

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΥ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αριθμός 1756

Μόνωση Ηλεκτρικών Μηχανών

Insulation of Electric Motors



ΣΠΟΥΔΑΣΤΗΣ: ΝΤΑΟΥΛΛΕ ΜΠΛΕΝΤΑΡ (6918)

ΕΠΟΠΤΕΥΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΧΑΡΑΛΑΜΠΙΑΚΟΣ ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ - ΝΕΚΤΑΡΙΟΣ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Ευχαριστώ τον Επιβλέπων καθηγητή κ. Χαραλαμπάκο Βσίλειο - Νεκταριο, γιατί μου έδωσε την ευκαιρία να ασχοληθώ με ένα ιδιαίτερα ενδιαφέρον θέμα, για την αμέριστη και ουσιαστική επιστημονική βοήθεια και καθοδήγηση που μου παρείχε. Τον ευχαριστώ θερμά για τις εξαιρετικά ωφέλιμες κριτικές παρατηρήσεις του στην επεξεργασία του θέματος αυτού.

Ακόμη ευχαριστώ την οικογένεια μου για τη στήριξη και την υπομονή τους σε όλη την διάρκεια των σπουδών μου.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η πτυχιακή αυτή εργασία γράφτηκε με σκοπό να δείξει και να αναλύσει αρχικά τα είδη των ηλεκτρικών μηχανών και πληροφορίες λειτουργίας τους. Στην συνέχεια αναλύονται τα είδη μονώσεων των ηλεκτρικών μηχανών και μια περιγραφή της διηλεκτρική αντοχής, καθώς και τα διάφορα αίτια γήρανσης της μόνωσης.

Στην συνέχεια γίνεται αναφορά στα συστήματα μόνωσης των περιελίξεων του στάτη και του ρότορα των μηχανών καθώς αναφέρονται και τα συστήματα που χρησιμοποιούν κάποιες εταιρίες.

Επίσης αναφέρεται και η κατασκευή του πυρήνα του στάτη και του ρότορα με γενικές πληροφορίες.

Έπειτα καταγράφονται όλα τα αίτια καταστροφής των περιελίξεων (άρα και της μόνωσης) στάτη και ρότορα με πολλές πληροφορίες.

Στο τελευταίο κεφάλαιο αναλύονται οι διάφορες δοκιμές που γίνονται σε μία μόνωση για να φανεί αν έχει υπέστη βλάβη.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ

1.1 Ηλεκτρικοί κινητήρες συνεχούς ρεύματος.....	6
1.2 Ηλεκτρικοί κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος.....	11

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΜΟΝΩΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ

2.1 Γενικά περί μονωτικών υλικών.....	23
2.2 Αέρια μονωτικά υλικά.....	24
2.3 Υγρά μονωτικά υλικά.....	25
2.4 Στερεά μονωτικά υλικά.....	26
2.5 Τα κυριότερα μονωτικά υλικά.....	27
2.6 Διηλεκτρική αντοχή.....	30
2.7 Γήρανση μονωτικών υλικών.....	32
2.7.1 Θερμική καταπόνηση.....	32
2.7.2 Ηλεκτρική Καταπόνηση.....	34
2.7.3 Περιβαλλοντική Καταπόνηση (Παράγοντες).....	36
2.7.4 Μηχανική Καταπόνηση.....	36
2.7.5 Ραδιενεργή (Ακτινοβολία) Καταπόνηση.....	37
2.7.6 Πολλαπλές Καταπονήσεις.....	38

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 : ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΜΟΝΩΣΗΣ ΣΤΑΤΗ

3.1 Σύστημα μόνωσης περιέλιξης στάτη προσδιορισμένης κατανομής.....	38
3.1.1 Μόνωση κλώνου (strand insulation).....	40
3.1.2 Μόνωση στροφής (turn insulation).....	40
3.1.3 Επιτοίχια μόνωση (Groundwall Insulation).....	41
3.2 Χαρακτηριστικά συστήματος μόνωσης περιελίξεων στάτη τυχαίας κατανομής.....	43
3.3 Μόνωση Αγωγών (Συρμάτων).....	44
3.4 Φασική και επιτοίχια Μόνωση.....	47
3.5 Εμπότιση Και Μεταχείριση Βερνικιού.....	47
3.6 Μέθοδοι Χαρτοδεσίας Της επιτοίχιας Μόνωσης Στάτη.....	48
3.7 Συστήματα και Υλικά Διαφόρων Εταιριών.....	49
3.7.1 Siemens.....	50
3.7.2 U.S Motors.....	51
3.7.3 Brush Electrical Machines.....	52
3.7.4 General Electric Company.....	52

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΜΟΝΩΣΗΣ ΠΕΡΙΕΛΙΞΕΩΝ ΔΡΟΜΕΑ.....53

4.1 Μόνωση Εγκοπών δρομέα και μόνωση σημείου περιστροφής σπειρών.....	55
4.2 Μόνωση Συλλέκτη.....	59
4.3 Τελική μόνωση περιέλιξης και Blocking insulation.....	59
4.4 Μόνωση Δακτυλίου Συγκράτησης.....	60
4.5 Αμεση Ψύξη Μόνωσης Δρομέα.....	61
4.6 Δακτυλιοφόροι Δρομείς.....	62
4.7 Συστήματα και Υλικά Διαφόρων Εταιριών.....	63
4.7.1 Brush Electrical Machines Ltd.....	63

4.7.2 Electric Machinery.....	63
<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 : ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΠΥΡΗΝΑ ΣΤΑΤΗ ΚΑΙ ΔΡΟΜΕΑ</u>	
5.1 Κατασκευή Πυρήνα Στάτη Γενικά.....	64
5.2 Κατασκευή Πυρήνα Δρομέα.....	66
<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 : ΑΙΤΙΕΣ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΗΣ.....</u>	
6.1 Αιτίες Καταστροφής Περιελίξεων Στάτη.....	68
6.1.1 Θερμική Γύραση.....	68
6.1.2 Ανεπαρκής Εμποτισμός Ρητίνης ή Ανεπαρκής Εμβάπτιση.....	71
6.1.3 Παροδικές Μεταβολές Τάσης.....	74
6.1.4 Ανεπαρκής Απόσταση Τελικής Περιέλιξης.....	75
6.1.5 Επαναλαμβανόμενες Υπερτάσεις Λόγω Μετατροπέων.....	77
6.1.6 Κακές Ηλεκτρικές Συνδέσεις.....	79
6.2 Αιτίες Κσταστροφής Περιελίξεων Δρομέα.....	79
6.2.1 Δακτυλιοφόρου Δρομέα.....	80
6.2.2 Δρομέας με Εκτυπους Πόλους.....	83
<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 : ΔΟΚΙΜΕΣ ΜΟΝΩΣΗΣ ΔΡΟΜΕΑ ΚΑΙ ΣΤΑΤΗ.....</u>	
7.1 Αντίσταση Μόνωσης και Δείκτης Πόλωσης.....	88
7.2 Δοκιμή DC Hipot.....	91
7.3 Θερμά Σημεία σε Κακές Συνδέσης (Υψηλό ρεύμα-υπέρυθρη κάμερα).....	92
7.4 Δοκιμή AC Hipot.....	93
7.5 Αναβάθμιση Χωρητικότητας Στάτη.....	94
7.6 Συντελεστής Απωλειών.....	95
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	97
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	98

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ

1.1 Ηλεκτρικοί μηχανές συνεχούς ρεύματος

Κινητήρες συνεχούς ρεύματος είναι οι κινητήρες που τροφοδοτούνται με συνεχές ρεύμα και μετατρέπουν την ηλεκτρική ενέργεια που προσλαμβάνουν σε μηχανική.

Οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος ήταν πολύ διαδεδομένοι, τουλάχιστον μέχρι και την δεκαετία του 1960. Στο γεγονός αυτό κυρίως οφείλεται στην ευκολία ελέγχου της ταχύτητας των κινητήρων συνεχούς ρεύματος. Η ραγδαία ανάπτυξη των ηλεκτρονικών ισχύος και η αξιοποίηση τους σε ηλεκτρονικά κυκλώματα οδήγησε αντιμετώπισε σε μεγάλο βαθμό τα μειονεκτήματα στον έλεγχο στροφών των επαγωγικών κινητήρων. Για το λόγο αυτό οι επαγωγικοί κινητήρες αξιοποιούνται στις περισσότερες σύγχρονες εφαρμογές κινητηρίων συστημάτων.

Αρχή λειτουργίας του κινητήρα συνεχούς ρεύματος

Τα βασικά μέρη ενός απλού κινητήρα συνεχούς ρεύματος φαίνονται στο σχήμα 1.1. Η λειτουργία μιας μηχανής συνεχούς ρεύματος σαν κινητήρα στηρίζεται στην ανάπτυξη δυνάμεων Laplace σε ρευματοφόρους αγωγούς από μαγνητικά πεδία. Για να επιτευχθεί αυτό θα πρέπει πρώτα να δημιουργηθεί μαγνητικό πεδίο στο εσωτερικό της μηχανής μέσω της τροφοδοσίας του τυλίγματος διέγερσης και στην συνέχεια να τροφοδοτηθεί με συνεχές ρεύμα το τυλίγμα του δρομέα μέσω των ψηκτρών και του συλλέκτη. Ως αποτέλεσμα θα έχουμε την ανάπτυξη δύναμης Laplace σε κάθε αγωγό του τυλίγματος του δρομέα ίση με:

$$\vec{F} = [\vec{I} \times \vec{B}] \cdot l$$

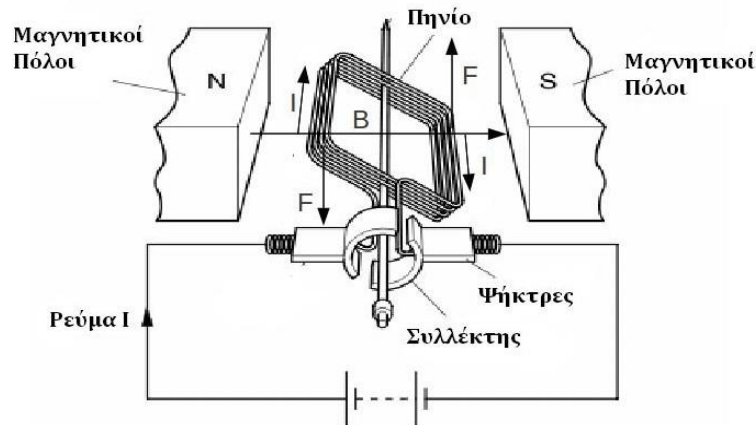
Αν υποθέσουμε ότι οι αγωγοί του τυλίγματος είναι κάθετοι στο μαγνητικό πεδίο τότε το μέτρο της δύναμης που θα ασκείται σε αυτό θα είναι ίσο με:

$$F = 2NIBl$$

Όπου N ο αριθμός σπειρών του τυλίγματος του δρομέα. Η ροπή στρέψης που θα αναπτυχθεί στον δρομέα θα είναι ίση με:

$$\tau = (2NIBl) \cdot r$$

Όπου r η ακτίνα του δρομέα.



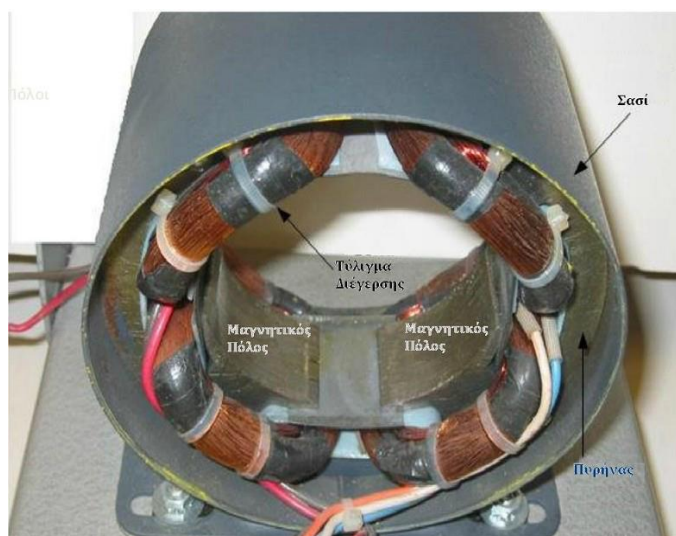
Σχήμα 1.1 : Τα βασικά μέρη ενός απλού κινητήρα συνεχούς ρεύματος.

Από την στιγμή που ο δρομέας του κινητήρα αρχίζει να περιστρέφεται αναπτύσσεται στα τυλίγματα του δρομέα μιας αντιηλεκτρεγερτική δύναμη η οποία αντιτίθεται στην τάση της πηγής τροφοδοσίας του δρομέα. Συνεπώς και στην περίπτωση του κινητήρα συνυπάρχουν τα φαινόμενα ανάπτυξης δυνάμεων Laplace (εμφανίζονται πρώτα) και επαγωγής τάσης στους αγωγούς (η τάση αναπτύσσεται αφού ο δρομέας αρχίσει να περιστρέφεται).

Τα μέρη μιας πραγματικής μηχανής συνεχούς ρεύματος

Μια πραγματική μηχανή συνεχούς ρεύματος αποτελείται από δυο βασικά μέρη, τον στάτη και τον δρομέα. Στον στάτη βρίσκονται οι μαγνητικοί πόλοι οι οποίοι είναι συνήθως ηλεκτρομαγνήτες. Στην περίπτωση αυτή στους πόλους της μηχανής βρίσκονται και τα τυλίγματα διέγερσης, σειράς και παράλληλα. Οι μαγνητικοί πόλοι είναι υπεύθυνοι για την δημιουργία του μαγνητικού πεδίου στο εσωτερικό της μηχανής. Μεταξύ των κύριων μαγνητικών πόλων βρίσκονται οι βοηθητικοί πόλοι οι οποίοι σαν σκοπό έχουν την αποφυγή σπινθηρισμών στον συλλέκτη κατά την λειτουργία της μηχανής υπό φορτίο. Τέλος, στον στάτη βρίσκονται ο ψηκτροφορέας με τις ψήκτρες καθώς και το κιβώτιο ακροδεκτών. Οι ψήκτρες χρησιμεύουν για την σύνδεση του τυλίγματος του δρομέα με το εξωτερικό κύκλωμα που περιλαμβάνει την πηγή τροφοδοσίας.

Στον δρομέα βρίσκεται το επαγωγικό τύμπανο, ο συλλέκτης και ο ανεμιστήρας. Ο συλλέκτης είναι χωρισμένος σε τομείς, οι οποίοι είναι μονωμένοι μεταξύ τους. Το επαγωγικό τύμπανο αποτελείται από το τύλιγμα και τον πυρήνα. Το τύλιγμα του επαγωγικού τυμπάνου αποτελείται από ομάδες (πηνία), κάθε μια από τις οποίες ξεκινά από ένα τομέα του συλλέκτη και καταλήγει σε έναν άλλο. Οι πλευρές των ομάδων (ονομάζονται και στοιχεία) τοποθετούνται μέσα σε αυλάκια στην περιφέρεια του τυμπάνου.



Σχήμα 1.2 : Ο στάτης μιας μηχανής συνεχούς ρεύματος.

Υπάρχουν δυο βασικοί τρόποι συνδεσμολογίας του τυλίγματος του επαγωγικού τυμπάνου, το βροχοτύλιγμα και το κυματοτύλιγμα.

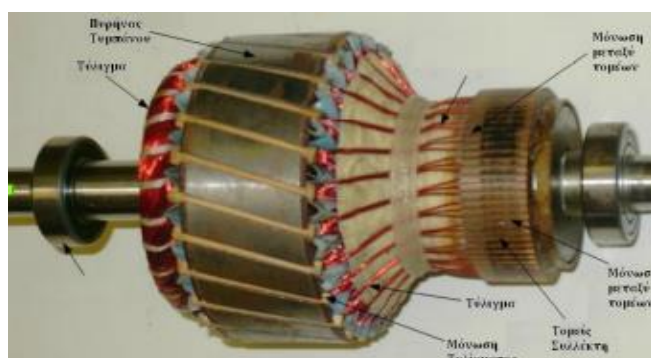
Σε ένα απλό βροχοτύλιγμα ισχύουν τα εξής:

1. Ο αριθμός των τομέων του συλλέκτη είναι ίσος με τον αριθμό των ομάδων του τυλίγματος.
2. Το τύλιγμα του δρομέα σχηματίζει παράλληλους κλάδους. Ο αριθμός των κλάδων αυτών είναι ίσος με τον αριθμό των πόλων της μηχανής.
3. Ο αριθμός των ψηκτρών ισούται με τον αριθμό των πόλων της μηχανής.

Στο απλό κυματοτύλιγμα ισχύει το εξής:

1. Υπάρχουν μόνο δυο παράλληλοι κλάδοι ανεξάρτητα από το αριθμό των πόλων της μηχανής.

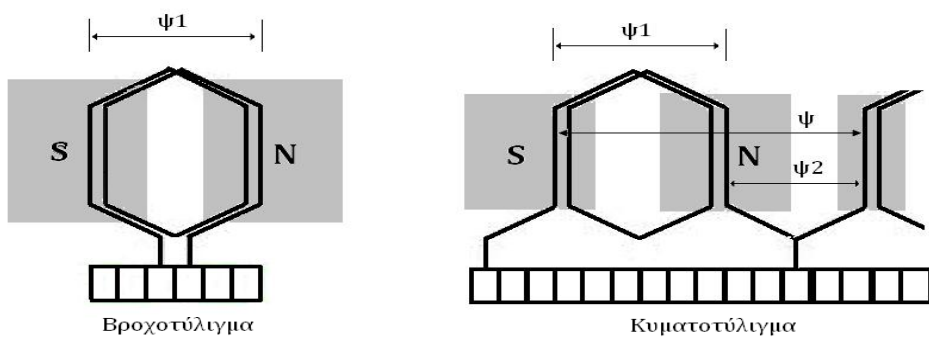
Η απόσταση των στοιχείων κάθε ομάδας καλείται πρώτο μερικό βήμα ψ_1 . Η απόσταση του δεύτερου στοιχείου μιας ομάδας από το πρώτο στοιχείο της αμέσως επόμενης, σε σειρά συνδεδεμένης, ομάδας ονομάζεται δεύτερο μερικό βήμα ψ_2 . Τέλος η απόσταση μεταξύ του πρώτου στοιχείου μιας ομάδας και του πρώτου στοιχείου της αμέσως επόμενης συνδεδεμένης σε σειρά ομάδας, ονομάζεται βήμα του τυλίγματος.



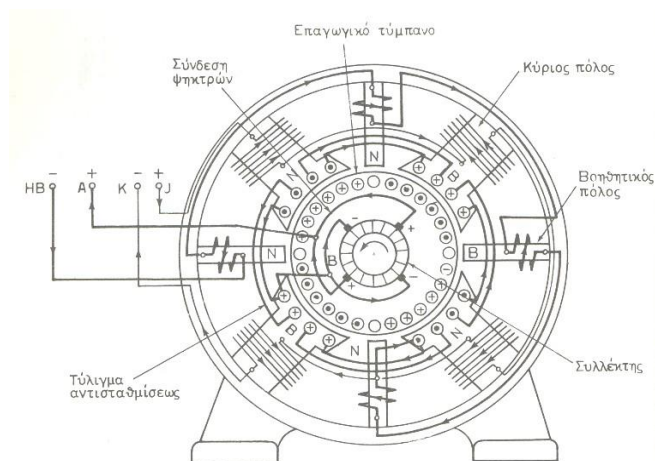
Σχήμα 1.3 : Ο δρομέας μιας μηχανής συνεχούς ρεύματος.



Σχήμα 1.4 : Λεπτομέρεια του ψηκτροφορέα και των ψηκτρών μιας μηχανής συνεχούς ρεύματος.



Σχήμα 1.5 : Συνδέσεις ομάδων τυλιγμάτων μηχανών συνεχούς ρεύματος.



Σχήμα 1.6 : Σχηματική αναπαράσταση μηχανής συνεχούς ρεύματος.

Είδη μηχανών συνεχούς ρεύματος και Απώλειες ηλεκτρικών μηχανών συνεχούς ρεύματος

Οι μηχανές συνεχούς ρεύματος διαθέτουν δυο είδη τυλιγμάτων διέγερσης. Το τύλιγμα παράλληλης διέγερσης και το τύλιγμα διέγερσης σειράς. Ανάλογα με το ποιο από τα τυλίγματα διέγερσης χρησιμοποιούμε προκύπτουν και οι διαφορετικές κατηγορίες

ηλεκτρικών μηχανών. Συγκεκριμένα διακρίνουμε τις εξής κατηγορίες για τους κινητήρες συνεχούς ρεύματος :

- Κινητήρες συνεχούς ρεύματος ξένης διέγερσης (χρησιμοποιείται μόνο το τύλιγμα παράλληλης διέγερσης).
- Κινητήρες συνεχούς ρεύματος παράλληλης διέγερσης (χρησιμοποιείται μόνο το τύλιγμα παράλληλης διέγερσης).
- Κινητήρες συνεχούς ρεύματος, διέγερσης σειράς (χρησιμοποιείται μόνο το τύλιγμα διέγερσης σειράς).
- Κινητήρες συνεχούς ρεύματος σύνθετης διέγερσης (χρησιμοποιούνται και τα δυο τυλίγματα).

Απώλειες ηλεκτρικών μηχανών συνεχούς ρεύματος

Οι απώλειες ισχύος των ηλεκτρικών μηχανών συνεχούς ρεύματος διακρίνονται σε ηλεκτρικές (απώλειες χαλκού), μαγνητικές (απώλειες σιδήρου ή πυρήνα) και μηχανικές. Οι απώλειες χαλκού είναι απώλειες που οφείλονται στην ροή ρεύματος στα τυλίγματα του δρομέα (επαγωγικό τύμπανο) και του στάτη (τύλιγμα διέγερσης, βοηθητικοί πόλοι). Οι απώλειες σιδήρου οφείλονται στις απώλειες λόγω μαγνητικής υστέρησης και δινορρευμάτων στον πυρήνα της μηχανής. Οι απώλειες μαγνητικής υστέρησης εξαρτώνται από τα μαγνητικά χαρακτηριστικά του υλικού κατασκευής του πυρήνα (την επιφάνεια του βρόχου υστέρησης) και από την συχνότητα της επαγόμενης Η.Ε.Δ. στο τύλιγμα του δρομέα. Οι απώλειες δινορρευμάτων εξαρτώνται από την συχνότητα της επαγόμενης Η.Ε.Δ. και την πυκνότητα της μαγνητικής ροής. Επειδή η συχνότητα της επαγόμενης Η.Ε.Δ. εξαρτάται από την ταχύτητα περιστροφής μπορούμε να θεωρήσουμε ότι οι απώλειες σιδήρου εξαρτώνται από την ταχύτητα περιστροφής του δρομέα της μηχανής. Τέλος οι μηχανικές απώλειες οφείλονται στις τριβές στα έδρανα του άξονα της μηχανής και την αντίσταση του αέρα (απώλειες εξαερισμού) που προκαλείται από την ειδική πτερωτή που είναι προσαρμοσμένη στον άξονα για να επιτυγχάνεται η ψύξη της μηχανής.



Σχήμα 1.7 : Διάγραμμα ροής ισχύος κινητήρα συνεχούς ρεύματος .

1.2 Ηλεκτρικοί κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος

Βασικές αρχές λειτουργίας

Το μαγνητικό πεδίο είναι αυτό που δημιουργεί μια μορφή σύνδεσης μεταξύ ηλεκτρικού και μηχανικού συστήματος στις ηλεκτρικές μηχανές. Οι μαγνητικές δυνάμεις παράγουν μηχανική ροπή. Το μαγνητικό πεδίο επάγει τάση στα τυλίγματα της μηχανής σύμφωνα με τον νόμο του Faraday.

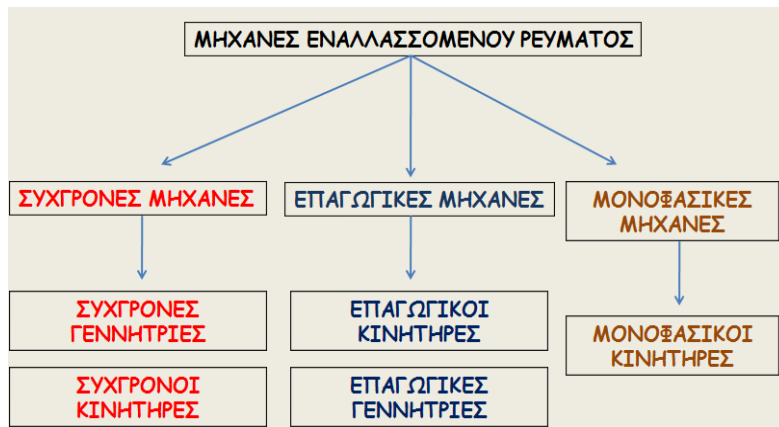
Σύμφωνα με τον Νόμο του Faraday, αν μέσα από μια σπείρα ενός πηνίου διέρχεται μαγνητική ροή, τότε στα άκρα της επάγεται τάση που είναι ανάλογη προς τον ρυθμό μεταβολής της μαγνητικής ροής ως προς το χρόνο:

$$e_{ind} = - \left(\frac{d\Phi}{dt} \right)$$

Εάν έχουμε N σπείρες:

$$e_{ind} = -N \frac{d\Phi}{dt}$$

Είδη μηχανών εναλλασσόμενου ρεύματος



Σχήμα 1.8 : Είδη μηχανών εναλλασσόμενου ρεύματος.

Οι μηχανές αυτές αποτελούν τους κυρίαρχους μετατροπείς από ηλεκτρική σε μηχανή ισχύ και αντίστροφα. Αποτελούν το 80% των ηλεκτρικών μηχανών του πλανήτη. Μπορεί να είναι από λίγα Watt μέχρι 30MW. Οι ασύγχρονες μηχανές, λόγω της στιβαρότητας της κατασκευής, χρησιμοποιούνται κατά κόρο ως ηλεκτρικοί κινητήρες, καλύπτοντας σχεδόν το σύνολο των βιομηχανικών εφαρμογών. Επίσης έχουν καθιερωθεί και ως ανεμογεννήτριες. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, μέσω της προσλαμβάνουσας μηχανικής ενέργειας από τον άνεμο, η ασύγχρονη μηχανή λειτουργεί σε υπερσύγχρονο αριθμό στροφών ως γεννήτρια πλέον, παρέχοντας

ηλεκτρική ισχύ στο δίκτυο με το οποίο είναι διασυνδεδεμένη. Οι σύγχρονες μηχανές χρησιμοποιούνται ως επί το πλείστον ως γεννήτριες. Το σύνολο σχεδόν της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας παγκοσμίως, παράγεται από σύγχρονες γεννήτριες μεγάλης ισχύος. Επίσης μπορεί να είναι μονοφασικές ή τριφασικές.

Αντικατέστησαν τις Μηχανές Συνεχούς Ρεύματος λόγω:

- απλής κατασκευής
- στιβαρότητας
- μακροζωίας
- συντήρησης
- δυνατότητες ελέγχου

Βασική δομή μιας μηχανής εναλλασσομένου ρεύματος

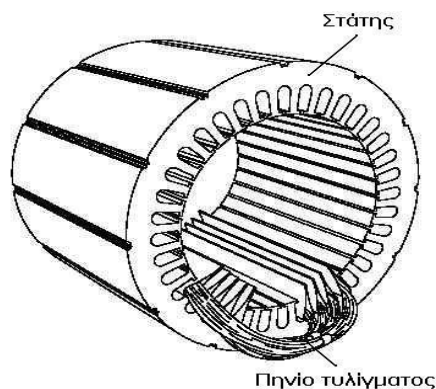
Οι μηχανές εναλλασσόμενου ρεύματος αποτελούνται από δυο μέρη, το σταθερό τμήμα της που λέγεται στάτης ενώ το άλλο βρίσκεται επί του άξονος της μηχανής και λέγεται δρομέας, ο οποίος έχει τη δυνατότητα να στρέφεται.

Στο στάτη είναι τοποθετημένα τυλίγματα, ο αριθμός των οποίων εξαρτάται από τον αριθμό των φάσεων. Τα τυλίγματα του στάτη είναι υπεύθυνα για την παραγωγή του κύριου μαγνητικού πεδίου, τροφοδοτούνται με εναλλασσόμενη τάση είτε απευθείας από το δίκτυο είτε μέσω αντιστροφέα.

Η κατασκευαστική δομή του στάτη αποτελείται από ελάσματα πολύ καλά μονωμένα μεταξύ τους, ώστε να αποφεύγεται η δημιουργία δινορευμάτων σε αυτόν. Όπως σημειώθηκε πιο πάνω, ο δρομέας αποτελεί ουσιαστικά το κινούμενο μέρος της μηχανής. Στην περίπτωση που η μηχανή λειτουργεί ως κινητήρας, όταν περιστρέφεται προσφέρει κινητική ενέργεια, ενώ όταν λειτουργεί ως γεννήτρια δέχεται κινητική ενέργεια. Ο δρομέας και αυτός επίσης είναι κατασκευασμένος από ελάσματα για τον ίδιο λόγο, δηλαδή τη μείωση των απωλειών λόγω των δινορευμάτων.

Στάτης

Ο στάτης είναι ένας κούφιος κύλινδρος, ο οποίος αποτελείται από ομοιόμορφα διανεμημένες αύλακες στο εσωτερικό του.



Σχήμα 1.9 : Στάτης μηχανής επαγωγής.

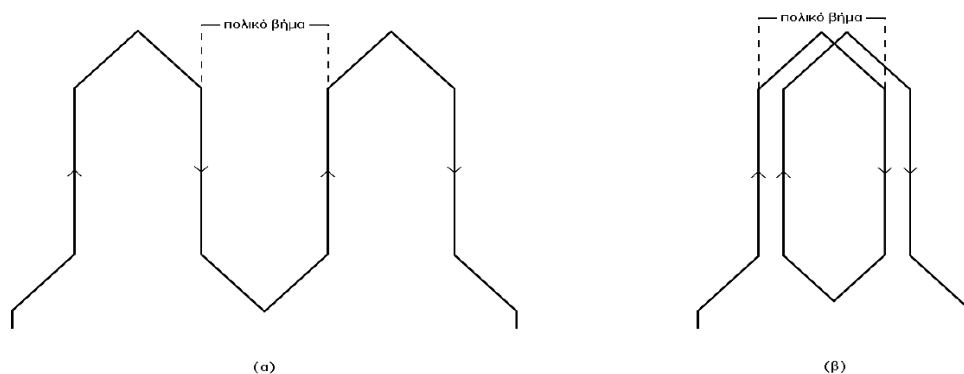
Σε αυτές τις διανεμημένες αύλακες τοποθετούνται τα σύρματα, για την δημιουργία ενός πλήρους τυλίγματος όμοια πηνία τοποθετούνται σε απέναντι αύλακες, ενώ στη συνέχεια συνδέονται μεταξύ τους σε ομάδες. Για παράδειγμα, στους τριφασικούς κινητήρες τα πηνία τους συνδέονται σε σχήμα αστέρα ή τριγώνου.

Επίσης, υπάρχουν τυλίγματα διπλής στρώσης, όπου κάθε αύλακας περιέχει δυο πλευρές πηνίου: η μια βρίσκεται στην κορυφή ενώ η άλλη στο κάτω μέρος του αύλακα.

Ο αριθμός των πόλων εξαρτάται από το τύλιγμα και την τροφοδότηση της μηχανής.

Το βρογχοτύλιγμα και το κυματοειδές είναι αυτά που χρησιμοποιούνται περισσότερο.

Το βρογχοτύλιγμα χρησιμοποιείται σε μηχανές με λίγους πόλους και υψηλές ταχύτητες, ενώ το κυματοειδές σε πολυπολικές μηχανές χαμηλών ταχυτήτων.

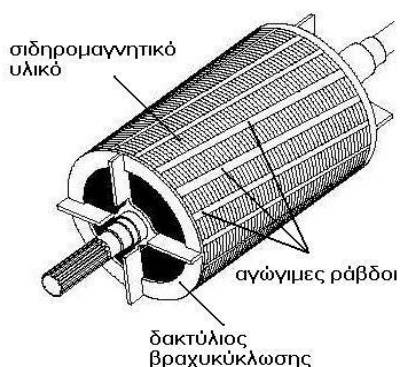


Σχήμα 1.10 : Τα τυλίγματα των ηλεκτρικών μηχανών: (α) κυματοειδές, (β) βρογχοειδές.

Δρομέας

Ο δρομέας μιας μηχανής επαγωγής έχει και αυτός τύλιγμα το οποίο είναι ηλεκτρικά κλειστό. Οι πιο διαδεδομένοι τύποι δρομέων που χρησιμοποιούνται είναι δυο.

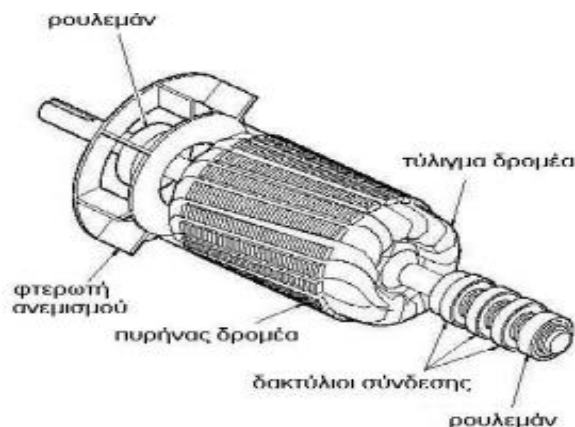
(α) Τύλιγμα κλωβού: Ο συγκεκριμένος τύπος δρομέα αποτελείται από αγωγίμους ράβδους, κατασκευασμένοι από αλουμίνιο ή χαλκό, τοποθετημένοι σε αύλακες στο σιδερένιο πύρινα του δρομέα και βραχυκυκλωμένοι στα άκρα τους με δακτυλίους.



Σχήμα 1.11 : Δρομέας με τύλιγμα κλωβού.

(β) Δακτυλιοφόρος Δρομέας: Αυτού του τύπου δρομέας έχει πολυφασικό τύλιγμα όμοιο με αυτό του στάτη, επίσης έχει και τον ίδιο αριθμό πόλων. Η σύνδεση των

ακροδεκτών του τυλίγματος γίνεται μέσω δακτυλίων και ψυκτῆρων με εξωτερικές ρυθμιζόμενες αντιστάσεις που χρησιμοποιούνται για την αύξηση της αντίστασης του δρομέα κατά την εκκίνηση του κινητήρα.



Σχήμα 1.12 : Δρακτυλιοφόρος δρομέας.

Συχνότητα και ολίσθηση

Η επαγόμενη τάση στους αγωγούς του δρομέα εξαρτάται από τη σχετική κίνηση του δρομέα ως προς τα μαγνητικά πεδία. Η σχετική κίνηση του δρομέα περιγράφεται από δυο μεγέθη, το πρώτο είναι η διαφορά ταχύτητας του δρομέα από τη σύγχρονη ταχύτητα και ορίζεται ως ταχύτητα ολίσθησης:

$$n_r = n_s - n$$

n_r : η ταχύτητα ολίσθησης της μηχανής.

n_s : η ταχύτητα των μαγνητικών πεδίων ή σύγχρονος αριθμός στροφών.

n : η μηχανική ταχύτητα του δρομέα.

Επίσης, ο σύγχρονος αριθμός στροφών n_s ορίζεται συναρτήσει της συχνότητας ως εξής:

$$n_s = \frac{f_s}{p}$$

f_s : η συχνότητα του εναλλασσομένου ηλεκτρικού ρεύματος στο στάτη.

p : είναι ο αριθμός των μαγνητικών πόλων.

Ακόμα η ταχύτητα ολίσθησης μπορεί να εκφραστεί συναρτήσει της συχνότητας ως εξής:

$$n_r = \frac{f_r}{p}$$

f_r : η συχνότητα του εναλλασσομένου ηλεκτρικού ρεύματος στο δρομέα.
Από τις παραπάνω σχέσεις προκύπτει ότι:

$$f_s = f_r + np$$

f_s : στάτης

f_r : δρομέας

n : αριθμός στροφών δρομέα

Το δεύτερο βασικό μέγεθος που χαρακτηρίζει τη σχετική κίνηση του δρομέα ως προς το μαγνητικό πεδίο είναι η ολίσθηση (slip), η οποία ορίζεται ως η ποσοστιαία διαφορά της ταχύτητας περιστροφής του δρομέα από τη σύγχρονη ταχύτητα του στρεφόμενου μαγνητικού πεδίου, και εκφράζεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$S = \frac{n_s - n}{n_s} = \frac{n_r}{n_s}$$

Όταν έχουμε κατάσταση ηρεμίας δηλαδή ο δρομέας μια μηχανής επαγωγής είναι ακινητοποιημένος $n=0$ τότε ισχύει $s=1$, ενώ όταν ο δρομέας στρέφεται με σύγχρονη ταχύτητα δηλαδή $n=n_s$ ολίσθηση είναι μηδέν $s=0$, επίσης για $n > n_s$ όταν δηλαδή ο δρομέας στρέφεται πιο γρήγορα από το στρεφόμενο πεδίο, η ολίσθηση είναι αρνητική. Η συχνότητα στο δρομέα σχετίζεται με την ηλεκτρική συχνότητα στο στάτη ως εξής.

$$f_r = sf_s$$

Στην κατάσταση αδράνειας ($n=0$ rpm) ισχύει $s=1$, οπότε η συχνότητα του δρομέα γίνεται $f_r = f_s$.

Ενώ για $n=n_s$ έχουμε $s=0$ οπότε η συχνότητα του δρομέα είναι: $f_r=0$ Hz

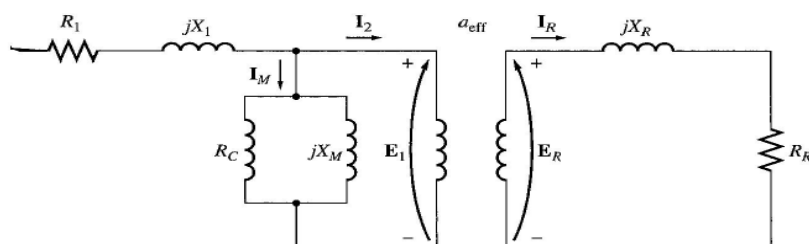
Ισοδύναμο κύκλωμα επαγωγικού κινητήρα

Έχοντας υπόψη την αρχή λειτουργίας των κινητήρων επαγωγής συμπεραίνουμε ότι η λειτουργία τους είναι παρόμοια με αυτή του μετασχηματιστή, επομένως το ισοδύναμο κύκλωμα του κινητήρα θα μοιάζει αρκετά με αυτό του μετασχηματιστή. Μπορεί να θεωρηθεί ότι το πρωτεύον ενός μετασχηματιστή με αντίσταση R_1 είναι στην ουσία το τύλιγμα του στάτη, το οποίο αντικατοπτρίζει τις θερμικές απώλειες των αγωγών του. Η σύζευξη των επιμέρους κυκλωμάτων του κινητήρα δεν είναι τόσο καλή εξαιτίας του διακένου συγκριτικά με αυτή του μετασχηματιστή.

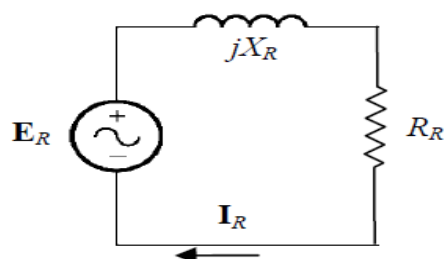
Αυτό ισχύει επειδή η συνολική μαγνητική ροή που δημιουργεί το κύκλωμα του στάτη αναλύεται σε δυο μέρη, το ένα μέρος της σχετίζεται με αυτό του κυκλώματος του δρομέα και το άλλο στη ροή σκέδασης η οποία παριστάνεται μέσω της αντίδρασης X_1 . Ακόμα το ρεύμα μαγνήτισης είναι το I_M (ο λόγος της ανάπτυξης της μαγνητικής ροής) στο οποίο αντιστοιχίζεται η αντίδραση X_M . Οι απώλειες υστέρησης και δινορευμάτων

στο σιδηρομαγνητικό υλικό περιγράφονται με την ωμική αντίσταση R_C . Οι εσωτερικές τάσεις E_1 και E_R σχετίζονται με τον λόγο μετασχηματισμού a .

Η τάση E_R είναι αυτή που επάγεται στο δρομέα και δημιουργεί την κυκλοφορία του ηλεκτρικού ρεύματος στο κύκλωμά του. Σημειώνεται ότι η βασική διαφορά μεταξύ των ισοδύναμων κυκλωμάτων του μετασχηματιστή και του κινητήρα επαγωγής παρουσιάζεται σε αυτά τα μεγέθη του δρομέα που προέρχονται από την επίδραση της μεταβολής της συχνότητας του δρομέα στα μεγέθη E_R , R_R , X_R .



Σχήμα 1.13: Ισοδύναμο κύκλωμα επαγωγικού κινητήρα.



Σχήμα 1.14: Ισοδύναμο κύκλωμα μόνο του δρομέα.

Η σχετική ταχύτητα του δρομέα ως προς το πεδίο του στάτη εξαρτάται άμεσα από την επαγόμενη τάση στους αγωγούς του, δηλαδή όσο πιο μεγάλη η σχετική ταχύτητα τόσο πιο μεγάλη και η επαγόμενη τάση στο δρομέα. Ποιο συγκεκριμένα, στην εκκίνηση του κινητήρα ο δρομέας έχει μηδενική ταχύτητα και η επαγόμενη τάση είναι η μέγιστη δυνατή (E_{R0}), ενώ όταν ο δρομέας περιστρέφεται με τη σύγχρονη ταχύτητα η τάση στο δρομέα είναι μηδέν. Για όλες της υπόλοιπες τιμές της ταχύτητας περιστροφής η επαγόμενη τάση είναι ανάλογη της ολίσθησης.

$$E_R = S E_{R0}$$

Η αντίδραση του δρομέα X_R εξαρτάται από την αυτεπαγωγή και από τη συχνότητα του ρεύματός που τον διαρρέει. Επειδή όμως, η συχνότητα του ρεύματος του δρομέα συνδέεται άμεσα με αυτή του στάτη μέσω της σχέσης $\omega_R = S \omega_e$, προκύπτει πως η αντίδραση του δρομέα εκφράζεται ως εξής:

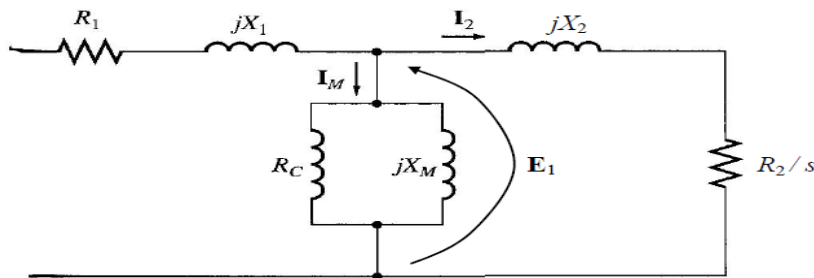
$$X_R = \omega_R L_R = S \omega_e L_R = S X_{R0}$$

X_{R0} είναι η αντίδραση του δρομέα όταν αυτός δεν περιστρέφεται. Ενώ για το ρεύμα του δρομέα ισχύει:

$$I_R = \frac{E_R}{R_R + jX_R} \Rightarrow I_R = \frac{E_{R0}}{\frac{R_R}{S} + jX_{R0}}$$

Συμπεραίνουμε πως το κύκλωμα του δρομέα μπορεί να θεωρηθεί ότι τροφοδοτείται από μια σταθερή πηγή τάσης E_{R0} ενώ επίσης περιλαμβάνει μια (ισοδύναμη) μεταβλητή σύνθετη αντίσταση $R_R/S + jX_{R0}$. Ακόμα βλέπουμε πως όταν η ολίσθηση είναι μικρή το ωμικό μέρος παίρνει μεγάλες τιμές ($R_R/S \gg X_{R0}$) ενώ το ρεύμα μεταβάλλεται γραμμικά με την ολίσθηση, αντίθετα όταν η ολίσθηση παίρνει μεγάλες τιμές ($R_R/S \ll X_{R0}$) το ρεύμα προσεγγίζει σταθερή τιμή.

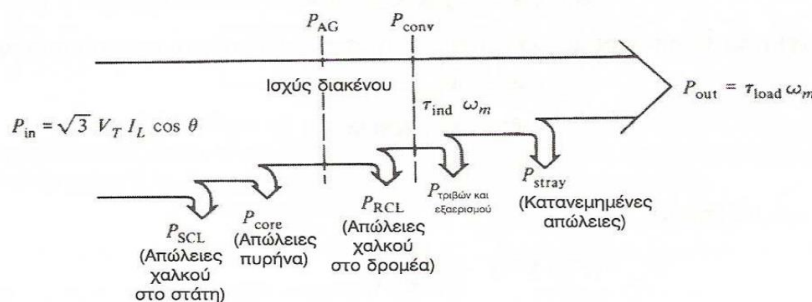
Τέλος, για το ακόλουθο τελικό ισοδύναμο κύκλωμα του επαγωγικού κινητήρα συνυπολογίζουμε την τιμή του λόγου μετασχηματισμού a και ορίζουμε τις τιμές $E_1 = a E_{R0}$, $I_2 = I_R / a$, $R_2 = a^2 R_R$ και $X_2 = a^2 X_{R0}$.



Σχήμα 1.15 : Τελικό κυκλωματικό ισοδύναμο του επαγωγικού κινητήρα.

Απώλειες και διάγραμμα ροής ισχύος

Επειδή ο δρομέας ενός επαγωγικού κινητήρα είναι βραχυκυκλωμένος στην έξοδο της μηχανής δεν εμφανίζεται ηλεκτρική ισχύς αλλά μηχανική. Στο παρακάτω διάγραμμα ροής παρουσιάζονται οι απώλειες στον κινητήρα επαγωγής καθώς και η σχέση ανάμεσα στην ηλεκτρική ισχύ εισόδου και στη μηχανική ισχύ εξόδου.



Σχήμα 1.16 : Διάγραμμα ροής- Απώλειας κινητήρων.

Σύμφωνα με το διάγραμμα ροής βλέπουμε ότι η ηλεκτρική ισχύς που παράγεται από το τριφασικό σύστημα ισχύς εισέρχεται στον κινητήρα και εξέρχεται ως μηχανική.

Στην συνέχεια οι θερμικές απώλειες στο τύλιγμα χαλκού του στάτη είναι οι πρώτες που συναντάμε.

$$P_{scl} = I^2 R$$

Ενώ συνέχεια έχουν οι:

P_{core} όπου είναι οι απώλειες στον πυρήνα, δηλαδή οι απώλειες υστέρησης δινορευμάτων του μετάλλου της μηχανής.

P_{AG} η ισχύς που έχει απομείνει διέρχεται από το διάκενο και μετατρέπεται ως εξής:

P_{RCL} θερμικές απώλειες στα τυλίγματα του δρομέα.

P_{conv} η εναπομένουσα ηλεκτρική ενεργεία μετατρέπεται σε μηχανική.

$P_{F\&W}$ η μηχανικές απώλειες δηλαδή οι απώλειες τριβών και εξερισμού.

P_{stray} κατανεμημένες απώλειες που δεν μπορούν να ενταχθούν σε κάποια από τις προηγούμενες κατηγορίες απωλειών, μαζί με τις $P_{F\&W}$ αποτελούν τις απώλειες περιστροφής της μηχανής.

P_{out} είναι η ισχύς εξόδου της μηχανής η ισχύς δηλαδή που έχει απομείνει.

Η P_{out} δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$P_{out} = T_{load} \omega_m$$

Η ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα και οι απώλειες περιστροφής είναι ανάλογες, δηλαδή όσο αυξάνεται η ταχύτητα περιστροφής αυξάνονται και οι απώλειες. Αντίθετα, οι απώλειες του πυρήνα μικραίνουν όσο μεγαλώνει η ταχύτητα του κινητήρα.

Χαρακτηριστική ροπής – στροφών

Η γενική εξίσωση για τη σχέση της επαγόμενης ροπής του κινητήρα με την ταχύτητα περιστροφής του βγαίνει με βάση το ισοδύναμο κύκλωμα και το διάγραμμα ροής.

$$T_{ind} = \frac{3V_{TH}^2 \frac{R_2}{S}}{\omega_{sync} \left[\left(R_{TH} + \frac{R_2}{S} \right)^2 + (X_{TH} + X_2)^2 \right]}$$

Η τάση V_{th} είναι η τάση, όταν δε συνδέεται φορτίο στους ακροδέκτες :

$$V_{th} = \frac{jX_m}{R_1 + jX_1 + jX_m} V_\phi$$

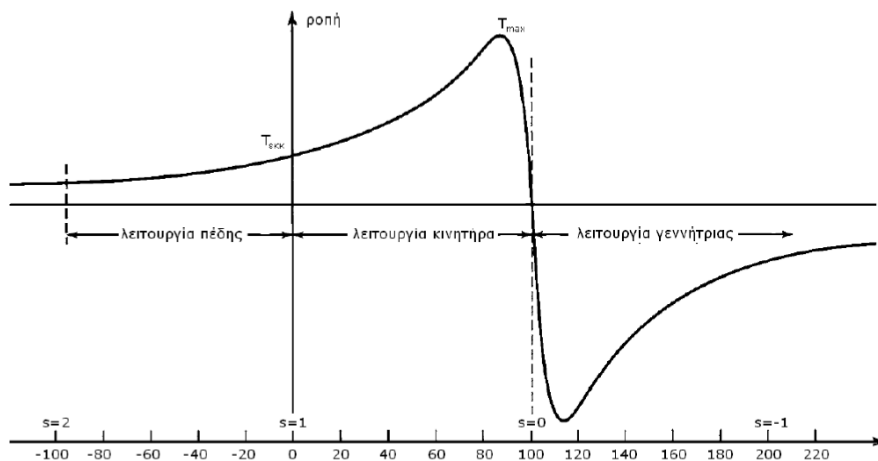
Η αντίσταση Z_{th} είναι η αντίσταση, όταν οι πηγές τάσης του κυκλώματος απενεργοποιηθούν (βραχυκυκλωθούν) και οι πηγές ρεύματος απομακρυνθούν (ανοιχτοκυκλωθούν) :

$$Z_{th} = \frac{jX_m(R_1 + jX_1)}{R_1 + j(X_1 + X_m)}$$

$$R_{th} = R_1 \left(\frac{X_m}{X_1 + X_m} \right)^2$$

Για τον υπολογισμό της τάσης V_{th} και της αντίστασης Z_{th} απομακρύνονται τα στοιχεία του δρομέα, X_2 και R_2/s .

Η καμπύλη ροπής – ολισθήσεως χαράζεται σύμφωνα με την παραπάνω εξίσωση.



Σχήμα 1.17 : Η καμπύλη ροπής –ολίσθήσεως.

Στην καμπύλη φαίνονται οι τρεις περιοχές λειτουργίας της επαγωγικής μηχανής. Για ολίσθηση $1 > s > 0$ η μηχανή συμπεριφέρεται ως κινητήρας, για $s < 0$ συμπεριφέρεται ως γεννήτρια και για $s > 1$ βρίσκεται σε κατάσταση πέδησης.

Στην περιοχή πέδησης είμαστε όταν κατά την λειτουργία ως κινητήρας έχουμε αντιστροφή φάσεων στα τυλίγματα τροφοδοσίας. Αυτό έχει ως συνέπεια την αναστροφή του μαγνητικού πεδίου καθώς και την ανάπτυξη μια ηλεκτρομαγνητικής ροπής αντίθετη από την ήδη υπάρχουσα μηχανική ροπή, πράγμα που οδηγεί τον κινητήρα στην πέδηση. Την στιγμή που οι δυο ροπές εξισωθούν και αποσυνδεθεί η τροφοδοσία τότε έχουμε αποτελεσματική πέδηση του κινητήρα.

Για το διάστημα $1 > s > 0$ η μηχανή συμπεριφέρεται ως κινητήρας. Τη στιγμή που η ολίσθηση είναι μηδέν, δηλαδή ο κινητήρας περιστρέφεται στη σύγχρονη ταχύτητα, η ηλεκτρομαγνητική ροπή δεν αναπτύσσεται. Με την αύξηση της ολίσθησης η σχετική ταχύτητα μειώνεται ενώ η ηλεκτρομαγνητική ροπή αυξάνεται μέχρι τη μέγιστη ροπή ή ροπή ανατροπής. Η πτώση τάσης στο στάτη είναι χαμηλή και η ροπή διακένου παραμένει περίπου σταθερή σε αυτή την περιοχή λειτουργίας.

$$T_{εκκ} = \frac{1}{\omega_s} \frac{3V_{th}^2 R_2}{(R_{th} + r_2)^2 + (X_{th} + x_2)^2}$$

Μεγίστη ροπή έχουμε όταν η προδιδόμενη στην αντίσταση R_2/s ισχύς γίνει μέγιστη. Αυτή η ισχύς θα είναι μέγιστη όταν η σύνθετη αντίσταση R_2/s είναι ίση με το μέτρο της σύνθετης αντίστασης μεταξύ αυτής και της σταθερής τάσης V_1 δηλαδή:

$$\frac{R_2}{s_{maxT}} = \sqrt{R_{th}^2 + (X_{th} + X_2)^2}$$

Οπότε η ολίσθηση όταν έχουμε μέγιστη ροπή είναι:

$$s_{maxT} = \frac{R_2}{\sqrt{R_{th}^2 + (X_{th} + X_2)^2}}$$

Ενώ η μέγιστη ροπή είναι:

$$T_{max} = \frac{3}{2} \frac{1}{\omega_s} \frac{V_{th}^2}{R_{th} + \sqrt{R_{th}^2 + (X_{th} + X_2)^2}}$$

Σύμφωνα με τις εξισώσεις η ολίσθηση είναι ανάλογη με την αντίσταση του δρομέα R_2 . Με την αύξηση της αντίστασης του δρομέα χρησιμοποιώντας μια εξωτερική αντίσταση (ο επαγωγικός κινητήρας είναι τυλιγμένου δρομέα) η μέγιστη εσωτερική ροπή δεν επηρεάζεται αλλά η ταχύτητα στην οποία λαμβάνεται μπορεί να ελεγχθεί.

Η τρίτη περιοχή είναι αυτή που η μηχανή λειτουργεί ως γεννήτρια. Αυτό συμβαίνει όταν η ολίσθηση της μηχανής γίνει αρνητική δηλαδή ο δρομέας περιστρέφεται σε συχνότητα μεγαλύτερη της συχνότητας του δικτύου τροφοδοσίας του στάτη. Έτσι δημιουργείται ροή ισχύος από το μηχανικό μέρος στο δίκτυο του στάτη.

Κατάταξη κινητήρων επαγωγής

Εξαιτίας των διαφόρων εφαρμογών και λειτουργικών χαρακτηριστικών των κινητήρων επαγωγής η NEMA (National Electrical Manufacturer Association) των ΗΠΑ κατάταξε του κινητήρες σε διάφορες κατηγορίες ή κλάσεις όπως λέγονται ανάλογα με τη χαρακτηριστική ροπής - στροφών του κάθε κινητήρα.

Κλάση σχεδίασης A

Είναι κινητήρες που παρουσιάζουν κανονική ροπή εκκίνησης, κανονικό ρεύμα εκκίνησης και χαμηλή ολίσθηση. Όταν λειτουργεί με πλήρες φορτίο η ολίσθηση θα πρέπει είναι μικρότερη του 5% και μικρότερη από την ολίσθηση ενός κινητήρα κλάσης B. Επίσης, η ροπή ανατροπής είναι 200% - 300% της ροπής κατά την πλήρη φόρτιση. Ενώ η ροπή εκκίνησης στους μεγάλους κινητήρες είναι τουλάχιστον ίση με την ονομαστική ροπή και στους μικρούς κινητήρες είναι ίση ή μεγαλύτερη από το 200%

της ονομαστικής ροπής τους. Το μεγαλύτερο πρόβλημα αυτής της κλάσης σχεδίασης αποτελεί το ιδιαίτερο υψηλό κρουστικό ρεύμα κατά την εκκίνηση, φτάνοντας δηλαδή το 500% - 800% του ονομαστικού ρεύματος. Σε αυτούς του τύπου κινητήρες με μέγεθος πάνω των 7.5 hp χρησιμοποιείται κάποια μέθοδος μείωσης της τάσης κατά την εκκίνηση έτσι ώστε το σύστημα ισχύος στο οποίο συνδέεται να προστατεύεται από μεγάλες πτώσης τάσης. Αυτού του τύπου κινητήρες αποτελούσαν καθιερωμένη σχεδίαση για εφαρμογές κάτω από 7.5 hp και πάνω από 200 hp. Σήμερα όμως έχουν αντικατασταθεί από τους κινητήρες κλάσης B. Οι βασικές εφαρμογές αυτών των κινητήρων ήταν η οδήγηση ανεμιστήρων, φυσερών, αντλιών τόνων και άλλων εργαλειομηχανών. Τέλος έχουν κλάση μόνωσης 60 °C.

Κλάση σχεδίασης B

Αυτοί του τύπου κινητήρες έχουν κανονική ροπή εκκίνησης, μικρότερο ρεύμα εκκίνησης και χαμηλή ολίσθηση. Η ροπή εκκίνησης που παράγει είναι ίδια με τις μηχανές κλάσης A και το ρεύμα εκκίνησης είναι περίπου 25% μικρότερο. Έτσι με τους κινητήρες κλάσης B μπορούμε να έχουμε άμεση τροφοδότηση από το δίκτυο για μηχανές μεγαλύτερης ισχύος σε σχέση με του κινητήρες κλάσης A. Το ρεύμα εκκίνησης μειώνεται αυξάνοντας την αντίδραση σκέδασης, ενώ η ροπή εκκίνησης διατηρείται με χρήση δρομέα διπλού κλωβού ή βαθέων αυλάκων. Ακόμα η ολίσθηση και η απόδοση πλήρους φορτίου είναι καλές και παρόμοιες με τους κινητήρες κλάσης A. Ωστόσο, η μεγαλύτερη αντίδραση μειώνει ελαφρά το συντελεστή ισχύος καθώς και τη μέγιστη ροπή (συνήθως μόνο λίγο πάνω από το 200% της ροπής πλήρους φορτίου είναι εφικτή). Αυτού του τύπου κινητήρες χρησιμοποιούνται κυρίως σε συστήματα σταθερής ταχύτητας όπου η ροπή εκκίνησης δεν είναι απαραίτητα μεγάλη, δηλαδή σε αεριστήρες, φυσητήρες, αντλίες και εργαλειομηχανές. Τέλος έχουν κλάση μόνωσης 80 °C.

Κλάση σχεδίασης C

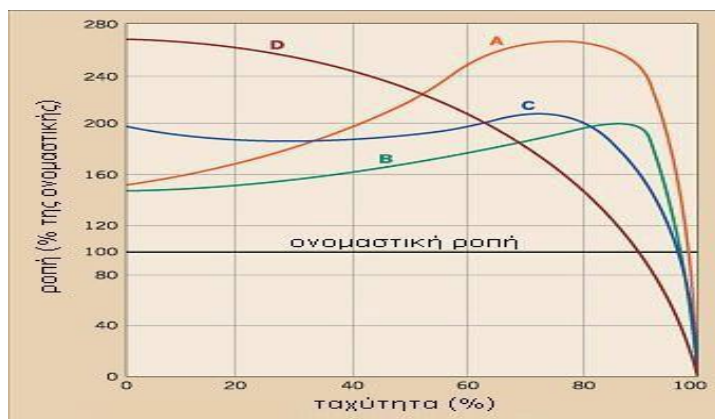
Οι κινητήρες κλάσεως C παρουσιάζουν στην εκκίνηση μεγάλη ροπή και χαμηλό ρεύμα. Αυτού του τύπου κινητήρες έχουν δρομέα διπλού κλωβού με αντίσταση μεγαλύτερη από αυτή των κινητήρων της κλάσης B. Αυτό έχει ως συνέπεια υψηλότερη ροπή εκκίνησης με χαμηλότερα ρεύματα εκκίνησης αλλά στις ονομαστικές συνθήκες λειτουργίας χαμηλότερη απόδοση και υψηλότερη ολίσθηση απ' ότι στις κλάσεις A και B. Βασικότερες εφαρμογές είναι οι συμπιεστές και οι ταινιόδρομοι. Τέλος έχουν κλάση μόνωσης 105 °C.

Κλάση σχεδίασης D

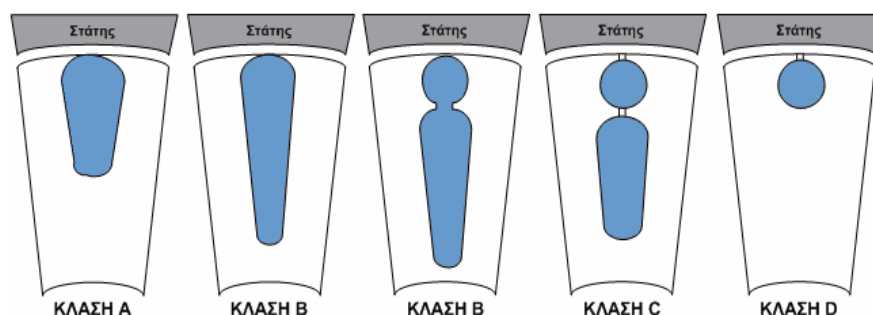
Τέλος, αυτοί οι κινητήρες έχουν μικρό ρεύμα εκκίνησης και πολύ μεγάλη ροπή εκκίνησης δηλαδή 275% παραπάνω της ονομαστικής ροπής, αλλά και υψηλή ολίσθηση όταν λειτουργούν με πλήρες φορτίο. Στην ουσία είναι σαν του κινητήρες κλάσης A που διαθέτουν όμως ράβδους μικρότερης διατομής κατασκευασμένοι από υλικό μεγαλύτερης αντίστασης. Αυτή η μεγάλη αντίσταση στο δρομέα μετακινεί τη μέγιστη ροπή σε μια πολύ μικρή ταχύτητα. Ακόμα είναι δυνατόν να έχουμε μέγιστη ροπή στη μηδενική ταχύτητα (ολίσθηση 100%). Στους κινητήρες αυτούς στην πλήρη φόρτιση η ολίσθηση είναι μεγάλη εξαιτίας της μεγάλης αντίστασης δρομέα. Η τιμή της ολίσθησης είναι 7% αλλά φτάνει και στο 17% η και πιο πάνω. Οι κινητήρες αυτοί βρίσκουν εφαρμογές στην επιτάχυνση φορτίων με μεγάλη αδράνεια, π.χ. σε ιδιαίτερα μεγάλους σφόνδυλους που χρησιμοποιούνται σε διατρητικές πρέσες ή ψαλίδια. Ο κινητήρας σε

αυτές τις εφαρμογές επιταχύνει βαθμιαία το σφόνδυλο ως τη μέγιστη ταχύτητά του, όπου ο σφόνδυλος αναλαμβάνει την οδήγηση της διατρητικής μηχανής, ενώ στη συνέχεια ο κινητήρας επιταχύνει ξανά το σφόνδυλο μέχρι την επόμενη ενέργειά του.

Στα παρακάτω σχήματα βλέπουμε τις χαρακτηριστικές ροπές – στροφών των πιο πάνω κλάσεων κινητήρων καθώς και τις διαφοροποιήσεις στον κλωβό του δρομέα για την επίτευξη των χαρακτηριστικών κάθε κλάσης. Τέλος έχουν κλάση μόνωσης 125°C.



Σχήμα 1.18 : Χαρακτηριστικές ροπές ταχύτητας κινητήρων κλάσης A, B, C και D κατά NEMA.



Σχήμα 1.19 : Τύποι αυλάκων δρομέα κλωβού ανά κατασκευαστική κλάση.

Προστασία του Κινητήρα

Μια συσκευή οδήγησης επαγωγικού κινητήρα έχει ποικίλες ιδιότητες που προστατεύουν τον κινητήρα που συνδέεται σε αυτή. Μια τέτοια συσκευή μπορεί και ανιχνεύει τα ισχυρά μόνιμα ρεύματα σε περίπτωση υπερφόρτισης, τα ισχυρά στιγμιαία ρεύματα καθώς και τις καταστάσεις υπερτάσεων και μειωμένης τάσης. Σε όλες αυτές τις περιπτώσεις για την προστασία του κινητήρα, η συσκευή οδήγησης διακόπτει τη λειτουργία του. Σήμερα οι συσκευές οδήγησης είναι τόσο ευέλικτες και αξιόπιστες που αντικαθιστούν κινητήρες συνεχούς ρεύματος, σε πολλές εφαρμογές που απαιτείται μεγάλο εύρος στη μεταβολή της ταχύτητας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΜΟΝΩΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ

Ως μονωτικά υλικά χαρακτηρίζονται τα υλικά, τα οποία πρακτικά δεν έχουν ηλεκτρική αγωγιμότητα σε σχετικά ασθενή πεδία συνεχούς ρεύματος. Άρα η ύπαρξη μονώσεων σε μια ηλεκτροτεχνική κατασκευή απαιτείται για τον διαχωρισμό και την αποφυγή υπερεντάσεων και υπερτάσεων, μεταξύ των ρευματοφόρων μερών καθώς και των ρευματοφόρων μερών προς τη γη. Ακόμη χρησιμοποιούνται ως διηλεκτρικά υλικά που τοποθετούνται στο εσωτερικό, μεταξύ του οπλισμού των πυκνωτών. Με τη χρήση μονώσεων εκμηδενίζουμε την πιθανότητα εμφάνισης του φαινομένου της διάσπασης. Η επιλογή των μονωτικού υλικού για την πραγματοποίηση των παραπάνω σκοπών γίνεται σύμφωνα με τη διηλεκτρική αντοχή τους, αλλά και άλλες ιδιότητες που χρειάζεται να έχουν ανάλογα με τις συνθήκες λειτουργίας της κατασκευής. Μεταξύ των μη ηλεκτρικών ιδιοτήτων των μονωτικών υλικών πολύ μεγάλη σημασία έχουν στην πράξη η μηχανική και θερμική αντοχή τους.

Το φαινόμενο της ηλεκτρικής γήρανσης των μονωτικών υλικών (electrical ageing) θα μας απασχολήσει διότι πρόκειται για ένα φαινόμενο το οποίο καταπονεί ηλεκτρικά τα μονωτικά υλικά, είτε από τον χρόνο, είτε από άλλους διάφορους παράγοντες, οι οποίοι επηρεάζουν τη λειτουργία τους.

2.1 Γενικά περί μονωτικών υλικών

Στα πλαίσια της ανθρώπινης δραστηριότητας συναντώνται μονωτικά υλικά διαφόρων μορφών και διαφόρων χρήσεων. Το είδος της μόνωσης που προσφέρουν τους προσδίδει και την γενικότερη ονομασία τους, οπότε γίνεται λόγος για θερμομονωτικά, ηχομονωτικά ή ηλεκτρομονωτικά υλικά

Τα θερμομονωτικά υλικά χρησιμοποιούνται για να εμποδίζουν τη μεταφορά θερμότητας από ένα σώμα σε ένα άλλο, δηλαδή είτε για την εγκλωβίσουν σε κάποια περιοχή, είτε για να την εμποδίσουν να εισβάλλει σε αυτή. Ο πετροβάμβακας, ο υαλοβάμβακας, ο κεραμοβάμβακας και πολλά άλλα υλικά έχουν την παραπάνω ιδιότητα και χρησιμοποιούνται όπου απαιτείται, όπως για παράδειγμα στη θερμομόνωση κτιρίων.

Είναι προφανές ότι τα ηχομονωτικά υλικά εμφανίστηκαν για να αποφεύγεται ο θόρυβος, για την ησυχία του ανθρώπου. Άριστο ηχομονωτικό υλικό θεωρείται το απλό φύλλο ενός δέντρου και όταν μιλάμε για μια συστοιχία φύλλων, δηλαδή μια φυλλωσιά, ταυτόχρονα αναφερόμαστε και σε ένα ηχομονωτικό φράγμα. Σε μια σύγχρονη μεγαλούπολη όμως, το άθροισμα των θορύβων των διαφόρων μηχανών (κυρίως των αυτοκινήτων) τελικά οδηγεί στο σχηματισμό αυτού που ονομάζεται ηχορύπανση.

Τέλος, τα ηλεκτρομονωτικά υλικά, αποσκοπούν στην προστασία του ανθρώπου ή άλλων διατάξεων από το ηλεκτρικό ρεύμα. Η θανατηφόρα διέλευση ακόμη και μικρής σχετικά έντασης ηλεκτρικού ρεύματος από το σώμα του ανθρώπου, γνωστή και ως ηλεκτροπληξία οδήγησε στην χρησιμοποίηση υλικών που έχουν αυτήν ακριβώς την ιδιότητα. Να εμποδίζουν τη δημιουργία αγωγίμου δρόμου ανάμεσα σε δύο διαφορετικής φόρτισης σημεία προβάλλοντας μεγάλη ηλεκτρική αντίσταση. Ένας ακόμη λόγος είναι η αποφυγή βραχυκυκλώματος που έχει καταστρεπτικές συνέπειες για τον ηλεκτρικό-ηλεκτρονικό εξοπλισμό και συχνά συντελεί σε εκδήλωση πυρκαγιάς καθώς συνεπάγεται μεγάλες τιμές έντασης ρεύματος.

Στη συνέχεια της εργασίας με τον όρο μονωτικά υλικά γίνεται αναφορά σε ηλεκτρομονωτικά υλικά. Παρακάτω στον πίνακα δίνονται διάφορες τιμές της

διηλεκτρικής αντοχής και της σχετικής διηλεκτρικής σταθεράς μερικών μονωτικών υλικών:

Μονωτικό υλικό	Διηλεκτρική αντοχή (E_d) (kV/cm)	Σχετική διηλεκτρική σταθερά (ϵ_r)
Αέρας	21-30	1,000594
Λάδι μετασχηματιστών	60-200	2-2,5
Πορσελάνη	340-380	5,5-6
Στεατίτης	200-300	6,4
Γυαλί	160-400	5-16
Χαρτί	300-450	1,8-2,6
Χαρτί και λάδι	200-400	1,8-2,6
Σκληρό ελαστικό	300-500	2,8-6,5
Ξύλο	30-50	2,5-6,5
Μονωτικό λάδι	< 30	2-2,5
Εξαφθοριούχο θείο (SF_6)	125	1,002049

Πίνακας 1:

Διηλεκτρική αντοχή και σχετική διηλεκτρική σταθερά μερικών μονωτικών υλικών.

2.2 Αέρια μονωτικά υλικά

Δύο από τα κυριότερα αέρια μονωτικά υλικά, είναι ο ατμοσφαιρικός αέρας και το εξαφθοριούχο θείο (SF_6), που βρίσκονται περίσσεια στη φύση στην πλειονότητα των ηλεκτρολογικών εφαρμογών, όπως παραδείγματος χάριν στο τεράστιο σε μέγεθος δίκτυο των εναέριων γραμμών μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας.

Στις περιπτώσεις όμως μεταφοράς υπερυψηλής τάσης και εξ' αιτίας της χαμηλής διηλεκτρικής του αντοχής, απαιτούνται μεγάλα διάκενα μεταξύ αγωγών. Το παραπάνω αποτελεί μειονέκτημα του αέρα ως μονωτικού έναντι των υπολοίπων. Βέβαια, η επιστημονική έρευνα τα τελευταία χρόνια εστιάζει στην ανάπτυξη αέριων μονωτικών με καλύτερα χαρακτηριστικά από εκείνα του ατμοσφαιρικού αέρα.

Από τα ήδη υπάρχοντα μονωτικά αέρια, το εξαφθοριούχο θείο χρησιμοποιείται περισσότερο. Πρόκειται για σπουδαίο μονωτικό αέριο που χρησιμοποιείται κυρίως σε διακόπτες ισχύος και πίνακες υψηλής τάσης προκειμένου να μειωθούν οι αποστάσεις μόνωσης. Στην ατμοσφαιρική πίεση (1 atm) εμφανίζει τη μισή διηλεκτρική αντοχή σε σύγκριση με τα μονωτικά έλαια αλλά σε υψηλότερες πιέσεις υπερέχει έναντι των μονωτικών ελαίων.

Η διηλεκτρική αντοχή του εξαφθοριούχου θείου σε πίεση μίας ατμόσφαιρας είναι δύο φορές καλύτερη από αυτήν του αέρα ενώ παράλληλα διαθέτει άριστη χαρακτηριστική θερμικής καταπάτησης και δυνατότητα σβέσης του ηλεκτρικού τόξου.

Παρακάτω στον πίνακα δίνονται διάφορες τιμές της διηλεκτρικής αντοχής και της σχετικής διηλεκτρικής σταθεράς μερικών μονωτικών υλικών:

2.3 Υγρά μονωτικά υλικά

Σε αντίθεση με τον αέρα, τα υγρά μονωτικά υλικά εμφανίζουν μεγαλύτερη διηλεκτρική αντοχή σε συνθήκες πίεσης μίας ατμόσφαιρας. Χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι ορισμένα από τα έλαια που χρησιμοποιούνται στους μετασχηματιστές έχουν τρεις έως και δέκα φορές μεγαλύτερη διηλεκτρική αντοχή από τον αέρα. Αυτό αυτόματα συνεπάγεται ότι απαιτούνται μικρότερα διάκενα ασφάλειας. Ορισμένες ιδιότητές τους είναι:

Η χρησιμοποίησή τους αποκλείει την ύπαρξη αέρα κατά το συνδυασμό τους με στερεά μονωτικά και συνεπάγεται τον περιορισμό της φθοράς των επιφανειών των στερεών μονωτικών, λόγω περιορισμού των μερικών εκκενώσεων (partial discharges). Η απομάκρυνση του αέρα γίνεται με τη μετάγγιση στο χώρο της διάταξης υγρού μονωτικού υπό συνθήκες κενού, όπως χαρακτηριστικά γίνεται στην πλήρωση των δοχείων των μετασχηματιστών με λάδι.

Η διηλεκτρική σταθερά του λαδιού είναι με βάση την τιμή παραπλήσια αυτής του απλού χαρτιού με αποτέλεσμα ο συνδυασμός των ανωτέρω να προτιμάται συχνά.

Ευρέως χρησιμοποιούμενα υγρά μονωτικά υλικά είναι διαφόρων ειδών λάδια. Αποτελούν προϊόν της απόσταξης του πετρελαίου που ανάλογα με την προέλευση και επεξεργασία του καυσίμου διαφοροποιούν και τη χημική τους σύσταση.

Τα διακρίνουμε στις εξής κατηγορίες:

- Τα μεθανέλαια: Στα λάδια αυτά κυριαρχούν κεκορεσμένοι υδρογονάνθρακες τύπου παραφίνης. Από τη γεωλογική άποψη είναι τα παλαιότερα λάδια.
- Τα ναφθανέλαια: Κυριαρχούν ακόρεστοι υδρογονάνθρακες τύπου ναφθαλίνης.

Ένα στοιχείο που λαμβάνει κανείς υπόψη κατά το σχεδιασμό μιας μονωτικής διάταξης είναι και οι υψηλές θερμοκρασίες που αναπτύσσονται κατά την ομαλή λειτουργία του ηλεκτρολογικού εξοπλισμού ή κατά την εμφάνιση υπερεντάσεων, αλλά και γενικότερα με την εμφάνιση μεταβατικών φαινομένων, όπως για παράδειγμα κρουστικές και κεραυνικές υπερτάσεις. Δηλαδή, η θερμοκρασία ανάφλεξης των ελαίων αποτελεί βαρυσήμαντο παράγοντα στη διασφάλιση του επιθυμητού επιπέδου μόνωσης και της απρόσκοπτης λειτουργίας της διάταξης.

Ένας ακόμη παράγοντας που χρήζει ιδιαίτερης προσοχής με βάση το σκεπτικό ότι μεγάλος αριθμός ηλεκτρολογικών διατάξεων και δη μετασχηματιστών βρίσκονται σε μικρή απόσταση από ανθρώπινη δραστηριότητα, είναι η τοξικότητα των υγρών μονωτικών υλικών. Τα μονωτικά λάδια δεν περιέχουν τοξικές ουσίες και είναι ακίνδυνα για το προσωπικό που εκτελεί εργασίες κατασκευής και συντήρησης και έρχεται σε άμεση επαφή με αυτά.

Τέλος αναφέρεται ένα από τα σημαντικότερα μειονεκτήματα των μονωτικών λαδιών, αυτό της οξειδωσης από τον αέρα. Το παραπάνω συνεπάγεται μείωση της διηλεκτρικής αντοχής τους και γι' αυτό αποκλείεται ο αέρας από τις κατασκευές που χρησιμοποιούν λάδι ως μονωτικό μέσο.

2.4 Στερεά μονωτικά υλικά

Τα στερεά μονωτικά υλικά που χρησιμοποιούνται συνήθως σε εφαρμογές μετάδοσης υψηλής τάσης, είναι κατασκευασμένα από γυαλί, πορσελάνη, καοτσούκ, σιλικόνη κ.α.. Οι μονωτήρες πορσελάνης είναι κατασκευασμένοι από άργιλο, χαλαζία, αργιλοξειδίο (alumina) κ.α. Η δυνατότητα που δίνεται με την πορσελάνη αλλά και γενικότερα τα στερεά μονωτικά υλικά είναι η διαμόρφωση του σχεδίου τους έτσι ώστε να επιτυγχάνονται ευνοϊκότερα μήκη κατά τη μόνωση. Για αυτό και στη μορφή τους χαρακτηρίζονται από κυρτώσεις, εσοχές, αύλακες. Η κατασκευαστική σχεδίαση και η μηχανική καταπόνηση επηρεάζουν ως έναν βαθμό την ηλεκτρική γήρανση. Τέλος, να αναφέρουμε πως όπου είναι κριτήριο η μεγάλη μηχανική αντοχή χρησιμοποιούνται μονωτήρες πορσελάνης εμπλουτισμένοι με αργιλοξειδίο.

Η ανάγκη ορισμένων ηλεκτρικών εφαρμογών για μονώσεις με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά αναπτύσσει συνεχώς την ανάπτυξη της τεχνολογίας των μονωτικών. Έτσι, εμφανίστηκαν πολυμερή σύνθετα υλικά που αποτελούνται από ίνες ενισχυμένου πλαστικού με περίβλημα σιλικόνης ή ΕΡΜΟ (ένωση προπυλενίου-αιθυλενίου. Οι διατάξεις αυτές έχουν το πλεονέκτημα ότι είναι πιο ελαφριές, κοστίζουν λιγότερο και έχουν άριστη συμπεριφορά σε υγρό περιβάλλον. Παρ' όλα αυτά, δεν έχουν καταφέρει να ξεπεράσουν σε αντοχή και διάρκεια ζωής το γυαλί και την πορσελάνη.

Σε γεννήτριες και ηλεκτρικούς κινητήρες, η μόνωση των τυλιγμάτων χαλκού αποτελείται από ένα έως τέσσερα στρώματα από βερνικωμένα φύλλα μονωτικού υλικού. Τα φύλλα δίνουν τη δυνατότητα στον κατασκευαστή να επιτύχει το μέγιστο δυνατό αριθμό γάλκινων τυλιγμάτων στον περιορισμένο χώρο της μηχανής. Πηνία που αποτελούνται από παχύτερους αγωγούς είναι δυνατό να είναι τυλιγμένα με βοηθητικές μονωτικές ταινίες. Τα βερνίκια ενισχύουν την προστασία του μετασχηματιστή και αποφεύγονται οι ηλεκτρικές καταπονήσεις.

Γενικότερα τα στερεά μονωτικά χωρίζονται σε:

Οργανικά μερικά από τα οποία είναι τα :

- Κεχριμπάρι
- Βαμβάκι
- Χαρτί
- Καοτσούκ
- Κερί
- Ξύλο

Ανόργανα μερικά από τα οποία είναι :

- Ασβεστός
- Κεραμικά
- Γυαλί
- Μίκα

και τα **Συνθετικά – Πολυμερή** μερικά από τα οποία είναι :

- Πολυαιθυλένιο
- Perspex
- Πολυπροπυλένιο
- Πολυστρένιο
- Πολυβινυλοχλωρίδιο (PVC)

- Βακελίτης
- Εποξειδικές Ρητίνες
- Πολυετέρες

Τα πλεονεκτήματα των στερεών μονωτικών υλικών είναι ότι έχουν μεγάλη διηλεκτρική αντοχή και υψηλή μηχανική αντοχή.

Από την άλλη όμως έχουν και μειονεκτήματα τα οποία είναι. Έχουν μη επανορθούμενη μόνωση, είναι εύφλεκτα με χαμηλή θερμική αγωγιμότητα και και σχετικά διηλεκτρικές απώλειες.

2.5 Τα κυριότερα μονωτικά υλικά

Βαμβάκι

Το βαμβάκι λαμβάνεται από φυτό, το οποίο καλλιεργείται και αναπτύσσεται σε θερμά κλίματα.

Στην ηλεκτροτεχνία το βαμβάκι χρησιμοποιείται για την κατασκευή βαμβακερών ταινιών από κλωστές βαμβακιού, οι οποίες, εάν εμποτιστούν με ασφαλτικά υλικά και πληρωθούν με κερί, αποτελούν στρώματα μόνωσης των αγωγών. Στα μεγαλύτερα μεγέθη χρησιμοποιούνται βαμβακερές ταινίες εμποτισμένες με καουτσούκ σε πολλά στρώματα. Ένα λεπτό στρώμα λαδιού ή πετρελαίου τίθεται μεταξύ των στρωμάτων.

Η μόνωση με βαμβακερές ή μεταξωτές ταινίες αποτελείται από 1 ως 3 στρώματα νημάτων περιτυλιγμένων γύρω από το σύρμα και εμποτισμένο συνήθως με παραφίνη ή βερνίκι.

Σαν μονωτικό υλικό το βαμβάκι είναι ακατάλληλο για υψηλές θερμοκρασίες. Παρουσιάζει το μειονέκτημα ότι είναι υγροσκοπικό, δηλαδή απορροφάει υγρασία. Γι' αυτό πρέπει να απαλλαγεί από την υγρασία και να διαποτιστεί με λάδι ή άλλα μονωτικά υγρά, για να βελτιωθούν οι μονωτικές του ιδιότητες και να προστατεύεται από την υγρασία.

Λινό (λινάρι)

Το λινάρι λαμβάνεται από ένα φυτό της οικογένειας των λινιδών. Ταινίες λινού υφάσματος εμποτισμένες με μονωτικά βερνίκια χρήσιμο ποιούνται σαν μονωτικές ταινίες στις ηλεκτρικές εφαρμογές και για την επένδυση αγωγών και πηνίων. Το λινάρι, όπως το βαμβάκι και το μετάξι, απορροφάει υγρασία και γι' αυτό, πριν χρησιμοποιηθεί, πρέπει απαραίτητα με θέρμανση να γίνει αφαίρεση της υγρασίας.

Μετάξι

Το μετάξι είναι κλωστική ύλη από λεπτές ίνες, την οποία δημιουργούν οι μεταξοσκώλικες.

Το μετάξι έχει μεγάλη στιλπνότητα και αντοχή, αποτελεί άριστο μονωτικό για την θερμότητα και το ηλεκτρισμό και αντέχει σε (θερμοκρασία 170° C. Χημικά αποτελείται από 50-60 % διβοΐνη, 25% αλβουμίνη, και 15% κερί, ρητίνη και χρωστικές ύλες.

Στον ηλεκτρισμό χρησιμοποιείται τόσο υπό μορφή υφάσματος και μονωτικών ταινιών, από καθαρό ή βερνικωμένο μετάξι, όσο και υπό μορφή τοπικών χιτωνίων στα άκρα των συρμάτων.

Πολλές φορές συναντούμε και μονώσεις καλωδίων, που αποτελούνται από βαμβακερές, και μεταξωτές κλωστές σε ένα ως τρία στρώματα πάνω στο σύρμα. Οι στρώσεις αυτές τοποθετούνται εναλλάξ και συνήθως εμποτίζονται με παραφίνη ή βερνίκι. Προκειμένου να χρησιμοποιήσουμε το μετάξι σαν μονωτικό υλικό πρέπει απαραίτητα να αφαιρέσουμε την υγρασία και να διαποτίσουμε αυτό με διάφορα βερνίκια.

Μονωτική ταινία

Η μονωτική ταινία κατασκευάζεται από βαμβακερό ύφασμα εμποτισμένο με ρευστό καουτσούκ, πίσσα ή διάφορα βερνίκια.

Χρησιμεύει για την κάλυψη των γυμνών μερών των αγωγών στα σημεία συνδέσεως τους. Στο εμπόριο συναντάται η μονωτική ταινία περιτυλιγμένη, σαν κουβαρίστρα, άλλοτε λευκή και άλλοτε μαύρη αναλόγως του υλικού, το οποίο χρησιμοποιήθηκε για την παρασκευή της.

Όταν εκτεθεί στον αέρα, ξηραίνεται και χάνει την μονωτικότητά της, ενώ όταν είναι πρόσφατη, η διηλεκτρική της αντοχή φθάνει τα 100 VOLT ανά χιλιοστό πάχους.

Κηρόπανο

Το κηρόπανο κατασκευάζεται από λινό ύφασμα εμποτισμένο με κερί. Υπάρχουν τρία είδη κεριού: ζωικό, ορυκτό και φυτικό.

Το ζωικό κερί λαμβάνεται από τις μέλισσες, ενώ το φυτικό από τα φύλλα ενός φυτού Βραζιλίας, που ονομάζεται CARNAUBA. Τδ ορυκτό προέρχεται από την απόσταξη των πετρελαίων και υπάγεται στους ανώτερους κεκορεσμένους υδρογονάνθρακες.

Στον ηλεκτρισμό το κηρόπανο χρησιμοποιείται για την μόνωση των περιελίξεων των ηλεκτρικών μηχανών, στις ενώσεις των καλωδίων και κυρίως των υπόγειων καλωδίων καθώς και σε πολλές άλλες περιπτώσεις.

Χαρτί μονώσεως

Το χαρτί μονώσεων είναι μονωτικό υλικό, το οποίο χρησιμοποιείται συχνά στις εγκαταστάσεις φωτισμού και κίνησης.

Το χαρτί Μανίλας έχει την καλύτερη διηλεκτρική και μηχανική αντοχή και όταν επαλειφθεί με καλό μονωτικό βερνίκι γίνεται άριστο μονωτικό.

Το χαρτί πρεσπάν, που χρησιμοποιείται για την μόνωση των οδοντώσεων των τυμπάνων των μηχανών, είναι χαρτί εμποτισμένο με μονωτικό βερνίκι.

Μίκα

Η μίκα είναι φυσικό ορυκτό, που συναντάται στη φύση σε διάφορα χρώματα και συνθέσεις. Η λευκή μίκα είναι η καλύτερη για τις ηλεκτρικές εφαρμογές. Η μίκα βρίσκεται στη φύση σε φύλλα, τα οποία λεπτύνονται βιομηχανικά μέχρι πάχους 0,00635mm.

Η μίκα έχει άρεστες μονωτικές ιδιότητες, η καλύτερη ποιότητά της έχει διηλεκτρική αντοχή $K 120.000 \text{ V/mm}$ και σχετική διηλεκτρική σταθερά $\epsilon_r=7$, αντοχή σε κάμψη $3.500 - 4.900 \text{ kg/cm}^2$ αντοχή σε διάτμηση $1260 - 2660 \text{ kg/cm}^2$ και μέτρο ελαστικότητας $1.750.000 \text{ ως } 2.100.000 \text{ kg/cm}^2$.

Η μίκα χρησιμοποιείται σαν άριστο μονωτικό υλικό για την κατασκευή μονώσεων θερμαντικών αντιστάσεων, για την μόνωση των τομέων του συλλέκτη μεταξύ τους και προς τον άξονα, καθώς και σαν διηλεκτρικό υλικό για την κατασκευή των πυκνωτών.

Μονωτικά βερνίκια

Τα μονωτικά βερνίκια χωρίζονται σε δύο γενικές κατηγορίες: α. Βερνίκια προερχόμενα από ορυκτή άσφαλτο σε διάλυμα πετρελαίου και β. Βερνίκια προερχόμενα από ξηραινόμενα λάδια.

Τα λιπαρά βερνίκια ανάλογα της ξηραντικής τους ικανότητας και της πρώτης τους ύλης διακρίνονται σε βερνίκια ξηραινόμενα στον αέρα και ξηραινόμενα σε ξηραντήρα (φούρνο). Για να εξασφαλιστεί καλή μόνωση πρέπει ο διαλύτης των βερνικιών να εξατμίζεται τελείως κατά την διάρκεια χρησιμοποίησής του βερνικιού.

Το χρώμα των βερνικιών είναι κίτρινο ή μαύρο.

Τα βερνίκια χρησιμοποιούνται στην ηλεκτροτεχνία με επικάλυψη με πινέλο ή με εμβάπτιση των συρμάτων, των περιελίξεων, πηνίων κ.λπ. για να προλαμβάνουν τα εσωτερικά βραχυκυκλώματα και να εξασφαλίζουν συνοχή μεταξύ των αγωγών μέσα στις οδοντώσεις και να τα συγκρατούν κολλημένο, ώστε να μην κινούνται μέσα στις οδοντώσεις του τυμπάνου.

Σιλικόνες

Οι σιλικόνες είναι πλαστικές ύλες προερχόμενες από τις ενώσεις τις σίλικας (πυρίτιο). Το βερνίκι της σιλικόνης είναι μονωτικό υλικό, όπως το γυαλί, κατασκευασμένο από ρητίνη (ρετσίνι) της οικογένειας του διοξειδίου του πυριτίου (SILICA), το οποίο συναντάται ελεύθερο στην φύση.

Οι σιλικόνες αντέχουν σε υψηλές θερμοκρασίες μέχρι 250 °C και στην υγρασία, συναντώνται υπό στερεή και υγρή μορφή.

Οι υγρές σιλικόνες είναι περισσότερο συμπιεστές και έχουν χαμηλότερο ιξώδες από τα περισσότερα υγρά. Έχουν μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας 150 - 250 °C, τάση εφελκυσμού 1960-2100 kg/cm² διηλεκτρική σταθερά E=2,75, πολύ μεγάλη διηλεκτρική αντοχή και ειδικό βάρος 0,96 - 0,97 και αποτελούν το καλύτερο μονωτικό υλικό, που ανακαλύφθηκε μέχρι σήμερα.

Χρησιμοποιούνται στα τυλίγματα τυμπάνων και στατών για την καλύτερή τους μόνωση έναντι της υγρασίας και για να αντέχουν σε υψηλότερες θερμοκρασίες. Από δοκιμές που έγιναν σε ηλεκτρικές μηχανές, οι οποίες έχουν τυλίγματα μονωμένα με σιλικόνη, παρατηρήθηκε ότι, αν και λειτουργούν αρκετό χρόνο με υπέρθερμους αγωγούς μέχρι ερυθροπύρωσής τους, η μόνωσή τους δεν καταστράφηκε.

Συνδετικό μέσο

Είναι μονωτικό υλικό, το οποίο, σκληραίνεται μετά από ορισμένο χρονικό διάστημα από την τοποθέτηση του πάνω σ'ένα πλήρως για την κυρία μόνωση του μονωμένου τυλίγματος μηχανής, συγκρατεί σε κατάσταση συμπαγούς μάζας τα κύρια υλικά, τα οποία αποτελούν την κύρια μόνωση του τυλίγματος (φύλλα μίκας, ταινία υαλομκτάξι, αμίαντος, εμποτισμένο χαρτί, βακελίτης, κ.λπ.).

Καταυτόν τον τρόπο προσδίδει στη μόνωση και αυξημένη μηχανική αντοχή, έναντι χαλαρώσεως της κύριας μόνωσης και μετατόπισης τμημάτων αυτής. Τα σημερινά χρησιμοποιούμενα συνδετικά μέσα είναι συνήθως οι εποξεικές ρητίνες.

2.6 Διηλεκτρική αντοχή

Το φαινόμενο της διηλεκτρικής αντοχής, λόγω πολύ μεγάλων πεδιακών εντάσεων, καταστροφής των ενδοατομικών συνδέσμων και της αποστάσεως των δεσμευμένων ηλεκτρονίων από την περιοχή του πυρήνα τους, καλείται διάσπαση του διηλεκτρικού υλικού.

Κατά κανόνα, η διάσπαση εμφανίζεται περίπου ταυτοχρόνως σε πολλά άτομα, τα οποία αποτελούν μια συνεχή γραμμή μεταξύ των δύο πόλων της πηγής, η οποία επέβαλε την τάση προς δημιουργία του πεδίου, και συνοδεύεται από έκλυση θερμότητας και φωτός. Στα σταθερά υλικά το μακροσκοπικό αποτέλεσμα της διασπάσεως είναι μια οπή με πολύ μικρή διάμετρο, η οποία εκτείνεται κατά μήκος του υλικού, από τον ένα προς τον άλλο πόλο της πηγής, η οποία παρέχει την τάση δημιουργίας του ηλεκτρικού πεδίου. Εν κατακλείδι η διηλεκτρική αντοχή είναι η μέγιστη πεδιακή ένταση που μπορεί να υποστεί το διηλεκτρικό χωρίς να απωλέσει την μονωτική του ικανότητα. Η διηλεκτρική αντοχή εκφράζεται σε kV/cm.

Διηλεκτρικές ιδιότητες των μονωτικών υλικών

Παρακάτω θα αναφερθούν τα δύο βασικότερα φυσικά μεγέθη που σχετίζονται με τα μονωτικά υλικά.

- Διηλεκτρική αντοχή (E_d): Είναι ένα κριτήριο για την επιλογή των μονωτικών υλικών σε μία κατασκευή. Ως διηλεκτρική αντοχή ενός μονωτικού υλικού έχει οριστεί το πηλίκο της ελάχιστης ενεργού τιμής της τάσης για τη διάσπαση προς την απόσταση των ηλεκτροδίων σε ομογενές πεδίο.

$$E_d = \frac{U_d}{d}$$

- Σχετική διηλεκτρική σταθερά (ϵ_r): Είναι ένα αδιάστατο μέγεθος και δίνει το πόσο μεγαλύτερη είναι η χωρητικότητα μίας διάταξης συγκριτικά προς εκείνη στο κενό ή στον αέρα.

Απώλειες ενέργειας εντός του διηλεκτρικού των μονώσεων

- Απώλειες στο εναλλασσόμενο ρεύμα

Οι απώλειες ενέργειας στο εναλλασσόμενο ρεύμα αυξάνονται με την συχνότητα της επιβαλλόμενης τάσεως και δεν έχουν ουσιώδη σχέση με την αγωγιμότητα του υλικού. Αντίθετα οι απώλειες στο συνεχές ρεύμα έχουν μεγάλη σχέση με την αγωγιμότητα. Όταν επί του διηλεκτρικού (μονωτικού) επιβληθούν από την μία τάση συνεχούς ρεύματος και από την άλλη εναλλασσόμενου, με ενδεικνυμένες τιμές ίσες, γενικά θα προκόψουν διάφορες απώλειες.

Μια αιτία του γεγονότος αυτού είναι η ανομοιογένεια του υλικού ως προς τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του.

- Απώλειες στο συνεχές ρεύμα

Όσο καλές μονωτικές ιδιότητες και αν έχει ένα μονωτικό υλικό, δεν είναι απαλλαγμένο από αγωγιμότητα, έστω πολύ μικρή, με αντίστοιχη πολύ μεγάλη ωμική αντίσταση. Η αντίσταση αυτή συντίθεται από τη φυσική αγωγιμότητα αυτού του υλικού και από τις αντιστάσεις στις οδούς των ρευμάτων ερπυσμού στην επιφάνεια του μονωτικού

υλικού, για τις θέσεις επικάλυψης μιας μονωτικής στρώσης από παρόμοια, η οποία αποτελεί συνέχεια της προηγούμενης (όταν π.χ. η μόνωση ενός τυλίγματος μηχανής δεν είναι συνεχής), για ενδεχόμενες ρωγμές του μονωτικού υλικού κ.λπ.

Το ρεύμα διαρροής χαρακτηρίζεται από την ένταση διαρροής. Αυτό δεν προκαλεί απώλεια ενέργειας στις ωμικές αντιστάσεις, οι οποίες αντιπροσωπεύουν την φυσική αγωγιμότητα του υλικού και τον ερπυσμό.

Απώλειες λόγω μερικών εκκενώσεων (εκφόρτιση)

Μερική εκκένωση ή κορώνα ονομάζεται οποιαδήποτε ηλεκτρική εκκένωση ασθενής σε ενέργεια και εμφανιζόμενη στην επιφάνεια ή μέσα στη μάζα του μονωτικού υλικού, κάτω από την επίδραση επιβαλλόμενης τάσης. Αυτή μπορεί να ανιχνευθεί:

- α. Με τα φωτεινά φαινόμενα τα οποία προκαλεί.
- β. Με τον ακουστικό θόρυβο, τον οποίο προκαλεί.
- γ. Με τους υπέρηχους, τους οποίους παράγει
- δ. Με τις ηλεκτρικές διαταραχές, τις οποίες προκαλεί.

Οι μερικές εκκενώσεις επάνω στην επιφάνεια ή μέσα στη μάζα ενός μονωτικού υλικού με την πάροδο του χρόνου μεταβάλλουν τις φυσικές και χημικές ιδιότητές του, με συνέπεια την μείωση της διηλεκτρικής αντοχής του υλικού.

Με λίγα λόγια, επιφέρουν τη γήρανση του μονωτικού υλικού, το οποίο καταστρέφεται υπό τάση λειτουργίας, σε χρόνο εξαρτώμενο της εντάσεως των εντός του μονωτικού υλικού εμφανιζόμενων μερικών εκκενώσεων, ενώ αρχικά είχε δοκιμασθεί επιτυχώς σε τάσεις μεγαλύτερες της τάσεως λειτουργίας του (δοκιμή διηλεκτρικής αντοχής κατά την παραλαβή μιας εγκαταστάσεως).

Οι πάνω στο μονωτικό υλικό μερικές εκκενώσεις εμφανίζονται σε θέση οξέων ακμών και καλούνται εξωτερικές μερικές εκκενώσεις ή κορώνα.

Οι εντός της μάζας του μονωτικού υλικού μερικές εκκενώσεις εμφανίζονται σε φυσαλίδες αερίου και α θέσεις ανομοιογένειας του υλικού, δηλαδή σε θέσεις όπου υπάρχουν αγώγιμες προσμίξεις, υπό μορφή π.χ. ρινισμάτων. Στην επιφάνεια των ρινισμάτων αυτών προκαλείται ισχυρή συγκέντρωση των δυναμικών γραμμών του ηλεκτρικού πεδίου μεγάλης τιμής πεδιακές εντάσεις και κατά συνέπεια διάσπαση του περιβάλλοντος αυτών μονωτικά υλικά, δηλαδή προκαλούνται μερικές εκκενώσεις. Οι εντός της μάζας του μονωτικού υλικού μερικές εκκενώσεις ονομάζονται εσωτερικές μερικές εκκενώσεις ή κορώνα.

Οι εξωτερικές και εσωτερικές μερικές εκκενώσεις διαφέρουν κατά τον τρόπο επιτελέσεως τους, έχουν όμως τα ίδια αποτελέσματα πάνω στην ποιότητα του μονωτικού υλικού. Και οι δύο συνοδεύονται από απώλειες ενέργειας. Το φαινόμενο των μερικών εκκενώσεων και οι συνοδευόμενες απώλειες ενέργειας παρουσιάζονται τόσο υπό συνεχή όσο και υπό εναλλασσόμενη τάση.

Απώλειες σε πολύ υψηλές συχνότητες

Σε πολύ υψηλές συχνότητες παρουσιάζονται και απώλειες ενέργειας, που οφείλονται σε φαινόμενα ενδομοριακά. Αυτές δεν λαμβάνονται υπ' όψη σε συχνότητες χαμηλές και για βιομηχανικές συχνότητες.

2.7 Γήρανση μονωτικών υλικών

Γήρανση μονωτικών υλικών ονομάζουμε την συνεχή και μόνιμη μείωση της μονωτικής ικανότητας ενός διηλεκτρικού με τον χρόνο πριν από την πρόκληση της ολοσχερούς καταστροφής του με διάσπαση. Υπάρχουν πολλές διαφορετικές καταπονήσεις που μπορούν να επηρεάσουν την ταχύτητα της υποβάθμισης της μόνωσης στις περιελίξεις του στάτη και του ρότορα. Σε γενικές γραμμές, υπάρχουν :

1. Θερμική καταπόνηση
2. Ηλεκτρική καταπόνηση
3. Περιβαλλοντικές καταπονήσεις
4. Μηχανική καταπόνηση
5. Ραδιενεργή (ακτινοβολία) καταπόνηση
6. Πολλαπλές καταπονήσεις

Πριν να ασχοληθούμε με τις μεμονωμένες καταπονήσεις όμως, είναι σημαντικό να λάβουμε υπόψη ότι οι πιέσεις μπορεί να είναι σταθερές ή μπορούν να είναι παρούσες μόνο για ένα σύντομο χρονικό διάστημα, δηλαδή να είναι παροδικές. Οι σταθερές καταπονήσεις περιλαμβάνουν τη θερμοκρασία λειτουργίας, την τάση εναλλασσόμενου ρεύματος 50 ή 60 Hz και τις μαγνητικά προκαλούμενες μηχανικές καταπονήσεις 100 ή 120 Hz. Σε γενικές γραμμές, εάν η αστοχία προκαλείται από μια σταθερή καταπόνηση, ο χρόνος μέχρι τη βλάβη είναι ανάλογος με τον αριθμό ωρών λειτουργίας του κινητήρα ή της γεννήτριας. Οι παροδικές καταπονήσεις περιλαμβάνουν όπως εκκίνηση κινητήρα, συγχρονισμό εκτός φάσης των γεννητριών και αστραπές. Εάν η φθορά οφείλεται κατά κύριο λόγο σε αυτές τις μεταβατικές συνθήκες, τότε ο χρόνος έως τη βλάβη είναι ανάλογος με τον αριθμό των μεταβατικών περιστατικών που βιώνει το μηχάνημα.

2.7.1 Θερμική καταπόνηση

Αυτή είναι ίσως η πιο αναγνωρισμένη αιτία σταδιακής αλλοίωσης της μόνωσης και τελικής αποτυχίας, τουλάχιστον σε μηχανές με αέρα ψύξης. Ως εκ τούτου, ένα σύστημα μόνωσης περιέλιξης πρέπει να αξιολογηθεί για την ικανότητά του υπό θερμική καταπόνηση. Η θερμοκρασία λειτουργίας μιας περιέλιξης προκαλεί θερμική καταπόνηση. Αυτή η θερμοκρασία οφείλεται σε απώλειες I^2R , δινορευμάτων και τυχαίων φορτίων στους χάλκινους αγωγούς, καθώς και πρόσθετη θέρμανση λόγω απωλειών πυρήνα, περιελίξεων κλπ. Στις σύγχρονες μονώσεις, η υψηλή θερμοκρασία προκαλεί μια χημική αντίδραση (οξειδωση σε μηχανές που ψύχονται με αέρα) όταν λειτουργεί πάνω από μια κατώτατη θερμοκρασία. Η διαδικασία οξειδωσης κάνει όλους τους τύπους μόνωσης εύθραυστους και να προκαλέσουν αποκόλληση της επιτοίχιας μόνωσης σε τυλίγματα προσδιορισμένης κατανομής.

Η αποκόλληση είναι ο διαχωρισμός των στρωμάτων ταινιών στην επιφάνεια των τυλιγμάτων λόγω απώλειας της αντοχής συγκόλλησης και / ή της σύνθεσης εμποτισμού.

Σε μια πρώτη προσέγγιση, η διαδικασία οξείδωσης είναι μια χημική αντίδραση πρώτης τάξης στην οποία ο ρυθμός της αντίδρασης διέπεται από τον νόμο του ρυθμού Arrhenius.

Όπως προτείνεται αρχικά από τον Dakin, η διάρκεια ζωής της μόνωσης (L, σε ώρες) σχετίζεται με τη θερμοκρασία (T, σε Kelvin) από :

$$L = Ae^{B/T} \text{ (Εξίσωση 2.1)}$$

όπου A και B θεωρούνται σταθερές. Λέγοντας ότι η διάρκεια ζωής της περιέλιξης θα μειωθεί κατά 50% για κάθε 10 ° C αύξηση της θερμοκρασίας συχνά προσεγγίζει αυτή την εξίσωση. Η εξίσωση 2.1 είναι μια προσέγγιση για δύο λόγους.

Πρώτον, ισχύει μόνο σε σχετικά υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας. Κάτω από ένα όριο, η οποία είναι διαφορετική για κάθε μονωτικό υλικό χωρίς να υπάρξει θερμική γήρανση. Για θερμοσκληρυνόμενα μονωτικά υλικά, το όριο είναι κοντά στη θερμοκρασία μετάπτωσης γυαλιού. Δεύτερον, περισσότερες από μία χημικές αντιδράσεις συμβαίνουν συνήθως κάθε φορά. Επομένως, ένα απλό μοντέλο ταχύτητας αντίδρασης πρώτης τάξης δεν είναι αυστηρά έγκυρο. Ωστόσο, επειδή η εξίσωση 2.1 είναι σταθερά εδραιωμένη στα πρότυπα, υπάρχει ελάχιστη επιθυμία να γίνει ακριβέστερο το μοντέλο.

Σαφώς, όσο υψηλότερη είναι η θερμοκρασία, τόσο μικρότερη είναι η αναμενόμενη διάρκεια ζωής της μόνωσης και επομένως η περιέλιξη. Η εξίσωση 2.1 αποτελεί τη βάση όλων των δοκιμών επιταχυνόμενης γήρανσης που χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση της θερμικής ζωής μιας περιέλιξης και χρησιμοποιείται επίσης για τον ορισμό των θερμικών κατηγοριών μόνωσης, π.χ. A, B, F και H.

Μια μεταβολή της θερμικής καταπόνησης είναι η θερμομηχανική καταπόνηση. Εφαρμόζεται κυρίως σε πολύ μεγάλες μηχανές. Η αλλαγή της φόρτισης της μηχανής προκαλεί την αλλαγή των θερμοκρασιών της περιέλιξης. Αν η θερμοκρασία περιελίξεων φτάσει γρήγορα από τη θερμοκρασία δωματίου στη θερμοκρασία λειτουργίας, οι αγωγοί χαλκού θα διαστέλλονται αξονικά.

Αντίθετα, οι σύγχρονες μονώσεις έχουν χαμηλότερο συντελεστή θερμικής διαστολής από τον χαλκό και σε μεταβατική κατάσταση είναι πιο ψυχρές λίγο μετά την αύξηση του φορτίου. Το αποτέλεσμα είναι μια διατμητική καταπόνηση μεταξύ των αγωγών και της μόνωσης, καθώς ο χαλκός αναπτύσσεται πιο γρήγορα από τη groundwall μόνωση. Στις περιελίξεις του στάτορα, μετά από πολλούς θερμικούς κύκλους (δηλαδή φορτίσεως), ο δεσμός μεταξύ της μόνωσης και του χαλκού σπάει. Δεν έχει αναπτυχθεί απλή σχέση που να συνδέει τον αριθμό των κύκλων με την αποτυχία ως συνάρτηση της θερμοκρασίας. Ωστόσο, όσο υψηλότερη είναι η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ της μόνωσης και του χαλκού, τόσο λιγότερος θα είναι ο αριθμός των κύκλων έως την αποτυχία.

Η θερμοκρασία έχει επίδραση σε πολλές άλλες διαδικασίες αποτυχίας που δεν είναι αυστηρά θερμικές. Για παράδειγμα, σε στάτορες με προβλήματα επικάλυψης ηλεκτρικής καταπόνησης, όσο υψηλότερη είναι η θερμοκρασία, τόσο ταχύτερη θα είναι η ταχύτητα φθοράς. Σε ορισμένες περιπτώσεις, οι περιελίξεις λειτουργίας σε υψηλές θερμοκρασίες μπορεί να είναι επωφελείς. Οι υψηλές θερμοκρασίες τείνουν να αποτρέπουν την υγρασία από την καθίζηση στις περιελίξεις, μειώνοντας έτσι τον κίνδυνο ηλεκτροπληξίας. Επιπλέον, εάν το groundwall των πηνίων / ράβδων του στάτη ξεφλουδίζεται από κακή κατασκευή ή από θερμική φθορά, τότε η λειτουργία σε υψηλή θερμοκρασία θα προκαλέσει ομοιόμορφη διόγκωση της μόνωσης, μειώνοντας το

μέγεθος τυχόν θυλάκων αέρα στη μόνωση και μείωση της δραστηριότητας μερικής εκφόρτισης (M.E) .

2.7.2 Ηλεκτρική Καταπόνηση

Η ηλεκτρική καταπόνηση συχνοτήτων 50/60 Hz σε συνηθισμένους ηλεκτροκινητήρες και γεννήτριες έχει μικρή επίδραση στη γήρανση της ηλεκτρικής μόνωσης στις περιελίξεις στάτορα με ονομαστική τιμή μικρότερη από περίπου 1000V. Το πάχος της μόνωσης σε τέτοιες περιελίξεις στάτορα χαμηλής τάσης, καθώς και σε όλες τις περιελίξεις ρότορα, καθορίζεται κυρίως από μηχανικές παραμέτρους. Δηλαδή, η μόνωση πρέπει να είναι αρκετά πυκνή ώστε να αντέχει τις ακαμψίες της περιέλιξης του πηνίου και τις μηχανικές δυνάμεις που είναι εντυπωμένες στην περιέλιξη που βρίσκεται σε λειτουργία.

Στις συμβατικές περιελίξεις στάτη 50/60-Hz με ονομαστική τιμή άνω των 1000V περίπου, το πάχος της μόνωσης καθορίζεται κυρίως από την ηλεκτρική τάση, δηλαδή την ονομαστική τάση συχνότητας ισχύος διαιρούμενη με το πάχος μόνωσης (Εξίσωση 2.2)

$$E = V/d \text{ (kV/mm)} \text{ (Εξίσωση 2.2)}$$

Η τάση συχνότητας ισχύος μπορεί να συμβάλει στη γήρανση της μόνωσης αν υπάρχει μερική εκφόρτιση. Οι μερικές εκφορτίσεις είναι μικροί ηλεκτρικοί σπινθήρες που εμφανίζονται μέσα στους θύλακες αέρα στη μόνωση ή στην επιφάνεια της μόνωσης του πηνίου. Αυτές οι σπίθες περιέχουν ηλεκτρόνια και ιόντα που βομβαρδίζουν τη στερεά μόνωση. Τα οργανικά υλικά όπως οι μεμβράνες, οι πολυεστέρες, οι ασφαλτότητες και τα εποξεία αποικοδομούνται κάτω από αυτόν τον βομβαρδισμό εξαιτίας της θραύσης (διάσπασης) ορισμένων χημικών δεσμών όπως ο δεσμός άνθρακα-υδρογόνου. Με αρκετό χρόνο, οι μερικές εκκενώσεις θα διαβρώσουν το υλικό, μειώνοντας την διηλεκτρική αντοχή του και θα προκαλέσει ηλεκτρική διάσπαση και καταστροφή του υλικού.

Εάν υπάρχουν μερικές εκκενώσεις τότε η επίδραση του επιπέδου καταπόνησης E (σε kilovolt / χιλιοστόμετρο) στη διάρκεια ζωής της μόνωσης (L σε ώρες) αντιπροσωπεύεται συχνά από το μοντέλο αντίστροφης ισχύος:

$$L = cE^{-n} \text{ (Εξίσωση 2.3)}$$

όπου c είναι μια σταθερά και n ονομάζεται σταθερά νόμου ισχύος (power law constant). Το μοντέλο αυτό βασίζεται στην εργασία που πραγματοποίησε ο Eyring, μεταξύ άλλων. Όπως και με τη θερμική γήρανση, κάτω από ένα όριο ηλεκτρικής καταπόνησης, δεν υπάρχει ουσιαστικά καμία γήρανση. Αυτό το όριο είναι η τάση εξαφάνισης μερικής εκκένωσης. Μερικές φορές, το E στην Εξίσωση 2.3 αντικαθίσταται από το E - E₀ όπου E₀ είναι όριο καταπόνησης κάτω από την οποία δεν λαμβάνει χώρα η γήρανση. Εάν η ηλεκτρική καταπόνηση σε σχέση με το χρόνο σε βλάβη έχει γραφτεί σε λογαριθμικό χαρτί, η κλίση της γραμμής σύμφωνα με την Εξίσωση (2.3) θα είναι n.

Η σταθερά n συνήθως αναφέρεται ότι κυμαίνεται από 9 έως 12 για μηχανικά συστήματα μόνωσης. Εάν κάποιος υποθέσει ότι το n είναι 10, τότε μια αύξηση στην ηλεκτρική καταπόνηση δύο φορές, θα μειώσει τη ζωή κατά περίπου 1000 φορές. Επομένως, η ηλεκτρική τάση έχει πολύ ισχυρή επίδραση στη διάρκεια ζωής, εάν υπάρχει (M.E). Παρόλο που το n αναφέρεται ως σταθερά, μερικοί έχουν αναφέρει ότι το n μπορεί να αλλάξει με το επίπεδο πίεσης. Έτσι, μερικές φορές, ένα εκθετικό μοντέλο χρησιμοποιείται για να μοντελοποιήσει την επίδραση της καταπόνησης στη ζωή. Για παράδειγμα:

$$L = ae^{bE} \text{ (Εξίσωση 2.4)}$$

όπου a και b είναι σταθερές. Ωστόσο, αυτό το μοντέλο χρησιμοποιείται σπάνια σε εφαρμογές μόνωσης περιστρεφόμενης μηχανής.

Όπως και με το μοντέλο Arrhenius για θερμική καταπόνηση, το μοντέλο στην Εξίσωση 2.3 επιτρέπει κατ' αρχήν τον υπολογισμό της διάρκειας ζωής βάσει δοκιμών επιτάχυνόμενης γήρανσης που πραγματοποιούνται σε υψηλή ηλεκτρική πίεση. Έχουν αναπτυχθεί τυποποιημένες μέθοδοι για την εκτέλεση δοκιμών αντοχής σε ηλεκτρική πίεση, υποθέτοντας μια διαδικασία αστοχίας ME. Τέτοιες δοκιμές αποτελούν τη βάση για τον προσδιορισμό του πάχους του τοιχώματος της μόνωσης που εφαρμόζεται σε πηνία στάτη.

Ένας άλλος σημαντικός τρόπος με τον οποίο η ηλεκτρική καταπόνηση μπορεί να γεράσει τη μόνωση συμβαίνει όταν πολλές επαναλαμβανόμενες υπερτάσεις πιέζονται κατά τη μόνωση περιστροφής σε τυχαία κατανομής στάτες ή σε ρότορες σύγχρονων μηχανών. Οι μονάδες τροφοδοσίας με τροφοδοσία μετατροπέα (IFD) που χρησιμοποιούν μετατροπείς πηγής τάσης με διαμόρφωση πλάτους παλμού (PWM) μπορούν να δημιουργήσουν πολλές χιλιάδες βραχείες αυξήσεις ανόδου ανά δευτερόλεπτο. Αυτές οι υπερτάσεις μπορούν να επιβάλουν σχετικά υψηλές τάσεις στις πρώτες λίγες στροφές σε περιέλιξη στάτη ή περιέλιξη δρομέα. Σε μηχανές με τυχαία κατανομημένες στροφές πηνίων έως 440 V, οι οποίες ελέγχονται από ρυθμιστή στροφών inverter, έχει παρατηρηθεί ότι εμφανίζονται μερικές εκκενώσεις λόγω της λεπτής μόνωσης των μηχανών. Με αποτέλεσμα σταδιακά να διαβρώνουν την μόνωση έως την ότου την καταστρέψουν.

2.7.3 Περιβαλλοντική Καταπόνηση (Παράγοντες)

Οι περιβαλλοντικές καταπονήσεις αναφέρεται σε μια συλλογή παραγόντων, οι οποίοι προέρχονται από το περιβάλλον γύρω από τον κινητήρα που μπορούν

να οδηγήσουν σε βλάβη. Μερικοί από αυτούς τους παράγοντες είναι:

- Συμπυκνωμένη υγρασία στις περιελίξεις
- Λάδι από τα έδρανα ή το σύστημα στεγανοποίησης λαδιού σε μηχανήματα με ψύξη με υδρογόνο
- Υψηλή υγρασία
- Επιθετικά χημικά
- Λειαντικά σωματίδια στον αέρα ψύξης ή το υδρογόνο

- Φθορά από καρβουνάκια μέσα στο μηχάνημα
- Βρωμιά και συντρίμμια που εισέρχονται στη μηχανή από το περιβάλλον, όπως έντομα, ιπτάμενη στάκτη, σκόνη άνθρακα και σκόνες που είναι υποπροϊόντα των σχετικών βιομηχανικών διεργασιών (τσιμέντο, πολτός, χημικά υπολείμματα κ.λπ.)

Κάθε ένα από αυτά μπορεί να επηρεάσει τη μόνωση του δρομέα και του στάτη με διαφορετικούς τρόπους. Σε ορισμένες περιπτώσεις, αυτοί οι παράγοντες δεν προκαλούν τη γήρανση αλλά, όταν συνδυάζονται με άλλη καταπόνηση μπορούν να οδηγήσουν σε γήρανση του μονωτικού.

Για παράδειγμα, η υγρασία και / ή το λάδι, σε συνδυασμό με βρωμιά, σωματίδια άνθρακα, κ.λπ. μπορούν να δημιουργήσουν ένα μερικώς αγωγίμο φιλμ πάνω από τη μόνωση, στην οποία η ηλεκτρική πίεση προκαλεί επιφανειακά ρεύματα. Οι συνδυασμοί λαδιού / υγρασίας / ρύπων μπορούν να συλλεχθούν στις διόδους εξαερισμού ρότορα και στάτορα και μεταξύ των πηνίων στο τέλος της περιέλιξης για να εμποδίσουν τη ροή αέρα ψύξης, γεγονός που αυξάνει τον κίνδυνο θερμικής αλλοίωσης. Το λάδι μπορεί επίσης να είναι ένα λιπαντικό που διευκολύνει τη σχετική κίνηση μεταξύ των πηνίων και της εγκοπής στις περιελίξεις δρομέα και στάτη, οδηγώντας σε τριβή μόνωσης. Η χαμηλή υγρασία στον αέρα ψύξης ή το υδρογόνο μειώνει την τάση διάσπασης του αερίου, οδηγώντας σε μεγαλύτερη δραστηριότητα μερικής εκκένωσης στις περιελίξεις του στάτη. Ομοίως, χημικές ουσίες όπως οξέα και όζον μπορούν να αποσυνθέσουν τη μόνωση, μειώνοντας τη μηχανική αντοχή της.

2.7.4 Μηχανική Καταπόνηση

Υπάρχουν τρεις κύριες πηγές μηχανικής καταπόνησης. Σε έναν δρομέα, το σύστημα μόνωσης εκτίθεται σε υψηλή φυγοκεντρική δύναμη. Αυτή είναι μια μη δονητική δύναμη που τείνει να συνθλίψει ή να παραμορφώσει τη μόνωση. Ως επί το πλείστον, η μόνωση έχει ή δεν έχει την ικανότητα να αντέξει τέτοιες δυνάμεις. Διάφορες μηχανικές δοκιμές στο υλικό, μικρής διάρκειας μπορούν να το αξιολογήσουν.

Η δεύτερη κοινή μηχανική καταπόνηση προκαλείται από το ρεύμα των τυλιγμάτων, το οποίο δημιουργεί μαγνητική δύναμη που ταλαντεύεται σε διπλάσια από τη συχνότητα ισχύος. Η εξίσωση 2.5 δείχνει τη σχέση μεταξύ της μηχανικής δύναμης και του ρεύματος που ρέει σε πηνίο στάτη / ράβδο.

$$F = cI^2/d \text{ (kN/m)} \text{ (Εξίσωση 2.5)}$$

Εάν τα πηνία είναι χαλαρά στην υποδοχή του στάτη, η δύναμη προκαλεί τη δόνηση των πηνίων και η μόνωση στην επιφάνεια των αγωγών λειαίνεται. Μια παρόμοια μαγνητική δύναμη εμφανίζεται στο τέλος της περιέλιξης. Εάν τα πηνία / ράβδοι είναι ελεύθερα να δονούνται το ένα με το άλλο ή κατά των δακτυλίων φραγής ή στήριξης, η μόνωση μπορεί και πάλι να λειασθεί.

Σε αντίθεση με τις θερμικές και ηλεκτρικές καταπονήσεις, δεν υπάρχουν καλά αποδεκτά μοντέλα για να περιγράψουν τη σχέση μεταξύ πλάτους κραδασμών και

διάρκεια ζωής της μόνωσης. Αν και τα μοντέλα περιγράφουν την ποσότητα τριβής που μπορεί να συμβεί, δεν είναι πρακτικά και κανένα δεν έχει γίνει η βάση για τυπικές δοκιμές επιτάχυνσης γήρανσης υπό δόνηση. Παρομοίως ένα πηνίο στάτη προσδιορισμένης κατανομής ή ράβδος στην τελική περιέλιξη μπορεί να μοντελοποιηθεί ως μια πολυστρωματική δοκός με πρόβολο και κατ' αρχήν μπορεί να καθοριστεί μια σχέση μεταξύ του αριθμού των κύκλων έως τη βλάβη και του πλάτους κραδασμών (αναφέρεται ως καμπύλη SN). Ωστόσο, κανένα δεν είναι ευρέως αποδεκτό.

Τα μεταβατικά προβλήματα προκαλούν την τρίτη σημαντική μηχανική καταπόνηση: ενεργοποίηση κινητήρων ή συγχρονισμός μηχανών εκτός φάσης. Και τα δύο δημιουργούν ένα μεγάλο μεταβατικό ρεύμα που μπορεί να είναι πέντε φορές ή περισσότερο, μεγαλύτερο από το κανονικό ρεύμα λειτουργίας του στάτη. Το αποτέλεσμα είναι ότι η μαγνητικά προκαλούμενη μηχανική δύναμη είναι 25 ή περισσότερες φορές ισχυρότερη από την κανονική λειτουργία. Το εξάρτημα «DC» (Εξίσωση 1.3) αυτής της παροδικής δύναμης τείνει να λυγίζει τα πηνία / ράβδους στο άκρο του στάτη. Εάν η δύναμη είναι μεγαλύτερη από όσο μπορεί να αντέξει η μόνωση πηνίου / ράβδου, τότε σπάει. Εάν εμφανιστούν πολλά μεταβατικά, όπως η συχνή εκκίνηση του κινητήρα, τότε η τελική περιέλιξη μπορεί σταδιακά να χαλαρώσει με την πάροδο του χρόνου, επιτρέποντας τη σχετική κίνηση μεταξύ των τελικών περιελίξεων και την τριβή μόνωσης υπό κανονικό ρεύμα βιομηχανικής συχνότητας.

2.7.5 Ραδιενεργή (Ακτινοβολία) Καταπόνηση

Η πυρηνική ακτινοβολία που οφείλεται σε νετρόνια, γρήγορα ηλεκτρόνια ή ακτίνες γάμμα που μπορούν να οδηγήσουν σε βαθμιαία γήρανση της μόνωσης με αποκοπή χημικών δεσμών και, συνεπώς, ευθραυστότητα μόνωσης. Όσο υψηλότερο είναι το επίπεδο ακτινοβολίας, τόσο πιο γρήγορη θα είναι η γήρανση. Η διαδικασία μοιάζει περισσότερο με θερμική φθορά, με την εξαίρεση ότι η επιφάνεια της μόνωσης γερνά πιο γρήγορα από το εσωτερικό. Αυτό είναι το αντίστροφο της κατάστασης θερμικής επιδείνωσης. Καθώς η διαδικασία είναι παρόμοια με τη θερμική φθορά, χρησιμοποιείται συχνά ο νόμος περί χημικής αντίδρασης (με την ένταση της ακτινοβολίας να αντικαθιστά τη θερμοκρασία) στην Εξίσωση 2.1. Τα σύγχρονα μονωτικά υλικά που χρησιμοποιούνται σε κινητήρες τείνουν να έχουν ένα όριο (περίπου 10 Megarads σε συνολική δόση γάμμα κατά τη διάρκεια ζωής τους) κάτω από το οποίο δεν συμβαίνει γήρανση λόγω ακτινοβολίας και ορισμένα συστήματα μόνωσης έχουν πιστοποιηθεί για συνολική ολοκληρωμένη δόση ακτινοβολίας 200 Megarads. Φυσικά, μόνο οι κινητήρες που λειτουργούν σε πυρηνικό εργοστάσιο ή πλοίο με πυρηνική ενέργεια είναι πιθανό να παρουσιάσουν γήρανση που προκαλείται από ακτινοβολία.

2.7.6 Πολλαπλές Καταπονήσεις

Όπως επισημάνθηκε νωρίτερα κατά τη συζήτηση περιβαλλοντικών καταπονήσεων, δύο ή περισσότερες καταπονήσεις συχνά πρέπει να αλληλεπιδρούν για να οδηγήσουν σε επιδείνωση της μόνωσης. Εκτός από αυτά που περιγράφονται στην προηγούμενη ενότητα, άλλα παραδείγματα περιλαμβάνουν:

- Θερμική φθορά σε προσδιορισμένης κατανομής στάτες, που δημιουργεί αποκόλληση, επιτρέποντας μερικές εκκενώσεις που τελικά διαβρώνουν μια τρύπα μέσω της μόνωσης.
- Η φθορά της ημιαγώγιμης επίστρωσης πηνίου / ράβδου που προκαλείται από κακή κατασκευή ή / και λειτουργία σε υψηλή θερμοκρασία, η οποία οδηγεί σε μερική εκκένωση, δημιουργώντας όζον που επιτίθεται χημικά στη μόνωση.

Το βασικό χαρακτηριστικό είναι ότι εάν υπάρχουν δύο ή περισσότεροι από αυτούς τους παράγοντες / καταπονήσεις, η διαδικασία αποτυχίας είναι πολύ ταχύτερη από ό,τι εάν υπήρχε μόνο μια καταπόνηση. Τα μοντέλα γήρανσης που επιτρέπουν στους κατασκευαστές μηχανημάτων να προβλέψουν την ικανότητα μόνωσης σε τέτοιες καταστάσεις πολλών καταπονήσεων τείνουν να είναι πολύ περίπλοκα και, μέχρι σήμερα, κάπως μη πρακτικά.

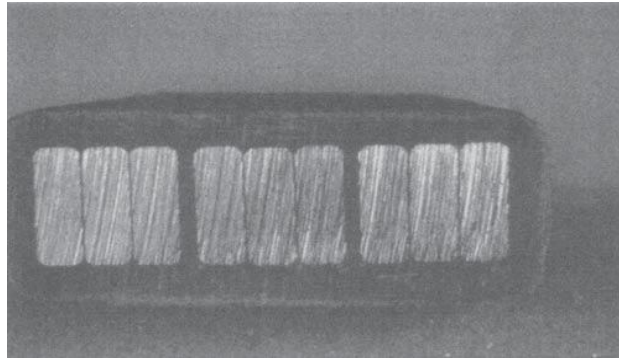
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΜΟΝΩΣΗΣ ΣΤΑΤΗ

3.1 Σύστημα μόνωσης περιέλιξης στάτη προσδιορισμένης κατανομής

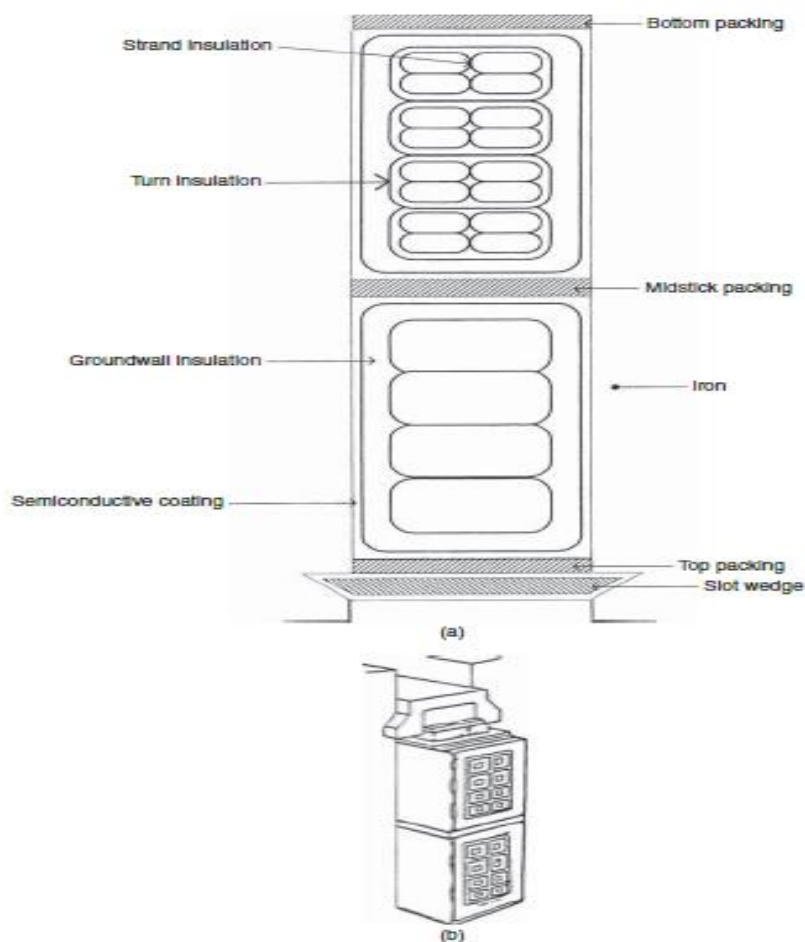
Το σύστημα μόνωσης περιέλιξης στάτη περιέχει πολλά διαφορετικά εξαρτήματα και χαρακτηριστικά, τα οποία από κοινού διασφαλίζουν ότι δεν εμφανίζονται ηλεκτρικά βραχυκυκλώματα, η θερμότητα από τις απώλειες του αγωγού I^2R απάγεται στο περιβάλλον και ότι οι αγωγοί δεν δονούνται παρά τις μαγνητικές δυνάμεις. Τα βασικά στοιχεία του συστήματος της μόνωσης του στάτη είναι:

- Μόνωση κλώνου (ή υποαγωγού) (strand insulation)
- Μόνωση στροφής (turn insulation)
- Επιτύχεια μόνωση (ή ground ή earth ή mainwall)

Το σχήμα 3.1 δείχνει τη διατομή ενός πηνίου πολλαπλών στροφών. Το Σχήμα 3.2 δείχνει τις διατομές των πηνίων με προσδιορισμένη κατανομή, σε μια υποδοχή στάτη και προσδιορίζει τα παραπάνω μέρη. Ο στάτης με προσδιορισμένη κατανομή έχει δύο πηνία ανά αυλάκι, αυτό είναι τυπικό. Σε μεγάλες γεννήτριες, μερικές φορές, η κάτω ράβδος μπορεί να έχει μια μικρότερη διατομή χαλκού, για να εξισώσει την θερμοκρασία των ράβδων πάνω και κάτω (υπάρχουν λιγότερες μαγνητικές απώλειες στην κάτω ράβδο). Εκτός από τα κύρια στοιχεία μόνωσης, το σύστημα μόνωσης έχει μερικές φορές επικαλύψεις ανακούφισης υψηλής τάσης και εξαρτήματα στήριξης τελικής περιέλιξης.



Σχήμα 3.1 Διατομή ενός πηνίου πολλαπλών στροφών με τρεις στροφές και τρεις κλώνους ανά στροφή.



Σχήμα 3.2 (a) form-wound πηνία πολλαπλών στροφών (b) Roebel ράβδοι με απευθείας ψύξη

3.1.1 Μόνωση κλώνου (strand insulation)

Υπάρχουν τόσο ηλεκτρικοί όσο και μηχανικοί λόγοι για την στρέψη ενός αγωγού σε ένα πηνίο ή ράβδο προσδιορισμένης κατανομής. Από μηχανική άποψη, ένας αγωγός που είναι αρκετά μεγάλος για να μεταφέρει το ρεύμα που απαιτείται στο πηνίο ή στη ράβδο για μια μεγάλη μηχανή θα έχει μια σχετικά μεγάλη επιφάνεια διατομής. Ένας τόσο μεγάλος αγωγός είναι δύσκολο να λυγίσει και να σχηματιστεί στο απαιτούμενο σχήμα πηνίου / ράβδου. Ένας αγωγός που σχηματίζεται από μικρότερους κλώνους

(ονομάζονται επίσης υποαγωγοί) είναι ευκολότερο να λυγίσει στο απαιτούμενο σχήμα χρησιμοποιώντας εξοπλισμό σχηματισμού πηνίων σε σχέση από έναν μεγάλο αγωγό.

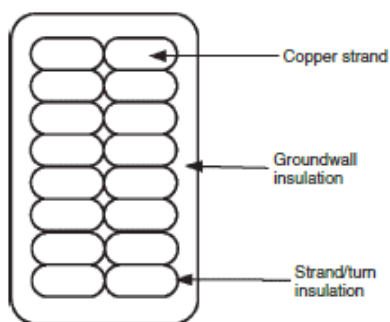
Είναι γνωστό από την ηλεκτρομαγνητική θεωρία ότι εάν ένας αγωγός χαλκού έχει αρκετά μεγάλη επιφάνεια διατομής, το ρεύμα AC θα τείνει να ρέει στην περιφέρεια του αγωγού. Αυτό είναι γνωστό ως skin effect. Το επιδερμικό φαινόμενο δημιουργεί μια περιοχή μέσω του οποίου ρέει το μεγαλύτερο μέρος του ρεύματος. Αυτή η περιοχή στον χαλκό είναι 8,5 mm στα 60 Hz. Εάν ο αγωγός έχει διατομή έτσι ώστε το πάχος να είναι μεγαλύτερο από 8,5 mm, υπάρχει μια τάση για το ρεύμα να μην ρέει μέσω του κέντρου του αγωγού, πράγμα που σημαίνει ότι το ρεύμα δεν χρησιμοποιεί όλη την διαθέσιμη διατομή του χαλκού. Αυτό αντικατοπτρίζεται ως μια αντίσταση AC που είναι υψηλότερη από την αντίσταση DC. Η υψηλότερη αντίσταση AC προκαλεί μεγαλύτερη απώλεια I^2R από ότι εάν η ίδια διατομή είχε κατασκευαστεί από κλώνους που είναι μονωμένοι ο ένας από τον άλλο για να αποφευχθεί η εμφάνιση του επιδερμικού φαινομένου. Δηλαδή, κάνοντας την απαιτούμενη διατομή από κλώνους που είναι μονωμένα το ένα από το άλλο, όλες οι διατομές χαλκού χρησιμοποιούνται για ροή ρεύματος, η επίδραση του δέρματος αναιρείται και οι απώλειες μειώνονται.

Οι ηλεκτρικοί λόγοι για το στρίψιμο των συρμάτων απαιτούν να μονώνονται μεταξύ τους. Η τάση κατά μήκος των κλώνων είναι μικρότερη από μερικά βολτ, επομένως, η μόνωση κλώνου μπορεί να είναι πολύ λεπτή. Η μόνωση κλώνου ενδέχεται να υποστεί ζημιά κατά τη διαδικασία κατασκευής του πηνίου, οπότε πρέπει να έχει καλές μηχανικές ιδιότητες. Καθώς η μόνωση κλώνου είναι αμέσως δίπλα στους αγωγούς χαλκού που φέρουν το κύριο ρεύμα στάτη, το οποίο προκαλεί την απώλεια I^2R , η μόνωση κλώνου εκτίθεται στις υψηλότερες θερμοκρασίες στον στάτη. Επομένως, η μόνωση κλώνου πρέπει να έχει καλές θερμικές ιδιότητες.

3.1.2 Μόνωση στροφής (turn insulation)

Ο σκοπός της μόνωσης στροφής (μόνωση μεταξύ σπειρών ή μόνωση σημείου περιστροφής αγωγού) τόσο στους στάτες προσδιορισμένης κατανομής όσο και στους τυχαίας κατανομής, είναι να αποφευχθούν τα βραχυκυκλώματα στροφών σε ένα πηνίο. Εάν συμβεί βραχυκύκλωμα, η βραχυκυκλωμένη στροφή θα εμφανίζεται ως η δευτερεύουσα περιέλιξη ενός αυτομετασχηματιστή. Πριν από περίπου το 1970, οι μονώσεις κλώνου και στροφής ήταν ξεχωριστά συστατικά σε πηνία πολλαπλών στροφών. Από εκείνη την εποχή, πολλοί κατασκευαστές στάτη έχουν συνδυάσει τις μονώσεις κλώνου και στροφής, αν και ορισμένοι χρήστες αντιτίθενται σε αυτό. Το Σχήμα 3.3 δείχνει τη μόνωση κλώνου που έχει αναβαθμιστεί (συνήθως με περισσότερο πάχος) για να χρησιμοποιηθεί τόσο ως μονωτικό κλώνου όσο και ως στροφής. Ωστόσο, ορισμένοι χρήστες μηχανών διαπίστωσαν ότι οι βλάβες κατά τη λειτουργία εμφανίζονται νωρίτερα σε στάτες χωρίς ξεχωριστό στοιχείο μόνωσης στροφής. Οι υψηλότερες μηχανικές καταπονήσεις για τη μόνωση στροφής τείνουν να εμφανίζονται κατά τη διαδικασία σχηματισμού του πηνίου, η οποία απαιτεί οι στροφές που καλύπτονται από μόνωση να κάμπτονται μέσω μεγάλων γωνιών, οι οποίες μπορούν να τεντώσουν και να σπάσουν τη μόνωση. Στην μόνιμη κατάσταση, οι μαγνητικά επαγόμενες μηχανικές δυνάμεις δόνησης (με διπλάσια συχνότητα ισχύος) δρουν στις

στροφές κατά τη διάρκεια της κανονικής λειτουργίας του μηχανήματος. Επιπλέον, πολύ μεγάλες παροδικές μαγνητικές δυνάμεις δρουν στις στροφές κατά την εκκίνηση του κινητήρα. Το αποτέλεσμα είναι η μόνωση στροφής να απαιτεί καλή μηχανική αντοχή. Σε μια περιέλιξη ράβδου Roebel, δεν χρησιμοποιείται μόνωση στροφής και υπάρχει μόνο μόνωση κλώνου.



Σχήμα 3.3 Διάγραμμα της διατομής ενός πηνίου όπου η μόνωση στροφής και η μόνωση κλώνου είναι τα ίδια

3.1.3 Επιτοίχια μόνωση (Groundwall Insulation)

Η groundwall μόνωση (ονομάζεται επίσης η κύρια μόνωση τοίχου) είναι το στοιχείο που διαχωρίζει τους αγωγούς χαλκού από τον γειωμένο πυρήνα στάτορα. Η αστοχία του συνήθως ρίχνει τον ρελέ. Έτσι, η επιτοίχια μόνωση στάτη είναι κρίσιμη για την ορθή λειτουργία ενός κινητήρα. Για μεγάλη διάρκεια ζωής, το επίγειο τοίχωμα πρέπει να ανταποκρίνεται στις ακαμψίες των ηλεκτρικών, θερμικών και μηχανικών τάσεων στις οποίες υπόκειται.

Ηλεκτρικός σχεδιασμός Η επιτοίχια μόνωση σε πηνία προσδιορισμένης κατανομής πολλαπλών στροφών και ράβδους Roebel που συνδέονται με το άκρο φάσης της περιέλιξης θα έχει την πλήρη ονομαστική τάση φάσης-εδάφους πέρα από αυτήν. Αυτή η υψηλή

τάση απαιτεί ένα σημαντικό πάχος μόνωσης τοίχου. Η υψηλή επιτοίχια καταπόνηση εμφανίζεται μόνο στα πηνία που συνδέονται με τους ακροδέκτες φάσης. Τα πηνία που είναι συνδεδεμένα στο ουδέτερο ουσιαστικά δεν έχουν τάση στο τοίχωμα κατά τη διάρκεια της κανονικής λειτουργίας. Ωστόσο, σχεδόν όλες οι μηχανές έχουν σχεδιαστεί για να έχουν το ίδιο πάχος μόνωσης τόσο για πηνία φάσης όσο και για ουδέτερα άκρα. Ένα πλεονέκτημα αυτής της σχεδιαστικής προσέγγισης είναι ότι καθώς όλα τα πηνία έχουν το ίδιο πάχος τοιχώματος, η αλλαγή συνδέσεων για την αντιστροφή της γραμμής και των ουδέτερων άκρων μπορεί να παρατείνει τη διάρκεια ζωής μιας περιέλιξης.

Θερμικός σχεδιασμός Η επιτοίχια μόνωση σε μηχανές έμμεσης ψύξης είναι η κύρια οδός για τη μετάδοση της θερμότητας από τους αγωγούς χαλκού (πηγή θερμότητας) στον πυρήνα του στάτορα. Έτσι, η επιτοίχια μόνωση πρέπει να έχει όσο το δυνατόν χαμηλότερη θερμική αντίσταση, για την αποφυγή υψηλών θερμοκρασιών στο χαλκό. Η επίτευξη χαμηλής θερμικής αντίστασης απαιτεί τα υλικά του τοιχώματος να έχουν όσο το δυνατόν υψηλότερη θερμική αγωγιμότητα. Επομένως, η μόνωση πρέπει να είναι

σε θέση να λειτουργεί σε υψηλές θερμοκρασίες (στο χαλκό) και να κατασκευάζεται με τέτοιο τρόπο ώστε να ελαχιστοποιείται ο σχηματισμός θυλάκων αέρα μέσα στο τοίχωμα. Πρόσφατα, καταβλήθηκε προσπάθεια για την ανάπτυξη υλικών με υψηλότερη θερμική αγωγιμότητα από ό,τι ήταν διαθέσιμη στο παρελθόν.

Μηχανικός σχεδιασμός Υπάρχουν μεγάλες μαγνητικές δυνάμεις που δρουν στους αγωγούς χαλκού. Αυτές οι μαγνητικές δυνάμεις είναι κυρίως το αποτέλεσμα των δύο μαγνητικών πεδίων από το ρεύμα που ρέει στην άνω και κάτω σπείρα / ράβδους σε κάθε υποδοχή. Αυτά τα πεδία αλληλεπιδρούν, ασκώντας μια δύναμη που κάνει τους μεμονωμένους αγωγούς χαλκού και ολόκληρο το πηνίο ή τη ράβδο να δονείται (κυρίως) πάνω και κάτω στην υποδοχή. Η δύναμη, F , που ενεργεί στο άνω πηνίο στα 120 Hz για ρεύμα 60-Hz στην ακτινική κατεύθυνση για μήκος πηνίου 1 μέτρου δίνεται από:

$$F = \frac{cI^2}{d} \text{ kN/m}$$

όπου I είναι το ρεύμα rms μέσω της ράβδου Roebel, ή $I = nI_0$ με το I_0 να είναι το ρεύμα πηνίου rms επί τον αριθμό στροφών στο πηνίο d το πλάτος της υποδοχής στάτη σε μέτρα και $c = 0,96$. Η δύναμη εκφράζεται σε kilonewton της δύναμης που ενεργεί ανά μέτρο μήκους πηνίου / bar στην υποδοχή. Οι υψηλότερες δυνάμεις είναι όταν και τα δύο πηνία στην μπάρα βρίσκονται στην ίδια φάση. Εάν το ρεύμα στη γραμμή στάτη είναι:

$$I = A \sin \omega t$$

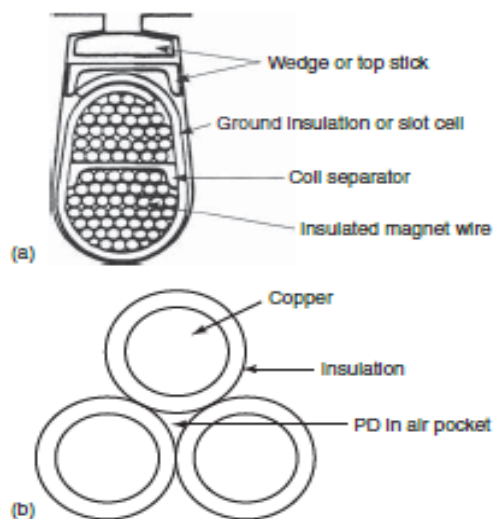
όπου ω είναι $2\pi f$ η συχνότητα ισχύος 50 ή 60 Hz, και το t ο χρόνος, και βγαίνει ένας συνδυαστικός τύπος:

$$F = \frac{cA^2(1 - \cos 2\omega t)}{(2d)}$$

Έτσι, με δύο πηνία / ράβδους στην ίδια φάση, υπάρχει καθαρή δύναμη στο κάτω μέρος της σχισμής. Γύρω από αυτήν τη δύναμη «DC» υπάρχει μια δύναμη ταλάντωσης με διπλάσια βιομηχανική συχνότητα, δηλαδή 100 ή 120 Hz. Υπάρχει επίσης δύναμη 100 ή 120 Hz στην περιφερειακή κατεύθυνση στην επάνω ράβδο / πηνίο που προκαλείται από το μαγνητικό πεδίο του δρομέα που αλληλεπιδρά με το ρεύμα στο πηνίο στάτη / ράβδου. Αυτή η περιφερειακή δύναμη είναι μόνο περίπου το 10% της ακτινικής δύναμης. Η επιτοίχια μόνωση πρέπει επίσης να αποτρέψει τη δόνηση των αγωγών χαλκού σε απόκριση σε αυτές τις μαγνητικές δυνάμεις. Εάν το groundwall ήταν γεμάτο με θύλακες αέρα, οι αγωγοί χαλκού ενδέχεται να είναι ελεύθεροι να δονούνται. Αυτό θα έκανε τους αγωγούς να χτυπήσουν εναντίον της υπόλοιπης μόνωσης του τοιχώματος, καθώς και να αφήσουν τα χάλκινα νήματα και τις στροφές να δονούνται μεταξύ τους, οδηγώντας σε τριβή της μόνωσης.

3.2 Χαρακτηριστικά συστήματος μόνωσης περιελίξεων στάτη τυχαίας κατανομής

Το Σχήμα 3.4α δείχνει τη διατομή ενός αυλακιού σε τυχαία κατανομής στάτη. Κανονικά, οι αγωγοί χαλκού έχουν κυκλική διατομή σε μικρότερους στάτες. Οι θερμικές και μηχανικές καταπονήσεις σε στάτες τυχαίας κατανομής είναι παρόμοιες με αυτές των στατών προσδιορισμένης κατανομής. Οι τυχαίας κατανομής περιελίξεις έχουν επιτοίχια μόνωση και μόνωση στροφής. Το Σχήμα 3.4α θα μπορούσε επίσης να είναι η διατομή από ένα αυλάκι δακτυλιοφόρου ρότορα. Η μόνωση του μαγνητικού σύρματος χρησιμεύει τόσο ως μόνωση στροφής όσο και ως ένα από τα συστατικά της επιτοίχιας μόνωσης. Η μόνωση στροφής έχει σχεδιαστεί για να αντέχει στην τάση πλήρους φάσης-φάσης, συνήθως το πολύ 690Vac. Στους περισσότερους στάτες με ονομαστική τιμή μεγαλύτερη από 250V, τα αυλάκια συνήθως έχουν επίσης φύλλα μονωτικού υλικού που καλύπτουν τα αυλάκια, για να παρέχουν πρόσθετη επιτοίχια μόνωση (Σχήμα 3.4a). Μπορούν επίσης να έχουν φύλλα μονωτικού υλικού που χωρίζουν τα πηνία διαφορετικών φάσεων. Η θερμική ικανότητα των επενδύσεων και των διαχωριστών είναι λιγότερο αυστηρή από την απαιτούμενη από τη μόνωση στροφής, καθώς οι επενδύσεις δεν είναι σε άμεση επαφή με τους αγωγούς χαλκού. Μηχανικά, ωστόσο, οι επενδύσεις πρέπει να έχουν εξαιρετική αντοχή στην τριβή για να αντέχουν στις μαγνητικές δυνάμεις, οι οποίες προκαλούν τις δονήσεις των στροφών.



Σχήμα 3.4 (a) Αντιπροσωπευτικό δείγμα μιας τυχαίας περιέλιξης σε σχισμή στάτη (b) ένα σχήμα του (a) όπου μερική εκκένωση μπορεί να συμβεί μεταξύ στροφών σε κινητήρες IFD.

Η περιέλιξη του στάτη συνήθως εμποτίζεται με υγρή ρητίνη ή βερνίκι. Αυτό γίνεται κυρίως για να διατηρούνται οι περιελίξεις σφιχτές εντός του αυλακιού έναντι των μαγνητικών δυνάμεων διπλής συχνότητας, έτσι ώστε να μην δημιουργείται τριβή μόνωσης. Η ρητίνη μειώνει επίσης την ποσότητα αέρα στο αυλάκι. Αυτό, με τη σειρά του, θα βοηθήσει στη μεταφορά θερμότητας από τους αγωγούς χαλκού στον πυρήνα του στάτη. Η πιο συνηθισμένη μέθοδος για τον εμποτισμό της ρητίνης μέσα στο τύλιγμα είναι απλά να βυθιστεί ολόκληρος ο στάτης σε μια δεξαμενή γεμάτη με υγρή ρητίνη, να μείνει για αρκετό χρόνο για εμποτισμό και, στη συνέχεια, να μετακινηθεί ο στάτης σε ένα φούρνο για σκλήρυνση.

3.3 Μόνωση αγωγών (Συρμάτων)

Το πιο συνηθισμένο σύρμα μαγνητών για random-wound στάτη που χρησιμοποιείται σήμερα είναι ένα στρογγυλό σύρμα χαλκού μονωμένο με μόνωση πολυαμιδίου-ιμιδίου (Class 220°C) ή πολυεστέρα με επικάλυψη πολυαμιδίου-ιμιδίου. Το πάχος της μόνωσης είναι συνήθως από 0.05mm έως περίπου 0.1mm. Το πιο συνηθισμένο πρότυπο κάλυψης αγωγών είναι το US NEMA MW 1000.

Παρακάτω παρουσιάζονται κάποια σμάλτα με την χρόνια που εισήχθηκαν και στον πίνακα 3.1 αναφέρονται οι ιδιότητες αυτών των υλικών.

- **Ακετάλη πολυβινυλίου :** Εισήχθη στα τέλη της δεκαετίας του 1930. Το πρώτο σμάλτο που χρησιμοποιείται για αυτή την εφαρμογή είχε τις εμπορικές ονομασίες Formex, Formvar.
- **Πρώιμος πολυεστέρας :** Εισήχθη στα μέσα της δεκαετίας του 1950. Εμπορική ονομασία Alkanex R.
- **Σύγχρονος πολυεστέρας :** Αναπτύχθηκε από την έκδοση του 1950. Με εμπορικό όνομα Mylar.
- **Πολυϊμίδιο :** Εισήχθη στις αρχές της δεκαετίας του 1960. Εμπορική ονομασία Karton.
- **Πολυεστέρας-ιμίδιο :** Αναπτύχθηκε από πολυεστέρα και πολυϊμίδιο για να δώσει βελτιωμένες ιδιότητες. Εισήχθη το 1965.
- **Πολυαμιδίου-ιμίδιο :** Αναπτύχθηκε από πολυϊμίδιο.
- **Πολυεστέρας με επικάλυψη πολυαμιδίου-ιμιδίου :** Αναπτύχθηκε για να βελτιώσει τις θερμικές ιδιότητες του πολυεστέρα που εισήχθη το 1967.

ΣΜΑΛΤΑ	Ακετάλη πολυβινυλίου	Πρώιμος πολυεστέρας	Σύγχρονος πολυεστέρας	Πολυϊμίδιο	Πολυεστέρας-ιμίδιο	Πολυαμιδίου-ιμίδιο	Πολυεστέρας με επικάλυψη πολυαμιδίου-ιμιδίου
ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ							
Θερμικές							
NEMA MW 1000 rating (°C)	105	130	155	220	180	220	200
Αντοχή σε θερμικό σοκ	Αρκετά καλή	Καλή	Καλή	Τέλειο	Πολύ Καλή	Καλή	Πολύ Καλή
Ηλεκτρικές							
Διηλεκτρική αντοχή (kV/mm)	118/93	128/118	141/135	177/135	141/135	177/161	149/135

25 ° C / σε ονομαστική θερμοκρασία							
Διηλεκτρική σταθερά (25°C/200°C)	—/—	—/—	—/—	3.3/3.2	3.9/4.0	3.3/3.2	—/—
Συντελεστής αποσβέσεως	—/—	—/—	—/—	0.008/0.024	0.009/0.008(180°C)	0.008/0.024	—/—
Αντίσταση μερικής εκκένωσης	Φτωχό	Επαρκή	Επαρκή	Επαρκή	Επαρκή	Επαρκή	Επαρκή
Μηχανικές							
Σκληρότητα	Καλή	Αρκετά καλό	Καλή	Καλή	Καλή	Τέλειο	Τέλειο
Ευκαμψία	Καλό	Καλό	Τέλειο	Τέλειο	Τέλειο	Καλό	Τέλειο
Cut through resistance	—	—	Τέλειο	Τέλειο	Τέλειο	Καλό	Πολύ Καλό
Αντίσταση στο νερό	Επαρκής	Επαρκής	Επαρκής	Καλό	Καλό	Τέλειο	Τέλειο
Χημική Αντίσταση	—	—	Poor resistance to xylene	Καλή	Καλή	Τέλειο	Τέλειο
Αντίσταση ραδιενέργειας	Φτωχό	—	—	Οι ιδιότητες του παραμένουν καλές έως 3 x 10 ⁹ rads ακτινοβολίας γάμμα	Καλό	Οι ιδιότητες του παραμένουν καλές έως 3 x 10 ⁹ rads	

Πίνακας 3.1

Στην συνέχεια αναφέρονται κάποια υλικά ινών και στον πίνακα 3.2 που ακολουθεί αναφέρονται οι ιδιότητες αυτών των υλικών.

Αυτά είναι :

- **Γυαλί :** Εισήχθη στη δεκαετία του 1930 ως βελτίωση έναντι του βαμβακιού, του μεταξιού, του αμιάντου.
- **Πολυεστερικό γυαλί :** Αναπτύχθηκε στις αρχές της δεκαετίας του 1950 για να δώσει καλύτερες θερμικές και μηχανικές ιδιότητες από αυτές των ινών γυαλιού.
- **Σμάλτο + ίνες γυαλιού :** Παρουσιάζεται παράλληλα με την ανάπτυξη ατομικών επενδύσεων.
- **Αμιάντος :** Έχει χρησιμοποιηθεί από τη δεκαετία του 1920. Έκτοτε, οι βασικές βελτιώσεις έγιναν στα υλικά συγκόλλησης.

<u>ΙΝΕΣ</u>	Γυαλί	Πολυεστερικό γυαλί	Σμάλτο + ίνες γυαλιού	Αμίαντο
ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ				
<u>Θερμικές</u>				
NEMA MW 1000 rating (°C)	Βιολογικό βερνίκι επεξεργασμένο: 155 ° C Βερνίκι σιλικόνης: 200 ° C	Ανεπεξεργασμένο: 155°C Βιολογικό βερνίκι: 180°C Βερνίκι σιλικόνης: 200°C	155, 180 ή 200 ° C ανάλογα με τη χαμηλότερη βαθμολογία για τα υλικά που χρησιμοποιούνται στο συνδυασμό	Εξαρτάται από το βερνίκι συγκόλλησης, δηλαδή 130 ° C για βερνίκι κλάσης B
Αντοχή σε θερμικό σοκ	Καλό	Καλό	Καλό	Αρκετά καλό
<u>Ηλεκτρικές</u>				
Διηλεκτρική αντοχή (kV/mm) 25 ° C / σε ονομαστική θερμοκρασία	—/3.54	—/3.54	Enamel kV/mm+3.4/—	3.4/—
Διηλεκτρική σταθερά (25°C/200°C)	—/—	—/—	—/—	—/—
Συντελεστής αποσβέσεως	—/—	—/—	—/—	—/—
Μερική αντίσταση απόρριψης	Καλό	Καλό	Καλό	Καλό
<u>Μηχανικές</u>				
Σκληρότητα	Καλό όταν είναι συνδεδεμένο	Εξαιρετική όταν συνδέεται με ίνες		Αρκετά Καλό
Ευκαμψία	Κακή σε σύγκριση με το σμάλτο	Επαρκή		Φτωχό
Αντίσταση στο νερό	Καλή όταν είναι συνδεδεμένο	Φτωχό		
Χημική Αντίσταση	Καλή για όλους τους βαθμούς			
Αντίσταση ραδιενέργειας	Καλή για μη επεξεργασμένο γυαλί Dacron και εποξειδικές και σιλικονούχες ποιότητες. Χαμηλή για ποιότητες οργανικής ρητίνης			

Πίνακας 3.2

3.4 Φασική και επιτοίχια Μόνωση

Όπως συμβαίνει με τις προσδιορισμένης κατανομής μηχανές, υπάρχουν συνήθως δύο πηνία, συχνά από διαφορετικές φάσεις, στο ίδιο αυλάκι.

Έτσι, η μόνωση "φάσης" χρησιμοποιείται συχνά για το διαχωρισμό των δύο πηνίων.

Οι πιο συνηθισμένες μονώσεις φάσης είναι "χαρτιά" κατασκευασμένα από συνθετικό υλικό "αραμίδιο", η DuPont είναι ένας προμηθευτής και χρησιμοποιεί το εμπορικό όνομα Nomex™. Το Nomex έχει θερμική ταξινόμηση 220°C, είναι ανθεκτικό σε χημικές καταπονήσεις και έχει εξαιρετική αντοχή στην πίεση σχισίματος. Ανάλογα με την κατηγορία τάσης λειτουργίας τους, το χαρτί μπορεί να είναι πάχους 0,1 mm έως 0,5 mm.

Το ίδιο υλικό αραμιδίου χρησιμοποιείται ως επένδυση στα αυλάκια, για να παρέχει επιπλέον επιτοίχια μόνωση μεταξύ του χαλκού στα πηνία και της σχισμής στάτη.

Παρομοίως, αυτό το υλικό χρησιμοποιείται συχνά μεταξύ των πηνίων σε διαφορετικές φάσεις στην τελική επίστρωση.

Ένα άλλο υλικό που χρησιμοποιείται συνήθως για την επιτοίχια μόνωση και για μόνωση φάσης τυχαία κατανομημένου στάτη, καθώς και για σφήνες, είναι το Dacron™ / Mylar™ / Dacron ή το DMD, το οποίο τείνει να έχει καλύτερη μηχανική αντοχή από το Nomex.

Για σφραγισμένους τυχαίας κατανομής στάτες, οι τελικές περιελίξεις είναι μονωμένες με ταινία Dacron για να συγκρατήσουν το βερνίκι. Τέτοιοι στάτες απαιτούνται συχνά σε σκληρά περιβάλλοντα πυρηνικών σταθμών ή σε περιβάλλοντα με χημική καταπόνηση.

3.5 Εμπότιση Και Μεταχείριση Βερνικιού

Οι περισσότεροι στάτες προσδιορισμένης κατανομής είναι επικαλυμμένοι με βερνίκι ή ρητίνη μετά την εισαγωγή των πηνίων στα αυλάκια.

Αυτή η επίστρωση προσδίδει αντίσταση στην υγρασία και τη μόλυνση (η οποία μπορεί να οδηγήσει σε ηλεκτρική καταπόνηση), και επίσης βελτιώνει την ηλεκτρική αντοχή των περιελίξεων σε βλάβες. Καθώς οι προδιαγραφές NEMA MW1000 για αγωγούς επιτρέπουν ένα ορισμένο αριθμό "οπών" στη μόνωση ανά μήκος αγωγού, το βερνίκι ή η ρητίνη εξασφαλίζει ότι η μερικός αγωγή μόλυνση δεν θα προκαλεί σφάλματα στροφής. Επιπλέον, το βερνίκι ή η ρητίνη θα βελτιώσει τη μετάδοση θερμότητας από τον χαλκό στον πυρήνα του στάτη, καθώς ο αριθμός των θυλάκων αέρα θα μειωθεί. Η επεξεργασία βερνικιού συγκρατεί επίσης τους αγωγούς σφιχτά στα αυλάκια, για να μειωθεί η τάση για την κίνηση των πηνίων κάτω από τις μαγνητικές δυνάμεις 100 Hz ή 120 Hz. Καθώς η χρήση ηλεκτρονικών ισχύος γίνεται όλο και πιο διαδεδομένη, οι υπερτάσεις που δημιουργούν μπορούν να οδηγήσουν σε καταστρεπτική μερική εκκένωση σε οποιαδήποτε οπή αέρα. Έτσι, η πλήρωση των οπών αέρα με βερνίκι ή εποξείδιο γίνεται όλο και πιο κρίσιμη, καθώς η μερική εκκένωση μπορεί να συμβεί μόνο εάν υπάρχουν οπές αέρα.

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται για το βερνίκι ή τις ρητίνες ακολουθούν την ίδια εξέλιξη τα τελευταία χρόνια με τα εμποτισμένα για προσδιορισμένης κατανομής πηνία στάτη.

Σήμερα, ως βερνίκια χρησιμοποιούνται ακρυλικά, πολυαμίδια και πολυιμίδια, και ως ρητίνες χρησιμοποιούνται πολυεστέρες και εποξειδία χωρίς διαλύτες. Τα βερνίκια συνήθως εφαρμόζονται με εμβάπτιση του στάτη σε μια δεξαμενή βερνικιού. Μερικές φορές, το υπεριώδες φως μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για να σκληρύνουν μερικά βερνίκια. Ο εμποτισμός του τέλματος είναι μια άλλη, πιο ακριβή διαδικασία, η οποία είναι συνήθως πιο επιτυχημένη στην πλήρωση όλων των οπών του αέρα. Στον εμποτισμό, η ρητίνη ή το βερνίκι στάζουν αργά πάνω από ένα πολύ αργό περιστρεφόμενο στάτη, ταυτόχρονα με το ρεύμα που κυκλοφορεί στην περιέλιξη για να αυξηθεί η θερμοκρασία. Και πάλι, η διαδικασία σκλήρυνσης μπορεί να ενισχυθεί με το λούσιμο του περιστρεφόμενου στάτη με υπεριώδη ακτινοβολία.

3.6 Μέθοδοι Χαρτοδεσίας Της Επιτοίχιας Μόνωσης Στάτη

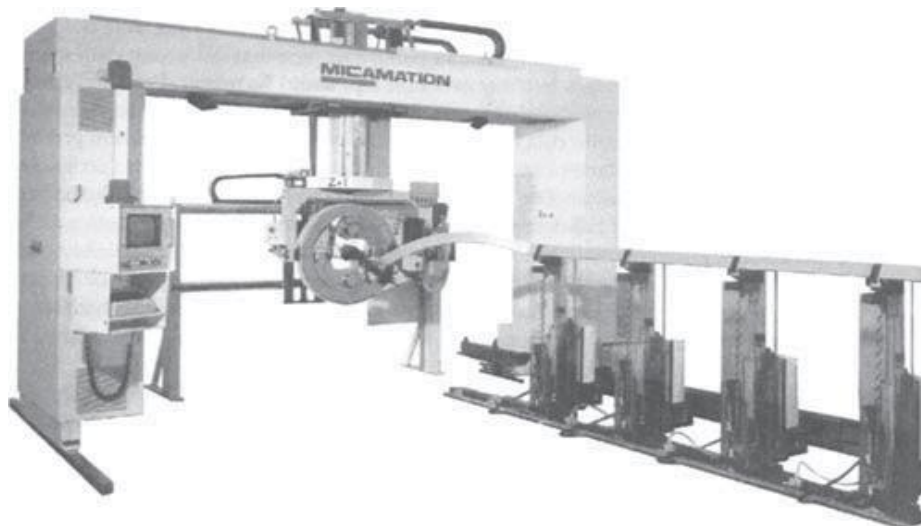
Για τις περισσότερες περιελίξεις στάτη μεγαλύτερου από 1000V, η επιτοίχια μόνωση αποτελείται από ταινίες πλάτους 2-3 cm που έχουν ελικοειδώς εφαρμοστεί στους αγωγούς χαλκού και έχουν εμποτιστεί είτε με θερμοπλαστική είτε με θερμοσκληρυνόμενη ρητίνη. Όταν οι ταινίες εισήχθησαν για πρώτη φορά και για πολλές δεκαετίες στη συνέχεια, εφαρμόστηκαν με το χέρι από ειδικευμένους επαγγελματίες.

Η εμφάνιση των μοντέρνων ταινιών με βάση τη μαρμαρυγία και των συνθετικών ρητινών με βάση το γυαλί, έκανε την ανάπτυξη της μηχανής ταινίας δυνατή. Πιθανώς οι μεγαλύτερες εξελίξεις στην κατασκευή κινητήρων τα τελευταία 25 χρόνια υπήρξαν στη ανάπτυξη μηχανών για την χαρτοδεσία της επιτοίχιας μόνωσης. Τις πρώτες μηχανές χαρτοδεσίας ταινίας μόνωσης τις χειρίζονταν ένας έως τρεις χειριστές, ανάλογα με τον ρυθμό παραγωγής και το μήκος της επιφάνειας που έπρεπε να μονωθεί.

Ο Έλεγχος της έντασης λειτουργίας της μηχανής αυτής γινόταν με ένα ρυθμιζόμενο μηχανικό φρένο στον κύλινδρο που είχε το ρολό με την ταινία μόνωσης. Αλλά οι ταινίες πλούσιες σε ρητίνη συμπίεζονταν έξω από το ρολό λόγω της αλλαγής της έντασης λειτουργίας από την αρχή μέχρι το τέλος. Αυτό οδήγησε στη χρήση μόνο ενός μικρού φρεναρίσματος πάνω στο ρολό ταινίας, με το μεγαλύτερο μέρος της έντασης της μηχανής να φρενάρεται από έναν κύλινδρο σταθερής διαμέτρου από όπου θα περνάει η μονωτική ταινία.

Στις σύγχρονες μηχανές χαρτοδεσίας τα μαγνητικά και ηλεκτρομαγνητικά φρένα φρένα άρχισαν να αντικαταστούνε τα μηχανικά φρένα.

Οι τελευταίες γενιές μηχανών χαρτοδεσίας (ή ρομπότ) ελέγχονται από υπολογιστή, συμπεριλαμβανομένων και των έξι βαθμών ελευθερίας κίνησης, εάν είναι επιθυμητό (Σχήμα 3.5). Γενικά, για κάθε σχεδιασμό πηνίου / ράβδου, ο χειριστής κατευθύνει χειροκίνητα την κεφαλή της μονωτικής ταινίας σε χαμηλή ταχύτητα μέσω όλων των θέσεων που απαιτούνται για την σωστή παρακολούθηση του πηνίου / ράβδου κατά τη διάρκεια του περάσματος της μονωτικής ταινίας. Κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας, μια συσκευή μέτρησης που αποστέλλει στη μνήμη του υπολογιστή τις πληροφορίες θέσης που απαιτούνται για την αυτόματη λειτουργία του μηχανήματος είναι συνδεδεμένη στην κεφαλή της μονωτικής ταινίας.



Σχήμα 3.5 Μια σύγχρονη μηχανή ταινίας με έξι άξονες που εφαρμόζει την ταινία στην υποδοχή και στα τμήματα τελικής περιέλιξης της ράβδου (Πηγή: Micamation).

Η τελευταία συσκευή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εφαρμογή ταινιών πλούσιων σε ρητίνες χωρίς διαλύτες, με βάση βελτιωμένες ρητίνες. Οι εξελίξεις στην τεχνολογία της χαρτοδεσίας της ταινίας μόνωσης ήταν ένα από τα κλειδιά για τη μείωση της διακύμανσης της ποιότητας της επιτοίχιας μόνωσης, επιτρέποντας έτσι τον σχεδιασμό μόνωσης για υψηλότερες τάσεις κατά τη διάρκεια λειτουργίας ενός κινητήρα. Οι βελτιώσεις στη μόνωση εμφανίζονται σε μικρότερη διακύμανση πάχους και καλύτερο έλεγχο περιτύλιξης, με μειώσεις στα κενά και επιπλέον επικαλύψεις εντός των ταινιών.

3.7 Συστήματα και Υλικά Διαφόρων Εταιριών

Σε αυτό το κεφάλαιο αναλύονται διάφορα συστήματα κάποιων εταιριών για περιελίξεις στάτορα επαγωγικών μηχανών.

3.7.1 Siemens

Siemens "MICALASTIC" [πρώην PROTOLASTIC 1963-1968]

Το "πλούσιο σε ρητίνη" φύλλο μαρμαρυγίας χρησιμοποιείται στα στρώματα των πηνίων και μια ταινία υψηλής περιεκτικότητας σε ρητίνη στις τελικές περιελίξεις.

Μόνωση αγωγού και σημείου περιστροφής του αγωγού

Χρησιμοποιούν διπλή επικαλυμμένη από πολυεστέρα ταινία μεμβράνης που χρησιμοποιείται για τις μονωτικές ταινίες και τις στροφές. Το πάχος της μόνωσης εξαρτάται από το εύρος τάσης.

Επιτοίγια Μόνωση

Ένα υψηλής περιεκτικότητας σε πολυεστέρα επικαλυμμένο με πολυεστέρα πολυαιθυλενικό περιτύλιγμα, εφαρμόζεται στις σπείρες πηνίου και μια ταινία μαρμαρυγίας υψηλής περιεκτικότητας σε ρητίνη στα τελικά νήματα και τις συνδέσεις.

Slot Wedging and Packing

Χρησιμοποιούνται στο επάνω μέρος στο κάτω μέρος και μεσαία και είναι κατασκευασμένα από έλασμα εποξειδικού γυαλιού.

Οι σφήνες της σχισμής είναι συνήθως μαγνητικές και αποτελούνται από σύνθετο υλικό εποξειδικής ρητίνης / σιδήρου.

Στήριξη τελικής περιέλιξη και υλικά

Όλα τα μηχανήματα έχουν σταθερούς ακτινικούς δακτυλίους στήριξης στους οποίους έχουν συνδεθεί τα πηνία. Το εποξειδικό υλικό χύτευσης εφαρμόζεται μεταξύ των πηνίων. Επιπρόσθετα, το κλείδωμα μεταξύ των πηνίων και των δακτυλίων στήριξης παρέχει μια ασφάλεια που ασφαλίζει το πηνίο-σε-πηνίο και τα πηνία στους δακτυλίους.

Winding Extension Lead and Insulation

Στεγανωτικά καλώδια από σιλικόνη συνδέονται μεταξύ του περιβλήματος και του κουτιού ακροδεκτών.

Δοκιμές διασφάλισης ποιότητας

Οι δοκιμές πραγματοποιούνται στα ακόλουθα στάδια κατασκευής.

1. Μετά την ολοκλήρωση της μόνωσης του πηνίου. η μόνωση του σημείου περιστροφής του αγωγού δοκιμάζεται σε υπέρταση και ο συντελεστής απορρόφησης λαμβάνεται στο 10% των πηνίων.
2. Η επιτοίγια μόνωση επανεξετάζεται μετά την εισαγωγή των πηνίων στις υποδοχές.
3. Η μόνωση σημείου περιστροφής και η επιτοίγια μόνωση δοκιμάζεται μετά την ολοκλήρωση της σφήνωσης της σχισμής και την ολοκλήρωση της ακινητοποίησης του τελικού τυλίγματος, αλλά πριν από τη σύνδεση.

3.7.2 U.S Motors

US Motors "EVERSEAL" VPI με θερμοσκληρυνόμενη εποξειδική ρητίνη μετά την περιέλιξη του πηνίου, τη στήριξη και τη σύνδεση.

Το σύστημα αυτό εισήχθη γύρω στο 1971. Οι παλαιότερες μηχανές είχαν επιτοίγια μόνωση με μαρμαρυγία.

Κατηγορία θερμοκρασίας

Class F 155°C.

Μόνωση αγωγού και σημείου περιστροφής του αγωγού

Class H βαριά βάση πολυεστέρα με επικάλυψη ιμιδίου πολυαμιδίου.

Ένα εξωτερικό στρώμα από συγκολλημένο διπλό περιτύλιγμα από γυαλί Dacron χρησιμοποιείται για βαθμολογίες άνω των 5000 V και για μεγαλύτερες μηχανές 4000 V.

Επιτοίγια Μόνωση

Το πλήρες πηνίο είναι κολλημένο με μεμβρανώδεις στρώσεις χαρτιού με μαρμαρυγία με πολυεστέρα συνδεδεμένη με γυάλινες ίνες. Χρησιμοποιείται επίσης ένα εξωτερικό στρώμα ταινίας πολυεστέρα. Αυτό προστατεύει το groundwall κατά τη διάρκεια της εισαγωγής του πηνίου και συρρικνώνεται κατά τη διάρκεια της προθέρμανσης πριν από την VPI για τη συμπύκνωση της groundwall ταινίας με μαρμαρυγία. Οι συνδέσεις μονώνονται με ταινία χαρτιού μαρμαρυγίας, πάνω από μανίκια με γυάλινη μανίκια ή με διπλό μανίκι από γυάλινες ίνες με ημιτελή ύλη πάνω από ακρυλικό σωλήνα, όπως απαιτείται.

Προστασία μερικής εκκένωσης

Δεν απαιτείται για αξιολογήσεις μέχρι 5000 V.

Για βαθμολογίες πάνω από αυτή την τάση, χρησιμοποιούνται ειδικές ταινίες μαρμαρυγίας για τη μόνωση του τοιχώματος.

Slot Wedging and Packing

Σφήνες σχισμών κατασκευασμένες από εξωθημένο haysite.

Μέσα και κάτω μπαστούνια κατασκευασμένα επίσης από αυτό το υλικό.

Στήριξη τελικής περιέλιξη και υλικά

Σχοινί από υαλοβάμβακα ή ενισχυμένο, γεμισμένο, χαλύβδινο δακτύλιο σε κάθε άκρο.

Δοκιμές διασφάλισης ποιότητας

1. Το μαγνητικό καλώδιο ελέγχεται για συνέχεια.
2. Οι δοκιμές υπερβολικής ροπής στροφών πραγματοποιούνται σε πηνία πριν από την εισαγωγή τους στις υποδοχές και στη συνέχεια.
3. Τα τεστ Megger και hipot εκτελούνται μετά τη συναρμολόγηση.
4. Εάν πρέπει να επαληθευτεί μια σφραγισμένη ικανότητα περιέλιξης, εκτελείται το NEMA MG1-20.48.

3.7.3 Brush Electrical Machines

Η Brush Electrical Machines Ltd χρησιμοποιεί χαρτοταινίες "EPOXY NOVOLAC" "Πλούσια σε ρητίνη". Τα ελαστικά πηνία θερμαίνονται με πρέσα πριν από την περιέλιξη.

Κατηγορία θερμοκρασίας

Class F 155°C.

Μόνωση αγωγού και σημείου περιστροφής του αγωγού

Η μόνωση σπειρών γίνεται από σμάλτο πολυεστέρα "M" με επικάλυψη ταινίας μαρμαρυγίας από πολυεστέρα. Η μόνωση σημείου περιστροφής αποτελείται από

στρώματα μισού γύρου από ταινία από μαρμαρυγία από πολυεστέρα με εμποτισμένο με εποξική ρητίνη Stage-B.

Επιτοίγια Μόνωση

Τα ελαστικά πηνία είναι μονωμένα με στρώματα μισής περιτύλιξης από ταινία Filol Novolac. Οι ακραίες περιελίξεις, τα καλώδια και οι συνδέσεις είναι μονωμένες με στρώματα μισού γύρου από ελαστομερές Novolac, πάνω από το οποίο εφαρμόζεται ένα στρώμα ταινίας Eproflex και τέλος ένα στρώμα ταινίας Terylene. Τα ελαστικά πηνία σκληρύνονται πριν από την περιέλιξη με θερμή πίεση σε ανοχές διαστάσεων.

Προστασία Μερικής Εκκένωσης

Έως 5,9 kV: κανένα Πάνω από 5,9 kV: αγωγή ταινία εδράνου γραφίτη στο τμήμα εγκοπής, ημιαγωγική ταινία ανακούφισης τάσης στο τέλος.

Σφήνα Εγκοπών

Οι σφήνες σχισμής κατασκευάζονται από ύφασμα με συνθετική ρητίνη.

Στήριξη Τελικής Περιέλιξης Και Υλικά

Το ακτινικό στήριγμα του πηνίου αποτελείται από μονωμένους σταθερούς χαλύβδινους δακτυλίους, επενδεδυμένους με στεφάνη εμποτισμένο με εποξική ρητίνη Stage-B. Τα πηνία προσδένονται σε αυτά με ταινία από ίνες γυαλιού. Οι σειρές μπλοκαρίσματος τοποθετούνται μεταξύ των πηνίων για να περιορίσουν την περιφερειακή κίνηση του πηνίου.

Winding Extension Lead and Insulation

Εύκαμπτο κλωνικό καλώδιο, μονωμένο ανάλογα με την τάση του συστήματος.

Δοκιμές διασφάλισης ποιότητας

Δοκιμές Hipot σε διάφορα στάδια κατασκευής.

3.7.4 General Electric Company

GENERAL ELECTRIC COMPANY GE “MICA MAT” epoxy VPI. Το σύστημα μπορεί να σφραγιστεί για να περάσει τη δοκιμή νερού NEMA MG1-20.48. Αυτό το σύστημα μόνωσης VPI κατηγορίας F εισήχθη στις αρχές της δεκαετίας του 1970 στο εργοστάσιο LM&G Schenectady.

Κατηγορία θερμοκρασίας

Class F 155°C

Μόνωση αγωγού και σημείου περιστροφής του αγωγού

Πριν από το 1984, σύρμα από πολυϊμιδαμεταλλικό ή συνδυασμός εμαγιέ σύρματος επικαλυμμένο με γυαλί πολυεστέρα ή ίνες γυαλιού. Μετά το 1984, ένα ανθεκτικό σε κορώνα σύρμα ελασματοποιημένου πολυεστέρα ή συνδυασμός γεμάτου εμαγιέ σύρματος που περιτυλίχθηκε με γυαλί πολυεστέρα ή ίνες γυαλιού. Οι ταινίες σύνδεσης

εφαρμόζονται με θερμή πίεση στις πλευρές των κλώνων για να σταθεροποιήσουν το ίδιο τμήμα του πηνίου πριν από την εξάπλωση.

Επιτοίγια Μόνωση

Το GE "MICA MAT" χρησιμοποιείται για τη μόνωση των πηνίων. Το "MICA MAT" είναι κατασκευασμένο από σύνθετο μίκα κορεσμένο με ρητίνη ανάμεσα σε γυαλί και πολυεστερική μεμβράνη για πρόσθετη αντοχή και προστασία. Σε μηχανήματα μικρού και μεσαίου μεγέθους, τα ευθεία τμήματα του πηνίου μονώνονται τυλίγοντας τα με ένα φύλλο "MICA MAT".

Σε μεγάλες μηχανές, τα ευθεία τμήματα του πηνίου είναι μονωμένα με πολλαπλά μισά περιτυλιγμένα στρώματα ταινίας "MICA MAT".

Προστασία Μερικής Εκκένωσης

Η προστασία μερικής εκφόρτισης εφαρμόζεται όταν η τάση της μηχανής ισούται ή υπερβαίνει τα 5200 V. Πριν από το 1984,

Σφήνα Εγκοπών

Το πηνίο είναι σφηνωμένο σε όλο το μήκος του πυρήνα του στάτορα. Οι σφήνες είναι κατασκευασμένες από γυαλί από πολυεστέρα ή γυάλινες πολυεστέρες με επικάλυψη από γυάλινο ύφασμα. Η συσκευασία αυλακώσεων είναι πληρωτικά πολυεστερικού υαλοβάμβακα και τοποθετείται ένα πτυχωτό Nomex ή βερνικωμένο γυαλί πληρώσεως μεταξύ της κορυφής του πηνίου και της σφήνας. Αυτό εμποδίζει τη σφήνα να καταστρέψει το πηνίο, και όταν η τσόχα είναι εμποτισμένη με ρητίνη VPI, σχηματίζει ένα συμπαγές μπλοκάρισμα για ασφαλή εφαρμογή των πηνίων στην υποδοχή.

Winding Extension Lead and Insulation

Οι σύνδεσμοι και οι δακτύλιοι κυκλώματος είναι μονωμένοι και θωρακισμένοι με τις ίδιες ταινίες που χρησιμοποιούνται στη groundwall μόνωση.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΜΟΝΩΣΗΣ ΠΕΡΙΕΛΙΞΕΩΝ ΔΡΟΜΕΑ

Απαιτείται ηλεκτρική μόνωση σε διάφορους τύπους περιελίξεων δρομέα μηχανών AC, περιλαμβανομένων των δρομέων με κατανεμημένο τύλιγμα, δρομείς με έκτυπους πόλους και των επαγωγικών κινητήρων. Συνήθως, υπάρχει μόνωση μεταξύ των σπειρών και μόνωση ως προς τα γειωμένα μέρη. Οι τάσεις που υπάρχουν στις περιελίξεις του δρομέα είναι πολύ χαμηλότερες από αυτές στις περιελίξεις του στάτη. Έτσι, ο σχεδιασμός των συστημάτων μόνωσης περιέλιξης δρομέα τείνει να περιορίζεται από τις μηχανικές και θερμικές ικανότητές τους.

Σε αυτό το κεφάλαιο περιγράφεται η μόνωση που απαιτείται και οι καταπονήσεις που ασκούνται στη μόνωση των διαφόρων εξαρτημάτων περιέλιξης του δρομέα, όπως οι περιελίξεις, οι δακτύλιοι ολίσθησης, οι δακτύλιοι συγκράτησης, η ταινία τελικής περιέλιξης κλπ. Αναφέρονται επίσης τα υλικά που χρησιμοποιούνται και ο τρόπος κατασκευής των συστημάτων μόνωσης. Η μόνωση περιέλιξης του δρομέα εκτίθεται σε

διαφορετικές πιέσεις από εκείνες της περιέλιξης του στάτη. Οι πιέσεις του δρομέα μπορούν να περιλαμβάνουν:

- Θερμική καταπόνηση από τις απώλειες ρεύματος I^2R DC στην περιέλιξη πεδίου.
- Φυγοκεντρική δύναμη από την υψηλή ταχύτητα περιστροφής του δρομέα.
- Η σχετικά χαμηλή ηλεκτρική καταπόνηση, καθώς οι σύγχρονες περιελίξεις πεδίου μηχανής και οι τριφασικές περιελίξεις περιστρεφόμενου ρότορα σπάνια λειτουργούν σε τάση μεγαλύτερη από 1000 VDC. Με τα συστήματα στατικής διέγερσης, οι υπερτάσεις τάσης από τη λειτουργία του θυρίστορ μπορεί να οδηγήσουν σε μερικές εκκενώσεις σε πολύ μεγάλες γεννήτριες που λειτουργούν σε σχετικά υψηλές τάσεις DC.
- Λάδι, υγρασία και λειαντικά υλικά που μπορεί να υπάρχουν στο μηχάνημα μπορεί είτε να προκαλέσουν ηλεκτρική αγωγή διαδρομή μεταξύ των στρωφών περιέλιξης είτε στη γείωση εάν ο χαλκός δεν είναι πλήρως μονωμένος και η τριβή της μόνωσης.
- Διαστολή και συστολή των αγωγών χαλκού, κάθε φορά που ενεργοποιείται και απενεργοποιείται ο κινητήρας η κίνηση του χαλκού οδηγεί σε τριβή της μόνωσης ή / και παραμόρφωση των αγωγών χαλκού στην τελική περιέλιξη.

Ο κινητήρας εναλλασσόμενου ρεύματος που χρησιμοποιείται περισσότερο είναι ο επαγωγικός κινητήρας βραχυκυκλωμένου δρομέα. Ο ρότορας αποτελείται από βαριές ράβδους χαλκού, ορείχαλκου ή κράματος αλουμινίου συγκολλημένες ή συγκολλημένες σε δακτυλίους και ενσωματωμένες σε λαμαρίνα από σίδηρο. Εναλλακτικά, οι περιελίξεις μπορεί να είναι από κράμα αλουμινίου χυτοπρεσαριστό. Ο επαγωγικός κινητήρας βραχυκυκλωμένου δρομέα λειτουργεί χωρίς ολίσθηση ηλεκτρικών επαφών οποιουδήποτε είδους. Δεν υπάρχει γενικά εφαρμοσμένη μόνωση μεταξύ των αγωγών και των ελασμάτων, καθώς η διαφορά στην αγωγιμότητα των ράβδων από χαλκό ή αλουμίνιο σε σχέση με τις πλάκες σιδήρου και η χαμηλή τάση στην οποία λειτουργεί ο ρότορας αποφεύγει την ανάγκη.

4.1 Μόνωση Εγκοπών δρομέα και μόνωση σημείου περιστροφής σπειρών

Οι περισσότεροι τύποι δρομέα σε κινητήρες και γεννήτριες, εκτός από τον τύπο SCI, έχουν επιτοίχια μόνωση και μόνωση σημείου περιστροφής. Οι δρομείς σε μικρότερα μηχανήματα είναι συνήθως τυχαίας κατανομής, χρησιμοποιώντας στρογγυλό σμάλτο (μαγνήτη) σύρμα (συνήθως με ένα βερνίκι για να συνδέσουν τους αγωγούς μαζί) που χρησιμεύει τόσο ως επιτοίχια μόνωση και μόνωση σημείου περιστροφής. Για τους δρομείς υψηλότερης τάσης, προσδιορισμένης και τυχαίας κατανομής πηνία,

χρησιμοποιείται ξεχωριστή μόνωση για αυλάκια και περιστροφής. Αυτή η μόνωση είναι συνήθως κατασκευασμένη από κομμάτια των υλικών που έχουν τοποθετηθεί πριν από την τοποθέτηση των περιελίξεων. Εναλλακτικά, μερικοί μικροί δρομείς χρησιμοποιούν μια μέθοδο ηλεκτροστατικής επικάλυψης για να εφαρμόζουν σκόνης πολυμερούς στις υποδοχές για μόνωση.

Τα υλικά που επιλέγονται για τη μόνωση στα αυλάκια και περιστροφής ποικίλουν ανάλογα με την κατηγορία θερμοκρασίας της περιέλιξης την τάση και την ισχύ της μηχανής. Τα διαμορφωμένα φύλλα μπορούν να είναι από χαρτί αραμιδίου (όπως Nomex™ από την DuPont) για μεσαίου μεγέθους γεννήτριες ή ελάσματα από πλαστικές μεμβράνες και μη υφασμένα στρώματα για μικρότερα μηχανήματα.

Μια πολύ κοινή μόνωση για τα αυλάκια ονομάζεται DMD [για ελασματοποίηση Dacron, Mylar, Dacron (εμπορικά σήματα DuPont)], με κατάλληλη κόλλα. Το DMD κατασκευάζεται από την DuPont και άλλους προμηθευτές από πολυεστερική ρητίνη τερεφθαλικού πολυαιθυλενίου σε μορφή φιλμ και μη υφασμένων ινών. Μια σειρά παρόμοιων ελασμάτων είναι διαθέσιμα για χρήση σε μηχανήματα με διαφορετικές κατηγορίες θερμοκρασίας. Οι χρησιμοποιούμενες μεμβράνες περιλαμβάνουν το ναφθαλικό πολυαιθυλένιο, το νάιλον και τα πολυϊμίδια. Τα μη υφασμένα υφάσματα περιλαμβάνουν το βαμβακερό χαρτί, το χαρτί kraft χαρτιού αλεύκαστου ξύλου, στρώμα από ίνες αραμιδίου, στρώμα υαλοβάμβακα και συνδυασμό πολυεστέρα και υαλοβάμβακα σε μορφή στρώματος. Παρόμοια υλικά χρησιμοποιούνται για τη μόνωση περιστροφής με τη μορφή τεμαχίων κομμένων από φύλλα ή ρολά. Για στρογγυλά πεδία δρομέα με βαρύ πηνίο από χαλκό, χρησιμοποιούνται λεπτά φύλλα υφάσματος από υαλοβάμβακα και πολυεστέρα ή εποξική ρητίνη.

Η μόνωση των αυλακίων για τους στρογγυλεμένους δρομείς δύο και τεσσάρων πόλων έχει εξελιχθεί με την πάροδο του χρόνου από ένα σύνθετο με βάση το μαρμαρυγία με χαρτί kraft, γυαλί ή ύφασμα αμιάντου και συγκολλητικές ρητίνες σε κομμάτια των θωρακισμένων κυψελών. Διάφορες μέθοδοι χρησιμοποιούνται για την κατασκευή αυτών των μονωτικών κομματιών.

Περιλαμβάνουν μεμονωμένα καλούπια που κατασκευάζονται σε πρέσες συμπίεσης, χύτευση συμπίεσεως με βηματική πίεση και χύτευση υδραυλικών ή αυτόκλειστων στρώσεων. Τα μεγάλα τμήματα από τις δύο τελευταίες μεθόδους κόβονται και τακτοποιούνται σε μεμονωμένα κομμάτια. Οι πολυεστερικές ρητίνες χρησιμοποιούνται για το προ-εμποτισμό γυάλινου υφάσματος για μεμονωμένα συμπίεσιμα κομμάτια ενώ τα προ-εμποτισμένα εποξειδικής ρητίνης με γυάλινο ύφασμα χρησιμοποιούνται για τη διαδικασία πτύχωσης. Αυτή η διαδικασία μπορεί επίσης να προσθέσει ειδικά στρώματα αραμιδίου και ανθεκτικών στις υψηλές θερμοκρασίες ιμιδοειδών μεμβρανών για την αύξηση της διηλεκτρικής αντοχής.

Οι ρητίνες που επιλέγονται για μόνωση για τα αυλάκια πρέπει να είναι σκληρές, ανθεκτικές στη θερμική γήρανση και να έχουν θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης (T_g) για το σκληρυνθέν υλικό που υπερβαίνει τη μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας. Η T_g είναι η θερμοκρασία στην οποία η ωριμανθείσα ρητίνη μαλακώνει ή αλλάζει από κρυσταλλική σε ελαστική ή άμορφη κατάσταση.

Λειτουργώντας πάνω από αυτή τη θερμοκρασία, η ρητίνη μπορεί να ξεφύγει από την ενίσχυση, καταστρέφοντας τα κομμάτια μόνωσης.

Οι δρομείς με έκτυπους πόλους σε υδρογεννήτριες μεγαλύτερους από περίπου 50MW και αυτοί που λειτουργούν στις 1800 έως 1000 σ.α.λ., έχουν τέτοιο σχεδιασμό καθώς μπορούν να αντέξουν καλύτερα τις φυγοκεντρικές δυνάμεις περιστροφής. Οι πόλοι

αυτού του τύπου περιέλιξης μπορούν να κατασκευαστούν είτε από πολυστρωματικό είτε από συμπαγές μαγνητικό χάλυβα. Στην περίπτωση του στερεού τύπου χαλύβδινου πόλου, που χρησιμοποιείται σε μεγαλύτερες μηχανές υψηλής ταχύτητας, οι άκρες πόλων μπορούν να είναι είτε βιδωμένες είτε ενσωματωμένες.

Σε αυτή την περίπτωση, σχηματίζεται μία λεπτή λωρίδα χαλκού σε σχήμα “κορνίζας” και τα πηνία συνήθως υφίστανται πλήρη επεξεργασία, συμπεριλαμβανομένου του εμποτισμού βερνικιού, πριν εγκατασταθούν στους πόλους. Η μόνη εξαίρεση είναι η κατασκευή ολοκληρωμένου τύπου πόλου, για την οποία οι κορνίζες πρέπει να συνδεθούν μεταξύ τους για να σχηματίσουν ένα πηνίο καθώς είναι εγκατεστημένα στον πόλο. Οι λωρίδες υλικού, που σήμερα είναι συνήθως χαρτί αραμιδίου, το οποίο η DuPont ονομάζει Nomex™, δρουν ως μόνωση περιστροφής για να διαχωρίσουν τα πλαίσια χαλκού το ένα από το άλλο. Σε μερικά πλαίσια χαλκού, ειδικά κοντά στην πρόσοψη του πόλου, μπορεί να εφαρμοστεί μονωτική ταινία στον χαλκό για να αυξηθεί η απόσταση ερπυσμού στο χαλύβδινο πόλο. Τα χάλκινα πλαίσια εικόνων συνδέονται σε σειρά για να κάνουν το πηνίο. Όπως συμβαίνει και με τον σχεδιασμό πολλών στρώσεων, η περιέλιξη απομονώνεται από τον γειωμένο πόλο με μονωτικές ροδέλες και ταινίες.

Τα βερνίκια συγκόλλησης σε μηχανές έκτυπων πόλων επιλέγονται σύμφωνα με την κατηγορία θερμοκρασίας της μηχανής και την σκληρότητα και την ελαστικότητα που απαιτούνται για την εφαρμογή. Αν η μίκα είναι επιλεγμένη για τη μόνωση γείωσης, συνδεδεμένη με λαστίκ, λάκα-εποξικό ή βινυλο-αλκυδικό. Χρησιμοποιούνται επίσης σύνθετα σχισίματα μαρμαρυγίας, φύλλα αραμιδίου, υάλινα υφάσματα και εποξειδικές ρητίνες.

Στον παρακάτω πίνακα 4.1 παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά και οι ιδιότητες ανθεκτικού σε υψηλή θερμοκρασία **χαρτιού αραμιδίου** διαφορετικών βαθμίδων της DuPont με την ονομασία Nomex.

Το Nomex χρησιμοποιείται για την μόνωση εγκοπών και την turn insulation, σε περιελίξεις ρότορα χαμηλής τάσης.

Βαθμίδες	410	410	410	411	414
Πάχος (mils / mm)	2.0/0.05	5.0/0.13	7.0/0.18- 30.0/.76	5.0/0.13– 23.0/.58	7.0/0.18– 15.0/.38
<u>ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ</u>					
<u>Θερμικές</u>					
Κατηγορία θερμοκρασίας (°C)	220	220	220	220	220
<u>Ηλεκτρικές</u>					

Διηλεκτρική αντοχή (kV/mm)	20	29	30	12	28.5
Διηλεκτρική σταθερά	1.6	2.4	3	1.3	2.7
Συντελεστής αποσβέσεως	0.004	0.006	0.0065	0.005	0.02
Μερική αντίσταση εκκένωσης	Καλή	Καλή	Καλή	Καλή	Καλή
Μηχανικές					
Αντοχή εφελκυσμού (MPa) MD	75.6/63.7	114.3/96	120/100	13.8/11.6	90/76
Στους 24/150°C XD	37.9/31.8	53.7/45.1	65/55	8.3/7.0	51/43
Μέγιστη αντοχή σχισίματος άκρων (N) MD	93	380	580–1200	45–250	55–157
Στους 24°C XD	40	150	260–580	27–170	110–260
Elmendorf δύναμη σχισίματος (N) MD	0.8	2.2	3.3–18	1.3–6.2	-
Στους 24°C XD	1.6	5.7	7.4–28	1.8–9.6	-

Πίνακας 4.1

MD: κατεύθυνση της μηχανής XD: εγκάρσια κατεύθυνση

Απορρόφηση νερού: Ο ρυθμός απορρόφησης εξαρτάται από το πάχος του υλικού, για παράδειγμα, ένα ξηρό φύλλο 3 μιλ. Της βαθμίδας 410 φτάνει το 50% της περιεκτικότητας του σε ισορροπία σε 1 ώρα σε 95% υγρασία, ενώ ένα φύλλο 30 χιλιοστών αυτού του υλικού θα πάρει 2 ημέρες για να φτάσει σε αυτό το επίπεδο. Αυτά τα υλικά απορροφούν έως και 14% νερό σε υγρασία 95%.

Χημική αντίσταση: Το υλικό αυτό έχει καλή αντίσταση στα πιο κοινά οξέα και αλκάλια και είναι πλήρως συμβατό με όλες τις κατηγορίες ηλεκτρικών βερνικιών και ρητινών, δηλαδή πολυαμιδίων, σιλικόνων, εποξειδίων, πολυεστέρων, ακρυλικών, φαινολικών, συνθετικών καουτσούκ κλπ.

Αντοχή στην ακτινοβολία: Το υλικό αυτό έχει καλή αντίσταση τόσο στις βήτα όσο και στις ακτινοβολίες γάμμα. Οι διηλεκτρικές του ιδιότητες είναι ουσιαστικά

ανεπηρέαστες από ολικές δόσεις ακτινοβολίας μέχρι 6400 megarads. Οι μηχανικές του ιδιότητες δεν επηρεάζονται σημαντικά μέχρις ότου η συνολική δόση ξεπεράσει τα 400 megarads.

Ακόμη στον παρακάτω πίνακα 4.2 ανφέρονται τα χαρακτηριστικά και οι ιδιότητες ανθεκτικού σε υψηλή θερμοκρασία χαρτιού αραμιδίου και μαρμαρυγίας, της DuPont με την ονομασία Nomex M. Το Nomex M χρησιμοποιείται για την turn insulation αλλά και για Groundwall μόνωση.

Πάχος (mils / mm)	3/8–10/0.25
<u>ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ</u>	
<u>Θερμικές</u>	
Κατηγορία θερμοκρασίας (°C)	220
<u>Ηλεκτρικές</u>	
Διηλεκτρική αντοχή (kV/mm)	39
Διηλεκτρική σταθερά	2.5
Συντελεστής αποσβέσεως	0.006
Αντίσταση μερικής εκκένωσης	Πολύ καλή
<u>Μηχανικές</u>	
Αντοχή εφελκυσμού (MPa) MD	45/37.8
Στους 24/150°C XD	30/25.2
Μέγιστη αντοχή σχισίματος άκρων (N) MD	40–110
Στους 24°C XD	22–67
Elmendorf δύναμη σχισίματος (N) MD	1.2–4.3
Στους 24°C XD	1.8–5.6

Πίνακας 4.2

Απορρόφηση νερού : Αυτό εξαρτάται από το πάχος του υλικού, δηλαδή, όσο παχύτερο είναι το υλικό, τόσο πιο αργά απορροφά την υγρασία.

Για την **Χημική αντίσταση** και την **Αντοχή στην ακτινοβολία** ισχύει ότι ισχύει και για το Nomex στις βαθμίδες 410.411.414.

4.2 Μόνωση Συλλέκτη

Εκτός εάν η περιέλιξη του δρομέα τροφοδοτείται από έναν "χωρίς ψήκτρες" διεγέρτη (στον οποίο το DC προέρχεται από ένα ανορθωμένο ρεύμα εναλλασσόμενου ρεύματος που προκαλείται σε μια βοηθητική περιέλιξη στο ρότορα) χρειάζονται έναν συλλέκτη για να φέρουν το ρεύμα DC στο τύλιγμα διέγερσης του δρομέα. Οι δακτύλιοι

απαιτούνται επίσης για τις περιελίξεις δρομέα επαγωγικού κινητήρα. Το συγκρότημα συλλέκτη κατασκευάζεται γενικά ως ξεχωριστό αντικείμενο που συστέλλεται θερμότατα πάνω στον άξονα του στροφέα κατά τη συναρμολόγηση. Υπάρχει μεγάλη ποικιλία υλικών για τις ανάγκες μόνωσης.

Μια κοινή επιλογή για τη μόνωση του δακτυλίου είναι η μαρμαρυγία. Το μαρμαρυγείο είναι ένα υλικό βήματος B που εφαρμόζεται με μαλάκωμα θερμότητας στο κέλυφος του συλλέκτη ή στο πλήμνη, μαζί με πρόσθετο βερνίκι σύνδεσης. Μετά την περιτύλιξη, το μαρμαρυγία υπόκειται σε υψηλή θλιπτική δύναμη, για παράδειγμα με περιτύλιξη με χαλύβδινο σύρμα υπό τάση. Στη συνέχεια η μονάδα ψήνεται με φούρνο για να σκληρύνει το βερνίκι, απογυμνώνεται από το σύρμα και επεξεργάζεται σε ένα τόρνο σε μια στενά καθορισμένη εξωτερική διάμετρο. Οι δακτύλιοι συλλογής χάλυβα (δακτύλιοι χαλκού ή κράματος χαλκού χρησιμοποιούνται συνήθως σε wound-rotor μηχανές) στη συνέχεια θερμοσυρρίκονται πάνω στη ground μόνωση μαρμαρυγίας. Η σύγχρονη πρακτική είναι η εφαρμογή ρινισμάτων από πολυεστερικές ρητίνες εμποτισμένων με ίνες υάλου, υπό τάση περιελίξεως, μεταξύ και πέρα από κάθε δακτύλιο. Μετά τη σκλήρυνση με ρητίνη, το πλεόνασμα υλικού κατεργάζεται και το τελευταίο στρώμα βερνικιού σφράγισης βουρτσίζεται πάνω από τις ταινίες υαλοβάμβακα και σκληρύνεται.

Η μόνωση του ψυκτροφορέα του συλλέκτη γενικά κατασκευάζεται από ενώσεις χύτευσης, ελασματοποιημένες σανίδες ή σωλήνες από χαρτί, βαμβάκι ή ίνες γυαλιού κατάλληλα συνδεδεμένες και εμποτισμένες. Οι ρητίνες που επιλέγονται για τις επιφάνειες που είναι ανθεκτικές στην υγρασία αυτών των τεμαχίων είναι πολύ σημαντικές για καλή λειτουργία.

4.3 Τελική μόνωση περιελίξης και Blocking insulation

Διπολικοί ή τετραπολικοί δρομείς με κατανεμημένο τύλιγμα λειτουργούν γενικά σε καθαρά περιβάλλοντα. Οι μεγαλύτερες γεννήτριες είναι συνήθως εντελώς κλειστές σχεδιαστικά στους οποίους ο ρότορας λειτουργεί σε ατμόσφαιρα πεπιεσμένου αερίου υδρογόνου για να ελαχιστοποιήσει τις απώλειες εξαερισμού και να βελτιώσει τη μεταφορά θερμότητας των απωλειών αγωγών στους εναλλάκτες θερμότητας. Οι μηχανές με αέρα ψύξης μπορούν επίσης να είναι πλήρως κλειστές με ψύξη αέρος-νερού μέσω ενός εναλλάκτη θερμότητας. Ο αέρας καθαρίζεται συνήθως περνώντας από φίλτρα ή φυγοκεντρικές μονάδες καθαρισμού για να απομακρυνθούν τα περισσότερα σωματίδια. Το καθαρό περιβάλλον επιτρέπει στις χάλκινες άκρες των πηνίων πεδίου έξω από τις σχισμές να εκτίθενται απευθείας στο αέριο ψύξης για μέγιστη απόδοση ψύξης. Για μεγαλύτερα πηνία, κάθε στροφή διαχωρίζεται από τις γειτονικές στροφές από μια λωρίδα μόνωσης φύλλων. Τα μικρότερα πηνία ρότορα, τα οποία κατασκευάζονται με περιστροφική περιελίξη, συχνά χρησιμοποιούν ταινία σε κάθε άλλη στροφή έξω από το τμήμα υποδοχής αλλά μπορούν επίσης να έχουν μόνωση λωρίδων όπως αραμιδικό χαρτί. Η ταινία στρέψης είναι συχνά χαρτί ή σχισίματα εμποτισμένα με ρητίνη B ή με άλλες ρητίνες, υποστηριζόμενη από ύφασμα από υαλοβάμβακα, αλλά μπορεί επίσης να είναι αραμιδικό χαρτί με εποξική ρητίνη στη μία πλευρά για την προώθηση της συγκόλλησης.

Αερόψυκτοι ρότορες που έχουν σχεδιαστεί για χρήση σε ακάθαρτα περιβάλλοντα, όπως οι εγκαταστάσεις εξόρυξης και χημικής παρασκευής, συνήθως έχουν ολόκληρη

την τελική περιέλιξη περιτυλιγμένη σε ταινία κατασκευασμένη από ίνες υαλοβάμβακα εμποτισμένη με ρητίνη. Κάποια σχέδια έχουν πλάκες ακτινοβολίας αλουμινίου συναρμολογημένες πάνω στη μόνωση της τελικής στροφής και μεταξύ γειτονικών σπειρών για να βοηθήσουν στην αφαίρεση της θερμότητας.

Οι τελικές περιελίξεις δεν είναι σταθερές κάτω από το φυγόκεντρο φορτίο, εκτός αν υποστηρίζονται από δακτυλίους συγκράτησης και ασφαρίζονται μεταξύ τους. Οι ελλειπείς ή κακώς μετατοπισμένοι κορμοί μπορούν να οδηγήσουν σε στρέβλωση του πηνίου από τη θερμική διαστολή του αγωγού κάτω από το φορτίο. Τα υλικά μπλοκαρίσματος κατασκευάζονται γενικά από χυτευμένο με συμπίεση φύλλο βαρέως υλικού. Παρόλο που ο αμιάντος χρησιμοποιήθηκε στο παρελθόν, αντικαταστάθηκε με ύφασμα από υαλοβάμβακα, εμποτισμένο με φαινολικές, πολυεστερικές ή εποξειδικές θερμοσκληρυνόμενες ρητίνες. Το μπλοκάρισμα μεταξύ των ευθύγραμμων τμημάτων των τελικών περιελίξεων που προεξέχουν έξω από τις σχισμές αποτελείται από σφηνοειδή σχήματα, ενώ τα ακραία μπλοκ είναι ορθογώνια κομμάτια με καμπύλες εξωτερικές άκρες. Υπάρχουν συνήθως λωρίδες από πολυστρωματικό υλικό που είναι στερεωμένες στην κορυφή των μπλοκ για να αποφευχθεί η μετατόπιση τους. Όλα τα μπλοκ τοποθετούνται ξεχωριστά με λείανση και μπορούν να συγκολληθούν στη θέση τους με στρώματα βερνικιού υαλοβάμβακα εμποτισμένου με ρητίνη Β και με τριμέννο ή ψεκασμένο θερμοσκληρυντικό βερνίκι. Αφού συναρμολογηθούν όλα τα τεμάχια και οι δεσμοί, ολόκληρη η τελική περιέλιξη υποβάλλεται σε ακτινική εσωτερική θερμική πίεση. Ο τύπος ολοκληρώνει τη σκλήρυνση των ρητινών και των βερνικιών και πιέζει την εξωτερική διάμετρο της συσκευασίας σπειρών κάτω από τη διάμετρο των δακτυλίων συγκράτησης και τη μόνωση τους, ώστε να επιτρέπεται η συναρμολόγηση των δακτυλίων επάνω τους.

4.4 Μόνωση Δακτυλίου Συγκράτησης

Οι ακραίες περιελίξεις των σπειρωμάτων δρομέα πρέπει να συγκρατούνται από την ακτινική κίνηση με τη χρήση χαλύβδινων δακτυλίων συγκράτησης χάλυβα που συρρικνώνουν θερμότητα στα άκρα του σώματος του δρομέα.

Ανάλογα με τη σχεδίαση, αυτοί οι δακτύλιοι είναι κατασκευασμένοι είτε από μαγνητικό είτε μη μαγνητικό σφυρήλατο χάλυβα και είναι τα μέρη με τις περισσότερες καταπονήσεις του ρότορα, καθώς πρέπει να φέρουν το δικό τους φυγόκεντρο φορτίο και αυτό των πηνίων πεδίου κάτω από αυτά. Η μόνωση του δακτυλίου συγκράτησης εισάγεται μεταξύ της εξωτερικής ακτίνας (ή της κορυφής) των πηνίων πεδίου και των δακτυλίων συγκράτησης. Έχουν χρησιμοποιηθεί πολλά υλικά για τη συγκράτηση της μόνωσης δακτυλίου. Τα αρχικά σχέδια χρησιμοποίησαν συσσωρευμένα φύλλα μαρμαρυγίας. Η πρόσφατη πρακτική έχει χρησιμοποιήσει αρκετά τμήματα από διαμορφωμένα φύλλα που κατασκευάζονται με ύφασμα εποξειδικού και υαλοβάμβακα. Συχνά, ένα συμπίεσμένο υλικό, όπως χαρτί αραμιδίου, τοποθετείται μεταξύ της κύριας μόνωσης και της κορυφής των πηνίων για να παρέχει κάποια προστασία. Η συναρμολόγηση των δακτυλίων συγκράτησης πάνω από τη μόνωση απαιτεί τη θέρμανση των χαλύβδινων δακτυλίων με καυστήρες αερίου ή με ηλεκτρική επαγωγή. Η μόνωση του δακτυλίου συγκράτησης πρέπει να συσφίγγεται στην τελική

περιέλιξη, συνήθως με χαλύβδινες ταινίες, καθώς οι δακτύλιοι τοποθετούνται στη θέση τους.

4.5 Άμεση Ψύξη Μόνωσης Δρομέα

Οι δρομείς και η μόνωση τους που αναφέρονται στα τμήματα 4.3 και 4.4 ονομάζονται περιελίξεις δρομέα έμμεσης ψύξης. Η θερμότητα που παράγεται στο τμήμα υποδοχής των περιελίξεων πρέπει να ρέει διαμέσου της ground μόνωσης ή την μόνωση των κυψελών υποδοχής, στα χαλύβδινα δόντια μεταξύ των εγκοπών των πηνίων και στις εγκοπές ψύξης και μεταξύ των εγκοπών των πηνίων. Το αέριο ψύξης ωθείται μέσω των εγκοπών ψύξης και των οπών εξαερισμού τους για την απομάκρυνση της θερμότητας. Οι περιελίξεις του δρομέα μπορούν να μεταφέρουν σημαντικά μεγαλύτερο ρεύμα χωρίς υπερθέρμανση, υιοθετώντας μεθόδους για την άμεση ψύξη του χαλκού. Αυτό αυξάνει σημαντικά την απόδοση της διαδικασίας απομάκρυνσης θερμότητας, επιτρέποντας την αύξηση της πυκνότητας του ρεύματος των περιελίξεων πεδίου. Οι δρομείς άμεσης ψύξης είναι πολλών τύπων. Όλα χαρακτηρίζονται από το ότι απομακρύνεται το μεγαλύτερο μέρος της θερμότητας με άμεση επαφή των αγωγών του χαλκού με το ψυκτικό μέσο. Αυτή η διάταξη προσθέτει κάποια περιπλοκότητα στη μόνωση του δρομέα. Η άμεση ψύξη δεν εξαλείφει απαραίτητως την παρουσία των εγκοπών ψύξης του δρομέα. Μπορεί να χρησιμοποιούνται ακόμα σχισμές για την απομάκρυνση της θερμότητας που παράγεται στο χάλυβα του ρότορα καθώς και μερικές από τις απώλειες χαλκού I^2R .

Ο λιγότερο περίπλοκος σχεδιασμός χρησιμοποιεί την απλή ακτινική ροή του αερίου ψύξης από τις υποθυρίδες του αγωγού κάτω από τα αυλάκια των πηνίων, μέσω της μόνωσης κυψελών υποδοχής, ακτινικά διαμέσου οπών στην μόνωση στροφής και χάλκινης σχισμής και μέσω των μπλοκ χώρου ερπυσμού και πτερύγιων συγκράτησης από χάλυβα ή αλουμίνιου. Το αέριο εξέρχεται στο διάκενο αέρα μεταξύ του δρομέα και της εσωτερικής διαμέτρου του πυρήνα του στάτη. Οι οπές στις στροφές του χαλκού, στις υποθυρίδες και στις σφήνες γενικά κατατάσσονται κάθετα προς τον άξονα του δρομέα, επιτρέποντας έτσι την οικονομική διάτρηση των οπών στον χαλκό και την περιστροφή της μόνωσης και της μηχανουργικής επεξεργασίας των οπών στα μπλοκ χώρου και τις σφήνες.

Τα μονωτικά στοιχεία των απλών, ακτινικών, με άμεση ψύξη δρομείς είναι γενικά κατασκευασμένα από τα ίδια υλικά που χρησιμοποιούνται για παρόμοια μέρη σε σχέδια με έμμεση ψύξη. Οι πιο συνηθισμένες επιλογές για μηχανές ονομαστική ισχύ άνω των 50MW είναι τα εποξειδικά υαλομβαμβηκά φύλλα για την επιτοίχια μόνωση (συνήα δύο τεμάχια σε σχήμα "L"), τη μόνωση στροφών, τα μπλοκ χώρου, το κλείδωμα της τελικής περιέλιξης και τη μόνωση του δακτυλίου συγκράτησης. Για μικρότερες μηχανές με ισχύ μέχρι περίπου 50MW, τα υλικά φύλλων όπως το χαρτί αραμιδίου χρησιμοποιούνται για την επιτοίχια μόνωση. Τα τμήματα μονωτικού τμήματος των αυλακίων είναι πιο περίπλοκα σε σχήμα διατομής και πάχους, καθώς περιέχουν τις οπές ψύξης ροής αερίου. Τα δευτερεύοντα αυλάκια είναι στενότερα από τα αυλάκια πηνίων και είναι εφοδιασμένα με μονωτικά πολυστρωματικά καλύμματα για να υποστηρίξουν τα πηνία και να παρέχουν απόσταση ερπυσμού στις πλευρές του χάλυβα. Το μπλοκ του χώρου ερπυσμού στην κορυφή της στοίβας πηνίων μπορούν να τοποθετηθούν μέσα στην κορυφή των σχισμών της μόνωσης των κυψελών. Πρέπει να είναι αρκετά πυκνές

ώστε να παρέχουν απόσταση ερπυσμού στις σφήνες χάλυβα ή αλουμινίου και στην κορυφή των εγκοπών των πηνίων. Η μόνωση στρέψης και τα μπλοκ ερπυσμού πρέπει να έχουν πολύ υψηλή συμπιεστική αντοχή, καθώς πρέπει να στηρίζουν το φυγόκεντρο φορτίο των σπειρών μέχρι τις μέγιστες συνθήκες υπέρβασης της ταχύτητας του σχεδιασμού.

4.6 Δακτυλιοφόροι Δρομείς

Οι περιελίξεις τύπου "bar-wave" ή "lap-type" είναι κατασκευασμένες από ορθογώνιο χαλκό και είναι μονωμένες με 1/2 στρώμα (στρώματα) υλικών όπως υφασμένη γυάλινη ταινία για μικρότερα μηχανήματα και ταινία με μαρμαρυγία για μεγαλύτερες. Η επιτοίχια μόνωση έχει στα αυλάκια του φύλλα υλικού όπως Nomex™ ή Dacron-Mylar-Dacron. Αφού τοποθετηθούν οι ράβδοι, πρέπει να συγκολληθούν μεταξύ τους και να εφαρμοστούν μονωτικά καλύμματα ταινιών σε κάθε σύνδεση μεταξύ των ράβδων. Γραμμές μονωτικού μπλοκαρίσματος, που κατασκευάζονται από υλικά όπως πολυεστέρες ή εποξικά ενισχυμένα με υαλοβάμβακα, εισάγονται μεταξύ των πηνίων στην περιοχή της τελικής περιέλιξης για την στήριξή τους έναντι των εξωτερικών δυνάμεων που υπάρχουν κατά την λειτουργία.

Η ταινία εφαρμόζεται πάνω στις περιελίξεις του άκρου του ρότορα για να τις συγκρατεί ενάντια στις φυγόκεντρες και τις ηλεκτρομαγνητικές δυνάμεις. Σε πιο σύγχρονες περιελίξεις, αυτή η ταινία αποτελείται από έναν αριθμό στρώσεων ταινίας από ίνες υαλοβάμβακα φορτωμένης με ρητίνη που θερμαίνεται μετά την εφαρμογή για να επιτευχθεί συγκόλληση μεταξύ των στρώσεων για μηχανική αντοχή. Σε παλαιότερες μηχανές και σε μερικούς σύγχρονους κινητήρες χρησιμοποιείται συγκολλητική ταινία συγκολλημένου χάλυβα. Αυτή η ταινία είναι μονωμένη από τις περιελίξεις του άκρου του δρομέα με ένα μονωτικό υλικό φύλλου όπως το Nomex™ που εφαρμόζεται πριν από την τοποθέτησή του. Τα καλώδια που φέρουν καλώδια με μανδύα με μαρμαρυγία χρησιμοποιούνται για να συνδέουν τις φάσεις περιέλιξης με τους δακτυλίους ολίσθησης που κατευθύνονται συνήθως μέσω οπών στον άξονα. Εντούτοις, σε ορισμένα σχέδια οι δακτύλιοι ολίσθησης είναι τοποθετημένοι στην πλευρά περιέλιξης του δρομέα του εδράνου στο άκρο δακτυλίου ολίσθησης για να ανακουφίσουν την ανάγκη για μία οπή άξονα και να επιτρέψουν την σύνδεση των καλωδίων σύνδεσης ή των ράβδων διαύλου με μονωτικά τεμάχια προς το εξωτερικό του άξονα του στροφέα. Μόλις ολοκληρωθεί η περιέλιξη του δρομέα, εμποτίζεται η συγκόλληση των μονωτικών υλικών μεταξύ τους και η σφράγιση με εμβάπτιση ή κυλίνδριση μέσω ρητίνης εποξειδικής ή πολυεστέρα ή με διεργασία παγκόσμιας εμβάπτισης υπό κενό. Μόλις εμποτιστεί, το πλήρες τύλιγμα ψήνεται σε φούρνο για να σκληρυνθεί η ρητίνη.

4.7 Συστήματα και Υλικά Διαφόρων Εταιριών

Σε αυτό το κεφάλαιο αναλύονται 2 συστήματα εταιριών για περιελίξεις δρομέων σύγχρονων μηχανών.

4.7.1 Brush Electrical Machines Ltd

Αυτός ο τύπος περιέλιξης χρησιμοποιείται σε μεγαλύτερους συγχρονισμένους κινητήρες και γεννήτριες τεσσάρων και έξι πόλων.

Brush Electrical Machines Ltd. “STRIP ON EDGE TYPE”

Μόνωση σημείου περιστροφής σπειρών

Δύο στρώματα επικαλυμμένα με ρητίνη Nomex παρεμβάλλονταν μεταξύ στροφών. Επιπλέον, οι στροφές κορυφής και πυθμένα είναι κολλημένες με γυαλί επεξεργασμένη με ρητίνη για την παροχή πρόσθετης ερπυσμού στη γη. Τα πηνία πιέζονται εν θερμώ για να στερεοποιηθούν και τα δύο και η μόνωση περιστροφής πριν τα τοποθετήσετε στο σώμα του πόλου.

Επιτοίγια Μόνωση

Το σώμα του πόλου είναι μονωμένο με Nomex πριν από την τοποθέτηση των πηνίων. Τα πηνία λαμβάνουν ένα τελικό ψεκασμό με βερνίκι φινιρίσματος ανθεκτικό σε λάδια και υγρασία.

Δοκιμές διασφάλισης ποιότητας

Προσωρινές λωρίδες, στις οποίες είναι συνδεδεμένη η περιέλιξη του πεδίου, είναι τοποθετημένες στον δρομέα εάν χρησιμοποιείται διέγερση χωρίς ψήκτρες. Οι δοκιμές κατά την κατασκευή περιλαμβάνουν hipot, αντοχή μόνωσης και μετρήσεις σύνθετης αντίστασης για τον έλεγχο των σπειροειδών. Οι έλεγχοι σύνθετης αντίστασης πραγματοποιούνται πριν και μετά από δοκιμές υπερβολικής ταχύτητας. Οι δοκιμές Megger και hipot εκτελούνται με το μηχάνημα σε λειτουργία και στάσιμο.

4.7.2 Electric Machinery

Η Electric Machinery χρησιμοποιεί δύο τύπους συστημάτων, το πρώτο με ονομασία Electric Machinery “STRAP COPPER TYPE” χρησιμοποιείται για μεγάλους σύγχρονους κινητήρες και γεννήτριες υψηλής ταχύτητας από το 1975.

Λειτουργούν σε θερμοκρασία τάξης F 155°C.

Μόνωση σημείου περιστροφής σπειρών

Χρησιμοποιείται Φύλλο Nomex συνδεδεμένο με λεπτούς ορθογώνιους αγωγούς με θερμοσκληρυνόμενη κόλλα. Η συστοιχία σπειρών συνήθως τοποθετείται με θερμή πίεση μετά την τοποθέτησή της στο αυλάκι.

Επιτοίγια Μόνωση

Πολυεστερικά φιλμ / πολυεστέρα σύνθετα ματ χρησιμοποιούνται για την μόνωση των αγωγών από το σώμα του πόλου. Οι επάνω και κάτω επιφάνειες αγωγών είναι μονωμένες από την άκρη του πόλου και το σώμα με φύλλο πολυεστέρα / γυαλιού.

Δοκιμές διασφάλισης ποιότητας

Οι δοκιμές hipot AC εκτελούνται στη μόνωση στρόφης και γείωσης σε διάφορα στάδια κατασκευής.

Το δεύτερο σύστημα ονομάζεται Electric Machinery “WIREWOUND TYPE” Multilayer wire wound type. Αυτό το σύστημα χρησιμοποιείται σε σύγχρονους κινητήρες και γεννήτριες χαμηλής ταχύτητας από τα μέσα της δεκαετίας του '60. Έχει υποστεί σημαντική εξελικτική μεταβολή από τότε. Πριν από αυτό, χρησιμοποιήθηκαν άλλα υλικά, συμπεριλαμβανομένων καλωδίων καλυμμένων με βαμβάκι, με ασφαλτικά ή φαινολικά βερνίκια ως ενώσεις σύνδεσης.

Λειτουργεί σε τάξη θερμοκρασίας F 155°C και τάση 100-300 V.

Έχει όλες τις μονώσεις ίδιες με το πρώτο σύστημα εκτός από την turn insulation.

Μόνωση σημείου περιστροφής σπειρών

Χρησιμοποιεί Σμάλτο φιλμ, γυαλί πολυεστέρα ή συνδυασμός αυτών των δύο υλικών. Οι αγωγοί συνδέονται μεταξύ τους με "υγρή περιέλιξη" αυτών με θερμοσκληρυνόμενη συγκολλητική ύλη εποξειδικής συγκόλλησης η οποία στη συνέχεια θερμαίνεται.

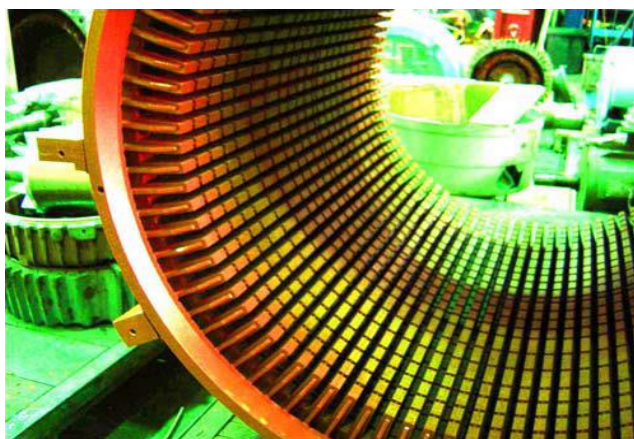
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΠΥΡΗΝΑ ΣΤΑΤΗ ΚΑΙ ΔΡΟΜΕΑ

5.1 Κατασκευή Πυρήνα Στάτη: Γενικά

Ένας μεγάλος πυρήνας στάτη μπορεί να περιέχει έως και 100.000s μονωμένα χαλύβδινα ελασμάτα και πρέπει να συγκρατούνται σφικτά μεταξύ τους αξονικά για να εμποδίζουν τη σχετική ακτινική κίνηση μεταξύ γειτονικών ελασμάτων υπό την επίδραση ηλεκτρομαγνητικών δυνάμεων 100/120 Hz που επιβάλλονται στον πυρήνα κατά τη λειτουργία της μηχανής. Στους πυρήνες με ενιαία λεπτά ελάσματα, ο πυρήνας μπορεί να είναι είτε:

1. Ενσωματωμένος στο πλαίσιο του στάτη και στερεωμένος από δάκτυλα στήριξης δοντιών και χαλύβδινους δακτυλίους σε κάθε άκρο και κατόπιν συγκολλημένο στις ράβδους υποστήριξης πυρήνα ή
2. Κατασκευασμένος ως ξεχωριστό κομμάτι και στη συνέχεια τοποθετείται σε πλαίσιο στάτη με ράβδους στήριξης που έχουν κατασκευαστεί με προφίλ και διαστάσεις που εξασφαλίζουν στενή τοποθέτηση μεταξύ του πυρήνα του στάτη και του πλαισίου. Συνήθως το συγκρότημα πυρήνα είναι κλειδωμένο στο πλαίσιο του στάτη για να αποτρέψει την περιστροφή του κάτω από τις ροπές από τις μαγνητικές δυνάμεις που επιβάλλονται σε αυτό κατά την κανονική λειτουργία και τις συνθήκες βλάβης.

Σε κάθε περίπτωση, συνήθως τοποθετούνται ακτινικοί αγωγοί εξαερισμού κατά τη διάρκεια της διαδικασίας κατασκευής του πυρήνα και ο πυρήνας πρέπει να τοποθετηθεί κάτω από υψηλή αξονική πίεση πριν στερεωθούν στη θέση τους οι δομές στήριξης του άκρου, που αποτελούνται από ακραίες παλάμες και δακτύλιους σύσφιξης (Σχήμα 5.1). Οι ακραίοι δακτύλιοι και τα μπλοκ διαχωριστικών αγωγών χρησιμοποιούνται για να διασφαλίσουν ότι η πίεση των δοντιών εξαπλώνεται ομοιόμορφα προς το κέντρο του πυρήνα. Η εφαρμοζόμενη πίεση κατά τη συναρμολόγηση του πυρήνα πρέπει να είναι ισορροπημένη ώστε να αποφεύγεται η ζημιά του πυρήνα από υπερπίεση ή από έλλειψη επαρκούς στεγανότητας, προκαλώντας τη χαλάρωση του πυρήνα σε λειτουργία. Η υπερβολική σύσφιξη του πυρήνα του στάτορα μπορεί να προκαλέσει βλάβη στις πλατφόρμες και στους διαχωριστές αεραγωγών αερισμού, οι οποίοι είναι συχνά δοκάρια "I", με αποτέλεσμα την εξασθένηση ή ακόμη και τη διάσπαση των δοκών και των λεπτών χαλύβδινων στρωμάτων, οι οποίες με την πάροδο του χρόνου θα οδηγήσουν σε χαλάρωση του πυρήνα. Εάν δεν εφαρμοστεί επαρκής πίεση στον πυρήνα, θα προκύψει δόνηση ελασμάτων, παράγοντας ακουστική βουητό συχνότητας διπλής ισχύος. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε τριβή της μόνωσης ελασματοποίησης ακολουθούμενη από πιθανή καύση, ρωγμές και θραύση του χάλυβα ελασματοποίησης καθώς και υψηλό δυναμικό για ζημιά στη μόνωση της ράβδου στάτη εγκατεστημένη στις σχισμές. Επιπλέον, ένας χαλαρός πυρήνας στάτορα δεν θα είναι σε θέση να αντέξει τις πρόσθετες δυνάμεις κατά τη διάρκεια των συνθηκών σφάλματος και μπορεί να οδηγήσει σε πρόωρη βλάβη του στάτορα. Περαιτέρω, μια χαμηλή δύναμη σύσφιξης θα μειώσει την ικανότητα πυρήνα για να αντισταθεί στο φαινόμενο λυγισμού.



Σχήμα 5.1

Εάν ο πυρήνας του στάτη και η περιέλιξη ψύχονται με αξονική ροή αέρα, οι οπές υπάρχουν στις ελασματοποιήσεις του στάτη για να παρέχουν στους αγωγούς ψύξης που επιτρέπουν στον αέρα να μετακινείται από το ένα άκρο του πυρήνα στο άλλο. Ο σχεδιασμός του πυρήνα και συνεπώς η στεγανότητα πρέπει να μπορούν να προσαρμόζονται στη στηροπή φορτίου κατά την μόνιμη κατάσταση λειτουργίας καθώς και στις μεταβατικές ροπές που παρατηρούνται κατά τη διάρκεια των συνθηκών βλάβης. Τέτοιες ροπές μεταφέρονται διαμέσου των στρωμάτων στο πλαίσιο του στάτη μέσω των ράβδων κλειδιών που είναι τοποθετημένες στο πλαίσιο του στάτορα.

Όταν η εξωτερική διάμετρος του πυρήνα γίνει πολύ μεγάλη για να κατασκευαστούν οι ελασματοποιήσεις για ένα μόνο κομμάτι φύλλου μαγνητικού χάλυβα (μεγαλύτερο από περίπου 1m διάμετρο), χρησιμοποιούνται θραυσμένοι πυρήνες. Αυτά τα τμήματα (Σχήμα 5.2) έχουν εγκοπές στην εξωτερική τους διάμετρο που διευκολύνουν την προσκόλλησή στο πλαίσιο του πυρήνα του στάτη.



Σχήμα 5.2

5.2 Κατασκευή Πυρήνα Δρομέα

Τα βασικά μέρη ενός πυρήνα δρομέα για επαγωγικές μηχανές και δαχτυλιοφόρου δρομέα, καθώς και κινητήρες και γεννήτριες μόνιμου μαγνήτη, είναι παρόμοια με εκείνα ενός πυρήνα στάτη, αλλά φυσικά η μέθοδος υποστήριξης είναι εντελώς διαφορετική. Όπως και με τους πυρήνες στάτη, οι πυρήνες δρομέα με διαμέτρους έως περίπου 1m είναι κατασκευασμένοι από ελασματοειδείς φύλλα απλού τεμαχίου και εκείνοι με διάμετρο μεγαλύτερο από αυτό έχουν διαχωρισμένους πυρήνες. Οι πυρήνες των ρότορων με ελασματοειδείς επιφάνειες απλών τεμαχίων στηρίζονται από έναν άξονα πάνω στον οποίο είναι είτε άμεσα τοποθετημένοι είτε συναρμολογημένοι σε βραχίονες αράχνης που είναι ενσωματωμένοι και συγκολλημένοι στον άξονα ή είναι τοποθετημένοι πάνω στον άξονα (Σχήμα 5.3).

Δεδομένου ο πυρήνας του δρομέα διαστέλλεται λόγω των φυγόκεντρων δυνάμεων κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του, πρέπει να ενωθεί πάνω στον άξονα του δρομέα ή στους βραχίονες . Επίσης, πρέπει να συνδέεται με το γειτονικό άξονα με ένα ή περισσότερα κλειδιά ή με συγκόλληση, ώστε να μην περιστρέφεται στον άξονα υπό την επίδραση της ροπής που μεταδίδεται από τον δρομέα κατά τη λειτουργία της μηχανής. Όταν απαιτείται μηχανική σύσφιξη (παρεμβολή) σε μηχανές όπως οι μεγάλοι κινητήρες δύο πόλων, είναι προτιμότερο να συναρμολογηθεί ο πυρήνας του ρότορα πριν την τοποθέτησή του στον άξονα, και στη συνέχεια να θερμανθεί η συνδεσμολογία για να εξασφαλίσει μια προσαρμογή ολίσθησης για τον ρότορα. Αυτό συμβαίνει επειδή οι δέσμες θέρμανσης των ελασμάτων και η στοίβαξή τους στον άξονα μπορούν να οδηγήσουν σε λυγισμό και χαλαρότητα του πυρήνα μόλις κρυώσουν και συρρικνωθούν πάνω στον άξονα. Οι χωριστοί πυρήνες δρομέων έχουν δύο εγκοπές στην οπή κάθε τμήματος για να τους επιτρέπουν να προσαρμόζονται σε ράβδους κλειδιών

συναρμολογημένες σε ένα στεφάνη που συνδέεται με τον δρομέα. Αυτό το στεφάνη υποστηρίζεται συνήθως από βραχίονες αράχνης συγκολλημένους με τον άξονα του στροφέα. Ο τύπος του πυρήνα του δρομέα και η ψύξη του τυμπάνου εξαρτάται από το μέγεθος και το σχέδιο της μηχανής. Σε μικρότερους κινητήρες και γεννήτριες, η θερμότητα απομακρύνεται με την βοήθεια του αέρα καθώς περνάει από την εξωτερική διάμετρο του δρομέα καθώς περνάει κατά μήκος του διακένου αέρα και προς τα έξω μέσω αγωγών εξαέρωσης στον πυρήνα του στάτορα. Σε μεγαλύτερες μηχανές, οι βραχίονες αράχνης ή οι αξονικοί αγωγοί στον πυρήνα του δρομέα διευκολύνουν τη διέλευση του αέρα ψύξης μέσα στον δρομέα κοντά στον άξονα και έπειτα ακτινικά προς τα έξω μέσω των αγωγών εξαερισμού στους πυρήνες του δρομέα και του στάτη. Σε μερικά σχέδια με μόνο έναν ανεμιστήρα, η ψύξη τόσο του στάτη όσο και των πυρήνων του δρομέα και των περιελίξεων τους επιτυγχάνεται με την ύπαρξη αξονικών αγωγών και στους δύο πυρήνες.



Σχήμα 5.3

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 ΑΙΤΙΕΣ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΗΣ

Αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζει τους κύριους μηχανισμούς γήρανσης και αστοχίας των περιελίξεων στάτορα και ρότορα. Μερικοί από τους μηχανισμούς αστοχίας θα συμβούν μόνο σε form-wound στάτες και μερικοί μόνο σε τυχαίας κατανομής στάτες. Ωστόσο, πολλές από τις διαδικασίες αποτυχίας μπορούν να προκύψουν σε κάθε τύπο στάτη.

6.1 Αιτίες Καταστροφής Περιελίξεων Στάτη

6.1.1 Θερμική Γήρανση

Η θερμική γήρανση συμβαίνει τόσο σε προσδιορισμένης κατανομής στάτες όσο και σε τυχαίας κατανομής στάτες. Είναι πιθανών ένας από τους πιο συνηθισμένους λόγους αποτυχίας των περιελίξεων στάτη, ειδικά εάν το μηχάνημα ψύχεται με αέρα. Αυτή η διαδικασία αστοχίας δεν είναι πολύ πιθανή σε άμεσες περιελίξεις με ψύξη με νερό ή υδρογόνο, με την προϋπόθεση ότι τα κανάλια ψύξης εντός των ράβδων στάτη δεν είναι φραγμένα.

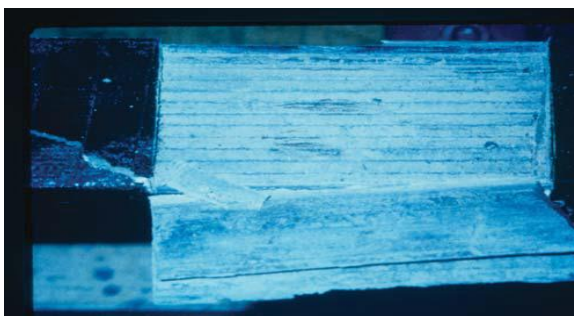
Η θερμική φθορά προκαλείται από τη λειτουργία σε υψηλή θερμοκρασία. Υπάρχουν διάφοροι λόγοι για τους οποίους ενδέχεται να εμφανιστούν υψηλές θερμοκρασίες περιέλιξης:

- Λειτουργία υπερφόρτωσης. Όταν το φορτίο του κινητήρα ή της γεννήτριας είναι μεγαλύτερο από αυτό για το οποίο είχε σχεδιαστεί. Γενικά, η θερμοκρασία θα αυξηθεί με το τετράγωνο του ρεύματος στάτη.
- Κακή κατασκευή. Για παράδειγμα, λόγω βραχυκυκλωμένων αγωγών (σε προσδιορισμένης κατανομής στάτες), βραχυκυκλώματος ελασμάτων πυρήνα και μερικώς μπλοκαρισμένες διαδρομές εξαερισμού, επειδή τα πηνία είναι εγκατεστημένα πολύ κοντά στο τέλος της περιέλιξης.
- Για επαγωγικούς κινητήρες, κάθε φορά που ξεκινάει ο κινητήρας, υπάρχει ρεύμα εκκίνησης περίπου πέντε έως έξι φορές μεγαλύτερο από ό, τι στην κανονική λειτουργία. Αυτό το ρεύμα εκκίνησης δημιουργεί μια επιπλέον απώλεια I^2R . Η προκύπτουσα θερμότητα χρειάζεται χρόνο για να διαχυθεί. Εάν ένας κινητήρας επανεκκινηθεί λίγο μετά την αρχική εκκίνηση, η περιέλιξη του στάτορα (και του ρότορα) ενδέχεται να εξακολουθεί να είναι ζεστή από την πρώτη εκκίνηση και η δεύτερη εκκίνηση θα αυξήσει και άλλο την θερμοκρασία. Αυτό ισχύει ιδιαίτερα για εφαρμογές με υψηλή αδράνεια, όπως οι μονάδες ανεμιστήρα, στις οποίες οι χρόνοι επιτάχυνσης είναι μεγάλοι και, ως εκ τούτου, οι αυξήσεις της θερμοκρασίας του στάτη και του δρομέα κατά την εκκίνηση είναι υψηλές.
- Υψηλά αρμονικά ρεύματα από μονάδες τροφοδοσίας με αντιστροφέα αυξάνουν τις απώλειες αγωγού, τον πυρήνα του στάτη και τη διηλεκτρική αντοχή της επιτοίχιας μόνωσης.
- Ρεύματα αρνητικής ακολουθίας από ανισορροπία τάσης στα καλώδια φάσης. Μια ανισορροπία τάσης 3,5% μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση της θερμοκρασίας κατά 25%. Η ανισορροπία τάσης τροφοδοσίας φάσης προς φάση προέρχεται από την τροφοδοσία του συστήματος ισχύος (οι επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας επιτρέπουν αρκετά υψηλές ανισορροπίες) ή όπου μια φάση μπορεί να έχει περισσότερο φορτίο από τις άλλες δύο φάσεις σε μια εγκατάσταση.
- Βρώμικες περιελίξεις που μπλοκάρουν τους αγωγούς εξαερισμού στον πυρήνα και γεμίζουν το διάστημα μεταξύ των πηνίων στο τέλος της περιέλιξης, με αποτέλεσμα την μείωση της ροής του αέρα ψύξης.
- Βρώμικοι, φραγμένοι εναλλάκτες θερμότητας που αποτυγχάνουν να ψύξουν επαρκώς τον αέρα (ή το υδρογόνο).
- Σε άμεσες υδρόψυκτες περιελίξεις, στερεά σωματίδια ή οξείδιο χαλκού στα κανάλια νερού, εμποδίζουν τη ροή του νερού ψύξης.
- Χαλαρά πηνία / ράβδοι στην υποδοχή, τα οποία μειώνουν την αγωγή θερμότητας από τους αγωγούς χαλκού στον πυρήνα.

- Σε σύγχρονα μηχανήματα, δημιουργούνται αξονικές μαγνητικές ροές στο άκρο του πυρήνα του στάτορα, οι οποίες προκαλούν κυκλοφορούντα ρεύματα στα άκρα του πυρήνα του στάτορα (και σε κάποιο βαθμό στους αγωγούς του στάτορα), προκαλώντας τοπικές αυξήσεις θερμοκρασίας στα άκρα του πυρήνα.
- Πάρα πολλές, “βυθίσεις” στις οποίες ο στάτης βυθίζεται σε υγρή ρητίνη για να σφίξουν τα πηνία στην υποδοχή και να επιδιορθώσει την φαγωμένη μόνωση. Αυτή η διαδικασία τείνει να κλείνει τις διαδρομές εξαερισμού μέσω των πυρήνων και των τελικών περιελίξεων των προσδιορισμένης κατανομής στατών, πιθανώς αυξάνοντας τη θερμοκρασία.

Η θερμική γήρανση μπορεί να συμβεί μέσω ποικίλων διαδικασιών, ανάλογα με τη φύση της μόνωσης (θερμοσκληρυνόμενη ή θερμοπλαστική) και το περιβάλλον λειτουργίας. Σε αερόψυκτες μηχανές, όπου η μόνωση είναι θερμοσκληρυνόμενο υλικό (εποξειδικό ή πολυεστέρας) ή μεμβράνη σύγχρονου σύρματος μαγνήτη, η θερμική φθορά είναι ουσιαστικά μια χημική αντίδραση οξείδωσης που συμβαίνει σε αρκετά υψηλές θερμοκρασίες, οι χημικοί δεσμοί εντός των οργανικών μερών η μόνωση διακόπτεται περιστασιακά λόγω της θερμικά επαγόμενης δόνησης των χημικών δεσμών. Όταν συμβαίνει αποκοπή δεσμών, το οξυγόνο συνδέεται συχνά με τους σπασμένους δεσμούς. Το αποτέλεσμα είναι μια βραχύτερη και ασθενέστερη πολυμερής αλυσίδα. Μακροσκοπικά, η μόνωση είναι πιο εύθραυστη και έχει χαμηλότερη μηχανική αντοχή και λιγότερη ικανότητα σύνδεσης των στρώσεων της ταινίας μεταξύ τους.

Για σύρμα περιέλιξης σε τυχαία κατανομής στάτες, η εύθραυστη μόνωση που προκύπτει από θερμική γήρανση σπάει εύκολα καθώς οι αγωγοί χαλκού κινούνται υπό μαγνητικές δυνάμεις κατά την εκκίνηση ή την κανονική λειτουργία. Η παλαιωμένη μόνωση μπορεί επίσης να ξεκολλήσει εύκολα από τον αγωγό. Και οι δύο μηχανισμοί μπορούν να οδηγήσουν σε αστοχία μόνωσης λόγω τριβής. Και στις δύο περιπτώσεις, μπορεί να προκύψουν βραχυκυκλώματα στροφής, γεγονός που οδηγεί γρήγορα σε τοπική υπερθέρμανση στη θέση βραχυκυκλώματος, τήξη του χαλκού και οποιαδήποτε άλλη κοντινή μόνωση, προκαλώντας τελικά φάσμα ως προς γη. Επιπλέον, για προσδιορισμένης κατανομής στάτες, η μειωμένη αντοχή συγκόλλησης μεταξύ κλώνων και επιυχοίας μόνωσης επιτρέπει στα στρώματα της μαρμαρυγίας να αρχίσουν να διαχωρίζονται, με αποτέλεσμα την αποκόλληση. Το Σχήμα 6.1 δείχνει την αποκόλληση ενός επίγειου εποξειδικού μαρμαρυγείου λόγω μακροχρόνιας θερμικής αλλοίωσης. Σε αυτό το σημείο, δύο διαδικασίες μπορούν να οδηγήσουν σε αποτυχία:



Σχήμα 6.1

1. Οι αγωγοί χαλκού να μην συγκρατούνται πλέον σφιχτά. Τελικά, οι αγωγοί μπορεί να αρχίσουν να δονούνται ο ένας εναντίον του άλλου λόγω των μαγνητικά επαγόμενων δυνάμεων. Βραχυκλώματα καλωδίων ή σοβαρά σφάλματα στροφών συρμάτων αν είναι περιέλιξη πηνίου πολλαπλών στροφών θα συμβούν ως αποτέλεσμα τριβής μόνωσης. Αυτό θα δημιουργήσει τοπικά hotspots, τα οποία στη συνέχεια αποσυνθέτουν τη επιτοίχια μόνωση.
2. Εάν τα πηνία λειτουργούν σε τάση υψηλότερη από περίπου 3 kV, ενδέχεται να προκύψει μερική εκκένωση στην μόνωση. Η μερική εκκένωση των στρωμάτων ταινίας μαρμαρυγίας τελικά θα διαβρώσει μια τρύπα μέσω της επιτοίχιας μόνωσης ή της μόνωσης του σημείου περιστροφής προκαλώντας σφάλμα ως προς τη γη.

Σε παλαιότερες προσδιορισμένης κατανομής σπείρες και ράβδους που κατασκευάζονταν με θερμοπλαστικά υλικά συγκόλλησης όπως ασφαλτος, μπορεί να υπάρχει μια επιπλέον διαδικασία αστοχίας. Καθώς η θερμοκρασία της ασφάλτου αυξάνεται πάνω από κάποιο κρίσιμο όριο, συνήθως 70-100°C, η ασφαλτος μαλακώνει και μπορεί πραγματικά να ρέει. Το αποτέλεσμα είναι να υπάρχει λιγότερη ασφαλτος μεταξύ των στρώσεων της ταινίας. Το γεγονός αυτό οδηγεί σε δονήσεις αγωγού ή / και σε μερική εκκένωση.

Η ταχύτητα φθοράς εξαρτάται από το μονωτικό υλικό και τη θερμοκρασία λειτουργίας της μόνωσης. Οι περισσότερες περιελίξεις που έγιναν πριν από το 1970 χρησιμοποίησαν υλικά της Κλάσης 130 (Κλάση B), πράγμα που συνεπάγεται μέση διάρκεια ζωής 20.000 ωρών (περίπου 2,3 έτη) σε θερμοκρασία μόνωσης 130°C. Τα περισσότερα προσδιορισμένης κατανομής μονωτικά υλικά ανήκουν στην τάξη 155 (Class F), δηλαδή, θα έχουν μέση διάρκεια ζωής 2,3 ετών στους 155°C. Οι τυχαίας κατανομής μηχανές έχουν συνήθως συστήματα μόνωσης τάξης 155 (F) ή 180 (H) που μπορούν να λειτουργήσουν περίπου στους 155°C και 180°C, αντίστοιχα, για 2,3 χρόνια πριν γίνουν εύθραυστα. Σαφώς, όσο καλύτερη είναι η θερμική ικανότητα της μόνωσης, τόσο περισσότερο θα διαρκέσει σε μια δεδομένη θερμοκρασία λειτουργίας. Σε γενικές γραμμές, οι σύγχρονες περιελίξεις στάτη κατηγορίας 155 δεν θα παρουσιάσουν θερμική γήρανση εάν η θερμοκρασία του σημείου περιέλιξης του στάτορα (μετρούμενη από έναν ανιχνευτή θερμοκρασίας αντίστασης περιέλιξης, RTD ή θερμοστοιχείο, TC) είναι κάτω από τους 110°C. Δεδομένου ότι η διαδικασία είναι μια χημική αντίδραση οξείδωσης, όσο υψηλότερη είναι η θερμοκρασία, τόσο πιο γρήγορη θα είναι η χημική αντίδραση και, επομένως, τόσο μικρότερος είναι ο χρόνος για την αποσύνθεση της μόνωσης, όπου για κάθε αύξηση 10°C στη θερμοκρασία λειτουργίας, η θερμική διάρκεια ζωής της μόνωσης μειώνεται κατά περίπου το ήμισυ. Εάν η μόνωση λειτουργεί στην ονομαστική θερμοκρασία της, ας πούμε 155°C για περιελίξεις κατηγορίας F, τότε αναμένεται ότι θα αρχίσει να σημειώνεται σημαντική φθορά μετά από μερικά χρόνια λειτουργίας. Εάν η μόνωση λειτουργεί σε θερμοκρασία που είναι 30°C χαμηλότερη, τότε μπορεί να αναμένεται περίπου οκτώ φορές μεγαλύτερη διάρκεια ζωής - περίπου 20-30 χρόνια. Η θερμική φθορά μπορεί να οδηγήσει σε αστοχία μετά από λίγους μήνες ή μπορεί να διαρκέσει πολλές δεκαετίες, ανάλογα με τα μονωτικά υλικά και τη θερμοκρασία λειτουργίας. Γενικά, η θερμική φθορά δεν είναι πολύ πιθανή σε απευθείας ψυχόμενες ράβδους στάτορα, εκτός εάν υπήρχε σοβαρό

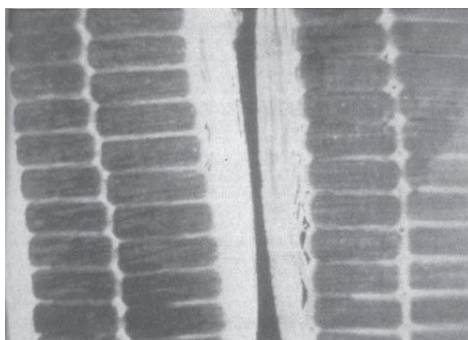
πρόβλημα λειτουργίας (όπως διακοπή του νερού ψύξης του στάτορα ή τοπική υπερθέρμανση του πυρήνα του στάτορα). Επιπλέον, οι περισσότεροι κατασκευαστές έχουν σχεδιάσει μηχανήματα έτσι ώστε η μόνωση να λειτουργεί συνήθως σε πολύ χαμηλότερη θερμοκρασία από την ονομαστική θερμική του ικανότητα. Η μέγιστη θερμοκρασία μόνωσης δεν μετράται άμεσα στα περισσότερα μηχανήματα. Η τυποποιημένη μέθοδος που χρησιμοποιείται για την παρακολούθηση της θερμοκρασίας σε έναν form-wound στάτορα με έμμεση ψύξη είναι ένα RTD ή TC ενσωματωμένο στην υποδοχή του στάτη, μεταξύ άνω και κάτω των ράβδων / πηνίων. Για μια μηχανή με έμμεση ψύξη (όλοι οι κινητήρες και οι περισσότερες γεννήτριες κάτω από μερικές εκατοντάδες μεγαβάτ), η θερμοκρασία υποδοχής RTD ή TC θα είναι 5-20°C πιο δροσερή από τη μόνωση στους αγωγούς χαλκού (όσο μεγαλύτερη είναι η μόνωση τόσο μεγαλύτερη είναι η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του χαλκού και του RTD ή του TC). Έτσι, η φθορά θα συμβεί γρηγορότερα στο χαλκό και πιο αργά στην επιφάνεια του πηνίου. Στις θερμοκρασίες που συζητήθηκαν παραπάνω, η θερμοκρασία μόνωσης αναφέρεται στη θερμοκρασία μόνωσης στο πιο θερμό σημείο, συνήθως στη θερμοκρασία που είναι δίπλα στο χαλκό. Σε random-wound μηχανήματα, οι ενσωματωμένοι αισθητήρες θερμοκρασίας είναι σπάνιοι και, συνεπώς, η πραγματική θερμοκρασία λειτουργίας της μόνωσης περιέλιξης του στάτη δεν είναι γνωστή με ακρίβεια, εκτός εάν μια δοκιμή φορτίου στο εργοστάσιο περιλαμβάνει και μέτρηση αύξησης θερμοκρασίας.

6.1.2 Ανεπαρκής Εμποτισμός Ρητίνης ή Ανεπαρκής Εμβάπτιση

Οι περισσότεροι τυχαίας κατανομής στάτες αφού έχουν τυλιχτεί βυθίζονται σε μια ρητίνη ή βερνίκι, για να σφραγίσουν το τύλιγμα από τη βρωμιά και την υγρασία, να βελτιώσουν τη μεταφορά θερμότητας στον πυρήνα και να κρατήσουν σφιχτά τα πηνία περιέλιξης στην υποδοχή για να αποφευχθεί η τριβή από τους κραδασμούς. Επιπλέον, για τυχαίας κατανομής μηχανές που τροφοδοτούνται από μετατροπέα πηγής τάσης PWM, η περιέλιξη πρέπει να εμποτιστεί για να εξαλειφθούν κενά που θα οδηγούσαν σε μερική εκκένωση, ακόμη και σε περιελίξεις με ονομαστική τιμή έως και 400V. Για παρόμοιους λόγους, σε συμβατικά προσδιορισμένης κατανομής πηνία, το τοίχωμα εμποτίζεται από τις διεργασίες πλούσιες σε ρητίνη. Εκτός από τα οφέλη που περιγράφονται για τις τυχαίας κατανομής μηχανές ο εμποτισμός εμποδίζει επίσης τη δραστηριότητα μερικής εκκένωσης εντός του τοιχώματος αποτρέποντας την εμφάνιση θυλάκων αέρα. Παρομοίως, η καθολική διαδικασία VPI για προσδιορισμένης κατανομής στάτες προορίζεται να εξαλείψει κενά εντός του τοιχώματος για να βελτιώσει τη μεταφορά θερμότητας, να αποτρέψει την κίνηση του αγωγού και να μειώσει την μερική εκκένωση. Ανεπαρκής εμποτισμός που προκαλεί αστοχία στάτη είναι πιο πιθανό να συμβεί σε καθολικά στάδια VPI, καθώς είναι πιο δύσκολο για τις διαδικασίες ελέγχου ποιότητας να βρουν κακό εμποτισμό κατά τη στιγμή της κατασκευής. Η αποτυχία λόγω μερικών εκκενώσεων στα κενά του τοιχώματος μπορεί να συμβεί σε τόσο σύντομο χρονικό διάστημα όσο 2 χρόνια σε στάτες με ονομαστική τιμή 6 kV ή περισσότερο. Σε προσδιορισμένης κατανομής στάτες που τροφοδοτούνται από μετατροπέα, ο κακός εμποτισμός μπορεί να οδηγήσει σε αποτυχία σε λίγους μόνο μήνες.

Οι κακώς εμποτισμένοι συμβατικοί τυχαίας κατανομής στάτες είναι πολύ πιο πιθανό να αποτύχουν λόγω βρωμιάς, ρύπανσης, λαδιού και υγρασίας που μπορεί να είναι εν μέρει αγωγίμοι. Δεν είναι ασυνήθιστο για τη μόνωση του να έχουν μικρές οπές ή ρωγμές ως αποτέλεσμα των ακαμψιών της κατασκευής. Εάν ο κύκλος εμποτισμού ή εμφάνισης είναι κακός, αυτές οι ατέλειες στη μόνωση του σύρματος μαγνήτη, σε συνδυασμό με μια μερικώς αγωγίμη μόλυνση, οδηγούν σε βραχυκυκλωμένες σπείρες και, συνεπώς, σε αστοχία. Ομοίως, εάν οι σπείρες δεν συνδέονται μεταξύ τους και στον πυρήνα, οι μαγνητικές δυνάμεις συχνότητας διπλάσιας της βιομηχανικής διπλής ισχύος λόγω της εκκίνησης του κινητήρα ή των κανονικών ρευμάτων λειτουργίας προκαλούν τις δονήσεις των στροφών. Οι τυχαίας κατανομής στάτες που τροφοδοτούνται από μετατροπέα που δεν ενσωματώνουν μαρμαρυγία στο σύστημα μόνωσης (δηλ. Ένα σύστημα μόνωσης τύπου I σύμφωνα με το IEC 60034-18-41) πρέπει να είναι χωρίς μερικές εκκενώσεις όταν κατασκευάζονται. Εάν υπάρχουν κενά, η επαναλαμβανόμενη τάση από την κίνηση θα προκαλέσει μερική εκκένωση, η οποία θα διαβρώσει τη μόνωση του καλωδίου καθώς και τη μόνωση τοιχώματος και φάσης σε λίγους μήνες έως χρόνια. Θα προκύψουν σφάλματα μεταξύ σπειρών, ground και / ή φάσης προς φάση.

Πολύ ανεπαρκής εμποτισμός τοιχώματος σε προσδιορισμένης κατανομής πηνία μπορεί να οδηγήσει σε υψηλότερες θερμοκρασίες λειτουργίας (καθώς η θερμική αγωγιμότητα του τοιχώματος είναι χαμηλότερη), οδηγώντας σε θερμική φθορά ή / και δονήσεις αγωγού, με αποτέλεσμα την τριβή τους. Ωστόσο, εάν ο εμποτισμός είναι κακός αλλά δεν λείπει εντελώς, οι θερμικές διαδικασίες και τριβές είναι λιγότερο σημαντικές. Αντ' αυτού, εάν η περιέλιξη καταπονείται από 6 kV ή περισσότερο, οι μερικές εκκενώσεις μπορούν να συμβούν σε πηνία που συνδέονται με τους ακροδέκτες φάσης. Οι μερικές εκκενώσεις θα συμβούν σε οποιονδήποτε θύλακα αέρα που προκύπτει από τον κακό εμποτισμό μεταξύ του χαλκού και του πυρήνα, έτσι η μερική εκκένωση σταδιακά θα διαβρώσει μια τρύπα μέσω της μόνωσης. Εάν η περιέλιξη είναι κατασκευασμένη από πηνία πολλαπλών στροφών και οι θύλακες αέρα βρίσκονται κοντά στη μόνωση στροφής (Σχήμα 6.2), τότε η μερική εκκένωση αρκεί να διαβρώσει μόνο τη σχετικά λεπτή μόνωση σπειρών (αυτό διαρκεί μερικά χρόνια), οδηγώντας σε σφάλμα σπειρών. Για τις ράβδους Roebel, η μερική εκκένωση πρέπει να διαβρώσει όλο το πάχος του τοιχώματος, το οποίο μπορεί να διαρκέσει δεκαετίες.



Σχήμα 6.2 Διατομή ενός πηνίου 12 στροφών από έναν στάτορα κινητήρα 6,6 kV που κατασκευάστηκε χρησιμοποιώντας τη συνολική διαδικασία VPI. Τα σκοτεινά κενά κοντά στο χαλκό προέκυψαν από κακό εμποτισμό με εποξική ακριβώς έξω από την υποδοχή.

Οι πιθανές αιτίες του κακού εμποτισμού σε τυχαίας κατανομής στάτες είναι:

- Ιξώδες ρητίνη / βερνίκη που είναι πολύ λεπτό ή πολύ παχύ, ή άλλα προβλήματα με τη χημεία ρητίνης / βερνικιού όπως μόλυνση και σωματίδια ρητίνης VPI.
- Επεξεργασία του στάτη με τρόπο που δεν είναι σύμφωνος με τις συστάσεις του προμηθευτή ρητίνης / βερνικιού, όπως η μη προθέρμανση του στάτη ή του βερνικιού/ ρητίνης, ανεπαρκής χρόνος στη δεξαμενή εμβάπτισης και όχι η πλήρης βύθιση του στάτη.
- Χρήση μόνωσης μαγνητικού σύρματος που δεν είναι χημικά συμβατή με τη ρητίνη / βερνίκη.
- Μια θερμοκρασία ψησίματος που είναι πολύ υψηλή ή πολύ χαμηλή, ή ο χρόνος ψησίματος που είναι πολύ μικρός.

Σε προσδιορισμένης κατανομής πηνία VPI ή σε Global VPI, οι βασικές αιτίες μπορεί να περιλαμβάνουν:

- Κακή ταινία groundwall μόνωσης, η οποία αφήνει ζαρώματα στην ταινία και, κατά συνέπεια, ένα κενό πολύ μεγάλο για να γεμίσει από τη ρητίνη χαμηλού ιξώδους.
- Ακατάλληλο ιξώδες ρητίνης ή χημική μόλυνση.
- Ρητίνη που έχει περάσει από πάρα πολλούς κύκλους VPI και δεν έχει ρυθμιστεί για να αποκαταστήσει τις σωστές προδιαγραφές χημείας και την ελευθερία από αιωρούμενα σωματίδια.
- Μη συμβατές ταινίες ρητίνης και μόνωσης.
- Ακατάλληλη προθέρμανση και πολύ σύντομος κύκλος κενού, ή ανεπαρκής κενό, ανεπαρκής χρόνος στον κύκλο σκλήρυνσης θερμότητας ή χρήση ακατάλληλης θερμοκρασίας / πίεσης σκλήρυνσης.
- Ανεπαρκής πίεση εμποτισμού και χρόνος για το διαθέσιμο ιξώδες της ρητίνης και το πάχος μόνωσης.

Σε πηνία πλούσια σε ρητίνη, ο κακός εμποτισμός μπορεί να προκύψει από:

- Παλιές ταινίες πλούσιες σε ρητίνη που έχουν ήδη αρχίσει να σκληραίνουν.
- Λανθασμένα αποθηκευμένες ταινίες, δηλαδή αποθήκευση σε πολύ υψηλή θερμοκρασία ή σε πολύ υψηλή υγρασία.
- Κακή ταινία, με αποτέλεσμα τα ζαρώματα να είναι πολύ μεγάλα. Τα κενά αέρα μεταξύ των δεν θα παραμείνουν γεμάτα από ρητίνη όταν το πηνίο ή ο στάτης βρίσκεται στο στάδιο σκλήρυνσης.
- Ανεπαρκής πίεση ή θερμοκρασία κατά τη διάρκεια του κύκλου σκλήρυνσης.
- Πολύς χρόνος για την μετακίνηση των πηνίων / ράβδων ή του στάτορα από το υδραυλικό δοχείο εμποτισμού στο φούρνο σκλήρυνσης, επιτρέποντας τη διαρροή της ρητίνης.

6.1.3 Παροδικές Μεταβολές Τάσης

Οι αυξήσεις τάσης στα συστήματα μόνωσης περιελίξεων στάτη στους κινητήρες και τις γεννήτριες είναι παροδικές (μη επαναλαμβανόμενες) κρουστικές τάσεις σχετικά υψηλής τιμής που αυξάνουν την ηλεκτρική τάση πέρα από εκείνη που συμβαίνει στην κανονική λειτουργία. Τέτοιες μεταβατικές τάσεις προκύπτουν από:

- Κεραυνικά φαινόμενα
- Σφάλματα γείωσης στο σύστημα τροφοδοσίας
- Κλείσιμο διακόπτη γεννήτριας σε συνθήκες εκτός φάσης
- Κλείσιμο και άνοιγμα διακόπτη κινητήρα

Πιστεύεται ότι η αύξηση της τάσης είτε προκαλεί την αποτυχία της μόνωσης αμέσως είτε έχει παροδικά αποτελέσματα. Δηλαδή, οι παροδικές μεταβολές τάσης δεν αλλοιώνουν σταδιακά τη μόνωση. Επομένως, οι μεταβατικές τάσεις κανονικά θα προκαλέσουν αμέσως αστοχία σε μια νέα περιέλιξη στάτη εάν η περιέλιξη δεν ήταν καλά σχεδιασμένη ή κατασκευασμένη. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο όλες οι νέες περιελίξεις απαιτούνται για να περάσουν μια δοκιμή hipot AC και τα πηνία πολλαπλών σπειρών πρέπει επίσης να περάσουν μια δοκιμή τάσης. Μια περιέλιξη μπορεί τότε να αποτύχει εάν εμφανιστεί παροδική τάση που υπερβαίνει την αντοχή της επιτοίχιας μόνωσης ή τη δύναμη μόνωσης σπειρών. Παρόλο που ορισμένοι μπορεί να λένε ότι μια παροδική τάση που παράγεται από κεραυνό ή ενεργοποίηση κινητήρα προκάλεσε την αποτυχία τυλίγματος, στην πραγματικότητα η αστοχία οφείλεται σε άλλους μηχανισμούς φθοράς και η αύξηση της τάσης ήταν μόνο η αφορμή.

Οι μεταβατικές τάσεις μπορούν να καταστρέψουν την επιτοίχια μόνωση σε όλους τους στάτες, καθώς και τη μόνωση σπειρών σε πηνία πολλαπλών σπειρών. Η διαδικασία της επιτοίχιας μόνωσης είναι απλή - εάν η παροδική τάση εναλλασσόμενου ρεύματος ή παλμού υπερβαίνει την ισχύ διάσπασης της μόνωσης, λειτουργεί το ρελέ.

Οι μεταβολές τάσης βραχείας αύξησης μπορεί να είναι ιδιαίτερα επικίνδυνες για τη μόνωση σπειρών σε περιελίξεις στάτη πολλαπλών σπειρών. Οι χρόνοι ανύψωσης 100 ns ή περισσότερο δημιουργούνται κατά την εκκίνηση του κινητήρα. Με ένα μετασχηματισμό Fourier, αυτός ο σύντομος χρόνος ανόδου θα παράγει συχνότητες έως περίπου 3 MHz. Δηλαδή, η τάση βιομηχανικής ισχύος κατανέμεται γραμμικά και ισότιμα μεταξύ κάθε γειτονικής στροφής από τον ακροδέκτη φάσης στο ουδέτερο σημείο. Ωστόσο, όταν εφαρμόζεται πολύ υψηλή συχνότητα σε περιέλιξη στάτη, η κατανομή τάσης είναι μη γραμμική, με πολύ μεγαλύτερο ποσοστό της εφαρμοζόμενης τάσης να εμφανίζεται κατά μήκος των σπειρών στο πρώτο πηνίο συνδεδεμένο στην φάση.

Η πηγή των μεταβατικών τάσεων AC 50/60 Hz είναι οι διαταραχές του συστήματος ισχύος, όπως ένα σφάλμα φάσης προς τη γείωση. Είναι απίθανο αυτά να μην εξαλειφθούν ποτέ, επομένως η επιτοίχια μόνωση πρέπει να είναι σχεδιασμένη ώστε να αντέχει σε τέτοιες μεταβατικές συνθήκες κατά την αναμενόμενη διάρκεια ζωής της. Αυτός είναι ένας βασικός λόγος για τον οποίο όλα τα νέα μηχανήματα πρέπει να αντέξουν μια δοκιμή hipot τάσης AC σε διπλάσια ονομαστική τάση συν 1 kV και ότι οι κατασκευαστές μηχανημάτων πραγματοποιούν δοκιμές επιτάχυνσης γήρανσης, για να αποδείξουν ότι η αντοχή του AC δεν πέφτει κάτω από τις αναμενόμενες μεταβατικές

τάσεις AC κατά τη διάρκεια της σχεδιαστικής ζωής. Οι πηγές μεταβατικών τάσεων παλμού είναι γεγονότα μεταγωγής και αστραπές. Ούτε μπορεί να εξαλειφθεί, επομένως η περιέλιξη του στάτη πρέπει να είναι σε θέση να αντέχει τέτοιες παροδικές τάσεις ή να προστατεύεται από αυτές. Ούτε η μία ούτε η άλλη μπορεί να εξαλειφθεί, επομένως η περιέλιξη του στάτη πρέπει να είναι σε θέση να αντέχει τέτοιες παροδικές τάσεις ή να προστατεύεται από αυτές.

6.1.4 Ανεπαρκής Απόσταση Τελικής Περιέλιξης

Σε μεγάλους στάτες, αφήνεται χώρος ανάμεσα σε γειτονικά πηνία στις τελικές περιελίξεις για να εξασφαλιστεί ότι ρέει επαρκής αέρας πάνω τους, για να βοηθήσει να μην αυξηθεί πολύ η θερμοκρασία στις περιελίξεις. Σε προσδιορισμένης κατανομής στάτες, ιδιαίτερα περιελίξεις με ονομαστική τιμή 6 kV και άνω, απαιτείται επίσης επαρκής απόσταση για την αποφυγή της μερικής εκκένωσης. Εάν η απόσταση είναι πολύ μικρή, μπορεί να προκύψει μερική εκκένωση, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε σφάλματα γείωσης ή / και φάσης προς φάση. Το πρόβλημα αυτό δεν συμβαίνει σε τυχαίας κατανομής στάτες και είναι απίθανο να συμβεί σε μηχανήματα υψηλής πίεσης με ψύξη με υδρογόνο.

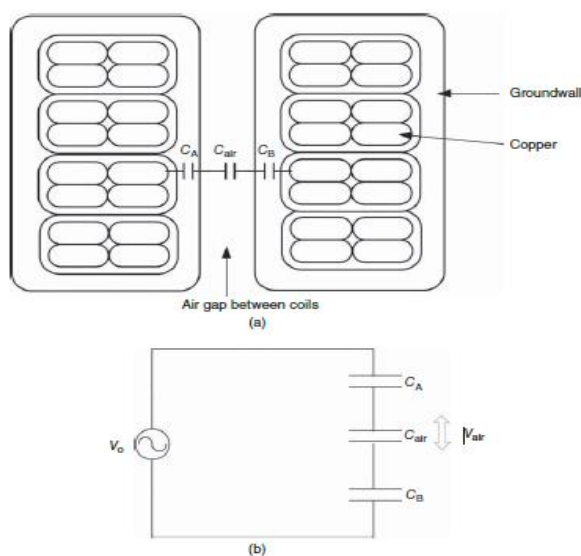
Το παρακάτω σχήμα 6.3 δείχνει μια διατομή δύο γειτονικών πηνίων ή ράβδων στο τελικό τύλιγμα ενός στάτη προσδιορισμένης κατανομής. Η διατομή μπορεί να θεωρηθεί ως τρεις πυκνωτές σε σειρά μεταξύ των αγωγών χαλκού: η χωρητικότητα του τοιχώματος φάσης A, η χωρητικότητα του διακένου αέρα μεταξύ των επιφανειών του πηνίου και η χωρητικότητα του τοιχώματος φάσης B.

Ως απλοποίηση, κάθε μία από αυτές τις χωρητικότητες μπορεί να υπολογιστεί από ένα μοντέλο, στο οποίο η χωρητικότητα εξαρτάται από το πάχος μόνωσης (ή την απόσταση μεταξύ των επιφανειών πηνίου στην περίπτωση του διακένου αέρα) και τη διηλεκτρική σταθερά του μονωτικού υλικού. Με δεδομένο ότι θα έχει περάσει αρκετός χρόνος, η μερική εκκένωση θα διαβρώσει μια τρύπα στην επιτοίχια μόνωση. Ο χρόνος για αποτυχία είναι συνήθως 10 χρόνια ή περισσότερο, καθώς η επιτοίχια μόνωση με βάση το mica είναι ανθεκτική στην μερική εκκένωση.

Εάν ο χώρος μεταξύ των πηνίων είναι πολύ μικρός, τυπικά μικρότερος από 5-7 mm σε περιέλιξη 13,8 kV με μέση τάση σχεδιασμού 2,5 kV rms / mm, θα προκύψει μερική εκκένωση εάν η τάση πλήρους φάσης προς φάση βρίσκεται σε παρακαείμενα πηνία. Η μερική εκκένωση είναι πιο πιθανή σε μεγάλα υψόμετρα, καθώς η τάση διάσπασης του αέρα είναι χαμηλότερη σε τέτοιες τοποθεσίες. Επιπλέον, τα λεπτά τοιχώματα μόνωσης αυξάνουν την χωρητικότητα του, μειώνοντας τη χωρητική του αντίσταση και εφαρμόζοντας περισσότερη τάση στο κενό. Κατά συνέπεια, τέτοια σχέδια είναι πιο επιρρεπή σε αυτό το πρόβλημα. Οι μηχανές υψηλής ισχύς και ψύξης με υδρογόνο είναι λιγότερο πιθανό να έχουν μερική εκκένωση, καθώς η ισχύς διάσπασης ενός αερίου υψηλής πίεσης είναι πολλές φορές υψηλότερη από την ισχύ σε μία ατμόσφαιρα.

Το πρόβλημα θα προκύψει όταν τα γειτονικά πηνία (πλάι-πλάι ή μεταξύ του άνω και κάτω στρώματος των πηνίων) είναι πολύ κοντά. Αυτό το πρόβλημα μπορεί επίσης να προκύψει εάν οι δακτύλιοι κυκλώματος υψηλής τάσης είναι πολύ κοντά. Η μόνωση τελικού καλύμματος γίνεται συχνά τοποθετώντας ένα καλούπι από πολυανθρακικό (ή παρόμοιο υλικό) πάνω από τη σύνδεση και γεμίζοντας το με ένα θιξοτροπικό εποξικό.

Εάν δύο γειτονικά ακραία καλύμματα μονώνουν συνδέσεις υψηλής τάσης σε διαφορετικές φάσεις και τα ακραία καλύμματα είναι πολύ κοντά, θα εμφανιστεί μερική εκκένωση μεταξύ τους και θα προκληθεί ζημιά στα ακραία καλύμματα.



Σχήμα 6.3 (α) Διατομή δύο γειτονικών πηνίων στην τελική περιέλιξη όπου θα συμβεί μερική εκκένωση εάν η απόσταση μεταξύ των πηνίων είναι πολύ μικρή. (β) Ισοδύναμο κύκλωμα για τον υπολογισμό της τάσης στο διάκενο αέρα

Ο κακός σχεδιασμός και / ή η κακή κατασκευή είναι η πιο πιθανή αιτία αυτών των προβλημάτων:

- Ανεπαρκής χώρος μεταξύ των πηνίων για το υψόμετρο στο οποίο αναμένεται να λειτουργεί το μηχάνημα. Ο αγοραστής μπορεί επίσης να είναι υπεύθυνος εάν ο κατασκευαστής δεν ενημερώθηκε για την προβλεπόμενη θέση για το μηχάνημα.
- Χρήση ενός λεπτού σχεδιασμού groundwall, χωρίς να αυξάνεται ο κανονικός χώρος μεταξύ των πηνίων ή να πραγματοποιούνται άλλες διατάξεις στην τελική περιέλιξη.
- Ασυνεπές σχήμα πηνίου / ράβδου μετά την κατασκευή. Εάν ένα πηνίο είναι μεγαλύτερο από τα παρακείμενα πηνία του, το μεγαλύτερο πηνίο πρέπει να είναι πιο κοντά στο γειτονικό πηνίο από ό, τι έχει σχεδιαστεί, μετά την πρώτη στροφή στο τέλος της περιέλιξης.
- Κακή εγκατάσταση των πηνίων στην υποδοχή. Ακόμα κι αν τα πηνία έχουν πανομοιότυπα σχήματα, εάν η πρώτη στροφή σε ένα πηνίο εμφανίζεται πιο μακριά από την εγκοπή από τα άλλα πηνία, τότε θα κλείσει το διάστημα μεταξύ των πηνίων, μετά την πρώτη στροφή στο τέλος.
- Ανεπαρκής φραγή ή κακή χρήση προσαρμοσίμης συσκευασίας μπορεί να επιτρέψει στα πηνία να κάμπτονται στην τελική περιέλιξη, μετά από υψηλό ρεύμα βλάβης ή υψηλό ρεύμα εκκίνησης κινητήρα μέσω του στάτη. Αυτό μπορεί να μειώσει την απόσταση μεταξύ των πηνίων που λειτουργούν σε πολύ διαφορετικές τάσεις
- Ανεπαρκής χημικός έλεγχος της εποξικής (στα πηνία ή στα ακραία καλύμματα), η οποία επιτρέπει υψηλή διηλεκτρική σταθερά σε θερμοκρασία λειτουργίας.

- Ανεπαρκής χώρος μεταξύ των άνω και κάτω πηνίων υψηλής τάσης σε διαφορετικές φάσεις σε διασταυρούμενες τελικές περιελίξεις.

6.1.5 Επαναλαμβανόμενες Υπερτάσεις Λόγω Μετατροπέων

Η εισαγωγή των μετατροπέων (PWM) έδειξε ότι η βαθμιαία γήρανση που θα συμβεί εάν η τάση αυξάνεται από αυτόν τον τύπο κίνησης είναι αρκετά υψηλού μεγέθους. Ο Persson ήταν από τους πρώτους που ανέφεραν ότι οι υπερτάσεις από μετατροπείς PWM προκάλεσαν αστοχία των τυχαία κατανομής κινητήρων λόγω της σταδιακής γήρανσης της μόνωσης των σπειρών του στάτη. Η μόνωση σπειρών σε τυχαία κατανομής κινητήρες με ονομαστική τάση μεταξύ 400V και 1000V που οδηγούνται από μετατροπείς PWM χρησιμοποιώντας συσκευές μεταγωγής IGBT είναι πιθανότερο να υποφέρει από το πρόβλημα της γήρανσης του κύματος, καθώς αυτοί οι μετατροπείς παράγουν τις μεγαλύτερες υπερτάσεις με χρόνους αύξησης τόσο σύντομα όσο 100 ns. Οι κινητήρες μεσαίας και υψηλής τάσης που χρησιμοποιούν παρόμοιους μετατροπείς μπορεί επίσης να παρουσιάσουν φθορά που προκαλείται από υπερτάσεις, αλλά η αστοχία της μόνωσης σπειρών είναι λιγότερο πιθανή λόγω της παρουσίας μόνωσης σπειρών με βάση την μαρμαρυγία.

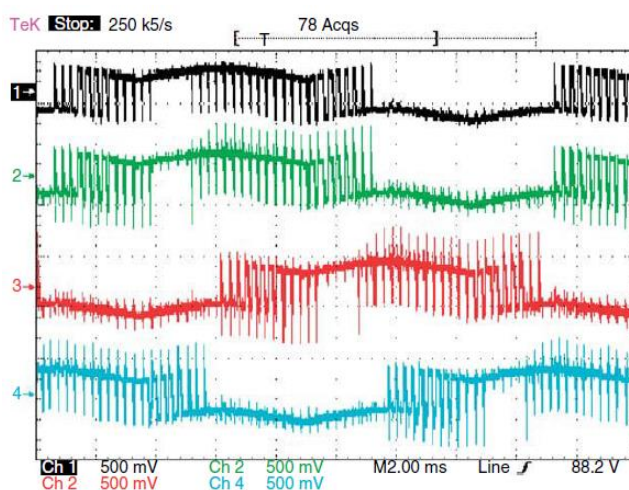
Οι επαναλαμβανόμενες υπερτάσεις μπορούν να προκαλέσουν σταδιακή επιδείνωση της (α) μόνωσης σπειρών, (β) της επιτοίχιας μόνωσης και της μόνωσης φάσης.

Φθορά της μόνωσης σπειρών Οι μετατροπείς PWM χρησιμοποιούνται ευρέως για την παροχή και δημιουργία κίνησης μεταβλητής ταχύτητας στους κινητήρες επαγωγής. Τέτοιοι μετατροπείς ενεργοποιούν και απενεργοποιούν μια υψηλή τάση DC, η οποία στέλνει ορθογώνιες παλμούς τάσης μέσω του καλωδίου τροφοδοσίας στο τύλιγμα του στάτη. Το σχήμα 6.4 δείχνει την ακολουθία παλμών που μετράται σε έναν μετατροπέα και στον στάτορα ενός κινητήρα 440V. Οι παλμοί τάσης είναι σαφώς μεγαλύτεροι στον κινητήρα λόγω των φαινομένων κίνησης. Ανάλογα με την χωρητικότητα της περιέλιξης του στάτη, ο χρόνος ανόδου μπορεί να κυμαίνεται από 100 έως 500 ns. Οι οδηγοί για κινητήρες μεσαίας και υψηλής τάσης τείνουν να έχουν πολλαπλά στάδια, γεγονός που επιβραδύνει τους χρόνους ανύψωσης των μεταβατικών σε συνήθως μεγαλύτερους από 500 ns.

Μια υψηλή τάση διακοπής μπορεί να προκαλέσει μερική εκκένωση εάν υπάρχει θύλακας αέρα κοντά στις σπείρες του χαλκού. Σε τυχαία κατανομής στάτες, υπάρχουν συχνά θύλακες αέρα δίπλα στις σπείρες του στρογγυλού μαγνητικού σύρματος. Εάν εμφανιστεί μερική εκκένωση στον αέρα, τότε κάθε εκφόρτιση θα υποβαθμίσει ελαφρώς τη μόνωση του σύρματος μαγνήτη. Εάν προκύψει επαρκής αριθμός υπερτάσεων, προκύπτει αρκετή σωρευτική ζημιά από τις εκκενώσεις που οδηγούν σε αστοχία σπειρών προς σπείρών, προχωρώντας γρήγορα σε αστοχία. Οι τυχαίες κατανομής στάτες με συμβατικό μαγνητικό σύρμα είναι πιο επιρρεπείς σε αυτήν τη διαδικασία, καθώς η μόνωση του σύρματος μαγνητών είναι συνήθως οργανική και δεν είναι ανθεκτική στην επίθεση από μερικές εκκενώσεις. Εάν δεν εφαρμοστούν ειδικά μέτρα όπως η χρήση ανθεκτικού σε μερικές εκκενώσεις μαγνητικό καλώδιο ή η αύξηση της απόστασης μεταξύ των εξαρτημάτων, μπορεί να προκύψει βλάβη εντός εβδομάδων ή μηνών από την έναρξη λειτουργίας ενός IFD. Οι προσδιορισμένης κατανομής μηχανές μπορούν να παρουσιάσουν τις ίδιες υπερτάσεις αλλά καθώς η μόνωση

σπειρών περιέχει συχνά ανόργανες ίνες γυαλιού ή ακόμη και χαρτί μαρμαρυγίας, αυτή η μόνωση είναι πολύ πιο ανθεκτική στην μερική εκκένωση και κατά συνέπεια λιγότερο πιθανό να αποτύχει.

Μόνωση τοιχώματος και Φασική μόνωση Εξ ορισμού, σε τυχαίας κατανομής στάτες, ένα καλώδιο φάσης, ας πούμε, Α-φάση μπορεί να είναι δίπλα σε μια ουδέτερη σπείρα ή μια σπείρα συνδεδεμένη στον ακροδέκτη της Β-φάσης. Εάν υπάρχει ανεπαρκής χώρος ή μόνωση μεταξύ φάσεων, το καλώδιο μικρής διαμέτρου σε τυχαίας κατανομή στάτες μπορεί να δημιουργήσει επαρκή ηλεκτρική τάση σε οποιουδήποτε χώρους αέρα γύρω από το σύρμα για τη δημιουργία μερικής εκκένωσης. Όσον αφορά τη μόνωση σπειρών, η μερική εκκένωση μπορεί να διαβρώσει σταδιακά την οργανική μόνωση, με αποτέλεσμα ένα σφάλμα φάσης-φάσης. Το μέγεθος κύματος και ο ρυθμός επανάληψης είναι κρίσιμοι σε αυτή την διαδικασία.



Σχήμα 6.4 Ψηφιακή εικόνα παλμογράφου της κυματομορφής τάσης που μετράται στη Φάση Α στον μετατροπέα (κορυφαίο ίχνος) και την τάση σε τρεις φάσεις στην περιέλιξη του στάτη (χαμηλότερα τρία ίχνη). Ο κινητήρας είχε βαθμολογία 440V. Η οριζόντια βάση χρόνου είναι 2 ms / division και η κατακόρυφη κλίμακα 1000 V / division.

6.1.6 Κακές Ηλεκτρικές Συνδέσεις

Σε μια τυπική περιέλιξη στάτη, υπάρχουν εκατοντάδες αν όχι χιλιάδες ηλεκτρικές συνδέσεις. Εάν η αντίσταση των συνδέσεων είναι πολύ υψηλή, η υπερθέρμανση των συνδέσεων θα υποβαθμίζει θερμικά τη μόνωση, προκαλώντας τελικά την καταστροφή της. Οι προσδιορισμένες κατανομή στάτες είναι πιο πιθανό να παρουσιάσουν αυτό το πρόβλημα, ωστόσο οποιοδήποτε κακώς κατασκευασμένος στάτης μπορεί να παρουσιάσει αυτό πρόβλημα.

Σε προσδιορισμένης κατανομής στάτες, οι συνδέσεις μεταξύ καλωδίων χαλκού σε πηνία και ράβδους είναι συνήθως συγκολλημένες. Οι συνδέσεις και τα καλώδια της μπάρας του κινητήρα στο κουτί ακροδεκτών είναι συνήθως βιδωμένα στα καλώδια του συστήματος ισχύος. Εάν οι συνδέσεις έχουν υπερβολική αντίσταση, τα καλώδια θα γίνουν θερμότερα από ό, τι είναι απαραίτητο. Η αυξημένη θερμοκρασία χαλκού θα αυξάνει περαιτέρω την αντίσταση και εάν οι συνδέσεις είναι ζεστές για μεγάλο χρονικό διάστημα, η οξείδωση θα επιταχύνεται, αυξάνοντας και πάλι την αντίσταση με αποτέλεσμα ο χαλκός να γίνει τόσο ζεστός που θα λιώνει, επιπλέον, οι θερμές συνδέσεις θα επιδεινώσουν θερμικά τη μόνωση πάνω από τις συνδέσεις (εάν υπάρχουν) και τη γειτονική μόνωση πηνίου. Εάν προκύψει αυξημένο ρεύμα, για παράδειγμα στην

εκκίνηση του κινητήρα, η μόνωση μπορεί να σπάσει εκθέτοντας τους αγωγούς χαλκού. Ο στάτης τότε έχει υψηλό κίνδυνο αστοχίας από κάποια καταπόνηση, νερό ή βραχυκύκλωμα. Δεδομένου ότι οι συνδέσεις απομακρύνονται γενικά πολύ μακριά από τον γειωμένο πυρήνα στάτη, η μόνωση πάνω από τους αγωγούς μπορεί να υποβαθμιστεί εξαιρετικά, αλλά δεν έχει ως αποτέλεσμα άμεση βλάβη. Οι τυχαίες κατανομής κινητήρες έχουν γενικά πολύ λιγότερες συνδέσεις, αλλά εξακολουθούν να υπάρχουν κάποιες συνδέσεις μεταξύ των πηνίων και στο κιβώτιο ακροδεκτών του κινητήρα. Δεδομένου ότι οι μονωμένες συνδέσεις είναι συνήθως πολύ κοντά στον πυρήνα ή σε άλλα πηνία, εάν η υπερθέρμανση σύνδεσης έχει προχωρήσει τόσο όσο ώστε η μόνωση να αρχίσει να λιώνει ή είναι τόσο εύθραυστη που έχει πέσει, μπορεί να ακολουθήσει σύντομα ένα σφάλμα γείωσης.

Συνήθως, η κακή κατασκευή είναι η κύρια αιτία υπερθέρμανσης της σύνδεσης. Η υπερθέρμανση μπορεί να προκληθεί από κακή συγκόλληση ή από ανεπαρκώς σφιγμένες ή σχεδιασμένες βιδωτές συνδέσεις.

6.2 Αιτίες Κταστροφής Περιελίξεων Δρομέα

Σε αυτό το κεφάλαιο ασχοληθήκαμε με τις αιτίες καταστροφής της μόνωσης των περιελίξεων του δακτυλιοφόρου δρομέα και του δρομέα με έκτυπους πόλους. Με τις περιελίξεις του δρομέα τύπου κλωβού δεν ασχοληθήκαμε λόγω του ότι οι περισσότερες περιελίξεις τους δεν είναι μονωμένες αλλά μπορούν να αποτύχουν λόγω διάφορων μηχανισμών γήρανσης, οι οποίοι μπορεί να είναι θερμικής, ηλεκτρικής ή μηχανικής φύσης.

6.2.1 Δακτυλιοφόρου Δρομέα

Υπάρχουν δύο βασικοί τύποι κατασκευής περιελίξεων δακτυλιοφόρου δρομέα : random-wound και bar lap/wave-wound. Η ground μόνωση είναι παρόμοια και για τους δύο τύπους, αλλά η μόνωση στροφής είναι διαφορετική. Στον random-wound τύπο, χρησιμοποιείται σμάλτο ή σμάλτο επικαλυμμένο με ίνες γυαλιού, ενώ οι ράβδοι στους τύπους περιτυλίγματος και κυμάτων συνήθως μονώνονται με βερνίκι ή κολλημένη με ρητίνη ταινία. Στην περίπτωση γεννητριών επαγωγής ανεμογεννητριών και κινητήρα ανάκτησης ενέργειας ολίσθησης, η ταινία χαρτιού μαρμαρυγίας χρησιμοποιείται ως μόνωση στροφής καθώς οι επαναλαμβανόμενες υπερτάσεις τάσης μεγάλου μεγέθους από τον μετατροπέα μπορούν να παράγουν μερικές εκκενώσεις που θα προσβάλλουν τα οργανικά υλικά.

Η θερμική επιδείνωση είναι η ίδια με του στάτη το οποίο αναφέρεται στο κεφάλαιο 6.1.1

Παροδική Απότομη Αύξηση Τάσης

Σε έναν κινητήρα επαγωγής δακτυλιοφόρου δρομέα, υπάρχει ένα αποτέλεσμα ζεύξης μετασχηματιστή μεταξύ των περιελίξεων στάτη και δρομέα. Κατά συνέπεια, οι τάσεις υπερτάσεων του συστήματος ισχύος που επιβάλλονται στην περιέλιξη του στάτη θα προκαλέσουν υπερτάσεις στην περιέλιξη του δρομέα. Αυτή η υπέρταση μπορεί να τρυπήσει τη μόνωση των σπειρών ή την επινοίχια μόνωση. Στην περίπτωση κινητήρων δακτυλιοφόρου δρομέα μεταβλητής ταχύτητας με μετατροπέα στο κύκλωμα περιέλιξης του δρομέα, οι συνεχείς επιβαλλόμενες υπερτάσεις τάσης μεγάλου μεγέθους, ταχείας ανόδου που επιβάλλονται στην περιέλιξη του δρομέα μπορούν να προκαλέσουν δραστηριότητα μερικής εκκένωσης, η οποία μπορεί να προκαλέσει ηλεκτρική γήρανση, ειδικά εάν χρησιμοποιείται οργανική μόνωση (Σχήμα 6.5). Δεδομένου ότι τα καλώδια που συνδέουν τις φάσεις περιέλιξης με τους δακτυλίους ολίσθησης συχνά δεν είναι μονωμένα με υλικό μαρμαρυγίας, αυτή η μόνωση μπορεί επίσης να αποτύχει από την ίδια διαδικασία ηλεκτρικής γήρανσης ως αποτέλεσμα ενδιάμεσων μερικών εκκενώσεων (Σχήμα 6.6).



Σχήμα 6.5 Αποτυχία μόνωσης σπειρών περιέλιξης δρομέα από μερικές εκκενώσεις.



Σχήμα 6.6 Αποτυχία μόνωσης μολύβδου περιέλιξης ρότορα από ενδιάμεσες εκκενώσεις.

Υπό την προϋπόθεση ότι υπάρχει επαρκής μόνωση σπειρών και επιυόχια μόνωση στο τύλιγμα του δρομέα, τέτοιες τάσεις δεν πρέπει να προκαλούν ηλεκτρική γήρανση, δηλαδή, η μερική εκκένωση είναι απίθανη ή εάν υπάρχει δεν θα προκαλέσει γρήγορη αστοχία εάν χρησιμοποιείται μόνωση μαρμαρυγίας. Οι μεταβατικές τάσεις, ωστόσο, θα επιταχύνουν την αποτυχία μόνωσης που αρχικά είναι ασθενής ή που έχει υποβαθμιστεί από θερμική ή μηχανική γήρανση.

Σφάλματα στροφής προς στροφή, φάσης προς φάση ή γείωση μπορούν να προκληθούν από παροδικές τάσεις στο τύλιγμα του δρομέα εάν η διηλεκτρική αντοχή της μόνωσης έχει μειωθεί σημαντικά κατά τη γήρανση ή δεν είναι επαρκής. Η συνεισφορά αυτών των τάσεων στις αστοχίες μόνωσης είναι δύσκολο να εξακριβωθεί εκτός εάν μπορεί να προσδιοριστεί το μέγεθος και η συχνότητα εμφάνισής τους.

Μη Ισορροπημένες Τάσης Στάτορα

Οι μη ισορροπημένες τάσης τροφοδοσίας περιέλιξης στάτη θα προκαλέσουν αρνητικές τάσεις ακολουθίας και ρεύματα στην περιέλιξη του ρότορα. Αυτά μπορεί να οδηγήσουν σε υπερθέρμανση της μόνωσης. Ο σχεδιασμός του συστήματος διανομής ισχύος ή οι ανισορροπίες αντίστασης φάσης (π.χ., λόγω συνδέσεων υψηλής αντίστασης) προκαλούν μη ισορροπημένες τάσεις στην περιέλιξη του στάτη του κινητήρα. Λόγω της επίδρασης του μετατροπέα μεταξύ του στάτορα και του ρότορα, οι ροές αρνητικής ακολουθίας δημιουργούν ρεύματα αρνητικής ακολουθίας στην περιέλιξη του δρομέα. Αυτά τα σημαντικά πρόσθετα ρεύματα αναγκάζουν τη περιέλιξη του δρομέα να λειτουργεί σε σημαντικά υψηλότερη θερμοκρασία που επιταχύνει τη θερμική του γήρανση.

Συνδέσεις Υψηλής Αντίστασης

Εάν ένας σύνδεσμος μεταξύ δύο αγωγών έχει κολλήσει ελάχιστα ή ο σύνδεσμος του κλιπ συμπίεσης δεν έχει φτιαχτεί σωστά, θα παρουσιάζει υψηλή αντίσταση στο ρεύμα που ρέει μέσω αυτού υπό φορτίο και αυτό θα προκαλέσει υπερθέρμανση της μόνωσης του αρμού.

Η υπερβολική ποσότητα θερμότητας που παράγεται από συνδέσεις ράβδου σε ράβδο υψηλής αντίστασης προκαλεί ταχεία θερμική γήρανση της μόνωσης γύρω από τη σύνδεση και σε παρακείμενες συνδέσεις έως ότου εμφανιστεί σφάλμα στροφής προς στροφή, φάση προς φάση ή γείωση. Σε πολλές περιπτώσεις, η θερμότητα που παράγεται είναι αρκετή για να λιώσει το συγκολλητικό ή το υλικό συγκόλλησης στην άρθρωση.

Οι κύριες αιτίες είναι οι εξής :

- Σύνδεσμοι αρθρώσεων με κακή συγκόλληση ή κακή κατασκευή μεταξύ ράβδων περιέλιξης ρότορα που δεν βρίσκονται κατά τη διαδικασία κατασκευής.
- Αποτυχία της άρθρωσης μεταξύ ράβδων λόγω κόπωσης χαμηλού κύκλου από συχνή εκκίνηση.

Οι έλεγχοι καλής ποιότητας ενός ολοκληρωμένου περιελίγματος, όπως ο έλεγχος υπερτάσεων και η χρήση συσκευών θερμικής απεικόνισης για την ανίχνευση καυτών αρθρώσεων κατά την κατασκευή περιελίξεων, θα πρέπει να ελαχιστοποιούν την πιθανότητα αστοχιών αυτού του τύπου.

Αποτυχίες Τελικής Περιέλιξης

Απαιτείται εφαρμογή ζωνών πάνω από τις περιελίξεις των άκρων του ρότορα για να τις συγκρατήσει έναντι των υψηλών φυγοκεντρικών δυνάμεων που τους επιβάλλονται κατά τη λειτουργία. Μέχρι τις αρχές της δεκαετίας του 1950, η λωρίδα τελικής περιέλιξης αποτελούσε έναν αριθμό στροφών από στρογγυλό χαλύβδινο σύρμα εφαρμοζόμενο σφιχτά πάνω σε ένα μονωτικό στρώμα, το οποίο απαιτούσε να δώσει μηχανικό και ηλεκτρικό διαχωρισμό από τους αγωγούς. Τα στρογγυλά σύρματα συνδέθηκαν μαζί με συγκολλητικό χαμηλού σημείου τήξης. Η ανάπτυξη προεντεταμένου υαλοβάμβακα με επίστρωση ρητίνης στη συνέχεια ώθησε τους κατασκευαστές κινητήρων να αρχίσουν να χρησιμοποιούν αυτό το υλικό λόγω των ανώτερων μηχανικών και θερμικών δυνατοτήτων του, καθώς και της ελαστικότητάς του.

Εάν το χαλύβδινο σύρμα ή τα υλικά από ίνες επικαλυμμένα με ρητίνη αποτύχουν λόγω υπερθέρμανσης, υπερβολικής πίεσης ή κακής κατασκευής, οι ακραίες περιελίξεις πετιούνται προς τα έξω υπό την επίδραση φυγοκεντρικών δυνάμεων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα βλάβη περιέλιξης ρότορα.

Οι κύριες αιτίες είναι :

- Υπερβολικές θερμοκρασίες περιέλιξης, προκαλώντας μαλάκωμα ή τήξη του συγκολλητικού καλωδίου.
- Υπερβολικές θερμοκρασίες περιέλιξης, προκαλώντας θερμική γήρανση των ινών με επικάλυψη ρητίνης και οι δεσμοί ρητίνης μεταξύ των στρωμάτων γίνονται εύθραυστοι, σπάνε και αποτυχαίνουν (Σχήμα 6.7).
- Κακές διαδικασίες κατασκευής που οδηγούν σε ανεπαρκή μηχανική αντοχή για να αντέχουν υψηλές επιβαλλόμενες φυγοκεντρικές δυνάμεις.



Σχήμα 6.7

Βραχυκύκλωμα Μόνωσης Δακτυλίου Ολίσθησης

Οι τρεις δακτύλιοι ολίσθησης σε έναν κινητήρα δακτυλιοφόρου ρότορα πρέπει να διαχωρίζονται από τον άξονα με ένα στρώμα μόνωσης που εφαρμόζεται μεταξύ των δύο. Η απόσταση μεταξύ των δακτυλίων πρέπει να είναι επαρκής ώστε να παρέχει

επαρκή ηλεκτρική απόσταση ερπυσμού και σε ορισμένα σχέδια χρησιμοποιούνται μονωτικά φράγματα για να επιτευχθεί αυτό. Επίσης, οι δύο εξωτερικοί δακτύλιοι συνδέονται συνήθως με τους αγωγούς περιέλιξης μέσω στηριγμάτων που περνούν μέσω των άλλων δακτυλίων. Αυτά τα στηρίγματα πρέπει να είναι ηλεκτρικά απομονωμένα από τους δακτυλίους και αυτό γίνεται συνήθως με τοποθέτηση μονωτικών σωλήνων πάνω τους.

Οι κύριες αιτίες είναι :

- Είσοδος σκόνης, λαδιού από ρουλεμάν και υγρασία στο περίβλημα δακτυλίου ολίσθησης.
- Αποτυχία μόνωσης άξονα δακτυλίου ολίσθησης λόγω θερμικών ή μηχανικών πιέσεων.
- Μηχανική βλάβη της μόνωσης στηρίγματος σύνδεσης δακτυλίου ολίσθησης, προκαλώντας αστοχίες φάσης προς φάση.

6.2.2 Δρομέας με Έκτυπους Πόλους

Υπάρχουν δύο τύποι περιελίξεων σε ρότορες στύλου. Αυτοί είναι ο τύπος strip-on-edge που χρησιμοποιείται σε μεγάλες μηχανές, ειδικά αν είναι μεγάλης ταχύτητας, και ο τύπος πολυστρωματικού καλωδίου που χρησιμοποιείται σε μεγάλους βραδύτερους κινητήρες και μικρούς κινητήρες υψηλής ταχύτητας. Η μόνωση μεταξύ των πηνίων και του σώματος του πόλου μπορεί να είναι η ίδια και για τους δύο τύπους, ενώ η μόνωση στροφής είναι αρκετά διαφορετική.

Θερμική Επιδείνωση Όλα τα μονωτικά και μη μεταλλικά υλικά στήριξης επιδεινώνονται με την πάροδο του χρόνου λόγω της θερμότητας από τις περιελίξεις. Ο ρυθμός φθοράς των συστατικών υλικών είναι συνάρτηση των θερμικών ιδιοτήτων τους και των θερμοκρασιών στις οποίες υποβάλλονται. Εάν η θερμική βαθμολογία των συστατικών υλικών έχει επιλεγεί σωστά, η θερμική γήρανση και η σχετική φθορά θα συμβούν σταδιακά σε μια αποδεκτή διάρκεια ζωής.

Τα μοντέρνα σχέδια περιελίξεων ρότορα με έκτυπους πόλους, χρησιμοποιούν μόνωση γείωσης και περιστροφής από αραμιδικό χαρτί (Nomex™) σε strip-on-edge περιελίξεις, ροδέλες με επένδυση από ρητίνη, πολυστρωματικό πόλο από γυαλί, Dacron™ και γυαλί (Daglass™) καλυμμένα με μόνωση στροφής από σμάλτο υψηλής θερμοκρασίας σε πόλους καλωδίων και θερμοσκληρυνόμενες ρητίνες συγκόλλησης. Η θερμική διάρκεια ζωής της μόνωσης σε θερμά σημεία σε περιελίξεις μειώνεται σημαντικά καθώς το περιθώριο μεταξύ θερμοκρασίας λειτουργίας και θερμικής βαθμολογίας είναι πολύ μικρότερο. Αυτό το αποτέλεσμα είναι πιο κρίσιμο σε παλαιότερα συστήματα μόνωσης Κατηγορίας Β και η παρουσία τέτοιων καυτών σημείων είναι πολύ δύσκολο να εντοπιστεί.

Τα ακόλουθα είναι τα πιο συνηθισμένα αίτια της θερμικής γήρανσης σε περιελίξεις έκτυπων πόλων :

- Υπερφόρτωση ή υψηλές θερμοκρασίες αέρα που οδηγούν σε θερμοκρασίες λειτουργίας πολύ πάνω από τις ονομαστικές τιμές.
- Ανεπαρκής ψύξη, η οποία μπορεί να είναι γενική, για παράδειγμα, ανεπαρκής αέρας ψύξης ή νερό ψύξης ή τοπικά νεκρά σημεία στο κύκλωμα ψύξης λόγω κακής διαδικασίας σχεδιασμού, κατασκευής ή συντήρησης.
- Η χρήση υλικών που έχουν ανεπαρκείς θερμικές ιδιότητες και συνεπώς επιδεινώνονται με απαράδεκτο ρυθμό ακόμα και όταν λειτουργούν εντός ορίων θερμοκρασίας.
- Αρνητικά ρεύματα ακολουθίας σε περιελίξεις στάτη λόγω ανισοροπίας τάσης συστήματος κ.λπ., γεγονός που οδηγεί σε κυκλοφορούντα ρεύματα στον ρότορα.

Ρύπανση και Απορρόφηση Υγρασίας

Οι περιελίξεις ρότορα με έκτυπους πόλους, ειδικά οι τύποι strip-on-edge, είναι γενικά ευαίσθητα σε αστοχία από μόλυνση από αγωγίμα υλικά επειδή βασίζονται σε επαρκείς αποστάσεις ερπυσμού μεταξύ γυμνών αγωγών χαλκού για την αποφυγή βραχυκυκλωμάτων.

Όταν οι μολυσματικές ουσίες όπως υγρασία, σκόνη φρένων ρότορα, σκόνη άνθρακα και μίγματα λαδιού / σκόνης καλύπτουν τις επιφάνειες των περιελίξεων, μπορούν να παράγουν αγωγίμες διαδρομές μεταξύ των στροφών του πηνίου και γείωσης. Προγενέστερα συστήματα μόνωσης που περιείχαν υλικά όπως αμίαντο, βαμβακερές ίνες, χαρτί, κ.λπ. που συνδέονται με οργανικά βερνίκια είναι πολύ πιο ευαίσθητα σε αποτυχία από την απορρόφηση υγρασίας.

Τα ακόλουθα είναι τα πιο συνηθισμένα αίτια :

- Εισροή ρύπων όπως σκόνη άνθρακα, σκόνη σιδήρου κ.λπ. σε μηχανήματα ανοιχτού τύπου, ειδικά παρουσία διαρροής λαδιού από ρουλεμάν.
- Είσοδος υγρασίας από την ατμόσφαιρα (ανοικτά περιβλήματα), από συμπύκνωση (όλα τα περιβλήματα) και διαρροές ψυγείων (περιβλήματα TEWAC).
- Εισροή χημικών ουσιών που προσβάλλουν τα μονωτικά υλικά που τυλίγουν τον πόλο.

Φυγόκεντρος Δύναμη

Μεταξύ των πιο συνηθισμένων αιτιών αστοχίας στις περιελίξεις ρότορα με έκτυπους πόλους είναι οι συνεχείς φυγοκεντρικές δυνάμεις που τους επιβάλλονται στην περιστροφή και οι κυκλικές φυγοκεντρικές δυνάμεις που προκαλούνται από την έναρξη και τη διακοπή.

Οι ακτινικές και εφαπτόμενες φυγοκεντρικές δυνάμεις που επιβάλλονται στα εξαρτήματα του συστήματος μόνωσης της περιέλιξης τείνουν να παραμορφώνουν τους αγωγούς πηνίου και να σπάνε τη μόνωση του πηνίου εάν δεν είναι επαρκώς στηριγμένες. Εάν το στήριγμα της περιέλιξης του πόλου είναι ανεπαρκές ή έχει χαλαρώσει, η προκύπτουσα δόνηση του πηνίου και η κίνηση των πηνίων στους πόλους

θα προκαλέσουν τριβή του αγωγού και της ground μόνωσης. Οι μηχανικές καταπονήσεις της περιέλιξης θα γίνουν υπερβολικές και θα προκαλέσουν σοβαρές ζημιές εάν ο ρότορας έχει σχεδιαστεί για να λειτουργεί με υπερβολική ταχύτητα.

Τα ακόλουθα είναι τα πιο συνηθισμένα αίτια :

- Ανεπαρκής στήριξη ενδιάμεσων σπειρών λόγω κακής σχεδίασης ή συρρίκνωσης υλικών από θερμική γήρανση.
- Ανεπαρκής στήριξη ακτινικού πηνίου λόγω κακής σχεδίασης, ή συρρίκνωσης μόνωσης / στήριξης πηνίου από θερμική γήρανση.
- Αθέλητη υπερβολική ταχύτητα του ρότορα, προκαλώντας υπερβολική πίεση στις περιελίξεις και στα μονωτικά υλικά.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 ΔΟΚΙΜΕΣ ΜΟΝΩΣΗΣ ΔΡΟΜΕΑ ΚΑΙ ΣΤΑΤΗ

Αυτό το κεφάλαιο περιγράφει τις κύριες δοκιμές που διατίθενται στο εμπόριο για την αξιολόγηση της κατάστασης των περιελίξεων και μονώσεων δρομέα και στάτη. Όλες οι δοκιμές απαιτούν το σταμάτημα του κινητήρα ή της γεννήτριας για τουλάχιστον ένα μικρό χρονικό διάστημα. Σημειώνονται τεράστιες εξελίξεις στην τεχνολογία δοκιμών, λόγω καλύτερων ηλεκτρονικών και υπολογιστών με εξελιγμένο λογισμικό ανάλυσης δεδομένων. Στους δύο παρακάτω πίνακες αναφέρονται περιληπτικά κάποιες συνηθισμένες δοκιμές που γίνονται στους στάτες και στους δρομείς, και στην συνέχεια μερικά από αυτά αναλύονται με πιο μεγάλη λεπτομέρεια.

Συνηθισμένες δοκιμές στάτορα εκτός σύνδεσης.

Όνομα	Περιγραφή	Δυσκολία απόδοσης	Αποτελεσματικότητα	Σχετικά πρότυπα
Αντοχή μόνωσης	Εφαρμόζετε τάση DC για 1 λεπτό για να μετρηθεί το ρεύμα διαρροής	Εύκολο	Βρίσκει μόνο μόλυνση ή σοβαρά ελαττώματα	IEEE 43
Δείκτης πόλωσης	Αναλογία 1 λεπτού και 10 λεπτών αντοχής μόνωσης	Εύκολο	Βρίσκει μόνο μόλυνση ή σοβαρά ελαττώματα	IEEE 43
Υψηλή DC Τάση	Εφαρμογή υψηλής DC τάσης για 1 λεπτό	Εύκολο	Βρίσκει μόνο σοβαρά ελαττώματα	IEEE 95

Υψηλή AC Τάση	Εφαρμογή υψηλής AC τάσης για 1 λεπτό	Μέτρια, λόγω του μεγάλου μετασχηματιστή που απαιτείται	Πιο αποτελεσματικό από το DC δυναμικό	NEMA MG1 or IEC 60034
Χωρητικότητα	Εφαρμογή χαμηλής ή υψηλής τάσης για τη μέτρηση της χωρητικότητας περιέλιξης με την γείωση	Μέτρια	Αρκετά αποτελεσματικό για την εύρεση προβλημάτων θερμικότητας ή διαρροής νερού	-
Συντελεστής ισχύος	Εφαρμογή χαμηλής ή υψηλής τάσης για να μετρηθεί η απώλεια μόνωσης	Μέτρια	Αρκετά αποτελεσματικό για την εύρεση προβλημάτων θερμικότητας ή διαρροής νερού	IEEE 286 or IEC 60034-27-3
Μερική εκφόρτιση εκτός σύνδεσης	Ανίχνευση άμεσα τις τάσεις παλμού μερικής εκφόρτισης στην ονομαστική τάση	Δύσκολη	Βρίσκει τα περισσότερα προβλήματα εκτός από τους κραδασμούς της τελικής περιέλιξης. Μόνο για form-wound περιελίξεις	IEEE 1434
Μπλακάουτ	Εφαρμογή υψηλής AC τάσης και αναζήτηση εκκενώσεων με σβηστά τα φώτα	Μέτρια	Αποτελεσματικό για προβλήματα μόλυνσης στην τελική περιέλιξη	IEEE 1434
Σύσφιξη σφήνας	"σφυρηλάτηση" σφηνών για να φανεί αν είναι χαλαρά	Μέτρια	Αποτελεσματική εύρεση χαλαρών περιελίξεων σε form-wound περιελίξεις	
Πλευρική απόσταση	Εισαγάγετε "μετρητές αισθητήρων" στην κάτω πλευρά της υποδοχής	Εύκολο, αφού αφαιρεθούν οι σφήνες	Αποτελεσματική εύρεση χαλαρών περιελίξεων σε form-wound περιελίξεις	

Συνηθισμένες δοκιμές ρότορα εκτός σύνδεσης.

Όνομα	Περιγραφή	Δυσκολία απόδοσης	Τύποι Δρομέων	Αποτελεσματικότητα
	Εφαρμόζετε τάση DC για 1 λεπτό	Εύκολο	Όλοι	Βρίσκει μόνο μόλυνση ή σοβαρά ελαττώματα

Αντοχή μόνωσης	για να μετρηθεί το ρεύμα διαρροής			
Δείκτης πόλωσης	Αναλογία 1 λεπτού και 10 λεπτών αντοχής μόνωσης	Εύκολο	Όλοι	Βρίσκει μόνο μόλυνση ή σοβαρά ελαττώματα
Υψηλή Τάση	DC Εφαρμογή υψηλής τάσης για 1 λεπτό DC	Εύκολο	Όλοι	Βρίσκει μόνο σοβαρά ελαττώματα
Υψηλή Τάση	AC Εφαρμογή υψηλής τάσης για 1 λεπτό AC	Μέτρια, λόγω του μεγάλου μετασχηματιστή που απαιτείται	Όλοι	Πιο αποτελεσματικό από το DC δυναμικό
Δοκιμή αντίστασης	Εφαρμόζετε ρεύμα με 50 (60) Hz και μετριέται το V/I σε διαφορετικές ταχύτητες για να βρεθούν βραχυκύκλωμα στροφής	Μέτρια	Όλοι οι ρότορες με δακτυλίους ολίσθησης	Αποτελεσματικό
Πτώση πόλου	Εφαρμόζετε ρεύμα με 50 (60) Hz και μετριέται η πτώση τάσης σε κάθε πόλο για να βρεθούν πόλοι που θα έχουν βραχυκύκλωμα περιστροφής	Εύκολη	Σε δρομείς με έκτυπους πόλους	Βρίσκει μόνο βραχυκυκλώματα που υπάρχουν όταν ο ρότορας σταματά
Δοκιμή υπερτάσεων	Βρίσκει σφάλματα στροφής και γείωσης μετρώντας τις ασυνέχειες στην αντίσταση των υπερτάσεων	Δύσκολη		Αποτελεσματικό εάν είναι κοντά σε τελειωτικό βραχυκύκλωμα

7.1 Αντίσταση Μόνωσης και Δείκτης Πόλωσης

Αυτό είναι ίσως το πιο διαδεδομένο διαγνωστικό τεστ για περιελίξεις κινητήρων. Μπορεί να εφαρμοστεί σε όλες τις μηχανές και τις περιελίξεις με εξαίρεση τις

περιελίξεις του επαγωγικού κινητήρα βραχυκυκλωμένου δρομέα, οι οποίες δεν έχουν καμία μόνωση για έλεγχο.

Σε παλαιότερα συστήματα μόνωσης, η δοκιμή μπορεί επίσης να ανιχνεύσει θερμική φθορά. Οι δοκιμές αντίστασης μόνωσης (IR) και δείκτη πόλωσης (PI) χρησιμοποιούνται εδώ και περισσότερο από 70 χρόνια. Και οι δύο δοκιμές εκτελούνται με το ίδιο όργανο μέτρησης και συνήθως πραγματοποιούνται ταυτόχρονα. Το τεστ αναφέρεται συχνά ως τεστ Megger TM, παίρνοντας το όνομα της εταιρείας που ανέπτυξε το πρώτο όργανο μέτρησης για την αντίσταση μόνωσης και το δείκτη πόλωσης πριν από πολλές δεκαετίες.

Η δοκιμή αντίστασης μόνωσης μετρά την αντίσταση της ηλεκτρικής μόνωσης μεταξύ των αγωγών χαλκού και του πυρήνα του στάτη ή του δρομέα. Στην ιδανική περίπτωση, αυτή η αντίσταση πρέπει να είναι άπειρη επειδή, τελικά, ο σκοπός της μόνωσης είναι να εμποδίσει τη ροή ρεύματος μεταξύ του χαλκού και του πυρήνα του στάτη. Στην πράξη, η αντίσταση μόνωσης δεν είναι απείρως υψηλή, συνήθως, όσο χαμηλότερη είναι, τόσο πιο πιθανό είναι να υπάρχει πρόβλημα με τη μόνωση.

Η δοκιμή του δείκτη πόλωσης είναι μια παραλλαγή της δοκιμής της αντίστασης μόνωσης. Ο δείκτης πόλωσης είναι ο λόγος της αντίστασης μόνωσης που μετράται μετά την εφαρμογή τάσης για 10 λεπτά (R₁₀) προς την αντίσταση μόνωσης που μετράται μετά από μόλις 1 λεπτό (R₁), δηλαδή θα είναι :

$$PI = \frac{R_{10}}{R_1}$$

Ενα χαμηλός δείκτης πόλωσης δείχνει ότι μια περιέλιξη μπορεί να είναι μολυσμένη ή εμποτισμένη με νερό. Στη δοκιμή, εφαρμόζεται σχετικά υψηλή DC τάση μεταξύ του χαλκού περιέλιξης και του πυρήνα στάτη ή δρομέα (συνήθως μέσω του πλαισίου του μηχανήματος). Στη συνέχεια μετράται το ρεύμα που ρέει στο κύκλωμα. Η αντίσταση μόνωσης με χρόνο t θα είναι τότε :

$$R_t = \frac{V}{I_t}$$

που είναι απλώς ο νόμος του Ohm.

V είναι η εφαρμοζόμενη τάση DC από τον ελεγκτή και I_t είναι το συνολικό ρεύμα που μετράται μετά από t λεπτά.

Απαιτείται αναφορά στον χρόνο της τρέχουσας μέτρησης, καθώς το ρεύμα συνήθως δεν είναι σταθερό. Υπάρχουν τουλάχιστον τέσσερα ρεύματα που μπορεί να ρέουν όταν εφαρμόζεται DC τάση στην περιέλιξη :

1. **Χωρητικό ρεύμα.** Όταν εφαρμόζεται DC τάση σε έναν πυκνωτή, ρέει πρώτα ένα υψηλό ρεύμα φόρτισης, το οποίο στη συνέχεια αποσυντίθεται εκθετικά. Το μέγεθος του πυκνωτή και η εσωτερική αντίσταση της τροφοδοσίας τάσης, (συνήθως μερικές εκατοντάδες kilohms), καθορίζουν τον τρέχοντα ρυθμό αποσύνθεσης. Ένα πηνίο στάτη προσδιορισμένης κατανομής μπορεί να έχει

χωρητικότητα περίπου 1 nF μεταξύ του χαλκού και του πυρήνα. Έτσι, αυτό το ρεύμα να εξασθενεί σε λιγότερο από 10 δευτερόλεπτα. Καθώς αυτό το χωρητικό ρεύμα περιέχει λίγες διαγνωστικές πληροφορίες, η αρχική αντίσταση μόνωσης μετριέται όταν το χωρητικό ρεύμα έχει εξασθενήσει. Αυτή η ώρα έχει οριστεί ως 1 λεπτό για να διασφαλιστεί ότι αυτό το ρεύμα δεν παραμορφώνει την αντίσταση μόνωσης.

2. **Ένα ρεύμα αγωγιμότητας.** Αυτό το ρεύμα οφείλεται σε ηλεκτρόνια ή ιόντα που μετακινούνται κατά μήκος της μόνωσης, μεταξύ του χαλκού και του πυρήνα.

Αυτό είναι ένα γαλβανικό ρεύμα μέσω του τοιχώματος.

Ένα τέτοιο ρεύμα μπορεί να ρέει εάν το τοίχωμα έχει απορροφήσει υγρασία, κάτι που μπορεί να συμβεί στα παλαιότερα θερμοπλαστικά συστήματα μόνωσης ή εάν μια σύγχρονη μόνωση έχει βραχεί με νερό για πολλές εβδομάδες. Αυτό το ρεύμα ρέει επίσης εάν υπάρχουν ρωγμές, κοψίματα ή οπές στη μόνωση τοιχώματος και υπάρχει κάποια μόλυνση που επιτρέπει τη ροή ρεύματος. Αυτό το ρεύμα είναι σταθερό με το χρόνο και ιδανικά θα πρέπει να είναι μηδέν. Με τη σύγχρονη μόνωση, αυτό το ρεύμα είναι συνήθως μηδέν (αρκεί να μην υπάρχουν κοψίματα κ.λπ.) καθώς τα ηλεκτρόνια και τα ιόντα δεν μπορούν να διεισδύσουν μέσω της σύγχρονης μόνωσης εποξειδικής μαρμαρυγίας.

3. **Ένα ρεύμα διαρροής πάνω στην επιφάνεια.** Αυτό είναι ένα σταθερό συνεχές ρεύμα που ρέει πάνω από την επιφάνεια της μόνωσης. Προκαλείται από μερικώς αγωγήμη μόλυνση (λάδι ή υγρασία αναμεμιγμένη με σκόνη, βρωμιά, χημικά κ.λπ.) στην επιφάνεια των περιελίξεων. Στην ιδανική περίπτωση, αυτό το ρεύμα διαρροής πρέπει να είναι μηδέν. Ωστόσο, εάν αυτό το ρεύμα είναι μεγάλο, είναι πιθανό να προκληθεί φθορά της μόνωσης που προκαλείται από μόλυνση.
4. **Το ρεύμα απορρόφησης.** Αυτό είναι ένα ρεύμα που είναι δύσκολο να αντληφθεί κανείς. Το ρεύμα οφείλεται εν μέρει στον επαναπροσανατολισμό ορισμένων τύπων πολικών μορίων στο εφαρμοζόμενο ηλεκτρικό πεδίο DC. Πολλά πρακτικά μονωτικά υλικά περιέχουν πολικά μόρια που έχουν εσωτερικό ηλεκτρικό πεδίο λόγω της κατανομής ηλεκτρονίων εντός του μορίου. Για παράδειγμα, τα μόρια του νερού είναι πολύ πολικά. Όταν ένα ηλεκτρικό πεδίο εφαρμόζεται σε νερό, τα μόρια H₂O ευθυγραμμίζονται, ακριβώς όπως τα μαγνητικά πεδία ευθυγραμμίζονται σε ένα μαγνητικό πεδίο. Η ενέργεια που απαιτείται για την ευθυγράμμιση των μορίων προέρχεται από το ρεύμα στην παροχή τάσης DC. Μόλις όλα τα μόρια ευθυγραμμιστούν, το ρεύμα σταματά. Αυτό το ρεύμα είναι το ρεύμα πόλωσης, το οποίο είναι ένα συστατικό του ρεύματος απορρόφησης. Υπάρχουν πολλά πολικά μόρια σε άσφαλτο, μαρμαρυγία, πολυεστέρα. Εκτός από τη μοριακή ευθυγράμμιση, ενδέχεται να προκύψουν ρεύματα σε μόνωση με πολυστρωματική επένδυση υψηλής τάσης (όπως στο τοίχωμα στάτη υψηλής τάσης), λόγω παγίδευσης ηλεκτρονίων σε διεπαφές μεταξύ στρώσεων ταινίας. Η εμπειρία δείχνει ότι μετά την εφαρμογή ενός ηλεκτρικού πεδίου συνεχούς ρεύματος, το ρεύμα απορρόφησης είναι πρώτα σχετικά υψηλό και μειώνεται στο μηδέν μετά από περίπου 10 λεπτά για τη σύγχρονη μόνωση τοοχώματος υψηλής τάσης. Αντίθετα, η μόνωση σπειρών έχει σχετικά λίγα πολικά μόρια και καμία αποτελεσματική διεπαφή, και

επομένως έχει χαμηλό ρεύμα απορρόφησης. Από κάθε πρακτική άποψη, το ρεύμα απορρόφησης συμπεριφέρεται σαν κύκλωμα RC. Το ρεύμα απορρόφησης, όπως το χωρητικό ρεύμα, δεν είναι ούτε καλό ούτε κακό. Είναι απλώς ιδιοκτησία των μονωτικών υλικών.

Η αντίσταση μόνωσης και του δείκτη πόλωσης μπορούν να μετρηθούν με παροχή DC υψηλής τάσης και με αμπερόμετρο ακριβείας. Η τροφοδοσία DC πρέπει να έχει καλά ρυθμιζόμενη τάση, διαφορετικά θα ρέει χωρητικό ρεύμα φόρτισης σε κατάσταση σταθερότητας ($I = CdV / dt$). Το αμπερόμετρο πρέπει να μετρά ρεύματα μικρότερα από ένα nanoamp. Υπάρχουν πολλά εμπορικά "megohmmeters" ειδικού σκοπού. Ένα megohmmeter ενσωματώνει μια ρυθμιζόμενη τροφοδοσία DC και ένα αμπερόμετρο που βαθμονομείται σε megohms. Τα σύγχρονα όργανα μπορούν να εφαρμόσουν τάσεις έως 10 kV DC και να μετρήσουν αντιστάσεις υψηλότερες από 100 GΩ (100.000 MΩ).

Για περιελίξεις στάτη, η δοκιμή γίνεται καλύτερα στους ακροδέκτες της μηχανής, κατά προτίμηση μία φάση κάθε φορά, με αποσυνδεδεμένο οποιοδήποτε άλλο εξοπλισμό όπως καλώδια και μετασχηματιστές οργάνων. Αυτό είναι σχετικά εύκολο στις γεννήτριες, ωστόσο, αυτές οι συνθήκες δοκιμής μπορεί να είναι δύσκολο να επιτευχθούν στους κινητήρες.

Τα καλώδια του κινητήρα στο κιβώτιο ακροδεκτών πρέπει να αποσυνδεθούν, κάτι που είναι συχνά κουραστικό. Επίσης, τα ουδέτερα άκρα κάθε φάσης συνήθως δεν είναι προσβάσιμα σε περιελίξεις στάτη κινητήρα, επομένως, και οι τρεις φάσεις δοκιμάζονται ταυτόχρονα. Αυτές οι δυσκολίες οδήγησαν πολλά άτομα συντήρησης να ελέγξουν την περιέλιξη του στάτη κινητήρα από το διακόπτη. Σε αυτήν την περίπτωση, η αντίσταση μόνωσης των καλωδίων (και ιδίως των τερματισμών των καλωδίων) είναι παράλληλα με την περιέλιξη του στάτη. Σε περίπτωση αποτυχίας αναγνώσης, η δοκιμή αντίστασης μόνωσης και δείκτη πόλωσης πρέπει να επαναληφθεί στο κιβώτιο ακροδεκτών του κινητήρα, με τα καλώδια αποσυνδεδεμένα από τον κινητήρα. Ωστόσο, εάν οι μετρήσεις είναι καλές, αυτό σημαίνει ότι τόσο τα καλώδια όσο και η περιέλιξη του στάτη έχουν καλά αποτελέσματα.

Για περιελίξεις δρομέα, η δοκιμή γίνεται στους δακτυλίους ολίσθησης. Η σκόνη άνθρακα από τις ψύκτρες (καρβουνάκια) τείνει να συσσωρεύεται γύρω από τους δακτυλίους ολίσθησης, και έτσι είναι η πρώτη θέση που καθαρίζεται εάν συναντηθεί χαμηλή αντίσταση μόνωσης στις περιελίξεις του στάτη. Εάν δοκιμάζεται ένας τύπος διεγέρτη χωρίς ψήκτρες, η περιέλιξη πρέπει πρώτα να αποσυνδεθεί από τον ανορθωτή περιστρεφόμενης διόδου για να επιτρέψει την εκτέλεση αυτής της δοκιμής.

7.2 Δοκιμή DC Hipot

Το Hipot είναι μια σύντομη φόρμα για υψηλές δυνατότητες. Σε αυτήν τη δοκιμή, μια τάση DC που είναι ουσιαστικά υψηλότερη από αυτήν της μέγιστης τάσης AC που εμφανίζεται σε κανονική λειτουργία εφαρμόζεται στην περιέλιξη. Η βασική ιδέα είναι ότι εάν η περιέλιξη δεν αποτύχει ως αποτέλεσμα της υψηλής τάσης, η περιέλιξη δεν είναι πιθανό να αποτύχει σύντομα λόγω της γήρανσης της μόνωσης όταν τοποθετείται ή επιστρέφεται για συντήρηση. Εάν μια περιέλιξη αποτύχει στη δοκιμή DC hipot, οι

επισκευές ή η επαναφορά είναι υποχρεωτικές, καθώς η επιτοίχια μόνωση θα έχει τρυπηθεί. Οι περιελίξεις στάτη πρέπει για να περάσουν ένα τεστ hipot μετά την κατασκευή (συχνά ονομάζεται hipot έναρξης λειτουργίας ή αποδοχής). Πολλοί τελικοί χρήστες εκτελούν επίσης μια δοκιμή hipot μειωμένης τάσης σε στάτες που έχουν λειτουργήσει (συχνά ονομάζεται hipot συντήρησης).

Υπάρχουν αρκετές μέθοδοι για τη διεξαγωγή μιας δοκιμής DC hipot. Τα περισσότερα αναθεωρούνται στο IEEE Standard 95. Ορισμένες από τις παραλλαγές μειώνουν τον κίνδυνο αστοχίας κατά τη διάρκεια του τεστ και μερικές παρέχουν επίσης πληροφορίες διαγνωστικού χαρακτήρα.

Για όλους τους τύπους μεθόδων ελέγχου DC hipot συντήρησης, η κρίσιμη απόφαση που πρέπει να ληφθεί αφορά τη μέγιστη τάση δοκιμής. Για περιελίξεις στάτη προσδιορισμένης κατανομής, το IEEE 95 παρέχει οδηγίες. Προτείνει ότι το hipot συντήρησης πρέπει να είναι τόσο υψηλό όσο το 75% του επιπέδου hipot έναρξης λειτουργίας. Τα NEMA MG1 και IEC 60034-1 ορίζουν ότι το DC hipot έναρξης λειτουργίας, πρέπει να είναι 1,7 φορές το επίπεδο έναρξης λειτουργίας AC hipot ($2E + 1$) kV, όπου το E είναι η ονομαστική τάση φάσης προς φάση rms σε kilovolts της περιέλιξης του στάτη. Το αρχικό σκεπτικό για τον παράγοντα 1,7 ήταν ότι οι DC δοκιμές βλάβης στη δεκαετία του 1950 στη επιτοίχια μόνωση στάτη φαινόταν να είναι περίπου 1,7 φορές υψηλότερες από την τάση βλάβης AC. Οι πιο πρόσφατες δοκιμές δεν επιβεβαίωσαν ότι η αναλογία 1,7 ισχύει πάντα για τις περιελίξεις στάτη με εποξική μίκα. Ωστόσο, η ομάδα εργασίας IEEE 95 αποφάσισε να αφήσει τον παράγοντα στο 1,7, καθώς καμία άλλη αναλογία δεν φαίνεται να έχει καλύτερη πειραματική βάση. Πολλοί χρήστες έχουν υιοθετήσει ένα DC επίπεδο hipot συντήρησης περίπου 2E, δηλαδή, μια περιέλιξη 4,1 kV θα δοκιμαστεί σε περίπου 8 kV DC. Αυτό το επίπεδο είχε αρχικά προταθεί καθώς προσεγγίζει την υψηλότερη πιθανή υπέρταση που μπορεί να προκύψει στον στάτη εάν παρουσιαστεί σφάλμα φάσης-γείωσης στο σύστημα ισχύος. Κατά συνέπεια, μια δοκιμή hipot συντήρησης αναπαράγει, με ελεγχόμενο τρόπο εκτός σύνδεσης, την υπέρταση που μπορεί να δει ένας στάτης σε λειτουργία. Η ιδέα εδώ είναι ότι εάν η περιέλιξη μπορεί να επιβιώσει από αυτήν τη δοκιμή hipot, είναι απίθανο να αποτύχει σε λειτουργία λόγω πιθανής αύξησης της τάσης που δημιουργείται από σφάλματα του συστήματος ισχύος.

Σε γενικές γραμμές, είναι καλύτερα να απομονωθούν οι φάσεις μεταξύ τους σε μια hipot δοκιμή περιτύλιξης στάτορα. Το hipot εφαρμόζεται σε κάθε φάση με τη σειρά, με τις άλλες δύο φάσεις να είναι γειωμένες. Η ενεργοποίηση κάθε φάσης ξεχωριστά διασφαλίζει ότι θα υπάρχει τουλάχιστον κάποια ηλεκτρική καταπόνηση μεταξύ των πηνίων στην τελική περιέλιξη. Σς στάτες κινητήρων 3.3 και 4.1 kV, συνήθως δεν είναι δυνατή η απομόνωση των φάσεων: επομένως, η δοκιμή DC hipot ενεργοποιεί και τις τρεις φάσεις ταυτόχρονα. Επειδή δεν υπάρχει πιθανή διαφορά μεταξύ των πηνίων στην τελική περιέλιξη, τα προβλήματα τελικής περιέλιξης που βρίσκονται μακριά από τον πυρήνα δεν εντοπίζονται στη δοκιμή τριών φάσεων.

Όλοι οι ανιχνευτές θερμοκρασίας περιέλιξης πρέπει να γειωθούν πριν από τη διεξαγωγή αυτής της δοκιμής, ειδικά σε περιελίξεις με ονομαστική τιμή μικρότερη από 6 kV, οι οποίες είναι απίθανο να έχουν ημιαγώγιμη επίστρωση στα αυλάκια.

Είναι συνετό να εκτελείτε πάντα μια δοκιμή αντίστασης μόνωσης / δείκτη πόλωσης πριν από μια δοκιμή DC hipot. Εάν η περιέλιξη περιέχει υγρά ή είναι μολυσμένη, η οποία θα ανακαλυφθεί από τη δοκιμή αντίστασης μόνωσης/ δείκτη πόλωσης δεν

πρέπει να εκτελεστεί η δοκιμή DC hipot μέχρι να στεγνώσει ή / και να καθαριστεί η περιέλιξη. Η διεξαγωγή δοκιμής hipot σε υγρή ή μολυσμένη περιέλιξη μπορεί να τρυπήσει άσκοπα τη μόνωση, αυξάνοντας σημαντικά την απαιτούμενη προσπάθεια για την επισκευή της περιέλιξης. Σε αντίθεση με τη δοκιμή AC hipot η οποία εξετάζεται σε παρακάτω κεφάλαιο, η δοκιμή DC hipot δεν γερνάει τη μόνωση περιέλιξης, καθώς μερικές εκκενώσεις συμβαίνουν πολύ σπάνια υπό DC τάση. Έτσι, εάν η περιέλιξη περάσει τη DC δοκιμή hipot, η μόνωση δεν θα έχει επιδεινωθεί με κανένα τρόπο από τη δοκιμή. Η δοκιμή Hipot ενέχει κίνδυνο ηλεκτροπληξίας για το προσωπικό που θα κάνει την δοκιμή, για αυτό τον λόγο απαιτούνται κατάλληλα μέτρα ασφαλείας.

7.3 Θερμά Σημεία σε Κακές Συνδέσεις (Υψηλό ρεύμα-υπέρυθρη κάμερα)

Εάν ένα υψηλό ρεύμα DC ή AC ρέει στον χαλκού, σε οποιοδήποτε περιοχές υψηλής αντίστασης θα προκαλέσει επιπλέον απώλειες I^2R , οι οποίες με τη σειρά τους θα αυξήσουν τη θερμοκρασία σε αυτή την περιοχή. Εάν οι αγωγοί χαλκού είναι γυμνοί και ορατοί, αυτή η αύξηση της θερμοκρασίας θα είναι άμεσα ορατή χρησιμοποιώντας μια κάμερα θερμικής απεικόνισης υπέρυθρης ακτινοβολίας. Εάν οι αγωγοί είναι μονωμένοι όπως στις περισσότερες περιελίξεις στάτη, θα χρειαστούν 15 έως 60 λεπτά για να εμφανιστεί η υψηλότερη θερμοκρασία στην επιφάνεια της μόνωσης. Πριν από τη δοκιμή, οι περιελίξεις πρέπει να “εκτεθούν”, απαιτώντας κάποια αποσυναρμολόγηση. Οι δρομείς πρέπει να αφαιρεθούν από το μηχάνημα. Στους στάτες, οι τελικές περιελίξεις και όλες οι συνδέσεις πρέπει να είναι ορατές. Απαιτείται κατάλληλη πηγή ρεύματος. Η οποία μπορεί να είναι είτε AC είτε DC. Μία από τις πιο κοινές πηγές που χρησιμοποιούνται για μεγαλύτερους κινητήρες είναι μια μηχανή συγκόλλησης. Εναλλακτικά, ένας δοκιμαστής απώλειας πυρήνα μπορεί να παρέχει ρεύμα εναλλασσόμενου ρεύματος. Για μικρότερους κινητήρες, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένας μετασχηματιστής μεταβλητής AC από 120/220V. Πρέπει να είμαστε προσεκτικοί για να κυκλοφορήσει ένα ρεύμα που δεν θα υπερβαίνει περίπου το 50% του ρεύματος πλήρους φορτίου για τη μέτρηση των περιελίξεων δρομέα και στάτη. Το ρεύμα αυτό δεν πρέπει να κυκλοφορεί πάνω από μία ώρα έτσι ώστε να μειωθεί η πιθανότητα να υπερθερμανθεί η μόνωση. Μια σύγχρονη κάμερα θερμικής απεικόνισης σαρώνει την περιέλιξη αμέσως μετά την εφαρμογή του αυτού του ρεύματος.

7.4 Δοκιμή AC Hipot

Η δοκιμή AC hipot είναι παρόμοια με τη δοκιμή DC hipot με την εξαίρεση ότι χρησιμοποιείται τάση βιομηχανικής συχνότητας (50 ή 60 Hz). Μερικές φορές χρησιμοποιείται 0,1 Hz AC. Αυτή η δοκιμή εφαρμόζεται συνήθως σε περιελίξεις προσδιορισμένης κατανομής στάτη. Το μεγαλύτερο μέρος της περιγραφής που δίνεται για τη δοκιμή DC hipot σχετίζεται με τη δοκιμή AC hipot. Συγκεκριμένα, πρόκειται για μια δοκιμή go-no go που διασφαλίζει ότι τα μεγάλα ελαττώματα μόνωσης που είναι πιθανό να προκαλέσουν σφάλμα λειτουργίας στο εγγύς μέλλον μπορούν να εντοπιστούν σε μια δοκιμή εκτός σύνδεσης.

Το βασικό στοιχείο σε μια δοκιμή AC hipot είναι ο μετασχηματιστής AC που απαιτείται για την ενεργοποίηση της χωρητικότητας της περιέλιξης. Ένα τύλιγμα στάτη γεννήτριας 13,8 kV με χωρητικότητα 1 μF απαιτεί ρεύμα φόρτισης 8 A στα 60 Hz για δοκιμή hipot συντήρησης 1.5E. Η ελάχιστη βαθμολογία μετασχηματιστή είναι 21 kV στα 8 A ή περίπου 170 kVA. Αυτός είναι ένας σημαντικός μετασχηματιστής και σίγουρα δεν είναι πολύ φορητός σε σύγκριση με ένα σετ DC hipot. Το σετ hipot AC είναι επίσης πολύ πιο ακριβό από το αντίστοιχο DC. Λόγω του μεγέθους και του κόστους της παροχής AC hipot, το AC hipot σπάνια εκτελείται ως δοκιμή συντήρησης σε ορισμένες χώρες, όπως οι Ηνωμένες Πολιτείες.

Μια εναλλακτική λύση αντί για μετασχηματιστή βιομηχανικής συχνότητας είναι ένα τροφοδοτικό πολύ χαμηλής συχνότητας. Τέτοια τροφοδοτικά λειτουργούν στα 0,1 Hz. Με αυτήν τη χαμηλή συχνότητα, το χωρητικό ρεύμα φόρτισης είναι 1/500 ή 1/600 του ρεύματος που απαιτείται στις βιομηχανικές συχνότητες. Το ρεύμα για την παραπάνω περιέλιξη θα ήταν τότε περίπου 13 mA. Το τροφοδοτικό πολύ χαμηλής συχνότητας βαθμολογείται τότε σε 275 VA, το οποίο είναι πολύ μικρότερο και πιο πρακτικό να μετακινείται σε μια εγκατάσταση. Τα σύγχρονα τροφοδοτικά πολύ χαμηλής συχνότητας είναι σχετικά οικονομικά και αποδοτικά. Η έρευνα δείχνει ότι η κατανομή τάσης σε όλη τη επιτοίχια μόνωση είναι ουσιαστικά η ίδια με τη βιομηχανική συχνότητα. Σύμφωνα με το πρότυπο δοκιμής πολύ χαμηλής συχνότητας IEEE 433, χρησιμοποιείται υψηλότερη τάση για το hipot πολύ χαμηλής συχνότητας από ό,τι της βιομηχανικής συχνότητας. Ο παράγοντας που ορίζεται στο IEEE 433 είναι 1,63 (ελαφρώς μικρότερος από τον παράγοντα 1,7 που χρησιμοποιείται για τη δοκιμή DC). Όπως και με τον συντελεστή DC, υπάρχουν λίγα που τεκμηριώνουν τον παράγοντα 1,63. Παρόλο που η δοκιμή πολύ χαμηλής συχνότητας χρησιμοποιεί σύγχρονα σετ δοκιμών (για παράδειγμα από την Baur ή την High Voltage Inc.) παράγει μια καλή μορφή ημιτονοειδούς μορφής, η οποία έχει βρει ευρεία αποδοχή για δοκιμή hipot καλωδίου ισχύος, υπήρξε μικρή αποδοχή της χρήσης της με περιστρεφόμενες μηχανές. Όπως συμβαίνει και με το DC hipot, είναι καλύτερο να δοκιμάζεται το AC hipot σε κάθε φάση ξεχωριστά, παρά και στις τρεις φάσεις ταυτόχρονα, καθώς αυτό θα επιτρέψει την αποτελεσματικότερη ανίχνευση τυχόν σημαντικών ελαττωμάτων στην τελική περιέλιξη. Η δοκιμή μπορεί να πραγματοποιηθεί στους ακροδέκτες περιέλιξης του στάτη ή από τους διακόπτες. Οι δοκιμές AC ή πολύ χαμηλής συχνότητας δεν γερνούν τα καλώδια που είναι σε καλή κατάσταση. Όπως και με τη δοκιμή DC hipot, απαιτείται μεγάλη προσοχή κατά τη διεξαγωγή της δοκιμής, καθώς υπάρχει κίνδυνος για το προσωπικό που θα την διεξάγει.

7.5 Αναβάθμιση Χωρητικότητας Στάτη

Αυτή η δοκιμή είναι έμμεση δοκιμή μερικής εκκένωσης και ισχύει μόνο για περιελίξεις στάτη προσδιορισμένης κατανομής 2300 V και άνω.

Δεν υπάρχουν τυποποιημένες διαδικασίες για την εκτέλεση αυτού του τεστ. Απαιτείται παροχή AC τάσης που να μπορεί να ενεργοποιεί την χωρητικότητα της περιέλιξης στην ονομαστική τάση. Αυτό μπορεί να είναι ένας συμβατικός μετασχηματιστής ή ακόμη

και μια τροφοδοσία πολύ χαμηλής τάσης. Για μεγάλο στάτορα με συχνότητα ισχύος μπορεί να χρειαστούν 20-30 kVA. Απαιτείται επίσης ένα όργανο το οποίο είναι ικανό να μετρά την χωρητικότητα τουλάχιστον στην ονομαστική τάση λειτουργίας της γραμμής προς την γείωση της περιέλιξης του στάτη. Για την κάλυψη όλων των μηχανών, το όργανο χωρητικότητας πρέπει να μπορεί να λειτουργεί έως και 25 kV. Επιπλέον, η συσκευή χρειάζεται ακρίβεια καλύτερη από 0,1%.

Υπάρχουν διάφοροι τύποι συσκευών που μπορούν να πληρούν αυτές τις απαιτήσεις. Η γέφυρα Schering και η γέφυρα αναλογίας μετασχηματιστή είναι τα πιο συνηθισμένα. Η δοκιμή γίνεται καλύτερα με τις φάσεις απομονωμένες μεταξύ τους, με αποσυνδεδεμένο όλο τον τερματικό εξοπλισμό, όπως καλώδια, καθώς αυτό θα αυξήσει την ευαισθησία. Κάθε φορά δοκιμάζεται μια φάση με τις άλλες δύο φάσεις να είναι γειωμένες. Πρώτα μετριέται η χωρητικότητα χαμηλής τάσης (C_{lv}), συνήθως είναι περίπου 0,2E, όπου το E είναι η ονομαστική τάση φάσης προς φάση του στάτη. Στη συνέχεια, η εφαρμοζόμενη τάση αυξάνεται περίπου στην ονομαστική τάση γραμμής προς γείωση (περίπου 0,6E) και μετράται η χωρητικότητα υψηλής τάσης (C_{hv}). Η αναβάθμιση χωρητικότητας είναι :

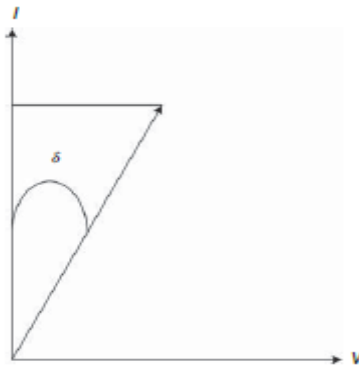
$$\Delta C = \frac{C_{hv} - C_{lv}}{C_{lv}}$$

Συνήθως εκφράζεται σε ποσοστό παρά σε Farad. Μερικές φορές η χωρητικότητα μετράται επίσης στην ονομαστική τάση φάσης προς φάση (E) που εφαρμόζεται μεταξύ του χαλκού και του πυρήνα. Όσο μεγαλύτερο είναι το ΔC , τόσο περισσότερα κενά θα υπάρχουν στη μόνωση. Τα πιο εξελιγμένα επιτοιχία μονωτικά απο epoxy-mica πρέπει να έχουν ΔC μικρότερο από περίπου 1%. Οι παλαιότερες περιελίξεις ασφάλτου μαρμαρυγίας πρέπει να έχουν ΔC μικρότερο από 3% ή 4%.

7.6 Συντελεστής Απωλειών

Ο συντελεστής απωλειών μας δείχνει ένα μέρος των διηλεκτρικών απωλειών μιας μόνωσης. Ορισμένες διαδικασίες φθοράς, όπως η θερμική γήρανση ή η απορρόφηση υγρασίας, αυξάνουν αυτές τις απώλειες. Έτσι, η τάση της διηλεκτρικής απώλειας με την πάροδο του χρόνου αποτελεί ένδειξη ορισμένων τύπων προβλημάτων μόνωσης. Υπάρχουν τρεις διαφορετικοί τρόποι για τη μέτρηση της διηλεκτρικής απώλειας. Όλα περιλαμβάνουν την αναγνώριση ότι η περιέλιξη είναι ουσιαστικά σαν ένας πυκνωτής με μικρή διηλεκτρική απώλεια.

1. **Συντελεστής απωλειών.** Ο συντελεστής απωλειών μετριέται με ένα ισορροπημένο όργανο τύπου, όπου ένα ανθεκτικό – χωρητικό δίκτυο μεταβάλλεται για να δώσει την ίδια γωνία τάσης και απώλειας ($\tan \delta$) με τη μέτρηση κατά μήκος της περιέλιξης του στάτη (Σχήμα 7.1). Στη συνέχεια, ο συντελεστής ισχύος υπολογίζεται από τα στοιχεία R και C στη γέφυρα που δίνουν τη μηδενική τάση. Αυτή η μέθοδος μπορεί εύκολα να επιτύχει ακρίβεια 0,01%.



Σχήμα 7.1 Υπολογισμός γωνίας απώλειας για μέτρηση $\tan \delta$.

2. **Tan $\delta\delta$.** Μια άλλη μέθοδος μετρά ψηφιακά τη γωνία φάσης μεταξύ της τάσης και του ρεύματος μέσω της περιέλιξης του στάτη. Σε έναν ιδανικό πυκνωτή, η γωνία φάσης πρέπει να είναι 90° . Ωστόσο, όπως φαίνεται στο σχήμα 7.1, η διηλεκτρική απώλεια δημιουργεί ένα στοιχείο του ρεύματος που βρίσκεται σε φάση με την τάση. Η εφαπτομένη της γωνίας δ που φαίνεται στο σχήμα 7.1 είναι ένας δείκτης της διηλεκτρικής απώλειας.
3. **Συντελεστής ισχύος.** Ο συντελεστής ισχύος μετράται με ακρίβεια μέτρησης της τάσης (V) που εφαρμόζεται μεταξύ του χαλκού και του πυρήνα μιας περιέλιξης και ανίχνευσης του προκύπτοντος ρεύματος (I). Συγχρόνως, η ισχύς (W) στην περιέλιξη μετράται με ακριβές βατόμετρο. Ο συντελεστής ισχύος PF είναι :

$$PF = \frac{W}{VI}$$

Όπως και με τον συντελεστή απωλειών, ο συντελεστής ισχύος εκφράζεται συνήθως σε ποσοστό στη Βόρεια Αμερική και μερικές φορές ανά χίλια στην Ευρώπη. Η δοκιμή του συντελεστή ισχύος είναι συχνά λιγότερο ακριβής στη μέτρηση της διηλεκτρικής απώλειας από τις άλλες μεθόδους.

Όλες οι μέθοδοι μπορούν να εκτελεστούν εφαρμόζοντας AC χαμηλή τάση μεταξύ του χαλκού της περιέλιξης και του πυρήνα του στάτη. Στις περισσότερες περιπτώσεις, όλες οι μέθοδοι επιτυγχάνονται χρησιμοποιώντας τάση εναλλασσόμενου ρεύματος βιομηχανικής συχνότητας για ενεργοποίηση της περιέλιξης. Ωστόσο, εάν χρησιμοποιείται AC χαμηλή τάση βιομηχανικής συχνότητας, ενδέχεται να υπάρχουν ορισμένα επαγόμενα ρεύματα βιομηχανικής συχνότητας στην περιέλιξη λόγω επαγωγικής ή χωρητικής παραλαβής από άλλο ενεργοποιημένο εξοπλισμό. Αυτά τα επαγόμενα σήματα μπορούν να οδηγήσουν σε ψευδή αποτελέσματα. Έτσι χρησιμοποιείται συχνότητα διαφορετική από 50 ή 60 Hz. Ο συντελεστής απωλειών μπορεί να μετατραπεί σε συντελεστή ισχύος χρησιμοποιώντας τον παρακάτω τύπο :

$$PF = \frac{DF}{(1 + DF^2)^{0.5}}$$

Ωστόσο, οι αριθμοί που παράγονται με όλες τις μεθόδους είναι ουσιαστικά οι ίδιοι για τα περισσότερα συστήματα μόνωσης περιστρεφόμενων μηχανών. Όπως με τη δοκιμή χωρητικότητας, η διηλεκτρική απώλεια μετράται πιο ευαίσθητα στους ακροδέκτες του στάτη. Το καλώδιο τροφοδοσίας μπορεί να παραμορφώσει τις ενδείξεις. Είναι καλύτερο να μετράτε κάθε φάση ξεχωριστά, καθώς αυτό αυξάνει την ευαισθησία. Ωστόσο, στους κινητήρες, αυτό συνήθως δεν είναι δυνατό λόγω της ουδέτερης σύνδεσης τυλίγματος του στάτη.

Οι τυπικοί συντελεστές εξάλειψης είναι περίπου 0,5% ή λιγότερο για σύγχρονη μόνωση εμποτισμένη με εποξικά και πολυεστέρα ενώ για περιελίξεις ασφάλτου μαρμαρυγίας για μπορεί να είναι 3% έως 5%. Εάν ο συντελεστής εξάλειψης μετράται σε τακτική βάση, ας πούμε κάθε λίγα χρόνια, και παραμένει σταθερός με την πάροδο του χρόνου, είναι ένδειξη ότι δεν υπάρχει θερμική γήρανση ή βαριά μόλυνση της μόνωσης περιέλιξης. Εάν υπάρχει αύξηση με την πάροδο του χρόνου, είναι μια ένδειξη ότι συμβαίνει υπερθέρμανση της μόνωσης και αν έχει σημειωθεί αύξηση κατά 1% ή περισσότερο από την αρχική τιμή θα εμφανιστεί σημαντική επιδείνωση της μόνωσης.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα πτυχιακή εργασία δόθηκε έμφαση στην μόνωση των ηλεκτρικών μηχανών. Αναφέρθηκαν τα μονωτικά υλικά που χρησιμοποιούνται στις περιελίξεις

των μηχανών, οι αιτίες καταστροφής τους και τα είδη των δοκιμών που αυτές υπόκεινται. Κατά τη διάρκεια εργασίας παρατηρήθηκε, ότι τα μονωτικά υλικά, θέλουν πολύ προσοχή, τόσο στην τοποθέτηση όσο και στην συντήρησή τους. Όσο τέλειες και αν είναι οι συνθήκες λειτουργίας υπάρχει πάντα ο κίνδυνος της γήρανσης.

Το σίγουρο είναι τα περισσότερα υλικά, αν όχι όλα, θα γηρανθούν κάποτε. Οπότε σκοπός είναι να το αποφύγουμε αυτό, όσο το δυνατόν βέβαια γίνεται και με την πάροδο του χρόνου με την βοήθεια της τεχνολογίας πολλές εταιρίες ανακαλύπτουν καινούρια υλικά και μεθόδους για την καλύτερη δυνατή αντοχή της μόνωσης.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Charman J. S., « Ηλεκτρικές Μηχανές AC- DC», Θεσσαλονίκη, Τζιόλα 2003.
- [2] Δέρβος Κ.Θ., Μονωτικά υλικά υψηλών τάσεων, εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα , 1997.
- [3] Δημητριάδης Α., Τεχνολογία Περιελίξεων Ηλεκτρικών Μηχανών, Ίδρυμα Ευγενίδου, Αθήνα, 1977.
- [4] Μπούρκας Π. Δ., Εφαρμογές Υψηλών Τάσεων, εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα, 1997.
- [5] Ντοκόπουλος Π., Ηλεκτρικές Εγκαταστάσεις Καταναλωτών, εκδόσεις ΖΗΤΗ, 2005.
- [6] Σαφάκας Α.Ν., Ηλεκτρικές Μηχανές Α, Εκδόσεις Πανεπιστημίου Πατρών, Πάτρα 2007.
- [7] Σαφάκας Α.Ν., Ηλεκτρικές Μηχανές Β, Εκδόσεις Πανεπιστημίου Πατρών, Πάτρα 2009.

[8] Χατζηϊωάννου Χ., Κίνδυνοι Από Το Ηλεκτρικό Ρεύμα, ΕΑ.ΓΝ.Υ.Α.Ε., Παράρτημα Θεσσαλονίκης, 2006.

[9] Greg C.Stone, Ian Culbert, Edward A. Boulter , Hussein Dhiarani Electrical Insulation for Rotating Machines