλακες του δρομέα δεν είναι ακριβώς παράλληλες με τον άξονα αλλά έχουν μια ελαφριά κλίση για δύο κυρίως λόγους. Ο πρώτος λόγος είναι να κάνει τη μηχανή να τρέχει πιο αθόρυβα μειώνοντας τον μαγνητικό θόρυβο και για να ελαττώσει τις αρμονικές αυλάκων. Ο δεύτερος λόγος είναι για να βοηθήσει την μείωση της τάσης «κλειδώματος» του δρομέα. Τα δόντια του δρομέα έχουν την τάση να ακινητοποιούνται κάτω από τα δόντια του στάτη όπου υπάρχει απευθείας μαγνητική έλξη μεταξύ τους. Αυτό συμβαίνει όταν ο αριθμός των οδοντώσεων του δρομέα είναι ίσος με τον αριθμό οδοντώσεων του στάτη.

Ο δρομέας προσάπτεται στο στέλεχος της μηχανής χρησιμοποιώντας ρουλεμάν στις δύο άκρες. Συνήθως η μια άκρη είναι μακρύτερη από την άλλη για να οδηγεί το φορτίο. Μεταξύ του στάτη και του δρομέα υπάρχει διάκενο αέρος, μέσω του οποίου μεταφέρεται ενέργεια από το στάτη στο δρομέα εξ επαγωγής. Η παραγόμενη ροπή αναγκάζει το δρομέα και το φορτίο να περιστραφούν. Ανεξάρτητα από τον τύπο δρομέα που θα χρησιμοποιηθεί, η αρχή λειτουργίας περιστροφής παραμένει η ίδια.

## **2.4 ΜΟΝΙΜΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ**

### **2.4.1 ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΤΗΣ ΕΠΑΓΩΓΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΗΣ**

Το μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται στο στάτη περιστρέφεται στη σύγχρονη ταχύτητα ( $N_s$ ).

$$N_s = 120 \cdot \frac{f}{p} \quad (2.4.1.1)$$

Όπου:  $N_s$  = η σύγχρονη ταχύτητα του μαγνητικού πεδίου του στάτη σε ΣΑΛ (στροφές ανά λεπτό)

$f$  = ο αριθμός των πόλων του στάτη

$p$  = η συχνότητα της πηγής σε Hz

Το μαγνητικό πεδίο που παράγεται στο δρομέα λόγω της επαγόμενης τάσης είναι εναλλασσόμενο εκ φύσεως. Για μείωση της σχετικής ταχύτητας, με αναφορά το στάτη, ο δρομέας αρχίζει να κινείται στην ίδια κατεύθυνση με την ροή του στάτη και προσπαθεί να ευθυγραμμιστεί με την στρεφόμενη ροή. Πρακτικά όμως ο δρομέας ποτέ δεν ευθυγραμμίζεται με το πεδίο του στάτη αλλά κινείται λίγο πιο αργά από την ταχύτητα του πεδίου του στάτη. Η ταχύτητα αυτή ονομάζεται ταχύτητα βάσης ( $N_b$ ). Η διαφορά μεταξύ της σύγχρονης ταχύτητας  $N_s$  και της ταχύτητας βάσης  $N_b$  ονομάζεται ολίσθηση. Η ολίσθηση αλλάζει ανάλογα με το φορτίο. Μια αύξηση στο φορτίο αναγκάζει τον δρομέα να κινηθεί πιο αργά ή αύξηση της ολίσθησης. Μια μείωση στο φορτίο κάνει το δρομέα να κινηθεί πιο γρήγορα οπότε η ολίσθηση μειώνεται. Η ολίσθηση εκφράζεται ως ποσοστό και μπορεί να προσδιοριστεί από την ακόλουθη εξίσωση.

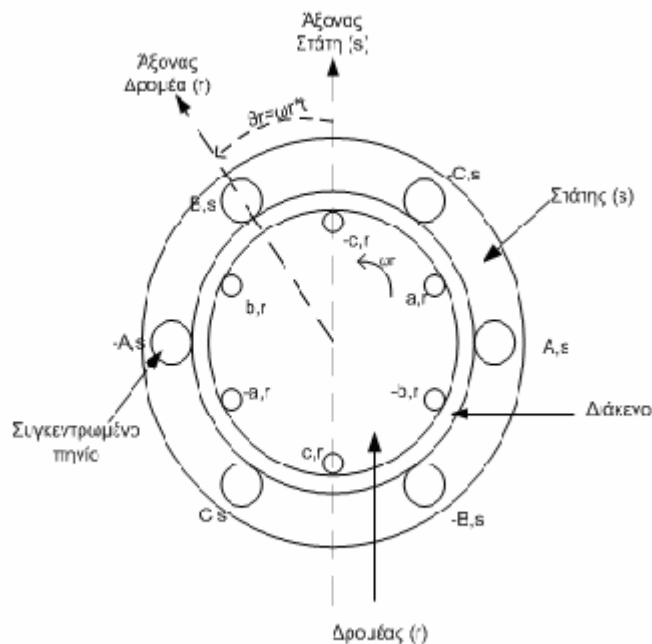
$$\%s = \frac{N_s - N_b}{N_s} \cdot 100 \quad (2.4.1.2)$$

Όπου:  $N_s$  = η σύγχρονη ταχύτητα σε ΣΑΛ

$N_b$  = η ταχύτητα βάσης σε ΣΑΛ

## 2.4.2 ΣΤΡΕΦΟΜΕΝΟ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟ ΠΕΔΙΟ

Το σχήμα (2.4.2.1) δείχνει τη θεμελιώδη τριφασική διπολική μηχανή επαγωγής, όπου το τυλίγμα κάθε φάσεως στο στάτη και στο δρομέα αντιπροσωπεύεται από ένα συγκεντρωμένο πηνίο.



**Σχήμα 2.4.2.1 Θεμελιώδης τριφασική ασύγχρονη επαγωγική μηχανή**

Τα τριφασικά τυλίγματα, σε συνδεσμολογία αστέρα ή τριγώνου, είναι ημιτονοειδώς κατανομημένα και τοποθετημένα σε αυλάκες. Η μηχανή επαγωγής μπορεί να θεωρηθεί ως ένας τριφασικός μετασχηματιστής με στρεφόμενο και βραχυκυκλωμένο δευτερεύον τυλίγμα. Το διάκενο της μηχανής είναι πρακτικά ομοιόμορφο (απουσία εκτυπότητας). Αγνοώντας την επίδραση των αυλάκων και τις αρμονικές χώρου, λόγω της μη γραμμικής κατανομής του τυλίγματος στάτη, μπορεί να αποδειχθεί ότι η συμμετρική τριφασική τροφοδότηση του τυλίγματος δημιουργεί στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο με τη σύγχρονη ταχύτητα. Η ανάλυση μπορεί να πραγματοποιηθεί με

γραφική ή και αναλυτική μέθοδο. Θεωρείται ένα σύστημα τριφασικών ημιτονοειδών ρευμάτων που ρέουν στο τριφασικό τύλιγμα του στάτη, ως εξής:

$$I_a = I_m \cos \omega_e t \quad (2.4.2.1)$$

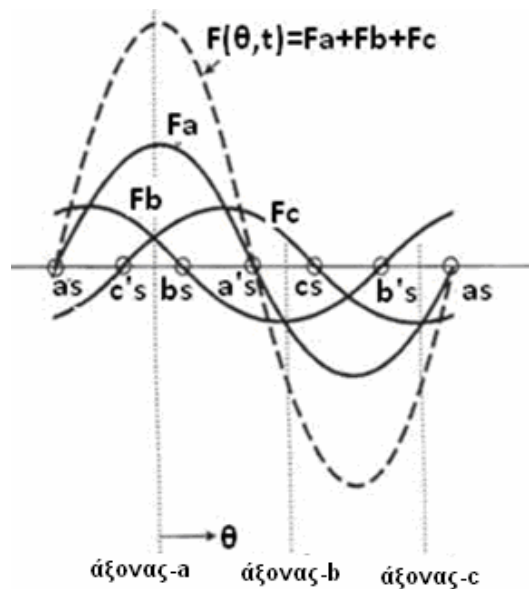
$$I_b = I_m \cos\left(\omega_e t - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (2.4.2.2)$$

$$I_c = I_m \cos\left(\omega_e t + \frac{2\pi}{3}\right) \quad (2.4.2.3)$$

Το τύλιγμα κάθε φάσεως, ανεξάρτητα από τα υπόλοιπα τυλίγματα, θα παράγει ένα κύμα ΜΕΔ ημιτονοειδώς καταναμημένο και σφύζον πέριξ των αντιστοιχών αξόνων.

Το σχήμα (2.4.2.2) δείχνει τα κύματα ΜΕΔ τη χρονική στιγμή  $t=0$ . Τότε είναι:

$$i_a = I_m, i_b = -\frac{I_m}{2}, i_c = -\frac{I_m}{2} \quad (2.4.2.4)$$



**Σχήμα 2.4.2.2 Κατανομή των κυμάτων ΜΕΔ σε τριφασικό τύλιγμα στάτη**

Σε χωρική γωνία  $\theta$ , οι εκφράσεις των ΜΕΔ δίνονται ως εξής:

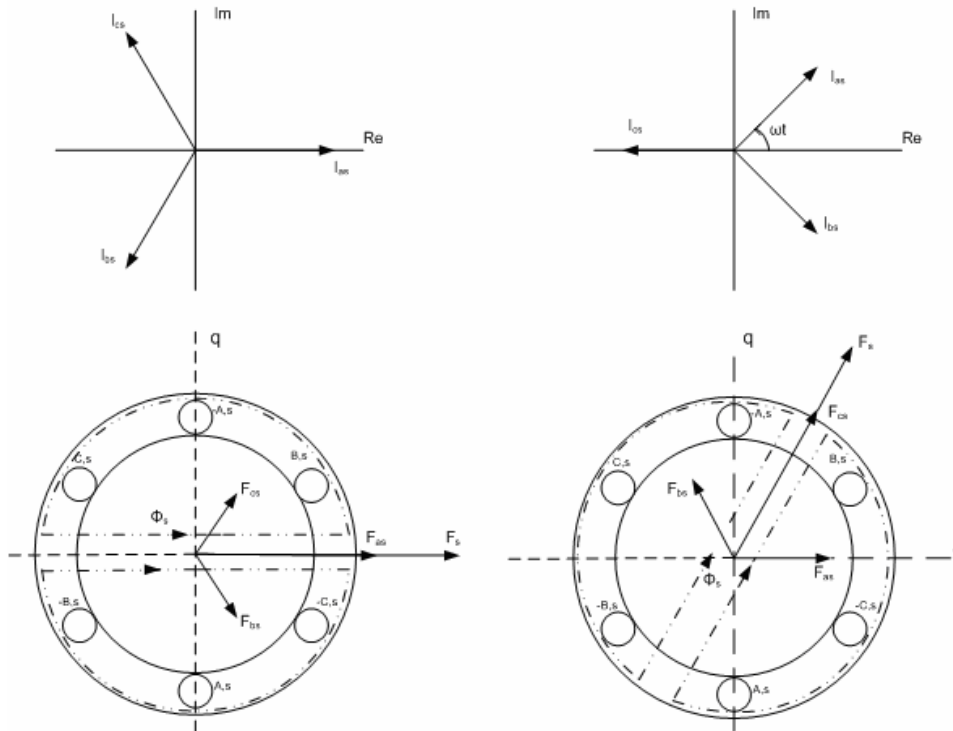
$$F_a(\theta) = Ni_a \cos \theta \quad (2.4.2.5)$$



$$F_b(\theta) = Ni_b \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (2.4.2.6)$$

$$F_c(\theta) = Ni_c \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \quad (2.4.2.7)$$

Όπου N ο αριθμός των ελιγμάτων ανά φάση.



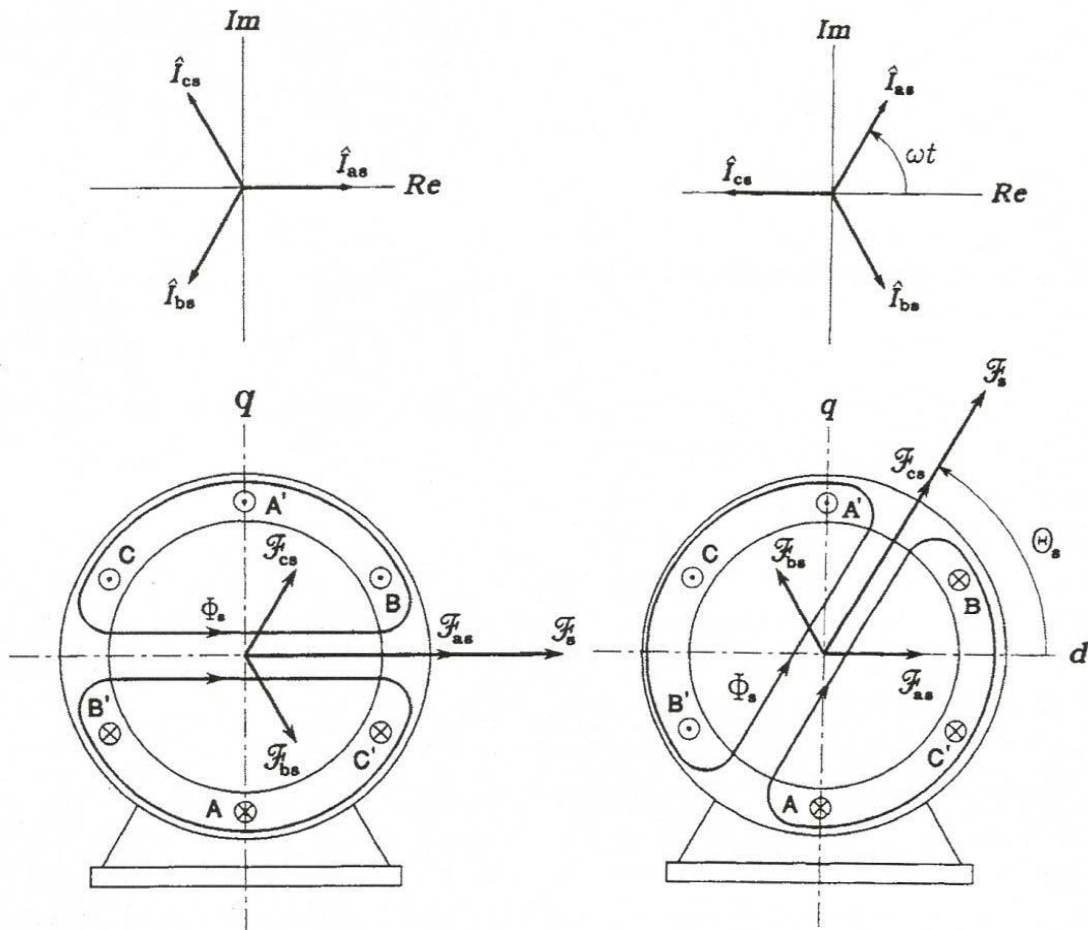
**Σχήμα 2.4.2.3: Φασιθέτες των ρευμάτων του στάτη και παραγόμενο μαγνητικό πεδίο για  $\omega t=0$  (αριστερά) και  $\omega t=60$  (δεξιά) σε διπολικό κινητήρα επαγωγής στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας**

Η συνιστάμενη ΜΕΔ στην ίδια γωνία θα είναι:

$$F(\theta) = F_a(\theta) + F_b(\theta) + F_c(\theta) \Rightarrow$$

$$F(\theta) = Ni_a \cos \theta + Ni_b \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) + Ni_c \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \Rightarrow$$

$$F(\theta, t) = NI_m \left[ \cos \omega_e t \cos \theta + \cos\left(\omega_e t - \frac{2\pi}{3}\right) \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) + \cos\left(\omega_e t + \frac{2\pi}{3}\right) \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \right]$$



Σχήμα 2.4.2.4: Φασιθέτες των ρευμάτων του στάτη και παραγόμενο μαγνητικό πεδίο για  $\omega t=0$  (αριστερά) και  $\omega t=60$  (δεξιά) σε τετραπολικό κινητήρα επαγωγής στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας

$$F(\theta, t) = \frac{3}{2} N I_m \cos(\omega_e t - \theta) \quad (2.4.2.8)$$

Η εξίσωση (2.4.2.8) αποδεικνύει ότι ένα ημιτονοειδώς κατανομημένο κύμα ΜΕΔ με πλάτος  $(3/2) \cdot N \cdot I_m$  στρέφεται στο διάκενο με σύγχρονη ταχύτητα  $\omega_e$ .

Σε μια διπολική μηχανή το κύμα ΜΕΔ κάνει μια περιστροφή σε μία περίοδο των τριφασικών ρευμάτων (σχήμα (2.4.2.3)).

Για τις πολυπολικές μηχανές της πράξεως (έστω μια Ρ-πολική μηχανή) η περιστροφική ταχύτητα του κύματος ΜΕΔ θα είναι:

$$N_e = \frac{120 f_e}{p} \quad (2.4.2.9)$$

## 2.5 ΕΞΑΓΩΓΗ ΙΣΟΔΥΝΑΜΟΥ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ

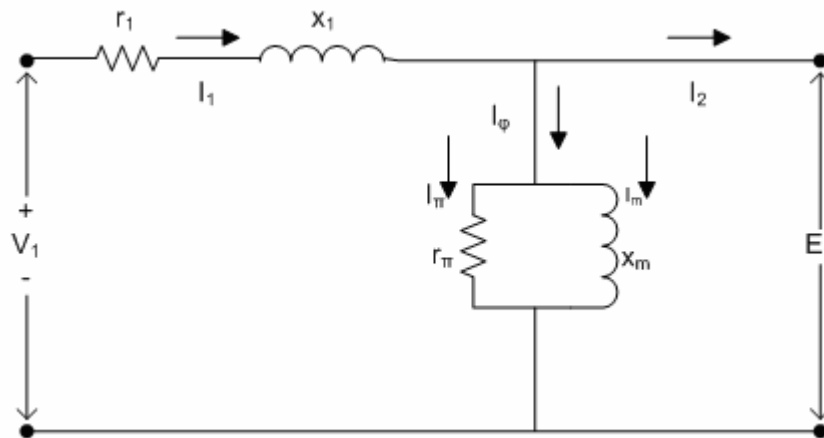
Η άνωθι μελέτη των κυμάτων ροής και ΜΕΔ στη θεμελιώδη διπολική μηχανή ευχερώς μπορεί να μεταφραστεί σε ένα ισοδύναμο κύκλωμα μονίμου καταστάσεως. Στην παραπέρα ανάλυση θεωρούνται ηλεκτρικές μηχανές επαγωγής που έχουν μόνο συμμετρικά τριφασικά τυλίγματα τα οποία διεγείρονται από συμμετρικές πολυφασικές τάσεις. Η μελέτη μπορεί να περιοριστεί μόνο σε μια φάση δεδομένου ότι η συμπεριφορά όλων των φάσεων σ' ένα συμμετρικό πολυφασικό σύστημα είναι η ίδια και η μόνη διάκριση μεταξύ τους είναι η χαρακτηριστική διαφορά φάσεως χρόνου. Για τριφασικές μηχανές θεωρείται ότι το τύλιγμα το στάτη είναι συνδεδεμένο κατά αστέρα. Η υπόθεση αυτή καθιστά τη μελέτη πιο εύκολη καθώς το ρεύμα γραμμής ταυτίζεται με το ρεύμα φάσεως της μηχανής ενώ η τάση της φάσεως έχει την τιμή της τάσεως της γραμμής προς τον ουδέτερο. Θεωρούνται επίσης ότι όλα τα ρεύματα και οι τάσεις έχουν ημιτονοειδή μορφή κύματος. Αγνοούνται δηλαδή οι επιδράσεις των αρμονικών χώρου στη διανομή της ροής εκτός όταν πρόκειται για τον υπολογισμό των αντιδράσεων σκεδάσεως στάτη και δρομέα.

Η μελέτη αρχίζει από το στάτη, Το κύμα ροής διακένου που περιστρέφεται με τη σύγχρονη ταχύτητα, παράγει ισορροπημένες πολυφασικές αντιηλεκτρεγερτικές δυνάμεις (αντι-ΗΕΔ) στις φάσεις του στάτη. Η τάση ακροδεκτών του τυλίγματος του στάτη  $V_1$  διαφέρει από την αντι-ΗΕΔ,  $E_1$  κατά την πτώση τάσεως στη σύνθετη αντίσταση σκέδασης του στάτη, την  $z_1 = r_1 + jx_1$ . Έτσι είναι:

$$\dot{V}_1 = \dot{E}_1 + \dot{I}_1(r_1 + jx_1) \quad (2.5.1)$$

Όπου  $I_1$  το ρεύμα του στάτη. Οι φορές των ανωτέρω μεγεθών φαίνονται στο σχήμα 2.5.1. Η παραγόμενη ροή διακένου προκύπτει από τη συνδυασμένη δράση των ΜΕΔ των ρευμάτων στάτη και δρομέα. Όπως ακριβώς και στην περίπτωση του μετασχηματιστή, το ρεύμα του στάτη μπορεί να αναλυθεί σε δύο συνιστώσες: σε ρεύμα φορτίου και ρεύμα διέγερσης. Το ρεύμα φορτίου  $I_2$  παράγει ΜΕΔ που αντιστοιχεί στη ΜΕΔ των ρευμάτων του δρομέα. Το ρεύμα διέγερσης  $I_\phi$  είναι το επιπλέον ρεύμα στάτη που απαιτείται για την παραγωγή της επακόλουθης ροής διακένου και είναι μια συνάρτηση της ΗΕΔ  $E_1$ . Αυτό μπορεί να αναλυθεί σε ρεύμα απωλειών πυρήνα  $I_\pi$  σε φάση με την  $E_1$  και

ρεύμα μαγνήτισης  $I_m$  που έπεται της  $E_1$  κατά  $90^\circ$ . Στο ισοδύναμο κύκλωμα, το ρεύμα διέγερσης μπορεί να ληφθεί υπ' όψη με έναν εγκάρσιο κλάδο, που συνίσταται σε μία αντίσταση απωλειών σιδήρου  $r_\pi$  και μια αντίδραση μαγνήτισης  $x_m$  εν παραλλήλω, συνδεμένο κατά μήκος της  $E_1$  (σχήμα (2.5.1)). Οι  $r_\pi$  και  $x_m$  υπολογίζονται συνήθως για ονομαστική συχνότητα στάτη και για μια τιμή της  $E_1$  κοντά στην αναμενόμενη τιμή υπό συνθήκες ονομαστικής λειτουργίας. Κατά προσέγγιση θεωρούνται αμετάβλητες στις μικρές μεταβολές της  $E_1$  κατά τη λειτουργία της μηχανής.



**Σχήμα 2.5.1: Ισοδύναμο κύκλωμα στάτη πολυφασικού κινητήρα επαγωγής**

Στη συνέχεια πρέπει να ληφθεί υπόψη η επίδραση του δρομέα. Από την οπτική γωνία του ισοδυνάμου κυκλώματος του στάτη, ο δρομέας μπορεί να αναπαρασταθεί από μια ισοδύναμη σύνθετη αντίσταση  $z_2 = E_2/I_2$  που αντιστοιχεί στη σύνθετη αντίσταση σκέδασης ενός σταθερού δευτερεύοντος. Για την ολοκλήρωση του ισοδυνάμου κυκλώματος πρέπει τώρα να προσδιορίσουμε την  $z_2$  ανάγοντας τις ποσότητες στάτη και δρομέα (ρεύματα και τάσεις) σε ποσότητες του δρομέα ανηγμένες στο στάτη.

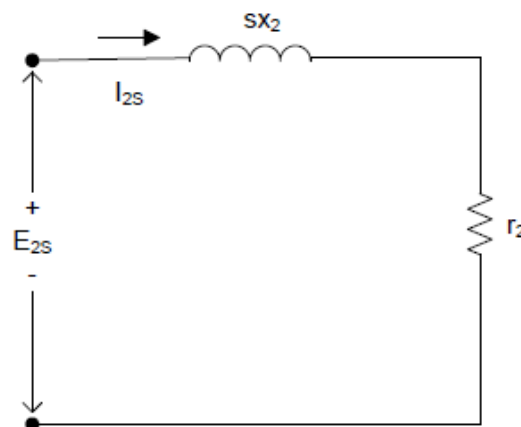
Στην ανάλυση των μετασχηματιστών, από την πλευρά του πρωτεύοντος, το δευτερεύον τύλιγμα του μετασχηματιστή μπορεί να αντικατασταθεί από ένα ισοδύναμο δευτερεύον τύλιγμα που έχει τον ίδιο αριθμό ελιγμάτων με το πρωτεύον. Σε ένα μετασχηματιστή με λόγο ελιγμάτων και δευτερεύουσες παραμέτρους γνωστές, αυτό μπορεί να γίνει με αναγωγή των σύνθετων αντιστάσεων από το δευτερεύον στο πρωτεύον, πολλαπλασιάζοντας με το τετράγωνο του λόγου ελιγμάτων πρωτεύοντος προς δευτερεύον. Το συνεπαγόμενο ισοδύναμο κύκλωμα προκύπτει πλήρως ανηγμένο στην πλευρά του πρωτεύοντος του μετασχηματιστή. Ομοίως, στην περίπτωση μιας

πολυφασικής ασύγχρονης μηχανής, αν ο δρομέας αντικατασταθεί με έναν ισοδύναμο δρομέα με πολυφασικό τύλιγμα με τον ίδιο αριθμό φάσεων και ελιγμάτων με το στάτη αλλά παράγοντας την ίδια ΜΕΔ και ροή διακένου όπως ο πραγματικός δρομέας, η λειτουργία της μηχανής, όπως φαίνεται από τους ακροδέκτες του στάτη, θα είναι πανομοιότυπη. Αυτή η τεχνική θα εφαρμοστεί και εδώ καθώς αποδεικνύεται ιδιαίτερα χρήσιμη, ειδικά για μηχανές επαγωγής δρομέα τύπου κλωβού για τις οποίες η «ταυτότητα» των τυλιγμάτων ανά φάση του δρομέα δεν είναι με καμία έννοια προφανής.

Ο δρομέας μιας μηχανής επαγωγής είναι βραχυκυκλωμένος, έτσι η σύνθετη αντίδραση που εμφανίζεται λόγω της επαγόμενης από το στάτη τάσεως είναι απλά η σύνθετη αντίσταση βραχυκύκλωσης του τυλίγματος δρομέα. Συνεπώς, η σχέση μεταξύ της σύνθετης αντίστασης σκέδασης του ισοδύναμου δρομέα στη συχνότητα ολισθήσεως ( $z_{2s}$ ) και της αντίστοιχης του πραγματικού δρομέα ( $Z_{\text{rotor}}$ ) θα είναι:

$$z_{2s} = \frac{\hat{E}_{2s}}{\hat{I}_{2s}} = r_2 + jx_2 \quad (2.5.2)$$

Σημειώνεται ότι η αντίδραση  $x_2$  είναι η αντίδραση σκέδασης του δρομέα στη συχνότητα του στάτη ( $f_e$ ). Καθώς η πραγματική συχνότητα των ρευμάτων του δρομέα είναι η συχνότητα ολισθήσεως  $f_r = s \cdot f_e$ , μπορεί να αναχθεί στη συχνότητα αυτή απλά πολλαπλασιάζοντας την με την ολίσθηση  $s$ . Το ισοδύναμο κύκλωμα, όπως φαίνεται από το πλαίσιο αναφοράς της συχνότητας ολισθήσεως των ρευμάτων του δρομέα, δίνεται στο σχήμα (2.5.2).



**Σχήμα 2.5.2: Ισοδύναμο ανά φάση κύκλωμα δρομέα πολυφασικής επαγωγικής μηχανής στη συχνότητα ολίσθησης**

Στη συνέχεια παρατηρείται ότι το κύμα ΜΕΔ διακένου παράγεται από τη συνδυασμένη δράση του ρεύματος στάτη  $I_1$  και του αντίστοιχου ρεύματος φορτίου  $I_2$ . Το ίδιο μπορεί να εκφραστεί παρομοίως σε όρους ρεύματος στάτη και αντίστοιχου ρεύματος δρομέα  $I_{2s}$ . Αυτά τα δύο ρεύματα είναι ίσα σε πλάτος αφού το  $I_{2s}$  ορίζεται ως το ρεύμα ενός ισοδύναμου δρομέα με τον ίδιο αριθμό ελιγμάτων ανά φάση με το στάτη. Καθώς το συνιστάμενο κύμα ΜΕΔ διακένου καθορίζεται από το ανυσματικό άθροισμα του ρεύματος στάτη και δρομέα, είτε του πραγματικού ή του ισοδύναμου δρομέα, τα  $I_2$  και  $I_{2s}$  πρέπει επίσης να είναι ίσα σε φάση (στις αντίστοιχες ηλεκτρικές τους συχνότητες) γι' αυτό θεωρείται:

$$\hat{I}_{2s} = \hat{I}_2 \quad (2.5.3)$$

Τέλος, το κύμα ροής του διακένου επάγει και την ΗΕΔ  $E_{2s}$  στη συχνότητα ολισθήσεως του δρομέα και την αντι-ΗΕΔ  $E_1$  του στάτη. Αν δεν υπήρχε η επίδραση της ταχύτητας (λειτουργία με ακινητοποιημένο δρομέα) αυτές οι δύο τάσεις θα ήταν ίσες σε μέτρο καθώς ο ισοδύναμος δρομέας έχει τύλιγμα με τον ίδιο αριθμό ελιγμάτων ανά φάση όπως και ο στάτης. Ωστόσο, επειδή η σχετική ταχύτητα του κύματος ροής διακένου σε σχέση με το δρομέα είναι  $s$  φορές η ταχύτητα σε σχέση με το στάτη, η σχέση μεταξύ των πλατών των επαγόμενων ΗΕΔ – αντιΗΕΔ είναι:

$$E_{2s} = sE_1 \quad (2.5.4)$$

Καθώς η φάση κάθε μιας από αυτές τις τάσεις και του προκύπτοντος κύματος ροής διακένου είναι  $90^\circ$ , αυτές οι δύο τάσεις πρέπει επίσης να έχουν ίσους φασιθέτες στις αντίστοιχες ηλεκτρικές τους συχνότητες. Έτσι:

$$\hat{E}_{2s} = s\hat{E}_1 \quad (2.5.5)$$

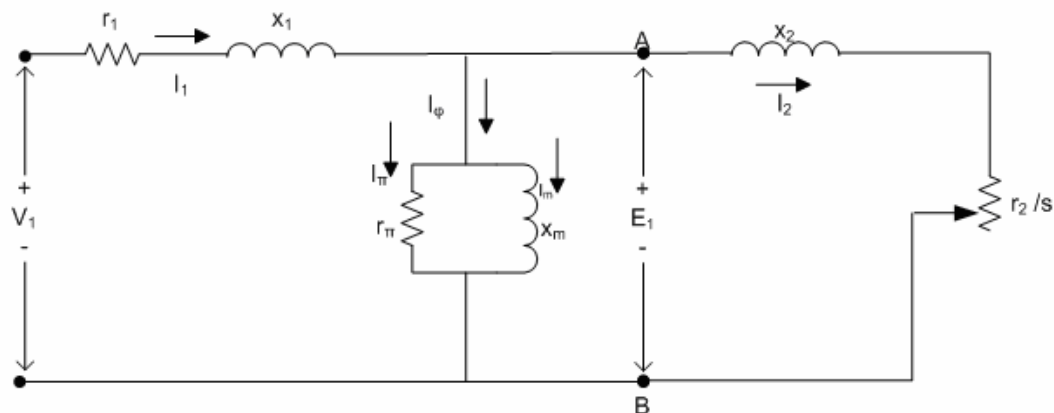
Αν διαιρεθεί η (2.5.5) με την (2.5.3) κατά μέλη και ληφθεί υπόψη η (2.5.2) τότε:

$$\frac{\hat{E}_{2s}}{\hat{I}_{2s}} = \frac{s\hat{E}_1}{\hat{I}_2} = z_{2s} = r_2 + jsx_2 \quad (2.5.6)$$

Αν η ανωτέρω εξίσωση διαιρεθεί με την ολίσθηση  $s$  τότε:

$$z_2 = \frac{\hat{E}_2}{\hat{I}_2} = \frac{r_2}{s} + jx_2 \quad (2.5.7)$$

Έτσι ολοκληρώνεται η κατασκευή του ανά φάση ισοδύναμου κυκλώματος της μηχανής επαγωγής. Η  $z_2$  είναι η σύνθετη αντίσταση του ισοδύναμου ακίνητου δρομέα όπως αυτή φαίνεται από τους ακροδέκτες του φορτίου στο ισοδύναμο κύκλωμα του στάτη. Το τελικό αποτέλεσμα φαίνεται στο ισοδύναμο ανά φάση κύκλωμα του σχήματος (2.5.3). Η συνδυασμένη δράση του φορτίου στον άξονα της μηχανής και της αντιστάσεως του δρομέα φαίνεται στην ανηγμένη αντίσταση  $r_2/s$ , που είναι συνάρτηση της ολίσθησης άρα και του μηχανικού φορτίου. Το ρεύμα στην ανηγμένη σύνθετη αντίσταση του δρομέα ισούται με το κομμάτι του ρεύματος του στάτη που αντιστοιχεί στο ρεύμα φορτίου. Η τάση κατά μήκος της ισούται με την τάση  $E_2$  του κυκλώματος στάτη. Σημειώνεται ότι όταν τα ρεύματα και οι τάσεις του δρομέα ανάγονται στο στάτη, οι συχνότητες τους επίσης αλλάζουν στη συχνότητα του στάτη. Όλα τα ηλεκτρικά φαινόμενα στο δρομέα, όταν παρατηρούνται από παρατηρητή σταθερά τοποθετημένο στο στάτη της μηχανής γίνονται φαινόμενα με συχνότητα αυτή του στάτη, γιατί απλούστατα τα τυλίγματα του στάτη βλέπουν τα κύματα ΜΕΔ και ροής να ταξιδεύουν με τη σύγχρονη ταχύτητα.



Σχήμα 2.5.3: Ισοδύναμο κύκλωμα πολυφασικού κινητήρα επαγωγής

### 2.5.1 ΑΝΑΛΥΣΗ ΙΣΟΔΥΝΑΜΟΥ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ

Από το κύκλωμα του σχήματος 2.5.3 μπορούν να υπολογισθούν το ρεύμα, η ενεργός και η άεργος ισχύς που απορροφούνται από τον κινητήρα σε δεδομένη ολίσθηση  $s$ . Επί πλέον μπορούν να καθορισθούν οι συνθήκες μηχανικής εξόδου.

Από απλή εποπτεία του ισοδύναμου κυκλώματος διαπιστώνεται ότι η ισχύς που προσδίδεται στο διάκενο από τα τυλίγματα του στάτη είναι:

$$P_{g1} = m_1 E_1 I_2 \cos \phi_2 \quad (2.5.1.1)$$

Όπου  $m_1$  ο αριθμός των φάσεων του στάτη. Η αντίστοιχη ροπή θα είναι τότε :

$$T = \frac{1}{\omega_s} m_1 E_1 I_2 \cos \phi_2 = \frac{P_s}{4\pi f} m_1 E_1 I_2 \cos \phi_2 \quad N \cdot m \quad (2.5.1.2\alpha)$$

Όπου  $\omega_s$  είναι η σύγχρονη γωνιακή ταχύτητα σε μηχανικά ακτίνια ανά δευτερόλεπτο και  $P_s$  ο αριθμός των πόλων του στάτη. Η ροπή αυτή ονομάζεται εσωτερική μαγνητική ροπή του κινητήρα. Συνεπώς:

$$T = \frac{1}{\omega_s} P_{g1} \quad (2.5.1.2\beta)$$

Εξ' άλλου το ισοδύναμο κύκλωμα δείχνει ότι  $P_{g1}$  ισούται με την ισχύ που απορροφάται από την ανακλώμενη αντίσταση δρομέα  $r_2/s$  για όλες τις φάσεις. Έτσι:

$$P_{g1} = m_1 I_2^2 \frac{r_2}{s} \quad (2.5.1.3)$$

$$T = \frac{1}{\omega_s} m_1 I_2^2 \frac{r_2}{s} \quad (2.5.1.4)$$

Η μηχανική ισχύς ισούται με τη ροπή επί τη γωνιακή ταχύτητα. Η εσωτερική μηχανική ισχύς  $P$  η αναπτυσσόμενη από τον κινητήρα, είναι τότε:

$$P = (1 - s) \omega_s T = (1 - s) P_{g1} \quad (2.5.1.5)$$

Εφ' όσον η μηχανική γωνιακή ταχύτητα του δρομέα σε ολίσθηση  $s$  είναι  $(1-s)\omega_s$ , rad/sec. Δηλαδή το κλάσμα  $(1-s)$  της ισχύος που απορροφάται από το στάτη μετασχηματίζεται σε μηχανική ισχύ. Το υπόλοιπο, δηλαδή το κλάσμα  $s$  της ισχύος του στάτη, μεταφέρεται με δράση μετασχηματιστή στα ηλεκτρικά κυκλώματα του δρομέα. Η ηλεκτρική ισχύς  $P_{g2}$  που αναπτύσσεται στο δρομέα στην συχνότητα ολισθήσεως είναι γι' αυτό:

$$P_{g2} = s P_{g1} \quad (2.5.1.6)$$



Η μηχανή επαγωγής είναι έτσι ένας γενικευμένος ηλεκτρομηχανικός μετασχηματιστής που απορροφά ηλεκτρική ισχύ στα πρωτεύοντα τυλίγματα, μετατρέπει το κλάσμα  $(1-s)$  της ισχύος αυτής σε μηχανική ισχύ και μετασχηματίζει το κλάσμα  $s$  σε ηλεκτρική ισχύ στα δευτερεύοντα τυλίγματα του με μια αντίστοιχη μεταβολή στη συχνότητα του. Στον κινητήρα επαγωγής με βραχυκυκλωμένα τυλίγματα δρομέα, η ισχύς  $P_{g2}$  καταναλίσκεται ως απώλεια χαλκού στο δρομέα για όλες τις φάσεις.

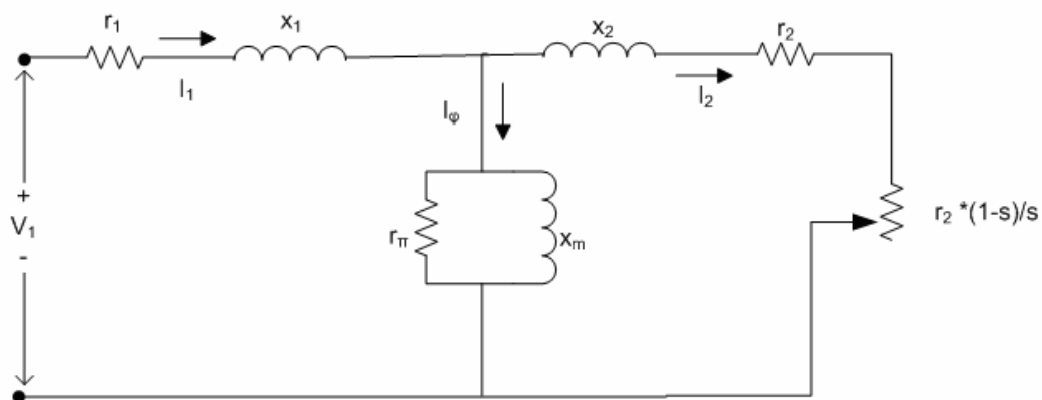
$$\text{Απώλειες χαλκού δρομέα} = sP_{g1} = s\omega_s T \quad (2.5.1.7)$$

Συμπέρασμα που συμφωνεί με το αποτέλεσμα του πολλαπλασιασμού της εξίσωσης 2.5.1.3 επί  $s$ . Μια μηχανή επαγωγής που λειτουργεί υπό υψηλή ολίσθηση είναι εγγενώς ένα μη αποδοτικό μέσο παραγωγής ροπής. Αντικατάσταση της εξίσωσης 2.5.1.3 στην εξίσωση 2.5.1.5 δίνει για την εσωτερική μηχανική ισχύ:

$$P = m_1 I_2^2 r_2 \frac{1-s}{s} \quad (2.5.1.8)$$

Όταν πρέπει να θεωρηθούν απόψεις ισχύος, το ισοδύναμο κύκλωμα σχεδιάζεται όπως το σχήμα 2.5.1.1.

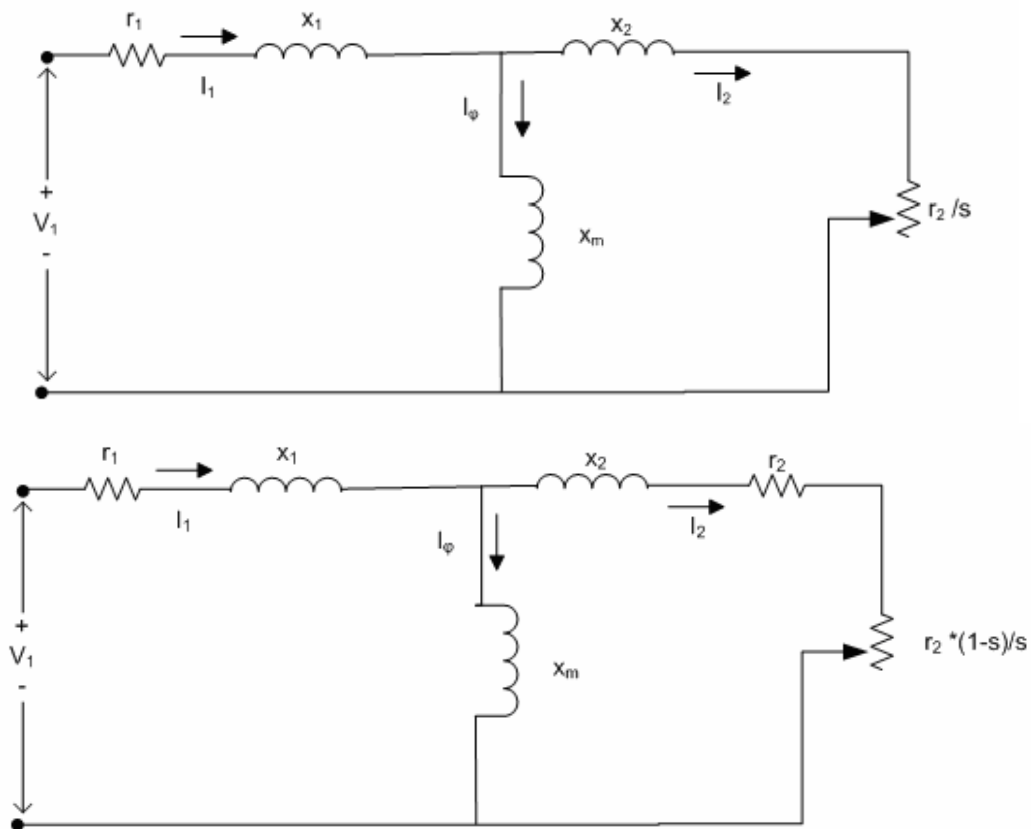
Η εσωτερική μηχανική ισχύς ανά φάση στάτη ισούται με την ισχύ που απορροφάται από την αντίσταση  $r_2 = (1-s)/s$ .



**Σχήμα 2.5.1.1: Ισοδύναμο ανά φάση κύκλωμα μηχανής επαγωγής για προσδιορισμό ισχύος**

Η ροπή  $T$  και η ισχύς  $P$  δεν είναι τιμές εξόδου που διατίθενται στον άξονα, διότι η τριβή, ο ανεμισμός και οι διαφεύγουσες απώλειες φορτίου απομένουν να ληφθούν υπόψη. Είναι φανερό ότι οι τριβές και ο ανεμισμός πρέπει να αφαιρεθούν από την εσωτερική ροπή  $T$  και την εσωτερική ισχύ  $P$  και γίνεται η παραδοχή ότι οι επιδράσεις του φορτίου μπορούν να αφαιρεθούν κατά αυτό τον τρόπο. Το τελικό υπόλοιπο είναι διαθέσιμο σε μηχανική μορφή στον άξονα ως χρήσιμο έργο.

Μια απλούστευση του ισοδύναμου κυκλώματος της μηχανής προκύπτει αν η παράλληλη αντίσταση  $r_{\pi}$  παραληφθεί και η αντίστοιχη επίδραση απώλειας πυρήνα αφαιρεθεί από την  $T$  ή  $P$  συγχρόνως με την αφαίρεση της τριβής, ανεμισμού και διαφευγουσών απωλειών φορτίου. Το ισοδύναμο κύκλωμα τότε γίνεται όπως το σχήμα 2.5.1.2α ή 2.5.1.2β και το σχετικό σφάλμα είναι αμελητέο. Μια τέτοια μέθοδος έχει ένα πλεονέκτημα κατά την δοκιμή του κινητήρα, διότι η απώλεια πυρήνα κενού φορτίου δεν χρειάζεται να χωρισθεί τότε από την τριβή και τον ανεμισμό.



**Σχήμα 2.5.1.2: Απλουστευμένα ισοδύναμα κυκλώματα. Η απώλεια πυρήνα συντίθεται με την τριβή και τον ανεμισμό**

## 2.6 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΗ ΡΟΠΗΣ – ΣΤΡΟΦΩΝ

Για τον καθορισμό της ροπής και της ισχύος της μηχανής επαγωγής με βάση το ισοδύναμο κύκλωμα χρησιμοποιείται το θεώρημα του Thevenin για την απλοποίηση του ισοδύναμου κυκλώματος. Με την ανάλυση αυτή η τάση του στάτη  $V_1$  στα κυκλώματα του σχήματος 2.5.1.2 αντικαθίσταται με την ισοδύναμη τάση  $V_{th}$  η οποία υπολογίζεται ως εξής.

$$\dot{V}_{th} = \dot{V}_1 \cdot \frac{jx_m}{r_1 + j(x_1 + x_m)} \quad (2.6.1)$$

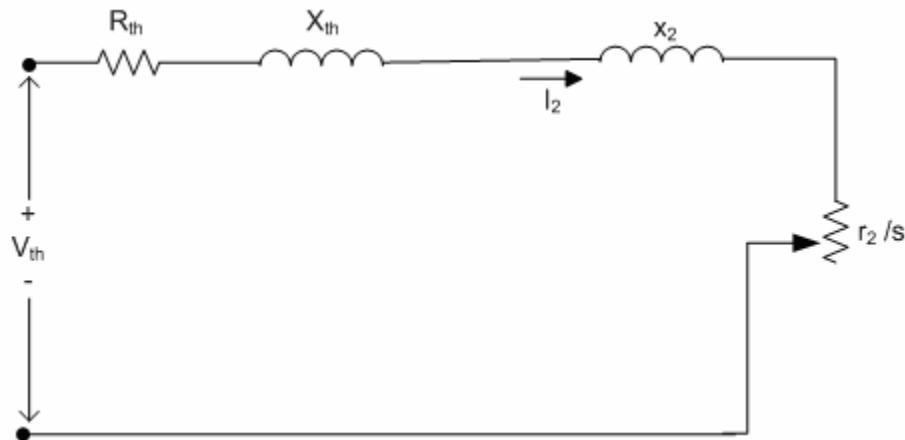
Οι σύνθετες αντιστάσεις αντικαθίστανται με τις ισοδύναμες αντιστάσεις:

$$Z_{th} = (r_1 + jx_m) // jx_m$$

$$Z_{th} = \frac{(r_1 + jx_1) \cdot jx_m}{(r_1 + jx_1 + jx_m)} \quad (2.6.2)$$

$$Z_{th} = R_{th} + jX_{th}$$

Έτσι προκύπτει το απλοποιημένο ισοδύναμο κύκλωμα του σχήματος 2.6.1:



**Σχήμα 2.6.1** Απλοποιημένο κατά Thevenin ισοδύναμο κύκλωμα μηχανής επαγωγής

Από το παραπάνω σχήμα μπορεί εύκολα να προσδιοριστεί το ρεύμα  $I_2$  το οποίο όταν αντικατασταθεί στην εξίσωση ροπής 2.5.1.4 δίνει την έκφραση της ροπής μέσω του ισοδύναμου κυκλώματος.

$$I_2 = \frac{V_{th}}{Z_{th} + Z_2} = \frac{V_{th}}{\left(R_{th} + \frac{r_2}{s}\right) + j(X_{th} + x_2)}$$

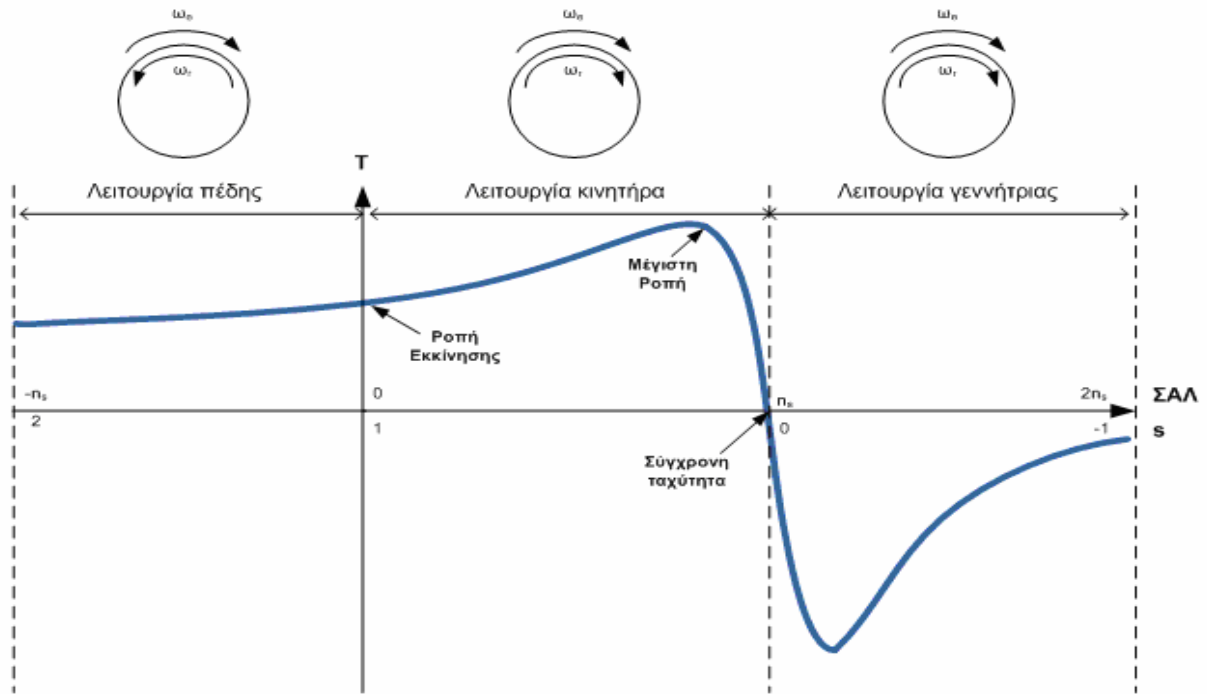
$$I_2^2 = \frac{V_{th}^2}{\left(R_{th} + \frac{r_2}{s}\right)^2 + j(X_{th} + x_2)^2} \quad (2.6.3)$$

$$\xrightarrow{2.5.14} T = m_1 \frac{p r_2}{2 s} \frac{1}{\omega_s} \cdot \frac{V_{th}^2}{\left(R_{th} + \frac{r_2}{s}\right)^2 + j(X_{th} + x_2)^2} \quad (2.6.4)$$

Από την εξίσωση 2.6.4 μπορεί να χαραχθεί η καμπύλη ροπής – ολισθήσεως που φαίνεται στο σχήμα 2.6.2

Από το σχήμα 2.6.2 διακρίνονται οι τρεις περιοχές λειτουργίας της επαγωγικής μηχανής. Ανάλογα με την ολίσθηση η μηχανή συμπεριφέρεται ως κινητήρας, ως γεννήτρια ή βρίσκεται σε κατάσταση πέδης.

Η πρώτη περιοχή λειτουργίας που διακρίνεται είναι η λειτουργία πέδης η οποία υφίσταται για τιμές ολισθήσεως  $1 < s < 2$ . Η μηχανή εισέρχεται στην περιοχή αυτή όταν κατά την διάρκεια λειτουργίας της ως κινητήρας (επόμενη περίπτωση) γίνει αντιστροφή φάσεων στα τυλίγματα τροφοδοσίας. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την άμεση αναστροφή του μαγνητικού πεδίου οπότε την ανάπτυξη μιας αρνητικής ροπής (ηλεκτρομαγνητική) η οποία αντιτίθεται στη ήδη υπάρχουσα ροπή (μηχανική) του δρομέα πράγμα που οδηγεί στην πέδηση της μηχανής. Αν μόλις εξισωθούν οι δύο ροπές αποσυνδεθεί η τροφοδοσία τότε γίνεται αποτελεσματική πέδηση του κινητήρα.



**Σχήμα 2.6.2: Καμπύλη ροπής–στροφών [T–ns] και ροπής–ολίσθησης [T–s]**

Η δεύτερη περιοχή λειτουργίας είναι η κανονική περιοχή λειτουργίας της μηχανής ως κινητήρα.  $0 < s < 1$ . Όταν η ολίσθηση είναι 0 δηλαδή ο κινητήρας είναι στη σύγχρονη ταχύτητα τότε δεν αναπτύσσεται ηλεκτρομαγνητική ροπή. Καθώς η ολίσθηση αυξάνει ενώ η ταχύτητα μειώνεται η ηλεκτρομαγνητική ροπή αυξάνεται ημιγραμμικώς μέχρι τη μέγιστη ροπή ή ροπή ανατροπής. Σε αυτή την περιοχή λειτουργίας η πτώση τάσεως στο στάτη είναι χαμηλή και η ροή διακένου παραμένει περίπου σταθερή. Πέραν της ροπής ανατροπής η ηλεκτρομαγνητική ροπή μειώνεται με την αύξηση της ολισθήσεως και για  $s=1$  βρίσκεται η ροπή εκκινήσεως. Αντικατάσταση του  $s$  την εξίσωση της ροπής (2.6.4) δίνει τη ροπή εκκίνησης.

$$T_{εκκ} = m_1 \frac{p r_2}{2 \omega_2} \frac{V_{th}^2}{(R_{th} + r_2)^2 + j(X_{th} + x_2)^2} \quad (1.6.5)$$

Η μέγιστη ροπή ή ροπή ανατροπής προκύπτει αν από την εξίσωση της ροπής (2.5.1.4) παρατηρηθεί ότι η ροπή γίνεται μέγιστη όταν η προσδιδόμενη στην αντίσταση  $r_2/s$  ισχύς γίνει μέγιστη. Η ισχύς αυτή γίνεται μέγιστη όταν η σύνθετη αντίσταση  $r_2/s$  ισούται με το μέτρο της σύνθετης αντίστασης μεταξύ αυτής και της σταθερής τάσης  $V_1$  δηλαδή:

$$\frac{r_2}{s_{maxT}} = \sqrt{R_{th} + (X_{th} + x_2)^2} \quad (2.6.6)$$

Η ολίσθηση τότε στη μέγιστη ροπή είναι:

$$s_{maxT} = \frac{r_2}{\sqrt{R_{th} + (X_{th} + x_2)^2}} \quad (2.6.7)$$

Οπότε η μέγιστη ροπή γίνεται:

$$T_{max} = m_1 \frac{1}{2} \frac{p}{\omega_s} \frac{1}{R_{th} + \sqrt{R_{th} + (X_{th} + x_2)^2}} V_1^2 \quad (2.6.8)$$

Από τις παραπάνω εξισώσεις προκύπτει ότι η ολίσθηση είναι ευθέως ανάλογη προς την αντίσταση του δρομέα  $r_2$ . Όταν η αντίσταση του δρομέα αυξηθεί με την προσθήκη μιας παράλληλης εξωτερικής αντίστασης (όταν η μηχανή είναι τυλιγμένου δρομέα) η μέγιστη εσωτερική ροπή είναι ανεπηρέαστη αλλά η ταχύτητα στην οποία λαμβάνεται μπορεί να ελεγχθεί.

Η Τρίτη περιοχή λειτουργίας είναι η περιοχή λειτουργίας της μηχανής ως γεννήτριας. Η συμπεριφορά αυτή λαμβάνει χώρα όταν η ολίσθηση γίνει αρνητική δηλαδή ο δρομέας περιστρέφεται σε συχνότητα μεγαλύτερη της συχνότητας του δικτύου τροφοδοσίας του στάτη. Έτσι υπάρχει ροή ισχύος από το μηχανικό μέρος στο δίκτυο του στάτη σύμφωνα με την εξίσωση:

$$P_{\varepsilon\sigma\sigma} = (1 - s)P_g \quad (2.6.9)$$

Όπου η ροπή λαμβάνεται θετική αλλά η ταχύτητα αρνητική έτσι αν η εσωτερική ισχύς είναι αρνητική τότε και η ισχύς διακένου θα είναι αρνητική.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

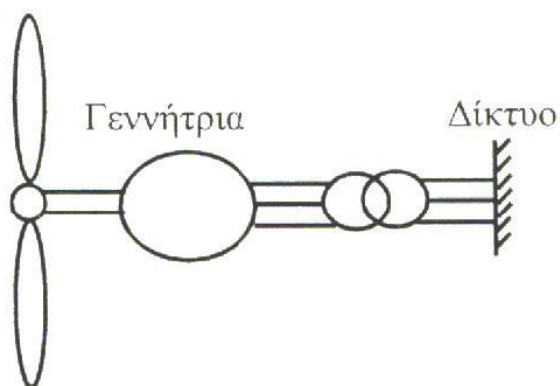
### ΑΙΟΛΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

#### 3.1 ΜΕΘΟΔΟΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ

Υπάρχουν δύο βασικές μέθοδοι λειτουργίας των συστημάτων μετατροπής της αιολικής ενέργειας σε ηλεκτρική. Η μέθοδος λειτουργίας σταθερής ταχύτητας (fixed speed) και η μέθοδος λειτουργίας μεταβλητής ταχύτητας (variable speed).

##### 3.1.1 ΣΤΑΘΕΡΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ

Λειτουργία σταθερής ταχύτητας σημαίνει ότι ο δρομέας της ανεμογεννήτριας στρέφεται με σταθερό αριθμό στροφών ανεξάρτητα της ταχύτητας του ανέμου. Ο τρόπος σύνδεσης της γεννήτριας με το δίκτυο, είναι ο ίδιος με τον τρόπο σύνδεσης γεννητριών που τροφοδοτούνται από συμβατικές πηγές ενέργειας. Δηλαδή η σύνδεση γίνεται απευθείας, χρησιμοποιώντας ένα μετασχηματιστή προσαρμογής του επιπέδου τάσης της γεννήτριας, σε αυτό του συστήματος μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας (σχήμα 3.1.1.1).



Σχήμα 3.1.1.1

Αυτός ο τρόπος σύνδεσης, “επιβάλλει” στην ανεμογεννήτρια την γωνιακή ταχύτητα περιστροφής της. Η γεννήτρια που χρησιμοποιείται μπορεί να είναι είτε σύγχρονη είτε ασύγχρονη. Ειδικότερα δε, όταν χρησιμοποιούνται σύγχρονες μηχανές ως γεννήτριες, ο αριθμός στροφών παραμένει σταθερός,

ενώ όταν χρησιμοποιούνται ασύγχρονες μηχανές το εύρος μεταβολών των στροφών εξαρτάται από το φορτίο και είναι περιορισμένο.

Τα συστήματα σταθερών στροφών – σταθερής συχνότητας είναι συστήματα που βασίζονται στην υλοποίηση συστημάτων ελέγχου μεθόδου “stall” (απώλεια αεροδυναμικής στήριξης, εξαρτάται από τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά των πτερυγίων), είτε συστημάτων ελέγχου μεθόδου “pitch” (έλεγχος μεταβολής της κλίσης των πτερυγίων).

Οι συμβατικές ανεμογεννήτριες σταθερών στροφών διαθέτουν κυρίως γεννήτριες επαγωγής τύπου βραχυκυκλωμένου κλωβού. Ο λόγος που προτιμάται η ασύγχρονη γεννήτρια είναι γιατί είναι κατασκευαστικά απλούστερη κάτι που μειώνει το κόστος και αυξάνει την αξιοπιστία της συγκρινόμενη με τη σύγχρονη γεννήτρια. Επιπλέον η γωνιακή της ταχύτητα μπορεί να μεταβάλλεται σε ένα εύρος λίγο πάνω από τη σύγχρονη ταχύτητα. Αυτή η δυνατότητα έχει ως αποτέλεσμα να εξομαλύνονται οι διακυμάνσεις της ισχύος στην έξοδο της γεννήτριας καθώς και η καταπόνηση του μηχανικού συστήματος μεταφοράς. Το μεγάλο μειονέκτημα που παρουσιάζει είναι ότι, σε αντίθεση με την σύγχρονη γεννήτρια, απορροφά άεργο ισχύ. Για την τροφοδοσία της ασύγχρονης γεννήτριας με άεργο ισχύ, συνδέονται στους ακροδέκτες των τυλιγμάτων της κατάλληλοι πυκνωτές.

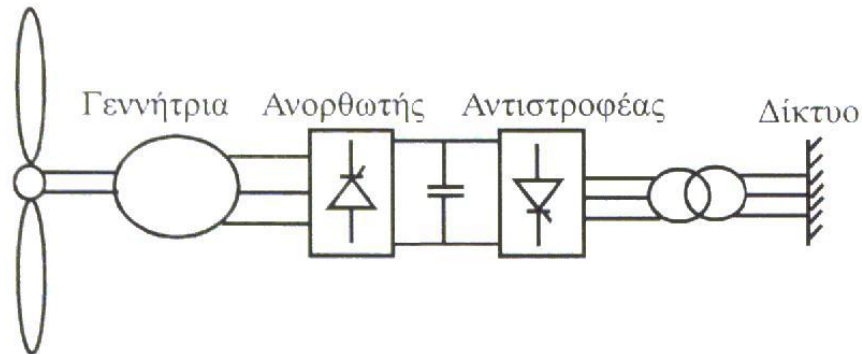
Το σύστημα σταθερών στροφών παρουσιάζει το πλεονέκτημα της εξαιρετικής απλότητας και αξιοπιστίας και των μηδενικών αναγκών συντήρησης, γεγονός που συνέβαλε στην καθιέρωσή του, σε μια εποχή όπου η αξιοπιστία ήταν το βασικότερο από τα προς επίλυση προβλήματα των ανεμογεννητριών. Ταυτόχρονα, όμως, το σχήμα αυτό χαρακτηρίζεται από μια σειρά από καθοριστικά μειονεκτήματα, τα οποία σχετίζονται αφ’ ενός με την σταθερότητα των στροφών και αφ’ ετέρου με τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά της μηχανής επαγωγής. Εάν η μεταβαλλόμενη αεροδυναμική ροπή περιέχει αρμονικές συνιστώσες, που βρίσκονται κοντά στις συχνότητες συντονισμού του μηχανικού συστήματος μετάδοσης της ισχύος, θα εμφανιστούν έντονες ταλαντώσεις σ’ αυτό αλλά και στην ισχύ εξόδου της γεννήτριας. Συνεπώς έχουμε αυξημένη μεταβλητότητα ροπών και της ισχύος εξόδου, ταλαντώσεις του μηχανικού συστήματος και τέλος λειτουργία του δρομέα σε υποβέλτιστο αεροδυναμικό συντελεστή ισχύος.

### **3.1.2 ANEMOGENNHTPIES METABΛHTHS TAXYTHTAS**

Στην λειτουργία μεταβλητής ταχύτητας, η ταχύτητα του δρομέα της ανεμογεννήτριας μεταβάλλεται κατά ελεγχόμενο τρόπο, ανάλογα με την ταχύτητα του ανέμου. Για την σύνδεση της ανεμογεννήτριας με το δίκτυο



σταθερής συχνότητας χρησιμοποιείται μετατροπέας συχνότητας. Με τον τρόπο αυτό η ταχύτητα περιστροφής αποδεσμεύεται από τη σταθερή συχνότητα του δικτύου και είναι δυνατή η μεταβολή της. Στο σχήμα 3.1.2.1 παρουσιάζεται το διάγραμμα ενός συστήματος μεταβλητής ταχύτητας.



**Σχήμα 3.1.2.1 Σύστημα μεταβλητής ταχύτητας**

Όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.1.2.1, στην έξοδο της γεννήτριας συνδέεται ένας τριφασικός ανορθωτής ελεγχόμενος ή μη, που μετατρέπει τα εναλλασσόμενα ηλεκτρικά μεγέθη σε συνεχή. Η σύνδεση στο δίκτυο γίνεται μέσω ενός αντιστροφέα, ο οποίος μετατρέπει τα συνεχή ηλεκτρικά μεγέθη σε εναλλασσόμενα, συχνότητας ίδιας με αυτήν του δικτύου. Οι μετατροπείς αυτοί μπορούν να αποτελούνται είτε από θυρίστορ, είτε από ημιαγωγικά στοιχεία ελεγχόμενης έναυσης και σβέσης, όπως θυρίστορ με πύλη σβέσης (GTO) ή τρανζίστορ μονωμένης πύλης (IGBT).

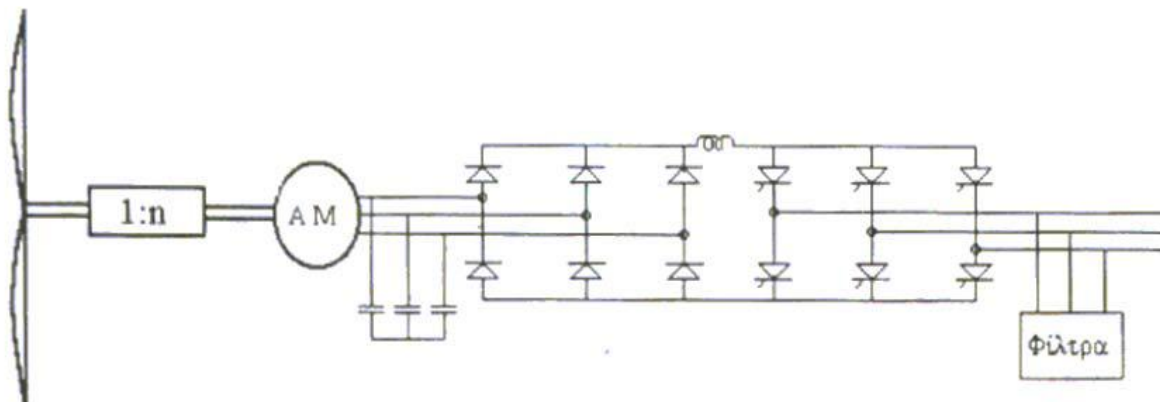
Το βασικό πλεονέκτημα της λειτουργίας μεταβλητής ταχύτητας είναι η βελτιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης της μηχανής, καθώς αυξάνεται το ποσοστό εκμετάλλευσης της κινητικής ενέργειας του ανέμου κυρίως κατά τις χαμηλές ταχύτητες ανέμου, σε σχέση με την λειτουργία σταθερής ταχύτητας. Ένα ακόμα πλεονέκτημα είναι η δυνατότητα ελέγχου της άεργου ισχύος ανάλογα με τον τύπο μετατροπέα που χρησιμοποιείται. Σημαντικό επίσης πλεονέκτημα από την λειτουργία μεταβλητής ταχύτητας είναι η εξομάλυνση της μεταβλητότητας των μηχανικών ροπών και απόσβεση των συντονισμών του μηχανικού συστήματος μετάδοσης της κίνησης, τα οποία σημαίνουν μείωση των μηχανικών καταπονήσεων και αύξηση της διάρκειας ζωής του συστήματος.

Τα μειονεκτήματα αυτού του συστήματος είναι καταρχήν η αυξημένη πολυπλοκότητα λόγω του μετατροπέα συχνότητας και η αντίστοιχη αύξηση του κόστους. Επίσης λόγω του ηλεκτρονικού μετατροπέα παρουσιάζεται αύξηση των ανώτερων αρμονικών που εισέρχονται στο δίκτυο, κάτι που κάνει αναγκαία την εγκατάσταση φίλτρων για τον περιορισμό τους. Υπάρχουν

διάφορα συστήματα εκ των οποίων στη συνέχεια θα εξεταστούν τα ακόλουθα τρία:

- Ασύγχρονη μηχανή βραχυκυκλωμένου δρομέα (κλωβό) με σύνδεση ΕΡ/ΣΡ/ΕΡ στον στάτη.
- Ασύγχρονη μηχανή δακτυλιοφόρου δρομέα με σύνδεση ΕΡ/ΣΡ/ΕΡ στον δρομέα
- Σύγχρονη μηχανή με διασύνδεση ΕΡ/ΣΡ/ΕΡ στον στάτη.

Στο σχήμα 3.1.2.2 εικονίζεται η απλούστερη δυνατή διάταξη ανεμογεννήτριας μεταβλητών στροφών με χρήση ασύγχρονης γεννήτριας, η οποία αυτοδιεγείρεται μέσω συστοιχίας πυκνωτών. Οι χρησιμοποιούμενοι μετατροπείς είναι ένας μη ελεγχόμενος ανορθωτής διόδων στους ακροδέκτες της μηχανής και μια εξαπαλμική γέφυρα με θυρίστορ που λειτουργεί ως αντιστροφέας.



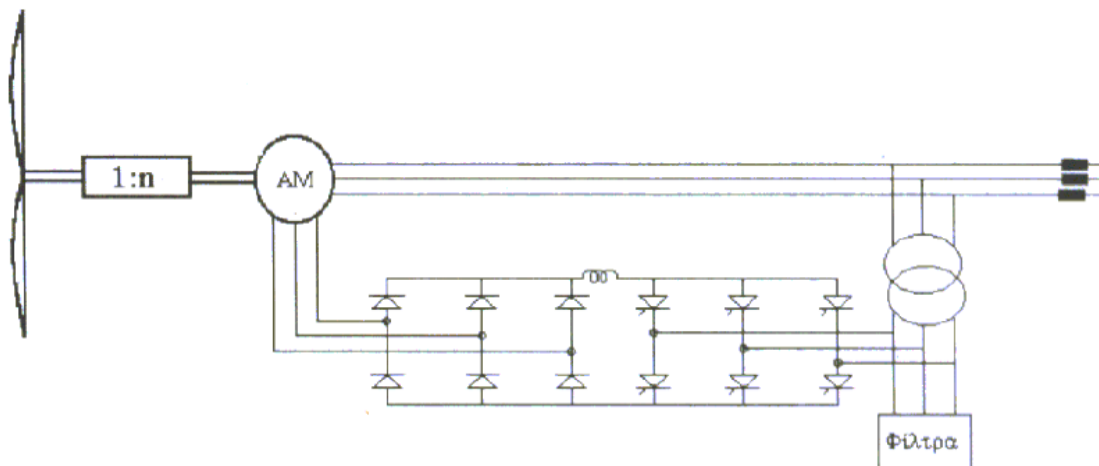
**Σχήμα 3.1.2.2 Ανεμογεννήτρια με Α.Μ. με βραχυκυκλωμένο δρομέα (κλωβό) με σύνδεση ΕΡ/ΣΡ/ΕΡ στο στάτη**

Ο ανορθωτής διόδων μετατρέπει τη μεταβαλλόμενου πλάτους και μεταβαλλόμενης συχνότητας, τάση των ακροδεκτών της γεννήτριας σε συνεχή. Η συνεχής τάση από την πλευρά του αντιστροφέα ρυθμίζεται μέσω της γωνίας έναυσης των θυρίστορ. Η διαφορά μεταξύ των δύο τάσεων καθορίζει την τιμή του συνεχούς ρεύματος. Άρα, μεταβάλλοντας κατάλληλα την γωνία έναυσης των θυρίστορ, μπορούμε να ρυθμίζουμε την ροή ισχύος από την γεννήτρια στο δίκτυο, έτσι ώστε να ελέγχεται η γωνιακή ταχύτητα του δρομέα κατά τον επιθυμητό τρόπο. Η διάταξη του σχήματος 3.1.2.2 χρησιμοποιείται για τον έλεγχο ανεμοκινητήρων ισχύος μέχρι 250 kW.

Ο περιορισμός της ισχύος σε αυτά τα συστήματα, για μεγάλες ταχύτητες του ανέμου, επιτυγχάνεται μέσω ελέγχου του βήματος των πτερυγίων. Οι πυκνωτές στους ακροδέκτες της ασύγχρονης γεννήτριας τροφοδοτούν την άεργο ισχύ που απαιτείται για την διέγερσή της. Κύρια πλεονεκτήματα της

διάταξης είναι βέβαια το χαμηλό κόστος της ασύγχρονης γεννήτριας και η απλότητα και αξιοπιστία του ανορθωτή διόδων. Όμως, η επιλογή ανορθωτή διόδων δεν μας δίνει την δυνατότητα ελέγχου της τάσης στη διασύνδεση συνεχούς ρεύματος. Η τάση αυτή αυξάνεται καθώς αυξάνονται οι στροφές της γεννήτριας. Για τον λόγο αυτό έχουν προταθεί διάφοροι τρόποι περιορισμού της, με κατάλληλη διαμόρφωση της παλμοδότησης των ημιαγωγικών στοιχείων του αντιστροφέα. Από την πλευρά του δικτύου, απαιτούνται μεγάλα και δαπανηρά φίλτρα έτσι ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι αρμονικές ρεύματος που δημιουργούνται από τον αντιστροφέα. Εκτός από το πρόβλημα των αρμονικών, ο αντιστροφέας απορροφά και άεργο ισχύ από το δίκτυο.

Σε ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών έχει προταθεί και διερευνηθεί σε σημαντικό βαθμό η διάταξη ασύγχρονης μηχανής δακτυλιοφόρου δρομέα με σύστημα μετατροπέων συνδεδεμένων στους ακροδέκτες του. Στην απλούστερη περίπτωση, η διάταξη των μετατροπέων περιλαμβάνει μη ελεγχόμενο ανορθωτή στους ακροδέκτες του δρομέα και γέφυρα που λειτουργεί ως αντιστροφέας στην έξοδο, όπως δείχνεται στο σχήμα 3.1.2.3, μέσω των οποίων πραγματοποιείται η ανάκτηση της ισχύος ολισθήσεως και η επιστροφή της στο δίκτυο.



**Σχήμα 3.1.2.3** Ανεμογεννήτρια με Α.Μ. και διάταξη ΕΡ/ΣΡ/ΕΡ στο δρομέα

Στο σχήμα 3.1.2.3, ο αντιστροφέας αποτελείται από θυρίστορ. Η ηλεκτρική ροπή της γεννήτριας είναι ανάλογη του ρεύματος του δρομέα και κατά συνέπεια του συνεχούς ρεύματος. Άρα, μεταβάλλοντας κατάλληλα την γωνία εναύσεως των θυρίστορ του αντιστροφέα, μπορούμε να ρυθμίζουμε την ηλεκτρική ροπή, έτσι ώστε να μεταβάλλεται η γωνιακή ταχύτητα του δρομέα κατά τον επιθυμητό τρόπο. Αυτή η συνδεσμολογία προτιμάται για συστήματα μεγάλης ισχύος (της τάξεως των MW). Η ασύγχρονη μηχανή είναι

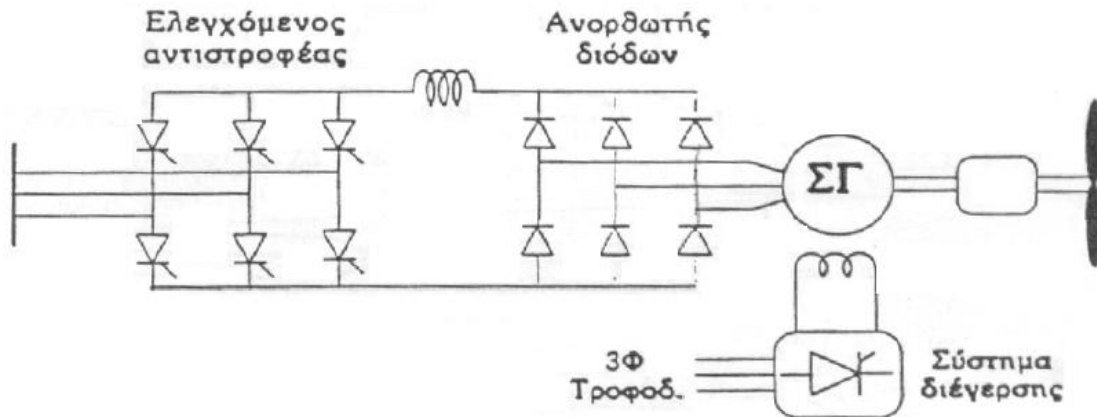
δακτυλιοφόρου δρομέα, η οποία σε σχέση με την βραχυκυκλωμένου δρομέα είναι ακριβότερη και έχει μεγαλύτερες απαιτήσεις συντήρησης.

Από την άλλη πλευρά, επειδή οι ηλεκτρονικοί μετατροπείς είναι στον δρομέα, διαχειρίζονται μόνο ένα τμήμα της συνολικής ισχύος εξόδου, το οποίο καθορίζεται από το εύρος ολισθήσεων που θέλουμε να λειτουργεί η μηχανή. Αυτό το γεγονός οδηγεί σε μείωση της ονομαστικής ισχύος των μετατροπέων και άρα και του κόστους τους. Αυτό είναι και το βασικό πλεονέκτημα αυτής της διάταξης που σε συνδυασμό με την απλότητα και την αξιοπιστία των μετατροπέων την καθιστούν ιδιαίτερα ελκυστική για εφαρμογές ανεμογεννητριών. Επιπλέον έχουμε μικρότερη καταπόνηση του δικτύου από αρμονικές. Παρόλα αυτά το πρόβλημα του μικρού συντελεστή ισχύος, λόγω του αντιστροφέα από θυρίστορ και η ύπαρξη αρμονικών συνεχίζουν να υφίστανται.

Επίσης σε αρκετά χαμηλή συχνότητα έχουμε ταλαντώσεις της ηλεκτρικής ροπής λόγω των παραμορφωμένων ρευμάτων του δρομέα. Το τελευταίο γεγονός πρέπει να ληφθεί σοβαρά υπόψη στον σχεδιασμό του μηχανικού συστήματος μεταφοράς της ισχύος, για την αποφυγή κάποιου πιθανού συντονισμού. Τέλος, είναι δυνατές και άλλες παραλλαγές της διάταξης οι οποίες μπορεί να περιλαμβάνουν ελεγχόμενο ανορθωτή με θυρίστορς αντί για τον ανορθωτή διόδων ή σύστημα διπλών μετατροπέων PWM. Η τελευταία υλοποίηση μάλιστα είναι και η καλύτερη καθώς απαλείφει και τα προβλήματα των αρμονικών, διατηρώντας το πλεονέκτημα του μειωμένου μεγέθους των μετατροπέων.

Η χρησιμοποίηση σύγχρονης μηχανής για γεννήτρια έχει το πλεονέκτημα ότι δεν χρειάζεται τους πυκνωτές οι οποίοι αποτελούν εξωτερική πηγή αέργου ισχύος. Όμως το κόστος της είναι μεγαλύτερο από το κόστος ασύγχρονης μηχανής.

Μια διαφορετική διαμόρφωση με χρήση σύγχρονης γεννήτριας είναι αυτή που εικονίζεται στο σχήμα 3.1.2.4 και στην οποία χρησιμοποιείται και ανορθωτής και αντιστροφέας με θυρίστορς.



**Σχήμα 3.1.2.4** Ανεμογεννήτρια με Σ.Μ., ανορθωτή διόδων και αντιστροφέα γέφυρας με θυρίστορς

Αυτή η διάταξη επιτρέπει την αντιστροφή της ροής ισχύος για επιτάχυνση της ανεμογεννήτριας κατά την εκκίνηση. Το συνεχές ρεύμα ελέγχεται μέσω της γωνίας έναυσης των ηλεκτρονικών στοιχείων του αντιστροφέα. Με αυτόν τον τρόπο, όπως και στην περίπτωση της ασύγχρονης μηχανής, ρυθμίζεται η ροή ισχύος από την ανεμογεννήτρια στο δίκτυο, έτσι ώστε να μεταβάλλεται η γωνιακή ταχύτητα του δρομέα κατά τον επιθυμητό τρόπο. Η συμπεριφορά αυτού του συστήματος από την πλευρά του δικτύου είναι εξίσου άσχημη με τις προηγούμενες περιπτώσεις λόγω των αρμονικών που εισάγει ο αντιστροφέας.

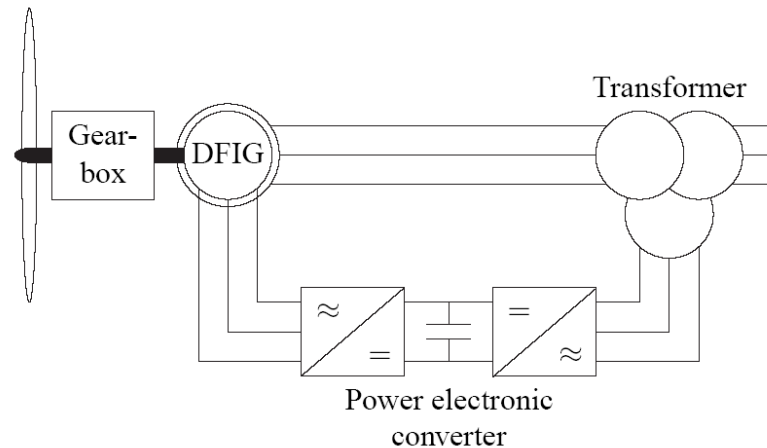
### **3.1.3 ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΜΕ DFIG**

Το DFIG αποτελείται από μια επαγωγική γεννήτρια με δακτυλιοφόρο δρομέα η οποία συνδέεται με το δίκτυο και έναν ηλεκτρονικό μετατροπέα.

Ο όρος “doubly fed” αναφέρεται στο γεγονός ότι η τάση στο στάτη εφαρμόζεται από το δίκτυο και η τάση στο δρομέα προκαλείται από το μετατροπέα ισχύος. Το σύστημα αυτό επιτρέπει λειτουργία μεταβλητής ταχύτητας γύρω από ένα μεγάλο αλλά με συγκεκριμένα όρια εύρος. Ο μετατροπέας εξισορροπεί τη διαφορά ανάμεσα στη μηχανική και την ηλεκτρική συχνότητα δίνοντας ένα ρεύμα δρομέα με μεταβλητή συχνότητα. Τόσο στη διάρκεια κανονικής λειτουργίας όσο και σε σφάλματα η συμπεριφορά της γεννήτριας καθορίζεται από το μετατροπέα και τους ελεγκτές του.

Το σύστημα που φαίνεται στο σχήμα 3.1.3.1 αποτελείται από μια ανεμογεννήτρια με DFIG. Αυτό σημαίνει πως ο στάτης είναι απευθείας συνδεδεμένος με το δίκτυο ενώ τα τυλίγματα του δρομέα είναι συνδεδεμένα διαμέσου δακτυλιδιών ολίσθησης (slip rings) με έναν μετατροπέα.

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 να χειριστεί τη συνολική ισχύ. Επίσης, το κόστος του μετατροπέα μειώνεται.



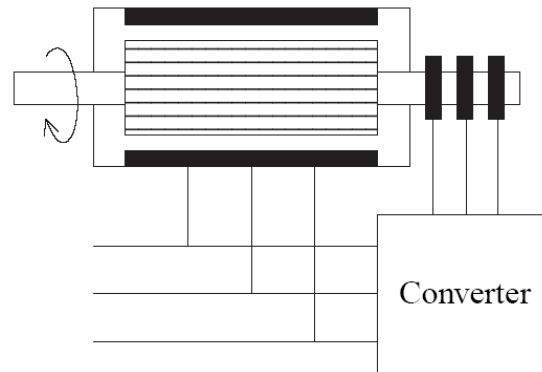
**Σχήμα 3.1.3.1** Ανεμογεννήτρια μεταβλητής ταχύτητας με DFIG

Το DFIG έχει αρκετά πλεονεκτήματα. Έχει την ικανότητα να ελέγχει την άεργο ισχύ και να αποσυνδέει τον έλεγχο της ενεργού και της άεργου ισχύος με ανεξάρτητο έλεγχο του ρεύματος δρομέα. Το DFIG δεν είναι απαραίτητο να μαγνητιστεί από το δίκτυο ισχύος, μπορεί να μαγνητιστεί από το κύκλωμα του δρομέα επίσης. Είναι επίσης δυνατό να παραχθεί άεργος ισχύς η οποία μπορεί να μοιραστεί στο στάτη από τον “grid side” μετατροπέα. Εντούτοις, ο “grid side” μετατροπέας κανονικά λειτουργεί σε μοναδιαίο συντελεστή ισχύος και δεν περιλαμβάνεται στην άεργο ισχύ που ανταλλάσσεται ανάμεσα στην ανεμογεννήτρια και το δίκτυο. Στην περίπτωση που το δίκτυο είναι ασθενές με διακυμάνσεις στην τάση, η γεννήτρια διπλής τροφοδότησης μπορεί να ρυθμιστεί ώστε να παράγει ή να καταναλώνει ένα ποσό άεργου ισχύος με σκοπό τον έλεγχο της τάσης.

Υπάρχει μια ποικιλία DFIG μεθόδων που χρησιμοποιεί ελεγχόμενες εξωτερικές αντιστάσεις δρομέα. Μερικά μειονεκτήματα της μεθόδου, είναι πως απελευθερώνεται ενέργεια χωρίς λόγο στις αντιστάσεις δρομέα και πως δεν είναι δυνατό να ελεγχθεί η άεργος ισχύς.

Για συστήματα μεταβλητής ταχύτητας με περιορισμένο εύρος ταχυτήτων, π.χ.  $\pm 30\%$  της σύγχρονης ταχύτητας, το DFIG μπορεί να είναι μια ενδιαφέρουσα λύση, εξαιτίας των παραπάνω λόγων.

Στο σχήμα 3.1.3.2 φαίνεται η σύνδεση του DFIG και συγκεκριμένα η σύνδεση του κυκλώματος του στάτη με το δίκτυο και η σύνδεση του κυκλώματος του δρομέα με το μετατροπέα διαμέσου δαχτυλιδιών ολίσθησης.

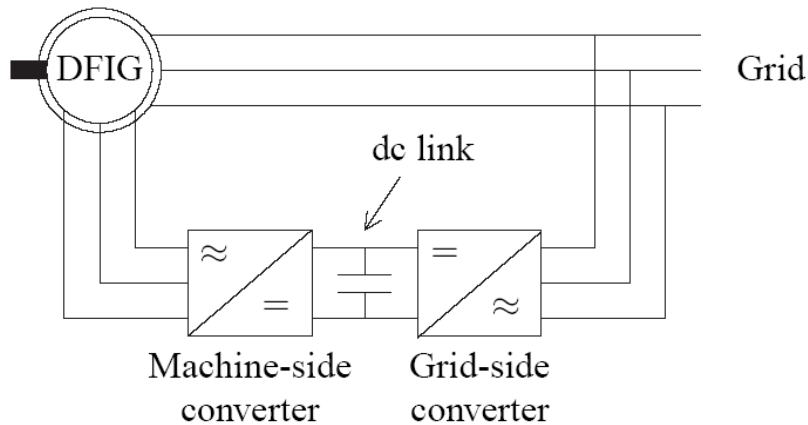


**Σχήμα 3.1.3.2 Αρχή ενός DFIG**

Μια πιο λεπτομερής εικόνα του DFIG συστήματος με έναν “back – to – back” μετατροπέα παρουσιάζεται στο σχήμα 3.1.3.3. Ο “back – to back” μετατροπέας αποτελείται από δυο μετατροπείς, έναν μετατροπέα στην πλευρά της μηχανής (machine side) και έναν μετατροπέα στην πλευρά του δικτύου (grid side), οι οποίοι συνδέονται «πλάτη με πλάτη» (back – to back). Ανάμεσα στους δυο μετατροπείς τοποθετείται ένας d.c. πυκνωτής ως αποθηκευτικός χώρος ενέργειας, με στόχο να κρατηθούν οι μεταβολές τάσης στη d.c. σύνδεση σε χαμηλά επίπεδα.

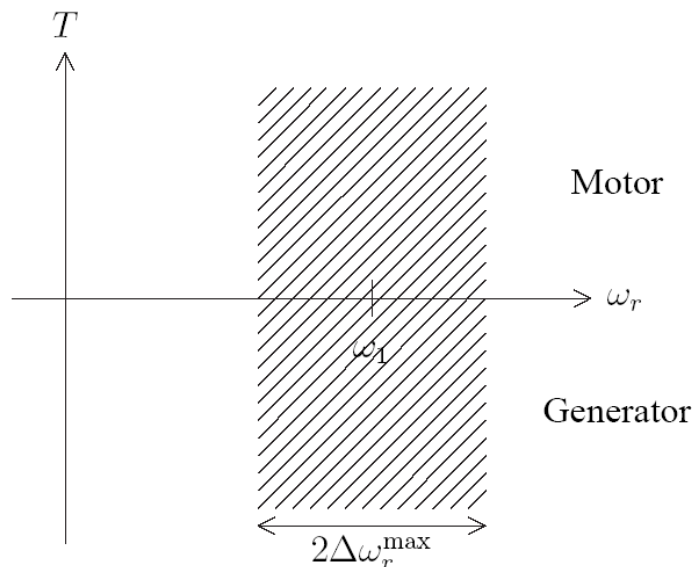
Με τον “machine side” μετατροπέα γίνεται δυνατός ο έλεγχος της ροπής ή της ταχύτητας του DFIG και επίσης ο παράγοντας ισχύος στα άκρα του στάτη. Δηλαδή πετυχαίνουμε έλεγχο της ενεργού και της άεργου ισχύος. Το κύριο αντικείμενο του “grid side” μετατροπέα είναι να διατηρεί την τάση της d.c. σύνδεσης σταθερή και να εξασφαλίζει λειτουργία μετατροπέα σε μοναδιαίο συντελεστή ισχύος (δηλαδή μηδενική άεργο ισχύ).

Με βάση τις συνθήκες λειτουργίας, ισχύς ρέει μέσα ή έξω από το δρομέα. Σε μια υπερ-σύγχρονη κατάσταση, η ισχύς ρέει από το δρομέα διαμέσου του μετατροπέα προς το δίκτυο, ενώ σε μια υπο-σύγχρονη κατάσταση έχουμε ροή προς την αντίθετη κατεύθυνση. Και στις δυο περιπτώσεις ο στάτης τροφοδοτεί με ενέργεια το δίκτυο.



**Σχήμα 3.1.3.3 DFIG σύστημα με “back – to – back” μετατροπέα**

Η χαρακτηριστική ταχύτητας – ροπής του DFIG συστήματος φαίνεται στο σχήμα 3.1.3.4. Όπως επίσης φαίνεται στο σχήμα, το DFIG μπορεί να λειτουργήσει τόσο σαν κινητήρας όσο και σα γεννήτρια με ένα εύρος ταχύτητας δρομέα του  $\pm \Delta\omega_r(\max)$  γύρω από τη σύγχρονη ταχύτητα  $\omega_1$ .



**Σχήμα 3.1.3.4 Χαρακτηριστική ταχύτητας – ροπής ενός DFIG**

Το μέγεθος του μετατροπέα δε σχετίζεται με τη συνολική ισχύ της γεννήτριας αλλά με το επιλεγμένο εύρος ταχυτήτων και συνεπώς με την ισχύ ολίσθησης. Το κόστος του μετατροπέα αυξάνει όταν το εύρος ταχύτητας γύρω από τη σύγχρονη ταχύτητα γίνεται πλατύτερο. Συνεπώς, η επιλογή του εύρους ταχύτητας βασίζεται σε οικονομικά κριτήρια και στην αυξημένη



αποτελεσματικότητα. Ένα μειονέκτημα του DFIG είναι η αναπόφευκτη ανάγκη δαχτυλιδιών ολίσθησης.

### **3.1.4 PITCH CONTROL** (έλεγχος μεταβολής της κλίσης των πτερυγίων)

Οι ανεμογεννήτριες είναι σχεδιασμένες ώστε να παράγουν ενέργεια όσο το δυνατόν φτηνότερα. Για αυτό γενικά σχεδιάζονται έτσι ώστε να παράγουν μέγιστη ισχύ σε ταχύτητες ανέμου της τάξης των 15 m/s. Δεν αποδίδει να σχεδιάζονται ώστε να μεγιστοποιούν την έξοδό τους σε μεγαλύτερους ανέμους, γιατί τόσο ισχυροί άνεμοι είναι σπάνιοι.

Σε περίπτωση ισχυρότερων ανέμων είναι απαραίτητο να ‘σπαταλάται’ μέρος της επιπλέον ενέργειας του ανέμου προκειμένου να προφυλαχθεί ο εξοπλισμός της ανεμογεννήτριας.

Το Pitch control είναι ο πιο συνηθισμένος τρόπος ελέγχου της αεροδυναμικής ισχύος που παράγεται από το δρομέα της ανεμογεννήτριας. Επίσης έχει σημαντική επίδραση σε όλα τα αεροδυναμικά φορτία που παράγονται από το δρομέα.

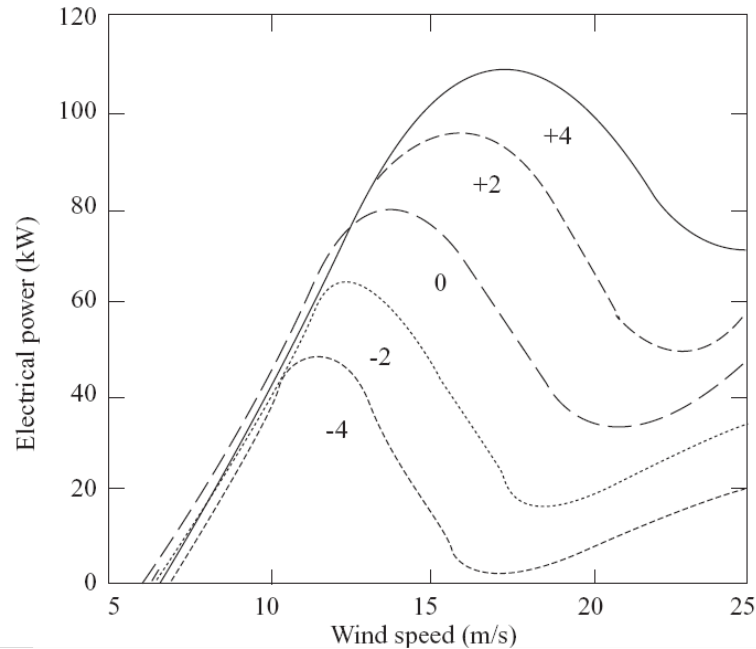
Σε ανεμογεννήτριες που εφαρμόζεται τέτοιου είδους έλεγχος, δηλαδή στις ανεμογεννήτριες με ελεγχόμενο βήμα έλικα, ο ηλεκτρονικός ελεγκτής ελέγχει την έξοδό τους αρκετές φορές το δευτερόλεπτο. Όταν η έξοδος γίνει αρκετά μεγάλη, στέλνει εντολή στο μηχανισμό περιστροφής του πτερυγίου ο οποίος αμέσως στρέφει τα πτερύγια προς τον αέρα. Γι’ αυτό τα πτερύγια πρέπει να είναι σε θέση να περιστρέφονται κατά μήκος του άξονά τους.

Κατά τη διάρκεια κανονικής λειτουργίας τα πτερύγια θα στρέφονται με μια γωνία μιας μοίρας τη φορά – ενώ ταυτόχρονα θα στρέφεται και ο δρομέας. Ο σχεδιασμός τέτοιου είδους ανεμογεννητριών απαιτεί έξυπνη μηχανική ώστε τα πτερύγια να στρέφονται ακριβώς την απαιτούμενη γωνία. Ο έλεγχος αυτός κάθε φορά που αλλάζει διεύθυνση ο αέρας στρέφει τα πτερύγια μερικές μοίρες ώστε να διατηρεί τη γωνία πρόσπτωσης ιδανική για να μεγιστοποιεί την έξοδο.

Μια παράμετρος που επηρεάζει την έξοδο ισχύος είναι η γωνία της μεταβολής της κλίσης των πτερυγίων (pitch angle) βs. Ο σχεδιασμός των πτερυγίων σχεδόν πάντοτε είναι σπειροειδής, αλλά τα πτερύγια μπορούν να τοποθετηθούν σε πλήρη pitch γωνία. Τα αποτελέσματα από αρκετές pitch γωνίες φαίνονται στο σχήμα 3.1.4.1.

Μικρές μεταβολές στην pitch γωνία μπορεί να έχουν δραματικές επιπτώσεις στην έξοδο ισχύος. Θετική ρύθμιση της pitch γωνίας αυξάνει την pitch γωνία σχεδιασμού και έτσι ελαττώνει τη γωνία επίπτωσης. Αντίθετα, αρνητική ρύθμιση της pitch γωνίας αυξάνει τη γωνία επίπτωσης και μπορεί να προκαλέσει καθυστέρηση όπως φαίνεται στο σχήμα 3.1.4.1. Ο δρομέας μιας

ανεμογεννήτριας που έχει σχεδιαστεί για λειτουργία σε δεδομένες συνθήκες ανέμου, μπορεί να γίνει κατάλληλος για άλλες συνθήκες με κατάλληλες προσαρμογές στην pitch γωνία και στην ταχύτητα περιστροφής.



**Σχήμα 3.1.4.1 Επίδραση της ρύθμισης της γωνίας μεταβολής της κλίσης των πτερυγίων στην εξαγόμενη ισχύ.**

Η ρύθμιση ισχύος μπορεί να επιτευχθεί με δυο τρόπους :

(α) “pitching to feather” ή “passive stall” (παθητική επιβράδυνση)

Οι ανεμογεννήτριες στις οποίες εφαρμόζεται αυτός ο έλεγχος έχουν τα πτερύγιά τους ενσωματωμένα στην κεφαλή του ρότορα σε σταθερή γωνία. Το γεωμετρικό προφίλ όμως των πτερυγίων, είναι αεροδυναμικά σχεδιασμένο ώστε να διασφαλίσει ότι τη στιγμή που η ταχύτητα του ανέμου γίνει αρκετά υψηλή, να δημιουργεί αναταραχές στην πλευρά του πτερυγίου που δεν ‘βλέπει’ τον αέρα, γεγονός που οδηγεί σε επιβράδυνση των πτερυγίων. Αυτή η επιβράδυνση προλαμβάνει την άσκηση ανεπιθύμητων δυνάμεων των πτερυγίων στον ρότορα.

Στις 90° θετικής κλίσης το πτερύγιο είναι «φτερό» (“feathered”). Μια αύξηση στην “pitch angle”, που ορίζεται ως στροφή της κύριας λεπίδας στον άνεμο, έχει σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία κλίσης στο «φτερό» (“feather”), μείωση της γωνίας πρόσπτωσης, μείωση της ροπής, άρα μείωση της δύναμης ανύψωσης στα πτερύγια.

(β) “pitching to stall” ή “active stall” (ενεργός επιβράδυνση).

Προκειμένου να επιτύχουν μια αρκετά μεγάλη ροπή (περιστροφική δύναμη) σε χαμηλές ταχύτητες ανέμου, οι μηχανές συχνά θα προγραμματίζονται να περιστρέφουν τα πτερύγιά τους όπως μια ανεμογεννήτρια με ελεγχόμενο βήμα έλικα σε χαμηλές ταχύτητες. Αν όμως η μηχανή τείνει να υπερφορτωθεί, η μηχανή με ελεγχόμενη ενεργητική καθυστέρηση θα στρέψει τα πτερύγιά της σε αντίστροφη διεύθυνση από ότι μια μηχανή με ελεγχόμενο βήμα έλικα. Με άλλα λόγια, θα αυξήσει τη γωνία πρόσπτωσης του ανέμου στα πτερύγια προκειμένου τα πτερύγια να επιβραδυνθούν, κατ’ αυτόν τον τρόπο σπαταλά την επιπλέον ενέργεια του ανέμου.

Συνεπώς, μια μείωση στο “pitch”, π.χ. γυρίζοντας την κύρια λεπίδα κόντρα στον άνεμο, ελαττώνει τη ροπή μέσω της αύξησης της γωνίας πρόσπτωσης προσεγγίζοντας την επιβράδυνση, όπου ξεκινάει να ελαττώνεται η ανύψωση και το σύρσιμο αυξάνεται.

Παρόλο που το “pitching to feather” είναι πιο συνηθισμένη μέθοδος, κάποιες ανεμογεννήτριες χρησιμοποιούν “pitching to stall”. Το “pitching to feather” απαιτεί πολύ περισσότερη δυναμική δραστηριότητα μεταβολής της κλίσης από το pitching to stall : ενώ ένα μεγάλο μέρος των πτερυγίων επιβραδύνεται, πολύ μικρές κινήσεις μεταβολής της κλίσης επαρκούν για να ελεγχθεί η ροπή. Το “pitching to stall” επιφέρει μια σημαντικά μεγαλύτερη ώθηση φορτίου εξαιτίας του αυξανόμενου συρσίματος. Από την άλλη, η ώθηση είναι πολύ πιο σταθερή όταν τα πτερύγια επιβραδύνονται, συνεπώς τα καταχρηστικά φορτία της ώθησης θα είναι μικρότερα.

Ένα επιπλέον πρόβλημα με το “pitching to stall” είναι ότι η κλίση της καμπύλης ανύψωσης στην αρχή της περιοχής επιβράδυνσης είναι αρνητική, έτσι ο συντελεστής ανύψωσης μειώνεται με την αύξηση της γωνίας πρόσπτωσης. Αυτό επιδρά στην αρνητική αεροδυναμική απόσβεση, που μπορεί να επιδράσει στην αστάθεια των στρεφόμενων πτερυγίων. Αυτό είναι επίσης πρόβλημα για τις ανεμογεννήτριες που ελέγχεται η επιβράδυνσή τους με ρυθμισμένο “pitch”.

Χαμηλότερα από τη ρύθμιση της ταχύτητας του ανέμου, η ανεμογεννήτρια απλά θα προσπαθεί να παράγει όση περισσότερη ισχύ είναι δυνατό, συνεπώς γενικά δεν υπάρχει ανάγκη να μεταβάλλεται η γωνία μεταβολής κλίσης. Τα αεροδυναμικά φορτία, χαμηλότερα από τη ρύθμιση της ταχύτητας του ανέμου, είναι γενικά χαμηλότερα σε σχέση με πριν τη ρύθμιση, οπότε πάλι δεν υπάρχει λόγος να χρησιμοποιηθεί το “pitch control”. Εντούτοις, για ρυθμισμένης ταχύτητας ανεμογεννήτριες, η επιθυμητή γωνία κλίσης για αεροδυναμική

αποδοτικότητα ποικίλλει ελαφρά με την ταχύτητα του ανέμου. Συνεπώς, σε μερικές ανεμογεννήτριες, η γωνία μεταβολής της κλίσης μεταβάλλεται αργά κάποιες μοίρες κάτω από τη ρυθμισμένη, σαν απάντηση σε «βαρύ» ανεμόμετρο ή σήμα εξόδου ισχύος.

Πάνω από τη ρυθμισμένη ταχύτητα του ανέμου, το “pitch control” προμηθεύει ένα πολύ αποτελεσματικό μέσο ρύθμισης της αεροδυναμικής ισχύος και των φορτίων που παράγονται από το δρομέα, έτσι που δεν υπάρχουν όρια στο σχεδιασμό. Για να πετύχουμε καλή ρύθμιση, το “pitch control” πρέπει να αποκρίνεται πολύ γρήγορα στις μεταβαλλόμενες συνθήκες. Αυτή η εφαρμογή υψηλού ενεργού ελέγχου απαιτεί πολύ προσεκτικό σχεδιασμό καθώς έχει ισχυρή αλληλεπίδραση με τη δυναμική απόκριση της ανεμογεννήτριας.

Μια από τις πιο ισχυρές αλληλεπιδράσεις είναι με τη δυναμική συμπεριφορά του πύργου. Καθώς μεταβάλλεται η κλίση των πτερυγίων για τη ρύθμιση της αεροδυναμικής ροπής, η αεροδυναμική ώθηση στο δρομέα μεταβάλλεται σημαντικά, και αυτό τροφοδοτεί παλμό στον πύργο. Καθώς ο άνεμος αυξάνει, η γωνία μεταβολής της κλίσης αυξάνει για να διατηρήσει σταθερή τη ροπή, αλλά ο δρομέας τείνει να τη μειώσει. Αυτό επιτρέπει στην απόκλιση του πύργου που είναι κόντρα στον άνεμο να μειωθεί και καθώς η κορυφή του πύργου μετακινείται ευνοϊκά στον άνεμο η σχετική ταχύτητα του ανέμου που φαίνεται από το δρομέα αυξάνεται. Η αεροδυναμική ροπή αυξάνεται περισσότερο, προκαλώντας περισσότερη μεταβολή στην κλίση των πτερυγίων. Αν το κέρδος του “pitch controller” είναι τόσο υψηλό, αυτή η θετική ανάδραση μπορεί να προκαλέσει αστάθεια. Έτσι είναι καθοριστικό να λάβουμε υπόψιν τη δυναμική συμπεριφορά του πύργου κατά το σχεδιασμό ενός “pitch controller”.

Οι περισσότερες από τις ανεμογεννήτριες που ελέγχονται με “pitch control” χρησιμοποιούν “pitch control” πλήρους ανοίγματος, στο οποίο ο προσανατολισμός του “pitch” είναι προς το κέντρο. Είναι επίσης δυνατό, αν και όχι συνηθισμένο, να πετύχουμε αεροδυναμικό έλεγχο κάνοντας “pitching” μόνο στα άκρα των πτερυγίων, ή με χρήση “ailerons”, “flaps”, “airjets” ή άλλες συσκευές που να τροποποιούν τις αεροδυναμικές ιδιότητες. Αυτές οι μέθοδοι έχουν ως αποτέλεσμα τα περισσότερα από τα πτερύγια να επιβραδύνονται σε υψηλούς ανέμους. Αν μόνο στα άκρα των πτερυγίων γίνεται “pitch”, μπορεί να είναι δύσκολο να ταιριάξει ένας κατάλληλος ωθητής στο εξωτερικό τμήμα του πτερυγίου, η επίτευξη της συντήρησης είναι επίσης δύσκολη.

## **3.2 ΕΙΔΗ ΑΙΟΛΙΚΩΝ ΠΑΡΚΩΝ**

Γενικά αιολικό πάρκο ονομάζεται μια ομάδα ανεμογεννητριών εγκατεστημένες στην ίδια τοποθεσία. Κάθε ανεμογεννήτρια είναι συνδεδεμένη σε ένα εσωτερικό δίκτυο χαμηλής ή μέσης τάσης, το οποίο συνδέεται με το διασυνδεδεμένο ηλεκτρικό δίκτυο μέσω ενός μετασχηματιστή ανύψωσης της τάσης. Υπάρχουν τρία βασικά είδη αιολικών πάρκων τα χερσαία (onshore), τα πάρκα που βρίσκονται κοντά στην ακτή (nearshore) και τα παράκτια (offshore).

### **3.2.1 ΧΕΡΣΑΙΑ ΑΙΟΛΙΚΑ ΠΑΡΚΑ (onshore)**

Χερσαία αιολικά πάρκα, ονομάζονται αυτά που κατασκευάζονται στις κορυφογραμμές περιοχών με μεγάλο σχετικά υψόμετρο τουλάχιστον τρία χιλιόμετρα προς το εσωτερικό από την πλησιέστερη ακτογραμμή. Αυτό συμβαίνει για την εκμετάλλευση της λεγόμενης τοπογραφικής επιτάχυνσης, την επιτάχυνση δηλαδή του ανέμου καθώς διασχίζει μια κορυφογραμμή. Η αύξηση της ταχύτητας του ανέμου οδηγεί και σε αύξηση της παραγόμενης ενέργειας.

Ιδιαίτερη σημασία δίνεται στην ακριβή τοποθέτηση των ανεμογεννητριών, η οποία γίνεται μετά από αναλυτική παρακολούθηση των τοπικών ανέμων για ένα μεγάλο χρονικό διάστημα πριν την εγκατάσταση.

Τέλος, αξίζει να αναφερθεί ότι η περιοχή στην οποία εγκαθίσταται το αιολικό πάρκο, αλλοιώνεται μόνο οπτικά και παραμένει αξιοποιήσιμη για γεωργία ή κτηνοτροφία.

### **3.2.2 ΑΙΟΛΙΚΑ ΠΑΡΚΑ ΚΟΝΤΑ ΣΤΗΝ ΑΚΤΗ**

Είναι τα πάρκα που βρίσκονται στην ξηρά εντός της ζώνης των τριών χιλιομέτρων από την ακτογραμμή ή στην θάλασσα εντός της ζώνης των δέκα χιλιομέτρων από την ακτογραμμή.

Αυτές οι τοποθεσίες είναι αποδοτικές για εγκατάσταση λόγω του ανέμου που δημιουργείται από την θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ θάλασσας και ξηράς καθημερινά.



**Εικόνα 3.2.2.1 Αιολικό πάρκο στο όρος Παναχαϊκό Αχαΐας.**



**Εικόνα 3.2.2.2 Αιολικό Πάρκο κοντά στην ακτή**

### **3.2.3 ΠΑΡΑΚΤΙΑ ΑΙΟΛΙΚΑ ΠΑΡΚΑ (offshore)**

Είναι εγκατεστημένα σε θαλάσσιες περιοχές πέραν των δέκα χιλιομέτρων από την ακτή ακριβώς επειδή η επιφάνεια του νερού είναι ομαλότερη αυτής του εδάφους, η ταχύτητα του ανέμου είναι υψηλότερη από την ξηρά, έτσι ο συντελεστής Χρησιμοποίησης ή συντελεστής Εκμετάλλευσης (Capacity Factor) είναι υψηλότερος των άλλων δυο τύπων αιολικών πάρκων.



**Εικόνα 3.2.3.1 Παράκτιο Αιολικό Πάρκο (offshore)**

### **3.3 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΑΙΟΛΙΚΩΝ ΠΑΡΚΩΝ**

Το ενδιαφέρον για τη χρήση “offshore” (παράκτιων) αιολικών πάρκων αυξάνεται σημαντικά διεθνώς. Ο λόγος είναι πως η ταχύτητα του ανέμου κοντά στην ακτή είναι υψηλότερη από ότι “onshore”(χερσαία πάρκα), κάτι που σημαίνει πολύ υψηλότερη παραγωγή ισχύος. Ένα 10% αύξηση στην ταχύτητα του ανέμου αντιστοιχεί σε 30 % αύξηση στην παραγωγή ισχύος.

Εντούτοις, το κόστος εγκατάστασης είναι πολύ μεγαλύτερο για “offshore” σε σχέση με “onshore” αιολικά πάρκα.

Το εσωτερικό ηλεκτρικό σύστημα ενός “offshore” αιολικού πάρκου και η σύνδεσή του με το κύριο σύστημα ισχύος θέτει νέες προκλήσεις. Στο “onshore”, η συνηθισμένη λύση είναι ένα a.c. δίκτυο μέσα στο αιολικό πάρκο, το οποίο συλλέγει την παραγωγή ισχύος από κάθε ανεμογεννήτρια. Το επίπεδο της τάσης μέσα σε ένα αιολικό πάρκο είναι συχνά το ίδιο με το μέσο επίπεδο της τάσης στο σημείο διανομής του δικτύου. Όπως οι περισσότερες γεννήτριες σε αιολικά συστήματα λειτουργεί σε ένα επίπεδο τάσης των 690V.

Μετασχηματιστές οι οποίοι έχουν εγκατασταθεί απευθείας ή κοντά στη βάση κάθε ανεμογεννήτριας χρησιμοποιούνται για να αυξήσουν το επίπεδο τάσης της γεννήτριας στο επίπεδο τάσης του δικτύου του αιολικού πάρκου. Το υψηλότερο επίπεδο τάσης που χρησιμοποιείται σε ένα “onshore” αιολικό πάρκο κινείται συνήθως μεταξύ 33 και 36kV.

Εντούτοις, τα “offshore” αιολικά πάρκα τείνουν να γίνουν μεγαλύτερα και η απόσταση ανάμεσα στις ανεμογεννήτριες είναι συνήθως μεγαλύτερη από ότι σε “onshore” αιολικά πάρκα. Για μεγάλα offshore αιολικά πάρκα με a.c. δίκτυο, υψηλότερα επίπεδα τάσης είναι χρήσιμα για την ελαχιστοποίηση των απωλειών ισχύος, αλλά από την άλλη μπορεί να έχουν ως αποτέλεσμα μεγαλύτερους μετασχηματιστές και υψηλότερα κόστη μετασχηματιστών. Οι μετασχηματιστές τοποθετούνται στην άτρακτο, τον πύργο ή σε ένα κιβώτιο μετά την ανεμογεννήτρια. Για αυτό το λόγο το μέγεθος του μετασχηματιστή μπορεί να είναι πρόβλημα. Σήμερα, μια τάση συλλογής των 36kV θεωρείται κλασική επιλογή.

Μικρότερα “offshore” αιολικά πάρκα επιλέγονται για συγκριτικά χαμηλά επίπεδα τάσης. Ο λόγος είναι ότι η μείωση των απωλειών φόρτισης δεν είναι επαρκής για να δικαιολογηθεί το κόστος του απαιτούμενου εξοπλισμού για υψηλότερα επίπεδα τάσης. Το ίδιο εφαρμόζεται σε μικρότερα “offshore” αιολικά πάρκα που σχεδιάζονται τελευταία.

Ο σχεδιασμός δικτύου ενός “offshore” αιολικού πάρκου δεν αντιστοιχεί απαραίτητα στο πιο ενεργειακά αποδοτικό δίκτυο (δηλ. με τις χαμηλότερες απώλειες). Ο λόγος είναι ότι οι offshore σταθμοί μετασχηματισμού είναι πιο σύνθετοι και περιλαμβάνουν μεγάλες δομές υποστήριξης.

Έτσι, οι offshore σταθμοί μετασχηματισμού είναι πολύ ακριβοί ενώ δεν είναι εξακριβωμένη ακόμα η αξιοπιστία τους.

Για τη μεταφορά στην ακτή, χρησιμοποιούνται είτε HVAC (υψηλής τάσης εναλλασσόμενο ρεύμα) είτε HVDC (υψηλής τάσης συνεχές ρεύμα) συνδέσεις. Για HVDC υπάρχουν δυο τεχνικές : ο “LCC” (line commutated converter) βασισμένος στην HVDC τεχνολογία και ο “VSC” (voltage source converter) βασισμένος στο HVDC.

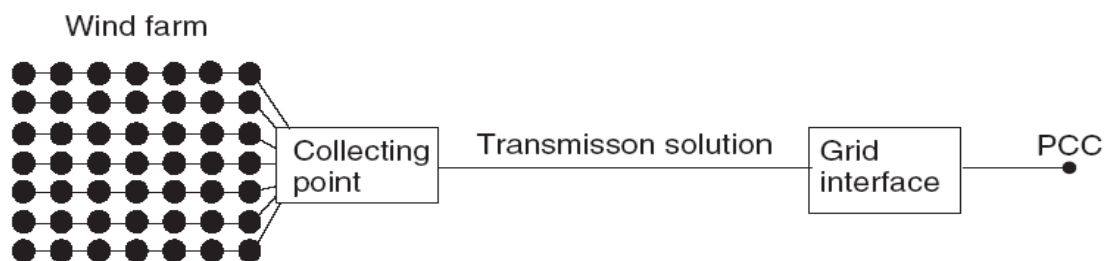
Όλα τα offshore αιολικά πάρκα που λειτουργούν τελευταία έχουν αποδεχτεί την a.c. επιλογή, καθώς και όλα όσα προγραμματίζεται να εγκατασταθούν στο άμεσο μέλλον θα χρησιμοποιούν επίσης την a.c. λύση. Αυτό γίνεται εξαιτίας του συγκριτικά μικρού μεγέθους και / ή της μικρής απόστασης ανάμεσα στην ακτή και τα υπαρκτά αιολικά πάρκα. Καθώς το μέγεθος των μελλοντικών αιολικών πάρκων και η απόσταση από την ακτή φαίνεται να αυξάνονται, αυτό μπορεί να αλλάξει.



Υπάρχουν 3 διαφορετικοί τρόποι σύνδεσης των offshore αιολικών πάρκων με την ακτή.

- HVAC μεταφορά
- LCC βασισμένη σε HVDC μεταφορά
- VSC βασισμένη σε HVDC μεταφορά

Το γενικό μοντέλο ενός offshore αιολικού πάρκου, με HVAC ή HVDC μεταφορά φαίνεται στο σχήμα 3.3.1.



**Σχήμα 3.3.1 Παρουσιάζεται σχηματικά ένα offshore αιολικά πάρκο. Το σημείο συλλογής μπορεί να είναι ένας offshore υποσταθμός (PCC = point of common coupling)**

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

### ΑΣΥΓΧΡΟΝΗ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ Α/Γ ΔΙΠΛΗΣ ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑΣ (DFIG)

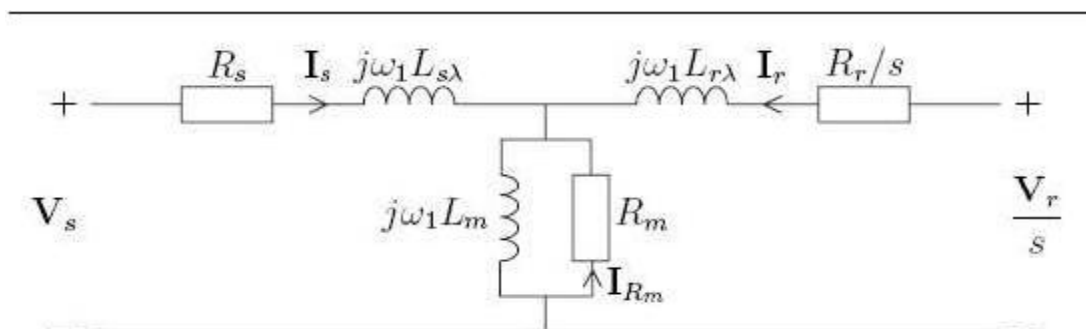
#### 4.1 ΕΠΑΓΩΓΙΚΗ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ ΔΙΠΛΗΣ ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑΣ (DFIG)

Οι ανεμογεννήτριες DFIG αποτελούνται από μια επαγωγική γεννήτρια δακτυλιοφόρου δρομέα (Wound Rotor Induction Generators) με τα τυλίγματα του στάτη να συνδέονται απ'ευθείας στο δίκτυο και με τα τυλίγματα του δρομέα να συνδέονται σε αυτό μέσω ενός back-to-back μετατροπέα που προσφέρει έλεγχο στα τέσσερα τεταρτημόρια (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 αρκετό μεγάλο εύρος, ωστόσο αυτό περιορίζεται σε ένα  $\pm 30\%$  όπως αναφέρθηκε.

#### 4.1.1 ΙΣΟΔΥΝΑΜΟ ΚΥΚΛΩΜΑ DFIG

Το ισοδύναμο κύκλωμα της DFIG, λαμβάνοντας υπόψη τις απώλειες μαγνήτισης, φαίνεται στο παρακάτω σχήμα :



Σχήμα 4.1.1.1 ισοδύναμο κύκλωμα DFIG στην μόνιμη κατάσταση

Στην ανάλυση που θα ακολουθήσει αγνοούνται οι απώλειες του πυρήνα. Επίσης, για την μαθηματική ανάλυση του μοντέλου θα υιοθετηθεί η μιγαδική παράσταση των μεγεθών.

Από το σχήμα ( $R_m$  δεν το λαμβάνουμε υπ'οψιν) προκύπτει ότι εάν ο δρομέας βραχυκυκλωθεί, τότε  $V_r = 0$  και το ισοδύναμο κύκλωμα της DFIG μετατρέπεται στο ισοδύναμο κύκλωμα της επαγωγικής γεννήτριας βραχυκυκλωμένου δρομέα. Επίσης, όλα τα μεγέθη έχουν αναχθεί στο στάτη. Αυτό έχει γίνει ως εξής.

Οι εξισώσεις που περιγράφουν τα δύο κυκλώματα, του στάτη και του δρομέα είναι :

$$(R_s + j\omega_1 L_{s1})\bar{I}_s - \bar{V}_s = \bar{E}_1 \text{ για ταχύτητα } \omega_1$$

$$(R_r^r + js\omega_1 L_{r1})\bar{I}_r^r - V_r^r = \bar{E}_2$$

για ταχύτητα

$$\omega_2 = s * \omega_1$$

Αν πολλαπλασιάσουμε την δεύτερη εξίσωση με τον λόγο των τυλιγμάτων στάτη/δρομέα ( $K_{sr}$ ), έχουμε :

$$(R_r + js\omega_r L_{r1})\bar{I}_r - \bar{V}_r = \frac{\bar{E}_2}{K_{sr}} \quad (4.1.1.1)$$

Όπου τα σύμβολα έχουν ως εξής :

$R_s$  αντίσταση στάτη

$R_r$  αντίσταση δρομέα

$L_{s1}$  αυτεπαγωγή σκέδασης στάτη

$L_{r1}$  αυτεπαγωγή σκέδασης δρομέα

$L_m$  αυτεπαγωγή μαγνήτισης

Με γνώμονα τις παρακάτω ισοδυναμίες

$$\bar{E}_2 = s \cdot \bar{E}_1 \cdot K_{sr}$$

$$R_r = R_r^r \cdot K_{sr}^2$$

$$L_{rl} = L_{rl}^r \cdot K_{sr}^2$$

$$\bar{V}_r = \bar{V}_r^r \cdot K_{sr}$$

$$\bar{I}_r = \bar{I}_r^r / K_{sr}$$

Διαιρώντας τη σχέση (4.1.1.1) με την ολίσθηση  $s$  προκύπτει

$$\left( \frac{R_s}{s} + j\omega_1 L_{rl} \right) \bar{I}_r - \frac{\bar{V}_r}{s} = \frac{s \bar{E}_1}{s} = \bar{E}_1$$

Με τον παραπάνω τύπο τα μεγέθη του δρομέα έχουν αναχθεί στο πεδίο του στάτη. Τέλος, η ηλεκτρεγερτική δύναμη  $E_1$ , μετά το μετασχηματισμό, μπορεί να θεωρηθεί ότι παράγεται και από το διανυσματικό άθροισμα των ρευμάτων  $I_s$  και  $I_r$ , ισχύει επομένως ότι

$$E_1 = -j\omega_1 L_m (\bar{I}_s + \bar{I}_r) = -j\omega_1 L_m \bar{I}_m$$

Η τελική μορφή των εξισώσεων έχει ως εξής

$$V_s = R_s \bar{I}_s + j\omega_1 L_{s1} \bar{I}_s + j\omega_1 L_m (\bar{I}_s + \bar{I}_r)$$

$$\frac{\bar{V}_r}{s} = \frac{R_s}{s} \bar{I}_r + j\omega_1 L_{rl} \bar{I}_r + j\omega_1 L_m (\bar{I}_s + \bar{I}_r)$$

Οι εξισώσεις των πεπλεγμένων ροών διακένου, στάτη και δρομέα ορίζονται ως εξής

$$\lambda_m = L_m (\bar{I}_s + \bar{I}_r)$$

$$\lambda_s = L_s \bar{I}_s + L_m \bar{I}_r$$

$$\lambda_r = L_r \bar{I}_r + L_m \bar{I}_s$$

Με  $L_s = L_{sl} + L_m$  και  $L_r = L_{rl} + L_m$

Συνδυάζοντας τα παραπάνω ζεύγη εξισώσεων προκύπτουν οι εξισώσεις

$$V_s = R_s \bar{I}_s + j\omega_1 \lambda_s$$

$$\frac{\bar{V}_r}{s} = \frac{R_s}{s} \bar{I}_r + j\omega_1 \lambda_r$$

Οι ωμικές απώλειες σιδήρου (αγνοώντας τις απώλειες σιδήρου) είναι

$$P_{loss} = 3(R_s |I_s|^2 + R_r |I_r|^2)$$

Η συνολική ενεργός ισχύς της μηχανής είναι

$$P_s + P_r^r = 3Re(\bar{V}_s \bar{I}_s^*) + 3Re(\bar{V}_r \bar{I}_r^*) = P_s + \Sigma P$$

$$ΜεΣΡ = P_{cu,στάτη} + P_{cu,στάτη} + P_{FE} + P_{μηχ.απωλειών}$$

Η συνολική άεργος ισχύς της μηχανής είναι

$$Q_s + Q_r = 3Imag(\bar{V}_s \bar{I}_s^*) + 3Re\left(\frac{\bar{V}_r \bar{I}_r^*}{s}\right) = 3\omega_1 (L_{sl} I_s^2 + L_{rl} I_r^2 + L_m I_m^2)$$

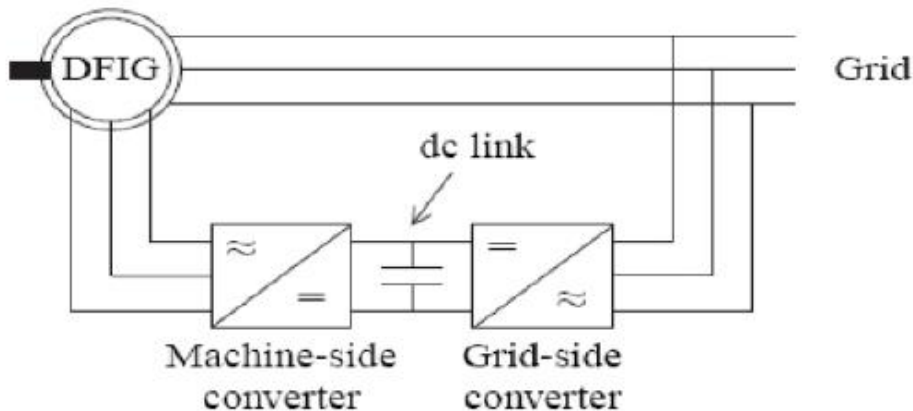
Από την μαθηματική έκφραση της άεργου ισχύος αποδεικνύεται αυτό που αναλύθηκε παραπάνω, δηλαδή ότι ο μαγνητισμός της γεννήτριας μπορεί να επιτευχθεί τόσο από τον στάτη όσο και από το δρομέα.

#### **4.1.2 ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑΣ ΙΣΧΥΟΣ**

Ο μετατροπέας ισχύος αποτελείται από δύο επιμέρους μετατροπείς, τον 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 δηλαδή την κλασσική

τοπολογία μετατροπέα ac/dc/ac με την δημιουργία dc link στην μέση με την βοήθεια πυκνωτή.

Και οι δύο μετατροπείς έχουν την δυνατότητα να λειτουργούν ως ανορθωτές ή αντιστροφείς, έχουμε δηλαδή έλεγχο τεσσάρων τεταρτημορίων.



**Σχήμα 4.1.2.1 Σύστημα με back-to-back μετατροπέα ισχύος**

Η βασική λειτουργία του RSC είναι ο έλεγχος της ενεργής και της άεργου ισχύος ελέγχοντας το ρεύμα που εγχέουμε στον δρομέα, ενώ η κύρια εργασία του LSC είναι ο έλεγχος της τάσης dc κλάδου (dc link). Πέρα από τα κύρια καθήκοντα του κάθε μετατροπέα, η στρατηγική έλεγχου που θα ακολουθηθεί επιτρέπει στον κάθε μετατροπέα να ρυθμίζει κατά βούληση την άεργο ισχύ.

Με βάση τις συνθήκες λειτουργίας, ισχύς ρέει μέσα ή έξω από τον δρομέα. Σε μια υπερσύγχρονη κατάσταση, η ισχύς ρέει από τον δρομέα διαμέσου του μετατροπέα προς το δίκτυο, ενώ σε μια υποσύγχρονη κατάσταση έχουμε ροή προς την αντίθετη κατεύθυνση. Και στις δύο περιπτώσεις ο στάτης τροφοδοτεί με ενέργεια το δίκτυο.

### **4.1.3 ΜΕΙΩΣΗ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΜΑΓΝΗΤΙΣΗΣ**

Σε μια συνηθισμένη επαγωγική μηχανή, που ο στάτης της συνδέεται μέσω ενός μετατροπέα στο δίκτυο, σε χαμηλά φορτία είναι δυνατόν να μειώσουμε τις απώλειες μαγνήτισης με μείωση της τιμής της ροής.

Ωστόσο κάτι τέτοιο δεν μπορεί να συμβεί στην γεννήτρια DFIG επειδή ο στάτης είναι συνδεδεμένος κατ'ευθείαν στο δίκτυο και η ροή είναι σταθερή

μιας και η τάση του δικτύου είναι περίπου σταθερή. Ωστόσο, μπορεί να επιτευχθεί μείωση των απωλειών μαγνήτισης με δύο άλλους τρόπους.

1. Βραχυκυκλώνοντας τον στάτη σε χαμηλές ταχύτητες και μεταφέροντας όλη την ισχύ μέσω του μετατροπέα του δρομέα. Η λειτουργία αυτή είναι γνωστή ως βραχυκυκλωμένη DFIG.

Με δύο διακόπτες, όπου ο ένας αποσυνδέει την γεννήτρια από το δίκτυο και ο άλλος βραχυκυκλώνει τον στάτη της γεννήτριας, η μηχανή δουλεύει ως γεννήτρια βραχυκυκλωμένου κλωβού με την διαφορά ότι ο μετατροπέας είναι συνδεδεμένος στον δρομέα και όχι στον στάτη. Αυτό σημαίνει ότι η μηχανή μπορεί να ελεγχθεί με την ίδια στρατηγική ελέγχου μιας επαγωγικής μηχανής βραχυκυκλωμένου κλωβού και έτσι σε χαμηλές στροφές, η τιμή της ροής μπορεί να μειωθεί.

2. Έχοντας συνδεδεμένα τα τυλίγματα του στάτη σε τρίγωνο για μεγάλες ταχύτητες και σε αστέρα για μικρές. Η υλοποίηση αυτή είναι γνωστή ως Y-Δ DFIG.

Εγκατασταθίσταται στο στάτη το κύκλωμα αλλαγής συνδεσμολογίας τυλιγμάτων από αστέρα σε τρίγωνο. Πριν από μια αλλαγή, η ισχύς της γεννήτριας μηδενίζεται και ένας διακόπτης αποσυνδέει το στάτη από το δίκτυο. Έπειτα, αλλάζει η συνδεσμολογία και η γεννήτρια επανασυγχρονίζεται.

## **4.2 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ – ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΗΣ DFIG**

### **ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ**

Η DFIG εμφανίζει πολλά πλεονεκτήματα γι' αυτό είναι ιδιαίτερος δημοφιλής για μεγάλα αιολικά πάρκα.

Μέσω του μετατροπέα ισχύος, δίνεται η δυνατότητα ξεχωριστού ελέγχου της ενεργού και άεργου ισχύος που παράγει η καταναλώνει η μηχανή. Με βάση τα αυστηρά πλαίσια απαιτήσεων που θέτουν οι διαχειριστές των δικτύων, αυτή η ιδιότητα αποδεικνύεται πάρα πολύ σημαντική για τις δυνατότητες στήριξης της τάσης του δικτύου.

Η DFIG δεν είναι απαραίτητο να μαγνητιστεί από το δίκτυο απαιτώντας άεργο ισχύ από αυτό, αλλά μπορεί να εξασφαλίσει το απαραίτητο ρεύμα μαγνήτισης μέσα από το κύκλωμα του δρομέα (τροφοδοσία με κατάλληλα ρεύματα). Ως αποτέλεσμα, οι συστοιχίες των πυκνωτών που απαιτούνται από τις ασύγχρονες μηχανές βραχυκυκλωμένου κλωβού να μην χρειάζονται εδώ με συνεπακόλουθο οικονομικό όφελος.

Η μηχανή είναι επίσης ικανή να τροφοδοτήσει με άεργο ισχύ το στάτη από το GSC. Ωστόσο, αυτός ο μετατροπέας επιλέγεται να λειτουργεί κατά προτεραιότητα με  $\cos\phi=1$  και δεν συμμετέχει στην μεταφορά άεργου ισχύος μεταξύ γεννήτριας και δικτύου. Σε περιπτώσεις όμως ασθενών δικτύων, όταν η τάση εμφανίζει διακυμάνσεις, η μηχανή είναι ικανή να παράγει ή να απορροφά άεργο ισχύ, με σκοπό τον έλεγχο της τάσης στο σύστημα. Έκει συμβάλει και ο GSC.

Ένα σημαντικό επίσης πλεονέκτημα της DFIG είναι η διαδικασία εκκίνησης και συγχρονισμού της γεννήτριας με το δίκτυο. Ο συγχρονισμός είναι γρήγορος και εύκολος γιατί μπορεί να γίνει σε οποιαδήποτε ταχύτητα  $\omega_r$  ελέγχοντας τον μετατροπέα από την πλευρά του δρομέα και επιδιώκοντας να συγχρονίσει τις τάσεις του στάτη και του δικτύου τόσο σε μέτρο όσο και σε φάση. Η όλη διαδικασία είναι σύντομη μιας και τα ρεύματα του δρομέα ελέγχονται γρήγορα, χωρίς να απαιτείται κανένας έλεγχος και συμβολή του μηχανικού μέρους ελέγχου.

## ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ

Το κύριο μειονέκτημα της DFIG είναι αναπόφευκτη χρήση δακτυλιδιών – ψηκτρών. Στο κύκλωμα του δρομέα, που πέρα από απώλειες που δημιουργούν, η φθορά τους απαιτεί συχνό έλεγχο και συντήρηση.

Επιπλέον, απαιτεί κυκλώματα αυξημένης προστασίας των μετατροπέων σε περιπτώσεις σφαλμάτων.

## 4.3 ΔΙΑΝΥΣΜΑΤΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ – ΔΥΝΑΜΙΚΕΣ ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ

Οι κλασικοί στατικοί μετατροπείς συχνότητας επιτυγχάνουν έλεγχο της ταχύτητας των ηλεκτρικών μηχανών μέσω της συχνότητας και της τάσεις ή του ρεύματος τροφοδοσίας. Ο έλεγχος αυτός είναι γνωστός ως **βαθμωτός έλεγχος** {scalar control} και δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα σε εφαρμογές



όπου δεν υπάρχουν ειδικές απαιτήσεις ως προς την δυναμική απόκριση του συστήματος. Κύριο χαρακτηριστικό και ταυτόχρονα μειονέκτημα του ελέγχου αυτού είναι ότι η ροπή και η μαγνητική διακένου ελέγχονται από κοινού είτε μέσω της τάσης είτε μέσω του ρεύματος ως προς την συχνότητα και δεν υπάρχει η δυνατότητα ανεξάρτητου ελέγχου της ροπής από τον έλεγχο του πεδίου. Για παράδειγμα, σε ένα μετατροπέα συχνότητας πηγής τάσης όπου διατηρείται σταθερή αναλογία τάσης προς συχνότητα  $V/f$  (σταθερή μαγνητική ροή) αν αυξηθεί απότομα η ταχύτητα αναφοράς (reference speed), τότε αυξάνεται απότομα η συχνότητα της τάσης με αποτέλεσμα να μειωθεί η μαγνητική ροή της μηχανής. Ο βρόγχος της ταχύτητας αυξάνει την τάση τροφοδοσίας στην μηχανή προσπαθώντας να αντισταθμίσει την μείωση της ροής. Ταυτόχρονα μέσω της αύξησης της τάσης αυξάνεται το ρεύμα τροφοδοσίας και συνεπώς η ροπή της, ώστε να επιταχυνθεί και να φτάσει την ταχύτητα αναφοράς. Έτσι η ροπή που παράγεται δημιουργείται μέσω του ελέγχου της τάσης και όχι απ'ευθείας από τον έλεγχο του ρεύματος. Επίσης, μέσω του ελέγχου της τάσης γίνεται και ο έλεγχος της ροής.

Δηλαδή, η ροπή και η μαγνητική ροή ελέγχονται από κοινού μέσω της τάσης τροφοδοσίας, με αποτέλεσμα να μην μπορεί να μεταβληθεί η κάθε μια ξεχωριστά στο ποσοστό που απαιτεί ο σωστός έλεγχος της δυναμικής κατάστασης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η απόκριση της μηχανής σε μεταβολές των σημάτων αναφοράς να μην είναι γρήγορη και κυρίως να μην είναι πλήρως ελεγχόμενη. Με άλλα λόγια, ο βαθμωτός έλεγχος δεν δίνει γρήγορες  $V$  επιταχύνσεις και επιβραδύνσεις και γενικά η δυναμική απόκριση δεν είναι η πλέον καλύτερη.

Ο διανυσματικός έλεγχος ή έλεγχος προσανατολισμένου πεδίου πλεονεκτεί έναντι του βαθμωτού ελέγχου, γιατί εξασφαλίζει καλύτερη δυναμική απόκριση του συστήματος και ικανοποιητικό έλεγχο ροπής στις χαμηλές ταχύτητες. Η αρχή λειτουργίας του διανυσματικού ελέγχου στηρίζεται στην τεχνική ελέγχου των μηχανών συνεχούς ρεύματος ανεξάρτητης διέγερσης και εφαρμόζεται στις μηχανές εναλλασσόμενου ρεύματος. Η ροπή και η μαγνητική ροή ελέγχονται ανεξάρτητα και μάλιστα η ροπή ελέγχεται άμεσα μέσω της συνιστώσα του ρεύματος που παράγει η ροπή (ρεύμα ροπής). Με άλλα λόγια, με την τεχνική του διανυσματικού ελέγχου οι μηχανές εναλλασσόμενου ρεύματος ελέγχονται σαν να είναι μηχανές συνεχούς ρεύματος. Έτσι επιτυγχάνονται γρήγορες και κυρίως ελεγχόμενες επιταχύνσεις και επιβραδύνσεις της ανεμογεννήτρια και μάλιστα ακριβής έλεγχος ταχύτητας και θέσης σε όλο το εύρος ταχυτήτων. Γενικά, ο διανυσματικός έλεγχος δίνει στο σύστημα πολύ καλή δυναμική συμπεριφορά, ωστόσο είναι περισσότερο πολύπλοκος και ακριβότερος στην υλοποίηση του σε σύγκριση με τον βαθμωτό έλεγχο.

### 4.3.1 Η ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΤΩΝ ΔΥΟ ΑΞΟΝΩΝ (Μ/Σ PARK)

Όλα τα ηλεκτρικά και μαγνητικά μεγέθη μιας τριφασικής ηλεκτρικής μηχανής εναλλασσόμενου ρεύματος είναι χρονικά μεταβαλλόμενα. Τα μεγέθη αυτά μπορούν να παρασταθούν με διανύσματα χρόνου και χώρου πάνω στο μιγαδικό επίπεδο. Τα διανύσματα χώρου μπορεί να είναι στρεφόμενα ή στατικά ανάλογα με το σύστημα αξόνων αναφοράς που έχει επιλεγεί. Τα ίδια συμπεράσματα μπορούν να προκύψουν και για τα διανύσματα χρόνου. Ο μετασχηματισμός αυτός είναι ιδιαίτερα χρήσιμος γιατί αφενός μεν μετασχηματίζει το τριφασικό σύστημα σε “διφασικό” και αφετέρου δε επιλέγοντας κατάλληλο σύστημα αξόνων αναφοράς μπορούν όλα τα χρονικά μεταβαλλόμενα μεγέθη να μετασχηματιστούν σε χρονικά αμετάβλητα διανύσματα χρόνου. Στο μετασχηματισμό Park, ένα τριφασικό μέγεθος  $(f_A, f_B, f_C)$  μετασχηματίζεται ακολουθώντας τις παρακάτω πράξεις πινάκων :

$$\begin{bmatrix} f_q^\theta \\ f_d^\theta \\ f_0^\theta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{pmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta + 2\pi/3) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta + 2\pi/3) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{pmatrix} \begin{bmatrix} f_A \\ f_B \\ f_C \end{bmatrix}$$

Η

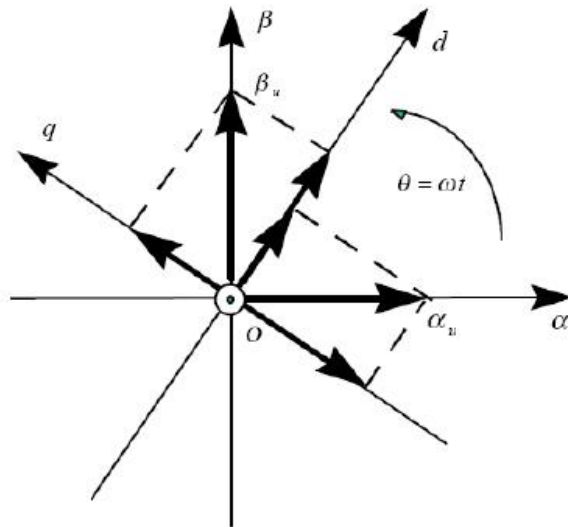
$$f_{qd0}^\theta = K^\theta f_{ABC}$$

Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται η ανάλυση του πραγματικού τριφασικού συστήματος σε δύο άξονες, d και q, κάθετους μεταξύ τους. Επιπλέον προκύπτει και τρίτος άξονας, 0, ονομάζεται *συνιστώσα μηδενικής συχνότητα ή ομοπολική συνιστώσα* και είναι ανεξάρτητη από την γωνία στροφής  $\theta$  και για την συμμετρική λειτουργία έχει μηδενικές τιμές και παραλείπεται συνήθως στον διανυσματικό έλεγχο. Ο άξονας d ονομάζεται ευθύς άξονας (direct axis), ο άξονας q εγκάρσιος και ο q προηγείται του d κατά 90 μοίρες, ενώ ο άξονας 0, είναι κάθετος στο επίπεδο της σελίδας.

Ο συντελεστής  $\frac{2}{3}$  στην μήτρα του μετασχηματισμού είναι αυθαίρετος και η επιλογή του σημαίνει ότι το πλάτος του χωρικού διανύσματος είναι ίσο με το

πλάτος του φυσικού μεγέθους. Εάν χρησιμοποιηθεί το  $\frac{\sqrt{2}}{3}$  τότε παραμένουν ίσες οι RMS ποσότητες. Αν τέλος χρησιμοποιηθεί ο συντελεστής  $\sqrt{\frac{2}{3}}$  παραμένει ίση η ισχύς και στο πλαίσιο d-q και στο πλαίσιο abc.

Η γωνία  $\theta = \int_0^t \omega(\tau) d\tau + \theta(0)$  που φαίνεται στον πίνακα μετασχηματισμού, είναι η γωνία που σχηματίζει ο άξονας d του νέου συστήματος αναφοράς, με τον άξονα a του τριφασικού συστήματος. Η γωνία  $\theta(0)$  είναι η αρχική γωνία η οποία λαμβάνεται ίση με μηδέν χωρίς βλάβη της γενικότητας και  $\omega$  η αυθαίρετη γωνιακή ταχύτητα του περιστρεφόμενου πλαισίου. Εάν η  $\omega$  είναι σταθερή, τότε  $\theta = \omega t$ .



**Σχήμα 4.3.1.1 Σχηματική αναπαράσταση των αξόνων d και q πλαισίου αναφοράς με αυθαίρετη ταχύτητα περιστροφής**

Το τριφασικό μέγεθος  $(f_A, f_B, f_C)$  μπορεί να είναι οποιοδήποτε ηλεκτρικό ή μαγνητικό μέγεθος της μηχανής (π.χ. η τάση, το ρεύμα, η πεπλεγμένη ροή κλπ). Ο υπερδείκτης  $\theta$  χαρακτηρίζει το σύστημα αξόνων αναφοράς στο οποίο μετασχηματίζεται το τριφασικό μέγεθος  $(f_A, f_B, f_C)$ .

Ο αντίστροφος μετασχηματισμός ο οποίος μετατρέπει το διφασικό σύστημα  $(f_q, f_d)$  στο τριφασικό  $(f_A, f_B, f_C)$

$$\begin{bmatrix} f_A \\ f_B \\ f_C \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 1 \\ \cos(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta - 2\pi/3) & 1 \\ \cos(\theta + 2\pi/3) & -\sin(\theta + 2\pi/3) & 1 \end{pmatrix} \begin{bmatrix} f_q^\theta \\ f_d^\theta \\ f_0^\theta \end{bmatrix}$$

Η

$$f_{ABC} = (K^\theta)^{-1} f_{qd0}^\theta$$

Εφαρμόζοντας τον πίνακα μετασχηματισμού στις εξισώσεις της μηχανής προκύπτουν οι εξισώσεις στο d-q σύστημα. Η ταχύτητα του δρομέα είναι  $\omega_r$ .

$$\begin{aligned} u_{qs} &= p\lambda_{qs} + \omega\lambda_{ds} + R_s i_{qs} \\ u_{ds} &= p\lambda_{ds} - \omega\lambda_{qs} + R_s i_{ds} \\ u_{qr} &= p\lambda_{qr} + (\omega - n_p\omega_r)\lambda_{dr} + R_r i_{qr} \\ u_{dr} &= p\lambda_{dr} - (\omega - n_p\omega_r)\lambda_{qr} + R_r i_{dr} \end{aligned} \quad (4.3.1.1)$$

Οι τέσσερις αυτές εξισώσεις περιγράφουν την λειτουργία της μηχανής και είναι οι εξισώσεις με τα μεγέθη ανηγμένα σε ένα περιστρεφόμενο με αυθαίρετη ταχύτητα πλαίσιο αναφοράς.

- Όπου  $p$  είναι ο λόγος της πρώτης παραγώγου  $d/dt$

Οι σχέσεις των ρευμάτων με τις ροές δίνονται από τις σχέσεις:

$$\begin{aligned} \lambda_{qs} &= (L_{ls} + L_m)i_{qs} + L_m i_{qr} \\ \lambda_{ds} &= (L_{ls} + L_m)i_{ds} + L_m i_{dr} \\ \lambda_{qr} &= (L_{lr} + L_m)i_{qr} + L_m i_{qs} \\ \lambda_{dr} &= (L_{lr} + L_m)i_{dr} + L_m i_{ds} \end{aligned}$$

Όπου

$L_s = L_{sl} + L_m$  η αυτεπαγωγή του στάτη  
 $L_r = L_{rl} + L_m$  η αυτεπαγωγή του δρομέα

### **4.3.2 ΔΥΝΑΜΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΣΕ ΣΤΑΤΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΑΝΑΦΟΡΑΣ**

Αν στο σύστημα εξισώσεων (4.3.1.1) θέσουμε  $\omega=0$ , τότε πλαίσιο αναφοράς στρέφεται με μηδενική ταχύτητα (στατό πλαίσιο). Οι εξισώσεις γίνονται

$$\begin{aligned} u_{ds}^s &= R_s i_{ds}^s + p \lambda_{ds}^s \\ u_{qs}^s &= R_s i_{qs}^s + p \lambda_{qs}^s \\ u_{dr}^s &= R_r i_{dr}^s + p \lambda_{dr}^s + n_p \omega_r \lambda_{qr}^s \\ u_{qr}^s &= R_r i_{qr}^s + p \lambda_{qr}^s - n_p \omega_r \lambda_{dr}^s \end{aligned}$$

Ενώ οι εξισώσεις της ηλεκτρομαγνητικής ροπής

$$\begin{aligned} T_e &= \frac{3}{2} \left( \frac{n_p}{2} \right) (\lambda_{dm}^s i_{qr}^s - \lambda_{qm}^s i_{dr}^s) \\ &= \frac{3}{2} \left( \frac{n_p}{2} \right) (\lambda_{dm}^s i_{qs}^s - \lambda_{qm}^s i_{ds}^s) \\ &= \frac{3}{2} \left( \frac{n_p}{2} \right) (\lambda_{ds}^s i_{qs}^s - \lambda_{qs}^s i_{ds}^s) \quad (4.3.2.1) \\ &= \frac{3}{2} \left( \frac{n_p}{2} \right) (\lambda_{qs}^s i_{qr}^s - \lambda_{ds}^s i_{dr}^s) \\ &= \frac{3}{2} \left( \frac{n_p}{2} \right) (\lambda_{dr}^s i_{qr}^s - \lambda_{qr}^s i_{dr}^s) \end{aligned}$$

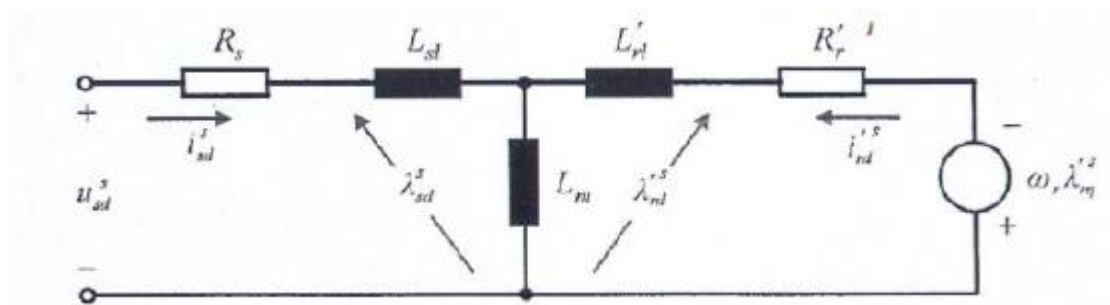
Όπου  $n_p$  είναι ο αριθμός των ζευγών πόλων της μηχανής.

Ο μετασχηματισμός σε στατό πλαίσιο αναφοράς έχει γίνει γνωστός σαν μετασχηματισμός Clarke και οι d-q συνιστώσες σαν συνιστώσες α-β.

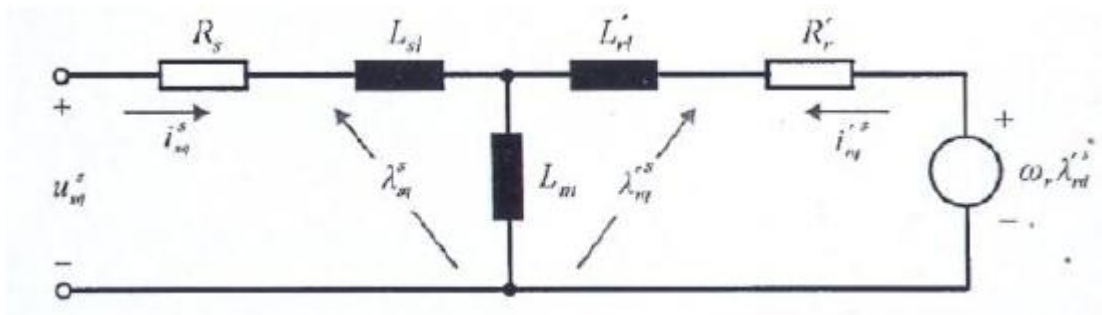
### 4.3.3 ΔΥΝΑΜΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΣΕ ΣΥΓΧΡΟΝΑ ΣΤΡΕΦΟΜΕΝΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΑΝΑΦΟΡΑΣ

Στην περίπτωση αυτή το πλαίσιο περιστρέφεται με την σύγχρονη ταχύτητα και το σύστημα εξισώσεων (4.3.1.1) γράφεται ως εξής

$$\begin{aligned}
 u_{ds}^e &= R_s i_{ds}^e + p \lambda_{ds}^e - \omega_e \lambda_{qs}^e \\
 u_{qs}^e &= R_s i_{qs}^e + p \lambda_{qs}^e + \omega_e \lambda_{ds}^e \\
 u_{dr}'^e &= R_r' i_{dr}'^e + p \lambda_{dr}'^e - (\omega_e - n_p \omega_r) \lambda_{qr}'^e \\
 u_{qr}'^e &= R_r' i_{qr}'^e + p \lambda_{qr}'^e + (\omega_e - n_p \omega_r) \lambda_{dr}'^e
 \end{aligned}
 \tag{4.3.3.1}$$



Σχήμα 4.3.3.1 Ισοδύναμο κύκλωμα DFIG στον άξονα d



Σχήμα 4.3.3.2 Ισοδύναμο κύκλωμα DFIG στον άξονα q

Οι εκφράσεις των πεπλεγμένων ροών με όρους ρευμάτων μπορούν να προκύψουν

$$\begin{aligned}\lambda_{ds} &= L_{sl}i_{ds} + L_m(i_{ds} + i_{dr}) \\ \lambda_{dr} &= L_{rl}i_{dr} + L_m(i_{ds} + i_{dr}) \\ \lambda_{dm} &= L_m(i_{ds} + i_{dr}) \\ \lambda_{qs} &= L_{sl} + L_m(i_{qs} + i_{qr}) \\ \lambda_{qr} &= L_{rl}i_{qr} + L_m(i_{qs} + i_{qr}) \\ \lambda_{qm} &= L_m(i_{qs} + i_{qr})\end{aligned}$$

Ή

$$\begin{aligned}\lambda_{ds} &= L_s i_{ds} + L_m i_{dr} \\ \lambda_{dr} &= L_r i_{dr} + L_m i_{ds} \\ \lambda_{dm} &= L_m i_{dm} \\ \lambda_{qs} &= L_s i_{qs} + L_m i_{qr} \\ \lambda_{qr} &= L_r i_{qr} + L_m i_{qs} \\ \lambda_{qm} &= L_m i_{qm}\end{aligned}$$

Δεδομένου ότι

$$\begin{aligned}i_{dm} &= i_{ds} + i_{dr} \\ i_{qm} &= i_{qs} + i_{qr} \\ L_s &= L_{sl} + L_m \\ L_r &= L_{rl} + L_m\end{aligned}$$

Η ταχύτητα του δρομέα  $\omega_r$  δεν μπορεί να θεωρηθεί σταθερή. Σχετίζεται με τις ροπές με την σχέση

$$T_e - T_m = Jp\omega_r + b\omega_r \quad (4.3.3.2)$$

Όπου  $T_m$  είναι η μηχανική ροπή,  $J$  η ροπή αδράνειας.

Για την ηλεκτρομαγνητική ροπή ισχύουν οι εξισώσεις (4.3.2.1) μόνο που τώρα τα μεγέθη αναφέρονται σε σύγχρονα στρεφόμενο πλαίσιο αναφοράς και όχι σε στατό.

Οι τέσσερις βασικές εξισώσεις της μηχανής (4.3.3.1) μαζί με την εξίσωση των ροπών (4.3.3.2) αποτελούν το δυναμικό μοντέλο πέμπτης τάξης της επαγωγικής μηχανής, απαραίτητο για την ανάλυση των μεταβατικών καταστάσεων.

#### **4.3.4 Η ΙΣΧΥΣ ΣΤΟ ΠΛΑΙΣΙΟ d-q**

Η ενεργός ισχύς στο d-q πλαίσιο προκύπτει με την χρήση των μετασχηματισμών

$$P_{dq} = \frac{3}{2}(u_d i_d + u_q i_q)$$

Και η άεργος ισχύς

$$Q_{dq} = \frac{3}{2}(u_q i_q - u_d i_d)$$

Βλέπουμε επίσης ότι η ισχύς στο πλαίσιο d-q είναι ανεξάρτητη της περιστροφής του πλαισίου.

Με βάση τις παραπάνω εξισώσεις για τον στάτη και τον δρομέα μιας τριφασικής μηχανής ισχύουν

$$P_s = \frac{3}{2}(u_{ds} i_{ds} + u_{qs} i_{qs})$$

$$Q_s = \frac{3}{2}(u_{qs} i_{ds} - u_{ds} i_{qs})$$

$$P_r = \frac{3}{2}(u_{dr} i_{dr} + u_{qr} i_{qr})$$

$$Q_r = \frac{3}{2}(u_{qr} i_{qr} - u_{dr} i_{qr})$$



Συμβολίζοντας με  $P_f$  και  $Q_f$  την ενεργό και άεργο ισχύ στον βρόχο του δρομέα (στην έξοδο του Inverter στην πλευρά του δικτύου) έχω αντίστοιχα

$$P_f = \frac{3}{2} (u_{ds} i_{df} + u_{qs} i_{qf})$$

$$Q_f = \frac{3}{2} (u_{qs} i_{df} - u_{ds} i_{qf})$$

Και η ολική ισχύς είναι

$$P_{tot} = P_f + P_s$$

$$Q_{tot} = Q_f + Q_s$$

#### **4.3.5 ΤΥΠΟΙ ΔΙΑΝΥΣΜΑΤΙΚΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ**

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

- Διανυσματικός έλεγχος με προσανατολισμό στο πεδίο του στάτη
- Διανυσματικός έλεγχος με προσανατολισμό στο πεδίο του δρομέα
- Διανυσματικός έλεγχος με προσανατολισμό στο πεδίο του διακένου

Ο τρόπος με τον οποίο υπολογίζεται η μαγνητική ροή και γίνεται 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 :

1. **Άμεσος διανυσματικός έλεγχος**, όταν χρησιμοποιούνται αισθητήρες ή οι τερματικές ποσότητες της μηχανής σε συνδυασμό με μαθηματικό μοντέλο της για να υπολογιστεί το διάνυσμα του πεδίου με βάση το οποίο γίνεται ο προσανατολισμός του συστήματος αναφοράς.
2. **Έμμεσος διανυσματικός έλεγχος**, όταν χρησιμοποιείται η συχνότητα ολίσθησης για να γίνει ο προσανατολισμός με το πεδίο.

Όπως φαίνεται καθαρά από το 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 ηλεκτρικών 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 την χρήση των τεχνικών αυτών αυξάνεται δραματικά η αξιοπιστία των ηλεκτροκινητήριων συστημάτων που χρησιμοποιούν ασύγχρονες μηχανές, με αποτέλεσμα να τείνουμε στην επικράτησή τους έναντι των κινητηρίων συστημάτων συνεχούς ρεύματος σε ένα ευρύτατο φάσμα εφαρμογών.

#### **4.4 ΜΟΝΤΕΛΑ ΧΩΡΟΥ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ - ΕΛΕΓΧΟΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ**

Τώρα μελετάμε την εξαγωγή και παρουσίαση ενός μοντέλου για την επαγωγική μηχανή DFIG, το οποίο θα χρησιμοποιήσουμε για τον έλεγχο της μηχανής. Η ορθή εξαγωγή των εξισώσεων και η κατάλληλη απεικόνισή τους είναι καθοριστική στην επιτυχία του ελέγχου.

##### **4.4.1 ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ DFIG ΣΤΟ ΧΩΡΟ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ (3 ΜΟΝΤΕΛΑ)**

Συγκεντρωτικά οι εξισώσεις που περιγράφουν το μοντέλο της επαγωγικής μηχανής διπλής τροφοδοσίας στο d-q πλαίσιο αναφοράς είναι

**Εξισώσεις τάσης στάτη**

$$u_{qs} = p\lambda_{qs} + \omega\lambda_{ds} + R_s i_{qs}$$

$$u_{ds} = p\lambda_{ds} - \omega\lambda_{qs} + R_s i_{ds}$$

**Εξισώσεις τάσης δρομέα**

$$u_{qr} = p\lambda_{qr} + (\omega - n_p\omega_r)\lambda_{dr} + R_r i_{qr}$$

$$u_{dr} = p\lambda_{dr} - (\omega - n_p\omega_r)\lambda_{qr} + R_r i_{dr}$$

### **Εξισώσεις ισχύος**

$$P_s = \frac{3}{2}(u_{ds}i_{ds} + u_{qs}i_{qs})$$

$$Q_s = \frac{3}{2}(u_{qs}i_{ds} - u_{ds}i_{qs})$$

$$P_f = \frac{3}{2}(u_{ds}i_{df} + u_{qs}i_{qf})$$

$$Q_f = \frac{3}{2}(u_{qs}i_{df} - u_{ds}i_{qf})$$

$$P_{tot} = P_f + P_s$$

$$Q_{tot} = Q_f + Q_s$$

### **Εξίσωση ροπής**

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

### **Εξισώσεις ροών**

$$\lambda_{qs} = L_s i_{qs} + L_m i_{qr}$$

**(4.4.1.1)**

$$\lambda_{ds} = L_s i_{ds} + L_m i_{dr}$$

$$\lambda_{qr} = L_r i_{qr} + L_m i_{qs}$$

$$\lambda_{dr} = L_r i_{dr} + L_m i_{ds}$$

Μετά από ανατροπές, αντικαταστάσεις και πράξεις, καταλήγουμε σε 3 μοντέλα εξισώσεων στο d-q πλαίσιο αναφοράς όπου θα συσχετίζονται, στο πρώτο μοντέλο τα ρεύματα του στάτη και του δρομέα ( $I_{ds} I_{qs} I_{dr} I_{qr}$ ), στο δεύτερο οι ροές του δρομέα με τα ρεύματα του στάτη ( $\lambda_{dr} \lambda_{qr} I_{ds} I_{qs}$ ) και στο τρίτο οι ροές με τα ρεύματα του δρομέα ( $\lambda_{ds} \lambda_{qs} I_{dr} I_{qr}$ ).

### A' ΜΟΝΤΕΛΟ ( $I_{ds} I_{qs} I_{dr} I_{qr}$ )

Οι δυναμικές εξισώσεις που προκύπτουν γι' αυτό το μοντέλο είναι :

$$L_s u_{dr} - L_m u_{ds} = L_s R_r i_{dr} + [\omega(L_m^2 - L_s L_r) + \omega_r L_s L_r] i_{qr} + \omega_r L_s L_m i_{qs} - R_s L_m i_{ds} - (L_m^2 - L_s L_r) p i_{dr}$$

$$L_s u_{qr} - L_m u_{qs} = L_s R_r i_{qr} - [\omega(L_m^2 - L_s L_r) + \omega_r L_s L_r] i_{dr} - \omega_r L_s L_m i_{ds} - R_s L_m i_{qs} - (L_m^2 - L_s L_r) p i_{qr}$$

$$L_m u_{dr} - L_r u_{ds} = L_m R_r i_{dr} + [\omega(L_s L_r - L_m^2) + \omega_r L_s L_r] i_{qs} + \omega_r L_r L_m i_{qr} - R_s L_r i_{ds} + (L_m^2 - L_s L_r) p i_{ds}$$

$$L_m u_{qr} - L_r u_{qs} = L_m R_r i_{qr} - [\omega(L_s L_r - L_m^2) + \omega_r L_s L_r] i_{ds} - \omega_r L_r L_m i_{dr} - R_s L_r i_{qs} + (L_m^2 - L_s L_r) p i_{qs}$$

### B' ΜΟΝΤΕΛΟ ( $\lambda_{dr} \lambda_{qr} I_{ds} I_{qs}$ )

Οι δυναμικές εξισώσεις που προκύπτουν γι' αυτό το μοντέλο είναι :

$$u_{dr} = \frac{R_r}{L_r} \lambda_{dr} - \frac{L_m R_r}{L_r} i_{ds} - (\omega - \omega_r) \lambda_{qr} + p \lambda_{dr}$$

$$u_{qr} = \frac{R_r}{L_r} \lambda_{qr} - \frac{L_m R_r}{L_r} i_{qs} + (\omega - \omega_r) \lambda_{dr} + p \lambda_{qr}$$

$$L_m u_{dr} - L_r u_{ds} = \frac{L_m R_r}{L_r} \lambda_{dr} - \left( \frac{L_m^2 R_r}{L_r} + R_s L_r \right) i_{ds} + n_p \omega_r L_m \lambda_{qr} + \omega (L_s L_r - L_m^2) i_{qs} + (L_m^2 - L_s L_r) p i_{ds}$$

$$L_m u_{qr} - L_r u_{qs} = \frac{L_m R_r}{L_r} \lambda_{qr} - \left( \frac{L_m^2 R_r}{L_r} + R_s L_r \right) i_{qs} - n_p \omega_r L_m \lambda_{dr} - \omega (L_s L_r - L_m^2) i_{qs} + (L_m^2 - L_s L_r) p i_{ds}$$

### **Γ' ΜΟΝΤΕΛΟ ( $\lambda_{ds}$ $\lambda_{qs}$ $I_{dr}$ $I_{qr}$ )**

Οι δυναμικές εξισώσεις που προκύπτουν γι' αυτό το μοντέλο είναι :

$$u_{ds} = \frac{R_s}{L_s} \lambda_{ds} - \frac{L_m R_s}{L_s} i_{dr} - \omega \lambda_{qs} + p \lambda_{ds}$$

$$u_{qs} = \frac{R_s}{L_s} \lambda_{qs} - \frac{L_m R_s}{L_s} i_{qr} + \omega \lambda_{ds} + p \lambda_{qs}$$

$$L_s u_{dr} - L_m u_{ds} = - \frac{L_m R_s}{L_s} \lambda_{ds} + \left( \frac{L_m^2 R_s}{L_s} + R_r L_s \right) i_{dr} + \omega_r L_m \lambda_{qs} + (\omega - n_p \omega_r) (L_m^2 - L_s L_r) i_{qr} + (L_m^2 - L_s L_m) p i_{qs}$$

$$L_s u_{qr} - L_m u_{qs} = - \frac{L_m R_s}{L_s} \lambda_{qs} + \left( \frac{L_m^2 R_s}{L_s} + R_r L_s \right) i_{qr} - \omega_r L_m \lambda_{ds} - (\omega - n_p \omega_r) (L_m^2 - L_s L_r) i_{dr} - (L_m^2 - L_s L_m) p i_{qr}$$

Στην παρούσα διπλωματική εργασία επιλέγουμε να δουλέψουμε με τις εξισώσεις του Γ μοντέλου που αφορούν τις ροές στο στάτη και τα ρεύματα του δρομέα. Έτσι, λύνοντας ως προς την πρώτη παράγωγο αυτών των μεγεθών έχουμε:

$$p\lambda_{ds} = u_{ds} - \frac{R_s}{L_s}\lambda_{ds} + \frac{L_m R_s}{L_s}i_{dr} + \omega\lambda_{qs}$$

$$p\lambda_{qs} = u_{qs} - \frac{R_s}{L_s}\lambda_{qs} + \frac{L_m R_s}{L_s}i_{qr} - \omega\lambda_{ds}$$

$$pi_{qs} = \left(\frac{1}{L_m^2 - L_s L_m}\right) \left[ -L_s u_{dr} + L_m u_{ds} - \frac{L_m R_s}{L_s} \lambda_{ds} + \left(\frac{L_m^2 R_s}{L_s} + R_r L_s\right) i_{dr} + n_p \omega_r L_m \lambda_{qs} + (\omega - n_p \omega_r)(L_m^2 - L_s L_r) i_{qr} \right]$$

$$pi_{qr} = \left(\frac{1}{L_m^2 - L_s L_m}\right) \left[ -L_s u_{qr} + L_m u_{qs} - \frac{L_m R_s}{L_s} \lambda_{qs} + \left(\frac{L_m^2 R_s}{L_s} + R_r L_s\right) i_{qr} - n_p \omega_r L_m \lambda_{ds} - (\omega - n_p \omega_r)(L_m^2 - L_s L_r) i_{dr} \right]$$

- Όπου  $p : d/dt$   
 $n_p$ : αριθμός ζευγών πόλων

Τέλος το μοντέλο γίνεται 5<sup>ης</sup> τάξης με την εξίσωση κυκλικής ροπής της μηχανής :

$$p\omega_r = n_p \frac{3}{2j} \frac{L_m}{L_s} (\lambda_{qs} i_{dr} - \lambda_{ds} i_{qr}) - \frac{T_m}{J} - \frac{b\omega_r}{J}$$

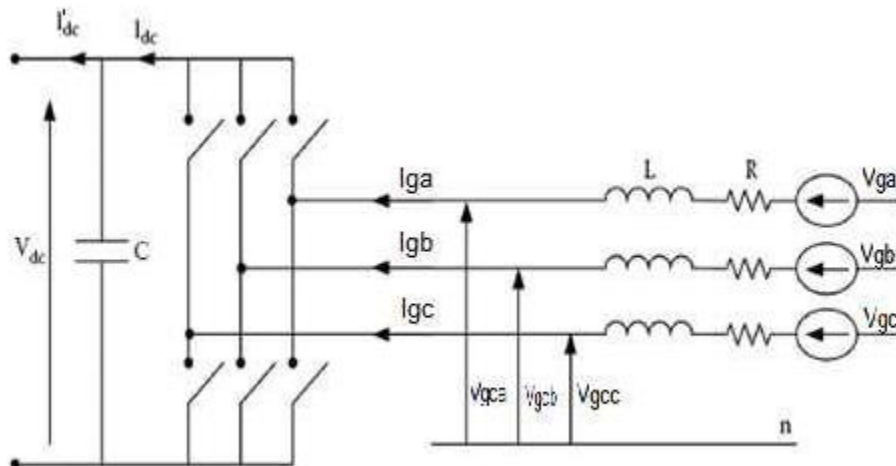
**Οι μαθηματικές εξισώσεις αφορούν την μηχανή κατά την λειτουργία της ως κινητήρα.**

#### 4.4.2 ΦΙΛΤΡΟ AC( $R_f L_f$ ) ΚΑΙ DC-ΠΥΚΝΩΤΗΣ: ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΣΤΟ d-q

Εξαιτίας της διακοπτικής λειτουργίας των ηλεκτρονικών στοιχείων που χρησιμοποιούνται στο δίκτυο, εγχύονται σε αυτό τα ρεύματα που περιέχουν υψηλής συχνότητας αρμονικές συνιστώσες. Έτσι, είναι απαραίτητη η χρήση κατωδιαβατών φίλτρων που καταστέλλουν αυτές τις αρμονικές. Οι δύο κοινές τοπολογίες είναι:

- Το φίλτρο του απλού επαγωγέα L
- 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 παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται ένας μετατροπέας πηγής τάσης, η έξοδος του οποίου συνδέεται στο δίκτυο μέσω ενός φίλτρου L.



Σχήμα 4.4.2.1 Φίλτρο απλού επαγωγέα L

Από το παραπάνω σχήμα αν ονομάσουμε τα στοιχεία του φίλτρου  $L_f, R_f$  τις τάσεις του δικτύου  $V_{as}, V_{bs}, V_{cs}$  και τις τάσεις στον μετατροπέα  $V_{a1}, V_{b1}, V_{c1}$  οι εξισώσεις στο τριφασικό σύστημα είναι :

$$\begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} = R_f \begin{bmatrix} I_{af} \\ I_{bf} \\ I_{cf} \end{bmatrix} + L_f \begin{bmatrix} pI_{af} \\ pI_{bf} \\ pI_{cf} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{a1} \\ V_{b1} \\ V_{c1} \end{bmatrix}$$

Μετασχηματίζοντας στο d-q πλαίσιο αναφοράς έχω:

$$\begin{aligned} u_{ds} &= R_f i_{df} + L_f p i_{df} - \omega L_f i_{df} + u_{df} \quad (4.4.2.1) \\ u_{qs} &= R_f i_{qf} + L_f p i_{qf} + \omega L_f i_{df} + u_{qf} \end{aligned}$$

Λύνοντας ως προς την πρώτη παράγωγο των  $i_{df}, i_{qf}$  παίρνω αντίστοιχα

$$p i_{df} = \frac{1}{L_f} (-R_f i_{df} + \omega L_f i_{qf} + u_{ds} - u_{df})$$

$$p i_{qf} = \frac{1}{L_f} (-R_f i_{qf} - \omega L_f i_{df} + u_{qs} - u_{qf})$$

Ο πυκνωτής που παρεμβάλλεται ανάμεσα στους δύο αντιστροφείς, όπως είναι φυσικό, αποθηκεύει ένα ποσό ενέργειας  $W_{dc}$ , που από τον τύπο της αποθηκευόμενης ενέργειας σε πυκνωτή είναι:

$$W_{dc} = \frac{1}{2} C V_{dc}^2$$

Για να μπορέσουμε να εξάγουμε την σχέση για την διασύνδεση dc, θα πρέπει να κάνουμε την επόμενη παραδοχή. Η αποθηκευμένη ενέργεια στον πυκνωτή είναι ίση με το ισοζύγιο των δύο ενεργειών του συστήματος των αντιστροφέων, δηλαδή των  $P_f, P_r$ , όπου  $P_r$  η ισχύς που πάει από τον αντιστροφέα GSC προς το φίλτρο δικτύου, όπως φαίνεται από το σχήμα



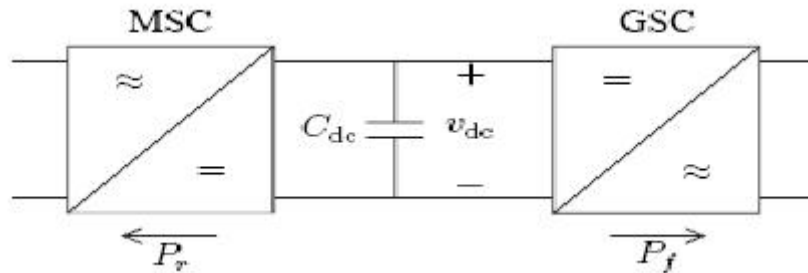
4.4.2.2. εμείς θα θεωρήσουμε η φορά της ισχύος  $P_f$  αντίστροφη (επειδή αναφερόμαστε σε γεννήτρια).

Άρα, η εξίσωση για την ενέργεια του πυκνωτή (αποδεχόμενοι μηδενικές απώλειες) είναι:

$$pW_{dc} = \frac{1}{2} C p V_{dc}^2 = P_f - P_r$$

(4.4.2.2)

$$C V_{dc} p V_{dc} = P_f - P_r$$



**Σχήμα 4.4.2.2 Ροή ισχύος στον μετατροπέα(περίπτωση λειτουργίας ως κινητήρας)**

Οι εξισώσεις της ισχύος  $P_f$  και  $P_r$  δίνονται αντίστοιχα από τις παρακάτω σχέσεις

$$P_f = \frac{3}{2} (u_{df} i_{df} + u_{qf} i_{qf})$$

$$P_r = \frac{3}{2} (u_{dr} i_{dr} + u_{qr} i_{qr})$$

Παίρνοντας την σχέση (4.4.2.2) καταλήγουμε στην εξής μορφή

$$pV_{dc} = \frac{3}{2CV_{dc}} (u_{df}i_{df} + u_{qf}i_{qf} - u_{dr}i_{dr} - u_{qr}i_{qr})$$

Έπειτα ορίζοντας τους λόγους τάσεων

$$m_{dr} = \frac{u_{dr}}{V_{dc}} \quad m_{qr} = \frac{u_{qr}}{V_{dc}} \quad m_{df} = \frac{u_{df}}{V_{dc}} \quad m_{qf} = \frac{u_{qf}}{V_{dc}}$$

Οι εξισώσεις παίρνουν τη εξής τελική μορφή:

$$p i_{df} = \frac{1}{L_f} (-R_f i_{df} + L_f \omega_s i_{qf} - m_{df} V_{dc} + u_{ds})$$

$$p i_{qf} = \frac{1}{L_f} (-R_f i_{qf} - L_f \omega_s i_{df} - m_{qf} V_{dc} + u_{qs})$$

$$p V_{dc} = \frac{3}{2C} (-m_{dr} i_{dr} - m_{qr} i_{qr} + m_{df} i_{df} + m_{qf} i_{qf})$$

### **4.4.3 ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΗΣ DFIG**

#### **4.4.3.1 ΕΛΕΓΧΟΣ ΑΠΟ ΤΗΝ ΠΛΕΥΡΑ ΤΟΥ ΔΡΟΜΕΑ (RSC)**

Ο στόχος του μετατροπέα στην πλευρά του δρομέα είναι να ελέγξει ανεξάρτητα την ενεργή και άεργη ισχύ. Η ενεργή και άεργη ισχύς δεν ελάγχονται ευθέως αλλά έμμεσα ελέγχοντας το impressed ρεύμα του δρομέα. Ο μετατροπέας στην πλευρά του δρομέα λειτουργεί σε ένα d-q σύστημα αναφοράς προσανατολισμένο προς την ροή του στάτη, όπου το ρεύμα του δρομέα διαιρείται σε μια παράλληλη και μια κάθετη συνιστώσα στην ροή του στάτη αντίστοιχα. Ένας πολύ γρήγορος εσωτερικός βρόχος ελέγχου ρυθμίζει την ενεργή και άεργη συνιστώσα του ρεύματος του δρομέα. Τα καθορισμένα σημεία του ρεύματος καθορίζονται από έναν πιο αργό εξωτερικό βρόχο ελέγχου που ρυθμίζει την ενεργή και άεργη ισχύ.

Η μηχανή επαγωγής ελέγχεται σε ένα σύγχρονο περιστρεφόμενο d-q άξονα αναφοράς όπου ο d άξονας είναι προσανατολισμένος με την διανυσματική θέση της ροής του στάτη. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται ένας ανεξάρτητος έλεγχος ανάμεσα στην ηλεκτρική ροπή και στο διεγερμένο ρεύμα του δρομέα. Ο PWM μετατροπέας στην πλευρά του δρομέα παρέχει την ώθηση και ο έλεγχος απαιτεί την μέτρηση των ρευμάτων του στάτη και του δρομέα, την τάση του στάτη και την θέση του δρομέα.

Λόγω του ότι οι τάσεις στον στάτη είναι σταθερές όσον αφορά το πλάτος, τη συχνότητα και τη φάση και επομένως η μαγνητική ροή  $\lambda_s$  είναι σχεδόν σταθερή, ο διανυσματικός έλεγχος στη πλευρά της μηχανής πραγματοποιείται με τον άξονα d του περιστρεφόμενου με την σύγχρονη ταχύτητα πλαισίου αναφοράς, προσανατολισμένο με την μαγνητική ροή του στάτη  $\lambda_s$ . Στην περίπτωση αυτή ισχύει:

$$\lambda_{qs} = 0$$

$$p\lambda_{qs} = 0$$

Άρα

$$\lambda_s = \lambda_{ds}$$

Οι εξισώσεις του στάτη στους d και q άξονες υπό αυτές τις συνθήκες γράφεται ως εξής:

$$u_{qs} = R_s i_{qs} + \omega \lambda_{ds}$$

$$u_{ds} = R_s i_{ds} + p\lambda_{ds}$$

Λόγω του ότι η μαγνητική ροή  $\lambda_{ds}$  δεν μεταβάλλεται πολύ θα ισχύει  $p\lambda_{ds} = 0$  και με την υπόθεση ότι η  $R_s$  είναι κοντά στο μηδέν προκύπτει ότι

$$u_{ds} = 0$$

$$u_{qs} = p\lambda_{ds}$$

Η ενεργός και η άεργος ισχύς υπολογίζονται από τις σχέσεις:

$$P_s = \frac{3}{2}(u_{ds}i_{ds} + u_{qs}i_{qs}) = \frac{3}{2}u_{qs}i_{qs} = \frac{3}{2}\lambda_{ds}i_{qs}$$

$$Q_s = \frac{3}{2}(u_{qs}i_{ds} - u_{ds}i_{qs}) = \frac{3}{2}u_{qs}i_{ds} = \frac{3}{2}\lambda_{ds}i_{ds}$$

Όμως από τις εξισώσεις (4.4.1.1) της ροής με τις συνθήκες του διανυσματικού ελέγχου προκύπτει ότι:

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

$$i_{ds} = \frac{1}{L_s}\lambda_{ds} - \frac{L_m}{L_s}i_{dr}$$

Η ενεργός και η άεργος ισχύς παίρνουν την τελική μορφή:

$$P_s = -\frac{3}{2}\omega\lambda_{ds}\frac{L_m}{L_s}i_{qr}$$

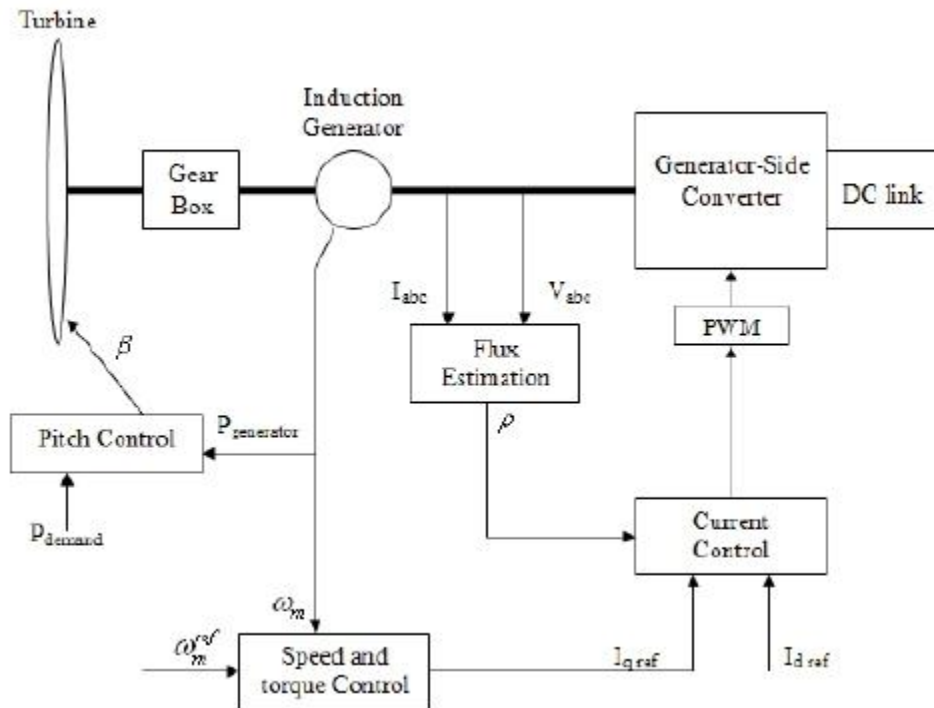
$$Q_s = \frac{3}{2}\omega\lambda_{ds}\left(\frac{1}{L_s}\lambda_{ds} - \frac{L_m}{L_s}i_{dr}\right)$$

Από την σχέση της ηλεκτρομαγνητικής ροπής και με τις συνθήκες του διανυσματικού ελέγχου προκύπτει ότι

$$T_e = \frac{3}{2}\lambda_{ds}i_{qs} = -\frac{3}{2}\lambda_{ds}\frac{L_m}{L_s}i_{qr}$$

Από τις παραπάνω εξισώσεις και εφόσον  $V_{ds}$  και  $V_{qs}$  εξαρτώνται από το δίκτυο και είναι σταθερές συμπεραίνουμε ότι η  $P_s$  εξαρτάται από  $I_{qr}$ ,  $Q_s$  εξαρτάται από  $I_{dr}$ ,  $T_e$  εξαρτάται από  $I_{qr}$ , μπορώ να έχω ανεξάρτητο έλεγχο των  $P_s, T_e, Q_s$  ελέγχοντας αντίστοιχα τα  $I_{qr}, I_{dr}$ .

Ακολουθεί στο σχεδιάγραμμα της γενικής μορφής ελέγχου του μετατροπέα στην πλευρά της μηχανής.



Σχήμα 4.4.3.1 Έλεγχος από την πλευρά του δρομέα

#### **4.4.3.2 ΕΛΕΓΧΟΣ ΑΠΟ ΤΗΝ ΠΛΕΥΡΑ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ (GSC)**

Ο μετατροπέας τάσης στην πλευρά του δικτύου χρησιμοποιεί το φίλτρο ισχύος με σκοπό να μειώσει τις αρμονικές ρεύματος.

Ο στόχος του μετατροπέα στην πλευρά του στάτη είναι να κρατήσει την dc-link σε μια τιμή άσχετα με την ποσότητα και την κατεύθυνση της ισχύος του δρομέα και να εγγυηθεί μια λειτουργία του μετατροπέα με μηδενική άεργο ισχύ. Αυτό σημαίνει ότι ο μετατροπέας στην πλευρά του δικτύου ανταλλάσει ενεργεί ισχύ μόνο με το δίκτυο και επομένως η μετάδοση της άεργης ισχύος από την DFIG στο δίκτυο γίνεται μόνο μέσω του στάτη. Η dc τάση και η άεργη ισχύς ελέγχονται έμμεσα από τον έλεγχο του ρεύματος του μετατροπέα στην πλευρά του δικτύου.

Ο σκοπός του μετατροπέα στην πλευρά του δικτύου είναι να διατηρήσει την dc-link τάση σταθερή ανεξάρτητο από το μέγεθος και την κατεύθυνση της ροής ισχύος του δρομέα. Μια προσέγγιση διανυσματικού ελέγχου χρησιμοποιείται, με ένα σύστημα αναφοράς προσανατολισμένο σύμφωνα με την διανυσματική θέση της τάσης του στάτη ( ή παροχής ), επιτρέποντας έτσι ανεξάρτητο έλεγχο της ενεργής και άεργης ισχύος. Ο PWM μετατροπέας ελέγχεται από ρεύμα, με την q συνιστώσα του ρεύματος να χρησιμοποιείται για να ελέγξει την dc-link τάση και την d συνιστώσα να χρησιμοποιείται για να ρυθμίσει την άεργο ισχύ  $Q_f$ .

Από τις εξισώσεις (4.4.2.1) και αν προσανατολίσω το πλαίσιο αναφοράς στην  $u_{ds} = 0$  και λύνοντας παίρνω

$$u_{df} = -R_f i_{df} - L_f p i_{df} + \omega L_f i_{qf}$$

$$u_{qf} = -R_f i_{qf} - L_f p i_{qf} - (\omega L_f i_{df} - u_{qs})$$

Αν συμβολίσουμε με  $I_{os}$  το ρεύμα που έρχεται από το δίκτυο και διαπερνάει τον πυκνωτή και με  $I_{or}$  το ρεύμα που περνάει από τον πυκνωτή και οδεύει προς τον δρομέα, τότε το ρεύμα του πυκνωτή είναι:

$$pV_{dc}C = I_{os} - I_{or}$$

Η ισχύς που περνάει από το τριφασικό στο συνεχές είναι ίδια, επομένως για την ισχύ έχω:

$$V_{dc}I_{os} = \frac{3}{2}(u_{ds}i_{df} + u_{qs}i_{qf}) = \frac{3}{2}u_{qs}i_{qf}$$

Για τον μετατροπέα δικτύου ισχύει:

$$u_{qs} = \frac{m_1}{2\sqrt{2}}V_{dc}$$

- Όπου  $m_1$  λόγος κατάτμισης

Από τα παραπάνω λοιπόν

$$I_{os} = \frac{3}{4\sqrt{2}}m_1i_{qf}$$

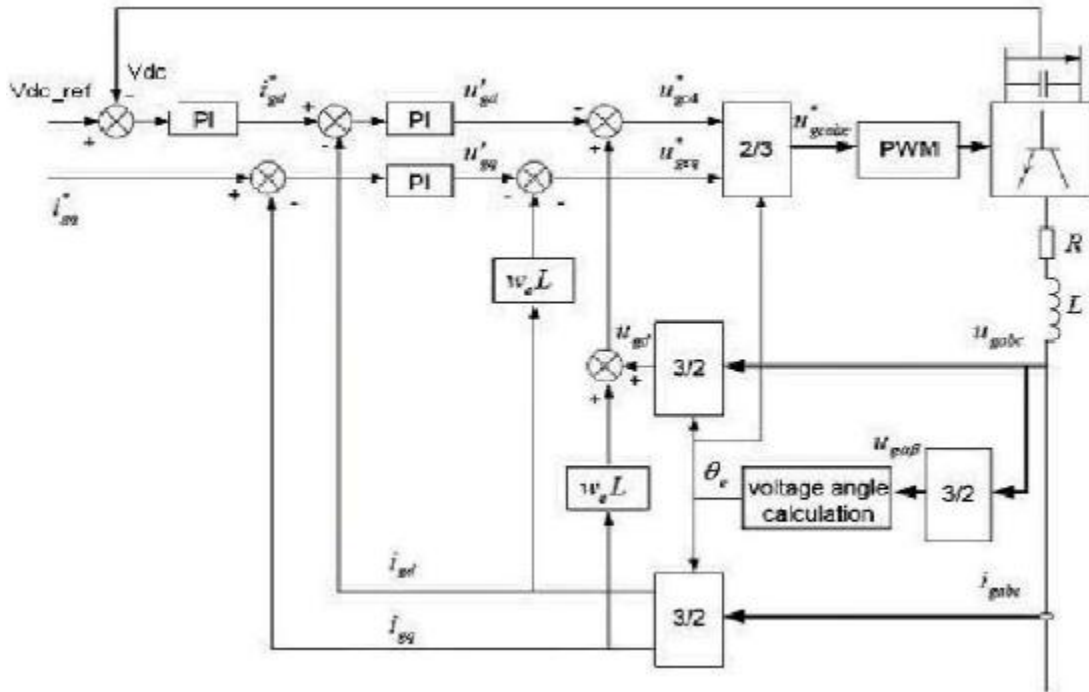
$$pV_{dc}C = \frac{3}{4\sqrt{2}}m_1i_{qf} - I_{or}$$

Ομοίως για την άεργο ισχύ  $Q_f$ , εφαρμόζοντας τις αρχές του ελέγχου καταλήγουμε στον εξής τύπο:

$$Q_f = \frac{3}{2}(u_{qs}i_{df} - u_{ds}i_{qf}) = \frac{3}{2}u_{qs}i_{df}$$

Από τις δύο τελευταίες σχέσεις καταλήγουμε και μαθηματικά στον έλεγχο της dc τάσης του πυκνωτή μέσω του  $I_{qf}$  και τον έλεγχο της άεργου ισχύος μέσω του  $I_{df}$ .

Αν τα ρεύματα  $I_{df}$  και  $I_{qf}$  είναι οι μεταβλητές οι οποίες πρέπει να ελεγχθούν με σκοπό να πραγματοποιηθεί η τεχνική του διανυσματικού ελέγχου, αυτό μπορεί να γίνει και με έμμεσο τρόπο ελέγχοντας τις τάσεις, αρκεί οι εξισώσεις των τάσεων να είναι αποσυζευγμένες ώστε να μπορεί να επιτευχθεί ανεξάρτητος έλεγχος των ρευμάτων.

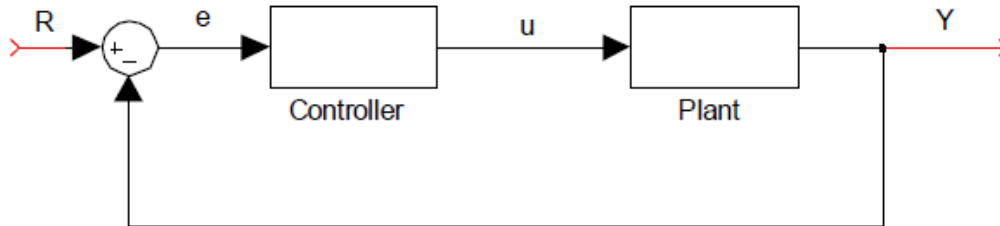


Σχήμα 4.4.3.2.1 Έλεγχος από την πλευρά του δικτύου

#### 4.4.3.3 ΕΛΕΓΚΤΗΣ ΠΙ

Κάθε ελεγκτής ΠΙ αποτελείται από δύο ελέγχους, τον αναλογικό (P) και τον ολοκληρωτικό (I). Θα λάβουμε ως βάση το ακόλουθο σύστημα μοναδιαίας ανατροφοδότησης.





**Σχήμα 4.4.3.3.1 Σύστημα μοναδιαίας ανατροφοδότησης**

**Plant:** Το σύστημα που θα ελεγχθεί

**Controller (Ελεγκτής):** Παρέχει τη διέγερση στο σύστημα προς έλεγχο. Είναι σχεδιασμένος για να ελέγχει την συνολική συμπεριφορά του συστήματος.

Η συνάρτηση μεταφοράς του PI ελεγκτή είναι η ακόλουθη:

$$k_p + \frac{k_i}{s} = \frac{sk_p + k_i}{s}$$

$k_p$  : Αναλογικό κέρδος

$k_i$  : Ολοκληρωτικό κέρδος

Από το παραπάνω σχήμα βλέπουμε τον τρόπο με τον οποίο δουλεύει ένας PI controller, ο οποίος δουλεύω σε σύστημα κλειστού βρόγχου. Η μεταβλητή (e) αντιπροσωπεύει το σφάλμα παρακολούθησης, δηλαδή την διαφορά ανάμεσα στην τιμή της επιθυμητής εισόδου (R) και σε εκείνη της πραγματικής εξόδου (Y). Αυτό το σήμα σφάλματος (e) θα σταλεί στον PI controller και ο ελεγκτής θα υπολογίσει το ολοκλήρωμα αυτό του σήματος. Το σήμα (u) αμέσως μετά τον ελεγκτή είναι πλέον ίσο με το αναλογικό κέρδος ( $k_p$ ) επί την τιμή του σφάλματος συν το ολοκληρωτικό κέρδος ( $k_i$ ) επί το ολοκλήρωμα του σφάλματος.

$$u = k_p e + k_i \int e dt$$

Η χρησιμοποίηση ενός ελεγκτή ( $k_p$ ) θα έχει ως αποτέλεσμα την ελάττωση του χρόνου ανύψωσης και την μείωση αλλά ποτέ την εξάλειψη του μόνιμου σφάλματος.

Ο ολοκληρωτικός έλεγχος ( $k_i$ ) θα εξαλείψει το μόνιμο σφάλμα αλλά θα χειροτερέψει την μεταβατική απόκριση(αριθμός των ταλαντώσεων μέχρι την τελική ισορροπία του συστήματος).

Στην παρούσα εργασία θα χρησιμοποιήσουμε τον PI ελεγκτή για να ελέγξουμε την άεργο ισχύ μέσω του ρεύματος  $I_{df}$ , όπως αποδείχτηκε παραπάνω.

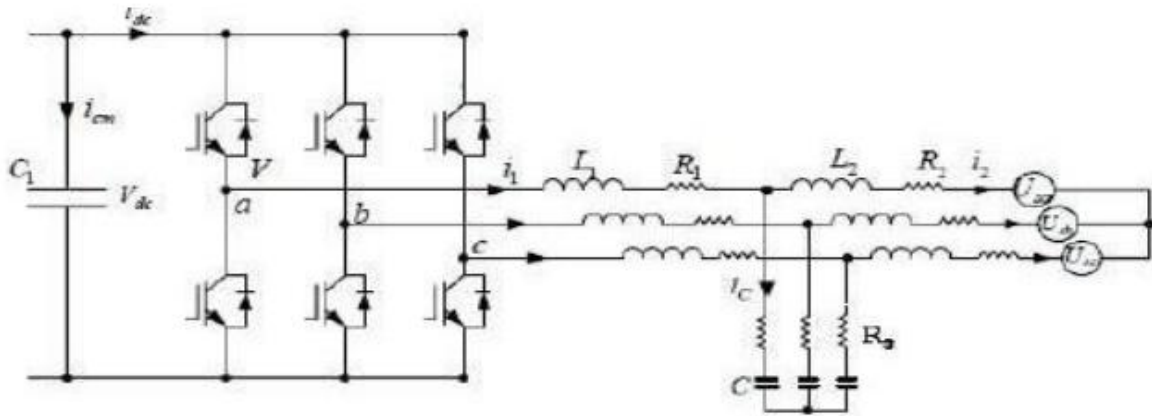
Έτσι σαν είσοδο θα έχουμε την συνιστώσα του ρεύματος  $I_{df}$  και σαν έξοδο τον συντελεστή τάσης  $m_{df}$ .

Η εξίσωση γίνεται:

$$m_{df} = -\frac{1}{V_{dc}^{ref}} \left[ -k_i \int i_{df} dt - k_p i_{df} \right]$$

#### **4.4.4 ΓΡΑΜΜΗ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ**

Θα δοκιμάσουμε να δούμε την συμπεριφορά της ανεμογεννήτριας διπλής τροφοδοσίας, στην ύπαρξη μιας γραμμής μεταφοράς τοποθετούμενη πριν από το δίκτυο. Με τον πυκνωτή βλέπουμε την τάση του στάτη.



Σχήμα 4.4.4.1 Σύνδεση της γεννήτριας με γραμμή μεταφοράς

Συμβολίζουμε λοιπόν στο d-q πλαίσιο αναφοράς τα μεγέθη ως εξής:

$i_d^c$  :Το ρεύμα της συνιστώσας d που περνάει από τον πυκνωτή

$i_q^c$  :Το ρεύμα της συνιστώσας q που περνάει από τον πυκνωτή

$V_d^\delta$  :Την τάση της συνιστώσας d του δικτύου

$V_q^\delta$  :Την τάση της συνιστώσας q του δικτύου

$C_d$  :Πυκνωτής της γραμμής

$R_d$  :Ωμική αντίσταση της γραμμής

$L_d$  :Επαγωγική αντίσταση της γραμμής

$l$  :Το μήκος της γραμμής

$$R = R_d * l$$

$$L = L_d * l$$

Επομένως από τον νόμο του Kirchoff έχουμε:

$$-u_{ds} + V_d^\delta = R(i_{df} + i_{ds} + i_d^c) - \omega L(i_{qf} + i_{qs} + i_q^c) + L(pi_{ds} + pi_{df} + pi_d^c)$$

$$-u_{qs} + V_q^\delta = R(i_{qf} + i_{qs} + i_q^c) - \omega L(i_{df} + i_{ds} + i_d^c) + L(pi_{qs} + pi_{qf} + pi_q^c)$$

Λύνοντας ως προς τα  $pi_{ds}$  και  $pi_q^c$  έχω αντίστοιχα:

$$pi_d^c = \frac{1}{L} [-R(i_{df} + i_d^c) - u_{ds} + V_d^\delta + \omega L(i_{qf} + i_q^c)] - \left( pi_{ds} + pi_{df} - \omega i_{qs} + \frac{R}{L} i_{ds} \right)$$

$$pi_q^c = \frac{1}{L} [-R(i_{qf} + i_q^c) - u_{qs} + V_q^\delta - \omega L(i_{df} + i_d^c)] - \left( pi_{qs} + pi_{qf} + \omega i_{ds} + \frac{R}{L} i_{qs} \right)$$

Όπου

$$pi_{ds} = \frac{1}{L_s} p\lambda_{qs} - \frac{L_m}{L_s} pi_{dr}$$

$$pi_{qs} = \frac{1}{L_s} p\lambda_{qs} - \frac{L_m}{L_s} pi_{qr}$$

Οι τάσεις του στάτη γίνονται πλέον:

$$pu_{ds} = \frac{i_d^c}{C_d} + \omega u_{qs}$$

$$pu_{qs} = \frac{i_q^c}{C_d} - \omega u_{ds}$$

Και η ενεργός και άεργος ισχύς γίνονται:

$$P_{\zeta v\gamma} = \frac{3}{2} [V_{ds}(i_{ds} + i_{df}) + V_{qs}(i_{qs} + i_{qf})]$$

$$Q_{\zeta v\gamma} = \frac{3}{2} [u_{qs}(i_{ds} + i_{df}) - u_{ds}(i_{qs} + i_{qf})]$$

$$P_{tot} = \frac{3}{2} [V_d^\delta(i_{ds} + i_{df} + i_d^c) + V_q^\delta(i_{qs} + i_{qf} + i_q^c)]$$

$$Q_{tot} = \frac{3}{2} [V_q^\delta (i_{ds} + i_{df} + i_d^c) - V_d^\delta (i_{qs} + i_{qf} + i_q^c)]$$

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν να αποδειχθούν οι ιδιαιτερότητες της ασύγχρονης(επαγωγικής) γεννήτριας διπλής τροφοδότησης στάτη και δρομέα, μιας ανεμογεννήτριας που γίνεται όλο και περισσότερο δημοφιλής στην αγορά των αιολικών συστημάτων.

Το μοντέλο καταδεικνύει την σημασία του διανυσματικού ελέγχου για την αποτελεσματικότερη διαχείριση της ενεργού και άεργου ισχύος. Η ευελιξία που αποκτά το μοντέλο με αυτή την μέθοδο ελέγχου είναι πολύ μεγάλη.

Οι εξισώσεις της μηχανής εκφράστηκαν σε d-q πλαίσιο με βάση την γνωστή θεωρία μετασχηματιστών και πλαισίων αναφοράς. Υιοθετήθηκε η μέθοδος του διανυσματικού ελέγχου με κατάλληλα πλαίσια αναφοράς για κάθε έναν από τους δύο μετατροπείς που συνδέονται στον δρομέα της γεννήτριας επαγωγής διπλής τροφοδοσίας. Με κατάλληλη επιλογή του πλαισίου αναφοράς για τον μετατροπέα από την πλευρά του δικτύου εξασφαλίζεται ότι η άεργος ισχύς που ανταλλάσσεται ανάμεσα στον μετατροπέα και τον δίκτυο είναι μηδενική.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. 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
2. A.Petersson, “Analysis, Modeling and Control of Doubly-Fed Induction Generators for Wind Turbines”, Licentiate Thesis, Dept. Electric Power Engineering, Chalmers University of Technology, Sweden 2003
3. Wind energy in Europe. European Wind Energy Association. Available at <http://www.ewea.org>.
4. Vas, P. 1992. Electrical machines and drives, a space-vector approach. Oxford. Clarendon Press, 1992.
5. <http://www.windpower.org>
6. J.I. Marvik, T. Bjorgum, B.I. Naess, T.M. Undeland, T. Gjengedal, “Control of a Wind Turbine with Doubly Fed Induction Generator after Transient Failures”, Nordic Workshop on Power and Industrial Electronics, 2004
7. Κ.Βουρνάς, Γ.Κονταξής, Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας, Πρώτη Έκδοση, Εκδόσεις Ε.Μ.Π.,1997 (επανεκδοση 2001)
8. Α. Κλαδάς, Π. Γιαννοπούλου - Λασκαράτου, Εργαστηριακές Ασκήσεις Μαθήματος Ηλεκτρικές Μηχανές Ι, Εκδόσεις Ε.Μ.Π.
9. Π. Γιαννοπούλου – Λασκαράτου, Θεωρία και Ασκήσεις στις Μηχανές Ι, Εκδόσεις Ε.Μ.Π.
10. Model-Based Current Control of AC Machines Using the Internal Model Control Method Lennart Harnefors, *Member, IEEE*, and Hans-Peter Nee, *Member, IEEE* JANUARY/FEBRUARY 1998
11. A Comprehensive Model of a Doubly Fed Induction Generator for Dynamic Simulations and Power System Studies J. Soens, J. Driesen, R. Belmans Department of Electrical Engineering ESAT/ELECTA, K.U. Leuven

12. Development of Induction Machines in Wind Power Technology, Stefan Soter, Ralf Wegener, Institute of Electrical Drives and Mechatronics University of Dortmund, Germany
13. Α .Ι .Κανελλάκη Διπλωματική Εργασία “Μελέτη συστήματος ανεμογεννήτριας με επαγωγική μηχανή διπλής τροφοδοσίας” Πάτρα 2011.
14. Doubly fed induction generator using back-to-back PWM converters and its application to variable-speed wind-energy generation R.Pena J.C.Clare G.M.Asher
15. M. B. Rifai, T. H. Ortmeyer, "Dynamic analysis of a doubly fed generator in power system applications.", Electric Machines and Power Systems, Vol. 21, pp 141-150, 1993.
16. G.S. Stavrakakis, G.N. Kariniotakis: “A general simulation algorithm for the accurate assessment of isolated Diesel – Wind Turbines system interaction”, I.E.E.E Transactions of Energy Conversion, Vol. 10, No.3, September 95, part I and II, pp557-590.
17. L.L. Freris, Wind Energy Conversion Systems, Prentice Hall International (U.K) Ltd.1990.
18. G.A Smith, “Power electronics applied to renewable energy sources”, PEMC 94”, p.p 1300-1309.
19. Cooper Power Systems: Electrical Distribution System Protection.
- 20 A. Wright, C. Christopoulos: Electrical power system protection, Chapman & Hall.
- 21 [www.electroepistimi.blogspot.com](http://www.electroepistimi.blogspot.com)