

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΟΣ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΙΑΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αριθμός 1512

ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ
ΣΕ ΜΟΝΩΤΙΚΑ ΛΑΔΙΑ

ΟΝΟΜΑΤΕΠΩΝΥΜΟ ΣΠΟΥΔΑΣΤΗ:

ΚΑΛΟΓΙΑΝΝΗΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ, Α.Μ. 5725

ΕΠΟΠΤΕΥΟΝΤΕΣ ΚΑΘΗΓΗΤΕΣ:

ΧΑΡΑΛΑΜΠΑΚΟΣ ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ

ΠΥΡΓΙΩΤΗ ΕΛΕΥΘΕΡΙΑ

ΠΕΠΠΑΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

ΠΑΤΡΑ ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 2015

Copyright © Δημήτριος Β. Καλογιάννης, 2014

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η εντατική αύξηση της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας που παρατηρείται τα τελευταία χρόνια (ετήσια παγκόσμια κατανάλωση 6,25X10⁹ KWH με ρυθμό ετήσιας αύξησης 7%), απαιτεί συστήματα Μεταφοράς Ηλεκτρικής ενέργειας όλο και μεγαλύτερης τάσης. Ταυτόχρονα πρέπει να εξασφαλίζεται και μεγαλύτερη αντοχή στις διάφορες ηλεκτρικές καταπονήσεις με τη χρησιμοποίηση των κατάλληλων μονωτικών υλικών.

Η χρήση μονωτικών υλικών αποτελεί βασική πρακτική στο σχεδιασμό μονωτικών διατάξεων υψηλών τάσεων μετασχηματιστών. Οι μετασχηματιστές υψηλής τάσης αποτελούν το κυρίαρχο μέσο στα παγκόσμια δίκτυα μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Η χρήση μονωτικών μέσων σε μετασχηματιστές υψηλής τάσης καθίσταται αναγκαία.

Τα πλέον διαδεδομένα μονωτικά υλικά που χρησιμοποιούνται ευρέως είναι τα μονωτικά έλαια. Πλεονεκτούν έναντι των υπολοίπων μονωτικών μέσων σε αρκετά σημεία. Υπό την επίδραση καταπονήσεων η μόνωση μπορεί να υποστεί μεταβολές (μόνιμες ή παροδικές) διαφόρων ιδιοτήτων της. Η μελέτη των ιδιοτήτων των συγκεκριμένων υλικών οδηγεί σε χρήσιμα συμπεράσματα για την λειτουργία τους και την σωστή χρήση τους. Συνεπώς θεωρείται σκόπιμη η μελέτη της συμπεριφοράς αυτών των υλικών.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η διατήρηση της διαφοράς του δυναμικού μεταξύ των υπό υψηλής τάσης αγωγίμων μερών ενός εξοπλισμού καθιστά αναγκαία την μόνωση αυτού καθώς και των εγκαταστάσεων υψηλής τάσης. Μια διαδεδομένη κατηγορία μονωτικών υλικών είναι τα μονωτικά υγρά. Συγκεκριμένα τα πιο εύχρηστα από αυτά είναι τα ορυκτά έλαια, δηλαδή έλαια που προέρχονται από την κλασματική απόσταξη του πετρελαίου. Η χρήση τους είναι ιδιαίτερα δημοφιλής για δυο κυρίως λόγους, λόγω της εύκολης διάθεσης τους αλλά και του χαμηλού σχετικά κόστους τους. Εφαρμογή της χρήσης των μονωτικών ελαίων έχουμε κυρίως σε μετασχηματιστές και διακόπτες ελαίου. Άλλα παραδείγματα χρήσης μονωτικών ελαίων είναι πυκνωτές, καλώδια, μονωτήρες διέλευσης κ.α.

Η παρούσα πτυχιακή μελέτη πραγματεύεται την ανθεκτικότητα των μονωτικών ελαίων στους μετασχηματιστές, καθώς αυτό το καταπονούμε σε διάκενο με γραμμικά αυξανόμενη τάση AC. Στο θεωρητικό σκέλος της εργασίας (κεφάλαιο 1) γίνεται εισαγωγική αναφορά και περιγραφή της έννοιας των μονωτικών υλικών και δη εκτενέστερα των μονωτικών ελαίων καθώς και της μεθόδου προέλευσης τους. Ακόμη αναλύονται οι φυσικές και χημικές τους ιδιότητες καθώς και οι τρόποι διάσπασης των μονωτικών ελαίων. Αναφέρονται ακόμη οι εφαρμογές των μονωτικών ελαίων και τα πλεονεκτήματά τους. Έπεται η πλήρης περιγραφή της δομής ενός μετασχηματιστή και η συνοπτική αναφορά της χρήσης των μονωτικών ελαίων και σε άλλες συσκευές (πυκνωτές, καλώδια, μονωτήρες διέλευσης, μετασχηματιστές μετρήσεων) (κεφάλαιο 2).

Στη συνέχεια περιγράφεται η πειραματική διάταξη της μελέτης η οποία χρησιμοποιήθηκε κατά την διεξαγωγή των μετρήσεων (κεφάλαιο 3). Γίνεται εκτενής αναφορά των επιμέρους στοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν για την επίτευξη του πειράματος (το είδος του μονωτικού λαδιού, η διάταξη καθώς και τα όργανα που χρησιμοποιήθηκαν). Περιγράφονται τα βήματα του πειράματος και μετρήσεις που λήφθηκαν. Τέλος αναλύονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την πειραματική διαδικασία με παρουσίαση γραφημάτων από την ομαδοποίηση των αποτελεσμάτων με την βοήθεια του προγράμματος ORIGIN.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ	I
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	II
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	4
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	5
1.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΜΟΝΩΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ	5
1.2. ΑΝΑΓΚΗ ΓΙΑ ΧΡΗΣΗ ΜΟΝΩΤΙΚΩΝ ΥΓΡΩΝ	7
1.3. ΟΡΥΚΤΑ ΕΛΑΙΑ	8
1.4. ΠΡΟΕΛΕΥΣΗ ΟΡΥΚΤΩΝ ΕΛΑΙΩΝ	9
1.5. ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΟΡΥΚΤΩΝ ΕΛΑΙΩΝ	10
1.5.1. Κλασματική απόσταξη	10
1.5.2. Διύλιση	10
1.6. ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΚΑΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΜΟΝΩΤΙΚΩΝ ΕΛΑΙΩΝ ..	11
1.6.1. ΦΥΣΙΚΑ ΚΑΙ ΧΗΜΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ	12
1.6.2. ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ	17
1.7. ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗΝ ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΗ	
ΑΝΤΟΧΗ ΤΩΝ ΜΟΝΩΤΙΚΩΝ ΛΑΔΙΩΝ	19
1.8. ΒΑΣΙΚΑ ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΜΟΝΩΤΙΚΩΝ ΛΑΔΙΩΝ	22
1.9. ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΔΙΑΣΠΑΣΗΣ ΜΟΝΩΤΙΚΩΝ ΛΑΔΙΩΝ	23
1.9.1. Ηλεκτρονική διάσπαση	24
1.9.2. Διάσπαση μέσω αιρούμενων σωματιδίων	25
1.9.3. Διάσπαση κοιλότητας	27
1.9.4. Ηλεκτρομεταφορά και ηλεκτροϋδροδυναμικό πρότυπο	
διηλεκτρικής διάσπασης	28
1.9.5. Μια ενδιαφέρουσα περίπτωση με χρήση νανοσωματιδίων	29
1.10. ΣΥΝΤΗΡΗΣΗ ΜΟΝΩΤΙΚΩΝ ΕΛΑΙΩΝ	30
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	31
2.1. ΧΡΗΣΗ ΜΟΝΩΤΙΚΩΝ ΛΑΔΙΩΝ	31
2.2. ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΕΣ	31
2.2.1. ΓΕΝΙΚΑ	31
2.2.2. ΔΟΜΗ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗ	32
2.2.3. ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΕΣ ΙΣΧΥΟΣ	34
2.2.4. ΒΑΣΙΚΑ ΜΕΡΗ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗ ΙΣΧΥΟΣ ΛΑΔΙΟΥ	37
2.2.5. ΜΟΝΩΤΙΚΟ ΧΑΡΤΙ	41
2.2.6. ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗ	42
2.3. ΚΑΛΩΔΙΑ	43
2.4. ΜΟΝΩΤΗΡΕΣ ΔΙΕΛΕΥΣΗΣ	45
2.5. ΠΥΚΝΩΤΕΣ	47
2.6. ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΕΣ ΟΡΓΑΝΩΝ	48
2.7. ΕΛΑΙΟΔΙΑΚΟΠΤΕΣ	48
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	50
ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ	50
3.1 ΓΕΝΙΚΑ	50
3.2 ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΕΝΤΑ ΟΡΓΑΝΑ.....	50
3.3 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΔΙΕΞΑΓΩΓΗΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ	54
3.3.1 ΠΙΝΑΚΕΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ	58
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	60

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σκοπός της παρούσας πτυχιακής εργασίας είναι η μελέτη των μονωτικών λαδιών. Αφού γίνει μια σύντομη εισαγωγή στα μονωτικά λάδια, αναλύεται η ανάγκη για τη χρήση μονωτικών υγρών καθώς και ο σκοπός τους. Στη συνέχεια δίνονται διάφορες πληροφορίες σχετικά με τα ορυκτά έλαια και την προέλευσή τους.

Αναλύονται οι ιδιότητες και τα χαρακτηριστικά των μονωτικών ελαίων, τα φυσικά αλλά και χημικά τους χαρακτηριστικά (χρώμα, πυκνότητα, ειδική θερμότητα), τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά (διηλεκτρική αντοχή, ειδική αντίσταση σε αγωγιμότητα, διηλεκτρική σταθερά, συνετελεστής απωλειών).

Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στους παράγοντες που επηρεάζουν την διηλεκτρική αντοχή των μονωτικών λαδιών. Πιο συγκεκριμένα αναλύονται η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων, το υλικό τους, η γεωμετρία τους, το είδος της εφαρμοζόμενης τάσης, η θερμοκρασία, η πίεση, η παρουσία ξένων σωματιδίων καθώς επίσης η γήρανση του ελαίου και η ποιότητα του. Επιπλέον, γίνεται λόγος για τα βασικά πλεονεκτήματα και τους μηχανισμούς των μονωτικών λαδιών.

Στη συνέχεια γίνεται αναφορά στους μετασχηματιστές (δομή, τύποι, βασικά μέρη μετασχηματιστή ισχύος, απώλειες). Ακόμη δίνονται πληροφορίες για καλώδια, μονωτήρες διέλευσης, πυκνωτές, ελαιοδιακόπτες.

Τέλος, παρατίθεται το πειραματικό κομμάτι της πτυχιακής εργασίας. Κάποιες γενικές πληροφορίες, τα χρησιμοποιηθέντα όργανα καθώς επίσης και οι πίνακες με τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο Τεχνολογίας Υψηλής Τάσεως των Ηλεκτρολόγων Μηχανικών, στο Πανεπιστήμιο Πάτρας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

1.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΜΟΝΩΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ

Τα μονωτικά υλικά συναντώνται στις περισσότερες εκφάνσεις της καθημερινής ανθρώπινης δραστηριότητας. Ανάλογα με το είδος της μόνωσης που προσδίδουν προέρχεται και η ονομασία τους θερμομονωτικά, ηχομονωτικά και ηλεκτρομονωτικά.

Τα θερμομονωτικά εμποδίζουν την μεταφορά θερμότητας από ένα σώμα σε ένα άλλο. Τέτοια υλικά είναι ο πετροβάμβακας, ο υαλοβάμβακας κ.α. και χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο στην θερμική μόνωση κτιρίων. Η άνοδος των επιπέδων ηχορρύπανσης λόγω των ανθρώπινων δραστηριοτήτων επιβάλλει και την ηχητική μόνωση κτιρίων, αυτοκινητοδρόμων κτλ. Μονωτικά υλικά που χρησιμοποιούνται για αυτό το σκοπό είναι ο υαλοβάμβακας και το πλαστικό. Τέλος τα ηλεκτρομονωτικά υλικά έχουν στόχο την προστασία του ανθρώπου ή άλλων διατάξεων από το ηλεκτρικό ρεύμα. Δηλαδή εμποδίζουν την δημιουργία αγωγίμου δρόμου ανάμεσα σε δύο διαφορετικού επιπέδου τάσης σώματα. Τα ηλεκτρομονωτικά υλικά μπορούν να ταξινομηθούν σε τρεις κατηγορίες : αέρια, υγρά και στερεά μονωτικά υλικά [6].

Στα αέρια μονωτικά υλικά ανήκει το εξαφθοριούχο θείο το οποίο χρησιμοποιείται σε διακόπτες και πίνακες υψηλής τάσεις προκειμένου να μειωθούν οι αποστάσεις μονώσεις. Στην ατμοσφαιρική πίεση εμφανίζει τη μισή διηλεκτρική αντοχή σε σύγκριση με τα μονωτικά έλαια αλλά σε υψηλότερες πιέσεις υπερέχει. Οι εφαρμογές του είναι πολλές. Το μεγαλύτερο μέρος της παραγωγής του προορίζεται ως μονωτικό μέσο σε εγκαταστάσεις παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και ένα μικρό μέρος της παραγωγής του προορίζεται για την κατασκευή ημιαγωγών κατάλληλης μορφολογίας, παραγωγή μετάλλου του μαγνησίου, στην ανακύκλωση του αλουμινίου κ.α. . Μερικές από τις βασικές του ιδιότητες είναι:

Μοριακός τύπος	SF ₆
Μοριακό βάρος	146,06 g/mol
Πυκνότητα	6,164 g/L ως αέριο σε 1 ατμόσφαιρα 1,329 kg/L ως υγρό στους 25°C 2,510 kg/m ³ ή 2,510 kg/L ως στερεό στους -50.8°C
Σημείο ζέσης	-64°C
Σημείο τήξης	-50,8°C

Πίνακας 1: βασικές ιδιότητες του εξαφθοριούχου θείου[9]

Τα υγρά μονωτικά υλικά έχουν μεγαλύτερη διηλεκτρική αντοχή από τα αέρια. Συγκεκριμένα κάποια από τα έλαια που χρησιμοποιούνται στους μετασχηματιστές έχουν ακόμη και δέκα φορές μεγαλύτερη διηλεκτρική αντοχή από τον αέρα. Ιδιαίτερα δημοφιλή υγρά μονωτικά υλικά είναι τα μονωτικά έλαια που προέρχονται από την απόσταξη του πετρελαίου. Τα πλεονεκτήματα και οι ιδιότητες τους αναλύονται σε παρακάτω κεφάλαιο. Όπως αναφέραμε και παραπάνω τα ορυκτά έλαια είναι τα πιο ευρέως διαδεδομένα υγρά που χρησιμοποιούνται για την ηλεκτρική μόνωση και τη μεταφορά θερμότητας σε εξοπλισμούς όπως μετασχηματιστές, πυκνωτές, μονωτήρες διέλευσης κλπ. Τα τεχνικά τους χαρακτηριστικά έχουν βελτιωθεί κατά τη διάρκεια του περασμένου αιώνα έτσι ώστε να ταιριάζουν με τις απαιτήσεις αυτών των πεδίων εφαρμογής. Παρόλα αυτά, ακόμα κι αν τα ορυκτέλαια παρουσιάζουν μια τέλεια τεχνική ενάντια στο κόστος, πρέπει να αντιμετωπιστούν οι περιβαλλοντικές τους επιδόσεις.[15].

Στο πλαίσιο των αρχών της βιώσιμης ανάπτυξης, η αναζήτηση για "πράσινα προϊόντα" ως εναλλακτική λύση για τα πετρελαιοειδή πρέπει να πραγματοποιηθεί. Λόγω της μη ορυκτής προέλευσης του, το φυτικό έλαιο θα μπορούσε να είναι μια κατάλληλη λύση σε προβλήματα περιβαλλοντικά, ασφάλειας και υγείας, καθώς και θα μπορούσε να μειώσει το κόστος εκμετάλλευσης των μετασχηματιστών.[15,16]

Τα τελευταία χρόνια έλαια από φυσικό εστέρα έχουν εισαχθεί ως υποκατάστατα των πετρελαιοειδών λόγω των ιδιοτήτων τους. Συγκεκριμένα, τα φυσικά έλαια εστέρα λόγω της βιοαποικοδομησιμότητας τους και τη μη τοξικότητα τους, η οποία συνοδεύεται με τις ιδιότητες τους ανθεκτικότητα στη φωτιά και σε υψηλή θερμοκρασία. Για τους παραπάνω λόγους υπάρχει η τάση αντικατάστασης των πετρελαιοειδών διηλεκτρικά. [17]

Ορισμένα φυτικά έλαια πληρούν τις τεχνικές απαιτήσεις των συμβατικών διηλεκτρικών υγρών. Το εξαιρετικά υψηλό ποσοστό βιοδιασπασιμότητας τους και η μη τοξικότητα είναι άλλες ιδιότητες που καθιστούν αυτά τα φυσικά έλαια ενδιαφέρουσες πρώτες ύλες για την ανάπτυξη νέων, φιλικών προς το περιβάλλον, διηλεκτρικών υγρών.

Τα φυτικά έλαια προέρχονται από σπόρους, άνθη, σιτηρά, φλοιούς και άλλα φυτικά προϊόντα ύστερα από κατάλληλες προσθήκες και επεξεργασία. Στην παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκε ο τύπος του φυτικού ελαίου Envirotemp®FR3TM. Το έλαιο αυτό παράγεται από ελαιούχους σπόρους οι οποίοι είναι ανακυκλώσιμοι και επαναχρησιμοποιήσιμοι.

Συνοψίζοντας, τα πλεονεκτήματα της χρήσης φυτικών ελαίων είναι ότι είναι φιλικά, τόσο για το περιβάλλον όσο και για τον άνθρωπο. Δεν είναι τοξικά και δεν είναι επικίνδυνα αν έρθουν σε επαφή με το

δέρμα. Ακόμα , το γεγονός ότι έχουν υψηλό σημείο ανάφλεξης, οδηγεί στην προστασία του μετασχηματιστή , καθώς και ολόκληρης της ηλεκτρικής εγκατάστασης από ενδεχόμενη πυρκαγιά[16]. Τέλος , τα φυτικά έλαια διασπώνται ταχύτατα, ενώ τα προϊόντα της αποσύνθεσής τους είναι το νερό και το διοξείδιο του άνθρακα.

Το σημαντικότερο όμως πλεονέκτημα των φυτικών ελαίων αφορά στη βελτίωση της λειτουργίας του μετασχηματιστή, είτε αυτή μεταφράζεται σε παρατεταμένη διάρκεια ζωής, είτε σε δυνατότητα υπερφορτίσεως. Τα φυτικά έλαια, έχουν λόγω της φύσης τους, την ικανότητα να διατηρούν το μονωτικό χαρτί του μετασχηματιστή σε καλύτερη κατάσταση, ακόμα και σε συνθήκες υψηλότερης θερμοκρασίας[14].

Τα στερεά μονωτικά υλικά χρησιμοποιούνται κυρίως σε μεταφορές υψηλής τάσης και είναι το γυαλί, η πορσελάνη και σύνθετα πολυμερή. Το βασικό πλεονέκτημα των στερεών μονωτικών υλικών είναι η δυνατότητα διαμόρφωσης του σχεδίου τους από την εκάστοτε κατασκευαστή σύμφωνα με τις ανάγκες της ζητούμενης μόνωσης.

1.2. ΑΝΑΓΚΗ ΓΙΑ ΧΡΗΣΗ ΜΟΝΩΤΙΚΩΝ ΥΓΡΩΝ

Μια ηλεκτρική διάταξη αποτελείται από αγωγούς, μονωτές, μαγνητικά και άλλα μηχανικά δομικά στοιχεία [2]. Μετατρέπει ενέργεια από μια μορφή σε άλλη, και γι' αυτό, η απώλεια ενέργειας είναι αναπόφευκτη. Η ενέργεια αυτή εμφανίζεται με την μορφή θερμότητας που προκαλεί άνοδο της θερμοκρασίας των βασικών δομικών μερών των οργάνων. Στην περίπτωση που η αποβολή της θερμότητας είναι ίσου ρυθμού με την παραγωγή της τότε υπάρχει κατάσταση ισορροπίας. Η μόνωση του εξοπλισμού και των εγκαταστάσεων υψηλής τάσης επιβάλλεται προκειμένου να διατηρηθεί η διαφορά δυναμικού μεταξύ των υπό υψηλή τάση αγωγίμων μερών.

Εκτός του βασικού της ρόλου η μόνωση έχει σκοπό να μεταφέρει την θερμότητα που παράγεται και την μηχανική υποστήριξη των αγωγών [3]. Συγκεκριμένα στους μετασχηματιστές υψηλής τάσεις τα στερεά μονωτικά υλικά χρησιμοποιούνται για την μόνωση των τυλιγμάτων του 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 εξαιτίας της θερμοκρασιακής διαφοράς, είτε με εξαναγκασμένη ροή με τη βοήθεια αντλίας. Από εκεί, η θερμότητα απάγεται προς το περιβάλλον. Άρα ο ρόλος τους είναι διπλός. Τα χρησιμοποιούμε ως μονωτικά μέσα αλλά και ως ψυκτικά μέσα.

Τα υγρά που χρησιμοποιούνται κυρίως σαν «μονωτικά υγρά» είναι μέρος μιας ομάδας ηλεκτροτεχνικών υγρών και είναι γνωστά σαν «υγρά ουσιώδη για την παραγωγή, μεταφορά, διανομή και βιομηχανική χρήση του ηλεκτρισμού». Ο ρόλος των μονωτικών υγρών στη λειτουργία ενός ηλεκτρολογικού εξοπλισμού όπως είναι οι διακόπτες, οι μετασχηματιστές και οι πυκνωτές είναι καθοριστικός. Παρ' όλα αυτά η αξία τους ανέρχεται σε ποσοστό 2% περίπου της συνολικής αξίας του εξοπλισμού. Το λάδι που περιέχεται σ' έναν ηλεκτρολογικό εξοπλισμό παλαιότερα ήταν 2 l/kVA, ενώ σήμερα είναι 1 l/kVA. Το ιδανικό υγρό που χρησιμοποιείται ως μονωτικό, πρέπει να έχει τα παρακάτω γενικά χαρακτηριστικά [6]:

- Μεγάλη διηλεκτρική αντοχή, αντοχή σε κρουστική τάση και ειδική αντίσταση.
- Μεγάλο συντελεστή διηλεκτρικής διασποράς.
- Μεγάλη ή μικρή διηλεκτρική σταθερά, εξαρτώμενη από το σκοπό χρησιμοποίησης.
- Μεγάλη ειδική θερμότητα και θερμική αγωγιμότητα.
- Έξοχη χημική ευστάθεια και ιδιότητες απορροφημένου αερίου.
- Αρκετά χαμηλή θερμοκρασία ροής και χαμηλό ιξώδες.
- Χαμηλή πτητικότητα και ψηλό σημείο ανάφλεξης.
- Μεγάλη διαλυτική ικανότητα.
- Μεγάλη πυκνότητα.
- Να μην είναι εύφλεκτο και τοξικό, να είναι φθινό και να διατίθεται εύκολα.
- Καλές ιδιότητες του τόξου σβέσης.

1.3. ΟΡΥΚΤΑ ΕΛΑΙΑ

Τα ορυκτά έλαια αποτελούν προϊόντα της απόσταξης του πετρελαίου που ανάλογα που ανάλογα με την προέλευση και την επεξεργασία του καυσίμου διαφοροποιούν και την χημική τους σύσταση. Είναι εύχρηστα μονωτικά υγρά διότι διατίθενται εύκολα και σε χαμηλό σχετικά κόστος [2]. Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στο ότι οι ιδιότητες που επιθυμούμε να έχει ένα μονωτικό υγρό μπορεί να μην υπάρχουν στο πετρέλαιο για αυτό το λόγο δημιουργούνται και συνθέσεις μονωτικών υγρών για να επιτευχθεί το προσδόκιμο αποτέλεσμα. Τέτοιες ιδιότητες είναι το σημείο ανάφλεξης και η διηλεκτρική σταθερά. Σημειώνεται ότι το σημείο ανάφλεξης των περισσότερων μονωτικών ελαίων είναι από 130°C έως 250°C. Για αυτό το λόγο και η μέγιστη θερμοκρασία καταπόνησης έχει ορισθεί στους 90°C.

Στα πλεονεκτήματα των μονωτικών ελαίων συγκαταλέγεται και το γεγονός ότι δεν περιέχουν τοξικές ουσίες. Έτσι καθίσταται ακίνδυνη η ανθρώπινη δραστηριότητα σε μικρή απόσταση κατά την εκτέλεση εργασιών κατασκευής και συντήρησης ηλεκτρολογικών διατάξεων και μετασχηματιστών.

Τέλος πρέπει να αναφερθεί το σημαντικότερο μειονέκτημα των μονωτικών λαδιών το οποίο είναι η οξείδωση με τον αέρα. Η οξείδωση με τον αέρα έχει ως αποτέλεσμα την μείωση της διηλεκτρικής αντοχής και για αυτό το λόγο αποκλείεται η επαφή με τον αέρα σε κατασκευές που χρησιμοποιούν ως μονωτικό μέσο τα έλαια.

1.4. ΠΡΟΕΛΕΥΣΗ ΟΡΥΚΤΩΝ ΕΛΑΙΩΝ

Τα ορυκτά έλαια, προέρχονται από ακατέργαστο πετρέλαιο, που σχηματίζεται από ενταφιασμό και σήψη φυτικής ύλης ή από την επίδραση νερού πάνω στο ορυκτό ανθρακασβέστιο [2].

Το αργό πετρέλαιο αποτελείται βασικά από υδρογονάνθρακες, που μπορούν να καταταγούν σε τρεις ομάδες:

- α) αρωματικοί υδρογονάνθρακες
- β) παραφινικοί υδρογονάνθρακες
- γ) ναφθενικοί υδρογονάνθρακες

Στους αρωματικούς υδρογονάνθρακες τα άτομα του άνθρακα ενώνονται με απλό δεσμό, σχηματίζοντας έναν τουλάχιστον δακτύλιο και καλούνται «κορεσμένοι».

Στους παραφινικούς και ναφθενικούς υδρογονάνθρακες δύο ή περισσότερα άτομα άνθρακα ενώνονται με διπλό ή πολλαπλό δεσμό σχηματίζοντας ανοικτή αλυσίδα και καλούνται «ακόρεστοι». Είναι περισσότερο σταθεροί υδρογονάνθρακες σε σύγκριση με τους αρωματικούς.

Υδρογονάνθρακες, που έχουν απλά και μικρά μόρια, βρίσκονται, υπό κανονική θερμοκρασία και πίεση, σε αέρια κατάσταση. Οι υδρογονάνθρακες με σύνθετα και μεγάλα παραβρίσκονται σε ρευστή κατάσταση, ενώ οι υδρογονάνθρακες με μεγαλύτερα και πολυσύνθετα μόρια βρίσκονται σε στερεά κατάσταση (π.χ. άσφαλτος).

Τα μονωτικά λάδια διακρίνονται σε οργανικά, ορυκτά και συνθετικά. Τα οργανικά λάδια έχουν φυτικά έλαια και εστέρες. Το πλεονέκτημα τους έναντι των ορυκτών λαδιών έγκειται στο γεγονός ότι έχουν καλύτερη αντοχή στη φωτιά και αποδομούνται πιο γρήγορα. Είναι όμως υδρόφιλα και οξειδώνονται εύκολα γεγονός που τα κάνει δύσχρηστα. Τα ορυκτά μονωτικά λάδια προέρχονται από την διύλιση του πετρελαίου σε κενό αέρα. Τα συνθετικά μονωτικά έλαια μπορεί να είναι είτε έλαια σιλικόνης είτε χλωριωμένα παράγωγα του διφαινυλίου και του πολυφαινυλίου καθώς και οι υδρογονάνθρακες που έχουν υποστεί φθορίωση.

Το αργό πετρέλαιο ανάλογα με το είδος των υδρογονανθράκων που περιέχει καθώς και με τις αναλογίες του μπορεί να χωριστεί σε τρεις κατηγορίες :

1. Στην κατηγορία ναφθενικής βάσεως
2. Στην κατηγορία παραφενικής βάσεως
3. Στην κατηγορία μικτής βάσης

Για την παρασκευή μονωτικών λαδιών χρησιμοποιούνται τα πετρέλαια ναφθενικής βάσης λόγω της ρευστότητάς τους σε χαμηλές θερμοκρασίες και της απουσίας κήρου.

1.5. ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΟΡΥΚΤΩΝ ΕΛΑΙΩΝ

Τα μονωτικά έλαια παράγονται μετά από επεξεργασία του αργού πετρελαίου [2]. Δύο είναι οι αυτές οι βασικές μέθοδοι παραγωγής:

α) Η κλασματική απόσταξη

β) Η διύλιση

1.5.1. Κλασματική απόσταξη

Το εκλεγμένο πετρέλαιο θερμαίνεται, εξατμίζεται και οι ατμοί του συμπυκνώνονται σε διάφορες θερμοκρασίες και σχηματίζουν υγρά αποστάγματα. Η απόσταξη εφαρμόζεται σε συνθήκες κενού, διότι σε συνθήκες ατμοσφαιρικής πίεσης απαιτείται μεγάλη θερμοκρασία που μπορεί να οδηγήσει σε αποσύνθεση του λαδιού.

1.5.2. Διύλιση

Μετά τη απόσταξη έχουμε τη διαδικασία καθαρισμού και την επεξεργασία με οξέα. Οι εργασίες αυτές αποτελούν το στάδιο της διύλισης. Παλαιότερα η διύλιση περιοριζόταν στην εντατική επεξεργασία των μονωτικών ελαίων με οξέα (συνήθως θεικό οξύ) μόνα ή σε συνδυασμό με διαλυτές. Όταν η διύλιση είναι μικρή το παραγόμενο μονωτικό λάδι αποσυντίθεται γρήγορα και μέσα σ' αυτό δημιουργούνται μεγάλες ποσότητες λάσπης. Όταν πάλι η διύλιση είναι μεγάλη, το λάδι που παράγεται αποσυντίθεται επίσης γρήγορα, η οξύτητα αυξάνεται με ταχύ ρυθμό, ενώ η λάσπη που σχηματίζεται αρχικά είναι περιορισμένη. Υπάρχει πάντα ένα βέλτιστο σημείο διύλισης. Με τη διύλιση πρέπει να εξαλειφθεί ένα ποσοστό αρωματικών ενώσεων για να μη δημιουργηθούν πολύ γρήγορα οξέα και αυξηθεί η οξύτητα σε μεγάλο βαθμό, ώστε να διαβρώσει όλα τα μεταλλικά μέρη της συσκευής (π.χ. το μετασχηματιστή). Οι αρωματικοί υδρογονάνθρακες που απομένουν στο λάδι και το προστατεύουν από οξειδωση ονομάζονται φυσικά αντιοξειδωτικά. Οι

σύγχρονοι τρόποι διύλισης σε συνδυασμό με τη βελτίωση των διαλυτών δίνουν λάδια πολύ καλής ποιότητας, που μπορούν να ανταποκριθούν στις απαιτήσεις των συσκευών υψηλής τάσης. Ένας απ' αυτούς είναι η διύλιση με H_2 . Το λάδι έρχεται σε επαφή με το H_2 κάτω από μεγάλη θερμοκρασία και πίεση με την παρουσία ειδικών καταλυτών.

Γενικά κατά την παραγωγή ηλεκτρικών μονωτικών λαδιών πρέπει να δώσουμε ιδιαίτερη προσοχή ώστε να παραχθεί έλαιο με καλές ηλεκτρικές ιδιότητες, οξειδωτική σταθερότητα, καλές ιδιότητες του απορροφούμενου αερίου καθώς και μικρή περιεκτικότητα θείου και αζώτου. Αν και έχουν γίνει μεταβολές στις μεθόδους διύλισης δεν έχει γίνει μεγάλη αλλαγή στα χαρακτηριστικά του προϊόντος εδώ και αρκετές δεκαετίες. Μεγάλη προσοχή έχει δοθεί σε βελτιώσεις και στην τεχνική εξασφάλισης σταθερότητας με δοκιμές που αφορούν την ποιότητα του λαδιού.

1.6. ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΚΑΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΜΟΝΩΤΙΚΩΝ ΕΛΑΙΩΝ

Τα μονωτικά έλαια παρουσιάζουν πλήθος πλεονεκτημάτων για τη χρήση τους ως μονωτικά υγρά [2, 4]. Αξιοσημείωτα είναι τα έλαια που προορίζονται για μετασχηματιστές και για διακόπτες η χρήση των οποίων προϋποθέτει καλές ηλεκτρικές ιδιότητες και ψυκτική ικανότητα με μεγάλο βαθμό απόδοσης. Ακόμα το λάδι των ελαιοδιακοπών πρέπει να αντέχει στα τόξα που γίνονται στο διακόπτη χωρίς τον κίνδυνο δημιουργίας εναποθέσεων. Το λάδι των πυκνωτών πρέπει να είναι τέλειο μονωτικό για να μην έχουμε απώλειες και να αντέχει σε ψηλές τάσεις δηλαδή να ελκύει όσο το δυνατόν λιγότερα αέρια (κυρίως υδρογόνο), ο ιονισμός των οποίων οδηγεί στη διάσπαση του μονωτικού. Τα χαρακτηριστικά κάθε λαδιού πρέπει να μένουν αναλλοίωτα επί μεγάλο χρονικό διάστημα και ιδίως στους μετασχηματιστές.

Οι ιδιότητες των μονωτικών λαδιών διακρίνονται σε φυσικές, χημικές και ηλεκτρικές [1]. Πάνω στο όλο θέμα, έχουν εκδοθεί πολλές ευπρόσδεκτοι μέθοδοι από διάφορους διεθνείς οργανισμούς, όπως είναι ο διεθνής οργανισμός προτύπων (ISO) και IEC, καθώς και από εθνικούς οργανισμούς όπως είναι ο BSI (Αγγλία), VDE (Γερμανία), ASTM, το ινστιτούτο πετρελαίου (IP) και από όμοιους οργανισμούς άλλων χωρών. Οι ιδιότητες των μονωτικών ελαίων είναι:

1. Τα λάδια των μετασχηματιστών και διακοπών πρέπει να έχουν καλά ηλεκτρικά χαρακτηριστικά και να λειτουργούν σαν ψυκτικά.
2. Τα λάδια των ελαιοδιακοπών πρέπει να αντέχουν σε τόξα χωρίς να δημιουργούν εναποθέσεις.

3. Τα λάδια πυκνωτών πρέπει να έχουν άριστες μονωτικές ιδιότητες και να αντέχουν σε υψηλές τάσεις δηλαδή να ελκύει όσο το δυνατόν λιγότερα αέρια (κυρίως υδρογόνο), ο ιονισμός των οποίων οδηγεί στη διάσπαση του μονωτικού.

Τα χαρακτηριστικά κάθε λαδιού πρέπει να μένουν αναλλοίωτα επί μεγάλο χρονικό διάστημα και ιδίως στους μετασχηματιστές. Οι ιδιότητες των μονωτικών λαδιών διακρίνονται σε φυσικές, χημικές και ηλεκτρικές.

1.6.1. ΦΥΣΙΚΑ ΚΑΙ ΧΗΜΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

1. ΧΡΩΜΑ

Το χρώμα του λαδιού πρέπει να είναι κίτρινο ανοιχτό με μικρή διαφορά από λάδι σε λάδι. Όταν σκουρύνει το χρώμα πρέπει να υποστεί μια σειρά ελέγχων.

2. ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ

Η πυκνότητα του πρέπει να είναι $0,85 \div 0,92$ gr/ml και η θερμοκρασία του 20°C . μεταβολή της πυκνότητας με τη θερμοκρασία αναφοράς t_0 ακολουθεί με προσέγγιση τον τύπο:

$$D_t = \frac{d_0}{1 + at}$$

όπου D_t η πυκνότητα σε θερμοκρασία $t+t_0$, d_0 η πυκνότητα σε θερμοκρασία αναφοράς, $a=75 \times 10^{-5}$ και t η διαφορά θερμοκρασίας από την t_0 . Αύξηση της θερμοκρασίας συνεπάγεται μείωση της πυκνότητας του ελαίου σύμφωνα με τη σχέση $m=p/V$, όπου η μάζα παραμένει σταθερή. Αντίθετα μείωση της θερμοκρασίας συνεπάγεται αύξηση της πυκνότητας και μείωση του όγκου του λαδιού. Το δοχείο διαστολής δέχεται αυτή την αυξομείωση του όγκου του λαδιού.

3. ΣΥΝΤΛΕΣΤΗΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΔΙΑΣΤΟΛΗΣ

Πρέπει να είναι $0,7 \div 0,8 \cdot 10^{-3} /^{\circ}\text{C}$. Η γνώση του είναι απαραίτητη για τον υπολογισμό του δοχείου διαστολής ή του κενού χώρου του δοχείου που το περιέχει. Υπολογίζεται από τη σχέση:

$$C = \frac{S_1 - S_2}{S_1(T_2 - T_x)}$$

όπου C ο συντελεστής θερμικής διαστολής, S1 το ειδικό βάρος σε θερμοκρασία T1 και S2 το ειδικό βάρος σε θερμοκρασία T2.

4. ΕΙΔΙΚΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑ

Πρέπει να είναι $0,4 \div 0,5 \text{ cal}/(\text{gr} \cdot ^\circ\text{C})$. Προσεγγίζεται ικανοποιητικά από τη σχέση:

$$C_p = \frac{0.42 + 0.00081t}{\sqrt{d}}$$

όπου C_p η ειδική θερμότητα με σταθερή πίεση σε $\text{cal}/(\text{gr } ^\circ\text{C})$ και d η πυκνότητα σε gr/ml σε 15° . Η ειδική θερμότητα του μονωτικού λαδιού χαρακτηρίζει την ικανότητα του να απορροφά θερμότητα και κατ' επέκταση την καταλληλότητά του ως ψυκτικό μέσο.

5. ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΘΕΡΜΟΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ

Πρέπει να είναι $3 \div 4 \cdot 10^{-4} \text{ cal}/(\text{cm} \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C})$. Πρακτικά ο συντελεστής θερμοαγωγιμότητας K_t σε κάποια θερμοκρασία t υπολογίζεται με βάση την πυκνότητα d από τη σχέση:

$$K_t = \frac{0.28(1 - 0.00054t)10^{-3}}{D}$$

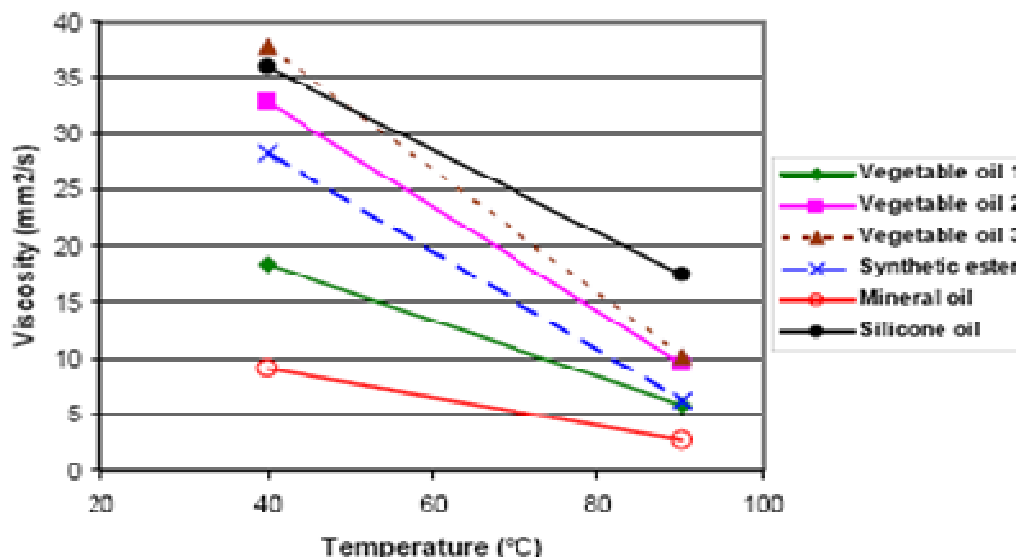
Αναλυτικότερα η θερμοαγωγιμότητα ενός υλικού είναι το ποσό της θερμότητας που απάγεται στη μονάδα του χρόνου από μία μοναδιαία επιφάνεια του υλικού, όταν υπάρχει διαφορά ενός βαθμού θερμοκρασίας σε μοναδιαίο πάχος υλικού. Σχετίζεται λοιπόν άμεσα με την απαγωγή της θερμότητας που αναπτύσσεται στο έλαιο.

6. ΚΙΝΗΤΙΚΗ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗ ΤΡΙΒΗ (ΙΞΩΔΕΣ)

Αναφέρεται στην εσωτερική αντίσταση ενός υγρού κατά τη ροή του. Όσο μικρότερο είναι το ιξώδες του ελαίου, τόσο ευκολότερα αυτό ρέει στα στοιχεία του μετασχηματιστή. Η τιμή του ιξώδους ενός ελαίου αυξάνεται κατά τη χρήση του ενώ μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας. Το ορυκτό έλαιο εξαιτίας του χαμηλού ιξώδους του είναι κατάλληλο για την ψύξη των μετασχηματιστών.

Για το λάδι κατηγορίας I πρέπει να είναι 40cSt στους 20⁰C και 800cSt στους -15⁰C.

Για το λάδι κατηγορίας II πρέπει να είναι 25cSt στους 20⁰C και 1800cSt στους -30⁰C.



Σχήμα 1: Μεταβολή ιξώδους συναρτήσει θερμοκρασίας για διάφορους τύπους υγρών [4]

7. ΣΗΜΕΙΟ ΡΟΗΣ

Αναφέρεται στην πιο χαμηλή θερμοκρασία στην οποία το υγρό αρχίζει να ρέει μετά από ψύξη που έγινε με προκαθορισμένες συνθήκες. Μας πληροφορεί δηλαδή για τη θερμοκρασία κάτω από την οποία η κυκλοφορία του ελαίου μπορεί να είναι ακόμη και αδύνατη. Τα μονωτικά έλαια βάσει κανονισμών πρέπει να διατηρούν τη ρευστότητα τους μέχρι -30 °C . Για λάδια που προορίζονται για μηχανήματα που λειτουργούν στην ύπαιθρο δεν πρέπει να είναι πάνω από -15⁰C.

8. ΚΑΘΑΡΟΤΗΤΑ

Το λάδι πρέπει να είναι διαυγές και να μην περιέχει αιωρούμενα ξένα σωματίδια και γενικότερα άλλες προσμίξεις.

9. ΔΙΑΛΥΤΟΤΗΤΑ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ ΣΤΟ ΛΑΔΙ

Σημαντικό χαρακτηριστικό στη μονωτική ικανότητα του λαδιού γιατί ίχνη υγρασίας μπορεί να συνυπάρχουν στις στερεές μονώσεις και στη συνέχεια να διαλυθούν στο λάδι ή το λάδι να απορροφήσει υγρασία από τον ατμοσφαιρικό αέρα. Για αυτό το λόγο τα δοχεία διαστολής πρέπει να παρουσιάζουν μικρή επιφάνεια λαδιού σε επαφή με τον αέρα. Οι μηχανισμοί με τους οποίους αυξάνεται η περιεκτικότητα σε νερό μέσα σε έναν μετασχηματιστή είναι δύο:

- Απορρόφηση από την ατμόσφαιρα,
- Γήρανση της μόνωσης κυτταρίνης που δημιουργεί νερό

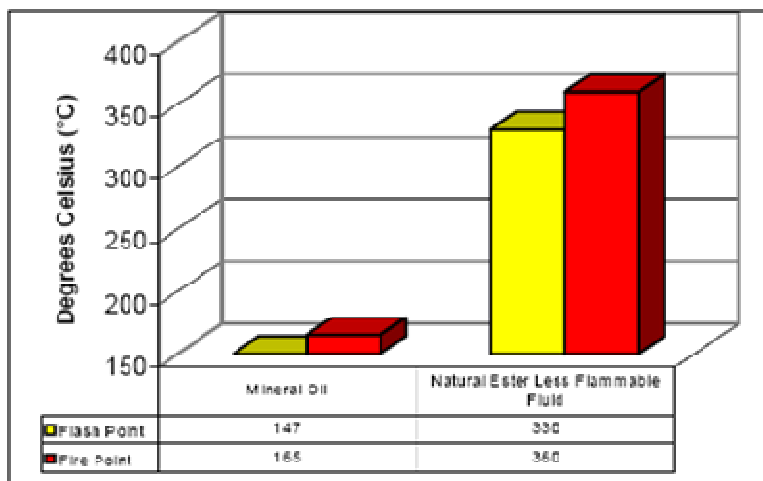
Η μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή της περιεκτικότητας νερού στα χρησιμοποιούμενα ηλεκτρομονωτικά έλαια είναι 35 ppm για την περίπτωση ηλεκτρικών διατάξεων με ονομαστική τάση μέχρι τα 69 kV, τα 25 ppm για ονομαστική τάση μέχρι 150 kV και τα 20 ppm για διατάξεις με ονομαστική τάση μέχρι τα 400 kV.

10. ΠΤΗΤΙΚΟΤΗΤΑ

Πρέπει να είναι χαμηλή.

11. ΣΗΜΕΙΑ ΑΝΑΦΛΕΞΕΩΣ ΚΑΙ ΚΑΥΣΕΩΣ

Σημείο ανάφλεξης είναι η θερμοκρασία στην οποία το λάδι αναδίδει ατμούς, που με τον ατμοσφαιρικό αέρα δημιουργούν εύφλεκτο μίγμα το οποίο αναφλέγεται με σπινθήρα. Σημείο καύσης είναι η θερμοκρασία στην οποία οι ατμοί αναφλέγονται και στην συνέχεια καίγεται το λάδι, όταν υπάρχει περίσσεια ατμοσφαιρικού αέρα. Το σημείο αυτό είναι 15% πάνω από το σημείο ανάφλεξης. Το σημείο αναφλέξεως δεν πρέπει να είναι κάτω από 160⁰C ενώ το σημείο καύσεως δεν πρέπει να είναι κάτω από 200⁰C για λόγους ασφαλείας.



Σχήμα 2: Σημείο ανάφλεξης και καύσης για ορυκτό και φυτικό έλαιο μετασχηματιστή [4]

12. ΠΕΡΙΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ ΣΕ ΤΕΦΡΑ

Δεν πρέπει να ξεπερνά το 0,001%.

13. ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗ ΤΑΣΗ

Στο εσωτερικό της μάζας οποιουδήποτε υγρού, κάθε μόριο περιβάλλεται από άλλα μόρια και υπάρχουν δυνάμεις έλξης, γνωστές ως δυνάμεις συνοχής, ομοιόμορφα προς όλες τις διευθύνσεις. Εξαιτίας αυτών, η εξωτερική επιφάνεια του ελαίου συμπεριφέρεται σαν ελαστική μεμβράνη που τεντώνεται προς όλες τις κατευθύνσεις. Η τάση του επιφανειακού στρώματος καλείται επιφανειακή τάση, αποτελεί μοριακή ιδιότητα και μετريέται σε dyn/cm . Πρέπει να είναι $20 \div 15 \cdot 10^{-3} \text{ N/m}$.

14. ΟΞΥΤΗΤΑ (ΒΑΘΜΟΣ ΕΞΟΥΔΕΤΕΡΩΣΗΣ)

Η ύπαρξη οξέων στα λάδια προκαλεί διάβρωση στα μεταλλικά μέρη και μειώνει τη διηλεκτρική τους ικανότητα. Η οξύτητα μετρίεται με το βαθμό εξουδετέρωσης που είναι το ποσό των mgr KOH (υδροξείδιο) που απαιτείται για την ολοσχερή εξουδετέρωση των οξέων που περιέχονται σε ένα gr λαδιού. Ο βαθμός εξουδετέρωσης δεν πρέπει να ξεπερνά τα 0.03 mgr KOH/gr . Η οξύτητα ενός λαδιού αυξάνεται με την πάροδο του.

15. ΑΛΚΑΛΙΚΟΤΗΤΑ(ΒΑΘΜΟΣ ΣΑΠΩΝΟΠΟΙΗΣΕΩΣ)

Στα καινούρια έλαια η αλκαλικότητα πρέπει να είναι αμελητέα. Ύπαρξη αλκαλικότητας μαρτυρά μόλυνση του ελαίου με συνέπεια τη μείωση της διηλεκτρικής του ικανότητας. Βαθμός σαπωνοποίησης είναι το μέτρο της αλκαλικότητας και είναι το ποσό των mgr KOH που χρειάζονται για την πλήρη σαπωνοποίηση ενός gr ελαίου. Ο βαθμός αυτός πρέπει να είναι 0.3-0.6 mgr KOH/gr και όταν φτάσει το 1.5 mgr KOH/gr, επιβάλλεται η αντικατάσταση του ελαίου.

1.6.2. ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

1. ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ

Σαν διηλεκτρική αντοχή μπορεί να οριστεί η μέγιστη τιμή τάσης που μπορεί να εφαρμοστεί ανάμεσα σε δυο ηλεκτρόδια που είναι βυθισμένα μέσα στο λάδι χωρίς να δημιουργηθεί τόξο. Η διηλεκτρική αντοχή είναι η μέση τιμή της τάσης στην οποία επιτυγχάνεται διάσπαση του λαδιού που βρίσκεται μεταξύ των ηλεκτροδίων, υπό προδιαγραφόμενες συνθήκες. Η διηλεκτρική αντοχή εκφράζεται σε KV για ορισμένο διάκενο. Όταν τα μονωτικά λάδια έχουν μεγάλη διηλεκτρική αντοχή εξασφαλίζεται καλύτερη μόνωση των υπό τάση στοιχείων που βρίσκονται μέσα σ' αυτά, η δε χρήση λαδιών μεγάλης διηλεκτρικής αντοχής επηρεάζει κατά κάποιο τρόπο τις διαστάσεις των μηχανημάτων στα οποία χρησιμοποιούνται τέτοια λάδια. Βέβαια η διηλεκτρική αντοχή δεν αποτελεί απόλυτο κριτήριο, ικανό για την εκτίμηση της ποιότητας του λαδιού. Δεν αποτελεί ένδειξη σχετική με τη γήρανση του λαδιού. Πολύ γερασμένα λάδια μπορεί να έχουν μεγάλη διηλεκτρική αντοχή. Μπορούμε να πούμε ότι στην πράξη δεν εξαρτάται από τη σύνθεση του λαδιού αλλά μόνο από τα περιεχόμενα σ' αυτό όπως νερό, ίνες και αέρια δηλαδή μόνο από τη καθαρότητα του. Σε ομογενές πεδίο η διηλεκτρική αντοχή (E_d) προσδιορίζεται από τη σχέση:

$$E_d = \frac{U_{d\min}}{d}$$

όπου $U_{d\min}$ η ελάχιστη ενεργός τιμή της τάσης για τη διάσπαση και d η απόσταση των ηλεκτροδίων. Πρακτικά για τους υπολογισμούς των μονωτικών υλικών η διηλεκτρική αντοχή λαμβάνεται ίση με το 10% της τιμής που μετριέται στις δοκιμές.

2. ΕΙΔΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ

Η ειδική αντίσταση του λαδιού μειώνεται όσο αυξάνεται η θερμοκρασία του. Έτσι η μέτρηση του μεγέθους αυτού πρέπει να είναι $5 \cdot 10^{11} \div 5 \cdot 10^{10} \Omega \cdot \text{cm}$.

3. ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΣΤΑΘΕΡΑ

Η διηλεκτρική σταθερά είναι ένα αδιάστατο μέγεθος το οποίο εκφράζει το πόσο μεγαλύτερη είναι η χωρητικότητα μίας διάταξης συγκριτικά με εκείνη στο κενό. Η διηλεκτρική σταθερά είναι $2,2 \div 2,4$ στους 20°C . Οι διηλεκτρικές σταθερές των διάφορων μονωτικών υλικών που συνθέτουν μία μόνωση π.χ. περιελίξεις μετασχηματιστών, μονώσεις καλωδίων, θα πρέπει να επιλέγονται κατά τέτοιο τρόπο ώστε να εξομαλύνεται το πεδίο στις διαχωριστικές επιφάνειές τους, ώστε να αποφεύγεται η εκδήλωση μερικών εκκενώσεων. Αυτός είναι και ο λόγος που ο συνδυασμός του μονωτικού χαρτιού και του ελαίου βρίσκει πολλές πρακτικές εφαρμογές. Τα δύο μονωτικά υλικά έχουν την ίδια περίπου διηλεκτρική σταθερά με αποτέλεσμα να μη συμβαίνει διάθλαση των πεδιακών γραμμών στη διαχωριστική επιφάνειά τους. Επιπλέον το έλαιο εμποτίζει το χαρτί, ώστε να αποκλείεται η ύπαρξη αέρα, ο οποίος θα δημιουργούσε προβλήματα λόγω της μικρής διηλεκτρικής αντοχής του.

4. ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΑΠΩΛΕΙΩΝ

Όταν τα μονωτικά υλικά βρίσκονται κάτω από την επίδραση ηλεκτρικών πεδίων, αναπτύσσονται διάφοροι μηχανισμοί οι οποίοι απορροφούν ενέργεια από τα πεδία, δηλαδή έχουμε απώλεια ενέργειας. Η ενέργεια που απορροφάται στα υλικά μετατρέπεται κυρίως σε θερμότητα, η οποία αν δεν αποβληθεί προς το περιβάλλον, προκαλεί αύξηση της θερμοκρασίας των υλικών με αποτέλεσμα την κακή λειτουργία, τις βλάβες και την πρόωρη καταστροφή των διατάξεων. Κάτω από συνεχή τάση η απορρόφηση της ενέργειας οφείλεται στη δημιουργία του ρεύματος διαρροής στο μονωτικό σώμα, εξαιτίας της αγωγιμότητας όγκου ή και της επιφανειακής αγωγιμότητας. Δηλαδή η θέρμανση του υλικού οφείλεται στο φαινόμενο Joule. Στα εναλλασσόμενα πεδία εμφανίζεται μία επιπλέον απορρόφηση ενέργειας και θέρμανση του σώματος που προκαλείται από τις περιοδικές πολώσεις και αποπολώσεις του, σύμφωνα με τους διάφορους μηχανισμούς πόλωσης. Η απώλεια ενέργεια ανά περίοδο και ανά μονάδα όγκου του σώματος δίνεται από τη σχέση:

$$W = \pi E^2 \epsilon_0 \epsilon_r \text{tg} \delta$$

όπου $\text{tg}\delta$ ο συντελεστής απωλειών και E η μέγιστη τιμή της πεδιακής έντασης.

Έτσι, σε έναν μονωτή έχουμε έκτος από το χωρητικό ρεύμα I_C , ένα ρεύμα διαρροής I_R . Ο συντελεστής απωλειών:

$$\text{Tg}\delta = \frac{I_R}{I_C} = \frac{G}{\omega C}$$

είναι κριτήριο αξιολόγησης του διηλεκτρικού, ή μιας μονωτικής διάταξης γενικότερα, γιατί παρέχει πληροφορίες σχετικά με την αγωγιμότητα του.

1.7. ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗΝ ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΤΩΝ ΜΟΝΩΤΙΚΩΝ ΛΑΔΙΩΝ

1. Η ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΩΝ

Όσο μεγαλύτερο είναι το κενό μεταξύ των ηλεκτροδίων τόσο μικρότερη είναι η διηλεκτρική αντοχή του μονωτικού λαδιού.

2. ΤΟ ΕΜΒΑΔΟΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΩΝ

Όσο μεγαλύτερη είναι η επιφάνεια ηλεκτροδίων τόσο μικρότερη είναι η διηλεκτρική αντοχή του μονωτικού ελαίου.

3. ΤΟ ΥΛΙΚΟ ΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΩΝ

Το υλικό των ηλεκτροδίων έχει επίδραση πάνω στη διηλεκτρική αντοχή. Τα μέταλλα που έχουν υψηλό έργο εξόδου έχουν μεγάλη διηλεκτρική αντοχή.

4. Η ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΩΝ

Η γεωμετρία των ηλεκτροδίων καθορίζει την ομοιογένεια του ηλεκτρικού πεδίου. Όσο πιο ανομοιογενές είναι το ηλεκτρικό πεδίο τόσο μειώνεται η τάση διάσπασης. Επίσης, έχει παρατηρηθεί ότι η αύξηση του μήκους του διακένου βοηθά στην βελτίωση της διηλεκτρικής αντοχής του ελαίου. Όσο μεγαλύτερη είναι η επιφάνεια των ηλεκτροδίων, τόσο μικρότερη γίνεται η διηλεκτρική αντοχή του

υπό εξέταση μονωτικού λαδιού. Αυτό συμβαίνει διότι μεγαλύτερη επιφάνεια ηλεκτροδίων αναμένεται να έχει περισσότερες προεξοχές και ανωμαλίες.

5. ΤΟ ΕΙΔΟΣ ΤΗΣ ΕΦΑΡΜΟΖΟΜΕΝΗΣ ΤΑΣΗΣ

Η διηλεκτρική αντοχή υπό κρουστική τάση είναι μεγαλύτερη από ότι υπό εναλλασσόμενη τάση 50Hz επί ένα λεπτό. Υπό συνεχή τάση η διηλεκτρική αντοχή είναι μεγαλύτερα από ότι υπό εναλλασσόμενη τάση.

5. ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ

Έχει παρατηρηθεί ότι η αύξηση της θερμοκρασίας διευκολύνει τη διαφυγή των φυσαλίδων αέρα καθώς μειώνει το ιξώδες του λαδιού. Όσο αυξάνεται η θερμοκρασία τόσο μειώνεται η διηλεκτρική αντοχή του μονωτικού. Επιπλέον, αύξηση της θερμοκρασίας έχει ως συνέπεια μικρότερη απόλυτη περιεκτικότητα σε νερό, αλλά αυξάνει τη διαλυτότητα σε νερό του υγρού. Επιπλέον, η αύξηση της θερμοκρασίας μειώνει σημαντικά τη σχετική περιεκτικότητα σε νερό στο έλαιο. Άρα, η διηλεκτρική αντοχή αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας. Η επίδραση της θερμοκρασίας επί της διηλεκτρικής αντοχής γίνεται δραματικά μεγαλύτερη καθώς προσεγγίζεται το σημείο βρασμού του υγρού μονωτικού. Σε αυτό το σημείο η διηλεκτρική αντοχή λαμβάνει τη μικρότερη τιμή της. Αντίθετα, για θερμοκρασίες χαμηλότερες από αυτής του δωματίου, παρατηρείται αύξηση της διηλεκτρικής αντοχής. Η επίδραση της θερμοκρασίας είναι ένα σύνθετο φαινόμενο εξ αιτίας των πιθανών μεταβολών στην εκπομπή ηλεκτρονίων από την κάθοδο, στην περιεκτικότητα του υγρού σε αέρια και στο ιξώδες του υγρού.

6. ΠΙΕΣΗ

Όσο αυξάνεται η πίεση τόσο μειώνεται η διηλεκτρική αντοχή του μονωτικού. . Περισσότερη εξάρτηση από την πίεση δείχνει η διηλεκτρική αντοχή του λαδιού σε εναλλασσόμενη τάση και ακολουθεί η συνεχής τάση, ενώ για κρουστική η εξάρτηση εξαφανίζεται.

7. ΠΑΡΟΥΣΙΑ ΞΕΝΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ, ΥΓΡΑΣΙΑΣ ΚΑΙ ΦΥΣΑΛΙΔΙΩΝ ΑΕΡΑ

Η παρουσία υγρασίας μειώνει την διηλεκτρική αντοχή του μονωτικού ενώ τα αιωρούμενα σωματίδια μειώνουν τις αποστάσεις μονώσεις. Ακόμη η οξείδωση του αέρα προκαλεί μείωση της διηλεκτρικής τους αντοχής. Το ίδιο συμβαίνει και εξαιτίας των φυσαλίδων αέρα. Φυσαλίδες αερίου μπορούν να προέλθουν από την αποσύνθεση των μορίων του υγρού μονωτικού, από θύλακες αερίου στην καθοδική επιφάνεια ή από επιτόπου εξάτμιση του υγρού εξ αιτίας της εκπομπής ηλεκτρονίων από προεξοχή της καθόδου. Υγρά μονωτικά, που εμπεριέχουν κάποια ποσότητα αερίου, θερμαινόμενα κυκλικά μπορεί επίσης να σχηματίσουν φυσαλίδες λόγω κάποιων φυσικοχημικών διεργασιών, οι οποίες επηρεάζονται από συνεχείς ή εναλλασσόμενες τάσεις.

Οι φυσαλίδες αέρα (ή αερίου) μέσα σε υγρό έχουν την τάση να επιμηκύνονται, ιδιαίτερα δε με την εφαρμογή εναλλασσόμενων τάσεων. Όσο μεγαλύτερη είναι η διαφορά μεταξύ του αερίου και του περιβάλλοντος υγρού, τόσο μικρότερο είναι το ηλεκτρικό πεδίο που απαιτείται για να προκαλέσει την επιμήκυνση της φυσαλίδας. Γι' αυτό σε κάθε δοκιμή διάσπασης μεσολαβεί ένας χρόνος παύσης ώστε να εξαφανιστούν οι φυσαλίδες. Επίσης, τα υγρά μονωτικά οξειδώνονται από τον αέρα, με αποτέλεσμα να μειώνεται η διηλεκτρική τους αντοχή. Γι' αυτό η παρουσία αέρα θα πρέπει να αποκλείεται στις κατασκευές που χρησιμοποιούνται μονωτικά λάδια. Έτσι όταν γίνεται η πλήρωση των δοχείων ελαίου των μετασχηματιστών στο στάδιο κατασκευής τους, η όλη διαδικασία λαμβάνει χώρα στο κενό αέρα, ώστε να αποφευχθεί η παρουσία αέρα στο δοχείο λαδιού, γεγονός που θα μειώσει τη διηλεκτρική αντοχή του λαδιού. Τέλος, πρέπει να δίνεται προσοχή στην κατάσταση της επιφάνειας των ηλεκτροδίων, ώστε να είναι καθαρά, χωρίς ξένα σωματίδια.

8. ΓΗΡΑΝΣΗ ΕΛΑΙΟΥ

Ο χρόνος αποθήκευσης του ελαίου, χωρίς αυτό να καταπονείται, δρα αρνητικά πάνω στην διηλεκτρική αντοχή καθώς αυξάνεται το ποσοστό της υγρασίας στο έλαιο. Μόνο μετά από συνεχείς και επαναλαμβανόμενες διασπάσεις αρχίζει να αυξάνεται σταδιακά η τιμή της τάσης διάσπασης του ελαίου, καθώς αρχίζει να υποχωρεί η υγρασία.

9. ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΤΥΠΟΣ ΕΛΑΙΟΥ

Η διηλεκτρική αντοχή του ελαίου είναι πολύ ευαίσθητη στην ποιότητα του ελαίου και μπορεί να επηρεαστεί από την παρουσία ακαθαρσιών, την υγρασία, τα μόρια και τα αέρια. Ακόμα κι αν η τάση διάσπασης περισσότερο συνδέεται με την ποιότητα ελαίου και τη χημεία του, για τη σύγκριση των διαφορετικών ελαίων ελέγχεται καλά η περιεκτικότητα σε ακαθαρσίες. Ο τύπος του ελαίου είναι καθοριστικός παράγοντας για την διηλεκτρική αντοχή. Μεγαλύτερος αριθμός ατόμων άνθρακα σε ένα υγρό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της διηλεκτρικής αντοχής του. Επιπλέον έχει παρατηρηθεί ότι υδρογονάνθρακες με μοριακές αλυσίδες που περιέχουν διακλαδώσεις παρουσιάζουν μειωμένη διηλεκτρική αντοχή. Επίσης η αύξηση της αρωματικής συνιστώσας (δηλ. αύξηση στους αρωματικούς υδρογονάνθρακες) μειώνει τη διηλεκτρική αντοχή.

1.8. ΒΑΣΙΚΑ ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΜΟΝΩΤΙΚΩΝ ΛΑΔΙΩΝ

Η χρήση των μονωτικών υγρών σε πρακτικές εφαρμογές οφείλεται σε μία σειρά γενικών χαρακτηριστικών που πλεονεκτούν έναντι των άλλων μονωτικών μέσων. Συγκεκριμένα, τα υγρά μονωτικά παρουσιάζουν τα εξής πλεονεκτήματα [1]:

Μεγάλη διηλεκτρική αντοχή. Η διηλεκτρική αντοχή του αέρα είναι 21 kV/cm, ενώ η διηλεκτρική αντοχή του λαδιού που χρησιμοποιείται στους μετασχηματιστές είναι 60...200 kV/cm πράγμα που δείχνει την ανωτερότητα των υγρών έναντι των αερίων με κριτήριο τη διηλεκτρική αντοχή.

Μεγάλο συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας. Είναι ίσως το πιο σημαντικό χαρακτηριστικό των υγρών μονωτικών στην εφαρμογή τους ως ψυκτικό μέσο. Η πιο συνήθης χρήση τους είναι στα τυλίγματα των μετασχηματιστών, όπου λόγω του μεγάλου συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας διευκολύνεται η απαγωγή της παραγόμενης θερμότητας λόγω των απωλειών (νόμοι των Joule και Foucault), καθώς το λάδι κυκλοφορεί σε όλο τον όγκο του μετασχηματιστή.

Προστατεύουν τα στερεά μονωτικά με τα οποία χρησιμοποιούνται συνδυαστικά. Όταν η πλήρωση του χώρου που καταλαμβάνει το υγρό μονωτικό γίνεται υπό συνθήκες κενού σε ορισμένη θερμοκρασία, αποφεύγεται η ύπαρξη αέρα που οξειδώνει το υγρό μονωτικό και έτσι το υγρό προστατεύει με τη σειρά του το στερεό μονωτικό από τις επιβλαβείς συνέπειες της επαφής τους με τον ατμοσφαιρικό αέρα.

1.9. ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΔΙΑΣΠΑΣΗΣ ΜΟΝΩΤΙΚΩΝ ΛΑΔΙΩΝ

Η γνώση επί της ηλεκτρικής διάσπασης σε υγρά είναι λιγότερο εξελιγμένη απ' ότι στην περίπτωση των αερίων ή ακόμα και των στερεών. Πολλές απόψεις για τη διάσπαση υγρών έχουν ερευνηθεί κατά τις τελευταίες δεκαετίες αλλά τα ευρήματα και τα συμπεράσματα δεν μπορούν να εναρμονιστούν και να παράγουν μία γενική θεωρία εφαρμόσιμη σε υγρά. Η κύρια αιτία για αυτή την κατάσταση είναι η έλλειψη αναλυτικής θεωρίας όσον αφορά στη φυσική βάση της υγρής κατάστασης, η οποία θα οδηγούσε στη γνώση του ακριβούς μηχανισμού διάσπασης.

Η έρευνα πάνω στο συγκεκριμένο θέμα συνετέλεσε στη δημιουργία δύο σχολών απόψεων [5]. Η μία εξ αυτών επιχειρεί να ερμηνεύσει τη διάσπαση υγρών με ένα πρότυπο το οποίο είναι μία επέκταση της αέριας διάσπασης, στηριγμένο στον ιονισμό στοιβάδας των ατόμων που προκαλείται από κρούσεις ηλεκτρονίων μέσα στο εφαρμοζόμενο πεδίο. Τα ηλεκτρόνια θεωρούνται να εγχέονται από την κάθοδο στο υγρό είτε μέσω εκπομπής πεδίου (περίπτωση κατά την οποία, αυτά θεωρούνται να εξορύσσονται διαμέσου της επιφάνειας υποβοηθούμενα από το πεδίο), είτε μέσω θερμιονικού φαινομένου (Schottky) ενισχυμένου από το πεδίο. Αυτός ο τύπος μηχανισμού διάσπασης έχει θεωρηθεί ότι εφαρμόζεται σε ομογενή υγρά υπερβολικής καθαρότητας και δεν εφαρμόζεται σε εμπορικά εκμεταλλεύσιμη υγρή μόνωση. Μελέτες αγωγής σε πολύ καθαρά υγρά έδειξαν ότι, σε χαμηλά πεδία η αγωγή είναι κατά κύριο λόγο ιονική εξαιτίας αποσύνθεσης ρύπων κι αυξάνει γραμμικά με την πεδιακή ένταση. Αυτή η αγωγή κορεννύεται σε ενδιάμεσα πεδία. Σε υψηλά πεδία, καθώς προσεγγίζεται η διάσπαση, η αγωγή αυξάνει ταχύτερα και τείνει να είναι ασταθής. Υπάρχει η γνώμη ότι αυτό το αυξημένο ρεύμα προκαλείται από εκπομπή ηλεκτρονίων στην κάθοδο από έναν εκ των παραπάνω, ή αμφοτέρους, τους μηχανισμούς και ενδεχομένως, από αποσύνδεση μορίων στο υγρό υποβοηθούμενη από το πεδίο.

Έχει επί μακρόν αναγνωριστεί ότι η παρουσία ξένων σωματιδίων σε υγρή μόνωση έχει ισχυρή επίδραση στην ένταση διάσπασης των υγρών. Σε μία προσέγγιση έχει διατυπωθεί αξιωματικά ότι τα αιωρούμενα σωματίδια πολώνονται και είναι υψηλότερης διαπερατότητας από το υγρό. Ως αποτέλεσμα, αυτά υποβάλλονται σε μία ηλεκτρική δύναμη κατευθυνόμενη προς τη θέση μέγιστης έντασης. Με ηλεκτρόδια ομοιόμορφου πεδίου, η κίνηση των σωματιδίων εκλαμβάνεται να εκκινεί από επιφανειακές ανωμαλίες των ηλεκτροδίων, οι οποίες εγείρουν τοπικές πεδιακές βαθμώσεις. Η συσσώρευση σωματιδίων συνεχίζεται και τείνει να σχηματίσει μία ζεύξη κατά μήκος του διακένου, η οποία οδηγεί σε έναρξη διάσπασης.

Οι ρύποι μπορεί επίσης να είναι αέριες φυσαλίδες χαμηλότερης έντασης διάσπασης από το υγρό, περίπτωση κατά την οποία η διάσπαση της φυσαλίδας δύναται να πυροδοτήσει την πλήρη διάσπαση του υγρού. Η διάσπαση, λοιπόν επιτυγχάνεται με διάφορους τρόπους όπως: η ηλεκτρονική διάσπαση, ο μηχανισμός αιωρούμενων στερεών σωματιδίων, η διάσπαση κοιλότητας και τέλος, η ηλεκτρομεταφορά και το ηλεκτροϋδροδυναμικό πρότυπο διηλεκτρικής διάσπασης.

1.9.1. Ηλεκτρονική διάσπαση

Η ηλεκτρονική διάσπαση γίνεται σε υγρά διηλεκτρικά που είναι καθαρά χωρίς προσμίξεις δηλαδή. Όταν το εφαρμοζόμενο ηλεκτρικό πεδίο είναι μικρότερο από 1 kV/cm οι αγωγιμότητες που παρατηρούνται στο υγρό κυμαίνονται από 10^{-18} έως 10^{-20} S/cm. Για πεδία μεγαλύτερα των 100 kV/cm το ρεύμα αγωγιμότητας αυξάνεται. Άρα σε αυτή την περίπτωση τα ηλεκτρόνια που εκπέμπονται επιταχύνονται και συγκρούονται με τα άτομα μορίου του υγρού προκαλώντας τον ιονισμό τους. Έτσι ο αριθμός των ηλεκτρονίων πολλαπλασιάζεται κινούμενος από την άνοδο προς την κάθοδο και προκαλώντας την διάσπαση του διηλεκτρικού. Η διαδικασία συνοδεύεται και με εκπομπή φωτός.

Αμφότεροι οι μηχανισμοί εκπομπής πεδίου και θερμιονικής εκπομπής ενισχυμένης από πεδίο, έχουν θεωρηθεί υπεύθυνοι για το ρεύμα στην κάθοδο. Μελέτες αγωγής σε μονωτικά υγρά για υψηλά πεδία δείχνουν ότι τα περισσότερα πειραματικά δεδομένα για το ρεύμα προσαρμόζονται καλά στην τύπου Schottky εξίσωση, στην οποία το ρεύμα είναι εξαρτημένο από τη θερμοκρασία. Μετρήσεις διάσπασης ωστόσο δείχνουν μικρή θερμοκρασιακή εξάρτηση. Αυτό υποδεικνύει ότι η καθοδική διαδικασία είναι μάλλον εκπομπή πεδίου παρά θερμιονική εκπομπή.

Μόλις το ηλεκτρόνιο εγχυθεί μέσα στο υγρό κερδίζει ενέργεια από το εφαρμοζόμενο πεδίο. Στην ηλεκτρονική θεωρία διάσπασης εικάζεται ότι μερικά ηλεκτρόνια κερδίζουν περισσότερη ενέργεια από το πεδίο, από ότι αυτά απολύουν σε κρούσεις με μόρια. Αυτά τα ηλεκτρόνια επιταχύνονται μέχρι να κερδίσουν επαρκή ενέργεια για να ιονίσουν μόρια επί κρούσεων και εκκινήσουν στοιβάδα.

Η συνθήκη για το ξέσπασμα στοιβάδας ηλεκτρονίων λαμβάνεται εξισώνοντας το κέρδος ενέργειας ενός ηλεκτρονίου κατά μήκος του μέσου ελεύθερου βήματός του με την ενέργεια που απαιτείται για ιονισμό του μορίου :

$$eE\lambda = chu,$$

όπου E είναι το εφαρμοζόμενο πεδίο, λ είναι το μέσο ελεύθερο βήμα ηλεκτρονίου, $h\nu$ είναι το διακριτό ποσό ενέργειας που απολύεται κατά τον ιονισμό του μορίου και c μία αυθαίρετη σταθερά.

Η ηλεκτρονική θεωρία προβλέπει ικανοποιητικά το σχετικό μέγεθος της έντασης διάσπασης υγρών, αλλά οι παρατηρούμενες χρονικές υστερήσεις σχηματισμού είναι πολύ μακρύτερες από ότι προβλέπονται από αυτήν.

1.9.2. Διάσπαση μέσω αιρούμενων σωματιδίων

Σε ένα μονωτικό λάδι μπορεί να υπάρχουν σωματίδια σκόνης, ίνες κ.α. Όταν εφαρμοστεί ηλεκτρικό πεδίο E , τα σωματίδια πολώνονται και οδηγούνται προς την περιοχή της υψηλότερης πεδιακής έντασης. Αυτό συμβαίνει γιατί η διηλεκτρική σταθερά των σωματιδίων είναι μεγαλύτερη από την διηλεκτρική σταθερά του υγρού.

Ας θεωρήσουμε ένα σφαιρικό σωματίδιο ακτίνας r και διαπερατότητας ϵ να αιωρείται σε διηλεκτρικό υγρό διαπερατότητας ϵ_1 κι. Τότε, εντός ενός πεδίου το σωματίδιο θα πολωθεί και θα υποστεί μια δύναμη που δίνεται από τη σχέση:

$$F_e = \epsilon_1 \lambda_i q r^3 \frac{\epsilon - \epsilon_1 \lambda_i q}{\epsilon + 2\epsilon_1 \lambda_i q} E \nabla(E)$$

Αυτή η δύναμη κατευθύνεται προς τη θέση μέγιστης έντασης αν $\epsilon > \epsilon_1 \lambda_i q$ αλλά για φυσαλίδες $\epsilon < \epsilon_1 \lambda_i q$ κι αυτή έχει την αντίθετη κατεύθυνση. Η δοθείσα δύναμη από την εξίσωση αυξάνει καθώς η διαπερατότητα (ϵ) του αιωρούμενου σωματιδίου αυξάνει και για ένα αγωγίμο σωματίδιο, για το οποίο $\epsilon \rightarrow \infty$, η δύναμη γίνεται

$$F_e = F_\infty = r^3 \nabla(E)$$

Έτσι, η δύναμη παροτρύνει το σωματίδιο να κινηθεί στην περιοχή του ισχυρότερου πεδίου. Σε ένα διάκενο ομοιόμορφου πεδίου, ή διάκενο σφαιρών μικρού μήκους το ισχυρότερο πεδίο είναι στην ομοιόμορφη περιοχή. Αν η διαπερατότητα του σωματιδίου είναι υψηλότερη από αυτή του μέσου, τότε η παρουσία του στην περιοχή ομοιόμορφου πεδίου επιφέρει συγκέντρωση ηλεκτρικής ροής στην επιφάνεια του. Επιπρόσθετα σωματίδια θα ελκυσθούν στην περιοχή υψηλότερης συγκέντρωσης ροής και με τον χρόνο θα ευθυγραμμιστούν από την κεφαλή προς τα πίσω σχηματίζοντας μια ζεύξη κατά μήκος του διακένου. Το πεδίο στο υγρό μεταξύ των σωματιδίων θα ενισχυθεί κι, αν αυτό φθάσει μια κρίσιμη τιμή, έπεται διάσπαση.

Η κίνηση ηλεκτρονίων λόγω ηλεκτρικής δύναμης ανταγωνίζεται από την οπισθέλκουσα ιξώδους και εφόσον τα σωματίδια κινούνται στην περιοχή υψηλής έντασης, πρέπει επίσης να ληφθεί υπόψη η διάχυση. Για ένα σωματίδιο ακτίνας r βραδέως κινούμενο με μία ταχύτητα u σε ένα μέσο ιξώδους η , η οπισθέλκουσα δύναμη δίνεται από τη σχέση του Stokes:

$$F_{\text{drag}} = 6\pi\eta r u(x)$$

Εξισώνοντας την ηλεκτρική δύναμη με την οπισθέλκουσα δύναμη $F_{\text{drag}} = F_e$ λαμβάνουμε:

$$u_e = r^2 \frac{E}{6\pi\eta} \frac{dE}{dx}$$

όπου u_e είναι η ταχύτητα του σωματιδίου προς τη περιοχή μέγιστης έντασης.

Αν συμπεριληφθεί η διαδικασία διάχυσης, η ταχύτητα ολίσθησης λόγω διάχυσης θα δίνεται από την εξίσωση:

$$u_d = -\frac{D}{N} \frac{dN}{dx} = -\frac{kT}{6\pi\eta r N} \frac{dN}{dx}$$

Η σχέση στο δεξί μέλος της εξίσωσης απορρέει από τη σχέση Stokes-Einstein $D = kT/6\pi\eta r$ όπου k είναι η σταθερά Boltzmann και T είναι η απόλυτη θερμοκρασία. Η εξίσωση της u_e με τη u_d δίνει:

$$\frac{r^2}{6\pi\eta} E \frac{dE}{dx} = -\frac{kT}{6\pi\eta r N} \frac{dN}{dx}$$

Αυτή η σχέση εισάγει εξάρτηση της έντασης διάσπασης στον χρόνο από τη συγκέντρωση N των σωματιδίων, την ακτίνα τους και το ιξώδες του υγρού. Η κρίσιμη τιμή εγκάρσιου πεδίου $E(x)$, είναι η τιμή ισορροπίας πέραν της οποίας αργά ή γρήγορα θα συμβεί η διάσπαση και μπορεί να ληφθεί από ολοκλήρωση της παραπάνω εξίσωσης.

Αν η αύξηση στην ηλεκτροστατική ενέργεια, όταν τα σωματίδια ολισθαίνουν προς το μέρος μέγιστης έντασης, είναι πολύ μικρότερη από την κινητική τους ενέργεια, δηλαδή $r^3[E^2(x) - E^2(\infty)] \ll 2kT$, η ζωή της μόνωσης είναι άπειρη. Το κριτήριο για τη διάσπαση, που

προκύπτει από κίνηση σωματιδίων προς την περιοχή υψηλής έντασης, αντιστοιχεί στη συνθήκη :

$$r^3[E^2(x)-E^2(\infty)] = 2kT$$

Αν θεωρήσουμε την περίπτωση κατά την οποία, η αρχική μη-ομοιομορφία του πεδίου προκαλείται από ένα ημισφαιρικό κύρτωμα του ηλεκτροδίου και υποθέσουμε ότι ένα εφαρμοζόμενο πεδίο E_0 θα οδηγήσει σε διάσπαση κατόπιν μιας μακροχρόνιας εφαρμογής, τότε η μέγιστη ένταση στην κορυφή της σφαίρας είναι $3E_0$ ή ,γενικά, η μέγιστη ένταση είναι gE_0 ,όπου g είναι ένας γεωμετρικός συντελεστής. Τότε, η παραπάνω εξίσωση μπορεί να γραφτεί ως :

$$r^3(g^2-1)E_0^2 = 2kT$$

Για $g=3$ λαμβάνουμε:

$$r^3E_0^2 = \frac{1}{4}kT$$

Μία πιο πλήρης θεωρία δίνει μια σχέση η οποία λαμβάνει υπόψη τις διαπερατότητες και είναι της μορφής:

$$\frac{\varepsilon - \varepsilon_{liq}}{\varepsilon + 2\varepsilon_{liq}} r^2 E_0^2 = \frac{1}{4}k$$

1.9.3. Διάσπαση κοιλότητας

Η ύπαρξη φυσαλίδων αέρα μέσα σε ένα διηλεκτρικό υγρό μειώνει την διηλεκτρική του αντοχή και οδηγεί στη διάσπαση του. Όταν το ηλεκτρικό πεδίο μιας φυσαλίδας γίνει ίσο με το πεδίο ιονισμού αέριας φάσης, λαμβάνει χώρα εκκένωση, η οποία οδηγεί σε αποσύνθεση του υγρού και δύναται να ακολουθήσει διάσπαση. Οι διαδικασίες μέσω των οποίων σχηματίζονται φυσαλίδες περιλαμβάνουν :

- θυλάκια αέρα στην επιφάνεια ηλεκτροδίων
- αλλαγές στη θερμοκρασία και την πίεση
- αποσύνδεση προϊόντων μέσω ηλεκτρονικών κρούσεων, δίνοντας αφορμή για τον σχηματισμό αέριων προϊόντων
- εξάτμιση υγρού από εκκενώσεις τύπου κορώνας σε ακίδες και ανωμαλίες επί των ηλεκτροδίων.

Το ηλεκτρικό πεδίο μέσα σε μία φυσαλίδα αερίου η οποία είναι βυθισμένη σε ένα υγρό διαπερατότητας ,δίνεται από τη σχέση

$$E_b = \frac{3E_0}{\varepsilon_{liq} + 2}$$

όπου, E_0 είναι το πεδίο εντός του υγρού, απουσία της φυσαλίδας. Όταν το πεδίο γίνεται ίσο με το πεδίο ιονισμού αέριας φάσης, λαμβάνει χώρα εκκένωση, η οποία οδηγεί σε αποσύνθεση του υγρού και δύναται να ακολουθήσει διάσπαση. Ο Kao έχει αναπτύξει μία πιο ακριβή έκφραση για την πεδιακή ένταση διάσπασης «φυσαλίδας», η οποία είναι της μορφής:

$$E_0 = \frac{1}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2} \sqrt{\frac{2\pi\sigma(2\varepsilon_1 + \varepsilon_2)}{r} \left[\frac{\pi}{4} \sqrt{\frac{V_b}{2rE_0}} - 1 \right]}$$

όπου, σ είναι η επιφανειακή τάση του υγρού, ε_1 και ε_2 είναι οι διαπερατότητες του υγρού και της φυσαλίδας, αντίστοιχα, r είναι η αρχική ακτίνα της φυσαλίδας (αρχικά σφαιρική, η οποία θεωρείται να επιμηκύνεται υπό την επίδραση του πεδίου) και είναι η πτώση τάσης μέσα στη φυσαλίδα. Αυτή η έκφραση μαρτυρά ότι, η κρίσιμη ένταση ηλεκτρικού πεδίου που απαιτείται για διάσπαση υγρού εξαρτάται από το αρχικό μέγεθος της φυσαλίδας, το οποίο επηρεάζεται από την εξωτερική πίεση και θερμοκρασία. Έχει παρατηρηθεί πειραματικά μία ισχυρή εξάρτηση της έντασης διάσπασης υγρού από την εφαρμοζόμενη υδροστατική πίεση.

Εμπορικά μονωτικά υγρά δε μπορούν να υποβληθούν εύκολα σε πολύ εξεζητημένη επεξεργασία κάθαρσης και η ένταση διάσπασης εξαρτάται συνήθως από τη φύση των παρόντων ρύπων.

Παρομοίως το ίδιο συμβαίνει και στην ύπαρξη υγρασίας. Υπό κανονικές συνθήκες η υγρασία που πρέπει να υπάρχει σε ένα μονωτικό δεν πρέπει να ξεπερνά το $10^{-3}\%$.

1.9.4. Ηλεκτρομεταφορά και ηλεκτροϋδροδυναμικό πρότυπο διηλεκτρικής διάσπασης

Η σπουδαιότητα της ηλεκτρομεταφοράς σε μονωτικά υγρά υποβαλλόμενα σε υψηλές τάσεις δεν επιδοκιμαζόταν μέχρι πρόσφατα. Η περισσότερη εργασία προέρχεται από τον Felici και τους συνεργάτες του. Σε άκρως κεκαθαυμένα διηλεκτρικά υγρά υποβαλλόμενα σε υψηλή τάση, η ηλεκτρική αγωγή απορρέει κυρίως από φορείς φορτίου εγχεόμενους μέσα στο υγρό από την επιφάνεια ηλεκτροδίων. Το προκύπτον φορτίο χώρου εγείρει δύναμη Coulomb, η οποία, υπό ορισμένες συνθήκες, προκαλεί υδροδυναμική αστάθεια που παράγει μεταδιδόμενο ρεύμα. Έπεται ότι, οσάκις η αγωγή σε ένα ρευστό συνοδεύεται από σχηματισμό σημαντικού φορτίου χώρου,

είναι πολύ πιθανό να συμβεί κίνηση μεταφοράς. Ο Lacroix κ.α. έχουν μελετήσει τις συνθήκες υπό τις οποίες εγκαθίσταται τυρβώδης κίνηση. Χρησιμοποιώντας ηλεκτρόδια παράλληλων πλακών κι ελεγχόμενο ρεύμα έγχυσης, αυτοί έδειξαν ότι η έναρξη αστάθειας σχετίζεται με μία κρίσιμη τάση.

Παρατήρησαν ότι, καθώς η εφαρμοζόμενη τάση αυξάνεται πλησίον της κρίσιμης τάσης, η κίνηση αρχικά παρουσιάζει μία δομή εξαγωνικών κυψελών. Με μία επιπλέον αύξηση στην τάση, η κίνηση γίνεται τυρβώδης. Έτσι, η αλληλεπίδραση μεταξύ ηλεκτρικού πεδίου και φορτίου χώρου γίνεται αφορμή για δυνάμεις που προσδίδουν μία στροβιλώδη κίνηση στο υγρό. Έχει αποδειχθεί, ότι σε τάσεις πλησίον στη διάσπαση, η ταχύτητα αυτής της κίνησης πλησιάζει μία τιμή δοθείσα από τη σχέση $(e/p/E)^{1/2}$ όπου e είναι η διαπερατότητα του υγρού, p η ειδική μάζα και E η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου. Σε υγρά, ο λόγος αυτής της ταχύτητας προς την ιονική ταχύτητα ολίσθησης KE (όπου K η κινητικότητα) δηλαδή, ο λόγος

$$M = \frac{\sqrt{e}}{k} \quad , \text{ είναι πάντα μεγαλύτερος της μονάδας και μερικές}$$

φορές πάρα πολύ μεγαλύτερος από αυτή. Ο λόγος M θεωρείται ότι παίζει έναν κυρίαρχο ρόλο στη θεωρία ηλεκτρομεταφοράς. Έτσι, η μεταφορά φορτίου γίνεται κυρίως από κίνηση υγρού και όχι από ιονική ολίσθηση. Η συνθήκη κλειδί για την έναρξη αστάθειας είναι να υπερβεί η ταχύτητα τοπικής ροής την ιοντική ταχύτητα ολίσθησης.

1.9.5. Μια ενδιαφέρουσα περίπτωση με χρήση νανοσωματιδίων

Με βάση προηγούμενη ερευνητική δραστηριότητα οι ερευνητές J. George Hwang,, Markus Zahn, Francis M. O'Sullivan, Leif A. A. Pettersson, Olof Hjortstam, και Rongsheng Liu ανέλυσαν την επίδραση αγώγιμων νανοσωματιδίων σε μονωτικό λάδι μετασχηματιστή. Πειραματικά, κι ενώ αναμενόταν μικρότερη τάση διάσπασης από ότι στο σκέτο λάδι, αποδείχθηκε ότι έχει υψηλότερη καθοδική τάση διάσπασης και μικρότερη ταχύτητα δημιουργίας στοιβάδας ηλεκτρονίων. Επίσης, με βάση τη μελέτη αναλύθηκαν ηλεκτροδυναμικά οι διαδικασίες που επιδρούν σε αυτή τη συμπεριφορά και ένα μοντέλο για το σχηματισμό στοιβάδας στη συγκεκριμένη περίπτωση. Με τη χρήση μαθηματικών μεθόδων το μοντέλο παρουσιάζει τα αγώγιμα σωματίδια ως συλλέκτες ηλεκτρονίων μετατρέποντας τα γρήγορα κινούμενα ηλεκτρόνια σε αργά, αρνητικά φορτισμένα σωματίδια. Η έρευνα σκόπευε στο ανιχνευθεί εάν τα νανοσωματίδια μπορούν να χρησιμεύσουν στην ψύξη του πυρήνα των μετασχηματιστών ισχύος.

1.10. ΣΥΝΤΗΡΗΣΗ ΜΟΝΩΤΙΚΩΝ ΕΛΑΙΩΝ

Για να εκτιμηθεί η κατάσταση ενός μονωτικού ελαίου είναι απαραίτητη οι έλεγχοι και οι δοκιμές τόσο κατά την περίοδο χρησιμοποίησης τους όσο και σε σποραδική συχνότητα. Κατά την συντήρηση τους ελέγχονται κάποια από τα φυσικά, χημικά και ηλεκτρικά χαρακτηριστικά τους. Αυτό επιτυγχάνεται με διάφορες τρόπους είτε επιτόπιους είτε εργαστηριακούς. Στους επιτόπιου ελέγχους εξετάζεται α) για τους μετασχηματιστές η διηλεκτρική τους αντοχή, μετράται ο βαθμός εξουδετέρωσης β) για τους διακόπτες ελέγχεται η διηλεκτρική αντοχή και μετράται ο βαθμός εξουδετέρωσης. Στους εργαστηριακούς ελέγχους για τα λάδια μετασχηματιστών αλλά και διακοπών εξετάζεται η διηλεκτρική τους αντοχή, μετράται ο βαθμός εξουδετέρωσης και η επιφανειακή τάση.

Έτσι προκύπτουν λάδια τεσσάρων κατηγοριών [5]. Τα λάδια κατηγορίας Α που είναι ικανοποιητικά. Τα λάδια κατηγορίας Β που χρειάζονται διήθηση(φιλτράρισμα), τα λάδια κατηγορίας Γ που δεν βρίσκονται σε ικανοποιητική κατάσταση και χρειάζονται χημική ή μηχανική επεξεργασία και τέλος λάδια κατηγορίας Δ που πρέπει να απορριφθούν.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

2.1. ΧΡΗΣΗ ΜΟΝΩΤΙΚΩΝ ΛΑΔΙΩΝ

Χρήση των μονωτικών λαδιών γίνεται στους παρακάτω τύπος συσκευών [2] :

- Μετασχηματιστές
- Καλώδια
- Μονωτήρες διέλευσης
- Πυκνωτές
- Μ/στές μετρήσεων
- Ελαιοδιακόπτες

2.2. ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΕΣ

2.2.1. ΓΕΝΙΚΑ

Η ραγδαία ανάπτυξη της χρήσης του ηλεκτρισμού κατέστησε επιτακτική ανάγκη την βελτίωση των συστημάτων ισχύος δηλαδή την παραγωγή, την μεταφορά και την διανομή του ηλεκτρικού ρεύματος σε ένα επίπεδο αξιοπιστίας και ασφάλειας. Οι διάφορες εκφάνσεις της ανθρώπινης δραστηριότητας επέβαλαν και την ανάγκη δημιουργίας συσκευών ανύψωσης και υποβιβασμού της επιθυμητής τάσης των καταναλωτικών δικτύων μεταφοράς ηλεκτρικού ρεύματος. Οι μετασχηματιστές συνιστούν μια τεχνολογία που καλύπτει αυτή την ανάγκη και έχει βρει πολλαπλές εφαρμογές εδώ και δεκαετίες. Καλύπτουν ανάγκες μιας ευρείας γκάμας εγκαταστάσεων, από τις πλέον μεγάλες είναι οι ηλεκτρικοί υποσταθμοί και από τις πλέον μικρές οι οικιακές ηλεκτρικές και ηλεκτρονικές συσκευές . Η χρήση των μετασχηματιστών είναι ευρεία και για αυτό το λόγο έχουν δημιουργηθεί διάφορων τύποι μετασχηματιστών που ανάλογα τον σκοπό τους καθορίζεται και ο τρόπος κατασκευής τους. Οι συνήθεις τύποι μετασχηματιστών είναι [11]:

α) Μετασχηματιστές ισχύος : Χρησιμοποιούνται στους σταθμούς παραγωγής για την ανύψωση της τάσης και στους υποσταθμούς (ΥΣ) για την ανύψωση ή για τον υποβιβασμό της τάσης μέχρι τη Μέση Τάση. Η ισχύς υπερβαίνει συνήθως τα 2ΜΥΛ.

β) Μετασχηματιστές διανομής : Χρησιμοποιούνται στο δίκτυο διανομής για να μεταφέρουν ενέργεια από τη μέση τάση στο δίκτυο

χαμηλής τάσης των καταναλωτών. Η ισχύς τους είναι από 50 kVA έως και 1600 kVA.

γ) Αυτομετασχηματιστές : για τη μετατροπή τάσεων εντός σχετικά μικρών ορίων, για σύνδεση συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας διαφόρων τάσεων, για εκκίνηση κινητήρων Ε.Ρ. κ.λπ.

δ) Μετασχηματιστές δοκιμών : για εκτέλεση δοκιμών με υψηλή και υπερυψηλή τάση

ε) Μετασχηματιστές ανόρθωσης : για το στάδιο της μετατροπής της εναλλασσόμενης τάσης (AC) σε συνεχή τάση (DC).

στ) Μετασχηματιστές μετρήσεων : για σύνδεση οργάνων μετρήσεως σε δίκτυα με σκοπό τη μέτρηση της τάσεως και της εντάσεως

ζ) Μετασχηματιστές τηλεπικοινωνιών : για την πιστότητα αναπαραγωγής του σήματος, σε ευρεία περιοχή συχνότητας και τάσης.

2.2.2. ΔΟΜΗ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗ

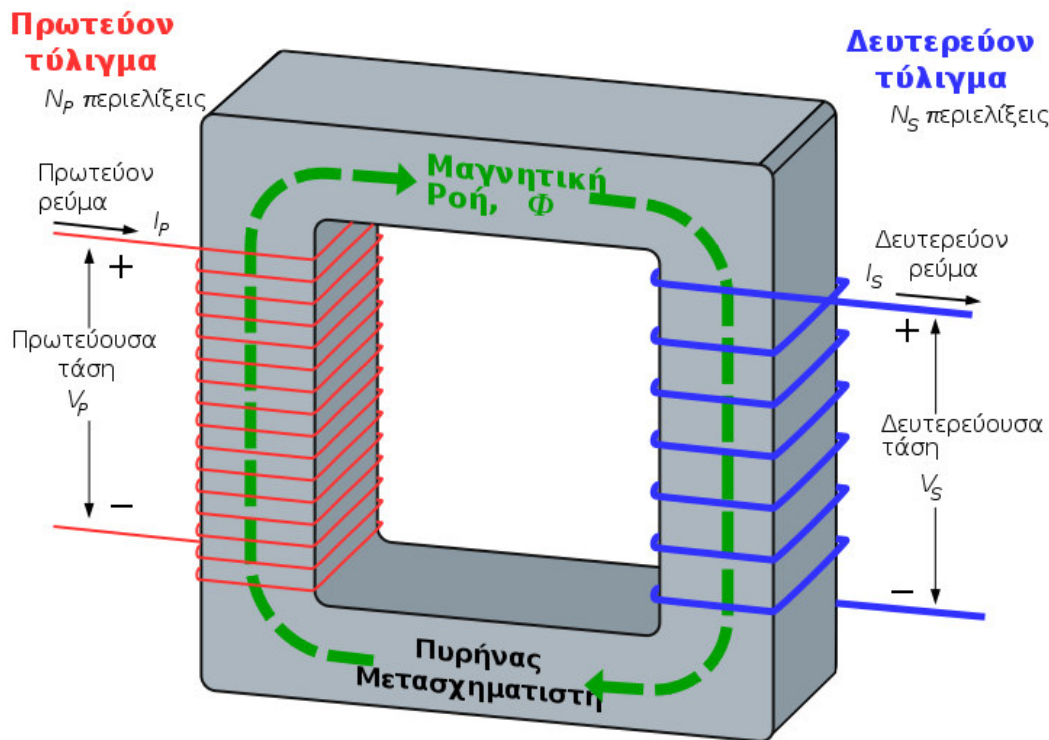
Ο μετασχηματιστής είναι μια ηλεκτρική μηχανή με σταθερά μέρη. Έχει δύο πηνία για κάθε φάση, τα οποία είναι μεταξύ τους ηλεκτρικά ανεξάρτητα και μαγνητικά συζευγμένα. Το τύλιγμα που τροφοδοτούμε το ονομάζουμε πρωτεύον και αυτό από το οποίο παίρνουμε την ηλεκτρική ενέργεια με μετασχηματισμένη τάση το ονομάζουμε δευτερεύον. Ας θεωρήσουμε τώρα ότι στο πρωτεύον κύκλωμα η τάση είναι U_1 , η ένταση είναι I_1 και ο αριθμός των σπειρών είναι N_1 και ότι αντίστοιχα στο δευτερεύον κύκλωμα η τάση είναι U_2 , η ένταση είναι I_2 και ο αριθμός των σπειρών είναι N_2 τότε ο λόγος μετασχηματισμού k ορίζεται ως εξής:

$$k = U_1/U_2 = I_2/I_1 = N_1/N_2$$

Ο μετασχηματιστής βασίζεται σε δύο αρχές: πρώτον, ότι ένα ηλεκτρικό ρεύμα μπορεί να παράγει ένα μαγνητικό πεδίο (ηλεκτρομαγνητισμός) και δεύτερον, ότι ένα μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο σε ένα τυλιγμένο σύρμα ("τύλιγμα"), επάγει διαφορά δυναμικού στα άκρα του τυλίγματος (ηλεκτρομαγνητική επαγωγή). Μεταβάλλοντας το ρεύμα στο πρωτεύον τύλιγμα, αλλάζει η ένταση του μαγνητικού του πεδίου. Εφόσον το μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο εκτείνεται και στο δευτερεύον τύλιγμα, επάγεται διαφορά δυναμικού στα άκρα του δευτερεύοντος.

Στο σχήμα φαίνεται ένα απλοποιημένο διάγραμμα μετασχηματιστή. Ηλεκτρικό ρεύμα περνάει μέσα από το πρωτεύον τύλιγμα δημιουργώντας μαγνητικό πεδίο. Τόσο το πρωτεύον όσο και το

δευτερεύον τυλίγματα περιελίσσονται γύρω από ένα μαγνητικό πυρήνα πολύ υψηλής μαγνητικής διαπερατότητας, π.χ. από σίδηρο. Με αυτόν τον τρόπο εξασφαλίζεται ότι όσο το δυνατόν περισσότερες γραμμές του μαγνητικού πεδίου που παράγει το πρωτεύον ρεύμα, βρίσκονται εντός του πυρήνα και περνούν τόσο από το πρωτεύον όσο και το δευτερεύον τυλίγμα.



Εικόνα 1: Δομή απλού μετασχηματιστή [10]

Ανάλογα με τη χρήση του μετασχηματιστή έχουμε αντίστοιχα επίπεδα τάσεως λειτουργίας και αντίστοιχα μονοφασικούς και τριφασικούς μετασχηματιστές. Υπάρχουν δύο βασικοί τύποι μονοφασικών και τριφασικών μετασχηματιστών:

A) τύπος πυρήνα: στον μονοφασικό τα τυλίγματα τοποθετούνται στα δύο σκέλη του μαγνητικού κυκλώματος. Κάθε σκέλος αυτού περιλαμβάνει το μισό των ελιγμάτων αμφότερων των τυλιγμάτων του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος. Τα δυο σκέλη ενώνονται με ζυγούς οι οποίοι κλείνουν το μαγνητικό κύκλωμα. Στον τριφασικό τύπου πυρήνα έχουμε τρία σκέλη αντί για δύο.

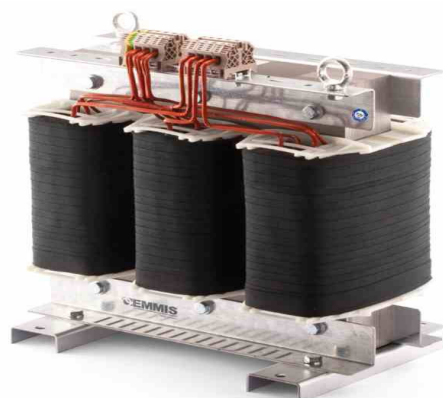
B) Τύπος κελύφους: στον μονοφασικό τα τυλίγματα του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος βρίσκονται στο μεσαίο σκέλος και το μαγνητικό κύκλωμα διαθέτει τώρα τρία σκέλη. Η διατομή του μεσαίου σκέλους είναι περίπου διπλάσια των δύο άλλων σκελών διότι η συνολική ροή στο μεσαίο σκέλος διανέμεται έτσι ώστε τα

εξωτερικά σκέλη και οι ζυγοί να διαρρέονται από το μισό της ροής. Στον τριφασικό τύπου κελύφους έχουμε απλά συνένωση τριών μονοφασικών μετασχηματιστών τύπου κελύφους.



Εικόνα 2:

Μονοφασικός μετασχηματιστής



Εικόνα3:

Τριφασικός μετασχηματιστής

2.2.3. ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΕΣ ΙΣΧΥΟΣ

Σε μετασχηματιστές μέσης και υψηλής τάσης εμφανίζονται σημαντικές θερμικές απώλειες λόγω των τυλιγμάτων (ωμικές απώλειες) και λόγω του πυρήνα (από υστέρηση και δινορρεύματα). Για αυτό το λόγο ο πυρήνας με τα τυλίγματα τοποθετούνται μέσα σε δοχείο που γεμίζεται με λάδι (το οποίο είναι ειδικό λάδι μετασχηματιστών και συνήθως είναι ορυκτέλαιο ή συνθετικό λάδι) ή αέρα. Με βάση το μέσο ηλεκτρικής και θερμικής μόνωσης τους χωρίζονται σε μετασχηματιστές λαδιού, μετασχηματιστές ξηρού τύπου και μετασχηματιστές τύπου GIS [5].

Οι μετασχηματιστές ξηρού τύπου χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις στις οποίες η χρήση των μετασχηματιστών λαδιού θεωρείται επισφαλής λόγω κινδύνου πυρκαγιάς ή όταν υπάρχουν απαιτήσεις για αποφυγή μόλυνσης του περιβάλλοντος. Συναντώνται για παράδειγμα σε χαρτοβιομηχανίες, αποθήκες καυσίμων, και εργοστάσια τροφίμων. Στους μετασχηματιστές αυτούς το ψυκτικό μέσο είναι ο αέρας, ενώ χρησιμοποιούνται επιπλέον για ηλεκτρική μόνωση, εποξειδική ρητίνη ή χαρτιά, διαποτισμένα με κατάλληλες ουσίες. Ένας μετασχηματιστής ξηρού τύπου είναι ο μετασχηματιστής ρητίνης, τα τυλίγματα του οποίου εμποτίζονται με μια εποξειδική ρητίνη υπό κενό. Η ρητίνη αυτή δεν είναι τοξική. Είναι διηλεκτρικό υλικό και αποτελεί πηγή υψηλού ηλεκτρικού δυναμικού. Επίσης, στο μετασχηματιστή αναπτύσσονται χωρητικά φορτία. Για τους λόγους αυτούς, είναι αναγκαίο να τηρούνται οι αποστάσεις ασφαλείας, που προδιαγράφονται από τα διεθνή πρότυπα, ως αποστάσεις από ενεργά

και εκτεθειμένα τμήματα. Όταν προκύψει βραχυκύκλωμα ή θερμοκρασία δεν μεταδίδεται μακριά από το σφάλμα.



Εικόνα 4: Μετασχηματιστής ξηρού τύπου

Στους μετασχηματιστές τύπου ελαίου χρησιμοποιείται το μονωτικό λάδι για την ηλεκτρική μόνωση των τυλιγμάτων, (προστασία από βραχυκύκλωμα), και για την απαγωγή της θερμότητας που αναπτύσσεται. Το λάδι απορροφά τη θερμότητα που παράγεται στα τυλίγματα και τον πυρήνα (Νόμοι των JOULE και FOYCAYLT) και την μεταφέρει στις ψυκτικές επιφάνειες των ψυγείων και στα τοιχώματα του δοχείου και από εκεί απάγεται στο περιβάλλον, από τα μεν ψυγεία με τη βοήθεια ανεμιστήρων, από τα δε τοιχώματα με ακτινοβολία. Επιπρόσθετα στα πηνία του μετασχηματιστή τοποθετείται μονωτικό χαρτί με πάχος, το οποίο μπορεί να είναι από μικρότερο του χιλιοστού έως μερικά εκατοστά. Ο συνδυασμός λαδιού

και χαρτιού έχει το πλεονέκτημα της ίδιας περίπου διηλεκτρικής σταθεράς, που έχουν τα υλικά αυτά.



Εικόνα 5: Μετασχηματιστής ελαίου

Οι μετασχηματιστές τύπου GIS (Gas Insulation System), χρησιμοποιούν ως μονωτικό και ψυκτικό μέσο κάποιο αέριο σε υψηλή πίεση σε στεγανοποιημένο περιβάλλον. Το πιο συχνά χρησιμοποιούμενο αέριο είναι το εξαφθοριούχο θείο (SF6), το οποίο είναι άχρωμο, άοσμο, άφλεκτο, χημικά αδρανές και μη τοξικό. Η διηλεκτρική αντοχή του SF6 στην ατμοσφαιρική πίεση είναι περίπου τριπλάσια από την αντίστοιχη του αέρα ή του αζώτου. Υπό τις ίδιες συνθήκες είναι μισή από αυτή των ελαίων, αλλά σε υψηλότερη πίεση υπερέρχει αυτής. Το SF6 μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μόνωση μετασχηματιστών ισχύος μέχρι αρκετές εκατοντάδες MVA. Το πλεονέκτημα των παραπάνω μετασχηματιστών είναι ότι είναι άφλεκτοι, εύκολοι στην εγκατάσταση και τοποθέτησή τους, ενώ καταλαμβάνουν σχετικά μικρό χώρο. Το κυριότερο μειονέκτημά τους

είναι ότι το SF6 θεωρείται μη οικολογικό, διότι συμβάλλει στη δημιουργία της τρύπας του όζοντος.

2.2.4. ΒΑΣΙΚΑ ΜΕΡΗ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗ ΙΣΧΥΟΣ ΛΑΔΙΟΥ

Η εργασία επικεντρώνεται στους μετασχηματιστές ισχύος με μονωτικό μέσο το έλαιο. Τα βασικά μέρη ενός μετασχηματιστή μεγάλης ισχύος είναι τα εξής:

- Το δοχείο που περικλείει τον πυρήνα τα τυλίγματα και το λάδι ψύξης του μετασχηματιστή. Όταν τα τυλίγματα του μετασχηματιστή διαρρέονται από ρεύμα εκλύεται κατά το γνωστό φαινόμενο Joule θερμότητα. Έτσι έχουμε μια απώλεια ενέργεια από το χαλκό των τυλιγμάτων. Ωστόσο θερμότητα εκλύεται επίσης και από τον πυρήνα λόγω κυκλοφορίας μέσα σ' αυτόν των δινορευμάτων. Στην περίπτωση αυτή έχουμε μια απώλεια ενέργειας από το σίδηρο του πυρήνα. Η θερμότητα που εκλύεται πρέπει να αποβάλλεται στο περιβάλλον για να μην πλησιάζει η θερμοκρασία του μετασχηματιστή σε επικίνδυνα όρια. Το μονωτικό λάδι είναι αυτό που λειτουργεί σαν ψυκτικό μέσο. Τα τυλίγματα κατασκευάζονται από σύρματα μονωμένα. Για διατομές συρμάτων μέχρι 3 τετραγωνικά χιλιοστά χρησιμοποιούνται συνήθως κυλινδρικά σύρματα ενώ για μεγαλύτερες διατομές χρησιμοποιούνται χρησιμοποιούνται σύρματα ορθογωνικά ή τετράγωνα για εξοικονόμηση χώρου. Οι στρώσεις χωρίζονται μεταξύ τους με μονωτικό χαρτί ή άλλο κατάλληλο μονωτικό υλικό. Η τοποθέτηση και η στήριξη των σπειρών του τυλίγματος πρέπει να γίνεται κατά τρόπο ικανοποιητικό ώστε να αντέχουν στις ηλεκτροδυναμικές καταπονήσεις που εμφανίζονται σε περίπτωση βραχυκυκλώματος. Το σώμα του πυρήνα αποτελείται από λεπτά σιδερένια ελάσματα μονωμένα μεταξύ τους ηλεκτρικά. Επειδή στον πυρήνα εμφανίζεται το φαινόμενο της ανάπτυξης δινορευμάτων με κατάλληλη κατεργασία των μετάλλων και με κατάλληλες προσμειξείς έχει επιτευχθεί η μείωση των απωλειών του πυρήνα στο ελάχιστο. Τα ελάσματα πρέπει να έχουν κατάλληλο σχήμα ώστε να μπαίνουν τα πηνία εύκολα στα ανοίγματα που σχηματίζουν κατά τη συναρμολόγησή τους. Για να μη δημιουργείται συγκεντρωμένη μαγνητική αντίσταση στο διάκενο αέρα των αρμών της συναρμολόγησης, τα ελάσματα τοποθετούνται κατά εναλλασσόμενες κατευθύνσεις. Η σχεδίαση της μορφής του πυρήνα πρέπει να είναι τέτοια ώστε η όλη κατασκευή να είναι συμπαγής και οι μαγνητικές γραμμές στον πυρήνα να έχουν το ελάχιστο δυνατό μήκος. Η ωφέλιμη διατομή ενός πυρήνα είναι περίπου το 90% της γεωμετρικής του διατομής γιατί την υπόλοιπη την καταλαμβάνουν οι μονώσεις των ελασμάτων. Το δοχείο μέσα στο οποίο τοποθετείται το συγκρότημα του πυρήνα

μαζί με τα πηνία είναι ένα κατάλληλο χαλύβδινο δοχείο που είναι γεμάτο με μονωτικό λάδι το οποίο εκτός από την ψύξη του μετασχηματιστή χρησιμεύει και για τη μόνωσή του. Στο πάνω μέρος του δοχείου υπάρχει σιδερένιο καπάκι που στερεώνεται στο δοχείο περιφερειακά με βίδες. Η στεγανοποίηση του δοχείου γίνεται κατάλληλη φλάντζα. Πάνω στο καπάκι τοποθετούνται οι μονωτήρες υψηλής και μέσης τάσης, ενώ στα πλευρικά βρίσκονται κατάλληλες υποδοχές για την τοποθέτηση των ψυγείων ψύξεως του λαδιού.

- Τους μονωτήρες υψηλής τάσης και μέσης τάσης που χρησιμεύουν για την ασφαλή διέλευση του ρεύματος υψηλής τάσης. Οι μονωτήρες διέλευσης υψηλής τάσης είναι συνήθως τύπου πυκνωτή. Το εσωτερικό του μονωτήρα αποτελείται από μονωτικό υλικό συνήθως χαρτί στο οποίο έχουν παρεμβληθεί κύλινδροι από φύλλα κασσιτέρου ή αλουμινίου. Με τον τρόπο αυτό από τον αγωγό διέλευσης μέχρι το σώμα του μετασχηματιστή παρεμβάλλεται μια σειρά από πυκνωτές ίσης χωρητικότητας. Σκοπός των πυκνωτών αυτών είναι η ομαλή κατανομή της τάσης σε όλο το πάχος του μονωτικού για να μην καταπονούνται ηλεκτρικά ορισμένα τμήματα της μόνωσης. Αναφορικά με τους μονωτήρες μέσης τάσης δύο είναι οι βασικοί τύποι που χρησιμοποιούνται. Ο ένας είναι όμοιος με τους μονωτήρες υψηλής τάσης και ο άλλος συνίσταται σε έναν μονωτήρα από πορσελάνη, ο οποίος είναι γεμάτος με λάδι το οποίο επικοινωνεί υδραυλικά με το λάδι ψύξης του μετασχηματιστή.



Εικόνα 6: Μονωτήρες διέλευσης

- Το δοχείο διαστολής το οποίο χρησιμεύει για να δέχεται την αύξηση του όγκου του λαδιού όταν αυτό θερμαίνεται κατά τη λειτουργία του μετασχηματιστή. Στο δοχείο διαστολής υπάρχει δείκτης στάθμης λαδιού ώστε να ελέγχεται οπτικά η ποσότητα

του λαδιού που υπάρχει μέσα σ' αυτό. Ο δείκτης στάθμης μπορεί είτε ένας απλός γυάλινος σωλήνας που δείχνει τη στάθμη με βάση την αρχή των συγκοινωνούντων δοχείων, είτε ένας μαγνητικός δείκτης που καταγράφει τη στάθμη με μια κατακόρυφη σειρά από εξωτερικά διαταγμένα μαγνητάκια τα οποία ενεργοποιούνται από πλωτήρα με μεταλλικό στοιχείο που επιπλέει μέσα στο δοχείο. Η ελεύθερη στάθμη του λαδιού του δοχείου διαστολής δεν πρέπει να έρθει σε επαφή με τον αέρα της ατμόσφαιρας γιατί το λάδι θα απορροφήσει υγρασία. Για το λόγο αυτό φροντίζουμε να παρεμβάλλουμε κατάλληλα συσκευή με υγροσκοπικούς κρυστάλλους.



Εικόνα 7: Δοχείο διαστολής

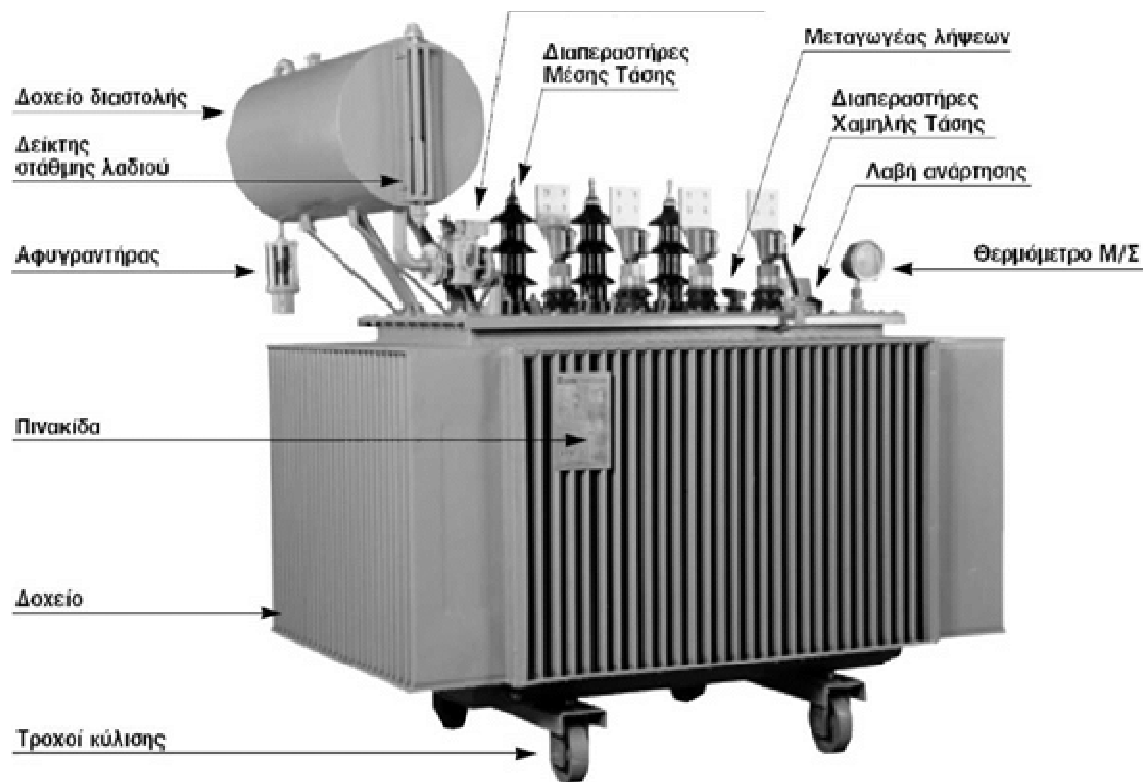
- Το ψυγείο του λαδιού που χρησιμεύει για την ψύξη του λαδιού. Για την καλύτερη απαγωγή της παραγόμενης θερμότητας τοποθετούνται εξωτερικά του δοχείου του μετασχηματιστή τα ψυγεία που διαθέτουν εκτεταμένες επιφάνειες εναλλαγής της θερμότητας. Στους μετασχηματιστές μεγάλης ισχύος με λάδι η ψύξη του λαδιού διευκολύνεται ακόμα περισσότερο με την εξαναγκασμένη κυκλοφορία του αέρα χρησιμοποιώντας ανεμιστήρες.
- Την ασφαλιστική διάταξη Buchholtz η οποία τοποθετείται μεταξύ δοχείου διαστολής και του σώματος του μετασχηματιστή. Αυτή φέρει έναν πλωτήρα οπτικής και ηχητικής σήμανσης, έναν πλωτήρα διακοπής, έναν εξαεριστικό κρουνό και έναν κρουνό αποστράγγισης και συνιστά μια διάταξη ευαίσθητη και αξιόπιστη για την προστασία ενός μετασχηματιστή από διαρροή λαδιού και υπερθέρμανση. Και τούτο γιατί αν εξαιτίας μιας διαρροής λαδιού αδειάσει το δοχείο διαστολής και κατέβει η στάθμη του λαδιού κάτω από τον πλωτήρα σήμανσης τότε θα κλείσουν οι επαφές της διάταξης Buchholtz θα ηχήσει η σειρήνα και θα αρχίσει να

αναβοσβήνει μια λάμπα. Αν συνεχιστεί η διαρροή, ο μετασχηματιστής θα υπερθερμανθεί από έλλειψη λαδιού και από την υψηλή θερμοκρασία θα δημιουργηθούν φυσαλίδες στη μάζα του λαδιού οι οποίες και θα κινήσουν τον πλωτήρα διακοπής. Εδώ έχουμε το δεύτερο επίπεδο ασφάλειας γιατί μόλις κλείσουν οι επαφές του πλωτήρα ενεργοποιείται το σύστημα αυτόματων διακοπών και βγαίνει οριστικά εκτός λειτουργίας ο μετασχηματιστής. Αν το λάδι υπερθερμανθεί από βραχυκύκλωμα ή από υπερφόρτιση διαρκείας και πάλι η ασφαλιστική διάταξη θα ενεργοποιηθεί για την προστασία του μετασχηματιστή.



Εικόνα 8: Ηλεκτρονόμος Buchholtz

- Τον αφυγραντήρα, που μπορεί να είναι εφοδιασμένος με χημικό φίλτρο ώστε να εμποδίζει την "εισπνοή" της υγρασίας από την ατμόσφαιρα στο δοχείο. Αυτός συνεισφέρει στην ασφαλή και έμπιστη λειτουργία του μετασχηματιστή, καθώς η υγρασία ελαττώνει τη διηλεκτρική δυνατότητα του λαδιού και την μονωτική ικανότητα του μονωτικού χαρτιού.



Εικόνα 9: Δομικά μέρη μετασχηματιστή ισχύος

2.2.5. ΜΟΝΩΤΙΚΟ ΧΑΡΤΙ

Το υλικό που έχει επικρατήσει για την μόνωση των αγωγών των τυλιγμάτων είναι το ηλεκτρομονωτικό χαρτί. Κατασκευάζεται από κατάλληλα επεξεργασμένο πολτό υψηλής ποιότητας, ώστε να μην παρουσιάζει χημικά κατάλοιπα και συνήθως είναι από πεύκο ή σκληρότερα ξύλα. Η παραγωγή του είναι απλή και το κόστος της πολύ χαμηλό. Επίσης έχει μεγάλο εύρος διαθεσιμότητας και μπορεί να πάρει την κατάλληλη μορφή ανάλογα με την εφαρμογή. Το χαρτί αυτό εμποτίζεται σε μονωτικό λάδι και έτσι το σύστημα χαρτί-λάδι έχει υψηλότερη διηλεκτρική αντοχή. Έχει πάρει την ονομασία Kraft «σκληρός» από τον Γερμανό Karl F.Dahl ο οποίος το κατασκεύασε το 1884. Οι τύποι του ηλεκτρομονωτικού χαρτιού είναι οι ακόλουθοι [5]:

- Insuldur είναι η εμπορική ονομασία του θερμικώς αναβαθμισμένου χαρτιού. Το χαρτί αυτό είναι Kraft με σταθεροποιητές και λειτουργεί αποτελεσματικά στην παρεμπόδιση της αντίδρασης με τα προϊόντα γήρανσης και το νερό που ενδεχομένως περιέχεται στο λάδι. Με την χρήση αυτού του χαρτιού επιτυγχάνεται λειτουργία σε υψηλότερες θερμοκρασίες από 55oC σε 65oC επομένως και αύξηση ικανότητας φόρτισης του μετασχηματιστή. Εφοδιάζοντας με

- μονωτικό χαρτί insuldur αντί Kraft έναν μετασχηματιστή μειώνουμε τον ρυθμό γήρανσης του κατά 2,5 φορές περίπου.
- Cottonboard: Το cottonboard είναι pressboard το οποίο αποτελείται από 100% βαμβάκι και έχει κατασκευαστεί από εν θερμώ συμπίεση.
 - Transformerboard: Ένας άλλος τύπος ηλεκτρομονωτικού χαρτιού είναι το transformerboard, το οποίο αποτελείται από υψηλής ποιότητας θειϊκωμένη κυτταρίνη και πολτό χαρτιού kraft. Το transformerboard διατίθεται σε δύο τύπους, είτε συμπιεσμένο εν θερμώ ή ελαφρά συμπιεσμένο.
 - Pressboard: Το pressboard είναι κατασκευασμένο από 50% βαμβάκι και 50% πολτό χαρτιού Kraft , ή από 100% μεταχειρισμένο ή παρθένο βαμβάκι. Έχει κατώτερες ιδιότητες από το χαρτί Kraft ίδιου πάχους και έχει την ίδια συμπεριφορά με το απλό χαρτί ενώ η πυκνότητά του είναι μεγαλύτερη. Αποτελεί μαζί με το λάδι, το κύριο μονωτικό υλικό των μετασχηματιστών. Η διηλεκτρική του αντοχή είναι μικρότερη στον αέρα και μεγαλύτερη όταν είναι εμποτισμένο στο λάδι. Έχει αντοχή σε έρπουσες εκφορτίσεις, χαμηλή συρρίκνωση και υψηλή μηχανική αντοχή. Ανάλογα με την τάση στο πρωτεύον του μετασχηματιστή οι κατηγορίες που κατατάσσεται είναι: 1 με τάση $\leq 750\text{kV}$, 2 με τάση $\leq 220\text{ kV}$, 3 για επιμήκη μονωτικά υλικά, 4 για εξαρτήματα τα οποία συγκολλούνται.
 - Nomex: Το nomex έχει σύνθεση από ίνες αρωματικής πολιαμίδης, δημιουργήθηκε την δεκαετία του 1960 και ένα πολύ διαδεδομένο υλικό. Παρουσιάζει μεγάλη αντοχή στη θερμότητα, υψηλή μηχανική αντοχή, προσαρμοστικότητα, πολύ υψηλή αντοχή σε εφαρμοζόμενη ακτινοβολία και ευκαμψία. Το κόστος του είναι υψηλότερο από αυτό του ηλεκτρομονωτικού χαρτιού kraft.

2.2.6. ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗ

Οι μετασχηματιστές είναι το πιο σημαντικό στοιχείο στο ενεργειακό σύστημα. Με τη συνεχώς αυξανόμενη ζήτηση της ηλεκτρικής ενέργειας, ο αριθμός και η χωρητικότητα των εγκατεστημένων μετασχηματιστών μεταφοράς, αλλά κυρίως των μετασχηματιστών διανομής, έχει αυξηθεί. Παρ' όλα αυτά δεν έχει δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στην ποσότητα των απωλειών και στην απόδοση των μετασχηματιστών, διότι ένας μετασχηματιστής, ως στοιχείο του δικτύου, έχει αποδοτικότητα 97-99%. Το σύνολο όμως των μετασχηματιστών στη μεταφορά και στη διανομή παρουσιάζει υψηλές συνολικές απώλειες λόγω του μεγάλου πλήθους τους. Επομένως, κάθε μείωση στις απώλειες των μετασχηματιστών θα μείωνε αισθητά τις συνολικές απώλειες του ηλεκτρικού δικτύου.

Πολύ μεγάλη σημασία για τον υπολογισμό των απωλειών των μετασχηματιστών του δικτύου έχει το είδος του φορτίου, το οποίο

τροφοδοτείται. Με την πάροδο των χρόνων τα φορτία, που συνδέονται και τροφοδοτούνται από το δίκτυο, έχουν αλλάξει σημαντικά. Πολλοί από τους μετασχηματιστές, που είχαν εγκατασταθεί αρχικά για να τροφοδοτούν γραμμικά φορτία με πλήρως ημιτονοειδές ρεύμα, σταδιακά απέκτησαν ως κύριο φορτίο μη γραμμικά φορτία, τα οποία παράγουν ρεύματα με υψηλότερες αρμονικές. Αύξηση της περιεκτικότητας σε αρμονικές του ρεύματος φόρτισης δημιουργεί παραπάνω απώλειες και επομένως οδηγεί σε αύξηση στη θερμοκρασία hot - spot των μετασχηματιστών, άρα και στη μείωση της διάρκειας ζωής τους και στην υποβάθμιση της μόνωσής τους.

Οι μετασχηματιστές συγκρινόμενοι με άλλες ηλεκτρικές μηχανές είναι αρκετά αποδοτικοί. Στο μετασχηματιστή παρατηρούνται οι εξής απώλειες [11]:

- Απώλειες κενού φορτίου (σιδήρου ή πυρήνα)
- Απώλειες φορτίου (χαλκού ή τυλιγμάτων)
- Επιπρόσθετες απώλειες (σύστημα ψύξης κλπ)

Κυριότερες είναι οι απώλειες κενού φορτίου και οι απώλειες φορτίου. Ως εκ τούτου μπορούμε να θεωρήσουμε ότι :

$$P_T = P_{NL} + P_{LL}$$

P_T συνολικές απώλειες μετασχηματιστή (total losses)

P_{NL} απώλειες κενού φορτίου (no load losses)

P_{LL} απώλειες φορτίου (load losses)

2.3. ΚΑΛΩΔΙΑ

Το μονωτικό λάδι χρησιμοποιείται στα υπόγεια και υποβρύχια καλώδια για:

- Να ενισχύσουμε την μόνωσή τους που είναι από χαρτί
- Να παρεμποδίσουμε την εισχώρηση υγρασίας
- Να ψύχουμε τον αγωγό του καλωδίου, όπως συμβαίνει με τα καλώδια τύπου PIRELLI.

Αρχικά τα καλώδια χαμηλής τάσης χρησιμοποιούσαν ως μόνωση θεϊκωμένη άσφαλτο. Αυτή όμως αλλοιωνόταν πολύ γρήγορα, με αποτέλεσμα στις υψηλές θερμοκρασίες να έχουμε σχηματισμό κενών που μπορούσαν να ιονιστούν. Για να αντιμετωπισθεί το φαινόμενο αυτό χρησιμοποιήθηκε με επιτυχία σαν πηκτικό το κολοφώνιο που ενίσχυε τη προσκόλληση του διαποτιστικού υλικού. Αργότερα με την αύξηση των τάσεων μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας

παρατηρήθηκαν συχνές διασπάσεις της μόνωσής του καλωδίου που οφειλόταν στα κενά που δημιουργούσε η συστολή του υλικού στις χαμηλές θερμοκρασίες. Για την αντιμετώπιση του προβλήματος χρησιμοποιήθηκαν και χρησιμοποιούνται μέχρι σήμερα παραφινικά έλαια που αναμιγνύονται με πυκνωτικά όπως είναι τα κολοφώνια. Το ποσοστό του πυκνωτικού εξαρτάται από τη τοποθέτηση του καλωδίου. Στα οριζόντια καλώδια αναμιγνύεται λιγότερο πυκνωτικό από ότι στα κατακόρυφα. Επειδή το παραπάνω υλικό που χρησιμοποιείται για τη πλήρωση του καλωδίου έχει μικρή διηλεκτρική αντοχή δεν χρησιμοποιείται σε καλώδια υψηλών τάσεων. Έτσι για καλώδια μέχρι 66 kV έχουμε παχύρρευστα λάδια, πολλές φορές αναμιγμένα με εξευγενισμένο κολοφώνιο. Το εξευγενισμένο κολοφώνιο έχει βέβαια μικρότερες απώλειες, δεν έχει όμως ικανοποιητική διαλυτότητα στα λάδια παραφινικής βάσης ενώ στις χαμηλές θερμοκρασίες παίρνει κρυσταλλική μορφή όταν οξειδωθεί. Εξ αιτίας αυτού προτιμώνται τα λάδια παραφινικής βάσης που έχουν τα εξής πλεονεκτήματα:

- α) Διατηρούν το κολοφώνιο εύκολα, ακόμα και όταν οξειδωθεί
- β) Είναι πιο λεπτόρρευστα στις θερμοκρασίες διαποτισμού
- γ) Έχουν μικρότερες απώλειες

Αναφορικά με τα καλώδια που προορίζονται για τάσεις πάνω από 66kV χρησιμοποιείται λάδι με πίεση. Τελευταίες έρευνες πάνω στην αντοχή των λαδιών τους, έδειξαν ότι αυτά παθαίνουν φυσικοχημικές αλλοιώσεις, ακόμα και σε κανονική λειτουργία του καλωδίου, επειδή μολύνονται από τα προϊόντα των αντιδράσεων που προκαλούνται από την ανύψωση της θερμοκρασίας. Η μόλυνση και οι αλλοιώσεις επιδρούν πάνω στις διηλεκτρικές απώλειες του λαδιού και του καλωδίου. Κανονικά οι απώλειες αυξάνουν ανάλογα με τη θερμοκρασία και πρακτικά είναι ανεξάρτητες από τη τάση. Δηλαδή η συνδυασμένη επίδραση της θερμότητας και της τάσης με τη παρουσία χαλκού και σιδήρου προκαλεί γήρανση του λαδιού χωρίς όμως να σχηματισθούν κατάλοιπα οξείδωσης όπως συμβαίνει με την οξείδωση στον αέρα. Αυτά βέβαια είναι αντίθετα με την άποψη, που ήταν δεκτή μέχρι πρότινος και έλεγε ότι το λάδι του καλωδίου δεν οξειδώνεται μιας και δεν υπάρχει αέρας μέσα στο καλώδιο. Επειδή οι αλλοιώσεις του λαδιού δεν προσβάλλουν το μονωτικό χαρτί, μπορούμε να αφαιρέσουμε το γηρασμένο λάδι, να ξεπλύνουμε τα καλώδια με λάδι και να τα γεμίσουμε με καινούργιο για να τα χρησιμοποιήσουμε εκ νέου. Τα λάδια που χρησιμοποιούνται σε καλώδια υψηλής τάσης πρέπει να αντέχουν σε μεγάλες θερμοκρασίες και στη γήρανση. Επίσης πρέπει να εκλύουν όσο το δυνατό λιγότερα αέρια και να είναι παχύρρευστα αν δεν προορίζονται για κυκλοφορία μέσα στα καλώδια. Τόσο το λάδι όσο και το μονωτικό εκλέγονται κατά τέτοιο τρόπο ώστε κάτω από οποιεσδήποτε συνθήκες λειτουργίας το λάδι να διαποτίζει τη μόνωση από χαρτί.

Τα λάδια που προορίζονται για καλώδια πρέπει να ελέγχονται ως προς τη χημική τους σύνθεση, το χαμηλό σημείο ροής και την απουσία μέσα σε αυτά κεριού. Οι βασικές ιδιότητες των λαδιών των καλωδίων είναι αναφέρονται παρακάτω.

- Η εσωτερική τριβή πρέπει να είναι όσο το δυνατό χαμηλή με αποδεκτή πτητικότητα. Η χαμηλή εσωτερική τριβή κάνει δυνατό το σχεδιασμό συστημάτων που μπορούν να λειτουργούν σε χαμηλές θερμοκρασίες.
- Το λάδι πρέπει να έχει τη δυνατότητα απορρόφησης κάθε αερίου που ίσως παραμένει στο καλώδιο μετά την εγκατάσταση.
- Η $\tan\delta$ πρέπει να είναι όσο το δυνατό μικρή σε συνδυασμό με καλή χημική σταθερότητα ακόμα και στις πιο υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας. Πάντως τα λάδια σαν υλικά εμποτισμού μπορούν να καταταγούν σε δύο κατηγορίες:
- Παχύρρευστα που περιέχουν εξευγενισμένο κολοφώνιο ή πολυμερείς υδρογονάνθρακες.
- Λάδια με χαμηλή εσωτερική τριβή (ιξώδες).

2.4. ΜΟΝΩΤΗΡΕΣ ΔΙΕΛΕΥΣΗΣ

Τα δίκτυα Μεταφοράς και Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας απαρτίζονται κυρίως από υπαίθριες εγκαταστάσεις υψηλής και μέσης τάσης, όπως οι υποσταθμοί και οι γραμμές μεταφοράς. Στις εγκαταστάσεις αυτές, βασική συνιστώσα μόνωσης είναι ο ατμοσφαιρικός αέρας, ο οποίος προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα, με κυριότερο το μηδενικό κόστος χρήσης. Έτσι, είναι εφικτή και οικονομικά αποδεκτή η κατασκευή εγκαταστάσεων με τάση λειτουργίας που φθάνει σήμερα μέχρι και τα 1000kV.

Εκτός όμως από τον ατμοσφαιρικό αέρα απαιτείται και η χρήση μονωτήρων, δηλαδή διατάξεων που χρησιμοποιούνται για την απομόνωση των ηλεκτροφόρων στοιχείων μιας ηλεκτρικής εγκατάστασης από τα μη ηλεκτροφόρα. Οι διατάξεις αυτές αποτελούν τη δεύτερη συνιστώσα του μονωτικού συστήματος, η οποία πρέπει σε κάθε περίπτωση να λειτουργεί αξιόπιστα, δεδομένου ότι αρκεί η αστοχία ενός μόλις μονωτήρα για να τεθεί εκτός λειτουργίας ένα τμήμα ενός δικτύου ή και ένα δίκτυο συνολικά. Χρησιμοποιούνται επίσης στα δίκτυα μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, έτσι ώστε να στηρίζουν, να διαχωρίζουν ή να εμπεριέχουν αγωγούς τάσης.

Η μόνωση μιας γραμμής μεταφοράς, καθορίζεται από τις ελάχιστες αποστάσεις μέσα στον αέρα, μεταξύ των φάσεων ή μεταξύ των φάσεων και του δυναμικού της γης. Αυτές οι ελάχιστες αποστάσεις, εξασφαλίζονται μέσω της ανάρτησης ή στήριξης των αγωγών των φάσεων με μονωτήρες.

Χαρακτηριστικά της μόνωσης που εξασφαλίζει ο μονωτήρας μιας γραμμής μεταφοράς είναι ότι αυτή είναι εξωτερική και αυτοεπανερχόμενη. Δηλαδή, υπόκειται σε εξωγενείς επιδράσεις (π.χ. ρύπανση) και μετά από μία διάσπαση (αν δεν έχουν υπάρξει καταστροφικές συνέπειες) η μόνωση επανακτά τις αρχικές ιδιότητές της. Συνέπεια αυτού, είναι ότι ένα σφάλμα που εμφανίζεται πάνω στη γραμμή μετά από μία υπέρταση, δεν έχει κάποια σοβαρή συνέπεια στη μόνωση της γραμμής, η οποία αποκαθίσταται μετά τη σβέση του τόξου.

Γενικά, τις καταπονήσεις που δέχεται η μόνωση του μονωτήρα μιας γραμμής μεταφοράς, κατατάσσουμε σε εξωτερικές και εσωτερικές. Οι εξωτερικές καταπονήσεις, προερχόμενες από κεραυνοπληξίες της ηλεκτρικής γραμμής και διαδιδόμενες μέσω αυτής, καταπονούν με σοβαρές, συχνά, συνέπειες τον εξοπλισμό του δικτύου. Οι εσωτερικές καταπονήσεις προέρχονται από το γεγονός ακριβώς της λειτουργίας της ηλεκτρικής γραμμής και υποδιαιρούνται:

- στην τάση βιομηχανικής συχνότητας, με την οποία λειτουργεί υπό κανονικές συνθήκες η ηλεκτρική γραμμή
- στις παροδικές υπερτάσεις βιομηχανικής συχνότητας, με διάρκεια της τάξεως του δευτερολέπτου
- στις υπερτάσεις χειρισμών, με διάρκεια εκατοντάδων έως χιλιάδων μς

Για εγκαταστάσεις πάνω από 20kV το υλικό των μονωτήρων είναι είτε κεραμικό (πορσελάνη), είτε γυαλί, είτε συνθετικό (δηλαδή ίνες fiber glass σε συνδυασμό με εποξειδικές ρητίνες).

Μια κατηγορία μονωτήρων είναι οι μονωτήρες διέλευσης. Οι μονωτήρες διέλευσης των μετασχηματιστών περιέχουν μονωτικό λάδι που μπορεί να είναι το ίδιο με του μετασχηματιστή. Αν το λάδι του μονωτήρα επικοινωνεί με το λάδι του μετασχηματιστή τότε αυτό βρίσκεται σε πίεση που οφείλεται στη στάθμη του λαδιού του δοχείου διαστολής.

Αν το λάδι του μονωτήρα διέλευσης δεν επικοινωνεί με το λάδι του μετασχηματιστή τότε είναι ένα παχύρρευστο ειδικό λάδι με διηλεκτρική αντοχή που δεν μεταβάλλεται ακόμα και με πολύ χαμηλές θερμοκρασίες. Οι μονωτήρες διέλευσης των μετασχηματιστών αλλά και των διακοπών είναι στεγανοί και έχουν χώρο διαστολής του υγρού που δεν επικοινωνεί με την ατμόσφαιρα και άρα δεν επηρεάζεται από τις συνθήκες. Η γωνία διηλεκτρικών απωλειών του μονωτικού λαδιού που προορίζεται για μονωτήρες διέλευσης επιδρά πάνω στη χρήση του, αλλά όχι τόσο πολύ όσο στη χρήση του λαδιού που προορίζεται για πυκνωτές. Γι' αυτό το λάδι των μετασχηματιστών είναι γενικά κατάλληλο για μονωτήρες διέλευσης. Ειδικά στους μονωτήρες διέλευσης υπερύψηλης τάσης (420kV) χρησιμοποιείται λάδι που περιέχει πρόσθετο βελτιωτικό.

Οι μονωτήρες αυτού του τύπου χρησιμοποιούνται για να μονώσουν τους αγωγούς των ακροδεκτών υψηλής τάσης, κυρίως μετασχηματιστών ή άλλων διατάξεων. Συνήθως οι μονωτήρες διέλευσης κατασκευάζονται από πορσελάνη. Οι μονωτήρες διέλευσης προτιμώνται όταν η γραμμή πρέπει να περνάει μέσα από τον μονωτήρα και ταυτόχρονα να στηρίζεται σε αυτόν. Χρησιμοποιούνται στις θέσεις εξόδου των αγωγών από τους μετασχηματιστές ή άλλες συσκευές και για τη διέλευση αγωγών εγκαρσίως μέσω χωρισμάτων (τοιχών κ.α.).

2.5. ΠΥΚΝΩΤΕΣ

Στους πυκνωτές το μονωτικό υγρό ενισχύει και διαποτίζει τη μόνωσή τους. Ο διαποτισμός πραγματοποιείται με την ύπαρξη μεγάλου κενού και υπό μεγάλη θερμοκρασία μετά από τέλεια ξήρανση. Τα φύλλα αλουμινίου με την ενδιάμεση διαποτισμένη μόνωση κλείνονται μέσα σε στεγανό σφραγιστό μεταλλικό δοχείο. Το γεγονός αυτό αποκλείει τη δυνατότητα αντικατάστασης ή συμπλήρωσης του υγρού, επομένως η διάρκεια ζωής του υγρού είναι και η διάρκεια ωφέλιμης ζωής του πυκνωτή. Φυσικά το υγρό δεν μπορεί να οξειδωθεί αφού δεν έρχεται σε επαφή με τον αέρα και η θερμοκρασία λειτουργίας δεν είναι υψηλή. Το υγρό πρέπει να αντέχει σε πεδιακές εντάσεις γύρω στα 100 kV/cm, ενώ στους μετασχηματιστές οι εντάσεις αυτές είναι γύρω στα 45 kV/cm.

Αρχικά τα έλαια των πυκνωτών ήταν όμοια με αυτά των μετασχηματιστών, ενώ τελευταία χρησιμοποιούνται ειδικά έλαια, αφού οι συνθήκες λειτουργίας των πυκνωτών διαφέρουν από αυτές των μετασχηματιστών. Τα έλαια των πυκνωτών χωρίζονται σε δύο κατηγορίες. Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν αυτά που προέρχονται από ορυκτά πετρέλαια ενώ στη δεύτερη τα χλωρισμένα συνθετικά υγρά που όλα έχουν για βάση τους το PCB (polychlorinated biphenyl). Τα τελευταία κυκλοφορούν στην αγορά με τις ονομασίες inerteen, clophen, pyranol κ.λ.π. Αυτά πλεονεκτούν λόγω χαμηλών διηλεκτρικών απωλειών καθώς και εξαιτίας του γεγονότος ότι δεν αναφλέγονται. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκαν αποκλειστικά σχεδόν, τα τελευταία χρόνια. Επειδή όμως το PCB αποδείχτηκε ότι μολύνει το περιβάλλον, αντικαταστάθηκε με άλλα υγρά τα τελευταία χρόνια. Ένα απ' αυτά έχει την εμπορική ονομασία XFS - 4169L. Αυτό έχει τοξικότητα 20 φορές μικρότερη από υγρά που βασίζονται στο PCB. Επίσης έχει σημεία ανάφλεξης και καύσης μεγαλύτερα από τα αντίστοιχα του ορυκτού μονωτικού λαδιού. Στον παρακάτω πίνακα 1 αναφέρουμε κάποια μονωτικά έλαια καθώς και ορισμένα ενδεικτικά χαρακτηριστικά τους.

ΤΥΠΟΣ	ΣΗΜΕΙΟ ΑΝΑΦΛΕΞΗΣ	ΣΗΜΕΙΟ ΚΑΥΣΗΣ
-------	------------------	---------------

ΟΡΥΚΤΑ ΛΑΔΙΑ	154°C	167°C
PCB	166°C	316°C
XFS-4169L	174°C	199°C

Πίνακας 2: σημείο ανάφλεξης και καύσης μονωτικών ελαίων

2.6. ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΕΣ ΟΡΓΑΝΩΝ

Στους μετασχηματιστές μετρήσεων (τάσης και έντασης) χρησιμοποιούνται μονωτικά λάδια, ίδια με αυτά των μετασχηματιστών ισχύος για τον εμποτισμό του στερεού υλικού που γενικά είναι ειδικό χαρτί. Στο πίνακα 2 δίνονται τα χαρακτηριστικά του ελαίου που έχουν την μεγαλύτερη σημασία για κάθε τύπο συσκευής.

Συσκευή	Χαρακτηριστικά που έχουν σημασία
Μετασχηματιστές	Χημική σταθερότητα, θερμικά χαρακτηριστικά και σε ειδικές περιπτώσεις μη αναφλεξιμότητα
Ελαιοδιακόπτες	Σχηματισμός άνθρακα, σβήσιμο του τόξου
Πυκνωτές	Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά, διηλεκτρική σταθερή, θερμική σταθερότητα και έκκλιση αερίων
Καλώδια	Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά, διηλ. σταθερή, θερμική σταθερότητα και έκλυση – απορρόφηση αερίων
Μονωτήρες διέλευσης:	Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά

Πίνακας 3: χαρακτηριστικά μονωτικών ελαίων για διάφορες συσκευές [2]

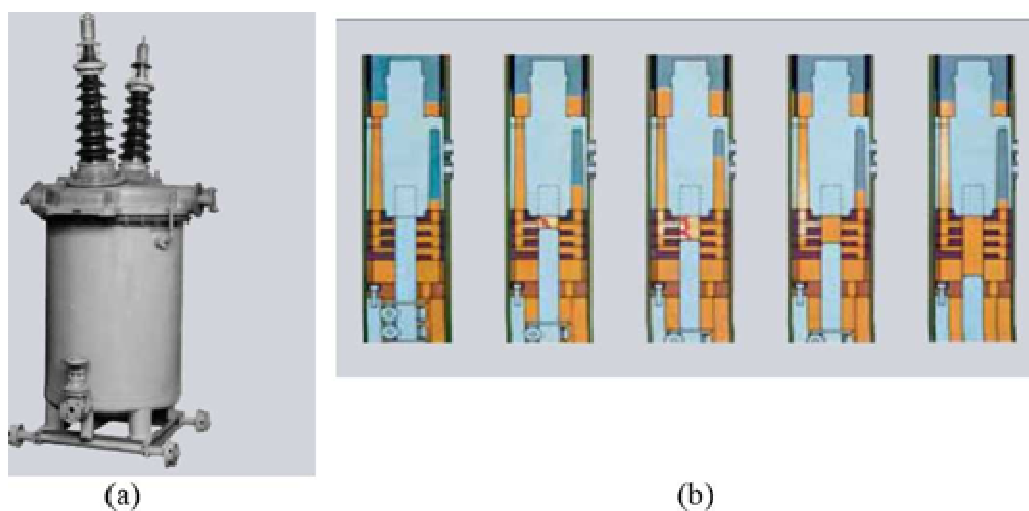
2.7. ΕΛΑΙΟΔΙΑΚΟΠΤΕΣ

Ο διακόπτης κυκλώματος αποτελεί ένας αυτόματης λειτουργίας ηλεκτρικός διακόπτης που αποσκοπεί στην προστασία ενός ηλεκτρικού κυκλώματος από ζημιές που προκλήθηκαν από υπερφόρτωση ή βραχυκύκλωμα. Σε αντίθεση με την ασφάλεια, η

οποία λειτουργεί μία φορά και στη συνέχεια πρέπει να αντικατασταθεί, ο διακόπτης κυκλώματος μπορεί να επαναφέρεται (είτε με το χέρι ή αυτόματα) για να συνεχιστεί η κανονική λειτουργία του. Αυτόματοι διακόπτες κυκλώματος υπάρχουν σε διαφορετικά μεγέθη, από μικρές συσκευές που προστατεύουν ένα άτομο οικιακών συσκευών μέχρι μεγάλους διακόπτες που αποσκοπούν στην προστασία των κυκλωμάτων υψηλής τάσης που τροφοδοτούν μια ολόκληρη πόλη.

Οι διακόπτες που χρησιμοποιούν ως μέσο σβέσης του τόξου μονωτικό λάδι, ονομάζονται διακόπτες ελαίου. Στους διακόπτες ελαίου, το λάδι εξυπηρετεί σε δύο σκοπούς. Λειτουργεί σαν μονωτής μεταξύ των φάσεων και μεταξύ φάσης-γης και αποτελεί το μέσο για την σβέση του τόξου. Όταν το ηλεκτρικό τόξο αποσβέννεται μέσω του λαδιού, το λάδι ατμοποιείται και δημιουργείται μια φυσαλίδα γύρω από το τόξο. Το αέριο στο εσωτερικό της φυσαλίδας είναι κατά 80% υδρογόνο, το οποίο εντείνει τον ιονισμό. Η αποσύνθεση του λαδιού απαιτεί ενέργεια η οποία προέρχεται από τη θερμότητα που γεννά το τόξο. Το λάδι που υπάρχει γύρω από τη φυσαλίδα απομακρύνει τη θερμότητα από το τόξο και επίσης συνεισφέρει στο απο-ιονισμό του τόξου. Το βασικό μειονέκτημα των ελαιοδιακοπών είναι η χαμηλή αναφλεξιμότητα του λαδιού και η αναγκαία συντήρησή του ώστε να κρατιέται το λάδι σε καλή κατάσταση (π.χ. αντικατάσταση και καθαρισμός του).

Στις τάσεις μετάδοσης κάτω από 345 kV, οι διακόπτες ελαίου ήταν δημοφιλείς. Χάνουν όλο και περισσότερο έδαφος από τους αεριομονωτικούς διακόπτες ισχύος, όπως οι διακόπτες κενού και οι διακόπτες SF₆.



Εικόνα 10: (a) Ελαιοδιακόπτης εξωτερικού χώρου, 110 kV, 350 A. (b) Απόσβεση ηλεκτρικού τόξου σε διακόπτη ελαίου

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

3.1 ΓΕΝΙΚΑ

Η παρούσα εργασία εκπονήθηκε στο εργαστήριο Υψηλών Τάσεων του Πανεπιστημίου Πατρών και στόχος της είναι να εξετάσει την συμπεριφορά του διερεύνηση της συμπεριφοράς του φυτικού ελαίου FR3 κατά τη διάρκεια καταπόνησης του με εναλλασσόμενη τάση (AC) και η σύγκριση του με το ορυκτό έλαιο.

Τα διάκενα στα οποία καταπονήθηκε το φυτικό έλαιο είναι : rogowski 2mm , ακίδα-πλάκα 2mm , rogowski-πλάκα 2.5mm. Στη συνέχεια , πραγματοποιήσαμε μετρήσεις με διάταξη rogowski 2.5mm σε φυτικό λάδι χωρίς ανάδευση και σε καταπονημένο σε κρουστική τάση. Οι επόμενες μετρήσεις αφορούσαν το σύνθετο διάκενο χαρτί – λάδι και χρησιμοποιήσαμε 2 τύπους χαρτιού :DPP PAPER και KRAFT PAPER σε διάταξη rogowski 2.5mm. Τέλος , χρησιμοποιήσαμε ορυκτό έλαιο σε διάκενα rogowski 2.5mm και Ακίδα πλάκα 2,5 mm.

3.2 ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΕΝΤΑ ΟΡΓΑΝΑ

Στις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν χρησιμοποιήθηκε γραμμικά αυξανόμενη AC τάση συχνότητας 60Hz, με μεταβλητό ρυθμό (ταχύτητα) αύξησης (0.5 , 1, 2 και 5 kV/s). Για την παραγωγή αλλά και τη μέτρηση της τάσης αυτής χρησιμοποιήθηκε η συσκευή BAUR Oil Tester DTA 822-129-1, που αποτελεί μέρος του ηλεκτρομηχανικού εξοπλισμού του εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων.



Εικόνα 11: Συσκευή BAUR Oil Tester DTA 822-129-1

Η συσκευή BAUR Oil Tester DTA 822-129-1 έχει μερικά χαρακτηριστικά που την καθιστούν εξαιρετικά εύχρηστη. Συγκεκριμένα έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

- Έχει μικρό όγκο και επιτρέπει εύκολο χειρισμό
- Παράγει τάσεις 0 - 100 kVrms με ταχύτητες αύξησης 0.5 kV/s, 1kV/s, 2kV/s ή 5kV/s
- Κύκλωμα γρήγορης ανοιχτοκύκλωσης ώστε να επιτυγχάνεται ταχεία σβέση του ηλεκτρικού τόξου, αποφεύγοντας έτσι το σχηματισμό παραπροϊόντων, αύξηση της θερμότητας που προκαλεί γρηγορότερη οξείδωση κ.λπ.
- Ξεκάθαρη και σίγουρη μέτρηση της τάσης διάσπασης
- Δυνατότητα ανάδευσης του μίγματος με χρήση αναδευτήρα
- Δυνατότητα προγραμματισμού σειράς μετρήσεων με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά και παραμέτρους
- Ειδικά εργαλεία όπως ο καθαρισμός ηλεκτροδίων (24 συνεχείς διασπάσεις σύμφωνα με διεθνή πρότυπα - IEC, BS, ASTM - ώστε να αφαιρούνται ατέλειες και προσμίξεις που μπορεί να έχουν κατακαθίσει στην επιφάνεια των ηλεκτροδίων)

- Μνήμη αποθήκευσης των ληφθεισών μετρήσεων
- Προστατευτικό καπάκι με μηχανισμό ανίχνευσης της κατάστασής του (αν είναι ανοιχτό ή κλειστό) για αποφυγή ηλεκτροπληξίας του χρήστη κατά τη διάρκεια διεξαγωγής μετρήσεων
- Εύκολη και ακριβής ρύθμιση της απόστασης του διακένου (με σκάλα Vernier)
- Δυνατότητα εκτύπωσης των αποτελεσμάτων των μετρήσεων

Η συσκευή **BAUR Oil Tester** αποτελείται από δύο μέρη. Το ένα κομμάτι αποτελείται από τον μετασχηματιστή, τα ηλεκτρόδια, την κυψέλη ελαίου και γενικά κάθε άλλη διάταξη που συντελεί στην ολοκλήρωση της διάσπασης. Το δεύτερο μέρος της συσκευής αποτελείται από τη διάταξη που αφορά την μέτρηση και παρουσίαση της τάσης διάσπασης καθώς και το σύνολο των ρυθμίσεων της διάταξης. Συγκεκριμένα είναι το κύκλωμα που μεσολαβεί μεταξύ του παρατηρητή και του κυκλώματος της διάσπασης. Στόχος του δευτέρου επιμέρους κομματιού είναι αφενός η μέτρηση αλλά και αφετέρου η προστασία του παρατηρητή από την αναπτυσσόμενη υψηλή τάση κατά την διάρκεια της διάσπασης. Στην διάταξη αυτού του δευτέρου μέρους περιλαμβάνεται η οθόνη, ο εκτυπωτής και τα κουμπιά χειρισμού της συσκευής. Αφού επιλέξουμε το ρυθμό αύξησης της τάσης που επιθυμούμε η συσκευή αυξάνει το πλάτος της εφαρμοζόμενης τάσης μέχρι να επιτευχθεί η διάσπαση. Η τιμή της τάσης διάσπασης καθορίζεται από την στιγμή που το πρώτο τόξο σαρώσει το διάστημα μεταξύ των ηλεκτροδίων. Το ρεύμα κυκλοφορεί αυτόματα αν συμβεί ένα πλήρες τόξο. Οι σπινθηρισμοί που δεν καταλήγουν σε τόξο αγνοούνται. Σε περίπτωση που η διάσπαση δεν πραγματοποιηθεί στα 100kV τότε η συσκευή διαθέτει έναν αυτόματη διακόπτη που σταματάει την παροχή τάσης. Επίσης ο διακόπτης του κυκλώματος διακόπτει την παροχή μέσα σε 10 ms μετά την έναρξη του τόξου.

Η συσκευή έχει ρυθμιστεί ώστε να ολοκληρώνει ένα σετ που αποτελείται από 6 εφαρμογές τάσης, με απολύτως συγκεκριμένο χρόνο χαλάρωσης του ελαίου μεταξύ των μετρήσεων. Μετά το πέρας του σετ μετρήσεων, εμφανίζονται στην οθόνη της συσκευής εκτός των ρυθμίσεων, με βάση τις οποίες πάρθηκαν οι μετρήσεις και τα παρακάτω :

- οι 6 μετρήσεις της τάσης διάσπασης καθώς και
- η Μέση Τιμή(M),
- η Τυπική Απόκλιση (σ) και
- ο Συντελεστής μεταβολής ($CV=\sigma/M$) των τάσεων διάσπασης.

Στις περισσότερες δοκιμές ελαίων το σύστημα μόνωσης των τυλιγμάτων είναι αυτό του ελαίου-μονωτικού χαρτιού (όπως συμβαίνει και στους μετασχηματιστές). Σε αυτή την εργασία όμως στόχος μας είναι να μελετήσουμε την καθαυτού συμπεριφορά του

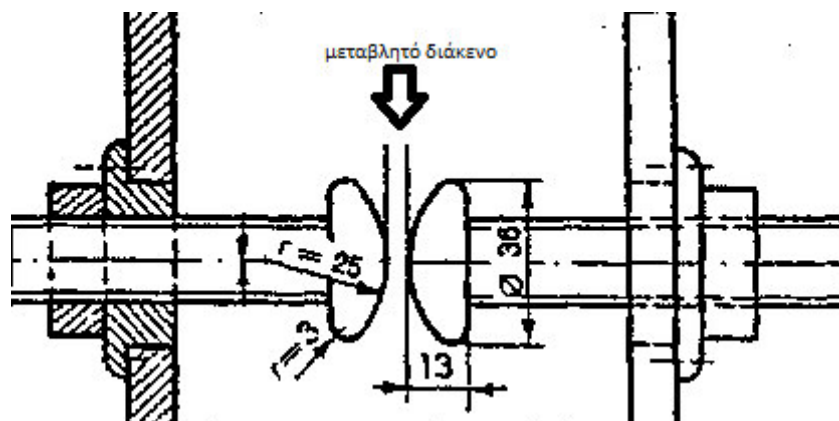
ελαίου συνεπώς δεν χρησιμοποιήθηκε μονωτικό χαρτί μεταξύ των ηλεκτροδίων.

Η **κυψέλη δοκιμής** είναι φτιαγμένη από γυαλί με χωρητικότητα περίπου 500ml και κατά την λειτουργία του μηχανήματος πρέπει να παραμένει κλειστό με το κατάλληλο καπάκι.



Εικόνα 12: Κυψέλη δοκιμής

Τα **ηλεκτρόδια** μπορούν είτε να είναι φτιαγμένα είτε απλά επικαλυμμένα από ορείχαλκο ή από ανοξείδωτο ατσάλι με πολύ καλά λειασμένη την επιφάνεια τους. Η μορφή τους είναι σφαιρική με διάμετρο 13.0 mm και τοποθετούνται οριζόντια ώστε να δημιουργούν μεταξύ τους ένα διάκενο το οποίο υπολογίζεται με τη βοήθεια φίλερ (λάμων) διαφορετικού πάχους. Το μήκος του διακένου πρέπει να μετράται συχνά και να διορθώνεται, καθώς παρατηρείται μετακίνηση των ηλεκτροδίων εξαιτίας των εκκενώσεων. Όταν παρατηρηθεί κάποια εξωτερική φθορά στην επιφάνεια των ηλεκτροδίων, αυτά πρέπει να αντικαθίστανται άμεσα. Η απόσταση των ηλεκτροδίων από την ελεύθερη επιφάνεια του υγρού πρέπει να είναι τουλάχιστον 40mm και η μεταξύ τους απόσταση 2,5 cm.



Εικόνα 13: Ηλεκτρόδια Rogowski [9]

Το φυτικό έλαιο που χρησιμοποιήσαμε είναι το Envirotemp™ FR3™ [12], το οποίο παράγεται από ελαιούχους σπόρους και δεν περιέχει καθόλου πετρελαϊκά υλικά . Το γεγονός ότι είναι φιλικό προς το περιβάλλον , προστατεύει από κίνδυνο πυρκαγιάς αλλά και χάρη στις χημικές και ηλεκτρικές του ιδιότητες , το καθιστά ιδανικό διηλεκτρικό για τη μόνωση μετασχηματιστών διανομής . Χαρακτηριστικό είναι το πράσινο χρώμα το οποίο αντανakλά τη φιλικότητα προς το περιβάλλον. Τυπικές τιμές των ιδιοτήτων του FR3 δίνονται στον παρακάτω πίνακα :

Διηλεκτρική αντοχή	47-56 kv (25°C)
Σχετική διηλεκτρική σταθερά	3,2 (25°C)
Συντελεστής απωλειών	0,05%
Σημείο ανάφλεξης	330 ° C
Σημείο καύσης	360° C
Βιοδιοσπασιμότητα	100%
PH	5.8

Πίνακας 4: Τυπικές τιμές Envirotemp FR3 [12]

3.3 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΔΙΕΞΑΓΩΓΗΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ

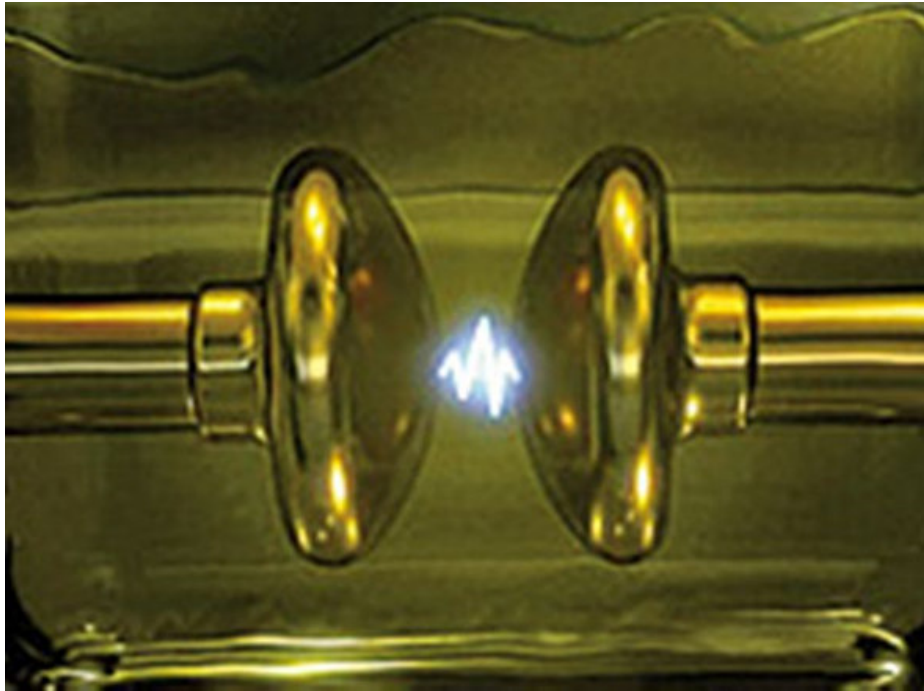
Κατά την πειραματική διαδικασία ακολουθήθηκαν βασικοί κανόνες για να επιτευχθεί η <<ιδανική>> συμπεριφορά ελαίου , απαλλαγμένη από λάθη, αστοχίες του παρατηρητή σχετικά με τις προς εξέταση ιδιότητές του και αφετέρου να εξασφαλίσουμε την ασφάλεια τόσο του παρατηρητή όσο και του εξοπλισμού του εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων.

Αναλόγως με τη διάταξη που θέλουμε να υπολογίσουμε , επιλέγουμε τα ηλεκτρόδια που θα χρησιμοποιήσουμε και τα τοποθετούμε στην κυψέλη δοκιμής , σε οριζόντια θέση.

1. Χρησιμοποιούμε πάντα γάντια latex για να μην μολύνουμε το προς δοκιμή λάδι, με χρήση γαντιών από latex, ανοίγουμε το δοχείο που εμπεριέχει το έλαιο, που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί στη δοκιμή μας. Για την εξαγωγή του ελαίου χρησιμοποιήθηκε αποστειρωμένη σύριγγα. Το πρώτο γέμισμα της κυψέλης χρησιμοποιείται για να ξεπλυθεί αυτή (ώστε να απομακρυνθούν σωματίδια τα οποία μπορεί να έχουν προηγουμένως προσκολληθεί στα τοιχώματα της) και το λάδι αυτό πεταγόταν και κατόπιν το δοχείο της δοκιμής ξαναγεμιζόταν με νέο λάδι.
2. Αμέσως μετά, σφραγίζουμε το δοχείο που εμπεριέχει το λάδι που χρησιμοποιείται στις δοκιμές με το κατάλληλο καπάκι ώστε να περιορίσουμε κατά το δυνατόν την αντίδραση του ελαίου με τον ατμοσφαιρικό αέρα. Να σημειώσουμε εδώ ότι και τα ηλεκτρόδια που χρησιμοποιήσαμε , αλλά και τα φίλερ (για να μετρήσουμε υπολογίσουμε το διάκενο) ξεπλένονται πρώτα με το ίδιο έλαιο.
3. Κατόπιν αφήναμε την κυψέλη σε καθαρό χαρτί να στραγγίξει και μετά γεμίζαμε την κυψέλη με έλαιο μέχρι τα 400 ml (.μέχρι να καλυφθούν τα ηλεκτρόδια χωρίς όμως να υπερχειλίζει). Μετά το κλείσιμο της κυψέλης με το καπάκι της, την τοποθετούμε στην ειδικά διαμορφωμένη για τις διαστάσεις της, ξύλινη βάση. Ιδιαίτερη προσοχή χρειάζεται κατά τη μεταφορά, ώστε να μη χυθεί έλαιο τόσο για την ασφάλεια των μετρήσεων όσο και για την καθαριότητα του εργαστηρίου. Κατά την τοποθέτηση του ελαίου στην κυψέλη μέσω της σύριγγας, πρέπει να αποφευχθεί ο σχηματισμός φυσαλίδων που ασκούν μεγάλη επίδραση στη τάση διάσπασης. Ένα μέτρο που παίρνουμε για να το εξασφαλίσουμε αυτό είναι να αφήσουμε το λάδι να ηρεμήσει για 10 λεπτά στην κυψέλη πριν εκκινήσουμε τη διαδικασία των μετρήσεων, ώστε να απαλλαγεί από τυχόν φυσαλίδες αέρα. Εξαιτίας των αρνητικών επιπτώσεων της υγρασίας, μέσω των μικροσωματιδίων που αιωρούνται στον αέρα ή εισέρχονται στο έλαιο λόγω απουσίας εξειδικευμένων μηχανισμών χειρισμού του λαδιού, το λάδι δεν πρέπει να παραμένει για μεγάλο διάστημα στην κυψέλη. Ένας ακόμη λόγος που συνιστά τη συχνή αλλαγή του ελαίου της κυψέλης είναι και η δημιουργία σωματιδίων που δημιουργούνται μετά τη σβέση του ηλεκτρικού τόξου. Βέβαια, έγιναν και μετρήσεις που το λάδι παρέμεινε στην κυψέλη για μέρες, αλλά ο σκοπός ήταν να διαπιστωθεί η επίδραση των παραπάνω παραγόντων στη συμπεριφορά του ελαίου. Για να προσομοιάζεται η συνεχής κίνηση του ελαίου εντός του μετασχηματιστή, η οποία όπως προείπαμε δεν αφήνει τις διαλυμένες εντός του προσμίξεις να κατακάθονται, χρησιμοποιήθηκε μια λειτουργία του μηχανήματος BAUR Oil Tester DTA 822-129-1 η οποία εξασφαλίζει τη συνεχή ανάδευση του μίγματος (stirring).
4. Μόλις τοποθετούμε την κυψέλη στο BAUR Oil Tester , τοποθετούμε μέσα και το ειδικό μαγνητάκι , το όποιο καθόλη τη διάρκεια των μετρήσεων περιστρέφεται με τη βοήθεια

ειδικής διάταξης μαγνητών στο εσωτερικό της συσκευής. Με τη βοήθεια , επίσης , ανοξειδωτων λαμών (φίλερ) καθορίζουμε το διάκενο των ηλεκτροδίων που θέλουμε να μετρήσουμε . Τοποθετούμε το φίλερ ανάμεσα στα δύο ηλεκτρόδια και με χειροκίνητη περιστροφή της στρόφιγγας , μπορούμε να πετύχουμε το διάκενο που θέλουμε .Μόλις τα δύο ηλεκτρόδια εφάπτονται με τη λάμα , ακούγεται η ειδική ηχητική σήμανση, οπότε και σταματάμε περεταίρω περιστροφή της στρόφιγγας , αφού ρυθμίσαμε τη ζητούμενη απόσταση.

5. Μετά το κλείσιμο της κυψέλης με το καπάκι της , τοποθετούμε την κυψέλη εντός της συσκευής BAUR Oil Tester. Ύστερα εφαρμόζουμε το ειδικό πρόγραμμα καθαρισμού ηλεκτροδίων (Tools→ Electrode Cleaning), κατά το οποίο διεξάγεται μία σειρά 24 συνεχόμενων διασπάσεων (υπό ταχέως αυξανόμενη τάση), όπως απαιτούν διεθνή πρότυπα (IEC, BS, AS) δοκιμών σε λάδια, ώστε να αφαιρεθούν τυχόν ατέλειες και προσμίξεις που έχουν κατακαθίσει στην επιφάνεια των ηλεκτροδίων. Τα αποτελέσματα αυτά δεν καταγράφονται ούτε από τον παρατηρητή ούτε αποθηκεύονται στη μνήμη του BAUR Oil Tester γιατί εκτός ότι γίνονται με γρήγορο ρυθμό, δεν αποτελούν στοιχεία έρευνας αλλά μέσο καθαρισμού των ηλεκτροδίων.
6. Κάνουμε εκκίνηση της διαδικασίας εκτέλεσης ενός σετ μετρήσεων (6 διασπάσεις) σύμφωνα με το ειδικά διαμορφωμένο πρόγραμμα που έχει αποθηκευτεί στη μνήμη της συσκευής και έχει τις εξής ρυθμίσεις:
 - Εύρος τάσης δοκιμής : 0 – 100 kV rms
 - Συχνότητα AC τάσης : 60 Hz
 - Αύξηση τιμής της εφαρμοζόμενης τάσης δοκιμής : 2 kVolt/sec
 - 6 διασπάσεις ανά σετ
 - 10 λεπτά διάλειμμα μεταξύ των σετ μετρήσεων (5 λεπτά μετρούμενο από εμάς διάλειμμα και 5 λεπτά από το ορισμένο από το μηχάνημα διάλειμμα)
 - 2 λεπτά διάλειμμα μεταξύ των διασπάσεων του ίδιου σετ
 - συνεχής ανάδευση (στις περισσότερες περιπτώσεις)
7. Μόλις ολοκληρωθεί η διαδικασία της διάσπασης , εμφανίζονται στην οθόνη της συσκευής, οι 6 τιμές τάσης διάσπασης που μετρήθηκαν καθώς και η Μέση Τιμή μ (kV) τάσης διάσπασης, η τυπική απόκλιση σ (kV) κανονικής κατανομής και ο συντελεστής μεταβολής (σ/μ %) της κατανομής. Όλες οι τιμές καταγράφονται για να περάσουμε στο επόμενο σετ μετρήσεων . Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται αναλόγως με το πλήθος των μετρήσεων που θέλουμε να εξάγουμε.



Εικόνα 14: Διάσπαση κατά τη διάρκεια μετρήσεων [13]

8. Μόλις πρέπει να αντικαταστήσουμε το έλαιο, ανοίγουμε το καπάκι της συσκευής και εξάγουμε το δοχείο δοκιμής. Η συσκευή πρέπει να επανασφραγίζεται με δικό της καπάκι ώστε να αποφεύγεται η ελεύθερη έκθεση της κυψέλης στον ατμοσφαιρικό αέρα. Σε περίπτωση που κάνουμε παύση των μετρήσεων μας και δεν επιθυμούμε την αλλαγή του λαδιού, πέρα από το προστατευτικό καπάκι, τυλίγουμε την κυψέλη με διάφανη μεμβράνη, ώστε να μην έρχεται σε επαφή με τον ατμοσφαιρικό αέρα. Αδειάζουμε το δοχείο δοκιμής σε ειδικά δοχεία, το στραγγίζουμε και το πλένουμε με ζεστό νερό και ειδικό σαπούνι πολύ προσεκτικά. Κατόπιν το αφήνουμε να στραγγίξει σε καθαρό χαρτί και μόλις είναι τελείως στεγνό το αποθηκεύουμε ξανά μέσα στη συσκευή μέχρι να χρειαστεί να το ξαναχρησιμοποιήσουμε.

3.3.1 ΠΙΝΑΚΕΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

1.ΦΥΤΙΚΟ ΛΑΔΙ ROGOWSKI , D=2 mm

SET BDV(kV)	1	2	3	4	5
1	47,1 kV	52,3 kV	30,1 kV	72,2 kV	64,2 kV
2	37,6 kV	62,9 kV	28,3 kV	54,4 kV	65,8 kV
3	34,8 kV	59,8 kV	58,4 kV	63,8 kV	65,1 kV
4	34,1 kV	59,7 kV	64 kV	32,2 kV	69,9 kV
5	39,9 kV	59,7 kV	58,8 kV	54,9 kV	72,2 kV
6	55,2 kV	59 kV	72,2 kV	52 kV	69,8 kV
MO(Kv)	41,45 kV	58,9 kV	42,3 kV	54,91kV	67,83 kV
σ (Kv)	kV	kV	kV	kV	kV
σ/MO	%	%	%	%	%
SET BDV(kV)	6	7	8	9	10
1	35,3 kV	39,4 kV	50,1 kV	50,9 kV	56 kV
2	55,6 kV	35,9 kV	42,2 kV	53,2 kV	57 kV
3	30,3 kV	29,8 kV	48,8 kV	56,2 kV	56,4 kV
4	32 kV	37 kV	47,8 kV	51,1 kV	61,5 kV
5	38,9 kV	41,1 kV	73,3 kV	61,1 kV	60,8 kV
6	34,8 kV	33,4 kV	49,5 kV	55 kV	59,1 kV
MO	37,81 kV	36.1 kV	51.95 kV	45,41 kV	40.96 kV
Σ	kV	kV	kV	kV	kV
σ/MO	%	%	%	%	%

SET BDV(kV)	16	17	18	19	20	21
1	42,6 kV	41,5 kV	61,1 kV	48,7 kV	63 kV	72,0 kV
2	30,8 kV	42,7 kV	54,5 kV	57,9 kV	70,3 kV	66,0 kV
3	65,5 kV	33,1 kV	61,2 kV	70,3 kV	61,7 kV	61,9 kV
4	39,3 kV	48,1 kV	69,7 kV	53,3 kV	73,1 kV	74,0 kV
5	41,7 kV	54,5 kV	58,7 kV	63,3 kV	46,7 kV	75,4 kV
6	38,4 kV	36,9 kV	63,5 kV	50,3 kV	72,2 kV	70,4 kV
MO	43,05 kV	42,8 kV	61,45 kV	57,3 kV	64,5 Kv	69,95 kV
Σ						
σ/MO	%	%	%	%	%	%

Στα σετ διασπάσεων 14,15,16,17,18,20,21 έχει γίνει ανάδευση του ελαίου με φίλερ.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Σαμοϊλης Β.Γ., Μονωτικά Λάδια, Αθήνα 1979.
2. Ανδρικόπουλος Αθανάσιος – ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ ΣΕ ΜΟΝΩΤΙΚΑ ΛΑΔΙΑ, Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών, Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων, Πάτρα 2010.
3. Ελευθερία Πυργιώτη - Σημειώσεις « ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΥΨΗΛΩΝ ΤΑΣΕΩΝ» , Εκδόσεις Πανεπιστημίου Πατρών, Πάτρα 2010.
4. Δημακοπούλου Παναγιώτα – ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ ΜΟΝΩΤΙΚΩΝ ΕΛΑΙΩΝ ΦΥΤΙΚΗΣ ΠΡΟΕΛΕΥΣΗΣ, Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών, Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων, Πάτρα 2011.
5. Αλέξανδρος Νέστορας- ΕΛΕΓΧΟΣ ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΜΟΝΩΤΙΚΟΥ ΕΛΑΙΟΥ ΕΠΕΙΤΑ ΑΠΟ ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΗ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΤΟΥ, Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα 2011
6. Κ.Θ. Δέρβος, «Μονωτικά υλικά υψηλών τάσεων», Αθήνα 2007
8. Π.Δ, Μπούρκας Γ.Κ. Καραγιαννόπουλος, «Βιομηχανικές ηλεκτρικές διατάξεις και υλικά», Αθήνα 2003
9. http://www.chem.uoa.gr/chemicals/chem_sf6.htm
10. <http://el.wikipedia.org/wiki/%CE%9C%CE%B5%CF%84%CE%B1%CF%83%CF%87%CE%B7%CE%BC%CE%B1%CF%84%CE%B9%CF%83%CF%84%CE%AE%CF%82>
11. <http://www.metadosi-ischios.gr/article.php?ID=89>
12. www.envirottempfluids.com/products/envirottemp-fr3-dielectric-fluid
13. www.wikipedia.com
14. Παπαροϊδάμης Γεώργιος – ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ ΣΕ ΜΟΝΩΤΙΚΑ ΒΙΟΔΙΑΣΠΩΜΕΝΑ ΛΑΔΙΑ- Διπλωματική

Εργασία Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας
Ηλεκτρονικών Υπολογιστών ,Πάτρα 2011

15. D.Martin and Z.D.Wang, "Statistical Analysis of the ac Breakdown Voltages of Ester Based Transformer Oils ", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol 15 , No 4 pp1044-1050,2008
16. David P. Stockton, John R. Bland JR. , Todd Mcclanahan, Jim Wilson , David L. Harris & Patrick Mcshane , "Seed-oil – based Coolants for Transformers" , IEEE Magazine pp68-74,2009
17. Georgios D. Peppas , Eleftheria C. Pyrgioti & Vasilios P. Charalampakos , "Investigation of Statistical Breakdown in Mineral and Natural Ester Oils Under AC Voltage