



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΥ**  
**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**  
**ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**  
**ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ**

**ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΣΥΓΧΡΟΝΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ**  
**ΜΕ ΜΟΝΙΜΟΥΣ ΜΑΓΝΗΤΕΣ**



**ΜΟΝΑΧΑ ΑΝΑΣΤΑΣΙΑ, ΑΜ: 7507**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΧΑΡΑΛΑΜΠΑΚΟΣ ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ**

**ΠΑΤΡΑ 2022**

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της παρούσας πτυχιακής εργασίας είναι η μελέτη και η σχεδίαση ενός σύγχρονου κινητήρα με μόνιμους μαγνήτες. Ένας κινητήρας μόνιμου μαγνήτη (PM) είναι ένας κινητήρας εναλλασσόμενου ρεύματος που χρησιμοποιεί μαγνήτες ενσωματωμένους ή συνδεδεμένους στην επιφάνεια του ρότορα του κινητήρα. Είναι ιδιαίτερα κατάλληλος για σερβοσυστήματα όπου το μέγεθος, το βάρος, η ισχύς και οι χρόνοι απόκρισης πρέπει να ελαχιστοποιηθούν και απαιτούνται υψηλές ακρίβειες θέσης και ταχύτητας.

Στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάζονται όλοι οι τύποι των κινητήρων. Ακολουθεί το δεύτερο κεφάλαιο όπου αναλύονται τα φαινόμενα του μαγνητισμού και του ηλεκτρομαγνητισμού και στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα είδη και οι ιδιότητες των μαγνητικών υλικών. Κατόπιν, στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η δομή και η λειτουργία του κινητήρα με μόνιμους μαγνήτες και στο έκτο και τελευταίο κεφάλαιο πραγματοποιούνται οι υπολογισμοί της σχεδίασης.

## ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ .....	I
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ.....	II
ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ .....	IV
ΠΙΝΑΚΑΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ .....	IV
1.ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 - ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	1
1.1 Τύποι κινητήρων.....	1
1.1.1 Σύγχρονη Μηχανή.....	1
1.1.2 Κινητήρες Συνεχούς Ρεύματος με Ψήκτρες.....	3
1.1.3 Σύγχρονος κινητήρας μόνιμου μαγνήτη (κινητήρας χωρίς ψήκτρες DC) .....	4
1.1.4 Τριφασικός επαγωγικός κινητήρας .....	5
1.1.5 Μονοφασικός επαγωγικός κινητήρας .....	6
2.ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 - ΤΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ΤΟΥ ΜΑΓΝΗΤΙΣΜΟΥ ΚΑΙ ΤΟΥ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΣΜΟΥ.....	9
2.1 Μαγνητισμός.....	9
2.1.1 Η Φύση του Μαγνητισμού.....	9
2.1.2 Ευθυγράμμιση μαγνητικού μορίου ενός κομματιού σιδήρου και ενός μαγνήτη .....	10
2.1.3 Μαγνητική Ροή.....	12
2.1.4 Το μέγεθος του μαγνητισμού .....	15
2.2 Ηλεκτρομαγνητισμός .....	16
2.2.1 Ο κανόνας του αριστερού χεριού.....	17
3.ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 - ΜΑΓΝΗΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ.....	22
3.1 Μαλακά μαγνητικά υλικά .....	24
3.2 Σκληρά μαγνητικά υλικά.....	25
4.ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 -ΚΙΝΗΤΗΡΑΣ ΜΟΝΙΜΟΥ ΜΑΓΝΗΤΗ -ΔΟΜΗ ΚΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ .....	27
4.1 Κινητήρες με μόνιμους μαγνήτες PM.....	27
4.1.1 Βασικές έννοιες .....	28
4.2 Κατανόηση της ροπής της μηχανής PM.....	32
4.3 SPM έναντι IPM: Κατασκευαστικές κατηγορίες κινητήρων PM.....	33
4.3.1 Διακύμανση επαγωγής κινητήρα PM με φορτίο .....	35
4.4 Εξασθένιση/ενίσχυση ροής κινητήρων PM.....	35
4.5 Πυκνότητα ισχύος κινητήρα IPM .....	36
4.6 Απομαγνητισμός μόνιμου μαγνήτη.....	37
4.7 Λειτουργία αυτοανίχνευσης έναντι κλειστού βρόχου.....	38
4.8 Σερβοκινητήρες .....	38
4.9 Τύποι Υλικών Μόνιμου Μαγνήτη .....	39
4.9.1 Alnicos.....	39
4.9.2 Φερρίτες .....	39
4.9.3 Σπάνιες γαίες.....	40
4.10 Εφαρμογές του κινητήρα συνεχούς ρεύματος μόνιμου μαγνήτη .....	40
4.11 Πλεονεκτήματα του κινητήρα συνεχούς ρεύματος μόνιμου μαγνήτη .....	41
4.12 Μειονεκτήματα του κινητήρα συνεχούς ρεύματος μόνιμου μαγνήτη.....	42
5.ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 - ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ.....	42
5.1 Οι προδιαγραφές του εναλλακτήρα .....	42
5.2 Διαστάσεις.....	42
5.3 Σχεδιασμός οπλισμού .....	43
5.4 Τυλίγματα τυμπάνου .....	44
5.5 Μέγεθος αγωγού.....	45
5.6 Επιλογή μεγέθους και σχήματος αυλακιού: .....	45
5.7 Αμπεροτυλίγματα του διακένου.....	47
5.8 Σχεδίαση των πόλων .....	49
5.9 Χαρακτηριστικά ανοικτού κυκλώματος .....	52

5.10	Αντίσταση τυμπάνου ανά φάση .....	53
5.11	Αντίδραση τυμπάνου $X_1$ .....	54
5.12	Χαρακτηριστικά βραχυκύκλωσης.....	54
5.13	Υπολογισμός της διακύμανσης.....	55
5.14	Short circuit ratio.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
5.15	Υπολογισμός των $X_q$ και $X_d$ .....	57
5.16	Σχεδιασμός τυλίγματος πεδίου.....	57
5.17	Αντίσταση τυλίγματος πεδίου .....	58
5.18	Βάρος χαλκού στο τύλιγμα του πεδίου.....	59
5.19	Απώλειες σιδήρου στο δόντι του τυμπάνου και στο πυρήνα: .....	59
5.20	Βάρος πυρήνα τυμπάνου:.....	60
5.21	Βάρος χαλκού στο τύμπανο .....	61
5.22	Απώλειες και απόδοση του εναλλακτήρα.....	62
6.	.....	BIBLIOΓΡΑΦΙΑ
	.....	63

## ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1-1	Τομή κινητήρα Σ.Ρ. με ψήκτρες.....	4
Σχήμα 1-2	Τομή σύγχρονου κινητήρα χωρίς ψήκτρες.....	4
Σχήμα 1-3	Τομή τριφασικού επαγωγικού κινητήρα κλωβού.....	7
Σχήμα 1-4	Τομή μονοφασικού επαγωγικού κινητήρα.....	8
Σχήμα 2-1	Μοριακή ευθυγράμμιση των σιδηρομαγνητικών υλικών ...	11
Σχήμα 2-2	Γραμμές δύναμης από μια ράβδο μαγνήτες μαγνητικό πεδίο.....	13
Σχήμα 2-3	Μαγνητικό Πεδίο Όμοιων και Ανόμοιων Πόλων.....	15
Σχήμα 2-4	Μαγνητικό πεδίο γύρω από έναν αγωγό.....	17
Σχήμα 2-5	Ο κανόνας του αριστερού χεριού.....	18
Σχήμα 2-6	Ηλεκτρομαγνητισμός γύρω από έναν βρόχο.....	19
Σχήμα 2-7	Δυναμικές γραμμές γύρω από τον Βρόχο.....	19
Σχήμα 4-1	Τομή ενός κινητήρα LSPM ( <a href="https://www.researchgate.net/figure/The-structure-of-three-phase-LS-PMSM-Four-Pole_fig3_320852875">https://www.researchgate.net/figure/The-structure-of-three-phase-LS-PMSM-Four-Pole_fig3_320852875</a> ).....	28
Σχήμα 4-2	Τομή κινητήρα PM με πόλους στην επιφάνεια του ρότορα (αριστερά) και μέσα στο ρότορα (δεξιά) ( <a href="http://m.vectormagnets.com/oid1742283/Permanent-Magnet-Motors.htm">http://m.vectormagnets.com/oid1742283/Permanent-Magnet-Motors.htm</a> ).....	34
Σχήμα 5-1	Διαστάσεις αυλακιού.....	45
Σχήμα 5-2	Διαστάσεις πυρήνα.....	48
Σχήμα 5-3	Πόλος, σχήμα ποδιού και διαστάσεις του πόλου.....	50
Σχήμα 5-4	Τομή τυλίγματος (όλες οι διαστάσεις σε mm).....	58

## ΠΙΝΑΚΑΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Διάγραμμα 5-1	Χαρακτηριστική ανοικτού κυκλώματος.....	55
Διάγραμμα 5-2	Διανυσματικό διάγραμμα.....	56

# 1. ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 - ΕΙΣΑΓΩΓΗ

## 1.1 Τύποι κινητήρων

### 1.1.1 Σύγχρονες Μηχανές

Η σύγχρονη μηχανή είναι διπλής τροφοδότησης. Το τύλιγμα τυμπάνου είναι απόλυτα όμοιο με εκείνο των μηχανών επαγωγής, βρίσκεται συνήθως στο στάτη και είναι τριφασικό διανεμημένο τύλιγμα.

Το τύλιγμα του δρομέα γνωστό και ως τύλιγμα διέγερσης ή τύλιγμα πεδίου, είναι τύλιγμα συνεχούς ρεύματος και ανάλογα του αριθμού των πόλων μπορεί να είναι διανεμημένο ή συγκεντρωμένο. Σε σπάνιες περιπτώσεις, είναι δυνατόν το τύλιγμα τυμπάνου να βρίσκεται στο δρομέα και το τύλιγμα διέγερσης στο στάτη.

**Κατηγορίες σύγχρονων μηχανών** (Ανάλογα με τον αριθμό των πόλων)

- Μηχανές κυλινδρικού δρομέα (Πολύστροφες μηχανές. Συνήθως είναι διπολικές, τετραπολικές)
- Μηχανές έκτυπων πόλων (Αργόστροφες μηχανές. Πρακτικά άνω των τεσσάρων πόλων, (οι σύγχρονες μηχανές κατασκευάζονται με έκτυπους πόλους).

Οι μηχανές ομοιόμορφου διάκενου, εμφανίζουν καλύτερα δυναμικά χαρακτηριστικά σε σχέση με τις μηχανές έκτυπων πόλων.

Οι δρομείς των μηχανών ομοιόμορφου διάκενου είναι μεγαλύτερου ενεργού μήκους και μικρότερης διαμέτρου, από τους αντίστοιχους δρομείς των μηχανών με έκτυπους πόλους (για τον περιορισμό των φυγοκεντρικών δυνάμεων αλλά και τη μείωση της ροπής αδράνειας των στρεφόμενων μαζών).

**Μόνιμη κατάσταση λειτουργίας**

Ανεξάρτητα από το είδος της λειτουργίας της ως κινητήρα ή γεννήτρια και τις συνθήκες φόρτισης, στρέφεται πάντα με σταθερό αριθμό στροφών (σύγχρονο αριθμό στροφών)

Σε αντίθεση λοιπόν με τις ασύγχρονες μηχανές, στις σύγχρονες μηχανές η ολίσθηση του δρομέα είναι μηδενική. Δηλαδή, το στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο στο διάκενο της μηχανής και ο δρομέας, στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας, στρέφονται με την ίδια ταχύτητα.

Οι σύγχρονες μηχανές, χρησιμοποιούνται κυρίως ως γεννήτριες και λιγότερο ως κινητήρες.

(π.χ. Αντλητικούς υδροηλεκτρικούς σταθμούς)

### **Βασικό πλεονέκτημα σύγχρονης γεννήτριας**

Εύκολη ρύθμιση της ενεργής και της άεργης ισχύος.

### **Χαρακτηριστικό των σύγχρονων κινητήρων**

Με κατάλληλη ρύθμιση της διέγερσης, για τις ίδιες συνθήκες φόρτισης μπορεί να εμφανίζουν χωρητική, επαγωγική ή ωμική συμπεριφορά.

Υπάρχουν σύγχρονοι κινητήρες (στα κέντρα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και στους υποσταθμούς βιομηχανικών μονάδων μεγάλης ισχύος), οι οποίοι συνήθως είναι χωρίς εξωτερικούς άξονες και οι οποίοι χρησιμοποιούνται σαν τοπικές μονάδες αντιστάθμισης της άεργης ισχύος. Οι κινητήρες αυτοί, δεν παράγουν μηχανικό έργο («επιπλέουν» στο δίκτυο) και κατά τη διάρκεια του εικοσιτετραώρου, με κατάλληλη ρύθμιση της διέγερσης τους, συμπεριφέρονται είτε ως ιδανικοί πυκνωτές είτε ως ιδανικά πηνία.

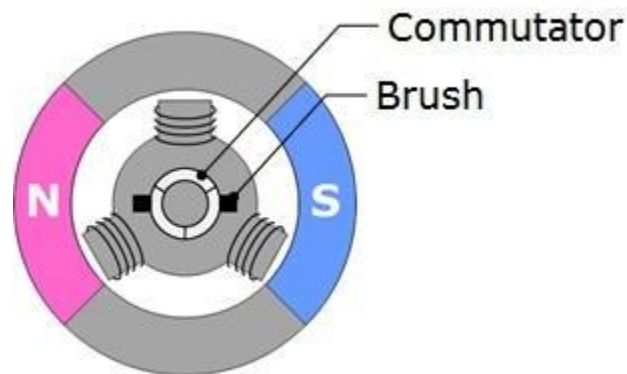
Ένα βασικό χαρακτηριστικό της σύγχρονης μηχανής, ανεξάρτητα από το είδος της λειτουργίας της ως κινητήρα ή γεννήτρια και τις συνθήκες φόρτισης, είναι ότι στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας, στρέφεται πάντα με σταθερό αριθμό στροφών (γνωστό ως σύγχρονο αριθμό στροφών) και στην ιδιότητα αυτή οφείλει και την ονομασία της.

Η ηλεκτρομηχανική μετατροπή της ενέργειας στη συγκεκριμένη κατηγορία μηχανών, γίνεται σε μια ορισμένη ταχύτητα περιστροφής, τη σύγχρονη ταχύτητα (synchronous speed), η οποία εξαρτάται από τον αριθμό των μαγνητικών πόλων των τυλιγμάτων και από τη συχνότητα των ρευμάτων του τυλίγματος τυμπάνου. Σε αντίθεση λοιπόν με τις ασύγχρονες μηχανές, στις σύγχρονες μηχανές η ολίσθηση του δρομέα

είναι μηδενική. Δηλαδή, το στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο στο διάκενο της μηχανής και ο δρομέας, στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας, στρέφονται με την ίδια ταχύτητα. Το βασικό πλεονέκτημα της σύγχρονης γεννήτριας, είναι η ευκολία με την οποία γίνεται η ρύθμιση της ενεργού και της άεργης ισχύος. Επιπρόσθετα, ένα βασικό χαρακτηριστικό των σύγχρονων κινητήρων είναι το ότι με κατάλληλη ρύθμιση της διέγερσης, για τις ίδιες συνθήκες φόρτισης μπορεί να εμφανίζουν χωρητική, επαγωγική ή ωμική συμπεριφορά. Στα κέντρα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς και στους υποσταθμούς βιομηχανικών μονάδων μεγάλης ισχύος, υπάρχουν σύγχρονοι κινητήρες, οι οποίοι συνήθως είναι χωρίς εξωτερικούς άξονες και οι οποίοι χρησιμοποιούνται σαν τοπικές μονάδες αντιστάθμισης της άεργης ισχύος. Οι κινητήρες αυτοί, δεν παράγουν μηχανικό έργο («επιπλέον» στο δίκτυο) και κατά τη διάρκεια του εικοσιτετραώρου, με κατάλληλη ρύθμιση της διέγερσης τους, συμπεριφέρονται είτε ως ιδανικοί πυκνωτές (synchronous condensers) είτε ως ιδανικά πηνία (synchronous inductors).



### 1.1.2 Κινητήρες Συνεχούς Ρεύματος με Ψήκτρες

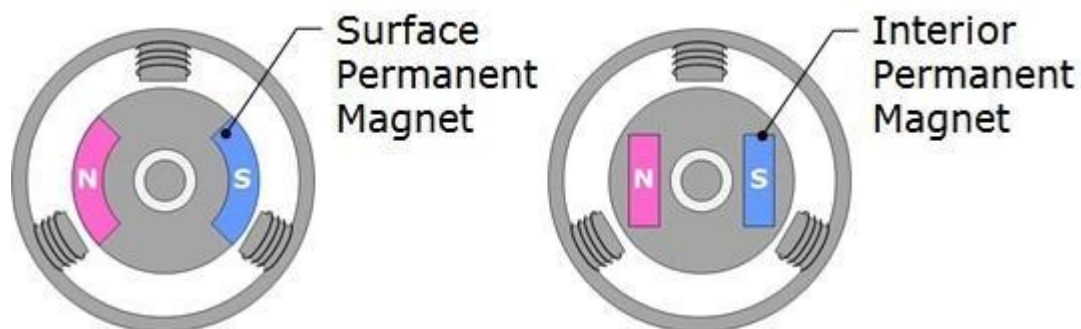


Σχήμα 1-1 Τομή κινητήρα Σ.Ρ. με ψήκτρες

Δεδομένου ότι αυτός ο τύπος κινητήρα κινείται από τροφοδοτικό συνεχούς ρεύματος, ονομάζεται επίσης απλά κινητήρας DC. Πρόκειται για κινητήρα συγκριτικά οικονομικό και εύκολο στην οδήγηση, οπότε χρησιμοποιείται για ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών.

Ένας κινητήρας συνεχούς ρεύματος με ψήκτρες δημιουργεί ροπή αλλάζοντας μηχανικά την κατεύθυνση του ρεύματος σε συντονισμό με την περιστροφή χρησιμοποιώντας έναν μεταγωγέα και ψήκτρες. Στα μειονεκτήματα ενός τέτοιου κινητήρα συγκαταλέγονται η ανάγκη συντήρησης λόγω φθοράς των ψηκτρών και η παραγωγή ηλεκτρικού και μηχανικού θορύβου. Για να αλλάξει την εφαρμοζόμενη τάση, επιτρέποντας έτσι τον έλεγχο της ταχύτητας περιστροφής και της θέσης χρησιμοποιείται η τεχνική PWM

### 1.1.3 Σύγχρονη μηχανή μόνιμου μαγνήτη (κινητήρας χωρίς ψήκτρες DC)



Σχήμα 1-2 Τομή σύγχρονου κινητήρα χωρίς ψήκτρες

Αν αφαιρέσουμε τον μεταγωγέα και τις ψήκτρες που είναι τα μειονεκτήματα του κινητήρα DC με ψήκτρες, έχουμε έναν σύγχρονο κινητήρα μόνιμου μαγνήτη (κινητήρα DC χωρίς ψήκτρες).

Λόγω της έλλειψης ψηκτρών, ο κινητήρας αυτός έχει εξαιρετική διάρκεια ζωής και χαρακτηριστικά χαμηλού θορύβου. Επίσης, μπορεί να επιτύχει μεγάλη απόδοση, επομένως χρησιμοποιείται σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, συμπεριλαμβανομένων των οικιακών συσκευών εξοικονόμησης ενέργειας και των μακροχρόνιων βιομηχανικών εφαρμογών.

Υπάρχουν δύο κύριοι τύποι δομής, που διαφέρουν ως προς τον τρόπο με τον οποίο ο μαγνήτης είναι εξοπλισμένος στο ρότορα.

- Μόνιμος μαγνήτης επιφάνειας (SPM): Αυτός ο τύπος έχει έναν μόνιμο μαγνήτη τοποθετημένο στο εξωτερικό του ρότορα και η μαγνητική διαπερατότητα είναι σταθερή σε όλες τις θέσεις.
- Εσωτερικός μόνιμος μαγνήτης (IPM): Αυτός ο τύπος έχει έναν μόνιμο μαγνήτη ενσωματωμένο στο εσωτερικό του ρότορα και επειδή η μαγνητική διαπερατότητα ποικίλλει ανάλογα με τη θέση, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ροπή μαγνητικής αντίστασης.

Δεδομένου ότι δεν υπάρχει δομή για μηχανική εναλλαγή της κατεύθυνσης του ρεύματος, αυτό πρέπει να γίνει ηλεκτρονικά χρησιμοποιώντας ένα κύκλωμα μετατροπέα. Οδηγώντας ένα κύκλωμα μετατροπέα χρησιμοποιώντας έναν μικροελεγκτή κ.λπ., εφαρμόζεται μια τριφασική τάση εναλλασσόμενου ρεύματος στον στάτορα, δημιουργώντας ένα περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο.

Οι κυματομορφές οδήγησης μπορούν να χωριστούν στους ακόλουθους δύο κύριους τύπους.

- Κυματομορφή τραπεζοειδούς κύματος: Οδηγεί εφαρμόζοντας τραπεζοειδή (ορθογώνια) τάση κύματος.
- Κυματομορφή ημιτονοειδούς κύματος: Οδηγεί εφαρμόζοντας τάση ημιτονοειδούς κύματος προκειμένου να καταστείλει τον κυματισμό των κραδασμών, του θορύβου και της ροπής, τα οποία είναι πιο έντονα με την κίνηση του τραπεζοειδούς κύματος.

Δεδομένου ότι η ροπή είναι ανάλογη με το ρεύμα κίνησης, είναι δυνατός ο έλεγχος θέσης και ταχύτητας με την προσθήκη αισθητήρων θέσης και ταχύτητας.

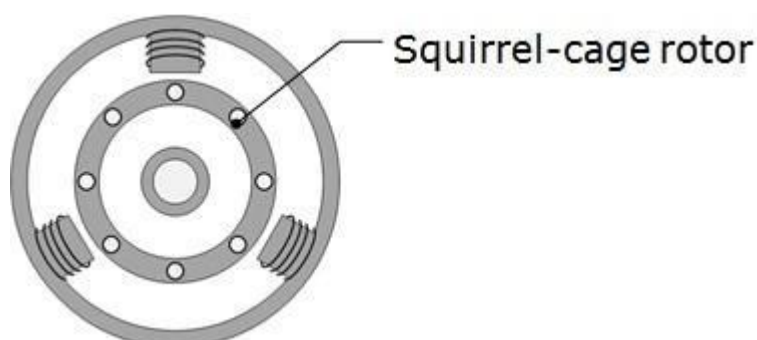
Για αποτελεσματική οδήγηση, είναι απαραίτητος ο εντοπισμός της θέσης του ρότορα (μαγνήτη). Αισθητήρες Hall, κωδικοποιητές και διαχωριστές χρησιμοποιούνται για τον εντοπισμό θέσης. Λόγω των περιορισμών θερμοκρασίας των αισθητήρων και του κόστους, υπάρχουν περιπτώσεις όπου η θέση του ρότορα (μαγνήτης) υπολογίζεται από τριφασικό ρεύμα ή επαγόμενη τάση χωρίς τη χρήση αισθητήρων (εκτίμηση θέσης χωρίς αισθητήρα).

#### **1.1.4 Τριφασικός επαγωγικός κινητήρας**

Μια επαγωγική μηχανή εναλλασσόμενου ρεύματος (Induction Motor) αναφέρεται επίσης ως κινητήρας εναλλασσόμενου ρεύματος. Ένα περιστρεφόμενο πεδίο δημιουργείται από την περιέλιξη του στάτη. Το περιστρεφόμενο πεδίο προκαλεί ρεύμα στις ράβδους του ρότορα. Απαιτείται διαφορά ταχύτητας μεταξύ του ρότορα και του μαγνητικού πεδίου. Η αλληλεπίδραση μεταξύ του πεδίου και του ρεύματος παράγει την κινητήρια δύναμη. Οι επαγωγικές μηχανές εναλλασσόμενου ρεύματος είναι ο κυρίαρχος κινητήρας που λειτουργεί με ρυθμιζόμενες ταχύτητες

Ένας τριφασικός επαγωγικός κινητήρας είναι ένας επαγωγικός κινητήρας που κινείται σε μια τριφασική πηγή ισχύος εναλλασσόμενου ρεύματος. Ένα περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο παράγεται τροφοδοτώντας ένα τριφασικό εναλλασσόμενο ρεύμα το στάτορα και ένα επαγωγικό ρεύμα δημιουργείται στον ρότορα με ηλεκτρομαγνητική επαγωγή. Αυτό το περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο και το επαγόμενο ρεύμα δημιουργούν μια ηλεκτρομαγνητική δύναμη, η οποία προκαλεί την περιστροφή του ρότορα. Δεδομένου ότι το μαγνητικό πεδίο πρέπει να κινείται σε σχέση με τον ρότορα για να δημιουργήσει ένα επαγόμενο ρεύμα, η ταχύτητα περιστροφής του ρότορα είναι πάντα πιο αργή από τη σύγχρονη ταχύτητα του περιστρεφόμενου μαγνητικού πεδίου. Η διαφορά μεταξύ της συχνότητας του περιστρεφόμενου μαγνητικού πεδίου και της συχνότητας

που ισοδυναμεί με την ταχύτητα περιστροφής ονομάζεται συχνότητα ολίσθησης. Η παραγόμενη ροπή είναι ανάλογη με τη συχνότητα ολίσθησης.



**Σχήμα 1-3** Τομή τριφασικού επαγωγικού κινητήρα κλωβού

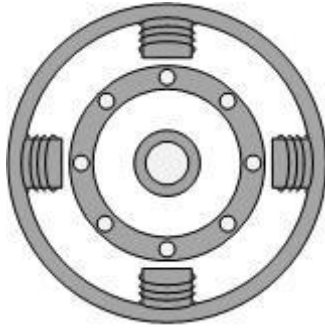
Η δομή ενός τριφασικού επαγωγικού κινητήρα είναι απλή και στιβαρή. Επειδή είναι εύκολο στη χρήση για κινητήρες μεγάλης ισχύος και έχει σχετικά καλή απόδοση, χρησιμοποιείται συχνά σε βιομηχανικές εφαρμογές. Ωστόσο, λόγω της προαναφερθείσας συχνότητας ολίσθησης, είναι ακατάλληλο για έλεγχο θέσης.

Σε πολλές περιπτώσεις, στα εργοστάσια η τροφοδοσία γίνεται απευθείας για να κινεί τον κινητήρα με σταθερή ταχύτητα. Για εφαρμογές εξοικονόμησης ενέργειας με ρυθμιζόμενη ταχύτητα που εκτιμούν την απόδοση, ο κινητήρας μπορεί να κινείται με μετατροπέα για τον έλεγχο της ροπής και της ταχύτητας περιστροφής.

### **1.1.5 Μονοφασικός επαγωγικός κινητήρας**

Οι μονοφασικοί επαγωγικοί κινητήρες είναι ένας τύπος επαγωγικού κινητήρα που όπως υποδηλώνει το όνομα λειτουργούν σε μονοφασική πηγή ισχύος εναλλασσόμενου ρεύματος. Δεδομένου ότι η αυτόματη εκκίνηση δεν είναι δυνατή με μονοφασικό εναλλασσόμενο ρεύμα, ο κινητήρας χρειάζεται έναν τρόπο εκκίνησης.

Οι μονοφασικοί επαγωγικοί κινητήρες μπορούν να χωριστούν στους ακόλουθους τρεις κύριους τύπους, ανάλογα με τον τρόπο εκκίνησης.



*Σχήμα 1-4 Τομή μονοφασικού επαγωγικού κινητήρα*

- Πυκνωτής: Ένας πυκνωτής χωρίζει φάσεις για να παράγει εναλλασσόμενο ρεύμα δύο φάσεων για να αποκτήσει ροπή εκκίνησης.
- Split Phase: Ένα πηνίο εκκίνησης με χαμηλή επαγωγή χρησιμοποιείται για τη λήψη μιας ροπής εκκίνησης.
- Σκιασμένος πόλος: Ένας σκιασμένος πόλος παράγει ένα επαγόμενο ρεύμα, το οποίο χρησιμοποιείται για τη λήψη μιας ροπής εκκίνησης.

Σε πολλές περιπτώσεις, το μονοφασικό εναλλασσόμενο ρεύμα που χρησιμοποιείται στα σπίτια και ούτω καθεξής εισάγεται απευθείας για να κινεί τον κινητήρα με σταθερή ταχύτητα. Η φάση τάσης AC μπορεί να ελεγχθεί χρησιμοποιώντας ένα triac για τον έλεγχο της ταχύτητας περιστροφής.

## 2. ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 – ΤΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ΤΟΥ ΜΑΓΝΗΤΙΣΜΟΥ ΚΑΙ ΤΟΥ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΣΜΟΥ

### 2.1 Μαγνητισμός

Γύρω από έναν αγωγό δημιουργείται ένα μικρό μαγνητικό πεδίο με την κατεύθυνση αυτού του μαγνητικού πεδίου σε σχέση με τους «Βόρειους» και «Νότους» πόλους του να καθορίζεται από την κατεύθυνση του ρεύματος που διαρρέει τον αγωγό.

Ο μαγνητισμός παίζει σημαντικό ρόλο στην Ηλεκτρολογία και την Ηλεκτρονική Μηχανική γιατί χωρίς αυτόν εξαρτήματα όπως ρελέ, ηλεκτρομαγνητικές βαλβίδες, πηνία, τσοκ, μεγάφωνα, κινητήρες, γεννήτριες, μετασχηματιστές και μετρητές ηλεκτρικής ενέργειας κ.λπ., δεν θα λειτουργούσαν αν δεν υπήρχε μαγνητισμός.

Στη συνέχεια, κάθε πηνίο σύρματος χρησιμοποιεί την επίδραση του ηλεκτρομαγνητισμού όταν ένα ηλεκτρικό ρεύμα ρέει μέσα από αυτό. Αλλά προτού μπορέσουμε να δούμε τον Μαγνητισμό και ειδικά τον Ηλεκτρομαγνητισμό με περισσότερες λεπτομέρειες, πρέπει να θυμηθούμε πίσω στα μαθήματα φυσικής μας για το πώς λειτουργούν οι μαγνήτες και ο μαγνητισμός.

#### 2.1.1 Η Φύση του Μαγνητισμού

Οι μαγνήτες μπορούν να βρεθούν σε φυσική κατάσταση με τη μορφή μαγνητικού μεταλλεύματος, με τους δύο κύριους τύπους να είναι ο μαγνητίτης που ονομάζεται επίσης «οξειδίο του σιδήρου», ( $Fe_3O_4$ ) και ο Lodestone, που ονομάζεται επίσης «κύριος λίθος». Εάν αυτοί οι δύο φυσικοί μαγνήτες αιωρούνται από ένα κομμάτι χορδής, θα πάρουν μια θέση ευθυγραμμισμένη με το μαγνητικό πεδίο της Γης που δείχνει πάντα βόρεια.

Ένα καλό παράδειγμα αυτού του εφέ είναι η βελόνα μιας πυξίδας. Για τις περισσότερες πρακτικές εφαρμογές, αυτοί οι φυσικοί μαγνήτες μπορούν να αγνοηθούν καθώς ο μαγνητισμός τους είναι πολύ χαμηλός και επειδή στις μέρες μας, οι τεχνητοί μαγνήτες μπορούν να παραχθούν σε πολλά διαφορετικά σχήματα, μεγέθη και μαγνητικές αντοχές.

Υπάρχουν βασικά δύο μορφές μαγνητισμού, οι "Μόνιμοι Μαγνήτες" και οι "Προσωρινοί Μαγνήτες", με τον τύπο που χρησιμοποιείται να εξαρτάται από την εφαρμογή του. Υπάρχουν πολλοί διαφορετικοί τύποι υλικών που διατίθενται για την κατασκευή μαγνητών, όπως σίδηρος, νικέλιο, κράματα νικελίου, χρώμιο και κοβάλτιο και στη φυσική τους κατάσταση ορισμένα από αυτά τα στοιχεία όπως το νικέλιο και το κοβάλτιο εμφανίζουν από μόνα τους πολύ φτωχές μαγνητικές ποσότητες.

Ωστόσο, όταν αναμειγνύονται ή «κραματίζονται» μαζί με άλλα υλικά όπως ο σίδηρος ή το υπεροξείδιο του αλουμινίου γίνονται πολύ ισχυροί μαγνήτες παράγοντας ασυνήθιστα ονόματα όπως «alcomax», «hycomax», «alni» και «alnico».

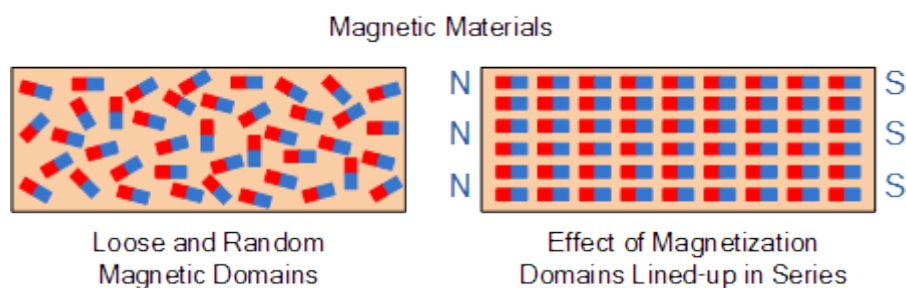
Το μαγνητικό υλικό στη μη μαγνητική κατάσταση έχει τη μοριακή του δομή με τη μορφή χαλαρών μαγνητικών αλυσίδων ή μεμονωμένων μικροσκοπικών μαγνητών χαλαρά διατεταγμένων σε ένα τυχαίο σχέδιο. Η συνολική επίδραση αυτού του τύπου διάταξης έχει ως αποτέλεσμα μηδενικό ή πολύ ασθενή μαγνητισμό καθώς αυτή η τυχαία διάταξη κάθε μοριακού μαγνήτη τείνει να εξουδετερώνει τον γείτονά του.

Όταν το υλικό μαγνητίζεται, αυτή η τυχαία διάταξη των μορίων αλλάζει και οι μικροσκοπικοί μη ευθυγραμμισμένοι και τυχαίοι μοριακοί μαγνήτες «παρατάσσονται» με τέτοιο τρόπο ώστε να παράγουν μια σειρά μαγνητική διάταξη. Αυτή η ιδέα της μοριακής ευθυγράμμισης των σιδηρομαγνητικών υλικών είναι γνωστή ως Θεωρία του Weber και απεικονίζεται παρακάτω.

### **2.1.2 Ευθυγράμμιση μαγνητικού μορίου ενός κομματιού σιδήρου και ενός μαγνήτη**

Η θεωρία του Weber βασίζεται στο γεγονός ότι όλα τα άτομα έχουν μαγνητικές ιδιότητες λόγω της περιστροφικής δράσης των ηλεκτρονίων των ατόμων. Ομάδες ατόμων ενώνονται μεταξύ τους έτσι ώστε τα μαγνητικά τους πεδία να περιστρέφονται όλα προς την ίδια κατεύθυνση. Τα μαγνητικά υλικά αποτελούνται από ομάδες μικροσκοπικών μαγνητών σε μοριακό επίπεδο γύρω από τα άτομα και ένα μαγνητισμένο υλικό θα έχει τους περισσότερους μικροσκοπικούς μαγνήτες του

ευθυγραμμισμένους προς μία μόνο κατεύθυνση για να δημιουργήσουν έναν βόρειο πόλο στη μία κατεύθυνση και έναν νότιο πόλο στην άλλη κατεύθυνση



Σχήμα 2-1 Μοριακή ευθυγράμμιση των σιδηρομαγνητικών υλικών

Ομοίως, ένα υλικό που έχει τους μικροσκοπικούς μοριακούς μαγνήτες του στραμμένους προς όλες τις κατευθύνσεις θα εξουδετερώσει τους μοριακούς του μαγνήτες από τον γειτονικό του μαγνήτη, εξουδετερώνοντας έτσι κάθε μαγνητικό αποτέλεσμα. Αυτές οι περιοχές μοριακών μαγνητών ονομάζονται «τομείς».

Οποιοδήποτε μαγνητικό υλικό θα παράγει από μόνο του ένα μαγνητικό πεδίο το οποίο εξαρτάται από τον βαθμό ευθυγράμμισης των μαγνητικών περιοχών στο υλικό που δημιουργούνται από τροχιακά και περιστρεφόμενα ηλεκτρόνια. Αυτός ο βαθμός ευθυγράμμισης μπορεί να προσδιοριστεί από μια ποσότητα γνωστή ως μαγνήτιση,  $M$ .

Σε ένα μη μαγνητισμένο υλικό,  $M = 0$ , αλλά μερικές από τις περιοχές παραμένουν ευθυγραμμισμένες σε μικρές περιοχές του υλικού μόλις αφαιρεθεί το μαγνητικό πεδίο. Το αποτέλεσμα της εφαρμογής μιας δύναμης μαγνήτισης στο υλικό είναι να ευθυγραμμιστούν ορισμένες από τις περιοχές για να παραχθεί μια μη μηδενική τιμή μαγνήτισης.

Μόλις αφαιρεθεί η δύναμη μαγνήτισης, ο μαγνητισμός μέσα στο υλικό είτε θα παραμείνει είτε θα αποσυντεθεί γρήγορα ανάλογα με το μαγνητικό υλικό που χρησιμοποιείται. Αυτή η ικανότητα ενός υλικού να διατηρεί τον μαγνητισμό του ονομάζεται συγκράτηση.

Τα υλικά που απαιτείται να διατηρήσουν τον μαγνητισμό τους θα έχουν αρκετά υψηλή ικανότητα συγκράτησης και ως τέτοια χρησιμοποιούνται



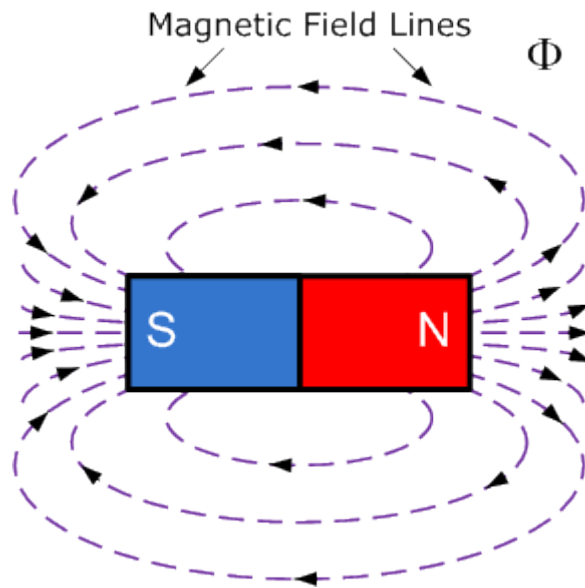
για την κατασκευή μόνιμων μαγνητών, ενώ εκείνα τα υλικά που απαιτούνται για να χάσουν γρήγορα τον μαγνητισμό τους, όπως οι μαλακοί πυρήνες σιδήρου για ρελέ και ηλεκτρομαγνητικές βαλβίδες θα έχουν πολύ χαμηλή ικανότητα συγκράτησης.

### 2.1.3 Μαγνητική Ροή

Όλοι οι μαγνήτες, ανεξάρτητα από το σχήμα τους, έχουν δύο περιοχές που ονομάζονται μαγνητικοί πόλοι με τον μαγνητισμό τόσο μέσα όσο και γύρω από ένα μαγνητικό κύκλωμα να παράγει μια ορισμένη αλυσίδα οργανωμένων και ισορροπημένων σχεδίων αόρατων γραμμών ροής γύρω του. Αυτές οι γραμμές ροής αναφέρονται συλλογικά ως το «μαγνητικό πεδίο» του μαγνήτη. Το σχήμα αυτού του μαγνητικού πεδίου είναι πιο έντονο σε ορισμένα μέρη από άλλα με την περιοχή του μαγνήτη που έχει τον μεγαλύτερο μαγνητισμό να ονομάζεται «πόλοι». Σε κάθε άκρο ενός μαγνήτη υπάρχει ένας πόλος.

Αυτές οι γραμμές ροής (που ονομάζονται διανυσματικό πεδίο) δεν είναι ορατές με γυμνό μάτι, αλλά μπορούν να φανούν οπτικά χρησιμοποιώντας γεμίσματα σιδήρου πασπαλισμένα σε ένα φύλλο χαρτιού ή χρησιμοποιώντας μια μικρή πυξίδα για να τις εντοπίσετε. Οι μαγνητικοί πόλοι είναι πάντα παρόντες σε ζεύγη, υπάρχει πάντα μια περιοχή του μαγνήτη που ονομάζεται Βόρειος Πόλος και υπάρχει πάντα μια αντίθετη περιοχή που ονομάζεται Νότιος Πόλος.

Τα μαγνητικά πεδία εμφανίζονται πάντα οπτικά ως γραμμές δύναμης που δίνουν έναν καθορισμένο πόλο σε κάθε άκρο του υλικού όπου οι γραμμές ροής είναι πιο πυκνές και συγκεντρωμένες. Οι γραμμές που συνθέτουν ένα μαγνητικό πεδίο που δείχνει την κατεύθυνση και την ένταση ονομάζονται Γραμμές Δύναμης ή πιο κοινά «Μαγνητική Ροή» και τους δίνεται το ελληνικό σύμβολο, Phi ( $\Phi$ ) όπως φαίνεται παρακάτω.



Σχήμα 2-2 Γραμμές δύναμης από μια ράβδο μαγνήτες μαγνητικό πεδίο

Όπως φαίνεται παραπάνω, το μαγνητικό πεδίο είναι ισχυρότερο κοντά στους πόλους του μαγνήτη όταν οι γραμμές ροής απέχουν πιο στενά. Η γενική κατεύθυνση για τη ροή της μαγνητικής ροής είναι από τον Βόρειο (B) προς τον Νότιο (N) πόλο. Επιπλέον, αυτές οι μαγνητικές γραμμές σχηματίζουν κλειστούς βρόχους που φεύγουν από τον βόρειο πόλο του μαγνήτη και εισέρχονται στον νότιο πόλο. Οι μαγνητικοί πόλοι είναι πάντα σε ζεύγη.

Ωστόσο, η μαγνητική ροή στην πραγματικότητα δεν ρέει από τον βορρά στον νότιο πόλο ή ρέει οπουδήποτε για αυτό το θέμα, καθώς η μαγνητική ροή είναι μια στατική περιοχή γύρω από έναν μαγνήτη στην οποία υπάρχει η μαγνητική δύναμη. Με άλλα λόγια, η μαγνητική ροή δεν ρέει ούτε κινείται είναι απλώς εκεί και δεν επηρεάζεται από τη βαρύτητα. Μερικά σημαντικά γεγονότα προκύπτουν όταν σχεδιάζονται δυναμικές γραμμές:

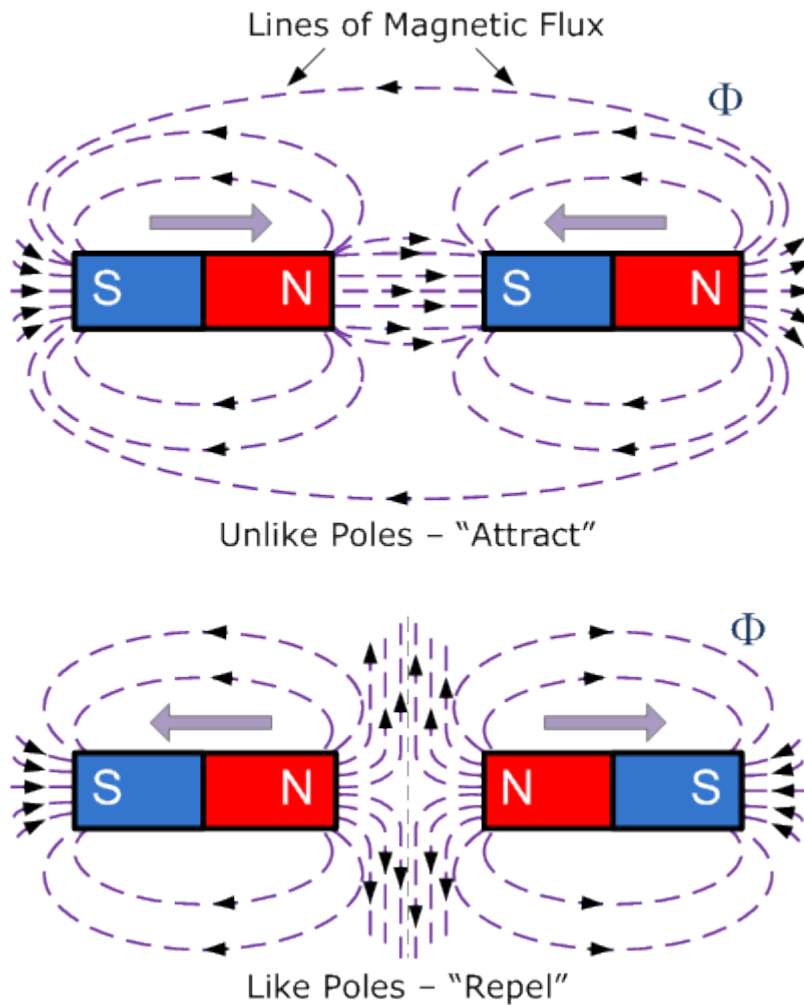
- Οι δυναμικές γραμμές ΠΟΤΕ δεν διασταυρώνονται.
- Οι δυναμικές γραμμές είναι ΣΥΝΕΧΕΙΣ.
- Οι δυναμικές γραμμές σχηματίζουν πάντα μεμονωμένους ΚΛΕΙΣΤΟΥΣ ΔΡΟΜΟΥΣ γύρω από τον μαγνήτη.

- Οι δυναμικές γραμμές έχουν συγκεκριμένη ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ από Βορρά προς Νότο.
- Οι δυναμικές γραμμές που είναι κοντά μεταξύ τους υποδεικνύουν ΙΣΧΥΡΟ μαγνητικό πεδίο.
- Οι δυναμικές γραμμές που απέχουν περισσότερο μεταξύ τους υποδηλώνουν Ασθενές μαγνητικό πεδίο.

Οι μαγνητικές δυνάμεις έλκονται και απωθούνται όπως οι ηλεκτρικές δυνάμεις και όταν δύο δυναμικές γραμμές έρχονται κοντά μεταξύ τους, η αλληλεπίδραση μεταξύ των δύο μαγνητικών πεδίων προκαλεί ένα από τα δύο πράγματα:

1. Όταν διπλανοί πόλοι είναι ίδιοι, (Βορράς-Βορράς ή Νότος-Νότος) ΑΠΟΚΡΟΥΟΥΝ ο ένας τον άλλον.
2. Όταν οι διπλανοί πόλοι δεν είναι ίδιοι, (βορράς-νότος ή νότος-βορράς) ΕΛΚΟΥΝ ο ένας τον άλλον.

Αυτό το φαινόμενο απομνημονεύεται εύκολα από τη διάσημη έκφραση ότι «τα αντίθετα έλκονται» και αυτή η αλληλεπίδραση των μαγνητικών πεδίων μπορεί εύκολα να αποδειχθεί χρησιμοποιώντας γεμίσματα σιδήρου για να δείξει τις γραμμές δύναμης γύρω από έναν μαγνήτη. Η επίδραση στα μαγνητικά πεδία των διάφορων συνδυασμών πόλων όπως όμοιοι πόλοι απωθούνται και σε αντίθεση με τους πόλους έλκονται φαίνεται παρακάτω.



Σχήμα 2-3 Μαγνητικό Πεδίο Όμοιων και Ανόμοιων Πόλων

#### 2.1.4 Το μέγεθος του μαγνητισμού

Στις δυναμικές γραμμές ή συνηθέστερα η μαγνητική ροή γύρω από ένα μαγνητικό υλικό δίνεται το ελληνικό σύμβολο, Phi, ( $\Phi$ ) με μονάδα ροής το Weber (Wb), μετά τον Wilhelm Eduard Weber. Αλλά ο αριθμός των δυναμικών γραμμών μέσα σε μια δεδομένη μονάδα εμβαδού ονομάζεται "Πυκνότητα ροής" και δεδομένου ότι η ροή ( $\Phi$ ) μετριέται σε (Wb) και η περιοχή (A) σε μέτρα στο τετράγωνο ( $m^2$ ), μετράται επομένως η πυκνότητα ροής σε  $Wb/m^2$  και δίνεται το σύμβολο B.

Ωστόσο, όταν αναφερόμαστε στην πυκνότητα ροής στον μαγνητισμό, η πυκνότητα ροής δίνεται στη μονάδα του Tesla μετά τον Nikola Tesla, επομένως ένα  $Wb/m^2$  είναι ίσο με ένα Tesla. Η πυκνότητα ροής είναι

ανάλογη με τις δυναμικές γραμμές και αντιστρόφως ανάλογη με το εμβαδόν, οπότε μπορούμε να ορίσουμε την πυκνότητα ροής ως:

$$\text{πυκνότητα μαγνητικής ροής} = \frac{\text{μαγνητική ροή (weber)}}{\text{Εμβαδόν (m}^2\text{)}}$$

Το σύμβολο για την πυκνότητα της μαγνητικής ροής είναι το  $B$  και η μονάδα της πυκνότητας της μαγνητικής ροής είναι ο Tesla,  $T$ .

$$B = \frac{\Phi}{A} (T)$$

## 2.2 Ηλεκτρομαγνητισμός

Ενώ οι μόνιμοι μαγνήτες παράγουν ένα καλό και μερικές φορές πολύ ισχυρό στατικό μαγνητικό πεδίο, σε ορισμένες εφαρμογές η ισχύς αυτού του μαγνητικού πεδίου είναι ακόμα πολύ ασθενής ή πρέπει να είμαστε σε θέση να ελέγξουμε την ποσότητα της μαγνητικής ροής που υπάρχει. Για να δημιουργήσουμε λοιπόν ένα πολύ ισχυρότερο και πιο ελεγχόμενο μαγνητικό πεδίο πρέπει να χρησιμοποιήσουμε ηλεκτρισμό.

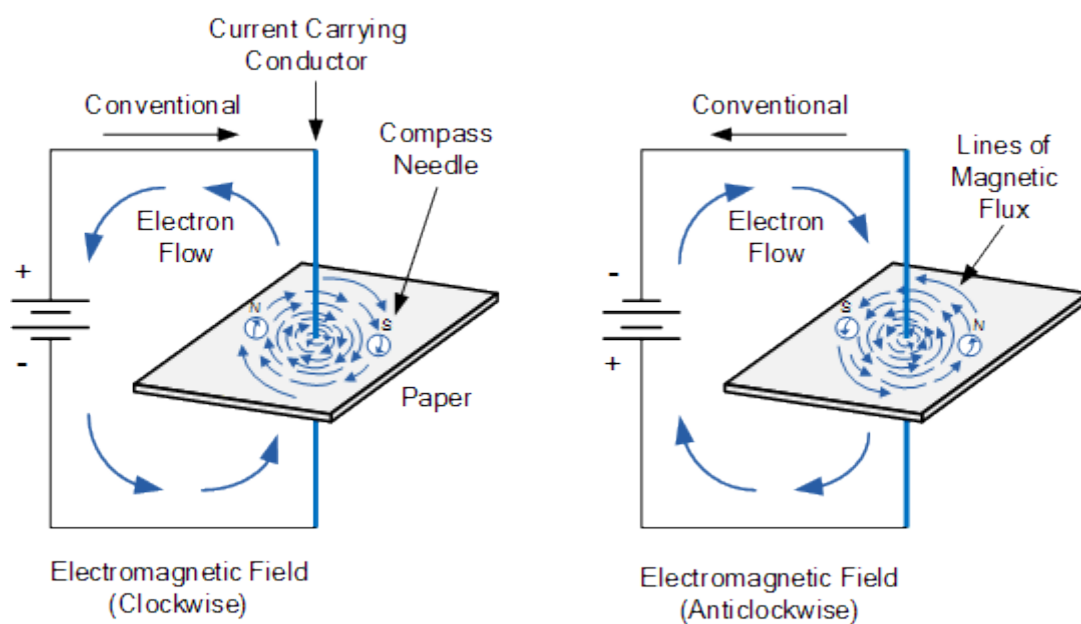
Χρησιμοποιώντας πηνία σύρματος τυλιγμένα γύρω από ένα μαλακό μαγνητικό υλικό, όπως ένας πυρήνας σιδήρου, μπορούμε να παράγουμε πολύ ισχυρούς ηλεκτρομαγνήτες για χρήση σε πολλούς διαφορετικούς τύπους ηλεκτρικών εφαρμογών. Αυτή η χρήση πηνίων σύρματος παράγει μια σχέση μεταξύ ηλεκτρισμού και μαγνητισμού που μας δίνει μια άλλη μορφή μαγνητισμού που ονομάζεται Ηλεκτρομαγνητισμός.

Ο ηλεκτρομαγνητισμός παράγεται όταν ένα ηλεκτρικό ρεύμα ρέει μέσω ενός απλού αγωγού, όπως ένα σύρμα ή καλώδιο, και καθώς το ρεύμα διέρχεται κατά μήκος ολόκληρου του αγωγού, δημιουργείται ένα μαγνητικό πεδίο κατά μήκος ολόκληρου του αγωγού. Το μικρό μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται γύρω από τον αγωγό έχει μια καθορισμένη κατεύθυνση με τον «Βόρειο» και τον «Νότιο» πόλο που παράγονται να καθορίζονται από την κατεύθυνση του ηλεκτρικού ρεύματος που ρέει μέσω του αγωγού.

Ως εκ τούτου, είναι απαραίτητο να δημιουργηθεί μια σχέση μεταξύ του ρεύματος που ρέει μέσω του αγωγού και του προκύπτοντος μαγνητικού

πεδίου που παράγεται γύρω του από αυτή τη ροή ρεύματος, επιτρέποντάς μας να ορίσουμε τη σχέση που υπάρχει μεταξύ Ηλεκτρισμού και Μαγνητισμού με τη μορφή Ηλεκτρομαγνητισμού.

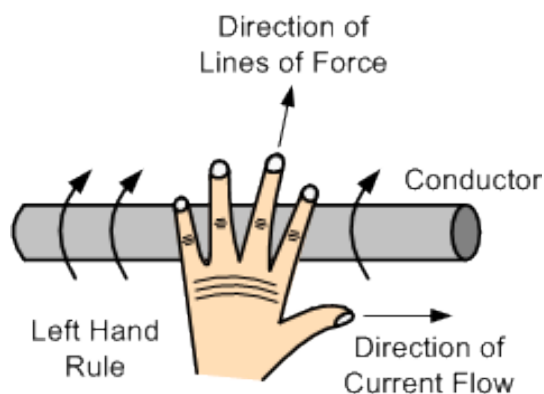
Όταν ένα ηλεκτρικό ρεύμα ρέει μέσα από έναν αγωγό παράγεται γύρω του ένα κυκλικό ηλεκτρομαγνητικό πεδίο με τις δυναμικές γραμμές να σχηματίζουν πλήρεις βρόχους που δεν διασχίζουν όλο το μήκος του αγωγού. Η φορά περιστροφής αυτού του μαγνητικού πεδίου διέπεται από την κατεύθυνση του ρεύματος που ρέει μέσω του αγωγού με το αντίστοιχο μαγνητικό πεδίο που παράγεται να είναι ισχυρότερο κοντά στο κέντρο του αγωγού που μεταφέρει ρεύμα. Αυτό οφείλεται στο ότι το μήκος διαδρομής των βρόχων είναι μεγαλύτερο όσο πιο μακριά από τον αγωγό με αποτέλεσμα ασθενέστερες γραμμές ροής όπως φαίνεται παρακάτω.



Σχήμα 2-4 Μαγνητικό πεδίο γύρω από έναν αγωγό

### 2.2.1 Ο κανόνας του αριστερού χεριού

Μια έννοια που καθορίζει τόσο την κατεύθυνση της ροής του ρεύματος όσο και την προκύπτουσα κατεύθυνση της μαγνητικής ροής γύρω από τον αγωγό ονομάζεται «Κανόνας του αριστερού χεριού».



Σχήμα 2-5 Ο κανόνας του αριστερού χεριού

Η αναγνωρισμένη κατεύθυνση ενός μαγνητικού πεδίου είναι από τον βόρειο πόλο του προς τον νότιο πόλο του. Αυτή η κατεύθυνση μπορεί να συναχθεί κρατώντας τον αγωγό μεταφοράς ρεύματος στο αριστερό χέρι με τον αντίχειρα εκτεταμένο να δείχνει προς την κατεύθυνση της ροής των ηλεκτρονίων από αρνητικό προς θετικό.

Η θέση των δακτύλων που βρίσκονται κατά μήκος και γύρω από τον αγωγό θα είναι τώρα στραμμένη προς την κατεύθυνση των παραγόμενων μαγνητικών δυναμικών γραμμών όπως φαίνεται.

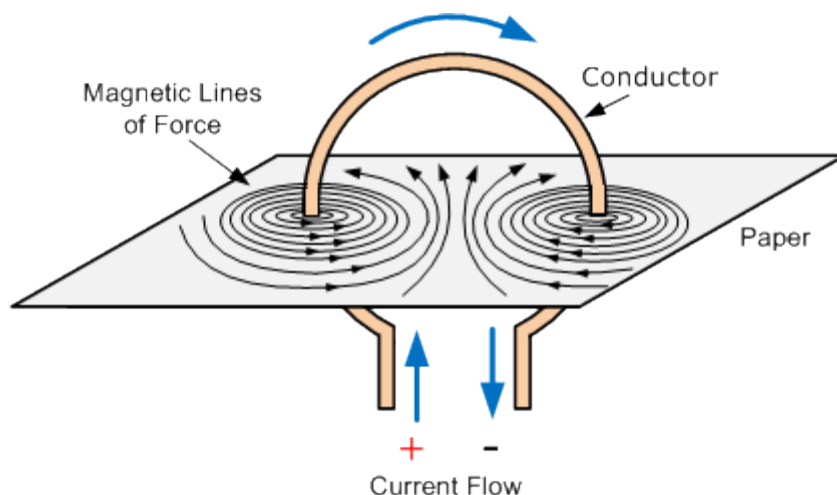
Εάν η κατεύθυνση του ηλεκτρονίου που ρέει μέσω του αγωγού αντιστραφεί, το αριστερό χέρι θα πρέπει να τοποθετηθεί στην άλλη πλευρά του αγωγού με τον αντίχειρα να δείχνει προς τη νέα κατεύθυνση της ροής του ρεύματος ηλεκτρονίων.

Επίσης, καθώς το ρεύμα αντιστρέφεται, η κατεύθυνση του μαγνητικού πεδίου που παράγεται γύρω από τον αγωγό θα αντιστραφεί επίσης επειδή, όπως είπαμε προηγουμένως, η κατεύθυνση του μαγνητικού πεδίου εξαρτάται από την κατεύθυνση της ροής του ρεύματος.

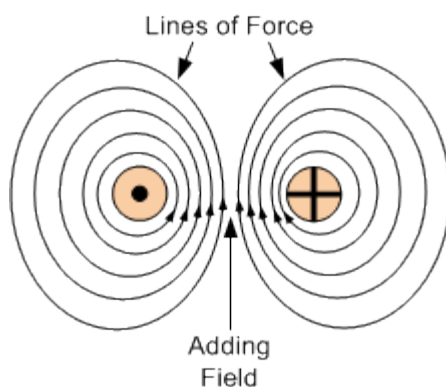
Αυτός ο «Κανόνας του αριστερού χεριού» μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό της μαγνητικής κατεύθυνσης των πόλων σε ένα ηλεκτρομαγνητικό πηνίο. Αυτή τη φορά, τα δάχτυλα δείχνουν προς την κατεύθυνση της ροής του ηλεκτρονίου από το αρνητικό στο θετικό, ενώ ο εκτεταμένος αντίχειρας δείχνει την κατεύθυνση του βόρειου πόλου. Υπάρχει μια παραλλαγή αυτού του κανόνα που ονομάζεται «κανόνας του δεξιού χεριού» που βασίζεται στη λεγόμενη συμβατική ροή ρεύματος, (θετικό προς αρνητικό).

Η παρακάτω εικόνα δείχνει έναν αγωγό σε μορφή ενιαίου βρόχου. Αν και το ηλεκτρικό ρεύμα ρέει προς την ίδια κατεύθυνση σε όλο το μήκος του συρμάτινου αγωγού, θα ρέει προς αντίθετες κατευθύνσεις μέσω του χαρτιού. Αυτό συμβαίνει επειδή το ρεύμα φεύγει από το χαρτί στη μία πλευρά και εισέρχεται στο χαρτί από την άλλη, επομένως ένα πεδίο δεξιόστροφα και ένα πεδίο αριστερόστροφα δημιουργούνται το ένα δίπλα στο άλλο σε όλο το φύλλο χαρτιού.

Ο προκύπτων χώρος μεταξύ αυτών των δύο αγωγών γίνεται ένα «ενισχυμένο» μαγνητικό πεδίο με τις γραμμές δύναμης να εξαπλώνονται με τέτοιο τρόπο που παίρνουν τη μορφή ενός μαγνήτη ράβδου που δημιουργεί έναν χαρακτηριστικό βόρειο και νότιο πόλο στο σημείο τομής.



Σχήμα 2-6 Ηλεκτρομαγνητισμός γύρω από έναν βρόχο



Σχήμα 2-7 Δυναμικές γραμμές γύρω από τον Βρόχο



Το ρεύμα που διαρρέει στους δύο παράλληλους αγωγούς του βρόχου είναι σε αντίθετες κατευθύνσεις καθώς το ρεύμα διαμέσου του βρόχου εξέρχεται από την αριστερή πλευρά και επιστρέφει στη δεξιά πλευρά. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το μαγνητικό πεδίο γύρω από κάθε αγωγό μέσα στον βρόχο να είναι στην «ΙΔΙΑ» κατεύθυνση μεταξύ τους.

Οι προκύπτουσες δυναμικές γραμμές που δημιουργούνται από το ρεύμα που ρέει μέσω του βρόχου αντιτίθενται η μία στην άλλη στο χώρο μεταξύ των δύο αγωγών όπου συναντώνται οι δύο όμοιοι πόλοι παραμορφώνοντας έτσι τις δυναμικές γραμμές γύρω από κάθε αγωγό όπως φαίνεται.

Ωστόσο, η παραμόρφωση της μαγνητικής ροής μεταξύ των δύο αγωγών οδηγεί σε μια ένταση του μαγνητικού πεδίου στη μεσαία διασταύρωση όταν οι δυναμικές γραμμές πλησιάζουν μεταξύ τους. Η προκύπτουσα αλληλεπίδραση μεταξύ των δύο όμοιων πεδίων παράγει μια μηχανική δύναμη μεταξύ των δύο αγωγών καθώς προσπαθούν να απωθηθούν ο ένας από τον άλλο. Σε μια ηλεκτρική μηχανή αυτή η απώθηση αυτών των δύο μαγνητικών πεδίων παράγει κίνηση.

Ωστόσο, καθώς οι αγωγοί δεν μπορούν να κινηθούν, τα δύο μαγνητικά πεδία βοηθούν το ένα το άλλο δημιουργώντας έναν βόρειο και έναν νότιο πόλο κατά μήκος αυτής της γραμμής αλληλεπίδρασης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το μαγνητικό πεδίο να είναι ισχυρότερο στη μέση μεταξύ των δύο αγωγών. Η ένταση του μαγνητικού πεδίου γύρω από τον αγωγό είναι ανάλογη με την απόσταση από τον αγωγό και με την ποσότητα του ρεύματος που τον διαρρέει.

Το μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται γύρω από ένα ευθύγραμμο σύρμα που μεταφέρει ρεύμα είναι πολύ ασθενές ακόμη και με υψηλό ρεύμα που διέρχεται από αυτό. Ωστόσο, εάν πολλοί βρόχοι του σύρματος τυλιχτούν μαζί κατά μήκος του ίδιου άξονα δημιουργώντας ένα πηνίο σύρματος, το προκύπτον μαγνητικό πεδίο θα γίνει ακόμη πιο συγκεντρωμένο και ισχυρότερο από αυτό ενός μόνο βρόχου. Αυτό παράγει ένα ηλεκτρομαγνητικό πηνίο που ονομάζεται σωληνοειδές.

Τότε κάθε μήκος σύρματος έχει την επίδραση του ηλεκτρομαγνητισμού γύρω του όταν το ρέει ηλεκτρικό ρεύμα. Η κατεύθυνση του μαγνητικού πεδίου εξαρτάται από την κατεύθυνση της ροής του ρεύματος. Μπορούμε να αυξήσουμε την ισχύ του παραγόμενου μαγνητικού πεδίου διαμορφώνοντας το μήκος του σύρματος σε πηνίο και θα εξετάσουμε αυτό το φαινόμενο με περισσότερες λεπτομέρειες στο επόμενο σεμινάριο.

### 3. ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – ΜΑΓΝΗΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ

Τα μαγνητικά υλικά παίζουν εξέχοντα ρόλο στη σύγχρονη τεχνολογία. Αποτελούν βασικά στοιχεία κινητήρων, γεννητριών και μετασχηματιστών. Σε αυτό το άρθρο περιγράφονται διάφορα μαγνητικά υλικά τεχνολογικής σημασίας με έμφαση στις πρόσφατες εξελίξεις.

Τα μαγνητικά υλικά έχουν μακρά ιστορία χρήσης. Σύμφωνα με κινεζικά δεδομένα, η πυξίδα ανακαλύφθηκε στην Κίνα πριν από περισσότερα από 4500 χρόνια. Υπάρχουν επίσης ισχυρισμοί ότι ένας φυσικός μαγνήτης ανακαλύφθηκε στη Μαγνησία (Μικρά Ασία) πριν από περισσότερα από 3500 χρόνια. Τα μαγνητικά υλικά έχουν συνεισφέρει ζωτικά στην ιστορία του πολιτισμού.

Παραδοσιακά, μόνο εκείνα τα υλικά που παρουσιάζουν σιδηρομαγνητικές ή σιδηρομαγνητικές ιδιότητες ονομάζονται «μαγνητικά». Μόνο εννέα στοιχεία είναι σιδηρομαγνήτες. Όλα είναι μέταλλα, εκ των οποίων τα τρία (Fe, Co, Ni) είναι μέταλλα της ομάδας σιδήρου και τα άλλα έξι (Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm) είναι μέταλλα σπανίων γαιών. Τα μέταλλα μετάπτωσης Fe και Co είναι τα βασικά στοιχεία για την Παρασκευή κραμάτων και ενώσεων με μεγάλη θερμοκρασία Κιουρί (TC) και μεγάλη αυθόρμητη μαγνήτιση (Ms) (βλ. Πίνακας 3-1). Μερικές από τις διαμεταλλικές ενώσεις με μέταλλα σπανίων γαιών χαρακτηρίζονται από πολύ υψηλή τιμή μαγνητοκρυσταλλικής ανισοτροπίας και μαγνητοσυστολής.

Το πρωταρχικό κριτήριο που επιτρέπει την ταξινόμηση των μαγνητικών υλικών είναι ο απομαγνητισμός, ο οποίος είναι ένα μέτρο της σταθερότητας της εναπομείνουσας κατάστασης. Τα μαλακά μαγνητικά υλικά χαρακτηρίζονται από χαμηλές τιμές απομαγνητισμού ( $H_c < 10^3 \text{ Am}^{-1}$ ), ενώ η ικανότητα απομαγνητισμού των σκληρών μαγνητικών υλικών (συνήθως μόνιμοι μαγνήτες) είναι υψηλότερη από  $10^4 \text{ Am}^{-1}$ . Τέλος, τα ημίσκληρα μαγνητικά υλικά (κυρίως μέσα αποθήκευσης) έχουν απομαγνητισμούς μεταξύ των δύο παραπάνω τιμών. Επιπλέον, υπάρχει μια σειρά από εξελιγμένα μαγνητικά υλικά με ασυνήθιστες ιδιότητες, όπως γιγάντια μαγνητοσυστολή, γιγάντια μαγνητοαντίσταση, και

γιγαντιαία μαγνητοεμπέδηση. Όλα αυτά τα υλικά είναι σημαντικά για τη σύγχρονη τεχνολογία.

**Πίνακας 3-1 Μαγνητικές ιδιότητες μαγνητικών υλικών**

Στοιχείο	Θερμοκρασία Curie (K)	Στιγμή κορεσμού ( $\mu_B$ )
Fe	1043	2.22
Co	1388	1.72
Ni	635	0.61
Gd	293	7.63
Tb	220	9.34
Dy	89	10.33
Ho	20	10.34
Er	20	9.1
Tm	32	7.14

Στις σύγχρονες εφαρμογές, οι μαγνητικές ιδιότητες προσαρμόζονται μέσω του συντονισμού ακριβείας της μικροδομής του υλικού. Έτσι, ένα κεντρικό ζήτημα στην ανάπτυξη και εφαρμογή τόσο μαλακών όσο και σκληρών μαγνητικών υλικών είναι η σύνδεση μεταξύ των εξωγενών μαγνητικών ιδιοτήτων (αποαμαγνητισμός, υστέρηση, βρόχος υστέρησης) και της μικροδομής. Καθιερώθηκε μια καθολική σχέση μεταξύ του αποαμαγνητισμού  $H_c$  και της σταθεράς ανισοτροπίας  $K_1$  :

$$H_c = 2\alpha K_1 / \mu_0 M_s - N_{\text{eff}} M_s$$

όπου οι μικροδομικές παράμετροι  $\alpha$  και  $N_{\text{eff}}$  περιγράφουν τα αποτελέσματα της μικροδομής και της δομής πεδίου.

Η παρούσα τεχνολογία επιτρέπει σε κάποιον να αποκτήσει ένα ευρύ φάσμα μικροδομών που κυμαίνονται από άμορφους, ναοκρυσταλλικούς έως μονοκρυστάλλους. Οι αντίστοιχοι απομαγνητισμοί μπορεί να ποικίλλουν κατά συντελεστή  $10^7$  έως  $10^8$  από εξαιρετικά μαλακά έως εξαιρετικά σκληρά μαγνητικά υλικά.

### 3.1 Μαλακά μαγνητικά υλικά

Τυπικές απαιτήσεις για ένα μαλακό μαγνητικό υλικό είναι η χαμηλή καταναγκαστική ικανότητα, η υψηλή αρχική διαπερατότητα και οι χαμηλές απώλειες υψηλής συχνότητας. Αυτά τα χαρακτηριστικά συνήθως συμβαδίζουν με τις ακόλουθες ιδιότητες των μέσων:

- χαμηλή αποτελεσματική μαγνητική ανισοτροπία,
- υψηλή υστέρηση,
- μικρή μαγνητοσυστολή (για την καταστολή της μαγνητοελαστικής συμβολής στη μαγνητική ανισοτροπία) και
- χαμηλή αγωγιμότητα.

Σημειώθηκε αξιοσημείωτη πρόοδος στην παραγωγή και τις εφαρμογές μαλακών μαγνητικών υλικών τα τελευταία χρόνια. Η στατική διαπερατότητα, για παράδειγμα, έχει αυξηθεί σε τεράστιες τιμές σε υλικά με σχεδόν μηδενικές τιμές μαγνητικής ανισοτροπίας και μαγνητοσυστολής. Τα καλύτερα μαλακά μαγνητικά υλικά έχουν διαπερατότητα  $\mu > 10^5$ . Η διαπερατότητα  $\mu$  περιγράφει την απόκριση των μαγνητικών υλικών σε ένα ασθενές μαγνητικό πεδίο. Για μικρά πεδία, αυτή η απόκριση είναι γραμμική και μπορεί να χαρακτηρίζεται από την αρχική διαπερατότητα  $\mu_i$ . Γενικά, η διαπερατότητα καθορίζεται από δύο μηχανισμούς: την ανάπτυξη ορισμένων μαγνητικών περιοχών σε βάρος άλλων (μηχανισμός τοίχου) και την περιστροφή της μαγνήτισης σε κάθε τομέα (μηχανισμός περιστροφής). Οι ίδιοι δύο μηχανισμοί είναι επίσης υπεύθυνοι για τον βρόχο υστέρησης σε μαλακά μαγνητικά υλικά. Υπάρχουν δύο κατηγορίες απωλειών σε αυτά τα υλικά: απώλειες υστέρησης (που καθορίζονται από το εμβαδόν του βρόχου υστέρησης)

και απώλειες δινορευμάτων (που σχετίζονται με την ηλεκτρική ειδική αντίσταση συνεχούς ρεύματος). Μετά από έναν θερμικό απομαγνητισμό ή μετά από ταχεία αλλαγή της μαγνήτισης, σχεδόν όλα τα μαλακά μαγνητικά υλικά παρουσιάζουν αργή μείωση της διαπερατότητάς τους σε συνάρτηση με το χρόνο ( $t$ ), σύμφωνα με έναν νόμο:

$$\delta\mu = -D \ln t$$

Αυτή η μείωση της διαπερατότητας με το χρόνο ονομάζεται «αποκατάσταση». Η αποσυμπίεση αποδίδεται σε μια αύξηση της ακαμψίας του τοιχώματος της περιοχής, η οποία προέρχεται από την παρουσία κινητών ελαττωμάτων που αλληλεπιδρούν με τη μαγνήτιση.

### 3.2 Σκληρά μαγνητικά υλικά

Τα πιο σημαντικά σκληρά μαγνητικά υλικά που είναι κατάλληλα για μόνιμους μαγνήτες αναμένεται να έχουν τις ακόλουθες εγγενείς μαγνητικές ιδιότητες:

1. Υψηλή θερμοκρασία Κιουρί. Αυτό εννοεί τα τρισδιάστατα στοιχεία που παρουσιάζουν άμεση ανταλλαγή.
2. Μαγνήτιση υψηλού κορεσμού σε θερμοκρασία δωματίου. Αυτό εννοεί και πάλι τα τρισδιάστατα στοιχεία (Fe, Co). Εδώ ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα υλικά που βασίζονται στην ελαφριά σπάνια γη, τα οποία συνδέονται παράλληλα με την τρισδιάστατη ροπή.
3. Υψηλή μονοαξονική ανισοτροπία. Η μονοαξονική ανισοτροπία είναι απαραίτητη για το σχηματισμό υψηλού απομαγνητισμού. Αυτή η ανισοτροπία είναι του τύπου ενός ιόντος.

Οι μόνιμοι μαγνήτες χαρακτηρίζονται από έναν εξαιρετικά ευρύ βρόχο υστέρησης. Η πιο σημαντική εξωτερική παράμετρος είναι ο απομαγνητισμός,  $H_c$ , που συνδέεται με την ολική ανισοτροπία μέσω της

εξίσωσης. 
$$H_c = 2\alpha K_1 / \mu_0 M_s - N_{\text{eff}} M_s$$



## **4. ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 -ΚΙΝΗΤΗΡΑΣ ΜΟΝΙΜΟΥ ΜΑΓΝΗΤΗ - ΔΟΜΗ ΚΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ**

Ένας κινητήρας μόνιμου μαγνήτη (PM) είναι ένας κινητήρας εναλλασσόμενου ρεύματος που χρησιμοποιεί μαγνήτες ενσωματωμένους ή προσαρτημένους στην επιφάνεια του ρότορα του κινητήρα.

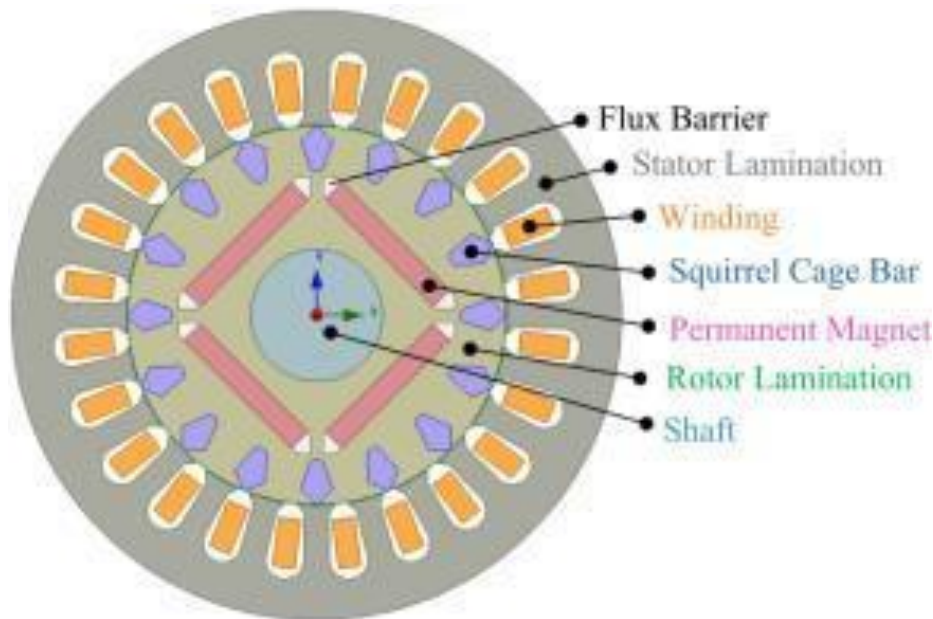
Ο έλεγχος της ταχύτητας των κινητήρων εναλλασσόμενου ρεύματος επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας μια διάταξη μεταβλητής συχνότητας (VFD - variable frequency drive) στις περισσότερες περιπτώσεις. Οι μονάδες VFD χρησιμοποιούνται με επαγωγικούς κινητήρες με περιελίξεις στάτη για τη δημιουργία περιστρεφόμενου μαγνητικού πεδίου. Είναι δυνατό όμως να επιτύχουν ακριβή έλεγχο ταχύτητας χρησιμοποιώντας αισθητήρες ανάδρασης ταχύτητας ή θέσης ως αναφορά στο VFD.

Σε ορισμένες περιπτώσεις, είναι δυνατό να επιτευχθεί συγκρίσιμα ακριβής έλεγχος ταχύτητας χωρίς την ανάγκη αισθητήρων ανάδρασης. Αυτό καθίσταται δυνατό χρησιμοποιώντας έναν κινητήρα μόνιμου μαγνήτη (PM) και μια διαδικασία που ονομάζεται "μέθοδος έγχυσης σήματος υψηλής συχνότητας" (high-frequency signal injection method).

### **4.1 Κινητήρες με μόνιμους μαγνήτες PM**

Ο κινητήρας PM είναι ένας κινητήρας εναλλασσόμενου ρεύματος που χρησιμοποιεί μαγνήτες ενσωματωμένους ή προσαρτημένους στην επιφάνεια του ρότορα του κινητήρα. Οι μαγνήτες χρησιμοποιούνται για να δημιουργούν μια σταθερή μαγνητική ροή απευθείας στο ρότορα, αντί να απαιτούν από το πεδίο του στάτη να δημιουργεί ένα ΜΠ με σύνδεση με τον ρότορα, όπως συμβαίνει με έναν επαγωγικό κινητήρα. Ένας τέταρτος κινητήρας γνωστός ως κινητήρας PM (LSPM -Line Start Permanent Magnet) γραμμής εκκίνησης ενσωματώνει χαρακτηριστικά και των δύο κινητήρων. Ένας κινητήρας LSPM ενσωματώνει τους μαγνήτες ενός κινητήρα PM εντός του ρότορα και τις ράβδους ρότορα ενός κινητήρα κλωβού για μεγιστοποίηση της ροπής και της απόδοσης





Σχήμα 4-1 Τομή ενός κινητήρα LSPM ([https://www.researchgate.net/figure/The-structure-of-three-phase-LS-PMSM-Four-Pole\\_fig3\\_320852875](https://www.researchgate.net/figure/The-structure-of-three-phase-LS-PMSM-Four-Pole_fig3_320852875))

#### 4.1.1 Βασικές έννοιες

Για να κατανοηθεί η λειτουργία των κινητήρων PM, είναι σημαντικό να κατανοηθούν πρώτα κάποιες βασικές έννοιες

**Ροή:** Η ροή του ρεύματος μέσω ενός αγωγού δημιουργεί ένα μαγνητικό πεδίο. Η ροή καθορίζει το ρυθμό ροής ενός μεγέθους ανά μονάδα επιφάνειας. Το ρεύμα ροής είναι ο ρυθμός ροής ρεύματος μέσω μιας συγκεκριμένης περιοχής διατομής αγωγού.

**Σύζευξη ροής:** Σύζευξη ροής συμβαίνει όταν ένα μαγνητικό πεδίο αλληλεπιδρά με ένα υλικό όπως αυτό που θα συνέβαινε όταν ένα μαγνητικό πεδίο διέρχεται από ένα πηνίο σύρματος. Η σύζευξη ροής καθορίζεται από τον αριθμό των περιελίξεων και της ροής, όπου το  $\phi$  χρησιμοποιείται για να δείξει τη στιγμιαία τιμή μιας ροής που μεταβάλλεται στο χρόνο.

**Μαγνητική ροή:** Η μαγνητική ροή ορίζεται ως ο ρυθμός ενός μαγνητικού πεδίου που ρέει μέσα από μια περιοχή διατομής ενός συγκεκριμένου αγωγού. Το πεδίο μαγνητικής ροής δημιουργείται από έναν μόνιμο μαγνήτη εντός ή στην επιφάνεια ενός κινητήρα μόνιμου μαγνήτη.

**Επαγωγέας:** Ένας επαγωγέας είναι ένα στοιχείο κυκλώματος που αποτελείται από ένα αγωγίμο σύρμα συνήθως με τη μορφή ενός πηνίου.

Ένας αγωγός που μεταφέρει ένα σταθερό ρεύμα θα παράγει ένα σταθερό μαγνητικό πεδίο. Μπορεί να αποδειχθεί ότι ένα μαγνητικό πεδίο και το ρεύμα που το παρήγαγε σχετίζονται γραμμικά. Η αλλαγή του μαγνητικού πεδίου θα προκαλέσει μια τάση σε έναν κοντινό αγωγό ανάλογη του ρυθμού μεταβολής του ρεύματος που παρήγαγε το μαγνητικό πεδίο.

**Επαγωγή:** Η επαγωγή ( $L$ ) είναι η σταθερά της αναλογικότητας που καθορίζει τη σχέση μεταξύ των τάσεων που προκαλούνται από ένα χρονικό ρυθμό μεταβολής του ρεύματος που παρήγαγε ένα μαγνητικό πεδίο. Με απλούστερους όρους, η επαγωγή είναι η σύζευξη ροής ανά μονάδα ρεύματος. Πρέπει να γίνει σαφές ότι η επαγωγή είναι ένα παθητικό στοιχείο και είναι καθαρά μια γεωμετρική ιδιότητα. Η επαγωγή μετράται σε Henrys ( $H$ ) ή στροφές weber ανά αμπερ.

**Ο άξονας  $d$  και ο άξονας  $q$ :** Σε γεωμετρικούς όρους, οι άξονες " $d$ " και " $q$ " είναι οι μονοφασικές αναπαραστάσεις της ροής που συμβάλλουν οι τρεις ξεχωριστές ποσότητες ημιτονοειδούς φάσης στην ίδια γωνιακή ταχύτητα. Ο άξονας  $d$ , γνωστός και ως άμεσος άξονας, είναι ο άξονας με τον οποίο παράγεται η ροή από την περιέλιξη του πεδίου. Ο άξονας  $q$  ή ο τετραγωνικός άξονας είναι ο άξονας στον οποίο παράγεται η ροπή. Σύμφωνα με τη σύμβαση, ο τετραγωνικός άξονας θα οδηγεί πάντα τον άμεσο άξονα ηλεκτρικά κατά  $90$  βαθμούς. Με απλοϊκούς όρους, ο άξονας  $d$  είναι η κύρια κατεύθυνση ροής, ενώ ο άξονας  $q$  είναι η κύρια κατεύθυνση παραγωγής ροπής.

**Μαγνητική διαπερατότητα:** Στον ηλεκτρομαγνητισμό, η διαπερατότητα είναι το μέτρο της ικανότητας ενός υλικού να υποστηρίζει τον σχηματισμό ενός μαγνητικού πεδίου μέσα του. Ως εκ τούτου, είναι ο βαθμός μαγνήτισης που αποκτά ένα υλικό ως απόκριση σε ένα εφαρμοσμένο μαγνητικό πεδίο.

**Κύκλος ισοδύναμου κινητήρα PM:** Ένας κινητήρας μόνιμου μαγνήτη μπορεί να αναπαρασταθεί σε μερικά διαφορετικά μοντέλα κινητήρων. Μία από τις πιο συνηθισμένες μεθόδους είναι το μοντέλο κινητήρα  $d$ - $q$ .

**Επαγωγή άξονα  $d$  κινητήρα PM και άξονας  $q$ :** Οι επαγωγές άξονα  $d$  και  $q$  είναι οι επαγωγές που μετρούνται καθώς η διαδρομή ροής διέρχεται

από τον ρότορα σε σχέση με τον μαγνητικό πόλο. Η επαγωγή του άξονα  $d$  είναι η επαγωγή που μετρείται όταν η ροή διέρχεται από τους μαγνητικούς πόλους. Η επαγωγή του άξονα  $q$  είναι το μέτρο επαγωγής όταν η ροή περνά μεταξύ των μαγνητικών πόλων.

Σε μια επαγωγική μηχανή, η σύζευξη ροής του ρότορα θα είναι η ίδια μεταξύ του άξονα  $d$  και του άξονα  $q$ . Ωστόσο, σε μια μηχανή μόνιμου μαγνήτη, ο μαγνήτης μειώνει το διαθέσιμο σίδηρο για σύζευξη ροής. Η διαπερατότητα ενός μαγνήτη είναι κοντά σε αυτή του αέρα. Επομένως, ο μαγνήτης μπορεί να θεωρηθεί ως κενό αέρα. Ο μαγνήτης βρίσκεται στη διαδρομή ροής καθώς ταξιδεύει μέσω του άξονα  $d$ , οπότε η διαδρομή ροής που διέρχεται από τον άξονα  $q$  δεν διασχίζει μαγνήτη. Επομένως, περισσότερος σίδηρος μπορεί να συνδεθεί με τη διαδρομή ροής του άξονα  $q$ , η οποία έχει ως αποτέλεσμα μεγαλύτερη επαγωγή. Ένας κινητήρας με ενσωματωμένο μαγνήτη θα έχει μεγαλύτερη επαγωγή στον άξονα  $q$  από την επαγωγή του άξονα  $d$ . Ένας κινητήρας με μαγνήτες επιφανειακής τοποθέτησης θα έχει σχεδόν πανομοιότυπες επαγωγές στον άξονα  $q$  και στον άξονα  $d$  επειδή οι μαγνήτες βρίσκονται έξω από τον ρότορα και δεν περιορίζουν την ποσότητα σιδήρου που συνδέεται με το πεδίο του στάτη.

**Ρεύμα διέγερσης:** Το ρεύμα διέγερσης είναι το ρεύμα στις περιελίξεις του στάτη που απαιτείται για τη δημιουργία μαγνητικής ροής στον πυρήνα του ρότορα. Οι μόνιμες μηχανές μαγνήτη δεν απαιτούν ρεύμα διέγερσης στην περιέλιξη του στάτη επειδή οι μαγνήτες ενός κινητήρα PM δημιουργούν ήδη ένα σταθερό μαγνητικό πεδίο.

**Δευτερεύον ρεύμα:** Δευτερεύον ρεύμα, αλλιώς γνωστό ως «ρεύμα παραγωγής ροπής», είναι το ρεύμα που απαιτείται για τη δημιουργία ροπής του κινητήρα. Σε μια μηχανή μόνιμου μαγνήτη, τα ρεύματα που παράγουν ροπή αποτελούν το μεγαλύτερο μέρος της τρέχουσας εξόδου.

**Ρεύμα εισόδου:** Σε αντίθεση με ένα σετ ενισχυτή και σερβο που προορίζεται για έλεγχο κίνησης, ένα συμβατικό VFD δεν έχει πληροφορίες σχετικά με τη θέση του μαγνητικού πόλου του ρότορα του κινητήρα. Χωρίς γνώση της θέσης του μαγνητικού πόλου, ένα πεδίο δεν

μπορεί να δημιουργηθεί στον στάτορα για να μεγιστοποιήσει την παραγωγή ροπής. Επομένως, ένα VFD έχει τη δυνατότητα να παρέχει τάση συνεχούς ρεύματος για να κλειδώνει το μαγνητικό πεδίο σε γνωστή θέση. Η τρέχουσα έλξη που απαιτείται για να τραβήξει τον ρότορα ονομάζεται "ρεύμα έλξης".

**Έγχυση υψηλής συχνότητας:** Η έγχυση υψηλής συχνότητας είναι μια μεθοδολογία μετατροπέα που χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό της θέσης του μαγνητικού πόλου ενός κινητήρα PM. Η μέθοδος ξεκινά με τον μετατροπέα να εγχέει ένα σήμα υψηλής συχνότητας και χαμηλής τάσης στον κινητήρα σε έναν αυθαίρετο άξονα. Ο μετατροπέας περιστρέφει στη συνέχεια τη γωνία διέγερσης και παρακολουθεί το ρεύμα.

Ανάλογα με τη γωνία έγχυσης, η αντίσταση του ρότορα ποικίλλει. Η εσωτερική σύνθετη αντίσταση του κινητήρα μόνιμου μαγνήτη (IPM) με εσωτερικούς πόλους μειώνεται όταν ο άξονας έγχυσης σήματος υψηλής συχνότητας και ο άξονας μαγνητικού πόλου (άξονας d) ευθυγραμμίζονται, δηλαδή στις  $0^\circ$ . Η σύνθετη αντίσταση είναι μέγιστη  $\pm 90^\circ$ . Χρησιμοποιώντας αυτό το χαρακτηριστικό, η μονάδα μπορεί να ανιχνεύσει τη θέση του ρότορα χωρίς κωδικοποιητές παλμών, εγχέοντας τάση/ρεύμα εναλλασσόμενου ρεύματος υψηλής συχνότητας στον κινητήρα IPM. Επιπλέον, η μέθοδος ψεκασμού σήματος υψηλής συχνότητας μπορεί να χρησιμοποιηθεί για ανίχνευση ταχύτητας στην περιοχή χαμηλής ταχύτητας, όπου ο έλεγχος ροπής πλήρους φορτίου είναι πολύ δύσκολος, επειδή το επίπεδο τάσης back-emf του κινητήρα είναι πολύ χαμηλό.

**Κυματομορφή Back-emf:** Το back emf είναι συντομογραφία της οπίσθιας ηλεκτροκινητικής δύναμης, αλλά επίσης γνωστό ως αντίθετη ηλεκτροκινητική δύναμη. Η πίσω ηλεκτροκινητική δύναμη είναι η τάση που εμφανίζεται στους ηλεκτρικούς κινητήρες όταν υπάρχει σχετική κίνηση μεταξύ των περιελίξεων του στάτη και του μαγνητικού πεδίου του ρότορα. Οι γεωμετρικές ιδιότητες του ρότορα θα καθορίσουν το σχήμα της κυματομορφής back-emf. Αυτές οι κυματομορφές μπορεί να είναι ημιτονοειδείς, τραπεζοειδείς, τριγωνικές ή κάτι ενδιάμεσο.

Τόσο οι μηχανές επαγωγής όσο και οι μηχανές PM δημιουργούν κυματομορφές back-emf. Σε μια επαγωγική μηχανή, η κυματομορφή back-emf θα αποσυντεθεί καθώς το υπολειπόμενο πεδίο του δρομέα αργά αποσυντίθεται λόγω της έλλειψης πεδίου στάτορα. Ωστόσο, με μια μηχανή PM, ο ρότορας δημιουργεί το δικό του μαγνητικό πεδίο. Επομένως, μπορεί να προκληθεί τάση στις περιελίξεις του στάτη όποτε ο ρότορας βρίσκεται σε κίνηση. Η τάση back-emf θα αυξάνεται γραμμικά με την ταχύτητα και είναι ένας κρίσιμος παράγοντας για τον προσδιορισμό της μέγιστης ταχύτητας λειτουργίας.

**Κυματομορφή αντί-ΗΕΔ:** Η αντί-ΗΕΔ είναι συντομογραφία της αντι ηλεκτροκινητικής δύναμης (back electromotive force ή counter electromotive force). Η αντί-ΗΕΔ είναι η τάση που δημιουργείται στους ηλεκτρικούς κινητήρες όταν υπάρχει μια σχετική κίνηση μεταξύ των περιελίξεων του στάτη και του μαγνητικού πεδίου του ρότορα. Οι γεωμετρικές ιδιότητες του ρότορα θα καθορίσουν το σχήμα της κυματομορφής της αντί-ΗΕΔ. Αυτές οι κυματομορφές μπορεί να είναι ημιτονοειδείς, τραπεζοειδείς, τριγωνικές ή κάτι ενδιάμεσα.

Τόσο οι επαγωγικές όσο και οι μηχανές μόνιμου μαγνήτη παράγουν κυματομορφές αντί-ΗΕΔ. Σε μια επαγωγική μηχανή, η κυματομορφή αντί-ΗΕΔ θα αποσυντεθεί καθώς το υπολειπόμενο πεδίο ρότορα εξασθενεί αργά λόγω της έλλειψης πεδίου στάτη. Ωστόσο, με μια μηχανή μόνιμου μαγνήτη, ο ρότορας δημιουργεί το δικό του μαγνητικό πεδίο. Επομένως, μπορεί να προκληθεί τάση στις περιελίξεις του στάτορα όποτε ο ρότορας είναι σε κίνηση. Η τάση αντί-ΗΕΔ θα αυξηθεί γραμμικά με την ταχύτητα και είναι ένας κρίσιμος παράγοντας για τον προσδιορισμό της μέγιστης ταχύτητας λειτουργίας.

## 4.2 Κατανόηση της ροπής της μηχανής PM

Η ροπή μιας ηλεκτρικής μηχανής μπορεί να χωριστεί σε δύο συστατικά: μαγνητική ροπή και ροπή απροθυμίας. Η ροπή απροθυμίας είναι η «δύναμη που δρα στο μαγνητικό υλικό που τείνει να ευθυγραμμιστεί με την κύρια ροή για να ελαχιστοποιήσει την απροθυμία». Με άλλα λόγια,

η ροπή απροθυμίας είναι η ροπή που δημιουργείται από την ευθυγράμμιση του άξονα του ρότορα στο πεδίο ροής του στάτη. Η μαγνητική ροπή είναι η «ροπή που δημιουργείται από την αλληλεπίδραση μεταξύ του πεδίου ροής του μαγνήτη και του ρεύματος στην περιέλιξη του στάτη».

**Ροπή μεταβαλλόμενης μαγνητικής αντίστασης:** Η ροπή απροθυμίας αφορά τη ροπή που δημιουργείται μέσω της ευθυγράμμισης του ρότορα που εμφανίζεται όταν το μαγνητικό πεδίο αναγκάζει μια επιθυμητή άμεση ροή από τον βόρειο πόλο του στάτη προς τον νότιο πόλο του στάτορα.

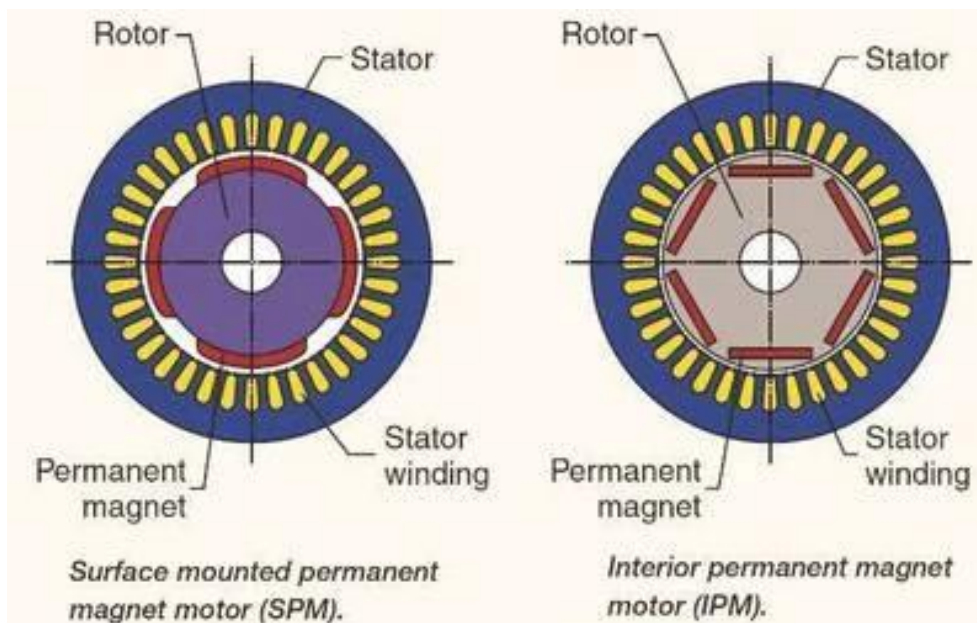
**Μαγνητική ροπή:** Οι μόνιμοι μαγνήτες δημιουργούν ένα πεδίο ροής στον ρότορα. Ο στάτορας δημιουργεί ένα πεδίο που αλληλεπιδρά με το μαγνητικό πεδίο του ρότορα. Η αλλαγή της θέσης του πεδίου του στάτορα σε σχέση με το πεδίο του ρότορα προκαλεί μετατόπιση του ρότορα. Η μετατόπιση λόγω αυτής της αλληλεπίδρασης είναι η μαγνητική ροπή.

### **4.3 SPM έναντι IPM: Κατασκευαστικές κατηγορίες κινητήρων PM**

Ένας κινητήρας PM μπορεί να χωριστεί σε δύο κύριες κατηγορίες: κινητήρες μόνιμου μαγνήτη επιφανείας (SPM) και κινητήρες μόνιμου μαγνήτη εσωτερικού χώρου (IPM). Κανένας τύπος σχεδίασης κινητήρα δεν περιέχει ράβδους ρότορα. Και οι δύο τύποι παράγουν μαγνητική ροή από τους μόνιμους μαγνήτες που είναι προσαρτημένοι στον ρότορα ή στο εσωτερικό του.

Οι κινητήρες IPM έχουν τον μόνιμο μαγνήτη ενσωματωμένο στον ίδιο τον ρότορα. Σε αντίθεση με τους SPM, η θέση των μόνιμων μαγνητών καθιστά τους κινητήρες IPM πολύ μηχανικά στιβαρούς και κατάλληλους για λειτουργία σε πολύ υψηλές ταχύτητες. Αυτοί οι κινητήρες καθορίζονται επίσης από τη σχετική υψηλή αναλογία μαγνητικής αξιοφάνειας ( $L_q > L_d$ ). Λόγω της μαγνητικής αξιοπιστίας τους, ένας κινητήρας IPM έχει τη δυνατότητα να παράγει ροπή εκμεταλλευόμενος

τόσο τα μαγνητικά όσο και τα συστατικά ροπής του κινητήρα (βλ. Εικόνα).



Σχήμα 4-2 Τομή κινητήρα PM με πόλους στην επιφάνεια του ρότορα (αριστερά) και μέσα στο ρότορα (δεξιά) (<http://m.vectormagnets.com/oid1742283/Permanent-Magnet-Motors.htm>)

Οι κινητήρες SPM έχουν τους μαγνήτες στερεωμένους στο εξωτερικό της επιφάνειας του ρότορα. Λόγω αυτής της μηχανικής τοποθέτησης, η μηχανική τους αντοχή είναι ασθενέστερη από αυτή των κινητήρων IPM. Η εξασθενημένη μηχανική αντοχή περιορίζει τη μέγιστη ασφαλή μηχανική ταχύτητα του κινητήρα. Επιπλέον, αυτοί οι κινητήρες παρουσιάζουν πολύ περιορισμένη μαγνητική υπεροχή ( $L_d \approx L_q$ ). Οι τιμές επαγωγής που μετρώνται στους ακροδέκτες του ρότορα είναι συνεπείς ανεξάρτητα από τη θέση του ρότορα. Λόγω της σχεδόν μονάδας αναλογίας προεξοχής, τα σχέδια κινητήρων SPM βασίζονται σημαντικά, αν όχι πλήρως, στο στοιχείο μαγνητικής ροπής για την παραγωγή ροπής.

Οι κινητήρες IPM έχουν τον μόνιμο μαγνήτη ενσωματωμένο στον ίδιο τον ρότορα. Σε αντίθεση με τους αντίστοιχους SPM, η θέση των μόνιμων μαγνητών καθιστά τους κινητήρες IPM πολύ μηχανικά υγιείς και κατάλληλους για λειτουργία σε πολύ υψηλές ταχύτητες. Αυτοί οι κινητήρες ορίζονται επίσης από τον σχετικό υψηλό λόγο μαγνητικής υπεροχής τους ( $L_q > L_d$ ). Λόγω της μαγνητικής τους υπεροχής, ένας

κινητήρας IPM έχει την ικανότητα να παράγει ροπή εκμεταλλευόμενος τόσο τα στοιχεία μαγνητικής όσο και απροθυμίας ροπής του κινητήρα.

#### 4.3.1 Διακύμανση επαγωγής κινητήρα PM με φορτίο

Η μαγνητική ροή που διαπερνάει ένα κομμάτι σιδήρου για να δημιουργήσει ροπή είναι πεπερασμένη. Τελικά, ο σίδηρος θα κορεστεί και δεν θα επιτρέπει επιπλέον ροή. Το αποτέλεσμα είναι μια μείωση στην επαγωγή. Σε μια μηχανή PM, οι τιμές επαγωγής του άξονα  $d$  και του άξονα  $q$  θα μειωθούν με την αύξηση του ρεύματος φορτίου.

Οι αυτεπαγωγές του άξονα  $d$  και  $q$  ενός κινητήρα SPM είναι σχεδόν πανομοιότυπες. Επειδή ο μαγνήτης βρίσκεται έξω από τον ρότορα, η αυτεπαγωγή του άξονα  $q$  θα πέσει με τον ίδιο ρυθμό με την αυτεπαγωγή του άξονα  $d$ . Ωστόσο, η αυτεπαγωγή ενός κινητήρα IPM θα μειωθεί διαφορετικά. Και πάλι, η επαγωγή του άξονα  $d$  είναι φυσικά χαμηλότερη επειδή ο μαγνήτης βρίσκεται στη διαδρομή ροής και δεν δημιουργεί επαγωγική ιδιότητα. Επομένως, υπάρχει λιγότερος σίδηρος για κορεσμό στον άξονα  $d$ , γεγονός που οδηγεί σε σημαντικά μικρότερη μείωση της ροής σε σχέση με τον άξονα  $q$ .

#### 4.4 Εξασθένηση/ενίσχυση ροής κινητήρων PM

Η ροή σε έναν κινητήρα μόνιμου μαγνήτη παράγεται από τους μαγνήτες. Το πεδίο ροής ακολουθεί μια συγκεκριμένη διαδρομή, η οποία μπορεί να ενισχυθεί ή να αντιστραφεί. Η ενίσχυση του πεδίου ροής θα επιτρέψει στον κινητήρα να αυξήσει προσωρινά την παραγωγή ροπής. Η αντίθεση με το πεδίο ροής θα αναιρέσει το υπάρχον μαγνητικό πεδίο του κινητήρα. Το μειωμένο μαγνητικό πεδίο θα περιορίσει την παραγωγή ροπής, αλλά θα μειώσει την τάση back-emf. Η μειωμένη τάση back-emf απελευθερώνει την τάση για να ωθήσει τον κινητήρα να λειτουργήσει σε υψηλότερες ταχύτητες εξόδου. Και οι δύο τύποι λειτουργίας απαιτούν πρόσθετο ρεύμα κινητήρα. Η κατεύθυνση του ρεύματος του κινητήρα κατά μήκος του άξονα  $d$ , που παρέχεται από τον ελεγκτή κινητήρα, καθορίζει το επιθυμητό αποτέλεσμα.



**Γωνία διέγερσης:** Η γωνία διέγερσης είναι η γωνία στην οποία το διανυσματικό άθροισμα των κυματομορφών του άξονα  $d$  και του άξονα  $q$  διεγείρονται στον κινητήρα σε σχέση με τον άξονα  $d$ . Ο άξονας  $d$  θεωρείται πάντα ότι είναι εκεί που υπάρχει ο μαγνήτης. Η μέγιστη μαγνητική ροή επιτυγχάνεται στον άξονα  $q$ , ο οποίος απέχει 90 ηλεκτρικές μοίρες από τον άξονα  $d$ . Επομένως, οι περισσότερες αναφορές της γωνίας διέγερσης λαμβάνουν ήδη υπόψη τη διαφορά 90 μοιρών από τον άξονα  $d$  στον άξονα  $q$ .

**Γωνία φάσης και ροπή:** Η μαγνητική ροπή μεγιστοποιείται όταν το πεδίο του στάτη διεγείρει τον ρότορα του κινητήρα 90 ηλεκτρικές μοίρες από τον άξονα  $d$  (θέση μαγνήτη κινητήρα). Η ροπή απροθυμίας ακολουθεί διαφορετική διαδρομή και μεγιστοποιείται 45 ηλεκτρικές μοίρες πέρα από τον άξονα  $q$ . Η μέγιστη μαγνητική ροπή εκμεταλλεύεται τόσο την απροθυμία του κινητήρα όσο και τις μαγνητικές ροπές. Η μετατόπιση πιο μακριά από τον άξονα  $q$  μειώνει τη μαγνητική ροπή, αλλά αντισταθμίζεται πολύ από το κέρδος στη ροπή απροθυμίας. Η μέγιστη συνδυασμένη μαγνητική και απροθυμία ροπή εμφανίζεται κοντά στις 45 ηλεκτρικές μοίρες από τον άξονα  $q$ , αλλά η ακριβής γωνία θα ποικίλλει ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του κινητήρα PM.

#### 4.5 Πυκνότητα ισχύος κινητήρα IPM

Η παραγωγή ισχύος ενός κινητήρα PM εξαρτάται από τη διαμόρφωση των μαγνητών του κινητήρα και την προκύπτουσα ισχύ του κινητήρα. Οι κινητήρες με υψηλή αναλογία προεξοχής ( $L_q > L_d$ ) μπορούν να αυξήσουν την απόδοση του κινητήρα και την παραγωγή ροπής ενσωματώνοντας τη ροπή απροθυμίας του κινητήρα. Ένας μετατροπέας μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αλλαγή της γωνίας διέγερσης σε σχέση με τον άξονα  $d$  για να μεγιστοποιηθεί τόσο η ροπή απροθυμίας όσο και η μαγνητική ροπή του κινητήρα.

## 4.6 Απομαγνητισμός μόνιμου μαγνήτη

Οι μόνιμοι μαγνήτες δεν είναι σχεδόν μόνιμοι και έχουν περιορισμένες δυνατότητες. Ορισμένες δυνάμεις μπορούν να ασκηθούν σε αυτά τα υλικά για να τα απομαγνητίσουν. Με άλλα λόγια, είναι δυνατό να αφαιρεθούν οι μαγνητικές ιδιότητες του υλικού μόνιμου μαγνήτη. Μια μόνιμη μαγνητική ουσία μπορεί να απομαγνητιστεί εάν το υλικό καταπονηθεί σημαντικά, αφεθεί να φτάσει σε σημαντικές θερμοκρασίες ή επηρεαστεί από μεγάλη ηλεκτρική διαταραχή.

Πρώτον, η καταπόνηση ενός μόνιμου μαγνήτη συνήθως γίνεται με φυσικά μέσα. Ένα μαγνητικό υλικό μπορεί να απομαγνητιστεί, εάν δεν εξασθενήσει, εάν επρόκειτο να υποστεί βίαιες κρούσεις/πτώσεις. Ένα σιδηρομαγνητικό υλικό έχει εγγενή μαγνητική ιδιότητα. Ωστόσο, αυτές οι μαγνητικές ιδιότητες μπορούν να εκπέμπουν σε πολλές κατευθύνσεις. Ένας τρόπος με τον οποίο μαγνητίζονται τα σιδηρομαγνητικά υλικά είναι η εφαρμογή ενός ισχυρού μαγνητικού πεδίου στο υλικό για να ευθυγραμμιστούν τα μαγνητικά του δίπολα. Η ευθυγράμμιση αυτών των διπόλων αναγκάζει το μαγνητικό πεδίο του υλικού σε ένα συγκεκριμένο λουτρό. Μια βίαιη πρόσκρουση μπορεί να αφαιρέσει την ατομική ευθυγράμμιση των μαγνητικών περιοχών του υλικού, η οποία αποδυναμώνει την ισχύ του επιδιωκόμενου μαγνητικού πεδίου.

Δεύτερον, οι θερμοκρασίες μπορούν επίσης να επηρεάσουν έναν μόνιμο μαγνήτη. Οι θερμοκρασίες αναγκάζουν τα μαγνητικά σωματίδια σε έναν μόνιμο μαγνήτη να αναταράσσονται. Τα μαγνητικά δίπολα έχουν την ικανότητα να αντέχουν κάποια ποσότητα θερμικής ανάδευσης. Ωστόσο, μεγάλες περίοδοι ανάδευσης μπορεί να αποδυναμώσουν την ισχύ ενός μαγνήτη, ακόμη και αν αποθηκευτεί σε θερμοκρασία δωματίου. Επιπλέον, όλα τα μαγνητικά υλικά έχουν ένα κατώφλι γνωστό ως «Θερμοκρασία Curie», το οποίο είναι ένα όριο που καθορίζει τη θερμοκρασία στην οποία η θερμική ανάδευση προκαλεί τον πλήρη απομαγνητισμό του υλικού. Όροι όπως καταναγκασμός και συγκράτηση χρησιμοποιούνται για να ορίσουν την ικανότητα διατήρησης της αντοχής του μαγνητικού υλικού.

Τέλος, μεγάλες ηλεκτρικές διαταραχές μπορεί να προκαλέσουν απομαγνητισμό ενός μόνιμου μαγνήτη. Αυτές οι ηλεκτρικές διαταραχές μπορεί να οφείλονται στην αλληλεπίδραση του υλικού με ένα μεγάλο μαγνητικό πεδίο ή εάν ένα μεγάλο ρεύμα διέρχεται από το υλικό. Με τον ίδιο τρόπο που ένα ισχυρό μαγνητικό πεδίο ή ρεύμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ευθυγράμμιση των μαγνητικών δίπολων ενός υλικού, ένα άλλο ισχυρό μαγνητικό πεδίο ή ρεύμα που εφαρμόζεται στο πεδίο που δημιουργείται από τον μόνιμο μαγνήτη μπορεί να οδηγήσει σε απομαγνητισμό.

#### **4.7 Λειτουργία αυτοανίχνευσης έναντι κλειστού βρόχου**

Οι πρόσφατες εξελίξεις στην τεχνολογία μετάδοσης κίνησης επιτρέπουν στους τυπικούς δίσκους εναλλασσόμενου ρεύματος να «αυτοανιχνεύονται» και να παρακολουθούν τη θέση του μαγνήτη του κινητήρα. Ένα σύστημα κλειστού βρόχου χρησιμοποιεί συνήθως το κανάλι z-pulse για τη βελτιστοποίηση της απόδοσης. Μέσα από ορισμένες ρουτίνες, ο ηλεκτροκινητήρας γνωρίζει την ακριβή θέση του μαγνήτη του κινητήρα παρακολουθώντας τα κανάλια A/B και διορθώνοντας για σφάλματα με το κανάλι z. Η γνώση της ακριβούς θέσης του μαγνήτη επιτρέπει τη βέλτιστη παραγωγή ροπής με αποτέλεσμα τη βέλτιστη απόδοση.

#### **4.8 Σερβοκινητήρες**

Οι σερβοκινητήρες είναι κινητήρες μόνιμου μαγνήτη που χρησιμοποιούνται για εφαρμογές ελέγχου κίνησης. Συνήθως, σε έναν εσωτερικό/εσωτερικό σχεδιασμό κινητήρα μόνιμου μαγνήτη, αυτοί οι κινητήρες συνδυάζονται με έναν συγκεκριμένο ενισχυτή ως μέρος ενός αντίστοιχου συνόλου για μεγιστοποίηση της απόδοσης. Ο ενισχυτής έχει ρυθμιστεί με ακρίβεια στον κινητήρα PM για να επιτυγχάνει τη βέλτιστη απόδοση από τον κατασκευαστή του. Η διαμόρφωση ενισχυτή κίνησης/σερβομηχανή χρησιμοποιεί συνήθως ανάδραση κινητήρα, η οποία παρέχει επίσης μια θέση μαγνητικού πόλου και ανάδραση ταχύτητας.

## 4.9 Τύποι Υλικών Μόνιμου Μαγνήτη

Υπάρχουν τρεις τύποι υλικών μόνιμου μαγνήτη που χρησιμοποιούνται στον κινητήρα PMDC. Οι αναλυτικές πληροφορίες δίνονται παρακάτω.

### 4.9.1 Alnicos

Το Alnicos έχει χαμηλή καταναγκαστική ένταση μαγνήτισης και υψηλή πυκνότητα υπολειμματικής ροής. Ως εκ τούτου, χρησιμοποιείται όπου απαιτείται χαμηλό ρεύμα και υψηλή τάση.

### 4.9.2 Φερρίτες

Χρησιμοποιούνται σε ευαίσθητες στο κόστος εφαρμογές όπως κλιματιστικά, συμπιεστές και ψυγεία.

### 4.9.3 Σπάνιες γαίες

Οι μαγνήτες σπάνιων γαιών είναι κατασκευασμένοι από κοβάλτιο Samarium, νεοδύμιο-σίδηρο-βόριο. Έχουν υψηλή υπολειμματική ροή και υψηλή ένταση μαγνήτισης. Οι μαγνήτες σπάνιων γαιών εξαιρούνται από προβλήματα απομαγνητισμού λόγω αντίδρασης οπλισμού. Είναι ακριβό υλικό.

Το σιδηροβόριο νεοδυμίου είναι φθηνότερο σε σύγκριση με το κοβάλτιο Samarium. Αλλά μπορεί να αντέξει υψηλότερη θερμοκρασία. Οι μαγνήτες σπανίων γαιών χρησιμοποιούνται για εφαρμογές ευαίσθητες στο μέγεθος. Χρησιμοποιούνται σε αυτοκίνητα, σερβοβιομηχανικούς δίσκους και σε μεγάλους βιομηχανικούς κινητήρες.

## 4.10 Εφαρμογές του κινητήρα συνεχούς ρεύματος μόνιμου μαγνήτη

Οι κινητήρες PMDC χρησιμοποιούνται σε διάφορες εφαρμογές που κυμαίνονται από κλάσματα έως αρκετούς ίππους. Έχουν αναπτυχθεί μέχρι περίπου 200 kW για χρήση σε διάφορες βιομηχανίες. Οι ακόλουθες εφαρμογές δίνονται παρακάτω.

- Οι κινητήρες PMDC χρησιμοποιούνται κυρίως στα αυτοκίνητα για τη λειτουργία υαλοκαθαριστήρων και πλυντηρίων παρμπρίζ, για

την ανύψωση των κάτω παραθύρων, για την κίνηση ανεμιστήρες για θερμάστρες και κλιματιστικά κ.λπ. Χρησιμοποιούνται επίσης σε μονάδες δίσκου υπολογιστών.

- Αυτοί οι τύποι κινητήρων χρησιμοποιούνται επίσης στις βιομηχανίες παιχνιδιών.
- Οι κινητήρες PMDC χρησιμοποιούνται σε ηλεκτρικές οδοντόβουρτσες, φορητές ηλεκτρικές σκούπες, μίξερ τροφίμων.
- Χρησιμοποιείται σε φορητό ηλεκτρικό εργαλείο, όπως μηχανές διάτρησης, μηχανές κοπής φρακτών κ.λπ.

#### **4.11 Πλεονεκτήματα του κινητήρα συνεχούς ρεύματος μόνιμου μαγνήτη**

- Είναι μικρότερος σε μέγεθος.
- Για μικρότερη βαθμολογία, ο μόνιμος μαγνήτης μειώνει το κόστος κατασκευής και έτσι ο κινητήρας PMDC είναι φθηνότερος.
- Καθώς αυτοί οι κινητήρες δεν απαιτούν περιελίξεις πεδίου, δεν έχουν απώλειες χαλκού στο κύκλωμα πεδίου. Αυτό αυξάνει την αποτελεσματικότητά τους.

#### **4.12 Μειονεκτήματα του κινητήρα συνεχούς ρεύματος μόνιμου μαγνήτη**

- Οι μόνιμοι μαγνήτες δεν μπορούν να παράγουν υψηλή πυκνότητα ροής όπως κάνει ένα εξωτερικά παρεχόμενο πεδίο διακλάδωσης. Επομένως, ένας κινητήρας PMDC έχει χαμηλότερη επαγόμενη ροπή ανά αμπέρ στρόφες ρεύματος οπλισμού σε σχέση με έναν κινητήρα διακλάδωσης της ίδιας ονομαστικής ισχύος.
- Υπάρχει κίνδυνος απομαγνητισμού των πόλων που μπορεί να προκληθεί από μεγάλα ρεύματα οπλισμού. Απομαγνητισμός μπορεί επίσης να συμβεί λόγω υπερβολικής θέρμανσης και επίσης όταν ο κινητήρας είναι υπερφορτωμένος για μεγάλο χρονικό διάστημα.

- Το μαγνητικό πεδίο του κινητήρα PMDC υπάρχει ανά πάσα στιγμή, ακόμη και όταν ο κινητήρας δεν χρησιμοποιείται.
- Δεν μπορούν να προστεθούν επιπλέον στροφές αμπερ για να μειωθεί η αντίδραση οπλισμού.

## 5. ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 - ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ

Σε αυτό το κεφάλαιο πραγματοποιείται ο σχεδιασμός ενός εναλλακτήρα που χρησιμοποιείται με μία κινητήρια μηχανή πετρελαίου

### 5.1 Οι προδιαγραφές του εναλλακτήρα

- $S=200\text{KVA}$
- Τριφασικός, συνδεσμολογία αστέρα
- Συχνότητα  $f=50\text{HZ}$
- Ονομαστική τάση:  $415\text{V}$
- $\text{Cos}\phi=0.8$  επαγωγικό
- Ταχύτητα περιστροφής:  $1500\text{rpm}$
- Μέγιστη θερμοκρασία  $50^\circ\text{C}$

### 5.2 Διαστάσεις

Ισχύς εξόδου

$$S = 1.11 \times K_W \times \pi^2 \times \bar{B} \times ac \times D^2 \times L \times n \times 10^{-3} \Rightarrow$$

$$D^2 \times L = \frac{S}{1.11 \times K_W \times \pi^2 \times \bar{B} \times ac \times n \times 10^{-3}}$$
$$= \frac{200}{1.11 \times 0.995 \times \pi^2 \times 0.7 \times 33000 \times \frac{1500}{60} \times 10^{-3}} \Rightarrow$$

$$D^2 \times L = 38 \cdot 10^6 \text{ mm}^3$$

Όπου

$K_w$ : συντελεστής τυλιγμάτων=0.955

$B$ : πυκνότητα ροής διακένου =  $0.6\text{Wb/m}^2$

$ac$ :ειδική ηλεκτρική φόρτιση= $33000$  ampere-conductors/m

$D$ : διάμετρος δρομέα σε m

$L$ : μήκος δρομέα σε m

Για  $D=335\text{mm}$  προκύπτει  $L=344.13\text{mm}$

Οπότε λαμβάνουμε  $D=335\text{mm}$  και  $L=345\text{mm}$

Επιλέγουμε 3 αγωγούς, πλάτους  $10\text{mm}$

Οπότε το πλάτος του τυλίγματος του τυμπάνου είναι  $345-3 \times 10=315\text{mm}$

### 5.3 Σχεδιασμός οπλισμού

Επιλέγουμε 48 αυλάκια προκειμένου να υπάρχει ισορροπία στο τριφασικό τύλιγμα, άρα 16 αυλάκια ανά φάση και

Αριθμός αυλακιών ανά πόλο =12 (4 πόλοι)

Αριθμός αυλακιών ανά πόλο και φάση  $m = \frac{48}{4 \times 3} = 4 \frac{\text{αυλάκια}}{\text{πόλο και φάση}}$

Ηλεκτρική γωνία μεταξύ γειτονικών αυλακιών  $\psi = \frac{60}{4} = 15^\circ \text{ ηλεκτρικές}$

Συντελεστής κατανομής (distribution factor)  $K_d = \frac{\sin(\frac{m\psi}{2})}{m \sin(\frac{\psi}{2})} = \frac{\sin(\frac{4 \cdot 15}{2})}{4 \sin(\frac{15}{2})} =$

0.958

Βήμα μεταξύ των πόλων=12 αυλάκια

Λαμβάνουμε επαγωγικό άνοιγμα 9 αυλάκια έτσι ώστε το τύλιγμα του πηνίου να είναι από 1-10, δηλ 9 αυλάκια

Συντελεστής βήματος μεταξύ αυλακιών  $K_p = \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) = \cos\left(\frac{45^\circ}{2}\right) =$

0.924, όπου

$\theta = 3 \times 15 = 45^\circ$

Συντελεστής τυλιγμάτων (winding factor)  $K_w = K_d \cdot K_p = 0.958 \cdot 0.924 =$

0.8852

Πολικό βήμα (Pole pitch)  $Y = \frac{\pi \cdot D}{p} = \frac{\pi \cdot 335}{4} = 263\text{mm}$

Μαγνητική ροή ανά πόλο  $\bar{B} \cdot Y \cdot L = 0.6 \cdot 0.263 \cdot 0.345 \cdot 1000 = 54.45\text{mWb}$



## 5.4 Τυλίγματα τυμπάνου

$$\text{Φασική τάση } U_{\phi} = \frac{415}{\sqrt{3}} = 240V$$

$$\text{Πλήθος τυλιγμάτων σε σειρά ανά φάση} = \frac{U_{\phi}}{4.44 \cdot K_w \cdot \phi \cdot f} = \frac{240}{4.44 \cdot 0.8852 \cdot 54.45 \cdot 10^{-3} \cdot 50} = 22.4 \text{ τυλίγματα}$$

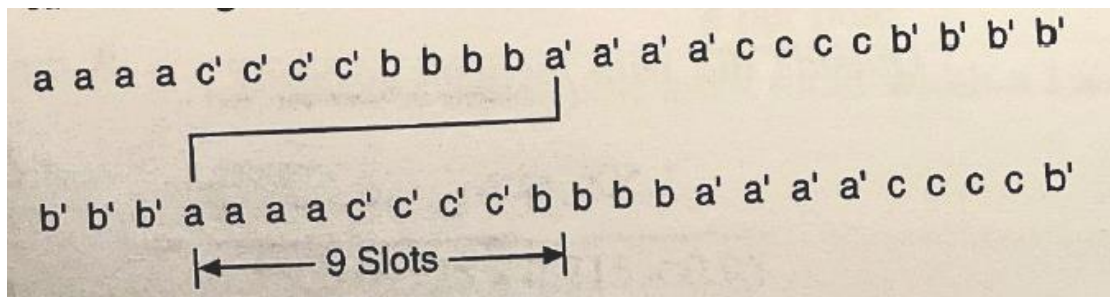
Αρα παίρνουμε 24 τυλίγματα, δηλ 48 αγωγούς ανά φάση

$$\text{Διορθωμένη μαγνητική ροή ανά πόλο } \phi = 54.45 \cdot \frac{22.4}{24} = 50.82mWb$$

Επιλέγεται διπλή στρώση στα τυλίγματα, οπότε ο αριθμός των αγωγών ανά αυλάκι είναι ζυγός αριθμός, επιλέγεται 6. Άρα χρησιμοποιούνται 6 πηνία, δηλ 12 αγωγοί ανά αυλάκι. Θέλουμε 48 αγωγούς ανά φάση ή 3 ενεργούς αγωγούς ανά αυλάκι. Με 12 αγωγούς ανά αυλάκι, θα διαμορφωθούν 4 παράλληλα κυκλώματα προκειμένου να μειωθεί το μέγεθος των αγωγών και να χωρέσουν μέσα στα αυλάκια. Συνοψίζοντας, το επιλεγθέν τύλιγμα είναι:

- Συνολικός αριθμός τυμπάνου: 48
- Εύρος τυλιγματος τυμπάνου: 1-10
- Πλήθος τυλιγμάτων ανά πηνίο: 6
- Τέσσερα τυλίγματα συνδεδεμένα σε αστέρα
- Μόνωση Class B
- Τύλιγμα διπλής στρώσης

Η κατανομή της διάταξης περιέλιξης για ένα ζεύγος πόλων φαίνεται παρακάτω



Εικόνα 5-1 Η κατανομή της διάταξης περιέλιξης για ένα ζεύγος πόλων

## 5.5 Μέγεθος αγωγού

$$\text{Ονομαστικό ρεύμα φορτίου: } I = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot U_{\Pi}} = \frac{200000}{\sqrt{3} \cdot 415} = 278.25A$$

Λαμβάνεται πυκνότητα ρεύματος  $\delta = 6A/mm^2$  (Μόνωση class B)

$$\text{Επιφάνεια εγκάρσιας διατομής} = \frac{278.25}{6} = 46.375mm^2$$

4 παράλληλα κυκλώματα, άρα η διατομή του αγωγού είναι:  $= \frac{46.375}{4} = 11.6mm^2$

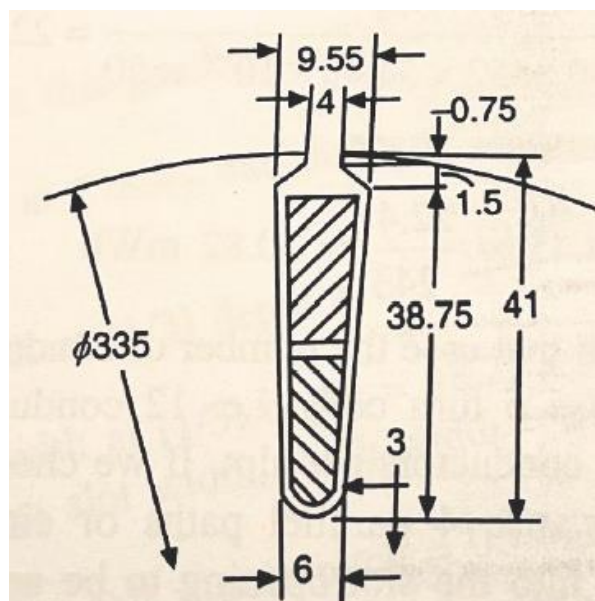
Επιλέγουμε 3 αγωγούς διαμέτρου 1.8mm και 3 αγωγούς διαμέτρου 1.4mm. Η διατομή που διαμορφώνεται από το συνδυασμό αυτών των αγωγών είναι

$$3 \times \frac{\pi}{4} \times 1.8^2 + 3 \times \frac{\pi}{4} \times 1.4^2 = 7.5 + 4.6 = 12.1mm^2 \text{ οπότε είναι οκ}$$

## 5.6 Επιλογή μεγέθους και σχήματος αυλακιού:

$$\text{Βήμα αυλακιού} = \frac{\pi \cdot 335}{48} = 21.93mm$$

Το πλάτος και το σχήμα του αυλακιού επιλέγεται κατά τρόπον ώστε η πυκνότητα ροής στο δόντι να είναι  $1.7Wb/m^2$  και οι αγωγοί μπορούν να χωρέσουν μέσα στο αυλάκι. Μετά από δοκιμές, το σχήμα και το μέγεθος του αυλακιού επιλέγεται όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 5-1 Διαστάσεις αυλακιού

Έλεγχος για το κατά πόσο χωράνε οι αγωγοί μέσα στο αυλάκι.  
Επιλέγουμε μέτρια καλυμμένους εμαγιέ καλώδια

Διάμετρος αγωγού	Εξωτερική διάμετρος με μέτρια μόνωση	Διατομή
1.4mm	1.506mm	$\frac{\pi}{4} \times 1.506^2$
1.8mm	1.916mm	$\frac{\pi}{4} \times 1.916^2$

---


$$\text{Διατομή ανά πλευρά πηνίου} = 3 \cdot 2.88 + 3 \cdot 1.78 = 14\text{mm}^2$$

Υπάρχουν 12 πλευρές πηνίων ή αγωγοί ανά αυλάκι

$$\text{Απαιτούμενη διατομή από τους αγωγούς κάθε αυλακιού} = 14 \times 12 = 168\text{mm}^2$$

$$\text{Διατομή αυλακιού} = \frac{9.55+6}{2} \times (38.75 - 3) = 278\text{mm}^2$$

$$\frac{1}{2} \times \frac{\pi}{4} \times 6^2 = 14\text{mm}^2$$

$$\text{Σύνολο} = 292\text{mm}^2$$

$$\text{Παράγοντας χώρου στο αυλάκι} = \frac{168}{292} = 0.575 \text{ Μόνωση Class B}$$

Η τιμή αυτή είναι ικανοποιητική

Έλεγχος της πυκνότητας του δοντιού στο 1/3 του βάθους από το μικρότερο πλάτος

$$\text{Βήμα αυλακιού στην επιφάνεια του οπλισμού: } \frac{335 \times \pi}{48} = 21.93\text{mm}$$

$$\text{Πλάτος αυλακιού στο μεγαλύτερο πλάτος αυλακιού} = \frac{\pi \times (335 - 2 \times 2.25)}{48} = 21.63\text{mm}^2$$

$$1/3 \text{ βάθος από την χαμηλότερη θέση} = \frac{38.5}{3} = 12.92\text{mm}$$

$$\text{Διάμετρος αυτής της θέσης} = 335 - (41 - 12.92) \times 2 = 278.84\text{mm}$$

$$\text{Βήμα αυλακιού στη διάμετρο } 278.84\text{mm} = \frac{\pi \times 278.84}{48} = 18.25\text{mm}$$

$$\text{Πλάτος αυλακιού στο } 1/3 \text{ του βάθους} = 6 + \frac{(12.92-3)(9.55-6)}{35.75} = 7\text{mm}$$

$$\text{Πλάτος δοντιού στο } 1/3 \text{ του βάθους} = 18.25 - 7 = 11.25\text{mm}$$

$$\text{Στο πλατύτερο άνοιγμα αυλακιού, πλάτος δοντιού} = 21.63 - 9.55 = 12.08\text{mm}$$

$$\text{Τόξο πόλου} = 0.7 \times \text{πολικό βήμα} = 0.7 \times \frac{\pi(335+2 \times 2.25)}{4} = 186\text{mm}$$

Λαμβάνουμε υπόψη τη διάμετρο του πόλου στο διάκενο αέρα που αντιπροσωπεύει το μήκος του διακένου αέρα στα 2,25 mm

$$\text{Πλήθος δοντιών κάτω από το τόξο του πόλου} = \frac{48 \times 186}{\pi \times 339.5} = 8.4$$

$$\begin{aligned} & \text{Πυκνότητα ροής στα δόντια } B_i = \\ & \frac{\varnothing \text{ ανά πόλο}}{\text{πλήθος δοντιών κάτω από το τόξο του πόλου} \times \text{πλάτος δοντιού} \times \text{συντελεστής στοιβαξης}} = \\ & \frac{50.82 \times 10^{-3}}{8.4 \times 0.01125 \times 0.315 \times 0.95} = 1.77 \text{Wb/m}^2 \end{aligned}$$

Το μέγεθος του αυλακιού είναι αποδεκτό

Πυκνότητα ροής στο δόντι	Αμπεροτυλίγματα	Μέσο μήκος	AT <sub>teeth</sub>	Απώλειες
1.77 Wb/m <sup>2</sup>	3000	0.041m	123	11W/kg

## 5.7 Αμπεροτυλίγματα του διακένου

$$\frac{\text{άνοιγμα του αυλακιού}}{\text{διάκενο}} = \frac{4}{2.25} = 1.77; \text{ από καμπύλη } k_0 = 0.3$$

$$y'_s = y_s - k_0 w_0 = 21.93 - 0.3 \times 4 = 20.73$$

$$\text{Ενεργό τόξο πόλου} = 20.73 \times 8.4 = 174\text{mm}$$

$$\text{Ενεργό μήκος πυρήνα } L' = 345 - (0.47 \times 3 \times 10) = 331\text{mm}$$

$$\frac{w_d}{l_g} = \frac{10}{2.25} = 4.44; \text{ από καμπύλη } k_0 = 0.47$$

$$\text{Ενεργό εμβαδόν διακένου} = 174 \times 331 \text{ mm}^2 = 0.0575 \text{ m}^2$$

$$\text{Πυκνότητα ισχύος στο διάκενο } B_g = \frac{50.82 \times 10^{-3}}{0.0575} = 0.884 \text{ Wb/mm}^2$$

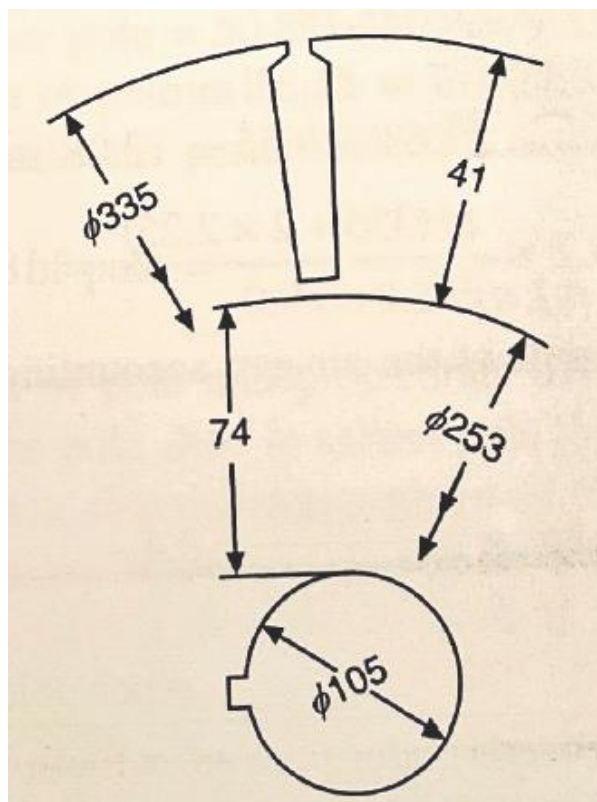
$$AT_{\text{air}} = 0.8 \times 10^6 \times 0.884 \times 0.00225 = 1591$$

Αμπεροτλίγματα στο πυρήνα

Η διάμετρος του άξονα είναι 105 mm

$$\text{Το βάθος του πυρήνα} = \frac{335 - (41 \times 2) - 105}{2} = 74 \text{ mm}$$

Το επόμενο σχήμα δείχνει τις διαστάσεις του πυρήνα



Σχήμα 5-2 Διαστάσεις πυρήνα

$$\begin{aligned} \text{Μέσο μήκος μαγνητικού μονοπατιού στον πυρήνα} &= \frac{\pi \times \text{μέση διάμετρο}}{p} = \\ &= \frac{\pi \times (105 + 74)}{4} = 140.5 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\text{Μαγνητική ροή στο τύλιγμα του πυρήνα} = \frac{50.82 \times 10^{-3}}{2} = 25.41 \times 10^{-3}$$

$$\begin{aligned} \text{Πυκνότητα μαγνητικής ροής στο τύλιγμα του πυρήνα } B_c &= \frac{25.41 \times 10^{-3}}{0.74 \times 0.315 \times 0.95} = \\ &= 1.09 \text{ Wb/m}^2 \end{aligned}$$

Πυκνότητα μαγνητικής ροής στον πυρήνα Bc	Αμπεροτυλίγματα	Μέσο μήκος μονοπατιού	ΑΤ	Απώλειες
1.09 Wb/m <sup>2</sup>	170	0.1405	24	3.8 W/kg
Αμπεροτυλίγματα Διακένου	1591	Από αυτά είναι δυνατόν να προσδιοριστεί με ακρίβεια η διαρροή στην κορυφή του πόλου και στον κάτω μέρος του πόλου και επομένως ο συντελεστής διαρροής . Κατά προσέγγιση είναι περίπου λ=1.15		
Δοντιού	123			
Πυρήνα	24			
ΑΤ1	1738			

## 5.8 Σχεδίαση των πόλων

Οι πόλοι κατασκευάζονται από ατσάλινες πλάκες ψυχρής έλασης ψυχρής ανόπτησης (CRCA – cold rolled cold annealed). Στερεώνονται σε ζυγό από μαλακό χάλυβα

Λαμβάνοντας συντελεστή διαρροής λ=1.15

Μαγνητική ροή ανά πόλο=  $50.82 \times 10^{-3} \times 1.15 = 0.0585 \text{ Wb}$

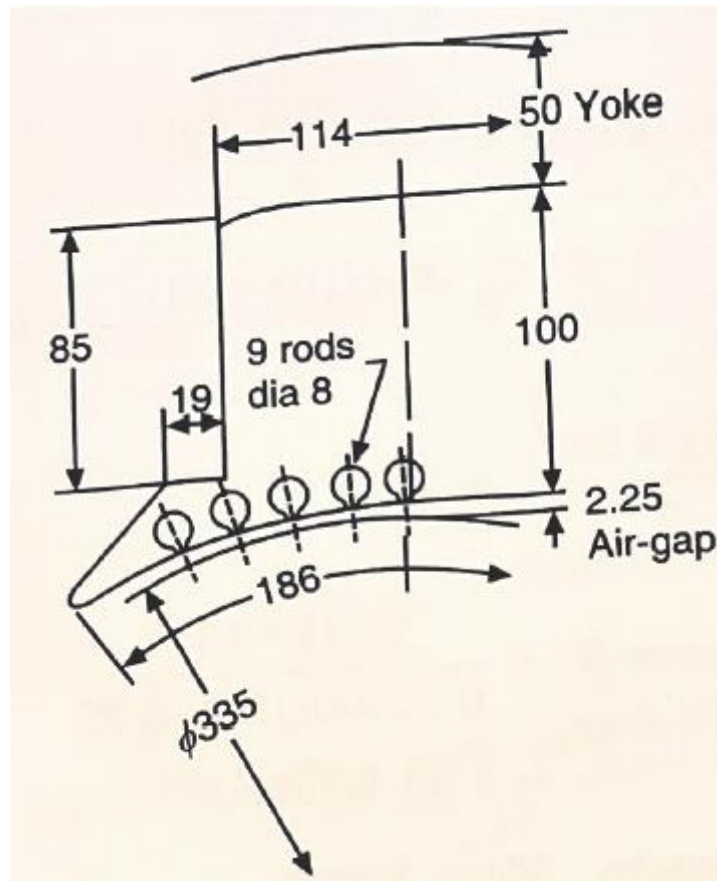
Μήκος πόλου= Μήκος πυρήνα τυμπάνου=0.345 m

Αν λάβουμε την επιτρεπτή πυκνότητα ροής στον πόλο  $B_p = 1.6 \text{ Wb/m}^2$

$$\text{Πλάτος πόλου} = \frac{0.0585}{0.93 \times 0.345 \times 1.6} = 114 \text{ m}$$

Το ύψος του πόλου και οι προβολές εξαρτώνται από τον απαιτούμενο χώρο για το τύλιγμα πεδίου. Το σχήμα του ποδιού του πόλου στις

μηχανές εκτύπων πόλων επιλέγεται μετά από δοκιμές προκειμένου να διασφαλιστεί η παραγωγή ημιτονοειδούς κυματομορφής της μαγνητικής ροής στο διάκενο. Το σχήμα και οι διαστάσεις του πόλου φαίνονται στο σχήμα 5-3. Το ύψος του πόλου κατά προσέγγιση επιλέγεται 100mm



Σχήμα 5-3 Πόλος, σχήμα ποδιού και διαστάσεις του πόλου

Αμπεροτυλίγματα του πόλου

Πυκνότητα ροής $Wb/m^2$	Αμπεροτυλίγματα /m(at)	Μήκος μονοπατιού	$AT_{pole}$
1.6	5000	0.1m	500

Ζυγός: Διάμετρος στην έδρα του πόλου= $335+[(100+2.25)\times 2]=540mm$

Ο ζυγός είναι τετραγωνικού σχήματος προκειμένου να χωρέσει περισσότερα αμπεροτυλίγματα στους πόλους. Οι εξωτερικές διαστάσεις του είναι 640mm κάθε πλευρά

$$\text{Πάχος ζυγού} = \frac{640-540}{2} = 50\text{mm}$$

$$\text{Πυκνότητα ροής στο ζυγό} = \frac{\text{ροή ανά πόλο}}{2 \times \text{μήκος ζυγού} \times \text{πλάτος ζυγού}} = \frac{0.0585}{2 \times 0.64 \times 0.05} = 0.9\text{Wb/m}^2$$

$$\text{Μέσο μήκος μαγνητικού μονοπατιού} = 590\text{mm}$$

Πυκνότητα ροής στο ζυγό $B_y$	Αμπεροτυλίγματα /m(at)	Μήκος μονοπατιού	$AT_{yoke}$
0.9Wb/m <sup>2</sup>	500	0.59m	295

Οπότε τα αμπεροτυλίγματα ανά πόλο είναι

Διάκενο	1591
Δόντι τυμπάνου	123
Πυρήνας τυμπάνου	<u>24</u>
$AT_1$	1738
Πόλος	500
Ζυγός	<u>295</u>
$AT$ ανά πόλο	2533



## 5.9 Χαρακτηριστικά ανοικτού κυκλώματος

Προκειμένου να υπολογισθούν τα χαρακτηριστικά της σύγχρονης γεννήτριας, πολλαπλασιάζονται τα αμπεροτυλίγματα που χρειάζονται για τον πόλο με τάση 1.15p.u και 1.3p.u., όπως γίνεται με τάση 1p.u. Άλλα σημεία μπορούν να χρησιμοποιηθούν αν κριθεί απαραίτητο

Όταν η p.u τάση είναι 1.15, η μαγνητική ροή ανά πόλο είναι 1.15 φορές η τελευταία τιμή. Όταν η p.u τάση είναι 1.13, η μαγνητική ροή ανά πόλο είναι 1.13 φορές η τελευταία τιμή. Η μαγνητική ροή στον πόλο, με βάση τον παράγοντα διαρροής είναι 1.15 φορές ή κύρια μαγνητική ροή

<i>p.u τάση</i>			<i>1.00</i>			<i>1.1</i> <i>5</i>			<i>1.13</i>
<i>E volts</i> <i>ανά</i> <i>φάση</i>			<i>240</i>			<i>276</i>			<i>312</i>
<i>Κύρια</i> <i>μαγνητικ</i> <i>ή ροή</i> <i>mWb</i>			<i>50.8</i> <i>2</i>			<i>58.</i> <i>5</i>			<i>66.0</i> <i>7</i>
<i>Τύμπανο</i>	<i>B</i>	<i>at</i>	<i>AT</i>	<i>B</i>	<i>at</i>	<i>AT</i>	<i>B</i>	<i>at</i>	<i>AT</i>
<i>Διάκενο</i>	<i>0.88</i> <i>4</i>	-	<i>1991</i>	<i>1.01</i> <i>6</i>	-	<i>183</i> <i>0</i>	<i>1.1</i> <i>5</i>	-	<i>2070</i>
<i>Δόντια</i>	<i>1.77</i>	<i>300</i> <i>0</i>	<i>123</i>	<i>2.03</i>	<i>1000</i> <i>0</i>	<i>410</i>	<i>2.3</i>	<i>25000</i> <i>0</i>	<i>1025</i>
<i>Πυρήνας</i>	<i>1.15</i>	<i>170</i>	<i>24</i>	<i>1.32</i>	<i>280</i>	<i>40</i>	<i>1.5</i>	<i>600</i>	<i>85</i>
<i>AT<sub>1</sub></i>			<i>1738</i>			<i>228</i> <i>0</i>			<i>3180</i>

<i>Πόλος</i>	1.6	500	500	1.84	1400	140	2.0	40000	4000
		0			0	0	8		0
<i>Ζυγός</i>	0.9	550	295	1.03	800	470	1.1	1000	590
							7		
<i>AT<sub>pole</sub></i>			2533			415			7770
						0			

### 5.10 Αντίσταση τυμπάνου ανά φάση

Αντίσταση σε Ω/m στους 20°C

1.8mm διάμετρος αγωγού: 0.006775

1.4 mm διάμετρος αγωγού: 0.001120

3 αγωγοί διαμέτρου 1.8mm παράλληλα =  $\frac{0.006775}{3} = 0.002258\Omega$

3 αγωγοί διαμέτρου 1.4mm παράλληλα =  $\frac{0.00112}{3} = 0.003733\Omega$

Οι δύο παραπάνω αγωγοί παράλληλα

$$R = \frac{2.258 \times 3.733 \times 10^{-3}}{5.991} = 1.407 \times 10^{-3}\Omega$$

Μέσο μήκος μισού τυλίγματος = μήκος πυρήνα +(1.15×σπείρα πηνίου)+120mm=345+(1.15× $\frac{9}{12}$ ×263)+120=700mm

Αντίσταση αγωγών τυμπάνου ανά φάση στους

20°C=48×0.700×1.407×10<sup>-3</sup>=47.2×10<sup>-3</sup>Ω

Υπάρχουν 4 παράλληλα μονοπάτια, οπότε

Αντίσταση στους 20°C ανά φάση =  $\frac{0.0472}{4} = 0.0118\Omega$

Αντίσταση στους 75°C ανά φάση = 0.0118×1.218=0.014Ω

$$\frac{I_r}{V} = \frac{278.25 \times 0.014}{240} = 0.01625 \text{ p.u. αντίσταση}$$

### 5.11 Αντίδραση τυμπάνου $X_1$

$$\frac{W_{S1}}{W_{S2}} = \frac{9.55}{6} = 1.5$$

$$\frac{h_1}{w_{S2}} = \frac{35.75}{6} = 5.56$$

$$F=132$$

$$\text{Διαμόρφωση αυλακίου } \lambda_s = \frac{0.75}{4} + \frac{2 \times 1.5}{4+9.55} + 1.32 \cong 1.709$$

$$\text{Αντίδραση διαρροής αυλακίου} = 31.6 \times 10^{-6} \times 50 \times \frac{24^2}{4 \times 4} \times 0.345 \times 1,709 = 0.0355 \Omega$$

$$L_o \lambda_o = \frac{K_s r^2 p}{\pi \tau_s} = \frac{0.82 \times 0.263^2}{\pi \times 0.02193} = 0.823$$

$$\frac{\text{σπείρα πηνίου}}{\text{βήμα πόλου}} = \frac{9}{12} = 0.75$$

$$K_s=0.82 \text{ (60}^\circ \text{ καμπύλη διασποράς φάσης)}$$

$$\text{αντίδραση διαρροής προεξοχής} = 31.6 \times 10^{-6} \times 50 \times \frac{24^2}{4 \times 4} \times 0.823 = 0.0468 \Omega$$

$$\text{αντίδραση διαρροής σπλισμού } X_1 = 0.0335 + 0.0468 = 0.08 \Omega$$

$$I \times X_1 = 278.25 \times 0.08 = 22.26 \text{ V}$$

$$\text{p.u. αντίδραση} = \frac{22.26}{240} = 0.093 \text{ p.u.}$$

$$\begin{aligned} \text{Αμπεροτυλίγματα αντίδρασης τυμπάνου } F_a &= 2.7 \times I \times T_{Ph} \times \frac{K_{w1}}{p} = 2.7 \times \\ 278.25 \times 24 \times \frac{0.8852}{4} &= 3990 \end{aligned}$$

### 5.12 Χαρακτηριστικά βραχυκύκλωσης

Για  $I X_1 = 0.093$  να βρεθούν τα απαιτούμενα αμπεροτυλίγματα της διέγερσης. Είναι 250

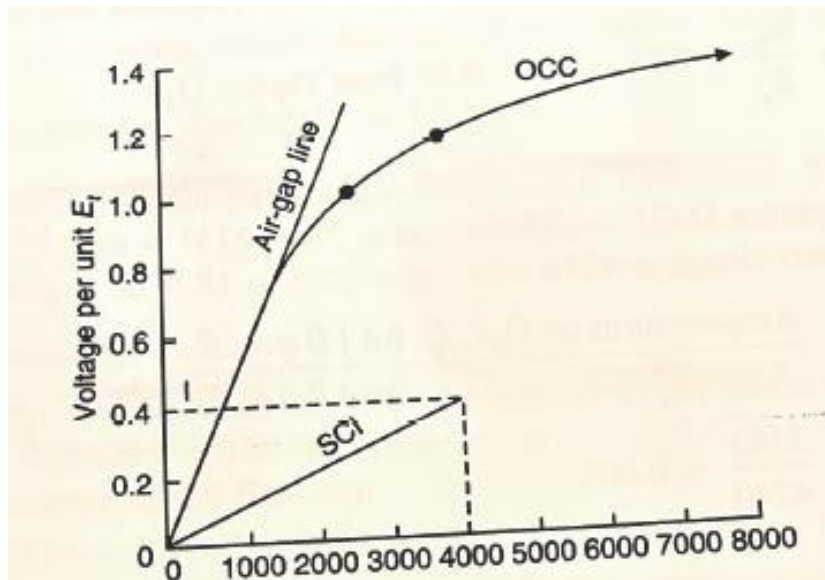
Αμπεροτυλίγματα για αντίδραση τυμπάνου  $F_a = 3990$

Αμπεραλίγματα στο ρεύμα βραχυκύκλωσης= ρεύμα πλήρους φορτίου=250+3990=4240

Λόγω βραχυκυκλώσης Ρεύμα:1.0 AT=4240

### 5.13 Υπολογισμός της διακύμανσης

Το διάγραμμα 5-1 δείχνει τη χαρακτηριστική ανοικτού κυκλώματος (OCC- Open Circuit Characteristics), με βάση τα AT για διάφορες τιμές της τάσης. Το διάγραμμα 5-2 δείχνει το αντίστοιχο διανυσματικό διάγραμμα

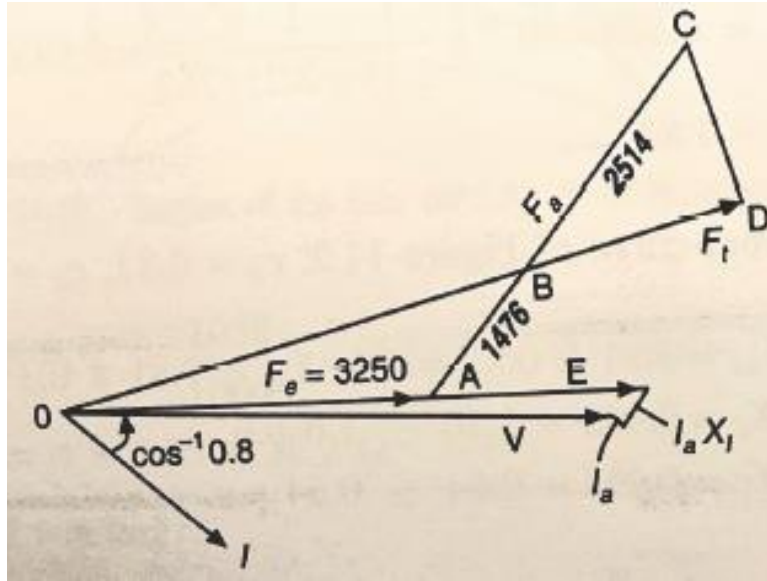


Διάγραμμα 5-1 Χαρακτηριστική ανοικτού κυκλώματος

E=1.0 p.u.	1.15 p.u.	1.3 p.u.
AT=2563	4150	7770

Στο διάγραμμα των φασόρων που αντιπροσωπεύει τη λειτουργία σε πλήρες φορτίο

$V=1.0$  p.u.  $I_r=0.01625$  p.u.  $IX_1=0.093$  p.u.



Διάγραμμα 5-2 Διανυσματικό διάγραμμα

Συντελεστής ισχύος 0.8 επαγωγικός

Το  $I_r$  καθυστερεί της τάσεως  $V$  κατά  $\cos^{-1}(0.8)$

Με διανυσματική πρόσθεση του  $I_r$  και του  $I X_1$ , η τάση ανοικτού κυκλώματος είναι  $E$ ,  $E_1=1.073$  p.u. Τα αμπεροτυλίγματα για αυτή την τάση είναι  $F_e=3250$ . Το  $F_a$  σχεδιάζεται στη σωστή γωνία σε σχέση με το ρεύμα

Διαιρούμε το  $F_a=3990$  έτσι ώστε

$AB=0.37 \times 3990=1476$  αμπεροτυλίγματα και  $BC=0.63 \times 3990=2514$

αμπεροτυλίγματα. Ενώνεται το  $OB$  και επεκτείνεται στο  $D$ , όπου το  $CD$  είναι κάθετο στο  $OD$ .  $OD=F_t=6550$  αμπεροτυλίγματα. Η τάση στο OCC για αυτό το  $F_t$ ,  $E_t=1.26$  p.u.

Η επί τις εκατό διακύμανση είναι

$$V_R = \frac{E_t - E}{E} = \frac{1.26 - 1.0}{1.0} = 26\%$$

Στην κατασκευή μιας μηχανής με έκτυπους πόλους  $AC=F_a$

Η αντίδραση τυμπάνου διαιρέθηκε με 0.37,  $\frac{X_q}{X_d} = 0.37$  ή  $K_r=0.37$

## 5.14 Λόγος βραχυκύκλωσης

$$E=1.0$$

Αμπεροτυλίγματα στο OCC =2563

Αμπεραλίγματα στο κύκλωμα βραχυκυκλώσης=4240

$$\text{Λόγος βραχυκύκλωσης} = \frac{\text{αμπεραλίγματα στο OCC για 1p.u.E}}{\text{αμπεραλίγματα στο SCC για 1p.u.I}} = \frac{2563}{4240} = 0.605$$

$$\text{Σύγχρονη αντίδραση} = \frac{1}{0.605} = 1.65 \text{ p.u.}$$

## 5.15 Υπολογισμός των $X_q$ και $X_d$

$$\begin{aligned} X_{\alpha} &= 0.565 \times 10^{-6} \times \frac{1}{\left(\frac{\ell'_q}{\tau_p}\right)} \times k_{w1} \times \left(\frac{q}{B_1}\right) \text{ p.u.} \\ &= 0.565 \times 10^{-6} \times \frac{1}{1.13 \times 2.25/263} \times 0.8852 \times \frac{33000}{\left(\frac{\pi}{2}\right) \times 0.6} = 1.81 \end{aligned}$$

Για  $\frac{\text{πολικό τόξο}}{\text{πολικό βήμα}} = 0.7$  από την καμπύλη του σχήματος 11.2,  $c_d=0.83$ ,

$$c_q=0.3$$

$$X_{ad} = 1.81 \times 0.83 = 1.5$$

$$X_{aq} = 1.81 \times 0.3 = 0.54$$

$$X_d = 0.093 + 1.5 = 1.6 \text{ p.u.}$$

$$X_q = 0.093 + 0.54 = 0.64 \text{ p.u.}$$

## 5.16 Σχεδιασμός τυλίγματος πεδίου

Αμπεροτυλίγματα πλήρους φορτίου ανά πόλο=6550

Επιλέγουμε 900 τυλίγματα ανά πηνίο πεδίου (δλδ ανά πόλο)

$$\text{Ρεύμα πεδίου } I_f = \frac{6550}{900} = 7.28 \text{ A}$$

Σχεδίαση αγωγού για 10A

Λαμβάνουμε ένταση ρεύματος  $\delta=4\text{A/mm}^2$  κλάση μόνωσης

Περιοχή δέσμευσης ρητίνης του αγωγού=10/4=2.5 mm<sup>2</sup>

Επιλέγουμε εμαγιε στρογγυλό αγωγό διαμέτρου 1.9 mm

Διατομή αγωγού= $\frac{\pi}{4} \times 1.9^2 = 2.83 \text{ mm}^2$

Εξωτερική διάμετρος αγωγού με μεσαία εμαγιέ επίστρωση=2.018 mm

Διατομή μονωμένου αγωγού = $\frac{\pi}{4} \times 2.018^2 = 3.2 \text{ mm}^2$

Απαιτούμενη διατομή των αγωγών στο πηνίο του πεδίου=900×3.2=2880 mm<sup>2</sup>. Ο χώρος για το τύλιγμα πεδίου, 19 mm×85 mm=1615 mm<sup>2</sup> δεν είναι αρκετός, οπότε αυξάνουμε το κολλάρο κατά 16 mm. Έτσι το εμβαδό για το τύλιγμα=35×85=2975 mm<sup>2</sup>, είναι επαρκές

### 5.17 Αντίσταση τυλίγματος πεδίου

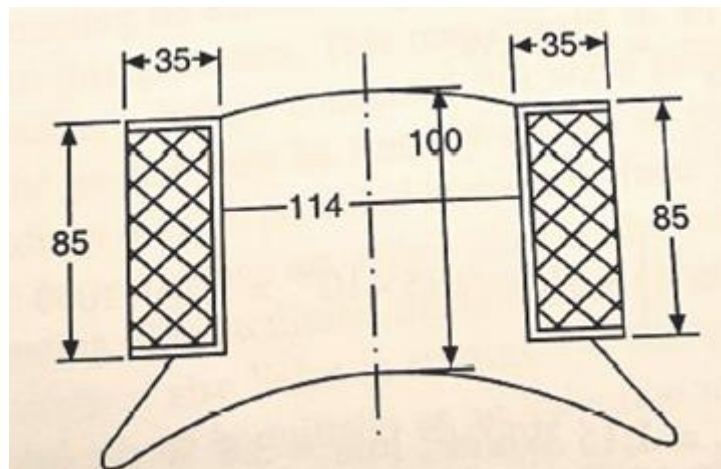
Αντίσταση του αγωγού διαμέτρου 1.9 mm στους 20°C=0.006081 Ω / m

Στους 75°C=1.218×.006081=.007407 Ω / m

Μέσο μήκος του αγωγού του πηνίου του πεδίου

$$\ell_m = (114 + 35) \times 2 + (345 + 35) \times 2 = 1058 \text{ mm}$$

Από το Σχήμα 5-4 η περιοχή του πόλου είναι 114×345 mm και το πάχος του τυλίγματος 35 mm



Σχήμα 5-4 Τομή τυλίγματος (όλες οι διαστάσεις σε mm)

Αντίσταση πηνίου στους 75°C= $\frac{1058}{1000} \times 0.007407 \times 900$  τυλίγματα = 7.05 Ω

$$R_f(\text{για πηνία 4 – πεδίων}) = 4 \times 7.05 = 28.2\Omega$$

### 5.18 Βάρος χαλκού στο τύλιγμα του πεδίου

βάρος χαλκού

$$\begin{aligned} &= \text{διατομή αγωγού} \times I_m \times \text{αριθμός τυλιγμάτων} \times \text{πηνία} \times 8.89 \\ &\times 1000kg = 2.83 \times 10^{-6} \times 1.058 \times 900 \times 4 \times 8.89 \times 1000 \\ &= 95.8kg \end{aligned}$$

$$\text{Απώλειες χαλκού} = I_f^2 R_f = 7.82^2 \cdot 28.2 = 205.3 \text{ Volts}$$

Προστίθεται 20% επιπλέον τάση οπότε επιλέγεται τάση 250V

$$\text{Ισχύς διέγερσης} = 250 \times 10A = 2.5 \text{ kW}$$

$$\text{Απόδοση διέγερσης 88\%, άρα είσοδος διέγερσης} = \frac{2500}{0.88} = 2840W$$

$$\text{Απώλειες διέγερσης} = 2840 - 2500 = 340W$$

$$\text{Απώλειες ψηκτρών} = 7.28 \times 2 = 15W$$

Απώλειες στη διέγερση και στο μαγνητικό πεδίο

$$\text{Απώλειες χαλκού} \quad 1.495kW$$

$$\text{Απώλειες ψηκτρών} \quad 0.015 \text{ kW}$$

$$\text{Απώλειες διέγερσης} \quad 0.340 \text{ kW}$$

$$1.850 \text{ kW}$$

### 5.19 Απώλειες σιδήρου στο δόντι του τυμπάνου και στο πυρήνα:

Βάρος σιδήρου στο δόντι του τυμπάνου

$$\text{Εμβαδόν αυλακιού: } 281.5 \times 48 \text{ mm}^2$$

$$\text{Εμβαδόν σιδήρου} = \left\{ \frac{\pi}{4} (355^2 - 263^2) - 281.5 \times 48 \right\} = 25778 \text{ mm}^2$$

$$\text{Καθαρό μήκος σιδήρου του πυρήνα} = (345 - 30) \times 0.95 \text{ mm}$$

$$\text{Βάρος ποδιού σιδήρου} = 25778 \times 315 \times 0.95 \times 10^{-9} \times 7.78 \times 1000 \text{ kgr} = 60 \text{ kgr}$$



Πυκνότητα πεδίου στο πόδι  $B_i=1.77\text{Wb/m}^2$     Απώλειες= $11\text{W/kg}$

Απώλειες στο δόντι του τυμπάνου= $\frac{60 \times 11}{1000} = 0.66\text{kW}$

### 5.20 Βάρος πυρήνα τυμπάνου:

Βάρος πυρήνα= $\left\{\frac{\pi}{4}(355^2 - 105^2)\right\} \times 315 \times 0.95 \times 10^{-9} \times 7.78 \times 1000\text{kgr} = 96.8\text{kgr}$

Πυκνότητα πεδίου στον πυρήνα του τυμπάνου  $B_c=1.15\text{Wb/m}^2$

Απώλειες= $3.8\text{W/kg}$

Απώλειες στον πυρήνα του τυμπάνου= $\frac{96.8 \times 3.8}{1000} = 0.37\text{kW}$

### 5.21 Βάρος χαλκού στο τύμπανο

Διατομή αγωγού διαμέτρου 1.8 mm= $\frac{\pi}{4} \times 1.8^2 = 2.54\text{mm}^2$

Διατομή αγωγού διαμέτρου 1.4 mm= $\frac{\pi}{4} \times 1.4^2 = 1.54\text{mm}^2$

4.08mm<sup>2</sup>

6 τυλίγματα:3 τέτοιοι ημιαγωγοί:διατομή= $4.08 \times 3 = 12.24\text{mm}^2$  μέσο μήκος μισού τυλίγματος (η ενός αγωγού)=700mm

Βάρος χαλκού= $12.24 \times 700 \times 10^{-9} \times 1000 \times 8.89 \times 48$  (αυλάκια)  $\times 12$  (αγωγοί ανά αυλάκι)=44kg

## 5.22 Απώλειες και απόδοση του εναλλακτήρα

Αντίσταση τυμπάνου ανά φάση  $r=0.014\Omega$

Ρεύμα πλήρους φόρτισης  $I=278.25\text{A}$

Απώλειες χαλκού  $=3 \times I^2 \times r = 3 \times 278.25^2 \times 0.014 = 3.25\text{kW}$

Κατανεμημένες απώλειες και απώλειες δινορρευμάτων  $= 2\text{kW}$

Απώλειες σιδήρου στο δόντι του τυμπάνου  $= 0.66\text{kW}$

Απώλειες σιδήρου στον πυρήνα του τυμπάνου  $= 0.37\text{kW}$

Απώλειες τριβών  $= 2\text{kW}$

Απώλειες διέγερσης  $= 1,85\text{kW}$

Συνολικές απώλειες  $= 10.13\text{kW}$

Ισχύς εξόδου του εναλλακτήρα με συντελεστή ισχύος

$$0.8 = 200 \times 0.8 = 160\text{kW}$$

Απόδοση του εναλλακτήρα με πλήρες φορτίο με επαγωγικό συντελεστή

$$\text{ισχύς} = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{out}} + p_{\text{losses}}} = \frac{160}{160 + 8.28} \times 100\% = 95\%, \text{ χωρίς τις απώλειες διέγερσης.}$$

$$\text{Απόδοση εναλλακτήρα και συστήματος διέγερσης} = \frac{160}{160 + 10.13} \times 100\% =$$

94%

## 6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. “Ηλεκτρικές Μηχανές”, Μαλατέστας Β. Παντελής, Εκδοτικός οίκος Τζιόλα, Δεκέμβριος 2015 3<sup>η</sup> έκδοση.
2. “Design and Testing of Electrical Machines”, M.V. Deshpande, PHI Learning, 2010
3. <https://www.controleng.com/articles/understanding-permanent-magnet-motors/>
4. <https://www.renesas.com/us/en/application/home-building/motor-control-solutions/motor-types>
5. <https://www.electronics-tutorials.ws/>
6. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B012369401900523>