

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΠΑΤΡΩΝ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΙΑΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αριθμός 1221

**Χρήση ασύγχρονης μηχανής για την παραγωγή
ηλεκτρικής ενέργειας από ανεμογεννήτριες.**

ΣΠΟΥΔΑΣΤΕΣ:

Παπαδόπουλος Βασίλης

Πέττας Αριστείδης

ΕΙΣΗΓΗΤΗΣ:

Χαραλαμπάκος Βασίλης

ΠΑΤΡΑ ΜΑΪΟΣ 2012

ΠΡΟΛΟΓΟΣ:

Στην πτυχιακή αυτή εργασία γίνεται αρχικά μια εκτενής αναφορά στις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας και ειδικότερα στην μετατροπή αιολικής ενέργειας σε ηλεκτρική όπου θα επικεντρωθούμε στον τομέα των ανεμογεννητριών. Στη συνέχεια θα αναφερθούν τα κυριότερα είδη ανεμογεννητριών μιας και αυτό είναι το αντικείμενο που θα μας απασχολήσει. Αυτά τα είδη θα τα κατηγοριοποιήσουμε βάσει της γεννήτριας που χρησιμοποιούν για τη σύνδεση τους με το δίκτυο.

Στο επόμενο κεφάλαιο θα μας απασχολήσει πιο αναλυτικά η ασύγχρονη γεννήτρια, θα μελετήσουμε την αρχή λειτουργίας της, την κατασκευή της καθώς και τα είδη της, αλλά θα γίνει και μια αναφορά στην σύγχρονη γεννήτρια. Επίσης θα παρουσιάσουμε τα πλεονεκτήματα αλλά και τα μειονεκτήματα της κάθε μιας από αυτές τις μηχανές.

Στο τέλος θα μελετήσουμε το ρόλο των ηλεκτρονικών ισχύος στην ασύγχρονη γεννήτρια, πως γίνεται ο έλεγχος της συχνότητας αλλά και ο έλεγχος της τάσης στην γεννήτρια. Επίσης κρίθηκε απαραίτητη και μια αναφορά στο πως επάγεται τάση χωρίς ρεύμα διέγερσης στη γεννήτρια καθώς και στο γεγονός που η τάση αλλά και η συχνότητα παραμένουν σταθερές.

Στο σημείο αυτό θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε θερμά τον καθηγητή μας κ. Βασίλη Χαραλαμπίκο, εισηγητή και επιβλέποντα της πτυχιακής μας εργασίας για την πολύτιμη καθοδήγηση του καθόλα την διάρκεια εκπόνησης της εργασίας αυτής.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ:

Το αντικείμενο της παρούσας πτυχιακής εργασίας είναι τα συστήματα μετατροπής αιολικής ενέργειας σε ηλεκτρική και πιο συγκεκριμένα οι ανεμογεννήτριες. Θα αναφερθούν γενικά κάποια στοιχεία για την αιολική ενέργεια, τα αιολικά πάρκα και τα είδη γεννητριών που χρησιμοποιούνται στις ανεμογεννήτριες. Οι ανεμογεννήτριες χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες βάσει της γεννήτριας που περιέχουν. Υπάρχουν ανεμογεννήτριες με σύγχρονη γεννήτρια με λειτουργία σε σχεδόν σταθερό αριθμό στροφών, αλλά εμείς θα ασχοληθούμε με την τεχνολογία που στηρίζεται στη χρήση ασύγχρονων γεννητριών που ακόμα και μέχρι σήμερα αποτελούν την πλειοψηφία των εν λειτουργία μηχανών.

Οι ασύγχρονες γεννήτριες χωρίζονται σε δυο κατηγορίες τις γεννήτριες βραχυκυκλωμένου κλωβού και δακτυλιοφόρου δρομέα. Το κύριο χαρακτηριστικό αυτών των γεννητριών είναι ότι παρουσιάζουν το μειονέκτημα ότι δεν παράγουν την άεργο ισχύ που απαιτείται για την εγκατάσταση του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου της, σε αντίθεση με την σύγχρονη γεννήτρια ή τη γεννήτρια συνεχούς ρεύματος, στις οποίες το πεδίο δημιουργείται από τα τυλίγματα της διέγερσης. Επομένως εάν μεν η ανεμογεννήτρια λειτουργεί παράλληλα με το δίκτυο, η άεργος ισχύς δίδεται στην γεννήτρια από αυτό, ενώ εάν πρόκειται να τροφοδοτεί ανεξάρτητο φορτίο (απομονωμένη λειτουργία), η άεργος ισχύς πρέπει να δοθεί από εξωτερική πηγή. Μια τέτοια πηγή αποτελούν οι στατοί πυκνωτές, οι οποίοι άλλωστε χρησιμοποιούνται ευρύτατα στην πράξη για την βελτίωση του συντελεστή ισχύος των εγκαταστάσεων.

Τέλος στην πτυχιακή εργασία θα αναλύσουμε τον τρόπο με τον οποίο μπορεί να αυτοδιεγερθεί μια ασύγχρονη μηχανή και τους τρόπους με τους οποίους γίνεται ο έλεγχος τάσης και συχνότητας. Επίσης τον τρόπο επαγωγής της τάσης χωρίς ρεύμα διέγερσης και πως η τάση και η συχνότητα διατηρούνται σταθερές.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ:

Πρόλογος.....	2
Περίληψη.....	3
Περιεχόμενα.....	4

Κεφάλαιο 1 – Εισαγωγή στις Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας

1.1 Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.....	6
1.2 Αιολική Ενέργεια.....	10
1.3 Μέρη Ανεμογεννήτριας.....	14
1.3.1 Μορφή Πτερυγίων.....	16
1.4 Κατηγορίες της Ανεμογεννήτριας.....	16
1.4.1 Τρίπτερες Ανεμογεννήτριες.....	17
1.4.2 Δίπτερες Ανεμογεννήτριες.....	18
1.4.3 Ανεμογεννήτριες Οριζόντιου Άξονα.....	18
1.4.4 Ανεμογεννήτριες Κάθετου Άξονα.....	19
1.4.5 Υπεράκτιες Ανεμογεννήτριες.....	20
1.5 Ενεργειακά χαρακτηριστικά της Ανεμογεννήτριας.....	23
1.6 Κριτήρια για την κατάλληλη θέση εγκατάστασης ενός αιολικού πάρκου.....	24

Κεφάλαιο 2 – Ασύγχρονες Μηχανές

2.1 Εισαγωγή.....	25
2.2 Αρχή Λειτουργίας των κινητήρων εναλλασσόμενου ρεύματος.....	26
2.3 Κατασκευαστική δομή των μηχανών εναλλασσόμενου ρεύματος.....	27
2.4 Το στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο.....	28
2.5 Είδη επαγωγικών κινητήρων.....	34
2.6 Ηλεκτρομαγνητική δομή του επαγωγικού κινητήρα.....	36
2.7 Η ολίσθηση.....	38
2.8 Ισοδύναμο κύκλωμα του επαγωγικού κινητήρα.....	39
2.9 Απώλειες των επαγωγικών κινητήρων.....	41
2.10 Ισχύς και ροπή των επαγωγικών κινητήρων.....	43
2.11 Χαρακτηριστική ταχύτητας – ροπής.....	44

2.12 Υπολογισμός της Αναπτυσσόμενης Ροπής.....	47
2.13 Κλάσεις των επαγωγικών κινητήρων.....	49
2.14 Πειραματικός προσδιορισμός των παραμέτρων του ισοδύναμου κυκλώματος.....	52
2.15 Η επαγωγική μηχανή ως γεννήτρια.....	56
2.16 Έλεγχος της ταχύτητας των επαγωγικών κινητήρων.....	58
2.17 Έλεγχος της ταχύτητας με ρύθμιση της αντίστασης του δρομέα.....	58
2.18 Έλεγχος της ταχύτητας με ρύθμιση της τάσης του στάτη.....	60
2.19 Έλεγχος της ταχύτητας με μεταβολή του αριθμού πόλων.....	61
2.20 Έλεγχος της ταχύτητας με μεταβολή της συχνότητας.....	63

Κεφάλαιο 3 – Ασύγχρονη Γεννήτρια DFIG

3.1 Ασύγχρονη Γεννήτρια.....	67
3.2 Ανεμογεννήτριες μεταβλητής ταχύτητας DFIG.....	78
3.3 Pitch Control (Έλεγχος μεταβολής της κλίσης πτερυγίων).....	81
3.4 Τεχνολογία μετατροπέων πηγής τάσης (VSC) και ρύθμισης του πλάτους παλμών (PWM).....	84
3.5 Μοντελοποίηση γεννήτριας επαγωγής διπλής τροφοδοσίας (DFIG).....	86
3.6 Ισοδύναμο κύκλωμα της ΓΕΔΤ.....	86
3.6.1 Είδη επαγωγικών μηχανών διπλής τροφοδοσίας (DFIG).....	87
3.7 Έλεγχος ρεύματος με την τεχνική σύγκρισης ράμπας (PI current control with ramp Comparison).....	90
3.8 Φίλτρα περιορισμού αρμονικών συνιστωσών ρεύματος.....	91
3.9 Διασύνδεση αιολικών πάρκων μεγάλης ισχύος.....	92
3.10 Έλεγχος μηχανής επαγωγής διπλής τροφοδοσίας (DFIG).....	94
3.11 Σύνδεση DFIG στο δίκτυο.....	95
3.12 Έλεγχος της DFIG.....	97
Βιβλιογραφία.....	99

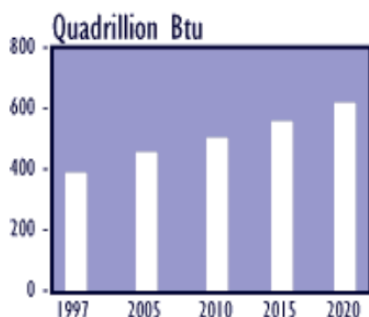
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1:

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

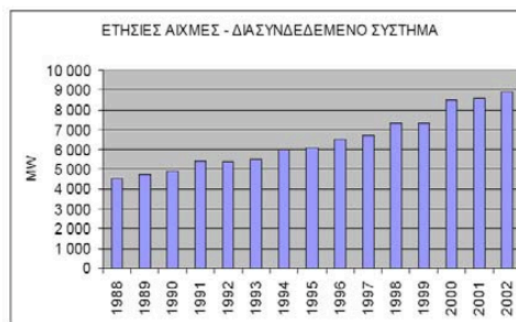
1.1 ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Στις μέρες μας, η ανάγκη για κατανάλωση όλο και περισσότερης ενέργειας, καθώς και η ανάγκη χρήσης πηγών ενέργειας που να μην μολύνουν το περιβάλλον, είναι γεγονός. Έτσι, λόγω της ισχυρής πίεσης από τις δυνάμεις που εκπροσωπούν την οικολογική αντίληψη, αλλά και της πίεσης για πιο «οικονομική» ενέργεια, οδηγηθήκαμε στην κατασκευή εγκαταστάσεων για άμεση χρήση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (αιολική, ηλιακή, υδροηλεκτρική, βιομάζα, γεωθερμική). Πιο συγκεκριμένα, τα τελευταία χρόνια υπάρχει έντονο ερευνητικό-αναπτυξιακό καθώς και εμπορικό ενδιαφέρον για τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (Α.Π.Ε.) και ειδικότερα για τη δημιουργία συστημάτων μέσω των οποίων αυτές να αξιοποιηθούν. Ο όρος *ανανεώσιμες* αποδίδεται, διότι οι πηγές αυτές έχουν το ιδιαίτερο χαρακτηριστικό ότι ανανεώνονται διαρκώς λόγω της φύσης τους, συνεπώς είναι ανεξάντλητες και προσφέρονται δωρεάν στον άνθρωπο προς εκμετάλλευση. Οι περισσότερες από τις ανανεώσιμες μορφές ενέργειας (μερικές από αυτές ήταν γνωστές και χρησιμοποιούνταν εδώ και πολλούς αιώνες) είναι αποτέλεσμα της δράσης της ηλιακής ενέργειας, π.χ. ο αέρας, τα κύματα των θαλασσών, η θερμοκρασιακή διαφορά των θαλασσών κ.λπ. Η μέση ηλιακή ενέργεια που προσπίπτει στην επιφάνεια της γης είναι 600 W/m², αλλά φυσικά η εκμεταλλεύσιμη τιμή διαφέρει πολύ, ανάλογα με τη γεωγραφική θέση και άλλους παράγοντες.

Αφορμή για αυτό το έντονο ενδιαφέρον αποτέλεσε η πετρελαϊκή κρίση του 1973, η οποία κατέστησε σαφές διεθνώς, ότι τα αποθέματα του πετρελαίου, στο οποίο βασιζόταν ως επί το πλείστον η παραγωγή τεράστιας ποσότητας αξιοποιήσιμης ενέργειας, είναι «πεπερασμένα» και «περιορισμένα». Άλλος ένας λόγος που οδήγησε στο έντονο ενδιαφέρον για τις Α.Π.Ε. είναι η εξέλιξη της τεχνολογίας και της βιομηχανίας. Η εξέλιξη αυτή και στους δύο κλάδους δημιούργησε νέα δεδομένα στην ανθρωπότητα και είχε ως αποτέλεσμα την ολοένα και μεγαλύτερη ανάγκη για ενέργεια, αλλά και την αρνητική συνέπεια ότι η καύση των ορυκτών έχει ως αποτέλεσμα την εκπομπή μιας μεγάλης ποικιλίας ρύπων, όπως οξείδια του θείου (SO_x) και του αζώτου (NO_x), μονοξείδιο του άνθρακα (CO), άκαυστοι υδρογονάνθρακες (HC) αλλά και διοξείδιο του άνθρακα (CO₂). Στο σχήμα 1.1 απεικονίζεται η παγκόσμια ενεργειακή κατανάλωση κατά τα έτη 1970-2025, ενώ στο σχήμα 1.2 οι ετήσιες αιχμές του ελληνικού διασυνδεδεμένου συστήματος.



Σχήμα 1: Παγκόσμια ενεργειακή Κατανάλωση 1970-2025



Σχήμα 2: Ετήσιες Αιχμές ελληνικού διασυνδεδεμένου συστήματος 1988-2002

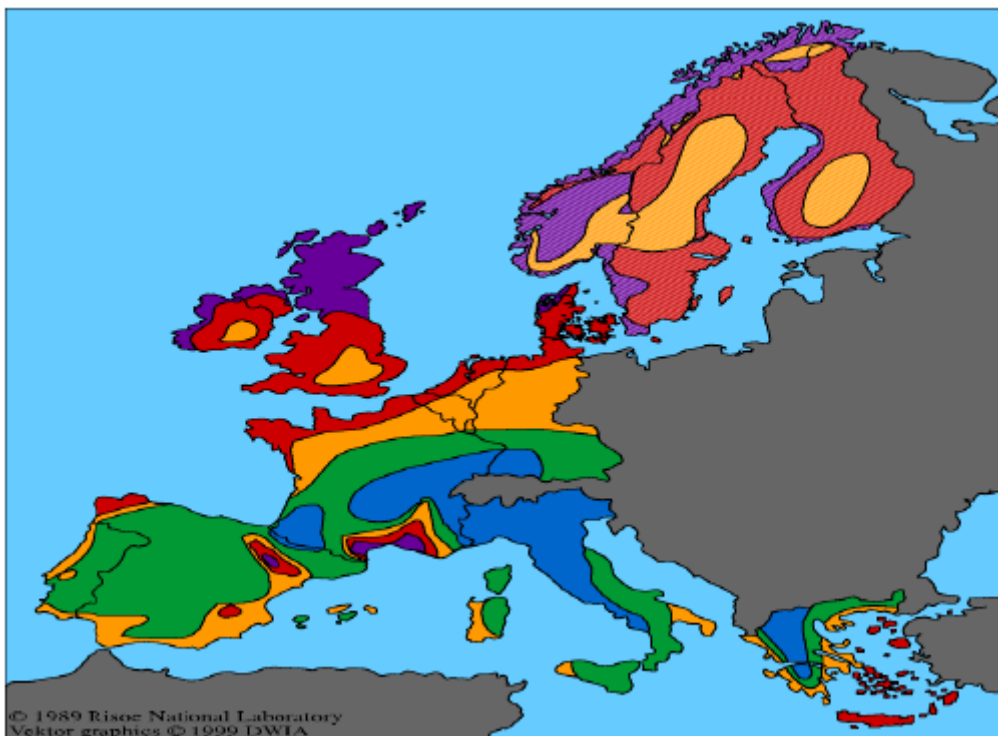
1 BTU = 1055.06 J

1 Quadrillion BTU = 10^{15} BTU

Αξίζει να επισημανθεί ότι ένα ευπρόσδεκτο χαρακτηριστικό των Α.Π.Ε. είναι ότι οι τεχνολογίες εκμετάλλευσης τους βρίσκονται μέσα στις κατασκευαστικές δυνατότητες των τεχνολογικά αναπτυσσόμενων χωρών. Επομένως, εκτός από την προσφορά στο ενεργειακό ισοζύγιο μιας χώρας, συνεισφέρουν σημαντικά, εφόσον αναπτυχθούν κατάλληλα, και στην ανάπτυξη της τεχνολογίας και στη δημιουργία νέων θέσεων εργασίας. Ειδικά για την χώρα μας αποτελεί πρόκληση η δημιουργία μιας εθνικής βιομηχανίας για την εκμετάλλευση των Α.Π.Ε., αν και έχουν σημειωθεί κάποιες προσπάθειες τα τελευταία χρόνια προς αυτή την κατεύθυνση, όπως η κατασκευή της ανεμογεννήτριας «Πυρκάλ» από μεγάλη ελληνική κατασκευαστική εταιρία. Ασφαλώς, χρειάζεται η συστηματική και μεγαλύτερης κλίμακας υποστήριξη από την πολιτεία και από άλλους φορείς.









2. Μερικά στοιχεία για το αιολικό δυναμικό και για την εκμετάλλευση του στον ελληνικό και παγκόσμιο χώρο

Στη χώρα μας έχει αρχίσει η εγκατάσταση, σε πολλά μέρη, ανεμογεννητριών είτε για πειραματικούς σκοπούς είτε για κάλυψη των τοπικών και όχι μόνο αναγκών για ενέργεια. Όπως προκύπτει από τα στοιχεία που παρατίθενται παρακάτω, η χώρα μας έχει πλούσιο αιολικό δυναμικό και όλα εχέγγυα για την επίτευξη των στόχων για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από Α.Π.Ε. και κυρίως από αιολική ενέργεια. Επίσης, μπορούμε να συμπεράνουμε ότι η αιολική ενέργεια κατέχει πολύ σημαντική θέση στις Α.Π.Ε. όσον αφορά την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, εφόσον ολοένα και περισσότερα αιολικά πάρκα εγκαθίστανται ανά τον κόσμο.



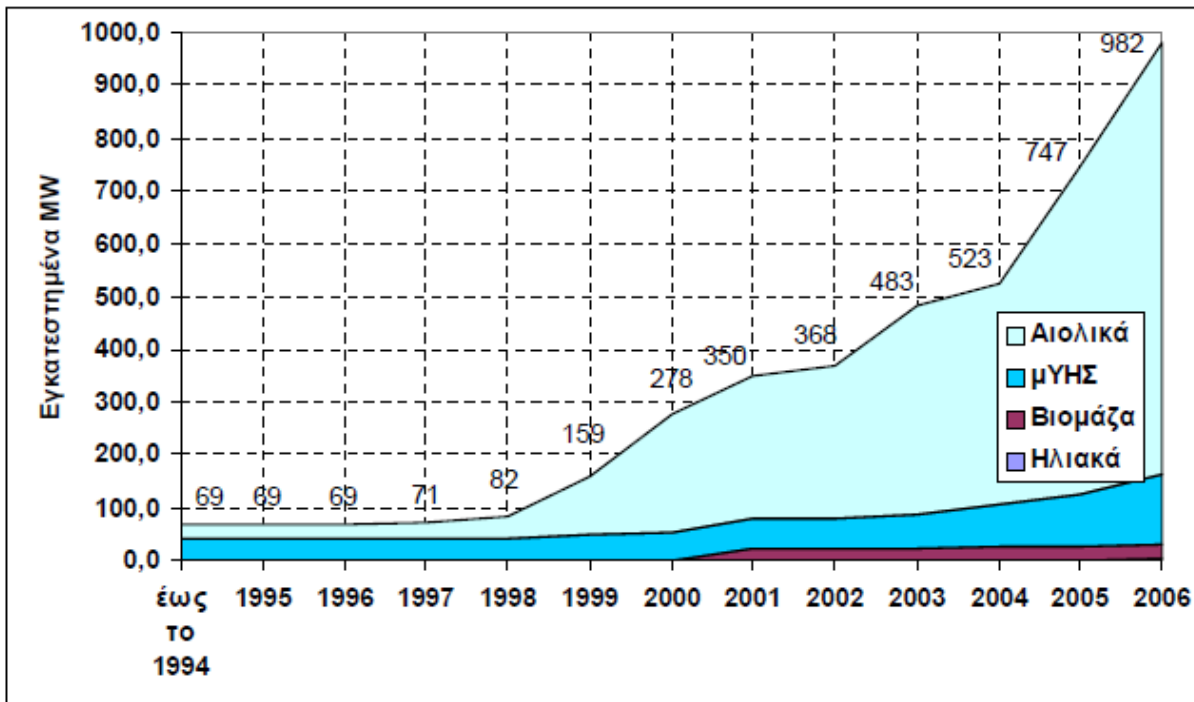
Σχήμα 3. Αιολικός χάρτης Δ. Ευρώπης

Υπόμνημα Σχήματος 3

	m/s	W/m ²	m/s	W/m ²	m/s	W/m ²	m/s	W/m ²	m/s	W/m ²
	>6.0	>250	>7.5	>500	>8.5	>700	>9.0	>800	>11.5	>1800
	5.0-6.0	150-250	6.5-7.5	300-500	7.0-8.5	400-700	8.0-9.0	600-800	10.0-11.5	1200-1800
	4.5-5.0	100-150	5.5-6.5	200-300	6.0-7.0	250-400	7.0-8.0	400-600	8.5-10.0	700-1200
	3.5-4.5	50-100	4.5-5.5	100-200	5.0-6.0	150-250	5.5-7.0	200-400	7.0-8.5	400-700
	<3.5	<50	<4.5	<100	<5.0	<150	<5.5	<200	<7.0	<400
			>7.5							
			5.5-7.5							
			<5.5							

Από τον παραπάνω χάρτη διαπιστώνουμε τη δικαιολογημένη ανάπτυξη των ανεμογεννητριών τόσο στην Ευρώπη όσο και στην Ελλάδα, αφού υπάρχει πλούσιο αιολικό δυναμικό προς εκμετάλλευση. Επίσης έχει διαπιστωθεί από μελέτες ότι το σύνολο της ηπειρωτικής Ελλάδας διαθέτει μέτριο προς υψηλό αιολικό δυναμικό, συνεπώς πρέπει να υπάρξει μαζική στροφή των επενδυτών προς αυτή την κατεύθυνση.

Στον πίνακα 1 και στο σχήμα 4 που ακολουθεί φαίνεται συγκεντρωτικά το ποσοστό συμμετοχής ανά κατηγορία Α.Π.Ε. στον ελληνικό χώρο καθώς και οι τάσεις το 2010. Ο πίνακας και το σχήμα προήλθαν από το Υπουργείο Ανάπτυξης και δείχνουν τη διαχρονική εξέλιξη και τις τάσεις που επικρατούν. Άλλωστε τα παραπάνω στοιχεία, αλλά και όσα φαίνονται στον εν λόγω πίνακα, δείχνουν τη μεγάλη ανάπτυξη των αιολικών πάρκων και γενικά της αιολικής ενέργειας, η οποία είναι η κυρίως αξιοποιούμενη μορφή ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Στην Ελλάδα φαίνεται ότι η αιολική ενέργεια κατέχει κυρίαρχη θέση μεταξύ των Α.Π.Ε. .



Σχήμα 4. Συνολική εγκατεστημένη ισχύς σταθμών ηλεκτροπαραγωγής στην Ελλάδα με χρήση Α.Π.Ε.

	Εγκατεστη- μένη Ισχύς σε MW (αρχές 2006)	Πρόσθε- τες Άδειες Εγκατά- στασης σε ισχύ (MW)	Πρόσθε- τα ΑΠΕ λόγω δρομολο- γη- μένων παρεμβά- σεων (MW)	Πρόσθετα ΑΠΕ στη λοιπή Ελλάδα (MW)	Εκτιμώμ- ενο σύνολο ισχύος 2010 σε MW	Εκτιμώμ- ενη Παραγωγ- ή ενέργειας 2010 σε δκις kWh	Ποσοστό συμμετο- χής ανά τύπο ΑΠΕ το 2010 (για στόχο 13,67 δκις kWh)
Αιολικά	622	505	1.240	650	3.017	6,34	9,33
Μικρά ΥΗ	100	62		90	252	0,76	1,11
Μεγάλα ΥΗ	3.018			307	3.325	4,58	6,74
Βιομάζα	24	22		25	71	0,56	0,82
Γεωθερμία	0			8	8	0,06	0,09
Φ/Β	1*	1		8	10	0,01	0,02
Σύνολο	3.765	590	1.240	1.088	6.683	12,31	18,10

Πίνακας 1. Βασικό σενάριο εκτίμησης δυνατής παραγωγής ενέργειας από ΑΠΕ κατά το έτος 2010 στην Ελλάδα

Τέλος, παρατίθενται κάποια αριθμητικά στοιχεία για τα αιολικά πάρκα στην Ελλάδα. Η Ελλάδα έχει το δεύτερο καλύτερο αιολικό δυναμικό στην Ευρώπη, μετά το Ηνωμένο Βασίλειο. Το τεχνικά εκμεταλλεύσιμο αιολικό δυναμικό της Ελλάδας ανέρχεται σε 44 TWh/έτος (αναλογεί σε εγκατεστημένη ισχύ περί τα 22 GW) και θα υπερκάλυπτε τη συνολικά κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας στη χώρα. Παρόλα αυτά η συνολική εγκατεστημένη ισχύς στη χώρα μας το 2006 ανέρχεται σε 800 MW περίπου, με τη Γερμανία και την Ισπανία να βρίσκονται στις πρώτες θέσεις με συνολική εγκατεστημένη ισχύ 20.621 MW και 11.615 MW αντίστοιχα. Από μια καταγραφή, η οποία πραγματοποιήθηκε τους μήνες Δεκέμβριο 2005 και Ιανουάριο 2006 από το Υπουργείο Ανάπτυξης, διαπιστώθηκε ότι η εγκατεστημένη ισχύς συστημάτων Α.Π.Ε. στη χώρα μας ήταν : 3.017 MW από μεγάλα υδροηλεκτρικά με τα 1.282,2 MW να βρίσκονται στη Δυτική Ελλάδα, 621 MW από αιολικά πάρκα με τα 204,3 MW να βρίσκονται στη Στερεά Ελλάδα, 99,6 MW από μικρά υδροηλεκτρικά με τα 22 MW να βρίσκονται στη Στερεά Ελλάδα, 1,15 MW* από φωτοβολταϊκά με τα 0,2 MW στην Αττική και 23,72 MW βιομάζα με τα 20,7 MW να βρίσκονται στην Ανατολική Μακεδονία και Θράκη.

*Η ισχύς αυτή είναι η καταγεγραμμένη αλλά υπάρχουν πολλά φωτοβολταϊκά συστήματα μη συνδεδεμένα με τα δίκτυα. Με βάση στοιχεία πωλήσεων εκτιμάται ότι η συνολική εγκατεστημένη ισχύς φωτοβολταϊκών συστημάτων κατά τις αρχές του 2006 βρισκόταν σε επίπεδο 4 MW.

1.2 ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

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

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



Αιολικό πάρκο ονομάζεται η συστοιχία πολλών ανεμογεννητριών και μπορεί να λειτουργήσει σαν μια μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Η συστηματική εκμετάλλευση του πολύ αξιόλογου αιολικού δυναμικού της Ελλάδας θα συμβάλει :

- Στην αύξηση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με ταυτόχρονη εξοικονόμηση σημαντικών συμβατικών καυσίμων, που συνεπάγεται συναλλαγματικά οφέλη.
- Σε σημαντικό περιορισμό της ρύπανσης του περιβάλλοντος, αφού έχει υπολογιστεί ότι η παραγωγή ηλεκτρισμού μιας μόνο ανεμογεννήτριας ισχύος 550 KW σε ένα χρόνο, υποκαθιστά την ενέργεια που παράγεται από την καύση 2700 βαρελιών πετρελαίου δηλαδή αποτροπή της εκπομπής 735 τόνων διοξειδίου του άνθρακα ετησίως καθώς και δύο τόνων άλλων ρύπων.

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

Η κινητική ενέργεια που οφείλεται στην μετακίνηση μαζών αέρα της ατμόσφαιρας, είναι γνωστή σαν αιολική ενέργεια. Η αιολική ενέργεια αποτελεί μια έμμεση μορφή της ηλιακής ενέργειας, γι' αυτό κατατάσσεται στην κατηγορία των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Η εκμετάλλευση του ανέμου αποτελεί τον αρχαιότερο τρόπο άντλησης ενέργειας από το περιβάλλον. Η πρώτη χρήση αιολικής ενέργειας έγινε στην ναυσιπλοΐα, ενώ οι πρώτοι ανεμόμυλοι χρησιμοποιήθηκαν για άλεσμα δημητριακών και άντληση νερού. Η πρώτη εμφάνιση των ανεμόμυλων (κατακόρυφου άξονα) καταγράφεται τον 6^ο έως τον 9^ο αιώνα μ.Χ. στην Περσία, ενώ η πρώτη γραπτή αναφορά γίνεται στην Κίνα τον 13^ο αιώνα μ.Χ. . Στην Ευρώπη αναπτύχθηκαν διάφορα είδη ανεμόμυλων (οριζόντιου άξονα) από τον 13^ο αιώνα και πιθανόν οι νερόμυλοι να αποτέλεσαν πρότυπο για την κατασκευή τους. Το 17^ο αιώνα η «τεχνολογία» μεταφέρεται στην Αμερική όπου χρησιμοποιούνται για την άντληση του νερού οι ανεμόμυλοι. Το 1888 στο Cleveland του Ohio έχουμε την κατασκευή του πρώτου ανεμόμυλου για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Σήμερα η Δανία, χώρα πλούσια σε αιολικό δυναμικό, έχει τα πρωτεία στην κατασκευή αλλά και στην χρήση ανεμογεννητριών. Και άλλες χώρες όμως έχουν αρχίσει και αναπτύσσουν ραγδαία την τεχνολογία των ανεμογεννητριών. Η χρήση των ανεμόμυλων στην Ελλάδα, χρονολογείται από τον 13^ο αιώνα. Το 1960 υπήρχαν 10.000 ανεμόμυλοι στο οροπέδιο του Λασιθίου, 2.500 στην υπόλοιπη Κρήτη και 600 στη Ρόδο.



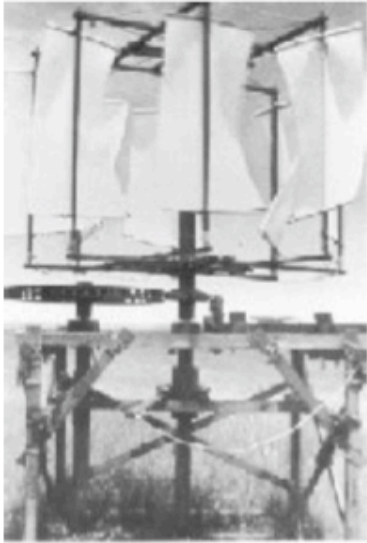
Παλαιοί ανεμόμυλοι στην Χίο (Ελλάδα)



Ένας κατεστραμένος ανεμόμυλος και μια σύγχρονη ανεμογεννήτρια. Η συνέχεια της ιστορίας του ανθρώπου και οι προσπάθειες εκμετάλλευσης της αιολικής ενέργειας.

Η ανομοιόμορφη ακτινοβολία της ηλιακής ενέργειας στην επιφάνεια της Γης, προκαλεί ανομοιόμορφη θέρμανση της ατμόσφαιρας, καθώς και των γήινων και υδάτινων μαζών, γεγονός που οφείλεται κυρίως σε δύο λόγους. Καταρχήν, στο ότι η Γη χωρίζεται σε δύο πλευρές, στην πλευρά που βλέπει ο ήλιος και στην πλευρά που δεν βλέπει ο ήλιος, καθώς και στο ότι η ηλιακή ακτινοβολία είναι μεγαλύτερη κοντά στον ισημερινό παρά στους πόλους. Τα παραπάνω έχουν ως αποτέλεσμα την δημιουργία θερμοκρασιακών διαφορών καθώς και διαφορών στη πίεση, με συνέπεια, οι αέρινες μάζες, που περιέχονται μεταξύ της ζώνης του ισημερινού και των πόλων αλλά και μεταξύ της πλευράς που βλέπει ο ήλιος και της πλευράς που δεν βλέπει ο ήλιος, να τίθενται σε κίνηση. Στην κίνηση των αέρινων μαζών συμβάλλει όμως και η περιστροφή της Γης, καθώς και η κλίση του άξονα περιστροφής της Γης στο επίπεδο, (το οποίο δημιουργείται απο την περιστροφική κίνηση της Γης γύρω απο τον ήλιο) η οποία οδηγεί σε εποχιακά ρεύματα αέρος.

Αντίγραφο του πρώτου
Περσικού μύλου



Μεσογειακός



Αμερικάνικος
(18^{ος} αιώνας)



Δανικός



Ολλανδικός



Αγγλικός



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

Σ' αυτές τις παγκόσμιες διαταραχές προστίθενται και τοπικές επιρροές, οι οποίες αναπτύσσουν τους ανέμους. Εξαιτίας της διαφοράς που υπάρχει μεταξύ του νερού και του εδάφους σχετικά με την περιεκτικότητά τους σε θερμότητα το έδαφος θερμαίνεται πιο γρήγορα από το νερό

και επίσης λόγω των παραγόμενων διαφορών πέσης, φυσάει ένας άνεμος από το νερό προς το έδαφος, κατά τη διάρκεια της μέρας. Κατά τη διάρκεια της νύχτας, το έδαφος ψύχεται πιο γρήγορα από το νερό και το φαινόμενο αντιστρέφεται. Επιπλέον ο άνεμος μπορεί να αναπτυχθεί πάνω από το νερό ανενόχλητα, έτσι ώστε σε πολλές παραθαλάσσιες περιοχές να έχουμε τακτικά πολύ ισχυρούς ανέμους. Συχνά συμβαίνει επίσης να δημιουργούνται ισχυρά αέρινα ρεύματα λόγω ανομοιομορφίας του εδάφους (κτίρια, βουνά κ.λ.π.). Η δύναμη του ανέμου στα κατώτερα στρώματα του αέρα εξαρτάται από τα υπάρχοντα τοπικά στοιχεία. Το νερό, το λιβάδι, το δάσος ή η κάλυψη με οικοδομές και καλλιέργειες, περιγράφουν την τριβή στην επιφάνεια της Γης. Αυτό το φαινόμενο οδηγεί στη μείωση της ταχύτητας του ανέμου και αυτό αζαρτώμενο πάντα από το ύψος πάνω από το έδαφος.

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

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

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

1.3 ΜΕΡΗ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ

1. Ηλεκτρικός Κινητήρας (Rotor): Οι λεπίδες και η πλήμνη (κέντρο άξονα) μαζί ονομάζονται ρότορας.

2. Ελεγκτής (Controller): Ο ελεγκτής ξεκινά τη μηχανή όταν οι ταχύτητες ανέμου είναι μεγαλύτερες από 8-16 mph και την κλείνει όταν φτάσουν στα 55 mph, γιατί αν οι τουρμπίνες λειτουργήσουν με παραπάνω ταχύτητα κινδυνεύουν να καταστραφούν.

3. Ανεμομετρητής (Anemometer): Μετρά την ταχύτητα του ανέμου και μεταφέρει δεδομένα για την ταχύτητά του στον ελεγκτή.

4. Πτερύγια (Blades): Οι περισσότερες ανεμογεννήτριες έχουν δύο ή τρεις λεπίδες. Ο άνεμος φυσώντας πάνω στις λεπίδες τις κάνει να «σηκωθούν» και να περιστραφούν.

20

5. Στροφή Πτερυγίων (Pitch): Οι λεπίδες στρέφονται, ή στρίβουν γύρω από τον άξονά τους, ανεξάρτητα από τον άνεμο, ώστε να ελέγχουν την ταχύτητα του ρότορα και να τον εμποδίζουν από το να στρίβει όταν οι άνεμοι είναι υπερβολικά ισχυροί ή υπερβολικά ασθενείς για να παραγάγουν ηλεκτρισμό.

6. Πύργος (Tower): Οι πύργοι κατασκευάζονται από ατσάλι ή τσιμέντο. Επειδή η ταχύτητα του ανέμου αυξάνει με το ύψος, οι ψηλότεροι πύργοι δίνουν τη δυνατότητα στις τουρμπίνες να «αιχμαλωτίσουν» περισσότερη ενέργεια και να παραγάγουν περισσότερο ηλεκτρισμό.

7. Ατρακτίδιο (Nacelle): Το ατρακτίδιο βρίσκεται στην κορυφή του πύργου και περιέχει το κιβώτιο ταχυτήτων, τους άξονες χαμηλής και υψηλής ταχύτητας, τη γεννήτρια, τον ελεγκτή και το φρένο. Μερικά ατρακτίδια είναι τόσο μεγάλα, ώστε ακόμη και ένα ελικόπτερο μπορεί να προσγειωθεί πάνω τους.

8. Φρένο (Brake): Ένας δίσκος φρένου, που μπορεί να εφαρμοστεί με μηχανικό, ηλεκτρικό ή υδραυλικό τρόπο, ώστε να σταματήσει τον ρότορα σε περιπτώσεις επείγουσας ανάγκης.

9. Κιβώτιο Ταχυτήτων (Gear box): Ο άξονας χαμηλής ταχύτητας συνδέεται με τον άξονα υψηλής ταχύτητας και αυξάνουν τις ταχύτητες περιστροφής από 30-60 σε 1000-1800 περιστροφές το λεπτό, που είναι η απαιτούμενη ταχύτητα περιστροφής των περισσότερων Α/Γ για παραγωγή ηλεκτρισμού. Το κιβώτιο ταχυτήτων είναι ακριβό εξάρτημα της ανεμογεννήτριας.

10. Γεννήτρια (Generator): Συνήθως μια γεννήτρια εισαγωγής που εύκολα βρίσκει κανείς στο εμπόριο και παράγει ηλεκτρισμό.

11. Άξονας υψηλής ταχύτητας (High-speed shaft): Κινεί τη γεννήτρια.

12. Άξονας χαμηλής ταχύτητας (Low-speed shaft): Ο ρότορας στρέφει τον άξονα χαμηλής ταχύτητας σε περίπου 30-60 περιστροφές το λεπτό.

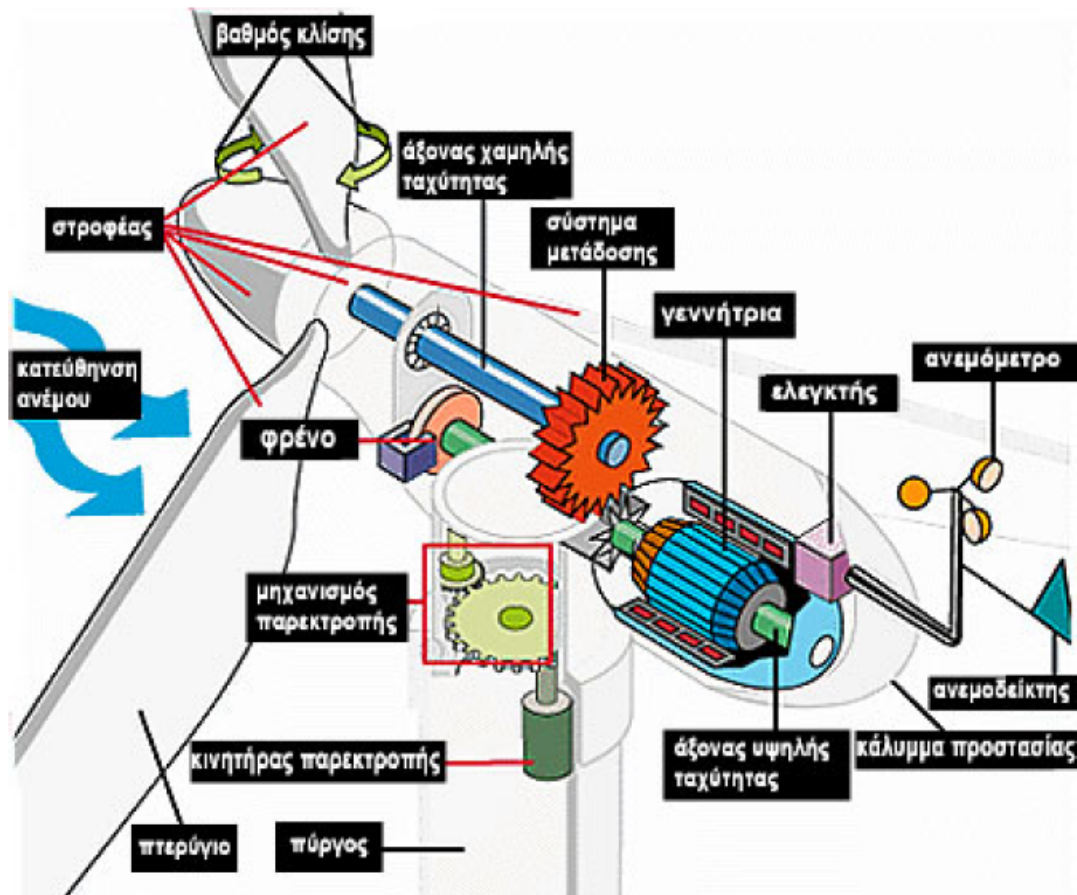
13. Κατεύθυνση του ανέμου (Wind direction): Αυτή είναι μια ανεμογεννήτρια με πνοή ανέμου προς τα πάνω.

14. Ανεμοδείκτης (Wind vane): Μετρά την κατεύθυνση του ανέμου και επικοινωνεί με τον οδηγό για την αποφυγή εκτροπής για να προσανατολίσει την ανεμογεννήτρια σωστά.

15. Οδηγός για την Αποφυγή Εκτροπής (Yaw drive): Οι ανεμογεννήτριες που λειτουργούν με πνοή ανέμου προς τα πάνω, είναι στραμμένες προς τον άνεμο.

Ο Οδηγός για την Αποφυγή Εκτροπής χρησιμοποιείται για να εξασφαλίσει ότι ο ρότορας θα είναι στραμμένος προς τον άνεμο καθώς ο άνεμος αλλάζει κατεύθυνση.

16. Κινητήρας του Οδηγού για την Αποφυγή Εκτροπής (Yaw motor): Δίνει ενέργεια στο προαναφερόμενο εξάρτημα.



1.3.1 ΜΟΡΦΗ ΠΤΕΡΥΓΙΩΝ

Τα πτερόγιο σε μεγάλες ανεμογεννήτριες περιστρέφονται κατά μήκος του άξονά τους. Το πτερόγιο δέχεται τον άνεμο κατά μήκος του υπό διαφορετικές γωνίες. Η γωνία πρόσπτωσης αυξάνεται προς τη βάση του πτερυγίου. Οι πολύ μεγάλες γωνίες δεν έχουν το επιθυμητό αποτέλεσμα. Προκειμένου να υπάρχει ενιαία γωνία πρόσπτωσης κατά μήκος πτερυγίου, το πτερόγιο έχει μορφή περιστροφική.

1.4 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΤΗΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ

Οι μηχανές με τις οποίες εκμεταλλευόμαστε τον άνεμο, ονομάζονται ανεμογεννήτριες (Α/Γ). Διακρίνονται σε κατηγορίες ανάλογα με τον αριθμό των πτερών τους και τον τύπο του άξονα

που χρησιμοποιούν. Με βάση το πρώτο κριτήριο χωρίζονται σε τρίπτερες και δίπτερες ανεμογεννήτριες ενώ με βάση το δεύτερο διακρίνονται σε ανεμογεννήτριες οριζόντιου και κάθετου άξονα.

1.4.1 ΤΡΙΠΤΕΡΕΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ

Οι τρίπτερες, με ρότορα μικρότερο των 10 μέτρων, έχουν τη δυνατότητα εκμετάλλευσης ασθενούς αιολικού δυναμικού. Στις μηχανές μεγάλου μεγέθους επικρατούν οι δίπτερες, με κόστος κατασκευής και συντήρησης μικρότερο απ' αυτό των τρίπτερων αντίστοιχου μεγέθους. Η σύγχρονη τεχνολογία χρήσης της αιολικής ενέργειας ξεκίνησε με μικρές Α/Γ δυναμικότητας 20 ως 75 KW. Σήμερα χρησιμοποιούνται Α/Γ δυναμικότητας 200 ως 2.000 KW. Τρίπτερες ανεμογεννήτριες με ρότορα μήκους μικρότερου των 10 μέτρων έχουν τη δυνατότητα εκμετάλλευσης ασθενούς αιολικού ανέμου (ευρύ φάσμα ταχυτήτων ανέμου) και κόστος κατασκευής και συντήρησης μικρό καθώς τα προβλήματα αντοχής και δυναμικής καταπόνησης μηχανικών μερών είναι περιορισμένα στις μηχανές αυτής της κατηγορίας.



1.4.2 ΔΙΠΤΕΡΕΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ

Στις μηχανές μεγάλου μεγέθους επικρατούν οι δίπτερες, με κόστος κατασκευής και συντήρησης σαφώς μικρότερο, από αυτό των τριπτέρυγων αντιστοίχου μεγέθους



1.4.3 ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ ΟΡΙΖΟΝΤΙΟΥ ΑΞΟΝΑ

Οριζόντιου άξονα (HAWT - Horizontal Axis Wind Turbines) είναι οι ανεμογεννήτριες οι οποίες περιστρέφονται γύρω από έναν άξονα οριζόντιο ως προς το επίπεδο του εδάφους. Είναι η συνηθισμένη εικόνα της ανεμογεννήτριας που έχουμε οι περισσότεροι στο μυαλό μας, αφού αυτές έχουν επικρατήσει για διάφορους λόγους που θα αναφέρουμε παρακάτω.

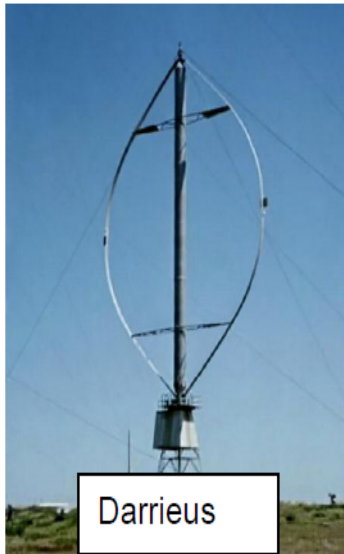
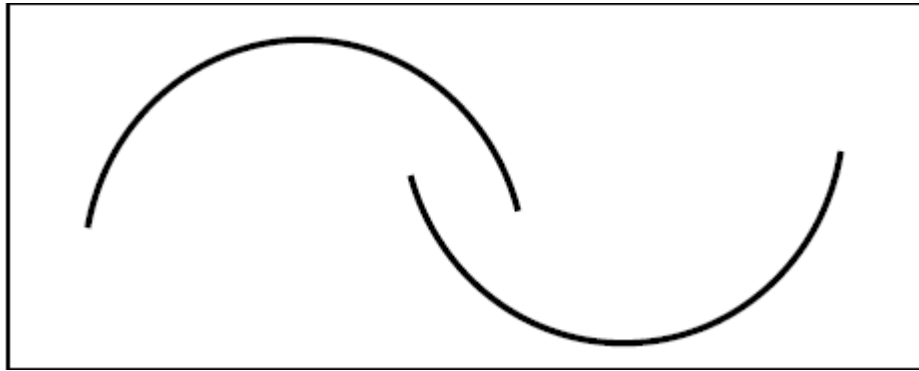


Στην εικόνα παραπάνω βλέπουμε μια τέτοια ανεμογεννήτρια οριζόντιου άξονα. Τα περύγιά της περιστρέφονται γύρω από έναν άξονα ο οποίος είναι οριζόντιος ως προς το επίπεδο του εδάφους. Είναι φανερό ότι κάθε στιγμή, πρέπει να προσανατολίζεται προς την κατεύθυνση του ανέμου.

1.4.4 ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ ΚΑΘΕΤΟΥ ΑΞΟΝΑ

Οι ανεμογεννήτριες κάθετου άξονα (VAWT - Vertical Axis Wind Turbines) αντίθετα, περιστρέφονται γύρω από έναν άξονα ο οποίος είναι κάθετος ως προς το επίπεδο του εδάφους. Οι ανεμογεννήτριες κάθετου άξονα, από τον τρόπο της κατασκευής τους, "πιάνουν" τον αέρα από κάθε κατεύθυνση. Στην παρακάτω φωτογραφία απεικονίζεται μια ανεμογεννήτρια κάθετου άξονα τύπου "savonius", που είναι και η απλούστερη σε ότι αφορά την κατασκευή της.

Αποτελείται ουσιαστικά από ένα σωλήνα κομμένο στη μέση κατά μήκος, με τα δύο κομμάτια τοποθετημένα κάθετα όπως στο παρακάτω σχέδιο.



Οι Α/Κ τύπου savonious απαιτούν χαμηλή ροπή εκκίνησης με αποτέλεσμα να μπορούν να εκμεταλλευτούν για την κίνηση τους και μικρές ταχύτητες ανέμου. Αντίθετα οι Α/Κ τύπου Darrieus απαιτούν μεγάλη ροπή εκκίνησης, αποτέλεσμα αυτού είναι για την εκκίνηση τους με χαμηλή ταχύτητα ανέμου να απαιτείται υποβοήθηση.

Τα παραπάνω χαρακτηριστικά οδήγησαν στην δημιουργία μεικτής κατασκευής Α/Κ η οποία δίνεται στην παραπάνω φωτογραφία.

1.4.5 ΥΠΕΡΑΚΤΙΕΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ

Η υπεράκτια αιολική ενέργεια αποτελεί μία πολλά υποσχόμενη μορφή ΑΠΕ και η εκμετάλλευσή της μπορεί να ικανοποιήσει άμεσα τόσο την παγκόσμια απαίτηση για ανανεώσιμες και καθαρές μορφές ενέργειας όσο και την αναγκαιότητα για εξασφάλιση νέων ενεργειακών πηγών δεδομένων των περιβαλλοντικών αλλαγών του πλανήτη και των ιδιαίτερα υψηλών τιμών του πετρελαίου και των άλλων καυσίμων. Συγκριτικά με τα χερσαία έργα αιολικής ενέργειας, η κατασκευή υπεράκτιων ανεμογεννητριών απαιτεί εφαρμοσμένη μηχανική όσον αφορά την υποδομή, την τοποθέτηση, την ηλεκτρική σύνδεση και τη χρήση υλικών που αντέχουν στις διαβρώσεις του θαλάσσιου περιβάλλοντος. Για το λόγο αυτό, παρά

το γεγονός ότι η ταχύτητα των υπεράκτιων ανέμων είναι γενικά μεγαλύτερη από αυτήν των ανέμων στη στεριά, δεν έχει γίνει ιδιαίτερη σημαντική υπεράκτια χρήση των ανεμογεννητριών κατά το παρελθόν. Είναι γεγονός ότι από το 1970 μέχρι το 1990 οι ανεμογεννήτριες περιορίζονταν κυρίως σε χερσαίες εγκαταστάσεις. Ωστόσο, η αύξηση του μεγέθους και της αποδοτικότητας των ανεμογεννητριών, σε συνδυασμό με τα πλεονεκτήματα της υπεράκτιας αιολικής ενέργειας, μείωσαν τα κόστη ανάθεσης και λειτουργίας των υπεράκτιων αιολικών πάρκων. Ένας ακόμα παράγοντας που είχε σημαντική επίδραση στην ανάπτυξη της υπεράκτιας αιολικής ενέργειας ήταν οι εξελίξεις στο σχεδιασμό, όπως η εισαγωγή νέων υλικών (π.χ. ανθρακοϊνες, ίνες γυαλιού). Τα νέα υλικά παρείχαν στους μηχανικούς τη δυνατότητα να αντιμετωπίσουν κρίσιμα θέματα όπως το διαβρωτικό θαλάσσιο περιβάλλον ή τα μεγαλύτερα, στιβαρότερα και ελαφρύτερα πτερύγια του ρότορα. Οι πρώτες μικρές πειραματικές υπεράκτιες μονάδες τέθηκαν σε λειτουργία για λόγους επίδειξης. Το 1991 στη Δανία ξεκίνησε η λειτουργία του πρώτου υπεράκτιου αιολικού πάρκου κοντά στο Vindeby στα ανοικτά των ακτών του Lolland (Εικ. 4.1). Αυτό το μικρό αιολικό πάρκο αποτελείται από 11 ανεμογεννήτριες που τοποθετούνται σε βάθος 3 - 4 μέτρων και η καθεμία έχει απόδοση ισχύος 450 kW. Η μέγιστη απόσταση από την ακτή περίπου 3 χλμ., ενώ το κόστος κατασκευής ήταν σχεδόν διπλάσιο σε σύγκριση με μια αντίστοιχη επένδυση στη στεριά. Τα πρώτα βήματα στην κατεύθυνση της εμπορικής υπεράκτιας χρήσης της αιολικής ενέργειας έχουν γίνει στα τέλη της δεκαετίας του '90. Μέχρι τώρα, οι δοκιμασμένες ανεμογεννήτριες ήταν της τάξης των MW. Βάσει του μεγέθους του στροβίλου, ήταν πλέον δυνατό να μεταβεί σε μεγαλύτερα βάθη των υδάτων. Ακολουθούν εικόνες από τα πρώτα αιολικά πάρκα που εμφανίζονται στη Σουηδία και τη Δανία.



Εικόνα 4.1 Υπεράκτιο αιολικό πάρκο κοντά στο Vindeby στα ανοικτά των ακτών του Lolland (Δανία), 1991



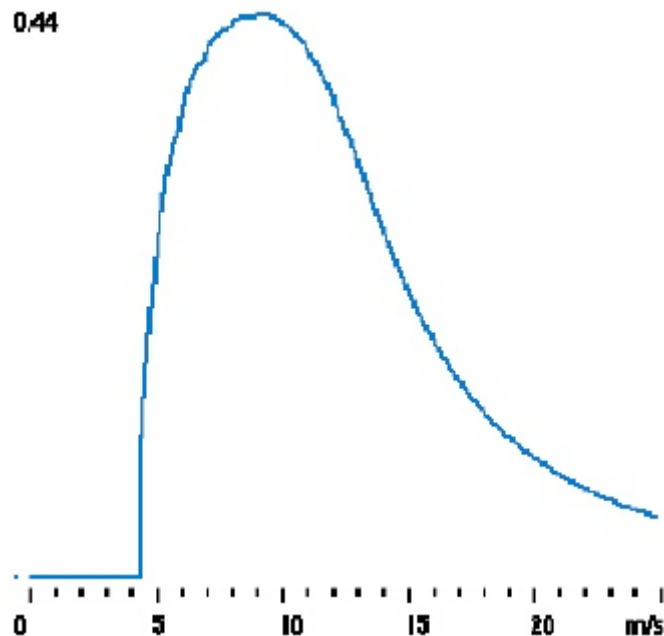
Εικόνα 4.2 Αιολικό πάρκο Yttre Stengrund στη Βαλτική Θάλασσα στο Gutland της Σουηδίας



Εικόνα 4.3 Υπεράκτιο Αιολικό Πάρκο Middelgrunden στη δανική ακτή κοντά στην Κοπεγχάγη

1.5 Ενεργειακά χαρακτηριστικά της Ανεμογεννήτριας

Για να προσδιοριστεί ο βαθμός απόδοσης μιας ανεμογεννήτριας συναρτήσει της ταχύτητα του ανέμου, πρέπει να διαιρεθεί κάθε ισχύς της αντίστοιχης καμπύλης 2.3 με την θεωρητική ισχύ του ανέμου σε αυτή την ταχύτητα (σχέση 2.4). Έτσι προκύπτει ο βαθμός απόδοσης του σχήματος 2.4 . Ένα άλλο χαρακτηριστικό μέγεθος μιας ανεμογεννήτριας που εξαρτάται από την κατανομή της ταχύτητας του ανέμου κατά την διάρκεια του έτους, τον τόπο εγκατάστασής της και τα τεχνικά χαρακτηριστικά της είναι ο συντελεστής εκμετάλλευσής της. Ο συντελεστής αυτός εκφράζει το λόγο της ετήσιας παραγόμενης ενέργειας προς αυτήν που θα παράγονταν αν η ανεμογεννήτρια λειτουργούσε στην ονομαστική ισχύ της συνεχώς κατά την διάρκεια του έτους. Ο συντελεστής εκμετάλλευσης εκφράζει πόσο αξιοποιείται η ανεμογεννήτρια στον τόπο εγκατάστασής της.



Σχήμα 2.4 Βαθμός Απόδοσης ανεμογεννήτριας.

Είναι προφανές ότι κάθε ανεμογεννήτρια μπορεί να είναι βελτιστοποιημένη ώστε να αποδίδει καλύτερα σε ένα εύρος ταχυτήτων. Μεταβάλλοντας μεγέθη όπως το ύψος της ή την γωνία και τη γεωμετρία των πτερυγίων ή το μέγεθος των πτερυγίων ή το μέγεθος της γεννήτριας μεταβάλλεται η ενεργειακή συμπεριφορά της. Αλλάζοντας τα δύο τελευταία μεγέθη μεταβάλλεται η καμπύλη ισχύος της ανεμογεννήτριας, ενώ το ύψος της επηρεάζει μόνο την ταχύτητα του ανέμου. Γενικά οι ανεμογεννήτριες πρέπει να έχουν τον μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης στις ταχύτητες ανέμου που παράγεται η περισσότερη ενέργεια ετησίως (δηλ. Στο εύρος των συχνότερων υψηλών ταχυτήτων). Για δεδομένο μέγεθος έλικα, όσο πιο μεγάλη είναι η γεννήτρια και όσο μεγαλύτερες οι ταχύτητες του ανέμου (αυτό επιτυγχάνεται αυξάνοντας το ύψος του ρότορα), τόσο πιο πολύ ενέργεια θα παράγεται, όμως συγχρόνως δεν θα αποδίδει ικανοποιητικά σε μικρές και μέσες ταχύτητες. Αντίθετα για την ίδια έλικα, όσο μικρότερη είναι η γεννήτρια τόσο καλύτερα θα αποδίδει σε αδύναμους ανέμους αλλά δεν θα αποδίδει ικανοποιητικά σε μεγάλες ταχύτητες. Οι μικρές ανεμογεννήτριες παράγουν μικρά ποσά ηλεκτρικής ενέργειας, όμως δεν απαιτούν ισχυρό

δίκτυο, παράγουν σχετικά πιο σταθερή ισχύ (διότι αποδίδουν καλύτερα σε μικρότερες ταχύτητες), απαιτούν μικρότερο κόστος θεμελίωσης και είναι αισθητικά πιο αποδεκτές από τους κατοίκους. Τέλος τα αιολικά πάρκα είναι προφανώς πιο αξιόπιστα όταν έχουν πολλές μικρές ανεμογεννήτριες. Με βάση τα παραπάνω φαίνεται ότι μια μεγάλη ανεμογεννήτρια δεν είναι πάντα η καλύτερη λύση λόγω της οικονομίας κλίμακας αλλά εξαρτάται από την ταχύτητα των ανέμων και τις ανάγκες μας σε ηλεκτρική ενέργεια. Τέλος πρέπει να αναφερθεί ότι οι ανεμογεννήτριες παραλαμβάνουν περίπου μέσα σε 2-3 μήνες λειτουργίας όλη την ενέργεια που απαιτήθηκε για να κατασκευαστούν, ενώ οι παραθαλάσσιες ανεμογεννήτριες απαιτούν ακόμα λιγότερο χρόνο.

1.6 ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΑΤΑΛΛΗΛΗ ΘΕΣΗ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΕΝΟΣ ΑΙΟΛΙΚΟΥ ΠΑΡΚΟΥ

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

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



Φωτογραφία Αιολικού Πάρκου

Αν και οι Α/Γ και γενικότερα τα αιολικά πάρκα ανήκουν στην κατηγορία των μορφών παραγωγής ενέργειας που είναι φιλικές προς το περιβάλλον οι περιβαλλοντικές τους

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

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

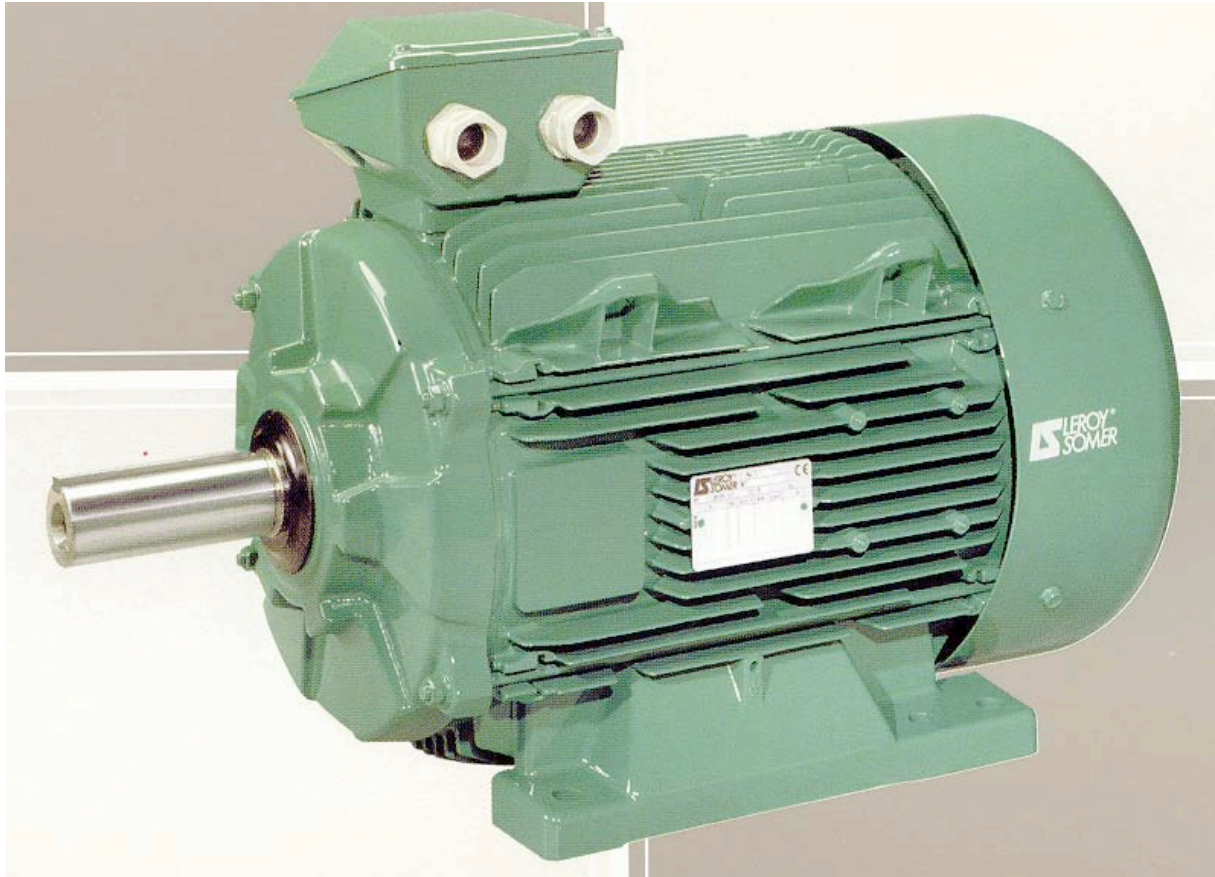
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2:

ΑΣΥΓΧΡΟΝΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Από τα διάφορα είδη ηλεκτρικών μηχανών εναλλασσόμενου ρεύματος, ο *τριφασικός ασύγχρονος ή επαγωγικός κινητήρας (induction motor)*, χρησιμοποιείται ευρύτατα στις βιομηχανικές εφαρμογές. Ενδεικτικό της καθολικής χρήσης της μηχανής αυτής είναι ότι, οι επαγωγικοί κινητήρες απορροφούν το 60% περίπου, της συνολικά παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας. Τα πλεονεκτήματα του ασύγχρονου κινητήρα, με κυριότερο την απλή κατασκευαστική δομή του δρομέα, θα εξηγηθούν στη συνέχεια. Οι επαγωγικές μηχανές χρησιμοποιούνται σχεδόν αποκλειστικά ως κινητήρες, εξαιτίας των μειονεκτημάτων που παρουσιάζουν όταν λειτουργούν ως γεννήτριες. Για το λόγο αυτό οι επαγωγικές μηχανές αναφέρονται ως επαγωγικοί κινητήρες. Η αρχή λειτουργίας των ασύγχρονων κινητήρων διατυπώθηκε από τον *N. Tesla* στα τέλη της δεκαετίας του 1880. Επαγωγικοί κινητήρες με μορφή αντίστοιχη της σημερινής, ήταν εμπορικά διαθέσιμοι από το 1896. Από τότε έως το 1970, οι βελτιώσεις στην ποιότητα των υλικών κατασκευής, στις τεχνικές χύτευσης και στη μόνωση των τυλιγμάτων, επέτρεψε τη δραστική μείωση του μεγέθους και του κόστους

κατασκευής των επαγωγικών κινητήρων. Ενδεικτικά αναφέρουμε ότι ένας σημερινός ασύγχρονος κινητήρας των 100hp, έχει τις ίδιες διαστάσεις με ένα κινητήρα 7.5hp του 1897. Η μείωση στις διαστάσεις των επαγωγικών κινητήρων δεν είχε συνοδευτεί από ουσιαστική βελτίωση του βαθμού απόδοσης, έως την πετρελαϊκή κρίση του 1973, εξαιτίας του μικρού κόστους της ηλεκτρικής ενέργειας. Όμως, στη συνέχεια, όλοι οι κατασκευαστές ανέπτυξαν επαγωγικούς κινητήρες με το χαρακτηρισμό *υψηλής απόδοσης (high efficiency induction motors)*. Οι κινητήρες αυτοί, αν και έχουν μεγαλύτερο κόστος από τους τυπικούς επαγωγικούς κινητήρες, αποκτούν όλο και μεγαλύτερο μερίδιο της αγοράς. Η τυπική μορφή ενός επαγωγικού κινητήρα υψηλής απόδοσης εικονίζεται στο Σχ. 2.1.



Σχ. 2.1 Τυπική εξωτερική δομή ενός τριφασικού επαγωγικού κινητήρα υψηλής απόδοσης.
Ο εικονιζόμενος κινητήρας είναι κατασκευής της εταιρείας *Leroy-Somer*

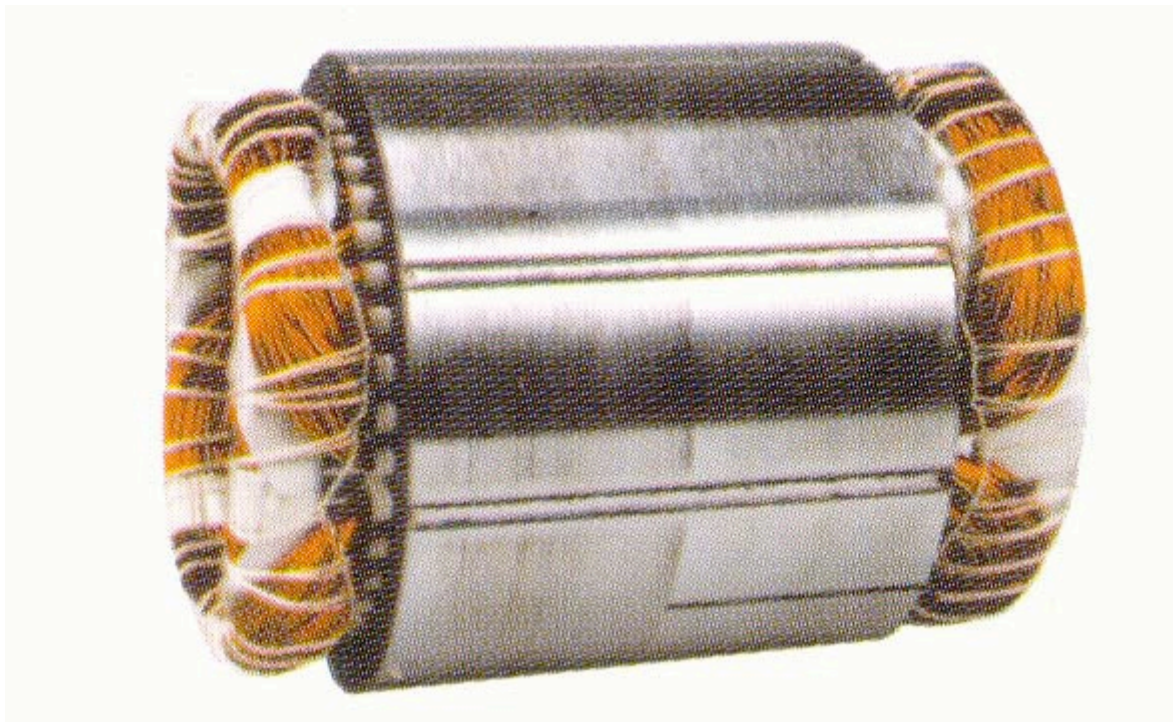
2.2 ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΩΝ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ ΕΝΑΛΛΑΣΣΟΜΕΝΟΥ ΡΕΥΜΑΤΟΣ

Οι μηχανές εναλλασσόμενου ρεύματος διακρίνονται σε δύο βασικές κατηγορίες: τις *σύγχρονες (synchronous)* και τις *ασύγχρονες ή επαγωγικές μηχανές*. Οι σύγχρονες μηχανές, αντίθετα από τις επαγωγικές, χρησιμοποιούνται κυρίως ως γεννήτριες. Οι κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος, όλων των κατηγοριών, έχουν την ίδια αρχή λειτουργίας. Σύμφωνα μ' αυτή, ο δρομέας του κινητήρα στρέφεται από τη ροπή, η οποία τείνει να ευθυγραμμίσει τα μαγνητικά πεδία του αναπτύσσων τα τυλίγματα του στάτη και του δρομέα.

Αν το μαγνητικό πεδίο του στάτη μπορούσε να στραφεί, τότε η αναπτυσσόμενη ροπή θα ανάγκαζε το δρομέα να ακολουθεί το μαγνητικό πεδίο του στάτη. Επομένως, η λειτουργία όλων κινητήρων εναλλασσόμενου ρεύματος στηρίζεται στη δυνατότητα παραγωγής από το τύλιγμα του στάτη ενός *στρεφόμενου μαγνητικού πεδίου*. Στους σύγχρονους κινητήρες η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα είναι ίση με την ταχύτητα που στρέφεται το πεδίο του στάτη. Αντίθετα, στους ασύγχρονους κινητήρες, η ταχύτητα του δρομέα είναι μικρότερη από εκείνη του στρεφόμενου πεδίου του στάτη και εξαρτάται από το μέγεθος του φορτίου.

2.3 ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΗ ΔΟΜΗ ΤΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ ΕΝΑΛΛΑΣΣΟΜΕΝΟΥ ΡΕΥΜΑΤΟΣ

Στις μηχανές συνεχούς ρεύματος ο στάτης αποτελείται από το ζύγωμα, πάνω στον οποίο στηρίζονται οι μαγνητικοί πόλοι. Οι μαγνητικοί πόλοι προεξέχουν από το κυλινδρικό ζύγωμα και ονομάζονται *έκτυποι πόλοι (salient poles)*. Το τύλιγμα της διέγερσης, που φέρουν οι πόλοι του στάτη, τροφοδοτείται με συνεχές ρεύμα και παράγει ένα *σταθερό* και ομοιόμορφο μαγνητικό πεδίο. Το τύλιγμα του οπλισμού τοποθετείται σε αυλακώσεις, στον κυλινδρικό δρομέα.



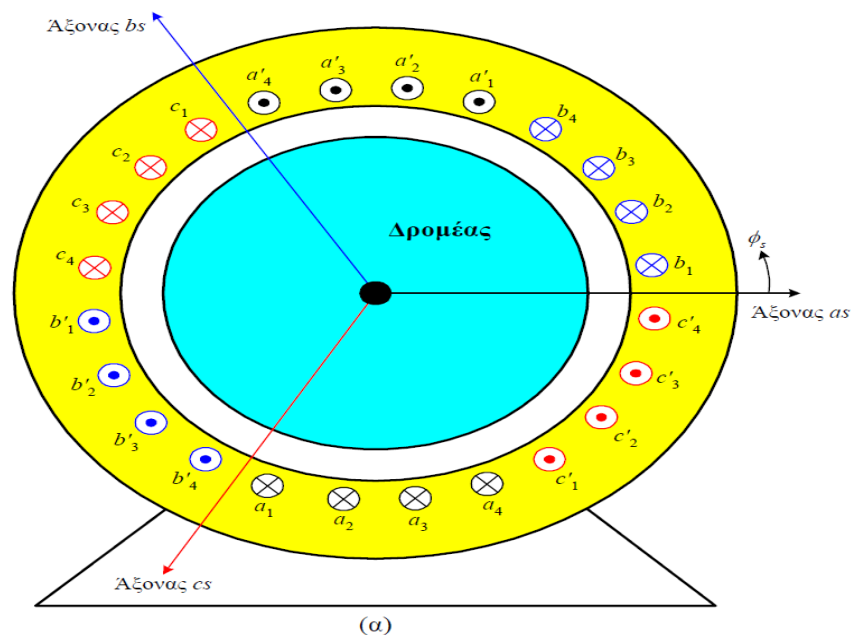
Σχ. 2.2 Κατασκευαστική δομή του στάτη, των τριφασικών μηχανών

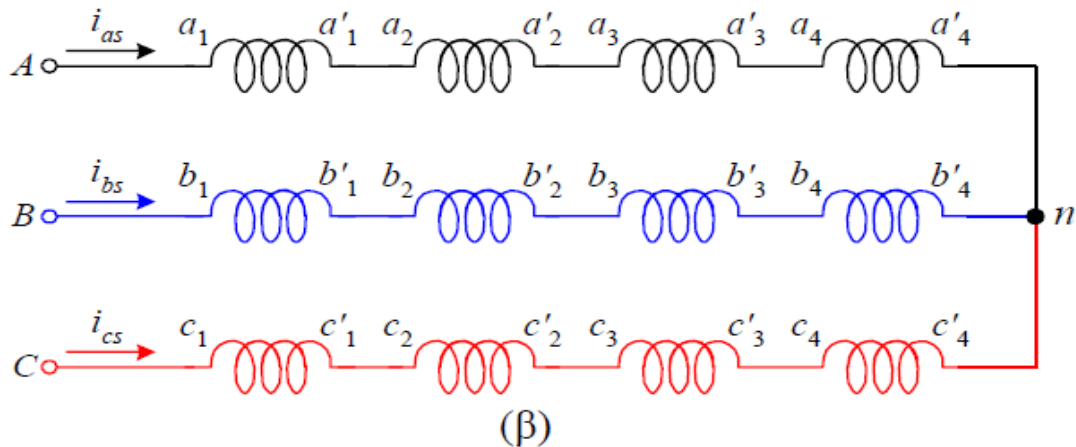
Στις μηχανές εναλλασσόμενου ρεύματος, με έμφαση τις σύγχρονες γεννήτριες, οι ρόλοι του στάτη και του δρομέα είναι αντεστραμμένοι, σε σχέση με τις μηχανές συνεχούς ρεύματος. Η μορφή του δρομέα αλλάζει δραστικά, ανάλογα με το είδος της μηχανής εναλλασσόμενου ρεύματος. Ο δρομέας των μηχανών εναλλασσόμενου ρεύματος μπορεί να έχει κυλινδρική δομή με αυλακώσεις, εντός των οποίων τοποθετείται το τύλιγμα. Εναλλακτικά, ο δρομέας μπορεί να έχει πόλους οι οποίοι να προεξέχουν (*salient pole rotor*), όπως οι πόλοι του στάτη

στις μηχανές συνεχούς ρεύματος. Στην κατασκευαστική δομή του δρομέα των επαγωγικών κινητήρων, θα αναφερθούμε λεπτομερέστερα στη συνέχεια. Αντίθετα από το δρομέα, ο στάτης όλων των μηχανών εναλλασσόμενου ρεύματος έχει την ίδια κατασκευαστική δομή. Ο στάτης είναι μια κυλινδρική δομή από ελάσματα μονωμένα μεταξύ τους. Στο εσωτερικό του φέρει αυλακώσεις, μέσα στις οποίες τοποθετείται το τύλιγμα του στάτη, όπως εικονίζεται στο Σχ. 2.2. Στη συνέχεια θεωρούμε ότι το τύλιγμα του στάτη είναι *τριφασικό*, οπότε η μηχανή χαρακτηρίζεται ως τριφασική. Όταν το τριφασικό τύλιγμα του στάτη διαρρέεται από ένα τριφασικό σύστημα ρευμάτων, αναπτύσσεται το στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο. Εκτός από τις τριφασικές μηχανές εναλλασσόμενου ρεύματος, υπάρχουν οι μονοφασικές και οι διφασικές. Οι μηχανές αυτές φέρουν στο στάτη μονοφασικό ή διφασικό τύλιγμα αντίστοιχα. Η χρήση τους είναι περιορισμένη, σε σχέση με τις τριφασικές μηχανές, εξαιτίας των λειτουργικών μειονεκτημάτων που παρουσιάζουν.

2.4 ΤΟ ΣΤΡΕΦΟΜΕΝΟ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟ ΠΕΔΙΟ

Όπως και στην ανάλυση των μηχανών συνεχούς ρεύματος, θεωρούμε αρχικά μια μηχανή εναλλασσόμενου ρεύματος, ο στάτης της οποίας φέρει ένα στοιχειώδες τριφασικό τύλιγμα. Το τύλιγμα του στάτη, όπως εικονίζεται στο Σχ. 5.3α, δημιουργεί ένα στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο με δύο πόλους (διπολική μηχανή). Το τριφασικό τύλιγμα είναι σε σύνδεση αστέρα (Σχ. 2.3β). Στην τριφασική μηχανή, η κάθε φάση του τυλίγματος είναι μετατοπισμένη κατά 120° , σε σχέση με τις άλλες δύο. Οι άξονες as , bs , cs , δηλώνουν τη θετική φορά των μαγνητικών πεδίων, που παράγουν τα τρία τυλίγματα μόνα τους. Τα τρία τυλίγματα έχουν την ίδια αντίσταση και τον ίδιο αριθμό σπειρών, οπότε το τριφασικό τύλιγμα του στάτη ονομάζεται *συμμετρικό*. Οι πλευρές των ομάδων (*coil sides*), κάθε τυλίγματος είναι τοποθετημένες σε αυλάκια (*slots*), τα οποία σχηματίζουν γωνία (*span*) 180° στη διπολική μηχανή. Η φορά του ρεύματος σε κάθε πλευρά των ομάδων, οι οποίες αποτελούνται από ορισμένο αριθμό σπειρών, εικονίζεται στο Σχ. 2.3α. Τα άκρα των τεσσάρων ομάδων κάθε τυλίγματος συνδέονται σε σειρά, με τον τρόπο που εικονίζεται στο Σχ. 2.3β. Τα άκρα $a'4$, $b'4$ και $c'4$ από τα τρία τυλίγματα συνδέονται μεταξύ τους, στη σύνδεση αστέρα.





Σχ. 2.3 Στοιχειώδης διπολική μηχανή εναλλασσόμενου ρεύματος, με τριφασικό τύλιγμα στο στάτη (α), σε σύνδεση αστέρα (β)

Στη στοιχειώδη μηχανή του Σχ. 5.3α, οι πλευρές των ομάδων κάθε τυλίγματος, είναι ομοιόμορφα κατανεμημένες στην επιφάνεια του στάτη, σε γωνία 60°. Στις πραγματικές μηχανές, οι πλευρές των ομάδων κατανέμονται σε μεγαλύτερη γωνία. Έτσι, στην ίδια αυλάκωση τοποθετούνται οι πλευρές από δύο ομάδες. Επιπλέον, οι ομάδες δεν έχουν τον ίδιο αριθμό σπειρών. Το τύλιγμα του Σχ. 5.3α ονομάζεται *full-pitch*, επειδή οι αντίθετες πλευρές των ομάδων σχηματίζουν γωνία 180° (διπολική μηχανή). Συχνά, οι αντίθετες πλευρές των ομάδων σχηματίζουν γωνία μικρότερη από 180°, οπότε το τύλιγμα ονομάζεται *fractional-pitch*. Στο Σχ. 2.4 εικονίζεται το ανάπτυγμα της στοιχειώδους μηχανής. Ως αρχή των αξόνων θεωρείται ο άξονας *as* στα δεξιά του σχήματος. Ακόμη, στο Σχ. 5.4 εικονίζεται η μαγνητεγερτική δύναμη ΜΕΔ, που αναπτύσσεται από το τύλιγμα της φάσης *as*. Η ΜΕΔ_{*as*} μεταβάλλεται βηματικά στο κέντρο των αγωγών του τυλίγματος. Σημειώνουμε ότι, το μαγνητικό πεδίο διατρέχει ακτινικά το διάκενο. Η ακτινική διεύθυνση του πεδίου οφείλεται στο μικρό πλάτος του διακένου σχετικά με τη διάμετρο του δρομέα και τη μεγάλη μαγνητική του αντίσταση, σε σχέση μ' εκείνη του σιδήρου στο στάτη και το δρομέα. Η ΜΕΔ που αναπτύσσεται από το τύλιγμα *bs* (ΜΕΔ_{*bs*}) έχει την ίδια μορφή με την ΜΕΔ_{*as*}, αλλά είναι μετατοπισμένη κατά 120° προς τα αριστερά. Αντίστοιχα, η ΜΕΔ_{*cs*} είναι μετατοπισμένη κατά 240° προς τα αριστερά ως προς την ΜΕΔ_{*as*}. Οι άξονες *as*, *bs*, *cs*, βρίσκονται στο μέσο της μέγιστης θετικής ΜΕΔ κάθε τυλίγματος. Οι κυματομορφές των ΜΕΔ που αναπτύσσουν τα τυλίγματα της στοιχειώδους μηχανής στο διάκενο, είναι μη ημιτονοειδείς συναρτήσεις της χωρικής γωνίας. Αυτό είναι ανεπιθύμητο, ιδιαίτερα στις μηχανές μεγάλης ισχύος, γιατί προκαλεί την ανάπτυξη αρμονικών τάσεων και ρευμάτων. Για την παραγωγή ημιτονοειδούς ΜΕΔ στο διάκενο της μηχανής, τα τυλίγματα του στάτη πρέπει να έχουν ημιτονοειδή κατανομή, όπως εικονίζεται στο Σχ. 2.5α. Τότε, η ΜΕΔ έχει την ημιτονοειδή μορφή του Σχ. 2.5β και ορίζεται από την παρακάτω u963 σχέση, για τη φάση *as*

$$\text{ΜΕΔ}_{as} = \frac{N_s}{2} i_{as} \cos \phi_s \quad (5.1)$$

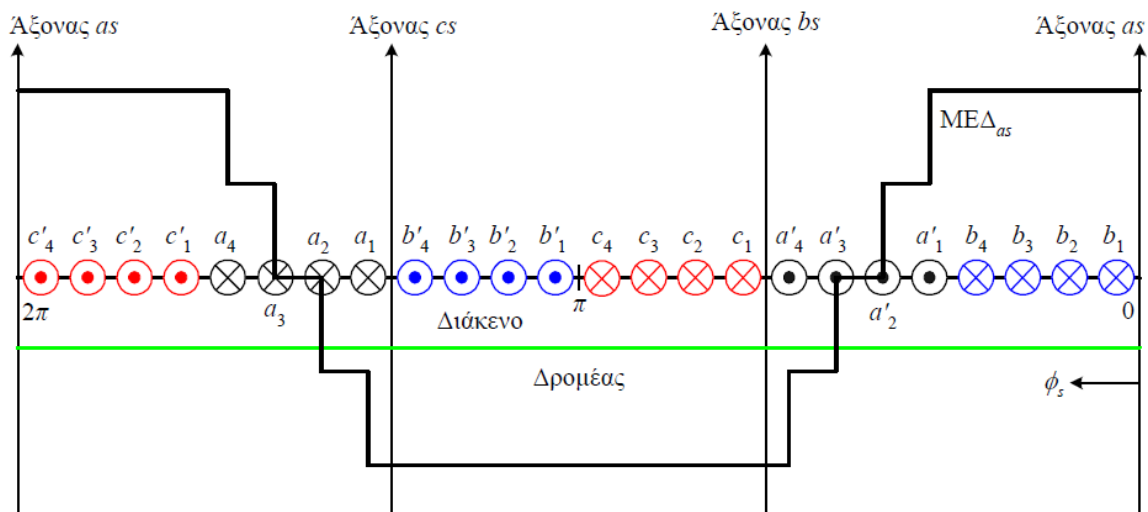
όπου *i_{as}* είναι το ρεύμα στη φάση *as* του τυλίγματος και *N_s* είναι ο ισοδύναμος αριθμός σπειρών ενός ημιτονοειδούς κατανεμημένου τυλίγματος, ο οποίος δίνει την ίδια θεμελιώδη συνιστώσα με το πραγματικό τύλιγμα. Οι ΜΕΔ που αναπτύσσονται από τα τυλίγματα των φάσεων *bs* και *cs*, ορίζονται από τις σχέσεις

$$\text{ΜΕ}\Delta_{bs} = \frac{N_s}{2} i_{bs} \cos(\phi_s - 2\pi/3) \quad (5.2)$$

$$\text{ΜΕ}\Delta_{cs} = \frac{N_s}{2} i_{cs} \cos(\phi_s + 2\pi/3) \quad (5.3)$$

Η ολική ΜΕΔ στο διάκενο, από τα τρία τυλίγματα, είναι ίση με το άθροισμα των επιμέρους ΜΕΔ

$$\text{ΜΕ}\Delta_s = \frac{N_s}{2} [i_{as} \cos \phi_s + i_{bs} \cos(\phi_s - 2\pi/3) + i_{cs} \cos(\phi_s + 2\pi/3)] \quad (5.4)$$



Σχ. 2.4 Ανάπτυγμα της στοιχειώδους μηχανής, όπου εικονίζεται το τριφασικό τύλιγμα και η αναπτυσσόμενη ΜΕΔ από τη φάση as

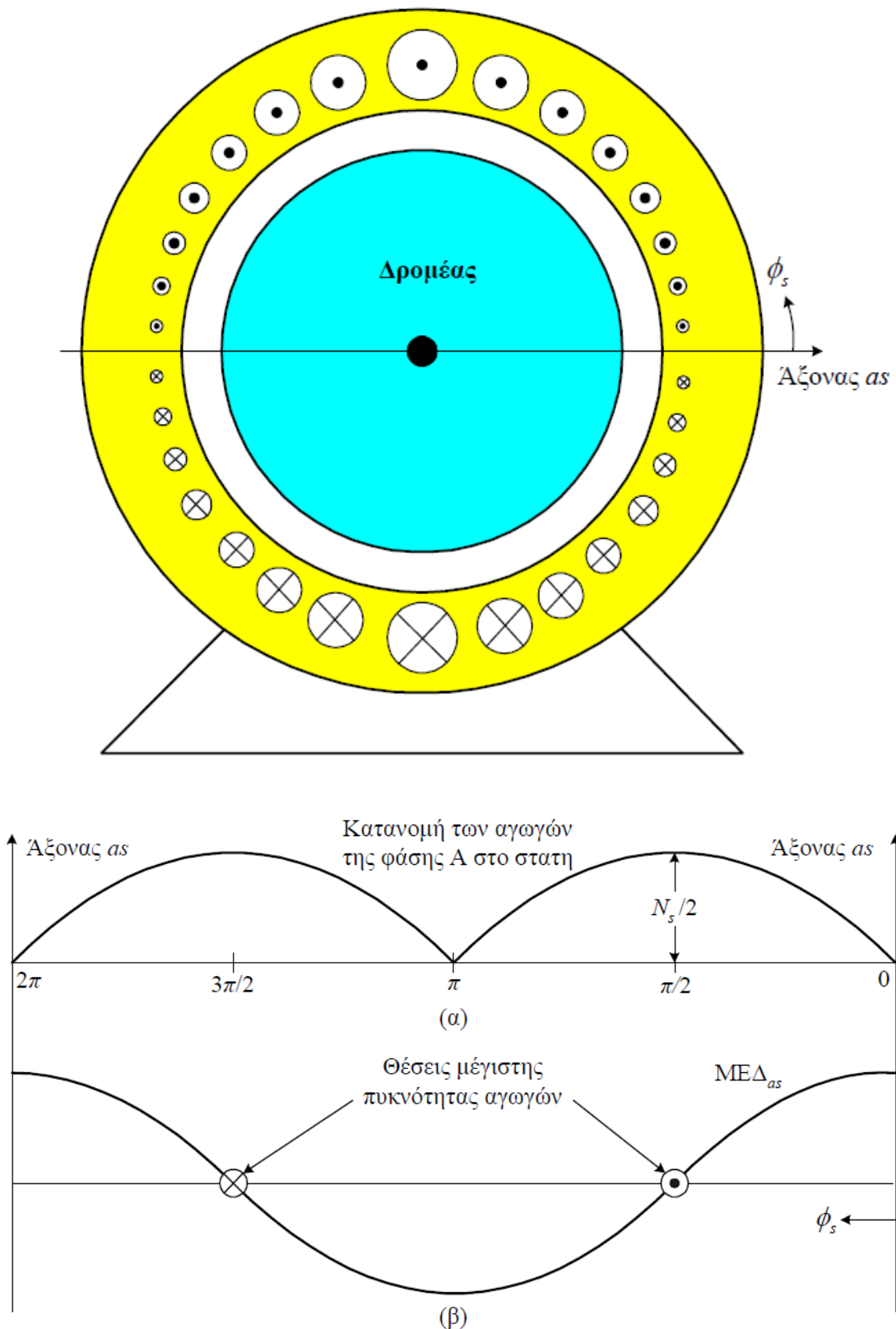
Τα συμμετρικά ρεύματα στο τριφασικό τύλιγμα της μηχανής, ορίζονται από τις σχέσεις

$$i_{as} = I_{ms} \cos(\omega_e t) \quad (5.5)$$

$$i_{bs} = I_{ms} \cos(\omega_e t - 2\pi/3) \quad (5.6)$$

$$i_{cs} = I_{ms} \cos(\omega_e t + 2\pi/3) \quad (5.7)$$

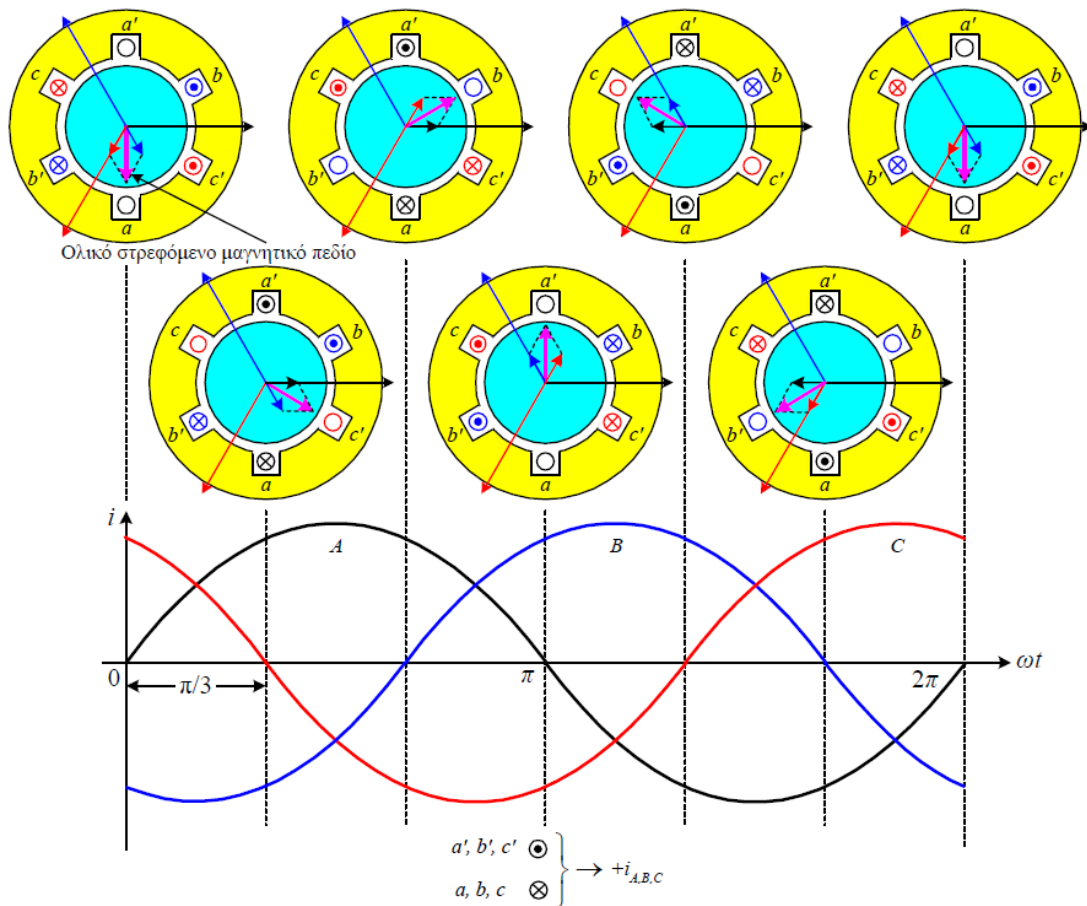
όπου ω_e είναι η κυκλική συχνότητα των ρευμάτων. Αντικαθιστώντας τις Εξ. (5.5)–(5.7) στην Εξ. (5.4), ορίζεται η ολική ΜΕΔ στο διάκενο της μηχανής



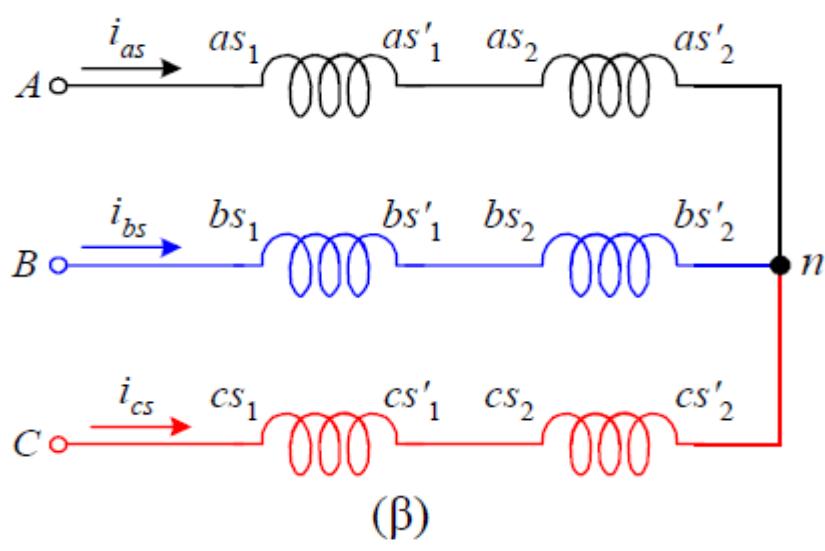
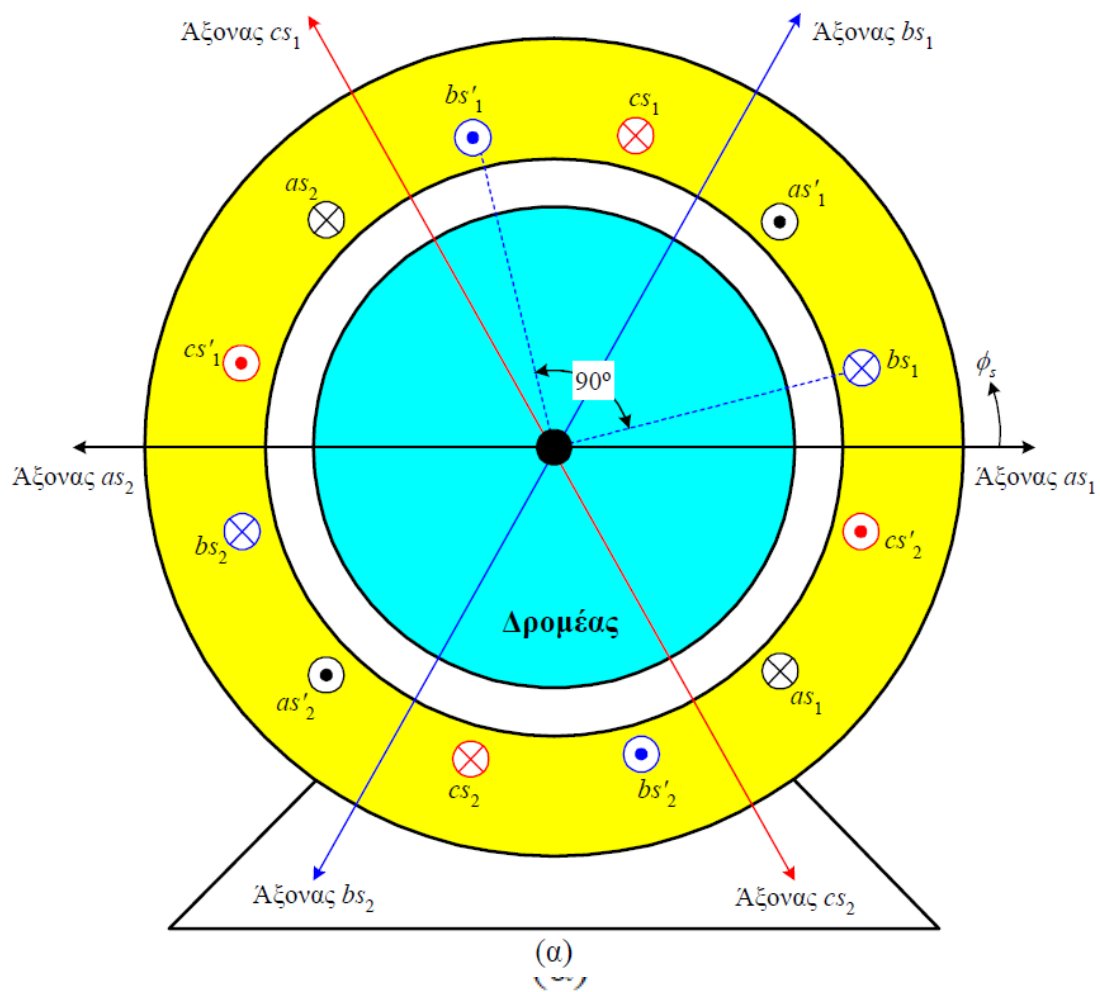
Σχ. 2.5 Τύλιγμα της φάσης as με ημιτονοειδή κατανομή (α) και η παραγόμενη ΜΕΔ στο διάκενο (β)

$$\text{ΜΕΔ}_s = \frac{N_s}{2} \frac{3}{2} I_{ms} \cos(\omega_e t - \phi_s) \quad (5.8)$$

Η Εξ. (5.8) παριστά μια ΜΕΔ με ημιτονοειδή κατανομή, η οποία στρέφεται με γωνιακή ταχύτητα ωe σε σχέση με το στάτη της μηχανής, με φορά αντίθετη των δεικτών του ρολογιού. Η ΜΕΔ έχει ένα ζεύγος πόλων. Επομένως, η ροή των τριφασικών ρευμάτων από το τριφασικό τύλιγμα του στάτη δημιούργησε ένα μαγνητικό πεδίο, ο βόρειος και ο νότιος πόλος του οποίου κάνουν μια πλήρη περιστροφή σε κάθε περίοδο των ρευμάτων. Η δημιουργία του στρεφόμενου μαγνητικού πεδίου γίνεται φανερή από το Σχ. 2.6. Η θετική φορά των ρευμάτων σε καθένα από τα τρία τύλιγματα του στάτη, αντιστοιχεί σ' εκείνη του Σχ. 2.3α. Κάθε τύλιγμα από τη ροή του αντίστοιχου ρεύματος παράγει ένα μαγνητικό πεδίο, η θετική φορά του οποίου (βόρειος πόλος) εικονίζεται στο Σχ. 2.6 και είναι ίδια μ' εκείνη στο Σχ. 2.3α. Στο Σχ. 2.6 εικονίζονται τα μαγνητικά πεδία που παράγει κάθε τύλιγμα του στάτη μόνο του, καθώς και το ολικό πεδίο της μηχανής σε επτά διακριτές χρονικές στιγμές, οι οποίες αντιστοιχούν σε γωνίες των ρευμάτων 60° . Η διαδοχή φάσης των ρευμάτων είναι ABC . Παρατηρούμε ότι στη διπολική μηχανή που εξετάζουμε το ολικό μαγνητικό πεδίο στρέφεται κατά 60° μηχανικές μοίρες σε κάθε 60° μεταβολή της φασικής γωνίας των ρευμάτων με αντιωρολογιακή φορά, όπως ήδη γνωρίζουμε από την Εξ.(5.8). Αν η σειρά διαδοχής φάσης των ρευμάτων αντιστραφεί, τότε θα αντιστραφεί και η φορά περιστροφής του μαγνητικού πεδίου (ωρολογιακή).



Σχ. 5.6 Παραγωγή του στρεφόμενου μαγνητικού πεδίου σε μια διπολική τριφασική μηχανή με θετική σειρά διαδοχής των φάσεων (ABC). Το μαγνητικό πεδίο εκτελεί μια πλήρη περιστροφή, με φορά αντίθετη των δεικτών του ρολογιού, σε κάθε περίοδο των ρευμάτων



Σχ. 2.7 Στοιχειώδης τετραπολική μηχανή εναλλασσόμενου ρεύματος, με τριφασικό τύλιγμα στο στάτη

Στο Σχ. 2.7 εικονίζονται τα τυλίγματα του στάτη σε μια τετραπολική μηχανή. Το τύλιγμα της κάθε φάσης αποτελείται από δύο επιμέρους τυλίγματα, τα οποία συνδέονται σε σειρά. Τα τρία τυλίγματα συνδέονται σε αστέρα. Οι αντίθετες πλευρές των ομάδων κάθε τυλίγματος

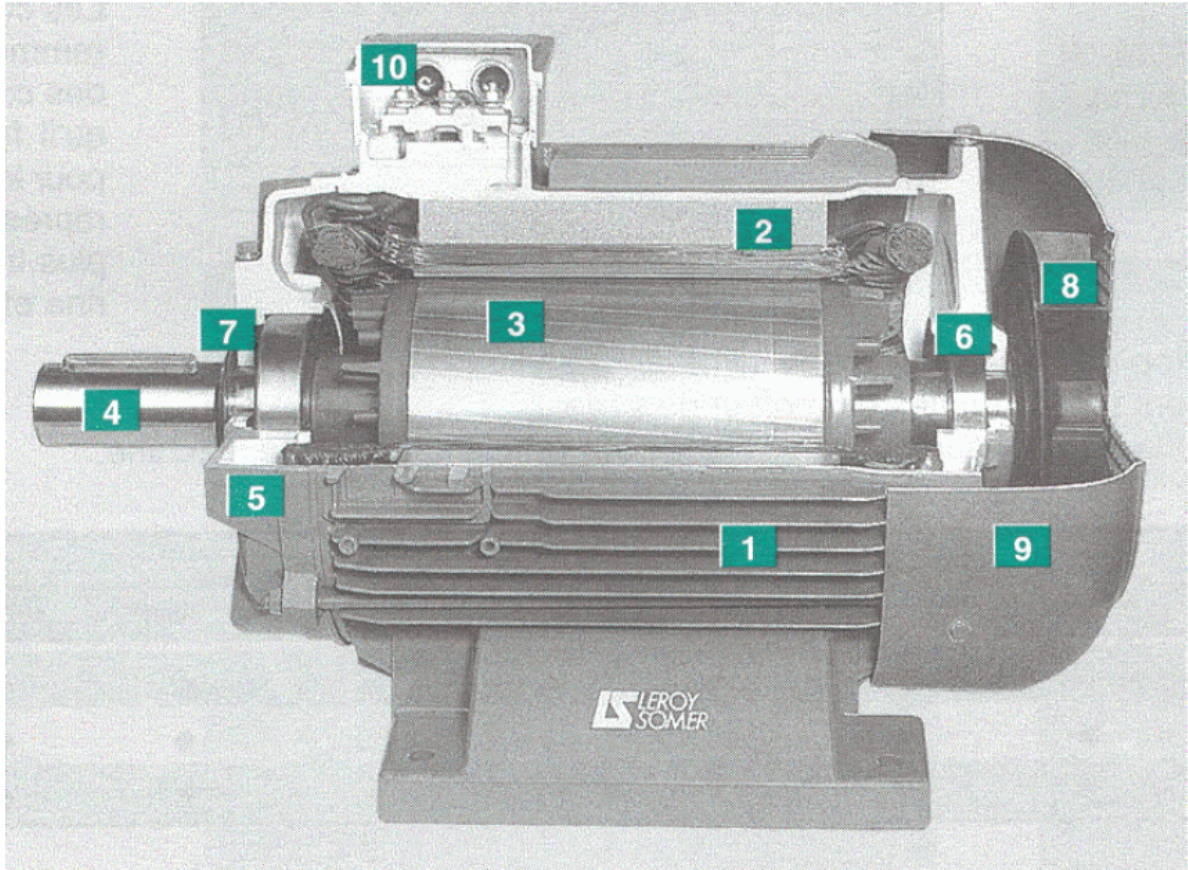
(span) σχηματίζουν γωνία 90°. Η ΜΕΔ που αναπτύσσεται στο διάκενο των μηχανών με P πόλους, ορίζεται με αντίστοιχο τρόπο από τη σχέση

$$\text{ΜΕΔ}_s = \frac{N_s}{P} \frac{3}{2} I_{ms} \cos \left\{ \omega_e t - \frac{P}{2} \phi_s \right\} \quad (5.9)$$

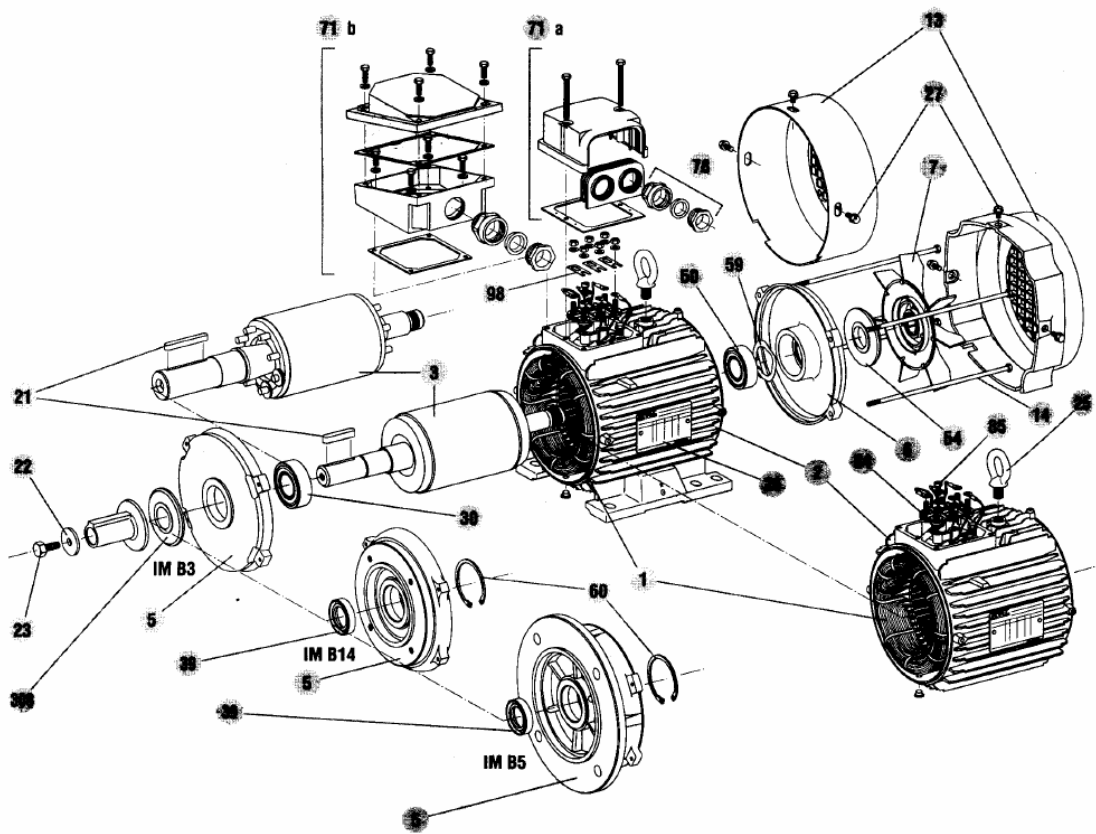
Η ταχύτητα περιστροφής της ΜΕΔ είναι μειωμένη και ίση με $\omega_e / (P/2)$. Η ταχύτητα της ΜΕΔ ονομάζεται *σύγχρονη ταχύτητα*. Το μαγνητικό πεδίο αποτελείται από P πόλους.

2.5 ΕΙΔΗ ΕΠΑΓΩΓΙΚΩΝ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ

Οι επαγωγικοί κινητήρες διακρίνονται σε δύο κατηγορίες, ανάλογα με την κατασκευαστική δομή του δρομέα τους: σε κινητήρες με *βραχυκυκλωμένο δρομέα ή κλωβό (squirrel cage rotor)* και σε κινητήρες με *δακτυλιοφόρο δρομέα (wound rotor)*. Οι κινητήρες με βραχυκυκλωμένο κλωβό είναι οι πλέον διαδεδομένοι. Ο δρομέας των κινητήρων αυτών αποτελείται από ελάσματα μονωμένα μεταξύ τους, τα οποία προσαρμόζονται στον άξονα. Τα ελάσματα φέρουν οδοντώσεις, οι οποίες σχηματίζουν αυλάκια κατά μήκος του δρομέα. Η γεωμετρική μορφή των αυλακώσεων καθορίζει την ηλεκτρική συμπεριφορά του κινητήρα, δηλαδή τη χαρακτηριστική ταχύτητας – ροπής. Στις *κλάσεις (classes)* των επαγωγικών κινητήρων με βραχυκυκλωμένο κλωβό, ανάλογα με τη μορφή των αυλακώσεων και στην ιδιαίτερη μορφή της χαρακτηριστικής ταχύτητας – ροπής κάθε κλάσης, θα αναφερθούμε στη συνέχεια. Στα αυλάκια του δρομέα τοποθετούνται ράβδοι από χαλκό ή ορείχαλκο, τα άκρα των οποίων συνδέονται μεταξύ τους με *δακτύλιους βραχυκύκλωσης (shorting rings)*. Έτσι, σχηματίζεται το τύλιγμα κλωβού του δρομέα. Στους επαγωγικούς κινητήρες μικρής ισχύος, το τύλιγμα κλωβού κατασκευάζεται με χύτευση αλουμινίου στα αυλάκια του δρομέα. Στην περίπτωση αυτή, οι δακτύλιοι βραχυκύκλωσης και τα πτερύγια εξαερισμού χυτεύονται μαζί με τους αγωγούς του κλωβού, οι οποίοι δεν είναι μονωμένοι ως προς το σίδηρο του δρομέα. Όμως, τα ρεύματα κυκλοφορούν κυρίως από τον κλωβό, καθώς η αγωγιμότητα του αλουμινίου είναι πολύ μεγαλύτερη από εκείνη του σιδήρου. Είναι φανερό ότι, ο δρομέας του επαγωγικού κινητήρα με βραχυκυκλωμένο κλωβό, δεν συνδέεται ηλεκτρικά με καμιά πηγή. Στο γεγονός αυτό οφείλεται η απλή κατασκευή και η ευρεία χρήση του επαγωγικού κινητήρα βραχυκυκλωμένου κλωβού (Σχ. 2.8).



(α)



(β)

Σχ. 2.8 Τριφασικός επαγωγικός κινητήρας με βραχυκυκλωμένο κλωβό. (α) Διακρίνονται τα παρακάτω μέρη: 1–Πτερύγια ψύξης του στάτη, 2–Ελάσματα του στάτη και το τύλιγμα, 3–Δρομέας, 4–Άξονας, 5–9–Κέλυφος, 6–7– Ρουλεμάν, 8–Ανεμιστήρας, 10–Κιβώτιο ηλεκτρικής σύνδεσης. (β) Λεπτομερής σχεδιαστική καταγραφή των επιμέρους τμημάτων του κινητήρα

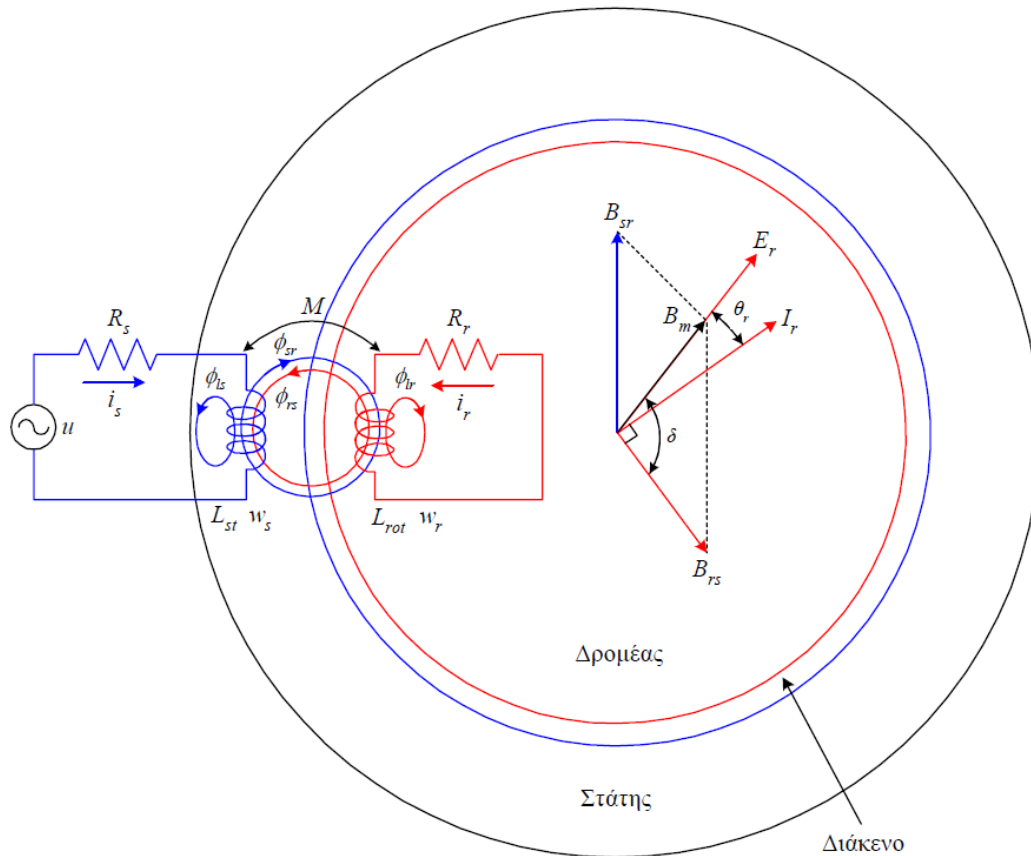
Ο δρομέας των επαγωγικών κινητήρων με δακτυλιοφόρο δρομέα φέρει αυλακώσεις, μέσα στις οποίες τοποθετείται ένα τριφασικό τύλιγμα, αντίστοιχο μ' εκείνο του στάτη. Οι τρεις φάσεις του τυλίγματος στο δρομέα συνδέονται σχεδόν πάντα σε αστέρα. Τα τρία άκρα του τυλίγματος αστέρα καταλήγουν σε ισάριθμους δακτυλίους, που φέρει ο δρομέας. Μέσω των δακτυλίων και των ψηκτρών που εφάπτονται σ' αυτούς, είναι δυνατή η σύνδεση ρυθμιστικών αντιστάσεων στο τύλιγμα του δρομέα. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται η τροποποίηση της χαρακτηριστικής ταχύτητας – ροπής του κινητήρα, ανάλογα με τις συνθήκες λειτουργίας.

2.6 ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΔΟΜΗ ΤΟΥ ΕΠΑΓΩΓΙΚΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ

Ο επαγωγικός κινητήρας έχει στο στάτη ένα συμμετρικό τριφασικό τύλιγμα, με ωμική αντίσταση R_s , αυτεπαγωγή L_{st} και ισοδύναμο αριθμό σπειρών w_s ανά φάση (Σχ. 5.9). Όταν το τύλιγμα του στάτη τροφοδοτηθεί από μια συμμετρική τριφασική πηγή με τάση u και συχνότητα ω_e , δημιουργείται το στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο του στάτη ϕ_s . Το συνιστώσα ϕ_{sr} του πεδίου του στάτη (κοινή ροή, *mutual flux*), διασχίζει ακτινικά το διάκενο και συνδέει το τύλιγμα του δρομέα. Η συνιστώσα ϕ_{ls} ονομάζεται *ροή σκέδασης (leakage flux)* και συνδέει μόνο τις σπείρες του στάτη. Το μέγεθος της ροής σκέδασης εξαρτάται από τη σύζευξη μεταξύ των τυλιγμάτων του στάτη και του δρομέα. Η σύζευξη των τυλιγμάτων στις ηλεκτρικές μηχανές είναι πολύ μικρότερη από εκείνη στους μετασχηματιστές, εξαιτίας του διακένου. Το ολικό πεδίο του στάτη είναι ίσο με

$$\phi_s = \phi_{ls} + \phi_{sr} \quad (5.10)$$

Το τύλιγμα του δρομέα έχει τη μορφή πλήρους τριφασικού τυλίγματος, με τον ίδιο αριθμό πόλων μ' εκείνο του στάτη, στον κινητήρα με δακτυλιοφόρο δρομέα. Στον κινητήρα με βραχυκυκλωμένο κλωβό το τύλιγμα του δρομέα αποτελείται από ράβδους, τα άκρα των οποίων συνδέονται με δακτυλίους βραχυκύκλωσης. Το τύλιγμα κλωβού μπορεί να θεωρηθεί αντίστοιχο με ένα πλήρες συμμετρικό τριφασικό τύλιγμα, με αριθμό πόλων ίσο μ' εκείνο του στάτη. Καθώς το στρεφόμενο πεδίο του στάτη (συνιστώσα ϕ_{sr}) τέμνει τους αγωγούς του τυλίγματος του δρομέα, επάγει σ' αυτούς συμμετρικές τριφασικές τάσεις E_r . Το πλάτος και η συχνότητα των επαγόμενων τάσεων, εξαρτάται από τη σχετική ταχύτητα του δρομέα ως προς το στρεφόμενο πεδίο του στάτη. Το τύλιγμα του δρομέα έχει ωμική αντίσταση R_r , αυτεπαγωγή L_{rot} και ισοδύναμο αριθμό σπειρών w_r ανά φάση. Εξαιτίας της επαγωγικής φύσης του βραχυκυκλωμένου τυλίγματος του δρομέα, το ρεύμα στο δρομέα I_r καθυστερεί ως προς την επαγόμενη τάση E_r . Στο Σχ. 2.9 εικονίζεται μόνο η μία φάση των τυλιγμάτων στο στάτη και το δρομέα. Τα τριφασικά ρεύματα που ρέουν στο δρομέα, ως συνέπεια των επαγόμενων τάσεων από το στρεφόμενο πεδίο του στάτη, προκαλούν την ανάπτυξη του στρεφόμενου πεδίου του δρομέα ϕ_r . Η συνιστώσα ϕ_{rs} του πεδίου του δρομέα, συνδέει το τύλιγμα του στάτη.



Σχ. 2.9 Ηλεκτρομαγνητική δομή του επαγωγικού κινητήρα

Η συνιστώσα ϕ_{lr} αντιπροσωπεύει τη ροή σκέδασης. Έτσι, ισχύει

$$\phi_r = \phi_{lr} + \phi_{rs} \quad (5.11)$$

Το διανυσματικό διάγραμμα των παραπάνω μεγεθών εικονίζεται στο Σχ. 2.9. Η ολική μαγνητική ροή στο διάκενο του κινητήρα ϕ_m , είναι ίση με το διανυσματικό άθροισμα των κοινών ροών του στάτη και του δρομέα

$$\phi_m = \phi_{sr} + \phi_{rs} \quad (5.12)$$

Η αλληλεπίδραση των μαγνητικών πεδίων του στάτη και του δρομέα, τα οποία στρέφονται με την ίδια ταχύτητα, προκαλεί την ανάπτυξη μιας σταθερής ηλεκτρομαγνητικής ροπής. Η ροπή είναι ανάλογη με το εξωτερικό γινόμενο των πεδίων

$$T_e = C_1 (\mathbf{B}_{sr} \times \mathbf{B}_{rs}) \quad (5.13)$$

ή αντίστοιχα των πεδίων

$$T_e = C_2 (\mathbf{B}_m \times \mathbf{B}_{rs}) \quad (5.14)$$

$$T_e = C_T B_m B_{rs} \sin \delta = C_T B_m B_{rs} \cos \theta_r \quad (5.15)$$

και η φορά της είναι η ίδια με τη φορά περιστροφής των πεδίων του στάτη και του δρομέα. Από τα προηγούμενα προκύπτει ότι, τα ρεύματα στο δρομέα του κινητήρα προέρχονται από τις τάσεις εξ επαγωγής που προκαλεί το στρεφόμενο πεδίο του στάτη. Επομένως, ο δρομέας δεν απαιτείται να τροφοδοτηθεί από κάποια εξωτερική πηγή ενέργειας. Οι μηχανές με τροφοδότηση μόνο στο στάτη, ονομάζονται *απλής διέγερσης (singly excited)*. Αντίστοιχα, οι μηχανές που τροφοδοτούνται από εξωτερικές πηγές τόσο στο στάτη όσο και στο δρομέα, όπως οι σύγχρονες και οι μηχανές συνεχούς ρεύματος, ονομάζονται *διπλής διέγερσης (doubly excited)*.

2.7 Η ΟΛΙΣΘΗΣΗ

Η ταχύτητα περιστροφής του μαγνητικού πεδίου του στάτη, εξαρτάται από τη συχνότητα των ρευμάτων τροφοδοσίας $\omega_e = 2\pi f_e$ και τον αριθμό των πόλων P , σύμφωνα με την Εξ. (5.9). Η ταχύτητα του στρεφόμενου πεδίου ονομάζεται σύγχρονη ταχύτητα n_s και ορίζεται από την παρακάτω σχέση σε rpm

$$n_s = \frac{60 \cdot f_e}{P/2} = \frac{120 f_e}{P} \quad (5.16)$$

Στον επαγωγικό κινητήρα, η ανάπτυξη της ροπής οφείλεται στην αλληλεπίδραση των μαγνητικών πεδίων του στάτη και του δρομέα. Όμως, το πεδίο του δρομέα οφείλεται στις τάσεις εξ επαγωγής, οι οποίες αναπτύσσονται στο δρομέα μόνο όταν υπάρχει σχετική κίνηση μεταξύ του δρομέα και του στρεφόμενου πεδίου. Επομένως, η ταχύτητα του δρομέα δεν μπορεί να είναι ίση με τη σύγχρονη, καθώς τότε δεν θα επάγονταν τάσεις στο δρομέα, με συνέπεια το ρεύμα και η ροή του δρομέα να ήταν μηδενικά. Έτσι, η ροπή θα μηδενίζονταν και η ταχύτητα του κινητήρα θα μειώνονταν σε μια τιμή μικρότερη από τη σύγχρονη.

Η διαφορά της ταχύτητας του δρομέα n_r από τη σύγχρονη n_s ονομάζεται *ταχύτητα ολίσθησης (slip speed)* και ορίζεται από τη σχέση

$$n_{slip} = n_s - n_r \quad (5.17)$$

Η ποσοστιαία διαφορά της ταχύτητας του κινητήρα από τη σύγχρονη ταχύτητα ονομάζεται *ολίσθηση (slip)*

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s} \times 100\% \quad (5.18)$$

Όταν ο κινητήρας είναι ακίνητος, η ολίσθηση είναι ίση με τη μονάδα ($s = 1$). Αν ο δρομέας στρέφονταν με τη σύγχρονη ταχύτητα, η ολίσθηση θα ήταν μηδέν ($s = 0$). Από την Εξ. (5.18) προκύπτει η παρακάτω σχέση της ταχύτητας του κινητήρα, ως συνάρτηση της σύγχρονης ταχύτητας και της ολίσθησης

$$n_r = (1 - s)n_s \quad (5.19)$$

Η ονομασία ασύγχρονος κινητήρας, προέρχεται από τη διαφορά της ταχύτητας του δρομέα από τη σύγχρονη, η οποία είναι ανάλογη με τη ροπή του φορτίου.

2.8 ΙΣΟΔΥΝΑΜΟ ΚΥΚΛΩΜΑ ΤΟΥ ΕΠΑΓΩΓΙΚΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ

Η λειτουργία του επαγωγικού κινητήρα στηρίζεται στην ανάπτυξη τάσεων εξ επαγωγής στο τριφασικό τύλιγμα του δρομέα. Επομένως, η αρχή λειτουργίας του επαγωγικού κινητήρα είναι ίδια μ' εκείνη του μετασχηματιστή. Για το λόγο αυτό, ο ασύγχρονος κινητήρας ονομάζεται και *στρεφόμενος μετασχηματιστής (rotating transformer)*. Προκειμένου να λάβουμε το ισοδύναμο κύκλωμα του συμμετρικού τριφασικού επαγωγικού κινητήρα, θεωρούμε την ηλεκτρομαγνητική δομή ανά φάση του Σχ. 2.9, από την οποία προκύπτουν οι παρακάτω εξισώσεις

$$u = R_s i_s + L_{st} \frac{di_s}{dt} - M \frac{di_r}{dt} \quad (5.20)$$

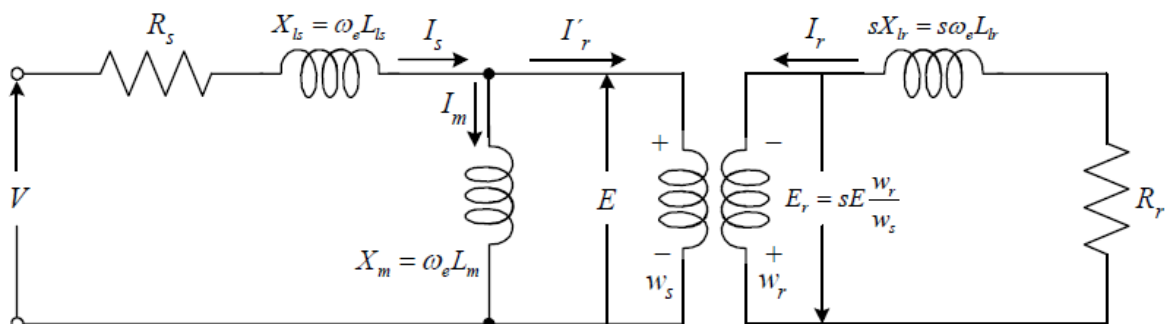
$$0 = R_r i_r + L_{rot} \frac{di_r}{dt} - M \frac{di_s}{dt} \quad (5.21)$$

όπου M είναι ο συντελεστής αμοιβαίας επαγωγής μεταξύ των τυλιγμάτων του στάτη και του δρομέα. Αν θεωρήσουμε ημιτονοειδή μεγέθη και μόνιμη κατάσταση ισορροπίας, οι Εξ. (5.20)– (5.21) λαμβάνουν τη μορφή

$$V = R_s I_s + j\omega_e L_{st} I_s - j\omega_e M I_r \quad (5.22)$$

$$0 = R_r I_r + js\omega_e L_{rot} I_r - js\omega_e M I_s \quad (5.23)$$

Οι εξισώσεις του επαγωγικού κινητήρα διαφέρουν από εκείνες του μετασχηματιστή, μόνο στο δευτερεύον κύκλωμα (δρομέα).



Σχ. 2.10 Ανά φάση ισοδύναμο κύκλωμα του επαγωγικού κινητήρα, το οποίο στηρίζεται στο μοντέλο του μετασχηματιστή

Στο Σχ. 2.10 εικονίζεται το ισοδύναμο κύκλωμα του μετασχηματιστή, τροποποιημένο ως προς το δρομέα, για τις ανάγκες του επαγωγικού κινητήρα. Στον κινητήρα, αντίθετα από το μετασχηματιστή, η συχνότητα των επαγόμενων τάσεων και των ρευμάτων στο δρομέα δεν είναι σταθερή και ίση με τη συχνότητα του πρωτεύοντος (στάτη). Στον επαγωγικό κινητήρα,

η συχνότητα των επαγόμενων τάσεων και ρευμάτων f_r εξαρτάται από την ολίσθηση, όπως προκύπτει από την Εξ. (5.23) και ορίζεται από τη σχέση

$$f_r = sf_e \quad (5.24)$$

Όταν ο κινητήρας είναι ακίνητος, η συχνότητα του δρομέα είναι ίση με τη συχνότητα του στάτη. Καθώς η ταχύτητα τείνει προς τη σύγχρονη, η συχνότητα των τάσεων και των ρευμάτων στο δρομέα τείνει στο μηδέν. Εκτός από τη συχνότητα των επαγόμενων τάσεων και το πλάτος των τάσεων μεταβάλλεται ανάλογα με την ολίσθηση. Έτσι, η επαγόμενη τάση είναι μέγιστη κατά την εκκίνηση του κινητήρα, όπου $n_r = 0$, $s = 1$ και ελάχιστη όταν η ταχύτητα τείνει προς τη σύγχρονη ($s \rightarrow 0$). Οι Εξ. (5.22), (5.23) του κινητήρα, με κατάλληλος χειρισμούς, λαμβάνουν την παρακάτω μορφή

$$V = (R_s + jX_{ls})I_s + jX_m(I_s - I_r') \quad (5.25)$$

$$0 = \left(\frac{R_r'}{s} + jX_{lr}'\right)I_r' + jX_m(I_r' - I_s) \quad (5.26)$$

Στις Εξ. (5.25)–(5.26), ορίζονται τα παρακάτω μεγέθη, τα οποία εμφανίζονται και στο ισοδύναμο κύκλωμα του επαγωγικού κινητήρα: X_{ls} είναι η αντίδραση σκέδασης του στάτη, η οποία εκφράζει τη ροή σκέδασης ϕ_{ls}

$$X_{ls} = \omega_e \left(L_{st} - M \frac{w_s}{w_r} \right) \quad (5.27)$$

X_{lr}' είναι η αντίδραση σκέδασης του δρομέα, η οποία εκφράζει τη ροή σκέδασης ϕ_{lr}

$$X_{lr}' = \omega_e \left(L_{rot} - M \frac{w_r}{w_s} \right) \quad (5.28)$$

X_m είναι η αντίδραση μαγνήτισης, η οποία παριστά τη σύζευξη μεταξύ των τυλιγμάτων του στάτη και του δρομέα

$$X_m = \omega_e M \frac{w_s}{w_r} \quad (5.29)$$

Τα μεγέθη του δρομέα αναφέρονται στο στάση, μέσω του λόγου σπειρών των δύο τυλιγμάτων w_s/w_r , από τις σχέσεις:

$$R'_r = R_r \left(\frac{\omega_s}{\omega_r} \right)^2 \quad (5.30)$$

$$X'_{lr} = X_{lr} \left(\frac{\omega_s}{\omega_r} \right)^2 \quad (5.31)$$

$$I'_r = I_r \left(\frac{\omega_r}{\omega_s} \right) \quad (5.32)$$

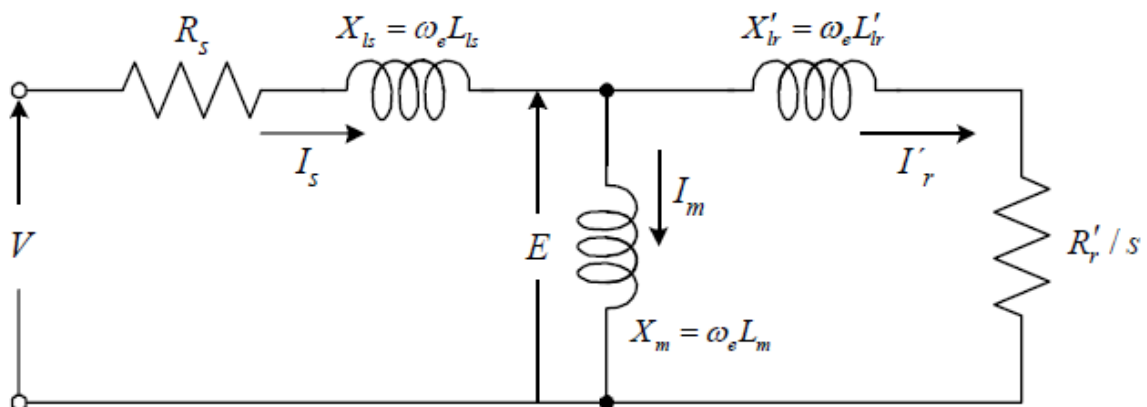
$$X_{ls} + X_m = \omega_e L_{st} \quad (5.33)$$

$$X'_{lr} + X_m = \omega_e L'_{rot} \quad (5.34)$$

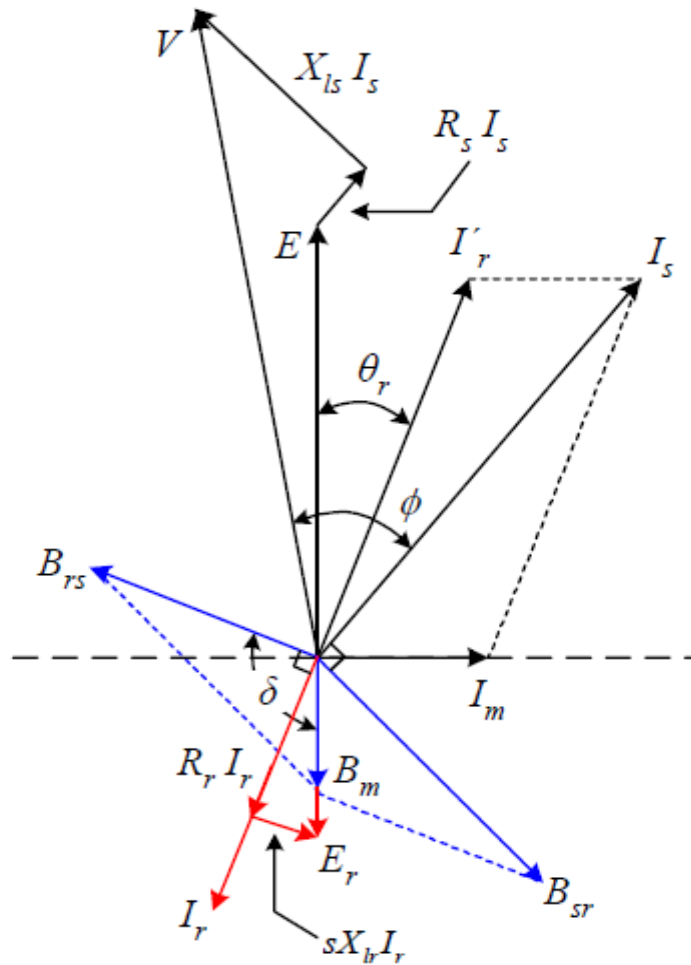
Το τελικό ισοδύναμο κύκλωμα του επαγωγικού κινητήρα, από τις Εξ. (5.25)–(5.26), εικονίζεται στο Σχ. 2.11. Στο ισοδύναμο κύκλωμα, η τάση του δρομέα είναι σταθερή E και η συχνότητα είναι ίση μ' εκείνη του στάτη ω_e . Οι επιπτώσεις από τη μεταβολή της ταχύτητας έχουν ενσωματωθεί στην ισοδύναμη σύνθετη αντίσταση του δρομέα $X'_{lr} + R'_r / s$, η οποία εξαρτάται από την ολίσθηση. Στο Σχ. 2.12 παρουσιάζεται το διάγραμμα *στροφόμενων ανυσμάτων* (*phasors*), των τάσεων και των ρευμάτων του κινητήρα. Τα δύο πρώτα τεταρτημόρια αναφέρονται στα μεγέθη του κινητήρα, ανοιγμένα στο στάτη. Εικονίζονται ακόμη, τα μεγέθη στην πλευρά του δρομέα και τα μαγνητικά πεδία.

2.9 ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΤΩΝ ΕΠΑΓΩΓΙΚΩΝ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ

Ο βαθμός απόδοσης του τριφασικού επαγωγικού κινητήρα, εκφράζει την ικανότητά του να μετατρέπει την ηλεκτρική ενέργεια εισόδου σε μηχανική.



Σχ. 2.11 Τυπικό ισοδύναμο κύκλωμα του επαγωγικού κινητήρα.
Τα μεγέθη του δρομέα αναφέρονται στην τάση και τη συχνότητα του στάτη



Σχ. 2.12 Ανυσματικό διάγραμμα των τάσεων, των ρευμάτων και των μαγνητικών πεδίων του επαγωγικού κινητήρα

Κατά τη μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας, ένα ποσοστό της ισχύος εισόδου καταναλώνεται από τον κινητήρα, με αποτέλεσμα την ανύψωση της θερμοκρασίας του. Αυτό το ποσοστό αντιπροσωπεύει τις απώλειες της μηχανής, οι οποίες πρέπει να είναι οι ελάχιστες δυνατές. Οι ολικές απώλειες των επαγωγικών κινητήρων, απαρτίζονται από τις παρακάτω επιμέρους συνιστώσες:

- *Απώλειες χαλκού ή ωμικές απώλειες (copper, winding losses).* Οι απώλειες χαλκού οφείλονται στη ροή των ρευμάτων από τα τυλίγματα του στάτη και του δρομέα. Οι απώλειες χαλκού στο στάτη ορίζονται από τη σχέση

$$P_{iron_s} = k_e \omega_e^2 \phi_m^2 + k_h \omega_e \phi_m^n \quad (5.38)$$

και στο δρομέα από την

$$P_{iron_r} = k_e (s\omega_e)^2 \phi_m^2 + k_h s\omega_e \phi_m^n \quad (5.39)$$

όπου k_e είναι ο συντελεστής απωλειών δινορευμάτων και k_h ο συντελεστής απωλειών υστέρησης. Ο εκθέτης n λαμβάνει τιμές από 1.5 έως 2.5 και συνήθως θεωρείται $n = 2$. Στην περίπτωση αυτή, οι ολικές απώλειες σιδήρου του επαγωγικού κινητήρα είναι ίσες με

$$P_{iron_s+r} = [k_e(1+s^2)\omega_e^2 + k_h(1+s)\omega_e] \phi_m^2 \quad (5.40)$$

Οι απώλειες σιδήρου στο δρομέα είναι σημαντικά μικρότερες από εκείνες στο στάτη, εξαιτίας της μικρότερης συχνότητας $s\omega_e$. Οι απώλειες σιδήρου αποτελούν τη δεύτερη σημαντικότερη συνιστώσα των ολικών απωλειών, με ποσοστό περίπου 20%. Στο ισοδύναμο κύκλωμα του Σχ. 2.11, οι μαγνητικές απώλειες μοντελοποιούνται με μια αντίσταση R_m σε παράλληλη σύνδεση με την αντίδραση μαγνήτισης. Η τιμή της αντίστασης απωλειών σιδήρου, υπολογίζεται από τη σχέση

$$P_{iron_s+r} = \frac{E^2}{R_m} \quad (5.41)$$

με αντικατάσταση της Εξ. (5.40) και θέτοντας $E = \omega_e \phi_m$, οπότε

$$R_m = \frac{1}{k_e(1+s^2) + k_h(1+s) / \omega_e} \quad (5.42)$$

- *Μηχανικές απώλειες (mechanical losses)*. Οι μηχανικές απώλειες P_{fw} , περιλαμβάνουν τις απώλειες τριβών (*friction*), λόγω της περιστροφής του άξονα και τη συνιστώσα αερισμού (*windage*) από τη λειτουργία του ανεμιστήρα. Οι απώλειες τριβών – αερισμού, μεταβάλλονται προσεγγιστικά ανάλογα με το τετράγωνο της ταχύτητας

$$P_{fw} = C_{fw} n_r^2 \quad (5.43)$$

όπου, C_{fw} είναι ο συντελεστής μηχανικών απωλειών. Οι μηχανικές απώλειες αποτελούν το 8–10% των ολικών απωλειών στο ονομαστικό φορτίο.

- *Κατανεμημένες απώλειες (stray losses)*. Πρόκειται για πρόσθετες απώλειες της μηχανής, οι οποίες οφείλονται στην αύξηση της ροής σκέδασης με το φορτίο και στις υψηλής συχνότητας διακυμάνσεις της ροής αυτής. Ο προσδιορισμός των κατανεμημένων απωλειών P_{stray} είναι εξαιρετικά δύσκολος. Έτσι, συνήθως λαμβάνονται ίσες με το 1% της ισχύος εξόδου της μηχανής, στη λειτουργία με το ονομαστικό φορτίο. Οι κατανεμημένες απώλειες αποτελούν το 8–20% των ολικών απωλειών, ανάλογα με την ιπποδύναμη του κινητήρα.

5.10 ΙΣΧΥΣ ΚΑΙ ΡΟΠΗ ΤΩΝ ΕΠΑΓΩΓΙΚΩΝ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ

Ο τριφασικός επαγωγικός κινητήρας μετατρέπει την ηλεκτρική ισχύ εισόδου σε μηχανική. Η ηλεκτρική ισχύς εισόδου ορίζεται από τη σχέση

$$P_m = 3VI_s \cos \phi \quad (5.44)$$

όπου V είναι η φασική τάση, I_s το φασικό ρεύμα και ϕ η διαφορά φάσης μεταξύ της τάσης και του ρεύματος. Η ισχύς που απομένει, αν από την ισχύ εισόδου αφαιρεθούν οι απώλειες χαλκού και οι μαγνητικές απώλειες στο στάτη, είναι η ισχύς που μέσω του διακένου

μεταφέρεται στο δρομέα. Η ισχύς αυτή ονομάζεται *ισχύς διακένου (air gap power)*. Από το ισοδύναμο κύκλωμα του κινητήρα, η ισχύς διακένου μπορεί να καταναλωθεί μόνο στην αντίσταση R'_r . Επομένως, η ισχύς διακένου ορίζεται από τη σχέση

$$P_{ag} = 3I_r'^2 \frac{R'_r}{s} = 3EI_r' \cos \theta_r \quad (5.45)$$

Ένα τμήμα της ισχύος διακένου χάνεται ως απώλειες χαλκού στο δρομέα και ένα τμήμα ως απώλειες σιδήρου στο δρομέα. Η ισχύς που απομένει P_m , μετατρέπεται σε μηχανική. Η ισχύς αυτή ονομάζεται *αναπτυσσόμενη μηχανική ισχύς* και ορίζεται από την παρακάτω σχέση, αν αγνοήσουμε τις μικρές απώλειες σιδήρου στο δρομέα.

$$P_m = P_{ag} - P_{cu_r} = 3I_r'^2 \frac{R'_r}{s} - 3I_r'^2 R'_r = P_{ag} (1 - s) \quad (5.46)$$

Συνήθως, οι απώλειες σιδήρου του δρομέα ενσωματώνονται στις μαγνητικές απώλειες του στάτη. Οι απώλειες χαλκού του δρομέα, από την Εξ. (5.46), υπολογίζονται από το γινόμενο της ισχύος διακένου με την ολίσθηση

$$P_{cu_r} = sP_{ag} \quad (5.47)$$

Όταν ο κινητήρας δεν στρέφεται ($s = 1$), όλη η ισχύς διακένου μετατρέπεται σε θερμότητα στην αντίσταση του δρομέα. Αυτό συμβαίνει γιατί η ισχύς εξόδου είναι μηδενική. Η ωφέλιμη ισχύς εξόδου του επαγωγικού κινητήρα, είναι μικρότερη από την αναπτυσσόμενη ισχύ κατά τις μηχανικές και τις καταναλωμένες απώλειες

$$P_{out} = P_m - P_{fw} - P_{stray} \quad (5.48)$$

Αντίστοιχα, η πραγματική ροπή στον άξονα του κινητήρα, εξαιτίας των τριβών και των καταναλωμένων απωλειών είναι μικρότερη από την εσωτερική ροπή. Η εσωτερική ροπή ονομάζεται *αναπτυσσόμενη ή ηλεκτρομαγνητική ροπή (developed torque)*. Η ηλεκτρομαγνητική ροπή ορίζεται από την αναπτυσσόμενη μηχανική ισχύ και την κυκλική ταχύτητα του κινητήρα, ή ισοδύναμα από την ισχύ διακένου και τη σύγχρονη ταχύτητα

$$T_e = \frac{P_m}{\omega_r} = \frac{(1-s)P_{ag}}{(1-s)\omega_s} = \frac{P_{ag}}{\omega_s} \quad (5.49)$$

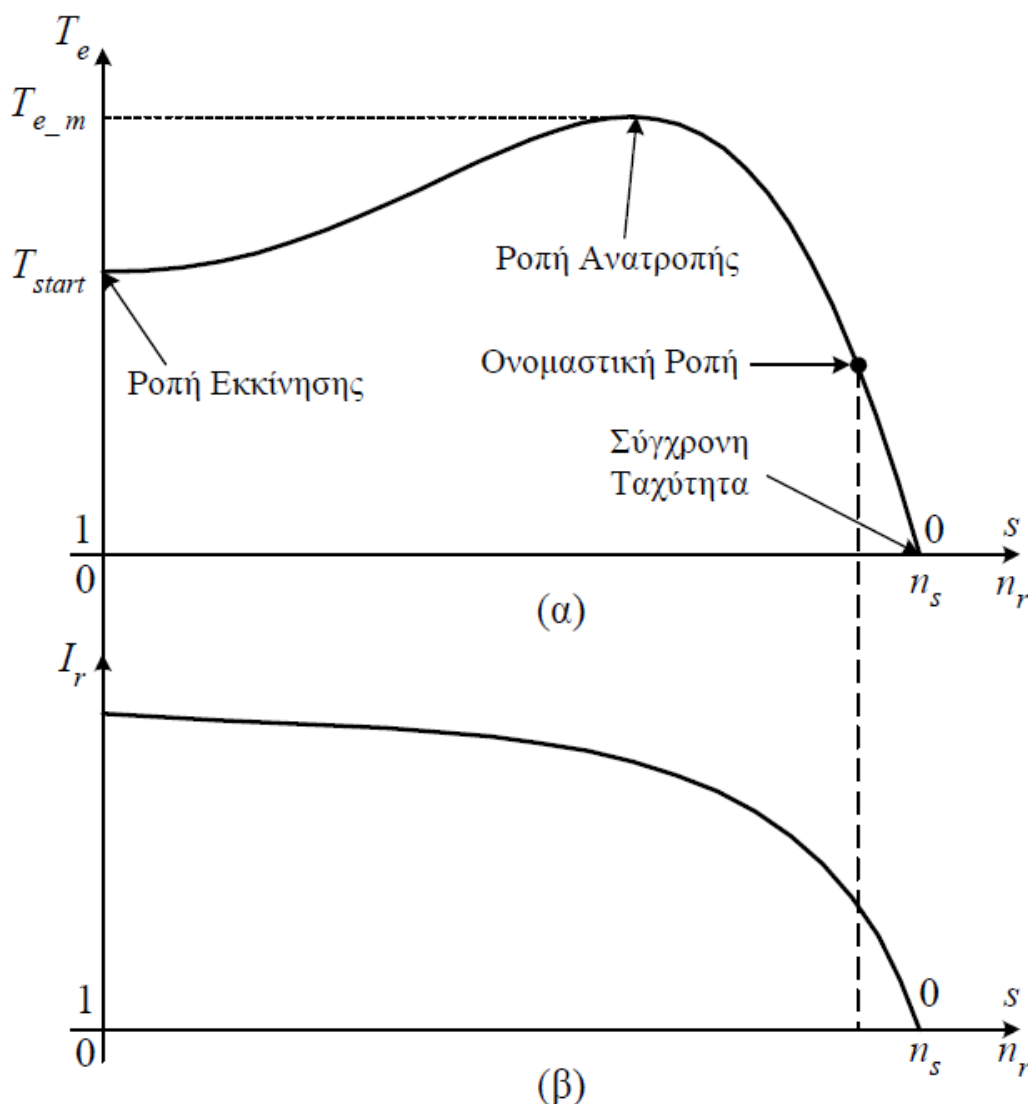
2.11 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ-ΡΟΠΗΣ

Η ροπή που αναπτύσσει ένας επαγωγικός κινητήρας μεταβάλλεται με την ταχύτητα, με τον τρόπο που εικονίζεται στο Σχ. 2.13α. Προκειμένου να ερμηνεύσουμε τη χαρακτηριστική αυτή, θεωρούμε ότι ο κινητήρας λειτουργεί αρχικά χωρίς φορτίο (Σχ. 2.14α). Τότε, η ταχύτητα του κινητήρα είναι περίπου ίση με τη σύγχρονη. Το μαγνητικό πεδίο του στάτη \mathbf{B}_s παράγεται από το ρεύμα I_s . Το ολικό μαγνητικό πεδίο \mathbf{B}_m είναι ανάλογο με το ρεύμα μαγνήτισης I_m (Σχ. 2.11). Το ρεύμα μαγνήτισης εξαρτάται από την τάση E , όταν ο κινητήρας είναι ακόρεστος. Επειδή η πτώση τάσης στη σύνθετη αντίσταση του στάτη $R_s + jX'_l$ είναι πολύ μικρή, η τάση E είναι σταθερή και περίπου ίση με την τάση τροφοδοσίας V . Επομένως,

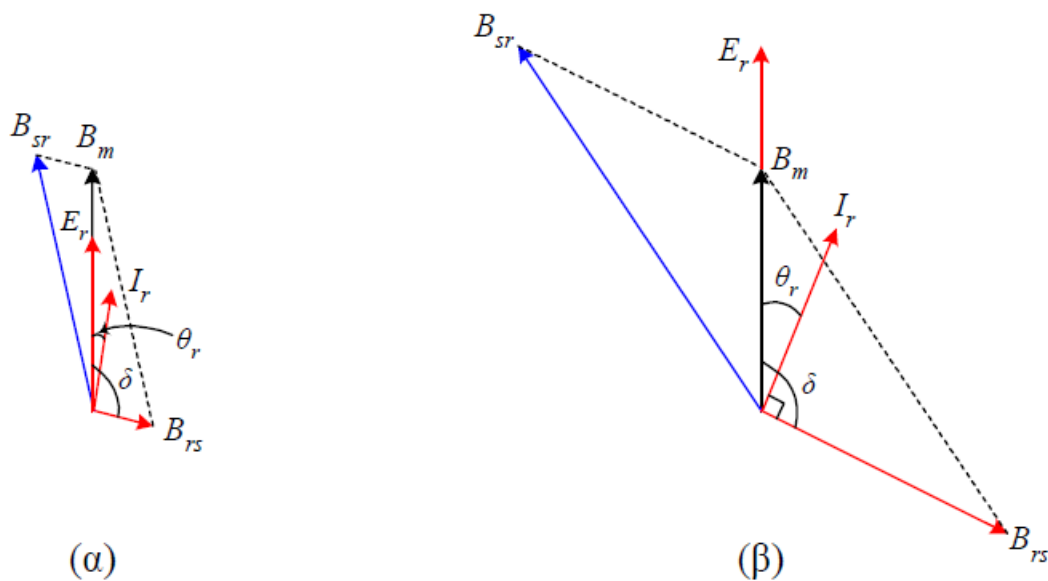
το ολικό μαγνητικό πεδίο στο διάκενο του κινητήρα είναι σταθερό και ανεξάρτητο από τη ροπή του φορτίου. Η τάση που επάγεται στο τύλιγμα του δρομέα E_r είναι πολύ μικρή, εξαιτίας της μικρής ολίσθησης. Έτσι, το ρεύμα του δρομέα I_r και το πεδίο που αυτό αναπτύσσει B_{rs} , είναι μικρά. Επειδή η συχνότητα των επαγόμενων τάσεων είναι μικρή, η αντίδραση του δρομέα είναι πολύ μικρή σε σχέση με την ωμική του αντίσταση και η διαφορά φάσης μεταξύ I_r και E_r είναι ελάχιστη. Μολονότι το ρεύμα του δρομέα είναι πολύ μικρό στη λειτουργία χωρίς φορτίο, το ρεύμα τροφοδοσίας του στάτη είναι αρκετά μεγάλο, καθώς παρέχει το ρεύμα μαγνήτισης. Το μέτρο της αναπτυσσόμενης ροπής δίνεται από τη σχέση

$$T_e = C_T B_m B_{rs} \sin \delta \quad (5.50)$$

Επειδή το μαγνητικό πεδίο B_{rs} είναι μικρό, η ροπή που αναπτύσσει ο κινητήρας είναι τόσο όση να υπερνικήσει τις απώλειές του.



Σχ. 2.13 Τυπική χαρακτηριστική ροπής – ταχύτητας των επαγωγικών κινητήρων (α) και μεταβολή του ρεύματος του δρομέα με την ταχύτητα (β)



Σχ. 2.14 Μεταβολή των μαγνητικών πεδίων όταν ο επαγωγικός κινητήρας λειτουργεί χωρίς φορτίο (α) και με υψηλό φορτίο (β)

Όταν η ροπή του φορτίου αυξηθεί στην ονομαστική τιμή, η ταχύτητα του κινητήρα μειώνεται και η ολίσθηση αυξάνει. Έτσι, η τάση που επάγεται στο δρομέα αυξάνεται. Η αυξημένη τάση E_r προκαλεί την αύξηση του ρεύματος και του μαγνητικού πεδίου στο δρομέα. Ταυτόχρονα, η αύξηση της συχνότητας στο δρομέα έχει ως αποτέλεσμα τη μεγαλύτερη διαφορά φάσης μεταξύ των E_r και I_r (Σχ. 5.14β). Η αντίδραση του δρομέα sX_{lr} είναι τώρα παραπλήσια της ωμικής του αντίστασης R_r . Η αύξηση του πεδίου \mathbf{B}_{rs} τείνει να αυξήσει την αναπτυσσόμενη ροπή. Αντίθετα, η αύξηση της γωνίας δ , η οποία είναι μεγαλύτερη από 90° , τείνει να μειώσει τη ροπή. Καθώς η επίδραση του πεδίου είναι μεγαλύτερη από την επίδραση της γωνίας, η ροπή αυξάνεται. Η επίδραση του μαγνητικού πεδίου του δρομέα \mathbf{B}_{rs} υπερिσχύει της γωνίας δ , μέχρι μια τιμή του φορτίου, η οποία αντιστοιχεί στη μέγιστη ροπή (Σχ. 5.13α). Η μέγιστη ροπή ονομάζεται *ροπή ανατροπής* (*pull out torque, breakdown torque*). Η ροπή ανατροπής είναι 2 έως 3 φορές μεγαλύτερη της ονομαστικής. Όταν η ροπή του φορτίου γίνει μεγαλύτερη από τη ροπή ανατροπής, η επίδραση του $\sin\delta$ είναι εντονότερη από εκείνη του μαγνητικού πεδίου και η ροπή που αναπτύσσει ο κινητήρας μειώνεται. Το αποτέλεσμα στην περίπτωση αυτή είναι ο κινητήρας να σταματήσει (παθητικό φορτίο). Η μεταβολή του ρεύματος του δρομέα με την ταχύτητα εικονίζεται στο Σχ. 5.13β. Σε μικρές τιμές της ολίσθησης, η μεταβολή του ρεύματος στο δρομέα και της ροπής είναι γραμμική με την ολίσθηση. Αυτό οφείλεται στην αμελητέα αντίδραση του δρομέα X'_{lr} , συγκριτικά με την R'_r/s . Σε ροπές μεγαλύτερες από την ονομαστική, η συχνότητα των ρευμάτων στο δρομέα είναι αρκετά μεγάλη και η αντίδραση του δρομέα είναι συγκρίσιμη με την R'_r/s . Έτσι, ο συντελεστής ισχύος του δρομέα $\cos\theta_r = \sin\delta$ μειώνεται. Η μεταβολή του ρεύματος του δρομέα και της ροπής περιορίζεται, σε ροπές μεγαλύτερες από την ονομαστική. Σε ροπές υψηλότερες από τη ροπή ανατροπής, ο συντελεστής ισχύος του δρομέα γίνεται πολύ μικρός και η ροπή μειώνεται αντί να αυξάνει. Ακόμη, το ρεύμα του δρομέα είναι περίπου σταθερό. Η ροπή που αναπτύσσει ο κινητήρας στη μηδενική ταχύτητα ονομάζεται *ροπή εκκίνησης* (T_{start}). Η ροπή εκκίνησης είναι μεγαλύτερη από την ονομαστική ροπή, συνήθως της τάξης του 150% της ονομαστικής.

2.12 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΑΝΑΠΤΥΣΣΟΜΕΝΗΣ ΡΟΠΗΣ

Για τον υπολογισμό της ροπής που αναπτύσσει ο επαγωγικός κινητήρας, από την Εξ. (5.49), απαιτείται η γνώση της ισχύος διακένου. Ο υπολογισμός της ισχύος διακένου προϋποθέτει τον υπολογισμό του ρεύματος στο δρομέα. Για τον υπολογισμό του ρεύματος δρομέα στο ισοδύναμο κύκλωμα του κινητήρα (Σχ. 2.15α), αντικαθιστούμε το τμήμα του κυκλώματος αριστερά των σημείων Α–Β, με το ισοδύναμο κύκλωμα *Thevenin*. Η τάση και η σύνθετη αντίσταση *Thevenin* ορίζονται από τις σχέσεις

$$\mathbf{V}_T = \frac{jX_m}{R_s + j(X_{ls} + X_m)} V = V_T \angle \theta_T \quad (5.51)$$

$$\mathbf{Z}_T = \frac{jX_m(R_s + jX_{ls})}{R_s + j(X_{ls} + X_m)} = R_T + jX_T \approx R_s + jX_{ls} \quad (5.52)$$

Το νέο ισοδύναμο κύκλωμα του κινητήρα εικονίζεται στο Σχ. 2.15β. Το μέτρο του ρεύματος στο δρομέα είναι ίσο με

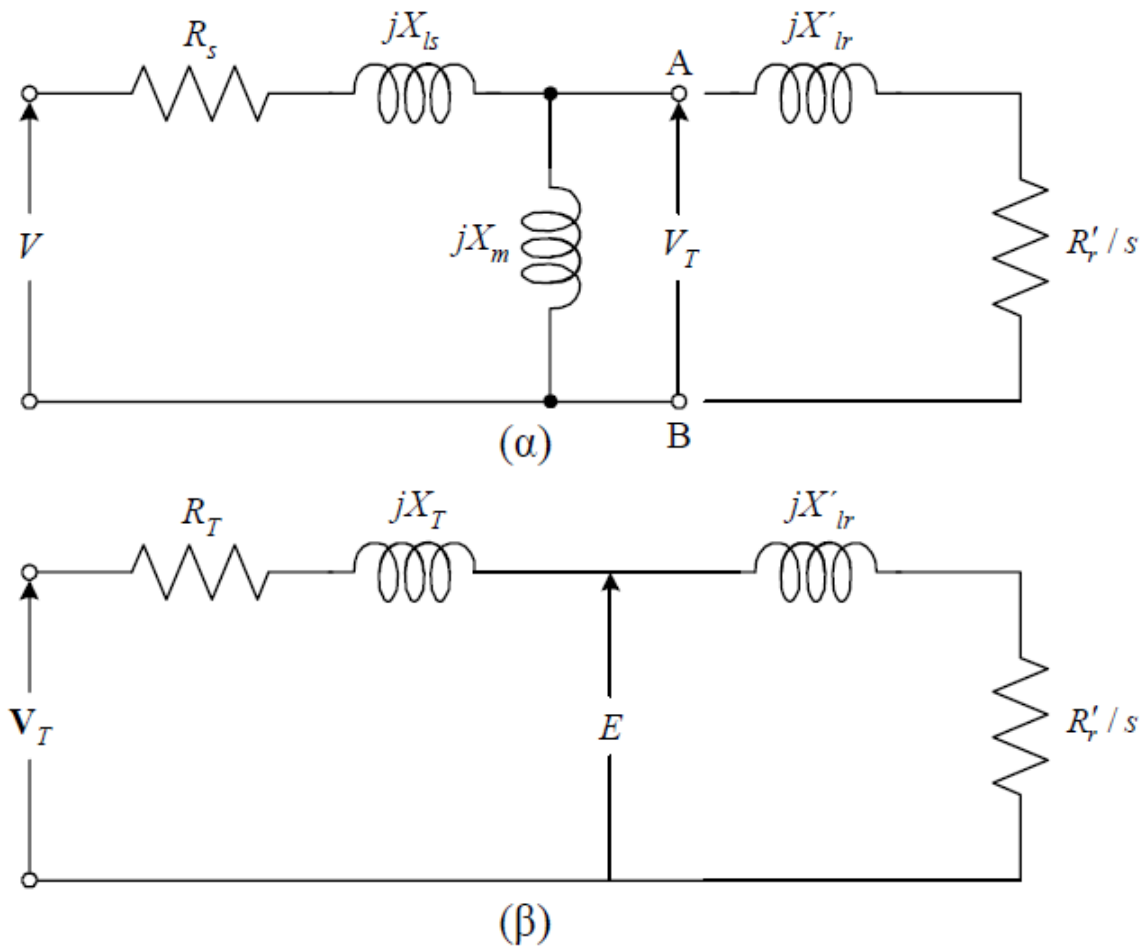
$$I_r' = \frac{V_T}{\sqrt{(R_T + R_r'/s)^2 + (X_T + X_{lr}')^2}} \quad (5.53)$$

Η ισχύς διακένου είναι

$$P_{ag} = 3I_r'^2 \frac{R_r'}{s} = \frac{3V_T^2}{(R_T + R_r'/s)^2 + (X_T + X_{lr}')^2} \frac{R_r'}{s} \quad (5.54)$$

και η ροπή

$$T_e = \frac{P_{ag}}{\omega_s} = \frac{3V_T^2}{(R_T + R_r'/s)^2 + (X_T + X_{lr}')^2} \frac{R_r'}{s\omega_s} \quad (5.55)$$



Σχ. 2.15 Μετατροπή του ισοδύναμου κυκλώματος του κινητήρα (α), στο ισοδύναμο κατά *Thevenin* (β)

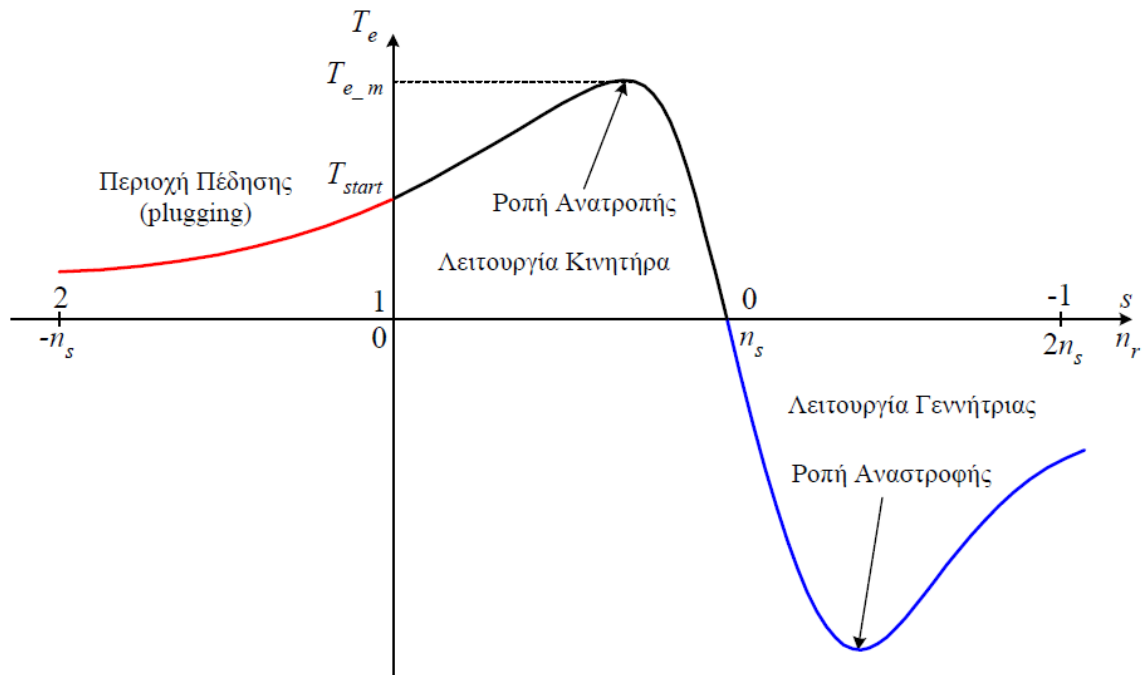
Από την Εξ. (5.55) προκύπτει ότι, η ροπή του κινητήρα μεταβάλλεται ανάλογα με το τετράγωνο της τάσης τροφοδοσίας. Επομένως, μια μικρή μεταβολή στην τάση V , προκαλεί σημαντική μεταβολή στην αναπτυσσόμενη ροπή. Στο Σχ. 2.16 εικονίζεται η πλήρης χαρακτηριστική ροπής – ταχύτητας του επαγωγικού κινητήρα, από την Εξ. (5.55). Η επαγωγική μηχανή λειτουργεί ως γεννήτρια, όταν η ταχύτητα του δρομέα είναι μεγαλύτερη από τη σύγχρονη, οπότε η ολίσθηση γίνεται αρνητική. Η ολίσθηση είναι μεγαλύτερη από τη μονάδα στο δεύτερο τεταρτημόριο, όπου η φορά περιστροφής του κινητήρα είναι αντίθετη από τη φορά του στρεφόμενου πεδίου του στατη. Η λειτουργία με $s > 1$ επιτυγχάνεται με την αλλαγή της σύνδεσης δύο φάσεων στα τυλίγματα του στάτη, οπότε αντιστρέφεται η φορά των μαγνητικών πεδίων και ο κινητήρας υφίσταται πέδηση (*plugging*). Ο κινητήρας αναπτύσσει τη μέγιστη ροπή όταν η ισχύς διακένου, η οποία καταναλώνεται στην ισοδύναμη αντίσταση R'_r/s είναι μέγιστη. Σύμφωνα με το θεώρημα μέγιστης μεταφοράς ισχύος, η ισχύς διακένου είναι μέγιστη όταν ισχύει η σχέση

$$\frac{R'_r}{s} = \sqrt{R_T^2 + (X_T + X'_{lr})^2} \quad (5.56)$$

από την οποία προκύπτει η τιμή της ολίσθησης s_m που αντιστοιχεί στη ροπή ανατροπής.

$$s_m = \frac{R'_r}{\sqrt{R_T^2 + (X_T + X'_{lr})^2}} \approx \frac{R'_r}{X_{ls} + X'_{lr}} \quad (5.57)$$

Από την Εξ. (5.57), 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. Αντικαθιστώντας την Εξ. (5.57) στην Εξ. (5.55), προκύπτει η ροπή ανατροπής



Σχ. 2.16 Πλήρης χαρακτηριστική ροπής – ταχύτητας του επαγωγικού κινητήρα, όπου περιλαμβάνονται οι περιοχές πέδησης και γεννήτριας

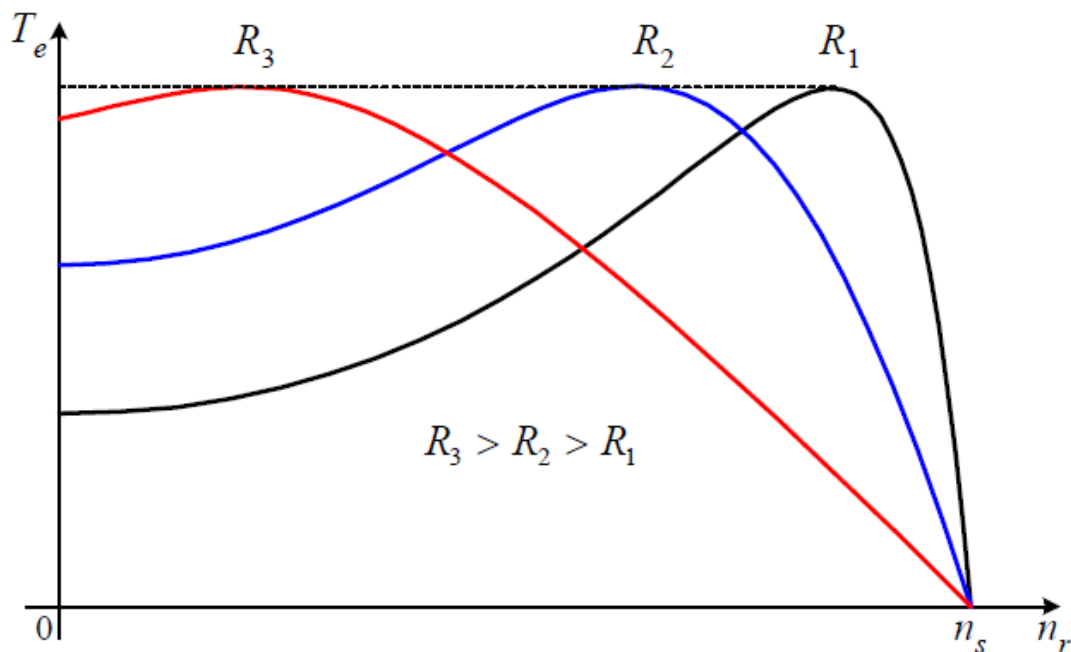
$$T_{e_m} = \frac{3V_T^2}{2\omega_s [R_T + \sqrt{R_T^2 + (X_T + X'_{lr})^2}]} \approx \frac{3V_T^2}{2\omega_s [X_{ls} + X'_{lr}]} \quad (5.58)$$

Η ροπή ανατροπής είναι ανάλογη με το τετράγωνο της τάσης τροφοδοσίας και αντιστρόφως ανάλογη των αντιδράσεων του στάτη και του δρομέα. Έτσι, οι αντιδράσεις σκέδασης πρέπει να είναι μικρές, όταν είναι επιθυμητή μια μεγάλη ροπή ανατροπής.

2.13 ΚΛΑΣΕΙΣ ΤΩΝ ΕΠΑΓΩΓΙΚΩΝ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ

Η μορφή της χαρακτηριστικής ροπής – ταχύτητας των επαγωγικών κινητήρων εξαρτάται από την ωμική αντίσταση του δρομέα R'_r και την ολική αντίδραση σκέδασης $X_{ls} + X'_{lr}$. Ένας επαγωγικός κινητήρας με μεγάλη αντίσταση στο δρομέα, εμφανίζει τη μέγιστη ροπή σε μικρή ταχύτητα και έχει υψηλή ροπή εκκίνησης. Όμως, οι απώλειες ισχύος στην ονομαστική λειτουργία είναι υψηλές, εξαιτίας της μεγάλης ολίσθησης ($P_{cu_r} = sP_{ag}$). Αντίθετα, ένας κινητήρας με μικρή αντίσταση στο δρομέα παρουσιάζει μικρή ροπή εκκίνησης, μεγάλο ρεύμα

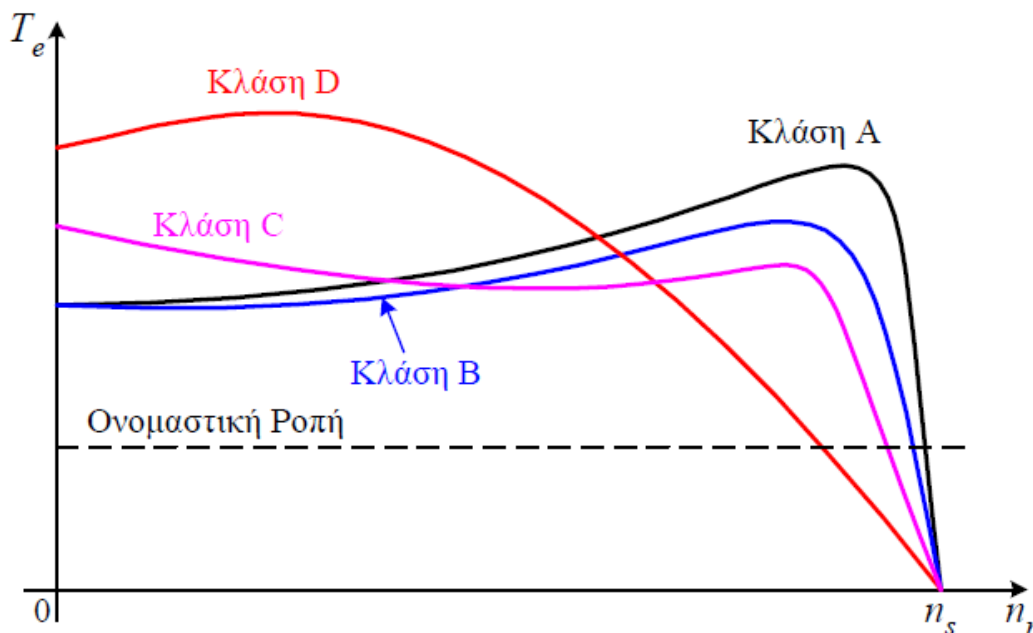
εκκίνησης, αλλά και υψηλό βαθμό απόδοσης στην ονομαστική λειτουργία. Ταυτόχρονα, η μεταβολή της ταχύτητας με το φορτίο είναι περιορισμένη. Ο συνδυασμός της επιθυμητής υψηλής αντίστασης κατά την εκκίνηση και της μικρής αντίστασης στην κανονική λειτουργία, επιτυγχάνεται ιδανικά στους κινητήρες με δακτυλιοφόρο δρομέα. Κατά την εκκίνηση των κινητήρων δακτυλιοφόρου δρομέα, προστίθενται εξωτερικές αντιστάσεις σε σειρά με το τύλιγμα του δρομέα, το οποίο έχει μικρή αντίσταση. Οι αντιστάσεις αυτές αφαιρούνται στην κανονική λειτουργία του κινητήρα. Με τον τρόπο αυτό οι χαρακτηριστικές ροπής – ταχύτητας του κινητήρα μεταβάλλονται όπως στο Σχ. 2.17. Η επιθυμητή μεταβολή της αντίστασης του δρομέα ανάλογα με την τιμή της ολίσθησης, μπορεί να επιτευχθεί και στους κινητήρες βραχυκυκλωμένου κλωβού, με την κατάλληλη σχεδίαση των αυλακώσεων του δρομέα. Όταν οι αυλακώσεις είναι κοντά στην επιφάνεια του δρομέα, οι ράβδοι του τυλίγματος κλωβού είναι σε ισχυρή σύζευξη με το τύλιγμα του στάτη. Επομένως, μόνο ένα μικρό τμήμα της ροής δεν συνδέει το τύλιγμα του στάτη. Έτσι, η αντίδραση σκέδασης του δρομέα X'_{lr} είναι μικρή.



Σχ. 2.17 Τροποποίηση των χαρακτηριστικών ροπής – ταχύτητας των επαγωγικών κινητήρων με δακτυλιοφόρο δρομέα, με τη μεταβολή της αντίστασης στο τύλιγμα του δρομέα

Αντίθετα, όταν οι ράβδοι είναι τοποθετημένες βαθιά μέσα στο δρομέα, η ροή και η αντίδραση σκέδασης του δρομέα είναι υψηλές. Η ωμική αντίσταση του τυλίγματος κλωβού εξαρτάται από το μέγεθος των αυλακώσεων, η οποία επιβάλλει τη διατομή των ράβδων. Όσο μεγαλύτερη είναι η διατομή των ράβδων, τόσο μικρότερη είναι η ωμική αντίσταση του κλωβού. Οι επαγωγικοί κινητήρες βραχυκυκλωμένου κλωβού διακρίνονται σε τέσσερις κατηγορίες, ανάλογα με τη διαμόρφωση των αυλακώσεων του δρομέα, οι οποίες ονομάζονται *κλάσεις σχεδίασης*. Στους κινητήρες *κλάσης Α*, η διαμόρφωση των αυλακώσεων επιβάλλει τη χρήση ράβδων μεγάλης διατομής, οι οποίες βρίσκονται κοντά στην επιφάνεια του δρομέα. Έτσι, το τύλιγμα κλωβού εμφανίζει μικρή αντίσταση και μικρή αντίδραση. Οι κινητήρες *κλάσης Α* έχουν μικρή ροπή εκκίνησης και μεγάλο ρεύμα εκκίνησης. Όμως, η ολίσθηση του κινητήρα στο ονομαστικό φορτίο είναι πολύ μικρή, με αποτέλεσμα ο βαθμός απόδοσης να είναι υψηλός. Η χαρακτηριστική ροπής – ταχύτητας του κινητήρα εικονίζεται στο Σχ. 2.18. Στους κινητήρες *κλάσης D*, οι ράβδοι του κλωβού βρίσκονται και πάλι κοντά στην επιφάνεια του

δρομέα αλλά έχουν μικρή διατομή. Έτσι, η αντίσταση του κλωβού είναι μεγάλη, ενώ η αντίδραση σκέδασης είναι μικρή. Ως αποτέλεσμα, οι κινητήρες κλάσης D έχουν μεγάλη ροπή εκκίνησης και μικρό ρεύμα εκκίνησης. Όμως, η ολίσθηση στο ονομαστικό φορτίο είναι μεγάλη, με αποτέλεσμα τις υψηλές απώλειες στο δρομέα και το μικρό βαθμό απόδοσης. Επιπλέον, η διακύμανση της ταχύτητας με το φορτίο είναι σημαντική. Η αντίσταση του δρομέα στους κινητήρες κλάσης A και D είναι σταθερή. Αντίθετα, στους κινητήρες με κλάση σχεδίασης B και C, η αντίσταση του δρομέα μεταβάλλεται με την ολίσθηση (ταχύτητα). Έτσι, οι κινητήρες αυτοί συνδυάζουν την υψηλή ροπή εκκίνησης των κινητήρων κλάσης D και τον υψηλό βαθμό απόδοσης στην ονομαστική λειτουργία των κινητήρων κλάσης A. Στους κινητήρες με κλάση B, η μεταβολή της αντίστασης του δρομέα με την ολίσθηση, επιτυγχάνεται κατασκευάζοντας το δρομέα με βαθιά αυλάκια. Στην ονομαστική λειτουργία, όπου η συχνότητα των επαγόμενων τάσεων στο δρομέα είναι μικρή, το ρεύμα ρέει ομοιόμορφα σ' όλη τη διατομή των ράβδων. Έτσι, η ενεργός διατομή των ράβδων είναι μεγάλη και η αντίσταση του δρομέα μικρή, όπως στους κινητήρες κλάσης A. Κατά την εκκίνηση, όπου η συχνότητα των επαγόμενων τάσεων είναι μεγάλη, οι αντιδράσεις σκέδασης των ράβδων είναι υψηλές. Το ρεύμα του δρομέα ρέει μόνο από τις περιοχές των ράβδων που βρίσκονται κοντά στην επιφάνεια του δρομέα, οι οποίες έχουν μικρές αντιδράσεις. Με τον τρόπο αυτό η ενεργός διατομή των ράβδων μειώνεται και η αντίσταση του δρομέα εμφανίζεται αυξημένη κατά την εκκίνηση, όπως στους κινητήρες κλάσης D. Η ροπή εκκίνησης των κινητήρων τάξης B είναι σχεδόν ίση μ' εκείνη των κινητήρων τάξης A, αλλά το ρεύμα εκκίνησης είναι μειωμένο κατά 25% περίπου.



Σχ. 2.18 Τυπικές χαρακτηριστικές ροπής – ταχύτητας των επαγωγικών κινητήρων βραχυκυκλωμένου κλωβού, ανάλογα με την κλάση σχεδίασης

Στους κινητήρες κλάσης C, η μεταβολή της αντίστασης του δρομέα με την ταχύτητα είναι εντονότερη και επιτυγχάνεται κατασκευάζοντας το δρομέα με διπλό κλωβό. Ο κινητήρας φέρει ένα τύλιγμα κλωβού, το οποίο αποτελείται από ράβδους μεγάλης διατομής τοποθετημένες στο εσωτερικό του δρομέα. Ένας δεύτερος ανεξάρτητος κλωβός από ράβδους μικρής διατομής, βρίσκεται στην επιφάνεια του δρομέα. Στην κανονική λειτουργία του κινητήρα, το ρεύμα του δρομέα ρέει και από τα δύο τυλίγματα κλωβού και ο κινητήρας εμφανίζει μικρή αντίσταση στο δρομέα. Κατά την εκκίνηση, το ρεύμα κυκλοφορεί κυρίως

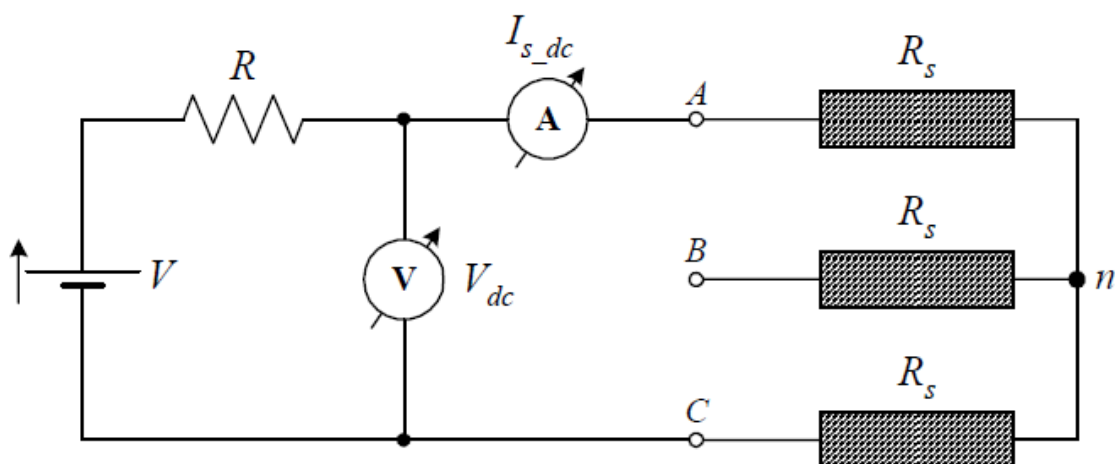
από το εξωτερικά τοποθετημένο τύλιγμα κλωβού, με την υψηλή αντίσταση. Το μειονέκτημα των κινητήρων με διπλό κλωβό είναι το μεγαλύτερο κόστος κατασκευής τους, σε σχέση με τις υπόλοιπες κινητήρες βραχυκυκλωμένου δρομέα.

2.14 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΤΟΥ ΙΣΟΔΥΝΑΜΟΥ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ

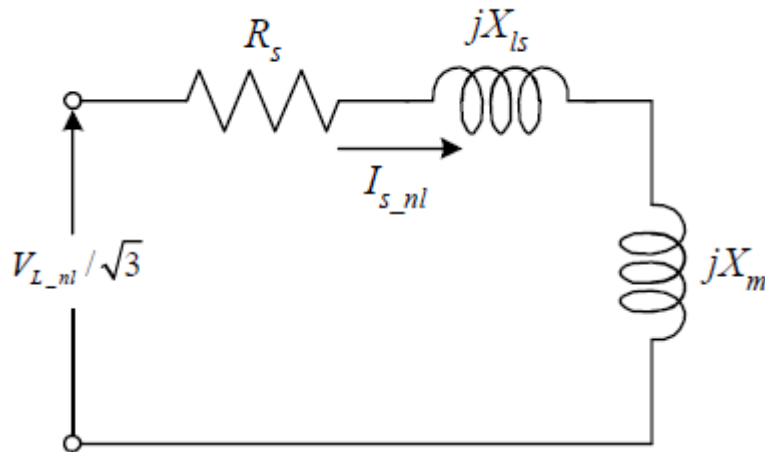
Για τον προσδιορισμό των παραμέτρων του ισοδύναμου κυκλώματος του επαγωγικού κινητήρα, πραγματοποιούνται τρία πειράματα. Οι ακριβείς συνθήκες των πειραμάτων αυτών περιγράφονται στην τυποποίηση 112 της IEEE. Αντίστοιχες τυποποιήσεις έχουν εκδώσει και άλλοι οργανισμοί. Στον προσδιορισμό της ωμικής αντίστασης του στάτη R_s , χρησιμοποιείται το πείραμα συνεχούς ρεύματος (*dc test*). Η διάταξη μέτρησης εικονίζεται στο Σχ. 2.19. Τα τυλιγματα του στάτη είναι συνδεδεμένα σε αστέρα και τροφοδοτούνται από μια πηγή συνεχούς τάσης. Η τάση της πηγής ρυθμίζεται έτσι ώστε, το ρεύμα I_{s_dc} να είναι ίσο με το ονομαστικό. Εξαιτίας της συνεχούς τάσης τροφοδοσίας, δεν επάγονται ρεύματα στο δρομέα και η αντίδραση του στάτη είναι μηδενική. Επομένως, η τιμή του ρεύματος περιορίζεται μόνο από την ωμική αντίσταση των δύο τυλιγμάτων του στάτη, σε σύνδεση σειράς

$$R_s = \frac{V_{dc}}{2I_{s_dc}} \quad (5.59)$$

Το ρεύμα επιλέγεται ίσο με το ονομαστικό, έτσι ώστε η μέτρηση της αντίστασης R_s να αντιστοιχεί στη θερμοκρασία του κινητήρα με το ονομαστικό φορτίο. Η αντίσταση των χάλκινων τυλιγμάτων των κινητήρων μεταβάλλεται με τη θερμοκρασία. Ακόμη, εξαιτίας του επιδερμικού φαινομένου, το οποίο εμφανίζεται στην κανονική λειτουργία με εναλλασσόμενη τάση, η αντίσταση που προσδιορίζεται από το πείραμα συνεχούς ρεύματος είναι ελαφρά μικρότερη από την πραγματική.



Σχ. 2.19 Διάταξη μέτρησης της αντίστασης του στάτη, με το πείραμα συνεχούς ρεύματος



Σχ. 2.20 Απλοποιημένο ισοδύναμο κύκλωμα του επαγωγικού κινητήρα στο πείραμα κενού

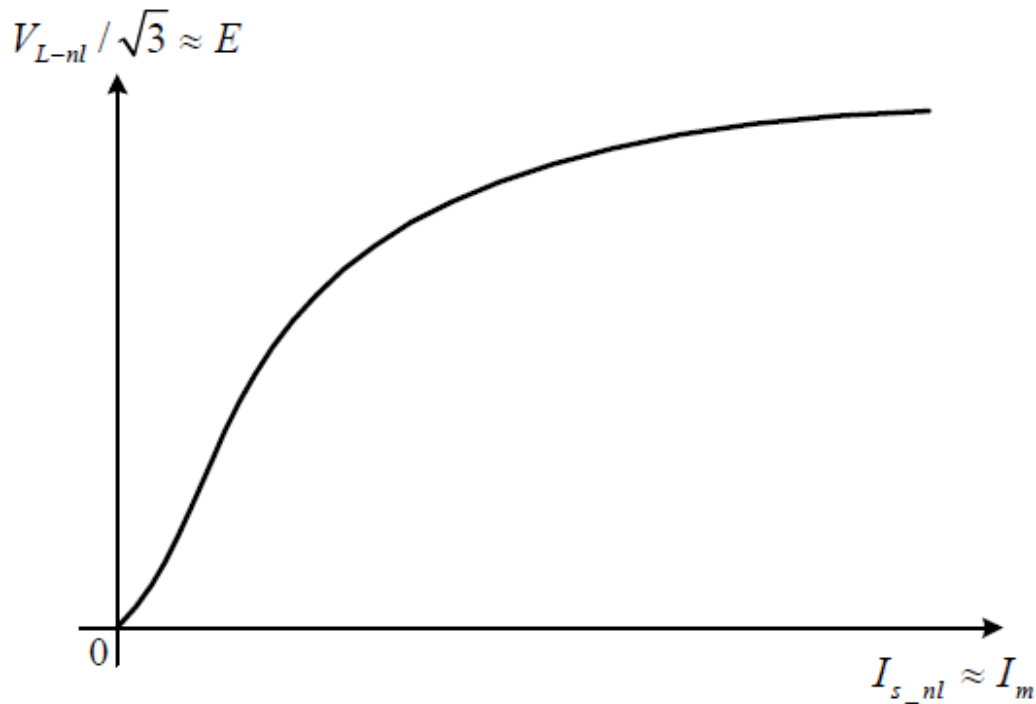
Το πείραμα κενού (*no-load test*) χρησιμοποιείται για τον καθορισμό της αντίδρασης μαγνήτισης X_m , των απωλειών του κινητήρα χωρίς φορτίο και της καμπύλης μαγνήτισης. Ο κινητήρας τροφοδοτείται με την ονομαστική τάση και λειτουργεί χωρίς φορτίο. Επομένως, η ισχύς που απορροφά ο κινητήρας από το δίκτυο είναι ίση με την ισχύ απωλειών, καθώς το φορτίο είναι μηδενικό. Η τριφασική ισχύς εισόδου, τα ρεύματα γραμμής I_{s_nl} και η πολική τάση V_{L_nl} μετρούνται με τα κατάλληλα όργανα. Επειδή ο κινητήρας λειτουργεί στο κενό, η ολίσθηση και το ρεύμα του δρομέα είναι σχεδόν μηδενικά. Έτσι, το ισοδύναμο κύκλωμα του κινητήρα αποκτά την απλοποιημένη μορφή του Σχ. 5.20. Το μέτρο της σύνθετης αντίστασης εισόδου του κινητήρα είναι ίσο με το λόγο της τάσης προς το ρεύμα

$$\frac{V_{L_nl}}{\sqrt{3}I_{s_nl}} = \sqrt{R_s^2 + (X_{ls} + X_m)^2} \quad (5.60)$$

Από την Εξ. (5.60) υπολογίζεται η ολική αντίδραση του στάτη $X_{ls} + X_m$. Για τον ανεξάρτητο καθορισμό των δύο επιμέρους αντιδράσεων, πρέπει να διεξαχθεί και το τρίτο πείραμα. Με το πείραμα κενού μετράται η ισχύς που απορροφά ο κινητήρας P_{in_nl} . Η ισχύς αυτή είναι ίση με τις απώλειες του κινητήρα

$$P_{in_nl} = P_{loss} = P_{cu_s} + P_{cu_r} + P_{iron} + P_{fw} + P_{stray} \quad (5.61)$$

Στην Εξ. (5.61), οι απώλειες χαλκού στο δρομέα είναι ελάχιστες. Μικρές είναι και οι κατανεμημένες απώλειες, στη λειτουργία κενού. Οι απώλειες χαλκού στο στάτη είναι ίσες με $P_{cu_s} = 3 R_s I_{s_nl}^2$. Επομένως, το άθροισμα των απωλειών σιδήρου και των μηχανικών είναι ίσο με



Σχ. 2.21 Καμπύλη μαγνήτισης του επαγωγικού κινητήρα από το πείραμα κενού

$$P_{iron} + P_{fw} = P_{in_nl} - 3R_s I_{s_nl}^2 \quad (5.62)$$

Όταν ο κινητήρας λειτουργεί χωρίς φορτίο, το ρεύμα του στάτη είναι με μεγάλη ακρίβεια ίσο με το ρεύμα μαγνήτισης ($I_{s_nl} \approx I_m$). Ακόμη, η τάση τροφοδοσίας είναι περίπου ίση με την τάση E . Έτσι, μεταβάλλοντας την τάση του στάτη και μετρώντας την τάση αυτή και το ρεύμα, προσδιορίζεται η καμπύλη μαγνήτισης του κινητήρα, η οποία έχει τη μορφή του Σχ. 2.21. Με το πείραμα ακίνητου δρομέα (*blocked rotor test*), υπολογίζονται και οι υπόλοιπες παράμετροι του ισοδύναμου κυκλώματος. Στο πείραμα αυτό ο δρομέας διατηρείται ακίνητος, ενώ ο κινητήρας τροφοδοτείται με την κατάλληλη μειωμένη τάση, έτσι ώστε το ρεύμα του στάτη να είναι ίσο με το ονομαστικό. Επειδή ο δρομέας δεν στρέφεται, η ολίσθηση είναι ίση με τη μονάδα. Επομένως, η σύνθετη αντίσταση του δρομέα είναι πολύ μικρότερη από την αντίδραση μαγνήτισης και το ισοδύναμο κύκλωμα του κινητήρα αποκτά την απλοποιημένη μορφή του Σχ. 2.22. Το μέτρο της σύνθετης αντίστασης εισόδου του κινητήρα είναι ίσο με το λόγο της φασικής τάσης τροφοδοσίας $V_{L_br}/3$ προς το ρεύμα του στάτη I_{s_br}

$$\frac{V_{L_br}}{\sqrt{3}I_{s_br}} = |Z_{br}| = \sqrt{(R_s + R_r')^2 + (X_{ls} + X_{lr}')^2} \quad (5.63)$$

Από τη μέτρηση της ισχύος εισόδου P_{in_br} , υπολογίζεται ο συντελεστής ισχύς

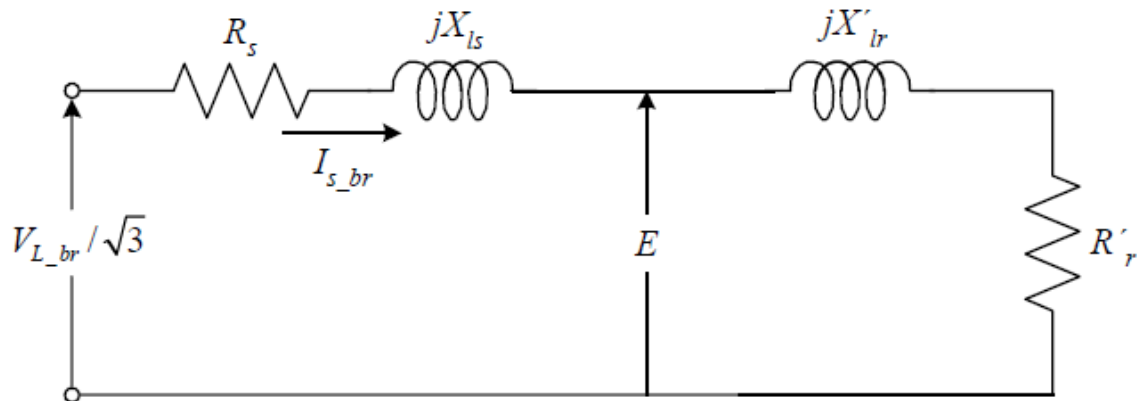
$$\cos \phi_{br} = \frac{P_{in_br}}{\sqrt{3}V_{L_br}I_{s_br}} \quad (5.64)$$

και επειδή το άθροισμα των αντιστάσεων του στάτη και του δρομέα είναι ίσο με

$$R_s + R'_r = \frac{V_{L_br}}{\sqrt{3}I_{s_br}} \cos \phi_{br} \quad (5.65)$$

Αντίστοιχα, η ολική αντίδραση σκέδασης είναι ίση με

$$X_{br} = X_{ls} + X'_{lr} = \frac{V_{L_br}}{\sqrt{3}I_{s_br}} \sin \phi_{br} = \sqrt{\left(\frac{V_{L_br}}{\sqrt{3}I_{s_br}}\right)^2 - (R_s + R'_r)^2} \quad (5.66)$$



Σχ. 2.22 Απλοποιημένο ισοδύναμο κύκλωμα του επαγωγικού κινητήρα, στο πείραμα ακίνητου δρομέα

Είδος/Κλάση κινητήρα	X_{ls}	X'_{lr}
Δακτυλιοφόρου δρομέα	$0.5 \cdot X_{br}$	$0.5 \cdot X_{br}$
Κλάσης A	$0.5 \cdot X_{br}$	$0.5 \cdot X_{br}$
Κλάσης B	$0.4 \cdot X_{br}$	$0.6 \cdot X_{br}$
Κλάσης C	$0.3 \cdot X_{br}$	$0.7 \cdot X_{br}$
Κλάσης D	$0.5 \cdot X_{br}$	$0.5 \cdot X_{br}$

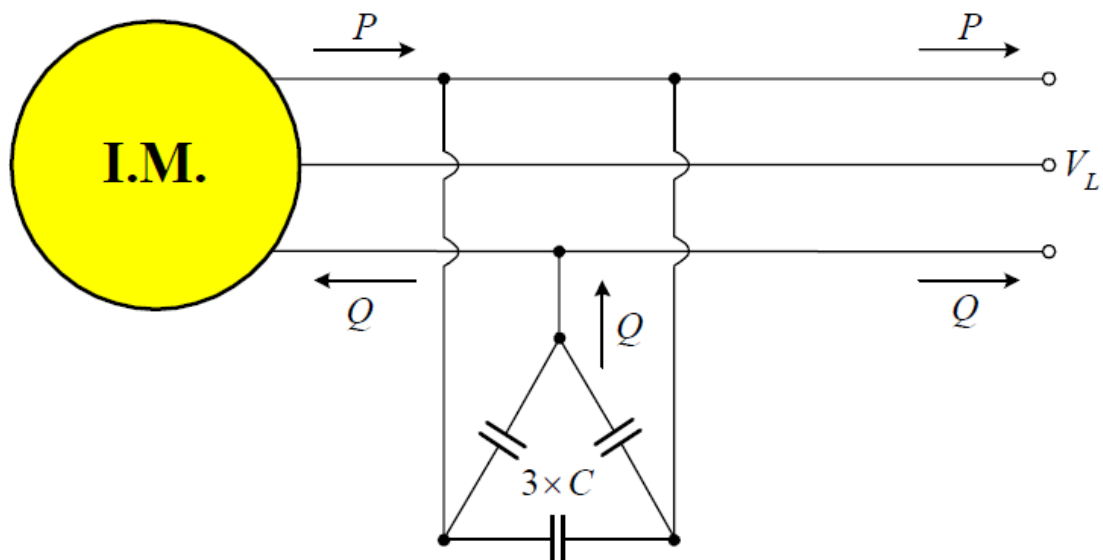
Πίνακας 1. Εμπειρικός διαχωρισμός της ολικής αντίδρασης σκέδασης, ανάλογα με το είδος του επαγωγικού κινητήρα

Οι τιμές των αντιδράσεων στην Εξ. (5.66), αντιστοιχούν στη συχνότητα τροφοδοσίας του κινητήρα. Επειδή δεν υπάρχει κάποια απλή μέθοδος για τον ανεξάρτητο καθορισμό των επιμέρους αντιδράσεων, έχει προκύψει εμπειρικά ο παραπάνω πίνακας υπολογισμού, ανάλογα με το είδος και την κλάση σχεδίασης του κινητήρα. Η αντίσταση του δρομέα υπολογίζεται από την Εξ. (5.65), αν αφαιρέσουμε από την ολική αντίσταση, την αντίσταση του στάτη από το πείραμα συνεχούς ρεύματος. Όμως, η ενεργός αντίσταση του δρομέα στους κινητήρες κλάσης B και C, εξαρτάται από τη συχνότητα των ρευμάτων στο δρομέα. Στο πείραμα ακίνητου δρομέα, η συχνότητα των ρευμάτων στο δρομέα είναι ίση με τη συχνότητα του στάτη. Επομένως, για τον ακριβή καθορισμό της αντίστασης του δρομέα στους κινητήρες

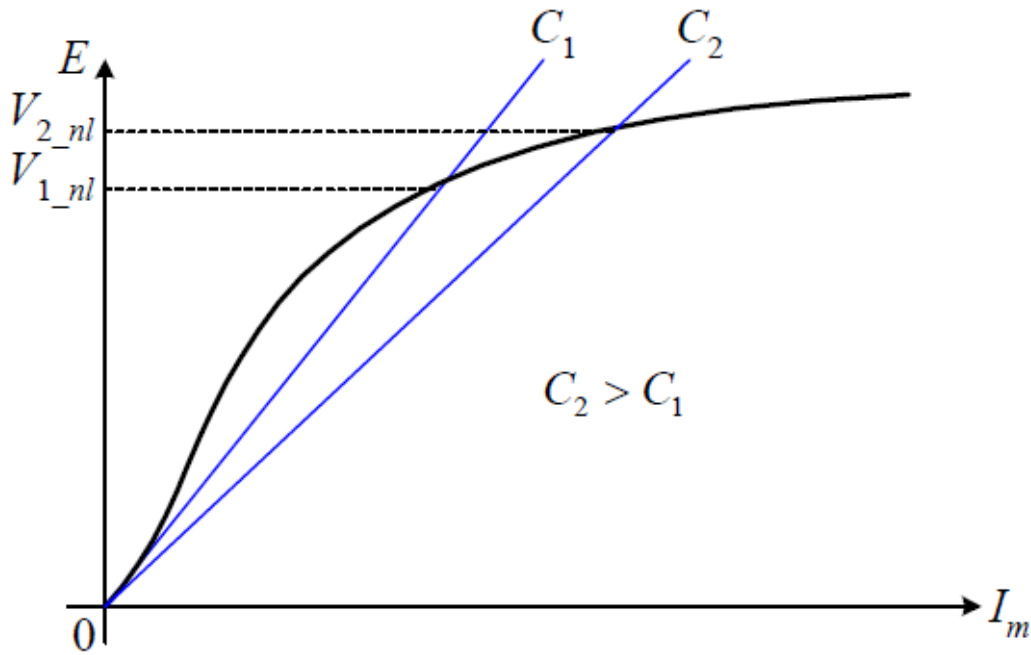
αυτούς, η συχνότητα της τάσης τροφοδοσίας του κινητήρα $V_{L_{br}}$ πρέπει να είναι πολύ μικρότερη από τη συχνότητα του δικτύου.

2.15 Η ΕΠΑΓΩΓΙΚΗ ΜΗΧΑΝΗ ΩΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ

Η επαγωγική μηχανή λειτουργεί ως γεννήτρια, όταν στρέφεται από μια κινητήρια μηχανή με ταχύτητα μεγαλύτερη της σύγχρονης (Σχ. 5.16). 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.

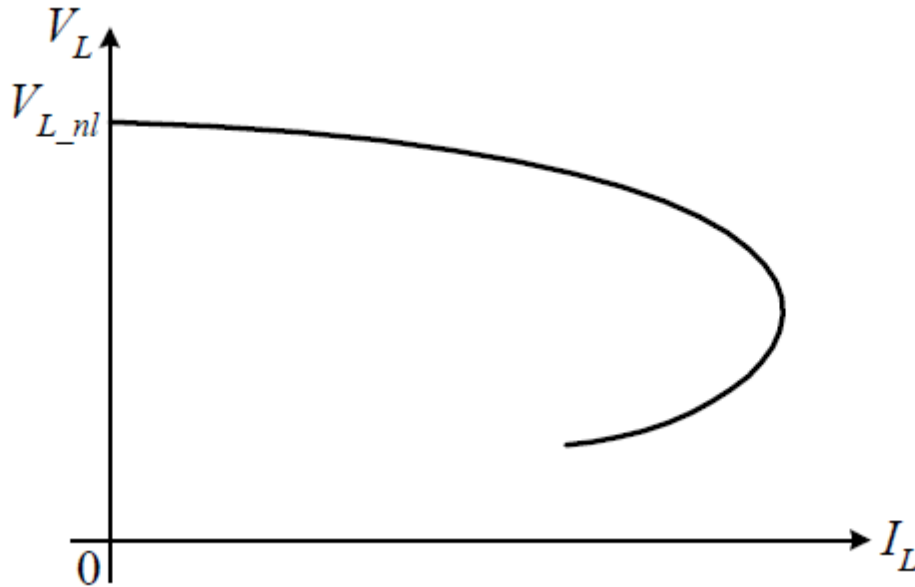


Σχ. 2.23 Αυτόνομη λειτουργία της τριφασικής επαγωγικής γεννήτριας, με τη σύνδεση πυκνωτών για την παροχή της άεργου ισχύος



Σχ. 2.24 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 Σχ. 2.23. 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 (Σχ. 2.24). Η αυτοδιέγερση της επαγωγικής γεννήτριας, όπως και στις γεννήτριες συνεχούς ρεύματος, οφείλεται στον παραμένον μαγνητισμό. Η χαρακτηριστική φορτίου εικονίζεται στο Σχ. 2.25, 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.



Σχ. 2.25 Χαρακτηριστική φορτίου της επαγωγικής γεννήτριας, όταν τροφοδοτεί ένα επαγωγικό φορτίο με σταθερό συντελεστή ισχύος

2.16 ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΤΩΝ ΕΠΑΓΩΓΙΚΩΝ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ

Όταν ένας τριφασικός επαγωγικός κινητήρας 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 του κινητήρα με μειωμένη ταχύτητα σημαίνει αύξηση της ολίσθησης και των απωλειών χαλκού στο δρομέα ($P_{cu_r} = sP_{ag}$), με συνέπεια τη μείωση του βαθμού απόδοσης. Ο έλεγχος της ταχύτητας των επαγωγικών κινητήρων επιτυγχάνεται με δύο τρόπους:

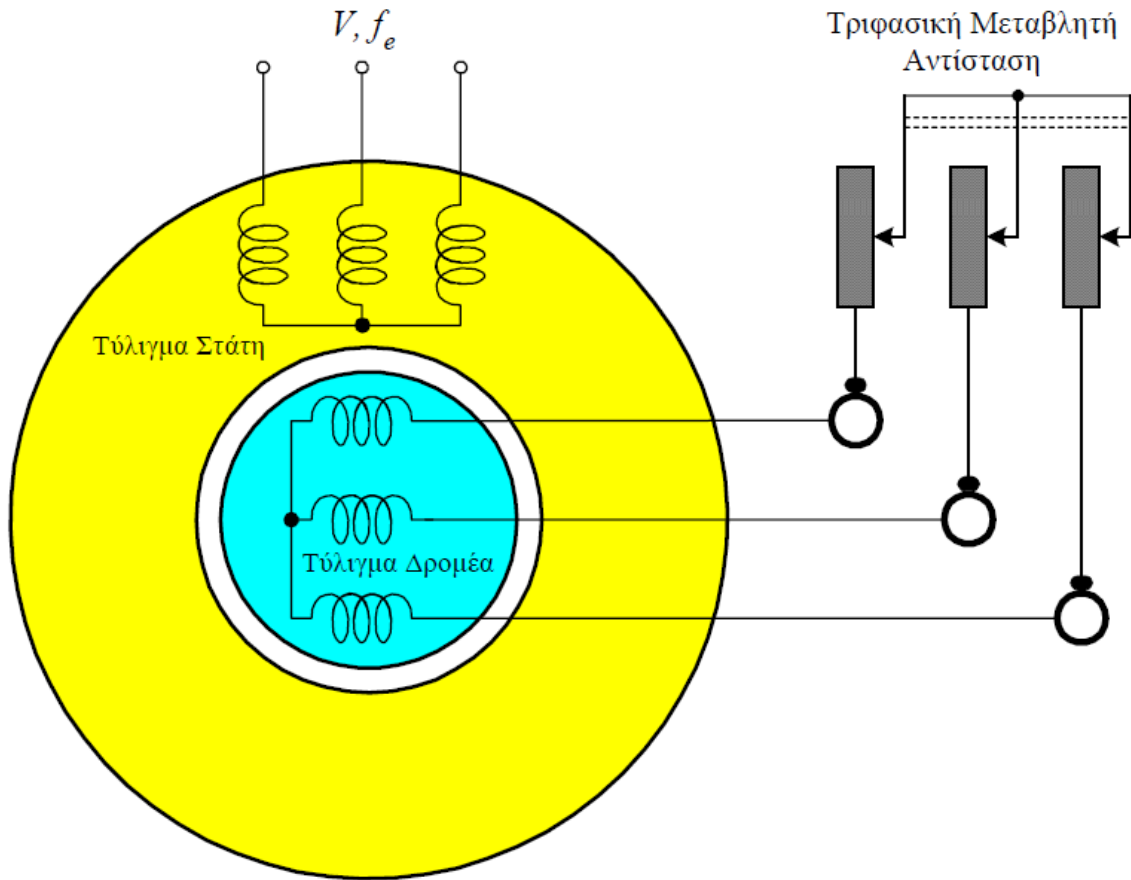
- Με τη ρύθμιση της ολίσθησης.
- Με τη ρύθμιση της σύγχρονης ταχύτητας.

Η ρύθμιση της ολίσθησης, για δεδομένη ροπή φορτίου, επιτυγχάνεται με τη μεταβολή της αντίστασης του δρομέα στον κινητήρα δακτυλιοφόρο δρομέα και με τον έλεγχο της τάσης τροφοδοσίας στον κινητήρα 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.

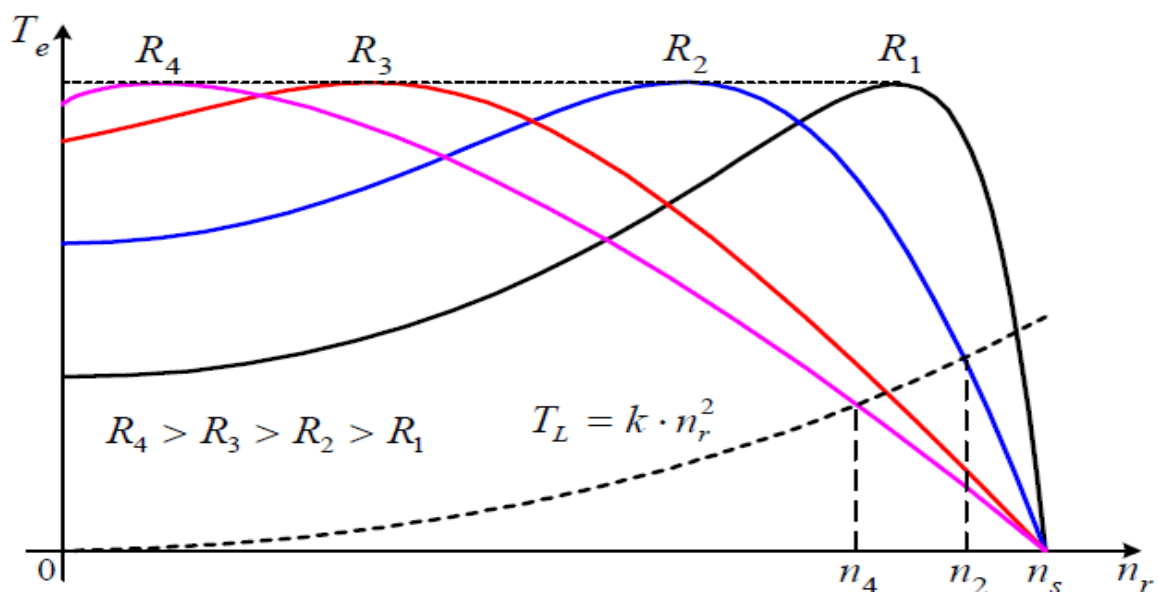
2.17 ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΜΕ ΡΥΘΜΙΣΗ ΤΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΤΟΥ ΔΡΟΜΕΑ

Η ταχύτητα των επαγωγικών κινητήρων με δακτυλιοφόρο δρομέα ρυθμίζεται με την εισαγωγή μεταβλητών αντιστάσεων στο τύλιγμα του δρομέα, όπως παρουσιάζεται στο Σχ.

2.26. Με τον τρόπο αυτό μεταβάλλεται η μορφή της χαρακτηριστικής ροπής–ταχύτητας του κινητήρα.



Σχ. 2.26 Εισαγωγή ρυθμιστικών αντιστάσεων στο δρομέα, για τη ρύθμιση της ταχύτητας του κινητήρα με δακτυλιοφόρο δρομέα

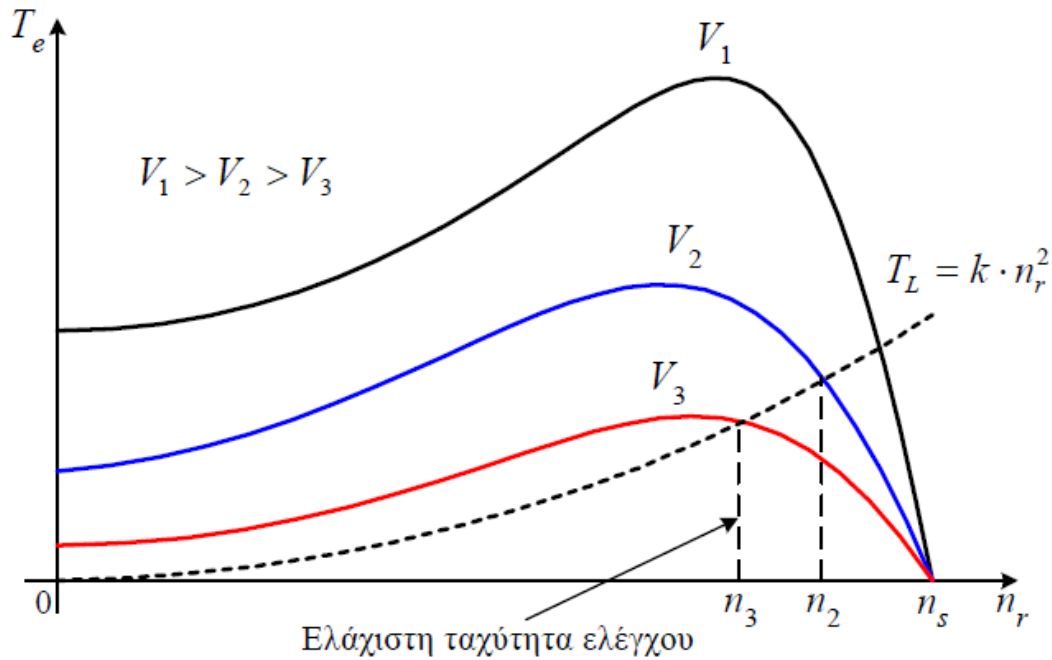


Σχ. 2.27 Έλεγχος της ταχύτητας του επαγωγικού κινητήρα με δακτυλιοφόρο δρομέα, με τη μεταβολή της αντίστασης του δρομέα

Στο Σχ. 2.27 εικονίζονται οι χαρακτηριστικές του κινητήρα 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 (*pump, fan, crane*). Η μεταβολή της ταχύτητας με τη ρύθμιση της αντίστασης είναι φανερή. Η ταχύτητα του κινητήρα 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.

2.18 ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΜΕ ΡΥΘΜΙΣΗ ΤΗΣ ΤΑΣΗΣ ΤΟΥ ΣΤΑΤΗ

Στους επαγωγικούς κινητήρες 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 ο επαγωγικός κινητήρας είναι ανάλογη με το τετράγωνο της τάσης του στάτη, οι χαρακτηριστικές ροπής – ταχύτητας μεταβάλλονται όπως στο Σχ. 2.28, για διάφορες τιμές της τάσης. Η ροπή του φορτίου είναι ανάλογη με το τετράγωνο της ταχύτητας. Από το Σχ. 2.28 είναι φανερό ότι, η ταχύτητα του κινητήρα 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 του κινητήρα 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 κινητήρων με τη ρύθμιση της τάσης του στάτη δεν είναι αποτελεσματικός. 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 Σχ. 2.29. Τα τυλίγματα του κινητήρα μπορεί να είναι σε σύνδεση αστέρα (Σχ. 2.29α), ή τριγώνου (Σχ. 2.29β). 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 απ' αυτούς. Οι *SCR* δέχονται παλμούς έναυσης με τη σειρά αρίθμησης τους και με διαφορά φάσης 60° .



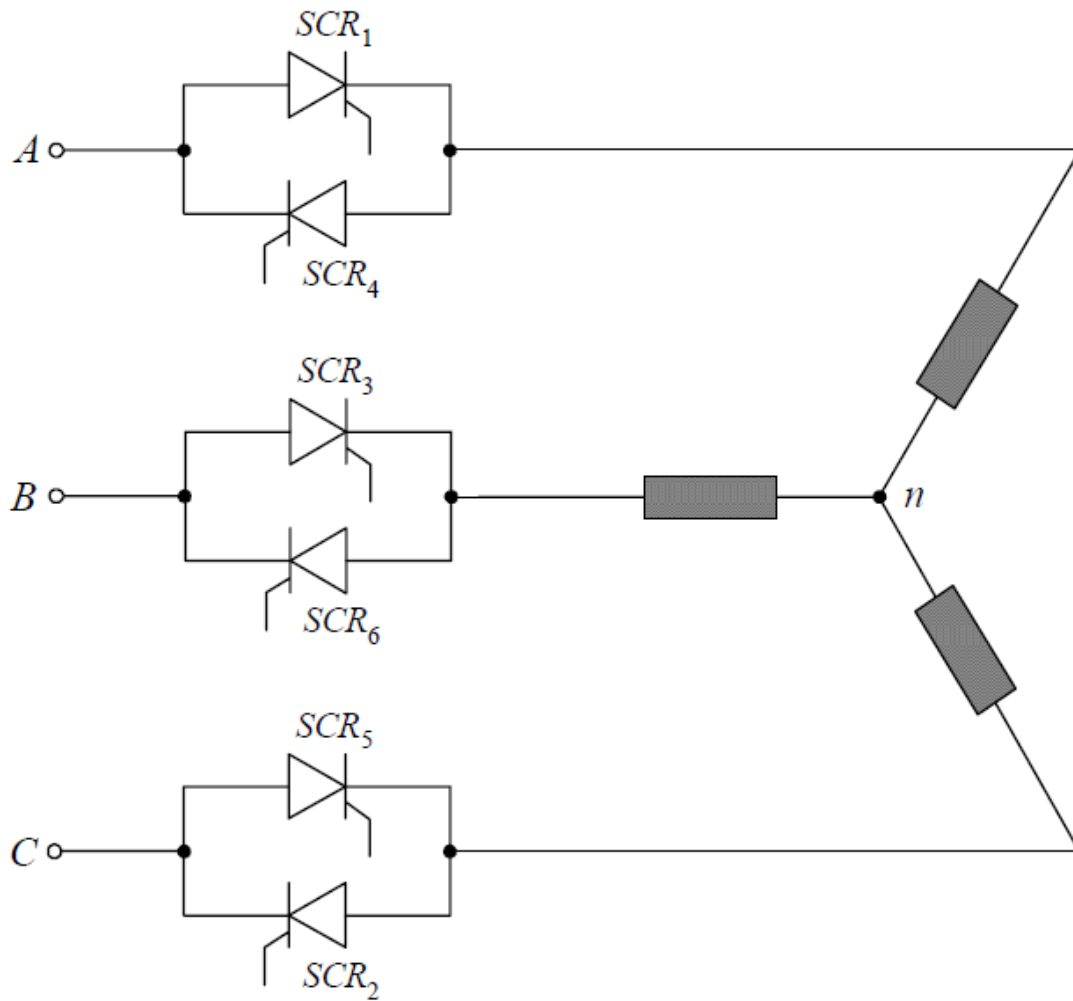
Σχ. 2.28 Έλεγχος της ταχύτητας του επαγωγικού κινητήρα, με τη μεταβολή της τάσης του στάτη

Οι ρυθμιστές εναλλασσόμενης τάσης χρησιμοποιούνται συνήθως στον έλεγχο της ταχύτητας επαγωγικών κινητήρων κλάσης D, σε εφαρμογές αντλιών και ανεμιστήρων, όπου δεν απαιτείται έλεγχος της ταχύτητας σε μικρές τιμές. Όμως, η κυριότερη εφαρμογή τους είναι στην εκκίνηση των επαγωγικών κινητήρων όλων των κατηγοριών, 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: η ομαλή επιτάχυνση και επιβράδυνση, ο έλεγχος του ρεύματος, η μειωμένη συντήρηση, η προστασία από έλλειψη ή ασυμμετρία των φάσεων. Επιπλέον, ένας εκκινητής με ρυθμιστή εναλλασσόμενης τάσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην ελαχιστοποίηση των απωλειών του επαγωγικού κινητήρα, λειτουργώντας τον κινητήρα με μειωμένη τάση σε μικρά φορτία. (Ο επαγωγικός κινητήρας 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 του κινητήρα ανάλογα με το φορτίο του, ώστε η μαγνητική ροή στο διάκενο να έχει πάντα τη βέλτιστη τιμή, επιτυγχάνουμε το μέγιστο βαθμό απόδοσης. Η βέλτιστη τιμή της μαγνητικής ροής εξαρτάται από το φορτίο και την ταχύτητα του κινητήρα).

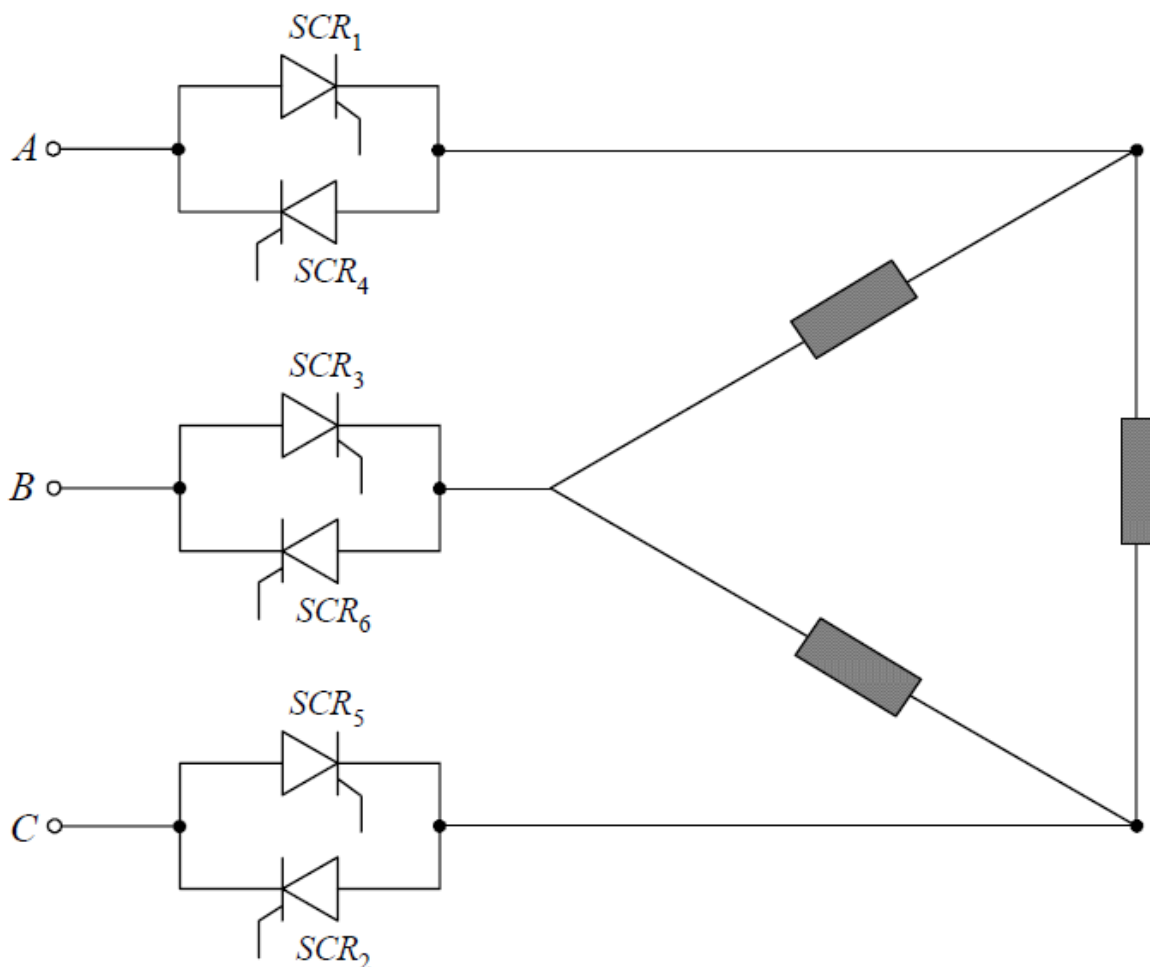
2.19 ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΜΕ ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΟΥ ΑΡΙΘΜΟΥ ΤΩΝ ΠΟΛΩΝ

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, ο επαγωγικός κινητήρας 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 του κινητήρα. Ακόμη, η μέθοδος των πολλαπλών τυλιγμάτων μπορεί να συνδυασθεί με τη μέθοδο των διαδοχικών πόλων, για τη λειτουργία του κινητήρα σε περισσότερες ταχύτητες. Πρέπει να σημειωθεί ότι, η μέθοδος ελέγχου της ταχύτητας με τη μεταβολή του αριθμών των πόλων, μπορεί να εφαρμοστεί μόνο σε επαγωγικούς κινητήρες με βραχυκυκλωμένο κλωβό. Ο δρομέας των κινητήρων αυτών αναπτύσσει πάντα τόσους πόλους, όσοι είναι και οι πόλοι του στάτη. Αυτό δεν ισχύει στους κινητήρες με δακτυλιοφόρο δρομέα, όπου το τύλιγμα του δρομέα αναπτύσσει ένα καθορισμένο αριθμό πόλων, ανάλογο με την κατασκευή του.



(α)

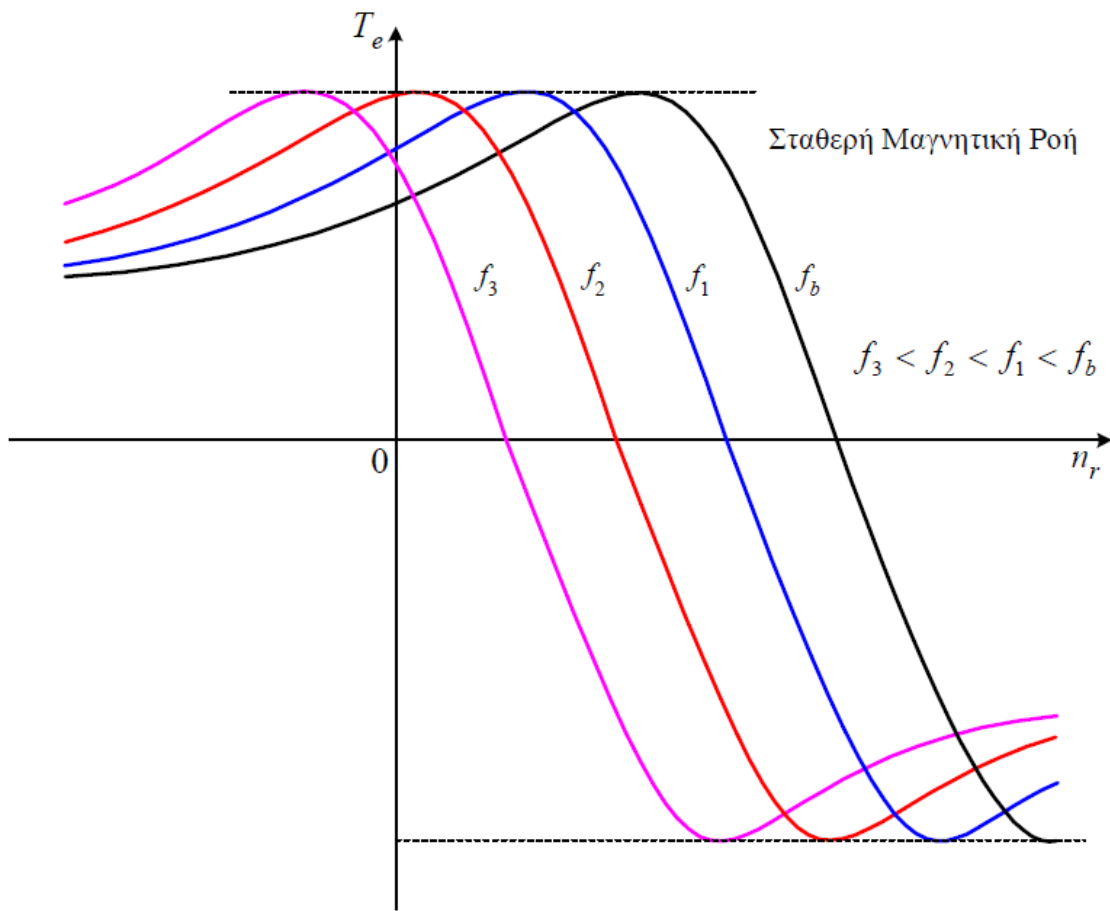


(β)

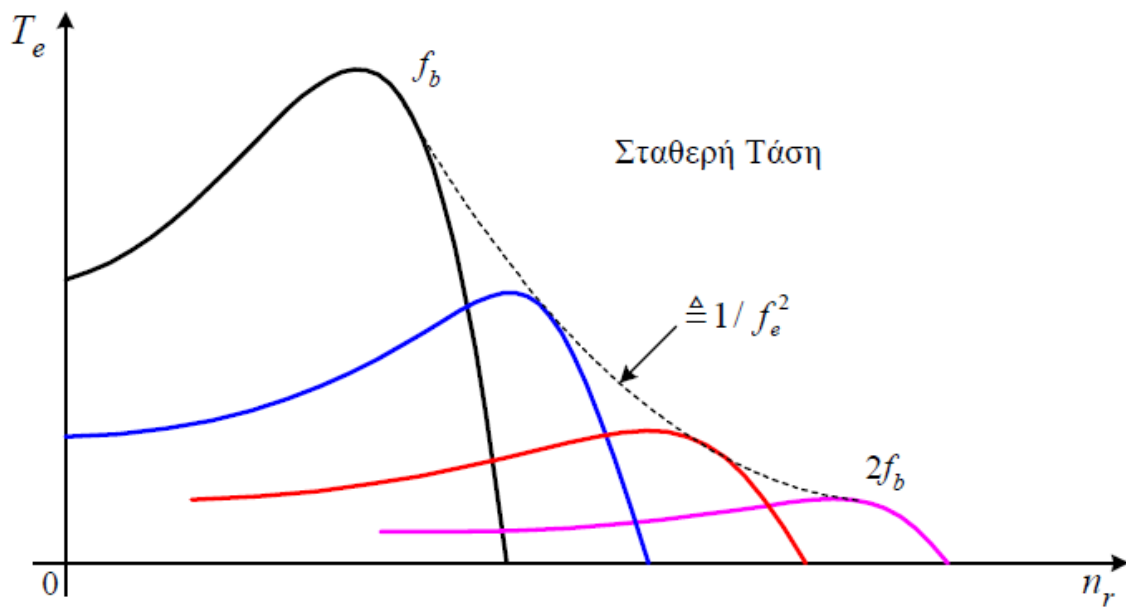
Σχ. 2.29 Τριφασικός ρυθμιστής εναλλασσόμενης τάσης, με φορτίο σε σύνδεση αστέρα (α) και τριγώνου (β)

2.20 ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΜΕ ΤΗ ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΗΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ

Η βέλτιστη μέθοδος για τον έλεγχο της ταχύτητας των επαγωγικών κινητήρων 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 του κινητήρα. Η σύγχρονη ταχύτητα που αντιστοιχεί στην ονομαστική συχνότητα f_b , ονομάζεται *βασική (base)*.



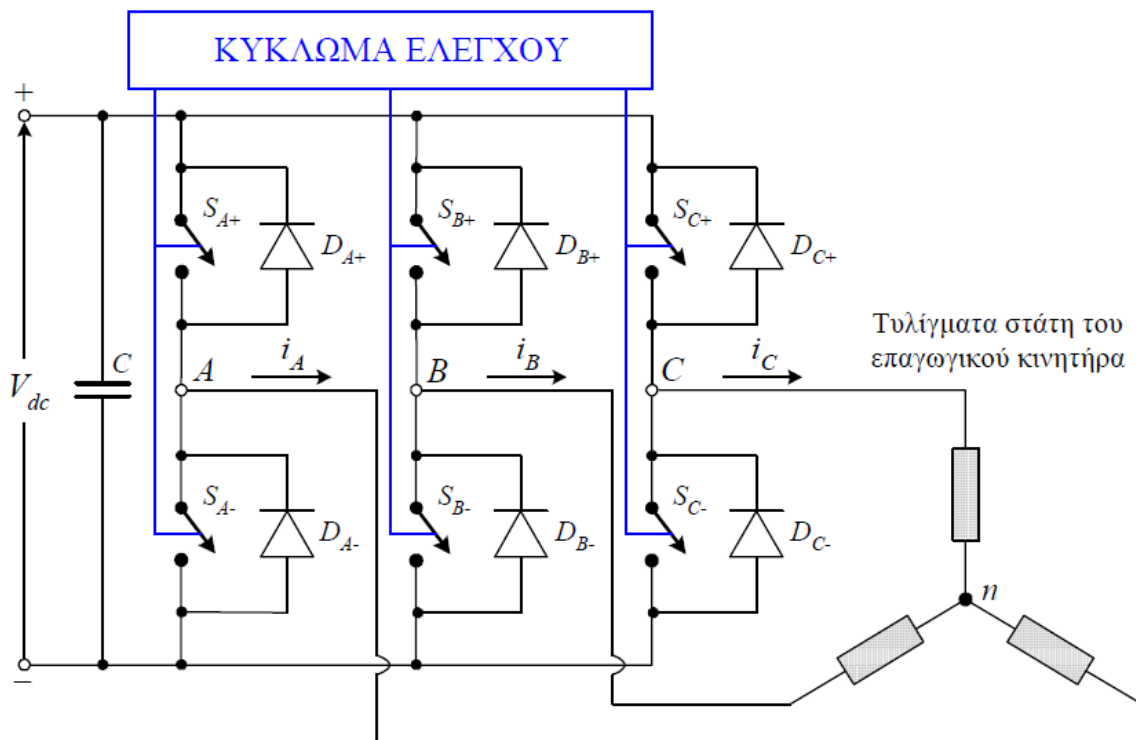
(α)



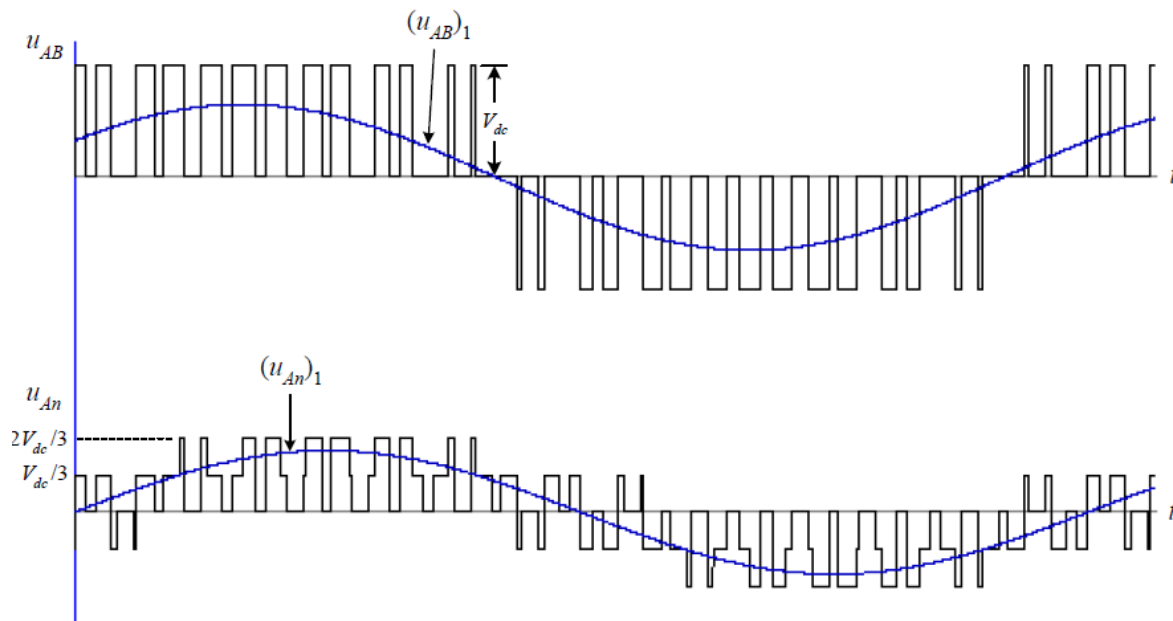
(β)

Σχ. 2.30 Έλεγχος της ταχύτητας του επαγωγικού κινητήρα με τη μεταβολή της συχνότητας, σε τιμές μικρότερες από τη βασική, με σταθερή τη μαγνητική ροή (α) και σε τιμές μεγαλύτερες από τη βασική, με σταθερή την τάση (β)

Καθώς η συχνότητα των τάσεων τροφοδοσίας μπορεί να ρυθμιστεί σε τιμές μικρότερες αλλά και μεγαλύτερες της ονομαστικής, η ταχύτητα του κινητήρα μπορεί να μεταβληθεί από το μηδέν, μέχρι μια τιμή πολλαπλάσια της βασικής. Το άνω όριο της ταχύτητας περιορίζεται από τη μηχανική αντοχή του κινητήρα. Εκτός από την ευρεία περιοχή ρύθμισης της ταχύτητας, η μέθοδος εξασφαλίζει τη λειτουργία του κινητήρα με μικρή ολίσθηση σε κάθε ταχύτητα. Έτσι, ο βαθμός απόδοσης διατηρείται υψηλός. Όταν η ταχύτητα του κινητήρα 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 του κινητήρα παραμένει περίπου σταθερή ($\phi_m = E / f_e$). Στο Σχ. 2.30α εικονίζονται οι χαρακτηριστικές ροπής – ταχύτητας του κινητήρα, 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, ο κινητήρας μπορεί να ελέγξει φορτία, τα οποία απαιτούν μεγάλη ροπή σε μικρές ταχύτητες. Επιπλέον, η δυναμική συμπεριφορά του κινητήρα είναι εξαιρετική. Στην ονομαστική ταχύτητα, ο κινητήρας 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 Σχ. 2.30β. Αν και η μέθοδος ελέγχου της ταχύτητας με τη ρύθμιση της συχνότητας προσφέρει πολύ καλύτερα χαρακτηριστικά λειτουργίας απ' 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 Σχ. 2.31 εικονίζεται η δομή του τριφασικού αντιστροφέα πηγής τάσης.



Σχ. 2.31 Κυκλωματική δομή του τριφασικού αντιστροφέα πηγής τάσης



Σχ. 2.32 Κυματομορφές της πολικής και της φασικής τάσης στον κινητήρα. Διακρίνεται ακόμη η θεμελιώδης συνιστώσα των τάσεων, με συχνότητα f_e

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 κινητήρων 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 συνδέετε μια δίοδος, 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 του κινητήρα. 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 Σχ. 5.32 παρουσιάζεται ενδεικτικά η κυματομορφή της πολικής και της φασικής τάσης στον κινητήρα, όταν τροφοδοτείται από ένα *PWM* αντιστροφέα. Ο κινητήρας εξαιτίας της επαγωγικής συμπεριφοράς του, φιλτράρει τις συνιστώσες υψηλής συχνότητας των ρευμάτων και ανταποκρίνεται μόνο στη θεμελιώδη συνιστώσα τους. Τα μικρά αρμονικά ρεύματα αυξάνουν τις απώλειες χαλκού και σιδήρου του κινητήρα.

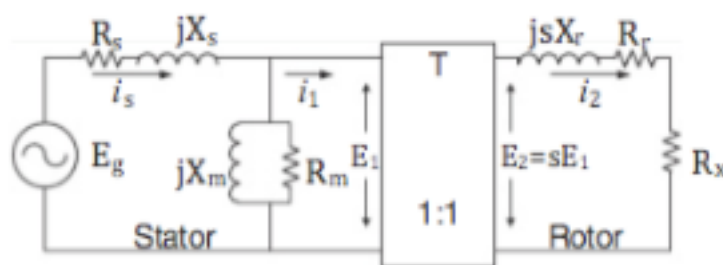
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

3.1 ΑΣΥΓΧΡΟΝΗ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ

Οι ασύγχρονες γεννήτριες επίσης ονομάζονται επαγωγικές γεννήτριες (εικ. 3.1.1). Οι αρχές λειτουργίας είναι παρόμοιες με ένα μετασχηματιστή στον οποίο το πρωτεύον τύλιγμα δημιουργεί το μαγνητικό πεδίο. Η μεταβολή του μαγνητικού πεδίου παράγει μια ΗΕΔ στο δευτερεύον πηνίο στην άλλη πλευρά του πυρήνα. Εδώ η ενέργεια μεταφέρεται από ένα επίπεδο AC τάσης σε ένα άλλο επίπεδο AC τάσης στην ίδια συχνότητα.

Σε μια επαγωγική γεννήτρια αντί ενός στερεού πυρήνα, υπάρχει ένα κενό με αέρα στο οποίο το μαγνητικό πεδίο διέρχεται. Ο πρωτεύον πυρήνας βρίσκεται στο στάτη και ο δευτερεύον στο ρότορα. Σε μια γεννήτρια βραχυκυκλωμένου δρομέα, το κύκλωμα του δρομέα βραχυκυκλώνεται, οπότε σε μια ιδεατή κατάσταση, η αντίσταση είναι μηδενική και επομένως δεν υπάρχει ηλεκτρικό φορτίο. Όπως συμβαίνει και σε μια σύγχρονη γεννήτρια όταν συνδέσουμε τον στάτη στο δίκτυο δημιουργείται ένα στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο. Όταν η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα (ω) είναι ίδια με την ταχύτητα του στρεφόμενου μαγνητικού πεδίου του στάτη, η σχετική ταχύτητα είναι μηδέν. Σε αυτή την περίπτωση δεν επάγεται ΗΕΔ στο δρομέα γιατί σε σχέση με τον δρομέα δεν υπάρχει μεταβολή του μαγνητικού πεδίου. Δεν υπάρχει ρεύμα στο δρομέα και, ως αποτέλεσμα, δεν αναπτύσσεται δύναμη και ροπή, ούτε και ισχύς.

Όταν ο άνεμος μεταφέρει ενέργεια στην γεννήτρια αναπτύσσεται ροπή στον άξονα (δρομέα) της ασύγχρονης γεννήτριας. Το μέγεθος της ροπής είναι ίσο με $\frac{P}{\omega}$. Η ροπή είναι η αιτία που ο δρομέας επιταχύνει. Όταν η ταχύτητα του ρότορα γίνει $\omega_i > \omega$, οι αγωγοί του δρομέα έχουν σχετική ταχύτητα $(\omega_i - \omega)$ σε σχέση με το στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο του στάτη. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να επάγεται ΗΕΔ στο δρομέα και να ρέει ρεύμα. Η συχνότητα του ρεύματος στους αγωγούς του δρομέα είναι $(\omega - \omega_i)f_i/\omega$ όπου f_i είναι η συχνότητα του δικτύου. Από την στιγμή που το ρεύμα αρχίζει να ρέει στους αγωγούς του δρομέα, αναπτύσσονται δυνάμεις στον δρομέα από το μαγνητικό πεδίο του στάτη. Η δύναμη αυτή αντιστέκεται στην επαγόμενη ροπή. Το μέγεθος της δύναμης είναι ανάλογο του ρεύματος το οποίο είναι ανάλογο της σχετικής ταχύτητας. Ο δρομέας συνεχίζει να επιταχύνει έως ότου η εξωτερική ροπή θα έχει αντισταθμιστεί πλήρως.



Εικόνα 3.1.1 :Ισοδύναμο κύκλωμα ασύγχρονης γεννήτριας

Η ολίσθηση ορίζεται από : $s = (\omega_o - \omega_l)/\omega_o$ (3.α)

Για τις περισσότερες γεννήτριες η ολίσθηση έχει εύρος μεταξύ 1.5 - 4% . Η ταχύτητα του δρομέα επομένως είναι πολύ κοντά στην σύγχρονη ταχύτητα.

Το κύκλωμα μιας επαγωγικής γεννήτριας με μεταβλητή αντίσταση στο δρομέα φαίνεται στο σχήμα (3.1.1). Το ρεύμα στο δρομέα δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$i_r = K_i \frac{s}{\sqrt{R_{rx}^2 + s^2 X_r^2}}$$

όπου K_i είναι μια σταθερά, X και R_{rx} είναι η συνολική αντίσταση ($R_r + R_x$) και η επαγωγική αντίδραση του δρομέα αντίστοιχα. R_x είναι η μεταβλητή αντίσταση στο δρομέα όπου θα περιγραφουμε παρακάτω. Η ροπή είναι ανάλογη του $i_r^2 R_{rx} / s$

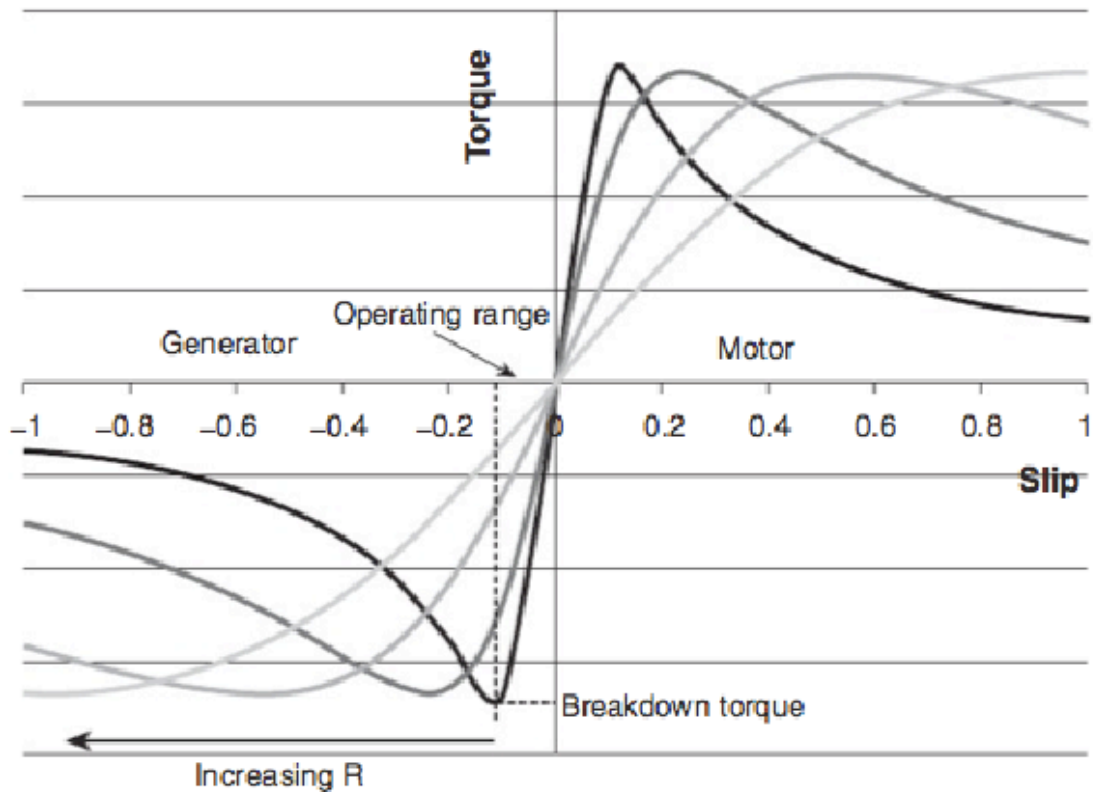
$$\tau = K_\tau \frac{s R_{rx}}{R_{rx}^2 + s^2 X_r^2}$$

Η ισχύς επομένως είναι $P = T\omega = Kr \frac{s R_{rx} \omega}{R_{rx}^2 + s^2 X_r^2}$ (3.β)

όπου ω είναι η ταχύτητα του δρομέα.

Η σχέση ανάμεσα στην ροπή και την ολίσθηση δίνεται από τον τύπο (3.1.2). Όταν οι αντιστάσεις (R_x) προστείνονται στον δρομέα, τότε η καμπύλη μετατίθεται προς τα δεξιά. Όταν εμφανίζονται υψηλότερα επίπεδα αιολικής ενέργειας, οι γεννήτριες μπορούν να δουλεύουν με μεγαλύτερες τιμες απόλυτης ολίσθησης και έτσι δίνεται η δυνατότητα να δουλεύουν με περισσότερες στροφές το λεπτό ενώ διατηρούν τη ροπή σταθερή. Στον πίνακα 10-1 παρουσιάζονται συνοπτικά οι ιδιότητες της σύγχρονης και ασύγχρονης γεννήτριας. Οι πρόσφατες βελτιώσεις στην βασική μορφή της ασύγχρονης γεννήτριας περιγράφονται παρακάτω.

Κατα την εκκίνηση η γεννήτρια απορροφά ένα μεγάλο ρεύμα απο το δίκτυο, το οποίο το οποίο είναι ακριβό και με το χρόνο καταστρέφει τον εξοπλισμό. Έτσι είναι απαραίτητη η ύπαρξη ενός εκκινητή ομαλής εκκίνησης (soft starter) ως μέρος του εξοπλισμού της γεννήτριας. Αυτό απεικονίζεται στο σχήμα 3.1.2



Εικόνα 3.1.2 : Η χαρακτηριστική λειτουργίας μιας ασύγχρονης γεννήτριας. Όταν ο δρομέας και ο στάτης συγχρονίζονται η ολίσθηση είναι μηδέν. Αρνητική ολίσθηση αντιστοιχεί στη λειτουργία γεννήτριας. Για μικρές τιμές ολίσθησης η ροπή αυξάνεται γραμμικά μέχρι να φτάσει το σημείο ανατροπής. Υψηλότερες τιμές ολίσθησης μπορούν να εμφανιστούν με τη χρήση εξωτερικής αντίστασης R_x . Σημειώστε ότι η ταχύτητα του δρομέα αυξάνεται από τα δεξιά προς τα αριστερά.

Κατά την κανονική λειτουργία, μια επαγωγική γεννήτρια απαιτεί περίπου 30% άεργο ισχύ από το δίκτυο και κατά την χαμηλή φόρτιση, η τιμή της άεργου ισχύος γίνεται μεγαλύτερη. Παίρνοντας άεργο ισχύ από το δίκτυο αυξάνει το κόστος. επομένως είναι απαραίτητη η σύνδεση πυκνωτών για να περιορίσουμε την ανάγκη για άεργο ισχύ. Αυτό φαίνεται στο σχήμα (3.1.2). Οι παραδοσιακές επαγωγικές γεννήτριες λειτουργούν με πολύ μικρό εύρος ολίσθησης δηλαδή η ταχύτητα του δρομέα είναι πρακτικά σταθερή. Όπως δείξαμε και νωρίτερα, η μεταβολή της ταχύτητας του δρομέα επιτρέπει στην ανεμογεννήτρια να αξιοποιήσει περισσότερη ισχύ (10 - 9). Ο πρώτος τρόπος για να αυξήσουμε την ολίσθηση και να επιτρέψουμε στο δρομέα να λειτουργεί με διαφορετικές ταχύτητες είναι με τη χρήση μεταβλητών αντιστάσεων.

3.1.2 ΑΝΤΙΣΤΑΘΜΙΣΗ ΑΕΡΓΟΥ ΙΣΧΥΟΣ - ΑΥΤΟΔΙΕΓΕΡΣΗ

Η ασύγχρονη γεννήτρια παρουσιάζει το μειονέκτημα ότι δεν παράγει την άεργο ισχύ που απαιτείται για την εγκατάσταση του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου της, σε αντίθεση με την σύγχρονη γεννήτρια ή την γεννήτρια Σ.Ρ., στις οποίες το πεδίο δημιουργείται από τα τυλίγματα διέγερσης. Επομένως εάν μεν η Α/Γ λειτουργεί παράλληλα με το δίκτυο, η άεργος ισχύς δίδεται στην γεννήτρια απ' αυτό, ενώ εάν πρόκειται να τροφοδοτεί ανεξάρτητο φορτίο (απομονωμένη λειτουργία), η άεργος ισχύς πρέπει να δοθεί από εξωτερική πηγή. Μια τέτοια πηγή αποτελούν οι στατοί πυκνωτές, οι οποίοι άλλωστε χρησιμοποιούνται ευρύτατα στην πράξη για την βελτίωση του συντελεστή ισχύος των εγκαταστάσεων.

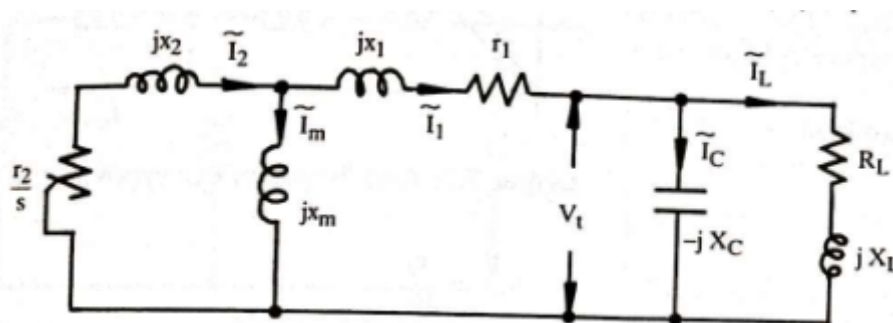
Θα αναλύσουμε συνοπτικά τον τρόπο με τον οποίο μπορεί να αυτοδιεγερθεί μια ασύγχρονη μηχανή. Για το σκοπό αυτό θεωρούμε ότι στους ακροδέκτες της μηχανής συνδέονται τρεις πυκνωτές, κατ' αστέρα, χωρητικότητας C ανά φάση.

Στο Σχήμα 3.1.6 δείχνεται το αντίστοιχο ισοδύναμο κύκλωμα, στο οποίο το τροφοδοτούμενο ανά φάση φορτίο παριστάται με μια σύνθετη αντίσταση $Z_L = R_L + jX_L$, ο δε πυκνωτής με μια χωρητική αντίσταση $X_C = 1/\omega C$ ανά φάση. Όταν η γεννήτρια λειτουργεί σε μόνιμη κατάσταση θα είναι

$$X_C = \frac{x_m(R_L^2 + X_L^2)}{R_L^2 + X_L^2 + x_m X_L} \quad \bar{I}_1 = \bar{I}_c = \bar{I}_L \quad \text{ή} \quad \frac{V_t}{z_g} = j \frac{V_t}{X_C} + \frac{V_t}{R_L + jX_L}$$

$$s = -\frac{r_2 R_L}{R_L^2 + X_L^2}$$

Όπου Z_g η σύνθετη αντίσταση που εμφανίζει η γεννήτρια, για μια ορισμένη ολίσθηση s.



Σχήμα 3.1.6: Ισοδύναμο κύκλωμα ασύγχρονης γεννήτριας με πυκνωτές και φορτίο.

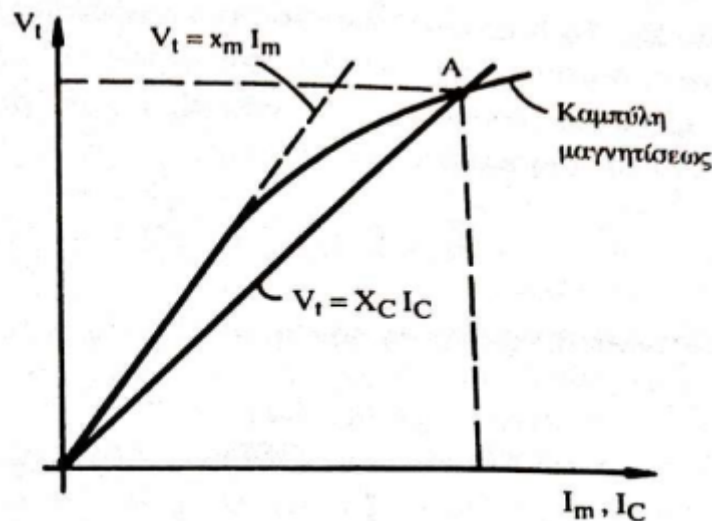
Η ανάλυση απλουστεύεται σημαντικά αν λάβουμε υπόψη ότι η σύνθετη αντίσταση του τυλίγματος του στάτη $r_1 + jx_1$ είναι πολύ μικρότερη από την αντίσταση του φορτίου και του πυκνωτή. Επίσης ότι, επειδή κατά την κανονική λειτουργία που το s έχει μικρές τιμές, το r_2/s

είναι πολύ μεγαλύτερο του x_2 . Μπορεί συνεπώς χωρίς σημαντικό λάθος, να αμεληθούν τα $r_1 + jx_1$ και x_2 . Με τις απλοποιήσεις αυτές η συνθήκη (7.11), αν εξισωθούν πραγματικό και φανταστικό μέρος, πληρούται όταν :

$$X_C = \frac{x_m(R_L^2 + X_L^2)}{R_L^2 + X_L^2 + x_m X_L}, \quad s = -\frac{r_2 R_L}{R_L^2 + X_L^2}$$

Για καθαρά ωμικό φορτίο, όταν $X_L = 0$, η συνθήκη θα είναι $X_C = X_m$ οπότε $I_C = I_m$. Δηλαδή αρκεί, όταν $X_L = 0$, για την αυτοδιέγερση της μηχανής οι πυκνωτές να παρέχουν την ένταση της μαγνήτισης της. Ή αλλιώς, αν ληφθεί υπόψη ότι $X_m \gg X_L$, περίπου την ένταση που απορροφά η μηχανή κατά την λειτουργία της χωρίς φορτίο.

Στην παραπάνω ανάλυση δεν λήφθηκε υπόψη ο κορεσμός του μαγνητικού κυκλώματος της μηχανής, θεωρήθηκε δηλαδή ότι η X_m είναι σταθερή και ανεξάρτητη της V_1 . Στην περίπτωση που λαμβάνεται υπόψη και ο κορεσμός το φαινόμενο της αυτοδιέγερσης μπορεί να παρουσιαστεί με τον απλό τρόπο που δείχνεται στο Σχήμα 3.1.7. Σ' αυτό η «καμπύλη μαγνητίσεως» δίνει την μεταβλητή τιμή της X_m , πέραν μιας τιμής της I_m , ενώ για τον πυκνωτή θα είναι $X_C = V_1/I_C$, δηλαδή μια ευθεία γραμμή. Το σημείο τομής A, για τον οποίο πληρούται η (7.11) είναι το σημείο λειτουργίας. Είναι δηλαδή προφανές από το Σχήμα 3.1.7 ότι η αυτοδιέγερση καθορίζεται βασικά από την καμπύλη μαγνητίσεως της μηχανής και πραγματοποιείται όταν υπάρχει σημείο τομής, δηλαδή όταν κατ' ελάχιστο $X_C = X_m$. Όσο μεγαλύτερη η ισχύς του πυκνωτή (μικρότερο X_C) τόσο μεγαλύτερη και επιτυγχανόμενη τάση V_t .



Σχήμα 3.1.7 Από διεγερση ασύγχρονης μηχανής.

Η ολίσθηση, εάν θεωρήσουμε $X_L = 0$, θα είναι:

$$s = -\frac{r_2}{R_L} \quad (7.13)$$

Και η ταχύτητα περιστροφής της μηχανής :

$$\omega_r = (1 - s) \omega_s = \left(1 + \frac{r_2}{R_L}\right) \frac{1}{X_C C} \quad (7.14)$$

Διότι : $X_C = 1 / \omega_s C$, όπου C η χωρητικότητα του πυκνωτή.

Η αυτοδιέγερση της ασύγχρονης γεννήτριας με στατούς πυκνωτές είναι επιβεβλημένη, προφανώς, στην περίπτωση των αυτόνομων συστημάτων και με το κριτήριο αυτό καθορίζεται το μέγεθος των πυκνωτών.

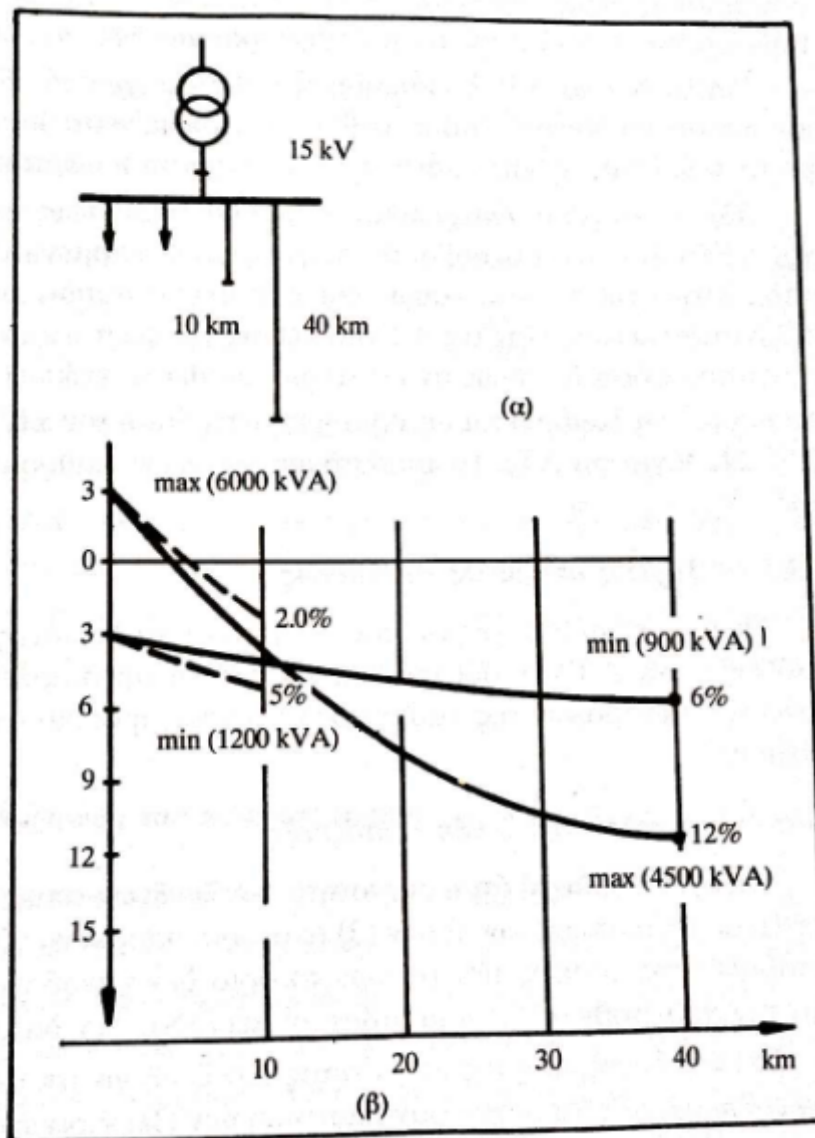
Στην περίπτωση όμως που οι Α/Γ λειτουργούν παράλληλα με το δίκτυο, το μέγεθος του πυκνωτή καθορίζεται με το κριτήριο που ισχύει και στην περίπτωση των ασύγχρονων κινητήρων, δηλαδή η μέση άεργος ισχύς που απορροφάται από το δίκτυο κατά την λειτουργία της μηχανής να μην υπερβαίνει ένα ορισμένο όριο που ορίζουν οι Ηλεκτρικές Επιχειρήσεις (π.χ. ο συντελεστής ισχύος να είναι μεγαλύτερος του 0.85). Κατά την παράλληλη λειτουργία η αυτοδιέγερση μπορεί να δημιουργήσει προβλήματα, στην περίπτωση που λόγω κάποιας ανωμαλίας, διακόπτεται η σύνδεση με το δίκτυο και η Α/Γ εξακολουθεί να λειτουργεί τροφοδοτώντας ένα ανεξάρτητο φορτίο. Η λειτουργία αυτή είναι ανεπιθύμητη γιατί μπορεί να γίνεται με συχνότητα και τάση πολύ διαφορετικές από τις κανονικές, οπότε θα προκληθούν ζημιές στις συσκευές των καταναλωτών που θα παραμείνουν τροφοδοτούμενοι. Είναι γι' αυτό επιβεβλημένο η Α/Γ να τίθεται το ταχύτερο εκτός λειτουργίας, μέσω των διατάξεων προστασίας της.

3.1.3 ΜΕΤΑΒΟΛΕΣ ΤΗΣ ΤΑΣΕΩΣ

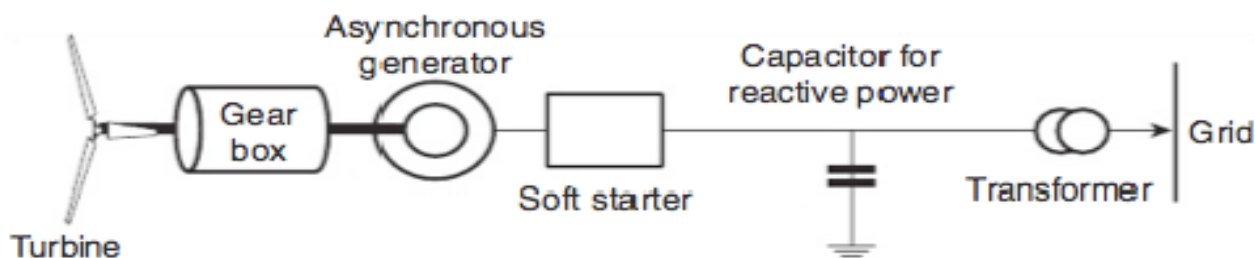
Για τον προσδιορισμό του μεγέθους των μεταβολών της τάσης που προκαλούν οι Α/Γ κατά την μόνιμη κατάσταση λειτουργίας τους, μπορούν να εφαρμόζονται οι καθιερωμένες μέθοδοι υπολογισμού των πτώσεων τάσεως των δικτύων Διανομής, όπου οι Α/Γ μπορούν να θεωρούνται ως «αρνητικά φορτία». Οι σχετικοί υπολογισμοί διευκολύνονται σημαντικά με την χρήση προγραμμάτων Ηλεκτρονικού Υπολογιστή (ΗΥ). Με τα ίδια προγράμματα ΗΥ μπορούν να υπολογίζονται και οι μεταβολές των απωλειών του δικτύου που συνεπάγεται η σύνδεση των Α/Γ.

Η μεγάλη ποικιλία που παρουσιάζεται η διαμόρφωση των δικτύων Διανομής ΜΤ κάνει δύσκολη την διατύπωση γενικών συμπερασμάτων. Οποσδήποτε όμως εκτεταμένες αναλύσεις που έχουν γίνει, έχουν αποδείξει ότι τα προβλήματα τάσεως που δημιουργούν οι Α/Γ περιορίζονται στην ανάγκη τοπικών ενισχύσεων των δικτύων.

Μια συγκεκριμένη εικόνα των επιπτώσεων για τα δίκτυα ΜΤ της ΔΕΗ προκύπτει αν θεωρήσουμε την τυπική περίπτωση δικτύου 15 KV που δείχνεται στο Σχήμα 3.16. Θεωρούμε δύο πλήρως φορτιζόμενες εναέριες γραμμές, με ομοιόμορφα κατανεμημένο φορτίο, μήκους 40 km και 10 km, των οποίων η διακύμανση της τάσεως (για μια συνήθη «αντιστάθμιση» 3% στον ζυγό 15 KV του Υ/Σ ΥΤ/ΜΤ), κυμαίνεται όπως δείχνεται στο Σχήμα 3.16(β).



Σχήμα 3.16 Μεταβολή των τάσεων κατά μήκος γραμμής ΜΤ.



Εικόνα 3.1.3 : Απεικόνιση της σύνδεσης ενός συστήματος σταθερής ταχύτητας ασύγχρονης γεννήτριας συνδεδεμένης απ'ευθείας στο δίκτυο.

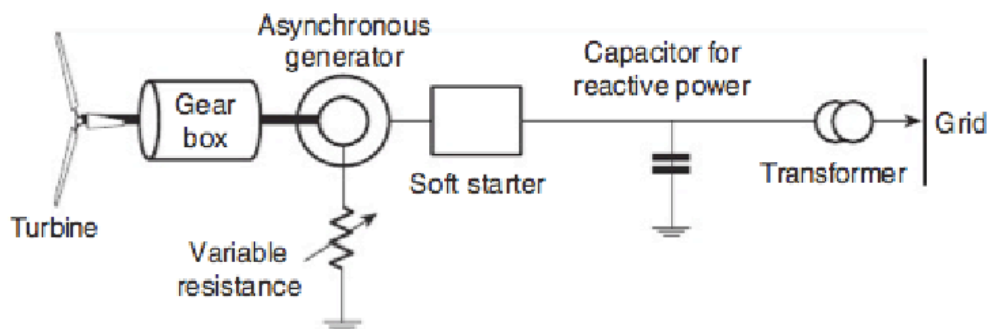
Στον παρακάτω πίνακα 3.1.4 γίνεται σύγκριση των ιδιοτήτων των ασύγχρονων και σύγχρονων μηχανών.

ΑΣΥΓΧΡΟΝΗ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ	ΣΥΓΧΡΟΝΗ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ
Απλή, φθηνή αξιόπιστη, χωρίς κόστος συντήρησης λόγω κατασκευής.	
Απαιτεί άεργο ισχύ. Μπορεί να απαιτηθούν πυκνωτές για τον έλεγχο της αέργου ισχύος.	Δεν απαιτείται άεργος ισχύς. Μπορεί να παρέχει άεργο ισχύ στο δίκτυο όταν ζητείται.
Οι ασύγχρονες γεννήτριες δεν μπορούν να δουλέψουν με μεταβαλλόμενη ταχύτητα.	Μία σύγχρονη γεννήτρια σταθερής ταχύτητας δεν μπορεί να αξιοποιήσει την ενέργεια του ανέμου αποτελεσματικά.
Οι γεννήτριες opti-slim ή DFIG μπορούν να αξιοποιήσουν την αιολική ενέργεια αποτελεσματικά.	Μία σύγχρονη γεννήτρια μεταβαλλόμενης ταχύτητας αξιοποιεί με τον πιο αποτελεσματικό τρόπο την ενέργεια του ανέμου.
Κατά την εκκίνηση εμφανίζεται υψηλό ρεύμα. Απαιτείται η ύπαρξη κυκλώματος ομαλής εκκίνησης για τον έλεγχο του ρεύματος	Κατα την διάρκεια της εκκίνησης υπάρχει χαμηλή απαίτηση ρεύματος απο το δίκτυο.
Κατά την κανονική λειτουργία απαιτείται άεργος ισχύς η οποία μπορεί να είναι της τάξης του 30% σε kVA απο αυτά που παραδίνονται στο δίκτυο.	Κατα την διάρκεια της κανονικής λειτουργίας μπορεί να παράγει ενεργό και άεργο.
Οι απότομες μεταβολές δεν προκαλούν προβλήματα συγχρονισμού. Με μεταβαλλόμενες εξωτερικές αντιστάσεις επιτρέπονται μεγάλες αρνητικές τιμές της ολίσθησης και έτσι οι διακυμάνσεις στην περιοχή του ρεύματος μπορούν να περιοριστούν.	Οι απότομες μεταβολές αέρα μπορούν να προκαλέσουν προβλήματα σταθερότητας στις γεννήτριες σταθερής ταχύτητας όπως για παράδειγμα να την αποσυγχρονίσουν.

Πίνακας 3.1.4

Οι ανεμογεννήτριες που ονομάζονται παραπάνω ως ‘opti-slip’ παρουσιάζονται στην εικόνα 3.1.5

Μια δεύτερη κατηγορία για την επίτευξη μεταβλητής ταχύτητας δρομέα είναι η διπλής τροφοδοσίας επαγωγικές γεννήτριες γνωστές και ως DFIG, οι οποίες είναι μια παραλλαγή επαγωγικών γεννητριών με δακτυλιοφόρο δρομέα. Σημειώστε ότι αν και η παραπάνω είναι ασύγχρονη γεννήτρια, η σχετική ταχύτητα του μαγνητικού πεδίου είναι μηδέν. Αυτό γίνεται γιατί η ολίσθηση (η διαφορά της ταχύτητας του μαγνητικού πεδίου του στάτη με την ταχύτητα περιστροφής του δρομέα) αντισταθμίζεται με την ταχύτητα της συχνότητας στο δρομέα.

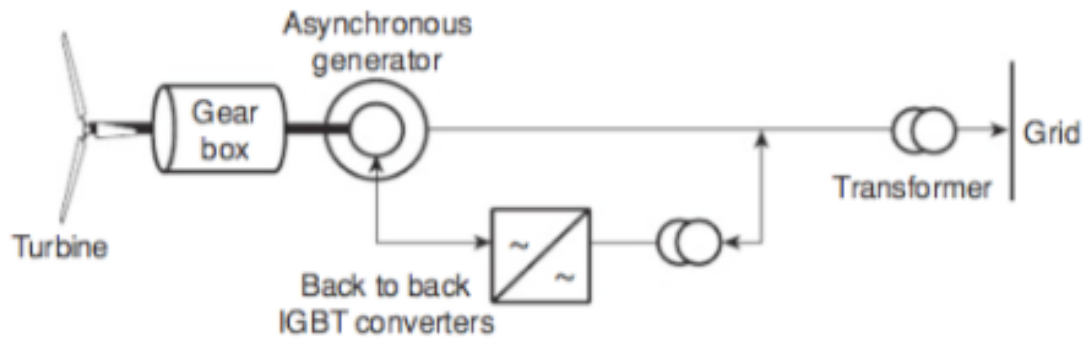


Εικόνα 3.1.5 σχηματική αναπαράσταση μιας ασύγχρονης γεννήτριας της οποίας η ολίσθηση ελέγχεται από μεταβαλλόμενες αντιστάσεις στο δρομέα.

Οι παραδοσιακές επαγωγικές γεννήτριες δουλεύουν με μικρές τιμές ολίσθησης. Ωστόσο οι DFIG δουλεύουν με εύρος ολίσθησης που κυμαίνεται από 60 έως 110%. Στην περιοχή ολίσθησης από 60 έως 110% η ενέργεια παρέχεται στο δρομέα από τα ηλεκτρονικά ισχύος σε μια συχνότητα που εξασφαλίζει μηδενική σχετική ταχύτητα. Στην περιοχή ολίσθησης από 100 έως 110% παράγεται ενέργεια από τον δρομέα η οποία τροφοδοτεί το δίκτυο. Πάνω από το 110% ενεργοποιείται ο μηχανισμός μεταβαλλόμενης κλίσης των πτερυγίων για να περιορίσει την ενέργεια που μεταφέρεται στον δρομέα. Το ρεύμα στο δρομέα έχει την συχνότητα της ολίσθησης, ως εκ τούτου θα πρέπει να ανορθωθεί και να αντιστραφεί πριν μεταφερθεί στο δίκτυο. Η εικόνα 10-15 είναι μια σχηματική απεικόνιση ενός DFIG.

ΜΕΤΑΒΑΛΟΜΕΝΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑ

Οι γεννήτριες μεταβαλλόμενης ταχύτητας είναι πολύ αποτελεσματικές στο να αξιοποιούν την ενέργεια του ανέμου σε ένα μεγαλύτερο εύρος από ταχύτητες του ανέμου. Γι αυτό το λόγο η αγορά έχει στραφεί σε αυτό τον τύπο γεννητριών. Τα τελευταία χρόνια τρεις τύποι γεννητριών έχουν γίνει δημοφιλείς: οι επαγωγικές γεννήτριες διπλής τροφοδοσίας (DFIG), οι σύγχρονες γεννήτριες άμεσης κίνησης με DC διέγερση (DDSG) και οι γεννήτριες άμεσης εκκίνησης παραμένουστος μαγνητισμού (DDPM). Η σύγκριση των χαρακτηριστικών των τριών γεννητριών παρουσιάζεται στον πίνακα 3.1.6.



Εικόνα 3.1.5 σχηματική παρουσίαση μιας γεννήτριας διπλής τροφοδοσίας. Όταν η ολίσθηση είναι αρνητική (η ταχύτητα του δρομέα είναι μεγαλύτερη από την σύγχρονη ταχύτητα), τότε ο δρομέας παρέχει ενέργεια στο δίκτυο. όταν η ολίσθηση είναι θετική, τότε ο δρομέας παίρνει ενέργεια από το δίκτυο.

DFIG και άλλες επαγωγικές γεννήτριες.	DDSG	DDPM
Ασύγχρονες γεννήτριες που δουλεύουν σε ένα μεγάλο εύρος ολίσθησης. Ο δακτυλιοφόρος δρομέας μεταφέρει ή παίρνει ενέργεια από το δίκτυο .	Ο δρομέας τροφοδοτείται με DC ρεύμα διέγερσης. Μεταβαλλόμενη ταχύτητα λειτουργίας έχει ως αποτέλεσμα ως την παραγωγή ισχύος μεταβαλλόμενης συχνότητας.	Ο δρομέας έχει μόνιμους μαγνήτες. Μεταβαλλόμενη ταχύτητα λειτουργίας έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή ισχύος μεταβαλλόμενης συχνότητας.
Ο συντελεστής ισχύος μπορεί και ρυθμίζεται.	Ο συντελεστής ισχύος μπορεί να ρυθμιστεί.	Ο συντελεστής ισχύος μπορεί να ρυθμιστεί. Επιπλέον κυκλώματα περιλαμβάνονται για να ελέγχουν την ισχύ.
Ο στάτης συνδέεται απ'ευθείας στο δίκτυο. Οι διαταραχές του δικτύου μπορούν να επηρεάσουν την γεννήτρια.	Η γεννήτρια είναι απομονωμένη από το δίκτυο. Καλύτερος έλεγχος της τάσης που μεταφέρεται προς τα μέσα.	Η γεννήτρια είναι απομονωμένη από το δίκτυο. Καλύτερος έλεγχος της τάσης που μεταφέρεται προς τα μέσα.
Η εξωτερική τάση είναι κανονικά λιγότερη από 1kV.	Η εξωτερική τάση είναι υψηλή και μπορεί να φτάσει σε μερικές δεκάδες kV. Δεν απαιτείται μετασχηματιστής εάν συνδέονται σε γραμμές διανομής.*	Η εξωτερική τάση είναι υψηλή και μπορεί να φτάσει κάποιες δεκάδες kV. Δεν απαιτείται μετασχηματιστής εάν συνδέονται σε γραμμές διανομής.
Απαιτείται κιβώτιο ταχυτήτων.	Δεν έχουν κιβώτιο ταχυτήτων έτσι ελαχιστοποιούνται οι δονήσεις και ο θόρυβος που προκαλείται από το κιβώτιο ταχυτήτων.	Δεν περιλαμβάνεται κιβώτιο ταχυτήτων.
Συμπαγής γεννήτριες.	Έχουν μεγάλες διαστάσεις λόγω μεγάλου αριθμού πόλων.	Συμπαγείς γεννήτριες

Οι ανεμογεννήτριες GE 1.5, Vestas (opti-slip) και Siemens χρησιμοποιούν αυτόν τον τύπο γεννητριών.	Η Enercon και η Emergya χρησιμοποιούν αυτόν τον τύπο γεννήτριας.	Οι ανεμογεννήτριες GE 2.5, Clipper, Vencys και Northwind χρησιμοποιούν αυτόν τον τύπο γεννητριών.
--	--	---

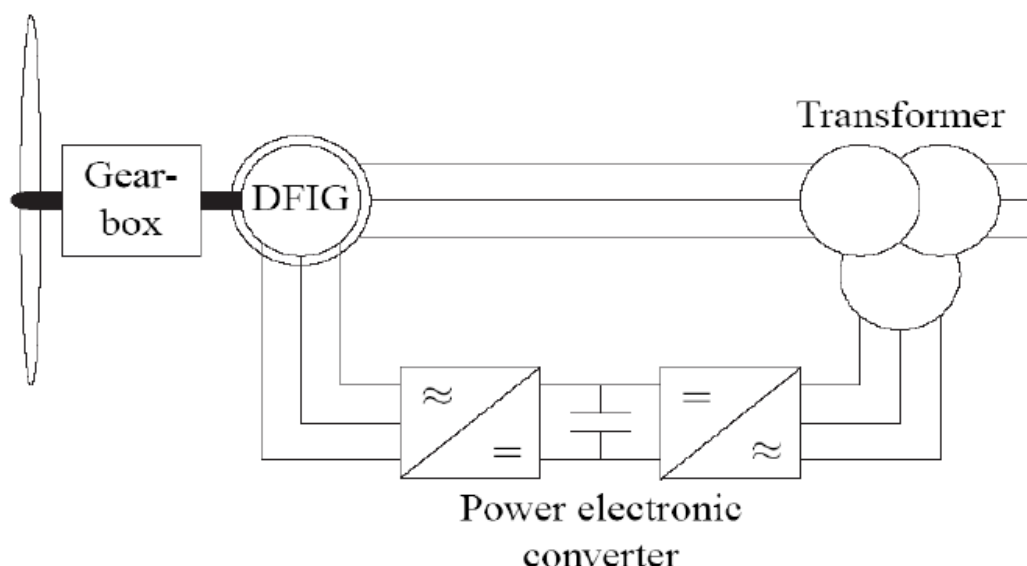
Η ύπαρξη δακτυλιδιών και ψυκτρών οδηγεί σε μεγαλύτερες ανάγκες συντήρησης και χαμηλότερη αξιοπιστία.	Δεν έχουν δακτυλίδια και ψύκτρες.	Το ίδιο όπως η DDSG.
Το εύρος της ταχύτητας του ανέμου είναι συνήθως στενότερο.	Το εύρος της ταχύτητας του ανέμου στο οποίο μπορούν να δουλέψουν είναι μεγαλύτερο.	Το ίδιο όπως η DDSG.
Έχουν περιορισμένη δυνατότητα να διαχειριστούν τους ρίπους του ανέμου.	Οι ριπές του ανέμου αυξάνουν την ταχύτητα ενώ η ροπή διατηρείται μέσα στα όρια. Η ενέργεια απο τις ριπές μετατρέπεται σε ηλεκτρική.	Το ίδιο όπως η DDSG.
Οι στροφές ανά λεπτό της γεννήτριας είναι μεγάλες 1800/3600 στρ/λ για 60Hz ή 1500/3000 στρ/λ για 50Hz, οπότε η ροπή είναι μικρότερη.	Οι στροφές παίρνουν τιμές από 15 έως 30 στρ/λ οπότε η ροπή είναι μεγάλη.	Το ίδιο όπως η DDSG.
Μικρής ισχύος μετατροπείς περιλαμβάνονται για να ελέγξουν το κύκλωμα του δρομέα.	Απαιτούνται ανορθωτές και inverters μεγάλης ισχύος για να μετατρέψουν όλη την ενέργεια σε DC και μετά σε AC στην συχνότητα του δικτύου. Παράγονται και φιλτράρονται υψηλές αρμονικές.	Το ίδιο όπως η DDSG.
Συμπαγείς γεννήτριες αλλά περίπλοκα ηλεκτρονικά ισχύος.	Οι γεννήτριες απαιτούν υψηλές προδιαγραφές κατασκευής για να επιτυγχάνεται και να διατηρείται ένα μικρό και ομοιόμορφο διάκενο αέρα.	Το κόστος των μαγνητών είναι υψηλό και η κατασκευή είναι περίπλοκη λόγω της απαίτησης για την ύπαρξη μικρού διάκενου αέρα.

Πίνακας 3.1.6

ΕΠΑΓΩΓΙΚΗ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ ΔΙΠΛΗΣ ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑΣ

3.2 ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΜΕ DFIG

Το DFIG αποτελείται από μια επαγωγική γεννήτρια με δακτυλιοφόρο δρομέα η οποία συνδέεται με το δίκτυο και έναν ηλεκτρονικό μετατροπέα. Ο όρος «doubly fed» αναφέρεται στο γεγονός ότι 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.



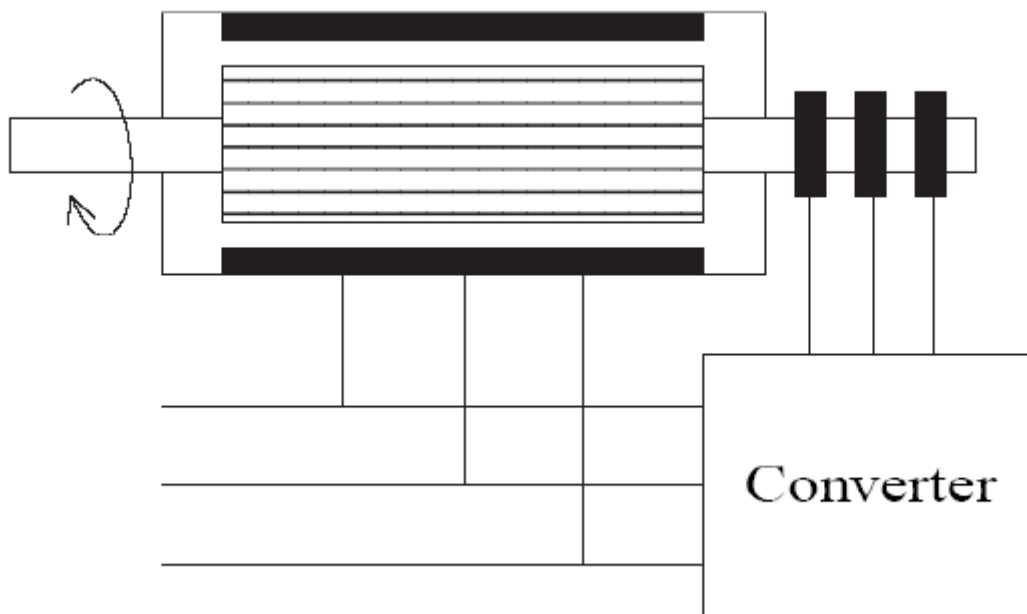
Σχήμα 3.2.1 Ανεμογεννήτρια μεταβλητής ταχύτητας με DFIG

Το DFIG έχει αρκετά πλεονεκτήματα. Έχει την ικανότητα να ελέγχει την άεργο ισχύ και να αποσυνδέει τον έλεγχο της ενεργού και της άεργου ισχύος με ανεξάρτητο έλεγχο του ρεύματος δρομέα. Το DFIG δεν είναι απαραίτητο να μαγνητιστεί από το δίκτυο ισχύος, μπορεί να μαγνητιστεί από το κύκλωμα του δρομέα επίσης. Είναι επίσης δυνατό να παραχθεί άεργος ισχύς η οποία μπορεί να μοιραστεί στο στάτη από τον «grid side» μετατροπέα. Εντούτοις, ο «grid side» μετατροπέας κανονικά λειτουργεί σε μοναδιαίο συντελεστή ισχύος

και δεν περιλαμβάνεται στην άεργο ισχύ που ανταλλάσσεται ανάμεσα στην ανεμογεννήτρια και το δίκτυο. Στην περίπτωση που το δίκτυο είναι ασθενές με διακυμάνσεις στην τάση, η γεννήτρια διπλής τροφοδότησης μπορεί να ρυθμιστεί ώστε να παράγει ή να καταναλώνει ένα ποσό άεργου ισχύος με σκοπό τον έλεγχο της τάσης.

Υπάρχει μια ποικιλία DFIG μεθόδων που χρησιμοποιεί ελεγχόμενες εξωτερικές αντιστάσεις δρομέα. Μερικά μειονεκτήματα της μεθόδου, είναι πως απελευθερώνεται ενέργεια χωρίς λόγο στις αντιστάσεις δρομέα και πως δεν είναι δυνατό να ελεγχθεί η άεργος ισχύς. Για συστήματα μεταβλητής ταχύτητας με περιορισμένο εύρος ταχυτήτων, π.χ. $\pm 30\%$ της σύγχρονης ταχύτητας, το DFIG μπορεί να είναι μια ενδιαφέρουσα λύση, εξαιτίας των παρακάτω λόγων.

Στο σχήμα 3.2.2 φαίνεται η σύνδεση του DFIG και συγκεκριμένα η σύνδεση του κυκλώματος του στάτη με το δίκτυο και η σύνδεση του κυκλώματος του δρομέα με το μετατροπέα διαμέσου δαχτυλιδιών ολίσθησης.

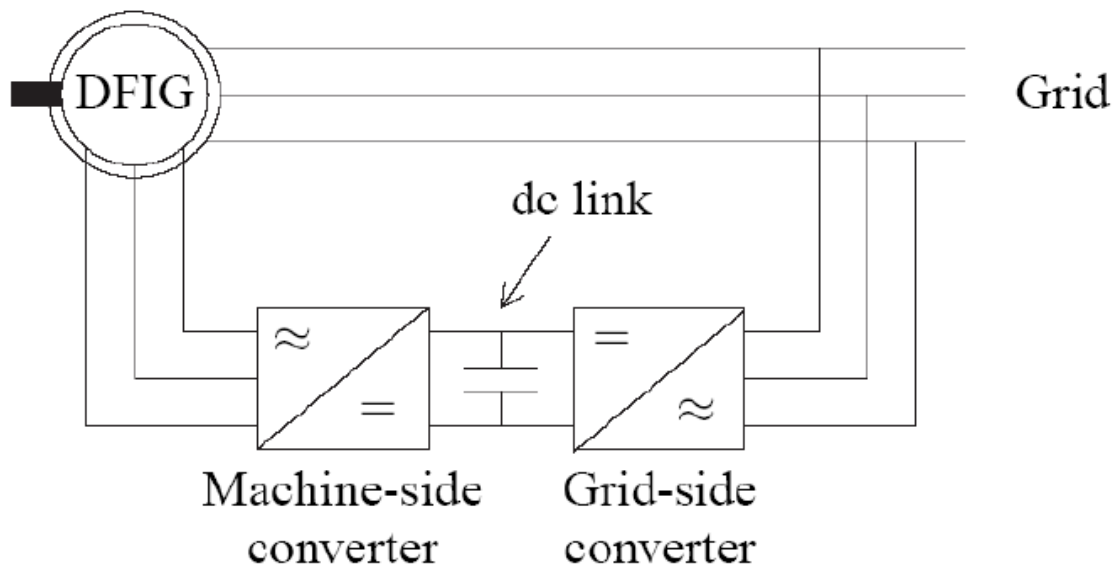


Σχήμα 3.2.2. Αρχή ενός DFIG

Μια πιο λεπτομερής εικόνα του DFIG συστήματος με έναν «back – to – back» μετατροπέα παρουσιάζεται στο σχήμα 3.2.3. Ο «back – to – back» μετατροπέας αποτελείται από δύο μετατροπείς, έναν μετατροπέα στην πλευρά της μηχανής (machine side) και έναν μετατροπέα στην πλευρά του δικτύου (grid side), οι οποίοι συνδέονται «πλάτη με πλάτη». Ανάμεσα στους δυο μετατροπείς τοποθετείται ένας DC πυκνωτής ως αποθηκευτικός χώρος ενέργειας, με στόχο να κρατηθούν οι μεταβολές τάσης στη DC 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 DC σύνδεσης σταθερή και να εξασφαλίζει λειτουργία μετατροπέα σε μοναδιαίο συντελεστή ισχύος (δηλαδή μηδενική άεργο ισχύ).

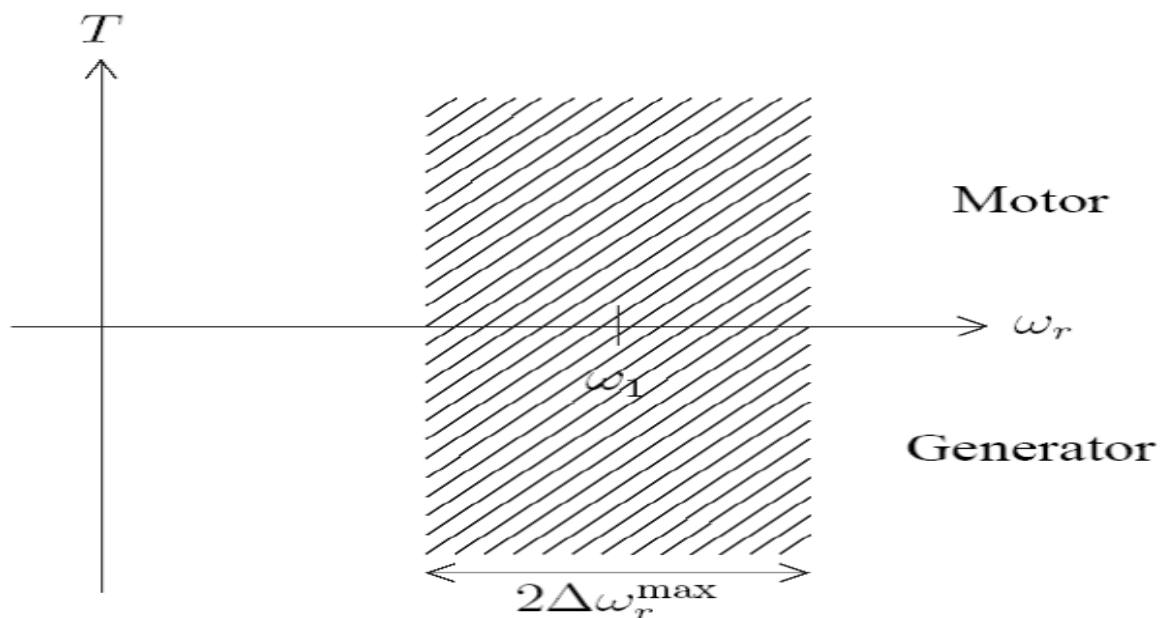
Με βάση τις συνθήκες λειτουργίας, ισχύς ρέει μέσα ή έξω από το δρομέα. Σε μια υπερσύγχρονη κατάσταση, η ισχύς ρέει από το δρομέα διαμέσου του μετατροπέα προς το

δίκτυο, ενώ σε μια υποσύγχρονη κατάσταση έχουμε ροή προς την αντίθετη κατεύθυνση. Και στις δυο περιπτώσεις ο στάτης τροφοδοτεί με ενέργεια το δίκτυο.



Σχήμα 3.2.3 DFIG σύστημα με back – to – back μετατροπέα

Η χαρακτηριστική ταχύτητας – ροπής του DFIG συστήματος φαίνεται στο σχήμα 3.2.4. Όπως επίσης φαίνεται στο σχήμα, το DFIG μπορεί να λειτουργήσει τόσο σαν κινητήρας όσο και σαν γεννήτρια με ένα εύρος ταχύτητας δρομέα του $\pm \Delta\omega_r(\max)$ γύρω από την σύγχρονη ταχύτητα ω_1 .



Σχήμα 3.2.4 Χαρακτηριστική ροπής – ταχύτητας ενός DFIG

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

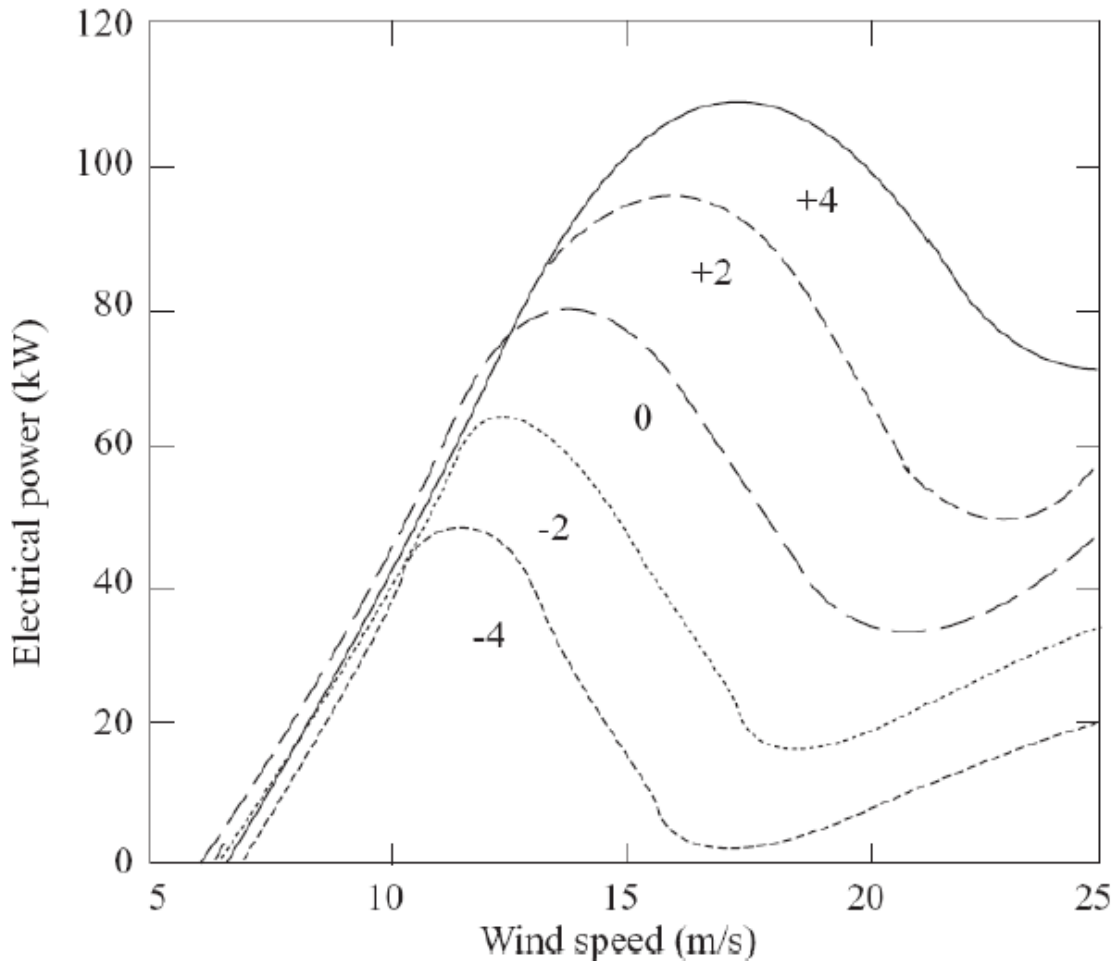
αυξημένη αποτελεσματικότητα. Ένα μειονέκτημα του DFIG είναι η αναπόφευκτη ανάγκη δαχτυλιδιών ολίσθησης.

3.3 PITCH CONTROL (ΕΛΕΓΧΟΣ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΤΗΣ ΚΛΙΣΗΣ ΤΩΝ ΠΤΕΡΥΓΙΩΝ)

Οι ανεμογεννήτριες είναι σχεδιασμένες ώστε να παράγουν ενέργεια όσο το δυνατόν φθηνότερα. Για αυτό γενικά σχεδιάζονται έτσι ώστε να παράγουν μέγιστη ισχύ σε ταχύτητες ανέμου της τάξης των 15 m/s. Δεν αποδίδει να σχεδιάζονται ώστε να μεγιστοποιούν την έξοδό τους σε μεγαλύτερους ανέμους, γιατί τόσο ισχυροί άνεμοι είναι σπάνιοι. Σε περίπτωση ισχυρότερων ανέμων είναι απαραίτητο να σπαταλάται μέρος της επιπλέον ενέργειας του ανέμου προκειμένου να προφυλαχθεί ο εξοπλισμός της ανεμογεννήτριας. Το Pitch Control είναι ο πιο συνηθισμένος τρόπος ελέγχου της αεροδυναμικής ισχύος που παράγεται από το δρομέα της ανεμογεννήτριας. Επίσης έχει σημαντική επίδραση σε όλα τα αεροδυναμικά φορτία που παράγονται από το δρομέα.

Σε ανεμογεννήτριες που εφαρμόζεται τέτοιου είδους έλεγχος, δηλαδή στις ανεμογεννήτριες με ελεγχόμενο βήμα έλικα, ο ηλεκτρονικός ελεγκτής ελέγχει την έξοδό τους αρκετές φορές το δευτερόλεπτο. Όταν η έξοδος γίνει αρκετά μεγάλη, στέλνει εντολή στο μηχανισμό περιστροφής του πτερυγίου ο οποίος αμέσως στρέφει τα πτερύγια προς τον αέρα. Γι' αυτό τα πτερύγια πρέπει να είναι σε θέση να περιστρέφονται κατά μήκος του άξονά τους. Κατά τη διάρκεια κανονικής λειτουργίας τα πτερύγια θα στρέφονται με μια γωνία μιας μοίρας τη φορά, ενώ ταυτόχρονα θα στρέφεται και ο δρομέας. Ο σχεδιασμός τέτοιου είδους ανεμογεννητριών απαιτεί έξυπνη μηχανική ώστε τα πτερύγια να στρέφονται ακριβώς την απαιτούμενη γωνία. Ο έλεγχος αυτός κάθε φορά που αλλάζει διεύθυνση ο αέρας στρέφει τα πτερύγια μερικές μοίρες ώστε να διατηρεί τη γωνία πρόσπτωσης ιδανική για να μεγιστοποιεί την έξοδο.

Μια παράμετρος που επηρεάζει την έξοδο ισχύος είναι η γωνία της μεταβολής της κλίσης των πτερυγίων (pitch angle) βs. Ο σχεδιασμός των πτερυγίων σχεδόν πάντοτε είναι σπειροειδής, αλλά τα πτερύγια μπορούν τοποθετηθούν σε πλήρη γωνία. Τα αποτελέσματα από αρκετές pitch γωνίες φαίνονται στο σχήμα 3.3.1. Μικρές μεταβολές στην pitch γωνία μπορεί να έχουν δραματικές επιπτώσεις στην έξοδο ισχύος. Θετική ρύθμιση της pitch γωνίας αυξάνει την pitch γωνία σχεδιασμού και έτσι ελαττώνει τη γωνία επίπτωσης 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 3.3.1 Επίδραση της ρύθμισης της γωνίας μεταβολής της κλίσης των πτερυγίων στην εξαγόμενη ισχύ.

Η ρύθμιση ισχύος μπορεί να επιτευχθεί με δυο τρόπους:

1. «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 διασφαλίζει 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 στο ρότορα.

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

2. «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 πτερύγια

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 πτερύγια 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» 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 επαρκούν για να ελεγχθεί η ροπή. Το «pitching to stall» επιφέρει μια σημαντικά μεγαλύτερη ώθηση του 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 επιβράδυνση τους με ρυθμισμένο «pitch». Χαμηλότερα από την 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 την 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 ποικίλει ελαφρά με την ταχύτητα του ανέμου. Συνεπώς, σε μερικές ανεμογεννήτριες, η γωνία μεταβολής της κλίσης μεταβάλλεται αργά κάποιες μοίρες κάτω από την 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 κοντρα 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 στη 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».

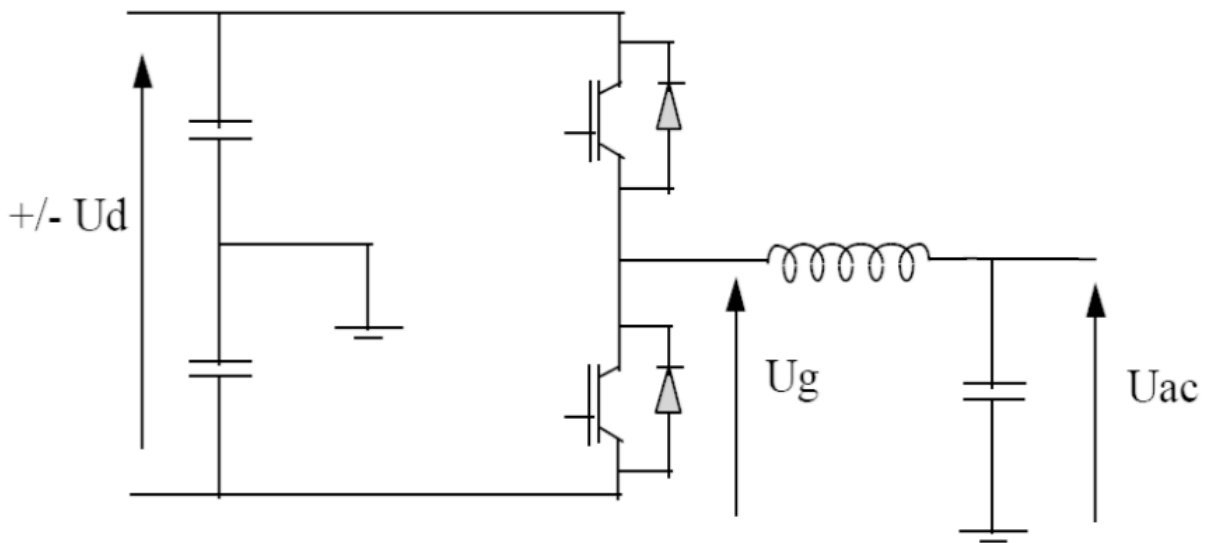
Οι περισσότερες ανεμογεννήτριες που ελέγχονται με «pitch control» χρησιμοποιούν «pitch control» πλήρους ανοίγματος, στο οποίο ο προσανατολισμός του «pitch» είναι προς το κέντρο. Είναι επίσης δυνατό, αν και όχι συνηθισμένο, να πετύχουμε αεροδυναμικό έλεγχο κάνοντας

‘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.

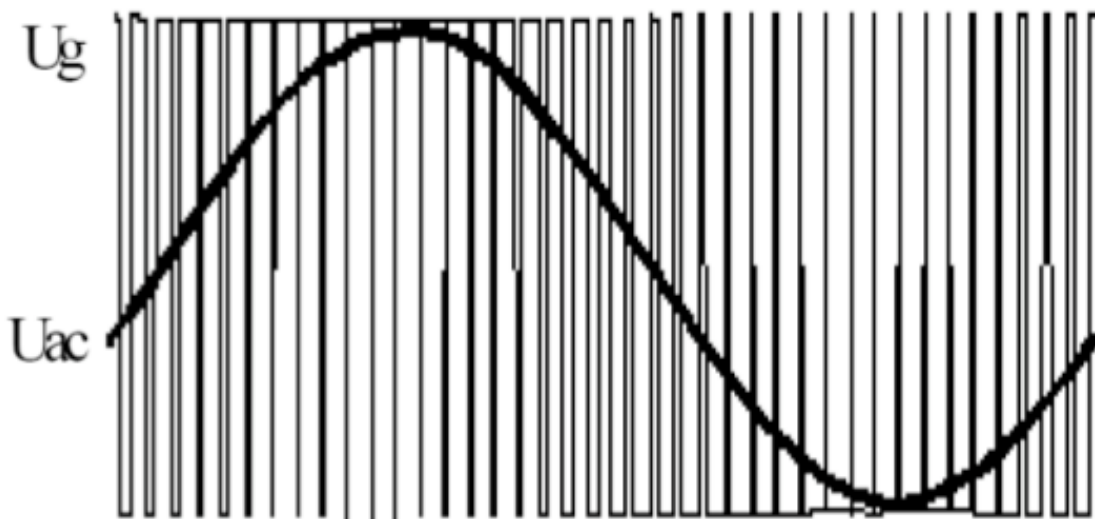
3.4 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΩΝ ΠΗΓΗΣ ΤΑΣΗΣ (VSC) ΚΑΙ ΡΥΘΜΙΣΗΣ ΤΟΥ ΠΛΑΤΟΥΣ ΤΩΝ ΠΑΛΜΩΝ (PWM).

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 δυνατόνα φτιαχτούν μετατροπείς υψηλής τάσης οι οποίοι να χρησιμοποιούν διπολικά τρανζίστορ μονωμένης πύλης (IGBTs). Η λειτουργία τους έχει αναπτυχθεί στο βαθμό που οι δυνατότητες που γινόταν συζήτηση πολλά χρόνια γύρω από τους VSC για HVDC να είναι πραγματικότητα σήμερα. Περιλαμβάνουν ανεξάρτητο έλεγχο της ενεργού και της αέργου ισχύος, αντιθετική λειτουργία σε απομονωμένα δίκτυα εναλλασσόμενου ρεύματος που δεν παράγουν ενέργεια από μόνα τους, πολύ μικρή ανάγκη φίλτρων και καθόλου ανάγκη μετασχηματισμών για τη διαδικασία μετατροπής. Τα HVDC αναπτύχθηκαν αρχικά από τεχνολογίες που χρησιμοποιήθηκαν σε βιομηχανικά συστήματα οδήγησης. Η τεχνολογία μετατροπέα με θυρίστορ (PCC) που μέχρι σήμερα χρησιμοποιείται για τα HVDC αντικαθιστάται 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 ανταλλάσει 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 ή που δεν υπάρχει αρκετή ισχύς στις περιστροφικές μηχανές (χαμηλή ισχύς βραχυκύκλωσης).

Το γεγονός ότι στην τεχνολογία PCC τα διακοπτικά στοιχεία είναι είναι χαμηλής διακοπτικής συχνότητας, αυξάνει την ενίσχυση 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 πάλμου της ρυθμισμένης τάσης. Έτσι αποφευγονται τα μεγάλα φίλτρα.



Σχήμα 3.4.1 Μια φάση ενός VSC μετατροπέα που χρησιμοποιεί PWM.



Σχήμα 3.4.2 πρότυπο PWM και τάση θεμελιώδους συχνότητας σε έναν VSC.

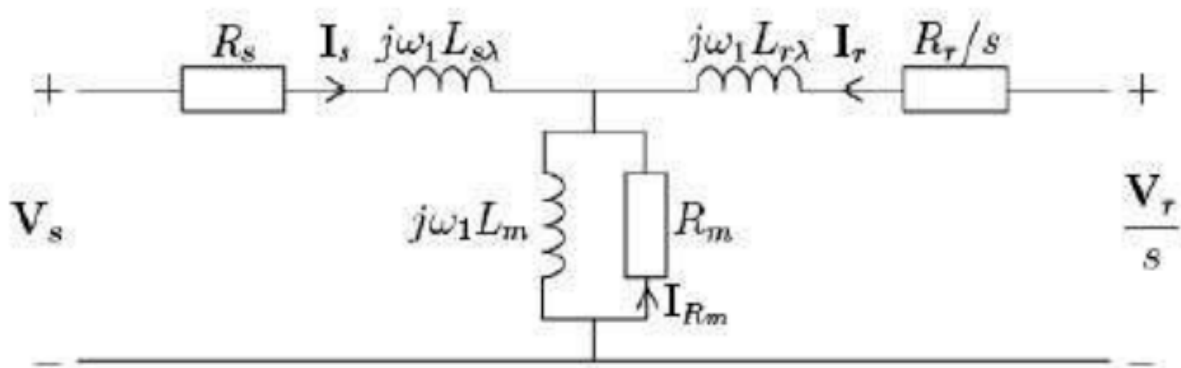
Με το PWM είναι δυνατή η δημιουργία κάθε φασικής γωνίας η πλάτους (ως ένα γενικό όριο) μέσω της μεταβολής του προτύπου του PWM (του σήματος ελέγχου της μεθόδου), κάτι που μπορεί να γίνει σχεδόν ακαριαία. Το PWM προσφέρει τη δυνατότητα να ελεγχθούν η ενεργός και η άεργος ισχύς ανεξάρτητα η μια από την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

3.5 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ ΕΠΑΓΩΓΗΣ ΔΙΠΛΗΣ ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑΣ ΓΕΔΤ (DFIG).

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 έντασης 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 μαγνητικό πεδίο. Η αλληλεπίδραση των δύο αυτών μαγνητικών πεδίων δημιουργεί ηλεκτρομαγνητική ροπή η οποία στρέφει το δρομέα ο οποίος προσπαθεί να φτάσει την ταχύτητα περιστροφής του μαγνητικού πεδίου (εάν η ταχύτητα 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 γεννήτρια επαγωγής διπλής τροφοδότησης DFIG, αφού τροφοδοτείται με ισχύ και από τον στάτη και από τον δρομέα.

3.6 ΙΣΟΔΥΝΑΜΟ ΚΥΚΛΩΜΑ ΤΗΣ ΓΕΔΤ (DFIG).

Το ισοδύναμο κύκλωμα της ΓΕΔΤ, όπου συμπεριλαμβάνονται οι απώλειες μαγνήτισης φαίνεται στο σχήμα 3.6.1. 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 3.6.1 Ισοδύναμο κύκλωμα της ΓΕΔΤ.

Με εφαρμογή του νόμου του Kirchoff δίνει τις :

$$V_s = R_s I_s + j\omega_1 L_{ls} I_s + j\omega_1 L_m (I_s + I_r + I_{R_m})$$

$$\frac{V_r}{s} = \frac{R_r}{s} I_r + j\omega_l L_{lr} I_r + j\omega_l L_m (I_s + I_r + I_{Rm})$$

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

Όπου :

V_s : τάση στάτη

R_s : αντίσταση στάτη

V_r : τάση δρομέα

R_r : αντίσταση δρομέα

I_s : ρεύμα στάτη

R_m : αντίσταση μαγνήτισης

I_r : ρεύμα αντίστασης μαγνήτισης

L_{sl} : επαγωγική σκέδαση στάτη

I_{Rm} : ρεύμα αντίστασης μαγνήτισης

$L_r = L_{ls}$: επαγωγική σκέδαση δρομέα

s : ολίσθηση

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

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

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

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

Οι ωμικές απώλειες της επαγωγικής γεννήτριας είναι :

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

Ενώ η ηλεκτρομαγνητική ροπή T_e εκφράζεται ως :

$$T_e = 3n_p \text{Im} [\lambda_m I_r^+] = 3n_p \text{Im} [\lambda_r I_r^+]$$

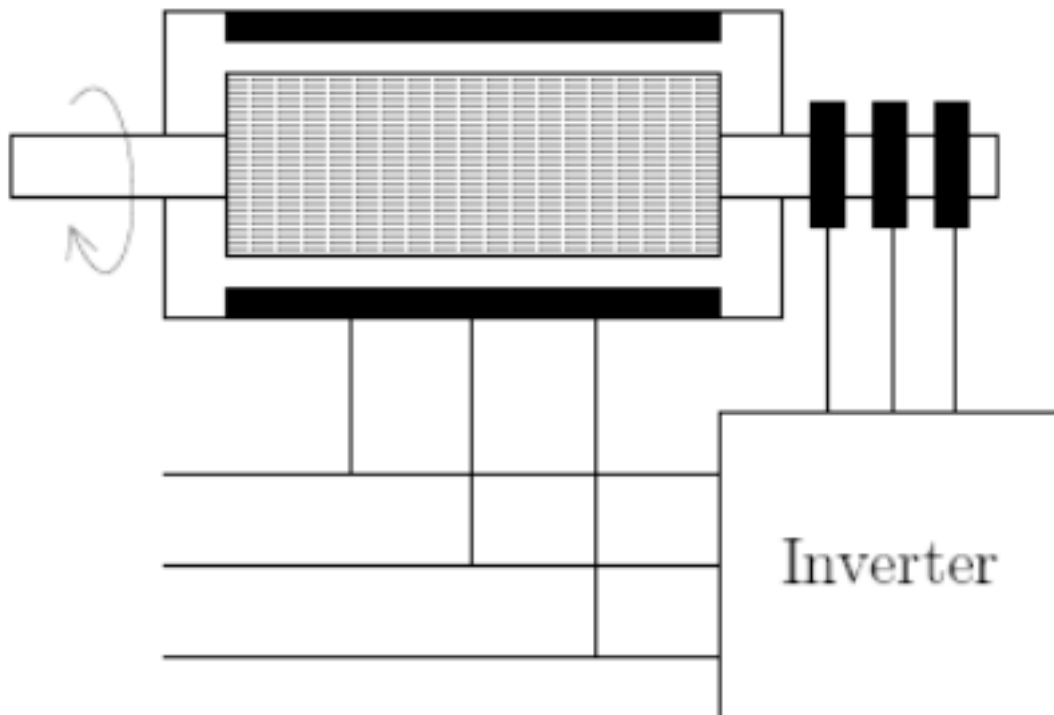
3.6.1. ΕΙΔΗ ΕΠΑΓΩΓΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ ΔΙΠΛΗΣ ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑΣ (DFIG).

Ακολουθεί παρουσίαση των διαφόρων ειδών μηχανών DFIG, τα οποία είναι η κλασική DFIG, DFIG σε σειρά, DFIG μονού πλαισίου σε σειρά και DFIG χωρίς ψύκτρες. 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 σε σύγκριση με μια μηχανή απλής τροφοδοσίας, είναι το μειωμένο ποσό ισχύος που καλείται να διαχειριστεί ο αντιστροφέας. Το μέγεθος της ισχύος αυτής, εξαρτάται από το εύρος τιμών στο οποίο πρέπει να κυμαίνεται η ταχύτητα της μηχανής.

I. ΚΛΑΣΣΙΚΗ ΜΗΧΑΝΗ ΔΙΠΛΗΣ ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑΣ

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

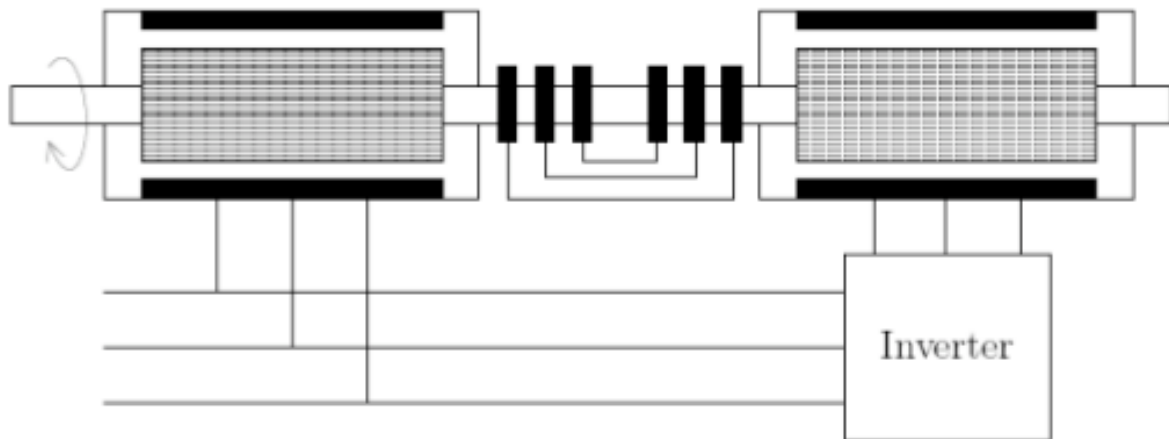


Σχήμα 3.6.2 Κλασσική μηχανή διπλής τροφοδοσίας

II. ΜΗΧΑΝΗ ΔΙΠΛΗΣ ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑΣ EN ΣΕΙΡΑ (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.



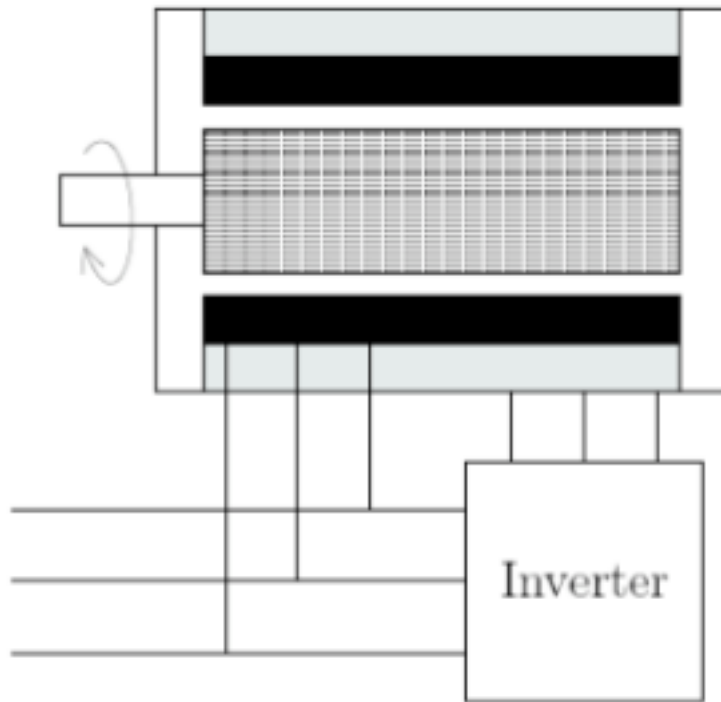
Σχήμα 3.6.4 Μηχανή διπλής τροφοδοσίας εν σειρά

III. ΜΗΧΑΝΗ ΔΙΠΛΗΣ ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑΣ ΕΝ ΣΕΙΡΑ (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 με τον άλλον τύπο.

IV. ΜΗΧΑΝΗ ΔΙΠΛΗΣ ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑΣ ΧΩΡΙΣ ΨΥΚΤΡΕΣ

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.



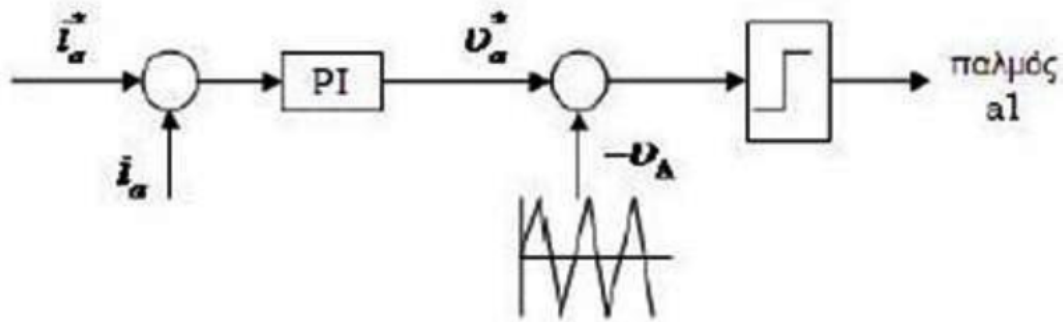
Σχήμα 3.6.5 Μηχανή διπλής τροφοδοσίας χωρίς ψύκτρες

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 ψύκτρες) είναι η (reluctance) Μηχανή διπλής τροφοδοσίας, της οποίας ο στάτης είναι ακριβώς όπως της προηγούμενης μηχανής ενώ ο δρομέας βασίζεται στην reluctance.

3.7 ΕΛΕΓΧΟΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΜΕ ΤΗΝ ΤΕΧΝΙΚΗ ΣΥΓΚΡΙΣΗΣ ΡΑΜΠΙΑΣ (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 3.7.1 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 :

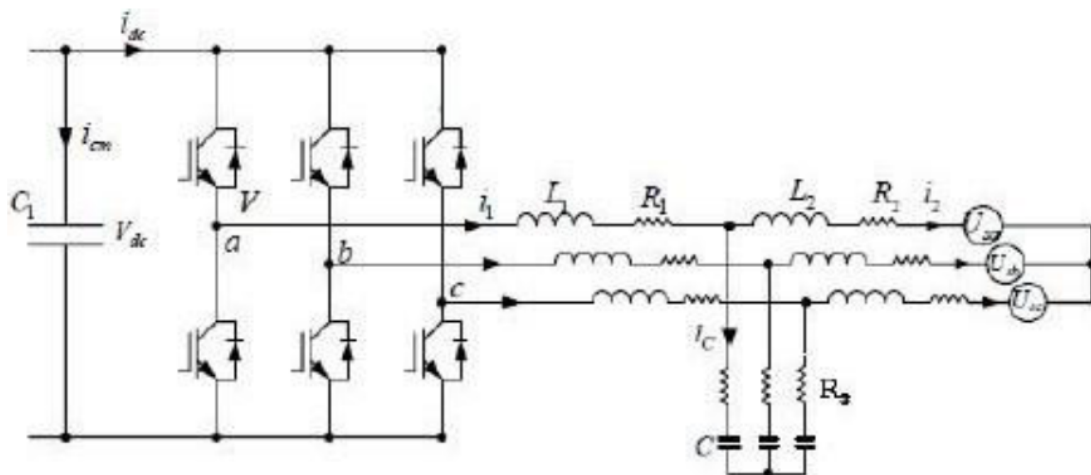
$$v_{an1} = v_{ao1} = K_{\Delta} v_a^* \quad \text{οπου} \quad K_{\Delta} = \frac{1}{V_{\Delta}} \frac{V_{dc}}{2} \quad \text{με} \quad V_a^* < V_{\Delta}$$

3.8 ΦΙΛΤΡΑ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΥ ΑΡΜΟΝΙΚΩΝ ΣΥΝΙΣΤΩΣΩΝ ΡΕΥΜΑΤΟΣ

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 κατωδιαβατών φίλτρων που καταστέλλουν αυτές τις αρμονικές. Οι δυο κοινές τοπολογίες είναι:

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

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

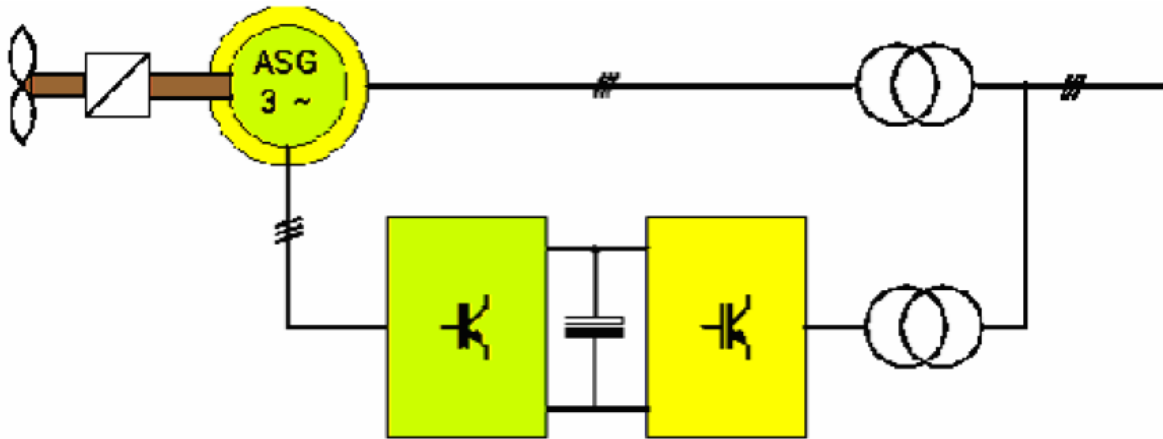


Σχήμα 3.8.1 Μετατροπέας πηγής τάσης που συνδέεται στο δίκτυο μέσω φίλτρου LCL.

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

3.9 ΔΙΑΣΥΝΔΕΣΗ ΑΙΟΛΙΚΩΝ ΠΑΡΚΩΝ ΜΕΓΑΛΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

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 εταιρίας VESTAS. Οι ανεμογεννήτριες αυτής της εταιρίας χρησιμοποιούν ασύγχρονη γεννήτρια δακτυλιοφόρου δρομέα. Σύμφωνα με το ενημερωτικό φυλλάδιο του κατασκευαστή ένας χονδρικός τρόπος σύνδεσης φαίνεται στο σχήμα 3.9.1. Σύμφωνα με αυτό παρατηρείται ότι η ασύγχρονη μηχανή είναι διπλά τροφοδοτούμενη (double – fed). Προς πληροφόρηση αναφέρεται ότι η γεννήτρια έχει ονομαστικά στοιχεία $U_n=690V$, $I_n=711A$, $n=1260σ.α.λ.$ 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 άρχισε να χρησιμοποιείται ευρέως πρόσφατα στα αιολικά συστήματα (μεταβλητών στροφών).



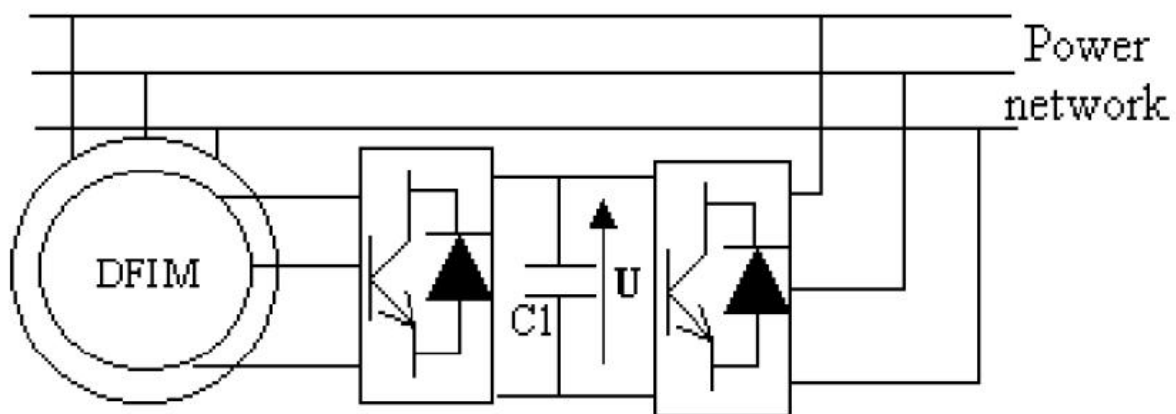
Σχήμα 3.9.1 Ηλεκτρονικός μετατροπέας ισχύος ανεμογεννήτριας DFIG.

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.

Μια 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 όσο και λόγω έλλειψης επικοινωνίας με το υπόλοιπο κύκλωμα. Αντίθετα με τον ηλεκτρονικό μετατροπέα ισχύος E.P. – Σ.P. – 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 $C_p - \lambda$ στην επιθυμητή τιμή λ_{opt} όπου υπάρχει μέγιστο C_p . Με αυτό τον τρόπο η ανεμογεννήτρια παρακολουθεί τις αλλαγές του ανέμου και προσαρμόζει τη λειτουργεί της. Χάρη στον ηλεκτρονικό μετατροπέα ισχύος υπάρχει μεγάλο εύρος ρύθμισης της τάσης και συνεπώς της άεργου ισχύος.

3.10 ΕΛΕΓΧΟΣ ΜΗΧΑΝΗΣ ΕΠΑΓΩΓΗΣ ΔΙΠΛΗΣ ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑΣ (DFIG)

Καταρχήν εισάγεται ένα μαθηματικό πρότυπο της μηχανής σε κατάλληλο $d - q$ πλαίσιο αναφοράς για την έρευνας 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 συχνότητα 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 ξεπεράσει 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 3.10.1. Ο στάτης είναι απευθείας συνδεδεμένος με το δίκτυο και ο δρομέας τροφοδοτείται για να μαγνητίζει τη μηχανή.



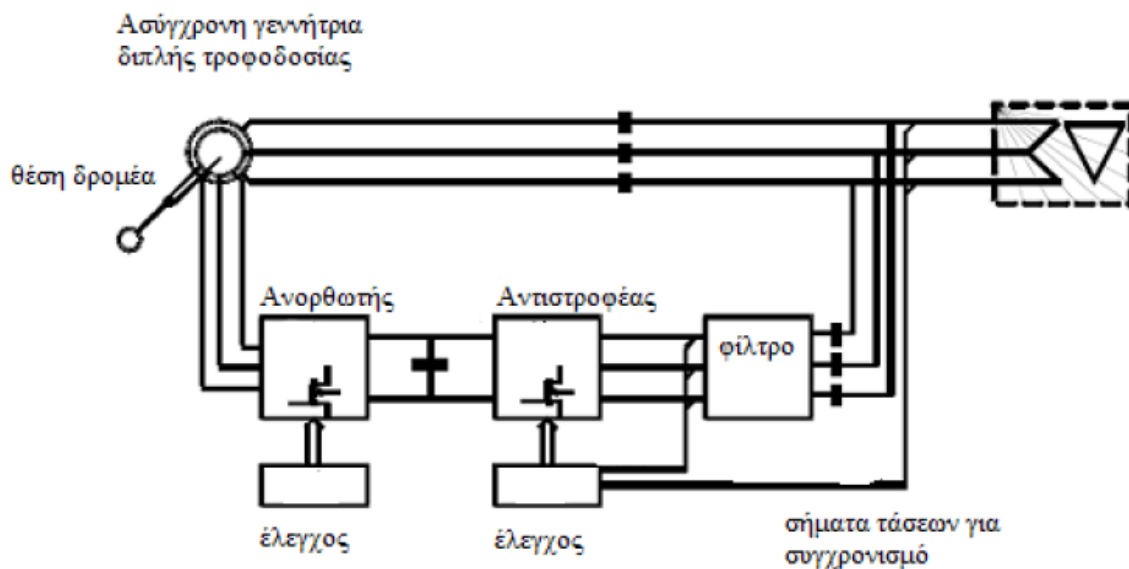
Σχήμα 3.10.1 Επαγωγική μηχανή διπλής τροφοδοσίας (DFIG).

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 κύκλο- μετατροπείς ως μετατροπείς και κλασικοί αναλογικοί – ολοκληρωτικοί (PI) ελεγκτές. Στην περίπτωση αυτή, αφού φτιαχτεί ένα πρότυπο της DFIG

και επιλέγει το κατάλληλο d-g πλαίσιο αναφοράς, η ενεργός και η άεργος ισχύς ελέγχονται με τη 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.

3.11 ΣΥΝΔΕΣΗ DFIG ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ

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 ΕΡ/ΣΡ/ΕΡ (back to back AC/DC/AC). Ο μετατροπέας είναι διπλής κατεύθυνσης ισχύος. Αποτελείται από δυο ανεξάρτητα ελεγχόμενους μετατροπείς τάσης (ΜΠΤ) που συνδέονται σε ένα κοινό ζυγό συνεχούς ρεύματος. Ο πυκνωτής μεταξύ των δύο μετατροπέων σταθεροποιεί την τάση.



Σχήμα 3.15 Σύνδεση DFIG στο δίκτυο με έλεγχο και φίλτρο.

Η συμπεριφορά της γεννήτριας εξαρτάται από αυτούς τους μετατροπείς και τους ελεγκτές τους 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 δυο κατευθύνσεις. Αυτός είναι και ο λόγος που χρησιμοποιείται η τοπολογία EP/ΣP/EP 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:

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

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

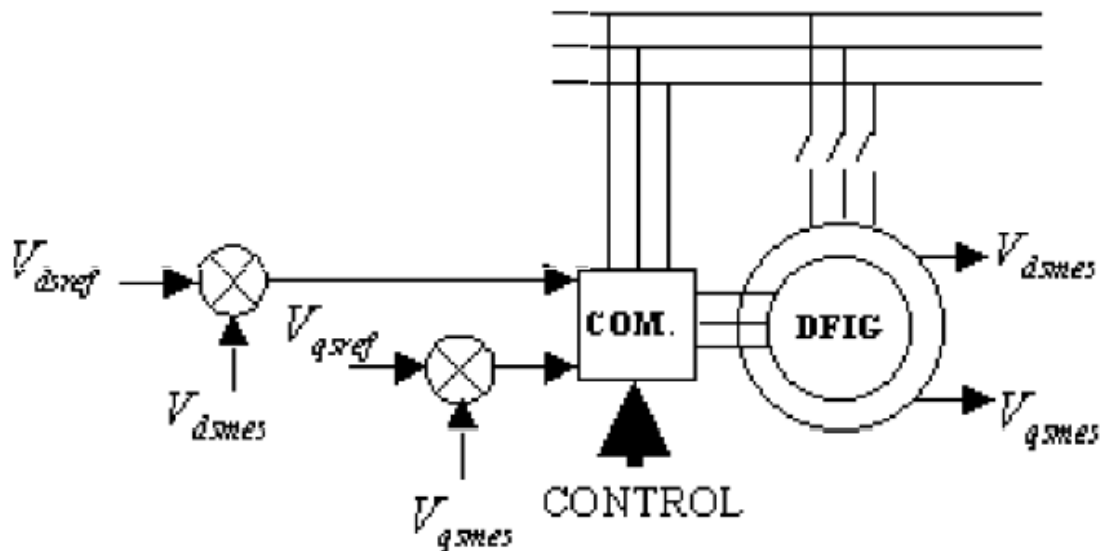
Όπου η_{gen} είναι ο βαθμός απόδοσης της γεννήτριας.

Η παρουσία του μετατροπέα ισχύος επιτρέπει στην γεννήτρια διπλής τροφοδοσίας μια πιο ευέλικτη λειτουργία σε σχέση με μια 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,

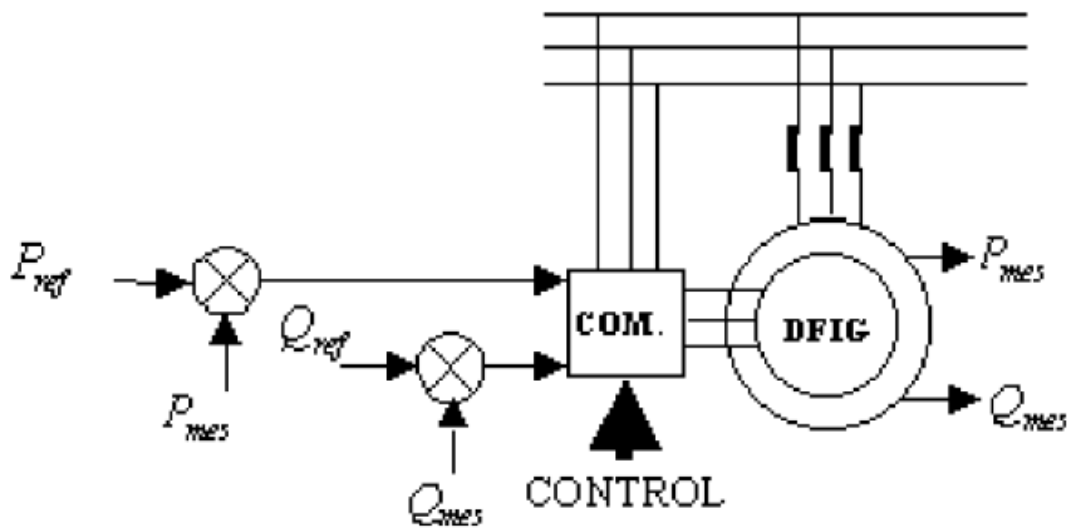
ο μετατροπέας ισχύος μπορεί να μαγνητίσει τη μηχανή μέσα από το κύκλωμα του δρομέα, ανεξάρτητα από την τάση του δικτύου.

3.12 ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΗΣ DFIG

Καθώς συνδέεται η DFIG με το δίκτυο, η σύνδεση πρέπει να γίνει σε 3 βήματα. Το πρώτο βήμα είναι ο έλεγχος των τάσεων στάτη με τις τάσεις δικτύου σαν αναφορά όπως φαίνεται στο σχήμα 3.16. 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 ανάμεσα στο στάτη και στο δίκτυο. Αυτό φαίνεται στο σχήμα 3.17.

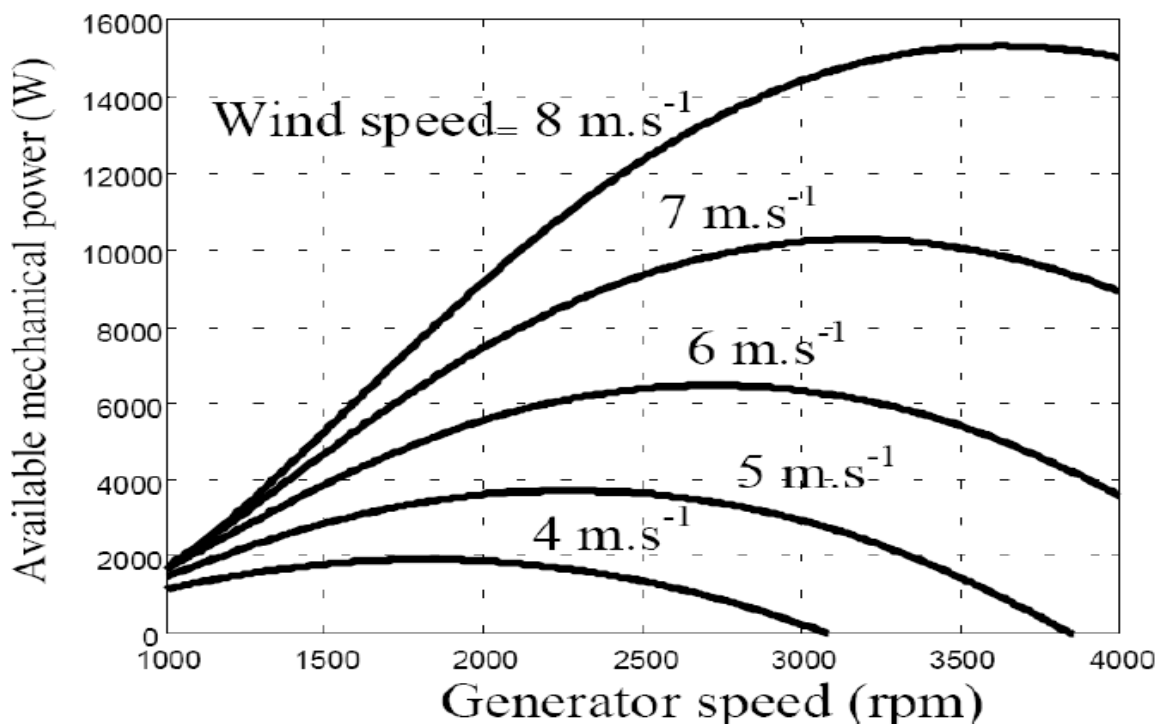


Σχήμα 3.16 Πρώτο βήμα σύνδεσης της DFIG στο δίκτυο.



Σχήμα 3.17 Τρίτο βήμα στη σύνδεση της DFIG με το δίκτυο.

Για δεδομένη ανεμογεννήτρια, αρκετές σχέσεις υπάρχουν ανάμεσα στην ταχύτητα του ανέμου, την περιστροφική ταχύτητα της γεννήτριας και τη διαθέσιμη μηχανική ισχύ. 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 3.18 Παράδειγμα για τις καμπύλες ισχύος της ανεμογεννήτριας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ :

1. Υπουργείο Ανάπτυξης: 3^η Εθνική έκθεση για το επίπεδο διεύθυνσης της ανανεώσιμης ενέργειας το έτος 2010.
2. Νικόλαος Βοβός «Ανάλυση, έλεγχος και ευστάθεια συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας» εκδόσεις ΖΗΤΗ, Θεσσαλονίκη 2004.
3. Μπεργελές Γεώργιος «Ανεμοκινητήρες» Εκδόσεις Συμεών 2005.
4. Ντοκόπουλος Πέτρος «Ηλεκτρικές Εγκαταστάσεις Καταναλωτών» Εκδόσεις ΖΗΤΗ 2005.
5. Saman Salarpour «Ανάλυση Αιολικών Συστημάτων με Ασύγχρονη Μηχανή Διπλής Τροφοδοσίας», Διπλωματική εργασία.
6. Α. Κλαδάς, Π. Γιαννοπούλου - Λασκαράτου, Εργαστηριακές Ασκήσεις Μαθήματος Ηλεκτρικές Μηχανές Ι, Εκδόσεις Ε.Μ.Π.
7. www.windpower.org Δικτυακός Τόπος Δανέζικου Οργανισμού Αιολικής Ενέργειας.
8. www.vestas.com/en/wind-power-solutions.aspx Δικτυακός Τόπος.
9. www.windenergysolutions.nl Δικτυακός Τόπος.
10. <http://el.wikipedia.org/wiki/>