

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΠΑΤΡΩΝ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΙΑΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΑΡΙΘΜΟΣ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ: 1203

ΘΕΜΑ
**ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ ΜΟΝΩΤΙΚΩΝ
ΕΛΑΙΩΝ ΟΡΥΚΤΗΣ ΠΡΟΕΛΕΥΣΗΣ**

ΚΑΟΥΡΑΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ-ΕΥΘΥΜΙΟΣ
ΓΟΥΡΛΑΣ ΜΙΧΑΛΗΣ

ΕΙΣΗΓΗΤΕΣ: ΠΥΡΓΙΩΤΗ ΕΛΕΥΘΕΡΙΑ

ΠΑΤΡΑ 2012

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ο εξοπλισμός Υψηλής Τάσης προϋποθέτει την αναγκαία ύπαρξη μόνωσης για την εύρυθμη λειτουργία του. Η μόνωση, εκτός από τον προφανή ρόλο, της διατήρησης της διαφοράς δυναμικού μεταξύ των υπό υψηλής τάσης αγωγίων μερών, έχει και επιπρόσθετους σκοπούς ύπαρξης, όπως την μηχανική στήριξη του εξοπλισμού, την επαγωγή της θερμότητας, κ.α.

Η χρήση ορυκτών ελαίων ως μονωτικό υλικό στον εξοπλισμό Υψηλής Τάσης είναι καθιερωμένη, με πιο ενδεικτικό παράδειγμα, τη μόνωση των τυλιγμάτων των μετασχηματιστών ισχύος. Για πιο αποδοτικά μονωτικά αποτελέσματα στον μετασχηματιστή γίνεται συνδυαστική χρήση του λαδιού με λεπτά συνθετικά φύλλα στερεής φύσεως που καλύπτουν τα τυλίγματα.

Στόχος της παρούσας πτυχιακής είναι η διερεύνηση της συμπεριφοράς ορυκτών ελαίων που καταπονούνται εντός διακένου υπό γραμμικά αυξανόμενη AC τάση. Αναζητούμε, λοιπόν, την διηλεκτρική συμπεριφορά του μονωτικού ελαίου, καθώς μεταβάλλουμε τους διάφορους παράγοντες από τους οποίους εξαρτάται (μέγεθος διακένου, τον ρυθμό της γραμμικής αύξησης της τάσης kV/sec , θερμοκρασία, το χρόνο χαλάρωσης του υγρού για δυο διαδοχικές μετρήσεις, την επίδραση των φυσαλίδων στη μονωτική συμπεριφορά του ελαίου, κ.α.

Για την διεξαγωγή της πειραματικής διαδικασίας χρησιμοποιήθηκε η συσκευή BAUR Oil DTA 822-129-1, μέρος του ηλεκτρομηχανικού εξοπλισμού του εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων στο Πανεπιστήμιο Πατρών. Η παραγωγή γραμμικά αυξανόμενης (με μεταβλητό ρυθμό) AC τάσης, η μέτρηση της τάσης διάσπασης καθώς και η επιλογή του πρωτοκόλλου δοκιμών γίνεται με κατάλληλες επιλογές στη λειτουργία της συσκευής αυτής. Χρειάστηκαν ειδικά ανοξείδωτες λάμες διαφορετικού πάχους με στόχο την ρύθμιση του μεγέθους του επιθυμητού διακένου καθώς επίσης και ιατρικές σήραγγες για την άντληση του και αποστειρωμένα δοχεία για την ασφαλή αποθήκευση του υπό δοκιμή ελαίου.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	6
---------------	---

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΕΣ.....	7
2.1 ΙΣΤΟΡΙΑ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΩΝ.....	7
2.2 ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΩΝ.....	7
2.3 ΧΡΗΣΗ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΩΝ.....	8
2.4 ΕΙΔΗ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΩΝ.....	8
2.4.1 ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΕΣ ΑΕΡΟΣ.....	8
2.4.2 ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΕΣ ΞΥΡΟΥ.....	9
2.4.3 ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΕΣ ΕΛΑΙΟΥ.....	10
2.5 ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗ.....	12
2.6 ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΗ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΩΝ.....	14

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΠΑΡΑΓΩΓΗ-ΧΡΗΣΗ ΜΟΝΩΤΙΚΩΝ ΕΛΑΙΩΝ.....	16
3.1 ΜΟΝΩΤΙΚΑ ΟΡΥΚΤΕΛΑΙΑ.....	16
3.2 ΠΡΟΕΛΕΥΣΗ ΜΟΝΩΤΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΕΛΑΙΩΝ.....	16
3.3 ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΜΟΝΩΤΙΚΩΝ ΕΛΑΙΩΝ.....	16
3.3.1 ΔΙΥΛΙΣΗ.....	16
3.3.2 ΚΛΑΣΜΑΤΙΚΗ ΑΠΟΣΤΑΞΗ.....	17
3.4 ΧΡΗΣΗ ΜΟΝΩΤΙΚΩΝ ΕΛΑΙΩΝ.....	17
3.5 ΤΥΠΟΙ ΜΟΝΩΤΙΚΩΝ ΕΛΑΙΩΝ.....	18
3.5.1 ΦΥΤΙΚΑ ΕΛΑΙΑ.....	18
3.5.2 ΣΥΝΘΕΤΙΚΑ ΕΛΑΙΑ.....	19
3.5.3 ΟΡΥΚΤΑ ΕΛΑΙΑ.....	19

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΜΟΝΩΤΙΚΩΝ ΕΛΑΙΩΝ.....	21
4.1 ΦΥΣΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ.....	21
4.1.1 ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ.....	21
4.1.2 ΕΙΔΙΚΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑ.....	21
4.1.3 ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ.....	22
4.1.4 ΙΞΩΔΕΣ.....	22
4.1.5 ΣΗΜΕΙΟ ΡΟΗΣ.....	23
4.1.6 ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΔΙΑΣΤΟΛΗΣ.....	23
4.1.7 ΧΡΩΜΑ.....	23
4.1.8 ΚΑΘΑΡΟΤΗΤΑ.....	24
4.1.9 ΣΗΜΕΙΟ ΑΝΑΦΛΕΞΗΣ-ΚΑΥΣΕΩΣ.....	24
4.1.10 ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗ ΤΑΣΗ.....	24
4.2 ΧΗΜΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ.....	25
4.2.1 ΟΞΕΙΔΩΣΗ.....	25
4.2.2 ΟΞΥΤΗΤΑ.....	26
4.2.3 ΒΑΘΜΟΣ ΕΞΟΥΔΕΤΕΡΩΣΗΣ.....	26
4.2.4 ΑΛΚΑΛΙΚΟΤΗΤΑ.....	26
4.2.5 ΥΓΡΑΣΙΑ.....	27
4.2.6 ΕΛΚΥΣΗ ΚΑΙ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗ ΑΕΡΙΩΝ.....	28

4.3 ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ.....	29
4.3.1 ΕΙΔΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ.....	29
4.3.2 ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΑΠΩΛΕΙΩΝ.....	30
4.3.3 ΕΙΔΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ.....	33
4.3.4 ΣΧΕΤΙΚΗ ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΣΤΑΘΕΡΑ.....	33
4.3.5 ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ.....	34
4.4 ΒΑΣΙΚΑ ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΜΟΝΩΤΙΚΩΝ ΕΛΑΙΩΝ.....	35

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΔΙΑΣΠΑΣΗ ΜΟΝΩΤΙΚΩΝ ΕΛΑΙΩΝ.....	37
5.1 ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ ΔΙΑΣΠΑΣΗ-ΙΟΝΙΣΜΟΣ.....	37
5.2 ΔΙΑΣΠΑΣΗ ΣΕ ΚΟΙΛΟΤΗΤΕΣ-ΘΕΡΜΙΚΗ ΔΙΑΣΠΑΣΗ.....	37
5.3 ΑΙΩΡΗΜΑΤΑ.....	39

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΓΗΡΑΝΣΗ ΜΟΝΩΣΕΩΝ.....	40
6.1 ΑΙΤΙΑ ΓΗΡΑΝΣΗΣ.....	40
6.1.1 ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ.....	40
6.1.2 ΥΓΡΑΣΙΑ.....	40
6.1.3 ΟΞΥΓΟΝΟ.....	41
6.2 ΓΗΡΑΝΣΗ ΧΑΡΤΙΟΥ ΕΛΑΙΟΥ.....	41

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ.....	46
7.1 ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΕΝΤΑ ΟΡΓΑΝΑ.....	46
7.2 ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΚΥΨΕΛΗΣ.....	50
7.3 ΓΕΜΙΣΜΑ ΚΥΨΕΛΗΣ.....	51
7.4 ΚΑΘΑΡΙΣΜΟΣ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΩΝ.....	52
7.5 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ.....	53

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ.....	55
(ΠΙΝΑΚΕΣ, ΓΡΑΦΙΚΕΣ ΠΑΡΑΣΤΑΣΕΙΣ, ΣΧΟΛΙΑ)	

<u>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....</u>	66
---------------------------------	-----------

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1:ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η πτυχιακή εργασία έχει ως στόχο την εκπόνηση μιας πειραματικής διαδικασίας, ικανής να εξετάσει τη συμπεριφορά του ελαίου, ορυκτής προέλευσης, καθώς μεταβάλουμε τους διάφορους παράγοντες από τους οποίους εξαρτάται. Η διηλεκτρική αντοχή του μονωτικού λαδιού μπορεί να οριστεί ως η μέγιστη τιμή τάσης που μπορεί να εφαρμοστεί ανάμεσα σε δύο ηλεκτρόδια βυθισμένα στο λάδι χωρίς να δημιουργηθεί τόξο. Η μέθοδος της μέτρησης της διηλεκτρικής αντοχής του λαδιού αποτελεί μια συμβατική μέθοδο δοκιμής που μπορεί να μας αποκαλύψει το βαθμό στον οποίο νερό ή και άλλα αιωρούμενα σωματίδια είναι αναμειγμένα στο λάδι και κατ' επέκταση την κατάσταση την οποία βρίσκεται το μονωτικό στο μετασχηματιστή. Η έρευνά μας διεξήχθη στο ερευνητικό εργαστήριο Υψηλών Τάσεων του τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών του Πανεπιστημίου Πατρών, κατά το χρονικό διάστημα μεταξύ Νοεμβρίου 2011 έως Ιανουαρίου 2012. Στόχος μας ήταν να μετρήσουμε τη διηλεκτρική αντοχή του μονωτικού λαδιού με όσο το δυνατό περισσότερες μετρήσεις ώστε να έχουμε αξιόπιστα αποτελέσματα.

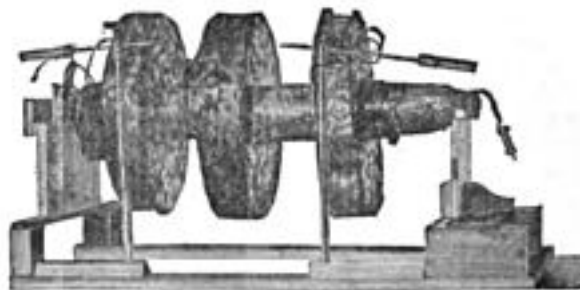
Κατά την πειραματική διαδικασία τοποθετούμε το μονωτικό λάδι σε ειδικό δοχείο που διαθέτει διάκενο αποτελούμενο από δύο ηλεκτρόδια, καταπονούμενο από γραμμικά αυξανόμενη AC τάση. Επειδή μάλιστα τέτοιου τύπου μονωτικές διατάξεις βρίσκουν συχνή χρήση σε μετασχηματιστές ελαίου, θα πρέπει να ληφθούν υπ' όψιν και οι ιδιαίτερες συνθήκες στις οποίες υποβάλλεται το λάδι όταν χρησιμοποιείται σε τέτοιες συσκευές, ώστε να επιτευχθεί μια κάποια είδους προσομοίωση αυτών των συνθηκών. Η βασική διαφορά ανάμεσα στην πειραματική και στην πραγματική διάταξη μονωτικών ελαίων στους μετασχηματιστές είναι η έλλειψη των στερεών συνθετικών λεπτών μονωτικών φύλλων που υπάρχουν γύρω από τα τυλίγματα. Αυτά τα μονωτικά φύλλα στην πειραματική διάταξη τοποθετούνται μεταξύ των ηλεκτροδίων, αλλά στη συγκεκριμένη έρευνα απουσιάζουν. Ο λόγος της απουσίας τους είναι πως η έρευνα αφορά την συμπεριφορά του μονωτικού ελαίου χωρίς τη συνδυαστική χρήση αυτού με το μονωτικό χαρτί και τις ιδιότητες της διεπιφάνειάς τους. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιήσαμε μόνο του το ρευστό μονωτικό στη κυψέλη, καταγράφοντας την επίδραση των παραγόντων που το επηρεάζουν. Μερικοί από τους παράγοντες που εξετάστηκαν είναι το μέγεθος του διακένου, η ύπαρξη νερού στη δοκιμαστική κυψέλη, η σχέση και συμπεριφορά του λαδιού με τον χρόνο, την ανάδευση μονωτικού ελαίου και τέλος οι διαφοροποιήσεις στις ατμοσφαιρικές συνθήκες που επικράτησαν κατά τη διάρκεια του πειράματος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΕΣ

2.1 ΙΣΤΟΡΙΑ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΩΝ

Η αρχή λειτουργίας του μετασχηματιστή διατυπώθηκε το 1831 από τον Michael Faraday, αν και την χρησιμοποίησε μόνο για επίδειξη των αρχών της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής, χωρίς να προβλέψει την πρακτική της σημασία. Ο πρώτος μετασχηματιστής σε ευρεία χρήση ήταν το πηνίο επαγωγής, το οποίο εφηύρε Nicholas Kalen το 1836. Ήταν ένας από τους πρώτους που κατάλαβαν την αρχή πως όσο περισσότερες περιελίξεις έχει το τύλιγμα ενός μετασχηματιστή, τόσο μεγαλύτερη ηλεκτρεγερτική δύναμη παράγει. Τα πηνία επαγωγής δημιουργήθηκαν από τις προσπάθειες των επιστημόνων για παροχή υψηλότερων τάσεων από μπαταρίες, το οποίο διακόπτονταν από ένα δονούμενο διακοπτικό μηχανισμό. Μεταξύ 1830-1870 οι προσπάθειες για δημιουργία καλύτερων επαγωγικών πηνίων, κυρίως με τη μέθοδο της συνεχούς δοκιμής (trial and error), αποκάλυψαν σταδιακά τις βασικές αρχές της λειτουργίας του μετασχηματιστή.

Ο μετασχηματιστής αποδείχτηκε ουσιώδης στην επικράτηση των συστημάτων εναλλασσόμενου ρεύματος έναντι αυτών του συνεχούς, θέση την οποία κρατούν μέχρι και σήμερα. Ο φυσικός της Ουέστινγκχαους, ο William Stanley, δημιούργησε την πρώτη εμπορική υλοποίηση μετασχηματιστή το 1885, ο πυρήνας του οποίου ήταν κατασκευασμένος από πλάκες σιδήρου σχήματος "E", οι οποίες έμπαιναν η μία μέσα στην άλλη. Ο μηχανικός Mikail Dolivo-Dobrovosky, ανέπτυξε τον πρώτο τριφασικό μετασχηματιστή το 1889. Το 1891 ο Nikola Tesla εφηύρε το πηνίο Τέσλα, ένα μετασχηματιστή συντονισμού με πυρήνα αέρα, για την παραγωγή πολύ υψηλών τάσεων σε υψηλές συχνότητες.



Εικόνα 2-1 Το πηνίο του Κάλαν, 1836 [35]

2.2 ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΩΝ

Ο μετασχηματιστής βασίζεται σε δύο αρχές: πρώτον, ότι ένα ηλεκτρικό ρεύμα μπορεί να παράγει ένα μαγνητικό πεδίο και δεύτερον, ότι ένα μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο σε ένα τυλιγμένο σύρμα, επάγει διαφορά δυναμικού στα άκρα του τυλίγματος. 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. Τόσο το πρωτεύον όσο και το δευτερεύον τύλιγμα 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 τύλιγμα.

2.3 ΧΡΗΣΗ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΩΝ

Συχνά έχουμε ανάγκη ηλεκτρικό ρεύματος με τάση διαφορετική από την τάση δικτύου, από το οποίο γίνετε η τροφοδότηση με ηλεκτρική ενέργεια.

Στο συνεχές ρεύμα είναι δυνατό να αντιμετωπιστεί με μια αντίσταση στην οποία δημιουργούμε την πτώση τάσεως που απαιτείται. Όμως έχουμε σημαντική απώλεια ενέργειας, από την θερμότητα που δημιουργείτε στην αντίσταση.

Η μεταφορά μεγάλων ποσοτήτων ηλεκτρικής ενέργειας, για να είναι οικονομικά συμφέρουσα, πρέπει να γίνετε με υψηλή τάση. Στην συνέχεια όμως πρέπει αυτή να υποβιβάζετε, για να είναι δυνατή η διανομή του στους καταναλωτές και με προφυλάξεις η ακίνδυνη χρησιμοποίηση του από αυτούς το σοβαρό αυτό πρόβλημα δεν έχει λυθεί ακόμα για το συνεχές ρεύμα με τρόπο που να συμφέρει οικονομικά.

Αντίθετα για το εναλλασσόμενο ρεύμα υπάρχουν κατάλληλα μηχανήματα, τα οποία μάλιστα δεν έχουν κινούμενα μέρη και τα οποία μας επιτρέπουν να ανυψώσουμε η να υποβιβάζουμε την τάση του ρεύματος. Στα μηχανήματα αυτά, που ονομάζονται μετασχηματιστές, η μεταβολή της τάσης του ρεύματος γίνετε με πολύ μικρές απώλειες της ηλεκτρικής ενέργειας που μεταβιβάζεται. Κατασκευάζονται σήμερα μεγάλοι μετασχηματιστές με βαθμό αποδόσεως πάνω από 98%, δηλαδή με απώλειες κάτω από 2% τις ισχύος που μεταβιβάζεται. Έτσι έγινε δυνατή η παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας στους μεγάλους σταθμούς παραγωγής στην ποιο κατάλληλη τάση (πχ. 20.000 V).

Από τα παραπάνω συμπεραίνουμε ότι η δυνατότητα χρησιμοποίησης μετασχηματιστών με το εναλλασσόμενο ρεύμα έδωσε σε αυτό τα πλεονεκτήματα, τα οποία το καθιέρωσαν σαν το είδος του ρεύματος, το οποίο χρησιμοποιούν ποια όλες οι χώρες στα δίκτυα ηλεκτροδότησεως των καταναλωτών.

2.4 ΕΙΔΗ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΩΝ

Χωρίζουμε τους μετασχηματιστές ανάλογα τον τρόπο μονώσεως και ψύξεως σε Μετασχηματιστές αέρος, ξηρού τύπου, και λαδιού.

2.4.1 ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΕΣ ΑΕΡΟΣ

Οι μετασχηματιστές αέρος ή τύπου GIS (Gas Insulation System) χρησιμοποιούν ως μονωτικό και ψυκτικό μέσο κάποιο αέριο σε υψηλή πίεση σε στεγανοποιημένο περιβάλλον. Το πιο συχνά χρησιμοποιούμενα αέριο είναι το εξαφθοριούχο θείο (SF₆) το οποίο είναι άχρωμο, άοσμο, άφλεκτο, χημικά αδρανές και μη τοξικό. Στην ατμοσφαιρική πίεση, η διηλεκτρική αντοχή του SF₆ είναι περίπου τριπλάσια από την αντίστοιχη του αέρα ή του αζώτου. Στην ατμοσφαιρική πίεση, επίσης το SF₆ έχει τη μισή διηλεκτρική αντοχή από έλαια, αλλά σε υψηλότερες πιέσεις υπερέχει. 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 του SF₆ είναι ότι θεωρείται μη οικολογικό γιατί συμβάλλει στη δημιουργία της τρύπας του όζοντος.



Εικόνα 2-2 Μετασχηματιστής SF6 22 kV/ 390 V Ισχύος 1500 kVA [15]

2.4.2 ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΕΣ ΞΗΡΟΥ

Στο μετασχηματιστή ξηρού τύπου τα τυλίγματα του εμποτίζονται με μια εποξική ρητίνη , η ρητίνη αυτή δεν είναι τοξική. Όταν προκύψει βραχυκύκλωμα, η θερμοκρασία δεν μεταδίδεται μακριά από το σφάλμα. Εκτός από την εποξική ρητίνη χρησιμοποιούνται και άλλα στερεά μονωτικά για τη μόνωση των τυλιγμάτων τα οποία είναι συνήθως κλάσης H ή F. Η κλάση ενός μονωτικού υλικού προσδιορίζει τη μέγιστη θερμοκρασία στην οποία είναι σχεδιασμένο να λειτουργεί. Στον πίνακα παρουσιάζονται οι κλάσεις σύμφωνα με το πρότυπο IEEE.

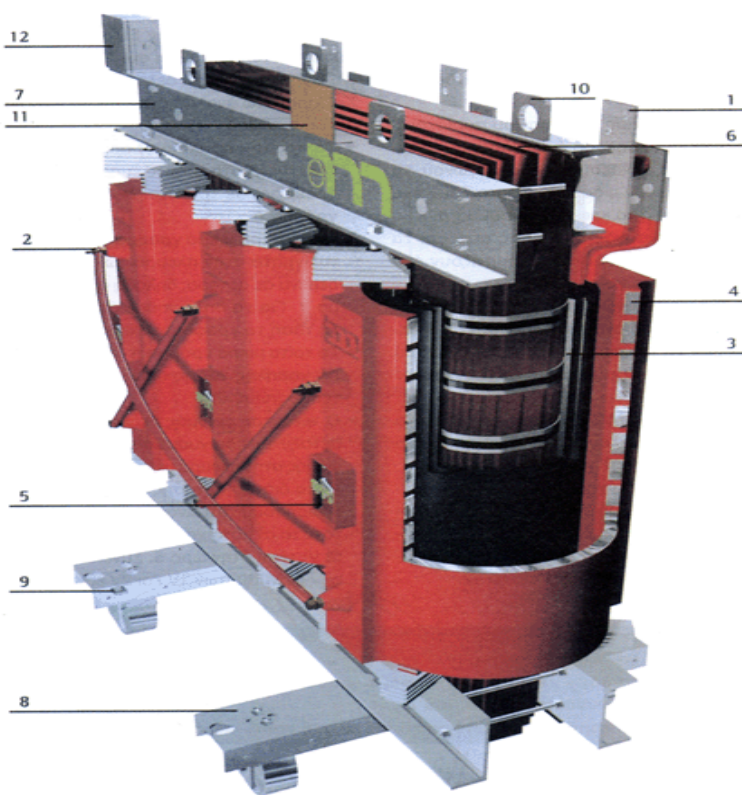
Κλάση μόνωσης	Μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας (°C)
0	90
A	105
B	130
F	155
H	180
C	220

Πίνακας 2-1 Λίστα των γραμμάτων που χρησιμοποιούνται για την κωδικοποίηση της κλάσης της μόνωσης [9]

Κατά την κατασκευή μετασχηματιστών λαμβάνονται κατάλληλα μέτρα ώστε να διευκολύνετε η μετάδοση της θερμότητας των απολήων στον περιβάλλοντα χώρο. Δηλαδή μέτρα για την ψύξη των μετασχηματιστών. Ανάλογα με τον τρόπο ψύξεως των μετασχηματιστών τους διακρίνουμε σε:

ι)ΞΗΡΟΥ ΤΥΠΟΥ ΜΕ ΦΥΣΙΚΗ ΨΥΞΗ. Στους μετασχηματιστές αυτούς η εξωτερική επιφάνεια του ενεργού μέρους του μετασχηματιστή, με την οποία έρχονται σε επαφή με τον αέρα του περιβάλλοντος, είναι αρκετή για την εξασφάλιση ικανοποιητικής ψύξεως. Ο τρόπος αυτός ψύξεως είναι ο πιο οικονομικός, δεν μπορεί όμως να εφαρμοστεί παρά μόνο σε μετασχηματιστές μικρής ισχύος (μέχρι 25 κVA).

ii)ΞΗΡΟΥ ΤΥΠΟΥ ΜΕ ΕΞΑΝΑΓΚΑΣΜΕΝΗ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑ. Σε αυτούς ένας ανεμιστήρας επιταχύνει την μετάδοση της θερμότητας των απολήων από το μετασχηματιστεί στον περιβάλλοντα αέρα. Ο μετασχηματιστής έχει διόδους (κανάλια) για την κυκλοφορία αέρα στον πυρήνα και τα τυλίγματα και είναι κλεισμένος μέσα σε ένα μεταλλικό περίβλημα. Πρέπει να παίρνουμε μέτρα προστασίας, δηλαδή να σταματά η λειτουργία του, αν για οποιονδήποτε λόγο σταματήσει να λειτουργεί ο ανεμιστήρας ψύξεως



1. Ακροδέκτες χαμηλής τάσης.
2. Ακροδέκτες μέσης τάσης
3. Τύλιγμα χαμηλής τάσης
4. Τύλιγμα μέσης τάσης
5. Ρυθμιστής τάσης
6. Πυρήνας
7. Σφικτήρες πυρήνα
8. Τροχοί κύλισης
9. Ακροδέκτης γείωσης
10. Αγκίστρα ανύψωσης
11. Πινακίδα
12. Κουτί με ηλεκτρονόμους προστασίας

Εικόνα 2-3 Μετασχηματιστής ξηρού τύπου με μόνωση χυτο-ρητίνης

2.4.3 ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΕΣ ΕΛΑΙΟΥ

Ο μετασχηματιστής ελαίου χρησιμοποιεί το μονωτικό λάδι για την ηλεκτρική μόνωση των τυλιγμάτων του (προστασία από βραχυκυκλώματα), αλλά και για την απαγωγή της θερμότητας που αναπτύσσεται σε αυτόν. Επιπροσθέτως στα πηνία του μετασχηματιστή τοποθετείται μονωτικό χαρτί με πάχος το οποίο μπορεί να είναι από μικρότερο του χιλιοστού έως μερικά εκατοστά. Ο συνδυασμός λαδιού - χαρτιού έχει το πλεονέκτημα της ίδιας περίπου σχετικής διηλεκτρικής σταθεράς, που έχουν τα υλικά αυτά.

Το λάδι που χρησιμοποιείται είναι ορυκτέλαιο προϊόν κλασματικής απόσταξης πετρελαίου, ναφθενικής ή παραφινικής ή ενδιάμεσης βάσης, το οποίο έχει μεν εξαιρετική μονωτική ικανότητα παρουσιάζει όμως το μειονέκτημα ότι μπορεί να καεί παράγοντας ισχυρή φλόγα και θερμότητα. Για αυτό το λόγο χρησιμοποιήθηκαν παλαιότερα συνθετικά

λάδια με βάση το PCB τα οποία όμως αργότερα καταργήθηκαν επειδή κρίθηκαν βλαβερά για το περιβάλλον και την υγεία. Η ανάγκη όμως για μονωτικά λάδια με υψηλό σημείο καύσης οδήγησε στην εμφάνιση ελαίων με βάση τους εστέρες ή τις σιλικόνες, ή ακόμα και φυτικά έλαια. Ανάλογα με τον τρόπο ψύξεως τους χωρίζονται σε:

i) ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΕΣ ΜΕ ΦΥΣΙΚΗ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑ ΛΑΔΙΟΥ, το λάδι που βρίσκετε σε επαφή με τα τυλίγματα και τον πυρήνα του μετασχηματιστή, θερμαίνεται από τη θερμότητα των απωλειών, γίνεται αραιότερο και ανεβαίνει. Το λάδι, το οποίο βρίσκετε σε επαφή με τα τοιχώματα του λέβητα και που έχει μεταδώσει σε αυτά μέρος της θερμότητάς του, έχει μεγαλύτερη πυκνότητα και συνεπώς κατεβαίνει και παίρνει τη θέση του θερμού λαδιού. Με τον τρόπο αυτό σχηματίζεται ένα ρεύμα λαδιού, το οποίο παίρνει την θερμότητα των απωλειών από το ενεργό μέρος του μετασχηματιστή και την μεταφέρει στα τοιχώματα του λέβητα, οπότε από εκεί μεταδίδεται στο περιβάλλοντα ατμοσφαιρικό αέρα. Για να αυξηθεί η ταχύτητα μετάδοσης θερμότητας στον ατμοσφαιρικό αέρα τοποθετούν στα πλευρά του λέβητα σωλήνες ή σώματα ψύξεως τα οποία επικοινωνούν με το επάνω και κάτω μέρος των πλευρών του λέβητα. Για να αυξηθεί ακόμα περισσότερο η ταχύτητα ψύξεως χρησιμοποιούνται ανεμιστήρες οι οποίοι θέτουν σε κίνηση τον αέρα.

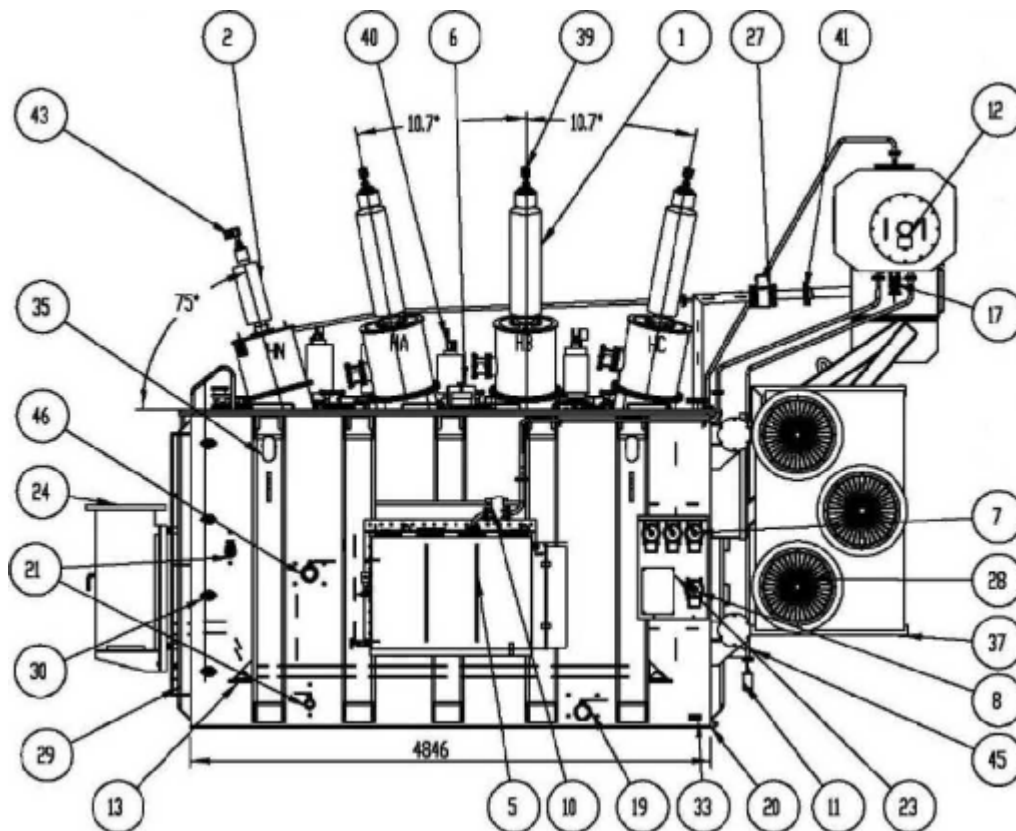
ii) ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΕΣ ΜΕ ΕΞΑΝΑΓΚΑΣΜΕΝΗ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑ ΛΑΔΙΟΥ. Με αυτήν την μέθοδο ψύξεως που εφαρμόζετε σε μετασχηματιστές μεγάλης ισχύος 50MVA, το λάδι οδηγείτε με τη βοήθεια αντλίας και σωληνώσεων από το επάνω μέρος του μετασχηματιστή σε ψυγείο που βρίσκετε έξω από αυτόν. Στο ψυγείο το λάδι ψήχεται είτε με ατμοσφαιρικό αέρα με την βοήθεια ανεμιστήρων, είτε με ψυχρό νερό που κυκλοφορεί εξωτερικά των ψυγείων.

Η κωδικοποίηση της ψύξης των μετασχηματιστών γίνεται με χρήση 4 γραμμάτων: τα δύο πρώτα αφορούν τον τρόπο κυκλοφορίας του ψυκτικού μέσου εσωτερικά (σε επαφή με τα τυλίγματα) του μετασχηματιστή και τα δύο τελευταία στον τρόπο κυκλοφορίας του ψυκτικού μέσου εξωτερικά του μετασχηματιστή. Στον πίνακα παρατίθεται η λίστα των γραμμάτων που χρησιμοποιούνται για την κωδικοποίηση της ψύξης των μετασχηματιστών και η επεξήγηση τους.

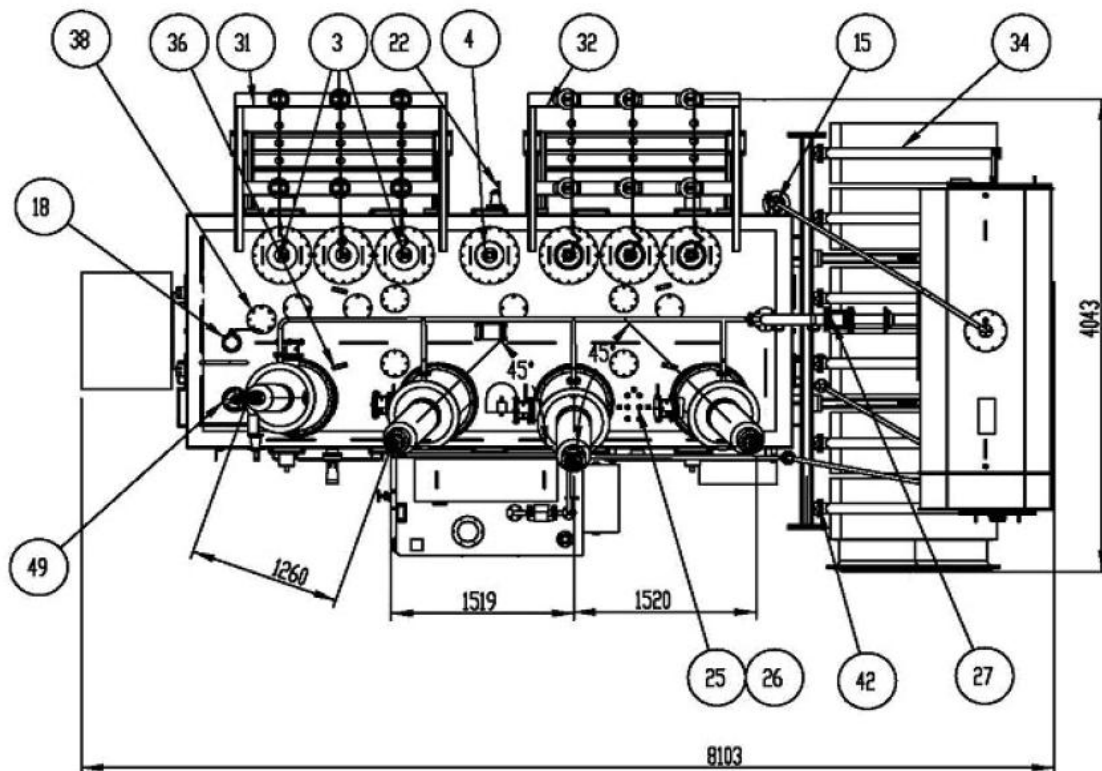
Εσωτερικό Μ/Σ	1° γράμμα (ψυκτικό μέσο)	Γράμμα	Περιγραφή
		0	Υγρό με σημείο καύσης μικρότερο ή ίσο των 300 °C
		K	Υγρό με σημείο καύσης μεγαλύτερο των 300 °C
		L	Υγρό με μη μετρήσιμο σημείο καύσης
	2° γράμμα (μηχανισμοί ψύξης)	N	Φυσική ροή στον εξοπλισμό ψύξης και στα τυλίγματα
		F	Εξαναγκασμένη κυκλοφορία στον εξοπλισμό ψύξης, φυσική ροή στα τυλίγματα
		D	Εξαναγκασμένη κυκλοφορία στον εξοπλισμό ψύξης, κατευθυνόμενη ροή στα τυλίγματα.
Εξωτερικό Μ/Σ	3° γράμμα (ψυκτικό μέσο)	A	Αέρας
		W	Νερό
	4° γράμμα (μηχανισμός ψύξης)	N	Φυσική ροή
		F	Εξαναγκασμένη κυκλοφορία

Πίνακας 2.2 Λίστα των γραμμάτων που χρησιμοποιούνται για την κωδικοποίηση της ψύξης των μετασχηματιστών και η επεξήγηση τους [10]

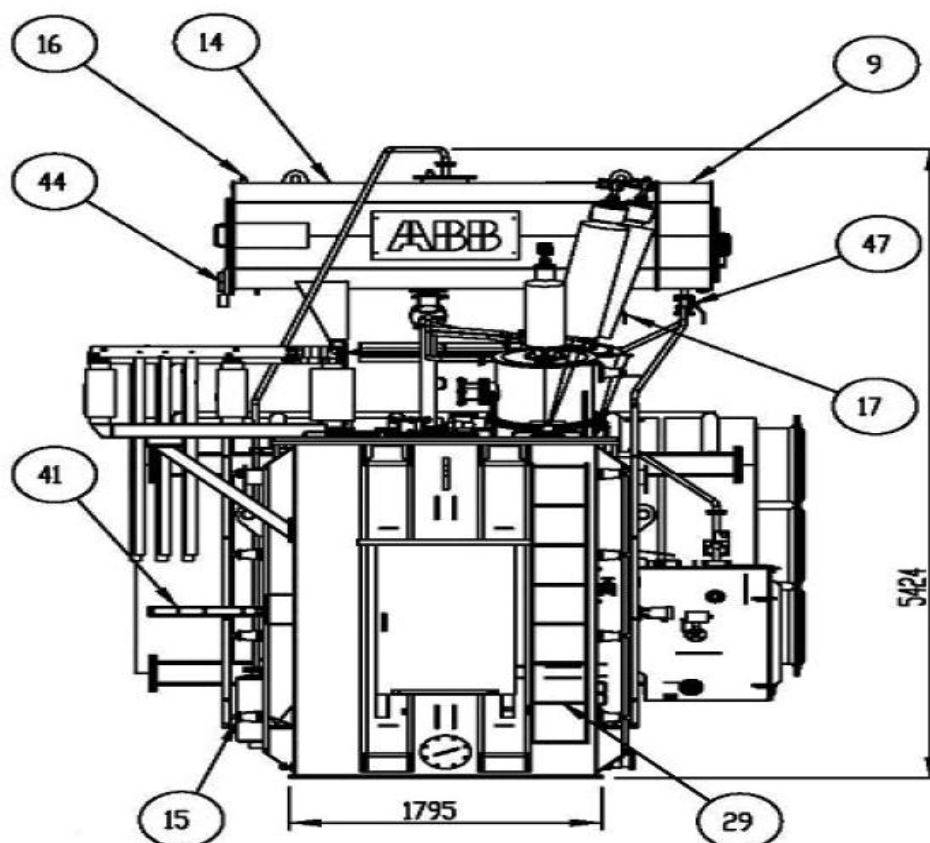
2.5 ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗ



Σχήμα 2-1 Πλάγια όψη μετασχηματιστή 20/25MVA [14]



Σχήμα 2-2 Κάτοψη μετασχηματιστή 20/25MVA [14]



Σχήμα 2-3 Μπροστινή όψη μετασχηματιστή 20/25MVA [14]

1. Μονωτήρας διέλευσης υψηλής τάσης
2. Μονωτήρας ουδετέρου κόμβου
3. Μονωτήρας διέλευσης μέσης τάσης
4. Μονωτήρας διέλευσης χαμηλής τάσης
5. Μεταγωγέας λήψεων υπό φορτίο
6. Συσκευή ανακούφισης πίεσης
7. Θερμόμετρα τυλιγμάτων
8. Θερμόμετρο λαδιού
9. Δοχείο διαστολής μεταγωγέα λήψεων
10. Ηλεκτρονόμος ροής λαδιού από μεταγωγέα
11. Αφυγραντής μεταγωγέα λήψεων
12. Ενδεικτικό στάθμης λαδιού μεταγωγέα
13. Λαβές έλξης
14. Δοχείο διαστολής κύριας δεξαμενής
15. Αφυγραντής δοχείου διαστολής κύριας δεξαμενής
16. Εξαερωτήρας δοχείου διαστολής
17. Βάνα αποστράγγισης δοχείου διαστολής κύριας δεξαμενής
18. Βάνα κένωσης
19. Βάνα πλήρωσης/αποστράγγισης λαδιού
20. Πώμα αποστράγγισης
21. Βάνα δειγματοληψίας
22. Ακροδέκτης γειώσεως ουδετέρου κόμβου
23. Πινακίδα

24. Πίνακας ελέγχου
25. Αισθητήρας θερμοκρασίας ελαίου (προαιρετικά)
26. Αισθητήρας θερμοκρασίας τυλιγμάτων (προαιρετικά)
27. Ηλεκτρονόμος ανίχνευσης αερίων (Buchholz)
28. Ανεμιστήρες ψύξης
29. Σκάλα
30. Γείωση τυλιγμάτων υψηλής τάσης
31. Ζυγοί μέσης τάσης (προαιρετικά)
32. Ζυγοί χαμηλής τάσης (προαιρετικά)
33. Ακροδέκτης γείωσης κύριας δεξαμενής
34. Ψυγείο
35. Λαβές ανύψωσης μετασχηματιστή
36. Λαβές ανύψωσης πάνω καλύμματος
37. Βάνα αποστράγγισης ψυγείου
38. Κιβώτιο σύνδεσης γείωσης πυρήνα
39. Ακροδέκτες μονωτήρα διέλευσης υψηλής τάσης
40. Ακροδέκτες μονωτήρα διέλευσης μέσης και χαμηλής τάσης
41. Βάνα απομόνωσης
42. Βάνες ψυγείου
43. Ακροδέκτης μονωτήρα ουδέτερου κόμβου
44. Ενδεικτικό στάθμης για δοχείο διαστολής
45. Βαλβίδα εξαέρωσης δεξαμενής
46. Ηλεκτρονόμος άμεσης εκτόνωσης
47. Βάνα αποστράγγισης δοχείου διαστολής μεταγωγέα
48. Μεταγωγέας λήψεων εν κενό (προαιρετικά)

2.6 ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΗ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΩΝ

Οι βασικότερες αιτίες καταπόνησης ενός μετασχηματιστή είναι οι παρακάτω:

i) ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ: Περιλαμβάνουν καταπονήσεις μεταξύ των αγωγών, ακροδεκτών και τυλιγμάτων εξαιτίας υπερεντάσεων μεγάλης διάρκειας και ρευμάτων βραχυκύκλωσης. Τα τελευταία οφείλονται σε βραχυκυκλώματα και ρεύματα εισροής υπό συνθήκες ηλεκτρισής.

ii) ΘΕΡΜΙΚΕΣ: Περιλαμβάνουν καταπονήσεις που οφείλονται στη θερμότητα ή σε τοπικές υπερθερμάνσεις που έχουν σχέση με τις υπερεντάσεις και τη ροή σκέδασης κατά τη φόρτιση πέραν της ονομαστικής τιμής ή λόγω δυσλειτουργίας του συστήματος ψύξης.

iii) ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ: Περιλαμβάνουν καταπονήσεις που οφείλονται σε υπερτάσεις του συστήματος, παροδικές κρουστικές τάσεις ή εσωτερική αντήχηση στα τυλίγματα.

Το ποσοστό των μετασχηματιστών που παθαίνουν βλάβη λόγω φυσικής γήρανσης είναι αρκετά μικρό. Οι βλάβες είναι συνήθως αποτέλεσμα :

- βραχυκυκλωμάτων
- τοπικών υπερθερμάνσεων
- σφαλμάτων του συστήματος μόνωσης (σφάλματα διηλεκτρικού)
- βλαβών στον εξοπλισμό (μονωτήρες διέλευσης, μεταγωγείς λήψεων, σύστημα ψύξεως, αλεξικέραυνα, κλπ)

Η χρονική διάρκεια εξέλιξης της βλάβης εξαρτάται από το αίτιο που την προκάλεσε. Μια βλάβη μπορεί να δημιουργηθεί σε δευτερόλεπτα ή και να αναπτύσσεται σταδιακά σε χρονικό διάστημα που μπορεί να φτάνει και χρόνια. Έτσι, στην περίπτωση βραχυκυκλώματος, υπέρτασης ή κεραυνικού πλήγματος οι βλάβες εμφανίζονται σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα της τάξης των μερικών δευτερολέπτων. Τα τοπικά σφάλματα αναπτύσσονται σε βδομάδες ή και μήνες. Η υποβάθμιση της μόνωσης των τυλιγμάτων υψηλής τάσης πραγματοποιείται σε διάστημα μηνών ή και ετών.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΠΑΡΑΓΩΓΗ -ΧΡΗΣΗ ΜΟΝΩΤΙΚΩΝ ΕΛΑΙΩΝ

3.1 ΜΟΝΩΤΙΚΑ ΟΡΥΚΤΕΛΑΙΑ

Ένα από τα πιο συχνά που χρησιμοποιούνται υγρά μονωτικά είναι το μονωτικό λάδι που προέρχεται από την απόσταξη πετρελαίου. Ιδιότητες που κάνουν το μονωτικό λάδι κατάλληλο για χρήση σε ηλεκτροτεχνικές συσκευές είναι ο συνδυασμός μεγάλης διηλεκτρικής αντοχής με την ικανότητα να επάγει την θερμότητα των συσκευών. Επί πλέον, όταν χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με στερεά μονωτικά, προστατεύει τα τελευταία από την υγρασία και την ελεύθερη επαφή με τον αέρα. Επίσης το λάδι έχει χαμηλή διηλεκτρική σταθερά το οποίο συντελεί στην ελάφρυνση των καταπονήσεων των στερεών μονώσεων. Χρησιμοποιούμενο σε διακόπτες αέρος, το λάδι βοηθά στη σβέση ηλεκτρικού τόξου με την απορρόφηση μεγάλων ποσοτήτων θερμότητας κατά την εξαέρωση του.

Το μονωτικό λάδι λαμβάνεται σαν κλάσμα της αποστάξεως του πετρελαίου. Ανάλογα με την προέλευση και την αρχική σύσταση του πετρελαίου από το οποίο προέρχεται, τον μονωτικό λάδι διακρίνεται σε:

- i) ΜΕΘΑΝΟΛΙΚΗΣ ΒΑΣΕΩΣ στο οποίο κυριαρχούν και κεκορεσμένοι υδρογονάνθρακες του τύπου παραφίνης.
- ii) ΝΑΥΘΑΝΕΛΙΚΗΣ ΒΑΣΕΩΣ στο οποίο κυριαρχούν ακόρεστοι υδρογονάνθρακες τύπου ναφθαλίνης.
- iii) ΜΕΙΚΤΗΣ ΣΥΣΤΑΣΕΩΣ όπου κανένας εκ των δυο άνωθεν τύπων υδρογονανθράκων δεν κυριαρχεί.

3.2 ΠΡΟΕΛΕΥΣΗ ΜΟΝΩΤΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΕΛΑΙΩΝ

Το αργό πετρέλαιο από το οποίο προέρχονται τα ορυκτά μονωτικά λάδια, βασικά αποτελείται από υδρογονάνθρακες. Το αργό πετρέλαιο σχηματίζεται από ενταφιασμό και σήψη φυτικής ύλης ή από την επίδραση νερού πάνω στο ορυκτό ανθρακασβέστιο. Από διαφορετικές τοποθεσίες εξόρυξης έχει και διαφορετική αναλογία στους διάφορους υδρογονάνθρακες από τους οποίους και αποτελείτε. Οι υδρογονάνθρακες που έχουν απλά και μικρά μόρια και βρίσκονται σε κανονική θερμοκρασία και πίεση σε αέρια κατάσταση, οι υδρογονάνθρακες που έχουν σύνθετα και μεγάλα μόρια βρίσκονται σε ρευστή κατάσταση, ενώ αυτοί με μεγαλύτερα και πολυσύνθετα μόρια βρίσκονται σε στερεή κατάσταση.

Η εκλογή του αργού πετρελαίου από το οποίο θα παραχθεί το μονωτικό λάδι των ηλεκτρικών μηχανημάτων αποτελεί αποφασιστικό παράγοντα για την ποιότητα του μονωτικού λαδιού. Γενικά προτιμάται το αργό πετρέλαιο ναφθενικής βάσης χάρη στην χημική συγκρότηση και γιατί διατηρεί τη ρευστότητά του σε χαμηλές θερμοκρασίες.

3.3 ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΜΟΝΩΤΙΚΩΝ ΕΛΑΙΩΝ

Τα μονωτικά λάδια παράγονται με επεξεργασία του αργού πετρελαίου μέσω της διύλισης όπου η βασικότερη διαδικασία αυτής είναι η κλασματική αποστάξεως.

3.3.1 ΔΙΥΛΙΣΗ

Η παραγωγή ικανοποιητικών μονωτικών λαδιών εξαρτάται κατά ένα μέρος από το εκλεγμένο κατάλληλα αργό πετρέλαιο και κατά ένα άλλο μέρος από την τεχνική της διυλίσεως. Αν αυτή δεν εκτελεστεί σωστά το μονωτικό λάδι δεν θα έχει ικανοποιητική

σταθερότητα. Όταν η διύλιση είναι μικρή το παραγόμενο μονωτικό λάδι αποσυντίθεται γρήγορα και μέσα σε αυτό δημιουργούνται μεγάλες ποσότητες λάσπης. Όταν η διύλιση είναι μεγάλη το λάδι που παράγεται αποσυντίθεται γρήγορα και η οξύτητα του αυξάνεται με όλο και ταχύτερο ρυθμό, ενώ η λάσπη που σχηματίζεται αρχικά θα είναι περιορισμένη. Υπάρχει πάντα ένα βέλτιστο σημείο διύλισης για το οποίο η ταχύτητα οξειδώσεως παρουσιάζει ένα ελάχιστο.

Με τη διύλιση πρέπει να εξαλειφθεί ένα ποσοστό αρωματικών ενώσεων για να μη δημιουργηθούν πολύ γρήγορα οξέα και αυξηθεί η οξύτητα πολύ ώστε να διαβρώσει όλα τα μεταλλικά μέρη της συσκευής. Έτσι διατηρείται στο λάδι μια ωφέλιμη ποσότητα αρωματικών υδρογονανθράκων που το προστατεύουν από οξείδωση.

Απαραίτητη είναι η παρουσία των καταλυτών. Έτσι απομακρύνονται οι ενώσεις που προκαλούν το σχηματισμό λάσπης ενώ διατηρούνται οι αντιοξειδωτικές ενώσεις που προστατεύουν το λάδι από την οξείδωση. Επίσης βελτιώνεται το χρώμα, η οσμή και η σταθερότητα του λαδιού.

3.3.2 ΚΛΑΣΜΑΤΙΚΗ ΑΠΟΣΤΑΞΗ

Απόσταξη είναι μια μέθοδος διαχωρισμού των συστατικών ενός υγρού μείγματος, η οποία συνιστάτε στο διαχωρισμό των ουσιών σε υγρή και αέρια μορφή. Με την απόσταξη επιτυγχάνεται ο διαχωρισμός των συστατικών ενός μείγματος χωρίς να χρειάζεται να εισέλθει στο υγρό μείγμα, νέα ουσία. Ο διαχωρισμός επιτυγχάνεται με εξάτμιση και συμπύκνωση.

Όταν ένα υγρό μείγμα που περιέχει δυο ή περισσότερα συστατικά θερμανθεί μέχρι το σημείο ζέσης του, θα αρχίσει να παράγει ατμούς των οποίων η σύσταση θα διαφέρει από αυτή του υγρού. Η διαφορά αυτής της σύστασης των δυο φάσεων είναι η βασική αρχή επί της οποίας στηρίζεται η διεργασία της απόσταξης.

3.4 ΧΡΗΣΗ ΜΟΝΩΤΙΚΩΝ ΕΛΑΙΩΝ

Σε έναν γεμισμένο μετασχηματιστή με υγρό, το μονωτικό υγρό παίζει μια σημαντική λειτουργία με την παροχή της ηλεκτρικής μόνωσης και των μέσων μεταφοράς των θερμικών απωλειών στο σύστημα ψύξης.

Ο ρόλος του μονωτικού λαδιού σε οποιοδήποτε μετασχηματιστή είναι η ηλεκτρική μόνωση μεταξύ των τυλιγμάτων και η μεταφορά της θερμότητας από τον πυρήνα και τα τυλίγματα προς το εξωτερικό σύστημα ψύξης. Το λάδι αποτελεί κατάλληλο ψυκτικό μέσο. Απορροφά τη θερμότητα που παράγεται στα τυλίγματα και στον πυρήνα και την μεταφέρει στις ψυκτικές επιφάνειες των ψυγείων και στα τοιχώματα του δοχείου και από εκεί στο περιβάλλον. Η κυκλοφορία του λαδιού στο μετασχηματιστή είναι φυσική ή εξαναγκασμένη ανάλογα με το μέγεθος του. Στους μικρούς μετασχηματιστές έχουμε συνήθως φυσική κυκλοφορία. Στους μεγάλους μετασχηματιστές είναι προσαρμοσμένοι σωλήνες ψύξεως που κυκλοφορεί το λάδι ενώ στους ακόμα πιο μεγάλους υπάρχουν βοηθητικά ποικίλες μέθοδοι τεχνητής ψύξης όπως συνδυασμοί με ψύξη με αέρα κυκλοφορούμενο από ανεμιστήρες ή τέλος απευθείας ψύξη με νερό που περνά μέσα από έλικες τοποθετημένες μέσα στο λάδι πάνω στα τυλίγματα.

Το λάδι παρεμβάλλεται ανάμεσα στα διαφορά στοιχεία του μετασχηματιστή εμποδίζοντας την ηλεκτρική υπερπήδηση και ενισχύει τις μονωτικές ιδιότητες που έχουν οι

μονώσεις των τυλιγμάτων. Ο πυρήνας, τα τυλίγματα και τα στηρίγματα που συνιστούν τη στερεά μόνωση εμποτίζονται στο λάδι, το οποίο διεισδύει και γεμίζει τα μικρά διάκενα αέρα. Έτσι, εμποδίζει την εισχώρηση υγρασίας, διατηρώντας την ποιότητα του χαρτιού και των υλικών κυτταρίνης.

Οι βασικές ιδιότητες που πρέπει να έχει το μονωτικό λάδι είναι:

- υψηλή διηλεκτρική σταθερά και διηλεκτρική αντοχή.
- μικρό ιξώδες, ώστε να ρέει ευκολότερα ακόμη και σε χαμηλές θερμοκρασίες
 - καλή θερμοαγωγιμότητα.
 - καθαρότητα, ώστε να μην περιέχονται σωματίδια που θα μπορούσαν να καταστρέψουν το σύστημα μόνωσης.

3.5 ΤΥΠΟΙ ΜΟΝΩΤΙΚΩΝ ΕΛΑΙΩΝ

Για την καλή λειτουργία των μετασχηματιστών την μόνωση αλλά και για την καλή τους ψύξη χρησιμοποιούμε τρεις βασικούς τύπους μονωτικών ελαίων, τα φυτικά, συνθετικά και ορυκτά έλαια. Καθένα από αυτά έχει τα πλεονεκτήματα αλλά και τα μειονεκτήματα τους ανάλογα με την χημική σύσταση τους.

3.5.1 ΦΥΤΙΚΑ ΕΛΑΙΑ

Οι φυσικοί εστέρες ή φυτικά έλαια, έχουν ιδιότητες παραπλήσιες των συνθετικών και σαφώς χαμηλότερο κόστος επεξεργασίας. Τέτοια έλαια είναι γνωστά με τα ονόματα (Biotemp, ECO Fluid, Envirotemp FR3, Coconut Oil).

Τα φυτικά έλαια είναι φυσικά προϊόντα διαθέσιμα σε αφθονία αφού προέρχονται από ανανεώσιμες πηγές, με περιβαλλοντική φιλική διάθεση και με υψηλό σημείο ανάφλεξης. Δεν έχουν ουσιαστικά καμία τοξικότητα και έχουν υψηλότερα ποσοστά βιοδιάσπασης από το ορυκτέλαιο. Έχουν πολύ χαμηλή ή όχι τοξικότητα, όποτε αν χυθούν δεν έχουν κανένα αντίκτυπο για το περιβάλλον.

Κατά την παραγωγή τους μετά από το χωρισμό του στερεού υλικού, το έλαιο αντιμετωπίζεται με τους πρόσθετους διαλύτες για να αφαιρεθούν πολλά ανεπιθύμητα συστατικά. Η λεύκανση γίνεται συνήθως από τύπους φίλτρων πηλού, οι οποίοι καθαρίζουν περαιτέρω το έλαιο. Η εξουδετέρωση της κακοσμίας από τον ατμό αφαιρεί τις πτητικές ουσίες που παράγουν τη μυρωδιά. Για να επιτευχθεί ικανοποιητική αγωγιμότητα πρόσθετος πηλός χρησιμοποιείται με βελτιωμένη δύναμη προσρόφησης. Η τελική φάση είναι το degassification και αφυδάτωση το έλαιο.

Τα σημαντικότερα όμως πλεονεκτήματα των φυτικών ελαίων αφορούν 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 τον μονωτικό χαρτί του μετασχηματιστή σε καλύτερη κατάσταση, ακόμα και σε συνθήκες υψηλότερης θερμοκρασίας.

Μειονέκτημα των φυτικών ελαίων αποτελεί επίσης το υψηλό κόστος παραγωγής τους και το υψηλό ιξώδες. Εντούτοις τα έλαια φυτικής προέλευσης δοκιμάζονται, βελτιώνονται και επιδέχονται αλλαγές συνεχώς για τη βελτίωση των παραπάνω χαρακτηριστικών.

3.5.2 ΣΥΝΘΕΤΙΚΑ ΕΛΑΙΑ

Τα συνθετικά έλαια αντικαταστάθηκαν από διηλεκτρικά υψηλού σημείου ανάφλεξης, με πρώτα τα λάδια με βάση τη σιλικόνη. Το έλαιο σιλικόνης είναι ένα πολυμερές βασισμένο στη σιλικόνη, είναι άχρωμο και περιλαμβάνει επίσης άτομα άνθρακα, οξυγόνου και υδρογόνου. Συγκεκριμένα, το τελικό προϊόν λαμβάνεται από τον πολυμερισμό του polydimethylsiloxane (PDMS). Αυτό το έλαιο παρουσιάζει το πλεονέκτημα να έχει μια υψηλή θερμική σταθερότητα, αλλά ο συνδυασμός μέτριων διηλεκτρικών και μονωτικών ιδιοτήτων με αμφισβητούμενες οικολογικές συνέπειες της σχεδόν μηδαμινής βιοαποικοδομησιμότητας της σιλικόνης, έχουν περιορίσει τη χρήση της σε ειδικές εφαρμογές.

Μια επόμενη κατηγορία συνθετικών ελαίων είναι οι συνθετικοί εστέρες, συνηθέστερα polyol (pentaerythritol) εστέρες. Ο συνθετικός εστέρας κατασκευάζεται βιομηχανικά. Πρόκειται για έλαια υψηλού σημείου ανάφλεξης, με διηλεκτρικές και μονωτικές ιδιότητες πολύ κοντά σε αυτές των ορυκτελαίων και με υψηλή βιοαποικοδομησιμότητα. Το υψηλό κόστος παρασκευής τους τα περιορίζει σε ειδικές εφαρμογές, όπου η ασφάλεια έναντι της πιθανότητας φωτιάς και οι περιβαλλοντικοί περιορισμοί δικαιολογούν την όχι ευκαταφρόνητη διαφορά στην τιμή του τελικού προϊόντος. Οι συνθετικοί εστέρες χρησιμοποιούνται κυρίως σε ειδικές εφαρμογές, όπως μετασχηματιστές έλξης και κινητούς μετασχηματιστές.

3.5.3 ΟΡΥΚΤΑ ΕΛΑΙΑ

Μετασχηματιστές γεμίζουν με ορυκτέλαια για περισσότερους από έναν αιώνες. Αυτός ο τύπος ελαίου είναι ένα προϊόν βασισμένο στο πετρέλαιο, που αποτελείται ουσιαστικά από άτομα υδρογόνου και άνθρακα. Ο άνθρακας και το υδρογόνο συγκεντρώνονται σε διαφορετικές δομές: ναφθενικός (C_nH_{2n}), παραφινικός (C_nH_{2n+2}) και αρωματικός (C_nH_{2n-6}). Αποτελείται από ένα σύνθετο μίγμα βασικών υγρών υδρογονανθράκων όπως παραφινικούς (40 - 60%), ναφθενικούς (30 -50%), αρωματικούς (5 - 20%) και ολεφίνη (κατά προσέγγιση 1%). Αυτοί οι υδρογονάνθρακες αποτελούνται από άνθρακα και υδρογόνο που συνδέονται με μεταξύ τους με μονούς και διπλούς δεσμούς. Η κατανομή των ανθράκων στις ναφθενικές και παραφινικές δομές καθορίζει τον τύπο του ορυκτελαίου. Αυτή η κατανομή ελέγχεται με τα ακατέργαστα ορυκτέλαια και τις διαδικασίες καθαρισμού που χρησιμοποιούνται.

Δεδομένου ότι το ορυκτέλαιο έχει χρησιμοποιηθεί μακροπρόθεσμα, μια μεγάλη βάση δεδομένων και πληροφοριών είναι διαθέσιμη για να επιτρέψει την ερμηνεία των αλλαγών στα χαρακτηριστικά του και να προβλέψει έτσι την πιθανή δυσλειτουργία ενός μετασχηματιστή. Τα μονωτικά έλαια βασισμένα στο πετρέλαιο, έχουν γενικά άριστες διηλεκτρικές ιδιότητες όπως χαμηλές διηλεκτρικές απώλειες, χαμηλό ιξώδες, συνδυάζονται καλά με την κυτταρίνη και έχουν καλή μακροπρόθεσμη συμπεριφορά. Η δημοτικότητα του ορυκτού ελαίου μετασχηματιστών οφείλεται στη διαθεσιμότητα και το χαμηλότερο κόστος, καθώς επίσης και στο ότι είναι άριστο διηλεκτρικό και μέσο ψύξης. Για αυτούς τους λόγους χρησιμοποιείται στη βιομηχανία των μετασχηματιστών και είναι αυτή τη στιγμή γενικά το μοναδικό που χρησιμοποιείται για τους μετασχηματιστές ισχύος.

Όμως, αυτού του τύπου το έλαιο μετασχηματιστών είναι κακώς βιοδιασπάσιμο και ελαφρώς τοξικό. Θα μπορούσε να μολυνθούν το χώμα και οι υδάτινες οδοί εάν εμφανιστούν σοβαρές διαρροές. Πρόσφατα πολλές έρευνες έχουν διεξαχθεί στην προσπάθεια να αναζητηθεί εναλλακτική λύση των υγρών μονωτικών υλικών που είναι φιλικά στο

περιβάλλον. Άλλωστε, έχουν αναφερθεί ότι τα αποθέματα πετρελαίου τείνουν να εξαντληθούν, γεγονός που θα οδηγήσει σε σοβαρά προβλήματα και έλλειψη του ορυκτέλαιου μέσα στις επόμενες δεκαετίες.

Τα τελευταία χρόνια έχουν κάνει την εμφάνισή τους στην αγορά των διηλεκτρικών, συνθετικά και φυτικά έλαια, μη πετρελαϊκής προέλευσης, τα οποία μάλιστα ενδέχεται να προσφέρουν πλεονεκτήματα σε σχέση με τα συμβατικά ορυκτέλαια. Το γεγονός αυτό συνάδει με τη σύγχρονη τάση για εφαρμογές που συνδυάζουν υψηλή απόδοση και φιλικότητα προς το περιβάλλον. Εξάλλου, μολονότι τα συμβατικά ορυκτέλαια, επιτελούν σε μεγάλο βαθμό το έργο τους ως διηλεκτρικά αρκετά ικανοποιητικά, δεν προσφέρουν κανενός είδους ασφάλεια έναντι πυρός. Δεδομένου ότι τα ορυκτέλαια έχουν σχετικά χαμηλό σημείο ανάφλεξης, ο κίνδυνος να εκδηλωθεί πυρκαγιά στον μετασχηματιστή σε περίπτωση σφάλματος είναι σημαντικός. Έτσι η ανάγκη να μειωθεί ο κίνδυνος ανάφλεξης του ορυκτέλαιου, που ενδέχεται να συνεπάγεται έκρηξη του ίδιου του μετασχηματιστή και καταστροφή των γειτονικών μηχανημάτων, αποτέλεσε το πρώτο κίνητρο για την αναζήτηση άλλων διηλεκτρικών ελαίων, με διαφορετική συμπεριφορά καύσης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΜΟΝΩΤΙΚΩΝ ΕΛΑΙΩΝ

Οι ιδιότητες των μονωτικών λαδιών μπορούν να χωριστούν σε φυσικές, χημικές και ηλεκτρικές. Ο προσδιορισμός της κατάστασης ενός μονωτικού λαδιού διαπιστώνεται ελέγχοντας κάποια από τα χαρακτηριστικά του. Γι' αυτό έχει μεγάλη σημασία η ανάλυση τους και ο προσδιορισμός των αναγκαίων τιμών και περιορισμών για την κανονική λειτουργία του μετασχηματιστή.

4.1 ΦΥΣΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ

Στις φυσικές ιδιότητες περιλαμβάνονται ιδιότητες όπως η θερμική αγωγιμότητα, η ειδική θερμότητα, η πυκνότητα, η κινητική εσωτερική τριβή (ιξώδες), το σημείο ροής, ο συντελεστής θερμικής διαστολής, το χρώμα, η καθαρότητα, τα σημεία ανάφλεξης και καύσης, η επιφανειακή τάση.

4.1.1 ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ

Η θερμική καταπόνηση των μονώσεων σχετίζεται με τα φαινόμενα τοπικής αύξησης του αριθμού των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων δηλαδή όσο πιο καλός μονωτής είναι ένα υλικό, τόσο καλύτερες είναι οι θερμομονωτικές του ιδιότητες.

Θερμική αγωγιμότητα (K) ενός υλικού είναι το πόσο θερμότητας που απάγεται στη μονάδα του χρόνου από μια μοναδιαία επιφάνεια του υλικού, όταν υπάρχει διαφορά ενός βαθμού θερμοκρασίας σε μοναδιαίο πάχος υλικού, επομένως έχει να κάνει με τη δυνατότητα απαγωγής της θερμότητας που αναπτύσσεται σε αυτό. Η θερμική αγωγιμότητα του μονωτικού λαδιού πρέπει να είναι $3 - 4 \cdot 10^{-4} \text{ cal/ (cm} \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C)}$ ανάλογα με τη θερμοκρασία.

Η θερμική αγωγιμότητα εξαρτάται από τη θερμοκρασία, το μοριακό βάρος του λαδιού και το είδος των υδρογονανθράκων που περιέχει. Συγκεκριμένα η θερμική αγωγιμότητα μειώνεται γραμμικά με την αύξηση της θερμοκρασίας και υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση.

$$K_t = 0.00028 (1 - 0.0054 \cdot t) / d$$

Όπου K_t : ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας

d: η πυκνότητα g/ml στους 15°C

t: η θερμοκρασία σε $^\circ\text{C}$

4.1.2 ΕΙΔΙΚΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑ

Η ειδική θερμότητα C του μονωτικού ελαίου σε μια δεδομένη θερμοκρασία και πίεση, είναι το ποσό ενέργειας (cal) που απαιτείται για να αυξηθεί μοναδιαία μάζα (1g) του λαδιού κατά ένα βαθμό θερμοκρασίας ($^\circ\text{C}$). Η μεταβολή αυτή μπορεί να θεωρηθεί ότι γίνεται υπό σταθερή πίεση οπότε η ειδική θερμότητα συμβολίζεται ως CP. Η ειδική θερμότητα του μονωτικού λαδιού χαρακτηρίζει την ικανότητά του να απορροφά θερμότητα και κατά συνέπεια την καταλληλότητα του ως ψυκτικό μέσο.

Η ειδική θερμότητα του μονωτικού ελαίου πρέπει να είναι μεταξύ $0,4 - 0,5 \text{ cal/ (g} \cdot ^\circ\text{C)}$ ανάλογα με τη θερμοκρασία του λαδιού, αυξάνεται όταν αυξάνεται η θερμοκρασία του και είναι δυνατό να υπολογισθεί από τον τύπο:

$$C_p = (1/\sqrt{d})(0,42 + 0,00081 \cdot t)$$

Όπου C_p : η ειδική θερμότητα με σταθερή πίεση cal/ (g-°C)

d : η πυκνότητα g/ml στους 15 °C

t : η θερμοκρασία σε °C

4.1.3 ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ

Η πυκνότητα του μονωτικού ελαίου πρέπει να είναι 0,85 - 0,92 g/ml ανάλογα με την προέλευση του σε θερμοκρασία 20 °C. Αρωματικοί υδρογονάνθρακες έχουν μεγαλύτερη πυκνότητα από τους παραφινικούς.

Η αύξηση της πυκνότητας του μονωτικού λαδιού μετασχηματιστή μπορεί να οφείλεται στα παραπροϊόντα αποικοδόμησης, στον όγκο του ελαίου, δηλαδή στη χημική αποσύνδεση του μονωτικού χαρτιού, στα παραγόμενα ιόντα χαλκού ή στις ελεύθερες ρίζες διασπασμένων αλυσίδων υδρογονανθράκων. Επίσης η πυκνότητα του μονωτικού λαδιού μειώνεται με αύξηση της θερμοκρασίας του μονωτικού λαδιού. Λόγω της αυξομειώσεως της πυκνότητας ο όγκος του λαδιού αυξομειώνεται.

Η μεταβολή της πυκνότητας με τη θερμοκρασία αναφοράς το ακολουθεί με πολύ μεγάλη προσέγγιση τον τύπο:

$$d_t = \frac{d_0}{1 + \alpha \cdot t}$$

Όπου d_t : η πυκνότητα σε θερμοκρασία $t + t_0$

d_0 : η πυκνότητα στη θερμοκρασία αναφοράς

t : η διαφορά θερμοκρασίας από την t_0 $\alpha = 75 \cdot 10^{-5}$

Αύξηση της θερμοκρασίας συνεπάγεται μείωση της πυκνότητας του λαδιού και αύξηση του όγκου του λαδιού 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. Γι αυτό το λόγο υπάρχει στο μετασχηματιστή το δοχείο διαστολής το οποίο δέχεται αυτή την αυξομείωση του όγκου του μονωτικού λαδιού.

4.1.4 ΙΞΩΔΕΣ

Με τον όρο ιξώδες περιγράφεται η εσωτερική αντίσταση ενός υγρού κατά τη ροή του. Το ιξώδες ενός μονωτικού υγρού είναι σημαντικό για το διασκεδασμό της θερμότητας και τη διαδικασία διαπότισης. Όσο μικρότερη είναι η τιμή του ιξώδους για ένα υγρό τόσο πιο εύκολα αυτό ρέει. Γι αυτό τον λόγο προτιμάμε μονωτικά λάδια με χαμηλές τιμές ιξώδους έτσι ώστε να μπορούν να κυκλοφορούν καλύτερα ανάμεσα στα στοιχεία του μετασχηματιστή και να απάγουν τη θερμότητα του πυρήνα και των τυλιγμάτων πιο αποτελεσματικά.

Η τιμή του ιξώδους ενός λαδιού αυξάνεται όσο αυτό βρίσκεται σε λειτουργία επειδή μπορεί να έχει μολυνθεί με ακαθαρσίες ή τα μόρια του να έχουν συνδυαστεί με άλλα μεγαλύτερα. Το ιξώδες ενός μίγματος αυξάνεται με το αυξανόμενο μοριακό μέγεθος και το μοριακό βάρος των συστατικών ενώσεων. Επίσης το ιξώδες μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας και τότε το λάδι μπορεί να ρέει ευκολότερα ανάμεσα στα τυλίγματα του μετασχηματιστή και να απάγει τη θερμοκρασία που αναπτύσσεται από αυτόν προς το

περιβάλλον. Το ιξώδες του ορυκτελαίου είναι πολύ χαμηλό έναντι αυτού του υγρού εστέρα. Συνεπώς το ορυκτό λάδι είναι πιο αποτελεσματικό για την ψύξη των μετασχηματιστών.

4.1.5 ΣΗΜΕΙΟ ΡΟΗΣ

Το σημείο ροής ενός υγρού είναι πιο χαμηλή θερμοκρασία στην οποία το υγρό αρχίζει να ρέει μετά από ψύξη που έγινε με προκαθορισμένες συνθήκες. Το σημείο ροής ενός μονωτικού ρευστού είναι σημαντικό επειδή δείχνει τη θερμοκρασία κάτω από την οποία η κυκλοφορία ελαίου μπορεί να είναι δύσκολη, εάν όχι αδύνατη. Το σημείο ροής αποτελεί χαρακτηριστικό του μονωτικού λαδιού και καθορίζεται από τον τρόπο παραγωγής του.

Ένα χαμηλό σημείο ροής είναι σημαντικό ιδιαίτερα σε ψυχρά κλίματα για να διασφαλιστεί ότι το έλαιο θα κυκλοφορήσει και θα εξυπηρετήσει το σκοπό του ως μονωτικό και ψυκτικό μέσο. Οι κανονισμοί προβλέπουν συνήθως ότι τα μονωτικά λάδια πρέπει να διατηρούν τη ρευστότητα τους μέχρι $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$. Οι τιμές του σημείου ροής των φυσικών εστέρων είναι πολύ πιο υψηλές απ' αυτές των τυπικών ορυκτελαίων.

4.1.6 ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΔΙΑΣΤΟΛΗΣ

Ο συντελεστής θερμικής διαστολής του λαδιού είναι η αύξηση της μονάδας του όγκου για αύξηση της θερμοκρασίας κατά $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ και πρέπει να είναι $0,7 - 0,8 \cdot 10^{-3} / ^{\circ}\text{C}$. Πρέπει να είναι γνωστός με ακρίβεια για τον υπολογισμό του δοχείου διαστολής ή του κενού χώρου του δοχείου που το περιέχει. Υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\Sigma.\Theta.\Delta. = (S_1 - S_2) / S_1 (T_2 - T_1)$$

Όπου $\Sigma.\Theta.\Delta.$ ο συντελεστής θερμικής διαστολής,

S_1 το ειδικό βάρος σε θερμοκρασία T_1

S_2 το ειδικό βάρος σε θερμοκρασία T_2 .

4.1.7 ΧΡΩΜΑ

Το μονωτικό λάδι πρέπει να είναι όσο το δυνατόν πιο ανοιχτόχρωμο και καθαρό. Το χρώμα του μονωτικού λαδιού ορυκτελαίου πρέπει να είναι κίτρινο ανοιχτό και η διαφορά από λάδι σε λάδι είναι μικρή. Γενικά τα ρευστά νέου φυσικού εστέρα μπορούν αρχικά να είναι ελαφρώς σκουρότερα στο χρώμα, από το καθαρισμένο νέο ορυκτέλαιο.

Το χρώμα του κάθε του λαδιού είναι κάποιο στοιχείο για να εκτιμηθεί η κατάσταση του. Κάθε μεταβολή του χρώματος κατά τη διάρκεια του χρόνου υποδηλώνει υποβάθμιση ή ρύπανση του μονωτικού λαδιού. Η μεταβολή του χρώματος του λαδιού που χρησιμοποιείται πιθανόν σημαίνει οξείδωση ή παρουσία ξένων σωματιδίων μέσα σε αυτό. Εντούτοις, άλλες δοκιμές (όπως ο παράγοντας διασκεδασμού και ο αριθμός ουδετεροποίησης) είναι καλύτερα μέτρα της επιδείνωσης ή της μόλυνσης του ρευστού.



Εικόνα 4-1 Τύποι ορυκτελαίου με διαφορές στη παλαιότητα, τη χρήση, το χρώμα και τη μονωτική τους ικανότητα. [34]

4.1.8 ΚΑΘΑΡΟΤΗΤΑ

Το μονωτικό λάδι πρέπει να είναι διαυγές, να μην περιέχει αιωρούμενα ξένα σωματίδια (σκόνη, ίνες), να μην έχει βλαβερές προσμίξεις, όπως αλκάλια, οξέα ή ελεύθερο θείο (που και σε ίχνη ακόμη επιδρά διαβρωτικά στις γυμνές μεταλλικές επιφάνειες). Μπορούμε να προσδιορίσουμε αν υπάρχουν ξένα σωματίδια και νερό στο λάδι με τον έλεγχο της διηλεκτρικής του αντοχής. Τα ξένα σωματίδια στο λάδι μειώνουν τις αποστάσεις μόνωσης γιατί σχηματίζουν αγωγίμες γέφυρες με αποτέλεσμα τη μείωση της τάσης διάσπασης. Επίσης υπάρχουν μέθοδοι που αποσκοπούν στην ανίχνευση ελεύθερου θείου στα μονωτικά λάδια βασιζόμενες την ιδιότητά του να προκαλεί διάβρωση στο γυμνό χαλκό. Η καταστροφή που θα προκαλέσει το θείο στα μέταλλα εξαρτάται από την ποσότητα του, τη θερμοκρασία και το χρόνο.

4.1.9 ΣΗΜΕΙΟ ΑΝΑΦΛΕΞΗΣ ΚΑΙ ΚΑΥΣΕΩΣ

Το σημείο ανάφλεξης είναι η ελάχιστη θερμοκρασία στην οποία κάτω από ορισμένες συνθήκες το λάδι αναδίδει ατμούς, που με τον ατμοσφαιρικό αέρα δημιουργούν εύφλεκτο μίγμα και αναφλέγεται με σπινθήρα. Σημείο καύσης είναι η θερμοκρασία στην οποία αρχίζει η συνεχής καύση του λαδιού. Το σημείο ανάφλεξης προσδιορίζεται πειραματικά από τη θέρμανση του λαδιού μέσα σε κλειστό δοχείο ή σε ανοιχτό δοχείο. Το σημείο καύσης προσδιορίζεται με τη βοήθεια ανοιχτού δοχείου.

Το χρησιμοποιούμενο λάδι δεν πρέπει να έχει χαμηλό σημείο ανάφλεξης και συγκεκριμένα κάτω από 160°C . Οι φυσικοί εστέρες έχουν υψηλότερα σημεία ανάφλεξης και καύσης από τα ορυκτέλαια και αλλά διηλεκτρικά υγρά και ξεπερνούν τους 300°C το σημείο ανάφλεξης και τους 350°C το σημείο καύσης. Σύμφωνα με το πρότυπο IEC 61100 κατατάσσονται στην κατηγορία Κ. Επομένως, ενδείκνυται η χρήση τους σε εφαρμογές όπου ο κίνδυνος ανάφλεξης επιβάλλει περιορισμούς. Πρόσφατες μελέτες, από μεγάλες ασφαλιστικές εταιρείες, αναγνωρίζουν ότι ένα ποσοστό μετασχηματιστών, θα αστοχήσουν «επεισοδιακά».

4.1.10 ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗ ΤΑΣΗ

Στο εσωτερικό της μάζας οποιουδήποτε υγρού, κάθε μόριο περιβάλλεται από άλλα μόρια και υπάρχουν δυνάμεις έλξης ομοιόμορφα προς όλες τις διευθύνσεις. Οι δυνάμεις είναι γνωστές σαν δυνάμεις συνοχής, λόγω των δυνάμεων συνοχής, η εξωτερική επιφάνεια του

λαδιού συμπεριφέρεται σαν ελαστική μεμβράνη του τεντώνεται προς όλες τις διευθύνσεις. Η τάση αυτή του επιφανειακού στρώματος λέγεται επιφανειακή τάση, η οποία αποτελεί την μοριακή ιδιότητα και μετριέται σε dyn/cm .

Τα σωματίδια που υπάρχουν ή που δημιουργούνται στο μονωτικό έλαιο τείνουν να συγκεντρωθούν στην επιφάνεια που διαχωρίζει αυτό από το αποσταγμένο νερό. Η συγκέντρωση αυτή έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της επιφανειακής τάσης. Ο προσδιορισμός της επιφανειακής τάσης του ελαίου μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εξεύρεση της παρουσίας προϊόντων που οφείλονται σε οξείδωση. Επίσης ο προσδιορισμός αυτός οδηγεί σε ενδιαφέροντα αποτελέσματα σχετικά με την ποιότητα και την εξέλιξη των ιδιοτήτων του ελαίου. Η επιφανειακή τάση είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας, μειώνεται όσο αυξάνεται η θερμοκρασία και μηδενίζεται στο κρίσιμο σημείο.

4.2 ΧΗΜΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ

Στις χημικές ιδιότητες περιλαμβάνονται ιδιότητες όπως η οξείδωση, η οξύτητα, ο βαθμός εξουδετέρωσης, η αλκαλικότητα, η υγρασία, η απορρόφηση και έκλυση αερίων.

4.2.1 ΟΞΕΙΔΩΣΗ

Οξείδωση επέρχεται σε μια συσκευή κατά την ατμοσφαιρική αναπνοή, παραπροϊόντα της χημικής αποσύνθεσης του λαδιού λόγω της οξείδωσης είναι οξέα, αλδεΐδες, κετόνες, νερό το οποίο παραμένει στο λάδι και μειώνει τη διηλεκτρική του αντοχή κλπ. Τα προϊόντα της οξείδωσης στο ορυκτό έλαιο μπορεί να αντιδρούν για να σχηματίσουν ιζήματα λάσπης, τα οποία φράζουν τους οχετούς κυκλοφορίας του ελαίου και παρεμποδίζουν την ψύξη της συσκευής. Τα ενδιάμεσα προϊόντα οξειδώσεως που παράγονται προσβάλλουν επίσης τα στερεά μονωτικά, όπως το χαρτί και μειώνουν τη μηχανική τους αντοχή. Με τη χρήση αντιοξειδωτικών πρόσθετων μπορεί να αναβληθεί η οξείδωση στο ορυκτέλαιο. Τέτοιες ουσίες είναι χημικές ενώσεις με βάση φαινόλες, αμίνες κλπ. Επομένως, τα ανασταλτικά οξειδωσης επιταχύνουν την ωφέλιμη διάρκεια ζωής του λαδιού.

Αντίθετα με τα ορυκτέλαια, τα προϊόντα της οξείδωσης των φυτικών ελαίων δεν σχηματίζουν ιζήματα λάσπης, αλλά το λάδι αρχίζει να πυκνώνει και τελικά γίνεται πολυμερισμός. Στα πρώτα στάδια της οξείδωσης του φυτικού ελαίου παρατηρείται αύξηση του ιξώδους. Η UV έκθεση των φυτικών ελαίων επίσης επιταχύνει τον πολυμερισμό. Έτσι, τα φυτικά έλαια είναι σχεδόν βέβαιο ότι δεν είναι κατάλληλα για χρήση σε μετασχηματιστές ελεύθερης αναπνοής εξαιτίας των ενδεχόμενων αλλαγών του. Η παρουσία χαλκού ενισχύει την τάση για οξείδωση στους μετασχηματιστές. Ο συνυπολογισμός του χαλκού αυξάνει το ποσοστό όξινης παραγωγής στο ιξώδους και πρέπει να απομονωθούν από την άμεση ατμοσφαιρική επαφή στο ορυκτέλαιο, εντούτοις μείωσε το ποσοστό όξινης παραγωγής στο φυσικό εστέρα. Ο χαλκός δεν έχει επιπτώσεις στο συνθετικό εστέρα, καταδεικνύοντας την καλή χημική σταθερότητα.

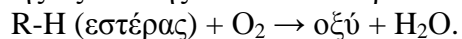
Για να βελτιωθεί η σταθερότητα των λαδιών απέναντι στην οξείδωση χρησιμοποιούνται διάφορες χημικές ενώσεις, τα αντιοξειδωτικά πρόσθετα. Αυτά είναι ουσίες που προστίθενται στο λάδι σε συγκεκριμένες ποσότητες και δρουν όπως η θυσιαζόμενη άνοδος στα κυκλώματα γείωσης. Έτσι, το οξυγόνο καταστρέφει το αντιοξειδωτικό αντί για την μόνωση κυτταρίνης. Κατά τη διάρκεια ζωής των μετασχηματιστών, τα πρόσθετα χρησιμοποιούνται και σταδιακά εξαφανίζονται οπότε και πρέπει να αντικαθίστανται. Τα ευρύτερα διαδεδομένα αντιοξειδωτικά μέσα είναι η δι-τριτογενής βουτυλική φαινόλη (DBP)

και η δι-τριτογενής βουτυλική παρά-κρεσόλη (DBPC). Η απαιτούμενη ποσότητα είναι 0,3% του συνολικού βάρους του λαδιού και καθορίζεται από την προδιαγραφή ASTM D3487. Ο υπολογισμός της υπολειπόμενης ποσότητας γίνεται βάσει του προτύπου ASTM D4768-03. Η περιεκτικότητα του αντιοξειδωτικού ελέγχεται κάθε 3-5 χρόνια.

4.2.2 ΟΞΥΤΗΤΑ

Η καλή υγρή μόνωση είναι χημικά ουδέτερη. Η ύπαρξη επομένως οξέων στα λάδια είναι ανεπιθύμητη. Τα οξέα μπορούν να προκύψουν στα μονωτικά υγρά κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας ή της λειτουργίας. Κατά τη διάρκεια της συνθήκης λειτουργίας η εμφάνιση οξέων δείχνει την υποβάθμιση της ποιότητας της μόνωσης. Αυτά προκαλούν διαβρώσεις των μεταλλικών στοιχείων και μειώνουν την διηλεκτρική αντοχή των λαδιών. Το υπερβολικό περιεχόμενο του οξέος δεν είναι ανεκτό.

Ο αριθμός οξύτητας είναι το πόσο των χιλιοστών του γραμμαρίου (mg) του υδροξειδίου (KOH) που απαιτείται για να εξουδετερωθούν τα ελεύθερα οξέα που περιέχονται σε δείγμα ελαίου ενός γραμμαρίου (g). Η οξύτητα αυξάνεται με την περιεκτικότητα σε εστέρα. Σε κανονικές συνθήκες η οξύτητα του εστέρα είναι υψηλότερη από του ορυκτέλαιου. Η αύξηση της οξύτητας του μίγματος με περιεχόμενο εστέρα οφείλεται στην υψηλή οξύτητα του εστέρα. Το υψηλότερο περιεχόμενο φυσικού εστέρα στο μίγμα συμβάλλει σε υψηλότερο οξύ στο μίγμα ορυκτέλαιου-εστέρα. Το οξύ στον εστέρα μπορεί να προκύψει ως αποτέλεσμα της οξείδωσης που απελευθερώνει οξύ και νερό σύμφωνα με την εξίσωση:



4.2.3 ΒΑΘΜΟΣ ΕΞΟΥΔΕΤΕΡΩΣΗΣ

Ο βαθμός εξουδετέρωσης αποτελεί μέτρο της οξύτητας του λαδιού. Μαζί με την επιφανειακή τάση δείχνει εάν το μονωτικό λάδι χρειάζεται αναγέννηση. Η εύρεση του βαθμού εξουδετέρωσης, υποδηλώνει τον αριθμό των mg KOH που απαιτούνται για να ουδετεροποιήσουν ένα γραμμάριο ηλεκτρομονωτικού ελαίου. Η οξύτητα εξαρτάται από τα παραπροϊόντα γήρανσης, όπως και από τις συγκεντρώσεις των πρόσθετων ουσιών, όπως η πιθανή συγκέντρωση PCBs στο σώμα του ελαίου με τιμή μεγαλύτερη των 50 ppm. Η οξύτητα, που μετράται στα μονωτικά έλαια, πρακτικά, αποτελείται μόνο από την οργανική οξύτητα, γιατί η ανόργανη είναι αμελητέα. Έχει σημασία η παρακολούθηση της οξύτητας του ελαίου, γιατί αύξηση της οξείδωσής του, συνοδεύεται γενικά και από αύξηση της οξύτητάς του. Τιμές μεγαλύτερες από 0,3 υποδηλώνουν την παρουσία οργανικών οξέων τα οποία είναι επιβλαβή για το μονωτικό σύστημα. Τα οξέα ενδέχεται να δημιουργούν διάβρωση, αυξάνουν τη διαλυτότητα του νερού στο λάδι και δρουν καταλυτικώς στη διαδικασία αποσύνθεσης του χαρτιού.

4.2.4 ΑΛΚΑΛΙΚΟΤΗΤΑ

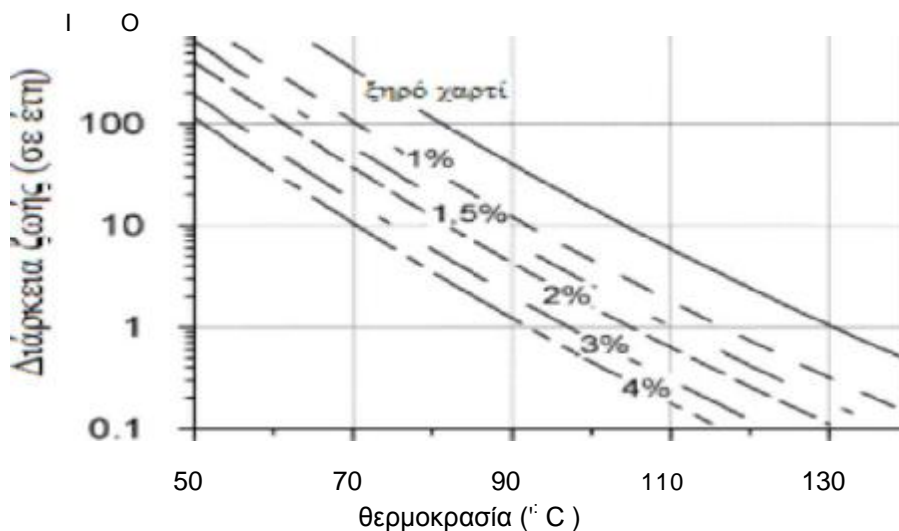
Στα καινούργια λάδια η αλκαλικότητα πρέπει να είναι αμελητέα. Ύπαρξη όμως σημαντικής αλκαλικότητας σημαίνει μόλυνση του λαδιού και μειώνει τη διηλεκτρική αντοχή του. Μέτρο της αλκαλικότητας του λαδιού είναι ο βαθμός σαπωνοποίησης. Βαθμός σαπωνοποίησης είναι το ποσό των mg KOH που χρειάζονται για την πλήρη σαπωνοποίηση 1g λαδιού. Ο βαθμός αυτός πρέπει να είναι 0,3 - 0,6 mg KOH/g και όταν φτάσει το 1,5 mg KOH/g επιβάλλεται η αντικατάσταση του λαδιού.

4.2.5 ΥΓΡΑΣΙΑ

Η σχετική υγρασία ενός υγρού είναι η περιεκτικότητα σε διαλυμένο νερό του υγρού σχετικά με τη μέγιστη χωρητικότητα υγρασίας που μπορεί να κρατήσει στη συγκεκριμένη θερμοκρασία. Η σχετική υγρασία σε μια δεδομένη απόλυτη θερμοκρασία, καθορίζεται ως το πηλίκο της περιεκτικότητας σε νερό στο υγρό προς το όριο κορεσμού του νερού στο λάδι. Το όριο κορεσμού ενός μονωτικού υγρού εξαρτάται από τον τύπο μόνωσης του υγρού, τη χημική σύνθεσή του, το μέσο μοριακό βάρος του και τη θερμοκρασία.

Οι ηλεκτρικές παράμετροι της μόνωσης είναι έντονα επηρεασμένες από την περιεκτικότητα σε νερό, και ένα επίπεδο υψηλής υγρασίας μειώνει τη λειτουργική ασφάλεια. Η τάση διάσπασης και η διηλεκτρική αντοχή ενός ελαίου επηρεάζονται αρνητικά από την παρουσία νερού. Η αύξηση της σχετικής περιεκτικότητας σε νερό μειώνει την τιμή της τάσης διάσπασης. Η παρουσία υγρασίας στο μονωτικό λάδι αποτελεί σημαντικό παράγοντα της μονωτικής του υποβάθμισης καθώς σχηματίζει αγωγίμες γέφυρες που μπορούν να επιφέρουν τη διάσπαση του. Επομένως η υγρασία προκαλεί δραστική μείωση στην διηλεκτρική αντοχή του μονωτικού λαδιού και αύξηση του συντελεστή απωλειών λόγω της αύξησης του ρεύματος απωλειών. Η υγρασία αυξάνει τον ηλεκτρικό παράγοντα αγωγιμότητας και διασκεδασμού και επιδεινώνει την διηλεκτρική αντοχή.

Η γήρανση του μονωτικού χαρτιού μειώνει το βαθμό πολυμερισμού του μονωτικού χαρτιού και κατά συνέπεια τη μηχανική του αντοχή μέχρι και το 20% της αρχικής τιμής. Η συμβολή της υγρασίας στη γήρανση του μονωτικού χαρτιού, αλλά και στη μείωση της διάρκειας ζωής του μετασχηματιστή, έγκειται στο γεγονός ότι μειώνει το βαθμό πολυμερισμού λόγω της υδρόλυσης που προκαλεί σε αυτό. Η αναμενόμενη διάρκεια ζωής του μονωτικού χαρτιού σε σχέση με την περιεχόμενη υγρασία σε αυτό.



Σχημα 4.1 Αναμενόμενη διάρκεια ζωής του μονωτικού χαρτιού σε σχέση με την περιεχόμενη υγρασία σε αυτό [12]

Το νερό διανέμεται ανάμεσα στο χαρτί και το λάδι ανάλογα με τη θερμοκρασία του συστήματος μόνωσης. Όσο η θερμοκρασία του συστήματος μόνωσης αυξάνεται νερό μετακινείται από το χαρτί στο λάδι ενώ όταν η θερμοκρασία του συστήματος μειώνεται νερό μετακινείται από το λάδι στο χαρτί.

Υπάρχουν δύο μηχανισμοί ώστε το έλαιο να αυξήσει στην περιεκτικότητα σε νερό σε έναν μετασχηματιστή. Ο πρώτος είναι μέσω της απορρόφησης από την ατμόσφαιρα, απίθανη εάν χρησιμοποιείται ένας στεγνωτήρας αέρα ή ο μετασχηματιστής σφραγίζεται, και ο δεύτερος η γήρανση της μόνωσης κυτταρίνης που δημιουργεί νερό. Η θερμική καταπόνηση της μόνωσης εξαιτίας της υψηλής θερμοκρασίας και η οξείδωση λόγω της παρουσίας οξυγόνου, έχουν ως αποτέλεσμα τη δημιουργία κάποιων παραπροϊόντων με πιο σημαντικό απ' όλα το νερό. Επίσης η παρουσία νερού οφείλεται και στη γήρανση του μονωτικού λαδιού.

Αποτέλεσμα της επαφής του λαδιού με τον ατμοσφαιρικό αέρα είναι η οξείδωση που υφίσταται. Τα κυριότερα τελικά προϊόντα της οξείδωσης του λαδιού είναι διοξείδιο του άνθρακα και νερό. Γι αυτό το λόγο όσο περισσότερο διάστημα χρησιμοποιείται το μονωτικό λάδι σε ένα μετασχηματιστή τόσο μεγαλύτερη είναι η ποσότητα του νερού που βρίσκεται σε αυτό. Η μέγιστη επιτρεπτή τιμή της περιεκτικότητας νερού στα χρησιμοποιούμενα ηλεκτρομονωτικά έλαια είναι τα 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.

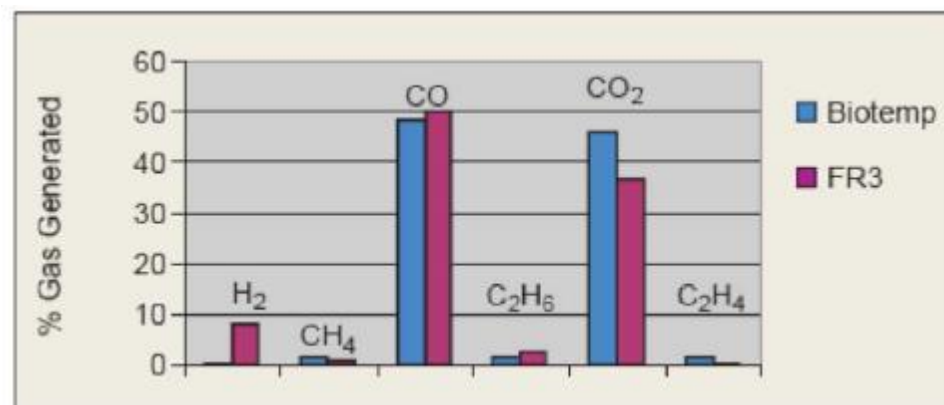
Η περιεκτικότητα σε νερό των υγρών φυσικών εστέρων μπορεί να διαφέρει σημαντικά του ορυκτού ελαίου. Δεδομένου ότι οι εστέρες είναι πολύ περισσότερο υγροσκοπικοί από το ορυκτέλαιο, η υγρασία ασκεί λιγότερη επίδραση στη διηλεκτρική αντοχή των εστέρων από το ορυκτέλαιο περιεκτικότητα σε υγρασία ενός διηλεκτρικού ρευστού πρέπει να παραμείνει αρκετά κάτω από τον κορεσμό για να αποτρέψει μείωση στην διηλεκτρική του αντοχή.

4.2.6 ΕΛΚΥΣΗ ΚΑΙ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗ ΑΕΡΙΩΝ

Τα μονωτικά υγρά κατά τη λειτουργία των μετασχηματιστών υφίστανται χημικές μεταβολές, λόγω θερμικών και ηλεκτρικών καταπονήσεων. Αποτέλεσμα αυτών των μεταβολών είναι η απορρόφηση και έκλυση αερίων. Τα αέρια προκαλούν δυσλειτουργίες στο έλαιο μεταβάλλοντας τις ηλεκτρικές του ιδιότητες. Οι φυσαλίδες αερίων μέσα στο λάδι ιονίζουν και δημιουργούν δρόμους για την διάσπαση των μονώσεων. Γι' αυτό οι συσκευές πρέπει να σχεδιάζονται με την ελάχιστη δυνατότητα σχηματισμού αερίων σε χαμηλή συνεχή τάση. Η απορρόφηση και έκλυση αερίων από το λάδι εξαρτάται από τη φύση και την προέλευση του λαδιού.

Η ξεχωριστή διαφορά στα προϊόντα αποσύνθεσης, σε σύγκριση με τα ρευστά υδρογονάνθρακα, είναι το μεγάλο πόσο CO και CO₂ που δημιουργούνται. Αυτό είναι επειδή, αντίθετα από τα ρευστά υδρογονάνθρακα, τα ρευστά εστέρα περιέχουν μια ομάδα καρβονύλιου - COO, η οποία αναλύεται για να δώσει CO και CO₂. Το υδρογόνο δεν πρέπει να σχηματιστεί κανονικά από τη θερμική αποσύνθεση, αλλά ορισμένα συστατικά ή πρόσθετες ουσίες θα μπορούσαν να παράγουν υδρογόνο, όπως φαίνεται στο FR3 ρευστό.

Υπό συνθήκες σχηματισμού τόξου, τα παραχθέντα αέρια είναι κυρίως υδρογόνο και ασετυλίνη για το λάδι μετασχηματιστή βασισμένο σε ορυκτέλαιο αλλά για το φυτικό έλαιο, επιπλέον, τα CO και CO₂ παράγονται επίσης σε μεγάλες ποσότητες λόγω της παρούσας ομάδας εστέρα. Παρακάτω παρουσιάζεται η σύγκριση παραγωγής αερίου από το φυτικό έλαιο (BIOTEMP®) και από το κανονικό έλαιο μετασχηματιστών.



Σχήμα 4.2 Ποσοστά παραγόμενων αερίων για τα ρευστά BIOTEMP® και Envirotemp FR3® [19]

Μια σημαντική εύρεση είναι ότι το συνολικό αέριο που παράγεται ήταν μόνο το ένα τέταρτο του αερίου που παρήχθη από το κανονικό έλαιο μετασχηματιστών. Αυτό παρουσιάζει τη δυνατότητα απόσβεσης τόξου των φυτικών ελαίων.

4.3 ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ

Στα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά περιλαμβάνονται η ειδική αγωγιμότητα, ο συντελεστής ισχύος (απωλειών), η ειδική αντίσταση, η διηλεκτρική σταθερά και η διηλεκτρική αντοχή.

4.3.1 ΕΙΔΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ

Ειδική αγωγιμότητα είναι μέτρο της ευκολίας ή της δυσκολίας με την οποία άγεται ηλεκτρικό ρεύμα διά μέσου κάποιου υλικού ανεξάρτητα από τις διαστάσεις του. Συμβολίζεται συνήθως με σ . Η μονάδα μέτρησης της ειδικής αγωγιμότητας είναι το $(\Omega \cdot \text{m})^{-1}$. Η ειδική αγωγιμότητα ενός υλικού με ένα φορέα ελεύθερου φορτίου είναι το γινόμενο της πυκνότητας φορτίου στο υλικό επί την ειδική κινητικότητα του φορτίου μέσα στο υλικό. Η πυκνότητα φορτίου είναι το γινόμενο της συγκέντρωσης φορτίου επί το ηλεκτρικό φορτίο του κάθε φορέα. Η ειδική κινητικότητα είναι ο λόγος του γινομένου του ηλεκτρικού φορτίου του κάθε φορέα επί το μέσο χρόνο ολίσθησης του φορέα στο υλικό προς την ενεργό μάζα του κάθε φορέα. Ο τύπος της ειδικής αγωγιμότητας είναι:

$$\sigma = N \cdot q \cdot T / m$$

Τα ηλεκτρομονωτικά υλικά έχουν μία πολύ μικρή ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα που εξαρτάται γενικά από τις συνθήκες λειτουργίας τους (τιμή πεδιακής έντασης, θερμοκρασία, υγρασία κ.α.) και έχει τιμή μεγαλύτερη από $10^{-10} [\Omega \cdot \text{cm}]^{-1}$. Η ειδική αγωγιμότητα είναι ένα πολύ σημαντικό κριτήριο αξιολόγησης των μονωτικών υλικών, γιατί εκφράζει τους ελεύθερους ηλεκτρικούς φορείς. Η ειδική αγωγιμότητα αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας. Αυτό συμβαίνει γιατί αύξηση της θερμοκρασίας αυξάνει την κινητικότητα των ηλεκτρονίων και συνεπώς αυξάνεται το ηλεκτρικό ρεύμα που διαρρέει το μονωτικό λάδι. Υποβαθμίζεται έτσι η μονωτική λειτουργία του λαδιού.

4.3.2 ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΑΠΩΛΕΙΩΝ

Ο συντελεστής απωλειών αναπαριστά τις διηλεκτρικές απώλειες του λαδιού, λόγω του ρεύματος διαρροής δια μέσω αυτού. Με τη μέτρηση του συντελεστή απωλειών ($\tan\delta$) εκτιμάται το ρεύμα διαρροής δια μέσω του λαδιού. Το ρεύμα διαρροής είναι μέτρο της μόλυνσης και δίνει την κατάσταση των μονωτικών του ιδιοτήτων. Υψηλή τιμή του συντελεστή απωλειών είναι ένδειξη μόλυνσης ή ύπαρξης προϊόντων υποβάθμισης όπως νερό, άνθρακας, μεταλλικοί σάπωνες και προϊόντα οξείδωσης.

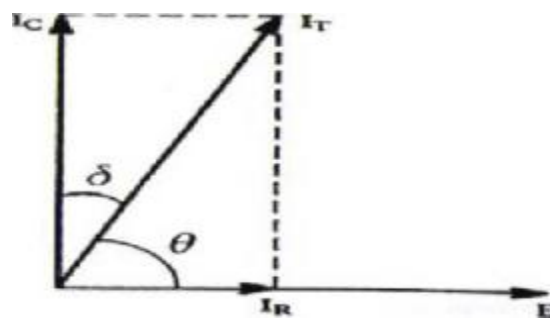
Σε μια μόνωση υπάρχουν πάντοτε απώλειες ενέργειας, οι οποίες υπό εναλλασσόμενη τάση οφείλονται :

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

Ο ιδανικός μονωτής είναι ένα ομοιογενές υλικό που δεν έχει απώλειες. Η γωνία μεταξύ τάσης και ρεύματος είναι 90° , πράγμα που σημαίνει μηδενικές απώλειες αφού $\cos 90^\circ = 0$. Το ισοδύναμο κύκλωμα του ιδανικού μονωτή είναι μια χωρητικότητα C. Πρακτικά όμως δεν υπάρχει ιδανικός μονωτής με μηδενικές απώλειες. Το μονωτικό υλικό έχει έστω ένα ελάχιστο ρεύμα διαρροής, λόγω της αγωγιμότητάς του. Η διαφορά φάσης μεταξύ της τάσης και του ρεύματος αποκλίνει από τις 90° κατά δ° . Αυτή η γωνία δ λέγεται γωνία απωλειών και το $\sin\delta$ λέγεται συντελεστής απωλειών γιατί η ισχύς που διαχέεται στο διηλεκτρικό (απώλειες) είναι : $P = V \cdot I \cdot \cos(90 - \delta) = V \cdot I \cdot \sin\delta$ Επειδή η δ είναι πολύ μικρή ισχύει $\sin\delta = \tan\delta$.

Παρακάτω δίνεται το ισοδύναμο κύκλωμα του πραγματικού ιδανικού μονωτή, όπου οι τιμές C και G θεωρούνται σταθερές. Ο συντελεστής απωλειών δίνεται από τη σχέση :

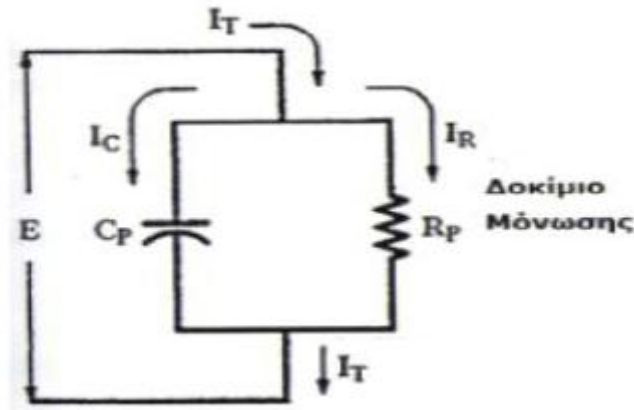
$$\tan\delta = I_R / I_C = G / \omega C$$



Σχήμα 4.3 Διανυσματικό διάγραμμα[29]

- Όπου: E: η εφαρμοζόμενη τάση δοκιμής στη μόνωση
C_p: η ισοδύναμη παράλληλη χωρητικότητα
R_p: η ισοδύναμη παράλληλη αντίσταση
I_T: η συνολική ένταση που διαπερνά τη μόνωση λόγω της E
I_C: η κάθετη συνιστώσα (χωρητική συνιστώσα) του I_T
I_R: η ομοπολική συνιστώσα (ενεργός συνιστώσα) του I_T
θ: η φασική γωνία του διηλεκτρικού
δ: η γωνία διηλεκτρικών απωλειών

Σε όλες τις πρακτικές εφαρμογές ο συντελεστής ισχύος ταυτίζεται με το συντελεστή απωλειών μέχρι την τιμή 0,1. Από την τιμή 0,1 και πάνω οι δύο συντελεστές έχουν απόκλιση μέχρι 30%. Η τιμή της $\tan\delta$ συμπίπτει με τον συντελεστή ισχύος, εφόσον η γωνία δ είναι μικρότερη από 10 μοίρες. Η πλειονότητα των δοκιμών μπορεί να πραγματοποιηθεί με χρήση οποιουδήποτε από τους παραπάνω συντελεστές. Γενικά η μόνωση μπορεί να αναπαρασταθεί με το κύκλωμα του σχήματος, δηλαδή ως μια χωρητικότητα παράλληλα συνδεδεμένη με μια αντίσταση.



Σχήμα 4.4 Ισοδύναμο κύκλωμα συστήματος μόνωσης[34]

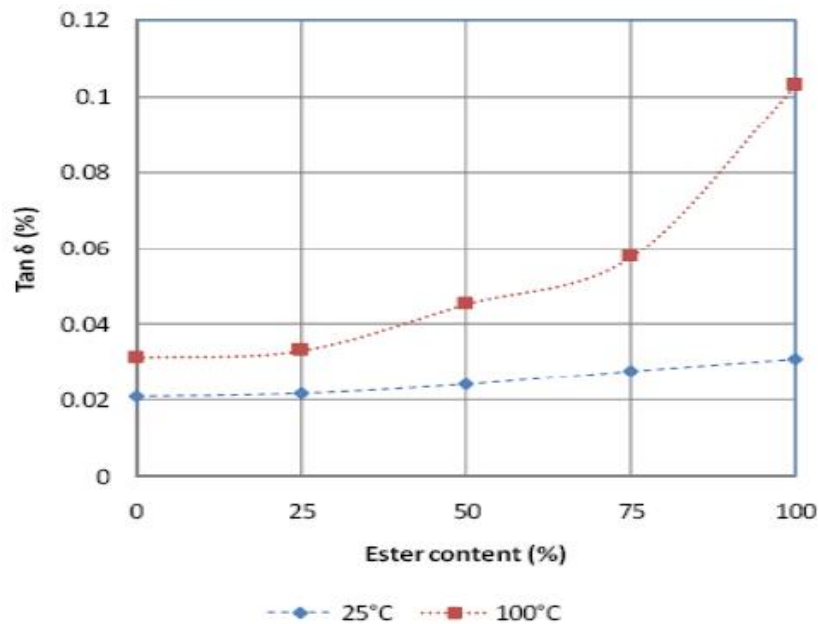
Το σχετικό πρότυπο IEEE/ ANSI C57.106 δεν ορίζει ακριβή όρια για τον συντελεστή ισχύος στα μονωτικά λάδια. Η εταιρία Doble Engineering συστήνει τον επόμενο πίνακα για την εκτίμηση της κατάστασης της μόνωσης ανάλογα με τα αποτελέσματα της δοκιμής.

Συντελεστής ισχύος PF	Πιθανή κατάσταση μόνωσης
$PF \leq 0.5\%$	Καλή
$0.5\% < PF \leq 0.7\%$	Επιδεινωμένη
$0.7\% < PF \leq 1.0\%$	Απαιτείται έλεγχος
$1\% < PF$	Κακή

Πίνακας 4.1 Διάγνωση της κατάστασης της μόνωσης βάση του συντελεστή ισχύος[31]

Ο συντελεστής απωλειών ενός νέου μετασχηματιστή χρησιμοποιείται ως ένδειξη ότι η μόνωση στερεών αποξηράνθηκε ικανοποιητικά κατά τη διάρκεια της διαδικασίας κατασκευής. Πολλά λάδια κρίνονται ακατάλληλα όταν έχουν μεγάλο συντελεστή απωλειών. Σημειώνεται ότι ο $\tan\delta$ δεν είναι απολύτως ανάλογος με την αύξηση του οξέος λόγω των μη όξινων πολικών ενώσεων που σχηματίζονται κατά τη διάρκεια της υποβάθμισης. Υπάρχει μια γενική σχέση που αν η οξύτητα του εστέρα αυξάνεται, ενώ το $\tan\delta$ είναι αρκετά σταθερό, αυτό μπορεί να οφείλεται στην υδρόλυση. Εναλλακτικά, εάν η οξύτητα παραμένει σχετικά σταθερό, ενώ ο $\tan\delta$ αυξάνεται, αυτό μπορεί να οφείλεται στην οξείδωση.

Ο συντελεστής απωλειών μεταβάλλεται γραμμικά σε συνάρτηση με την αποσύνθεση του λαδιού εξαιτίας οξείδωσης ή σε συνάρτηση με τα ξένα σωματίδια που υπάρχουν στο λάδι. Το σχήμα παρουσιάζει την εξάρτηση διηλεκτρικού παράγοντα απωλειών ($\tan\delta$) στην περιεκτικότητα σε εστέρα με τη θερμοκρασία 25°C και 100°C.



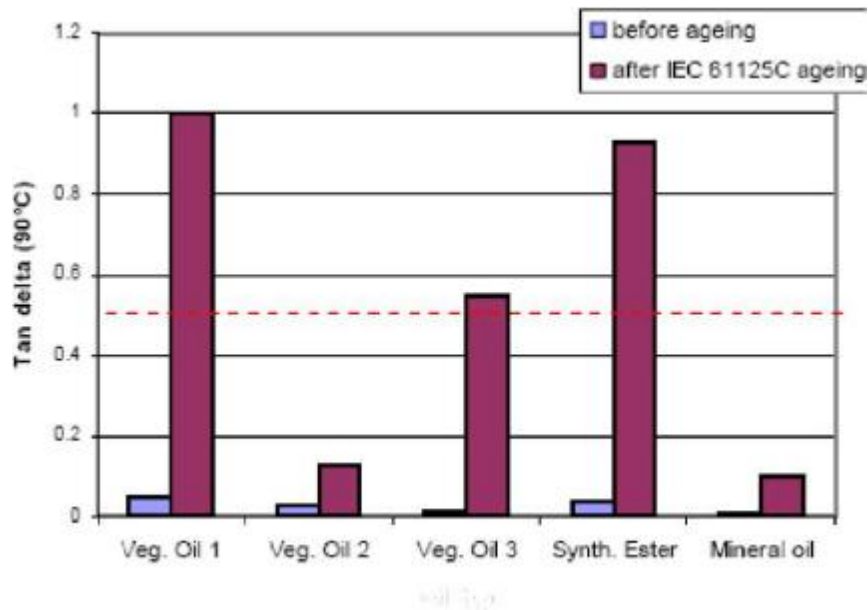
Σχήμα 4.5 Μεταβολή παράγοντα απωλειών σε σχέση με το περιεχόμενο σε εστέρα[20]

Ο συντελεστής απωλειών επηρεάζεται από το βαθμό πόλωσης του ελαίου. Η χημική δομή έδειξε ότι το ορυκτέλαιο έχει μια συμμετρική δομή ενώ ο μεθυλικός εστέρας περιέχει δομή ανισορροπίας. Αυτή η δομή ανισορροπίας του μεθυλικού εστέρα ενισχύει τον συντελεστή απωλειών του. Ο συντελεστής απωλειών του καθαρού μεθυλικού εστέρα από το έλαιο φοινίκων είναι πολύ υψηλότερος από το ορυκτέλαιο. Η αντίσταση των δίπολων κατά τη διάρκεια της διαδικασίας πόλωσης αύξησε τις απώλειες στο έλαιο δειγμάτων εστέρα. Ο άλλος λόγος είναι ότι ο μεθύλο-εστέρας περιέχει υψηλότερο απόλυτο νερό. Η ύπαρξη νερού στο μεθυλικό εστέρα ενισχύει τον συντελεστή απωλειών.

Οι εστέρες έχουν έναν υψηλότερο παράγοντα διασκεδασμού, το οποίο θα σημαίνει ότι οι τιμές του $\tan\delta$ θα είναι γενικά υψηλότερες για έναν μετασχηματιστή γεμισμένο με εστέρα σε συγκρίσιμες συνθήκες. Για το ορυκτέλαιο, μια υψηλότερη τιμή του $\tan\delta$ δείχνει γενικά τη γήρανση του μετασχηματιστή. Τα αποτελέσματα υψηλότερου συντελεστή απωλειών για ορισμένους από τους φυσικούς εστέρες είναι πιο πιθανό να οφείλονται στο υψηλότερο πολικό περιεχόμενο σε σύγκριση με εκείνη των ορυκτών πετρελαίου.

Ο συντελεστής απωλειών εξαρτάται από τη θερμοκρασία και η αύξηση του με την αύξηση της θερμοκρασίας, οφείλεται στην αύξηση της αγωγιμότητας λόγω της απελευθέρωσης ιόντων και μικρών τεμαχίων της επιφάνειας του υλικού (χαρτί ή μέταλλο). Αύξηση της θερμοκρασίας έχει ως αποτέλεσμα αύξηση του συντελεστή απωλειών άρα και την μονωτική υποβάθμιση του μονωτικού λαδιού.

Ακολουθεί μια δοκιμή γήρανσης διαφορετικών τύπων ελαίου που πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με το πρότυπο IEC 61125 C. Αυτή είναι δοκιμή αναφοράς για να αξιολογήσει ένα νέο ορυκτέλαιο. Συνίσταται στη γήρανση του ελαίου παρουσία ενός καταλύτη χαλκού σε 120°C για 164 ώρες με ένα καθορισμένο ποσοστό ροής οξυγόνου. Αυτές οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν στα νέα έλαια, όπως λαμβάνονται από τον προμηθευτή. Μετρήθηκε ο παράγοντας απωλειών σύμφωνα με τις προδιαγραφές IEC 60247. Το παρακάτω σχήμα δείχνει ότι το $\tan\delta$ του συνθετικού εστέρα αυξάνεται σημαντικά μετά από τη γήρανση σε σύγκριση με το ορυκτέλαιο και μερικά φυτικά έλαια. Ένα φυτικό έλαιο (veg. έλαιο 2) παραμένει κάτω από τα όρια IEC για το ορυκτέλαιο



Σχήμα 4.6 Μεταβολή συντελεστή απωλειών για διάφορα έλαια πριν και μετά τη γήρανση[21]

4.3.3 ΕΙΔΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ

Η ειδική αντίσταση (ρ) είναι το αντίστροφο μέγεθος της ειδικής αγωγιμότητας (σ) όπως φαίνεται από τον παρακάτω τύπο $\rho=1/\sigma$

Μεγάλη ειδική αντίσταση σημαίνει μικρή περιεκτικότητα ελευθέρων ιόντων και σωματιδίων που σχηματίζουν ιόντα, σημαίνει δηλαδή μικρή αγωγιμότητα, που είναι επιθυμητή στα μονωτικά υλικά. Η ειδική αντίσταση του λαδιού ελαττώνεται όταν αυξάνεται η θερμοκρασία του. Επίσης ελαττώνεται όταν μέσα στο λάδι υπάρχουν ξένα σωματίδια και προϊόντα αποσυνθέσεως του λαδιού, που οφείλονται στην οξείδωση του. Σημαντική ελάττωση της ειδικής αντίστασης έχουμε όταν υπάρχει αδιάλυτο νερό στο λάδι έστω και σε μικρές ποσότητες.

Η μέτρηση του μεγέθους αυτού, που πρέπει να είναι $5 \cdot 10^{11} - 5 \cdot 10^{10} \Omega m$, είναι έλα κριτήριο σχετικά με την κατάσταση του λαδιού.

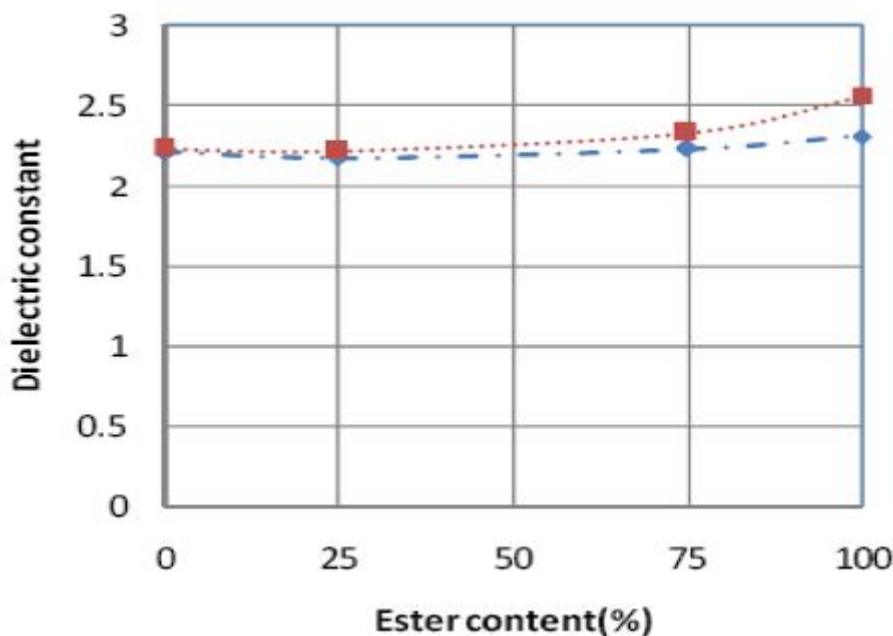
4.3.4 ΣΧΕΤΙΚΗ ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΣΤΑΘΕΡΑ

Η σχετική διηλεκτρική σταθερά $\epsilon_r (>1)$ είναι ένας συντελεστής, η τιμή του οποίου διαφέρει σε κάθε είδος μονωτικού, και εξαρτάται από τη στατικότητα των ανομοιογενειών στο υλικό. Η σχετική διηλεκτρική σταθερά δίνει το πόσο μεγαλύτερη είναι η χωρητικότητα μια διάταξης συγκριτικά με εκείνη στο κενό ή στον αέρα. Είναι ο λόγος της ειδικής αγωγιμότητας του λαδιού προς την ειδική αγωγιμότητα του κενού κάτω από τις ίδιες συνθήκες.

Οι σχετικές διηλεκτρικές σταθερές διαφόρων μονωτικών που συνθέτουν μία μόνωση θα πρέπει να επιλέγονται κατά τρόπο ώστε να εξομαλύνεται το πεδίο στις διαχωριστικές επιφάνειες τους, για να μη διευκολύνεται η εκδήλωση μερικών εκκενώσεων.

Η διηλεκτρική σταθερά επηρεάζεται ελάχιστα από την αύξηση της θερμοκρασίας στα καθαρά λάδια και παρατηρείται αύξηση διηλεκτρικής σταθεράς ελαφρώς με την

περιεκτικότητα σε εστέρα. Ο φυσικός εστέρας περιέχει υψηλότερο ποσοστό σε νερό έναντι του ορυκτελαίου. Εντούτοις, η διαλυτότητα νερού του εστέρα είναι πολύ υψηλότερη από του ορυκτέλαιου. Η διηλεκτρική σταθερά επηρεάζεται πολύ από την απόλυτη απορρόφηση νερού στο υγρό. Επομένως, αυξάνεται με την περιεκτικότητα σε εστέρα.



Σχήμα 4.7 Μεταβολή διηλεκτρικής σταθεράς σε σχέση με το περιεχόμενο σε φυσικό εστέρα[20]

4.3.5 ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ

Η διηλεκτρική αντοχή ενός υγρού είναι δείκτης της μονωτικής του ικανότητας. Μεγάλη τιμή της διηλεκτρικής αντοχής ενός ελαίου εξασφαλίζει καλύτερη μόνωση των υπό τάση στοιχείων που βρίσκονται μέσα σε αυτό. Χαμηλές τιμές είναι αποτέλεσμα υγρασίας ή και ύπαρξης αιωρούμενων σωματιδίων, ινών και αερίων. Η δοκιμή εκτελείται με συσκευή η οποία αυξάνει την τάση βαθμιαία, μέχρις ότου επέλθει διάσπαση του λαδιού. Η τάση στην οποία γίνεται η διάσπαση λέγεται τάση διάσπασης. Επίσης μπορούμε να ορίσουμε σαν διηλεκτρική αντοχή τη μέγιστη τιμή της τάσης που εφαρμόζεται ανάμεσα σε δυο ηλεκτρόδια που είναι μέσα στο λάδι, χωρίς να δημιουργηθεί τόξο. Η διηλεκτρική αντοχή μπορεί να οριστεί διαφορετικά ως η μέγιστη πεδιακή ένταση την οποία μπορεί να υποστεί ένα διηλεκτρικό χωρίς να απολέσει τη μονωτική του ικανότητα, δηλαδή χωρίς να διασπαστεί. Η διηλεκτρική αντοχή γενικά εκφράζεται σε kV για ορισμένο διάκενο.

Οι βασικότεροι παράγοντες που επηρεάζουν την διηλεκτρική αντοχή του λαδιού είναι η υγρασία, παρουσία ξένων σωματιδίων και αερίων, θερμοκρασία, η διάταξη των ηλεκτροδίων, η γήρανση του ελαίου, ποιότητα και τύπος ελαίου, το είδος της εφαρμοζόμενης τάσης, η πίεση.

Η τάση διάσπασης του μονωτικού λαδιού παρουσιάζει μεγάλη διασπορά που γίνεται μεγαλύτερη για τα μικρότερα διάκενα. Η διασπορά αυξάνει επίσης όσο πιο ακάθαρμο είναι το λάδι.

Με την αύξηση της θερμοκρασίας από 0 °C μέχρι 70 °C, η διηλεκτρική αντοχή αυξάνει από 20% μέχρι 100%, πάνω όμως από τους 70 °C μειώνεται απότομα. Το μέγιστο της διηλεκτρικής αντοχής, περί τους 70 °C, γίνεται λιγότερο εμφανές όσο καθαρότερο είναι το λάδι. Σε θερμοκρασία βρασμού, το μονωτικό λάδι αλλά και όλα τα μονωτικά υγρά

παρουσιάζουν πολύ μειωμένη διηλεκτρική αντοχή. Υπό κρουστική τάση η εξάρτηση της διηλεκτρικής αντοχής από 0 °C μέχρι 70 °C δεν υφίσταται. Μόνο πάνω από τους 70 °C μειώνεται η κρουστική διηλεκτρική αντοχή.

Με την αύξηση της πίεσης, η διηλεκτρική αντοχή σε συνεχή και εναλλασσόμενη τάση αυξάνει στην αρχή απότομα και στην συνέχεια λιγότερο. Περισσότερη εξάρτηση από την πίεση δείχνει η διηλεκτρική αντοχή του λαδιού σε εναλλασσόμενη τάση και ακολουθεί σε συνεχή τάση. Υπό κρουστική τάση η εξάρτηση αυτή εξαφανίζεται.

Όσο αφορά την εξάρτηση από την συχνότητα, η διηλεκτρική αντοχή καθαρού λαδιού σε συνεχή τάση, είναι λίγο χαμηλότερη παρά σε εναλλασσόμενη τάση 50 Hz. Με αύξηση της συχνότητας η διηλεκτρική αντοχή αυξάνει ακόμα και για μερικές εκατοντάδες Hz όπου φτάνει ένα μέγιστο. Για πολύ μεγάλες συχνότητες 300 έως 500 kHz, φαίνεται ότι συμβαίνει θερμική διάσπαση γιατί παρατηρείται επίσης αύξηση της γωνίας απωλειών. Γι'αυτές τις συχνότητες η διηλεκτρική αντοχή πέφτει στα 25 έως 30% τις αντοχής σε 50Hz.

Η διηλεκτρική αντοχή εξαρτάται επίσης από τον τρόπο εφαρμογής της τάσεως. Για πολύ ταχεία αύξηση της τάσης προκύπτουν τιμές σημαντικά υψηλότερες παρά για βραδεία εφαρμογή. Με ένα λεπτό όμως εφαρμογής της τάσεως η αντοχή σταθεροποιείται.

Η μείωση της διηλεκτρικής αντοχής είναι σημαντικότερη όταν η παρουσία υγρασίας συνδυάζεται με ορισμένα είδη ευρημάτων πχ. Ίνες βάμβακος. Για μεγάλα σχετικά διάκενα, αιωρήματα άνθρακος δεν είναι τόσο βλαβερά ενώ είναι επικίνδυνα για μικρά διάκενα. Ο άνθρακας επίσης γίνεται επικίνδυνος όταν, υπό την επίδραση του ηλεκτρικού πεδίου, επικάθεται πάνω στις μονωτικές επιφάνειες. Συνδυασμός ιζημάτων οξειδώσεων με υγρασία προκαλούν επίσης σημαντική μείωση της αντοχής.

Ένα άλλο φαινόμενο που μειώνει την ηλεκτρική αντοχή του λαδιού είναι ο σχηματισμός μιας ουσίας με μορφή κεριού που αρχικά είναι άχρωμο αργότερα κίτρινη και τελικά καστανόχρωμη. Η ουσία αυτή σχηματίζεται υπό την επίδραση ισχυρών ηλεκτρικών καταπονήσεων εναλλασσόμενης μορφής με σύγχρονη έκλυση αερίων.

4.4 ΒΑΣΙΚΑ ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΜΟΝΩΤΙΚΩΝ ΕΛΑΙΩΝ

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:

i) ΜΕΓΑΛΗ ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ. Όπως φαίνεται και στον παρακάτω πίνακα , 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.

ii) ΜΕΓΑΛΟ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ. 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.

iii) ΠΡΟΣΤΑΤΕΥΟΥΝ ΤΑ ΣΤΕΡΕΑ ΜΟΝΩΤΙΚΑ 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 υλικό	d (mm)	E _d (kV/cm)
Αέρας		21
λάδι μετασχηματιστών		60...200
Πορσελάνη	0,5...3	340...380
Στεατίτης	0,5...3	200...300
Γυαλί	< 1	160...450
Χαρτόνι	0,5...1,5	300...450
χαρτί στο λάδι	< 2	200...400
σκληρό ελαστικό	< 3	300...500
Ξύλο	< 3	30...50
Glimmer	0,01...0,1	500...1000

Πίνακας 4-2 Σχετική διηλεκτρική σταθερά ορισμένων υλικών στους 20°C [39]

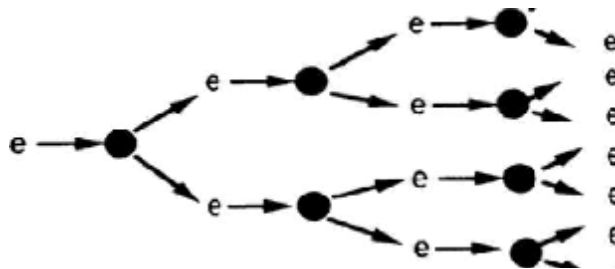
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΔΙΑΣΠΑΣΗ ΜΟΝΩΤΙΚΩΝ ΕΛΑΙΩΝ

Ο μηχανισμός με τον οποίον συμβαίνει η ηλεκτρική διάσπαση του μονωτικού λαδιού δεν είναι τελείως σαφής. Οι δυο επικρατέστερες υποθέσεις είναι η διάσπαση από ιονισμό και η θερμική διάσπαση. Και οι δυο υποθέσεις προϋποθέτουν την ύπαρξη φυσαλίδων αέρος.

5.1 ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ ΔΙΑΣΠΑΣΗ- ΙΟΝΙΣΜΟΣ

Κατά την υπόθεση του ιονισμού, μόλις το ηλεκτρικό πεδίο που μέσα σε μια φυσαλίδα λάβει ορισμένη τιμή, ο αέρας που περιέχει ιονίζεται. Στις παρυφές τις ιονισμένης φυσαλίδας παρουσιάζεται ενίσχυση του ηλεκτρικού πεδίου που έχει σαν συνέπεια τον ιονισμό του λαδιού ο οποίος τελικά εξελίσσεται σε πλήρη διάσπαση.

Ο μηχανισμός ηλεκτρονικής διάσπασης βασίζεται στη δημιουργία ηλεκτρονικών στιβάδων (θεωρία Townsend για τη διάσπαση αερίων). Η βασική ιδέα πίσω από το μηχανισμό είναι ότι ένα ηλεκτρόνιο εκπέμπεται από την κάθοδο εντός του διηλεκτρικού. Αυτό εν συνεχεία επιταχύνεται από το ηλεκτρικό πεδίο με δύο δυνατές εκβάσεις: Είτε συγκρούεται με άλλα μόρια και λόγω της κινητικής του ενέργειας τα ιονίζει προκαλώντας μία κάποιου είδους αλυσιδωτή αντίδραση, είτε συγκρούεται με συνέπεια την απώλεια της κινητικής του ενέργειας αλλά αύξηση της ενέργειας του φαινόμενου πλέγματος των μορίων του διηλεκτρικού. Με τον όρο φαινόμενο πλέγμα εννοείται μια στατική εικόνα των μορίων του ρευστού που εξετάζεται για πολύ μικρό χρονικό διάστημα. Παρ'ότι παρατηρούνται στα αποτελέσματα πειραματικών δοκιμών στα άμορφα στερεά και τα ρευστά αποκλίσεις από τα θεωρητικά αναμενόμενα (σύμφωνα με το συγκεκριμένο μηχανισμό), πολυάριθμες μελέτες, ειδικά σε ανομοιογενή πεδία όπως αυτό που επικρατεί σε ένα διάκενο ακίδας- πλάκας, καταδεικνύουν πως σχεδόν πάντα η διαδικασία της διάσπασης ξεκινά από την κάθοδο, αποκαλύπτοντας έτσι τον καθοριστικό ρόλο των ηλεκτρονικών ιδιοτήτων των διηλεκτρικών μέσων.



Σχήμα 5-1 Μηχανισμός ηλεκτρονικών στιβάδων Townsend [39]

5.2 ΔΙΑΣΠΑΣΗ ΣΕ ΚΟΙΛΟΤΗΤΕΣ-ΘΕΡΜΙΚΗ ΔΙΑΣΠΑΣΗ

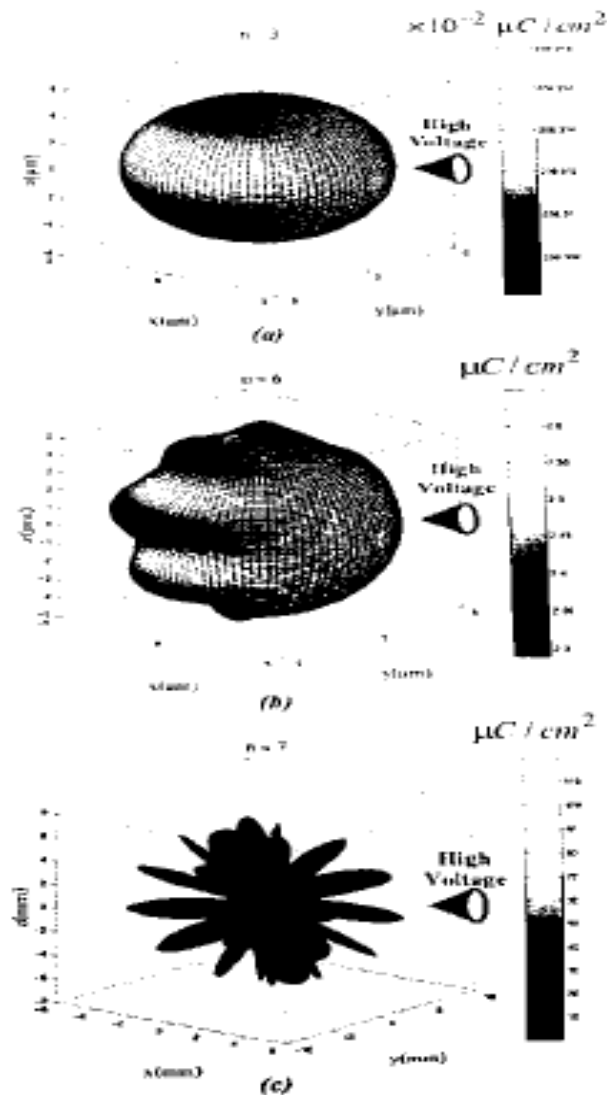
Κατά την υπόθεση της θερμικής διάσπασης, το λάδι που περιβάλλει την ιονισμένη φυσαλίδα θερμαίνεται και όταν φτάσει σε θερμοκρασία βρασμού η φυσαλίδα διογκώνεται, εκτοπίζει το λάδι και έτσι η διάσπαση επέρχεται μέσα από ατμούς λαδιού που έχουν σημαντικά χαμηλότερη διηλεκτρική αντοχή από το ίδιο το λάδι.

Περιοχές χαμηλής πυκνότητας του ρευστού διαμορφώνονται εντός του όγκου του, και με μεγαλύτερη συχνότητα και ποσότητα εμφάνισης στην περιοχή πλησίον των ηλεκτροδίων. Εντός αυτών προφανώς η τιμή της σχετικής διηλεκτρικής σταθεράς ϵ_r μειώνεται με συνέπεια συγκέντρωση των δυναμικών γραμμών του ηλεκτρικού πεδίου και αύξηση της τοπικής

έντασης του ηλεκτρικού πεδίου E . Οι φορείς φορτίου συγκεντρώνουν εκεί μεγάλες ποσότητες ενέργειας σε περιορισμένο χώρο, γεγονός που μπορεί να έχει δύο δυνατές εξελίξεις:

i) ΔΙΕΥΡΥΝΣΗ ΦΥΣΑΛΙΔΑΣ, η οποία μάλιστα επηρεάζεται από παράγοντες όπως η πίεση και η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου παραμορφώνεται με πολύπλοκες δυνατές εκβάσεις

ii) ΑΠΟΤΟΜΗ ΑΥΞΗΣΗΣ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ τοπικά και εξάτμιση του ρευστού. Με την εμφάνιση φυσαλίδων αέριας φάσης οι ανομοιογένειες του ηλεκτρικού πεδίου γίνονται εξαιρετικά έντονες, με συνέπεια την εκδήλωση φαινομένων όπως αγωγοί προεκκένωσης, με δραματική επίπτωση στην τιμή της διηλεκτρικής αντοχής του δοκιμίου .



Σχήμα 5-2 Παραμόρφωση φυσαλίδας υπό ηλ. Πεδίο
 α)διόγκωση β)ταλάντωση γ)κατάρρευση[40]

5.3 ΑΙΩΡΗΜΑΤΑ

Στον μηχανισμό διασπάσεως φαίνεται ότι σημαντικό ρόλο παίζει η παρουσία αιωρημάτων. Τα αιωρήματα αυτά, επειδή συνήθως παρουσιάζουν υψηλότερη διηλεκτρική σταθερά από το λάδι, διατάσσονται κατά τις γραμμές του μέγιστου ηλεκτρικού πεδίου. Έτσι σχηματίζεται μεταξύ των ηλεκτροδίων μια γέφυρα αιωρημάτων με μικρότερη διηλεκτρική αντοχή από το λάδι η οποία συμβάλει στη διάσπαση. Επειδή επίσης τα αιωρήματα αυτά απορροφούν υγρασία που μειώνει περαιτέρω την διηλεκτρική αντοχή, λάδια που περιέχουν αιωρήματα είναι πιο ευαίσθητα στην παρουσία υγρασίας.

Σε ένα εφαρμοζόμενο ηλεκτρικό πεδίο E θα επιφέρει πόλωση στα αιωρούμενα σωματίδια. Εάν το σωματίδιο έχει διηλεκτρική σταθερά ϵ_2 , μεγαλύτερη αυτής του μονωτικού υγρού (η οποία είναι ϵ_1), η δύναμη η οποία θα αναπτυχτεί θα το οδηγήσει στην περιοχή της υψηλότερης έντασης του μαγνητικού πεδίου. Σε ένα σφαιρικό σωματίδιο ακτίνας r , το μέγεθος της αναπτυσσόμενης δύναμης F δίνεται ως

$$F = r^3(\epsilon_2 - \epsilon_1)\Delta E^2 / 2(2\epsilon_1 + \epsilon_2)$$

Εάν το σωματίδιο περιέχει υγρασία, τότε εξαιτίας της μεγάλης διηλεκτρικής σταθεράς του υγρού η F παίρνει μεγαλύτερες τιμές (για τον λόγο αυτό πρέπει να απουσιάζει στα μονωτικά υγρά κάθε ίχνος υγρασίας). Τα σωματίδια τείνουν να έλκονται σε περιοχές όπου το πεδίο είναι υψηλό και να σχηματίζουν γέφυρες ή αλλιώς αλυσίδες από το ένα ηλεκτρόδιο στο άλλο. Αυτές οι γέφυρες είναι περισσότερο αγώγιμες από το περιβάλλον υγρό. Ροή ρεύματος θα υπάρξει μέσα από τις γέφυρες, θα ακολουθήσει η αύξηση θερμοκρασίας, με αποτέλεσμα την ηλεκτρική διάσπαση. Η παρεμπόδιση σχηματισμού γεφυρών επιτυγχάνεται με την περιστροφή των ηλεκτροδίων ή με υποχρεωτική ροή του υγρού.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΓΗΡΑΝΣΗ ΜΟΝΩΣΕΩΝ

Για να προσεγγίσουμε την γήρανση μιας μόνωσης πρέπει να έχουμε υπόψη μας το σχεδιασμό της, το υλικό της από το οποίο συνίσταται καθώς επίσης και τον τρόπο, την μέθοδο παραγωγής της, τις συνθήκες λειτουργίας της μόνωσης, δηλαδή το περιβάλλον στο οποίο η μόνωση λειτουργεί και οι παράγοντες όπου το επηρεάζουν.

Είναι διάφοροι παράγοντες οι οποίοι επιδρούν στην μόνωση ξεχωριστά για το λόγο αυτό είναι δύσκολη η πρόβλεψη της διαρκούς ζωής της, χρειάζεται γνώση της ταυτόχρονης επίδρασης των παραγόντων αυτών πάνω στο μονωτικό υλικό. Έχει αποδειχτεί ότι εάν μια μόνωση υποβληθεί διαδοχικά σε ηλεκτρικό πεδίο και κατόπιν σε θερμική καταπόνηση, η συνολική καταπόνηση δεν θα είναι η ίδια με την καταπόνηση που προκύπτει εάν η μόνωση υποβληθεί ταυτόχρονα σε ηλεκτρικό πεδίο και θερμική καταπόνηση. Η πρόβλεψη της διάρκειας ζωής των μόνωσεων υπό ταυτόχρονη επίδραση περισσότερο του ενός παραγόντων είναι από τα ποιο δύσκολα προβλήματα γι' αυτό το λόγο χρησιμοποιούνται μαθηματικές εκφράσεις όπου είναι εμπειρικές εξισώσεις οι οποίες έχουν επαληθευτεί.

6.1 ΑΙΤΙΑ ΓΗΡΑΝΣΗΣ

Η μακροχρόνια μελέτη των μετασχηματιστών και οι δοκιμές ελέγχου έχουν αναδείξει τους εξής τρεις βασικούς παράγοντες που οδηγούν στην υποβάθμιση της μόνωσης και γενικότερα των υλικών. Είναι η θερμοκρασία, η υγρασία και το οξυγόνο. Η επίδραση τους στη λειτουργία του μετασχηματιστή είναι σημαντική, για αυτό και συχνά οι επιτρεπόμενες τιμές τους καθορίζονται με ακρίβεια για την εκτέλεση δοκιμών. Οι συνέπειες των τριών παραμέτρων είναι διαφορετικές για τα επί μέρους τμήματα του συστήματος μόνωσης (χαρτί και μονωτικό λάδι), για αυτό το λόγο και εξετάζονται χωριστά. Πρέπει να σημειωθεί ότι η χρήση των φυτικών ελαίων επιβραδύνει το ρυθμό γήρανσης του μονωτικού χαρτιού σε σχέση με τη χρήση ορυκτελαίων, ενώ συγχρόνως τα φυτικά έλαια έχουν μεγαλύτερη διάρκεια ζωής.

6.1.1 ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ

i) ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΣΤΟ ΧΑΡΤΙ: Το χαρτί παρουσιάζει αστάθεια στη θερμοκρασία. Το θερμικός αναβαθμισμένο χαρτί επηρεάζεται λιγότερο από τη θερμοκρασία σε σχέση με το χαρτί kraft αλλά και αυτό όταν εκτεθεί σε υψηλές θερμοκρασίες υποβαθμίζεται. Ισχύει ο νόμος μείωσης της ζωής του στο 50%, όταν η θερμοκρασία λειτουργίας αυξηθεί κατά 6-8°C.

ii) ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΣΤΟ ΛΑΔΙ: Ένας περιορισμός που τίθεται στη χρησιμοποίηση μονωτικών λαδιών είναι η μέγιστη επιτρεπτή θερμοκρασία λειτουργίας τους. Ο περιορισμός αυτός τίθεται, αφ' ενός μεν γιατί η υψηλή θερμοκρασία συντελεί στην ταχεία αποσύνθεση των λαδιών και αφ' ετέρου, επειδή σε σχετικά υψηλές θερμοκρασίες υπάρχει κίνδυνος δημιουργίας εκρηκτικών ατμών και τελικά αναφλέξεως.

6.1.2 ΥΓΡΑΣΙΑ

i) ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΣΤΟ ΧΑΡΤΙ: Το θερμικός αναβαθμισμένο χαρτί επηρεάζεται λιγότερο από την υγρασία σε σχέση με το χαρτί kraft. Σε κάθε περίπτωση η επίδραση του νερού στο χαρτί είναι σημαντική και ανάλογη με την περιεχόμενη ποσότητα. Με μείωση στο 50% της περιεχόμενης υγρασίας διπλασιάζεται η διάρκεια ζωής του χαρτιού.

ii) ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΣΤΟ ΛΑΔΙ: Το λάδι επηρεάζεται λίγο από την περιεχόμενη υγρασία. Το μόριο του νερού περιέχει οξυγόνο που επιταχύνει τη γήρανση του λαδιού. Ωστόσο, η ποσότητα του οξυγόνου δεν είναι σημαντική συγκριτικά με άλλες πηγές οξυγόνου. Παρακάτω εξηγείται αναλυτικά η διαφορετική επίδραση που ασκεί η υγρασία σε συστήματα μόνωσης με φυτικό και με ορυκτό λάδι.

6.1.3 ΟΞΥΓΟΝΟ

i) ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΣΤΟ ΧΑΡΤΙ: Το χαρτί επηρεάζεται από τη παρουσία του οξυγόνου. Το αναβαθμισμένο χαρτί επηρεάζεται λιγότερο από το χαρτί kraft. Η επίδραση του οξυγόνου καθορίζεται από την ποσότητά του.

ii) ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΣΤΟ ΛΑΔΙ: Το λάδι επηρεάζεται σημαντικά από την παρουσία οξυγόνου, ειδικά όταν η θερμοκρασία είναι υψηλή. Ο ρυθμός παραγωγής προϊόντων οξείδωσης είναι ανάλογος προς το περιεχόμενο οξυγόνο. Το λάδι του μετασχηματιστή μπορεί να παραμείνει σταθερό επί χρόνια με θερμοκρασία λειτουργίας της τάξης των 120°C, εφόσον δεν υπάρχει οξυγόνο. Με τη διείσδυση οξυγόνου, το λάδι γηράσκει γρήγορα και είναι δυνατόν να υποβαθμιστεί σε ώρες ή και ημέρες.

6.2 ΓΗΡΑΝΣΗ ΧΑΡΤΙΟΥ-ΕΛΑΙΟΥ

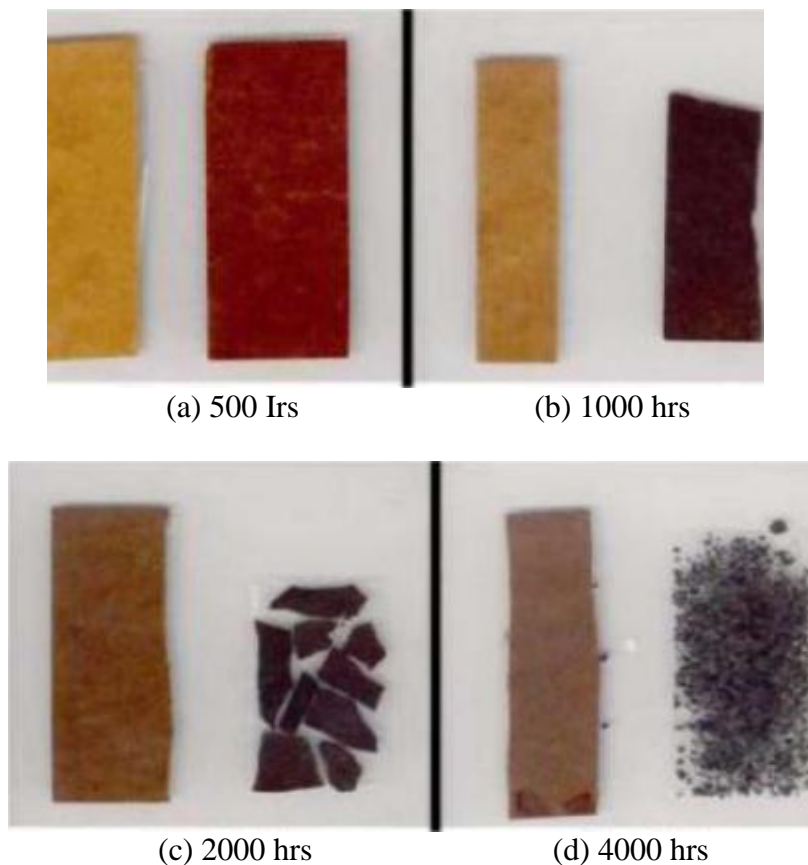
Παραθέτουμε τα αποτελέσματα ενός πειράματος που πραγματοποιήθηκε προκειμένου να διαπιστωθεί εάν οι φυσικοί εστέρες παρουσιάζουν επαρκή σταθερότητα στο διάστημα της ζωής ενός μετασχηματιστή αλλά και για να μελετηθούν οι μηχανισμοί αλληλεπίδρασης χαρτιού - φυτικού ελαίου σε σχέση με το ορυκτέλαιο.

Ερμητικά κλειστοί δοκιμαστικοί σωλήνες από χάλυβα, που περιείχαν 24,8 g μονωτικό χαρτί σε σχετική υγρασία 0,76% κατά βάρος, χαλκό, αλουμίνιο και 350 ml λάδι, θερμάνθηκαν σε θερμοκρασία 150 °C για 500, 1000, 2000 και 4000 ώρες. Η θερμική αποσύνθεση του χαρτιού μετρήθηκε με τη βοήθεια των κριτηρίων της παραμένουσας επιφανειακής τάσης, του βαθμού πολυμερισμού και της παρουσίας Φουρανίων στο έλαιο. Συγκρίθηκαν τα ποσοστά υγρασίας στο χαρτί και στα έλαια.

Το χαρτί που εμβαπτίστηκε σε ορυκτέλαιο έφτασε στο τέλος της ζωής του μέσα στις πρώτες 1000 ώρες του πειράματος. Αντίθετα, το χαρτί που εμβαπτίστηκε σε φυτικό έλαιο δεν έφτασε στο τέλος της ζωής του ακόμα και μετά από 4000 ώρες γήρανσης. Ο μειωμένος ρυθμός γήρανσης του χαρτιού στο φυτικό έλαιο, αποδίδεται στο ότι το φυτικό έλαιο διατήρησε το χαρτί σε εξαιρετικά στεγνή κατάσταση.

Μετά από 1000 ώρες γήρανσης, το χαρτί που εμβαπτίστηκε σε ορυκτέλαιο είχε σκούρο καφετί χρώμα και ήταν πολύ εύθραυστο. Το χαρτί που εμβαπτίστηκε σε φυτικό έλαιο ήταν ελαφρώς χρωματισμένο. Μετά από 2000 και 4000 ώρες γήρανσης τα χαρτιά που εμβαπτίστηκαν σε ορυκτέλαιο έγιναν πολύ εύθραυστα και δύσκολα στη χρήση, σε αντίθεση με τα χαρτιά που εμβαπτίστηκαν σε φυτικό έλαιο.

Οι αλλαγές στην εμφάνιση και το χρώμα των τελευταίων, συμφωνούν απολύτως με τις μετρούμενες αλλαγές στην παραμένουσα επιφανειακή τάση τους και τον βαθμό πολυμερισμού.



Εικόνα 6-1 Τα χαρτιά στα αριστερά των φωτογραφιών εμβαπτίστηκαν σε φυτικό έλαιο, ενώ τα χαρτιά στα δεξιά των φωτογραφιών εμβαπτίστηκαν σε ορυκτό έλαιο[34]

i) **ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗ ΤΑΣΗ:** Η επιφανειακή τάση παρουσίασε αρχικά μία σημαντική μείωση και στο χαρτί που εμβαπτίστηκε σε φυτικό έλαιο αλλά και στο χαρτί που εμβαπτίστηκε σε ορυκτέλαιο. Η μεγαλύτερη τιμή στο ρυθμό μείωσης της επιφανειακής τάσης σημειώθηκε στις πρώτες 500 ώρες γήρανσης. Ο ρυθμός αυτός μειώθηκε σημαντικά μετά τις 1000 ώρες. Η παραμένουσα επιφανειακή τάση του χαρτιού που εμβαπτίστηκε σε ορυκτέλαιο, έπεσε κάτω από το 50% μέσα σε 500 ώρες, ενώ βρέθηκε κάτω από το 20% στο τέλος 1000 ωρών γήρανσης. Τα αποτελέσματα αυτά συμφωνούν με αντίστοιχες έρευνες που έχουν δημοσιευτεί στο παρελθόν. Αντίθετα με το χαρτί που εμβαπτίστηκε σε φυτικό έλαιο, η παραμένουσα επιφανειακή τάση δεν έπεσε κάτω από το 50% ακόμα και μετά το τέλος του πειράματος διάρκειας 4000 ωρών.

ii) **ΒΑΘΜΟΣ ΠΟΛΥΜΕΡΙΣΜΟΥ:** Ένα δεύτερο κριτήριο μέτρησης της θερμικής αποσύνθεσης του χαρτιού είναι ο βαθμός πολυμερισμού. Η μεταβολή στο βαθμό πολυμερισμού, και στα δύο δείγματα, ακολούθησε πορεία παρόμοια με αυτή της επιφανειακής τάσης. Το χαρτί που εμβαπτίστηκε σε ορυκτέλαιο έφτασε σε βαθμό πολυμερισμού κάτω του 200, λίγο μετά τις πρώτες 500 ώρες γήρανσης, αποτέλεσμα που συμφωνεί με αντίστοιχες έρευνες που έχουν δημοσιευτεί στο παρελθόν. Αντίθετα για το χαρτί που εμβαπτίστηκε σε φυτικό έλαιο η τιμή αυτή δεν έπεσε κάτω του 200 ακόμα και μετά από 4000 ώρες γήρανσης.

iii) **ΦΟΥΡΑΝΙΑ:** Η περιεκτικότητα του διηλεκτρικού σε φουράνια χρησιμοποιείται προκειμένου να εκτιμηθεί η κατάσταση του μονωτικού χαρτιού σε μετασχηματιστές εν

χρήσει. Όπως φαίνεται και στον πίνακα μετά από 4000 ώρες γήρανσης η περιεκτικότητα σε φουράνια στο ορυκτέλαιο είναι 10 φορές μεγαλύτερη από την αντίστοιχη περιεκτικότητα στο φυτικό έλαιο.

iii) ΠΕΡΙΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ ΣΕ ΝΕΡΟ: Η περιεκτικότητα σε νερό του χαρτιού στο ορυκτέλαιο αυξήθηκε σημαντικά κατά τη διάρκεια του πειράματος. Αντίθετα, η περιεκτικότητα σε νερό του χαρτιού που εμβαπτίστηκε στο φυτικό έλαιο μειώθηκε. Μετά από τις 4000 ώρες γήρανσης, η διαφορά ήταν συντριπτική, το ποσοστό του νερού στο χαρτί σε ορυκτέλαιο ήταν 3,36%, ενώ η αντίστοιχη τιμή για το χαρτί στο φυτικό έλαιο ήταν 0,05%. Αντίστοιχη τάση παρουσίασε και το ποσοστό του νερού στο ίδιο το ορυκτέλαιο και στο φυτικό λάδι. Η σχετική υγρασία του ορυκτέλαιου μετά από τις 4000 ώρες ήταν 75% ενώ του φυτικού ελαίου μόλις 2%.

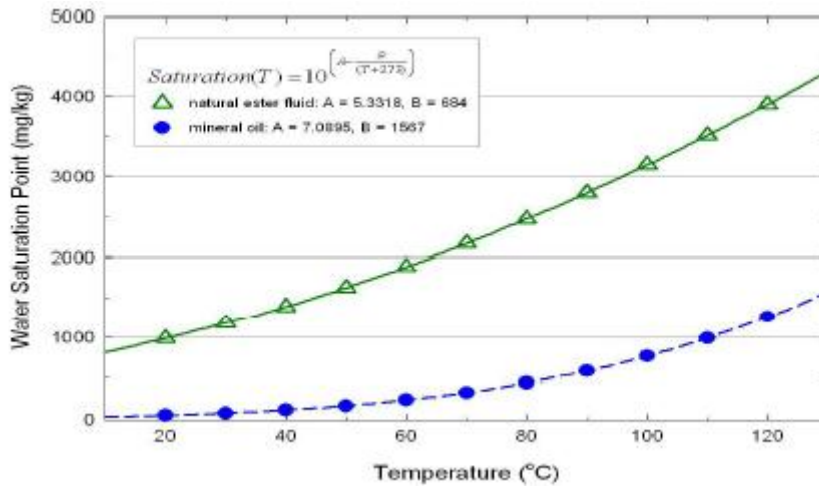
Χρόνος (Ωρες)	0	500	1000	2000	4000
Κατά βάρος ποσοστό νερού στο χαρτί [wt%]					
ορυκτέλαιο	0,76	0,67	2,44	3,39	3,36
φυτικό έλαιο	0,77	0,27	0,21	0,04	0,05
Ποσοστό νερού στο έλαιο [% saturation @ 20^UC {ntg/kg}]					
ορυκτέλαιο	2(1)	30 (18)	58 (35)	61 (36)	75(45)
φυτικό έλαιο	2(24)	9(89)	11(116)	2(21)	2(25)
Επιφανειακή τάση του χαρτιού [MPa]					
ορυκτέλαιο	119	53,2	21,9	17,8	6,9
φυτικό έλαιο	121	80,8	74,9	63,6	69,8
Βαθμός πολυμερισμού του χαρτιού					
ορυκτέλαιο	1119	217	110	75	12
φυτικό έλαιο	1225	380	320	306	274
Φουράνια [mg/1/kg]					
ορυκτέλαιο	nd	1055	1462	670	602
φυτικό έλαιο	nd	191	234	151	62

Πίνακας 6-1 Αποτελέσματα πειράματος γήρανσης[34]

Ένα προϊόν της αποδόμησης του χαρτιού είναι το νερό, το οποίο χρησιμεύει για την επιτάχυνση της γήρανσης του ίδιου του χαρτιού. Η βραδύτερη υποβάθμιση του χαρτιού στο υγρό φυσικού εστέρα εξηγείται από μια σειρά μηχανισμών, που αρχίζει με το υδατικό ισοζύγιο. Οι φυσικοί εστέρες μπορεί να διαλύσουν πολύ περισσότερο νερό από ότι το ορυκτέλαιο, αφού έχουν πολύ υψηλότερο σημείο κορεσμού για μια δεδομένη θερμοκρασία και είναι περισσότερο υδρόφιλοι. Για να επιτευχθεί ισορροπία, χρειάζεται μια μεγαλύτερη ποσότητα νερού στο υγρό φυσικού εστέρα σε σχέση με το ορυκτέλαιο. Αυτό μειώνει το νερό στο χαρτί, με αποτέλεσμα τη μείωση της γήρανσης λόγω του νερού. Αυτή η μετατόπιση της ισορροπίας αποτελεί τον κύριο συντελεστή στο μειωμένο συντελεστή γήρανσης και στο μειωμένο ρυθμό αποσύνθεσης του χαρτιού. Μόλις διαλυθεί στον εστέρα, το νερό μπορεί να υδρολύει τον εστέρα για να διαμορφώσει ελεύθερα λιπαρά οξέα. Αυτά τα λιπαρά οξέα μπορούν στη συνέχεια να αντιδράσουν με τα μόρια του χαρτιού σε μια χημική αντίδραση που ονομάζεται «trans-εστεροποίηση», και να ενεργούν για να παρέχουν ένα μικρό ποσό επιπλέον προστασίας της κυτταρίνης από την υδρολυτική επίθεση. Η αντίδραση δημιουργεί αλυσίδες

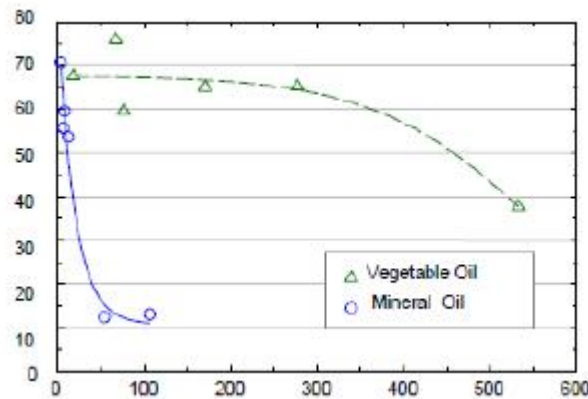
μορίων λιγότερο ευάλωτες στην θερμική αποσύνθεση λόγω υδρόλυσης. Το σωρευτικό αποτέλεσμα είναι να επιβραδύνει τον ρυθμό της γήρανσης του χαρτιού.

Η διαφορά στα ποσοστά γήρανσης μεταφράζεται σε 21°C υψηλότερη επιτρεπόμενη θερμοκρασία λειτουργίας για το φυσικό εστέρα / θερμικά αναβαθμισμένο σύστημα χαρτιού Kraft. Χρησιμοποιώντας τον IEEE πρότυπο οδηγό, η μόνωση θα έχει την ίδια διάρκεια ζωής σε μια άνοδο της θερμοκρασίας του σημείου hot spot των 86 ° C σε φυσικό εστέρα, όπως και σε μια άνοδο της θερμοκρασίας του σημείου hot spot των 65 ° C σε ορυκτέλαιο.



Σχήμα 6-1 Καμπύλες κορεσμού για ορυκτέλαιο και φυτικό έλαιο[34]

Πρέπει επίσης να τονιστεί στο σημείο αυτό το εξής: Είναι γνωστό ότι η σχετική υγρασία αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για την διηλεκτρική αντοχή του ελαίου. Τόσο για τα ορυκτέλαια, όσο και για τα φυτικά έλαια, η διηλεκτρική αντοχή μειώνεται σημαντικά, όταν το ποσοστό σχετικής υγρασίας τους ξεπερνά το 50% περίπου. Η διαφορά ανάμεσα στα δύο έλαια είναι ότι σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, 50% υγρασία στο ορυκτέλαιο μεταφράζεται κατ' απόλυτο τιμή σε περίπου 30 mg/kg ενώ στα φυτικά έλαια η ίδια τιμή είναι περίπου 550 mg/kg. Δηλαδή περίπου 20 φορές μεγαλύτερη. Το σχήμα 6-2 παρουσιάζει τη σχέση της διηλεκτρικής αντοχής ορυκτέλαιου και φυτικού ελαίου με την υγρασία.



Σχήμα 6-2 Διηλεκτρική αντοχή kV σε σχέση με την υγρασία (ppm)[40]

Η ποιότητα του ελαίου έχει επιπτώσεις άμεσα στις συνθήκες της μόνωσης κυτταρίνης και καθώς η υγρασία και το όξινο περιεχόμενο έχει επιπτώσεις στο ποσοστό υποβάθμισης της κυτταρίνης. Οι φυσικοί εστέρες μπορούν να επεκτείνουν την ζωή ενός μετασχηματιστή με την προστασία της μόνωσης κυτταρίνης . Υποτίθεται ότι οι φυσικοί εστέρες μειώνουν το ποσοστό της κυτταρίνης που γερνά με την αφαίρεση του νερού από την κυτταρίνη και της πραότητας των ενώσεων που δημιουργούνται κατά τη διάρκεια της γήρανσης του ελαίου. Οξέα που δημιουργούνται κατά τη διάρκεια της οξείδωσης του ελαίου έχουν επιπτώσεις στο ποσοστό υποβάθμισης της κυτταρίνης. Τα οξέα που διαμορφώνονται στο ορυκτέλαιο είναι καταστρεπτικά, ενώ τα οξέα που παράγονται από τους εστέρες είναι ευεργετικά. Αυτό οφείλεται στις διαφορές στις χημικές δομές των οξέων που διαμορφώνονται από τους εστέρες και από το ορυκτέλαιο.

Καταλήγουμε επομένως στο συμπέρασμα ότι η χρήση των φυτικών ελαίων επιβραδύνει το ρυθμό γήρανσης του μονωτικού χαρτιού, προστατεύοντας το από τη θερμική αποσύνθεση. Δεδομένου ότι η υπερφόρτωση ενός μετασχηματιστή έχει συνέπειες πρώτα απ' όλα στη ζωή του μονωτικού χαρτιού, υποστηρίζεται από τα πειραματικά δεδομένα ότι η χρήση των φυτικών ελαίων καθιστά δυνατή τη λειτουργία του μετασχηματιστή σε συνθήκες υπερφορτίσεως χωρίς συνέπειες στο προσδόκιμο της ζωής του. Εναλλακτικά βέβαια και στην περίπτωση που δεν τίθεται ζήτημα υπερφορτίσεως, ο μετασχηματιστής φυτικού ελαίου προβλέπεται να έχει τουλάχιστον την διπλάσια ζωή από ότι ένας μετασχηματιστής συμβατικού ορυκτέλαιου.

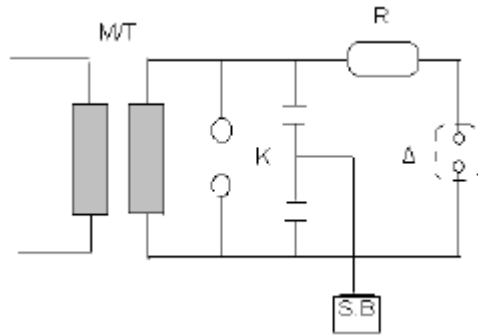
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

7.1 ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΕΝΤΑ ΟΡΓΑΝΑ

Για την παραγωγή αλλά και τη μέτρηση της τάσης χρησιμοποιήθηκε το μηχάνημα BAUR Oil Tester DTA822-129-1 (Εικόνα), που αποτελεί μέρος του ηλεκτρομηχανικού εξοπλισμού του εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων. Πρόκειται για μια συσκευή που περιέχει μια γεννήτρια εναλλασσόμενης τάσης, ένα δοχείο που δέχεται το υγρό και ένα ζεύγος ηλεκτροδίων.



Εικόνα 7-1 : Το BAUR Oil Tester DTA 822-129-1.[34]



Σχήμα 7-2: Ισοδύναμο κύκλωμα πειραματικής διάταξης [40]

- όπου M/T: Μετασχηματιστής υψηλής τάσης
R: Αντίσταση
Δ : Δοκίμιο
K : Καταμεριστής
S.B. : Όργανο μέτρησης

Το μηχάνημα BAUR Oil Tester DTA 822-129-1, εκτός της μεγάλης ευκολίας χρήσης που παρέχει, έχει και ορισμένες άλλες πολύ χρήσιμες δυνατότητες. Συγκεκριμένα έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

- Έχει μικρό όγκο και επιτρέπει εύκολο χειρισμό
- Παράγει τάσεις 0 - 100 kV rms 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
- Εύκολη στη χρήση διεπαφή χρήστη
- 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 λαμβανόμενων 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)

Πίνακας 7.1: Τεχνικά χαρακτηριστικά της συσκευής BAUR Oil tester DTA 822-129-1 [34]

Τροφοδοσία	85 V ... 264 V (47 Hz ... 63 Hz)
Κατανάλωση ισχύος	Max. 70 VA
Τάση εξόδου για δοκιμές ελαίων	0 ... 100 kV eff συμμετρική
Χρήση για διηλεκτρικά ρευστά με χαρακτηριστικά :	Συντελεστής απωλειών $\delta < 4.5$ ή ειδική αντίσταση $\rho > 30 \text{ M}\Omega\text{m}$
Ρυθμός αύξησης τάσης	0.5 ... 10 kV/s
Χρόνος διακοπής μετά την εκκένωση	$< 10 \text{ ks}$
Έλεγχος τάσης	Πραγματικός έλεγχος διάσπασης

Μέτρηση θερμοκρασίας δοκιμίου	0 ... 99 °C
Ελάχιστη υποδιαίρεση θερμοκρασίας	1 °C
Οθόνη	LCD έγχρωμη οθόνη (320 χ 240)
Ακρίβεια μέτρησης τάσης	0 ... 100 kV ± 1 kV
Ελάχιστη υποδιαίρεση τάσης	0.1 kV
Γλώσσες μενού	Γερμανικά, Αγγλικά, Γαλλικά, Ισπανικά, Ιταλικά, Πορτογαλικά, Ρωσικά, Κινεζικά
Προγραμματισμένα εκ των πρότερων πρότυπα	ASTMD1816041 mm, ASTMD1816042 mm, ASTMD877/2002 PA, ASTMD877/2002 PB, BSEN60156, CEIEN60156, CSSRRVHP/85, IEC60156/199505, IRAM2341/72, JISC2101/1999, PN77/E04408, PASEVEN60156, UNEEN60156, NFEN60156, SABSEN60156, VDE0370Part5/96, AS1767.2.1, single measurement
Προγραμματισμένες ακολουθίες δοκιμής	10
Συνδεση με Η/Υ	USB 2.0
Εκτυπωτής	Ακίδων, 24 χαρακτήρων, 57 mm , απλό χαρτί
Θερμοκρασία λειτουργίας	-10 ...55 °C
Θερμοκρασία αποθήκευσης	-20 ... 60 °C
Σχετική υγρασία	Δεν συμπυκνώνεται
Διαστάσεις (W χ H χ D)	545 χ 458 χ 380 mm (κλειστό) 545 χ 770 χ 461 mm (ανοιχτό)
Βάρος	39 kg
Κατηγορία προστασίας	IP 32
Σχεδιασμένο και κατασκευασμένο σύμφωνα με τα πρότυπα	IEC 61010-1 , EN 61010-1, VDE0411 Part 1

Το μηχάνημα BAUR Oil Tester DTA 822-129-1 χωρίζεται σε δύο επιμέρους κομμάτια. Το πρώτο κομμάτι αποτελείται από τη διάταξη που πραγματοποιεί την διάσπαση, όπως στο μετασχηματιστή, τα ηλεκτρόδια, την κυψέλη ελαίου και κάθε άλλη διάταξη που συντελεί στην ολοκλήρωση της διάσπασης. Η τάση διάσπασης είναι η τιμή στην οποία φτάνει η τάση τη στιγμή που το πρώτο τόξο σαρώνει το διάστημα μεταξύ των ηλεκτροδίων. Το ρεύμα κυκλοφορεί αυτόματα αν συμβεί ένα πλήρες τόξο. Οι σπινθηρισμοί που δεν καταλήγουν σε τόξο αγνοούνται. Αν η διάσπαση δεν έχει πραγματοποιηθεί μέχρι τα 100 kV η συσκευή διαθέτει αυτόματο διακόπτη που διακόπτει την παροχή τάσης, μιας και τάσεις πέραν αυτής της τιμής είναι εκτός του πεδίου έρευνάς μας αφού προσδίδει «τέλεια» μονωτική συμπεριφορά στο ρευστό.

ι) Ηλεκτρόδια: Μπορούν να χρησιμοποιηθούν ηλεκτρόδια από ορείχαλκο ή απλά επικαλυμμένα από ορείχαλκο, από ανοξείδωτο ατσάλι με πολύ καλά λειασμένη την επιφάνειά τους. 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. Οι επιφάνειες των ηλεκτροδίων πρέπει να είναι λείες, καθαρές και στεγνές και να μην είναι στιλβωμένες. Όταν παρατηρηθεί κάποια επιφανειακή φθορά των ηλεκτροδίων, γίνει η επιφάνεια τους τραχιά ή εμφανίσουν κρατήρες κατά τη

χρήση, τότε αυτά πρέπει να αντικαθίστανται άμεσα. Η απόσταση των ηλεκτροδίων από την ελεύθερη επιφάνεια του υγρού πρέπει να είναι τουλάχιστον 40mm.

ii)Κυψέλη:Η κυψέλη δοκιμής είναι φτιαγμένη από γυαλί με χωρητικότητα περίπου 500 ml και σκεπάζεται με γυάλινο καπάκι. Μέσα στην κυψέλη τοποθετούμε επίσης τον stirrer ο οποίος ανακατεύει το έλαιο συνεχώς κατά τη διάρκεια των μετρήσεων με τη βοήθεια ενός μαγνήτη που είναι ενσωματωμένος στη συσκευή, κάτω από την κυψέλη.



Εικόνα7-2 :Η απαιτούμενη η συνεχής ανάδευση επιτυγχάνεται με ένα κινητό μαγνητάκι (stirrer) που τοποθετείται στον πάτο της κυψέλης και περιστρέφεται μέσω ειδικής διάταξης μαγνητών στο εσωτερικό του BAUR. [34]

Για να λειτουργήσει το μηχάνημα πρέπει να κλείσουμε το κατάλληλο καπάκι, διαφορετικά η οθόνη μας δείχνει την ένδειξη cover open και δεν γίνεται να ξεκινήσει η διαδικασία των μετρήσεων. (Εικόνες 7-3,7-4)



Εικόνα 7-3 :Με ανοιχτό καπάκι γίνεται η ρύθμιση των χαρακτηριστικών κάθε μέτρησης. [34]



Εικόνα 7-4 : Μόνο όταν κλείσει το καπάκι μπορεί να εκκινήσει η διαδικασία των μετρήσεων[34]

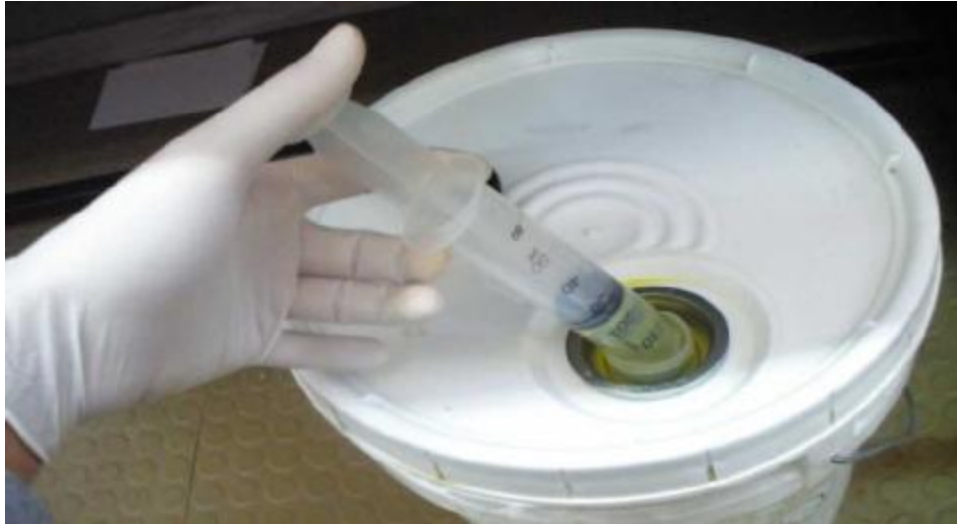
Το δεύτερο κομμάτι αποτελείται από τη διάταξη που αφορά την μέτρηση και παρουσίαση της τάσης διάσπασης καθώς και το σύνολο των ρυθμίσεων του μηχανήματος. Πρόκειται, λοιπόν, για το κύκλωμα που μεσολαβεί μεταξύ του παρατηρητή και του κυκλώματος της διάσπασης, και εκτός της μέτρησης έχει ως στόχο την προστασία του παρατηρητή από την αναπτυσσόμενη υψηλή τάση κατά τη διάσπαση. Αυτό το δεύτερο μέρος, είναι το «συρτάρι» που εμπεριέχει την οθόνη, τον εκτυπωτή και τα κουμπιά χειρισμού του μηχανήματος

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 κάτωθεν:

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

7.2 ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΚΥΨΕΛΗΣ

Ανοίγουμε το καπάκι της συσκευής και αφαιρούμε την γυάλινη κυψέλη από της συσκευή. Στη συνέχεια με τη χρήση γαντιών από latex ανοίγουμε το δοχείο που εμπεριέχει το λάδι, που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί στη δοκιμή μας και γίνεται εξαγωγή του λαδιού χρησιμοποιώντας μια αποστειρωμένη σύριγγα. Γάντια οικιακής χρήσης από latex χρησιμοποιήθηκαν κατά το χειρισμό του λαδιού, όχι μόνο ως μέσο προστασίας του χρήστη, αλλά ώστε να μην έρχεται το λάδι σε επαφή με σωματίδια που μπορεί να είναι συγκεντρωμένα στα χέρια (Εικόνα 75).



Εικόνα 7-5 :Άντληση του ελαίου με χρήση σύριγγας από το δοχείο αποθήκευσης του. Η χρήση προστατευτικών γαντιών θεωρείται επιβεβλημένη[34]

Το μονωτικό έλαιο φυλασσόταν εντός ενός κλειστού δοχείου, το οποίο ανοιγόταν μόνο για να εξαχθεί η ποσότητα που ήταν απαραίτητη για την εκτέλεση της εκάστοτε δοκιμής και αμέσως επανασφραγιζόταν. Αυτό μας προφύλασσε από τις αρνητικές επιπτώσεις της επαφής του ελαίου με τα ελεύθερο ατμοσφαιρικό αέρα, μειώνοντας έτσι τη συγκέντρωση υγρασίας εντός του. Επίσης μειωμένη κατ' αυτόν τον τρόπο ήταν και η ένταση της οξείδωσής του. Αρχικά λοιπόν τοποθετούμε στην κυψέλη μικρή ποσότητα λαδιού ώστε να ξεπλυθεί αυτή και τα ηλεκτρόδια (να απομακρυνθούν σωματίδια τα οποία μπορεί να έχουν προηγουμένως προσκολληθεί στα τοιχώματα της) και το λάδι αυτό πετάγεται.

7.3 ΓΕΜΙΣΜΑ ΚΥΨΕΛΗΣ

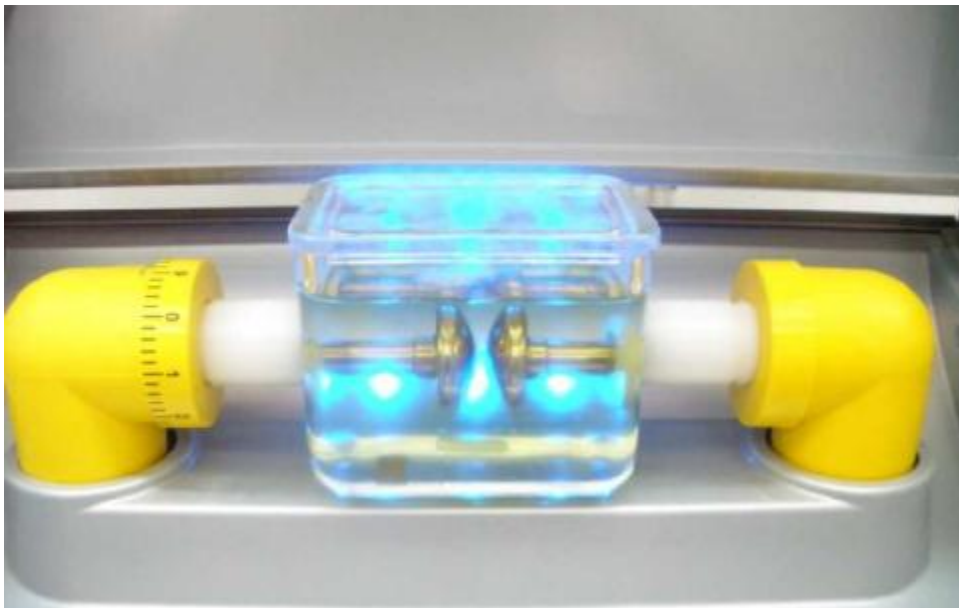
Κατόπιν το δοχείο της κυψέλης ξαναγεμίζεται με νέο λάδι. Προσέχουμε να χύνεται το λάδι αργά και σταθερά ώστε να μην σχηματιστούν φυσαλίδες αέρα. Γεμίζουμε την κυψέλη με έλαιο μέχρι η στάθμη του ελαίου να απέχει ένα περίπου εκατοστό από την υπερχειλίση (Εικόνα 7-6) και την τοποθετούμε ξανά στη συσκευή BAUR Oil Tester DTA 822-129-1 (Εικόνα 7-8). Αμέσως μετά, σφραγίζουμε το δοχείο που εμπεριέχει το λάδι που χρησιμοποιείται στις δοκιμές με κατάλληλο καπάκι ώστε να περιορίσουμε κατά το δυνατόν την αντίδραση του ελαίου με τον ατμοσφαιρικό αέρα.



Εικόνα 7-6[34]



Εικόνα 7-7 :Γέμισμα της κυψέλης με έλαιο, εισαγωγή του stirrer και σφράγιση της κυψέλης με το ειδικό καπάκι. [34]



Εικόνα 7-8 Μετά την τοποθέτηση της κυψέλης στη διάταξη, η πειραματική διαδικασία μπορεί να ξεκινήσει [34]

7.4 ΚΑΘΑΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΩΝ

Για να προσομοιάζεται η συνεχής κίνηση του λαδιού εντός του μετασχηματιστή, η οποία όπως προείπαμε δεν αφήνει τις διαλυμένες εντός τοπ προσμίξεις να κατακάθονται, χρησιμοποιήθηκε μια λειτουργία του μηχανήματος BAUR Oil Tester DTA 822-129-1 η οποία εξασφαλίζει τη συνεχή ανάδευση του μίγματος (stirring). Εφαρμόζουμε το ειδικό πρόγραμμα καθαρισμού ηλεκτροδίων πατώντας τα κουμπιά (Settings — Tools — Electrode Cleaning), κατά το οποίο διεξάγεται μία σειρά 24 συνεχόμενων διασπάσεων (υπό ταχύως 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 στο μηχάνημα BAUR Oil Tester γιατί εκτός ότι γίνονται με γρήγορο ρυθμό, δεν αποτελούν στοιχεία έρευνας αλλά μέσο καθαρισμού των ηλεκτροδίων.

7.5 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Επιλέγοντας το πρότυπο IEC 60156:1995 και κάνοντας τις παρακάτω ρυθμίσεις κάνουμε εκκίνηση της διαδικασίας εκτέλεσης ενός σετ μετρήσεων (6 διασπάσεις) σύμφωνα με το ειδικά διαμορφωμένο πρόγραμμα που έχει αποθηκευτεί στη μνήμη της συσκευής BAUR Oil Tester DTA 822-129-1.

- Εύρος τάσης δοκιμής: 0 -100 kVrms
- Συχνότητα AC τάσης: 60 Hz
- Κλίση ράμπας (ταχύτητα αύξησης rms τιμής της AC εφαρμοζόμενης τάσης) :2 kV/s
- Συνεχής Ανάδευση (Continuous Stirring) καθ' όλη την διάρκεια του πειράματος.

Κατ' αυτόν τον τρόπο, προσομοιώνεται δηλαδή η συνεχής κίνηση του λαδιού εντός του μετασχηματιστή.

- 6 διασπάσεις σε κάθε σετ
- Χρονικά κενά μεταξύ των 6 διασπάσεων (ώστε να εξασφαλίζεται επαρκής χρόνος ομογενοποίησης του μίγματος μέσω ανάδευσης του και εξαφάνισης των φυσαλίδων αέρα): 5min για την πρώτη διάσπαση, 2min μεταξύ των υπολοίπων 5 διασπάσεων

Ακολουθεί καταγραφή των τιμών της τάσης διάσπασης που μετρήθηκαν και εμφανίζονται στην οθόνη της συσκευής, καθώς και των υπόλοιπων παραμέτρων που αυτόματα δίνει ως αποτελέσματα η συσκευή, όπως τη Μέση Τιμή τάσης διάσπασης

Επαναλαμβάνουμε άλλα 6 σετ, ώστε συνολικά λαμβάνουμε συνήθως 36 τιμές τάσεων διάσπασης. Η πειραματική διαδικασία διαρκεί συνολικά γύρω στις 2,5 ώρες. Στη συνέχεια ανοίγουμε το καπάκι της συσκευής, εξάγουμε την κυψέλη, χύνεται το μονωτικό λάδι και αυτή τοποθετείται άδεια ξανά στη θέση της. Εξαιτίας των αρνητικών επιπτώσεων της υγρασίας, μέσω των μικροσωματιδίων που αιωρούνται στον αέρα ή εισέρχονται στο λάδι 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

Κάθε φορά επαναλαμβάνεται η παραπάνω διαδικασία. Κάποιες φορές χρειάζεται να αλλάξει η απόσταση των ηλεκτροδίων ή ο και τύπος των ηλεκτροδίων ανάλογα με τις μετρήσεις που θέλουμε να πάρουμε. Οι συγκεκριμένες αλλαγές εξετάζονται αναλυτικά παρακάτω και μας βοηθούν να εξάγουμε χρήσιμα συμπεράσματα για το πώς επηρεάζουν οι διάφορες παράμετροι τις τιμές της τάσης διάσπασης

i) Τύποι ηλεκτροδίων: Οι τύποι των ηλεκτροδίων που θα χρησιμοποιηθούν κατά τη διάρκεια των μετρήσεων είναι Rogowsky - Rogowsky. Η αλλαγή των ηλεκτροδίων γίνεται με ιδιαίτερη προσοχή, φορώντας γάντια ώστε να μην έρθουν σε επαφή με ξένα σωματίδια ή δημιουργηθεί κάποια φθορά στην επιφάνεια τους.

ii) Μήκος Διακένου: Πρέπει να σημειωθεί ότι το μέγεθος του διακένου είναι ένας παράγοντας που αξίζει ιδιαίτερης προσοχής και επηρεάζει εμφανώς την συμπεριφορά του μονωτικού ελαίου. Αυτό είναι λογικό, καθώς μεγαλώνοντας ή μικραίνοντας την απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων, αντίστοιχα μεγαλώνει ή μικραίνει η απόσταση που πρέπει να «διανύσει» η εκκένωση.

Η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων ρυθμίζεται χειροκίνητα με την περιστροφή μιας στρόφιγγας που βρίσκεται αριστερά της κυψέλης και μετακινεί το ένα ηλεκτρόδιο προς τα εμπρός ή προς τα πίσω, ανάλογα με την φορά της περιστροφής. Η ακριβής απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων ρυθμίζεται με τη χρήση λάμων του επιθυμητού πάχους που τοποθετούνται μεταξύ των ηλεκτροδίων. Μόλις εφάπτονται τα δύο ηλεκτρόδια με την λάμα, ακούγεται μία ηχητική σήμανση και σταματάμε την περαιτέρω περιστροφή της στρόφιγγας. Σημασία έχει οι λάμες να είναι ανοξειδώτες ώστε να μην αντιδρούν με το λάδι αλλά ούτε και να αφήνουν υπολείμματα πάνω στα ηλεκτρόδια.

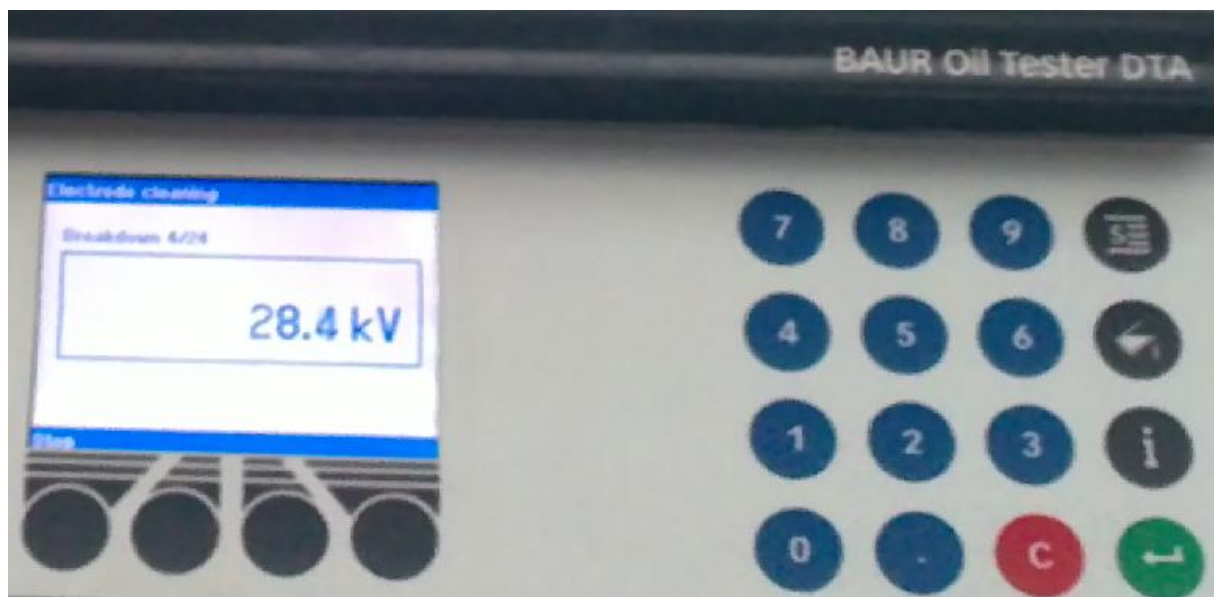
Επιπλέον πρέπει να σημειωθεί ότι η διάρκεια της ερευνητικής διαδικασίας ήταν περίπου 3 μήνες. Δεδομένου της σημασίας που παίζουν οι ατμοσφαιρικές συνθήκες στην συμπεριφορά του λαδιού (υγρασία, θερμοκρασία κ.λπ.) αλλά και η διαφοροποίηση των συνθηκών από την έναρξη της έρευνας μέχρι τη λήξη της απαιτήσαν την καθημερινή μέτρηση και καταγραφή τους.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 : ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Σε όλες τις μετρήσεις που ακολουθούν το λάδι που χρησιμοποιείται είναι ορυκτής προέλευσης,

Αρχικά γίνονται κάποιες μετρήσεις χρησιμοποιώντας ηλεκτρόδια Rogowsky - Rogowsky και μήκος διακένου ηλεκτροδίων 2,5 mm. Ακολουθούν οι ημερομηνίες διεξαγωγής και τα αποτελέσματα σε μορφή πινάκων. Κατόπιν υπολογίζουμε τη μέση τιμή τάσης διάσπασης (M) για κάθε σετ και την μέση τιμή τάσης διάσπασης για κάθε πίνακα (Mt).

Στις περισσότερες μετρήσεις έγιναν 6 set με 6 μετρήσεις το κάθε ένα, ενώ η κάθε μέτρηση του ίδιου set είχε διαφορά 2 λεπτών με την επόμενη μέτρηση καθώς και το κάθε set είχε διαφορά 10 λεπτών με το επόμενο για να «ηρεμήσει» το λάδι. Για την καλύτερη διεξαγωγή αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκαν δυο τρόποι κυκλοφορίας του λαδιού εντός του δοχείου, με εξαναγκασμένη κυκλοφορία και χωρίς ανάδευση. Τέλος χρησιμοποιήθηκαν δυο διαφορετικοί τύποι μονωτικών ελαίων.



Εικόνα 8-1

ΛΑΔΙ ΠΕΤΡΕΛΑΪΚΗΣ ΑΠΟΣΤΑΞΗΣ

Ημερομηνία διεξαγωγής μετρήσεων: 24/11/2011

Ατμοσφαιρικές συνθήκες

Πίεση: 764 mmHg

Θερμοκρασία: 15,9 °C

Σχετική υγρασία: 48,4%

Ηλεκτρόδια : Rogowsky – Rogowsky

Μήκος διακένου: 2,5 mm

SET 1 (kV)	SET 2 (kV)	SET 3 (kV)	SET 4 (kV)	SET 5 (kV)	SET 6 (kV)	
21,2	14,7	18,2	22,2	17,4	21,1	
20,9	19,8	22,0	18,5	15,6	19,9	
18,2	18,7	16,3	20,8	20,4	13,8	
15,4	25,5	25,1	22,0	20,6	24,4	
20,9	23,7	25,7	23,1	19,4	20,8	
22,2	18,5	21,3	13,0	18,1	21,1	
19,8	20,2	21,4	19,9	18,6	20,2	Μέση τιμή (M)
20,0						Mt

Πίνακας 8-1

ΔΕΝ ΕΓΙΝΕ ΑΛΛΑΓΗ ΛΑΔΙΩΝ. ΛΑΔΙ ΠΡΟΗΓΟΥΜΕΝΗΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ

Ημερομηνία διεξαγωγής μετρήσεων: 25/11/2011

Ατμοσφαιρικές συνθήκες

Πίεση: 764 mmHg

Θερμοκρασία: 16 °C

Σχετική υγρασία: 45,8 g/m³

Ηλεκτρόδια : Rogowsky – Rogowsky

Μήκος διακένου: 2,5 mm

SET 1 (kV)	SET 2 (kV)	SET 3 (kV)	SET 4 (kV)	SET 5 (kV)	SET 6 (kV)	
13,1	21,8	23,0	17,5	19,3	24,0	
19,0	24,9	18,8	19,8	23,5	19,8	
15,6	19,5	10,8	15,1	19,7	21,9	
19,9	16,6	22,2	11,5	27,4	16,8	
16,5	18,5	16,3	21,4	23,7	23,9	
22,4	24,0	14,1	25,7	24,3	16,2	
17,8	20,9	17,5	18,5	23,0	20,4	Μέση τιμή (Μ)
19,7						Mt

Πίνακας 8-2

ΑΛΛΑΓΗ ΛΑΔΙΟΥ. ΛΑΔΙ ΠΕΤΡΕΛΑΪΚΗΣ ΑΠΟΣΤΑΞΗΣ

Ημερομηνία διεξαγωγής μετρήσεων: 28/11/2011

Ατμοσφαιρικές συνθήκες

Πίεση: 764 mmHg

Θερμοκρασία: 14,8 °C

Σχετική υγρασία: 53,5%

Ηλεκτρόδια : Rogowsky – Rogowsky

Μήκος διακένου: 2,5 mm

SET 1 (kV)	SET 2 (kV)	SET 3 (kV)	SET 4 (kV)	SET 5 (kV)	SET 6 (kV)	
12,7	11,6	11,4	25,6	22,2	19,6	
11,8	19,3	17,4	19,0	19,3	19,6	
14,1	15,7	22,4	19,8	22,2	22,0	
20,0	18,2	19,7	24,5	16,0	22,7	
15,1	21,2	13,6	22,5	19,7	15,8	
19,1	15,1	20,2	21,3	20,4	26,4	
15,5	16,9	17,5	22,1	20,0	21,0	Μέση τιμή (Μ)
18,8						Μt

Πίνακας 8-3

ΛΑΔΙ SHELL DIALA OIL

Ημερομηνία διεξαγωγής μετρήσεων: 2/12/2011

Ατμοσφαιρικές συνθήκες

Πίεση: 764 mmHg

Θερμοκρασία: 14 °C

Σχετική υγρασία: 60,1%

Ηλεκτρόδια : Rogowsky – Rogowsky

Μήκος διακένου: 2,5 mm

SET 1 (kV)	SET 2 (kV)	SET 3 (kV)	SET 4 (kV)	SET 5 (kV)	
17,4	26,3	23,5	20,2	22,8	
21,7	23,4	20,6	21,0	19,2	
18,7	23,2	22,2	20,0	21,9	
21,9	26,6	24,2	22,0	22,7	
22,8	26,1	23,2	28,5	19,2	
19,0	23,7	23,8	22,7	27,6	
20,3	24,9	22,9	22,4	22,2	Μέση τιμή (M)
22,5					Mt

Πίνακας 8-4

ΛΑΔΙ ΠΡΟΙΓΟΥΜΕΝΗΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ
ΤΟ ΠΡΩΤΟ ΣΕΤ ΕΓΙΝΕ ΧΩΡΙΣ ΑΝΑΔΕΥΣΗ

Ημερομηνία διεξαγωγής μετρήσεων: 8/12/2011

Ατμοσφαιρικές συνθήκες

Πίεση: 764 mmHg

Θερμοκρασία: 15,1 °C

Σχετική υγρασία: 61,8%

Ηλεκτρόδια : Rogowsky – Rogowsky

Μήκος διακένου: 2,5 mm

SET 1 (kV)	SET 2 (kV)	SET 3 (kV)	SET 4 (kV)	SET 5 (kV)	SET 6 (kV)	SET 7 (kV)	
34,0	24,7	22,8	19,6	10,0	21,5	17,8	
34,5	26,2	29,4	20,0	23,0	24,7	26,3	
42,9	19,0	25,8	17,0	23,3	26,3	29,7	
39,6	21,5	19,4	24,6	27,0	25,6	31,7	
32,5	19,1	22,7	24,0	22,3	25,4	20,2	
44,3	23,6	22,7	27,6	21,5	15,9	20,0	
38,0	22,4	23,8	22,1	21,2	23,2	24,3	Μέση τιμή (M)
25,0							Mt

Πίνακας 8-5

ΔΕΝ ΕΓΙΝΕ ΑΛΛΑΓΗ ΛΑΔΙΟΥ. ΛΑΔΙ ΠΡΟΙΓΟΥΜΕΝΗΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ
ΤΑ ΠΑΡΑΚΑΤΩ ΣΕΤ ΕΓΙΝΑΝ ΧΩΡΙΣ ΑΝΑΔΕΥΣΗ

Ημερομηνία διεξαγωγής μετρήσεων: 12/12/2011

Ατμοσφαιρικές συνθήκες

Πίεση: 764 mmHg

Θερμοκρασία: 15,8 °C

Σχετική υγρασία: 70,4%

Ηλεκτρόδια : Rogowsky – Rogowsky

Μήκος διακένου: 2,5 mm

SET 1 (kV)	SET 2 (kV)	SET 3 (kV)	SET 4 (kV)	
42,1	33,1	32,0	30,5	
24,4	35,1	37,4	32,6	
18,4	30,5	33,9	31,8	
17,4	31,2	35,4	31,3	
17,,2	32,2	32,7	31,3	
32,6	35,9	31,1	33,3	
22,5	33,0	33,8	31,8	Μέση τιμή (M)
30,3				Mt

Πίνακας 8-6

ΑΛΛΑΓΗ ΛΑΔΙΟΥ. SHELL DIALA OIL

Ημερομηνία διεξαγωγής μετρήσεων: 14/12/2011

Ατμοσφαιρικές συνθήκες

Πίεση: 764 mmHg

Θερμοκρασία: 15,7 °C

Σχετική υγρασία: 70,7%

Ηλεκτρόδια : Rogowsky – Rogowsky

Μήκος διακένου: 2,5 mm

ΧΩΡΙΣ ΑΝΑΔΕΥΣΗ		ΜΕ ΑΝΑΔΕΥΣΗ		
SET 1 (kV)	SET 2 (kV)	SET 3 (kV)	SET 4 (kV)	
24,2	24,7	19,3	21,6	
28,7	32,3	21,2	25,9	
28,0	33,6	26,2	26,0	
27,3	32,2	21,3	25,8	
31,0	30,1	24,5	27,6	
27,7	32,5	21,6	29,2	
27,8	30,9	22,4	26,0	Μέση τιμή (M)
29,4		24,2		Mt

Πίνακας 8-7

ΑΛΛΑΓΗ ΛΑΔΙΟΥ SHELL DIALA OIL

Ημερομηνία διεξαγωγής μετρήσεων: 14/12/2011

Ατμοσφαιρικές συνθήκες

Πίεση: 764 mmHg

Θερμοκρασία: 16,2 °C

Σχετική υγρασία: 71,4%

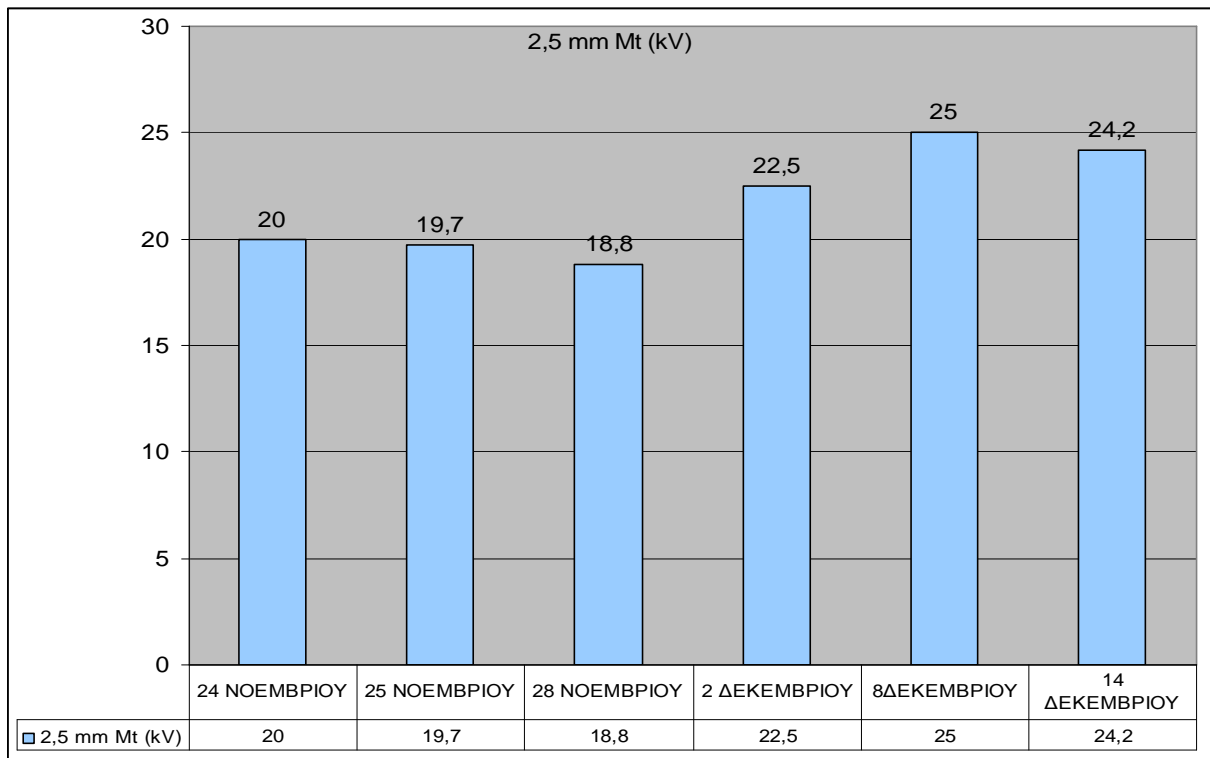
Ηλεκτρόδια : Rogowsky – Rogowsky

Μήκος διακένου: 1,5 mm

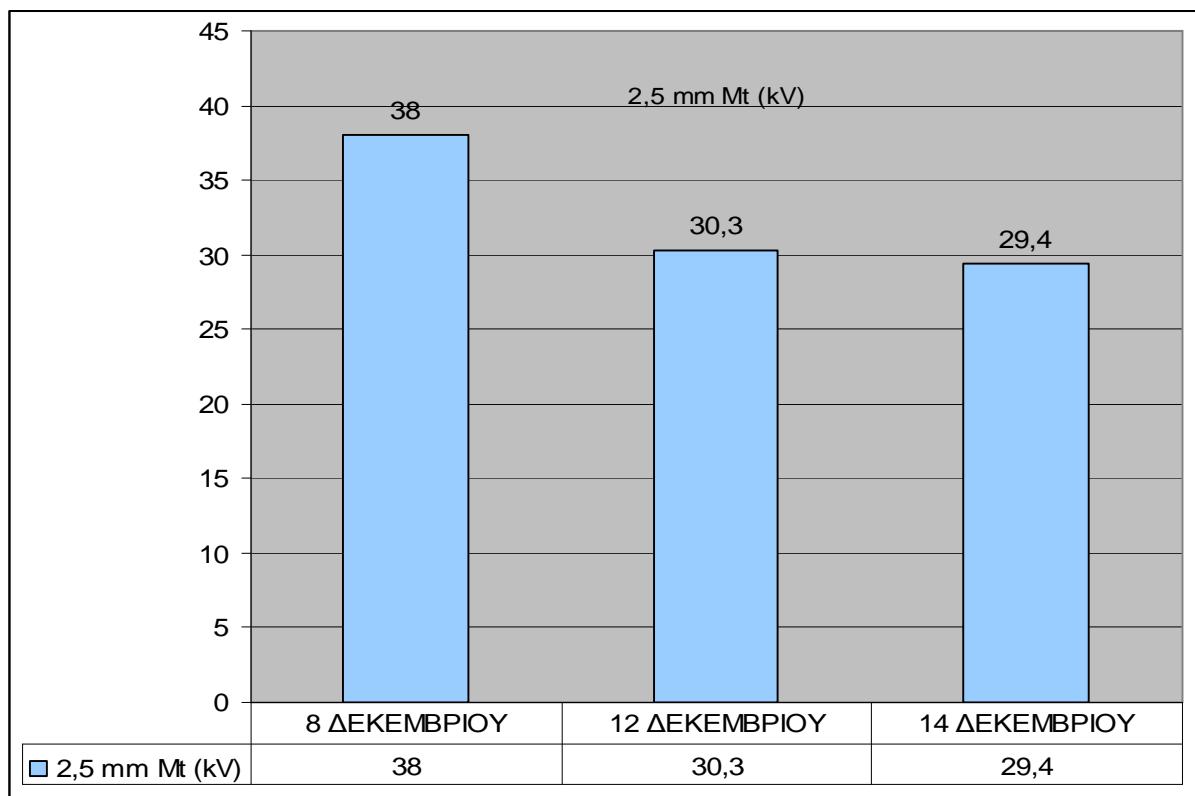
SET 1 (kV)	SET 2 (kV)	
19,7	18,0	
17,4	14,7	
16,8	14,1	
10,8	17,0	
15,5	16,8	
12,9	16,3	
15,5	16,2	Μέση τιμή (M)
15,8		Mt

Πίνακας 8-8

Στα παρακάτω γραφήματα παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι μέσες τιμές για κάθε ημέρα μετρήσεων με ηλεκτρόδια Rogowski – Rogowski, μήκος διακένου 2,5 mm, στον πίνακα 8-9 οι μετρήσεις έγιναν με ανάδευση ενώ στον πίνακα 8-10 έγιναν χωρίς ανάδευση



Πίνακας 8-9



Πίνακας 8-10

Σύμφωνα με τους παραπάνω συγκεντρωτικούς πίνακες παρατηρούμε ότι η διηλεκτρική αντοχή του μονωτικού λαδιού επηρεάζεται αισθητά με την ανάδευση του καθώς ο μέσος όρος των αποτελεσμάτων της τάσης διάσπασης των μετρήσεων με ανάδευση είναι 21,7 kV αισθητά πιο χαμηλός από αυτόν που έγιναν χωρίς ανάδευση και είναι 32,6 kV, η διαφορά αυτή οφείλετε στα διάφορα αιωρήματα τα οποία κατακάθονταν κατά την διάρκεια των μετρήσεων που υπήρχαν εντός του μονωτικού λαδιού και βοηθούσαν στην διάσπαση του.

Επίσης παρατηρούμε την σημαντική αλλαγή στην τάση διάσπασης που έχουμε λόγο της διαφοράς των διάκενων. Για μικρότερο διάκενο έχουμε και μικρότερη τάση διάσπασης άρα και μικρότερη διηλεκτρική αντοχή λόγω της μειωμένης απόστασης που πρέπει να διανύσει η τάση.

Καθ' όλη την διάρκεια του πειράματος δεν είχαμε σημαντικές αλλαγές στις ατμοσφαιρικές συνθήκες, για τον λόγο αυτό δεν μπορούμε να βγάλουμε ασφαλή συμπεράσματα για το κατά πόσο επηρεάζουν την διηλεκτρική αντοχή του λαδιού.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Ελευθερία Πυργιώτη - Σημειώσεις «ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΥΨΗΛΩΝ ΤΑΣΕΩΝ», Εκδόσεις Πανεπιστημίου Πατρών, Πάτρα 2010.
2. Παναγιώτης Σπ. Σβάρνας, E. Kuffel, W.S. Zaengl, J. Kuffel , «ΥΨΗΛΕΣ ΤΑΣΕΙΣ», Εκδόσεις ΤΖΙΟΛΑ
3. Ελένη Αθανασάτου, John Luksich - "NATURAL ESTERS AS A DIELECTRIC COOLANT IN POWER TRANSFORMERS" - "ΟΙ ΦΥΣΙΚΟΙ ΕΣΤΕΡΕΣ ΩΣ ΜΟΝΩΤΙΚΟ ΜΕΣΟ ΣΕ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΕΣ ΙΣΧΥΟΣ", Cooper Power Systems, Γλυφάδα, Αθήνα, pages: 1-8.
4. Παρασκευάς Χ.Δ., Βασιλείου Π., Δερβος Κ.Θ., «Χαρακτηρισμός Γήρανσης Μονωτικών Ελαίων Μετασχηματιστών - Φυσικοχημικές / Αναλυτικές Μέθοδοι και Διηλεκτρική Φασματοσκοπία. Μέρος I - Θεωρητική Ανάλυση», Τεχν. Χρον. Επιστ. Εκδ. ΤΕΕ, III, τευχ. 1-2, 2003 , pages: 1930.
5. Μπούρκας Π.Δ., Καραγιαννόπουλος Κ.Γ., «Μετρήσεις σε Βιομηχανικές Διατάξεις και Υλικά», Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα 2004
6. Σαμοίλης Β.Γ., «Μονωτικά λάδια (προέλευση - χρήση - χαρακτηριστικά - συντήρηση)», Αθήνα, 1979
7. D. Vukovic, S. Tenbohlen, "Comparative Evaluation of Breakdown Strength of Natural Esters and Mineral Oil", Proceedings of the 16th International Symposium on High Voltage Engineering, Copyright 2009 SAIEE, Innes House, Johannesburg, pages: 603-608.
8. John Voukelatos, Kostas Argiropoulos, Peter Stenborg, John Luksich -"NATURAL ESTER (VEGETABLE OIL) DIELECTRIC FLUID APPLICATION IN TRANSFORMERS", Cooper Power Systems - McGraw-Edison Development Corp., Glyfada, Athens, pages: 1-7.
9. Flanagan W.M., "Handbook of Tranformer Design and Applications", 2nd ed., McGraw-Hill.
10. Harlow J.M., "Electric Power Transformer Engineering", CRC Press, 2004
11. Baird P.J., Herman H., Stevens G.C., Jarman P.N., "Non- Destructive measurement of the degradation of transformer insulating paper", IEEE Trans. On Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 13, No 2, Apr. 2006
12. Lundgaard L.E., Hansen W., Linhjell D., Painter T.J., "Ageing of Oil-Impregnated Paper in Power Transformers", IEEE Trans.on Power Delivery, Vol. 19, No 1, 2004
13. Dan Martin , Dr. Zhongdong Wang, "An Overview of the Suitability of Ester Oil Dielectrics for use in Large Power Transformers", The University of Manchester

14. ABB, Data Sheets Transformer, Transformer 25MVA 15±9x1.78%/38.5±2x2.5%/23(10)kV (1ZVN460100-E), 2007.
15. <http://www.meppi.com/Products/Tranformers/Pages/SF6Sas.aspx>
16. <http://www.abb.com>
17. D. Martin , I. Khan, J. Dai & Z.D. Wang, "An Overview of the Suitability of Vegetable Oil Dielectrics for use in Large Power Transformers", Euro TechCon 2006, pages: 4-23
18. C. Patrick McShane, "New Dielectric Coolant Concepts for Distribution and Power Transformers", Cooper Power Systems, Waukesha, 0-7803-5526-1/99/\$10.00©1999IEEE, pages: 55-62.
19. "Vegetable Oils for Liquid - Filled Transformers" , IEEE Electrical Insulation Magazine, January/ February 2002 - Vol.18, No 1 , pages: 611.
20. Suwarno, Irawan Surya Darma, "Dielectric properties of mixtures between mineral oil and natural ester from palm oil" , School of Electrical Engineering and Informatics, Indonesia, Issue 2, Volume 3, February 2008, p: 37-46.
21. Alan Darwin, Christophe Perrier, Philippe Folliot, "The use of natural ester fluids in transformers", mat post 07.
22. E.Gockenbach, H. Borsi, "New insulating liquids for high voltage apparatus', Schering Institut, Germany
23. H. Boris, E. Gockenbach, B. Dolata, "Ester fluids as Alternative for Mineral based Transformer Oil", Institute of Electric Power Systems, High Voltage Engineering Section, Schering-Institute, Germany
24. C. Patrick McShane, J. Luksich, K.J. Rapp, " Experience in Retrofilling Older Transformers with Natural Ester Based Dielectric Coolant", Presented at the 2002 International Conference of Doble Clients, April 7-12, 2002, Boston, Mass, pages: 1-8.
25. Lance R. Leward, "Laboratory Testing of Natural Ester Dielectric Liquids", Chemist's Perspective, Winter 2004 - 2005, Neta World, pages: 1-4.
26. Y. Bertrand, L.C. Hoang, "Vegetal Oils as Substitute for Mineral Oils", Proceedings of the 7th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, June 1-5, 2003, Nagoya, pages: 491-494.
27. David P. Stockton, Jim Wilson, John R. Bland, David L. Harris, Todd McClanahan, Patric McShane, "Natural Ester Transformer Fluids: Safety, Reliability & Environmental Performance", Copyright Material IEEE, Paper No. PCIC-2007-34, pages: 1-7.
28. D. Martin, Z.D. Wang, A.W. Darwin, I. James, "A Comparative Study of the Chemical Stability of Esters for Use in Large Power Transformers", 1- 4244-0547-5/06/\$20.00©2006 IEEE, 2006 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, pages: 493- 496.

29. Μπέλλου Γεωργία, Μανωλάκης Δημήτρης, «μονωτικά λάδια και έλεγχος της διηλεκτρικής αντοχής τους», Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών, Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων.
30. Ντουντουλάκης Μιχαήλ , «επιπτώσεις της θερμοκρασίας στις ιδιότητες και τη συμπεριφορά του λαδιού μετασχηματιστή», Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Ε.Μ.Π., Αθήνα 2009.
31. Γιαννόπουλος Δημήτριος, «ΣΥΝΤΗΡΗΣΗ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ», Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Ε.Μ.Π., Αθήνα 2010
32. Χριστοδούλου Χρήστος, «Ηλεκτρικές δοκιμές σε καλώδια μέσης τάσης -Διαδικασίες επαλήθευσης και υπολογισμού αβεβαιότητας» Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Ε.Μ.Π., Αθήνα 2006
33. Αλέξανδρος Ε. Νέστορας, «Έλεγχος διηλεκτρικής δοκιμής μονωτικού ελαίου έπειτα από καταπόνηση κατά τη μεταφορά του», Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Ε.Μ.Π., Αθήνα 2011
34. Δημακοπούλου Παναγιώτα «Διηλεκτρικές δοκιμές Μονωτικών ελαίων φυτικής προέλευσης», Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών, Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων. Πανεπιστήμιο Πατρών 2011
35. el.wikipedia.org/wiki/Μετασχηματιστής
36. Μαινεμενλής Χρήστος «Μόνωση ηλεκτρικών δικτύων υψηλής τάσης» Εκδόσεις Πανεπιστημίου Πατρών, Πάτρα 2006
37. Δανίκας Γ. Μιχαήλ «Στοιχεία υψηλών τάσεων» έκδοση 'β . Εκδόσεις Σμπίλιας. Αθήνα 2009
38. Παπαστάθη Κυριακή «Πετρέλαιο-διύλιση και προϊόντα». Πτυχιακή εργασία, Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών, Τμήμα Γεωτεχνολογίας και Περιβάλλοντος. ΑΤΕΙ Κοζάνης 2009
39. Παπαροϊδάμης Γεώργιος «Διηλεκτρικές Δοκιμές σε Μονωτικά Βιοδιασπώμενα Λάδια» Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών, Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων. Πανεπιστήμιο Πατρών
40. Παπαχρήστος Χρήστος « Μελέτη συμπεριφοράς διηλεκτρικών υγρών σε εναλλασσόμενη τάση» Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών, Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων. Πανεπιστήμιο Πατρών