



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΥ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

**ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ**

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΣΥΓΧΡΟΝΗΣ ΜΗΧΑΝΗΣ

ΜΑΝΩΛΑΚΟΣ ΑΝΤΩΝΙΟΣ , ΑΜ: 7359

ΤΖΟΛΑΣ ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ, ΑΜ:7326

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΧΑΡΑΛΑΜΠΑΚΟΣ ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ

ΠΑΤΡΑ 2024

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της παρούσας πτυχιακής εργασίας είναι η μελέτη και η σχεδίαση μιας τριφασικής σύγχρονης μηχανής ισχύος 50 kVA. Στο πρώτο κεφάλαιο πραγματοποιείται μια περιγραφή των βασικών κανόνων που πρέπει να διέπουν το σχεδιασμό των ηλεκτρικών μηχανών. Ακολουθεί το δεύτερο κεφάλαιο, όπου παρατίθενται πληροφορίες σχετικά με τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των ηλεκτρικών μηχανών. Στο τρίτο κεφάλαιο περιγράφονται οι ιδιότητες των μαγνητικών υλικών που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη προκειμένου να γίνεται σωστή χρήση κάθε υλικού ανάλογα με την εφαρμογή και στο τέταρτο κεφάλαιο αναλύονται οι βασικές αρχές σχεδιασμού των σύγχρονων μηχανών για κάθε τμήμα των μηχανών. Τέλος στο πέμπτο κεφάλαιο πραγματοποιούνται οι υπολογισμοί όλων των τμημάτων και των απωλειών για την παραπάνω μηχανή

Λέξεις κλειδιά: Σύγχρονη μηχανή, μαγνητικά υλικά, σχεδιασμός ηλεκτρικής μηχανής

ABSTRACT

The subject of this thesis is the study and design of a three phase synchronous machine of 50 kVA power. In the first chapter a description of the basic rules that should govern the design of electrical machines is given. This is followed by the second chapter, which provides information on the materials used in the construction of electric machines. The third chapter describes the properties of magnetic materials that must be taken into account in order to make the correct use of each material according to the application, and the fourth chapter discusses the basic design principles of modern machines for each part of the machines. Finally in chapter five the calculations of all the parts and losses for the above machine are carried out

Keywords: synchronous machine, magnetic materials, electric machine design

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	I
ABSTRACT	II
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ	III
ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ	VII
ΠΙΝΑΚΑΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ	VII
1. ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 – ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
1.1 Μια πρώτη προσέγγιση για το σχεδιασμό μιας ηλεκτρικής μηχανής 1	
1.2 Παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψη στο σχεδιασμό ηλεκτρικών μηχανών	2
1.3 Περιορισμοί στο σχεδιασμό.....	3
2. ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 – ΥΛΙΚΑ ΓΙΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ	5
2.1 Αγώγιμα υλικά.....	5
2.2 Μαγνητικά υλικά	6
2.3 Μονωτικά υλικά.....	9
2.3.1 Στερεά μονωτικά	9
2.3.2 Υγρά μονωτικά	10
2.3.3 Αέρια μονωτικά.....	10
2.4 Ταξινόμηση των μονωτικών υλικών με βάση τη θερμική θεώρηση 11	
3. ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ	13
3.1 Διαμαγνητισμός	14
3.2 Παραμαγνητισμός	15
3.3 Σιδηρομαγνητισμός	16
3.3.1 Αυθόρμητη Μαγνήτιση	17
3.3.2 Θερμοκρασία Κιουρί	18
3.3.3 Υστέρηση.....	19
3.4 Σιδηριμαγνητισμός.....	21

3.5	Αντισιδηρομαγνητισμός	23
4.	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 –ΓΕΝΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΜΙΑΣ ΣΥΓΧΡΟΝΗΣ ΜΗΧΑΝΗΣ.....	26
4.1	Προδιαγραφές γεννήτριας	26
4.2	Εξοδος τριφασικής σύγχρονης γεννήτριας.....	26
4.3	Διάκενο αέρα.....	27
4.4	Επιλογή των αυλακιών (πλήθος – μέγεθος)	28
4.5	Τύλιγμα του στάτη	28
4.6	Σχεδιασμός του πόλου και του πέδιλου του πόλου	29
4.7	Σχεδιασμός του μαγνητικού κυκλώματος	30
4.8	ΑΝΤΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΣΥΓΧΡΟΝΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ	31
4.9	Προσδιορισμός διέγερσης για οποιαδήποτε κατάσταση φορτίου... ..	33
4.10	Χαρακτηριστικά βραχυκυκλώματος	34
4.11	Κορεσμός.....	34
4.12	Σχεδιασμός της περιέλιξης πεδίου.....	34
4.13	Ανάλυση της μεταφοράς θερμότητας και αύξησης της θερμοκρασίας	35
4.14	Σύστημα διέγερσης.....	35
4.15	Σχεδιασμός τυλίγματος αποσβεστήρα	36
5.	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 – ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ	37
5.1	Οι προδιαγραφές του εναλλακτήρα.....	37
<input type="checkbox"/>	S=50KVA	37
<input type="checkbox"/>	Τριφασικός, συνδεσμολογία αστέρα.....	37
<input type="checkbox"/>	Συχνότητα f=50HZ.....	37
<input type="checkbox"/>	Ονομαστική τάση:400V	37
<input type="checkbox"/>	Cosφ=0.8 επαγωγικό	37
<input type="checkbox"/>	Ταχύτητα περιστροφής: 1500rpm.....	37

□ Μέγιστη θερμοκρασία 50°C	37
□ Μήκος δρομέα :885mm.....	37
5.2 Διαστάσεις της μηχανής.....	37
5.3 Σχεδιασμός οπλισμού	38
Συντελεστής κατανομής (distribution factor)	38
$Kd = \sin(m\psi/2)m \sin(\psi/2) = \sin(4 \cdot 152)/4 \sin(152) = 0.958$	38
Βήμα μεταξύ των πόλων=12 αυλάκια	38
Πολικό βήμα (Pole pitch) $Y = \pi \cdot Dp = \pi \cdot 1054 = 82.47mm = 83mm$	39
5.4 Τυλίγματα τυμπάνου.....	39
Φασική τάση $U\phi = 4003 = 230.94V$	39
Αρα παίρνουμε 28 τυλίγματα, δηλ 56 αγωγούς ανά φάση	39
5.5 Μέγεθος αγωγού	40
Ονομαστικό ρεύμα φορτίου: $I = S3 \cdot U\phi = 503 \cdot 400 = 72.2A$	40
Επιφάνεια εγκάρσιας διατομής $= 72,26 = 12mm^2$	40
$6 \times \pi 4 \times 12 = 2.35mm^2$ οπότε είναι οκ	40
5.6 Επιλογή μεγέθους και σχήματος αυλακιού:	40
5.7 Αμπερελίγματα του διακένου.....	43
5.8 Σχεδίαση των πόλων.....	45
5.9 Χαρακτηριστικά ανοικτού κυκλώματος.....	48
5.10 Αντίσταση τυμπάνου ανά φάση	48
5.11 Αντίδραση τυμπάνου X_1	49
5.12 Χαρακτηριστικά βραχυκύκλωσης	50
5.13 Υπολογισμός της διακύμανσης.....	50
5.14 Λόγος βραχυκύκλωσης.....	53
5.15 Υπολογισμός των X_q και X_d	54

5.16	Σχεδιασμός τυλίγματος πεδίου.....	54
5.17	Αντίσταση τυλίγματος πεδίου.....	55
5.18	Βάρος χαλκού στο τύλιγμα του πεδίου.....	56
5.19	Απώλειες σιδήρου στο δόντι του τυμπάνου και στο πυρήνα.....	57
5.20	Βάρος πυρήνα τυμπάνου:	57
5.21	Βάρος χαλκού στο τύμπανο	58
5.22	Απώλειες και απόδοση του εναλλακτήρα	58
6.	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	60

ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 3.1	Διαμαγνητισμός.....	14
Σχήμα 3.2	Παραμαγνητισμός[2].....	15
Σχήμα 3.3	Σιδηρομαγνητισμός[2].....	17
Σχήμα 3.4	Βρόχος Υστέρησης[2]	20
Σχήμα 3.5	απλή αναπαράσταση των μαγνητικών σπιν σε ένα σιδηριμαγνητικό οξείδιο[2].....	21
Σχήμα 3.6	Κρυσταλλική Δομή Μαγνητίτη[2]	22
Σχήμα 3.7	Αντισιδηρομαγνητισμός.....	23
Σχήμα 3.8	Κρυσταλλική Δομή Αιματίτη[2]	24
Σχήμα 4.1	Τυπικό σχήμα εκτυπου πόλου[3].....	30
Σχήμα 5.1	Σχήμα και διαστάσεις αυλακιού - παράδειγμα	41
Σχήμα 5.2	Διαστάσεις και σχήμα πυρήνα - παράδειγμα	44
Σχήμα 5.3	Πόλος, σχήμα ποδιού και διαστάσεις του πόλου - παραδειγμα	45
Σχήμα 5.4	Τομή τυλίγματος (όλες οι διαστάσεις σε mm)	55

ΠΙΝΑΚΑΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Διάγραμμα 3.1	μαγνήτιση κορεσμού[2].....	18
Διάγραμμα 3.2	Τυπικό διάγραμμα μαγνήτισης έναντι θερμοκρασίας για μαγνητίτη[2]	19
Διάγραμμα 3.3	Συμπεριφορά της ευαισθησίας πάνω από μια κρίσιμη θερμοκρασία, που ονομάζεται θερμοκρασία Néel (T_N)[2].....	24
Διάγραμμα 3.4	Μετάβαση Morin[2].....	25
Διάγραμμα 4.1	C_d , C_g σε συνάρτηση με το τόξο πόλου / βήμα πόλου για σύγχρονες μηχανές με έκτυπο πόλο.....	32
Διάγραμμα 4.2	Διανυσματικό Διάγραμμα φασμάτων μιας γεννήτριας με έκτυπους πόλους.	33

Διάγραμμα 5.1	Χαρακτηριστική ανοικτού κυκλώματος	51
Διάγραμμα 5.2	Διανυσματικό διάγραμμα.....	52

1. ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 – ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Μια πρώτη προσέγγιση για το σχεδιασμό μιας ηλεκτρικής μηχανής

Η μαγνητική ροή σε όλες τις ηλεκτρικές μηχανές (γεννήτριες, κινητήρες και μετασχηματιστές) παίζει σημαντικό ρόλο στη μετατροπή ή τη μεταφορά της ενέργειας. Το τύλιγμα πεδίου ή μαγνήτισης των περιστρεφόμενων μηχανών παράγει τη ροή, ενώ το τύλιγμα οπλισμού παρέχει είτε ηλεκτρική ισχύ είτε μηχανική ισχύ. Στην περίπτωση των μετασχηματιστών το πρωτεύον τύλιγμα παρέχει την ισχύ στο δευτερεύον.

Ο βασικός σχεδιασμός μιας ηλεκτρικής μηχανής περιλαμβάνει τη διαστασιολόγηση του μαγνητικού κυκλώματος, του ηλεκτρικού κυκλώματος, του συστήματος μόνωσης κ.λπ. και πραγματοποιείται με την εφαρμογή αναλυτικών εξισώσεων.

Ένας σχεδιαστής έρχεται γενικά αντιμέτωπος με έναν αριθμό προβλημάτων για τα οποία μπορεί να μην υπάρχει μία λύση, αλλά πολλές λύσεις. Ένας σχεδιασμός θα πρέπει να εξασφαλίζει ότι το προϊόν της σχεδίασης αποδίδει σύμφωνα με τις απαιτήσεις σε υψηλότερη απόδοση, χαμηλότερο βάρος υλικού για την επιθυμητή απόδοση, χαμηλότερη αύξηση της θερμοκρασίας και χαμηλότερο κόστος. Επίσης πρέπει να είναι αξιόπιστα και ανθεκτικά.

Ένας πρακτικός σχεδιαστής πρέπει να πραγματοποιήσει το σχεδιασμό έτσι ώστε τα χαρακτηριστικά της μηχανής (π.χ. τυποποιημένα πλαίσια) να είναι προσαρμόσιμα στις απαιτήσεις των προδιαγραφών. Ο σχεδιαστής πρέπει επίσης να επιτύχει κάποιο είδος συμβιβασμού μεταξύ του ιδανικού σχεδιασμού και ενός σχεδιασμού που να συμμορφώνεται με τις συνθήκες κατασκευής.

Ο ηλεκτρολόγος σχεδιαστής πρέπει να είναι εξοικειωμένος με [1]

- a. Τα Εθνικά και διεθνή πρότυπα IS, BIS, BS, IEC,
- b. Προδιαγραφές (που αφορούν τις ονομαστικές τιμές του μηχανήματος, τις απαιτήσεις απόδοσης κ.λπ. του καταναλωτή)
- c. Κόστος υλικών και εργασίας
- d. Κατασκευαστικοί περιορισμοί κ.λπ.

Ο σχεδιαστής μπορεί να ανατρέξει σε εγχειρίδια που αποτελούν πηγή διαδικασιών σχεδιασμού, ιδιοτήτων υλικών, εύρους παραμέτρων σχεδιασμού κ.λπ. και σε φυλλάδια του κατασκευαστή.

Καθώς ο σχεδιασμός περιλαμβάνει έναν αριθμό παραδοχών και περιορισμών, οι τελικές τιμές του σχεδιασμού μπορούν να ληφθούν μόνο με επαναληπτικές μεθόδους. Ο υπολογιστής παίζει ζωτικό ρόλο στην εξεύρεση των τελικών τιμών. Με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων (FEM), μπορεί να μελετηθεί η επίδραση μιας και μόνο παραμέτρου στη δυναμική απόδοση της μηχανής. Επιπλέον, ορισμένες δοκιμές, οι οποίες δεν είναι καν εφικτές σε εργαστηριακή διάταξη, μπορούν να εκτελεστούν εικονικά με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων.[1]

1.2 Παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψη στο σχεδιασμό ηλεκτρικών μηχανών

Τα βασικά στοιχεία όλων των ηλεκτρομαγνητικών συσκευών είναι τα τυλίγματα πεδίου και οπλισμού που υποστηρίζονται από διηλεκτρικό ή μόνωση, το σύστημα ψύξης και τα μηχανικά μέρη. Ως εκ τούτου, οι παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά τον σχεδιασμό είναι οι εξής, [1]

1. Το μαγνητικό κύκλωμα ή η διαδρομή ροής: Θα πρέπει να καθορίζει την απαιτούμενη ποσότητα ροής χρησιμοποιώντας το

ελάχιστο mmf (Μαγνητικοκινητική δύναμη). Οι απώλειες του πυρήνα πρέπει να είναι μικρότερες.

2. Ηλεκτρικό κύκλωμα ή περιελίξεις: Θα πρέπει να διασφαλίζει την επαγωγή της απαιτούμενης ηλεκτρεγερτικής τάσης χωρίς πολυπλοκότητα στη διάταξη των περιελίξεων. Οι απώλειες χαλκού θα πρέπει να είναι λιγότερες.
3. Μόνωση: Πρέπει να εξασφαλίζει τον απρόσκοπτο διαχωρισμό των τμημάτων της μηχανής που λειτουργούν σε διαφορετικό δυναμικό και να περιορίζει το ρεύμα στις προβλεπόμενες διαδρομές.
4. Σύστημα ψύξης ή εξαερισμού: Πρέπει να διασφαλίζει ότι το μηχάνημα λειτουργεί στην καθορισμένη θερμοκρασία.
5. Μέρη του μηχανήματος: Θα πρέπει να είναι ανθεκτικά.

Η τέχνη του επιτυχημένου σχεδιασμού δεν έγκειται μόνο στην επίλυση εύρεσης χώρου μεταξύ σιδήρου, χαλκού, μόνωσης και ψυκτικού υγρού, αλλά και στη βελτιστοποίηση του κόστους κατασκευής και των λειτουργικών εξόδων και των εξόδων συντήρησης.

Οι παράγοντες, πέραν των ανωτέρω, που απαιτούν εξέταση είναι οι εξής[1]

- i. Περιορισμοί στο σχεδιασμό (κορεσμός, πυκνότητα ρεύματος, μόνωση, αύξηση θερμοκρασίας κ.λπ.)
- ii. Ανάγκες του πελάτη
- iii. Εθνικά και διεθνή πρότυπα
- iv. Ευκολία στη γραμμή παραγωγής και στη μεταφορά
- v. Συντήρηση και επισκευές
- vi. Περιβαλλοντικές συνθήκες κ.λπ.

1.3 Περιορισμοί στο σχεδιασμό

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται για τη μηχανή και άλλα, όπως η ψύξη κ.λπ., θέτουν περιορισμούς στο σχεδιασμό. Οι περιορισμοί προέρχονται από τον κορεσμό του σιδήρου, την πυκνότητα ρεύματος στους αγωγούς,

τη θερμοκρασία, τη μόνωση, τις μηχανικές ιδιότητες, την απόδοση, τον συντελεστή ισχύος κ.λπ. [1]

- i. Κορεσμός: Η υψηλότερη πυκνότητα ροής μειώνει τον όγκο του σιδήρου αλλά οδηγεί τον σίδηρο να λειτουργεί στην περιοχή κορεσμού. Ο κορεσμός του σιδήρου θέτει περιορισμούς λόγω των αυξημένων απωλειών πυρήνα και της υπερβολικής διέγερσης που απαιτείται για τη δημιουργία μιας επιθυμητής τιμής ροής. Εισάγει επίσης αρμονικές.
- ii. Πυκνότητα ρεύματος: Η υψηλότερη πυκνότητα ρεύματος μειώνει τον όγκο του χαλκού αλλά αυξάνει τις απώλειες και τη θερμοκρασία.
- iii. Θερμοκρασία: θέτει έναν περιορισμό λόγω πιθανών ζημιών στη μόνωση και σε άλλα υλικά
- iv. Μόνωση (η οποία είναι τόσο μηχανικά όσο και ηλεκτρικά αδύναμη): αποτελεί περιορισμό λόγω διάσπασης από υπερβολική κλίση τάσης, μηχανικές δυνάμεις ή θερμότητα.
- v. Η μηχανική αντοχή των υλικών αποτελεί περιορισμό ιδιαίτερα στην περίπτωση μεγάλων και ταχύτατων μηχανών.
- vi. Η υψηλή απόδοση και ο υψηλός συντελεστής ισχύος αποτελούν περιορισμό λόγω του υψηλότερου κόστους κεφαλαίου. (Από την άλλη πλευρά, μια χαμηλή τιμή του βαθμού απόδοσης και του συντελεστή ισχύος έχει ως αποτέλεσμα υψηλό κόστος συντήρησης).
- vii. Η μηχανική μεταγωγή σε κινητήρες ή γεννήτριες συνεχούς ρεύματος οδηγεί σε κακή μεταγωγή.

Εκτός από τους ανωτέρω παράγοντες, περιοριστικό παράγοντα μπορεί να αποτελέσουν οι προδιαγραφές του καταναλωτή, του κατασκευαστή ή του προτύπου.

2. ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 – ΥΛΙΚΑ ΓΙΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ

Τα κύρια χαρακτηριστικά των υλικών που σχετίζονται με τις ηλεκτρικές μηχανές είναι αυτά που σχετίζονται με τους αγωγούς για το ηλεκτρικό κύκλωμα, το σύστημα μόνωσης που είναι απαραίτητο για την απομόνωση των κυκλωμάτων, καθώς και με τους εξειδικευμένους χάλυβες και τους μόνιμους μαγνήτες που χρησιμοποιούνται για το μαγνητικό κύκλωμα. [1]

2.1 Αγωγή υλικά

Τα συνήθως χρησιμοποιούμενα αγωγή υλικά είναι ο χαλκός και το αλουμίνιο. Ορισμένες από τις επιθυμητές ιδιότητες που πρέπει να διαθέτει ένας καλός αγωγός παρατίθενται παρακάτω.

1. Χαμηλή τιμή ειδικής αντίστασης ή υψηλή αγωγιμότητα
2. Χαμηλή τιμή του θερμοκρασιακού συντελεστή αντίστασης
3. Υψηλή αντοχή σε εφελκυσμό
4. Υψηλό σημείο τήξης
5. Υψηλή αντοχή στη διάβρωση
6. Επιτρέπουν συγκόλληση, συγκόλληση ή συγκόλληση ώστε οι αρθρώσεις να είναι αξιόπιστες.
7. Εξαιρετικά εύπλαστα και όλκιμα
8. Ανθεκτικά και φτηνά από πλευράς κόστους

Για την ίδια αντίσταση και το ίδιο μήκος, η επιφάνεια διατομής του αλουμινίου είναι 61% μεγαλύτερη από εκείνη του χάλκινου αγωγού και σχεδόν 50% ελαφρύτερη από το χαλκό.

Αν και το αλουμίνιο μειώνει το κόστος των μετασχηματιστών μικρής χωρητικότητας, αυξάνει το μέγεθος και το κόστος των μετασχηματιστών μεγάλης χωρητικότητας. Το αλουμίνιο χρησιμοποιείται πολύ σήμερα μόνο επειδή ο χαλκός είναι ακριβός και δεν είναι εύκολα διαθέσιμος.

2.2 Μαγνητικά υλικά

Οι μαγνητικές ιδιότητες ενός μαγνητικού υλικού εξαρτώνται από τον προσανατολισμό των κρυστάλλων του υλικού και καθορίζουν το μέγεθος της μηχανής ή του εξοπλισμού για δεδομένη ονομαστική ισχύ, την απαιτούμενη διέγερση, την αποδοτικότητα της λειτουργίας κ.λπ.

Ορισμένες από τις ιδιότητες που πρέπει να διαθέτει ένα καλό μαγνητικό υλικό παρατίθενται παρακάτω. [1]

1. Χαμηλή μαγνητική αντίσταση ή θα πρέπει να είναι ιδιαίτερα διαπερατό ή θα πρέπει να έχει υψηλή τιμή της σχετικής διαπερατότητας
2. Υψηλή επαγωγή κορεσμού (για την ελαχιστοποίηση του βάρους και του όγκου των σιδερένιων μερών)
3. Υψηλή ειδική ηλεκτρική αντίσταση, ώστε η ηλεκτρεγερτική τάση εξαιτίας των δινορρευμάτων και συνεπώς οι απώλειες δινορρευμάτων να είναι μικρότερες.
4. Στενός βρόχος υστέρησης ή χαμηλή συνθετική ικανότητα, ώστε οι απώλειες υστέρησης να είναι μικρότερες και η απόδοση λειτουργίας υψηλή
5. Υψηλό σημείο curie. (Πάνω από το σημείο Curie ή τη θερμοκρασία το υλικό χάνει τη μαγνητική του ιδιότητα ή γίνεται παραμαγνητικό, δηλαδή ουσιαστικά μη μαγνητικό)
6. Θα πρέπει να έχει υψηλή τιμή ενεργειακού προϊόντος (εκφρασμένη σε joules / m³).

Τα μαγνητικά υλικά μπορούν σε γενικές γραμμές να ταξινομηθούν σε διαμαγνητικά, παραμαγνητικά, σιδηρομαγνητικά, αντιφερρομαγνητικά και σιδηρομαγνητικά υλικά. Μόνο τα σιδηρομαγνητικά υλικά έχουν ιδιότητες που είναι κατάλληλες για ηλεκτρικές μηχανές. Οι σιδηρομαγνητικές ιδιότητες περιορίζονται σχεδόν αποκλειστικά στον σίδηρο, το νικέλιο και το κοβάλτιο και τα κράματά τους. Οι μόνες εξαιρέσεις είναι ορισμένα κράματα μαγγανίου και ορισμένα από τα στοιχεία σπάνιων γαιών. Η σχετική διαπερατότητα r των

σιδηρομαγνητικών υλικών είναι πολύ μεγαλύτερη από 1,0. Όταν τα σιδηρομαγνητικά υλικά υποβάλλονται σε μαγνητικό πεδίο, τα δίπολα ευθυγραμμίζονται προς την κατεύθυνση του εφαρμοζόμενου πεδίου και μαγνητίζονται ισχυρά.

Περαιτέρω, τα σιδηρομαγνητικά υλικά μπορούν να ταξινομηθούν σε σκληρά ή μόνιμα μαγνητικά υλικά και σε μαλακά μαγνητικά υλικά. [1]

- a. Τα σκληρά ή μόνιμα μαγνητικά υλικά έχουν βρόχο υστέρησης μεγάλου μεγέθους (προφανώς η απώλεια υστέρησης είναι μεγαλύτερη) και σταδιακά αυξανόμενη καμπύλη μαγνήτισης. Π.χ.: ανθρακούχος χάλυβας, χάλυβας βολφραμίου, χάλυβας κοβαλτίου, alnico, σκληρός φερρίτης κ.λπ.
- b. Τα μαλακά μαγνητικά υλικά έχουν βρόχο υστέρησης μικρού μεγέθους και απότομη καμπύλη μαγνήτισης. Π.χ.:
 - i. χυτοσίδηρος, χυτοχάλυβας, χάλυβας έλασης, σφυρηλατημένος χάλυβας κ.λπ. (σε στερεή μορφή). Γενικά χρησιμοποιούνται για πόλους ζυγών μηχανών συνεχούς ρεύματος, ρότορες εναλλακτήρων κ.λπ. όπου εμπλέκεται σταθερή ή συνεχής ροή
 - ii. χάλυβας πυριτίου (σίδηρος + 0,3 έως 4,5% πυρίτιο) σε μορφή ελάσματος. Η προσθήκη πυριτίου σε κατάλληλο ποσοστό εξαλείφει τη γήρανση & μειώνει την απώλεια πυρήνα. Ο χάλυβας χαμηλής περιεκτικότητας σε πυρίτιο ή χάλυβας ποιότητας δυναμό χρησιμοποιείται σε περιστρεφόμενες ηλεκτρικές μηχανές και λειτουργεί σε υψηλή πυκνότητα ροής. Ο χάλυβας υψηλής περιεκτικότητας σε πυρίτιο (4 έως 5% πυρίτιο) ή χάλυβας ποιότητας μετασχηματιστή (ή χάλυβας υψηλής αντοχής) χρησιμοποιείται σε μετασχηματιστές. Περαιτέρω, το χαλυβδοέλασμα μπορεί να είναι θερμής ή ψυχρής έλασης. Ο χάλυβας ψυχρής έλασης με προσανατολισμό κόκκων (CRGOS) είναι ακριβότερος και ανώτερος από τον χάλυβα

θερμής έλασης. Ο χάλυβας CRGOS χρησιμοποιείται γενικά σε μετασχηματιστές.

- c. Κράματα ειδικού σκοπού: Τα κράματα σιδήρου νικελίου έχουν υψηλή διαπερατότητα και η προσθήκη μολυβδαινίου ή χρωμίου οδηγεί σε βελτιωμένο μαγνητικό υλικό. Το νικέλιο με σίδηρο σε διαφορετική αναλογία οδηγεί σε
- i. Permalloy υψηλού νικελίου (σίδηρος +μολυβδαίνιο +χαλκός ή χρώμιο), που χρησιμοποιείται σε μετασχηματιστές ρεύματος, μαγνητικούς ενισχυτές κ.λπ,
 - ii. Permalloy χαμηλού νικελίου (σίδηρος +πυρίτιο +χρώμιο ή μαγγάνιο), που χρησιμοποιείται σε μετασχηματιστές, πηνία επαγωγής, πηνία κ.λπ.
 - iii. Perminvor (σίδηρος +νικέλιο +κοβάλτιο)
 - iv. Remendur (σίδηρος +κοβάλτιο +βανάδιο), που χρησιμοποιείται για μικρόφωνα, παλμογράφους κ.λπ.
 - v. Mumetal (χαλκός + σίδηρος)
- d. Άμορφα κράματα (συχνά αποκαλούμενα μεταλλικά γυαλιά): Τα άμορφα κράματα παράγονται με ταχεία στερεοποίηση του κράματος με ρυθμούς ψύξης περίπου ενός εκατομμυρίου βαθμών Κελσίου ανά δευτερόλεπτο. Τα κράματα στερεοποιούνται με ατομική δομή που μοιάζει με γυαλί και είναι μη κρυσταλλικό παγωμένο υγρό. Η ταχεία ψύξη επιτυγχάνεται με τη ροή του λιωμένου κράματος μέσω ενός ανοίγματος σε ένα ταχέως περιστρεφόμενο υδρόψυκτο τύμπανο. Αυτό μπορεί να παράγει φύλλα λεπτού πάχους 10μm και πλάτους ενός μέτρου ή και περισσότερο.

2.3 Μονωτικά υλικά

Για την αποφυγή οποιασδήποτε ηλεκτρικής δραστηριότητας μεταξύ εξαρτημάτων σε διαφορετικά δυναμικά, χρησιμοποιείται μόνωση. Ένα ιδανικό μονωτικό υλικό πρέπει να διαθέτει τις ακόλουθες ιδιότητες. [1]

1. Θα πρέπει να έχει υψηλή διηλεκτρική αντοχή.
2. Θα πρέπει να αντέχει σε υψηλές θερμοκρασίες.
3. Θα πρέπει να έχει καλή θερμική αγωγιμότητα
4. Θα πρέπει να μην υφίσταται θερμική οξείδωση
5. Θα πρέπει να μην αλλοιώνεται λόγω υψηλότερης θερμοκρασίας και επαναλαμβανόμενου κύκλου θερμότητας
6. Πρέπει να έχει υψηλή τιμή ειδικής αντίστασης
7. Θα πρέπει να μην καταναλώνει ενέργεια ή να έχει χαμηλή γωνία διηλεκτρικών απωλειών
8. Πρέπει να αντέχει σε καταπονήσεις λόγω φυγόκεντρων δυνάμεων (όπως στις περιστρεφόμενες μηχανές), ηλεκτροδυναμικών ή μηχανικών δυνάμεων (όπως στους μετασχηματιστές)
9. Πρέπει να αντέχει σε κραδασμούς, τριβή, κάμψη
10. Δεν πρέπει να απορροφά υγρασία
11. Πρέπει να είναι εύκαμπτο και φθηνό

Τα μονωτικά υλικά μπορούν να ταξινομηθούν σε στερεά, υγρά και αέρια και σε κενό. Ο όρος μονωτικό υλικό χρησιμοποιείται μερικές φορές με ευρύτερη έννοια για να χαρακτηρίσει επίσης τα μονωτικά υγρά, το αέριο και το κενό.

2.3.1 Στερεά μονωτικά

Χρησιμοποιούνται σε περιελίξεις πεδίου, οπλισμού, μετασχηματιστή κ.λπ. Τα παραδείγματα είναι τα εξής: [1]

1. Ινώδεις ή ανόργανες ζωικής ή φυτικής προέλευσης, φυσικό ή συνθετικό χαρτί, ξύλο, χαρτόνι, βαμβάκι, γιούτα, μετάξι κ.λπ., ρεγιόν, νάιλον, τερελάνη, αμίαντος, υαλοΐνες κ.λπ,

2. Πλαστικά ή ρητίνες. Φυσικές ρητίνες-λάκα, κεχριμπάρι, οστρακιά κ.λπ., Συνθετικές ρητίνες-φαινόλη φορμαλδεΰδης, μελαμίνη, πολυεστέρες, εποξειδικές ρητίνες, ρητίνες πυριτίου, βακελίτης, τεφλόν, PVC κ.λπ.
3. Καουτσούκ : φυσικό καουτσούκ, συνθετικό καουτσούκ-βουταδιένιο, καουτσούκ σιλικόνης, hyralon κ.λπ,
4. Ορυκτά : μαρμαρυγία, μάρμαρο, σχιστόλιθος, χλωριούχο ταλκ κ.λπ,
5. Κεραμικά : πορσελάνη, στεατίτης, αλουμίνα κ.λπ,
6. Γυαλί : γυαλί σόδας ασβέστη, γυαλί πυριτίου, γυαλί μολύβδου, βοριοπυριτικό γυαλί
7. Μη ρητινώδη : ορυκτά κεριά, άσφαλτος, άσφαλτος, χλωριωμένο ναφθαλίνη, σμάλτο κ.λπ,

2.3.2 Υγρά μονωτικά

Χρησιμοποιούνται σε μετασχηματιστές, διακόπτες κυκλώματος, αντιδραστήρες, ρεοστάτες, καλώδια, πυκνωτές κ.λπ. Τα παραδείγματα είναι τα εξής: [1]

1. Ορυκτέλαιο (υποπροϊόν του πετρελαίου)
2. Συνθετικά έλαια ασκαρέλες, πυρανόλες κ.λπ,
3. Βερνίκι, γαλλικό βερνίκι, βερνίκι εποξειδική ρητίνη κ.λπ,

2.3.3 Αέρια μονωτικά

Τα παραδείγματα είναι: [1]

1. Αέρας που χρησιμοποιείται σε διακόπτες, συμπυκνωτές αέρα, γραμμές μεταφοράς και διανομής κ.λπ,
2. Χρήση αζώτου σε πυκνωτές, καλώδια πίεσης αερίου HV κ.λπ,
3. Υδρογόνο αν και δεν χρησιμοποιείται ως διηλεκτρικό, χρησιμοποιείται γενικά ως ψυκτικό μέσο
4. Αδρανή αέρια νέον, αργό, ατμοί υδραργύρου και νατρίου που χρησιμοποιούνται γενικά για λαμπτήρες επιγραφών νέον.

5. Αλογόνα όπως το φθόριο, που χρησιμοποιούνται υπό υψηλή πίεση σε καλώδια

Κανένα μονωτικό υλικό στην πράξη δεν ικανοποιεί όλες τις επιθυμητές ιδιότητες. Επομένως, πρέπει να επιλεγεί ένα υλικό που να ικανοποιεί τις περισσότερες από τις επιθυμητές ιδιότητες.

2.4 Ταξινόμηση των μονωτικών υλικών με βάση τη θερμική θεώρηση

Το σύστημα μόνωσης (που ονομάζεται επίσης κλάση μόνωσης) για τα σύρματα που χρησιμοποιούνται σε γεννήτριες, κινητήρες μετασχηματιστές και άλλα συρμάτινα ηλεκτρικά εξαρτήματα χωρίζεται σε διάφορες κλάσεις ανάλογα με τη θερμοκρασία που μπορούν να αντέξουν με ασφάλεια.

Σύμφωνα με το ινδικό πρότυπο (Thermal evaluation and classification of Electrical Insulation, IS.No.1271,1985,first revision) και άλλα διεθνή πρότυπα η μόνωση ταξινομείται με γράμματα A,E,B,F,H (προηγούμενο Y,A,E,B,F,H,C).

Η μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας είναι η θερμοκρασία που μπορεί να φτάσει η μόνωση κατά τη λειτουργία και είναι το άθροισμα της τυποποιημένης θερμοκρασίας περιβάλλοντος, δηλαδή 40 βαθμών Κελσίου, της επιτρεπόμενης αύξησης της θερμοκρασίας και της ανοχής για θερμό σημείο στην περιέλιξη. Για παράδειγμα, η μέγιστη θερμοκρασία της μόνωσης κατηγορίας B είναι (θερμοκρασία περιβάλλοντος 40 + επιτρεπόμενη αύξηση θερμοκρασίας 80 + ανοχή θερμού σημείου 10) = 130°C.

Η μόνωση είναι το πιο αδύναμο στοιχείο έναντι της θερμότητας και αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για την απόφαση της διάρκειας ζωής του ηλεκτρικού εξοπλισμού. Οι μέγιστες θερμοκρασίες λειτουργίας που προβλέπονται για τις διάφορες κατηγορίες μόνωσης είναι για υγιή διάρκεια ζωής 20.000 ωρών. Η επιτρεπόμενη θερμοκρασία ύψους για

τα μέρη της μηχανής είναι συνήθως περίπου 2000°C στο μέγιστο. Η υπέρβαση της μέγιστης θερμοκρασίας λειτουργίας θα επηρεάσει τη διάρκεια ζωής της μόνωσης. Ως γενικός κανόνας, η διάρκεια ζωής της μόνωσης της περιέλιξης μειώνεται κατά το ήμισυ για κάθε αύξηση της θερμοκρασίας κατά 10°C. Η σημερινή τάση είναι ο σχεδιασμός της μηχανής με χρήση μόνωσης κατηγορίας F για αύξηση της θερμοκρασίας κατηγορίας B. [1]

3. ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Η προέλευση του μαγνητισμού έγκειται στις τροχιακές και σπιν κινήσεις των ηλεκτρονίων και στο πώς τα ηλεκτρόνια αλληλεπιδρούν μεταξύ τους. Ο καλύτερος τρόπος για να εισαγάγετε τους διαφορετικούς τύπους μαγνητισμού είναι να περιγράψετε πώς τα υλικά ανταποκρίνονται στα μαγνητικά πεδία. Αυτό μπορεί να εκπλήσσει για κάποιους, αλλά όλη η ύλη είναι μαγνητική. Απλώς ορισμένα υλικά είναι πολύ πιο μαγνητικά από άλλα. Η κύρια διάκριση είναι ότι σε ορισμένα υλικά δεν υπάρχει συλλογική αλληλεπίδραση ατομικών μαγνητικών ροπών, ενώ σε άλλα υλικά υπάρχει πολύ ισχυρή αλληλεπίδραση μεταξύ ατομικών ροπών.

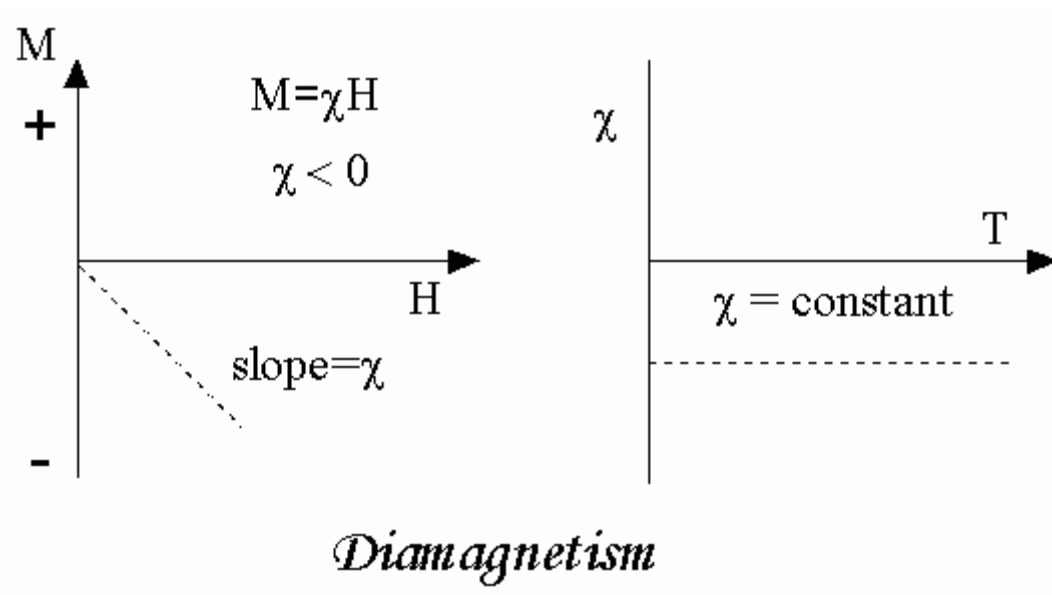
Η μαγνητική συμπεριφορά των υλικών μπορεί να ταξινομηθεί στις ακόλουθες πέντε μεγάλες ομάδες:[2]

1. Διαμαγνητισμός
2. Παραμαγνητισμός
3. Σιδηρομαγνητισμός
4. Σιδηρομαγνητισμός
5. Αντισιδηρομαγνητισμός

Τα υλικά στις δύο πρώτες ομάδες είναι εκείνα που δεν παρουσιάζουν συλλογικές μαγνητικές αλληλεπιδράσεις και δεν είναι μαγνητικά ταξινομημένα. Τα υλικά στις τρεις τελευταίες ομάδες εμφανίζουν μαγνητική τάξη μεγάλης εμβέλειας κάτω από μια ορισμένη κρίσιμη θερμοκρασία. Τα σιδηρομαγνητικά και τα σιδηρομαγνητικά υλικά είναι συνήθως αυτά που θεωρούμε μαγνητικά (δηλ. συμπεριφέρονται σαν σίδηρος). Τα υπόλοιπα τρία είναι τόσο ασθενώς μαγνητικά που συνήθως θεωρούνται «μη μαγνητικά».

3.1 Διαμαγνητισμός

Ο διαμαγνητισμός είναι μια θεμελιώδης ιδιότητα όλης της ύλης, αν και συνήθως είναι πολύ αδύναμος. Οφείλεται στη μη συνεργατική συμπεριφορά των ηλεκτρονίων που βρίσκονται σε τροχιά όταν εκτίθενται σε εφαρμοσμένο μαγνητικό πεδίο. Οι διαμαγνητικές ουσίες αποτελούνται από άτομα που δεν έχουν καθαρές μαγνητικές ροπές (δηλαδή, όλα τα τροχιακά κελύφη είναι γεμάτα και δεν υπάρχουν ασύζευκτα ηλεκτρόνια). Ωστόσο, όταν εκτίθεται σε ένα πεδίο, παράγεται αρνητική μαγνήτιση και έτσι η επιδεκτικότητα είναι αρνητική. Αν σχεδιάσουμε M (ροπή) έναντι H (έντασης μαγνητικού πεδίου), βλέπουμε το σχήμα[2]



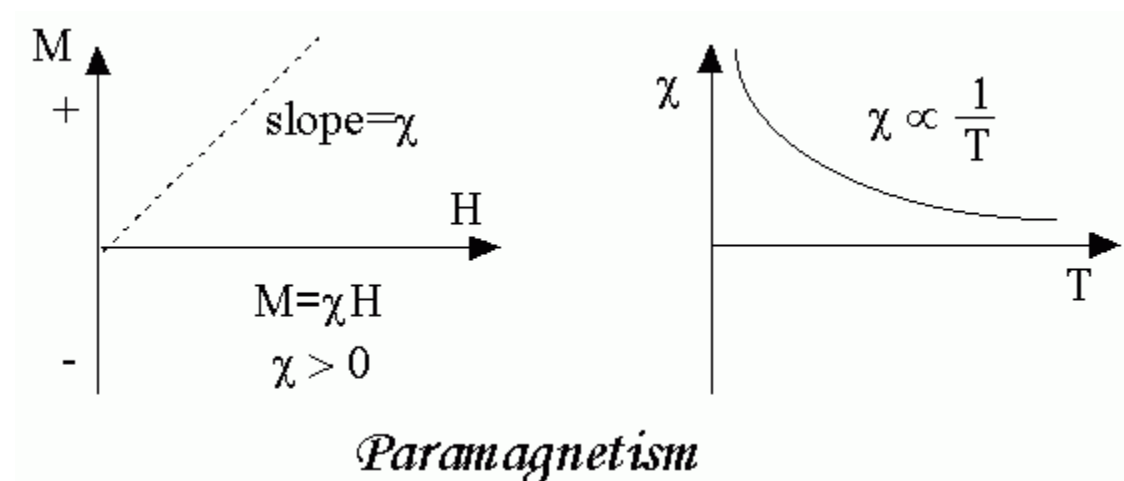
Σχήμα 3.1 Διαμαγνητισμός

Σημειώνεται ότι όταν το πεδίο είναι μηδέν η μαγνήτιση είναι μηδέν. Η άλλη χαρακτηριστική συμπεριφορά των διαμαγνητικών υλικών είναι ότι η επιδεκτικότητα είναι ανεξάρτητη από τη θερμοκρασία. Ορισμένες πολύ γνωστές διαμαγνητικές ουσίες, σε μονάδες $10^{-8} \text{m}^3/\text{kg}$, περιλαμβάνουν: [2]

- χαλαζίας (SiO_2) -0,62
- Ασβεστίτης (CaCO_3) -0,48
- νερό -0,90

3.2 Παραμαγνητισμός

Σε αυτή την κατηγορία υλικών, ορισμένα από τα άτομα ή τα ιόντα στο υλικό έχουν καθαρή μαγνητική ροπή λόγω μη ζευγαρωμένων ηλεκτρονίων. Ένα από τα πιο σημαντικά άτομα με ασύζευκτα ηλεκτρόνια είναι ο σίδηρος. Ωστόσο, οι μεμονωμένες μαγνητικές ροπές δεν αλληλεπιδρούν μαγνητικά, και όπως ο διαμαγνητισμός, η μαγνήτιση είναι μηδέν όταν αφαιρεθεί το πεδίο. Παρουσία πεδίου, υπάρχει τώρα μια μερική ευθυγράμμιση των ατομικών μαγνητικών ροπών προς την κατεύθυνση του πεδίου, με αποτέλεσμα μια καθαρή θετική μαγνήτιση και θετική επιδεκτικότητα. [2]



Σχήμα 3.2 Παραμαγνητισμός[2]

Επιπλέον, η αποτελεσματικότητα του πεδίου στην ευθυγράμμιση των ροπών εξασθενείται από τις τυχαίες επιδράσεις της θερμοκρασίας. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα μια ευαισθησία που εξαρτάται από τη θερμοκρασία, γνωστή ως νόμος Κιουρί.

Σε κανονικές θερμοκρασίες και σε μέτρια πεδία, η παραμαγνητική επιδεκτικότητα είναι μικρή (αλλά μεγαλύτερη από τη διαμαγνητική συνεισφορά). Εκτός εάν η θερμοκρασία είναι πολύ χαμηλή ($\ll 100$ K) ή το πεδίο είναι πολύ υψηλό, η παραμαγνητική ευαισθησία είναι ανεξάρτητη από το εφαρμοζόμενο πεδίο. Υπό αυτές τις συνθήκες, η παραμαγνητική επιδεκτικότητα είναι ανάλογη της συνολικής περιεκτικότητας σε σίδηρο. Πολλά ορυκτά που φέρουν σίδηρο είναι

παραμαγνητικά σε θερμοκρασία δωματίου. Μερικά παραδείγματα, σε μονάδες $10^{-8}\text{m}^3/\text{kg}$, περιλαμβάνουν: [2]

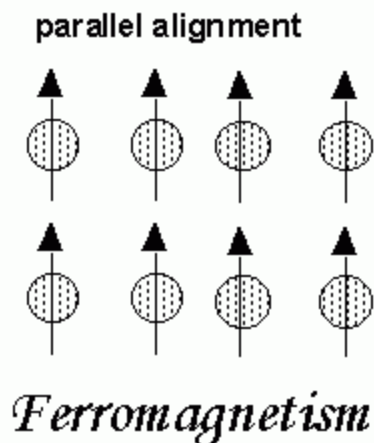
- Μονμοριλονίτης (άργιλος) 13
- Νοντρονίτης (άργιλος πλούσιος σε Fe) 65
- Βιοτίτης (πυριτικό) 79
- Σιδερίτης (ανθρακικός) 100
- Πυρίτης (σουλφίδιο) 30

Ο παραμαγνητισμός των ορυκτών σε φυσικά δείγματα μπορεί να είναι σημαντικός εάν η συγκέντρωση του μαγνητίτη είναι πολύ μικρή. Σε αυτή την περίπτωση, μπορεί να χρειαστεί παραμαγνητική διόρθωση.

3.3 Σιδηρομαγνητισμός

Μαγνητικά υλικά είναι ο σίδηρος, το νικέλιο, ο μαγνητίτης. Σε αντίθεση με τα παραμαγνητικά υλικά, οι ατομικές ροπές σε αυτά τα υλικά παρουσιάζουν πολύ ισχυρές αλληλεπιδράσεις. Αυτές οι αλληλεπιδράσεις παράγονται από ηλεκτρονικές δυνάμεις ανταλλαγής και καταλήγουν σε παράλληλη ή αντιπαράλληλη ευθυγράμμιση των ατομικών ροπών. Οι δυνάμεις ανταλλαγής είναι πολύ μεγάλες, ισοδύναμες με ένα πεδίο της τάξης των 1000 Tesla, ή περίπου 100 εκατομμύρια φορές τη δύναμη του πεδίου της γης. Η δύναμη ανταλλαγής είναι ένα κβαντομηχανικό φαινόμενο που οφείλεται στον σχετικό προσανατολισμό των σπιν δύο ηλεκτρονίων.

Τα σιδηρομαγνητικά υλικά παρουσιάζουν παράλληλη ευθυγράμμιση ροπών με αποτέλεσμα μεγάλη καθαρή μαγνήτιση ακόμη και απουσία μαγνητικού πεδίου.



Σχήμα 3.3 Σιδηρομαγνητισμός[2]

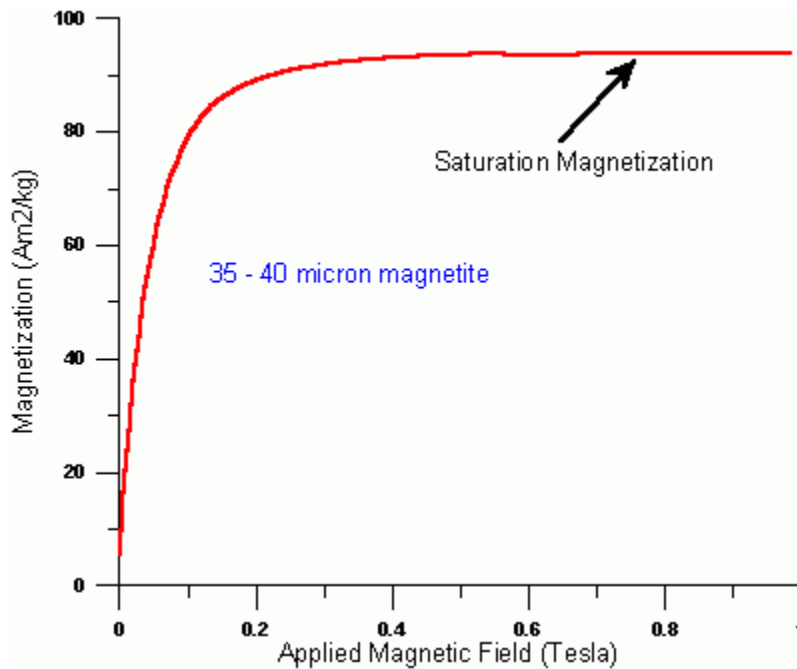
Τα στοιχεία Fe, Ni και Co και πολλά από τα κράματά τους είναι τυπικά σιδηρομαγνητικά υλικά. [2]

Παρακάτω παρουσιάζονται κάποιες ιδιότητες των σιδηρομαγνητικών υλικών

3.3.1 Αυθόρμητη Μαγνήτιση

Η αυθόρμητη μαγνήτιση είναι η καθαρή μαγνήτιση που υπάρχει μέσα σε έναν ομοιόμορφα μαγνητισμένο μικροσκοπικό όγκο απουσία πεδίου. Το μέγεθος αυτής της μαγνήτισης, στους 0K, εξαρτάται από τις μαγνητικές ροπές σπιν των ηλεκτρονίων.

Ένας σχετικός όρος είναι η μαγνήτιση κορεσμού που μπορούμε να μετρήσουμε στο εργαστήριο. Η μαγνήτιση κορεσμού είναι η μέγιστη επαγόμενη μαγνητική ροπή που μπορεί να ληφθεί σε ένα μαγνητικό πεδίο (H_{sat}). πέρα από αυτό το πεδίο δεν εμφανίζεται περαιτέρω αύξηση της μαγνήτισης. [2]



Διάγραμμα 3.1 μαγνήτιση κορεσμού[2]

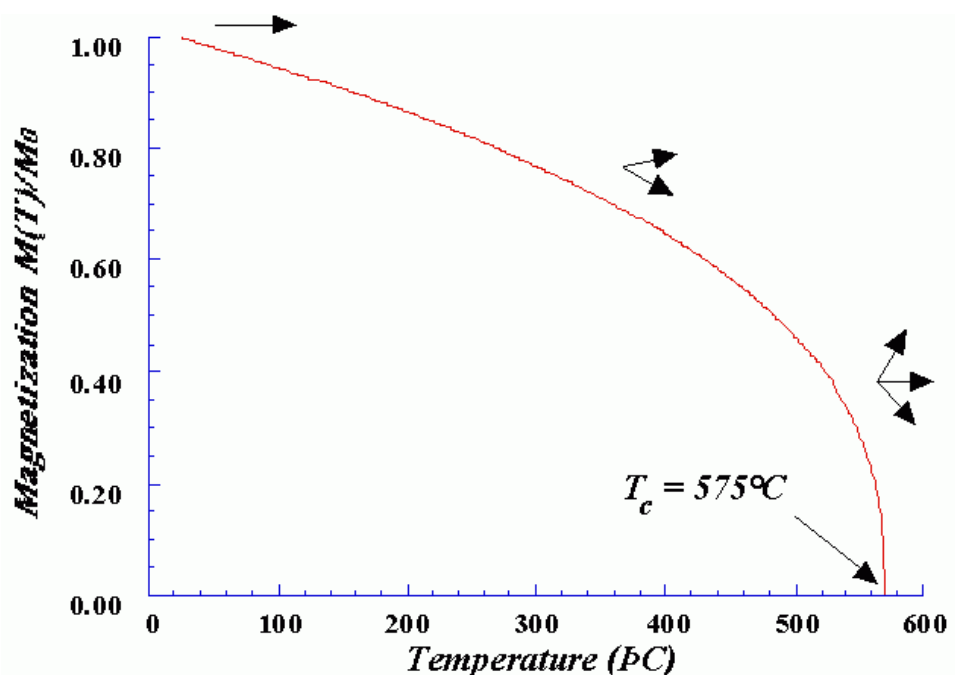
Η διαφορά μεταξύ της αυθόρμητης μαγνήτισης και της μαγνήτισης κορεσμού έχει να κάνει με τις μαγνητικές περιοχές (περισσότερα για τις περιοχές αργότερα). Η μαγνήτιση κορεσμού είναι μια εγγενής ιδιότητα, ανεξάρτητη από το μέγεθος των σωματιδίων αλλά εξαρτάται από τη θερμοκρασία.

Υπάρχει μεγάλη διαφορά μεταξύ παραμαγνητικής και σιδηρομαγνητικής επιδεκτικότητας. Σε σύγκριση με τα παραμαγνητικά υλικά, η μαγνήτιση στα σιδηρομαγνητικά υλικά είναι κορεσμένη σε μέτρια μαγνητικά πεδία και σε υψηλές θερμοκρασίες (θερμοκρασία δωματίου) [2]

3.3.2 Θερμοκρασία Κιουρί

Παρόλο που οι ηλεκτρονικές δυνάμεις ανταλλαγής στους σιδηρομαγνήτες είναι πολύ μεγάλες, η θερμική ενέργεια τελικά υπερνικά την ανταλλαγή και παράγει ένα τυχαίο αποτέλεσμα. Αυτό συμβαίνει σε μια συγκεκριμένη θερμοκρασία που ονομάζεται θερμοκρασία Κιουρί (T_C). Κάτω από τη θερμοκρασία Κιουρί, ο σιδηρομαγνήτης είναι διατεταγμένος και πάνω από αυτόν, διαταραγμένος. Η μαγνήτιση κορεσμού πηγαίνει στο μηδέν στη

θερμοκρασία Κιουρί. Ένα τυπικό διάγραμμα μαγνήτισης έναντι θερμοκρασίας για μαγνητίτη φαίνεται παρακάτω. [2]

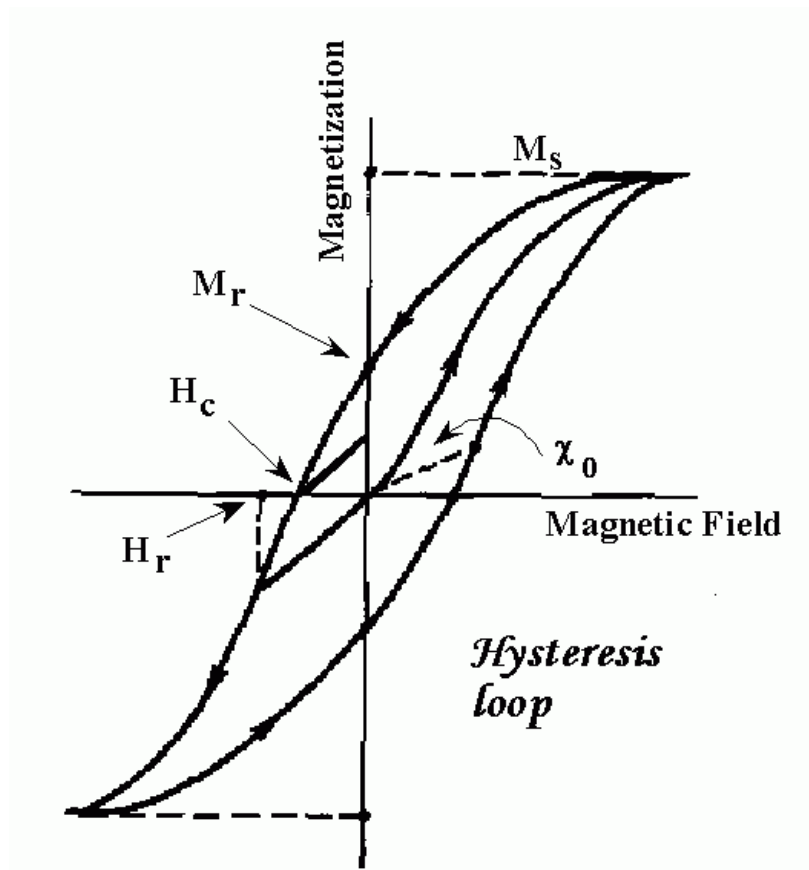


Διάγραμμα 3.2 Τυπικό διάγραμμα μαγνήτισης έναντι θερμοκρασίας για μαγνητίτη[2]

Η θερμοκρασία Κιουρί είναι επίσης μια εγγενής ιδιότητα και είναι μια διαγνωστική παράμετρος που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αναγνώριση ορυκτών. Ωστόσο, δεν είναι αλάνθαστο επειδή διαφορετικά μαγνητικά ορυκτά, κατ' αρχήν, μπορούν να έχουν την ίδια θερμοκρασία Κιουρί. [2]

3.3.3 Υστέρηση

Εκτός από τη μαγνήτιση θερμοκρασίας Κιουρί και κορεσμού, οι σιδηρομαγνήτες μπορούν να διατηρήσουν τη μνήμη ενός εφαρμοζόμενου πεδίου μόλις αφαιρεθεί. Αυτή η συμπεριφορά ονομάζεται υστέρηση και η γραφική παράσταση της μεταβολής της μαγνήτισης με το μαγνητικό πεδίο ονομάζεται βρόχος υστέρησης.



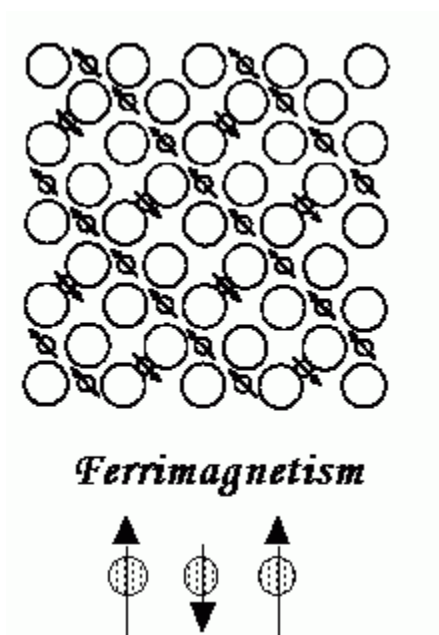
Σχήμα 3.4 Βρόχος Υστέρησης[2]

Μια άλλη ιδιότητα υστέρησης είναι η απομαγνητίζουσα υστέρηση (coercivity of remanence) (H_r). Αυτό είναι το αντίστροφο πεδίο το οποίο, όταν εφαρμόζεται και στη συνέχεια αφαιρείται, μειώνει την παραμονή κορεσμού στο μηδέν. Είναι πάντα μεγαλύτερη από την απομαγνητίζουσα δύναμη. Η αρχική επιδεκτικότητα (χ_0) είναι η μαγνήτιση που παρατηρείται σε χαμηλά πεδία, της τάξης του γήινου πεδίου (50-100 μT). [2]

Οι διάφορες παράμετροι υστέρησης δεν είναι μόνο εγγενείς ιδιότητες αλλά εξαρτώνται από το μέγεθος των κόκκων, την κατάσταση της περιοχής, τις τάσεις και τη θερμοκρασία. Επειδή οι παράμετροι υστέρησης εξαρτώνται από το μέγεθος των κόκκων, είναι χρήσιμες για το μαγνητικό μέγεθος κόκκων φυσικών δειγμάτων. [2]

3.4 Σιδηριμαγνητισμός

Σε ιοντικές ενώσεις, όπως τα οξείδια, μπορεί να εμφανιστούν πιο σύνθετες μορφές μαγνητικής διάταξης ως αποτέλεσμα της κρυσταλλικής δομής. Ένας τύπος μαγνητικής διάταξης ονομάζεται σιδηριμαγνητισμός. Μια απλή αναπαράσταση των μαγνητικών σπιν σε ένα σιδηριμαγνητικό οξείδιο φαίνεται εδώ.



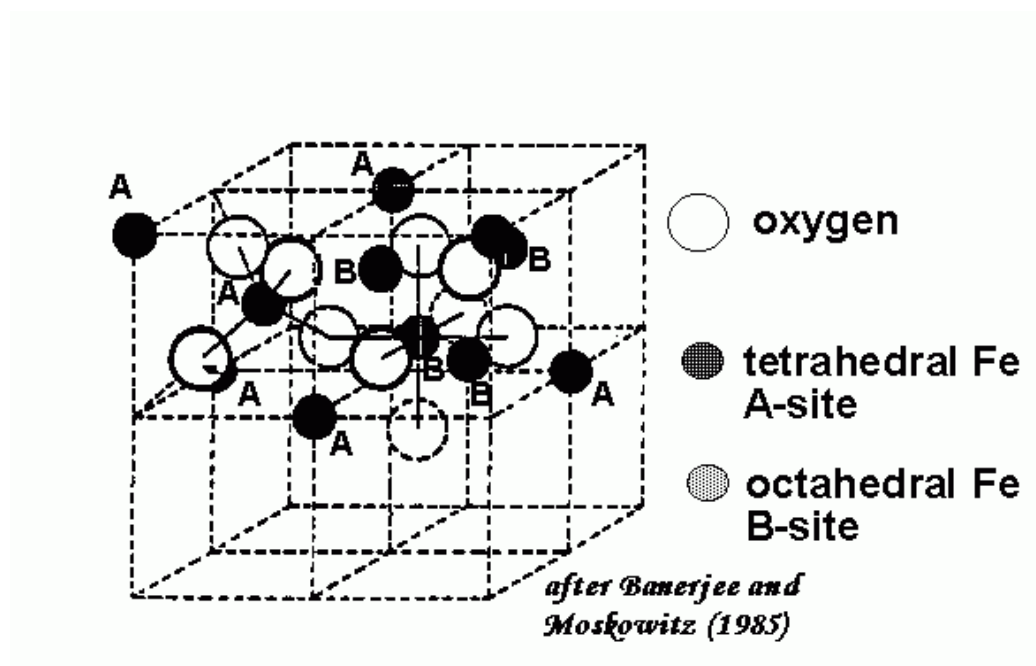
Σχήμα 3.5 απλή αναπαράσταση των μαγνητικών σπιν σε ένα σιδηριμαγνητικό οξείδιο[2]

Η μαγνητική δομή αποτελείται από δύο μαγνητικά υποπλέγματα (που ονομάζονται A και B) που χωρίζονται από οξυγόνα. Οι αλληλεπιδράσεις ανταλλαγής εξυπηρετούνται από τα ανιόντα οξυγόνου. Όταν συμβαίνει αυτό, οι αλληλεπιδράσεις ονομάζονται έμμεσες ή υπερανταλλακτικές αλληλεπιδράσεις. Οι ισχυρότερες αλληλεπιδράσεις υπερανταλλαγής έχουν ως αποτέλεσμα μια αντιπαράλληλη ευθυγράμμιση των περιστροφών μεταξύ του υποπλέγματος A και B.

Στους σιδηριμαγνήτες, οι μαγνητικές ροπές των υποδικτυωμάτων A και B δεν είναι ίσες και καταλήγουν σε καθαρή μαγνητική ροπή. Ο σιδηριμαγνητισμός είναι επομένως παρόμοιος με τον σιδηρομαγνητισμό. Παρουσιάζει όλα τα χαρακτηριστικά της σιδηρομαγνητικής συμπεριφοράς - αυθόρμητη μαγνήτιση,

θερμοκρασίες Κιουρί, υστέρηση. Ωστόσο, οι σιδηριμαγνήτες και οι σιδηρομαγνήτες έχουν πολύ διαφορετική μαγνητική διάταξη.

Ο μαγνητίτης είναι ένα πολύ γνωστό σιδηρομαγνητικό υλικό. Πράγματι, ο μαγνητίτης θεωρούνταν σιδηρομαγνήτης έως ότου ο Néel τη δεκαετία του 1940, παρείχε το θεωρητικό πλαίσιο για την κατανόηση του σιδηρομαγνητισμού. [2]



Σχήμα 3.6Κρυσταλλική Δομή Μαγνητίτη[2]

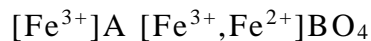
Ο μαγνητίτης, Fe₃O₄ κρυσταλλώνεται με τη δομή του σπινελίου. Τα μεγάλα ιόντα οξυγόνου διατάσσονται στενά σε κυβική διάταξη και τα μικρότερα ιόντα Fe γεμίζουν τα κενά. Τα κενά απαντώνται σε δύο θέσεις: [2]

- τετραεδρική θέση: Το ιόν Fe περιβάλλεται από τέσσερα οξυγόνα
- οκταεδρική θέση: Το ιόν Fe περιβάλλεται από έξι οξυγόνα

Οι τετραεδρικές και οκταεδρικές θέσεις σχηματίζουν τα δύο μαγνητικά υποπλέγματα, A και B αντίστοιχα. Οι περιστροφές στο υποπλέγμα A είναι αντιπαράλληλες με αυτές του υποπλέγματος B. Οι δύο κρυσταλλικές θέσεις είναι πολύ διαφορετικές και έχουν ως αποτέλεσμα

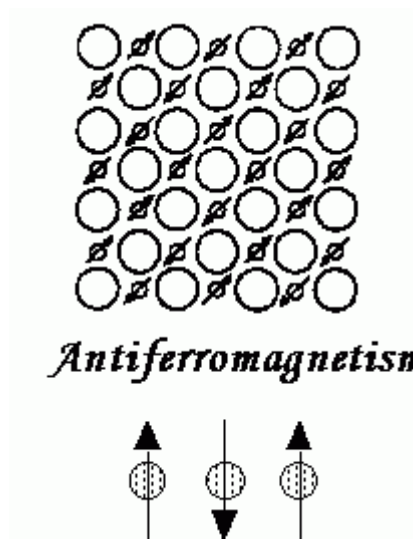
πολύπλοκες μορφές ανταλλαγής αλληλεπιδράσεων των ιόντων σιδήρου μεταξύ και εντός των δύο τύπων θέσεων.

Ο δομικός τύπος για τον μαγνητίτη είναι



Αυτή η συγκεκριμένη διάταξη κατιόντων στο υποπλέγμα A και B ονομάζεται δομή αντίστροφου σπινελίου. Με αρνητικές αλληλεπιδράσεις ανταλλαγής AB, η καθαρή μαγνητική ροπή του μαγνητίτη οφείλεται στη θέση B Fe^{2+} . [2]

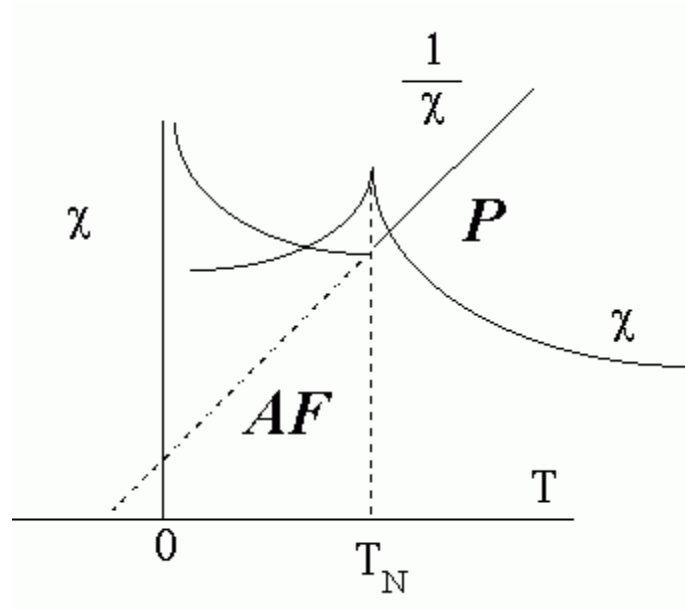
3.5 Αντισιδηρομαγνητισμός



Σχήμα 3.7 Αντισιδηρομαγνητισμός

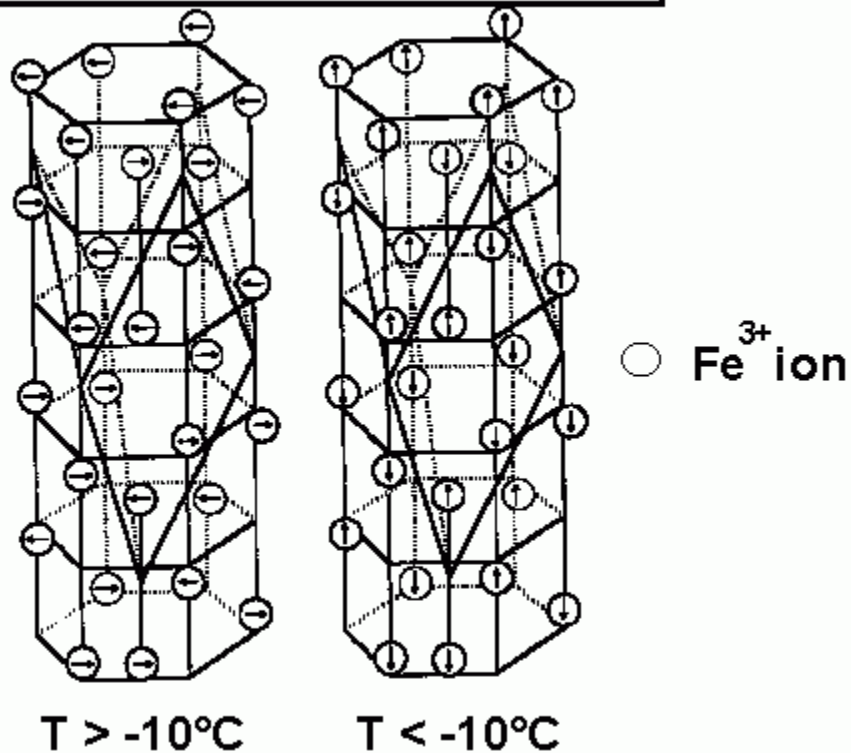
Εάν οι ροπές του υποπλέγματος A και B είναι ακριβώς ίσες αλλά αντίθετες, η καθαρή ροπή είναι μηδέν. Αυτός ο τύπος μαγνητικής διάταξης ονομάζεται αντισιδηρομαγνητισμός.

Η ένδειξη για τον αντισιδηρομαγνητισμό είναι η συμπεριφορά της ευαισθησίας πάνω από μια κρίσιμη θερμοκρασία, που ονομάζεται θερμοκρασία Néel (T_N). Πάνω από το T_N , η ευαισθησία υπακούει στο νόμο Curie-Weiss για τους παραμαγνήτες, αλλά με μια αρνητική τομή που υποδεικνύει αρνητικές αλληλεπιδράσεις ανταλλαγής. [2]



Διάγραμμα 3.3 Συμπεριφορά της ευαισθησίας πάνω από μια κρίσιμη θερμοκρασία, που ονομάζεται θερμοκρασία Néel (T_N)[2]

Crystal Structure of Hematite



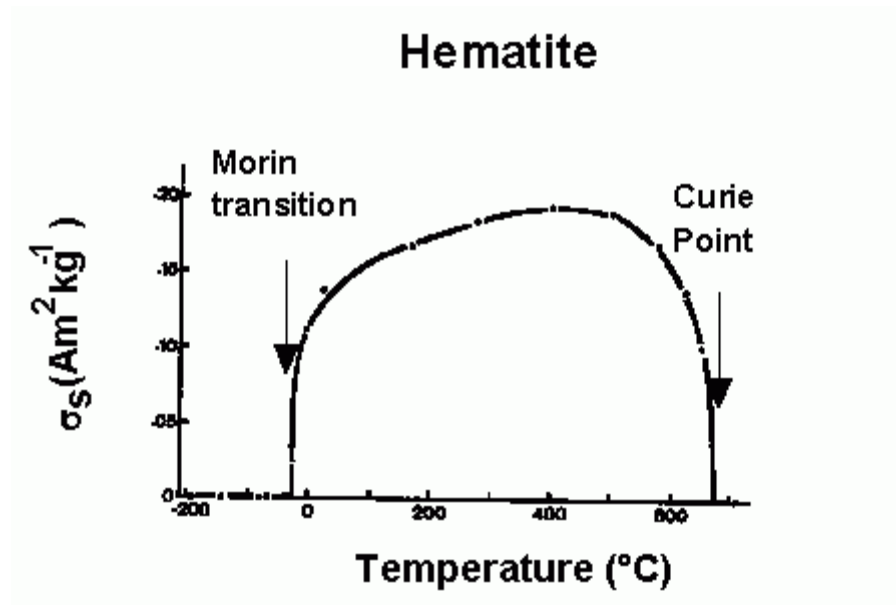
after Fuller (1987)

Σχήμα 3.8 Κρυσταλλική Δομή Αιματίτη[2]

Ο αιματίτης κρυσταλλώνεται στη δομή του κορούνδιου με ιόντα οξυγόνου σε ένα εξαγωνικό κλειστό πλαίσιο. Οι μαγνητικές ροπές των ιόντων Fe^{3+} συνδέονται σιδηρομαγνητικά μέσα σε συγκεκριμένα επίπεδα c, αλλά αντισιδηρομαγνητικά συνδέονται μεταξύ των επιπέδων.

Πάνω από $-10^{\circ}C$, οι ροπές spin βρίσκονται στο c-plan αλλά είναι ελαφρώς λοξές. Αυτό παράγει μια ασθενή αυθόρμητη μαγνήτιση εντός του σχεδίου c ($\sigma_S = 0,4 \text{ Am}^2/\text{kg}$).

Κάτω από τους $-10^{\circ}C$, η κατεύθυνση του αντισιδηρομαγνητισμού αλλάζει και γίνεται παράλληλη προς τον άξονα c. Δεν υπάρχει spin canting και ο αιματίτης γίνεται τέλειος αντισιδηρομαγνήτης. Αυτή η μετάβαση spin-flip ονομάζεται μετάβαση Morin. [2]



Διάγραμμα 3.4 Μετάβαση Morin[2]

4. ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 –ΓΕΝΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΜΙΑΣ ΣΥΓΧΡΟΝΗΣ ΜΗΧΑΝΗΣ

4.1 Προδιαγραφές γεννήτριας

Οι βασικές προδιαγραφές που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη για την έναρξη της μελέτης μίας γεννήτριας είναι οι εξής: [3]

- ονομαστική τάση
- συχνότητα
- ταχύτητα
- συντελεστής ισχύος
- αύξηση θερμοκρασίας
- κατηγορία μόνωσης
- τύπος περιβλήματος
- σύστημα ψύξης
- σύστημα διέγερσης
- τύπος ρυθμιστή τάσης
- απώλειες.

Επίσης, τυχόν ειδικές τυποποιημένες προδιαγραφές που πρέπει να πληρούνται- τυχόν περιορισμοί διαστάσεων και περιορισμοί μεταφοράς.

4.2 Εξοδος τριφασικής σύγχρονης γεννήτριας

Η έξοδος μιας τριφασικής σύγχρονης γεννήτριας δίνεται από τη σχέση:

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

Ο συντελεστής εξόδου:

$$G = \frac{S}{D^2 L n} = 11K_w \bar{B} ac \times 10^{-3}$$

Όσο μεγαλύτερος είναι ο συντελεστής εξόδου, τόσο μικρότερο είναι το απαιτούμενο D^2L : όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός στροφών ανά λεπτό, τόσο μικρότερη είναι η μηχανή.

Οι σύγχρονες μηχανές μπορούν να ταξινομηθούν κυρίως σε μηχανές χαμηλής ταχύτητας και μηχανές υψηλής ταχύτητας. Οι μηχανές χαμηλής ταχύτητας έχουν κατασκευή με έκτυπο πόλο, ενώ οι μηχανές υψηλής ταχύτητας έχουν κατασκευή κυλινδρικού δρομέα. Η γραμμική ταχύτητα για τις μηχανές χαμηλής ταχύτητας μπορεί να ληφθεί ως $u = \pi D n = 80$ μέτρα/δευτερόλεπτο, ενώ η u για τις μηχανές υψηλής ταχύτητας, όπως οι στροβιλογεννήτριες, μπορεί να φτάσει τα 170 μέτρα/δευτερόλεπτο. Συνεπώς, οι μηχανές χαμηλής ταχύτητας έχουν μεγάλη διάμετρο και μικρό μήκος και ο λόγος μήκους προς διάμετρο μπορεί να είναι 0,4 έως 1,0- για τους στροβιλογεννήτριες, ο λόγος μήκους προς διάμετρο είναι 1,5 έως 2,5 ή και μεγαλύτερος.

Το γινόμενο $\bar{B} \times ac$ καθορίζει την ισχύ ανά μονάδα όγκου. Μια αύξηση σε ένα από τα φορτία απαιτεί μείωση του άλλου. Μια υψηλή τιμή του τόξου ειδικής ηλεκτρικής φόρτισης παράγει μεγαλύτερη αντίδραση του οπλισμού και η διέγερση του πεδίου πρέπει να αυξηθεί. Η υποδιαίρεση του γινομένου $\bar{B} \times ac$ επηρεάζεται από τις συνθήκες φόρτισης της μηχανής και από το βραχυκύκλωμα. Ο λόγος βραχυκυκλώματος για τις στροβιλογεννήτριες είναι γενικά 0,5 έως 6, ενώ για τις γεννήτριες με εξέχοντα πόλο εναλλακτήρες είναι περίπου 1,00 έως 1,5. [3]

4.3 Διάκενο αέρα

Ένα πολύ μικρό διάκενο αέρα αυξάνει τις απώλειες ελεύθερου φορτίου-επίσης, η εκκεντρότητα στο διάκενο αέρα μπορεί να προκύψει από μηχανικές δυσκολίες συναρμολόγησης. Αυτό αυξάνει επίσης τη σύγχρονη αντίδραση της μηχανής X_d . Ένα μεγάλο διάκενο αέρα αυξάνει το ρεύμα διέγερσης. Οπότε κατά τον σχεδιασμό πρέπει να επέλθει ένας συμβιβασμός. Γενικά, ο λόγος του διακένου αέρα προς το βήμα των πόλων κυμαίνεται μεταξύ 0,008 και 0,02. [3]

4.4 Επιλογή των αυλακιών (πλήθος – μέγεθος)

Ο αριθμός των αυλακιών ανά πόλο και ανά φάση πρέπει να είναι μεγάλος για να επιτευχθεί ημιτονοειδής κυματομορφή στην παραγόμενη τάση. Γενικά, ο αριθμός των αυλακιών ανά πόλο ανά φάση είναι 3 ή 4 για μικρές μηχανές και μεγαλύτερος από 5 για μεγάλες μηχανές. Οι μικρές μηχανές μπορεί να έχουν ολοκληρωμένο τύλιγμα αυλακιών με αρκετή περιέλιξη. Για τις μεγάλες μηχανές, χρησιμοποιείται κλασματική περιέλιξη αυλακιών και έτσι ο αριθμός των εγκοπών ανά πόλο ανά φάση μπορεί να μην είναι ακέραιος.

Το πλάτος του αυλακιού πρέπει να προσαρμόζεται στο πλάτος του αγωγού, εάν πρόκειται για αγωγό ταινίας. Το πλάτος του αυλακιού θα πρέπει να είναι περίπου ίσο με το πλάτος του δοντιού στο $1/3$ του βάθους του αυλακιού. Το ελάχιστο πλάτος του δοντιού πρέπει να είναι τέτοιο ώστε η μέγιστη πυκνότητα ροής στο αυτό να μην υπερβαίνει το όριο της πυκνότητας ροής στα δόντια που επιτρέπεται για την αποφυγή κορεσμού. Το βάθος και το σχήμα του αυλακιού είναι τέτοια ώστε να φιλοξενεί τον απαιτούμενο αριθμό αγωγών ανά αυλάκι για την ονομαστική τάση που παράγεται στην ονομαστική ταχύτητα. Γενικά, το βάθος είναι 4 έως 6 φορές το πλάτος. Εάν το βάθος αυξηθεί, η αντίδραση διαρροής (αυλακιού) αυξάνεται, οι απώλειες πυρήνα στα δόντια είναι μεγαλύτερες και απαιτείται μεγαλύτερη διέγερση για τη μηχανή. Τα ημίκλειστα αυλάκια χρησιμοποιούνται με στρογγυλούς αγωγούς σύρματος με μόνωση για την περιέλιξη στην περίπτωση μηχανών μικρού και μεσαίου μεγέθους. Για την περιέλιξη ταινιών απαιτούνται ανοικτά αυλάκια. [3]

4.5 Τύλιγμα του στάτη

Για μικρές μηχανές έως 200 kVA χρησιμοποιούνται εμαγιέ σύρματα με αριθμό παράλληλων κυκλωμάτων για την απαιτούμενη ονομαστική ένταση ρεύματος. Για μεγάλο ρεύμα και για υψηλή τάση, καλυμμένα με υαλονήματα χρησιμοποιούνται ορθογώνιοι χάλκινοι αγωγοί. Ο

συντελεστής πληρότητας είναι υψηλότερος αλλά η μεταφορά θερμότητας είναι φτωχότερη.

Ο συνήθης τύπος τυλίγματος που χρησιμοποιείται για γεννήτριες εναλλασσόμενου ρεύματος είναι τύλιγμα διπλού στρώματος με ενσωματωμένο αυλάκι ή τύλιγμα με κλασματικό αυλάκι.

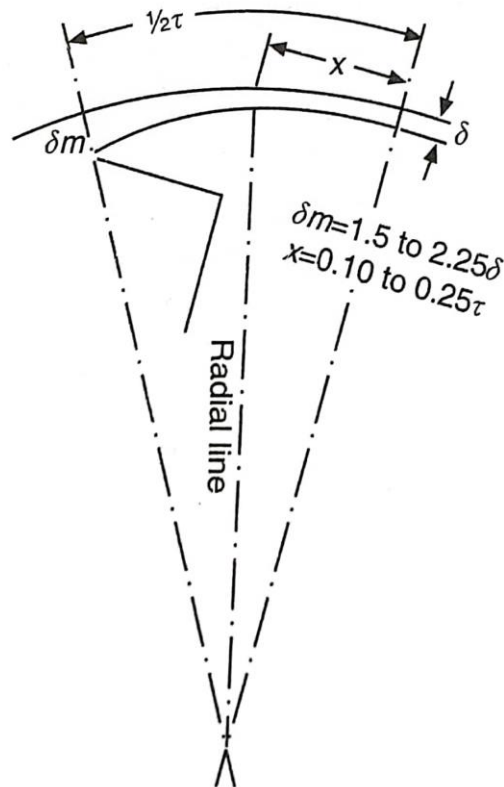
Η πυκνότητα ρεύματος εξαρτάται από την ταχύτητα, την κατηγορία της χρησιμοποιούμενης μόνωσης, το περίβλημα και το σύστημα ψύξης που χρησιμοποιείται. Γενικά, η πυκνότητα ρεύματος μπορεί να ληφθεί ως 5 έως 8 A/mm².

Το σύστημα μόνωσης που χρησιμοποιείται είναι η μόνωση κατηγορίας B. Προς το παρόν χρησιμοποιείται η μόνωση κατηγορίας F, αλλά τα όρια θερμοκρασίας της κλάσης F δεν χρησιμοποιούνται και χρησιμοποιούνται μόνο τα όρια θερμοκρασίας της κλάσης B. Υψηλότερες θερμοκρασίες μπορούν να εμφανιστούν με υπερφόρτωση για σύντομο χρονικό διάστημα, εάν απαιτείται. Η χρήση μόνωσης κλάσης F, επιτρέπει τη βέλτιστη χρήση των ενεργών υλικών της μηχανής.

Οι κατανεμημένες απώλειες προκαλούνται από τις εναλλασσόμενες ροές που εμφανίζονται όταν η μηχανή φορτίζεται στις επιφάνειες των πόλων, στα δόντια, στον πυρήνα και στις προεξοχές. Αυξάνονται με την κατασκευή τμηματικών πυρήνων σε μεγάλες μηχανές. [3][4]

4.6 Σχεδιασμός του πόλου και του πέλδου του πόλου

Για την κατασκευή έκτυπου πόλου, ο πόλος θα πρέπει να έχει κατάλληλο σχήμα ώστε η παραγόμενη τάση να έχει ημιτονοειδή κυματομορφή. Ο λόγος τόξου πόλου/διατομής πόλου στις σύγχρονες μηχανές είναι γενικά 65% έως 75%. Το 70% έως 72% είναι πιο ικανοποιητικό τόσο για σύγχρονες γεννήτριες όσο και για σύγχρονες μηχανές, ο λόγος μέγιστου διάκενου/ελάχιστου διάκενου είναι 1,5 έως 2,25. Στο σχήμα 11.1 παρουσιάζεται ένα συνηθισμένο σχήμα πόλου.



Σχήμα 4.1 Τυπικό σχήμα εκτυπου πόλου[3]

Η καμπύλη κατανομής ροής στο διάκενο αέρα προκύπτει από το διάγραμμα ροής. Για να ληφθεί η κατανομή της ροής στην επιφάνεια του οπλισμού, ο χώρος μεταξύ της επιφάνειας του πόλου και του οπλισμού διαιρείται περίπου σε ίσα τετράγωνα με γραμμές ροής και ισοδυναμίας. Η καμπύλη κατανομής της ροής σχεδιάζεται με την άπω άξονα σε ηλεκτρικές μοίρες και την ευθεία σε πυκνότητα ροής B στη συγκεκριμένη θέση. [3]

Ο συντελεστής κατανομής ροής $f_d = \frac{\text{μέση πυκνότητα ροής } B_a}{\text{μέγιστη πυκνότητα ροής } B_m}$

Ο συντελεστής μορφής του κύματος ροής $f_b = \frac{RMS \text{ τιμή του κύματος ροής}}{\text{Μέση πυκνότητα ροής}} = \frac{B_e}{B_a}$

4.7 Σχεδιασμός του μαγνητικού κυκλώματος

Αφού προσδιορισθούν τα αμπερελίγματα του πεδίου χωρίς φορτίο και με πλήρες φορτίο, προσδιορίζεται η καμπύλη μαγνήτισης χωρίς φορτίο για τάσεις έως και 130% της ονομαστικής τάσης. Υπολογίζεται το

μαγνητικό κύκλωμα για τον πυρήνα του στάτη, τα δόντια του στάτη, το διάκενο αέρα, τον πόλο και το ζυγό και υπολογίζονται τα συνολικά αμπερελίγματα για διάφορα σημεία τάσης στην καμπύλη και, στη συνέχεια, σχεδιάζονται τα χαρακτηριστικά ανοικτού κυκλώματος. Γνωρίζοντας ή επιλέγοντας το σχήμα του πόλου και του πέδιλου του πόλου, υπολογίζεται η ροή διαρροής του πόλου- και ο συντελεστής διαρροής A που αντιστοιχεί στο λόγο της ροής ανά πόλο συν τη ροή διαρροής διαιρούμενη με ροή ανά πόλο. [3][4]

4.8 ΑΝΤΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΣΥΓΧΡΟΝΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ

Αντίσταση διαρροής x_{al} : i) η αντίσταση διαρροής αυλακιών και ii) η αντίσταση διαρροής προεξοχών εξετάζονται με εκφράσεις παρόμοιες με εκείνες για τις επαγωγικές μηχανές. [3]

Σύγχρονη αντίδραση άμεσου άξονα $X_d = X_{al} + X_{ad}$ p.u.

Σύγχρονη αντίδραση τετραγωνικού άξονα $X_q = X_{al} + X_{aq}$ p.u.

όπου οι X_{ad} και X_{aq} δίνονται από τις εκφράσεις:

$$X_{ad} = c_d x_a \text{ p.u.}$$

Και $X_{aq} = c_q x_a \text{ p.u.}$

Και $x_a = 0.565 \times 10^{-6} \times \frac{1}{\ell'_g/\tau_p} k_{w1} \frac{q}{B_1} \text{ p.u.}$

ℓ'_g :πραγματικό μήκος διάκενου αέρα

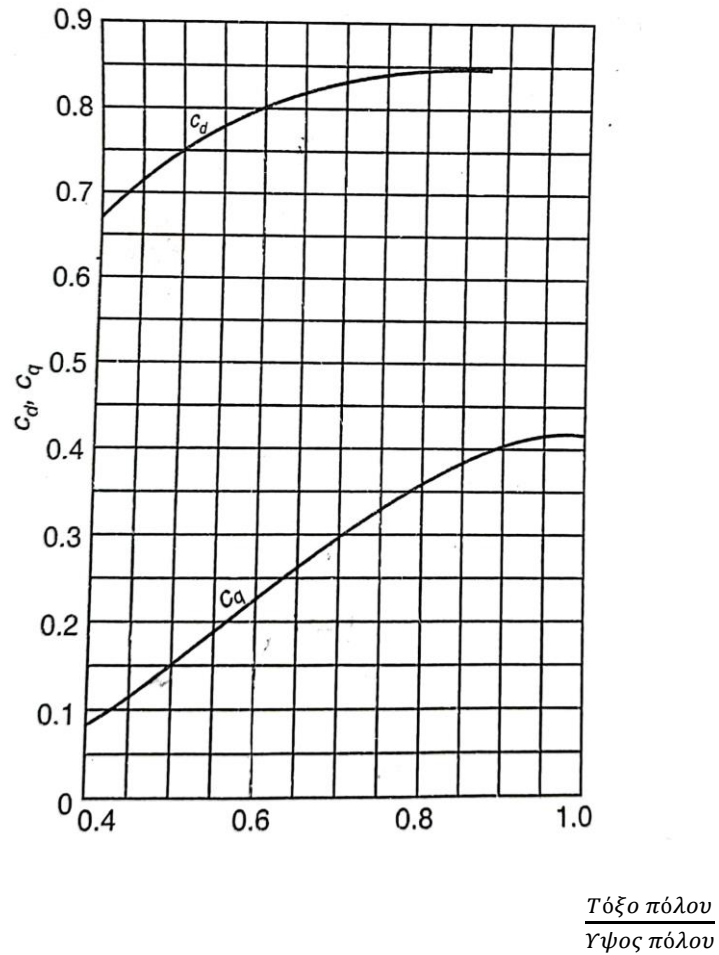
τ_p :βήμα πόλου

k_{w1} :συντελεστής τυλίγματος

q :ειδικό ηλεκτρικό φορτίο σε αμπερ-αγωγούς ανά m

B_1 :πυκνότητα ροής σε Wb/m² (πλάτος της καμπύλης της θεμελιώδους πυκνότητας ροής)

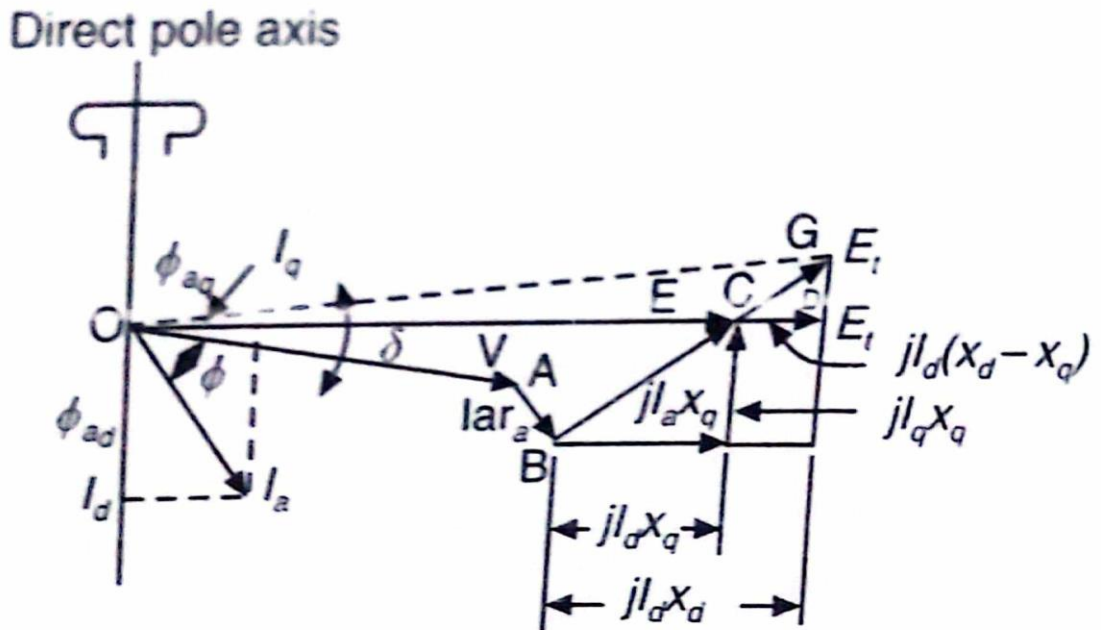
Οι τιμές των σταθερών C_d , C_q σε συνάρτηση με το τόξο πόλου/βήμα πόλου για σύγχρονες γεννήτριες με έκτυπο πόλο με ημιτονοειδές διάκενο αέρα δίνονται από το σχήμα 11.2. [3]



Διάγραμμα 4.1 C_d , C_q σε συνάρτηση με το τόξο πόλου / βήμα πόλου για σύγχρονες μηχανές με έκτυπο πόλο.

4.9 Προσδιορισμός διέγερσης για οποιαδήποτε κατάσταση φορτίου

Έχοντας προσδιορίσει τη σύγχρονη αντίδραση x_d και x_q , η τάση διέγερσης που απαιτείται για οποιαδήποτε κατάσταση φόρτισης μπορεί να προσδιοριστεί από το φασικό διάγραμμα μιας σύγχρονης μηχανής με έκτυπους πόλους. Το Σχήμα 11.3 δείχνει το διάγραμμα φάσης μιας σύγχρονης γεννήτριας με έκτυπο πόλο. Για τάση V και ρεύμα φορτίου I_a με συντελεστή ισχύος $\cos\phi$ επαγωγικό, η τάση που απαιτείται σε ανοικτό κύκλωμα θα είναι E_f , λαμβανομένων υπόψη των την επίδραση των αντιδράσεων x_d και x_q . Η διακύμανση σε αυτό το φορτίο είναι $\frac{E_f - V}{V} \times 100\%$. [3]



Διάγραμμα 4.2 Διανυσματικό Διάγραμμα φασμάτων μιας γεννήτριας με έκτυπους πόλους.

4.10 Χαρακτηριστικά βραχυκυκλώματος

Τα χαρακτηριστικά βραχυκυκλώματος της μηχανής μπορούν να προσδιοριστούν και να απεικονιστούν μαζί με τα χαρακτηριστικά ανοικτού κυκλώματος της μηχανής. Ο λόγος βραχυκύκλωσης είναι ο λόγος της απαιτούμενης διέγερσης για την παραγωγή τάσης ανοικτού κυκλώματος ίσης με την ονομαστική τάση προς τη διέγερση που απαιτείται για την παραγωγή ρεύματος πλήρους φορτίου υπό βραχυκύκλωμα. Ένας χαμηλός λόγος βραχυκυκλώματος σημαίνει μικρότερο διάκενο αέρα και κακή ρύθμιση. Απαιτεί μεγάλες αλλαγές στη διέγερση του πεδίου για μικρές αλλαγές στο φορτίο, ενώ ένα μεγάλος λόγος βραχυκυκλώματος σημαίνει μεγάλο διάκενο αέρα και καλή ρύθμιση. Οι σύγχρονες μηχανές έχουν μεγαλύτερο διάκενο αέρα σε σύγκριση με τις μηχανές επαγωγής. Γενικά ο λόγος βραχυκύκλωσης των σύγχρονων μηχανών γεννητριών κυμαίνεται από 0,65 έως 1,4. [3]

4.11 Κορεσμός

Το φαινόμενο του κορεσμού μπορεί να εξεταστεί για να βρεθεί η διέγερση που απαιτείται υπό συνθήκες φόρτισης. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί η αντίδραση Potier (x_p). [3]

4.12 Σχεδιασμός της περιέλιξης πεδίου

Το τύλιγμα πεδίου θα σχεδιάζεται για τάση 15 έως 30 % μικρότερη από την τάση διέγερσης, ώστε να επιτρέπεται η πτώση τάσης μεταξύ του πεδίου της γεννήτριας και του διεγέρτη και για να επιτραπεί η μεταβολή της του μαγνητικού κυκλώματος. Γνωρίζοντας τα αμπερελίγματα που απαιτούνται για ονομαστικό φορτίο σε ονομαστικό συντελεστή ισχύος, είναι δυνατόν να προσδιοριστεί το ρεύμα πεδίου και το μέγεθος του καλωδίου. Για μικρές μηχανές, μπορούν να χρησιμοποιηθούν στρογγυλά σύρματα με σμάλτο. για την περιέλιξη του πεδίου. Για μεσαίες μηχανές έως 500 kW, μπορούν να χρησιμοποιηθούν χάλκινες λωρίδες με σμάλτο, και για μεγάλες μηχανές, γυμνές χάλκινες

λωρίδες με μόνωση μεταξύ των στροφών. Πυκνότητα ρεύματος στην περιέλιξη πεδίου είναι περίπου 4 έως 5 A/mm². [3]

4.13 Ανάλυση της μεταφοράς θερμότητας και αύξησης της θερμοκρασίας

Μετά το σχεδιασμό της περιέλιξης του πεδίου, μπορούν να υπολογιστούν οι διάφορες απώλειες στη μηχανή και να υπολογιστεί η απόδοση. Ο προσδιορισμός της πραγματικής αύξησης της θερμοκρασίας είναι ένα πολύπλοκο πρόβλημα. Βρίσκεται από τα εμπειρικά δεδομένα που συλλέγονται. Η μεταφορά θερμότητας εξαρτάται από τον σχεδιασμό του συστήματος εξαερισμού. Οι ακτινικοί ανεμιστήρες χρησιμοποιούνται για μικρές και μεσαίες μηχανές χαμηλής ταχύτητας. Για μεγάλες και υψηλών ταχυτήτων μηχανές χρησιμοποιούνται αξονικοί ανεμιστήρες. Για μικρού και μεσαίου μεγέθους μηχανές, χρησιμοποιούνται συνήθως περιβλήματα που δεν αφήνουν σταγόνες. Η θερμότητα που πρέπει να απορριφθεί από τον οπλισμό είναι οι απώλειες I^2r και οι απώλειες πυρήνα. [3]

4.14 Σύστημα διέγερσης

Γενικά χρησιμοποιείται ένας διεγέρτης συνεχούς ρεύματος απευθείας συνδεδεμένος με τον άξονα της γεννήτριας. Το μέγεθος του διεγέρτη μπορεί να είναι 2 έως 3% της χωρητικότητας της γεννήτριας. Η τυπική ονομαστική τάση μπορεί να είναι 110 V ή 220 V. Ένας αυτόματος ρυθμιστής τάσης χρησιμοποιείται για τη διατήρηση της τάσης των ακροδεκτών της γεννήτριας σταθερή σε διάφορα φορτία. Σήμερα οι στατικοί διεγέρτες χρησιμοποιούνται με ημιαγωγούς. Προκειμένου να εξαλειφθεί το πρόβλημα των δακτυλίων ολίσθησης και της φθοράς των ψηκτρών, η τάση είναι τώρα να χρησιμοποιούνται διεγέρτες χωρίς ψήκτρες που χρησιμοποιούν έναν εναλλασσόμενο διεγέρτη συνδεδεμένο στον ίδιο άξονα με αυτόν της γεννήτριας με έναν περιστρεφόμενο τροχό διόδου που τροφοδοτεί ισχύ στον δρομέα. Η διέγερση του πεδίου του διεγέρτη λαμβάνεται από το δίκτυο μέσω

ρυθμιστή τάσης. Το σύστημα διέγερσης πρέπει να έχει χαμηλή βύθιση τάσης και γρήγορη τάση αποκατάστασης. Οι γεννήτριες κατασκευάζονται πλέον με στατικά συστήματα διέγερσης ακόμη και για μεσαίου μεγέθους ντιζελοκίνητες γεννήτριες. Η μονάδα στατικής διέγερσης τοποθετείται στην κορυφή της μονάδας γεννήτριας. Αποτελείται από ένα μετασχηματιστή με διάκενο που τροφοδοτεί μια γέφυρα συνδεδεμένη με ανορθωτή πλήρους κύματος που ανορθώνει το εναλλασσόμενο ρεύμα από το δίκτυο μέσω του μετασχηματιστή σε συνεχές και τροφοδοτεί την διέγερση για τη γεννήτρια. Οι διακλαδώσεις της μονάδας διέγερσης μπορούν να ρυθμιστούν για να δώσουν ονομαστική τάση εντός +5% της τυπικής τάσης σχεδιασμού. Η διέγερση μπορεί να ρυθμιστεί εκ νέου για καλύτερη ρύθμιση όταν η διακύμανση του κινητήρα είναι καλύτερη από 42%. Μπορεί να συνδεθεί μεταβλητός μετασχηματιστής στις αναμονές μιας από τις φάσεις για να ρυθμίσει την τάση της γεννήτριας κατά $\pm 5\%$ του προτύπου τάσης σχεδιασμού διέγερσης για τη γεννήτρια. Οι διακλαδώσεις της μονάδας διέγερσης μπορούν να ρυθμιστούν για να δώσουν ονομαστική τάση εντός +5% της τυπικής τάσης σχεδιασμού. Η διέγερση μπορεί να ρυθμιστεί εκ νέου για καλύτερη διακύμανση όταν η διακύμανση του κινητήρα είναι καλύτερη από 42%. Μπορεί να συνδεθεί μεταβλητή μετασχηματιστή στις αναμονές μιας από τις φάσεις για να ρυθμίσει την τάση της γεννήτριας κατά $\pm 5\%$ του προτύπου τάσης σχεδιασμού. [3][4]

4.15 Σχεδιασμός τυλίγματος αποσβεστήρα

Η περιέλιξη του αποσβεστήρα αναπτύσσεται στην πρόσοψη του πόλου της γεννήτριας μέσω χάλκινων ράβδων οι οποίες συνδέονται στις επιφάνειες των πόλων με δακτυλίους βραχυκύκλωσης. Η περιέλιξη αποσβεστήρα βοηθά στην αποφυγή ταλαντώσεων της γεννήτριας όταν μια σύγχρονη μηχανή λειτουργεί υπό φορτίο ιδίως κατά την παράλληλη λειτουργία με άλλες σύγχρονες μηχανές. [3]

5. ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 – ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ

Σε αυτό το κεφάλαιο πραγματοποιείται ο σχεδιασμός ενός εναλλακτήρα που χρησιμοποιείται με μία κινητήρια μηχανή πετρελαίου. Οι υπολογισμοί πραγματοποιήθηκαν χρησιμοποιώντας τις πηγές

[3] Design and Testing of Electrical Machines, M.V.Deshpande, PHI, 2010

[4] Ηλεκτρικές Μηχανές, 4η Έκδοση, Chapman Stephen, Εκδόσεις ΤΖΙΟΛΑ

5.1 Οι προδιαγραφές του εναλλακτήρα

- S=50KVA
- Τριφασικός, συνδεσμολογία αστέρα
- Συχνότητα f=50HZ
- Ονομαστική τάση:400V
- Cosφ=0.8 επαγωγικό
- Ταχύτητα περιστροφής: 1500rpm
- Μέγιστη θερμοκρασία 50°C
- Μήκος δρομέα :885mm

5.2 Διαστάσεις της μηχανής

Ισχύς εξόδου

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

$$D^2 \times L = \frac{S}{1.11 \times K_W \times \pi^2 \times \bar{B} \times ac \times n \times 10^{-3}}$$
$$= \frac{50}{1.11 \times 0.955 \times \pi^2 \times 0.6 \times 33000 \times \frac{1500}{60} \times 10^{-3}} \Rightarrow$$

$$D^2 \times L = 9.65 \cdot 10^6 \text{ mm}^3$$

Όπου

Kw: συντελεστής τυλιγμάτων=0.955

B: πυκνότητα ροής διακένου =0.6Wb/m²

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

D: διάμετρος δρομέα σε m

L: μήκος δρομέα σε m

Για L=885mm προκύπτει D=104.45mm

Οπότε D=105mm και L=885mm

Επιλέγουμε 3 αγωγούς, πλάτους 10mm

Οπότε το πλάτος του τυλίγματος του τυμπάνου είναι 885-3×10=855mm

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)

$$K_d = \frac{\sin\left(\frac{m\psi}{2}\right)}{m \sin\left(\frac{\psi}{2}\right)} = \frac{\sin\left(\frac{4 \cdot 15}{2}\right)}{4 \sin\left(\frac{15}{2}\right)} = 0.958$$

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

$$\theta = 3 \times 15 = 45^\circ \text{ ηλεκτρικές}$$

Συντελεστής τυλιγμάτων (*winding factor*)

$$K_W = K_d \cdot K_p = 0.958 \cdot 0.924 = 0.8852$$

$$\text{Πολικό βήμα (Pole pitch) } Y = \frac{\pi D}{p} = \frac{\pi \cdot 105}{4} = 82.47 \text{mm} = 83 \text{mm}$$

$$\text{Μαγνητική ροή ανά πόλο } \bar{B} \cdot Y \cdot L = 0.6 \cdot 0.083 \cdot 0.885 \cdot 1000 = 44 \text{mWb}$$

5.4 Τυλίγματα τυμπάνου

$$\text{Φασική τάση } U_\phi = \frac{400}{\sqrt{3}} = 230.94 \text{V}$$

$$\text{Πλήθος τυλιγμάτων σε σειρά ανά φάση} = \frac{U_\phi}{4.44 \cdot K_W \cdot \phi \cdot f} = \frac{230.94}{4.44 \cdot 0.8852 \cdot 44 \cdot 10^{-3} \cdot 50} = 26.7 \text{ τυλίγματα}$$

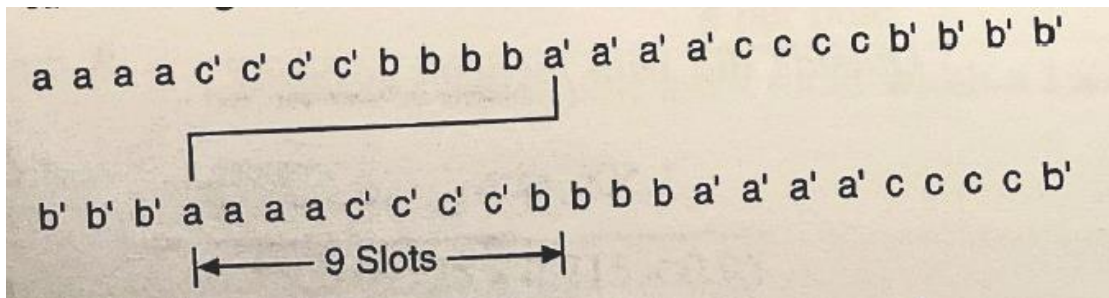
Άρα παίρνουμε 28 τυλίγματα, δηλ 56 αγωγούς ανά φάση

$$\text{Διορθωμένη μαγνητική ροή ανά πόλο } \phi = 44 \cdot \frac{26.7}{28} = 41.95 \text{mWb}$$

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 αυλακιών τυμπάνου: 48
- Εύρος τυλίγματος τυμπάνου: 1-10
- Πλήθος τυλιγμάτων ανά πηνίο: 6
- **4 parallel star**
- 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

$$\text{Ονομαστικό ρεύμα φορτίου: } I = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot U_{\Pi}} = \frac{50}{\sqrt{3} \cdot 400} = 72.2A$$

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

$$\text{Επιφάνεια εγκάρσιας διατομής} = \frac{72,2}{6} = 12mm^2$$

4 παράλληλα κυκλώματα, άρα η διατομή του αγωγού είναι: $= \frac{12}{4} = 3mm^2$

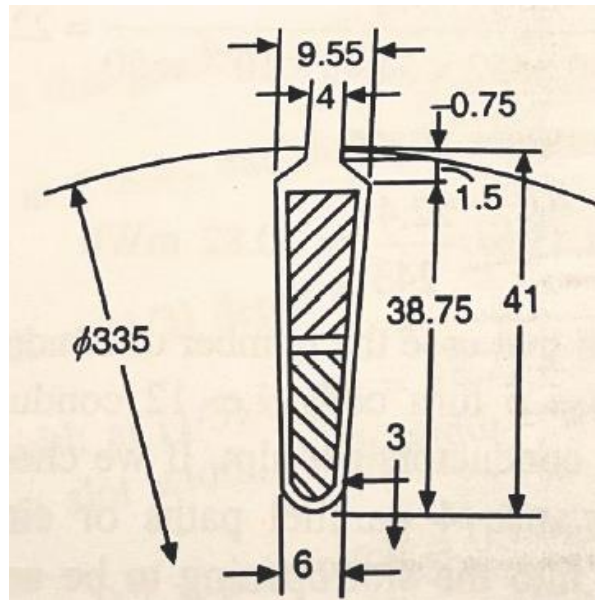
Επιλέγουμε 6 αγωγούς διαμέτρου 1mm. Η διατομή που διαμορφώνεται είναι

$$6 \times \frac{\pi}{4} \times 1^2 = 2.35mm^2 \text{ οπότε είναι οκ}$$

5.6 Επιλογή μεγέθους και σχήματος αυλακιού:

$$\text{Βήμα αυλακιού} = \frac{\pi \cdot 105}{48} = 6.872mm$$

Το πλάτος και το σχήμα του αυλακιού επιλέγεται κατά τρόπον ώστε η πυκνότητα ροής στο δόντι να είναι 1.7 Wb/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 Σχήμα και διαστάσεις αυλακιού - παράδειγμα

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

Διάμετρος αγωγού	Εξωτερική διάμετρος με μέτρια μόνωση	Διατομή
1mm	1.106mm	$\frac{\pi}{4} \times 1.106^2$ = 0.96

Διατομή ανά πλευρά πηνίου = 0.96 mm^2

Υπάρχουν 12 πλευρές πηνίων ή αγωγοί ανά αυλάκι

Απαιτούμενη διατομή από τους αγωγούς κάθε αυλακιού= $0.96 \times 12 = 11.52 \text{mm}^2$

$$\text{Διατομή αυλακιού} = \frac{4+2}{2} \times (18-3) = 60 \text{mm}^2$$

$$\frac{1}{2} \times \frac{\pi}{4} \times 2^2 = 1.57 \text{mm}^2$$

$$\text{Σύνολο} = 61.57 \text{mm}^2$$

$$\text{Παράγοντας χώρου στο αυλάκι} = \frac{11.52}{61.57} = 0.187 \text{ Μόνωση Class B}$$

Η τιμή αυτή είναι ικανοποιητική

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

$$\text{Βήμα αυλακιού στην επιφάνεια του οπλισμού: } \frac{105 \times \pi}{48} = 6,87 \text{mm}$$

$$\text{Πλάτος αυλακιού στο μεγαλύτερο πλάτος αυλακιού} = \frac{\pi \times (105 - 2 \times 2.25)}{48} = 6.58 \text{mm}^2$$

$$1/3 \text{ βάθος από την χαμηλότερη θέση} = \frac{18}{3} = 6 \text{mm}$$

$$\text{Διάμετρος αυτής της θέσης} = 105 - (20.25 - 6) \times 2 = 76.5 \text{mm}$$

$$\text{Βήμα αυλακιού στη διάμετρο } 76.5 \text{mm} = \frac{\pi \times 76.5}{48} = 5 \text{mm}$$

$$\text{Πλάτος αυλακιού στο } 1/3 \text{ του βάθους} = 2 + \frac{(6-2)(4-2)}{15} = 2.53 \text{mm}$$

$$\text{Πλάτος δοντιού στο } 1/3 \text{ του βάθους} = 5 - 2.53 = 2.47 \text{mm}$$

$$\text{Στο πλατύτερο άνοιγμα αυλακιού, πλάτος δοντιού} = 6.58 - 4 = 2.58 \text{mm}$$

$$\text{Τόξο πόλου} = 0.7 \times \text{πολικό βήμα} = 0.7 \times \frac{\pi(105 + 2 \times 2.25)}{4} = 60.2 \text{mm}$$

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

$$\text{Πλήθος δοντιών κάτω από το τόξο του πόλου} = \frac{48 \times 60.2}{\pi \times 109.5} = 8.4$$

$$\text{Πυκνότητα ροής στα δόντια } B_i = \frac{\varnothing \text{ ανά πόλο}}{\text{πλήθος δοντιών κάτω από το τόξο του πόλου} \times \text{πλάτος δοντιού} \times 1 \times \text{συντελεστής στοίβαξης}} = \frac{41.95 \times 10^{-3}}{8.4 \times 0.00247 \times 0.855 \times 0.95} = 2.49 \text{ Wb/m}^2$$

Το μέγεθος του αυλακιού είναι αποδεκτό

5.7 Αμπερελίγματα του διακένου

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

$$y'_s = y_s - k_0 w_0 = 6.87 - 0.3 \times 4 = 5.67$$

$$\text{Ενεργό τόξο πόλου} = 5.67 \times 8.4 = 47.628 \text{ mm}$$

$$\text{Ενεργό μήκος πυρήνα } L' = 105 - (0.47 \times 3 \times 10) = 90.9 \text{ mm}$$

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

$$\text{Ενεργό εμβαδόν διακένου} = 47.628 \times 90.9 \text{ mm}^2 = 4.33 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$\text{Πυκνότητα ισχύος στο διάκενο } B_g = \frac{41.95 \times 10^{-3}}{4.33 \times 10^{-3}} = 9.7 \text{ Wb/mm}^2$$

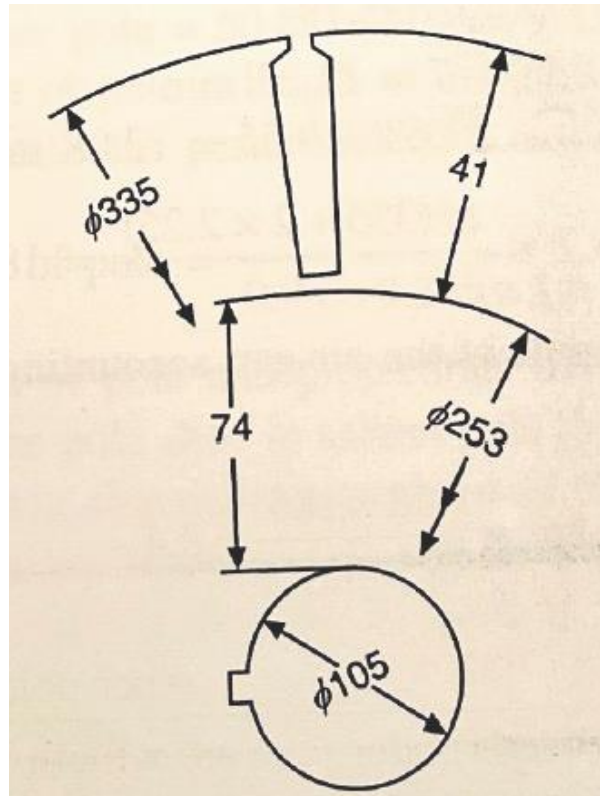
$$AT_{\text{air}} = 0.8 \times 10^6 \times 9.7 \times 0.00225 = 17460$$

Αμπερελίγματα στο πυρήνα

Η διάμετρος του άξονα είναι 45mm

$$\text{Το βάθος του πυρήνα} = \frac{105 - (20.25 \times 2) - 45}{2} = 9.75 \text{ mm}$$

Το επόμενο σχήμα δείχνει τις διαστάσεις του πυρήνα



Σχήμα 5.2 Διαστάσεις και σχήμα πυρήνα - παράδειγμα

$$\text{Μέσο μήκος μαγνητικού μονοπατιού στον πυρήνα} = \frac{\pi \times \text{μέση διάμετρο}}{p} = \frac{\pi \times (45 + 9.75)}{4} = 43 \text{ mm}$$

$$\text{Μαγνητική ροή στο τύλιγμα του πυρήνα} = \frac{41.95 \times 10^{-3}}{2} = 20.9751 \times 10^{-3}$$

$$\text{Πυκνότητα μαγνητικής ροής στο τύλιγμα του πυρήνα } B_c = \frac{20.975 \times 10^{-3}}{0.74 \times 0.855 \times 0.95} = 0.035 \text{ Wb/m}^2$$

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

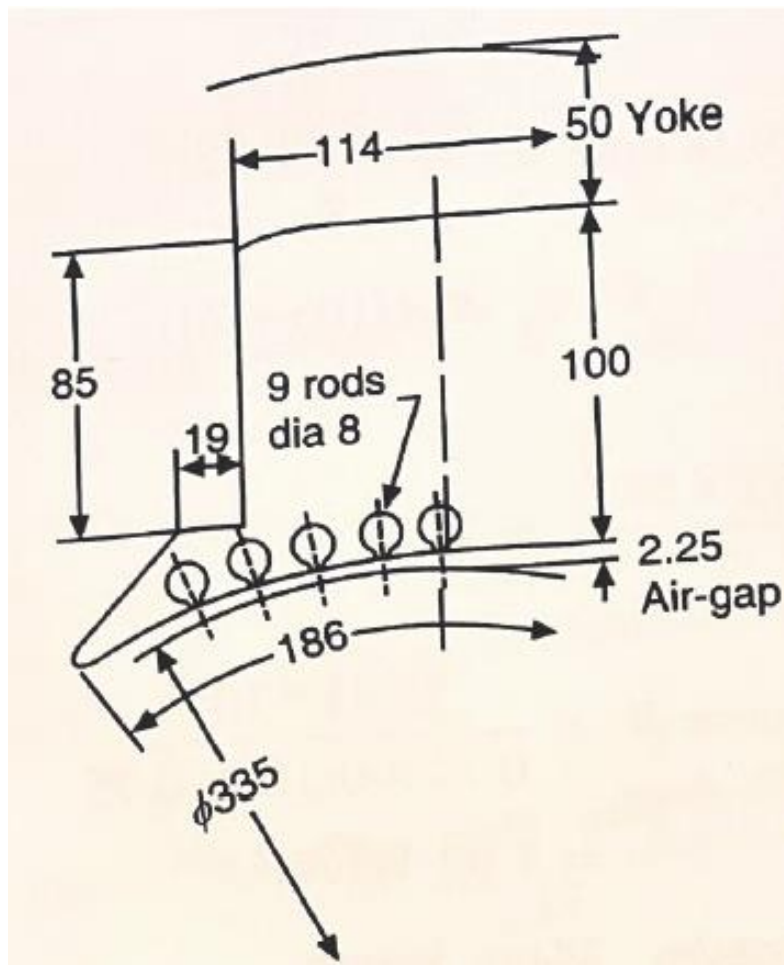
Λαμβάνοντας συντελεστή διαρροής $\lambda=1.15$

Μαθητική ροή ανά πόλο $= 41.95 \times 10^{-3} \times 1.15 = 0.04824 \text{ Wb}$

Μήκος πόλου = Μήκος πυρήνα τυμπάνου $= 0.885 \text{ m}$

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

$$\text{Πλάτος πόλου} = \frac{0.04824}{0.93 \times 0.885 \times 1.6} = 37 \text{ mm}$$



Σχήμα 5.3 Πόλος, σχήμα ποδιού και διαστάσεις του πόλου - παραδειγμα

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 40mm

Αμπερελίγματα του πόλου

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

Ζυγός: Διάμετρος στην έδρα του πόλου=885+[(40+2.25)×2]=1065mm

Ο ζυγός είναι τετραγωνικού σχήματος προκειμένου να χωρέσει περισσότερα αμπερελίγματα στους πόλους. Οι εξωτερικές διαστάσεις του είναι 1100mm κάθε πλευρά

$$\text{Πάχος ζυγού} = \frac{1100-1065}{2} = 18\text{mm}$$

$$\text{Πυκνότητας ροής στο ζυγό} = \frac{\text{ροή ανά πόλο}}{2 \times \text{μήκος ζυγού} \times \text{πλάτος ζυγού}} = \frac{0.04824}{2 \times 1,1 \times 0.018} = 01.22\text{Wb/m}^2$$

Μέσο μήκος μαγνητικού μονοπατιού=1083mm

Πυκνότητα ροής στο ζυγό B_y	Αμπερελίγματα /m(at)	Μήκος μονοπατιού	AT_{yoke}
0.9Wb/m ²	500	0.59m	295

Οπότε τα αμπερελίγματα ανά πόλο είναι

Διάκενο	1591
Δόντι τυμπάνου	123
Πυρήνας τυμπάνου	<u>24</u>
ΑΤ ₁	1738
Πόλος	500
Ζυγός	<u>295</u>
ΑΤανά πόλο	2533

5.9 Χαρακτηριστικά ανοικτού κυκλώματος

Προκειμένου να υπολογισθούν τα χαρακτηριστικά της σύγχρονης γεννήτριας, πολλαπλασιάζονται τα αμπερελίγματα που χρειάζονται για τον πόλο με τάση 1.15p.u και 1.3p.u., όπως γίνεται με τάση 1p.u. Αλλα 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

5.10 Αντίσταση τυμπάνου ανά φάση

Αντίσταση σε Ω/m στους $20^{\circ}C$

1mm διάμετρος αγωγού:

$$q = \pi \cdot \frac{d^2}{4} = \pi \cdot \frac{1^2}{4} = \frac{\pi}{4}$$

$$R_{20^{\circ}C} = \frac{1}{k \cdot q} = \frac{1}{58 \cdot \frac{\pi}{4}} = 0.02195$$

$$10 \text{ αγωγοί διαμέτρου } 1\text{mm παράλληλα} = \frac{0.02195}{10} = 0.002195\Omega = R$$

Μέσο μήκος μισού τυλίγματος = μήκος πυρήνα +(1.15×σπείρα πηνίου)+120mm=885+(1.15× $\frac{9}{12}$ ×83)+120=1076.5875mm

Αντίσταση αγωγών τυμπάνου ανά φάση στους $20^{\circ}C=48 \times 1.0765875 \times 0.002195=0.1134\Omega$

Υπάρχουν 4 παράλληλα μονοπάτια, οπότε

$$\text{Αντίσταση στους } 20^{\circ}\text{C ανά φάση} = \frac{0.1134}{4} = 0.02835\Omega$$

$$\text{Αντίσταση στους } 75^{\circ}\text{C ανά φάση} = 0.02835 \times 1.218 = 0.0345\Omega$$

$$\frac{I_r}{V} = \frac{72.2 \times 0.0345}{230.94} = 0.0108 \text{ p.u. αντίσταση}$$

5.11 Αντίδραση τυμπάνου X_1

$$\frac{W_{S1}}{W_{S2}} = \frac{2.58}{6} = 0.43$$

$$\frac{h_1}{w_{S2}} = \frac{15}{6} = 2.5$$

$$F = 132$$

$$\text{Διαμόρφωση αυλακιού } \lambda_s = \frac{0.75}{4} + \frac{2 \times 0.43}{4 + 2.58} + 1.32 \cong 1.59$$

$$\text{Αντίδραση διαρροής αυλακιού} = 31.6 \times 10^{-6} \times 50 \times \frac{24^2}{4 \times 4} \times 0.885 \times 1.59 = 0.08\Omega$$

$$L_o \lambda_o = \frac{K_s r^2 p}{\pi \tau_s} = \frac{0.82 \times 0.083^2}{\pi \times 0.02193} = 0.626$$

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

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

$$\text{αντίδραση διαρροής προεξοχής} = 31.6 \times 10^{-6} \times 50 \times \frac{24^2}{4 \times 4} \times 0.626 = 0.0356\Omega$$

$$\text{αντίδραση διαρροής σπλισμού } X_1 = 0.08 + 0.0356 = 0.1156\Omega$$

$$I \times X_1 = 72.2 \times 0.1156 = 8.35\text{V}$$

$$\text{p.u. αντίδραση} = \frac{8.35}{230.94} = 0.036 \text{ p.u.}$$

$$\begin{aligned} \text{Αμπερελίγματα αντίδρασης τυμπάνου} \quad F_a &= 2.7 \times I \times T_{ph} \times \frac{K_{w1}}{p} = \\ 2.7 \times 72.2 \times 24 \times \frac{0.8852}{4} &= 1036 \end{aligned}$$

5.12 Χαρακτηριστικά βραχυκύκλωσης

Για $I_{X1}=0.036$ να βρεθούν τα απαιτούμενα αμπερελίγματα της διέγερσης. Είναι 97

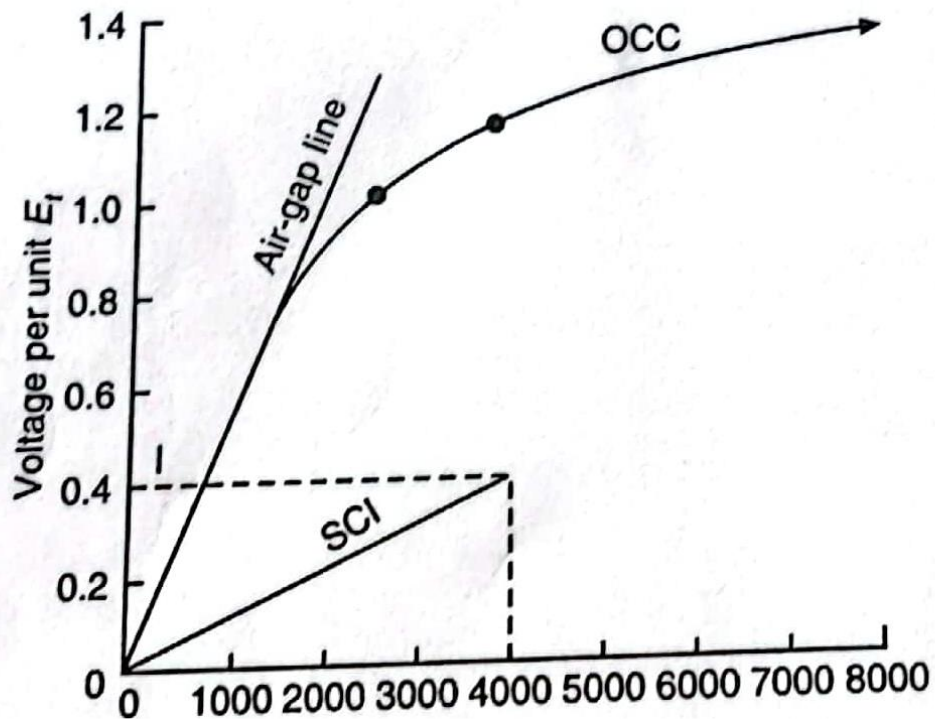
Αμπερελίγματα για αντίδραση τυμπάνου $F_a = 1036$

Αμπερελίγματα στο ρεύμα βραχυκύκλωσης= ρεύμα πλήρους φορτίου=97+1036=1133

Χαρακτηριστικά βραχυκύκλωσης *Ρεύμα:1.0 AT=1133*

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



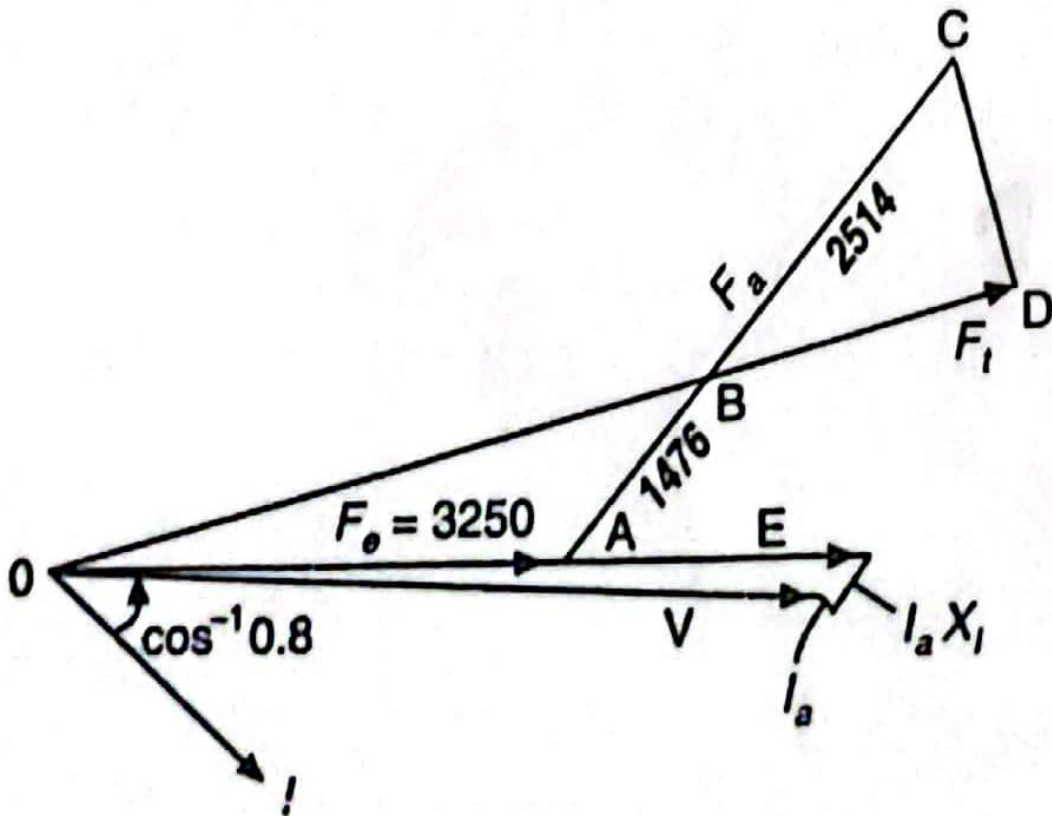
Διάγραμμα 5.1 Χαρακτηριστική ανοικτού κυκλώματος

$E=1.0$ 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

$$V=1.0 \text{ p.u.} \quad I_r=0.0108 \text{ p.u.}$$

$$IX_1=0.036 \text{ p.u.}$$



Διάγραμμα 5.2 Διανυσματικό διάγραμμα

Συντελεστής ισχύος 0.8 επαγωγικός

Το I_r καθυστερεί της τάσεως V κατά $\cos^{-1}(0.8)=36.87^\circ$

Με διανυσματική πρόσθεση του I_r/V και του IX_1 , η τάση ανοικτού κυκλώματος είναι E ,

$$E = V + \frac{I_r}{V} + IX_1 = 1 + 0.0108\angle -36.87^\circ + 0.036\angle(90 - 36.87^\circ)$$

$$= 1.03\angle 1.24^\circ$$

$E_1=1.03$ p.u. Τα αμπερελίγματα για αυτή την τάση είναι $F_e=3000$. Το F_a σχεδιάζεται στη σωστή γωνία σε σχέση με το ρεύμα

Θεωρούμε $F_t = 3 \times F_a = 3 \times 1036 = 3108$ αμπερελίγματα.

Η τάση για αυτό το F_t , $E_t = 1.1$ p.u.

Η επί τις εκατό διακύμανση είναι

$$V_R = \frac{E_t - E}{E} = \frac{1.1 - 1.03}{1.03} = 6.8\%$$

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

5.14 Λόγος βραχυκύκλωσης

$$E = 1.0$$

Αμπερελίγματα στο OCC = 2563

Αμπερελίγματα στο κύκλωμα βραχυκυκλώσης = 1133

$$\text{Λόγος βραχυκύκλωσης} = \frac{\text{αμπερελίγματα στο OCC για } 1 \text{ p.u. } E}{\text{αμπερελίγματα στο SCC για } 1 \text{ p.u. } I} = \frac{2563}{1133} =$$

$$2.262$$

$$\text{Σύγχρονη αντίδραση} = \frac{1}{2.262} = 0.44 \text{ p.u.}$$

5.15 Υπολογισμός των X_q και X_d

$$\begin{aligned} X_\alpha &= 0.565 \times 10^{-6} \times \frac{1}{\left(\frac{\ell'_q}{\tau_p}\right)} \times k_{w1} \times \left(\frac{q}{B_1}\right) \text{ p. u.} \\ &= 0.565 \times 10^{-6} \times \frac{1}{1.13 \times 2.25/83} \times 0.8852 \times \frac{33000}{\left(\frac{\pi}{2}\right) \times 0.6} = 0.57 \end{aligned}$$

Για $\frac{\text{τόξο πόλου}}{\text{βήμα πόλου}} = 0.7$ από την καμπύλη του σχήματος 11.2, $c_d=0.83$,
 $c_q=0.3$

$$X_{ad} = 0.57 \times 0.83 = 0.4731$$

$$X_{aq} = 0.57 \times 0.3 = 0.171$$

$$X_d = 0.036 + 0.4731 = 0.51 \text{ p. u.}$$

$$X_q = 0.036 + 0.171 = 0.207 \text{ p. u.}$$

5.16 Σχεδιασμός τυλίγματος πεδίου

Αμπερελίγματα πλήρους φορτίου ανά πόλο=1554

Επιλέγουμε 300 τυλίγματα ανά πηνίο πεδίου (δλδ ανά πόλο)

$$\text{Ρεύμα πεδίου } I_f = \frac{1554}{300} = 5.18 \text{ A}$$

Σχεδίαση αγωγού για 8A

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

Περιοχή δέσμευσης ρητίνης του αγωγού= $8/4=2\text{mm}^2$

Επιλέγουμε εμαγιε στρογγυλό αγωγό διαμέτρου 1.6mm

$$\text{Διατομή αγωγού} = \frac{\pi}{4} \times 1.6^2 = 2.01 \text{ mm}^2$$

Εξωτερική διάμετρος αγωγού με μεσαία εμαγιέ επίστρωση=1.718mm

$$\text{Διατομή μονωμένου αγωγού} = \frac{\pi}{4} \times 1.718^2 = 2.318 \text{mm}^2$$

Απαιτούμενη διατομή των αγωγών στο πηνίο του πεδίου = $300 \times 2.318 = 695.4 \text{mm}^2$. Ο χώρος για το τύλιγμα πεδίου, $19 \text{mm} \times 85 \text{mm} = 1615 \text{mm}^2$ είναι αρκετός.

5.17 Αντίσταση τυλίγματος πεδίου

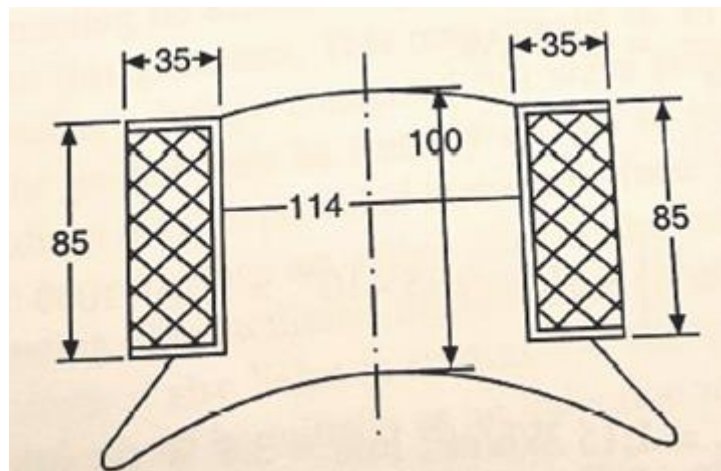
Αντίσταση του αγωγού διαμέτρου 1.6mm στους $20^\circ\text{C} = 0.009213 \Omega / \text{m}$

Στους $75^\circ\text{C} = 1.218 \times 0.009213 = 0.01122 \Omega / \text{m}$

Μέσο μήκος του αγωγού του πηνίου του πεδίου

$$\ell_m = (114 + 35) \times 2 + (885 + 35) \times 2 = 2138 \text{mm}$$

Από το Σχήμα 5-4 η περιοχή του πόλου είναι $114 \times 885 \text{mm}$ και το πάχος του τυλίγματος 35mm



Σχήμα 5.4 Τομή τυλίγματος (όλες οι διαστάσεις σε mm)

Αντίσταση πηνίου στους $75^\circ\text{C} = \frac{2138}{1000} \times 0.01122 \times 300 \text{τυλίγματα} = 7.1965 \Omega$

$$R_f(\text{για πηνία 4 - πεδίων}) = 4 \times 7.1965 = 28.786 \Omega$$

5.18 Βάρος χαλκού στο τύλιγμα του πεδίου

βάρος χαλκού

$$\begin{aligned} &= \text{διατομή αγωγού} \times I_m \times \text{αριθμός τυλιγμάτων} \times \text{πηνία} \times 8.89 \\ &\times 1000kg = 2.01 \times 10^{-6} \times 2.138 \times 300 \times 4 \times 8.89 \times 1000 \\ &= 45.85kg \end{aligned}$$

$$\text{Απώλειες χαλκού} = I_f^2 R_f = 5.18^2 \cdot 28.786 = 772.4 \text{ Watts}$$

$$\text{Τάση στο τύλιγμα πεδίου} = 5.18 \cdot 28.786 = 149.11V$$

Προστίθεται 20% επιπλέον τάση οπότε επιλέγεται τάση 200V

$$\text{Ισχύς διέγερσης} = 200 \times 10A = 2 \text{ kW}$$

$$\text{Απόδοση διέγερσης } 88\%, \text{ άρα είσοδος διέγερσης} = \frac{2000}{0.88} = 2273W$$

$$\text{Απώλειες διέγερσης} = 2273 - 2000 = 273W$$

$$\text{Απώλειες ψηκτρών} = 5.18 \times 2 = 10.36W$$

Απώλειες στη διέγερση και στο μαγνητικό πεδίο

$$\text{Απώλειες χαλκού} \quad 0.7724kW$$

$$\text{Απώλειες ψηκτρών} \quad 0.0136 \text{ kW}$$

$$\text{Απώλειες διέγερσης} \quad 0.273 \text{ kW}$$

$$1.059 \text{ kW}$$

5.19 Απώλειες σιδήρου στο δόντι του τυμπάνου και στο πυρήνα

Βάρος σιδήρου στο δόντι του τυμπάνου

Εμβαδόν αυλακιού: $61.57 \times 48 \text{ mm}^2$

$$\text{Εμβαδόν σιδήρου} = \left\{ \frac{\pi}{4} (105^2 - 83^2) - 61.57 \times 48 \right\} = 293 \text{ mm}^2$$

Καθαρό μήκος σιδήρου του πυρήνα $(885 - 30) \times 0.95 \text{ mm}$

$$\text{Βάρος ποδιού σιδήρου} = 293 \times (885 - 30) \times 0.95 \times 10^{-9} \times 7.78 \times 1000 \text{ kgr} = 1.85 \text{ kgr}$$

Πυκνότητα πεδίου στο πόδι $B_i = 2.49 \text{ Wb/m}^2$ Απώλειες = 11 W/kg

$$\text{Απώλειες στο δόντι του τυμπάνου} = \frac{1.85 \times 11}{1000} = 0.02035 \text{ kW}$$

5.20 Βάρος πυρήνα τυμπάνου:

$$\text{Βάρος πυρήνα} = \left\{ \frac{\pi}{4} (105^2 - 45^2) \right\} \times (885 - 30) \times 0.95 \times 10^{-9} \times 7.78 \times 1000 \text{ kgr} = 44.67 \text{ kgr}$$

Πυκνότητα πεδίου στον πυρήνα του τυμπάνου $B_c = 0.035 \text{ Wb/m}^2$
Απώλειες = 3.8 W/kg

$$\text{Απώλειες στον πυρήνα του τυμπάνου} = \frac{44.67 \times 3.8}{1000} = 0.17 \text{ kW}$$

5.21 Βάρος χαλκού στο τύμπανο

Διατομή αγωγού διαμέτρου 1mm:

$$q = \pi \cdot \frac{d^2}{4} = \pi \cdot \frac{1^2}{4} = \frac{\pi}{4} \text{mm}^2$$

6 τυλίγματα:3 τέτοιοι ημιαγωγοί:

$$\text{διατομή} = \frac{\pi}{4} \times 3 = 2.356 \text{mm}^2$$

μέσο μήκος μισού τυλίγματος (η ενός αγωγού)=700mm

Βάρος χαλκού= $2.356 \times 700 \times 10^{-9} \times 1000 \times 8.89 \times 48$ (αυλάκια) $\times 12$ (αγωγοί ανά αυλάκι)=8.45kg

5.22 Απώλειες και απόδοση του εναλλακτήρα

Αντίσταση τυμπάνου ανά φάση $r=0.0345\Omega$

Ρεύμα πλήρους φόρτισης $I=72.2\text{A}$

Απώλειες χαλκού= $3 \times I^2 \times r = 3 \times 72.2^2 \times 0.0345 =$ 0.54kW

Κατανεμημένες απώλειες και απώλειες δινορρευμάτων= 0.5 kW

Απώλειες σιδήρου στο δόντι του τυμπάνου 0.02035kW

Απώλειες σιδήρου στον πυρήνα του τυμπάνου 0.17 kW

Απώλειες τριβών 0.5 kW

Συνολικές απώλειες 1.73 kW

Ισχύς εξόδου του εναλλακτήρα με συντελεστή ισχύος
 $0.8 = 50 \times 0.8 = 40\text{kW}$

Απόδοση του εναλλακτήρα με πλήρες φορτίο με επαγωγικό συντελεστή

$$\text{ισχύς} = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{out}} + P_{\text{losses}}} = \frac{40}{40 + 1.73} \times 100\% = 96\%$$

Λαμβάνοντας υπόψη της απώλειες μαγνητικού πεδίου και τις απώλειες της διέγερσης $= 1.73 + 1.059 = 2.789 \text{ kW}$

Απόδοση εναλλακτήρα και συστήματος διέγερσης $= \frac{40}{40 + 2.789} \times 100\% = 93\%$

6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] https://fmcet.in/EEE/EE2355_uw.pdf

[2] [\]https://cse.umn.edu/irm/2-classes-magnetic-materials](https://cse.umn.edu/irm/2-classes-magnetic-materials)

[3] Design and Testing of Electrical Machines, M.V.Deshpande, PHI, 2010

[4] Ηλεκτρικές Μηχανές, 4η Έκδοση, Chapman Stephen, Εκδόσεις ΤΖΙΟΛΑ