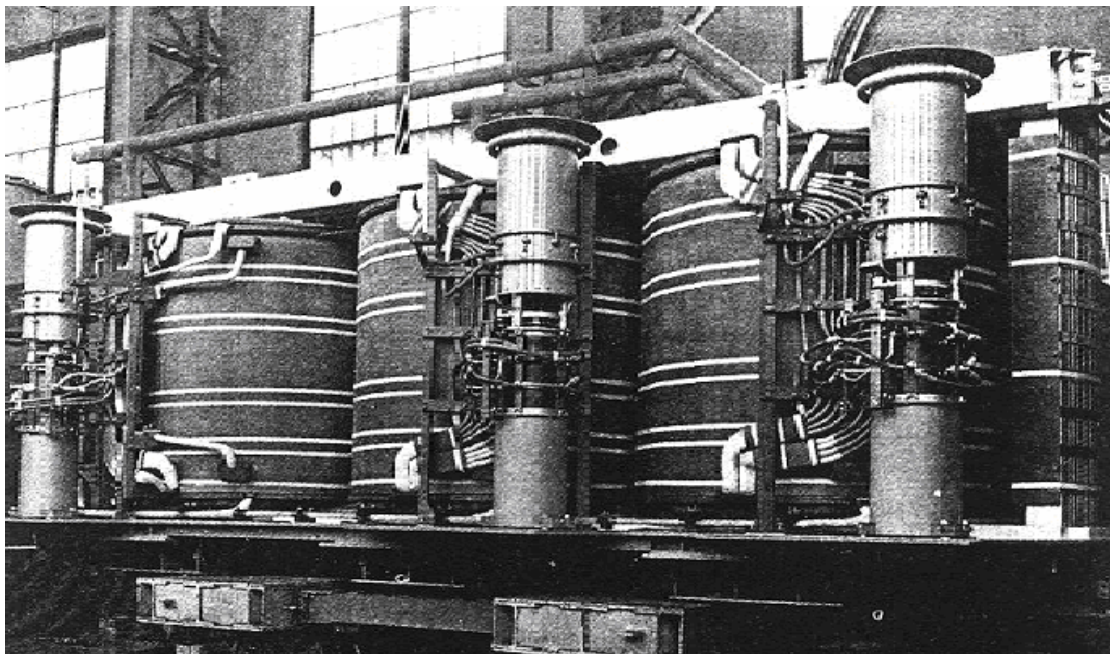




**ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΠΑΤΡΩΝ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΙΑΣ**

**ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΑΡΙΘΜΟΣ 1320**

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΜΟΝΩΣΕΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ



**ΦΟΙΤΗΤΕΣ
ΧΡΙΣΤΟΔΟΥΛΟΥ ΒΑΣΙΛΗΣ
ΑΔΑΜΟΠΟΥΛΟΣ ΓΙΩΡΓΟΣ**

ΕΙΣΗΓΗΤΗΣ ΧΑΡΑΛΑΜΠΑΚΟΣ ΝΕΚΤΑΡΙΟΣ ΒΑΣΙΛΗΣ

ΠΑΤΡΑ ΑΠΡΙΛΙΟΣ 2013

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Με την πάροδο του χρόνου και την πρόοδο της τεχνολογίας έχουν εφευρεθεί καλύτερα υλικά μονώσεων και μέσω εργαστηριακών πειραμάτων έχει επιτευχθεί η καλύτερη μόνωση των μηχανών
Αυτό προσφέρει μεγαλύτερη απόδοση αλλά και την προστασία τους από διάφορες φθορές και από περιβαλλοντολογικές συνθήκες.

Μόνωση ονομάζεται η απομόνωση ενός χώρου από υγρά, θερμότητα, ψύχος και από τον ήχο. Για να επιτευχθεί η μόνωση χρησιμοποιούμε εξειδικευμένα, κατάλληλα υλικά με θερμομονωτικές ηχομονωτικές ή στεγανοποιητικές ιδιότητες (για παράδειγμα ταινία πολυεστέρα, ταινία μίκα, μονωτικά βερνίκια, γυαλί καθώς και PVC). Η μόνωση του εξοπλισμού και των εγκαταστάσεων υψηλής τάσης είναι αναγκαία για την διατήρηση της διαφοράς δυναμικού μεταξύ των υπο υψηλή τάση αγωγίων μερών.

Η βασική λειτουργία της μόνωσης είναι να χωριστούν τα συστατικά των διαφορετικών ηλεκτρικών κυκλωμάτων. Οι μηχανικές, ηλεκτρικές και θερμικές πιέσεις στις οποίες η μόνωση εκτίθεται παίζουν ρόλο στις διαστάσεις μιας μηχανής

Ενα κομμάτι το οποίο θα ασχοληθούμε είναι η κατασκευή μόνωσης. Ανάλογα με τις περιβαλλοντικές συνθήκες υπο τις οποίες προορίζεται να λειτουργήσει μια μόνωση διακρίνεται σε εσωτερική ή εξωτερική. Η κατασκευή μονώσεων υψηλής τάσης πραγματοποιείται με την συμμετοχή ενός ή περισσοτέρων διηλεκτρικών τα οποία διακρίνονται σε αέρια, στερεά και υγρά.

Με την πάροδο του χρόνου δημιουργούνται βλάβες στις μονώσεις και αυτό έχει ως συνέπεια την ελαχιστοποίηση του χρόνου ζωής των κινητήρων καθώς και μειωμένη απόδοσή τους.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	2
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	3-4
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	5
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	
1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΤΩΝ ΒΑΣΙΚΩΝ ΕΝΝΟΙΩΝ ΣΤΙΣ ΜΟΝΩΣΕΙΣ ΥΨΗΛΩΝ ΤΑΣΕΩΝ.....	6
1.2 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΜΟΝΩΣΕΩΝ.....	7-9
1.3 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΜΟΝΩΣΕΩΝ.....	9-10
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	
ΒΑΣΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΘΕΩΡΙΑΣ ΤΩΝ ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ	
2.1. ΒΑΣΙΚΑ ΣΤΕΡΕΑ ΗΛΕΚΤΡΟΜΟΝΩΤΙΚΑ.....	11-12
2.2. ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΟΜΟΝΩΤΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ.....	13
2.2.1. Η ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ.....	13-14
2.2.2. Η ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΣΤΑΘΕΡΑ.....	14-15
2.2.3. Ο ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΑΠΩΛΕΙΩΝ.....	15-17
2.2.4. Η ΕΙΔΙΚΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ.....	17-18
2.2.5. Ο ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ $\varepsilon \operatorname{tg}\delta$	18-20
2.2.6. Η ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ.....	20
2.2.7. Ο ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ.....	20-21
2.2.8. Η ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ.....	21
2.2.9 ΜΕΛΕΤΗ ΦΑΙΝΟΜΕΝΩΝ ΔΙΑΣΠΑΣΗΣ ΣΤΕΡΕΩΝ ΜΟΝΩΤΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ.....	21-22
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	
3.1 ΒΛΑΒΕΣ ΣΤΙΣ ΜΟΝΩΣΕΙΣ ΣΤΡΕΦΟΜΕΝΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ.....	23-24

3.2 ΕΡΕΥΝΕΣ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	24
3.2.1. ΔΙΑΤΑΞΗ <<ΑΚΙΔΑ-ΠΛΑΚΑ>>.....	24-25
3.2.2. ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΔΕΝΔΡΙΤΩΝ ΣΤΗΝ ΜΟΝΩΣΗ ΜΙΚΑΣ ΤΩΝ ΡΑΒΔΩΝ.....	25-29
3.2.3. ΘΕΡΜΙΚΗ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΓΗΡΑΝΣΗ.....	29-33
3.2.4. ΕΡΕΥΝΑ ΓΙΑ ΤΙΣ ΑΡΧΙΚΕΣ ΡΑΒΔΟΥΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ.....	33-35
3.3 ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΕΙΣ ΜΟΝΩΣΕΩΝ.....	35-36
3.4 ΑΝΤΟΧΕΣ ΜΟΝΩΣΕΩΝ.....	36-39
3.5 ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΗΣ ΜΟΝΩΤΙΚΗΣ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ.....	39-40
 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4	
4.1 ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΑ ΥΛΙΚΑ ΤΑ ΥΛΙΚΑ ΜΟΝΩΣΗΣ ΣΤΗΝ ΥΨΗΛΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑ/ΤΑΣΗ ΠΕΡΙΣΤΡΕΦΟΜΕΝΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ.....	41
4.2 ΥΛΙΚΑ ΜΟΝΩΣΗΣ ΑΡΛΟΝ ΝG ΒΑΣΙΣΜΕΝΑ ΣΤΗΝ ΣΙΛΙΚΟΝΗ.....	42-43
4.3 ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ.....	43
4.3.1 ΘΕΡΜΙΚΗ ΣΤΑΘΕΡΟΤΗΤΑ.....	44
4.4 ΝΕΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΜΟΝΩΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ ΓΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΜΟΝΩΣΗΣ ΤΩΝ ΠΕΡΙΣΤΡΕΦΟΜΕΝΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ.....	44-50
4.5 ΜΟΝΩΣΗ ΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ.....	50-52
4.5.1 ΜΟΝΩΣΗ ΤΩΝ ΠΕΡΙΣΤΡΕΦΟΜΕΝΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ....	52-58
4.6 ΒΕΡΝΙΚΙΑ ΚΑΙ ΡΗΤΙΝΕΣ ΔΙΑΠΟΤΙΣΗΣ.....	59-63
4.7 ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ ΜΙΑΣ ΜΟΝΩΣΗΣ.....	64-67
4.8 ΠΡΑΚΤΙΚΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ ΜΟΝΩΣΗΣ.....	67-68
4.8.1 ΜΟΝΩΣΕΙΣ ΑΥΛΑΚΩΣΕΩΝ ΤΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ ΧΑΜΗΛΗΣ ΤΑΣΗΣ...68-69	
4.8.2 ΠΟΛΟΙ ΤΥΛΙΓΜΑΤΟΣ ΜΟΝΩΣΕΩΝ.....	70
4.9 ΜΟΝΩΣΗ ΤΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ ΧΑΜΗΛΗΣ ΤΑΣΗΣ.....	70
4.9.1 ΜΟΝΩΣΗ ΤΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ ΥΨΗΛΗΣ ΤΑΣΗΣ.....	70-72
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	73

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο κεφάλαιο 1 βλέπουμε το πως η μόνωση του εξοπλισμού και των εγκαταστάσεων υψηλής τάσης είναι αναγκαία για την διατήρηση της διαφοράς δυναμικού μεταξύ των υπο υψηλή τάση αγωγίων μερών. Ανάλογα τον τρόπο με τον οποίο μονώνονται οι μηχανές και αναλογα με το είδος μονωσης διακρίνονται σε υγρά, στερεά και αέρια. Υπάρχουν βασικά τμήματα συστημάτων μόνωσης του στατή που εξασφαλίζουν ότι δεν θα εμφανιστεί βραχυκύκλωμα, ότι η θερμότητα του αγωγού θα απάγεται στο περιβάλλον και ότι ο αγωγός δεν θα δονείται από μαγνητικές δυνάμεις. αυτά είναι τα εξής: Δέσμη μόνωσης, μόνωση μεταξύ των περιελίξεων, και μόνωση γείωσης.

Στο κεφαλαίο 2 βλέπουμε τα βασικά ηλεκτρομονωτικά στερεά όπως είναι η μίκα, το μάρμαρο, τα ορυκτέλαια, η πίσσα, τα μονωτικά βερνίκια, η πορσελάνη, ο χαλαζίας, το γυαλί, ο βακελίτης, το τεχνητό καουτσούκ και το PVC. Παρατηρούμε το πως ο συντελεστής ϵ_{tg} παίζει τον δικό του ρόλο στην μόνωση μιας μηχανής. Η ανάγκη για την αξιόπιστη διαχρονική συμπεριφορά των διαφόρων μονωτικών υλικών σε μία κατασκευή υψηλών τάσεων έχει οδηγήσει σε ορισμένα βασικά κριτήρια αξιολόγησής τους, ανάλογα με την κατασκευή τους όπως η διηλεκτρική αντοχή, η σχετική διηλεκτρική σταθερά, ο συντελεστής απωλειών, η ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα, η επιφανειακή αγωγιμότητα, η μηχανική αντοχή και ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας.

Στο κεφάλαιο 3 μπορούμε να δούμε αναλυτικά το πως ο χρόνος αλλά και διάφοροι άλλοι παράγοντες προκαλούν βλάβες στις μηχανές και αυτό να έχει ως αποτέλεσμα την μειωμένη απόδοση των μηχανών λόγω της καταπονήσής τους. Μπορεί επομένως να προκύψει ότι η αποτυχία μόνωσης είναι μια βασική αιτία για τη διακοπή της υψηλής τάσης στις περιστρεφόμενες μηχανές. Οι καταπονήσεις τις οποίες υφίστανται οι μονώσεις είναι, ηλεκτρικές, θερμικές, μηχανικές και περιβαλλοντικές.

Τέλος στο κεφάλαιο 4 υπάρχουν κάποια νέα ηλεκτρικά μονωτικά υλικά των περιστρεφόμενων. Η βασική λειτουργία της μόνωσης είναι να χωριστούν τα συστατικά των διαφορετικών ηλεκτρικών κυκλωμάτων. Επίσης αναλύεται η μόνωση των περιστρεφόμενων ηλεκτρικών μηχανών η οποία μπορεί να διαιρεθεί σε δύο βασικές κατηγορίες: την μόνωση ως προς τη γείωση και την μόνωση αγωγών. Η μόνωση αγωγών χωρίζει τα καλώδια και τις στρόφες ενός πηνίου. Οι βασικοί τύποι μονώσεων είναι: μόνωση των αυλακώσεων, ο εμποτισμός με βερνίκι και ρητίνη και διάφοροι άλλοι.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΤΩΝ ΒΑΣΙΚΩΝ ΕΝΝΟΙΩΝ ΣΤΙΣ ΜΟΝΩΣΕΙΣ ΥΨΗΛΩΝ ΤΑΣΕΩΝ

Η μόνωση του εξοπλισμού και των εγκαταστάσεων υψηλής τάσης είναι αναγκαία για την διατήρηση της διαφοράς δυναμικού μεταξύ των υπο υψηλή τάση αγωγίμων μερών. Ταυτόχρονα με τον κύριο αυτό προορισμό της η μόνωση μπορεί να έχει και άλλους ρόλους, όπως την μηχανική στήριξη των αγωγών, την απαγωγή της αναπτυσσόμενης θερμότητας κ.λ.π.

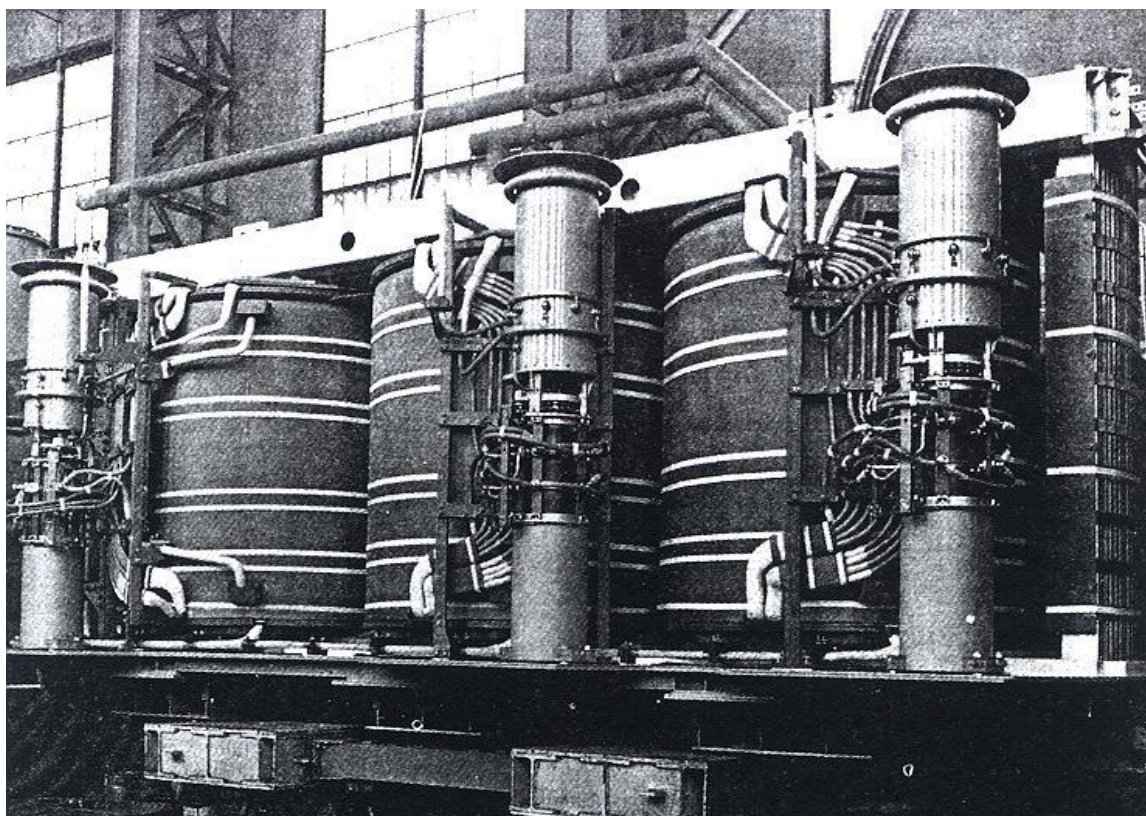
Χαρακτηριστικό παραδειγμα της πολλαπλότητας των ρόλων της μόνωσης παρέχεται από ένα μετασχηματιστή υψηλής τάσης όπως αυτός που παριστάνεται στο σχήμα 1. Τα στερεά μονωτικά υλικά που χρησιμοποιούνται για την μόνωση των τυλιγμάτων του, καταπονούνται μηχανικά από το βάρος του χαλκού και από τις δυνάμεις που αναπτύσσονται εξαιτίας της ροής υψηλών ρευμάτων κατά την διάρκεια βραχυκυκλωμάτων ή άλλων μεταβατικών φαινομένων. Τα μηχανικά στηρίγματα των τυλιγμάτων στο εσωτερικό του μετασχηματιστή είναι από στερεά μονωτικά υλικά, ενώ το μονωτικό λάδι που περιβάλλει τα ενεργά μέρη μεταφέρει την αναπτυσσόμενη θερμότητα από τα τυλίγματα και τον πυρήνα προς τα μεταλλικά τοιχώματα του δοχείου του μετασχηματιστή, είτε με φυσική ροή που δημιουργείται εξ' αιτίας της θερμοκρασιακής διαφοράς, είτε με εξαναγκασμένη ροή με την βοήθεια της αντλίας. Από τα τοιχώματα του δοχείου η θερμότητα απαγάγεται προς το περιβάλλον

Η κατάσταση και η συμπεριφορά μιας μόνωσης υψηλής τάσης εξαρτάται:

- **Από την κατασκευή της**, τα διηλεκτρικά που την αποτελούν και τις εγγενείς ιδιοτητές τους, την διαμόρφωση των συνόρων τους, τη σχεδίασή και την βιομηχανοποίησή της.
- **Από τις καταπονήσεις** που υφίσταται, το είδος, την μορφή, το μέγεθος και την διάρκειά τους.

Η κατάσταση μιας μόνωσης μπορεί να εκτιμηθεί με την βοήθεια εργαστηριακών δοκιμών, μετρήσεων και ελέγχων στους οποίους υποβάλλεται, κατά την διάρκεια της κατασκευής της, μετά την κατασκευή του εξοπλισμού υψηλής τάσης (τμήμα του οποίου αποτελεί), κατά την λειτουργία του και κατά τις περιόδους συντήρησης, ή οποτεδήποτε απαιτηθεί.

Για την πρόβλεψη της συμπεριφοράς της μόνωσης του εξοπλισμού υψηλής τάσης έχουν αναπτυχθεί διάφορα μοντέλα που στηρίζονται κατά κύριο λόγο σε πειραματικές μετρήσεις και εμπειρικές παρατηρήσεις αλλά και σε θεωρητικές αναλύσεις. Τα μοντέλα αυτά κατά κανόνα λαμβάνουν υπόψη τους την αρχική κατάσταση μόνωσης, τα στοιχεία και τον τρόπο κατασκευής της, τις συνθήκες λειτουργίας και τις καταπονήσεις που επιβάλλονται και εκτιμούν περισσότερο ή λιγότερο αξιόπιστα το καθένα, την μελλοντική συμπεριφορά της μόνωσης.



Σχήμα 1 : Μονώσεις τυλιγμάτων υψηλής τάσης σε μετασχηματιστή ισχύος 250 MVA, 20 kV/40Kv

1.2 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΜΟΝΩΣΕΩΝ

Η κατασκευή μονώσεων υψηλής τάσης πραγματοποιείται με την συμμετοχή ενός ή περισσοτέρων διηλεκτρικών. Η σύνθεση αυτή των διηλεκτρικών σε διάφορες γεωμετρικές κατασκευές και διαστάσεις, σε συσχετισμό και με τα αγώγιμα ή και ημιαγώγιμα τμήματα του εξοπλισμού υψηλής τάσης που μονώνουν, αποτελεί ένα **μονωτικό σύστημα**. Παρά την ανάπτυξη εξελιγμένων μεθόδων υπολογισμού των ηλεκτρικών πεδίων και τη γνώση των ιδιοτήτων των επι μέρους διηλεκτρικών που συνθέτουν ένα μονωτικό σύστημα, η συνολική συμπεριφορά του εν λόγω συστήματος, μετά την κατασκευή του, υπό συνθήκες ηλεκτρικής καταπόνησης δεν μπορεί κατά κανόνα, να προσδιοριστεί υπολογιστικά με ακρίβεια και υψηλή αξιοπιστία. Γι' αυτό είναι απαραίτητο να επιβεβαιώνεται η συμπεριφορά κάθε μονωτικού συστήματος και η καταλληλότητα του για την συγκεκριμένη εφαρμογή με δοκιμές, μετρήσεις και ελέγχους που εκτελούνται στα εργαστήρια υψηλών τάσεων. Σε κάθε περίπτωση όμως η γνώση των διηλεκτρικών και της συμπεριφοράς τους είναι αναγκαία για τον υπολογισμό των μονώσεων και την σχεδίαση του εξοπλισμού υψηλής τάσης. Τα διηλεκτρικά ανάλογα με την φυσική τους κατάσταση σε κανονικές συνθήκες (θερμοκρασία $t_0=20^{\circ}\text{C}$, πίεση $p_0=760\text{mmHg}$, απόλυτη υγρασία $h_0=11\text{g/m}^3$) διακρίνονται σε:

- **Αέρια** (αέρας, εξαφθοριούχο θείο, κ.λ.π)
- **Υγρά** (ορυκτέλαιο, κλοφέν, κ.λ.π)
- **Στερεά** (πολυαιθυλένιο, χαρτί, λάστιχο κ.λ.π)

Ξεχωριστά αναφέρονται τα **εμποτισμένα** διηλεκτρικά (π.χ χαρτί εμποτισμένο με λάδι) και το **κενό**.

Τα διηλεκτρικά μπορεί να είναι ευκρινώς διαχωρισμένα μεταξύ τους ή αναμιγμένα και με άλλο τρόπο συνδυασμένα. Εκτός από τον εμποτισμό που προαναφέρθηκε, στερεά διηλεκτρικά υπό την μορφή πλήσματος, κόκκων ή ινών, μπορούν να ενσωματώνονται σε άλλα στερεά (κυρίως χυτά), τους υποδοχείς, σχηματίζοντας ουσιαστικά ένα νέο μονωτικό υλικό με βελτιωμένες μηχανικές, θερμικές ή και διηλεκτρικές ιδιότητες. Στις περιπτώσεις συνδυασμού διηλεκτρικών ιδιαίτερη σημασία έχουν τα μεταξύ τους σύνορα και οι διαχωριστικές συνροιακές επιφάνειες που σχηματίζονται, δηλαδή οι **διεπιφάνειες των μονώσεων**. Τα φαινόμενα στις διεπιφάνειες αυτές είναι συχνά καθοριστικά για την συνολική συμπεριφορά της μόνωσης, για αυτό και μελετούνται ιδιαίτερα προσεκτικά, τόσο θεωρητικά όσο και πειραματικά.

Ανάλογα με τις περιβαλλοντικές συνθήκες υπο τις οποίες προορίζεται να λειτουργήσει μια μόνωση διακρίνεται σε εσωτερική ή εξωτερική. Η **εσωτερική μόνωση** λειτουργεί υπο καθορισμένες συνθήκες περιβάλλοντος, στο εσωτερικό κλειστών ηλεκτρικών συσκευών ή εγκαταστάσεων υψηλής τάσης, χωρίς επαφή με το εξωτερικό περιβάλλον και τον ατμοσφαιρικό αέρα (π.χ μόνωση τυλιγμάτων μετασχηματιστή μέσα σε μονωτικό λάδι ή εξαφθοριούχο θείο σε ερμητικά κλειστό υποσταθμό). Έτσι η εσωτερική μόνωση προστατεύεται από την επίδραση του ατμοσφαιρικού αέρα και άλλων εξωτερικών παραγόντων όπως είναι η ρύπανση, η υγρασία και η σκόνη.

Η **εξωτερική μόνωση** λειτουργεί σε επαφή με τον ατμοσφαιρικό αέρα ή συμμετέχει σ' αυτή και ο ίδιος ο ατμοσφαιρικός αέρας. Η εξωτερική μόνωση μπορεί να λειτουργεί είτε σε εσωτερικούς χώρους (π.χ μονωτήρες στο εσωτερικό κτίριο υποσταθμού) είτε σε εξωτερικούς χώρους στεγασμένους ή μη (π.χ μονωτήρες δικτύων). Ιδιαίτερη σημασία στην επιλογή των διηλεκτρικών και στη μελέτη και σχεδίαση των μονώσεων εξωτερικού χώρου παίζουν οι συνθήκες περιβάλλοντος υπο τις οποίες θα λειτουργήσει η μόνωση (π.χ υγρασία, βιομηχανική ρύπανση).

Ως παράδειγμα αναφέρεται ο μονωτήρας διελεύσεως ενός μετασχηματιστή υψηλής τάσης που παριστάνεται στο σχήμα 2. Το μονωτικό σύστημα συντίθεται από τον κοίλο πορσελάνινο μονωτήρα (στερεό διηλεκτρικό), από το μονωτικό ορυκτέλαιο (υγρό διηλεκτρικό) που γεμίζει το δοχείο του μετασχηματιστή και την εσωτερική κοιλότητα του μονωτήρα διελεύσεως, από τον αέρα (αέριο διηλεκτρικό) που περιβάλλει εξωτερικά τον μονωτήρα, ενώ τα αγώγιμα μέρη μεταξύ των οποίων επιβάλλεται η διαφορά δυναμικού είναι αφενός το κοίλο χάλκινο ηλεκτρόδιο που καταλήγει στον ακροδέκτη υψηλής τάσης το οποίο είναι περιτυλιγμένο με στρώματα χαρτιού εμποτισμένου με ορυκτέλαιο (εμποτισμένο διηλεκτρικό) και διέρχεται δια του πορσελάνινου μονωτήρα και αφετέρου το γειωμένο χαλύβδινο περίβλημα του δοχείου του μετασχηματιστή.

Το εξωτερικό μέρος του μονωτήρα διελεύσεως που βρίσκεται εκτός του δοχείου, είναι εξωτερική μόνωση και βρίσκεται σε επαφή με τον ατμοσφαιρικό αέρα και η εξωτερική επιφάνεια του καθορίζει την διεπιφάνεια πορσελάνης-ατμοσφαιρικού αέρα, δηλαδή στερεού-αερίου διηλεκτρικού. Το εσωτερικό του πορσελάνινου μονωτήρα και το τύλιγμα εμποτισμένου χαρτιού μαζί με το μονωτικό λάδι που βρίσκεται στην κοιλότητα του μονωτήρα και στο δοχείο του μετασχηματιστή αποτελούν εσωτερική μόνωση, ενώ σχηματίζουν και τις διεπιφάνειες εμποτισμένου χαρτιού-ορυκτέλαιου και πορσελάνης (δλδ στερεού διηλεκτρικού). Για την ομαλότερη κατανομή των δυναμικών γραμμών του ηλεκτρικού πεδίου

παρεμβάλλονται, σε ορισμένες περιπτώσεις ημιαγώγιμες ή και αγώγιμες στρώσεις στα τυλίγματα του χαρτιού γύρω από το ηλεκτρόδιο υψηλής τάσης. Προφανώς ο μονωτήρας διελεύσεως παίζει και το ρόλο του μηχανικού στηρίγματος του ακροδέκτη καθώς επίσης και το ρόλο του κελύφους προστασίας των τυλιγμάτων χαρτιού και του μονωτικού λαδιού από την βροχή, την σκόνη και την ρύπανση του περιβάλλοντος.

Πίνακας 1: Ενδεικτικές τιμές της διηλεκτρικής αντοχής E_d και της σχετικής διηλεκτρικής σταθεράς ϵ_r μονωτικών υλικών υπό κανονικές συνθήκες

Μονωτικό υλικό	Δηλ. Αντογή (kV/cm)	Σχετ. δηλ. Σταθερά
Αέρας	32	1,00059
Εξαφθοριούχο θείο (SF ₆)	89	1,00205
Ορυκτέλαιο (mineral oil)	250	2,2
Λάδι σιλικόνης (silicon oil)	100	2,8
Ηλεκτροτεχνικό γυαλί (E-glass)	1200	6
Πορσελάνη	350	6
Στεατίτης	300	6
Μίκα	3000	7
Τεφλόν	250	2,1
Νάυλον	300	5
Εποξική ρητίνη (epoxy)	150	3
Εποξική ρητίνη με πλήσμα S ₂ O ₂ 60%	150	4
Πολυαιθυλένιο χαμ. Πυκν. (LDPE)	750	2,3
» υψ. » (HDPE)	1000	2,4
» διασταυρ. Ινών (XLPE)	500	2,4
Πολυβινύλιο χλωρίδιο (PVC) σκληρό	300	2,3
» » » μαλακό	100	5,5
Εθυλένιο-προπυλένιο-λάστιχο (EPR)	319-370	3...3,5
Χαρτί	150	1,5...4
Πεπεσμένη ξυλόμαζα (pertinax)		
Εμποτισμένο χαρτί σε ορυκτέλαιο	600	
Κενό 1Pa (10 ⁻³ atm)	250	1,00001
Κενό 0,2Pa (2·10 ⁻⁶ atm)	700	1,00000

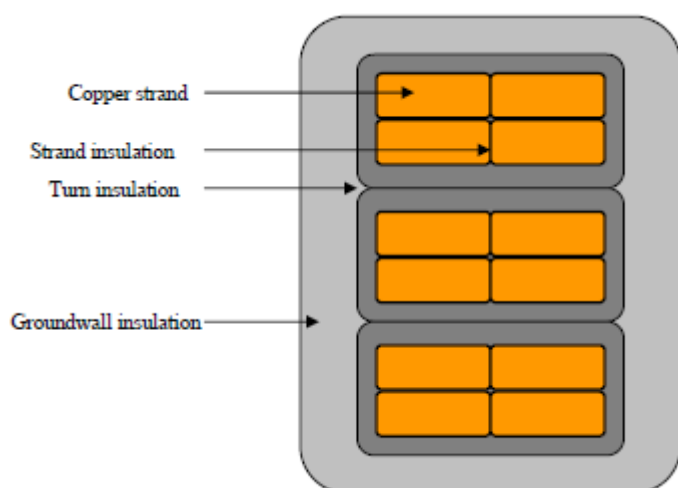
1.3 ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΥΛΙΚΑ ΜΟΝΩΣΗΣ

Τα ηλεκτρικά υλικά μόνωσης είναι πολύ διαδεδομένα στη ζωή και την εργασία μας. Κάθε κομμάτι του ηλεκτρικού εξοπλισμού περιέχει ένα υλικό μόνωσης. Στον προηγούμενο αιώνα, η μεγάλης κλίμακας χρήση των πολυμερών υλικών μόνωσης για πρακτικούς λόγους έχει προκύψει από τις άριστες ηλεκτρικές ιδιότητες και την δυνατότητα επεξεργασίας του πολυμερούς υλικού.

Μια σημαντική κατηγορία ηλεκτρικών συσκευών είναι οι ηλεκτρικές μηχανές. Οι περιστρεφόμενες ηλεκτρικές μηχανές που έχουν ισχύ μεγαλύτερη του 1 KW ταξινομούνται σε δύο κατηγορίες: 1) τους κινητήρες που μετατρέπουν την ηλεκτρική ενέργεια σε μηχανική ενέργεια και 2) τις γεννήτριες που μετατρέπουν την μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική ενέργεια. Οι κινητήρες και οι γεννήτριες μπορούν να είναι ή AC ή DC. Τα τυλίγματα των ηλεκτρικών κινητήρων και γεννητριών απαιτούν ηλεκτρικά υλικά μόνωσης.

Τα βασικά τμήματα συστημάτων μόνωσης του στατή εμφανίζονται στο σχήμα 1. Αυτά τα τμήματα μόνωσης μαζί, εξασφαλίζουν ότι δεν θα εμφανιστεί βραχυκύκλωμα, ότι η θερμότητα του αγωγού θα απάγεται στο περιβάλλον και ότι ο αγωγός δεν θα δονείται από μαγνητικές δυνάμεις.

- **Δέσμη μόνωσης :** για να μειώσουν την επίδραση του δέρματος χαλκονημάτων
- **Μόνωση μεταξύ των περιελίξεων:** για να αποτρέψουν την ηλεκτρική μεταβολή μεταξύ των στρωφών. Σε μερικές εφαρμογές δεν υπάρχει δεσμη μόνωσης.
- **Μόνωση γείωσης:** για την πρόληψη βραχυκυκλώματος από την υψηλή τάση.



Σχήμα 1 : Η διατομή ενός χαρακτηριστικού μονωμένου πηνίου στάτη

Τα υλικά μόνωσης ενός τυλίγματος δρομέα περιλαμβάνουν τη μόνωση του ρότορα και τη μόνωση έναντι της γης. Η μόνωση σε έναν ρότορα μπορεί να είναι σχετικά λεπτή δεδομένου ότι η τάση στο τύλιγμα του ρότορα είναι συνήθως χαμηλότερη από ότι στο στάτη. Εντούτοις, η μόνωση του ρότορα πρέπει να έχει πολύ υψηλή μηχανική αντοχή για να αποτρέπει τις στρεβλώσεις λόγω της υψηλής περιστροφικής δύναμης στο ρότορα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΒΑΣΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΘΕΩΡΙΑΣ ΤΩΝ ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ

2.1. ΒΑΣΙΚΑ ΣΤΕΡΕΑ ΗΛΕΚΤΡΟΜΟΝΩΤΙΚΑ

➤ **PVC (Πολυβινυλοχλωρίδιο)**

Το PVC είναι συνθετικό μονωτικό υλικό και ανήκει στα λεγόμενα θερμοπλαστικά υλικά. Έχει πολύ καλή μονωτική συμπεριφορά, δεν επηρεάζεται από την υγρασία και αντεχει στην επίδραση νερού, λαδιού, βενζίνης, οξέων και ηλιακού φωτός. Έχει χαμηλό κόστος. Το μειονεκτημά του είναι ότι σε χαμηλές θερμοκρασίες (κάτω από 3 C) γίνεται σκληρό και εύθραστο και υπάρχουν κίνδυνοι να προκληθούν ρωγμές στην επιφανεία του και να χάσει τις μονωτικές του ιδιότητες. Γι' αυτό αποφεύγεται η χρήση του στην ύπαιθρο. Χρησιμοποιείται σαν υλικό μόνωσης αγωγών.

➤ **Τεχνητό καουτσούκ (ελαστικό)**

Είναι συνθετικό μονωτικό υλικό. Έχει καλές μονωτικές ιδιότητες και δεν επηρεάζεται από τις χαμηλές θερμοκρασίες και από την υγρασία. Μειονεκτήματα του είναι ότι καταστρέφεται από διαλυτικά όπως η βενζίνη και έχει μικρότερη αντοχή σε μηχανικές καταπονήσεις από το PVC. Χρησιμοποιείται ως υλικό μόνωσης αγωγών.

➤ **Βακελίτης**

Είναι σκληρό συνθετικό μονωτικό υλικό και ανήκει στην κατηγορία θερμοσκληρυνόμενων υλικών. Έχει πολύ καλή μονωτική συμπεριφορά, δεν καίγεται και δεν μαλακώνει σε υψηλές θερμοκρασίες. Χρησιμοποιείται στην κατασκευή διακοπών, ντουί, πλακετών και εξαρτημάτων μηχανών.

➤ **Γυαλί**

Ανήκει στα ανοργανα μονωτικά υλικά και έχει σαν βασικό του συστατικό το διοξείδιο του πυριτίου. Είναι πολύ καλό μονωτικό υλικό, φθινό, δεν προσβάλλεται από οξέα και υγρασία και είναι στεγανό. Μειονεκτήματα του είναι ότι είναι εύθραστο, καταστρέφεται σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες και κατεργάζεται δύσκολα. Χρησιμοποιείται στην κατασκευή μονωτήρων στις γραμμές μεταφοράς και διανομής στεγανών ακροδεκτών και λαμπτήρων.

➤ **Χαλαζίας**

Είναι ορυκτό μονωτικό υλικό και είναι καθαρό οξείδιο του πυριτίου. Έχει καλύτερες μονωτικές ιδιότητες από το γυαλί και αντέχει πολύ περισσότερο σε υψηλές θερμοκρασίες. Χρησιμοποιείται στην κατασκευή λαμπτήρων αλογόνου.

➤ **Πορσελάνη**

Είναι ανόργανο μονωτικό υλικό και παράγεται με ψήσιμο σε πού μεγάλη θερμοκρασία καλής ποιότητας αργίλου(πηλού).Η πορσελάνη για να είναι κατάλληλη για ηλεκτρικές εφαρμογές πρέπει να είναι συμπαγής, να αντέχει σε υψηλές θερμοκρασίες, να έχει καλή μηχανική αντοχή και η επιφάνεια της να έχει υποστεί υάλωση. Χρησιμοποιείται στην κατασκευή μονωτήρων ,βάσεων ασφαλειών και πυκνωτών

➤ **Μίκα**

Είναι ορυκτό μονωτικό υλικό. Εξορύσσεται σε διάφορες ποιότητες και συναντάται σε καθαρή μορφή που είναι διαφανής ή με προσμίξεις σε αποχρώσεις του καφέ χρώματος. Μετά την εξόρυξη, καθαρίζεται και κόβεται στο πάχος και το μέγεθος που χρειάζεται για την κάθε εφαρμογή. Έχει καλές μονωτικές ιδιότητες, είναι άφλεκτος, αντέχει σε κρούσεις, πιέσεις και ψηλές θερμοκρασίες. Χρησιμοποιείται στην κατασκευή: μονώσεων θερμαντικών αντιστάσεων, πυκνωτών, συλλεκτών ηλεκτρικών μηχανών, στηριγμάτων αντιστάσεων και τρανζίστορ, επενδύσεως πηνίων κλπ.

➤ **Μάρμαρο**

Είναι ορυκτό μονωτικό υλικό. Παλαιότερα είχε πολλές χρήσεις στις ηλεκτρικές εφαρμογές και κυρίως στην κατασκευή ηλεκτρικών πινάκων. Σήμερα χρησιμοποιείται με μορφή σκόνης για το γέμισμα του θαλάμου των ασφαλειών τήξης.

➤ **Ορυκτέλαια**

Είναι ορυκτά υγρά μονωτικά υλικά. Προέρχονται από την απόσταξη του αργού πετρελαίου. Έχουν πολύ καλές μονωτικές ιδιότητες και επιπλέον ψύχουν τα υλικά που μονώνουν και τα προστατεύουν από την υγρασία. Χρειάζεται όμως ιδιαίτερη προσοχή να μην πάρει υγρασία το ίδιο το ορυκτέλαιο και γι' αυτό, πρέπει να υπάρχει κάποιο σύστημα αφύγρανσης του αέρα που εισέρχεται στο δοχείο του ορυκτελαίου. Χρησιμοποιούνται στο γέμισμα θαλάμων διακοπών, μετασχηματιστών, πυκνωτών και καλωδίων.

➤ **Πίσσα**

Είναι ορυκτό μονωτικό υλικό και παράγεται από την απόσταξη του αργού πετρελαίου ή του λιθάνθρακα. Χρησιμοποιείται στο γέμισμα διαφόρων συσκευών και εξαρτημάτων για την προστασία τους από την υγρασία όπως π.χ. στις συνδέσεις καλωδίων μέσα σε σύνδεσμο, στα υπόγεια και υποθαλάσσια καλώδια.

➤ **Μονωτικά βερνίκια**

Είναι συνθετικά μονωτικά υλικά σε υγρή μορφή, που σκληραίνουν μετά την επάλειψή τους. Έχουν καλές μονωτικές ιδιότητες εφ' όσον επαλειφθούν με

επιμέλεια, καλή αντοχή στην θερμοκρασία και στην υγρασία. Χρησιμοποιούνται εκεί όπου δεν υπάρχει αρκετός χώρος για την τοποθέτηση άλλου μονωτικού, όπως σε τυλίγματα ηλεκτρικών μηχανών, μετασχηματιστών και πηνίων.

2.2. ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΟΜΟΝΩΤΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Η ανάγκη για την αξιόπιστη διαχρονική συμπεριφορά των διαφόρων μονωτικών υλικών σε μία κατασκευή υψηλών τάσεων έχει οδηγήσει σε ορισμένα βασικά κριτήρια αξιολόγησής τους, τα οποία δεν αφορούν μόνο τις ηλεκτρικές (ή διηλεκτρικές) ιδιότητές τους, άλλα και άλλες ιδιότητες που πρέπει να έχουν ανάλογα με την κατασκευή, όπως π.χ.: η θερμική αντοχή κατά την απαγωγή των απωλειών Joule των αγωγών, η ψυκτική ικανότητα κατά τη σβέση του ηλεκτρικού τόξου σε διακόπτες, η μηχανική αντοχή των μονωτήρων (π.χ. λόγω του βάρους της γραμμής), η αντοχή κατά την εκδήλωση βραχυκυκλώματος, κ.λ.π. Τα κριτήρια αυτά είναι :

- Η διηλεκτρική αντοχή
- Η σχετική διηλεκτρική σταθερά
- Ο συντελεστής απωλειών
- Η ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα
- Ο συντελεστής $\epsilon \tan \delta$
- Η επιφανειακή αγωγιμότητα
- Η μηχανική αντοχή
- Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας

2.2.1. Η ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ

Ως διηλεκτρική αντοχή (E_d) ενός μονωτικού υλικού έχει οριστεί το πηλίκο της ελάχιστης ενεργού τιμής της τάσης για τη διάσπαση ($U_{d \min}$) προς την απόσταση των ηλεκτροδίων (d) σε ομογενές πεδίο.

$$E_d = \frac{U_{d \min}}{d} \quad \text{(Εξίσωση 1)}$$

Ακολουθεί πίνακας με παραδείγματα μονωτικών υλικών και αντίστοιχες τιμές της διηλεκτρικής αντοχής τους :

ΠΙΝΑΚΑΣ 1 Διηλεκτρική αντοχή E_d για καταπόνηση μικρής χρονικής διάρκειας ορισμένων μονωτικών υλικών σε ομογενές πεδίο συχνότητας 50 Hz

Μονωτικό Υλικό	D (mm)	E _d (kV/cm)
Αέρας	-	21
Λάδι μετασχηματιστών	-	60...200
Πορσελάνη	0,5...3	340...380
Στεατίτης	0,5...3	200...300
Γυαλί	<1	160...450
Χαρτί	0,5...1,5	300...450
Χαρτί στο λάδι	<2	200...400
Σκληρό ελαστικό	<3	300...500
Ξύλο	<3	30...50
Glimmer	0,01...0,1	500...1000

2.2.2. Η ΣΧΕΤΙΚΗ ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΣΤΑΘΕΡΑ

Η σχετική διηλεκτρική σταθερά (ϵ_r) εκφράζει το πόσο μεγαλύτερη είναι η χωρητικότητα μίας διάταξης συγκριτικά προς εκείνη στο κενό ή στον αέρα. Οι σχετικές διηλεκτρικές σταθερές των διάφορων μονωτικών, που συνθέτουν μια μόνωση (π.χ. περιελίξεις μετασχηματιστών και μονώσεις καλωδίων) θα πρέπει να επιλέγονται κατά τρόπο, ώστε να εξομαλύνεται το πεδίο στις διαχωριστικές επιφάνειές τους, για να μη διευκολύνεται η εκδήλωση μερικών εκκενώσεων.

ΠΙΝΑΚΑΣ 2 Σχετική διηλεκτρική σταθερά ορισμένων υλικών στους 20 °C

Υλικό	ϵ_r	Υλικό	ϵ_r
Αέρας(κανονικές συνθήκες)	1,000594	Mikanit	4-6
Αέρας υγρός	1,5	Πάγος	2-3
Αποσταγμένο νερό	1,5	Pertinax	4,8-5,4
Βακελίτης	3,5-8,2	PVC	4-6
Condense	4-8	Plexiglas	2,6-3,5
Glimmer	5-16	Πορσελάνη	5,5-6
Γυαλί	5-16	Presspan	2,5-3,4

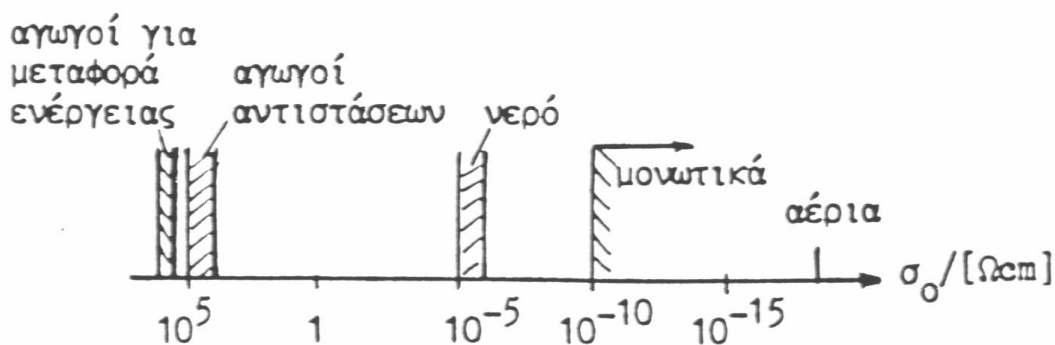
Θερμοπλαστικά συνθετικά	2-5	Ρητίνη	2,2
Λάδι μετασχηματιστών	2-2,5	SF ₆	1,002049
Λάστιχο	2,8-6,5	Στεατίτης	6,4
Ξύλο	2,5-6,5	Χαλαζίας	3-7

2.2.3. Ο ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΑΠΩΛΕΙΩΝ

Σε μία μόνωση, που παρεμβάλλεται μεταξύ ηλεκτροδίων με σκοπό την δημιουργία ενός ηλεκτροστατικού πεδίου, υπάρχουν πάντοτε απώλειες ενέργειας, οι οποίες υπό εναλλασσόμενη τάση οφείλονται:

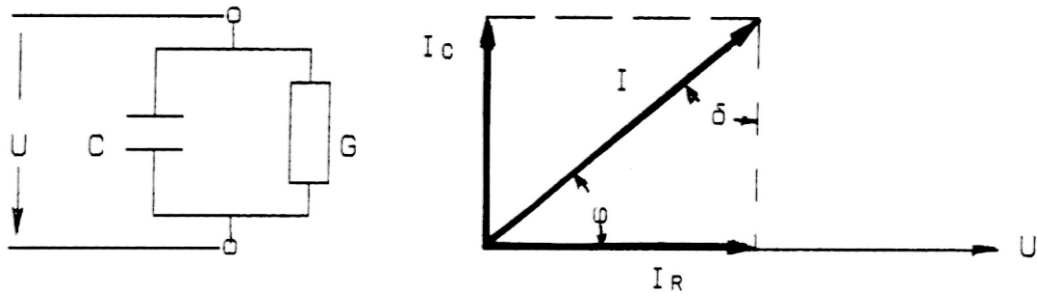
- α) στην κατανάλωση ενέργειας κατά τη διαρκή εναλλαγή της φοράς της ηλεκτρικής ροπής των διπόλων στο ρυθμό της εναλλαγής της πολικότητας της εναλλασσόμενης τάσης,
- β) στην πολύ μικρή ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα, που έχουν τα μονωτικά υλικά.

Έτσι, ο μονωτής έχει, εκτός από το χωρητικό ρεύμα IC και ένα ρεύμα διαρροής IR. Στην πράξη το ρεύμα διαρροής αυξάνει, γιατί η αγωγιμότητα του μονωτή γίνεται μεγαλύτερη, όπως συμβαίνει π.χ. κατά την εκδήλωση μερικών εκκενώσεων, και τη θερμική καταπόνηση του μονωτή από τις απώλειες των αγωγών.



ΕΙΚΟΝΑ 1 Τάξη μεγέθους της ειδικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας διαφόρων κατηγοριών Υλικών

Στο παρακάτω σχήμα δίνεται το ισοδύναμο κύκλωμα ενός πυκνωτή C με ομοιογενές διηλεκτρικό και απώλειες (λόγω της αγωγιμότητάς του G).

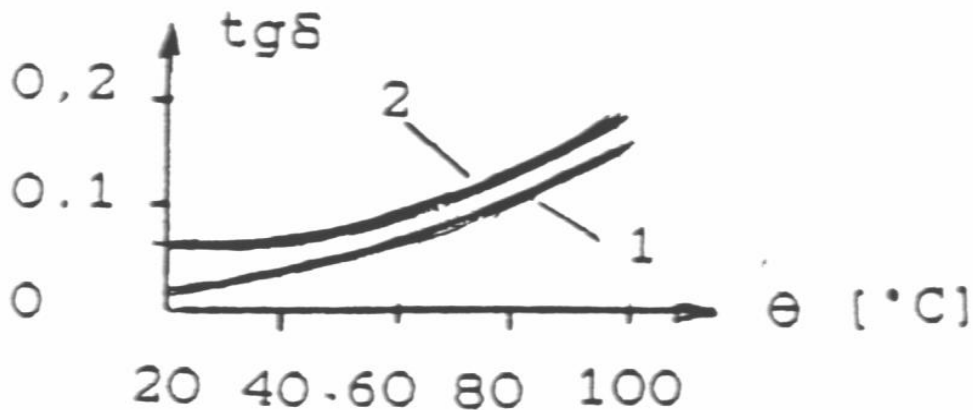


ΕΙΚΟΝΑ 2 Ισοδύναμο κύκλωμα ενός πυκνωτή C με απώλειες λόγω της αγωγιμότητας G του διηλεκτρικού του.

Ο συντελεστής απωλειών δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{I_R}{I_C} = \frac{G}{\omega C} \quad (\text{Εξίσωση 2})$$

και είναι ένα κριτήριο αξιολόγησης του διηλεκτρικού (ή μίας μονωτικής διάταξης γενικότερα), γιατί δίνει πληροφορίες για την αγωγιμότητά του. Όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα η $\operatorname{tg} \delta$ αυξάνει εκθετικά με τη θερμοκρασία.



ΕΙΚΟΝΑ 3 $\operatorname{tg} \delta$ ορισμένων διηλεκτρικών 1 : σκληρό χαρτί, 2 : πορσελάνη[22]. Οι απώλειες Joule (PW) στην αγωγιμότητα G είναι :

$$P_w = I_R U = G U^2 = U^2 \omega C \cdot \operatorname{tg} \delta = P_B \operatorname{tg} \delta \quad (\text{Εξίσωση 3})$$

όπου P_B η άεργος ισχύς (ισχύς στην χωρητικότητα C).

Αν υποθέσουμε ότι ο παραπάνω πυκνωτής αποτελείται από δύο επίπεδες

πλάκες διατομής A σε απόσταση d και ότι ο μεταξύ τους χώρος καταλαμβάνεται από ένα μονωτικό με σχετική διηλεκτρική σταθερά ϵ , τότε η τιμή της χωρητικότητας C είναι :

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{d} \quad (\text{Εξίσωση 4})$$

$$G = \sigma \frac{A}{d} \quad (\text{Εξίσωση 5})$$

Για την αγωγιμότητα G του παραπάνω πυκνωτή ισχύει η σχέση :

όπου σ η ειδική αγωγιμότητα του διηλεκτρικού. Για τις απώλειες του πυκνωτή αυτού ισχύει:

$$P_w = U^2 \omega \cdot \epsilon \frac{A}{d} \cdot \text{tg} \delta \quad (\text{Εξίσωση 6})$$

2.2.4. Η ΕΙΔΙΚΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ

Τα ηλεκτρομονωτικά υλικά έχουν μία πολύ μικρή ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα, που εξαρτάται γενικά από τις συνθήκες λειτουργίας τους (τιμή της πεδιακής έντασης, θερμοκρασία, υγρασία, κ.λ.π.). Η ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα είναι επομένως ένα σημαντικό κριτήριο αξιολόγησης των διηλεκτρικών, γιατί εκφράζει τους ελεύθερους ηλεκτρικούς φορείς. Η αύξηση της ειδικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας στα στερεά μονωτικά, σε τιμές πεδίου, που η καταπόνηση του διηλεκτρικού μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι μόνο θερμική, δίνεται από την σχέση :

$$\sigma = \sigma_0 e^{-W/kT} = \sigma_0 e^{\beta\theta} \quad (\text{Εξίσωση 7})$$

$\sigma\theta$: η ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα για διαφορά θερμοκρασίας θ ως προς το περιβάλλον

σ : η αρχική ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα

W : η ενέργεια ενεργοποίησης (ενέργεια για τη μεταφορά ηλεκτρονίων από τη ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας)

k : η σταθερά Boltzmann

T : η απόλυτη θερμοκρασία

β : ένας συντελεστής του υλικού

Από έρευνες σε οργανικά στερεά μονωτικά συμπεραίνεται, ότι η ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα αυξάνει απότομα με την ενέργεια των μερικών εκκενώσεων. Έχει διαπιστωθεί ότι η τιμή της πεδιακής έντασης είναι καθοριστική για την τιμή. Μία τιμή πεδιακής έντασης χαρακτηρίζεται ως χαμηλή όταν δεν εκδηλώνονται μερικές εκκενώσεις, ή έστω όταν οι μερικές εκκενώσεις συμμετέχουν μόνο στην αύξηση των απωλειών Joule. Αυτό μπορεί να συμβεί λόγω π.χ. του μεγάλου πάχους του διηλεκτρικού, ή της μικρής τιμής της εφαρμοζόμενης τάσης. Για μεγαλύτερες τιμές της πεδιακής έντασης από προηγούμενως, η τιμή της ειδικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας οφείλεται κυρίως στις μερικές εκκενώσεις. Έχει διαπιστωθεί, ότι στην περίπτωση αυτή συμβαίνει ιονισμός με κρούσεις, όπως στα ιονισμένα αέρια. Για την αύξηση της τιμής σ , από τις απώλειες του διηλεκτρικού και τις μερικές εκκενώσεις, έχει διατυπωθεί η σχέση :

$$\sigma = \sigma_0 \frac{\exp(\beta\theta)}{(1 - \delta E)^2} \quad \text{(Εξίσωση 8)}$$

όπου E η πεδιακή ένταση στο τμήμα του υλικού, που δεν εκδηλώνονται μερικές εκκενώσεις (το οποίο χαρακτηρίζεται ως υγιές τμήμα) και δ ένας συντελεστής, που εκφράζει τη συμμετοχή των ανομοιογενειών του υλικού στη διαμόρφωση της τιμής. Για το ομοιογενές υλικό είναι $\delta=0$, διαφορετικά ισχύει $\delta>0$. Η αγωγιμότητα τέλος των μονωτικών υλικών αυξάνει όταν προσβάλλονται με ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Η ακτινοβολία X ειδικότερα μπορεί να μετατρέψει ένα μονωτή σε αγωγό. Φαίνεται ότι η ακτινοβολία προκαλεί διαχωρισμό των ηλεκτρονίων από τους μητρικούς τους πυρήνες και ανύψωση των ελεύθερων ηλεκτρονίων σε υψηλότερο ενεργειακό επίπεδο, με αποτέλεσμα την αύξηση της αγωγιμότητας των μονωτικών. Το φαινόμενο αυτό, που είναι γνωστό ως επαγόμενη αγωγιμότητα, αποτελεί πρόβλημα στις διαστημικές κατασκευές, λόγω του υψηλού ποσοστού κοσμικής ακτινοβολίας.

2.2.5. Ο ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ $\varepsilon \cdot \text{tg}\delta$.

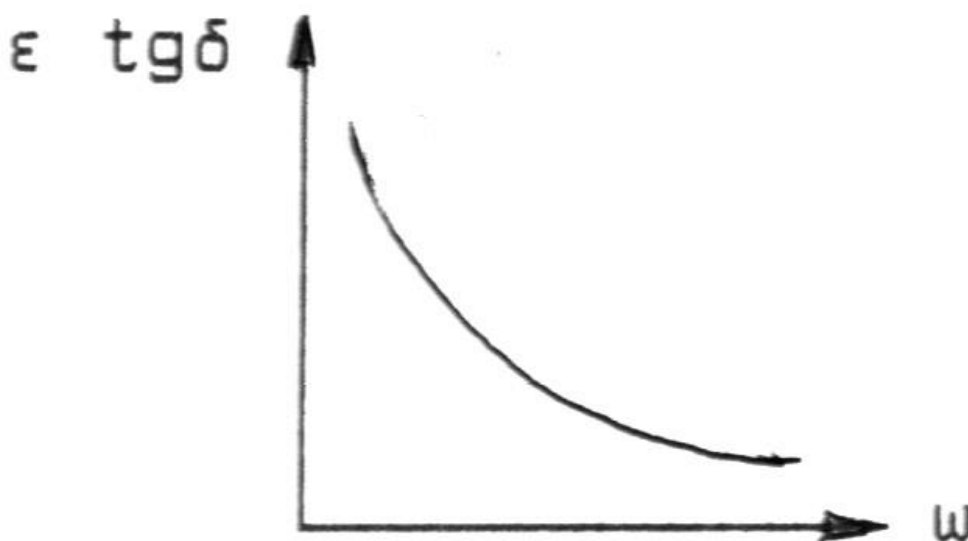
Από τις εξισώσεις 2, 4 και 5 έχουμε για έναν πυκνωτή επίπεδων πλακών:

$$\varepsilon_r \cdot \text{tg}\delta = \frac{\sigma}{\varepsilon_0 \omega} \quad \text{(Εξίσωση 9)}$$

ή με $\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$:

$$\varepsilon \cdot \text{tg}\delta = \frac{\sigma}{\omega} \quad \text{(Εξίσωση 10)}$$

Στο παρακάτω σχήμα δίνεται η γραφική παράσταση της χαρακτηριστικής κατά την παραπάνω σχέση.



ΕΙΚΟΝΑ 4 $\varepsilon \operatorname{tg}\delta = f(\omega)$ για το ομοιογενές μονωτικό υλικό[22].
(Υποτίθεται ότι η τιμή σ είναι σταθερή με τη θερμοκρασία)

Το γινόμενο $\varepsilon \operatorname{tg}\delta$ χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση των μονωτικών υλικών

ΠΙΝΑΚΑΣ 3 Τάξη μεγέθους των τιμών $\varepsilon \operatorname{tg}\delta$ για ορισμένα διηλεκτρικά σε θερμοκρασία 20°C

Υλικό	Πάχος μόνωσης (mm)	$\varepsilon \operatorname{tg}\delta$
Λάδι μετασχηματιστών		0,004... 0,0046
Πορσελάνη	0,5...3	0,085...0,16
Στεατίτης	0,5...3	0,006...0,02
Γυαλί	<1	
Χαρτόνι	0,5...1,5	0,03...0,1
Glimmer	0,01...0,1	0,009...0,012

Από τις εξισώσεις 7 και 10 έπεται ότι ο συντελεστής $\varepsilon \operatorname{tg}\delta$ του ομοιογενούς στερεού μονωτικού υλικού (ή γενικότερα του στερεού διηλεκτρικού όταν δεν εκδηλώνονται σε αυτό μερικές εκκενώσεις) αυξάνει εκθετικά με τη θερμοκρασία :

$$\varepsilon \cdot \operatorname{tg}\delta = \frac{\sigma_0}{\omega} e^{\beta\theta} \quad \text{(Εξίσωση 11)}$$

Αν θεωρήσουμε την τιμή ε ως σταθερή, τότε από την παραπάνω σχέση έπεται ότι η αύξηση της $\operatorname{tg}\delta$ είναι εκθετική.

Για την αύξηση της τιμής $\varepsilon \operatorname{tg}\delta$ στην περιοχή του στερεού μονωτικού, όπου οι

μερικές εκκενώσεις συντελούν στην αύξηση των απωλειών Joule, έχουμε αντίστοιχα:

$$\varepsilon \cdot \operatorname{tg} \delta = \frac{\sigma_0}{\omega} \frac{e^{\beta \theta}}{(1 - \delta E)^2} \quad (\text{Εξίσωση 12})$$

2.2.6. Η ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ

Η διηλεκτρική αντοχή των στερεών μονωτικών μειώνεται, όταν η επιφάνειά τους περιλαμβάνει ξένες επικαθίσεις (σκόνη, υγρασία, κ.λ.π.). Το ίδιο συμβαίνει όταν καταπονηθεί θερμικά η επιφάνεια. Έχει διαπιστωθεί, ότι στα φαινόμενα που εκδηλώνονται στην επιφάνεια των στερεών μονωτικών κατά την ηλεκτρική καταπόνησή τους (κυρίως αύξηση των απωλειών Joule και μερικές εκκενώσεις), συμμετέχει η επιφάνειά τους σε πάχος μέχρι 30Å. Γι' αυτό, η επιφανειακή αγωγιμότητα είναι ένα κριτήριο για την προδιάθεση των διαφόρων στερεών διηλεκτρικών στην εκδήλωση των παραπάνω φαινομένων. Επειδή οι παράγοντες, που προκαλούν αύξηση της επιφανειακής αγωγιμότητας ποικίλουν (ανάλογα με τις συνθήκες λειτουργίας), η ειδική επιφανειακή αγωγιμότητα δεν είναι κάποια σταθερά των στερεών μονωτικών. Η επιφανειακή αγωγιμότητα έχει συσχετιστεί με έννοιες, που αφορούν την αντοχή των στερεών μονωτικών από τις καταπονήσεις στην επιφάνειά τους (όπως : αντοχή σε ρεύμα διαρροής, αντοχή σε ηλεκτρικό τόξο, δυνατότητα απομάκρυνσης των επικαθίσεων κατά τη βροχή κ.λ.π.), που ενδιαφέρουν στην πράξη για την κατασκευή π.χ. μονωτήρων και φλογοθαλάμων διακοπών. Με κριτήριο π.χ. τη μείωση του ποσοστού της σκόνης συμπεραίνει κανείς, ότι οι μονωτήρες πορσελάνης χρησιμοποιούνται ως εξωτερικού χώρου, έναντι των μονωτήρων ρητίνης (που χρησιμοποιούνται ως εσωτερικού χώρου), γιατί η επιφάνειά τους διευκολύνει περισσότερο στην απομάκρυνση της σκόνης κατά τη βροχή. Πληροφορίες για τη μέτρηση της επιφανειακής αγωγιμότητας μπορούν να αναζητηθούν στις προδιαγραφές (π.χ. VDE 0303) και στη βιβλιογραφία περί ηλεκτρικών μετρήσεων.

2.2.7. Ο ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ

Η θερμική καταπόνηση των μονωτικών υλικών σχετίζεται με την αύξηση του αριθμού των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων στις θέσεις, όπου η πεδιακή ένταση έτυχε να είναι αυξημένη (όπως π.χ. ανομοιογένειες στον όγκο ή στην επιφάνεια των στερεών μονωτικών, ανεπιθύμητα αιωρούμενα σωματίδια στο λάδι). Η θερμότητα για την εκδήλωση των παραπάνω θέσεων διαταραχής υπάρχει πάντοτε κατά τη λειτουργία των διαφόρων κατασκευών (π.χ. απώλειες Joule των αγωγών, απώλειες σιδήρου, θερμότητα στις επαφές των διακοπών). Επειδή γενικά ισχύει, ότι η θερμική ειδική αγωγιμότητα (λ) συμβαδίζει με την ηλεκτρική ειδική αγωγιμότητα, η τιμή λ είναι (όπως και η τιμή σ) ένα κριτήριο για την αξιολόγηση των μονωτικών υλικών. Στον πίνακα παρακάτω δίνονται τιμές του συντελεστή λ για διάφορα διηλεκτρικά.

Υλικό	Πάχος μόνωσης (mm)	$\lambda \left(\frac{W \cdot cm}{cm^2 grad} \right)$
Πορσελάνη	0,5...3	0,008...0,015
Στεατίτης	0,5...3	0,02...0,026
Γυαλί	<1	0,0075...0,012
Ξυλό	<3	0,001...0,002
Χαρτόνι	0,3...1,5	0,003
Σκληρό Ελαστικό	<3	0,001
Glimmer	<0,5	0,003
Χαρτί στο λάδι	<2	0,014...0,03

ΠΙΝΑΚΑΣ 4 Τιμές του συντελεστή ειδικής θερμικής αγωγιμότητας (λ) για ορισμένα μονωτικά υλικά

Στις προδιαγραφές IEC και VDE γίνεται μία διαβάθμιση των στερεών μονωτικών ως προς τη μέγιστη επιτρεπόμενη θερμοκρασία λειτουργίας τους.

2.2.8. Η ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ

Σε αρκετές κατασκευές ενδιαφέρουν εκτός από τις ηλεκτρικές ιδιότητες των στερεών μονωτικών και οι μηχανικές ιδιότητές τους, όπως π.χ. τα πλαστικά μέρη του μηχανισμού περιστροφής ενός ασφαλειοαποζεύκτη σε ένα πίνακα μέσης τάσης, η αντοχή σε εφελκυσμό ενός μονωτικού, η δύναμη τάνυσης σε μονωτήρες των γραμμών μεταφοράς. Στις περιπτώσεις αυτές θεωρείται το στερεό μονωτικό ως ένα "μηχανολογικό εξάρτημα", οπότε ισχύουν για τον υπολογισμό του οι κανόνες της μηχανικής αντοχής των υλικών. Συχνά ενδιαφέρει η μηχανική αντοχή σε πλήρεις κατασκευές, που περιλαμβάνουν στερεά μονωτικά, όταν αυτή ενδέχεται να επηρεάσει τη διηλεκτρική αντοχή από την εξάσκηση μεγάλων δυνάμεων ηλεκτρικής προέλευσης, όπως συμβαίνει κατά το βραχυκύκλωμα (π.χ. πίνακες μέσης τάσης, μετασχηματιστές μεταφοράς και διανομής μετασχηματιστές μέτρησης στο δίκτυο υψηλών τάσεων, διακόπτες υψηλών τάσεων). Οι δυνάμεις αυτές μπορούν να μειώσουν τις αποστάσεις μόνωσης και να γίνουν αιτία καταστροφής της κατασκευής, όταν δεν υπάρχει η απαιτούμενη μηχανική αντοχή κατά το βραχυκύκλωμα. Η μόνωση π.χ. ενός διακόπτη υψηλής τάσης δεν εξασφαλίζεται μόνο με επιλογή των σωστών αποστάσεων μόνωσης, προς δημιουργία ηλεκτροστατικού πεδίου, όταν η επιδίωξη αυτή δεν συνδυάζεται με την απαιτούμενη μηχανική αντοχή, που θα διασφαλίζει την ικανότητα μόνωσης.

2.2.9 ΜΕΛΕΤΗ ΦΑΙΝΟΜΕΝΩΝ ΔΙΑΣΠΑΣΗΣ ΣΤΕΡΕΩΝ ΜΟΝΩΤΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Με τον όρο διάσπαση των στερεών μονωτικών υλικών εννοούμε την οποιαδήποτε ηλεκτρική, φυσική ή χημική διαδικασία η οποία μπορεί να οδηγήσει σε ολική ή μερική απώλεια των ηλεκτρικών, μηχανικών ή μονωτικών ιδιοτήτων του υλικού. Σε κάθε περίπτωση παρατηρείται διάσπαση δεσμών και ενδεχομένως απελευθέρωση ιόντων λόγω των ιονισμών που λαμβάνουν χώρα. Επειδή στα διάφορα στάδια διάσπασης υπάρχουν και αέρια μονωτικά υλικά (η πιο απλή περίπτωση είναι ο ατμοσφαιρικός αέρας σε ήδη υπάρχουσα ή σε νεοσχηματισμένη κοιλότητα αέρος),

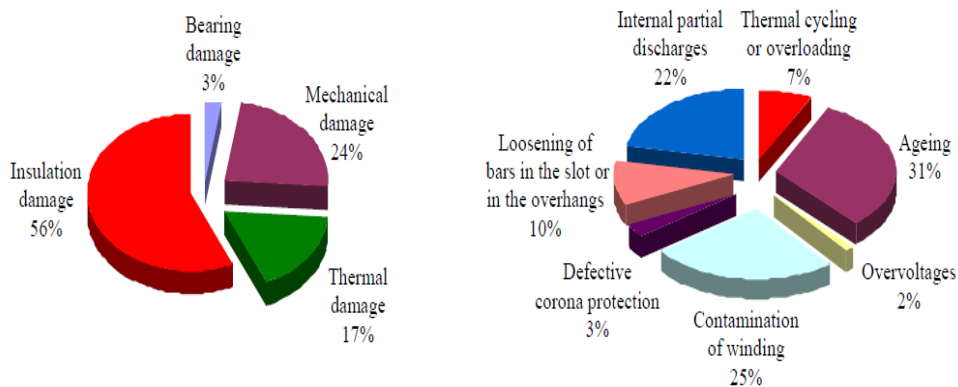
η μελέτη της διάσπασης των στερεών μονωτικών υλικών είναι άμεσα συνυφασμένη με τη μελέτη της διάσπασης των αέριων μονωτικών υλικών. Η ανακατανομή για παράδειγμα των φορτίων κατά τη διάρκεια μερικών εκκενώσεων είναι ένα φαινόμενο που συμβαίνει στο εσωτερικό κοιλοτήτων οπότε αφού η κοιλότητα αέρος βρίσκεται στο εσωτερικό στερεού μονωτικού, η ανακατανομή φορτίων επηρεάζει τοπικά τις ιδιότητες του μονωτικού υλικού. Η παραπάνω παράλληλη συμπεριφορά αερίων και στερεών διηλεκτρικών ενισχύεται από τον πολλαπλασιασμό των ηλεκτρονίων στο εσωτερικό του μονωτικού υλικού. Ο τρόπος πολλαπλασιασμού είναι ίδιος στα στερεά και στα αέρια διηλεκτρικά.

Ο ρόλος των μερικών εκκενώσεων είναι συνοδευτικός- συμπληρωματικός των φαινομένων των ηλεκτρικών δένδριτών. Τα δυο φαινόμενα υπάρχουν αλληλοεξαρτώμενα σε τέτοιο βαθμό που θα μπορούσε να καταγραφεί ότι οποτεδήποτε παρατηρείται ηλεκτρικός δένδριτης έχουν προηγηθεί εκκενώσεις. Το αντίθετο δεν συμβαίνει απαραίτητα. Τέλος, σημαντικό μέρος του κεφαλαίου καταλαμβάνουν τα διάφορα μοντέλα που έχουν κατά καιρούς αναπτυχθεί τόσο για τη μελέτη των μερικών εκκενώσεων όσο και για τη μελέτη της διάδοσης των ηλεκτρικών δένδριτών.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

3.1 ΒΛΑΒΕΣ ΣΤΙΣ ΜΟΝΩΣΕΙΣ ΣΤΡΕΦΟΜΕΝΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ

Διάφορες στατιστικές μελέτες έχουν δημοσιευθεί εξετάζοντας τις αιτίες βλαβών των στρεφόμενων ηλεκτρικών μηχανών υψηλής τάσης και ιδίως τις γεννήτριες [1 - 4]. Μερικές από αυτές τις στατιστικές προσδιορίζουν μόνο το μέρος της μηχανής που απέτυχε. Άλλες δημοσιεύσεις διακρίνουν μεταξύ της ζημίας που προκάλεσε η αποτυχία της μηχανής και της πρωταρχικής αιτίας που επηρέασε τη ζημία. Η έρευνα για τις γεννήτριες σε υδροηλεκτρικούς σταθμούς που πραγματοποιείται από την επιτροπή μελέτης CIGRE SC11, Π.Χ. 11.02 παρέχει ένα παράδειγμα μιας τέτοιας έρευνας [5]. Δίνει τα λεπτομερή αποτελέσματα από 69 γεγονότα. Το 56% των μηχανών εμφάνισαν ζημία στην μόνωση. Άλλοι σημαντικοί τύποι ζημιών που βρίσκουμε είναι μηχανικοί, θερμικοί και ζημιές των ρουλεμάν (Σχήμα 1a). Οι βασικές αιτίες που οδήγησαν σε αυτές τις ζημιές υποδιαιρούνται σε 7 διαφορετικές ομάδες (Σχήμα 1b).



Σχήμα 1a και 1b. Ζημιές των γεννητριών σε υδροηλεκτρικούς σταθμούς (αριστερά) και βασικές αιτίες των ζημιών μόνωσης (δεξιά)

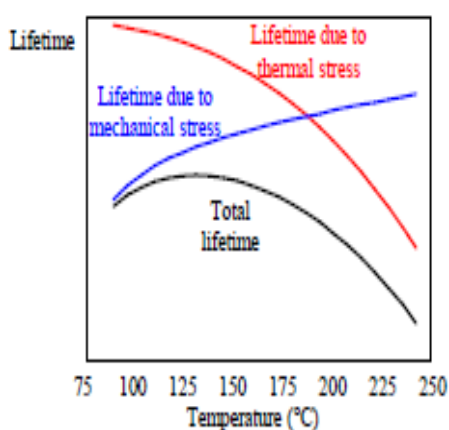
Μπορεί επομένως να προκύψει ότι η αποτυχία μόνωσης είναι μια βασική αιτία για τη διακοπή της υψηλής τάσης στις περιστρεφόμενες μηχανές. Διάφοροι συντάκτες ερεύνησαν τους μηχανισμούς αποτυχίας της μόνωσης μίκα στο εργαστήριο. Τα βασικά τους συμπεράσματά είναι:

1. Παρόλο που η ηλεκτρική διάσπαση προκαλεί την τελική βλάβη της ηλεκτρικής μόνωσης, η ηλεκτρική καταπόνηση δεν είναι ο κυρίαρχος παράγοντας γήρανσης. Θεωρείται ότι ο μηχανισμός γήρανσης κυριαρχείται από τη θερμική υποβάθμιση της ρητίνης συνδέσμων, την μηχανική καταπόνηση που προκαλείται από τους κραδασμούς και τη μεταβασή παλμών και την πίεση που προκαλείται από τους διαφορετικούς συντελεστές θερμικής διαστολής των σχετικών υλικών.

2. Η γήρανση κάτω από τη θερμική, μηχανική και ηλεκτρική καταπόνηση εμφανίζει μια αύξηση στη διάρκεια ζωής στις μέτριες θερμοκρασίες επάνω από περίπου 130°C και μια γρήγορη μείωση εάν η θερμοκρασία γήρανσης αυξάνεται μέχρι 180°C (σχήμα 2)

Αυτά τα συμπεράσματα εξηγούνται αφενός από μια αυξανόμενη θερμική υποβάθμιση της οργανικής ύλης και αφετέρου από την μείωση της εσωτερικής πίεσης και τον σχηματισμό ρωγμών στην ρητίνη συνδέσμων σε υψηλότερες θερμοκρασίες.

Με βάση αυτά τα δεδομένα, ξεκίνησε ένα κοινό ερευνητικό πρόγραμμα που περιέλαβε διάφορους βιομηχανικούς συνεργάτες, επιχειρήσεις ηλεκτρικής ενέργειας και το ελβετικό ομοσπονδιακό ινστιτούτο τεχνολογίας στη Ζυρίχη. Ο στόχος αυτής της μελέτης ήταν να αναπτυχθεί ένα επιτυχημένο μοντέλο μόνωσης της ηλεκτρογεννήτριας, το οποίο θα εξαρτάται από τις συνθήκες λειτουργίας της. Η έρευνα κάλυψε την ηλεκτρική, την θερμική και την μηχανική γήρανση των ειδικά αναπτυγμένων δειγμάτων καθώς και των ράβδων πρότυπων δειγμάτων.

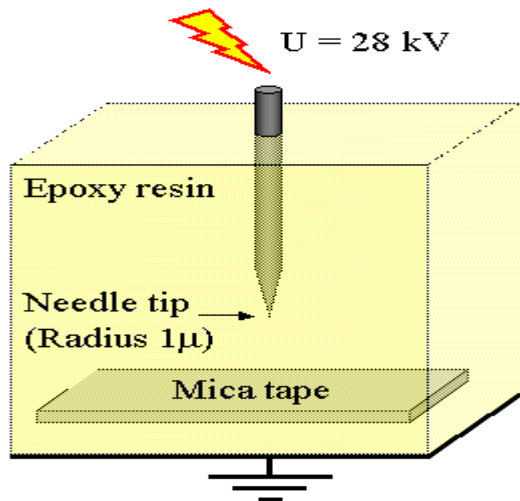


Σχήμα 2. Σχηματική γραφική παράσταση που εμφανίζει τη διάρκεια ζωής της μόνωσης μίκας ως συνάρτηση της θερμικής καταπόνηση (κόκκινη καμπύλη), της μηχανικής πίεσης (μπλε καμπύλη) και της αλληλεπίδρασής τους (μαύρη καμπύλη).

3.2 Έρευνες και αποτελέσματα

3.2.1. Διάταξη «ακίδα - πλάκα»

Για την μελέτη του φαινομένου της δημιουργίας δενδρίτη στο εσωτερικό ενός συστήματος μόνωσης που αποτελείται από ένα συνδυασμό εποξικής ρυτίνης και μίκας, χρησιμοποιήθηκε η εργαστηριακή διάταξη που φαίνεται στο σχήμα 3. Η διάταξη των ηλεκτροδίων ήταν τύπου ακίδας πλάκας και η ανάπτυξη του δενδρίτη καταγράφηκε με την βοήθεια βιντεοκάμερας.

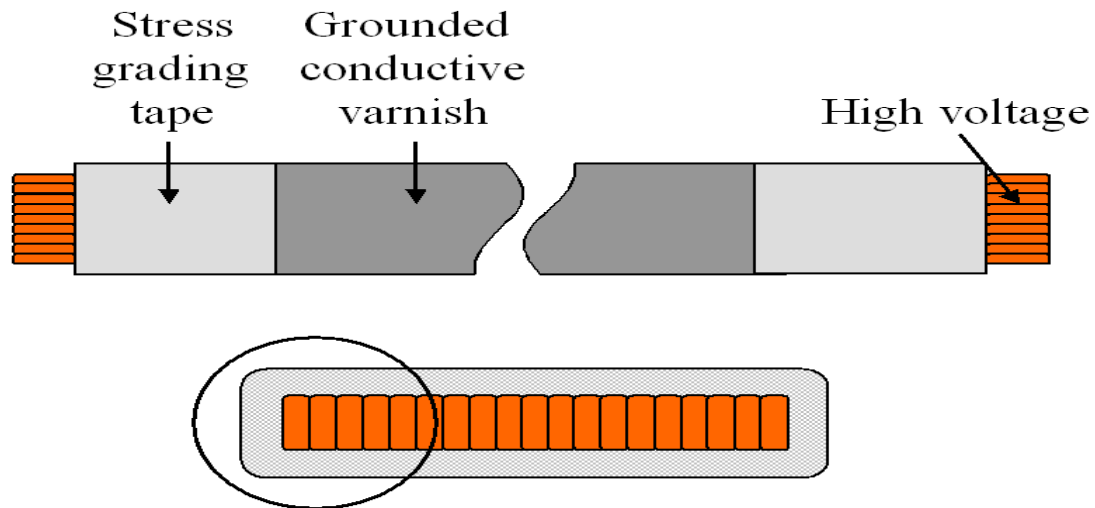


Σχήμα 3. δείγμα δοκιμής«ακίδα πλάκα»

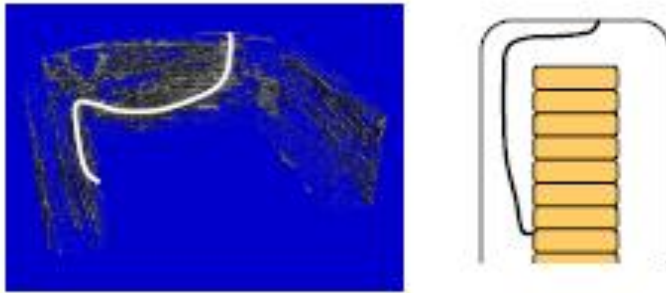
Σχήμα 4. Φωτογραφίες δυο διαφορετικών δενδριτών. Ο δενδρίτης στη δεύτερη φωτογραφία είναι αρκετά αγωγίμος για να προκαλέσει ηλεκτρική διάσπαση. Ο σχηματισμός των δενδριτών άρχισε αμέσως μετά από την εφαρμογή της τάσης. Η διάδοση των δενδριτών προς το γειωμένο ηλεκτρόδιο σταμάτησε από την ενσωματωμένη ταινία μίκας, και στη συνέχεια οι δενδρίτες συνεχίσαν να διαδίδονται στην επιφάνεια της μίκας γεγονός που οδηγεί σε μεγαλύτερο χρόνο διάσπασης. Όταν ο δενδρίτης έφτασε στην άκρη της μίκας, η διάδοση συνεχίστηκε γρήγορα προς το γειωμένο ηλεκτρόδιο. Η διάσπαση δεν εμφανίζεται αμέσως μέχρι οι πρώτοι κλάδοι του δενδρίτη φτάσουν στο γειωμένο ηλεκτρόδιο. Περισσότεροι κλάδοι παρήχθησαν και η διάμετρος των καναλιών του δενδρίτη αυξήθηκε από 50-200 μm. Σε αυτή τη φάση η αγωγιμότητα των καναλιών του δενδρίτη ήταν επαρκείς για να προκαλέσουν τη διάσπαση (σχήμα 4). Ο μέσος χρόνος διάσπασης του δείγματος ήταν περίπου 50 - 100 ώρες. Σε όλα τα πειράματα οι δενδρίτες θα μπορούσαν να διαπεράσουν την ταινία μίκας μόνο εάν ήταν χαλασμένη.

3.2.2. Ανάπτυξη δενδριτών στη μόνωση μίκας των ράβδων

Οι μήκους 1 μ ράβδοι με πάχος μόνωσης 2 χιλ. που παρασκευάζονται με VPI και με την τεχνολογία πλούσιας ρητίνης χρησιμοποιήθηκαν για δοκιμές αντοχής με τάση τριπλάσια της ονομαστικής (σχήμα 5). Η τάση που εφαρμόστηκε ήταν 32 kV εναλλασσόμενη. Ο έλεγχος της ανάπτυξης δενδριτών μέσα στα τμήματα μόνωσης μίκας των ράβδων έγινε με την βοήθεια ακτίνων X. Το σχήμα 6 εμφανίζει ένα παράδειγμα ενός τμήματος ράβδων όπου τονίζεται γραφικά η παρουσία δενδρίτη. Η διαδρομή των δενδριτών θα μπορούσε επίσης να εντοπισθεί από το κάψιμο της ρητίνης συνδέσμων της μόνωσης μίκας σε έναν φούρνο και με την προσεκτική αφαίρεση του στρώματος από το στρώμα της ταινίας μίκας. Εφαρμόζοντας και τις δύο μεθόδους διαπιστώθηκε ότι οι δενδρίτες συνήθως ξεκινάνε από την άκρη της στοίβας του χάλκινου αγωγού και μπορεί εύκολα να εξηγηθεί από την αύξηση της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου σε αυτό το σημείο. Καθώς ο δενδρίτης προχωρούσε στο εσωτερικό της μόνωσης, δεν έφτανε ποτέ απευθείας στο γειωμένο ηλεκτρόδιο αλλά ακολουθούσε τις ακμές της μόνωσης της μίκας.

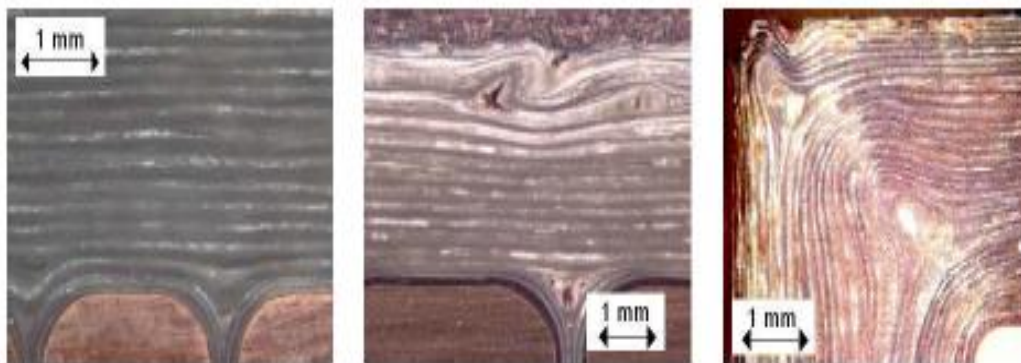


Σχήμα 5. Η πρότυπη ράβδος που χρησιμοποιείται για την δοκιμή αντοχής τάσης. Οι δενδρίτες ερευνήθηκε στο περικυκλωμένο τμήμα.



Σχήμα 6. Η διαδρομή του δενδρίτη σε μια πρότυπη ράβδο που αποκαλύπτεται από την μέθοδο ακτίνας X (αριστερά) και ανιχνεύεται απο το κάψιμο των σύνδεσμων ρητίνης και απο την αφαίρεση των στρωμάτων της ταινίας μίκας (δεξιά)

Υποθέτουμε ότι οι δενδρίτες ήταν σε θέση «να πάρουν τους συντομότερους δρόμους» σε σημεία όπου η μόνωση μίκας είχε ατέλειες ή ελαττώματα όπως κενά, ρωγμές, αποκολλήσεις, συσσωρεύσεις ρητίνης στις επικαλύψεις ταινιών και ζαρωμένα ή χαλασμένα στρώματα μίκας. Τέτοια ελαττώματα ευνοούν το σχηματισμό και τη διάδοση των δενδριτών στη μόνωση μίκας και μειώνουν τη διάρκεια ζωής της. Αυτές οι υποθέσεις θα μπορούσαν να επιβεβαιωθούν από τα μικρογραφήματα της μόνωσης μίκας που εμφανίζει πολλές ατέλειες (σχήμα 7). Αυτα τα συμπεράσματα συμφωνούν με τα αποτελέσματα των πειραμάτων στη διάταξη «ακίδα πλάκα», όπου παρατηρήσαμε ότι οι ηλεκτρικοί δενδρίτες δεν είναι ικανοί να διαπεράσουν την ταινία μίκας εάν είναι άθικτη, αλλά μπορεί εύκολα να περάσει κατευθείαν εάν η ταινία είναι λυγισμένη ή τσακισμένη.

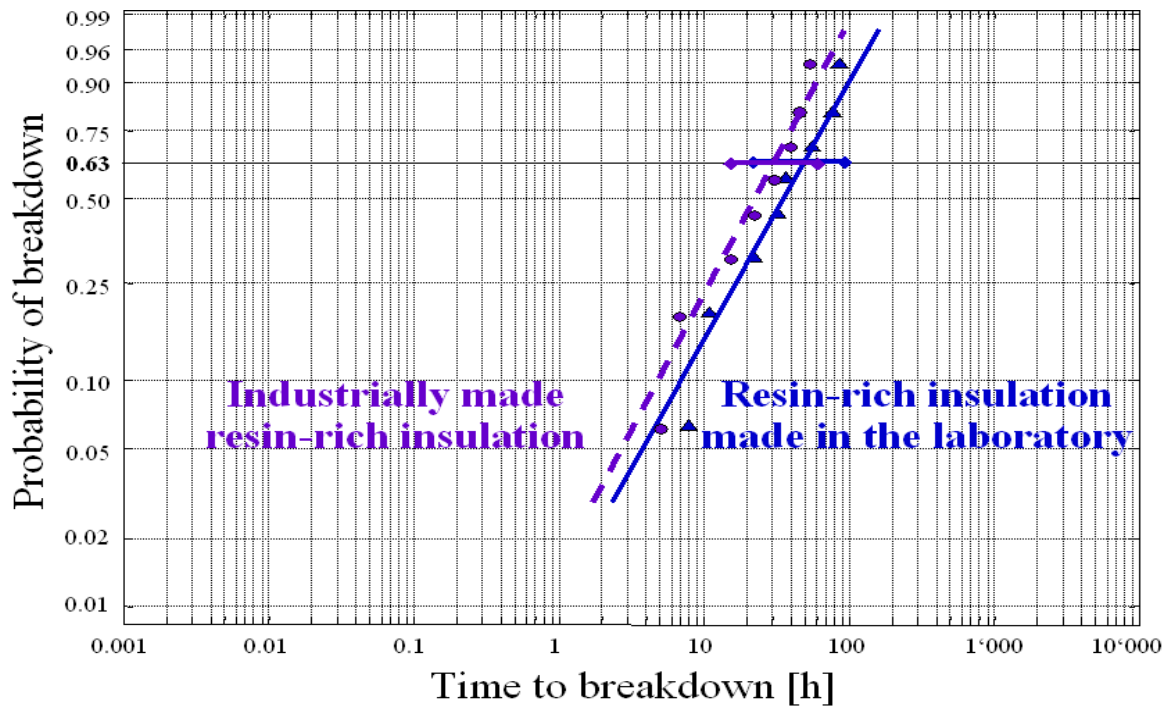


Σχήμα 7. Τέλεια μόνωση μίκας (αριστερά) και μόνωση μίκας που εμφανίζει διάφορες ατέλειες (δύο μικρογραφήματα στα δεξιά) όπως τα κενά, οι ζαρωμένες και διπλωμένες ταινίες μίκας.

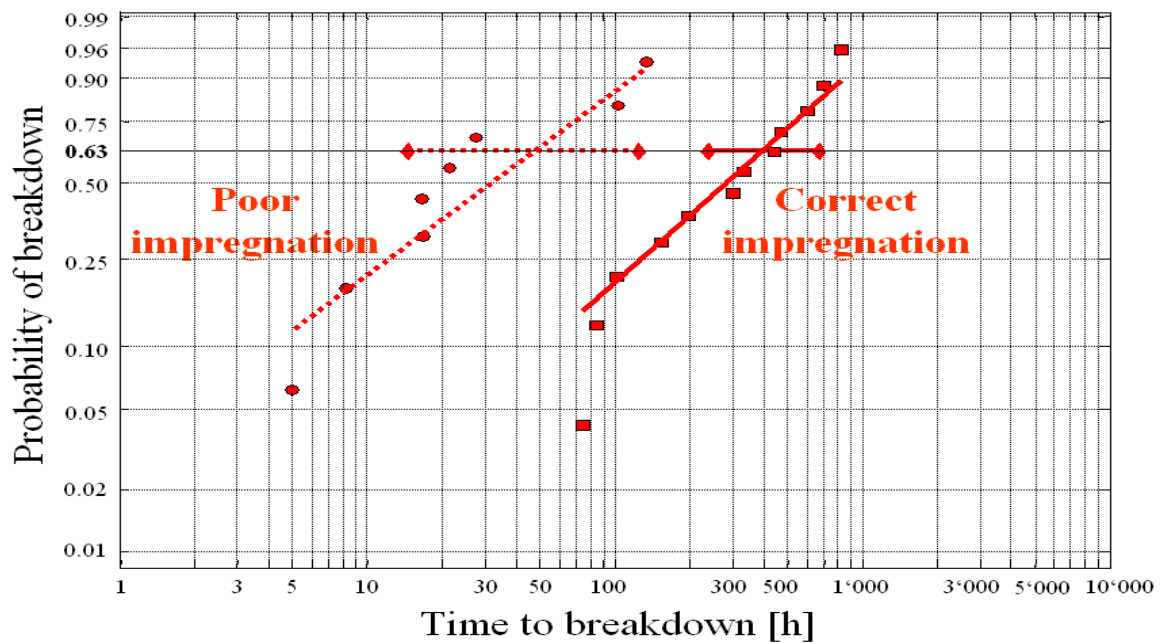
Είναι επομένως προφανές ότι η ποιότητα κατασκευής της μόνωσης μίκας έχει επίδραση στη διάρκεια ζωής του πηνίου ή της ράβδου. Διάφορες δοκιμές αντοχής τάσης έγιναν για να αποδείξουν αυτό, χρησιμοποιώντας τους διαφορετικούς τύπους ράβδων όπως φαίνεται στο σχήμα 8. Οι προκύπτουσες κατανομές Weibull δίνονται στα σχήματα 9 - 11. Στο σχήμα 9 συγκρίνεται η διάρκεια ζωής των ράβδων που κατασκευάζονται σύμφωνα με βιομηχανικές συνθήκες και των ράβδων που παρασκευάζονται στο εργαστήριο. Εφαρμόζοντας προσεκτικά την μόνωση μίκας στις πρότυπες ράβδους, τα εργαστηριακά αποτελέσματα έδειξαν ότι υπάρχει μια αύξηση στην διάρκεια ζωής. Το σχήμα 10 εμφανίζει τη διάρκεια ζωής των ράβδων που ήταν κατασκευασμένες με κακή διαδικασία διαπότισης VPI. Η κακή διαπότιση έδωσε μια μόνωση μίκας με κενά μέρη, με αποτέλεσμα η χαρακτηριστική διάρκεια ζωής των δειγμάτων των ράβδων που ερευνήθηκαν προέκυψε μειωμένη κατά ένα συντελεστή 10. Το σχήμα 11 δίνει την διαφορά μεταξύ των ράβδων με και χωρίς ρυτίδες στη μόνωση μίκας. Η διαφορά στη διάρκεια ζωής είναι πάλι σημαντική. Οι ατέλειες κατασκευής και τα μονοπάτια δένδριτών στη μόνωση μίκας των διαφορετικών ράβδων αναλύθηκαν παραπάνω. Η έρευνα κατέληξε στο συμπέρασμα ότι αυτές οι ατέλειες ενισχύουν τον σχηματισμό και τη διάδοση των ηλεκτρικών δένδριτών και έτσι μειώνουν την διάρκεια ζωής της μόνωσης.



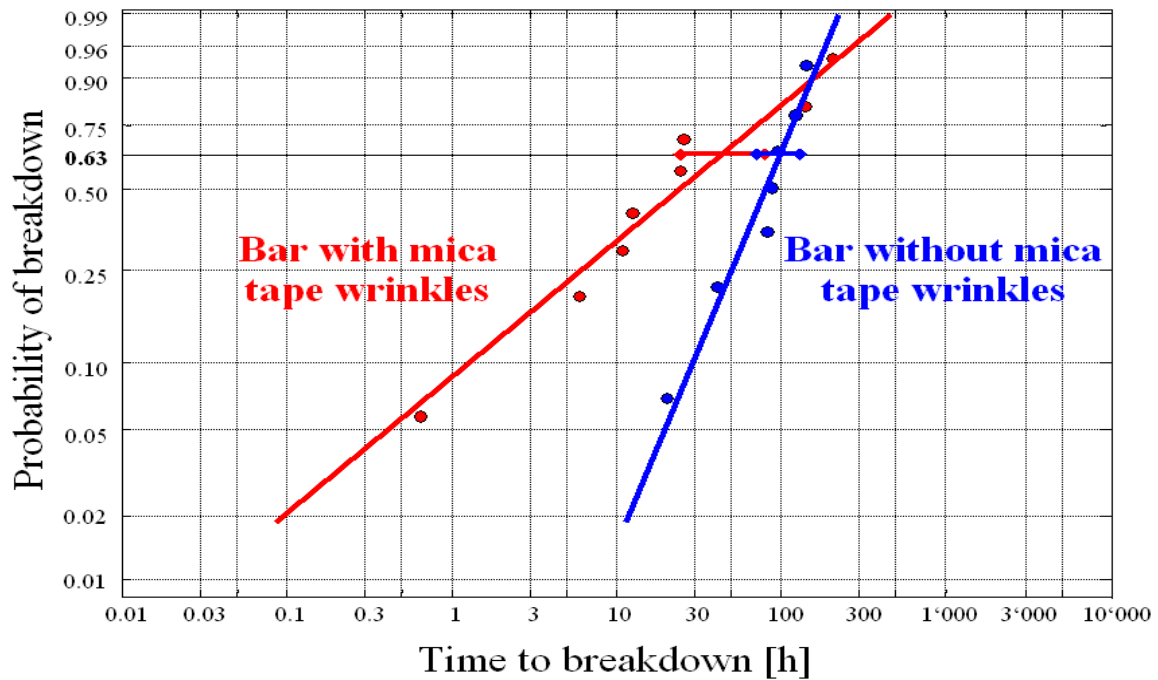
Σχήμα 8. Διαφορετικοί τύποι πρότυπων ράβδων που χρησιμοποιούνται για την μέτρηση διηλεκτρικής αντοχής.



Σχήμα 9. Πιθανότητα διάσπασης των βιομηχανικών ράβδων και των πρότυπων ράβδων που παρασκευάζονται στο εργαστήριο σε συνάρτηση με τον χρόνο.



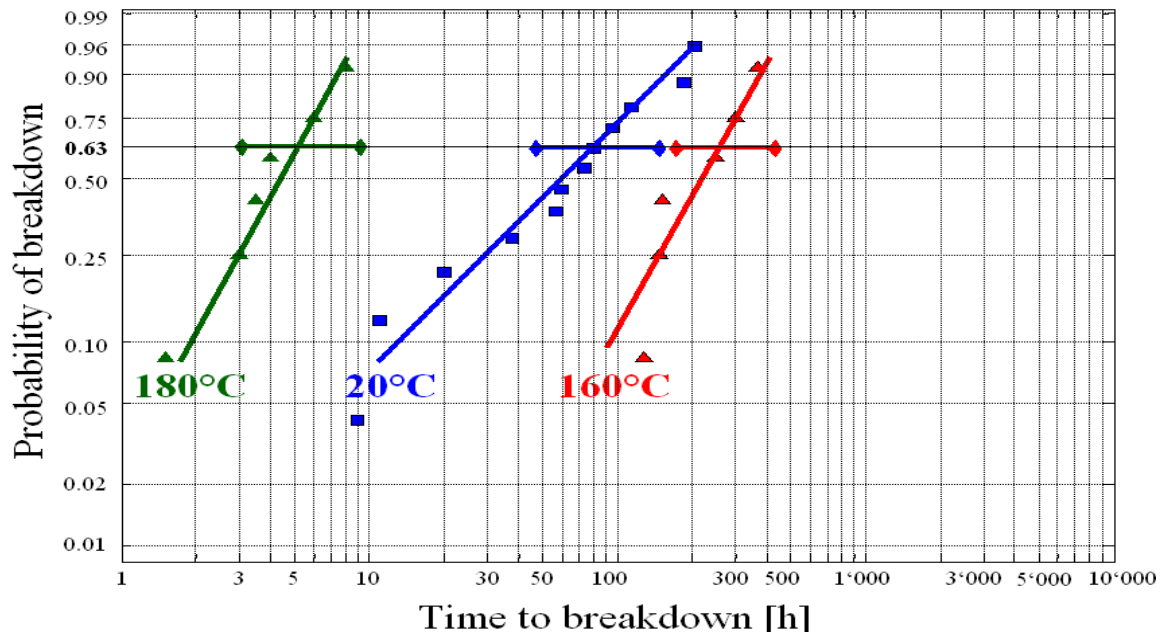
Σχήμα 10. Επίδραση της ποιότητας εμποτισμού VPI επάνω στην πιθανότητα διάσπασης.



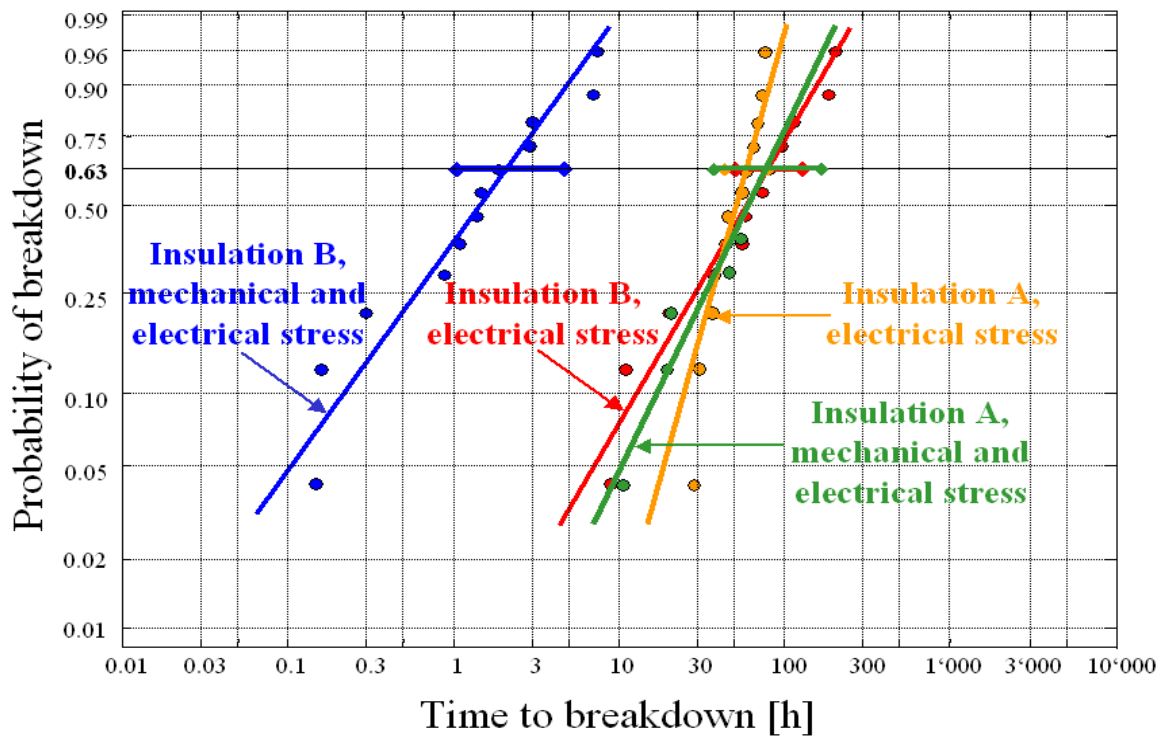
Σχήμα 11. Πιθανότητα διάσπασης της μόνωσης των ράβδων της γεννήτριας με και χωρίς ρυτίδες στρώματων ταινιών μίκας σε συνάρτηση με τον χρόνο.

3.2.3. Θερμική και μηχανική γήρανση

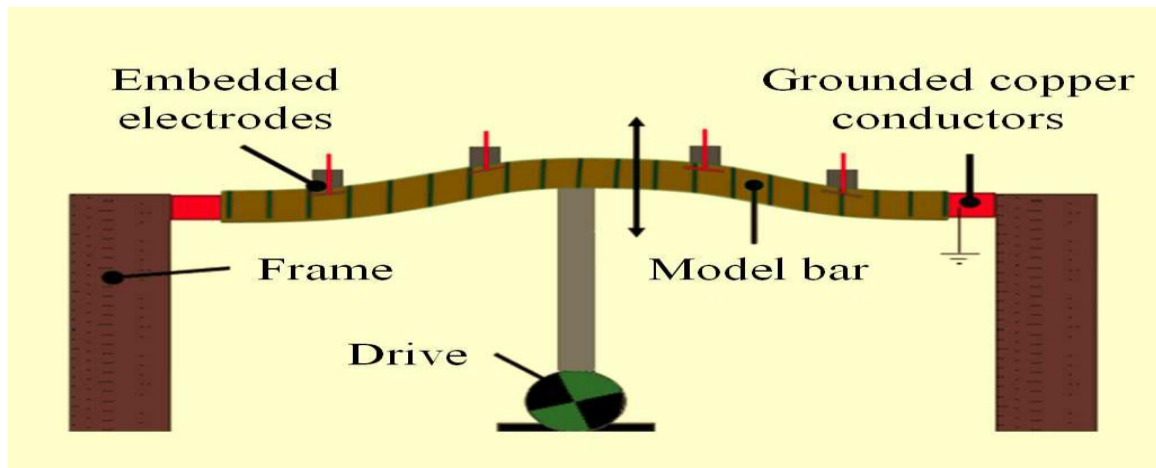
Στην εισαγωγή αναφέρθηκε ότι η θερμική και η μηχανική καταπόνηση είναι οι παράγοντες που κυριαρχούν στην γήρανση της μόνωσης των περιστρεφόμενων ηλεκτρικών μηχανών υψηλών τάσεων. Επομένως ένας μεγάλος αριθμός των δοκιμών διηλεκτρικής αντοχής έγινε προκειμένου να διερευνηθούν οι δύο παράγοντες καταπόνησης. Το σχήμα 12 εμφανίζει την επίδραση της θερμοκρασίας γήρανσης στην διηλεκτρική αντοχή που διερευνήθηκε σε συνδυασμό με μία θερμική/ηλεκτρική δοκιμή γήρανσης. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η διάρκεια ζωής της μόνωσης είναι υψηλότερη στους 160°C από, τι στους 20°C το οποίο είναι σύμφωνο με τις διαπιστώσεις που αναφέρονται παραπάνω. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί από μια υψηλότερη ευελιξία του συνδέσμου ρητίνης σε υψηλή θερμοκρασία που ελαχιστοποιεί τον κίνδυνο σχηματισμού ρωγμών, αλλά και από την μείωση των εσωτερικών πιέσεων που προέρχονται από την «θεραπευτική αντίδραση» που εμφανίζεται συνήθως στις θερμοκρασίες γύρω στους 160°C. Η μεγαλύτερη διάρκεια ζωής στους 160°C μπορεί να οφείλεται ενμέρει σε ένα θεραπευτικό αποτέλεσμα που προκύπτει στην υψηλότερη θερμοκρασία. Ωστόσο, στους 180°C η θερμική υποβάθμιση της ρητίνης συνδέσμων είναι ο κυρίαρχος παράγοντας γήρανσης και η διάρκεια ζωής των πρότυπων ράβδων ήταν αρκετά μειωμένη. Σύμφωνα με τον T. Weiers [8] η καλύτερη θερμοκρασία στην οποία επιτυγχάνεται η μέγιστη διάρκεια ζωής των εποξικών μονώσεων μίκας είναι 90°C, το οποίο είναι μέσα στο συνηθισμένο εύρος λειτουργίας των μεγάλων γεννητριών ισχύος.



Σχήμα 12. Επίδραση της θερμοκρασίας γήρανσης επάνω στην διηλεκτρική αντοχή.



Σχήμα 13. Επίδραση της μηχανικής πίεσης (κραδασμοί) και το είδος μόνωσης στην διηλεκτρική αντοχή.



Σχήμα 14. Ο Εργαστηριακός εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε για την διερεύνηση της επίδρασης των μηχανικών καταπονήσεων στην διηλεκτρική αντοχή.

Η μηχανική πίεση ασκείται στη μόνωση των περιστρεφόμενων μηχανών υψηλής τάσης λόγω των κραδασμών με διαφορετικό θερμικό συντελεστή επέκτασης των σχετικών υλικών καθώς επίσης και των παροδικών και φυγοκεντρικών δυνάμεων. Τα πειράματα κραδασμών πραγματοποιήθηκαν σε δείγματα ράβδων μήκους 1 μέτρου που χρησιμοποιούν έναν εξοπλισμό κραδασμών που επέτρεψε δονήσεις συχνότητας 100 Hz με ένα εύρος ± 0.5 χιλ. (σχήμα 14).

Η διάρκεια ζωής της μόνωσης μετρήθηκε εφαρμόζοντας την παλμική και ηλεκτρική πίεση ταυτόχρονα και συγκρίνοντας την με τις ράβδους που εκτίθενται στην ηλεκτρική πίεση μόνο. Η τάση που εφαρμόστηκε στις ράβδους προέρχεται από τα

ενσωματωμένα ηλεκτρόδια. Από τις αιχμηρές άκρες των ηλεκτροδίων ξεκίνησε η έναρξη διάδοσης του δενδρίτη αμέσως μετά από την εφαρμογή της τάσης. Το πάχος και η τάση μόνωσης που εφαρμόστηκαν ήταν τα ίδια όπως για το 3Un πρότυπες ράβδοι (2 χιλ., 32 kV εναλλασσόμενο ρεύμα). Το πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου δοκιμής είναι ότι μέχρι και τέσσερις μετρήσεις βλάβης μπορούν να γίνουν με ένα BAR. P. Vogelsang [9]. Αποδείχθηκε ότι τα αποτελέσματα της τάσης αντοχής που επιτεύχθηκαν με τη μέθοδο ενσωματωμένων ηλεκτροδίων συμφωνούν με τη διάρκεια ζωής που μετριέται σύμφωνα με το IEEE 1043.

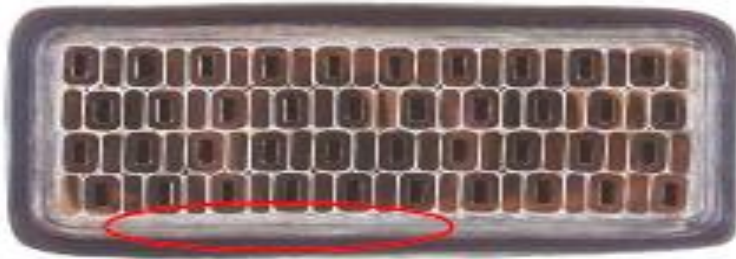
Δύο διαφορετικά μονωτικά υλικά χρησιμοποιήθηκαν για τις παλμικές δοκιμές: **Μόνωση Α**, ένας συνδυασμός μιας ταινίας μίκας και μιας εποξικής ρητίνης VPI που χρησιμοποιείται συνήθως στις μεγάλες ηλεκτρογεννήτριες,

Μόνωση Β ένας συνδυασμός μιας πολυεστέρα – μίκας και πολυεστέρα - ρυτίνης. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η διάρκεια ζωής της μόνωσης Β μειώθηκε λόγω των κραδασμών κατά έναν συντελεστή περίπου 10, ενώ η διάρκεια ζωής της μόνωσης Α δεν άλλαξε (σχήμα 13). Τα μικρογραφήματα της μόνωσης Β εμφανίζουν αποκολλήσεις παράλληλα στα στρώματα μίκας που υποτιθέεται ότι προκαλούν και επιταχύνουν τους δενδρίτες αλλά ο σχηματισμός των καθέτων ρωγμών στα στρώματα μίκας δεν θα μπορούσε να παρατηρηθεί. Οι ρητίνες πολυεστέρα χρησιμοποιούνται για να δώσουμε μεγαλύτερη συρρίκνωση κατά τη διάρκεια της θεραπείας σε σύγκριση με αυτής των επόξινων. Αυτή η επίδραση ενισχύεται από την ταινία μίκας που χρησιμοποιείται για τη μόνωση Β.

Τα πειράματα κραδασμών δεν περιλαμβάνουν την μηχανική τριβή της προστασίας των αυλακώσεων της κορώνας δεδομένου ότι οι ράβδοι δειγμάτων δεν ήταν τοποθετημένοι σε ένα μοντέλο αυλακώσεων. Η τριβή του αγωγισμού στρώματος στην αυλάκωση από τις αιχμηρές άκρες του τοποθετημένου σε στρώματα πυρήνα στατών είναι πρόσθετος παράγοντας που καταστρέφει τη μόνωση και που μειώνει τη διάρκεια ζωής του, ειδικά εάν γίνει χαλαρή η ενσφηνώση της ράβδου στην αυλάκωση. Ως συνέπεια εμφανίζεται μια μερική απαλλαγή, προσθέτοντας τη χημική υποβάθμιση των οργανικών υλικών της μόνωσης στη μηχανική διάβρωση που προκαλείται από τους κραδασμούς. Γενικά αυτός ο φαύλος κύκλος θεωρείται μια από τις πιο βασικές αιτίες της πρόωρης βλάβης των περιστρεφόμενων μηχανών υψηλής τάσης [2]. Το σχήμα 15 εμφανίζει την επίδραση των κραδασμών, την προστασία της κορώνας αυλακώσεων που φοριέται εκτός από τις θέσεις των αεραγωγών.



Σχήμα 15. Η τριβή της προστασίας κορώνας αυλακώσεων λόγω κραδασμών.



Σχήμα 16. Αποχρωματισμός της μόνωσης μίκας λόγω της διαρροής του νερού ψύξης[10].

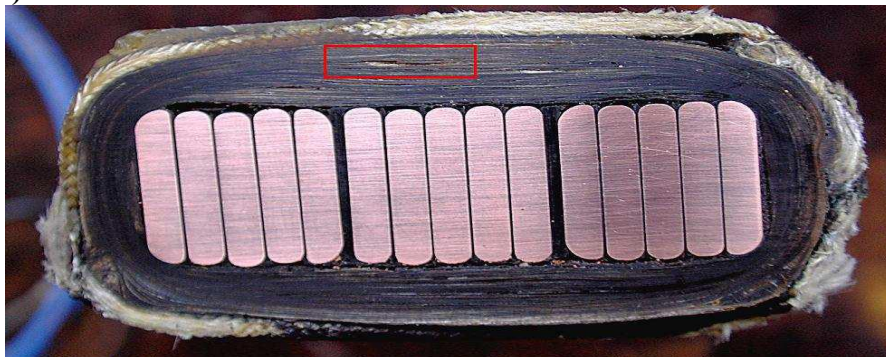
3.2.4. Έρευνα για τις αρχικές ράβδους γεννητριών

Κατά τη διάρκεια της έρευνας ήταν διαθέσιμες χρησιμοποιημένες αλλά και νέες ράβδοι υδροηλεκτρικών γεννητριών διαφορετικής προέλευσης για την έρευνα. Δοκιμές τάσης αντοχής, η οπτική και μικροσκοπική εξέταση πραγματοποιήθηκε για να συγκρίνει τα αποτελέσματα με τα αποτελέσματα των δειγμάτων εργαστηριακής δοκιμής. Το σχήμα 17 δίνει τα μικρογραφήματα των τμημάτων των ράβδων στις διαφορετικές φάσεις αποκολλήσεων και κενών εμφάνισης γήρανσης.

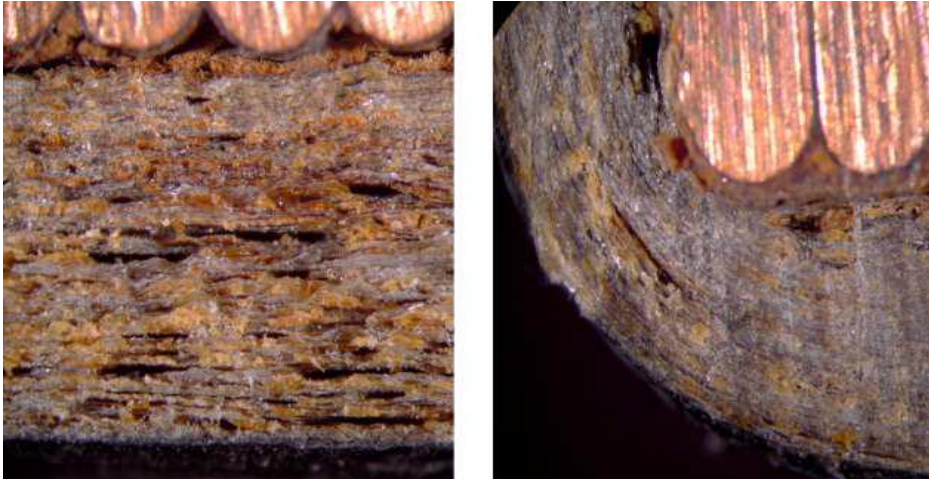
Εξετάζοντας τις ράβδους που προέρχονται από τις υδροηλεκτρικές γεννήτριες με μια κάθετη ευθυγράμμιση άξονων ανιχνεύσαμε τις ράβδους με φθαρμένη ή αποσυνδεδεμένη προστασία κορώνας αυλακώσεων. Ο λόγος για αυτό το ελάττωμα βρέθηκε να είναι το λιπαντικό των ρουλεμάν που διαπερνούν τις αυλακώσεις του στάτη εάν η σφράγιση είχε διαρροή. Η διαρροή του λιπαντικού είχε καταστρεπτική επίδραση στην προστασία της κορώνας αυλακώσεων.

Η διαρροή του νερού ψύξης στις άμεσες γεννήτριες ψύξης επιδεινώνει την κύρια μόνωση τοίχων [10]. Αυτό το είδος των ζημιών θα μπορούσε να ανιχνευθεί στις διατομές της φθαρμένης μόνωσης μίκας από έναν διακριτικό αποχρωματισμό (Σχήμα 16).

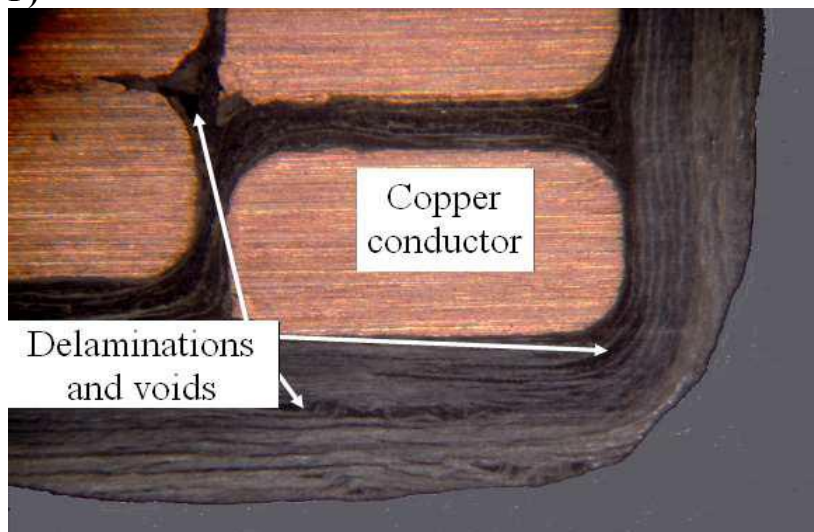
A)



B)



D)

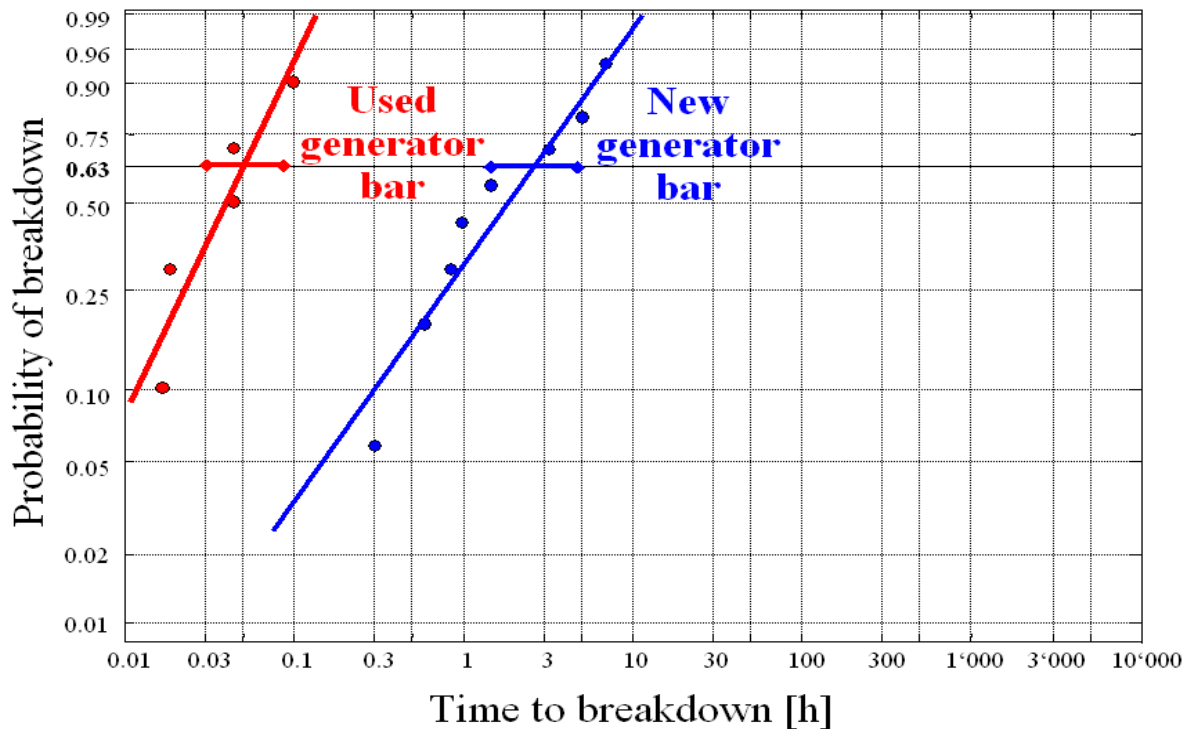


Σχήμα 17. Νέα ράβδος υδροηλεκτρικών γεννητριών με αποκολλήσεις στη μόνωση μίκας (Α).

Ράβδοι υδροηλεκτρικών γεννητριών μετά από 37 χρόνια εμφάνισης αποκολλήσεων και κενών (Γ).

Ράβδοι υδροηλεκτρικών γεννητριών μετά από 40 χρόνια. Η ρητίνη συνδέσμων έχει σε ένα μεγάλο βαθμό αλλοιωθεί (Α και Β).

Η μείωση της διάρκειας ζωής λόγω της γήρανσης φαίνεται στο σχήμα 18 όπου συγκρίνεται η πιθανότητα διάσπασης μεταχειρισμένων αλλά ακόμα λειτουργικών ράβδων γεννητριών με νέες. Η υπόλοιπη διάρκεια ζωής των χρησιμοποιημένων ράβδων μειώνεται δραστικά.



Σχήμα 18. Σύγκριση νέων και μεταχειρισμένων αλλά ακόμα λειτουργικών ράβδων γεννητριών

3.3 ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΕΙΣ ΜΟΝΩΣΕΩΝ

Οι καταπονήσεις τις οποίες υφίστανται οι μονώσεις και κατ'ακολουθία τα διηλεκτρικά που απαρτίζουν τις μονώσεις του εξοπλισμού υψηλής τάσης είναι ποικίλες, όπως ηλεκτρικές, θερμικές, μηχανικές, από ακτινοβολία, από υγρασία κ.λ.π. Αυτές μπορεί να είναι συνεχείς ή διακοπτόμενες, σταθερές ή μεταβαλλόμενες με τον χρόνο (περιοδικά ή μη).

Οι καταπονήσεις των μονώσεων υψηλής τάσης μπορούν να ταξινομηθούν σε 4 ομάδες:

- **Ηλεκτρικές καταπονήσεις:** Αυτές μπορεί να οφείλονται τόσο σε υπερτάσεις (μόνιμες, παροδικές ή μεταβατικές) όσο και στην τάση λειτουργίας του εξοπλισμού της μόνωσης.
- **Θερμικές καταπονήσεις.** Κατά την διάρκεια της λειτουργίας του εξοπλισμού η θερμοκρασία των μονώσεων αυξάνεται τόσο στις διηλεκτρικές απώλειες όσο και από τις απώλειες joule των αγωγών που μονώνουν. Αύξηση της θερμοκρασίας της μόνωσης μπορεί να προέλθει από την αυξημένη θερμοκρασία του περιβάλλοντος ή από κακή λειτουργία του συστήματος ψύξης.
- **Μηχανικές καταπονήσεις.** Μπορεί να είναι είτε μόνιμες, οφειλόμενες στην κατασκευή και λειτουργία του εξοπλισμού, είτε μεταβατικές εξαιτίας βραχυκυκλωμάτων ή εξωτερικών καταπονήσεων.

- **Περιβαλλοντικές καταπονήσεις.** Στην ομάδα αυτή εντάσσονται όλες οι καταπονήσεις που προέρχονται από το περιβάλλον, όπως η ρύπανση, η υγρασία, η ακτινοβολία κ.λ.π.

Κατά κανόνα οι μονώσεις υφίστανται τη συνδυασμένη εφαρμογή περισσότερων της μια καταπονήσεων ταυτόχρονα. Μεταξύ αυτών συνήθως υπερέχει μια η οποία χαρακτηρίζεται ως η κύρια καταπόνηση.

Υπο την επίδραση τέτοιων καταπονήσεων, ένα διηλεκτρικό μπορεί να υποστεί μεταβολές διαφόρων ιδιοτήτων του. Οι μεταβολές αυτές μπορεί να είναι παροδικές ή μόνιμες και επηρεάζουν καθοριστικά την αξιοπιστία του διηλεκτρικού και κατ'ακολουθία του εξοπλισμού (ή της εγκατάστασης) υψηλής τάσης στη μόνωση του οποίου συμμετέχει. Η ταυτόχρονη συνύπαρξη περισσότερων καταπονήσεων κατά κανόνα επιταχύνει τις μεταβολές των ιδιοτήτων του μονωτικού, όμως σε μερικές περιπτώσεις μπορεί να τις καθυστερεί (π.χ. καταπόνηση μόνωσης από την υγρασία περιβάλλοντος ταυτόχρονα με την θερμική καταπόνηση εξαιτίας της παραγόμενης θερμότητας joule στον αγωγό που μονώνεται).

3.4 ANTOXH TΩN MONΩΣEΩN

Η μονωτική ικανότητα ενός διηλεκτρικού χαρακτηρίζεται από το μέγεθος της διηλεκτρικής αντοχής. Η διηλεκτρική αντοχή είναι η μέγιστη πεδιακή ένταση την οποία μπορεί να υποστεί ένα διηλεκτρικό χωρίς να απολέσει την μονωτική του ικανότητα, δηλαδή χωρίς να διασπαστεί. Το μέγεθος της διηλεκτρικής αντοχής είναι χαρακτηριστικό μέγεθος ενός υλικού και μάλιστα ιδιαίτερα σημαντικό για κάθε μονωτικό υλικό. Όμως στον εξοπλισμό υψηλής τάσης κατά κανόνα συμμετέχουν ποικίλα μονωτικά υλικά που συνθέτουν την μόνωση του. Γι'αυτό είναι αναγκαία η εισαγωγή ενός γενικότερου μεγέθους της **ηλεκτρικής αντοχής E_d** μιας μόνωσης, η οποία στην περίπτωση που η μόνωση αποτελείται από ένα μόνο διηλεκτρικό ταυτίζεται με την διηλεκτρική αντοχή του. Τόσο η διηλεκτρική αντοχή όσο και η ηλεκτρική αντοχή θεωρούνται διηλεκτρικά μεγέθη και συνήθως εκφράζονται σε kV/cm.

Στον πίνακα 1.01 έχουν συγκεντρωθεί οι τιμές της διηλεκτρικής αντοχής και της διηλεκτρικής σταθεράς ενός πλήθους μονωτικών υλικών. Οι τιμές αυτές είναι ενδεικτικές. Ειδικά στα τεχνητά υλικά μπορεί να υπάρχουν σημαντικές αποκλίσεις από τις τιμές του πίνακα σχετιζόμενες με τον τρόπο κατασκευής τους. Σε κάθε περίπτωση η ακριβής τιμή της διηλεκτρικής αντοχής (και της σχετικής διηλεκτρικής σταθεράς) ενός υλικού προσδιορίζεται με εργαστηριακές μετρήσεις.

Κατά τον εργαστηριακό προσδιορισμό της διηλεκτρικής αντοχής ενός μονωτικού υλικού ή της ηλεκτρικής αντοχής μιας μόνωσης το μετρούμενο μέγεθος είναι η **τάση διασπάσεως U_d** δηλαδή η τάση υπό την οποία ένα διηλεκτρικό ή ένας συνδυασμός διηλεκτρικών που συνιστούν μια μόνωση ή συμμετέχουν σ'ένα μονωτικό σύστημα, χάνει προσωρινά ή μόνιμα τη μονωτική του ικανότητα διασπώμενο. Η τάση διασπάσεως μεταβάλλεται με το πάχος του διηλεκτρικού, με την διάταξη των διηλεκτρικών στη μόνωση, με τον τρόπο εφαρμογής της, με το χρόνο την μορφή του πεδίου καταπόνησης κ.λ.π.

Γι'αυτό για τον προσδιορισμό της διηλεκτρικής αντοχής των μονωτικών υλικών εφαρμόζονται κανονισμοί που καθορίζουν λεπτομερώς την διαδικασία, τις συνθήκες, τα μεγέθη και την διάταξη καταπόνησης σε ομοιογενές ηλεκτρικό πεδίο όπως π.χ. ο κανονισμός της Διεθνούς Ηλεκτροτεχνικής Επιτροπής.

Εκτός από την πλήρη διάσπαση ενός διηλεκτρικού ή μιας μόνωσης υπάρχει και η μερική διάσπαση. Κατά την μερική διάσπαση δεν σημειώνεται πλήρης γεφύρωση των δυο ηλεκτροδίων, μεταξύ των οποίων επιβάλλεται η διαφορά δυναμικού στη μόνωση, αλλά διασπάται μόνο ένα τμήμα της μόνωσης. Ενώ η πλήρης διάσπαση συνοδεύεται από ένα βραχυκύκλωμα, με δημιουργία είτε ενός βραχύχρονου σπινθήρα είτε ενός συντηρούμενου τόξου δια μέσω της μόνωσης, η μερική διάσπαση συνοδεύεται μόνο από στιγμιαία μετακίνηση κάποιων φορτίων. Η μερική διάσπαση λαμβάνει χώρα σε θέσεις όπου η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου υπερβαίνει τοπικά την διηλεκτρική αντοχή του υλικού. Οι θέσεις αυτές συνήθως είναι δίπλα με το ηλεκτρόδιο επί του οποίου μεγιστοποιείται η πεδιακή ένταση, είτε βρίσκονται στα σύνορα διηλεκτρικών ή σε σημεία αναμοιομορφίας της μόνωσης. Η τάση υπό την οποία σημειώνεται μερική διάσπαση σε μια μόνωση ονομάζεται **τάση προσβολής της μόνωσης ή τάση έναρξης μερικής διάσπασης U_e** .

Μετά από μια μερική διάσπαση μπορεί να μην συμβεί άλλη. Μπορεί όμως να συμβούν μερικές σποραδικές ακόμα, είτε να αρχίσει η συστηματική εμφάνιση μερικών διασπάσεων. Οι μερικές διασπάσεις ονομάζονται και **μερικές εκκενώσεις**, αλλά συνήθως ο όρος αυτός χρησιμοποιείται για τις συστηματικές μερικές διασπάσεις. Η τάση υπό την οποία αρχίζουν να σημειώνονται συστηματικά και όχι σποραδικά οι μερικές εκκενώσεις ονομάζεται **τάση έναρξης των μερικών εκκενώσεων U_i** και αυτή μπορεί να είναι ίση ή μεγαλύτερη από την U_e ($U_i \geq U_e$).

Οι μερικές διασπάσεις (ή μερικές εκκενώσεις) αν δεν σχετίζονται με αλλαγές διηλεκτρικών και θέσεις ανομοιομορφίας και ατελειών των μονώσεων αναμένονται μόνο σε ανομοιογενή ηλεκτροστατικά πεδία. Σ' αυτά η μεταξύ των ηλεκτροδίων τάση U , μπορεί να έχει σαν αποτέλεσμα την εμφάνιση πεδιακής έντασης που η μέγιστη τιμή της, η οποία σημειώνεται τοπικά να υπερβαίνει την διηλεκτρική αντοχή του διηλεκτρικού στη θέση αυτή.

Για καταπόνηση σε ομοιογενές ηλεκτροστατικό πεδίο η διηλεκτρική αντοχή ενός μονωτικού υλικού, ή η ηλεκτρική αντοχή μιας μόνωσης, συνδέεται με την τάση διασπάσεως με την σχέση:

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

Όπου d είναι το πάχος της μόνωσης μεταξύ των αγωγών-ηλεκτροδίων επί των οποίων εφαρμόζεται η τάση U_d . Σ' αυτή την περίπτωση του ομοιογενούς πεδίου, αν η μόνωση αποτελείται από περισσότερα του ενός διηλεκτρικά η ηλεκτρική αντοχή της θα ισούται με την μικρότερη από τις διηλεκτρικές αντοχές των επί μέρους διηλεκτρικών. Δηλαδή:

$$E_d = \min \{ E_{d1}, E_{d2}, \dots, E_{dn} \}$$

Στην περίπτωση που η ηλεκτρική καταπόνηση της μόνωσης γίνεται σε ανομοιογενές πεδίο, τότε αν αυτή αποτελείται από περισσότερα του ενός διηλεκτρικά, μπορεί να επιτευχθεί συνολική ηλεκτρική αντοχή των επί μέρους μονωτικών υλικών. Για να επιτευχθεί αυτό πρέπει στις θέσεις μέγιστης πεδιακής έντασης να τοποθετηθούν τα διηλεκτρικά με την μεγαλύτερη αντοχή. Δηλαδή σε μονωτικά συστήματα όπου αναπτύσσεται ανομοιογενές ηλεκτρικό πεδίο, ανάλογα με τις διαστάσεις και την διάταξη των διηλεκτρικών της μόνωσης, η ηλεκτρική αντοχή της μπορεί να είναι ίση ή και μεγαλύτερη από την μικρότερη από τις διηλεκτρικές αντοχές των διηλεκτρικών που συμμετέχουν. Δηλαδή:

$$E_d \geq \min \{E_{d1}, E_{d2}, \dots, E_{dn}\}$$

Ανεξάρτητα από την μορφή του ηλεκτρικού πεδίου που καταπονεί μια μόνωση η οποία αποτελείται από περισσότερα του ενός διηλεκτρικού, ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο στην διαμόρφωση της ηλεκτρικής αντοχής της μόνωσης παίζουν οι διεπιφάνειες, δηλαδή οι συνοριακές επιφάνειες μεταξύ αυτών των διηλεκτρικών. Ανάλογα με τον τρόπο κατασκευής της μόνωσης, συνοριακά φαινόμενα μπορούν να έχουν ως αποτέλεσμα την τελική διαμόρφωση της ηλεκτρικής αντοχής της μόνωσης σε επίπεδο χαμηλότερο της ελάχιστης των διηλεκτρικών αντοχών των επι μέρους διηλεκτρικών. Εξαιτίας λοιπόν των συνοριακών φαινομένων μπορεί τελικά

$$E_d < \min \{E_{d1}, E_{d2}, \dots, E_{dn}\}$$

Λόγω λοιπόν της πολυπλοκότητας των φαινομένων που καθορίζουν τελικά την ηλεκτρική αντοχή μιας μόνωσης, πρέπει να προσδιορίζεται με εργαστηριακές μετρήσεις σε κατάλληλα διαμορφωμένα δοκίμια ή σε δείγμα του εξοπλισμού υψηλής τάσης που μονώνει. Βεβαίως η γνώση της διηλεκτρικής αντοχής των επί μέρους μονωτικών υλικών αποτελεί την βάση για την αρχική σχεδίαση και την εκτίμηση της αναμενόμενης συμπεριφοράς της μόνωσης στη σύνθεση της οποίας συμμετέχουν.

Αντίστοιχα της ηλεκτρικής αντοχής είναι και τα μεγέθη της θερμικής αντοχής και της μηχανικής αντοχής. Τα μεγέθη αυτά μετρώνται σε μονάδες θερμοκρασίας (C συνήθως) και σε μονάδες δύναμης ή πίεσης (N ή kPa συνήθως) αντιστοίχως.

Όμως αυτό που ενδιαφέρει τελικά σε μια μόνωση ή σε ένα διηλεκτρικό είναι η διατήρηση των μονωτικών ιδιοτήτων και αυτό αναφέρεται γενικά με τον όρο αντοχή. Δηλαδή η αντοχή μιας μόνωσης ή ενός μονωτικού υλικού είναι μια γενικότερη έννοια που εκφράζει ποιοτικά (και όχι ποσοτικά-αριθμητικά) την ικανότητα του υλικού ή της μόνωσης να διατηρεί τις μονωτικές ιδιότητες της στο συγκεκριμένο περιβάλλον καταπόνησης. Ποσοτικοποίηση αυτής της γενικής ικανότητας μπορεί να γίνει με την βοήθεια της έννοιας της αξιοπιστίας. Η αξιοπιστία ενός μονωτικού συστήματος είναι η ικανότητα του να μονώνει υπό ορισμένες συνθήκες καταπόνησης για κάποιο χρονικό διάστημα και εκφράζεται ποσοτικά με την πιθανότητα διατήρησης της μονωτικής ικανότητάς του για το χρονικό διάστημα αυτό.

Είναι προφανές ότι στην έννοια της αντοχής μιας μόνωσης περιέχεται και η έννοια της διάρκειας, δηλαδή του χρονικού διαστήματος για το οποίο η μόνωση διατηρεί τη μονωτική ικανότητά της ενώ υφίσταται κάποιο συνδυασμό καταπονήσεων. Η χρονική διάρκεια αυτή εκφράζεται από το μέγεθος της **διάρκειας ζωής ti** της μόνωσης.

Το τέλος της διάρκειας ζωής μιας μόνωσης καθορίζεται από την χρονική στιγμή της **διάσπασης** της. Η διάσπαση των στερεών διηλεκτρικών αναφέρεται και ως **διατήρηση**, ενώ των αερίων και των υγρών ως **εκκένωση**. Η διάσπαση (εκκένωση) που γίνεται επί της επιφάνειας ενός στερεού διηλεκτρικού το οποίο βρίσκεται εντός αερίου ή υγρού μέσου, αναφέρεται και ως **υπερπήδηση**. Στο επόμενο σχήμα απεικονίζεται η υπερπήδηση ενός μονωτήρα.



Σχήμα 19.Υπερπήδηση μονωτήρα

Η μόνωση η οποία μετά από την διάσπασή της και την εν συνεχεία διακοπή του ρεύματος διασπάσεως ανακτά πλήρως τη μονωτική του ικανότητα που είχε πριν τη διάσπαση, ονομάζεται **επανορθούμενη μόνωση** (π.χ ο ατμοσφαιρικός αέρας). **Μη επανορθούμενη** είναι η μόνωση εκείνη η οποία μετά από μια διάσπαση χάνει τις μονωτικές του ιδιότητες πλήρως ή εν μέρει (π.χ η μόνωση των τυλιγμάτων ενός κινητήρα).

3.5 ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΗΣ ΜΟΝΩΤΙΚΗΣ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ

Η καταπόνηση μιας μόνωσης μπορεί να έχει ως συνέπεια την διάσπαση της, μετά από ένα χρόνο ίση με την διάρκεια ζωής της για την κατασκευή αυτή. Δηλαδή η διάρκεια ζωής εξαρτάται από την καταπόνηση ή τον συνδυασμό των καταπονήσεων οι οποίες δρουν επί της μόνωσης. Οι καταπονήσεις αυτές επιδρούν στα διηλεκτρικά της μόνωσης, προκαλώντας την βαθμιαία χρονική μεταβολή των φυσικοχημικών ιδιοτήτων και ως συνέπεια και των μονωτικών ιδιοτήτων τους κατά τρόπο μη αντιστρεπτό. Αυτή η συνεχής μη αντιστρεπτή αλλοίωση των χαρακτηριστικών, που έχει ως συνέπεια τη συνεχή και μόνιμη μείωση της μονωτικής ικανότητας ενός διηλεκτρικού με τον χρόνο, πριν από την πρόκληση της ολοσχερούς καταστροφής τους με διάσπαση, ονομάζεται **γήρανση** του διηλεκτρικού. Κατ'ακολουθία η γήρανση μιας μόνωσης είναι συνέπεια γήρανσης ενός ή περισσότερων εκ των διηλεκτρικών που την αποτελούν.

Κύριο αποτέλεσμα της γήρανσης ενός διηλεκτρικού είναι η μείωση της διηλεκτρικής αντοχής του E_d και αντίστοιχα της τάσης διάσπασης του U_d . Όταν η τιμή της διηλεκτρικής αντοχής μειωθεί με την γήρανση του διηλεκτρικού και γίνει ελάχιστα μικρότερη από την πεδιακή ένταση καταπόνησης E τότε αυτό θα διασπασθεί. Την χρονική στιγμή $t-dt$, δηλαδή αμέσως πριν την διάσπαση του διηλεκτρικού, η διηλεκτρική αντοχή του γίνεται ίση με την ένταση του πεδίου καταπόνησης

$$E_d(t-dt) = E(t-dt)$$

Αμέσως μετά τη διάσπαση η διηλεκτρική αντοχή του μονωτικού υλικού μηδενίζεται

$$Ea(tl+dt)=0$$

Η μονωτική ικανότητα ενός διηλεκτρικού και κατ' ακολουθία η διηλεκτρική αντοχή του είναι συνυφασμένη με τις φυσικοχημικές ιδιότητες του (π.χ με την τραχύτητα της επιφάνειας του πολυμερούς υλικού που σχηματίζει το εξωτερικό στρώμα ενός συνθετικού μονωτήρα, με τον βαθμό οξειδωσης ενός μονωτικού ορυκτέλαιου). Η μεταβολή των φυσικοχημικών ιδιοτήτων ενός διηλεκτρικού μπορεί σε μερικές περιπτώσεις να μην είναι συνέπεια επιβαλλόμενων καταπονήσεων αλλά επιδράσεων των γειτονικών διηλεκτρικών ή των αγωγών (ή και ημιαγωγών) που συμμετέχουν στην κατασκευή του εξοπλισμού υψηλής τάσης (π.χ η χημική αντίδραση αερίων διηλεκτρικών με μεταλλικά τμήματα των αγωγών ή με ρητίνες της εσωτερικής μόνωσης του εξοπλισμού).

Σε άλλες περιπτώσεις η γήρανση είναι αποτέλεσμα συνδυασμού της επίδρασης των καταπονήσεων με την επίδραση των γειτονικών διηλεκτρικών (π.χ η γήρανση της μόνωσης χαρτιού των τυλιγμάτων ενός μετασχηματιστή είναι αποτέλεσμα των χημικών αντιδράσεων που λαμβάνουν χώρα εξαιτίας της πυρόλησης, της οξειδωσης και της υδρόλησης, οι οποίες επιταχύνονται με την άνοδο της θερμοκρασίας και με την αύξηση της περιεκτικότητας οξυγόνου και υγρασίας στο μονωτικό λάδι εντός του οποίου βρίσκονται τα τυλίγματα).

Όμως η γήρανση των διηλεκτρικών δεν επηρεάζει μόνο την διηλεκτρική αντοχή και την τάση διάσπασης τους, αλλά και κάποια άλλα χαρακτηριστικά μεγέθη τους όπως την γωνία απωλειών δ , την ένταση και την συχνότητα των μερικών εκκενώσεων κλπ. Μετρώντας τα μεγέθη αυτά και τις μεταβολές τους μπορεί αν εκτιμηθεί μέχρι έναν βαθμό η κατάσταση μιας μόνωσης.

Εκτός από την γήρανση, η οποία είναι μη αντιστρεπτή χρονική μεταβολή των ιδιοτήτων των διηλεκτρικών, υπό την επίδραση κάποιων καταπονήσεων ένα διηλεκτρικό (ή μια μόνωση) μπορεί να υποστεί **υποβάθμιση** ή **χειροτέρευση**.

Ως **υποβάθμιση** ορίζεται η προσωρινή μείωση των μονωτικών ιδιοτήτων ενός διηλεκτρικού (ή μιας μόνωσης) υπό την επίδραση καταπονήσεων η οποία εξαφανίζεται μετά την διακοπή τους (π.χ μείωση της διηλεκτρικής αντοχής του χαρτιού ή του μονωτικού λαδιού λόγω υγρασίας).

Ως **χειροτέρευση** ορίζεται η μόνιμη γείωση των μονωτικών ιδιοτήτων ενός διηλεκτρικού (ή μιας μόνωσης) που πραγματοποιείται εντός ενός περιορισμένου χρονικού διαστήματος υπό την επίδραση ορισμένων καταπονήσεων οι οποίες επιβάλλονται κατά την διάρκεια αυτού του χρονικού διαστήματος. Ανεξάρτητα από τις καταπονήσεις που επιδρούν σε μια μόνωση, οι οποίες μπορεί να προκαλέσουν την άμεση καταστροφή της ή την υποβάθμιση, χειροτέρευση, ή γήρανση των διηλεκτρικών της, η καταπόνηση η οποία τελικά θα προκλέσει την διάσπασή της μόνωσης και την εν συνεχεία αστοχία του εξοπλισμού είναι η ηλεκτρική. Για αυτό και η γενικότερη έννοια της αντοχής μιας μόνωσης ουσιαστικά αναφέρεται στην συμπεριφορά της υπό ηλεκτρική καταπόνηση.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

4.1 ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΑ ΥΛΙΚΑ ΜΟΝΩΣΗΣ ΣΤΗΝ ΥΨΗΛΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑ /ΤΗΝ ΤΑΣΗ ΣΤΙΣ ΠΕΡΙΣΤΡΕΦΟΜΕΝΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ

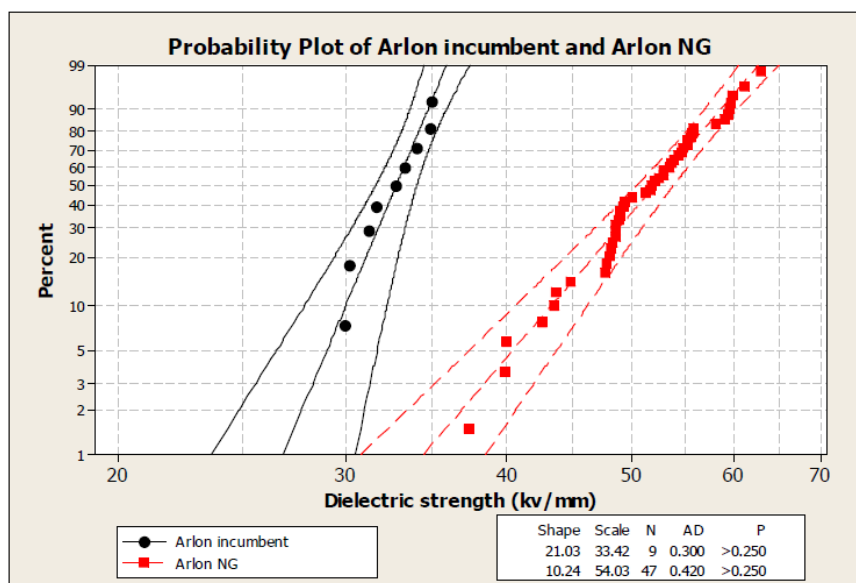
Η υψηλή ταχύτητα, στις στρεφόμενες ηλεκτρικές μηχανές υψηλής τάσης λειτουργεί σε δύσκολα βιομηχανικά περιβάλλοντα. Αυτές οι μηχανές έχουν υψηλότερες απαιτήσεις για τα ηλεκτρικά υλικά μόνωσης από τις συμβατικές περιστρεφόμενες μηχανές. Αυτές οι απαιτήσεις μπορούν να περιλαμβάνουν:

- **Ενισχυμένες ηλεκτρικές ιδιότητες:** Δεδομένου ότι η τάση λειτουργίας είναι υψηλότερη, τα ηλεκτρικά υλικά μόνωσης πρέπει να είναι σε θέση να αντέξουν την υψηλότερη αυτή τάση. Η βελτίωση της διηλεκτρικής αντοχής, η αντοχή τάσης, και η αντίσταση μερικών εκκενώσεων θα οδηγήσουν σε ένα λεπτότερο υλικό μόνωσης. Κατόπιν, η πυκνότητα ισχύος των ηλεκτρικών μηχανών ή η δύναμη ή η αναλογία βάρους μπορεί να αυξηθεί επίσης. Τα λεπτότερα υλικά μόνωσης οδηγούν επίσης σε μια γρηγορότερη θέρμανση και έτσι το ποσοστό μεταφοράς στις μηχανές μπορεί να λειτουργήσει σε πιο χαμηλές θερμοκρασίες. Επιπλέον, εάν η εφαπτομένη απωλειών (ή tanφ που παρέχει μια ένδειξη της διηλεκτρικής απώλειας μέσα στη μόνωση) του μονωτικού υλικού είναι χαμηλότερος, παράγει λιγότερη θερμότητα, και συνεπώς η θερμική πίεση στο υλικό μόνωσης θα μειωθεί.
- **Υψηλότερη θερμική σταθερότητα:** Στη υψηλή ταχύτητα και την τάση, οι στρεφόμενες ηλεκτρικές μηχανές παράγουν περισσότερη θερμότητα από τις συμβατικές μηχανές και επομένως τα ηλεκτρικά υλικά μόνωσης υποχρεούνται να λειτουργήσουν στην υψηλότερη θερμοκρασία. Αυτό απαιτεί ότι τα υλικά της ηλεκτρικής μόνωσης έχουν υψηλότερη θερμική σταθερότητα για να καλύψουν τις λειτουργικές απαιτήσεις της διάρκειας ζωής των περιστρεφόμενων μηχανών. Γενικά, μια θερμική κλάση >H, είναι απαραίτητη για αυτούς τους τύπους των ηλεκτρικών μηχανών.
- **Υψηλότερη θερμική αγωγιμότητα:** Όλα τα μεταλλικά μέρη στις περιστρεφόμενες μηχανές έχουν πολύ υψηλή θερμική αγωγιμότητα ($T_c > 50 \text{ W/mK}$). Τα υλικά μόνωσης βασισμένα στα πολυμερή σώματα είναι ο αδύναμος κρίκος για η μεταφορά θερμότητας από όλα τα πολυμερή σώματα που έχουν τη σχετικά χαμηλή θερμική αγωγιμότητα ($T_c < 0.5 \text{ W/mK}$). Η υψηλότερη θερμική αγωγιμότητα του υλικού μόνωσης μπορεί να βοηθήσει στη μεταφορά της θερμότητας γρηγορότερα και με ελαχιστοποίηση της θερμικής πίεσης στα υλικά μόνωσης. Συνεπώς, οι περιστρεφόμενες μηχανές μπορούν να είναι σχεδιασμένες με μικρότερο μέγεθος, υψηλότερη ταχύτητα και υψηλότερη πυκνότητα ισχύος.

4.2 ΥΛΙΚΑ ΜΟΝΩΣΗΣ ΤΗΣ ΑΡΛΟΝ NG ΒΑΣΙΣΜΕΝΑ ΣΤΗΝ ΣΙΛΙΚΟΝΗ

Το προϊόν 51228R της Αρλόν χρησιμοποιείται ευρέως ως μόνωση στα πηνία των ηλεκτρικών μηχανών. Οι δεκαετίες πραγματικής εμπειρίας έχουν αποδείξει την αξιοπιστία αυτής της ρητίνης, με εμποτισμένη σιλικόνη μόνωσης υαλοβαμβακα. Εντούτοις, σχεδιασμένες βελτιώσεις μπορούν εντυπωσιακά να βελτιώσουν τις ηλεκτρικές ιδιότητες, τη θερμική σταθερότητα και τη θερμική αγωγιμότητα. Οι εξελίξεις της τεχνολογίας έχουν οδηγήσει σε ένα προϊόν μόνωσης των πηνίων που είναι επόμενης γενεάς, που χαρακτηρίζεται ως «Αρλόν NG» σε αυτό το κείμενο. Οι ιδιότητες της «Αρλόν NG» συγκρίνονται με το προϊόν 51228R.

Διηλεκτρική αντοχή: Σε αυτήν την μελέτη, η αντοχή εξετάζεται με τη μέθοδο δοκιμής της Αρλόν--Sqa-tms-020 που είναι παρόμοια με αυτή της ASTM D149. Ο εξοπλισμός δοκιμής είναι Hipotronics πρότυπο 750-2/D149-15A. Και οι δύο «Αρλόν NG» και τα δείγματα της Αρλόν έχουν ωριμασει πλήρως με λαστιχένια φύλλα σιλικόνης (0.25 χιλ. πάχος). Η διηλεκτρική αντοχή (unit=kv/mm) «της Αρλόν NG» είναι πολύ υψηλότερη από αυτή «της απλής Αρλόν», όπως φαίνεται στην πυκνότητα πιθανότητας Weibull του σχήματος 1. Αυτό δείχνει ότι το υλικό μόνωσης με «την Αρλόν NG» μπορεί να εκτελέσει την ίδια λειτουργία με έναν παχύτερο «απλό Αρλόν».



Σχήμα 1 διηλεκτρική αντοχή «απλής μόνωσης Αρλόν» και «της Αρλόν NG»

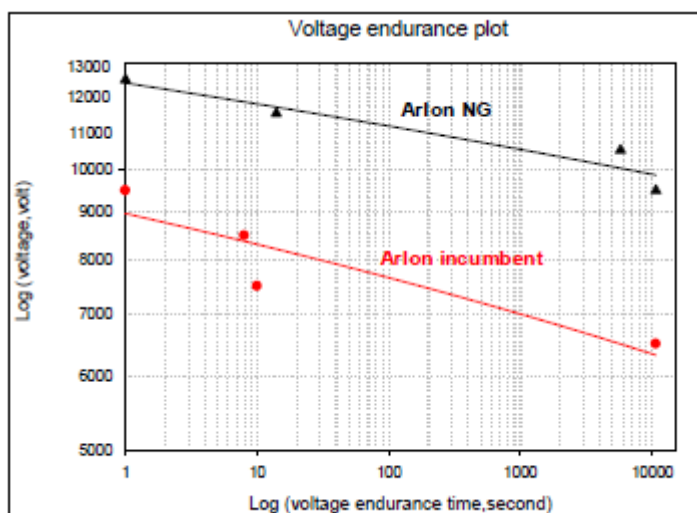
Αντοχή τάσης: Μια δοκιμή αντοχής τάσης είναι πίο κοντα σε μια πραγματική ανάλυση παγκόσμιας εφαρμογής από μια διηλεκτρική διακοπή δοκιμή δύναμης. Το IEC 61251 περιγράφει ότι η σχέση μεταξύ της τάσης και του χρόνου αντοχής τάσης δίνεται από την εξίσωση (1) ως εξής

$$L = cE^n \quad (1)$$

Όπου, «L» είναι χρόνος αντοχής τάσης

«E» είναι τάση
«c» και «n» είναι σταθερές εξαρτώμενες από τη θερμοκρασία και άλλες περιβαλλοντικές συνθήκες.

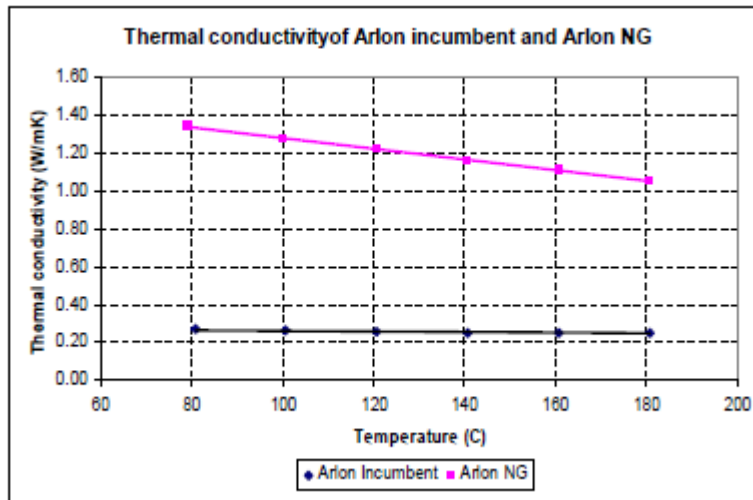
Η δοκιμή αντοχής τάσης σε αυτήν την μελέτη είναι βασισμένη σε ASTM D2275 και το IEC 61251. Το μοντέλο του εξοπλισμού δοκιμής είναι Hipotronics πρότυπο 750-2/D149-15A. Η θερμοκρασία περιβάλλοντος είναι θερμοκρασία δωματίου (~20°C). Η μεγαλύτερη διάρκεια ζωής δοκιμών είναι 178 λεπτά. Και η «Αρλόν NG» και η «απλή μόνωση Αρλόν» είχαν πάχος 0.25 χιλ. Πέντε σημεία εξετάζονται για κάθε τάση. Η μεση τιμή αντοχής της τάσης χρησιμοποιείται ως καταγραμμένο αποτέλεσμα. Τα αποτελέσματα εμφανίζονται στο σχήμα 2. Επίσης η τάση της «Αρλόν NG» μπορεί να διαρκέσει πολύ περισσότερο από την «απλή μόνωση Αρλόν». Αυτό το αποτέλεσμα είναι συνεπές με το αποτέλεσμα της διηλεκτρικής αντοχής. Η υψηλότερη διηλεκτρική αντοχή συσχετίζεται με πιο μακροχρόνια αντοχή τάσης.



Σχήμα 2. Η επιφάνεια της αντοχής τάσης είναι βασισμένη στην εξίσωση (1)

4.3 ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ

Η θερμική αγωγιμότητα αναλύεται χρησιμοποιώντας τη μέθοδο sqa-tms-022 δοκιμής της Αρλόν, η οποία είναι βασισμένη ASTM E1530. Εξοπλισμός δοκιμής - TCA-300. Το σχήμα 3 δείχνει ότι η θερμική αγωγιμότητα «της Αρλόν Το NG» είναι πολύ υψηλότερη από την «απλή μόνωση Αρλόν». Αυτό επιτρέπει στη θερμότητα να μεταφερθεί μακριά από τους αγωγούς χαλκού πολύ γρηγορότερα. Συνεπώς, το υλικό μόνωσης μπορεί να λειτουργήσει σχετικά σε χαμηλότερη θερμοκρασία και έτσι έχει μακρύτερη διάρκεια ζωής. Αυτό αποκτά μεγαλύτερη σημασία για τη υψηλή ταχύτητα/την τάση των περιστρεφόμενων μηχανών που παράγουν περισσότερη θερμότητα από τα συμβατικά περιστρεφόμενα μηχανήματα.



Σχήμα 3 θερμική αγωγιμότητα της «απλής μόνωσης Αρλόν» και «της Αρλόν NG»

4.3.1 ΘΕΡΜΙΚΗ ΣΤΑΘΕΡΟΤΗΤΑ

Η θερμική σταθερότητα χαρακτηρίζεται από τη δύναμη διατήρησης αντοχής, τη διατήρηση επιμήκυνσης, και την χρήση σκληρομέτρου που αλλάζει πριν και μετά από τη θερμική γήρανση στους 300°C σε φούρνο για 24 ώρες. Ο «Αρλόν NG» είναι ειδικά σχεδιασμένος για την πολύ καλύτερη θερμική σταθερότητα από την «απλή μόνωση Αρλόν», όπως φαίνεται στον πίνακα 1. Αυτό δείχνει ότι «η Αρλόν NG» μπορεί να έχει μια πολύ μακρύτερη διάρκεια ζωής από την «απλή μόνωση Αρλόν». Αν και δεν συγκρίνονται με άλλα υλικά όπως την βασισμένη στον πολυεστέρα εποξική μόνωση. Τα υλικά μόνωσης που είναι βασισμένα στη σιλικόνη είναι γνωστά για την άριστη θερμική σταθερότητα τους.

Πίνακας 1 το θερμικό αποτέλεσμα της δοκιμής σταθερότητας της «απλής μόνωσης Αρλόν» και «της Αρλόν NG»

Property change after 300°C*24hr	Arlon incumbent	Arlon NG
Tensile strength retention (%)	63%	102%
Elongation retention (%)	4%	30%
Durometer change (Shore A)	+27	+4

4.4 ΝΕΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΜΟΝΩΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ ΓΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΜΟΝΩΣΗΣ ΤΩΝ ΠΕΡΙΣΤΡΕΦΟΜΕΝΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ

Ηλεκτρικά μονωτικά υλικά για τα συστήματα μόνωσης μιας υπερτροφοδοτούμενης μηχανής, μιας γεννήτριας υδροηλεκτρικού σταθμού και ηλεκτρικών μηχανών υψηλής τάσης.

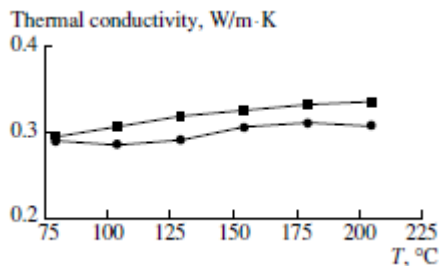
Προκαταρκτικά εμποτισμένες ταινίες γυαλί-μίκας έχουν αντοχή στη θερμότητα κλάσης F, τα οποία παράγονται προς το παρόν από το HC κάτω από το εμπορικό σήμα Elmicatherm® 1 (52409 και 55409) για την τεχνολογία της κατασκευής της μόνωσης με την πίεση και που χαρακτηρίστηκαν ως Elmicatherms είναι ιδιαίτερα ανταγωνιστικά με τους κύριους παγκόσμιους παραγωγούς ηλεκτρικών μονωτικών υλικών που βασίζεται στα τεχνολογικά χαρακτηριστικά τους. Η εισαγωγή της θερμο-αντιδραστικής μόνωσης Elmicatherm επέτρεψε τα εξής: Μια υψηλή, μακροπρόθεσμη ηλεκτρική δύναμη για τη μόνωση πλαισίων εξασφαλίστηκε.

Η τιμή του διηλεκτρικού παράγοντα διάχυσης σε υψηλές θερμοκρασίες μειώθηκαν αρκετά και με αυτό τον τρόπο ικανοποίησαν τις αυστηρές απαιτήσεις σχετικά με το χρόνο (με μια "διάρκεια" μέχρι 400 ώρες) κάτω από την ταυτόχρονη επιρροή των εναλλασσόμενων πεδίων με ισχυρά πλεονεκτήματα μια βιομηχανική συχνότητα 10 MV/m, και με θερμοκρασία 120 ° C στη μόνωση.

Η ανοχή για την επιρροή των θερμοκυκλικών φορτίων κάτω από τις επαναλαμβανόμενες αλλαγές στη θερμοκρασία της μόνωσης που κυμαίνονται από 40-155 °C εξασφαλίστηκε. Τα δύο τελευταία είναι οι απαραίτητες απαιτήσεις για τις εξαγωγές υπερτροφοδοτούμενων και γεννητριών υδροηλεκτρικών σταθμών. Το πραγματικό επίτευγμα της αντοχής της θερμότητας κλάσης F μέσα στη μόνωση εξασφαλίστηκε, και η οποία επιτρέπει αποτελεσματικά την αύξηση της θερμοκρασίας λειτουργίας και, συνεπώς για να μειώσουν τις διαστάσεις μηχανών ή για να αυξήσουν την μονάδα ισχύος.

Τα πλεονεκτήματα της μόνωσης Elmicatherm είναι η σκλήρυνση των βασικών προτύπων των γεννητριών υδροηλεκτρικών σταθμών που κανονικοποιεί το πάχος του τυλίγματος της μόνωσης ανάλογα με την τάση. Έτσι το επίτευγμα του να καταστεί η ένταση του πεδίου στο εσωτερικό της μηχανής ίση με 3.0 MV/m έχει επίσης ολοκληρωθεί. Η επιτυχής εφαρμογή της νέας μόνωσης στην θέση της θερμικής mica της βασικής μόνωσης στην παραγωγή του τυλίγματος των ράβδων υπερτροφοδοτούμενων και των υδροηλεκτρικών σε JSC. Οι μηχανές δύναμης στον κλάδο ηλεκτρικής ενέργειας εμφανίζουν εκείνο το Elmicatherms που ταιριάζει πλήρως στις απαιτήσεις για τη μόνωση υψηλής τάσης.

Εντούτοις, ισχυρές τουρμπογεννήτριες με αερόψυξη, οι όποιοι σχεδιάζονται αυτήν την περίοδο, απαιτούν ποιοτικότερα ηλεκτρικά μονωτικά υλικά βασισμένα σε μια σειρά παραγωγής δεικτών για την μόνωση του στάτη και του ρότορα στα τυλίγματα.



Σχήμα 4. Η εξάρτηση του συντελεστή της θερμικής αγωγιμότητας από τη μόνωση στη θερμοκρασία για τις παραλλαγές:

- Elmicapor 533099-UT (διαπότιση σε PK-11)
- LSKN 160 TT (διαπότιση σε PK-11).

Υλικά βασισμένα σε χαρτί Nomex® αραμιδίου (προεμποτισμένα Π-AKN), καθώς επίσης και περιστροφικά κιβώτια αυλακώσεων βασισμένα στο γυαλί ινών αραμιδίου και χαρτι έχουν κυριαρχήσει για την μόνωση του ρότορα. Εφαρμόζονται τα υλικά κλάσης N.

Είναι σημαντικό να αυξηθεί η μετάδοση της θερμότητας από ένα τύλιγμα στο στάτη σιδήρου για τη μόνωση των πλαισίων του τυλίγματος του στάτη. Υπάρχουν διάφορες λύσεις εφαρμοσμένης μηχανικής για αυτόν το λόγο, συμπεριλαμβανομένων των εξής:

- για να μειωθεί το πάχος του τυλίγματος του στάτη για την μόνωση πλαισίων.
- για να αυξηθεί η θερμική αγωγιμότητα του συντελεστή μόνωσης.
- για την αύξηση της θερμοκρασίας σε ένα τύλιγμα.

Η πρώτη λύση απαιτεί μια μόνωση πλαισίων με μεγάλης αξίας ηλεκτρικής αντοχής, δηλ., αύξηση του ηλεκτρικού πεδίου σε ένα τύλιγμα από το επίπεδο 3.0 MV/m όπως επιτυγχάνεται με την Elmicatherm 3.5 MV/m.

Πίνακας 2. Τα κύρια χαρακτηριστικά της Elmicatherm 52419 ταινία

Nominal thickness, mm	0.14	0.18
Surface density, g/m ²	185 ± 25	260 ± 40
The contents of the components, %:		
mica, no less than	40	40
binding compound	36 ± 5	36 ± 5
volatile matter, no more than	1.5	1.5
Breaking load at stretching, N/cm, no less than	130	130
Electric strength, kW/mm, no less than	25	25
tan δ, no more than:		
in the initial state	0.02	0.02
at temperature of 180°C	0.10	0.10

Η δεύτερη λύση είναι να εφαρμοστεί η μόνωση με αυξανόμενο συντελεστή της θερμικής αγωγιμότητας. Ο θερμοαντιδραστικές μονώσεις Elmicatherm και ο μονόλιθος έχουν συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας 0.28 W/m *K.

Η τρίτη λύση είναι να εφαρμοστεί η μόνωση κλάσης N. Σύμφωνα με τα στοιχεία [3], η μόνωση μίκας με συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας 0.50-0.55 W/m*K έχει αναπτυχθεί με τις προσθήκες των ανόργανων στερεών μορίων. Τα υλικά πλήρωσης προστίθενται κατά τη διάρκεια της παράγωγής της μη επεξεργασμένης ταινίας μίκας, ενώ η μόνωση παράγεται χρησιμοποιώντας μια μέθοδο διαπότισης ύπο πίεση κενού.

Η έρευνα που πραγματοποιείται για τη δημιουργία των ταινιών μίκας με τους συντελεστές της θερμικής αγωγιμότητας να έχουν αυξηθεί οδηγημένοι στην έξοδο μιας μη επεξεργασμένης ταινία μίκας κάτω από το εμπορικό σήμα Elmicapor ® 533199-UT. Η ταινία αυτή γονιμοποιήθηκε με την εποξική ένωση PK-11. Η μόνωση παρήχθη από την τεχνολογία (μονόλιθος) monolith-2. Η

μόνωση μονόλιθος-2 παρήχθη σύμφωνα με τις προϋποθέσεις LSKN-160TT σειράς ταινιών. Το σχήμα 4 παρουσιάζει την εξάρτηση του συντελεστή της θερμικής αγωγιμότητας της μόνωσης μονόλιθος-2 με τη θερμοκρασία. Πρέπει να σημειωθεί ότι το επίπεδο της θερμικής αγωγιμότητας του συντελεστή στη νέα ταινία είναι ίση με 0.33 W/m*K. Το οποίο δεν καλύπτει τις καθορισμένες απαιτήσεις, επομένως η παρούσα ανάπτυξη λειτουργεί προς τη λήψη μιας αξίας 0.4-0.45 W/(m*k).

Η ανάπτυξη μιας παρτίδας με προκαταρκτικό εμποτισμό που προορίζονται για την εφαρμογή της κλάσης N στο πλαίσιο των τυλιγμάτων του στάτη έχουν αναπτυχθεί και έχουν παραχθεί. Οι βασικές ιδιότητες που έχει η ταινία παρουσιάζονται στον πίνακα 2. Η ταινία προορίζεται για να παραγάγει τη μόνωση με την χρήση της θερμής πίεσης και την χρησιμοποίηση του ήδη υπάρχοντος τεχνολογικού εξοπλισμού. Η νέα ταινία προς το παρόν εξετάζεται.

Μια μη επεξεργασμένη Elmicapor® 523119 ταινία μίκας περιέχει μια τροποποιημένη polyethyleneterephthalate ταινία στην ITS σύνθεση έχει ήδη αναπτυχθεί. Το έργο εκτελέστηκε με σκοπό την αύξηση της έντασης της ηλεκτρικής μόνωσης του πλαισίου. Ο ρόλος της ταινίας polyethyleneterephthalate στην αύξηση της μακροπρόθεσμης ηλεκτρικής δύναμης στην εισαγωγή της στη σύνθεση μίκας είναι γνωστός [4]. Κατά τη διάρκεια της μακροπρόθεσμης εκμετάλλευσης της μόνωσης, PET-E η ταινία μπορεί να υποβληθεί στη μερική αποκόλληση από το υπόστρωμα, αν και αυτή η επίδραση δεν έχει ανακαλυφθεί στην πράξη μέχρι τώρα. Επομένως, πριν παράγει τη μη επεξεργασμένη ταινία μίκας, η PET-E ταινία, σε αυτό το πείραμα, τροποποιήθηκε σε ένα πλάσμα σιγοκαίγοντας, με χαμηλή συχνότητα απαλλαγής προκειμένου να αυξήσουν την πρόσφυση της επαφής των επιφανειών. Ο κεντρικός αγωγός του elmilapor ® η ταινία 523119 δίνεται μέσα στον πίνακα 3.

Δέκα ομοιώματα με ένα υπολογισμένο πάχος μόνωσης 2 mm. έγινε προκειμένου να πραγματοποιηθεί η δοκιμή στην ταινία (10 στρώματα δημιουργήθηκαν που ήταν το μισό από πλάτος της ταινίας με την ταινία που τοποθετείται στην κορυφή) Και οι διαστάσεις του χαλκού ήταν 6×30×800 mm.

Thickness, mm	0.10 ± 0.02	0.11 ± 0.03
Surface density, g/m²	130 ± 12	140 ± 14
Mass share of components, g/m²		
mica (calcined muscovite)	65 ± 4	65 ± 4
glass fiber cloth	27 ± 3	38 ± 4
PET-E film	28 ± 2	28 ± 2
binding compound	10 ± 3	10 ± 3
Breaking load at stretching, N/cm	>80	>130
Mass share of accelerator, mg/m²	360 ± 80	360 ± 80
Breakdown voltage, V	>5.0	>5.0
Rigidity, N/m	<45	<50

Πίνακας 3. Τα κύρια χαρακτηριστικά μη επεξεργασμένων ταινιών Elmicapor 523119.

Model No.	Average dimensions before impregnation, mm	Average dimensions after impregnation, mm	Thickness of the finished insulation, mm
30	9.5	9.9	2.0
44	–	10.0	2.0
55	9.7	10.1	2.0
98	–	10.1	2.1
100	–	9.9	1.9
104	9.6	10.0	2.0
118	9.6	10.1	2.0
The average value			2.0

Πίνακας 4. Οι γεωμετρικές διαστάσεις της μόνωσης μέσα από τα ομοιώματα των ράβδων μετά από την διαπότιση υπό πίεση κενού.

Model No.	20°C				130°C				155°C			
	2 kV	4 kV	6 kV	8 kV	2 kV	4 kV	6 kV	8 kV	2 kV	4 kV	6 kV	8 kV
98	0.33	0.43	0.49	0.55	4.84	4.92	5.01	5.12	6.74	6.88	7.18	7.30
141	0.35	0.37	0.46	0.54	4.72	4.79	4.91	5.00	6.71	6.82	7.20	7.25

Πίνακας 5. Η εξάρτηση του συντελεστή απωλειών $\tan\delta$ σε Elmicaror® ταινία 523119 στη θερμοκρασία και την τάση.

Model No.	d , mm	Parameter	U_{test} , MV/m				
			16	12	8	4	2
98	2.05	U_{max} , mV	920	900	800	5	5
		$U_{average}$, mV	40	33	18	0.3	0.3
		q_{pd} , pC	1012	990	880	6	6
		I_{pd} , mA	2.68	2.21	1.21	0.02	0.02
141	2.1	U_{max} , mV	660	700	660	6	5.6
		$U_{average}$, mV	29	24	13	0.3	0.3
		q_{pd} , pC	726	770	726	7	6
		I_{pd} , mA	1.94	1.61	0.87	0.02	0.02

Πίνακας 6. Οι μετρήσεις των μερικών εκφορτίσεων των ομοιωμάτων ράβδων με τη μόνωση σε Elmicaror® ταινία 523119.

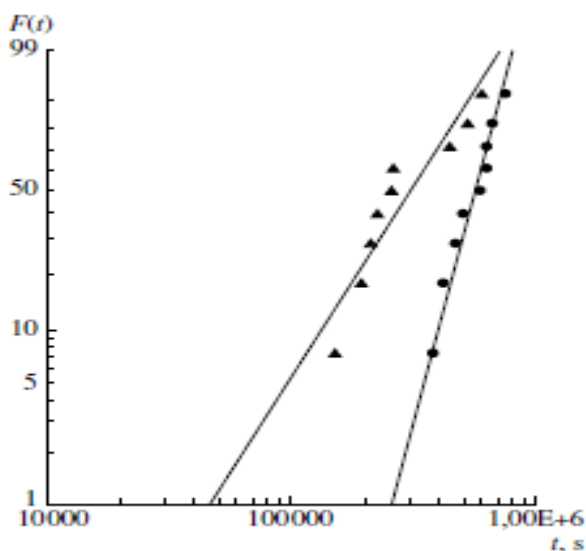
Οι μπάρες τροφοδότησης χαλκού μονώθηκαν σε μια εργαστηριακή μηχανή. Οι μεγάλες και οι μικρές πτυχές των ομοιωμάτων ήταν ενωμένα με τα (πλακέτες). Τα ομοιώματα υποβλήθηκαν έπειτα σε πίεση με σύνθετους εμποτισμούς κενού PK-11 και στον τρόπο λειτουργίας για τη μόνωση μονόλιθος-2. Οι γεωμετρικές διαστάσεις των ράβδων και το πάχος της μόνωσης δίνεται στον πίνακα 4

Οι τιμές της $\tan \delta$ σε θερμοκρασίες 20, 130, και 155 °C Το καθορίστηκαν στα έτοιμα ομοιώματα ράβδων (Πίνακας 5). Οι μερικές εκφορτίσεις μετριούνται στο πεδίο τιμών με δύναμη 16 MV/m και δίνεται στον πίνακα 6. Για να εξεταστεί η μόνωση για τη μακροπρόθεσμη ηλεκτρική δύναμη, τα ομοιώματα ράβδων έγιναν σε Elmicaror ® 523119 η ταινία και ο τμηματικός περιορισμός των ταινιών ISKN-135SPI PET-E μια ταινία σε σύνθεση μίκας.

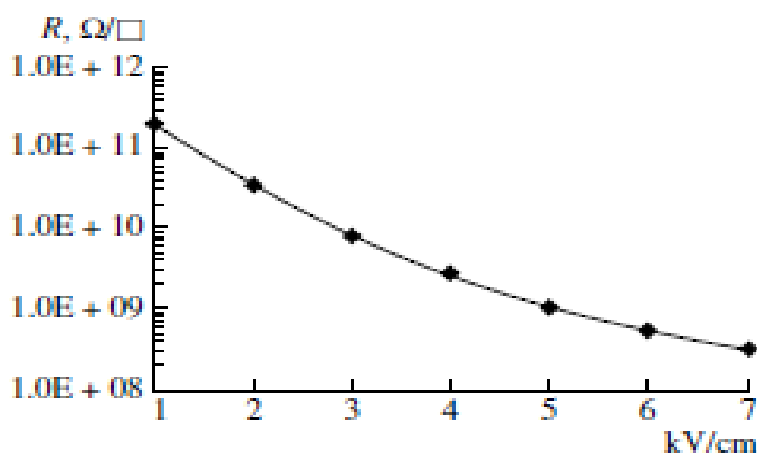
Το σχήμα 6 παρουσιάζει τις γραφικές παραστάσεις της στατιστικής κατανομής της διάρκειας ζωής, πριν από την βλάβη της μόνωσης.

Δοκιμή της μόνωσης των ομοιωμάτων ράβδων Elmicaror ® η ταινία 523119 εμφανίζει τα εξής:

- Η $\tan \delta$ έχει χαμηλές τιμές σε θερμοκρασίες μέχρι 155 °C
- Η αύξηση της $\tan \delta$ έχει μια ελάχιστη τιμή
- Τα επίπεδα μερικής εκφόρτισης αντιστοιχούν σε κανόνες για τη μόνωση υψηλής τάσης
- Ο λειτουργών χρόνος μη αποτυχίας πριν από τη μόνωση σε επίπεδο πιθανότητας 63% ανέρχεται σε 168 ώρες σε Elmicaror ταινία ® 523119 και 99 ώρες πάνω σε LKSN-135SPI ταινία.



Σχήμα 6. Η κατανομή του χρόνου κατά Weibull πριν από τη βλάβη της μόνωσης. $E = 15 \text{ MV/m}$, 50 Hz για τις παραλλαγές: - σε Elmicaror ® ταινία 523119 (παραλλαγή 1: $\beta_1=5051$, $\eta_1=6.04 \text{ E}+5$). Και σε LKSN-135 SPI ταινία (παραλλαγή 2: $\beta_2=2.28$, $\eta_2=3.57 \text{ E}+5$).



Σχήμα 7 Η εξάρτηση της ηλεκτρικής αντίστασης LPP-1000 ταινία στη σταθερή ισχύ ηλεκτρικών πεδίων.

Κατά συνέπεια, η μακροπρόθεσμη ηλεκτρική αντοχή σε Elmicapor® ταινία 523119 στην τροποποιημένη PET-E ταινία ουσιαστικά αυξάνει την αξία της τμηματικής ταινίας IKSΝ-135SP1. Αυτή τη στιγμή η ταινία Elmicapor® 523119 είναι δοκιμασμένη σε φυσικό μέγεθος ράβδων στροβιλογεννητριών.

4.5 ΜΟΝΩΣΗ ΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ

Ένας μονωτής αναφέρεται σε ένα μη αγωγιμο υλικό ή σε ένα μονώτικο υλικό με μια πολύ χαμηλή αγωγιμότητα. Ένα σύστημα μόνωσης περιλαμβάνει τα μονώτικα υλικά και τις αποστάσεις μόνωσης. Η βασική λειτουργία της μόνωσης είναι να χωριστούν τα συστατικά των διαφορετικών ηλεκτρικών δυνατοτήτων ή των διαφορετικών ηλεκτρικών κυκλωμάτων. Περαιτέρω, οι μονωτές βελτιώνουν τη αντοχή των τυλιγμάτων και πρέπει επίσης να ενεργήσουν ως αγωγοί θερμότητας μεταξύ του τυλιγματος και του περιβαλλοντος, και πρέπει να προστατεύσουν το τυλίγμα από εξωτερικούς παραγοντες όπως ο ρύπος, η υγρασία και οι χημικές ουσίες.

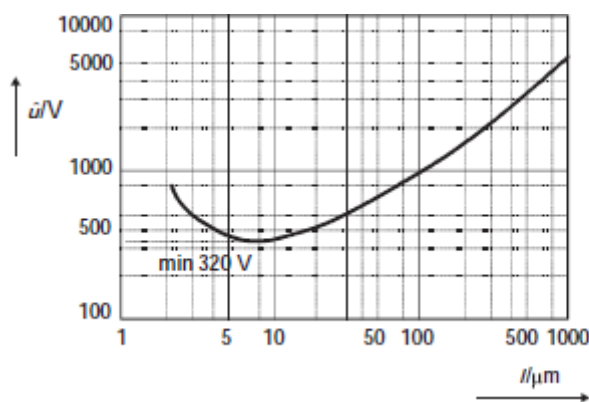
Στις ηλεκτρικές μηχανές, υπάρχουν χαρακτηριστικές αποστάσεις μόνωσης τριών τύπων. Κατ' αρχάς, μια εκκαθάριση στον αέρα είναι απλά ένα κενό αέρα μεταξύ των αντικειμένων, η δύναμη μόνωσης των οποίων καθορίζεται από την απόσταση μεταξύ των αντικειμένων, της μορφής τους και της κατάστασης του αέρα. Μια εκκαθάριση στον αέρα μπορεί να καθοριστεί από μονωμένες ή από μη μονωμένες επιφάνειες. Σε ορισμένες περιπτώσεις, το μέσο της απόστασης μόνωσης, που ταυτόχρονα ενεργεί ως ψυκτικό μέσο, μπορεί να είναι ένα αέριο εκτός από τον αέρα. Στην περίπτωση ενός ομοιογενούς ηλεκτρικού πεδίου, η τάση διακοπής εξαρτάται από το πλάτος του κενού αέρα σύμφωνα με τη Paschen καμπύλη, σχήμα 8.

Ο νόμος Paschen ουσιαστικά δηλώνει ότι τα χαρακτηριστικά διακοπής ενός χάσματος είναι μια λειτουργία του προϊόντος του αερίου πίεσης και το μήκος χάσματος. Το σχήμα 8. εμφανίζει μια ειδική περίπτωση με σταθερή την πίεση. Ο αέρας σε μια κατασκευή μόνωσης είναι συχνά επιρρεπείς σε μερικές εκκενωσεις. Αυτές οι εκκενωσεις πραγματοποιούνται μέσα στην κατασκευή μόνωσης, ειδικά σε σημεία όπου τα υλικά με διαφορετικές διαπερατότητες είναι συνδεδεμένα παράλληλα. Αυτό πραγματοποιείται παραδείγματος χάριν σε μια μόνωση που εμπεριέχει αεροφυσαλίδες στη μονώτικη ρητίνη. Η διηλεκτρική αντοχή της

φυσαλίδας αέρα είναι πολύ μικρότερη από η ίδια τη ρητίνη, και οι μικρές μερικές εκκενωσεις πραγματοποιούνται μέσα στην φυσαλίδα αέρα. Η ευαισθησία για αυτές τις εκκενωσεις μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας την καμπύλη Paschen. Εάν υπάρχει 500V πέρα από μια αεροφυσαλίδα 10 μm ($E = 50 \text{ MV/m}$), οι μερικές εκκενωσεις θα πραγματοποιηθούν. Η μόνωση αρχίζει να αλλειώνεται σε ισχύ σε αυτά τα σημεία και τελικά, οι μερικές εκκενωσεις μπορούν να καταστρέψουν τη μόνωση εάν τα υλικά που επιλέγονται δεν αντεχουν τις μερικές εκκενωσεις.

Η μίκα χρησιμοποιείται στις υψηλές τάσεις μονώσεις δεδομένου ότι ανέχεται τις μερικές εκκενωσεις χωρίς να επιδεινωθεί. Αυτές οι παροχές μετατροπής ηλεκτρικού ρεύματος μπορούν να προκαλέσουν αυτές τις μερικές εκκενωσεις και στις μηχανές χαμηλής τάσης, ειδικά στην πρώτη στροφή του τυλίγματος λόγω του ανομοιόμορφου τμήματος της γρήγορης-αυξανόμενης τάσης στο τυλίγμα.

Δεύτερον, μια απόσταση μόνωσης που δημιουργείται από τη στερεά μόνωση αποτελείται κυρίως από τους στερεούς μονωτές, στους οποίους το ηλεκτρικό πεδίο δεν είναι προσαρμοσμένο κατά μήκος της συνδεσης των μονοτών. Σε αυτήν την περίπτωση, η δύναμη μόνωσης καθορίζεται από το πάχος της μόνωσης και από τη σχετική διαπερατότητα του μονώτικου υλικού.



Τρίτον, ένα μήκος ερπυσμού είναι μια απόσταση μόνωσης στην οποία ένα γυμνό υπό τάση μέρος συνδέεται με ένα αγωγίμο ή μονωμένο συστατικό σε μια άλλη ηλεκτρική δυνατότητα, όπως το γειωμένο πλαίσιο της μηχανής. Έπισης έχουμε μια απόσταση μόνωσης ερπυσμού όταν ένα υπό τάση μέρος είναι δεν είναι ιδιαίτερα μονωμένο και έτσι μπορούν να προκύψουν οι εκκενωσεις στην επιφάνεια ή μια ανάφλεξη πυρκαγιάς στο μήκος ερπυσμού, εάν το αποτελεσματικό ηλεκτρικό πεδίο έχει ένα συστατικό παράλληλο στην εν λόγω επιφάνεια. Χαρακτηριστικά, ένα τέτοιο σημείο εμφανίζεται σε μια ηλεκτρική μηχανή στην επιφάνεια της μόνωσης των αυλακώσεων ακριβώς έξω από τον πυρήνα σιδήρου.

Ένα ανοικτό μήκος ερπυσμού μπορεί να συλλέξει το ρύπο ή την υγρασία που μπορούν να παραγάγουν τα ρεύματα και τις εκκενωσεις ερπυσμού στην επιφάνεια της μόνωσης. Στις μηχανές κάτω από 1000V, τα ρεύματα ερπυσμού είναι ένας παράγοντας κινδύνου. Με τις υψηλές τάσεις, οι εκκενωσεις επιφάνειας μπορούν επίσης να βλάψουν την μόνωση. Η αντοχή ενός υλικού περιγράφει τη δυνατότητα του υλικού να αντισταθεί στο σχηματισμό μιας ανθρακωμένης διαδρομής όταν εφαρμόζεται μια υψηλή τάση σε αυτόν. Η αντοχή ενός μονώτικου υλικού καθορίζεται από το Comparative Tracking Index (CTI). Δεδομένου ότι η αντοχή του υλικού καθορίζεται από την τάση η μονάδα CTI είναι το βολτ. Η μέθοδος δοκιμής καθορίζεται παραδείγματος χάριν στα πρότυπα IEC 600112.

Σε ένα ηλεκτρικό κύκλωμα, πάντα πρέπει να υπάρχει μόνωση, η οποία λαμβάνει κάποιο χώρο. Αυτό είναι ένα γεγονός που πρέπει να ληφθεί υπόψη για τις διαστάσεις

του μαγνητικού κυκλώματος και το τύλιγμα. Η πραγματική μόνωση είναι πάντα ελαφρώς αγώγιμη, και μπορεί να βλαφθεί από την ηλεκτρική, θερμική, μηχανική ή περιβαλλοντική πίεση, ή από τη χημική επίθεση. Οι περιβαλλοντικές πιέσεις περιλαμβάνουν παραδείγματος χάριν την υγρασία, λειαντικά μόρια στον αέρα, το ρύπο και την ακτινοβολία. Ένα μονώτικο υλικό πρέπει να έχει μια ικανοποιητική αντίσταση τάσης για να αποφύγει τις αναφλέξεις στη δοκιμή τάσης ή όταν εκτίθεται σε υπερταση. Η εκτίμηση των πιέσεων στην οποία η μόνωση μπορεί να εκτεθεί κατά τη διάρκεια της ζωής της και να διαστασιολογήσει τη μόνωση βασισμένη σε αυτήν την ανάλυση καλείται συντονισμός μόνωσης.

Η αγωγιμότητα της μόνωσης και οι διηλεκτρικές απώλειες πρέπει να παραμείνουν χαμηλές κατά τη διάρκεια της λειτουργίας. Η μόνωση πρέπει να είναι θερμικά ανθεκτική στις βραχυπρόθεσμες υπερφορτίσεις κατά τη διάρκεια της λειτουργίας της και επίσης στη συσσωρευτική επιμηκυνση της εργασιακής της ζωής (γήρανση) που προκαλείται από τις προαναφερθείσες πιέσεις. Αν και αυτή τη στιγμή υπάρχουν εκατοντάδες ή ακόμα και χιλιάδες κατάλληλες εναλλακτικές λύσεις για τη μόνωση των υλικών, τα πιο κοινά μονώτικα υλικά στις ηλεκτρικές μηχανές είναι: η μίκα, οι ταινίες πολυεστέρα και οι εποξικές ρητίνες πολυεστέρα. Τα υλικά μόνωσης είναι κάπως λιγότερο κοινά στις ηλεκτρικές μηχανές και είναι υλικά φτιαγμένα από ένα πολυεστέρα (Dacron, Terylene, Diolen, Mylar, κ.λπ.), ταινίες (Kapton) και ρητίνες πυριτίου που χρησιμοποιούνται στον εμποτισμό.

4.5.1 ΜΟΝΩΣΗ ΤΩΝ ΠΕΡΙΣΤΡΕΦΟΜΕΝΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ

Η μόνωση μπορεί να διαιρεθεί κατά προσέγγιση σε δύο βασικές κατηγορίες: μόνωση ως προς τη γείωση και μόνωση αγωγών. Η λειτουργία της μόνωσης ως προς τη γείωση είναι να χωριστούν εκείνα τα συστατικά που μπορούν να μην είναι σε γαλβανική επαφή η μια με την άλλη και να χωρίζει με γαλβανισμό το πηνίο από τον πυρήνα σιδήρου της μηχανής. Η μόνωση αγωγών χωρίζει τα καλώδια και τις στροφές ενός πηνίου. Συνήθως, τα πρότυπα δεν είναι τόσο υψηλά για τη μόνωση αγωγών όσο είναι για τη μόνωση γείωσης, και επομένως το πρώτο είναι συνήθως πιο λεπτό από τα τελευταία. Συνεπώς, ένας αγωγός ή μια μόνωση (στροφή προς στροφή) είναι συνήθως, και στις μικρές μηχανές ειδικότερα, ένα λουστράρισμα στο καλώδιο.

Οι βασικοί τύποι μονώσεων είναι:

- μόνωση των αυλακώσεων και η αυλάκωση πιο κοντά
- σε κάθε φασή, μόνωση στην αυλάκωση και στο τέλος του πηνίου
- μόνωση των τυλιγμάτων των πολων
- μόνωση των μολύβδων σύνδεσης και των τερματικών
- εμποτισμός με βερνίκι και ρητίνη
- βερνίκι επιφάνειας και προστατευτικό χρώμα.

Το εξωτερικό στρώμα του μονωτή αυλακώσεων πρέπει να έχει μια καλή μηχανική δύναμη, δεδομένου ότι οι αιχμηρές άκρες μπορούν να εμφανιστούν στην αυλάκωση. Μια ταινία πολυεστέρα, παραδείγματος χάριν, είναι ένα κατάλληλο υλικό για τη μόνωση των αυλακώσεων. Εάν δύο μονώτικα υλικά είναι στην αυλάκωση, το εσωτερικό στρώμα επιλέγεται συνήθως για να είναι aramid χαρτί δεδομένου ότι έχει τις καλύτερες θερμικές ιδιότητες αντίστασης και

εμπότισης από την ταινία πολυεστέρα. Τα χαρτια Aramid απορροφούν αποτελεσματικά τη ρητίνη, και η ρητίνη καθορίζεται καλά στην επιφάνεια έναντι με τις επιφάνειες πολυεστέρα που είναι στιλπνές και μη πορωδης επιφανειες. Στα φαση προς φάση διαστήματα, τα εύκαμπτα (όπως το πανί) υλικά μόνωσης επιλέγονται για τα τυλίγματα των περιελίξεων. Όταν απαιτείται μια δύναμη υψηλής τάσης, τότε χρησιμοποιείται η μίκα, και όταν απαιτείται μια υψηλή μηχανική δύναμη, η θερμοπλαστική ενισχύεται με το υαλονημα που χρησιμοποιείται.

Η mica είναι μια ανόργανη φυσική ουσία που εμφανίζεται συνήθως σε βραχώδες υπόστρωμα. Η mica ανήκει στο μονοκλινικό σύστημα, και αποτελείται από λεπτές φλοίδες του tetrahedra πυριτικών αλάτων που είναι ελαστικές και διαφανείς. Αυτά τα φύλλα πυριτικών αλάτων αποτελούνται από τα διασυνδεδεμένα δαχτυλίδια έξι μελών, τα οποία διαμορφώνουν τη χαρακτηριστική δομή συμμετρίας ψευδοεξαγωνων (pseudo-hexagonal) της mica.

Για τα προηγούμενα εκατό έτη η mica είναι ένα σημαντικό συστατικό στη μόνωση των μηχανών υψηλής τάσης, και αυτο οφειλεται κυρίως στην άριστη μερική δύναμη εκκενωσης της. Χημικά, η mica αποτελείται από το κάλιο, το πυριτικό άλας αλουμινίου ή κάποιο άλλο σχετικό μετάλλευμα. Τα κρύσταλλα της mica περιλαμβάνουν τα στρώματα των λεπτών φλιδών ή των φύλλων που μπορούν να χωριστούν εύκολα το ένα από το άλλο. Αυτή η δομή κρυστάλλου επιτρέπει στις φλιδες να χωριστούν σε λεπτές λωρίδες που είναι εύκαμπτες και έτσι είναι κατάλληλες ως υλικό μόνωσης για τις ηλεκτρικές μηχανές.

Η θερμική αντοχή της mica είναι πολύ υψηλή. (Δείτε επίσης τις θερμικές κλάσεις που παρουσιάζονται στον πίνακα.7.) Στο χαμηλότερο, οι ιδιότητες της mica αρχίζουν να χάνουν το νερο του κρυστάλλου τους σε μια θερμοκρασία 500 C, αν και μερικές ιδιότητες υπομένουν ακόμη και επάνω από 1100 C.

Πινάκας 7 Θερμικές κλάσεις της μόνωσης των υλικών. Προσαρμοσμένος από το IEC 60085, IEC 60034-1 προτύπων.

Thermal class	Previous designation	Hot spot allowance/°C	Permitted design temperature rise/K, when the ambient temperature is 40 °C	Permitted average winding temperature determined by resistance measurement/°C
90	Y	90		
105	A	105	60	
120	E	120	75	
130	B	130	80	120
155	F	155	100	140

Για τις ηλεκτρικές μηχανές, αυτές οι τιμές είναι περισσότερο από επαρκείς, δεδομένου ότι οι υψηλότερες επιτρεπόμενες θερμοκρασίες για τα μέρη των μηχανών είναι συνήθως περίπου 200 C στο μέγιστο. Η mica έχει άριστη χημική αντίσταση και είναι ανθεκτική στο νερο, τα αλκάλια, τα διάφορα οξέα και τους κοινούς διαλύτες. Μόνο το θειικό οξύ και το φωσφορικό οξύ διαλύουν τη mica. Όμως δεν αντιστέκεται στο πετρέλαιο, επειδή το πετρέλαιο διαπερνά τις φλιδες του που χωρίζουν την μια από την άλλη.

Η διηλεκτρική δύναμη της mica είναι υψηλή, οι διηλεκτρικές απώλειες είναι χαμηλές και η αντίσταση επιφάνειας είναι υψηλή. Τα ρεύματα ερπυσμού δεν την βλάπτουν και αντιστέκεται στα αποτελέσματα των μερικών εκκενωσεων πολύ καλύτερα από τους καλύτερους οργανικούς μονωτές. Επομένως, η mica είναι σχεδόν ένα απαραίτητο υλικό στις ηλεκτρικές μηχανές υψηλής τάσης, στις οποίες

υπάρχουν πάντα κάποιες εν μέρη εκκενώσεις. Οι εν μέρη εκκενώσεις είναι δύσκολο να χειριστούν. Συνήθως σε μηχανές με μια εκτιμομένη τάση επάνω από 4 kV, κάποιες εν μέρη εκκενώσεις εμφανίζονται κατά τη διάρκεια της λειτουργίας. Η mica το επιτρέπει αυτό. Είναι, εντούτοις, δυνατό ακόμη και στις μεγάλες μηχανές χαμηλής τάσης, να υπάρξουν εν μέρη εκκενώσεις στον μετατροπέα ισχύος. Αυτό γίνεται επειδή οι απότομοι παλμοί τάσης δεν διανέμονται ομοιόμορφα στις στροφές του τυλίγματος, αλλά μπορεί να γίνει υπερβολικά την πρώτη στροφή του τυλίγματος. Σε αυτή την περίπτωση, η ισχύς των ηλεκτρικών πεδίων μπορεί να είναι αρκετά μεγάλη ώστε να προκαλέσει τις εν μέρη εκκενώσεις, και εάν δεν υπάρχει η mica η μόνωση θα αποτύχει αργά ή γρήγορα.

Στο μονωτή mica, οι φλιδες της mica είναι συνδεδεμένες με έναν κατάλληλο συσχετισμών (binding). Έτσι, μερικά στρώματα μιας κατάλληλης βοηθητικής ουσίας απαιτούνται, όπως το ύφασμα γυαλιού ή το φύλλο αλουμινίου πολυεστέρα για να βελτιώσουν την αντοχή της μόνωσης. Σήμερα, η mica χρησιμοποιείται κυρίως ως χαρτί στη μόνωση των ηλεκτρικών μηχανών. Το χαρτί mica είναι ένας μονωτής που αποτελείται από τις εξαιρετικά μικρές φλιδες της mica και παραγεται με τον ίδιο τρόπο όπως το χαρτί, εξού και το όνομα. Κατά συνέπεια, παρά τον όρο χαρτί το υλικό δεν περιλαμβάνει οποιεσδήποτε ίνες κυτταρίνης. Η φυσική mica συντρίβεται είτε μηχανικά είτε με τη θερμότητα στις μικρές φλιδες που είναι κολλημένες με τη ρητίνη σε ένα εύκαμπτο, υλικό όπως το χαρτί. Οι ιδιότητες των μονωτών mica παρουσιάζονται στον πίνακα 8

Οι μονώτικες ταινίες αποτελούν μια μάλλον διαφορετική ομάδα μονωτών (πίνακας 9). Οι ταινίες είναι συνήθως από σκληρό πλαστικό, η θερμική αντίσταση του οποίου περιορίζεται από τη θερμοκρασία τήξης και προκαλεί γρήγορη φθορά πολύ κάτω από αυτήν την θερμοκρασία.

A) Στη διαδικασία παραγωγής, οι φλιδες της mica γλιστρούν η μια προς την άλλη. Όταν ο σύνδεσμος είναι έτοιμος, η συμπίεση είναι 4%-8%

B) Στη μεταγωγή μόνωσης των μηχανών κλάσης F

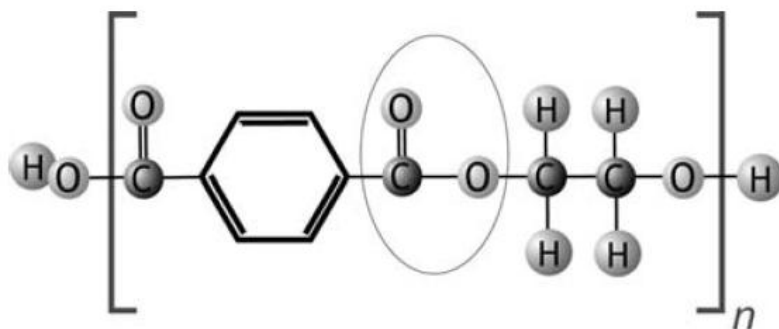
Γ) Στη μεταγωγή μόνωσης των μηχανών κλάσης H

Characteristic	Commutator micanite	Moulding micanite	Mica folium	Glass-mica tape	Epoxy glass mica paper tape
Mica content/%	95–98	80–90	40–50	40	45–55
Binder content/%	2–5	10–20	25–40	18–22	35–45
Content of the supporting material	—	—	20	40	15
Compression strength/N/mm ²	110–170	—	—	—	—
Tensile strength/N/mm ²	—	—	30–50	40–80	80–120
Compression/%	2–6	— ^a	—	—	—
Continuous operating temperature/°C, binder:					
Shellac	F155 ^b	F ^b	B130	B130	F155
Alkyds, epoxy	H180 ^c	H ^c	F155	F155	
Silicone	—	—	H180	H180	
Voltage strength/kV/mm (1 min, 50 Hz)	25	20	20	16–20	20–30

πίνακας 8 χαρακτηριστικά των μονωτών μίκα. Προσαρμοσμένος από Paloniemi και Keskinen (1996)

Characteristic	Unit	Polyester PETP	Polyimide	Polysulphone PS
Tensile strength	N/mm ²	140–160	180	90
Elongation at break	%	75	70	25
Modulus of elasticity	N/mm ²	3900	3000	2500
Density	g/cm ³	1.38	1.42	1.37
Continuous operation temperature	°C	130	220	180
Instantaneous thermal resistance	°C	190	400	210
Softening point	°C	80–210	530	235
Melting point	°C	250	Does not melt	
Shrinkage at 150 °C	%	3	—	—
Burning		Slow	Does not burn	Does not keep up burning
Moisture absorbency	% by weight	0.5	3	1.1
Chemical strength	Graded 0–4			
Acids		2	3	3
Alkalis		1	0	3
Organic solvents		4	4	1
Specific resistivity	Ω cm	10 ¹⁹	10 ¹⁸	5 × 10 ¹⁶
Voltage strength	kV/mm	150	280	175
Trade names		Mylar Melinex Hostaphan	Kapton	Folacron PES

πίνακας 9 χαρακτηριστικά της μόνωσης των φύλλων αλουμινίου. Προσαρμοσμένος από Paloniemi και Keskinen (1996)



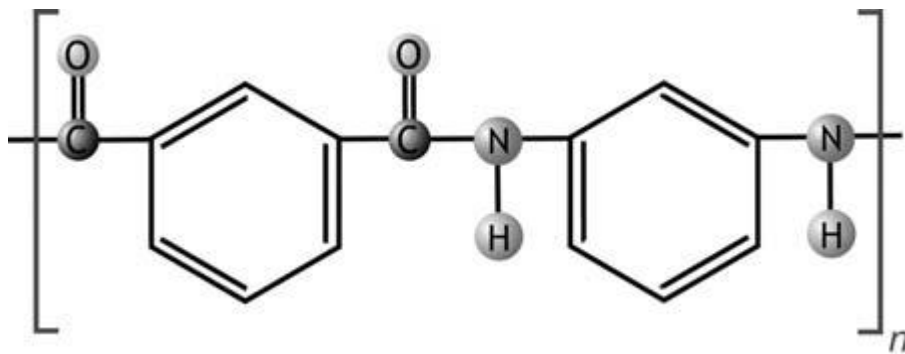
Σχήμα 9. Κατασκευή πολυεστέρα Mylar. Το υλικό περιέχει το υδρογόνο (H), το οξυγόνο (O), τον άνθρακα (C) και βενζόλιο (C₆H₆). Το περικυκλωμένο μέρος είναι ένας εστέρας. Η ομάδα εστέρα είναι επιρρεπής σε υδρόλυση, ως εκ τούτου το υλικό δεν ανέχεται τη θερμότητα και την υγρασία ταυτόχρονα.

Η ταινία πολυεστέρα παράγεται για διάφορους σκοπούς στα ονομαστικά πάχη από 6 μm στη μεμβράνη 0,4 mm. PETP (polyethyleneterephthalate) είναι μια σκληρή ταινία πολυεστέρα, η οποία χρησιμοποιείται υπό αυτήν τη μορφή ή ως τοποθετημένο σε στρώματα μονωτή ως μόνωση αυλακώσεων και μόνωση πηνίων φάσης σε μικρό - και μεσαίου μεγέθους μηχανές. Το σχήμα 9. επεξηγεί τη χημική σύνθεση μιας ταινίας πολυεστέρα Mylar.

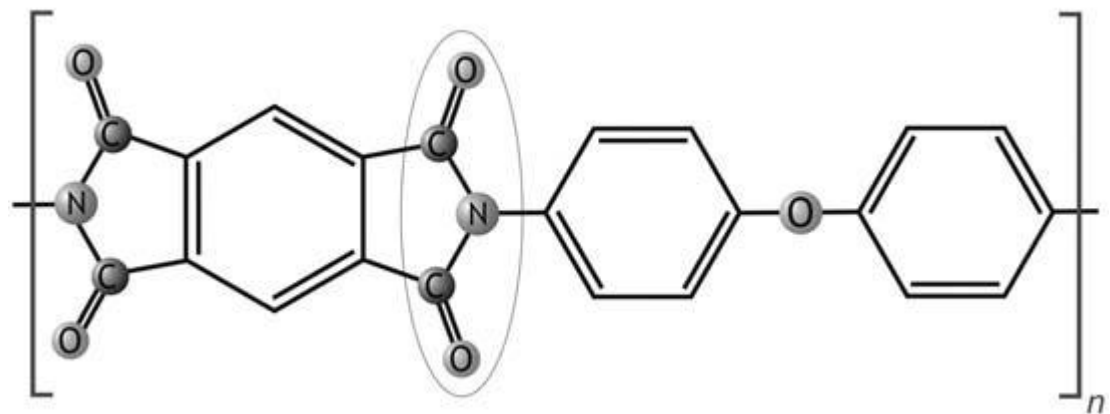
Τα αρωματικά πολυαμίδια, ή οι aramid ίνες (εμπορική φίρμα Nomex), έχουν καλύτερη θερμική αντιστάση από τις προηγούμενες, αλλά δεν είναι τόσο ευκαμπτες όσο οι ταινίες PETP. Επομένως, τα αρωματικά πολυαμίδια χρησιμοποιούνται συχνά ως τοποθετημένοι σε στρώματα μονωτές μαζί με τις ταινίες PETP ή polyimide. Το σχήμα 10 επεξηγεί τη χημική σύνθεση των ινών aramid.

Η ταινία πολυεστέρα έχει καλύτερη μηχανική αντοχή από τα μονωτικά φύλλα αλουμινίου που είναι διαθέσιμα και η δύναμή εφελκυσμού του πλησιάζουν τις τιμές του μαλακού χαλκού. Οι ταινίες χρησιμοποιούνται υπό αυτήν τη μορφή στη μόνωση αυλακώσεων των μικρών μηχανών, και στις αυλακώσεις των μεγάλων μηχανών, μαζί με τη μόνωση ινών (aramid ή έγγραφο πολυεστέρα). Η θερμοκρασία τήξης της ταινίας πολυεστέρα είναι περ. 250 C. Εντούτοις, ο πολυεστέρας έχει μια ανεπαρκή ειδική αντίσταση στην υγρασία στις υψηλές θερμοκρασίες. Σε τέτοιες περιπτώσεις, χρησιμοποιούνται μόνο οι aramid ίνες.

Η ταινία Polyimide υπομένει σταθερές θερμοκρασίες ακόμη και 220 C, και η στιγμιαία θερμική αντίστασή του είναι τόσο υψηλή έως 400 C. Έτσι οι μηχανικές ιδιότητες της ταινίας είναι σχετικά καλές, και η τάση διακοπής της είναι υψηλή. Δεν επηρεάζεται από τους οργανικούς διαλύτες. Το πάχος της ταινίας ποικίλλει και είναι συνήθως μεταξύ 0,01 και 0,12 χιλ. Η μόνωση Polyimide είναι ιδιαίτερα ακριβή, αλλά ως λεπτός μονωτής αφήνει περισσότερο χώρο για τα τυλίγματα, και έτσι είναι μια συμφέρουσα εναλλακτική λύση σε ορισμένες περιπτώσεις. Το σχήμα 11 επεξηγεί την κατασκευή polyimide.



Σχήμα 10 Χημική δομή ινών Nomex aramid. Το υλικό περιέχει το υδρογόνο (H), το οξυγόνο (O), τον άνθρακα (C), το άζωτο (N) και βενζόλιο (C₆H₆). Αυτή η απλή κατασκευή ανέχεται διαφορετικές πιέσεις, ακόμη και θερμότητα και υγρασία ταυτόχρονα.

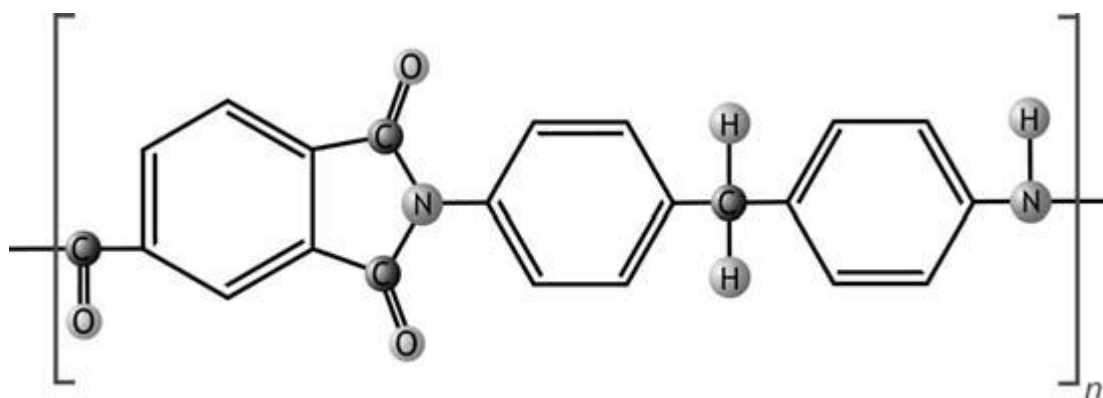


Σχήμα 11. Polyimide Kapton. Οι λειτουργικές ομάδες NC₂O₂ είναι οι ομάδες ιμιδίου. Το υλικό περιέχει το οξυγόνο (O), τον άνθρακα (C), το άζωτο (N) και βενζόλιο (C₆H₆). Οι ομάδες ιμιδίου είναι επιρρεπείς σε υδρόλυση, και το υλικό δεν ανέχεται τη θερμότητα και την υγρασία ταυτόχρονα.

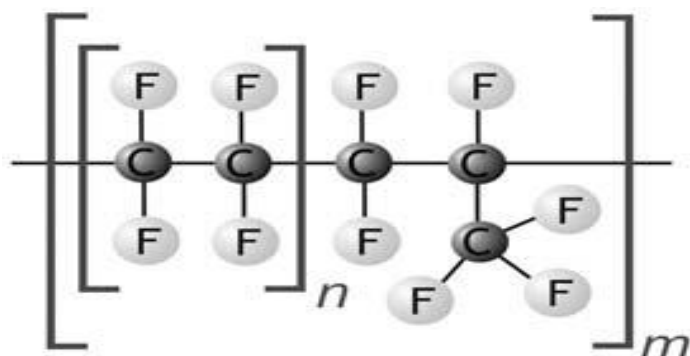
Η μόνωση των αγωγών είναι η πιο απαιτητική στοιχειώδης εργασία στην κατασκευή μόνωσης μιας ηλεκτρικής μηχανής, δεδομένου ότι η μόνωση βρίσκεται πιο κοντά στο καυτό καλώδιο χαλκού και επιπλέον, είναι το λεπτότερο τμήμα μόνωσης. Η μόνωση των αγωγών είναι συχνά βερνίκι-όπως θερμοπλαστική. Υπάρχουν και κρυστάλλινες και άμορφες περιοχές στο βερνίκι. Η κρυσταλличότητα του υλικού βελτιώνει τη θερμική αντίσταση, διαμορφώνει μια στεγανή σφράγιση ενάντια στους διαλύτες και βελτιώνει τις μηχανικές ιδιότητες του μονωτή. Η άμορφη περιοχή, αφ' ετέρου, καθιστά το μονωτή εύκαμπτο. Τα πιο κοινά βερνίκια αγωγών που χρησιμοποιούνται στις ηλεκτρικές μηχανές είναι εστερα-ιμιδια ή amide-imides. Το σχήμα 12 εμφανίζει πολυμερή αλυσίδα polyamide-imide. Συσχετίζονται έτσι και με τις ταινίες πολυεστέρα και polyimide. Οι υψηλότερες επιτρεπόμενες θερμοκρασίες για τα ester-imides είναι της κατάταξης 180-200 C.

Η μόνωση αγωγών μπορεί να διαμορφωθεί από δύο ή περισσότερους διαφορετικούς τύπους βερνικιών. Δύο διαφορετικά βερνίκια χρησιμοποιούνται

προκειμένου να επιτευχθεί η καλύτερη θερμική αντίσταση, οι καλύτερες μηχανικές ιδιότητες και η βελτιωμένη αποδοτικότητα δαπανών απ'ό,τι με ένα ενιαίο υλικό. Στην πράξη, το επίστρωμα βερνικιών περιλαμβάνει διάφορα στρώματα ενός ενιαίου υλικού λουστραρίσματος. Στο επίστρωμα, ο γυμνός αγωγός είναι θερμικά επεξεργασμένος και ντυμένος με το βερνίκι. Έπειτα, ο διαλύτης ατμοποιείται με τη θέρμανση του καλωδίου και το καλώδιο είναι ντυμένο με ένα νέο στρώμα βερνικιού. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται 4 έως 12 φορές. Τα καλώδια διαιρούνται σε τρεις βαθμούς σύμφωνα με το πάχος του επιστρώματος: `μονός` (βαθμός 1), `διπλός` (βαθμός 2) και `τριπλός` (βαθμός 3). Στην πραγματικότητα, υπάρχουν πάντα διάφορα στρώματα του βερνικιού.



Σχήμα 12 Πολυμερές σώμα Polyamide-imide .Το υλικό περιέχει το υδρογόνο (H), το οξυγόνο (O), τον άνθρακα (C), το άζωτο (N) και βενζόλιο (C₆H₆). Οι ομάδες ιμιδίου είναι επιρρεπείς σε υδρόλυση.



Σχήμα 13 Χημική δομή fluoropolymer FEP. Η δομή, που περιέχει δύο άνθρακες και τέσσερα fluorines και επαναλαμβάνει τους χρόνους n , είναι η χημική δομή fluoropolymer PTFE

Επιπλέον, το πάχος του λουστραρίσματος κάθε βαθμού είναι πάντα ανάλογο προς τη διάμετρο του καλωδίου.

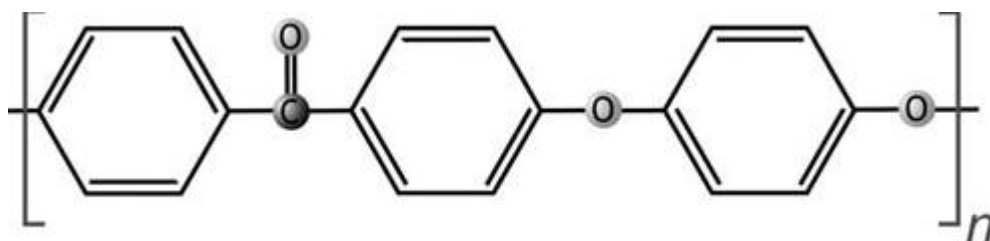
Οι ταινίες Polyimide και οι aramid ταινίες μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν ως μόνωση αγωγών. Είναι τυλιγμένοι σε ένα καλώδιο-όπως ταινία. Μπορούν να εξεταστούν για ειδικές εφαρμογές, αλλά είναι πάρα πολύ ακριβοί για τις κοινές

μηχανές. Η μόνωση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τα εξαιρετικά σκληρά περιβάλλοντα, όπως το τεφλόν. Εξωθείται στο καλώδιο στη διαδικασία κατασκευής. Fluoropolymers προσφέρουν την καλή χημική ειδική αντίσταση και την άριστη ειδική αντίσταση στην υγρασία ακόμη και στις υψηλές θερμοκρασίες. Όμως, η τάση διακοπής τους μπορεί να είναι το ένα τέταρτο των polyester-imides και polyamide-imides το οποίο πρέπει να ληφθεί υπόψη κατά το σχεδιασμό ενός συστήματος μόνωσης. Το σχήμα 13 επεξηγεί τη χημική σύνθεση του τεφλόν.

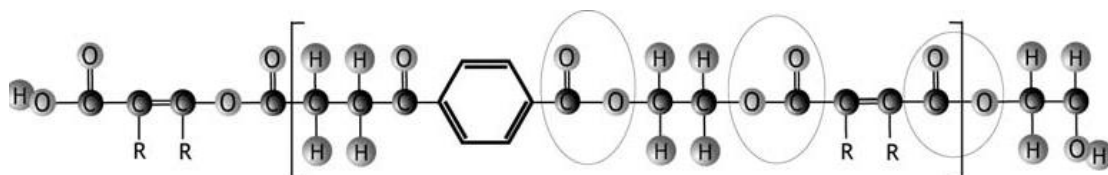
PEEK (polyetheretherketone) το πολυμερές σώμα είναι ένα πολύ καλό υλικό μόνωσης αγωγών στα απαιτητικά περιβάλλοντα. Το PEEK αναφέρεται για να υπάρξει μια άριστη αντίσταση ακόμη και στην υδρόλυση μέχρι 250 C. Το PEEK δεν είναι, δυστυχώς, εύκολα διαθέσιμο. Το σχήμα 14 επεξηγεί τη σύνθεση PEEK.

4.6 ΒΕΡΝΙΚΙΑ ΚΑΙ ΡΗΤΙΝΕΣ ΔΙΑΠΟΤΙΣΗΣ

Η λειτουργία ενός βερνικιού εμποτισής ή μιας ρητίνης είναι να ενισχυθεί μηχανικά το τύλιγμα, να προστατευθεί από την υγρασία, το ρύπο και τις χημικές ουσίες, και να βελτιωθεί η θερμική αγωγιμότητά της. Όμως το υπερβολικό λουστράρισμα μειώνει τη θερμική αγωγιμότητα, στις άκρες του πηνίου. Ένα βερνίκι εμποτισής περιλαμβάνει ένα τμήμα βάσης (γραμμικά πολυμερή σώματα), το μονομερές, τους διαλύτες και τα πιθανά πετρέλαια. Ανάλογα με τη σύνθεση, τα βερνίκια διαιρούνται σε κατηγορίες ανάλογα το λάδι και τα επιστρώματα πολυεστέρα. Οι ρυθμίσεις με βάση το πετρέλαιο στο λάδι βερνικιών απαιτεί οξυγόνο, και επομένως δεν πρέπει να χρησιμοποιηθούν στα συμπαγή και παχιά τυλίγματα. Οι ηλεκτρικές ιδιότητες των βασισμένων στο λάδι βερνικιών είναι καλές, αλλά η μηχανική δύναμή τους είναι μάλλον φτωχή.



Σχήμα 14. Χημική δομή PEEK

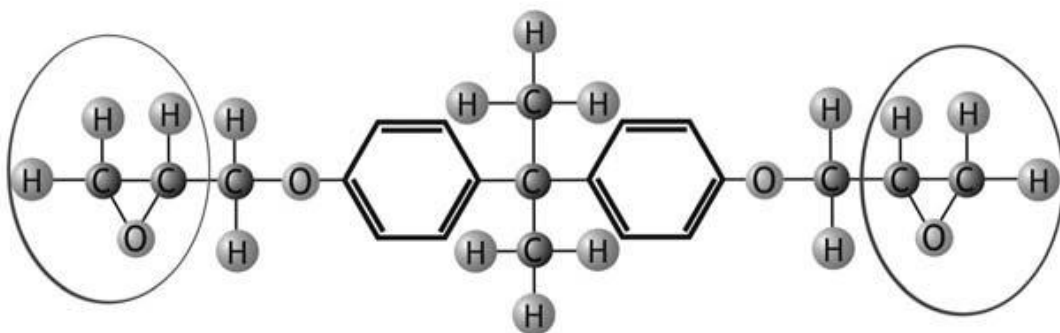


Σχημα 15. Σύνθεση ρητίνης πολυεστέρα. Το υλικό περιέχει το υδρογόνο (H), το οξυγόνο (O), τον άνθρακα (C), βενζόλιο (C₆H₆) και τα αντιδραστικά μέρη (R). Τα περικυκλωμένα μέρη είναι εστέρες. Το μονομερές δεσμεύεται στα

αντιδραστικά μέρη που υποδεικνύονται από το ρ όταν θεραπεύεται το υλικό σε έναν θερμοπλαστικό.

Τα βερνίκια πολυεστέρα είναι σήμερα τα πιο κοινά υλικά λουστραρίσματος, σχήμα 15. Είναι είτε ενιαία - είτε δύο-συστατικών βερνίκια, η σκλήρυνση των οποίων απαιτεί συνήθως θερμική επεξεργασία. Στη διαδικασία θεραπείας, ο διαλύτης ατμοποιείται, το μονομερές από την μια ακρη συνδέεται με το αντιδραστικό μέρος ενός συστατικού βάσης και το άλλο μέρος στο αντιδραστικό μέρος του άλλου συστατικού βάσης. Αυτό καλείται διασύνδεση, επειδή η πολυμερής αλυσίδα του μονομερούς θέτει την κάθετο στην πολυμερή αλυσίδα του τμήματος βάσεων. Με αυτόν τον τρόπο, μια σύνθετη τρισδιάστατη πολυμερής δομή διαμορφώνεται. Ένα πλαστικό δημιουργήσε αυτόν τον τρόπο και είναι το θερμοπλαστικό. Στα βερνίκια εμποτισμού, περίπου το μισό του ογκού είναι ένας εξαμιζόμενος διαλύτης, ο οποίος αντικαθίσταται από αερα όταν σκληραίνει το βερνίκι. Επομένως, αλκυδικες- ή ο πολυεστέρας-βασισμένα στο βερνίκια συμπεριλαμβανομένων των διαλυτών έχουν αντικατασταθεί συνήθως από ρητίνες εμποτισμού που είναι πολυεστέρας ή εποξειδικής βάσης και δεν περιέχουν τους διαλύτες και σκληρά χημικά πρόσθετα. Οι κοινές μηχανές, χρησιμοποιούν ρητίνες πολυεστέρα, επειδή έχουν μια χαμηλή τιμή και είναι εύκολο να χειριστούν. Σε μια ρητίνη πολυεστέρα, το τμήμα βάσεων και το μονομερές είναι αρκετά παρόμοιες ουσίες ως προς την φύση και το ιξώδες, και αναμειγνύεται εύκολα. Έτσι είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν οι κατάλληλες αναλογίες μίξης, όπως το ένα προς ένα. Οι εποξειδικές ρητίνες είναι πολύ αξιόπιστες και επεξηγούν τη σύνθεση στο σχήμα 16.

Ένα μειονέκτημα των εποξικών ρητινών είναι η υψηλή τιμή τους σε σύγκριση με τις ρητίνες πολυεστέρα. Εντούτοις, οι εποξικές ρητίνες χρησιμοποιούνται συνήθως στις μηχανές επάνω από 250kW λόγω της καλής μηχανικής αντοχής, της συγκολλητικότητάς τους και την χαμηλή ικανότητα συρρίκνωσης. Στα σκληρά περιβάλλοντα, οι εποξικές ρητίνες ευνοούνται. Έχουν καλή ειδική αντίσταση στις χημικές ουσίες, την υγρασία και την ακτινοβολία. Από την άλλη, οι ρητίνες πολυεστέρα έχουν καλύτερη ειδική αντίσταση στα πετρέλαια, όπως το πετρέλαιο μετασχηματιστών.



Σχήμα 16. Χημική σύνθεση της βασικής εποξικής ρητίνης. Οι λειτουργικές ομάδες εποξειδίου είναι στον κύκλο. Αυτοί οι ομάδες είναι χαρακτηριστικές για κάθε εποξικό, αλλά η πολυμερής αλυσίδα μεταξύ τους μπορεί να ποικίλει. Σε ιδιαίτερες περιπτώσεις, όπως στις μηχανές έλξης που εμπλεκονται σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες (πάνω από 200 °C) μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι ρητίνες σιλκόνης. Προσφέρουν άριστες θερμικές ιδιότητες, αλλά έχουν μικρή μηχανική δύναμη.

Το βερνίκι επιφάνειας βελτιώνει την ποιότητα επιφάνειας της μόνωσης. Το βερνίκι επιφάνειας διαμορφώνει μια στεγανή επένδυση που είναι εύκολο να

καθαριστεί και που βελτιώνει την αντίσταση διαδρομής της μόνωσης. Ο πίνακας 10 μας δείχνει τις ιδιότητες των βερνικιών μόνωσης, των ρητινών και των βερνικιών επιφάνειας.

Ο εμποτισμός της μόνωσης έχει επιδραση στην αντίσταση διαδρομής της μόνωσης. Η μόνωση αποτελείται από πολλά διαφορετικά συστατικά. Ένα από τα συστατικά είναι συχνά ένα κενό αέρα. Τα κενά αέρα μπορούν επίσης να μείνουν σε ανεπιθύμητα σημεία, για παράδειγμα σε μια αυλάκωση, όταν ο εμποτισμός δεν είναι πλήρης ή υπάρχουν φυσαλίδες στο βερνίκι. Αυτό πρέπει να είναι λήφθει υπόψη κατά την διαστασιολογήση της μόνωσης και της επιλογής της μέθοδου εμποτισμού. Η ισχύς E των ηλεκτρικών πεδίων σε ένα ενιαίο υλικό του πάχους D είναι

$$E = \frac{U}{d}. \quad (1)$$

Η πυκνότητα D των ηλεκτρικών πεδίων μέσω της μόνωσης πρέπει να είναι σταθερή σε μια ομοιογενή μόνωση και ίση σε όλη την κατασκευή της μόνωσης φτιαγμένη από διάφορα στρώματα:

$$E \cdot \varepsilon = D. \quad (2)$$

Όταν δύο διαφορετικά υλικά μόνωσης 1 και 2 (πάχη d_1 και d_2) είναι σε σειρά στο ίδιο εξωτερικό πεδίο, έχουμε τις αντίστοιχες δυνάμεις πεδίων E_1 και E_2 και τις τάσεις U_1 και U_2 σύμφωνα με τις εξισώσεις (1) και (2):

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \quad (3)$$

Και

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{d_1}{d_2} \cdot \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}. \quad (4)$$

Όταν υπάρχει μια τάση $U = U_1 + U_2$ πέρα από τη μόνωση, μπορούμε να γράψουμε για τις τάσεις

$$U_1 = U \cdot \frac{\frac{d_1}{\varepsilon_1}}{\frac{d_1}{\varepsilon_1} + \frac{d_2}{\varepsilon_2}} \quad (5)$$

Και

$$U_2 = U \cdot \frac{\frac{d_2}{\varepsilon_2}}{\frac{d_1}{\varepsilon_1} + \frac{d_2}{\varepsilon_2}}. \quad (6)$$

Table 8.4 Characteristics of insulating varnishes and impregnating resins. Adapted from Paloniemi and Keskinen (1996)

Characteristic, Grades 0–4	Impregnating varnishes		Impregnating resins		Coating (surface) varnishes		
Continuous operating temperature/°C	155	180	155	180	130	155	180
Mechanical strength at operating temperature	3	1	3	4	2	2	1
Flexibility	3	2	2	2	4	3	2
Moisture resistance	3	3	3	4	3	4	4
Chemical strength	3	3	3	4	3	4	3
Track resistance	3	3	3	2	3	2	3
Typical materials	Alkyd polyester	Silicone epoxy	Polyester alkyd epoxy	Polyester epoxy	Alkyd Polyurethane	Alkyd Polyurethane	Alkyd Silicone Epoxy

Παράδειγμα 1: Το πάχος της μόνωσης είναι 4mm και η ηλεκτρική διαπερατότητα του $\epsilon_1 = 5$. Μέσα στη μόνωση, υπάρχει ένα κενό αέρα 0.25mm με $\epsilon_2 = 1$. Η τάση πέρα από τη μόνωση είναι $U = 12$ kV. Πόση είναι η τάση που διαιρείται μεταξύ της μόνωσης και του κενού αέρα, και πόσο υψηλή είναι η δύναμη πεδίων στο κενό αέρα;

Λύση: Με τις εξισώσεις (5) και (6) παίρνουμε τις τάσεις $U_1 = 9.14$ και $U_2 = 2.86$ kV. Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου στο κενό αέρα είναι $E_2 = 2.86$ kV/0.25mm = 11.44 kV/mm, το οποίο μπορεί να υπερβεί τη δύναμη σημαντικών πεδίων. Ακόμη και ένα μικρό κενό αέρα στη μόνωση μπορεί να προκαλέσει μερικές εκκενώσεις που μπορούν να γεράσουν τη μόνωση. Ακόμα κι αν η μερική εκκενώση στο διάκενο υαλοπινάκων που παραμένει μέσα στη μόνωση δεν οδήγησε σε άμεση ανάφλεξη πυρκαγιάς στην πλήρη μόνωση, μπορεί μέσω της τοπικής υπερθέρμανσης και της φθορας, να προκαλεί γρήγορα μια διακοπή στην κατασκευή της μόνωσης.

Μπορούμε να πάρουμε για παράδειγμα δύο εποξικές-ντυμένες ταινίες πολυεστέρα: είναι σχετικά ανθεκτικές στη θερμότητα όταν δεν είναι σε επαφή με τον αέρα. Η διηλεκτρική αντοχή αυτού του είδους κατασκευής μπορεί να είναι δεκάδες φορές υψηλότερη σε σύγκριση με την τάση στην οποία το διακενό μεταξύ των ταινιών αρχίζουν να σπινθηρίζουν, φορώντας κατά συνέπεια την επένδυση και μονώνοντας τα φύλλα αλουμινίου. Εντούτοις, υπερβαίνοντας αυτό η τάση αρχίζει να σπινθηρίζει και κόβει δραστικά τη διάρκεια ζωής της μόνωσης, ενώ η τάση διακοπής δεν έχει σχεδόν καμία επιδραση στη διάρκεια ζωής της μόνωσης.

Επομένως, σήμερα τέτοιες μέθοδοι εμπότισης επιλέγονται όταν εξασφαλίζουν επαρκή διείσδυση από πρόσθετα και μια στεγανή κατασκευή. Μια πιθανή μέθοδος παρέχεται για παράδειγμα από την κενή τεχνολογία διαπότισης πίεσης (VPI). Αυτή η μέθοδος υιοθετείται και στις χαμηλές και υψηλές τάσεις στις κλάσεις 155-220 θερμοκρασίας (βλ. πίνακα 10).

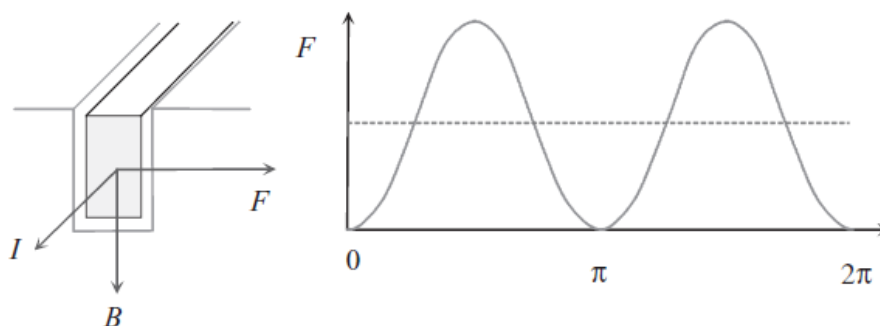
Για τη λειτουργία κάτω από αυτές τις συνθήκες, τα τυλίγματα μπορούν να ριχθούν στο πλαστικό. Ένα πλεονέκτημα από αυτή τη μέθοδο είναι ότι το τυλίγμα γίνεται απολύτως αδιάβροχο. Έτσι η μηχανική δύναμη του πηνίου βελτιώνεται. Ένα μειονέκτημα είναι η υψηλή τιμή της μόνωσης. Τα πλαστικά που χρησιμοποιούνται στη μέθοδο αυτή είναι είτε ο πολυεστέρας είτε τα εποξικά πλαστικά. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται σπάνια μέσα σε αβιομηχανικές εφαρμογές μηχανών.

Δεδομένου ότι οι χημικές ουσίες απελευθερώνονται πάντα από τη μόνωση κατά τη λειτουργία, πρέπει να εξασφαλιστεί ότι αυτές οι χημικές ουσίες δεν είναι επιβλαβείς για τα άλλα μονωτικά υλικά. Το διαλυμένο οξυγόνο και τα μόρια που δημιουργεί το όζον στις μερικές εκκενώσεις, μπορούν γρήγορα να αποδυναμώνουν διάφορα πολυμερή σώματα. Η γονιμοποίηση του βερνίκιου πρέπει ιδίως να είναι συμβατό με άλλους μονωτές. Οι κατασκευαστές συστήσουν την δοκιμή του μονωτικού υλικού και τους συνδυασμούς μόνωσης για να εξασφαλιστεί η συμβατότητα.

4.7 ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ ΜΙΑΣ ΜΟΝΩΣΗΣ

Οι μηχανικές, ηλεκτρικές και θερμικές πιέσεις στις οποίες η μόνωση εκτίθεται συμβάλλουν στους παράγοντες για τις διαστάσεις μιας ηλεκτρικής μηχανής. Αυτές οι πιέσεις υποβιβάζουν τις ιδιότητες της μόνωσης. Γι' αυτό στην επιλογή του μονώτικου υλικού οι καταπονήσεις που προκαλούνται από τις συνθήκες λειτουργίες, όπως η συσσώρευση ρύπων, των χημικών ουσιών, των πετρελαίων, της υγρασίας και της ακτινοβολίας, πρέπει να ληφθεί υπόψη.

Η δύναμη συμπίεσης της μόνωσης είναι συνήθως υψηλότερη από την εκτατή δύναμη, και επομένως, στο σχεδιασμό, πρέπει να στοχεύσουμε στις μονώσεις που εκτίθενται στη συμπίεση από την ένταση. Για παράδειγμα, οι συσχετισμοί φίμπεργκλας μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να λάβουν τις εκτατές πιέσεις ασκημένος στη μόνωση (βλ. συσχετισμός του δρομεα μιας μηχανής DC).



Σχήμα 17 Δύναμη Lorentz που προκαλείται από τη ροή στον αγωγό στην αυλάκωση στην περιφέρεια της μηχανής.

Τα τυλίγματα τελος είναι επίσης εκτεθειμένα σε διατμητικές πιέσεις. Κατά συνέπεια, η μόνωση πρέπει να διαστασιολογηθεί σύμφωνα με αυτά που τονίζει. Αν και απαιτείται επίσης η ακαμψία από τη μόνωση, υπό ορισμένες συνθήκες πρέπει να είναι και εύκαμπτη. Συνήθως στις μηχανές χαμηλής τάσης πιο συγκεκριμένα αρκεί ότι η μόνωση προσαρμόζεται στην παραμόρφωση που προκαλείται από τη θερμική επέκταση του καλωδίου χαλκού.

Μια κατασκευή μόνωσης χρησιμοποιείται συχνά για να υποστηρίξει το τύλιγμα. Επομένως, η δομή πρέπει να αντεχει τους κραδασμούς και τις ηλεκτροδυναμικές δυνάμεις, όπως το βραχυκύκλωμα. Όσο μεγαλύτερη ασφάλεια έχει το τελευταίο πηνίο που υποστηρίζεται, τόσο υψηλότερη φυσική συχνότητα παίρνει. Ο στόχος είναι να αυξηθεί η φυσική συχνότητα της κατασκευής μόνωσης σε ένα επίπεδο επάνω από το φάσμα συχνότητων των ηλεκτροδυναμικών δυνάμεων. Η σημαντικότερη φυσική συχνότητα που πρέπει να αποφεύγεται είναι η διπλή συχνότητα ανεφοδιασμού. Αυτή η δύναμη έχει δημιουργηθεί από τη μαγνητική ροή και το ρεύμα. Η κατεύθυνση αυτής της δύναμης είναι διευκρινισμένη μέσα Σχήμα 17.

Εκτός από την κανονική τάση λειτουργίας, η κατασκευή μόνωσης μιας ηλεκτρικής μηχανής πρέπει να αντεχει σε προσωρινες υπερτάσεις στη λειτουργούσα συχνότητα, μεταστρέφοντας υπερτάσεις και εκτεθειμένες υπερτάσεις. Αυτές οι βραχυπρόθεσμες υπερτάσεις πρέπει να ληφθούν υπόψη ιδιαίτερα στη διαστασιολογήση του κενού αέρα, δεδομένου ότι η μόνωση που αποτελείται από στερεούς μονωτές αντεχουν την αρκετά υψηλή προσωρινή τάση. Στην πράξη, σε μια υψηλή τάση η μόνωση

σχεδιάζεται συνήθως με μια αποτελεσματική δύναμη πεδίων 2-3 kV/mm. Μια κατά προσέγγιση τιμή για το ελάχιστο πάχος του στρώματος μόνωσης επιτυγχάνεται με τη "Εφαρμογή" της εξίσωσης (1)

$$d = U/E_{\max}, \quad (7)$$

όπου το d είναι το πάχος του μονώτικου υλικού, το U είναι η τάση πέρα από τη μόνωση και Το E_{max} είναι η υψηλότερη επιτρεπόμενη δύναμη πεδίων στο σχετικό υλικό. Εάν η μόνωση αποτελείται από διάφορα στρώματα, τα πάχη αυτών των στρωμάτων μπορούν να υπολογιστούν από τα εξής:

$$U = E_1d_1 + E_2d_2 = D \left(\frac{d_1}{\varepsilon_1} + \frac{d_2}{\varepsilon_2} \right). \quad (8)$$

Σύμφωνα με τα πρότυπα IEC για τις περιστρεφόμενες ηλεκτρικές μηχανές (IEC 60034), η τάση δοκιμής πρέπει να πραγματοποιηθεί με μια τάση εναλλασσόμενου ρεύματος σε μια συχνότητα 50 ή 60Hz. Με χαμηλής τάσης τριφασικές μηχανές, η τάση δοκιμής για τις μηχανές κάτω από 1 KW πρέπει να είναι

$$U_{\text{test}} = 2U_N + 500 \text{ V}. \quad (9)$$

Για τις μηχανές επάνω από 1 KW, η τάση δοκιμής πρέπει να είναι

$$U_{\text{test}} = 2U_N + 1000 \text{ V (but at least 1500 V)}, \quad (10)$$

όπου το U_N είναι η ονομαστική γραμμή προς γραμμή τάση και το U_{test} είναι η τάση δοκιμής. Η δοκιμαστική περίοδος είναι 5 δευτερόλεπτα για χρησιμοποιημένες μηχανές, η δύναμη των οποίων είναι λιγότερο ή ίσο προς 5 KW, και για τις νέες μηχανές, 1λεπτο. Για τις μηχανές συνεχους ρευματος, το επίπεδο μόνωσης εξετάζεται μεταξύ του τυλίγματος και του πλαισίου με μια 50Hz τάση εναλλασσόμενου ρεύματος 1.5 kV, όταν η εκτιμημένη τάση είναι από 50 έως 380V, και 2.5 kV όταν η εκτιμημένη τάση είναι από 380 έως 1000V. Αξίζει να σημειωθεί ότι εάν η δοκιμαστική περίοδος είναι 1 λεπτο, η τάση δεν πρέπει να υπερβεί 50% της τάσης δοκιμής. Μετά από αυτήν την περίοδο, η τάση δοκιμής μπορεί να είναι αυξημένη στη μέγιστη τάση σε 10 δευτερόλεπτα. Οι υψηλής τάσεως μηχανές πρέπει επίσης να αντέχουν τα κύματα ώθησης. Η ανοχή των κυμάτων ώθησης πρέπει να είναι τουλάχιστον

«U_{sj}» που εδώ είναι η μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης. Λόγω του κινδύνου αποτυχίας, μια νέα ολοκληρωμένη μηχανή δεν εξετάζεται με αυτήν την τάση εντούτοις, τα χωριστά πηνία μπορούν να εξεταστούν στο εργαστήριο.

$$\hat{U}_{sj} = 4U_N + 5 \text{ kV.}$$

(11)

Η κρουστική τάση ρυθμίζεται για να έχει έναν χρόνο ανόδου 1.2 μs και μια "διάρκεια" 50 μs . Η εξίσωση (11) αποδίδει την μεγιστη αξια για την υπερταση για τις υψηλής τάσεως μηχανές. Αυτή η μεγιστη τιμή είναι η βάση για την διαστασιολογήση της μόνωσης στροφής. Επιπλέον, εκτός από την υπερταση δύναμη,στη διαστασιολογήση της μόνωσης πρέπει να σημειώθει ότι το ηλεκτρικό πεδίο έχει ενα φαινομενο γήρανσης στην κατασκευή.Για να εξασφαλίσει η μακροπρόθεσμη διάρκεια, η μερικη εκκένωση της κατασκευής μόνωσης πρέπει να παραμείνει όσο το δυνατόν χαμηλότερα.Αυτό μπορεί να εξεταστεί από μια μέτρηση της $\tan\delta$. Η $\tan\delta$ αυξάνεται όταν η τάση δοκιμης αυξάνεται, δεδομένου ότι το ποσό των μερικών εκκενωσεων αυξάνεται. Επομένως η κλίση από την τάση $\tan\delta$ στην καμπύλη μπορεί να θεωρηθεί έμμεσος δείκτης της μερικής εκκένωσης στο επίπεδο.

Τα μονώτικα υλικά είναι ταξινομημένα σύμφωνα με τη δυνατότητά τους να αντεχουν στις υψηλές θερμοκρασίες χωρίς αποτυχίες. Ο πίνακας παρουσιάζει τις θερμοκρασίες σύμφωνα με τα πρότυπα IEC, και τον προηγούμενο, αν και εξακολουθει να χρησιμοποιείται ακόμα συνήθως, θερμικές κλάσεις με τους κώδικες επιστολών. Το επίδομα δυναμικής ζώνης δίνει την υψηλότερη επιτρεπόμενη θερμοκρασία οπου το θερμότερο μέρος της μόνωσης μπορεί να φθάσει και το επίδομα ανόδου θερμοκρασίας δείχνει την υψηλότερη επιτρεπόμενη άνοδο θερμοκρασίας του τυλίγματος του ονομαστικου φορτίου.

Η πιο κοινή θερμική κλάση στις ηλεκτρικές μηχανές είναι 155 (F). Οι κλάσεις 130 (B) και 180 (H) είναι επίσης συνηθισμένες στην πράξη.

Η γήρανση της μόνωσης βάζει ένα όριο στη μακροπρόθεσμη θερμική αντοχη του, η οποία προέρχεται από την άνοδο της θερμοκρασίας.Κατά την αξιολόγηση της μακροπρόθεσμης θερμικής αντίστασης ενός ενιαίου μονωτή, η έννοια του δείκτη θερμοκρασίας υιοθετείται. Ο δείκτης θερμοκρασίας είναι η μέγιστη θερμοκρασία στην οποία ο μονωτής μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να παραγάγει μια μέση διάρκεια ζωής 20.000 ωρες, ή 2.3 έτη. Αυτό είναι μια πολύ σύντομη διάρκεια ζωής στην πράξη. Η διάρκεια ζωής είναι πιο μακροχρόνια από 2.3 έτη, επειδή θεωρείται ότι κατά την προετοιμασία των προτύπων ταξινόμησης της μόνωσης στην πραγματικότητα η θερμοκρασία του τυλίγματος δεν παραμένει συνεχώς στο ανώτερο όριο.Υποτίθεται ότι η μηχανή λειτουργει περιοδικά στο μερικό φορτίο, η περιβαλλοντική θερμοκρασία φθάνει σπάνια το ανώτερο όριο του και υπάρχει κάποιος χρόνος που δεν λειτουργούν. Οι κατασκευαστές σχεδιάζουν συχνά την άνοδο θερμοκρασίας για παράδειγμα για την κλάση 130 (B), αλλά έπειτα χρησιμοποιεί ένα συστημα μόνωσης στην κλάση 155 (F). Αυτή η ταξινόμηση οδηγεί σε μια μακρύτερη διάρκεια ζωής της μόνωσης. Αξίζει επίσης να σημειωθεί ότι ο δείκτης θερμοκρασίας της μόνωσης που ανήκει για παράδειγμα η κλάση 155 πρέπει να είναι τουλάχιστον 155. Όταν η θερμική κλάση της μόνωσης καθορίζεται,ο δείκτης της θερμοκρασίας στρογγυλοποιείται προς τα κάτω στην κοντινότερη θερμική κλάση.Εάν μια μηχανή λειτουργεί 24 ώρες την ημέρα καθ' όλη τη διάρκεια του έτους (μια κατάσταση χαρακτηριστική στις εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας), η άνοδος της θερμοκρασίας της μηχανής στα τυλίγματα πρέπει να σχεδιαστούν κάτω από την επιτρεπόμενη αξία που δίνεται στον πίνακα.

Η βραχυπρόθεσμη θερμική αντίσταση αναφέρεται στις θερμικές πιέσεις,η "διάρκεια" των οποίων είναι μερικές ώρες στο μέγιστο. Κατά τη διάρκεια αυτής της

πίεσης, το μονωτικό υλικό μπορεί να λιώσει, ή μπορεί να εμφανιστούν φυσαλίδες ή μπορεί να συρρικνωθεί ή να γίνει απανθρακωμένο. Η μόνωση δεν πρέπει να καταστραφεί με οποιονδήποτε από αυτούς τους τρόπους, εάν η θερμοκρασία ξεπερνιέται συγκρατημένα σε οποιαδήποτε κατάσταση υπό τις κανονικές συνθήκες λειτουργίας. Στον πίνακα, η άνοδος θερμοκρασίας αναφέρεται σε μια επιτρεπόμενη άνοδο θερμοκρασίας και σε ένα εκτιμημένο τύλιγμα φορτίου. Αυτή η άνοδος θερμοκρασίας δεν προκαλεί την πρόωρη γήρανση του μονωτή. Η υπερβολική διακύμανση της θερμοκρασίας μπορεί να προκαλέσει την ανάπτυξη της ευθραυστότητας και ρωγμές στο μονωτικό υλικό. Πρέπει να σημειωθεί πως όταν υπάρχουν διάφοροι παράγοντες γήρανσης, όπως η θερμοκρασία και η υγρασία, συγχρόνως, η κρίσιμη θερμοκρασία θα είναι χαμηλότερη και θα πρέπει να προσεγγιστεί χωριστά για κάθε περίπτωση. Η θερμική γήρανση υπολογίζεται συνήθως από την εξίσωση του Arrhenius για την ταχύτητα της αντίδρασης

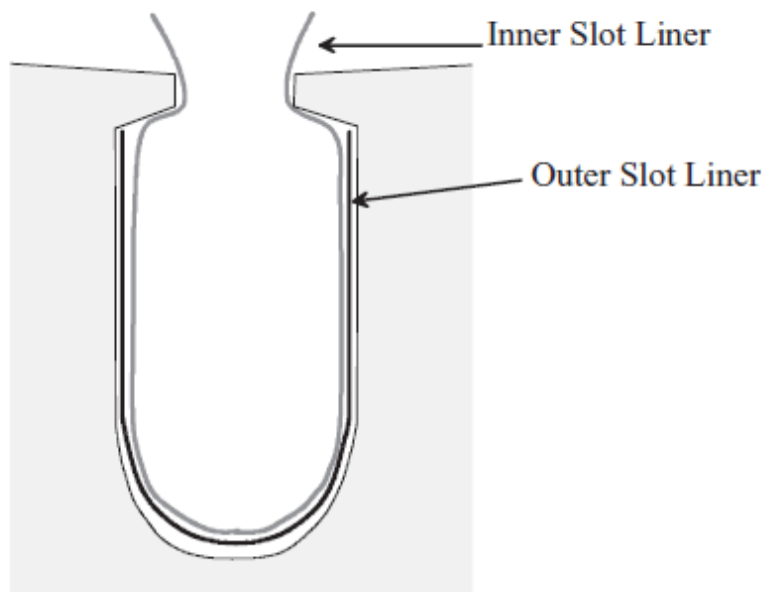
$$k = \eta e^{-E_a/RT} \quad (12)$$

όπου η είναι μια πειραματική προ-εκθετική σταθερά, E_a είναι η ενέργεια ενεργοποίησης, το R είναι το αέριο και η σταθερά T είναι η απόλυτη θερμοκρασία.

Οι πρακτικές κατασκευές μονωτών έχουν δείξει ότι μια άνοδος θερμοκρασίας 8-10K κόβουν το αναμενόμενο προσδόκιμο ζωής στο μισό.

4.8 ΠΡΑΚΤΙΚΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ ΜΟΝΩΣΗΣ

Στην πράξη, ο σημαντικότερος παράγοντας που επηρεάζει τη δομή της μόνωσης είναι η ονομαστική τάση της μηχανής. Με βάση την ονομαστική τάση, οι ηλεκτρικές μηχανές μπορούν να διαχωριστούν σε μηχανές υψηλής τάσης και χαμηλής τάσης. Μια μηχανή χαμηλής τάσης είναι μια μηχανή η ονομαστική τάση της οποίας είναι κάτω από 1 kV. Στις μηχανές χαμηλής τάσης, η τάση αντοχής της μόνωσης δεν αποτελεί συνήθως ένα αποφασιστικό κριτήριο σχεδιασμού. Εάν η κατασκευή μόνωσης είναι αρκετά ισχυρή μηχανικά για να αντέξει (την διάταξη) assembly, και τα ρεύματα ερπυσμού της κατασκευής μόνωσης είναι στον έλεγχο, η δύναμη της τάσης είναι αρκετά ικανοποιητική. Το Nonsparking έχει κατά τη λειτουργία για να εξασφαλιστούν, προς το παρόν, τα περισσότερα κοινά οργανικά υλικά που δεν αντιστέκονται στην ανάφλεξη. Στις υψηλής τάσεως μηχανές αντ' αυτού, η δύναμη είναι ένας αποφασιστικός παράγοντας στο σχέδιο της παρουσίας των μερικών εκκενώσεων. Μερικά πρακτικά παραδείγματα των κατασκευών μόνωσης θα συζητηθούν παρακάτω.



σχήμα 18. Μόνωση μιας αυλάκωσης του στατή μιας χαμηλής τάσης μηχανής AC. Μια απόσταση 0.2 mm - 0.3mm από τον τοίχο αυλακώσεων πρέπει να διατηρηθεί για τη μόνωση. Με άλλα λόγια, η μόνωση αυλακώσεων έχει τελειώσει πριν την τοποθέτηση του πηνίου στην αυλάκωση. Τα πηνία τροφοδοτούνται στο καλώδιο των αυλακώσεων από το καλώδιο ή σε ομάδες μερικών καλωδίων.

4.8.1 ΜΟΝΩΣΕΙΣ ΑΥΛΑΚΩΣΕΩΝ ΤΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ ΧΑΜΗΛΗΣ ΤΑΣΗΣ

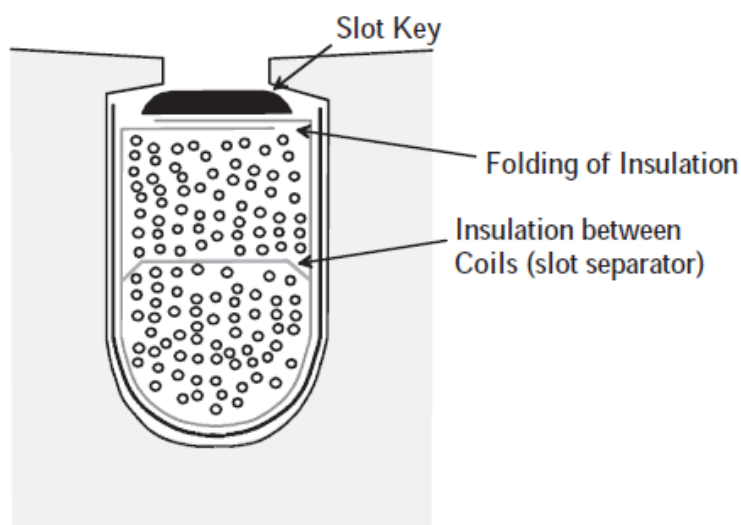
Η μόνωση των αυλακώσεων αποτελείται συνήθως από δύο στρώματα, δηλαδή από μια εξωτερική και από μια εσωτερική επένδυση. Το σχήμα 18 επεξηγεί τον προσδιορισμό της θέσης των επενδύσεων της γραμμής στην αυλάκωση. Η εσωτερική μόνωση διαμορφώνει μια καθοδήγηση που διευκολύνει τη διάταξη των καλωδίων. Η αυλάκωση του στάτη είναι τελικά κλειστή και ανοίγει τις αυλάκώσεις με ένα κλειδί ή μια σφήνα αυλακώσεων.

Εάν το τύλιγμα κατασκευάζεται έτσι ώστε να υπάρξουν περισσότερες από μια πλευρές πηνίων σε μια ενιαία αυλάκωση, μια πρόσθετη μόνωση (ένας διαχωριστής αυλακώσεων) απαιτείται μεταξύ των πλευρών των πηνίων. Αυτό δεν είναι συνήθως πρόβλημα στις μηχανές κάτω από 1 kV. Η τάση μεταξύ των διάφορων πλευρών των πηνίων είναι το μέγεθος της τάσης γραμμή προς γραμμών στο μέγιστο. Το σχήμα 19 απεικονίζει μια αυλάκωση με δύο πλευρές πηνίων που κλείνουν με ένα κλειδί τις αυλακώσεις. Η μόνωση πρέπει να επεκτείνει τη εξωτερική όψη της αυλάκωσης στις άκρες. Για παράδειγμα, η προεξοχή πρέπει να είναι 5mm στο ελάχιστο όταν η εκτιμημένη τάση είναι 500V μέγιστο. Αυτή η προεξοχή είναι σημαντική, δεδομένου ότι ένα τοπικό μέγιστο ηλεκτρικό πεδίο δημιουργείται κατα θέση όπου η αυλάκωση τελειώνει, δημιουργώντας τα ρεύματα ερπυσμού.

Σήμερα υπάρχουν ανθεκτικά υλικά διαθέσιμα, η δύναμη τάσης των οποίων είναι αρκετά υψηλή (π.χ. ταινίες πολυεστέρα) και που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να κατασκευάσουν μια μονής στρώσης ή μόνωση αυλακώσεων. Σε αυτή την περίπτωση, τα πηνία τοποθετούνται στις αυλακώσεις με βοηθητικούς οδηγούς ή με την

χρησιμοποίηση φαρδιών ταινιών μόνωσης που οδηγούν τα καλώδια στην αυλάκωση χωρίς να καταστραφούν. Μετά τα πηνία τοποθετούνται στην αυλάκωση, οι πρόσθετοι οδηγοί αφαιρούνται ή οι μεγάλες ταινίες μόνωσης κόβονται και η αυλάκωση είναι κλειστή με ένα καπάκι.

Στο προηγούμενο κεφάλαιο, συζητήθηκαν οι μονώσεις των πηνίων φάσης σε μια αυλάκωση. Επίσης πρέπει να διαχωρίζονται στα άκρα των πηνίων οι διαφορετικές φάσεις. Τα κομμάτια υφάσματος χρησιμοποιούνται ως μονωτικά υλικά για την μόνωση των πηνίων. Τα κομμάτια είναι γεμισμένα σε θέση μετά τη συναρμολόγηση των πηνίων και τα τυλίγματα τέλος είναι δεμένα με τις ζώνες ίνας γυαλιού και τελικά ολόκληρο το σύστημα μόνωσης με πρόσθετα.



Σχήμα 19 Κλειστο-κλειδί αυλάκωσης μιας ρύθμισης τυλίγματος διπλού στρώματος. Το τύλιγμα αποτελείται από στρογγυλά σμαλτωμένα καλώδια. Η περιέλιξη κατασκευάζεται από τύλιγμα των καλωδίων σε ένα προηγούμενο πηνίο παραμελώντας την σειρά των καλωδίων. Όταν το πηνίο τροφοδοτείται μέσα στις αυλακώσεις του στατη, η σειρά των καλωδίων μπορεί να μπερδευτεί ακόμα περισσότερο και επομένως το τύλιγμα λέγεται τύλιγμα τυχαία-πληγή εκκαθάρισης. Στην διαστασιολογία της διατομής για την περιοχή της αυλάκωσης, πρέπει να σημειώσει ότι η υψηλότερη πιθανή kCu παράγοντα του ελεύθερου χώρου για ένα στρογγυλό καλώδιο το τύλιγμα είναι στην πράξη, περίπου 0.66. Συνήθως, ο παράγοντας ποικίλλει μεταξύ 0.6 και 0.66. Έτσι όταν λαμβάνεται υπόψη ο χώρος που απαιτείται για τη μόνωση των αυλακώσεων, μπορούμε να δούμε ότι λιγότερο από το μισό του συνόλου την περιοχή της αυλάκωσης μπορεί να γεμίσει με τον πραγματικό χαλκό καλωδίων. Η μόνωση έχει μεγάλη σημασία στον προσδιορισμό των ανθεκτικών απωλειών της μηχανής. Στις μικρές μηχανές, το ποσοστό των ανθεκτικών απωλειών είναι σχετικά υψηλό, και επομένως, κατά εξέταση της αποδοτικότητας της μηχανής, το γέμισμα των αυλακώσεων αξίζει ιδιαίτερης προσοχής.

Εκτός από τους παραπάνω τύπους μονώσεων, οι μολύβδοι σύνδεσης πρέπει να μονώνονται με μόλυβδο-INS χρησιμοποιώντας ένα μονωτικό περίβλημα κατάλληλου πάχους. Τέλος, πριν τον εμποτισμό, τα πηνία είναι δεμένα με τις ζώνες. Πρόσθετη προσοχή πρέπει να δοθεί στην αξιοπιστία της στερέωσης των καλωδίων και των μολύβδων σύνδεσης για να εξασφαλιστεί ότι το τύλιγμα δεν μπορεί να κινηθεί και να υπάρξει φθορά στα μηχανικά.

4.8.1 ΠΟΛΟΙ ΤΥΛΙΓΜΑΤΟΣ ΜΟΝΩΣΕΣΩΝ

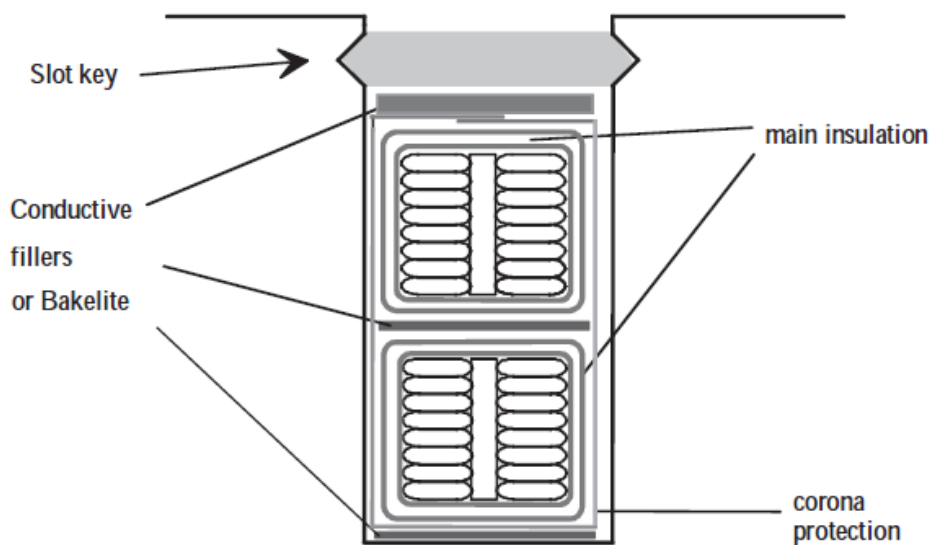
Στο συνεχές ρεύμα και τις σύγχρονες μηχανές, χρησιμοποιούνται τα συνεχή τυλίγματα. Αυτά τα τυλίγματα καλούνται πόλοι τυλίγματα ή τυλίγματα πεδίων. Τα συγκεντρωμένα τυλίγματα χρησιμοποιούνται επίσης στην κλασματική αυλάκωση PMSMs. Αυτά τα τυλίγματα είναι παρόμοια με τα τυλίγματα πεδίων του συνεχούς ρεύματος ή των σύγχρονων μηχανών. Οι πόλοι με τον προσχηματισμένο χαλκό, ο οποίος αν και έχει χαρακτηριστικά ορθογώνιας μορφής μπορεί να χρησιμοποιηθεί. Και στις δύο περιπτώσεις, το λουστράρισμα είναι η πιο κοινή μέθοδος μόνωσης. Το μονωμένο τύλιγμα συγκεντρώνεται γύρω από έναν πυρήνα σιδήρου. Κανονικά, η διαστασιολογήση των τυλιγμάτων πόλων δεν είναι προβληματική και επομένως το πάχος από τη μόνωση δεν θέτει οποιαδήποτε όριο στην κατασκευή. Πόλοι των μηχανών συνεχούς ρεύματος τυλίγονται χωριστά, όπως τα πηνία. Κατ' αρχάς, ένα στρώμα της μόνωσης και έπειτα οι περιελίξεις τυλίγονται σε αυτό.

4.9 ΜΟΝΩΣΗ ΤΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ ΧΑΜΗΛΗΣ ΤΑΣΗΣ

Οι μηχανές χαμηλής τάσης μπορούν να εμποτιστούν με την εμβύθιση και να ψηθούν με τη μέθοδο της ενυδάτωσης της μηχανής στη ρητίνη (εμβύθιση) και έπειτα με το ζέσταμα της ρητίνης σε έναν φούρνο. Αυτή είναι μια παραδοσιακή μέθοδος και ήταν σε χρήση από την αρχή των ημερών των ηλεκτρικών μηχανών. Εντούτοις, η μέθοδος αυτή ακόμα χρησιμοποιείται ευρέως επειδή είναι εύκολη και φτηνή και δεν απαιτεί κάποια βαριά ή ακριβή εγκατάσταση, όπως οι αντλίες νερού. Η κενή διαπότιση πίεσης (VPI) χρησιμοποιείται σε ειδικές μηχανές με μια ειδικά σχεδιασμένη μόνωση, σαν αυτές που οδηγούνται από τα συστήματα κίνησης με μετατροπέα. Η μέθοδος συζητείται λεπτομερώς στο επόμενο κεφάλαιο. Για τις μικρές μηχανές, μπορεί να εφαρμοστεί η μέθοδος εμποτισμού μικρών διαχύσεων. Σε αυτήν την μέθοδο, ο στάτης είναι συνδεδεμένος σε ένα περιστρεφόμενο με κλίση πάγκο. Το ρεύμα είναι εφαρμοσμένο στα τυλίγματα για να τους προθερμάνει. Η προθερμασμένη ρητίνη χύνεται αργά επάνω στα τυλίγματα από το άνω άκρο της μηχανής, εξού και το όνομα. Ταυτόχρονα, ο πάγκος αρχίζει να περιστρέφεται αργά. Η ρητίνη αρχίζει να ρέει από τις σχισμές του στάτη και τις γεμίζει. Όταν η ρητίνη αρχίζει να πέφτει έξω από το χαμηλότερο τύλιγμα της μηχανής, τότε το γυρίζουν ανάποδα και η ίδια διαδικασία επαναλαμβάνεται. Όταν ο επιθυμητός εμποτισμός επιτυγχάνεται, η ρητίνη ζεσταίνεται μέσα σε ένα φούρνο.

ΜΟΝΩΣΗ ΤΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ ΥΨΗΛΗΣ ΤΑΣΗΣ

Στη μόνωση των μηχανών υψηλής τάσεως, οι μερικές εκκενώσεις μπορεί να αποδειχθούν ως μια σημαντική αιτία για τη γήρανση της μόνωσης. Οι μηχανές υψηλής τάσεως μπορούν να τυλιχτούν με το στρογγυλό καλώδιο, όταν η εκτιμημένη τάση είναι 3 kV ή λιγότερο. Στις τάσεις επάνω από αυτό, προκατασκευασμένα πηνία είναι φτιαγμένα από προσχηματισμένο χαλκό και επιλέγεται σχεδόν πάντα. Το σχήμα 20 επεξηγεί μια διατομή μιας αυλάκωσης ενός προσχηματισμένου τυλίγματος χαλκού, γνωστό ως form-wound τύλιγμα. Συνήθως, από 6 kV και μετά, υπάρχει επίσης ένα αγωγίμο στέμμα προστασίας μεταξύ του μονωτή και της στοίβας του στάτη στην αυλάκωση.



Σχήμα 20 κατασκευή μόνωσης μιας αυλάκωσης του στάτη σε μια μηχανή υψηλής τάσεως. Το σχήμα δείχνει ότι το ποσοστό της μόνωσης είναι σημαντικά υψηλότερο απ'ό, τι στην αυλάκωση της μηχανής χαμηλής τάσης Σχήμα 19. Αφ' ενός, ο προσχηματισμένος χαλκός έχει χρησιμοποιηθεί στην αυλάκωση και επομένως σε αυτό το διάστημα ο παράγοντας του χαλκού γίνεται σχετικά υψηλός.

Η λειτουργία αυτού του στρώματος είναι να αποτραπεί η ανάφλεξη στα κενά μεταξύ του μονωτή και της στοιβάς των φύλλων. Τα ημι-αγώγιμα και αγώγιμα υλικά μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν ως γέμιση των αυλακώσεων. Το πιο κοινό μονωτικό υλικό του πηνίου στις υψηλής τάσεως μηχανές είναι μια ταινία μίκας στα στρώματα γύρω από τους αγωγούς. Χάρη στην εξαιρετική αντοχή στις μερικές εκκενώσεις του και οι ιδιότητες απόδοσης, η μίκα έχει διατηρήσει την κυρίαρχη θέση της ως μονωτικό υλικό σε μηχανές υψηλής τάσης για περισσότερο από έναν αιώνα. Στη μόνωση των μηχανών υψηλής τάσης, το ποσό των κενών για τον εμποτισμό πρέπει να περιοριστεί στο ελάχιστο. Επομένως, μόνο το VPI και η ρητίνη (RR) είναι μέθοδοι που εφαρμόζονται συνήθως.

Στη μέθοδο VPI, το αντικείμενο για τον εμποτισμό τοποθετείται σε ένα θάλαμο κενού, ο οποίος είναι κλειστός και δημιουργείται ένα κενό με πίεση περίπου 1 millibar. Έπειτα, η ρητίνη αυτή έχει επεξεργαστεί εκ των προτέρων (ιζώδες που ελέγχονται, προσθήκη σκληρυντικού, ψύξη) και εξαερώνεται σε ένα ξεχωριστό δοχείο που διοχετεύεται στον θάλαμο κενού μέσω ενός εναλλάκτη θερμότητας όπου η ρητίνη προθερμαίνεται σε περίπου 70 C ° μέχρι το αντικείμενο που να εμποτίζεται να καλύπτεται εντελώς με τη warmedup ρητίνη. Η προθέρμανση της ρητίνης είναι πολύ σημαντική, επειδή μειώνει σημαντικά το ιζώδες, και έτσι η ρητίνη μπορεί πιο εύκολα να διαπεράσουν τις αυλακώσεις και να τις γεμίσουν εντελώς.

Το κενό στην συνέχεια απελευθερώνεται και ο θάλαμος επιτρέπει να διατηρήσει σταθερή ατμοσφαιρική πίεση από 3 έως 5 bar για μια περίοδο αρκετών ωρών. Τέλος, η ρητίνη διοχετεύεται μέσω ενός εναλλάκτη θερμότητας πίσω στο δοχείο ψύξης. Η ψύξη στο δοχείο αποθήκευσης είναι σημαντική για να επεκτείνει τη διάρκεια ζωής της μη σκληρής ρητίνης. Το αντικείμενο που χρησιμοποιείται για τον εμποτισμό τοποθετείται έπειτα στο φούρνο, όπου η ρητίνη έχει σκληρύνει. Η μέθοδος VPI είναι

ιδιαίτερα κατάλληλη για τα προσχηματισμένα τυλίγματα χαλκού, το πάχος της μόνωσης των οποίων μπορεί να διαστασιοποιηθεί ακριβώς. Κατά συνέπεια το πάχος των στρωμάτων της ρητίνης μπορούν επίσης να ελεγχθούν.

Στη μέθοδο RR, σχεδόν όλα τα επιλεγμένα μονωτικά και άλλα υλικά είναι προεμποτισμένα. Το συνδετικό υλικό είναι συνήθως η εποξική ρητίνη, η οποία είναι προψημένη, στην οποία η ρητίνη είναι σταθερή αλλά μαλακή, και το μονωτικό υλικό είναι εύκολο να επεξεργαστεί. Τα πηνία είναι μονωμένα με διάφορες στρώσεις ταινίας μίκας και έχουν τυλιχθεί γύρω από το πηνίο από άκρη σε άκρη. Αυτή είναι η βασική μόνωση του πηνίου. Τέλος, η εποξική ρητίνη της μόνωσης έχει σκληρύνει σε υψηλή θερμοκρασία (περίπου 160 ° C) και υψηλή πίεση. Συνήθως, η μόνωση αυτού του τύπου καλύπτει τις απαιτήσεις της θερμικής κλάσης 155 (F).

Η μέθοδος VPI διαφέρει από τη μέθοδο RR από το γεγονός ότι στην πρώτη, τα μονωτικά υλικά που χρησιμοποιούνται είναι πορώδη, και δεν περιέχουν σημαντική ποσότητα δεσμευατικών παραγόντων. Όταν η μόνωση τοποθετείται στην θέση του, τα διαστήματα του αέρα είναι προσεκτικά εμποτισμένα με ρητίνη. Κατά την εφαρμογή της μεθόδου VPI, με ακριβή διαστασιοποίηση είναι δυνατό να μειωθεί το ποσό της πληρωμής που απαιτούνται στη βασική συναρμολόγηση. Η τελική μόνωση είναι να τηρούν την ίδια ποιότητα ανεξάρτητα από την επιλεγμένη μέθοδο.

Όπως φαίνεται στο σχήμα 20, με τη μέθοδο RR οι ταινίες υλικών πληρώσεως μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Ένας από τους σκοπούς αυτών των ταινιών είναι να εξασφαλιστεί ότι η βασική σχισμή των αυλακώσεων ενσφηνώνει ομοιόμορφα τη ράβδο. Μερικές φορές ακόμη και οι εύκαμπτες ταινίες υλικών πληρώσεως επιλέγονται για να αποφύγουν την χαλάρωση των πηνίων. Αυτή η χαλάρωση μπορεί επίσης να αποφευχθεί με τη εφαρμογή μιας μεθόδου με την οποία στο τυλίγμα προκαλείται γήρανση με την έκθεση του στη μηχανική δύναμη και στη θερμότητα. Αυτή η μέθοδος καλείται καυτή *prewedging*. Εξασφαλίζει μια υψηλή και μόνιμη συμπίεση δύναμης της βασικής συναρμολόγησης.

Η μόνωση των τυλιγμάτων τέλος κατασκευάζεται με τον ίδιο τρόπο όπως στις αυλακώσεις χωρίς όμως ταινίες υλικών πληρώσεως. Δεν χρησιμοποιείται ένα αγωγίμο υλικό, σε αντίθεση με το σημείο αυλακώσεων. Εντούτοις, στο σημείο όπου η στοιβα του στάτη τελειώνει, τα ημιαγωγίμα υλικά επίστρωσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην επιφάνεια του αγωγού. Τα πιο συνηθισμένα υλικά ταξινόμησης πίεσης είναι ένα ημιαγωγίμο καρβίδιο του πυριτίου ή μολύβδα.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Silicone Based Electrical Insulation Material for High Speed/Voltage Rotating Machines www.arlon-std.com , pdf

Rudolf Bruetsch

Von Roll Switzerland Ltd., 4226 Breitenbach, Switzerland

Makoto Tari

Von Roll Isola Japan, Tokyo, 150-0013, Japan

Πυργιώτη Ελευθερία ,Επίκουρος καθηγήτης

Χαραλαμπάκος Βασίλης

Design of rotating Machines ,*Design es* Juha Pyrho nen, Tapani Jokinen and Valeria Hrabovcova , pdf