

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΥ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ ΣΕ ΠΛΟΙΑ



ΔΑΜΗΣ ΓΕΩΡΓΟΣ, ΑΜ: 7129

ΠΑΠΑΔΗΜΑΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ, ΑΜ: 7223

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΧΑΡΑΛΑΜΠΑΚΟΣ ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ

ΠΑΤΡΑ 2021

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στα πλήρως εξηλεκτρισμένα πλοία του μέλλοντος, οι μηχανές που τα θέτουν σε κίνηση (ντιζελοκινητήρες) που περιστρέφουν την προπέλα θα αντικατασταθούν από ηλεκτρικούς κινητήρες. Ηλεκτρική ενέργεια θα χρησιμοποιείται επίσης σε όλες τις διατάξεις κατανάλωσης ισχύος, όπως είναι οι αντλίες, οι συμπιεστές και τα συστήματα ελέγχου, αλλά και ο κλιματισμός.

Αυτό είναι και το αντικείμενο της παρούσας πτυχιακής, δηλαδή η παρουσίαση των τεχνολογιών που χρησιμοποιούνται στην ηλεκτρική κίνηση των πλοίων. Πιο συγκεκριμένα, στο πρώτο κεφάλαιο πραγματοποιείται μια γενική περιγραφή του εξηλεκτρισμένου πλοίου. Ακολουθεί το δεύτερο κεφάλαιο, όπου παρουσιάζονται αναλυτικά οι κινητήρες που χρησιμοποιούνται στην ηλεκτροπρόωση γενικά. Στο τρίτο κεφάλαιο πραγματοποιείται μια λεπτομερής περιγραφή της δομής και των λειτουργιών του ηλεκτρικού πλοίου. Κατόπιν στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι ηλεκτρικοί σύγχρονοι κινητήρες με μόνιμους μαγνήτες που είναι οι πιο ευρέως χρησιμοποιούμενοι κινητήρες στα συστήματα ηλεκτροκίνησης. Ακολουθεί το πέμπτο κεφάλαιο, στο οποίο περιγράφονται τα συστήματα οδήγησης των ηλεκτρικών κινητήρων και τέλος στο έκτο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι συσσωρευτές που χρησιμοποιούνται στην ηλεκτροπρόωση, με ιδιαίτερη αναφορά στους συσσωρευτές ιόντων λιθίου.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	I
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	II
ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΙΚΟΝΩΝ	V
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΙΝΑΚΩΝ	V
ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ	V
ΠΙΝΑΚΑΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ	VII
1 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 – ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1 Πλεονεκτήματα ηλεκτροπρόωσης	3
1.2 Μειονεκτήματα ηλεκτροπρόωσης	5
2 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 – ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΙ ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ ΠΡΟΩΣΗΣ	6
2.1 Ιστορική αναδρομή	6
2.2 Αρχή λειτουργίας των ηλεκτρικών μηχανών	7
2.2.1 Τυπική ηλεκτρική μηχανή και μηχανικό φορτίο	7
2.2.2 Στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο – Δημιουργία ροπής- Τύποι ηλεκτροκινητήρων	9
2.3 Τύποι ηλεκτροκινητήρων	16
2.3.1 Ασύγχρονοι ή επαγωγικοί κινητήρες	17
2.4 Κινητήρες συνεχούς ρεύματος (dc motors)	20
2.5 Σύγχρονοι κινητήρες	23
2.6 Μονοφασικοί και μικροί κινητήρες	25
2.7 Κινητήρες που χρησιμοποιούνται στην ηλεκτροπρόωση	26
3 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – ΔΟΜΗ ΚΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΕΝΟΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΠΛΟΙΟΥ	32
3.1 Γενικά Χαρακτηριστικά	32
3.2 Σχεδιαστικά χαρακτηριστικά	34
3.3 Σχετική Ορολογία	37
3.4 Γενική τοπολογία ηλεκτρικών δικτύων πλοίων	38
3.5 Καλώδια που χρησιμοποιούνται σε ηλεκτρικά δίκτυα πλοίων ...	39
3.6 Τεχνικές ελέγχου κινητήρων πρόωσης εναλλασσόμενου ρεύματος	42
3.7 Είδη αξονικών συστημάτων πλοίων	43
3.7.1 Έλικά σταθερού βήματος (Fixed Pitch Propeller – FPP)	44

3.7.2	Έλικά ρυθμιζόμενου βήματος (Controllable Pitch Propeller – CPP)	44
3.8	Αζιμουθιακό προωστήριο σύστημα (Podded Propulsion – POD)	44
3.9	Υβριδικό / ηλεκτρικό σύστημα πρόωσης	45
3.10	Ορολογία ηλεκτροπρόωσης πλοίων	46
4	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΣΥΓΧΡΟΝΟΙ ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ ΜΕ ΜΟΝΙΜΟΥΣ ΜΑΓΝΗΤΕΣ (PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTORS)	48
4.1	Τεχνολογία ηλεκτροπροωθούμενης – υβριδικής πρόωσης	48
4.2	Είδη σύγχρονου κινητήρα μόνιμου μαγνήτη	49
4.2.1	Κινητήρες αξονικής ροής	49
4.2.2	Πολυβάθμιοι κινητήρες εγκάρσιας ροής (transverse flux motors)	50
4.2.3	Πολυβάθμιοι κινητήρες αξονικής ροής (axial flux motors)	50
4.3	Τύποι σύγχρονης μηχανής μόνιμου μαγνήτη	50
4.4	Αισθητήρες Hall-Φαινόμενο Hall	52
4.5	Ηλεκτρονική μεταγωγή – Οδήγηση του κινητήρα χωρίς ψύκτρες	53
4.6	Χαρακτηριστική ροπής-στροφών	55
4.7	Σύγκριση σύγχρονου κινητήρα μόνιμου μαγνήτη με άλλους τύπους μηχανών	57
4.8	Σύγκριση κινητήρα μόνιμου μαγνήτη με κινητήρα βραχυκυκλωμένου δρομέα που ελέγχεται από inverter	58
5	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΟΔΗΓΗΣΗΣ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ	62
5.1	Βασικές τοπολογίες μετατροπών DC AC	62
5.1.1	Εισαγωγή και βασικές έννοιες	62
5.1.2	Πολυεπίπεδοι αντιστροφείς	62
5.1.3	Τριφασικοί αντιστροφείς	63
5.1.4	Διαμόρφωση παλμών	63
5.1.5	Προηγμένες τεχνικές διαμόρφωσης	68
5.2	Βασικές Τοπολογίες Μετατροπών DC DC	68
5.2.1	Βασικές έννοιες, κυκλωματική παράσταση και βασικές στρατηγικές	69
5.2.2	DC DC μετατροπέας υποβιβασμού (buck converter)	71
5.2.3	DC DC μετατροπέας ανύψωσης (boost converter)	73

5.2.4	DC DC μετατροπέας υποβιβασμού ανύψωσης (buck boost converter)	74
5.2.5	Μετατροπέας Cuk	75
5.3	Παλμοτροφοδοτικά	76
5.3.1	Flyback μετατροπέας	76
5.3.2	Forward μετατροπέας.....	77
5.3.3	Μετατροπέας ημιγέφυρας (half bridge converter)	78
5.3.4	Μετατροπέας πλήρους γέφυρας (full bridge converter)..	79
5.3.5	Μετατροπέας Push Pull.....	80
5.4	Μετατροπείς συχνότητας	81
5.4.1	Ζεύγη ανορθωτών – αντιστροφών SPWM	81
5.4.2	Κυκλομετατροπείς (cycloconverters)	82
6	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 – ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΕΣ.....	84
6.1	Η Ηλεκτροχημική Κυψέλη Καυσίμου	84
6.2	Τα Ηλεκτρικά Στοιχεία	86
6.3	Αρχή λειτουργίας των ηλεκτρικών συσσωρευτών	90
6.4	Τύποι Ηλεκτρικών Συσσωρευτών	92
6.5	Μπαταρίες ιόντων λιθίου, τύποι, πλεονεκτήματα και χρήσεις τους	92
6.5.1	Ενεργειακή απόδοση.....	93
6.5.2	Κύκλοι και διάρκεια ζωής των μπαταριών ιόντων λιθίου	94
6.5.3	Φόρτιση	97
6.5.4	Όρια θερμοκρασίας φόρτισης	98
6.5.5	Πιθανά προβλήματα κατά τη χρήση.....	99
7	ΠΗΓΕΣ ΑΠΟ ΤΟ ΔΙΑΔΙΚΤΥΟ.....	103

ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 2.1	Κατασκευαστικά στοιχεία δρομέα ηλεκτρικής μηχανής. α. Τυλίγματα και συλλέκτης, β. Σύνδεση άκρων τυλιγμάτων σε συλλέκτη, γ. Ψήκτρες	11
Εικόνα 2.2	. α) Στάτης ηλεκτρικού κινητήρα β) Λεπτομέρεια τυλιγμάτων στάτη.	15
Εικόνα 2.3	. Τομή επαγωγικού κινητήρα βραχυκυκλωμένου κλωβού. ..	18
Εικόνα 2.4	Δρομέας κινητήρα συνεχούς ρεύματος , ψήκτρες και συλλέκτης.	21
Εικόνα 3.1	Καλώδιο με μόνωση PVC	40
Εικόνα 3.2	Τυπική δομή καλωδίων ναυτικού τύπου	41

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 4-1	Σύγκριση μεταξύ μιας BLDC μηχανής με μία επαγωγική μηχανή	57
Πίνακας 4-2	Σύγκριση μεταξύ μιας BLDC μηχανής με μία μηχανή Σ.Ρ. με ψήκτρες	58
Πίνακας 4-3	Συγκριτικός πίνακας επιδόσεων μεταξύ ASM και PMSM60	
Πίνακας 6-1	Αναπτυσσόμενη θεωρητικά τάση (Η.Ε.Δ.) στα διάφορα ηλεκτροχημικά στοιχεία στη θερμοκρασία των 25 [°C].	86

ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1-1	Συγκριτικές ανάγκες περιορισμού διαστάσεων (ή βάρους) συναρτήσει της ηλεκ. Ισχύος για διάφορους τύπους πλοίων (εμπορικών και πολεμικών)	2
Σχήμα 1-2	Εγκατάσταση συστήματος ηλεκτρικής πρόωσης σε τρία διαφορετικά καταστρώματα	4
Σχήμα 2-1	Λειτουργία ηλεκτροκινητήρα	8
Σχήμα 2-2	Κατασκευαστικά μέρη ενός τυπικού ηλεκτρικού κινητήρα.	9
Σχήμα 2-3	Παράσταση της αρχής λειτουργίας ηλεκτροκινητήρα.	10

Σχήμα 2-4	Επαγωγικός κινητήρας δακτυλιοφόρου δρομέα.	12
Σχήμα 2-5	Δημιουργία στρεφόμενου ηλεκτρομαγνητικού πεδίου στο στάτη.	14
Σχήμα 2-6	Κινητήρας συνεχούς ρεύματος.	20
Σχήμα 2-7	Τύποι κινητήρων συνεχούς ρεύματος και χαρακτηριστικές καμπύλες.	21
Σχήμα 2-8	Διατάξεις σύγχρονων κινητήρων με μόνιμους μαγνήτες α) οι μόνιμοι μαγνήτες στην εξωτερική επιφάνεια του δρομέα β) οι μόνιμοι μαγνήτες στο εσωτερικό του δρομέα γ) οι μόνιμοι μαγνήτες στο εσωτερικό του δρομέα με διεύθυνση ροής εγκάρσια στον άξονα.	29
Σχήμα 2-9	Κινητήρας εγκάρσιας ροής.....	30
Σχήμα 2-10	Μηχανή αξονικής ροής.....	30
Σχήμα 2-11	Κάθετη τομή κινητήρα αξονικής ροής με 4 σπονδύλους (modules)	31
Σχήμα 2-12	Διάταξη στάτη αποτελούμενου από 4 επιμέρους σπονδύλους κινητήρα αξονικής ροής.....	31
Σχήμα 2-13	Διάταξη μετατροπέα συχνότητας κινητήρα αξονικής ροής	31
Σχήμα 3-1	Γενικευμένο ηλεκτρολογικό διάγραμμα ενός ηλεκτρικού δικτύου πλοίου	33
Σχήμα 3-2	Γενικό διάγραμμα συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας πλοίου με κυψέλες καυσίμου.	34
Σχήμα 3-3	Τυπικό ηλεκτρικό δίκτυο πλοίου (HV/LV) [D.T. Hall, “Practical marine electrical knowledge” , Witherby Seamanship Ltd 1999]	39
Σχήμα 4-1	Αισθητήρες Hall (α) στο ακίνητο μέρος του άξονα του δρομέα, (β) στον στάτη του κινητήρα	53
Σχήμα 4-2	Χαρακτηριστική ροπής – στροφών ενός κινητήρα BLDC	56
Σχήμα 5-1	Ένας αντιστροφέας τριών επιπέδων, οι σχετικές κυματομορφές και μια παραλλαγή στον σχεδιασμό. Και στις δύο περιπτώσεις ισχύει $A1=A2=A3$	63
Σχήμα 5-2	Τριφασικός αντιστροφέας σε συνδεσμολογία γέφυρας ..	63
Σχήμα 5-3	Μονοπαλμική PWM διαμόρφωση	65
Σχήμα 5-4	Πολυπαλμική PWM διαμόρφωση	65
Σχήμα 5-5	Δύο παραδείγματα SPWM διαμόρφωσης	67

Σχήμα 5-6	Παράδειγμα τάσης και ρεύματος εξόδου με SPWM τεχνική και φίλτρο εξόδου	67
Σχήμα 5-7	Παράδειγμα MSPWM.....	68
Σχήμα 5-8	Η απλουστευμένη γενική αρχή λειτουργίας των καταμητών	69
Σχήμα 5-9	Σταθερή και μη σταθερή κατάσταση για DC DC μετατροπείς	70
Σχήμα 5-10	Βασικό κύκλωμα του buck μετατροπέα και κυματομορφές	72
Σχήμα 5-11	Buck μετατροπέας με φίλτρο εξόδου και κυματομορφές	73
Σχήμα 5-12	Βασικό κύκλωμα του boost μετατροπέα	74
Σχήμα 5-13	Boost μετατροπέας φίλτρο εξόδου και κυματομορφές	74
Σχήμα 5-14	Βασικό κύκλωμα buck boost μετατροπέα και κύκλωμα με φίλτρο εξόδου	75
Σχήμα 5-15	Βασική τοπολογία μετατροπέα Cuk	76
Σχήμα 5-16	Ο buck boost μετατροπέας και ο flyback μετατροπέας. Με διακεκομμένες υπογραμμίζεται η αντικατάσταση του πηνίου από έναν μετασχηματιστή.	77
Σχήμα 5-17	Ο forward μετατροπέας	78
Σχήμα 5-18	Ο μετατροπέας ημιγέφυρας	79
Σχήμα 5-19	Ο μετατροπέας πλήρους γέφυρας	80
Σχήμα 5-20	Ο push pull μετατροπέας	80
Σχήμα 6-1	Ηλεκτροχημική κυψέλη καυσίμου (H ₂)	85
Σχήμα 6-2	Ηλεκτρικό στοιχείο DANIEL (1,1[V]).....	89
Σχήμα 6-3	Αρχή λειτουργίας (φόρτιση-εκφόρτιση) ηλ. Συσσωρευτή	91

ΠΙΝΑΚΑΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Διάγραμμα 2-1	. Εξέλιξη τεχνολογίας μονίμων μαγνητών τα τελευταία 30 χρόνια	28
Διάγραμμα 2-2	Επιδόσεις μονίμων μαγνητών ως προς τη θερμοκρασία μαγνήτισης	28

Διάγραμμα 4-1	Τάση εξ επαγωγής τραπεζοειδούς μορφής	51
Διάγραμμα 4-2	Τάση εξ επαγωγής ημιτονοειδούς μορφής	52
Διάγραμμα 4-3	Κυματομορφές μεγεθών λειτουργίας κινητήρα BLDC ..	55

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 – ΕΙΣΑΓΩΓΗ

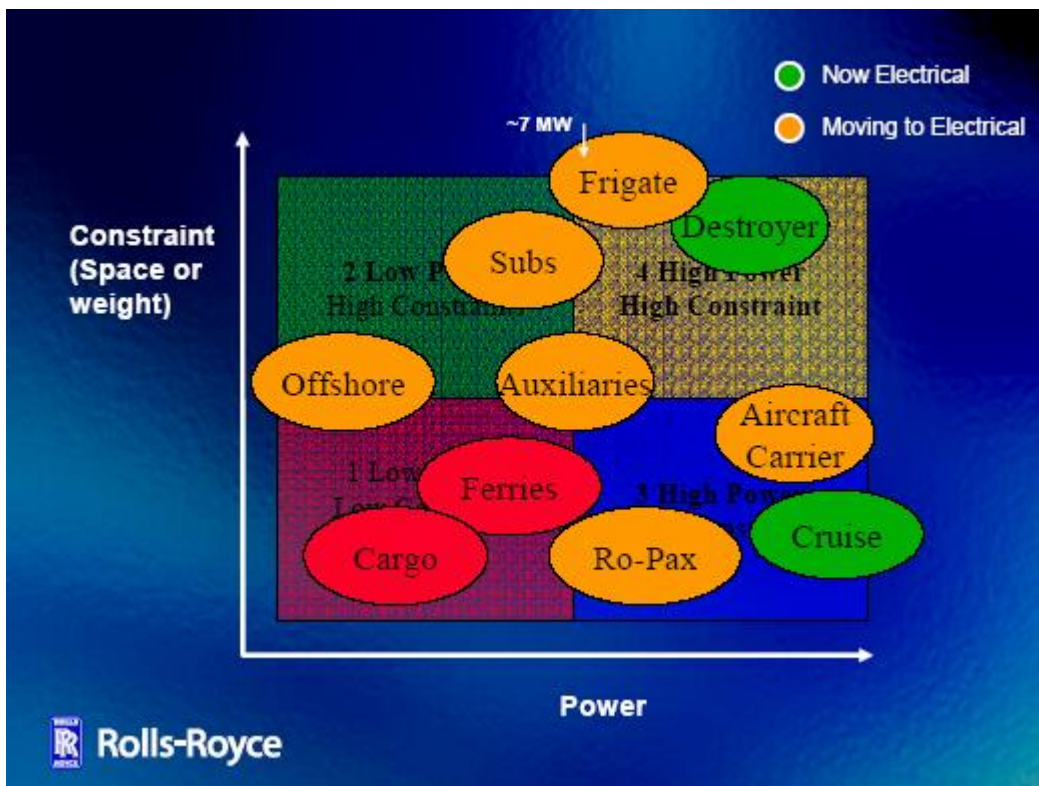
Ως ηλεκτροπρόωση ορίζεται το είδος εκείνο της πρόωσης στο οποίο οι άξονες του πλοίου κινούνται απ' ευθείας (ή και σπανιότερα μέσω μειωτήρων) από ηλεκτρικούς κινητήρες και όχι από άλλες μηχανές όπως ντήζελ, αεριοστρόβιλους και ατμοστρόβιλους. Φυσικά οι κινητήρες ντήζελ, αεριοστρόβιλοι και ατμοστρόβιλοι εξακολουθούν να υπάρχουν στις εγκαταστάσεις ηλεκτροπρόωσης, αλλά αντί να κινούν απ' ευθείας το αξονικό σύστημα με την έλικα κινούν ηλ. γεννήτριες, που με τη σειρά τους τροφοδοτούν τους ηλεκτρικούς κινητήρες πρόωσης, οπότε και αναφέρονται στη βιβλιογραφία σαν “prime movers” (‘κινητήριες μηχανές’). Η προωστήρια εγκατάσταση συμπληρώνεται από κάποιο σύστημα ελέγχου για τον χειρισμό της, δηλαδή την κράτηση-εκκίνηση, την αυξομείωση στροφών και την αλλαγή φοράς περιστροφής των ηλεκτρικών κινητήρων .

Η ηλεκτρική πρόωση έχει αρχίσει να εφαρμόζεται πριν από περίπου 70 χρόνια. Επί μεγάλο διάστημα, τα συστήματα ήταν του τύπου Σ.Ρ./Σ.Ρ. (συχνά συστήματα Ward-Leonard) δηλ. παραγωγή συνεχούς ρεύματος και κίνηση με συνεχές ρεύμα. Το εναλλασσόμενο ρεύμα αρχίζει να χρησιμοποιείται στα πλοία στις αρχές της δεκαετίας του 1950, αλλά τα συστήματα ηλεκτρικής πρόωσης εξακολουθούν να στηρίζονται σε κινητήρες Σ.Ρ.. Κατά την τελευταία εικοσαετία, η ανάπτυξη διατάξεων και τεχνικών ελέγχου κινητήρων Ε.Ρ (ηλεκτρονικά ισχύος), που να ικανοποιούν τις απαιτήσεις της πρόωσης από πλευράς τόσο ευελιξίας όσο και οικονομίας καυσίμου, έδωσε τη δυνατότητα για ευρύτερη διάδοση της ηλεκτρικής πρόωσης σε εμπορικά πλοία.

Ενώ παλαιότερα η ηλεκτρική πρόωση έβρισκε μόνον πολύ εξειδικευμένες εφαρμογές (παγοθραυστικά, ερευνητικά σκάφη, σκάφη πόντισης καλωδίων), κατά τη δεκαετία του '90 παρουσιάζει μια έντονα αυξανόμενη διάδοση σε πλοία όπως μεγάλα επιβατηγά, οχηματαγωγά, κρουαζιερόπλοια, δεξαμενόπλοια, κ.λπ., βλ. και Σχήμα 1-1. Γενικά, η ηλεκτρική πρόωση μπορεί να αποδειχθεί η καταλληλότερη λύση στις ακόλουθες κατηγορίες εφαρμογών:

α. Σκάφη με υψηλές απαιτήσεις ελκτικών ικανοτήτων.

- β. Σκάφη με μεγάλη ισχύ βοηθητικών μηχανημάτων.
- γ. Σκάφη με μεγάλα φορτία ενδιαίτησης και έντονη διακύμανση της ισχύος πρόωσης.
- δ. Σκάφη εξοπλισμένα με πολλές ταχύστροφες μη αναστρέψιμες μηχανές.
- ε. Υποβρύχια και βαθυσκάφη.



Σχήμα 1-1 Συγκριτικές ανάγκες περιορισμού διαστάσεων (ή βάρους) συναρτήσει της ηλεκ. Ισχύος για διάφορους τύπους πλοίων (εμπορικών και πολεμικών)

Ειδικά, όσον αφορά στα πολεμικά πλοία, η ηλεκτροπρόωση αποτελεί την βασική επιλογή για την κίνηση των Υποβρυχίων. Η χρήση της σε πολεμικά πλοία επιφάνειας, που μέχρι σήμερα ήταν σχετικά περιορισμένη, προσελκύει ξανά το έντονο ενδιαφέρον των ναυτικών χωρών που κατασκευάζουν πολεμικά πλοία και εξετάζεται πλέον σαν υποψήφιο σύστημα για την προωστήρια εγκατάσταση της επόμενης γενιάς και των μεγάλων πολεμικών πλοίων. Οι αυξημένες απαιτήσεις και

οι αυστηρότερες - σε σχέση με τα εμπορικά πλοία -προδιαγραφές των πολεμικών ναυτικών, (τόσο από απόψεως περιορισμών χώρου αλλά και απαιτήσεων του προωστήριου συστήματος), προϋποθέτουν περισσότερη ανάπτυξη και τελειοποίηση υποσυστημάτων για να πραγματοποιηθούν τα εν δυνάμει πλεονεκτήματα της ηλεκτροπρόωσης.

Οι κύριες αιτίες της αναζωπύρωσης του ενδιαφέροντος των πολεμικών ναυτικών για τη χρήση της ηλεκτροπρόωσης είναι :

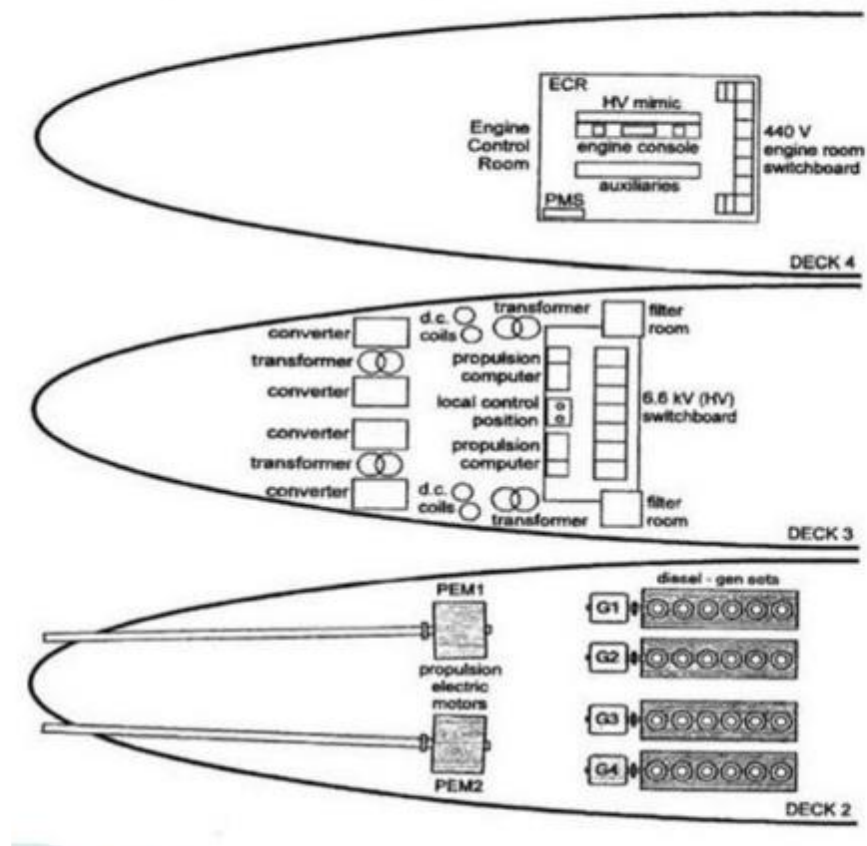
- a. η αύξηση των ηλεκτρικών καταναλωτών στα πλοία και η τάση για την ‘ηλεκτροποίηση’ των πλοίων (με αποκορύφωση το Πλήρως Εξηλεκτρισμένο Πλοίο-All Electric Ship-AES), δηλαδή η τάση όλες οι λειτουργίες, κύριες και βοηθητικές, να γίνονται πλέον από ηλεκτρικά συστήματα και μηχανήματα (αντικαθιστώντας π.χ. υδραυλικά, μηχανικά ή συστήματα ατμού κ.λ.π.),
- b. η ανάγκη για περισσότερο ‘αθόρυβη’ λειτουργία των πλοίων ,
- c. η αναζήτηση προωστήριων συστημάτων με χαμηλότερο κόστος ζωής και μειωμένες απαιτήσεις επανδρώσεως,
- d. και κυρίως η ωρίμανση τεχνολογιών που απαιτούνται για να αξιοποιηθεί το πλήρες δυναμικό της ηλεκτροπρόωσης. Τέτοιες τεχνολογίες είναι κυρίως των ηλεκτρικών κινητήρων και των ηλεκτρονικών ισχύος για τον έλεγχό τους.

Επίσης πρέπει να τονιστεί ότι η επιλογή συστήματος ηλεκτροπρόωσης για ένα πλοίο, προσφέρει περισσότερη ελευθερία στη σχεδίαση και στην επιλογή των υποσυστημάτων και της διάταξης όλης της προωστήριας και ηλεκτρικής εγκατάστασης. Σε κάθε περίπτωση αξίζει να σημειωθεί, ότι οι ηλεκτρικοί κινητήρες είναι η μόνη λύση για τη βοηθητική πρόωση (δηλ. το σύστημα των πλευρικών προωστήριων μηχανισμών που επαυξάνουν την ελικτική ικανότητα των σκαφών ιδίως εντός των λιμένων) με αξιοποίηση κυρίως επαγωγικών κινητήρων μεγάλης ισχύος (0.5-2.5 MW).

1.1 Πλεονεκτήματα ηλεκτροπρόωσης

- Μεταβολή ταχύτητας περιστροφής της έλικας σε όλο το φάσμα στροφών

- Το σύστημα παράγει μεγάλα ποσά ηλεκτρικής ισχύος η οποία τροφοδοτεί και τα βοηθητικά μηχανήματα
- Μεγάλη ικανότητα ελιγμών
- Χαμηλή στάθμη θορύβου και κραδασμών
- Οικονομία καυσίμου
- Περιβαλλοντικά οφέλη εξαιτίας της μικρότερης κατανάλωσης καυσίμου και εκπομπών ρύπων
- Αυξημένη αξιοπιστία λόγω πολλών συστημάτων συνδεδεμένων παράλληλα και άρα αυξημένη ασφάλεια
- Απαιτεί λιγότερο χώρο για την εγκατάσταση των επιμέρους συστημάτων (Σχήμα 1-2)
- Μεγαλύτερη ευελιξία στην τοποθέτηση των επιμέρους συστημάτων



Σχήμα 1-2 Εγκατάσταση συστήματος ηλεκτρικής πρόωσης σε τρία διαφορετικά καταστρώματα

1.2 Μειονεκτήματα ηλεκτροπρόωσης

- Τα κόστη εγκατάστασης του συστήματος είναι σημαντικά υψηλότερα
- Υψηλότερες απώλειες στο σύστημα μετάδοσης της κίνησης σε σχέση με το παραδοσιακό μηχανικό σύστημα
- Εμφανίζονται προβλήματα ποιότητας της ηλεκτρικής ενέργειας
- Υψηλότερες απαιτήσεις εκπαίδευσης του προσωπικού εφόσον το σύστημα είναι αρκετά διαφορετικό από το παραδοσιακό

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 – ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΙ ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ ΠΡΟΩΣΗΣ

2.1 Ιστορική αναδρομή

1740 - Ξεκίνησαν οι εφευρέσεις

Οι πρώτες κατασκευές του ηλεκτρικού κινητήρα εμφανίστηκαν για πρώτη φορά στη δεκαετία του 1740 μέσω του έργου του σκωτσέζικου μοναχού και επιστήμονα Benedictine, Andrew Gordon. Άλλοι επιστήμονες όπως ο Michael Faraday και ο Joseph Henry συνέχισαν να αναπτύσσουν πρώιμους ηλεκτρικούς κινητήρες, πειραματίζονται με ηλεκτρομαγνητικά πεδία και ανακαλύπτουν πώς να μετατρέψουν την ηλεκτρική ενέργεια σε μηχανική ενέργεια.

1834 - Ο πρώτος ηλεκτροκινητήρας κατασκευάζεται

Ο Thomas Davenport από το Βερμόντ εφηύρε τον πρώτο ηλεκτρικό κινητήρα με μπαταρία το 1834. Αυτός ήταν ο πρώτος ηλεκτρικός κινητήρας που είχε αρκετή ισχύ για να εκτελέσει μια εργασία και η εφεύρεσή του χρησιμοποιήθηκε για την τροφοδοσία μιας εκτυπωτικής μηχανής μικρής κλίμακας.

1886 - Η εφεύρεση του κινητήρα DC

Ο William Sturgeon εφηύρε τον πρώτο κινητήρα DC που θα μπορούσε να παρέχει αρκετή ισχύ για την οδήγηση μηχανημάτων, αλλά μόλις το 1886 δημιουργήθηκε ο πρώτος πρακτικός κινητήρας DC που μπορούσε να λειτουργήσει με σταθερή ταχύτητα με μεταβλητό βάρος. Ο Frank Julian Sprague ήταν ο εφευρέτης του και αυτός ήταν ο κινητήρας που έδρασε καταλυτικά για την ευρύτερη υιοθέτηση ηλεκτρικών κινητήρων σε βιομηχανικές εφαρμογές.

Τέλη 1880 - Οι κινητήρες χρησιμοποιούνται για εμπορική χρήση

Παρά τη μεγάλη ανακάλυψη του Davenport πολλά χρόνια πριν, οι ηλεκτρικοί κινητήρες δεν χρησιμοποιήθηκαν ευρέως σε εμπορικό επίπεδο για άλλα 50 χρόνια. Επιστήμονες και μηχανικοί συνέχισαν να αναπτύσσουν διάφορους τύπους ηλεκτρικών κινητήρων με σκοπό να τους καταστήσουν κατάλληλους για χρήση σε εμπορικά περιβάλλοντα. Πριν από πολύ καιρό, οι ηλεκτρικοί κινητήρες άρχισαν να χρησιμοποιούνται σε ολόκληρη τη βιομηχανία, στα εργοστάσια και στο σπίτι.

1888 - Ο κινητήρας επαγωγής AC είναι κατοχυρωμένος με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας

Το 1887, ο Νικόλα Τέσλα εφηύρε έναν επαγωγικό κινητήρα AC που κατοχυρώθηκε με επιτυχία ένα χρόνο αργότερα. Δεν ήταν κατάλληλο για οδικά οχήματα, αλλά αργότερα προσαρμόστηκε από τους μηχανικούς της Westinghouse. Το 1892 σχεδιάστηκε ο πρώτος πρακτικός επαγωγικός κινητήρας, ακολουθούμενος από έναν περιστρεφόμενο ρότορα, καθιστώντας τη μονάδα κατάλληλη για χρήση σε εφαρμογές αυτοκινήτων.

1891 - Η ανάπτυξη τριφασικών κινητήρων

Η General Electric άρχισε να αναπτύσσει τριφασικούς επαγωγικούς κινητήρες. Προκειμένου να αξιοποιηθεί ο σχεδιασμός του ρότορα, η GE και η Westinghouse υπέγραψαν συμφωνία πολλαπλών αδειών το 1896.

2000s - Η χρήση κινητήρων σήμερα

Τον 21ο αιώνα, οι ηλεκτροκινητήρες AC και DC χρησιμοποιούνται ευρέως σε βιομηχανίες σε όλο τον κόσμο και αποτελούν αναπόσπαστο μέρος πολλών εφαρμογών. Ο κόσμος θα ήταν σίγουρα ένα πολύ διαφορετικό μέρος χωρίς τον ηλεκτροκινητήρα

2.2 Αρχή λειτουργίας των ηλεκτρικών μηχανών

2.2.1 Τυπική ηλεκτρική μηχανή και μηχανικό φορτίο

Το Σχήμα 2-1 παρουσιάζει έναν τριφασικό ηλεκτρικό κινητήρα που χρησιμοποιείται για την περιστροφή ενός βιομηχανικού ανεμιστήρα. Ο κινητήρας τροφοδοτείται από ένα 3φασικό σύστημα τάσης 400 V. Η ισχύς ρέει από το δίκτυο προς τον κινητήρα. Το μεγαλύτερο μέρος της ηλεκτρικής ισχύος εισόδου μετατρέπεται σε μηχανική ροπή στον άξονα του κινητήρα, η οποία κινεί τον ανεμιστήρα. Η ηλεκτρική ισχύς σε W που εισέρχεται στον κινητήρα είναι,

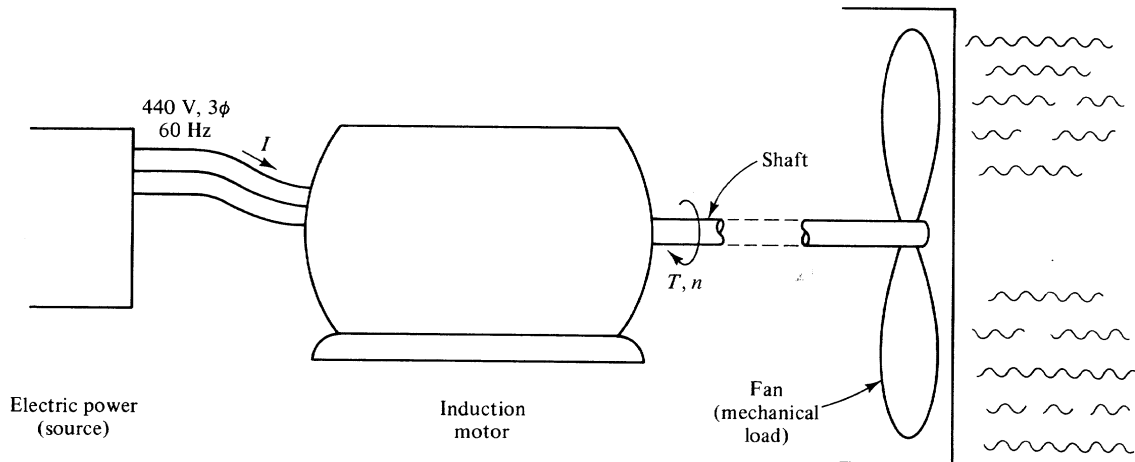
$$P_e = \sqrt{3}V_{\text{πολ}}I_{\text{γρ}} \cos \varphi$$

ενώ η μηχανική ισχύς σε W στον άξονα είναι,

$$P_L = T\omega_m$$

όπου T η ροπή σε Nm και ω_m η μηχανική γωνιακή ταχύτητα περιστροφής σε rad/s. Οι δυο παραπάνω ισχύεις διαφέρουν κατά το ποσό των απωλειών του κινητήρα, δηλ.

$$P_{out} = P_e - P_L$$



Σχήμα 2-1 Λειτουργία ηλεκτροκινητήρα.

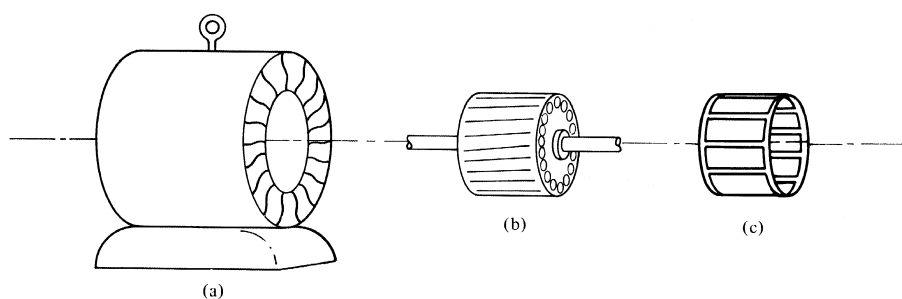
Σε πρακτικές εφαρμογές συνηθίζεται η χρησιμοποίηση σαν μονάδας μέτρησης της ισχύος ενός ηλεκτροκινητήρα ο **ίππος (horse power HP)**. Ισχύει

$$1\text{HP} = 0,746 \text{ kW} = 746 \text{ W}$$

Στο Σχήμα 2-2 φαίνονται τα δύο κύρια μέρη του ηλεκτροκινητήρα. Το εξωτερικό μέρος αποτελείται από ένα σωληνωτό κυλινδρικό πλαίσιο, το οποίο, κατά κανόνα, αποτελεί το σταθερό μέρος του ηλεκτροκινητήρα και στερεώνεται στο χώρο της τοποθέτησης και το οποίο, καθώς είναι ακίνητο ονομάζεται **στάτης (stator)**. Στο εσωτερικό μέρος του στάτη και σε κατάλληλα διαμορφωμένα αυλάκια παράλληλα με τον άξονα του, υπάρχουν ηλεκτρικοί αγωγοί, τα τυλίγματα ή περιελίξεις, που καταλήγουν σε ακροκιβώτιο σύνδεσης στο εξωτερικό μέρος. Η εξωτερική επιφάνεια του στάτη φέρει συνήθως πτερύγια για την καλύτερη ψύξη με φυσική κυκλοφορία αέρα.

Στο εσωτερικό του στάτη φωλιάζει ο **δρομέας (rotor)**, ένας κύλινδρος πάνω στον άξονα του κινητήρα που κι αυτός έχει στην εξωτερική του περιφέρεια τυλίγματα.

Ο δρομέας αφήνει ένα λεπτό διάκενο αέρα μεταξύ της εξωτερικής του επιφάνειας και του στάτη. Η τάξη μεγέθους του διακένου είναι συνήθως κλάσματα του χιλιοστού. Μόνο σε πολύ μεγάλους κινητήρες μπορεί το διάκενο να είναι μερικά χιλιοστά. Ο δρομέας αποτελεί το στρεφόμενο μέρος του κινητήρα. Και ο στάτης και ο δρομέας είναι κατασκευασμένοι από σιδηρομαγνητικό υλικό, έτσι ώστε να παρέχουν κατάλληλο δρόμο για την μαγνητική ροή. Επίσης, για να αποφευχθεί η δημιουργία διννορευμάτων, στους πυρήνες του στάτη και του δρομέα, αυτοί κατασκευάζονται από συμπιεσμένα δυναμοελάσματα. Τα δυναμοελάσματα συμπιέζονται με την πρέσα και τοποθετούνται σφιχτά στο περίβλημα της μηχανής. Οι περιελίξεις του στάτη και του δρομέα, επειδή είναι φορείς τάσης και ρεύματος και οι πυρήνες του στάτη και του δρομέα, επειδή είναι φορείς της μαγνητικής ροής αποτελούν τα **ενεργά μέρη** του κινητήρα.



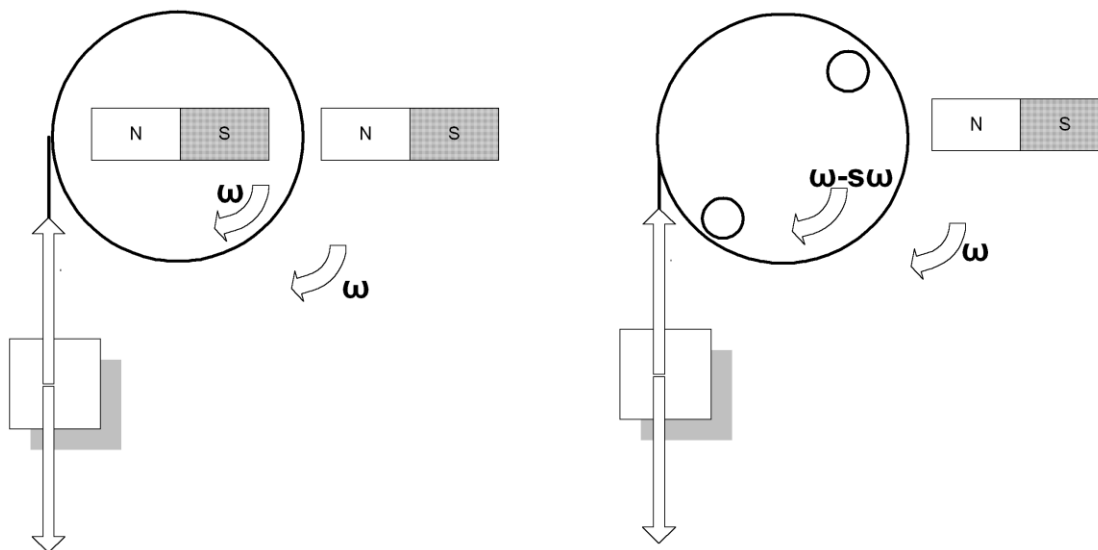
Σχήμα 2-2 Κατασκευαστικά μέρη ενός τυπικού ηλεκτρικού κινητήρα.

Η κατασκευαστική μορφή του δρομέα εξαρτάται από τον τύπο του κινητήρα. Έτσι ο δρομέας μπορεί να έχει τυλίγματα στα οποία θα πρέπει να εφαρμοστεί κάποια, κατά κανόνα συνεχής, τάση, ή τα οποία είναι κατάλληλα βραχυκυκλωμένα. Αν στο τύλιγμα του δρομέα πρέπει να εφαρμοστεί κάποια τάση, αυτή είναι γνωστή σαν **τάση διέγερσης**.

2.2.2 Στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο – Δημιουργία ροπής- Τύποι ηλεκτροκινητήρων.

Για τη δημιουργία ροπής σε έναν ηλεκτροκινητήρα, είναι απαραίτητη η αλληλεπίδραση δυο μαγνητικών πεδίων, ενός περιστρεφόμενου μαγνητικού πεδίου στο στάτη και ενός άλλου σταθερά προσκολλημένου στο δρομέα. Το στρεφόμενο πεδίο του στάτη, λειτουργώντας σαν μόνιμος περιστρεφόμενος μαγνήτης,

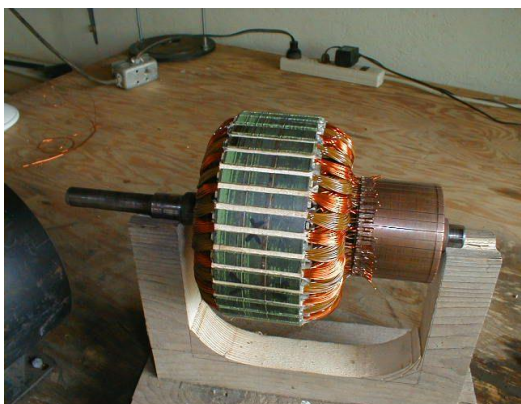
παρασύρει τον αντίστοιχο μαγνήτη του πεδίου του δρομέα, δημιουργώντας κατάλληλη ροπή και αναγκάζοντάς τον να περιστραφεί, όπως φαίνεται παραστατικά στην τροχαλία του Σχήμα 2-3.



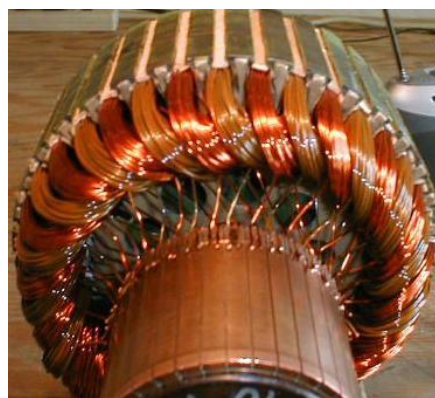
Σχήμα 2-3 Παράσταση της αρχής λειτουργίας ηλεκτροκινητήρα.

Τα μαγνητικά πεδία του στάτη και του δρομέα μπορούν να υλοποιηθούν με τη χρήση μόνιμων μαγνητών. Αυτό όμως έχει μεγάλο κόστος, απαιτεί μεγάλη μάζα υλικού, ιδιαίτερα στους μεγάλους κινητήρες και επιπλέον έχει το μειονέκτημα της απώλειας της μαγνήτισης με την πάροδο του χρόνου. Αντίστοιχα αποτελέσματα όμως μπορούν να προκύψουν από το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο που παράγεται από ένα πηνίο όταν αυτό διαρρέεται από ρεύμα.

Στις περιπτώσεις όπου απαιτείται τροφοδότηση του τυλίγματος, το οποίο περιστρέφεται μαζί με το δρομέα, με συνεχή τάση, αυτό επιτυγχάνεται με τη βοήθεια μιας διάταξης σαν αυτή που παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.1β. Οι ακροδέκτες του τυλίγματος του δρομέα οδηγούνται σε ειδικούς δακτύλιους που είναι στερεωμένοι πάνω στον άξονα της μηχανής και περιστρέφονται με αυτόν. Οι δακτύλιοι αυτοί έχουν στην εξωτερική τους επιφάνεια επίστρωση από αγωγίμο υλικό, συνήθως χαλκό. Οι δακτύλιοι αυτοί ονομάζονται **συλλέκτες (commutator rings, slip rings)**. Η τροφοδότηση των ακροδεκτών του τυλίγματος με τάση γίνεται μέσα από σταθερούς αγωγίμους ακροδέκτες που εφάπτονται στην εξωτερική επιφάνεια των συλλεκτών και ονομάζονται **ψήκτρες (brushes)**.



(α)



(β)



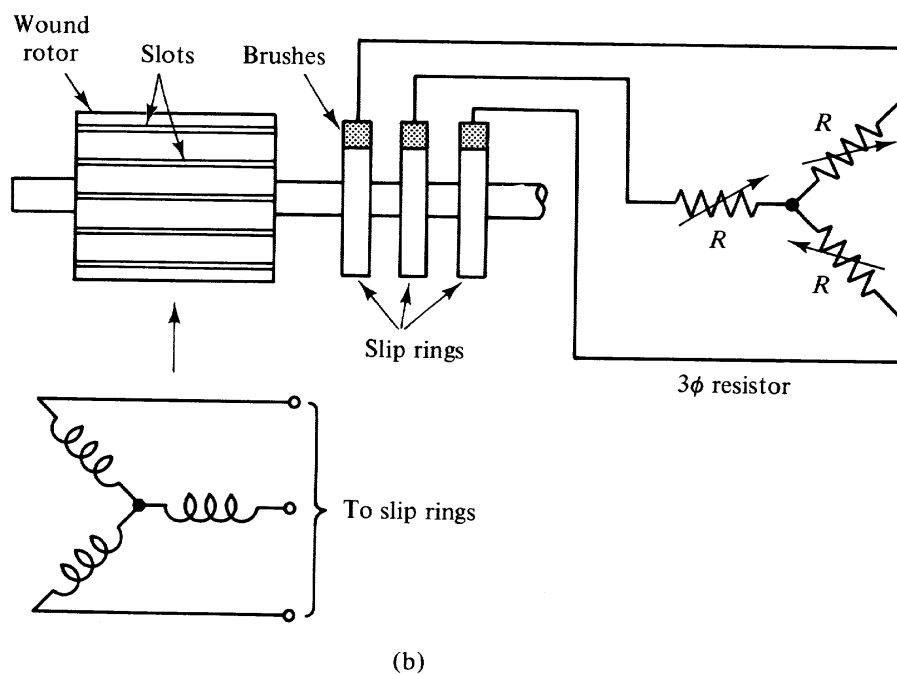
(γ)

Εικόνα 2.1 Κατασκευαστικά στοιχεία δρομέα ηλεκτρικής μηχανής. α. Τυλίγματα και συλλέκτης, β. Σύνδεση άκρων τυλιγμάτων σε συλλέκτη, γ. Ψήκτρες

Με την περιστροφή του συλλέκτη η επιφάνεια επαφής της ψήκτρας τρίβεται πάνω στη χάλκινη επιφάνεια του συλλέκτη. Συνεπώς θα πρέπει να είναι κατασκευασμένη από μαλακό αγωγίμο υλικό. Τέτοιο υλικό είναι συνήθως ο γραφίτης και οι ψήκτρες κατασκευάζονται κυρίως από αυτό το υλικό και για το λόγο αυτό έχουν την εμπορική ονομασία **καρβουνάκια**. Προφανώς με τη χρήση οι ψήκτρες γραφίτη, καθώς είναι πιο μαλακές από το χαλκό του συλλέκτη, φθείρονται και χρειάζονται αντικατάσταση. Ο τρόπος αυτός της διέγερσης εφαρμόζεται στις μηχανές **συνεχούς ρεύματος (dc motors)** και στις **σύγχρονες μηχανές (synchronous motors)**, όπου η επιβαλλόμενη τάση στο τύλιγμα διέγερσης είναι συνεχής (dc)

ακόμη και στην περίπτωση των σύγχρονων κινητήρων, οι οποίοι είναι κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος.

Η ίδια κατασκευαστική τεχνική εφαρμόζεται και στις περιπτώσεις όπου τα τυλίγματα του δρομέα δεν τροφοδοτούνται με κάποια τάση αλλά βραχυκυκλώνονται με εξωτερικές, συνήθως μεταβλητές, αντιστάσεις, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2-4. Ο ηλεκτρικός κινητήρας του σχήματος λειτουργεί με εναλλασσόμενο ρεύμα, και διαθέτει ένα τριφασικό τύλιγμα στο δρομέα, συνδεδεμένο σε αστέρα. Το τύλιγμα του δρομέα βραχυκυκλώνεται με τρεις μεταβλητές εξωτερικές αντιστάσεις, που συνδέονται με τρεις δακτύλιους και έτσι η συγκεκριμένη κατασκευή χαρακτηρίζεται σαν **επαγωγικός κινητήρας δακτυλιοφόρου δρομέα (wound rotor induction motor)**.



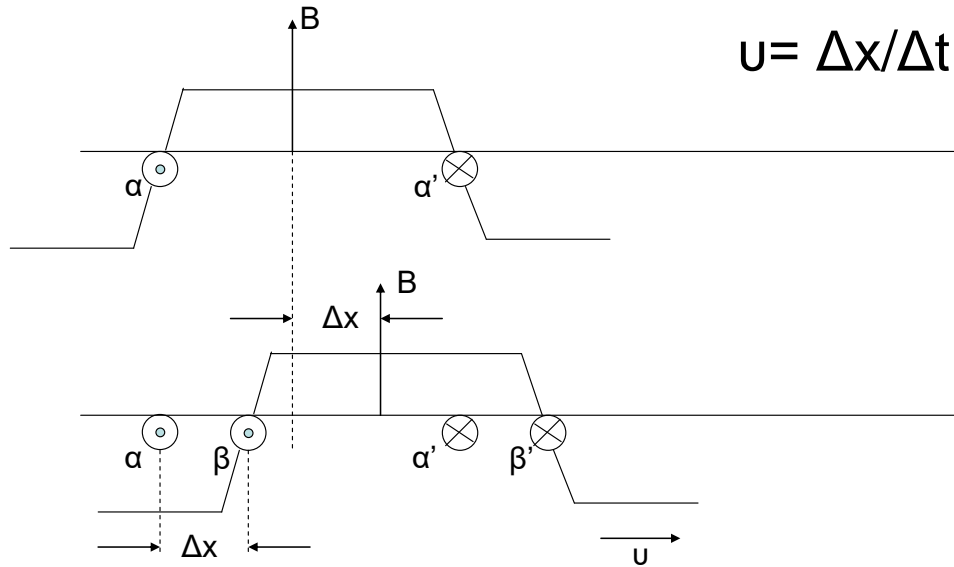
Σχήμα 2-4 Επαγωγικός κινητήρας δακτυλιοφόρου δρομέα.

Στους περισσότερους όμως επαγωγικούς κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος, ο δρομέας αντί για τυλίγματα, έχει έναν ειδικό κλειστό κλωβό, που αποτελείται από ελάσματα χαλκού ή αλουμινίου, τοποθετημένα σε κατάλληλα διαμορφωμένες εσοχές. Τα δυο άκρα των ελασμάτων αυτών βραχυκυκλώνονται με κατάλληλους δακτύλιους από το ίδιο υλικό, δημιουργώντας έτσι ένα βραχυκυκλωμένο κλωβό.

Ο κινητήρας αυτού του τύπου χαρακτηρίζεται σαν *επαγωγικός κινητήρας βραχυκυκλωμένου κλωβού (squirrel-cage induction motor)*.

Στις περιπτώσεις των επαγωγικών κινητήρων είτε δακτυλιοφόρων, είτε βραχυκυκλωμένου κλωβού, δεν συνδέεται κάποια πηγή τάσης στο τύλιγμα του δρομέα. Το ρεύμα που είναι απαραίτητο για τη δημιουργία του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου του δρομέα, προέρχεται από επαγωγή από το ρεύμα του στάτη, καθώς ο στάτης και ο δρομέας λειτουργούν με τα πηνία τους σαν ένας μετασχηματιστής. Εξαιτίας του τρόπου αυτού της ανάπτυξης του πεδίου του δρομέα εξ επαγωγής ο τύπος αυτός του κινητήρα χαρακτηρίζεται σαν *επαγωγικός κινητήρας εναλλασσομένου ρεύματος (induction motor)*.

Είτε με απευθείας τροφοδοσία, είτε εξ επαγωγής, τα ρεύματα που διαρρέουν το πηνίο του δρομέα της ηλεκτρικής μηχανής δημιουργούν τον ένα από τους δυο ηλεκτρομαγνήτες που φαίνονται στο Σχήμα 2-3. Ο ηλεκτρομαγνήτης αυτός περιστρέφεται με την περιστροφή του δρομέα. Για τη δημιουργία του δεύτερου ηλεκτρομαγνήτη του σχήματος είναι απαραίτητη η δημιουργία ενός ηλεκτρομαγνητικού πεδίου, που να προέρχεται από τυλίγματα που θα είναι τοποθετημένα στο στάτη του ηλεκτρικού κινητήρα και το οποίο θα περιστρέφεται στο χώρο ανάμεσα στο στάτη και στο δρομέα, αν και ο στάτης παραμένει ακίνητος. Για την υλοποίηση ενός τέτοιου πεδίου είναι απαραίτητη η ύπαρξη δυο τουλάχιστον χωρικά μετατοπισμένων πηνίων τα οποία να διαρρέονται από κατάλληλα χρονικά μετατοπισμένα ρεύματα.

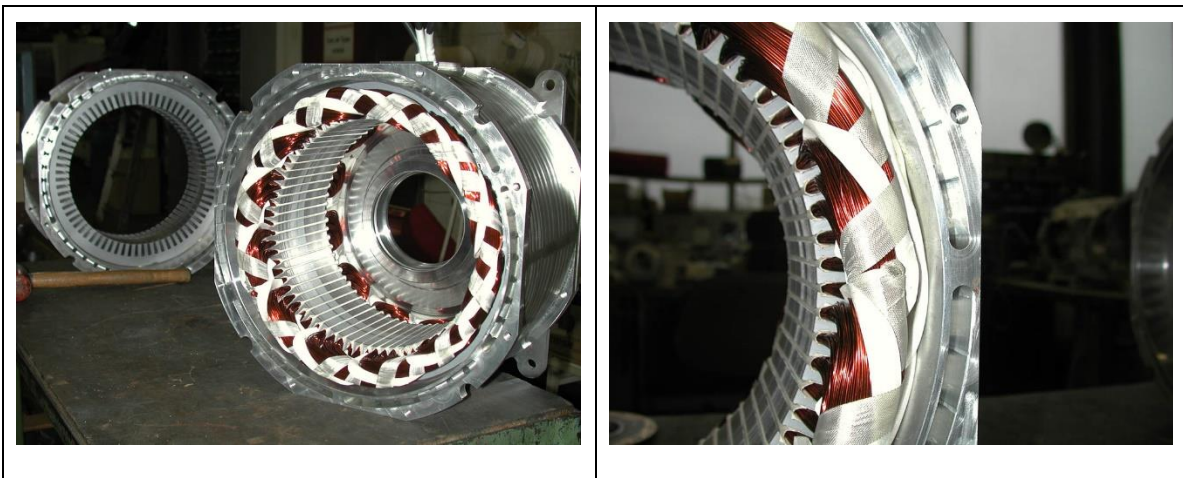


Σχήμα 2-5 Δημιουργία στρεφόμενου ηλεκτρομαγνητικού πεδίου στο στάτη.

Στο Σχήμα 2-5 φαίνεται το ανάπτυγμα του στάτη ενός ηλεκτροκινητήρα. Αν υποθεθεί ότι στο επίπεδο που είναι κάθετο στο σχήμα εισάγεται ένα τύλιγμα που αποτελείται από μια σπείρα, η τομή της οποίας χαρακτηρίζεται σαν aa' . Όταν το τύλιγμα αυτό διαρρέεται από ένα ρεύμα τότε δημιουργείται ένα ηλεκτρομαγνητικό πεδίο το οποίο μπορεί να υποθεθεί ότι έχει τη μορφή που φαίνεται στο Σχήμα 2-5 και χαρακτηρίζεται από ένα τυπικό μέγεθος το B . Έστω ότι ένα ίδιο δεύτερο τύλιγμα $\beta\beta'$ τοποθετείται μετατοπισμένο χωρικά κατά Δx από το προηγούμενο. Αν μετά από χρόνο Δt διακοπεί η τροφοδοσία του αρχικού τυλίγματος και ταυτόχρονα μια ίδια πηγή τροφοδοτήσει το δεύτερο τύλιγμα, τότε δημιουργείται ένα ίδιο πεδίο με το προηγούμενο μετατοπισμένο κατά Δx . Η διαδικασία αυτή ισοδυναμεί με την κίνηση του πεδίου προς τα δεξιά με γραμμική ταχύτητα $u = \Delta x / \Delta t$. Αν ο στάτης ξαναγίνει κύλινδρος η προηγούμενη γραμμική ταχύτητα μετατρέπεται σε αντίστοιχη γωνιακή $\omega = \Delta \phi / \Delta t$. Συνεπώς για την παραγωγή ενός κινούμενου (στρεφόμενου) ηλεκτρομαγνητικού πεδίου απαιτούνται τουλάχιστον δυο χωρικά μετατοπισμένα τυλίγματα στο στάτη και η τροφοδότησή τους με δυο τουλάχιστον πηγές με χρονική διαφορά. Τότε μπορεί να παραχθεί ένα στρεφόμενο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο στο διάκενο, ισοδύναμο με τον κινούμενο μαγνήτη του Σχήμα 2-3.

Το συμμετρικό τριφασικό σύστημα είναι ένα σύστημα τριών χρονικά μετατοπισμένων τάσεων και ρευμάτων. Εάν ένα τέτοιο σύστημα τροφοδοτήσει τρία διαφορετικά πηνία, τοποθετημένα στο στάτη με απόσταση 120 μοίρες το ένα από το άλλο, τότε στο διάκενο της μηχανής, ανάμεσα στην εσωτερική επιφάνεια του στάτη και στην εξωτερική του δρομέα, εμφανίζεται ένα στρεφόμενο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο. Γίνεται λόγος στην περίπτωση αυτή για **στρεφόμενο πεδίο στο διάκενο**.

Στην Εικόνα 2.2 φαίνεται ο στάτης ενός τριφασικού κινητήρα και τα τυλίγματά του.



Εικόνα 2.2 . α) Στάτης ηλεκτρικού κινητήρα β) Λεπτομέρεια τυλιγμάτων στάτη.

Η κατανομή των τριών τυλιγμάτων στον στάτη ενδέχεται να μην καλύπτει όλη την περιφέρειά του αλλά μια υποδιαίρεσή της και να επαναλαμβάνεται, δημιουργώντας έτσι περισσότερους από 2 **μαγνητικούς πόλους**, δηλαδή 4, 6, ..., $2p$. Στην περίπτωση αυτή ο κινητήρας έχει p **ζεύγη πόλων**. Η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του πεδίου που δημιουργείται είναι σταθερή και εξαρτάται μόνο από τη συχνότητα του ρεύματος τροφοδοσίας και το πλήθος των ζευγών των πόλων. Η σχέση που δίνει την καλούμενη **σύγχρονη ταχύτητα περιστροφής (synchronous speed)** σε **rad/s** είναι,

$$\eta = 2\pi \frac{f}{p} = 100 \frac{\pi}{p}$$

για τη συχνότητα $f = 50 \text{ Hz}$ του Ελληνικού δικτύου. Μία πιο συνηθισμένη μονάδα μέτρησης της ταχύτητας περιστροφής εκτός SI είναι η *rpm (revolutions per minute)*. Θεωρώντας ότι $1 \text{ rev} = 2\pi \text{ rad}$, τότε για $f = 50 \text{ Hz}$.

$$\eta = 3000/\rho \text{ rpm}$$

2.3 Τύποι ηλεκτροκινητήρων

Οι ηλεκτροκινητήρες χωρίζονται σε δυο βασικές κατηγορίες.

- Τους κινητήρες συνεχούς ρεύματος και
- τους κινητήρες εναλλασσομένου ρεύματος.

Οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος λειτουργούν με συνεχή τάση, η οποία τροφοδοτεί κατάλληλα και τα τυλίγματα του στάτη και τα τυλίγματα του δρομέα. Αποτελούν την πρώτη μορφή κινητήρα που αναπτύχθηκε για παραγωγικές εφαρμογές αν και σήμερα η χρήση τους έχει σχεδόν συνολικά υποκατασταθεί από τους κινητήρες εναλλασσομένου ρεύματος, οι οποίοι εμφανίζουν σημαντικά οικονομοτεχνικά πλεονεκτήματα που επιβάλλουν την εφαρμογή τους. Παρόλα αυτά οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος χρησιμοποιούνται σε κάποιες εφαρμογές λόγω κάποιων ειδικών λειτουργικών χαρακτηριστικών που διαθέτουν. Αναλυτικότερη παρουσίασή τους γίνεται στη συνέχεια.

Οι κινητήρες εναλλασσομένου ρεύματος έχουν το κοινό χαρακτηριστικό ότι τα τυλίγματα του στάτη τροφοδοτούνται με εναλλασσόμενη τάση, μονοφασική ή τριφασική. Διακρίνονται δυο βασικές κατηγορίες ηλεκτροκινητήρων εναλλασσόμενου ρεύματος.

- Οι σύγχρονοι κινητήρες και
- οι ασύγχρονοι κινητήρες.

Στους σύγχρονους κινητήρες το τύλιγμα του δρομέα τροφοδοτείται με συνεχή τάση από ανεξάρτητη πηγή συνεχούς τάσης. Η ονομασία σύγχρονοι προέρχεται από τη βασική ιδιότητά τους να περιστρέφεται ο άξονάς τους με γωνιακή ταχύτητα ίση

με τη σύγχρονη ταχύτητα περιστροφής του πεδίου στο διάκενο, ανεξάρτητα από τις μεταβολές του φορτίου στον άξονά τους.

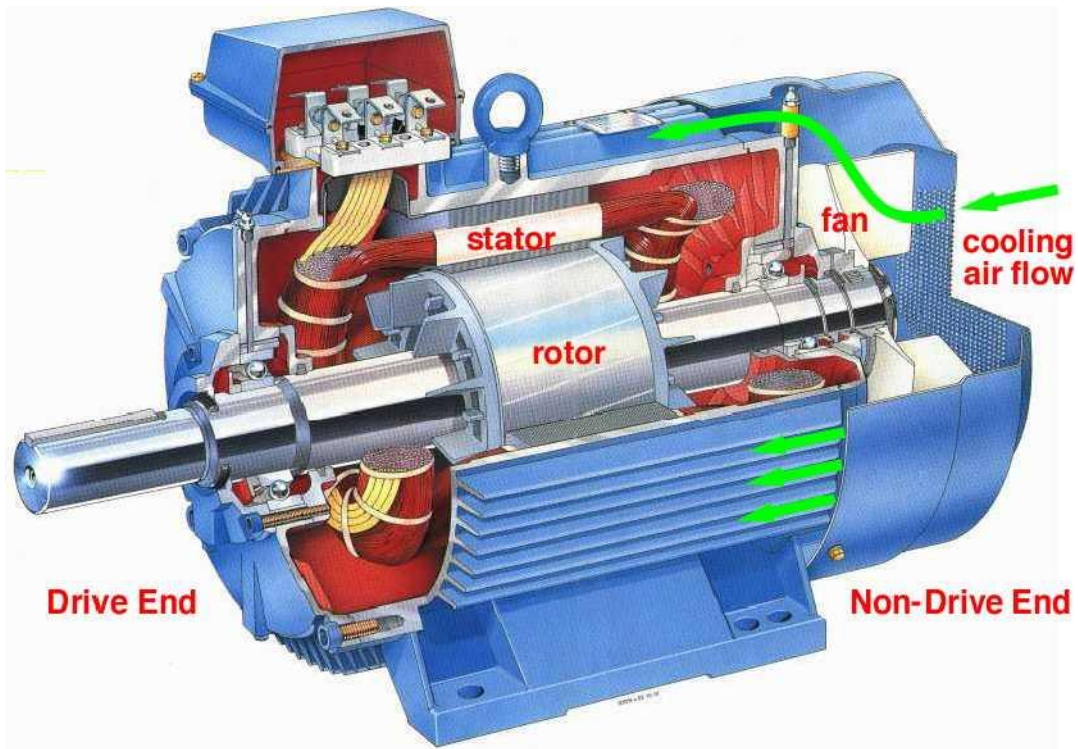
Οι ασύγχρονοι κινητήρες ονομάζονται και επαγωγικοί. Όπως προαναφέρθηκε, η ονομασία τους αυτή προέρχεται από το γεγονός ότι στο βραχυκυκλωμένο τύλιγμα του δρομέα δεν επιβάλλεται εξωτερική τάση, αλλά επάγεται τάση από το τύλιγμα του στάτη. Ονομάζονται και ασύγχρονοι λόγω της ιδιότητάς τους να περιστρέφονται με ταχύτητα λίγο διαφορετική από τη σύγχρονη ταχύτητα του πεδίου στο διάκενο. Οι σύγχρονοι και ασύγχρονοι κινητήρες μπορεί να είναι, ανάλογα με την ονομαστική τους ισχύ, είτε τριφασικοί είτε μονοφασικοί.

Στις εφαρμογές ηλεκτροκίνησης χρησιμοποιούνται σε συντριπτική πλειοψηφία επαγωγικοί κινητήρες καθώς παρουσιάζουν μια σειρά από χαρακτηριστικά πλεονεκτήματα σε σχέση με τους άλλους τύπους κινητήρων που προαναφέρθηκαν. Έτσι η ανάλυση, στη συνέχεια, επικεντρώνεται στους επαγωγικούς κινητήρες, ενώ στο τέλος του κεφαλαίου δίνονται ορισμένα στοιχεία και για τους άλλους τύπους των κινητήρων.

2.3.1 Ασύγχρονοι ή επαγωγικοί κινητήρες

Τα πηνία του δρομέα του επαγωγικού κινητήρα είναι βραχυκυκλωμένα, είτε με κλωβό είτε μέσω εξωτερικών αντιστάσεων. Η Εικόνα 2.3 δείχνει την τομή ενός επαγωγικού κινητήρα βραχυκυκλωμένου κλωβού. Διακρίνεται ο στάτης και τα τυλίγματά του, ο άξονας με τον βραχυκυκλωμένο δρομέα, οι τριβείς που στηρίζουν τον άξονα, το εξωτερικό κέλυφος του στάτη με το κιβώτιο των ακροδεκτών και τέλος ο ανεμιστήρας για την ψύξη του κινητήρα.

Η επαγόμενη τάση προκαλεί τη ροή ισχυρών ρευμάτων στο δρομέα. Τα ρεύματα αυτά δημιουργούν μαγνητεγερτικές δυνάμεις οι οποίες αλληλεπιδρούν με το στρεφόμενο πεδίο του στάτη και δημιουργούν μηχανική ροπή, η οποία αναγκάζει το δρομέα να κινηθεί προς την κατεύθυνση της κίνησης του στρεφόμενου πεδίου.



Εικόνα 2.3 . Τομή επαγωγικού κινητήρα βραχυκυκλωμένου κλωβού.

Καθώς η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα αυξάνει, ο ρυθμός της μεταβολής του πεδίου του στάτη, όπως αυτός φαίνεται από το δρομέα, ελαττώνεται. Το σύστημα των πηνίων στάτη και δρομέα εξακολουθεί να λειτουργεί σαν ένας στρεφόμενος μετασχηματιστής που διεγείρεται από μια εναλλασσόμενη τάση η συχνότητα της οποίας ελαττώνεται όσο αυξάνει η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα. Σε κάποια χρονική στιγμή η επαγόμενη στο δρομέα τάση φτάνει σε μια χαμηλή τιμή, ώστε η ΜΕΔ που δημιουργείται από τα ρεύματα στα πηνία του δρομέα, να δίνει μια ροπή ίση με εκείνη του επιβαλλόμενου μηχανικού φορτίου. Τότε ο κινητήρας έχει φτάσει στο σημείο λειτουργίας του και η ταχύτητα περιστροφής σταθεροποιείται και είναι λίγο μικρότερη από τη σύγχρονη ταχύτητα του πεδίου στο διάκενο.

Εάν ο κινητήρας λειτουργεί στο κενό, δηλαδή χωρίς μηχανικό φορτίο στον άξονα, τότε η παραγόμενη ηλεκτρομαγνητική ροπή ισούται με τις τριβές της περιστροφής του άξονα του κινητήρα. Στο σημείο αυτό είναι απαραίτητο να γίνει κατανοητό ότι όσο υπάρχει ένα μηχανικό φορτίο στο κινητήρα, οσοδήποτε μικρό, η ταχύτητα περιστροφής του θα είναι πάντοτε μικρότερη από τη σύγχρονη. Καθώς η λειτουργία του κινητήρα στηρίζεται στην εξ επαγωγής διέγερση του δρομέα, απαραίτητη

προϋπόθεση είναι να υπάρχει, έστω και ελάχιστη, διαφορά ταχύτητας περιστροφής μεταξύ του πεδίου στο διάκενο και του δρομέα της μηχανής. Εάν οι δυο αυτές ταχύτητες ήταν ίσες τότε τα πηνία του δρομέα θα ‘έβλεπαν’ μια σταθερή τάση στο πρωτεύον και, φυσικά, η επαγόμενη τάση θα ήταν μηδέν.

Η διαφορά στη ταχύτητα περιστροφής, ή **ολίσθηση (slip)** και ορίζεται σαν,

$$\text{Ολίσθηση} = n - n_m \quad \text{rpm}$$

όπου n_m η πραγματική μηχανική ταχύτητα του δρομέα σε rpm. Ο όρος ολίσθηση χρησιμοποιείται για να εκφράσει ότι, από έναν παρατηρητή που στρέφεται με σύγχρονη ταχύτητα στο διάκενο, ο δρομέας φαίνεται να ολισθαίνει προς τα πίσω. Η ολίσθηση εκφράζεται συνηθέστερα σαν ποσοστό της σύγχρονης ταχύτητας, σύμφωνα με τη σχέση.

$$s = \frac{n - n_m}{n}$$

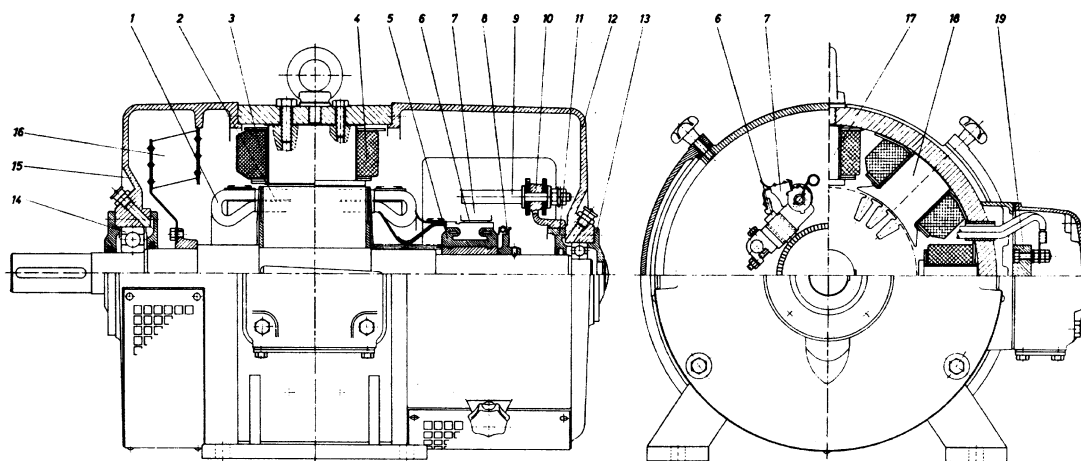
Η ολίσθηση ενός κινητήρα μπορεί, θεωρητικά, να μεταβάλλεται μεταξύ 0 και 1. Στην πράξη, είναι ιδιαίτερα χαμηλή και κυμαίνεται μεταξύ μερικών δεκάτων % έως το πολύ 10%. Η συχνότητα ρευμάτων και τάσεων στο δρομέα εξαρτάται από τη σχετική ταχύτητα μεταξύ του σύγχρονα στρεφόμενου πεδίου και του δρομέα, δηλαδή από την ολίσθηση και δίνεται από τη σχέση,

$$f_2 = sf_1$$

όπου f_2 η συχνότητα στο δρομέα και f_1 η συχνότητα τροφοδοσίας του στάτη. Στην ιδιότητα του δρομέα να περιστρέφεται με ταχύτητα διάφορη της σύγχρονης οφείλεται και η ονομασία **ασύγχρονη μηχανή (asynchronous machine)**.

2.4 Κινητήρες συνεχούς ρεύματος (dc motors)

Οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος, ή κινητήρες *dc* χρησιμοποιήθηκαν για πολλά χρόνια στη βιομηχανία, καθώς προσφέρουν εξαιρετικές δυνατότητες ρύθμισης στροφών και πολύ καλή ροπή κατά την εκκίνηση, ακόμη και σε πολύ χαμηλές στροφές.

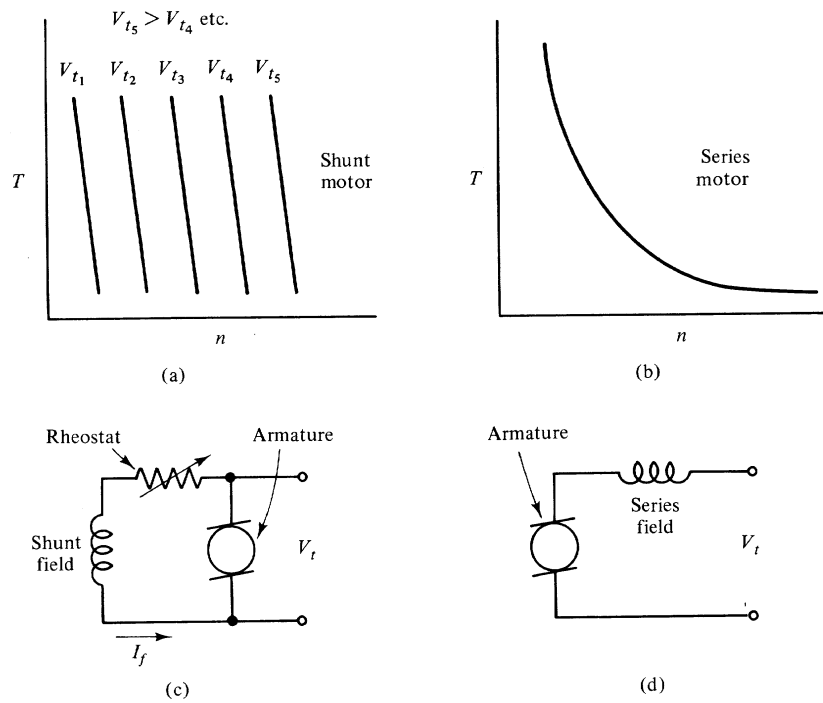


Σχήμα 2.5.

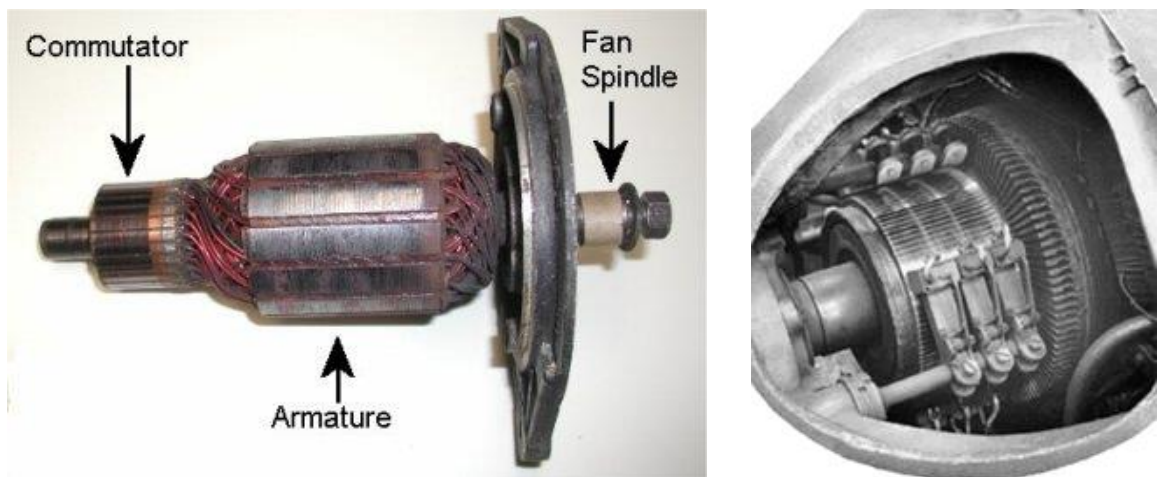
Κινητήρας ΣΡ. 1. Περιέλιξη τυμπάνου, 2. Πυρήνας δρομέα, 3. Περιέλιξη κυρίων πόλων, 4. Περιέλιξη βοηθητικών πόλων, 5. Συλλέκτης, 6. Ψήκτρα, 7. Ψηκτροθήκη, 8. Δίσκος ζυγοστάθμισης, 9. Βραχίονας ψηκτροθήκης, 10. Δακτύλιος συγκράτησης βραχιόνων, 11. Εσωτερικό πλευρικό κάλυμμα, 12. Πλευρικό κάλυμμα, 13. Εξωτερικό πλευρικό κάλυμμα, 14. Έδρανο κύλισης (ρουλμάν), 15. Πλευρικό κάλυμμα, 16. Ανεμιστήρας, 17. Πυρήνας βοηθητικών πόλων, 18. Πυρήνας κυρίων πόλων, 19. Πινακίδα ακροδεκτών

Σχήμα 2-6 Κινητήρας συνεχούς ρεύματος.

Στους κινητήρες συνεχούς ρεύματος και ο στάτης και ο δρομέας, φέρουν τυλίγματα, τα οποία θα συνδεθούν σε συνεχή τάση. Σε αντίθεση με τους επαγωγικούς κινητήρες, στους κινητήρες συνεχούς ρεύματος τα ισχυρά ρεύματα ρέουν στα τυλίγματα του δρομέα. Για την τροφοδοσία των τυλιγμάτων αυτών υπάρχει στον άξονα του κινητήρα ειδικός δακτύλιος χαλκού, ο οποίος ονομάζεται **συλλέκτης (commutator)**. Στο συλλέκτη εφάπτονται ειδικές ψήκτρες από άνθρακα (καρβουνάκια). Ανάλογα με τη συνδεσμολογία των τυλιγμάτων του στάτη, οι κινητήρες *dc* διακρίνονται σε *κινητήρες συνεχούς ρεύματος παράλληλης διέγερσης (shunt)*, *διέγερσης σειράς (series)*, *σύνθετης διέγερσης (compound)* ή *ξένης διέγερσης*.



Σχήμα 2-7 Τύποι κινητήρων συνεχούς ρεύματος και χαρακτηριστικές καμπύλες.



Εικόνα 2.4 Δρομέας κινητήρα συνεχούς ρεύματος, ψήκτρες και συλλέκτης.

Στο Σχήμα 2-7c και d φαίνονται τα κυκλωματικά ισοδύναμα των 2 πρώτων τύπων. Ο κινητήρας συνεχούς ρεύματος παράλληλης διέγερσης έχει το τύλιγμα διέγερσης παράλληλα με το τύλιγμα του πεδίου. Ο κινητήρας αυτός εμφανίζει την οικογένεια χαρακτηριστικών $T-n$ του Σχήμα 2-7a, σαν συνάρτηση της τάσης διέγερσης. Οι καμπύλες αυτές μοιάζουν με τη γραμμική περιοχή λειτουργίας του επαγωγικού

κινητήρα. Η μεταβολή του ρεύματος διέγερσης, μέσω της μεταβλητής αντίστασης του στάτη, επιτρέπει τον έλεγχο της ταχύτητας περιστροφής σε μικρότερη κλίμακα από την τάση διέγερσης. Αλλά το ρεύμα διέγερσης είναι μικρό και προσφέρεται έτσι μία φθηνή και απλή διαδικασία ελέγχου των στροφών του κινητήρα. Με μεταβολή λοιπόν της τάσης και του ρεύματος διέγερσης μεταβάλλονται τα χαρακτηριστικά $T-n$ του κινητήρα, σύμφωνα με το μεταβαλλόμενο φορτίο. Αυτή η δυνατότητα του ελέγχου της ταχύτητας περιστροφής σε μεγάλη κλίμακα αποτελεί και το μέγιστο πλεονέκτημα του κινητήρα συνεχούς ρεύματος παράλληλης διέγερσης.

Ο κινητήρας συνεχούς ρεύματος παράλληλης διέγερσης έχει ένα ακόμη ιδιαίτερο χαρακτηριστικό, που μπορεί να γίνει ιδιαίτερα επικίνδυνο. Εάν λειτουργεί με χαμηλό φορτίο ή εν κενώ και η τάση του δρομέα ελαττωθεί απότομα ή διακοπεί, τότε ο δρομέας επιταχύνεται διαρκώς με κίνδυνο να σπάσει ο κινητήρας από τις φυγόκεντρες δυνάμεις που αναπτύσσονται. Για τον λόγο αυτό οι μεγάλοι κινητήρες συνεχούς ρεύματος παράλληλης διέγερσης είναι εφοδιασμένοι με κατάλληλες διατάξεις προστασίας.

Στους κινητήρες συνεχούς ρεύματος σειράς, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2-7d, τα τυλίγματα του δρομέα συνδέονται σε σειρά με τα αντίστοιχα του στάτη, άρα όλα διαρρέονται από το υψηλό ρεύμα του πεδίου. Η χαρακτηριστική $T-n$ του κινητήρα αυτού είναι ασυνήθιστη, εμφανίζοντας ιδιαίτερα υψηλή ροπή εκκίνησης, η οποία πέφτει όσο αυξάνει η ταχύτητα περιστροφής. Έτσι ο κινητήρας αυτός είναι ιδανικός για εφαρμογές ηλεκτροκίνησης (τραίνα, τρόλεϊ, οχήματα) ή για εργαλεία χειρός (δράπανα κλπ.). Και οι κινητήρες αυτοί μπορούν να αναπτύξουν επικίνδυνες ροπές επιτάχυνσης σε χαμηλά φορτία. Η απευθείας όμως ζεύξη τους στο φορτίο, παρέχει την απαιτούμενη ροπή για πέδηση.

Οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος είναι πολύ ακριβότεροι από τους ίσης ισχύος επαγωγικούς. Η τροφοδοσία υψηλών ρευμάτων μέσω των ψηκτρών δημιουργεί πρόσθετες απαιτήσεις συντήρησης και επισκευών. Επιπλέον δεν είναι, συνήθως, διαθέσιμες πηγές τροφοδοσίας συνεχούς ρεύματος υψηλής ισχύος. Για τους

λόγους αυτούς η χρήση των κινητήρων συνεχούς ρεύματος περιορίζεται σε περιπτώσεις όπου είναι απαραίτητοι λόγω των ειδικών χαρακτηριστικών τους.

Η τεχνολογική εξέλιξη στα ηλεκτρονικά είχε σαν αποτέλεσμα την προσφορά οικονομικών, αξιόπιστων και μικρών σε μέγεθος συστημάτων ανορθωτών με ηλεκτρονικά ισχύος, τα οποία συνδέονται σε πηγές εναλλασσομένου ρεύματος και δίνουν στην έξοδό τους συνεχή τάση με πολλές δυνατότητες ρύθμισης. Έτσι προσφέρεται δυνατότητα εκμετάλλευσης των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών των κινητήρων συνεχούς ρεύματος και σε πολλές εφαρμογές χαμηλής και μέσης ισχύος με λογικό κόστος.

2.5 Σύγχρονοι κινητήρες

Οι *σύγχρονοι κινητήρες (synchronous motors)* είναι κινητήρες εναλλασσομένου ρεύματος, οι οποίοι έχουν το ιδιαίτερο χαρακτηριστικό να περιστρέφονται με την σύγχρονη ταχύτητά τους (6.6), η οποία για ένα ζεύγος πόλων είναι 3000 rpm στα 50 Hz. Οι σύγχρονοι κινητήρες μπορεί να είναι μεγάλης ισχύος τριφασικοί ή μονοφασικοί κλασματικής ιπποδύναμης για εφαρμογές όπου απαιτείται απόλυτα σταθερή ταχύτητα περιστροφής, όπως ηλεκτρικά ρολόγια, πικάπ κλπ.

Οι μεγάλοι 3φασικοί κινητήρες αναπτύσσουν ένα περιστρεφόμενο πεδίο στον στάτη ακριβώς, όπως οι επαγωγικοί. Διαθέτουν όμως περιελίξεις στο δρομέα, οι οποίες τροφοδοτούνται με συνεχή τάση, την *τάση διέγερσης*. Δημιουργείται έτσι ένα σταθερό πεδίο στον δρομέα, σαν να ήταν ένας μόνιμος μαγνήτης. Η αλληλεπίδραση αυτών των δυο πεδίων δημιουργεί ροπή στον άξονα του κινητήρα.

Ο επαγωγικός, ή ασύγχρονος, κινητήρας προσαρμόζεται στις μεταβολές του φορτίου με μικρή μεταβολή της ταχύτητας περιστροφής του. Έτσι η αύξηση του φορτίου οδηγεί σε μία επιβράδυνση, αύξηση της ολίσθησης, του ρεύματος του στάτη και της ροπής στον άξονα. Οι χαρακτηριστικές καμπύλες $T-n$ δείχνουν παραστατικά την διαδικασία αυτή. Αντίθετα ο σύγχρονος κινητήρας διατηρεί τη σύγχρονη ταχύτητα περιστροφής, ανεξάρτητα από τις μεταβολές του φορτίου στον άξονά του, όσο αυτές παραμένουν μέσα στα πλαίσια της λειτουργίας τους.

Για να γίνει κατανοητή η διαδικασία προσαρμογής του σύγχρονου κινητήρα στις μεταβολές του φορτίου, θα χρησιμοποιηθεί ένα ανάλογο παράδειγμα. Έστω ότι 2 μικροί μαγνήτες βρίσκονται στις 2 πλευρές ενός τζαμιού. Η μετακίνηση του ενός μαγνήτη αναγκάζει τον άλλο να τον ακολουθήσει με κάποια μικρή καθυστέρηση. Εάν ο δεύτερος μαγνήτης κατά την πορεία του συναντήσει υποστρώματα με διαφορετικούς συντελεστές τριβής, θα πλησιάσει περισσότερο ή θα απομακρυνθεί από τον πρώτο, κινούμενος όμως συνεχώς σύμφωνα με την κίνηση του πρώτου.

Κάτι αντίστοιχο συμβαίνει και με τον σύγχρονο κινητήρα. Μόλις ο δρομέας αποκτήσει τη σύγχρονη ταχύτητα περιστροφής, το πεδίο του στάτη που γυρίζει μέσα στο διάκενο, συμπαρασύρει τον δρομέα, ο οποίος λειτουργεί σαν ηλεκτρομαγνήτης. Η καθυστέρηση ανάμεσα στο πεδίο του στάτη και στον περιστρεφόμενο με την ίδια ταχύτητα άξονα του μαγνήτη του δρομέα ονομάζεται γωνία φορτίου (load angle). Τα 2 πεδία είναι ακλόνητα συμπλεγμένα. Τυχόν μεταβολές του φορτίου προκαλούν αύξηση ή μείωση της γωνίας φορτίου, χωρίς να επηρεάσουν την κοινή ταχύτητα περιστροφής των 2 πεδίων.

Η γωνία φορτίου μπορεί να μεταβληθεί αρκετά. Υπάρχει όμως ένα όριο πέρα από το οποίο δεν είναι πλέον δυνατή η αύξηση της ροπής του σύγχρονου κινητήρα και αυτός θα επιβραδυνθεί και θα σταματήσει. Το φαινόμενο αυτό χαρακτηρίζεται σαν απώλεια συγχρονισμού και σε μεγάλους σύγχρονους κινητήρες είναι ιδιαίτερα οδυνηρό προκαλώντας τεράστια ρεύματα σφάλματος και ενεργοποίηση των συστημάτων προστασίας.

Ο σύγχρονος κινητήρας δεν έχει ροπή εκκίνησης και δεν μπορεί να παράγει ροπή παρά μόνο όταν περιστρέφεται στη σύγχρονη ταχύτητα. Για το λόγο αυτό οι μεγάλοι σύγχρονοι κινητήρες εκκινούν σαν ασύγχρονοι με τη βοήθεια ειδικού κλωβού στο δρομέα. Λειτουργώντας σαν ασύγχρονοι επιταχύνονται μέχρι τη σύγχρονη ταχύτητα. Τότε συνδέεται η συνεχής τάση στο τύλιγμα του δρομέα, εμπλέκεται το φορτίο και ο κινητήρας λειτουργεί πλέον σαν σύγχρονος.

Με τις ειδικές απαιτήσεις της εκκίνησης, την ανάγκη για συνεχή τάση στο δρομέα και το υψηλό κόστος, οι σύγχρονοι κινητήρες δεν είναι ιδιαίτερα δημοφιλείς στη βιομηχανία, εκτός από τις περιπτώσεις όπου η σταθερή ταχύτητα περιστροφής

είναι απαραίτητη. Παρόλα αυτά οι σύγχρονοι κινητήρες έχουν ένα πολύ σημαντικό πλεονέκτημα. Με κατάλληλη ρύθμιση της συνεχούς τάσης του δρομέα, ένας σύγχρονος κινητήρας αλλάζει την κατανάλωση αέργου ισχύος ή μπορεί ακόμη και να παράγει άεργη ισχύ σαν ένας πυκνωτής. Στην περίπτωση αυτή η λειτουργία του χαρακτηρίζεται σαν λειτουργία στρεφόμενου πυκνωτή (synchronous condenser).

Όλοι οι τύποι των κινητήρων μπορούν, θεωρητικά, να λειτουργήσουν σαν γεννήτριες, δηλαδή με εφαρμογή κάποιας κινητήριας ροπής στον άξονα να παράγουν ηλεκτρική ισχύ στα τυλίγματα του στάτη. Η πιο χαρακτηριστική κατηγορία τέτοιων μηχανών είναι οι σύγχρονες, που αποτελούν τις γεννήτριες σε όλους τους σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος λειτουργούν και σαν γεννήτριες συνεχούς ρεύματος κατά την πέδηση σε συστήματα ηλεκτρικής έλξης, ενώ η μηχανή των ανεμογεννητριών είναι, όπως προαναφέρθηκε, ασύγχρονη γεννήτρια.

2.6 Μονοφασικοί και μικροί κινητήρες

Κινητήρες με ισχύ από 2 HP και κάτω ή και με κλασματική ιπποδύναμη είναι μονοφασικοί καθώς προβλέπεται να λειτουργούν σε χώρους μονοφασικών καταναλωτών. Οι μονοφασικοί επαγωγικοί κινητήρες μπορούν να λειτουργήσουν εξίσου αποδοτικά με τους πολυφασικούς, δεν αναπτύσσουν όμως ροπή εκκίνησης, καθώς αυτή προκαλείται από το στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο των πολυφασικών ρευμάτων. Για την εκκίνηση των μονοφασικών επαγωγικών κινητήρων χρησιμοποιείται ένα δεύτερο τύλιγμα στο στάτη. Το τύλιγμα αυτό συνδέεται σε σειρά με έναν πυκνωτή ή μία μεγάλη αντίσταση. Έτσι μετατοπίζεται το ρεύμα του τυλίγματος αυτού σε σχέση με το αρχικό και ο κινητήρας εκκινεί σαν ένας κινητήρας 2 φάσεων. Ο πυκνωτής αυτός, που είναι ένας μικρός μεταλλικός κύλινδρος και βρίσκεται συνήθως στο εξωτερικό του κινητήρα, αποσυνδέεται με τη βοήθεια ενός φυγοκεντρικού διακόπτη όταν ο κινητήρας φθάσει στο 60% περίπου της ονομαστικής ταχύτητας περιστροφής. Οι φυγοκεντρικοί αυτοί διακόπτες και οι εξωτερικοί πυκνωτές εκκίνησης παρουσιάζουν τα περισσότερα προβλήματα βλαβών στους μονοφασικούς ασύγχρονους κινητήρες.

Μία άλλη συνηθισμένη μορφή κινητήρα μικρής ισχύος είναι ο κινητήρας 2 ρευμάτων (universal motor). Αυτός είναι πρακτικά ένας κινητήρας συνεχούς ρεύματος, ο οποίος, όπως δηλώνει η ονομασία του, μπορεί να λειτουργήσει και με εναλλασσόμενη και με συνεχή τάση. Το μειονέκτημά του είναι ότι διαθέτει συλλέκτη με ψήκτρες, άρα απαιτεί τακτική συντήρηση. Τα πλεονεκτήματά του είναι ότι έχει χαμηλό κόστος και μικρό βάρος. Αυτό τον κάνει ιδανικό για χρήση σε εργαλεία χειρός, ιδιαίτερα αν δεν προορίζονται για συνεχή χρήση. Τα χαρακτηριστικά του είναι όμοια με εκείνα του κινητήρα συνεχούς ρεύματος σειράς, δηλ. υψηλή ροπή κατά την εκκίνηση και σε χαμηλές στροφές.

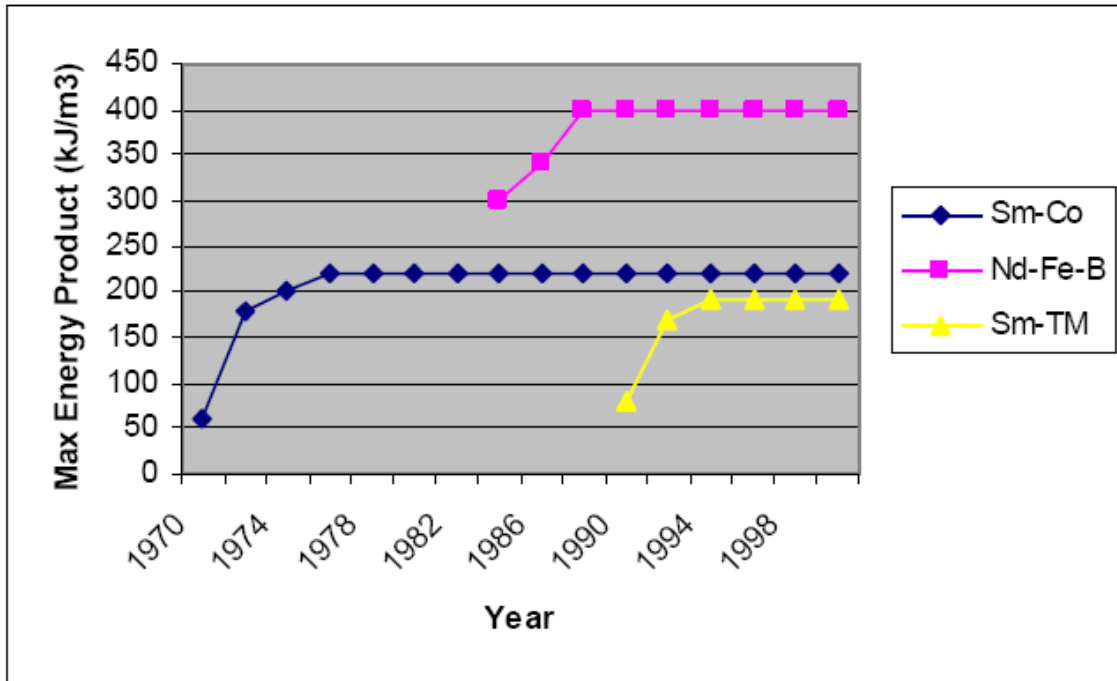
Μία άλλη μορφή κινητήρα τέλος, είναι ο κινητήρας βηματικής τάσης (stepper motor), ο οποίος διαθέτοντας κατάλληλη περιέλιξη, επιτρέπει την κίνηση του δρομέα κατά μικρά βήματα. Ο κινητήρας αυτός χρησιμοποιείται σε εφαρμογές που απαιτούν μεγάλη ακρίβεια θέσης και ταχύτητας, όπως σε ψηφιακά οδηγούμενα συστήματα.

2.7 Κινητήρες που χρησιμοποιούνται στην ηλεκτροπρόωση

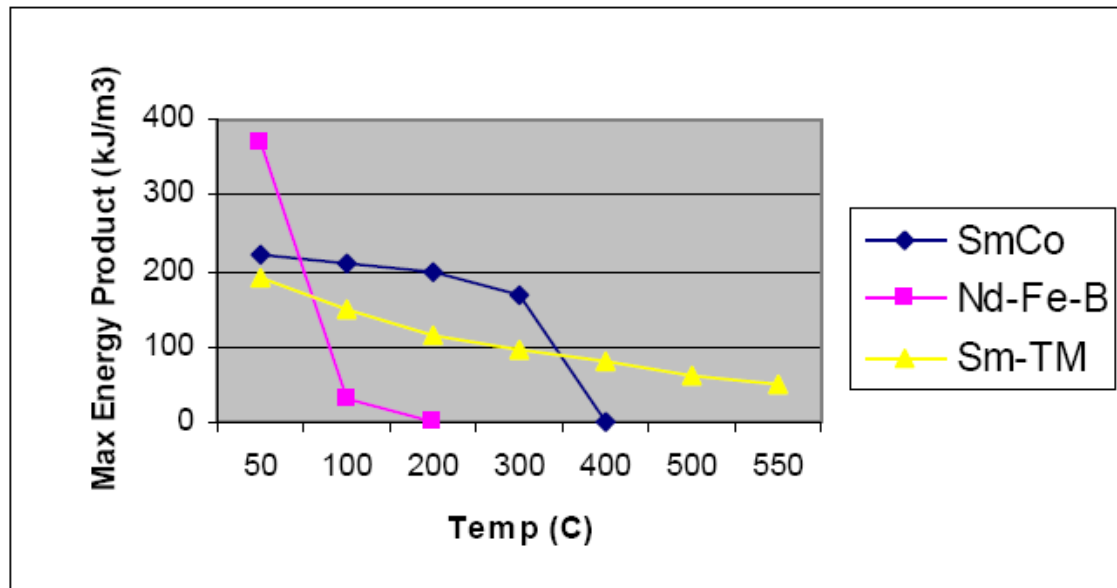
Η πλειονότητα των κινητήρων είναι σύγχρονοι, οι οποίοι έχουν βαθμό απόδοσης 96 - 98%, υψηλότερο κατά 3 - 4% από τον βαθμό απόδοσης κινητήρων επαγωγής. Η ονομαστική τάση λειτουργίας στις εγκαταστάσεις μέσης και μεγάλης ισχύος είναι 3,3 - 6,6 kV. Στους σύγχρονους κινητήρες έρχεται να προστεθεί μία νέα κατηγορία αυτή των σύγχρονων κινητήρων με μόνιμους μαγνήτες των οποίων η απόδοση σύμφωνα με τους κατασκευαστές τους υπερβαίνει το 98%!! Σε αυτές τις σύγχρονες μηχανές, το τυλίγμα διεγέρσεως του δρομέα (που διαρρέεται από συνεχές ρεύμα) έχει αντικατασταθεί από μόνιμους μαγνήτες. Το αποτέλεσμα είναι το ίδιο καθώς και στις δύο περιπτώσεις παράγεται ένα ηλεκτρομαγνητικό πεδίο σταθερής τιμής που στρέφεται στο χώρο με την ταχύτητα του δρομέα. Το προφανές πλεονέκτημα των μηχανών αυτών είναι ότι δεν έχουν ανάγκη παροχής σε ΣΡ, ενώ με τον τρόπο αυτό αυξάνεται και η συνολική απόδοση καθώς μεταξύ των άλλων μειώνονται και οι συνολικές απώλειες Joule στα τυλίγματα. Η ιδέα της χρήσης μόνιμων μαγνητών είναι παλιά αλλά η τεχνολογική πρόοδος τα τελευταία χρόνια

είναι που κατέστησε δυνατή την κατασκευή κραμάτων “μονίμων μαγνητών” (κράματα σαμαρίου-κοβαλτίου, Sm-Co και νεοβιδίου-σιδήρου-βορείου, NdFeB) που έχουν τη δυνατότητα να διατηρούν σταθερή τη μαγνήτισή τους για αρκετά υψηλές θερμοκρασίες, όπως είναι αυτές που αναπτύσσονται στο εσωτερικό μίας στρεφόμενης μηχανής,

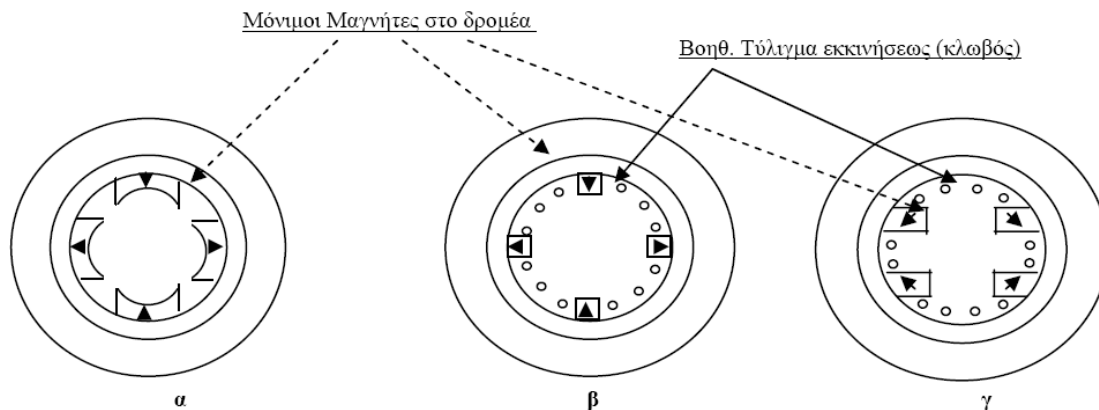
Οι κινητήρες αυτοί με κατάλληλη επιλογή τυλίγματος στάτη και πόλων δρομέα μπορούν να παράγουν ημιτονοειδές ηλεκτρομαγνητικό πεδίο συναγωνίζοντας έτσι μία συμβατική σύγχρονη μηχανή στα χαμηλά επίπεδα απότομων αιχμών ροπής (torque ripples) και μηχανικών δονήσεων (vibrations). Τα τελευταία χρόνια ερευνάται η χρησιμοποίηση ηλεκτρικών κινητήρων με υπεραγώγιμα υλικά ως κινητήρες πρόωσης, κυρίως στην Αμερική. Οι κινητήρες αυτοί, λόγω του ότι το υπεραγώγιμο υλικό παρουσιάζει μηδενική ηλεκτρική αντίσταση σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες, έχουν πολύ μεγάλη ισχύ ανά μονάδα όγκου σε σύγκριση με τους συμβατικούς κινητήρες. Θεωρούνται έτσι ιδανικοί για την πρόωση πολεμικών πλοίων όπου ο χώρος είναι περιορισμένος σε συνδυασμό με τις αυξημένες ανάγκες ισχύος. Η εταιρεία American Superconductor Inc. χρηματοδοτείται από το Αμερικανικό Πολεμικό Ναυτικό για να κατασκευάσει έναν κινητήρα πρόωσης ονομαστικής ισχύος 25MW.



Διάγραμμα 2-1 . Εξέλιξη τεχνολογίας μονίμων μαγνητών τα τελευταία 30 χρόνια



Διάγραμμα 2-2 Επιδόσεις μονίμων μαγνητών ως προς τη θερμοκρασία μαγνήτισης



Σχήμα 2-8 Διατάξεις σύγχρονων κινητήρων με μόνιμους μαγνήτες α) οι μόνιμοι μαγνήτες στην εξωτερική επιφάνεια του δρομέα β) οι μόνιμοι μαγνήτες στο εσωτερικό του δρομέα γ) οι μόνιμοι μαγνήτες στο εσωτερικό του δρομέα με διεύθυνση ροής εγκάρσια στον άξονα.

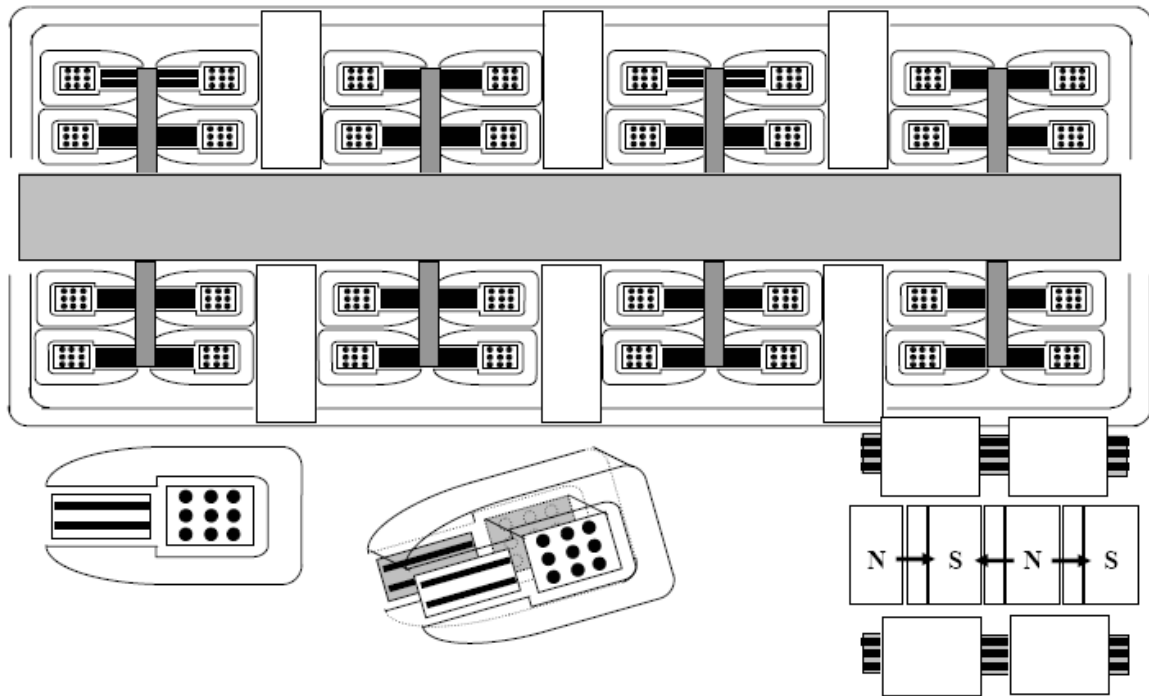
3.1.1 Κινητήρες αξονικής ροής

Πρόκειται για κινητήρες στους οποίους η ωφέλιμη μαγνητική ροή είναι κατά την ακτινική διεύθυνση δηλαδή όπως στις συνήθεις συμβατικές ηλεκτρικές μηχανές. Αντιπροσωπευτικές περιπτώσεις τέτοιων κινητήρων είναι ο κινητήρας PERMASYN της εταιρείας SIEMENS, με μόνιμους μαγνήτες Sm-Co που βρίσκει εφαρμογές πρόωσης μεταξύ άλλων σε υποβρύχια του ΠΝ. Ένας άλλος τύπος ηλεκτρικού κινητήρα πρόωσης είναι ο Εξελιγμένος Επαγωγικός Κινητήρας (Advanced Induction Motor-AIM) της ALSTOM, ο οποίος έχει επιλεγεί για την πρόωση της φρεγάτας (Type 45) του Βρετανικού Πολεμικού Ναυτικού. Προσφέρει υψηλή πυκνότητα ισχύος και ροπής σε σύγκριση με έναν συμβατικό επαγωγικό κινητήρα ίδιας ονομαστικής ισχύος. Η διαφορά με τον κοινό 3-φασικό επαγωγικό κινητήρα είναι ότι προσφέρει την δυνατότητα λειτουργίας με 5, 10 ή 15 φάσεις χρησιμοποιώντας τις αρμονικές του μαγνητικού πεδίου με την βοήθεια εξελιγμένων ηλεκτρονικών ισχύος για να αυξηθεί η ισχύς του κινητήρα.

3.1.2 Πολυβάθμιοι κινητήρες εγκάρσιας ροής (transverse flux motors)

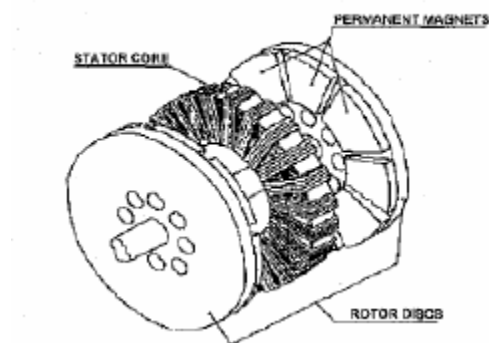
Οι κινητήρες αυτοί έχουν μόνιμους μαγνήτες στο δρομέα, προσανατολισμένους μάλιστα κατά τέτοιο τρόπο ώστε η μαγνητική ροή να

ρέει μέσα στο διάκενο σε διεύθυνση εν μέρει κατά την αξονική διεύθυνση και κυρίως κάθετη- εγκάρσια προς τον άξονα της μηχανής, βλ. Σχήμα 2-9.

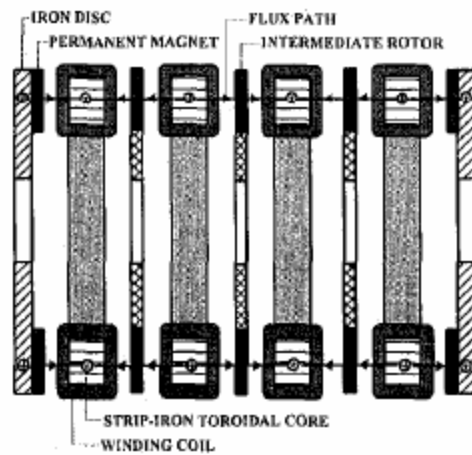


Σχήμα 2-9 Κινητήρας εγκάρσιας ροής

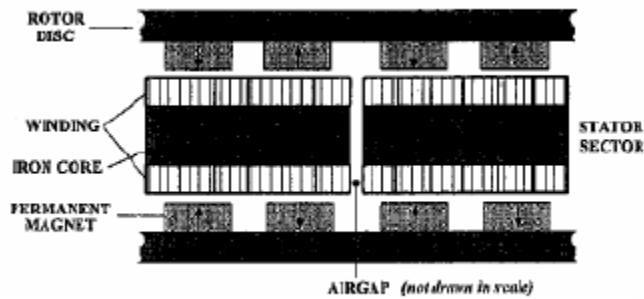
3.1.3 Πολυβάθμιοι κινητήρες αξονικής ροής (axial flux motors) Οι κινητήρες αυτοί έχουν μόνιμους μαγνήτες στον δρομέα, προσανατολισμένους κατά τρόπο ώστε η μαγνητική ροή να ρέει σε διεύθυνση παράλληλη προς τον άξονα της μηχανής (αξονική)



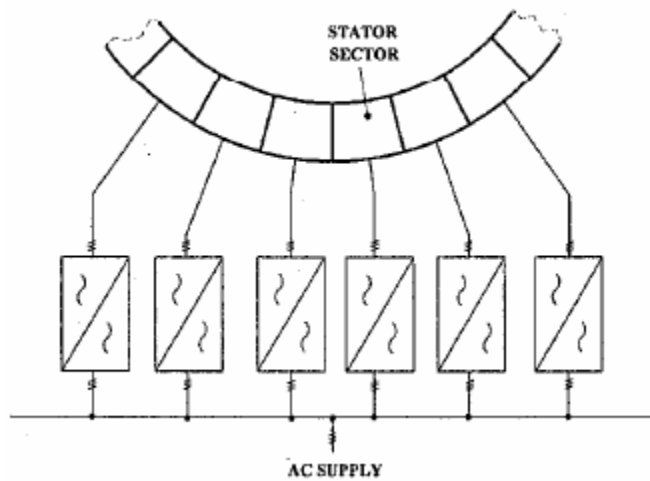
Σχήμα 2-10 Μηχανή αξονικής ροής



Σχήμα 2-11 Κάθετη τομή κινητήρα αξονικής ροής με 4 σπονδύλους (modules)



Σχήμα 2-12 Διάταξη στάτη αποτελούμενου από 4 επιμέρους σπονδύλους κινητήρα αξονικής ροής

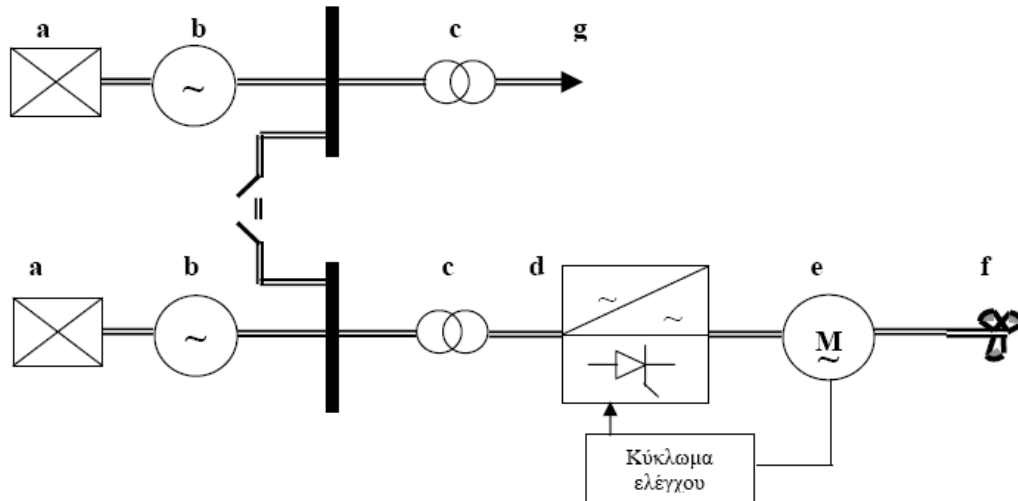


Σχήμα 2-13 Διάταξη μετατροπέα συχνότητας κινητήρα αξονικής ροής

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – ΔΟΜΗ ΚΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΕΝΟΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΠΛΟΙΟΥ

3.1 Γενικά Χαρακτηριστικά

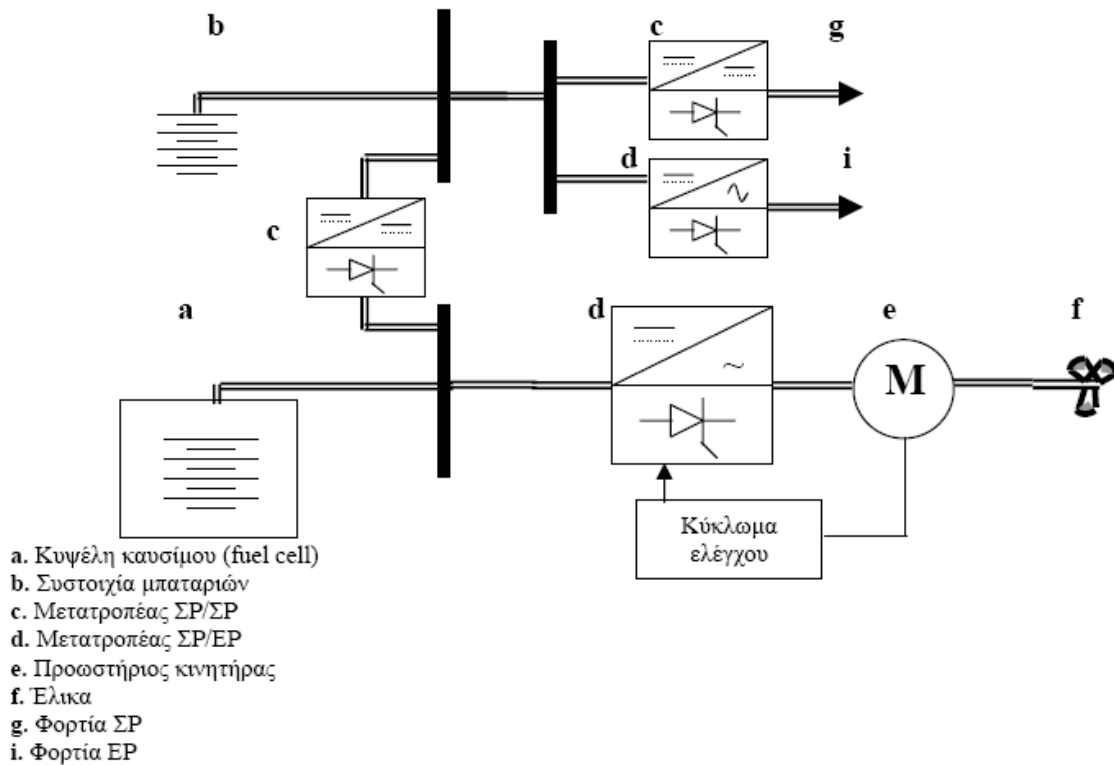
Το γενικευμένο ηλεκτρολογικό διάγραμμα ενός ηλεκτρικού δικτύου πλοίου με ηλεκτρική πρόωση απεικονίζεται στο Σχήμα 3-1. Το σύστημα ηλεκτροπαραγωγής μπορεί να είναι ενιαίο καλύπτοντας όλες τις ηλεκτρικές ενεργειακές ανάγκες ή μπορεί να αποτελείται από δύο επιμέρους υποσυστήματα, αυτό της ηλεκτροπρόωσης κι εκείνο των λοιπών ηλεκτρικών φορτίων. Σε πλοία με συμβατική πρόωση, ειδική υποπερίπτωση αποτελούν τα συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που περιλαμβάνουν και γεννήτριες άξονα-shaft generators- (εξηρητημένες δηλαδή γεννήτριες που στρέφονται από την κύρια ντιζελο-μηχανή πρόωσης του πλοίου). Οι γεννήτριες αυτές μπορεί να συνδέονται με το υπόλοιπο ηλεκτρικό δίκτυο με σύνδεσμο ΣΡ (DC link) ή να τροφοδοτούν αυτόνομα μόνο μεγάλα φορτία όπως οι κινητήρες βοηθητικής πρόωσης (thrusters). Ενίοτε, σε έκτακτες περιπτώσεις (π.χ. μεγάλης έκτασης ζημία στην κύρια μηχανή) μπορούν να λειτουργήσουν και αντίστροφα, δηλ. ως ηλεκτρικοί κινητήρες πρόωσης (τροφοδοτούμενες από τις άλλες ηλεκτρογεννήτριες) περιορισμένης ισχύος και να οδηγήσουν το σκάφος σε ασφαλή προορισμό.



- a. Κινητήρια μηχανή (ντιζελοκινητήρας ή αεριοστρόβιλος)
- b. Σύγχρονη γεννήτρια
- c. Μετασχηματιστής ισχύος
- d. Μετατροπέας συχνότητας
- e. Προωστήριος κινητήρας
- f. Έλκα
- g. Λοιπά φορτία (αντλίες, συμπιεστές, φωτισμός, εργάτες κλπ)

Σχήμα 3-1 Γενικευμένο ηλεκτρολογικό διάγραμμα ενός ηλεκτρικού δικτύου πλοίου

Σημαντικά διαφορετικό είναι το ηλεκτρικό σύστημα της νέας γενιάς υποβρυχίων στα οποία η ηλεκτρική ενέργεια παράγεται από **κυψέλες καυσίμου** (fuel cells) (και αποθηκεύεται συστοιχίες συσσωρευτών ΣΡ) για να τροφοδοτήσει καταναλώσεις ΣΡ αλλά και ΕΡ μέσω μετατροπέων ΣΡ/ΕΡ. Ηλεκτρογεννήτριες ΕΡ που κινούνται με κινητήρες ντήζελ υφίστανται μεν, αλλά δεν αποτελούν την κύρια πηγή παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Σε κάθε περίπτωση όμως, οι κινητήρες πρόωσης είναι ΕΡ.



Σχήμα 3-2 Γενικό διάγραμμα συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας πλοίου με κυψέλες καυσίμου.

3.2 Σχεδιαστικά χαρακτηριστικά

Όπως αναφέρθηκε οι επιλογές για το σχεδιασμό των σύγχρονων συστημάτων ηλεκτροπρόωσης είναι πολλές και κάθε μία μπορεί να προσαρμοστεί στις ανάγκες και τον ρόλο του συγκεκριμένου πλοίου. Ο σχεδιασμός ενός σύγχρονου συστήματος ηλεκτροπρόωσης μπορεί να αναλυθεί στην επιλογή λύσεων σε επιμέρους ζητήματα, που είναι :

1. Το είδος των κινητήριων μηχανών. Ντήζελ, Αεριοστρόβιλοι (ειδικά για πιο αθόρυβη λειτουργία), Ατμοστρόβιλοι (ειδικά για πυρηνοκίνητα σκάφη), Συσσωρευτές ή/και Ηλεκτροχημικές Κυψέλες Καυσίμου (Fuel-Cells) (για τα υποβρύχια).
2. Τα χαρακτηριστικά του ηλεκτρικού δικτύου, όπως το είδος (DC, AC) και η τιμή της τάσης παραγωγής και διανομής της ηλεκτρικής ισχύος (που υπαγορεύεται κυρίως από τις απαιτήσεις ισχύος προώσεως και

τη διαθεσιμότητα παρελκόμενου ηλεκτρολογικού εξοπλισμού (καλώδια, μονωτικά, διακόπτες πίνακες κ.λ.π.)).

3. Ο αριθμός και το είδος των γεννητριών.
4. Η παράλληλη ή μη λειτουργία των γεννητριών.
5. Το ποσοστό αυτοματισμού στη λειτουργία, φόρτωση, παραλληλισμό και κράτηση των γεννητριών.
6. Ο αριθμός και το είδος των κινητήρων προώσεως. Τα λειτουργικά χαρακτηριστικά που εξετάζονται είναι η μέγιστη ισχύς, ο όγκος και το βάρος ανά μονάδα ισχύος, ο μέσος χρόνος μεταξύ επισκευών και βλαβών και η αποδοτικότητα (βαθμός αποδόσεως).
7. Το είδος ελέγχου-χειρισμού των κινητήρων προώσεως.
8. Το είδος των στατών μετατροπέων.
9. Η σχεδίαση της διάταξης του ηλεκτρικού δικτύου και συγκεκριμένα:
 - α.** Θα υπάρχει διάκριση ανάμεσα στα ηλεκτρικά φορτία του πλοίου, άρα και στα ηλεκτρικά δίκτυα, σε φορτία προώσεως και στα λοιπά ; Το ζήτημα έχει να κάνει και με το βαθμό εξηλεκτρισμού του πλοίου καθώς η σχέση του ηλεκτρικού δικτύου προώσεως με το ηλεκτρικό δίκτυο χρήσεως μπορεί να είναι μία από τις παρακάτω :

α.1. να είναι τελείως ανεξάρτητα, δηλαδή το καθένα να εξυπηρετείται από δικές του γεννήτριες και να μη συνδέονται μεταξύ τους ή αν υπάρχει δυνατότητα σύνδεσης, αυτή να είναι μόνο για κατάσταση ανάγκης.

α.2. να είναι διακριτά, αλλά να υπάρχει σύνδεση μεταξύ τους οπότε το ένα από τα δύο να μπορεί να τροφοδοτείται και από το άλλο.

α.3. να είναι ενοποιημένα σε ένα κοινό ηλεκτρικό δίκτυο, οπότε οδηγούμαστε στο «πλήρως εξηλεκτρισμένο πλοίο» (AES), οπότε και είναι δυνατή η βελτιστοποίηση της εκμετάλλευσης των πλεονεκτημάτων της ηλεκτροπρόωσης.

β. Στην περίπτωση που τα δύο δίκτυα συνδέονται, η επιλογή του τρόπου σύνδεσης (απευθείας μέσω πινάκων, μέσω αντιστροφών

(inverters) ή άλλου μετατροπέα ηλεκτρονικών ισχύος (converter), μέσω ζεύγους κινητήρα-γεννήτριας, μέσω μετασχηματιστών κ.λ.π.).

γ. Από ποιο δίκτυο τροφοδοτούνται τα βοηθητικά συστήματα προώσεως (π.χ. τα συστήματα ελέγχου-χειρισμού, ψύξης, λίπανσης).

δ. Ο τρόπος με τον οποίο διασφαλίζεται η 'ποιότητα ισχύος' του ηλεκτρικού δικτύου όσον αφορά την τάση και την συχνότητα, (θόρυβος-αρμονική παραμόρφωση) και ειδικά του δικτύου χρήσεως, όταν αυτό συνδέεται με το δίκτυο προώσεως. Σαν κύρια πηγή δημιουργίας αρμονικών αναφέρονται τα ηλεκτρονικά ισχύος των ηλεκτροκινητήρων. Η ποιότητα των ηλεκτρικών δικτύων (συχνότητα, αρμονικές τάσεως, ταχείες διαταραχές τάσεως κ.λ.π.) καθορίζεται από τις διάφορες προδιαγραφές και νηογνώμονες. Οι προδιαγραφές αυτές αφορούν μόνο το δίκτυο χρήσης του πλοίου, δηλαδή φορτία που δεν σχετίζονται με την πρόωση. Στις περιπτώσεις ανεξαρτήτου δικτύου προώσεως δεν υπάρχουν προς το παρόν ιδιαίτερες απαιτήσεις ποιότητας για τα φορτία της πρόωσης. Αν όμως το ηλεκτρικό δίκτυο είναι ενοποιημένο πρέπει ή και το δίκτυο της προώσεως να ικανοποιεί τις ίδιες απαιτήσεις ποιότητας, ή να λαμβάνεται μέριμνα, ώστε τυχόν 'διαταραχές' στο δίκτυο προώσεως να μην 'διαδίδονται' στο δίκτυο χρήσεως. Για δίκτυα Συνεχούς Ρεύματος δεν υπάρχουν ακόμη εν γένει ιδιαίτερες απαιτήσεις ποιότητας.

ε. Η διάταξη τέλος του ηλεκτρικού δικτύου πρέπει να μεγιστοποιεί την βιωσιμότητα του πλοίου.

- 10.Ελάχιστες απαιτήσεις σε καταστάσεις ανάγκης - Αντιμετώπιση. Για παράδειγμα μπορεί να απαιτείται εκκίνηση κινητήρα προώσεως με μια μόνο γεννήτρια σε λειτουργική κατάσταση, η δυνατότητα τροφοδότησης του ενός δικτύου από το άλλο, η δυνατότητα ενός μόνο κινητήρα να μπορεί να κινήσει το πλοίο με μια ελάχιστη ταχύτητα, ή να απαιτείται οι (η) γεννήτρες(α) να μπορούν(εί) να τροφοδοτούν(εί) τα φορτία ανάγκης και ταυτόχρονα να κινήσουν(ει) το πλοίο με μια μικρή ταχύτητα (3-5 knots).

11. Ο τρόπος έδρασης των μηχανημάτων, καθώς και ο (φυσικός) διαχωρισμός τους, όπως για παράδειγμα των πινάκων ηλεκτρικού δικτύου προώσεως και χρήσεως, των κινητήρων προώσεως και των ηλεκτρονικών διατάξεων οδήγησής τους. Ως γενικοί κανόνες-απαιτήσεις αναφέρονται :
- α. αν υπάρχει αρκετός χώρος πρέπει οι πίνακες προώσεως και χρήσεως να διαχωρίζονται φυσικά.
 - β. οι κινητήρες και οι αντίστοιχοι αντιστροφείς (inverters) πρέπει να τοποθετούνται σε διαφορετικούς υδατοστεγανούς τομείς.
 - γ. οι μετατροπείς (converters) πρέπει να τοποθετούνται κοντά στους κινητήρες για να μειώνεται το μήκος των καλωδίων.
 - δ. τοποθέτηση των κινητήρων (που φυσικά υπαγορεύεται από την διάταξη των αξόνων) όσο πιο πύμα γίνεται.
12. Όπως αναφέρθηκε ήδη σημαντικό πλεονέκτημα της ηλεκτροπρόωσης είναι η ευχέρεια που παρέχει στο σχεδιαστή σχετικά με τη διάταξη των υποσυστημάτων της. Έτσι είναι δυνατό οι γεννήτριες να τοποθετηθούν σε οποιαδήποτε απόσταση από τους κινητήρες, σχεδόν οπουδήποτε στο πλοίο, αρκεί να μην παραβιάζονται κλασσικοί κανόνες που σχετίζονται με την ευστάθεια του πλοίου, την ισοκατανομή των φορτίων στο πλοίο, την ακουστική υπογραφή και την ευκολία επισκευής.

3.3 Σχετική Ορολογία

Δεδομένης της ραγδαίως αναπτυσσόμενης έρευνας επί των ηλεκτροπροωστήριων συστημάτων, είναι αναγκαίο να διευκρινισθούν οι παρακάτω βασικοί όροι που χρησιμοποιούνται συχνά στη βιβλιογραφία :

α. Πλήρης Ηλεκτροπρόωση (Full Electric Propulsion - F.E.P.) : Η εγκατάσταση προώσεως κατά την οποία το πλοίο κινείται αποκλειστικώς από ηλεκτρικούς κινητήρες. Τα ζεύγη κινητηρίων μηχανών-γεννητριών που τροφοδοτούν τους κινητήρες προώσεως, υπάρχουν αποκλειστικώς για το

σκοπό αυτό (δεν τροφοδοτούν άλλα φορτία). Η ηλ. ισχύς για όλους τους άλλους καταναλωτές του πλοίου παράγεται από άλλες γεννήτριες.

β. Ολοκληρωμένη Πλήρης Ηλεκτροπρόωση (Integrated Full Electric Propulsion - I.F.E.P.) : Η εγκατάσταση ηλεκτροπρόωσης στην οποία τα ίδια ζεύγη κινητηρίων μηχανών - γεννητριών, τροφοδοτούν τόσο τους ηλεκτρικούς κινητήρες προώσεως, όσο και τα υπόλοιπα ηλεκτρικά φορτία του πλοίου.

γ. Πλήρως Εξηλεκτρισμένο πλοίο (All Electric Ship -A.E.S.) : Το πλοίο που διαθέτει ολοκληρωμένη πλήρη ηλεκτροπρόωση και που επιπλέον σε ευρεία έκταση επιτελεί τις λειτουργίες του μέσω ηλεκτρικών μηχανημάτων και συστημάτων.

δ. Ηλεκτρικό δίκτυο προώσεως (Propulsion Network) : Το τμήμα εκείνο (ανεξάρτητο ή ‘ενσωματωμένο’) του ηλεκτρικού δικτύου πλοίου που τροφοδοτεί τα ηλεκτρικά φορτία που σχετίζονται με την πρόωση.

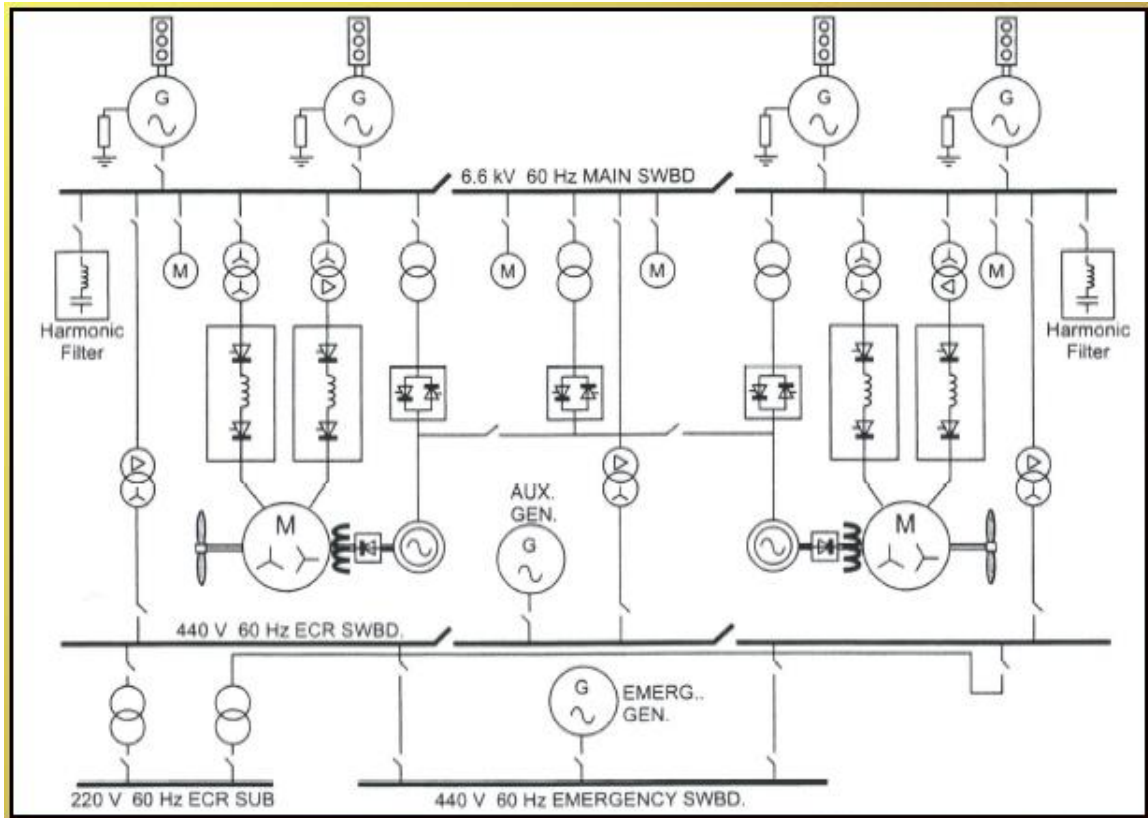
ε. Ηλεκτρικό δίκτυο χρήσεως (Ship Service System) : Το υπόλοιπο, πλην δικτύου προώσεως, ηλεκτρικό δίκτυο του πλοίου.

3.4 Γενική τοπολογία ηλεκτρικών δικτύων πλοίων

Στην πλειοψηφία των πλοίων, το ηλεκτρικό δίκτυο είναι τριφασικό E.P. (440V, 3-phase / 380V, 3-phase). Όλοι οι καταναλωτές ηλεκτρικού ρεύματος τροφοδοτούνται από τον κεντρικό πίνακα του ηλεκτροστασίου μέσω του κυρίου δικτύου διανομής και των τοπικών πινάκων. Ξεχωριστό δίκτυο διανομής ανάγκης (*emergency distribution system*) που τροφοδοτείται από τη *γεννήτρια ασφαλείας* (ή κατάλληλους συσσωρευτές) δίνει τη δυνατότητα παράλληλης τροφοδοσίας συγκεκριμένων καταναλωτών -*απαραίτητοι για την ασφάλεια και τη λειτουργία του πλοίου*, σε περίπτωση μη λειτουργίας του κύριου δικτύου

Σε πλοία με *πολύ μεγάλα φορτία* (μεγάλα κρουαζιερόπλοια), το κύριο δίκτυο μπορεί να τροφοδοτείται μέσω γεννητριών υψηλής τάσης (3.3 kV, 6.6 kV ή ακόμα και 11 kV) για τον περιορισμό του μεγέθους της έντασης του

ρεύματος και συνεπώς της απαραίτητης διατομής καλωδίων τροφοδοσίας. Ο φωτισμός του πλοίου και μονοφασικά φορτία χαμηλής ισχύος συνήθως λειτουργούν σε τάση 220V (μέσω κατάλληλων μετασχηματιστών)



Σχήμα 3-3 Τυπικό ηλεκτρικό δίκτυο πλοίου (HV/LV) [D.T. Hall, "Practical marine electrical knowledge", Witherby Seamanship Ltd 1999]

3.5 Καλώδια που χρησιμοποιούνται σε ηλεκτρικά δίκτυα πλοίων

Τα καλώδια που χρησιμοποιούνται σε ηλεκτρικό δίκτυο πλοίου πρέπει να είναι εγκεκριμένου "ναυτικού τύπου" (πιστοποιημένα από νηογνώμονα) καθώς οι συνθήκες λειτουργίας τους διαφοροποιούνται σε σχέση με εκείνες σε ένα κλασικό δίκτυο διανομής στεριάς (π.χ. υγρασία, θερμοκρασία περιβάλλοντος χώρου κ.α.). Πρέπει να είναι άφλεκτα και στεγανά - σε περίπτωση πυρκαγιάς καταστρέφονται αλλά δεν αναφλέγονται ώστε να μεταδώσουν τη φωτιά

Σε πλοίο με ηλεκτρολογικό δίκτυο τάσης 440V (πλειοψηφία των περιπτώσεων) χρησιμοποιούνται πιστοποιημένα καλώδια διανομής

600/1000V (600V ως προς τη γη /1000V μεταξύ δύο αγωγών). Κατηγοριοποιούνται σε δύο βασικές κατηγορίες με βάση το σκοπό χρήσης τους:

- Εύκαμπτα – σε περιπτώσεις όπου απαιτείται αντοχή του καλωδίου σε επανειλημμένες κάμψεις αυτού, π.χ. ηλεκτρικές φορητές συσκευές
- Δύσκαμπτα – σε περιπτώσεις όπου δεν απαιτείται ευκαμψία του καλωδίου (π.χ. σε κυκλώματα διανομής ηλεκτρικής διανομής), εξαιρετικά ανθεκτικά σε θερμότητα και φλόγα

Ανάλογα με τις απαιτήσεις του συγκεκριμένου δικτύου διανομής που εξυπηρετούν (π.χ. ένταση ρεύματος λειτουργίας) και τις αντίστοιχες συνθήκες λειτουργίας (π.χ. αντίσταση σε υψηλή θερμοκρασία), επιλέγονται με βάση την κατασκευαστική δομή τους

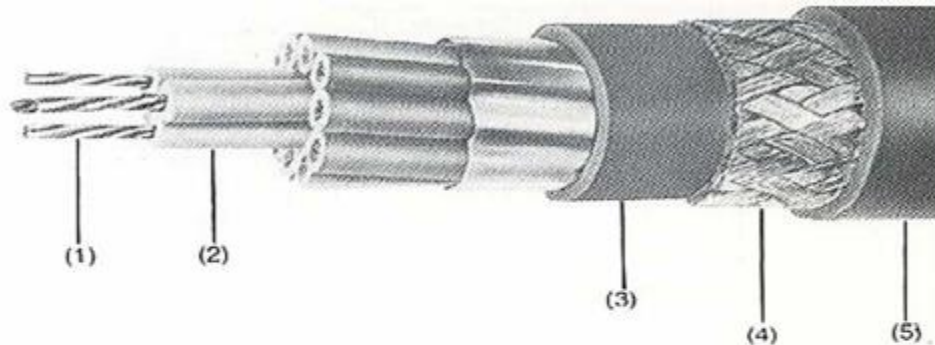
Τα περισσότερα καλώδια που χρησιμοποιούνται σε πλοία έχουν εξωτερική θωράκιση από δικτυωτό μεταλλικό πλέγμα από χάλυβα, ορείχαλκο ή αλουμίνιο



Εικόνα 3.1 Καλώδιο με μόνωση PVC

Τα βασικά μέρη που αποτελούν ένα καλώδιο είναι:

- Ηλεκτρικοί αγωγοί -αποτελούνται από χαλκό υψηλής καθαρότητας, ανάλογα με τον αριθμό των αγωγών χαρακτηρίζονται διπολικά (δύο αγωγοί), τριπολικά (τρεις αγωγοί), κτλ
- Μονωτικά υλικά – γενικά αποτελούνται από συνθετικά υλικά (βουτίλιο, σιλικόνη κ.α.) εξασφαλίζουν την ηλεκτρική μόνωση μεταξύ των αγωγών Cu (το PVC το οποίο συναντάται συνήθως σε εγκαταστάσεις διανομής ξηράς, δεν χρησιμοποιείται για μόνωση των αγωγών καθώς παρουσιάζει μικρή αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες (σημείο τήξης 150 οC)
- Παρεμβάσματα – κατάλληλα υλικά για την πλήρωση πιθανών κενών μεταξύ των μονωμένων αγωγών ώστε να εξασφαλίζεται η συμπαγής κυλινδρική δομή του καλωδίου
- Προστατευτική επένδυση/θωράκιση – εξασφαλίζει την προστασία του καλωδίου από την υγρασία και πιθανές μηχανικές καταπονήσεις, συνήθως αποτελούνται από δικτυωτό μεταλλικό πλέγμα από χάλυβα, ορείχαλκο ή αλουμίνιο



- (1) Ηλεκτρικός αγωγός Cu
- (2) Ηλεκτρική μόνωση μεταξύ αγωγών -FPR καουτσούκ
- (3) Εσωτερική επένδυση
- (4) Θωράκιση καλωδίου Cu
- (5) Εξωτερική επένδυση Polychloroprene καουτσούκ

MGCC type [Fulgor Greek Electric Cables SA]

Εικόνα 3.2 Τυπική δομή καλωδίων ναυτικού τύπου

3.6 Τεχνικές ελέγχου κινητήρων πρόωσης εναλλασσόμενου ρεύματος

Οι μέθοδοι ελέγχου κινητήρων εναλλασσόμενου ρεύματος –εστιάζοντας κυρίως στις εφαρμοζόμενες σε κινητήρες ηλεκτροπρόωσης– είναι οι παρακάτω:

- Βαθμωτός έλεγχος ανοικτού ή κλειστού βρόχου V/F (scalar control): Είναι μη εφαρμόσιμος στην περίπτωση της πρόωσης, αλλά κρίνεται αναγκαία η αναφορά σε αυτόν. Δίνεται η επιθυμητή μηχανική ταχύτητα χωρίς να λαμβάνεται μέτρηση της πραγματικής ταχύτητας. Η τάση μεταβάλλεται αναλογικά προς την επιθυμητή ταχύτητα σε μία προσπάθεια να μην μεταβάλλεται η ροπή. Σε παραλλαγή αυτής της τεχνικής, λαμβάνεται μέτρηση της πραγματικής ταχύτητας, που συγκρινόμενη με την επιθυμητή ταχύτητα παράγει ένα σήμα σφάλματος, το οποίο οδηγείται σε έναν ελεγκτή PI και παράγεται κατάλληλο σήμα εναύσεως των διακοπτικών στοιχείων ισχύος. Το ίδιο σήμα ρυθμίζει και την τάση σε μία προσπάθεια να μη μεταβάλλεται η ροπή στον άξονα.
- Έλεγχος με SPWM και CSI (με συγκριτές υστερήσεως): Η στιγμιαία τιμή του ρεύματος εισόδου ελέγχεται συνεχώς, ώστε να κυμαίνεται μεταξύ δύο οριακών τιμών κατωφλίου. Σε κάθε προσπάθεια του ρεύματος να υπερβεί τα όρια αυτά, παράγεται σήμα από τον ελεγκτή PWM, που δίνει εντολή στους διακόπτες να άγουν κατά τέτοιο τρόπο ώστε να αναιρεθεί η εν λόγω προδιάθεση του ρεύματος
- Διανυσματικός έλεγχος (vector control): Γίνεται όπως στη μηχανή συνεχούς ρεύματος ξένης διεγέρσεως, όπου η ροπή M είναι μία ποσότητα ανάλογη του γινομένου του ρεύματος τυλίγματος διεγέρσεως (πεδίου) I_f και του ρεύματος τυλίγματος τυμπάνου I_a : $M = k \cdot I_f \cdot I_a$.
- Έλεγχος πεδίου (field control): Η πλέον διαδεδομένη παραλλαγή της τεχνικής του διανυσματικού ελέγχου είναι η μέθοδος του ελέγχου με προσανατολισμό στο διάνυσμα της πεπλεγμένης ροής του δρομέα ή

πιο απλά έλεγχος πεδίου (field control). Μειονέκτημά της είναι ο μεγάλος αριθμός αισθητήρων, μετατροπέων και μετρητικών διατάξεων, που αυξάνουν την πολυπλοκότητα, το κόστος αλλά και τον χρόνο απόκρισης των διατάξεων ελέγχου. Γενικότερα, με τη μέθοδο διανυσματικού ελέγχου η ροπή ελέγχεται μόνο με έμμεσο τρόπο, χωρίς να αποφεύγονται και κραδασμοί (vibrations).

- Απευθείας έλεγχος ροπής (Direct Torque Control DTC): Είναι μια εξέλιξη της μεθόδου του διανυσματικού ελέγχου πεδίου (vector field control). Η τεχνική αυτή έχει ήδη αρχίσει να εφαρμόζεται σε πλοία με ηλεκτρική πρόωση, και πιο συγκεκριμένα σε πλοία με αζιμουθιακό προωστήριο σύστημα σε συνδυασμό με σύγχρονο κινητήρα μονίμων μαγνητών (Azipod, της εταιρείας ABB) και κυκλομετατροπείς. Πλεονεκτεί έναντι του διανυσματικού ελέγχου, καθώς παρουσιάζει τα παρακάτω χαρακτηριστικά:
 - Απευθείας έλεγχος της ροπής εξόδου του κινητήρα.
 - Παραγόμενη ροπή χωρίς μεγάλες αιχμές (torque ripples).
 - Πολύ λιγότερες απαιτήσεις σε μετρήσεις και υπολογισμούς μεγεθών (π.χ. δεν είναι απαραίτητη η μέτρηση της ταχύτητας περιστροφής).

3.7 Είδη αξονικών συστημάτων πλοίων

Ένα από τα πλεονεκτήματα της ηλεκτρικής πρόωσης είναι και η ουσιαστική ελάττωση του αξονικού συστήματος των πλοίων.

Τα συστήματα ηλεκτρικής πρόωσης πλεονεκτούν λόγω της συνεχούς μεταβολής των στροφών σχεδόν σε όλο το εύρος από μηδενική έως την ονομαστική ταχύτητα. Κι επιπροσθέτως, το μέγιστο της ροπής μπορεί συνήθως να χρησιμοποιηθεί σε όλο το φάσμα λειτουργίας. Για λόγους ασφαλείας, η έλικα κινείται από δύο (ή και περισσότερους) ηλεκτροκινητήρες ίδιας ισχύος.

Η έλικα, ως μηχανικό φορτίο, ακολουθεί τον «νόμο της έλικας» όπως αναφέρεται συχνά· δηλαδή η μηχανική ροπή της είναι ανάλογη του

τετραγώνου της μηχανικής ταχύτητάς της, όπως συμβαίνει στις φυγοκεντρικές αντλίες και στους ανεμιστήρες. Και η χαρακτηριστική αυτή μπορεί να είναι:

- Σταθερή (έλικα σταθερού βήματος).
- Μεταβαλλόμενη, με αλλαγή της κλίσης των πτερυγίων της (έλικα μεταβλητού βήματος).

3.7.1 Έλικα σταθερού βήματος (Fixed Pitch Propeller – FPP)

Όταν η υπερτάχυνση δεν είναι εφικτή, η έλικα σχεδιάζεται έτσι ώστε να απορροφά τη μέγιστη συνεχή ισχύ (σημείο MCR) σε καταστάσεις δοκιμών (με πλήρες φορτίο, καθαρή γάστρα και ήρεμο καιρό).

Προκειμένου να είναι δυνατή η λειτουργία με πλήρη ισχύ σε δυσμενείς συνθήκες, το σύστημα πρόωσης συνήθως υπολογίζεται για τιμή κατά 10 – 20% μεγαλύτερη της ονομαστικής, χωρίς αύξηση της ισχύος πέρα από τη μέγιστη συνεχή (MCR). Αυτό σημαίνει υπερδιαστασιολόγηση έλικας αξονικού συστήματος – μειωτήρα – κινητήρα – μετατροπέα κατά 10 – 20%.

3.7.2 Έλικα ρυθμιζόμενου βήματος (Controllable Pitch Propeller – CPP)

Το σύστημα είναι συχνά (ή θα έπρεπε να είναι) εφοδιασμένο με διάταξη αυτόματης επιλογής του συνδυασμού βήματος – στροφών έλικας στο διάστημα 65 – 100% των στροφών, ώστε να εξασφαλίζεται η βέλτιστη λειτουργία και η καλύτερη δυνατή απόκριση κατά τους χειρισμούς.

Όταν η έλικα είναι ρυθμιζόμενου βήματος, δεν απαιτείται περιθώριο ροπής, διότι η μέγιστη ισχύς μπορεί σχεδόν πάντοτε να απορροφηθεί με ρύθμιση του βήματος.

3.8 Αξιμουθιακό προωστήριο σύστημα (Podded Propulsion – POD)

Παράλληλα με την εισαγωγή της ηλεκτρικής πρόωσης εμφανίστηκε μία εναλλακτική λύση για το προωστήριο σύστημα που έχει πολλαπλά πλεονεκτήματα. Πιο συγκεκριμένα, το σύστημα ηλεκτρικού κινητήρα και

έλικας είναι μία ενιαία μονάδα, εμβαπτισμένη στο νερό στο πρυμναίο μέρος του πλοίου, όπως στις εξωλέμβιες.

Το σύστημα μπορεί να φέρει μία ή δύο έλικες και έχει τη δυνατότητα να στρέφεται σχεδόν κατά 360 μοίρες κατά την αζιμουθιακή διεύθυνση (από όπου προέρχεται και το όνομά του), δηλαδή στο οριζόντιο επίπεδο, αυξάνοντας σε μεγάλο βαθμό τις δυνατότητες ελιγμών του πλοίου, ενώ αφενός πρακτικά εκμηδενίζεται το αξονικό σύστημα και αφετέρου δεν υφίσταται μηχανισμός πηδαλίου. Στις εικόνες 2-5 παρουσιάζονται ενδεικτικά συστήματα μερικών εταιρειών.

3.9 Υβριδικό / ηλεκτρικό σύστημα πρόωσης

Για τη μελέτη, σχεδίαση και κατασκευή ή μετασκευή ενός σύγχρονου συστήματος υβριδικής ηλεκτροπρόωσης θα πρέπει να ακολουθούνται συγκεκριμένα στάδια και να καθορίζονται:

1. Το είδος των κινητήριων μηχανών, και συγκεκριμένα αν είναι:
 - Πετρελαιοκινητήρες, αεριοστρόβιλοι (για πιο αθόρυβη λειτουργία).
 - Ατμοστρόβιλοι (κυρίως για πυρηνοκίνητα σκάφη).
 - Συσσωρευτές ή/και ηλεκτροχημικές κυψέλες καυσίμου (fuel-cells) (για υποβρύχια).
2. Τα χαρακτηριστικά του ηλεκτρικού δικτύου, και συγκεκριμένα:
 - Το είδος του δικτύου (DC, AC).
 - Η τιμή της ηλεκτρικής τάσης παραγωγής και διανομής της ηλεκτρικής ισχύος.
3. Ο αριθμός και το είδος των γεννητριών.
4. Η παράλληλη ή μη λειτουργία των γεννητριών.
5. Το ποσοστό αυτοματισμού σε:
 - Λειτουργία.
 - Φόρτωση.
 - Παραλληλισμό.

- Κράτηση των γεννητριών.
6. Ο αριθμός και το είδος των κινητήρων προώσεως. Τα λειτουργικά χαρακτηριστικά που εξετάζονται είναι:
- Η μέγιστη ισχύς.
 - Ο όγκος και το βάρος ανά μονάδα ισχύος.
 - Ο μέσος χρόνος μεταξύ επισκευών και βλαβών.
 - Ο βαθμός της απόδοσης.
7. Το είδος ελέγχου-χειρισμού των κινητήρων προώσεως.
8. Οι ελάχιστες απαιτήσεις σε καταστάσεις ανάγκης.
9. Ο τρόπος έδρασης των μηχανημάτων και ο φυσικός διαχωρισμός τους, όπως για παράδειγμα:
- Των πινάκων ηλεκτρικού δικτύου προώσεως και των πινάκων ηλεκτρικού δικτύου χρήσεως.
 - Των κινητήρων προώσεως και των ηλεκτρονικών διατάξεων οδήγησής τους.
10. Η τοποθέτηση των γεννητριών, που πρέπει να γίνεται κατά τέτοιο τρόπο, ώστε να μην παραβιάζονται οι θεμελιώδεις κανόνες που σχετίζονται με:
- Την ευστάθεια του πλοίου.
 - Την ισοκατανομή των φορτίων στο πλοίο.
 - Την ακουστική υπογραφή
 - Την ευκολία επισκευής.

3.10 Ορολογία ηλεκτροπρόωσης πλοίων

Παρακάτω παραθέτουμε τους σημαντικότερους όρους, με μια στοιχειώδη επεξήγηση για κάθε έναν από αυτούς, μια και είναι επιβεβλημένη η αναζήτηση πηγών στη διεθνή βιβλιογραφία.

Πλήρης ηλεκτροπρόωση (Full Electric Propulsion [FEP]): Το πλοίο κινείται αποκλειστικώς με ηλεκτροκινητήρες. Τα ζεύγη κινητηρίων μηχανών –

ηλεκτρογεννητριών που τροφοδοτούν τους ηλεκτροκινητήρες προώσεως δεν τροφοδοτούν άλλα φορτία. Η ηλεκτρική ισχύς που απαιτείται για άλλα φορτία παράγεται από άλλες γεννήτριες.

Ολοκληρωμένη πλήρης ηλεκτροπρόωση (Integrated Full Electric Propulsion [IFEP]): Τα ίδια ζεύγη κινητηρίων μηχανών – γεννητριών τροφοδοτούν και τους ηλεκτρικούς κινητήρες πρόωσης και τα υπόλοιπα ηλεκτρικά φορτία.

Πλήρως εξηλεκτρισμένο πλοίο (All Electric Ship [AES]): Ένα πλοίο στο οποίο υπάρχει ολοκληρωμένη πλήρης ηλεκτροπρόωση αλλά γίνεται και ευρεία χρήση ηλεκτρικής ενέργειας σε πολλά συστήματα.

Ηλεκτρικό δίκτυο προώσεως (Propulsion Network): Το ανεξάρτητο ή ενσωματωμένο τμήμα του ηλεκτρικού δικτύου πλοίου που τροφοδοτεί τα ηλεκτρικά φορτία που σχετίζονται με την πρόωση.

Ηλεκτρικό δίκτυο χρήσεως (Ship Service System): Το υπόλοιπο ηλεκτρικό δίκτυο του πλοίου, εκτός του δικτύου προώσεως.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΣΥΓΧΡΟΝΟΙ ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ ΜΕ ΜΟΝΙΜΟΥΣ ΜΑΓΝΗΤΕΣ (PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTORS)

Τα τελευταία χρόνια είναι σε ερευνητικό επίπεδο η χρησιμοποίηση ηλεκτρικών κινητήρων με υπεραγώγιμα υλικά ως κινητήρων πρόωσης (Η.Π.Α.), οι οποίοι κινητήρες, λόγω του ότι το υπεραγώγιμο υλικό παρουσιάζει μηδενική ηλεκτρική αντίσταση σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες, έχουν πολύ μεγάλη ισχύ ανά μονάδα όγκου σε σύγκριση με τους συμβατικούς κινητήρες. Κατ' επέκταση θεωρούνται ιδανικοί για την πρόωση πολεμικών πλοίων, όπου ο χώρος είναι περιορισμένος και υπάρχουν αυξημένες ανάγκες ισχύος.

4.1 Τεχνολογία ηλεκτροπροωθούμενης – υβριδικής πρόωσης

Η πλειονότητα των κινητήρων αυτών είναι σύγχρονοι και έχουν βαθμό απόδοσης 96 – 98%, υψηλότερο κατά 3 – 4% από το βαθμό απόδοσης κινητήρων επαγωγής. Η ονομαστική τάση λειτουργίας στις εγκαταστάσεις μέσης και μεγάλης ισχύος είναι 3,3 – 6,6 kV.

Στους σύγχρονους κινητήρες έρχεται να προστεθεί μία νέα κατηγορία, αυτή των σύγχρονων κινητήρων με μόνιμους μαγνήτες, των οποίων η απόδοση – σύμφωνα με τους κατασκευαστές– υπερβαίνει το 98%.

Σε αυτές τις σύγχρονες μηχανές, το τυλίγμα διεγέρσεως του δρομέα (που διαρρέεται από συνεχές ρεύμα) έχει αντικατασταθεί από μόνιμους μαγνήτες. Το αποτέλεσμα είναι το ίδιο, καθώς και στις δύο περιπτώσεις παράγεται ένα ηλεκτρομαγνητικό πεδίο σταθερής τιμής που στρέφεται στο χώρο με την ταχύτητα του δρομέα.

Το προφανές πλεονέκτημα των μηχανών αυτών είναι ότι δεν έχουν ανάγκη παροχής σε συνεχές ρεύμα, ενώ με τον τρόπο αυτό αυξάνεται και η συνολική απόδοση, καθώς μεταξύ των άλλων μειώνονται και οι συνολικές απώλειες Joule στα τυλίγματα.

Η ιδέα της χρήσης μονίμων μαγνητών είναι παλιά αλλά η τεχνολογική πρόοδος τα τελευταία χρόνια είναι που κατέστησε δυνατή την κατασκευή κραμάτων «μονίμων μαγνητών» (από κράματα σαμαρίου – κοβαλτίου [SmCo] και νεοβιδίου – σιδήρου – βορείου [NdFeB]), τα οποία κράματα έχουν τη δυνατότητα να διατηρούν σταθερή τη μαγνήτισή τους για αρκετά υψηλές θερμοκρασίες, όπως είναι αυτές που αναπτύσσονται στο εσωτερικό μίας στρεφόμενης μηχανής.

Οι κινητήρες αυτοί, με κατάλληλη επιλογή τυλίγματος στάτη και πόλων δρομέα, μπορούν να παράγουν ημιτονοειδές ηλεκτρομαγνητικό πεδίο συναγωνιζόμενοι έτσι μία συμβατική σύγχρονη μηχανή στα χαμηλά επίπεδα απότομων αιχμών ροπής (torque ripples) και μηχανικών δονήσεων (vibrations).

Σημειώνεται ότι η εταιρεία American Superconductor Inc. χρηματοδοτείται από το Αμερικανικό Πολεμικό Ναυτικό για να κατασκευάσει έναν κινητήρα πρόωσης ονομαστικής ισχύος 25MW.

4.2 Είδη σύγχρονου κινητήρα μόνιμου μαγνήτη

4.2.1 Κινητήρες αξονικής ροής

Πρόκειται για κινητήρες στους οποίους η ωφέλιμη μαγνητική ροή είναι κατά την ακτινική διεύθυνση όπως στις συμβατικές ηλεκτρικές μηχανές, με παραδείγματα τον κινητήρα Permasyn της εταιρείας Siemens με μόνιμους μαγνήτες (εφαρμογές πρόωσης και σε υποβρύχια του ΠΝ) κι έναν άλλο τύπο ηλεκτρικού κινητήρα πρόωσης, τον εξελιγμένο επαγωγικό κινητήρα (Advanced Induction Motor-AIM) της Alstom, ο οποίος έχει επιλεγεί για την πρόωση της φρεγάτας Type 45 του Βρετανικού Πολεμικού Ναυτικού.

Ο τελευταίος προσφέρει υψηλή πυκνότητα ισχύος και ροπής σε σύγκριση με έναν συμβατικό επαγωγικό κινητήρα ίδιας ονομαστικής ισχύος, και η διαφορά με τον κοινό τριφασικό επαγωγικό κινητήρα είναι ότι προσφέρει τη δυνατότητα λειτουργίας με 5, 10 ή 15 φάσεις χρησιμοποιώντας τις

αρμονικές του μαγνητικού πεδίου με τη βοήθεια εξελιγμένων ηλεκτρονικών ισχύος, για να αυξηθεί η ισχύς του κινητήρα.

4.2.2 Πολυβάθμιοι κινητήρες εγκάρσιας ροής (transverse flux motors)

Οι κινητήρες αυτοί έχουν μόνιμους μαγνήτες στο δρομέα, προσανατολισμένους μάλιστα κατά τέτοιο τρόπο ώστε η μαγνητική ροή να ρέει μέσα στο διάκενο, σε διεύθυνση εν μέρει κατά την αξονική διεύθυνση και κυρίως κάθετη – εγκάρσια προς τον άξονα της μηχανής.

4.2.3 Πολυβάθμιοι κινητήρες αξονικής ροής (axial flux motors)

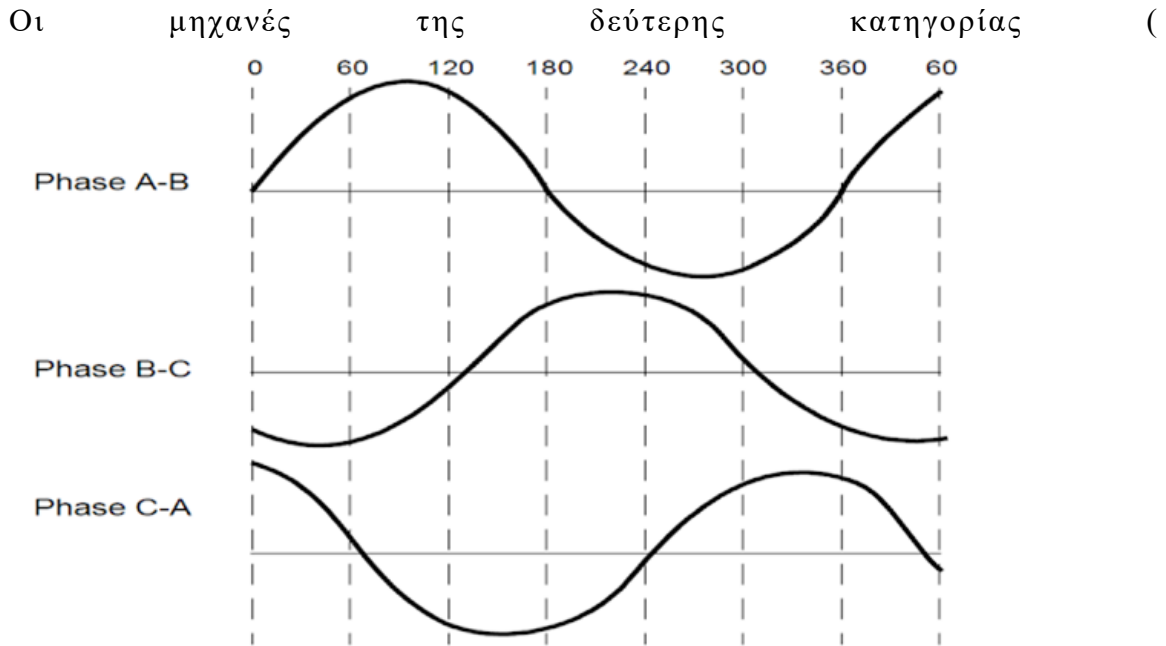
Οι κινητήρες αυτοί έχουν μόνιμους μαγνήτες στον δρομέα, προσανατολισμένους κατά τρόπο ώστε η μαγνητική ροή να ρέει σε διεύθυνση παράλληλη προς τον άξονα της μηχανής (αξονική)

4.3 Τύποι σύγχρονης μηχανής μόνιμου μαγνήτη

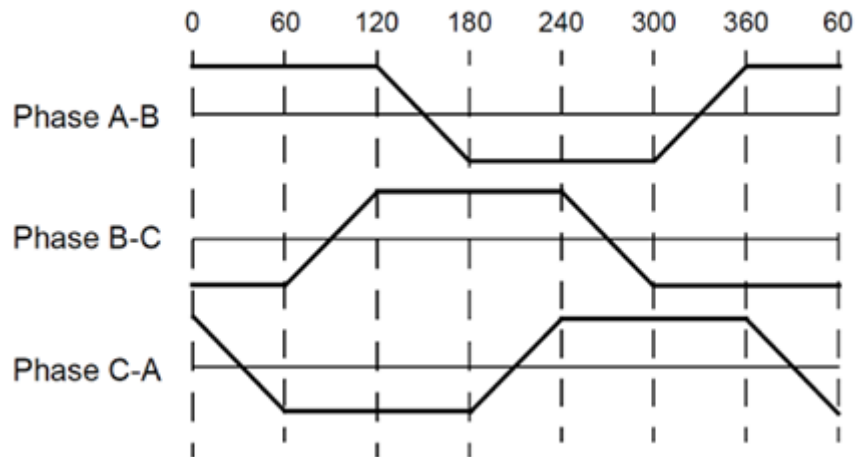
Οι σύγχρονες μηχανές μόνιμου μαγνήτη ανάλογα με την τεχνική ελέγχου και την μορφή της επαγόμενης τάσης στα τυλίγματα του στάτη, χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες:

- Μηχανές μόνιμου μαγνήτη τραπεζοειδούς ή τετραγωνικού παλμού (trapezoidal or square wave permanent magnet machines)-
- Ημιτονοειδείς σύγχρονες μηχανές μόνιμου μαγνήτη (sinusoidal permanent magnet synchronous machines)

Στις μηχανές της πρώτης κατηγορίας (Διάγραμμα 4-1), η τροφοδοσία γίνεται με τετραγωνικούς παλμούς ρεύματος διάρκειας 120 ηλεκτρικών μοιρών συγχρονισμένους με την τάση εξ επαγωγής. Οι παλμοί ρεύματος είναι συγχρονισμένοι με τη τάση εξ επαγωγής, έτσι ώστε το σταθερό τμήμα της τάσης να συμπίπτει με τα διαστήματα όπου το φασικό ρεύμα διατηρεί σταθερή τιμή. Στις μηχανές αυτής της κατηγορίας χρησιμοποιούνται αισθητήρες Hall, καθώς είναι απαραίτητη η γνώση της θέσης του δρομέα μόνο στα σημεία μετάβασης, δηλαδή κάθε 60 ηλεκτρικές μοίρες. Η οδήγηση αυτού του τύπου κινητήρων γίνεται με χρήση τριφασικού αντιστροφέα.

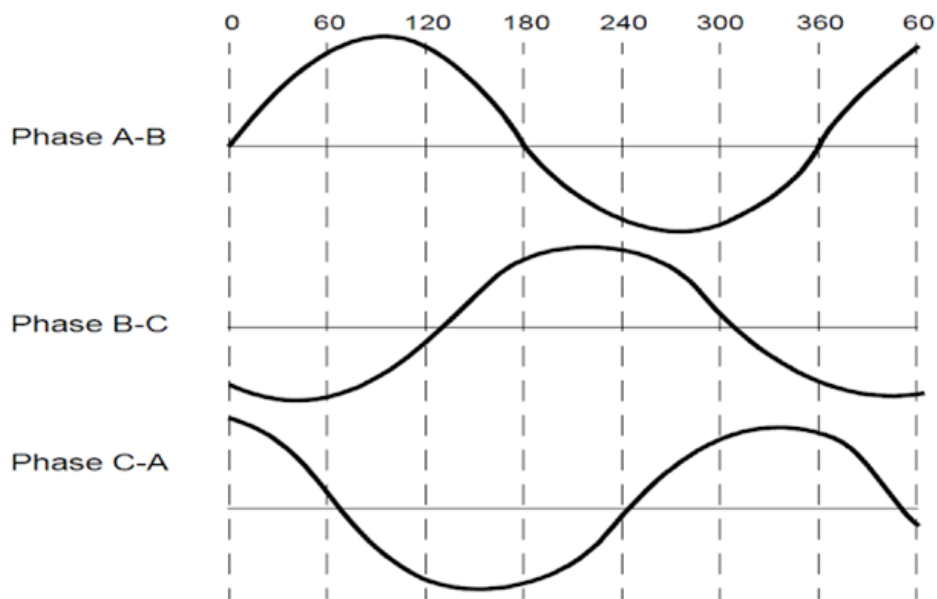


Διάγραμμα 4-2) προέκυψαν από την προσπάθεια κατασκευής μιας σύγχρονης μηχανής χωρίς το τύλιγμα διεγέρσεως. Αυτό έγινε δυνατό αντικαθιστώντας το τύλιγμα με μόνιμους μαγνήτες ημιτονοειδούς κατανομής μαγνητικού πεδίου. Οι μηχανές αυτές τροφοδοτούνται με τριφασική ημιτονοειδή τάση και λειτουργούν υπό την αρχή του στρεφόμενου μαγνητικού πεδίου. Σε λειτουργία σταθερών στροφών δεν απαιτείται γνώση της ακριβούς θέσης του, καθώς η μηχανή περιστρέφεται με τον σύγχρονο αριθμό στροφών. Όταν όμως έχουμε μεταβολή της συχνότητας περιστροφής, απαιτείται ακριβής εποπτεία της θέσης του δρομέα, ώστε οι τάσεις τροφοδοσίας που θα παραχθούν να συγχρονίζονται με την τάση εξ επαγωγής και κατ' επέκταση με την περιστροφή του δρομέα. Η οδήγηση αυτού του τύπου κινητήρων γίνεται συνήθως με τριφασικό αντιστροφέα.



Διάγραμμα 4-1

Τάση εξ επαγωγής τραπεζοειδούς μορφής



Διάγραμμα 4-2

Τάση εξ επαγωγής ημιτονοειδούς μορφής

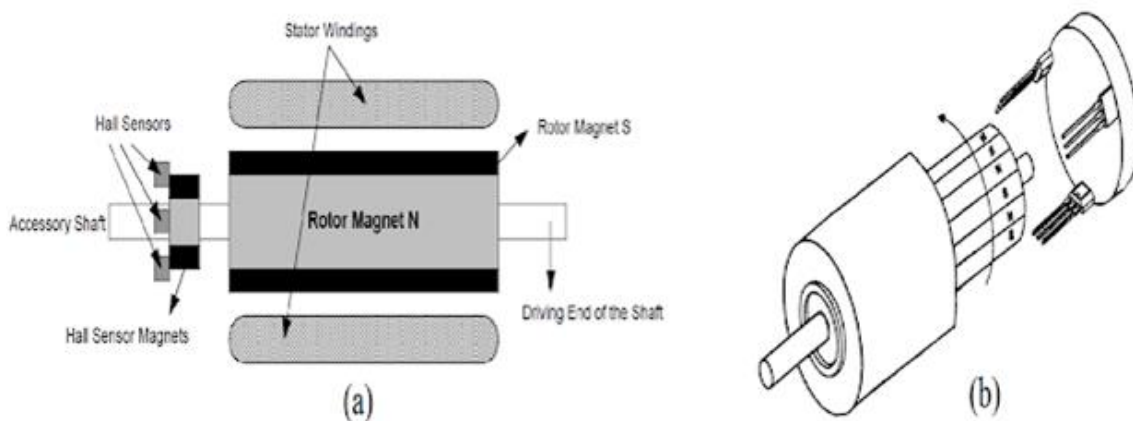
4.4 Αισθητήρες Hall-Φαινόμενο Hall

Όταν ένας ρευματοφόρος αγωγός βρίσκεται μέσα σε ένα μαγνητικό πεδίο, τότε η επαγωγή B ασκεί εγκάρσια δύναμη στους φορείς ρεύματος και τους ωθεί στη μια πλευρά του αγωγού. Το παρακάτω φαινόμενο είναι γνωστό ως φαινόμενο Hall

Ο αισθητήρας Hall είναι ένας αισθητήρας μαγνητικού πεδίου. Όταν εφαρμόζεται σε αυτόν μαγνητικό πεδίο έντασης B και τροφοδοτείται από συνεχές ρεύμα, αναπτύσσει τάση στους ακροδέκτες του.

Αντίθετα από έναν κινητήρα συνεχούς ρεύματος με ψήκτρες, η μετάβαση σε έναν κινητήρα χωρίς ψύκτρες ελέγχεται ηλεκτρονικά. Για να περιστραφεί ο δρομέας του κινητήρα, τα τυλίγματα του στάτη πρέπει να τροφοδοτηθούν με μια συγκεκριμένη ακολουθία, καθώς με αυτό τον τρόπο αποφασίζεται ποιο τύλιγμα θα τροφοδοτηθεί, ώστε να δημιουργηθεί στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο στο εσωτερικό της μηχανής. Προκειμένου να επιτευχθεί αυτό, είναι απαραίτητο να γνωρίζουμε την ακριβή θέση του δρομέα ανά πάσα στιγμή. Αυτό γίνεται δυνατό με την τοποθέτηση τριών αισθητήρων Hall. Οι αισθητήρες συνήθως τοποθετούνται στο στάτη της μηχανής σε διαστήματα των 60 ή 120 μοιρών. Όταν ένας μαγνητικός πόλος περάσει δίπλα από τον αισθητήρα Hall δημιουργεί ένα υψηλό ή χαμηλό σήμα, ανάλογα με την πολικότητα του. Με την ανάγνωση και αποκωδικοποίηση του συνδυασμού των τριών σημάτων των αισθητήρων Hall, καθίσταται δυνατή η επιλογή της κατάλληλης ακολουθίας για την ηλεκτρονική μετάβαση.

Σε σπάνιες περιπτώσεις, οι αισθητήρες Hall τοποθετούνται στο σταθερό τμήμα της μηχανής, ενώ τοποθετούνται επιπρόσθετοι μαγνήτες μικρότερης κλίμακας στον δρομέα. Οι μαγνήτες αυτοί τοποθετούνται με σκοπό να έχουν ίδια πολικότητα με τους μόνιμους μαγνήτες του δρομέα, έτσι ώστε, όταν αυτός περιστρέφεται, οι αισθητήρες hall να δίνουν το κατάλληλο αποτέλεσμα.



Σχήμα 4-1 Αισθητήρες Hall (α) στο ακίνητο μέρος του άξονα του δρομέα, (β) στον στάτη του κινητήρα

4.5 Ηλεκτρονική μεταγωγή – Οδήγηση του κινητήρα χωρίς ψύκτρες

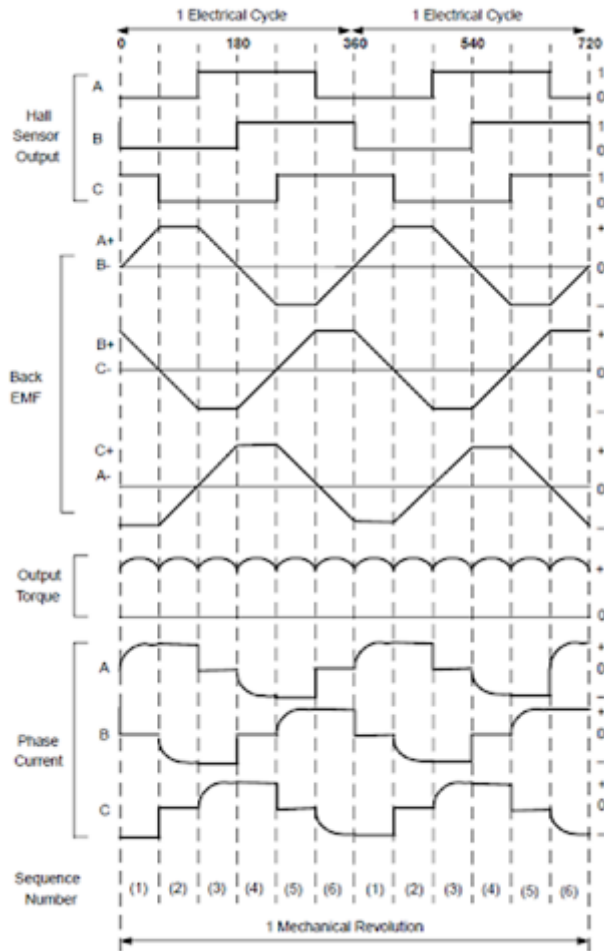
Σε κάθε μετάβαση της τροφοδοσίας του στάτη απαιτείται να υπάρχει ένα τύλιγμα, από το οποίο εισέρχεται το ρεύμα, και ένα τύλιγμα, από το οποίο εξέρχεται. Κάθε τύλιγμα άγει συνεχόμενα για 120 ηλεκτρικές μοίρες.

Η ηλεκτρομαγνητική ροπή που εμφανίζεται στον άξονα της μηχανής παράγεται μέσω της αλληλεπίδρασης των πεδίων του στάτη και του δρομέα. Η ροπή αυτή μεγιστοποιείται, όταν τα διανύσματα των πεδίων αυτών είναι κάθετα μεταξύ τους και μειώνεται όσο αυτά τείνουν να γίνουν παράλληλα. Προκειμένου να διατηρείται αυτή η καθετότητα καθ' όλη τη διάρκεια της περιστροφής του δρομέα, το μαγνητικό πεδίο του στάτη πρέπει να περιστρέφεται μαζί με τον δρομέα. Για αυτό το λόγο υπάρχει μια συγκεκριμένη ακολουθία μεταβάσεων, ώστε το πεδίο του στάτη να μετακινείται στο διάκενο ανάλογα με την ηλεκτρική γωνία που έχει διανύσει ο δρομέας. Οι μεταβάσεις λαμβάνουν χώρα κάθε 60 ηλεκτρικές μοίρες και κάθε τύλιγμα άγει συνεχόμενα για 120 ηλεκτρικές μοίρες, στο πέρας των οποίων πραγματοποιείται μετάβαση του ρεύματος από την μία φάση στην επόμενη.

Αυτό επαναλαμβάνεται έξι φορές προκειμένου να ολοκληρωθεί ένας ηλεκτρικός κύκλος. Κάθε αλλαγή της τιμής ενός εκ των σημάτων Hall

πρέπει να μεταφράζεται σε αλλαγή των φάσεων αγωγής από τον τριφασικό αντιστροφέα, με τρόπο που να διατηρείται η ορθή διαδοχή διέγερσης. Όσο αφορά την μηχανική περιστροφή του δρομέα, ο αριθμός των ζευγών πόλων του κινητήρα καθορίζει πόσες φορές μεγαλύτερη είναι η ηλεκτρική γωνία/ταχύτητα από τη μηχανική. Για την υλοποίηση του ελέγχου απαιτείται η γνώση της θέσης του δρομέα σε διακριτές θέσεις 60 μοιρών. Όπως βλέπουμε στο παράδειγμα του Διάγραμμα 4-3 κάθε 60 ηλεκτρικές μοίρες περιστροφής, ένας από τους αισθητήρες Hall δίνει σήμα

Η ακριβής σχέση μεταξύ ηλεκτρικής γωνίας και σημάτων Hall του προηγούμενου παραδείγματος αποτυπώνεται στο Διάγραμμα 4-3. Επίσης, παρουσιάζονται οι κυματομορφές των πολικών τάσεων εξ επαγωγής, του ρεύματος κάθε φάσης και της ροπής.



Διάγραμμα 4-3Κυματομορφές μεγεθών λειτουργίας κινητήρα BLDC

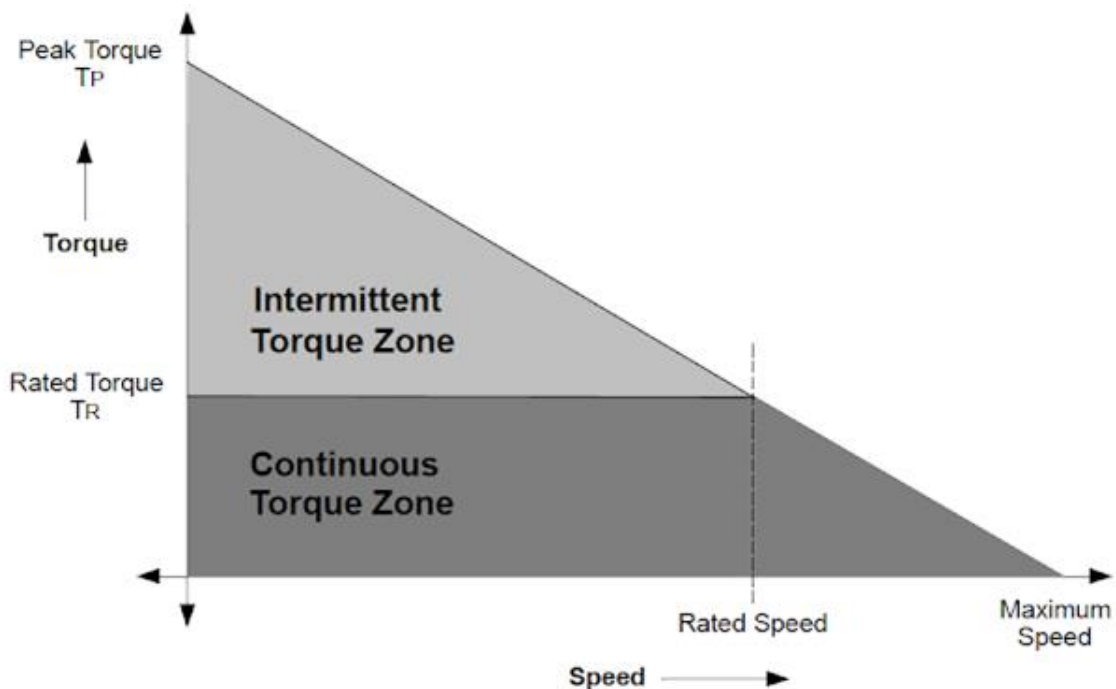
4.6 Χαρακτηριστική ροπής-στροφών

Υπάρχουν δύο βασικές παράμετροι που καθορίζουν την ικανότητα παραγωγής ροπής ενός κινητήρα BLDC: η ροπή ονομαστικού φορτίου T_R και η μέγιστη ροπή φορτίου T_P .

Σε εφαρμογές σταθερού φορτίου η μηχανή μπορεί να παράγει συνεχόμενη ροπή με μέγιστη τιμή την ονομαστική ροπή T_R . Αν το φορτίο ξεπεράσει την τιμή, προκειμένου να καλύψει την ροπή φορτίου ο κινητήρας θα αναπτύξει στα τυλίγματα του τιμές ρεύματος μεγαλύτερες της ονομαστικής, προκαλώντας σε αυτά υπερθέρμανση και πιθανώς βλάβες. Η παραγόμενη ροπή παραμένει σταθερή, όσο η ταχύτητα παραμένει μικρότερη της ονομαστικής. Η μηχανή μπορεί να φτάσει την μέγιστη ταχύτητα

περιστροφής (περίπου 150% της ονομαστικής), αλλά αυτό θα επιφέρει μείωση της παραγόμενης ροπής.

Σε εφαρμογές όπου υπάρχουν συχνές εκκινήσεις και παύσεις στη λειτουργία της μηχανής με προσθήκη φορτίου, η μηχανή μπορεί να καλείται να αναπτύξει τιμές ηλεκτρομαγνητικής ροπής μεγαλύτερες από την ονομαστική. Αυτή η απαίτηση διαρκεί για μικρό χρονικό διάστημα, και συμβαίνει ιδίως κατά την εκκίνηση και επιτάχυνση του κινητήρα. Η επιπλέον αυτή ροπή χρειάζεται ώστε να ξεπεραστεί η αδράνεια του φορτίου και του ίδιου του δρομέα και δεν μπορεί με τίποτα να ξεπεράσει την τιμή TP. Γενικά, η ροπή φορτίου μπορεί να ξεπεράσει την ονομαστική τιμή, υπό την προϋπόθεση όμως ότι θα είναι για μικρό σχετικά χρονικό διάστημα και η τιμή της θα είναι μικρότερη από τη τιμή TP.



Σχήμα 4-2 Χαρακτηριστική ροπής – στροφών ενός κινητήρα BLDC

4.7 Σύγκριση σύγχρονου κινητήρα μόνιμου μαγνήτη με άλλους τύπους μηχανών

Στις μέρες μας, η ραγδαία εξέλιξη της τεχνολογίας, ευνοεί την αντικατάσταση σε πολλές εφαρμογές των κλασικών κινητήρων συνεχούς ρεύματος και των ασύγχρονων επαγωγικών κινητήρων με μηχανές νέας τεχνολογίας. Χαρακτηριστικό παράδειγμα, του νέου αυτού τύπου μηχανών, είναι και η σύγχρονη μηχανή μόνιμου μαγνήτη. Η ευκολία στον έλεγχο, η απουσία ψηκτρών και των προβλημάτων που αυτές δημιουργούν, ο μεγάλος βαθμός απόδοσης, καθώς και η υψηλή πυκνότητα ισχύος, την έχουν καταστήσει μια ελκυστική εναλλακτική για μεγάλο πλήθος εφαρμογών.

Στους παρακάτω δύο Πίνακες ακολουθεί μια σύντομη παρουσίαση των χαρακτηριστικών του κινητήρα BLDC σε σχέση με άλλα είδη κινητήρων.

Πίνακας 4-1 Σύγκριση μεταξύ μιας BLDC μηχανής με μία επαγωγική μηχανή

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΟ	ΚΙΝΗΤΗΡΑΣ ΤΥΠΟΥ BLDC	ΕΝΑΛΛΑΞΣΟΜΕΝΟΣ ΕΠΑΓΩΓΙΚΟΣ ΚΙΝΗΤΗΡΑΣ
Χαρακτηριστική Ροπής/Ταχύτητας	Επίπεδη- Επιτρέπει τη λειτουργία σε όλες τις ταχύτητες με ονομαστικό φορτίο.	Μη γραμμική- Χαμηλότερη ροπή σε χαμηλότερες ταχύτητες.
Ισχύς Εξόδου/Μέγεθος	Υψηλή- Αφού οι μαγνήτες είναι στο δρομέα μπορεί να επιτευχθεί μικρότερο μέγεθος για δεδομένη ισχύ εξόδου.	Μέτρια- Αφού και ο δρομέας και ο στάτης έχουν τυλίγματα ο λόγος ισχύος εξόδου/μέγεθος είναι μικρότερος από αυτόν του κινητήρα BLDC
Αδράνεια Δρομέα	Χαμηλή λόγω των μόνιμων μαγνητών του δρομέα. Αυξημένη δυναμική απόκριση.	Υψηλή- Περιορισμένα δυναμικά χαρακτηριστικά.
Ρεύμα εκκίνησης	Ονομαστικό- Δεν απαιτείται ξεχωριστό κύκλωμα για την εκκίνηση.	Περίπου 7 φορές του ονομαστικού. Η διαβάθμιση του κυκλώματος του εκκινήτη επιλέγεται προσεκτικά. Συνήθως χρησιμοποιείται εκκινήτης αστέρα-τριγώνου.
Απαιτήσεις Ελέγχου	Απαιτείται πάντα ελεγκτής για την περιστροφή του κινητήρα. Ο ίδιος ελεγκτής χρησιμοποιείται και για έλεγχο ταχύτητας.	Δεν χρειάζεται ελεγκτής για καθορισμένη ταχύτητα. Χρειάζεται μόνο όταν είναι απαιτείται μεταβαλλόμενη ταχύτητα.
Ολίσθηση	Δεν παρατηρείται ολίσθηση μεταξύ των συχνοτήτων του δρομέα και του στάτη.	Η συχνότητα περιστροφής του δρομέα είναι μικρότερη από τη συχνότητα του πεδίου του στάτη λόγω ολίσθησης η οποία αυξάνεται με φορτίο στον κινητήρα.

Πίνακας 4-2 Σύγκριση μεταξύ μιας BLDC μηχανής με μία μηχανή Σ.Ρ. με ψήκτρες

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΟ	ΚΙΝΗΤΗΡΑΣ ΤΥΠΟΥ BLDC	ΚΙΝΗΤΗΡΑΣ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΜΕ ΨΗΚΤΡΕΣ
Μετάβαση	Ηλεκτρονική οδήγηση βασισμένη σε αισθητήρες Hall	Οδήγηση με ψήκτρες
Συντήρηση	Λιγότερη απαιτούμενη λόγω απουσίας ψηκτρών	Απαραίτητη ανά τακτές χρονικές περιόδους
Διάρκεια Ζωής	Μεγαλύτερη	Μικρότερη
Χαρακτηριστική Ροπής/Ταχύτητας	Επίπεδη- Επιτρέπει τη λειτουργία σε όλες τις ταχύτητες με ονομαστικό φορτίο	Μετρίως επίπεδη- Σε υψηλότερες ταχύτητες η θραύση των ψηκτρών αυξάνεται μειώνοντας τη ροπή.
Αποδοτικότητα	Υψηλή-Μηδενική πτώση τάσης στις ψήκτρες	Περιορισμένη
Ισχύς Εξόδου/Μέγεθος	Υψηλή- Μειωμένο μέγεθος λόγω καλύτερων θερμικών χαρακτηριστικών. Ο κινητήρας τύπου BLDC έχει τα τυλίγματα στο στάτη που είναι συνδεδεμένοι με το περίβλημα και η απαγωγή θερμότητας είναι καλύτερη.	Μέτρια/Χαμηλή- Η θερμότητα που παράγεται στα τυλίγματα διαχέεται στο διάκενο και έτσι αυξάνεται η θερμοκρασία του διακένου μειώνοντας τις προδιαγραφές ισχύος/μέγεθος.
Αδράνεια Δρομέα	Χαμηλή λόγω των μόνιμων μαγνητών του δρομέα. Αυξημένη δυναμική απόκριση.	Υψηλή αδράνεια δρομέα που μειώνει τα δυναμικά χαρακτηριστικά.
Εύρος Ταχυτήτων	Υψηλό- Κανέναν μηχανικός περιορισμός από ψήκτρες/συλλέκτη	Χαμηλό- Μηχανικοί περιορισμοί από ψήκτρες.
Ηλεκτρικός Θόρυβος	Χαμηλός.	Οι ψήκτρες δημιουργούν ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές (EMI) που προκαλούν θόρυβο.
Κόστος Κατασκευής	Υψηλό- Το κόστος των μόνιμων μαγνητών είναι υψηλότερο.	Χαμηλό
Έλεγχος	Περίπλοκος και ακριβός.	Απλός και οικονομικός.
Απαιτήσεις Ελέγχου	Απαιτείται πάντα ελεγκτής για την περιστροφή του κινητήρα. Ο ίδιος ελεγκτής χρησιμοποιείται και για έλεγχο ταχύτητας.	Δεν χρειάζεται ελεγκτής για καθορισμένη ταχύτητα. Χρειάζεται μόνο όταν είναι απαιτείται μεταβαλλόμενη ταχύτητα.

4.8 Σύγκριση κινητήρα μόνιμου μαγνήτη με κινητήρα βραχυκυκλωμένου δρομέα που ελέγχεται από inverter

Είναι γνωστό ότι οι ηλεκτροκινητήρες καταναλώνουν το 65% της ενέργειας που χρησιμοποιείται στη βιομηχανία, αλλά είναι λιγότερο γνωστό το γεγονός ότι το 96% του κόστους διάρκειας ζωής (lifetime cost) ενός ηλεκτροκινητήρα συνδέεται με την κατανάλωση ενέργειας. Αυτό δείχνει τη σημασία της συνολικής απόδοσης σε σχέση με το αρχικό κόστος αγοράς, σύμφωνα με τους όρους σπουδαιότητας του συνολικού κόστους ιδιοκτησίας (TCO-Total Cost of Ownership).

Οι σύγχρονοι κινητήρες μόνιμου μαγνήτη (PMSM-Permanent Magnet Synchronous Motors) πληρούν τις απαιτήσεις της ταξινόμησης IE4 (Super Premium). Αυτό αποδεικνύεται από τις δυνατότητές τους για εξοικονόμηση ενέργειας έως και 40% σε σύγκριση με έναν κινητήρα βραχυκυκλωμένου δρομέα κατηγορίας IE2 που ελέγχεται από inverter. Οι κινητήρες PMSM έχουν καλύτερη απόδοση σε σύγκριση με τους επαγωγικούς κινητήρες σε συνθήκες λειτουργίας μερικού φορτίου και εξαιρετικά υψηλή απόδοση σε ονομαστικές συνθήκες λειτουργίας. Έχουν, επίσης, σημαντικά υψηλότερη πυκνότητα ισχύος η οποία (για κινητήρες με κιβώτιο ταχυτήτων) εξασφαλίζει υψηλότερη απόδοση με μειωμένες ανάγκες σε χώρο και όγκο για την εγκατάσταση.

Ο σύγχρονος σχεδιασμός των PMSM τους καθιστά ανώτερους όχι μόνο σε ότι αφορά τη μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας σε μηχανική ισχύ, αλλά και στη δυνατότητα διατήρησης σταθερής ταχύτητας, ανεξάρτητα από το φορτίο. Αυτό σημαίνει ότι η ταχύτητα του κινητήρα δεν αλλάζει σε τυχόν μεταβολές του φορτίου ή σε ενδεχόμενο πτώσης τάσεως (τουλάχιστον για όσο διάστημα η συχνότητα του δικτύου παραμένει σταθερή). Αυτός ο σχεδιασμός, μειώνει τις απώλειες θερμότητας από τον ρότορα κατά 100%, τις συνολικές απώλειες κατά περίπου 25% και αυξάνει την συνολική απόδοση κατά 10% ή και περισσότερο. Για τον πελάτη που εγκαθιστά έναν κινητήρα PMSM, αυτό μεταφράζεται σε χαμηλότερο συνολικό κόστος ιδιοκτησίας, μείωση των εκπομπών CO₂, και διαρκή εξοικονόμηση ενέργειας. Το χαμηλό κόστος λειτουργίας και συντήρησης των PMSMs τους καθιστά ιδανικούς για εφαρμογές όπως ανεμιστήρες, αντλίες και αεροσυμπιεστές, καθώς και για εφαρμογές φορτίου σταθερής ροπής όπως είναι οι ανελκυστήρες και οι μεταφορικές ταινίες.

Σημειώνεται ότι από τον Ιανουάριο του 2015 και μετά, οι κινητήρες με ονομαστική ισχύ από 7,5 έως 375 kW (και από τον Ιανουάριο του 2017 και μετά κινητήρες με ονομαστική ισχύ από 0,75 έως 375 kW) θα πρέπει να ικανοποιούν τις απαιτήσεις της κατηγορία ενεργειακής αποδοτικότητας IE3 (Premium). Αντίθετα, κινητήρες που ελέγχονται από μετατροπείς

συχνότητας εξαιρούνται από αυτόν τον κανονισμό, και θα πρέπει να πληρούν το πρότυπο IΕ2.

Η βελτιωμένη τεχνολογία και αποδοτικότητα ενός κινητήρα PMSM συνεπάγεται ένα υψηλότερο αρχικό κόστος αγοράς. Το κόστος αυτό, όμως, ανακτάται αργότερα κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του κινητήρα.

Στη συνέχεια, δίνεται μια σύγκριση, όπου ένας ασύγχρονος κινητήρας (ASM-Asynchronous Motor) που ελέγχεται από μετατροπέα συχνότητας και ένας κινητήρας μόνιμου μαγνήτη εκτελούν πανομοιότυπα καθήκοντα. Η σύγκριση έγινε σε ένα εργοστάσιο επεξεργασίας αποβλήτων στη Γερμανία. Και τα δύο μοτέρ τροφοδοτούν έναν παχυντικό δίσκο για επτά ώρες κάθε μέρα. Προκειμένου να εξασφαλιστεί ότι ο ασύγχρονος κινητήρας λειτουργεί υπό βέλτιστη αποδοτικότητα, χρησιμοποιήθηκε ένας μετατροπέας συχνότητας για την παρακολούθηση των φορτίων του κινητήρα. Τέλος, προκειμένου να είναι βέβαιο ότι ενδεχόμενες διαφορές στην απόδοση θα αποδοθούν μόνο στους κινητήρες, τα δύο συστήματα κίνησης χρησιμοποιούν το ίδιο ακριβώς κιβώτιο ταχυτήτων. Τα αποτελέσματα της σύγκρισης, φαίνονται στον παρακάτω πίνακα

Πίνακας 4-3 Συγκριτικός πίνακας επιδόσεων μεταξύ ASM και PMSM

Τύπος κινητήρα	Ροπή (Nm)	Ταχύτητα (RPM)	% απόδοση ενέργειας	Κατανάλωση (kW/hr)	Τετραετής κατανάλωση(kW)
ASM: Ασύγχρονος Κινητήρας	2,62	1350	61,5	0,26	2657
PMSM : Σύγχρονος κινητήρας Μόνιμης Μαγνήτισης	3,50	1500	87,7	0,16	1635

Η δοκιμή έδειξε ότι ο κινητήρας PMSM εξοικονόμησε 40% ενέργεια σε σχέση με τον ASM, η οποία για μια περίοδο τεσσάρων ετών μεταφράζεται σε 1022 kW/hr. Δεδομένου ότι πιθανότατα η τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας θα αυξηθεί μέσα σε αυτό το διάστημα, θα αυξηθεί και η πραγματική αξία της εξοικονόμησης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΟΔΗΓΗΣΗΣ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ

5.1 Βασικές τοπολογίες μετατροπέων DC-AC

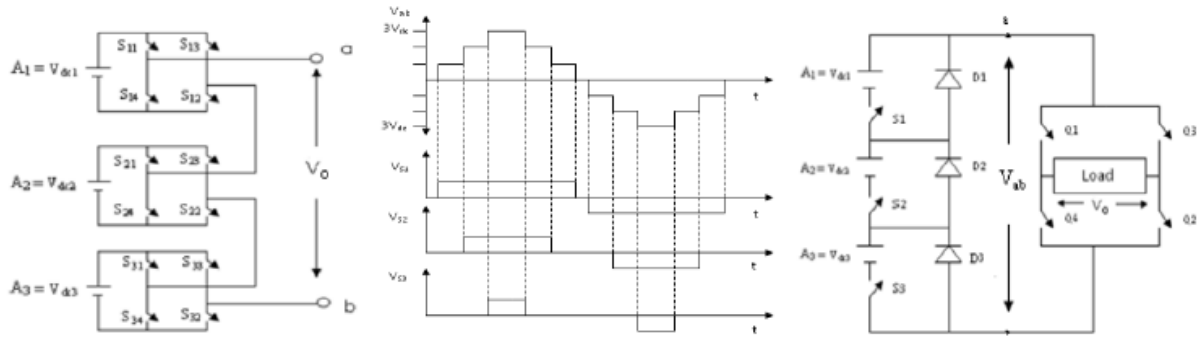
5.1.1 Εισαγωγή και βασικές έννοιες

Η ιδανική λειτουργία για έναν αντιστροφέα είναι η μετατροπή μιας σταθερής DC τάσης σε AC τάση αμιγώς ημιτονοειδούς μορφής. Πρακτικά, το ζητούμενο είναι η προσέγγιση της ημιτονοειδούς μορφής (καλύτερη προσέγγιση απαιτεί αύξηση κόστους και γενικά είναι περισσότερο αναγκαία όσο η ισχύς ανεβαίνει). Για χαμηλές ισχύεις μπορεί να γίνει δεκτή ακόμα και τετραγωνική AC τάση εξόδου.

5.1.2 Πολυεπίπεδοι αντιστροφείς

Οι πολυεπίπεδοι αντιστροφείς είναι ουσιαστικά περισσότεροι του ενός αντιστροφείς κατάλληλα συνδεδεμένοι ώστε να προσφέρουν περισσότερα επίπεδα στην τάση εξόδου. Έτσι αν π.χ. χρησιμοποιηθούν τρεις αντιστροφείς τότε θα μπορούν να προσφέρουν τέσσερα επίπεδα στην τάση εξόδου (δηλαδή 3 θετικές και 3 αρνητικές στάθμες τάσης καθώς και την μηδενική) όπως φαίνεται στο **Σχήμα 5-1**. Όσον αφορά τις πηγές εισόδου αυτές μπορεί να είναι διαφορετικές ή να χρησιμοποιηθούν πυκνωτές για να ισομοιραστεί η τάση από μία πηγή.

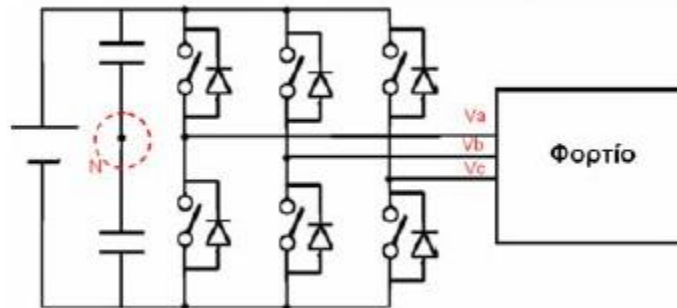
Διαφορετικές παραλλαγές στον σχεδιασμό επίσης μπορεί να εφαρμοσθούν (**Σχήμα 5-1**). Η προσθήκη περισσότερων σταθμών στην τάση εξόδου σημαίνει ότι μπορεί να επιτευχθεί (με κατάλληλο έλεγχο των διακοπών) μια κυματομορφή εξόδου που να προσεγγίζει καλύτερα την ημιτονοειδή μορφή.



Σχήμα 5-1 Ένας αντιστροφέας τριών επιπέδων, οι σχετικές κυματομορφές και μια παραλλαγή στον σχεδιασμό. Και στις δύο περιπτώσεις ισχύει $A_1=A_2=A_3$.

5.1.3 Τριφασικοί αντιστροφεείς

Όσον αφορά τους τριφασικούς αντιστροφεείς, η προφανής προσέγγιση είναι τρεις μονοφασικοί αντιστροφεείς (ημιγέφυρας ή γέφυρας) που συνδέονται στην ίδια είσοδο για να δώσουν τις 3 διαφορετικές φάσεις. Η συνηθέστερη σύνδεση είναι σε συνδεσμολογία γέφυρας (**Σχήμα 5-2**).



Σχήμα 5-2 Τριφασικός αντιστροφέας σε συνδεσμολογία γέφυρας

5.1.4 Διαμόρφωση παλμών

Η διαμόρφωση παλμών γίνεται για να επιτευχθεί αφενός έλεγχος της τάσης και αφετέρου καλύτερη προσέγγιση της αμιγώς ημιτονοειδούς μορφής και άρα μείωση των αρμονικών.

Οι βασικές κατηγορίες τεχνικών διαμόρφωσης παλμών είναι:

- (1) μονοπαλμική διαμόρφωση εύρους παλμού (single PWM)
- (2) πολυπαλμική διαμόρφωση εύρους παλμού (multiple PWM)

(3) ημιτονοειδής διαμόρφωση εύρους παλμού (SPWM)

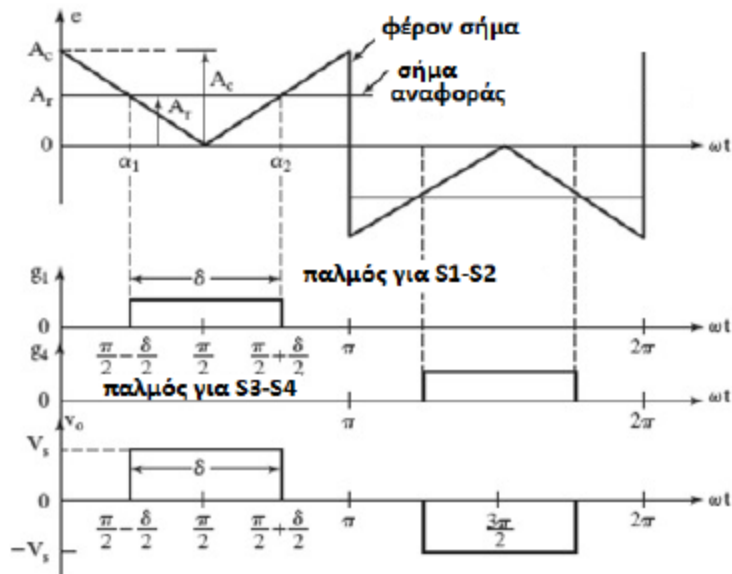
(4) τροποποιημένη ημιτονοειδής διαμόρφωση εύρους παλμού (modified SPWM ή MSPWM)

(5) προηγμένες τεχνικές διαμόρφωσης

Η βασική λογική είναι η εξής: χρησιμοποιείται ένα σήμα αναφοράς A_r (reference) (ορθογώνιο ή ημιτονοειδές) και ένα φέρον σήμα A_c (carrier) (τριγωνικό). Ορίζεται προφανώς η συχνότητα f_r του σήματος αναφοράς και η συχνότητα f_c του φέροντος σήματος. Τα δύο σήματα συγκρίνονται και ανάλογα με το αποτέλεσμα παράγεται ή δεν παράγεται παλμός. Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι είναι δυνατόν να υπάρχουν διαφορετικές λογικές παραγωγής παλμού ακόμα και για τον ίδιο τύπο διαμόρφωσης.

5.1.4.1 Μονοπαλμική PWM

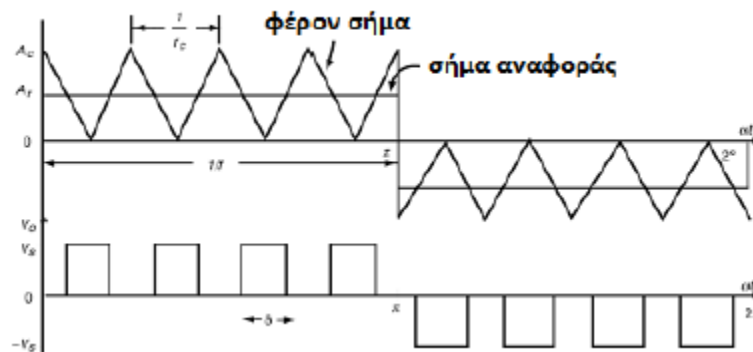
Με τον όρο μονοπαλμική PWM περιγράφεται η τεχνική με την οποία παράγεται μόνο ένας παλμός ανά περίοδο για κάθε διακόπτη και ένα παράδειγμα παρατίθεται στο Σχήμα 5-3. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα παλμός για τα S1-S2 (συνδεσμολογία πλήρους γέφυρας) παράγεται όταν (και για όσο) το σήμα αναφοράς είναι μεγαλύτερο από το θετικό φέρον σήμα, ενώ παλμός για τα S3-S4 παράγεται όταν (και για όσο) το σήμα αναφοράς είναι μικρότερο από το αρνητικό φέρον σήμα.



Σχήμα 5-3 Μονοπαλμική PWM διαμόρφωση

5.1.4.2 Πολυπαλμική PWM

Στην πολυπαλμική PWM παράγονται περισσότεροι από ένας παλμοί ανά περίοδο για κάθε διακόπτη και ένα παράδειγμα φαίνεται στο **Σχήμα 5-4**. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα παλμός για τα S1-S2 (συνδεσμολογία πλήρους γέφυρας) παράγεται όταν (και για όσο) το σήμα αναφοράς είναι μεγαλύτερο από το θετικό φέρον σήμα, ενώ παλμός για τα S3-S4 παράγεται όταν (και για όσο) το σήμα αναφοράς είναι μικρότερο από το αρνητικό φέρον σήμα, με αποτέλεσμα την κυματομορφή AC τάσεως εξόδου που φαίνεται στο **Σχήμα 5-4**.

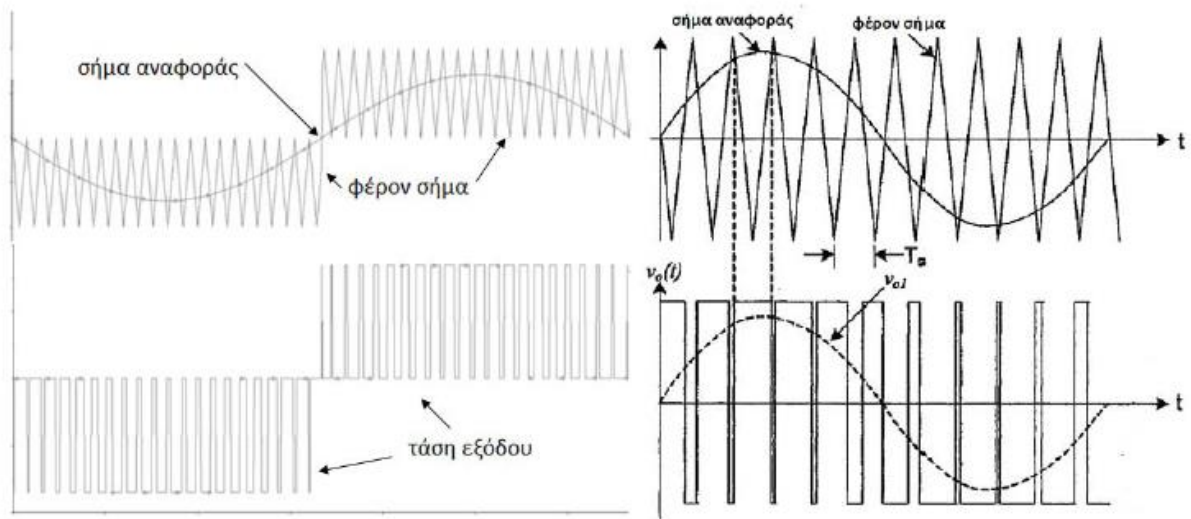


Σχήμα 5-4 Πολυπαλμική PWM διαμόρφωση

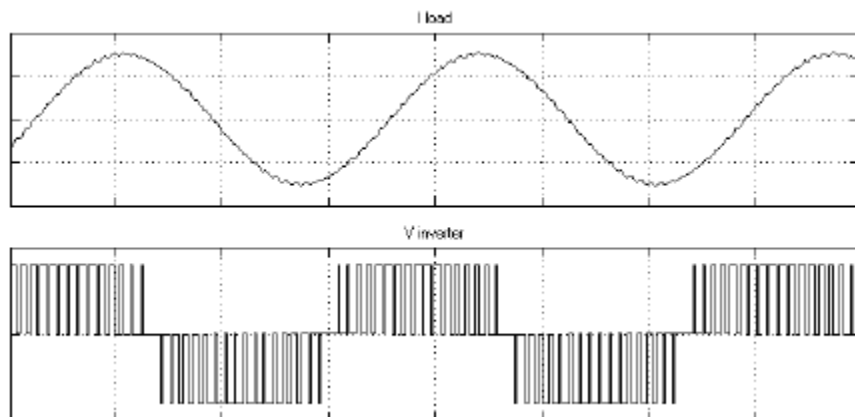
5.1.4.3 Ημιτονοειδής PWM (SPWM)

Στην ημιτονοειδή PWM αντί να έχουν όλοι οι παλμοί το ίδιο εύρος (όπως στην μονοπαλμική και στην πολυπαλμική), το εύρος κάθε παλμού μεταβάλλεται ανάλογα με το πλάτος ενός ημιτονοειδούς σήματος. Το σήμα αναφοράς είναι ένα ημίτονο της ίδιας συχνότητας με την επιθυμητή συχνότητα εξόδου. Η συχνότητα f_r του σήματος αναφοράς καθορίζει την συχνότητα εξόδου και το πλάτος του καθορίζει την RMS τιμή της τάσης εξόδου. Οι αρμονικές ωθούνται προς υψηλές συχνότητες (γύρω από την συχνότητα του φέροντος).

Δύο παραδείγματα SPWM τεχνικής φαίνονται στο **Σχήμα 5-5**. Στο πρώτο η λογική ομοιάζει με αυτές που αναλύθηκαν στο προηγούμενο: παλμός για τα S1-S2 (συνδεσμολογία πλήρους γέφυρας) παράγεται όταν (και για όσο) το σήμα αναφοράς είναι μεγαλύτερο από το θετικό φέρον σήμα, ενώ παλμός για τα S3-S4 παράγεται όταν (και για όσο) το σήμα αναφοράς είναι μικρότερο από το αρνητικό φέρον σήμα. Στο δεύτερο παράδειγμα παλμός για τα S1-S2 παράγεται όταν (και για όσο) το σήμα αναφοράς είναι μεγαλύτερο από το φέρον σήμα, ενώ παλμός για τα S3-S4 παράγεται όταν (και για όσο) το σήμα αναφοράς είναι μικρότερο από το φέρον σήμα. Η προσέγγιση με την ημιτονοειδή μορφή θα γίνει πιο προφανής αν προστεθεί ένα κατάλληλο φίλτρο εξομάλυνσης (π.χ. L-C). Το ρεύμα στο φορτίο τότε θα προσεγγίσει αρκετά την ημιτονοειδή μορφή όπως φαίνεται στο **Σχήμα 5-6**. Να σημειωθεί ότι μπορούν να ακολουθηθούν και άλλες λογικές στην SPWM τεχνική π.χ. μπορεί να χρησιμοποιηθεί σήμα αναφοράς διπλής κατεύθυνσης.



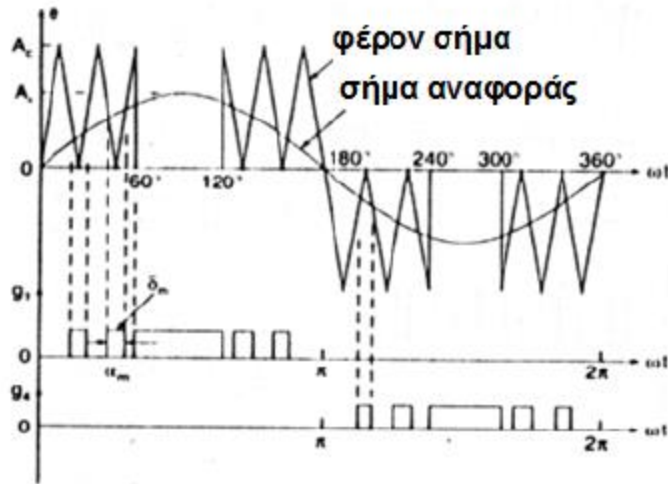
Σχήμα 5-5 Δύο παραδείγματα SPWM διαμόρφωσης



Σχήμα 5-6 Παράδειγμα τάσης και ρεύματος εξόδου με SPWM τεχνική και φίλτρο εξόδου

5.1.4.4 Τροποποιημένη SPWM (MSPWM)

Με τον όρο «τροποποιημένη SPWM» εννοείται μια ημιτονοειδής διαμόρφωση η οποία όμως εφαρμόζεται μόνο στις πρώτες και στις τελευταίες 60° κάθε ημιπεριόδου όπως φαίνεται στο **Σχήμα 5-7**.



Σχήμα 5-7 Παράδειγμα MSPWM

5.1.5 Προηγμένες τεχνικές διαμόρφωσης

Στην κατηγορία αυτή ανήκουν τεχνικές όπως η τραπεζοειδής όπου το σήμα αναφοράς είναι τραπέζιο, η κλιμακωτή όπου το σήμα αναφοράς είναι ένα κλιμακωτό κύμα, η βηματική όπου το σήμα αναφοράς αποτελείται από βηματικά μέρη, η έγχυση αρμονικών όπου το σήμα αναφοράς παράγεται με έγχυση συγκεκριμένων αρμονικών και η διαμόρφωση δέλτα όπου ένα τριγωνικό σήμα ταλαντώνεται εντός ορισμένου παραθύρου, γύρω από το ημιτονοειδές σήμα αναφοράς.

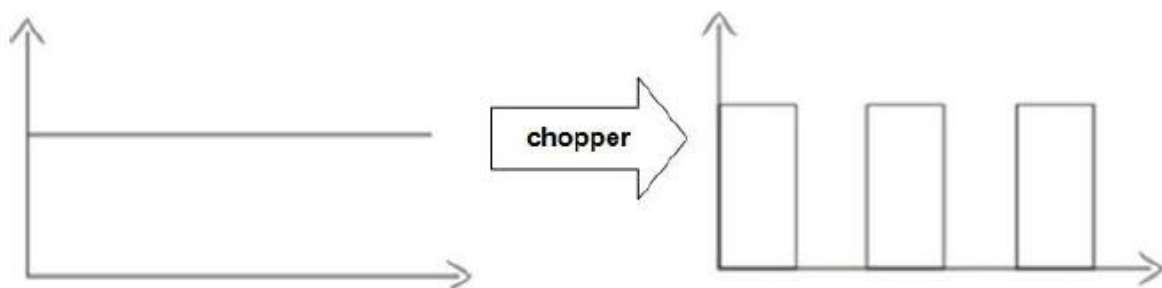
5.2 Βασικές Τοπολογίες Μετατροπών DC-DC

Οι DC-DC μετατροπείς ονομάζονται και κατατμητές (ή ψαλιδιστές) («choppers»). Πρόκειται κατά βάση για κυκλώματα που χρησιμοποιούν ηλεκτρονικούς διακόπτες μεγάλης διακοπτικής συχνότητας ώστε να αποκόπτουν ή όχι μια DC τάση εισόδου από το φορτίο, παράγοντας έτσι μια DC τάση εξόδου με διαφορετική μέση τιμή. Η απλουστευμένη γενική αρχή λειτουργίας απεικονίζεται στο **Σχήμα 5-8**. Με χρήση κατάλληλων στοιχείων και κυκλωματικών διατάξεων (αξιοποιώντας τις δυνατότητες αποθήκευσης ενέργειας παθητικών στοιχείων) είναι δυνατόν να παραχθούν και τάσης εξόδου με μεγαλύτερη μέση τιμή από αυτήν της εισόδου. Συνεπώς

οι DC-DC μετατροπείς μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον υποβιβασμό και την ανύψωση μιας DC τάσης.

Έτσι ανάλογα με την λειτουργία του μετατροπέα αυτός μπορεί να είναι υποβιβασμού (buck), ανύψωσης (boost) ή υποβιβασμού-ανύψωσης (buck-boost). Άλλες ονομασίες χρησιμοποιούνται για να δηλώσουν συγκεκριμένες τοπολογίες/ιδιότητες (Flyback, Forward, Push-pull, Half bridge, Full bridge, Cuk, SEPIC κλπ).

Οι DC-DC μετατροπείς έχουν ευρύ πεδίο εφαρμογών που περιλαμβάνει τα παλμοτροφοδοτικά, τα συστήματα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, τα συστήματα αντιστάθμισης, τα συστήματα ελέγχου ταχύτητας DC μηχανών κ.α.



Σχήμα 5-8 Η απλουστευμένη γενική αρχή λειτουργίας των κατατμητών

5.2.1 Βασικές έννοιες, κυκλωματική παράσταση και βασικές στρατηγικές

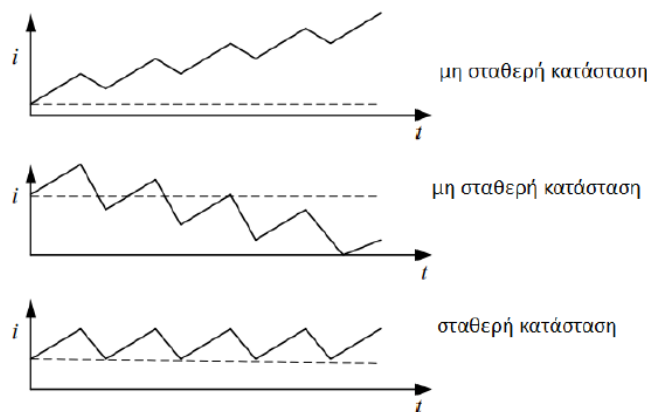
Για κάθε DC-DC μετατροπέα (ή διακόπτη) ορίζεται ο χρόνος αγωγής (ton) και ο χρόνος μη αγωγής (toff). Το άθροισμά τους αποτελεί την περίοδο κατάτμησης ή διακοπτική περίοδο η οποία συμβολίζεται συνήθως με T ή με Tsw (το «sw» από το «switch» (διακόπτης) συχνά προστίθεται στα μεγέθη που αφορούν τον διακόπτη). Αντίστοιχα ορίζεται η συχνότητα κατάτμησης ή διακοπτική συχνότητα f (ή fsw) και ισχύει $f=1/T$. Το πηλίκο $D=ton/T$ ονομάζεται κύκλος λειτουργίας ή βαθμός χρησιμοποίησης («duty cycle») και αποτελεί ένα μέγεθος με ιδιαίτερη σημασία. Σημειώνεται ότι η διακοπτική συχνότητα επιλέγεται αρκετά υψηλή ώστε να μην διαταράσσει την λειτουργία του φορτίου.

Κατάλληλα φίλτρα (π.χ. L-C διατάξεις) χρησιμοποιούνται ώστε το ρεύμα στο φορτίο να διατηρείται σταθερό (στην πραγματικότητα συνήθως παρατηρείται κάποια κυμάτωση). Για την λειτουργία των κυκλωμάτων τέτοιων μετατροπέων συχνά απαιτούνται παθητικά στοιχεία (πηνία) για την αποθήκευση ενέργειας. Σε αυτή την περίπτωση ενδιαφέρει και η μορφή του ρεύματος σε αυτά (στο πηνίο).

Οι παράγοντες αξιολόγησης των DC-DC μετατροπέων είναι:

- (1) η κυμάτωση του ρεύματος στο πηνίο
- (2) η μέγιστη διακοπτική συχνότητα
- (3) η συνθήκη για συνεχές ρεύμα στο πηνίο
- (4) η κυμάτωση/παραμόρφωση της τάσεως και του ρεύματος εξόδου (THD)
- (5) η κυμάτωση/παραμόρφωση του ρεύματος εισόδου (THD)

Σημειώνεται ότι κατά τον σχεδιασμό και την ανάλυσή τέτοιων κυκλωμάτων θεωρείται ότι το τέλος κάθε περιόδου βρίσκει το κύκλωμα (από πλευράς ρεύματος) στην ίδια κατάσταση με την αρχή της περιόδου (λειτουργίας σταθερής κατάστασης) (**Σχήμα 5-9**).



Σχήμα 5-9 Σταθερή και μη σταθερή κατάσταση για DC DC μετατροπείς

Όσον αφορά την κυκλωματική τους παράσταση, ανάλογα με τις απαιτήσεις της εφαρμογής, μπορούν να χρησιμοποιηθούν διαφορετικά στοιχεία για την

υλοποίηση των διακοπών ενός DC-DC μετατροπέα. Έτσι συνηθίζεται για την θεωρητική ανάλυση τέτοιων κυκλωμάτων να χρησιμοποιείται απλά το γενικό σύμβολο του διακόπτη αντί για τα επιμέρους σύμβολα (IGBT, MOSFET κλπ).

Όσον αφορά την λειτουργία τους υπάρχουν δύο βασικές στρατηγικές:

(1) η λειτουργία σταθερής συχνότητας κατά την οποία η διακοπτική συχνότητα παραμένει σταθερή αλλά μεταβάλλονται τα t_{on} και t_{off} . Ουσιαστικά έτσι μεταβάλλεται το εύρος του παλμού (δηλαδή η διάρκεια του) και για αυτό η συγκεκριμένη στρατηγική ονομάζεται Διαμόρφωση Εύρους Παλμών (Pulse Width Modulation ή PWM)

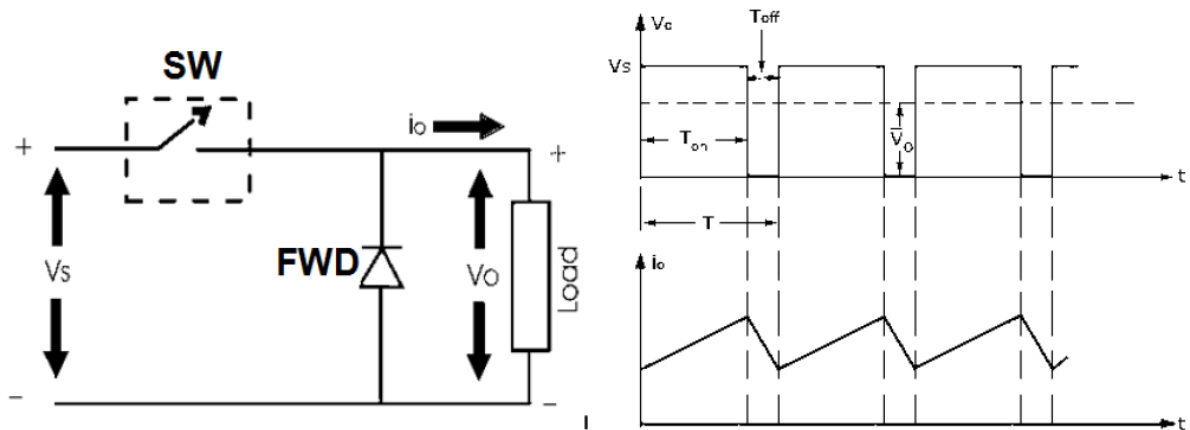
(2) η λειτουργία μεταβλητής συχνότητας όπου η διακοπτική συχνότητα είναι μεταβαλλόμενη αλλά διατηρείται σταθερός είτε ο t_{on} είτε ο t_{off} . Η στρατηγική αυτή ονομάζεται Διαμόρφωση Συχνότητας (Frequency Modulation).

Στην πλειονότητα των εφαρμογών χρησιμοποιείται η PWM τεχνική και διάφορες παραλλαγές της.

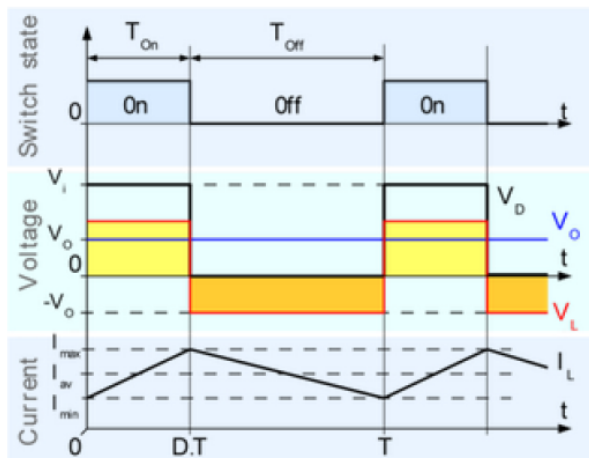
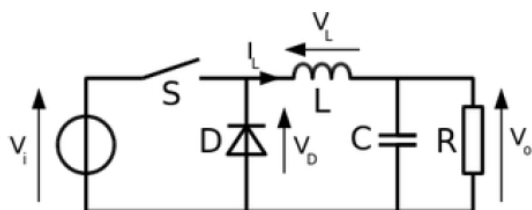
5.2.2 DC-DC μετατροπέας υποβιβασμού (buck converter)

Αν θεωρήσουμε ότι έχουμε το απλό κύκλωμα ενός διακόπτη που αποκόπτει ή όχι μια πηγή τάσης από ένα ωμικό φορτίο, τότε η λειτουργία θα είναι αυτή του **Σχήμα 5-8**. Στην περίπτωση όμως που το φορτίο έχει επαγωγικό χαρακτήρα, τότε το πηνίο θα αποθηκεύσει ενέργεια και όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, ο διακόπτης θα δεχτεί υπέρταση κατά το άνοιγμά του. Για να αποφευχθεί η καταπόνηση ή και η καταστροφή του διακόπτη, προστίθεται μία διάοδος ελεύθερης διέλευσης όπως φαίνεται στο **Σχήμα 5-10**. Αντί να συνδέεται παράλληλα στο φορτίο, σε άλλα κυκλώματα είναι δυνατόν να σχεδιασθεί συνδεδεμένη παράλληλα σε κάθε διακόπτη. Αν τώρα υποθέσουμε ότι έχουμε σταθερή λειτουργία τότε οι κυματομορφές της τάσεως και του ρεύματος εξόδου θα είναι αυτές που φαίνονται στο **Σχήμα 5-10**

Αν συνδεθεί κατάλληλο φίλτρο για την εξομάλυνση της εξόδου τότε είναι δυνατόν να προκύψει σταθερό ρεύμα στο φορτίο. Το Σχήμα 5-11 δείχνει ένα τέτοιο παράδειγμα. Σε μια τέτοια περίπτωση η ανάλυση επικεντρώνεται στο ρεύμα στο πηνίο όπως φαίνεται στο Σχήμα 5-11. Το ρεύμα στο πηνίο μπορεί να είναι συνεχές ή όχι. Στην περίπτωση ασυνεχούς ρεύματος, η ανάλυση είναι γενικά πιο σύνθετη. Δεδομένου ότι συνήθως αυτή είναι μια μη επιθυμητή κατάσταση, η ανάλυση των κυκλωμάτων που θα ακολουθήσει θα επικεντρωθεί στην περίπτωση που το ρεύμα στο πηνίο είναι συνεχές. Επίσης δεν θα γίνει αναφορά στις προϋποθέσεις που πρέπει να ισχύουν κάθε φορά ώστε το ρεύμα στο πηνίο να είναι συνεχές. Στην περίπτωση που το ρεύμα στο πηνίο είναι συνεχές, τότε αποδεικνύεται ότι ισχύει: $V_o = D \cdot V_i$, με $D < 1$, και συνεπώς ο έλεγχος του χρόνου που ο διακόπτης άγει σε κάθε περίοδο (με άλλα λόγια, ο έλεγχος του εύρους του παλμού), προσφέρει και έλεγχο της τάσης εξόδου.



Σχήμα 5-10 Βασικό κύκλωμα του buck μετατροπέα και κυματομορφές



Σχήμα 5-11 Buck μετατροπέας με φίλτρο εξόδου και κυματομορφές

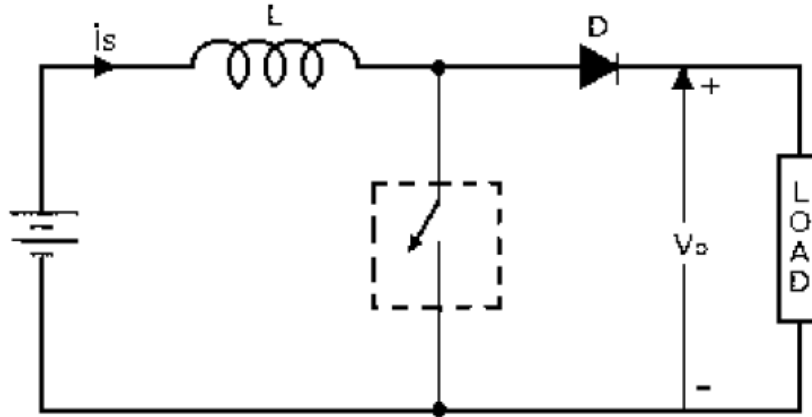
5.2.3 DC-DC μετατροπέας ανύψωσης (boost converter)

Για να γίνει πιο κατανοητή η λειτουργία του boost μετατροπέα θα εξεταστεί αρχικά το βασικό κύκλωμα που φαίνεται στο **Σχήμα 5-12**. Όταν ο διακόπτης είναι κλειστός, το ρεύμα τρέχει στον αριστερό βρόγχο και το πηνίο αποθηκεύει ενέργεια. Όταν ο διακόπτης ανοίξει, η ενέργεια που έχει αποθηκεύσει το πηνίο προστίθεται σε αυτήν της πηγής και διοχετεύεται μέσω της διόδου \$D\$ στο φορτίο. Συνεπώς, όταν ανοίξει ο διακόπτης το πηνίο γίνεται πηγή τάσης ίδιας πολικότητας με την πηγή εισόδου, οπότε η συνολική τάση εξόδου (στο φορτίο) προκύπτει μεγαλύτερη από αυτήν της εισόδου (πηγής). Αντίστοιχη λειτουργία με την προσθήκη φίλτρου προκύπτει και για την περίπτωση του μετατροπέα ανύψωσης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5-14.

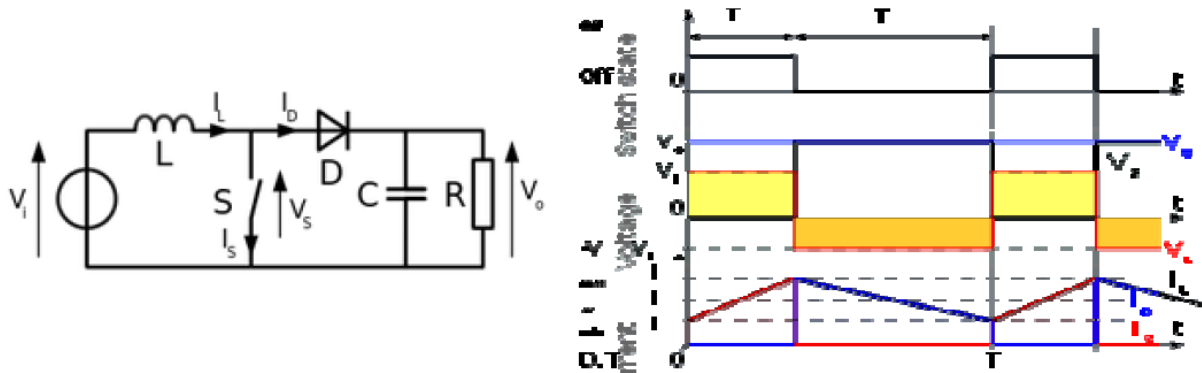
Για την περίπτωση που το ρεύμα στο πηνίο είναι συνεχές προκύπτει:

$$V_o = \frac{1}{1-D} V_i$$

και συνεπώς και σε αυτή την περίπτωση ελέγχοντας το εύρος του παλμού, είναι δυνατός ο έλεγχος της τάσης εξόδου η οποία θα προκύψει μεγαλύτερη από την εισόδο (εφόσον εξ' ορισμού $D < 1$).



Σχήμα 5-12 Βασικό κύκλωμα του boost μετατροπέα

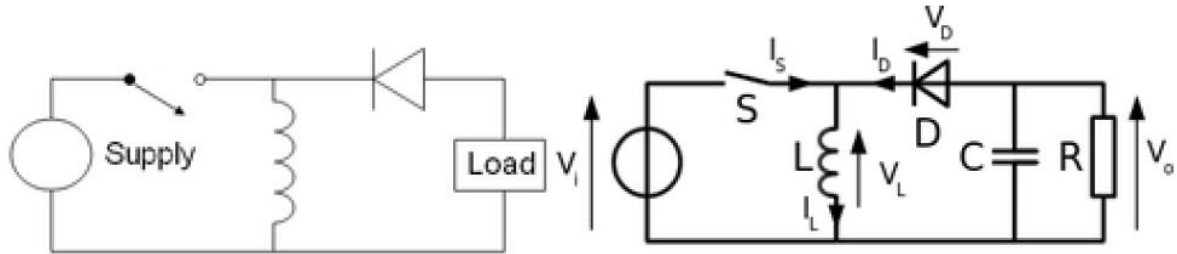


Σχήμα 5-13 Boost μετατροπέας φίλτρο εξόδου και κυματομορφές

5.2.4 DC-DC μετατροπέας υποβιβασμού-ανύψωσης (buck-boost converter)

Ο buck-boost μετατροπέας αποτελεί έναν συνδυασμό των προηγούμενων δύο (buck και boost). Το βασικό κύκλωμα και το κύκλωμα με προσθήκη φίλτρου εξόδου φαίνονται στο Σχήμα 5-14. Κατά το διάστημα που ο διακόπτης είναι κλειστός, φορτίζεται το πηνίο και αν υπάρχει πυκνωτής (που θα έχει φορτιστεί από την προηγούμενη φάση λειτουργίας) τότε αυτός εκφορτίζεται στην αντίσταση.

Κατά το διάστημα που ο διακόπτης είναι ανοικτός, το πηνίο εκφορτίζεται μέσα από την δίοδο φορτίζοντας τον πυκνωτή (αν υπάρχει) στέλνοντας ρεύμα και στην αντίσταση.



Σχήμα 5-14 Βασικό κύκλωμα buck boost μετατροπέα και κύκλωμα με φίλτρο εξόδου

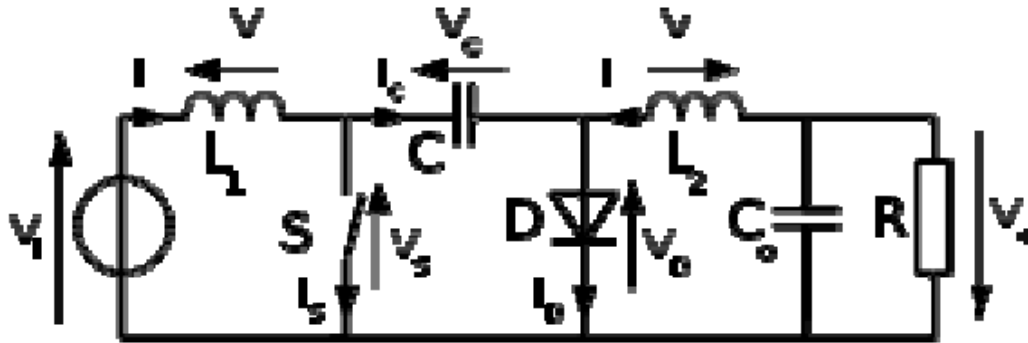
Για την περίπτωση που το ρεύμα στο πηνίο είναι συνεχές προκύπτει:

$$V_o = -\frac{D}{1-D} V_i$$

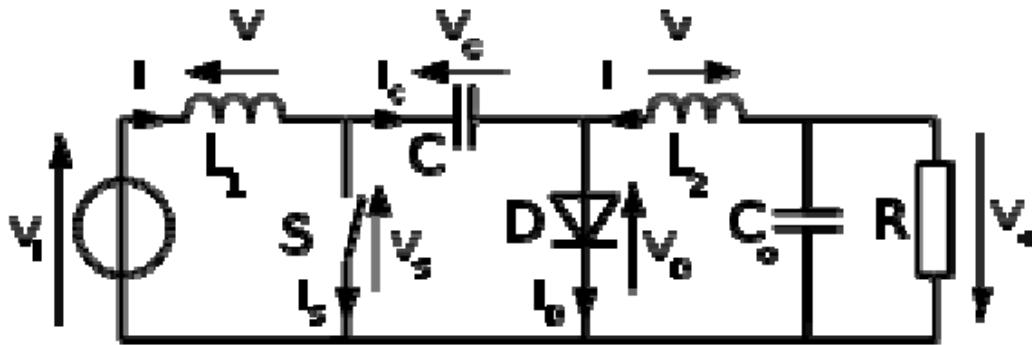
και ουσιαστικά η συνάρτηση μεταφοράς του buck-boost μετατροπέα προκύπτει ως το γινόμενο των συναρτήσεων μεταφοράς των buck και boost μετατροπέων. Πάντως και σε αυτή την περίπτωση ελέγχοντας το εύρος του παλμού, είναι δυνατός ο έλεγχος της τάσης εξόδου και μάλιστα ελέγχοντας την τιμή του D μπορεί να επιτευχθεί αύξηση (για $1 > D > 0.5$) ή υποβιβασμός (για $D < 0.5$). Σε κάθε περίπτωση θα υπάρχει όμως αναστροφή της πολικότητας της τάσης από την είσοδο στην έξοδο (για αυτό και το μείον στον παραπάνω τύπο).

5.2.5 Μετατροπέας Cuk

Μια διαφορετική τοπολογία για έναν DC-DC μετατροπέα υποβιβασμού αύξησης προτάθηκε από τον Slobodan Cuk και πήρε το όνομά του. Η προτεινόμενη τοπολογία έχει διάφορα πλεονεκτήματα σε σχέση με έναν buck-boost μετατροπέα με βασικότερο ότι επιτρέπει συνεχές ρεύμα στην είσοδο και στην έξοδό του με βέλτιστη χρήση στοιχείων (μέγιστη απόδοση για ελάχιστο αριθμό στοιχείων). Η βασική τοπολογία του μετατροπέα Cuk



Σχήμα 5-15. Η συνάρτηση μεταφοράς του μετατροπέα του είναι ίδια με αυτή ενός buck-boost μετατροπέα.



Σχήμα 5-15 Βασική τοπολογία μετατροπέα Cuk

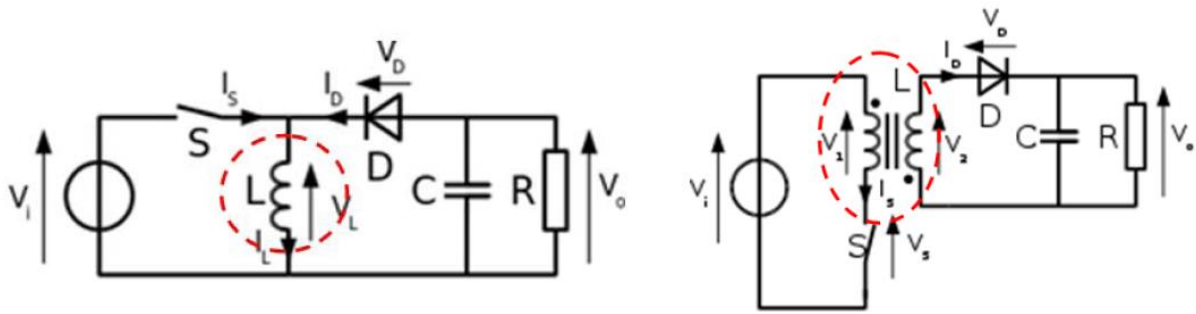
5.3 Παλμοτροφοδοτικά

Με τον όρο «παλμοτροφοδοτικά» ή «διακοπτικά τροφοδοτικά» περιγράφονται διατάξεις που περιλαμβάνουν μια διάταξη ανόρθωσης (AC-DC) και στην συνέχεια μια διάταξη DC-DC μετατροπής ώστε να παράγουν την επιθυμητή DC τάση για την τροφοδοσία συσκευών. Οι DC-DC μετατροπείς που χρησιμοποιούνται σε τέτοια τροφοδοτικά είναι παραλλαγές των προηγούμενων με διάφορες ονομασίες (Flyback, Forward, Half bridge, Full bridge, Push-pull κ.α.), επιλέγονται ανάλογα με την επιθυμητή ισχύ εξόδου και θα εξεταστούν συνοπτικά στην συνέχεια.

5.3.1 Flyback μετατροπέας

Ο Flyback μετατροπέας είναι ο απλούστερος όλων, έχει χαμηλή απόδοση και απαιτεί μεγάλο πυκνωτή εξόδου. Ουσιαστικά είναι ένας buck-boost μετατροπέας που το πηνίο του έχει αντικατασταθεί από έναν μετασχηματιστή. Η φορά περιέλιξης στα τυλίγματα αυτού του μετασχηματιστή είναι τέτοια ώστε να προκύπτει τάση εξόδου ίδιας πολικότητας με την τάση εισόδου. Η συνάρτηση μεταφοράς που προκύπτει είναι:

$$V_o = \frac{D}{1-D} \cdot \frac{N_2}{N_1} V_i$$



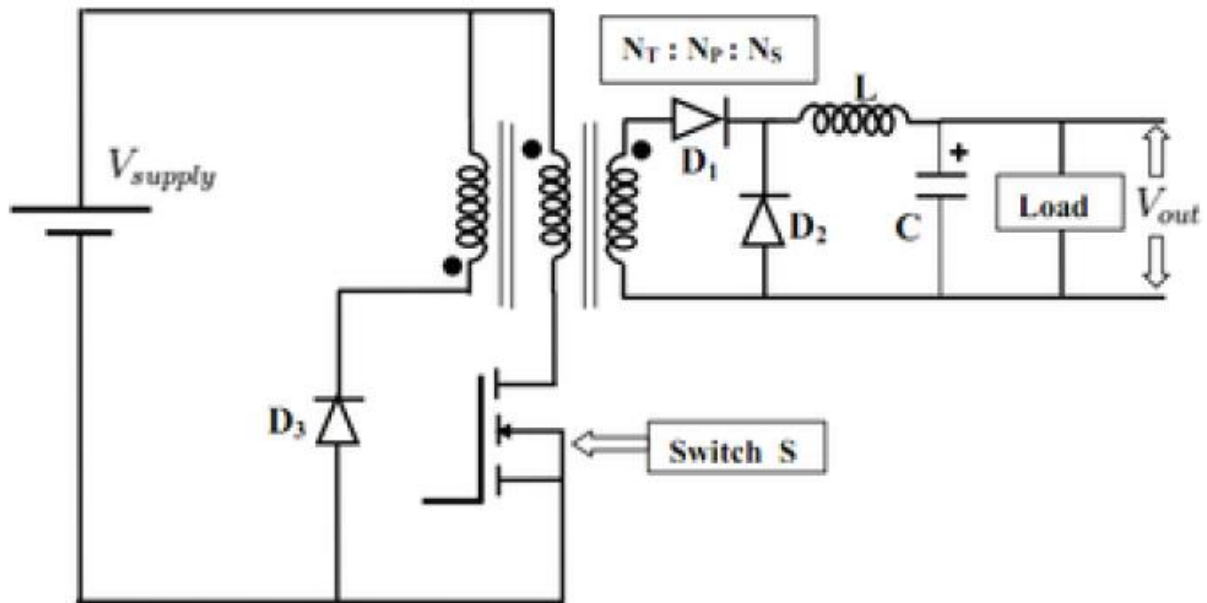
Σχήμα 5-16 Ο buck boost μετατροπέας και ο flyback μετατροπέας. Με διακεκομμένες υπογραμμίζεται η αντικατάσταση του πηνίου από έναν μετασχηματιστή.

5.3.2 Forward μετατροπέας

Το βασικό κύκλωμα για τον forward μετατροπέα φαίνεται στο Σχήμα 5-17. Όταν ο διακόπτης είναι ON η $D1$ είναι ορθά πολωμένη, ρεύμα διαρρέει το φορτίο και καταλήγει και στα L , C . Όταν ο διακόπτης είναι OFF, η πολικότητα αντιστρέφεται, η $D1$ είναι OFF, οι $D2$ και $D3$ είναι ON και ρεύμα μαγνήτισης επιστρέφει στην πηγή μέσω $D3$.

Η συνάρτηση μεταφοράς που προκύπτει για τον μετατροπέα αυτόν είναι:

$$V_o = D \cdot \frac{N_2}{N_1} V_i$$

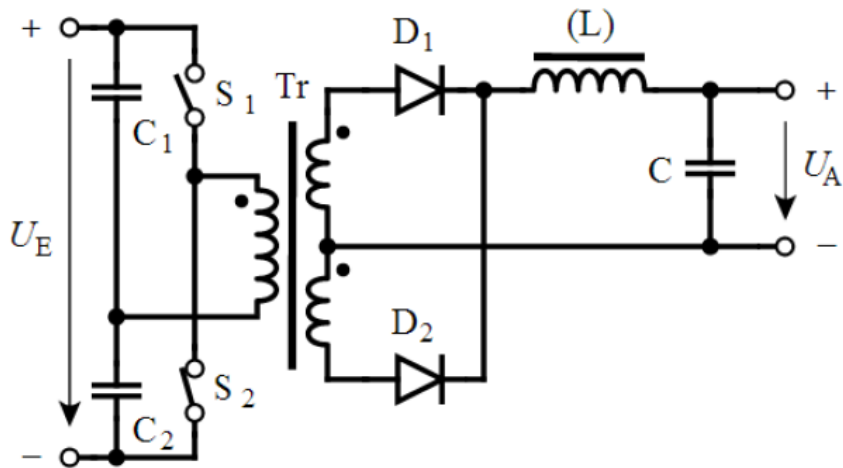


Σχήμα 5-17 Ο forward μετατροπέας

5.3.3 Μετατροπέας ημιγέφυρας (half bridge converter)

Το βασικό κύκλωμα για τον μετατροπέα ημιγέφυρας φαίνεται στο Σχήμα 4.22. Ο μετατροπέας ημιγέφυρας έχει τέσσερις φάσεις λειτουργίας (S1 ON-S2 OFF, S1-S2 OFF, S1 OFF-S2 ON, S1-S2 OFF).

Μια τετραγωνική AC στο πρωτεύον, υποβιβάζεται/ανυψώνεται από τον Μ/Σ, ανορθώνεται και φιλτράρεται. Ο μετατροπέας ημιγέφυρας έχει την ίδια συνάρτηση μεταφοράς με τον forward μετατροπέα αλλά μπορεί να αποδώσει διπλάσια ισχύ σε σχέση με τον forward για τα ίδια στοιχεία και μετασχηματιστή.



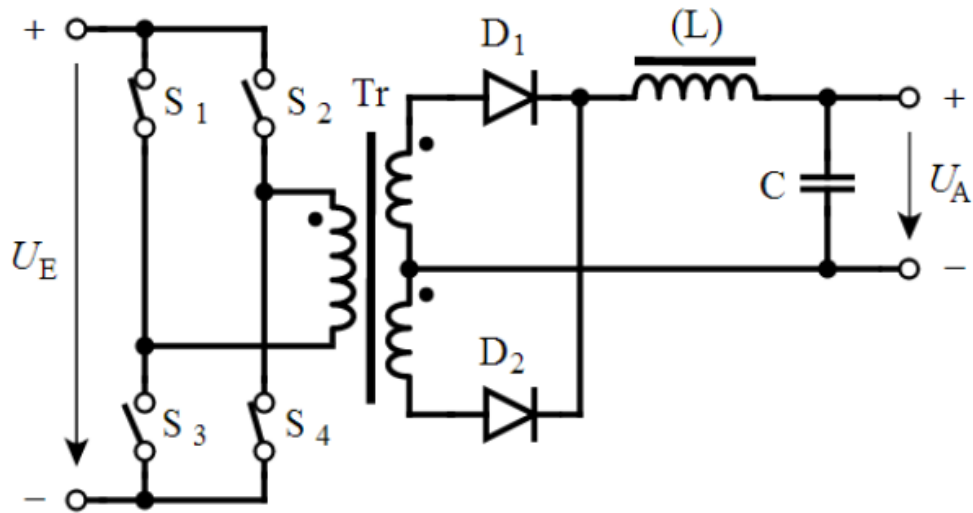
Σχήμα 5-18 Ο μετατροπέας ημιγέφυρας

5.3.4 Μετατροπέας πλήρους γέφυρας (full bridge converter)

Το βασικό κύκλωμα για τον μετατροπέα πλήρους γέφυρας φαίνεται στο **Σχήμα 5-19**. Ο μετατροπέας πλήρους γέφυρας αντιμετωπίζει τους διακόπτες σαν ζευγάρια παρόμοια με τις γνωστές συνδεσμολογίες γέφυρας (ζευγάρι 1: S1 και S4, ζευγάρι 2: S2 και S3). Για τον μετατροπέα πλήρους γέφυρας υπάρχουν 4 φάσεις λειτουργίας (ON το 1ο ζευγάρι-OFF το 2ο, όλοι OFF, ON το 2ο ζευγάρι και OFF το 1ο, όλοι OFF). Έτσι παράγεται τετραγωνικό AC στο πρωτεύον. Η τάση ανυψώνεται ή υποβιβάζεται, ανορθώνεται, και φιλτράρεται ώστε να προκύψει DC τάση εξόδου. Ο μετατροπέας πλήρους γέφυρας αποδίδει διπλάσια ισχύ από τον μετατροπέα ημιγέφυρας και η

$$V_o = 2 \cdot D \cdot \frac{N_2}{N_1} V_i$$

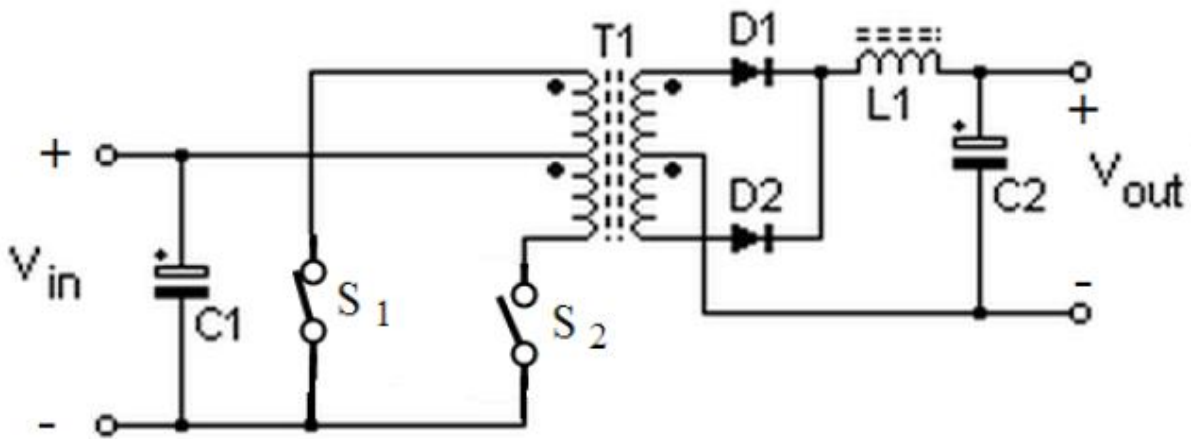
συνάρτηση μεταφοράς του είναι:



Σχήμα 5-19 Ο μετατροπέας πλήρους γέφυρας

5.3.5 Μετατροπέας Push-Pull

Το βασικό κύκλωμα για τον μετατροπέα push-pull φαίνεται στο **Σχήμα 5-20**. Ο push-pull μετατροπέας έχει επίσης τέσσερις φάσεις λειτουργίας (S1 ON-S2 OFF, S1-S2 OFF, S1 OFF-S2 ON, S1-S2 OFF). Όταν S1 ή S2 ON, ενεργοποιείται το ένα μισό του πρωτεύοντος και άγει η μία από τις 2 διόδους. Οι S1 και S2 δεν μπορεί να είναι ταυτόχρονα ON καθώς τότε θα υπάρξει βραχυκύκλωμα. Η συνάρτηση μεταφοράς του push-pull μετατροπέα είναι ίδια με αυτήν του μετατροπέα πλήρους γέφυρας.



Σχήμα 5-20 Ο push pull μετατροπέας

5.4 Μετατροπείς συχνότητας

Στις εγκαταστάσεις εναλλασσόμενου ρεύματος, στις οποίες η συχνότητα του παραγομένου ρεύματος είναι σταθερή, η συνεχής ρύθμιση της ταχύτητας περιστροφής του ηλεκτροκινητήρα πρόωσης (και επομένως της έλικας) είναι δυνατή εάν αυτός τροφοδοτηθεί όχι απευθείας από το δίκτυο αλλά από διάταξη μετατροπής της συχνότητας. Η διάδοση της ηλεκτρικής πρόωσης κατά τα τελευταία έτη ίσως δεν θα ήταν δυνατή χωρίς τους μετατροπείς αυτούς.

Η θεμελιώδης διάταξη μετατροπής είναι η γέφυρα 6 παλμών (ανορθωτής αλλά και αντιστροφέας κυρίως). Ωστόσο, για μείωση των αρμονικών παραμορφώσεων κατασκευάζονται πιο σύνθετες διατάξεις. Έτσι ένας αντιστροφέας 12 παλμών αποτελείται από δύο αντιστροφείς 6 παλμών, των οποίων οι αντίστοιχες φάσεις έχουν γωνιακή διαφορά 30 μοίρες. Σε σύγχρονες ναυπηγήσεις αξιοποιούνται προς το παρόν έως και γέφυρες 24 παλμών. Ακολουθεί μία συνοπτική περιγραφή ευρέως χρησιμοποιούμενων μετατροπέων ηλεκτρονικών ισχύος.

5.4.1 Ζεύγη ανορθωτών – αντιστροφέων SPWM

Στις διατάξεις αυτές αρχικά γίνεται ανόρθωση από εναλλασσόμενο σε συνεχές ρεύμα και στη συνέχεια αντιστροφή από συνεχές ρεύμα σε εναλλασσόμενο. Στο σύνδεσμο συνεχούς ρεύματος (DC-link), μεταξύ των δύο μετατροπέων παρεμβάλλεται κάποιο στοιχείο που διατηρεί σταθερή την τάση ή το ρεύμα που παρέχει ο μετατροπέας, όπως:

α) Πηγές ρεύματος (CSI Current Source Inverters) με SPWM: Στο DC-link παρεμβάλλεται πηνίο που διατηρεί το ρεύμα τροφοδοσίας σταθερό, με αποτέλεσμα ο μετατροπέας να εμφανίζεται να λειτουργεί ως πηγή (σταθερού) ρεύματος.

β) Πηγές τάσεως (VSI Voltage Source Inverters) με SPWM: Στο σύνδεσμο συνεχούς ρεύματος παρεμβάλλεται πυκνωτής που διατηρεί την τάση

τροφοδοσίας σταθερή, με αποτέλεσμα ο μετατροπέας να εμφανίζεται ότι λειτουργεί ως πηγή (σταθερής) τάσεως.

γ) Συγχρομετατροπείς (synchroconverters) ή LCI (Load Commutated Inverters, LCI): Πρόκειται για ειδική περίπτωση μετατροπέων πηγής ρεύματος (CSI) στην οποία όμως οι διακόπτες ισχύος σβήνουν μόνο με τη βοήθεια του φορτίου τους. Το χαρακτηριστικό αυτό αποτελεί το κύριο πλεονέκτημά τους, καθώς δεν απαιτούνται επιπλέον βοηθητικά κυκλώματα σβέσεως. Βρίσκουν εφαρμογή σε προωστήρια συστήματα με σύγχρονους κινητήρες μεγάλης ισχύος.

5.4.2 Κυκλομετατροπείς (cycloconverters)

Με τις διατάξεις αυτές επιτυγχάνεται απευθείας μετατροπή από μία μορφή εναλλασσόμενου ρεύματος συγκριμένου πλάτους και συχνότητας σε άλλη μορφή εναλλασσόμενου ρεύματος, διαφορετικού πλάτους και συχνότητας. Στην περίπτωση των προωστήριων συστημάτων πλοίων λαμβάνει χώρα υποβιβασμός συχνότητας (από 50/60 Hz σε 2-3 Hz).

Η απλή περίπτωση ενός τριφασικού κυκλομετατροπέα 6 παλμών (6-παλμικού) αποτελείται από 36 ελεγχόμενους διακόπτες ισχύος, 12 για κάθε φάση. Σε κάθε φάση αντιστοιχούν δύο γέφυρες διακοπών με 6 διακόπτες η κάθε μία. Η μία γέφυρα είναι υπεύθυνη για τη δημιουργία της κυματομορφής κατά τη θετική ημιπερίοδο και η άλλη κατά την αρνητική.

Στις γέφυρες εισέρχονται όλες οι φάσεις εισόδου. Αντιπαράλληλα προς τους διακόπτες ισχύος, συνδέονται και δίοδοι ισχύος για να κυκλοφορούν αντίστροφης φοράς ρεύματα, προστατεύοντας τους ελεγχόμενους διακόπτες.

Η τεχνική ελέγχου αγωγής των διακοπτικών στοιχείων ισχύος μπορεί να ποικίλλει κι εδώ, αλλά έχει επικρατήσει μία αντίστοιχη μέθοδος της ημιτονοειδούς διαμόρφωσης εύρους παλμών των αντιστροφών SPWM. Στην περίπτωση αυτή, το επιθυμητό σήμα σε μία φάση εξόδου συγκρίνεται με τις τάσεις όλων των φάσεων εισόδου και στα σημεία που εξισώνονται

(σημεία τομής των κυματομορφών), παράγονται σήματα αλλαγής κατάστασης των αντίστοιχων διακοπών ισχύος.

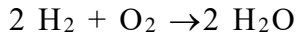
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 – ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΕΣ

6.1 Η Ηλεκτροχημική Κυψέλη Καυσίμου

Η ηλεκτροχημική κυψέλη καυσίμου είναι μία συσκευή με την οποία παράγεται ηλεκτρική. Ενέργεια απευθείας από την μετατροπή της απελευθερούμενης ενέργειας μιας χημικής αντιδράσεως. Η χημική αντίδραση είναι συνήθως καύση ενός αερίου ή υγρού καυσίμου, που προσάγεται συνεχώς στην κυψέλη, όπως και ο απαιτούμενος αέρας για την καύση. Η ηλεκτροχημική κυψέλη αποτελείται από έναν ηλεκτρολύτη και δύο ηλεκτρόδια, στα άκρα των οποίων αναπτύσσεται η συνεχής τάση της κυψέλης.

Στο Σχήμα 6-1 παριστάνεται σχηματικά η αρχή λειτουργίας της ηλεκτροχημικής κυψέλης, στην περίπτωση που σαν καύσιμο χρησιμοποιείται το H_2 .

Η γνωστή αντίδραση του κροτούντος αερίου

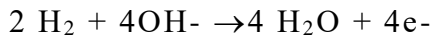


γίνεται σταδιακά και ελεγχόμενα:

στην Κάθοδο:

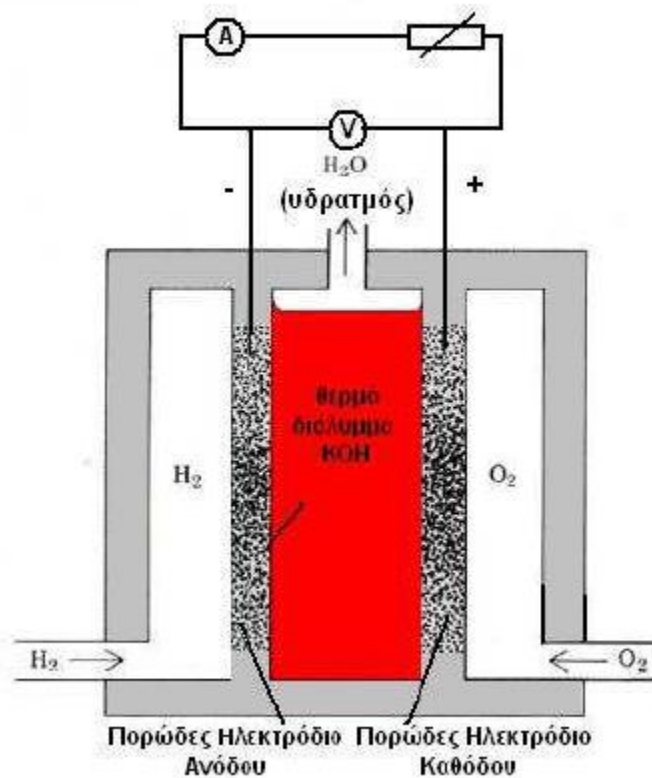


στην Άνοδο:



Τα απελευθερούμενα ηλεκτρόνια στην άνοδο οδεύουν μέσω της εξωτερικής αντιστάσεως R στην κάθοδο, όπου χρησιμοποιούνται στην αντίδραση με το O_2 . Έτσι, δημιουργείται Σ.Ρ. με θετικό πόλο την κάθοδο και αρνητικό την άνοδο. Η δημιουργούμενη τάση είναι θεωρητικά (όταν απάγεται υγρό H_2O) για θερμοκρασία 25 [°C] ίση προς 1,23 [Vdc]. Πρακτικά, η τάση είναι μικρότερη λόγω της εσωτερικής αντιστάσεως της κυψέλης.

Από την κυψέλη πρέπει να απάγεται συνεχώς η περίσσεια του παραγόμενου H_2O . Επίσης, εφόσον δεν προσάγεται καθαρό O_2 αλλά αέρας, πρέπει να απάγονται συνεχώς τα μη χρησιμοποιούμενα N_2 , CO_2 , κ.λ.π. καθώς και τυχόντα άλλα συστατικά του προσαχθέντος καυσίμου στην περίπτωση που αυτό δεν είναι χημικώς εντελώς καθαρό.



Σχήμα 6-1 Ηλεκτροχημική κυψέλη καυσίμου (H₂)

Στον Πίνακα 6-1 δίνεται η θεωρητική τάση (Η.Ε.Δ.) ενός ηλεκτροχημικού στοιχείου για διάφορες περιπτώσεις χημικών αντιδράσεων. Λόγω των εσωτερικών απωλειών, η αναπτυσσόμενη τάση των εν χρήσει κυψελών κυμαίνεται από 0,6 έως 0,85 [V] ανά στοιχείο.

Πίνακας 6-1 Αναπτυσσόμενη θεωρητικά τάση (Η.Ε.Δ.) στα διάφορα ηλεκτροχημικά στοιχεία στη θερμοκρασία των 25 [°C].

Αντίδραση Καύσεως		Τάση [V]
$2 \text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2 \text{H}_2\text{O}$	H_2O ατμός	1,18
$2 \text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2 \text{H}_2\text{O}$	H_2O υγρό	1,23
$\text{CO} + \text{O}_2 \rightarrow 2 \text{CO}_2$	H_2O ατμός	1,34
$\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + 2 \text{H}_2\text{O}$	H_2O υγρό	1,04
$\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + 2 \text{H}_2\text{O}$	H_2O υγρό	1,06
$\text{C}_2\text{H}_4 + 3\text{O}_2 \rightarrow 2 \text{CO}_2 + 2 \text{H}_2\text{O}$	H_2O	1,11
$4 \text{Na} + 2 \text{H}_2\text{O} + \text{O}_2 \rightarrow 4 \text{NaOH}_{\text{aq}}$		3,11
$4 \text{NH}_3 + 3 \text{O}_2 \rightarrow 2 \text{N}_2 + 6 \text{H}_2\text{O}$	H_2O υγρό	1,17

Μεγαλύτερες τάσεις λαμβάνονται με την εν σειρά σύνδεση περισσότερων στοιχείων (μέχρι και 500). Ο βαθμός απόδοσης της ηλεκτροχημικής κυψέλης είναι αρκετά μεγάλος κυμαινόμενος από 35% έως 50%, έχοντας και το πλεονέκτημα ότι παραμένει σχετικά σταθερός, όταν το φορτίο κυμαίνεται από 25% έως 100%.

Η ηλεκτροχημική κυψέλη καυσίμου βρίσκει εφαρμογές στην τεχνολογία του διαστήματος, στα υποβρύχια, σε σταθμούς αναμετάδοσης τηλεόρασης, για παραγωγή ηλ. Ενέργειας προς παροχή στο δίκτυο, για κίνηση οχημάτων κ.τ.λ.

Η πυκνότητα ενεργείας (ανηγμένη στην επιφάνεια των ηλεκτροδίων) κυμαίνεται από 1,1 έως 2,2 [kW/m²] και το σύνηθες μέγεθος κατασκευής είναι από 10 έως 200 [kW].

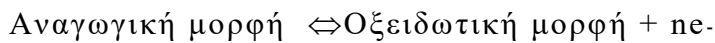
6.2 Τα Ηλεκτρικά Στοιχεία

Ένα ηλεκτρικό στοιχείο είναι μια διάταξη παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (Σ.Ρ.) για απευθείας μετατροπή της χημικής ενέργειας που περιέχεται στο στοιχείο. Η μετατροπή γίνεται βάσει του φαινομένου της οξειδαναγωγής δύο ετερογενών ηλεκτροδίων που είναι βυθισμένα σε ένα ηλεκτρολυτικό υγρό (διάλυμα οξέος, βάσεως, ή άλατος).

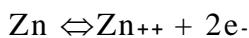
Οξείδωση ενός στοιχείου είναι η αποβολή ηλεκτρονίων από αυτό (και άρα η αύξηση του θετικού σθένους του, ή η μείωση του αρνητικού σθένους του. Αναγωγή ενός στοιχείου είναι η πρόσληψη ηλεκτρονίων από αυτό (και άρα

η μείωση του θετικού σθένους, ή η αύξηση του αρνητικού σθένους του). Οξειδωτικά είναι τα σώματα που μπορούν να προκαλέσουν οξείδωση, ενώ αναγωγικά είναι τα σώματα που μπορούν να προκαλέσουν αναγωγή. Οι αντιδράσεις οξειδώσεως και αναγωγής αλληλοσυνδέονται και συμβαίνουν ταυτόχρονα αντισταθμίζοντας η μία την άλλη στην πρόσληψη και αποβολή ηλεκτρονίων, γι' αυτό και λέγονται αντιδράσεις οξειδαναγωγής.

Έτσι, αν θεωρήσουμε ένα διάλυμα, μέσα στο οποίο να περιέχεται τόσο η οξειδωμένη όσο και η ανηγμένη μορφή ενός σώματος τότε θα υπάρχει η ισορροπία:

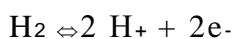


όπου n ο αριθμός των ηλεκτρονίων που αποβάλλονται κατά τη μετάπτωση από την αναγωγική στην οξειδωτική του μορφή. Π.χ. αν βυθίσουμε ένα ηλεκτρόδιο από Zn σε ένα διάλυμα αλατός του, η οξειδο-αναγωγική αντίδραση θα είναι:



(δηλαδή ο μεταλλικός Zn αποτελεί την αναγωγική μορφή και το ιόν Zn^{++} την οξειδωτική μορφή του στοιχείου) και επειδή ο Zn είναι αναγωγικό σώμα, επικρατεί η φορά (\rightarrow) και τα ελευθερούμενα ηλεκτρόνια συγκεντρώνονται πάνω στο ηλεκτρόδιο του Zn και το φορτίζουν αρνητικά, ως προς το διάλυμα. Έτσι το δυναμικό που αποκτά το ηλεκτρόδιο αποτελεί ένα μέτρο της αναγωγικής (ή οξειδωτικής) δυνάμεως του συστήματος που θεωρούμε.

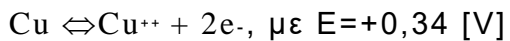
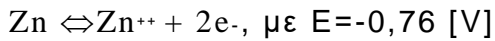
Το δυναμικό αυτό μετράται σε σύγκριση προς το δυναμικό ισορροπίας του H_2 προς τα ιόντα του:



[υπό προδιαγεγραμμένες συνθήκες του φυσικού ηλεκτροδίου υδρογόνου (NERST)] και λέγεται Κανονικό Δυναμικό (Κ.Δ.) του εκάστοτε στοιχείου. Έτσι προκύπτει η ηλεκτροχημική σειρά τάσεως των διαφόρων στοιχείων

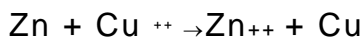
που δίνεται στον Πίνακα 1.2. Όσο μεγαλύτερο είναι το Κ.Δ. , ενός στοιχείου, τόσο περισσότερο οξειδωτικό είναι αυτό και αντίστροφα.

Η αρχή λειτουργίας των ηλεκτρικών στοιχείων βασίζεται ακριβώς στην ύπαρξη του προαναφερθέντος Κ.Δ. όπως φαίνεται σχηματικά στο Σχήμα 1.2 για την περίπτωση του στοιχείου DANIEL. Οι επιμέρους οξειδαναγωγικές αντιδράσεις και τα αντίστοιχα Κ.Δ. είναι:

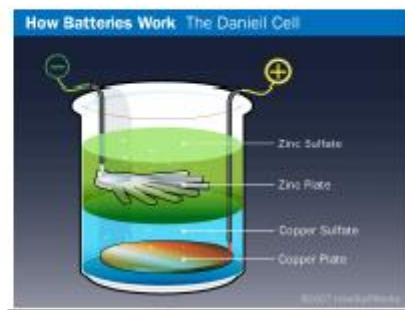
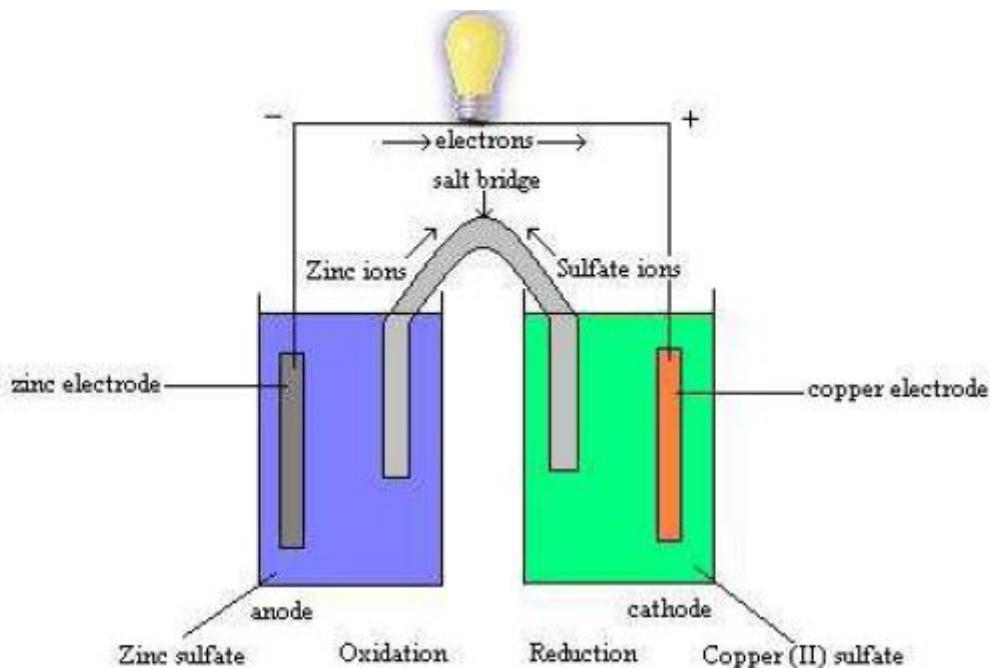


Έτσι, μεταξύ των ηλεκτροδίων αναπτύσσεται τάση ίση προς

$0,34 - (-0,76) = 1,1 \text{ [V]}$, με το ηλεκτρόδιο του Cu θετικό πόλο, το δε ηλεκτρικό ρεύμα προκύπτει από την κίνηση των ηλεκτρονίων της ολικής οξειδαναγωγικής αντιδράσεως:



Η πολική τάση ενός στοιχείου κατά τη λειτουργία είναι μικρότερη της θεωρητικά υπολογιζόμενης λόγω της εσωτερικής αντιστάσεως.



Σχήμα 6-2 Ηλεκτρικό στοιχείο DANIEL (1,1[V])

Σε κάθε στοιχείο δημιουργείται κατά τη λειτουργία το φαινόμενο της πολώσεως των ηλεκτροδίων δηλ. μεταβολή της φύσεως της επιφάνειας του λόγω επικαθίσεως ιόντων. Η πόλωση δημιουργεί μια Α.Η.Ε.Δ. που έχει φορά αντίθετη από την πολικότητα του στοιχείου με αποτέλεσμα τη μείωση της τάσεως του στοιχείου. Για την αντιμετώπιση της πολώσεως χρησιμοποιούνται κατάλληλες αντιπολωτικές ουσίες.

Υπάρχουν διάφοροι τύποι ηλεκτρικών στοιχείων (ανάλογα με τα στοιχεία των ηλεκτροδίων, τον ηλεκτρολύτη, τα αντιπολωτικά κ.λ.π.) με τάση από 1 έως 2 [V]. Σε χρήση είναι πια μόνο τα ξηρά στοιχεία, στα οποία ο ηλεκτρολύτης βρίσκεται απορροφημένος μέσα στα ειδικά σώματα (οι

γνωστές μικρές μπαταρίες). Το κύριο χαρακτηριστικό των ηλεκτρικών στοιχείων είναι ότι είναι μίας χρήσεως δηλ. αφού εξαντληθούν (αποδώσουν δηλ. την ποσότητα ενέργειας για την οποία έχουν κατασκευαστεί) καταστρέφονται χωρίς να μπορούν να ξαναχρησιμοποιηθούν.

6.3 Αρχή λειτουργίας των ηλεκτρικών συσσωρευτών

Στους ηλ.συσ/τες μετατρέπεται κατά τη φόρτιση ηλ. ενέργεια σε χημική ή οποία κατά την εκφόρτιση μετατρέπεται πάλι σε ηλεκτρική. Η φόρτιση και εκφόρτιση γίνονται υπό Σ.Ρ. (συνεχές ρεύμα). Η φόρτιση-εκφόρτιση του συσσωρευτή μπορεί να γίνει θεωρητικά άπειρες φορές.. Πρακτικά υπό σωστές συνθήκες λειτουργίας και συντηρήσεως η διάρκεια ζωής των ηλ.συσ/των φθάνει μέχρι τα 15 έως 20 χρόνια.

Η λειτουργία του ηλ. συσσωρευτή βασίζεται τόσο στο φαινόμενο της ηλεκτρολύσεως (κατά την φόρτιση) όσο και στις οξειδοαναγωγικές αντιδράσεις (κατά την εκφόρτιση). Το φαινόμενο της πολώσεως όχι μόνο δεν καταπολεμάται (όπως γίνεται στα ηλεκτρικά στοιχεία), αλλά αντίθετα προκαλείται διότι επ'αυτού βασίζεται η λειτουργία του.

Ο νόμος του FARADAY που ισχύει κατά τη διέλευση ηλεκτρικού ρεύματος μέσα από ηλεκτρολύτη:

$$M=1/F (A/n)$$

όπου:

$m(\text{gr})$: Η μάζα του (αποτιθέμενου) ιόντος ((στην) άνοδο ή (στην) κάθοδο).

$F \approx 96500 [\text{Cb.gr.}]$: Η σταθερά του FARADAY.

$A[-]$: Ατομικός αριθμός του ιόντος (στοιχείου ή ρίζας)

$n [-]$: Σθένος του ιόντος.

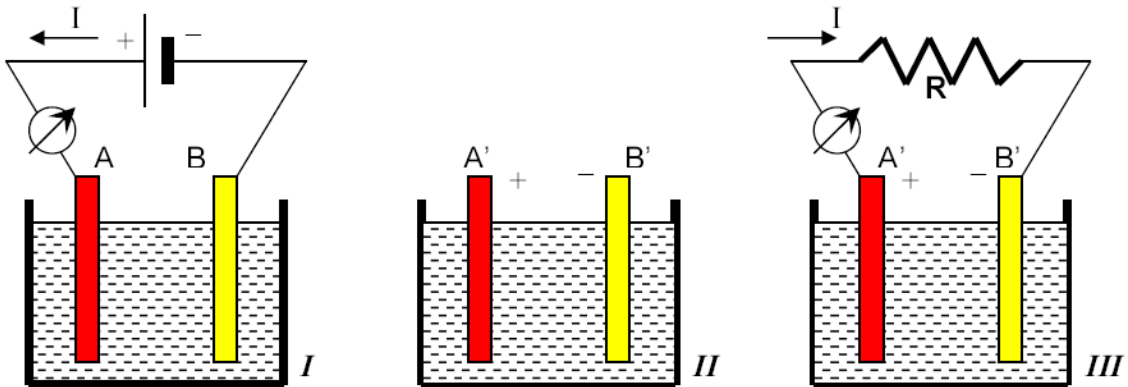
$q [(b)] =$: Το φορτίο που διήλθε από τον ηλεκτρολύτη το χρονικό διάστημα από $t = 0$

έως $t = \tau$ για το οποίο υπολογίζεται η m .

$i(t)[A]$: Η στιγμιαία τιμή του ρεύματος.

Στο Σχήμα 6.3 φαίνεται σχηματικά η αρχή λειτουργίας του ηλ.συσσωρευτή. Δύο ηλεκτρόδια A και B είναι βυθισμένα σε ένα ηλεκτρολυτικό διάλυμα και ρεύμα ρέει στο όλο κύκλωμα με τη σημειούμενη φορά στο σχ. 6.3[I] εξαιτίας της συνδέσεως της πηγής. Η φάση αυτή λέγεται φόρτιση και κατ' αυτήν συμβαίνει σταδιακά αλλαγή της χημικής συστάσεως των ηλεκτροδίων και ηλεκτρολύτη. Το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας που δίνει η πηγή κατά τη φόρτιση αποθηκεύεται υπό μορφή χημικής ενέργειας στον συσσωρευτή. Στο τέλος της φορτίσεως και μετά την απομάκρυνση της πηγής μεταξύ των ηλεκτροδίων επικρατεί μια ηλεκτρική τάση (με την πολικότητα του σχ. 6.3(II)

Με τον συσσωρευτή τροφοδοτούμε τώρα μια αντίσταση R (καταναλωτής) οπότε στο κύκλωμα ρέει ρεύμα (με φορά του σχ. 6.3 (III)) και μετατρέπεται το μεγαλύτερο μέρος της χημικής ενέργειας του συσσωρευτή σε ηλ.ενέργεια. Η φάση αυτή λέγεται εκφόρτιση και κατ' αυτήν συμβαίνει πάλι μια σταδιακή αντίστροφη αλλαγή της χημικής συστάσεως των ηλεκτροδίων, με μια παράλληλη μείωση της τάσεως των ηλεκτροδίων.



Σχήμα 6-3 . Αρχή λειτουργίας (φόρτιση-εκφόρτιση) ηλ. συσσωρευτή

6.4 Τύποι Ηλεκτρικών Συσσωρευτών

Η βασική ιδέα για τον ηλ. συζ/τη ανήκει στον J.W.RITTER (1802). Για την εξέλιξη των συζ.μολύβδου εργάστηκαν οι : SISTEDEN (1854), PLANTE (1859), FAURE και TUDOR. Οι αλκαλικοί συζ/τες κατασκευάστηκαν το 1901 από τους Junger και TH.EDISON. Τελευταίοι οι ANDREE και YARDNEY κατασκεύασαν τους συζ/τες Αργύρου – Ψευδαργύρου (Ag – Zn)

Σήμερα υπάρχουν οι παρακάτω τύποι ηλ. συσσωρευτών

- Συσσωρευτής μολύβδου (Pb)
- Αλκαλικοί συσσωρευτές (ή συσσωρευτές χάλυβος) (Fe – Ni),(Cd – Ni)
- Συσσωρευτής Ag – Zn (Αργυρος – Ψευδάργυρος)
- Συσσωρευτής Ag – Cd (Αργυρος – Κάδμιο)
- Συσσωρευτής Ni – Zn (Νικέλιο – Ψευδάργυρος)
- Συσσωρευτής Zn – Cl (Ψευδάργυρος – Χλώριο)
- Συσσωρευτής Na – S (Νάτριο – Θείο)

6.5 Μπαταρίες ιόντων λιθίου, τύποι, πλεονεκτήματα και χρήσεις τους

Οι επαναφορτιζόμενες μπαταρίες ιόντων λιθίου, έχουν πολλαπλά πλεονεκτήματα και μεγαλύτερη ενεργειακή απόδοση σε σχέση με τις κοινές μπαταρίες μολύβδου-οξέος.

Το μικρό βάρος, η υψηλότερη τάση των στοιχείων (από 2.90 volt έως 4.20 volt), η μεγάλη ενεργειακή πυκνότητα, η χαμηλή αυτοεκφόρτιση, η γρήγορη επαναφόρτιση, η αντοχή σε κυκλικές εφαρμογές και η δυνατότητα πολύμηνης αποθήκευσης, τις καθιστούν κατάλληλες, για χρήση τόσο σε κυκλικές εφαρμογές όσο και σε εφαρμογές εκκίνησης.

Λόγω των παραπάνω χαρακτηριστικών τους, βρίσκουν εφαρμογή σε μικρές συσκευές οικιακής χρήσης, αυτοκίνητα, μοτοσυκλέτες, σκάφη, συστήματα

συναγερμών, εφεδρικά συστήματα ασφαλείας, βιομηχανικές εφαρμογές (περονοφόρα, αυτοκινούμενες σκούπες κ.λ.π) και τηλεπικοινωνίες.

Οι μπαταρίες με ονομαστική τάση 12volt, περιέχουν 4 στοιχεία λιθίου 3,2 volt, τα οποία συνδεδεμένα σε σειρά και πλήρως φορτισμένα, δίνουν τάση εξόδου 13,20 έως 13,35 volt. Τα στοιχεία των μπαταριών λιθίου, διαθέτουν αρνητικό ηλεκτρόδιο (άνοδο) κατασκευασμένο από λίθιο, στο οποίο κατά την εκφόρτιση, λαμβάνει χώρα η οξείδωση, δηλαδή ελευθερώνονται ηλεκτρόνια και ρέουν προς το θετικό ηλεκτρόδιο (τεχνικά, ρέει ρεύμα προς τους πόλους). Αυτό συμβαίνει στο θετικό ηλεκτρόδιο (κάθοδος) κατά την φόρτιση, δηλαδή κατά τη διάρκεια της φόρτισης ελευθερώνονται ηλεκτρόνια και ρέουν προς το αρνητικό ηλεκτρόδιο (τεχνικά, εισέρχεται ρεύμα στη μπαταρία). Αυτή είναι η θετική-αρνητική πολικότητα των μπαταριών ιόντων λιθίου.

Μια μπαταρία ιόντων λιθίου δεν περιέχει λίθιο σε μεταλλική κατάσταση, αλλά χρησιμοποιεί ιόντα λιθίου που μετακινούνται μεταξύ της καθόδου και της ανόδου της μπαταρίας κατά τη διάρκεια της φόρτισης και της εκφόρτισης, αντίστοιχα. Η μπαταρία ιόντων λιθίου, διαθέτει τρία λειτουργικά συστατικά. Το θετικό ηλεκτρόδιο, το αρνητικό ηλεκτρόδιο και τον ηλεκτρολύτη.

6.5.1 Ενεργειακή απόδοση

Επειδή οι μπαταρίες ιόντων λιθίου μπορούν να έχουν ποικιλία υλικών θετικού και αρνητικού ηλεκτροδίου, η ενεργειακή πυκνότητα και η τάση ποικίλλουν αντίστοιχα.

- **Ειδική ενεργειακή πυκνότητα:** 100 έως 250 W·h/kg (360 έως 900 $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$)
- **Ογκομετρική ενεργειακή πυκνότητα:** 250 έως 620 W·h/L (900 έως 2230 J/cm^3)

- **Ειδική πυκνότητα ισχύος:** 300 έως 1500 W/kg (στα 20 δευτερόλεπτα και 285 W·h/L).

6.5.2 Κύκλοι και διάρκεια ζωής των μπαταριών ιόντων λιθίου

Η ζωή των επαναφορτιζόμενων μπαταριών ορίζεται συνήθως ως ο αριθμός των πλήρων κύκλων φόρτισης-εκφόρτισης πριν την σημαντική απώλεια χωρητικότητας, ενώ η αποθήκευση μπαταρίας η οποία είναι πλήρως εκφορτισμένη, μπορεί επίσης να μειώσει επίσης τη χωρητικότητα. Η αποθήκευση σε τάση μικρότερη από 2,00 Volt, καταλήγει σε αργή υποβάθμιση των καθόδων LiCoO_2 και LiMn_2O_4 , την απελευθέρωση οξυγόνου και τη μη αντιστρεπτή απώλεια χωρητικότητας.

Κάποιες μπαταρίες με ανόδους άνθρακα (LiCoO_2), προσφέρουν διάρκεια ζωής μεγαλύτερη από 10.000 κύκλους. Η διάρκεια ζωής, καθορίζεται με αριθμό κύκλων (π.χ., γραμμική πτώση της χωρητικότητας στο 80% στους 500 κύκλους), χωρίς αναφορά σε χρονολογική ηλικία.

Κατά μέσο όρο, η διάρκεια ζωής μιας μπαταρίας ιόντων λιθίου και ανάλογα με τον τύπο του θετικού ηλεκτροδίου είναι:

DoD (Βάθος Εκφόρτισης)	Κύκλοι εκφόρτισης	
	NMC	LiPO₄
100% DoD	300	600
80% DoD	400	900
60% DoD	600	1,500
40% DoD	1,000	3,000
20% DoD	2,000	9,000

10% DoD	6,000	15,000
---------	-------	--------

Τον Νοέμβριο του 2016, η ιαπωνική εταιρεία Yasunaga, αποκάλυψε ότι έχουν αναπτύξει ειδική επεξεργασία επιφάνειας θετικού ηλεκτροδίου που μπορεί να επιτρέψει στην μπαταρία να έχει περισσότερες από δώδεκα φορές τον κύκλο της ζωής μιας συμβατικής μπαταρίας ιόντων λιθίου.

Οι μπαταρίες αυτές κατάφεραν να διαρκέσουν από 60.000 έως 102.400 κύκλους στο 30% DoD, σε σύγκριση με τις συμβατικές μπαταρίες που είχαν μόνο 5000 έως 6000 κύκλους. Αυτή η τεχνολογία εμφάνισε, επίσης, 12% μείωση στην αντίσταση του στοιχείου. Η Yasunaga ανακοίνωσε επίσης, ότι η διάρκεια ζωής αναμένεται να αυξηθεί ακόμη περισσότερο, όταν εφαρμοστεί η ίδια τεχνολογία και στα αρνητικά ηλεκτρόδια.

Ο καθορισμός της ζωής της μπαταρίας μέσω πλήρων κύκλων αποφόρτισης, είναι το βιομηχανικό πρότυπο, αλλά μπορεί να επηρεαστεί, επειδή το πλήρες βάθος αποφόρτισης/επαναφόρτισης (DoD) μπορεί να ελαχιστοποιήσει τη ζωή της μπαταρίας, συγκρινόμενο με την αθροιστική απόδοση μερικής αποφόρτισης/φόρτισης σε Ah.

Εκτός από το βάθος εκφόρτισης, πρέπει να λάβουμε υπ' όψιν και άλλους παράγοντες όπως το ρυθμό αποφόρτισης και τη θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Ορισμένοι κατασκευαστές, αντί για τον αριθμό κύκλων, προτείνουν την αντικατάσταση της μπαταρίας σε μια ορισμένη ημερομηνία που αναγράφεται στη μπαταρία, αλλά αυτή η μέθοδος δεν λαμβάνει υπόψη τον τρόπο χρήσης της. Έτσι, μια μπαταρία ιόντων λιθίου μπορεί να αποτύχει εντός του καθορισμένου χρόνου λόγω βαριάς χρήσης ή δυσμενών συνθηκών θερμοκρασίας. Ωστόσο, οι περισσότερες μπαταρίες, διαρκούν πολύ περισσότερο από ότι δείχνει η ημερομηνία του κατασκευαστή.

Η εσωτερική αντίσταση και η αυτό-εκφόρτιση παίζουν επίσης ρόλο, αλλά αυτές επηρεάζουν τη διάρκεια της ζωής μιας σύγχρονης μπαταρίας Li-ion. Εάν είναι δυνατόν, αποφεύγουμε τις πλήρεις εκφορτίσεις (100%) και

φορτίζουμε τη μπαταρία πιο συχνά μεταξύ των χρήσεων. Η μερική εκφόρτιση μιας μπαταρίας Li-ion είναι καλή καθώς δεν υπάρχει μνήμη και η μπαταρία δεν χρειάζεται περιοδικούς κύκλους πλήρους εκφόρτισης για να παρατείνει τη ζωή της.

Για κάθε μείωση στην τάση αιχμής κατά 0,10 volt, λέγεται ότι διπλασιάζεται ο αριθμός των κύκλων ζωής. Τα περισσότερα στοιχεία Li-ion φορτίζονται σε 4,20 volt και τυπικά αποδίδουν 300-500 κύκλους. Αν φορτίσουμε λιγότερο ένα στοιχείο, θα αποδώσει 600-1.000 κύκλους στα 4.10 volt, 1.200-2.000 κύκλους στα 4.00 volt και 2.400-4.000 κύκλους στα 3,90 volt.

Τάση (Volt)	Κύκλοι Εκφόρτισης	Χωρητικότητα
4.30	150–250	110–115%
4.25	200–350	105–110%
4.20	300–500	100%
4.15	400–700	90–95%
4.10	600–1,000	85–90%
4.05	850–1,500	80–85%
4.00	1,200–2,000	70–75%
3.90	2,400–4,000	60–65%
3.80	4,800-8,000	35–40%
3.70	9,600-16,000	25-30%

Όμως, αυτό έχει και την αρνητική του επίπτωση, καθώς για κάθε 0,70 volt μείωση της τάσης φόρτισης, μειώνεται κατά 10% η χωρητικότητα του στοιχείου. Ο πολλαπλασιασμός του χρόνου ζωής της μπαταρίας (στο βάθος του κύκλου) επί την χωρητικότητα δίνει τη συνολική ενέργεια που παράχθηκε κατά τη διάρκεια της ζωής της. Έτσι μπορεί κανείς να υπολογίσει το κόστος ανά kWh της ισχύος (συμπεριλαμβανομένου του κόστους φόρτισης).

6.5.3 Φόρτιση

Οι διεργασίες φόρτισης για τα απλά στοιχεία ιόντων λιθίου και τις πλήρεις μπαταρίες ιόντων λιθίου, είναι ελαφρώς διαφορετικές. Ένα απλό στοιχείο ιόντων λιθίου φορτίζεται σε δύο στάδια:

- Σταθερό ρεύμα (Constant current ή CC)
- Σταθερή τάση (Constant Voltage ή CV)

Μια συστοιχία στοιχεία ιόντων λιθίου σε σειρά - μπαταρία) φορτίζεται σε τρία στάδια:

- Σταθερό ρεύμα
- Εξισορρόπηση (δεν απαιτείται μόλις η μπαταρία ισορροπήσει)
- Σταθερή τάση

Κατά τη διάρκεια της φάσης του σταθερού ρεύματος, ο φορτιστής εφαρμόζει σταθερό ρεύμα στη μπαταρία σε σταθερά αυξανόμενη τάση, μέχρι να φτάσει το όριο τάσης ανά στοιχείο.

Κατά της φάσης εξισορρόπησης, ο φορτιστής μειώνει το ρεύμα φόρτισης (ή ανοιγοκλείνει για να μειώσει το μέσο ρεύμα), ενώ η κατάσταση φόρτισης των μεμονωμένων στοιχείων φέρνεται στο ίδιο επίπεδο από κύκλωμα εξισορρόπησης, μέχρι την εξισορρόπηση της μπαταρίας. Μερικοί γρήγοροι φορτιστές παραλείπουν αυτό το στάδιο. Μερικοί φορτιστές ολοκληρώνουν την εξισορρόπηση φορτίζοντας κάθε στοιχείο ανεξάρτητα.

Κατά τη διάρκεια της φάσης σταθερής τάσης, ο φορτιστής εφαρμόζει τάση ίση με το μέγιστο της τάσης στοιχείου επί τον αριθμό των στοιχείων σε

σειρά προς τη μπαταρία, καθώς το ρεύμα μειώνεται σταδιακά προς το 0, μέχρι το ρεύμα να είναι κάτω από το ορισμένο κατώφλι του αρχικού σταθερού ρεύματος φόρτισης κατά περίπου 3%.

Περιοδική φόρτιση κορυφής περίπου μια φορά ανά 500 ώρες. Η φόρτιση κορυφής, συνιστάται όταν η τάση πηγαίνει κάτω από 4,05 V/cell.

6.5.4 Όρια θερμοκρασίας φόρτισης

Τα όρια θερμοκρασίας φόρτισης για τις μπαταρίες ιόντων λιθίου είναι πιο αυστηρά από τα όρια λειτουργίας. Η χημεία των ιόντων λιθίου λειτουργεί καλά σε αυξημένες θερμοκρασίες, αλλά παρατεταμένη έκθεση στη θερμότητα μειώνει τη ζωή της μπαταρίας.

Οι μπαταρίες των ιόντων λιθίου προσφέρουν καλύτερη απόδοση φόρτισης σε δροσερές θερμοκρασίες, επιτρέποντας "γρήγορη φόρτιση" στο θερμοκρασιακό εύρος των 5 μέχρι 45 °C και έτσι η φόρτιση τους πρέπει να εκτελείται μέσα σε αυτή τη θερμοκρασιακή περιοχή.

Σε θερμοκρασίες από 0 μέχρι 5 °C η φόρτιση είναι δυνατή, αλλά θα πρέπει να μειωθεί το ρεύμα φόρτισης, ενώ κατά τη διάρκεια φόρτισης χαμηλής θερμοκρασίας, είναι ωφέλιμη μια μικρή αύξηση της θερμοκρασίας πάνω από το περιβάλλον λόγω της εσωτερικής αντίστασης του στοιχείου.

Φόρτιση σε θερμοκρασίες πάνω από 45 °C θα υποβαθμίσει την απόδοση της μπαταρίας, ενώ σε χαμηλότερες θερμοκρασίες η εσωτερική αντίσταση της μπαταρίας μπορεί να αυξηθεί, με αποτέλεσμα πιο αργή φόρτιση και συνεπώς μεγαλύτερους χρόνους φόρτισης.

Οι μπαταρίες ιόντων λιθίου για καταναλωτές δεν πρέπει να φορτίζονται σε θερμοκρασίες κάτω από 0 °C. Αν και μια συστοιχία μπαταριών μπορεί να φαίνεται ότι φορτίζεται κανονικά, μπορεί να συμβεί ηλεκτρολυτική επικάλυψη του μεταλλικού λιθίου στο αρνητικό ηλεκτρόδιο κατά τη διάρκεια φόρτισης κάτω από το σημείο πήξης και μπορεί να μην αφαιρείται ακόμα και με επαναλαμβανόμενους κύκλους.

Οι περισσότερες συσκευές που είναι εφοδιασμένες με μπαταρίες ιόντων λιθίου δεν επιτρέπουν τη φόρτιση εκτός της περιοχής 0–45 °C για λόγους ασφαλείας, εκτός από τα κινητά τηλέφωνα που μπορεί να επιτρέψουν κάποιο βαθμό φόρτισης όταν ανιχνεύσουν επείγουσα κλήση σε εξέλιξη.

Αποτυχία παρακολούθησης των περιορισμών ρεύματος και τάσης μπορεί να καταλήξει σε έκρηξη.

6.5.5 Πιθανά προβλήματα κατά τη χρήση

Οι μπαταρίες ιόντων λιθίου, απαιτούν σύστημα διαχείρισης μπαταριών (battery management system ή BMS) για να αποτρέψουν τη λειτουργία εκτός της ασφαλούς περιοχής λειτουργίας κάθε στοιχείου (μέγιστη φόρτιση, ελάχιστη φόρτιση, ασφαλής περιοχή θερμοκρασίας) και να εξισορροπεί τα στοιχεία ώστε να εξαλείψει τις πιθανές παράταιρες καταστάσεις φόρτισης.

Αυτό βελτιώνει σημαντικά την αποτελεσματικότητα της μπαταρίας και αυξάνει την χωρητικότητα. Καθώς αυξάνεται ο αριθμός των στοιχείων και των ρευμάτων φόρτισης, αυξάνεται η πιθανότητα για ασυμφωνία μεταξύ τους.

Οι δύο περιπτώσεις ασυμφωνίας είναι η κατάσταση φόρτισης (state of charge ή SOC) και η χωρητικότητα / ενέργεια ("C/E"). Αν και η SOC είναι πιο συνηθισμένη περίπτωση ασυμφωνίας, κάθε πρόβλημα περιορίζει τη χωρητικότητα φόρτισης της συστοιχίας (mAh) στη χωρητικότητα του πιο ασθενούς στοιχείου.

Εάν υπερθερμανθούν ή υπερφορτιστούν, οι μπαταρίες ιόντων λιθίου, μπορεί να υποστούν θερμική διαφυγή και διάρρηξη του στοιχείου. Σε ακραίες καταστάσεις αυτό μπορεί να οδηγήσει σε διαρροή, έκρηξη ή πυρκαγιά.

Για να μειωθούν αυτοί οι κίνδυνοι, πολλά στοιχεία ιόντων λιθίου (και συστοιχίες μπαταριών) περιέχουν κύκλωμα ασφαλείας από σφάλμα που αποσυνδέει την μπαταρία όταν η τάση του είναι εκτός της περιοχής

ασφαλείας των 3,00–4,20 Volt ανά στοιχείο ή όταν υπερφορτιστεί ή εκφορτιστεί.

Οι συστοιχίες μπαταριών λιθίου, χωρίς αποτελεσματική διαχείριση κυκλωμάτων μπαταρίας, που είναι προϊόντα ιδιοκατασκευής, είτε από πωλητή ή τελικό χρήστη, είναι ευπαθείς σε αυτά τα θέματα.

Άσχημα σχεδιασμένα ή υλοποιημένα κυκλώματα διαχείρισης μπορεί επίσης να προκαλέσουν προβλήματα· είναι δύσκολο να είναι κανείς βέβαιος ότι οποιαδήποτε μεμονωμένο κύκλωμα διαχείρισης μπαταρίας είναι κατάλληλα κατασκευασμένο.

Τα στοιχεία ιόντων λιθίου είναι πολύ ευπαθή σε ζημιές εκτός της επιτρεπόμενης περιοχής τάσης που είναι συνήθως (2,50 έως 3,65) V για τα περισσότερα στοιχεία LFP. Η υπέρβαση αυτής της περιοχής τάσης, ακόμα και κατά μικρό ποσοστό τάσης (χιλιοστά του volt) καταλήγει σε πρόωρη γήρανση των στοιχείων και, συνεπώς, καταλήγει σε κινδύνους ασφαλείας λόγω των ενεργών συστατικών στα στοιχεία.

Όταν αποθηκεύονται για παρατεταμένες περιόδους το μικρό λαμβανόμενο ρεύμα του κυκλώματος προστασίας μπορεί να αδειάσει τη μπαταρία κάτω από την τάση αποκοπής και οι κανονικοί φορτιστές μπορεί τότε να είναι άχρηστοι επειδή η BMS μπορεί να κρατά μια εγγραφή αυτής της 'αποτυχίας' αυτής της μπαταρίας (ή του φορτιστή). Πολλοί τύποι στοιχείων ιόντων λιθίου δεν μπορούν να φορτιστούν με ασφάλεια κάτω από τους 0 °C.

Άλλα χαρακτηριστικά ασφαλείας που απαιτούνται σε κάθε στοιχείο:

- Διαχωριστής απενεργοποίησης (Shut-down separator) για προστασία από υπερθέρμανση.
- Καπάκι αποκοπής (Tear-away tab) για εσωτερική εκτόνωση πίεσης.
- Απαέρωση (εκτόνωση πίεσης σε περίπτωση σοβαρής απαέρωσης)
- Θερμική διακοπή (έκθεση σε υπερένταση/υπερφόρτιση/ακραία περιβάλλοντα)

Αυτά τα χαρακτηριστικά απαιτούνται, επειδή το αρνητικό ηλεκτρόδιο παράγει θερμότητα κατά τη διάρκεια της χρήσης, ενώ το θετικό ηλεκτρόδιο παράγει οξυγόνο. Όμως, αυτές οι πρόσθετες διατάξεις καταλαμβάνουν χώρο μέσα στα στοιχεία, προσθέτουν σημεία αποτυχίας και μπορεί να απενεργοποιήσουν μη αντιστρεπτά το στοιχείο όταν ενεργοποιηθεί.

Επιπλέον, αυτά τα χαρακτηριστικά αυξάνουν τα κόστη συγκρινόμενα με τις μπαταρίες υδριδίου νικελίου-μετάλλου, που απαιτούν μόνο μια διάταξη ανασυνδυασμού υδρογόνου/οξυγόνου και μια εφεδρική βαλβίδα πίεσης. Επιμολυντές μέσα στα στοιχεία μπορεί να ανατρέψουν αυτές τις διατάξεις ασφαλείας.

Επίσης, αυτά τα χαρακτηριστικά δεν μπορούν να εφαρμοστούν σε όλα τα είδη στοιχείων, π.χ. τα πρισματικά στοιχεία υψηλού ρεύματος δεν μπορούν να εφοδιαστούν με απαερισμό ή θερμική διακοπή.

Στοιχεία υψηλού ρεύματος δεν πρέπει να παράγουν υπερβολική θερμότητα ή οξυγόνο, για να μην υπάρξει αστοχία, ενδεχομένως βίαιη. Αντίθετα, πρέπει να είναι εξοπλισμένα με εσωτερικές θερμικές ασφάλειες που δρουν πριν να φτάσουν η άνοδος και η κάθοδος τα θερμικά τους όρια.

Βραχυκύκλωμα μιας μπαταρίας θα προκαλέσει την υπερθέρμανση του στοιχείου και ενδεχομένως να πιάσει φωτιά. Γειτονικά στοιχεία μπορεί τότε να υπερθερμανθούν και να αστοχήσουν, προκαλώντας ενδεχομένως την ανάφλεξη ή ρήξη της συνολικής μπαταρίας.

Σε περίπτωση πυρκαγιάς, η συσκευή μπορεί να εκπέμψει πυκνό ερεθιστικό καπνό. Το ενεργειακό περιεχόμενο πυρκαγιάς (ηλεκτρικό + χημικό) των στοιχείων οξειδίου κοβαλτίου είναι περίπου 100 έως 150 kJ/Ah, που το μεγαλύτερο μέρος είναι χημικό.

Η αντικατάσταση του θετικού ηλεκτροδίου οξειδίου κοβαλτίου-λιθίου στις μπαταρίες ιόντων λιθίου με φωσφορικό μέταλλο-λίθιο όπως ο φωσφορικός σίδηρος-λίθιο βελτιώνει τους αριθμούς των κύκλων, τη διάρκεια ζωής και την ασφάλεια, αλλά μειώνει τη χωρητικότητα.

Από το 2006 αυτές οι 'πιο ασφαλείς' μπαταρίες ιόντων λιθίου χρησιμοποιούνται κυρίως σε ηλεκτρικά αυτοκίνητα και σε άλλες εφαρμογές μπαταριών υψηλής χωρητικότητας, όπου η ασφάλεια είναι κρίσιμη.

Οι μπαταρίες ιόντων λιθίου, αντίθετα με τις άλλες επαναφορτίσιμες μπαταρίες, έχουν έναν δυνητικά επικίνδυνο, υπό πίεση, εύφλεκτο, υγρό διαλύτη, και απαιτούν αυστηρό ποιοτικό έλεγχο κατά την κατασκευή. Οι ελαττωματικές μπαταρίες μπορούν να προκαλέσουν σοβαρή πυρκαγιά.

Ελαττωματικοί φορτιστές μπορούν να επηρεάσουν την ασφάλεια των μπαταριών, επειδή μπορούν να καταστρέψουν το κύκλωμα προστασίας της μπαταρίας. Κατά τη φόρτιση σε θερμοκρασίες κάτω του 0 °C, το αρνητικό ηλεκτρόδιο των στοιχείων επιμεταλλώνεται με καθαρό λίθιο, που μπορεί να διακινδυνεύσει την ασφάλεια όλης της συστοιχίας.

ΠΗΓΕΣ ΑΠΟ ΤΟ ΔΙΑΔΙΚΤΥΟ

- <https://www.parvalux.com/news/when-was-the-electric-motor-invented/>
- https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKewjizKerj4jwAhVqhv0HHZUOBvc4ChAWMAZ6B-AgGEAM&url=https%3A%2F%2Feclass.teiwm.gr%2Fmodules%2Fdocument%2Ffile.php%2FBMM111%2F%25CE%2598%25CE%2595%25CE%25A9%25CE%25A1%25CE%2599%25CE%2591%2F%25CE%25A0%25CE%25B1%25CF%2581%25CE%25B1%25CE%25B4%25CF%258C%25CF%2583%25CE%25B5%25CE%25B9%25CF%2582%2F%25CE%25A3%25CE%25B7%25CE%25BC%25CE%25B5%25CE%25B9%25CF%2589%25CF%2583%25CE%25B5%25CE%25B9%25CF%2582_%25CE%259C%25CE%25B7%25CF%2587%25CE%25B1%25CE%25BD%25CE%25AD%25CF%2582_%25CE%2599%25CE%2599_%25CE%25BC%25CE%25BF%25CE%25BD%25CE%25BF.doc&usg=AOvVaw3cm5HL_iwbrMTeRuKCoo7y
- https://oaedhlectrologoi.blogspot.com/2017/03/blog-post_9.html
- <https://www.metadosi-ischios.gr/leitoyrgia-kai-pleonektimata-ton-ilektrokinitiron-proosis/>
- https://www.hna.gr/snd/tomeis/seecs/cv/ht/TOTAL_Ergasies_IKX/92--Dec12_correct_Hlektr_SYSSOREFTES_23_r0t-NEW2019.pdf
- <https://www.amperorio.gr/index.php/el/tehnika-themata-syssvreurwn/item/351-mpataries-ionton-lithiou-typoi-kai-xriseis.html>