



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

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

ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ ΕΠΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ DFIG ΣΕ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Al Sabaileh A. Tareq

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

Αθήνα, Οκτώβριος 2010



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

ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ ΕΠΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ DFIG ΣΕ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Al Sabaileh A. Tareq

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

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή

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

.....
Ν. Θεωδόρου
Καθηγητής Ε.Μ.Π

.....
Π. Τσαραμπάρης
Λέκτορας Ε.Μ.Π

Αθήνα, Οκτώβριος 2010

.....
Al Sabaileh A. Tareq

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

Copyright © Al Sabaileh A. Tareq, 2010.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

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

Η παρούσα εργασία πραγματεύεται την ανάλυση και τον έλεγχο της επαγωγικής γεννήτριας και της διπλά τροφοδοτούμενης επαγωγικής μηχανής (DFIG) που χρησιμοποιείται σε συστήματα ανεμογεννητριών. Τα πρώτα κεφάλαια, αναφέρονται κάποια στοιχεία απαραίτητα για την κατανόηση του αντικειμένου και των προβλημάτων του, και ακολουθεί η ενασχόληση με την 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 αιολικό σύστημα με τέτοιου τύπου γεννήτριας θα γίνει έλεγχος ισχύος. Για να γίνει αυτό, αρχικά παράγεται ένα πρότυπο της επαγωγικής μηχανής διπλής τροφοδοσίας (DFIG) σε σύστημα δύο αξόνων (d-q). Στη συνέχεια περιγράφεται η διαδικασία σύνδεσης του συστήματος με το δίκτυο. Ακολουθεί ο έλεγχος της ενεργού και της αέργου ισχύος. Για να επιτευχθεί ο έλεγχος της ενεργού και της αέργου ισχύος του στάτη η οποία ανταλλάσσεται ανάμεσα στη DFIG και το δίκτυο, παρουσιάζεται μια μέθοδος διανυσματικού ελέγχου. Μελετώνται δυο τύπους ελεγκτών: τον κλασικό PI ελεγκτή και τον πολυωνυμικό RST. Προκύπτει πως ο RST ελεγκτής είναι πιο αποδοτικός στις περιπτώσεις όπου η ταχύτητα μεταβάλλεται απότομα, ενώ είναι πιο ισχυρός έναντι μεταβολών των παραμέτρων της DFIG. Τέλος, διαπιστώνεται ότι μεγαλύτερες τιμές των παραμέτρων του ελεγκτή δίνουν και καλύτερες αποκρίσεις.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ

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

ABSTRACT

The industry of systems of wind energy is developed rapidly in world level. The past years, technology has seen a large grown up in the field of producing electrical power using the wind parks. The energy market proved that the investments in this particular sector are viable and seductive; especially knowing that through this way the reduction of pollutants is forecasted.

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. For the power control and power flow between the generator and the grid, two controllers have chosen to be studied. The PI controller and the RST controller. The analysis showed that the RST controller is more efficient in cases where the speed is altered abruptly.

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 επιβλέπων καθηγήτρια μου Μαρία 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 τη νοοτροπία του Μηχανικού προς τους φοιτητές της.

Τέλος, οφείλω να ευχαριστήσω την οικογένεια 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

Εισαγωγή.....	5
Λέξεις κλειδιά.....	5
Abstract.....	6
Key words.....	6
Περιεχόμενα.....	8
1. ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ.....	11
1.1 Η αιολική ενέργεια σε Ευρώπη και Ελλάδα.....	11
1.2 Κόστος παραγόμενης αιολικής ενέργειας.....	14
1.3 Είδη ανεμογεννητριών.....	16
1.3.1 Ανεμογεννήτρια κατακόρυφου άξονα.....	16
1.3.2 Ανεμογεννήτρια οριζοντίου άξονα.....	17
1.4 Μηχανικά μέρη ανεμογεννήτριας.....	18
1.5 Αεροδυναμική μετατροπή.....	19
1.6 Αεροδυναμικός έλεγχος ισχύος.....	21
2. ΜΗΧΑΝΕΣ ΕΠΑΓΩΓΗΣ.....	23
2.1 Μοντέλο μηχανής επαγωγής.....	23
2.1.1 Ηλεκτρικό ισοδύναμο μηχανής.....	23
2.1.2 Ισχύς και ροπή μηχανής.....	25
2.1.3 d-q μοντέλο της μηχανής.....	27
2.2 Δυναμικές εξισώσεις και διανυσματικός έλεγχος.....	29
2.2.1 Επαγωγική μηχανή ως γεννήτρια.....	29
2.2.2 Κατηγορίες ελέγχου μηχανών επαγωγής.....	31
2.2.3 Σύγχρονες τεχνικές ελέγχου μηχανών επαγωγής.....	34
2.2.4 Έλεγχος ταχύτητας επαγωγικών μηχανών.....	35
2.2.5 Ανυσματικό διάγραμμα μηχανής επαγωγής.....	35
2.3 Έλεγχος της ταχύτητας με ρύθμιση της αντίστασης του δρομέα.....	37
2.4 Έλεγχος της ταχύτητας με ρύθμιση τάσης του στάτη.....	38
2.5 Έλεγχος της ταχύτητας με μεταβολή τον αριθμό πόλων.....	41
2.6 Έλεγχος της ταχύτητας με μεταβολή της συχνότητας.....	41
3. ΜΗΧΑΝΕΣ ΕΠΑΓΩΓΗΣ ΣΕ ΑΙΟΛΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ.....	46
3.1 Γενικά για τα αιολικά συστήματα.....	46
3.2 Παραγωγή ενέργειας από ανεμογεννήτριες.....	47
3.3 Συστήματα ανεμογεννητριών.....	48
3.3.1 Σταθερής ταχύτητας ανεμογεννήτριες.....	48
3.3.2 Μεταβλητής ταχύτητας ανεμογεννήτριες.....	50
3.3.3 Ανεμογεννήτριες μεταβλητής ταχύτητας με DFIG.....	51

3.4 Εναλλακτικές τοπολογίες για την λειτουργία μεταβλητών στροφών Σταθερής συχνότητας.....	54
3.5 Ηλεκτρονικά ισχύος στις ανεμογεννήτριες.....	58
3.5.1 Ασύγχρονη γεννήτρια βραχυκυκλωμένου κλωβού.....	58
3.5.2 Ασύγχρονη γεννήτρια δακτυλιοφόρου δρομέα.....	60
3.6 Έλεγχος μεταβολής της κλίσης των πτερυγίων (Pitch control).....	62
3.7 Είδη αιολικών πάρκων.....	65
3.8 Λειτουργία αιολικών πάρκων.....	67
3.9 Τεχνολογία μετατροπών πηγής τάσης (VSC) και ρύθμιση πλάτους των παλμών (PWM).....	69
3.10 Ηλεκτρική προστασία ανεμογεννητριών.....	71
3.10.1 Οι κύριοι τύποι βραχυκυκλωμάτων και οι επιπτώσεις τους....	73
3.10.2 Βασικοί υπολογισμοί των ρευμάτων βραχυκύκλωσης.....	74
3.10.3 Απλοποιημένη μέθοδος υπολογισμού ρευμάτων βραχυκύκλωσης σε διασυνδεδεμένα αιολικά πάρκα.....	78
3.10.4 Ο ρόλος των πυκνωτών.....	83
3.11 Προβλήματα από την διασύνδεση ανεμογεννητριών σε ασθενή ενεργειακά συστήματα.....	84
4. ΕΠΑΓΩΓΙΚΗ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ ΔΙΠΛΗΣ ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑΣ.....	88
4.1 Μοντελοποίηση γεννήτριας επαγωγής διπλής τροφοδοσίας DFIG.....	88
4.1.1 Ισοδύναμο κύκλωμα της DFIG.....	88
4.1.2 Ροή ισχύος.....	90
4.1.3 Μείωση των απωλειών μαγνήτισης.....	91
4.2 Είδη επαγωγικών μηχανών διπλής τροφοδοσίας DFIG.....	91
4.3 Ο μετατροπέας και τεχνικές διαμόρφωσης.....	94
4.3.1 Ο τριφασικός μετατροπέας.....	94
4.3.2 Ημιτονοειδής διαμόρφωση εύρους παλμών (SPWM).....	95
4.3.3 PWM με έλεγχο του ρεύματος σε ζώνη υστέρησης.....	97
4.3.4 Έλεγχος ρεύματος με την τεχνική σύγκρισης ράμπας.....	99
4.3.5 Τριφασικός μετατροπέας πηγής τάσης στο δίκτυο.....	100
4.4 Φίλτρα περιορισμού αρμονικών συνιστωσών ρεύματος.....	100
4.5 Διασύνδεση αιολικών πάρκων μεγάλης ισχύος.....	101
4.6 Έλεγχος μηχανής επαγωγής διπλής τροφοδοσίας.....	103
4.6.1 Μαθηματικό πρότυπο της DFIG.....	104
4.6.2 Σύνδεση DFIG στο δίκτυο.....	105
4.6.3 Έλεγχος της DFIG.....	107
4.6.4 Εγκατάσταση του συστήματος ελέγχου.....	109
4.6.5 Σχεδιασμός RST ελεγκτή.....	113
4.7 Έλεγχος άεργου ισχύος.....	115
Συμπεράσματα.....	121
Βιβλιογραφία.....	122

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

1.1 Η αιολική ενέργεια σε Ευρώπη και Ελλάδα

Η κλιματική αλλαγή είναι, ίσως, το πιο σημαντικό πρόβλημα προς επίλυση από την ανθρωπότητα μπορεί να αποδειχθεί μοιραία για την ίδια την ζωή στον πλανήτη. Τα τελευταία χρόνια, ο προβληματισμός αυτός, καθώς επίσης και οι οικονομικές προεκτάσεις του ζητήματος, έχουν φέρει στο προσκήνιο τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και την ταχεία ενσωμάτωσή τους στα συστήματα παραγωγής ενέργειας.

Ένας από τους λόγους της μεγάλης στροφής προς τον κλάδο των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας ήταν ότι μελέτες έδειξαν πως πριν το 2030 οι εκπομπές των αερίων του θερμοκηπίου αναμένονται να διπλασιαστούν λόγω της χρήσης των ορυκτών καυσίμων. Αυτό τράβηξε την προσοχή της Ε.Ε να αυξήσει την εξάρτησή της από τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ) για την παραγωγή ενέργειας θέτοντας σαν στόχο μέχρι το 2020 το 20% της καταναλισκόμενης ενέργειας να είναι από ΑΠΕ.

Η σπουδαιότητα της αιολικής ενέργειας είναι γνωστή σε όλους μας από την αρχαιότητα, ξεκινώντας από τους ανεμόμυλους στους οποίους χρησιμοποιείται ως κινητήρια δύναμη την κινητική ενέργεια του άνεμου για την άλεση του σιτηρών και άντληση νερού και καταλήγοντας στα αιολικά πάρκα που τροφοδοτούν με ηλεκτρική ενέργεια ολόκληρες πόλεις.

Η Ευρώπη είναι μία περιοχή μεγάλης ενεργειακής έντασης. Πάνω από τα $\frac{3}{4}$ της συνολικής παγκόσμιας εγκατεστημένης ισχύος αιολικών πάρκων λειτουργεί στη περιοχή της Ευρώπης και είναι και η περιοχή στην οποία οφείλεται η ραγδαία ανάπτυξη των τελευταίων ετών. Κατά το έτος 2002, εγκαταστάθηκαν παγκοσμίως νέα αιολικά πάρκα συνολικής εγκατεστημένης ισχύος 6.868 MW, μέγεθος το οποίο αποτελεί δείκτη της εξέλιξης του κλάδου. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της εγκατεστημένης ισχύος κατά 28% παγκοσμίως σύμφωνα με τα στοιχεία που δημοσιεύτηκαν από την EWEA₂ (European Wind Energy Association). Η αξία της τεχνολογίας για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τη χρησιμοποίηση αιολικών

γεννητριών ανήλθε στο ποσό των 6,8 δισεκατομμυρίων Ευρώ παγκοσμίως, έχοντας ως αποτέλεσμα την αύξηση της παγκόσμιας εγκατεστημένης ισχύος στα 31.000 MW, ικανών για την κάλυψη των αναγκών 7,5 εκατομμυρίων τυπικών μέσων αμερικανικών σπιτιών ή 16 εκατομμυρίων τυπικών μέσων ευρωπαϊκών σπιτιών.

Σήμερα, τα αιολικά πάρκα ικανοποιούν περίπου το 0,4% της παγκόσμιας ζήτησης σε ηλεκτρική ενέργεια. Εάν υπάρξουν ισχυρότερες πολιτικές δεσμεύσεις, παγκοσμίως, τότε θα μπορούσαν να εγκατασταθούν περίπου 230.000MW μέχρι το 2010 και 1.2 εκατομμύρια MW μέχρι το 2020. Στον πίνακα 1.1 φαίνεται το αναμενόμενο ποσοστό ενέργειας παραγόμενη από ΑΠΕ το 2020:

	Μερίδιο ενέργειας από ΑΠΕ στην τελική κατανάλωση ενέργειας κατά το έτος 2005	Στόχος για το 2020
Belgium	2.2%	13%
Bulgaria	9.4%	16%
The Czech Republic	6.1%	13%
Denmark	17.0%	30%
Germany	5.8%	18%
Estonia	18.0%	25%
Ireland	3.1%	16%
Greece	6.9%	18%
Spain	8.7%	20%
France	10.3%	23%
Italy	5.2%	17%
Cyprus	2.9%	13%
Latvia	34.9%	42%
Lithuania	15.0%	23%
Luxembourg	0.9%	11%
Hungary	4.3%	13%
Malta	0.0%	10%
The Netherlands	2.4%	14%
Austria	23.3%	34%
Poland	7.2%	15%
Portugal	20.5%	31%
Romania	17.8%	24%
Slovenia	16.0%	25%
The Slovak Republic	6.7%	14%
Finland	28.5%	38%
Sweden	39.8%	49%
United Kingdom	1.3%	15%

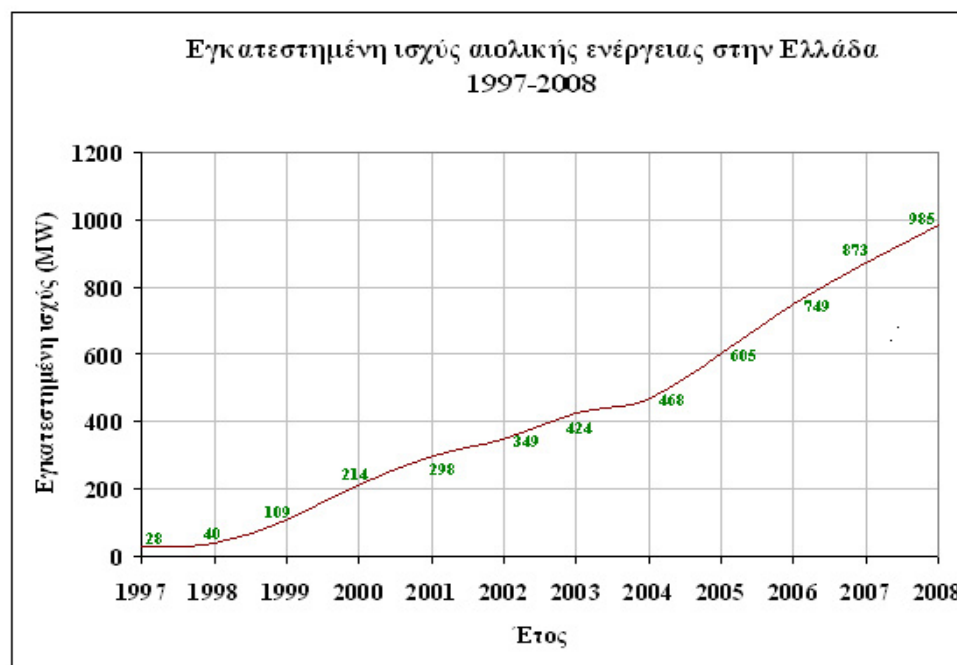
Πίνακας 1.1 Στόχος ποσοστού συνολικής ενέργειας από ΑΠΕ της ΕΕ μέχρι το 2020.

Όσο αφορά την εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας, το 3.4% της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας προέρχεται από αυτήν, αλλά ο στόχος είναι να αυξηθεί το ποσοστό αυτό σε 12-14% μέχρι το 2020, αφήνοντας πίσω της το φυσικό αέριο και την πυρηνική ενέργεια. Ο επόμενος πίνακας 1.2 δείχνει την μεγάλη διείσδυση της και την ποσότητα καταναλισκόμενης ενέργειας και ηλεκτρισμού ανά χώρα τα τελευταία χρόνια.

Wind power in the European Union									
#	Country	Capacity (MW)				Electricity (GWh)			
		2006	2007	2008	2009	Total	2007	2008	2009
1	Germany	2,233	1,667	1,656	1,917	25,777	39,500	40,600	37,500
2	Spain	1,587	3,522	1,609	2,459	19,149	27,050	34,207	36,188
3	United Kingdom	634	427	852	1,077	4,051	5,274	7,097	9,259
4	France	810	888	950	1,088	4,492	4,052	5,654	7,800
5	Portugal	694	434	712	673	3,535	4,040	5,700	7,493
6	Denmark	11	3	51	334	3,465	7,173	6,976	6,716
7	Italy	417	603	1,010	1,114	4,850	4,034	5,957	6,087
8	Netherlands	356	210	478	39	2,229	3,437	4,200	4,800
9	Ireland	250	59	197	233	1,260	1,875	2,298	2,955
10	Sweden	62	217	233	512	1,560	1,430	2,021	2,519
11	Greece	173	125	114	102	1,087	1,847	2,159	2,107
12	Austria	146	20	13	0	995	2,019	2,040	2,100

Πίνακας 1.2 Καταναλισκόμενη ενέργεια σε χώρες της Ε.Ε

Η Ελλάδα αποτελείται ιδανική για την εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας εξαιτίας καιρού και μορφολογίας εδάφους. θεωρείται η βασική μορφή ΑΠΕ που χρησιμοποιείται και αυξάνεται η συμμετοχή της στην ενεργειακή παραγωγή της χώρας. Αυτό παρουσιάζεται στο σχήμα 1.1:



Σχήμα 1.1 Εγκατεστημένη ισχύς από αιολική ενέργεια σε MW τα τελευταία χρόνια.

1.2 Κόστος παραγόμενης αιολικής ενέργειας

Οι βασικές παράμετροι που καθορίζουν τα οικονομικά της αιολικής ενέργειας περιλαμβάνουν:

- Κόστος επένδυσης, κόστος θεμελίωσης και διασύνδεσης στο δίκτυο.

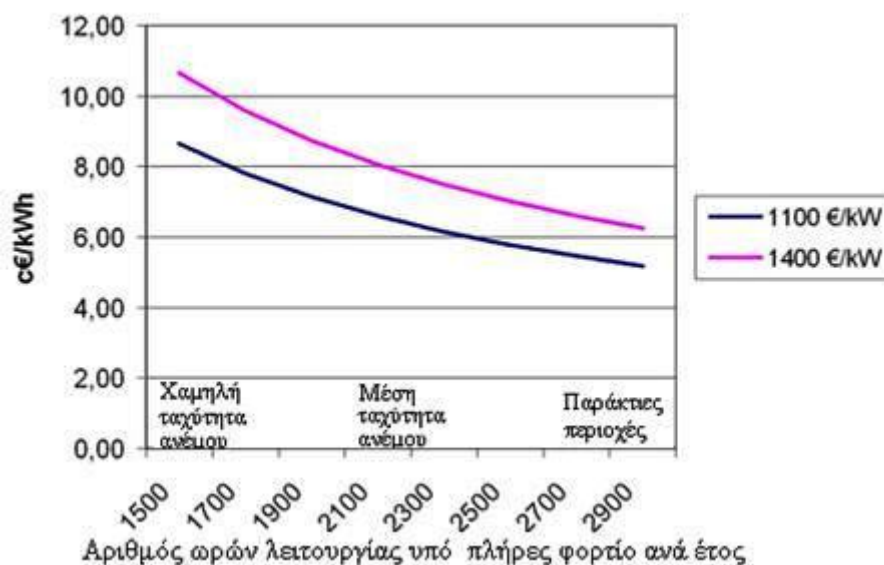
Το κόστος κεφαλαίου ενός αιολικού πάρκου κυριαρχείται από το κόστος της ίδιας της ανεμογεννήτριας. Μια μέση ανεμογεννήτρια ισχύος 2 MW εγκατεστημένης ισχύς σε μία χώρα της Ευρώπης, έχει ένα συνολικό κόστος επένδυσης περίπου 1.23 εκατομμύρια € ανά MW. Το ποσοστό της ανεμογεννήτριας στο συνολικό κόστος είναι περίπου 76%, ενώ το κόστος διασύνδεσης με το δίκτυο και οι θεμελιώσεις, αντιστοιχούν σε 9% και 7% του συνολικού κόστους.

- Κόστος λειτουργίας και συντήρησης.

Τα κόστη λειτουργίας και συντήρησης συνιστούν ένα σημαντικό ποσοστό τοθ συνολικού ετήσιου κόστους. Για μια νέα ανεμογεννήτρια αυτά τα κόστη μπορούν να φτάσουν το 20-25 % (κατά μέσο όρο) του συνολικού κόστους ανά παραγόμενη kWh κατά τη συνολική διάρκεια της ζωής της. Τα κόστη αυτά συνίστανται σε:

- Ασφάλεια.
 - Τακτική συντήρησης.
 - Επισκευή βλαβών.
 - Ανταλλακτικά.
 - Διοικητικά έξοδα.
- Ηλεκτρική παραγωγή / μέση ταχύτητα ανέμου.

Τα υπολογισθέντα κόστη ανά παραγόμενη kWh , σαν συνάρτησης της μέσης ταχύτητας του ανέμου στην περιοχή εγκατάστασης της ανεμογεννήτριας φαίνονται στο σχήμα 1.2:



Σχήμα 1.2 Κόστη ανά kWh της αιολικής παραχθείσας ενέργειας, σαν συνάρτηση της μέσης ταχύτητας του ανέμου.

Τα κόστη κυμαίνονται από περίπου 7-10 c€/kWh σε τοποθεσίες με χαμηλή ταχύτητα ανέμου, έως περίπου 5-6.5 c€/kWh σε παράκτιες περιοχές , με μέσο όρο περίπου 7 c€/kWh σε μέρη με μέτριες ταχύτητες ανέμου.

- Διάρκεια ζωής της ανεμογεννήτριας (υπολογίζεται στα 20 έτη).
- Προεξοφλητικό επιτόκιο.

1.3 Είδη ανεμογεννητριών

1.3.1 Ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα.

Έχουν τον άξονα του ρότορα τοποθετημένο κατακόρυφα, όπως φαίνεται στο σχήμα 1.3. Το κιβώτιο ταχυτήτων και η γεννήτρια μπορούν να τοποθετηθούν στο έδαφος, έτσι είναι προσβάσιμα και δεν χρειάζεται πυλώνας.

Πλεονεκτήματα αυτής της διάταξης είναι ότι η μηχανή δεν χρειάζεται να είναι προσανατολισμένη προς τον άνεμο για να είναι αποτελεσματική. Από την άλλη πλευρά, μειονεκτήματα της μηχανής είναι ότι η ταχύτητα του ανέμου στο έδαφος δεν είναι μεγάλη και έτσι δεν έχουν μεγάλη απόδοση. Επίσης, χρειάζονται ρεύμα από το δίκτυο για την εκκίνηση τους αφού η ροπή εκκίνησης τους είναι χαμηλή και για αυτούς τους λόγους χρησιμοποιούνται μόνο για γεωργικούς σκοπούς.



Σχήμα 1.3 Ανεμογεννήτρια τύπου Darrieus (κατακόρυφου άξονα).

1.3.2 Ανεμογεννήτριες οριζοντίου άξονα.

Αυτός ο τύπος χρησιμοποιείται στην ηλεκτροπαραγωγή λόγω της μεγάλης απόδοσης του. Στις Α/Γ οριζοντίου άξονα ο δρομέας είναι τύπου έλικα και βρίσκεται συνεχώς παράλληλος με την κατεύθυνση του ανέμου και του εδάφους.

Στην παγκόσμια αγορά έχουν επικρατήσει οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα σε ποσοστό 90 %. Η ισχύς τους φτάνει τα 5 MW, η διάμετρος του δρομέα κυμαίνεται μεταξύ 40 και 120 μέτρων, το ύψος του πύργου εγγίζει τα 120 μέτρα και λειτουργούν σε ένα παράθυρο ταχυτήτων ανέμου 3 ως 30 m/s. Μπορούν να συνδεθούν κατευθείαν στο ηλεκτρικό δίκτυο της χώρας. Οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα έχουν δύο ή τρία πτερύγια τα οποία προσδένονται σταθερά ή με τη δυνατότητα να μεταβάλλουν τη γωνία τους σε σχέση με τον άνεμο. Ο δρομέας και η γεννήτρια τοποθετούνται στην κορυφή του πύργου ώστε να εκμεταλλεύονται καλύτερα τον διαθέσιμο αέρα. Στον πύργο τοποθετείται και στηρίζεται όλος ο ηλεκτρομηχανολογικός εξοπλισμός.

Στο αεροδυναμικό μέρος της Α/Γ ο δρομέας περιστρέφεται εκμεταλλευόμενος την ταχύτητα του ανέμου. Η μηχανική ενέργεια που παράγεται από την περιστροφική του κίνηση μετατρέπεται στη συνέχεια σε ηλεκτρική μέσω της γεννήτριας. Η ηλεκτρική γεννήτρια μπορεί να είναι σύγχρονη ή επαγωγής. Η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα είναι μικρή σε σχέση με την απαιτούμενη για τη λειτουργία της γεννήτριας. Για το λόγο αυτό τοποθετείται ενδιάμεσα κιβώτια ταχυτήτων.

Το ηλεκτρικό σύστημα της Α/Γ περιλαμβάνει εκτός από την γεννήτρια, τους μετατροπείς ισχύος, πυκνωτές αντιστάθμισης, φίλτρα αρμονικών, διακόπτες, διατάξεις προστασίας και τον μετασχηματιστή.

Το ηλεκτρονικό σύστημα επίβλεψης και ελέγχου της λειτουργίας της Α/Γ χωρίζεται σε επιμέρους συστήματα, κάθε ένα από τα οποία εκτελεί ξεχωριστή λειτουργία. Το σύστημα προσανατολισμού συνήθως διαθέτει αισθητήρα ανέμου ώστε να διατηρείται πάντα ο δρομέας παράλληλος με την κατεύθυνση του ανέμου. Σε μικρές Α/Γ η αλλαγή του προσανατολισμού γίνεται με ανεμοδείκτη. Η ρύθμιση της κλίσης των πτερυγίων στη βέλτιστη θέση (αν υπάρχει τέτοια δυνατότητα) μεγιστοποιεί την ενέργεια που παράγεται από την Α/Γ για κάθε ταχύτητα ανέμου. Αν υπάρχουν μετατροπείς ισχύος, η λειτουργία τους ελέγχεται από ξεχωριστό σύστημα ελέγχου.



Σχήμα 1.4 Ανεμογεννήτρια οριζοντίου άξονα με τρία πτερύγια.

1.4 Μηχανικά μέρη ανεμογεννήτριας.

Μία ανεμογεννήτρια περιλαμβάνει συνήθως τα ακόλουθα κύρια μέρη όπως φαίνεται στο σχήμα 1.5:

Στροφέας (Δρομέας) : Τα πτερύγια του στροφέα σχεδιάζονται στην περιστροφή στον αέρα, που οδηγεί τη γεννήτρια στροβίλων. Μερικές φορές χρησιμοποιείται σύστημα γραναζιών για να αυξηθεί η συχνότητα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

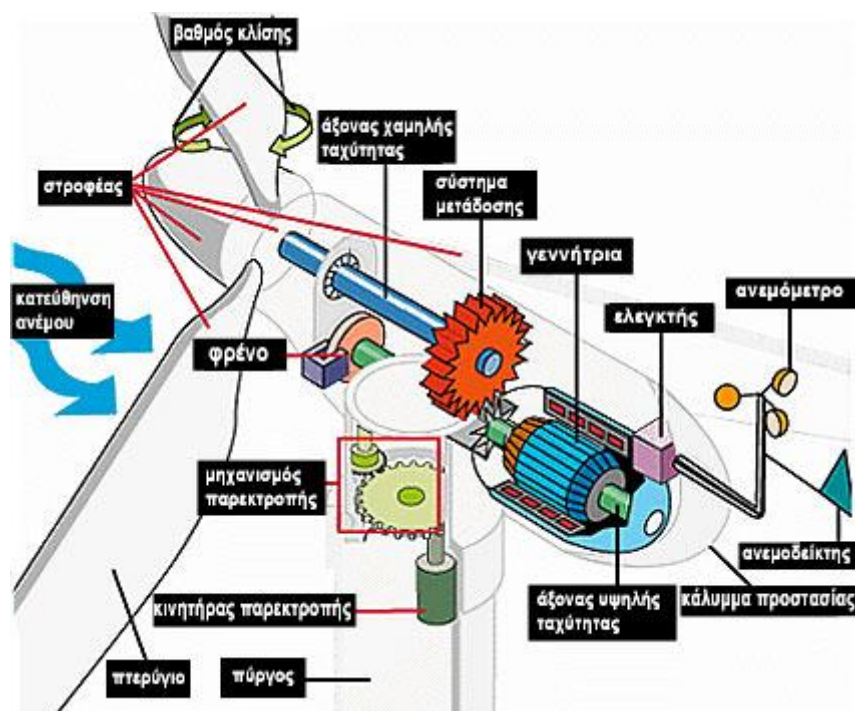
Γεννήτρια: Ο μηχανισμός αυτός παράγει την ηλεκτρική ενέργεια όταν υπάρχει ικανοποιητικός αέρας για να περιστρέψει τα πτερύγια. Η ηλεκτρική ενέργεια μεταφέρεται στο επόμενο στάδιο (είτε για αποθήκευση, είτε στο σύστημα διανομής, είτε για άμεση χρήση) χρησιμοποιώντας καλωδίωση.

Κατευθυντήριο σύστημα: Οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα απαιτούν έναν μηχανισμό που να τις τοποθετεί προς την κατεύθυνση του αέρα. Οι μικρές ανεμογεννήτριες έχουν συνήθως μια ουρά που τις περιστρέφει προς την σωστή κατεύθυνση. Οι μεγάλες μηχανές έχουν συνήθως έναν "σέρβο μηχανισμό" που τις προσανατολίζει στην κατεύθυνση της μέγιστης αιολικής δύναμης.

Σύστημα προστασίας: Οι σύγχρονες ανεμογεννήτριες είναι συνήθως εξοπλισμένες με μηχανισμούς για να αποτρέψουν κάποια ζημία στους υπερβολικά υψηλούς ανέμους. Οι μεγάλες μηχανές μπορούν και έχουν σύνθετες ρυθμίσεις για να

διακόψουν την παραγωγή με τις ταχύτητες υψηλού αέρα. Τα μικρότερα συστήματα αλλάζουν τον προσανατολισμό των λεπίδων έτσι ώστε να παρουσιάζουν μια μικρότερη επιφάνεια στον αέρα και με αυτόν τον τρόπο μειώνουν την ταχύτητα περιστροφής των πτερυγίων τους, ή χρησιμοποιούν μηχανικά φρένα.

Πύργος: Ο πύργος υψώνει την ανεμογεννήτρια αρκετά παραπάνω από τη δίνη του αέρα κοντά στο έδαφος και συλλαμβάνει τον αέρα ψιλότερα σε μεγαλύτερες ταχύτητες. Ο σχεδιασμός των πύργων είναι ιδιαίτερα κρίσιμος, καθώς πρέπει να είναι ψιλός, γερός, να επιτρέπει την πρόσβαση στην ανεμογεννήτρια για τη συντήρησή της, και όμως να μην επιβαρύνει το κόστος του συστήματος.



Σχήμα 1.5 Μηχανικά μέρη μιας ανεμογεννήτριας.

1.5 Αεροδυναμική μετατροπή

Υποθέτοντας ότι ο αέρας έχει μάζα m , ο άνεμος τότε έχει κινητική ενέργεια $\frac{1}{2} mV^2$. Ένα ποσοστό της αιολικής ενέργειας που περιστρέφει την ανεμογεννήτρια, μετατρέπεται σε μηχανική ενέργεια καθώς δημιουργεί ροπή στον άξονα της. Άρα, η ισχύς του ανέμου που ισούται με την κινητική ενέργεια και γνωρίζοντας ότι $m = \rho SV$ έχουμε

$$P_a = \frac{1}{2} \rho S V^2 \times V = \frac{1}{2} \rho S V^3$$

Όπου ρ = πυκνότητα του αέρα (εξαρτάται από την ατμοσφαιρικές συνθήκες)

V = ταχύτητα του ανέμου.

S = Επιφάνεια που διαπερνά κάθετα ο άνεμος.

Η προηγούμενη εξίσωση δίνει την συνολική ισχύ που προσπίπτει στην ανεμογεννήτρια. Όμως, μόνο ένα μέρος αυτής μπορεί να δεσμευθεί, καθώς ένα μέρος πρέπει να απομακρύνεται από την ανεμογεννήτρια με κάποια ταχύτητα, και επίσης, τα πτερύγια προκαλούν εκτροπή μέρους του αέρα. Για τον υπολογισμό της ισχύος που δεσμεύουμε χρησιμοποιούμε τον συντελεστή ισχύος της ανεμογεννήτριας C_p ο οποίος υπολογίζεται

$$C_p = P_m / P_a = P_m / (1/2) \rho S V^3 = \text{δεσμευμένη μηχαν. ισχύς} / \text{ισχύς του προσπ. ανέμου}$$

Ο A.Betz απέδειξε ότι για μία ιδανική ανεμογεννήτρια η μέγιστη τιμή του $C_p(\lambda, \beta)$ είναι 0.593. Αυτό σημαίνει ότι από την κινητική ενέργεια του ανέμου δεν μπορούμε να δεσμεύσουμε σε μηχανική μέσω μιας ανεμογεννήτριας ποσοστό μεγαλύτερο του 59.3%. Στην πράξη όμως αυτό δεν ισχύει λόγω μηχανικών τριβών. Η παραπάνω συνάρτηση εξαρτάται από δύο μεταβλητές, την γωνία προσβολής β και την παράμετρο λ (tip speed ratio). Όπου

$$\lambda = \omega R / V$$

με $\omega(\text{rot})$ = γωνιακή ταχύτητα ρότορα σε rad/sec, R ακτίνα του ρότορα σε m και V ταχύτητα του ανέμου σε m/sec.

Ο συντελεστής $C_p(\lambda, \beta)$ είναι συνάρτηση των λ και β και για κάθε ταχύτητα του ανέμου πρέπει η γωνιακή ταχύτητα του ρότορα να παίρνει τις τιμές που βελτιστοποιεί τα λ και β , έτσι ώστε να επιτυγχάνεται μέγιστη παραγωγή ισχύος από την ανεμογεννήτρια. Για τον καθορισμό του C_p για δοσμένες τιμές του λ και του β , χρησιμοποιούμε τον ακόλουθο γενικό προσεγγιστικό τύπο για διάφορους τύπους Α/Γ:

Όπου

$$C_p(\lambda, \beta) = C_1 \left(\left(\frac{C_2}{\lambda} \right) - C_3 \beta - C_4 \right) e^{-(C_5/\lambda)} + C_6 \lambda$$

$$\lambda = 1 / \left(1 / (\lambda - C_7 \beta) - (C_8 / (\beta^3 + 1)) \right)$$

Οι συντελεστές C_1 έως C_9 έχουν καθοριστεί χρησιμοποιώντας μια αριθμητική βελτιστοποίηση ελαχιστοποιώντας το λάθος ανάμεσα στην καμπύλη ισχύος που προκύπτει από τις εξισώσεις και σε αυτές που δίνει ο κατασκευαστής.

1.6 Αεροδυναμικός έλεγχος ισχύος

Στις υψηλές ταχύτητες είναι απαραίτητος ο περιορισμός της παραγόμενης μηχανικής ισχύς της ανεμογεννήτριας για την αποφυγή της υπέρβασης των ονομαστικών μεγεθών της γεννήτριας. Επίσης, για τον ίδιο λόγο ο έλεγχος εφαρμόζεται για να μην υπάρξει υπερτάχυνση στον ρότορα και αποσυνδεθεί η ανεμογεννήτρια. Τα προηγούμενα επιτυγχάνονται με τρεις τρόπους:

- **Έλεγχος παθητικής απώλειας στήριξης(Passive stall control).**

Η γωνία πτερυγίων είναι σταθερή και στην κανονική λειτουργία επιτυγχάνεται ομαλή ροή του αέρα στα πτερύγια του ρότορα και έτσι έχουμε υψηλό βαθμό αεροδυναμικής απόδοσης.

- **Έλεγχος προσανατολισμού έλικα(Yaw control).**

Χρησιμεύει στον προσανατολισμό του έλικα σε πιθανές αλλαγές του ανέμου.

- **Έλεγχος ενεργής απώλειας στήριξης(Active stall control).**

Αυτός ο έλεγχος επιτυγχάνει περιορισμό ισχύος πάνω από την ονομαστική ταχύτητα ανέμου στρέφοντας αρχικά τα πτερύγια προς την απώλεια στήριξης επιτυγχάνοντας ευκολότερη εκκίνηση και αποσύνδεση. Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται σε μεγάλες τουρμπίνες σταθερής ταχύτητας.

- **Έλεγχος βήματος πτερυγίου(Pitch control).**

Επιτυγχάνει περιορισμό της ισχύος πάνω από τις ονομαστική ταχύτητα, περιστρέφοντας όλο ή μέρος του πτερυγίου γύρω από τον άξονα του, στην κατεύθυνση που μειώνεται η γωνία πρόσπτωσης και έτσι έχει αυξημένη δέσμευση της ισχύος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΜΗΧΑΝΕΣ ΕΠΑΓΩΓΗΣ

Στα σύγχρονα συστήματα ηλεκτρικής κίνησης οι ασύγχρονοι τριφασικοί κινητήρες επαγωγής είναι οι συνηθέστερα χρησιμοποιούμενοι καλύπτοντας ένα ευρύτατο φάσμα εφαρμογών. Αυτό συμβαίνει διότι παρουσιάζουν σημαντικά πλεονεκτήματα όπως μικρό βάρος και όγκο, υψηλή αξιοπιστία και απόδοση και μεγάλη διάρκεια ζωής χωρίς ιδιαίτερες ανάγκες συντήρησης.

Τα τελευταία χρόνια οι μηχανές επαγωγής χρησιμοποιούνται με αυξανόμενο ρυθμό σαν γεννήτριες κυρίως σε αιολικά συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Επειδή η μηχανή επαγωγής δεν έχει ανεξάρτητη διέγερση, για να λειτουργήσει σαν γεννήτρια πρέπει να συνδεθεί με ένα τριφασικό σύστημα εναλλασσόμενης τάσεως, από το οποίο απορροφά άεργο ισχύ.

Οι ασύγχρονες μηχανές κατασκευάζονται συνήθως με τους εξής τύπους δρομέων:

- Τύλιγμα κλωβού : Αποτελεί το απλούστερο τύλιγμα για το δρομέα ενός κινητήρα επαγωγής. Το τύλιγμα αποτελείται από αριθμό ράβδων από αλουμίνιο ή χαλκό κατά τη διεύθυνση της γενέτειρας ή με κάποια λοξότητα, οι οποίες βραχυκυκλώνονται στα δύο άκρα με δακτυλίους από το ίδιο υλικό. Ο κλωβός από αλουμίνιο κατασκευάζεται με χύτευση κι ο κλωβός από χαλκό συντίθεται από τις ράβδους.

- Τύλιγμα δρομέα με δακτυλίους : τα άκρα των τριών φάσεων συνδέονται με δακτυλίους, πάνω στους οποίους εφάπτονται ψήκτρες για να έχουμε πρόσβαση της εντάσεις του δρομέα. Στο στάτη εφαρμόζουμε τριφασική συμμετρική εναλλασσόμενη τάση που δημιουργεί σε αυτό συμμετρικά ρεύματα και με την σειρά τους ένα στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο το οποίο επάγει τάσεις στα τυλίγματα του δρομέα, με συνέπεια να δημιουργηθεί δεύτερο στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο. Η αλληλεπίδραση των δύο μαγνητικών πεδίων δημιουργεί ηλεκτρομαγνητική ροπή η οποία στρέφει το δρομέα.

2.1 Μοντέλο επαγωγικής μηχανής

Η αρχή λειτουργίας της μηχανής επαγωγής βασίζεται στο ότι το τύλιγμα του στάτη τροφοδοτείται με συμμετρικά τριφασικά εναλλασσόμενα ρεύματα. Το τύλιγμα του δρομέα αναπτύσσει ρεύματα εξ επαγωγής σε συχνότητα διαφορετική από τη συχνότητα του στάτη και συγκεκριμένα στη συχνότητα που αντιστοιχεί στη διαφορά ανάμεσα στη σύγχρονη ταχύτητα και την ταχύτητα περιστροφής του δρομέα, δηλαδή την συχνότητα ολισθήσεως.

Έτσι το στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο που παράγουν τα ρεύματα εξ επαγωγής περιστρέφεται ως προς τον δρομέα με την ταχύτητα ολισθήσεως και έχει τελικά την ίδια ταχύτητα περιστροφής με το πεδίο του στάτη. Τα δυο πεδία παραμένουν λοιπόν ακίνητα το ένα ως προς το άλλο και έχουμε τις συνθήκες για ανάπτυξη σταθερής ροπής.

2.1.1 Ηλεκτρικό ισοδύναμο μηχανής.

Στην παρακάτω ανάλυση θεωρούνται ηλεκτρικές μηχανές επαγωγής που έχουν μόνο συμμετρικά τριφασικά τυλίγματα τα οποία διεγείρονται από συμμετρικές πολυφασικές τάσεις. Συνήθως, η σύνδεση στο δίκτυο γίνεται σε συνδεσμολογία αστέρα, αφού σε αυτήν το ρεύμα γραμμής συμπίπτει με το φασικό ρεύμα και η τάση της φάσεως έχει την τιμή της τάσεως γραμμής προς ουδέτερο. Το ισοδύναμο κύκλωμα ανά φάση εκφράζεται μέσω της σχέσης:

$$\mathbf{V}_1 = \mathbf{E}_1 + \mathbf{I}_1 (r_1 + jx_1)$$

όπου \mathbf{V}_1 = τάση ακροδεκτών στάτη.

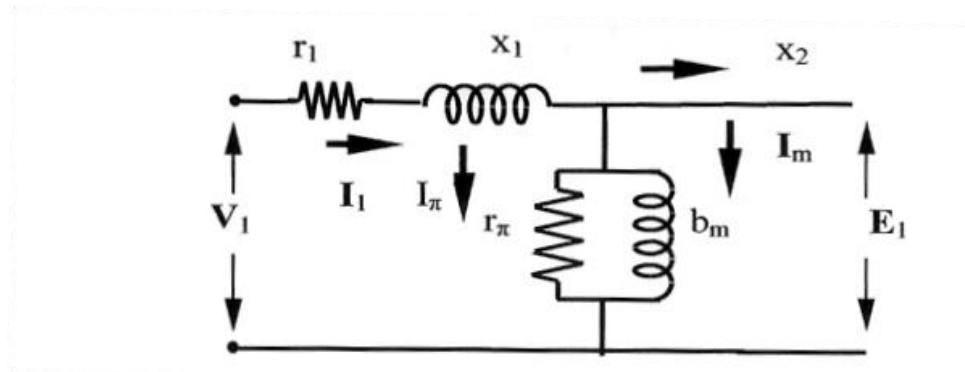
\mathbf{E}_1 = αντι-ΗΕΔ που αναπτύσσεται από την συνισταμένη ροή διακένου.

\mathbf{I}_1 = ρεύμα του στάτη.

r_1 = πραγματική αντίσταση στάτη .

x_1 = η αντίδραση σκεδάσεως του στάτη

Στο παρακάτω σχήμα 2.1 φαίνεται το ισοδύναμο κύκλωμα ανά φάση επαγωγικής μηχανής.



Σχήμα 2.1 Ισοδύναμο κύκλωμα ανά φάση επαγωγικής μηχανής ανηγμένο στο στάτη.

Το ανά φάση τύλιγμα του στάτη παρίσταται από μια ωμική αντίσταση r_1 και μια επαγωγή x_1 (πηνίο). Στον στάτη της μηχανής εφαρμόζεται η τάση V_1 της πηγής (δίκτυο). Ανάλογα με το αν τα τριφασικά τυλίγματα της μηχανής είναι συνδεδεμένα κατ' αστέρα ή σε τρίγωνο η τάση αυτή είναι η φασική ή η πολική τάση του δικτύου αντίστοιχα. Ο εγκάρσιος κλάδος που ακολουθεί και αποτελείται από μια ωμική αντίσταση παράλληλα με μια επαγωγή καλείται κλάδος μαγνήτισης. Ο κλάδος μαγνήτισης διαρρέεται από το ρεύμα πυρήνα το οποίο αποτελείται από δύο συνιστώσες: το ρεύμα απωλειών πυρήνα I_π και από το ρεύμα μαγνήτισης I_m . Το ρεύμα απωλειών πυρήνα διαρρέει την αντίσταση r_π , η οποία συμβολίζει τις θερμικές απώλειες του σιδηρομαγνητικού πυρήνα από τον συνεχή επαναπροσανατολισμό των στοιχειωδών μαγνητικών δίπολων του μαγνητικού υλικού και από τα δινορεύματα. Το ρεύμα μαγνήτισης I_m διαρρέει την επαγωγή b . Η επαγωγή b_m ονομάζεται και αλληλεπαγωγή τυλιγμάτων στάτη-δρομέα ή επαγωγή μαγνήτισης.

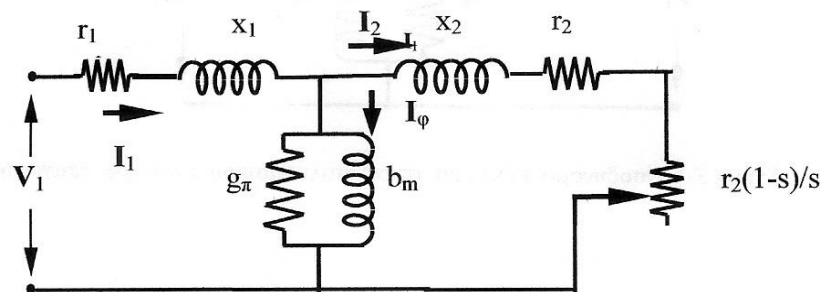
Είναι επίσης γνωστό ότι οι μηχανές επαγωγής δεν στρέφονται σύγχρονα με την συχνότητα διέγερσης. Σε ονομαστικό φορτίο η ταχύτητα της μηχανής επαγωγής είναι ελαφρώς μικρότερη, κατά 2-7% από την σύγχρονη ταχύτητα.

Όμως πρέπει να ενσωματωθεί η επίδραση του δρομέα. Ο δρομέας μπορεί να είναι ή με τύλιγμα κλωβού ή του τυλιγμένου τύπου με τύλιγμα συμμετρικό πολυφασικό. Και στις δύο περιπτώσεις τα βασικά φαινόμενα είναι τα ίδια. θεωρώντας τις συνθήκες οι οποίες υφίστανται όταν ο δρομέας στρέφεται με ταχύτητα n με ολίσθηση s . Η θεμελιώδης συνιστώσα χώρου του κύματος της συνισταμένης ροής διακένου Φ_R οδεύει ως προς το δρομέα στην ταχύτητα ολίσθησης και επάγει ΗΕΔ συχνότητας της ολίσθησης στα κυκλώματα του δρομέα. Οι ΗΕΔ αυτές παράγουν ρεύματα συχνότητας ολίσθησης στις βραχυκυκλωμένες φάσεις του δρομέα ή ράβδους. Εάν ο δρομέας είναι του τυλιγμένου τύπου, πρέπει να έχει τον ίδιο αριθμό πόλων όπως ο στάτης αν και δεν είναι απαραίτητο να έχει τον ίδιο αριθμό φάσεων. Στον τυλιγμένο δρομέα, τα ρεύματα του δρομέα συχνότητας ολίσθησης παράγουν ένα κύμα

ΜΕΔ του οποίου η θεμελιώδης συνιστώσα χώρου έχει τον ίδιο αριθμό πόλων όπως το επάγον κύμα ροής και το οποίο οδεύει στη ταχύτητα ολισθήσεως ως προς τον δρομέα. Η γωνία φάσεως χώρου μεταξύ του κύματος επάγουσας ροής και του κύματος ΜΕΔ του δρομέα είναι η γωνία ροπής δ , η οποία είναι κατά 90° μεγαλύτερη από τη γωνία φ_2 του Σ.Ι. του δρομέα.

2.1.2 Ισχύς και ροπή μηχανής

Το ισοδύναμο κύκλωμα μιας μηχανής επαγωγής ανά φάση είναι αυτό που παρουσιάζεται στο σχήμα 2.2.



Σχήμα 2.2 Ισοδύναμο κύκλωμα μιας μηχανής επαγωγής ανά φάση.

Από το ισοδύναμο κύκλωμα της επαγωγικής μηχανής που φαίνεται στο παραπάνω σχήμα εξάγονται οι ισχύς και ροπές που προσδίδονται στην μηχανή. Ξεκινώντας με την εσωτερική μηχανική ισχύς P και λαμβάνοντας υπόψη μας την ολίσθηση s , εκφράζεται με τον τύπο:

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

όπου ω_s είναι η σύγχρονη γωνιακή ταχύτητα σε rad/sec και P_{g1} η ισχύς διακένου που ισούται με

$$P_{g1} = m_1 E_1 I_2 \cos\varphi_2$$

Γνωρίζοντας ότι m_1 είναι ο αριθμός των φάσεων του στάτη και P_s ο αριθμός πόλων του στάτη, παίρνουμε την εσωτερική μαγνητική ροπή

$$T = \frac{1}{\omega_s} m_1 E_1 I_2 \cos\varphi_2 = \frac{P_s}{4\pi f} m_1 E_1 I_2 \cos\varphi_2$$

$$\text{και συνεπώς, } T = \frac{1}{\omega_s} P_{g1}$$

Επίσης από το ισοδύναμο κύκλωμα υπολογίζοντας το P_{g1} λαμβάνοντας την αντίσταση του δρομέα r_2/s έχουμε ότι

$$P_{g1} = m_1 I_2^2 \frac{r_2}{s}$$

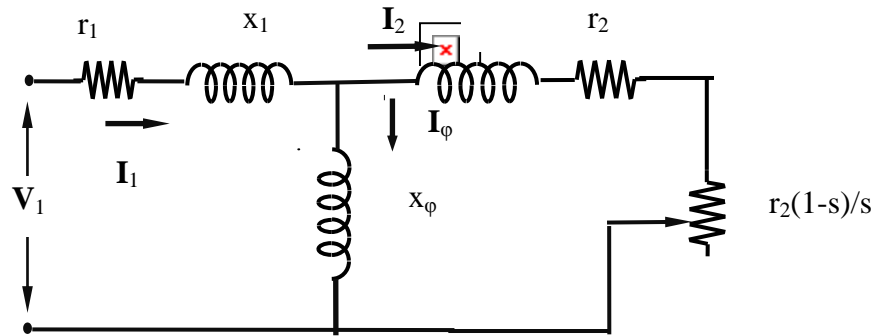
Από την οποία προκύπτει

$$T = \frac{1}{\omega_s} m_1 I_2^2 \frac{r_2}{s}$$

Η μηχανή επαγωγής είναι ένας γενικευμένος ηλεκτρομηχανικός μετασχηματιστής που απορροφάει 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 αυτού με μια αντίστοιχη μεταβολή στη συχνότητα. Αφού η μηχανική γωνιακή ταχύτητα του δρομέα σε ολίσθηση s είναι $(1-s)\omega_s$ rad/sec, το κλάσμα $(1-s)$ της ισχύος που απορροφάται από το στάτη μετασχηματίζεται σε μηχανική ισχύ. Το υπόλοιπο, της ισχύος του στάτη μεταφέρεται με δράση μετασχηματισμού στα ηλεκτρικά κυκλώματα του δρομέα. Η ηλεκτρική ισχύς P_{g2} που αναπτύσσεται στο δρομέα στη συχνότητα ολισθήσεως γίνεται

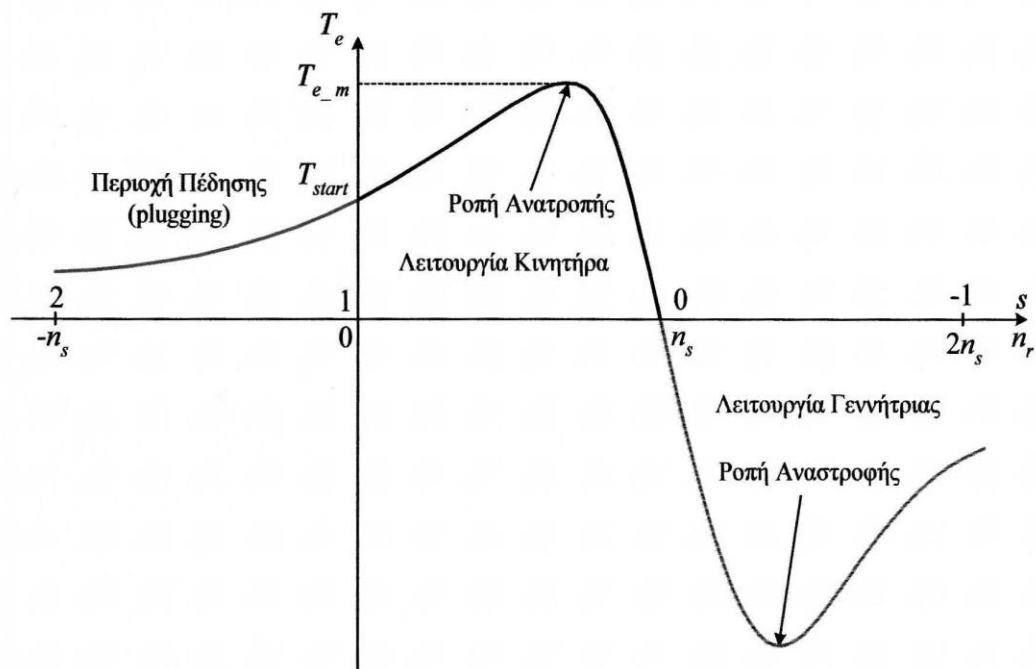
$$P_{g2} = s P_{g1}$$

Μια απλούστευση του ισοδύναμου κυκλώματος της μηχανής επαγωγής προκύπτει εάν η παράλληλη αγωγιμότητα g_π παραλειφθεί και η αντίστοιχη επίδραση απώλειας πυρήνα αφαιρεθεί από την T ή P συγχρόνως με την αφαίρεση τριβής, ανεμισμού διαφευγουσών απωλειών φορτίου. Το ισοδύναμο κύκλωμα τότε γίνεται όπως παρακάτω και το σχετικό σφάλμα είναι αμελητέο.



Σχήμα 2.3 Απλουστευμένο κύκλωμα μηχανής επαγωγής ανά φάση

Μια μηχανή επαγωγής είναι ικανή να έχει την λειτουργία κινητήρα και γεννήτριας, αυτό αποτυπώνεται στην παρακάτω χαρακτηριστική με βάση την περιοχή λειτουργίας της μηχανής όπου η τιμή της ολίσθησης στη ροπή ανατροπής είναι ανάλογη με την αντίσταση του δρομέα. Επομένως, όσο μεγαλύτερη είναι η αντίσταση του δρομέα, σε τόσο μικρότερη ταχύτητα θα εμφανίζεται η μέγιστη ροπή.



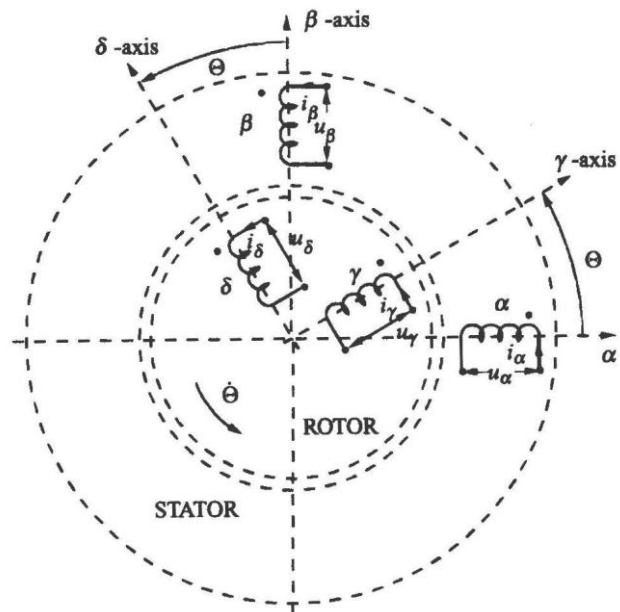
Σχήμα 2.4 Πλήρης χαρακτηριστική ροπής-ταχύτητας του επαγωγικού κινητήρα, όπου περικλείονται οι περιοχές πέδησης και γεννήτριας.

2.1.3 d-q μοντέλο της μηχανής

Το δυναμικό μοντέλο της επαγωγικής μηχανής φαίνεται στο σχήμα 2.5. το σύστημα αξόνων $\alpha\beta$ βρίσκεται πάνω στον στάτη και το σύστημα αξόνων $\gamma\delta$ πάνω

στον δρομέα. Για τον καθορισμό του d-q μοντέλου θεωρείται η ύπαρξη συμμετρίας τόσο στον στάτη όσο και στο δρομέα της μηχανής. Λόγω της συμμετρίας αυτής έχουμε:

$$\begin{aligned} R_S &= R_\alpha = R_\beta & L_S &= L_{\alpha\alpha} = L_{\beta\beta} \\ R_R &= R_\gamma = R_\delta & L_R &= L_{\gamma\gamma} = L_{\delta\delta} \\ M &= L_{\alpha\gamma} = L_{\alpha\delta} = L_{\beta\delta} = L_{\beta\gamma} = L_{\gamma\alpha} = L_{\delta\alpha} = L_{\delta\beta} \end{aligned}$$



Σχήμα 2.5 Δυναμικό μοντέλο επαγωγικής μηχανής.

σύμφωνα με το σχήμα 2.5 οι εξισώσεις τάσεων είναι:

$$\begin{aligned} u_\alpha &= R_S i_\alpha + d/dt(\Psi_\alpha) \\ u_\beta &= R_S i_\beta + d/dt(\Psi_\beta) \\ u_\gamma &= R_R i_\gamma + d/dt(\Psi_\gamma) \\ u_\delta &= R_R i_\delta + d/dt(\Psi_\delta) \end{aligned}$$

όπου R_S και R_R είναι οι ωμικές αντιστάσεις του τυλίγματος του στάτη και του δρομέα αντίστοιχα, M η αμοιβαία επαγωγή μεταξύ των τυλιγμάτων του στάτη και δρομέα και L_S και L_R οι αντίστοιχες αυτεπαγωγές. θ είναι γωνία μεταξύ στάτη και δρομέα. Οι εξισώσεις για τις μαγνητικές ροές είναι:

$$\begin{aligned} \Psi_\alpha &= L_R i_\alpha + M \cos\theta i_\gamma - M \sin\theta i_\delta \\ \Psi_\beta &= L_R i_\beta + M \sin\theta i_\gamma + M \cos\theta i_\delta \\ \Psi_\gamma &= L_R i_\gamma + M \cos\theta i_\alpha + M \sin\theta i_\beta \\ \Psi_\delta &= L_R i_\delta - M \sin\theta i_\alpha + M \cos\theta i_\beta \end{aligned}$$

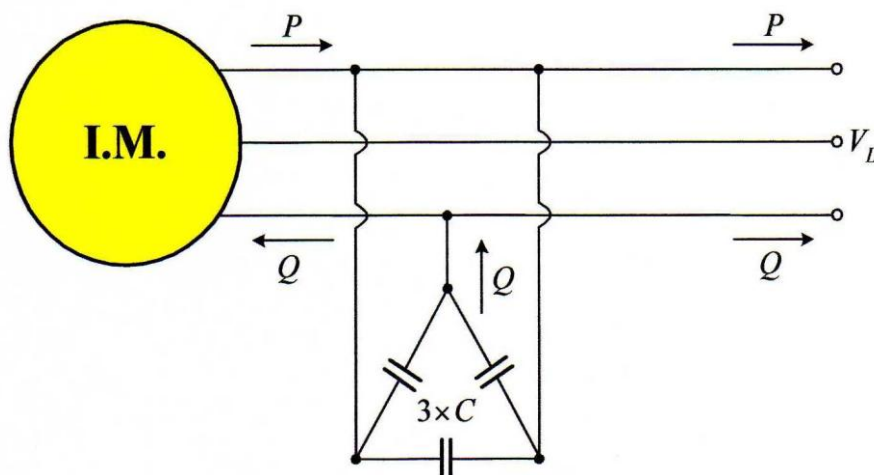
Ο d άξονας ονομάζεται ευθύς άξονας, q εγκάρσιος και ο άξονας θ μηδενικής συνιστώσας, ο οποίος είναι κάθετος στο επίπεδο της σελίδας και αγνοείται για ένα συμμετρικό τριφασικό σύστημα. Επίσης ο άξονας q προηγείται του d κατά 90 μοίρες.

2.2 Δυναμικές εξισώσεις και διανυσματικός έλεγχος

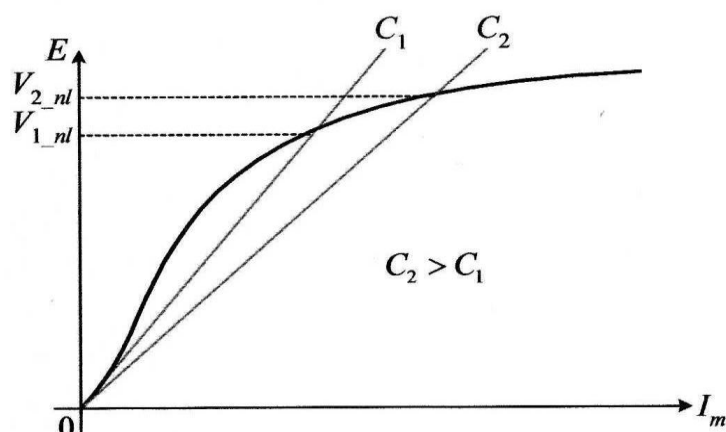
2.2.1 Επαγωγική μηχανή ως γεννήτρια.

Όπως είναι γνωστό μια μηχανή επαγωγής δεν έχει ανεξάρτητη διέγερση, για να λειτουργήσει σαν γεννήτρια πρέπει να συνδεθεί με ένα τριφασικό σύστημα εναλλασσόμενης τάσεως, από το οποίο απορροφά άεργο ισχύ.

Η επαγωγική μηχανή λειτουργεί ως γεννήτρια, όταν στρέφεται από μια κινητήρια μηχανή με ταχύτητα μεγαλύτερη της σύγχρονης, όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 2.6. Η τριφασική ισχύς που παράγει η επαγωγική γεννήτρια, εξαρτάται από τη ροπή που εφαρμόζει η κινητήρια μηχανή. Η ροπή αυτή πρέπει να είναι μικρότερη από μια μέγιστη τιμή, η οποία ονομάζεται ροπή αναστροφής (push over torque). Η ροπή αναστροφής είναι μεγαλύτερη από τη ροπή ανατροπής. Η ταχύτητα της γεννήτριας αυξάνεται υπερβολικά, όταν η επιβαλλόμενη ροπή γίνει μεγαλύτερη από τη ροπή αναστροφής.



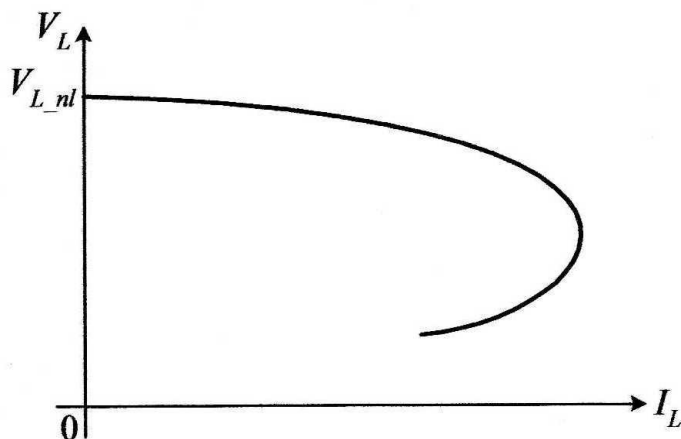
Σχήμα 2.6 Αυτόνομη λειτουργία της τριφασικής επαγωγικής γεννήτριας, με τη σύνδεση πυκνωτών για την παροχή της άεργου ισχύος.



Σχήμα 2.7 Καθορισμός της τάσης εξόδου της επαγωγικής γεννήτριας, η οποία λειτουργεί αυτόνομα, από την τομή της καμπύλης μαγνήτισης και της χαρακτηριστικής τάσης–ρεύματος των πυκνωτών.

Το μεγάλο μειονέκτημα της επαγωγικής γεννήτριας είναι ότι δεν παράγει άεργο ισχύ. Επιπλέον, για την ανάπτυξη του μαγνητικού πεδίου πρέπει να καταναλώσει άεργο ισχύ. Για το λόγο αυτό, οι επαγωγικές γεννήτριες σπάνια χρησιμοποιούνται αυτόνομα για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Συνήθως συνδέονται στο ηλεκτρικό δίκτυο, το οποίο τις τροφοδοτεί με την αναγκαία άεργο ισχύ και ρυθμίζει την τάση εξόδου τους. Η κυριότερη εφαρμογή τους είναι στις ανεμογεννήτριες, οι οποίες συνδέονται στο υπάρχον ισχυρό ηλεκτρικό δίκτυο. Στην περίπτωση αυτή, η επαγωγική μηχανή προσφέρει απλή κατασκευή και τη δυνατότητα περιστροφής της με ταχύτητα η οποία μπορεί να μεταβάλλεται. Για την αυτόνομη λειτουργία της επαγωγικής γεννήτριας απαιτείται η σύνδεση πυκνωτών, όπως εικονίζεται στο Σχήμα 2.6. Οι πυκνωτές παρέχουν την άεργο ισχύ που απαιτεί η γεννήτρια και το φορτίο. Η τάση εξόδου της γεννήτριας στη λειτουργία χωρίς φορτίο, ορίζεται από το σημείο τομής της καμπύλης μαγνήτισης και της χαρακτηριστικής τάσης–ρεύματος των πυκνωτών (σχήμα. 2.7). Η αυτοδιέγερση της επαγωγικής γεννήτριας, όπως και στις γεννήτριες συνεχούς ρεύματος, οφείλεται στον παραμένον μαγνητισμό.

Η χαρακτηριστική φορτίου εικονίζεται στο σχήμα. 2.8, όταν η γεννήτρια τροφοδοτεί ένα επαγωγικό φορτίο. Η απότομη πτώση της τάσης εξόδου με την αύξηση του ρεύματος φορτίου, οφείλεται στην αύξηση της άεργου ισχύος που απαιτεί το φορτίο. Την άεργο ισχύ παρέχουν αποκλειστικά οι πυκνωτές C , με σταθερή τιμή. Εκτός από τη μεταβολή της τάσης εξόδου με το φορτίο, μεταβάλλεται και η ταχύτητα του κινητήρα. Έτσι, η συχνότητα των τάσεων εξόδου δεν είναι σταθερή.

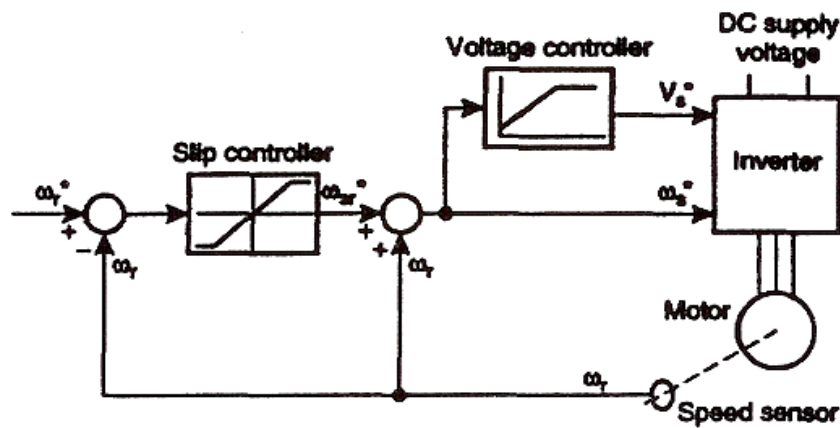


Σχήμα 2.8 Χαρακτηριστική φορτίου της επαγωγικής γεννήτριας, όταν τροφοδοτεί ένα επαγωγικό φορτίο με σταθερό συντελεστή ισχύος

2.2.2 Κατηγορίες ελέγχου μηχανών επαγωγής

1) Βαθμωτός έλεγχος

Για να δημιουργήσουμε την υψηλότερη δυνατή ροπή, θα πρέπει να διατηρηθεί η ροή σταθερή και κοντά στην ονομαστική της τιμή, καθώς μεταβάλλονται οι λειτουργικές καταστάσεις του κινητήρα. Προκειμένου να λειτουργεί στο μέγιστο επίπεδο ροής, θα πρέπει να ρυθμιστούν οι δυο ελεγχόμενες παράμετροι, η τάση τροφοδοσίας του στάτη V_s και η συχνότητα ω_s για κάθε κατάσταση λειτουργίας. Μια απλή διάταξη ελέγχου V/F φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί. Η σχέση ανάμεσα στην τάση τροφοδοσίας και στη συχνότητα είναι γραμμική εκτός από τις μικρές ταχύτητες. Μια ανύψωση τάσης παρέχεται σε χαμηλές ταχύτητες για να αντισταθμίσει την αντίσταση του στάτη. Αφού η συχνότητα εξαρτάται άμεσα από την ταχύτητα η μόνη μεταβλητή που είναι διαθέσιμη για έλεγχο είναι η V_s .



Σχήμα 2.9 Έλεγχος ταχύτητας με σταθερό λόγο V/F

II) Διανυσματικός έλεγχος

Όπως είναι γνωστό, το πολύπλοκο μαθηματικό μοντέλο της ασύγχρονης μηχανής δεν ευνοεί την ανάπτυξη συμβατικών τεχνικών ελέγχου για τον έλεγχο της λόγω της μη γραμμικότητας του και των επαγωγιοτήτων της μηχανής, που μεταβάλλονται καθώς αυτή στρέφεται. Η θεωρία του διανυσματικού ελέγχου βασίζεται στην αξιοποίηση του μετασχηματισμού του Park με τον οποίο επιτυγχάνεται η απλοποίηση του μοντέλου της μηχανής σε ένα σύστημα εξισώσεων με σταθερούς συντελεστές.

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

Με χρήση του μετασχηματισμού Park επιτυγχάνεται η ανάλυση του πραγματικού τριφασικού συστήματος σε δύο άξονες d και q κάθετους μεταξύ τους.

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

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

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

Ο τρόπος με τον οποίο υπολογίζεται η μαγνητική ροή και γίνεται ο προσανατολισμός του συστήματος αναφοράς έχει μεγάλη σημασία στο διανυσματικό έλεγχο, διότι από την ακρίβεια με την οποία θα γίνει ο προσανατολισμός εξαρτάται και η ποιότητα του ελέγχου. Με βάση τον τρόπο με τον οποίο γίνεται ο προσανατολισμός του συστήματος αναφοράς διακρίνουμε δύο κατηγορίες διανυσματικού ελέγχου :

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

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

Ο συνδυασμός της επιστήμης των ηλεκτρονικών ισχύος και του αυτομάτου ελέγχου, καθώς και η ραγδαία εξέλιξη της ψηφιακής τεχνολογίας, οδήγησε τα

τελευταία χρόνια σε μια διαρκή βελτίωση της αξιοπιστίας των υπαρχουσών τεχνικών διανυσματικού ελέγχου. Με τη χρήση των τεχνικών αυτών αυξάνεται δραματικά η αξιοπιστία των ηλεκτροκινητήριων συστημάτων που χρησιμοποιούν ασύγχρονες μηχανές, με αποτέλεσμα να τείνουμε στην επικράτησή τους έναντι των κινητηρίων συστημάτων συνεχούς ρεύματος σε ένα ευρύτατο φάσμα εφαρμογών.

2.2.3 Σύγχρονες τεχνικές ελέγχου μηχανών επαγωγής

Ο διανυσματικός έλεγχος αποτελεί σήμερα την πιο αξιόπιστη μέθοδο ελέγχου των ασύγχρονων μηχανών προσφέροντας βέλτιστη δυναμική απόκριση στο ηλεκτρομηχανικό σύστημα. Η έρευνα στον τομέα του διανυσματικού ελέγχου κατευθύνεται σήμερα στην επίλυση των προβλημάτων που παρουσιάζονται εξαιτίας των μεταβολών των παραμέτρων της μηχανής κατά τη διάρκεια της λειτουργίας αυτής. Οι μηχανές συνεχούς ρεύματος έχουν το πλεονέκτημα ότι ο έλεγχος της ροπής τους ανάγεται σε απευθείας έλεγχο της συνεχούς τάσης τροφοδοσίας στο τύμπανο, αν η ροή διακένου διατηρείται σταθερή με ξένη διέγερση. Έτσι ο συνδυασμός μιας μηχανής συνεχούς ρεύματος και μιας τοπολογίας μετατροπεία ηλεκτρονικών ισχύος DC-DC αποτελούσε για πολλά χρόνια την πιο συνήθη επιλογή για έλεγχο κίνησης.

Στην περίπτωση των μηχανών επαγωγής η ροπή εξαρτάται από τη ροή διακένου και από την ταχύτητα, χωρίς όμως να μεταβάλλεται γραμμικά με κανένα από τα δυο αυτά μεγέθη. Το γεγονός αυτό περιπλέκει το σχεδιασμό του συστήματος ελέγχου. Η αλματώδης ανάπτυξη της τεχνολογίας των ηλεκτρονικών ισχύος οδήγησε τα τελευταία χρόνια στην ανάπτυξη ρυθμιστών στροφών χαμηλού κόστους για την οδήγηση ασύγχρονων μηχανών. Μέχρι πριν από λίγα χρόνια η χρήση της ασύγχρονης μηχανής περιοριζόταν σε ηλεκτροκινητήρια συστήματα που λειτουργούν με περίπου σταθερή ταχύτητα, κι αυτό οφείλεται σε δύο κυρίως λόγους: Πρώτον, το γεγονός ότι η ταχύτητα λειτουργίας της ασύγχρονης μηχανής εξαρτάται από τη συχνότητα της τάσης τροφοδοσίας της έδινε τη δυνατότητα στις τροφοδοτούμενες από το σταθερής συχνότητας δίκτυο να λειτουργήσουν μόνο σε κάποιες συγκεκριμένες ταχύτητες αλλάζοντας τα ζεύγη των πόλων. Ο άλλος λόγος είναι το σύνθετο μοντέλο της μηχανής που δεν προσφέρεται για έλεγχο. Τα πρώτο πρόβλημα λύθηκε με την ανάπτυξη και μαζική παραγωγή αντιστροφικών τάσης που δίνουν τη δυνατότητα της δημιουργίας τριφασικών τάσεων που μεταβάλλονται σε συχνότητα και ενεργό τιμή. Αξιόπιστος έλεγχος επιτεύχθηκε με την ανάπτυξη των τεχνικών διανυσματικού ελέγχου. Η εξέλιξη αυτή σε συνδυασμό με την αξιοπιστία και στιβαρότητα της ασύγχρονης μηχανής έχει ως αποτέλεσμα την αντικατάσταση των μηχανών συνεχούς ρεύματος από αυτή σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών στην ηλεκτροκίνηση. Αν και η ιδέα του διανυσματικού ελέγχου είναι σχετικά παλιά, μόλις

τα τελευταία χρόνια κατέστη δυνατό να εφαρμοστούν αξιόπιστες μέθοδοι διανυσματικού ελέγχου για συστήματα υψηλών προδιαγραφών. Τούτο οφείλεται στην εξέλιξη που παρουσίασαν τα τελευταία χρόνια η επιστήμη των ηλεκτρονικών ισχύος και η ψηφιακή τεχνολογία. Η πρόοδος της τελευταίας έδωσε τη δυνατότητα να εμφανιστούν στο εμπόριο ισχυροί μικροεπεξεργαστές για βιομηχανική χρήση, το κόστος των οποίων συνεχίζει να μειώνεται. Έτσι έγινε δυνατή η ανάπτυξη νέων μεθόδων διανυσματικού ελέγχου με μειωμένη ευαισθησία στις μεταβολές των παραμέτρων της μηχανής σε σχέση με τις κλασσικές μεθόδους ελέγχου.

2.2.4 Έλεγχος ταχύτητας επαγωγικών μηχανών

Όταν μια τριφασική επαγωγική μηχανή τροφοδοτείται από το δίκτυο σταθερής τάσης και συχνότητας, στρέφεται με μια ταχύτητα η οποία είναι λίγο μικρότερη από τη σύγχρονη. Η μεταβολή της ταχύτητας από τη σύγχρονη εξαρτάται από το φορτίο και είναι τόσο μεγαλύτερη όσο υψηλότερη είναι η αντίσταση του δρομέα. Όμως, η λειτουργία της μηχανής με μειωμένη ταχύτητα σημαίνει αύξηση της ολίσθησης και των απωλειών χαλκού στο δρομέα ($P_{cu} = r \cdot I^2$), με συνέπεια τη μείωση του βαθμού απόδοσης.

Ο έλεγχος της ταχύτητας των επαγωγικών μηχανών επιτυγχάνεται με δύο τρόπους:

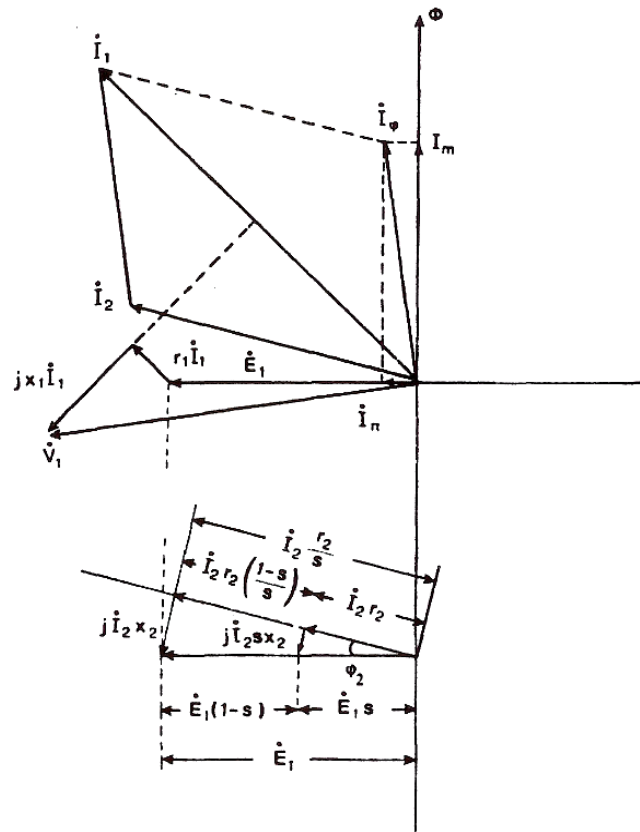
- 1) Με τη ρύθμιση της ολίσθησης.
- 2) Με τη ρύθμιση της σύγχρονης ταχύτητας.

Η ρύθμιση της ολίσθησης, για δεδομένη ροπή φορτίου, επιτυγχάνεται με τη μεταβολή της αντίστασης του δρομέα στην μηχανή δακτυλιοφόρου δρομέα και με τον έλεγχο της τάσης τροφοδοσίας στην μηχανή βραχυκυκλωμένου κλωβού.

Η ρύθμιση της σύγχρονης ταχύτητας από τη σχέση $n_s = 120f_e / p$, επιτυγχάνεται είτε με τη μεταβολή του αριθμού των πόλων του τυλίγματος του στάτη, ή με τη μεταβολή της συχνότητας τροφοδοσίας.

2.2.5 Ανυσματικό διάγραμμα μηχανής επαγωγής

Με βάση το ισοδύναμο κύκλωμα της μηχανής επαγωγής είναι δυνατό να κατασκευασθεί το ανυσματικό διάγραμμα του πρωτεύοντος (στάτη) και δευτερεύοντος (δρομέα) αντίστοιχα, όπως είναι στο σχήμα:



Σχήμα 2.10 Ανυσματικό διάγραμμα ασύγχρονης μηχανής (στάτη και δρομέα).

Με μια γρήγορη ματιά το ανυσματικό διάγραμμα φαίνεται ότι η ροή διακένου Φ είναι σε φάση με το ρεύμα μαγνητίσεως $I_m \cos \phi$ είναι η άεργος συνιστώσα του ρεύματος διεγέρσεως I_ϕ . Η ενεργός συνιστώσα του ρεύματος διεγέρσεως I_π είναι σε φάση με την επαγόμενη στον στάτη τάση E_1 . Δηλαδή ισχύει :

$$I_m + I_\pi = I_\phi$$

Η ΗΕΔ που επάγεται στο πρωτεύον από την ροή Φ είναι η E_1 η οποία, σύμφωνα με την σύμβαση που ακολουθείται προπορεύεται της ροής Φ κατά 90 μοίρες. Η γωνία του Σ.Ι του δευτερεύοντος είναι η ϕ_2 και η τάση E_1 του δευτερεύοντος ισούται με:

$$E_1 = I_2 r_2 / s + j I_2 x_2$$

Επίσης,

$$s E_1 = I_2 r_2 + j I_2 s x_2$$

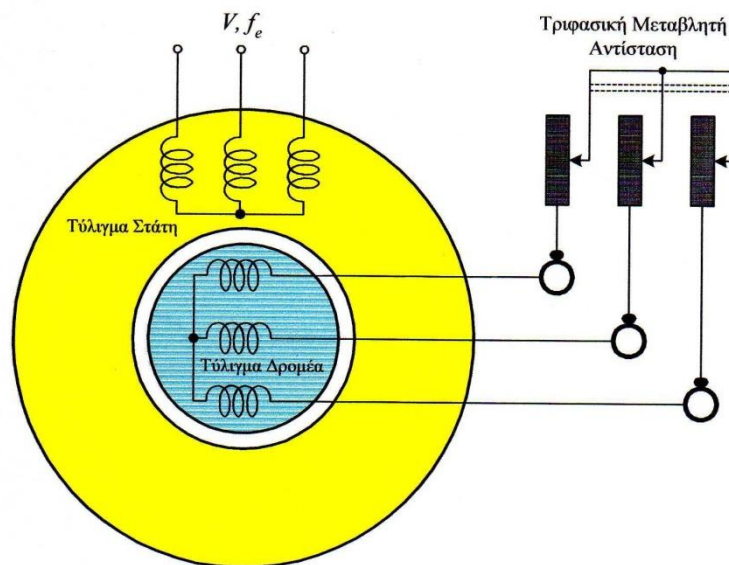
Στο πρωτεύον η επιβαλλόμενη τάση V_1 δίνεται ανυσματικά από τον τύπο:

$$V_1 = E_1 + r_1 I_1 + j x_1 I_1$$

Το ρεύμα στο πρωτεύον I_1 είναι το ανυσματικό άθροισμα του ρεύματος διεγέρσεως I_ϕ και του ρεύματος του δευτερεύοντος I_2 . Ας σημειωθεί ότι το ρεύμα I_2 δεν είναι το πραγματικό ρεύμα του δρομέα αλλά ένα ρεύμα το οποίο όταν ρέει στο τύλιγμα του στάτη παράγει ΜΕΔ ίση και αντίθετη προς αυτήν που παράγει το πραγματικό ρεύμα του δρομέα όταν ρέει στο τύλιγμα του δρομέα.

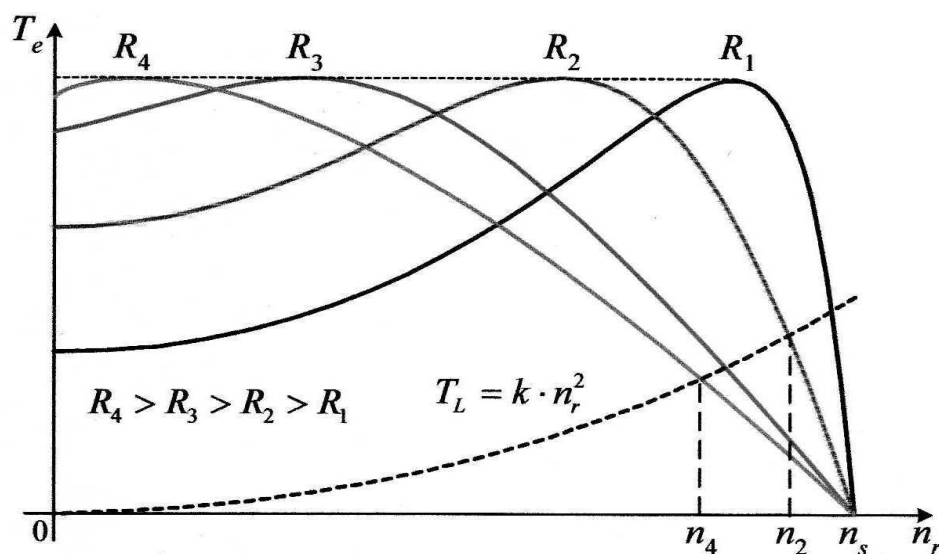
2.3 Έλεγχος της ταχύτητας με ρύθμιση της αντίστασης του δρομέα

Η ταχύτητα των επαγωγικών μηχανών με δακτυλιοφόρο δρομέα ρυθμίζεται με την εισαγωγή μεταβλητών αντιστάσεων στο τύλιγμα του δρομέα, όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 2.11. Με τον τρόπο αυτό μεταβάλλεται η μορφή της χαρακτηριστικής ροπής – ταχύτητας της μηχανής.



Σχήμα 2.11 Εισαγωγή ρυθμιστικών αντιστάσεων στο δρομέα, για τη ρύθμιση της ταχύτητας της μηχανής με δακτυλιοφόρο δρομέα.

Στο σχήμα 2.12 εικονίζονται οι χαρακτηριστικές της μηχανής για τέσσερις τιμές της αντίστασης του δρομέα, μαζί με τη χαρακτηριστική του φορτίου. Η ροπή του φορτίου μεταβάλλεται ανάλογα με το τετράγωνο της ταχύτητας. Αυτή η χαρακτηριστική φορτίου είναι πολύ κοινή και απαντάται στις αντλίες, τους ανεμιστήρες και τα ανυψωτικά. Η μεταβολή της ταχύτητας με τη ρύθμιση της αντίστασης είναι φανερή. Η ταχύτητα της μηχανής μειώνεται από την τιμή n_2 όταν $R_r=R_2$ στην τιμή n_4 όταν $R_r=R_4$. Το μειονέκτημα της μεθόδου είναι ότι, ο βαθμός απόδοσης της διάταξης μειώνεται με τη μείωση της ταχύτητας, εξαιτίας των εξωτερικών αντιστάσεων.

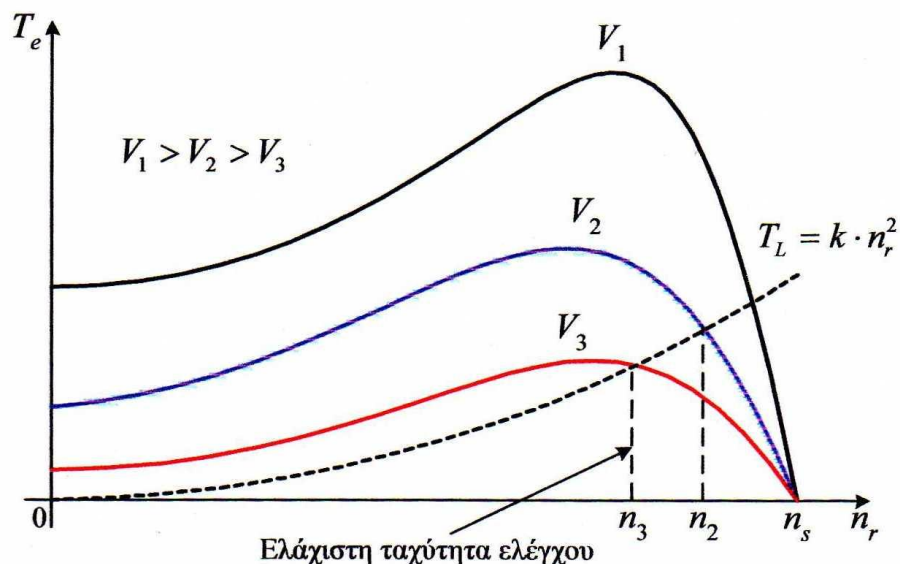


Σχήμα 2.12 Έλεγχος της ταχύτητας του επαγωγικού κινητήρα με δακτυλιοφόρο δρομέα, με τη μεταβολή της αντίστασης του δρομέα.

2.4 Έλεγχος ταχύτητας με ρύθμιση τάσης του στάτη

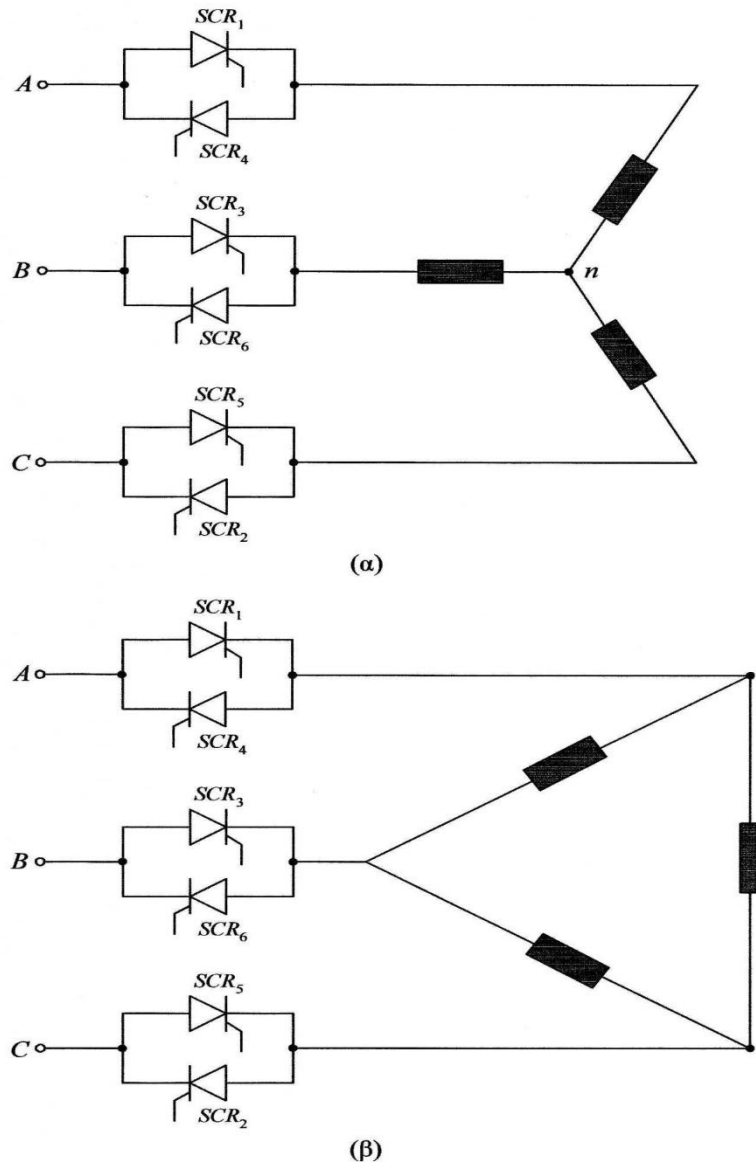
Στις επαγωγικές μηχανές βραχυκυκλωμένου κλωβού, η ρύθμιση της ολίσθησης (ταχύτητας) επιτυγχάνεται με τη μεταβολή της τάσης τροφοδοσίας των τυλιγμάτων του στάτη. Η συχνότητα των τάσεων είναι σταθερή και ίση με τη συχνότητα του δικτύου. Καθώς η ροπή που αναπτύσσει η επαγωγική μηχανή είναι ανάλογη με το τετράγωνο της τάσης του στάτη, οι χαρακτηριστικές ροπής-ταχύτητας μεταβάλλονται όπως στο σχήμα 2.13, για διάφορες τιμές της τάσης. Η ροπή του φορτίου είναι ανάλογη με το τετράγωνο της ταχύτητας. Από το σχήμα 2.13 είναι φανερό ότι, η ταχύτητα της μηχανής δεν μπορεί να ελεγχθεί σε τιμές πολύ μικρότερες από τη σύγχρονη. Η ελάχιστη δυνατή ταχύτητα είναι η n_3 , που αντιστοιχεί στη ροπή ανατροπής για την τάση V_3 . Ακόμη, το ρεύμα της μηχανής είναι ανάλογο της τάσης. Έτσι, ο λόγος ροπής προς ρεύμα, η μέγιστη ροπή, ο συντελεστής ισχύος και ο βαθμός

απόδοσης, μειώνονται με τη μείωση της ταχύτητας. Επομένως, ο έλεγχος της ταχύτητας των επαγωγικών μηχανών με τη ρύθμιση της τάσης του στάτη δεν είναι αποτελεσματικός.



Σχήμα 2.12 Έλεγχος της ταχύτητας επαγωγικής μηχανής, με τη μεταβολή της τάσης του στάτη.

Ο έλεγχος της τάσης στα τυλίγματα του στάτη επιτυγχάνεται με κατάλληλους μετατροπείς ισχύος, οι οποίοι ονομάζονται ρυθμιστές εναλλασσόμενης τάσης (ac voltage controllers). Η κυκλωματική δομή του τριφασικού ρυθμιστή εναλλασσόμενης τάσης εικονίζεται στο σχήμα 2.14. Τα τυλίγματα της μηχανής μπορεί να είναι σε σύνδεση αστέρα (Σχήμα 2.14α), ή τριγώνου (Σχήμα 2.14β). Ο ρυθμιστής αποτελείται από έξι ελεγχόμενους ανορθωτές πυριτίου (SCR), οι οποίοι συνδέονται ανά δύο αντιπαράλληλα. Σε μικρές ισχύς χρησιμοποιούνται ως διακόπτες τρία TRIAC, στη θέση των έξι SCR. Το TRIAC συμπεριφέρεται όπως δύο αντιπαράλληλοι ελεγχόμενοι ανορθωτές πυριτίου, όμως έχει πολύ μικρότερη ικανότητα χειρισμού ισχύος από αυτούς. Οι SCR δέχονται παλμούς έναυσης με τη σειρά αρίθμησης τους και με διαφορά φάσης 60 μοίρες.



Σχήμα 2.14 Τριφασικός ρυθμιστής εναλλασσόμενης τάσης, με φορτίο σε σύνδεση (α) αστέρα και (β) τριγώνου.

Οι ρυθμιστές εναλλασσόμενης τάσης χρησιμοποιούνται συνήθως στον έλεγχο της ταχύτητας επαγωγικών μηχανών σε εφαρμογές αντλιών και ανεμιστήρων, όπου δεν απαιτείται έλεγχος της ταχύτητας σε μικρές τιμές. Όμως, η κυριότερη εφαρμογή τους είναι στην εκκίνηση, οπότε ονομάζονται *soft starters*. Οι ηλεκτρονικοί εκκινητές έχουν αρκετά πλεονεκτήματα σε σχέση με τις συμβατικές μεθόδους εκκίνησης, με αυτομετασχηματιστή ή διακόπτη αστέρα-τριγώνου. Κάποια από τα πλεονεκτήματα είναι:

- 1) Η ομαλή επιτάχυνση και επιβράδυνση.
- 2) Ο έλεγχος του ρεύματος.
- 3) Η μειωμένη συντήρηση.

- 4) Η προστασία από έλλειψη ή ασυμμετρία των φάσεων.
- 5) Ελαχιστοποίηση των απωλειών του επαγωγικών μηχανών, λειτουργώντας με μειωμένη τάση σε μικρά φορτία. (Η επαγωγική μηχανή λειτουργεί με το μέγιστο βαθμό απόδοσης στο ονομαστικό φορτίο, όπου η κατανομή των επιμέρους απωλειών του είναι η βέλτιστη. Όταν το φορτίο μειώνεται, η βέλτιστη κατανομή των απωλειών διαταράσσεται και ο βαθμός απόδοσης μειώνεται. Μεταβάλλοντας την τάση τροφοδοσίας της μηχανής ανάλογα με το φορτίο της, ώστε η μαγνητική ροή στο διάκενο να έχει πάντα τη βέλτιστη τιμή, επιτυγχάνεται το μέγιστο βαθμό απόδοσης. Η βέλτιστη τιμή της μαγνητικής ροής εξαρτάται από το φορτίο και την ταχύτητα του της μηχανής).

2.5 Έλεγχος της ταχύτητας με μεταβολή τον αριθμό πόλων

Ο αριθμός των μαγνητικών πόλων που αναπτύσσονται από το τριφασικό τύλιγμα του στάτη μπορεί να μεταβληθεί, με τη μέθοδο των διαδοχικών πόλων (consequent poles), ή τοποθετώντας πολλαπλά τυλίγματα στο στάτη (multiple stator windings).

Στη μέθοδο των διαδοχικών πόλων, με κάποιες απλές αλλαγές στη σύνδεση των ομάδων του τυλίγματος του στάτη, ο αριθμός των πόλων του μεταβάλλεται με ένα λόγο 2 προς 1. Έτσι, η επαγωγική μηχανή μπορεί να έχει δύο ή τέσσερις πόλους και σύγχρονη ταχύτητα 3000rpm ή 1500rpm αντίστοιχα. Όταν ο λόγος 2 προς 1 στην ταχύτητα δεν είναι βολικός, τοποθετούνται στο στάτη περισσότερα από ένα ανεξάρτητα τριφασικά τυλίγματα, με τον επιθυμητό αριθμό πόλων. Ανάλογα με τη ζητούμενη ταχύτητα, τροφοδοτείται κάθε φορά το κατάλληλο τύλιγμα. Το μειονέκτημα των πολλαπλών τυλιγμάτων είναι ότι αυξάνουν το κόστος της μηχανής. Ακόμη, η μέθοδος των πολλαπλών τυλιγμάτων μπορεί να συνδυασθεί με τη μέθοδο των διαδοχικών πόλων, για τη λειτουργία σε περισσότερες ταχύτητες.

Πρέπει να σημειωθεί ότι, η μέθοδος ελέγχου της ταχύτητας με τη μεταβολή του αριθμών των πόλων, μπορεί να εφαρμοστεί μόνο σε επαγωγικές μηχανές με βραχυκυκλωμένο κλωβό. Ο δρομέας των μηχανών αυτών αναπτύσσει πάντα τόσους πόλους, όσοι είναι και οι πόλοι του στάτη. Αυτό δεν ισχύει στις μηχανές με δακτυλιοφόρο δρομέα, όπου το τύλιγμα του δρομέα αναπτύσσει ένα καθορισμένο αριθμό πόλων, ανάλογο με την κατασκευή του.

2.6 Έλεγχος της ταχύτητας με μεταβολή της συχνότητας

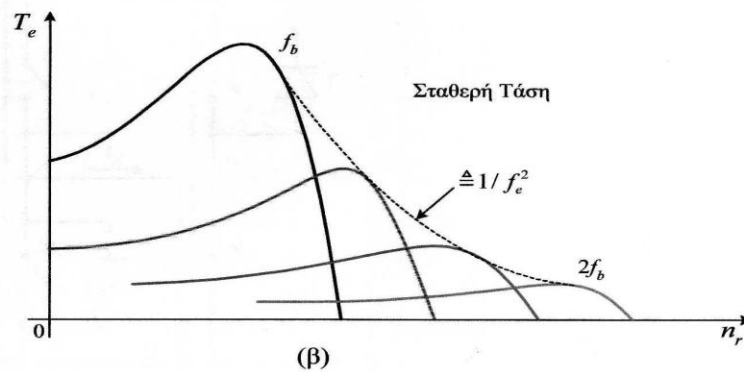
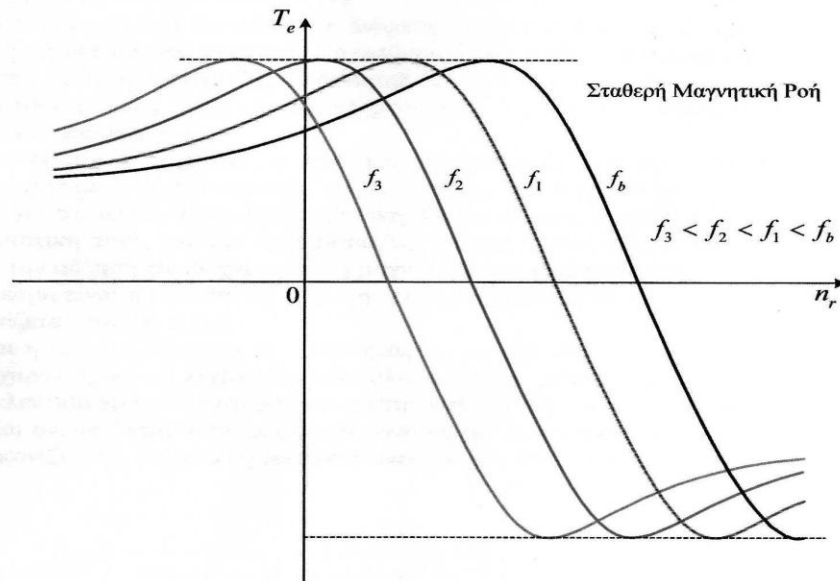
Η βέλτιστη μέθοδος για τον έλεγχο της ταχύτητας των επαγωγικών μηχανών κάθε είδους, είναι με τη ρύθμιση της συχνότητας τροφοδοσίας του στάτη. Έτσι,

μεταβάλλεται η σύγχρονη ταχύτητα, δηλαδή η ταχύτητα περιστροφής των μαγνητικών πεδίων και μαζί τους η ταχύτητα της μηχανής. Η σύγχρονη ταχύτητα που αντιστοιχεί στην ονομαστική συχνότητα f_b , ονομάζεται βασική (base).

Καθώς η συχνότητα των τάσεων τροφοδοσίας μπορεί να ρυθμιστεί σε τιμές μικρότερες αλλά και μεγαλύτερες της ονομαστικής, η ταχύτητα της μηχανής μπορεί να μεταβληθεί από το μηδέν, μέχρι μια τιμή πολλαπλάσια της βασικής. Το άνω όριο της ταχύτητας περιορίζεται από τη μηχανική αντοχή της. Εκτός από την ευρεία περιοχή ρύθμισης της ταχύτητας, η μέθοδος εξασφαλίζει τη λειτουργία της μηχανής με μικρή ολίσθηση σε κάθε ταχύτητα. Έτσι, ο βαθμός απόδοσης διατηρείται υψηλός.

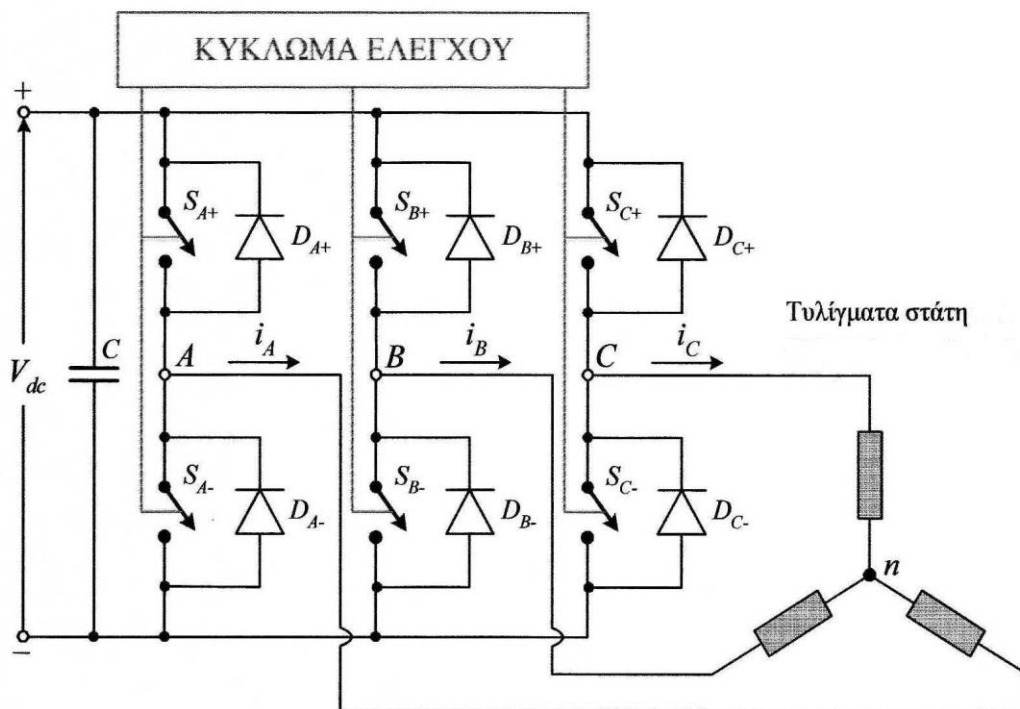
Όταν η ταχύτητα της μηχανής ρυθμίζεται σε τιμές μικρότερες της βασικής, η μείωση της συχνότητας συνοδεύεται από αντίστοιχη μείωση της τάσης. Ειδικότερα, ο λόγος της τάσης προς τη συχνότητα V/f_e διατηρείται σταθερός. Με τον τρόπο αυτό η μαγνητική ροή στο διάκενο παραμένει περίπου σταθερή ($\phi_m = E/f_e$). Στο σχήμα. 2.15α εικονίζονται οι χαρακτηριστικές ροπής–ταχύτητας σε διάφορες συχνότητες μικρότερες από τη βασική, όταν μαγνητική ροή διατηρείται σταθερή. Παρατηρούμε ότι η ροπή ανατροπής (μέγιστη ροπή), δεν μεταβάλλεται με τη μεταβολή της συχνότητας. Έτσι, η μηχανή μπορεί να ελέγξει φορτία, τα οποία απαιτούν μεγάλη ροπή σε μικρές ταχύτητες.

Στην ονομαστική ταχύτητα, η μηχανή τροφοδοτείται με την ονομαστική τάση και τη βασική συχνότητα. Για την αύξηση της ταχύτητας, σε τιμές πέρα από την ονομαστική, η συχνότητα γίνεται μεγαλύτερη από τη βασική. Όμως, η τάση τροφοδοσίας διατηρείται σταθερή στην ονομαστική τιμή, για την προστασία της μόνωσης των τυλιγμάτων. Επειδή η τάση δεν ακολουθεί την αύξηση της συχνότητας, η μαγνητική ροή μειώνεται καθώς η συχνότητα αυξάνει. Το αποτέλεσμα είναι η μείωση της μέγιστης ροπής ανατροπής με το τετράγωνο της συχνότητας, όπως εικονίζεται στο σχήμα 2.15β.



Σχήμα 2.15 Έλεγχος της ταχύτητας επαγωγικής μηχανής με τη μεταβολή της (α) συχνότητας σε τιμές μικρότερες από τη βασική, με σταθερή τη μαγνητική ροή και (β) σε τιμές μεγαλύτερες από τη βασική, με σταθερή την τάση.

Αν και η μέθοδος ελέγχου της ταχύτητας με τη ρύθμιση της συχνότητας προσφέρει πολύ καλύτερα χαρακτηριστικά λειτουργίας από όλες τις άλλες μεθόδους, η χρήση της έχει γενικευτεί μόλις τα τελευταία χρόνια. Αυτό οφείλεται στην κατασκευή των κατάλληλων μετατροπέων ισχύος, οι οποίοι ονομάζονται αντιστροφείς (inverters), με λογικό κόστος και υψηλή αξιοπιστία. Στο σχήμα 2.16 εικονίζεται η δομή του τριφασικού αντιστροφέα πηγής τάσης.

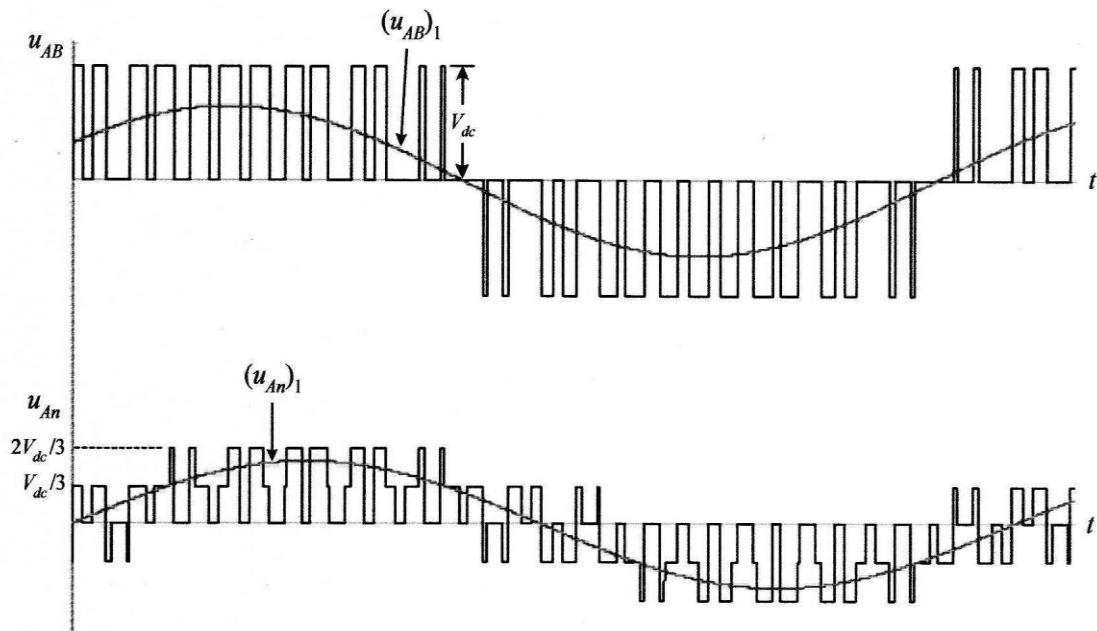


Σχήμα 2.16 Κυκλωματική δομή του τριφασικού αντιστροφέα πηγής τάσης.

Ο αντιστροφέας ονομάζεται πηγής τάσης, επειδή τροφοδοτείται από μια πηγή συνεχούς τάσης. Η συνεχής τάση εισόδου του αντιστροφέα V_{dc} , προέρχεται από την ανόρθωση της τάσης του δικτύου, την οποία εξομαλύνει ο πυκνωτής C. Οι αντιστροφείς που τροφοδοτούνται από πηγές συνεχούς ρεύματος ονομάζονται αντιστροφείς πηγής ρεύματος και χρησιμοποιούνται στον έλεγχο μηχανών μεγάλης ισχύος. Οι έξι διακόπτες του αντιστροφέα πηγής τάσης, είναι συνήθως MOSFET ισχύος (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) ή IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor). Αντιπαράλληλα με κάθε διακόπτη συνδέεται μια διόδος, η οποία εξασφαλίζει την αμφίδρομη ροή της ισχύος μεταξύ της dc εισόδου και της ac εξόδου. Οι διακόπτες οδηγούνται από το κύκλωμα ελέγχου, με κάποια από τις πολλές τεχνικές διαμόρφωσης εύρους παλμού PWM (Pulse Width Modulation).

Το χαρακτηριστικό όλων των τεχνικών PWM είναι η ρύθμιση εκτός από τη συχνότητα και της τάσης τροφοδοσίας της μηχανής. Όμως, οι διακόπτες του αντιστροφέα λειτουργούν με μια συχνότητα f_s , η οποία είναι πολύ μεγαλύτερη από τη θεμελιώδη f_e . Η συχνότητα f_s ονομάζεται συχνότητα μετάβασης (switching frequency). Στο σχήμα 2.17 παρουσιάζεται ενδεικτικά η κυματομορφή της πολικής και της φασικής τάσης στην μηχανή, όταν τροφοδοτείται από ένα PWM αντιστροφέα. Η μηχανή εξαιτίας της επαγωγικής συμπεριφοράς της, φιλτράρει τις συνιστώσες υψηλής συχνότητας των ρευμάτων και ανταποκρίνεται μόνο στη θεμελιώδη

συνιστώσα τους. Τα μικρά αρμονικά ρεύματα αυξάνουν τις απώλειες χαλκού και σιδήρου της μηχανής.



Σχήμα 2.17 Κυματομορφές της πολικής και της φασικής τάσης στην μηχανή. Διακρίνεται ακόμη η θεμελιώδης συνιστώσα των τάσεων, με συχνότητα f_e .

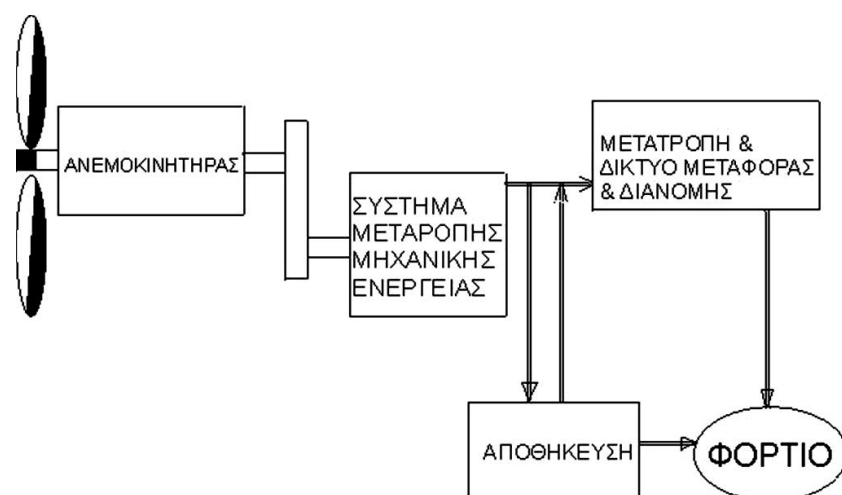
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΜΗΧΑΝΕΣ ΕΠΑΓΩΓΗΣ ΣΕ ΑΙΟΛΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

3.1 Γενικά για τα αιολικά συστήματα

Ο ανεμοκινητήρας από την εποχή της εμφάνισης του μέχρι σήμερα έχει περάσει από πολλά στάδια εξέλιξης, τόσο ως προς τον τύπο του (οριζοντίου ή κάθετου άξονα) όσο και ως προς τα υποσυστήματα του (πτερύγια, κιβώτιο ταχυτήτων, πύργος, αυτοματισμοί, γεννήτρια κ.α.).

Εξελίξεις έχουν επίσης σημειωθεί και στον τρόπο δέσμευσης, αξιοποίησης, αποθήκευσης ή μεταφοράς της ενέργειας του ανέμου που μετατρέπεται από την ανεμογεννήτρια σε άλλη μορφή ενέργειας. Μια εικόνα των βασικών μερών που αποτελούν μια διάταξη εκμετάλλευσης της αιολικής ενέργειας καθώς και της ροής ενέργειας παρουσιάζεται στο σχήμα 3.1. Η διάταξη αυτή είναι μια γενική περίπτωση όπου η κινητική ενέργεια του ανέμου μετατρέπεται σε μηχανικό έργο με τη βοήθεια αεροδυναμικής διάταξης (π.χ. μιας έλικας). Αυτό το μηχανικό έργο μπορεί να είναι εκμεταλλεύσιμο επί τόπου ή να χρειαστεί να μετατραπεί σε μια άλλη μορφή ενέργειας και να μεταφερθεί στον τόπο της ζήτησης.



Σχήμα 3.1 Σχηματική αναπαράσταση εγκατάστασης εκμετάλλευσης της αιολικής ενέργειας.

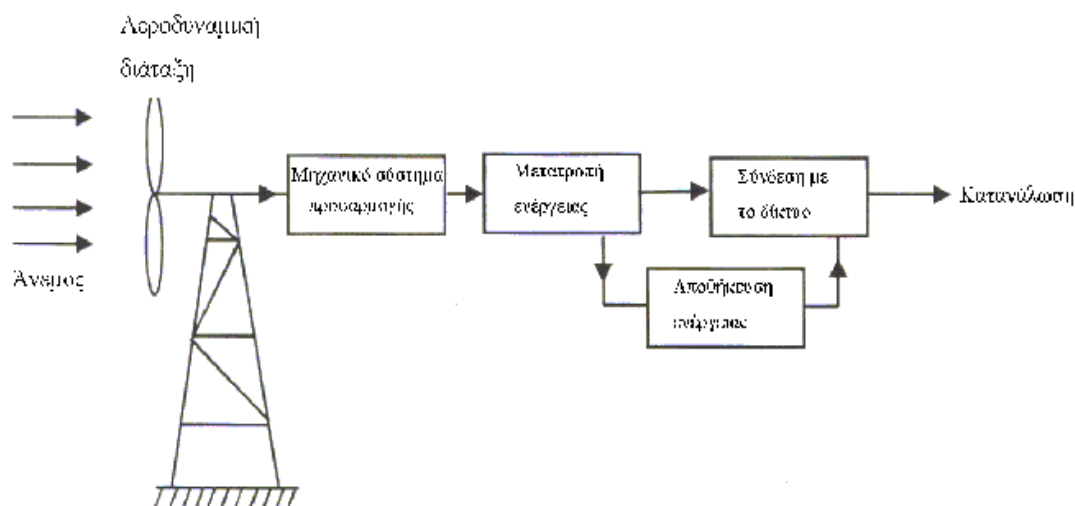
Παραδείγματα εκμετάλλευσης της παραγόμενης ενέργειας επί τόπου είναι αυτό της παραγωγής υδρογόνου με ηλεκτρόλυση του νερού που μπορεί να αποθηκευτεί, μεταφερθεί, και να καεί ως αέριο καύσιμο με μηδαμινή επιβάρυνση του περιβάλλοντος.

Στη δεύτερη που είναι και πιο ευρέως διαδεδομένη είναι αυτή της μετατροπής της μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική ενέργεια λόγω της εύκολης μεταφοράς αλλά και της δυνατότητας που έχει να μετατρέπεται σε οποιαδήποτε άλλη μορφή θέλουμε.

Βέβαια οι μεγάλες διακυμάνσεις της ενέργειας του ανέμου με το χρόνο πολλές φορές έχουν χρονική ασυμφωνία με την ζήτηση ενέργειας με αποτέλεσμα την αναγκαιότητα της αποθήκευσης της ενέργειας για τις χρονικές στιγμές στις οποίες η ισχύς του ανέμου πέφτει κάτω από ένα όριο.

3.2 Παραγωγή ενέργειας από ανεμογεννήτριες

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ανεμογεννήτριες διαφοροποιείται σημαντικά από τις συμβατικές μεθόδους παραγωγής. Στο σημείο αυτό είναι σημαντικό να αναφερθούν τα βασικά μέρη από τα οποία αποτελείται ένα σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από τον άνεμο. Στο σχήμα 3.2 φαίνεται το διάγραμμα ενός τέτοιου συστήματος καθώς και η ροή ενέργειας σε αυτό:



Σχήμα 3.2 Διάταξη παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από τον άνεμο.

Η κινητική ενέργεια των αερίων μαζών μετατρέπεται σε μηχανικό έργο με την βοήθεια μιας αεροδυναμικής διάταξης, του ανεμοκινητήρα (Α/Κ). Μεταξύ του ανεμοκινητήρα και της γεννήτριας, η οποία μετατρέπει το μηχανικό έργο σε ηλεκτρική ενέργεια, παρεμβάλλεται ένα μηχανικό σύστημα προσαρμογής. Στη

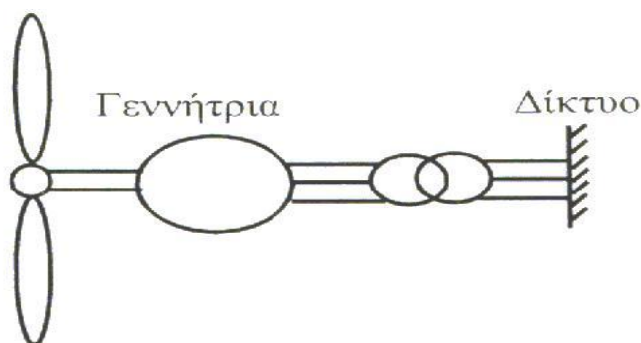
συνέχεια, η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται στην έξοδο της γεννήτριας, τροφοδοτείται στο δίκτυο, μέσω της χρησιμοποιούμενης συσκευής συνδέσεώς της με αυτό. Οι μεγάλες διακυμάνσεις της ταχύτητας του ανέμου με το χρόνο, οδηγούν σε ασυμφωνία μεταξύ ζήτησης και παραγωγής ενέργειας. Λύση στο πρόβλημα αυτό μπορεί να δοθεί με την χρήση συσκευών αποθήκευσης ενέργειας. Η αποθηκευμένη ενέργεια καλύπτει το ενεργειακό έλλειμμα, όταν η ισχύς της ανεμογεννήτριας πέφτει κάτω από ένα συγκεκριμένο επίπεδο.

Στα αιολικά συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας η μεταβλητότητα του ανέμου προκαλεί σημαντικές διακυμάνσεις στην ισχύ που απομαστεύεται από τον ανεμοκινητήρα, οι οποίες μεταφέρονται μέσω του μηχανικού συστήματος μετάδοσης στην έξοδο της γεννήτριας. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα αφενός μεν να εμφανίζονται έντονες μηχανικές και ηλεκτρικές καταπονήσεις, αφετέρου δε να έχουμε μεγάλες ταλαντώσεις της ηλεκτρικής ισχύος στην έξοδο της ανεμογεννήτριας. Οι ταλαντώσεις αυτές αλλοιώνουν την ποιότητα της ισχύος, ενώ είναι δυνατό να επηρεάσουν την ευστάθεια του δικτύου στο οποίο είναι συνδεδεμένη η ανεμογεννήτρια. Στη δυναμική αυτών των φαινομένων συμμετέχουν εξίσου ο ανεμοκινητήρας, το μηχανικό σύστημα μετάδοσης της ισχύος, η γεννήτρια, τα συστήματα αυτομάτου ελέγχου που μπορεί να υπάρχουν και το ηλεκτρικό δίκτυο.

3.3 Συστήματα ανεμογεννητριών

3.3.1 Σταθερής ταχύτητας ανεμογεννήτριες

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. Στο σχήμα 3.3 παρουσιάζεται ένα τέτοιο σύστημα.



Σχήμα 3.3 Σύστημα σταθερής ταχύτητας.

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.

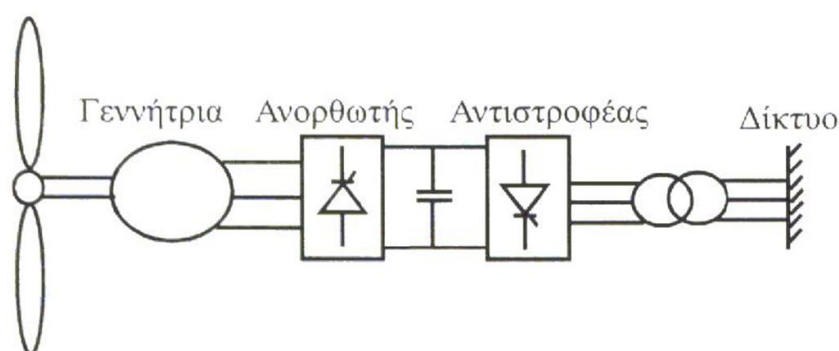
Τα συστήματα σταθερών στροφών – σταθερής συχνότητας είναι συστήματα που βασίζονται στην υλοποίηση συστημάτων ελέγχου μεθόδου “stall” (απώλεια αεροδυναμικής στήριξης, εξαρτάται από τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά των πτερυγίων), είτε συστημάτων ελέγχου μεθόδου “pitch” (έλεγχος μεταβολής της κλίσης των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

3.3.2 Ανεμογεννήτριες μεταβλητής ταχύτητας

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 3.4 παρουσιάζεται το διάγραμμα ενός συστήματος μεταβλητής ταχύτητας.



Σχήμα 3.4 Σύστημα μεταβλητής ταχύτητας.

Όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.4 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

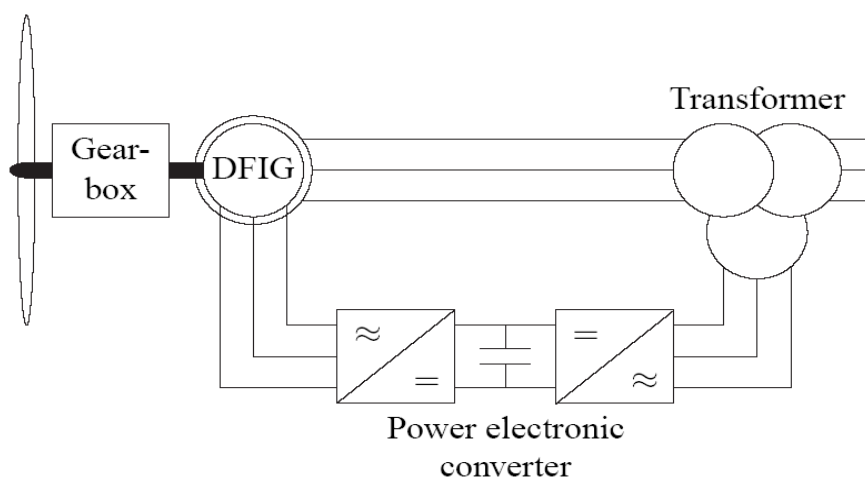
ανώτερων αρμονικών που εισέρχονται στο δίκτυο, κάτι που κάνει αναγκαία την εγκατάσταση φίλτρων για τον περιορισμό τους.

3.3.3 Ανεμογεννήτριες μεταβλητής ταχύτητας 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 3.5 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.



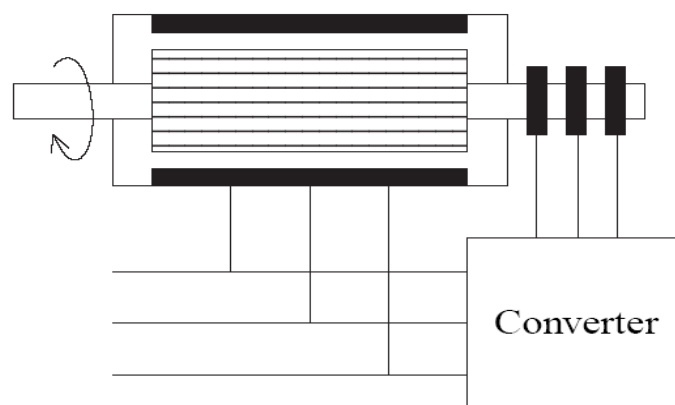
Σχήμα 3.5 Ανεμογεννήτρια μεταβλητής ταχύτητας με DFIG.

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 αέργου 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 3.6 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.

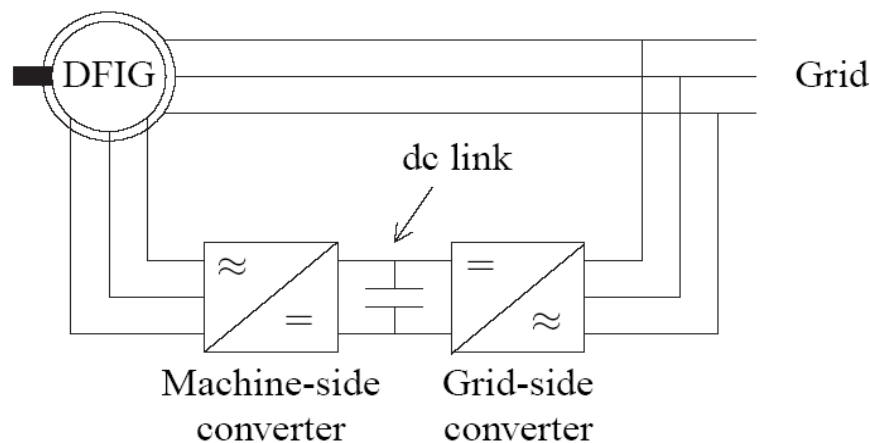


Σχήμα 3.6 Αρχή ενός DFIG.

Μια πιο λεπτομερής εικόνα του DFIG συστήματος με έναν “back – to – back” μετατροπέα παρουσιάζεται στο σχήμα 3.7. Ο “back – to back” μετατροπέας

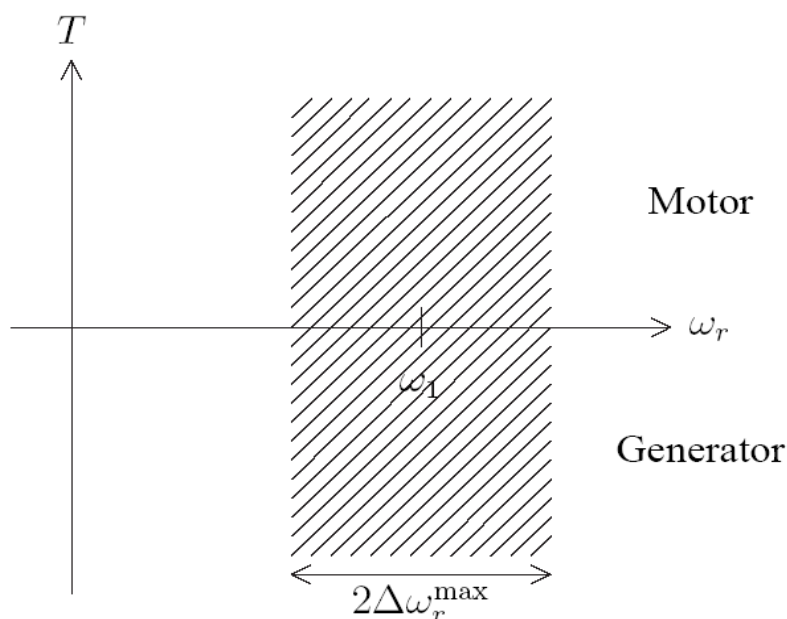
αποτελείται από δυο μετατροπείς, έναν μετατροπέα στην πλευρά της μηχανής (machine side) και έναν μετατροπέα στην πλευρά του δικτύου (grid side), οι οποίοι συνδέονται «πλάτη με πλάτη» (back – to – back). Ανάμεσα στους δυο μετατροπείς τοποθετείται ένας d.c. πυκνωτής ως αποθηκευτικός χώρος ενέργειας, με 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 υπερσύγχρονη κατάσταση, η ισχύς ρέει από το δρομέα διαμέσου του μετατροπέα προς το δίκτυο, ενώ σε μια υποσύγχρονη κατάσταση έχουμε ροή προς την αντίθετη κατεύθυνση. Και στις δυο περιπτώσεις ο στάτης τροφοδοτεί με ενέργεια το δίκτυο.



Σχήμα 3.7 DFIG σύστημα με “back – to – back” μετατροπέα.

Η χαρακτηριστική ταχύτητας – ροπής του DFIG συστήματος φαίνεται στο σχήμα 3.8. Όπως επίσης φαίνεται στο σχήμα, το DFIG μπορεί να λειτουργήσει τόσο σαν κινητήρας όσο και σαν γεννήτρια με ένα εύρος ταχύτητας δρομέα του $\pm \Delta\omega_1(\max)$ γύρω από τη σύγχρονη ταχύτητα ω_1 .



Σχήμα 3.8 Χαρακτηριστική ταχύτητας – ροπής ενός DFIG.

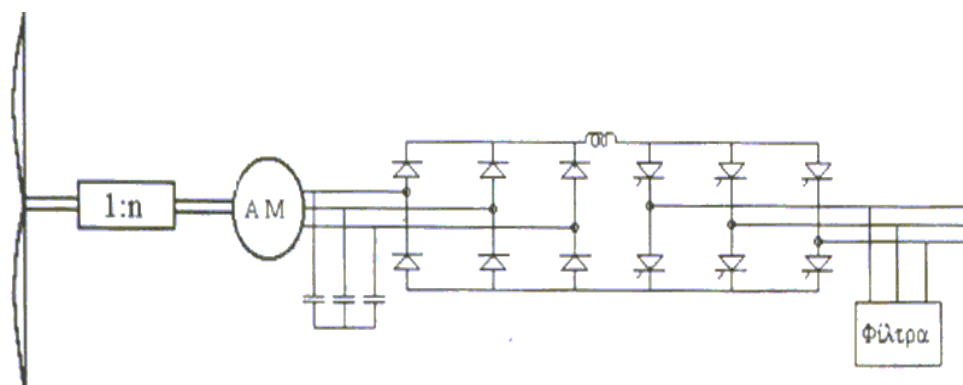
Το μέγεθος του μετατροπέα δε σχετίζεται με τη συνολική ισχύ της γεννήτριας αλλά με το επιλεγμένο εύρος ταχυτήτων και συνεπώς με την ισχύ ολίσθησης. Το κόστος του μετατροπέα αυξάνει όταν το εύρος ταχύτητας γύρω από τη σύγχρονη ταχύτητα γίνεται πλατύτερο. Συνεπώς, η επιλογή του εύρους ταχύτητας βασίζεται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

3.4 Εναλλακτικές τοπολογίες για την λειτουργία μεταβλητών στροφών σταθερής συχνότητας

Η αξιολόγηση των εναλλακτικών διαμορφώσεων του ηλεκτρικού μέρους μιας ανεμογεννήτριας μεταβλητών στροφών και η επιλογή του βέλτιστου σχήματος εξαρτάται από πολλούς και συχνά αντικρουόμενους παράγοντες, όπως είναι η δυναμική συμπεριφορά, το κόστος, η απλότητα, οι αρμονικές και ο συντελεστής ισχύος. Η δυναμική συμπεριφορά των εναλλακτικών τοπολογιών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν αποτελεί και τον πρωταρχικό παράγοντα επιλογής του καταλληλότερου σχήματος. Παρόλα αυτά, για λόγους πληρότητας της ανάλυσης, στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται και σχολιάζονται συνοπτικά και οι άλλοι παράγοντες που υπεισέρχονται και συνεκτιμώνται για την επιλογή του τελικού σχήματος. Όσον αφορά το κόστος, αυτό σχετίζεται κατά κύριο λόγο με την επιλογή της γεννήτριας. Δηλαδή σχήματα που περιλαμβάνουν ασύγχρονη μηχανή βραχυκυκλωμένου κλωβού έχουν πλεονέκτημα όσο αφορά το κόστος συγκριτικά με σχήματα που περιλαμβάνουν σύγχρονη μηχανή ή ασύγχρονη μηχανή δακτυλιοφόρο

δρομέα, καθόσον οι μηχανές αυτές είναι σημαντικά ακριβότερες και επιπλέον παρουσιάζουν αυξημένες ανάγκες συντήρησης λόγω των δακτυλίων του δρομέα. Από την άλλη πλευρά η χρήση σύγχρονων μηχανών παρότι αυξάνει το κόστος της κατασκευής έχει το πλεονέκτημα της παραγωγής έργου ισχύος, προϋπόθεση απαραίτητη σε πολλές εφαρμογές. Παλαιότερα, στην επιλογή του κατάλληλου σχήματος έπρεπε να ληφθεί σοβαρά υπόψη και το κόστος της διάταξης με τα ηλεκτρονικά ισχύος κάτι που δεν ισχύει πλέον σήμερα λόγω της μείωσης του κόστους τους από την εκτεταμένη εφαρμογή τους.

Στο σχήμα 3.9 φαίνεται το σχηματικό διάγραμμα ενός αιολικού συστήματος ΜΣΣΣ (μεταβλητών στροφών – σταθερής συχνότητας) με ασύγχρονη γεννήτρια. Για τη σύνδεση της γεννήτριας στο δίκτυο χρησιμοποιείται μία διάταξη εναλλασσόμενου/συνεχούς/εναλλασσόμενου (ΕΡ/ΣΡ/ΕΡ) που αποτελείται από έναν ανορθωτή διόδων και έναν αντιστροφέα με θυρίστορ.



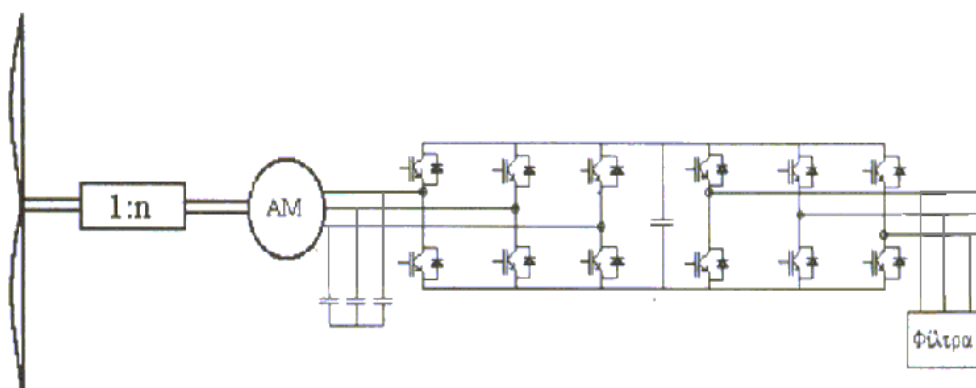
Σχήμα 3.9 Ανεμογεννήτρια ΜΣΣΣ με ασύγχρονη μηχανή και διάταξη ΕΡ/ΣΡ/ΕΡ στο στάτη.

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. Μεταβάλλοντας κατάλληλα την γωνία έναυσεως ελέγχεται η γωνιακή ταχύτητα του δρομέα κατά τον επιθυμητό τρόπο και έτσι μπορούμε να ρυθμίζουμε την ροή ισχύος από την γεννήτρια στο δίκτυο. Η διάταξη αυτή χρησιμοποιείται για τον έλεγχο ανεμοκινητήρων ισχύος μέχρι 250 kW. Οι πυκνωτές στους ακροδέκτες της ασύγχρονης γεννήτριας τροφοδοτούν την έργο ισχύ που απαιτείται για την διέγερσή της.

Κύρια πλεονεκτήματα της διάταξης είναι βέβαια το χαμηλό κόστος λόγω της χρήσης ασύγχρονης γεννήτριας, καθώς και η απλότητα και αξιοπιστία του συστήματος μετατροπής εξαιτίας της χρήσης ανορθωτικής γέφυρας διόδων και

αντιστροφέα με θυρίστορ. Όμως, η επιλογή ανορθωτή διόδων δεν μας δίνει την δυνατότητα ελέγχου της τάσης στη πλευρά συνεχούς ρεύματος. Η τάση αυτή αυξάνεται καθώς αυξάνονται οι στροφές της γεννήτριας. Για το 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 με θυρίστορ.

Στο σχήμα 3.10 εικονίζεται μια από τις βασικές διατάξεις των συστημάτων ηλεκτρικής κίνησης, η οποία έχει βρει εφαρμογή και σε ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών λόγω των πολύ καλών λειτουργικών και δυναμικών της χαρακτηριστικών. Πρόκειται για μια ασύγχρονη γεννήτρια με δύο ηλεκτρονικούς μετατροπείς αποτελούμενους από τρανζίστορ μονωμένης πύλης (IGBT) στον στάτη.

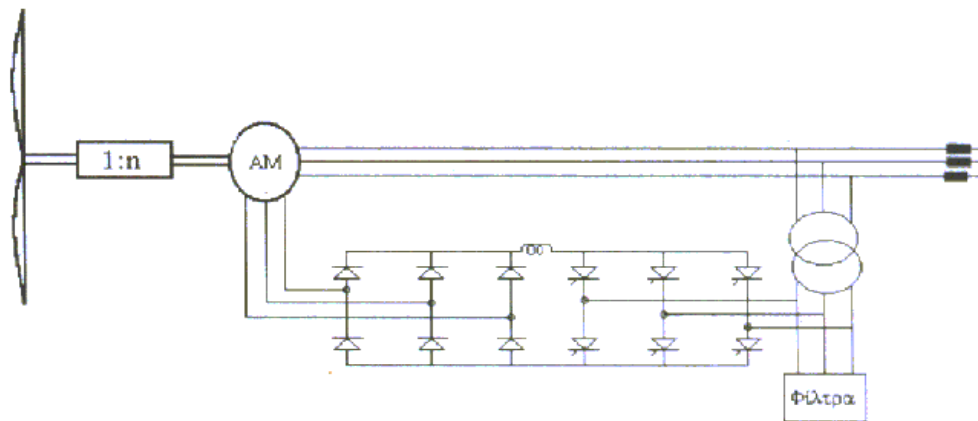


Σχήμα 3.10 Ανεμογεννήτρια ΜΣΣΣ με ασύγχρονη γεννήτρια και μετατροπείς με IGBT.

Όπως φαίνεται και στο σχήμα χρησιμοποιούνται δύο όμοιοι μετατροπείς πηγής τάσης, τόσο στην πλευρά της γεννήτριας, όσο και στην έξοδο του συστήματος προς το δίκτυο, οι οποίοι παλμοδοτούνται με την τεχνική διαμόρφωσης εύρους παλμών (PWM). Για τη μεταφορά ενέργειας στο δίκτυο ο πρώτος μετατροπέας λειτουργεί ως ανορθωτής ενώ ο δεύτερος ως αντιστροφέας. Ο μετατροπέας από την πλευρά της γεννήτριας ρυθμίζει την τάση εισόδου του αντιστροφέα ενώ ο μετατροπέας από την πλευρά του δικτύου ελέγχει το συντελεστή ισχύος και άρα την ροή πραγματικής ισχύος προς αυτό. Τα μειονεκτήματα αυτού του ηλεκτρικού σχήματος είναι η αυξημένη πολυπλοκότητα λόγω των δύο ελεγχόμενων μετατροπέων καθώς και η χρησιμοποίηση περισσότερων ελεγχόμενων ημιαγωγικών στοιχείων ισχύος (12 IGBT). Από την άλλη πλευρά υπάρχει πλεονέκτημα από τη χρήση της ασύγχρονης γεννήτριας λόγω του μικρότερου κόστους της αλλά και η δυνατότητα ροής ισχύος και προς τις δυο κατευθύνσεις. Επιπλέον, η χρησιμοποίηση τεχνικών PWM εκτός από τον αποτελεσματικό έλεγχο της τάσης εξόδου, εξασφαλίζει την πολύ σημαντική μείωση του αρμονικού περιεχομένου των παραγόμενων ρευμάτων, οι

οποίες μετατοπίζονται σε υψηλές συχνότητες επιτρέποντας την χρήση μικρότερων και οικονομικότερων φίλτρων.

Σε ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών έχει προταθεί και διερευνηθεί σε σημαντικό βαθμό η διάταξη ασύγχρονης μηχανής με δακτυλιοφόρο δρομέα και σύστημα μετατροπών συνδεδεμένων στους ακροδέκτες του. Στην απλούστερη περίπτωση η διάταξη των μετατροπών περιλαμβάνει μη ελεγχόμενο ανορθωτή στους ακροδέκτες του δρομέα και αντιστροφέα στην έξοδο, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.11.



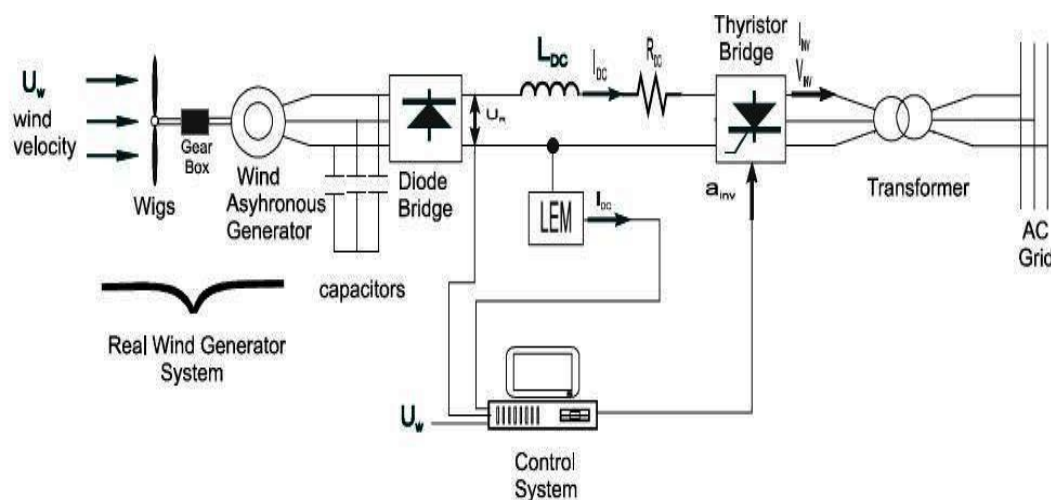
Σχήμα 3.11 Ανεμογεννήτρια ΜΣΣΣ με ασύγχρονη μηχανή και μετατροπέα ΕΡ/ΣΡ/ΕΡ στο δρομέα.

Η ασύγχρονη μηχανή δακτυλιοφόρου δρομέα σε σχέση με τη βραχυκυκλωμένου δρομέα είναι ακριβότερη και έχει μεγαλύτερες απαιτήσεις συντήρησης. Από την άλλη πλευρά, οι ηλεκτρονικοί μετατροπείς είναι στον δρομέα διαχειρίζονται μόνο ένα τμήμα της συνολικής ισχύος εξόδου, γεγονός που οδηγεί σε μείωση της ονομαστικής ισχύος των μετατροπών και άρα και του κόστους τους. Αυτό είναι και το βασικό πλεονέκτημα της διάταξης αυτής που σε συνδυασμό με την απλότητα και την αξιοπιστία των μετατροπών την καθιστούν ιδιαίτερα ελκυστική για εφαρμογές ανεμογεννητριών μεγάλης ισχύος (της τάξεως των MW). Τέλος, είναι δυνατές και άλλες παραλλαγές της διάταξης οι οποίες μπορεί να περιλαμβάνουν ελεγχόμενο ανορθωτή με θυρίστορ αντί για τον ανορθωτή διόδων ή σύστημα διπλών μετατροπών ελεγχόμενων με τη μέθοδο PWM. Η τελευταία υλοποίηση μάλιστα είναι και η καλύτερη καθώς απαλείφει και τα προβλήματα των αρμονικών, διατηρώντας το πλεονέκτημα του μειωμένου μεγέθους των μετατροπών.

3.5 Ηλεκτρονικά ισχύος στις ανεμογεννήτριες

3.5.1 Ασύγχρονη γεννήτρια βραχυκυκλωμένου κλωβού

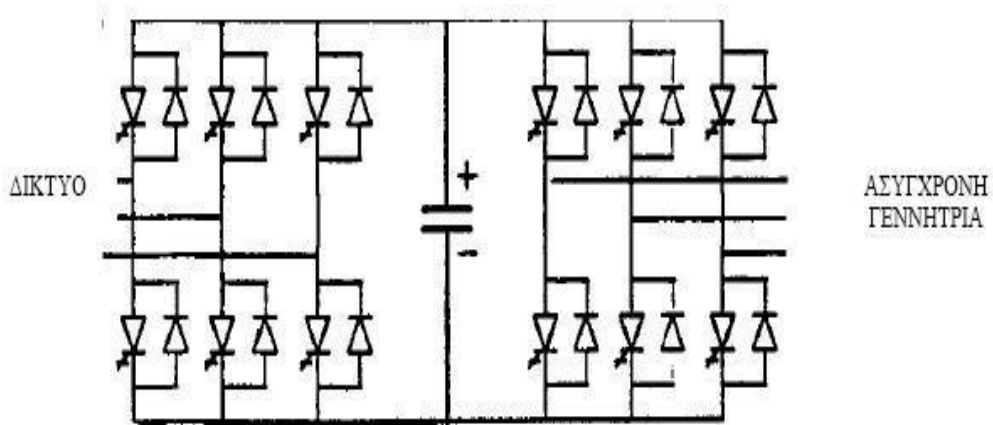
Οι ασύγχρονες γεννήτριες βραχυκυκλωμένου κλωβού μπορούν να λειτουργήσουν με μεταβλητό αριθμό στροφών αν χρησιμοποιήσουμε μετατροπείς πηγής τάσης ή πηγής ρεύματος. Ο πιο απλός μετατροπέας που χρησιμοποιείται σε τέτοια συστήματα είναι ο μετατροπέας πηγής τάσης που αποτελείται από ένα απλό αντιστροφέα με θυρίστορ και μεταγωγή από την τάση του δικτύου και συνδέεται στην πλευρά του δικτύου, μαζί με ένα μη ελεγχόμενο ανορθωτή διόδων ή ένα μετατροπέα με φυσική μετάβαση στην πλευρά του στάτη, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.12. Αυτός είναι ένας απλός μετατροπέας πηγής τάσης. Στις περισσότερες εφαρμογές η ασύγχρονη γεννήτρια πρέπει να έχει πυκνωτές.



Σχήμα 3.12 Μετατροπές πηγής τάσης.

Η τεχνική που χρησιμοποιείται στηρίζεται στη ρύθμιση της γωνίας έναυσης των θυρίστορ ώστε να αρχίζει η αγωγή τους όταν η γεννήτρια έχει επιταχυνθεί, αποκτώντας ταχύτητα τέτοια ώστε η τάση εξόδου του ανορθωτή να είναι μεγαλύτερη από τη τάση του δικτύου. Η ταχύτητα, το ρεύμα και η ισχύς αυξάνονται με σχεδόν σταθερό συντελεστή ισχύος καθώς αυξάνεται η ταχύτητα του ανέμου. Ο μετατροπέας αυτός μπορεί να αποτελείται από θυρίστορ GTO ώστε να μπορούν να λειτουργήσουν σε ισχύς της τάξεως των MW και τα οποία προοπτικά αντικαθίστανται με στοιχεία IGBT εξαιτίας της αύξησης της ονομαστικής τάσης και του ρεύματος αυτών. Η διάταξη αυτή παρουσιάζει προβλήματα λόγω της αυτοδιέγερσης των πυκνωτών και των ανεπιθύμητων συντονισμών ειδικά σε χαμηλές ταχύτητες ανέμου όπου έχουμε σημαντικές μεταβολές της παραγόμενης ισχύος, ενώ ο έλεγχος της τάσης δεν είναι εύκολος με τους πυκνωτές σταθερού μεγέθους.

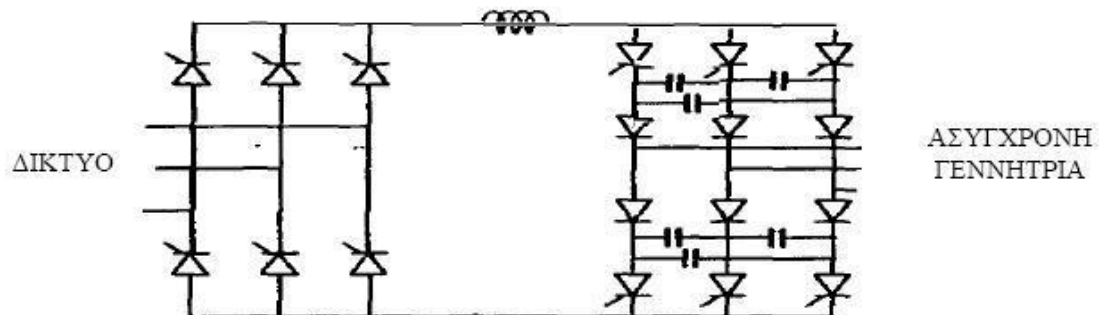
Μια άλλη τοπολογία που χρησιμοποιείται συχνά, περιέχει δύο όμοιους μετατροπείς πηγής τάσης PWM φαίνεται στο σχήμα 3.13. Η χρήση του μετατροπέα αυτού στην έξοδο εξασφαλίζει δυνατότητα ροής ισχύος προς τις δύο κατευθύνσεις, ελαχιστοποιεί την αρμονική παραμόρφωση των ρευμάτων εξόδου και επιτρέπει τον έλεγχο της άεργου ισχύος του συστήματος. Ο μετατροπέας στην πλευρά της γεννήτριας περιορίζει τις αρμονικές των ρευμάτων και της ροπής της μηχανής και επιτρέπει τη βελτιστοποίηση της δυναμικής απόκρισης της ανεμογεννήτριας. Ο μετατροπέας αυτός αποτελείται από θυρίστορ GTO για μεγάλες γεννήτριες της τάξεως των MW και τα οποία όπως και στον προηγούμενο μετατροπέα τείνουν να αντικατασταθούν με ηλεκτρονικά στοιχεία ισχύος IGBT. Το κόστος βέβαια αυτού του μετατροπέα παραμένει υψηλό και οριακά συμφέρον για τέτοιου είδους εφαρμογές.



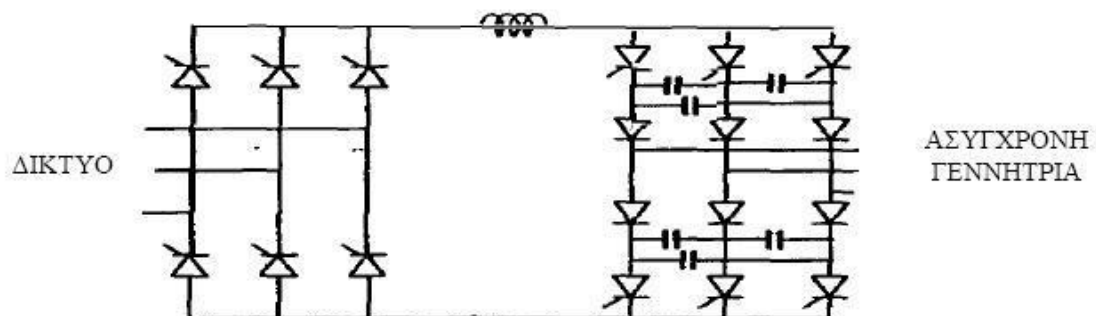
Σχήμα 3.13 Σύστημα με δύο μετατροπείς τάσης.

Μία άλλη συνδεσμολογία που μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε συνδυασμό με ασύγχρονη γεννήτρια βραχυκυκλωμένου κλωβού αποτελείται από έναν μετατροπέα πηγής ρεύματος που συνδέεται στην πλευρά της γεννήτριας, σε συνδυασμό με ένα μετατροπέα με μεταγωγή από την τάση του δικτύου στην πλευρά του δικτύου όπως φαίνεται στο σχήμα 3.14. Χρησιμοποιείται ευρέως σε επαγωγικές μηχανές σε άλλες εφαρμογές (έλεγχος ηλεκτρικών κινητηρίων συστημάτων) αλλά δεν έχει εφαρμοσθεί ιδιαίτερα σε ανεμογεννήτριες. Είναι απλή κατασκευή, αξιόπιστη, χαμηλού κόστους και έχει τη δυνατότητα αντιστροφής της ροής ισχύος. Παρόλα αυτά δε δίνει λύση στα προβλήματα των υψηλών αρμονικών και των αιχμών των τάσεων της μηχανής λόγω των κυκλωμάτων μεταγωγής των θυρίστορ. Ο δε μετατροπέας εξόδου παρουσιάζει ανάλογα προβλήματα αρμονικών και απαιτεί μεγάλη κατανάλωση ισχύος, γεγονός το οποίο απαιτεί την εγκατάσταση φίλτρων αρμονικών και διόρθωσης του συντελεστού ισχύος. Αυτό καθιστά απαγορευτική την εγκατάσταση τέτοιων τοπολογιών σε ασθενή δίκτυα με μεγάλη διείδυση ισχύος. Καλύτερα αποτελέσματα έχουμε με τη χρήση

διπλών μετατροπέων πηγής ρεύματος PWM με ημιαγωγικά στοιχεία τύπου GTO, όπου έχουμε μείωση των αρμονικών των ρευμάτων και της ροπής της μηχανής, καθώς και έλεγχο της άεργου ισχύος. Αυτό παρουσιάζεται στο σχήμα 3.15.



Σχήμα 3.14 Σύστημα μετατροπέα πηγής ρεύματος.



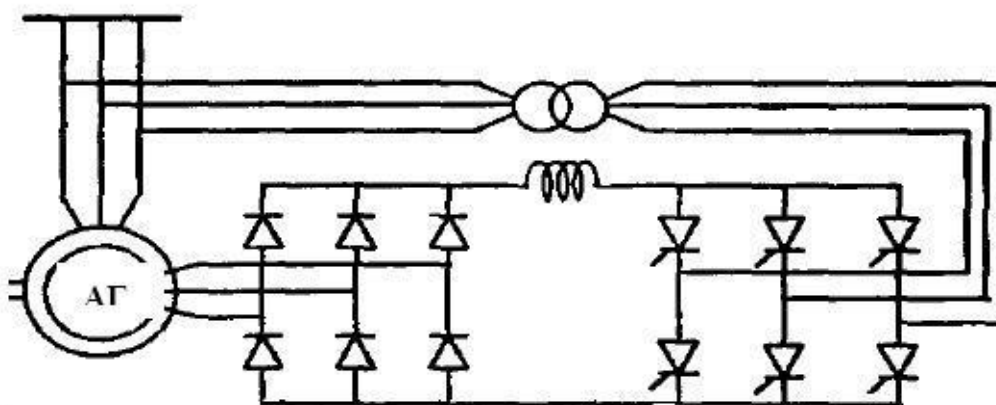
Σχήμα 3.15 Σύστημα με δύο μετατροπείς πηγής ρεύματος.

3.5.2 Ασύγχρονη γεννήτρια δακτυλιοφόρου δρομέα

Μία άλλη διάταξη που έχει εφαρμοσθεί σε ανεμογεννήτριες περιλαμβάνει επαγωγική μηχανή δακτυλιοφόρου δρομέα με σύστημα μετατροπέων συνδεδεμένων στα άκρα του. Ο μετατροπέας μπορεί να αποτελείται από ένα μη ελεγχόμενο ανορθωτή διόδων στο δρομέα και ένα αντιστροφέα στην έξοδο όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 3.16. Μέσω αυτού του κυκλώματος γίνεται ανάκτηση της ισχύος ολισθήσεως και επιστροφή της στο δίκτυο. Η χρησιμοποίηση βέβαια τέτοιου είδους γεννήτριας έχει το μειονέκτημα του υψηλού κόστους με μεγαλύτερες απαιτήσεις ως προς τη συντήρηση και τη λειτουργία της. Η απαίτηση όμως για χρήση απλών τοπολογιών μετατροπέων μικρότερης ισχύος έχει το πλεονέκτημα της απλής και φθηνής λύσης, που δε δίνει όμως λύση στα προβλήματα των αρμονικών στο δίκτυο και στην υψηλή κατανάλωση άεργου ισχύος, φαινόμενα τα οποία είναι μειωμένα σε σχέση με τη χρήση ενός ανάλογου μετατροπέα στη μεριά του στάτη. Προφανώς η

λειτουργία αυτής της γεννήτριας είναι δυνατή μόνο σε υπερσύγχρονες στροφές. Είναι δυνατόν, όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις να χρησιμοποιήσουμε ελεγχόμενο μετατροπέα με θυρίστορ, ή μετατροπέα πηγής ρεύματος ή και σύστημα διπλών μετατροπέων PWM. Σ' αυτή την περίπτωση μπορεί η γεννήτρια να λειτουργήσει σε οποιαδήποτε ταχύτητα με κατάλληλη διαστασιολόγηση του μετατροπέα και παρουσιάζει άριστα χαρακτηριστικά ελέγχου και ρύθμιση του συντελεστή φορτίου με ταυτόχρονη μείωση των αρμονικών.

Γίνεται επίσης να χρησιμοποιηθεί κυκλομετατροπέα, για τη διασύνδεση μεταξύ του δρομέα και του δικτύου, ο οποίος δίνει τη δυνατότητα μεταφοράς της ισχύος και προς τις δύο διευθύνσεις. Η περιοχή λειτουργίας της γεννήτριας επεκτείνεται και σε στροφές κάτω από τη σύγχρονη και είναι δυνατός ο έλεγχος της άεργου ισχύος εξόδου. Είναι απλή λύση για μεγάλες ανεμογεννήτριες και ιδιαίτερα αξιόπιστη, αλλά το κόστος του κυκλομετατροπέα είναι ακόμα υψηλό.



Σχήμα 3.16 Σύστημα με Α.Γ με δακτυλιοφόρου δρομέα με μετατροπέα για ανάκτηση της ισχύος ολίσθησης.

Υπάρχουν επίσης εφαρμογές, με ασύγχρονη γεννήτρια δακτυλιοφόρου δρομέα όπου μέσω των εξωτερικών κυκλωμάτων του δρομέα επιτυγχάνεται περιορισμένη μεταβολή των στροφών, της τάξεως της 10%, ώστε να περιοριστούν τα δυναμικά προβλήματα που εμφανίζονται εξαιτίας του μηχανικού ελέγχου της γωνίας κλίσης των πτερυγίων και να εξομαλυνθούν οι ροπές και η ισχύς εξόδου, χωρίς όμως να είναι δυνατή η πλήρης ανάκτηση της ισχύος του δρομέα.

3.6 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.

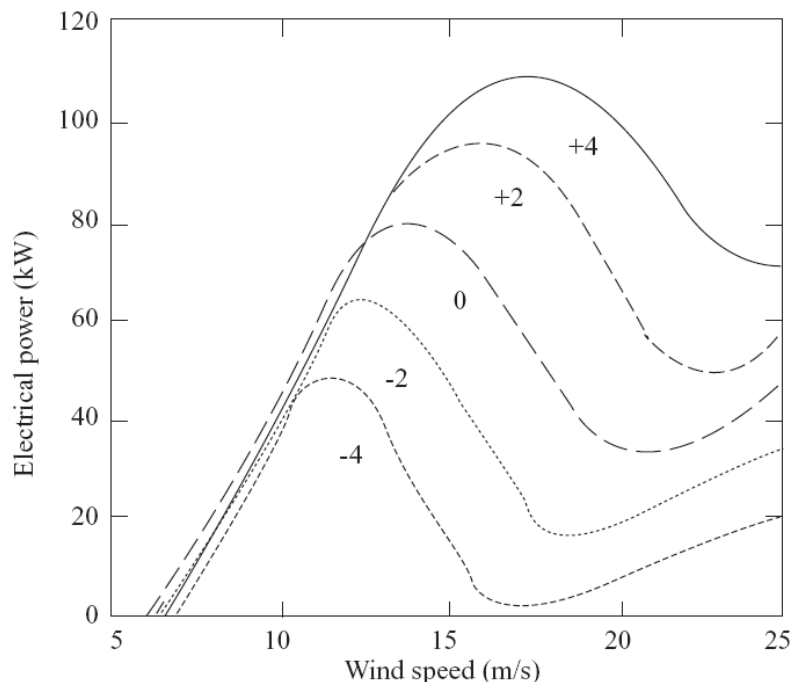
Σε ανεμογεννήτριες που εφαρμόζεται τέτοιου είδους έλεγχος, δηλαδή στις ανεμογεννήτριες με ελεγχόμενο βήμα έλικα, ο ηλεκτρονικός ελεγκτής ελέγχει την έξοδό τους αρκετές φορές το δευτερόλεπτο. Όταν η έξοδος γίνει αρκετά μεγάλη, στέλνει εντολή στο μηχανισμό περιστροφής του πτερυγίου ο οποίος αμέσως στρέφει 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) β . 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 3.17.

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 3.12 . 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 3.17 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 μοίρες 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 ταιριάζει ένας κατάλληλος ωθητής στο εξωτερικό τμήμα του πτερυγίου, η επίτευξη της συντήρησης είναι επίσης δύσκολη.

3.7 Είδη αιολικών πάρκων

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).

I) Χερσαία Αιολικά Πάρκα (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.

II) Αιολικά Πάρκα κοντά στην ακτή

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.



Σχήμα 3.18. Αιολικό πάρκο στο όρος Παναχαϊκό Αχαΐας.

III) Παράκτια Αιολικά Πάρκα (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. Γενικά έχουν μεγαλύτερο κόστος εγκατάστασης και συντήρησης, οι πύργοι είναι ψηλότεροι των χερσαίων.

Η μεταφορά της ενέργειας γίνεται με υποθαλάσσιο καλώδια, σε περιπτώσεις μεγάλων αποστάσεων από την ακτή χρησιμοποιείται μεταφορά με συνεχές ρεύμα υψηλής τάσης (HVDC) για ελαχιστοποίηση των απωλειών κατά την μεταφορά. Παρακάτω φαίνεται ένα θαλάσσιο αιολικό πάρκο.



Σχήμα 3.19. Παράκτιο Αιολικό Πάρκο (offshore).

3.8 Λειτουργία αιολικών πάρκων

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.

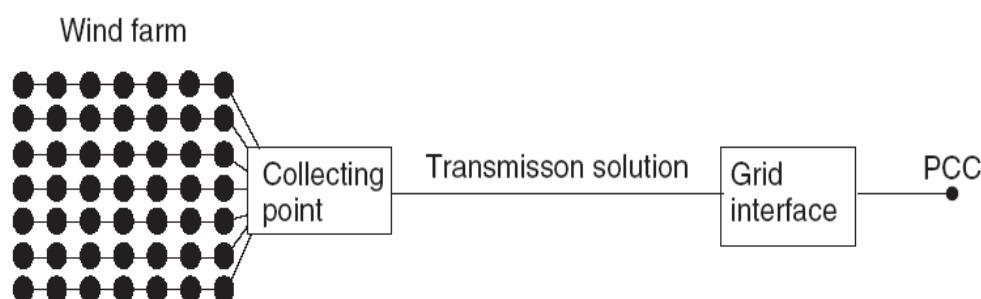
Για τη μεταφορά στην ακτή, χρησιμοποιούνται είτε HVAC (υψηλής τάσης εναλλασσόμενο ρεύμα) είτε HVDC (υψηλής τάσης συνεχές ρεύμα) συνδέσεις. Για HVDC υπάρχουν δυο τεχνικές : ο “LCC” (line commutated converter) βασισμένος στην HVDC τεχνολογία και ο “VSC” (voltage source converter) βασισμένος στο HVDC. Όλα 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 3.20.



Σχήμα 3.20 Παρουσιάζεται σχηματικά ένα offshore αιολικό πάρκο. Το σημείο συλλογής μπορεί να είναι ένας offshore υποσταθμός. (PCC = point of common coupling).

3.9 Τεχνολογία μετατροπών πηγής τάσης (VSC) και ρύθμισης του πλάτους των παλμών (PWM).

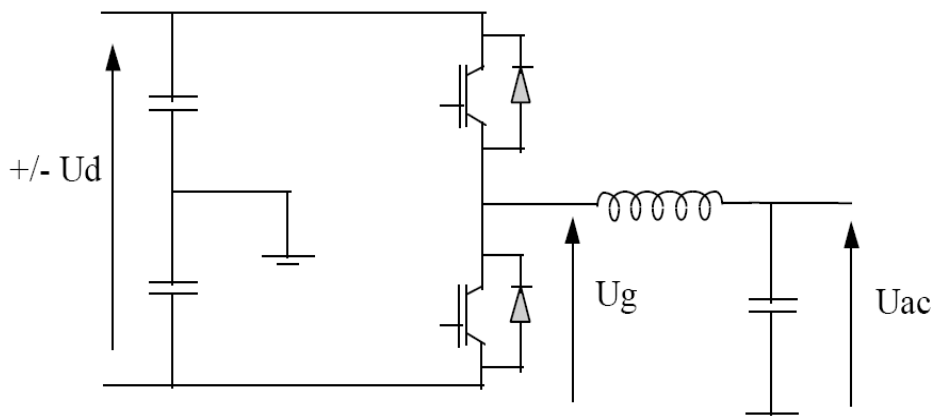
Οι Μετατροπείς Πηγής Τάσης (VSC) χρησιμοποιήθηκαν για πρώτη φορά για μεταφορά υψηλής τάσης συνεχούς ρεύματος (HVDC) σε ένα πραγματικό δίκτυο. Η πείρα από το σχεδιασμό και την υλοποίηση της μεταφοράς δείχνει ότι η τεχνολογία έχει φτάσει πλέον στο επίπεδο όπου είναι δυνατό να φτιαχτούν μετατροπείς υψηλής τάσης οι οποίοι να χρησιμοποιούν διπολικά τρανζίστορ μονωμένης πύλης (IGBTs). Η λειτουργία τους έχει αναπτυχθεί στο βαθμό που οι δυνατότητες που συζητιόνταν για πολλά χρόνια γύρω από τους VSC για HVDC να είναι πραγματικότητα σήμερα. Περιλαμβάνουν ανεξάρτητο έλεγχο της ενεργού και της άεργου ισχύος, αντιθετική λειτουργία σε απομονωμένα δίκτυα εναλλασσόμενου ρεύματος που δεν παράγουν ενέργεια από μόνα τους, πολύ μικρή ανάγκη φίλτρων και καθόλου ανάγκη μετασχηματιστών για τη διαδικασία μετατροπής.

Τα HVDC αναπτύχθηκαν αρχικά από τεχνολογίες που χρησιμοποιούνταν σε βιομηχανικά συστήματα οδήγησης. Η τεχνολογία μετατροπέα με θυρίστορς (PCC) που μέχρι σήμερα χρησιμοποιείται για τα HVDC, αντικαθίσταται σταδιακά από την τεχνολογία VSC. Η βασική διαφορά ανάμεσα σε αυτές τις δύο τεχνολογίες, είναι πως οι VSC περιέχουν ημιαγωγικά στοιχεία υψηλής διακοπτικής συχνότητας (IGBTs), τα οποία μπορούν να ανάψουν και να σβήσουν πολλές φορές μέσα σε μια περίοδο. Αντίθετα, τα ημιαγωγικά στοιχεία του PCC ανάβουν, αλλά μπορούν να σβήσουν μόνο όταν μηδενιστεί το ρεύμα που περνά μέσα από αυτά.

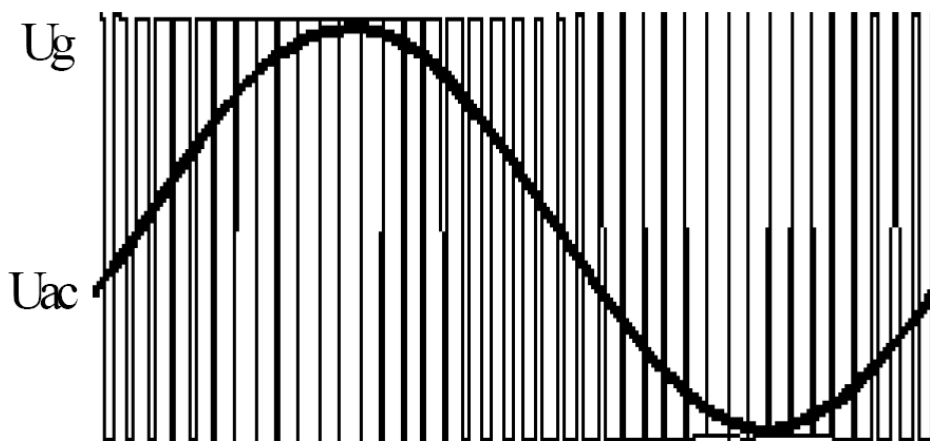
Δεδομένου ότι σε ένα VSC υπάρχει η δυνατότητα σβέσης, δεν υπάρχει η ανάγκη δικτύου που να ανταλλάσσει ισχύ σε αντίθετη κατεύθυνση. Η χρήση της VSC τεχνολογίας στα HVDC θα ήταν πλεονέκτημα ειδικά για την τροφοδοσία δικτύων παθητικού φορτίου, τα οποία είναι περιοχές όπου δεν υπάρχουν περιστροφικές μηχανές ή που δεν υπάρχει αρκετή ισχύς στις περιστροφικές μηχανές (χαμηλή ισχύς βραχυκύκλωσης).

Το γεγονός ότι στην τεχνολογία PCC τα διακοπτικά στοιχεία είναι χαμηλής διακοπτικής συχνότητας, αυξάνει την έγχυση αρμονικών στο ηλεκτρικό δίκτυο. Για να μειωθούν οι παραγόμενες αρμονικές, οι μετατροπείς πρέπει να διαιρεθούν σε αρκετούς μικρότερους που λειτουργούν με μετατόπιση φάσης. Σε αυτή την περίπτωση απαιτούνται σχετικά σύνθετοι μετασχηματιστές για τη σύνδεση των μετατροπέων.

Στους VSC, με την εμφάνιση των παραγόντων συχνότητας υψηλής μεταβολής, όπως οι IGBTs, γίνεται επιθυμητή η χρήση της τεχνολογίας ρύθμισης του πλάτους των παλμών (PWM). Σε έναν VSC μετατροπέα, η εναλλασσόμενη τάση δημιουργείται από την πολύ γρήγορη μετάβαση ανάμεσα σε 2 ρυθμισμένες τάσεις. Αυτό γίνεται αναβοσβήνοντας τους ημιαγωγούς πολλές φορές μέσα σε μια περίοδο. Η επιθυμητή τάση με τη θεμελιώδη συχνότητα (η βασική αρμονική) δημιουργείται μέσω ενός χαμηλοπερατού φιλτραρίσματος του υψηλής συχνότητας παλμού της ρυθμισμένης τάσης. Έτσι αποφεύγονται τα μεγάλα φίλτρα.



Σχήμα 3.21 Μια φάση ενός VSC μετατροπέα που χρησιμοποιεί PWM.



Σχήμα 3.22 Πρότυπο PWM και τάση θεμελιώδους συχνότητας σε έναν VSC.

Με το PWM είναι δυνατή η δημιουργία κάθε φασικής γωνίας ή πλάτους (ως ένα γενικό όριο) μέσω της μεταβολής του προτύπου του PWM (του σήματος ελέγχου της μεθόδου), κάτι που μπορεί να γίνει σχεδόν ακαριαία. Το PWM προσφέρει τη δυνατότητα να ελεγχθούν η ενεργός και η άεργος ισχύς ανεξάρτητα η μια από την άλλη.

Αυτό καθιστά το PWM VSC έναν σχεδόν ιδανικό παράγοντα στο δίκτυο μεταφοράς. Από τη σκοπιά του συστήματος, ένας VSC που παλμοδοτείται με τη μέθοδο της διαμόρφωσης του πλάτους των παλμών, λειτουργεί σαν κινητήρας ή σα γεννήτρια χωρίς μάζα, που μπορεί να ελέγξει την ενεργό και την άεργο ισχύ σχεδόν ακαριαία. Έτσι, η τεχνολογία των VSC μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να τροφοδοτήσει παθητικά δίκτυα, δηλαδή περιοχές στις οποίες δεν υπάρχει παραγωγή ή περιοχές με χαμηλή ισχύ βραχυκύκλωσης. Επιπλέον, δε συνεισφέρει στην ισχύ βραχυκύκλωσης δεδομένου ότι το a.c. ρεύμα μπορεί να ελεγχθεί.

3.10 Ηλεκτρική προστασία ανεμογεννητριών

Τα ηλεκτρικά δίκτυα λειτουργούσαν μέχρι πρόσφατα, κατά κανόνα, «ακτινικά». Δηλαδή οι πηγές ήταν συγκεντρωμένες σε ένα, και πάντως λίγα σημεία, και ένα ευρύ δίκτυο διανομής αναλάμβανε να φέρει την ηλεκτρική ισχύ στις καταναλώσεις. Η ηλεκτρική ισχύς «κυκλοφορούσε», δηλαδή, πάντα προς μια κατεύθυνση (αν εξαιρέσουμε περιπτώσεις σφαλμάτων). Η ακτινική λειτουργία επέτρεπε την εύκολη και απλή προστασία των εγκαταστάσεων.

Η σύνδεση όμως στο ηλεκτρικό δίκτυο τα τελευταία χρόνια ολοένα και μεγαλύτερου αριθμού ηλεκτροπαραγωγών σταθμών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, κυρίως αιολικών πάρκων, έχει μεταβάλλει την ακτινική λειτουργία του δικτύου. Η μεταβολή αυτή έχει κάνει πιο πολύπλοκο το θέμα των προστασιών. Οι επιπτώσεις προφανώς εξαρτώνται από το βαθμό διείσδυσης των σταθμών αυτών στο δίκτυο. Σε κάθε περίπτωση, όμως, πρέπει να ληφθούν υπόψη για την επιλογή των κατάλληλων προστασιών.

Η ενότητα αυτή δεν ασχολείται με όλο το εύρος των απαιτούμενων ηλεκτρικών προστασιών για την καλή και ασφαλή λειτουργία των δικτύων και ειδικότερα των ανεμογεννητριών. Άλλωστε κάτι τέτοιο θα ήταν αδύνατο από πλευράς διαθέσιμου χρόνου. Θα περιοριστεί στο αρκετά ενδιαφέρον και σημαντικό τμήμα των προστασιών από υπερεντάσεις.

Από την άποψη της επιλογής των υλικών και των εξαρτημάτων μιας ηλεκτρικής εγκατάστασης είναι σημαντική η γνώση των αναμενόμενων ρευμάτων βραχυκύκλωσης. Για λόγους προστασίας της ζωής είναι, επίσης, αναγκαία η γνώση των ρευμάτων βραχυκύκλωσης σε κάθε σημείο της εγκατάστασης.

Για τους παραπάνω λόγους, και για τη σωστή επιλογή και ρύθμιση των προστατευτικών διατάξεων, πρέπει να είναι γνωστές δύο τιμές των ρευμάτων βραχυκύκλωσης σε κάθε σημείο σφάλματος:

- ❖ Το μέγιστο ρεύμα βραχυκύκλωσης, το οποίο είναι αναγκαίο να υπολογισθεί προκειμένου να:
 1. Επιλεγεί η ικανότητα διακοπής των διακοπτικών και ασφαλιστικών στοιχείων.
 2. Επιλεγεί η μηχανική αντοχή του εξοπλισμού, ο οποίος καταπονείται λόγω των ηλεκτροδυναμικών φαινομένων που προκαλούνται από τα ισχυρά ρεύματα του βραχυκυκλώματος.

- ❖ Το ελάχιστο ρεύμα βραχυκύκλωσης, το οποίο είναι απαραίτητο να εκτιμηθεί προκειμένου να:

1. Επιλεγούν ασφαλιστικά στοιχεία με την επιθυμητή συμπεριφορά (κατάλληλες καμπύλες ρεύματος σε ασφάλειες, αυτόματους διακόπτες κ.λ.π.).
2. Προστατευθεί η ζωή, σε σχέση και με το τύπο του ηλεκτρικού δικτύου (δίκτυα TN ή TI κ.λ.π.).

Πρέπει να επισημανθεί ότι, σε κάθε περίπτωση, τα ασφαλιστικά στοιχεία πρέπει να είναι σε θέση να εκκαθαρίσουν το σφάλμα, είτε το ρεύμα σφάλματος είναι μεγάλο είτε μικρό.

3.10.1 Οι κύριοι τύποι βραχυκυκλωμάτων και οι επιπτώσεις τους

Υπάρχουν διάφοροι τύποι βραχυκυκλωμάτων τα οποία μπορούν να συμβούν στα ηλεκτρικά δίκτυα. Τα βασικά τους χαρακτηριστικά είναι:

- ❖ Η διάρκεια (μεταβατικά ή μόνιμης κατάστασης).
- ❖ Η προέλευση:
 1. Μηχανική αιτία (σπάσιμο αγωγών, τυχαία ηλεκτρική επαφή μεταξύ στοιχείων υπό τάση κ.λ.π.).
 2. Από υπερτάσεις χειρισμών ή ατμοσφαιρικές υπερτάσεις (κεραυνοπτώσεις).
 3. Υποβάθμιση και αστοχία της μόνωσης λόγω υπερθέρμανσης, υγρασίας ή διαβρωτικού περιβάλλοντος.

Τα βραχυκυκλώματα μπορούν να είναι:

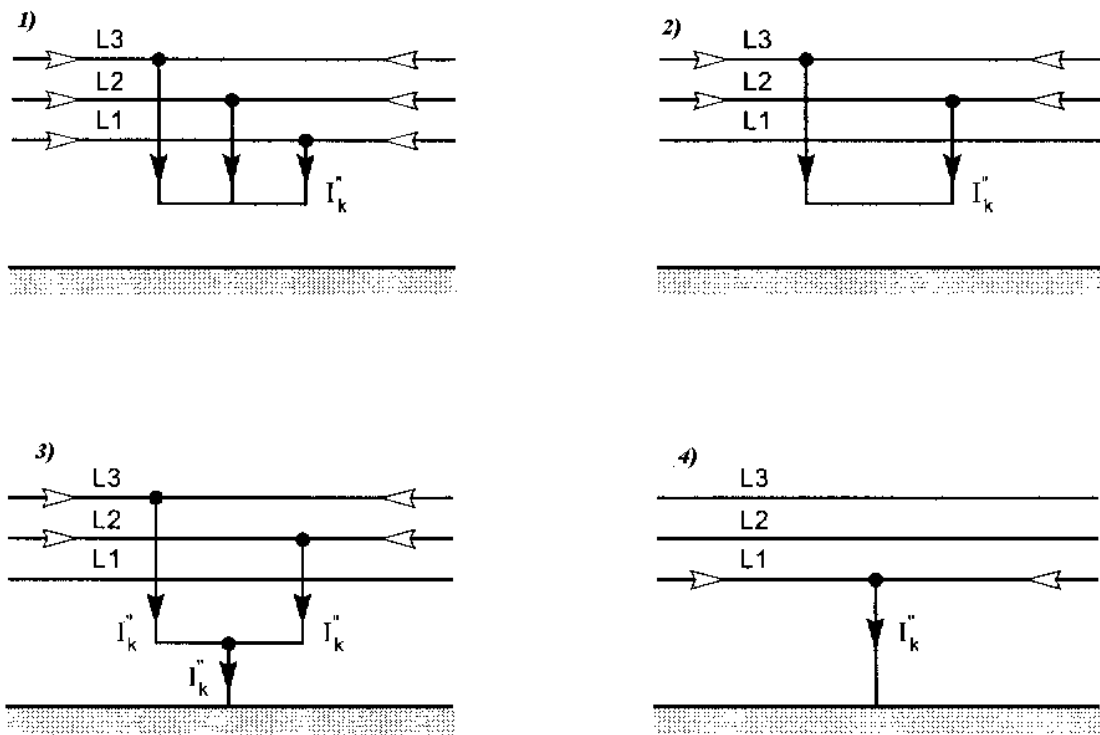
- ❖ Μονοφασικά (μεταξύ φάσης και γης) τα οποία αποτελούν περίπου το 80% των σφαλμάτων.
- ❖ Διφασικά (μεταξύ φάσεων, με ή χωρίς επαφή γης) τα οποία αποτελούν περίπου το 15% των σφαλμάτων.
- ❖ Τριφασικά τα οποία αποτελούν περίπου το 5% των σφαλμάτων.

Αυτοί οι τρεις τύποι σφαλμάτων παρουσιάζονται ενδεικτικά στο σχήμα 3.23.

Οι επιπτώσεις των βραχυκυκλωμάτων ποικίλουν και εξαρτιόνται από τον τύπο, τη θέση και τη διάρκεια του βραχυκυκλώματος. Στη γενική περίπτωση μπορεί να συμβούν τα παρακάτω:

- ❖ Στη θέση του βραχυκυκλώματος να προκληθεί ηλεκτρικό τόξο το οποίο είναι δυνατό να προκαλέσει καταστροφή των μονώσεων, λιώσιμο των αγωγών, πυρκαγιά ή ατυχήματα (πιθανόν και θανατηφόρα).

- ❖ Στο ηλεκτρικό κύκλωμα στο οποίο εκδηλώθηκε το σφάλμα, τα ισχυρά ρεύματα προκαλούν μηχανικές καταπονήσεις στον εξοπλισμό με αποτέλεσμα την καταστροφή των ηλεκτρικών ζυγών, την αποσύνδεση των καλωδίων και την υπερθέρμανση του ηλεκτρικού εξοπλισμού λόγω των αυξημένων απωλειών Joule. Το τελευταίο μπορεί να προκαλέσει καταστροφή των μονώσεων.
- ❖ Στα υπόλοιπα κυκλώματα του δικτύου μπορεί να προκληθούν διαταραχές και παράσιτα σε κυκλώματα τηλεπικοινωνιών και ελέγχου, βυθίσεις ή διακοπές της τάσης (μέχρι να γίνει η εκκαθάριση του σφάλματος) διακοπή ηλεκτροδότησης (λόγω της λειτουργίας των ασφαλιστικών διατάξεων) και, στις χειρότερες περιπτώσεις, αστάθεια στο συνολικό ηλεκτρικό σύστημα με ενδεχόμενη συνολική κατάρρευση (Black out).

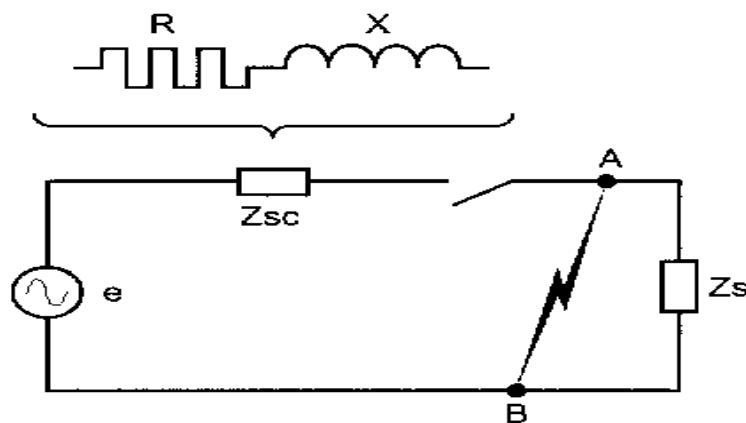


Σχήμα 3.23 Διάφοροι τύποι βραχυκυκλωμάτων: 1) τριφασικό, 2) διφασικό χωρίς επαφή γης, 3) διφασικό με επαφή γης και 4) μονοφασικό με γη.

3.10.2 Βασικοί υπολογισμοί των ρευμάτων βραχυκύκλωσης

Η απλούστερη περίπτωση ηλεκτρικού δικτύου μπορεί να παρασταθεί από μια σταθερή πηγή εναλλασσόμενης τάσης, ένα διακόπτη και μια σύνθετη αντίσταση η οποία παριστάνει όλες τις σύνθετες αντιστάσεις προς τα ανάντη του διακόπτη (προς την πλευρά της πηγής ισχύος). Το δίκτυο τροφοδοτεί ένα φορτίο το οποίο παριστάνεται με μια σύνθετη αντίσταση, όπως φαίνεται σχήμα 3.24.

Όταν συμβεί ένα σφάλμα μεταξύ των σημείων A και B, ένα αρκετά μεγάλο ρεύμα κυκλοφορεί στο κύκλωμα. Το ρεύμα αυτό, I_{SC} , περιορίζεται μόνο από τη σύνθετη αντίσταση του δικτύου Z_{SC} . Το ρεύμα αυτό εξαρτάται, εκτός των άλλων, από την επαγωγική και ωμική αντίσταση του δικτύου. Στην περίπτωση των ηλεκτρικών δικτύων είναι συνηθισμένη πρακτική να διακρίνονται τα βραχυκυκλώματα σε σχέση με την απόσταση της θέσης του σφάλματος από την γεννήτρια. Αυτή η απόσταση δεν έχει αναγκαστικά την έννοια του φυσικού μήκους απλά σημαίνει ότι η σύνθετη αντίσταση της γεννήτριας είναι μικρότερη ή μεγαλύτερη από την συνολική σύνθετη αντίσταση του δικτύου μεταξύ της γεννήτριας και του σημείου του σφάλματος.



Σχήμα 3.24 Απλοποιημένη αναπαράσταση δικτύου για τον υπολογισμό των βραχυκυκλωμάτων.

1) Σφάλμα μακριά από την γεννήτρια

Αυτή είναι η πιο συχνή περίπτωση σφαλμάτων στα ηλεκτρικά δίκτυα. Το μεταβατικό ρεύμα βραχυκυκλώματος που αναπτύσσεται στην περίπτωση αυτή, για τάση που δίνεται από την σχέση $e = E \sin(\omega t + \phi)$, είναι το άθροισμα δύο συνιστωσών :

$$i = i_{ac} + i_{dc}.$$

Η πρώτη συνιστώσα (i_{ac}) είναι ένα εναλλασσόμενο ρεύμα που δίνεται από τη σχέση:

$$i_{ac} = I \sin(\omega t + \phi), \text{ όπου } I = \frac{E}{Z_{sc}}$$

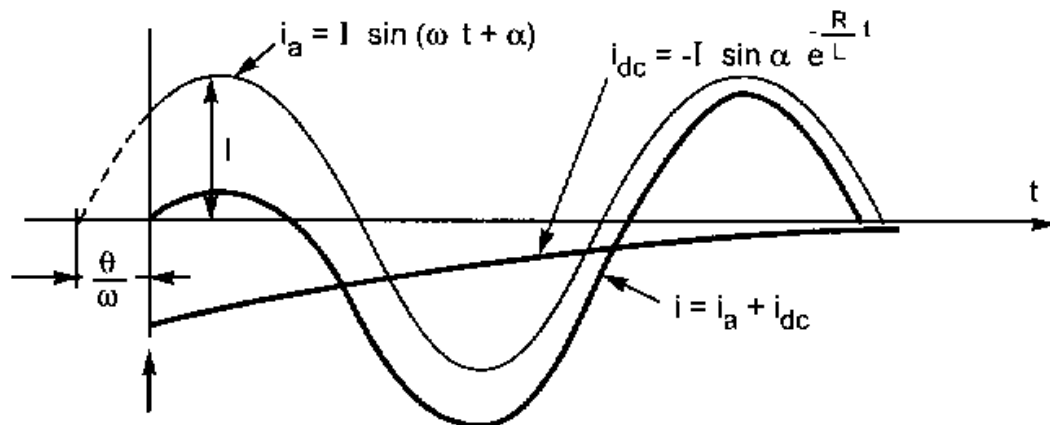
είναι το μέγιστο ρεύμα και ϕ είναι η διαφορά φάσης μεταξύ της χρονικής στιγμής εκδήλωσης του σφάλματος και του μηδενισμού της τάσης.

Ο δεύτερος όρος ρεύματος (i_{dc}) είναι μια απεριοδική φθίνουσα συνάρτηση του χρόνου:

$$i_{dc} = -I \sin \phi e^{-\frac{R}{L} t}.$$

Η αρχική τιμή του εξαρτάται από το χρόνο εκδήλωσης του σφάλματος (ϕ). Ο ρυθμός μείωσης του ρεύματος αυτού είναι ανάλογος του λόγου $\frac{R}{L}$.

Στο σχήμα 3.25 φαίνεται η γραφική αναπαράσταση του ρεύματος σφάλματος για την περίπτωση σφάλματος μακριά από την πηγή.



Σχήμα 3.25 Ρεύματα βραχυκυκλώματος για σφάλματα μακριά από τη γεννήτρια.

Στην περίπτωση των σφαλμάτων είναι πολύ σημαντικό το μέγιστο ρεύμα (i_p) που αναμένεται να προκύψει. Με το ρεύμα αυτό υπολογίζεται η διακοπτική ικανότητα των στοιχείων ελέγχου του κυκλώματος καθώς και η μηχανική αντοχή του εξοπλισμού λόγω των ηλεκτρομαγνητικών δυνάμεων που αναπτύσσονται. Η τιμή του ρεύματος αυτού μπορεί να προκύψει από την τιμή του ρεύματος συμμετρικού βραχυκυκλώματος I_{ac} και τη χρήση της παρακάτω σχέσης:

$$i_p = K I_{ac} \sqrt{2}.$$

Ο συντελεστής K λαμβάνεται από την καμπύλη του σχήματος 3.25 σαν συνάρτηση του λόγου R/X .

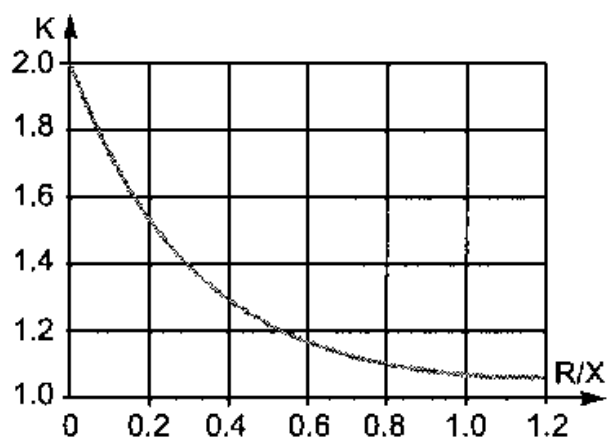
2) Σφάλματα κοντά στην γεννήτρια

Όταν το σφάλμα συμβαίνει κοντά στις γεννήτρια υπεισέρχεται στο φαινόμενο και η μεταβολή της σύνθετης αντίστασης της γεννήτρια λόγω του σφάλματος. Το μεταβατικό φαινόμενο είναι πιο σύνθετο και για λόγους απλότητας διακρίνονται τρία χαρακτηριστικά χρονικά διαστήματα:

- ❖ Υπομεταβατικό (τα πρώτα περίπου 20 ms του σφάλματος).
- ❖ Μεταβατικό (μέχρι 0,5 sec).
- ❖ Μόνιμη κατάσταση.

Στα παραπάνω χαρακτηριστικά διαστήματα αντιστοιχεί και αντίστοιχη αντίδραση της στρεφόμενης μηχανής. Το συνολικό ρεύμα σφάλματος προκύπτει σαν το άθροισμα των επιμέρους ρευμάτων. Στο προηγούμενο άθροισμα πρέπει να συνυπολογισθεί και η φθίνουσα συνεχής συνιστώσα, όπως στο σχήμα 3.26.

Ο υπολογισμός των ρευμάτων βραχυκύκλωσης, για σφάλματα κοντά στις γεννήτριες, είναι πιο πολύπλοκος και απαιτεί, σε σύνθετες περιπτώσεις, χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή.



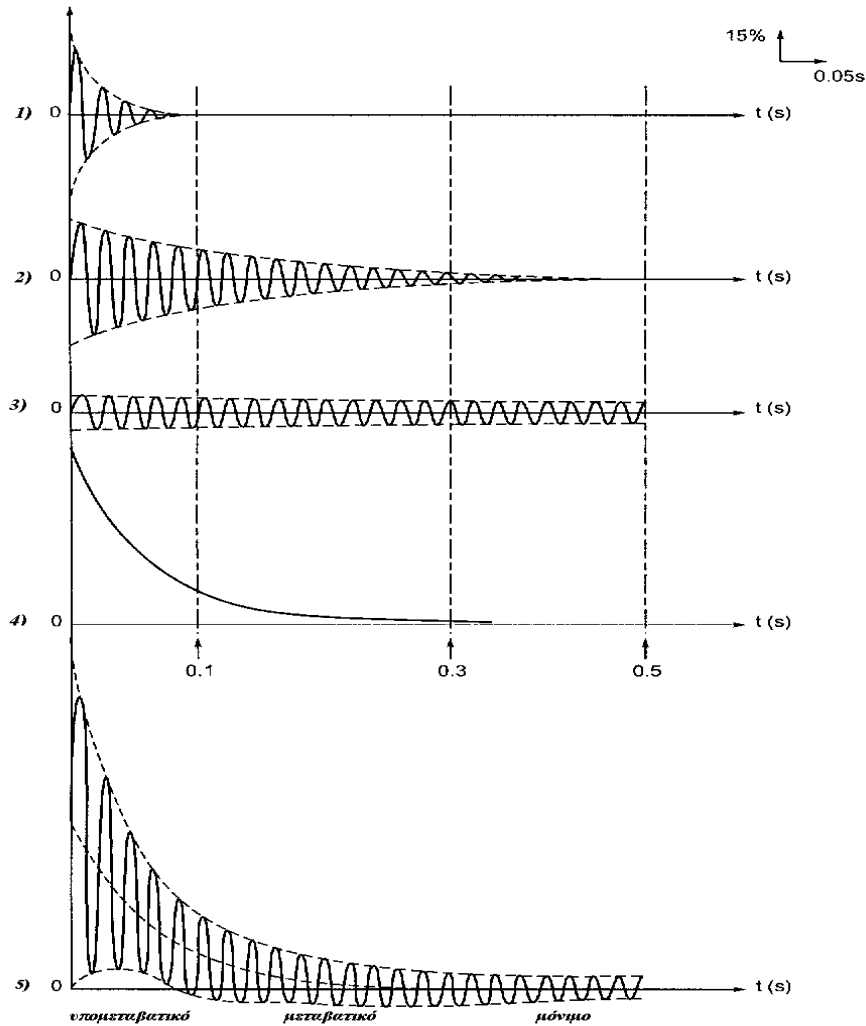
Σχήμα 3.26 Μεταβολή του συντελεστή K σε σχέση με το λόγο R/X .

3.10.3 Απλοποιημένη μέθοδος υπολογισμού ρευμάτων βραχυκύκλωσης σε διασυνδεδεμένα αιολικά πάρκα

Για την απλοποίηση των υπολογισμών των ρευμάτων σφάλματος είναι αναγκαίο να γίνουν κάποιες παραδοχές. Οι παραδοχές αυτές ορίζουν και το πλαίσιο στο οποίο είναι επιτρεπτή η μεθοδολογία που αναπτύσσεται στη συνέχεια. Οι υπολογισμοί που γίνονται οδηγούν σε προσεγγίσεις οι οποίες είναι από την ασφαλή πλευρά.

Οι προϋποθέσεις εφαρμογής της απλοποιημένης μεθόδου είναι:

- ❖ Το ηλεκτρικό δίκτυο είναι ακτινικό οποιασδήποτε ονομαστικής τάσης η οποία δεν ξεπερνά τα 230 kV.
- ❖ Το τριφασικό ρεύμα βραχυκύκλωσης, κατά το χρόνο σφάλματος, θεωρούμε ότι συμβαίνει ταυτόχρονα και στις τρεις φάσεις.
- ❖ Κατά τη διάρκεια του σφάλματος δεν αλλάζει ο αριθμός των φάσεων που συμμετέχουν σε αυτό (π.χ. το μονοφασικό σφάλμα προς γη παραμένει μονοφασικό προς γη).
- ❖ Κατά τη διάρκεια εξέλιξης του σφάλματος οι τάσεις των πηγών και οι σύνθετες αντιστάσεις του δικτύου δεν αλλάζουν σημαντικά.
- ❖ Οι ρυθμιστές τάσεις των μετασχηματιστών δεν λαμβάνονται υπόψη.
- ❖ Οι αντιστάσεις τόξου δεν λαμβάνονται υπόψη.
- ❖ Τα ρεύματα φορτίου θεωρούνται αμελητέα.
- ❖ Οι αντιστάσεις και αντιδράσεις μηδενικής ακολουθίας λαμβάνονται υπόψη.



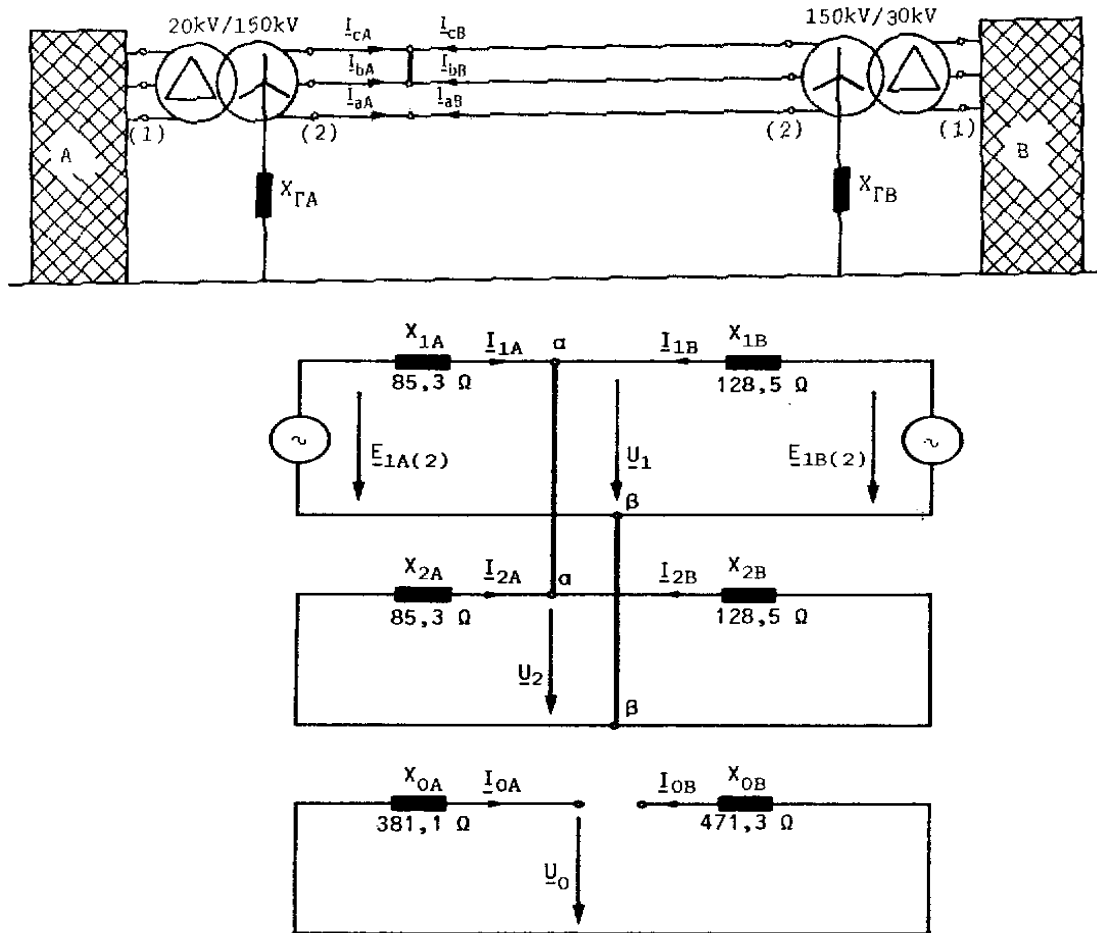
Σχήμα 3.27 Συνιστώσες του ρεύματος 5) σε τριφασικό βραχυκύκλωμα κοντά στη γεννήτρια : 1) υπομεταβατική συνιστώσα, 2) μεταβατική συνιστώσα, 3) μόνιμο ρεύμα σφάλματος, 4) συνεχής συνιστώσα.

Τριφασικό βραχυκύκλωμα.

Το τριφασικό ρεύμα βραχυκύκλωσης δίνεται από τη σχέση:

$$I_{sc3} = \frac{U}{\sqrt{3} Z_{sc}},$$

όπου U είναι η ονομαστική πολική τάση του δικτύου και Z_{sc} η συνολική ισοδύναμη σύνθετη αντίσταση του δικτύου, όπως αυτή προκύπτει από το σημείο του σφάλματος.



Σχήμα 3.28 Υπολογισμός ρευμάτων βραχυκύκλωσης με τη μέθοδο των συμμετρικών συνιστωσών.

Διφασικό βραχυκύκλωμα χωρίς επαφή γης.

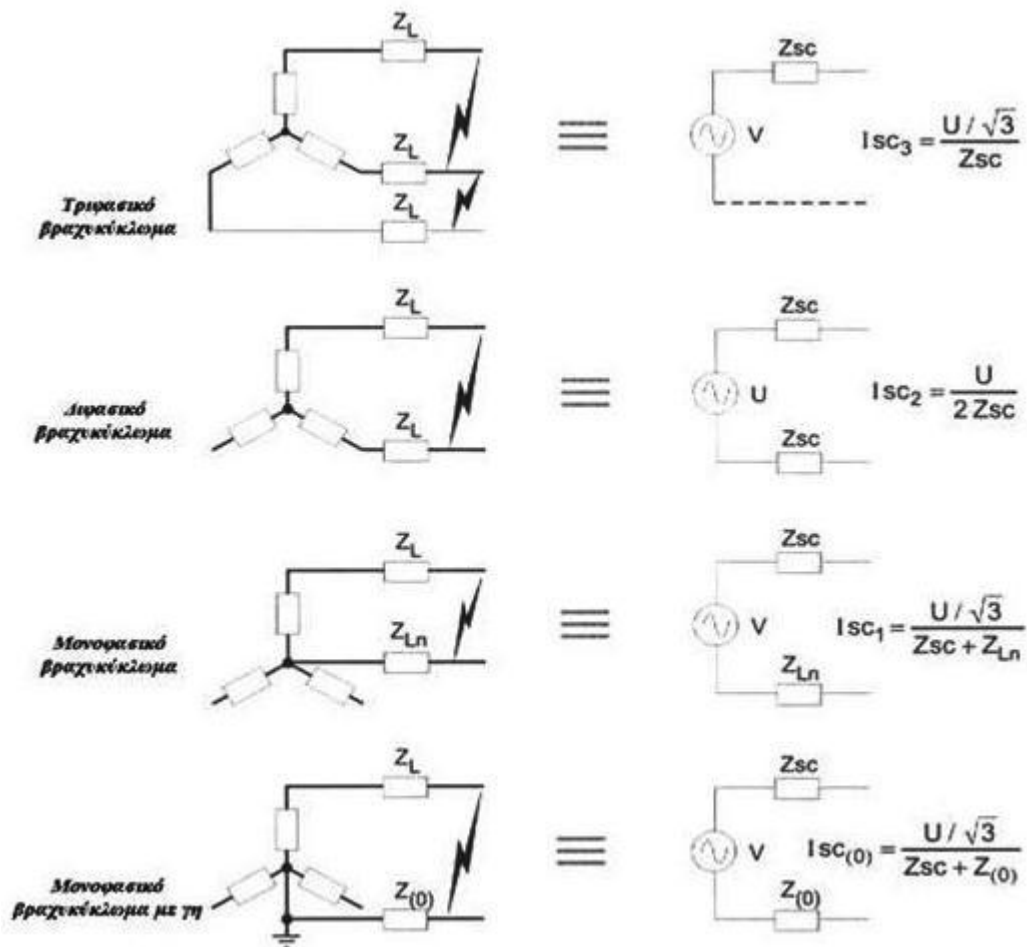
Στην περίπτωση αυτή το ρεύμα βραχυκύκλωσης είναι μικρότερο από το τριφασικό ρεύμα βραχυκύκλωσης και δίνεται από τη σχέση:

$$I_{sc2} = \frac{U}{2Z_{sc}} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_{sc3} \approx 0,86 I_{sc3} .$$

Μονοφασικό βραχυκύκλωμα χωρίς επαφή γης.

Αυτό είναι σφάλμα μεταξύ φάσης και ουδετέρου. Το ρεύμα βραχυκύκλωσης δίνεται από τη σχέση:

$$I_{sc1} = \frac{U / \sqrt{3}}{Z_{sc} + Z_{Lr}} ,$$



Σχήμα 3.29. Διάφορες περιπτώσεις σφαλμάτων βραχυκύκλωσης δικτύων.

Όπου Z_{Ln} είναι η σύνθετη αντίσταση του ουδετέρου αγωγού.

Μονοφασικό βραχυκύκλωμα προς γη.

Αυτός ο τύπος βραχυκυκλώματος εμπλέκει την σύνθετη αντίσταση μηδενικής ακολουθίας του κυκλώματος. Στις περισσότερες περιπτώσεις το ρεύμα βραχυκύκλωσης είναι μικρότερο από το τριφασικό βραχυκύκλωμα. Σε ειδικές περιπτώσεις είναι αναγκαίο λεπτομερέστερος υπολογισμός.

Για την εφαρμογή της απλοποιημένης μεθόδου οι σύνθετες αντιστάσεις των στοιχείων του δικτύου λαμβάνονται ως εξής:

Σύνθετη αντίσταση του δικτύου

Συνήθως είναι γνωστή η ισχύς βραχυκύκλωσης, S_{sc} , του δικτύου, για την οποία ο παροχέας του δικτύου (η ΔΕΗ στην περίπτωσή μας) θέτει το πάνω όριο. Η ισοδύναμη σύνθετη αντίσταση του ανάντη δικτύου είναι:

$$Z_Q = \frac{U^2}{S_{sc}}.$$

Σύνθετη αντίσταση μετασχηματιστών.

Η αντίσταση των μετασχηματιστών υπολογίζεται από τη σχέση

$$Z_T = u_k \frac{U^2}{S_N},$$

όπου u_k είναι η τάση βραχυκύκλωσης του μετασχηματιστή και S_N η ονομαστική φαινομένη ισχύς του. Στη γενική περίπτωση η ωμική αντίσταση είναι αρκετά μικρότερη από την επαγωγική και μπορεί να παραληφθεί χωρίς μεγάλο σφάλμα στους υπολογισμούς. Αν θεωρηθεί αναγκαίος ο υπολογισμός της, ιδιαίτερα στα δίκτυα χαμηλής τάσης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η σχέση:

$$R_T = \frac{P_{Cu}}{3I_N^2},$$

όπου P_{Cu} είναι οι ονομαστικές απώλειες χαλκού του μετασχηματιστή και I_N το ονομαστικό του ρεύμα.

Σύνθετες αντιστάσεις διασυνδετικών γραμμών και καλωδίων.

Οι ωμικές αντιστάσεις των εναέριων γραμμών, των καλωδίων και των ζυγών λαμβάνονται από σχετικούς πίνακες για θερμοκρασία 20° C. Για τον υπολογισμό των ελάχιστων ρευμάτων βραχυκύκλωσης οι αντιστάσεις αυτές προσ αυξάνονται κατά 50%. Η επαγωγική αντίδραση ανά μονάδα μήκους καλωδίων, ζυγών κ.λ.π., αν δεν υπάρχουν πίνακες, μπορεί να υπολογισθεί από τη σχέση:

$$X_L = L\omega = \left(15,7 + 144,44 \log \left(\frac{d}{r} \right) \right) \left[\frac{m\Omega}{km} \right],$$

όπου r η ακτίνα του αγωγού (σε mm) και d η μέση απόσταση μεταξύ των αγωγών (σε mm). Στην πράξη, και για δίκτυα χαμηλής τάσης, η επαγωγική αντίδραση λαμβάνεται υπόψη για διατομές μεγαλύτερες από 150 mm^2 .

Η χωρητική αντίδραση των καλωδίων λαμβάνεται υπόψη, στην υψηλή τάση, μόνο στις περιπτώσεις σφαλμάτων ως προς γη.

Σύνθετη αντίσταση σύγχρονων μηχανών

Η σύνθετη αντίδραση του μηχανών συνήθως εκφράζεται σε ποσοστό στα εκατό ή σε «ανά μονάδα» μέγεθος. Επομένως η σύνθετη αντίδραση της σύγχρονης μηχανής δίνεται από τη σχέση

$$Z_s = \frac{x_s}{100} \frac{U^2}{S_N},$$

όπου S_N είναι η ονομαστική φαινόμενη ισχύς της μηχανής (VA).

Τυπικές τιμές της σύνθετης αντίδρασης των σύγχρονων μηχανών δίνονται από τον πίνακα 3.1 που ακολουθεί.

Τύπος μηχανής	Υπομεταβατική αντίδραση	Μεταβατική αντίδραση	Σύγχρονη αντίδραση
Πολύστροφες	10-20	15-25	150-230
Αργόστροφες	15-25	25-35	70-120

Πίνακας 3.1 Σύνθετη αντίδραση σύγχρονων μηχανών, σε x_s %.

Ο λόγος R/X στις σύγχρονες μηχανές είναι μικρός. Τυπικές τιμές για μηχανές μέσης τάσης είναι της τάξης 0,05 μέχρι 0,1 για μηχανές χαμηλής τάσης μεταξύ 0,1 και 0,2. Επομένως μπορούμε, με αποδεκτό σφάλμα, να θεωρήσουμε ότι η σύνθετη αντίσταση της μηχανής ταυτίζεται, αριθμητικά, με την επαγωγική αντίδρασή της.

3.10.4 Ο ρόλος των πυκνωτών.

Η συμπεριφορά των ασύγχρονων μηχανών κατά τη διάρκεια ενός βραχυκυκλώματος είναι παρόμοια με τις σύγχρονες μηχανές. Όταν μια ασύγχρονη μηχανή αποκοπεί από το δίκτυο μια τάση εμφανίζεται στους ακροδέκτες της. Η τάση

αυτή εξαφανίζεται σε διάστημα μερικών εκατοστών του δευτερολέπτου. Στην περίπτωση των ανεμογεννητριών με ασύγχρονη μηχανή, λόγω του παραμένουστος μαγνητισμού στο δρομέα, εμφανίζεται μια μικρή τάση. Κάτω από ειδικές συνθήκες, και ειδικά αν υπάρχουν συνδεδεμένα παράλληλα χωρητικά φορτία, είναι ενδεχόμενο να εκδηλωθεί ένα ενδιαφέρον φαινόμενο: η ασύγχρονη μηχανή να αυτοδιεγερθεί και να εμφανισθούν σημαντικά υψηλές τάσεις.

Όταν συμβαίνει ένα βραχυκύκλωμα στους ακροδέκτες της μηχανής, η μηχανή τροφοδοτεί το σημείο του σφάλματος με ρεύμα. Το ρεύμα αυτό είναι αμελητέο μετά την πάροδο χρόνου της τάξης των 0,02 δευτερολέπτων για μικρές μηχανές μέχρι 100 kW, 0,03 δευτερολέπτων για μηχανές μεγαλύτερες από 100 kW και μεταξύ 0,03 και 0,1 για πολύ μεγάλες μηχανές (1000 kW). Επομένως στην περίπτωση του βραχυκυκλώματος η ασύγχρονη μηχανή μπορεί να θεωρηθεί μια σύγχρονη μηχανή με αντίδραση (υποσύγχρονη μόνο) μεταξύ 20 και 25%.

Συστοιχίες πυκνωτών, που βρίσκονται κοντά στο σημείο του σφάλματος, επειδή εκφορτίζονται, αυξάνουν το ρεύμα βραχυκύκλωσης. Αυτή η μεταβατική συμπεριφορά των πυκνωτών, μολονότι αποσβένεται πολύ γρήγορα, είναι δυνατόν να αυξήσει το μέγιστο ρεύμα βραχυκύκλωσης (το ρεύμα κορυφής – peak current). Το μέγεθος του ρεύματος εκφόρτισης των πυκνωτών εξαρτάται από την τιμή της τάσης κατά το χρόνο εγκατάστασης του βραχυκυκλώματος. Μπορούμε να διακρίνουμε δύο ακραίες περιπτώσεις:

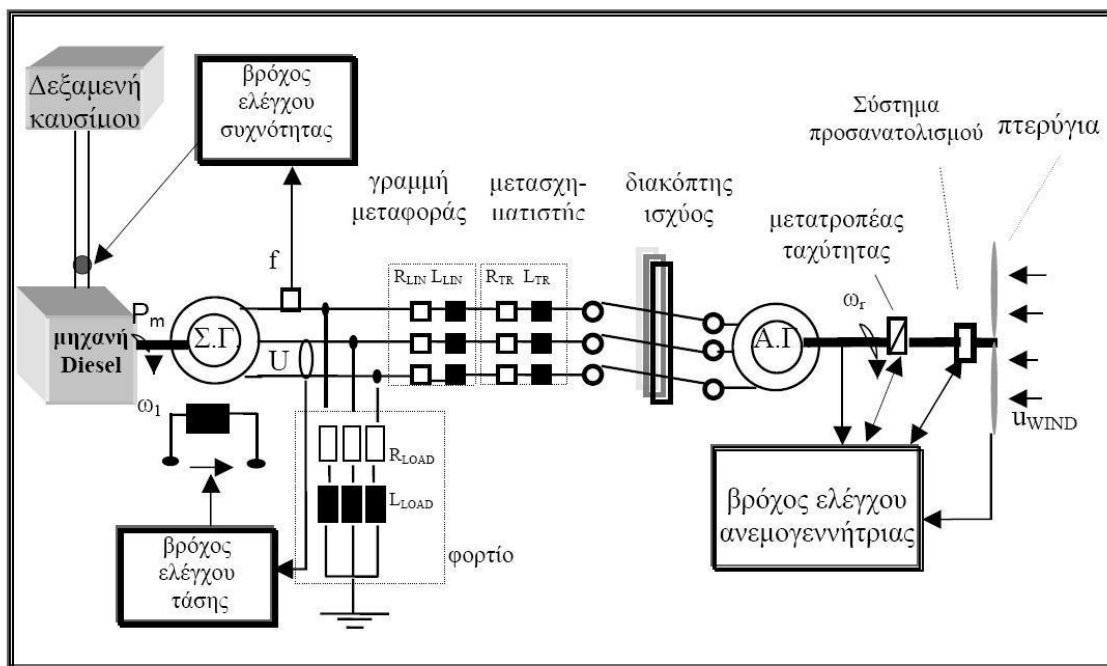
- ❖ Εάν το βραχυκύκλωμα συμβεί όταν η τάση μηδενίζεται, το ρεύμα εκφόρτισης των πυκνωτών είναι μηδέν. Στην περίπτωση όμως αυτή το ρεύμα βραχυκύκλωσης (από το υπόλοιπο δίκτυο) έχει τη μέγιστη αρχική τιμή.
- ❖ Αντίθετα, αν το βραχυκύκλωμα συμβεί στο μέγιστο της τάσης, το ρεύμα εκφόρτισης επιπροστίθεται στο ρεύμα βραχυκύκλωσης, το οποίο όμως, στην περίπτωση αυτή, έχει μικρή τιμή.

Επομένως, αν εξαιρεθούν περιπτώσεις αρκετά μεγάλων χωρητικών φορτίων, δεν λαμβάνεται υπόψη η ύπαρξη των πυκνωτών για τον υπολογισμό του μέγιστου ρεύματος βραχυκύκλωσης.

3.11 Προβλήματα από τη διασύνδεση ανεμογεννητριών σε ασθενή ενεργειακά συστήματα.

Σ' αυτή την ενότητα διερευνάται η δυναμική συμπεριφορά ενός ασθενούς δικτύου που περιέχει ανεμογεννήτρια. Το ασθενές δίκτυο εκτός από την ανεμογεννήτρια, η οποία αποτελείται από τον ανεμοκινητήρα, την ασύγχρονη

γεννήτρια και το απαιτούμενο σύστημα ελέγχου στροφών στηριζόμενο στην τεχνική ρύθμισης του λόγου του ακροπτερυγίου, περιλαμβάνει ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος (Diesel μηχανή, σύγχρονη γεννήτρια και τα κατάλληλα συστήματα αυτομάτου ελέγχου τάσεως και συχνότητας), φορτίο, γραμμή μικρού μήκους και μετασχηματιστή. Η ανάλυση της δυναμικής συμπεριφοράς του συστήματος στηρίζεται στη δημιουργία ενός γενικευμένου και αναλυτικού μαθηματικού μοντέλου, το οποίο βασίζεται όσον αφορά τις ηλεκτρικές μηχανές στη χρήση του μετασχηματισμού Park, απαραίτητου για τέτοιου είδους διερευνήσεις και για τον Α/Κ στις βασικές αεροδυναμικές εξισώσεις. Αναλυτικά η δομή φαίνεται στο σχήμα 3.30.



Σχήμα 3.30 Βασική δομή του ασθενούς ενεργειακού συστήματος.

Από την αναλυτική διερεύνηση του συνόλου των κυματομορφών των μεταβλητών του ασθενούς υβριδικού ενεργειακού συστήματος, διαπιστώθηκε ότι οι διαταράξεις αυτών κατά τη ζεύξη της Α/Γ εξαρτώνται κυρίως από την ονομαστική ισχύ των Α/Γ (συνεπώς από τα παραμετρικά στοιχεία αυτών) και δευτερευόντως από την παραγόμενη ηλεκτρική ισχύ από αυτές (συνεπώς από την ταχύτητα του ανέμου). Οι διαταράξεις των κρίσιμότερων μεταβλητών του συστήματος, όσον αφορά τους καταναλωτές (δηλ. της συχνότητας και της τάσης του δικτύου), δεν είναι αντίστοιχες με τη μεταβολή της ονομαστικής ισχύος των Α/Γ. Επίσης, παρατηρήθηκε ότι οι διαταράξεις των μεταβλητών του συστήματος κατά την απόζευξη Α/Γ είναι μικρότερες, ενώ η χρονική διάρκεια της απόσβεσής τους δεν παρουσιάζει ιδιαίτερη μεταβολή, συγκριτικά με τις αντίστοιχες διαταράξεις των μεταβλητών του συστήματος κατά τη ζεύξη των ανεμογεννητριών.

Σε χώρες όπως η Ελλάδα, που χαρακτηρίζεται από ικανοποιητικό αιολικό δυναμικό, τα οφέλη αυτά μπορούν να θεωρηθούν πολλαπλάσια σε σχέση με άλλες χώρες. Ένα επιπλέον σημαντικό πλεονέκτημα για τη χώρα μας είναι η χωροταξική κατανομή των νησιών, που δεν ευνοεί την αποκλειστική ύπαρξη ενός συστήματος παραγωγής, μεταφοράς και διανομής ενέργειας.

Γι' αυτό το λόγο σε μικρά και απομονωμένα νησιά, που συνήθως έχουν αξιοποιήσιμα αιολικά δυναμικά, θεωρείται πλεονεκτική η εγκατάσταση αιολικών πάρκων, που θα προσφέρουν συμπληρωματικά ηλεκτρική ενέργεια. Τα προβλήματα που δημιουργούνται σε τέτοιου είδους υβριδικά συστήματα, χωρίζονται σε δυο βασικές κατηγορίες, αυτές των:

- ❖ προβλημάτων που δημιουργούνται στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας
- ❖ προβλημάτων που δημιουργούνται σε διάφορες μεταβατικές καταστάσεις λειτουργίας.

Για την πρώτη περίπτωση, απαιτείται διερεύνηση εξαιτίας της διάχυσης ισχύος στο ασθενές ενεργειακό σύστημα, ενώ η συνολική ισχύς που θα παράγεται από όλες τις πηγές ενέργειας θα πρέπει να μείνει εξαρτώμενη από την ενεργειακή ζήτηση των καταναλωτών.

Επίσης θα πρέπει να επισημανθεί ότι, τυχόν προβλήματα που πιθανά θα δημιουργηθούν στην Α/Γ, θα πρέπει να προκαλούν ελάχιστα προβλήματα στο υπόλοιπο δίκτυο (άλλα παράγωγα ζεύγη και καταναλωτές) και αντίστροφα, προβλήματα στο συμβατικό παραγωγό ζεύγος και στο φορτίο δεν πρέπει παρά να προκαλούν ελάχιστα προβλήματα στην Α/Γ.

Στις περιπτώσεις αυτές τα προβλήματα που μπορούν να προκύψουν οφείλονται σε αιτίες όπως, ζεύξη και απόζευξη Α/Γ, βραχυκυκλώματα στο φορτίο, απότομες διαταραχές του αιολικού δυναμικού, απότομες μεταβολές στην κατανάλωση φορτίου, κ.λπ. Και στις δυο περιπτώσεις, που προαναφέρθηκαν, πρέπει το σύστημα να προστατευτεί από διακυμάνσεις, που πιθανά θα οδηγήσουν στην κατάρρευσή του ή στη συνειδητή απόζευξη από το ασθενές δίκτυο κάποιων από τα υποσυστήματά του, όπως τα παράγωγα ζεύγη, οι καταναλωτές, κ.λπ.

Επίσης θα πρέπει να προστατευτούν οι καταναλωτές από μεταβολές του εύρους της ενεργού τιμής της τάσης ή της συχνότητας, που σύμφωνα με τους κανονισμούς πρέπει να είναι $\pm 10\%$ και $\pm 1\%$ σε σχέση με τις ονομαστικές τιμές αντίστοιχα. Επίσης θα πρέπει να υπάρξει, κατά το δυνατόν, περιορισμός των διακυμάνσεων των ηλεκτρομηχανικών μεγεθών του συστήματος και γρήγορη εξομάλυνσή τους, για την επίτευξη των παρακάτω στόχων:

I) Την αύξηση του χρόνου ζωής των υποσυστημάτων, τα οποία συμβάλλουν στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

II) Την προστασία μέρους των υποσυστημάτων όπως, οι προστασίες στις οποίες μπορεί να δημιουργηθούν επιπλέον ανωμαλίες εξαιτίας της σχεδίασής τους για ακτινική τροφοδοσία και τα στοιχεία διακοπής, εφόσον στο ασθενές δίκτυο τα βραχυκυκλώματα τροφοδοτούνται και από την Α/Γ.

III) Την προστασία του Η/Ζ από υπολειτουργία.

IV) Την προστασία της Α.Γ, στην περίπτωση ύπαρξης Α/Γ και συστήματος Σταθερών Στροφών Σταθερής Συχνότητας (Σ.Τ.Σ.Σ.), από εκτός ορίων διακυμάνσεις στροφών, που δύναται να προκύψουν από χαμηλές ή υψηλές ταχύτητες ανέμου ή από τυχόν σφάλμα λειτουργίας του συμβατικού παραγωγού ζεύγους. Τέτοια παραδείγματα δύναται να είναι η λειτουργία της Α.Γ ως κινητήρας ή και η ανατροπή της Α.Γ.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

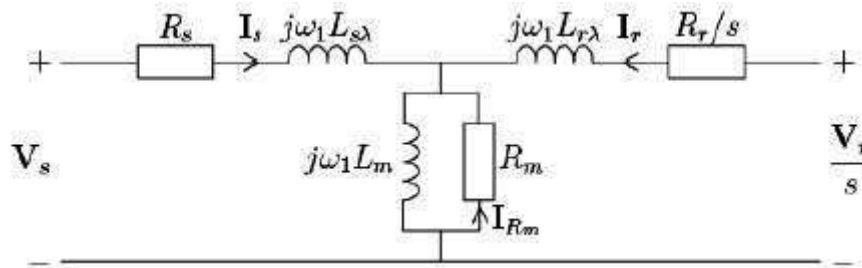
ΕΠΑΓΩΓΙΚΗ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ ΔΙΠΛΗΣ ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑΣ

4.1 Μοντελοποίηση γεννήτριας επαγωγής διπλής τροφοδοσίας ΓΕΔΤ

Ο δρομέας της ασύγχρονης μηχανής, έχει τυλίγματα όμοια με αυτά του στάτη. Τα άκρα των τριών φάσεων συνδέονται με δακτυλίους, πάνω στους οποίους εφάπτονται ψήκτρες για να υπάρχει πρόσβαση της εντάσεις του δρομέα. Στον στάτη εφαρμόζεται τριφασική συμμετρική εναλλασσόμενη τάση, που δημιουργεί σε αυτόν συμμετρικά ρεύματα. Αυτά τα ρεύματα δημιουργούν ένα στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο, το οποίο επάγει τάσεις στα τυλίγματα του δρομέα, με συνέπεια να δημιουργηθούν σε αυτά συμμετρικά ρεύματα. Αυτά τα ρεύματα δημιουργούν ένα δεύτερο στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο. Η αλληλεπίδραση των δύο αυτών μαγνητικών πεδίων δημιουργεί ηλεκτρομαγνητική ροπή, η οποία στρέφει τον δρομέα, ο οποίος προσπαθεί να φτάσει την ταχύτητα περιστροφής του μαγνητικού πεδίου (εάν η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα γίνει ίδια με αυτήν του μαγνητικού πεδίου του στάτη, τότε δεν θα υπάρχει επαγωγή τάσης στο δρομέα). Η ταχύτητα του δρομέα στη λειτουργία σαν κινητήρας, είναι μικρότερη της ταχύτητας περιστροφής του μαγνητικού πεδίου του στάτη (σύγχρονη ταχύτητα). Εάν περιστραφεί ο δρομέας (προσδίδοντας σε αυτόν μηχανική ενέργεια) με ταχύτητα μεγαλύτερη από την σύγχρονη, η μηχανή λειτουργεί σαν γεννήτρια. Εάν στα τυλίγματα του δρομέα συνδεθεί η έξοδος του μετατροπέα ισχύος, τότε η διάταξη είναι η γεννήτριας επαγωγής διπλής τροφοδότησης DFIG, αφού τροφοδοτείται με ισχύ, και από τον στάτη και από τον δρομέα.

4.1.1 Ισοδύναμο κύκλωμα της ΓΕΔΤ

Το ισοδύναμο κύκλωμα της ΓΕΔΤ, όπου συμπεριλαμβάνονται οι απώλειες μαγνήτισης, φαίνεται στο σχήμα 4.1. Σε αυτή την ενότητα υιοθετείται η μιγαδική παράσταση. Ας σημειωθεί ότι εάν ο δρομέας βραχυκυκλωθεί, τότε $V_r = 0$ και το ισοδύναμο κύκλωμα της ΓΕΔΤ γίνεται το κύκλωμα γεννήτριας βραχυκυκλωμένου δρομέα.



Σχήμα 4.1 Ισοδύναμο κύκλωμα της ΓΕΔΤ.

Με εφαρμογή του νόμου του Kirchoff δίνει τις:

$$V_s = R_s I_s + j\omega_1 L_{s\lambda} I_s + j\omega_1 L_m (I_s + I_r + I_{Rm})$$

$$\frac{V_r}{s} = \frac{R_r}{s} I_r + j\omega_1 L_{r\lambda} I_r + j\omega_1 L_m (I_s + I_r + I_{Rm})$$

$$0 = R_m I_{Rm} + j\omega_1 L_m (I_s + I_r + I_{Rm})$$

Όπου:

V_s : τάση στάτη

V_r : τάση δρομέα

I_s : ρεύμα στάτη

I_r : ρεύμα δρομέα

I_{Rm} : ρεύμα αντίστασης μαγνήτισης

ω : συχνότητα στάτη

s : ολίσθηση

R_s : αντίσταση στάτη

R_r : αντίσταση δρομέα

R_m : αντίσταση μαγνήτισης

$L_{s\lambda}$: επαγωγική σκέδαση στάτη

$L_r = L_{r\lambda}$: επαγωγική σκέδαση δρομέα

$L_r = L_{lr}$: επαγωγική μαγνήτιση

Επιπλέον εάν η πεπλεγμένη ροή διακένου, η ροή του στάτη και η ροή του δρομέα ορίζονται ως εξής:

$$\lambda_m = L_m (I_s + I_r + I_{Rm})$$

$$\lambda_s = L_{s\lambda} I_s + L_m (I_s + I_r + I_{Rm}) = L_{s\lambda} I_s + \lambda_m$$

$$\lambda_r = L_{lr} I_r + L_m (I_s + I_r + I_{Rm}) = L_{lr} I_r + \lambda_m$$

Οι ωμικές απώλειες της επαγωγικής γεννήτριας είναι:

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

Ενώ η ηλεκτρομαγνητική ροπή T_e εκφράζεται ως:

$$T_e = 3n_p \operatorname{Im}[\lambda_m I_r^*] = 3n_p \operatorname{Im}[\lambda_r I_r^*]$$

4.1.2 Ροή ισχύος

Για την μελέτη την ροή ισχύος της ΓΕΔΤ, πρέπει να οριστεί η φαινομένη ισχύς της μηχανής στο στάτη και στο δρομέα. Οπότε με βάση των προηγούμενων εξισώσεων προκύπτει:

$$S_s = 3R_s |I_s|^2 + j3\omega_1 L_s |I_s|^2 + j3\omega_1 \frac{|\lambda_m|^2}{L_m} + 3R_m |I_{Rm}|^2 - j3\omega_1 \lambda_m I_r^*$$

$$S_r = 3R_r |I_r|^2 + j3\omega_1 s L_r |I_r|^2 + j3\omega_1 s \lambda_m I_r^*$$

Επίσης η ενεργός ισχύς στάτη και δρομέα είναι:

$$P_s = \operatorname{Re} S_s = 3R_s |I_s|^2 + 3R_m |I_{Rm}|^2 + 3\omega_1 \operatorname{Im}[\lambda_m I_r^*] \approx 3\omega_1 \operatorname{Im}[\lambda_m I_r^*]$$

$$P_r = \operatorname{Re} S_r = 3R_r |I_r|^2 - 3\omega_1 s \operatorname{Im}[\lambda_m I_r^*] \approx 3\omega_1 s \operatorname{Im}[\lambda_m I_r^*]$$

Όπου οι προσεγγίσεις οφείλονται στο ότι έχουν αγνοηθεί οι ωμικές και μαγνητικές απώλειες. Από τις παραπάνω εξισώσεις, η μηχανική ισχύς που παράγει η ΓΕΔΤ, ορίζεται σαν το άθροισμα της ισχύος του στάτη και του δρομέα από:

$$P_{mech} = 3\omega_1 \operatorname{Im}[\lambda_m I_r^*] - 3\omega_1 s \operatorname{Im}[\lambda_m I_r^*] = 3\omega_r \operatorname{Im}[\lambda_m I_r^*]$$

4.1.3 Μείωση των απωλειών μαγνήτισης

Στην οδήγηση της κοινής επαγωγικής μηχανής, ο στάτης τροφοδοτείται από ένα μετατροπέα, πράγμα που σημαίνει ότι γίνεται να μειωθούν οι απώλειες της μηχανής επιτυγχάνοντας το κατάλληλο επίπεδο ροής. Σε χαμηλά φορτία είναι δυνατόν να μειωθεί το επίπεδο ροής, άρα οι απώλειες μαγνήτισης μειώνονται, οδηγώντας σε καλύτερη απόδοση. Στην ΓΕΔΤ όμως, ο στάτης συνδέεται στο δίκτυο, πράγμα που συνεπάγεται ότι το επίπεδο της μαγνητικής ροής είναι στενά συνδεδεμένο με την τάση δικτύου.

Παρόλα αυτά υπάρχουν τουλάχιστον δύο τρόποι μείωσης των απωλειών μαγνήτισης σε μία ΓΕΔΤ :

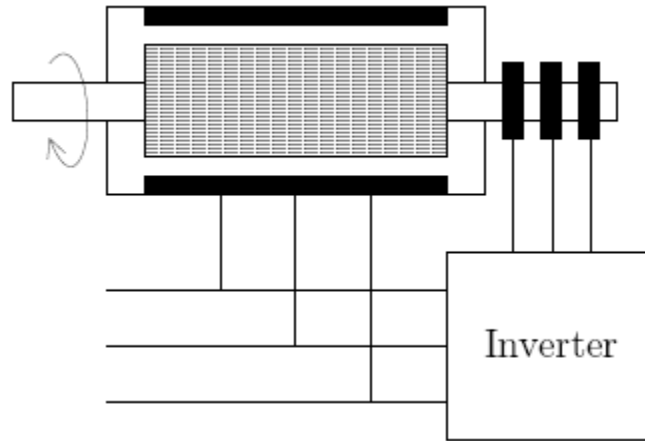
- Βραχυκυκλώνοντας τον στάτη της επαγωγικής γεννήτριας στις χαμηλές ταχύτητες και μεταφέροντας όλη την ισχύ της τουρμπίνας από τον μετατροπέα. Αυτή η διάταξη λέγεται βραχυκυκλωμένη ΓΕΔΤ.
- Συνδέοντας τον στάτη κατά τρίγωνο στις υψηλές ταχύτητες ανέμου και κατ'αστέρα στις χαμηλές. Αυτή η διάταξη αναφέρεται σαν Y-Δ συνδεδεμένη ΓΕΔΤ.

4.2 Είδη επαγωγικών μηχανών διπλής τροφοδοσίας (DFIG)

Ακολουθεί παρουσίαση των διαφόρων ειδών μηχανών DFIG, τα οποία είναι η κλασική $dfig$, $dfig$ σε σειρά, $dfig$ μονού πλαισίου σε σειρά και $dfig$ χωρίς ψήκτρες. Οι μηχανές διπλής τροφοδοσίας μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε εφαρμογές που απαιτούν σταθερή συχνότητα και μεταβαλλόμενη ταχύτητα, όπως επιθυμείται στις Α/Γ. Το κύριο πλεονέκτημα μιας DFIG μηχανής σε σύγκριση με μια μηχανή απλής τροφοδοσίας, είναι το μειωμένο ποσό ισχύος που καλείται να διαχειριστεί ο αντιστροφείας. Το μέγεθος της ισχύος αυτής, εξαρτάται από το εύρος τιμών στο οποίο πρέπει να κυμαίνεται η ταχύτητα της μηχανής.

I) Κλασική μηχανή διπλής τροφοδοσίας

Η κλασική DFIG είναι μια επαγωγική μηχανή με δακτυλίους στον άξονα του ρότορα. Το τύλιγμα του στάτη συνδέεται κατευθείαν στο δίκτυο, ενώ ένας αντιστροφείας παρεμβάλλεται ανάμεσα στο ρότορα και το δίκτυο, και ο οποίος ελέγχει ουσιαστικά τα ρεύματα του ρότορα.

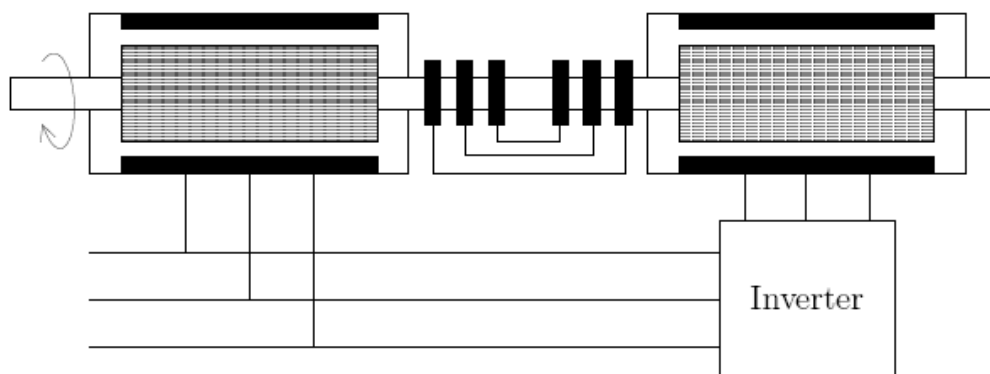


Σχήμα 4.2 Κλασσική μηχανή διπλής τροφοδοσίας.

II) Μηχανή διπλής τροφοδοσίας εν σειρά (cascaded)

Σε αυτόν τον τύπο συνδεσμολογίας, το σύστημα αποτελείται από δύο μηχανές διπλής τροφοδοσίας, οι οποίες συνδέονται και μηχανικά, μέσω των αξόνων τους, και ηλεκτρικά μέσω των ρευμάτων των δρομέων. Στην περίπτωση αυτή, μόνο το τύλιγμα στάτη συνδέεται απευθείας στο δίκτυο, ενώ το αντίστοιχο τύλιγμα της δεύτερης, συνδέεται με έναν αντιστροφέα πριν συνδεθεί στο δίκτυο. Επειδή οι τάσεις των δρομέων είναι ίδιες, ο έλεγχος της DFIG που συνδέεται απευθείας στο δίκτυο, μπορεί να επιτευχθεί μέσω της δεύτερης DFIG που συνδέεται στον αντιστροφέα.

Παρόλο που είναι δυνατόν να υπάρξει παρόμοιος έλεγχος της ισχύος, όπως στην κλασσική DFIG, είναι πολύ αρνητικό ότι παρουσιάζονται αυξημένες απώλειες συνολικά στο σύστημα, καθώς περιλαμβάνονται 2 μηχανές.



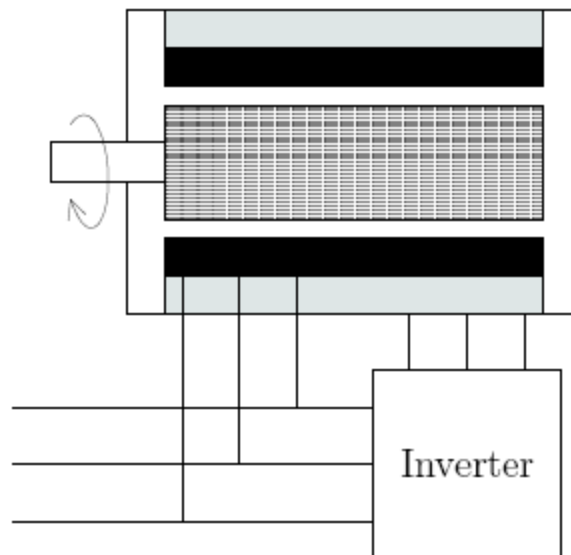
Σχήμα 4.3 Μηχανή διπλής τροφοδοσίας εν σειρά.

III) Μηχανή διπλής τροφοδοσίας εω σειρά (single-frame cascaded)

Αυτός ο τύπος είναι όπως και ο προηγούμενος, αλλά με τις 2 επαγωγικές μηχανές σε ένα κοινό πλαίσιο. Το θετικό αυτού του συστήματος είναι η αυξημένη στιβαρότητα, αλλά το μείον του είναι η μειωμένη απόδοση, σε σχέση τον άλλον τύπο.

IV) Μηχανή διπλής τροφοδοσίας χωρίς ψήκτρες

Αυτός ο τύπος περιέχει 2 τυλίγματα στάτη, ένα για τον έλεγχο και ένα για την ισχύ. Επειδή υπάρχει ο κίνδυνος να έχουμε αλληλεπαγωγικά φαινόμενα μεταξύ των δύο τυλιγμάτων, τα δύο τυλίγματα έχουν διαφορετικό αριθμό ζευγών πόλων, με τη διαφορά μεταξύ τους να είναι μεγαλύτερη του ενός ζεύγους.



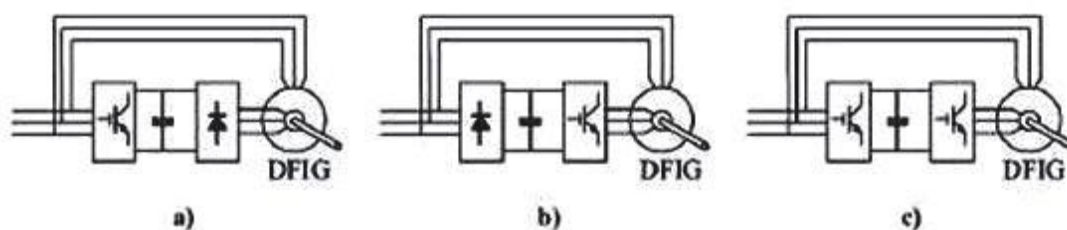
Σχήμα 4.4 Μηχανή διπλής τροφοδοσίας χωρίς ψήκτρες.

Ένα επιπλέον σημείο που πρέπει να προσεχθεί είναι ότι ο αριθμός των ζευγών πόλων του ρότορα πρέπει να είναι ίσος με το άθροισμα των ζευγών πόλων των τυλιγμάτων του στάτη.

Ένας τύπος μηχανής που εντάσσεται σε αυτή την κατηγορία DFIG, αυτή χωρίς ψήκτρες, είναι η (reluctance) Μηχανή διπλής τροφοδοσίας, της οποίας ο στάτης είναι ακριβώς όπως της προηγούμενης μηχανής, ενώ ο δρομέας βασίζεται στην reluctance.

4.3 Ο μετατροπέας και τεχνικές διαμόρφωσης

Η πλειονότητα των συστημάτων οδήγησης των μεταβλητής ταχύτητας τριφασικών μηχανών, όσον αφορά την ροή ισχύος, είναι μόνης κατεύθυνσης. Αν και οι μόνης κατεύθυνσης μετατροπείς χρησιμοποιούνται σε συστήματα ανεμογεννητριών με ΓΕΔΤ. Όπως τα λεγόμενα static Kramer drive ή τα συστήματα VCRS, που εισήγαγε η εταιρεία Vestas, η πιο αποτελεσματική λειτουργία των ΓΕΔΤ επιτυγχάνεται με τη χρήση του μετατροπέα ισχύος διπλής κατεύθυνσης. Τα τρία διαφορετικά συστήματα βασισμένα σε ΓΕΔΤ φαίνονται στο σχήμα 4.5.



Σχήμα 4.5 Α/Γ με ΓΕΔΤ και μετατροπέα. **a)** static kramer drive. **b)** το σύστημα VCRS . **c)** back to back μετατροπέα πηγής τάσης.

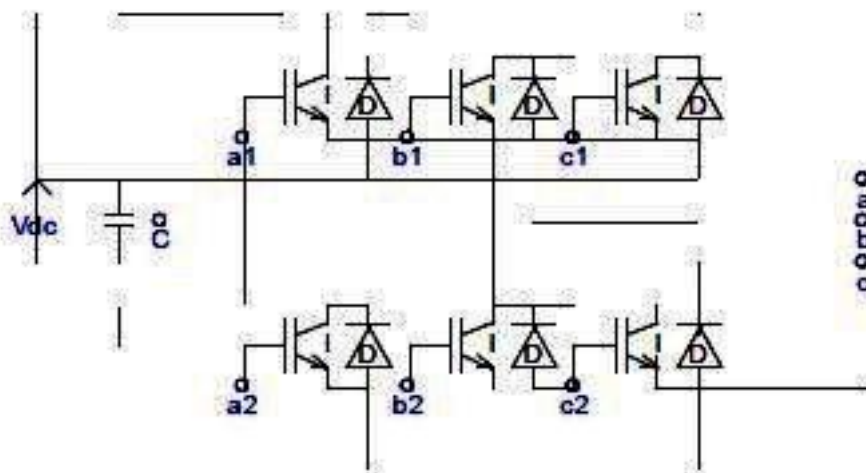
Το σύστημα Kramer drive, μπορεί να παράγει ισχύ μόνο στην υπερσύγχρονη λειτουργία. Επιπλέον, εξαιτίας του ανορθωτή διόδων στην πλευρά του δρομέα, η μαγνήτιση της μηχανής πρέπει να πραγματοποιηθεί από τον στάτη, μειώνοντας την ικανότητα του συστήματος να επιτύχει έλεγχο της άεργου ισχύος. Από την άλλη πλευρά, το σύστημα VCRS του σχήματος είναι ικανό να παράγει ισχύ μόνον όταν λειτουργεί με υποσύγχρονη ταχύτητα, ενώ το σύστημα με back to back μετατροπέα, μπορεί να παράγει και στις δύο περιοχές λειτουργίας, πράγμα που του επιτρέπει να ανιχνεύει την βέλτιστη ταχύτητα ακροτερυγίου, σε ένα μεγαλύτερο εύρος ταχυτήτων από ότι οι δύο άλλες τοπολογίες. Επίσης, μπορεί να ελέξει την άεργο ισχύ και την αρμονική βελτιστοποίηση και με τον μετατροπέα στην πλευρά του δικτύου και με αυτόν στην πλευρά του δρομέα.

4.3.1 Ο τριφασικός μετατροπέας

Οι μετατροπείς ΣΡ/ΕΡ διαχωρίζονται σε σχέση με τον τύπο της DC πλευράς τους (πηγής), σε μετατροπείς πηγής τάσης και ρεύματος. Στους πρώτους, στην ΣΡ πλευρά χρησιμοποιείται πυκνωτής ή μπαταρία για την επίτευξη σταθερής τάσης, ενώ στους μετατροπείς ρεύματος, χρησιμοποιείται αυτεπαγωγή για την επίτευξη σταθερού ρεύματος. Στην περίπτωση κατανεμημένης παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, χρησιμοποιούνται οι μετατροπείς πηγής τάσης.

Ο τριφασικός μετατροπέας αποτελείται από τρεις ημιγέφυρες, όπου στην κάθε μία βρίσκονται δύο ηλεκτρονικοί διακόπτες. Αυτοί οι διακόπτες, βρίσκονται σε κατάσταση αγωγής ή αποκοπής εναλλάξ, για να μην βραχυκύκλωθεί η πηγή. Όταν ο ένας άγει, ο άλλος είναι σε κατάσταση αποκοπής και αντιστρόφως. Κάθε μία από αυτές τις ημιγέφυρες παράγει την τάση κάθε μίας από τις τρεις φάσεις. Από τον χρόνο αποκοπής και αγωγής, εξαρτάται το πλάτος και η συχνότητα της παραγόμενης AC τάσης. Οι κυριότερες τεχνικές διαμόρφωσης εύρους παλμών (Pulse Width Modulation - PWM) είναι οι ακόλουθες:

- Ημιτονοειδής PWM (Sinusoidal PWM – SPWM).
- PWM απαλοιφή επιλεγμένων αρμονικών (Selected harmonic elimination).
- PWM ελάχιστης κυμάτωσης ρεύματος (Minimum ripple current PWM).
- PWM με διάνυσμα χώρου (Space Vector PWM).
- Στοχαστική PWM (Random PWM).
- PWM ελέγχου του στιγμιαίου ρεύματος (Sinusoidal PWM with instantaneous current control).
- Δέλτα διαμόρφω (Delta modulation).
- Σίγμα-Δέλτα διαμόρφωσης (Sigma-delta modulation).



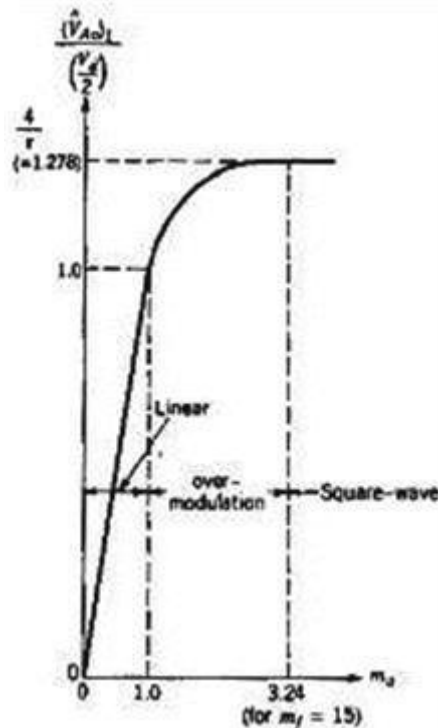
Σχήμα 4.6 Τριφασικός μετατροπέας πηγής τάσης.

4.3.2 Ημιτονοειδής διαμόρφωση εύρους παλμών (SPWM)

Η τεχνική της ημιτονοειδής PWM είναι πολύ δημοφιλής στους βιομηχανικούς μετατροπείς. Το σχήμα 4.8 εξηγεί την γενική αρχή της SPWM. Είναι μια τεχνική με φέρον σήμα. Το φέρον (carrier) είναι ένα τριγωνικό σήμα συχνότητας f_c , το οποίο συγκρίνεται με το ημιτονοειδές σήμα αναφοράς (ελέγχου), συχνότητα f . Τα σημεία

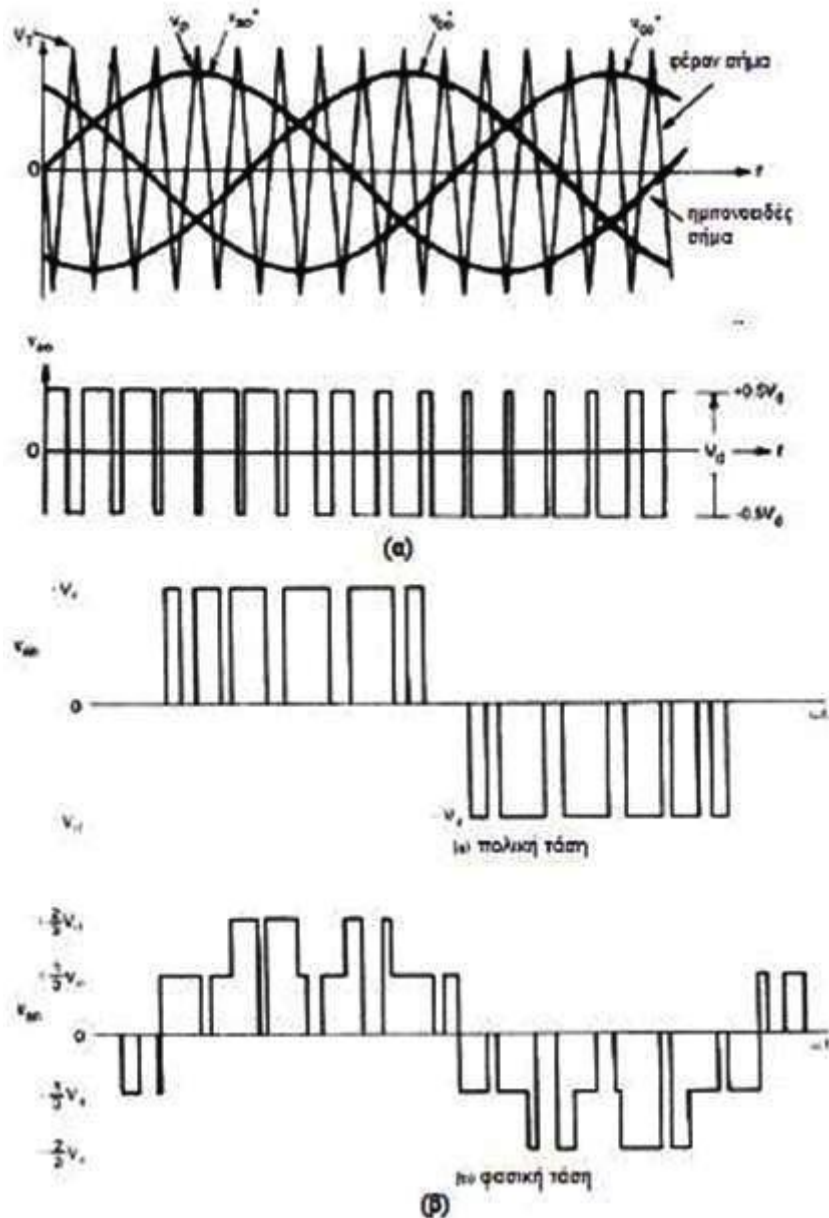
διατονής των δύο σημάτων, προσδιορίζουν τα σημεία μεταγωγής, αυτά δηλαδή που θα προκαλέσουν αλλαγή της κατάστασης των διακοπών. Το ίδιο σήμα φέροντος χρησιμοποιείται και για τις τρεις ημιγέφυρες (φάσεις).

Ο λόγος του σήματος αναφοράς προς το πλάτος του φέροντος σήματος $m = u/V_{\Delta}$. Το μέγεθος αυτό καθορίζει το πλάτος της θεμελιώδους συνιστώσας της τάσης εξόδου του μετατροπέα, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα



Σχήμα 4.7 τριφασικός αντιστροφέας ως συνάρτηση του m_a .

Ο λόγος της συχνότητας του φέροντος σήματος προς την συχνότητα του σήματος αναφοράς $m_f = f_c / f$, όπου f η επιθυμητή συχνότητα του σήματος εξόδου, δηλαδή τα 50 Hz. Το μέγεθος αυτό καθορίζει τις τάξεις των αρμονικών συνιστωσών της τάσης και η τιμή του επιλέγεται έτσι ώστε να ελαχιστοποιείται η αρμονική παραόρφωση της τάσης. Πιο συγκεκριμένα, το m_f πρέπει να είναι ακέραιος, ώστε να υπάρχει σταθερός αριθμός κύκλων του φέροντος σήματος, σε κάθε κύκλο του σήματος ελέγχου. Αν επιπλέον διασφαλιστεί, ότι τα δύο σήματα είναι και συγχρονισμένα, τότε απολείεται την εμφάνιση υποαρμονικών στην περιοχή από 0 έως 50 Hz. Ακόμη πρέπει το m_f να είναι περιττός, γιατί έτσι εξαλείφονται οι άρτιες αρμονικές. Τέλος, αν το m_f είναι πολλαπλάσιο του 3, εξαλείφονται οι αρμονικές της πολικής τάσης, που έχουν τάξη m_f και πολλαπλάσια αυτού.

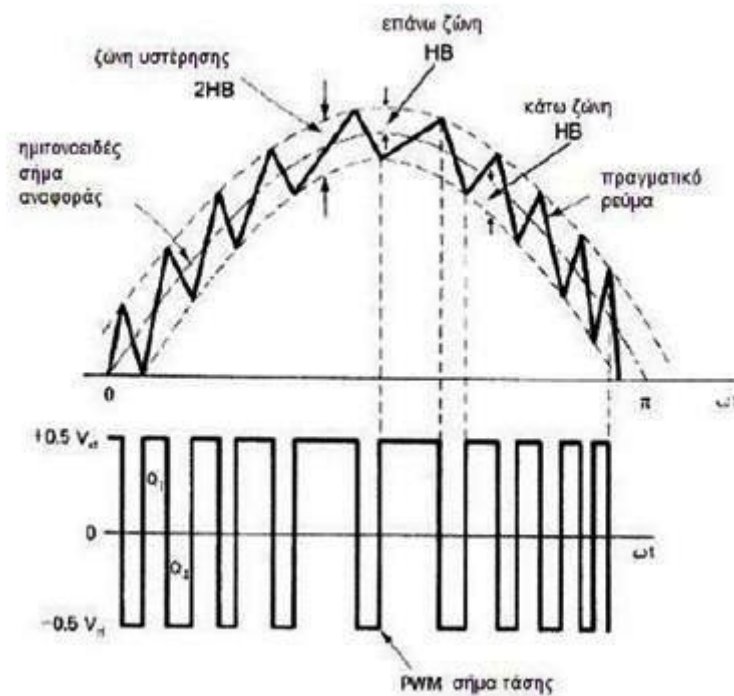


Σχήμα 4.8 α) αρχή της SPWM για τριφασικό μετατροπέα. β) πολική και φασική κυματομορφή τάσης.

4.3.3 PWM με έλεγχο του ρεύματος σε ζώνη υστέρησης (Hysteresis band current control PWM)

Η τεχνική διαμόρφωσης εύρους παλμών για τον έλεγχο ρεύματος σε ζώνη υστέρησης, είναι βασικά μία μέθοδος ελέγχου των διακοπών του μετατροπέα, έτσι ώστε το ρεύμα εξόδου της κάθε φάσης να παραμένει μέσα σε μία προκαθορισμένη ζώνη υστέρησης (όριο σφάλματος), πάνω ή κάτω από την τιμή αναφοράς του.

Το σχήμα 4.9 εξηγεί την αρχή λειτουργίας της PWM με την τεχνική ζώνης υστέρησης για μία ημιγέφυρα μετατροπέα. Το κύκλωμα ελέγχου, δημιουργεί την ημιτονοειδή κυματομορφή του ρεύματος αναφοράς επιθυμητού πλάτους και συχνότητας και συγκρίνεται με την κυματομορφή του πραγματικού ρεύματος αυτής της φάσης. Καθώς το ρεύμα υπερβαίνει το άνω όριο, ο πάνω διακόπτης a_1 του σχήματος 4.6 της ημιγεφυρας ανοίγει και ο κάτω κλείνει. Σαν αποτέλεσμα, η τάση εξόδου a του μετατροπέα γίνεται αρνητική και το ρεύμα μειώνεται. Όταν το ρεύμα διασχίζει το κάτω όριο, ο κάτω διακόπτης ανοίγει και ο πάνω κλείνει. Όσο το ρεύμα παραμένει μέσα στην ζώνη, οι διακόπτες δεν αλλάζουν κατάσταση. Έτσι το ρεύμα εξαναγκάζεται να ακολουθεί το ρεύμα αναφοράς μέσα στο εύρος της ζώνης υστέρησης, με μία μπρός-πίσω (bang-bang) λειτουργία των πάνω και κάτω διακοπών. Όσο μικρότερη είναι η ζώνη, τόσο είναι η διακύμανση του ρεύματος, αλλό τόσο μελύτερη η διακοπτική συχνότητα. Μία βέλτιστη ζώνη που διατηρεί ισορροπία μεταξύ διακύμανσης ρεύματος και απωλειών του μετατροπέα εξαιτίας υψηλής διακοπτικής συχνότητας είναι επιθυμητή.



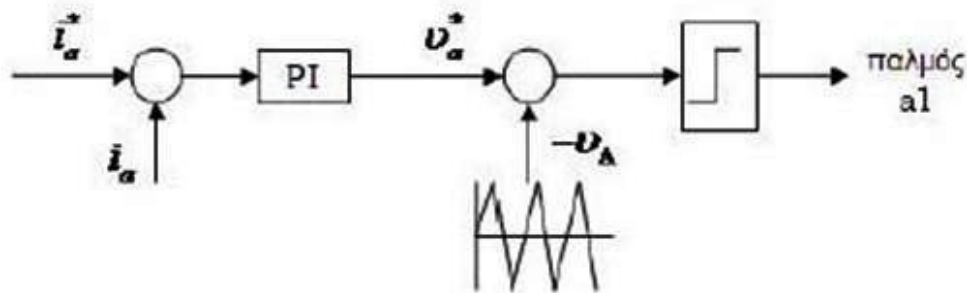
Σχήμα 4.9 Αρχή λειτουργίας ελέγχου ρεύματος σε ζώνη υστέρησης.

Σε χαμηλές ταχύτητες της μηχανής, εξαιτίας της χαμηλής αντι-ΗΕΔ, δεν υπάρχει δυσκολία στην παρακολούθηση του ρεύματος αναφοράς. Όμως σε υψηλές ταχύτητες, ο ελεγκτής ρεύματος θα κορεσθεί σε ένα μέρος του κύκλου, και θα εμφανισθούν ανώτερες αρμονικές.

Η PWM με έλεγχο ρεύματος σε ζώνη υστέρησης είναι πολύ δημοφιλής, επειδή είναι απλή στην εφαρμογή και ταχύτητας δυναμικής απόκρισης. Το βασικό της μειονέκτημα όμως είναι, ότι η διακοπτική της συχνότητα δεν είναι γνωστή εκ των προτέρων και δεν είναι σταθερή. Μάλιστα σε μερικά σημεία μπορεί να γίνει πολύ υψηλή, με αποτέλεσμα αυξημένες διακοπτικές απώλειες του μετατροπέα. Αυτό το μειονέκτημα προσπαθεί να ξεπεράσει η επόμενη μέθοδος.

4.3.4 Έλεγχος ρεύματος με την τεχνική σύγκρισης ράμπας (PI current control with ramp comparison)

Η μεταβαλλόμενη διακοπτική συχνότητα που εμφανίζεται στον έλεγχο ζώνης υστέρησης, οδήγησε στην χρησιμοποίηση μίας εξελιγμένης μεθόδου, όπου χρησιμοποιείται φέρον σήμα, πράγμα που σημαίνει ότι η διακοπτική συχνότητα γίνεται σταθερή. Η μέθοδος ονομάζεται έλεγχος ρεύματος με σύγκριση ράμπας. Η αρχή λειτουργίας είναι η εξής:



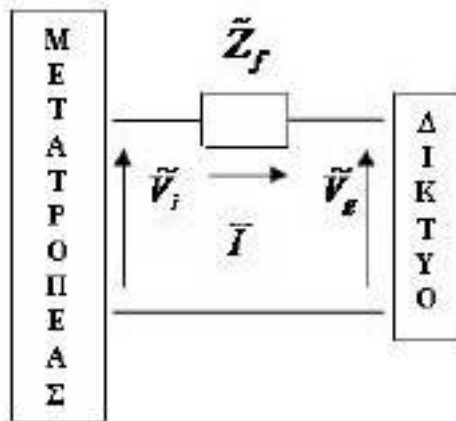
Σχήμα 4.10 Αρχή λειτουργίας ελέγχου ρεύματος με σύγκριση ράμπας.

Το σφάλμα ρεύματος π.χ της φάσης a, γίνεται είσοδος σε ένα PI ελεγκτή, η έξοδος του οποίου, συγκρίνεται με ένα φέρον τριγωνικό σήμα σταθερής συχνότητας. Αν η έξοδος του PI ελεγκτή είναι μεγαλύτερη από την τριγωνική κυματομορφή V_{Δ} , επιβάλλεται θετικό δυναμικό στον ακροδέκτη a, ενώ εάν είναι μικρότερη, αρνητικό. Αποδεικνύεται, ότι αν το πλάτος του σήματος εξόδου του PI ελεγκτή είναι μικρότερο από το πλάτος του τριγωνικού V_{Δ} , τότε η θεμελιώδης τάση του μετατροπέα συνδέεται με το σήμα αναφοράς ως εξής:

$$v_{a1} = v_{a01} = K_{\Delta} v_a^* \quad \text{οπου} \quad K_{\Delta} = \frac{1}{2} \frac{V_{dc}}{V_{\Delta}} \quad \text{με} \quad v_a^* < V_{\Delta}$$

4.3.5 Τριφασικός μετατροπέας πηγής τάσης συνδεδεμένο στο δίκτυο

Έστω V_i , V_g οι φασικές τάσεις της εξόδου του μετατροπέα και του δικτύου αντίστοιχα. Για τη σύνδεση του μετατροπέα με το δίκτυο πρέπει να παρεμβληθεί μία σύνθετη αντίσταση προσαρμογής, με τιμή Z_f ανά φάση. Αυτή χαρακτηρίζεται σαν φίλτρο, επειδή καταστέλλει τις αρμονικές του ρεύματος που παράγονται από την λειτουργία του μετατροπέα.



Σχήμα 4.11 Ανά φάση ισοδύναμο κύκλωμα τριφασικού μετατροπέα συνδεδεμένος στο δίκτυο.

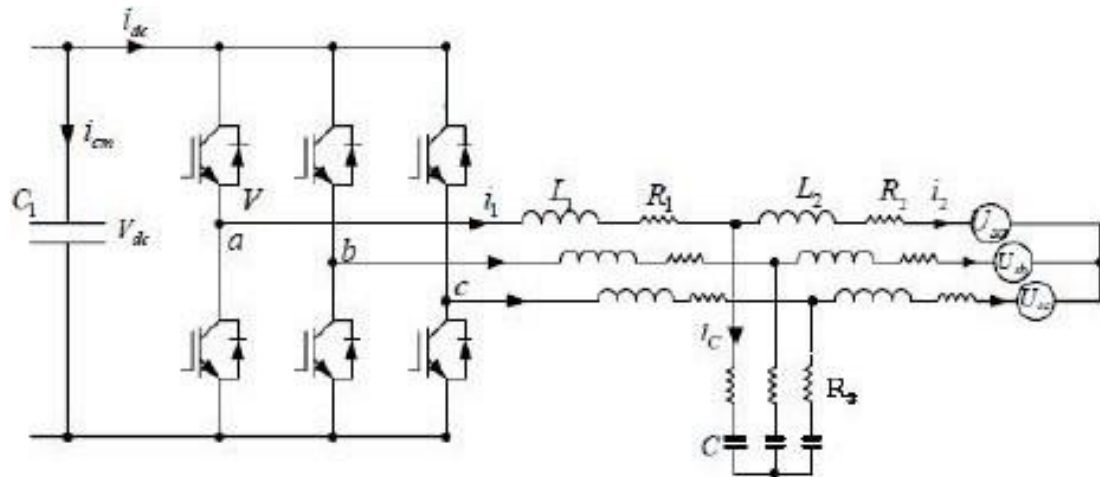
Με την τεχνικές διαμόρφωσης που χρησιμοποιούνται, είναι δυνατόν να μεταβάλλεται η V_i με αποτέλεσμα να μεταβάλλεται και το ρεύμα εξόδου του μετατροπέα προς το δίκτυο κατά μέτρο και φάση. Με ρύθμιση της τάσης, ελέγχεται η ενεργός και άεργος ισχύς που παράγει ο μετατροπέας, ο οποίος μπορεί να απορροφά ή να παράγει άεργο ισχύ (λειτουργεί με επαγωγικό ή χωρητικό συντελεστή). Το ίδιο ισχύει και για την ενεγό ισχύ (λειτουργεί σαν πηγή ή σαν φορτίο).

4.4 Φίλτρα περιορισμού αρμονικών συνιστωσών ρεύματος

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

- I) Το φίλτρο απλού επαγωγέα L.
- II) 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 αρμονικων 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 LCL φίλτρου.



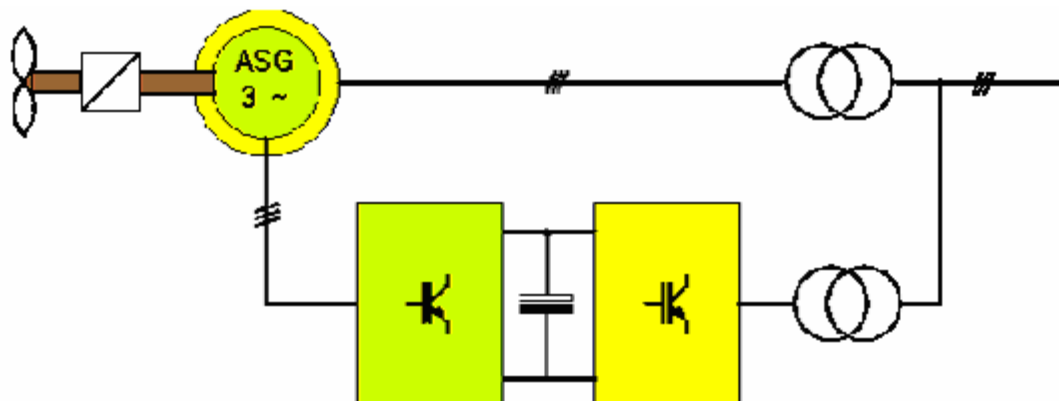
Σχήμα 4.12 Μετατροπέας πηγής τάσης, που συνδέεται στο δίκτυο μέσω φίλτρου LCL.

Στην πλευρά του πυκνωτή συνδέεται μία πηγή συνεχούς ρεύματος, όπως η έξοδος μίας φωτοβολταϊκής συστοιχίας ή ενός κυττάρου ή η ανορθωμένη έξοδος εναλλασσόμενης πηγής, όπως μία ανεμογεννήτρια.

4.5 Διασύνδεση αιολικών πάρκων μεγάλης ισχύος

Στην παρούσα ενότητα θα γίνει περιγραφή του τρόπου της κατευθείαν διασύνδεσης ανεμογεννητριών με το δίκτυο. Η περιγραφή βασίζεται στον τρόπο διασύνδεσης των ανεμογεννητριών της γνωστής δανέζικης εταιρείας VESTAS. Οι ανεμογεννήτριες αυτής της εταιρείας χρησιμοποιούν ασύγχρονη γεννήτρια δακτυλιοφόρου δρομέα. Σύμφωνα με το ενημερωτικό φυλλάδιο του κατασκευαστή ένας χονδρικός τρόπος σύνδεσης φαίνεται στο σχήμα 4.13. Σύμφωνα με αυτό παρατηρείται ότι η ασύγχρονη μηχανή είναι διπλά τροφοδοτούμενη (double - fed). Προς πληροφόρηση αναφέρεται ότι η γεννήτρια είναι έχει ονομαστικά στοιχεία $U_n=690V$, $I_n=711A$, $n=1620$ σ.α.λ. Από το εν λόγω σχήμα βλέπουμε ότι ο στάτης είναι κατευθείαν συνδεδεμένος με το δίκτυο ενώ ο δρομέας είναι συνδεδεμένος με ηλεκτρονικό μετατροπέα ισχύος. Ο τελευταίος αποτελείται από μια διπλή γέφυρα από

στοιχεία IGBT. Ο τρόπος λειτουργίας θα εξηγηθεί στη συνέχεια. Το σύστημα αυτό άρχισε να χρησιμοποιείται ευρέως πρόσφατα στα αιολικά συστήματα (μεταβλητών στροφών).



Σχήμα 4.13 Ηλεκτρονικός μετατροπέας ισχύος ανεμογεννήτριας DFIG.

Το κύριο πλεονέκτημα αυτού του συστήματος είναι ότι ο ηλεκτρονικός μετατροπέας ισχύος διαπερνάται από ένα ποσοστό της ισχύος της τάξης του 20-30% της συνολικής ισχύος και συνεπώς εμφανίζονται λιγότερες απώλειες σε σχέση με ένα σύστημα απευθείας οδηγούμενο από τον ανεμοκινητήρα.

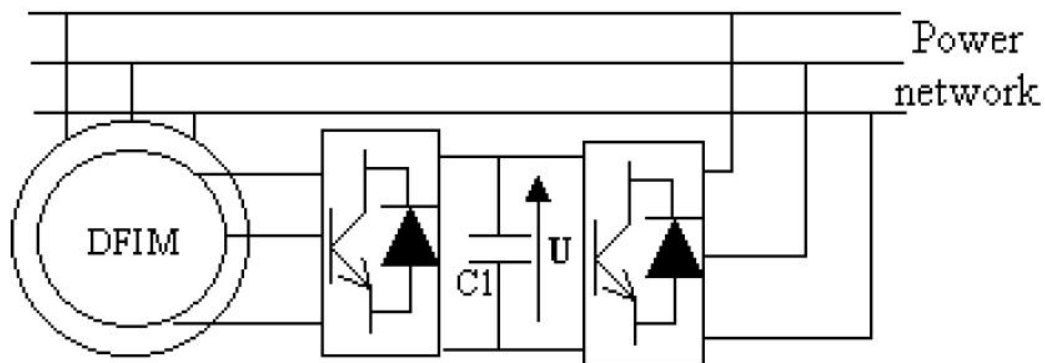
Μία μέθοδος μετατόπισης των καμπυλών ροπής - στροφών είναι μέσω διάφορων αντιστάσεων. Ο τρόπος αυτός εκτός του ότι εμφανίζει πολλές ωμικές απώλειες δεν έχει και τη δυνατότητα ενεργητικού ελέγχου δηλαδή δεν μπορεί ανά πάσα στιγμή η τιμή της αντίστασης να αλλάζει τόσο λόγω συνδεσμολογίας της όσο και λόγω έλλειψης επικοινωνίας με το υπόλοιπο κύκλωμα. Αντίθετα με τον ηλεκτρονικό μετατροπέα ισχύος E.P.-Σ.Π.-E.P. ο οποίος ουσιαστικά παίζει τον ρόλο των αντιστάσεων, δεν υπάρχουν ωμικές απώλειες και υπάρχει ανά πάσα στιγμή δυνατότητα ρύθμισης σε μεγάλο εύρος της ροπής εκκίνησης της γεννήτριας μετατοπίζοντας την καμπύλη ροπής-στροφών δεξιά ή αριστερά ανάλογα με την ταχύτητα του αέρα. Με αυτό τον τρόπο εκτός του ότι υπάρχει η δυνατότητα εκμετάλλευσης ακόμα και των πιο χαμηλών ταχυτήτων αέρα (εφόσον είναι πάνω από την ταχύτητα σύζευξης), και ταυτόχρονα προστατεύεται η ηλεκτρική γεννήτρια από την εμφάνιση υψηλών ρευμάτων κατά την εκκίνηση. Ο ηλεκτρονικός μετατροπέας ισχύος έχει τη δυνατότητα ανά πάσα στιγμή να επικοινωνεί με την Κεντρική Μονάδα Ελέγχου της ανεμογεννήτριας και ρυθμίζει τη συμπεριφορά του σύμφωνα με τις εντολές που λαμβάνει από αυτή (ΚΜΕ). Έτσι ο ηλεκτρονικός μετατροπέας ισχύος αλλάζοντας ουσιαστικά την αντίσταση του δρομέα αλλάζει το μαγνητικό πεδίο στο εσωτερικό της μηχανής και πετυχαίνει τη μετακίνηση της καμπύλης C_p -λ στην επιθυμητή τιμή λ_{opt} όπου υπάρχει μέγιστο C_p . Με αυτό τον τρόπο η ανεμογεννήτρια

παρακολουθεί τις αλλαγές του ανέμου και προσαρμόζει τη λειτουργία της. Χάρη στον ηλεκτρονικό μετατροπέα ισχύος υπάρχει μεγάλο εύρος ρύθμισης της τάσης και συνεπώς της άεργου ισχύος.

4.6 Έλεγχος μηχανή επαγωγής διπλής τροφοδοσίας DFIG

Καταρχήν εισάγεται ένα μαθηματικό πρότυπο της μηχανής σε κατάλληλο d-q πλαίσιο αναφοράς για την έρευνα της προσομοίωσης. Για τον έλεγχο της ροής ισχύος μεταξύ του στάτη της doubly-fed επαγωγικής γεννήτριας (DFIG) και του δικτύου ισχύος, φτιάχνεται ένας κανόνας ελέγχου, ο οποίος χρησιμοποιεί δυο είδη ελεγκτών: PI και RST.

Για να ικανοποιηθούν οι ανάγκες σε ισχύ, συνυπολογίζοντας οικονομικούς και περιβαλλοντικούς παράγοντες, η μετατροπή αιολικής ενέργειας κερδίζει συνεχώς έδαφος σε μια κατάλληλη πηγή ανανεώσιμης ενέργειας. Η ηλεκτρομαγνητική μετατροπή συνήθως επιτυγχάνεται με επαγωγικές μηχανές ή σύγχρονες και μόνιμης μαγνήτισης γεννήτριες. Οι επαγωγικές γεννήτριες βραχυκυκλωμένου κλωβού χρησιμοποιούνται πλατιά λόγω χαμηλού κόστους, αξιοπιστίας, κατασκευής και απλότητας στη συντήρηση. Αλλά, όταν μια τέτοια γεννήτρια συνδέεται απευθείας σε ένα δίκτυο ισχύος, που επιβάλλει τη συχνότητά του, η ταχύτητα πρέπει να ρυθμιστεί σε μια σταθερή τιμή μέσω ενός μηχανικού μηχανισμού στην ανεμογεννήτρια. Τότε, για υψηλές τιμές της ταχύτητας του ανέμου, δεν επιτυγχάνεται πλήρης κάλυψη της θεωρητικής ισχύος. Για να ξεπεραστεί αυτό το πρόβλημα, ένας μετατροπέας, που επιλέγεται για πλήρη κάλυψη της ανταλλαγής ισχύος, τοποθετείται ανάμεσα στο στάτη και στο δίκτυο. Για να γίνει δυνατή η λειτουργία σε μεταβλητή ταχύτητα με ένα μετατροπέα ισχύος χαμηλής αναλογίας, η DFIG μπορεί να χρησιμοποιηθεί όπως φαίνεται στο σχήμα 4.14. Ο στάτης είναι απευθείας συνδεδεμένος με το δίκτυο και ο δρομέας τροφοδοτείται για να μαγνητίζει τη μηχανή.



Σχήμα 4.14 Επαγωγική μηχανή διπλής τροφοδοσίας (DFIG).

Ο έλεγχος της ηλεκτρικής ισχύος που ανταλλάσσεται ανάμεσα στο στάτη του DFIG και στο δίκτυο ισχύος γίνεται με τον έλεγχο ανεξάρτητα της ροπής (και συνεπώς της ενεργού ισχύος) και της άεργου ισχύος. Αρκετές μελέτες γίνονται σε αυτήν την κατεύθυνση, όπου χρησιμοποιούνται κυκλο-μετατροπείς ως μετατροπείς και κλασικοί αναλογικοί-ολοκληρωτικοί (PI) ελεγκτές. Στην περίπτωση αυτή, αφού φτιαχτεί ένα πρότυπο της DFIG και επιλεγεί το κατάλληλο d-q πλαίσιο αναφοράς, η ενεργός και η άεργος ισχύς ελέγχονται με χρήση αντίστοιχα PI και RST ελεγκτή βασισμένο στη θεωρία τοποθέτησης των πόλων. Οι αποδόσεις τους συγκρίνονται για ονομαστική κατάσταση, ευαισθησίας στις διαταραχές και σθεναρότητα σε μεταβολές των παραμέτρων της μηχανής.

4.6.1 Μαθηματικό πρότυπο της DFIG

Για μια doubly-fed επαγωγική μηχανή, η εφαρμογή του μετασχηματισμού Concordia και Park στο κλασικό a, b, c πρότυπο, δίνει ένα δυναμικό πρότυπο σε d-q πλαίσιο αναφοράς ως ακολουθεί:

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d}{dt} \psi_{ds} - \dot{\theta}_s \psi_{qs} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{d}{dt} \psi_{qs} + \dot{\theta}_s \psi_{ds} \\ V_{dr} = R_r I_{dr} + \frac{d}{dt} \psi_{dr} - \dot{\theta}_r \psi_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \frac{d}{dt} \psi_{qr} + \dot{\theta}_r \psi_{dr} \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \psi_{ds} = L_s I_{ds} + M I_{dr} \\ \psi_{qs} = L_s I_{qs} + M I_{qr} \\ \psi_{dr} = L_r I_{dr} + M I_{ds} \\ \psi_{qr} = L_r I_{qr} + M I_{qs} \end{array} \right.$$

$$\Gamma_m = \Gamma_e + J \frac{d\Omega}{dt} + f\Omega$$

$$\Gamma_e = -P \frac{M}{L_s} (\psi_{qs} I_{dr} - \psi_{ds} I_{qr})$$

Όπου:

$V_{ds}, V_{qs}, V_{dr}, V_{qr}$: τάσεις δρομέα και στάτη δυο φάσεων.

$\Psi_{ds}, \Psi_{qs}, \Psi_{dr}, \Psi_{qr}$: ροές δρομέα και στάτη δυο φάσεων.

$I_{ds}, I_{qs}, I_{dr}, I_{qr}$: ρεύματα δρομέα και στάτη δυο φάσεων.

θ_s, θ_r : φάση ροής στάτη και μηχανική φάση δρομέα.

Ω : μηχανική ταχύτητα.

Γ_m, Γ_e : ροπή εκκίνησης και ηλεκτρομαγνητική ροπή.

P : αριθμός ζευγών πόλων.

R_s, R_r : ανά φάση αντίσταση στάτη και δρομέα.

M : μαγνητική αυτεπαγωγή.

L_s, L_r : συνολική κυκλική αυτεπαγωγή στάτη και δρομέα.

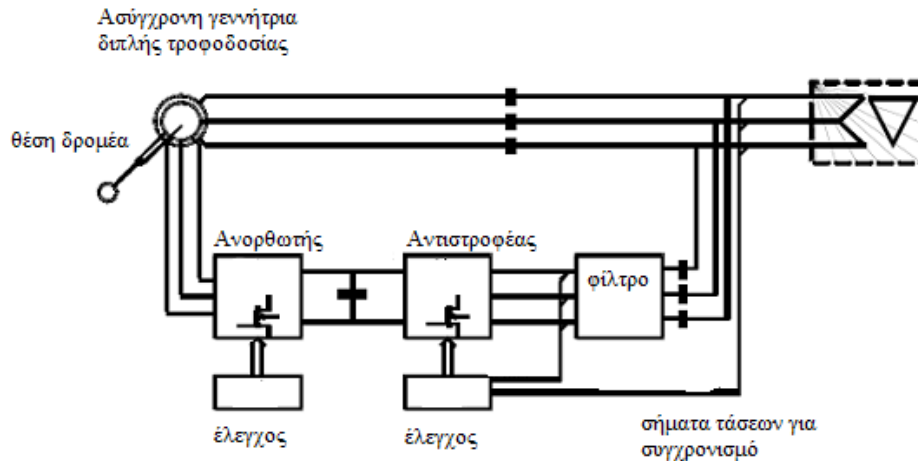
g : ολίσθηση γεννήτριας.

J, f : αδράνεια και τριβή.

p : τελεστής Laplace.

4.6.2 Σύνδεση DFIG στο δίκτυο

Το παρακάτω σχήμα αποτελείται από μια ασύγχρονη γεννήτρια δακτυλιοφόρου δρομέα με τα τυλίγματα του στάτη απευθείας συνδεδεμένα με το τριφασικό δίκτυο και με τα τυλίγματα του δρομέα συνδεδεμένα μέσω δακτυλίων ολίσθησης και ψηκτρών με ένα μετατροπέα ισχύος EP/ΣP/EP (back to back AC/DC/AC). Ο μετατροπέας είναι διπλής κατεύθυνσης ισχύος. Αποτελείται από δύο ανεξάρτητα ελεγχόμενους μετατροπείς τάσεις (ΜΠΤ), που συνδέονται σε ένα κοινό ζυγό συνεχούς ρεύματος. Ο πυκνωτής μεταξύ των δύο μετατροπέων σταθεροποιεί την τάση.



Σχήμα 4.15 Σύνδεση DFIG στο δίκτυο με έλεγχο και φίλτρο.

Η συμπεριφορά της γεννήτριας εξαρτάται από αυτούς τους μετατροπείς και τους ελεγκτές τόσο στη μόνιμη κατάσταση όσο και σε συνθήκες σφαλμάτων. Οι μετατροπείς ελέγχουν την τάση του δρομέα κατά πλάτος και κατά φάση και ως εκ τούτου χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο της ενεργούς και άεργου ισχύος. Το σύστημα αυτό επιτρέπει τη λειτουργία μεταβλητής ταχύτητας σε ένα μεγάλο, αλλά περιορισμένο εύρος. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, η ισχύς που πρέπει να διαχειριστεί ο μετατροπέας να είναι περίπου στο 30% της ονομαστικής ισχύος της γεννήτριας. Έτσι το μέγεθος του μετατροπέα είναι αντίστοιχο της ισχύος, που διαχειρίζεται αυτός, δηλαδή της «ισχύος ολίσθησης», το οποίο είναι αρκετά μικρό σε σχέση με την ονομαστική ισχύ. Αυτό οδηγεί σε μείωση του κόστους του μετατροπέα.

Αξίζει να σημειωθεί ότι, επειδή το εύρος της ταχύτητας είναι περιορισμένο, η επαγόμενη τάση είναι ένα κλάσμα αυτής του δικτύου και συγκεκριμένα εξαρτάται από το λόγο των τυλιγμάτων μεταξύ του δρομέα και του στάτη. Η τάση του ζυγού συνεχούς ρεύματος είναι σχετικά χαμηλή.

Το σύστημα αυτό χρησιμοποιείται για να επιτευχθεί ένα μεγάλο εύρος λειτουργίας από την υποσύγχρονη μέχρι την υπερσύγχρονη λειτουργία, δηλαδή η γεννήτρια να λειτουργεί και με θετική και με αρνητική ολίσθηση. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί στην περίπτωση που ο μετατροπέας ισχύος μπορεί να λειτουργήσει με ροή ισχύος και προς τις δύο κατευθύνσεις. Αυτός είναι και ο λόγος που χρησιμοποιείται η τοπολογία του ΕΡ/ΣΡ/ΕΡ μετατροπέα διπλής κατεύθυνσης. Η ολίσθηση ορίζεται ως εξής:

$$s = \frac{n_{syn} - n_{gen}}{n_{syn}}$$

όπου n_{syn} και n_{gen} είναι αντίστοιχα η σύγχρονη ταχύτητα και η ταχύτητα της γεννήτριας σε στροφές ανά λεπτό (rpm). Υποθέτοντας ότι όλες οι απώλειες στα κυκλώματα του στάτη και του δρομέα μπορούν να αμεληθούν, η ισχύς μέσω του μετατροπέα ισχύος και η αποδιδόμενη ισχύς του στάτη, βασισμένη στην ισχύ που αποδίδεται στο δίκτυο P_{grid} ή στη μηχανική ισχύ, μπορούν να εκφραστούν ως εξής:

$$P_{rotor} \approx -s \cdot P_{stator}$$

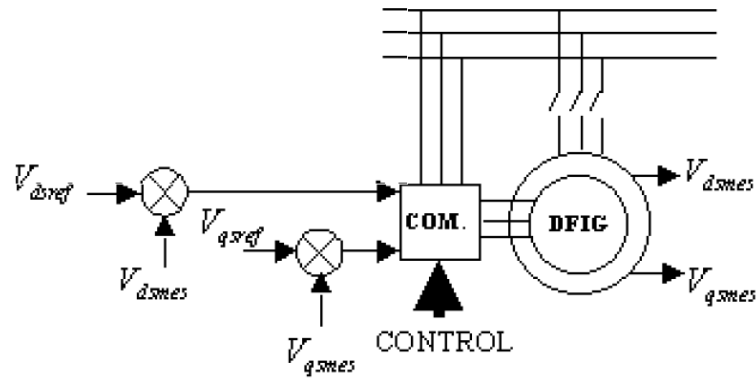
$$P_{stator} \approx P_{grid} / (1-s) = \eta_{gen} \cdot P_{mech} / (1-s)$$

όπου η_{gen} είναι ο βαθμός απόδοσης της γεννήτριας. Εξαρτώμενη από τις λειτουργικές συνθήκες του άξονα οδήγησης, η ισχύς αποδίδεται προς το δρομέα ή αναχωρεί από αυτόν: ρέει από το δίκτυο μέσω του μετατροπέα προς τον δρομέα ($P_{rotor} < 0$) στην υποσύγχρονη κατάσταση, ή αντίστροφα ($P_{rotor} > 0$) στην υπερσύγχρονη κατάσταση. Όμως, ο στάτης και στις δύο περιπτώσεις τροφοδοτεί το δίκτυο ($P_{grid} > 0$).

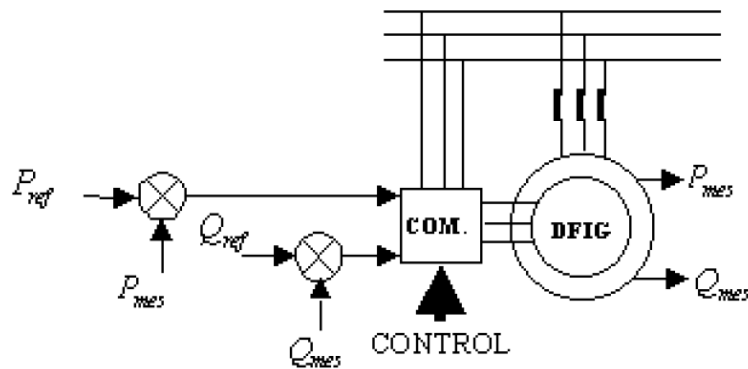
Η παρουσία του μετατροπέα ισχύος επιτρέπει στην γεννήτρια διπλής τροφοδοσίας μία πιο ευέλικτη λειτουργία σε σχέση με μία γεννήτρια βραχυκυκλωμένου κλωβού. Επίσης, πετυχαίνει απόζευξη της μηχανικής από την ηλεκτρική συχνότητα μέσω ρευμάτων μεταβλητής συχνότητας στο δρομέα, πάντα σύμφωνα όμως με την ταχύτητα του άξονα. Μέσω δακτυλίων, ο μετατροπέας τροφοδοτεί τα τυλίγματα του δρομέα με τάση μεταβλητού πλάτους και συχνότητας και έτσι μπορεί να επιτευχθεί έλεγχος της άεργου ισχύος, εφόσον η γεννήτρια διπλής τροφοδοσίας είναι ικανή να παράγει ή να απορροφήσει άεργο ισχύ προς ή από το δίκτυο, με τη δυνατότητα ελέγχου της τάσης. Επιπλέον, επιτυγχάνεται η απόζευξη του ελέγχου ενεργού και άεργου ισχύος με ανεξάρτητο έλεγχο του ρεύματος του δρομέα. Επίσης, ο μετατροπέας ισχύος μπορεί να μαγνητίσει τη μηχανή μέσα από το κύκλωμα του δρομέα, ανεξάρτητα από την τάση του δικτύου.

4.6.3 Έλεγχος της DFIG

Καθώς συνδέεται η DFIG με το δίκτυο, η σύνδεση πρέπει να γίνει σε 3 βήματα, τα οποία παρουσιάζονται παρακάτω. Το πρώτο βήμα είναι ο έλεγχος (χρήση ελεγκτή) των τάσεων στάτη με τις τάσεις δικτύου σαν αναφορά όπως φαίνεται στο σχήμα 4.16. Το δεύτερο βήμα είναι η σύνδεση του στάτη με το δίκτυο. Στο βαθμό που οι τάσεις των δυο έχουν συγχρονιστεί, η σύνδεση μπορεί να γίνει χωρίς προβλήματα. Όταν η σύνδεση επιτευχθεί, το τρίτο βήμα είναι ο έλεγχος της ισχύος (ελεγκτής) ανάμεσα στο στάτη και στο δίκτυο. Αυτό παρουσιάζεται στο σχήμα 4.17.

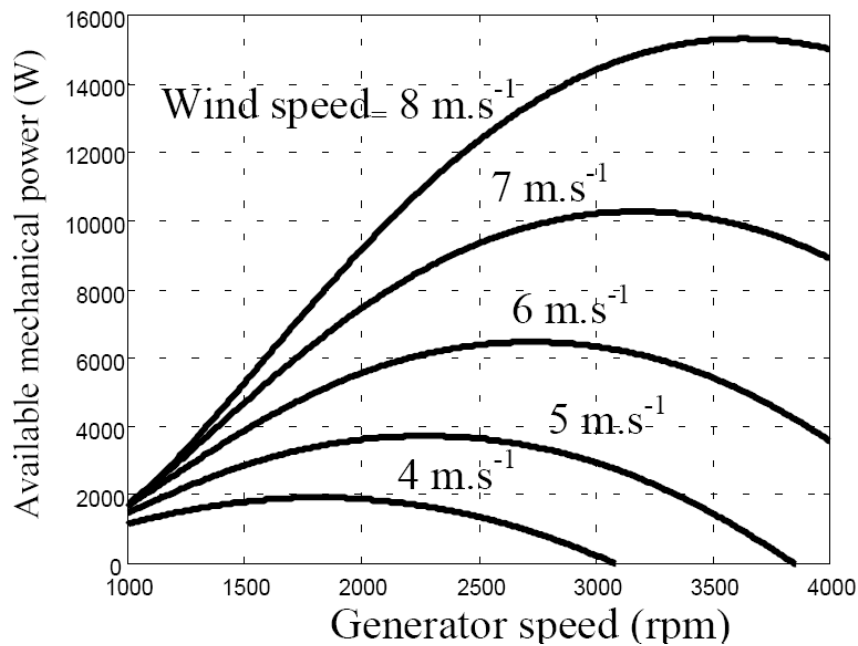


Σχήμα 4.16 Πρώτο βήμα της σύνδεσης της DFIG στο δίκτυο.



Σχήμα 4.17 Τρίτο βήμα στη σύνδεση της DFIGI με το δίκτυο.

Για δεδομένη ανεμογεννήτρια, αρκετές σχέσεις υπάρχουν ανάμεσα στην ταχύτητα του ανέμου, την περιστροφική ταχύτητα της γεννήτριας και τη διαθέσιμη μηχανική ισχύ, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.18. Αν η ταχύτητα του ανέμου έχει μετρηθεί και τα μηχανικά χαρακτηριστικά της ανεμογεννήτριας είναι γνωστά, συμπεραίνεται σε πραγματικό χρόνο η θεωρητική ηλεκτρική ισχύ που μπορεί να δώσει η γεννήτρια. Τότε είναι δυνατό να ελεγχθεί η γεννήτρια με χρήση της ισχύος σαν αναφορά.



Σχήμα 4.18 Παράδειγμα για τις καμπύλες ισχύος της ανεμογεννήτριας.

4.6.4 Εγκατάσταση του συστήματος ελέγχου

Για να επιτευχθεί διανυσματικός έλεγχος της ενεργού και της άεργου ισχύος του στάτη, επιλέγουμε ένα d-q πλαίσιο αναφοράς σε συγχρονισμό με τη ροή στάτη. Θέτοντας το διάνυσμα της ροής στάτη σε ευθυγράμμιση με το d-άξονα, ακολουθεί:

$$\psi_{ds} = \psi_s \text{ and } \psi_{qs} = 0$$

$$\Gamma_e = -p \frac{M}{L_s} I_{qr} \psi_{ds}$$

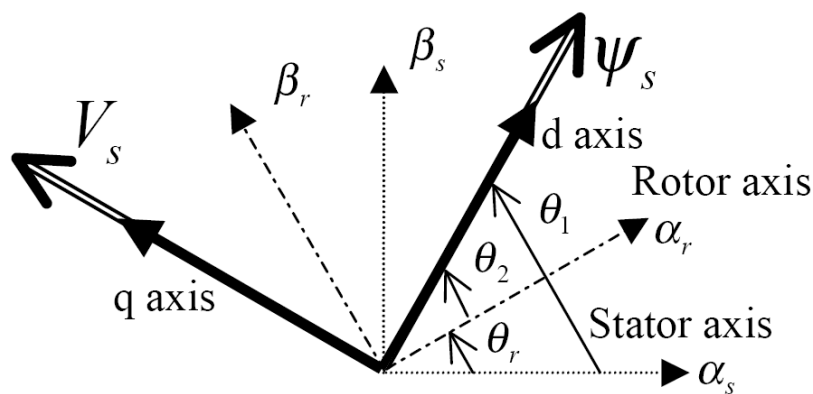
Η ηλεκτρομαγνητική ροπή και συνεπώς η ενεργός ισχύς θα εξαρτάται μόνο από την q-συνιστώσα του ρεύματος δρομέα. Θεωρώντας αμελητέα την ανά φάση αντίσταση του στάτη R_s (αυτό ισχύει για τις μέσης ισχύος μηχανές που χρησιμοποιούνται στα συστήματα αιολικής Ενέργειας), η τάση στάτη για τη φάση νούμερο n της DFIG γράφεται ως εξής:

$$V_{sn} \approx \frac{d\psi_{sn}}{dt} ; \quad n=a, b \text{ or } c.$$

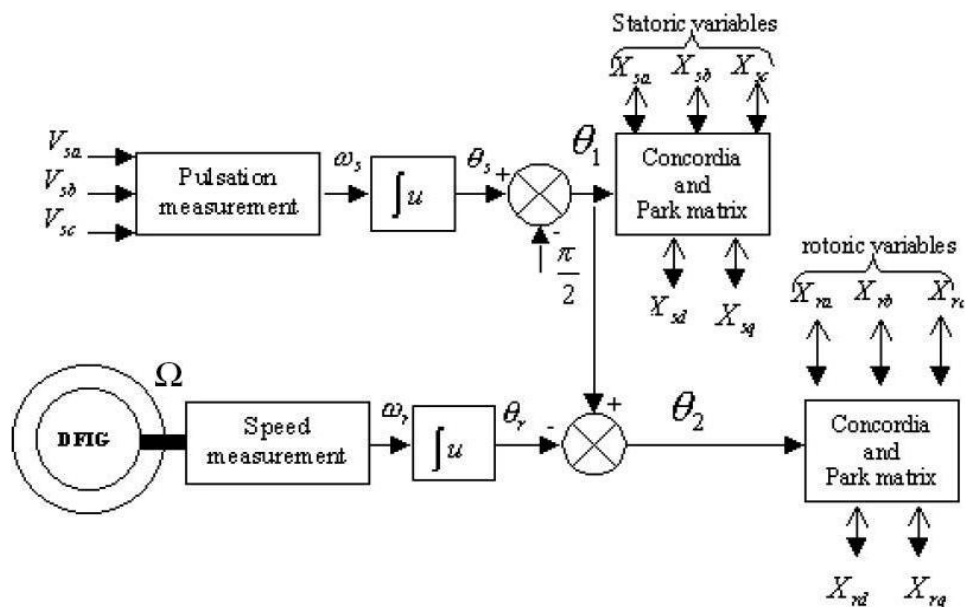
Το διάνυσμα της τάσης στάτη συνεπώς προπορεύεται κατά ένα τεταρτημόριο του διανύσματος ροής του στάτη. Έτσι προκύπτει:

$$V_{ds} = 0 \text{ and } V_{qs} = V_s$$

Για να περιγραφούν οι γωνίες μετασχηματισμού των μεταβλητών στάτη και δρομέα, πρέπει να μετρηθούν ο παλμός στάτη και η μηχανική ταχύτητα, αυτό είναι παρακάτω στο σχήμα 4.20. Η τοποθέτηση των διανυσμάτων και των γωνιών μετασχηματισμού προκύπτει από αυτές τις μετρήσεις όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 4.19. Οι γωνίες θ_1 και θ_2 χρησιμοποιούνται στη μήτρα Park για τη μετατροπή των στρεφόμενων μεταβλητών δυο φάσεων του στάτη και του δρομέα σε καθορισμένες μεταβλητές δυο φάσεων.



Σχήμα 4.19 Τοποθέτηση των διανυσμάτων και γωνιών μετασχηματισμού.



Σχήμα 4.20 Καθορισμός των γωνιών μετασχηματισμού.

Με την επιλογή αυτού του πλαισίου αναφοράς, οι τάσεις και οι ροές στάτη μπορούν να γραφούν ως εξής:

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{ds} = 0 \quad ; \quad V_{qs} = V_s = \omega_s \Psi_{ds} \\ \Psi_{ds} = 0 = L_s I_{qs} + M I_{qr} \quad ; \quad \Psi_{dr} = L_r I_{dr} + M I_{ds} \\ \Psi_{qs} = \Psi_s = L_s I_{ds} + M I_{dr} \quad ; \quad \Psi_{qr} = L_r I_{qr} + M I_{qs} \end{array} \right.$$

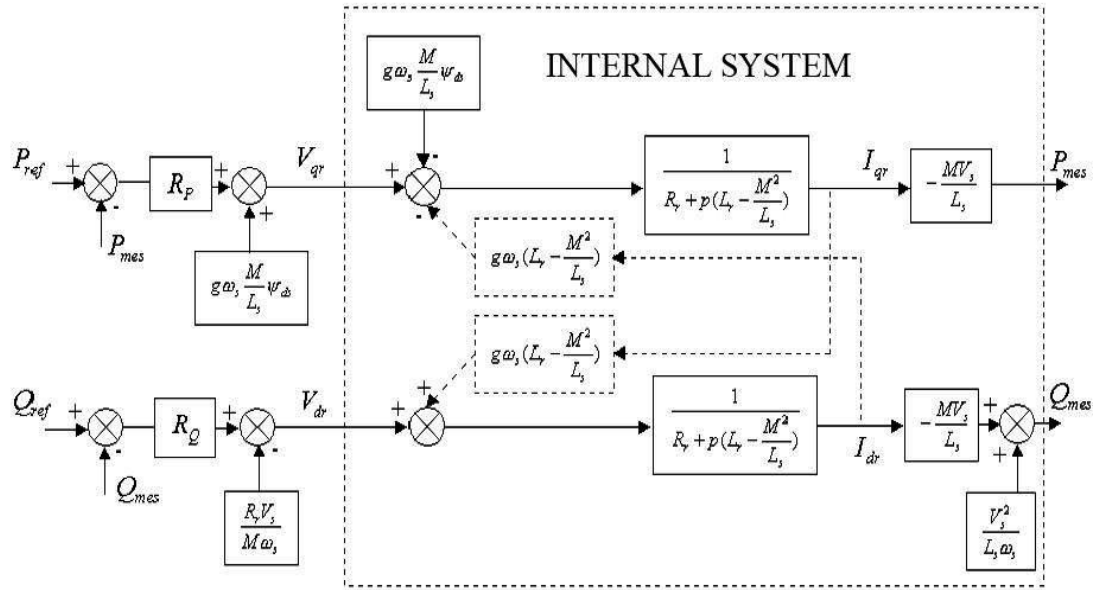
Η ενεργός και η άεργος ισχύς του στάτη, οι τάσεις και οι ροές του δρομέα μπορούν να γραφούν σαν συναρτήσεις των ρευμάτων δρομέα ως εξής:

$$\left\{ \begin{array}{l} P = -V_s \frac{M}{L_s} I_{qr} \\ Q = \frac{V_s \Psi_s}{L_s} - \frac{V_s M}{L_s} I_{dr} \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \Psi_{dr} = (L_r - \frac{M^2}{L_s}) I_{dr} + \frac{M V_s}{\omega_s L_s} \\ \Psi_{qr} = (L_r - \frac{M^2}{L_s}) I_{qr} \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{dr} = R_r I_{dr} + (L_r - \frac{M^2}{L_s}) \frac{dI_{dr}}{dt} - g \omega_s (L_r - \frac{M^2}{L_s}) I_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + (L_r - \frac{M^2}{L_s}) \frac{dI_{qr}}{dt} + g \omega_s (L_r - \frac{M^2}{L_s}) I_{dr} + g \omega_s \frac{M V_s}{\omega_s L_s} \end{array} \right.$$

Στη μόνιμη κατάσταση, οι δεύτεροι όροι των τελευταίων δυο εξισώσεων είναι μηδέν. Οι τρίτοι όροι, που αποτελούν τους όρους διαγώνιας σύνδεσης, μπορούν να θεωρηθούν αμελητέοι εξαιτίας της μικρής τους επίδρασης. Γνωρίζοντας τις τέσσερις τελευταίες σχέσεις, είναι δυνατό να σχεδιαστούν ελεγκτές και να συγκροτηθεί το συνολικό διάγραμμα block του συστήματος που ελέγχετε, αυτό παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα.

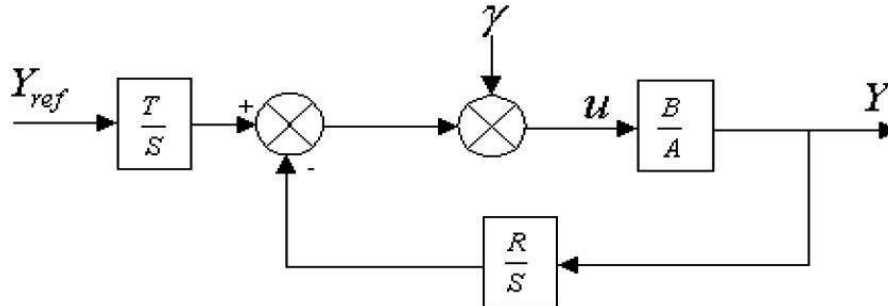


Σχήμα 4.21 Έλεγχος ισχύος της DFIG.

Τα μπλοκ RP και RQ αντιπροσωπεύουν ελεγκτές ενεργού και άεργου ισχύος. Ο σκοπός των ελεγκτών είναι να δώσουν υψηλές δυναμικές αποκρίσεις σε όρους κατάστασης αναφοράς, ευαισθησίας σε διαταραχές και αντοχής στις μεταβολές των παραμέτρων της μηχανής. Για να γίνει καλύτερα κατανοητό το θέμα, μελετείται ο RST ελεγκτής που βασίζεται στη θεωρία τοποθέτησης των πόλων. Υποθέτοντας πως οι τρίτοι όροι των δύο τελευταίων εξισώσεων, που αναπαρίστανται με διακεκομμένες γραμμές, αμελούνται, τα ρεύματα δρομέα συνδέονται ευθέως με την ενεργό και την άεργο ισχύ με σταθερούς όρους. Τότε οι εσωτερικοί βρόχοι ελέγχου του ρεύματος δεν είναι απαραίτητοι. Ο σχεδιασμός του PI ελεγκτή επιτυγχάνεται με την μέθοδο της αναπλήρωσης πόλων και δε θα εξεταστεί εδώ. Ο σχεδιασμός του RST ελεγκτή αναλύεται παρακάτω.

4.6.5 Σχεδιασμός RST ελεγκτή

Το διάγραμμα block ενός συστήματος με τον RST ελεγκτή του παρουσιάζεται στο σχήμα 4.22.



Σχήμα 4.22 Διάγραμμα block του RST ελεγκτή.

Το σύστημα με συνάρτηση μεταφοράς B/A έχει Y_{ref} σαν αναφορά και διαταράσσεται με τη μεταβλητή γ . R , S και T είναι πολυώνυμα τα οποία αποτελούν τον ελεγκτή. Δηλαδή:

$$A = L_s R_r + p L_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \text{ and } B = M V_s$$

Όπου p είναι ο τελεστής Laplace.

Η συνάρτηση μεταφοράς του ελεγχόμενου συστήματος είναι:

$$Y = \frac{BT}{AS + BR} Y_{ref} + \frac{BS}{AS + BR} \gamma$$

Με την εξίσωση Besout, προκύπτει:

$$D = AS + BR = CF$$

Για καλή ακρίβεια προσαρμογής, επιλέγουμε έναν αυστηρά κατάλληλο ελεγκτή. Έτσι, αν A είναι ένα πολυώνυμο n τάξης ($\deg(A) = n$), είναι:

$$\begin{aligned} \deg(D) &= 2n+1 \\ \deg(S) &= \deg(A)+1 \\ \deg(R) &= \deg(A). \end{aligned}$$

Επίσης ισχύει:

$$\begin{cases} A = a_1 p + a_0 & ; R = r_1 p + r_0 \\ B = b_0 & ; S = s_2 p^2 + s_1 p + s_0 \\ D = d_3 p^3 + d_2 p^2 + d_1 p + a_0 \end{cases}$$

Για να βρεθούν οι συντελεστές των πολυωνύμων R και S, η μέθοδος τοποθέτησης των πόλων είναι αποδεκτή με T_c ορίζοντα ελέγχου και T_f ορίζοντα φιλτραρίσματος. Οπότε:

$$p_c = -\frac{1}{T_c} \text{ and } p_f = -\frac{1}{T_f}$$

Όπου p_c είναι ο πόλος του C και p_f είναι ο πόλος του F. Ο πόλος p_c πρέπει να επιταχύνει το σύστημα και γενικά επιλέγεται τρεις με πέντε φορές μεγαλύτερος από τον πόλο του A p_a . Ο p_f γενικά επιλέγεται τρεις φορές μικρότερος από τον p_c και ισχύει:

$$T_c = \frac{1}{3} T_f = -\frac{1}{3 p_a} = \frac{L_s (L_r - \frac{M^2}{L_s})}{5 L_s R_r}$$

Οι διαταραχές γενικά θεωρούνται σαν σταθερά. Η μεταβλητή γ τότε μπορεί να παρασταθεί από μια βηματική είσοδο. Για να ληφθεί καλή αποκοπή διαταραχών, το θεώρημα τελικής τιμής απαιτεί ο όρος (BS)/(AS + BR) να τείνει στο μηδέν:

$$\lim_{p \rightarrow 0} p \frac{S \gamma}{D p} = 0$$

Για να επιτευχθεί ικανοποιητική σταθερότητα στη μόνιμη κατάσταση, πρέπει να είναι $D(0)$ διάφορο του μηδενός και να ισχύει η συνθήκη της τελικής τιμής. Η Bezout εξίσωση οδηγεί σε 4 εξισώσεις με 4 άγνωστους όρους όπου οι συντελεστές του D συνδέονται με τους συντελεστές των πολυωνύμων R και S μέσω της μήτρας Sylvester:

$$\begin{pmatrix} d_3 \\ d_2 \\ d_1 \\ d_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_1 & 0 & 0 \\ 0 & a_0 & b_0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & b_0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} s_2 \\ s_1 \\ r_1 \\ r_0 \end{pmatrix}$$

Για τον προσδιορισμό των συντελεστών του T, θεωρείται πως στη σταθερή κατάσταση το Y πρέπει να είναι ίσο με το Y_{ref} , δηλαδή:

$$\lim_{p \rightarrow 0} \frac{BT}{AS + BR} = 1$$

Ως γνωστόν, $S(0) = 0$ και άρα $T = R(0)$. Για να διαχωριστεί η ρύθμιση και η κατάσταση αναφοράς, ο όρος $(BT)/(AS + BR)$ πρέπει να εξαρτάται μόνο από το C. Επομένως γίνεται $T = hF$ (όπου h είναι πραγματικός), έτσι:

$$\frac{BT}{AS + BR} = \frac{BT}{D} = \frac{BhF}{CF} = \frac{Bh}{C}$$

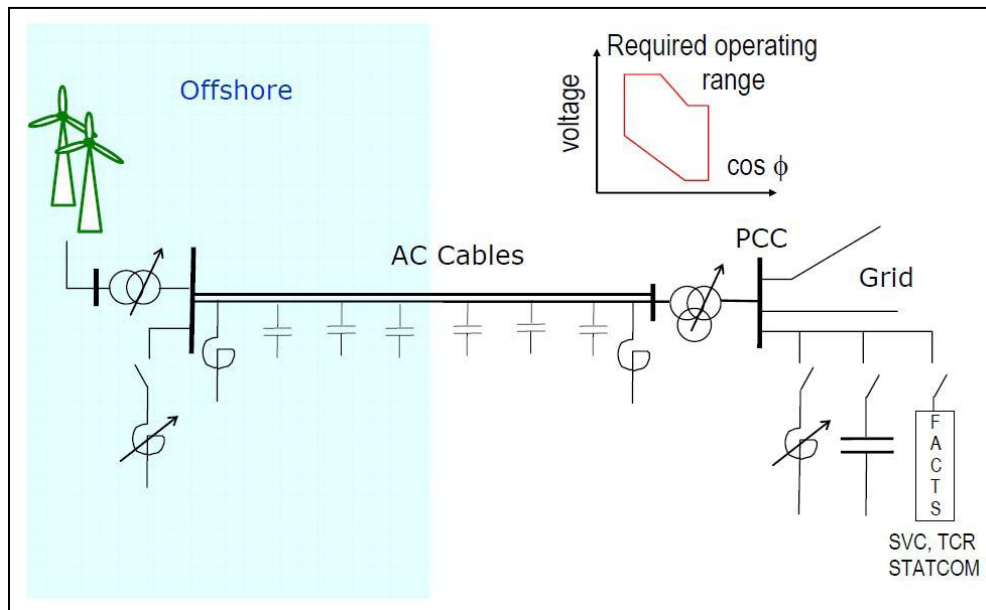
Καθώς είναι $T = R(0)$, προκύπτει ότι $h = [R(0)]/[F(0)]$.

Με αυτό τον τρόπο καταλήγει το σύστημα να έχει υψηλότερες δυναμικές αποκρίσεις σε όρους κατάστασης αναφοράς, ευαισθησίας σε διαταραχές και αντοχής στις μεταβολές των παραμέτρων της μηχανής.

4.7 Έλεγχος άεργου ισχύος

Ο διανυσματικός έλεγχος για την οδήγηση της DFIG δίνει μεγάλη ευελιξία και πολλές δυνατότητες σχετικά με τη ρύθμιση της άεργου ισχύος. Τόσο σε steady-state καταστάσεις, όσο και σε περιπτώσεις σφαλμάτων η DFIG μπορεί να συνεισφέρει με πολύ αποτελεσματικό τρόπο στην ευστάθεια του δικτύου στο οποίο εντάσσεται. Ίσως μαζί με την ικανότητα για fault-ride through (παραμονή στο δίκτυο ακόμα και σε σοβαρά σφάλματα του δικτύου), να είναι οι δύο κύριοι λόγοι για τους οποίους η συγκεκριμένη ανεμογεννήτρια έχει γίνει τόσο δημοφιλής στην αγορά των αιολικών συστημάτων τα τελευταία χρόνια.

Ένα κλασικό παράδειγμα είναι ένα off-shore αιολικό πάρκο το οποίο συνδέεται στο δίκτυο μέσω ενός υποβρύχιου καλωδίου και θεωρώντας επίσης ότι ο διαχειριστής του δικτύου απαιτεί στο σημείο κοινής σύνδεσης (PCC) του πάρκου, συντελεστή ισχύος μονάδα ($\cos\phi=1$).

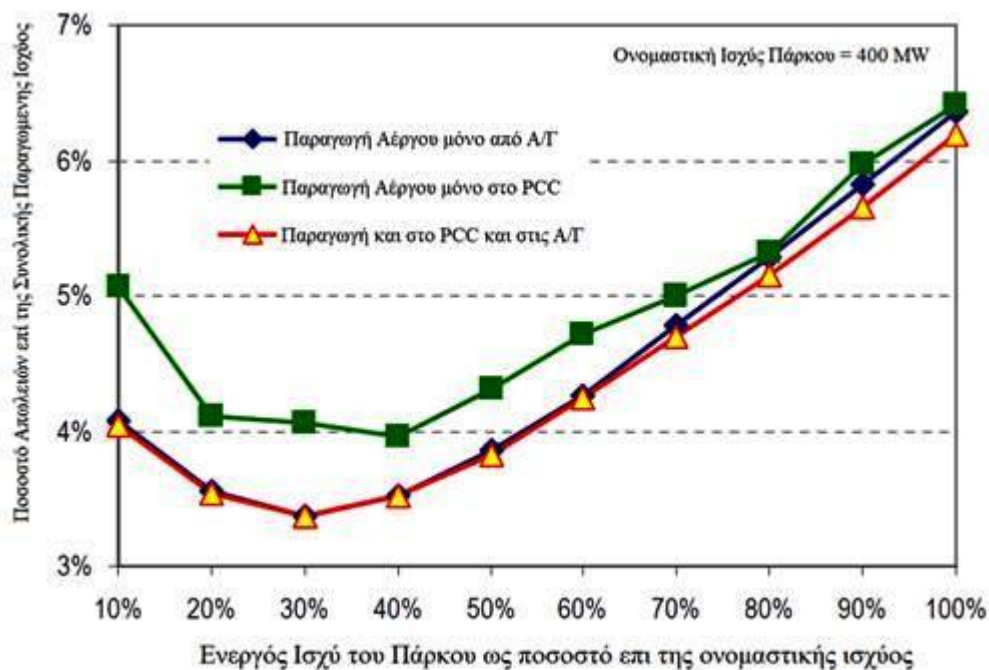


Σχήμα 4.23 Μέσα ρύθμισης άεργου ισχύος σε offshore αιολικό πάρκο.

Όπου αποτελείται από:

- Το υποβρύχιο καλώδιο το οποίο είναι πηγή άεργης ισχύος.
- Μετασχηματιστές με διακόπτες On Load.
- Συστοιχίες πυκνωτών και πηνίων.
- Διάφορα FACTs, συνήθως SVCs και STATCOMs.
- Οι ανεμογεννήτριες DFIG.

Η αποτελεσματικότερη στρατηγική ελέγχου της τάσης είναι η συμμετοχή όλων των δυνατών μέσων, ούτε δηλαδή μόνο των ανεμογεννητριών, ούτε μόνο των μέσων ρύθμισης στο PCC. Αυτό άλλωστε είναι κάτι που αναμέναμε, μιας και η αντιστάθμιση έχει καλύτερα αποτελέσματα όταν γίνεται επί μέρους τοπικά παρά κάπου κεντρικά.



Σχήμα 4.24 Απώλειες συναρτήσει της στρατηγικής ρύθμισης άεργου.

Ωστόσο, σε άλλα δίκτυα που δεν έχουν τόσο αυστηρές απαιτήσεις, ούτε τον παραπάνω αναφερόμενο εξοπλισμό, οι ανεμογεννήτριες πιθανότατα καλούνται να αναλάβουν κυρίαρχο ρόλο στο ισοζύγιο άεργου ισχύος.

Η DFIG έχει τη δυνατότητα να τροφοδοτήσει ή να απορροφήσει την άεργο από το δίκτυο από δύο δρόμους.

- 1) Μέσω του στάτη της μηχανής, με έλεγχο δηλαδή του μετατροπέα από την πλευρά του δρομέα (RSC).
- 2) Απευθείας, μέσω του μετατροπέα στην πλευρά του δικτύου (LSC).

Συνήθως ο LSC δεν συμμετέχει κατά προτεραιότητα στην ρύθμιση της άεργου γιατί αυτό είναι προτιμότερο να γίνεται μέσω του RSC. Η άεργου που απορροφάται από τον RSC στη συχνότητα ολίσθησης $f_2 = s \cdot f_1$ μετασχηματίζεται ή καλύτερα “μεγεθύνεται” στην πλευρά του στάτη στη συχνότητα f_1 . Έτσι,

$$Q_s = \frac{Q_r}{|s|}$$

και η άεργου που μετρίεται στα δακτυλίδια του δρομέα είναι μικρότερη από αυτή που

μετρίεται στους ακροδέκτες του στάτη. Γι' αυτό το λόγο, είναι προτιμότερο αν χρειάζεται να παράγεται μια συγκεκριμένη ποσότητα έργου ισχύος να δίνεται μέσω του RSC και όχι του LSC.

Από την άλλη όμως η παροχή έργου από τον RSC πρέπει πρώτα να περάσει μέσα από τη μηχανή και να βγει έπειτα στην έξοδο της γεννήτριας, ενώ η παροχή έργου ισχύος από τον LSC είναι πιο άμεση. Ο LSC συμμετέχει κατά βούληση και αυτός στη ρύθμιση τόσο σε steady καταστάσεις, όσο και σε σφάλματα. Ειδικά σε σφάλματα η συμμετοχή του ίσως είναι ζωτικής σημασίας.

Για τους δύο μετατροπείς η φαινόμενη ισχύ που περνά από τους διακόπτες των μετατροπέων δεν πρέπει να ξεπερνά την ονομαστική. Διαφορετικά οι μετατροπείς μπλοκάρουν για να προλάβουν την καταστροφή των διακοπών. Έτσι, είναι λογικό με αύξηση της παραγόμενης ενεργής ισχύος να περιορίζεται η δυνατότητα ρύθμισης έργου με σκοπό να μην ξεπεραστεί η συνολική φαινόμενη. Αντιθέτως, σε περιπτώσεις φτωχού αιολικού δυναμικού η DFIG έχει μεγάλα περιθώρια ρύθμισης έργου ισχύος. Μια πιθανή υπερδιαστασιολόγηση των μετατροπέων αυξάνει τις δυνατότητες, αυξάνει όμως και το κόστος.

Μία πλήρης μαθηματική ανάλυση σχετικά με τις δυνατότητες παροχής έργου από την DFIG. Η δυνατότητα καθορίζεται από τρεις παράγοντες

1) Τον περιορισμό των μέγιστων ρευμάτων του στάτη.

Από τις σχέσεις $P_s = V_{qs} i_{qs}$ και $Q_s = V_{qs} i_{qs}$ προκύπτει:

$$-\sqrt{I_{smax}^2 - \left(\frac{P_s}{V_{qs}}\right)^2} \leq Q_s \leq \sqrt{I_{smax}^2 - \left(\frac{P_s}{V_{qs}}\right)^2}$$

2) Τον περιορισμό των μέγιστων ρευμάτων στο δρομέα.

Από την απαίτηση των ρευμάτων του δρομέα προκύπτουν οι εξισώσεις:

$$Q_s \geq -\frac{V_{qs}^2}{\omega_s(L_{sl} + L_m)} - \frac{V_{qs}L_m}{(L_{sl} + L_m)} \sqrt{I_{rmax}^2 - \left[\frac{P_s(L_{sl} + L_m)}{V_{qs}L_m}\right]^2}$$

$$Q_s \leq -\frac{V_{qs}^2}{\omega_s(L_{sl} + L_m)} + \frac{V_{qs}L_m}{(L_{sl} + L_m)} \sqrt{I_{rmax}^2 - \left[\frac{P_s(L_{sl} + L_m)}{V_{qs}L_m}\right]^2}$$

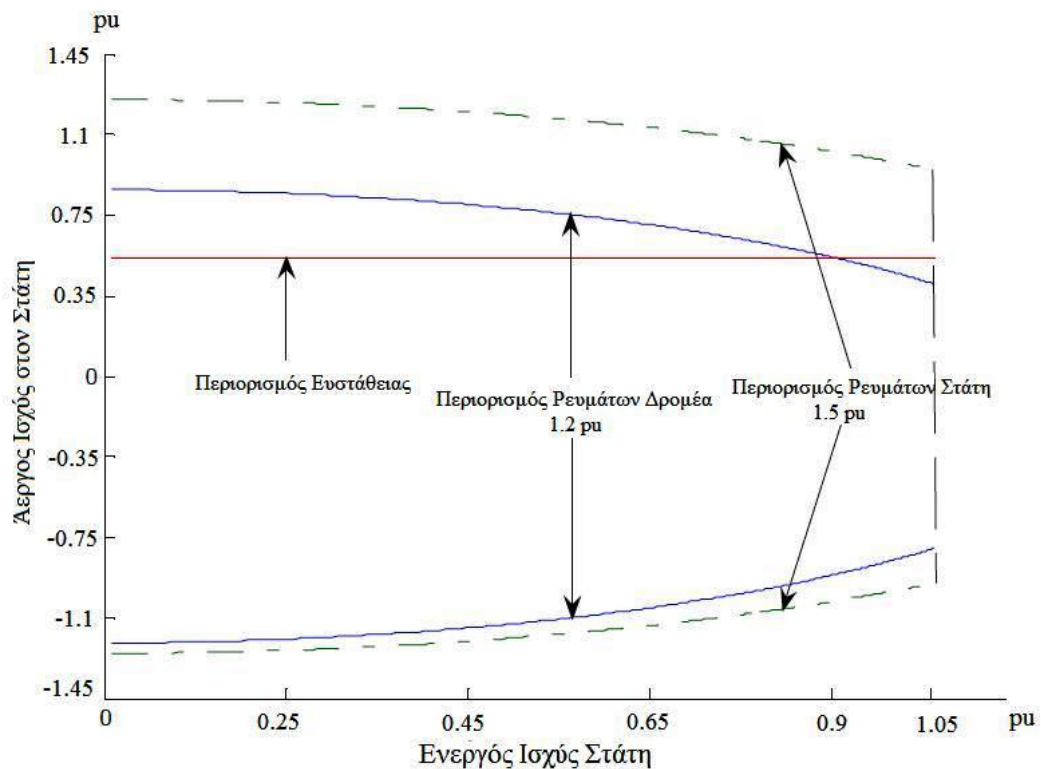
Από τις παραπάνω σχέσεις συμπεραίνεται πρώτον, ότι η DFIG είναι περισσότερο ικανή να απορροφά άεργο ισχύ απ' ό,τι να παράγει και δεύτερον η ενεργός ισχύ του στάτη έχει σημαντική επίδραση στην δυνατότητα ρύθμισης άεργου.

3) Τον περιορισμό για ευσταθή λειτουργία της μηχανής

Προκύπτει ότι

$$Q_s \leq \frac{3V_{qs}^2}{\omega_s(L_{sl} + L_m)}$$

Από το συνδυασμό των τριών παραπάνω περιορισμών προκύπτουν οι καμπύλες μέγιστης ρύθμισης άεργου ισχύος.



Σχήμα 4.25 Καμπύλες ορίων ρύθμισης άεργου ισχύος ανεμογεννήτριας DFIG 2.75 MW.

Από το διάγραμμα του σχήματος γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι αναλόγως την φόρτιση της γεννήτριας αλλάζουν και οι δυνατότητες μας για ρύθμιση. Επίσης τα περιθώρια αλλάζουν σημαντικά αναλόγως αν επιθυμείται να απορροφηθεί ή να παραχθεί άεργος ισχύς.

Συμπερασματικά, το θέμα της ρύθμισης της άεργου ισχύος σε μία DFIG ανεμογεννήτρια απαιτεί προσεκτικό σχεδιασμό και σωστή διαστασιολόγηση των μετατροπέων. Επίσης απαιτείται μία λογική στρατηγική κατανομής της άεργου στους δύο μετατροπείς.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στόχος της διπλωματικής εργασίας ήταν να αναδειχθούν οι ιδιαιτερότητες της επαγωγικής γεννήτριας διπλής τροφοδότησης στάτη και δρομέα, μίας 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 τη μέθοδο ελέγχου είναι πολύ μεγάλη.

Οι εξισώσεις της μηχανής εκφράστηκαν σε d-q πλαίσιο με βάση τις γνωστή θεωρία μετασχηματισμών και πλαισίων αναφοράς. Υιοθετήθηκε η μέθοδος του διανυσματικού ελέγχου με κατάλληλα πλαίσια αναφοράς για κάθε έναν από τους δύο μετατροπείς που συνδέονται στο δρομέα της γεννήτριας επαγωγής διπλής τροφοδότησης. Με κατάλληλη επιλογή του πλαισίου αναφοράς για το μετατροπέα από την πλευρά του δικτύου εξασφαλίζεται ότι η άεργος ισχύς που ανταλλάσσεται ανάμεσα στο μετατροπέα και το δίκτυο είναι μηδενική. Βασική λειτουργία του μετατροπέα αυτού είναι η διατήρηση της συνεχούς τάσης σε σταθερή τιμή. Οι τιμές των παραμέτρων του ελεγκτή της συνεχούς τάσης καθορίζουν την ποιότητα της απόκρισης του ελεγκτή αυτού.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Control of a doubly-fed induction generator for wind energy conversion systems. F. Poitiers, M. Machmoum, R. Le Doeuff and M.E. Zaim.
2. S. Heier, "Grid integration of wind energy conversion systems.", John Wiley & Sons Ltd, England, 1998.
3. L. Xu, W. Cheng, "Torque and reactive power control of a doubly-fed induction machine by position sensorless scheme.", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 31, N°3, pp 636-642, May/June 1995.
4. M. Yamamoto, O. Motoyoshi, "Active and reactive power control for doubly-fed wound rotor induction generator.", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 6, N° 4, Oct. 1991, pp 624-629.
5. M. B. Rifai, T. H. Ortmeier, "Dynamic analysis of a doubly fed generator in power system applications.", Electric Machines and Power Systems, Vol. 21, pp 141-150, 1993.
6. B. Hopfensperger, D.J. Atkinson, R.A. Lakin, : "Stator-flux-oriented control of a doubly fed induction machine with and without position encoder.", IEE Proc.-Electr. Power Appl., Vol. 147, N° 4, July 2000, pp 241-250.
7. L. Morel, A. Mirzaian, J.M. Kauffmann: "Field oriented control for double fed induction machine : simulation and experimental results.", ELECTRIMACS'96., Vol. 2, September 17-18- 19, 1996, pp 391,396.
8. D. Ramuz, A. Mirzaian, J.M. Kauffmann, S. Thani, H. Godfroid : "Control strategy of double fed machine for variable speed drives.", proceedings of ICEM 98, Istanbul, Sept. 1998, pp. 1340-1345.
9. P. De Larminat, "Automatique – Commande des systèmes linéaires", Seconde Edition 1997 Hermes.
10. T. Burton, D. Sharpe, N. Jenkins, E. Bossanyi, Wind Energy Hand Book. John Wiley & Sons, Ltd, 2001.

11. Προβλήματα από τη διασύνδεση ανεμογεννητριών σε ασθενή ενεργειακά συστήματα. Ε. Τσιμπλοστεφανάκης Α. Σαφάκας.
12. V. Tsimplostephanakis, A. Safacas :”Investigation of the dynamic behaviour of a weak grid during connecting a wind turbine generator via simulation”, ELECTRIMACS 1996, Saint Nazaire, France, pp. 1095 - 1100.
13. 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.
14. V. Tsimplostephanakis, A. Safacas: “Dynamic behaviour of an Energy Weak Grid consisting of Diesel Motor - Synchronous Generator Unit and Wind Asynchronous Generator”, OPTIM 98, pp. 421-426, Brasov, Romania
15. L.L. Freris, Wind Energy Conversion Systems, Prentice Hall International (U.K) Ltd.1990.
16. S. A. De La Salle, D. Reardon, W. E. Leithead, M. J. Grimple, Review of wind turbine control, INT. J. CONTROL, 1990, Vol. 52, No. 6, pp. 1295-1310.
17. V. Tsimplostephanakis, A. Safacas: "Dynamic analysis and control of a wind energy conversion system using an asynchronous generator connecting at a weak grid", ELECTROMOTION '99, Patras, Greece.
18. Ανεμογεννήτριες και ηλεκτρονικά ισχύος. Μ. Π. Μπράτιτσης, Ε. Τσιμπλοστεφανάκης.
19. G.A Smith, “Power electronics applied to renewable energy sources”, PEMC 94”, p.p 1300-1309.
20. Σ. Παπαθανασίου, “Συμβολή στην ανάλυση ανεμογεννητριών μεταβλητών στροφών με ασύγχρονη γεννήτρια για την επιλογή του ηλεκτρικού σχήματος”, Διδακτορική διατριβή, 1997.
21. Γ. Μπεργελές: «Ανεμοκινητήρες», Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα, 1990.
22. A. Petersson, PhD. “Analysis, Modelling and Control of Doubly-Fed Induction Generators for Wind Turbines”, Division of Electric Power Engineering, Chalmers University of Technology, Sweden 2005.

23. Διασύνδεση αιολικών πάρκων με το εθνικό διασυνδεδεμένο σύστημα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας μέσω ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος. Σωκράτης Παστρωμάς. Αθανάσιος Σαφάκας.
24. Τεχνικό Φυλλάδιο Εταιρείας Vestas, “Digitally controlled WT in megawatt size with DFIG without position sensor”.
25. Σ. Α. Παστρωμάς, Διπλωματική Εργασία: «Μελέτη συστημάτων μετατροπής αιολικής ενέργειας σε ηλεκτρική-Κατευθείαν σύνδεση ανεμογεννητριών με το δίκτυο και σύνδεση μέσω ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος», Πάτρα, Οκτώβριος 2005.
26. Σύγχρονα συστήματα μετατροπής αιολικής ενέργειας σε ηλεκτρική. Δημήτρος Γκιαουάκης. Αθανάσιος Σαφάκας.
27. A.J Pujante-Lopez E.Gomez-Lazaro J.A Fuentes-<oreno A. Molina-Garcia A. Vigueras-Rodriguez: “Performance comparison of a DFIG wind turbine model under wind speed Variations”, EWEC2009, Marseille, 2009.
28. Νέρης Σ. Αριστομένης: “Ανάλυση και έλεγχος αιολικών συστημάτων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας”, -ιδασκτορική διατριβή, Πανεπιστήμιο Πατρών, Φεβρουάριος 1999.
29. Τζινευράκης Ε. Αντώνιος: “Μελέτη και κατασκευή διάταξης διασύνδεσης ανεμογεννήτριας με το δίκτυο”, -ιδασκτορική εργασία, Πανεπιστήμιο Πατρών. Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχ. & Μηχ. Τεχν. Υπολ 2004.
30. J.M. Elder, J.T. Boys, J.L. Woodward: “Self-excited induction machine as a small low-cost generator”, IEE PROCEEDINGS, Vol. 131, Pt. C, No. 2, March 1984.
31. A.K. Al Jabri, A.I. Alolah: “Capacitance requirement for isolated self-excited induction generator», IEE PROCEEDINGS, Vol. 137, Pt. B, No. 3 May 1990.
32. N.H. Malik, A.H. Al-Bahrani: “Influence of the terminal capacitor on the performance characteristics of a self excited induction generator”, IEE PROCEEDINGS, Vol. 137, Pt. C, No 2, March 1990.
33. H.Ø. Røstøen, T.M. Undeland, T. Gjengedal, “Doubly fed induction generator in a windturbine”, Proceedings of wind power and the impacts on power systems workshop, Oslo 2002.

34. Διερεύνηση της λειτουργίας αιολικού συστήματος σε ασύγχρονη γεννήτρια συνδεδεμένο στο δίκτυο χαμηλής τάσης. Ε. Τατάκης.
35. Ι. Α. Τεγόπουλος, Ηλεκτρικές Μηχανές, Μέρος Β' Μόνιμη Κατάσταση, Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα 1991.
36. Κ. Βουρνάς, Γ. Κονταξής, Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας, Αθήνα 1997.
37. Ηλεκτρική προστασία ανεμογεννητριών, Χαράλαμπος Γ. Κουτρούλης.
38. A. Wright, C. Christopoulos: Electrical power system protection, Chapman & Hall.
39. Cooper Power Systems: Electrical Distribution System Protection.
40. Donald Fink, H. Wayne Beaty: Standard handbook for electrical engineers, McGraw Hill.
41. Michael A. Anthony: Electric power system protection and coordination, McGraw Hill.
42. Δ. Κ. Τσανάκα: Συμμετρικές συνιστώσες και ανάλυση σφαλμάτων στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, Ξάνθη 1990.
43. www.electroepistimi.blogspot.com.
44. Wind energy and research, www.ewea.org.
45. Wind energy statistics, www.ewea.org.

