

ΤΕΙ ΠΕΙΡΑΙΑ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΙΑΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

44

**Ηλεκτρονικοί Μετατροπείς Ισχύος DC-DC για
Μεταφορά Ηλεκτρικής Ενέργειας Αιολικών Πάρκων**



ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ
ΤΕΙ ΠΕΙΡΑΙΑ

Σπουδαστής: Μοσχοβίτης Φίλιππος

Επιβλέπων: Βυλλιώτης Ηρακλής

Ηλεκτρονικοί Μετατροπείς Ισχύος DC-DC για Μεταφορά Ηλεκτρικής Ενέργειας Αιολικών Πάρκων

Πίνακας Περιεχομένων

ΠΡΟΛΟΓΟΣ	4
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 - ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ - ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ.....	5
1.1 ΓΕΝΙΚΑ.....	5
1.2 Η ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΣΑΝ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΗ ΠΗΓΗ	5
1.3 ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ.....	7
1.4 ΤΥΠΟΙ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ	10
1.5 ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΠΟ ΤΟΝ ΑΕΡΑ	17
1.6 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΣΤΑΘΕΡΩΝ ΣΤΡΟΦΩΝ – ΣΤΑΘΕΡΗΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ.....	20
1.7 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ ΣΤΡΟΦΩΝ – ΣΤΑΘΕΡΗΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ...	22
1.8 ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ	25
1.8.1 Ηλεκτρική μηχανή Ε.Ρ.....	25
1.8.2 Ασύγχρονοι τριφασικοί κινητήρες.....	26
1.8.2.1 Το στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο	26
1.8.2.2 Είδη επαγωγικών μηχανών	31
1.8.2.3 Ηλεκτρομαγνητική δομή της επαγωγικής μηχανής.....	32
1.8.2.4 Η ολίσθηση	34
1.8.2.5 Ισοδύναμο κύκλωμα μηχανής επαγωγής.....	35
1.8.2.6 Απώλειες των επαγωγικών μηχανών	36
1.8.2.7 Ισχύς και ροπή επαγωγικών μηχανών.....	38
1.8.3 Σύγχρονες γεννήτριες	39
1.8.3.1 Γενικά περί σύγχρονων μηχανών	40
1.8.3.2 Μετασχηματισμός του Park.....	42
1.8.3.3 Ανά μονάδα σύστημα	45
1.8.4 ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΕΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΤΟΥ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΜΕΡΟΥΣ	46
1.8.4.2 Χρήση της σύγχρονης γεννήτριας	48
1.8.4.3 Η εξαφασική σύγχρονη γεννήτρια.....	51
1.8.5 ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΜΕ ΓΕΔΤ (DFIG)	53
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 - ΑΙΟΛΙΚΑ ΠΑΡΚΑ	56
2.1 ΓΕΝΙΚΑ.....	56
2.2 ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΟΠΟΘΕΣΙΑΣ ΑΙΟΛΙΚΟΥ ΠΑΡΚΟΥ	59
2.3 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ - ΣΥΝΤΗΡΗΣΗ ΑΙΟΛΙΚΩΝ ΠΑΡΚΩΝ	59
2.3.1 Λειτουργία Αιολικού Πάρκου	59
2.3.2 Συντήρηση Αιολικού Πάρκου	60
2.4 ΤΡΟΠΟΙ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΑΙΟΛΙΚΩΝ ΠΑΡΚΩΝ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ ΔΙΑΝΟΜΗΣ	60
2.5 ΑΙΟΛΙΚΟ ΠΑΡΚΟ ΕΝΑΛΛΑΣΣΟΜΕΝΗΣ – ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΤΑΣΗΣ.....	62
2.6 ΑΙΟΛΙΚΟ ΠΑΡΚΟ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΤΑΣΗΣ ΜΕ ΕΝΑ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑ ΑΝΥΨΩΣΗΣ (τοπολογία DC1).....	63
2.7 ΑΙΟΛΙΚΟ ΠΑΡΚΟ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΤΑΣΗΣ ΜΕ ΔΥΟ ΕΝ ΣΕΙΡΑ ΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΟΥΣ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΙΣ ΑΝΥΨΩΣΗΣ (τοπολογία DC2).....	64
2.8 ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΔΙΑΣΥΝΔΕΣΗΣ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ	66
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 - ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ ΙΣΧΥΟΣ.....	71
3.1 ΓΕΝΙΚΑ.....	71
3.2 ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΟΙ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΙΣ ΙΣΧΥΟΣ.....	73
3.3 ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΙΣ DC – DC.....	76

3.3.1 DC - DC μετατροπέας υποβιβασμού τάσης.....	77
3.3.2 DC - DC μετατροπέας ανύψωσης τάσης	80
3.3.3 DC - DC ΜΕΙΚΤΟΣ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑΣ.....	84
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4	86
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	86
4.1 ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑΣ ΑΝΥΨΩΣΗΣ.....	86
4.2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΠΟΛΟΓΙΑΣ ΑΝΥΨΩΣΗΣ ΣΤΗ ΜΟΝΙΜΟ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΑΓΩΓΗΣ	88
4.2.1 Υπολογισμός της Τάσης Εξόδου \bar{U}_{out} ,	88
4.2.2 Κυμάτωση του Ρεύματος του Πηνίου I_L	89
4.2.3 Απλοποιημένες σχέσεις	89
4.2.4 Σχέση Ρεύματος Εισόδου – Εξόδου.....	90
4.2.5 Καταπόνηση Ημιαγωγικών Στοιχείων.....	91
4.3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΠΟΛΟΓΙΑΣ ΑΝΥΨΩΣΗΣ ΣΤΗ ΜΟΝΙΜΟ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΔΙΑΚΟΠΤΟΜΕΝΗΣ ΑΓΩΓΗΣ.....	93
4.3.1 Κυμάτωση dI_L του ρεύματος του πηνίου	95
4.3.2 Τάση εξόδου \bar{U}_{out}	96
4.4 ΕΠΙΛΟΓΗ ΠΗΝΙΟΥ L	97
4.5 ΕΠΙΛΟΓΗ ΠΥΚΝΩΤΗ ΕΞΟΔΟΥ C_{out}	98
4.6 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ - ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΟΥ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑ ΑΝΥΨΩΣΗΣ	99
4.7 ΠΑΡΑΛΛΗΛΑ ΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΟΙ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΙΣ ΑΝΥΨΩΣΗΣ.....	99
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5	101
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	101
5.1 ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑΣ ΠΛΗΡΟΥΣ ΓΕΦΥΡΑΣ.....	101
5.2 ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΗ ΗΜΙΑΓΩΓΙΚΩΝ ΔΙΑΚΟΠΤΩΝ	104
5.3 ΣΧΕΣΗ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΕΙΣΟΔΟΥ – ΕΞΟΔΟΥ	105
5.4 ΕΠΙΛΟΓΗ ΦΙΛΤΡΟΥ ΕΞΟΔΟΥ L_oC_o	105
5.4.1. Επιλογή Πηνίου Εξόδου L_o	105
5.4.2 Επιλογή Πυκνωτή Εξόδου C_o	106
5.5 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ– ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΟΥ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑ ΠΛΗΡΟΥΣ ΓΕΦΥΡΑΣ.....	107
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 - ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΩΝ ΑΝΥΨΩΣΗΣ – ΠΛΗΡΟΥΣ ΓΕΦΥΡΑΣ.....	109
6.1 ΜΕΓΙΣΤΕΣ ΕΠΙΤΡΕΠΟΜΕΝΕΣ ΤΙΜΕΣ ΤΩΝ ΗΜΙΑΓΩΓΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ	109
6.1.1 Σύγκριση Συντελεστή F για τους Ελεγχόμενους Ημιαγωγικούς.....	109
6.1.2 Σύγκριση Συντελεστή F για τις Διόδους των Τοπολογιών Ανύψωσης – Πλήρους Γέφυρας.....	112
6.2 ΜΕΓΕΘΟΣ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟΥ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ.....	113
6.3 ΜΕΓΕΘΟΣ ΠΥΚΝΩΤΩΝ ΕΞΟΔΟΥ.....	116
6.4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	117
ΕΠΙΛΟΓΟΣ.....	119
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	120

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και κυρίως η αιολική, τα τελευταία χρόνια έχουν γίνει επίκεντρο ενδιαφέροντος τόσο για λόγους οικονομικούς όσο και για οικολογικούς. Η χρησιμοποίηση των ηλεκτρονικών ισχύος στην διασύνδεση των αιολικών πάρκων με το δίκτυο έχει επιλύσει πολλά προβλήματα, ενώ ταυτόχρονα έχει δημιουργήσει νέα (αρμονικές). Η παρούσα πτυχιακή εργασία εξετάζει τους μετατροπείς που χρησιμοποιούνται για την μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας από τα αιολικά πάρκα προς το δίκτυο και τις σύγχρονες τεχνικές που χρησιμοποιούνται για την διασύνδεση αιολικών πάρκων με το δίκτυο διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας και περιλαμβάνουν την εκτεταμένη χρήση ηλεκτρονικών ισχύος. Εξετάζονται δύο από τους κυριότερους μετατροπείς ισχύος DC/DC που χρησιμοποιούνται σήμερα και είναι ο μετατροπέας ανύψωσης και ο μετατροπέας πλήρους γέφυρας. Οι δύο αυτοί μετατροπείς εξετάζονται αναλυτικά και συγκρίνονται μεταξύ τους ως προς τα χαρακτηριστικά τους και την καταπόνηση των ημιαγωγικών τους στοιχείων και αναφέρονται τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα που παρουσιάζουν.

Αναλυτικότερα, στο 1^ο κεφάλαιο γίνεται μια γενικότερη αναφορά στην αιολική ενέργεια και τις ανεμογεννήτριες, αρχή λειτουργίας τους και τύποι. Αναφέρονται επίσης κάποια πράγματα που αφορούν τις σύγχρονες και ασύγχρονες μηχανές και γεννήτριες και θα μας βοηθήσουν να καταλάβουμε καλύτερα τον τρόπο λειτουργίας των ανεμογεννητριών. Ακόμα παρουσιάζονται οι εναλλακτικές διατάξεις του ηλεκτρικού μέρους των ανεμογεννητριών.

Το 2^ο κεφάλαιο ασχολείται με τα αιολικά πάρκα και κυρίως με τους διαφορετικούς τρόπους διασύνδεσής τους με το δίκτυο διανομής καθώς και τα προβλήματα που προκύπτουν.

Στο 3^ο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι ηλεκτρονικοί μετατροπείς ισχύος και ειδικότερα οι DC – DC μετατροπείς ανύψωσης, πλήρους γέφυρας ενώ γίνεται και μια μικρή αναφορά στους μεικτούς μετατροπείς.

Το 4^ο κεφάλαιο ασχολείται με το μετατροπέα ανύψωσης και επιχειρείται η πλήρης ανάλυση του τρόπου λειτουργίας του και των χαρακτηριστικών του.

Στο 5^ο κεφάλαιο αναλύεται ο μετατροπέας πλήρους γέφυρας και περιγράφεται ο τρόπος λειτουργίας του και οι σχέσεις που τον διέπουν.

Στο 6^ο κεφάλαιο επιχειρείται η όσο το δυνατόν γίνεται ολοκληρωμένη σύγκριση των δύο μετατροπέων και καταγράφονται τα τελικά συμπεράσματα από τη σύγκριση αυτή.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 - ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ - ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ

1.1 ΓΕΝΙΚΑ

Όλοι γνωρίζουμε ότι τα τελευταία χρόνια υπάρχει μία ραγδαία αύξηση στη ζήτηση «καθαρής» ενέργειας, ώστε να μειωθεί κατά το δυνατόν η επιβάρυνση στο περιβάλλον. Η στροφή προς τις ήπιες μορφές ενέργειας έδωσε ώθηση στην εξέλιξη των τεχνολογιών των συστημάτων μετατροπής της αιολικής ενέργειας σε ηλεκτρική και στην εμπορευματοποίηση των ανεμογεννητριών.

Η χρησιμοποίηση του ανέμου ως ανανεώσιμη πηγή ενέργειας βασίζεται στη μετατροπή της ενέργειας που υπάρχει στις κινούμενες μάζες του αέρα σε μηχανική. Η μηχανική αυτή ενέργεια αποδίδεται μέσω ενός περιστρεφόμενου άξονα σε μια ηλεκτρογεννήτρια μέσω της οποίας μετατρέπεται τελικά σε ηλεκτρισμό.

Υπολογίζεται ότι στο 25% της επιφάνειας της γης επικρατούν άνεμοι μέσης ετήσιας ταχύτητας πάνω από 5,1m/s σε ύψος 10m. Υποθέτοντας ότι, ανά τετραγωνικό χιλιόμετρο επιφάνειας μπορούν να εγκατασταθούν κατά μέσο όρο ανεμογεννήτριες ισχύος περίπου 1-3 MW καθώς και το γεγονός ότι ανά MW εγκατεστημένης ισχύος παράγονται περίπου 2.000 MWh/έτος, σε συνθήκες μέτριου αιολικού δυναμικού συνεπάγεται ότι η συνολική ετήσια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ανέρχεται σε 20.000 TWh, για εγκατεστημένη ισχύ 10.000 GW. Συγκριτικά, αξίζει να αναφερθεί ότι η συνολική κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας κατά το έτος 1987 ήταν περίπου 9.000 TWh παγκοσμίως. Συνεπώς, είναι φανερό ότι το παγκόσμιο αιολικό δυναμικό είναι πολύ σημαντικό και μπορεί να αποτελέσει μια πολύ σημαντική πηγή παραγωγής «καθαρής» ενέργειας, δηλαδή ενέργειας που δεν ρυπαίνει το περιβάλλον.

Επιπλέον κίνητρο για παραγωγή «καθαρής» ενέργειας είναι το οικονομικό, καθώς έτσι μπορεί να περιοριστεί η εξάρτηση από τις πετρελαιοπαραγωγές χώρες, όπως επίσης και το γεγονός ότι έτσι δίνεται η δυνατότητα ανάπτυξης της βιομηχανίας κάθε χώρας, η οποία θα έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία νέων θέσεων εργασίας. Επίσης δεν πρέπει να ξεχνάμε ότι τα πετρελαϊκά αποθέματα δεν είναι ανεξάντλητα, κάτι που καθιστά αυτόματα αναγκαία τη στροφή προς τις «καθαρές» μορφές ενέργειας, όπως η αιολική, η ηλιακή, η γεωθερμική.

1.2 Η ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΣΑΝ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΗ ΠΗΓΗ

Η ατμόσφαιρα της γης είναι μια γιγάντια μηχανή που τροφοδοτείται από τον ήλιο. Το ποσό της θερμότητας που απορροφά η ατμόσφαιρα μεταβάλλεται με το χώρο και τον χρόνο. Η δημιουργία των ανέμων είναι αποτέλεσμα της ανομοιόμορφης

θέρμανσης της ατμόσφαιρας και οφείλεται στη μετακίνηση τεράστιων αερίων μαζών ώστε να γίνει ανακατανομή της θερμότητας που απορροφάται.

Τα κύρια χαρακτηριστικά του ανέμου είναι η διεύθυνση και η ένταση, η μέτρηση των οποίων γίνεται με ανεμόμετρα και ανεμογράφους και δίνει τους ανεμολογικούς πίνακες και χάρτες, που πρέπει να προέρχονται από μια σειρά συνεχών μετρήσεων.

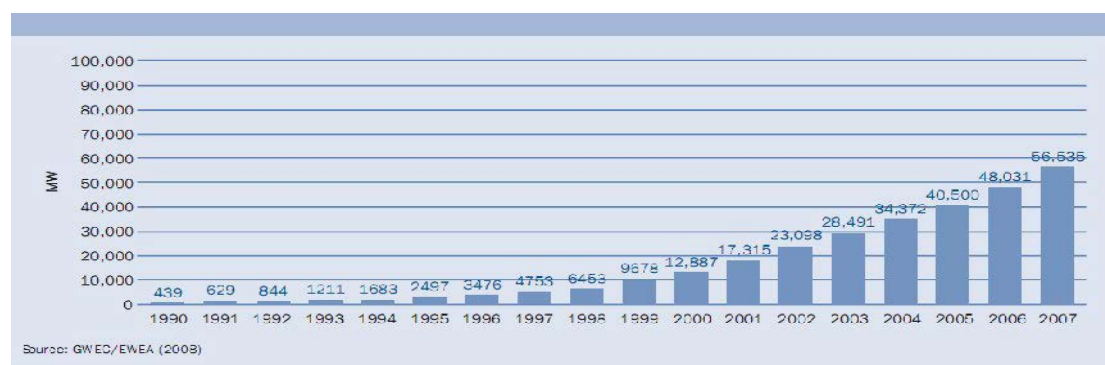
Τα κυριότερα πλεονεκτήματα της αιολικής ενέργειας είναι τα εξής:

- δε ρυπαίνει το περιβάλλον,
- είναι δωρεάν,
- είναι ανεξάντλητη,
- είναι εγχώρια πηγή ενέργειας,
- είναι ανανεώσιμη,
- δίνει απ' ευθείας μηχανική ενέργεια, η οποία με απλά μέσα μετατρέπεται σε οποιαδήποτε άλλη μορφή ενέργειας,
- πολλά από τα στοιχεία της ανεμογεννήτριας μπορούν να ανακυκλωθούν
- προσφέρεται για περιφερειακή ανάπτυξη και νέες θέσεις εργασίας.

Αυτό δε σημαίνει ότι δεν υπάρχουν και μειονεκτήματα όπως:

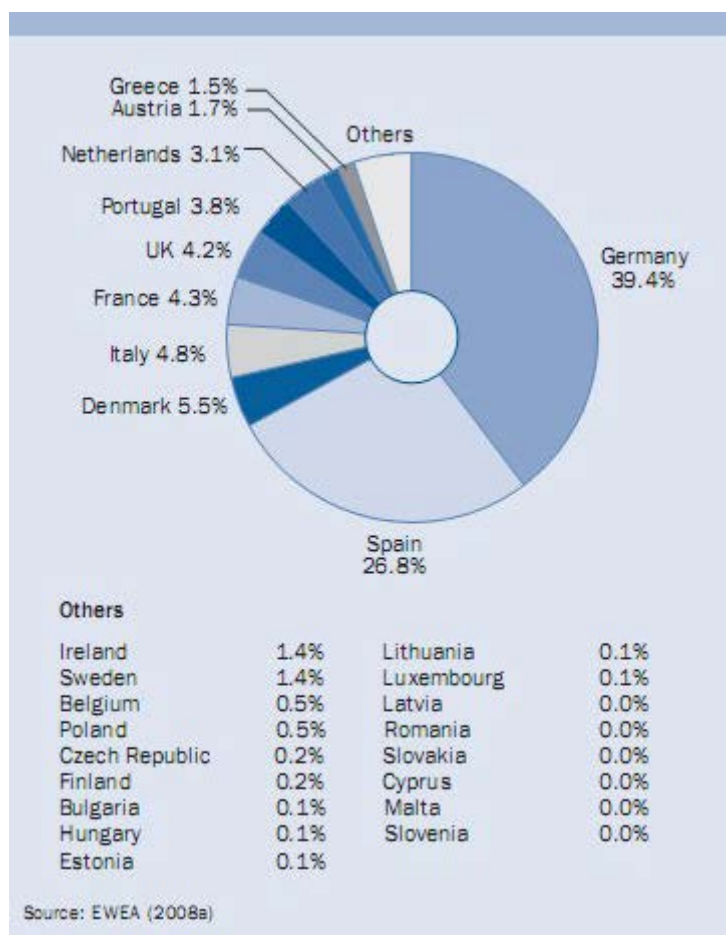
- δεν έχει αξιοπιστία διαθεσιμότητας, αφού εξαρτάται από το στατιστικό χαρακτήρα του ανέμου και άρα ο έλεγχος του ρυθμού παροχής ενέργειας είναι αδύνατος,
- είναι ήπια μορφή ενέργειας. Αυτό σημαίνει ότι η ποσότητα ενέργειας ανά μονάδα χρόνου που μπορεί να δεσμευτεί σε κάθε τετραγωνικό μέτρο επιφάνειας που προσβάλλεται από τον άνεμο είναι μικρή.

Όταν συγκρίνεται με άλλες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπως τα φωτοβολταϊκά, η αιολική ενέργεια είναι μια σχετικά φθηνή πηγή ενέργειας. Για το λόγο αυτό, η προώθηση από πολλές κυβερνήσεις των ανανεώσιμων μορφών ενέργειας οδήγησε σε μεγάλη αύξηση την παραγωγή από αιολική ενέργεια. Παραδείγματα τέτοιων χωρών είναι η Γερμανία, η Δανία και η Ισπανία. Το σχήμα 1.2.1 δείχνει την αύξηση της εγκατεστημένης ισχύος από αιολική ενέργεια κατά τη διάρκεια των τελευταίων δεκαεπτά χρόνων, στην Ευρώπη. Όπως εύκολα διακρίνουμε, η εγκατεστημένη ισχύς παρουσιάζει μια σχεδόν εκθετική αύξηση. Ο βασικός λόγος για την παρατηρούμενη αυτή ανοδική πορεία της αιολικής ενέργειας είναι όπως προαναφέραμε το σχετικά χαμηλό κόστος παραγωγής σε σύγκριση με τις άλλες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.



Σχ. 1.2.1 Εγκατεστημένη ισχύς από αιολική ενέργεια στην Ευρώπη

Ενδιαφέρον παρουσιάζει και το σχήμα 1.2.2 που παρουσιάζει το μερίδιο της συνολικής εγκατεστημένης ισχύος από αιολική ενέργεια στην Ευρώπη που κατείχε το κάθε ευρωπαϊκό κράτος στο τέλος του έτους 2007. Αξίζει να σημειωθεί ότι η Ελλάδα κατείχε μόλις το 1.5% της συνολικής εγκατεστημένης ισχύος στην Ευρώπη.



Σχ. 1.2.2 Ποσοστό που κατείχε η κάθε ευρωπαϊκή χώρα της συνολικής εγκατεστημένης ισχύος από αιολική ενέργεια στην Ευρώπη κατά το έτος 2007

1.3 ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ

Η ποικιλία των μηχανών που επινοήθηκαν και προτάθηκαν για να δεσμεύσουν την αιολική ενέργεια είναι σημαντική και περιλαμβάνει πρωτότυπες επινοήσεις. Διάφορα είδη μηχανών οριζοντίου και κατακόρυφου άξονα έχουν προταθεί κατά καιρούς. Οι σύγχρονοι "ανεμόμυλοι" ονομάζονται ανεμογεννήτριες και διακρίνονται σε δύο κύριες κατηγορίες: τις μηχανές οριζοντίου και κατακόρυφου άξονα. Η πλειοψηφία των σύγχρονων μηχανών μετατρέπουν την αιολική ενέργεια σε

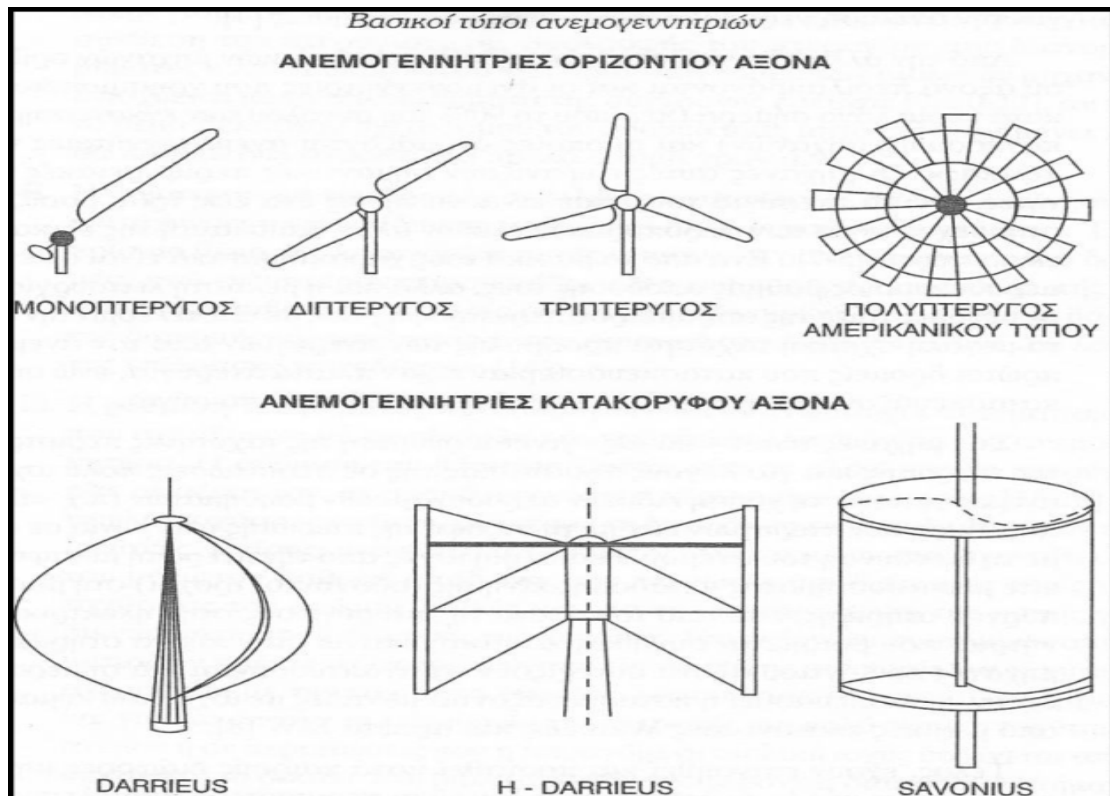
ηλεκτρική. Τα μεγέθη τους ποικίλλουν από μηχανές που παράγουν μερικές δεκάδες η εκατοντάδες Watt και φτάνουν τα μερικά MW.

Προορίζονται κυρίως για εφαρμογές παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, άντλησης και θερμότητας. Όσον αφορά την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, η μηχανική ενέργεια του δρομέα χρησιμοποιείται για την κίνηση ηλεκτρογεννητριών.

Χαρακτηριστική είναι η διαφορά που υπάρχει στην αρχή λειτουργίας των παραδοσιακών ανεμόμυλων, με τις σύγχρονες ανεμογεννήτριες. Οι παραδοσιακοί ανεμόμυλοι κινούνται είτε με τη βοήθεια της αντίστασης των πτερυγίων τους στον άνεμο, είτε με εκμετάλλευση της άνωσης που ασκείται πάνω τους. Στις σύγχρονες ανεμογεννήτριες η κίνηση οφείλεται στην άνωση, η οποία αξίζει να σημειωθεί ότι μπορεί να γίνει υπέρ-δεκαπλάσια της αντίστασης. Στις μέρες μας ο πιο γνωστός τύπος ανέμου κινητήρα που έχει εφαρμοσθεί ευρύτατα στην πράξη είναι ο δρομέας οριζόντιου άξονα.

Ο άνεμος περιστρέφει τα πτερύγια μιας ανεμογεννήτριας, τα οποία είναι συνδεδεμένα με ένα περιστρεφόμενο άξονα. Ο άξονας περνάει μέσα σε ένα κιβώτιο μετάδοσης της κίνησης όπου αυξάνεται η ταχύτητα περιστροφής. Το κιβώτιο συνδέεται με έναν άξονα μεγάλης ταχύτητας περιστροφής ο οποίος κινεί μια γεννήτρια παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος.

Οι ανεμογεννήτριες μπορούν να λειτουργούν αυτόνομα τροφοδοτώντας απευθείας την κατανάλωση, ή να συνδέονται και να διοχετεύουν την ηλεκτρική ενέργεια σε υπάρχον δίκτυο. Στην πρώτη περίπτωση (σε μικρές εγκαταστάσεις) επειδή ο άνεμος δεν είναι συνεχώς διαθέσιμος, είναι δυνατόν να γίνεται χρήση μιας ή περισσοτέρων γεννητριών ντίζελ οι οποίες λειτουργούν παράλληλα με τις ανεμογεννήτριες. Η δεύτερη περίπτωση αφορά τη μαζική εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας όπου συστοιχία πολλών ανεμογεννητριών (αιολικό πάρκο) εγκαθίσταται και λειτουργεί σε μια συγκεκριμένη θέση, διοχετεύοντας το σύνολο της παραγωγής.



Οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα έχουν συνήθως τον άξονά τους παράλληλο προς την κατεύθυνση του ανέμου (head on), ενώ σε μερικές περιπτώσεις έχουμε ανεμογεννήτριες των οποίων ο άξονας είναι παράλληλος προς την επιφάνεια της γης και κάθετος προς την κατεύθυνση του ανέμου.

Οι ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα εμφανίζουν το σημαντικό πλεονέκτημα της αυτόματης προσαρμογής στη διεύθυνση του ανέμου, δεδομένου ότι ο άξονάς τους είναι κάθετος σε αυτή, καθώς και στην επιφάνεια της γης. Επίσης, έχουν επινοηθεί και άλλοι τύποι ανεμοκινητήρων, όπως για παράδειγμα οι ανεμογεννήτριες τύπου μεταφοράς, αποτελούμενες από οχήματα που κινούνται σε μια καθορισμένη διαδρομή και είναι συνδεδεμένα με ηλεκτρογεννήτριες.

Οι υφιστάμενες αιολικές μηχανές κατατάσσονται επίσης σε ταχύστροφες και σε αργόστροφες, ανάλογα με την ταχύτητα περιστροφής τους ή ανάλογα με την τιμή της παραμέτρου περιστροφής "λ". Η ταχύτητα περιστροφής μιας ανεμογεννήτριας εξαρτάται εκτός από τις αεροδυναμικές παραμέτρους και από το μέγεθος των πτερυγίων της μηχανής, δεδομένου ότι πρέπει να ληφθούν υπ' όψιν λόγοι στατικής αντοχής, φαινόμενα δυναμικών καταπονήσεων και ταλαντώσεων, φυγόκεντρες δυνάμεις κ.λ.π..

Μια παράμετρος που χρησιμοποιείται για το χαρακτηρισμό και την ταξινόμηση των ανεμοκινητήρων είναι η παράμετρος στιβαρότητας «σ» της κατασκευής η οποία δίνει το λόγο του εμβαδού όλων των πτερυγίων προς το εμβαδόν της επιφάνειας που διαγράφουν τα πτερύγια κατά την περιστροφή τους. Για μηχανές οριζόντιου άξονα ορίζεται σαν:

$$\sigma = \frac{z \cdot c \cdot R}{\pi \cdot R^2}$$

όπου:

z ο αριθμός των πτερυγίων της πτερωτής

R η ακτίνα της πτερωτής και

c η χορδή (πλάτος) των πτερυγίων της πτερωτής.

Κατά κανόνα οι ανεμογεννήτριες μεγάλης στιβαρότητας είναι μηχανές αργόστροφες, αποδίδοντας τη μέγιστη ισχύ τους σε χαμηλές τιμές της παραμέτρου περιστροφής "λ", έχουν σχετικά μικρό βαθμό απόδοσης, ενώ είναι ανθεκτικές με ελάχιστες ανάγκες συντήρησης. Αντίθετα, οι ανεμογεννήτριες μικρής στιβαρότητας είναι μηχανές πολύστροφες, αποδίδοντας τη μέγιστη ισχύ τους σε μεγάλες τιμές της παραμέτρου "λ", διαθέτουν σχετικά μεγάλο βαθμό απόδοσης, είναι πλέον ευπαθείς σε σχέση με τις μηχανές μεγάλης στιβαρότητας και χαρακτηρίζονται από σχετικά μικρές δυνάμεις στα πτερύγια και περιορισμένη ροπή στον άξονά τους.

1.4 ΤΥΠΟΙ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ

Οι επικρατέστεροι τύποι ανεμογεννητριών ταξινομούνται κυρίως σύμφωνα με τον προσανατολισμό των αξόνων τους σε σχέση με τη ροή του ανέμου. Ως εκ τούτου, οι πλέον διαδεδομένοι τύποι ανεμοκινητήρων είναι οι ανεμογεννήτριες "οριζόντιου" και οι ανεμογεννήτριες "κατακόρυφου" άξονα.

Ανεμογεννήτρια οριζοντίου άξονα

Ο ευρύτερα διαδεδομένος τύπος ανεμοκινητήρα είναι τύπου δρομέα οριζόντιου άξονα.



Ανεμογεννήτρια Οριζοντίου Άξονα

Οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα έχουν τον άξονά τους παράλληλο προς την επιφάνεια της γης και συνήθως παράλληλο και με τη διεύθυνση του ανέμου, αν και κάποτε η διεύθυνσή τους είναι κάθετη προς την διεύθυνση του ανέμου. Επιπλέον, οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα μπορούν να έχουν ένα, δυο, τρία ή ακόμα και πενήντα πτερύγια ενώ η πτερωτή τους μπορεί να τοποθετηθεί είτε σε προσήνεμη διάταξη, δηλαδή μπροστά από τον πύργο στήριξης, είτε σε υπήνεμη διάταξη, δηλαδή πίσω από τον πύργο στήριξης σε σχέση με τη διεύθυνση του ανέμου.

Ανάμεσα στις ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα συγκαταλέγονται οι κλασικοί παραδοσιακοί ανεμόμυλοι, καθώς και οι αργές μηχανές πολλών πτερυγίων "αμερικανικού τύπου", οι οποίες λόγω των περιορισμένων διαστάσεών τους και της χαμηλής περιφερειακής τους ταχύτητας έχουν εγκαταλειφθεί σήμερα.

Στην κατηγορία των αιολικών μηχανών οριζόντιου άξονα περιλαμβάνονται και οι ανεμογεννήτριες που χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο σήμερα και οι οποίες ονομάζονται ανεμογεννήτριες τύπου "έλικας". Οι μηχανές αυτές εμφανίζουν σημαντικές περιφερειακές ταχύτητες, ενώ τα πτερύγιά τους, που είναι συνήθως ένα έως τρία, βασίζονται στην τεχνολογία των αεροπορικών ελίκων αλλά και σ' αυτή της έλικας των ελικοπτέρων.

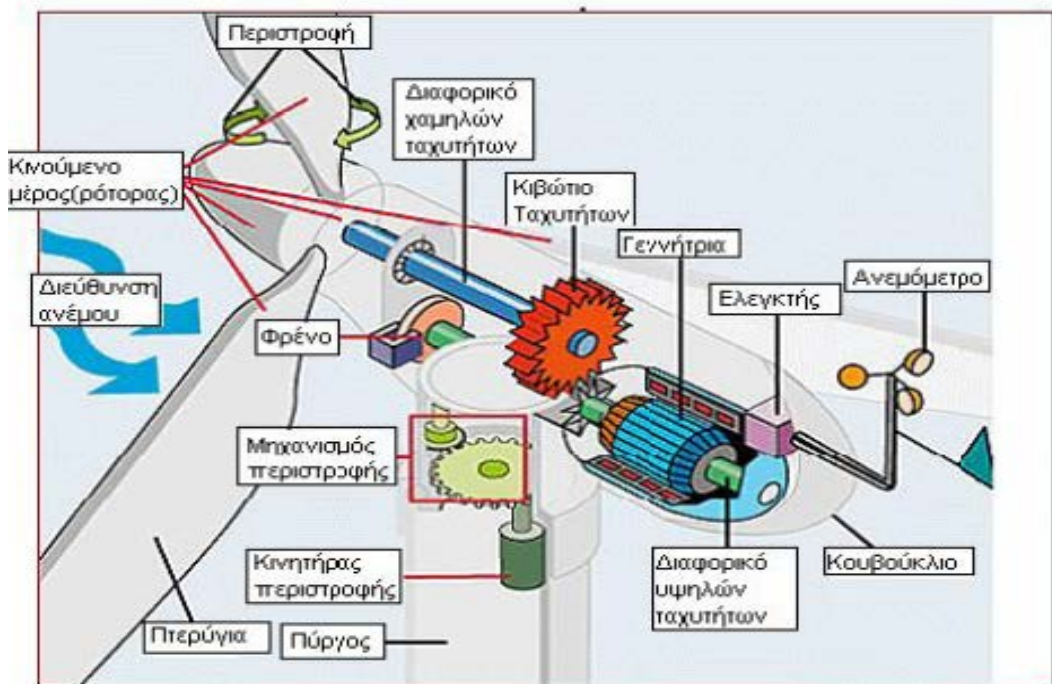
Τέλος, έχουν επινοηθεί και προταθεί κατά καιρούς διάφορες μηχανές τύπου "crosswind", οι οποίες όμως δεν είναι περισσότερο αποτελεσματικές σε σύγκριση με τους άλλους τύπους. Αντίθετα, οι συγκεκριμένοι ανεμοκινητήρες παρουσιάζουν μειονεκτήματα, όσον αφορά τη συλλογή της παραγόμενης ενέργειας, καθώς και τη ρύθμιση της διεύθυνσης θέσης της πτερωτής σε περιπτώσεις έντονων μεταβολών της διεύθυνσης του ανέμου.

Τα προβλήματα που αντιμετωπίζει η βιομηχανία κατασκευής ανεμογεννητριών οριζόντιου άξονα και κυρίως οι μηχανές τύπου έλικα είναι:

- ο βέλτιστος σχεδιασμός του δρομέα, με σκοπό τη βελτίωση των

χαρακτηριστικών λειτουργίας της μηχανής,

- η συμπεριφορά του δρομέα σε ειδικές καταστάσεις, όπως η εκκίνηση, η επιτάχυνση, η επιβράδυνση, καθώς και άλλα δυναμικά φαινόμενα,
- η ρύθμιση του βήματος των περυγίων και οι αντίστοιχοι αυτοματισμοί, που σχετίζονται με την έναρξη και την παύση λειτουργίας του ανεμοκινητήρα,
- προσανεμισμός του άξονα του δρομέα προς την κατεύθυνση του ανέμου, ο οποίος επιτυγχάνεται είτε με τη χρήση καθοδηγητικού περυγίου, είτε με κατάλληλα αισθητήρια που καταγράφουν τη στιγμιαία διεύθυνση του ανέμου και προσανατολίζουν ηλεκτρονικά με τη χρήση σερβομηχανισμού την περωτή στη διεύθυνση του ανέμου,
- προβλήματα αντοχής των υλικών που αφορούν την κατασκευή και την έδραση των περυγίων,
- καθορισμός του ύψους του δρομέα επάνω από το έδαφος,
- κατασκευή του πύργου στήριξης και θεμελίωσή του. Ο πύργος στήριξης πρέπει να συνδυάζει το κατάλληλο αεροδυναμικό σχήμα με τη σταθερότητα και την αντοχή σε χρονικά μεταβαλλόμενες καταπονήσεις,
- μελέτη του πεδίου ροής πίσω από την περωτή και η επίδραση του ομόρου στο περιβάλλον καθώς και σε πιθανές επόμενες ανεμογεννήτριες.



Μηχανικά Μέρη Ανεμογεννήτριας

Τα μέρη που αποτελούν μια ανεμογεννήτρια είναι τα εξής:

α) ο δρομέας (στρεφόμενο μέρος της μηχανής), το άκρο του οποίου είναι τύπου έλικας και μπορεί να φέρει μία (μονόπτερος) δύο ή τρεις πτέρυγες. Η περιστροφή των περυγίων ενός δρομέα οριζοντίου άξονα οφείλεται στη συνδυασμένη δύναμη της άνωσης και της πίεσης που ασκείται, όταν οι μάζες του αέρα προσπίπτουν στα πτερύγια. Για τη μέγιστη αξιοποίηση αυτής της

δύναμης απαιτείται κατάλληλος σχεδιασμός, στη μορφή των πτερυγίων, στη στρέψη τους ως προς τον άξονα στήριξης τους (κλίση) και στην ελικοειδή διάταξη τους (βήμα). Τα πτερύγια συνήθως κατασκευάζονται από ενισχυμένο πολυεστέρα.

β) το σύστημα μετάδοσης της κίνησης, αποτελούμενο από τον κύριο άξονα, τα έδρανα του και το κιβώτιο πολλαπλασιασμού στροφών, το οποίο προσαρμόζει την ταχύτητα περιστροφής του δρομέα στη σύγχρονη ταχύτητα περιστροφής (ταχύτητα με συγκεκριμένο αριθμό στροφών) της ανεμογεννήτριας. Με το σύστημα μετάδοσης δίνεται η κίνηση από το δρομέα (χαμηλές στροφές), στην ηλεκτρογεννήτρια (υψηλές στροφές),

γ) η ηλεκτρογεννήτρια που είναι ένας σύγχρονος εναλλακτήρας, δηλαδή μηχανή εναλλασσόμενου ρεύματος με συνήθως 4 ή 6 πόλους. Συνδέεται με την έξοδο του κιβωτίου πολλαπλασιασμού των στροφών (κιβώτιο ταχυτήτων) μέσω ελαστικού ή υδραυλικού συνδέσμου. Η ηλεκτρογεννήτρια μπορεί να είναι και μηχανή συνεχούς ρεύματος (DC). Μικρής ισχύος ανεμογεννήτριες παράγουν συνεχή τάση τροφοδοσίας και χρησιμοποιούνται για ηλεκτροδότηση σκαφών και μικρών κατοικιών. Σε μεγάλες ανεμογεννήτριες, που η παραγόμενη από αυτές τάση πρόκειται να παραλληλιστεί με το δίκτυο, η ηλεκτρογεννήτρια είναι μηχανή εναλλασσόμενου ρεύματος (AC),

δ) το δισκόφρενο, το οποίο τοποθετείται στον κύριο άξονα και αποτελεί το σύστημα πέδησης της ανεμογεννήτριας,

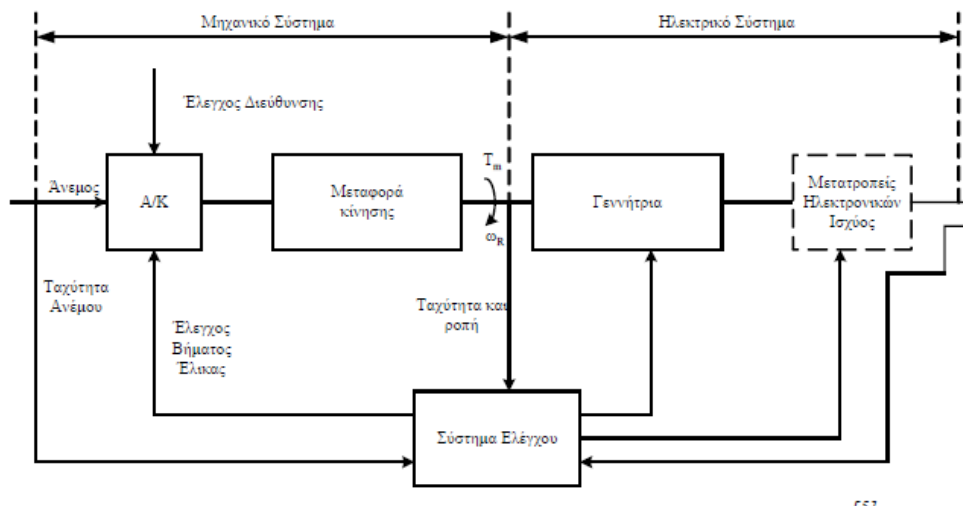
ε) το σύστημα προσανατολισμού (μικρές ανεμογεννήτριες), το οποίο αναγκάζει συνεχώς τον άξονα περιστροφής του δρομέα να βρίσκεται παράλληλα με τη διεύθυνση του ανέμου. Το σύστημα προσανατολισμού βρίσκεται τοποθετημένο μεταξύ της ατράκτου και του πύργου στερέωσης,

στ) ο πύργος μέσα στον οποίο στερεώνεται η ηλεκτρομηχανολογική εγκατάσταση. Ο πύργος είναι συνήθως μεταλλικός, σωληνωτός ή δικτυωτός και σπανίως από οπλισμένο σκυρόδεμα (μπετόν), ενώ το ύψος του είναι τέτοιο, ώστε ο αέρας που προσπίπτει στα πτερύγια της ανεμογεννήτριας να έχει ομαλή ροή και όχι τυρβώδη μειώνοντας το θόρυβο στο ελάχιστο,

ζ) ο ηλεκτρικός πίνακας και ο πίνακας ελέγχου που είναι τοποθετημένοι στη βάση του πύργου. Ο πίνακας ελέγχου ρυθμίζει όλες τις λειτουργίες της ανεμογεννήτριας.

Μεγάλης σημασίας είναι η γείωση που πρέπει να έχει η μεταλλική κατασκευή της ανεμογεννήτριας.

Όλα τα κύρια τμήματα που αποτελούν μια ανεμογεννήτρια παρουσιάζονται στο παρακάτω δομικό διάγραμμα :



Δομικό διάγραμμα κύριων τμημάτων ανεμογεννήτριας

Ανεμογεννήτριες Κατακόρυφου άξονα

Αυτός ο τύπος φέρει πτερύγια που στηρίζονται και στρέφονται σε κατακόρυφο σταθερό άξονα. Τα πλεονεκτήματα των ανεμογεννητριών κατακόρυφου άξονα είναι τα εξής:

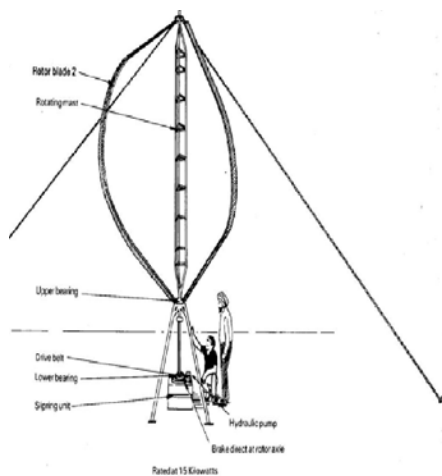
- η κατακόρυφη συμμετρία συνεπάγεται απουσία ανάγκης προσανατολισμού του δρομέα προς τον άνεμο,
- το μηχανικό έργο μεταφέρεται μέσω του κατακόρυφου άξονα στο έδαφος όπου είναι τοποθετημένο το σύστημα μετατροπής σε άλλη μορφή ενέργειας,
- απλή κατασκευή του πλαισίου στήριξης και γενικότερα απλούστερη κατασκευή, άρα μικρότερο κόστος,
- δεν απαιτούν ιδιαίτερη συντήρηση και όταν αυτό χρειαστεί γίνεται εύκολα αφού όλα τα υποσυστήματα (κιβώτιο ταχυτήτων, σύστημα πέδησης, γεννήτρια) βρίσκονται στο έδαφος οπότε υπάρχει άμεση εποπτεία και είναι εύκολη η διάγνωση πιθανών βλαβών,
- μεγάλη στιβαρότητα κατασκευής, άρα μεγαλύτερη ανθεκτικότητα π.χ. σε σεισμούς και σφοδρές ταχύτητες ανέμων.



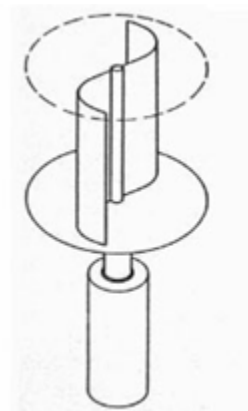
Ανεμογεννήτρια Κατακόρυφου Άξονα

Αντίθετα, τα μειονεκτήματα μιας ανεμογεννήτριας κάθετου άξονα είναι κυρίως τα εξής: το πρώτο και σημαντικότερο μειονέκτημα είναι ότι οι ανεμογεννήτριες κάθετου άξονα έχουν πολύ χαμηλή απόδοση. Αυτό ισχύει σε μεγάλο βαθμό για τον τύπο "savonius" όπου δεν ξεπερνούν το 15%, αλλά και στους άλλους τύπους σε μικρότερο βαθμό (μια καλή μικρή ανεμογεννήτρια οριζόντιου άξονα έχει μέση απόδοση 30%-40%), από το προηγούμενο προκύπτει ότι για να έχει μια ανεμογεννήτρια κάθετου άξονα την ίδια περίπου παραγωγή με μια οριζόντιου άξονα, θα πρέπει η κάθετου άξονα να έχει μέχρι και τριπλάσια επιφάνεια επαφής με τον αέρα. Αυτό συνεπάγεται μεγάλο όγκο και βάρος της κατασκευής, λόγω χαμηλότερων στροφών περιστροφής ανά λεπτό, χρειάζονται πιο ισχυρούς ανέμους για να ξεκινήσουν την φόρτιση των συσσωρευτών (με δεδομένο το ίδιο μοτέρ σε οριζόντιου άξονα ανεμογεννήτρια).

Οι πλέον γνωστοί τύποι ανεμοκινητήρων κατακόρυφου άξονα είναι οι μηχανές τύπου «Darrieus» και οι μηχανές τύπου «Savonius».



α) τύπος Darrieus



β) τύπος Savonius

Συνοπτικά, οι ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα περιστρέφονται γύρω από έναν άξονα κάθετο τόσο στη διεύθυνση του ανέμου όσο και στο έδαφος. Οι αιολικές μηχανές του τύπου αυτού έχουν καλή αεροδυναμική απόδοση, ανεξαρτησία ως προς τη διεύθυνση του ανέμου, χαμηλό κόστος κατασκευής και σχετικά απλά συστήματα ελέγχου.

Το σύστημα μετάδοσης της κίνησης δε παρουσιάζει ιδιαίτερες διαφορές σε σύγκριση με το αντίστοιχο σύστημα των μηχανών οριζόντιου άξονα, εκτός βέβαια από το γεγονός ότι τα εξαρτήματα είναι τοποθετημένα κατακορύφως. Ο δρομέας στηρίζεται σε κατάλληλο έδρανο στη βάση του, το οποίο ακόμα και σε σταθερή ταχύτητα ανέμου καταπονείται από εναλλασσόμενα φορτία.

Οι ανεμογεννήτριες τύπου «Darrieus» έχουν ιδιαίτερα υψηλές ταχύτητες εκκίνησης, λόγω χαμηλής αρχικής ροπής και για μεγάλα συστήματα χρησιμοποιείται βοηθητικός κινητήρας για την εκκίνηση. Επιπλέον, οι μηχανές του τύπου αυτού παρέχουν τελικά χαμηλότερο μέσο ετήσιο συντελεστή ισχύος. Συνοπτικά, είναι αποδεκτό ότι οι ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα τύπου «Darrieus» θεωρούνται συγκρίσιμες σε οικονομικοτεχνική ελκυστικότητα με τις πλέον σύγχρονες ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα.

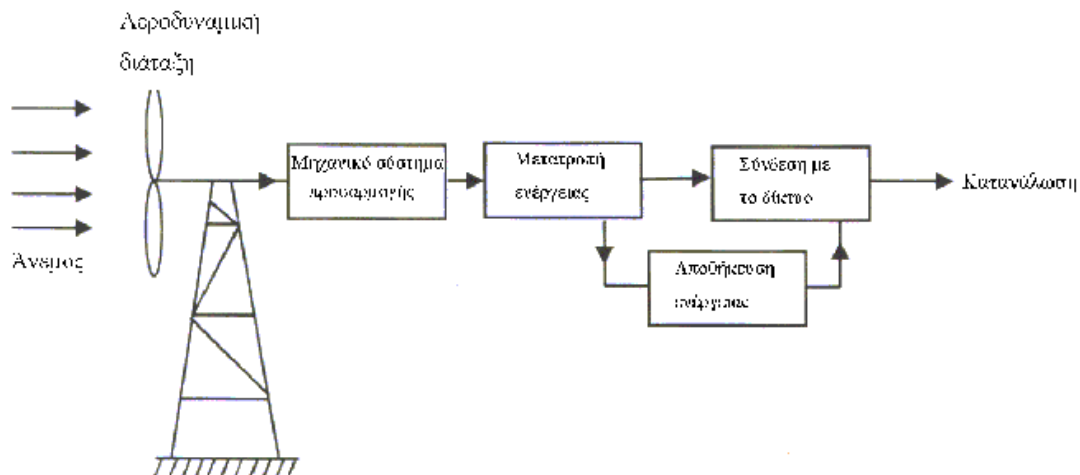
Αντίστοιχα, οι ανεμογεννήτριες τύπου «Savonius» παρουσιάζουν χαμηλό συντελεστή ισχύος, μικρή ακραία περιφερειακή ταχύτητα, περιορισμένο μέγεθος, αλλά και εξαιρετική απλότητα και οικονομικότητα κατασκευής. Η απλότητα κατασκευής σε συνδυασμό με το γεγονός ότι δεν απαιτείται σύστημα προσανατολισμού ως προς τη διεύθυνση του ανέμου, αποτελούν σημαντικά κίνητρα για τη μελέτη και βελτιστοποίηση των κατασκευαστικών χαρακτηριστικών παρόμοιων μηχανών.

Και οι δύο προαναφερόμενοι τύποι, εκτός από τον πύργο, το δρομέα, τα πτερύγια και τη γεννήτρια διαθέτουν και τις ακόλουθες μονάδες:

- ρυθμιστή τάσης, με τον οποίο επιτυγχάνεται η σταθεροποίηση σε συγκεκριμένα όρια της παραγόμενης τάσης,
- συσσωρευτές (μπαταρίες) για την αποθήκευση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας στην περίπτωση που οι γεννήτριες υποστηρίζουν αυτόνομα τα φορτία και δεν είναι συνδεδεμένες με το δίκτυο,
- μετατροπέα DC-AC, για ανεμογεννήτρια που παράγει συνεχή τάση. Είναι ηλεκτρονική διάταξη, που μετατρέπει τη συνεχή τάση που παράγει η ανεμογεννήτρια σε εναλλασσόμενη. Η εναλλασσόμενη τάση κατόπιν οδηγείται σε μετασχηματιστή ανύψωσης τάσης, για να αποκτήσει εκείνη την τιμή, που θα της επιτρέψει να συνδεθεί με το δίκτυο της ΔΕΗ. Τέλος η παραγόμενη από την ανεμογεννήτρια ηλεκτρική ενέργεια μεταφέρεται με καλώδια (γραμμή μεταφοράς),
- μετατροπέα AC-DC, για ανεμογεννήτρια που παράγουν εναλλασσόμενη τάση και η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια πρόκειται να αποταμιευθεί σε συσσωρευτές.

1.5 ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΠΟ ΤΟΝ ΑΕΡΑ

Μια συνήθης διάταξη παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από τον αέρα φαίνεται στο παρακάτω σχήμα :



Διάταξη παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από τον αέρα

Η κινητική ενέργεια των αερίων μαζών μετατρέπεται σε μηχανικό έργο με την βοήθεια μιας αεροδυναμικής διάταξης, του ανεμοκινητήρα (Α/Κ). Μεταξύ του ανεμοκινητήρα και της γεννήτριας, η οποία μετατρέπει το μηχανικό έργο σε ηλεκτρική ενέργεια, παρεμβάλλεται ένα μηχανικό σύστημα προσαρμογής. Στη συνέχεια, η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται στην έξοδο της γεννήτριας, τροφοδοτείται στο δίκτυο, μέσω της χρησιμοποιούμενης συσκευής συνδέσεώς της με αυτό. Οι μεγάλες διακυμάνσεις της ταχύτητας του ανέμου με το χρόνο, οδηγούν σε ασυμφωνία μεταξύ ζήτησης και παραγωγής ενέργειας. Λύση στο πρόβλημα αυτό μπορεί να δοθεί με την χρήση συσκευών αποθήκευσης ενέργειας. Η αποθηκευμένη ενέργεια καλύπτει το ενεργειακό έλλειμμα, όταν η ισχύς της ανεμογεννήτριας πέφτει κάτω από ένα συγκεκριμένο επίπεδο

Ο άνεμος, από μετεωρολογικής άποψης, είναι αέριες μάζες σε κίνηση. Ο αέρας έχει μάζα m η οποία όταν αποκτήσει ταχύτητα u_w , ο άνεμος που προκύπτει έχει κινητική ενέργεια:

$$E_{wind} = 0.5 \cdot m \cdot u_w^2 \quad (1)$$

Αν ρ η πυκνότητα του αέρα που μεταβάλλεται με το ύψος και τις ατμοσφαιρικές συνθήκες, u_w η ταχύτητα του ανέμου και A η επιφάνεια που διαπερνά κάθετα ο άνεμος, τότε:

$$m = \rho \cdot A \cdot u_w \quad (2)$$

θα είναι η μάζα αέρα που περνά στη μονάδα του χρόνου από τη συγκεκριμένη επιφάνεια. Συνεπώς, σύμφωνα με τη σχέση (1) η κινητική ενέργεια που περνά από

την επιφάνεια στη μονάδα του χρόνου, δηλαδή η ισχύς θα είναι:

$$P_{wind} = 0.5 \cdot \rho \cdot A \cdot u_w^3 = 0.5 \cdot \rho \cdot u_w^3 \cdot \pi \cdot R^2 \quad (3)$$

όπου R η ακτίνα των πτερυγίων.

Αυτή είναι η ολική ισχύς που διαθέτει ο άνεμος όταν διαπερνά τα πτερύγια ενός ανεμοκινητήρα (A/K). Η μηχανική ισχύς που απομαστεύεται από τον ανεμοκινητήρα (P_{wm}) είναι μόνο ένα κλάσμα αυτής της ισχύος, διότι αφενός μεν ο αέρας πρέπει να απομακρύνεται από τον ανεμοκινητήρα με κάποια ταχύτητα, αφετέρου δε η κίνηση των πτερυγίων του A/K προκαλεί εκτροπή μέρους του αέρα το οποίο τα παρακάμπτει χωρίς να τα διαπεράσει. Τα μεγέθη P_{wind} και P_{wm} συνδέονται μεταξύ τους μέσω ενός συντελεστή C_p που ονομάζεται αεροδυναμικός συντελεστής ισχύος και αποτελεί χαρακτηριστικό μέγεθος για κάθε A/K:

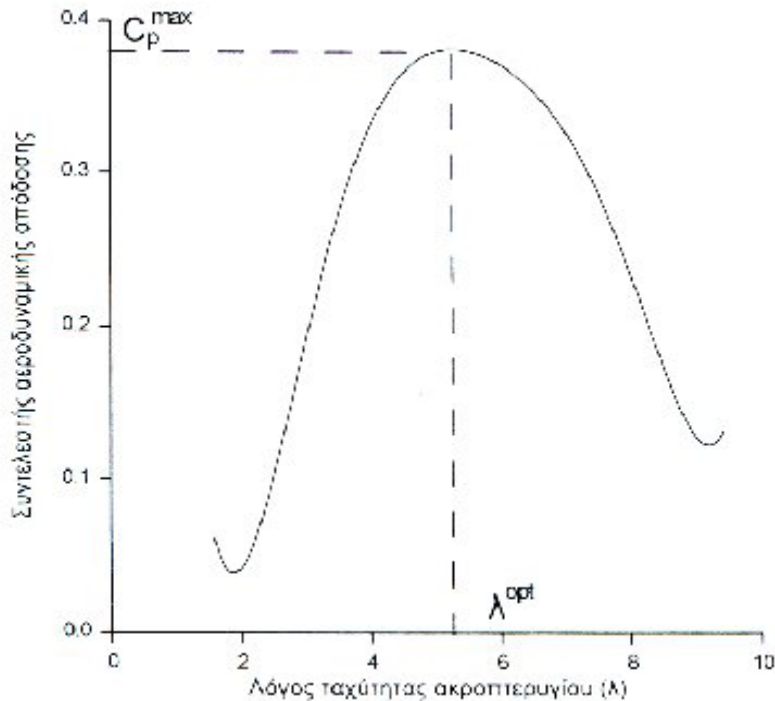
$$P_{wm} = C_p \cdot P_{wind} = 0.5 \cdot \rho \cdot C_p \cdot u_w^3 \cdot \pi \cdot R^2 \quad (4)$$

Ο συντελεστής αεροδυναμικής ισχύος C_p προκύπτει βάσει μετρήσεων και υπολογισμών και εκφράζει την αεροδυναμική απόδοση του ανεμοκινητήρα. Η μέγιστη τιμή που μπορεί να λάβει είναι $C_{p,max}=16/27=59\%$ και καλείται όριο του Betz. Το όριο αυτό είναι κατά κάποιο τρόπο ο μέγιστος βαθμός απόδοσης ενός συστήματος με ιδανική έλικα. Ο συντελεστής C_p εξαρτάται από τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά του A/K και στην απλούστερη περίπτωση είναι μία συνάρτηση του λόγου ακροπτερυγίου " λ " και της κλίσης " β " των πτερυγίων: $C_p(\lambda, \beta)$. Ο λόγος ακροπτερυγίου (tip-speed ratio) " λ " ορίζεται από τη σχέση:

$$\lambda = \frac{\text{ταχύτητα ακροπτερυγίου}}{\text{ταχύτητα ανέμου}} = \frac{\Omega_{wm} \cdot R}{u_w} \quad (5)$$

όπου, Ω_{wm} η γωνιακή ταχύτητα του ανεμοκινητήρα.

Στο σχήμα 1.5.1 δίνεται μια τυπική καμπύλη του αεροδυναμικού συντελεστή ισχύος $C_p(\lambda)$ θεωρώντας την κλίση των πτερυγίων σταθερή. Όπως φαίνεται από το σχήμα μόνο για μία τιμή του λόγου " λ " ο αεροδυναμικός συντελεστής απόδοσης αποκτά τη μέγιστη τιμή του, η οποία είναι βέβαια μικρότερη από το όριο του Betz.



Σχ. 1.5.1 Συντελεστής αεροδυναμικής απόδοσης συναρτήσει του λόγου "λ"

Μεγαλύτερο ενδιαφέρον αλλά και δυσκολία παρουσιάζει η μελέτη και σχεδίαση της ένταξης ανεμογεννητριών σε αυτόνομα δίκτυα απομακρυσμένων περιοχών, που τροφοδοτούνται από γεννήτριες οδηγούμενες από κινητήρες ντίζελ, μικρούς αεροστρόβιλους ή αεροστροβίλους. Η τροφοδοσία σημαντικών ποσών ισχύος από ανεμογεννήτριες σε τέτοια δίκτυα έχει μεγάλη οικονομική σημασία, αλλά ταυτόχρονα μπορεί να προκαλέσει σημαντικές διακυμάνσεις της τάσης και της συχνότητας. Με δεδομένη την μικρή αδράνεια αλλά και την μικρή αντοχή σε βραχυκύκλωμα που παρουσιάζουν αυτά τα συστήματα, ο μόνος τρόπος περιορισμού των διακυμάνσεων τάσεως και συχνότητας είναι μέσω των συστημάτων ελέγχου του δικτύου ή με προσθήκη διατάξεων αποθήκευσης ενέργειας .

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

Θα περιγραφούν στη συνέχεια οι δύο βασικές μέθοδοι λειτουργίας των συστημάτων μετατροπής της αιολικής ενέργειας σε ηλεκτρική, οι οποίες είναι :

- **Μέθοδος σταθερών στροφών – σταθερής συχνότητας (ΣΣΣΣ)**

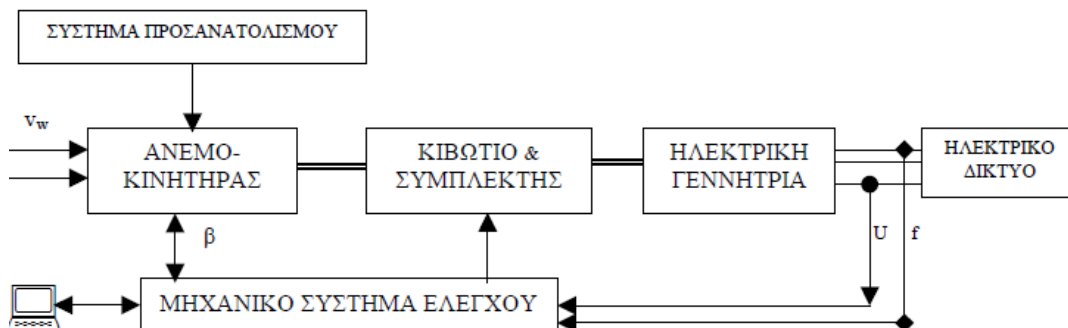
- **Μέθοδος μεταβλητών στροφών – σταθερής συχνότητας (ΜΣΣΣ)**

Οι πρώτες ανεμογεννήτριες που εγκαταστάθηκαν λειτουργούσαν σύμφωνα με τη μέθοδο σταθερών στροφών – σταθερής συχνότητας. Αργότερα διαπιστώθηκε ότι το σύστημα μεταβλητών στροφών – σταθερής συχνότητας προσφέρει περισσότερα πλεονεκτήματα και για το λόγο αυτό καθιερώθηκε. Στη συνέχεια θα αναλυθούν οι δύο μέθοδοι λειτουργίας και θα γίνουν σαφή τα πλεονεκτήματα της λειτουργίας των μεταβλητών στροφών συγκριτικά με τις σταθερές στροφές.

1.6 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΣΤΑΘΕΡΩΝ ΣΤΡΟΦΩΝ – ΣΤΑΘΕΡΗΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ

Στη λειτουργία σταθερών στροφών ο δρομέας του ανεμοκινητήριου συστήματος στρέφεται με σχεδόν σταθερή ταχύτητα, ανεξάρτητα από την ταχύτητα του ανέμου. Η σύνδεση της ανεμογεννήτριας με το δίκτυο γίνεται όπως και η σύνδεση γεννητριών που τροφοδοτούνται από συμβατικές πηγές ενέργειας, δηλαδή απευθείας, με τη χρήση ενός μετασχηματιστή προσαρμογής της τάσης εξόδου της Α/Γ στην τάση του δικτύου με το οποίο αυτή συνδέεται.

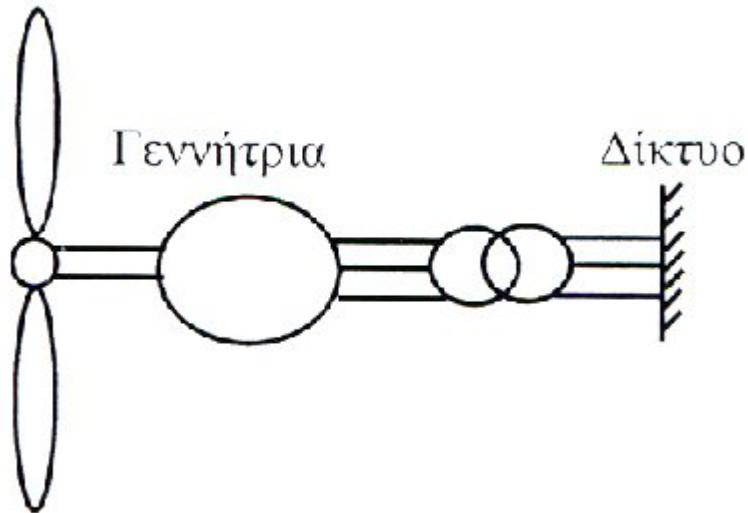
Μια βασική δομή συστήματος σταθερών στροφών – σταθερής συχνότητας φαίνεται στο σχήμα :



Σχ. 1.6.1 Βασική δομή συστήματος ΣΣΣΣ

Αυτός ο τρόπος σύνδεσης "επιβάλλει" στην ανεμογεννήτρια τη γωνιακή ταχύτητα περιστροφής της. Η γεννήτρια του αιολικού συστήματος μπορεί να είναι είτε σύγχρονη είτε ασύγχρονη. Στην περίπτωση σύγχρονης γεννήτριας οι στροφές είναι σταθερές και εξαρτώνται από τη συχνότητα του δικτύου, ενώ στην περίπτωση χρησιμοποίησης ασύγχρονης γεννήτριας οι στροφές είναι σχεδόν σταθερές, αφού εξαιτίας της ολίσθησης μεταβάλλονται σε ένα μικρό εύρος τιμών. Για να διατηρηθεί η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα του ανεμοκινητήρα μέσα σε ένα αρκετά μικρό εύρος τιμών, ανεξάρτητα από την ταχύτητα του ανέμου, χρησιμοποιούνται μηχανολογικές διατάξεις που ελέγχουν το βήμα της έλικας.

Ένα σχηματικό διάγραμμα της λειτουργίας αυτής φαίνεται στο σχήμα 1.6.2



Σχ. 1.6.2 Λειτουργία σταθερών στροφών – σταθερής συχνότητας

Τα συστήματα ΣΣΣΣ παρουσιάζουν προβλήματα που οφείλονται στην απευθείας σύνδεσή τους με το δίκτυο. Για παράδειγμα, όταν χρησιμοποιείται σύγχρονη γεννήτρια, η μανδάλωση της ταχύτητας σε μία συγκεκριμένη τιμή έχει ως αποτέλεσμα απότομες μεταβολές της ισχύος του ανέμου να μεταφέρονται απ' ευθείας στο δίκτυο. Επιπλέον, εάν η μεταβαλλόμενη αεροδυναμική ροπή περιέχει αρμονικές συνιστώσες, που βρίσκονται κοντά στις συχνότητες συντονισμού του μηχανικού συστήματος μετάδοσης της ισχύος, θα εμφανιστούν έντονες ταλαντώσεις σ' αυτό αλλά και στην ισχύ εξόδου της γεννήτριας.

Από την άλλη, η χρησιμοποίηση ασύγχρονης γεννήτριας η οποία επιτρέπει τη μεταβολή της γωνιακής ταχύτητας σε ένα περιορισμένο εύρος έχει σαν αποτέλεσμα την εξομάλυνση των διακυμάνσεων της ισχύος στην έξοδό της. Επίσης η ασύγχρονη γεννήτρια είναι περισσότερο αξιόπιστη, οικονομικότερη και κατασκευαστικά απλούστερη. Το μειονέκτημά της είναι ότι σε αντίθεση με την σύγχρονη γεννήτρια απορροφά άεργο ισχύ, πράγμα που σημαίνει ότι δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αποκλειστική τροφοδότηση δικτύων. Για την τροφοδοσία της ασύγχρονης γεννήτριας με άεργο ισχύ, συνδέονται στους ακροδέκτες των τυλιγμάτων της κατάλληλοι πυκνωτές.

Το μεγαλύτερο όμως μειονέκτημα της λειτουργίας ΣΣΣΣ είναι άλλο. Στη λειτουργία με σταθερές στροφές, έχοντας δηλαδή $\Omega_{wm} = c \cdot t$, ο λόγος ακροπτερυγίου "λ", όπως προκύπτει από τη σχέση (5), θα είναι αντιστρόφως ανάλογος της ταχύτητας του ανέμου. Αυτό σημαίνει πως μόνο για μία ταχύτητα ανέμου ο λόγος "λ" θα παίρνει τη βέλτιστη τιμή λ_{opt} για την οποία $C_p = C_{p,max}$. Η λειτουργία, λοιπόν, ΣΣΣΣ συνεπάγεται υποεκμετάλλευση του ανεμοκινητήρα για τις περισσότερες ταχύτητες ανέμου, γεγονός που οδηγεί σε δραστική μείωση του συντελεστή απόδοσης τέτοιων συστημάτων.

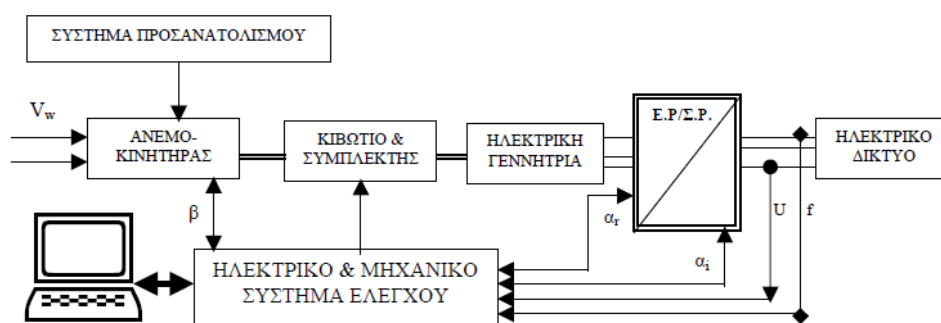
Συμπερασματικά, το σύστημα σταθερών στροφών – σταθερής συχνότητας παρουσιάζει το πλεονέκτημα της εξαιρετικής απλότητας, αξιοπιστίας και των μηδενικών αναγκών συντήρησης, γεγονός που συνέβαλε στην καθιέρωσή του σε μια

εποχή όπου η αξιοπιστία ήταν το βασικότερο από τα προς επίλυση προβλήματα των ανεμογεννητριών. Ταυτόχρονα, όμως, το σχήμα αυτό χαρακτηρίζεται από μια σειρά από καθοριστικά μειονεκτήματα: αυξημένη μεταβλητότητα της ροπής και της ισχύος εξόδου, αυξημένο ρεύμα εκκίνησης, ταλαντώσεις του μηχανικού συστήματος και λειτουργία του συστήματος σε υποβέλτιστο αεροδυναμικό συντελεστή ισχύος. Μια λύση που ακολουθούν ορισμένοι κατασκευαστές είναι να εξοπλίζουν τις ανεμογεννήτριες με δύο γεννήτριες: μία που λειτουργεί σε περιόδους στις οποίες έχουμε μικρές ταχύτητες ανέμων και μία όταν θα πνέουν ισχυροί άνεμοι. Άλλη λύση είναι οι γεννήτριες μεταβλητών πόλων: αυτές δουλεύουν ανάλογα με τον τρόπο σύνδεσης των τυλιγμάτων του στάτη και να λειτουργούν σε διαφορετικές ταχύτητες περιστροφής. Οι δύο τελευταίες λύσεις αν και θεωρούνται ανεμογεννήτριες σταθερής ταχύτητας συνήθως αποφεύγονται εξ' αιτίας του αυξημένου κόστους.

1.7 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ ΣΤΡΟΦΩΝ – ΣΤΑΘΕΡΗΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ

Λύση σε πολλά από τα παραπάνω προβλήματα μπορεί να δώσει η λειτουργία ΜΣΣΣ, όπου η ταχύτητα του δρομέα της ανεμογεννήτριας μεταβάλλεται κατά ελεγχόμενο τρόπο, ανάλογα με την ταχύτητα του ανέμου. Για το σκοπό αυτό και τη σύνδεση της ηλεκτρικής γεννήτριας στο δίκτυο σταθερής συχνότητας έχουν προταθεί παλαιότερα διάφορες μέθοδοι με χρήση υδραυλικών συστημάτων ή κιβωτίων ταχυτήτων μεταβαλλόμενου λόγου, αλλά ο πλέον κατάλληλος τρόπος, για λόγους απωλειών, αξιοπιστίας και αναγκών συντήρησης, είναι με τη χρήση ηλεκτρονικών ισχύος και ιδιαίτερα με το μετατροπέα συχνότητας. Το μεγάλο πλεονέκτημα της χρήσης των ηλεκτρονικών ισχύος είναι ότι δε μας απασχολεί η μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου, η οποία έχει ως αποτέλεσμα τη μεταβαλλόμενη ταχύτητα περιστροφής του δρομέα του ανεμοκινητήρα. Με τον τρόπο αυτό η ταχύτητα περιστροφής αποδεσμεύεται από τη σταθερή συχνότητα του δικτύου και είναι δυνατή η μεταβολή της εντός ευρέων ορίων.

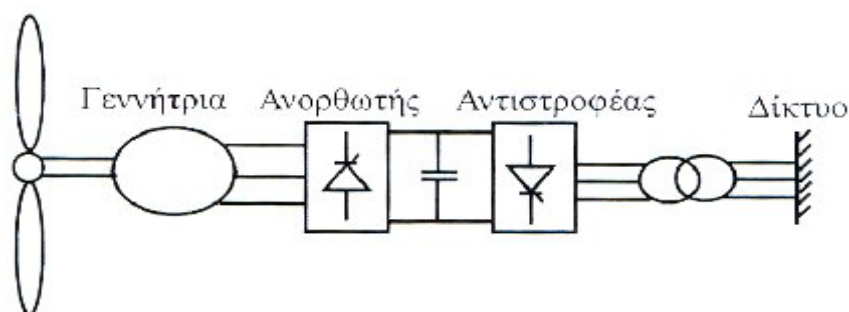
Μια βασική δομή συστήματος μεταβλητών στροφών – σταθερής συχνότητας φαίνεται στο σχήμα 1.7.1



Σχ. 1.7.1 Βασική δομή συστήματος ΜΣΣΣ

Όπως φαίνεται και στο σχήμα 1.7.2, στην έξοδο της γεννήτριας συνδέεται ένας τριφασικός ανορθωτής ελεγχόμενος ή μη, που μετατρέπει τα εναλλασσόμενα ηλεκτρικά μεγέθη της ανεμογεννήτριας σε συνεχή. Η σύνδεση στο δίκτυο γίνεται μέσω ενός αντιστροφέα, ο οποίος μετατρέπει τα συνεχή ηλεκτρικά μεγέθη σε εναλλασσόμενα, συχνότητας ίδιας με αυτήν του δικτύου. Οι μετατροπείς αυτοί μπορούν να αποτελούνται είτε από θυρίστορ, είτε από ημιαγωγικά στοιχεία ελεγχόμενης έναυσης και σβέσης, όπως θυρίστορ με σβέση από την πύλη (GTO) ή τρανζίστορ μονωμένης πύλης (IGBT). Αυτός ο τρόπος σύνδεσης αποσκοπεί κυρίως στην μεγιστοποίηση της ισχύος που απομαστεύεται από τον άνεμο, μεταβάλλοντας κατάλληλα την γωνιακή ταχύτητα της ανεμογεννήτριας, μέσω του ηλεκτρονικού ελέγχου της διασύνδεσης ΕΡ/ΣΡ/ΕΡ .

Στο σχήμα 1.7.2 δίνεται το σχηματικό διάγραμμα ενός τέτοιου συστήματος.



Σχ. 1.7.2 Λειτουργία μεταβλητών στροφών – σταθερής συχνότητας

ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ - ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ ΣΤΡΟΦΩΝ

Το βασικότερο ίσως πλεονέκτημα της λειτουργίας μεταβλητών στροφών είναι η εξομάλυνση της μεταβλητότητας των μηχανικών ροπών, η απόσβεση των συντονισμών του μηχανικού συστήματος μετάδοσης της κίνησης και ο περιορισμός των μέγιστων φορτίων (αιχμών της ροπής, π.χ. για ριπές του ανέμου). Άμεση συνέπεια αυτών είναι ο περιορισμός των καταπονήσεων και άρα η αύξηση της αναμενόμενης διάρκειας ζωής των μηχανικών συνιστωσών του συστήματος και η δυνατότητα μείωσης του μεγέθους τους, με θετική επίπτωση στο βάρος και το κόστος της κατασκευής.

Επιτρέποντας στις στροφές της ανεμογεννήτριας να μεταβάλλονται, διακυμάνσεις της ισχύος από την πλευρά του ανέμου δεν εμφανίζονται κατευθείαν στην γεννήτρια, αφού τα στρεφόμενα μέρη του συστήματος λειτουργούν τώρα ως σφόνδυλος, ο οποίος αποθηκεύει ή δίνει ενέργεια, σε μια αύξηση ή μείωση της ταχύτητας του ανέμου. Έτσι, ως τελικό αποτέλεσμα, εκτός από τη μεγαλύτερη

απορρόφηση ισχύος από τον άνεμο, έχουμε καλύτερη ποιότητα ισχύος που προσδίδεται στο δίκτυο.

Επίσης, ανάλογα με τον τύπο των χρησιμοποιούμενων μετατροπέων ισχύος, σε ορισμένες περιπτώσεις είναι δυνατός ο έλεγχος και της άεργου ισχύος εξόδου, με λειτουργία της ανεμογεννήτριας υπό μοναδιαίο συντελεστή ισχύος. Άλλα σημαντικά πλεονεκτήματα είναι τα χαμηλότερα επίπεδα θορύβου λόγω λειτουργίας σε μειωμένες στροφές. Η χρήση των μετατροπέων ισχύος παρέχει ακόμα τη δυνατότητα ηλεκτρικής πέδησης σχεδόν μέχρι μηδενικής ταχύτητας (ανάλογα με το είδος των μετατροπέων) μειώνοντας τη φθορά των μηχανικών συστημάτων πέδησης, ενώ επίσης ο έλεγχος των υπερφορτίσεων της μηχανής είναι πολύ πιο αποτελεσματικός, αφού ελέγχεται άμεσα το ρεύμα και η ροπή της γεννήτριας. Η λειτουργία της ανεμογεννήτριας σε μειωμένη ταχύτητα έχει ως αποτέλεσμα και τη μείωση των απωλειών ισχύος του συστήματος μετάδοσης της κίνησης, η οποία όμως αντισταθμίζεται από τις απώλειες των μετατροπέων ισχύος, σε ποσοστό που εξαρτάται από το είδος των χρησιμοποιούμενων μετατροπέων. Ένα ακόμα πλεονέκτημα είναι ότι η λειτουργία με μεταβλητό αριθμό στροφών παρέχει τη δυνατότητα μείωσης της ισχύος εξόδου σε ώρες χαμηλού φορτίου. Αυτή η δυνατότητα είναι σημαντική, γιατί έτσι αποφεύγεται η αποσύνδεση της ανεμογεννήτριας από το δίκτυο. Συμπερασματικά, η λειτουργία μεταβλητών στροφών με τη χρήση κατάλληλων μετατροπέων ισχύος περιορίζει τον μη ελεγχόμενο χαρακτήρα της ανεμογεννήτριας ως πηγής ισχύος και καθιστά ευκολότερη την ενσωμάτωσή της στα υπάρχοντα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας.

Πέραν των πολλών πλεονεκτημάτων των ανεμογεννητριών με λειτουργία μεταβλητών στροφών υπάρχουν και αρκετά μειονεκτήματα. Το πρώτο μειονέκτημα σχετίζεται με την αυξημένη πολυπλοκότητα του συστήματος λόγω του μετατροπέα συχνότητας. Ταυτόχρονα, ανάλογα με τη χρησιμοποιούμενη διαμόρφωση του ηλεκτρικού μέρους, ενδεχομένως να χρησιμοποιείται σύγχρονη γεννήτρια ή μηχανή επαγωγής δακτυλιοφόρου δρομέα, αντί για την απλή γεννήτρια κλωβού, με αποτέλεσμα την αύξηση του κόστους, του βάρους και των αναγκών συντήρησης.

Εξαιτίας της ύπαρξης ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος υπάρχουν διακοπτικά φαινόμενα, τα οποία οδηγούν σε αύξηση των ανώτερων αρμονικών που εγγέονται στο δίκτυο. Συνεπώς είναι απαραίτητη η εγκατάσταση ογκωδών φίλτρων για τον περιορισμό των ανώτερων αρμονικών. Με τη χρήση μετατροπέων ελεγχόμενων με τη μέθοδο PWM σε διακοπτικές συχνότητες της τάξης των KHz, τα προβλήματα των αρμονικών περιορίζονται σημαντικά, αφού μεταφέρονται σε υψηλότερες συχνότητες απαιτώντας έτσι μικρότερα φίλτρα .

Τα πολύ σημαντικά πλεονεκτήματα των συστημάτων μεταβλητών στροφών οδήγησαν στην καθιέρωσή τους. Για τους μετατροπέις με χρήση ηλεκτρονικών ισχύος μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφορες διατάξεις, ανάλογα με τον τύπο της χρησιμοποιούμενης γεννήτριας .

1.8 ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ

Σε προηγούμενη παράγραφο περιγράφηκε συνοπτικά ο τρόπος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από τον αέρα, η συνολική δηλαδή μηχανή η οποία παράγει ηλεκτρική ενέργεια μετατρέποντας την κινητική ενέργεια του ανέμου. Τα δύο βασικά μέρη είναι ο ανεμοκινητήρας (Α/Κ) και η ηλεκτρική γεννήτρια. Στη συνέχεια θα παρουσιαστεί το μαθηματικό υπόβαθρο που διέπει την λειτουργία των σύγχρονων και ασύγχρονων μηχανών που χρησιμοποιούνται σήμερα. Επίσης, ένα πολύ βασικό τμήμα της μηχανής είναι η ηλεκτρική διάταξη που χρησιμοποιείται προκειμένου να συνδεθεί η γεννήτρια με το δίκτυο, γιατί η απευθείας σύνδεση δημιουργεί πολλά προβλήματα. Σήμερα, με την ανάπτυξη των ηλεκτρονικών ισχύος όλοι οι μετατροπείς αιολικής ενέργειας που χρησιμοποιούνται για σύνδεση με το δίκτυο χρησιμοποιούν μετατροπείς με ηλεκτρονικά ισχύος και έτσι τα αρχικά προβλήματα των ανεμογεννητριών έχουν επιλυθεί στο μεγαλύτερο μέρος τους. Ωστόσο, η χρήση των ηλεκτρονικών ισχύος, εισάγει στο δίκτυο αρμονικές τάσεως και ρεύματος ή είναι πιθανή η απορρόφηση αέργου ισχύος από το δίκτυο. Εύκολα μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι εμφανίζονται νέα μειονεκτήματα όπως αύξηση του κόστους και μείωση της αξιοπιστίας. Για το λόγο αυτό περιγράφονται αναλυτικά όλες οι εναλλακτικές ηλεκτρικές διατάξεις σύνδεσης της γεννήτριας με το δίκτυο όπως χρησιμοποιούνται σήμερα από τις κατασκευάστριες εταιρείες με τα πλεονεκτήματά τους και τα μειονεκτήματα ώστε να υπάρξει μια ολοκληρωμένη εικόνα.

Γενικά για τις μηχανές επαγωγής

1.8.1 Ηλεκτρική μηχανή Ε.Ρ.

Ηλεκτρική μηχανή είναι η συσκευή που μετατρέπει μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική και αντίστροφα: όταν η συσκευή μετατρέπει μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική ονομάζεται **γεννήτρια** ενώ όταν μετατρέπει την ηλεκτρική σε μηχανική ονομάζεται **κινητήρας**. Οι ηλεκτρικές μηχανές εναλλασσόμενου ρεύματος είναι γεννήτριες που μετατρέπουν μηχανική ενέργεια σε εναλλασσόμενη ηλεκτρική ενέργεια και κινητήρες που μετατρέπουν εναλλασσόμενη ηλεκτρική ενέργεια σε μηχανική. Οι δυο βασικές κατηγορίες στις οποίες χωρίζονται οι μηχανές εναλλασσόμενου ρεύματος είναι:

- **Σύγχρονες Μηχανές**
- **Ασύγχρονες (επαγωγικές) Μηχανές.**

Το ρεύμα διέγερσης των σύγχρονων ηλεκτρικών μηχανών (γεννητριών και κινητήρων) παράγεται από ανεξάρτητες πηγές συνεχούς ρεύματος, ενώ το ρεύμα διέγερσης των επαγωγικών μηχανών παράγεται επαγωγικά (αρχή λειτουργίας του μετασχηματιστή) στα τυλίγματα διέγερσης τους. Στις ηλεκτρικές μηχανές εναλλασσόμενου ρεύματος το τύλιγμα του οπλισμού βρίσκεται σχεδόν πάντα τοποθετημένο στο στάτη ενώ το τύλιγμα διέγερσης τοποθετείται στο δρομέα. Το περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο του δρομέα μιας μηχανής εναλλασσόμενου ρεύματος επάγει τριφασικά εναλλασσόμενα ρεύματα στο τύλιγμα οπλισμού του στάτη. Κατ' αναλογία, αν το τύλιγμα οπλισμού του στάτη της μηχανής τροφοδοτηθεί

με ένα τριφασικό σύστημα ρευμάτων, στο εσωτερικό της αναπτύσσεται ένα περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο το οποίο επιδρώντας στο πεδίο του δρομέα της μηχανής παράγει ροπή στον άξονα της. Τα δυο αυτά φαινόμενα αποτελούν τις εκδοχές της αρχής λειτουργίας της γεννήτριας και της αρχής λειτουργίας του κινητήρα.

1.8.2 Ασύγχρονοι τριφασικοί κινητήρες

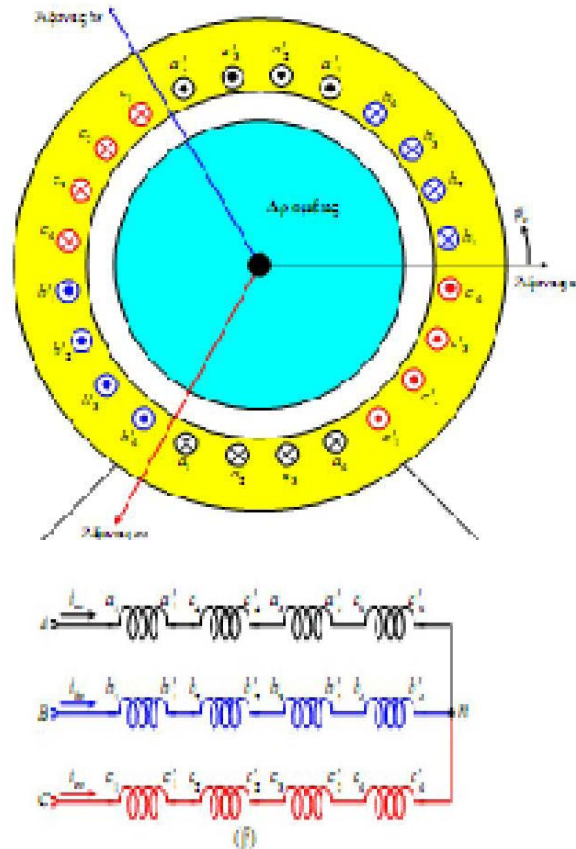
Στα σύγχρονα συστήματα ηλεκτρικής κίνησης οι ασύγχρονοι τριφασικοί κινητήρες επαγωγής είναι οι συνηθέστερα χρησιμοποιούμενοι καλύπτοντας ένα ευρύτατο φάσμα εφαρμογών με απαιτήσεις ισχύος που ξεκινούν από μερικά κλάσματα του Watt και φτάνουν μέχρι χιλιάδες ή εκατομμύρια Watts. Αυτό συμβαίνει διότι παρουσιάζουν σημαντικά πλεονεκτήματα όπως μικρό βάρος και όγκο, υψηλή αξιοπιστία και απόδοση και μεγάλη διάρκεια ζωής χωρίς ιδιαίτερες ανάγκες συντήρησης. Όλα τα ανωτέρω χαρακτηριστικά σε συνδυασμό με τους μοντέρνους αντιστροφείς και τις προηγμένες τεχνικές ελέγχου τους καθιστούν την ιδανική επιλογή για τα περισσότερα συστήματα ηλεκτρικής κίνησης. Το ενδιαφέρον για νέες εφαρμογές αυξάνεται συνεχώς και ήδη υπάρχει η τάση αντικατάστασης των κινητήρων συνεχούς ρεύματος σε βιομηχανικό επίπεδο από τους πιο οικονομικούς και αξιόπιστους κινητήρες επαγωγής. Συνεπώς το ερευνητικό ενδιαφέρον πάνω σε συστήματα ηλεκτρικής κίνησης με ασύγχρονους τριφασικούς κινητήρες επαγωγής είναι διαρκώς διογκούμενο καθώς τα αποτελέσματα έχουν μεγάλη πρακτική αξία.

Η αρχή λειτουργίας της μηχανής επαγωγής είναι η ακόλουθη : Το τύλιγμα του στάτη τροφοδοτείται με συμμετρικά τριφασικά εναλλασσόμενα ρεύματα. Το τύλιγμα του δρομέα αναπτύσσει ρεύματα εξ επαγωγής σε συχνότητα διαφορετική από τη συχνότητα του στάτη και συγκεκριμένα στη συχνότητα που αντιστοιχεί στη διαφορά ανάμεσα στη σύγχρονη ταχύτητα και την ταχύτητα περιστροφής του δρομέα (συχνότητα ολισθήσεως). Έτσι το στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο που παράγουν τα ρεύματα εξ επαγωγής περιστρέφεται ως προς τον δρομέα με την ταχύτητα ολισθήσεως και έχει τελικά την ίδια ταχύτητα περιστροφής με το πεδίο του στάτη. Τα δυο πεδία παραμένουν λοιπόν ακίνητα το ένα ως προς το άλλο και έχουμε τις συνθήκες για ανάπτυξη σταθερής ροπής. Τα τελευταία χρόνια οι μηχανές επαγωγής χρησιμοποιούνται με αυξανόμενο ρυθμό σαν γεννήτριες κυρίως σε αιολικά συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Επειδή η μηχανή επαγωγής δεν έχει ανεξάρτητη διέγερση, για να λειτουργήσει σαν γεννήτρια πρέπει να συνδεθεί με ένα τριφασικό σύστημα εναλλασσόμενης τάσεως, από το οποίο απορροφά άεργο ισχύ.

1.8.2.1 Το στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο

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. 1.8α, δημιουργεί

ένα στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο με δύο πόλους (διπολική μηχανή). Το τριφασικό τύλιγμα είναι σε σύνδεση αστέρα, Σχ. 1.8β.

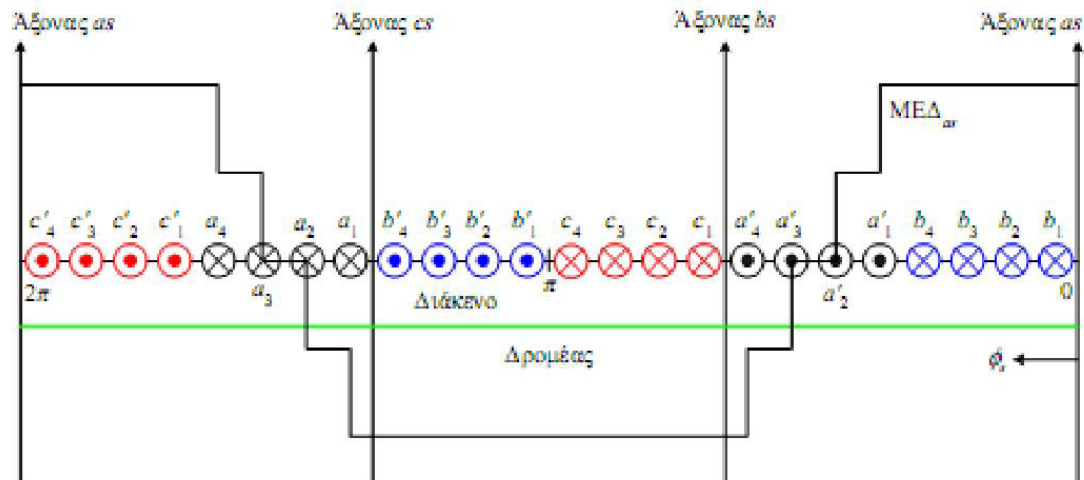


Σχ. 1.8.1 (α) Τύλιγμα στάτη, (β) Τριφασικό τύλιγμα σε αστέρα

Στην τριφασική μηχανή, η κάθε φάση του τυλίγματος είναι μετατοπισμένη κατά 120° , σε σχέση με τις άλλες δύο. Οι άξονες a_s , b_s , c_s , 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, όποτε 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.1.8α. Τα άκρα των τεσσάρων ομάδων κάθε τυλίγματος συνδέονται σε σειρά, με τον τρόπο που εικονίζεται στο Σχ.1.8β. Τα άκρα $a'4$, $b'4$ και $c'4$ από τα τρία τυλίγματα συνδέονται μεταξύ τους, σε σύνδεση αστέρα.

Στη στοιχειώδη μηχανή του Σχ. 1.8α, οι πλευρές των ομάδων κάθε τυλίγματος, είναι ομοιόμορφα κατανομημένες στην επιφάνεια του στάτη, σε γωνία 60° . Στις πραγματικές μηχανές, οι πλευρές των ομάδων κατανομούνται 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.1.8α 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 .



Σχ.1.8.2 Ανάπτυγμα στοιχειώδους μηχανής

Στο Σχ. 1.8.2 εικονίζεται το ανάπτυγμα της στοιχειώδους μηχανής. Ως αρχή των αξόνων θεωρείται ο άξονας as στα δεξιά του σχήματος. Ακόμη, στο Σχ. 1.8.2 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 με 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 φ_s. 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. 1.8.3α. Τότε, η ΜΕΔ έχει την ημιτονοειδή μορφή του Σχ. 1.8.3.(β) και ορίζεται από την παρακάτω σχέση για τη φάση as:

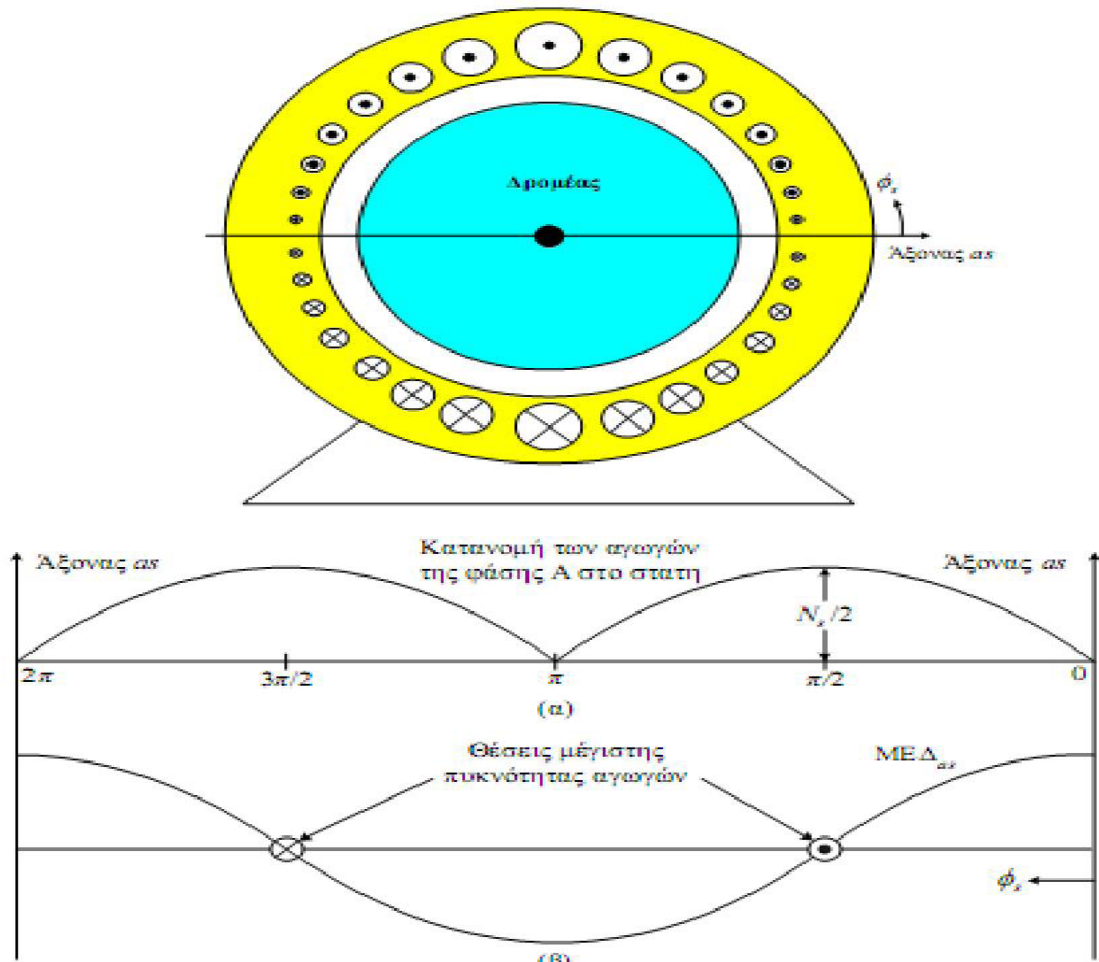
$$ΜΕΔ_{as} = \frac{N_s}{2} \cdot I_{as} \cdot \cos \varphi_s$$

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 ,

:

$$ME\Delta_{bs} = \frac{N_s}{2} \cdot I_{bs} \cdot \cos \varphi_s$$

$$ME\Delta_{cs} = \frac{N_s}{2} \cdot I_{cs} \cdot \cos \varphi_s$$



Σχ. 1.8.3 (α) Ημιτονοειδή κατανομή τυλιγμάτων στάτη, (β) ημιτονοειδής μορφή ΜΕΔ

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

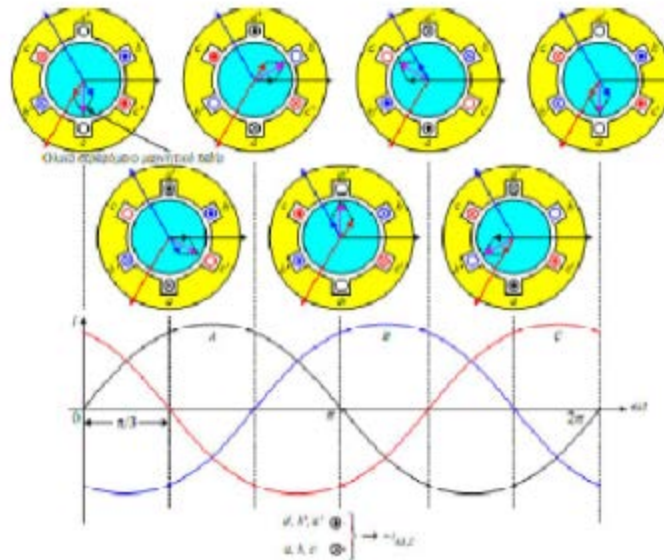
$$ME\Delta_s = \frac{N_s}{2} \cdot \left[\left(I_{as} \cdot \cos \varphi_s \right) + \left(I_{bs} \cdot \cos \left(\varphi_s - \frac{2\pi}{3} \right) \right) + I_{cs} \cdot \cos \left(\varphi_s - \frac{2\pi}{3} \right) \right]$$

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

$$I_{as} = I_{ms} \cdot \cos(\omega_e \cdot t)$$

$$I_{bs} = I_{ms} \cdot \cos\left(\omega_e \cdot t - \frac{2\pi}{3}\right)$$

$$I_{cs} = I_{ms} \cdot \cos\left(\omega_e \cdot t + \frac{2\pi}{3}\right)$$



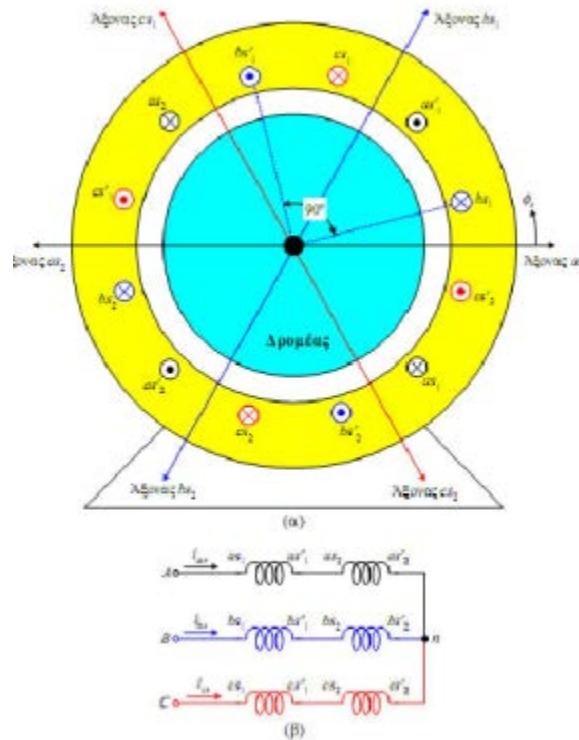
Σχ. 1.8.4 Στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο.

Όπου ω_e είναι η κυκλική συχνότητα των ρευμάτων. Αντικαθιστώντας ορίζεται η ολική ΜΕΔ στο διάκενο της μηχανής :

$$ME\Delta = \frac{N_s}{2} \cdot \frac{3}{2} \cdot I_{ms} \cdot \cos(\omega_e \cdot t - \varphi_s)$$

Η παραπάνω εξίσωση παριστά μια ΜΕΔ με ημιτονοειδή κατανομή, η οποία στρέφεται με γωνιακή ταχύτητα ω 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. 1.8.4. Η θετική φορά των ρευμάτων σε καθένα από τα τρία τυλίγματα του στάτη, αντιστοιχεί σ' εκείνη του Σχ. 1.8.1α. Κάθε τύλιγμα από τη ροή του αντίστοιχου ρεύματος παράγει ένα μαγνητικό πεδίο, η θετική φορά του οποίου (βόρειος πόλος) εικονίζεται στο Σχ. 1.8.4 και είναι ίδια μ' εκείνη στο Σχ. 1.8.1α. Στο Σχ. 1.8.4 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 πιο πάνω εξίσωση. Αν η σειρά διαδοχής φάσης των ρευμάτων αντιστραφεί, τότε θα αντιστραφεί και η φορά περιστροφής του μαγνητικού πεδίου (ωρολογιακή).



Σχ. 1.8.5 (α) Τυλίγματα στάτη σε τετραπολική μηχανή, (β) Τυλίγματα σε αστέρα

Στο Σχ. 1.8.5 εικονίζονται τα τυλίγματα του στάτη σε μια τετραπολική μηχανή. Το τυλίγμα 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 :

$$ME\Delta_s = \frac{N_s}{2} \cdot \frac{3}{2} \cdot I_{ms} \cdot \cos\left(\omega_e \cdot t - \frac{P}{2} \cdot \varphi_s\right)$$

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.

1.8.2.2 Είδη επαγωγικών μηχανών

Οι επαγωγικές μηχανές διακρίνονται σε δύο κατηγορίες, ανάλογα με την κατασκευαστική δομή του δρομέα τους:

- Σε κινητήρες με βραχυκυκλωμένο δρομέα ή κλωβό (squirrel cage rotor)

- **Κινητήρες με δακτυλιοφόρο δρομέα (wound rotor).**

Οι μηχανές με βραχυκυκλωμένο κλωβό είναι οι πλέον διαδεδομένοι. Ο δρομέας των μηχανών 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. Στα αυλάκια του δρομέα τοποθετούνται ράβδοι από χαλκό ή ορείχαλκο, τα άκρα των οποίων συνδέονται μεταξύ τους με δακτυλίους 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 περύγια 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 καμία πηγή.

Στο γεγονός αυτό οφείλεται η απλή κατασκευή και η ευρεία χρήση του επαγωγικού κινητήρα βραχυκυκλωμένου κλωβού. 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.

1.8.2.3 Ηλεκτρομαγνητική δομή της επαγωγικής μηχανής

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 (Σχήμα 1.8.6).

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 . Η 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:

$$\varphi_s = \varphi_{sr} + \varphi_{ls}$$

Το τύλιγμα του δρομέα έχει τη μορφή πλήρους τριφασικού τυλίγματος, με τον ίδιο αριθμό πόλων με 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 με 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_{rr} 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 σχήμα 1.8.6 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.

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

$$\varphi_l = \varphi_{ls} + \varphi_{lr}$$

Το διανυσματικό διάγραμμα των παραπάνω μεγεθών εικονίζεται στο Σχήμα 1.8.6. Η ολική μαγνητική ροή στο διάκενο του κινητήρα Φ_m , είναι ίση με το διανυσματικό άθροισμα των κοινών ροών του στάτη και του δρομέα :

$$\varphi_m = \varphi_{sr} + \varphi_{rs}$$

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 :

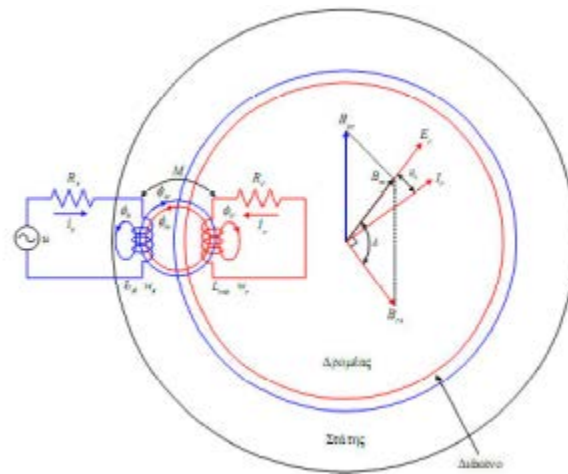
$$T_e = C_1 \cdot (B_{sr} \cdot B_{rs})$$

Ή αντίστοιχα για τα πεδία:

$$T_e = C_2 \cdot (B_m \cdot B_{rs}) \leftrightarrow T_e = C_T \cdot B_m \cdot B_{rs} \cdot \sin \delta = C_T \cdot B_m \cdot B_{rs} \cdot \cos \vartheta_r$$

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 ασύγχρονες και οι μηχανές συνεχούς ρεύματος, ονομάζονται διπλής διέγερσης (doubly excited).



Σχ. 1.8.6 Μία φάση τυλιγμάτων στάτη και δρομέα.

1.8.2.4 Η ολίσθηση

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

$$n_s = \frac{120 \cdot f_e}{P}$$

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 :

$$n_{slip} = n_s - n_r$$

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

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s} \cdot 100$$

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 παραπάνω εξίσωση προκύπτει η παρακάτω σχέση της ταχύτητας του κινητήρα, ως συνάρτηση της σύγχρονης ταχύτητας και της ολίσθησης :

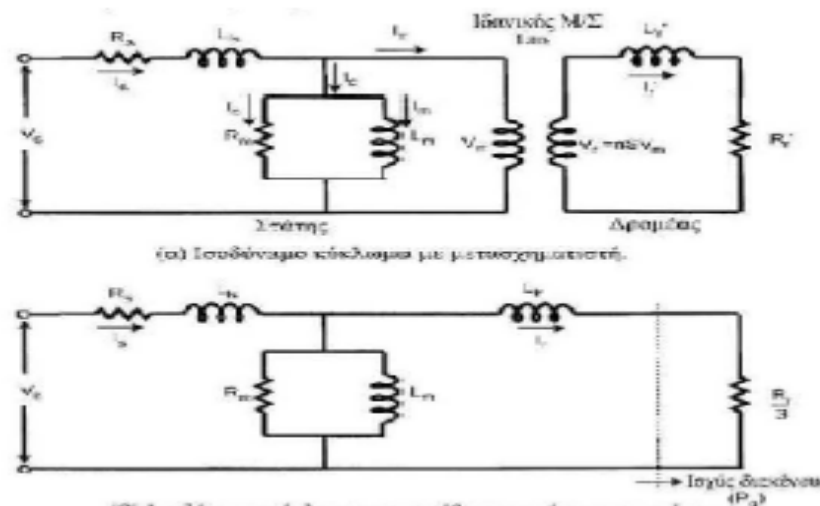
$$n_r = (1 - s) \cdot n_s$$

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

1.8.2.5 Ισοδύναμο κύκλωμα μηχανής επαγωγής

Στο παρακάτω κύκλωμα έχουμε:

- R_s και R_r είναι οι αντιστάσεις του στάτη και του δρομέα αντίστοιχα
- L_m είναι η αλληλεπαγωγή των τυλιγμάτων στάτη-δρομέα ή επαγωγή μαγνήτισης (magnetizing inductance)
- L_{ls} και L_{lr} είναι η αυτεπαγωγές σκεδάσεως του τυλίγματος του στάτη (stator leakage inductance) και του δρομέα (rotor leakage inductance) αντίστοιχα.
- V_s τάση στάτη ή της πηγής (δίκτυο)
- S η ολίσθηση



Σχ. 1.8.7 Ισοδύναμο ανά φάση κύκλωμα της ασύγχρονης τριφασικής μηχανής επαγωγής στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας.

Στο στάτη της μηχανής εφαρμόζεται η τάση V_s της πηγής (δίκτυο). Ανάλογα με το αν τα τριφασικά τυλίγματα της μηχανής είναι συνδεδεμένα κατ' αστέρα ή σε τρίγωνο η τάση αυτή είναι η φασική ή η πολική τάση του δικτύου αντίστοιχα. Το ανά φάση τύλιγμα του στάτη παρίσταται από μια ωμική αντίσταση R_s και μια επαγωγή L_{ls} (πηνίο). Η αντίσταση προσομοιώνει τις απώλειες Joule (θερμότητα) στο τύλιγμα λόγω της κυκλοφορίας ρεύματος σε αυτό, ενώ η επαγωγή προσομοιώνει τη σκέδαση

(ροή που δημιουργείται από το τύλιγμα και εμπλέκει το ίδιο το τύλιγμα χωρίς να εμπλέκει άλλα τυλίγματα της μηχανής) του μαγνητικού πεδίου του τυλίγματος. Η επαγωγή L_{ls} ονομάζεται και αυτεπαγωγή του τυλίγματος του στάτη (stator leakage inductance). Ο εγκάρσιος κλάδος που ακολουθεί και αποτελείται από μια ωμική αντίσταση παράλληλα με μια επαγωγή καλείται κλάδος μαγνήτισης. Ο κλάδος μαγνήτισης διαρρέεται από το ρεύμα πυρήνα (I_0) το οποίο αποτελείται από δύο συνιστώσες: το ρεύμα απωλειών πυρήνα (I_c) και από το ρεύμα μαγνήτισης (I_m). Το ρεύμα απωλειών πυρήνα (I_c) διαρρέει την αντίσταση R_m , η οποία συμβολίζει τις θερμικές απώλειες του σιδηρομαγνητικού πυρήνα από τον συνεχή επαναπροσανατολισμό των στοιχειωδών μαγνητικών δίπολων του μαγνητικού υλικού (υστέρηση) και από τα δινορρεύματα. Το ρεύμα μαγνήτισης (I_m) διαρρέει την επαγωγή L_m , η οποία μοντελοποιεί το μαγνητικό πεδίο εντός της μηχανής που εμπλέκει τα τυλίγματα στάτη και δρομέα. Η επαγωγή L_m ονομάζεται και αλληλεπαγωγή τυλιγμάτων στάτη-δρομέα ή επαγωγή μαγνήτισης (magnetizing inductance). Επιπλέον, στο ισοδύναμο αυτό κύκλωμα, όλες οι μεταβλητές και οι παράμετροι του δρομέα δεν είναι οι πραγματικές τους τιμές αλλά οι ποσότητες που είναι ανηγμένες στο στάτη. Είναι επίσης γνωστό ότι οι μηχανές επαγωγής δεν στρέφονται σύγχρονα με την συχνότητα διέγερσης. Σε ονομαστικό φορτίο η ταχύτητα της μηχανής επαγωγής είναι ελαφρώς μικρότερη, κατά 2-7% από την σύγχρονη ταχύτητα.

1.8.2.6 Απώλειες των επαγωγικών μηχανών

Ο βαθμός απόδοσης του τριφασικού επαγωγικού κινητήρα, εκφράζει την ικανότητά του να μετατρέπει την ηλεκτρική ενέργεια εισόδου σε μηχανική. Κατά τη μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας, ένα ποσοστό της ισχύος εισόδου καταναλώνεται από τον κινητήρα, με αποτέλεσμα την ανύψωση της θεοκρασίας 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 :

$$P_{cu,s} = 3 \cdot R_s \cdot I_s^2$$

και στο δρομέα από τη σχέση :

$$P_{cu,r} = 3 \cdot R_r \cdot I_r^2$$

Οι ολικές απώλειες χαλκού είναι ίσες με το άθροισμα των απωλειών στο στάτη και το δρομέα :

$$P_{cu} = P_{cu,s} + P_{cu,r}$$

Οι απώλειες χαλκού εξαρτώνται από το μέγεθος των αντιστάσεων των τυλιγμάτων και το μέγεθος των ρευμάτων στο στάτη I_s και το δρομέα I_r , τα οποία είναι συνάρτηση της ροπής του φορτίου. Οι απώλειες χαλκού στο στάτη και το δρομέα συμβάλλουν κατά 33–40% και 15–22% αντίστοιχα, στις ολικές απώλειες των συμβατικών επαγωγικών κινητήρων υπό ονομαστικές συνθήκες λειτουργίας.

- **Απώλειες σιδήρου ή μαγνητικές απώλειες (core, iron losses)**

Οι απώλειες σιδήρου προκύπτουν από το άθροισμα των απωλειών υστέρησης και δινορρευμάτων στο στάτη και το δρομέα. Εξαρτώνται από το μέγεθος της ολικής μαγνητικής ροής στο διάκενο Φ_m και τη συχνότητα μεταβολής της, ενώ είναι ανεπηρέαστες από τη ροπή του φορτίου. Οι απώλειες σιδήρου στο στάτη προσεγγίζονται από τη σχέση :

$$P_{iron,s} = (k_e \cdot \phi_m^2 \cdot \omega_e^2) + (k_h \cdot \phi_m^n \cdot \omega_e)$$

$$P_{iron,r} = (k_e \cdot (s\omega_e)^2 \cdot \phi_m^2) + (k_h \cdot s \cdot \omega_e \cdot \phi_m^n)$$

Όπου k_e είναι ο συντελεστής απωλειών δινορρευμάτων 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 :

$$P_{iron,s+r} = \left[(k_e \cdot (1 + s^2) \cdot \omega_e^2) + (k_h \cdot (1 + s^2) \cdot \omega_e) \right] \phi_m^n$$

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 του κυκλώματος Σχήμα 1.8.7 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 :

$$P_{iron,s+r} = \frac{E^2}{R_m}$$

Αντικαθιστώντας $E = \omega_e \cdot \phi_m$

$$R_m = \frac{1}{\left(k_e \cdot (1 + s^2) + \left((1 + s) \cdot \frac{k_h}{\omega_e} \right) \right)}$$

- **Μηχανικές απώλειες (mechanical losses)**

Οι μηχανικές απώλειες P , 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 :

$$P_{fw} = C_{fw} \cdot n_r^2$$

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.

1.8.2.7. Ισχύς και ροπή επαγωγικών μηχανών

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

$$P_{in} = 3 \cdot V \cdot I_s \cdot \cos \varphi$$

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 :

$$P_{ag} = 3 \cdot I_r'^2 \cdot \left(\frac{R'_r}{s} \right) = 3 \cdot E \cdot I_r \cdot \cos \vartheta_r$$

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.

$$P_m = P_{ag} - P_{cu,r} = \left(3 \cdot I_r'^2 \cdot \left(\frac{R'_r}{s} \right) \right) - \left(3 \cdot I_r'^2 \cdot R'_r \right) = P_{ag} \cdot (1 - s)$$

Συνήθως, οι απώλειες σιδήρου του δρομέα ενσωματώνονται στις μαγνητικές απώλειες του στάτη. Οι απώλειες χαλκού του δρομέα, από την παραπάνω εξίσωση υπολογίζονται από το γινόμενο της ισχύος διακένου με την ολίσθηση :

$$P_{cu,r} = s \cdot P_{ag}$$

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 κατανεμημένες απώλειες :

$$P_{out} = P_m - P_{fw} - P_{stray}$$

Αντίστοιχα, η πραγματική ροπή στον άξονα του κινητήρα, εξαιτίας των τριβών και των κατανεμημένων 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 :

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

1.8.3 Σύγχρονες γεννήτριες

Η σύγχρονη γεννήτρια είναι πιο πολύπλοκη και ακριβότερη σε σχέση με μια αντίστοιχη επαγωγική. Εμφανίζει όμως ένα σημαντικό πλεονέκτημα έναντι της επαγωγικής: δεν απαιτεί άεργο ρεύμα μαγνήτισης.

Σε γενικές γραμμές η λειτουργία των σύγχρονων μηχανών έχει ως εξής:

Όλες οι τριφασικές γεννήτριες χρησιμοποιούν ένα περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο, το οποίο δημιουργείται από τρεις ηλεκτρομαγνήτες. Καθένας από τους τρεις ηλεκτρομαγνήτες είναι συνδεδεμένος με μια φάση του ηλεκτρικού δικτύου. Καθένας από τους ηλεκτρομαγνήτες μετατρέπεται διαδοχικά από Νότιος σε Βόρειος πόλος και αντίστροφα. Η μεταβολή αυτή του μαγνητισμού αντικατοπτρίζει ακριβώς τη μεταβολή της τάσης της κάθε φάσης. Όταν η μια φάση βρίσκεται στο μέγιστο, οι άλλες δυο διαρρέονται από ρεύμα αντίθετης διεύθυνσης στη μισή τάση. Αφού οι μαγνήτες είναι τοποθετημένοι ανά 120° , το μαγνητικό πεδίο θα κάνει μια πλήρη περιστροφή ανά κύκλο. Η σύγχρονη μηχανή λειτουργεί ως γεννήτρια αν επιβληθεί στον δρομέα ρεύμα ώστε να τον εξαναγκάσει στην κυκλική κίνηση, αντί να τον περιστρέφει το ρεύμα του δικτύου. Πρέπει συνεπώς να υπάρχει ένας ισχυρός μαγνήτης για να παράγεται αρκετό ρεύμα. Όσο περισσότερη δύναμη εφαρμόζεται στο δρομέα τόσο περισσότερο ρεύμα παράγεται, η γεννήτρια όμως συνεχίζει να λειτουργεί στην ίδια ταχύτητα η οποία προσδιορίζεται από τη συχνότητα του δικτύου και τους πόλους της μηχανής. Υπάρχει επίσης η δυνατότητα να αποσυνδεθεί η γεννήτρια από το δίκτυο, και να προκύψει ένα ανεξάρτητο τριφασικό δίκτυο. Εάν όμως αποσυνδεθεί η γεννήτρια από το δίκτυο, θα πρέπει να διατηρηθεί σταθερή περιστροφική ταχύτητα προκειμένου να παραχθεί εναλλασσόμενο ρεύμα με σταθερή συχνότητα. Επομένως, με τέτοιου είδους γεννήτρια θα πρέπει συνήθως να χρησιμοποιείται έμμεση σύνδεση με το δίκτυο.

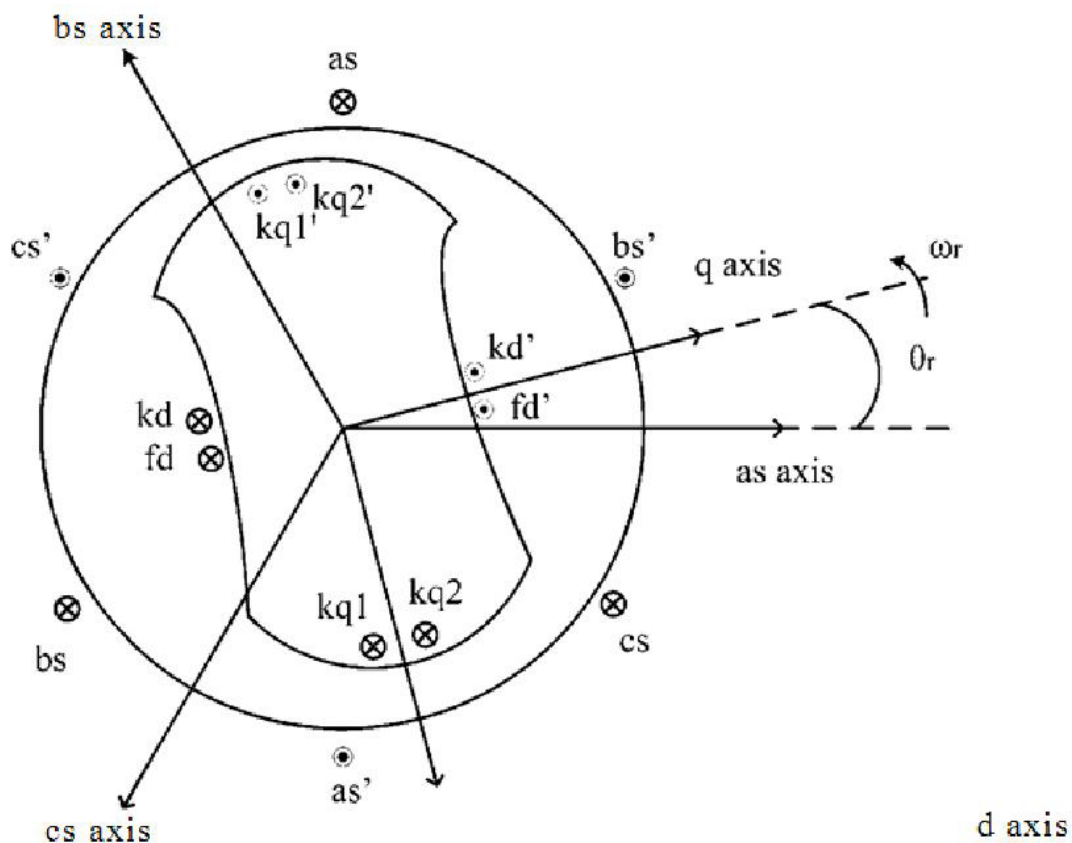
Στην πράξη, σύγχρονες γεννήτριες με μόνιμους μαγνήτες δεν χρησιμοποιούνται πολύ. Υπάρχουν αρκετοί λόγοι γι' αυτό. Ένας είναι ότι οι μόνιμοι μαγνήτες τείνουν να απομαγνητιστούν όταν λειτουργούν κάτω από ισχυρά μαγνητικά πεδία όπως αυτά της γεννήτριας. Ένας άλλος είναι ότι ισχυροί μαγνήτες φτιάχνονται από σπάνια μέταλλα π.χ. Νεοδύμιο, και είναι πολύ ακριβοί. Συνήθως οι ανεμογεννήτριες που χρησιμοποιούν σύγχρονες γεννήτριες χρησιμοποιούν στον δρομέα ηλεκτρομαγνήτες που λειτουργούν με συνεχές ρεύμα το οποίο παρέχεται από το δίκτυο.

Αφού όμως το δίκτυο παρέχει εναλλασσόμενο ρεύμα, πρέπει να προηγηθεί ένα στάδιο μετατροπής του εναλλασσόμενου σε συνεχές ρεύμα. Η ταχύτητα μιας γεννήτριας που είναι άμεσα συνδεδεμένη με το τριφασικό δίκτυο είναι σταθερή, προσδιορίζεται από τη συχνότητα του δικτύου, και από τα ζεύγη πόλων του στάτη. Οι περισσότερες ανεμογεννήτριες με σύγχρονες μηχανές χρησιμοποιούν γεννήτριες με δύο ή τρία ζεύγη πόλων. Ο λόγος για τον οποίο χρησιμοποιούνται αυτές οι σχετικά υψηλής ταχύτητας γεννήτριες είναι η οικονομία σε μέγεθος και κόστος. Η μέγιστη δύναμη την οποία μπορεί να 'αντέξει' η γεννήτρια εξαρτάται από το μέγεθος του δρομέα. Για δεδομένη ισχύ εξόδου υπάρχει η δυνατότητα επιλογής μεταξύ μιας αργόστροφης, μεγάλης και άρα ακριβής γεννήτριας, ή μιας υψηλόστροφης και άρα φθηνότερης μικρότερης γεννήτριας .

1.8.3.1 Γενικά περί σύγχρονων μηχανών

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται οι βασικές διαφορικές και αλγεβρικές εξισώσεις, οι οποίες περιγράφουν μία συμμετρική τριφασική σύγχρονη γεννήτρια. Για την εξαγωγή των εξισώσεων της σύγχρονης γεννήτριας γίνονται οι ακόλουθες παραδοχές:

- Τα τυλίγματα του στάτη έχουν ημιτονοειδή κατανομή κατά μήκος του διακένου
- Οι αύλακες του στάτη δεν προκαλούν σημαντική μεταβολή των αυτεπαγωγών και των αλληλεπαγωγών λόγω της θέσης του δρομέα

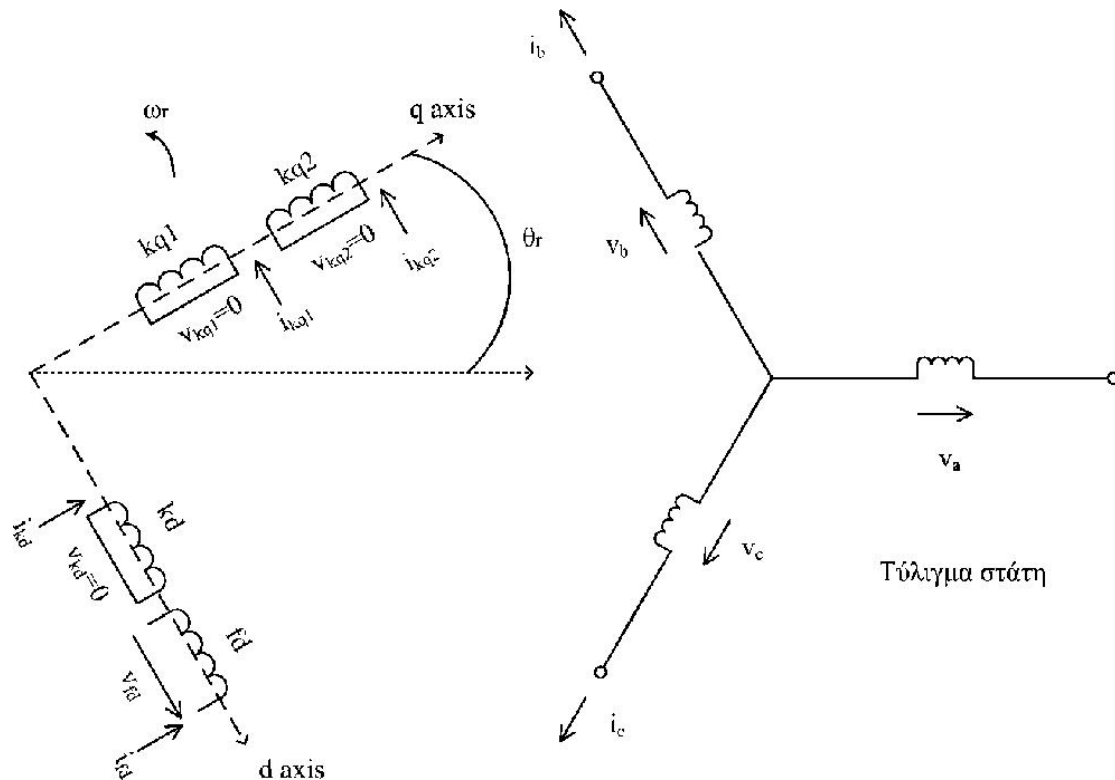


Σχ. 1.8.8 Παράσταση σύγχρονης μηχανής με έκτυπους πόλους

Τα τυλίγματα των τριών φάσεων του στάτη είναι όμοια μεταξύ τους και ημιτονοειδώς διανεμημένα. Το κάθε ένα έχει N_s ισοδύναμα ελίσματα και ωμική αντίσταση r_s . Ο δρομέας διαθέτει τυλίγμα πεδίου, με N_{fd} ισοδύναμα ελίσματα και ωμική αντίσταση r_{fd} , καθώς και τρία βραχυκυκλωμένα τυλίγματα αποσβέσεως τα οποία έχουν ισοδύναμα ελίσματα N_{kq1} , N_{kq2} , N_{kd} και αντιστάσεις r_{kq1} , r_{kq2} , r_{kd} αντίστοιχα.

Επίσης, εισάγονται ο εγκάρσιος άξονας (άξονας q-quadrature) και ο ευθύς άξονας (άξονας d-direct). Ο άξονας q είναι ο άξονας των τυλιγμάτων αποσβέσεως k_{qi} και k_{q2} , ενώ ο άξονας d ταυτίζεται με τον άξονα του τυλίγματος διέγερσης και του τυλίγματος αποσβέσεως k_d . Ο άξονας q για τη θετική φορά περιστροφής, λαμβάνεται να προηγείται κατά 90° του άξονα d. Η γωνία του δρομέα θ_r μετράται ως προς τον άξονα του πηνίου as.

Οι εντάσεις του στάτη θεωρούνται συμβατικά εξερχόμενες από τους ακροδέκτες της μηχανής, δηλαδή ακολουθείται η γνωστή σύμβαση γεννήτριας για τη γραφή των εξισώσεων. Συνεπώς, με τη δεδομένη θετική φορά των μαγνητικών αξόνων, αρνητικές πεπλεγμένες ροές προκύπτουν από θετικά ρεύματα στο στάτη.



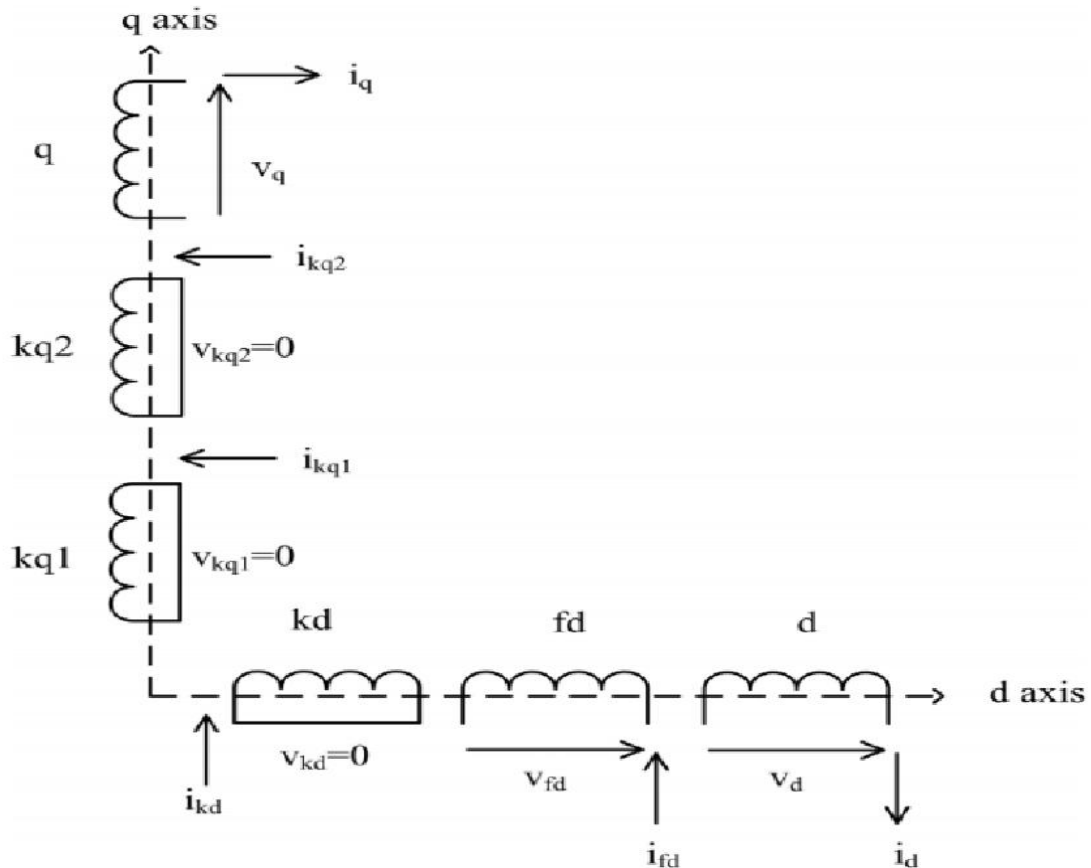
Σχ. 1.8.9 Κυκλωματική παράσταση σύγχρονης μηχανής

1.8.3.2 Μετασχηματισμός του Park

Με δεδομένο ότι οι επαγωγές των τυλιγμάτων της μηχανής είναι συναρτήσεις της γωνίας του δρομέα θ_ϕ και επομένως, της γωνιακής ταχύτητας ω_r , οι διαφορικές εξισώσεις των τάσεων είναι μη γραμμικές και οι συντελεστές των μεταβλητών είναι χρονικά μεταβαλλόμενοι. Επιπλέον, η ταχύτητα του δρομέα είναι συνάρτηση της ηλεκτρομαγνητικής ροπής, η οποία προκύπτει από γινόμενα εντάσεων. Προφανώς, η επίλυση των εξισώσεων είναι εξαιρετικά πολύπλοκη, και καθίσταται αναγκαία η χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή.

Ο μετασχηματισμός του Park αποτελεί το μαθηματικό εργαλείο για την ανάλυση των σύγχρονων μηχανών. Ο μετασχηματισμός αυτός συνίσταται στην αντικατάσταση των τριών τυλιγμάτων a,b,c του στάτη από τρία υποθετικά (ισοδύναμα) τυλίγματα d, q, 0. Με τον τρόπο αυτό ο μετασχηματισμός του Park συμβάλει στην απλοποίηση των εξισώσεων μετατρέποντας τους χρονικά μεταβαλλόμενους συντελεστές σε χρονικά αμετάβλητους. Τα τυλίγματα d, q του

στάτη περιστρέφονται μαζί με τον δρομέα της μηχανής και βρίσκονται στους ίδιους άξονες με τα αντίστοιχα τυλίγματα του δρομέα (τύλιγμα διεγέρσεως και τυλίγματα αποσβέσεως). Το τρίτο τύλιγμα 0 δεν είναι μαγνητικά συζευγμένο με τα άλλα δύο νέα τυλίγματα του στάτη και παίζει ρόλο μόνο σε συνθήκες ασύμμετρης φόρτισης της μηχανής.



Σχ. 1.8.10 Τυλίγματα σύγχρονης μηχανής μετά το μετασχηματισμό του Park

Ο μετασχηματισμός του Park αποτελεί μια ειδική περίπτωση του μετασχηματισμού $abc \rightarrow qd0s$, όπου η γωνιακή ταχύτητα του στρεφόμενου πλαισίου λαμβάνεται ίση με τη γωνιακή ταχύτητα του δρομέα. Ο άξονας d ταυτίζεται με τον άξονα του μαγνητικού πεδίου του τυλίγματος διέγερσης. Αφού εφαρμοσθεί ο μετασχηματισμός, οι εξισώσεις του Park για τα τυλίγματα d, q του στάτη στο πλαίσιο αναφοράς του δρομέα είναι:

$$U_{ds} = (-r_s \cdot I_{ds}) + \left(\frac{1}{\omega_b} \cdot \frac{d\psi_{ds}}{dt} \right) - \left(\frac{\omega_r}{\omega_b} \cdot \psi_{qs} \right)$$

$$U_{qs} = (-r_s \cdot I_{qs}) + \left(\frac{1}{\omega_b} \cdot \frac{d\psi_{qs}}{dt} \right) - \left(\frac{\omega_r}{\omega_b} \cdot \psi_{ds} \right)$$

όπου U_{ds}, U_{qs} : οι τάσεις των τυλιγμάτων d, q του στάτη αντίστοιχα,

I_{ds}, I_{qs} : τα ρεύματα των τυλιγμάτων d, q του στάτη αντίστοιχα.

ψ_{ds}, ψ_{qs} : οι πεπλεγμένες ροές ανά δευτερόλεπτο των τυλιγμάτων d, q του αντίστοιχα.

ω_b : η ηλεκτρική γωνιακή ταχύτητα (σε rad/sec) του συστήματος.

r_s : η ωμική αντίσταση του στάτη.

Οι εξισώσεις του Park για τα τυλίγματα του δρομέα είναι:

$$U_{fd} = (-r_{fd} \cdot I_{fd}) + \left(\frac{1}{\omega_b} \cdot \frac{d\psi_{fs}}{dt} \right)$$

$$U_{kd} = 0 = (r_k \cdot I_{kd}) + \left(\frac{1}{\omega_b} \cdot \frac{d\psi_{kd}}{dt} \right)$$

$$U_{kq1} = 0 = (r_{kq1} \cdot I_{kq1}) + \left(\frac{1}{\omega_b} \cdot \frac{d\psi_{kq1}}{dt} \right)$$

$$U_{kq2} = 0 = (r_{kq2} \cdot I_{kq2}) + \left(\frac{1}{\omega_b} \cdot \frac{d\psi_{kq2}}{dt} \right)$$

Όπου $U_{fd}, U_{kd}, U_{kq1}, U_{kq2}$: οι τάσεις του τυλίγματος διέγερσης και των τυλιγμάτων απόσβεσης αντίστοιχα.

$I_{fd}, I_{kd}, I_{kq1}, I_{kq2}$: τα ρεύματα του τυλίγματος διέγερσης και των τυλιγμάτων απόσβεσης αντίστοιχα.

$\psi_{fd}, \psi_{kd}, \psi_{kq1}, \psi_{kq2}$: οι πεπλεγμένες ροές ανά δευτερόλεπτο του τυλίγματος διέγερσης και των τυλιγμάτων απόσβεσης αντίστοιχα

$r_{fd}, r_{kd}, r_{kq1}, r_{kq2}$: οι ωμικές αντιστάσεις του τυλίγματος διέγερσης και των τυλιγμάτων απόσβεσης αντίστοιχα.

Οι πεπλεγμένες ροές ανά δευτερόλεπτο δίνονται από τις σχέσεις:

$$\psi_{ds} = (-X_{fs} \cdot I_{ds}) + [X_{md} \cdot (-I_{ds} + I_{kd} + I_{fd})]$$

$$\psi_{qs} = (-X_{fs} \cdot I_{qs}) + [X_{mq} \cdot (-I_{qs} + I_{kq1} + I_{kq2})]$$

$$\psi_{fd} = (-X_{ffd} \cdot I_{fd}) + [X_{md} \cdot (-I_{ds} + I_{fd} + I_{kd})]$$

$$\psi_{kd} = (-X_{ikd} \cdot I_{kd}) + [X_{md} \cdot (-I_{ds} + I_{kd} + I_{fd})]$$

$$\psi_{kq1} = (-X_{ikq1} \cdot I_{kq1}) + [X_{mq} \cdot (-I_{qs} + I_{kq1} + I_{kq2})]$$

$$\psi_{kq2} = (-X_{ikq2} \cdot I_{kq2}) + [X_{mq} \cdot (-I_{qs} + I_{kq1} + I_{kq2})]$$

Όπου $X_{fs}, X_{ffd}, X_{ikd}, X_{ikq1}, X_{ikq2}$: Οι αυτεπαγωγές του στάτη του τυλίγματος διέγερσης και των τυλιγμάτων απόσβεσης αντίστοιχα.

X_{md}, X_{mq} : οι αμοιβαίες επαγωγικές αντιδράσεις στον άξονα d,q αντίστοιχα.

1.8.3.3 Ανά μονάδα σύστημα

Η ηλεκτρομαγνητική ροπή συναρτήσσει των πεπλεγμένων ροών ανά δευτερόλεπτο και των ρευμάτων δίνεται σε φυσικές τιμές από τη σχέση:

$$T_e = \frac{3}{2} \cdot \frac{P}{2} \cdot \frac{1}{\omega_b} \cdot (\psi_{ds} \cdot I_{qs} - \psi_{qs} \cdot I_{ds})$$

Όπου P ο αριθμός των πόλων της μηχανής.

Η βασική ισχύς μπορεί να εκφραστεί:

$$S_B = 3 \cdot U_{B(abc)} \cdot I_{B(abc)}$$

Η ισοδύναμα :

$$S_B = \frac{3}{2} \cdot U_{B(qd0)} \cdot I_{B(qd0)}$$

Θεωρώντας ως βασική ροπή :

$$T_B = \frac{P}{2} \cdot \frac{S_B}{\omega_B}$$

Η ηλεκτρομαγνητική ροπή σε per unit τιμές ισούται με:

$$T_e = \psi_{ds} \cdot I_{qs} - \psi_{qs} \cdot I_{ds}$$

Η ενεργός και η άεργος ισχύς δίνονται αντίστοιχα από τις σχέσεις:

$$P = \frac{3}{2} \cdot (U_d \cdot I_d + U_q \cdot I_q)$$

$$Q = \frac{3}{2} \cdot (U_q \cdot I_q - U_d \cdot I_d)$$

Η εξίσωση της κίνησης του μηχανικού μέρους της μηχανής γράφεται:

$$T_m - T_e = j \frac{d\omega_m}{dt} = j \left(\frac{2}{P} \right) \cdot \frac{d\omega_m}{dt}$$

Όπου ω_m : η μηχανική γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του δρομέα

ω_e : η αντίστοιχη ηλεκτρική ταχύτητα(σε rad/sec)
 j : η ροπή αδράνειας (σε Kg*m²) του στρεφόμενου μηχανικού μέρους της διάταξης.

Η ανηγμένη σταθερά αδράνειας σε sec ορίζεται ως:

$$H = \left(\frac{1}{2}\right) \cdot \left(\frac{2}{P}\right)^2 \cdot \left(\frac{j\omega_b^2}{SB}\right)$$

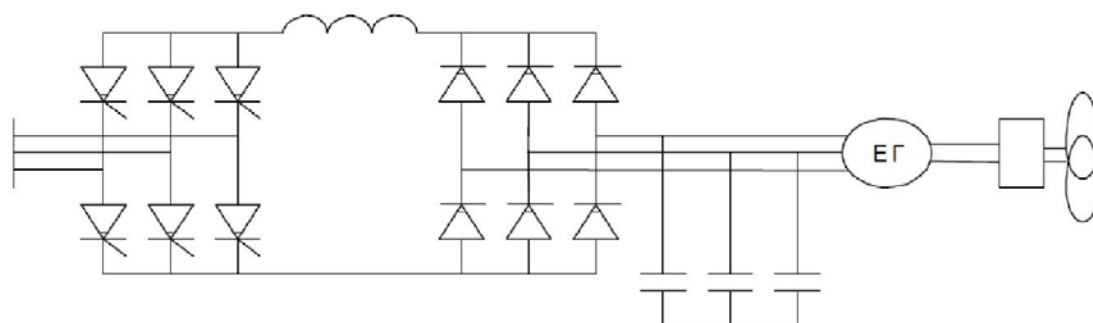
Συνεπώς λύνοντας ως προς j έχουμε :

$$T_m - T_e = 2 \cdot H \cdot \frac{d\omega_e}{dt}$$

1.8.4 ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΕΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΤΟΥ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΜΕΡΟΥΣ

1.8.4.1 Χρήση της ασύγχρονης γεννήτριας

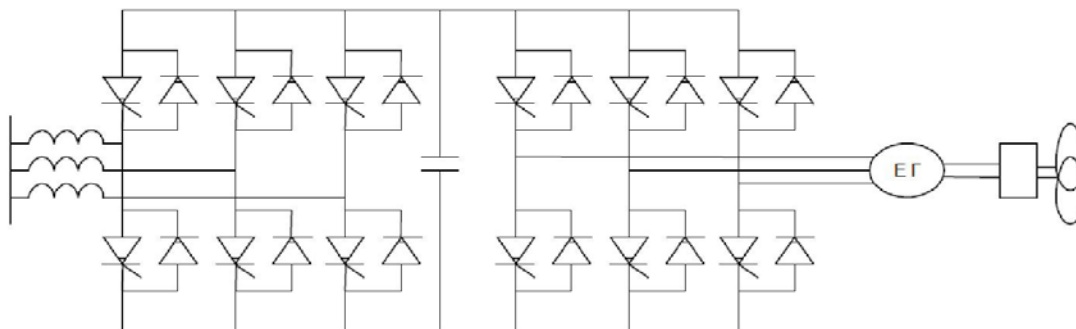
Οι ονομαστικές ισχείς των μηχανών που προορίζονται για λειτουργία σε δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας κυμαίνονται μεταξύ μερικών εκατοντάδων kW έως κάποια MW (περίπου 5 MW για τις Α/Γ που αυτή τη στιγμή βρίσκονται στο στάδιο των δοκιμών). Το ηλεκτρικό μέρος αυτού του μεγέθους Α/Γ μπορεί κατ' αρχήν να περιλαμβάνει οποιοδήποτε συνδυασμό ηλεκτρικής μηχανής εναλλασσόμενου ρεύματος και συστήματος μετατροπών ισχύος, ο οποίος εξασφαλίζει λειτουργία γεννήτριας και είναι διαθέσιμος στα παραπάνω επίπεδα ισχύος. Η μηχανή συνεχούς ρεύματος δε χρησιμοποιείται λόγω πολυπλοκότητας, αυξημένης συντήρησης, βάρους και κόστους. Στο Σχήμα 1.8.11 εμφανίζεται η απλούστερη δυνατή διάταξη ανεμογεννήτριας με χρήση ασύγχρονης μηχανής. Η αυτοδιέγερση της επαγωγικής μηχανής πραγματοποιείται μέσω συστοιχίας πυκνωτών. Στους ακροδέκτες της μηχανής υπάρχει μη ελεγχόμενος ανορθωτής με διόδους ενώ στην πλευρά του δικτύου υπάρχει 6-παλμικός αντιστροφείας με θυρίστορ και μεταγωγή από την τάση του δικτύου.



Σχ. 1.8.11 Ανεμογεννήτρια ΜΣΣΣ με ασύγχρονη μηχανή και διάταξη ΕΡ/ΣΡ/ΕΡ στο στάτη

Κύριο πλεονέκτημα αυτής της διάταξης είναι βέβαια το χαμηλό κόστος και η απλή κατασκευή του ανορθωτή. Η διάταξη αυτή όμως δεν χρησιμοποιείται λόγω των προβλημάτων που προκαλεί η αυτοδιέγερση των πυκνωτών (π.χ. ανεπιθύμητοι συντονισμοί κυρίως σε χαμηλές συχνότητες λόγω της βηματικής μεταβολής της χωρητικότητας).

Στο Σχήμα 1.8.12 εμφανίζεται μία διάταξη η οποία έχει εφαρμοσθεί σε ανεμογεννήτρια λόγω των πολύ καλών λειτουργικών και δυναμικών της χαρακτηριστικών.

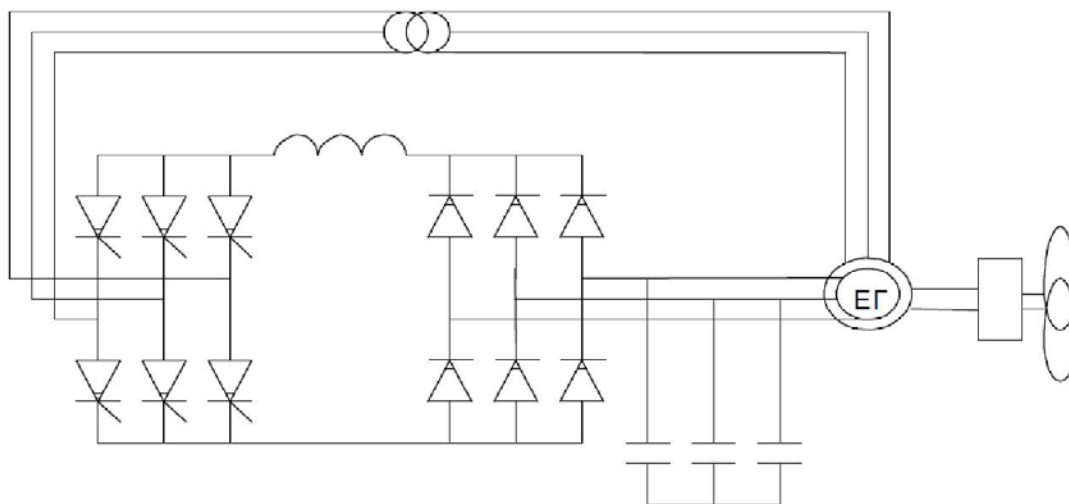


Σχ. 1.8.12 Ανεμογεννήτρια ΜΣΣΣ με ασύγχρονη γεννήτρια και διάταξη ΕΡ/ΣΡ/ΕΡ με δύο ελεγχόμενους μετατροπείς στο στάτη

Στη διάταξη αυτή χρησιμοποιούνται δύο όμοιοι μετατροπείς πηγής τάσης, τόσο στην πλευρά της γεννήτριας όσο και στην έξοδο του συστήματος προς το δίκτυο. Η χρήση μετατροπέα πηγής τάσης στην έξοδο του συστήματος εξασφαλίζει τη δυνατότητα ροής ισχύος και προς τις δύο κατευθύνσεις, ελαχιστοποιεί την παραμόρφωση του ρεύματος εξόδου και επιτρέπει τον έλεγχο της αέργου ισχύος της διάταξης. Ο μετατροπέας από την πλευρά της γεννήτριας, αντί απλού ανορθωτή, περιορίζει τις αρμονικές των ρευμάτων και ομαλοποιεί σημαντικά τη ροπή της μηχανής με την παλμοδότηση, η οποία βασίζεται στις μεθόδους του διανυσματικού ελέγχου για βελτίωση της δυναμικής απόκρισης της μηχανής. Σημαντικότατο μειονέκτημα της διάταξης αυτής είναι η πολυπλοκότητα σε υλικό (hardware) και σε λογισμικό (software) και το πολύ υψηλό κόστος. Όπως γίνεται προφανές και από το παραπάνω σχήμα, το σύνολο της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος πρέπει να περάσει στο δίκτυο διαμέσω των ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος. Συνεπώς, η ονομαστική τιμή των μετατροπέων θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη από την ονομαστική ισχύ της ανεμογεννήτριας, με προφανείς επιπτώσεις στο κόστος, την πολυπλοκότητα και τις ανάγκες συντήρησης. Για τους λόγους αυτούς η χρήση της διάταξης αυτής δεν έχει ευρεία εφαρμογή στους κατασκευαστές ανεμογεννητριών.

Στο Σχήμα 1.8.13 απεικονίζεται η διάταξη με χρήση ασύγχρονης μηχανής με τυλίγμα στο δρομέα και σύστημα μετατροπέων συνδεδεμένων στα άκρα του. Το σημαντικότερο πλεονέκτημα του συστήματος αυτού είναι η σημαντικά μειωμένη ισχύς των μετατροπέων, οι οποίοι ελέγχουν μόνο την ολίσθηση του δρομέα. Στην απλούστερη μορφή της η διάταξη αυτή αποτελείται από έναν απλό ανορθωτή με διόδους στην πλευρά του τυλίγματος του δρομέα και μετατροπέα πηγής ρεύματος στην έξοδο, όπως δείχνεται και στο σχήμα. Το σχήμα αυτό είναι απλό, αξιόπιστο και με πολύ χαμηλό κόστος και έτσι είναι αρκετά ελκυστικό για εφαρμογή σε ανεμογεννήτρια. Παρ' όλα αυτά εμφανίζονται σημαντικές αρμονικές παραμορφώσεις

των ρευμάτων και της ροπής της μηχανής, μειονεκτήματα τα οποία μπορούν να ελαττωθούν σημαντικά με τη χρήση διπλών μετατροπών διαμόρφωσης πλάτους παλμών (PWM).



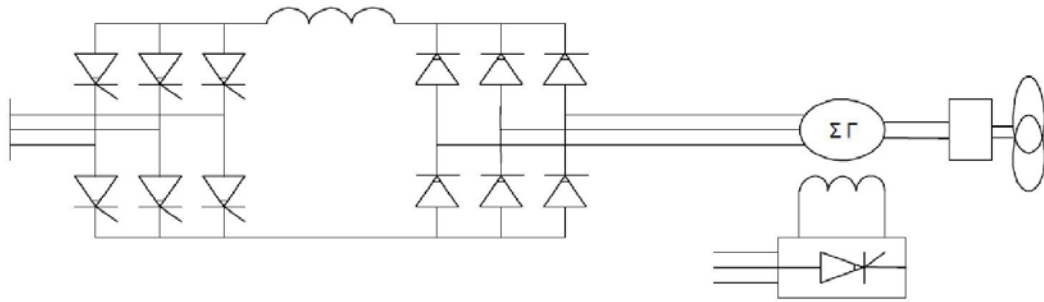
Σχ. 1.8.13 Ανεμογεννήτρια ΜΣΣΣ με ασύγχρονη γεννήτρια και μετατροπέα ΕΡ/ΣΡ/ΕΡ στο δρομέα

Αξίζει να σημειωθεί ότι με τη μείωση του κόστους και την αύξηση της ικανότητας διαχείρισης ισχύος μοντέρνων ημιαγωγών ισχύος όπως τα Gate Turn-Off (GTO) thyristors, τα MOSFETs και τα Insulated Gate Bipolar Transistors (IGBTs), έχουν δημιουργηθεί και χρησιμοποιούνται διατάξεις με μεγαλύτερες δυνατότητες ελέγχου και βελτιωμένα λειτουργικά χαρακτηριστικά.

1.8.4.2 Χρήση της σύγχρονης γεννήτριας

Το βασικό μειονέκτημα των διατάξεων με την επαγωγική γεννήτρια τύπου κλωβού είναι το γεγονός ότι απαιτείται η δυνατότητα παραγωγής αέργου ισχύος για τη μαγνήτιση της μηχανής.

Στο Σχήμα 1.8.14 απεικονίζεται η απλούστερη δυνατή διάταξη που χρησιμοποιεί σύγχρονη γεννήτρια και ανορθωτή στους ακροδέκτες της και συμβατικό μετατροπέα με θυρίστορ στην πλευρά του δικτύου η οποία έχει χρησιμοποιηθεί σε μεγάλες πρωτότυπες μηχανές.



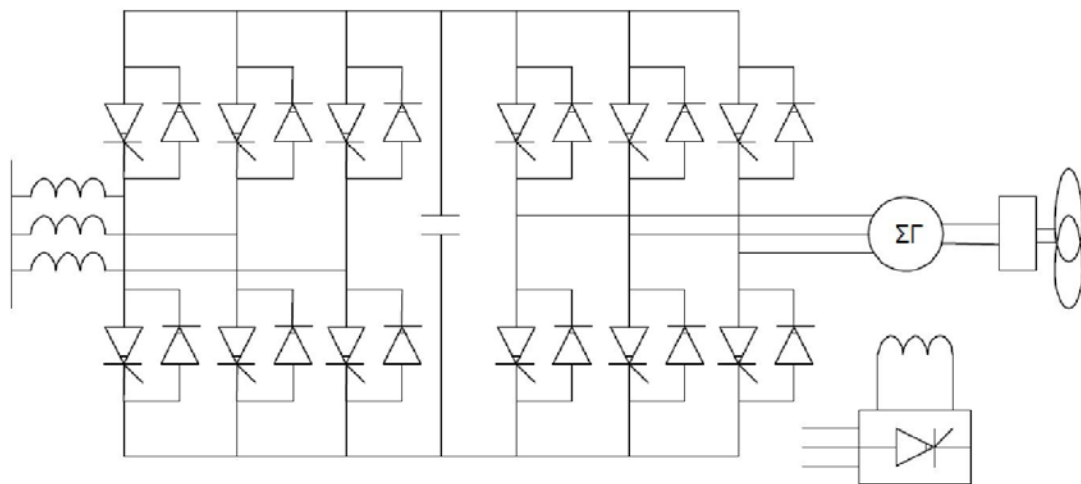
Σχ. 1.8.14 Ανεμογεννήτρια ΜΣΣΣ με σύγχρονη μηχανή και διάταξη ΕΡ/ΣΡ/ΕΡ με ανορθωτή με διόδους στο στάτη

Η σύγχρονη γεννήτρια προσφέρει τη δυνατότητα κατασκευής και ρύθμισης του μαγνητικού της πεδίου μέσω του κυκλώματος του δρομέα και απορροφώντας μία ελάχιστη ενεργό ισχύ από το δίκτυο κατά τη διαδικασία της εκκίνησης της μηχανής. Με τη δυνατότητα ρύθμισης του πεδίου μπορεί να λειτουργήσει υπό μοναδιαίο, επαγωγικό ή και χωρητικό συντελεστή ισχύος στους ακροδέκτες της ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του δικτύου στο οποίο συνδέεται, καθιστώντας δυνατή τη χρήση απλών μετατροπέων φυσικής μετάβασης χωρίς να είναι αναγκαία η εγκατάσταση πυκνωτών. Αυτό είναι και το σημαντικότερο πλεονέκτημα των διατάξεων με χρήση της σύγχρονης γεννήτριας. Σήμερα πλέον το κόστος της σύγχρονης γεννήτριας με ανορθωτή καθίσταται συγκρίσιμο με αυτό των διατάξεων με χρήση της επαγωγικής μηχανής.

Η διάταξη του Σχήματος 1.8.14 πέρα από την απλότητα της κατασκευής και το σχετικά χαμηλό κόστος δεν εμφανίζει κάποιο άλλο πλεονέκτημα. Τα μειονεκτήματα είναι αρκετά, όπως αυξημένη παρουσία αρμονικών στο ρεύμα εξόδου και στη ροπή της μηχανής, μη δυνατότητα ελέγχου της συνεχούς τάσης της διασύνδεσης ΕΡ/ΣΡ/ΕΡ και φυσικά όσον αφορά τη χρήση της σύγχρονης γεννήτριας αυξημένο κόστος κατασκευής – αγοράς αλλά και συντήρησης στη συνέχεια.

Μία διάταξη η οποία μπορεί να ελαττώσει σημαντικά τις αρμονικές αλλά και να προσφέρει τη δυνατότητα ελέγχου της συνεχούς τάσης της διασύνδεσης ΕΡ/ΣΡ/ΕΡ προκύπτει με την αντικατάσταση του απλού ανορθωτή από μετατροπέα με θυρίστορ.

Η διάταξη αυτή απεικονίζεται στο Σχήμα 1.8.15 και είναι αντίστοιχη της διάταξης του σχήματος 1.8.12 όπως παρουσιάσθηκε στην προηγούμενη παράγραφο με χρήση της επαγωγικής μηχανής τύπου κλωβού.

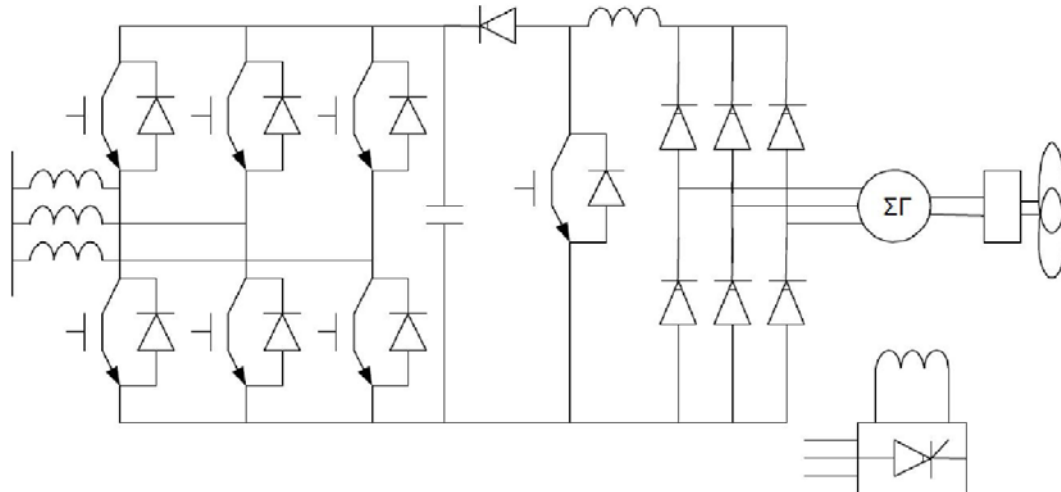


Σχ. 1.8.15 Ανεμογεννήτρια ΜΣΣΣ με σύγχρονη μηχανή και διάταξη ΕΡ/ΣΡ/ΕΡ με δύο μετατροπείς με ελεγχόμενα στοιχεία στο στάτη

Με τη διάταξη αυτή, αν και συνδυάζει τα πλεονεκτήματα των δύο μετατροπέων πηγής τάσης και της σύγχρονης γεννήτριας, αυξάνεται σημαντικά το κόστος της όλης κατασκευής.

Η λύση η οποία μπορεί να διατηρήσει το κόστος σε χαμηλότερο επίπεδο διατηρώντας το συνδυασμό σύγχρονης γεννήτριας – ανορθωτή με ταυτόχρονη εύκολη σύνδεση με το δίκτυο, αλλά προσφέροντας και τη δυνατότητα ελέγχου της συνεχούς τάσης της διασύνδεσης ΕΡ/ΣΡ/ΕΡ είναι η διάταξη η οποία απεικονίζεται στο Σχήμα 1.8.16.

Στο σχήμα αυτό χρησιμοποιείται μετατροπέας πηγής τάσης με IGBT στην πλευρά του δικτύου ενώ στην πλευρά της γεννήτριας διατηρείται η παρουσία μόνο ενός απλού ανορθωτή ελαττώνοντας με αυτόν τον τρόπο το συνολικό κόστος και παράλληλα αυξάνοντας ίσως και την αξιοπιστία του συστήματος αφού είναι γνωστό ότι η παρουσία λιγότερων ηλεκτρονικών στοιχείων συμβάλλει στον τομέα αυτόν. Επίσης δίνεται η δυνατότητα ελέγχου της συνεχούς τάσης στην είσοδο του αντιστροφέα μέσω του ανυψωτή τάσης (boost converter).



Σχήμα 1.8.16 Ανεμογεννήτρια ΜΣΣΣ με σύγχρονη μηχανή και διάταξη ΕΡ/ΣΡ/ΕΡ με ανορθωτή με διόδους και ανυψωτή τάσης στο στάτη

Ένα άλλο πολύ σημαντικό πλεονέκτημα της χρήσης της σύγχρονης γεννήτριας σε συνδυασμό με τις παραπάνω διατάξεις, που ουσιαστικά την αποδεσμεύουν από το δίκτυο, είναι το γεγονός ότι μπορεί να λειτουργήσει σε οποιονδήποτε αριθμό στροφών ακόμα και σε αρκετά μικρό. Αυτή η ιδιότητα της επιτρέπει πολύ εύκολα να στρέφεται με τις ίδιες στροφές με τον ανεμοκινητήρα και να παράγει εύκολα ηλεκτρική ισχύ χαμηλής συχνότητας, η οποία στη συνέχεια μετατρέπεται σε αυτήν του δικτύου από τον αντιστροφέα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την απάλειψη του κιβωτίου ταχυτήτων από το μηχανικό σύστημα μετάδοσης της κίνησης της ανεμογεννήτριας, επιτυγχάνοντας έτσι μείωση του συνολικού βάρους, του κόστους και της συντήρησης, βελτίωση της αξιοπιστίας, απάλειψη των προβλημάτων ευθυγράμμισης με το δρομέα αλλά και το σημαντικότερο ίσως ελάττωση του θορύβου που αποτελεί το σημαντικότερο μειονέκτημα ανάπτυξης και ευρείας χρήσης των αιολικών συστημάτων.

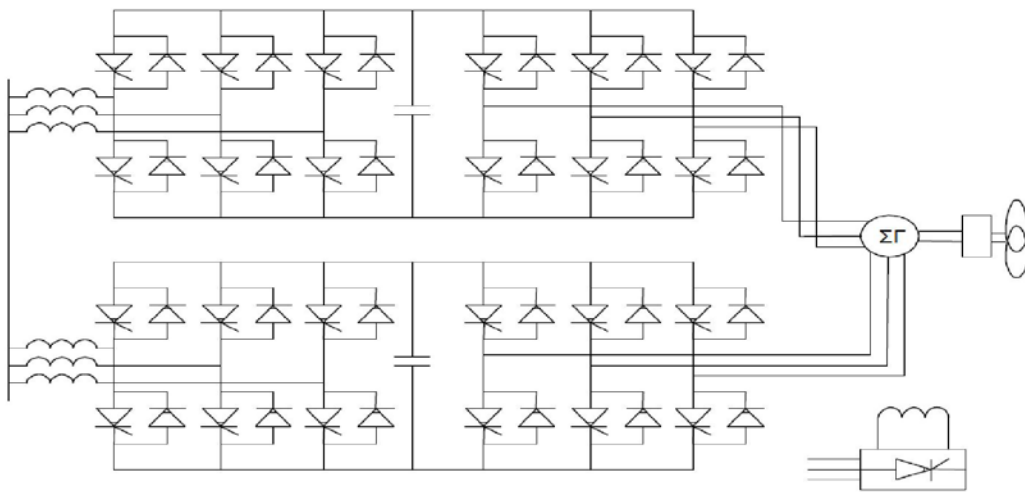
1.8.4.3 Η εξαφασική σύγχρονη γεννήτρια

Όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο, ο ανεμοκινητήρας αποδίδει τη μέγιστη ισχύ από τον άνεμο όταν αποκτά μία συγκεκριμένη ταχύτητα ανάλογα με την ταχύτητα του ανέμου (λειτουργία μεταβλητών στροφών). Αναφέρθηκε επίσης στην προηγούμενη παράγραφο ότι η σύγχρονη γεννήτρια μπορεί να χρησιμοποιηθεί σχετικά εύκολα σε λειτουργία μεταβλητών στροφών και μάλιστα χαμηλών τιμών. Το σχήμα: «σύγχρονη γεννήτρια άμεσα συνδεδεμένη με τον άξονα του ανεμοκινητήρα» φαίνεται να ικανοποιεί την απαίτηση για απορρόφηση μέγιστης ισχύος από τον άνεμο με τρόπο ικανοποιητικό όσον αφορά τη λειτουργία της σύγχρονης μηχανής. Παρ' όλα αυτά, όταν η σύγχρονη μηχανή οδηγείται σε λειτουργία χαμηλών και μεταβλητών στροφών είναι αναπόφευκτη η εμφάνιση ταλαντώσεων της ηλεκτρομαγνητικής ροπής της μηχανής οποίος συγκρίνει συνεχώς την ισχύ κάθε τυλίγματος και στην περίπτωση που αυτές διαφέρουν μεταξύ τους διακόπτει αμέσως τη λειτουργία της μηχανής). Η κατασκευή αυτή του συνολικού τυλίγματος του στάτη επιφέρει την απαλοιφή κάποιων ανώτερων αρμονικών στην ηλεκτρομαγνητική ροπή της μηχανής με αποτέλεσμα την ομαλοποίησή της και κατά συνέπεια την ποιοτικότερη ισχύ στην

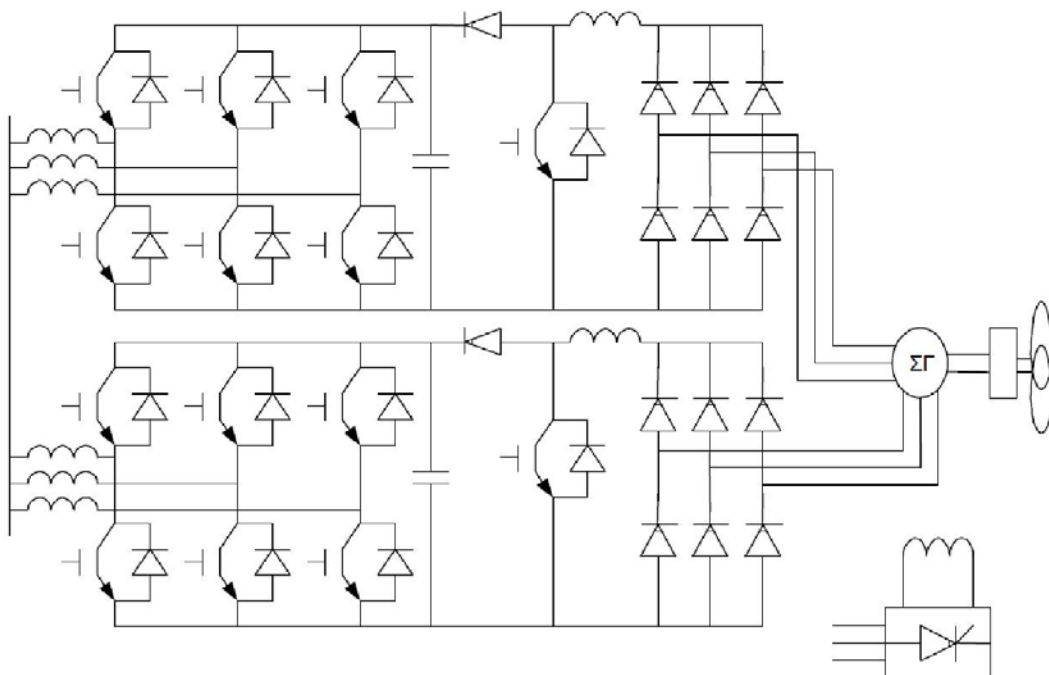
έξοδο. Η μηχανή αυτής της κατασκευής έχει καθιερωθεί με την ονομασία «εξαφασική σύγχρονη μηχανή».

Στην προηγούμενη παράγραφο περιγράφηκαν όλες οι διατάξεις που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στα σχήματα με σύγχρονη μηχανή. Ακόμα σε άλλη περίπτωση η μηχανή μπορεί να αποτελείται από δύο τριφασικά τυλίγματα στον στάτη και όχι από ένα. Συνεπώς το κάθε ένα από τα δύο τυλίγματα είναι συνδεδεμένο στο δικό του ζεύγος μετατροπέων. Με άλλα λόγια υπάρχουν δύο διασυνδέσεις συνεχούς ρεύματος στο στάτη της γεννήτριας.

Στα Σχήματα 1.8.17, 1.8.18 που ακολουθούν απεικονίζονται τα δύο επικρατέστερα ηλεκτρικά σχήματα όπως περιγράφηκαν στην προηγούμενη παράγραφο με εφαρμογή στην εξαφασική μηχανή.



Σχ. 1.8.17 Ανεμογεννήτρια ΜΣΣΣ με εξαφασική σύγχρονη μηχανή και διάταξη ΕΡ/ΣΡ/ΕΡ σε κάθε τύλιγμα του στάτη αποτελούμενη από δύο ελεγχόμενους μετατροπείς



Σχ. 1.8.18 Ανεμογεννήτρια ΜΣΣΣ με εξαφασική σύγχρονη μηχανή και διάταξη ΕΡ/ΣΡ/ΕΡ σε κάθε τύλιγμα του στάτη αποτελούμενη από ανορθωτή με διόδους,

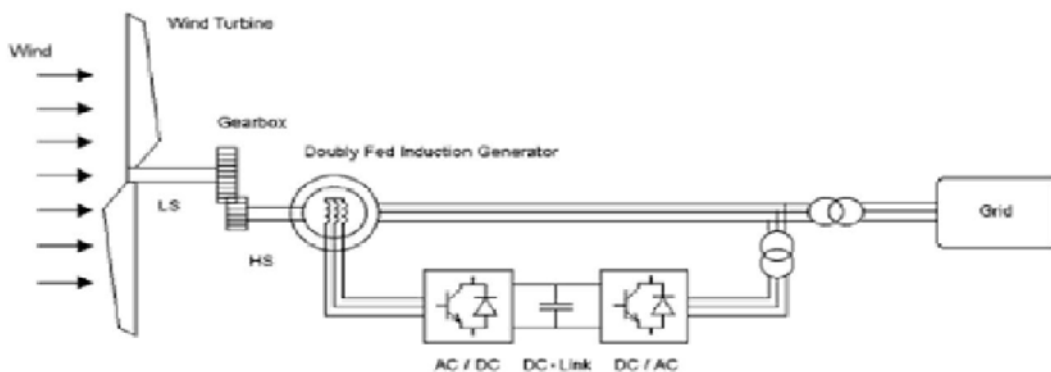
ανυψωτή τάσης και αντιστροφή με IGBT

1.8.5 ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΜΕ ΓΕΔΤ (DFIG)

Η γεννήτρια επαγωγής διπλής τροφοδότησης, ΓΕΔΤ, κερδίζει συνεχώς έδαφος στη σημερινή αγορά. Αποτελείται από μια γεννήτρια δακτυλιοφόρου δρομέα με τα τυλίγματα του στάτη απευθείας συνδεδεμένα στο δίκτυο ΕΡ και τα τυλίγματα του ρότορα συνδεδεμένα σε μια διάταξη διασύνδεσης Εναλλασσόμενου Ρεύματος /Συνεχούς Ρεύματος /Εναλλασσόμενου Ρεύματος (ΕΡ/ΣΡ/ΕΡ) με μετατροπείς πηγής τάσης. Ο όρος «διπλής τροφοδότησης» αναφέρεται στο γεγονός ότι η τάση στο στάτη εφαρμόζεται από το δίκτυο και η τάση στο ρότορα εφαρμόζεται από τον μετατροπέα ισχύος. Ο μετατροπέας αντισταθμίζει τη διαφορά ανάμεσα στη μηχανική και την ηλεκτρική συχνότητα εκχύνοντας στο ρότορα ένα ρεύμα με μεταβλητή συχνότητα. Έτσι, κατά την κανονική λειτουργία αλλά και κατά τη διάρκεια σφαλμάτων, η συμπεριφορά της γεννήτριας ελέγχεται από τον μετατροπέα ισχύος και τους ελεγκτές του.

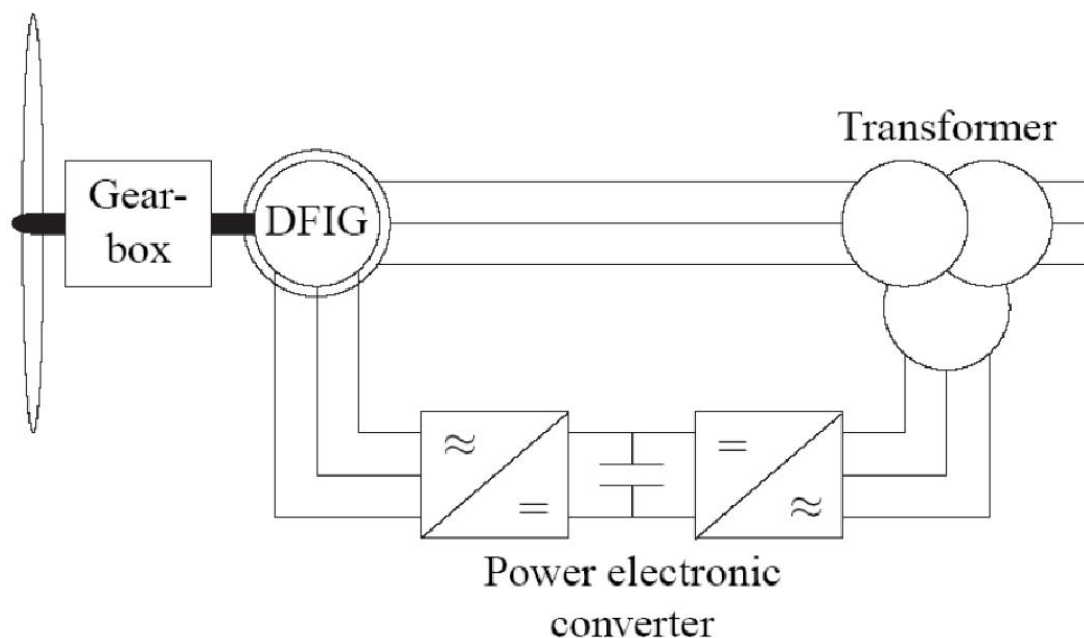
Η διάταξη των μετατροπέων αποτελείται από δύο μετατροπείς πηγής τάσης, ο ένας στην πλευρά του ρότορα και ο άλλος στην πλευρά του δικτύου, οι οποίοι ελέγχονται ανεξάρτητα ο ένας από τον άλλο. Ο μετατροπέας που βρίσκεται στην πλευρά του ρότορα ελέγχει την πραγματική και την άεργο ισχύ ελέγχοντας τις συνιστώσες του ρεύματος του ρότορα, ενώ ο μετατροπέας από την πλευρά του δικτύου ελέγχει την τάση ΣΡ ώστε η άεργος ισχύς που απορροφάται από το δίκτυο να είναι ίση με μηδέν. Ανάλογα με την κατάσταση λειτουργίας στο σύστημα οδήγησης, η ισχύς τροφοδοτείται στο ρότορα ή απορροφάται από αυτόν.

Σε μια υπέρ-σύγχρονη κατάσταση λειτουργίας, η ισχύς οδηγείται από το ρότορα μέσω του μετατροπέα στο δίκτυο, ενώ στην υπο-σύγχρονη κατάσταση λειτουργίας η κατεύθυνση της ισχύος είναι από το δίκτυο προς το ρότορα. Και στις δύο καταστάσεις ο στάτης τροφοδοτεί με ενέργεια το δίκτυο.



Σχ.1.8.19 Α/Γ μεταβλητής ταχύτητας με γεννήτρια επαγωγής διπλής τροφοδότησης

Πιο αναλυτικά, για συστήματα μεταβλητής ταχύτητας με περιορισμένο εύρος (για παράδειγμα 30 % της σύγχρονης ταχύτητας) η ΓΕΔΤ μπορεί να είναι μια ενδιαφέρουσα λύση. Όπως προαναφέρθηκε νωρίτερα ο λόγος για αυτό είναι ότι ο ηλεκτρονικός μετατροπέας ισχύος έχει μόνο να χειριστεί ένα μέρος (20-30%) της συνολικής ισχύος. Αυτό σημαίνει ότι οι απώλειες στον ηλεκτρονικό μετατροπέα ισχύος μπορούν να μειωθούν έναντι ενός συστήματος όπου ο μετατροπέας πρέπει να χειριστεί τη ολική ισχύ. Επιπλέον, το κόστος του μετατροπέα γίνεται χαμηλότερο. Το κύκλωμα του στάτη της ΓΕΔΤ συνδέεται με το δίκτυο ενώ το κύκλωμα του δρομέα συνδέεται με έναν μετατροπέα μέσω των δαχτυλιδιών ολίσθησης. Ο μετατροπέας που συνδέεται μεταξύ δρομέα και τερματικό ζυγό της Α/Γ αποτελείται από δύο μετατροπείς, δηλ. το μετατροπέα στην πλευρά της μηχανής και το μετατροπέα στην πλευρά του δικτύου, οι οποίοι συνδέονται μέσω της dc πλευράς τους. Στη διεθνή βιβλιογραφία το σχήμα αυτό των μετατροπέων είναι γνωστό ως back to back. Μια πιο λεπτομερής εικόνα του συστήματος της ΓΕΔΤ με back-to-back μετατροπείς φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί.



Σχ. 1.8.20 Σύστημα επαγωγικής γεννήτριας διπλής εξόδου

Ο back to back μετατροπέας αποτελείται από δύο μετατροπείς :έναν μετατροπέα στην πλευρά του δικτύου (grid side converter) και έναν στην πλευρά του δρομέα (rotor side converter),οι οποίοι συνδέονται back to back. Μεταξύ των δύο μετατροπέων τοποθετείται ένας DC-link πυκνωτής, σαν αποθήκη ενέργειας, με στόχο να διατηρεί μικρές τις διακυμάνσεις (ή τον κυματισμό) της DC-link τάσης. Με τον μετατροπέα στην πλευρά του δρομέα είναι δυνατό να ελεγχθεί η ροπή ή η ταχύτητα της ΓΕ/Τ και επίσης ο συντελεστής ισχύος στα τερματικά του στάτη, ενώ ο κύριος στόχος του μετατροπέα στην πλευρά του δικτύου (στάτη) είναι να κρατήσει την DC-link τάση σταθερή.

Μια συνήθης εφαρμογή για ΓΕΔΤ είναι οι Α/Γ καθώς αυτές λειτουργούν σε ένα περιορισμένο εύρος ταχύτητας περίπου $\pm 30\%$. Άλλες εφαρμογές ,πέρα από Α/Γ, είναι για παράδειγμα αυτόνομα συστήματα diesel συστήματα αποθήκευσης

ενέργειας, στρεφόμενοι μετατροπείς που τροφοδοτούν ένα δίκτυο σιδηροδρόμων από ένα δίκτυο σταθερής συχνότητας.

Η γεννήτρια διπλής τροφοδότησης παρουσιάζει αρκετά πλεονεκτήματα. Έχει την ιδιότητα να ελέγχει ανεξάρτητα την πραγματική από την άεργο ισχύ μέσω του ρεύματος στο ρότορα. Δεν είναι αναγκαίο να μαγνητιστεί από το δίκτυο, απαιτώντας άεργο ισχύ από αυτό καθώς μπορεί να εξασφαλίσει το απαραίτητο ρεύμα μαγνήτισης μέσα από το κύκλωμα του δρομέα. Έχει επίσης την ικανότητα να παράγει άεργο ισχύ, η οποία τροφοδοτείται στο δίκτυο μέσω του μετατροπέα που βρίσκεται προς την πλευρά του δικτύου. Παρόλα αυτά αυτός ο μετατροπέας υπό κανονικές συνθήκες λειτουργεί υπό μοναδιαίο συντελεστή ισχύος και δεν εμπλέκεται σε ανταλλαγή άεργου ισχύος 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. Ένα ακόμα πλεονέκτημα της ΓΕΔΤ είναι η διαδικασία είναι η διαδικασία εκκίνησης και συγχρονισμού της γεννήτριας με το δίκτυο. Ο συγχρονισμός είναι γρήγορος και εύκολος γιατί μπορεί να γίνει σε οποιαδήποτε ταχύτητα $\omega_r = \omega_1 \cdot (1 - |S_{max}|)$ ελέγχοντας το μετατροπέα από την πλευρά του δρομέα και επιδιώκοντας να συγχρονίσει τις τάσεις του στάτη και του δικτύου τόσο σε μέτρο όσο και σε φάση. Η όλη διαδικασία είναι σύντομη μιας και τα ρεύματα του δρομέα ελέγχονται γρήγορα, χωρίς να απαιτείται κανένας έλεγχος και συμβολή του μηχανικού μέρους της μηχανής (pitch control).

Το βασικό μειονέκτημα της γεννήτριας αυτής είναι η χρήση δαχτυλιδιών και ψυκτρών στο κύκλωμα του δρομέα, που έχει ως αποτέλεσμα πέρα από τις απώλειες που εισάγουν, η φθορά τους να απαιτεί συχνό έλεγχο και συντήρηση. Επιπλέον απαιτεί κυκλώματα αυξημένης προστασίας των μετατροπέων σε περιπτώσεις σφαλμάτων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 - ΑΙΟΛΙΚΑ ΠΑΡΚΑ

2.1 ΓΕΝΙΚΑ

Τα αιολικά πάρκα αποτελούνται από σειρές ανεμογεννητριών που μετατρέπουν την αιολική ενέργεια σε ηλεκτρική. Κάθε ανεμογεννήτρια είναι συνδεδεμένη σε ένα εσωτερικό δίκτυο χαμηλής ή μέσης τάσης, το οποίο συνδέεται με το διασυνδεδεμένο ηλεκτρικό δίκτυο μέσω ενός μετασχηματιστή ανύψωσης της τάσης. Υπάρχουν τρία βασικά είδη αιολικών πάρκων τα χερσαία, τα παράκτια, που βρίσκονται κοντά στην ακτή και τα θαλάσσια.

Χερσαία Αιολικά Πάρκα

Χερσαία αιολικά πάρκα, ονομάζονται αυτά που κατασκευάζονται στις κορυφογραμμές περιοχών με μεγάλο σχετικά υψόμετρο τουλάχιστον τρία χιλιόμετρα προς το εσωτερικό από την πλησιέστερη ακτογραμμή. Αυτό συμβαίνει για την εκμετάλλευση της λεγόμενης τοπογραφικής επιτάχυνσης, την επιτάχυνση δηλαδή του ανέμου καθώς διασχίζει μια κορυφογραμμή. Η αύξηση της ταχύτητας του ανέμου οδηγεί και σε αύξηση της παραγόμενης ενέργειας. Ιδιαίτερη σημασία δίνεται στην ακριβή τοποθέτηση των ανεμογεννητριών, η οποία γίνεται μετά από αναλυτική παρακολούθηση των τοπικών ανέμων για ένα μεγάλο χρονικό διάστημα πριν την εγκατάσταση. Τέλος, αξίζει να αναφερθεί ότι η περιοχή στην οποία εγκαθίσταται το αιολικό πάρκο, αλλοιώνεται μόνο οπτικά και παραμένει αξιοποιήσιμη για γεωργία ή κτηνοτροφία.



Παράκτια Αιολικά Πάρκα

Είναι τα πάρκα που βρίσκονται στην ξηρά εντός της ζώνης των τριών χιλιομέτρων από την ακτογραμμή ή στην θάλασσα εντός της ζώνης των δέκα χιλιομέτρων από την ακτογραμμή. Αυτές οι τοποθεσίες είναι αποδοτικές για εγκατάσταση λόγω του ανέμου που δημιουργείται από την θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ θάλασσας και ξηράς καθημερινά. Οι ταχύτητες στο μερίδιο αυτών των ζωνών εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά του χερσαίου και παράκτιου ανέμου, ανάλογα με την κατεύθυνση επικρατούντος ανέμου.



Θαλάσσια Αιολικά Πάρκα

Είναι εγκατεστημένα σε θαλάσσιες περιοχές πέραν των δέκα χιλιομέτρων από την ακτή. Ακριβώς επειδή η επιφάνεια του νερού είναι ομαλότερη αυτής του εδάφους, η ταχύτητα του ανέμου είναι υψηλότερη από την ξηρά, έτσι ο συντελεστής χρησιμοποίησης ή συντελεστής εκμετάλλευσης (Capacity Factor) είναι υψηλότερος των άλλων δυο τύπων αιολικών πάρκων. Η θαλάσσια εγκατάσταση είναι ακριβότερη από τη χερσαία αλλά αυτό εξαρτάται από τις ιδιότητες της περιοχής. Οι πυλώνες των θαλάσσιων ανεμογεννητριών είναι γενικά πιο ψηλοί από αυτούς των χερσαίων αν περιληφθεί το καταδυόμενο ύψος. Τα θεμέλια θαλάσσιων ανεμογεννητριών είναι ακριβότερα για να κατασκευαστούν. Η μετάδοση δύναμης από τις θαλάσσιες ανεμογεννήτριες είναι μέσω υποθαλάσσιου καλωδίου. Οι θαλάσσιες εγκαταστάσεις μπορούν να χρησιμοποιήσουν την άμεση τρέχουσα λειτουργία υψηλής τάσης εάν πρόκειται να καλυφθεί σημαντική απόσταση. Το θαλασσινό νερό επίσης αυξάνει τις δαπάνες συντήρησης με τη διάβρωση των πύργων, αλλά δεν ισχύει το ίδιο για τους πύργους εντός του γλυκού νερού μεγάλων λιμνών. Οι επισκευές και η συντήρηση είναι συνήθως δαπανηρότερες απ' ό,τι στις χερσαίες ανεμογεννήτριες. Οι θαλάσσιες ανεμογεννήτριες εξοπλίζονται με επιπλέον μέτρα προστασίας διάβρωσης όπως είναι τα επιστρώματα και η καθοδική προστασία, μέτρα τα οποία δεν μπορούν να απαιτηθούν στις θέσεις γλυκού νερού.



Τα αιολικά πάρκα εμφανίζουν ορισμένα πλεονεκτήματα συγκριτικά με τις μεμονωμένες ανεμογεννήτριες.

Πλεονεκτήματα:

- Εξομάλυνση παραγόμενης ισχύος
- Σταθερές και μειωμένες διακυμάνσεις ηλεκτρικής ισχύος
- Αντιμετώπιση των τοπικών ριπών ανέμου
- Παραγωγή μεγαλύτερων ποσών ηλεκτρικής ισχύος

Μειονεκτήματα:

- Απαιτητικός σχεδιασμός αιολικού πάρκου (κόστος)
- Ανάγκη για συσχέτιση των διακυμάνσεων εκμετάλλευσης του ανέμου
- Κάθε ανεμογεννήτρια επηρεάζεται από την άλλη (μείωση του πεδίου ανέμου)

Βαθμός απόδοσης αιολικού πάρκου:

Ο βαθμός απόδοσης αιολικού πάρκου ορίζεται από την σχέση:

$$\eta = \frac{\sum_{i=1}^{n_T} P_i}{n_T \cdot P_W}$$

Βαθμός απόδοσης αιολικού πάρκου

όπου n_T είναι το πλήθος των ανεμογεννητριών του πάρκου, P_i η ισχύς της i -οστής ανεμογεννήτριας και P_W η ισχύς που αντιστοιχεί στην ταχύτητα αναφοράς του ανέμου και εκφράζει την ισχύ που θα παρήγαγε κάθε ανεμογεννήτρια αν λειτουργούσε μόνη της. Ο βαθμός απόδοσης αιολικού πάρκου αναφέρεται σε συγκεκριμένη ταχύτητα και διεύθυνση του ανέμου.

Για να υπολογιστεί ο ετήσιος βαθμός απόδοσης του πάρκου, πρέπει να ληφθεί υπόψη η συχνότητα εμφάνισης κάθε ταχύτητας και διεύθυνσης. Για τον υπολογισμό είναι απαραίτητο να γνωρίζουμε τη χωροθέτηση του αιολικού πάρκου, αναλυτικά ανεμολογικά δεδομένα, τα χαρακτηριστικά των ανεμογεννητριών (γεωμετρικά χαρακτηριστικά, καμπύλη ισχύος και συντελεστή ώσης).

2.2 ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΟΠΟΘΕΣΙΑΣ ΑΙΟΛΙΚΟΥ ΠΑΡΚΟΥ

Οι βασικές παράμετροι επιλογής της τοποθεσίας στην οποία θα εγκατασταθεί το αιολικό πάρκο είναι οι εξής:

- το αιολικό δυναμικό της περιοχής, η αξιολόγηση του οποίου γίνεται βάση αιολικών χαρτών για κάθε περιοχή
- η δυνατότητα πρόσβασης στην περιοχή, με βάση γεωγραφικούς χάρτες
- τα απαιτούμενα έργα υποδομής όπως: διάνοιξη πλατειών για κάθε ανεμογεννήτρια, οικίσκος ελέγχου, εσωτερική οδοποιία, μετασχηματιστές τάσης για κάθε ανεμογεννήτρια
- τα υφιστάμενα δίκτυα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας στην περιοχή
- η δυνατότητα χρήσης της γης, η οποία περιλαμβάνει αδειοδοτήσεις από υπηρεσίες όπως: η διεύθυνση δασών, η υπηρεσία πολιτικής αεροπορίας, η πολεοδομική υπηρεσία, οι εφορίες αρχαιοτήτων, ο Ο.Τ.Ε., ο Ε.Ο.Τ.
- περιβαλλοντικές επιπτώσεις, όπως οι εκπομπές θορύβου, τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία, η οπτική αρμονία, οι επιδράσεις στην πανίδα της περιοχής
- πιθανή αντιμετώπιση ακραίων καιρικών συνθηκών, όπως ο παγετός, οι συχνές βροχοπτώσεις, η μεγάλη υγρασία, παράγοντες που αυξάνουν το κόστος συντήρησης και μειώνουν τη διάρκεια ζωής των ανεμογεννητριών
- η πιθανότητα εκδήλωσης σεισμών στην περιοχή

2.3 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ - ΣΥΝΤΗΡΗΣΗ ΑΙΟΛΙΚΩΝ ΠΑΡΚΩΝ

2.3.1 Λειτουργία Αιολικού Πάρκου

Η καθημερινή λειτουργία ενός αιολικού πάρκου παρακολουθείται και ελέγχεται με τη χρήση ενός συστήματος εποπτικού ελέγχου και συλλογής δεδομένων (SCADA). Το σύστημα αυτό διασυνδέει όλα τα συστατικά μέρη (δηλ. ανεμογεννήτριες, μετεωρολογικούς σταθμούς και υποσταθμούς) του αιολικού πάρκου σε έναν κεντρικό Η/Υ, που παρέχει τη δυνατότητα στο χειριστή να παρακολουθεί και να ελέγχει τη λειτουργία του αιολικού πάρκου. Το σύστημα παρέχει και αποθηκεύει πληροφορίες σχετικά με τη λειτουργία του αιολικού πάρκου και έτσι μπορούν να εντοπιστούν αστοχίες ή προβλήματα λειτουργίας συγκεκριμένων ανεμογεννητριών.

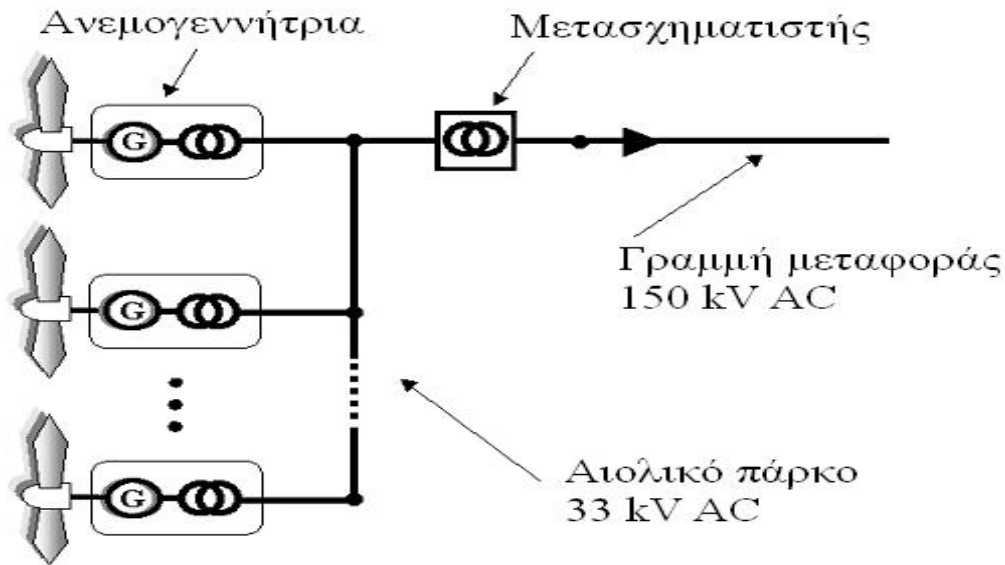
2.3.2 Συντήρηση Αιολικού Πάρκου

Η διαδικασία συντήρησης τόσο των υπεράκτιων ανεμογεννητριών όσο και των χερσαίων ανεμογεννητριών απαιτεί τεχνογνωσία παρόμοια λόγω του ότι χρησιμοποιούν παρόμοιες συνιστώσες. Η συντήρηση των ΑΓ γίνεται με φορητό σύστημα διαγνωστικού - προληπτικού ελέγχου με ανίχνευση της μηχανικής φθοράς στις κρίσιμες συνιστώσες ανεμογεννητριών. Ειδικό φορητό σύστημα μετρά, αποθηκεύει και αναλύει τη στάθμη κραδασμών και δονήσεων σε επιλεγμένα κρίσιμα σημεία ως δείκτη “υγιούς λειτουργικής κατάστασης”. Με ειδικό λογισμικό συγκρίνεται η τρέχουσα κατάσταση με τις προηγούμενες αποτυπώσεις και γίνεται προληπτική διάγνωση και εντοπισμός εξαρτημάτων που έχουν αρχίσει να φθείρονται και απαιτείται η αντικατάστασή τους ή η αποσύνδεσή τους. Η φθορά συσχετίζεται με τις επιταχύνσεις και ταλαντώσεις στο κιβώτιο της ανεμογεννήτριας, στην ηλεκτρογεννήτρια και το έδρανο του κύριου άξονα. Συντήρηση μπορεί να γίνεται ανά τρίμηνο και ανά εξάμηνο. Σε κάθε συντήρηση γίνεται έλεγχος τόσο των μηχανικών μερών, μπουλόνια, φτερά, κύριος άξονας, σασμάν, γεννήτρια όσο και ηλεκτρικός έλεγχος σε συστήματα όπως το UPS, τις εφεδρικές μπαταρίες, σε αισθητήρες, στο ανεμόμετρο.

2.4 ΤΡΟΠΟΙ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΑΙΟΛΙΚΩΝ ΠΑΡΚΩΝ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ ΔΙΑΝΟΜΗΣ

Επειδή η αιολική ενέργεια είναι μια “ήπια” μορφή ενέργειας, για να μπορέσουμε να πάρουμε από τον άνεμο μια ικανοποιητική ποσότητα ενέργειας, η οποία να είναι συγκρίσιμη με αυτήν έστω ενός μικρού συμβατικού σταθμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, απαιτούνται αρκετές αιολικές μηχανές διασυνδεδεμένες μεταξύ τους. Οι μηχανές αυτές πρέπει να βρίσκονται σε περιοχές με υψηλό αιολικό δυναμικό, δημιουργώντας έτσι ένα αιολικό πάρκο. Στο πάρκο αυτό η διάταξη των ανεμογεννητριών τόσο μεταξύ τους όσο και ως προς την επικρατούσα κατεύθυνση του ανέμου καθορίζεται με κριτήρια όπως την ελαχιστοποίηση της αλληλεπίδρασης των ανεμοκινητήρων που μπορούν να εγκατασταθούν στο διαθέσιμο χώρο του πάρκου και της μεγιστοποίησης της ενεργειακής απόδοσης του αιολικού πάρκου.

Οι δύο τρόποι μεταφοράς της παραγόμενης από το αιολικό πάρκο ενέργειας είναι:
α) με εναλλασσόμενη τάση υψηλής τιμής



Σύστημα μεταφοράς ενέργειας με εναλλασσόμενη τάση από αιολικό πάρκο

β) με μετατροπή της τάσης του πάρκου σε συνεχή τάση υψηλής τιμής (HVDC) , μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας με συνεχή τάση DC και στη συνέχεια μετατροπή της σε εναλλασσόμενη AC κοντά στο φορτίο ή στο σύστημα διασύνδεσης.

Η μεταφορά με συνεχή τάση υψηλής τιμής (HVDC) έχει τα παρακάτω πλεονεκτήματα:

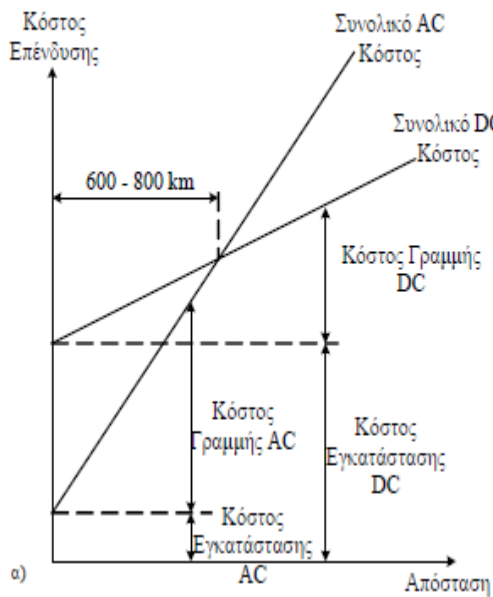
- δεν παρουσιάζονται προβλήματα που προκύπτουν από τη δημιουργία των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων όταν η μεταφορά γίνεται με εναλλασσόμενη τάση και αποφεύγονται έτσι παρεμβολές και δυσλειτουργίες στον χώρο των τηλεπικοινωνιών.
- η ροή της ισχύος είναι ελεγχόμενη σε αντίθεση με τα συστήματα μεταφοράς εναλλασσόμενης τάσης
- δεν απαιτούνται ενεργά φίλτρα και πυκνωτές για αντιστάθμιση ισχύος
- είναι δυνατή η διασύνδεση δύο ηλεκτρικών συστημάτων, όταν αυτά έχουν διαφορετική συχνότητα ή διαφορετική φιλοσοφία ελέγχου αυτής
- για μεγάλες αποστάσεις μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας οι απώλειες ισχύος είναι μικρότερες από ότι με μεταφορά με εναλλασσόμενη τάση
- τα καλώδια δεν παρουσιάζουν μεγάλη παρασιτική χωρητικότητα που δημιουργείται κατά τη μεταφορά με εναλλασσόμενη τάση
- επιτρέπει αποτελεσματικά το διαχωρισμό δυο συστημάτων με διατήρηση της ευστάθειάς τους
- δυναμική απόσβεση των ταλαντώσεων του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας

Μειονεκτήματα του συγκεκριμένου τρόπου μεταφοράς είναι:

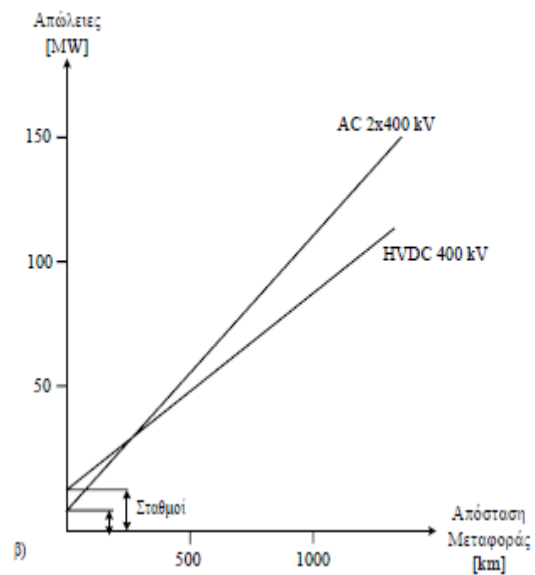
- το κόστος των συστημάτων συνεχούς τάσης είναι μεγαλύτερο από αυτό των συστημάτων που χρησιμοποιούν εναλλασσόμενη τάση. Αυτό πάντως είναι πιθανό να μειωθεί δραστικά με την εξέλιξη της τεχνολογίας των ημιαγωγών σε περιοχές υψηλής ισχύος

- η χρησιμοποίηση μετατροπέων ισχύος αυξάνει τις συνολικές απώλειες ισχύος

Παρατηρώντας τα παρακάτω διαγράμματα, τα οποία συγκρίνουν τους δύο δυνατούς τρόπους μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας με AC και DC τάση με κριτήρια το κόστος επένδυσης και τις συνολικές απώλειες ισχύος, εύκολα καταλαβαίνουμε ότι για μεγάλες αποστάσεις μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, η μεταφορά με σταθερή τάση υψηλής τιμής (HVDC) είναι πιο συμφέρουσα. Η κρίσιμη απόσταση για την εναέρια μεταφορά είναι τα 300 - 400 μίλια, ενώ γίνεται πολύ μικρότερη όταν πρόκειται για υποθαλάσσια μεταφορά.



α) σύγκριση με κριτήριο το κόστος



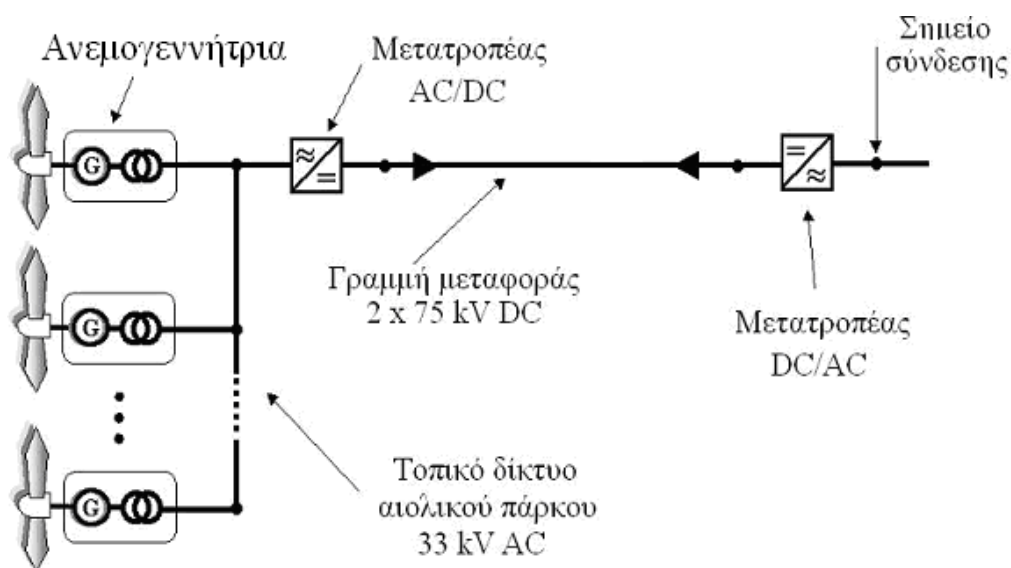
β) σύγκριση με κριτήριο τις απώλειες ισχύος

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τρεις διαφορετικοί τρόποι μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας με συνεχή τάση.

2.5 ΑΙΟΛΙΚΟ ΠΑΡΚΟ ΕΝΑΛΛΑΣΣΟΜΕΝΗΣ - ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΤΑΣΗΣ

Στο αιολικό πάρκο εναλλασσόμενης – συνεχούς τάσης του σχήματος 2.5.1 κάθε ανεμογεννήτρια διαθέτει ένα μετασχηματιστή 33kV, άρα η τάση εξόδου είναι 33kV AC. Η κάθε ανεμογεννήτρια είναι συνδεδεμένη σε ένα τοπικό δίκτυο

εναλλασσόμενης τάσης, το οποίο συνδέεται με τον κύριο μετατροπέα 33/150 kV AC/DC.

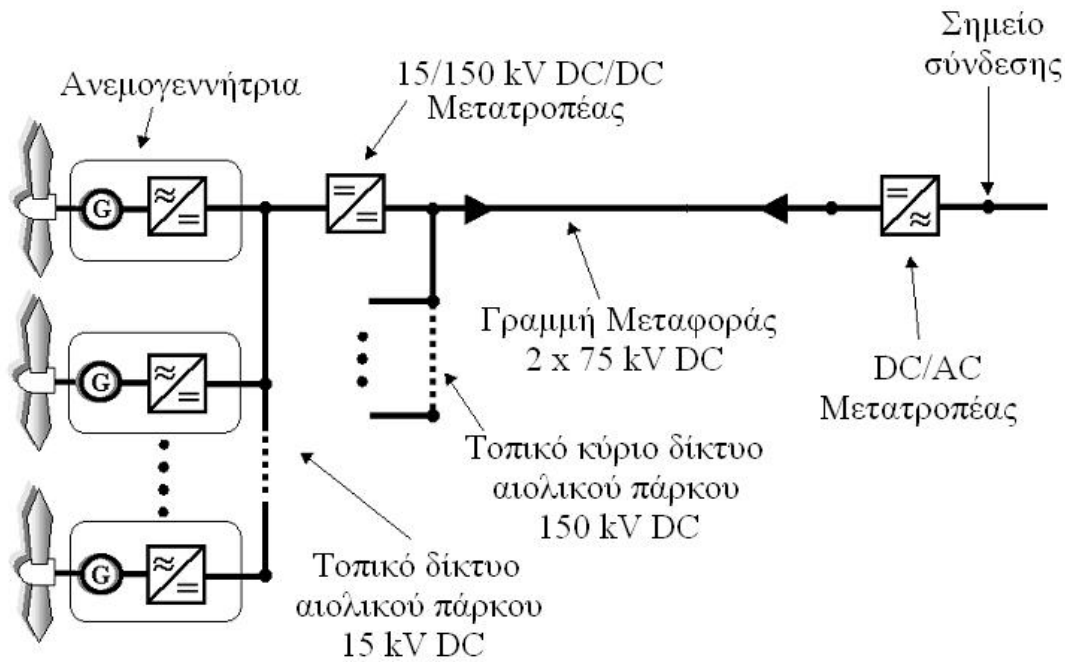


Σχ. 2.5.1 Σχηματικό διάγραμμα αιολικού πάρκου AC/DC που αποτελείται από ανεμογεννήτριες, τοπικό δίκτυο AC τάσης, μετατροπέα AC/DC, καλώδια μεταφοράς DC τάσης και μετατροπέα DC/AC στο σημείο σύνδεσης με το δίκτυο

Η μεταφορά μπορεί να γίνει με δύο ομάδες καλωδίων 75 kV DC. Στο σημείο σύνδεσης με το δίκτυο υπάρχει μετατροπέας για τη σύνδεση της εγκατάστασης στο δίκτυο.

2.6 ΑΙΟΛΙΚΟ ΠΑΡΚΟ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΤΑΣΗΣ ΜΕ ΕΝΑ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑ ΑΝΥΨΩΣΗΣ (τοπολογία DC1)

Στο αιολικό πάρκο του σχήματος 2.6.1 κάθε ανεμογεννήτρια έχει ένα μετατροπέα 15 kV AC/DC και επομένως μια τάση εξόδου των 15 kV DC. Ανά πέντε οι ανεμογεννήτριες συνδέονται μεταξύ τους δημιουργώντας ένα τοπικό υποδίκτυο 15 kV DC, το οποίο συνδέεται σε ένα 15/150 kV DC/ DC μετατροπέα.

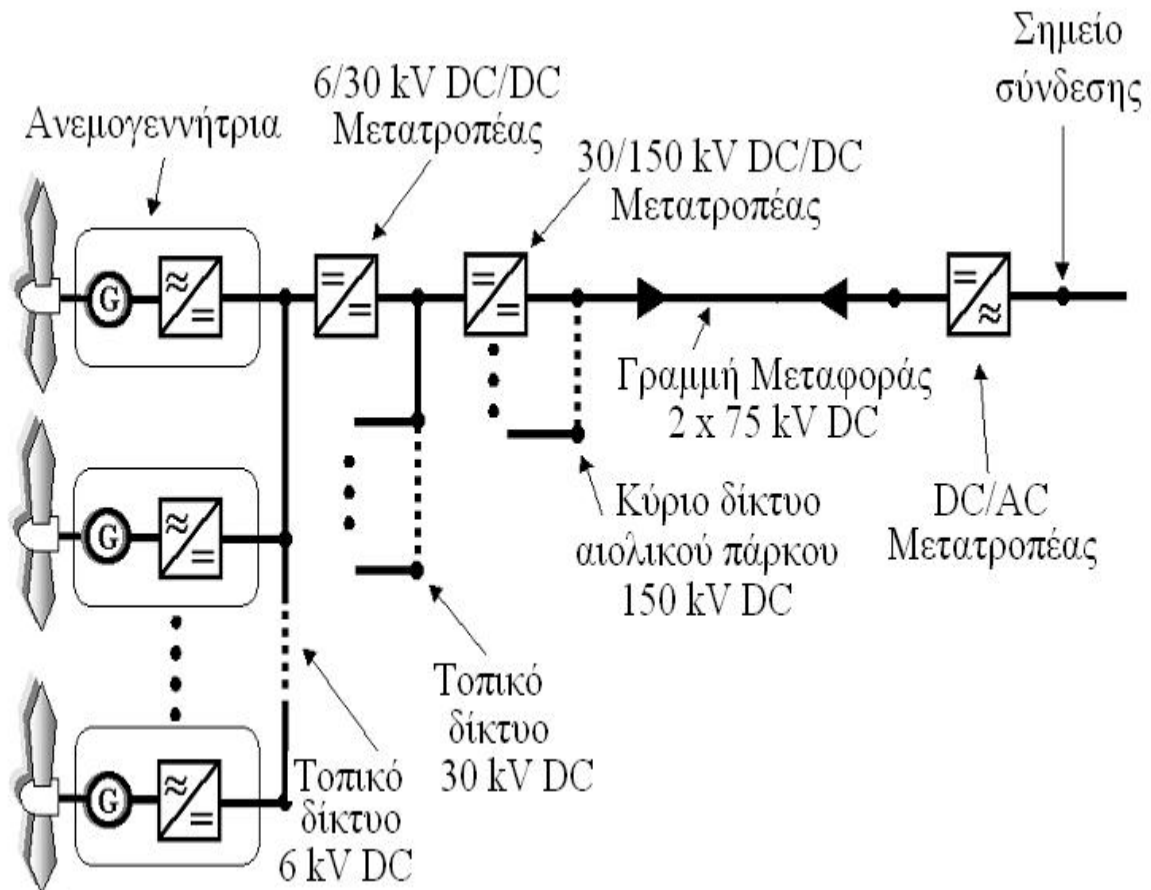


Σχ. 2.6.1 Σχηματικό διάγραμμα αιολικού πάρκου συνεχούς τάσης DC1 που αποτελείται από ανεμογεννήτριες, τοπικό δίκτυο DC τάσης, μετατροπέα DC/DC, καλώδια μεταφοράς DC τάσης και μετατροπέα DC/AC στο σημείο σύνδεσης με το δίκτυο

Όλοι αυτοί οι 15/150 kV DC/ DC μετατροπείς συνδέονται μεταξύ τους αποτελώντας το τοπικό κύριο δίκτυο του πάρκου. Στη συνέχεια μέσω δύο ομάδων καλωδίων 75 kV μεταφέρεται η ηλεκτρική ενέργεια σε μετατροπέα DC/AC που υπάρχει στο σημείο σύνδεσης με το δίκτυο.

2.7 ΑΙΟΛΙΚΟ ΠΑΡΚΟ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΤΑΣΗΣ ΜΕ ΔΥΟ ΕΝ ΣΕΙΡΑ ΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΟΥΣ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΙΣ ΑΝΥΨΩΣΗΣ (τοπολογία DC2)

Στο αιολικό πάρκο του σχήματος 2.7.1 κάθε ανεμογεννήτρια έχει τάση εξόδου 6kV DC. Ανά πέντε οι ανεμογεννήτριες συνδέονται μεταξύ τους δημιουργώντας ένα τοπικό δίκτυο το οποίο συνδέεται με ένα 6/30kV DC/DC μετατροπέα. Σε ομάδες οι μετατροπείς 6/30kV DC/DC είναι συνδεδεμένοι με ένα 30/150kV DC/DC. Όλοι αυτοί οι μετατροπείς 30/150kV συνδέονται μεταξύ τους δημιουργώντας το κύριο δίκτυο του αιολικού πάρκου. Από εκεί η ηλεκτρική ενέργεια μεταφέρεται μέσω δύο ομάδων καλωδίων 75kV DC σε ένα μετατροπέα DC/AC που βρίσκεται στο σημείο σύνδεσης με το δίκτυο.



Σχ. 2.7.1 Σχηματικό διάγραμμα αιολικού πάρκου συνεχούς τάσης DC2 που αποτελείται από ανεμογεννήτριες, τοπικά δίκτυα DC τάσης, μετατροπείς DC/DC, καλώδια μεταφοράς DC τάσης και μετατροπέα DC/AC στο σημείο σύνδεσης με το δίκτυο

Συνοψίζοντας τα παραπάνω έχουμε τέσσερις διαφορετικούς τρόπους μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας από το αιολικό πάρκο προς το δίκτυο:

- μεταφορά με εναλλασσόμενη τάση AC
- μεταφορά συνεχούς τάσης DC από το δίκτυο του αιολικού πάρκου στο οποίο η τάση είναι εναλλασσόμενη AC. Εδώ υπάρχει η δυνατότητα οι ανεμογεννήτριες να δουλεύουν με μεταβλητή ταχύτητα περιστροφής, αφού το πρόβλημα της μεταβολής της συχνότητας λύνεται με τη χρήση ηλεκτρονικών ισχύος. Ωστόσο οι μηχανικές καταπονήσεις των ανεμοκινητήρων θα είναι ίδιες από τη στιγμή που είναι συνδεδεμένες όλες μαζί.
- δύο τρόπους μεταφοράς σταθερής συνεχούς τάσης DC από το δίκτυο του πάρκου στο οποίο όμως η τάση είναι συνεχής σταθερή DC. Με αυτούς τους δύο τρόπους δίνεται η δυνατότητα στις ανεμογεννήτριες να εργάζονται μεταξύ τους με διαφορετική ταχύτητα και επομένως να έχουμε αφ' ενός μεν μικρότερες καταπονήσεις αφ' ετέρου δε μεγαλύτερη εκμετάλλευση ενέργειας από τον άνεμο.

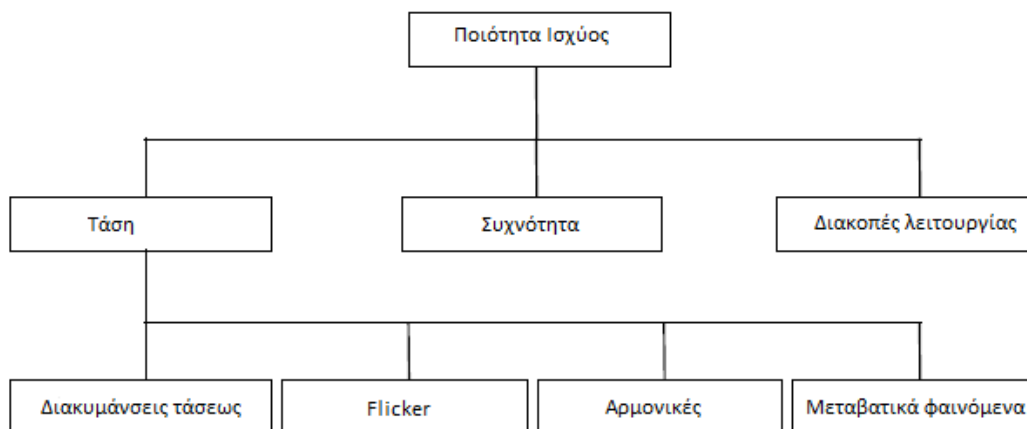
Σε όλους τους παραπάνω τρόπους μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, εκτός του παραδοσιακού AC, χρησιμοποιούνται μετατροπείς συνεχούς τάσης σε συνεχή (DC/DC). Στα επόμενα κεφάλαια θα αναλύσουμε και θα συγκρίνουμε δύο βασικούς DC/DC μετατροπείς, που χρησιμοποιούνται σε αυτές τις εφαρμογές.

2.8 ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΔΙΑΣΥΝΔΕΣΗΣ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ

Η τοποθέτηση ανεμογεννητριών επηρεάζει την ποιότητα ισχύος στο συνδεδεμένο δίκτυο. Ανάλογα με τη διαμόρφωση του δικτύου και τον τύπο των Α\Γ που χρησιμοποιούνται παρουσιάζονται διαφορετικά προβλήματα ποιότητας ισχύος. Όλες οι Α\Γ ακολουθώντας τις φυσικές μεταβολές του ανέμου έχουν ανομοιογενή παραγωγή ενέργειας.

Οι μονάδες αιολικής ενέργειας πρέπει να είναι εξοπλισμένες με νέες τεχνολογίες οι οποίες τους δίνουν τη δυνατότητα να παρέχουν καλές υπηρεσίες και να παράγουν όσο το δυνατόν πιο καθαρή ενέργεια για το δίκτυο. Η πρόοδος στα ηλεκτρονικά ισχύος έχει επιτρέψει να ολοκληρωθεί μια ομαλότερη ρύθμιση. Εφαρμογές όπως η αντιστάθμιση άεργης ισχύος, η αποθήκευση ενέργειας και οι Α\Γ μεταβλητής ταχύτητας είναι σύνηθες να υπάρχουν σε αιολικούς σταθμούς. Επειδή το αιολικό πάρκο είναι συνδεδεμένο στο δίκτυο είναι σημαντικό να εντοπιστούν και να κατανοηθούν οι πηγές διαταραχών που επηρεάζουν την ποιότητα ισχύος. Η τάση και η συχνότητα πρέπει να διαφυλάσσονται όσο το δυνατόν σταθερές. Οι διαταραχές στην τάση και το ρεύμα λόγω των αρμονικών εξαιτίας της αντίδρασης της γραμμής πρέπει να παρακολουθούνται.

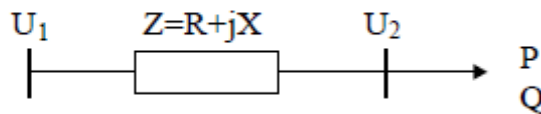
Οι συνδεδεμένες στο δίκτυο Α\Γ επηρεάζουν την ποιότητα της ισχύος. Η ποιότητα της ισχύος εξαρτάται από την αλληλεπίδραση ανάμεσα στο δίκτυο και τις Α\Γ. Στην συνέχεια παρουσιάζονται αναλυτικά τα προβλήματα που προκαλεί η σύνδεση Α/Γ στο δίκτυο.



Διάγραμμα ποιότητας ισχύος

Διακύμανση τάσης

Η διακύμανση τάσης ορίζεται ως οι αλλαγές στην rms τιμή της τάσης που συμβαίνουν στο χρονικό όριο ενός λεπτού ή και περισσότερο (π.χ. 24 ωρών). Η διακύμανση τάσης στο δίκτυο προκαλείται κυρίως από τις διακυμάνσεις στο φορτίο και στην ισχύ της μονάδας παραγωγής. Όταν φυσάει ο άνεμος, η διακύμανση της τάσης προέρχεται και από την ισχύ που παράγουν οι Α/Γ. Η παραγωγή ισχύος από τις Α\Γ μπορεί να ποικίλει αρκετά και όχι μόνο εξαιτίας της διακύμανσης του ανέμου. Μπορεί ακόμη και στιγμιαία να μεταπηδήσει από τη μέγιστη στη μηδενική παραγωγή σε περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης και αντίθετα. Όλοι οι τύποι Α\Γ προκαλούν διακυμάνσεις τάσεως. Αυτές δημιουργούνται εξαιτίας της διακύμανσης του περιεχομένου της αιολικής ενέργειας. Υπάρχουν πολλές μέθοδοι που υπολογίζουν αυτές τις διακυμάνσεις. Για παράδειγμα υπάρχουν πολλά υπολογιστικά προγράμματα στην αγορά για την διακύμανση του φορτίου. Εταιρίες κοινής ωφέλειας χρησιμοποιούν αυτά τα προγράμματα για την πρόβλεψη των διακυμάνσεων τάσης που προκαλούνται από τις διακυμάνσεις φορτίου. Υπάρχει και η αναλυτική μέθοδος που υπολογίζει την διακύμανση τάσης από την αντίδραση του δικτύου Z , την ενεργό ισχύ P και την άεργο ισχύ Q . Σε αυτή τη μέθοδο ένα απλό μοντέλο αντίστασης είναι :



όπου U_1 είναι η σταθερή τάση στο άκρο του συστήματος και U_2 είναι η τάση στο κοινό άκρο σύνδεσης.

Η διακύμανση τάσης υπολογίζεται από τον παρακάτω τύπο:

$$\frac{\Delta U}{U} = \frac{R \cdot P + X \cdot Q}{U} \cdot 100\%$$

όπου R είναι η αντίσταση, X η αντίδραση της γραμμής και U η τάση της εναέριας γραμμής .

Flicker –Ταχείες μεταβολές τάσης

Ταχείες μεταβολές τάσης είναι οι γρήγορες μεταβολές της ενεργού (rms) τιμής της οι οποίες συμβαίνουν σε χρονικές κλίμακες από 1 έως αρκετά δευτερόλεπτα (και οπωσδήποτε εντός διαστήματος μικρότερου από 10 λεπτά). Ταχείες μεταβολές συμβαίνουν, λόγω χειρισμών, στις εγκαταστάσεις παραγωγής (συνηθέστερες είναι οι ζεύξεις/αποζεύξεις γεννητριών και πυκνωτών) ή και εξαιτίας της μεταβλητότητας της ισχύος εξόδου των Α/Γ. Οι διαταραχές αυτές μπορεί να επηρεάζουν την λειτουργία

ευαίσθητων ηλεκτρονικών συσκευών και να προκαλούν ενοχλητικές διακυμάνσεις της φωτεινής εντάσεως των λυχνιών φωτισμού.

Το φαινόμενο flicker είναι ένας παλιός τρόπος για να ποσοτικοποιήσουμε τη διακύμανση της τάσης. Η μέθοδος αυτή βασίζεται στις μετρήσεις της διακύμανσης του πλάτους της τάσης, δηλαδή της διάρκειας και του μεγέθους των διακυμάνσεων. Το flicker που προκαλείται από τις Α\Γ προέρχεται από δυο τρόπους λειτουργίας τους: τη συνεχή και τη διακοπτόμενη λειτουργία.

Συνεχής λειτουργία

Το flicker που δημιουργείται κατά την συνεχή λειτουργία προκαλείται από τις διακυμάνσεις ισχύος. Οι διακυμάνσεις ισχύος κυρίως προέρχονται από τις διακυμάνσεις της ταχύτητας του αέρα και τις μηχανικές ιδιότητες της Α\Γ. Η μέθοδος που προτείνεται για να ξεπεραστεί το φαινόμενο είναι συνεχείς μετρήσεις στην τάση και το ρεύμα θεωρώντας την ενεργό και την άεργο ισχύ ως τα μόνα φορτία.

Διακοπτόμενη λειτουργία

Η διακοπτόμενη λειτουργία παράγει επίσης flicker. Τυπικές διακοπτόμενες λειτουργίες είναι η έναρξη και το σταμάτημα των Α\Γ. Έναρξη, σταμάτημα και διακοπές ανάμεσα στις Α\Γ ή ανάμεσα σε σειρές Α\Γ προκαλούν αλλαγές στην παραγωγή ισχύος. Αυτή η αλλαγή στην παραγωγή ισχύος προκαλεί αλλαγές στην τάση, στο σημείο κοινής σύνδεσης. Αυτές οι αλλαγές με τη σειρά τους προκαλούν flicker.

Αρμονικές

Η σύνδεση των εγκαταστάσεων στο δίκτυο μέσης τάσης είναι εφικτή όταν η προκαλούμενη από τη λειτουργία τους αρμονική παραμόρφωση της τάσης του δικτύου δεν υπερβαίνει τα παρακάτω όρια κατά IEC 61000-3-6:

Περισσότερες αρμονικές ≠3k			Περισσότερες αρμονικές =3k			Αρτιες αρμονικές		
Τάξη h	Αρμονική τάση (% της ονομαστικής)		Τάξη h	Αρμονική τάση (% της ονομαστικής)		Τάξη h	Αρμονική τάση (% της ονομαστικής)	
	ΜΤ	ΥΤ		ΜΤ	ΥΤ		ΜΤ	ΥΤ
5	5	2	3	4	2	2	1,6	1,5
7	4	2	9	1,2	1	4	1	1
11	3	1,5	15	0,3	0,3	6	0,5	0,5
13	2,5	1,5	21	0,2	0,2	8	0,4	0,4
17	1,6	1	>21	0,2	0,2	10	0,4	0,4
19	1,2	1				12	0,2	0,2
23	1,2	0,7				>12	0,2	0,2
25	1,2	0,7						
>25	0,2+	0,2+						
	$0,5 \cdot \left(\frac{25}{h}\right)$	$0,5 \cdot \left(\frac{25}{h}\right)$						
Ολική αρμονική παραμόρφωση, THD: 6,5% για δίκτυα ΜΤ και 3% για δίκτυα ΥΤ								

Οι αρμονικές τάσης είναι σχεδόν πάντα παρούσες στο δίκτυο. Μη γραμμικά φορτία, ηλεκτρονικά ισχύος, ανορθωτές, inverter είναι μερικές πηγές αρμονικών. Όταν υπάρχουν τέτοιου είδους φορτία απαιτείται έλεγχος αρμονικών. Στην περίπτωση της απευθείας σύνδεσης συμβατικών γεννητριών (σύγχρονων και ασύγχρονων), χωρίς την παρεμβολή μετατροπέα ισχύος δεν αναμένονται προβλήματα εκπομπών αρμονικών εφόσον η τάση διατηρείται εντός των προβλεπόμενων ορίων. Επίσης ενδιαφέρουν οι εκπομπές αρμονικών μόνο κατά την κανονική λειτουργία των εγκαταστάσεων και όχι για μεταβατικές περιόδους διάρκειας λίγων δευτερολέπτων (π.χ. κατά τον παραλληλισμό με το δίκτυο). Οι επιδράσεις των αρμονικών περιλαμβάνουν υπερθέρμανση, βλάβη εξοπλισμού, ελαττωματική λειτουργία εξοπλισμού προστασίας, ενεργοποίηση ευαίσθητων φορτίων και παρεμβολές σε κυκλώματα επικοινωνίας. Οι Α\Γ σταθερών στροφών δεν αναμένεται να προκαλέσουν σημαντικές αρμονικές και ενδιάμεσες αρμονικές. Για τις Α\Γ μεταβλητής ταχύτητας, η εκπομπή αρμονικών πρέπει να ελέγχεται.

Μεταβατικά φαινόμενα

Μεταβατικά φαινόμενα συμβαίνουν κυρίως κατά την έναρξη και διακοπή λειτουργίας μίας Α\Γ σταθερών στροφών. Η διαδικασία για την ομαλή εκκίνηση αποτελείται από 2 βήματα.. Πρώτον, η Α/Γ πρέπει να είναι ενεργοποιημένη. Για να αποφύγουμε ένα μεγάλο ρεύμα εκκίνησης χρησιμοποιείται ένας ομαλός εκκινήτης. Όταν αρχίζει να λειτουργεί ο ομαλός εκκινήτης και η Α\Γ συνδέεται στο δίκτυο, τότε συνδέονται και οι συστοιχίες πυκνωτών. Οι πυκνωτές ενεργοποιούνται κατευθείαν στο δίκτυο χωρίς μηχανήματα ομαλής εκκίνησης. Τη στιγμή που συνδέονται οι

πυκνωτές έχουμε ένα μέγιστο ρεύματος. Κατά το μεταβατικό αυτό φαινόμενο, η τιμή του ρεύματος μπορεί να φτάσει και το διπλάσιο της ονομαστικής της τιμής της $A\Gamma$ και μπορεί να επηρεάσει την τάση του δικτύου χαμηλής τάσης. Το μεταβατικό φαινόμενο της τάσης μπορεί να ενοχλήσει ευαίσθητο εξοπλισμό που είναι συνδεδεμένο στο χαμηλό δίκτυο.

Το πλάτος του ρεύματος που δημιουργείται από την σύνδεση εκφορτισμένων πυκνωτών καθορίζεται από την αντίσταση του δικτύου και τη χωρητικότητα των πυκνωτών. Η συχνότητα του φαινομένου μπορεί να διατυπωθεί και ως :

$$f = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{1}{L \cdot C}}$$

όπου L είναι η αυτεπαγωγή του δικτύου και C η χωρητικότητα των πυκνωτών.

Διακυμάνσεις συχνότητας

Η εισαγωγή ενός σχετικά μικρού ποσοστού αιολικής ισχύος σε ένα σύστημα παραγωγής, δεν επηρεάζει τη συχνότητα του συστήματος, καθώς οι εισερχόμενες διαταραχές συχνότητας από τα αιολικά πάρκα, λόγω μεταβλητότητας του ανέμου, είναι μικρές και αντισταθμίζονται εύκολα από τις θερμοηλεκτρικές μηχανές του συστήματος. Ωστόσο, η εισαγωγή μεγάλου σχετικά ποσοστού αιολικής ισχύος σε ένα σύστημα, μπορεί να είναι πολύ σημαντική όσον αφορά τη σταθερότητα της συχνότητας, ιδιαίτερα αν οι εγκατεστημένες ανεμογεννήτριες είναι σταθερών στροφών. Η συχνότητα του συστήματος ρυθμίζεται κλασσικά από τις θερμοηλεκτρικές μηχανές.

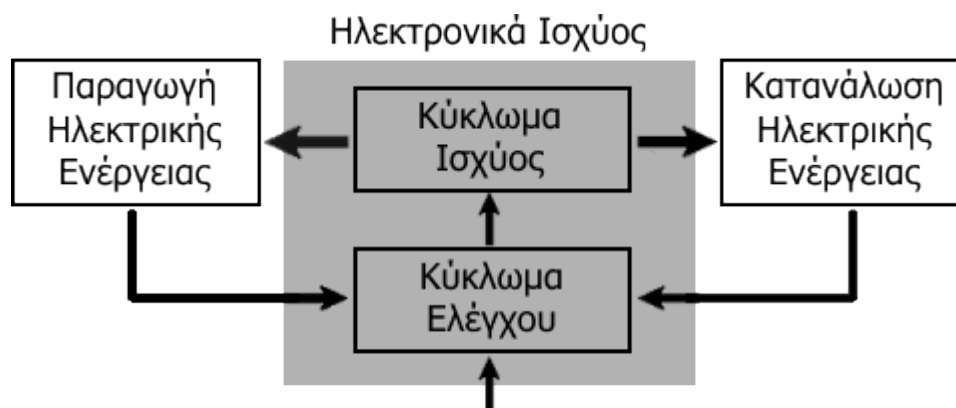
Πάντως, οι νέες ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών παρουσιάζουν πολύ καλύτερα χαρακτηριστικά σχετικά με τη συχνότητα του συστήματος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 - ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ ΙΣΧΥΟΣ

3.1 ΓΕΝΙΚΑ

Τα ηλεκτρονικά ισχύος είναι μια ιδιαίτερη κατηγορία ηλεκτρονικών διατάξεων, οι οποίες χρησιμοποιούνται για την επεξεργασία, τον έλεγχο και τη μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας και αποτελούν συνδετικό κρίκο μεταξύ της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και της κατανάλωσης. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται κυκλώματα με ηλεκτρονικά στοιχεία. Μια διάταξη ηλεκτρονικών ισχύος αναφέρεται και ως μετατροπέας ηλεκτρικής ενέργειας.

Τα ηλεκτρονικά ισχύος χωρίζονται στο κύκλωμα ισχύος και στο κύκλωμα ελέγχου.



Ηλεκτρονικά Ισχύος σαν συνδετικός κρίκος μεταξύ παραγωγής και κατανάλωσης ενέργειας

Βασικά στοιχεία στα κυκλώματα ισχύος είναι: το thyristor, το οποίο λειτουργεί σαν διακόπτης, οι δίοδοι ισχύος, τα triacs, τα transistor ισχύος, τα transistor IGBT καθώς δε και τα transistor επίδρασης πεδίου μονωμένης πύλης που είναι γνώστα σαν MOSFET. Το κύκλωμα ελέγχου διαθέτει ηλεκτρονικά στοιχεία χαμηλής ισχύος, τα οποία μπορούν να συνθέτουν κυκλώματα: αναλογικά, ψηφιακά, μικροεπεξεργαστές, μικροϋπολογιστές ή ακόμη ολόκληρες εγκαταστάσεις υπολογιστών εάν πρόκειται για μεγάλα και λειτουργικά πολύπλοκα συστήματα ισχύος.

Στόχος του κυκλώματος είναι να επιτυγχάνεται η ιδανικότερη δυνατή προσαρμογή της ηλεκτρικής ενέργειας στις απαιτήσεις της κατανάλωσης. Η ανάγκη για την επεξεργασία της ηλεκτρικής ενέργειας προκύπτει από το γεγονός ότι η ηλεκτρική ισχύς πρέπει να παρέχεται με σταθερά χαρακτηριστικά. Συνήθως η διαθέσιμη πηγή ισχύος (δίκτυο ισχύος), είναι μια τριφασική πηγή σταθερής τάσης και συχνότητας. Όταν οι απαιτήσεις του φορτίου δεν είναι συμβατές με τα χαρακτηριστικά του διαθέσιμου δικτύου, είναι αναγκαία η χρήση ενός μετατροπέα ηλεκτρικής ενέργειας (M.H.E.). Η διάταξη ισχύος μορφοποιεί κατάλληλα τις παραμέτρους εξόδου (τάση, ένταση, συχνότητα), έτσι ώστε να ικανοποιούν τις απαιτήσεις του φορτίου. Από τη συνολικά παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια σε εναλλασσόμενη μορφή, ένα ποσοστό της τάξης από 30% ως 40% το οποίο αυξάνεται συνεχώς, υφίσταται κάποιου είδους μετατροπή. Για τον σκοπό αυτό είναι δυνατόν να συλλέγονται πληροφορίες από την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, την κατανάλωση και από μια τρίτη πηγή η οποία καθορίζει τα πλαίσια λειτουργίας του συστήματος.

Η χρήση των ηλεκτρονικών ισχύος ολοένα και αυξάνεται, όπως επίσης και οι εφαρμογές τους σε διάφορες διατάξεις. Ενδεικτικά στη συνέχεια θα αναφέρουμε τις κυριότερες χωρίς να ξεχνάμε ότι η πρόοδος στη μελέτη και κατανόηση πεδίων όπως η ηλεκτρονική, ο αυτόματος έλεγχος, τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας δε θα αυξήσουν ακόμα περαιτέρω τη χρήση βελτιωμένων διατάξεων ηλεκτρονικών ισχύος. Οι κυριότερες εφαρμογές των ηλεκτρονικών ισχύος είναι:

- διακοπτικά τροφοδοτικά dc και τροφοδοτικά αδιάλειπτης λειτουργίας (UPS), διατάξεις που παρέχουν σταθερή και αδιάλειπτη τροφοδοσία σε συστήματα όπως οι ηλεκτρονικοί υπολογιστές και τα τηλεπικοινωνιακά συστήματα,
- εξοικονόμηση ενέργειας, η οποία επιτυγχάνεται με αύξηση του συντελεστή απόδοσης και τη μείωση των απωλειών ισχύος. Τέτοιου είδους διατάξεις χρησιμοποιούμε στις οικιακές συσκευές και το φωτισμό,
- έλεγχος διαδικασιών και βιομηχανικοί αυτοματισμοί, όταν χρειάζεται να γίνεται έλεγχος της ροπής και των στροφών μιας μηχανής
- μεταφορές, ηλεκτρονικά ισχύος χρησιμοποιούνται σε τρένα και ηλεκτρικά οχήματα
- ηλεκτροτεχνικές εφαρμογές, όπως οι συγκολλήσεις, οι επιμεταλλώσεις και η επαγωγική θέρμανση
- συστήματα παραγωγής και μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, γραμμές υψηλής τάσης (HVDC)
- διασύνδεση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας με το δίκτυο

Στη συνέχεια θα αναφερθούμε αναλυτικότερα στους ηλεκτρονικούς μετατροπείς ισχύος.

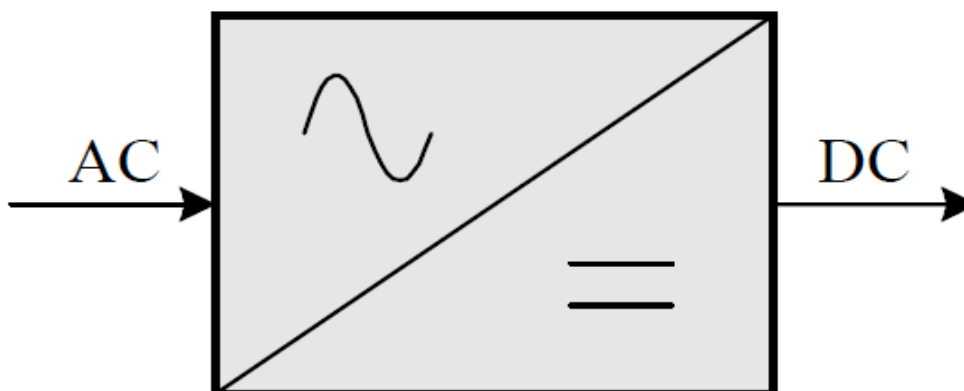
3.2 ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΟΙ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΙΣ ΙΣΧΥΟΣ

Οι ηλεκτρονικοί μετατροπείς ισχύος είναι διατάξεις που χρησιμοποιούνται για τη μετατροπή της ηλεκτρικής ισχύος από μια μορφή σε μια άλλη και για το σκοπό αυτό περιλαμβάνουν ηλεκτρονικά στοιχεία ισχύος, τα οποία ελέγχονται από αναλογικά ή ψηφιακά ηλεκτρονικά κυκλώματα χαμηλής ισχύος. Με τους μετατροπείς αυτούς μπορούμε να ελέγξουμε και να ρυθμίσουμε τη ροή ενέργειας μεταξύ διαφορετικών συστημάτων. Σε σχέση με τις ηλεκτρομηχανικές διατάξεις που χρησιμοποιούνταν παλιότερα, οι σύγχρονοι ηλεκτρονικοί μετατροπείς ισχύος :

- έχουν μικρότερο όγκο και βάρος
- προσφέρουν μεγαλύτερη ακρίβεια και ταχύτερη απόκριση στη ρύθμιση των μεγεθών εξόδου
- έχουν υψηλότερο συντελεστή απόδοσης
- έχουν ελάχιστες ανάγκες συντήρησης και παρουσιάζουν αθόρυβη λειτουργία
- μοναδικό, ίσως, μειονέκτημα είναι η εμφάνιση ανώτερων αρμονικών στην πλευρά της τροφοδοσίας τους αλλά και στην πλευρά του φορτίου

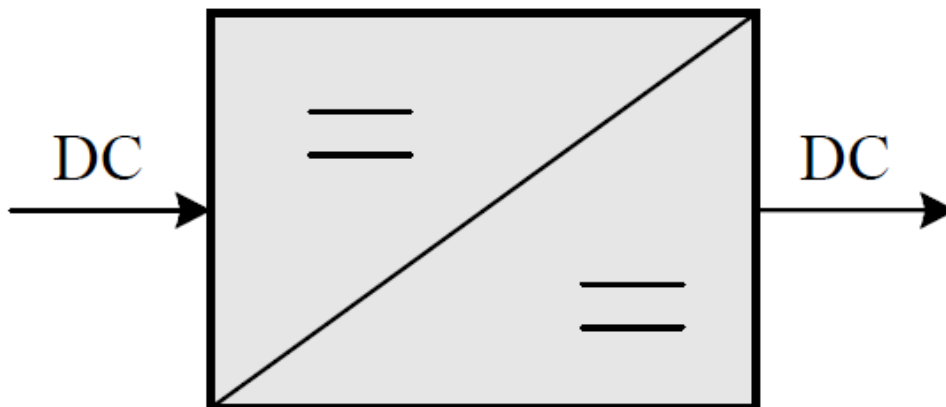
Οι μετατροπείς ηλεκτρικής ενέργειας (ισχύος) διακρίνονται σε τέσσερις κύριες κατηγορίες, ανάλογα με τη μορφή της ισχύος εισόδου και εξόδου. Αυτές είναι:

- Μετατροπείς ac–dc ή Ανορθωτές (Rectifiers). Ανορθωτές ονομάζονται οι διατάξεις ισχύος, οι οποίες μετατρέπουν το εναλλασσόμενο ρεύμα σε συνεχές. Ανάλογα με τη μορφή της εναλλασσόμενης εισόδου οι ανορθωτές διακρίνονται σε μονοφασικούς και πολυφασικούς (διφασικούς, τριφασικούς, εξαφασικούς). Ακόμη διακρίνονται σε ελεγχόμενους και μη ελεγχόμενους, ανάλογα με το αν η τάση εξόδου είναι μεταβαλλόμενη ή σταθερή. Το γενικό σύμβολο των μετατροπέων ac–dc εικονίζεται στο παρακάτω σχήμα 2.2.1 :



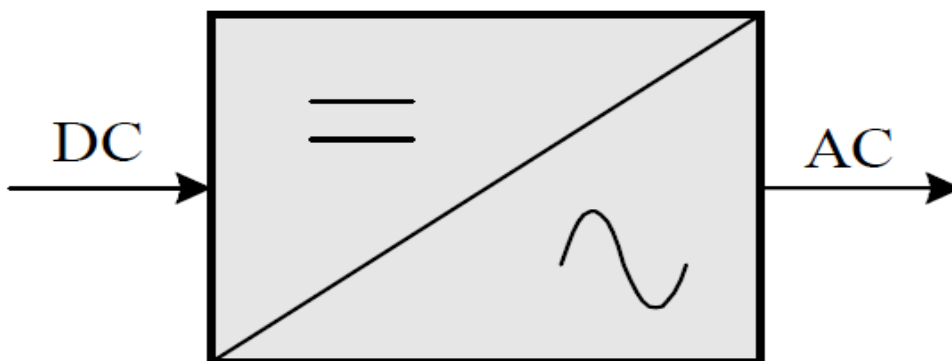
Γενικό σύμβολο του ανορθωτή

- Μετατροπείς συνεχούς ρεύματος (dc–dc converters, choppers). Οι μετατροπείς συνεχούς ρεύματος μετατρέπουν τη συνεχή τάση με ορισμένο πλάτος και πολικότητα σε συνεχή τάση με διαφορετικό πλάτος ή/και πολικότητα. Διακρίνονται σε μετατροπείς υποβιβασμού (step–down) και ανύψωσης (step–up) της τάσης, ανάλογα με το αν η τάση εξόδου είναι μικρότερη ή μεγαλύτερη της τάσης εισόδου. Ακόμη, διακρίνονται σε μετατροπείς με απομόνωση και χωρίς απομόνωση της εξόδου από την είσοδό τους. Το γενικό σύμβολο των μετατροπέων συνεχούς ρεύματος δίνεται στο σχήμα 2.2.2 :



Γενικό σύμβολο του μετατροπέα συνεχούς ρεύματος

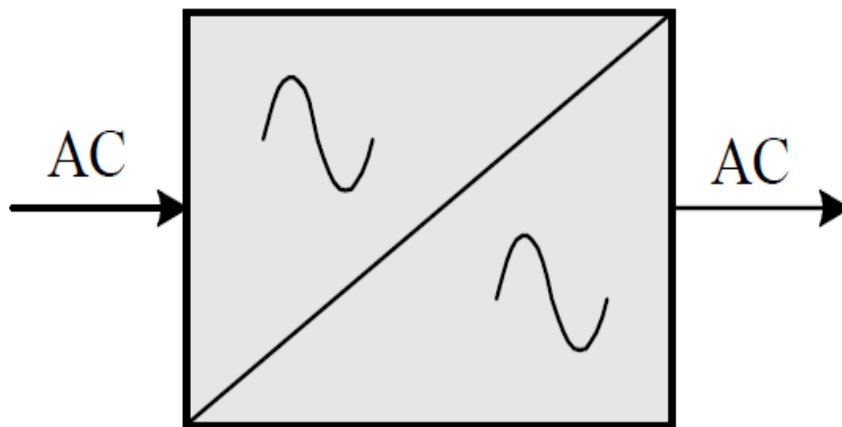
- Μετατροπείς dc–ac ή Αντιστροφείς (Inverters). Οι αντιστροφείς μετατρέπουν την ενέργεια συνεχούς μορφής σε εναλλασσόμενη. Η λειτουργία τους είναι δηλαδή αντίθετη από εκείνη των ανορθωτών. Η έξοδος των αντιστροφέων είναι μονοφασική είτε πολυφασική (συνήθως τριφασική). Επίσης, η συχνότητα και το πλάτος της τάσης ή του ρεύματος εξόδου είναι ελεγχόμενα. Το γενικό σύμβολο των αντιστροφέων εικονίζεται στο σχήμα 2.2.3



Γενικό σύμβολο του αντιστροφέα

- Μετατροπείς εναλλασσομένου ρεύματος ή Κυκλομετατροπείς (Cycloconverters). Οι κυκλομετατροπείς μετατρέπουν απευθείας, την εναλλασσόμενη τάση σταθερού πλάτους και συχνότητας, σε εναλλασσόμενη τάση με ρυθμιζόμενο πλάτος και συχνότητα. Ο κυκλομετατροπέας ονομάζεται υποβιβασμού συχνότητας (step-down) όταν η συχνότητα εξόδου είναι μικρότερη της συχνότητας εισόδου. Διαφορετικά χαρακτηρίζεται ως ανύψωσης συχνότητας (step-up). Οι κυκλομετατροπείς χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές πολύ μεγάλης ισχύος.

Μια ειδική κατηγορία των μετατροπέων εναλλασσομένου ρεύματος είναι οι ρυθμιστές εναλλασσόμενης τάσης (ac voltage controllers). Οι ρυθμιστές εναλλασσόμενης τάσης παρέχουν στην έξοδό τους μια τάση μεταβαλλόμενου πλάτους, η συχνότητα της οποίας είναι σταθερή και ίση με τη συχνότητα της ac πηγής εισόδου.



Γενικό σύμβολο του κυκλομετατροπέα

Οι μετατροπείς ισχύος διακρίνονται ακόμη σε τρεις κατηγορίες, ανάλογα με τον τρόπο μετάβασης των διακοπτικών στοιχείων τους:

- Μετατροπείς στη συχνότητα του δικτύου με φυσική μετάβαση (natural line load commutated ή phase controlled converters).

Οι διακόπτες των μετατροπέων με φυσική μετάβαση ανοίγουν ή και κλείνουν με τη βοήθεια της εναλλασσόμενης τάσης του δικτύου (εισόδου), ή των συνθηκών που επιβάλλει το φορτίο. Οι μετατροπείς με φυσική μετάβαση έχουν περιορισμένες δυνατότητες και χρήσεις. Η εξέλιξή τους έχει σημειωθεί άλλωστε πριν από αρκετές δεκαετίες, με την κατασκευή του SCR. Η τάση εξόδου των μετατροπέων με φυσική μετάβαση αποτελείται από τμήματα της τάσης εισόδου, με αποτέλεσμα να εμφανίζονται ισχυρές αρμονικές συνιστώσες στην είσοδο και την έξοδο του μετατροπέα. Έτσι, ένας αντιστροφείας τάσης δεν μπορεί να ανήκει

στην κατηγορία των μετατροπέων με φυσική μετάβαση. Αντίθετα, οι τυπικοί ανορθωτές με διόδους ή SCR και οι κυκλομετατροπείς υποβιβασμού της συχνότητας, είναι μετατροπείς με φυσική μετάβαση.

- Μετατροπείς με εξαναγκασμένη μετάβαση (force commutated ή switch-mode converters).

Η κατάσταση των διακοπών στους μετατροπείς με εξαναγκασμένη μετάβαση ορίζεται αποκλειστικά από τη μονάδα ελέγχου της διάταξης ισχύος. Οι διακόπτες των μετατροπέων αυτών λειτουργούν συνήθως σε υψηλές συχνότητες σε σχέση με το δίκτυο και έτσι μπορούν να θεωρηθούν ως διακοπτικοί ενισχυτές ισχύος με υψηλό κέρδος (switching-mode power amplifiers). Ανεξάρτητα από τη μεγάλη εσωτερική συχνότητα των μεταβάσεων του μετατροπέα, η συχνότητα της εξόδου μπορεί να είναι είτε dc είτε να συγκριθεί με τη συχνότητα του δικτύου

- Μετατροπείς συντονισμού (resonant converters).

Η έναυση και η σβέση των διακοπών στους μετατροπείς συντονισμού επιτελείται όταν η τάση στα άκρα τους ή και το ρεύμα που τους διαρρέει είναι μηδέν. Επειδή οι περισσότερες τοπολογίες των μετατροπέων αυτών απαιτούν κάποιο κύκλωμα συντονισμού LC, επικράτησε να ονομάζονται μετατροπείς συντονισμού. Τα πλεονεκτήματα των μετατροπέων συντονισμού έναντι των δύο προηγούμενων τύπων είναι ότι περιορίζονται δραστικά οι μεταβατικές απώλειες ισχύος στους διακόπτες και η ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή.

3.3 ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΙΣ DC – DC

Για την μετατροπή συνεχούς τάσης σε συνεχή (DC-DC) σήμερα χρησιμοποιούνται διατάξεις οι οποίες δεν περιλαμβάνουν μετασχηματιστή. Τέτοιες διατάξεις είναι DC-DC μετατροπέας υποβιβασμού τάσης (step down converter), DC-DC μετατροπέας ανύψωσης τάσης (step up converter), μεικτός DC-DC μετατροπέας (step down/up DC-DC converter). Η λογική λειτουργίας των DC - DC μετατροπέων είναι κατά βάση η ίδια καθώς όλοι περιλαμβάνουν τα ίδια ενεργά και παθητικά στοιχεία. Η διαφορά τους έγκειται στη σχέση της τάσης εξόδου με τη σχέση εισόδου. Συγκεκριμένα, ο DC -DC μετατροπέας υποβιβασμού τάσης δημιουργεί τάση εξόδου μικρότερη από την τάση εισόδου, ο DC – DC μετατροπέας ανύψωσης τάσης δημιουργεί μεγαλύτερη τάση εξόδου, ενώ ο μεικτός DC - DC μετατροπέας δημιουργεί και μεγαλύτερη αλλά και μικρότερη τάση εξόδου σε σχέση με την τάση εισόδου αλλά με διαφορετική πολικότητα. Το επίπεδο της τάσης εξόδου σε όλους τους DC - DC μετατροπείς ρυθμίζεται με τη μεταβολή της διάρκειας αγωγής (Duty Cycle) του ημιαγώγιμου διακόπτη των διατάξεων.

Σε ένα DC – DC μετατροπέα η μέση τάση εξόδου θα πρέπει να ελέγχεται, ώστε να διατηρείται σε ένα επιθυμητό επίπεδο, ανεξάρτητα από το γεγονός ότι η τάση εισόδου και το φορτίο μπορούν να αυξομειώνονται. Οι μετατροπείς αυτοί χρησιμοποιούν ένα ή περισσότερους διακόπτες για το μετασχηματισμό της DC τάσης

από το ένα επίπεδο στο άλλο. Η μέση τάση εξόδου ρυθμίζεται ελέγχοντας τους χρόνους έναυσης (t_{on}) και σβέσης (t_{off}). Μια τέτοια μέθοδος ονομάζεται μετάβαση με Διαμόρφωση Εύρους Παλμών (pulse width modulation, PWM). Σε αυτήν τη μέθοδο μεταβάλλεται η σχετική διάρκεια αγωγής $D = t_{on} / T$. Η άλλη μέθοδος είναι γενικότερη, χρησιμοποιείται σε μετατροπείς που έχουν thyristor με εξαναγκασμένη μετάβαση και σύμφωνα με αυτή μεταβάλλονται τόσο η συχνότητα μετάβασης όσο και η διάρκεια κατά την οποία ο διακόπτης είναι κλειστός. Οι μεταβολές αυτές καθιστούν δύσκολο το φιλτράτισμα της κυμάτωσης των κυματομορφών της εισόδου και της εξόδου.

Παρακάτω θα αναλύσουμε κυρίως τους δύο βασικούς μετατροπείς ισχύος, δηλαδή της ανύψωσης και του υποβιβασμού τάσης και θα αναφέρουμε κάποια γενικά πράγματα για τους μεικτούς μετατροπείς.

3.3.1 DC - DC μετατροπέας υποβιβασμού τάσης

Η περιγραφή της λειτουργίας του συγκεκριμένου μετατροπέα ισχύει για τη λειτουργία με συνεχή αγωγή ρεύματος, δηλαδή για μη διακοπόμενο ρεύμα πηνίου. Ο DC - DC μετατροπέας υποβιβασμού τάσης (**step down DC - DC converter**), όπως προαναφέρθηκε, παράγει μέση τάση εξόδου V_o μικρότερη από την DC τάση εισόδου του U_d . Η λειτουργία του μετατροπέα βασίζεται στον ημιαγώγιμο διακόπτη και στη σχετική διάρκεια αγωγής του D . Η τάση εισόδου U_d και η τάση εξόδου U_o συνδέονται με τη σχετική διάρκεια αγωγής D σύμφωνα με τη σχέση :

$$\frac{U_o}{U_d} = D$$

Σχέση (1)

Και θεωρώντας ένα κύκλωμα χωρίς απώλειες, η ισχύς εξόδου P_o είναι ίση με την ισχύ εισόδου P , και άρα προκύπτει η ανάλογη Σχέση για το ρεύμα εισόδου I_d . το ρεύμα εξόδου I_o και τη σχετική διάρκεια αγωγής D :

$$P_d = P_o \Rightarrow U_d I_d = U_o I_o \Rightarrow \frac{I_o}{I_d} = \frac{U_d}{U_o} \Rightarrow \frac{I_o}{I_d} = \frac{1}{D}$$

Σχέση (2)

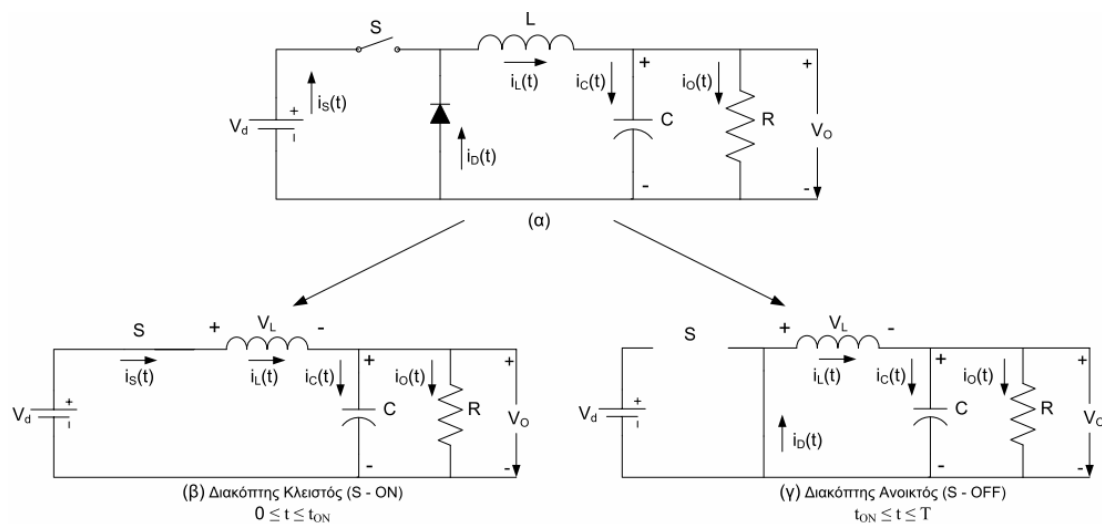
Η σχετική διάρκεια αγωγής δίνεται από τη σχέση:

$$D = \frac{t_{on}}{T}$$

Σχέση (3)

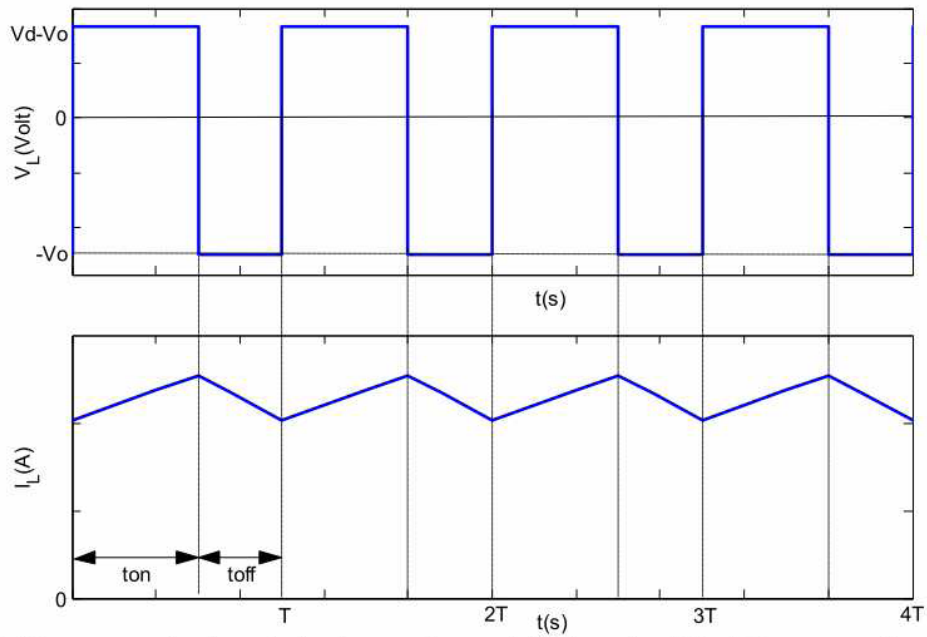
Όπου T είναι η περίοδος παλμοδότησης και t_{on} είναι ο χρόνος κατά τον οποίο ο διακόπτης βρίσκεται σε κατάσταση αγωγής. Οι χρόνοι αγωγής t_{on} και αποκοπής t_{off}

του διακόπτη καθώς και η περίοδος παλμοδότησης T φαίνονται στο σχήμα 3.3.2, όπου παρουσιάζονται οι κυματομορφές της τάσης και του ρεύματος του πηνίου του μετατροπέα υποβιβασμού κατά τη λειτουργία του με σχετική διάρκεια αγωγής $D = 0.6$. Επιπλέον, στο επόμενο σχήμα παρουσιάζεται το κύκλωμα του DC - DC μετατροπέα υποβιβασμού τάσης, καθώς και τα ισοδύναμα κυκλώματα για τις δύο καταστάσεις του ημιαγωγίμου διακόπτη. Στα ισοδύναμα κυκλώματα παρουσιάζεται και η φορά ροής των ρευμάτων των στοιχείων.



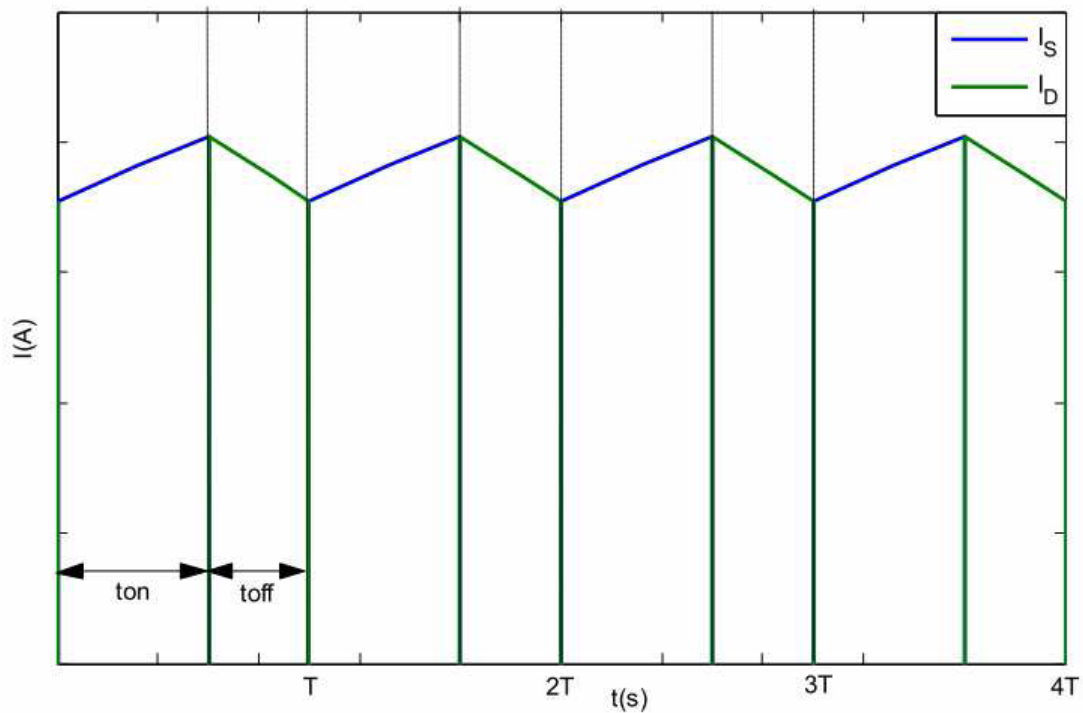
Σχ. 3.3.1 Κύκλωμα μετατροπέα υποβιβασμού και ισοδύναμα κυκλώματα για τις καταστάσεις του διακόπτη

Όπως φαίνεται και από το σχήμα 3.3.1(β) κατά τη διάρκεια που ο διακόπτης S είναι κλειστός το ρεύμα του πηνίου περνάει από αυτόν, ενώ η διάοδος πολώνεται ανάστροφα και βρίσκεται σε κατάσταση αποκοπής. Σε αυτό το χρονικό διάστημα, στα άκρα του πηνίου εφαρμόζεται τάση $V_L = V_d - V_o$, η οποία προκαλεί αύξηση του ρεύματος του. Επομένως, κατά το χρόνο $0 - t_{on}$ το πηνίο αποταμιεύει ενέργεια. Όταν ο διακόπτης S ανοίξει, λόγω της αποθηκευμένης στο πηνίο ενέργειας, το τελευταίο συνεχίζει να διαρρέεται από ρεύμα, το οποίο όμως διέρχεται από τη διάοδο. Λόγω αγωγής της διάοδου, το πηνίο συνδέεται παράλληλα με τον πυκνωτή εξόδου, όπως φαίνεται και από το Σχήμα 3.3.1(γ), και η τάση του γίνεται $V_L = -V_o$. Στο Σχήμα 3.3.2 φαίνεται η αύξηση του ρεύματος πηνίου κατά το χρονικό διάστημα $0 - t_{on}$ και έπειτα η μείωση του κατά το διάστημα $t_{on} - T$.



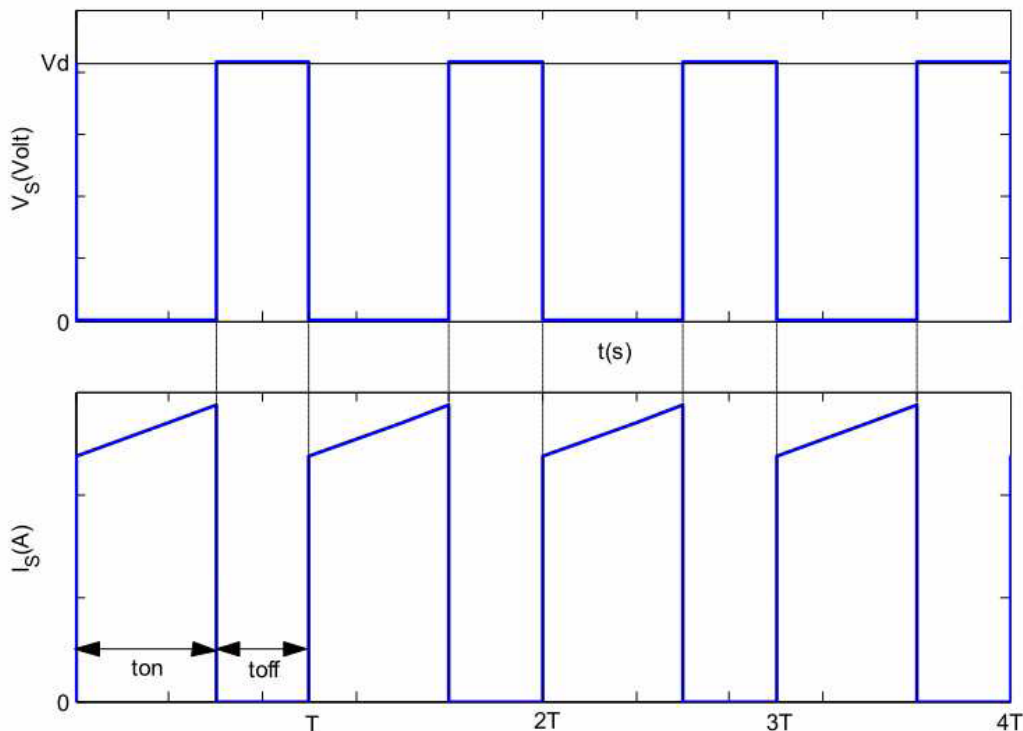
Σχ. 3.3.2 Κυματομορφές τάσης και ρεύματος πηνίου DC- DC μετατροπέα υποβιβασμού

Στο επόμενο Σχήμα 3.3.3 φαίνονται τα ρεύματα του διακόπτη I_S και της διόδου I_D , όπου κατά το χρόνο $0 - t_{on}$ το ρεύμα πηνίου διέρχεται από το διακόπτη και το ρεύμα της διόδου είναι μηδέν, ενώ κατά το χρόνο $t_{on} - T$ το ρεύμα του πηνίου διαρρέει τη δίοδο και το ρεύμα του διακόπτη είναι μηδέν:



Σχ. 3.3.3 Ρεύμα διακόπτη I_S και διόδου I_D DC-DC μετατροπέα υποβιβασμού

Όπως φαίνεται από το Σχήμα 3.3.3, τα ρεύματα του διακόπτη και της διόδου σχηματίζουν το συνολικό ρεύμα πηνίου. Τέλος, στα επόμενα σχήματα παρουσιάζονται η τάση και το ρεύμα τόσο του διακόπτη του DC - DC μετατροπέα υποβιβασμού τάσης, όσο και της διόδου του.



Σχ. 3.3.4 Κυματομορφές τάσης και ρεύματος διόδου DC-DC μετατροπέα υποβιβασμού

Για τη δίοδο ισχύουν αυτά που ισχύουν και για το διακόπτη, καθώς και η δίοδος πρόκειται για ένα ημιαγωγικό διακόπτη με τη διαφορά ότι δεν μπορεί να ελεγχθεί η αγωγή και αποκοπή της. Επομένως, όταν ο διακόπτης βρίσκεται σε κατάσταση αγωγής, η δίοδος δεν άγει και η τάση στα άκρα της είναι ίση με την τάση εισόδου U . Αυτό είναι εμφανές από το ισοδύναμο κύκλωμα του Σχήματος 3.3.1(β). Αντίθετα, όταν ο διακόπτης δεν άγει, η δίοδος γίνεται αγωγίμη και η τάση στα άκρα της είναι μηδέν, όπως φαίνεται και στο παραπάνω σχήμα.

Τέτοιους μετατροπείς χρησιμοποιούμε σε σταθεροποιημένα dc διακοπτικά τροφοδοτικά και για τον έλεγχο της ταχύτητας των dc κινητήρων.

3.3.2 DC - DC μετατροπέας ανύψωσης τάσης

Στο σημείο αυτό θα γίνει μια σύντομη περιγραφή του DC - DC μετατροπέα ανύψωσης τάσης, ανάλογη με αυτή που έγινε προηγουμένως για τον DC - DC μετατροπέα υποβιβασμού τάσης. Η περιγραφή ισχύει και εδώ για μη διακοπόμενο ρεύμα πηνίου. Ο DC - DC μετατροπέας ανύψωσης τάσης (step up DC - DC converter), παράγει μέση τάση εξόδου U_o μεγαλύτερη από την DC τάση εισόδου του

U_d . Σε αυτή την περίπτωση, η τάση εισόδου U_d και η τάση εξόδου U_o συνδέονται με τη σχετική διάρκεια αγωγής D σύμφωνα με τη σχέση :

$$\frac{U_o}{U_d} = \frac{1}{1-D}$$

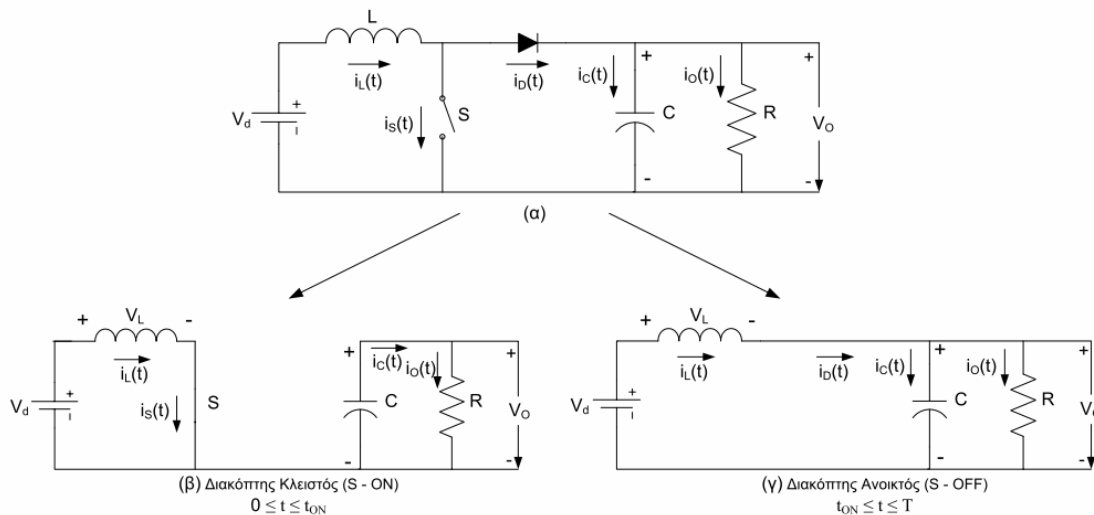
Σχέση (4)

Και θεωρώντας ένα κύκλωμα χωρίς απώλειες, η ισχύς εξόδου P_o είναι ίση με την ισχύ εισόδου P_d και άρα προκύπτει η ανάλογη σχέση για το ρεύμα εισόδου I_d , το ρεύμα εξόδου I_o και τη σχετική διάρκεια αγωγής D :

$$P_d = P_o \Rightarrow U_d I_d = U_o I_o \Rightarrow \frac{I_o}{I_d} = \frac{U_d}{U_o} \Rightarrow \frac{I_o}{I_d} = (1-D)$$

Σχέση (5)

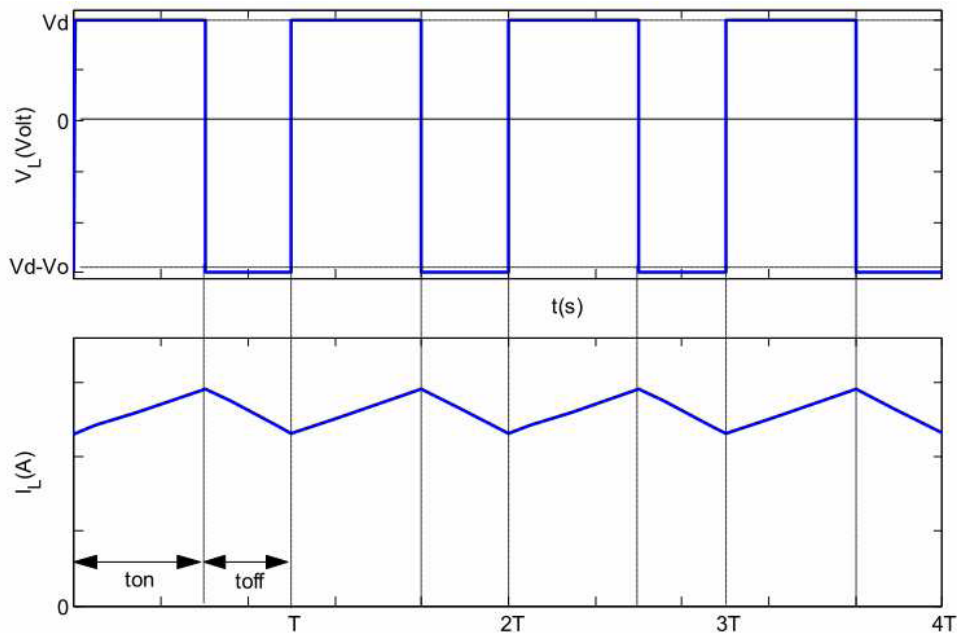
Η σχετική διάρκεια αγωγής δίνεται και πάλι από τη σχέση (3). Στο επόμενο Σχήμα φαίνεται το κύκλωμα του DC - DC μετατροπέα ανύψωσης τάσης, καθώς και τα ισοδύναμα κυκλώματα για τις δύο καταστάσεις του ημιαγωγίμου διακόπτη. Στα ισοδύναμα κυκλώματα παρουσιάζεται και η φορά ροής των ρευμάτων των στοιχείων.



Σχ. 3.3.5 Κύκλωμα μετατροπέα ανύψωσης και ισοδύναμα κυκλώματα για τις καταστάσεις του διακόπτη

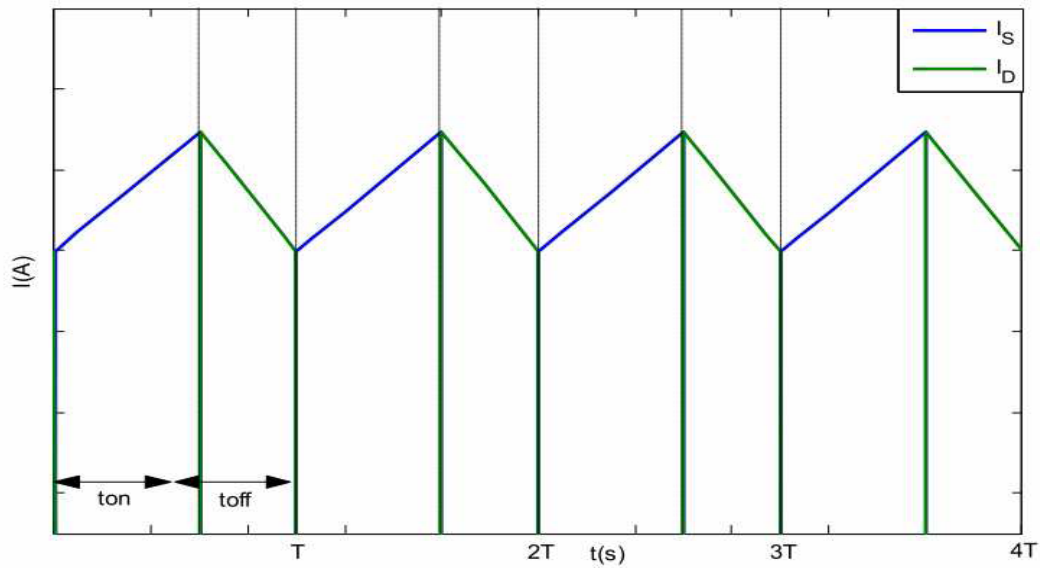
Όπως φαίνεται και από το σχήμα 3.3.5(β), κατά τη διάρκεια που ο διακόπτης S είναι κλειστός το ρεύμα του πηνίου περνάει από αυτόν, ενώ η διάδος βρίσκεται σε κατάσταση αποκοπής, απομονώνοντας τη βαθμίδα εξόδου από το υπόλοιπο κύκλωμα. Σε αυτό το χρονικό διάστημα, στα άκρα του πηνίου εφαρμόζεται η τάση εισόδου

$U_L = U_d$ και το ρεύμα του αυξάνει. Επομένως, κατά το χρόνο $0 - t_{on}$ το πηνίο αποταμιεύει ενέργεια. Όταν ο διακόπτης S βρεθεί σε κατάσταση αποκοπής, η αποθηκευμένη στο πηνίο ενέργεια αποδίδεται στη βαθμίδα μέσω της διόδου. Όταν η διάδος είναι αγώγιμη, το πηνίο συνδέεται παράλληλα με τον πυκνωτή εξόδου, όπως φαίνεται και από το σχήμα 3.3.5(γ), και η τάση του γίνεται $U_L = U_d - U_o$. Στο σχήμα 3.3.6, παρουσιάζονται οι κυματομορφές της τάσης και του ρεύματος του πηνίου του μετατροπέα ανύψωσης κατά τη λειτουργία του με σχετική διάρκεια αγωγής $D = 0.6$



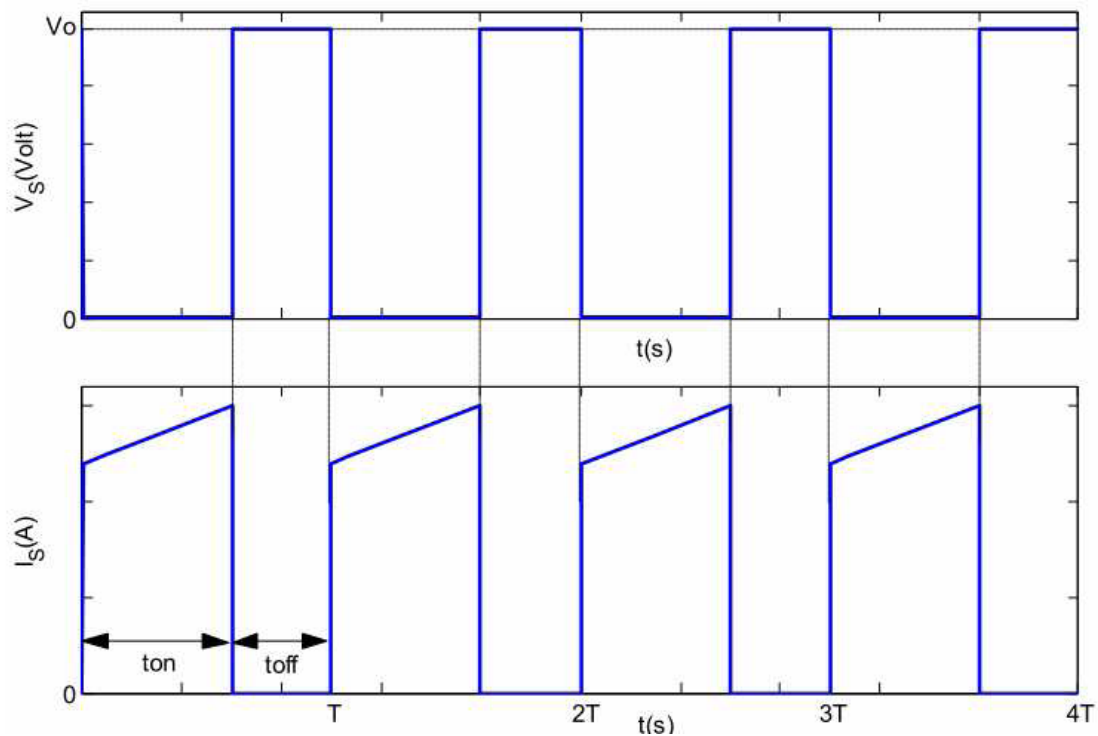
Σχ. 3.3.6 Κυματομορφές τάσης και ρεύματος πηνίου DC- DC μετατροπέα ανύψωσης

Στο επόμενο σχήμα φαίνονται τα ρεύματα του διακόπτη I_S και της διόδου I_D , όπου κατά το χρόνο $0 - t_{on}$ το ρεύμα πηνίου διέρχεται από το διακόπτη και το ρεύμα της διόδου είναι μηδέν, ενώ κατά το χρόνο $t_{on} - T$ το ρεύμα του πηνίου διαρρέει τη διάοδο και το ρεύμα του διακόπτη είναι μηδέν:



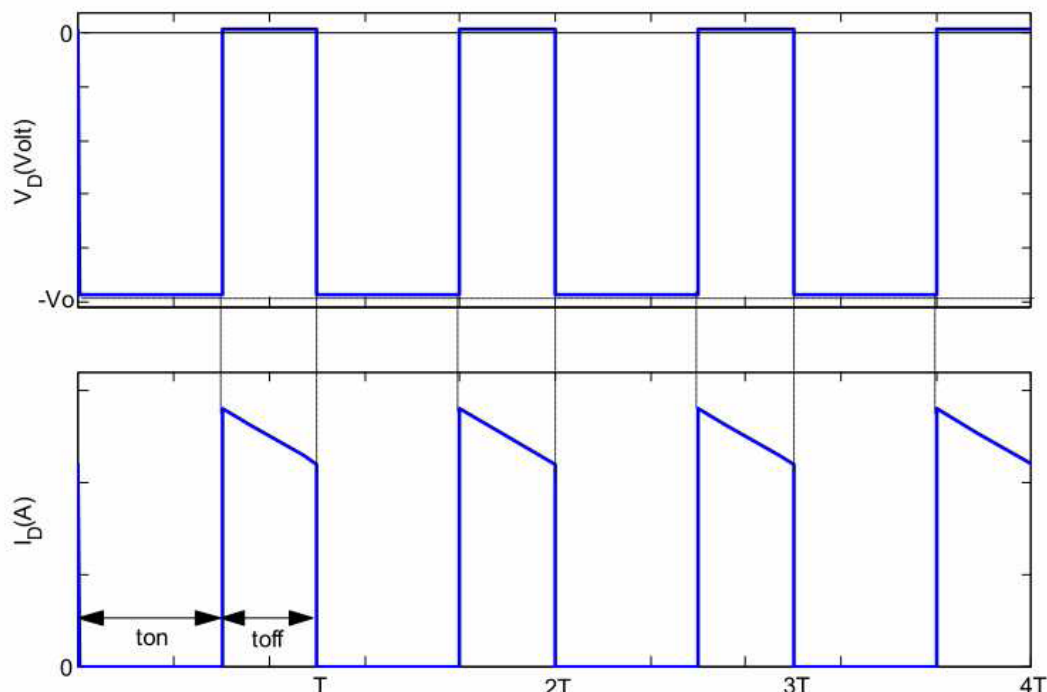
Σχ. 3.3.7 Ρεύμα διακόπτη I_S και διόδου I_D DC-DC μετατροπέα ανύψωσης

Όπως φαίνεται από το σχήμα 3.3.7, τα ρεύματα του διακόπτη και της διόδου σχηματίζουν το συνολικό ρεύμα πηνίου. Στα επόμενα σχήματα παρουσιάζονται η τάση και το ρεύμα του διακόπτη και της διόδου του DC - DC μετατροπέα ανύψωσης τάσης.



Σχ. 3.3.8 Κυματομορφές τάσης και ρεύματος διακόπτη DC-DC μετατροπέα ανύψωσης

Από το παραπάνω Σχήμα 3.3.8, φαίνεται ότι όταν ο διακόπτης βρίσκεται σε κατάσταση αγωγής η τάση του είναι μηδέν, ενώ κατά την κατάσταση αποκοπής, η τάση στα άκρα του είναι ίση με την τάση εξόδου U_o . Αυτό μπορεί να γίνει αντιληπτό από το ισοδύναμο κύκλωμα του Σχήματος 3.3.5(γ).



Σχ. 3.3.9 Κυματομορφές τάσης και ρεύματος διόδου DC-DC μετατροπέα ανύψωσης

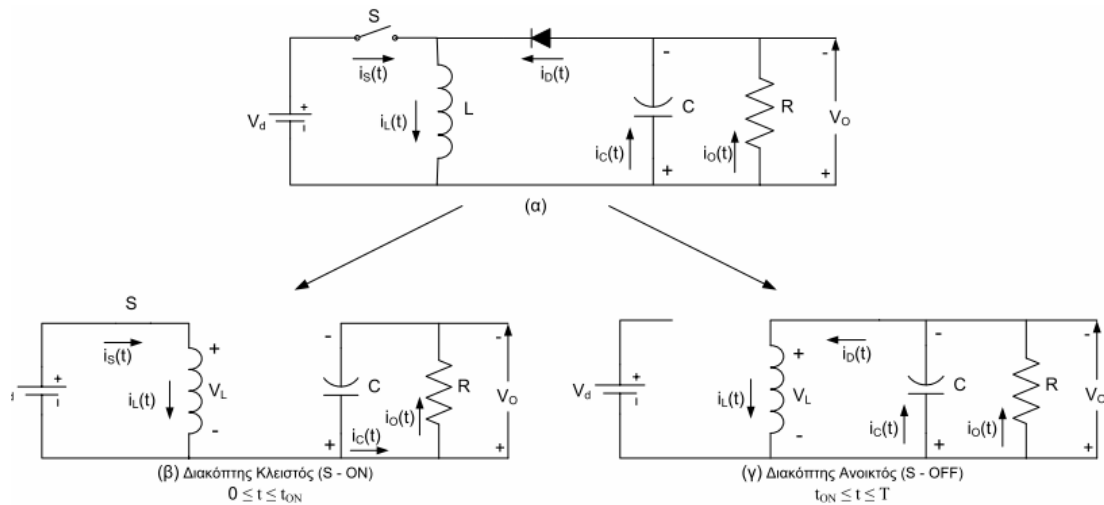
Όταν ο διακόπτης βρίσκεται σε κατάσταση αγωγής, η διάδος δεν άγει και η τάση στα άκρα της είναι ίση με την τάση εξόδου U_o . Το αρνητικό πρόσημο προκύπτει γιατί οι κυματομορφές αναφέρονται στην τάση ανόδου καθόδου της διόδου, η οποία έχει αντίθετη πολικότητα από την τάση εξόδου. Αυτό είναι εμφανές από το ισοδύναμο κύκλωμα του Σχήματος 3.3.5(β). Τέλος, όταν ο διακόπτης δεν άγει, η διάδος γίνεται αγώγιμη και η τάση στα άκρα της είναι μηδέν.

Ένας τέτοιος μετατροπέας χρησιμοποιείται κυρίως στα DC διακοπτικά τροφοδοτικά και στην πέδηση DC κινητήρων με ανάκτηση ισχύος.

3.3.3 DC - DC ΜΕΙΚΤΟΣ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑΣ

Εκτός από τους δύο προηγούμενους βασικούς μετατροπείς DC-DC υπάρχει και ο μεικτός DC-DC μετατροπέας. Ο μικτός DC - DC μετατροπέας χαρακτηρίζεται και ως έμμεσος μετατροπέας, καθώς η τάση πηγής ποτέ δε συνδέεται άμεσα με το φορτίο. Το πηνίο στο κύκλωμα του μικτού DC - DC μετατροπέα είναι αυτό που ελέγχει τη ροή ενέργειας από την πλευρά της εισόδου στην πλευρά της εξόδου. Στο επόμενο σχήμα παρουσιάζεται το κύκλωμα του μικτού DC - DC μετατροπέα.

Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στις φορές των ρευμάτων που ρέουν στον πυκνωτή και στην αντίσταση φορτίου, καθώς και στην πολικότητα της τάσης εξόδου.



Σχ. 3.3.10 Κύκλωμα μεικτού DC-DC μετατροπέα και ισοδύναμα κυκλώματα για τις καταστάσεις του διακόπτη

Να σημειωθεί ότι μεικτός DC - DC μετατροπέας μπορεί να δημιουργηθεί και από τη σύνδεση σε σειρά των άλλων δύο βασικών τοπολογιών, δηλαδή το μετατροπέα ανύψωσης και το μετατροπέα υποβιβασμού τάσης. Σε αυτή την περίπτωση η τάση εξόδου του πρώτου θα είναι η τάση εισόδου του δεύτερου, αλλά τα ελεγχόμενα ημιαγωγικά στοιχεία σε αυτή την περίπτωση είναι δύο. Ο έλεγχος τους όμως είναι απλός, καθώς παλμοδοτούνται ταυτόχρονα και με την ίδια σχετική διάρκεια αγωγής. Ωστόσο, αν και ένας τέτοιος μεικτός μετατροπέας δημιουργεί τάση εξόδου ίδιας πολικότητας με την τάση εισόδου, απαιτείται διπλάσιος αριθμός παθητικών και ενεργητικών στοιχείων για την κατασκευή του. Ένας τέτοιος DC - DC μετατροπέας εφαρμόζεται κυρίως σε εφαρμογές όπου απαιτείται η τάση εξόδου U_o να παραμένει σταθερή υπό συνθήκες μεταβαλλόμενης τάσης εισόδου U_d .

Όσον αφορά τη λειτουργία του μεικτού DC - DC μετατροπέα, είναι παρόμοια με τη λειτουργία των άλλων δύο DC - DC μετατροπέων. Δηλαδή, όταν ο διακόπτης είναι κλειστός, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.3.10(β), η τάση της πηγής εφαρμόζεται στο πηνίο $U_L = U_d$, το οποίο αποταμιεύει ενέργεια και το ρεύμα του αυξάνεται. Όταν ο διακόπτης βρεθεί σε κατάσταση αποκοπής τότε η ενέργεια που είναι αποθηκευμένη στο πηνίο αποδίδεται στη βαθμίδα εξόδου και το ρεύμα του πηνίου μειώνεται. Κατά τη χρονική αυτή περίοδο, το ρεύμα του πηνίου διαρρέει τη δίοδο η οποία έχει περάσει σε κατάσταση αγωγής, ενώ η τάση του πηνίου είναι ίση με την τάση εξόδου $U_L = -U_o$.

Κύρια εφαρμογή τέτοιου μετατροπέα είναι στα DC διακοπτικά τροφοδοτικά, όπου μπορεί να είναι επιθυμητή μια έξοδος με αρνητική πολικότητα σε σχέση με το κοινό της τάσης εισόδου.

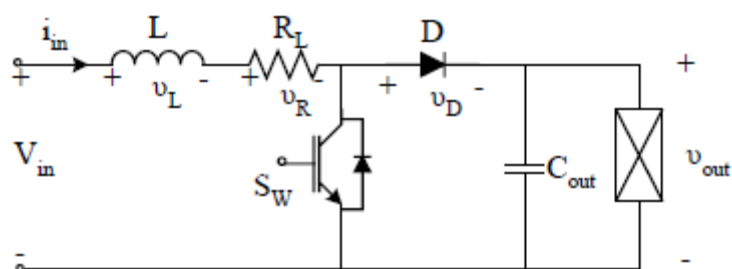
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σε προηγούμενο κεφάλαιο εξετάσαμε τους δύο διαφορετικούς τρόπους με τους οποίους μπορεί να γίνει σύνδεση ενός αιολικού πάρκου με το δίκτυο. Καταλήξαμε έτσι στο συμπέρασμα ότι η μεταφορά με σταθερή τάση υψηλής τιμής (HVDC) είναι η πιο συμφέρουσα. Δύο βασικοί μετατροπείς DC – DC που χρησιμοποιούνται σε τέτοιου είδους εφαρμογές είναι ο μετατροπέας ανύψωσης και ο μετατροπέας πλήρους γέφυρας. Στο κεφάλαιο αυτό θα αναλύσουμε το μετατροπέα ανύψωσης.

4.1 ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑΣ ΑΝΥΨΩΣΗΣ

Τοπολογία: Στο σχήμα 4.1 φαίνεται ο μετατροπέας ανύψωσης.

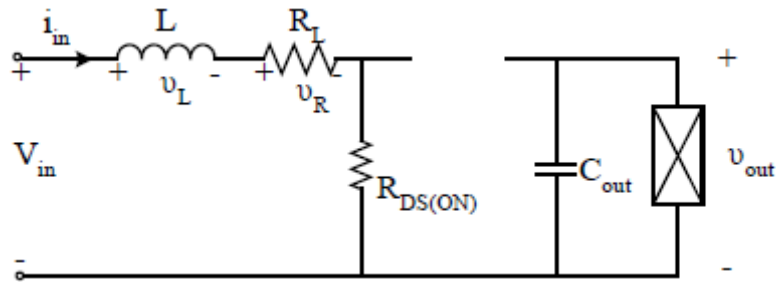


Σχ. 4.1 Μετατροπέας Ανύψωσης

Χρήση: Η τοπολογία ανύψωσης χρησιμοποιείται στους μετατροπείς DC – DC για ανύψωση της τάσης εισόδου. Το χαρακτηριστικό ενός τέτοιου μετατροπέα είναι ότι δεν παρέχει γαλβανική απομόνωση της εξόδου από την είσοδο, ενώ επιτρέπει τη ρύθμιση του λόγου τάσης εξόδου προς την τάση εισόδου $U_{out} \setminus U_{in}$, ο οποίος είναι πάντα $U_{out} \setminus U_{in} \geq 1$.

Τρόπος Λειτουργίας: Ο τρόπος λειτουργίας του μετατροπέα ανύψωσης είναι κυκλικός. Κάθε κύκλος λειτουργίας έχει δύο φάσεις:

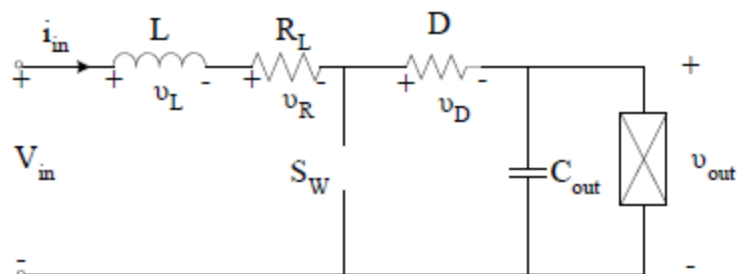
- **Φάση Πρώτη:** Ο ημιαγωγικός διακόπτης S_w άγει (on). Στην περίπτωση αυτή το ισοδύναμο κύκλωμα του μετατροπέα γίνεται όπως στο σχήμα 4.2



Σχ. 4.2 Ισοδύναμο Κύκλωμα Μετατροπέα Ανύψωσης κατά την Πρώτη Φάση

Στη φάση αυτή στα άκρα του πηνίου L εφαρμόζεται πρακτικά η τάση εισόδου U_{in} . Τότε το ρεύμα εισόδου αρχίζει να αυξάνεται γραμμικά ($dI_{in} > 0$) και στο πηνίο αποθηκεύεται ενέργεια, εξ' αιτίας του μαγνητικού πεδίου που δημιουργείται γύρω από αυτό. Η διόδος D πολώνεται ανάστροφα και έτσι αποτρέπει τη βραχυκύκλωση των άκρων του πυκνωτή εξόδου C_{out} , ο οποίος αρχίζει να εκφορτίζεται τροφοδοτώντας το φορτίο με την απαραίτητη ενέργεια. Λόγω της εκφόρτισης του πυκνωτή η τάση εξόδου θα αρχίσει να μειώνεται.

-Φάση Δεύτερη: Ο ημιαγωγικός διακόπτης S_w δεν άγει (off): Το ισοδύναμο κύκλωμα γίνεται όπως στο σχήμα 4.3



Σχ. 4.3 Ισοδύναμο Κύκλωμα Μετατροπέα Ανύψωσης κατά τη Δεύτερη Φάση

Στη φάση αυτή μεταφέρεται ενέργεια από την πηγή U_{in} αλλά και από το μαγνητικό πεδίο του πηνίου L, στο φορτίο και τον πυκνωτή C_{out} . Στην περίπτωση αυτή το ρεύμα του πηνίου αρχίζει να μειώνεται γραμμικά ($dI_{in} < 0$) οπότε η τάση στα άκρα του U_L θα είναι $U_L < 0$, επομένως η τάση εξόδου U_{out} (θεωρώντας ότι $U_{RL}, U_D \rightarrow 0$ όπως πρακτικά συμβαίνει):

$$-U_{in} + U_L + U_{out} = 0 \Rightarrow U_{out} = U_{in} - U_L$$

θα είναι μεγαλύτερη της τάσης εισόδου U_{in} . Στη φάση αυτή ο πυκνωτής εξόδου C_{out} φορτίζεται.

Ο μετατροπέας ανύψωσης ανάλογα με το φορτίο και το χρόνο μη αγωγής του διακόπτη S_w , μπορεί να λειτουργεί με δύο τρόπους:

- με διακοπτόμενη αγωγή του πηνίου, στην οποία το ρεύμα εισόδου μηδενίζεται πριν την έναρξη ενός νέου κύκλου λειτουργίας του μετατροπέα

- με συνεχή αγωγή του πηνίου, στην οποία το ρεύμα εισόδου δε μηδενίζεται.

Στο σημείο αυτό θα δώσουμε κάποιους ορισμούς που θα μας βοηθήσουν στην καλύτερη κατανόηση των σχέσεων και των κυκλωμάτων που θα παρουσιαστούν.

Ορισμοί:

t_{on} : χρόνος αγωγής ημιαγωγικού διακόπτη S_w

t_{off} : χρόνος μη αγωγής ημιαγωγικού διακόπτη S_w

T_s : περίοδος κύκλου λειτουργίας του μετατροπέα ($t_{on} + t_{off}$)

D : βαθμός χρησιμοποίησης ((Duty Cycle) ημιαγωγικού διακόπτη $S_w = t_{on} \setminus T_s$

U_{in} : τάση εισόδου

U_{out} : τάση εξόδου

4.2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΠΟΛΟΓΙΑΣ ΑΝΥΨΩΣΗΣ ΣΤΗ ΜΟΝΙΜΟ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΑΓΩΓΗΣ

4.2.1 Υπολογισμός της Τάσης Εξόδου \bar{U}_{out} , όταν ο μετατροπέας λειτουργεί σε κατάσταση Συνεχούς Αγωγής του Πηνίου CCM ($I_L > 0 \forall t$).

- Η ενέργεια που στην Φάση 1 αποθηκεύεται στο πηνίο L είναι:

$$W_1 = \bar{U}_L \cdot \bar{I}_L \cdot t_{on}, \text{ όπου } \bar{U}_L = U_{in} - R_L \cdot \bar{I}_L - \bar{U}_{sw}$$

- Η ενέργεια που στην Φάση 2 απελευθερώνεται από το πηνίο L είναι:

$$W_2 = \bar{U}_L \cdot \bar{I}_L \cdot t_{off}, \text{ όπου } \bar{U}_L = U_{in} - R_L \cdot \bar{I}_L - \bar{U}_D - \bar{U}_{out}$$

Συνεπώς και βάση της Αρχής Διατήρησης της Ενέργειας θα ισχύει:

$$W_1 = -W_2 \Rightarrow (U_{in} - R_L \cdot \bar{I}_L - \bar{U}_{sw})t_{on} = -(U_{in} - R_L \cdot \bar{I}_L - \bar{U}_D - \bar{U}_{out})t_{off}$$

Αλλά $\frac{t_{off}}{t_{on}} = \frac{T - t_{on}}{t_{on}} = \frac{T}{t_{on}} - 1 \Rightarrow \frac{t_{on}}{t_{off}} = \frac{D}{1 - D}$

οπότε τελικά η τάση εξόδου δίνεται από την σχέση:

$$\bar{U}_{out} = \frac{U_{in} - R_L \bar{I}_L}{1 - D} - \bar{U}_D - \bar{U}_{sw} \frac{D}{1 - D} \quad (4.1)$$

4.2.2 Κυμάτωση του Ρεύματος του Πηνίου I_L

Είναι
$$U_L = L \frac{dI_L}{dt} \Rightarrow \bar{U}_L = L \frac{dI_L}{dt} \Rightarrow dI_L = \frac{\bar{U}_L}{L} dt$$

οπότε στην Φάση 1 η κυμάτωση του ρεύματος του πηνίου θα είναι:

$$dI_L(+)=\frac{U_{in}-R_L\bar{I}_L-\bar{U}_{sw}}{L}t_{on} \quad (4.2.\alpha)$$

και στην Φάση 2 θα είναι:

$$dI_L(-)=\frac{(\bar{U}_{out}+\bar{U}_D+R_L\bar{I}_L)-U_{in}}{L}t_{off} \quad (4.2.\beta)$$

Είναι φανερό ότι ισχύει η σχέση : $dI_L(-) = dI_L(+)$

4.2.3 Απλοποιημένες σχέσεις

Οι τάσεις \bar{U}_D και \bar{U}_{sw} στα άκρα των ημιαγωγικών στοιχείων, όταν αυτά είναι σε κατάσταση αγωγής, είναι πολύ μικρές σε σχέση με την U_{in} οπότε μπορούν να θεωρηθούν ίσες με μηδέν ($\bar{U}_D = \bar{U}_{sw} = 0$). Επίσης η ωμική αντίσταση R_L του πηνίου είναι πολύ μικρή, άρα μπορούμε να θεωρήσουμε $RL \approx 0$. Μετά από τις παραδοχές αυτές, οι παραπάνω σχέσεις γράφονται:

$$\bar{U}_{out} = \frac{U_{in}}{1-D} \quad (4.3)$$

$$dI_L(+)=\frac{U_{in}}{L}DT_s \quad (4.4.\alpha)$$

$$dI_L(-)=\frac{\bar{U}_{out}-U_{in}}{L}(1-D)T_s \quad (4.4.\beta)$$

Στην περίπτωση αυτή οι κυματομορφές του μετατροπέα Ανύψωσης θα είναι αυτές του σχήματος 4.4. Επομένως η κυμάτωση του ρεύματος του πηνίου θα είναι

$$dI_L = dI_L(+)=dI_L(-) \Rightarrow$$

$$dI_L = \frac{U_{in}}{L} \cdot DT_s \quad (4.5)$$

και

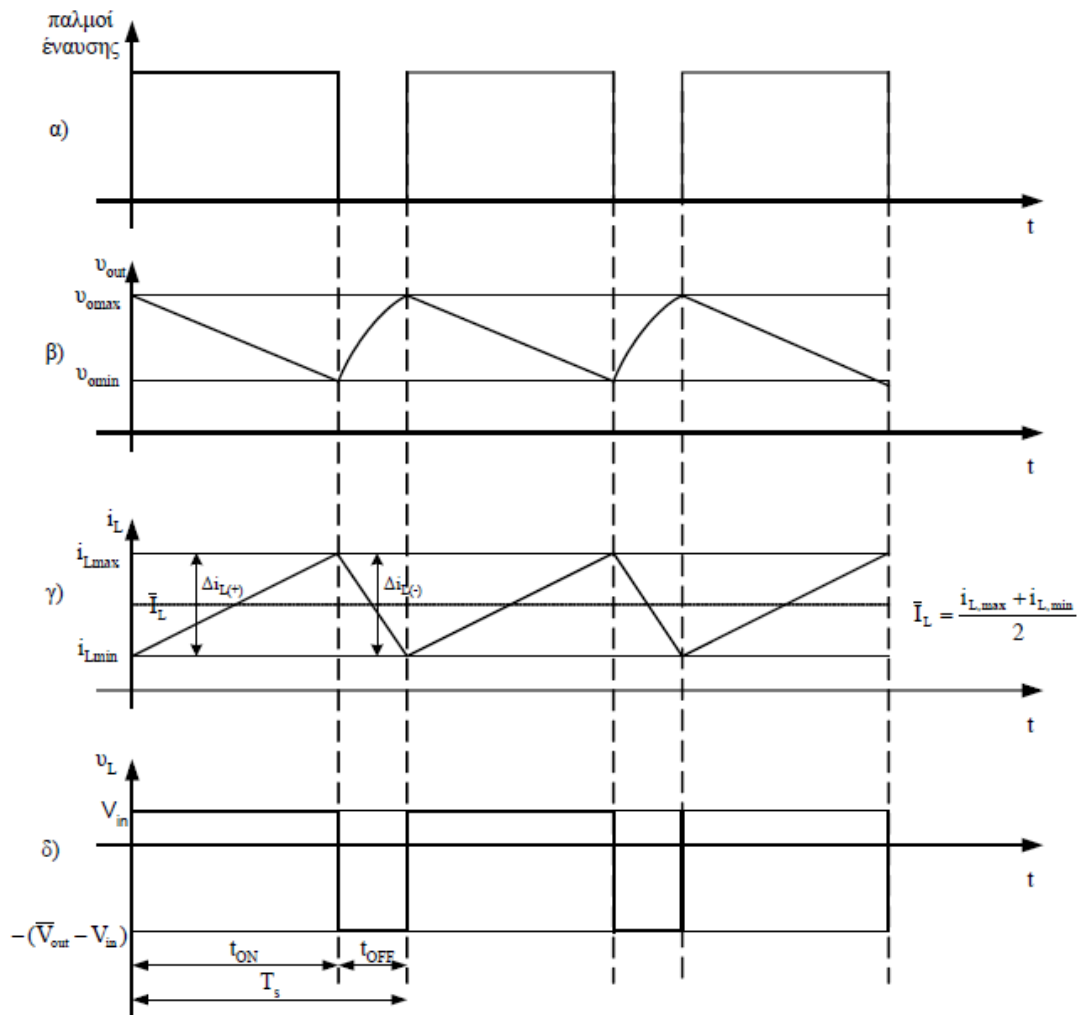
$$dI_L = I_{Lmax} - I_{Lmin} \quad (4.6)$$

4.2.4 Σχέση Ρεύματος Εισόδου - Εξόδου

Σε έναν ιδανικό, χωρίς απώλειες, μετατροπέα θα ισχύει:

Ισχύς Εισόδου = Ισχύς Εξόδου =>

$$U_{in} \cdot \bar{I}_L = \bar{U}_{out} \cdot \bar{I}_{out} \Rightarrow$$
$$\bar{I}_L = \frac{\bar{I}_{out}}{1-D} \quad (4.7)$$



Σχ.4.4 Κυματομορφές του Μετατροπέα Ανύψωσης για κατάσταση συνεχούς αγωγής.

α) παλμοί έναυσης του ημιαγωγικού διακόπτη S_w , β) τάση εξόδου, γ) ρεύμα εισόδου, δ) τάση στα άκρα του πηνίου

4.2.5 Καταπόνηση Ημιαγωγικών Στοιχείων

Για επιλογή ημιαγωγικού στοιχείου και την αποφυγή καταστροφής αυτού, είναι χρήσιμο να εξετάζουμε μέγιστες τιμές που καταπονούν το στοιχείο, όπως:

- **Μέγιστη Τάση στα Άκρα του ημιαγωγικού διακόπτη S_w**

Η μέγιστη τάση στα άκρα του ημιαγωγικού διακόπτη S_w εμφανίζεται αμέσως μετά από την στιγμή που ο διακόπτης S_w μεταβαίνει από την κατάσταση αγωγής (on) στην κατάσταση αποκοπής (off). Άρα

$$U_{swmax} = U_{out} \quad (4.8)$$

- **Μέγιστο Ρεύμα που Διαρρέει τον ημιαγωγικό διακόπτη S_w**

Εμφανίζεται αμέσως πριν την στιγμή που ο ημιαγωγικός διακόπτης μεταβεί από on σε off. Είναι:

$$I_{sw\max} = I_{L\max} = \bar{I}_L + \frac{dI_L}{2} = \frac{\bar{I}_{out}}{1-D} + \frac{1}{2} \frac{U_{in}}{L} t_{on} \quad (4.9)$$

RMS τιμή: Το ρεύμα του ημιαγωγικού διακόπτη S_w στην ιδανική περίπτωση είναι γραμμικό, δηλαδή είναι της μορφής:

$$I_{sw\max} = \alpha \cdot t + \beta$$

Εξετάζουμε χρονικό διάστημα στο οποίο ο διακόπτης άγει, δηλαδή για χρονικό διάστημα:

$$kT_s \leq t \leq kT_s + t_{on}$$

Για $t_1 = kT_s$ έχουμε: $I_{sw}(t_1) = I_{\min}$

για $t_2 = kT_s + t_{on}$ έχουμε: $I_{sw}(t_2) = I_{\max}$

Επομένως: $I_{sw}(t) = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{t_{on}} t + I_{\min} \Rightarrow$

$$I_{sw}(t) = \frac{dI_L}{t_{on}} t + \left(\bar{I}_L - \frac{1}{2} dI_L \right)$$

Άρα η **rms** τιμή του ρεύματος είναι:

$$I_{sw,rms} = \sqrt{\frac{1}{T_s} \int_{(TS)} I(t) dt} = \sqrt{D \left[\left(\frac{I_{out}}{1-D} \right)^2 + \frac{1}{3} \left(\frac{1}{2} dI_L \right)^2 \right]} \Rightarrow \quad (4.10)$$

$$I_{sw,rms} = \sqrt{D} \sqrt{\left[\left(\frac{I_{out}}{1-D} \right)^2 + \frac{1}{3} \left(\frac{1}{2} \frac{U_{in}}{L} DT_s \right)^2 \right]}$$

• **Μέγιστη Τάση στα Άκρα της Διόδου D**

Εμφανίζεται στην Φάση 1 κατά την οποία η διόδος D δεν άγει:

$$-U_{sw} + U_D + U_{out} = 0 \Rightarrow U_{D\max} = -U_{o\max} \quad (4.11)$$

• **Μέγιστο Ρεύμα που διαρρέει την διόδο D**

Εμφανίζεται στην αρχή της Φάσης 2, ακριβώς μετά το άνοιγμα του S_w :

$$I_{D,\max} = \bar{I}_L + \frac{dI_L}{2} \Rightarrow I_{D,\max} = \frac{I_{out}}{1-D} + \frac{U_{in}}{2L} DT_s \quad (4.12)$$

rms τιμή: Το ρεύμα του ημιαγωγικού διακόπτη S_w στην ιδανική περίπτωση είναι γραμμικό, δηλαδή είναι της μορφής $I_{sw} = \alpha \cdot t + \beta$

Εξετάζουμε χρονικό διάστημα στο οποίο ο διακόπτης άγει, δηλαδή για χρονικό διάστημα

$$kT_s + t_{on} \leq t \leq (k+1)T_s \quad \text{ή} \quad (k+1)T_s - t_{off} \leq t \leq (k+1)T_s.$$

Χωρίς βλάβη, λόγω της περιοδικότητας του ρεύματος, μπορούμε να κάνουμε μία μετατόπιση του άξονα, ώστε να διευκολυνθούμε στον υπολογισμό του ολοκληρώματος. Έτσι:

$$\text{Για } t_1 = -t_{off} \text{ είναι: } I_D(t_1) = I_{\max}$$

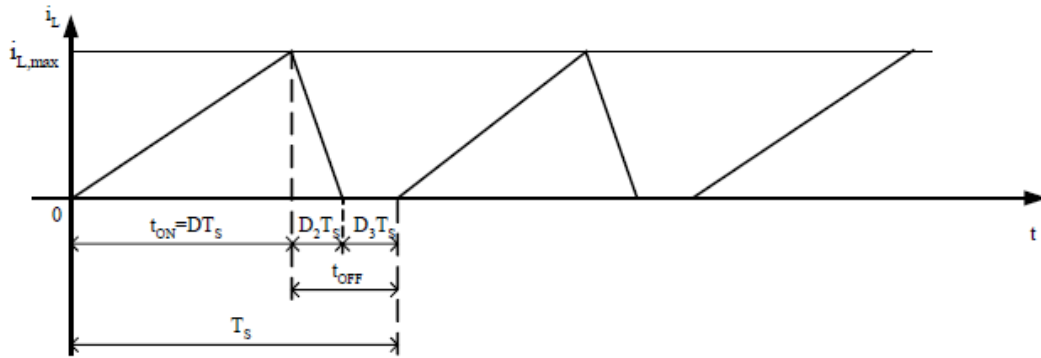
$$\text{για } t_2 = 0 \text{ είναι: } I_D(t_2) = I_{\min}$$

$$\text{Άρα: } I_D(t) = \frac{I_{\min} - I_{\max}}{t_{off}} t + I_{\min}$$

$$\text{και τελικά } I_{Drms} = \sqrt{1-D} \sqrt{\left[\left(\frac{I_{out}}{1-D} \right)^2 + \frac{1}{3} \left(\frac{1}{2} \frac{U_{in}}{L} DT_s \right)^2 \right]} \quad (4.13)$$

4.3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΠΟΛΟΓΙΑΣ ΑΝΥΨΩΣΗΣ ΣΤΗ ΜΟΝΙΜΟ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΔΙΑΚΟΠΤΟΜΕΝΗΣ ΑΓΩΓΗΣ

Όπως προκύπτει από την σχέση (4.7), που ισχύει όταν το πηνίο διαρρέεται από συνεχόμενο ρεύμα ($I_L(t) > 0 \quad \forall t$), η μέση τιμή του ρεύματος του πηνίου ελαττώνεται όταν μειώνεται το ρεύμα εξόδου. Επιπλέον η κυμάτωση του ρεύματος του πηνίου dI_L δεν εξαρτάται από το ρεύμα εξόδου (σχέση 4.5). Έτσι, όπως φαίνεται και από το σχήμα 4.4γ, όσο το ρεύμα εξόδου μειώνεται προκαλώντας ανάλογη μείωση του I_L , το $I_{L,\min}$ θα μειώνεται και αυτό, ώσπου κάποια στιγμή να γίνει μηδέν. Η τιμή που έχει τότε το ρεύμα φορτίου την ονομάζουμε κρίσιμη τιμή. Εάν το ρεύμα φορτίου πάρει τιμή μικρότερη από την κρίσιμη τιμή, το ρεύμα πηνίου δεν πρόκειται να γίνει ποτέ αρνητικό, λόγω της διόδου D . Στην περίπτωση αυτή το ρεύμα του πηνίου θα παραμείνει μηδέν, μέχρι να ξεκινήσει ο επόμενος κύκλος λειτουργίας του μετατροπέα, που αρχίζει με την αγωγή του S_w . Η κυματομορφή του ρεύματος του πηνίου στην περίπτωση αυτή θα είναι η παρακάτω:



Σχ. 4.5 Ρεύμα πηνίου όταν ο μετατροπέας Ανύψωσης λειτουργεί στην κατάσταση διακοπτόμενης αγωγής πηνίου.

Στην περίπτωση λοιπόν της κατάστασης διακοπτόμενης αγωγής έχουμε σε έναν κύκλο λειτουργίας τρεις φάσεις:

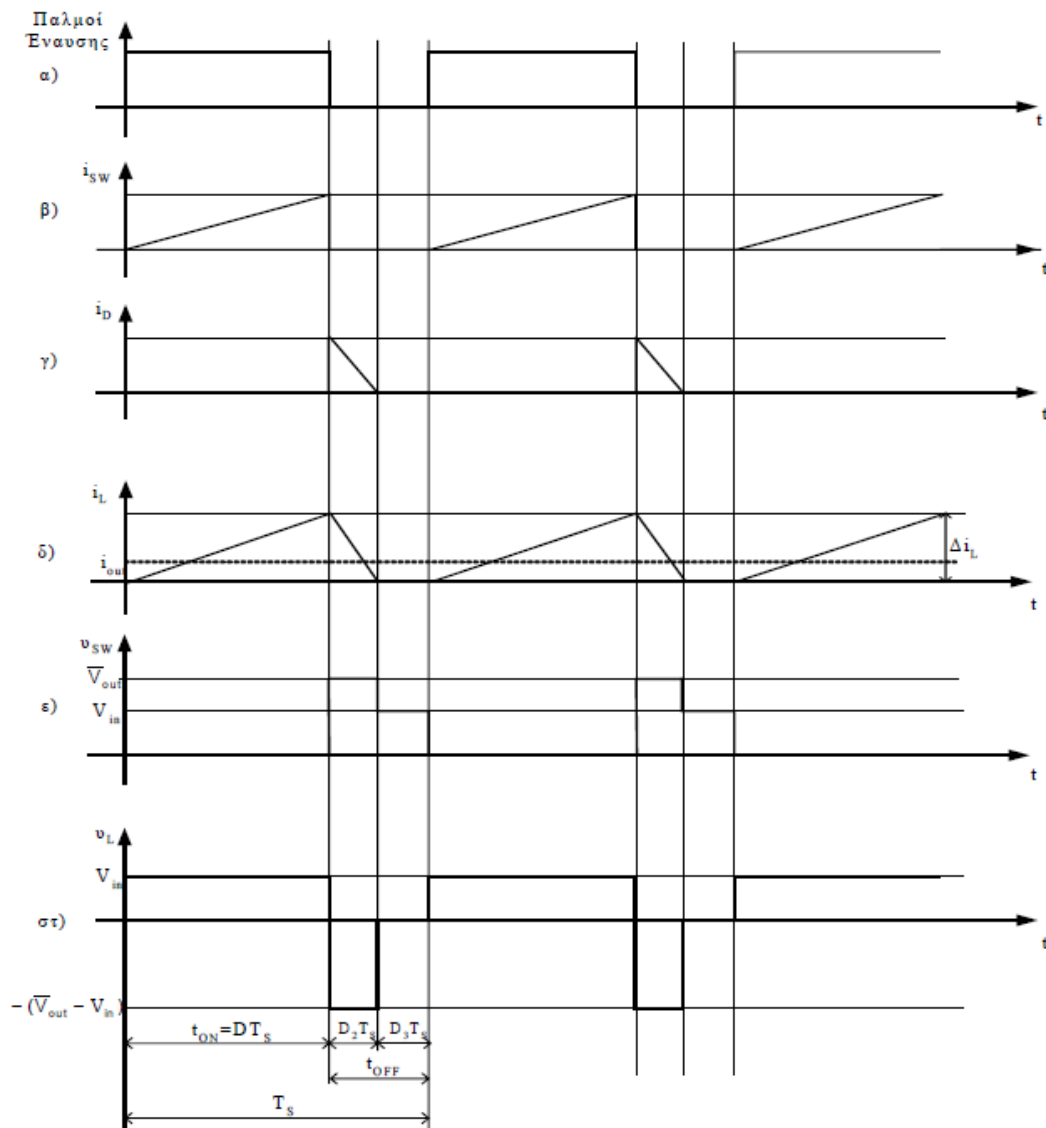
- η πρώτη, στην οποία ο ημιαγωγικός διακόπτης S_w είναι on και έχει διάρκεια

$$t_{on} = D_1 \cdot T_s$$

- η δεύτερη, στην οποία ο ημιαγωγικός διακόπτης S_w είναι off και η διόδος D άγει, η οποία έχει διάρκεια $t_{off} = D_2 \cdot T_s$

- η τρίτη, στην οποία ούτε ο ημιαγωγικός διακόπτης S_w ούτε η διόδος D άγουν. Η διάρκεια της φάσης αυτής είναι $D_3 \cdot T_s$

Οι κυματομορφές του μετατροπέα Ανύψωσης για την κατάσταση DCM φαίνονται στο σχήμα 4.6.



Σχ. 4.6 Μετατροπέας Ανύψωσης στην κατάσταση διακοπτόμενης αγωγής πηνίου (DCM) α) παλμοί έναυσης, β) ρεύμα που διαρρέει τον ημιαγωγικό διακόπτη S_w , γ) ρεύμα που διαρρέει τη δίοδο D , δ) ρεύμα πηνίου L , ε) τάση στα άκρα του ημιαγωγικού διακόπτη S_w , στ) τάση στα άκρα του πηνίου L

4.3.1 Κυμάτωση dI_L του ρεύματος του πηνίου

Επειδή η μεταβολή του ρεύματος του πηνίου είναι πρακτικά γραμμική, από τη σχέση τάσης – ρεύματος που ισχύει γενικά για ένα πηνίο:

$$U_L = L \cdot \frac{\Delta I_L}{dt}$$

προκύπτει ότι

$$|\Delta I_L| = \frac{|\bar{U}_L|}{L} \cdot dt$$

οπότε η κυμάτωση είναι:

- στην πρώτη φάση (Φ1)

$$U_L = U_{in}$$

$$\Delta I_L(+)=\frac{U_{in}}{L}\cdot D\cdot T_S \quad (4.14)$$

- στην δεύτερη φάση (Φ2)

$$\Delta I_L(-)=\frac{\bar{U}_{out}-U_{in}}{L}\cdot D_2\cdot T_S \quad (4.15)$$

4.3.2 Τάση εξόδου \bar{U}_{out}

Η κυμάτωση στις δύο φάσεις Φ1 και Φ2 είναι η ίδια, οπότε από την σχέση:

$$\Delta I_L(+)=\Delta I_L(-)$$

προκύπτει

$$U_{out}=\frac{U_{in}(D+D_2)}{D_2} \quad (4.16)$$

Η παράμετρος D_2 δεν είναι ανεξάρτητη, δηλαδή ρυθμιζόμενη από το κύκλωμα οδήγησης, αλλά καθορίζεται και από το φορτίο.

Θα διερευνήσουμε την τάση εξόδου \bar{U}_{out} , στην περίπτωση που το φορτίο είναι μια καθαρά ωμική αντίσταση R . Σε κάθε κύκλο λειτουργίας, η ενέργεια που εισέρχεται στον μετατροπέα είναι ίση με την ενέργεια που εξέρχεται από αυτόν, δηλαδή:

$$E_1+E_2=E_o \Rightarrow$$

$$\int_{DT_s} U_{in} I_{in} dt + \int_{D_2 T_2} U_{in} I_{in} dt = U_{out} I_{out} T_S \Rightarrow$$

$$U_{in} \cdot \frac{1}{2} \cdot dI \cdot D \cdot T_s + U_{in} \cdot \frac{1}{2} \cdot dI \cdot D_2 \cdot T_2 = \bar{U}_{out} \cdot \bar{I}_{out} \cdot T_s \Rightarrow$$

$$D_2 = \frac{2L\bar{U}_{out}^2 - R V_{in}^2 D^2 T_S}{R U_{in}^2 D T_S} \quad (4.17)$$

Επίσης ισχύει η παρακάτω σχέση:

$$\text{Volts} \times \text{seconds (Φάσης 1)} = \text{Volts} \times \text{seconds (Φάσης 2)} \Rightarrow$$

$$U_{in} \cdot D \cdot T_s = (U_{out} - U_{in}) \cdot D_2 \cdot T_s \Rightarrow$$

$$D_2 = \frac{U_{in} D}{U_{out} - U_{in}} \quad (4.18)$$

Εξισώνοντας τις παραπάνω σχέσεις (4.17) και (4.18) μπορούμε να βρούμε την τάση εξόδου του αντιστροφέα. Πράγματι η εξίσωση των δύο αυτών σχέσεων οδηγεί στην εξής δευτεροβάθμια εξίσωση:

$$2 \cdot L \cdot \bar{U}_{out}^2 - 2 \cdot L \cdot \bar{U}_{in} - R \cdot U_{in}^2 \cdot D^2 \cdot T_s = 0$$

που έχει λύσεις τις:
$$\bar{U}_{out} = \bar{U}_{in} \cdot \frac{1 \pm \sqrt{1 + \frac{4D^2 RT_s}{2L}}}{2}$$

Θέτουμε :

$$K = \frac{2L}{RT_s} \quad (4.19)$$

και λαμβάνοντας υπόψη την θετική τιμή της λύσης, η τάση εξόδου του αντιστροφέα, για την περίπτωση που το φορτίο είναι ωμική αντίσταση R, είναι:

$$U_{out} = U_{in} \frac{\sqrt{1 + \frac{4D^2}{K}}}{2} \quad (4.20)$$

Παρατηρούμε ότι στην περίπτωση της διακοπόμενης αγωγής, η τάση εξόδου δεν εξαρτάται μόνο από την τάση εισόδου U_{in} και τον βαθμό χρησιμοποίησης D , όπως στη συνεχόμενη αγωγή, αλλά και από την παράμετρο K που εμπλέκει το φορτίο εξόδου R , το πηνίο εισόδου L και την περίοδο T_s του διακοπτικού κύκλου.

4.4 ΕΠΙΛΟΓΗ ΠΗΝΙΟΥ L

Η κατάσταση στην οποία λειτουργεί ο μετατροπέας (συνεχόμενη ή διακοπόμενη) εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως είναι η τάση εισόδου U_{in} , η τάση εξόδου U_{out} , το ρεύμα εξόδου I_{out} και η τιμή του πηνίου L . Για να εξασφαλίσουμε τη συνεχόμενη αγωγή του πηνίου σε ένα μετατροπέα, πρέπει να επιλέξουμε κατάλληλη τιμή για το πηνίο L .

Στην οριακή περίπτωση μεταξύ Συνεχούς (CCM) και Διακοπτόμενης (DCM) αγωγής του πηνίου ισχύει η παρακάτω σχέση:

$$I_{L,\min} = \frac{dI_L}{2} \quad (4.21)$$

η οποία με την βοήθεια των (4.7) και (4.4.α) γίνεται:

$$L_{\min} = \frac{1}{2} \frac{U_{in}(1-D)DT_s}{I_{out}} \quad (4.22)$$

4.5 ΕΠΙΛΟΓΗ ΠΥΚΝΩΤΗ ΕΞΟΔΟΥ C_{out}

Ο πυκνωτής εξόδου C_{out} θα θέλαμε να είναι όσο το δυνατόν μεγαλύτερος (ιδανικά $C_{out} \rightarrow \infty$) ώστε η τάση εξόδου U_{out} να παραμένει σταθερή ανεξάρτητα του φορτίου εξόδου.

Το φορτίο του πυκνωτή συνδέεται με την τάση στα άκρα του με την σχέση

$$Q = C \cdot U$$

Για δύο διαφορετικές χρονικές στιγμές t_1, t_2 η παραπάνω σχέση γράφεται:

$$Q_1 = C \cdot U_1$$

$$\Rightarrow dQ = C \cdot dU$$

$$Q_2 = C \cdot U_2$$

Άρα

$$dU_{out} = \frac{I_{out}DT_s}{C_{out}} \quad (4.23)$$

Αν θέλουμε η κυμάτωση να μην υπερβαίνει κάποιο ποσοστό της τάσης εξόδου \bar{U}_{out} , έστω $\alpha \times 100\%$, τότε:

$$\frac{dU_{out}}{\bar{U}_{out}} \leq \alpha \Rightarrow$$

$$C_{out} \geq \frac{\bar{I}_{out}DT_s}{\alpha \bar{U}_{out}} \quad (4.24)$$

4.6 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ - ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΟΥ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑ ΑΝΥΨΩΣΗΣ

Το κυριότερο πλεονέκτημα του μετατροπέα Ανύψωσης είναι:

- Η απλότητα της τοπολογίας, η οποία αποτελείται από τον ημιαγωγικό διακόπτη S_w , που είναι το μόνο στοιχείο που χρειάζεται κύκλωμα οδήγησης, τη διόδο D και δύο παθητικά στοιχεία, το πηνίο L και τον πυκνωτή εξόδου C_{out} .

Τα κυριότερα μειονεκτήματα είναι:

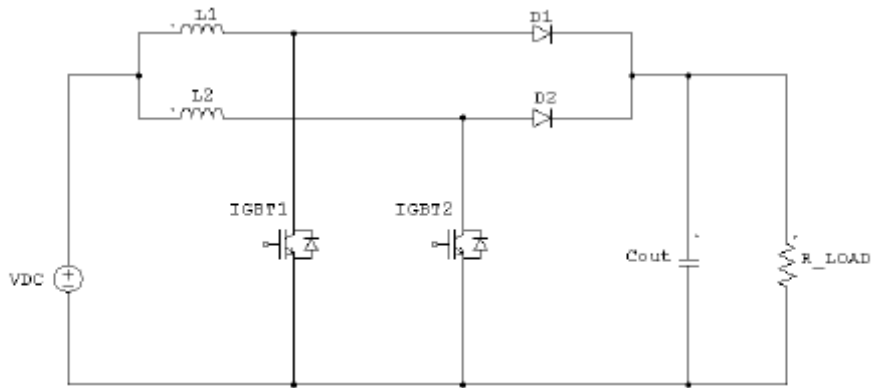
- Οι διάφορες παρασιτικές αντιστάσεις του πηνίου και του διακόπτη S_w έχουν ως αποτέλεσμα ο βαθμός χρησιμοποίησης D να έχει πρακτικά ως μέγιστη τιμή περίπου 0,9 γεγονός που οδηγεί σε έναν μέγιστο λόγο τάσεως εξόδου προς είσοδο

$$\frac{U_{out}}{U_{in}} = 10$$

- Όταν ο βαθμός χρησιμοποίησης λαμβάνει μεγάλες τιμές, τότε το διερχόμενο ρεύμα από τον ημιαγωγικό διακόπτη λαμβάνει μεγάλες τιμές,
- Κακή μεταβατική απόκριση εξαιτίας του γεγονότος ότι η αποθηκευμένη ενέργεια στο πηνίο πρέπει να μεταφερθεί στην έξοδο, ακόμα και αν το φορτίο απομακρυνθεί,
- Δεν υπάρχει περιορισμός του ρεύματος εξόδου (άρα και προστασία) σε ενδεχόμενο εξωτερικό βραχυκύκλωμα στην πλευρά της εξόδου,
- Η ισχύς μπορεί να ρέει μόνο προς μία κατεύθυνση, από την είσοδο στην έξοδο, λόγω της διόδου D .

4.7 ΠΑΡΑΛΛΗΛΑ ΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΟΙ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΙΣ ΑΝΥΨΩΣΗΣ

Εκτός της συνηθισμένης τοπολογίας ανύψωσης που παρουσιάστηκε παραπάνω, υπάρχουν και κάποιες άλλες τοπολογίες που προκύπτουν με παράλληλη ή σε σειρά σύνδεση μετατροπέων ανύψωσης. Στο σχήμα 4.10 φαίνεται μια τοπολογία που χρησιμοποιεί δύο μετατροπείς ανύψωσης, οι οποίοι είναι μεταξύ τους παράλληλα συνδεδεμένοι.



Σχ. 4.10 Μετατροπείς Ανύψωσης Παράλληλα Συνδεδεμένοι

Χρησιμοποιώντας παράλληλα συνδεδεμένους μετατροπείς ανύψωσης πετυχαίνουμε κάθε μετατροπέας να χειρίζεται το 50% της ισχύος εξόδου. Αυτό έχει ως θετική συνέπεια τη μικρότερη καταπόνηση των ημιαγωγικών στοιχείων. Επίσης όταν ο μετατροπέας ανύψωσης χρησιμοποιείται για διόρθωση του συντελεστή ισχύος, τότε η χρησιμοποίηση των δύο παράλληλα συνδεδεμένων μετατροπέων έχει ως αποτέλεσμα οι αρμονικές που δημιουργούνται να είναι λιγότερες, οπότε το μέγεθος του φίλτρου που απαιτείται στην είσοδο να είναι και αυτό μικρότερο. Το μειονέκτημα από την άλλη είναι ο μεγαλύτερος αριθμός χρησιμοποίησης ημιαγωγικών στοιχείων, γεγονός που αυξάνει το κόστος του μετατροπέα.

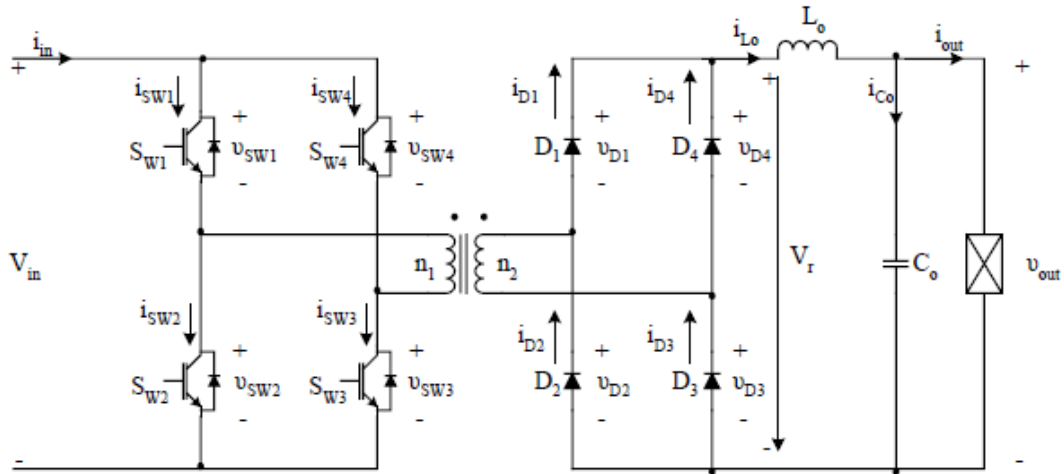
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο κεφάλαιο αυτό θα αναφερθούμε στο δεύτερο μετατροπέα που χρησιμοποιείται συνήθως, μετατροπέας πλήρους γέφυρας και θα προσπαθήσουμε να αναλύσουμε τον τρόπο λειτουργίας του και τα χαρακτηριστικά του.

5.1 ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑΣ ΠΛΗΡΟΥΣ ΓΕΦΥΡΑΣ

Τοπολογία: Στο σχήμα 5.1 φαίνεται ο μετατροπέας πλήρους γέφυρας



Σχ. 5.1 Μετατροπέας Πλήρους Γέφυρας

Χρήση: Ο μετατροπέας πλήρους γέφυρας χρησιμοποιείται ως ένας ηλεκτρονικός μετασχηματιστής υψηλής συχνότητας της τάσης εισόδου σε DC συστήματα. Ανάλογα με τον λόγο μετασχηματισμού n_1 / n_2 χρησιμοποιείται για ανύψωση ή για υποβιβασμό της DC τάσης εισόδου. Με τον μετατροπέα αυτό εξασφαλίζουμε γαλβανική απομόνωση της εξόδου από την είσοδο. Επίσης προτιμάται έναντι άλλων τοπολογιών στις περιπτώσεις εκείνες όπου υπάρχει ανάγκη μεγάλης μεταφοράς ισχύος.

Τρόπος Λειτουργίας: Η λειτουργία του μετατροπέα πλήρους γέφυρας είναι κυκλική. Κατά την πρώτη ημιπερίοδο του κύκλου λειτουργίας του, άγουν οι Ημιαγωγικοί Διακόπτες S_{W1} , S_{W3} (on) ενώ οι S_{W2} , S_{W4} δεν άγουν (off). Έτσι στο πρωτεύον του μετασχηματιστή θα εφαρμοσθεί η τάση εισόδου και επομένως στο δευτερεύον του μετασχηματιστή θα δημιουργηθεί εξ επαγωγής μια θετική ροή. Κατά την δεύτερη ημιπερίοδο του κύκλου λειτουργίας του μετατροπέα, άγουν οι Ημιαγωγικοί Διακόπτες S_{W2} , S_{W4} (on) και δεν άγουν οι S_{W1} , S_{W3} (off). Έτσι στο

πρωτεύον του μετασχηματιστή εφαρμόζεται η τάση εισόδου αλλά αντεστραμμένη, με αποτέλεσμα στο δευτερεύον του μετασχηματιστή να επάγεται κατά την δεύτερη ημιπερίοδο μια αρνητική ροή. Τελικά στο δευτερεύον του μετασχηματιστή εμφανίζεται ένας εναλλασσόμενος τετραγωνικός παλμός, το πλάτος του οποίου είναι

$$U_{in} \cdot \frac{n_2}{n_1}, \text{ ο οποίος με την βοήθεια της γέφυρας (D1 – D4) και του πυκνωτή εξόδου}$$

C_{out} (το πηνίο L_{out} του σχ. 5.1 δεν χρειάζεται στην περίπτωση αυτή) ανορθώνεται πλήρως σε σταθερή DC τάση.

Ο λόγος τάσης εξόδου προς εισόδου είναι:

$$U_{out} = U_{in} \frac{n_2}{n_1}$$

Εάν θέλουμε να μεταβάλλουμε την τάση εξόδου ή ισodύναμα να έχουμε την δυνατότητα να την διατηρούμε σταθερή έναντι των ενδεχόμενων μικρών μεταβολών που παρουσιάζονται στην τάση εισόδου, τότε ρυθμίζουμε τους παλμούς προς τους ημιαγωγικούς διακόπτες έτσι ώστε τα αντίστοιχα ζεύγη των ημιαγωγικών διακοπών να άγουν για μικρότερο χρονικό διάστημα από την διάρκεια μιας ημιπεριόδου.

Στο σχήμα 5.2 φαίνονται οι κυματομορφές για τον μετατροπέα πλήρους γέφυρας. Στο στάδιο εξόδου (σχήμα. 5.1) υπάρχει ένα LC βαθυπερατό φίλτρο, ώστε η τάση εξόδου U_{out} να είναι ίση με την μέση τιμή της ανορθωμένης τάσης U_T μετά την πλήρη γέφυρα.

Έστω T_S η περίοδος του εναλλασσόμενου τετραγωνικού παλμού στο πρωτεύον του μετασχηματιστή (σχήμα 5.2ε) και t_{on} το χρονικό διάστημα της ταυτόχρονης αγωγής των S_{W1} , S_{W3} (ή S_{W2} , S_{W4}) εντός μίας περιόδου T_S . Τότε ορίζουμε τον βαθμό χρησιμοποίησης (duty cycle) D ως τον λόγο:

$$D = \frac{t_{on}}{t_{off}} \quad (5.1)$$

Είναι φανερό ότι ο βαθμός χρησιμοποίησης μπορεί να πάρει τιμές $0 < D < 0,5$.

Επομένως η τάση εξόδου, που όπως αναφέρθηκε είναι η μέση τιμή της τάσης U_T στην έξοδο της πλήρους γέφυρας, θα είναι:

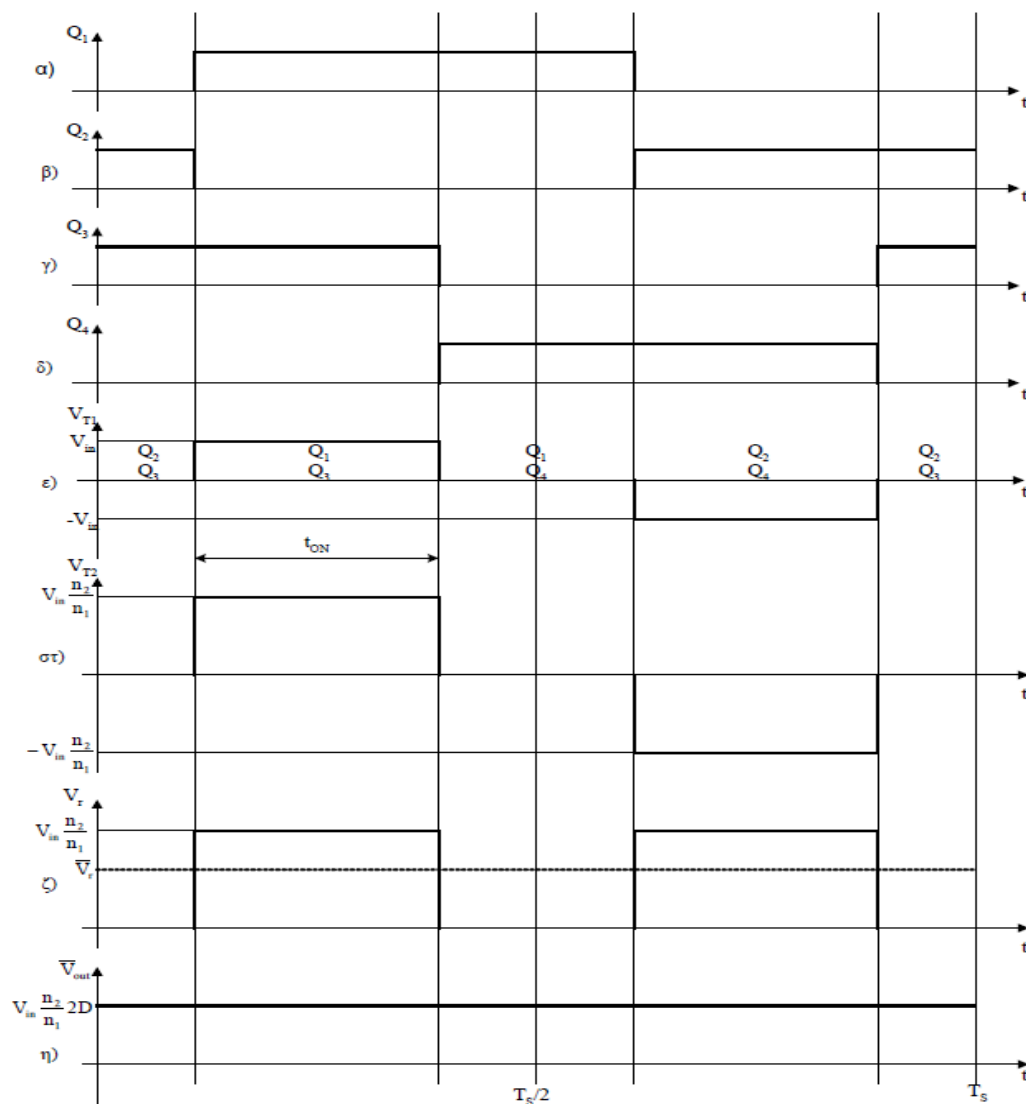
$$\bar{U}_{out} = \bar{U}_T \Rightarrow$$

$$\bar{U}_{out} = U_{in} \cdot \frac{n_2}{n_1} \cdot 2D \quad (5.2)$$

Στο σχήμα 5.2ε είναι σημειωμένα τα ζεύγη των ημιαγωγικών διακοπών που άγουν ταυτόχρονα. Παρατηρούμε ότι υπάρχουν χρονικές στιγμές που άγουν ταυτόχρονα τα S_{W1} , S_{W4} και S_{W2} , S_{W3} . Αυτό συμβαίνει για να έχουμε στο πρωτεύον του μετασχηματιστή μια μορφή τάσης καθαρά τετραγωνική. Αν π.χ. μετά την αγωγή των S_{W1} , S_{W3} δεν βραχυκυκλώναμε τα άκρα του πρωτεύοντος πηνίου, γεγονός που το πετυχαίνουμε με την ταυτόχρονη αγωγή των S_{W1} , S_{W4} , τότε εξαιτίας του απότομου

μηδενισμού του ρεύματος του πηνίου θα αναπτύσσονταν στα άκρα του μία υπέρταση. Αυτός είναι και ο λόγος που οι παλμοί του σχήματος 5.2 α-δ έχουν διευρυμένο πλάτος σε σχέση με τον χρόνο αγωγής t_{on} .

Θα πρέπει επίσης να προσεχθεί ότι οι παλμοί πρέπει να είναι τέτοιοι ώστε να μην βραχυκυκλώσει ποτέ η είσοδος του μετατροπέα. Για παράδειγμα από την στιγμή που θα μηδενιστεί ο παλμός έναυσης του S_{W1} μέχρι να εφαρμοσθεί παλμός στον S_{W2} θα πρέπει να μεσολαβήσει ένα μικρό χρονικό διάστημα ώστε να εξασφαλισθεί ότι ο S_{W1} θα είναι σε κατάσταση πλήρους αποκοπής πριν την αγωγή του S_{W2} , αποτρέποντας με τον τρόπο αυτό ένα βραχυκύκλωμα της εισόδου. Η χρονική αυτή καθυστέρηση καθορίζεται από τις προδιαγραφές $t_{d(off)}$ (turn-off Delay Time) και $t_{d(on)}$ (turn-on Delay Time) των ημιαγωγικών στοιχείων. Επίσης η υψηλή διακοπτική συχνότητα που χρησιμοποιείται για την οδήγηση των ημιαγωγικών διακοπών έχει ως αποτέλεσμα ο εναλλασσόμενος τετραγωνικός παλμός που εφαρμόζεται στο πρωτεύον του μετασχηματιστή να είναι υψηλής συχνότητας, γεγονός που οδηγεί σε μικρού μεγέθους μετασχηματιστή.



Σχ. 5.2 Κυματομορφές Μετατροπέα Πλήρους Γέφυρας, α-δ) παλμοί έναυσης ημιαγωγικών διακοπών S_{W1-4} , ε) τάση στο πρωτεύον του μετασχηματιστή, στ) τάση στο δευτερεύον του μετασχηματιστή, ζ) ανορθωμένη τάση,

η) τάση εξόδου του μετατροπέα

5.2 ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΗ ΗΜΙΑΓΩΓΙΚΩΝ ΔΙΑΚΟΠΤΩΝ

Για την σωστή επιλογή των ημιαγωγικών στοιχείων, προκειμένου αυτά να αντέχουν στις καταπονήσεις ρεύματος και τάσης, απαιτείται η γνώση ορισμένων μεγεθών, όπως:

• Μέγιστη Τάση στα Άκρα του Ημιαγωγικού Διακόπτη Sw

Η μέγιστη τάση είναι η ίδια για όλους τους Ημιαγωγικούς Διακόπτες Sw και είναι ίση με την τάση εισόδου:

$$U_{swmax} = U_{in} \quad (5.3)$$

• Μέγιστο Ρεύμα που Διαρρέει τον Ημιαγωγικό Διακόπτη Sw

Λαμβάνοντας υπόψη το ρεύμα μαγνήτισης του μετασχηματιστή, όλοι οι ημιαγωγοί διακόπτες διαρρέονται από το ίδιο μέγιστο ρεύμα, που δίνεται από την σχέση:

$$I_{swmax} = \frac{n_2}{n_1} \frac{\bar{I}_{out}}{2D} + I_{M,max} \quad (5.4)$$

όπου $I_{M,max}$ είναι το μέγιστο ρεύμα μαγνήτισης του μετασχηματιστή.

rms τιμή:

$$I_{swrms} = \sqrt{D \left[\left(\frac{n_2}{n_1} \frac{I_{out}}{2D} \right)^2 + \frac{1}{3} I_{M,max}^2 \right]} \quad (5.5)$$

• Μέγιστη Τάση στα Άκρα των Διόδων D

Η μέγιστη τάση που εφαρμόζεται στα άκρα των διόδων είναι η ίδια για όλες τις διόδους της πλήρους γέφυρας ανόρθωσης και είναι ίση με την τάση εξόδου του μετατροπέα, δηλαδή:

$$U_{Dmax} = U_{out} \quad (5.6)$$

• Μέγιστο Ρεύμα που διαρρέει τις Διόδους D

Το μέγιστο ρεύμα εξαρτάται από το ρεύμα φορτίου και από τον βαθμό χρησιμοποίησης και είναι ίδιο για όλες τις διόδους:

$$I_{Dmax} = \frac{\bar{I}_{out}}{2D} \quad (5.7)$$

rms τιμή:
$$I_{D\max} = \frac{I_{out}}{2\sqrt{D}} \quad (5.8)$$

5.3 ΣΧΕΣΗ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΕΙΣΟΔΟΥ - ΕΞΟΔΟΥ

Σε έναν ιδανικό μετατροπέα που δεν έχουμε απώλειες ισχύος, θα ισχύει:

$$\begin{aligned} U_{in} \cdot \bar{I}_{in} &= \bar{U}_{out} \cdot \bar{I}_{out} \Rightarrow \\ \bar{I}_{in} &= 2 \cdot \frac{n_2}{n_1} \cdot D \cdot \bar{I}_{out} \end{aligned} \quad (5.9)$$

5.4 ΕΠΙΛΟΓΗ ΦΙΛΤΡΟΥ ΕΞΟΔΟΥ $L_o C_o$

5.4.1. Επιλογή Πηνίου Εξόδου L_o

Θεωρώντας μηδενική την αντίσταση του πηνίου L_o , το ρεύμα του θα μεταβάλλεται γραμμικά και αν U_{L_o} είναι η μέση τάση στα άκρα του, τότε η μεταβολή του I_{L_o} ρεύματος που το διαρρέει θα δίνεται από την σχέση:

$$\Delta I_{L_o} = \frac{U_{L_o}}{L_o} \Delta t \quad (5.10)$$

Γενικά ισχύει ότι:
$$\bar{U}_{out} - U + \bar{U}_{L_o} = 0 \quad (5.11)$$

ενώ κατά την διάρκεια που η τάση U_r δεν είναι μηδέν (σχ. 3.2ζ), δηλαδή για χρονικό διάστημα $\Delta t = t_{on} = DT_S$ ισχύει:

$$\bar{U}_{L_o} = U_{in} \cdot \frac{n_2}{n_1} (1 - 2D) \quad (5.12)$$

Επομένως η κυμάτωση του ρεύματος I_{L_o} του πηνίου L_o θα δίνεται από την σχέση:

$$\Delta I_{L_o} = \frac{1}{L_o} U_{in} \frac{n_2}{n_1} (1 - 2D) DT_S \quad (5.13)$$

Η επιλογή του πηνίου L_o γίνεται έτσι ώστε η κυμάτωση του ρεύματος ΔI_{L_o} στο πηνίο L_o να είναι ένα μικρό ποσοστό της dc συνιστώσας του ρεύματος πλήρους φορτίου και επιπλέον ο μετατροπέας να δουλεύει στην κατάσταση συνεχούς αγωγής CCM.

Έτσι αν η κυμάτωση ΔI_{L_o} δεν θέλουμε να υπερβαίνει ένα μικρό ποσοστό του I_{out} , έστω $(\alpha \times 100)\%$, $0 < \alpha < 1$, θα πρέπει:

$$\Delta I_{L_o} < \alpha \cdot \bar{I}_{out} \Rightarrow$$

$$L_o > \frac{1}{a} \frac{U_{in}}{\bar{I}_{out}} \frac{n_2}{n_1} (1 - 2D) D T_s \quad (5.14)$$

Παρατηρούμε ότι όσο μικραίνει το φορτίο, άρα και το I_{out} , η τιμή του L_o πρέπει να γίνει μεγαλύτερη.

Επίσης για να εξασφαλισθεί ότι ο μετατροπέας θα δουλεύει σε CCM θα πρέπει:

$$\bar{I}_{L_o} > \frac{\Delta I_{L_o}}{2}$$

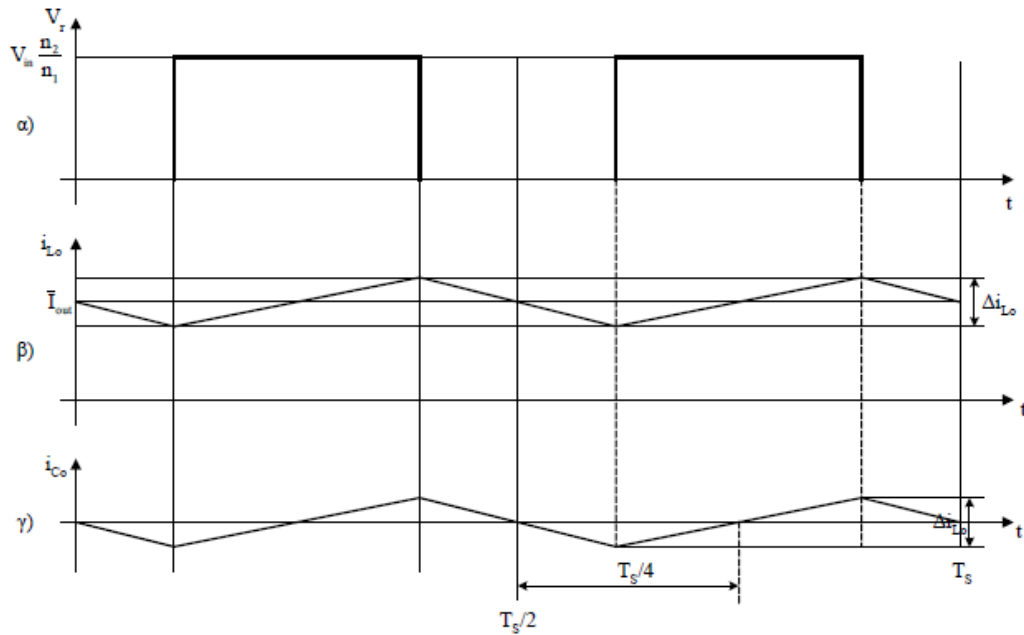
Δεδομένου ότι $\bar{I}_{L_o} = \bar{I}_{out}$ θα πρέπει για το πηνίο L_o να ισχύει η σχέση:

$$L_o > \frac{1}{2} \frac{U_{in}}{\bar{I}_{out}} \frac{n_2}{n_1} (1 - 2D) D T_s \quad (5.15)$$

Από τις (5.14), (5.15) προκύπτει ότι για το ίδιο ρεύμα φορτίου I_{out} , η ισχύς της (3.14) μας εξασφαλίζει ότι ο μετατροπέας θα εργάζεται και στην κατάσταση CCM.

5.4.2 Επιλογή Πυκνωτή Εξόδου C_o

Στο σχήμα 5.3β φαίνεται η κυματομορφή του ρεύματος του πηνίου εξόδου L_o . Θεωρώντας ότι η αντίσταση του πηνίου είναι πρακτικά μηδενική, η μεταβολή του ρεύματος μέσα από αυτό θα είναι γραμμική, όπως ακριβώς φαίνεται στο σχήμα 5.3β. Όταν η τάση μετά την ανόρθωση U_r είναι θετική, το ρεύμα I_{L_o} που διέρχεται από το πηνίο L_o θα αυξάνεται, ενώ όταν η U_r γίνει μηδέν, το ρεύμα I_{L_o} θα μειώνεται, πάντα γραμμικά. Το ρεύμα αυτό έχει μια κυμάτωση ΔI_{L_o} που δίνεται από την σχ (5.13) και μια DC συνιστώσα I_{L_o} , η οποία είναι ίση με το ρεύμα φορτίου I_{out} . Η AC συνιστώσα του ρεύματος I_{L_o} μοιράζεται μεταξύ της αντίστασης φορτίου RLOAD και του πυκνωτή C_o . Σε έναν όμως καλοσχεδιασμένο μετατροπέα, στον οποίον ο πυκνωτής εξόδου παρέχει ικανοποιητικό φιλτράρισμα της κυμάτωσης, ο πυκνωτής C_o επιλέγεται αρκετά μεγάλος έτσι ώστε η αντίδρασή του στην διακοπτική συχνότητα να είναι αρκετά μικρότερη από την αντίσταση φορτίου. Με τον τρόπο αυτό μπορούμε να θεωρήσουμε ότι όλη σχεδόν η AC συνιστώσα του I_{L_o} ρέει προς τον πυκνωτή C_o . Επομένως η κυματομορφή του ρεύματος I_{C_o} του πυκνωτή εξόδου C_o θα είναι αυτή του σχήματος 5.3γ.



Σχ. 5.3 Κυματομορφές Μετατροπέα Πλήρους Γέφυρας U_r α) ανορθωμένη τάση U_r , β) ρεύμα πηνίου εξόδου I_{Lo} , γ) ρεύμα πυκνωτή εξόδου C_o

Μετά την παραπάνω ανάλυση μπορούμε εύκολα να υπολογίσουμε την κυμάτωση της τάσης εξόδου U_{out} . Πράγματι το γραμμοσκιασμένο εμβαδόν του σχ. 5.3γ είναι ίσο με το φορτίο φόρτισης του πυκνωτή, οπότε:

$$\Delta Q = \frac{1}{2} \frac{\Delta I_{Lo}}{2} \frac{T_s}{4} \Rightarrow \Delta Q = \frac{1}{16} \cdot \Delta I_{Lo} \cdot T_s \quad (5.16)$$

Επομένως η κυμάτωση της τάσης εξόδου ΔU_{out} θα είναι:

$$\Delta U_{out} = \frac{\Delta Q}{C_o} = \frac{\Delta I_{Lo} T_s}{16 C_o} \quad (5.17)$$

Η τελευταία αυτή σχέση σε συνδυασμό με την (5.13) μας επιτρέπει να επιλέξουμε τιμή πυκνωτή εξόδου C_o . Πράγματι, αν θέλουμε η κυμάτωση τάσης να μην ξεπερνάει ένα μικρό ποσοστό της μέσης τάσης εξόδου \bar{U}_{out} , δηλαδή να είναι μικρότερη από $\beta \bar{U}_{out}$, $0 < \beta < 1$, τότε:

$$C_o > \frac{1}{16 \beta L_o} \frac{U_{in}}{\bar{U}_{out}} \frac{n_2}{n_1} (1 - 2D) D T_s^2 \quad (5.18)$$

5.5 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ- ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΟΥ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑ ΠΛΗΡΟΥΣ ΓΕΦΥΡΑΣ

Τα κυριότερα πλεονεκτήματα του μετατροπέα πλήρους γέφυρας είναι τα εξής:

- Καλή αξιοποίηση του μετασχηματιστή, ο οποίος εξ' αιτίας και της υψηλής διακοπτικής συχνότητας είναι μικρός σε όγκο
- Λόγω του διπλασιασμού της συχνότητας της τάσης μετά την ανόρθωση σε σχέση με πριν την ανόρθωση, οι απαιτήσεις για το φίλτρο εξόδου περιορίζονται
- Μεγάλη ικανότητα μεταφοράς ισχύος, αφού ολόκληρη η τάση εισόδου εφαρμόζεται στο πρωτεύον του μετασχηματιστή

Τα κυριότερα μειονεκτήματα είναι:

- Το κύκλωμα οδήγησης είναι πολύπλοκο, επειδή πρέπει να οδηγήσει τέσσερα διακοπτικά στοιχεία, να αποτρέπει το ενδεχόμενο βραχυκύκλωσης της εισόδου του μετατροπέα, καθώς επίσης ότι το κύκλωμα θα πρέπει να έχει γαλβανική απομόνωση από τα διακοπτικά στοιχεία
- Το πρωτεύον του μετασχηματιστή θα πρέπει να έχει κύκλωμα που να αποτρέπει τον κορεσμό του πυρήνα του

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 - ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΩΝ ΑΝΥΨΩΣΗΣ – ΠΛΗΡΟΥΣ ΓΕΦΥΡΑΣ

Στο κεφάλαιο αυτό θα επιχειρήσουμε να κάνουμε μια συνολική σύγκριση των δύο παραπάνω τοπολογιών. Για το σκοπό αυτό θα λάβουμε υπ' όψιν μας, εκτός από τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα του κάθε μετατροπέα, κριτήρια τα οποία έχουν άμεση συσχέτιση με το κόστος κατασκευής τους. Τα κριτήρια αυτά είναι τα εξής:

6.1 ΜΕΓΙΣΤΕΣ ΕΠΙΤΡΕΠΟΜΕΝΕΣ ΤΙΜΕΣ ΤΩΝ ΗΜΙΑΓΩΓΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Είναι λογικό ότι, το κόστος των ημιαγωγικών στοιχείων αυξάνεται όσο μεγαλώνουν οι απαιτήσεις μας για αντοχή αυτών σε μεγαλύτερες τάσεις και ρεύματα. Θεωρούμε ότι, το κόστος των ημιαγωγικών διακοπών καθορίζεται κυρίως από το ποσό του πυριτίου που χρησιμοποιείται για την κατασκευή τους. Το ποσό πυριτίου προκύπτει ως εξής: θεωρούμε ότι το πάχος του στρώματος πυριτίου καθορίζεται από την μέγιστη τάση $U_{Sw,max}$ που εφαρμόζεται σε αυτό και ότι το εμβαδόν του πυριτίου καθορίζεται από την rms τιμή του ρεύματος $I_{Sw,rms}$ που διαρρέει τον ημιαγωγικό διακόπτη, εξαιτίας των διαφόρων θερμικών παραμέτρων. Κατά συνέπεια το συνολικό ποσό του απαιτούμενου πυριτίου ανά ημιαγωγικό διακόπτη είναι μια συνάρτηση και μάλιστα αύξουσα του γινομένου $U_{Sw,max} I_{Sw,rms}$. Ορίζουμε τον συντελεστή F ημιαγωγικού διακόπτη μιας τοπολογίας ως:

$$F = \frac{\sum U_{Sw,max} I_{Sw,rms}}{\bar{U}_{out} \bar{I}_{out}} \quad (6.1)$$

Είναι λογικό επίσης ότι όσο μεγαλύτερος γίνεται ο συντελεστής αυτός, για την ίδια ισχύ P_{out} , το κόστος του μετατροπέα εξαιτίας των ημιαγωγικών διακοπών θα αυξάνεται. Στην επόμενη παράγραφο υπολογίζεται ο συντελεστής F για τις δύο τοπολογίες, τόσο για τους ελεγχόμενους ημιαγωγικούς διακόπτες όσο και για τις διόδους αυτών.

6.1.1 Σύγκριση Συντελεστή F για τους Ελεγχόμενους Ημιαγωγικούς

Διακόπτες των Τοπολογιών Ανύψωσης – Πλήρους Γέφυρας

- Τοπολογία Ανύψωσης: Ισχύουν από προηγούμενο κεφάλαιο οι σχέσεις

$$U_{swmax} = U_{out} \quad \text{και}$$

$$I_{Sw,rms} = I_L \sqrt{D_B} \sqrt{1 + \frac{1}{3} \left(\frac{\Delta I_L}{2\bar{I}_L} \right)^2}$$

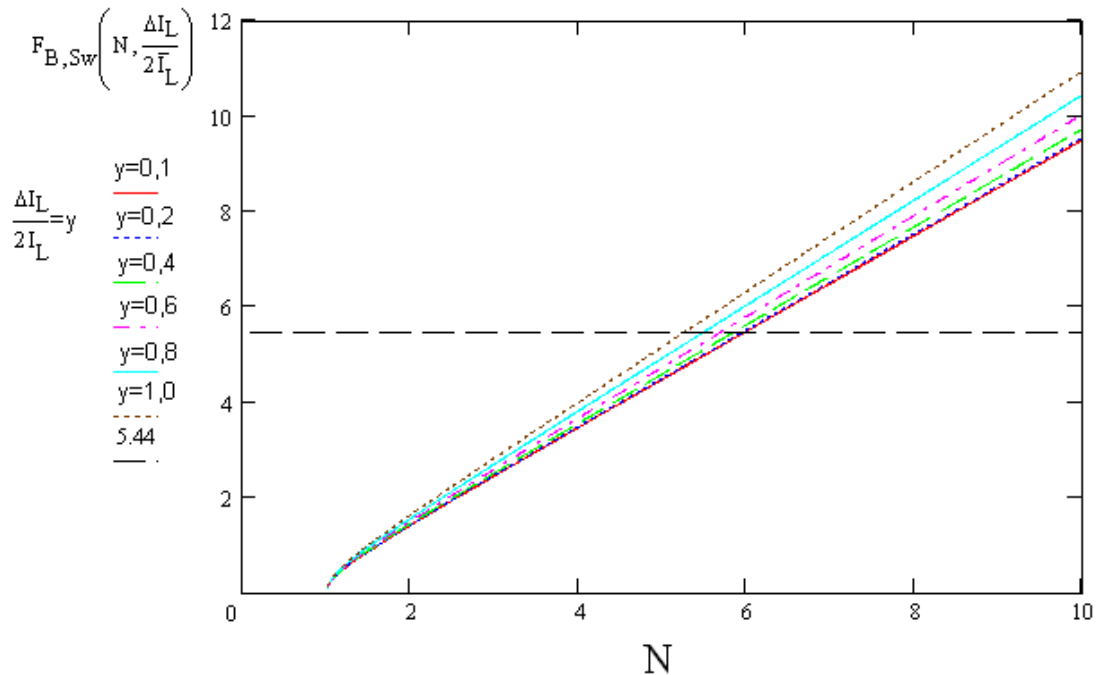
από τις οποίες προκύπτει ο συντελεστής F

$$F_{Bsw} = N \cdot \sqrt{1 - \frac{1}{N}} \sqrt{1 + \frac{1}{3} \left(\frac{\Delta I_L}{2\bar{I}_L} \right)^2} \quad (6.2)$$

όπου N ορίζουμε γενικά τον λόγο τάσης εξόδου προς τάσης εισόδου ενός μετατροπέα, δηλαδή

$$N = \frac{\bar{U}_{out}}{U_{in}} \quad (6.3)$$

Στο σχήμα 6.1 φαίνεται η γραφική παράσταση της (6.2).



Σχ. 6.1 Γραφική Παράσταση του συντελεστή $F_{B,Sw}$ του ημιαγωγικού διακόπτη του Μετατροπέα Ανύψωσης

• Τοπολογία Πλήρους Γέφυρας: Ισχύουν από προηγούμενο κεφάλαιο οι σχέσεις:

$$U_{swmax} = U_{in} \quad \text{και}$$

$$I_{swrms} = \sqrt{D_{FB} \left[\left(\frac{n_2}{n_1} \frac{I_{out}}{2D_{FB}} \right)^2 + \frac{1}{3} I_{M,max}^2 \right]}$$

Κάνουμε την παραδοχή ότι: $I_{M,max} \approx \bar{I}_{in}$

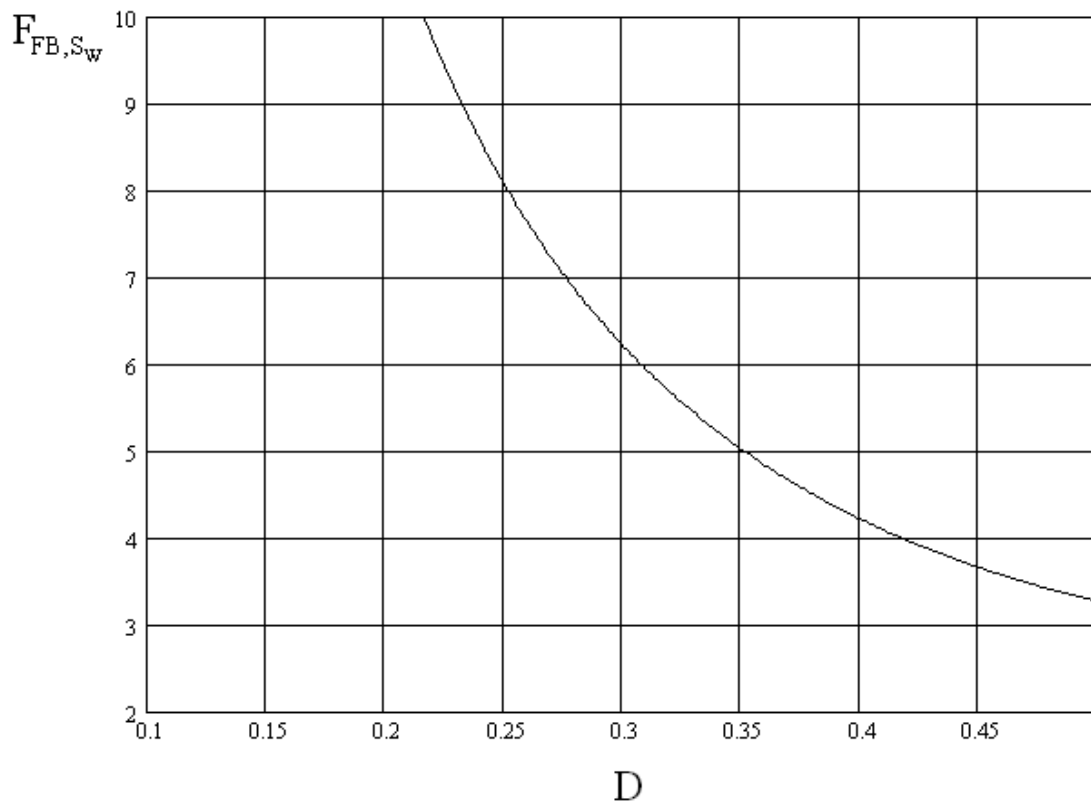
ενώ λόγω της ομοιόμορφης καταπόνησης των τεσσάρων Ημιαγωγικών Διακοπών θα ισχύει ότι:

$$\sum U_{Sw,max} \cdot I_{Sw,rms} = 4 \cdot U_{Sw,max} \cdot I_{Sw,rms}$$

Τελικά προκύπτει ότι ο συντελεστής F γίνεται:

$$F_{FB,Sw} = \sqrt{\frac{3 + 16D_{FB}^4}{3D_{FB}^3}} \quad (6.4)$$

Η γραφική παράσταση της (6.4) φαίνεται στο σχήμα 6.2.



Σχ. 6.2 Γραφική Παράσταση του Συντελεστή $F_{B,Sw}$ των ημιαγωγικών διακοπών του Μετατροπέα Πλήρους Γέφυρας

Από το σχήμα 6.2 προκύπτει ότι όσο μεγαλύτερος είναι ο βαθμός χρησιμοποίησης D_{FB} , τόσο μικρότερος είναι ο συντελεστής $F_{FB,Sw}$ που σχετίζεται με το κόστος των ημιαγωγικών διακοπών του μετατροπέα. Για τον λόγο αυτό όταν σχεδιάζουμε έναν μετατροπέα πλήρους γέφυρας επιλέγουμε όσο το δυνατόν μεγαλύτερο βαθμό χρησιμοποίησης D_{FB} . Επειδή όμως θα πρέπει να έχουμε την δυνατότητα αυξομείωσης του D_{FB} , ώστε να μπορούμε να διατηρούμε την τάση εξόδου σταθερή έναντι μεταβολών της τάσης εισόδου, ο D_{FB} δεν λαμβάνει την μέγιστη τιμή του, που είναι 0,5, αλλά μικρότερη.

Έστω για παράδειγμα ότι κατά την σχεδίαση ενός μετατροπέα πλήρους γέφυρας, η τάση εισόδου στους υπολογισμούς μας είναι U_{in} γεγονός που οδηγεί σε βαθμό χρησιμοποίησης D_{FB} . Έστω επίσης ότι θέλουμε ο μετατροπέας αυτός να μπορεί να διατηρεί σταθερή την τάση εξόδου του ακόμα και αν η τάση εισόδου του αυξομειώνεται κατά ένα ποσοστό $\alpha\%$ της τάσης εισόδου U_{in} , δηλαδή η τάση εισόδου κυμαίνεται μεταξύ των τιμών $U'_{in} = (1-\alpha/100) U_{in}$ και $U''_{in} = (1+\alpha/100)U_{in}$. Για να διατηρήσουμε την τάση εξόδου σταθερή, θα πρέπει, μέσω ενός συστήματος ελέγχου να ρυθμιστεί ξανά ο βαθμός χρησιμοποίησης D_{FB} , ο οποίος πρέπει να γίνει για τις αντίστοιχες παραπάνω τιμές:

$$D'_{FB} = \frac{D_{FB}}{(1 - \alpha / 100)}$$

$$D''_{FB} = \frac{D_{FB}}{(1 + \alpha / 100)}$$

όπου $D''_{FB} < D_{FB} < D'_{FB}$.

Επειδή η μέγιστη τιμή που μπορεί να πάρει ο βαθμός χρησιμοποίησης D_{FB} είναι 0,5, θέτουμε $D'_{FB} = 0,5$, οπότε ο βαθμός χρησιμοποίησης που χρησιμοποιείται για τον σχεδιασμό υπολογίζεται από την σχέση:

$$D_{FB} = 0.5 \cdot \frac{1 - \alpha}{100} \quad (6.5)$$

ενώ για τον υπολογισμό του συντελεστή F_{FB} , λαμβάνουμε υπόψη την μικρότερη τιμή για τον βαθμό χρησιμοποίησης, δηλαδή την D''_{FB} .

Έτσι, π.χ. για $\alpha\% = 20\%$ προκύπτει ότι: $D_{FB} = 0,4$ και $D''_{FB} = 0,33$, οπότε από την σχέση (6.4) προκύπτει ότι: $F_{FB}(D_{FB}=0,33) = 5,44$.

Επανερχόμαστε τώρα στο σχήμα 6.1. Παρατηρούμε ότι ο συντελεστής κόστους $F_{B,sw}$ γίνεται μεγαλύτερος από $F_{FB}(D_{FB}=0,33) = 5,44$ για $N > 6$, που σημαίνει ότι αν ο μετατροπέας ανύψωσης πρέπει να μπορεί να διατηρεί την τάση εξόδου σταθερή ακόμα και για 20% μεταβολή της τάσης εισόδου, όπως δεχθήκαμε και στην περίπτωση του μετατροπέα πλήρους γέφυρας, για $N = 6 \times (1-0,2) = 4,8$ άρα $N > 5$, ο μετατροπέας πλήρους γέφυρας έχει χαμηλότερο συντελεστή κόστους F από ότι ο μετατροπέας ανύψωσης.

6.1.2 Σύγκριση Συντελεστή F για τις Διόδους των Τοπολογιών Ανύψωσης – Πλήρους Γέφυρας

• Τοπολογία Ανύψωσης: Ισχύουν οι σχέσεις από προηγούμενο κεφάλαιο:

$$U_{D_{max}} = U_{out} \quad \text{και}$$

$$I_{Dmax} = I_L \cdot \sqrt{1 - D_B} \sqrt{1 + \frac{1}{3} \left(\frac{\Delta I_L}{2I_L} \right)^2}$$

όπου ο συντελεστής F γίνεται:

$$F_{B,D} = N \sqrt{\frac{1}{N}} \sqrt{1 + \frac{1}{3} \left(\frac{\Delta I_L}{2I_L} \right)^2} \quad (6.6)$$

• Τοπολογία Πλήρους Γέφυρας: Ισχύουν οι σχέσεις

$$U_{Dmax} = U_{out} \quad \text{και}$$

$$I_{D,rms} = I_{Drms} = \frac{I_{out}}{2\sqrt{D_{FB}}}$$

όπου ο συντελεστής F γίνεται:

$$F_{FB,D} = \frac{2}{\sqrt{D_{FB}}} \quad (6.7)$$

από όπου προκύπτει ότι: $F_{FB,D} (D_{FB} = 0.33) = 3.48$

Στο σχήμα 6.3 φαίνεται η γραφική παράσταση της (6.6), από όπου προκύπτει ότι για τιμές $N < 9(1-0,2) = 7,2$ είναι:

$$F_{B,D} < F_{FB,D} (D_{FB} = 0.33)$$

δηλαδή ο συντελεστής κόστους για την τοπολογία Ανύψωσης είναι χαμηλότερος από τον αντίστοιχο της τοπολογίας πλήρους γέφυρας για $N < 7$.

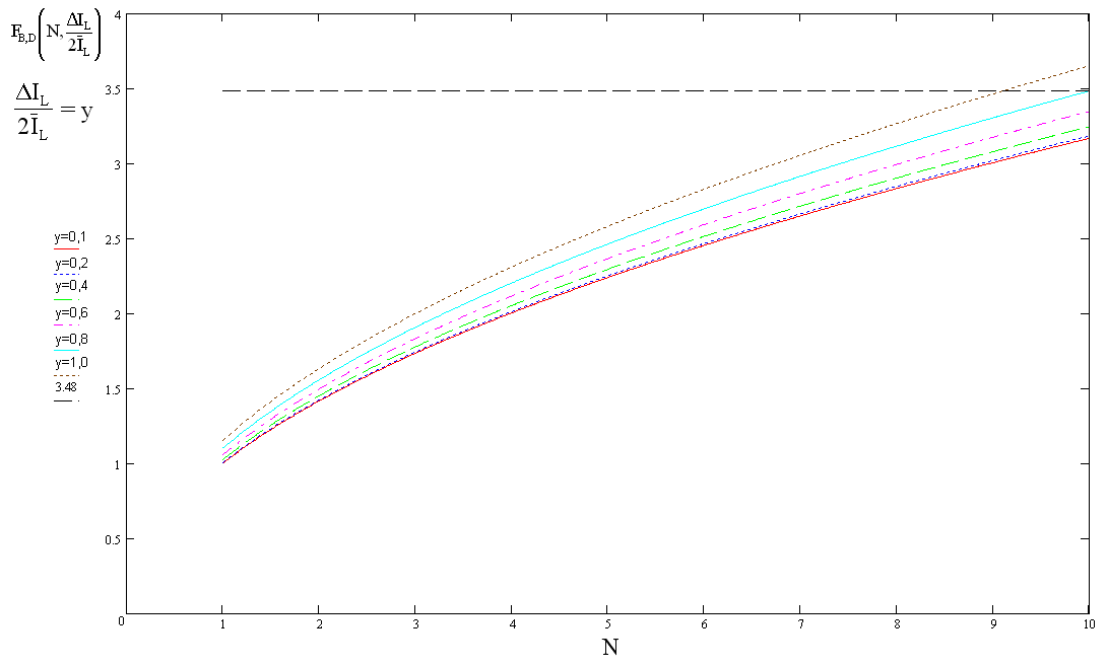
6.2 ΜΕΓΕΘΟΣ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟΥ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ

Για την τοπολογία Ανύψωσης η ελάχιστη τιμή που πρέπει να έχει το πηνίο προκειμένου ο μετατροπέας να δουλεύει σε κατάσταση CCM δίνεται από την σχέση

$$L_{\min} = \frac{1}{2} \frac{U_{in} \cdot (1 - D_B) \cdot D_B \cdot T_S}{\bar{I}_{out}} \Rightarrow L_{\min} = \frac{U_{in} \cdot D_B \cdot T_S}{\Delta I_L} \quad (6.8)$$

Επομένως η επιλογή πηνίου πρέπει να είναι τέτοια ώστε $L \geq L_{\min}$ ή

$$\Delta I_L \leq \Delta I'_L \Rightarrow \Delta I_L \leq 2 \cdot \bar{I}_L \Rightarrow \frac{\Delta I_L}{2 \cdot \bar{I}_L} \leq 1$$



Σχ. 6.3 Γραφική Παράσταση Συντελεστή $F_{B,D}$ για τη Δίοδο του Μετατροπέα Ανύψωσης

Το μέγεθος του πηνίου, εκφραζόμενο ως γινόμενο εμβαδών παραθύρου περιέλιξης A_w και πυρήνα A_c δίνεται από την σχέση

$$A_w \cdot A_c = \frac{L I_{\max} I_{rms}}{k_{cu} J_{rms} B_{\max}} \quad (6.9)$$

όπου k_{cu} είναι ο συντελεστής πλήρωσης χαλκού, J_{rms} η rms τιμή της πυκνότητας ρεύματος και B_{\max} η μέγιστη πυκνότητα μαγνητικής ροής.

Για έναν μετασχηματιστή το γινόμενο εμβαδών είναι:

$$A_w \cdot A_c = \frac{S}{2,22 k_{cu} J_{rms} B_{\max} f} \quad (6.10)$$

όπου S η φαινόμενη ισχύς και f η συχνότητα της εφαρμοζόμενης τάσης στον μετασχηματιστή.

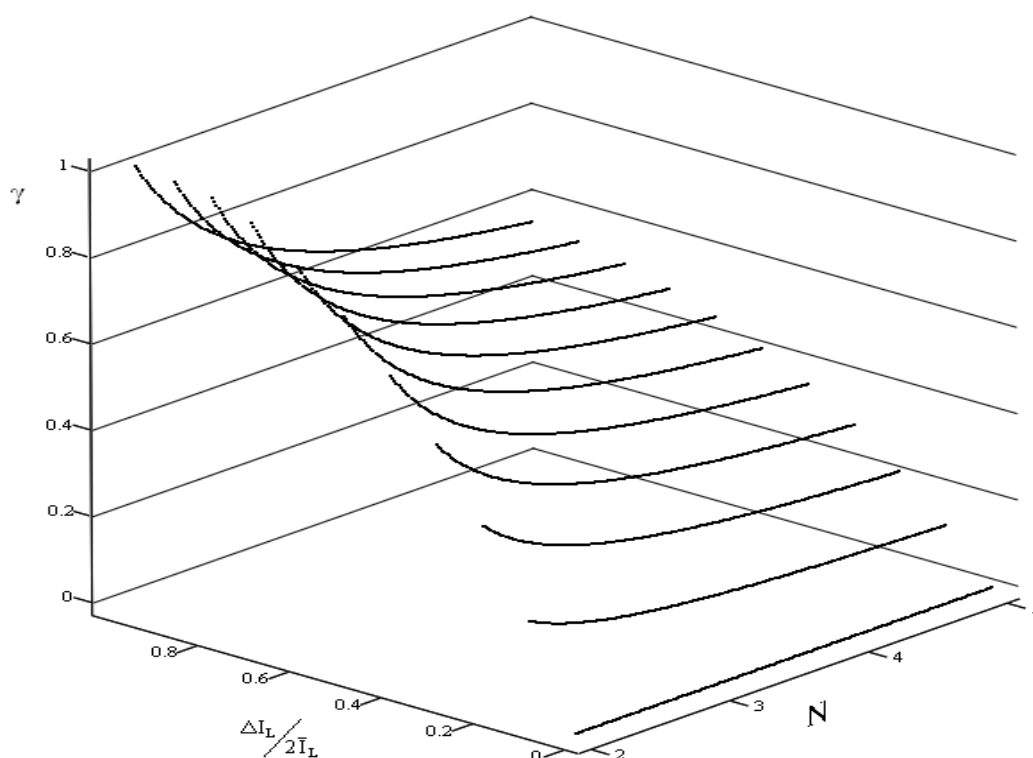
Προκειμένου να συγκρίνουμε το μέγεθος του μετασχηματιστή του μετατροπέα πλήρους γέφυρας με το μέγεθος του πηνίου L ($L > L_{\min}$) του μετατροπέα ανύψωσης, διαιρούμε την (6.10) με την (6.9), οπότε προκύπτει ο λόγος:

$$\gamma = \frac{1}{1,11 \left(1 + \frac{2\bar{I}_L}{\Delta I_L} \right) \sqrt{\left(1 - \frac{1}{N} \right)^3} \sqrt{1 + \frac{1}{3} \left(\frac{\Delta I_L}{2\bar{I}_L} \right)^2}} \quad (6.11)$$

Η γραφική παράσταση της (6.11) φαίνεται στο σχήμα 6.4.

Από το σχήμα 6.4 παρατηρούμε ότι για $N > 2$, ο λόγος γ είναι μικρότερος της μονάδας, $\gamma < 1$, άρα έχουμε μικρότερο μέγεθος μετασχηματιστή σε σχέση με το μέγεθος του πηνίου.

Όσο μάλιστα μικρότερη κυμάτωση ($\frac{\Delta I_L}{I_L} = 0,2 \Rightarrow \frac{\Delta I_L}{2\bar{I}_L} = 0,1$) το μέγεθος του μετασχηματιστή πλήρους γέφυρας είναι μικρότερο από το 20% του μεγέθους του πηνίου ανύψωσης.



Σχ. 6.4: Γραφική Παράσταση του λόγου μεγέθους πηνίου προς μετασχηματιστή ως συνάρτηση του λόγου τάσης N και της κυμάτωσης του ρεύματος πηνίου

6.3 ΜΕΓΕΘΟΣ ΠΥΚΝΩΤΩΝ ΕΞΟΔΟΥ

Για την τοπολογία Ανύψωσης, για κυμάτωση τάσης εξόδου ΔU_{out} , ο απαιτούμενος πυκνωτής εξόδου δίνεται από τη σχέση:

$$C_{Bout} = \frac{\bar{I}_{out} \left(1 - \frac{1}{N}\right) T_S}{\Delta U_{out}} \quad (6.12)$$

Για την τοπολογία πλήρους γέφυρας ο αντίστοιχος πυκνωτής εξόδου δίνεται από τη σχέση:

$$C_{FBout} = \frac{\Delta \bar{I}_{Lo} T_S}{16 \Delta U_{out}} \quad (6.13)$$

Για να λειτουργεί σε κατάσταση συνεχόμενης αγωγής (CCM) ο μετατροπέας θα πρέπει:

$$\frac{\Delta I_{Lo}}{2 \bar{I}_{out}} < 1 \Rightarrow \Delta I_{Lo} < 2 \cdot \bar{I}_{out}$$

Έστω λοιπόν ότι επιλέγουμε κυμάτωση ρεύματος:

$$\Delta I_{Lo} = \beta \cdot \bar{I}_{out}$$

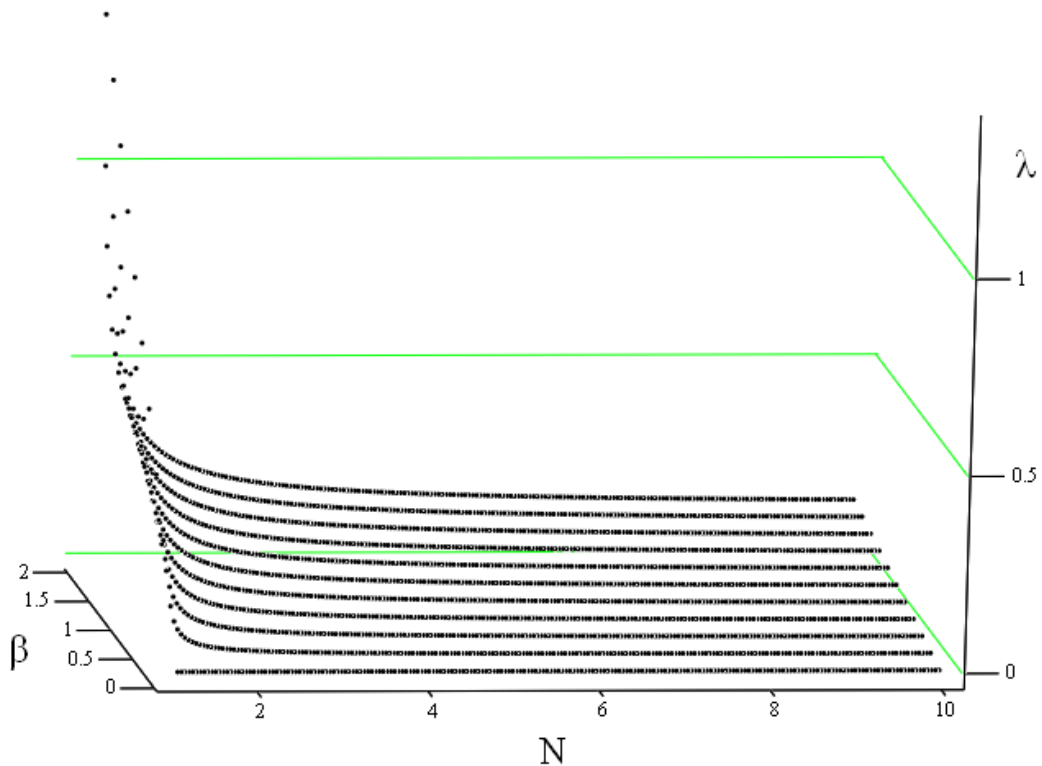
με $0 < \beta < 2$, οπότε η (6.13) γίνεται:

$$C_{FBout} = \frac{\beta \cdot \bar{I}_{out} \cdot T_S}{16 \cdot \Delta U_{out}} \quad (6.14)$$

Διαιρώντας την (6.14) με την (6.12) προκύπτει ο λόγος λ μεγέθους του πυκνωτή εξόδου του μετατροπέα πλήρους γέφυρας προς το μέγεθος του αντίστοιχου πυκνωτή του μετατροπέα ανύψωσης, δηλαδή

$$\lambda = \frac{\beta}{16 \left(1 - \frac{1}{N}\right)} \quad (6.15)$$

Στο σχήμα 6.5 φαίνεται η γραφική παράσταση του λόγου λ για διάφορες τιμές του N και β .



Σχ. 6.5 Γραφική Παράσταση του λόγου μεγεθών λ πυκνωτή εξόδου μετατροπέα πλήρους γέφυρας προς μετατροπέα ανύψωσης

Όπως φαίνεται στο σχήμα 6.5 για $N > 2$ ο απαιτούμενος πυκνωτής εξόδου για την τοπολογία πλήρους γέφυρας είναι αρκετά μικρότερος από τον αντίστοιχο της τοπολογίας ανύψωσης. Από την άλλη όμως ο μετατροπέας πλήρους γέφυρας επιβαρύνεται οικονομικά με το πηνίο εξόδου.

6.4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από την παραπάνω ανάλυση προκύπτει ότι ο μετατροπέας πλήρους γέφυρας υπερτερεί στα περισσότερα σημεία έναντι του μετατροπέα ανύψωσης. Τα κύρια πλεονεκτήματα του μετατροπέα πλήρους γέφυρας που μας οδηγούν τελικά στην επιλογή του είναι η μικρότερη καταπόνηση των ελεγχόμενων ημιαγωγικών διακοπών, άρα η μεγαλύτερη διάρκεια ζωής τους, το μικρότερο μαγνητικό κύκλωμα και το μικρότερο μέγεθος του πυκνωτή εξόδου, κάνοντας έτσι πιο συμφέρουσα οικονομικά τη χρήση του σε σχέση με το μετατροπέα ανύψωσης. Επίσης έχουμε μεγαλύτερη αξιοποίηση του μετασχηματιστή μιας και ο μέγιστος λόγος μετασχηματισμού του μετατροπέα ανύψωσης είναι $\frac{U_{out}}{U_{in}} = 10$. Ένα ακόμα

πλεονέκτημα του μετατροπέα πλήρους γέφυρας είναι ότι έχουμε μεγαλύτερη ικανότητα μεταφοράς ισχύος μιας και ολόκληρη η τάση εισόδου εφαρμόζεται στο πρωτεύον του μετασχηματιστή, ενώ έχει μικρότερες απαιτήσεις για το φίλτρο εξόδου αφού διπλασιάζεται η συχνότητα της τάσης μετά την ανόρθωση. Από την άλλη ο μετατροπέας ανύψωσης παρουσιάζει εξαιρετικά απλή τοπολογία σε αντίθεση με το

πολύπλοκο κύκλωμα οδήγησης της διάταξης πλήρους γέφυρας. Παρουσιάζει όμως κακή μεταβατική απόκριση ενώ δεν υπάρχει περιορισμός του ρεύματος εξόδου, άρα και προστασία, σε ενδεχόμενο βραχυκύκλωμα στην πλευρά της εξόδου.

ΕΠΙΛΟΓΟΣ

Όπως όλοι αντιλαμβανόμαστε η στροφή προς τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι αναπόφευκτη καθώς πρόκειται για πηγές ενέργειας που δε μολύνουν το περιβάλλον, είναι ανεξάντλητες και συμφέρουν οικονομικά αφού είναι δωρεάν.

Ειδικά σε μια χώρα σαν την Ελλάδα, η οποία έχει πραγματικά τεράστιο αιολικό δυναμικό μάλλον θα πρέπει να γίνουν σοβαρότερες προσπάθειες για την εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας με την εγκατάσταση αιολικών πάρκων.

Η διασύνδεση μεταξύ αιολικών πάρκων και δικτύου θα πρέπει να γίνει τηρώντας προδιαγραφές. Η χρήση ηλεκτρονικών ισχύος κρίνεται απαραίτητη για την βελτίωση των χαρακτηριστικών της τάσης και της συχνότητας στο σημείο σύνδεσης αιολικών πάρκων και δικτύου. Η μεταφορά της ενέργειας από το αιολικό πάρκο μέχρι το σημείο κοινής σύνδεσης μπορεί να γίνει με συνεχή τάση υψηλής τιμής, το δε κόστος αυτής αναμένεται στο μέλλον να μειωθεί σημαντικά με την πτώση του κόστους των ημιαγωγικών στοιχείων μεγάλης ισχύος.

Για την προσαρμογή του επιπέδου της συνεχούς τάσης σε διάφορα επίπεδα μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι ηλεκτρονικοί μετασχηματιστές, από τους οποίους ο μετατροπέας ανύψωσης και πλήρους γέφυρας με μετασχηματιστή υψηλής συχνότητας είναι οι πιο συχνοί. Μάλιστα ο μετατροπέας πλήρους γέφυρας φαίνεται να υπερτερεί του πρώτου, όταν οι λόγοι μετασχηματισμού της τάσης είναι μεγαλύτεροι από 3.

Ας ελπίσουμε λοιπόν ότι στο μέλλον η παραγωγή ενέργειας από τον άνεμο θα αυξηθεί μιας και η αύξηση στην τεχνολογία δείχνει να επιλύει τα προβλήματα που δημιουργούνται.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Σ.Ν. Μανιάς, «Ηλεκτρονικά Ισχύος»
- N. Mohan, T.M. Undeland, W.P. Robbins, “Power electronics Converters, Applications and Design
- Ε. Τσιμπλοστεφανάκης- Μ. Π. Μπράτιτσης «Ανεμογεννήτριες και Ηλεκτρονικά Ισχύος»
- ΥΠΕΧΩΔΕ «Ειδικό Πλαίσιο Χωροταξικού Σχεδιασμού και Αειφόρου Ανάπτυξης για τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας»
- Μπινόπουλος Ε., Χαβιαρόπουλος Π. «Περιβαλλοντικές επιπτώσεις των αιολικών πάρκων: Μύθος και πραγματικότητα» Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΚΑΠΕ)
- ΔΕΣΜΥΕ «Ελληνικό Διασυνδεδεμένο Σύστημα Μεταφοράς ηλεκτρικής Ενέργειας»
- Αλ. Αλεξιάκης « Αιολική Ενέργεια »
- Σωκράτης Παστρομάς – Αθανάσιος Σαφάκας «Διασύνδεση αιολικών πάρκων με το εθνικό διασυνδεδεμένο σύστημα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας μέσω ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος»
- Stephen Charman Ηλεκτρικές Μηχανές AC – DC
- P.C. Krause «Analysis of electrical machinery»
- Γ. Μπεργελές «Ανεμοκινητήρες»
- Αθανάσιος Σαφάκας «Ηλεκτρονικά Ισχύος»

