



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΚΑΙ
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ

Επιπτώσεις της θερμοκρασίας στις ιδιότητες και τη συμπεριφορά του λαδιού μετασχηματιστή

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Μιχαήλ Γ. Ντουντουλάκης

Επιβλέπων : Περικλής Δ. Μπούρκας

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2009



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΚΑΙ
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ

Επιπτώσεις της θερμοκρασίας στις ιδιότητες και τη συμπεριφορά του λαδιού μετασχηματιστή

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Μιχαήλ Γ. Ντουντουλάκης

Επιβλέπων : Περικλής Δ. Μπούρκας

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την

.....

Π. Δ. Μπούρκας
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....

Ν. Ι. Θεοδώρου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....

Κ. Γ. Καραγιαννόπουλος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2009

.....
Ντουντουλάκης Γ. Μιχαήλ

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Ντουντουλάκης Γ. Μιχαήλ, 2009
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

*Αφιερώνεται
στον μικρό μου αδελφό, Λευτέρη*

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στην Περιοχή Χανίων της Δ.Ε.Η. Α.Ε. κατά το ακαδημαϊκό έτος 2008-2009.

Θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες και την απεριόριστη εκτίμησή μου, προς τον επιβλέποντα της παρούσης διπλωματικής εργασίας κ. Περικλή Μπούρκα, καθηγητή Ε.Μ.Π., για την εμπιστοσύνη που έδειξε προς το πρόσωπό μου, αναθέτοντάς μου αυτήν τη διπλωματική εργασία.

Επίσης ένα μεγάλο ευχαριστώ οφείλω στον Διδάκτορα Ηλεκτρολόγο Μηχανικό Ε.Μ.Π. κ. Εμμανουήλ Κουφάκη, διευθυντή της Δ.Ε.Η. Χανίων, για την άψογη συνεργασία που είχαμε στα πλαίσια της εργασίας αυτής.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστώ την οικογένειά μου καθώς και την Μαρία Κλείδωνα για την αμέριστη συμπαράστασή τους και την στήριξή τους στην μεγάλη προσπάθεια που κατέβαλα προκειμένου να αποφοιτήσω από την σχολή.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η περιγραφή των επιπτώσεων της θερμοκρασίας στις ιδιότητες και τη συμπεριφορά του μονωτικού λαδιού.

Στο πλαίσιο της εργασίας, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις στη Περιοχή Χανίων της Δ.Ε.Η. Α.Ε. χρησιμοποιώντας εξειδικευμένο εξοπλισμό.

Στο **πρώτο κεφάλαιο** γίνεται μια αναφορά στους μετασχηματιστές και παρουσιάζεται το ισοδύναμο κύκλωμα του μετασχηματιστή ώστε να γίνουν ευκολότερα κατανοητά τα φαινόμενα που εμφανίζονται κατά την λειτουργία του.

Στο **δεύτερο κεφάλαιο** δίνεται ο ορισμός του μονωτικού υλικού και αναπτύσσονται τα κριτήρια αξιολόγησης μιας μόνωσης. Επίσης παρουσιάζονται οι διάφοροι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την μόνωση των μετασχηματιστών.

Στο **τρίτο κεφάλαιο** δίνεται μια συνοπτική αναφορά για το μονωτικό χαρτί ενώ ακολουθεί μια εκτενής αναφορά για το μονωτικό λάδι στην οποία παρουσιάζονται η διαδικασία παραγωγής, οι χρήσεις του σε ηλεκτρολογικό εξοπλισμό, οι λειτουργίες του και τα χαρακτηριστικά του. Επίσης γίνεται μια αναφορά και για τα συνθετικά λάδια.

Στο **τέταρτο κεφάλαιο** παρατίθενται τα φαινόμενα γήρανσης και διάσπασης στο μονωτικό λάδι και οι δύο βασικές θεωρίες των φαινομένων προ και κατά τη διάσπαση των στερεών μονωτικών, ήτοι: η μακροσκοπική θεωρία και η κβαντομηχανική θεωρία, με την βοήθεια των οποίων παρουσιάζουμε και το πλήρες ισοδύναμο κύκλωμα του μετασχηματιστή.

Στο **πέμπτο κεφάλαιο** γίνεται μια συνοπτική αναφορά σε διαγνωστικές μεθόδους που χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό της κατάστασης της μόνωσης των μετασχηματιστών.

Στο **έκτο κεφάλαιο** παρουσιάζονται τα όρια της θερμοκρασίας, οι πηγές θερμότητας στον μετασχηματιστή και η εξάρτηση της διάρκειας ζωής ενός μετασχηματιστή από την θερμοκρασία.

Στο **έβδομο κεφάλαιο** μελετάμε την εξάρτηση ορισμένων χαρακτηριστικών του μονωτικού λαδιού σε σχέση με την θερμοκρασία.

Στο **όγδοο κεφάλαιο** ασχολούμαστε με την υγρασία στον μετασχηματιστή.

Στο **ένατο κεφάλαιο** παρουσιάζεται η πειραματική διάταξη και η μεθοδολογία που χρησιμοποιήσαμε για την διεξαγωγή των μετρήσεων. Επίσης παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων σε πίνακες και γραφικές παραστάσεις.

Στο **δέκατο κεφάλαιο** γίνονται σχόλια επί των αποτελεσμάτων των μετρήσεων και εξάγονται σχετικά συμπεράσματα.

Στο **ενδέκατο κεφάλαιο** παρατίθεται η βιβλιογραφία που χρησιμοποιήθηκε.

Τέλος, στο **Παράρτημα**, παρουσιάζονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά της συσκευής BAUR DPA 75 Insulating Oil Tester 75 kV μεταφρασμένα στην ελληνική γλώσσα.

Λέξεις Κλειδιά

Μετασχηματιστής, Μόνωση μετασχηματιστή, Απώλειες μετασχηματιστή, Θερμική καταπόνηση, Γήρανση μόνωσης, Διάσπαση μόνωσης, Μονωτικά λάδια, Μονωτικό χαρτί, Υγρασία

ABSTRACT

The purpose of this thesis is to describe the consequences of temperature in regards to the properties and the function of insulating oil.

The experiments were conducted through the Public Power Corporation, within the region of Chania, using specialized equipment.

The **first chapter** introduces the transformers and the equivalent circuit of the transformer is presented so that we can better understand the phenomena that occur while the transformers are in operation.

The **second chapter** defines insulation and proceeds to analyze the criteria for evaluating an insulation. Furthermore, various methods are introduced for insulating the transformers.

The **third chapter** deals concisely with the insulation paper, which is followed by an extensive analysis on the insulating oil. The analysis of the insulation oil entails the production procedure, its usage in electrical equipment, its functions and its properties. There is also a commentary on synthetic oils.

The **fourth chapter** focuses on the degradation and the breakdown of the insulating oil. Moreover, this chapter introduces the two basic theories concerning the phenomena before and during the breakdown of the solid insulation materials, which are the macroscopic and the quantum mechanical theory. With the help of these two theories, it is possible to present the complete equivalent circuit of the transformer.

The **fifth chapter** presents certain basic diagnostic techniques for determining the condition of the transformer's insulation system.

The **sixth chapter** presents the limits of temperature, the sources of heat for the insulator and how temperature affects the life of a transformer.

The **seventh chapter** deals with the dependence, of certain characteristics, of the insulating oil according to the temperature.

The **eighth chapter** focuses on the moisture of the transformer.

The **ninth chapter** describes the measurement circuit, the measuring procedure that was used for the measurements. The results of the measurements are also presented in graphs and charts.

In the **tenth chapter** conclusions on the measurements are portrayed, along with commentaries regarding the results of the measurements.

The **eleventh chapter** cites the bibliography that was used for this thesis.

Finally, the technical characteristics of the BAUR DPA 75 Insulating Oil Tester 75kV device are presented in the **Appendix**, translated in the Greek language.

Keywords

Transformer, Transformer insulation, Transformer losses, Thermal stress, Insulation degradation, Insulation breakdown, Transformer oils, Insulation paper, Moisture

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΕΣ	15
1.1 Γενικά περί μετασχηματιστών.....	15
1.1.1 Μετασχηματιστές γεννήτριας.....	15
1.1.2 Μετασχηματιστές μεταφοράς.....	15
1.1.3 Μετασχηματιστές διανομής	15
1.1.4 Άλλα είδη μετασχηματιστών	15
1.2 Ιστορική αναδρομή	16
1.3 Αρχή λειτουργίας του μετασχηματιστή	17
1.4 Ισοδύναμο κύκλωμα μετασχηματιστή	19
2. Η ΜΟΝΩΣΗ ΤΩΝ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΩΝ	25
2.1 Γενικά περί μονώσεων και κριτήρια αξιολόγησης	25
2.2 Μόνωση και ψύξη μετασχηματιστών	30
2.2.1 Μετασχηματιστές τύπου GIS	30
2.2.2 Μετασχηματιστές ξηρού τύπου.....	31
2.2.3 Μετασχηματιστές ελαίου	32
3. ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΜΟΝΩΣΗΣ ΛΑΔΙΟΥ-ΧΑΡΤΙΟΥ	35
3.1 Το Μονωτικό χαρτί	35
3.2 Μονωτικά λάδια.....	37
3.2.1 Προέλευση και παραγωγή των μονωτικών λαδιών	37
3.2.2 Συνθετικά μονωτικά λάδια	40
3.2.3 Χρήσεις των μονωτικών λαδιών.....	41
3.2.4 Λειτουργίες των μονωτικών λαδιών	42
3.2.5 Ιδιότητες και χαρακτηριστικά των μονωτικών λαδιών.....	44
4. ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΗ ΤΗΣ ΜΟΝΩΣΗΣ ΤΩΝ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΩΝ	53
4.1 Τα φαινόμενα γήρανσης και διάσπαση στο μονωτικό λάδι	53
4.2 Φαινόμενα προ και κατά τη διάσπαση των στερεών μονωτικών υλικών	54
4.2.1 Η μακροσκοπική θεωρία των φαινομένων προ και κατά τη διάτρηση των στερεών μονωτικών.....	55

4.2.2 Η κβαντομηχανική θεωρία της γήρανσης και της διάσπασης.....	
των στερεών μονωτικών.....	58
4.3 Πλήρες ισοδύναμο κύκλωμα του μετασχηματιστή	60
5. ΔΙΑΓΝΩΣΤΙΚΕΣ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟ ΤΗΣ	
ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΤΗΣ ΜΟΝΩΣΗΣ ΣΤΟΥΣ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΕΣ	63
5.1 Φυσικοχημικές διαγνωστικές τεχνικές.....	63
5.1.1 Αεριοχρωματογραφία	63
5.1.2 Μέτρηση του βαθμού πολυμερισμού (DP) της κυτταρίνης.....	64
5.1.3 Ανάλυση των παραγόμενων φουρανίων	65
5.2 Ηλεκτρικές διαγνωστικές τεχνικές	66
5.2.1 Μέτρηση του δείκτη πόλωσης και του συντελεστή απωλειών	66
5.2.2 Η μέτρηση της τάσης επιστροφής.....	67
5.2.3 Η μέτρηση των ρευμάτων πόλωσης-αποπόλωσης.....	68
6. ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΚΑΙ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΕΣ	71
6.1 Θερμοκρασιακά όρια	71
6.2 Πηγές θερμότητας στους μετασχηματιστές.....	71
6.2.1 Θερμότητα λόγω απωλειών του μετασχηματιστή	71
6.2.1.1 Απώλειες κενού φορτίου.....	71
6.2.1.2 Απώλειες φορτίου.....	72
6.2.1.3 Θερμότητα λόγω απωλειών διηλεκτρικού	72
6.2.2 Θερμοκρασία περιβάλλοντος	73
6.2.3 Θερμότητα λόγω της υποβάθμισης της θερμοαπαγωγικής	
ικανότητας του λαδιού	73
6.3 Θερμοκρασία και διάρκεια ζωής μετασχηματιστή	74
7. ΟΙ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΣΤΙΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΚΑΙ ΤΗ	
ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΟΥ ΛΑΔΙΟΥ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗ	75
7.1 Ειδική αντίσταση (ρ) – Ειδική αγωγιμότητα.....	75
7.2 Συντελεστής απωλειών ($\text{tg}\delta$)	76
7.3 Εσωτερική τριβή (ιξώδες)	77
7.4 Πυκνότητα	78
7.5 Ειδική θερμότητα.....	79
7.6 Θερμική αγωγιμότητα	79

7.7 Υγρασία.....	80
8. ΥΓΡΑΣΙΑ ΣΤΟΝ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗ.....	81
8.1 Επιπτώσεις της υγρασίας στη μόνωση του μετασχηματιστή	81
8.1.1 Επιπτώσεις της υγρασίας στο μονωτικό λάδι	81
8.1.2 Επιπτώσεις της υγρασίας στο μονωτικό χαρτί	81
8.2 Καταστάσεις στις οποίες εμφανίζεται το νερό στον μετασχηματιστή.....	82
8.3 Παράγοντες που επηρεάζουν τη διαλυτότητα του νερού στο μονωτικό λάδι....	83
8.4 Παράγοντες που συμβάλουν στη παρουσία νερού στο μονωτικό λάδι	85
8.5 Μέθοδοι ανάλυσης της υγρασίας στο μονωτικό λάδι.....	86
9. ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ.....	87
9.1 Η διάταξη των μετρήσεων.....	87
9.2 Η διαδικασία των μετρήσεων	88
9.3 Αποτελέσματα των μετρήσεων.....	91
9.3.1 Μέτρηση της τάσης διάσπασης σε θερμοκρασίες από -15°C έως +101°C.....	91
9.3.2 Μέτρηση της τάσης διάσπασης σε θερμοκρασίες από -5°C έως +1°C.....	92
9.3.3 Μέτρηση της τάσης διάσπασης σε θερμοκρασίες από +9°C έως +11°C.....	93
9.3.4 Μέτρηση της τάσης διάσπασης σε θερμοκρασίες δωματίου	94
10. ΣΧΟΛΙΑ ΕΠΙ ΤΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	97
10.1 Σχόλια επί των μετρήσεων	97
10.2 Συμπεράσματα	98
11. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	101
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	105
Τεχνικά χαρακτηριστικά της συσκευής BAUR DPA 75 Insulating Oil Tester 75 kV	105

1. Μετασχηματιστές

1.1 Γενικά περί μετασχηματιστών

Λόγω της ανάγκης μεταφοράς της ενέργειας σε απομακρυσμένους προορισμούς είναι αναγκαίο τα δίκτυα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας να λειτουργούν σε πολύ υψηλή τάση, πολύ μεγαλύτερη από την παραγόμενη τάση από τις γεννήτριες, έτσι ώστε να έχουμε λιγότερες απώλειες μεταφοράς και μικρότερη πτώση τάσης στις γραμμές. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιούμε τους μετασχηματιστές οι οποίοι ανυψώνουν ή υποβιβάζουν την τάση. Σε ένα δίκτυο παραγωγής, μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας οι μετασχηματιστές που χρησιμοποιούνται διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες, στους μετασχηματιστές γεννήτριας, στους μετασχηματιστές μεταφοράς και τους μετασχηματιστές διανομής. Οι μετασχηματιστές των κατηγοριών αυτών ονομάζονται και μετασχηματιστές ισχύος. Παρακάτω κάνουμε μια μικρή αναφορά στα είδη των μετασχηματιστών.

1.1.1 Μετασχηματιστές γεννήτριας

Οι μετασχηματιστές γεννήτριας χρησιμοποιούνται για την ανύψωση της τάσης από το επίπεδο της γεννήτριας στο επίπεδο μεταφοράς (π.χ. 20/150kV ή 20/400kV).

1.1.2 Μετασχηματιστές μεταφοράς

Οι μετασχηματιστές μεταφοράς χρησιμοποιούνται για το μετασχηματισμό της ισχύος μεταξύ των διαφόρων επιπέδων τάσης του συστήματος μεταφοράς (π.χ. 150/400kV ή 150/20kV)

1.1.3 Μετασχηματιστές διανομής

Ο μετασχηματιστής διανομής είναι ο τελευταίος κρίκος στην αλυσίδα ενός συστήματος παραγωγής και μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας αφού υποβιβάζει την τάση στο κατάλληλο επίπεδο που χρειάζονται οι εμπορικοί και οικιακοί καταναλωτές. Οι μετασχηματιστές διανομής μπορεί να είναι μονοφασικοί ή τριφασικοί, ενώ η ισχύς λειτουργίας τους ποικίλει ανάλογα με την εφαρμογή που χρησιμοποιούνται. Γενικά, η ισχύς των μονοφασικών μετασχηματιστών διανομής κυμαίνεται από 5 μέχρι 500 KVA, ενώ των τριφασικών από 25 μέχρι 1600 kVA. Αποτελούν το μεγαλύτερο πληθυσμιακά είδος μετασχηματιστών με πολλούς κατασκευαστές ανά τον κόσμο[1].

1.1.4 Άλλα είδη μετασχηματιστών

Εκτός από τους μετασχηματιστές που χρησιμοποιούνται στα συστήματα μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας υπάρχουν και άλλοι τύποι

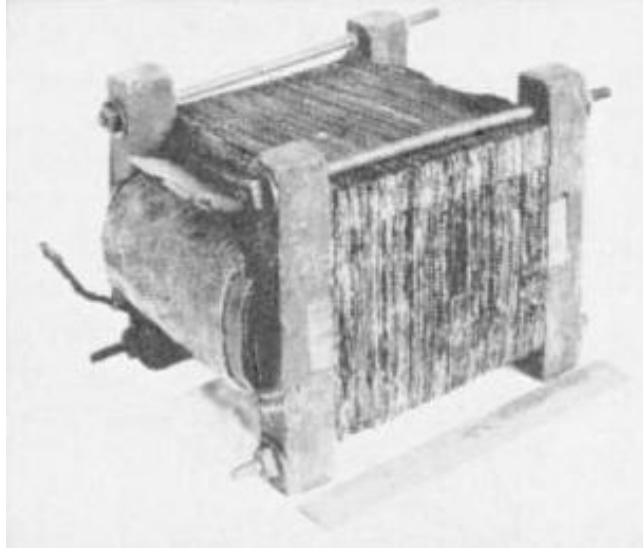
μετασχηματιστών με μεγάλο εύρος εφαρμογών. Οι πλέον γνωστοί τύποι μετασχηματιστών είναι οι παρακάτω[1]:

1. **Αυτομετασχηματιστές** για μετατροπή τάσεων εντός σχετικώς μικρών ορίων, για σύνδεση συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας διαφόρων τάσεων, για εκκίνηση κινητήρων εναλλασσομένου ρεύματος κ.λ.π..
2. **Μετασχηματιστές για τροφοδότηση διατάξεων** με στάτους μετατροπείς ήτοι ανορθωτές υδραργύρου, ignitrons, και διατάξεις στερεάς κατάστασης, οι οποίες χρησιμοποιούνται είτε για ανόρθωση (εναλλασσόμενου ρεύματος σε συνεχές ρεύμα) είτε για αναστροφή (συνεχές ρεύμα σε εναλλασσόμενο ρεύμα).
3. **Μετασχηματιστές δοκιμών**, για εκτέλεση δοκιμών με υψηλή ή υπερυψηλή τάση.
4. **Μετασχηματιστές για ειδικές εφαρμογές** όπως οι ηλεκτρικοί κλίβανοι, συγκολλήσεις κ.λ.π.
5. **Μετασχηματιστές μετρήσεων**, για σύνδεση οργάνων μετρήσεως σε δίκτυα με σκοπό τη μέτρηση τάσεως και εντάσεως.
6. **Μετασχηματιστές τηλεπικοινωνιών**, κ.λ.π. [1,2].

Όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό, οι μετασχηματιστές που χρησιμοποιούνται για κάθε μια από τις παραπάνω εφαρμογές διαφέρουν εξαιρετικά μεταξύ τους τόσο σε μέγεθος, όσο και σε τεχνικά χαρακτηριστικά (μονώσεις, ψύξη κλπ.). Αυτό όμως που όλοι οι μετασχηματιστές έχουν κοινό είναι η αρχή λειτουργίας τους: Πρόκειται για συσκευές στις οποίες εισέρχεται ηλεκτρική ενέργεια σε μια ορισμένη τάση και εξέρχεται πάλι ηλεκτρική ενέργεια, αλλά σε μια διαφορετική τάση [3].

1.2 Ιστορική αναδρομή

Παρόλο που ο Michael Faraday ανακάλυψε τον νόμο της επαγωγής δεν διέκρινε την πρακτική του εφαρμογή στους μετασχηματιστές. Ο πρώτος στοιχειώδης μετασχηματιστής διανομής με εμπορική χρήση λειτούργησε στη Μασαχουσέτη το 1886 από τον William Stanley. Ο μετασχηματιστής του Stanley (σχήμα 1.1) υποβίβαζε την τάση από τα 500V στα 100V. Για την κατασκευή του μετασχηματιστή ο Stanley βασίστηκε στον μετασχηματιστή που αναπτύχτηκε από τους Lucien Gaulard και John Dixon Gibbs και παρουσιάστηκε στο Λονδίνο το 1881. Τα δικαιώματα της πατέντας του μετασχηματιστή των Gaulard και Gibbs αγοράστηκαν από τον εργοδότη του Stanley, τον George Westinghouse. Το 1887 ο Elihu Thompson συνέλαβε την ιδέα της χρήσης ορυκτέλαιου ως μονωτικού και ψυκτικού μέσου στους μετασχηματιστές [4].



Σχήμα 1.1: Ο μετασχηματιστής του William Stanley [4].

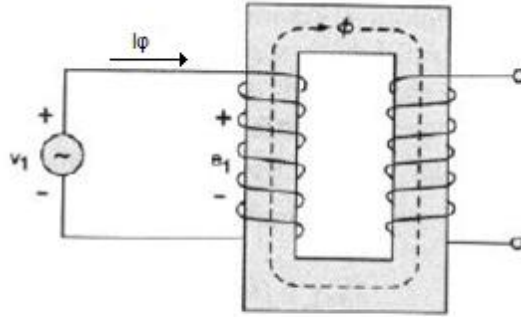
1.3 Αρχή λειτουργίας του μετασχηματιστή

Ένας μονοφασικός μετασχηματιστής αποτελείται από δύο τυλίγματα συζευγμένα μέσω ενός κοινού μαγνητικού κυκλώματος. Το ένα τύλιγμα ονομάζεται πρωτεύον και θεωρείται εδώ ως η είσοδος της ηλεκτρικής ισχύος ενώ το άλλο τύλιγμα, από το οποίο εξέρχεται η ηλεκτρική ισχύς, ονομάζεται δευτερεύον. Σε μερικές ειδικές περιπτώσεις μετασχηματιστών μπορεί να υπάρχει και τριτεύον τύλιγμα.

Τα ηλεκτρικά μεγέθη του πρωτεύοντος συμβολίζονται με το δείκτη 1 και του δευτερεύοντος με το δείκτη 2. Τόσο το πρωτεύον όσο και το δευτερεύον θεωρούνται τυλιγμένα γύρω από τον σιδερένιο πυρήνα ενός μαγνητικού κυκλώματος, το οποίο διαρρέεται από μαγνητική ροή Φ . Αν με N_1 συμβολιστεί ο αριθμός των ελιγμάτων του πρωτεύοντος και με N_2 ο αριθμός ελιγμάτων του δευτερεύοντος, ο λόγος των ελιγμάτων n είναι [3]:

$$n = \frac{N_1}{N_2} \quad (1.1)$$

Για να κατανοήσουμε την λειτουργία του μετασχηματιστή θα μελετήσουμε την εν κενώ λειτουργία του. Στην κατάσταση αυτή το πρωτεύον του μετασχηματιστή τροφοδοτείται από μια πηγή εναλλασσόμενης τάσης U_1 , ενώ το δευτερεύον παραμένει ανοικτοκυκλωμένο ($i_2=0$). Κατά την εν κενώ λειτουργία το πρωτεύον απορροφά ένα πολύ μικρό ρεύμα i_ϕ , το οποίο ονομάζεται ρεύμα διεγέρσεως.



Σχήμα 1.2: Λειτουργία μετασχηματιστή εν κενώ[5].

Λόγω της εναλλασσόμενης μαγνητικής ροής ϕ που θα εγκατασταθεί στον σιδηρό πυρήνα από το ρεύμα διεγέρσεως, αναπτύσσεται στο ηλεκτρικό κύκλωμα του πρωτεύοντος μια ηλεκτρεγερτική δύναμη (ΗΕΔ) σύμφωνα με το νόμο του Faraday:

$$e_1 = N_1 \left(\frac{d\Phi}{dt} \right) \quad (1.2)$$

Όπως φαίνεται και στο Σχ.1.2 η e_1 τείνει να προκαλέσει ρεύμα αντίθετης φοράς από το ρεύμα i_ϕ , γι' αυτό και ονομάζεται αντιηλεκτρεγερτική δύναμη. Σύμφωνα με τον νόμο τάσεων του Kirchhoff, η τάση U_1 ισούται με το άθροισμα της αντί-ΗΕΔ e_1 συν την πτώση τάσεως πάνω στην ωμική αντίσταση του πρωτεύοντος R_p .

$$U_1 = e_1 + R_p i_\phi \quad (1.3)$$

Όπως προαναφέρθηκε το ρεύμα διεγέρσεως i_ϕ έχει πολύ μικρή τιμή ενώ συνήθως μικρή είναι και η τιμή της ωμικής αντιστάσεως R_p , επομένως ο όρος της πτώσης τάσεως μπορεί να παραλειφτεί χωρίς μεγάλο σφάλμα, οπότε η στιγμιαία τιμή της τάσεως ακροδεκτών U_1 γίνεται κατά προσέγγιση ίση με την αντί-ΗΕΔ e_1 .

Η μαγνητική ροή που διέρχεται από τον πυρήνα επάγει επίσης μια τάση στο δευτερεύον τύλιγμα τιμής e_2 . Για την τάση e_2 ισχύει:

$$e_2 = N_2 \left(\frac{d\Phi}{dt} \right) \quad (1.4)$$

Αν, όπως και πριν, κάνουμε την παραδοχή ότι η πτώση τάσης στο δευτερεύον θεωρείται αμελητέα έχουμε ότι $e_2 = U_2$. Επομένως από τις σχέσεις 1.2 και 1.4 και δεδομένου ότι $e_1 = U_1$ και $e_2 = U_2$ προκύπτει ότι:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (1.5)$$

Κάνοντας επίσης την παραδοχή ότι δεν υπάρχουν απώλειες στον μετασχηματιστή, η εισερχόμενη ισχύς θα είναι ίση με την εξερχόμενη οπότε θα ισχύει ότι:

$$U_1 i_1 = U_2 i_2 \quad (1.6)$$

Συνδυάζοντας τις εξισώσεις 1.5 και 1.6 προκύπτει ότι

$$\frac{i_1}{i_2} = \frac{N_2}{N_1} \quad (1.7)$$

1.4 Ισοδύναμο Κύκλωμα Μετασχηματιστή

Για την ερμηνεία της λειτουργίας του μετασχηματιστή στην προηγούμενη παράγραφο κάναμε την παραδοχή ότι μετασχηματιστής είναι ιδανικός. Ένας ιδανικός μετασχηματιστής έχει τις εξής ιδιότητες:

- (α) Οι αντιστάσεις των τυλιγμάτων καθώς και αυτές των συνδέσεων, επαφών και ακροδεκτών είναι αμελητέες.
- (β) Όλη η μαγνητική ροή περιορίζεται στον πυρήνα και συνδέει και τα δύο τυλίγματα.
- (γ) Οι απώλειες του πυρήνα είναι αμελητέες.
- (δ) Η μαγνητική διαπερατότητα πυρήνα είναι τόσο υψηλή, ώστε μόνο ένα αμελητέο ρεύμα διεγέρσεως χρειάζεται για να εγκατασταθεί η μαγνητική ροή.
- (ε) Τα μονωτικά υλικά είναι τέλεια και δεν εμφανίζουν καμιά αγωγιμότητα (ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα $\sigma = 0$).

Σε ένα πραγματικό μετασχηματιστή υπάρχουν όμως:

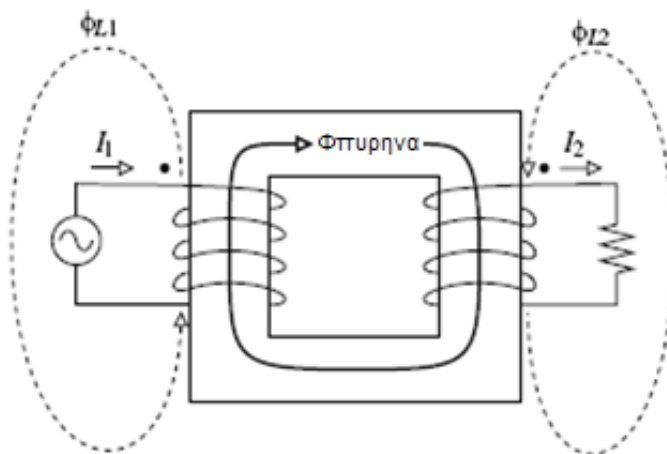
- (1) Αντιστάσεις τυλιγμάτων.
- (2) Αντιστάσεις ακροδεκτών, συνδέσεων και επαφών.
- (3) Μαγνητική σκέδαση.
- (4) Οι απώλειες στον πυρήνα, οφειλόμενες στο (μη μηδενικό) ρεύμα διεγέρσεως. (Ρεύμα διεγέρσεως = υστέρηση και ρεύματα Foucault (δινορρεύματα) + ρεύμα μαγνητίσεως).
- (5) Χωρητικότητες των τυλιγμάτων, μεταξύ των σπειρών, προς τον πυρήνα και προς το δοχείο.
- (6) Απώλειες λόγω αγωγιμότητας των μονωτικών.
- (7) Απώλειες λόγω μερικών εκκενώσεων στην επιφάνεια των μονωτικών

- (8) Απώλειες λόγω μερικών εκκενώσεων στη μάζα των μονωτικών.
- (9) Απώλειες λόγω ηλεκτρικής πόλωσης των μονωτικών.
- (10) Διαφοροποίηση των ιδιοτήτων του μονωτικού (ειδική αγωγιμότητα και διηλεκτρική σταθερά) λόγω βάρθρωσης της θερμοκρασίας του.
- (11) Μη γραμμικά φαινόμενα στα μονωτικά.
- (12) Από τα παραπάνω προκύπτουν οι παράμετροι του ισοδύναμου κυκλώματος του μετασχηματιστή.

Σε αυτό το κομμάτι της εργασίας θα παρουσιάσουμε το ισοδύναμο κύκλωμα του μετασχηματιστή που προκύπτει από τις απώλειες πυρήνα, τις απώλειες λόγω της μαγνητικής ροής σκέδασης και τις απώλειες Joule των τυλίγματος. Σε επόμενο κεφάλαιο θα συμπεριλάβουμε και τις απώλειες του διηλεκτρικού του μετασχηματιστή ώστε να παρουσιάσουμε το πλήρες ισοδύναμο κύκλωμα του μετασχηματιστή.

Η συνολική μαγνητική ροή που συνδέεται με το πρωτεύον τύλιγμα, διακρίνεται σε δύο συνιστώσες:

- Την προκύπτουσα αμοιβαία μαγνητική ροή, η οποία ουσιαστικά περιορίζεται εις τον σιδηρούν πυρήνα (βλ. σχ.1.3) και παράγεται σαν συνδυασμένο αποτέλεσμα των ρευμάτων πρωτεύοντος και δευτερεύοντος τυλίγματος. Η προκύπτουσα αμοιβαία μαγνητική ροή συνδέει αμφοτέρωτα τα τυλίγματα και δημιουργείται από τις συνδυασμένες μαγνητεγερτικές τους δυνάμεις (mmfs).
- Την μαγνητική ροή σκεδάσεως του πρωτεύοντος ϕ_{L1} , η οποία διέρχεται μόνον από το πρωτεύον τύλιγμα (βλ. σχ.1.3). Επειδή η διαδρομή της σκέδασης είναι κυρίως στον αέρα, η μαγνητική ροή σκεδάσεως και η τάση η επαγόμενη από αυτήν, μεταβάλλονται γραμμικά με το ρεύμα πρωτεύοντος I_1 . Το αποτέλεσμα της μαγνητικής ροής σκεδάσεως πάνω στο πρωτεύον κύκλωμα, μπορούμε να το εξομοιώσουμε προσδιορίζοντας μια επαγωγή σκεδάσεως L_p . Επιπροσθέτως υπάρχει μια πτώση τάσεως στην ωμική αντίσταση του πρωτεύοντος R_p . Ομοίως για το δευτερεύον τύλιγμα προσδιορίζουμε μια επαγωγή σκεδάσεως L_s λόγω της μαγνητικής ροής σκεδάσεως του δευτερεύοντος ϕ_{L2} και μια ωμική αντίσταση τυλίγματος R_s .



Σχήμα 1.3: Ροή μαγνήτισης ($\phi_{\text{πυρήνα}}$) και ροή σκεδάσεως (ϕ_{L1} και ϕ_{L2})[7].

Το ρεύμα πρωτεύοντος καλείται να εκπληρώνει δύο απαιτήσεις του μαγνητικού κυκλώματος:

- (α) Να εξουδετερώνει το φαινόμενο απομαγνήτισης που προκαλεί το ρεύμα δευτερεύοντος.
- (β) Να παράγει επαρκή μαγνητεγερτική δύναμη ώστε να δημιουργήσει την προκύπτουσα αμοιβαία μαγνητική ροή.

Σύμφωνα με τις παραπάνω φυσικές έννοιες μπορούμε να αναλύσουμε το ρεύμα πρωτεύοντος (I_1) σε δύο συνιστώσες:

- μία συνιστώσα φορτίου I'_2 , και
- μία συνιστώσα διεγέρσεως I_ϕ .

Η συνιστώσα φορτίου καθορίζεται ως η συνιστώσα του ρεύματος του πρωτεύοντος η οποία ακριβώς εξουδετερώνει την μαγνητεγερτική δύναμη που παράγει το ρεύμα του δευτερεύοντος I_2 . Ισχύει ότι:

$$I'_2 = \frac{N_2}{N_1} I_2 \quad (1.7)$$

όπου N_1 και N_2 ο αριθμός σπειρών πρωτεύοντος και δευτερεύοντος τυλίγματος.

Η συνιστώσα διεγέρσεως I_ϕ , καθορίζεται ως το επί πλέον ρεύμα πρωτεύοντος που απαιτείται για να παράγει την προκύπτουσα αμοιβαία μαγνητική ροή.

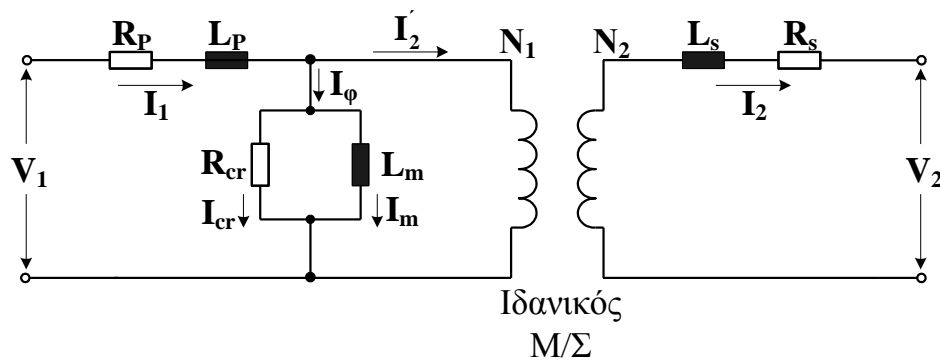
Το ρεύμα διεγέρσεως δεν είναι ημιτονοειδούς μορφής. Επειδή όμως το ρεύμα διεγέρσεως είναι μικρό (σε ένα τυπικό μετασχηματιστή ισχύος είναι της τάξεως του 5% του ονομαστικού ρεύματος), μπορεί να αντικατασταθεί από το ισοδύναμό του ημιτονοειδές, το οποίο παράγει την ίδια μέση ισχύ όπως το πραγματικό.

Το ρεύμα διεγέρσεως I_ϕ μπορεί να αναλυθεί σε δύο συνιστώσες:

- (α) Τη συνιστώσα απωλειών του πυρήνα, I_{cr} . Οι απώλειες του πυρήνα οφείλονται στο φαινόμενο της υστέρησης και στα ρεύματα Foucault (δινορρεύματα).
- (β) Τη συνιστώσα μαγνητίσεως, I_m .

Οι δύο αυτές συνιστώσες του ρεύματος διεγέρσεως βρίσκονται σε διαφορά φάσεως 90° και στο ισοδύναμο κύκλωμα μπορούν να παρασταθούν με την παράλληλη διάταξη μιας μη επαγωγικής αντίστασης R_{cr} και μιας επαγωγής χωρίς απώλειες L_m . Οι τιμές των R_{cr} και L_m προσδιορίζονται στις ονομαστικές τιμές λειτουργίας τάσεως και συχνότητας του μετασχηματιστή.

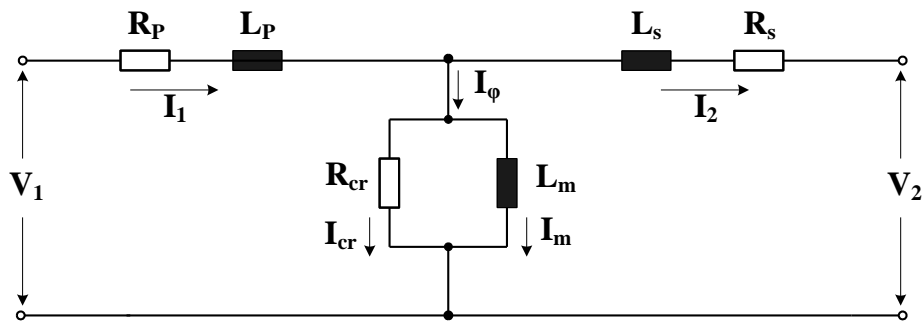
Τα παραπάνω φαίνονται στο σχήμα 1.4, στο οποίο ο πραγματικός μονοφασικός μετασχηματιστής απεικονίζεται ως ένας ιδανικός μετασχηματιστής συν τις εξωτερικές σύνθετες αντιστάσεις[6].



Σχήμα 1.4: Βασικό ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα του μονοφασικού μετασχηματιστή.

- R_p : Ωμική αντίσταση πρωτεύοντος
- L_p : Επαγωγή σκεδάσεως πρωτεύοντος
- R_s : Ωμική αντίσταση δευτερεύοντος
- L_s : Επαγωγή σκεδάσεως δευτερεύοντος
- R_{cr} : Μη επαγωγική αντίσταση
- L_m : Επαγωγή χωρίς απώλειες
- V_1 : Τάση πρωτεύοντος
- V_2 : Τάση δευτερεύοντος
- I_1 : Ρεύμα πρωτεύοντος
- I_2 : Ρεύμα δευτερεύοντος
- I'_2 : Συνιστώσα φορτίου του ρεύματος πρωτεύοντος
- I_ϕ : Συνιστώσα διεγέρσεως του ρεύματος πρωτεύοντος
- I_{cr} : Συνιστώσα απωλειών του πυρήνα
- I_m : Συνιστώσα μαγνητίσεως
- N_1 : Αριθμός σπειρών πρωτεύοντος τυλίγματος
- N_2 : Αριθμός σπειρών δευτερεύοντος τυλίγματος

Ανάγοντας όλες τις τάσεις, τις εντάσεις και τις σύνθετες αντιστάσεις στο πρωτεύον ή το δευτερεύον, μπορούμε να απομακρύνουμε τον ιδανικό μετασχηματιστή και να διαμορφώσουμε το ισοδύναμο κύκλωμα του μονοφασικού μετασχηματιστή – ονομάζεται και T κύκλωμα – όπως φαίνεται στο σχήμα 1.5.



Σχήμα 1.5: T - ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα του μονοφασικού μετασχηματιστή.

- R_p : Ωμική αντίσταση πρωτεύοντος
- L_p : Επαγωγή σκεδάσεως πρωτεύοντος
- R_s : Ωμική αντίσταση δευτερεύοντος
- L_s : Επαγωγή σκεδάσεως δευτερεύοντος
- R_{cr} : Μη επαγωγική αντίσταση
- L_m : Επαγωγή χωρίς απώλειες
- V_1 : Τάση πρωτεύοντος
- V_2 : Τάση δευτερεύοντος
- I_1 : Ρεύμα πρωτεύοντος
- I_2 : Ρεύμα δευτερεύοντος
- I_ϕ : Συνιστώσα διεγέρσεως του ρεύματος πρωτεύοντος
- I_{cr} : Συνιστώσα απωλειών του πυρήνα
- I_m : Συνιστώσα μαγνητίσεως

2. Η μόνωση των Μετασχηματιστών

2.1 Γενικά περί μονώσεων και κριτήρια αξιολόγησης

Σκοπός των μονώσεων σε μία ηλεκτροτεχνική κατασκευή είναι ο διαχωρισμός μεταξύ των ρευματοφόρων μερών καθώς και των ρευματοφόρων μερών προς γη, κατά τρόπο ώστε το σχηματιζόμενο ηλεκτρικό πεδίο να είναι ηλεκτροστατικό[8].

Οι λέξεις διηλεκτρικό και μονωτικό χρησιμοποιούνται συχνά ως περίπου συνώνυμες, όμως με την πρώτη δίνουμε έμφαση στις ιδιότητες του υλικού από φυσική άποψη, ενώ με τη δεύτερη στη χρήση του σε πρακτικές εφαρμογές[9].

Η ανάγκη για την αξιόπιστη διαχρονική συμπεριφορά των διαφόρων μονωτικών υλικών σε μία κατασκευή υψηλών τάσεων έχει οδηγήσει σε ορισμένα βασικά κριτήρια αξιολόγησής τους, τα οποία δεν αφορούν μόνο τις ηλεκτρικές (ή διηλεκτρικές) ιδιότητές τους, άλλα και άλλες ιδιότητες, που πρέπει να έχουν, ανάλογα με την κατασκευή, όπως π.χ.: η θερμική αντοχή κατά την απαγωγή των απωλειών Joule των αγωγών, η ψυκτική ικανότητα κατά τη σβέση του ηλεκτρικού τόξου σε διακόπτες, η μηχανική αντοχή των μονωτήρων (π.χ. λόγω του βάρους της γραμμής), η αντοχή κατά την εκδήλωση βραχυκυκλώματος, κλπ. Τα κριτήρια αυτά είναι [8]:

1. Η διηλεκτρική αντοχή

Ως διηλεκτρική αντοχή (E_d) ενός μονωτικού υλικού ορίζεται η μέγιστη δυνατή τιμή της πεδιακής έντασης που μπορεί να εφαρμοστεί στο μονωτικό υλικό χωρίς να επιφέρει διάσπαση της μόνωσης του. Με τον όρο διάσπαση εννοεί κανείς την αγωγή σύνδεση δύο μεταξύ τους μονωμένων ηλεκτροδίων μέσω ηλεκτρικής εκκένωσης.

Η διηλεκτρική αντοχή αποτελεί κριτήριο αξιολόγηση των μονωτικών υλικών, μέσω της ελάχιστης τιμής της πεδιακής έντασης για τη διάσπαση εντός ομογενούς πεδίου. Η μονάδα μέτρησης της διηλεκτρικής αντοχής είναι kV/cm[10].

2. Η σχετική διηλεκτρική σταθερά

Ως σχετική διηλεκτρική σταθερά (ϵ_r) ενός μονωτικού υλικού ορίζεται ο λόγος της διηλεκτρικής σταθεράς του μονωτικού υλικού ϵ προς αυτήν του κενού ϵ_0 και είναι αδιάστατος αριθμός.

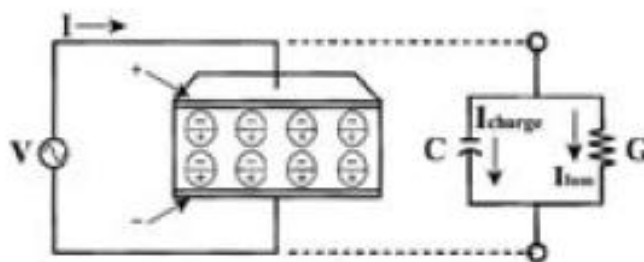
Οι σχετικές διηλεκτρικές σταθερές των διαφόρων μονωτικών, που συνθέτουν μία μόνωση (π.χ. περιελίξεις μετασχηματιστών και μονώσεις καλωδίων), θα πρέπει να επιλέγονται κατά τρόπο, ώστε να εξομαλύνεται το πεδίο στις διαχωριστικές επιφάνειές τους, για να μη διευκολύνεται η εκδήλωση μερικών εκκενώσεων[8].

Η χωρητικότητα μιας διάταξης με μονωτικό υλικό σχετίζεται με τη διηλεκτρική σταθερά του υλικού σύμφωνα με τη σχέση[10]:

$$C = C_0 \cdot \varepsilon_r \Rightarrow \varepsilon_r = \frac{C}{C_0} \quad (2.1)$$

όπου:

- ε_r :σχετική διηλεκτρική σταθερά του υλικού
- C : χωρητικότητα με την παρουσία του διηλεκτρικού
- C_0 : χωρητικότητα χωρίς τη προσθήκη υλικού (κενό)



Σχήμα 2.1: Πυκνωτής παράλληλων πλακών με ενδιάμεσο διηλεκτρικό. Παράλληλο ισοδύναμο κύκλωμα C – G που χρησιμοποιείται για τον αναλυτικό προσδιορισμό των διηλεκτρικών μεγεθών.

Από την παραπάνω σχέση είναι εμφανές ότι η διηλεκτρική σταθερά (ε_r) δίνει το πόσο μεγαλύτερη είναι η χωρητικότητα μίας διάταξης με διηλεκτρικό συγκριτικά προς εκείνη στο κενό ή στον αέρα. Το διηλεκτρικό αυξάνει την ικανότητα αποθήκευσης ενέργειας του πυκνωτή, εξουδετερώνοντας κάποια από τα φορτία των ηλεκτροδίων, τα οποία κανονικά θα συνέβαλαν στη διαμόρφωση της όλης πεδιακής έντασης μεταξύ των οπλισμών.

Η τιμή της σχετικής διηλεκτρικής σταθεράς (ε_r) παίρνει τιμές από μονάδα για το κενό έως ελαφρώς μεγαλύτερη της μονάδας για αέρια σε ατμοσφαιρικές πιέσεις. Όμως, για τα περισσότερα στερεά και υγρά μονωτικά υλικά ισχύει: $\varepsilon_r > 1$. Ειδικά για τα μονωτικά υλικά ισχύει ότι $1 \leq \varepsilon_r \leq 10$, για τους ημιαγωγούς $10 \leq \varepsilon_r \leq 20$, και για τα μέταλλα $\varepsilon_r \rightarrow \infty$. Τα ηλεκτρομονωτικά έλαια χαρακτηρίζονται από τιμές $2,2 \leq \varepsilon_r \leq 2,5$, στη συχνότητα και θερμοκρασία λειτουργίας. Στον πίνακα 2.1 δίνονται οι τιμές της διηλεκτρικής σταθεράς για διάφορα μονωτικά υλικά[36].

Πίνακας 2.1: Τιμές της διηλεκτρικής σταθεράς για διάφορα μονωτικά υλικά.

Διηλεκτρική σταθερά για διάφορα μονωτικά υλικά			
Κενό	1	Βακελίτης	4,5-5,5
Αέρας	1	Γυαλί	5,4-9,9
Χαρτί	2-2,6	Μίκα	2,5-7,7
Λάδι	2,2-2,5	Πορσελάνη	5,7-6,8
Ξύλο	2,5-7,7	Πολυαιθυλένιο	2,3

3. Ο συντελεστής απωλειών (tgδ)

Όταν εφαρμοστεί μια εναλλασσόμενη ημιτονοειδής τάση στα άκρα ενός πυκνωτή παράλληλων πλακών με ενδιάμεσο διηλεκτρικό (βλ. σχήμα 2.1), το συνολικά παρατηρούμενο ρεύμα θα προέρχεται από το ρεύμα φόρτισης (I_{charge}) που διαρρέει τον πυκνωτή και σχετίζεται με τη χωρητικότητα, και επομένως τη διηλεκτρική σταθερά του υλικού, και από το ρεύμα απωλειών (I_{loss}) που σχετίζεται με τις απώλειες ενέργειας οι οποίες οφείλονται:

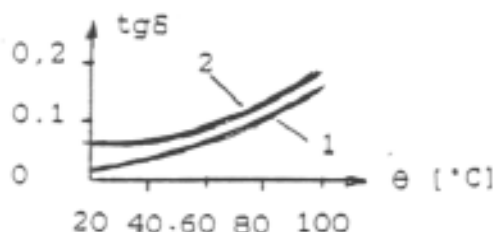
α) στην κατανάλωση ενέργειας κατά τη διαρκή εναλλαγή της φοράς της ηλεκτρικής ροπής των δίπολων στο ρυθμό της εναλλαγής της πολικότητας της εναλλασσόμενης τάσης, και

β) στην πολύ μικρή ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα, που έχουν τα μονωτικά υλικά.

Ο συντελεστής απωλειών :

$$tg\delta = \frac{I_{loss}}{I_{Chsrge}} = \frac{G}{\omega C} \quad (2.2)$$

είναι ένα κριτήριο αξιολόγησης του διηλεκτρικού (ή μίας μονωτικής διάταξης γενικότερα), γιατί δίνει πληροφορίες για την αγωγιμότητά του. Για τα ισχυρά μονωτικά υλικά, όπως είναι τα ηλεκτρομονωτικά έλαια μετασχηματιστών, η tgδ τείνει στο +0. Όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα η tgδ αυξάνει εκθετικά με τη θερμοκρασία.



Σχήμα 2.2 : tgδ ορισμένων διηλεκτρικών

1 : σκληρό χαρτί, 2 : πορσελάνη

4. Η ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα

Καθώς τα μονωτικά υλικά δεν είναι τέλει μονωτές, έχουν μια πολύ μικρή ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα (σ) η οποία εκφράζει τους ελευθέρους ηλεκτρικούς φορείς. Ως εκ τούτου η ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα είναι ένα σημαντικό κριτήριο αξιολόγησης των μονωτικών υλικών.

Η αύξηση της ειδικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας στα στερεά μονωτικά, σε τιμές πεδίου, που η καταπόνηση του διηλεκτρικού μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι μόνο θερμική, δίδεται από την σχέση:

$$\sigma = \sigma_0 e^{\frac{-W}{kT}} = \sigma_0 e^{\beta W} \quad (2.3)$$

όπου : σ : η ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα για διαφορά θερμοκρασίας θ ως προς το περιβάλλον

σ_0 : η αρχική ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα

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

k : η σταθερά Boltzmann ($1,37 \cdot 10^{-23}$ Ws/°K)

T : η απόλυτη θερμοκρασία

β : ένας συντελεστής του υλικού

5. Ο συντελεστής $\varepsilon \cdot \text{tg}\delta$

Αν συμβολίσουμε με A την διατομή των πλακών του πυκνωτή του σχήματος 2.1 και την μεταξύ τους απόσταση με d τότε η τιμή της χωρητικότητας C είναι:

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{A}{d} \quad (2.4)$$

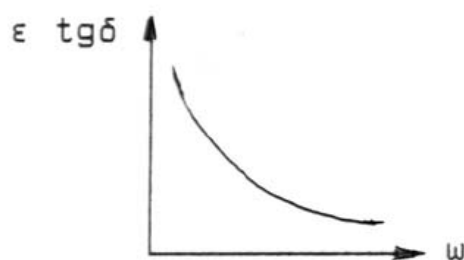
Για την αγωγιμότητα G του παραπάνω πυκνωτή ισχύει η σχέση:

$$G = \sigma \frac{A}{d} \quad (2.5)$$

Από τις σχέσεις 2.2,2.4,2.5 και δεδομένου ότι $\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r$ συμπεράνουμε ότι για τον παραπάνω πυκνωτή παράλληλων πλακών με ενδιάμεσο διηλεκτρικό του σχήματος 2.1 ισχύει:

$$\varepsilon \cdot \text{tg}\delta = \frac{\sigma}{\omega} \quad (2.6)$$

Στο σχήμα 2.3 δίδεται η γραφική παράσταση της χαρακτηριστικής κατά την παραπάνω σχέση. Το γινόμενο $\varepsilon \cdot \text{tg}\delta$ χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση των μονωτικών υλικών.



Σχήμα 2.3 : $\varepsilon \cdot \text{tg}\delta = f(\omega)$ για το ομοιογενές μονωτικό υλικό. (Υποτίθεται ότι η τιμή σ είναι σταθερή με τη θερμοκρασία)

6. Η επιφανειακή αγωγιμότητα

Η διηλεκτρική αντοχή των στερεών μονωτικών μειώνεται, όταν η επιφάνειά τους περιλαμβάνει ξένες επικαθίσεις (σκόνη, υγρασία, κλπ). Το ίδιο συμβαίνει όταν καταπονηθεί θερμικά η επιφάνεια. Έχει διαπιστωθεί, ότι στα φαινόμενα, που εκδηλώνονται στην επιφάνεια των στερεών μονωτικών κατά την ηλεκτρική καταπόνησή τους (κυρίως αύξηση των απωλειών Joule και μερικές εκκενώσεις), συμμετέχει η επιφάνειά τους σε πάχος μέχρι 30\AA . Γι' αυτό, η επιφανειακή αγωγιμότητα είναι ένα κριτήριο για την προδιάθεση των διαφόρων στερεών διηλεκτρικών στην εκδήλωση των παραπάνω φαινομένων. Επειδή οι παράγοντες, που προκαλούν αύξηση της επιφανειακής αγωγιμότητας ποικίλουν (ανάλογα με τις συνθήκες λειτουργίας), η ειδική επιφανειακή αγωγιμότητα δεν είναι κάποια σταθερά των στερεών μονωτικών.

7. Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας

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

8. Η μηχανική αντοχή

Σε αρκετές κατασκευές ενδιαφέρουν (εκτός από τις ηλεκτρικές ιδιότητες των στερεών μονωτικών) και οι μηχανικές ιδιότητές τους, όπως π.χ. : τα πλαστικά μέρη του μηχανισμού περιστροφής ενός ασφαλειοαποζεύκτη σε ένα πίνακα μέσης τάσης, η αντοχή σε εφελκυσμό ενός μονωτικού, η δύναμη τάνυσης σε μονωτήρες των γραμμών μεταφοράς, κλπ.). Στις περιπτώσεις αυτές θεωρείται το στερεό μονωτικό ως ένα "μηχανολογικό εξάρτημα", οπότε ισχύουν για τον υπολογισμό του οι κανόνες της μηχανικής αντοχής των υλικών.

Συχνά ενδιαφέρει η μηχανική σε πλήρεις κατασκευές, που περιλαμβάνουν στερεά μονωτικά, όταν αυτή ενδέχεται να επηρεάσει τη διηλεκτρική αντοχή από την εξάσκηση μεγάλων δυνάμεων ηλεκτρικής προέλευσης, όπως συμβαίνει κατά το βραχυκύκλωμα (π.χ. : πίνακες μέσης τάσης, μετασχηματιστές μεταφοράς και διανομής, μετασχηματιστές μέτρησης στο δίκτυο υψηλών τάσεων, διακόπτες υψηλών τάσεων, κλπ.). Οι δυνάμεις αυτές μπορούν να μειώσουν τις αποστάσεις μόνωσης και να γίνουν αιτία καταστροφής της κατασκευής, όταν δεν υπάρχει η απαιτούμενη μηχανική αντοχή κατά το βραχυκύκλωμα. Η μόνωση π.χ. ενός διακόπτη υψηλής

τάσης δεν εξασφαλίζεται μόνο με επιλογή των σωστών αποστάσεων μόνωσης, προς δημιουργία ηλεκτροστατικού πεδίου, όταν η επιδίωξη αυτή δεν συνδυάζεται με την απαιτούμενη μηχανική αντοχή, που θα διασφαλίζει την ικανότητα μόνωσης μέχρι να διακοπεί το βραχυκύκλωμα από το μέσο προστασίας του δικτύου.

9. Δευτερεύοντα κριτήρια αξιολόγησης

Εκτός από τα κύρια κριτήρια αξιολόγησης που αναπτύξαμε παραπάνω υπάρχουν και άλλα τα οποία αποκτούν μεγάλη σημασία σε ειδικότερες εφαρμογές. Αυτά είναι η χημική σταθερότητα, η υγροσκοπικότητα, η αντοχή στις ακτινοβολίες, η πυκνότητα, το ιξώδες (για υγρά μονωτικά), και η αντοχή σε βιολογικές επιδράσεις, όπως από έντομα ή μικροοργανισμούς. Πολλές από τις ιδιότητες αυτές δεν έχουν σταθερές τιμές, αλλά είναι συνάρτηση άλλων παραγόντων, όπως η συχνότητα του πεδίου, η θερμοκρασία και η υγρασία του περιβάλλοντος. Τέλος το κόστος είναι επίσης κριτήριο αποφασιστικής σημασίας για την αξιολόγηση των μονωτικών υλικών και την επιλογή τους στις διάφορες εφαρμογές[9].

2.2 Μόνωση και ψύξη μετασχηματιστών

Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την απαγωγή της θερμότητας και την ηλεκτρική μόνωση στους μετασχηματιστές εξαρτώνται από διάφορους παράγοντες όπως είναι το είδος της εφαρμογής, η ισχύς του μετασχηματιστή και η ποσότητα της θερμότητας που πρέπει να απαχθεί. Οι συνηθέστεροι τύποι μετασχηματιστών ανάλογα με το μονωτικό και ψυκτικό μέσο του διακρίνονται στις παρακάτω κατηγορίες:

2.2.1 Μετασχηματιστές τύπου GIS

Οι μετασχηματιστές τύπου GIS (Gas Insulation System) χρησιμοποιούν ως μονωτικό και ψυκτικό μέσο κάποιο αέριο σε υψηλή πίεση σε στεγανοποιημένο περιβάλλον. Το πιο συχνά χρησιμοποιούμενο αέριο είναι το εξαφθοριούχο θείο (SF_6) το οποίο είναι άχρωμο, άοσμο, άφλεκτο, χημικά αδρανές και μη τοξικό.

Στην ατμοσφαιρική πίεση, η διηλεκτρική αντοχή του SF_6 είναι περίπου τριπλάσια από την αντίστοιχη του αέρα ή του αζώτου. Στην ατμοσφαιρική πίεση, επίσης το SF_6 έχει τη μισή διηλεκτρική αντοχή από έλαια, αλλά σε υψηλότερες πιέσεις υπερέχει. Το SF_6 μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την μόνωση μετασχηματιστών ισχύος μέχρι αρκετές εκατοντάδες MVA [12].

Το πλεονέκτημα των παραπάνω μετασχηματιστών είναι ότι είναι άφλεκτοι, εύκολοι στην εγκατάσταση και τοποθέτηση τους ενώ καταλαμβάνουν σχετικά μικρό χώρο. Το κυριότερο μειονέκτημα του SF_6 είναι ότι θεωρείται μη οικολογικό διότι συμβάλει στην δημιουργία της τρύπας του όζοντος [9,12].



Σχήμα 2.2: Μετασχηματιστής SF₆ 22kV/390V ισχύος 1500kVA[13].

2.2.2 Μετασχηματιστές ξηρού τύπου

Ένας τύπος ξηρού μετασχηματιστή είναι ο μετασχηματιστής ρητίνης τα τυλίγματα των οποίου εμποτίζονται με μια εποξική ρητίνη υπό κενό. Η ρητίνη αυτή δεν είναι τοξική. Όταν προκύψει βραχυκύκλωμα, η θερμοκρασία δε μεταδίδεται μακριά από το σφάλμα. Εκτός την εποξική ρητίνη χρησιμοποιούνται και άλλα στερεά μονωτικά (π.χ. μίκα) για την μόνωση των τυλιγμάτων τα οποία είναι συνήθως κλάσης H ή F. Η κλάση ενός μονωτικού υλικού προσδιορίζει την μέγιστη θερμοκρασία στην οποία είναι σχεδιασμένο να λειτουργεί. Στον πίνακα 2.2 παρουσιάζονται οι κλάσεις σύμφωνα με το πρότυπο της IEEE[14].

Πινάκας 2.2: Λίστα των γραμμάτων που χρησιμοποιούνται για την κωδικοποίηση της κλάσης της μόνωσης[14].

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

Οι μετασχηματιστές ξηρού τύπου δεν έχουν δοχείο και διάφορα άλλα εξαρτήματα, είναι αερόψυκτοι και διακρίνονται ανάλογα με την κυκλοφορία του αέρα σε:

ξηρούς με φυσική ψύξη στους οποίους η εξωτερική επιφάνεια του ενεργού μέρους έρχεται σε επαφή με τον αέρα του περιβάλλοντος και αυτό είναι αρκετό για ικανοποιητική ψύξη.

ξηρούς με βεβιασμένη κυκλοφορία του αέρα ψύξης στους οποίους χρησιμοποιείται ανεμιστήρας που μέσω καναλιών στον πυρήνα απομακρύνει την θερμότητα. Ο μετασχηματιστής βρίσκεται σε κλειστό περίβλημα.

Το κόστος ενός τέτοιου μετασχηματιστή ξηρού τύπου είναι σχεδόν διπλάσιο από το κόστος ενός συμβατικού με πλήρωση λαδιού. Αλλά και το κόστος συντήρησης των μετασχηματιστών αυτών είναι αρκετά υψηλό. Επίσης λόγω του ότι ψύχονται με τον αέρα παρουσιάζουν το μειονέκτημα του μεγάλου όγκου και γι' αυτό χρησιμοποιούνται μόνο σε μικρά μεγέθη και μάλιστα για μικρές τάσεις.



Σχήμα 2.3: Μετασχηματιστής ξηρού τύπου εποξικής ρητίνης[15].

2.2.3 Μετασχηματιστές ελαίου

Ο μετασχηματιστής ελαίου χρησιμοποιεί το μονωτικό λάδι για την ηλεκτρική μόνωση των τυλιγμάτων του (προστασία από βραχυκυκλώματα) και για την απαγωγή της θερμότητας που αναπτύσσεται σε αυτόν. Επιπρόσθετα στα πηνία του μετασχηματιστή τοποθετείται μονωτικό χαρτί με πάχος το οποίο μπορεί να είναι από μικρότερο του χιλιοστού έως μερικά εκατοστά. Ο συνδυασμός λαδιού χαρτιού έχει το πλεονέκτημα της ίδιας περίπου σχετικής διηλεκτρικής σταθεράς, που έχουν τα υλικά αυτά[8]. Στον πίνακα 2.3 παρατίθενται η διηλεκτρική αντοχή του λαδιού συγκρινόμενη με αυτή του αέρα και του εξαφθοριούχου θείου για διάκενα ηλεκτροδίων 0,5 και 1 cm.

Πίνακας 2.3: Προσεγγιστικές τιμές της διηλεκτρικής αντοχής σε kV αέρα, SF₆ σε ατμοσφαιρική πίεση και λαδιού [14].

Μονωτικό υλικό	Μήκος διακένου, cm	
	0.5	1.0
Αέρας	19	32
SF ₆	45	86
Λάδι	110	218

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 το λόγο αυτό 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 φυτικών ελαίων[10].

Η κωδικοποίηση της ψύξης των μετασχηματιστών γίνεται με χρήση 4 γραμμάτων: τα δυο πρώτα αφορούν στον τρόπο κυκλοφορίας του ψυκτικού μέσου εσωτερικά (σε επαφή με τα τυλίγματα) του μετασχηματιστή και τα δυο τελευταία στον τρόπο κυκλοφορίας του ψυκτικού μέσου εξωτερικά του μετασχηματιστή. Στον πίνακα 2.4 παρατίθεται η λίστα των γραμμάτων που χρησιμοποιούνται για την κωδικοποίηση της ψύξης των μετασχηματιστών και η επεξήγηση τους

Στους μετασχηματιστές λαδιού η κυκλοφορία του λαδιού και του αέρα μπορεί να είναι φυσική ή βεβιασμένη, έτσι έχουμε:

Μ/Σ λαδιού με φυσική κυκλοφορία λαδιού και αέρα(ONAN) στους οποίους η φυσική κυκλοφορία του λαδιού στον λέβητα απομακρύνει μέρος της αναπτυσσόμενης θερμότητας στα πηνία του μετασχηματιστή προς τα τοιχώματα του λέβητα και από εκεί στον εξωτερικό αέρα. Αυτό το είδος είναι και το πιο διαδεδομένο αφού χρησιμοποιείται σε μετασχηματιστές ισχύος μέχρι 3000 kVA [2].

Μ/Σ λαδιού με φυσική κυκλοφορία λαδιού και βεβιασμένη κυκλοφορία του αέρα (ONAF). Στους μετασχηματιστές μεγάλης ισχύος με λάδι η ψύξη του λαδιού διευκολύνεται ακόμα περισσότερο με την εξαναγκασμένη κυκλοφορία του αέρα χρησιμοποιώντας ανεμιστήρες[16].

Μ/Σ λαδιού με βεβιασμένη κυκλοφορία λαδιού και αέρα(OFAF) στους οποίους η κίνηση του λαδιού ψύξης γίνεται μέσω αντλιών και σωληνώσεων προς το ψυγείο, όπου το λάδι ψύχεται και κυκλοφορείται προς τα τοιχώματα του πυρήνα. Χρησιμοποιείται σε μεγάλες ισχύς πάνω από 10 MVA. Σε μετασχηματιστές ίδιας τάξης μεγέθους ισχύος χρησιμοποιείται επίσης η ψύξη με νερό (OFWF) κατά την

οποία το θερμό λάδι τίθεται σε εξαναγκασμένη κυκλοφορία μέσω ψυγείου νερού το οποίο διατάσσεται εκτός του κιβωτίου λαδιού[2].

Πίνακας 2.4 : Λίστα των γραμμάτων που χρησιμοποιούνται για την κωδικοποίηση της ψύξης των μετασχηματιστών και η επεξήγηση τους [4].

Εσωτερικό Μ/Σ	1 ^ο γράμμα (ψυκτικό μέσο)	Γράμμα	Περιγραφή
		O	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
Εσωτερικό Μ/Σ	2 ^ο γράμμα (μηχανισμός 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 ^ο γράμμα (ψυκτικό μέσο)	A	Αέρας
		W	Νερό
	4 ^ο γράμμα (μηχανισμός ψύξης)	N	Φυσική ροή
		F	Εξαναγκασμένη κυκλοφορία



Σχήμα 2.4: Μετασχηματιστής ελαίου [15].

3. Το σύστημα μόνωσης λαδιού – χαρτιού

Ο συνδυασμός μόνωσης λάδι με χαρτί είναι ο πλέον διαδεδομένος στους μετασχηματιστές ενώ το μονωτικό λάδι που χρησιμοποιείται είναι ως επί το πλείστον είναι ορυκτέλαιο. Αν και στην παρούσα εργασία ασχολούμαστε με το μονωτικό λάδι κρίνουμε σκόπιμο να αναφερθούμε και για το μονωτικό χαρτί διότι η μόνωση των μετασχηματιστών προκύπτει από την συνεργασία αυτών των υλικών.

3.1 Μονωτικό χαρτί

Το μονωτικό χαρτί χρησιμοποιείται ως μονωτικό μέσο για την μόνωση των τυλιγμάτων των μετασχηματιστών λαδιού (βλ. σχήμα 3.1 [17]) και για το λόγο αυτό πρέπει να αντέχει σε ηλεκτρική και μηχανική καταπόνηση. Εκτός όμως από τους μετασχηματιστές χρησιμοποιείται επίσης σε καλώδια και πυκνωτές.

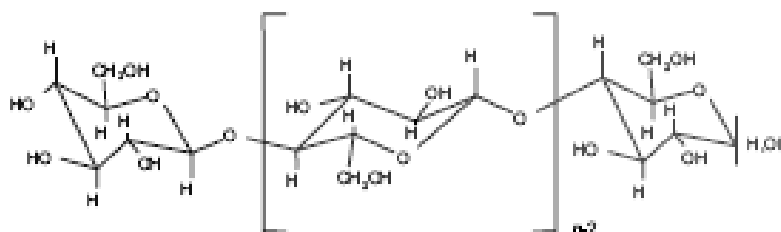
Το μονωτικό χαρτί αποτελείται κυρίως από κυτταρίνη η οποία έχει διηλεκτρική αντοχή σημαντικά μεγαλύτερη της μονάδας ($3,2 \div 7,5$ [18]) και άρα το καθιστά πολύ καλό μονωτικό μέσο. Επίσης σημαντικός παράγοντας που κατέστησε το μονωτικό χαρτί τόσο διαδεδομένο στη χρήση του είναι το φθινό κόστος του αφού η πρώτη υλη για την παρασκευή του είναι το ξύλο.



Σχήμα 3.1: Τμήματα της μόνωσης του μετασχηματιστή κατασκευασμένα από μονωτικό χαρτί.

Η κυτταρίνη είναι ένα πολυμερές φυσικής προέλευσης. Η δομή του πολυμερούς της κυτταρίνης μπορεί να παρασταθεί όπως φαίνεται στο σχήμα 3.2. Κάθε μόριο κυτταρίνης αποτελείται έναν αριθμό μονομερών μονάδων τα οποία

μοιάζουν πολύ με την γλυκόζη. Ο αριθμός των μονομερών μονάδων σε ένα μόριο κυτταρίνης ορίζεται ως βαθμός πολυμερισμού (Degree of Polymerization-DP) της κυτταρίνης. Το πολυμερές της κυτταρίνης μπορεί να παρασταθεί και στην απλούστερη μορφή: $[C_6 H_{10} O_5]_n$, όπου n είναι ο βαθμός πολυμερισμού. Ο βαθμός πολυμερισμού (DP) μπορεί να είναι 1100-1600 για καινούριο χαρτί. Κατά την γήρανση του μορίου της κυτταρίνης, η αλυσίδα πολυμερούς διασπάται και ο αριθμός των μονομερών σε κάθε μόριο κυτταρίνης μειώνεται. Με τη μείωση του βαθμού πολυμερισμού της κυτταρίνης μειώνεται η μηχανική της αντοχή ενώ αλλάζει και το χρώμα και ο βαθμός πολυμερισμού του (DP) πέφτει στο 200 έως 250. Μετά από μια τέτοια μεταβολή του βαθμού πολυμερισμού του χαρτιού, η μηχανική αντοχή του μπορεί να έχει μειωθεί στο 20% της αρχικής και αυτό το σημείο θεωρείται ως το κριτήριο για το τέλος της ζωής της μόνωσης του μετασχηματιστή [6]. Οι κυριότεροι παράγοντες που συμβάλουν στη γήρανση του μονωτικού χαρτιού είναι η θερμότητα, η υγρασία και το οξυγόνο.



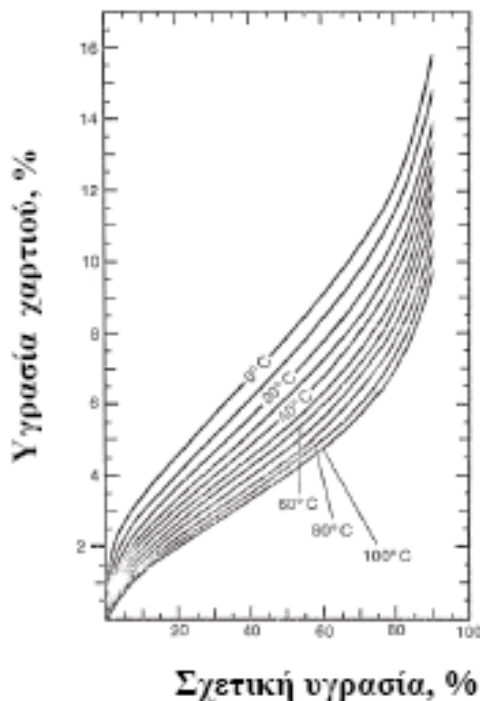
Σχήμα 3.2: Η δομή του πολυμερούς της κυτταρίνης [19].

Η κυτταρίνη αποτελεί σημαντικό συστατικό του ξύλου. Εκτός της κυτταρίνης όμως το ξύλο περιέχει λιγνίτη και ημιγλυκόζη. Με την επεξεργασία Kraft απομακρύνονται κατά το μέγιστο δυνατόν τόσο η λιγνίτη όσο και η ημιγλυκόζη και το τελικό προϊόν είναι χαρτί που αποτελείται σε ποσοστό περίπου 90% από κυτταρίνη, 6-7% λιγνίτη, 3-4% ημιγλυκόζη και ίχνη μεταλλικών κατιόντων. Το χαρτί που έχει υποστεί επεξεργασία Kraft έχει μεγαλύτερη μηχανική αντοχή που αποδίδεται στην μεγαλύτερη περιεκτικότητα ινών κυτταρίνης[20].

Για την επιβράδυνση της γήρανσης του χαρτιού έχει αναπτυχθεί το θερμικά αναβαθμισμένο χαρτί (thermal upgraded paper) το οποίο περιέχει ουσίες, που καταναλώνουν την υγρασία με το να αντιδρούν χημικά με αυτήν και οργανικές βάσεις οι οποίες εν μέρη εξουδετερώνουν τα οξέα. Το χαρτί αυτό έχει διάρκεια ζωής τριπλάσια του χαρτιού Kraft, παράγει όμως μεγαλύτερες ποσότητες οξέων από αυτό[20].

Το κυριότερο μειονέκτημα της κυτταρίνης, άρα και του μονωτικού χαρτιού, είναι ότι είναι υγροσκοπική, έχει δηλαδή την τάση να απορροφάει υγρασία. Το ξηρό χαρτί μπορεί να απορροφήσει μια σημαντική ποσότητα νερού, η οποία είναι συνάρτηση της σχετικής υγρασίας και της θερμοκρασίας (βλ. σχήμα 3.3 [6]). Η

υγρασία που εμπεριέχεται στο χαρτί είναι συνήθως της τάξης του 4-5%[21]. Για τον λόγο αυτό πριν την τοποθέτηση του χαρτιού στον μετασχηματιστή υπόκειται μια διαδικασία αφύγρανσης η οποία μειώνει την υγρασία στο χαρτί σε ποσοστό μικρότερο του 0,5% που είναι και το αποδεκτό όριο υγρασίας.[4,6,17,20,22]



Σχήμα 3.3: Καμπύλες απορρόφησης υγρασίας για το ξηρό χαρτί.

3.2 Μονωτικά λάδια

3.2.1 Προέλευση και παραγωγή των μονωτικών λαδιών.

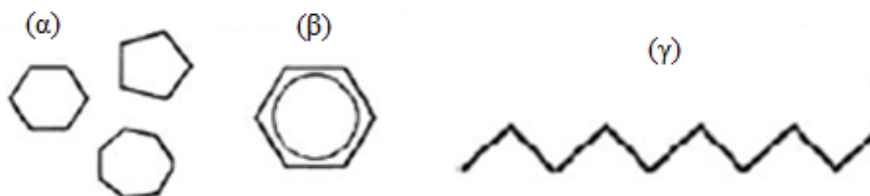
Το αργό πετρέλαιο, απ' το οποίο προέρχονται τα ορυκτά μονωτικά λάδια, βασικά αποτελείται από υδρογονάνθρακες. Αργό πετρέλαιο από διαφορετικές τοποθεσίες εξόρυξης έχει και διαφορετική αναλογία στους διάφορους υδρογονάνθρακες από το οποίο και αποτελείται. Οι κυριότεροι υδρογονάνθρακες μπορούν να καταταγούν σε τρεις ομάδες.

- α) Αρωματικοί υδρογονάνθρακες
- β) Παραφινικοί υδρογονάνθρακες
- γ) Ναφθενικοί υδρογονάνθρακες

Κάθε είδος υδρογονάνθρακα έχει μια χαρακτηριστική μοριακή δομή.

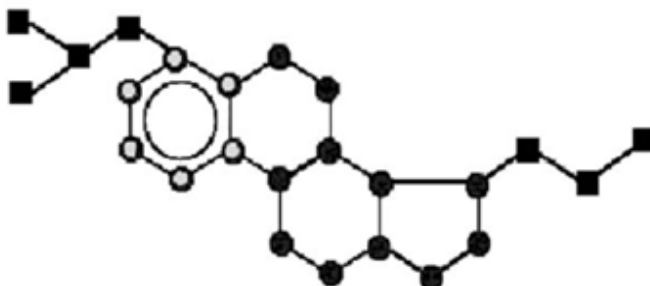
Οι αρωματικοί υδρογονάνθρακες είναι «κεκορεσμένοι». Σ' αυτούς τα άτομα τού άνθρακα ενώνονται με απλό δεσμό και στο μόριο τους περιέχεται το λιγότερο ένας δακτύλιος από άτομα άνθρακα. Η δομή του μορίου τους είναι δακτυλιοειδή.

Οι παραφινικοί και ναφθενικοί υδρογονάνθρακες είναι «ακόρεστοι». Σ' αυτούς δυο ή περισσότερα άτομα τού άνθρακα ενώνονται με διπλό ή πολλαπλό δεσμό. Το γεγονός αυτό καθιστά τους παραφινικούς και ναφθενικούς υδρογονάνθρακες περισσότερο σταθερούς σε σχέση με τους αρωματικούς. Η συγκρότηση των μορίων των παραφινικών υδρογονανθράκων είναι αλυσοειδή ενώ των ναφθενικών δακτυλιοειδή.



Σχήμα 3.3: Μοριακή δομή των κυριότερων υδρογονανθράκων[4].

- α) Ναφθενικοί υδρογονάνθρακες
- β) Αρωματικοί υδρογονάνθρακες
- γ) Παραφινικοί υδρογονάνθρακες



Σχήμα 3.4: Μοριακή δομή μορίου ενός τυπικού μονωτικού λαδιού[4].

Οι υδρογονάνθρακες, που έχουν απλά και μικρά μόρια, βρίσκονται, με κανονική θερμοκρασία και πίεση, σε αέριο κατάσταση. Οι υδρογονάνθρακες με σύνθετα και μεγάλα μόρια βρίσκονται σε ρευστή κατάσταση, ενώ οι υδρογονάνθρακες με μεγαλύτερα και πολυσύνθετα μόρια βρίσκονται σε στερεά κατάσταση (για παράδειγμα, ή άσφαλτος κ.τ.λ.).

Με βάση την πιο πάνω κατάταξη των υδρογονανθράκων υπάρχουν τρεις κύριες κατηγορίες αργών πετρελαίων.

α) Αργό πετρέλαιο παραφινικής βάσης, που περιέχει σε μεγάλη αναλογία (πάνω από 66%) παραφινικούς υδρογονάνθρακες και σε μικρή αναλογία αρωματικούς και ναφθενικούς. Σ' αυτό το πετρέλαιο υπάρχει κερί σε μεγάλη αναλογία, ενώ ή άσφαλτος σε μικρότερη. Τα μόρια εδώ είναι αλυσοειδή.

β) Αργό πετρέλαιο ναφθениκής βάσης, πού περιέχει σε μεγάλη αναλογία (πάνω από 66%) ναφθениκούς υδρογονάνθρακες και σε μικρή αναλογία παραφινικούς. Σ' αυτό το πετρέλαιο υπάρχει άσφαλτος σε μεγάλη αναλογία, ενώ το κερι σε πολύ μικρή. Επίσης υπάρχουν αρκετοί αρωματικοί υδρογονάνθρακες.

γ) Αργό πετρέλαιο μικτής βάσης, πού περιέχει υδρογονάνθρακες όλων των ομάδων σε μεγάλες αναλογίες (καμιά ομάδα δεν περιέχεται σε αναλογία πάνω από 66%). Το πετρέλαιο αυτό περιέχει και άσφαλτο και κερι. Τα μόρια εδώ είναι σε συγκρότηση δακτυλιοειδή. Το 90% των αργών πετρελαίων είναι μικτής βάσεως.

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

Παραγωγή των μονωτικών λαδιών

Δυο είναι οι βασικές επεξεργασίες για την παραγωγή μονωτικού λαδιού από επιλεγμένο αργό πετρέλαιο:

- α) Ο διαχωρισμός κλασμάτων επιθυμητής ρευστότητας με απόσταξη.
- β) Η διύλιση για την απομάκρυνση των ασταθών συστατικών.

α) Κλασματική απόσταξη

Κατά την κλασματική απόσταξη το εκλεγμένο πετρέλαιο καθώς θερμαίνεται εξατμίζεται και οι ατμοί του συμπυκνώνονται σε διάφορες θερμοκρασίες και σχηματίζουν υγρά αποστάγματα.

Όπως είναι γνωστό, για την εξάτμιση στην ατμοσφαιρική πίεση απαιτείται μεγάλη θερμοκρασία, πού μπορεί να οδηγήσει στην αποσύνθεση του λαδιού σε συστατικά μη επιθυμητά. Γι' αυτό βρίσκει εφαρμογή η απόσταξη σε κενό. Σ' αυτή την περίπτωση, επειδή η πίεση αποστάξεως είναι μικρότερη από την ατμοσφαιρική, η θερμοκρασία για την εξάτμιση τού λαδιού είναι χαμηλή.

β) Διύλιση

Μετά από την απόσταξη γίνεται ή διαδικασία καθαρισμού, καθώς και ή επεξεργασία με οξέα. Οι εργασίες αυτές αποτελούν τη διύλιση, πού παίζει σπουδαίο ρόλο στην παραγωγή τού μονωτικού λαδιού. Αν αυτή δεν εκτελεσθεί σωστά το μονωτικό λάδι θα είναι μικρής ή μεγάλης διυλίσεως. Και στις δυο περιπτώσεις πάντως, το λάδι δεν θα έχει ικανοποιητική σταθερότητα.

Έτσι, όταν ή διύλιση είναι μικρή το παραγόμενο μονωτικό λάδι αποσυντίθεται γρήγορα και μέσα σ' αυτό δημιουργούνται μεγάλες ποσότητες λάσπης (ιλύος,

Sludge). Όταν πάλι ή διύλιση είναι πολύ μεγάλη, το λάδι πού παράγεται αποσυντίθεται επίσης γρήγορα. Η οξύτητα του αυξάνεται με όλο και ταχύτερο ρυθμό, ενώ ή λάσπη πού σχηματίζεται αρχικά θα είναι περιορισμένη.

Παλιότερα οι τρόποι διυλίσεως των μονωτικών λαδιών περιορίζονταν στην εντατική επεξεργασία τους με οξέα, (το λάδι έρχεται σ' επαφή με θεϊκό οξύ) καμιά φορά σε συνδυασμό με διαλύτες. Με την επεξεργασία αυτή βελτιώνεται το χρώμα, η οσμή, η σταθερότητα και άλλες φυσικές ιδιότητες. Η επεξεργασία αυτή επιτρέπει επίσης την εξάλειψη μερικών μη επιθυμητών αρωματικών ενώσεων στις όποιες οφείλεται η μικρή σταθερότητα του λαδιού σε ότι αφορά την οξειδωση του. Πρέπει να σημειωθεί ότι υπάρχει ένα «βέλτιστο» σημείο διυλίσεως. Γι' αυτό δεν πρέπει να εξαλειφθούν όλες οι αρωματικές ενώσεις απ' το λάδι. Όταν σ' αυτό δεν υπάρχουν τέτοιες αρωματικές ενώσεις δεν θα σχηματισθεί λάσπη (ιλύς) από οξειδωση και θα διατηρηθεί το χρώμα του, αλλά θα δημιουργηθούν πολύ γρήγορα οξέα και ή οξύτητα του θα αυξηθεί τόσο πολύ, ώστε θα διαβρώσει όλα τα μεταλλικά μέρη του μηχανήματος (π.χ. του μετασχηματιστή).

Έτσι διατηρείται στο λάδι μια ωφέλιμη ποσότητα αρωματικών υδρογονανθράκων, πού το προστατεύουν από οξειδωση και ονομάζονται φυσικά αντιοξειδωτικά.

Οι σύγχρονοι τρόποι διυλίσεως και οι βελτιώσεις στους διαλύτες δίνουν λάδια πολύ καλής ποιότητας, πού μπορούν να ανταποκριθούν στις απαιτήσεις των μεγάλων μετασχηματιστών και των διακοπών υψηλής τάσης.

Ένας απ' αυτούς τούς τρόπους είναι και η διύλιση με υδρογόνο. Σ' αυτή έρχεται σε επαφή με το λάδι, πού δεν έχει διυλιστεί τέλεια, αέριο H_2 κάτω από μεγάλες θερμοκρασίες και πιέσεις. Απαραίτητη είναι ή παρουσία ειδικών καταλυτών.

Με τον πιο πάνω τρόπο απομακρύνονται οι ενώσεις, πού προκαλούν το σχηματισμό λάσπης, ενώ διατηρούνται, όσο είναι δυνατόν, οι αντιοξειδωτικές ενώσεις, πού προστατεύουν το λάδι απ' την οξειδωση. Επίσης βελτιώνεται το χρώμα ή οσμή, ή σταθερότητα και άλλες φυσικές ιδιότητες.

Γενικά μπορούμε να πούμε ότι ή παραγωγή Ικανοποιητικών μονωτικών λαδιών εξαρτάται κατά ένα μέρος από το εκλεγμένο κατάλληλα αργό πετρέλαιο και κατά ένα μέρος από την τεχνική της διυλίσεως. Αν και έχουν γίνει μεταβολές στις μεθόδους διυλίσεως δεν έχει γίνει μεγάλη αλλαγή στα χαρακτηριστικά του προϊόντος εδώ και αρκετές δεκαετίες αλλά έχει δοθεί προσοχή σε βελτιώσεις του και στην τεχνική εξασφαλίσεως σταθερότητας με δοκιμές πού αφορούν την ποιότητα του[23].

3.2.2 Συνθετικά μονωτικά έλαια

Συνθετικά μονωτικά έλαια χρησιμοποιήθηκαν σε μεγάλο βαθμό ως μονωτικά μέσα σε πολλούς μετασχηματιστές και πυκνωτές από τα μέσα της δεκαετίας του 30 έως τα μέσα της δεκαετίας του 70 οπότε και απαγορευτική η παράγωγή και διάθεση τους. Εντούτοις μετασχηματιστές και πυκνωτές που περιέχουν ως διηλεκτρικό υγρό συνθετικά μονωτικά έλαια, συνεχίζουν να βρίσκονται ακόμη και σήμερα σε λειτουργία, λόγω του μεγάλου χρόνου ζωής τους και του υψηλού κόστους αντικατάστασής τους.

Τα συνθετικά μονωτικά λάδια είναι χλωριωμένες φαινόλες. Έχουν για βάση το PCB (Polychlorinated Biphenyl, $C_{12}H_5C_{15}$) και στο εμπόριο έχουν διάφορες ονομασίες: Askarel, Aroclor, Clophen, Inerteen, Nopolin, Pyranol κλπ.

Η σημαντικότερη ιδιότητα των συνθετικού μονωτικού ελαίου είναι το υψηλό σημείο ανάφλεξης του το οποίο ξεπερνά τους 300 °C έναντι 140 °C για το ορυκτέλαιο, γι' αυτό ονομάστηκε "άκαυστο υγρό". Επίσης στις ξαφνικές αυξήσεις ηλεκτρικών φορτίων (όπως συμβαίνει στους μετασχηματιστές) μεταβάλλεται σημαντικά το ιξώδες τους με παράλληλη αύξηση της ειδικής θερμότητας και θερμοαγωγιμότητας τους, πράγμα που τα αναδεικνύει σε θαυμάσια ψυκτικά μέσα. Άλλα χαρακτηριστικά των PCB είναι οι εξαιρετικές διηλεκτρικές ιδιότητες τους, ενώ είναι και ισχυροί διαλυτές.

Τα χαμηλά ποσοστά βιοαποικοδόμησης των συνθετικών λαδιών με βάση το PCB αλλά και η τοξικότητα τους οδήγησε στην βαθμιαία απόσυρση τους από την αγορά διεθνώς και την αντικατάστασή τους με άλλα, λιγότερο τοξικά. Αποτέλεσμα αυτής της ανάγκης, ήταν η εμφάνιση ελαίων παραφινικής βάσης, ή με βάση τους εστέρες ή τις σιλικόνες ή ακόμα και φυτικών ελαίων. Παρόλα αυτά, το σχετικά υψηλό τους κόστος και το γεγονός ότι τα έλαια αυτά εμπεριέχουν μεγάλα ποσοστά υγρασίας τα καθιστούν σήμερα δυσεύρετα στην πράξη και αξιοποιήσιμα μόνο σε ειδικές εφαρμογές μετασχηματιστών. Εδώ πρέπει να προσθέσουμε ότι οι εστέρες, οι σιλικόνες και τα φυτικά έλαια, ανήκουν στην κατηγορία «υψηλής ανάφλεξης», δηλαδή αναφλέγονται σε αρκετά υψηλή θερμοκρασία. Ένα τέτοιο έλαιο δεν μπορεί να αναφλεχθεί σε θερμοκρασία μικρότερη των 300°C. Για την αποφυγή παρεξηγήσεων στην παρούσα εργασία με τον όρο μονωτικά έλαια θα αναφερόμαστε στα ορυκτέλαια καθώς θα ασχοληθούμε αποκλειστικά με αυτά [10,23,24,25].

3.2.3 Χρήσεις μονωτικών λαδιών σε ηλεκτρολογικό εξοπλισμό

Το μονωτικό λάδι πέρα από την χρήση του στους μετασχηματιστές έχει ευρεία χρήση ως μονωτικό και ψυκτικό μέσο και σε άλλους είδους ηλεκτρολογικό εξοπλισμό όπως:

Σε ελαιοδιακόπτες

Στους διακόπτες, το μονωτικό λάδι αποτελεί μονωτικό μέσο και χρησιμεύει για την ψύξη, τον απιονισμό και το σβήσιμο του τόξου που αναπτύσσεται κατά την λειτουργία του διακόπτη.

Σε πυκνωτές

Στους πυκνωτές τα μονωτικά λάδια χρησιμοποιούνται για να ενισχύσουν την μόνωση τους την οποία και διαποτίζουν. Να σημειωθεί ότι σε πυκνωτές παλαιότερης κατασκευής χρησιμοποιήθηκαν σχεδόν αποκλειστικά συνθετικά μονωτικά έλαια με βάση το PCB επειδή δεν αναφλέγονται και επειδή έχουν χαμηλές διηλεκτρικές απώλειες

Σε καλώδια.

Η χρήση του μονωτικού λαδιού στα υπόγεια και υποβρύχια καλώδια έχει σκοπό:

- α) Να ενισχύσει την μόνωση τους που είναι από χαρτί
- β) Να παρεμποδίσει την εισχώρηση υγρασίας και
- γ) Να ψύχει τον αγωγό του καλωδίου, όπως συμβαίνει με τα καλώδια τύπου Pirelli.

Τα λάδια που χρησιμοποιούνται στα καλώδια ψηλής τάσης (για παράδειγμα 150kV) έχουν γενικά ναφθενική βάση. Τα λάδια αυτά πρέπει να είναι ιδιαίτερα ανθεκτικά σε μεγάλες θερμοκρασίες και στη γήρανση. Επίσης πρέπει να εκλύουν όσο το δυνατό λιγότερα αέρια και να είναι παχύρρευστα αν δεν προορίζονται για κυκλοφορία μέσα στα καλώδια.

Σε μονωτήρες διελεύσεως.

Οι κενοί χώροι των μονωτήρων διελεύσεως μετασχηματιστών ή διακοπών πληρώνονται με λάδι το οποίο αυξάνει την μονωτική τους ικανότητα.

Σε μετασχηματιστές οργάνων.

Στους μετασχηματιστές οργάνων (έντασης και τάσης) χρησιμοποιούνται επίσης μονωτικά λάδια για τον εμποτισμό του στερεού μονωτικού τους υλικού που γενικά είναι ειδικό χαρτί[23].

3.2.4 Λειτουργίες του μονωτικού λαδιού

α) Ηλεκτρική μόνωση

Το λάδι παρεμβάλλεται ανάμεσα στα διάφορα στοιχεία του μετασχηματιστή που έχουν διαφορετικά δυναμικά, εμποδίζει την ηλεκτρική υπερπήδηση και ενισχύει τις μονωτικές ιδιότητες που έχουν οι μονώσεις των τυλιγμάτων, εμποδίζοντας έτσι την εισχώρηση υγρασίας[24]. Όπως είναι γνωστό οι μονώσεις των τυλιγμάτων των μετασχηματιστών έχουν σα βάση την κυτταρίνη (χαρτί, χαρτόνι) και έτσι έχουν την τάση να απορροφούν υγρασία, όταν έρθουν σε επαφή με αυτή, με αποτέλεσμα τη μείωση των μονωτικών τους χαρακτηριστικών.

Το μονωτικό λάδι επίσης λειτουργεί ως προστατευτικό κάλυμμα των μεταλλικών επιφανειών του μετασχηματιστή. Αυτό το κάλυμμα προστατεύει τις μεταλλικές επιφάνειες από χημικές αντιδράσεις, όπως την οξείδωση. Αποτέλεσμα της οξείδωσης θα ήταν η εμφάνιση σκουριάς στις επιφάνειες του εξοπλισμού.

Επίσης το μονωτικό λάδι χρησιμοποιείται στους μετασχηματιστές γιατί παρεμποδίζει τη δημιουργία μικροσκοπικών φυσαλίδων αέρα και αερίων στις μονώσεις των τυλιγμάτων. Παρόλο που οι μονώσεις από χαρτί εφαρμόζονται πάνω

στους αγωγούς με προσοχή, δημιουργούνται μικρά διάκενα μεταξύ των μονώσεων και μεταξύ των μονώσεων και των αγωγών. Ο αέρας που υπάρχει σε αυτά τα διάκενα ιονίζεται και έτσι είναι δυνατό να προκληθούν εκκενώσεις. Το μονωτικό λάδι όμως γεμίζει τα διάκενα και παρεμποδίζει τον ιονισμό[24].

Τέλος το μονωτικό λάδι χρησιμεύει επίσης για την απομάκρυνση των μικρών, αλλά σημαντικών σε πλήθος, ιχνών ξένων σωμάτων και υγρασίας, που είναι δυνατό να βρίσκονται μέσα σε κάθε καινούργιο μετασχηματιστή. Τα ίχνη αυτά απομακρύνονται με την κυκλοφορία του λαδιού διαμέσου μιας διατάξεως διηθήσεως (φίλτρου). Τα ίχνη αυτά θα μπορούσαν να σχηματίσουν αγωγίμες γέφυρες μεταξύ των ρευματοφόρων αγωγών διαφορετικού δυναμικού και άρα την δημιουργία τόξου. Παρολ' αυτά το μονωτικό λάδι, δεν είναι καλό λιπαντικό. Ωστόσο είναι διαδεδομένη η χρήση του σε μετασχηματιστές, διακόπτες κ.λ.π[2,24].

β) Θερμική μόνωση

Όπως σε όλες τις ηλεκτρομαγνητικές συσκευές έτσι και στους μετασχηματιστές εμφανίζονται απώλειες υπό μορφή θερμότητας οι οποίες θερμαίνουν τόσο τα τυλίγματα όσο και τον σιδηρό πυρήνα. Αυτές συνίστανται σε απώλειες θερμότητας στο αγωγίμο υλικό, απώλειες θερμότητας από υστέρηση και δινορεύματα στον σιδηρό πυρήνα και απώλειες στο διηλεκτρικό του, και πρέπει καθ' οιονδήποτε τρόπο να απαχθούν εκτός του μετασχηματιστή στον περιβάλλοντα χώρο από αέρα. Η ψύξη του μετασχηματιστή έχει μεγάλη σημασία γιατί η θερμοκρασία που αναπτύσσεται στον μετασχηματιστή επιταχύνει την αλλοίωση του μονωτικού του συστήματος, περιορίζοντας την διάρκεια ζωής του μετασχηματιστή.

Το μονωτικό λάδι λειτουργεί ως μέσο για την απαγωγή της θερμότητας στους μετασχηματιστές. Για το καλύτερο αποτέλεσμα στην απαγωγή της θερμότητας το λάδι πρέπει να έχει χαμηλό ιξώδες και μεγάλη θερμοχωρητικότητα [26]. Οι μετασχηματιστές που χρησιμοποιούν το μονωτικό λάδι ως μέσο ψύξης ονομάζονται μετασχηματιστές λαδιού. Υπάρχουν επίσης και οι ξηροί μετασχηματιστές οι οποίοι ψύχονται ή με ακτινοβολία και φυσική έλξη ή με τη βοήθεια ανεμιστήρα.

Τα πλεονεκτήματα τα όποια παρουσιάζει το λάδι ως μέσο ψύξεως έναντι του αέρα είναι τα εξής:

α) Το μεγαλύτερο ειδικό βάρος, η μεγαλύτερη ειδική θερμότητα και η μεγαλύτερη θερμική αγωγιμότητα του λαδιού έχουν ως αποτέλεσμα αφενός μεν την καλή απαγωγή της θερμότητας των απωλειών σιδήρου και χαλκού (τυλίγματος) αφ' ετέρου δε την δυνατότητα αποθήκευσης μεγάλης ποσότητας ενέργειας θερμότητας πράγμα το οποίο ισχύει για προσωρινές υπερφορτίσεις.

β) Το λάδι αντέχει σε υψηλότερες τάσεις παρά ο αέρας επειδή η αντοχή διασπάσεως του λαδιού μετασχηματιστών είναι περίπου εξαπλάσια αυτής του αέρα.[2]

γ) Διαγνωστικές λειτουργίες

Το μονωτικό λάδι επίσης μπορεί να αποτελέσει μέσο ελέγχου της μονωτικής ικανότητας του συστήματος μόνωσης του μετασχηματιστή άρα και της επιχειρησιακής κατάστασης του ίδιου του μετασχηματιστή. Για τον προσδιορισμό της κατάστασης ενός μετασχηματιστή εκτιμώνται τα περιεχόμενα στο λάδι αέρια, φουράνια και η υγρασία. Οι αντίστοιχες διαγνωστικές μέθοδοι θα αναπτυχθούν σε επόμενο κεφάλαιο[4].

3.2.5 Ιδιότητες και χαρακτηριστικά του λαδιού

Τα λάδια των μετασχηματιστών πρέπει να έχουν ορισμένες ιδιότητες όπως καλά ηλεκτρικά χαρακτηριστικά, να λειτουργούν σαν ψυκτικά με ικανοποιητική απόδοση και να διατηρούν τα αρχικά τους χαρακτηριστικά για όσο γίνεται μεγαλύτερο χρονικό διάστημα.

Τα χαρακτηριστικά των μονωτικών λαδιών μπορούν να χωριστούν σε 3 κατηγορίες: ηλεκτρικά, φυσικά και χημικά, χαρακτηριστικά. Ο προσδιορισμός της κατάστασης ενός μονωτικού λαδιού διαπιστώνεται με τον έλεγχο κάποιων από τα χαρακτηριστικά του. Για το λόγο αυτό έχει μεγάλη σημασία η ανάλυση τους και ο προσδιορισμός των αναγκαίων τιμών και περιορισμών για την κανονική λειτουργία του μετασχηματιστή.

Τα κυριότερα ηλεκτρικά, χημικά και φυσικά χαρακτηριστικά των μονωτικών λαδιών είναι τα παρακάτω και οι τιμές και περιορισμοί (όπου αναφέρονται) αφορούν σε καινούργια λάδια σύμφωνα με τη σύσταση 296/1969 της IEC [22,24].

α. Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά

Τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των μονωτικών λαδιών είναι τα εξής: Η διηλεκτρική αντοχή (E_d), ο συντελεστής απωλειών ($\text{tg}\delta$), η ειδική αγωγιμότητα (σ) και η σχετική διηλεκτρική σταθερά (ϵ_r) για τα οποία έχει γίνει ήδη αναφορά σε προηγούμενο κεφάλαιο (2.1).

1. Διηλεκτρική αντοχή

Πειραματικά, διηλεκτρική αντοχή του λαδιού είναι η μέγιστη τιμή τάσης, που μπορεί να εφαρμοστεί ανάμεσα σε δύο ηλεκτρόδια βυθισμένα στο έλαιο χωρίς να δημιουργηθεί τόξο. Η διηλεκτρική αντοχή δεν είναι κριτήριο της ποιότητας κατασκευής του μονωτικού ελαίου, είναι όμως μια συμβατική μέθοδος δοκιμής, που μπορεί να μας αποκαλύψει το βαθμό, στον οποίο νερό ή και άλλα αιωρούμενα σωματίδια, όπως ίνες κυτταρίνης[22], είναι αναμεμιγμένα στο έλαιο.

Η μετρούμενη τιμή της διηλεκτρικής αντοχής εξαρτάται κυρίως από τη συσκευή και τη μέθοδο που θα χρησιμοποιήσουμε. Η συσκευή όπως και η μέθοδος περιγράφονται σε διάφορους κανονισμούς, ο επικρατέστερος των οποίων είναι ο ASTM D 877. Η μέθοδος που περιγράφεται σε αυτό τον κανονισμό είναι και η πιο

κοινά χρησιμοποιούμενη, για την εκτίμηση της ποιότητας των ηλεκτρομονωτικών ελαίων[10].

2. Σχετική διηλεκτρική σταθερά

Η σχετική διηλεκτρική σταθερά (ϵ_r) είναι $2,2 \div 2,45$ στους 20°C για όλα σχεδόν τα καθαρά λάδια ενώ μεταβάλλεται ελάχιστα μέχρι τους 90°C σε καθαρά λάδια αλλά και οξειδωμένα αλλά ξηρά. Αντίθετα στα ακάθαρτα και σε εκείνα που έχουν υγρασία αυξάνει αισθητά με τη θερμοκρασία.

3. Ειδική αντίσταση

Η ειδική αντίσταση (ρ) είναι το αντίστροφο μέγεθος της ειδικής αγωγιμότητας (σ) όπως φαίνεται και από τον παρακάτω τύπο:

$$\rho = \frac{1}{\sigma} \quad (3.1)$$

Μεγάλη ειδική αντίσταση σημαίνει μικρή περιεκτικότητα ελεύθερων 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 αποσύνθεσης του λαδιού που οφείλονται στην οξείδωση του.

Η μέτρηση του μεγέθους αυτού, που πρέπει να είναι $5 \cdot 10^{11} \div 5 \cdot 10^{10} \Omega \cdot \text{cm}$, είναι ένα κριτήριο σχετικά με την κατάσταση του λαδιού.

4. Συντελεστής απωλειών (tgδ)

Το μονωτικό λάδι χαρακτηρίζεται από κάποιο συντελεστή απωλειών, γιατί υπόκειται, σε διηλεκτρικό που είναι, σε χωρητικά φαινόμενα.

Ο συντελεστής απωλειών αποτελεί για το καινούργιο λάδι μεν, ένα παράγοντα με τον όποιο γίνεται εκτίμηση της ποιότητας του λαδιού, για το μεταχειρισμένο λάδι δε, ένα παράγοντα με τον όποιο ελέγχεται η αποσύνθεση του λαδιού. Πολλά λάδια κρίνονται σαν ακατάλληλα όταν έχουν μεγάλο συντελεστή ισχύος. Πιο συγκεκριμένα, η τιμή της tgδ για καινούριο λάδι που έχει καλά χαρακτηριστικά είναι της τάξης του 0,05% στους 20°C ενώ για λάδι που βρίσκεται σε λειτουργία, η τιμή της tgδ μπορεί να φτάσει την τιμή 0,5% στους 20°C χωρίς να δείχνει σημαντική υποβάθμιση των χαρακτηριστικών του λαδιού. Όταν η τιμή της tgδ φτάσει την τιμή 0,5%, τότε πρέπει να γίνει παραπέρα έρευνα της κατάστασης του λαδιού[23].

Έχει αποδειχθεί ότι ο συντελεστής απωλειών λαδιού μεταβάλλεται γραμμικά σε συνάρτηση με την αποσύνθεση του λαδιού από οξείδωση ή σε συνάρτηση με τα ξένα σωματίδια που υπάρχουν στο λάδι. Τα ξένα σωματίδια επηρεάζουν κυρίως το ρεύμα απωλειών I_{loss} και επομένως τις τιμές της tgδ σύμφωνα με την σχέση 2.2. Επίσης ο συντελεστής απωλειών του λαδιού μεταβάλλεται με την θερμοκρασία όπως θα αναλύσουμε σε επόμενη παράγραφο.[23,10]

β. Φυσικά και χημικά χαρακτηριστικά

1. Χρώμα

Το χρώμα του μονωτικού ελαίου πρέπει να είναι κίτρινο ανοιχτό και η διαφορά από λάδι σε λάδι να είναι μικρή.

Το χρώμα του αχρησιμοποίητου ελαίου είναι κάποιο στοιχείο για να εκτιμηθεί η κατάσταση του. Το ίδιο ισχύει τόσο για τα λίγο μεταχειρισμένα έλαια όσο και για τα έλαια, που βρίσκονται σε χρήση για πολύ χρόνο. Αν η κατάσταση των τελευταίων έχει χειροτερεύσει από τη χρήση τους, είναι δυνατό να βγουν συμπεράσματα από τη μεταβολή στο χρώμα τους, σε συνδυασμό όμως και με άλλους ελέγχους. Η μεταβολή του χρώματος του ελαίου που βρίσκεται σε υπηρεσία πιθανό να σημαίνει οξείδωση ή παρουσία ξένων σωματιδίων μέσα σ' αυτό.

Πρέπει, ωστόσο, να σημειωθεί ότι το χρώμα του δείγματος δεν αποτελεί πάντα έναν αξιόπιστο παράγοντα για τον καθορισμό της ποιότητας του ελαίου και δε θα πρέπει να χρησιμοποιείται αυτόνομα για το χαρακτηρισμό του[10,24].

2. Πυκνότητα

Η πυκνότητα του μονωτικού ελαίου πρέπει να είναι $0,85 \pm 0,92$ gr/ml (ανάλογα με την προέλευση) σε θερμοκρασία 20°C.

Η αύξηση της πυκνότητας του μονωτικού λαδιού μετασχηματιστή μπορεί να οφείλεται στα παραπροϊόντα αποικοδόμησης, στον όγκο του ελαίου, δηλαδή στη χημική αποσύνθεση του μονωτικού χαρτιού στα παραγόμενα ιόντα χαλκού, ή στις ελεύθερες ρίζες διασπασμένων αλυσίδων υδρογονανθράκων[10]. Επίσης η πυκνότητα του μονωτικού λαδιού αυξάνεται με αύξηση της θερμοκρασίας του μονωτικού λαδιού. Λόγω της αυξομείωσης της πυκνότητας ο όγκος του λαδιού αυξομειώνεται.

3. Συντελεστής θερμικής διαστολής

Ο συντελεστής θερμικής διαστολής του λαδιού είναι η αύξηση της μονάδας του όγκου για αύξηση της θερμοκρασίας κατά 1°C και πρέπει να είναι $0,7 \pm 0,8 \cdot 10^{-3} / ^\circ\text{C}$. 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

$$\sigma.\theta.\delta. = \frac{S_1 - S_2}{S_1(T_2 - T_1)} \quad (3.2)$$

όπου $\sigma.\theta.\delta.$ ο συντελεστής θερμικής διαστολής, S_1 το ειδικό βάρος σε θερμοκρασία T_1 και S_2 το ειδικό βάρος σε θερμοκρασία T_2 .

4. Ειδική θερμότητα

Η ειδική θερμότητα C του μονωτικού ελαίου σε δεδομένη θερμοκρασία και πίεση, είναι το ποσό ενέργειας (cal) που απαιτείται για να αυξηθεί μοναδιαία μάζα (1gr) του λαδιού κατά 1 βαθμό θερμοκρασίας (1°C). Η μεταβολή αυτή μπορεί να θεωρηθεί ότι γίνεται υπό σταθερή πίεση οπότε η ειδική θερμότητα συμβολίζεται ως C_p [9]. Η ειδική θερμότητα του μονωτικού λαδιού χαρακτηρίζει την ικανότητα του να απορροφά θερμότητα και κατά συνέπεια την καταλληλότητα του ως ψυκτικού μέσου.

Η ειδική θερμότητα C_p του μονωτικού ελαίου πρέπει να είναι μεταξύ $0,4\div 0,5$ cal/(gr $\cdot^{\circ}\text{C}$) ανάλογα με την θερμοκρασία του λαδιού.

5. Θερμική αγωγιμότητα

Θερμική αγωγιμότητα (K) ενός υλικού είναι το ποσό θερμότητας που απάγεται στη μονάδα του χρόνου από μια μοναδιαία επιφάνεια του υλικού, όταν υπάρχει διαφορά ενός βαθμού θερμοκρασίας σε μοναδιαίο πάχος υλικού. Η θερμική αγωγιμότητα του μονωτικού λαδιού επομένως, έχει να κάνει με τη δυνατότητα απαγωγής της θερμότητας που αναπτύσσεται σε αυτό [9].

Η θερμική αγωγιμότητα του μονωτικού λαδιού πρέπει να είναι $3\div 4\cdot 10^{-4}$ cal/(cm \cdot s $\cdot^{\circ}\text{C}$) ανάλογα με τη θερμοκρασία.

6. Κινητική εσωτερική τριβή (ιξώδες)

Με τον όρο ιξώδες περιγράφεται η εσωτερική αντίσταση ενός υγρού κατά την ροή του. Όσο μικρότερη είναι η τιμή του ιξώδους για ένα υγρό τόσο πιο εύκολα αυτό ρέει. Για το λόγο αυτό 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. Το ιξώδες μετριέται με ειδικό όργανο που λέγεται ιξωδόμετρο. Η μέτρηση γίνεται κυρίως σε βαθμούς Engler, Centistoke (cSt) ή Centipose (cP).

Οι επιτρεπτές τιμές της εσωτερικής τριβής των μονωτικών λαδιών κατά τις Συστάσεις της IEC έχουν να κάνουν με την κατηγορία με την οποία αυτά ανήκουν. Σύμφωνα με τη Σύσταση 296/1969 της IEC τα λάδια κατατάσσονται σε δυο κατηγορίες, I και II, που ορίζονται από τα ακόλουθα χαρακτηριστικά των λαδιών.

- εσωτερική τριβή cSt στους 20°C και στους -15°C ή -30°C .
- σημείο ανάφλεξης
- σημείο ροής.

Έτσι, η εσωτερική τριβή λαδιού δε πρέπει να υπερβαίνει τα όρια: Για λάδι κατηγορίας I να είναι 40 cSt στους 20°C και 800 cSt στους -15°C . Για λάδι κατηγορίας II να είναι 25 cSt στους 20°C και 1800 cSt στους -30°C [23].

Η τιμή του ιξώδους ενός λαδιού αυξάνεται όσο αυτό βρίσκεται σε λειτουργία επειδή μπορεί να έχει μολυνθεί με κολλοειδής ακαθαρσίες ή τα μόρια του λαδιού να

έχουν συνδυαστεί με άλλα μεγαλύτερα. Επίσης όπως θα δείξουμε σε επόμενο κεφάλαιο τιμή του ιξώδους ενός λαδιού αυξάνεται με την μείωση της θερμοκρασίας του λαδιού[23,26].

7. Σημείο ροής

Το σημείο ροής ενός υγρού είναι η πιο χαμηλή θερμοκρασία στην οποία το υγρό αρχίζει να ρέει μετά από ψύξη που του έγινε με προκαθορισμένες συνθήκες.

Το σημείο ροής αποτελεί χαρακτηριστικό του μονωτικού λαδιού και καθορίζεται από τον τρόπο παραγωγής του και από το αργό πετρέλαιο απ' το οποίο προέρχεται. Το χαρακτηριστικό αυτό έχει μεγάλη σημασία αφενός για την ψύξη του μετασχηματιστή αφετέρου για τη λειτουργία του ηλεκτρονόμου buchholz (buchholz relay) και του αλλαγέα σχέσης μεταφοράς με φορτίο (on-load tap changing equipment) του μετασχηματιστή.

Για λάδια που προορίζονται για μηχανήματα που λειτουργούν στο ύπαιθρο δεν πρέπει να είναι πάνω από -15°F ($-45,6^{\circ}\text{C}$)[23].

8. Καθαρότητα

Το μονωτικό λάδι πρέπει να είναι διαυγές, να μη περιέχει αιωρούμενα ξένα σωματίδια (σκόνες, ίνες κ.λ.π.), να μην περιέχει βλαβερές προσμίξεις, όπως αλκάλια, οξέα ή ελεύθερο θείο (που και σε ίχνη ακόμη επιδρά διαβρωτικά στις γυμνές μεταλλικές επιφάνειες).

Μπορούμε να προσδιορίσουμε εάν υπάρχουν ξένα σωματίδια στο λάδι με τον έλεγχο της διηλεκτρικής του αντοχής. Τα ξένα σωματίδια στο λάδι μειώνουν τις αποστάσεις μόνωσης, γιατί σχηματίζουν αγώγιμες γέφυρες με αποτέλεσμα τη μείωση της τάσης διάσπασης.

Επίσης υπάρχουν μέθοδοι δοκιμών που αποσκοπούν στην ανίχνευση ελεύθερου θείου στα μονωτικά λάδια βασισόμενες στην ιδιότητα του να προκαλεί διάβρωση στον γυμνό χαλκό[23].

9. Διαλυτότητα του νερού στο λάδι

Έχει σημαντική σημασία η διαλυτότητα του νερού στο λάδι στη μονωτική του ικανότητα, επειδή, ίχνη υγρασίας μπορούν να ενυπάρχουν στις στερεές μονώσεις (χαρτί, βαμβάκι) που στη συνέχεια θα διαλυθούν στο λάδι ή μπορεί να απορροφήσει το λάδι υγρασία από τον ατμοσφαιρικό αέρα. Για το λόγο αυτό τα δοχεία διαστολής πρέπει να παρουσιάζουν μικρή επιφάνεια λαδιού σ' επαφή με τον αέρα και πάντοτε μέσω αναπνευστήρα με υγροσκοπικές ουσίες.

Η μέση τιμή της περιεκτικότητας νερού (κατά ASTM D1533) στο λάδι αυξάνεται καθώς τα διηλεκτρικά χαρακτηριστικά του χειροτερεύουν. Η μέγιστη επιτρεπτή τιμή περιεκτικότητας νερού στα χρησιμοποιημένα ηλεκτρομονωτικά έλαια είναι τα 35 ppm για την περίπτωση ηλεκτρικών διατάξεων με ονομαστική τάση μέχρι

69 kV, τα 25 rpm για ονομαστική τάση μέχρι 150 kV και τα 20 rpm για διατάξεις με ονομαστική τάση μέχρι τα 400 kV[28].

10. Διάλυση, απορρόφηση και έκλυση αερίων από το λάδι

Η διάλυση, απορρόφηση και έκλυση αερίων από το λάδι εξαρτάται από τη φύση και προέλευση του λαδιού, επειδή οι φυσαλίδες αερίων μέσα στο λάδι ιονίζουν και δημιουργούν έτσι δρόμους για τη διάσπαση των μονώσεων. Πάντως η έκλυση αερίων πρέπει να ελέγχεται σχολαστικά (προστασία Buchholz).

11. Πτητικότητα

Η πτητικότητα του μονωτικού ελαίου πρέπει να είναι χαμηλή, επειδή η απώλεια λαδιού από εξάτμιση είναι επικίνδυνη (στέγνωμα) και δαπανηρή (συχνές συμπληρώσεις λαδιού).

12. Σημεία αναφλέξεως και καύσεως

Σημείο αναφλέξεως είναι η θερμοκρασία στην οποία το λάδι αναδίδει ατμούς, που με τον ατμοσφαιρικό αέρα δημιουργούν εύφλεκτο μίγμα και αναφλέγεται με σπινθήρα. Για λόγους ασφάλειας το σημείο αυτό δεν πρέπει να είναι κάτω από τους 160°C. Το σημείο αναφλέξεως ελέγχεται και προσδιορίζεται με τη συσκευή PENSKY-MARTENS. Να σημειωθεί ότι το σημείο ανάφλεξης δεν επηρεάζεται σχεδόν καθόλου από τον χρόνο λειτουργίας άρα και την γήρανση του λαδιού[27].

Σημείο καύσεως είναι η θερμοκρασία στην οποία οι ατμοί αναφλέγονται και στη συνέχεια καίγεται το λάδι, όταν υπάρχει περίσσεια ατμοσφαιρικού αέρα. Το σημείο αυτό είναι συνήθως 15% πάνω από το σημείο αναφλέξεως. Πάντως δεν επιτρέπεται να είναι κάτω από 200°C. Πολύ υψηλά σημεία αναφλέξεως και καύσεως δεν πρέπει να επιζητούνται, επειδή (χωρίς να ωφελούν σε κάτι) αποβαίνουν σε βάρος άλλων χαρακτηριστικών (ιξώδες π.χ.).

13. Περιεκτικότητα σε τέφρα

Η περιεκτικότητα σε τέφρα δεν πρέπει να ξεπερνάει το 0,001%, αλλιώς το λάδι χρειάζεται διήθηση.

14. Οξύτητα ή βαθμός εξουδετερώσεως

Η ύπαρξη οξέων στα λάδια προκαλεί διάβρωση στα μεταλλικά μέρη του μετασχηματιστή. Τα προϊόντα που προέρχονται από αυτή τη διάβρωση ελαττώνουν σημαντικά τη διηλεκτρική αντοχή του λαδιού. Η οξύτητα μετριέται με το βαθμό εξουδετερώσεως, που είναι το ποσό των mgf KOH που απαιτείται για την ολοσχερή εξουδετέρωση των οξέων που περιέχονται σε ένα gr λαδιού. Δεν πρέπει πάντως ο

βαθμός εξουδετερώσεως να ξεπερνάει τα 0,03 mgr KOH/gr. Η οξύτητα ενός λαδιού αυξάνει με την πάροδο χρόνου, καθώς αυξάνεται η οξείδωση του [10], και προσεγγιστικά μπορεί να υπολογισθεί από τη σχέση:

$$\log A = f \log Y + g \quad (3.3)$$

όπου A: η οξύτητα σε 10^{-2} mgr KOH/gr
Y : τα χρόνια λειτουργίας του λαδιού
g=0,405
f=0,725

Η αυξημένη οξύτητα μπορεί να αποδοθεί στα παραπροϊόντα γήρανσης, αλλά και στις συγκεντρώσεις επιπρόσθετων συστατικών, όπως π.χ. η ενδεχόμενη συγκέντρωση PCBs σε επίπεδα μεγαλύτερα των 50ppm [28]. Τα οξέα μπορεί επίσης να εμφανιστούν κατά την διαδικασία της δύλισης ή ακόμα μπορεί να υπήρχαν στο αρχικό αργό πετρέλαιο και να μην απομακρύνθηκαν κατά την κλασματική απόσταξη [27].

15. Αλκαλικότητα ή βαθμός σαπωνοποίησης

Στα καινούργια λάδια η αλκαλικότητα πρέπει να είναι αμελητέα. Ύπαρξη όμως σημαντικής αλκαλικότητας σημαίνει μόλυνση του λαδιού και, επειδή η ύπαρξη αλκαλικότητας μειώνει τη διηλεκτρική του ικανότητα, πρέπει να ελέγχεται. Βαθμός σαπωνοποίησης είναι το μέτρο της αλκαλικότητας και είναι το ποσό των mgr KOH που χρειάζονται για πλήρη σαπωνοποίηση 1 gr λαδιού. Ο βαθμός αυτός πρέπει να είναι 0,3÷ 0,6 mgr KOH/gr και όταν φτάσει το 1,5 mgr KOH/gr, επιβάλλεται η αντικατάσταση του λαδιού.

16. Επιφανειακή τάση

Η επιφανειακή τάση αποτελεί μοριακή ιδιότητα, που οφείλεται στις έλξεις μεταξύ των μορίων. 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. Γι' αυτό, 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 συμπεράσματα σχετικά με την ποιότητα και την εξέλιξη των ιδιοτήτων του ελαίου. Τα πιο πάνω ισχύουν τόσο για τα καινούργια έλαια όσο και για τα έλαια που βρίσκονται σε μηχανήματα εν λειτουργία.

Η επιφανειακή τάση πρέπει να είναι $20 \div 10^{-3}$ N/m, επειδή όσο περισσότερα αιωρήματα υπάρχουν τόσο μικραίνει η επιφανειακή τάση [10,24].

17. Σταθερότητα χαρακτηριστικών

Τα χαρακτηριστικά του λαδιού πρέπει να μένουν αναλλοίωτα όταν λειτουργεί σε επαφή με γυμνό χαλκό και σε θερμοκρασία μέχρι 90°, γιατί αλλιώς αρχίζουν οι διαβρώσεις, οξείδωση του λαδιού, ανάπτυξη οξύτητας και εμφάνιση ιζήματος (λάσπης-sludge). Η λάσπη εμποδίζει την ελεύθερη κυκλοφορία του λαδιού και τότε (εξαιτίας της κακής ψύξεως του λαδιού) έχουμε επιτάχυνση των οξειδώσεων του λαδιού, του ρυθμού αυξήσεως της οξύτητας και του ρυθμού αποθέσεως λάσπης. Για το λόγο αυτό είναι απαραίτητη η δοκιμή ταχείας οξειδώσεως. Αυτή (κατά τη μέθοδο της IEC) συνίσταται στην παροχή ενός λίτρου οξυγόνου την ώρα μέσα από το υπό δοκιμή λάδι (που διατηρείται σε θερμοκρασία 100°C) με παρουσία χαλκού σαν καταλύτη. Μετά από 164 ώρες ελέγχεται ο βαθμός εξουδετερώσεως και ο σχηματισμός λάσπης (βαθμός εξουδετερώσεως 0,4 mgr KOH/gr και λάσπη 0,1% κατά βάρος). Ενδεικτικά σημειώνεται ότι αν, για οποιοδήποτε λόγο, αυξηθεί η θερμοκρασία λειτουργίας του λαδιού κατά 5°C μειώνεται ο χρόνος ζωής του κατά 25%. Για το λόγο αυτό προστίθενται αντιοξειδωτικά πρόσθετα (oxidation inhibitors) που μηδενίζουν σχεδόν τον κίνδυνο σχηματισμού οξέων και λάσπης. Τα πρόσθετα αυτά, που είναι συνήθως φαινολικές ή αμινικές ενώσεις, καταναλίσκονται βαθμιαία με τη λειτουργία του λαδιού και υπάρχουν πίνακες και μέθοδοι για έλεγχο της περιεκτικότητας σε πρόσθετα[24].

4. Καταπόνηση μόνωσης μετασχηματιστών

4.1 Τα φαινόμενα γήρανσης και διάσπασης στο μονωτικό λάδι

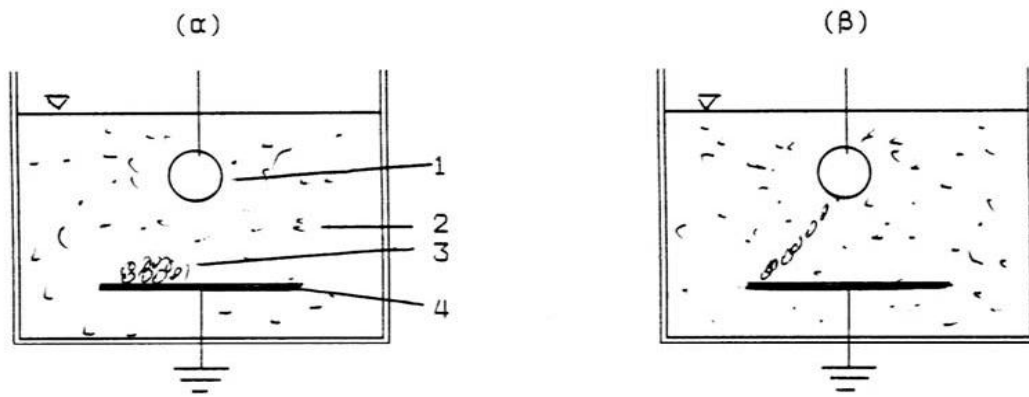
Τα φαινόμενα γήρανσης και διάσπασης των μονωτικών υγρών δεν έχουν ερμηνευτεί πλήρως. Έχει διατυπωθεί η άποψη, ότι οι παράγοντες μείωσης της διηλεκτρικής αντοχής μπορεί να είναι οι ίδιοι με εκείνους κατά τη γήρανση και διάσπαση των στερεών μονωτικών. Η δυσκολία για τη μελέτη των παραγόντων μείωσης της διηλεκτρικής αντοχής των υγρών μονωτικών, οφείλεται στην αλλαγή της μοριακής δομής τους μετά από μία τιμή της εφαρμοζόμενης τάσης[8].

Εκτός από τους παράγοντες αυτούς, η γήρανση και η διάσπαση του μονωτικού ελαίου αποδίδεται κυρίως στα αιωρούμενα σε αυτό ξένα σωματίδια, τα οποία φαίνεται ότι μειώνουν τις αποστάσεις μόνωσης, γιατί σχηματίζουν αγωγίμες γέφυρες μεταξύ των ρευματοφόρων μερών με διαφορετικό δυναμικό. Τα σωματίδια αυτά μπορεί να είναι[4,10]:

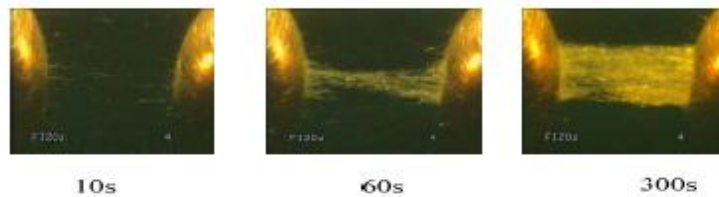
- i. Μη μεταλλικά σωματίδια όπως τεμάχια μονωτικού χαρτιού ή χαρτονιού.
- ii. Μεταλλικά σωματίδια που προέρχονται από τις μεταλλικές επιφάνειες του μετασχηματιστή όπως ιόντα χαλκού που προέρχονται από τα ελίγματα του μετασχηματιστή και δημιουργούνται λόγω του όξινου χαρακτήρα του ελαίου.
- iii. Υγρασία.
- iv. Παραπροϊόντα της χημικής αποσύνθεσης του λαδιού λόγω της οξείδωσης του, όπως οξέα, αλδεΐδες, κετόνες κ.λ.π

Το φαινόμενο αυτό μπορεί εύκολα να διαπιστωθεί πειραματικά με τη διάταξη του σχήματος 4.1, όπου τα μικρά τεμάχια χαρτιού (3) διατάσσονται κατά την εφαρμογή της τάσης μεταξύ των ηλεκτροδίων. Στο σχήμα 4.2 επίσης μπορούμε να δούμε καλύτερα τον σταδιακό σχηματισμό της αγωγίμης γέφυρας σε λάδι με 0.00750% περιεκτικότητα σε αγωγή σωματίδια σε 3 χρονικές στιγμές και αναπτυσσόμενη τάση στα ηλεκτρόδια ίση με 15kV.

Τέλος διάσπαση στο μονωτικό λάδι μπορεί να επέλθει λόγω της ύπαρξης φυσαλίδων αέρα σε αυτό. Όπως είναι γνωστό η τάση διάσπασης του αέρα είναι μικρότερη αυτής του μονωτικού λαδιού επομένως οι φυσαλίδες αέρα μπορούν να προκαλέσουν διάσπαση του μονωτικού λαδιού κατά τρόπο αντίστοιχο με αυτόν που προκαλούν τα ξένα σωματίδια στο μονωτικό λάδι.



Σχήμα 4.1 : Πειραματική απόδειξη για τη διάταξη των αιωρούμενων σωματιδίων στο μονωτικό λάδι, υπό μορφή γέφυρας μεταξύ των ηλεκτροδίων.
 1, 4 : ηλεκτρόδια εφαρμογής της τάσης
 2 : μονωτικό λάδι
 3 : τεμάχια χαρτιού
 α) Τεμάχια χαρτιού πάνω στο ηλεκτρόδιο πλάκα προ της εφαρμογής της τάσης.
 β) Διάταξη των τεμαχίων χαρτιού κατά την εφαρμογή της τάσης.



Σχήμα 4.2: Σταδιακός σχηματισμός αγώγιμης γέφυρας μεταξύ δυο σφαιρικών ηλεκτροδίων, απόστασης 10mm μεταξύ τους και υπό τάση 15kV, σε λάδι με 0.00750% περιεκτικότητα σε αγώγιμα σωματίδια σε 3 χρονικές στιγμές (10s, 60s και 300s)[29].

4.2 Φαινόμενα προ και κατά τη διάσπαση των στερεών μονωτικών υλικών

Από τη στιγμή που θα εγκατασταθεί η μόνωση του μετασχηματιστή, που στην περίπτωση μας είναι ο συνδυασμός λαδιού χαρτιού, αρχίζει μια αργή διαδικασία γήρανσης.

Τα φαινόμενα γήρανσης και διάσπασης των υγρών μονωτικών δεν έχουν ερμηνευτεί πλήρως. Έχει διατυπωθεί η άποψη, ότι οι παράγοντες μείωσης της διηλεκτρικής αντοχής μπορεί να είναι οι ίδιοι με εκείνους κατά τη γήρανση και διάσπαση των στερεών μονωτικών. Για το λόγο αυτό παραθέτουμε παρακάτω τα Φαινόμενα προ και κατά τη διάσπαση των στερεών μονωτικών υλικών.

Από τις διάφορες έρευνες, που έχουν γίνει, για τα φαινόμενα γήρανσης και διάσπασης των στερεών μονωτικών υλικών μπορεί κανείς να ομαδοποιήσει τις μεθόδους, που εφαρμόζονται, σε δύο βασικές θεωρίες :

- 1) Τη **μακροσκοπική θεωρία** των φαινομένων προ και κατά τη διάσπαση των στερεών μονωτικών, και
- 2) Τη **κβαντομηχανική θεωρία** των φαινομένων προ και κατά τη διάσπαση των στερεών μονωτικών.

Σύμφωνα με την "μακροσκοπική θεωρία", τα αποτελέσματα των ερευνών βασίζονται (ή αποσκοπούν) σε κάποιο ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα, το οποίο πηγάζει συνήθως από το συνδυασμό των ηλεκτρικών μετρήσεων με οπτικές παρατηρήσεις για την εκδήλωση ακουστικών και φωτεινών φαινομένων, καθώς και αλλαγές στην επιφάνεια του υλικού.

Στην κβαντομηχανική θεωρία ενδιαφέρει κυρίως η ενέργεια των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων (κυρίως ηλεκτρόνια), κατά την εξαναγκασμένη επιβράδυνσή τους στα ηλεκτρόδια. Πρόκειται δηλαδή για μία συσχέτιση των φαινομένων προ και κατά τη διάσπαση, με το φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, που εκπέμπεται τότε.

4.2.1 Η μακροσκοπική θεωρία των φαινομένων προ και κατά τη διάτρηση των στερεών μονωτικών

Τα στερεά μονωτικά αποκτούν συνήθως μόνιμες βλάβες προ της διάσπασης και καταστρέφονται κατά τη διάτρηση. Η ανάγκη για να δοθεί μία εξήγηση στις παραπάνω αλλαγές των υλικών (προ και κατά τη διάτρηση), οδήγησε στην αναζήτηση των διαφόρων παραγόντων, που τις προκαλούν. Έτσι, από μετρήσεις, που έχουν γίνει σε διάφορα στερεά μονωτικά (κυρίως μετρήσεις της τάσης διάσπασης σε σχέση με το χρόνο και τη μορφή της τάσης), οι οποίες έχουν συνδυαστεί με παρατηρήσεις σχετικά με την αλλαγή της μοριακής δομής, που προκαλείται στα υλικά αυτά, θεωρείται ότι υπάρχουν οι παρακάτω βασικοί παράγοντες μείωσης της σταθερότητας των μορίων τους:

1. Οι απώλειες Joule
2. Οι δυνάμεις Coulomb
3. Οι μερικές εκκενώσεις
4. Η θερμοκρασία του περιβάλλοντος

Οι αντίστοιχες προς τα παραπάνω μορφές της διάτρησης είναι:

1. Η θερμική διάτρηση

2. Η ηλεκτρική διάτρηση
3. Η ηλεκτροχημική διάτρηση ή τεχνητή γήρανση
4. Η θερμοχημική διάτρηση

1. Η θερμική διάτρηση

Το φαινόμενο της θερμικής διάτρησης εμφανίζεται λόγω της θερμικής καταπόνησης του υλικού σε χαμηλές τιμές τάσης και οφείλεται στις απώλειες Joule. Σαν αποτέλεσμα έχει την τήξη και απανθράκωση του υλικού, ιδιαίτερα σε περιοχές που οι απώλειες Joule είναι αυξημένες. Ο οχετός διάτρησης δημιουργείται όταν η ειδική αγωγιμότητα (σ), η οποία αυξάνει σύμφωνα με την σχέση 2.3, σε κάποιο σημείο του υλικού αποκτήσει την απαιτούμενη για θερμική διάτρηση οριακή τιμή (σ_1).

2. Η ηλεκτρική διάτρηση

Όταν στο δοκίμιο εφαρμόζεται τάση με ενεργό τιμή αρκετά μεγαλύτερη από αυτή που δύναται να προκαλέσει θερμική διάτρηση, υπάρχει το ενδεχόμενο να σημειωθεί ηλεκτρική διάτρηση. Αυτό οφείλεται στην αυξημένη πεδιακή ένταση και συνεπώς στην αυξημένη ενέργεια των ελεύθερων ηλεκτρονίων. Για το λόγο αυτό, από μια τιμή της τάσης κι έπειτα η διάτρηση του υλικού αποδίδεται στις δυνάμεις Coulomb και όχι στη θερμότητα Joule που αναπτύσσεται.

Έτσι, θεωρείται ότι η διάτρηση οφείλεται σε:

- 1) Αυτοσυντηρούμενο ιονισμό που παραμένει σε περιοχή του υλικού, το καταπονεί και έχει ως τελικό αποτέλεσμα τη διάτρησή του
- 2) Μηχανική τάνυση του υλικού, δηλαδή διαχωρισμό του σε αρνητικούς και θετικούς φορείς, υπό την επίδραση των δυνάμεων του ηλεκτρικού πεδίου
- 3) Συνδυασμό των παραπάνω περιπτώσεων

Όσον αφορά στην εικόνα που παρουσιάζει το ηλεκτρικό τόξο κατά τη διάτρηση, η ηλεκτρική διάτρηση χαρακτηρίζεται ως:

- Δενδροειδής (εμφανίζονται θύσανοι με διεύθυνση κάθετη στο ηλεκτρικό πεδίο)
- Υπό μορφή οχετού με διεύθυνση τη διεύθυνση του πεδίου

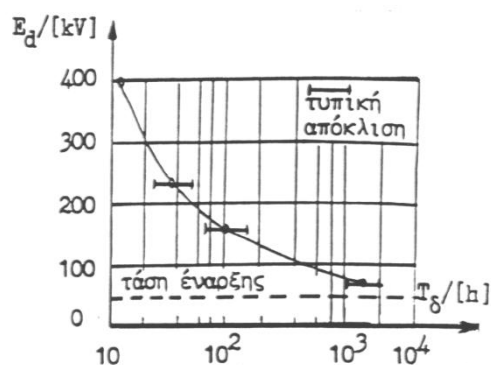
3. Η ηλεκτροχημική διάτρηση/τεχνητή γήρανση

Κατά την καταπόνηση ενός στερεού μονωτικού υλικού με κάποια μορφή τάσης, εναλλασσόμενη, κρουστική ή συνεχής, διαπιστώνει κανείς ότι μετά από κάποια τιμές της τάσης, εμφανίζονται μερικές εκκενώσεις.

Η γήρανση του μονωτικού υλικού στο εργαστήριο με τιμές της τάσης μεγαλύτερες από την τάση έναρξης των μερικών εκκενώσεων χαρακτηρίζεται τεχνική γήρανση.

Από τη στιγμή της έναρξης των μερικών εκκενώσεων προκαλείται συνήθως σταδιακή αλλαγή της μοριακής δομής του στερεού μονωτικού, η οποία είναι ιδιαίτερα έντονη σε περιορισμένο τμήμα του, όπου δηλαδή έτυχε οι θέσεις ανομοιογένειας να είναι περισσότερο αγωγίμες. Πρόκειται για ένα ηλεκτροχημικό φαινόμενο, που σε κάποιο απροσδιόριστο χρονικό διάστημα οδηγεί στη διάσπαση του στερεού μονωτικού.

Συγκριτικά με τις άλλες μορφές διάσπασης, η ηλεκτροχημική διάσπαση προκαλεί βαθμιαία μείωση της ηλεκτρικής αντοχής, ανάλογα με το ρυθμό αύξησης της χημικής μεταβολής και είναι συνήθως μακροπρόθεσμη, γι' αυτό ονομάζεται και γήρανση του μονωτικού υλικού. Στο Σχήμα 4.3 δίνεται ένα παράδειγμα μείωσης της διηλεκτρικής αντοχής, λόγω γήρανσης του υλικού από τη μεγαλύτερη συμμετοχή των θέσεων διαταραχής.



Σχήμα 4.3 : Μείωση της διηλεκτρικής αντοχής στο νάιλον πάχους 0,125mm, λόγω μερικών εκκενώσεων.
Αριθμός δοκιμών : 10 ανά σημείο μέτρησης.
 T_d : χρόνος διάσπασης.

Η τεχνητή αυτή γήρανση του στερεού μονωτικού δεν ανταποκρίνεται βέβαια στην πραγματική κατάσταση, που δημιουργείται με την πάροδο του χρόνου (όταν το υλικό εργάζεται υπό ονομαστικά μεγέθη στο δίκτυο), δίνει όμως τη δυνατότητα ανίχνευσης των παραγόντων διάσπασης, που τελικά δεν μπορεί να είναι διαφορετικοί από τους πραγματικούς.

Ένα κριτήριο αξιολόγησης που έχει προταθεί, βασισμένο στην έναρξη της τεχνητής γήρανσης, είναι ο φαινόμενος συντελεστής ανομοιογενειών. Ο συντελεστής έχει οριστεί ως το πηλίκο της τάσης έναρξης των μερικών εκκενώσεων προς την τάση της διηλεκτρικής δοκιμής που προβλέπεται στις προδιαγραφές, ανάλογα με την ονομαστική τάση και τη μορφή της εφαρμοζόμενης τάσης.

4. Η θερμοχημική διάτρηση

Η μείωση της διηλεκτρικής αντοχής είναι δεδομένη κατά την αύξηση της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος μέσου, γιατί η παραγωγή ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων γίνεται μεγαλύτερη. Στα πολυμερή μονωτικά υλικά μπορούμε να υποθέσουμε ότι εξασθενούν οι δεσμοί των μορίων και επομένως η ενέργεια εξόδου των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων από το πλέγμα των μορίων είναι μικρότερη.

Η διάτρηση που προκαλείται μόνο από τη θερμότητα του περιβάλλοντος στερεού μονωτικού μέσου, ονομάζεται θερμοχημική. Έχει διαπιστωθεί πειραματικά ότι, μετά από μία τιμή της τάσης, η θερμοχημική διάτρηση δεν αντιμετωπίζεται με την αύξηση του πάχους της μόνωσης. Η τάση αυτή ονομάζεται θερμική τάση ανατροπής. Η τάση αυτή αποτελεί το κριτήριο για το τεχνοοικονομικό πάχος στερεών μονωτικών στις πρακτικές εφαρμογές (όπως μετασχηματιστές, καλώδια κτλ.). Η τιμή είναι για τα περισσότερα υλικά, σε θερμοκρασία περιβάλλοντος 20 °C και καταπόνηση με εναλλασσόμενη τάση 50 Hz της τάξης του 1MV. Πρόσφατες έρευνες σε στερεά μονωτικά οδηγούν στο συμπέρασμα ότι η αύξηση της θερμοκρασίας στο περιβάλλον μέσο του στερεού μονωτικού ενισχύει τις μερικές εκκενώσεις, με αποτέλεσμα τη μείωση της διηλεκτρικής αντοχής. Έχει διαπιστωθεί ότι οι μερικές εκκενώσεις εκδηλώνονται, λόγω της θερμότητας του περιβάλλοντος, σε μικρότερες τιμές της τάσης από ότι σε κανονική θερμοκρασία 20°C, με αποτέλεσμα να συμβαίνει ο ιονισμός με κρούσεις σε αρκετά μικρότερες τιμές του πεδίου από ότι κατά την καταπόνηση σε θερμοκρασία περιβάλλοντος 20°C.

4.2.2 Η κβαντομηχανική θεωρία της γήρανσης και της διάσπασης των στερεών μονωτικών

Σύμφωνα με τα αναφερόμενα στο κεφάλαιο 4.2.1, η γήρανση και η διάσπαση των στερεών μονωτικών οφείλονται σε τέσσερις βασικούς παράγοντες (απώλειες Joule, μερικές εκκενώσεις, δυνάμεις Coulomb, και θερμότητα του περιβάλλοντος). Οι παράγοντες αυτοί δεν περιλαμβάνουν όμως στοιχεία για φαινόμενα, που δεν μπορεί κανείς να ακούσει, ή να παρατηρήσει, όπως :

- ο ιονισμός με κρούσεις, που πιστεύεται ότι εκδηλώνεται στα στερεά μονωτικά, και
- το μη ορατό φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας και η συσχέτισή του με φωτεινά φαινόμενα και καταπονήσεις, που παρατηρούνται στο υλικό (θερμικές, ή μηχανικές, ή και τα δύο).

Οι πληροφορίες αυτές, καθώς και άλλες, δόθηκαν με κβαντομηχανική ερμηνεία των φαινομένων, που εκδηλώνονται προ και κατά τη διάσπαση των στερεών μονωτικών, η οποία βασίζεται κυρίως :

- στις μετρήσεις των αλμάτων δυναμικού κατά την καταπόνηση στερεών μονωτικών με κρουστικές τάσεις.
- στις κρούσεις φορτίου, που είναι η κυματομορφή (το παλμογράφημα) της πτώσης τάσης σε ένα ωμικό τετράπολο μέτρησης (ως στοιχείο μέτρησης χρησιμοποιήθηκε δηλαδή μία αντίσταση, αντί του πυκνωτή μέτρησης :
- στην ανίχνευση του μη ορατού φάσματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας (που εκπέμπεται κατά τη γήρανση και τη διάσπαση)
- στην ικανοποιητική πειραματική και θεωρητική ταύτιση του μηχανισμού παραγωγής των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων

Στη κβαντομηχανική θεωρία ενδιαφέρει κυρίως η ενέργεια των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων (κυρίως ηλεκτρόνια). Η τιμή της ενέργειας αυτής, πάνω από την **ενέργεια Fermi** των ηλεκτροδίων διευκολύνει στην εξαγωγή συμπερασμάτων για τον μηχανισμό παραγωγής των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων. Τα βασικότερα συμπεράσματα από τη θεωρία αυτή είναι :

1) Η γήρανση και η διάσπαση, σχετίζονται με εκπομπή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που παράγεται στο υλικό. Έχει διαπιστωθεί, ότι :

α) το φάσμα της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας κατά τη γήρανση μπορεί να είναι από ακουστικά κύματα μέχρι υπεριώδεις ακτίνες.

β) Το φάσμα της παραπάνω ακτινοβολίας κατά τη διάσπαση είναι δυνατό να επεκταθεί σε τιμές της ιονίζουσας περιοχής του (η εκπομπή του φάσματος αυτού προκαλεί την απεικόνιση αντικειμένων στη φωτογραφική πλάκα)

2) Καθοριστικός παράγοντας για την δημιουργία ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων είναι η τιμή του πεδίου. Από μετρήσεις σε οργανικά στερεά μονωτικά (με σχετική διηλεκτρική σταθερά 2,5-4,5) έχει διαπιστωθεί ότι οι μερικές εκκενώσεις, υπό κρουστικές τάσεις καταπόνησης, αρχίζουν σε τιμή πεδίου περίπου 0,2MV/cm.

3) Για τιμές του πεδίου μέχρι περίπου 0,5MV/cm αυξάνει η ειδική αγωγιμότητα κατά τη σχέση 2.3:

$$\sigma = \sigma_0 \exp(-W/kT) \quad (4.1)$$

4) Για μεγαλύτερες τιμές πεδίου από προηγουμένως, οι ελεύθεροι ηλεκτρικοί φορείς γίνονται αρκετά περισσότεροι και δεν ισχύει η σχέση 4.1.2. Στην περίπτωση αυτή η παραγωγή των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων αποδίδεται στον ιονισμό με κρούσεις.

Έχει διαπιστωθεί, ότι ο ιονισμός με κρούσεις σχετίζεται με την εκδήλωση αρνητικής διαφορικής αντίστασης στο υλικό (κατά την αύξηση της τάσεως παρατηρείται μείωση του ρεύματος). Το φάσμα της εκπεμπόμενης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας εξαρτάται από το περίσσειμα της ενέργειας των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων κατά την εξαναγκασμένη επιβράδυνσή τους στα ηλεκτρόδια.

4.3 Πλήρες ισοδύναμο κύκλωμα μετασχηματιστή

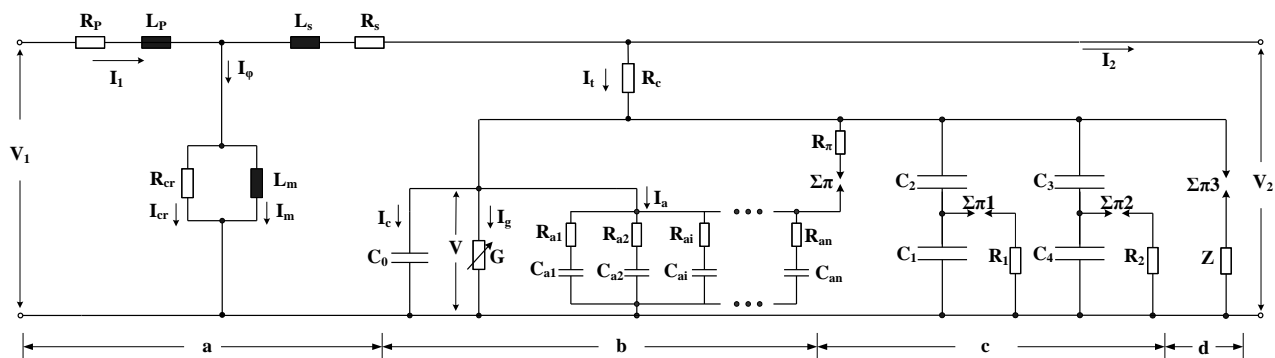
Σε προηγούμενο κεφάλαιο παρουσιάσαμε το ισοδύναμο κύκλωμα του μετασχηματιστή χωρίς όμως να λάβουμε υπόψιν τη μόνωση του.

Παρακάτω θα εξετάσουμε το μονωτικό σύστημα του μετασχηματιστή σε ένα πραγματικό μετασχηματιστή και θα συμπληρώσουμε το ισοδύναμο κύκλωμά του λαμβάνοντας υπόψη και τη συμβολή του μονωτικού.

Το μονωτικό σύστημα του μετασχηματιστή αποτελείται βασικά από μονωτικό λάδι και χαρτί. Όπως αναφέραμε στην παράγραφο 4.1 για το μονωτικό λάδι έχει διατυπωθεί η άποψη, ότι οι παράγοντες μείωσης της διηλεκτρικής αντοχής είναι οι ίδιοι με εκείνους κατά τη γήρανση και διάσπαση των στερεών μονωτικών.

Επομένως το πλήρες ισοδύναμο κύκλωμα του μετασχηματιστή προκύπτει εάν σε αυτό του ισοδύναμου κυκλώματος του σχ. 1.4 συμπεριλάβουμε τις απώλειες του μονωτικού συστήματος του μετασχηματιστή με βάση τις θεωρίες (μακροσκοπική και κβαντομηχανική) των φαινομένων προ και κατά τη διάσπαση των μονώσεων, όπως αυτές αναπτύχθηκαν στο κεφάλαιο 4.2.

Το πλήρες ισοδύναμο κύκλωμα του μονοφασικού μετασχηματιστή διαμορφώνεται όπως δείχνεται στο σχήμα 4.4. Εννοείται ότι για ένα τριφασικό μετασχηματιστή ισχύει το ισοδύναμο αυτό κύκλωμα για κάθε φάση του.



Σχήμα 4.4: Το πλήρες ισοδύναμο κύκλωμα του μονοφασικού μετασχηματιστή για την ερμηνεία των φαινομένων με συνδυασμό της μακροσκοπικής και της κβαντομηχανικής θεωρίας.

R_P : Ωμική αντίσταση πρωτεύοντος

L_P : Επαγωγή σκεδάσεως πρωτεύοντος

R_S : Ωμική αντίσταση δευτερεύοντος

L_S : Επαγωγή σκεδάσεως δευτερεύοντος

R_{cr} : Μη επαγωγική αντίσταση

L_m : Επαγωγή χωρίς απώλειες

V_1 : Τάση πρωτεύοντος

V_2 : Τάση δευτερεύοντος

V : Τάση επί του μονωτικού

I_1 : Ρεύμα πρωτεύοντος

I_2 : Ρεύμα δευτερεύοντος

I_ϕ : Συνιστώσα διεγέρσεως του ρεύματος πρωτεύοντος

I_{cr} : Συνιστώσα απωλειών του πυρήνα

I_m : Συνιστώσα μαγνητίσεως

I_i : Συνολικό ρεύμα μέσω του σώματος της μόνωσης

I_c : Ρεύμα φορτίσεως της γεωμετρικής χωρητικότητας C_0

I_g : Ρεύμα διαρροής ή αγωγιμότητας

I_a : Ρεύμα απορροφήσεως

R_c : Αντίσταση συνδέσεων και επαφών

C_0 : Γεωμετρική χωρητικότητα του μετασχηματιστή

G : Αγωγιμότητα της μόνωσης

R_{ai} : Ωμική αντίσταση της i ομάδας διπόλων της μόνωσης

C_{ai} : Χωρητικότητα της i ομάδας διπόλων της μόνωσης

R_π : Αντίσταση του τόξου του σπινθηριστή $\Sigma\pi$

C_1 : Χωρητικότητα της φυσαλίδας

C_4 : Χωρητικότητα της επιφανειακής θέσης διαταραχής

C_2 : Χωρητικότητα του υπόλοιπου υγιούς τμήματος του στερεού μονωτικού

C_3 : Χωρητικότητα του υπόλοιπου υγιούς τμήματος του επιφανειακού φιλμ

R_1 : Αντίσταση του τόξου του σπινθηριστή $\Sigma\pi 1$

R_2 : Αντίσταση του τόξου του σπινθηριστή $\Sigma\pi 2$

Στο ισοδύναμο κύκλωμα του μονοφασικού μετασχηματιστή, όπως αυτό απεικονίζεται στο σχήμα 4.4, διακρίνουμε τα παρακάτω τμήματα, στα οποία μπορούμε να μελετήσουμε τα αντίστοιχα φαινόμενα:

Τμήμα a:

Ισοδύναμο κύκλωμα μετασχηματισμού τάσεων και εντάσεων το οποίο αναλύσαμε στην προηγούμενη παράγραφο.

Τμήμα b:

Εδώ μπορούμε να μελετήσουμε τα φαινόμενα πόλωσης του μονωτικού. Επίσης τα φαινόμενα **θερμικής διάτρησης** που παρατηρούνται σε χαμηλές πεδιακές εντάσεις, λόγω αύξησης της ειδικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας, κυρίως εξ αιτίας των απωλειών Joule, αλλά και εξ αιτίας αύξησης της θερμοκρασίας περιβάλλοντος (**θερμοχημική διάτρηση**).

Τμήμα c:

Στο τμήμα c μπορούμε να μελετήσουμε την **ηλεκτρική διάτρηση** του μονωτικού, σε υψηλότερες από πριν πεδιακές εντάσεις, όπου η διάτρηση αποδίδεται κυρίως στις δυνάμεις Coulomb. Επίσης την **ηλεκτροχημική διάσπαση** του μονωτικού λόγω μερικών εκκενώσεων, σε θέσεις ανομοιογένειας, μέσα στον όγκο ή στην επιφάνεια του μονωτικού.

Τμήμα d:

Στο τμήμα d του σχήματος 4.4, μπορούμε να μελετήσουμε, συνδυάζοντας τη μακροσκοπική και την κβαντική θεωρία, τα φαινόμενα για πεδιακές εντάσεις πολύ μεγαλύτερες από 0,5MV/cm.

5. Διαγνωστικές τεχνικές για τον προσδιορισμό της κατάστασης της μόνωσης στους μετασχηματιστές

Η λειτουργική αξιοπιστία των μετασχηματιστών στο δίκτυο, συνδέεται άμεσα με την ικανοποιητική κατάσταση των μονώσεών τους. Η συνεχής παρακολούθηση και ο έλεγχος της ικανότητας μόνωσης των διατάξεων των μετασχηματιστών, και ιδίως του ηλεκτρομονωτικού ελαίου, αποτελεί επιτακτική ανάγκη δεδομένου ότι, πέραν της τακτικής περιοδικής συντήρησης μπορεί να προβλεφθεί έγκαιρα η αυξημένη πιθανότητα εκδήλωσης αστοχίας στις διατάξεις αυτές και να επιχειρηθεί προληπτική συντήρηση, όταν και όπου απαιτηθεί[10].

Υπάρχουν σήμερα διάφορες τεχνικές διάγνωσης για τον προσδιορισμό της κατάστασης της μόνωσης. Αυτές μπορούμε να τις διακρίνουμε σε φυσικοχημικές και ηλεκτρικές διαγνωστικές τεχνικές.

5.1 Φυσικοχημικές διαγνωστικές τεχνικές

Η ανάλυση των εκλυόμενων αερίων (αεριοχρωματογραφία), η μέτρηση του βαθμού πολυμερισμού του μονωτικού χαρτιού και η ανάλυση των παραγόμενων φουρανίων μαζί με την εκτίμηση της περιεκτικότητας του λαδιού σε νερό αποτελούν τις κύριες φυσικοχημικές διαγνωστικές τεχνικές που χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση της κατάστασης της μόνωσης του μετασχηματιστή. Επίσης οι μετρήσεις φυσικοχημικών παραμέτρων των μονωτικών ελαίων, όπως της οξύτητας, του χρώματος, της τάσης διάσπασης, του ιξώδους, της διεπιφανειακής τάσης και της σχετικής πυκνότητας μπορούν να μας δώσουν μια εκτίμηση της κατάστασης της μόνωσης του μετασχηματιστή

Παρακάτω θα παρουσιάσουμε την μέθοδο της αεριοχρωματογραφίας, την μέθοδο της μέτρησης του βαθμού πολυμερισμού (DP) του μονωτικού χαρτιού και τη μέθοδο της ανάλυσης των παραγόμενων φουρανίων ενώ σε επόμενο κεφάλαιο θα αναφερθούμε για την μέθοδο της μέτρησης της υγρασίας.

5.1.1 Αεριοχρωματογραφία

Κατά την διαδικασία της γήρανσης του μονωτικού συστήματος λαδιού - χαρτιού εκλύονται διάφορα αέρια παραπροϊόντα τα οποία παρατίθενται παρακάτω και χωρίζονται σε:

- **Αέριους Υδρογονάνθρακες και Υδρογόνο:** μεθάνιο (CH_4), αιθάνιο C_2H_6), αιθυλένιο (C_2H_4), ακετυλένιο (C_2H_2), αλλά και βαρύτερους υδρογονάνθρακες της οικογένειας $\text{C}_3 - \text{C}_4$ όπως προπάνιο (C_3H_8) και τέλος υδρογόνο (H_2).

- **Οξείδια του Άνθρακα:** μονοξείδιο του άνθρακα (CO) και διοξείδιο του άνθρακα (CO₂).
- **Nonfault gases:** Άζωτο N₂ και οξυγόνο O₂.

Με τη μέθοδο της αεριοχρωματογραφίας προσδιορίζονται οι συγκεντρώσεις και οι αναλογίες των παραπάνω αερίων και προκύπτει μια εκτίμηση της κατάστασης της μόνωσης του μετασχηματιστή. Οι συνηθέστερα χρησιμοποιούμενες μέθοδοι για την ανάλυση των αερίων είναι οι ακόλουθες:

- (a) IEEE C57.104-1991
- (b) Η μέθοδος Doernenberg
- (c) Η μέθοδος Roger
- (d) IEC 60599
- (e) Το τρίγωνο Duval

Οι περιορισμοί στη χρήση αεριοχρωματογραφικών προσεγγίσεων (Dissolved Gas Analysis, DGA) προέρχονται από το γεγονός ότι η συνολική σύσταση των διαλυμένων αερίων συστατικών (Total Dissolved Gas Composition, TDGC) δεν μπορεί να καταγραφεί ανά πάσα στιγμή, αφού τα αέρια μπορούν είτε να εκλύονται είτε να απορροφώνται από το υγρό μονωτικό, με αποτέλεσμα οι μετρούμενες τιμές να είναι το αποτέλεσμα δύο ανταγωνιστικών αντιδράσεων των ανιχνευόμενων αερίων[6,10,28,30]

5.1.2 Μέτρηση του βαθμού πολυμερισμού (DP) της κυτταρίνης.

Όπως αναφέραμε και σε προηγούμενη παράγραφο κατά την γήρανση του μορίου της κυτταρίνης, η αλυσίδα πολυμερούς διατρέεται και ο αριθμός των μονομερών σε κάθε μόριο κυτταρίνης μειώνεται. Με την μείωση του βαθμού πολυμερισμού της κυτταρίνης μειώνεται και η ικανότητα της ως μονωτικό μέσο. Για το λόγο αυτό η μέτρηση του DP χρησιμοποιείται σαν διαγνωστικό εργαλείο προσδιορισμού της κατάστασης της μόνωσης του μετασχηματιστή[6].

Ο ρυθμός αντίδρασης κάθε χρονική στιγμή μπορεί να θεωρηθεί ανάλογος προς τον αριθμό των εκάστοτε διαθέσιμων δεσμών της αλυσίδας όπως φαίνεται από τον παρακάτω τύπο [31]:

$$\frac{1}{DP_t} - \frac{1}{DP_0} = kt \quad (5.1)$$

όπου

DP_t , η τιμή του Βαθμού Πολυμερισμού τη χρονική στιγμή t

DP_0 , η αρχική τιμή του Βαθμού Πολυμερισμού

και

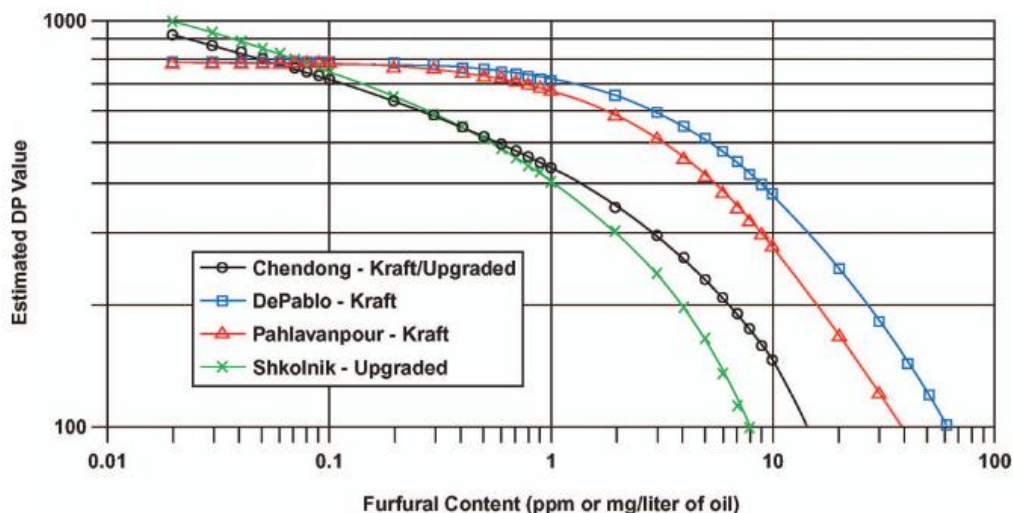
k = σταθερά

5.1.3 Ανάλυση των παραγόμενων φουρανίων

Τα φουράνια είναι κύρια προϊόντα της υποβάθμισης (θερμικής καταπόνησης/πυρόλυσης για θερμοκρασίες $>130^{\circ}\text{C}$ και υδρόλυσης[32]) του χαρτιού της μόνωσης και βρίσκονται διαλυμένα στα μονωτικά λάδια των μετασχηματιστών. Αυξημένη συγκέντρωση φουρανίων στο λάδι υποδηλώνει την μείωση της μηχανικής αντοχής του μονωτικού χαρτιού άρα και της μονωτικής του ικανότητας. Εκτεταμένα εργαστηριακά πειράματα, από διάφορους ερευνητές έχουν δείξει ότι υπάρχει μια περίπου λογαριθμική σχέση μεταξύ της συγκέντρωσης της φουρφουραλδεΐδης, του κυριότερου φουρανίου, στο λάδι και του βαθμού πολυμερισμού (DP) της κυτταρίνης στο χαρτί [6]. Η ακριβής συσχέτιση όμως της συγκέντρωσης της φουρφουραλδεΐδης στο λάδι και του βαθμού πολυμερισμού (DP) της κυτταρίνης στο χαρτί είναι πιο σύνθετη και εξαρτάται από την υγρασία, την θερμοκρασία, το είδος του μετασχηματιστή (αν αναπνέει ή όχι) και τον τύπο του λαδιού και του χαρτιού[33].

Στο σχήμα 5.1 παρουσιάζονται οι καμπύλες της συσχέτισης της συγκέντρωσης της φουρφουραλδεΐδης στο λάδι και του βαθμού πολυμερισμού (DP) της κυτταρίνης στο χαρτί όπως έχουν προκύψει από τα πειράματα τεσσάρων ερευνητών. Αυτό που είναι εμφανές από τις παρακάτω καμπύλες είναι ότι η σημαντικότερη αύξηση της φουρφουραλδεΐδης στο λάδι προκύπτει για $DP < 200$ όπου το χαρτί χάνει την μηχανική του αντοχή και είναι πλέον πιο ευάλωτο σε διάτρηση[22,30].

Ο ποσοτικός προσδιορισμός της φουρφουραλδεΐδης που βρίσκεται διαλυμένη στα λάδια των μετασχηματιστών γίνεται με τη μέθοδο της Χρωματογραφίας Λεπτής Στιβάδας (T.L.C.) και προσφέρει μια πιο εξυπηρετική μέθοδο ανάλυσης από την απ' ευθείας μέτρηση στο χαρτί της μόνωσης[6].



Σχήμα 5.1: Σχέση μεταξύ της συγκέντρωσης της φουρφουραλδεΐδης στο λάδι και του βαθμού πολυμερισμού (DP) της κυτταρίνης στο χαρτί. Στο κουτάκι φαίνεται το όνομα του ερευνητή και το είδος του χαρτιού που χρησιμοποιήθηκε[22].

5.2 Ηλεκτρικές διαγνωστικές μέθοδοι

Νέες μέθοδοι έχουν προταθεί την τελευταία δεκαετία και ακόμα νωρίτερα, για τις οποίες απαιτούνται αξιόπιστα διαγνωστικά εργαλεία. Μερικές από αυτές τις μεθόδους παρουσιάζονται παρακάτω[6].

5.2.1 Μέτρηση του δείκτη πόλωσης και του συντελεστή απωλειών

Όπως αναφέραμε στην παράγραφο 4.2.1, προ και κατά τη διάτρηση των μονωτικών υλικών, συμβαίνουν μηχανικές και θερμικές καταπονήσεις, οι οποίες συνεπάγονται απώλειες ενέργειας εντός της μάζας του μονωτικού υλικού. Για κάθε μόνωση και συνεπώς και για τη μόνωση του μετασχηματιστή στο σύνολό της ισχύει ότι:

- Επειδή οι απώλειες στο συνεχές ρεύμα οφείλονται αποκλειστικά στην αγωγιμότητα την οποία παρουσιάζει η μόνωση, μπορούμε με περιοδικές μετρήσεις της **αντίστασης μόνωσης** να γνωρίζουμε τη διηλεκτρική συμπεριφορά του μετασχηματιστή.
- Όταν ένα ανομοιογενές μονωτικό υλικό τεθεί υπό συνεχή τάση (όπως εν προκειμένω η μόνωση του μετασχηματιστή), παρουσιάζεται το φαινόμενο της μεταφορτίσεως ή πολώσεως του διηλεκτρικού. Μέγεθος σχετιζόμενο με το φαινόμενο της πολώσεως είναι ο **δείκτης πολώσεως (Polarization Index)** ο

ο οποίος χαρακτηρίζει τον βαθμό ανομοιογένειας του μονωτικού υλικού. Ο δείκτης πολώσεως υπολογίζεται ως ο λόγος της αντιστάσεως μονώσεως εις το πέρας του 10^{ου} λεπτού προς την αντίσταση μονώσεως εις το πέρας του 1^{ου} λεπτού:

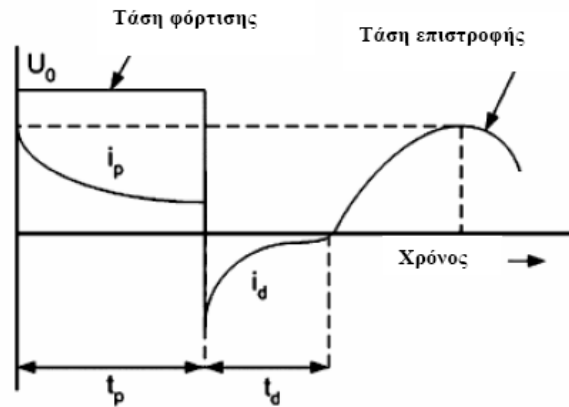
$$P.I. = \frac{R_{10}}{R_1} \quad (5.2)$$

Έτσι μετρώντας περιοδικά τον δείκτη πολώσεως ενός μετασχηματιστή, μπορεί να συγκρίνει κανείς τις διαδοχικές τιμές και να έχει ένδειξη για τη μεταβολή του βαθμού ανομοιογένειας του μονωτικού του συστήματος.

- Τα ανεπιθύμητα χαρακτηριστικά των μονωτικών υλικών μιας μόνωσης, ήτοι η αγωγιμότητα, η ανομοιογένεια και οι ασυνέχειες της μάζας αυτών εντός των υλικών αλλά και στην επιφάνειά της, εκδηλώνονται σαν απώλειες ενέργειας στο εναλλασσόμενο ρεύμα. Την εξέλιξη της κατάστασης της μόνωσης ενός μετασχηματιστή από την άποψη των παραπάνω χαρακτηριστικών, μπορούμε να παρακολουθήσουμε με περιοδικές μετρήσεις (στη βιομηχανική συχνότητα) **του συντελεστή απωλειών (tgδ)** του συστήματος μόνωσης του μετασχηματιστή (βλέπε παραγρ. 2.1 (3)).

5.2.2 Η μέτρηση της τάσης επιστροφής.

Όταν εφαρμοστεί μια συνεχής τάση σε ένα διηλεκτρικό για μια μακρά χρονική περίοδο (ώστε να φορτιστεί πλήρως) και μετά βραχυκυκλωθεί για ένα σύντομο χρονικό διάστημα ώστε να εκφορτιστεί, τότε, αφού ανοιχτεί το βραχυκύκλωμα, οι ηλεκτρικοί φορείς οι οποίοι ήταν δεσμευμένοι από την πόλωση, μετατρέπονται σε ελεύθερους φορείς και έτσι μια τάση αναπτύσσεται μεταξύ των ηλεκτροδίων στο διηλεκτρικό. Αυτό το φαινόμενο ονομάζεται **τάση επιστροφής (recovery or return voltage - RV)**. Η διεξαγόμενη πάνω στο φαινόμενο αυτό έρευνα στοχεύει στην αξιοποίηση της τάσης επιστροφής για τη γνωμάτευση της μονωτικής ικανότητας του μονωτικού συστήματος «λάδι-χαρτί». Στο σχήμα 5.2 δίδονται οι μορφές τάσεως και εντάσεων της διηλεκτρικής απόκρισης του μονωτικού.



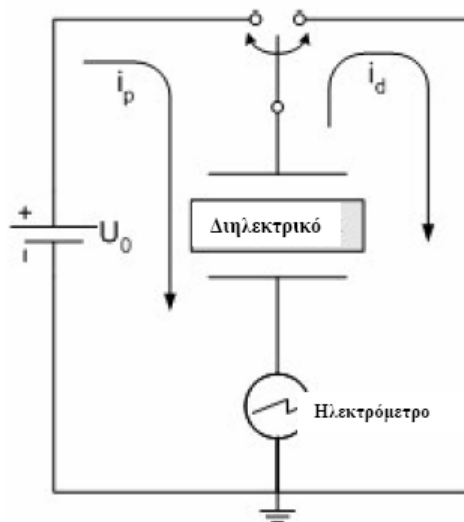
Σχήμα 5.2: Μετρήσεις πόλωσης του διηλεκτρικού.

- U_0 : βηματική τάση φόρτισης
- i_p : ρεύμα πόλωσης (φόρτισης)
- i_d : ρεύμα αποπόλωσης (εκφόρτισης)
- t_p : χρόνος φόρτισης
- t_d : χρόνος εκφόρτισης

5.2.3 Η μέτρηση των ρευμάτων πόλωσης – αποπόλωσης.

Όταν σε ένα σύστημα μόνωσης εφαρμόζεται μια βηματική τάση U_0 , εμφανίζεται ένα ρεύμα φόρτισης ή πόλωσης. Αν η τάση αποσυνδεθεί από το μονωτικό και το μονωτικό εκφορτισθεί, εμφανίζεται το ρεύμα εκφόρτισης ή αποπόλωσης Ένας αριθμός ερευνητών προτείνουν τη μέτρηση **των ρευμάτων πόλωσης/αποπόλωσης (polarization/depolarization)** του μονωτικού συστήματος του μετασχηματιστή σαν ένα σημαντικό εργαλείο, επειδή αυτό μπορεί να παρακολουθεί την κατάσταση του λαδιού και του χαρτιού χωριστά.

Στο σχήμα 5.3 δίδεται το βασικό κύκλωμα μέτρησης των ρευμάτων πόλωσης (i_p) και αποπόλωσης (i_d).



Σχήμα 5.3: Βασικό κύκλωμα μέτρησης των ρευμάτων πόλωσης (i_p) και αποπόλωσης (i_d).

Μια άλλη ομάδα ερευνητών χρησιμοποίησε τις **μετρήσεις πόλωσης του μονωτικού συστήματος του μετασχηματιστή στο πεδίο συχνότητας**. Κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι οι μετρήσεις στο πεδίο χρόνου και αυτές στο πεδίο συχνότητας, οδηγούν στις ίδιες προβλέψεις για την κατάσταση της μόνωσης.

Καμιά μέθοδος από μόνη της δεν μπορεί να θεωρηθεί ως η καλύτερη διαγνωστική μέθοδος. Η ανάλυση των διαλυμένων αερίων και η ανάλυση των παραγομένων φουρανίων θα παραμείνουν οι πιο χρήσιμες τεχνικές για πρακτικές εφαρμογές. Εν τούτοις η πρόοδος στην τεχνολογία των μετρήσεων και των τεχνικών ανάλυσης δεδομένων, αναμένεται να δώσει ώθηση στις ηλεκτρικές διαγνωστικές μεθόδους οι οποίες βασίζονται στα φαινόμενα της πόλωσης.

6. Θερμοκρασία και Μετασχηματιστές

Η θερμοκρασία αποτελεί μια από τις βασικότερες παραμέτρους της λειτουργίας ενός μετασχηματιστή, που πρέπει να παρακολουθείται τακτικά για την συλλογή πληροφοριών σχετικά με την κατάσταση της μόνωσης του και την εύρυθμη λειτουργία του.

6.1 Θερμοκρασιακά όρια

Σύμφωνα με το πρότυπο ANSI, προκειμένου οι μετασχηματιστές διανομής να έχουν φυσιολογική λειτουργία, και κατ' επέκταση φυσιολογική διάρκεια ζωής, πρέπει να έχουν μέση ανύψωση θερμοκρασίας στα τυλίγματα τέτοια που να μην ξεπερνάει τους 65 °C, ως προς την θερμοκρασία περιβάλλοντος η οποία με την σειρά της δεν πρέπει να ξεπερνάει τους 30°C. Η δε μέγιστη δυνατή θερμοκρασία των τυλιγμάτων στο θερμότερο σημείο τους (hot-spot), δεν θα πρέπει να ξεπερνάει τους 80 °C ως προς το περιβάλλον. Έτσι, για θερμοκρασία περιβάλλοντος 30°C θα έχουμε μέγιστη επιτρεπόμενη θερμοκρασία, hot-spot, 110 °C[4,7].

Για την μέτρηση της θερμοκρασίας χρησιμοποιείται θερμομέτρο, το θερμικό στοιχείο του οποίου είναι τοποθετημένο στο πιο ψηλό στρώμα του λαδιού, ώστε να μετράει την μέγιστη θερμοκρασία αυτού. Οι ηλεκτρικές επαφές του θερμομέτρου ρυθμίζονται στις επιθυμητές θερμοκρασίες και συνδέονται στο κύκλωμα προστασίας για συναγερμό (alarm) και για διακοπή (trip) του κυκλώματος, όταν γίνεται υπέρβαση των θερμοκρασιακών ορίων που τίθενται[1].

6.2 Πηγες θερμότητας στον μετασχηματιστή

6.2.1 Θερμότητα λόγω απωλειών του μετασχηματιστή.

Αν και οι μετασχηματιστές είναι αρκετά αποδοτικοί συγκρινόμενοι με άλλες ηλεκτρικές συσκευές, παρουσιάζουν απώλειες οι οποίες προκαλούν αύξηση της θερμοκρασίας και τη μείωση του βαθμού απόδοσης. Οι απώλειες κατηγοριοποιούνται σε 2 είδη[34]: στις απώλειες φορτίου και στις απώλειες κενού φορτίου. Αύξηση της θερμοκρασίας όμως προκαλείται και από το ίδιο το διηλεκτρικό. Οι τρεις αυτές αιτίες αύξησης της θερμοκρασίας στον μετασχηματιστή αναπτύσσονται παρακάτω.

6.2.1.1 Απώλειες φορτίου.

Οι απώλειες φορτίου οφείλονται στις ωμικές απώλειες στα τυλίγματα υψηλής και χαμηλής τάσης και εξαρτώνται από το τετράγωνο του ρεύματος φόρτισης του μετασχηματιστή.

6.2.1.2 Απώλειες κενού φορτίου.

Εκτός από τις απώλειες φορτίου, υπάρχουν και οι απώλειες κενού φορτίου ή «απώλειες πυρήνα» οι οποίες οφείλονται σε μαγνητικές επιδράσεις στον πυρήνα. Ίσως οι πιο σημαντικές από αυτές τις «απώλειες πυρήνα» είναι οι απώλειες δινορρευμάτων, οι οποίες είναι ωμικές και οφείλονται στη διαδρομή επαγόμενων ρευμάτων μέσα από τον πυρήνα σιδήρου.

Ο σίδηρος είναι καλός αγωγός του ηλεκτρισμού, αλλά όχι τόσο όσο ο χαλκός ή το αλουμίνιο από τα οποία κατασκευάζονται συνήθως τα τυλίγματα. Συνεπώς, αυτά τα «δινορρεύματα» πρέπει να υπερνικήσουν σημαντική ηλεκτρική αντίσταση καθώς περιστρέφονται γύρω από τον πυρήνα. Υπερνικώντας την αντίσταση που οφείλεται στο σίδηρο, ελευθερώνουν ισχύ με τη μορφή θερμότητας.

Ακόμα ένα είδος «απωλειών πυρήνα» είναι εκείνο της μαγνητικής υστέρησης. Όλα τα σιδηρομαγνητικά υλικά τείνουν να διατηρήσουν κάποιο επίπεδο μαγνήτισης μετά από έκθεση σε κάποιο εξωτερικό μαγνητικό πεδίο. Αυτή η ροπή του να παραμένουν τα υλικά αυτά υπό μαγνήτιση αποκαλείται «υστέρηση», και απαιτείται κάποια επένδυση σε ενέργεια για να υπερνικηθεί η αντίθεση κατά την εκάστοτε αλλαγή πολικότητας του μαγνητικού πεδίου το οποίο παράγεται από τα τυλίγματα πρωτεύοντος.

Οι απώλειες κενού φορτίου είναι σταθερές και ανεξάρτητες από το φορτίο του μετασχηματιστή, δηλαδή είναι ίσες είτε ο μετασχηματιστής λειτουργεί υπό φορτίο είτε υπό κενό φορτίο[35].

6.2.1.3 Θερμότητα λόγω απωλειών διηλεκτρικού.

Όταν το μονωτικό σύστημα του μετασχηματιστή βρίσκεται κάτω από την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου, αναπτύσσονται διάφοροι μηχανισμοί οι οποίοι απορροφούν ενέργεια από το πεδίο. Δηλαδή έχουμε ανεπιθύμητη απώλεια ενέργειας. Το φαινόμενο είναι ιδιαίτερα δυσάρεστο, διότι η ενέργεια που απορροφάται στο μονωτικό σύστημα μετατρέπεται κυρίως σε θερμότητα η οποία πρέπει να απαχθεί προς το περιβάλλον. Οι απώλειες αυτές χωρίζονται σε δυο κατηγορίες[9]:

- i. **Ωμικές απώλειες:** Τα μονωτικά υλικά εφόσον δεν είναι τέλει μονωτές έχουν μια μικρή ηλεκτρική αγωγιμότητα (σ). Αποτέλεσμα αυτής της αγωγιμότητας είναι η δημιουργία ρεύματος διαρροής (I_{loss}) στο σύστημα μόνωσης, εξαιτίας της αγωγιμότητας όγκου (R_v) ή και της επιφανειακής του αγωγιμότητας (R_s). Υπάρχει διαφορά μεταξύ αντίστασης όγκου (R_v) και επιφανειακής αντίστασης (R_s). Η συνολική αντίσταση είναι: $R_{\text{total}} = \frac{R_v \cdot R_s}{R_v + R_s}$.

Η ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα αυξάνει απότομα με την ενέργεια των μερικών εκκενώσεων. Επομένως οι μερικές εκκενώσεις στην μόνωση του μετασχηματιστή αυξάνουν τις ωμικές απώλειες του[8]. Οι ωμικές απώλειες γίνονται αισθητές με την αύξηση της θερμοκρασίας της μόνωσης, που είναι συχνά αξιολογημένη.

ii. **Διηλεκτρικές απώλειες:** Είναι το αποτέλεσμα αλλαγής της πολικότητας των στοιχειωδών τμημάτων του διηλεκτρικού που οφείλεται στην αλλαγή της φοράς του πεδίου σε κάθε περίοδο. Η αλλαγή αυτή προκαλεί ταλαντώσεις που παράγουν θερμότητα λόγω τριβής, άρα μέρος της ηλεκτρικής ενέργειας χάνεται σε θερμότητα. Το ποσό των απωλειών είναι: $P = V_{rms}^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C \cdot tg\delta$, όπου $tg\delta$ είναι ο παράγοντας απωλειών και είναι ένα μέτρο των διηλεκτρικών απωλειών, εξαρτώμενο από τη συχνότητα.

Σε κάθε περίπτωση, παρατηρείται μια ανεπιθύμητη απώλεια ενέργειας, η οποία μετατρέπεται κυρίως σε θερμότητα. Σε περίπτωση που η θερμότητα αυτή δεν αποβάλλεται με επαρκή ρυθμό από τα υλικά προς το περιβάλλον, προκαλεί αύξηση θερμοκρασίας με αποτέλεσμα την κακή λειτουργία, την εκδήλωση πιθανών βλαβών ή/και την πρόωρη καταστροφή της μόνωσης του μετασχηματιστή.

6.2.2 Θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Η θερμότητα του περιβάλλοντος παίζει καθοριστικό ρόλο στην θερμοκρασία του μετασχηματιστή. Η ονομαστική ισχύς του μετασχηματιστή υπολογίζεται για τις πιο κάτω συνθήκες[1]:

- Μέγιστη θερμοκρασία περιβάλλοντος ίση με 40°C.
- Μέση ημερήσια θερμοκρασία περιβάλλοντος ίση με 30°C.
- Μέση ετήσια θερμοκρασία περιβάλλοντος ίση με 20°C.

6.2.3 Θερμότητα λόγω της υποβάθμισης της θερμοαπαγωγικής ικανότητας του λαδιού.

Όπως αναφέραμε και σε προηγούμενη παράγραφο μια από τις λειτουργίες του μονωτικού λαδιού είναι η απαγωγή της αναπτυσσόμενης θερμότητας στους μετασχηματιστές. Αν για οποιαδήποτε λόγο η ικανότητα του μονωτικού λαδιού να απάγει την θερμότητα μειωθεί τότε η θερμοκρασία στον μετασχηματιστή αυξάνεται. Η μειωμένη ικανότητα του μονωτικού λαδιού να απάγει την θερμότητα οφείλεται κυρίως στην μείωση της ροής του λαδιού στον μετασχηματιστή λόγω της αυξημένης εσωτερικής τριβής του.

Ένας σημαντικός παράγοντας που συμβάλει σε αυτό το γεγονός είναι ο σχηματισμός λάσπης στον μετασχηματιστή. Η λάσπη εμποδίζει την ελεύθερη κυκλοφορία του λαδιού και άρα την ικανότητα απαγωγής της θερμότητας από τον πυρήνα και τα τυλίγματα του μετασχηματιστή στον περιβάλλοντα χώρο από αέρα.

Η λάσπη σχηματίζεται όταν κατά τη διάρκεια της αποικοδόμησης του ελαίου συντελείται η θραύση των μοριακών αλυσίδων των υδρογονανθράκων και αναπτύσσονται αέρια παραπροϊόντα, τα οποία αφήνουν μεγάλες ελεύθερες ρίζες στην υγρή φάση. Οι συγκρούσεις μεταξύ τέτοιων ελεύθερων ριζών παράγουν συνήθως μεγάλα συσσωματώματα κolloειδών προϊόντων αποσύνθεσης με ένα μέσο μοριακό

βάρος από 450 έως 550, τα οποία δεν είναι πλέον διαλυτά στο έλαιο και καθιζάνουν με τη μορφή λάσπης ή στάχτης[6].

6.3 Θερμοκρασία και διάρκεια ζωής μετασχηματιστών

Η θερμοκρασία παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην υποβάθμιση της μονωτικής ικανότητας του μετασχηματιστή και επομένως επηρεάζει άμεσα τη διάρκεια ζωής του. Διαπιστώνεται ότι έχει γίνει εκτεταμένη έρευνα προκειμένου να αναπτυχθούν μέθοδοι της εκτίμησης της κατάστασης της μόνωσης και κατ' επέκταση της υπολειπόμενης διάρκειας ζωής του μετασχηματιστή.

Ο λόγος της μείωσης της ζωής του μετασχηματιστή με την αύξηση της θερμοκρασίας, φαίνεται να οφείλεται στο γεγονός ότι η αύξηση της θερμοκρασίας έχει σαν συνέπεια να αυξάνεται ο ρυθμός των χημικών αντιδράσεων μέσα στη μόνωση του μετασχηματιστή.

Σύμφωνα με την εξίσωση Arrhenius ο ρυθμός με τον οποίο πραγματοποιούνται οι χημικές αντιδράσεις δίδεται από τη σχέση:

$$D = D_0 e^{\frac{-W}{kT}} \quad (6.1)$$

Όπου D: είναι ο ρυθμός στη θερμοκρασία T

D_0 : ο ρυθμός στη θερμοκρασία περιβάλλοντος

W: η ενέργεια ενεργοποίησης της κύριας αντίδρασης που λαμβάνει χώρα (δηλαδή η ενέργεια για τη μεταπήδηση του ηλεκτρονίου από την ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας)

k: η σταθερά Boltzmann

T: η απόλυτη θερμοκρασία σε °K.

Στο επόμενο κεφάλαιο θα μελετήσουμε τις επιπτώσεις της θερμοκρασίας σε κάθε μια από τις ιδιότητες του λαδιού ξεχωριστά. [6]

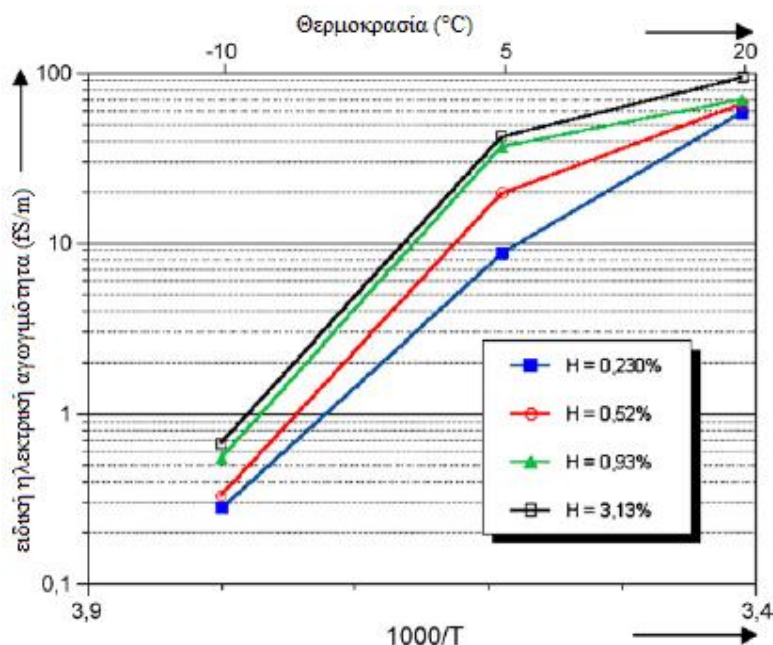
7. Οι επιπτώσεις της θερμοκρασίας στις ιδιότητες και τη συμπεριφορά του λαδιού

Η γνώση της εξάρτησης ορισμένων ιδιοτήτων των ελαίων των μετασχηματιστών, οι οποίες αναφέρθηκαν στο κεφάλαιο 3, ως συνάρτηση της θερμοκρασίας, μπορεί να δώσει σημαντικές πληροφορίες για την κατάσταση της μόνωσης των μετασχηματιστών.

7.1 Ειδική αντίσταση (ρ) – Ειδική αγωγιμότητα (σ)

Η ειδική αντίσταση (ρ) του λαδιού ελαττώνεται όταν αυξάνεται η θερμοκρασία ενώ αντίστοιχα η ειδική αγωγιμότητα (σ) αυξάνεται. Αυτό συμβαίνει γιατί η αύξηση της θερμοκρασίας αυξάνει την κινητικότητα των ηλεκτρονίων και συνεπώς αυξάνεται το ηλεκτρικό ρεύμα που διαρρέει το μονωτικό λάδι. Η αύξηση μάλιστα της ειδικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας (σ) στο λάδι, σε τιμές πεδίου, που η καταπόνηση του διηλεκτρικού μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι μόνο θερμική, δίνεται από την σχέση 2.3.

Οι τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας (σ) του μονωτικού λαδιού, σε διάφορες θερμοκρασίες και για λάδια με διάφορες περιεκτικότητες υγρασίας, όπως υπολογιστήκαν από την μέθοδο της μέτρηση των ρευμάτων πόλωσης – αποπόλωσης παρουσιάζονται στο σχήμα 7.1.



Σχήμα 7.1: Σχέση της ειδικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας (σ) του μονωτικού λαδιού-θερμοκρασίας, σε λάδια με διάφορες περιεκτικότητες υγρασίας σε αυτά (όπου T η απόλυτη θερμοκρασία)[36].

Επομένως αύξηση της θερμοκρασίας συνεπάγεται αύξηση της ειδικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας γεγονός που υποβαθμίζει την μονωτική λειτουργία του λαδιού αφού είναι πιο εύκολο πλέον να σχηματίσουν αγώγιμες γέφυρες που πιθανώς να καταλήξουν σε διάσπαση του μονωτικού λαδιού.

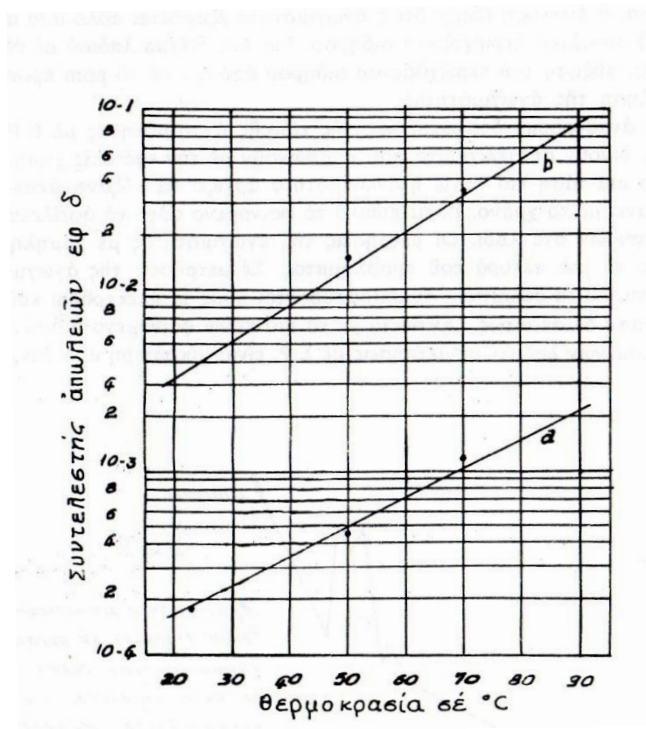
7.2 Ο συντελεστής απωλειών (tgδ)

Από τις σχέσεις 2.3 και 2.6 και θεωρώντας ότι η διηλεκτρική σταθερά ϵ του μονωτικού λαδιού δεν μεταβάλλεται, έχουμε:

$$\operatorname{tg}\delta = \frac{\sigma_0 e^{\beta\theta}}{\epsilon \cdot \omega}$$

Επομένως ο συντελεστής απωλειών πρέπει να μεταβάλλεται κατά τον ίδιο τρόπο που μεταβάλλεται και η ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα δηλαδή με αύξηση της θερμοκρασίας έχουμε και αύξηση του συντελεστή απωλειών.

Στο σχήμα 7.2 παριστάνεται η μεταβολή του Συντελεστή Ισχύος σε συνάρτηση της θερμοκρασίας για διάφορα λάδια.



Σχήμα 7.2: Σχέση συντελεστή απωλειών – θερμοκρασίας 2 μονωτικών λαδιών (a και b)[23].

Επομένως αύξηση της θερμοκρασίας στο μονωτικό λάδι έχει ως αποτέλεσμα αύξηση του συντελεστή απωλειών άρα και την μονωτική υποβάθμιση του μονωτικού λαδιού.

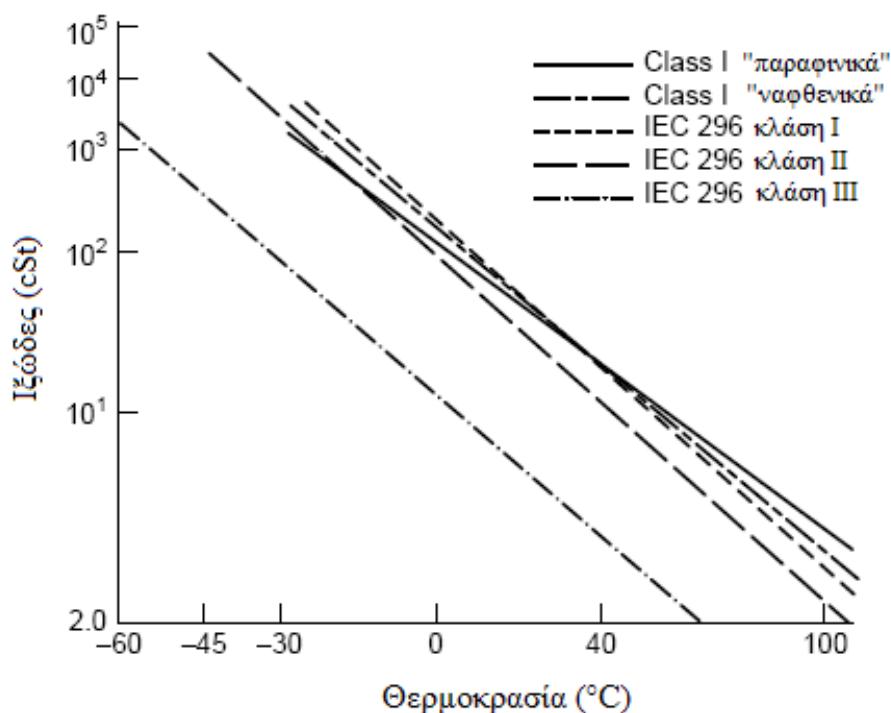
7.3 Εσωτερική τριβή (ιξώδες)

Το ιξώδες ενός μονωτικού λαδιού αυξάνεται εκθετικά με την θερμοκρασία όπως φαίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$n = \exp \frac{a}{T}$$

όπου a, T εμπειρικοί συντελεστές[23]

Το ιξώδες ενός μονωτικού λαδιού εξαρτάται και από την χημική του σύνθεση. Στο σχήμα 7.3 παρουσιάζεται η σχέση ιξώδους-θερμοκρασίας για διάφορα λάδια της κατηγορίας IEC 296.



Σχήμα 7.3: Σχέση ιξώδους-θερμοκρασίας για διάφορα λάδια της κατηγορίας IEC 296[37].

Επομένως αύξηση της θερμοκρασίας συνεπάγεται μείωση της εσωτερικής τριβής του μονωτικού λαδιού επομένως το λάδι μπορεί να ρέει ευκολότερα ανάμεσα στα τυλίγματα του μετασχηματιστή και να απάγει την θερμοκρασία που αναπτύσσεται σε αυτόν προς το περιβάλλον με καλύτερο αποτέλεσμα.

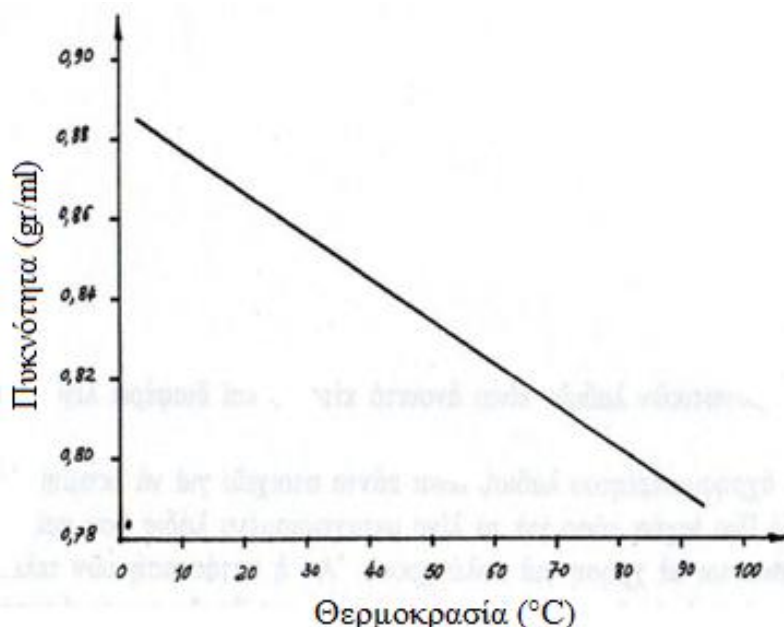
7.4 Πυκνότητα.

Η μεταβολή της πυκνότητας με τη θερμοκρασία αναφοράς t_0 ακολουθεί με πολύ μεγάλη προσέγγιση τον τύπο:

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

όπου d_t : η πυκνότητα σε θερμοκρασία t_0+t ,
 d_0 : η πυκνότητα στη θερμοκρασία αναφοράς
 $\alpha=75 \cdot 10^{-5}$
 t : η διαφορά θερμοκρασίας (αλγεβρική) από την t_0 .

Στο σχήμα που ακολουθεί παριστάνεται η μεταβολή της πυκνότητας του μονωτικού λαδιού σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία του.



Σχήμα 7.4: Μεταβολή της πυκνότητας του μονωτικού λαδιού σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία του.

Επομένως αύξηση της θερμοκρασίας συνεπάγεται μείωση της πυκνότητας του λαδιού αύξηση του όγκου του λαδιού σύμφωνα με την σχέση: $\rho = \frac{m}{V}$ ενώ μείωση της θερμοκρασίας συνεπάγεται αύξηση της πυκνότητας και μείωση του όγκου του λαδιού.

Για το λόγο αυτό υπάρχει στον μετασχηματιστή το δοχείο διαστολής το οποίο δέχεται αυτή την αυξομείωση του όγκου του μονωτικού λαδιού.

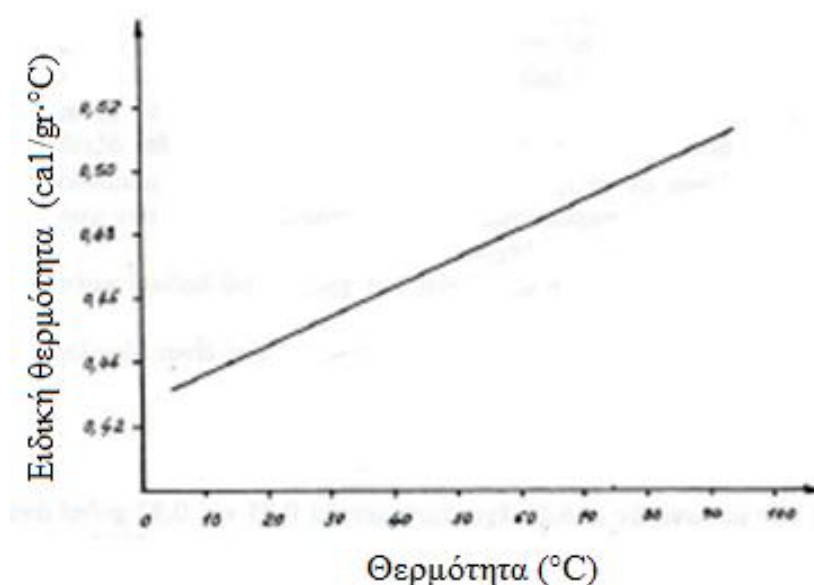
7.5 Ειδική Θερμότητα.

Η ειδική θερμότητα του λαδιού αυξάνεται όταν αυξάνεται η θερμοκρασία του και είναι δυνατό να υπολογιστεί από τον τύπο:

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

όπου C_p : η ειδική θερμότητα με σταθερή πίεση σε cal/(gr·°C),
 d : η πυκνότητα σε gr/ml στους 15°C
 t : η θερμοκρασία σε °C

Στο σχήμα που ακολουθεί παριστάνεται η μεταβολή της ειδικής θερμότητας του λαδιού σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία του.



Σχήμα 7.5: Μεταβολή της ειδικής θερμότητας του μονωτικού λαδιού σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία του.

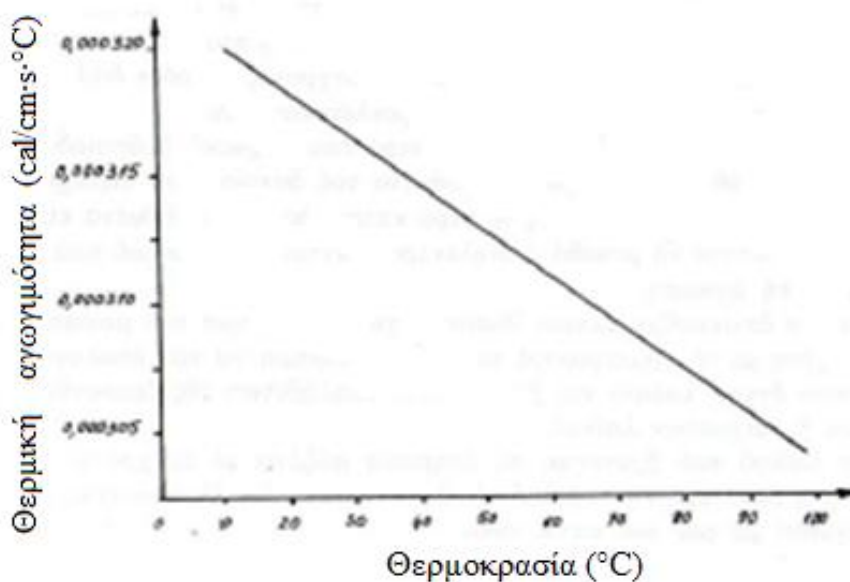
7.6 Θερμική Αγωγιμότητα

Ο συντελεστής θερμοαγωγιμότητας ελαττώνεται γραμμικά με την αύξηση της θερμοκρασίας και υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$K_t = (1 - 0,00054t) \cdot 10^{-3}$$

όπου d : η πυκνότητα σε gr/ml στους 15°C.
 t : η θερμοκρασία σε °C.

Στο σχήμα που ακολουθεί παριστάνεται η μεταβολή της θερμικής αγωγιμότητας του λαδιού σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία του



Σχήμα 7.5: Μεταβολή του συντελεστή θερμοαγωγιμότητας του μονωτικού λαδιού σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία του[23].

7.7 Υγρασία

Σημαντικό ρόλο στην συμπεριφορά του μονωτικού συστήματος λαδιού - χαρτιού παίζει και η υγρασία η κατανομή της οποίας εξαρτάται έντονα από τη θερμοκρασία. Εκτενής αναφορά για την υγρασία γίνεται στο επόμενο κεφάλαιο.

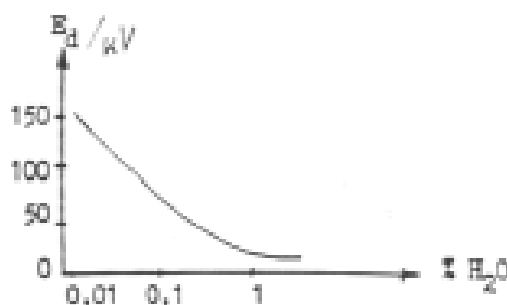
8. Υγρασία στον Μετασχηματιστή

8.1 Επιπτώσεις της υγρασίας στην μόνωση του μετασχηματιστή

Η παρουσία υγρασίας σε έναν μετασχηματιστή μπορεί να αποβεί καταστροφική για την μόνωση του για τους καθώς επηρεάζει την μονωτική ικανότητα τόσο του μονωτικού λαδιού όσο και του μονωτικού χαρτιού με τρόπο που θα αναλύσουμε στη συνέχεια.

8.1.1 Επιπτώσεις της υγρασίας στο μονωτικό λάδι

Η παρουσία υγρασίας στο μονωτικό λάδι αποτελεί σημαντικό παράγοντα της μονωτικής του υποβάθμισης καθώς σχηματίζει αγωγίμες γέφυρες που μπορούν να επιφέρουν την διάσπαση του. Επομένως η υγρασία προκαλεί δραστική μείωση στην διηλεκτρική αντοχή του μονωτικού λαδιού όπως φαίνεται και στο σχήμα 8.1 και αύξηση του συντελεστή απωλειών (tgδ) λόγω της αύξησης του ρεύματος απωλειών I_{loss} .

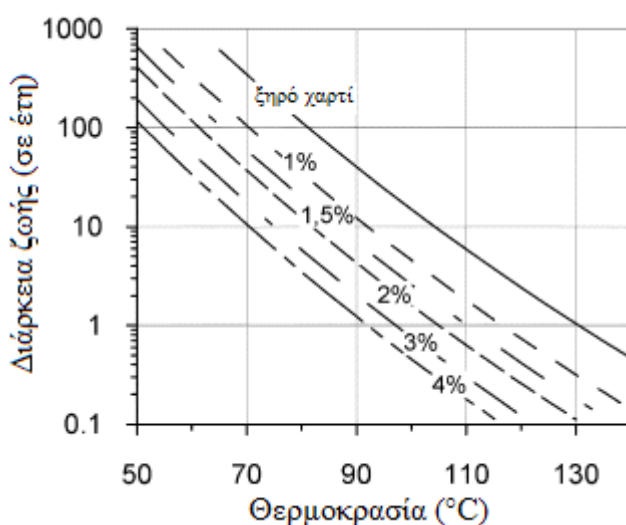


Σχήμα 8.1: Μείωση της διηλεκτρικής αντοχής του μονωτικού λαδιού ανάλογα με το ποσοστό της υγρασίας σε αυτό[8].

8.1.2 Επιπτώσεις της υγρασίας στο μονωτικό χαρτί

Όπως είπαμε και σε προηγούμενο κεφάλαιο η διάρκεια ζωής του μετασχηματιστή εξαρτάται σε πολύ μεγάλο βαθμό από την διάρκεια ζωής της στερεάς μόνωσης του δηλαδή του μονωτικού χαρτιού. Η γήρανση του μονωτικού χαρτιού μειώνει τον βαθμό πολυμερισμού του μονωτικού χαρτιού, και κατά συνέπεια την μηχανική του αντοχή, μέχρι το 20% της αρχικής τιμής. Το σημείο θεωρείται ως το κριτήριο για το τέλος της ζωής της μόνωσης του μετασχηματιστή. Η συμβολή της υγρασίας στην γήρανση του μονωτικού χαρτιού, άρα και στην μείωση της διάρκειας ζωής του μετασχηματισμού, έγκειται στο γεγονός ότι μειώνει τον βαθμό

πολυμερισμού του λόγω της υδρόλυσης που προκαλεί σε αυτό. Η αναμενόμενη διάρκεια ζωής του μονωτικού χαρτιού σε σχέση με την περιεχόμενη υγρασία σε αυτό παρουσιάζεται στο παρακάτω διάγραμμα.



Σχήμα 8.2: Αναμενόμενη διάρκεια ζωής του μονωτικού χαρτιού σε σχέση με την περιεχόμενη υγρασία σε αυτό[20].

8.2 Καταστάσεις στις οποίες εμφανίζεται το νερό στον μετασχηματιστή

Το νερό στον μετασχηματιστή μπορεί να εντοπιστεί τόσο στο μονωτικό λάδι όσο και στο μονωτικό χαρτί στις παρακάτω καταστάσεις[38]:

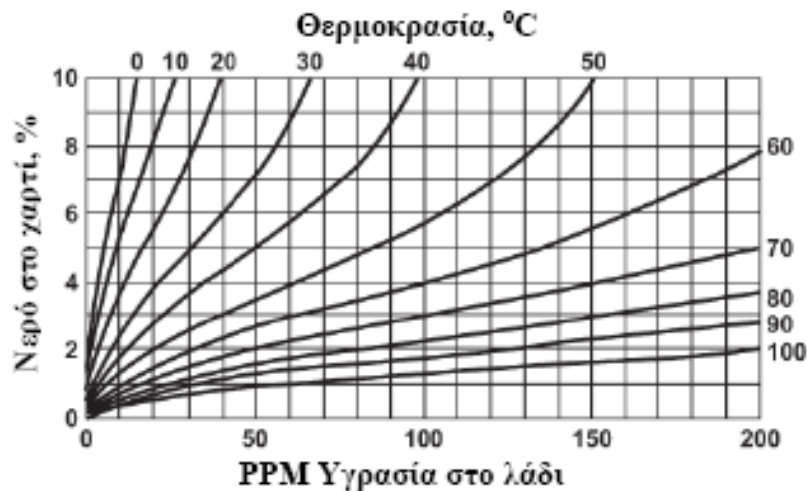
- Ενωμένο με δεσμούς Van Der Waals ή δεσμούς υδρογόνου με τα προϊόντα της γήρανσης του λαδιού (Διαλυμένο στο λάδι).
- Στα λάδια που περιέχουν νερό περισσότερο από την τιμή κορεσμού, το νερό υπάρχει με την μορφή σταγόνων που αιωρούνται σ' αυτά (γαλάκτωμα) ή σε ελεύθερη κατάσταση στον πυθμένα του δοχείου του μετασχηματιστή.
- Απορροφημένη από το μονωτικό χαρτί εξαιτίας της υγροσκοπικότητας του.

Εξ ορισμού η σχετική υγρασία ενός υγρού είναι ο λόγος της ποσότητας του νερού που είναι διαλυμένο στο υγρό προς την μέγιστη ποσότητα νερού που μπορεί να διαλυθεί σε αυτό. Η σχετική υγρασία $W_{rel}(\%)$ του λαδιού σε δοσμένη απόλυτη θερμοκρασία $T(K)$, ορίζεται το πηλίκο της ποσότητας νερού στο λάδι $W_{abs} (ppm)$ προς το σημείο κορεσμού του νερού στο λάδι $W_L(T)$.

$$W_{rel} = \frac{W_{abs}}{W_L(T)} \quad (8.1)$$

Το σημείο κορεσμού του νερού στο μονωτικό λάδι εξαρτάται από τον τύπο του λαδιού, την χημική του σύνθεση και την θερμοκρασία.

Το νερό διανέμεται ανάμεσα στο λάδι και το χαρτί 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. Τέτοιες μεταβολές στην περιεχόμενη στο λάδι υγρασία, ελάχιστα επηρεάζουν την περιεχόμενη στο χαρτί υγρασία, η οποία παραμένει σχεδόν σταθερή. Αυτό συμβαίνει διότι περισσότερο από το 99% του συνολικού νερού του μονωτικού συστήματος του μετασχηματιστή, περιέχεται στο στερεό μονωτικό, δηλαδή στο χαρτί. Εάν η θερμοκρασία παρέμενε σταθερή τότε θα υπήρχε μια «κατάσταση ισορροπίας» μεταξύ της περιεχόμενης υγρασίας στο λάδι και το χαρτί οπότε και θα μπορούσαμε να υπολογίσουμε την υγρασία στο χαρτί γνωρίζοντας μονό την υγρασία στο λάδι. Παρόλα αυτά, καμπύλες ισορροπίας όπως στο σχήμα 8.3 χρησιμοποιούνται για να δώσουν μια ιδέα της περιεχόμενης στο χαρτί υγρασίας [6].



Σχήμα 8.3: Χαρακτηριστικές ισορροπίας της υγρασίας σε χαρτί και λάδι[22].

8.3 Παράγοντες που επηρεάζουν την διαλυτότητα του νερού στο μονωτικό λάδι

1. Γήρανση του λαδιού

Το καθαρό μονωτικό λάδι αποτελείται από κεκορεσμένους υδρογονάνθρακες όπως παραφινικούς και ναφθενικούς. Εξαιτίας της μοριακής δομής των υδρογονανθράκων αυτών, οι οποίοι δεν μπορούν να σχηματίσουν δεσμούς Van Der

Waals ή δεσμούς υδρογόνου με τα μόρια του νερού, το νερό δεν μπορεί να διαλυθεί στο καθαρό μονωτικό λάδι. Όμως οι υδρογονάνθρακες, από τους οποίους αποτελείται το μονωτικό λάδι, οξειδώνονται και παράγουν αλκοόλες, αλδεΐδες, κετόνες και εν τέλη οξέα. Τα παραπάνω παραπροϊόντα σχηματίζουν δεσμούς Van Der Waals και δεσμούς υδρογόνου με τα μόρια του νερού. Επειδή λοιπόν τα παραπροϊόντα γήρανσης του λαδιού έχουν την δυνατότητα να απορροφήσουν νερό συμπεραίνουμε ότι η διαλυτότητα του νερού στο μονωτικό λάδι αυξάνεται με την γήρανση του[39].

2. Θερμοκρασία

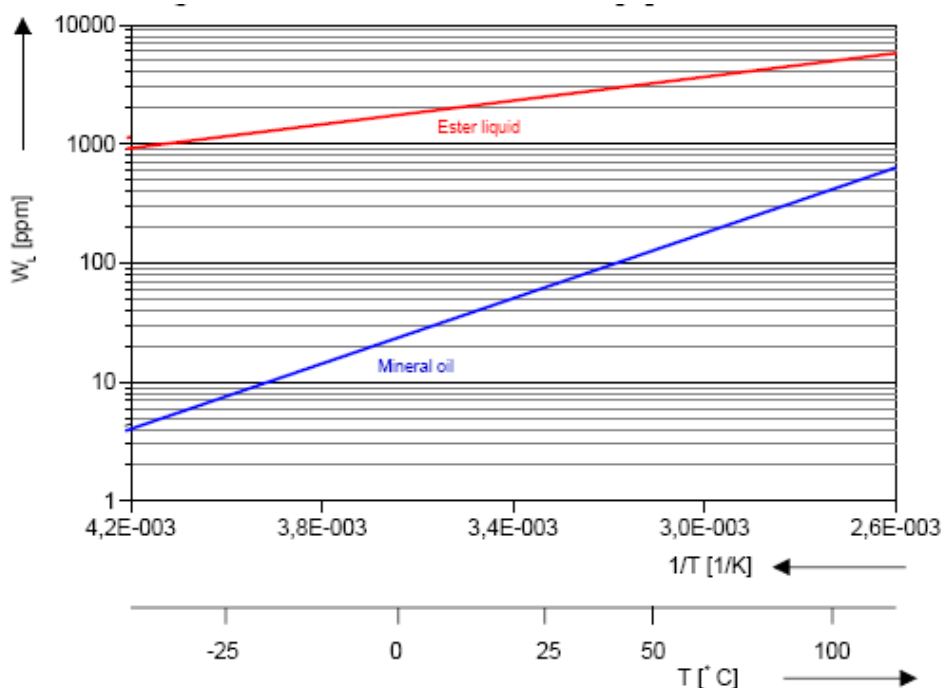
Η διαλυτότητα του νερού στο λάδι είναι ανάλογη με την θερμοκρασία του. Όσο μεγαλύτερη είναι η θερμοκρασία ενός λαδιού αυξάνεται και η διαλυτότητα του νερού σε αυτό. Η αύξηση της θερμοκρασίας έχει σαν συνέπεια να αυξάνεται ο ρυθμός των χημικών αντιδράσεων που προκαλούν την γήρανση του μονωτικού λαδιού και επομένως αυξάνουν τα παραπροϊόντα της. Τα παραπροϊόντα αυτά, όπως είπαμε και στην προηγούμενη παράγραφο, σχηματίζουν δεσμούς Van Der Waals και δεσμούς υδρογόνου με τα μόρια του νερού. Έτσι θεωρούμε ότι η σχέση μεταξύ της διαλυτότητας του νερού στο λάδι (W_L) και της θερμοκρασίας (T) έχει την ίδια μορφή με την εξίσωση Arrhenius όπως περιγράφεται από την παρακάτω σχέση:

$$W_L(T) = W_0 \cdot e^{-\frac{H}{T}} \quad (8.2)$$

όπου W_0 (ppm) και $H(K)$ είναι σταθερές του κάθε μονωτικού λαδιού και προσδιορίζονται πειραματικά[39].

3. Είδος λαδιού – Χημική σύνθεση λαδιού

Όπως αναφέραμε και σε προηγούμενο κεφάλαιο τα συνθετικά λάδια είναι πιο υδρόφιλα από τα ορυκτά λάδια και η διαλυτότητα του νερού σ' αυτά είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη των ορυκτέλαιων[23]. Στο διάγραμμα 8.4 παρουσιάζεται το όριο διαλυτότητας δυο λαδιών σε ένα εύρος θερμοκρασιών από $-30^{\circ}C$ έως $100^{\circ}C$. Το ένα λάδι είναι ορυκτέλαιο ενώ το άλλο συνθετικό μονωτικό λάδι με βάση τους εστέρες. Από το διάγραμμα φαίνεται ότι το όριο διαλυτότητας του νερού στο συνθετικό λάδι είναι σημαντικά μεγαλύτερο από αυτό του ορυκτέλαιου[40]. Η διαφορά αυτή οφείλεται στην διαφορετική χημική σύνθεση των δυο λαδιών. Ακόμη και μεταξύ δυο ορυκτέλαιων η διαλυτότητα του νερού σε αυτά αλλάζει ανάλογα με την χημική τους σύνθεση. Για παράδειγμα η αύξηση των αρωματικών υδρογονανθράκων που περιέχονται σε ένα λάδι αυξάνει σημαντικά την διαλυτότητα του.



Σχήμα 8.4: Διαλυτότητα του νερού σε ορυκτέλαιο και λάδι με βάση τους εστέρες ανάλογα με την θερμοκρασία [40].

8.4 Παράγοντες που συμβάλουν στην παρουσία νερού στο μονωτικό λάδι

Η ύπαρξη υγρασίας στα μονωτικά λάδια των μετασχηματιστών που είναι σε λειτουργία είναι ένα γεγονός που δεν μπορεί να αποφευχθεί. Οι κύριοι παράγοντες που συμβάλουν στην παρουσία της υγρασίας στο μονωτικό λάδι παρατίθενται παρακάτω.

i. Γήρανση του μονωτικού χαρτιού

Το μονωτικό χαρτί το οποίο χρησιμοποιείται στα τυλίγματα του μετασχηματιστή και βρίσκεται σε άμεση επαφή με το μονωτικό λάδι υπόκειται σε διάφορες διαδικασίες που προκαλούν γήρανση του. Οι διαδικασίες αυτές είναι η θερμική καταπόνηση εξαιτίας της υψηλής θερμοκρασίας και η οξείδωση του λόγω της παρουσίας οξυγόνου. Αποτέλεσμα των διαδικασιών αυτών είναι η δημιουργία κάποιων παραπροϊόντων, με ποιο σημαντικό απ' όλα το νερό. Να σημειωθεί ότι η μεγαλύτερη ποσότητα της υγρασίας ενός μετασχηματιστή βρίσκεται στο μονωτικό χαρτί[22,39].

ii. Γήρανση του μονωτικού λαδιού

Το μονωτικό λάδι όπως αναφέραμε και σε προηγούμενο κεφάλαιο υφίσταται οξείδωση ως αποτέλεσμα της επαφής του λαδιού με τον ατμοσφαιρικό αέρα. Τα κυριότερα τελικά προϊόντα της οξείδωσης του λαδιού είναι διοξείδιο του άνθρακα και

νερό. Για το λόγο αυτό όσο περισσότερο διάστημα χρησιμοποιείται το μονωτικό λάδι σε έναν μετασχηματιστή τόσο μεγαλύτερη είναι και η ποσότητα του νερού που βρίσκεται σε αυτό[27].

iii. Εξωτερικοί παράγοντες

Παρόλη την διαδικασία ξήρανσης στην οποία υπόκειται το μονωτικό χαρτί πριν την τοποθέτηση του στον μετασχηματιστή θα παραμένει σε αυτό νερό της τάξης $C_w = 0,5-1\%$. Τα μονωτικά λάδια επίσης, ακόμη και καινούρια, περιέχουν νερό καθώς είναι υγροσκοπικά. Τέλος υγρασία μπαίνει στο δοχείο του μετασχηματιστή κατά την διάρκεια των αναπνοών του, λόγω των μεταβολών της θερμοκρασίας του[39]. Για το λόγο αυτό τοποθετείται ένας αφυγραντήρας πάνω στο δοχείο διαστολής του λαδιού ο οποίος περιέχει κρυστάλλους SiO_2 (silicagel) που απορροφούν την υγρασία του αέρα[1].

8.5 Μέθοδοι ανάλυσης της υγρασίας στον μετασχηματιστή

Η πλέον γνωστή μέθοδος για την εύρεση της περιεκτικότητας νερού στον όγκο του μονωτικού ελαίου είναι η Μέθοδος Karl Fischer Titration (χρωματομετρική τιτλοδότηση Karl Fischer) η οποία περιγράφεται στον κανονισμό ASTM D1533 και απαιτεί τη χρήση ειδικού οργάνου (αναλυτής Karl Fischer).

Η Μέθοδος Karl Fischer Titration βασίζεται στην εισαγωγή γνωστής ποσότητας ενός αντιδραστηρίου (I_2) παρουσία θεικού οξέος (SO_2) στο νερό έως ότου επιτευχθεί χημική ισορροπία. Μετά την αποκατάσταση της χημικής ισορροπίας, που αποδίδεται με τη στοιχειομετρική εξίσωση: $2H_2O + SO_2 + I_2 \rightarrow H_2SO_4 + 2HI$ μπορούμε να αποφανθούμε για την ποσότητα του νερού που βρίσκεται στο μονωτικό λάδι γνωρίζοντας ότι ένα mole I_2 καταναλώνεται για κάθε 2 mole H_2O [6,10,38,39].

Η γνώση της περιεχόμενης υγρασίας στο μονωτικό λάδι σε συνδυασμό με διάφορες χαρακτηριστικές καμπύλες ισορροπίας (π.χ. βλ. σχήμα 8.1) μας δίνουν μια εκτίμηση της υγρασίας στο μονωτικό χαρτί. Για μεσαίες και υψηλές θερμοκρασίες των μετασχηματιστών η εκτίμηση της υγρασίας στο μονωτικό χαρτί μέσω των καμπυλών ισορροπίας μπορεί να γίνει με ικανοποιητική προσέγγιση ενώ για χαμηλές θερμοκρασίες παρουσιάζονται σημαντικές αποκλίσεις. Οι αποκλίσεις αυτές οφείλονται στην δυσκολία αποκατάστασης της θερμικής ισορροπίας στο εσωτερικό του μετασχηματιστή στις χαμηλές θερμοκρασίες[41].

9. Μετρήσεις

Όπως αναφέραμε και σε προηγούμενο κεφάλαιο ως διηλεκτρική αντοχή του μονωτικού λαδιού μπορεί να οριστεί 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 αναμεμιγμένα στο λάδι και κατ' επέκταση την κατάσταση στην οποία βρίσκεται το μονωτικό λάδι του μετασχηματιστή.

Στην εργασία αυτή θα χρησιμοποιήσουμε την μέθοδο της τάσης διάσπασης όχι όμως για να αξιολογήσουμε την κατάσταση του μονωτικού λαδιού αλλά για να μελετήσουμε την συμπεριφορά του σε ένα φάσμα θερμοκρασιών που κυμαίνεται από -15°C έως 101°C . Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στην Περιοχή Χανίων της Δ.Ε.Η. Α.Ε. χρησιμοποιώντας εξειδικευμένο εξοπλισμό. Η διάταξη των μετρήσεων, η διαδικασία που ακολουθήθηκε και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στις επόμενες παραγράφους.

9.1 Η διάταξη των μετρήσεων

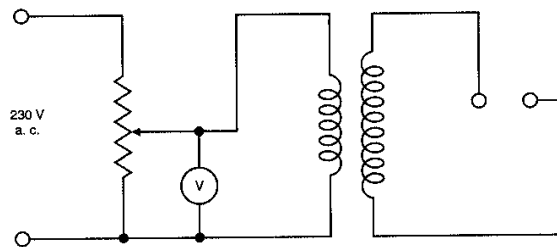
Η συσκευή η οποία χρησιμοποιήθηκε για την μέτρηση της τάσης διάσπασης του μονωτικού λαδιού ήταν η BAUR DPA 75 Insulating Oil Tester 75 kV. Η συσκευή αυτή μπορεί να αναπτύξει τάση έως $75\text{ kV}_{\text{rms}}$ ενώ έχει και θερμόμετρο για την μέτρηση του υπό δοκιμή λαδιού. Οι μετρήσεις έγιναν κατά τα πρότυπα IEC 156/95 [42]. Χρησιμοποιήθηκαν επίσης δυο θερμόμετρα για την μέτρηση της θερμοκρασίας του μονωτικού λαδιού, ένα υδραργυρικό και ένα ψηφιακό. Τέλος χρησιμοποιήσαμε και ένα ψηφιακό θερμόμετρο-υγρόμετρο για την μέτρηση της θερμοκρασίας και της υγρασίας του περιβάλλοντος χώρου.

Το λάδι που χρησιμοποιήθηκε στις μετρήσεις ήταν αυτό που χρησιμοποιείται στους μετασχηματιστές που ανήκουν στην Δ.Ε.Η. Χανίων. Το λάδι αυτό το ήταν αποθηκευμένο σε γυάλινα μπουκάλια. Για να επιτύχουμε την επιθυμητή θερμοκρασία του λαδιού ώστε να κάνουμε τις μετρήσεις τοποθετούσαμε τα μπουκάλια σε κατάψυξη, ψυγείο ή ηλεκτρικό φούρνο ώστε να το ψύξουμε ή να το θερμάνουμε αντίστοιχα.

Οι συσκευή που χρησιμοποιήσαμε για την μέτρηση της τάσης διάσπασης του μονωτικού λαδιού παρουσιάζεται στην εικόνα του σχήματος 9.1 ενώ ένα ισοδύναμο κύκλωμα της πειραματικής διάταξης παρουσιάζεται στο σχήμα 9.2.



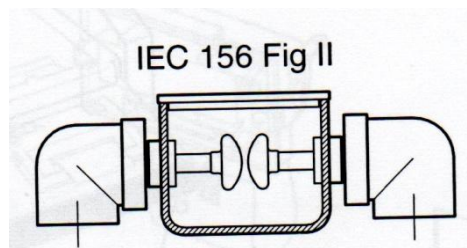
Σχήμα 9.1: Συσκευή εκτέλεσης δοκιμών BAUR DPA 75 Insulating Oil Tester 75 kV.



Σχήμα 9.2: Ισοδύναμο κύκλωμα της πειραματικής διάταξης[43].

9.2 Η διαδικασία των μετρήσεων

Όπως προαναφέραμε οι μετρήσεις έγιναν κατά τα πρότυπα IEC 156/95. Σύμφωνα με τα IEC 156/95 το δοκιμαστικό δοχείο που χρησιμοποιείται έχει χωρητικότητα 0.4l, ενώ η απόσταση μεταξύ των δυο ηλεκτροδίων είναι 2,5mm. Η διάμετρος των ηλεκτροδίων είναι 36mm και η ακτίνα τους 25mm. Η μορφή και οι αποστάσεις των ηλεκτροδίων φαίνονται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 9.3: Δοκιμαστικό δοχείο

Η διαδικασία που ακολουθείται για την πλήρωση του δοκιμαστικού δοχείου με το λάδι είναι αυτή που περιγράφεται στις οδηγίες λειτουργίας της συσκευής και είναι οι εξής:

1. Ανοίγουμε το καπάκι της συσκευής.
2. Αφαιρούμε το δοκιμαστικό δοχείο από την συσκευή.
3. Αφαιρούμε το καπάκι από το δοκιμαστικό δοχείο.
4. Γεμίζουμε το δοκιμαστικό δοχείο με το μονωτικό λάδι.
5. Τοποθετούμε το καπάκι του δοκιμαστικού δοχείου αφού πρώτα μετρήσουμε την θερμοκρασία του προς μέτρηση λαδιού ($\Theta_{αρχ}$).
6. Τοποθετούμε το δοκιμαστικό δοχείο στην συσκευή.
7. Κλείνουμε το καπάκι της συσκευής.

Στη συνέχεια αφού έχουμε συνδέσει την συσκευή με την παροχή ηλεκτρισμού και έχουμε επιλέξει η μέτρηση της τάσης διάσπασης να γίνει κατά τα πρότυπα IEC 156/95 πατάμε το “START” ώστε να ξεκινήσει η μέτρηση της τάσης διάσπασης από την συσκευή. Η διαδικασία που ακολουθείται από την συσκευή και είναι σύμφωνη με τα πρότυπα IEC 156/95 είναι η ακόλουθη.

Αφότου πατήσουμε το “START” το λάδι αφήνεται να ηρεμήσει μέσα στο δοκιμαστικό δοχείο της συσκευής για 5 λεπτά. Στη συνέχεια η τάση ανάμεσα στα ηλεκτρόδια αυψώνεται με ρυθμό 2kV/s μέχρι τα 75kV ή μέχρι τη διάσπαση του λαδιού. Αμέσως μετά την πρώτη διάσπαση το λάδι αφήνεται να ηρεμήσει μέσα στο δοκιμαστικό δοχείο της συσκευής για 2 λεπτά οπότε επαναλαμβάνεται η διαδικασία αυψώσεως της τάσης συνολικά 6 φορές. Στο τέλος μετράμε πάλι την θερμοκρασία του λαδιού ($\Theta_{τελ}$) ακολουθώντας την διαδικασία που αναφέραμε προηγουμένως.

Μετά το τέλος της διαδικασίας η συσκευή παρουσιάζει τα αποτελέσματα της μέτρησης. Τα αποτελέσματα αυτά είναι:

- Η τάση διάσπασης της κάθε δοκιμής από την ενδειξη TEST (αν η τάση διάσπασης είναι πάνω από 75kV εμφανίζει: > 75kV).
- Ο μέσος όρος των τάσεων διάσπασης (MEAN VALUE).
- Η τυπική απόκλιση των μετρήσεων (STD. DEV).
- Ο συντελεστής μεταβολής των μετρήσεων (S/M).
- Η θερμοκρασία του λαδιού στο τέλος της διαδικασίας (TEMP).

Για την καλύτερη κατανόηση των αποτελεσμάτων παραθέτουμε μια μαθηματική ανάλυση τους ενώ παρουσιάζουμε και τα σύμβολα που θα χρησιμοποιήσουμε στην παρουσίαση των αποτελεσμάτων σε πίνακες.

- **Τάση διάσπασης**

Την τάση διάσπασης της κάθε δοκιμής την ονομάζουμε V_{d1} , V_{d2} , κλπ ανάλογα με τον αριθμό της διάσπασης.

- **Μέσος όρος των τάσεων διάσπασης**

Ο μέσος όρος των τάσεων διάσπασης υπολογίζεται από τον παρακάτω τύπο:

$$V_{\bar{d}} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n V_{di} = \frac{V_{d1} + V_{d2} + V_{d3} + V_{d4} + V_{d5} + V_{d6}}{6} \quad (9.1)$$

- **Τυπική απόκλιση των μετρήσεων**

Η τυπική απόκλιση (σ) είναι μέτρο της διασποράς των τιμών από τη μέση τιμή (το μέσο) και εκφράζεται με την ίδια μονάδα που εκφράζονται και οι παρατηρήσεις (kV). Υπολογίζεται χρησιμοποιώντας την "αμερόληπτη" μέθοδο ή μέθοδο του "n-1" η οποία δίνεται από τον τύπο:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (V_{di} - V_{\bar{d}})^2}{n-1}} \quad (9.1)$$

Επομένως στην περίπτωση μας όπου έχουμε 6 μετρήσεις, το ανάπτυγμα της τυπικής απόκλισης δίνεται από τον παρακάτω τύπο.

$$\sigma = \sqrt{\frac{(V_1 - V_{\bar{d}})^2 + (V_2 - V_{\bar{d}})^2 + (V_3 - V_{\bar{d}})^2 + (V_4 - V_{\bar{d}})^2 + (V_5 - V_{\bar{d}})^2 + (V_6 - V_{\bar{d}})^2}{5}} \quad (9.1)$$

- **Συντελεστής μεταβολής**

Ο συντελεστής μεταβολής (CV) είναι το πηλίκο της τυπικής απόκλισης δια της μέσης τιμής και δίνεται από τον τύπο:

$$CV = \frac{\sigma}{V_{\bar{d}}} \quad (9.1)$$

Ο συντελεστής μεταβολής εκφράζεται επί τοις εκατό και είναι ανεξάρτητος από τις μονάδες μέτρησης. Εκφράζει ένα μέτρο σχετικής διασποράς των τιμών που μετρήθηκαν.

Ένα δείγμα τιμών μιας μεταβλητής είναι ομοιογενές όταν ο CV είναι μικρότερος ή ίσος από το 10%.

Σύμφωνα με όλα τα παραπάνω η μορφή του πίνακα των αποτελεσμάτων των μετρήσεων έχει την εξής μορφή: Στην πρώτη στήλη του πίνακα είναι η θερμοκρασία του μονωτικού λαδιού όπως εμείς την μετρήσαμε πριν την έναρξη της δοκιμής ($\Theta_{αρχ}$) ενώ στην δεύτερη στήλη η θερμοκρασία μετά την δοκιμή ($\Theta_{τελ}$). Στις στήλες 3 έως 8 είναι οι τιμές της τάσης διάσπασης (V_{d1} έως V_{d6}) που μας έδωσε η συσκευή και στη στήλη 9 ο μέσος όρος αυτών ($V_{\bar{d}}$). Στις στήλες 10 και 11 είναι οι τιμές της τυπικής απόκλισης (σ) και του συντελεστή μεταβολής (CM).

9.3 Αποτελέσματα των μετρήσεων

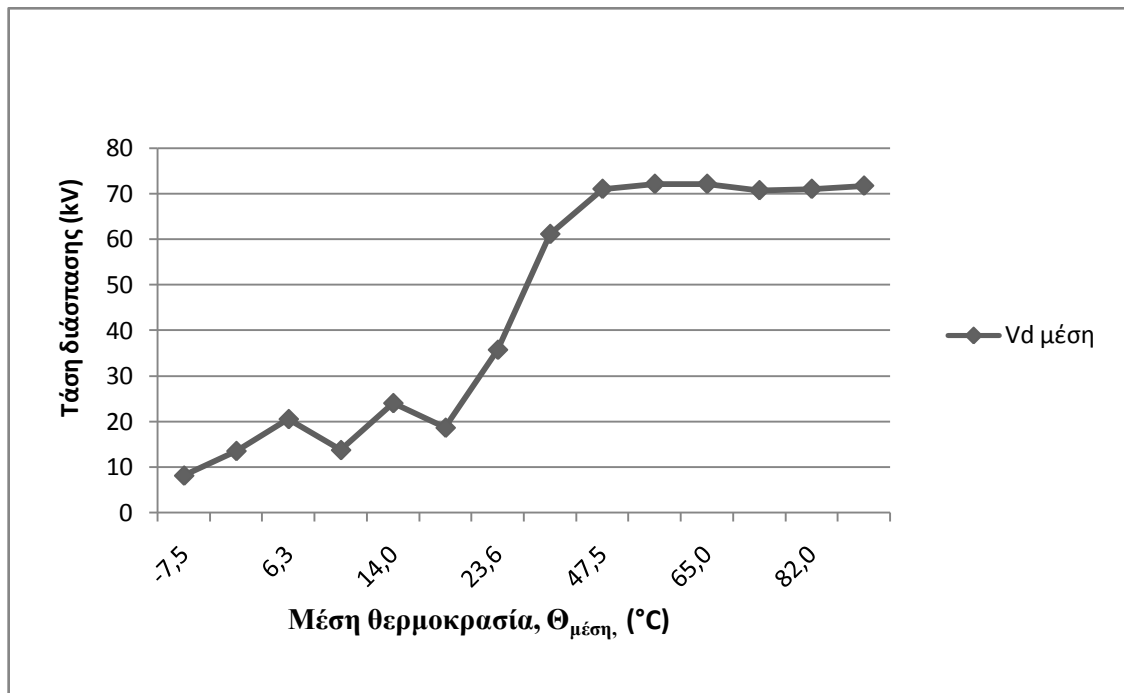
Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν σε πίνακες και παραθέτουμε γραφικές παραστάσεις των μετρηθεισών μέσων τιμών διάσπασης (V_d) συναρτήσει της θερμοκρασίας. Στις γραφικές παραστάσεις αυτές χρησιμοποιούμε τις μέσες τιμές των θερμοκρασιών ($\Theta_{\text{μέση}} = \frac{\Theta_{\text{αρχ}} + \Theta_{\text{τελ}}}{2}$) του δείγματος λαδιού που μετρήσαμε εμείς με το υδραργυρικό θερμόμετρο στην αρχή και το τέλος κάθε πειράματος. Πριν την παρουσίαση των αποτελεσμάτων θα κάνουμε μια συνοπτική αναφορά στο είδος της μέτρησης.

9.3.1 Μέτρηση της τάσης διάσπασης σε αρχικές θερμοκρασίες από -15°C έως +101°C

Στην πρώτη σειρά μετρήσεων μετράμε την τάση διάσπασης του μονωτικού λαδιού σε διάφορες θερμοκρασίες από -15°C έως +101°C. Δεν κατέστη εφικτό να πετύχουμε θερμοκρασίες μικρότερες ή μεγαλύτερες από τις παραπάνω με τον υπάρχοντα εξοπλισμό. Μετά από κάθε σειρά διασπάσεων το δεξιόγμα αντικαθίσταται και έτσι το λάδι που χρησιμοποιείται σε κάθε δοκιμή είναι καινούριο. Τα αποτελέσματα της πρώτης σειράς μετρήσεων παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 9.1 : Αποτελέσματα των μετρήσεων της τάσης διάσπασης λαδιού μετασχηματιστών διανομής για αρχικές θερμοκρασίες από -15°C έως 101°C.

Θαρχ (°C)	Θτελ (°C)	V ₁ (kV)	V ₂ (kV)	V ₃ (kV)	V ₄ (kV)	V ₅ (kV)	V ₆ (kV)	V _d (kV)	σ (kV)	CV (%)
-15	0	6,7	8,9	7,7	11,1	7,2	7,9	8,2	1,6	19,3
-10	4,3	17,6	15,7	12,9	14,2	8,9	12,6	13,6	3	21,9
3	9,5	31,7	15,8	13,7	18,8	23,9	19,6	20,6	6,5	31,4
10	13,2	19,2	11,2	13,8	14,5	12,6	11,4	13,8	3	21,4
12	16	33,1	20,5	24,1	26,1	10,9	30	24,1	7,8	32,5
16	18	25,6	9,6	17,9	22	21,6	15,7	18,7	5,7	30,2
24	23,2	58,4	20,9	45	40,4	21,4	28,8	35,8	14,8	41,3
39	33	59,9	61,7	58,7	58,2	71,4	57,1	61,2	5,3	8,6
53	42	70,8	65	75	65,8	75	75	71,1	4,7	6,6
66	51	75	69,1	64,3	75	75	75	72,2	4,6	6,3
74	56	58	75	75	75	75	75	72,2	7	9,6
89	63	67,2	70,7	68,1	75	75	69	70,8	3,4	4,8
99	65	58,5	73,2	75	69,9	75	75	71,1	6,5	9,1
101	66	65,4	66,2	74,1	75	75	75	71,8	4,7	6,5



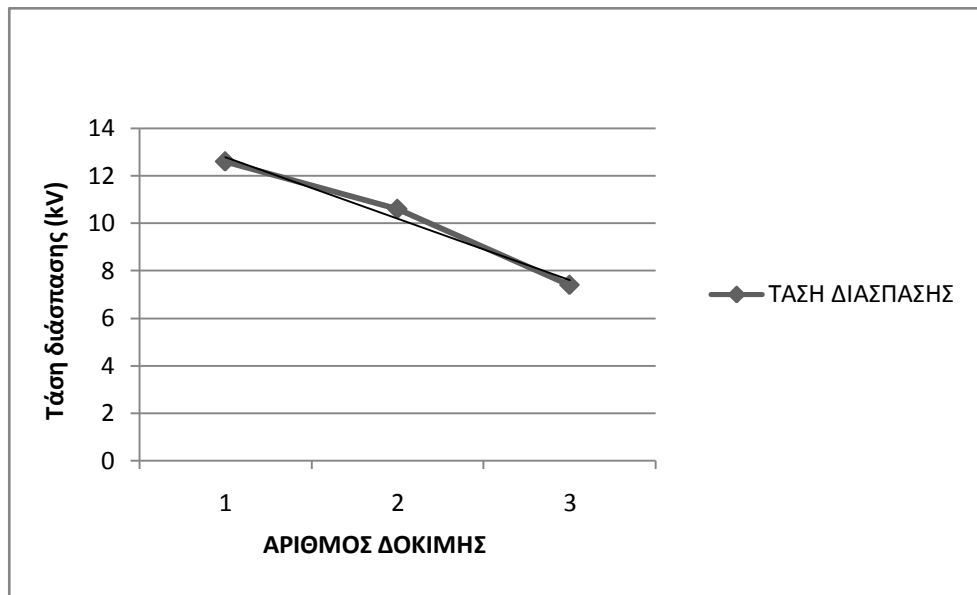
Σχήμα 9.4 : Η γραφική παράσταση της συνάρτησης $V_d = f(\Theta_{\text{μέση}})$

9.3.2 Μέτρηση της τάσης διάσπασης σε αρχικές θερμοκρασίες από -5°C έως $+1^{\circ}\text{C}$

Στην δεύτερη σειρά μετρήσεων μετράμε την τάση διάσπασης του μονωτικού λαδιού σε χαμηλές αρχικές θερμοκρασίες οι οποίες είναι από -5°C έως $+1^{\circ}\text{C}$ ώστε να μελετήσουμε την συμπεριφορά του σε αυτές τις θερμοκρασίες. Τις παραπάνω θερμοκρασίες τις επιτύχαμε τοποθετώντας το μπουκάλι στο οποίο ήταν τοποθετημένο το μονωτικό λάδι σε κατάψυξη. Το λάδι που μετράμε είναι και στις 3 δοκιμές το ίδιο, σε κάθε δοκιμή το δείγμα υφίσταται 6 διασπάσεις, δηλαδή συνολικά 18 διασπάσεις. Στον πίνακα 9.2 που ακολουθεί παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων ενώ στο διάγραμμα του σχήματος 9.5 παρουσιάζεται η μεταβολή της μέσης τιμής της τάσης διάσπασης με τον αριθμό δοκιμής.

Πίνακας 9.2 : Αποτελέσματα των μετρήσεων της τάσης διάσπασης δείγματος λαδιού για 18 διασπάσεις στην περιοχή αρχικών θερμοκρασιών από -5°C έως 1°C .

$\Theta_{\text{αρχ}}$ (°C)	$\Theta_{\text{τελ}}$ (°C)	V_1 (kV)	V_2 (kV)	V_3 (kV)	V_4 (kV)	V_5 (kV)	V_6 (kV)	V_d (kV)	σ (kV)	CV (%)
-5	7	12,4	11,6	14,2	11,8	16	9,5	12,6	2,3	17,9
0	10	11,7	8,9	11,5	9,9	10,2	11,6	10,6	1,1	10,6
1	12	7,2	6,3	7,2	7,1	8,2	8,4	7,4	0,8	10,4



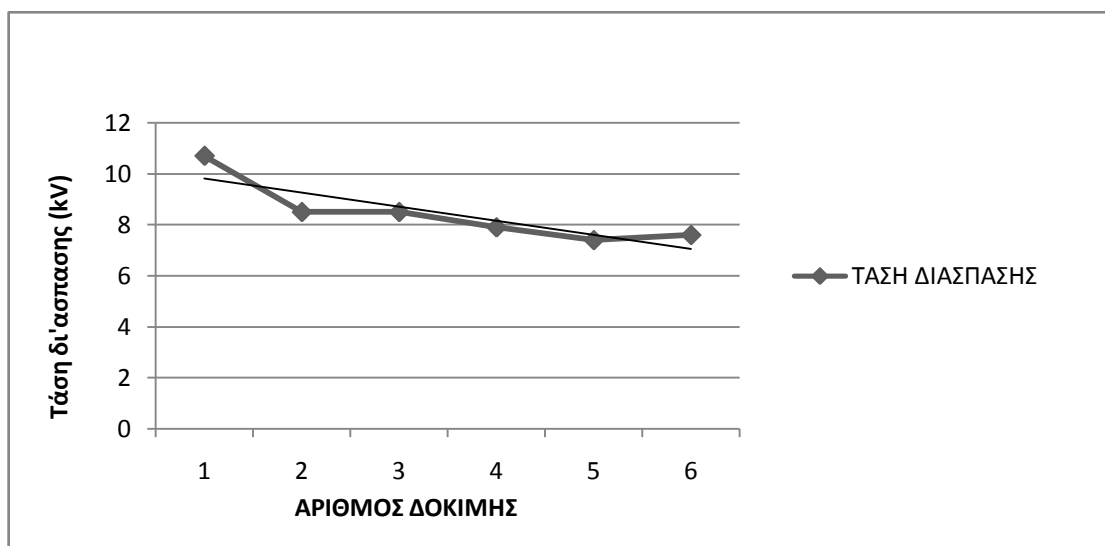
Σχήμα 9.5 : Γραφική παράσταση της μέσης τιμής της τάσης διάσπασης (V_d) του δείγματος λαδιού σαν συνάρτηση του αριθμού δοκιμής, στην περιοχή θερμοκρασιών -5°C έως $+1^{\circ}\text{C}$.

9.3.3 Μέτρηση της τάσης διάσπασης σε αρχικές θερμοκρασίες από $+9^{\circ}\text{C}$ έως $+11^{\circ}\text{C}$

Στην τρίτη σειρά μετρήσεων μετράμε την τάση διάσπασης του μονωτικού λαδιού σε αρχικές θερμοκρασίες, χαμηλότερες από τις θερμοκρασίες δωματίου, οι οποίες είναι από $+9^{\circ}\text{C}$ έως $+11^{\circ}\text{C}$ ώστε να μελετήσουμε την συμπεριφορά του σε αυτές τις θερμοκρασίες. Τις παραπάνω θερμοκρασίες τις επιτύχαμε τοποθετώντας το μπουκάλι στο με το μονωτικό λάδι σε ψυγείο. Το λάδι που μετράμε είναι και στις 7 δοκιμές το ίδιο, σε κάθε δε δοκιμή υφίσταται 6 διασπάσεις, δηλαδή συνολικά 42 διασπάσεις.

Πίνακας 9.3 : Αποτελέσματα των μετρήσεων της τάσης διάσπασης δείγματος λαδιού για 18 διασπάσεις στην περιοχή αρχικών θερμοκρασιών από -5°C έως $+1^{\circ}\text{C}$.

Θαρχ ($^{\circ}\text{C}$)	Θτελ ($^{\circ}\text{C}$)	V_1 (kV)	V_2 (kV)	V_3 (kV)	V_4 (kV)	V_5 (kV)	V_6 (kV)	V_d (kV)	σ (kV)	CV (%)
10	15	10,6	10,6	10	9,7	11,1	12,1	10,7	0,8	7,8
10	15	8,7	8,6	8,6	7,9	9,2	7,9	8,5	0,5	5,8
11	17	6,9	6,7	8,4	8,4	11,4	9,2	8,5	1,7	20,3
10	15	8,7	8,4	8,2	7,7	7,3	7,2	7,9	0,6	7,4
10	15	6,9	7,2	7,5	7,7	7,5	7,5	7,4	0,3	3,8
9	14	6,9	7,8	7,2	8	7,9	7,9	7,6	0,4	5,8
10	16	8	7	7,2	7,2	8,7	8,3	7,8	0,7	9



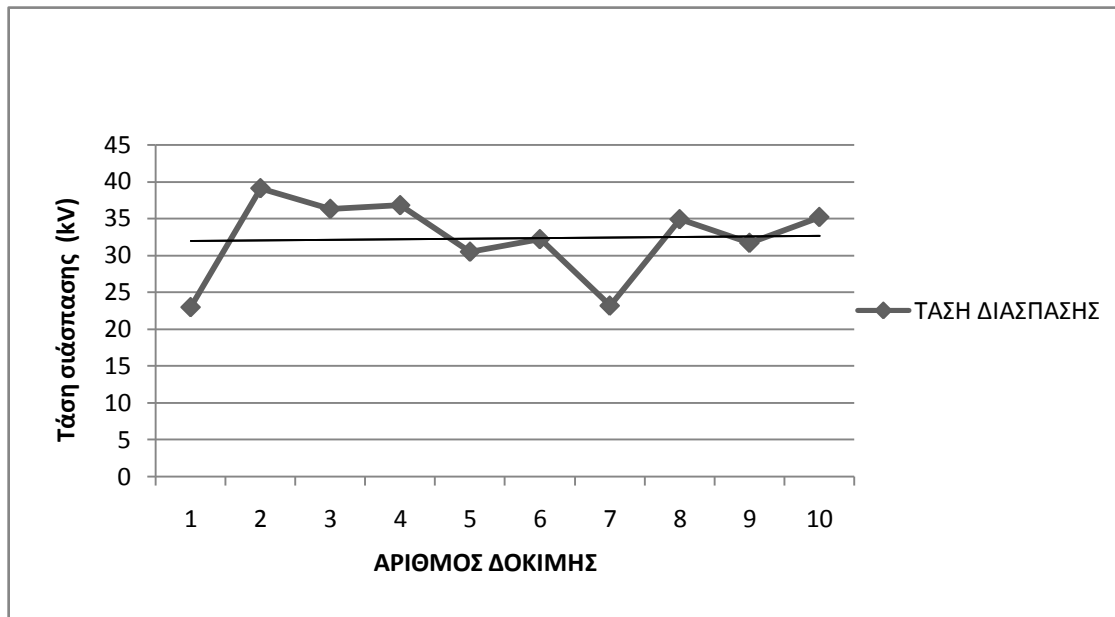
Σχήμα 9.6 : Γραφική παράσταση της μέσης τιμής της τάσης διάσπασης (V_d) του δείγματος λαδιού σαν συνάρτηση του αριθμού δοκιμής, στην περιοχή θερμοκρασιών $+9^{\circ}\text{C}$ έως $+11^{\circ}\text{C}$.

9.3.4 Μέτρηση της τάσης διάσπασης σε θερμοκρασίες δωματίου (από $+20,5^{\circ}\text{C}$ έως $+26^{\circ}\text{C}$)

Στην τέταρτη σειρά μετρήσεων μετράμε την τάση διάσπασης του μονωτικού λαδιού σε θερμοκρασία δωματίου. Το λάδι που μετράμε είναι και στις 10 δοκιμές το ίδιο, σε κάθε δε δοκιμή υφίσταται 6 διασπάσεις, δηλαδή συνολικά 60 διασπάσεις.

Πίνακας 9.4 Αποτελέσματα των μετρήσεων της τάσης διάσπασης δείγματος λαδιού για 60 διασπάσεις σε θερμοκρασία δωματίου.

Θαρχ ($^{\circ}\text{C}$)	Θτελ ($^{\circ}\text{C}$)	V_1 (kV)	V_2 (kV)	V_3 (kV)	V_4 (kV)	V_5 (kV)	V_6 (kV)	V_d (kV)	σ (kV)	CV (%)
20,5		18,4	17,6	16,9	20,6	38,6	25,9	23	8,3	36,1
	22,5	34,2	38,5	40,1	40,8	39,2	42	39,1	2,7	6,9
22,5		30,8	37,3	36,4	35,6	37,9	39,6	36,3	3	8,3
	24	36,9	35,5	39	38,2	39,5	31,9	36,8	2,8	7,7
24		20,7	44,5	25,9	28,2	33,6	29,8	30,5	8,1	26,6
	25	30	31,3	32	36,1	33,1	31	32,2	2,1	6,6
25		29,8	9,9	27,6	23,7	20,1	28,1	23,2	7,4	31,9
	26	41,9	31,1	32,7	33,1	35,2	35,4	34,9	3,8	10,8
26		28,2	32,6	31,7	29,2	33,2	35,1	31,7	2,5	8
	27	34,4	34,1	33,1	34,6	36,9	37,8	35,2	1,8	5,1



Σχήμα 9.7 : Γραφική παράσταση της μέσης τιμής της τάσης διάσπασης (V_d) του δείγματος λαδιού σαν συνάρτηση του αριθμού δοκιμής, σε θερμοκρασία δωματίου.

10. Σχόλια επί των μετρήσεων – Συμπεράσματα.

10.1 Σχόλια επί των μετρήσεων.

Όπως έχει ήδη εξ αρχής αναφερθεί, σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι να μελετήσει τη συμπεριφορά του μονωτικού λαδιού μετασχηματιστών διανομής σε διάφορες θερμοκρασίες.

Ήδη οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν αναφέρονται σε ένα ευρύ φάσμα θερμοκρασιών από -15°C έως $+101^{\circ}\text{C}$. Μπορούμε να πούμε ότι το πεδίο αυτών των θερμοκρασιών καλύπτει αφ' ενός μεν τις κλιματολογικές συνθήκες που συνήθως επικρατούν στην Ελλάδα, αφ' ετέρου δε τις θερμοκρασίες που συνήθως λειτουργεί ένας μετασχηματιστής υπό φορτίο.

Οι μετρήσεις μπορούν να διακριθούν σε δύο κατηγορίες:

- i. Τις μετρήσεις της παραγράφου 9.3.1 που έγιναν σε ανεξάρτητα δείγματα από το ίδιο λάδι. Το κάθε δείγμα ήταν σε διαφορετική αρχική θερμοκρασία και υπέστη μία και μόνη φορά την προβλεπόμενη από το IEC 156/95 σειρά των έξι διασπάσεων.

Οι μετρήσεις αυτές απέβλεπαν στο να διαπιστώσουν ποια είναι η επίπτωση της μεταβολής της θερμοκρασίας και μόνο, στην τάση διάσπασης του λαδιού, χωρίς αυτή να επηρεάζεται από άλλους παράγοντες όπως π.χ. οι επανειλημμένες και πάρα πολλές διασπάσεις του ίδιου δείγματος λαδιού.

- ii. Τις μετρήσεις των παραγράφων 9.3.2, 9.3.3 και 9.3.4 κατά τις οποίες κάθε ομάδα μετρήσεων έγινε σε ένα πολύ μικρό θερμοκρασιακό εύρος, πλην όμως όλες οι διασπάσεις της ομάδας έγιναν στο ίδιο δείγμα λαδιού.

Από τις μετρήσεις των παραγράφων 9.3.2, 9.3.3 και 9.3.4. φαίνεται ότι γενικά υπάρχει μια χειροτέρευση της διηλεκτρικής αντοχής του λαδιού όταν υφίσταται επανειλημμένες διασπάσεις. Ο ρυθμός όμως της χειροτέρευσης αυτής (δηλαδή η κλίση της καμπύλης) γίνεται μικρότερος καθώς το λάδι δοκιμάζεται σε υψηλότερες θερμοκρασίες.

Οι μετρήσεις των παραγράφων αυτών επίσης, επιβεβαιώνουν έμμεσα τα ευρήματα της παραγράφου 9.3.1 αφού και πάλι φαίνεται ότι όσο το δείγμα λαδιού δοκιμάζεται σε υψηλότερες θερμοκρασιακές ζώνες, οι προκύπτουσες τάσεις διάσπασης είναι υψηλότερες.

10.2 Συμπεράσματα

Μετά την επισκόπηση της βιβλιογραφίας που παρουσιάσαμε και τις μετρήσεις των δειγμάτων λαδιού μετασχηματιστών διανομής που πραγματοποιήσαμε, μπορούμε να οδηγηθούμε προς κάποια συμπεράσματα.

- (α) Τα φαινόμενα προ και κατά τη διάσπαση των υγρών μονωτικών φαίνεται ότι είναι πιο σύνθετα από τα αντίστοιχα στα αέρια και τα στερεά μονωτικά και επίσης είναι ευαίσθητα σε πολλούς παράγοντες οι οποίοι μπορεί να τα επηρεάσουν.
- (β) Παρά το ότι έχει γίνει εκτεταμένη έρευνα πάνω στο θέμα, δεν υπάρχει μια ενιαία θεωρία που να εξηγεί τα φαινόμενα διάσπασης στα υγρά μονωτικά.
- (γ) Κάποιοι ερευνητές προτείνουν για την ερμηνεία των φαινομένων μοντέλα που έχουν αναπτυχθεί για τα αέρια μονωτικά, ενώ άλλοι μοντέλα που έχουν αναπτυχθεί για τα στερεά μονωτικά.
- (δ) Σημαντικό ρόλο (θετικό ή αρνητικό) στη διάσπαση των υγρών μονωτικών φαίνεται να παίζουν κάποιες χημικές προσμίξεις.
- (ε) Επίσης πολύ σημαντικό ρόλο παίζει η υπάρχουσα στο μονωτικό λάδι υγρασία. Η ύπαρξη υγρασίας μέσα στο μετασχηματιστή είναι αναπόφευκτη και είναι διαφόρων προελεύσεων. Σε κάθε θερμοκρασία του μετασχηματιστή αποκαθίσταται μια ισορροπία μεταξύ της υγρασίας της περιεχόμενης στο λάδι και αυτής της περιεχόμενης στο χαρτί του μονωτικού συστήματος του μετασχηματιστή.
- (στ) Οι φυσαλίδες αέρα ή αερίων φαίνεται να είναι σημεία μειωμένης αντοχής του μονωτικού λαδιού. Τη συμπεριφορά αυτών των θέσεων διαταραχής του ηλεκτρικού πεδίου έχουμε, μεταξύ άλλων, δείξει στο ισοδύναμο κύκλωμα του μετασχηματιστή που συμπεριλάβαμε στην εργασία αυτή.
- (ζ) Η ύπαρξη αιωρούμενων στερεών σωματιδίων στο μονωτικό λάδι, φαίνεται να αλλάζει δραματικά τη διηλεκτρική του αντοχή, κάτω από την επίδραση ενός ηλεκτρικού πεδίου. Τα σωματίδια αυτά υπό την επίδραση του πεδίου πολώνονται, μετακινούνται σε θέσεις όπου οι τιμές του πεδίου είναι οι μέγιστες, διατάσσονται γραμμικά και τελικά γεφυρώνουν το διάκενο και προκαλούν διάσπαση.
- (η) Όλα τα εμπορικά μονωτικά λάδια θεωρούνται ως χημικά “μη καθαρά”, δηλαδή περιέχουν ξένα στερεά αιωρούμενα σωματίδια, τα οποία έχουν εισχωρήσει λόγω του τρόπου συσκευασίας, φύλαξης, χρήσης κ.λπ. του μονωτικού λαδιού.
- (θ) Πιθανότατα και η μεταβολή της διηλεκτρικής αντοχής συναρτηθεί της θερμοκρασίας του λαδιού που παρατηρήσαμε, να μπορεί να εξηγηθεί με τη

μεταβολή της συμπεριφοράς των αιωρούμενων στο λάδι στερεών σωματιδίων καθώς η θερμοκρασία του λαδιού αλλάζει. Για το θέμα αυτό απαιτείται περεταίρω θεωρητική και πειραματική διερεύνηση.

- (i) Από τις διεξαχθείσες μετρήσεις πάντως, διαπιστώθηκαν τα εξής:
- Στις πολύ χαμηλές και χαμηλές θερμοκρασίες η διηλεκτρική αντοχή του μονωτικού λαδιού είναι μειωμένη, ενώ σε θερμοκρασίες δωματίου βελτιώνεται και γίνεται ακόμα καλύτερη στις θερμοκρασίες στις οποίες συνήθως λειτουργεί ο μετασχηματιστής.
Αυτή η τάση γίνεται σαφής από τις μετρήσεις, παρά το ότι ο συντελεστής μεταβολής CV των μετρήσεων κάτω από τη θερμοκρασία δωματίου είναι μεγάλος και το δείγμα των μετρήσεων εμφανίζεται ως μη ομοιογενές.
 - Κατά τις πολλαπλές διασπάσεις ενός και του αυτού δείγματος μονωτικού λαδιού, διαπιστώθηκε η προοδευτική μείωση της διηλεκτρικής αντοχής του λαδιού, δηλαδή χειροτέρευση του λαδιού σαν μονωτικό.
 - Ο ρυθμός της χειροτέρευσης αυτής φαίνεται να είναι μεγαλύτερος στις χαμηλές θερμοκρασίες.
- (ια) Σαν ένα γενικό συμπέρασμα της ανασκόπησης της βιβλιογραφίας που έγινε και των μετρήσεων που διεξήχθησαν μπορεί να λεχθεί ότι τα ορυκτά λάδια με βάση το πετρέλαιο, όπως το συγκεκριμένο που εξετάσαμε είναι ένα καλό μονωτικό υγρό για τους μετασχηματιστές διανομής, με καλή συμπεριφορά στις θερμοκρασίες λειτουργίας των μετασχηματιστών, χωρίς να είναι ακριβό υλικό. Θα πρέπει όμως να τονιστεί ιδιαίτερα ότι κατά την παραγωγή, μεταφορά, φύλαξη και χρήση του μονωτικού λαδιού θα πρέπει να λαμβάνεται κάθε μέριμνα ώστε να μη συμβούν επιμολύνσεις με ξένες ουσίες ή σωματίδια διότι τότε η συμπεριφορά του λαδιού γίνεται απρόβλεπτη.

11. Βιβλιογραφία.

- [1] Τεχνικό Τετράδιο n°2 "Μετασχηματιστές Διανομής Λαδιού ΕΛΒΗΜ-Χρήση και Συντήρηση" , Schneider Electric.
- [2] Τεγόπουλος Ι.Α., "Ηλεκτρικές Μηχανές-Μέρος Β-Μόνιμη Κατάσταση", Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα 1991.
- [3] Βουρνά Κ., Κονταξή Γ., Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενεργειας, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα , 2001.
- [4] Harlow J. M., Electric Power Transformer Engineering, CRC Press, 2004.
- [5] El-Hawary M. E., Introduction to Electrical Power Systems, IEEE Press, 2008.
- [6] Κουφάκης Ε.Ι., Μια προσέγγιση της διάρκειας ζωής εξοπλισμού των δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας παράδειγμα τους μετασχηματιστές διανομής, Διδακτορική Διατριβή, ΕΜΠ, Αθήνα 2008.
- [7] Short T.A., Electric Power Distribution Equipment and Systems, Taylor & Francis Group, 2006
- [8] Μπούρκας Π.Δ., Καραγιαννόπουλος Κ.Γ., Μετρήσεις σε Βιομηχανικές Διατάξεις και Υλικά, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα , 2004.
- [9] Μέργος Ι.Α., Διηλεκτρικά Υλικά και Περιβάλλον, Διδακτορική Διατριβή, ΕΜΠ, Αθήνα 2007.
- [10] Παρασκευάς Χ.Δ., Βασιλείου Π., Δέρβος Κ.Θ., Χαρακτηρισμός Γήρανσης Μονωτικών Ελαίων Μετασχηματιστών – Φυσικοχημικές / Αναλυτικές Μέθοδοι και Διηλεκτρική Φασματοσκοπία. Μέρος Ι – Θεωρητική Ανάλυση, Τεχν. Χρον. Επιστ. Εκδ. ΤΕΕ, ΙΙΙ, τεύχ. 1-2 2003.
- [11] Gill P., Electrical Power Equipment Maintenance and Testing, 2nd ed., CRS Press, 2008.
- [12] Δέρβος Κ.Θ., Μονωτικά Υλικά Υψηλών Τάσεων, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα , 2005.
- [13] <http://www.meppi.com/Products/Transformers/Pages/SF6Gas.aspx>
- [14] Flanagan W.M., Handbook of Transformer Design and Applications 2nd ed., McGraw-Hill.
- [15] <http://www.abb.com>
- [16] <http://www.metadosi-ischios.gr/article.php?ID=89>
- [17] Prevost T.A., Oommen T.V., Cellulose Insulation in Oil-Filled Power Transformers: Part I-History and Development, IEEE Electrical Insulation Magazine, January/February 2006-Vol. 22, No 1.

- [18] http://www.clippercontrols.com/info/dielectric_constants.html#C
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] Emsley A.M. and Stevens G.C., Review of Chemical Indicators of Degradation of Cellulosic Electrical Paper Insulation in Oil-filled Transformers, Proc. Inst. Elect. Eng., Sci. Meas. Technol., Vol.141, No 5, 1994.
- [22] Oommen T.V., Prevost T.A., Cellulose Insulation in Oil-Filled Power Transformers: Part II- Maintaining Insulation Integrity and Life, IEEE Electrical Insulation Magazine, March/April 2006-Vol.22, No 2.
- [23] Σαμοΐλης Β.Γ., Μονωτικά λάδια (προέλευση-χρήση-χαρακτηριστικά-συντήρηση), Αθήνα, 1979.
- [24] Σταθόπουλος Ι.Α., Υψηλές Τάσεις Ι.
- [25] Ραΐτσιου Π., Έλαια Μετασχηματιστών: Γιατί η ΔΕΗ δεν χρησιμοποίησε ποτέ Μετασχηματιστές με Clophen, Σύγχρονη Τεχνική Επιθεώρηση.
- [26] Dua R., Bhandari N., Kumar V., Multi-criteria Optimization for obtaining Efficiently Blended Transformer Oils, IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol.15, No 3, June 2008.
- [27] Wahab M.A.A., Hamada M.M., Zeitoun A.G., Ismail G., Novel modeling for the prediction of aged transformer oil characteristics, Electric Power Systems Research, Volume 51, Number 1, 1 July 1999 , pp. 61-70.
- [28] Παρασκευάς Χ.Δ., Στεφάνου Ν., Βασιλείου Π., Δέρβος Κ.Θ., Χαρακτηρισμός Γήρανσης Μονωτικών Ελαίων Μετασχηματιστών – Φυσικοχημικές / Αναλυτικές Μέθοδοι και Διηλεκτρική Φασματοσκοπία. Μέρος ΙΙ – Πειραματική Προσέγγιση, Τεχν. Χρον. Επιστ. Έκδ. ΤΕΕ, ΙΙΙ, τεύχ. 1-2 2003.
- [29] Chen G., Zuber H. M., Pre-breakdown Characteristics of Contaminated Power Transformer Oil, Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, October 14 - 17, 2007, Vancouver, Canada.
- [30] Saha T.K., Review of Modern Diagnostic Techniques for Assessing Insulation Condition in Aged Transformers, IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol.10, No 5, Oct. 2003.
- [31] Emsley A.M. and Stevens G.C., Review of Chemical Indicators of Degradation of Cellulosic Electrical Paper Insulation in Oil-filled Transformers, Proc. Inst. Elect. Eng., Sci. Meas. Technol., Vol.141, No 5, 1994.

- [32] Hohlein, I. Kachler, A.J., Aging of cellulose at transformer service temperatures. Part 2. Influence of moisture and temperature on degree of polymerization and formation of furanic compounds in free-breathing systems, IEEE Electrical Insulation Magazine, Volume 21, Issue 5, Sept.-Oct. 2005.
- [33] Kachler A.J., Hohlein I., Aging of cellulose at transformer service temperatures. Part 1: Influence of type of oil and air on the degree of polymerization of pressboard, dissolved gases, and furanic compounds in oil, IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol.21, No.5, 2005.
- [34] Κεφάλας Θ.Δ., Ανάλυση Απωλειών Μετασχηματιστών Ισχύος με Προηγμένα Υλικά, Διδακτορική Διατριβή, ΕΜΠ, Αθήνα 2008.
- [35] Κότσιρας Φ. Λ., Ανάλυση μετασχηματιστών ισχύος και υπολογισμός απωλειών κενού φορτίου, Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ, Αθήνα 2005.
- [36] Fofana I., Hemmatjou H., Farzaneh M., Low temperature and moisture effects on polarization and depolarization currents of oil-paper insulation, Electric Power Systems Research, 2009.
- [37] Heathcote M. J., J & P Transformer Book, 12nd ed., Newnes Publication, 2007.
- [38] Du Y., Mamishev A.V., Lesieutre B.C., Zahn M., Kang S.H., Moisture solubility for differently conditioned transformer oils, IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol.8, No 5, Oct. 2001.
- [39] Koch M., Improved Determination of Moisture in Oil-Paper-Insulations by Specialised Moisture Equilibrium Charts, Proceedings of the XIVth International Symposium on High Voltage Engineering, Beijing, China, 2005.
- [40] Fofana I., Wasserberg V., Borsi H. and Gockenbach E., The Effect of Temperature Gradient on the Dielectric Properties of Insulating Fluids, IEEE 1-4244-0333-2 International Symposium on Electrical Insulation, 2006.
- [41] Τασούλας Ι.Α., Συντήρηση Συστήματος Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας, Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ, Αθήνα 2009.
- [42] Fully Automatic Insulating Oil Tester DPA 75, Operating Instruction, BAUR, Ident no.822-073, 05/98.
- [43] Wadhawa C. L., High Voltage Engineering, New Age International (P) Ltd., Publishers, New Delhi, 2007.

Παράρτημα

Τεχνικά χαρακτηριστικά της συσκευής BAUR DPA 75 Insulating Oil Tester 75 kV.

Τροφοδοσία	100 V ...244 V (50 Hz ...60 Hz)
Κατανάλωση ισχύος	Περίπου 70 VA
Τάση εξόδου για δοκιμές ελαίων	0 .. .75 kV _{rms} συμμετρική
Εσωτερική επαναφορτιζόμενη μπαταρία (προαιρετική)	2x6V/6,5 Arhs
Χρήση για διηλεκτρικά ρευστά με χαρακτηριστικά:	ειδική αντίσταση $\rho > 30 \text{ M}\Omega\text{m}$ ή συντελεστής απωλειών $\delta < 4.5$
Ρυθμός αύξησης τάσης	0,5/1/2/3/5 kV/s
Χρόνος διακοπής μετά την εκκένωση	< 1 ms
Ανίχνευση σφαλμάτων	Παρακολουθεί αν έλαβε χώρα ηλεκτρική εκκένωση (RBM)
Μέτρηση θερμοκρασίας δοκιμίου	0 -99 °C / +32-120 °F)
Ελάχιστη υποδιαίρεση θερμοκρασίας	1 °C /1,8 °F
Οθόνη	Ασπρόμαυρη οθόνη, ανάλυσης 160 x 80
Ακρίβεια μέτρησης τάσης	0 -75 kV $\pm 1 \text{ kV}$
Ελάχιστη υποδιαίρεση τάσης	0.1 kV
Γλώσσες μενού	Γερμανικά, Αγγλικά, Γαλλικά, Ισπανικά
Σύνδεση με H/Y	Αμφίδρομη, μέσω της σειριακής θύρας RS-232
Εκτυπωτής	Ακίδων, 24 χαρακτήρων, 57mm / 2 1/4", απλό χαρτί
Θερμοκρασία λειτουργίας	0 ...45 °C / 32 ... 113 °F
Θερμοκρασία αποθήκευσης	-20 ...+55 °C / -4 ...+131 °F
Σχετική υγρασία	$\leq 90\%$
Διαστάσεις (Π x Υ x Μ)	405 x 345 x 275 mm / 16" x 13 1/2" x 10 3/4"
Βάρος	Χωρίς μπαταρία: 18,7 kg (43,6 lbs) με μπαταρία: 21 kg (49 lbs)
Σχεδιασμένο και κατασκευασμένο σύμφωνα με τα πρότυπα:	IEC 1010, EN 61010-1, VDE 0411 Part 100

