



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

**ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ &
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ**

Τομέας Βιομηχανικών διατάξεων και συστημάτων
αποφάσεων

**ΘΕΩΡΙΑ ΜΟΝΩΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ ΕΠΙ
ΤΩΝ ΠΑΡΑΓΟΝΤΩΝ ΓΗΡΑΝΣΗΣ ΚΑΙ ΔΙΑΣΠΑΣΗΣ ΤΩΝ
ΥΓΡΩΝ ΜΟΝΩΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΤΩΝ ΣΥΝΔΥΑΣΜΩΝ ΤΟΥΣ ΜΕ
ΑΛΛΕΣ ΜΟΡΦΕΣ ΜΟΝΩΤΙΚΩΝ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΜΑΡΙΟΣ Γ. ΠΑΠΑΜΙΧΑΛΟΠΟΥΛΟΣ

Επιβλέπων : Κ. Γ. ΚΑΡΑΓΙΑΝΝΟΠΟΥΛΟΣ
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα 2010



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ &
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

Τομέας Βιομηχανικών διατάξεων και συστημάτων
αποφάσεων

ΘΕΩΡΙΑ ΜΟΝΩΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ ΕΠΙ ΤΩΝ ΠΑΡΑΓΟΝΤΩΝ ΓΗΡΑΝΣΗΣ ΚΑΙ ΔΙΑΣΠΑΣΗΣ ΤΩΝ ΥΓΡΩΝ ΜΟΝΩΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΤΩΝ ΣΥΝΔΥΑΣΜΩΝ ΤΟΥΣ ΜΕ ΑΛΛΕΣ ΜΟΡΦΕΣ ΜΟΝΩΤΙΚΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΜΑΡΙΟΣ Γ. ΠΑΠΑΜΙΧΑΛΟΠΟΥΛΟΣ

Επιβλέπων : Κ. Γ. ΚΑΡΑΓΙΑΝΝΟΠΟΥΛΟΣ

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή την2010

.....
Κ. Γ. Καραγιαννόπουλος

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Ν. Ι. Θεοδώρου

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Μ. Π. Ιωαννίδου

Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Αθήνα 2010

.....
Μάριος Γ. Παπαμιχαλόπουλος

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

Copyright © Μάριος Γ. Παπαμιχαλόπουλος, 2010
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.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια του Τομέα Ηλεκτρικών Βιομηχανικών Διατάξεων και Συστημάτων Αποφάσεων της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Ε.Μ.Π. κατά το ακαδημαϊκό έτος 2009-2010.

Η επίβλεψη της εργασίας έγινε από τον καθηγητή Κ.Γ. Καραγιαννόπουλο, τον οποίο θα ήθελα να ευχαριστήσω για την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπό μου με την ανάθεση της διπλωματικής εργασίας. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον ομότιμο καθηγητή Π.Δ. Μπούρκα, ο οποίος με την εμπειρία του και τις πολύτιμες συμβουλές του, συνέβαλε σε μεγάλο βαθμό στην πραγματοποίηση αυτής της εργασίας.

Αφιερώνεται στους αγαπημένους μου γονείς

Γεώργιο και Παναγιώτα.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας, είναι τα ηλεκτρομονωτικά υλικά. Αυτά διακρίνονται σε τρεις μεγάλες κατηγορίες, με βάση τη φυσική τους κατάσταση : τα υγρά, τα αέρια και τα στερεά μονωτικά. Στις ηλεκτροτεχνικές κατασκευές, η απαιτούμενη ηλεκτρική μόνωση, μπορεί να αποτελείται είτε από ένα είδος μονωτικού είτε από συνδυασμό διαφόρων μορφών μονωτικών(π.χ. μόνωση χαρτιού-λαδιού). Στο μέρος Α (Εισαγωγή) δίνεται ένα πλήρες θεωρητικό υπόβαθρο για τις τρεις μορφές μονωτικών και πληροφορίες σχετικά με τα κριτήρια αξιολόγησης της μόνωσης που παρέχουν. Στο μέρος Β (Σκοπός), αναφέρεται ο στόχος της μελέτης μας και ο οποίος είναι η κατανόηση των παραγόντων που επηρεάζουν την απόδοση των μονωτικών. Δίνεται έμφαση στην κατηγορία των υγρών μονωτικών, αλλά και συνδιασμών τους με τις άλλες μορφές. Παρουσιάζονται πειράματα (μέρος Γ), τα οποία έχουν πραγματοποιηθεί κατά καιρούς με σκοπό την διερεύνηση των παραγόντων που προκαλούν γήρανση των μονώσεων και μείωση της διηλεκτρικής τους αντοχής. Στο μέρος Δ (Σχόλια), τέλος, παρουσιάζονται κάποιες γενικές παρατηρήσεις που προκύπτουν από την πραγματοποίηση της εργασίας.

Λέξεις Κλειδιά : υγρό μονωτικό, τάση διάσπασης, γήρανση, μόνωση χαρτιού-λαδιού, ηλεκτρικό τόξο, πυκνότητα φορτίου, θερμική καταπόνηση, ιονισμός, αγωγιμότητα, υγρασία.

ABSTRACT

The subject of this thesis, is the insulating materials. These fall into three broad categories, according to their physical state : liquid, gaseous and solid insulating materials. At electrical equipment, the required electrical insulation may consist of either one type of insulation or a combination of different forms of insulation (for example: oil-paper insulation). Part A (Introduction) is a complete theoretical background for the three types of insulation, and information about the criteria that characterize the insulation they provide. Part B (Scope) states the objective of our study and who is the understanding of the factors affecting performance of insulation. Emphasis is placed into the category of insulating liquids, and combinations with other forms. Experiments are presented (Part Γ), which have been made from time to time to investigate the factors that cause aging of insulation and reduce the dielectric strength. In Part Δ (Conclusion), finally, some general comments arising from the work done.

Key Words : liquid insulation, breakdown voltage, aging, oil-paper insulation, electric arc, charge density, thermal stress, ionization, conductivity, moisture.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<u>A. ΕΙΣΑΓΩΓΗ</u>	11
1. ΒΑΣΙΚΑ ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΜΟΝΩΤΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ	11
1.1 Βασικές ιδιότητες των ηλεκτρομονωτικών υλικών	11
1.2 Η διηλεκτρική αντοχή	11
1.3 Η σχετική διηλεκτρική σταθερά	12
1.4 Ο συντελεστής απωλειών ($\tan\delta$)	13
1.5 Η ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα	16
1.6 Ο συντελεστής $\epsilon \tan\delta$	17
1.7 Η επιφανειακή αγωγιμότητα	18
1.8 Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας	18
1.9 Η μηχανική αντοχή	20
2. ΤΑ ΗΛΕΚΤΡΟΜΟΝΩΤΙΚΑ ΑΕΡΙΑ	22
2.1 Κίνηση των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων	22
2.2 Ο ιονισμός των ηλεκτρομονωτικών αερίων	25
2.2.1 Η συνθήκη ιονισμού με κρούσεις	28
2.2.2 Η σημασία της πίεσης και της θερμοκρασίας για τον ιονισμό με κρούσεις	28
2.2.3 Οι συντελεστές ιονισμού α και $\bar{\alpha}$ (συνάρτηση των κρούσεων)	29
2.2.4 Η μη αυτοσυντηρούμενη και η αυτοσυντηρούμενη εκκένωση	32
2.2.5 Συμπεράσματα από τα προαναφερόμενα για την περαιτέρω μελέτη του ιονισμού με κρούσεις	34
2.3 Η διάσπαση των ηλεκτρομονωτικών αερίων	35
2.3.1 Προσέγγιση του μηχανισμού διάσπασης του αέρα (& γενικά, των ηλεκτροθετικών αερίων) σε ομογενές πεδίο, μέσω της θεωρίας Townsend	35
2.4 Τα μειονεκτήματα του συνδυασμού του αέρα με τα στερεά και τα υγρά μονωτικά	39
3. ΤΑ ΥΓΡΑ ΜΟΝΩΤΙΚΑ	40
3.1 Τα φαινόμενα γήρανσης και διάσπασης στο μονωτικό λάδι	42
3.2 Τεχνικά χαρακτηριστικά των υγρών μονωτικών υλικών	43
3.3 Μέσα ελέγχου της μονωτικής ικανότητας του λαδιού κατά τη λειτουργία των μετασχηματιστών	46
4. ΦΑΙΝΟΜΑΙΝΑ ΠΡΟ ΚΑΙ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΣΠΑΣΗ ΤΩΝ ΣΤΕΡΕΩΝ ΜΟΝΩΤΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ	48
4.1 Η μακροσκοπική θεωρία των φαινομένων προ και κατά τη διάσπαση των στερεών μονωτικών	49
4.1.1 Η θερμική διάτρηση	50
4.1.2 Η ηλεκτρική διάτρηση	50

4.1.3 Η διάσπαση λόγω μερικών εκκενώσεων (ηλεκτροχημική διάσπαση ή γήρανση της μόνωσης)	50
4.1.4 Η θερμοχημική διάσπαση	54
4.1.5 Συνδυασμοί των παραγόντων γήρανσης και διάτρησης	55
4.1.6 Στατικές μετρήσεις των μερικών εκκενώσεων	57
4.1.7 Το φαινόμενο της πολικότητας σε πολυμερή στερεά μονωτικά κατά την εκδήλωση μερικών εκκενώσεων	65
4.2 Η επιφανειακή διάσπαση και η υπερπήδηση	66
4.3 Η κβαντομηχανική θεωρία της γήρανσης και της διάσπασης των στερεών μονωτικών	67
4.3.1 Φαινόμενα προ της διάσπασης των στερεών μονωτικών υλικών	69
4.3.2 Το φάσμα της εκπεμπόμενης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας κατά τη διάτρηση	76
4.3.3 Θεωρητική προσέγγιση του ιονισμού με κρούσεις προ και κατά τη διάτρηση στερεών μονωτικών	78
4.3.4 Φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας κατά την επιφανειακή διάσπαση	80
4.4 Ένας συνδυασμός της μακροσκοπικής και της κβαντομηχανικής θεωρίας για τα φαινόμενα προ και κατά τη διάσπαση των στερεών μονωτικών των πρακτικών εφαρμογών	83
<u>B. Ο ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ</u>	86
<u>Γ. ΕΡΕΥΝΑ ΣΤΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</u>	87
1. ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΠΑΡΕΛΘΟΝΤΙΚΩΝ ΕΡΓΑΣΙΩΝ ΣΕ ΘΕΜΑΤΑ ΔΙΑΣΠΑΣΗΣ ΥΓΡΩΝ ΜΟΝΩΤΙΚΩΝ	87
2. ΕΞΕΛΙΞΗ ΣΤΟΝ ΤΟΜΕΑ ΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΤΩΝ ΥΓΡΩΝ ΜΟΝΩΤΙΚΩΝ	88
3. ΕΡΕΥΝΕΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΣΕ ΜΕΤΡΑ ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ, ΣΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΜΟΝΩΣΗΣ ΧΑΡΤΙΟΥ-ΛΑΔΙΟΥ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗ	89
3.1 Εισαγωγή	89
3.2 Πειραματική διαδικασία	90
3.3 Ανάλυση αποτελεσμάτων	91
3.4 Σχόλια	95
4. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΣΕ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΔΙΑΡΡΕΟΝΤΟΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ ΣΕ ΣΙΛΙΚΟΝΟΥΧΟ ΕΛΑΙΟ	96
4.1 Εισαγωγή	96
4.2 Πειραματική διαδικασία	96
4.3 Ανάλυση αποτελεσμάτων	96

4.4 Σχόλια	99
5. ΘΕΡΜΙΚΗ ΕΞΑΡΤΗΣΗ ΤΟΥ ΙΞΩΔΟΥΣ ΚΑΙ ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΓΙΑ ΗΛΕΚΤΡΟΜΟΝΩΤΙΚΑ ΕΛΑΙΑ. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΜΙΓΜΑΤΩΝ ΕΛΑΙΩΝ.	100
5.1 Εισαγωγή	100
5.2 Πειράματα	100
5.3 Ανάλυση αποτελεσμάτων	100
5.4 Σχόλια	102
6. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΑΚΑΘΑΡΣΙΩΝ ΕΠΙ ΤΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ ΤΩΝ ΥΓΡΩΝ ΜΟΝΩΤΙΚΩΝ	103
6.1 Εισαγωγή	103
6.2 Πειραματική διαδικασία	103
6.3 Ανάλυση αποτελεσμάτων	105
6.3.1 Επίδραση φιλτραρίσματος	105
6.3.2 Επίδραση της έντασης ηλεκτρικού πεδίου	107
6.3.3 Επίδραση συγκέντρωσης σωματιδίων	110
6.4 Σχόλια	114
7. ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΥΓΡΩΝ ΜΟΝΩΤΙΚΩΝ ΣΕ ΧΑΜΗΛΕΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΕΣ	115
7.1 Εισαγωγή	115
7.2 Πειραματική διαδικασία	115
7.3 Ανάλυση αποτελεσμάτων	116
7.3.1 Χρόνος	116
7.3.2 Συχνότητα	119
7.3.3 Θερμοκρασιακή επίδραση	121
7.4 Σχόλια	125
8. ΜΟΝΩΤΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΥΓΡΩΝ ΜΟΝΩΤΙΚΩΝ ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΕΚΔΗΛΩΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΤΟΞΟΥ	126
8.1 Εισαγωγή	126
8.2 Πειραματική διαδικασία	126
8.3 Ανάλυση αποτελεσμάτων	127
8.4 Σχόλια	130
<u>Δ. ΣΧΟΛΙΑ</u>	131
<u>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</u>	133

A. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1. ΒΑΣΙΚΑ ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΜΟΝΩΤΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

1.1 Βασικές ιδιότητες των ηλεκτρομονωτικών υλικών

Ως ηλεκτρομονωτικά υλικά χαρακτηρίζουμε τα υλικά τα οποία παρουσιάζουν πολύ μικρή ηλεκτρική αγωγιμότητα. Με την εφαρμογή τάσης, δεν επιτρέπουν την διέλευση ηλεκτρικού ρεύματος και επιτυγχάνεται η ηλεκτρική μόνωση.

Σκοπός των μονώσεων σε μία ηλεκτροτεχνική κατασκευή είναι ο ηλεκτρικός διαχωρισμός μεταξύ ρευματοφόρων μερών, καθώς και ρευματοφόρων μερών προς γη. Με την χρήση μονώσεων αποτρέπουμε την εμφάνιση του φαινομένου της διάσπασης.

Με τον όρο διάσπαση εννοεί κανείς την αγωγή σύνδεση δύο μεταξύ τους μονωμένων ηλεκτροδίων μέσω ηλεκτρικής εκκένωσης. Όταν η διάσπαση συμβαίνει με εκκένωση στη διαχωριστική επιφάνεια μεταξύ δύο μονωτικών (π.χ. : αέρας-πορσελάνη , βακελίτης-μονωτικό λάδι), τότε ονομάζεται επιφανειακή διάσπαση (ή υπερπήδηση).

Η διάσπαση δια του όγκου ενός μονωτικού υλικού καλείται διάτρηση. Η διάσπαση σε περιορισμένο μήκος του μονωτικού ονομάζεται μερική εκκένωση. Οι μερικές εκκενώσεις οφείλονται σε θέσεις ανομοιογένειας στον όγκο ή την επιφάνεια του υλικού (κυρίως φυσαλίδες αερίων στον όγκο του υλικού και διάφορες ξένες επικαθίσεις στην επιφάνεια του: σκόνη , υγρασία , κλπ.). Οι μερικές εκκενώσεις στον όγκο ενός στερεού μονωτικού ονομάζονται εσωτερικές μερικές εκκενώσεις και εκείνες στην επιφάνεια του εξωτερικές μερικές εκκενώσεις. Οι μερικές εκκενώσεις στον αέρα γύρω από γυμνούς αγωγούς έχουν την ξεχωριστή ονομασία Corona (στεμματοειδείς μερικές εκκενώσεις) [2].

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 ιδιότητες, που πρέπει να έχουν, ανάλογα με την κατασκευή, όπως π.χ. : η θερμική αντοχή κατά την απαγωγή των απωλειών Joule των αγωγών, η μηχανική αντοχή των μονωτήρων (π.χ. λόγω του βάρους της γραμμής), η αντοχή κατά την εκδήλωση βραχυκυκλώματος, κλπ. .

Τα κριτήρια αυτά είναι [1] :

1.2 Η διηλεκτρική αντοχή

Ως διηλεκτρική αντοχή (E_d) ενός μονωτικού υλικού ορίζεται το πηλίκο της ελάχιστης ενεργού τιμής της τάσης για τη διάσπαση (U_{dmin}) προς την απόσταση των ηλεκτροδίων (d) σε ομογενές πεδίο :

$$E_d = U_{dmin} / d \quad (\text{συνήθως σε kV/cm}) \quad (1.2 - 1)$$

Η τιμή E_d είναι ένα κριτήριο για την επιλογή των διαφόρων ηλεκτρομονωτικών. Οι τιμές που δίνονται στον πίνακα (1.2-1) για τη διηλεκτρική

αντοχή μερικών μονωτικών υλικών (σε ομογενές πεδίο, συχνότητας 50 Hz και για μικρό χρονικό διάστημα καταπόνησης) δείχνουν τη δυνατότητα αυτή [2].

Μονωτικό υλικό	d σε mm	E_d σε kV/cm
Αέρας		21
λάδι μετασχηματιστών		60...200
πορσελάνη	0,5...3	340...380
στεατίτης	0,5...3	200...300
Γυαλί	< 1	160...450
Χαρτόνι	0,5...1,5	300...450
χαρτί στο λάδι	< 2	200...400
σκληρό ελαστικό	< 3	300...500
Ξύλο	< 3	30...50
Glimmer	0,01...0,1	500...1000

Πίνακας 1.2–1: Διηλεκτρική αντοχή (E_d) για καταπόνηση μικρής χρονικής διάρκειας ορισμένων μονωτικών υλικών σε ομογενές πεδίο συχνότητας 50 Hz [2].

1.3 Η σχετική διηλεκτρική σταθερά

Η σχετική διηλεκτρική σταθερά (ϵ_r) δίνει το πόσο μεγαλύτερη είναι η χωρητικότητα μίας διάταξης συγκριτικά προς εκείνη στο κενό ή στον αέρα.

Οι σχετικές διηλεκτρικές σταθερές των διαφόρων μονωτικών, που συνθέτουν μία μόνωση (π.χ. περιελίξεις μετασχηματιστών & 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.

Ο συνδυασμός του χαρτιού με το μονωτικό λάδι είναι μία μόνωση, που χρησιμοποιείται ευρύτατα στην πράξη, γιατί :

α) τα δύο αυτά μονωτικά έχουν την ίδια περίπου σχετική διηλεκτρική σταθερά (πίνακας 1.3-1) με αποτέλεσμα να μην συμβαίνει ουσιαστικά διάθλαση των γραμμών στη διαχωριστική επιφάνειά τους, και

β) το λάδι εμποτίζει το χαρτί, ώστε να αποκλείεται έτσι η ύπαρξη του αέρα, ο οποίος μόνο προβλήματα θα μπορούσε να δημιουργήσει, λόγω της μικρής του διηλεκτρικής αντοχής κατά τον πίνακα 1.2-1 (κυρίως βλάβες στην επιφάνεια του χαρτιού από μερικές εκκενώσεις ή διάσπασης σε φυσαλίδες του αέρα) [1].

Υλικό	ϵ_r	Υλικό	ϵ_r
Αέρας (Κανονικές συνθήκες)	1,000594	Πάγος	2 – 3
Αέρας (υγρός)	1,5	Pertinax	4,8 – 5,4
Απεσταγμένο νερό	8	PVC	4 – 6
Βακελίτης	3,5 – 8,2	Plexiglas	2,6 – 3,5
Condesa	4 – 8	Πορσελάνη	5,5 – 6
Glimmer	4 – 8	Presspann	2,5 – 3,4
Γυαλί	5 – 16	Ρητίνη	2,2

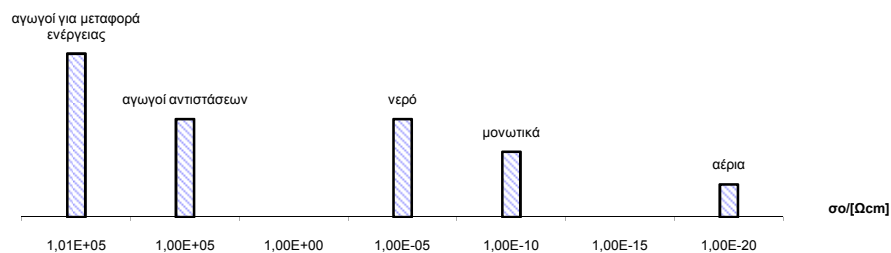
Θερμοπλαστικά συνθετικά	2 – 5	SF ₆	1,002049
Μονωτικό λάδι	2 – 2,5	Στεατίτης	6,4
Λάστιχο	2,8 – 6,5	Teflon	2,1
Mikanit	4 – 6	Χαλαζίας	3 – 7
Ξύλο	2,5 – 6,5	Χαρτί	1,8 – 2,6

Πίνακας 1.3-1 : Σχετική διηλεκτρική σταθερά ορισμένων υλικών στους 20°C [1].

1.4 Ο συντελεστής απωλειών (tgδ)

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

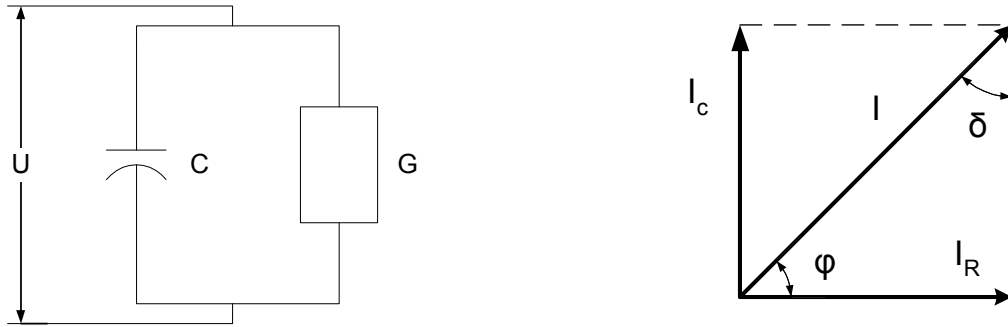
- στην κατανάλωση ενέργειας κατά τη διαρκή εναλλαγή της φοράς της ηλεκτρικής ροπής των διπόλων στο ρυθμό της εναλλαγής της πολικότητας της εναλλασσόμενης τάσης, και
- στην πολύ μικρή ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα, που έχουν τα μονωτικά υλικά (σχήμα 1.4-1).



Σχήμα 1.4-1 : Τάξη μεγέθους της ειδικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας διαφόρων κατηγοριών υλικών [1]

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

Στο σχήμα 1.4-2 δίνεται το ισοδύναμο κύκλωμα ενός πυκνωτή C με ομοιογενές διηλεκτρικό και απώλειες (λόγω της αγωγιμότητας του G).

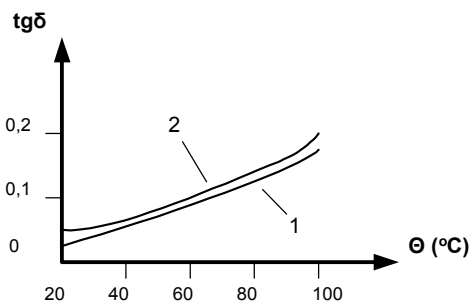


Σχήμα 1.4-2 : Ισοδύναμο κύκλωμα ενός πυκνωτή C με απώλειες λόγω της αγωγιμότητας G του διηλεκτρικού του [1]

Ο συντελεστής απωλειών:

$$\operatorname{tg}\delta = \frac{I_R}{I_c} = \frac{G}{\omega C} \quad (1.4-1)$$

είναι κριτήριο αξιολόγησης του διηλεκτρικού (ή μίας μονωτικής διάταξης γενικότερα), γιατί δίνει πληροφορίες για την αγωγιμότητά του (σχήμα 1.4-3). Όπως φαίνεται στο σχήμα αυτό η $\operatorname{tg}\delta$ αυξάνει εκθετικά με τη θερμοκρασία.



Σχήμα 1.4-3 : $\operatorname{tg}\delta$ ορισμένων διηλεκτρικών
1 : σκληρό χαρτί
2 : πορσελάνη [1]

Οι απώλειες Joule (P_w) στην αγωγιμότητα G είναι:

$$P_w = I_R U = G U^2 = U^2 \omega C \cdot \operatorname{tg}\delta = P_B \cdot \operatorname{tg}\delta \quad (1.4-2)$$

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

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

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{A}{d} \quad (1.4-3)$$

Για την αγωγιμότητα G του παραπάνω πυκνωτή ισχύει η σχέση:

$$G = \sigma \frac{A}{d} \quad (1.4-4)$$

όπου σ η ειδική αγωγιμότητα του διηλεκτρικού. Για τις απώλειες του πυκνωτή αυτού ισχύει κατά τις σχέσεις 1.4-2 και 1.4-3 :

$$P_w = U^2 \omega \varepsilon \frac{A}{d} \operatorname{tg} \delta \quad (1.4-5)$$

ή πολλαπλασιάζοντας και διαιρώντας με d :

$$P_w = \left(\frac{U}{d} \right)^2 \omega \cdot \varepsilon \cdot \operatorname{tg} \delta \cdot (A d) = \left(\frac{U}{d} \right)^2 \omega \cdot \varepsilon \cdot \operatorname{tg} \delta \cdot V \quad (1.4-6)$$

όπου V ο όγκος του διηλεκτρικού.

Αν θεωρήσουμε ότι ο στοιχειώδης όγκος dV μίας τυχαίας διάταξης ηλεκτροδίων είναι ένας μικρός πυκνωτής επιπέδων πλακών, τότε οι απώλειες Joule της διάταξης είναι:

$$P_w = \omega \cdot \varepsilon \cdot \operatorname{tg} \delta \cdot \int \left(\frac{U}{d} \right)^2 dV = \omega \cdot \varepsilon \cdot \operatorname{tg} \delta \cdot \int E^2 dV \quad (1.4-7)$$

Από την παραπάνω σχέση μπορεί να υπολογίσει κανείς εύκολα τις απώλειες Joule μιας μόνωσης. Για ένα καλώδιο π.χ. κυκλικής διατομής (με εξωτερική ακτίνα R_2 , ακτίνα του αγωγού R_1 και μήκος l), που έχει ένα διηλεκτρικό ε πάχους $R_2 - R_1$ έχουμε [1] :

$$E = \frac{U}{r \ln \left(\frac{R_2}{R_1} \right)} \quad (1.4-8)$$

Οι απώλειες Joule του διηλεκτρικού του καλωδίου θα είναι επομένως :

$$P_w = \omega \cdot \varepsilon \cdot \operatorname{tg} \delta \cdot \int \frac{U^2 2 \pi r \cdot l \cdot dr}{r \ln \left(\frac{R_2}{R_1} \right)} = \frac{4 \pi^2 \cdot l \cdot f \cdot \varepsilon \cdot \operatorname{tg} \delta \cdot U^2}{\ln \left(\frac{R_2}{R_1} \right)} \quad (1.4-9)$$

1.5 Η ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα

Τα ηλεκτρομονωτικά υλικά έχουν μία πολύ μικρή ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα (σχήμα 1.4-1), που εξαρτάται γενικά από τις συνθήκες λειτουργίας τους (τιμή της πεδιακής έντασης, θερμοκρασία, υγρασία, κλπ.). Η ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα είναι επομένως ένα σημαντικό κριτήριο αξιολόγησης των διηλεκτρικών, γιατί εκφράζει τους ελεύθερους ηλεκτρικούς φορείς.

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

$$\sigma = \sigma_0 e^{-W/kT} = \sigma_0 e^{\beta\theta} \quad (1.5-1)$$

- όπου: σ_0 : η ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα για διαφορά θερμοκρασίας θ ως προς το περιβάλλον
 σ : η αρχική ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα
 W : η ενέργεια ενεργοποίησης (ενέργεια για τη μεταφορά ηλεκτρονίων από τη ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας)
 k : η σταθερά Boltzmann ($1,37 \cdot 10^{-23}$ Ws/°K)
 T : η απόλυτη θερμοκρασία
 β : ένας συντελεστής του υλικού (π.χ. για το presspan $\beta \approx 0,02$)

Από έρευνες σε οργανικά στερεά μονωτικά συμπεραίνεται, ότι η ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα αυξάνει απότομα με την ενέργεια των μερικών εκκενώσεων. Έχει διαπιστωθεί ότι η τιμή της πεδιακής έντασης είναι καθοριστική για την τιμή σ . Μία τιμή πεδιακής έντασης χαρακτηρίζεται ως χαμηλή όταν δεν εκδηλώνονται μερικές εκκενώσεις, ή έστω όταν οι μερικές εκκενώσεις συμμετέχουν μόνο στην αύξηση των απωλειών Joule. Αυτό μπορεί να συμβεί λόγω π.χ. του μεγάλου πάχους του διηλεκτρικού, ή της μικρής τιμής της εφαρμοζόμενης τάσης.

Για μεγαλύτερες τιμές της πεδιακής έντασης από προηγουμένως, η τιμή της ειδικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας οφείλεται κυρίως στις μερικές εκκενώσεις. Έχει διαπιστωθεί, ότι στην περίπτωση αυτή συμβαίνει ιονισμός με κρούσεις, όπως στα ιονισμένα αέρια και ότι δεν ισχύει η σχέση 1.5-1.

Για την αύξηση της τιμής σ , από τις απώλειες του διηλεκτρικού και τις μερικές εκκενώσεις, έχει διατυπωθεί η σχέση :

$$\sigma = \sigma_0 \frac{e^{\beta\theta}}{(1 - \delta E)^2} \quad (1.5-2)$$

όπου E η πεδιακή ένταση στο τμήμα του υλικού, που δεν εκδηλώνονται μερικές εκκενώσεις (το οποίο χαρακτηρίζεται ως υγιές τμήμα) και δ ένας συντελεστής, που εκφράζει τη συμμετοχή των ανομοιογενειών του υλικού στη διαμόρφωση της τιμής σ . Για το ομοιογενές υλικό είναι $\delta=0$, διαφορετικά ισχύει $\delta>0$.

Η αγωγιμότητα τέλος των μονωτικών υλικών αυξάνει όταν προσβάλλονται με ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Η ακτινοβολία X ειδικότερα μπορεί να μετατρέψει ένα μονωτή σε αγωγό. Φαίνεται ότι η ακτινοβολία προκαλεί διαχωρισμό των ηλεκτρονίων από τους μητρικούς τους πυρήνες και ανύψωση

των ελευθέρων ηλεκτρονίων σε υψηλότερο ενεργειακό επίπεδο, με αποτέλεσμα την αύξηση της αγωγιμότητας των μονωτικών. Το φαινόμενο αυτό, που είναι γνωστό ως επαγόμενη αγωγιμότητα, αποτελεί πρόβλημα στις διαστημικές κατασκευές, λόγω του υψηλού ποσοστού κοσμικής ακτινοβολίας [1].

1.6 Ο συντελεστής $\epsilon \cdot \text{tg}\delta$

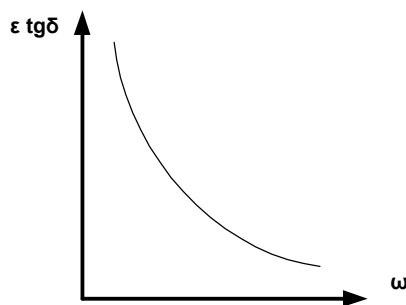
Από τις σχέσεις 1.4-1, 1.4-3 και 1.4-4 έχουμε για ένα πυκνωτή επίπεδων πλακών:

$$\epsilon_r \cdot \text{tg}\delta = \frac{\sigma}{\epsilon_0 \omega} \quad (1.6-1)$$

ή με $\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$:

$$\epsilon \cdot \text{tg}\delta = \frac{\sigma}{\omega} \quad (1.6-2)$$

Στο σχήμα 1.6-1 δίνεται η γραφική παράσταση της χαρακτηριστικής κατά την παραπάνω σχέση. Το γινόμενο $\epsilon \cdot \text{tg}\delta$ χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση των μονωτικών υλικών (Πίνακας 1.6-1).



Σχήμα 1.6-1 :
 $\epsilon \cdot \text{tg}\delta = f(\omega)$ για το ομοιογενές
 μονωτικό υλικό [1]
 (Υποτίθεται ότι η τιμή σ
 σταθερή με τη θερμοκρασία)

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

Πίνακας 1.6-1 : Τάξη μεγέθους των τιμών $\epsilon \cdot \text{tg}\delta$ για ορισμένα διηλεκτρικά σε θερμοκρασία 20 °C [1].

Από τις σχέσεις 1.5-1 και 1.6-2 έπεται ότι ο συντελεστής $\epsilon \cdot \text{tg}\delta$ του ομοιογενούς στερεού μονωτικού υλικού (ή γενικότερα του στερεού διηλεκτρικού όταν δεν εκδηλώνονται σε αυτό μερικές εκκενώσεις, π.χ. λόγω $U < U_a$) αυξάνει εκθετικά με τη θερμοκρασία :

$$\varepsilon \cdot \operatorname{tg} \delta = \frac{\sigma_0}{\omega} e^{\beta \theta} \quad (1.6-3)$$

Αν θεωρήσουμε την τιμή ε ως σταθερή, τότε από την παραπάνω σχέση έπεται ότι η αύξηση της $\operatorname{tg} \delta$ είναι εκθετική (σχήμα 1.4-3).

Για την αύξηση της τιμής $\varepsilon \cdot \operatorname{tg} \delta$ στην περιοχή του στερεού μονωτικού, όπου οι μερικές εκκενώσεις συμβάλουν στην αύξηση των απωλειών Joule, έχουμε αντίστοιχα (από τις σχέσεις 1.5-2 και 1.6-2) [1]:

$$\varepsilon \cdot \operatorname{tg} \delta = \frac{\sigma_0}{\omega} \frac{e^{\beta \theta}}{(1 - \delta E)^2} \quad (1.6-4)$$

1.7 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 Å. Γι' αυτό, η επιφανειακή αγωγιμότητα είναι ένα κριτήριο για την προδιάθεση των διαφόρων στερεών διηλεκτρικών στην εκδήλωση των παραπάνω φαινομένων. Επειδή οι παράγοντες, που προκαλούν αύξηση της επιφανειακής αγωγιμότητας, ποικίλουν (ανάλογα με τις συνθήκες λειτουργίας) η ειδική επιφανειακή αγωγιμότητα δεν είναι κάποια σταθερά των στερεών μονωτικών.

Η επιφανειακή αγωγιμότητα έχει συσχετιστεί με έννοιες, που αφορούν την αντοχή των στερεών μονωτικών από τις καταπονήσεις στην επιφάνειά τους (όπως : αντοχή σε ρεύμα διαρροής, αντοχή σε ηλεκτρικό τόξο, δυνατότητα απομάκρυνσης των επικαθίσεων κατά τη βροχή κλπ.), που ενδιαφέρουν στην πράξη για την κατασκευή π.χ. μονωτήρων και φλογοθαλάμων διακοπών. Με κριτήριο π.χ. τη μείωση του ποσοστού της σκόνης συμπεραίνει κανείς, ότι οι μονωτήρες πορσελάνης χρησιμοποιούνται ως εξωτερικού χώρου, έναντι των μονωτήρων ρητίνης (που χρησιμοποιούνται ως εσωτερικού χώρου), γιατί η επιφάνειά τους διευκολύνει περισσότερο στην απομάκρυνση της σκόνης κατά τη βροχή [1].

Πληροφορίες για τη μέτρηση της επιφανειακής αγωγιμότητας μπορούν να αναζητηθούν στις προδιαγραφές (π.χ. VDE 0303) και στη βιβλιογραφία περί ηλεκτρικών μετρήσεων.

1.8 Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας

Η θερμική καταπόνηση των μονωτικών υλικών σχετίζεται με την αύξηση του αριθμού των ελευθέρων 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. Στον πίνακα 1.8-1 δίνονται τιμές του συντελεστή λ για διάφορα διηλεκτρικά.

Υλικό	Πάχος [mm]	μόνωσης	λ [$\frac{W\text{ cm}}{cm^2\text{ grad}}$]
Πορσελάνη	0,5 ... 3		0,008 ... 0,015
Στεατίτης	0,5 ... 3		0,02 ... 0,026
Γυαλί	< 1		0,0075 ... 0,012
Ξύλο	< 3		0,001 ... 0,002
Χαρτόνι	0,3 ... 1,5		0,003
Σκληρό ελαστικό	< 3		0,001
Glimmer	< 0,5		0,003
Χαρτί στο λάδι	< 2		0,014 ... 0,03

Πίνακας 1.8-1 : Τιμές του συντελεστή ειδικής θερμικής αγωγιμότητας (λ) για ορισμένα μονωτικά υλικά [1].

Στις προδιαγραφές IEC και VDE γίνεται μία διαβάθμιση των στερεών μονωτικών ως προς τη μέγιστη επιτρεπόμενη θερμοκρασία λειτουργίας τους. Πρόκειται για κατηγορίες (ή κλάσεις) των υλικών αυτών, που διευκολύνουν στην πράξη για τη διάρκεια ζωής τους.

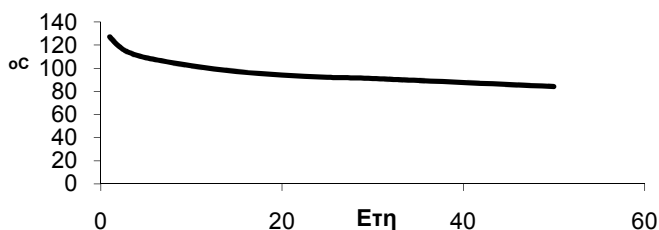
Για την επίδραση της θερμοκρασίας στη διάρκεια ζωής των στερεών μονωτικών υλικών έχουν γίνει αρκετές έρευνες, που δίνουν χρήσιμες πληροφορίες για τις πρακτικές εφαρμογές. Οι χαρακτηριστικές π.χ. κατά τα σχήματα 1.8-1 δίνουν τη διάρκεια ζωής του χαρτιού, ανάλογα με τη θερμοκρασία θ . Από τη μαθηματική προσέγγιση των χαρακτηριστικών αυτών (μέσω ηλεκτρονικού υπολογιστή) ισχύουν αντίστοιχα οι σχέσεις :

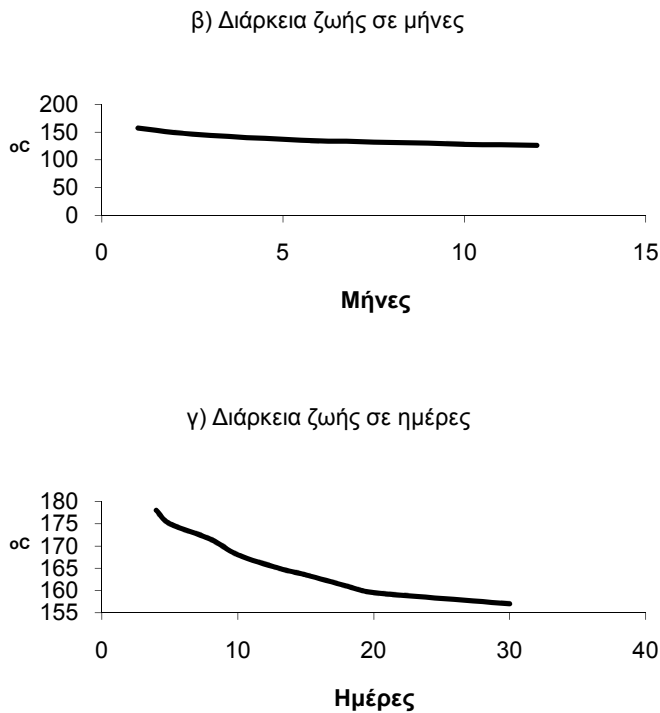
$$\alpha) \text{ διάρκεια ζωής σε έτη} \quad : t = 1,15242 \cdot 10^2 \cdot e^{-0,00736482 \theta} \quad (1.8-1)$$

$$\beta) \text{ διάρκεια ζωής σε μήνες} \quad : t = 1,54429 \cdot 10^2 \cdot e^{-0,01838 \theta} \quad (1.8-2)$$

$$\gamma) \text{ διάρκεια ζωής σε ημέρες} \quad : t = 1,78848 \cdot 10^2 \cdot e^{-0,00483647 \theta} \quad (1.8-3)$$

α) Διάρκεια ζωής σε έτη





Σχήμα 1.8-1 : Διάρκεια ζωής χαρτιού, ανάλογα με τη θερμοκρασία [1].

Έτσι, επειδή το χαρτί μαζί με το λάδι αποτελούν κυρίως τη μόνωση ενός μετασχηματιστή υψηλής τάσης (μετασχηματιστής μεταφοράς ή διανομής ή μέτρησης), μπορεί κανείς να εκτιμήσει (μετά από μετρήσεις στα πλαίσια των προγραμματισμένων εργασιών συντήρησης) τον μέγιστο υπολειπόμενο χρόνο ζωής του. Αν θεωρηθεί η μεταβολή της τιμής ϵ πολύ μικρή συγκριτικά προς εκείνη της μεταβολής της $\text{tg}\delta$ (λόγω επικαθίσεων αιωρούμενων σωματιδίων στο χαρτί, που δημιουργούνται ως ανεπιθύμητες προσμείξεις στο λάδι), τότε με μέτρηση της $\text{tg}\delta$ (μετά από αφύγρανση και πλήρωση του μετασχηματιστή με λάδι, υπό συνθήκες κενού), από τις σχέσεις 1.5-1 και 1.6-3 έχουμε :

$$\theta = \frac{\ln\left(\frac{\text{tg}\delta}{\text{tg}\delta^*}\right)}{\beta} \quad (1.8-4)$$

Όπου $\text{tg}\delta^*$ ο αρχικός συντελεστής απωλειών (όταν ο μετασχηματιστής εγκαταστάθηκε στο δίκτυο για πρώτη φορά). Για τον συντελεστή β μπορεί να θεωρηθεί ότι ισχύει : $\beta \approx 0,02$ [1].

1.9 Η μηχανική αντοχή

Σε αρκετές κατασκευές ενδιαφέρουν (εκτός από τις ηλεκτρικές ιδιότητες των στερεών μονωτικών) και οι μηχανικές ιδιότητες τους, όπως π.χ. : τα πλαστικά μέρη του μηχανισμού περιστροφής ενός ασφαλισοζεύκτη 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 [1].

2. ΤΑ ΗΛΕΚΤΡΟΜΟΝΩΤΙΚΑ ΑΕΡΙΑ

Από τα εκατομμύρια χιλιόμετρα των εναέριων γραμμών γίνεται φανερό ότι ο ατμοσφαιρικός αέρας είναι το περισσότερο χρησιμοποιούμενο μονωτικό της κατηγορίας αυτής. Αποτελεί επίσης τη μόνωση ενός πολύ μεγάλου αριθμού ηλεκτροτεχνικών κατασκευών, όπως : διακόπτες μέσης τάσης (αποζεύκτες, γειωτές, διακόπτες φορτίου και ασφαλειοαποζεύκτες), πίνακες μέσης τάσης, αυτόματοι διακόπτες του δικτύου μεταφοράς της ενέργειας (διακόπτες υπό πίεση 20 ατμοσφαιρών), κλπ. .

Η διηλεκτρική αντοχή του αέρα μεταβάλλεται σε συνδυασμό με την εκάστοτε επικρατούσα πίεση και θερμοκρασία. Η τιμή E_d για κανονικές συνθήκες λειτουργίας δίνεται στον πίνακα 1.2-1. Η διηλεκτρική του σταθερά διαφέρει ελάχιστα από τη μονάδα (βλέπετε πίνακα 1.3-1) και πρακτικά μπορεί να θεωρηθεί ίση με εκείνη του κενού χώρου.

Ένα άλλο σπουδαίο αέριο μονωτικό είναι το εξαφθοριούχο θείο (SF_6), που χρησιμοποιείται κυρίως σε διακόπτες και πίνακες υψηλής τάσης ως μονωτικό και ψυκτικό μέσο. Είναι άχρωμο, άοσμο, άφλεκτο χημικά αδρανές και μη τοξικό. Υπό τη δράση ηλεκτρικού τόξου, το SF_6 , αποσυντίθεται σε αέρια (θειούχα φθορίδια) και σε στερεά προϊόντα υπό μορφή σκόνης (μεταλλικά φθορίδια). Τα αέρια προϊόντα είναι εν μέρει διαβρωτικά, όταν υπάρχει υγρασία, αλλά τόσο η καθαρότητα του αερίου όσο και ειδικά φίλτρα εκμηδενίζουν τον κίνδυνο διάβρωσης.

Στην ατμοσφαιρική πίεση, η διηλεκτρική αντοχή του SF_6 είναι περίπου τριπλάσια από την αντίστοιχη του αέρα ή του αζώτου.

Στην ατμοσφαιρική πίεση το SF_6 , έχει τη μισή διηλεκτρική αντοχή από τα μονωτικά έλαια, αλλά σε υψηλότερες πιέσεις υπερέχει. Το αέριο αυτό είναι εξαιρετικό υλικό για τη σβέση τόξων, γιατί αφ' ενός διευκολύνει τη διακοπή τους και αφ' ετέρου δεν επιτρέπει την επαναφή τους.

Άλλα αέρια μονωτικά υλικά είναι το άζωτο, τα ευγενή αέρια, με τάση διάσπασης πολύ μικρότερη της αντίστοιχης του αέρα, καθώς και ο εξαφθοριούχος άνθρακας (C_2F_6). Ο τελευταίος είναι αέριο μη εύλεκτο, αντεκρηκτικό και μη τοξικό.

Στις σύγχρονες εφαρμογές κρουγενικών καλωδίων έχουν χρησιμοποιηθεί σαν μονωτικά σε υγροποιημένη μορφή το άζωτο και το υδρογόνο. Τα υλικά αυτά έχουν χαρακτηριστικές διάσπασης και απωλειών υπέρτερες από τις χαρακτηριστικές των συνδυασμών χάρτου-ελαίου. Τονίζεται όμως ότι τόσο η κρουγενική παραγωγή όσο και η κρουγενική μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας βρίσκονται ακόμα στα επίπεδα της έρευνας.

Στο κεφάλαιο αυτό εξετάζονται κυρίως τα φαινόμενα προ και κατά τη διάσπαση των αερίων μονωτικών, με ιδιαίτερη έμφαση των φαινομένων αυτών στον αέρα και το εξαφθοριούχο θείο, που ενδιαφέρουν βασικά στις πρακτικές εφαρμογές [1].

2.1 Κίνηση των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων

Όταν ένας ελεύθερος ηλεκτρικός φορέας με φορτίο q και μάζα ηρεμίας m_0 κινείται ανεμπόδιστα (όπως περίπου ισχύει στο κενό) με ταχύτητα $v < 0,2c$ (όπου $c=300 \text{ m}/\mu\text{s}$ η ταχύτητα του φωτός), υπό την επίδραση ενός ομογενούς ηλεκτροστατικού πεδίου, τότε αποκτά την επιτάχυνση :

$$\ddot{x} = \frac{F}{m_0} = \frac{q E}{m_0} \quad (2.1-1)$$

Η κινητική ενέργεια του φορέα για μία διαδρομή x με διαφορά δυναμικού $\Delta\phi$ (μεταξύ τέλους και αρχής της διαδρομής) είναι :

$$W_k = q \int^x E dx = \frac{m_0 v^2}{2} = q \Delta\phi \quad (2.1-2)$$

όπου v η ταχύτητα στο τέλος της διαδρομής. Από την παραπάνω σχέση ισχύει για την ταχύτητα του ελεύθερου ηλεκτρονίου :

$$v = \sqrt{\frac{2q_e \Delta\phi}{m_0}} \quad (2.1-3)$$

όπου : $m_0 = 9,1 \cdot 10^{-31}$ kg και $q_e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Cb. Έτσι η ταχύτητά του v στο τέλος της διαδρομής είναι :

$$v = 600 \sqrt{\Delta\phi} \quad (2.1-4)$$

όπου $\Delta\phi$ σε V. Για ταχύτητα του ελεύθερου ηλεκτρονίου $v=0,2c$ είναι : $\Delta\phi = 10,25$ kV.

Όταν η ταχύτητα κίνησης του ελεύθερου ηλεκτρικού φορέα είναι $v > 0,2c$, θα πρέπει να ληφθεί υπ' όψη στους υπολογισμούς η σχέση του Einstein :

$$m = m_0 \sqrt{1 - \left[\frac{v}{c} \right]^2} \quad (2.1-5)$$

Στην περίπτωση αυτή η κινητική ενέργεια είναι :

$$W_k = q_e \Delta\phi = mc^2 - m_0 c^2 \quad (2.1-6)$$

και η ταχύτητα :

$$v = c \sqrt{1 - \frac{1}{\left[\frac{q_e \Delta\phi}{m_0 c^2} + 1 \right]^2}} \quad (2.1-7)$$

Στους προηγούμενους υπολογισμούς θεωρήθηκε, ότι οι ελεύθεροι ηλεκτρικοί φορείς κινούνται ανεμπόδιστα, σαν να πρόκειται για κίνηση στο κενό. Σε ένα ηλεκτρομονωτικό αέριο οι κινήσεις των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων περιορίζονται, λόγω των κρούσεων με γειτονικά τους τμήματα του αερίου. Για

τη μαθηματική προσέγγιση της κίνησης αυτής των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων, θα υποθέσουμε ότι η ταχύτητά τους (υπό την επίδραση του ομογενούς ηλεκτροστατικού πεδίου) είναι πολύ μεγάλη, ως προς εκείνη της θερμικής κίνησης των μορίων του αερίου. Θα θεωρηθεί επίσης ότι οι κρούσεις είναι ανελαστικές. Με τις προϋποθέσεις αυτές ένας ελεύθερος ηλεκτρικός φορέας συγκρούεται διαδοχικά (κατά την εξαναγκασμένη ευθύγραμμη κίνηση του από το πεδίο), με μόρια του αερίου, τα οποία απέχουν μεταξύ τους ακανόνιστα. Ως μέσο ελεύθερο μήκος (λ) του παραπάνω ελεύθερου ηλεκτρικού φορέα για κίνηση του σε απόσταση x , έχει οριστεί το πηλίκο :

$$\lambda = \frac{x}{z} \quad (2.1-8)$$

όπου z ο αριθμός των κρούσεων. Με r και R τις ακτίνες αντίστοιχα του ελεύθερου ηλεκτρικού φορέα και του μορίου, ο όγκος στον οποίο συμβαίνουν οι z κρούσεις είναι :

$$V = \pi (r + R)^2 x \quad (2.1-9)$$

Για N μόρια στον όγκο V , τα οποία συγκρούστηκαν από τον ελεύθερο ηλεκτρικό φορέα, ο αριθμός των κρούσεων z είναι :

$$z = N V = N \pi (r + R)^2 x \quad (2.1-10)$$

Από τις σχέσεις 2.1-8 και 2.1-10 έπεται ότι :

$$\lambda = \frac{1}{N \pi (r + R)^2 x} \quad (2.1-11)$$

Επειδή η ακτίνα του ηλεκτρονίου είναι $r=1,87 \cdot 10^{-13}$ cm και του μορίου $R \approx 0,1 \div 0,2$ nm, το μέσο ελεύθερο μήκος του ηλεκτρονίου είναι :

$$\lambda_e = \frac{1}{N \pi R^2} \quad (2.1-12)$$

Για τον αέρα ΥΚΣ ($p=1,013$ bar και $\theta=20$ °C) είναι : $\lambda_e=0,57\mu\text{m}$.

Όταν πρόκειται για ένα ιόν, τότε είναι $r \approx R$, οπότε το μέσο ελεύθερο μήκος του ιόντος είναι :

$$\lambda_i = \frac{1}{4 N \pi R^2} \quad (2.1-13)$$

που σημαίνει ότι [1] :

$$\lambda_i = \frac{\lambda_e}{4} \quad (2.1-14)$$

2.2 Ο ιονισμός των ηλεκτρομονωτικών αερίων

Το αποτέλεσμα των κρούσεων, που προαναφέρθηκαν, σχετίζονται με την τιμή της κινητικής ενέργειας των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων, ανάλογα προς την οποία η προσδιδόμενη στα μόρια ενέργεια μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα τη διέγερση ή μη ηλεκτρικών φορέων ή τον ιονισμό του αερίου.

Ως **διέγερση ενός μορίου** εννοεί κανείς την ανύψωση ενός ηλεκτρικού φορέα του σε υψηλότερη ενεργειακή στάθμη, χωρίς αυτός να γίνει ελεύθερος. Αυτό σημαίνει (κατά την κβαντομηχανική θεώρηση) κάποια στάθμη π.χ. του φορέα μέσα στην απαγορευμένη ζώνη. Η αύξηση π.χ. της απόστασης ενός ηλεκτρονίου από το μητρικό πυρήνα του σε ένα άτομο, λόγω μετάβασης του σε μία εξωτερική τροχιά (ή λόγω αύξησης της ακτίνας της τροχιάς σε περίπτωση ενός μόνο ηλεκτρονίου, όπως συμβαίνει στο άτομο του υδρογόνου) είναι μία διέγερση. Η ενεργειακή αυτή κατάσταση διαρκεί συνήθως $10 \div 100\text{ns}$ και ο φορέας επιστρέφει πάλι στην αρχική του στάθμη (**αποδιέγερση**), αποδίδοντας το περίσσειμα της ενέργειάς του σε **ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία (φωτόνιο)**. Για τον υπολογισμό της παραπάνω ακτινοβολίας ισχύει η σχέση :

$$W = h \cdot f = \frac{h \cdot c}{\lambda} \quad (2.2-1)$$

όπου : h : η σταθερά Planck $h=6,62 \cdot 10^{-34} \text{Ws}^2$,
 f : η συχνότητα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, και
 λ : το μήκος κύματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας

Η δημιουργία ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων από κρούσεις, μπορεί να συμβεί, όταν η προσδιδόμενη από τους ελεύθερους ηλεκτρικούς φορείς (που κινούνται, υπό την επίδραση του πεδίου, εντός του ηλεκτρομονωτικού αερίου) ενέργεια είναι αρκετή, ώστε ηλεκτρόνια των ατόμων ή μορίων του αερίου να βρεθούν ενεργειακά από την ζώνη σθένους στην ζώνη αγωγιμότητας. Για την εκδήλωση του φαινομένου αυτού (που είναι γνωστό ως ιονισμός με κρούσεις) είναι φανερό ότι απαιτείται μεγαλύτερη τιμή της πεδιακής έντασης, από εκείνη για τις διεργασίες διέγερσης.

Η δημιουργία γενικά ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων στα ηλεκτρομονωτικά αέρια ονομάζεται **ιονισμός**. Διακρίνει κανείς τρεις περιπτώσεις ιονισμού :

α) **Τον ιονισμό με κρούσεις** (από μετρήσεις είναι γνωστό, ότι στον αέρα αναπαράγονται το δευτερόλεπτο, λόγω κοσμικών ακτινοβολιών και φυσικής ραδιενέργειας, περίπου $5 \div 20$ ζεύγη φορέων ανά cm^3 , ως **αρχικοί ελεύθεροι ηλεκτρικοί φορείς**· έτσι, τα προϋπάρχοντα κυρίως ελεύθερα ηλεκτρόνια στον αέρα είναι διαθέσιμα ως **αρχικά ηλεκτρόνια** του ιονισμού),

β) Η **θερμοεκπομπή** (εκπομπή ελεύθερων ηλεκτρονίων από μία θερμαινόμενη κάθοδο), και

γ) **Φωτοϊονισμός** (ιονισμός από ιονίζουσες ακτινοβολίες : μήκος κύματος $\lambda < 100\text{nm}$).

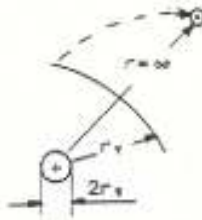
Το φως της ημέρας έχει μήκος κύματος $400 \div 800\text{nm}$ και επομένως δεν προκαλεί ιονισμό.

Η ενέργεια, που πρέπει να προσφερθεί στο άτομο για να συμβεί ιονισμός, ονομάζεται **ενέργεια ιονισμού W_i** . Ο ιονισμός ενός ατόμου μπορεί να θεωρηθεί ως επιδίωξη του ηλεκτρονίου να απομακρυνθεί σε απόσταση $r = \infty$

από τον μητρικό του πυρήνα (σχήμα 2.2-1). Έτσι, για το ηλεκτρόνιο εντός του σφαιρικού (κατά προσέγγιση) πεδίου του πυρήνα ισχύει :

$$W_i = \int_{r_T}^{\infty} \vec{F} d\vec{r} = q_e \int_{r_T}^{\infty} \vec{E} d\vec{r} = q_e U_i \quad (2.2-2)$$

όπου U_i η τάση ιονισμού.



Σχήμα 2.2-1 : Μακροσκοπική παράσταση της απομάκρυνσης ενός ηλεκτρονίου από το μητρικό πυρήνα του, λόγω ιονισμού.
 + : Πυρήνας
 - : Ηλεκτρόνιο (r_t απόσταση τροχιάς προ του ιονισμού) [1]

Για την πεδιακή ένταση E σε απόσταση r από το κέντρο του πυρήνα έχουμε (κατά την σχέση : $E = E_i \left(\frac{r_i}{r} \right)^2$)

$$E = E_{\pi} \left(\frac{r_{\pi}}{r} \right)^2 \quad (2.2-3)$$

ή

$$U_i = E_{\pi} \frac{r_{\pi}^2}{r} \quad (2.2-4)$$

όπου E_{π} η πεδιακή ένταση στην επιφάνεια του πυρήνα, για την οποία ισχύει (από ν. Gauss) :

$$E_{\pi} = \frac{q_e}{4 \pi r_{\pi}^2 \epsilon_0} \quad (2.2-5)$$

Από τις σχέσεις 2.2-2, 2.2-4 και 2.2-5 η ενέργεια ιονισμού είναι :

$$W_i = q_e E_{\pi} r_{\pi}^2 \int_{r_T}^{\infty} \frac{dr}{r} = \frac{q_e E_{\pi} r_{\pi}^2}{r_T} = \frac{q_e^2}{4 \pi \epsilon_0 r_T} \quad (2.2-6)$$

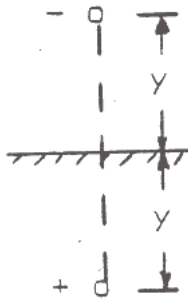
Με $\epsilon_0 = 8,854 \text{ pF/m}$ και $r_T = 0,1 \text{ nm}$ έχουμε : $W_i = 14,38 \text{ eV}$, όπου : $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Ws}$.

Στον πίνακα 2.2-1 δίνονται τιμές της ενέργειας ιονισμού για διάφορα αέρια.

Αέριο	H	H ₂	O ₂	H ₂	SF ₆
W _i σε Ev	13,5	15,9	12,5	15,8	19,3

Πίνακας 2.2-1 : Ενέργεια ιονισμού ορισμένων αερίων [1].

Η ενέργεια ιονισμού W_i στα ηλεκτρομονωτικά αέρια είναι μία ανάλογη έννοια προς την ενέργεια εξόδου (ή έργο εξόδου) των μετάλλων W_α, γιατί και οι δύο αποτελούν προϋπόθεση παροχής ενέργειας προς το υλικό για την δημιουργία ελευθέρων ηλεκτρικών φορέων. Μία θεωρητική προσέγγιση της ενέργειας εξόδου στα μέταλλα γίνεται παρακάτω με τη μέθοδο του ισοδύναμου φορτίου (αντικατοπτρικό φορτίο προς το ηλεκτρόνιο), όπου η απόσταση των ηλεκτρικών φορτίων είναι r = 2y [1].



Σχήμα 2.2-2 : Αντικατοπτρικό φορτίο του ηλεκτρονίου, για τον υπολογισμό της ενέργειας εξόδου του από ένα μέταλλο. [1]

Κατ' αναλογία, προς τους προηγούμενους υπολογισμούς έχουμε :

$$W_{\alpha} = q_e E_{\pi} r_{\pi}^2 \int_{r_T}^{\infty} \frac{dx}{r^2} \quad (2.2-7)$$

ή με r=2y :

$$W_{\alpha} = q_e E_{\pi} r_{\pi}^2 \int_{r_T}^{\infty} \frac{dy}{(2y)^2} = \frac{q_e E_{\pi} r_{\pi}^2}{4r_T^2} \quad (2.2-8)$$

Από τις σχέσεις 2.2-6 και 2.2-8 φαίνεται ότι :

$$W_{\alpha} = \frac{W_i}{4} \quad (2.2-9)$$

Στον παρακάτω πίνακα δίνονται τιμές της ενέργειας εξόδου ορισμένων μετάλλων.

Μέταλλο	Cu	Al	Fe	Ag	Au	Cr
W _α σε eV	4,0 ~ 4,8	1,8 ~ 3,9	4,0 ~ 4,7	3,0 ~ 4,7	4,8	4,4

Πίνακας 2.2-2 : Ενέργεια εξόδου (ή έργο εξόδου) ορισμένων μετάλλων [1]

2.2.1 Η συνθήκη του ιονισμού με κρούσεις

Σύμφωνα με τα παραπάνω, για να συμβεί ιονισμός με κρούση ενός ελεύθερου ηλεκτρικού φορέα επί ενός ατόμου ηλεκτρομονωτικού αερίου, θα πρέπει :

$$W_{\kappa} = q \cdot \Delta\phi = q \cdot E \cdot \lambda \geq W_i \quad (2.2.1-1)$$

ή με $W_i = U_i \cdot q$, έχουμε :

$$\boxed{E \cdot \lambda \geq U_i} \quad (2.2.1-2)$$

Η παραπάνω σχέση είναι γνωστή ως συνθήκη ιονισμού [1].

2.2.2 Η σημασία της πίεσης και της θερμοκρασίας για τον ιονισμό με κρούσεις

Για τον αριθμό των μορίων (N) του ηλεκτρομονωτικού αερίου στη μονάδα του όγκου, υπό πίεση p και θερμοκρασία T, ισχύει κατά τη θερμοδυναμική η σχέση:

$$N = \frac{p}{k T} \quad (2.2.2-1)$$

όπου k η σταθερά Boltzmann ($k=1,37 \cdot 10^{-23} \text{Ws/}^\circ\text{K}$). Έτσι, επειδή κατά τη σχέση 2.1-12 είναι $N=1/(\pi \lambda_e R^2)$, έχουμε :

$$\lambda_e = \frac{k T}{\pi p R^2} \quad (2.2.2-2)$$

Για τη συνθήκη ιονισμού ισχύει επομένως :

$$E = \frac{k T}{\pi p R^2} \geq U_i \quad (2.2.2-3)$$

Από την ανισότητα αυτή φαίνεται, ότι **η αύξηση της θερμοκρασίας διευκολύνει τον ιονισμό με κρούσεις, ενώ η αύξηση της πίεσης δεν τον διευκολύνει.** Έτσι, επειδή ο ιονισμός με κρούσεις είναι τελικά (λόγω της παραγωγής ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων) μία εκκένωση, που επενεργεί για τη μετατροπή του επιδιωκόμενου ηλεκτροστατικού πεδίου σε ένα πεδίο ροής (μερική εκκένωση, διάσπασης, κλπ.), συμπεραίνεται ότι : **η διηλεκτρική αντοχή μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας του αερίου, ενώ γίνεται μεγαλύτερη όσο αυξάνει η πίεση του αερίου.**

Από το παραπάνω συμπέρασμα γίνονται φανεροί οι λόγοι χρησιμοποίησης των ηλεκτρομονωτικών αερίων υπό πίεση. Όσο αυξάνει η τάση του δικτύου τόσο μεγαλύτερη είναι η πίεση, ανάλογα με το είδος του αερίου (κυρίως αέρας και SF₆). Στους διακόπτες π.χ. αέρος του δικτύου των 150 kV η πίεση είναι περίπου 20 at, ενώ στους διακόπτες με SF₆ του δικτύου των 150 kV η πίεση είναι: αρκετά μικρότερη (2,5at ή 6at, ανάλογα με την κατασκευή) [1].

2.2.3 Οι συντελεστές ιονισμού α και $\bar{\alpha}$ (συνάρτηση των κρούσεων)

Όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 2.2, στον αέρα αναπαράγονται το δευτερόλεπτο (λόγω κοσμικών ακτινοβολιών και φυσικής ραδιενέργειας) 5 ÷ 20 αρχικά ζεύγη ηλεκτρικών φορέων ανά cm³, που μπορούν να προκαλέσουν τον ιονισμό με κρούσεις, όταν πληρούται η συνθήκη ιονισμού (βλέπετε παρ. 2.2.1 και 2.2.2). Υπάρχουν όμως αέρια (όπως το SF₆), που ενσωματώνουν στα μόριά τους τα αρχικά ελεύθερα ηλεκτρόνια, σχηματίζοντας έτσι αρνητικά ιόντα, τα οποία δεν διευκολύνουν στον ιονισμό με κρούσεις επί ατόμων και μορίων του αερίου (βλέπετε σχέση 2.1-14). Με βάση την παραπάνω διαφορά γίνεται διάκριση σε :

1) ηλεκτρομονωτικά αέρια (αέρας, H₂, N₂, CO₂ και τα ιδανικά αέρια), που διαθέτουν αρχικούς ηλεκτρικούς φορείς (λόγω κοσμικών ακτινών και φυσικής ραδιενέργειας) και ονομάζονται **ηλεκτροθετικά**.

2) μονωτικά αέρια, που ονομάζονται **ηλεκτραρνητικά** (SF₆, O₂ και ενώσεις αλογόνων), γιατί ενσωματώνουν (εξουδετερώνουν) τα αρχικά ελεύθερα ηλεκτρόνια, με το να σχηματίζουν μαζί τους αρνητικά ιόντα. Η παραγωγή των αναγκαίων ελεύθερων ηλεκτρονίων έναρξης του ιονισμού στα αέρια αυτά έχει αποδοθεί :

- α) στην αποσύνθεση ιόντων (απαιτείται ενέργεια 1,4 eV)
- β) στην εκπομπή από την κάθοδο (λόγω θερμοεκπομπής ή μεγάλης τιμής της πεδιακής έντασης), και
- γ) στο φωτοϊονισμό.

Όταν σε ένα ηλεκτροθετικό αέριο πληρούται η συνθήκη του ιονισμού με κρούσεις ($E \cdot \lambda \geq U_i$), τότε παράγονται ελεύθεροι ηλεκτρικοί φορείς (ηλεκτρόνια και ισάριθμα θετικά ιόντα). Σε περίπτωση, που η συνθήκη ιονισμού πληρούται για ελεύθερους ηλεκτρικούς φορείς, οι οποίοι προήλθαν από τον ιονισμό, τότε θα συμμετέχουν και αυτοί στη παραγωγή ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων. Έτσι, ο ιονισμός με κρούσεις είναι κάποιος μηχανισμός πλήθυνσης των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων, για τον οποίο είναι χρήσιμο να γνωρίζει κανείς τους παράγοντες που επηρεάζουν την παραγωγή του. Αν υποθέσουμε, ότι πληρούται η συνθήκη ιονισμού για ελεύθερους ηλεκτρικούς φορείς, που δημιουργήθηκαν από κρούσεις, τότε, όσο μεγαλύτερες είναι οι τιμές E και λ, τόσο περισσότερο αυξάνει η κινητική ενέργειά τους ($W_k = q \cdot E \cdot \lambda$). Επειδή το μέσο ελεύθερο μήκος είναι αντιστρόφως ανάλογο με την πίεσή του αερίου (σχέση 2.2.2-3), η τιμή W_k μειώνεται όσο αυξάνει η πίεση του αερίου. Επομένως, η κινητική ενέργεια W_k εξαρτάται ανάλογα από μια συνάρτηση $f_1(E/p)$. Επειδή η πιθανότητα για κρούση αυξάνει με την πίεση p, ισχύει τελικά μία συνάρτηση :

$$W_k = p f_1 \left(\frac{E}{p} \right) \quad (2.2.3-1)$$

Αν υποθέσουμε ότι παράγονται α ζεύγη των ηλεκτρικών φορέων στη μονάδα του μήκους, τότε ισχύει η αναλογία :

$$\alpha = f_2(W_\kappa) \quad (2.2.3-2)$$

Από τις συναρτήσεις 2.2.3-1 και 2.2.3-2 έπεται ότι :

$$\frac{\alpha}{p} = f\left(\frac{E}{p}\right) \quad (2.2.3-3)$$

Η παραπάνω συνάρτηση είναι γνωστή ως **συνάρτηση κρούσεων των ηλεκτροθετικών αερίων**. Ο αριθμός α έχει ονομαστεί **συντελεστής ιονισμού** των ηλεκτροθετικών αερίων και δίνεται συνήθως σε ζεύγη ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων/cm (ή ανά mm). Η τιμή α εξαρτάται από το είδος, του ηλεκτροθετικού αερίου.

Για τη διατύπωση της συνάρτησης των κρούσεων στα ηλεκτραρνητικά αέρια θα πρέπει να πάρει κανείς υπ' όψη τα ελεύθερα ηλεκτρόνια, που ενσωματώθηκαν (εξουδετερώθηκαν). Αν υποθέσουμε ότι ενσωματώθηκαν (η) ελεύθερα ηλεκτρόνια (αρχικά ηλεκτρόνια και ηλεκτρόνια, που δημιουργήθηκαν κατά τον ιονισμό), ο συντελεστής ιονισμού των ηλεκτραρνητικών αερίων είναι :

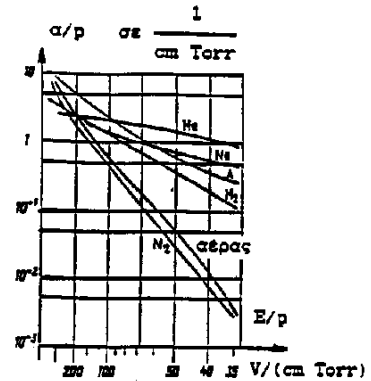
$$\bar{\alpha} = \alpha - \eta \quad (2.2.3-4)$$

όπου η τα ενσωματωμένα και α τα παραχθέντα ηλεκτρόνια. Η τιμή του $\bar{\alpha}$ εξαρτάται από το είδος του ηλεκτραρνητικού αερίου και δίνεται συνήθως σε ζεύγη ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων (λόγω ιονισμού) ανά cm (ή ανά mm). Για τη συνάρτηση των κρούσεων των ηλεκτραρνητικών αερίων ισχύει επομένως :

$$\frac{\bar{\alpha}}{p} = \frac{\alpha - \eta}{p} = f\left(\frac{E}{p}\right) \quad (2.2.3-5)$$

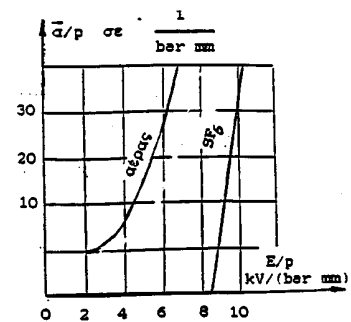
Οι παραπάνω συναρτήσεις των κρούσεων διευκολύνουν μόνο στην κατανόηση του μηχανισμού παραγωγής ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων, γιατί δεν δίνουν τη δυνατότητα για τον υπολογισμό του συντελεστή ιονισμού, που ως κριτήριο αξιολόγησης μεταξύ των διαφόρων ηλεκτρομονωτικών αερίων, θα μπορούσε να δώσει πληροφορίες για τη διηλεκτρική αντοχή τους. Για το λόγο αυτό, είναι αναγκασμένος κανείς να αναζητήσει τις πληροφορίες αυτές σε εμπειρικές χαρακτηριστικές και εμπειρικές σχέσεις. Στα σχήματα 2.2.3-1 και 2.2.3-2 δίνονται γραφικές παραστάσεις της χαρακτηριστικής των κρούσεων. Από τις χαρακτηριστικές του σχήματος 2.2.3-2 φαίνεται, ότι το SF₆ έχει μεγαλύτερη διηλεκτρική αντοχή από τον αέρα (αν και τα δύο διηλεκτρικά έχουν, κατά τον πίνακα 1.3-1 περίπου την ίδια διηλεκτρική σταθερά), γιατί ο ιονισμός σ' αυτό είναι ανύπαρκτος στην περιοχή E/p, όπου συμβαίνει ιονισμός στον αέρα. Από την παραπάνω σύγκριση μπορεί κανείς να υποθέσει, ότι η μεγαλύτερη διηλεκτρική αντοχή του SF₆ (σε σχέση με τον αέρα) οφείλεται στην ηλεκτραρνητική ιδιότητά του (ενσωμάτωση ελευθέρων ηλεκτρονίων στο άτομό του).

Σχήμα 2.2.3-1 : Χαρακτηριστική $\alpha/p=f(E/p)$ διαφόρων αερίων [1]



Σχήμα 2.2.3-2 : Χαρακτηριστική $\alpha/p=f(E/p)$ για τον αέρα

Χαρακτηριστική $\alpha/p=f(E/p)$ για το SF₆ [1]



Σε αρκετές περιπτώσεις, μπορεί να γίνει προσέγγιση συνάρτησης των κρούσεων των ηλεκτροθετικών αερίων με την εμπειρική σχέση :

$$\frac{\alpha}{p} = A e^{-B\left(\frac{p}{E}\right)} \quad (2.2.3-6)$$

όπου: A και B σταθερές του αερίου για μία περιοχή τιμών E/p (Πίνακας 2.2.3-1). Στη λογαριθμική σχεδίαση του σχήματος 2.2.3-1, οι χαρακτηριστικές κατά την παραπάνω σχέση είναι ευθείες γραμμές, που σημαίνει ότι η σχέση 2.2.3-6 ισχύει μόνο για το ευθύγραμμο τμήμα των χαρακτηριστικών του σχήματος αυτού.

ΑΕΡΙΟ	A	B	Ισχύει για τις παρακάτω τιμές E/p
	$\frac{1}{\text{bar} \cdot \text{mm}}$	$\frac{\text{kV}}{\text{bar} \cdot \text{mm}}$	$\frac{\text{kV}}{\text{bar} \cdot \text{mm}}$
Αέρας	645,0	19,0	3 ~ 14
H ₂	375,0	9,8	11 ~ 30
N ₂	945,0	25,6	11 ~ 45

CO ₂	1500,0	35,0	37 ~ 75
-----------------	--------	------	---------

Πίνακας 2.2.3-1 : Σταθερές A και B για τη σχέση 2.2.3-6 [1]

Μία εμπειρική σχέση για τον αέρα, που ισχύει με ικανοποιητική προσέγγιση για τις τιμές E/p μέχρι 6 kV/(bar·mm) είναι η παρακάτω :

$$\frac{\alpha}{p} = 1,65 \left[\left(\frac{E}{p} \right) - 2,13 \right]^2 \quad (2.2.3-7)$$

όπου α σε 1/mm p σε bar και E σε kV/mm.

Για τον αέρα σε πίεση 1 Torr έχει εφαρμογή η σχέση :

για p=1 Torr :

$$\alpha = 14,6 e^{-365/E} \quad (2.2.3-8)$$

όπου E σε V/cm και α σε 1/cm.

Συχνά γίνεται χρήση για τον αέρα και της προσεγγιστικής σχέσης :

$$\alpha = 8,8p \cdot e^{(-255p)/E} \quad (2.2.3-9)$$

όπου E σε V/cm, p σε Torr και α σε 1/cm.

Για τα ηλεκτραρνητικά αέρια ισχύει (σε αντιστοιχία προς την σχέση 2.2.3-6 των ηλεκτροθετικών αερίων) η εμπειρική σχέση :

$$\bar{\alpha} = \alpha - \eta = A \cdot p \cdot e^{-B \left(\frac{p}{E} \right)} - K \quad (2.2.3-10)$$

όπου K μία σταθερά του αερίου (σταθερά ενσωμάτωσης). Για το SF₆ στους 20 °C έχει εφαρμογή η εμπειρική σχέση :

$$\frac{\bar{\alpha}}{p} = \frac{\alpha - \eta}{p} = 27,7 \left[\left(\frac{E}{p} \right) - 8,84 \right] \quad (2.2.3-11)$$

όπου : $\bar{\alpha}$ σε 1/mm, p σε bar και E kV/mm [1].

2.2.4 Η μη αυτοσυντηρούμενη και η αυτοσυντηρούμενη εκκένωση

Από τις μετρήσεις, που έχουν γίνει για την ερμηνεία των φαινομένων, τα οποία εκδηλώνονται προ και κατά τη διάσπαση των αερίων μονωτικών, έχει ιδιαίτερη σημασία η χαρακτηριστική ρεύματος-τάσης, κατά την καταπόνηση με εναλλασσόμενη τάση (υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας). Η χαρακτηριστική αυτή δίνεται, κατά τον G. Oberdorffer στο σχήμα 2.2.4-1 για την πυκνότητα ροής (S), ανάλογα με την ενεργό τιμή της εφαρμοζόμενης τάσης (U). Στη χαρακτηριστική S = f(U) επισημαίνονται δύο βασικές περιοχές της εκκένωσης (μη αυτοσυντηρούμενη εκκένωση και αυτοσυντηρούμενη) καθώς και διάφορες

υποπεριοχές τους (νόμος του Ohm, κορεσμός, ιονισμός με κρούσεις, φωτεινή εκκένωση και εκκένωση τόξου).

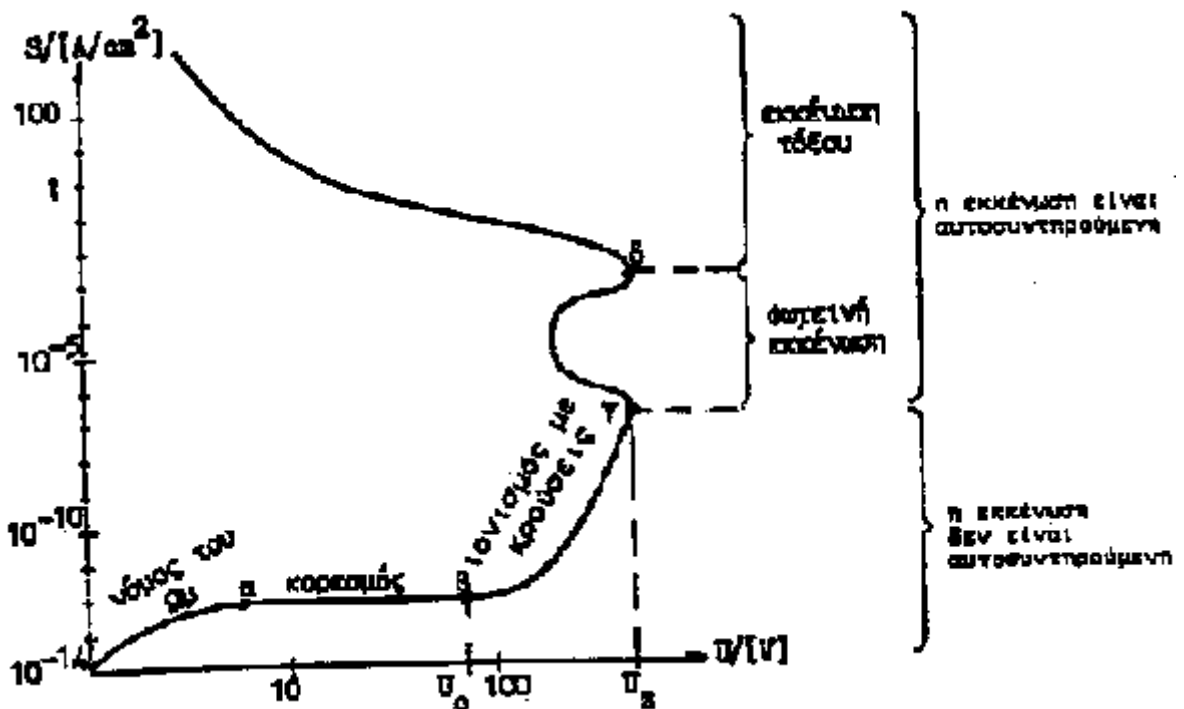
Ο όρος **μη αυτοσυντηρούμενη εκκένωση** αναφέρεται στην απαίτηση για εξωτερική επίδραση στο ηλεκτρομονωτικό αέριο, ώστε να συμβεί από ελεύθερους ηλεκτρικούς φορείς μία ροή ρεύματος. Κατά την **αυτοσυντηρούμενη εκκένωση** δεν ισχύει η ανωτέρω απαίτηση.

Για πολύ μικρές τιμές του εφαρμοζόμενου πεδίου η ροή του ρεύματος ακολουθεί τον νόμο του Ohm. Έτσι, στο ωμικό τμήμα της χαρακτηριστικής ισχύει για την κίνηση των ελευθέρων ηλεκτρικών φορέων η έννοια της κινητικότητας (b), όπως στα μέταλλα :

$$b = \frac{v}{E} \quad (2.2.4-1)$$

με τη διαφορά, ότι, ενώ η κινητικότητα στα μέταλλα είναι περίπου 50 (cm/s)/(V/cm), στον αέρα, υπό κανονικές συνθήκες (πίεση 1,013 bar και θερμοκρασία 20 °C) έχει περίπου την τιμή:

- α) για τα ηλεκτρόνια : $b=500(\text{cm/s})/(\text{V/cm})$, και
- β) για τα ελεύθερα αρνητικά ιόντα : $b=1,5(\text{cm/s})/(\text{V/cm})$



Σχήμα 2.2.4-1 : Χαρακτηριστική «τάσης-πυκνότητας ροής» ενός αερίου υπό κανονικές συνθήκες (κατά G. Oberdorffer).
 U_0 : τάση έναρξης ιονισμού
 U_z : τάση έναυσης
 S : πυκνότητα ροής [1]

Από τις παραπάνω τιμές φαίνεται, ότι η κινητικότητα των ελευθέρων ηλεκτρονίων στον αέρα (υπό κανονικές συνθήκες) είναι 300 φορές μεγαλύτερη από εκείνη των ιόντων.

Για μεγαλύτερη τιμή της πεδιακής έντασης, από προηγουμένως, αυξάνει η συμμετοχή των προϋπαρχόντων (αρχικών) ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων στη ροή του ηλεκτρικού ρεύματος. Φαίνεται όμως, ότι συμβαίνουν αλληλοεξουδετερώσεις μεταξύ των αρχικών φορέων, με αποτέλεσμα να υπάρχει μία **περιοχή κορεσμού** της πυκνότητας ροής. Οι αλληλοεξουδετερώσεις, που γίνονται στη μονάδα του χρόνου (dn/dt), είναι ανάλογες προς τον αριθμό των ελευθέρων ηλεκτρονίων και των ιόντων στη μονάδα του όγκου (n_- και n_+ αντίστοιχα). Με την εισαγωγή του συντελεστή αλληλοεξουδετέρωσης (ξ) έχει διατυπωθεί η σχέση :

$$\frac{dn}{dt} = -\xi \cdot n_- \cdot n_+ \quad (2.2.4-2)$$

Για τον αέρα, υπό πίεση 760Torr και θερμοκρασία 20°C, ο συντελεστής αλληλοεξουδετέρωσης είναι :

$$\xi = 1,6 \cdot 10^{-6} \text{ cm}^3/\text{s}$$

Στο τμήμα της χαρακτηριστικής βγ η απότομη αύξηση των ελευθέρων ηλεκτρικών φορέων οφείλεται στον ιονισμό με κρούσεις. Η έναρξη του ιονισμού συμβαίνει στη τιμή της τάσης U_0 , που είναι η **τάση έναρξης του ιονισμού** με κρούσεις. Μέχρι προ του σημείου γ ο ιονισμός δεν είναι αυτοσυντηρούμενος. Απαιτείται το εξωτερικά εφαρμοζόμενο πεδίο, για να υπάρχει μία σταθερή παραγωγή ελευθέρων ηλεκτρικών φορέων (ανάλογα με την ενεργό τιμή της πεδιακής έντασης), που καθορίζουν τη ροή του ρεύματος. Ο ιονισμός **στο σημείο γ ονομάζεται έναυση** και η τιμή της τάσης **U_z τάση έναυσης**.

Από το σημείο γ και μετά η αύξηση του ρεύματος προκαλεί μείωση της τάσης και συμβαίνει η διάσπαση. Η διάσπαση είναι μία τελική φάση φαινομένων ιονισμού. Συμβαίνει συνήθως σε τιμές της τάσης $U \geq U_z$.

Από την χαρακτηριστική $S=f(U)$ παρατηρεί κανείς, ότι η διάσπαση σχετίζεται με την εκδήλωση αρνητικής διαφορικής αντίστασης τύπου S.

Περισσότερες πληροφορίες για το μηχανισμό προ και κατά τη διάσπαση μπορούν να αναζητηθούν από την ενέργεια των παραγομένων ελευθέρων ηλεκτρικών φορέων, κατά την εξαναγκασμένη επιβράδυνση τους στην άνοδο. Όταν οι παραγόμενοι ελεύθεροι ηλεκτρικοί φορείς συλλέγονται από τα ετερόνυμα προς αυτούς ηλεκτρόδια, τότε αποδίδουν περίσσειμα της ενέργειας τους (πάνω από την ενέργεια Fermi) υπό μορφή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Για τον υπολογισμό της παραπάνω ακτινοβολίας ισχύει η σχέση 2.2-1. Από πειράματα, που έχουν γίνει είναι γνωστό ότι η διάσπαση σχετίζεται με υπεριώδεις ακτίνες και μαλακές ακτίνες X. Τα φωτεινά φαινόμενα, που παρατηρούνται κατά τον αυτοσυντηρούμενο ιονισμό (σχήμα 2.2.4-1) φαίνεται ότι είναι ένα τμήμα της παραπάνω ακτινοβολίας [1].

2.2.5 Συμπεράσματα από τα προαναφερόμενα για την περαιτέρω μελέτη του ιονισμού με κρούσεις

Από όσα αναφέρθηκαν στις παραγράφους 4.2÷4.2 για τον ιονισμό των ηλεκτρομονωτικών αερίων, καταλήγει κανείς περιληπτικά στα παρακάτω :

- 1) Ο ιονισμός είναι ένας μηχανισμός παραγωγής ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων.
- 2) Η ενέργεια εξόδου των μετάλλων είναι περίπου το 1/4 της ενέργειας ιονισμού των ηλεκτρομονωτικών αερίων.
- 3) Διακρίνει κανείς τρεις περιπτώσεις ιονισμού :
 - α) τον ιονισμό με κρούσεις (μη αυτοσυντηρούμενο και αυτοσυντηρούμενο)
 - β) την θερμοεκπομπή (ή θερμοϊονική εκπομπή)
 - γ) τον φωτοϊονισμό.
- 4) Τα ηλεκτροθετικά αέρια (π.χ. ο αέρας) διαθέτουν αρχικούς ηλεκτρικούς φορείς για τον ιονισμό με κρούσεις.
- 5) Τα ηλεκτραρνητικά αέρια (π.χ. το SF₆) ενσωματώνουν (εξουδετερώνουν) τους παραπάνω αρχικούς φορείς
- 6) Για να συμβεί ιονισμός με κρούσεις πρέπει να ισχύει η συνθήκη ιονισμού :

$$E \cdot \lambda \geq U_i$$

- 7) Ο συντελεστής ιονισμού δίνει τα ζεύγη των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων ανά cm (ή mm), που παράγονται κατά τον ιονισμό με κρούσεις.
- 8) Η αύξηση της θερμοκρασίας και η μείωση της πίεσης του αερίου διευκολύνουν τον ιονισμό με κρούσεις και προκαλούν έτσι μείωση της διηλεκτρικής αντοχής του αερίου.
- 9) Η διάσπαση συμβαίνει συνήθως σε τιμές της τάσης $U \geq U_z$
- 10) Η διάσπαση των αερίων είναι μία τελευταία φάση του ιονισμού.
- 11) Η αποδιέγερση και τα φαινόμενα ιονισμού σχετίζονται με εκπομπή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας.

Από τα παραπάνω φαίνεται, ότι για την περαιτέρω μελέτη των φαινομένων του ιονισμού με κρούσεις χρειάζονται περισσότερες πληροφορίες, που να οδηγούν στη διατύπωση μίας συνθήκης για την έναυση (όπως ήδη έχει γίνει με την έναρξη του ιονισμού) και τη συσχέτιση των φαινομένων ιονισμού με την εκπομπή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας [1].

2.3 Η διάσπαση των ηλεκτρομονωτικών αερίων

2.3.1 Προσέγγιση του μηχανισμού διάσπασης του αέρα (και γενικά των ηλεκτροθετικών αερίων) σε ομογενές πεδίο, μέσω της θεωρίας Townsend

Από κριτική της θεωρίας Townsend με στοιχεία, που δίνονται στη βιβλιογραφία, διαπιστώνονται σε μερικές περιπτώσεις αποκλίσεις από την πραγματικότητα. Για την παραγωγή π.χ. ελευθέρων ηλεκτρονίων με κρούσεις θετικών ιόντων επί της καθόδου, που υποτίθεται ότι είναι η βασική αιτία δημιουργίας αρχικών ελευθέρων ηλεκτρονίων χρειάζεται κατά τη θεωρία Townsend ένας χρόνος περίπου 0,1 μs, που θεωρείται απαραίτητος λόγω της δυσκινησίας των θετικών ιόντων. Από μετρήσεις όμως έχει διατυπωθεί, ότι ο χρόνος αυτός είναι πολύ μικρότερος (0,001 μs). Επίσης το πεδίο κατά θεωρία Townsend θεωρείται ως ομογενές, ενώ δεν συμβαίνει αυτό στην πραγματικότητα, λόγω των χωρικών φορτίων που δημιουργούνται. Μία βελτίωση της θεωρίας Townsend επιχειρήθηκε από τον W. Rogowski και είναι γνωστή ως θεωρία Townsend-Rogowski. Η σύγκριση των δύο θεωριών έχει οδηγήσει στο συμπέρασμα, ότι η θεωρία Townsend είναι μία προσέγγιση των φαινομένων μέχρι την έναυση, ενώ η θεωρία Townsend-Rogowski αφορά

κατάσταση ισορροπίας του αυτοσυντηρούμενου ιονισμού. Παρ' όλα αυτά, λόγω της πολυπλοκότητας των σχέσεων της θεωρίας Townsend-Rogowski, εξακολουθεί να έχει εφαρμογή η μαθηματική προσέγγιση της διάσπασης για την τιμή U_z κατά τη θεωρία Townsend.

Η προσέγγιση αυτή της διάσπασης με την τάση έναυσης κατά Townsend δεν φαίνεται να αποτελεί πρόβλημα, γιατί η έναρξη των μερικών εκκενώσεων σε ομογενές πεδίο (το μηχανισμό των οποίων διαπραγματεύεται ουσιαστικά η θεωρία Townsend) συμπίπτει με την τάση διάσπασης, η οποία κατά Townsend είναι η τάση έναυσης U_z . Πάντως, μία συμπλήρωση της θεωρίας Townsend με στοιχεία, που θα την συσχετίζουν με το φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας κατά την εξαναγκασμένη επιβράδυνση των ελευθέρων ηλεκτρικών φορέων στα ηλεκτρόδια, φαίνεται ότι θα δώσει περισσότερες πληροφορίες για την διάσπαση.

Παρακάτω εξετάζεται η προσέγγιση του μηχανισμού διάσπασης στον αέρα (και γενικά στα ηλεκτροθετικά αέρια) εντός ομογενούς πεδίου, μέσω της θεωρίας του Townsend και του νόμου του Paschen (που την συμπληρώνει ως προς τη μεταβολή της τάσης διάσπασης, ανάλογα με την απόσταση των ηλεκτροδίων και την πίεση του αερίου). Γίνεται αναφορά σε εμπειρικές σχέσεις για τη διάσπαση του αέρα σε ομογενές πεδίο.

Η ελάχιστη πεδιακή ένταση διάσπασης σε ομογενές πεδίο (υπό σταθερή πίεση του αερίου και σταθερή απόσταση των ηλεκτροδίων) είναι δεδομένη κατά τη θεωρία του Townsend, όταν πληρούται η συνθήκη έναυσης. Στην περίπτωση αυτή είναι :

$$U_z = U_d \quad (2.3.1-1)$$

ή :

$$E_d = \frac{U_d}{d} = \frac{U_z}{d} \quad (2.3.1-2)$$

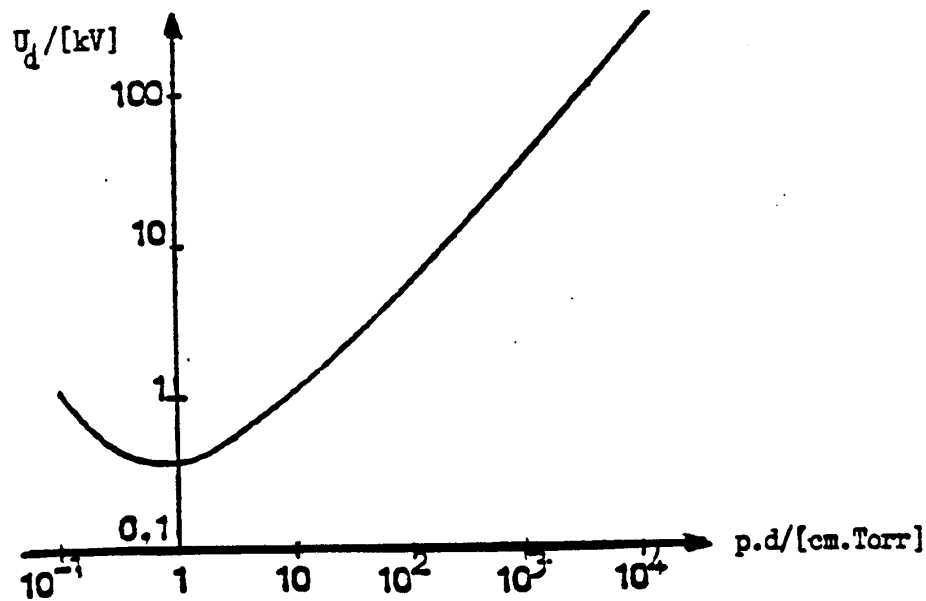
Για την τιμή της τάσης διάσπασης για μεταβλητές τιμές πίεσης και απόστασης των ηλεκτροδίων ισχύει ο νόμος του Paschen :

$$U_d = f(p \cdot d) \quad (2.3.1-3)$$

Υπάρχουν πάντως αποκλίσεις από το νόμο του Paschen σε όλα τα αέρια μετά από μία τιμή της πίεσης.

Στο σχήμα 2.3.1-1 δίνεται η χαρακτηριστική $U_d=f(p \cdot d)$ για τον αέρα. Κατά τη χαρακτηριστική αυτή δεν μπορεί να συμβεί διάσπαση στον αέρα (σε ομογενές πεδίο) για $U_d < 300V$.

Αν δεχτούμε, ότι η έναυση του διάκενου προκαλείται με το μηχανισμό κατά την α-γ θεωρία (όπως κυρίως συμβαίνει κατά τη θεωρία του Townsend επειδή είναι $\beta < \alpha$), τότε πληρούται η συνθήκη έναυσης : $a \cdot d = \ln[1 + 1/\gamma]$.



Σχήμα 2.3.1-1 : Χαρακτηριστική $U_d=f(p \cdot d)$ για τον αέρα σε κανονική θερμοκρασία [1].

Έτσι με την εμπειρική σχέση : $\alpha = p A \exp\left[-B \frac{p}{A}\right]$

για τον συντελεστή ιονισμού α έχουμε :

$$\alpha = \ln\left[1 + \left(\frac{1}{\gamma}\right)\right] / d = p A e^{-B(p/E_d)} \quad (2.3.1-4)$$

Επομένως, με $E_d=(U_d/d)$ η τάση διάσπασης είναι :

$$U_d = B \frac{p \cdot d}{\ln\left[\frac{A \cdot p \cdot d}{\ln\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right)}\right]} \quad (2.3.1-5)$$

Η παραπάνω σχέση είναι μία προσέγγιση του νόμου του Paschen. Σύμφωνα με τη σχέση αυτή, η ελάχιστη τιμή της τάσης διάσπασης ($U_{d\min}$) δίνεται όταν :

$$\frac{A \cdot p \cdot d}{\ln\left[1 + \left(\frac{1}{\gamma}\right)\right]} = e$$

που σημαίνει, ότι για το ελάχιστο γινόμενο ($p \cdot d$) της χαρακτηριστικής $U_d=f(p \cdot d)$ ισχύει :

$$(p \cdot d)_{\min} = \frac{e \cdot \ln \left[1 + \left(\frac{1}{\gamma} \right) \right]}{A} \quad (2.3.1-6)$$

Έτσι, για την ελάχιστη τιμή της τάσης διάσπασης ισχύει η σχέση :

$$U_{d \min} = B \cdot (p \cdot d)_{\min} \quad (2.3.1-7)$$

Εκτός από τις παραπάνω σχέσεις, που προσεγγίζουν ικανοποιητικά τη διάσπαση των ηλεκτροθετικών αερίων, στη βιβλιογραφία δίνονται διάφορες εμπειρικές σχέσεις και χαρακτηριστικές για τη διάσπαση του αέρα. Ορισμένες σχέσεις είναι [1] :

1) για τον αέρα υπό κανονικές συνθήκες και d μερικά cm :

$$E_d = 24,36 + \frac{6,72}{\sqrt{d}} \quad \text{σε kV/cm} \quad (2.3.1-8)$$

2) για τον αέρα στους 20 °C :

$$U_d = 2,405 \cdot p \cdot d + 2,11 \sqrt{p \cdot d} \quad \text{σε kV} \quad (2.3.1-9)$$

(όπου : p σε bar και d σε mm)

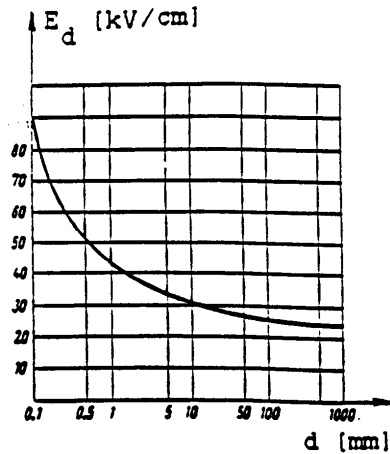
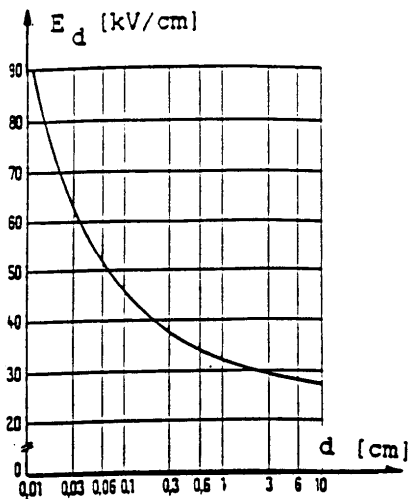
3) για τον αέρα υπό κανονικές συνθήκες και d=1 cm :

$$(p \cdot d)_{\min} = \frac{13,3 e}{A} \quad (2.3.1-10)$$

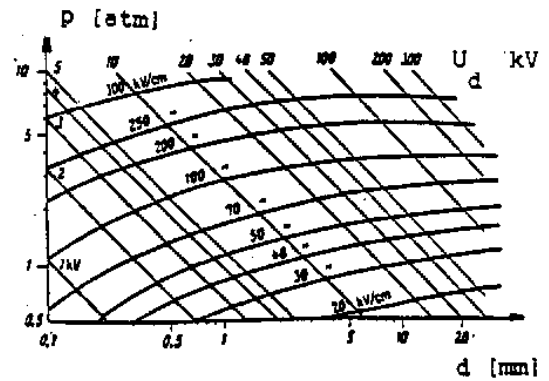
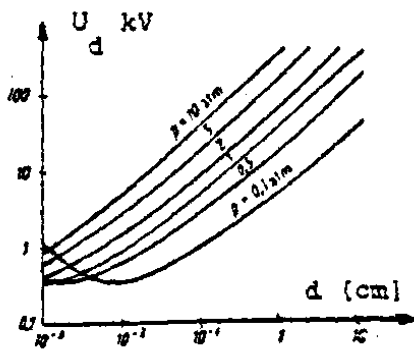
4) για τον αέρα υπό κανονικές συνθήκες και d=10 cm :

$$(p \cdot d)_{\min} = \frac{45 e}{A} \quad (2.3.1-11)$$

Στα σχήματα 2.3.1-2÷2.3.2-4 δίνονται πειραματικές χαρακτηριστικές για τη διάσπαση του αέρα.



Σχήμα 2.3.1-2 : $E_d=f(d)$ για τον αέρα υπό κανονικές συνθήκες σε ομογενές πεδίο [1].



Σχήμα 2.3.1-3
Τάση διάσπασης του αέρα σε ομογενές πεδίο, ανάλογα με την απόσταση των ηλεκτροδίων και την πίεση [1]

Σχήμα 2.3.1-4
Τάση διάσπασης και πεδίο διάσπασης του αέρα, ανάλογα με την απόσταση των ηλεκτροδίων και την πίεση [1]

2.4 Τα μειονεκτήματα του συνδυασμού του αέρα με τα στερεά και τα υγρά μονωτικά

Τα αέρια μονωτικά έχουν το μειονέκτημα να προκαλούν βλάβες στα στερεά μονωτικά, που συνεργάζονται μαζί τους. Αυτό οφείλεται στις ξένες κυρίως επικαθίσεις, λόγω των οποίων μειώνονται οι αποστάσεις μόνωσης, με αποτέλεσμα την εκδήλωση εκκενώσεων στην επιφάνεια των στερεών μονωτικών. Προκαλούν επίσης βλάβες στα στερεά και στα υγρά μονωτικά, όταν εγκλωβίζονται σε αυτά, γιατί τότε επενεργούν ως ανεπιθύμητες ανομοιογένειες, οι οποίες μειώνουν (κυρίως λόγω μερικών εκκενώσεων) τη διηλεκτρική αντοχή των στερεών και υγρών μονωτικών [1].

3. ΤΑ ΥΓΡΑ ΜΟΝΩΤΙΚΑ

Τα υγρά μονωτικά υλικά έχουν αρκετά μεγαλύτερη διηλεκτρική αντοχή από ότι τα αέρια σε ατμοσφαιρική πίεση (πίνακας 1.2-1 διηλεκτρική αντοχή του αέρα 21kV/cm και διηλεκτρική αντοχή του μονωτικού ελαίου μετασχηματιστών 60 ÷ 200 kV/cm) . Η σημασία τους στις πρακτικές εφαρμογές είναι μεγάλη γιατί έχουν τα παρακάτω γνωρίσματα :

α) Μεγάλο συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας ($\approx 0,3 \cdot 10^{-3} \text{ cal / cms } ^\circ\text{C}$), με αποτέλεσμα να διευκολύνουν την απαγωγή θερμότητας, η οποία δημιουργείται στους αγωγούς, τις επαφές διακοπών και τους σιδηροπυρήνες μετασχηματιστών.

β) Ο συνδυασμός τους με στερεά μονωτικά δεν επιτρέπει την ύπαρξη αέρα, ο οποίος προκαλεί βλάβες στις επιφάνειες των στερεών μονωτικών. Αυτό επιτυγχάνεται όταν η πλήρωση του χώρου, που καταλαμβάνει το υγρό μονωτικό, γίνεται υπό συνθήκες κενού σε ορισμένη θερμοκρασία. Τυπικό παράδειγμα της διαδικασίας αυτής είναι η πλήρωση των δοχείων των μετασχηματιστών υψηλών τάσεων με λάδι.

Ο συνδυασμός, ειδικότερα χαρτί-λάδι έχει μεγάλη εφαρμογή, λόγω της περίπτωσης ίδιας σχετικής διηλεκτρικής σταθεράς, που έχουν τα υλικά αυτά.

Το κυρίως χρησιμοποιούμενο υγρό μονωτικό, σε μετασχηματιστές, καλώδια, διακόπτες και πυκνωτές, είναι το μονωτικό λάδι. **Παράγεται σαν κλάσμα της απόσταξης του πετρελαίου και η χημική του σύσταση διαφέρει με την προέλευση του πετρελαίου.**

Τα μονωτικά λάδια διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες:

- 1) Τα μεθανέλαια: Στα λάδια αυτά κυριαρχούν κεκορεσμένοι υδρογονάνθρακες τύπου παραφίνης. Από γεωλογική άποψη είναι τα παλαιότερα λάδια.
- 2) Τα ναφθανέλαια: Κυριαρχούν ακόρεστοι υδρογονάνθρακες τύπου ναφθαλίνης.
- 3) Τα ναφθαλμεθανέλαια: Είναι μείγμα των δύο προηγούμενων, χωρίς όμως να κυριαρχεί κανένας από τους δύο τύπους υδρογονανθράκων.

Η θερμοκρασία ανάφλεξης του μονωτικού ελαίου είναι 130 ÷ 250 °C. Γι 'αυτό ως μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας τους καθορίζεται στις προδιαγραφές (VDE, IEC κλπ.) η θερμοκρασία των 90°C.

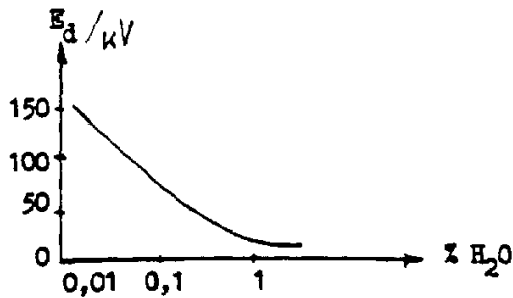
Τα μονωτικά λάδια δεν έχουν τοξικές ουσίες και είναι ακίνδυνα για το προσωπικό κατά τις διάφορες εργασίες κατασκευών και συντήρησης (εκτός βέβαια από εργασίες που μπορούν να προκαλέσουν τιμές της θερμοκρασίας στην περιοχή ανάφλεξης).

Τα μονωτικά λάδια οξειδώνονται από τον αέρα, με αποτέλεσμα να μειώνεται η διηλεκτρική αντοχή τους. Γι 'αυτό, η παρουσία του αέρα αποκλείεται στις κατασκευές που χρησιμοποιείται το μονωτικό λάδι.

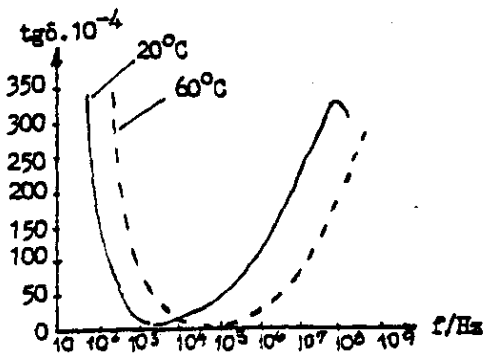
Η υγρασία προκαλεί δραστική μείωση στη διηλεκτρική αντοχή του μονωτικού ελαίου (Σχήμα 3-1).

Η $\text{tg}\delta$ των μονωτικών ελαίων (για συχνότητα 50 Hz και $0.5 \div 1$ kV) πρέπει να είναι μικρότερη από 0,005. Η μεταβολή της $\text{tg}\delta$ με τη συχνότητα δίνεται στο σχήμα 3-2.

Η διηλεκτρική αντοχή των μονωτικών ελαίων εξαρτάται, όπως εκείνη των αερίων και στερεών μονωτικών, από τη διάταξη των ηλεκτροδίων και τη μορφή της τάσης. Ισχύει δηλαδή ότι :



Σχήμα 3-1: Μείωση της διηλεκτρικής αντοχής του μονωτικού ελαίου ανάλογα με το ποσοστό του νερού[1].



Σχήμα 3-2: Μεταβολή της $\text{tg}\delta$ των μονωτικών ελαίων ανάλογα με τη θερμοκρασία και τη συχνότητα [1].

- 1) Όσο περισσότερο ανομοιογενές είναι το πεδίο, τόσο μειώνεται η τάση διάσπασης.
- 2) Η διηλεκτρική αντοχή υπό κρουστική τάση είναι μεγαλύτερη από ότι με εναλλασσόμενη τάση 50 Hz επί 1 min.
- 3) Η διηλεκτρική αντοχή υπό συνεχή τάση είναι μεγαλύτερη από ότι με εναλλασσόμενη τάση.
- 4) Η τάση διάσπασης κατά την καταπόνηση με κρουστικές τάσεις είναι μεγαλύτερη κατά την αρνητική πολικότητα από ότι κατά τη θετική (φαινόμενο πολικότητας).

Ο έλεγχος της διηλεκτρικής αντοχής των μονωτικών ελαίων γίνεται με ειδικές συσκευές. Τα ηλεκτρόδια που χρησιμοποιούνται για το σκοπό αυτό, καθώς και η διαδικασία δοκιμής, καθορίζονται ανάλογα με τον κανονισμό που θα γίνουν οι δοκιμές (VDE 0370/10 66, B.S.S. 148-195, A.S.T.M D870-49, C.E.I. 10-1 VI 1953). Γι' αυτό, όταν δίνονται τα αποτελέσματα ενός ελέγχου, είναι απαραίτητο να γίνεται αναφορά στον κανονισμό δοκιμών (π.χ. 50 kV κατά VDE).

Περισσότερες πληροφορίες για τον έλεγχο της διηλεκτρικής αντοχής θα πρέπει να αναζητηθούν στις προδιαγραφές που προαναφέρθηκαν.

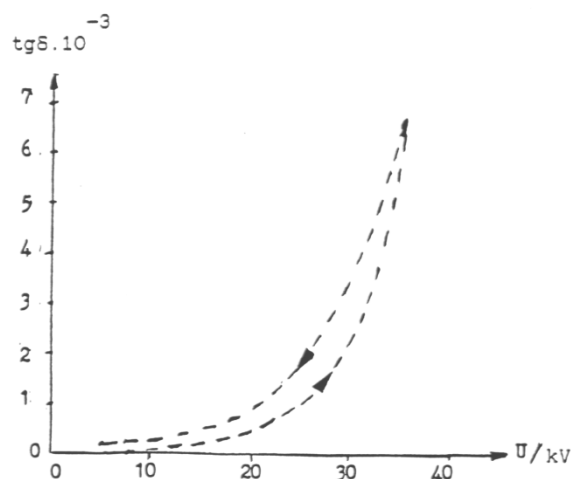
Στα μονωτικά υγρά ανήκουν επίσης υδρογονάνθρακες οι οποίοι έχουν υποστεί χλωρίωση (το χλώριο έχει αντικαταστήσει μεμονωμένα άτομα υδρογόνου), όπως : το Askarel, το ryranol, το Nerdin κλπ. Τα μονωτικά αυτά είναι άκαυστα και έχουν περίπου διπλάσια έως τριπλάσια διηλεκτρική σταθερά ως προς το μονωτικό έλαιο. Δεν χρησιμοποιούνται πλέον, γιατί περιέχουν τοξικά συστατικά, που μετατρέπονται βιολογικά στη φύση σε επικίνδυνες ουσίες.

Μία άλλη κατηγορία συνθετικών μονωτικών υγρών είναι υδρογονάνθρακες που έχουν υποστεί φθορίωση. Η διηλεκτρική σταθερά τους είναι μεγαλύτερη από εκείνη του μονωτικού ελαίου. Δεν προκαλούν φθορές στα στερεά μονωτικά και είναι άκαυστα υλικά. Η εφαρμογή τους είναι πρακτικά ανύπαρκτη λόγω του μεγάλου κόστους τους.

Ενα άλλο υγρό μονωτικό είναι το σιλικονούχο έλαιο (υδρογονάνθρακες που περιλαμβάνουν πυρίτιο). Είναι εύφλεκτο υλικό και γι' αυτό έχει πολύ περιορισμένη πρακτική εφαρμογή [1].

3.1 Τα φαινόμενα γήρανσης και διάσπασης στο μονωτικό λάδι

Τα φαινόμενα γήρανσης και διάσπασης του μονωτικού ελαίου 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

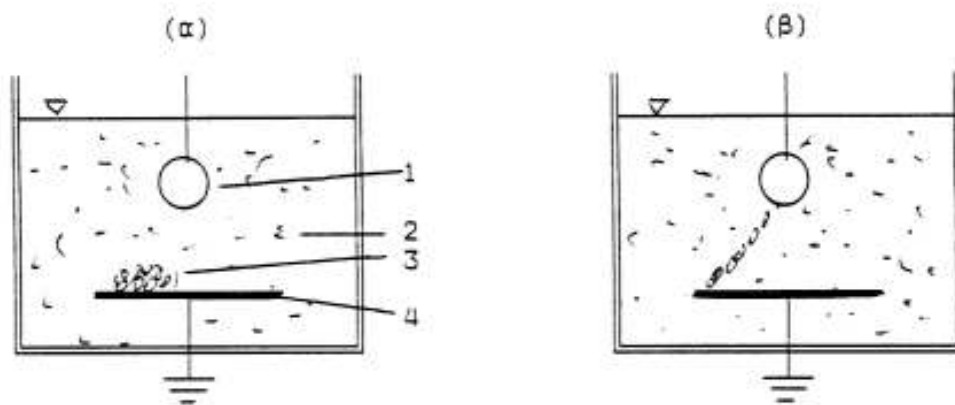


Σχήμα 3.1-1 : $\text{tg}\delta=f(U)$ στο λάδι μετασχηματιστών [1].

διάσπαση των στερεών μονωτικών. Η δυσκολία για τη μελέτη των παραπάνω παραγόντων στο λάδι, οφείλεται στην αλλαγή της μοριακής δομής του μετά από μία τιμή της εφαρμοζόμενης τάσης. Η αλλαγή αυτή διαπιστώνεται

πειραματικά από την αύξηση της τιμής $tg\delta$ μετά από καταπόνηση (Σχήμα 3.1-1).

Εκτός από τους παράγοντες αυτούς, που εξετάζονται στα στερεά μονωτικά 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 αγώγιμες γέφυρες μεταξύ των ρευματοφόρων μερών με διαφορετικό δυναμικό. Το φαινόμενο αυτό μπορεί εύκολα να διαπιστωθεί πειραματικά με τη διάταξη του σχήματος 3.1-2 όπου τα μικρά τεμάχια χαρτιού (3) διατάσσονται κατά την εφαρμογή της τάσης μεταξύ των ηλεκτροδίων [1].



Σχήμα 3.2.1-2: Πειραματική απόδειξη για τη διάταξη των αιωρούμενων σωματιδίων στο μονωτικό λάδι, υπό μορφή γέφυρας μεταξύ των ηλεκτροδίων [1].

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.

3.2 Τεχνικά χαρακτηριστικά των υγρών μονωτικών υλικών

Κατά την εκλογή ενός μονωτικού ελαίου σε μια ηλεκτροτεχνική εφαρμογή θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη τα κάτωθι χαρακτηριστικά :

α)Ιξώδες : Το ιξώδες προσδιορίζει την ικανότητα ψύξεως και μεταβάλλεται συναρτήσει της θερμοκρασίας. Για την καλύτερη απαγωγή της θερμότητας σε

έναν μετασχηματιστή, όπου υπάρχουν μικρά διάκενα μεταξύ των τυλιγμάτων του, είναι απαραίτητο το μονωτικό λάδι να χαρακτηρίζεται από χαμηλό ιξώδες, έτσι ώστε να ρέει ευκολότερα ανάμεσα στα τυλίγματα.

β)Μονωτική ικανότητα : Σχεδόν όλα τα μονωτικά λάδια στο σύνολό τους είναι κάλοι μονωτές. Εντούτοις, σε μεγάλο βαθμό ενδιαφέρει η μείωση της διηλεκτρικής αντοχής του ελαίου, λόγω της παρουσίας υγρασίας, η οποία θα πρέπει να αποφεύγεται αυστηρώς. Μια πολύ μικρή ποσότητα υγρασίας, εντός του ελαίου, μειώνει σε μεγάλο βαθμό την αξία του μονωτικού, ενώ η παρουσία σκόνης και μικρών ινών τείνει να δημιουργήσει οδούς μεγάλης αγωγιμότητας.

γ)Σημείο αναφλέξεως : Είναι η θερμοκρασία στην οποία το μονωτικό έλαιο, θερμαινόμενο εντός ειδικής συσκευής (Pensky – Martens), αναδίδει ατμούς, σε ποσότητα τέτοια ώστε αναμιγνυόμενοι με τον ατμοσφαιρικό αέρα να σχηματίζουν εύφλεκτο μίγμα και με την παρουσία σπινθήρα να αναφλέγονται αυτοστιγμεί. Για λόγους ασφαλείας και αξιοπιστίας του ηλεκτρολογικού εξοπλισμού το σημείο αναφλέξεως θα πρέπει να είναι τουλάχιστον ίσο προς 130°C.

δ)Σημείο καύσεως : Είναι η θερμοκρασία στην οποία το έλαιο, θερμαινόμενο υπό κανονικές συνθήκες δοκιμής, αναδίδει ατμούς επάρκειας τέτοιας, ώστε να αναφλεγεί και να συνεχίσει καιόμενο. Η θερμοκρασία αυτή είναι περίπου 25% υψηλότερα του σημείου αναφλέξεως.

ε)Καθαρότητα : Το έλαιο δεν πρέπει να περιλαμβάνει προσμίξεις όπως είναι το θείο και ενώσεις αυτού. Η παρουσία θείου προκαλεί διάβρωση των μεταλλικών τμημάτων και επιταχύνει την παραγωγή ιζήματος (λάσπης).

στ)Σχηματισμός ιζήματος : Η ευκολία με την οποία σχηματίζεται ίζημα αποτελεί μεγάλης σημασίας χαρακτηριστικό, ιδιαίτερα στην περίπτωση των μετασχηματιστών. Πρόκειται για τον βραδύ σχηματισμό ημιστερεών υδρογονανθράκων, ενίοτε οξειδωμένης μορφής, οι οποίοι επικάθονται επί των τυλιγμάτων και των τοιχωμάτων του δοχείου του μετασχηματιστή. Ο σχηματισμός του ιζήματος συνδέεται άμεσα με την θερμοκρασία και την οξείδωση του λαδιού. Το ίζημα σχηματιζόμενο, καθιστά το σύνολο του μετασχηματιστή θερμότερο, όσο δε αυξάνει η θερμοκρασία μεταβάλλει προς το

χειρότερο την κατάσταση από απόψεως ιζήματος, έως ότου αποφραχθούν τελικώς οι σωληνώσεις ψύξεως και ο μετασχηματιστής καταστεί ακατάλληλος προς χρήση, λόγω υπερθέρμανσης. Η εμπειρία δείχνει ότι το ίζημα σχηματίζεται ταχύτερα εκεί που υπάρχουν στιλπνές επιφάνειες χαλκού.

ζ)Οξύτητα : Μεταξύ των παραγόμενων προϊόντων οξειδώσεως του λαδιού είναι το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂), πτητικά οργανικά και ανόργανα οξέα διαλυτά στο νερό και νερό. Τα παραπάνω προϊόντα σε συνδυασμό δύναται να προσβάλουν και να διαβρώσουν τα μεταλλικά τμήματα του μετασχηματιστή. Για τον λόγο αυτό υπάρχουν ειδικές διατάξεις που εμποδίζουν την είσοδο του υγρού αέρα στο δοχείο λαδιού και επιπλέον απομακρύνουν τα ανεπιθύμητα προϊόντα οξείδωσης.

η)Δυνατότητα εμπλουτισμού του ελαίου : Η αλλοίωση του ελαίου κατά τη διάρκεια της χρησιμοποίησής του είναι δυνατόν να επιβραδυνθεί με εμπλουτισμό του, κατά την κατεργασία του, με αντιοξειδωτικά μέσα (oxidation inhibitors). Τα αντιοξειδωτικά αυτά, τα οποία συνήθως είναι τύπου φαινόλης ή αμίνης, μετατρέπουν τα εις το έλαιο σχηματισμένα μοριακά συγκροτήματα σε αδρανή μόρια, καταναλισκόμενα βαθμιαία κατά τη λειτουργία. Οι αντιοξειδωτικές ουσίες εμπλουτισμού αυξάνουν σημαντικά την διάρκεια χρησιμοποίησεως του ελαίου, αφού ο σχηματισμός οξέων και ιζήματος είναι κατ' ουσία μηδενικός [3].

	Πυκνότητα gr/cm ³	Ειδική αντίσταση Ω cm	Διηλεκτρική αντοχή kV/cm	Διηλεκτρική σταθερά	Συντελεστής απωλειών	Σημείο ανάφλεξης °C	Μέγιστη επιτρεπόμενη θερμοκρασία
Ορυκτέλαιο	<0,89	10 ¹⁴	110	2,2	10 ⁻³	130	90°C
Βαζελίνη (>55°C)	0,90	10 ¹⁵	300	2,2	10 ⁻⁴	130	90 °C
πολυισοβουτυλένιο	0,85	10 ¹⁴	150	2,2	10 ⁻³	200	85 °C
Έλαιο σιλικόνης	0,96	10 ¹⁵	100	2,8	10 ⁻⁴	300	150 °C

Πίνακας 3.2 -1 : Τεχνικές ιδιότητες ορισμένων υγρών μονωτικών υλικών [3].

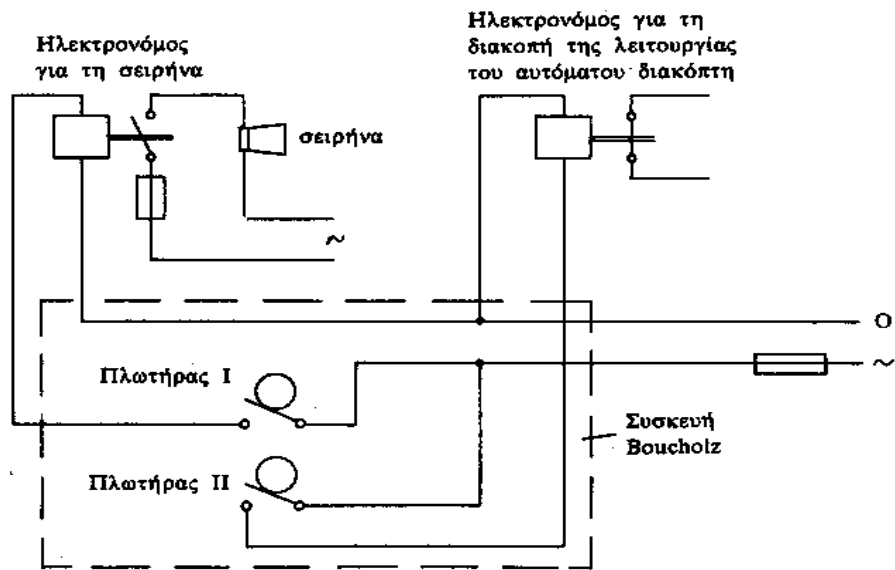
3.3 Μέσα ελέγχου της μονωτικής ικανότητας του λαδιού κατά τη λειτουργία των μετασχηματιστών

Η υγρασία και τα αέρια, που δημιουργούνται κατά τη γήρανση του μονωτικού λαδιού, μειώνουν δραστικά τη διηλεκτρική αντοχή του. Για την αποφυγή βλαβών και ατυχημάτων προβλέπονται μέσα ελέγχου που προειδοποιούν, κατά τη λειτουργία του μετασχηματιστή, για την μείωση της μονωτικής ικανότητας του λαδιού. Προβλέπεται επίσης, προστασία του μετασχηματιστή, όταν η μείωση της διηλεκτρικής αντοχής του λαδιού είναι σημαντική. Πρόκειται για τον αφυγραντήρα και τη συσκευή Boucholz, που πρέπει να περιλαμβάνει κάθε μετασχηματιστής.

Ο αφυγραντήρας τοποθετείται στο δοχείο διαστολής του μετασχηματιστή και περιέχει στο εσωτερικό του siticagel. Πρόκειται για υλικό το οποίο έχει την ικανότητα να απορροφά την υγρασία και παράλληλα να αλλάζει το χρώμα του από γαλάζιο σε κόκκινο ανάλογα με το ποσοστό υγρασίας που αυτό περιέχει. Παρακολουθώντας το χρώμα του siticagel στον αφυγραντήρα μπορούμε να διαπιστώσουμε την κατάσταση του μονωτικού λαδιού. Στην περίπτωση που διαπιστωθεί ότι το siticagel έχει κόκκινο χρώμα τότε αυτό σημαίνει ότι είναι κορεσμένο από υγρασία και το λάδι του μετασχηματιστή θα πρέπει να υποβληθεί σε ξήρανση για την απομάκρυνση της υγρασίας. Η διαδικασία της ξήρανσης του μονωτικού λαδιού καθορίζεται από διεθνείς κανονισμούς, και περιλαμβάνει την θέρμανση του λαδιού για 3 ως 6 ώρες σε θερμοκρασία περίπου 140°C.

Η αρχή λειτουργίας της συσκευής Boucholz (Σχήμα 3.3 -1) βασίζεται στα αέρια που παράγονται κατά τη μείωση της διηλεκτρικής αντοχής του λαδιού. Τα παραγόμενα αέρια διέρχονται από τη συσκευή Boucholz, η οποία έχει δύο πλωτήρες I και II. Όταν ο χώρος του Boucholz καταλαμβάνεται μόνο από λάδι, τότε οι πλωτήρες αυτοί είναι δύο ανοιχτές επαφές. Κατά τη μείωση της διηλεκτρικής αντοχής του μονωτικού λαδιού τα παραγόμενα αέρια εισχωρούν στο χώρο όπου βρίσκονται οι πλωτήρες.

Όταν το ποσοστό τους είναι μικρό τότε κλείνει ο πλωτήρας I και ενεργοποιείται έτσι το κύκλωμα της σειρήνας. Για μεγαλύτερο ποσοστό των αερίων κλείνει και ο πλωτήρας II, με αποτέλεσμα να τεθεί εκτός λειτουργίας ο αυτόματος διακόπτης. Η συσκευή Boucholz διαθέτει χειροκίνητη βαλβίδα εξερισμού, η οποία είναι απαραίτητη κατά την πρώτη εγκατάσταση ή μετά την αντικατάσταση του λαδιού. Με λήψη δείγματος των παραγόμενων αερίων από τη συσκευή Boucholz και χημική ανάλυση αυτών, μπορεί να εκτιμηθεί η κατάσταση του μονωτικού λαδιού και του μετασχηματιστή γενικότερα [3].



Σχήμα 3.3 -1 : Κύκλωμα της προστασίας Boucholz [1].

4. ΦΑΙΝΟΜΑΙΝΑ ΠΡΟ ΚΑΙ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΣΠΑΣΗ ΤΩΝ ΣΤΕΡΕΩΝ ΜΟΝΩΤΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Τα φαινόμενα προ και κατά τη διάσπαση των ηλεκτρομονωτικών αερίων έχουν επεξηγηθεί ικανοποιητικά. Αυτό οφείλεται βασικά στη μικρή σταθερότητα των μορίων τους, ως προς εκείνη των υγρών και προ πάντων των στερεών μονωτικών, με αποτέλεσμα να επανέρχεται το αέριο μετά τη διάσπαση (ή την εκδήλωση μερικών εκκενώσεων) στην αρχική του κατάσταση. Στα στερεά μονωτικά, η ικανότητα δημιουργίας ιόντων είναι κατά πολύ μικρότερη και η διάτρηση έχει σαν αποτέλεσμα κάποια μόνιμη βλάβη σε αυτά (κάψιμο, τήξη, μηχανικές κακώσεις, κλπ.). Επίσης, τα φαινόμενα που εκδηλώνονται προ της διάσπασης των στερεών μονωτικών, καθώς και εκείνα κατά την επιφανειακή διάσπαση ή την υπερπήδηση, προκαλούν συνήθως μόνιμες βλάβες σε βάρος της διηλεκτρικής αντοχής των στερεών διηλεκτρικών. Αυτή ακριβώς η ιδιότητα των στερεών μονωτικών υλικών, να μην επανέρχονται στην αρχική τους κατάσταση, αλλά να καταστρέφονται κατά τη διάσπαση ή να αποκτούν συνήθως μόνιμες βλάβες (λόγω επιφανειακής διάσπασης, υπερπήδησης και μερικών εκκενώσεων) είναι η βασική δυσκολία για τη μελέτη του μηχανισμού της γήρανσης της διάσπασής τους.

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 επιβράδυνση τους στα ηλεκτρόδια. Πρόκειται δηλαδή για μία συσχέτιση των φαινομένων προ και κατά τη διάσπαση, με το φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, που εκπέμπεται.

Στο κεφάλαιο αυτό εξετάζονται οι δύο θεωρίες, που προαναφέρθηκαν, καθώς και ο συνδυασμός τους. Επίσης, εξετάζεται ξεχωριστά η διάτρηση από την επιφανειακή διάτρηση και την υπερπήδηση [1].

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

Όπως προαναφέρθηκε, 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 :

- α) οι απώλειες Joule,
- β) οι δυνάμεις Coulomb,
- γ) οι μερικές εκκενώσεις, και
- δ) η θερμοκρασία του περιβάλλοντος.

Οι αντίστοιχες προς τους παραπάνω παράγοντες θεωρητικές μορφές της διάτρησης είναι :

- α) η θερμική διάτρηση,
- β) η ηλεκτρική διάτρηση (που διακρίνεται στη δένδροειδή και την ηλεκτρομηχανική),
- γ) η ηλεκτροχημική διάτρηση (ή γήρανση), και
- δ) η θερμοχημική διάτρηση.

Στην πράξη βέβαια συνδυάζονται οι παράγοντες αυτοί και υποβοηθούνται από διάφορες ειδικές συνθήκες που επικρατούν (μορφή ηλεκτρικού πεδίου, περιβάλλον μέσο, κλπ.), έτσι ώστε η αλλαγή της μοριακής δομής να είναι κάποιο από κοινού αποτελεσμά τους [1].

4.1.1 Η θερμική διάτρηση

Η μορφή της διάτρησης αυτής συναντάται κυρίως σε χαμηλές τιμές της τάσης, όταν το στερεό μονωτικό καταπονείται θερμικά μόνο από τις απώλειες Joule (π.χ. κακή απαγωγή θερμότητας από τη μόνωση ενός καλωδίου λόγω σκόνης και ύγρανσης). Η εικόνα που παρουσιάζει το θερμικά καταπονούμενο υλικό είναι συνήθως η απανθράκωση και η τήξη του, στην περιοχή όπου οι απώλειες Joule είναι ιδιαίτερα αυξημένες [1].

4.1.2 Η ηλεκτρική διάτρηση

Όταν η σταθερή ενεργός τιμή της τάσης, που εφαρμόζεται στο δοκίμιο, είναι αρκετά μεγαλύτερη από εκείνη για τη θερμική διάτρηση, τότε η πεδιακή ένταση γίνεται μεγαλύτερη και επομένως μπορεί να αυξηθεί η ενέργεια των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων μέσα στο μονωτικό υλικό.

Από μία τιμή της τάσης και μετά η διάτρηση του υλικού αποδίδεται κυρίως στις δυνάμεις Coulomb. Θεωρείται, ότι η διάτρηση οφείλεται σε :

- α) αυτοσυντηρούμενο ιονισμό με κρούσεις (όπως στα αέρια μονωτικά), ή
- β) μηχανική τάνυση του υλικού (διαχωρισμό του σε αρνητικούς και θετικούς φορείς υπό την επίδραση των δυνάμεων του ηλεκτρικού πεδίου), ή
- γ) συνδυασμό των δύο παραπάνω περιπτώσεων.

Η μορφή της διάτρησης αυτής ονομάζεται ηλεκτρική και διακρίνεται, ανάλογα με την εικόνα που παρουσιάζει το ηλεκτρικό τόξο κατά τη διάτρηση, στη δενδροειδή (θύσανοι κάθετοι προς το ηλεκτρικό πεδίο) και εκείνη υπό μορφή οχητού κατά τη διεύθυνση του πεδίου (ηλεκτρομηχανική) [1].

4.1.3 Η διάσπαση λόγω μερικών εκκενώσεων (ηλεκτροχημική διάσπαση ή γήρανση της μόνωσης)

1) Γενικά περί των μερικών εκκενώσεων

Η διάσπαση των στερεών μονωτικών έχει, στις περισσότερες περιπτώσεις, την αφετηρία της στις μερικές εκκενώσεις στην επιφάνεια και στον όγκο τους. Οι μερικές εκκενώσεις εμφανίζονται σε φυσαλίδες αερίων ή γενικά θέσεις ανομοιογένειας μέσα στον όγκο του μονωτικού (εσωτερικές μερικές

εκκενώσεις), καθώς και σε θέσεις ανομοιογένειας ή ξένες επικαθίσεις (ηλεκτρικές ακαθαρσίες) στην επιφάνεια του (εξωτερικές εκκενώσεις).

2) Η τεχνητή γήρανση

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

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

3) Μία ερμηνεία του ισοδύναμου κυκλώματος των μερικών εκκενώσεων κατά Gemant και Philipoff, μέσω σύγκρισης της ηλεκτρικής καταπόνησης με τη μηχανική καταπόνηση.

Για την ερμηνεία της μηχανικής καταπόνησης των στερεών υλικών χρησιμοποιούνται μηχανικά πρότυπα, που βασίζονται σε δύο γραμμικά στοιχεία : το ελαστικό και το ιξώδες. Το πρώτο εκφράζει τη μεταβολή της τροπής λόγω της ακαριαίας επιβολής (ή αφαίρεση) φορτίου σε ένα στερεό υλικό και το δεύτερο τη διαχρονική μεταβολή της τροπής. Το ελαστικό στοιχείο θεωρείται ότι είναι ένα ελατήριο και το ιξώδες η αντίσταση ροής ενός συνεκτικού υγρού, το οποίο γεμίζει το χώρο ενός κυλίνδρου κάτω από ένα έμβολο, κατά τρόπο ώστε να διαρρέει από ένα μικρό κενό μεταξύ κυλίνδρου και εμβόλου ή από μία τρύπα στο έμβολο. Από τη σύνδεση των δύο παραπάνω στοιχείων σε σειρά προκύπτει το μοντέλο Maxwell (σχήμα 4.1.3-1 , α), για το οποίο ισχύει :

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{d\sigma}{dt} E + \frac{\tau}{\kappa} \quad (4.1.3-1)$$

Όπου ε η τροπή, τ η μηχανική τάση, E το μέτρο ελαστικότητας, κ μία σταθερά του υλικού και t ο χρόνος. Επειδή η μεταβολή της τροπής $d\varepsilon$ αντιστοιχεί σε μία μεταβολή του μήκους κατά dL και η μηχανική τάση είναι ανάλογη της δύναμης, έπεται ότι :

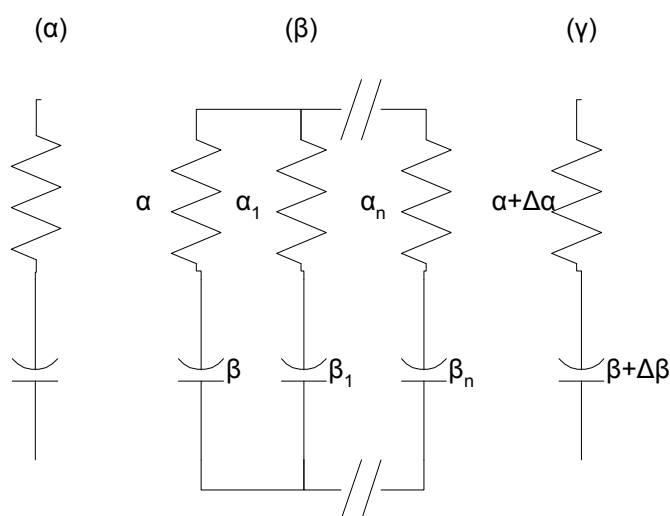
$$\frac{dL}{dt} = \alpha \frac{dF}{dt} + \beta F \quad (4.1.3-2)$$

όπου α και β σταθερές του υλικού. Η παραπάνω σχέση αφορά τη συμπεριφορά του ομοιογενούς στερεού, γιατί οι τιμές α και β δεν μεταβάλλονται με την καταπόνηση. Ένα μοντέλο για τη συμμετοχή των θέσεων ανομοιογένειας σε ένα στερεό υλικό φαίνεται ότι μπορεί να γίνει με την παράλληλη σύνδεση πολλών μοντέλων Maxwell (σχήμα 4.1.3. β και γ), ένα εκ των οποίων αντιστοιχεί στο βασικό υλικό και τα υπόλοιπα στις επιμέρους ανομοιογένειες του. Η μεταβολή του μήκους κατά dL στο μοντέλο αυτό μπορεί να δοθεί από την παραπάνω σχέση, με την εισαγωγή των συντελεστών A και B του υλικού, όπου:

$$A = \alpha + \Delta\alpha \quad (4.1.3-3)$$

και

$$B = \beta + \Delta\beta \quad (4.1.3-4)$$



Σχήμα 4.1.3-1 : (α) Στοιχείο Maxwell και μηχανικό μοντέλο του ανομοιογενούς στερεού υλικού.

(β) Αναλυτικό μοντέλο.

(γ) Απλουστευμένο μοντέλο.[1]

όπου $\Delta\alpha$ και $\Delta\beta$ οι αντίστοιχες μεταβολές των συντελεστών A και B, ως προς τις σταθερές α και β του βασικού υλικού.

Κατ' αναλογία προς την σχέση 4.1.3-2 έχουμε επομένως:

$$\frac{dL}{dt} = (\alpha + \Delta\alpha) \frac{dF}{dt} + (\beta + \Delta\beta) F \quad (4.1.3-5)$$

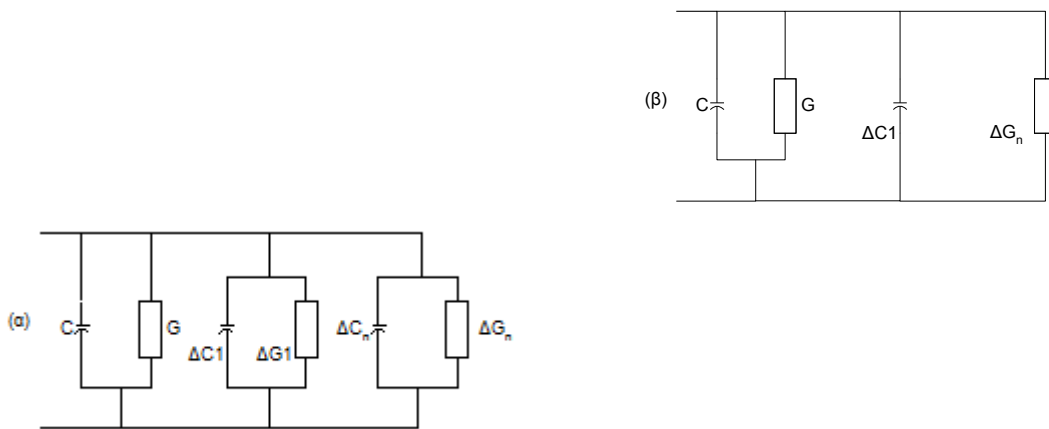
Από την αναλογία μεταξύ μηχανικών και ηλεκτρικών μεγεθών κατά G. Oberdorffer (Πίνακας 4.1.3-1), μπορούμε να καταλήξουμε (κατά την εφαρμογή μίας ηλεκτρικής τάσης στο υλικό) στη σχέση :

$$\frac{dQ}{dt} = (C + \Delta C) \frac{dU}{dt} + (G + \Delta G) U \quad (4.1.3-6)$$

από την οποία φαίνεται ότι ο συντελεστής $C+\Delta C$ είναι η χωρητικότητα του ανομοιογενούς υλικού (όταν έχει μονωτικές ιδιότητες), ενώ ο $G+\Delta G$ η αγωγιμότητα του (όταν έχει αγώγιμες ιδιότητες). Το ομοιογενές στερεό μονωτικό δίνεται από την παραπάνω σχέση για $\Delta C=0$ και $\Delta G=0$, ενώ για $C+\Delta C=0$ το στερεό υλικό είναι μία ωμική αντίσταση. Από τη σχέση (4.1.3-6) καταλήγει κανείς στο ισοδύναμο κύκλωμα του σχήματος 4.1.3-2 [1].

Ηλεκτρομαγνητικό πεδίο	Μηχανικό σύστημα
Τάση	Δύναμη
Ρεύμα	Ταχύτητα
Ηλεκτρικό φορτίο	Επιμήκυνση
Ωμική αντίσταση	Τριβή
Αυτεπαγωγή	Μάζα
Χωρητικότητα	Ελαστικότητα

Πίνακας 4.1.3-1 : Αναλογίες μεταξύ ηλεκτρομαγνητικών και μηχανικών μεγεθών [1]



Σχήμα 4.1.3-2 : Ισοδύναμο κύκλωμα για την αύξηση της χωρητικότητας λόγω ανομοιογενειών στο στερεό μονωτικό υλικό

α : πλήρες ισοδύναμο κύκλωμα

β : απλουστευμένο ισοδύναμο κύκλωμα [1]

4.1.4 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 (σχέση 1.6-3 και σχέση 1.6-4). 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 του 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 και δίνεται από τη σχέση :

$$U_{\alpha} = \sqrt{\alpha \frac{\kappa \cdot \theta}{\sigma_0}} \quad (4.1.4-1)$$

όπου α σταθερά του υλικού που εξαρτάται από τη μορφή της τάσης. Η σταθερά α έχει την τιμή 2,83 για καταπόνηση με συνεχή τάση, ενώ για εναλλασσόμενη τάση είναι 1,88.

Η θερμική τάση ανατροπής αποτελεί το κριτήριο για το τεχνικοοικονομικό πάχος των στερεών μονωτικών στις πρακτικές εφαρμογές (όπως μετασχηματιστές, καλώδια κλπ.). Η τιμή είναι για τα περισσότερα υλικά, σε θερμοκρασία περιβάλλοντος 20°C και καταπόνηση με εναλλασσόμενη τάση 50 Hz, της τάξης του 1 MV.

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 δια κρούσεως σε αρκετά μικρότερες τιμές του πεδίου απ' ότι κατά την καταπόνηση σε θερμοκρασία περιβάλλοντος 20°C [1].

4.1.5 Συνδυασμοί των παραγόντων γήρανσης και διάτρησης

Σύμφωνα με τα αναφερόμενα στην παράγραφο 4.1 τα φαινόμενα προ και κατά τη διάτρηση των στερεών μονωτικών μπορούν να αποδοθούν σε τέσσερις βασικούς παράγοντες αποσταθεροποίησης των μορίων (απώλειες Joule, δυνάμεις Coulomb, μερικές εκκενώσεις και θερμότητα του περιβάλλοντος), οι οποίοι χαρακτηρίζονται ως παράγοντες γήρανσης και διάτρησης. Οι παράγοντες αυτοί συνδυάζονται στην πράξη με διαφορετική βαρύτητα, ανάλογα με την περίπτωση καταπόνησης του στερεού μονωτικού.

Στον πίνακα 4.1.5-1 δίνονται συνοπτικά οι βασικές περιπτώσεις συνδυασμού των παραγόντων γήρανσης και διάτρησης. Οι θεωρητικές σχέσεις του πίνακα 4.1.5-1 δεν δίνουν τη δυνατότητα υπολογισμού της τάσης διάτρησης (γιατί περιλαμβάνουν αρκετές άγνωστες τιμές, που πρέπει να βρεθούν με μετρήσεις), δίνουν όμως τη δυνατότητα κατανόησης των φαινομένων, όταν οι μετρήσεις ηλεκτρικών μεγεθών συνδυάζονται με παρατηρήσεις σχετικά με την αλλαγή της μοριακής δομής [1].

α/α	Παράγοντες που συμμετέχουν στην αλλαγή της μοριακής δομής	Θεμελιώδεις σχέσεις	Οριακή τιμή της τάσης για τη διάτρηση

1	Συνδυασμός της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος με τους άλλους παράγοντες διάτρησης	<p>Η θερμότητα του περιβάλλοντος μέσου ενισχύει συνήθως όλους τους παράγοντες γήρανσης και διάτρησης</p>	
2	Μερικές εκκενώσεις και απώλειες Joule	<p>1) $\sigma = \frac{\sigma_0 e^{\beta\theta}}{(1-\delta E)^2}$</p> <p>2) $\frac{\sigma_0 e^{\beta\theta} A}{(1-\delta E)^2 d} = \kappa 2\pi r \delta\theta$</p>	<p>$u_{\theta\epsilon} = d(1-\delta E) \sqrt{\frac{2\kappa}{e\beta\sigma_0}}$</p> <p>(μείωση της τάσης για τη διάτρηση:</p> <p>$\Delta u_1 = \delta E d \sqrt{\frac{2\kappa}{e\beta\sigma_0}}$)</p>
3	Μερικές εκκενώσεις και δυνάμεις Coulomb	<p>1) $\sigma = \frac{\sigma_0 e^{\beta\theta}}{(1-\delta E)^2}$</p> <p>2) $\frac{u^2 \sigma A}{(1-\delta E)^2 d} = C_0 \frac{d\theta}{dt}$</p>	<p>$u_{\eta\epsilon} = (1-\delta E) \sqrt{d} \sqrt{\frac{C_0 \theta}{\sigma A T_\delta}}$</p> <p>(μείωση της τάσης για τη διάτρηση:</p> <p>$\Delta u_3 = \delta E \sqrt{d} \sqrt{\frac{C_0 \theta}{\sigma A T_\delta}}$</p>
4	Μερικές εκκενώσεις και θερμοκρασία περιβάλλοντος	<p>1) $u_\alpha = \sqrt{\alpha \frac{\kappa\theta}{\sigma}}$</p> <p>2) $\sigma = \frac{\sigma_0 e^{\beta\theta}}{(1-\delta E)^2}$</p>	<p>$U_{\alpha\epsilon} = (1-\delta E) \sqrt{\alpha \frac{\kappa\theta}{\sigma_0}}$</p> <p>(μείωση της τάσης για τη διάτρηση:</p> <p>$\Delta u_4 = \delta E \sqrt{\frac{\kappa\theta}{\sigma_0}}$</p>

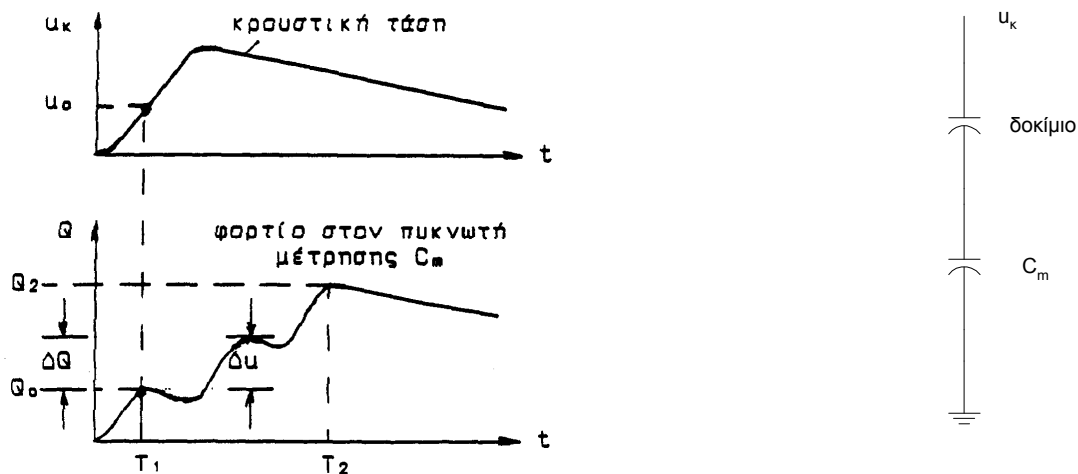
5	Συνδυασμός των τεσσάρων* βασικών παραγόντων διάτρησης	$\frac{u^2 e^{\beta\theta} A}{d(1-\delta E)^2} = 2\pi r d k \theta + C_o \left(\frac{d\theta}{dt} \right)$	Εξαρτάται κυρίως από τον παράγοντα που υπερिशύει κατά τη διάτρηση
---	---	---	---

Πίνακας 4.1.5-1 : Βασικές σχέσεις μίας θεωρητικής ερμηνείας για τη γήρανση και διάτρηση των στερεών μονωτικών [1].

* : Μερικές εκκενώσεις, απωλειών Joule, δυνάμεις Coulomb και θερμοκρασία περιβάλλοντος.

4.1.6 Στατικές μετρήσεις των μερικών εκκενώσεων

Για την πειραματική έρευνα των μερικών εκκενώσεων, μέσω παλμογραφημάτων (ή μετρήσεων των κυματομορφών σε ηλεκτρονικό υπολογιστή, μέσω αναλογικού – ψηφιακού μετατροπέα), έχουν προταθεί διάφορες έννοιες, όπως π.χ. στο σχήμα 4.1.6-1 για μετρήσεις με κρουστικές τάσεις. Με παρόμοιες σκέψεις, μπορεί κανείς να καθορίσει μεγέθη για τη μελέτη των μερικών εκκενώσεων κατά την καταπόνηση με άλλες μορφές τάσεων, καθώς και με άλλα τετράπολα μέτρησης (συνήθως ωμική αντίσταση, αντί του πυκνωτή, ή συνδυασμός των δύο αυτών στοιχείων μέτρησης, σχήμα 4.1.6-2). Στο σχήμα π.χ. 4.1.6-3 δίνεται ένα παράδειγμα καθορισμού εννοιών, για παλμογραφήματα των μερικών εκκενώσεων, υπό ημιανορθωμένη τάση καταπόνησης.



Σχήμα 4.1.6-1 : Παράδειγμα καθορισμού ορισμένων εννοιών για τη στατιστική μελέτη των μερικών εκκενώσεων σε στερεά μονωτικά, των πρακτικών εφαρμογών, υπό κρουστικές τάσεις καταπόνησης [1].

T_1 : Χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων.

T_2 : Χρόνος περαίωσης των μερικών εκκενώσεων.

Q_0 : Φορτίο έναρξης των μερικών εκκενώσεων.

Q_2 : Φορτίο περαίωσης των μερικών εκκενώσεων.

u_k : Στιγμιαία τιμή της εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης.

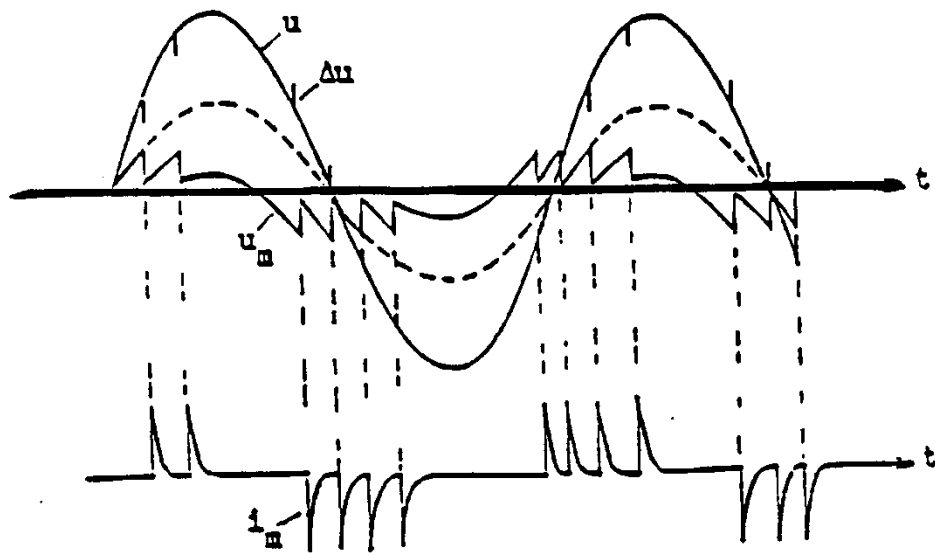
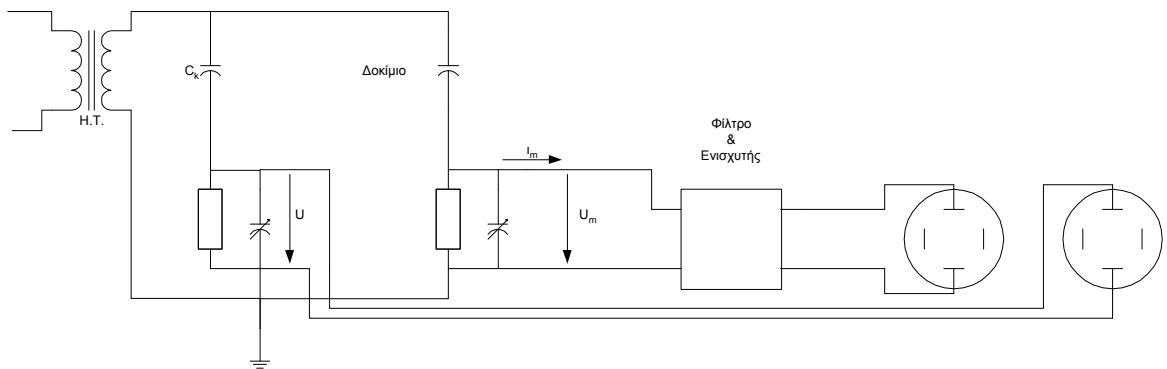
u_0 : Τάση έναρξης των μερικών εκκενώσεων
(στιγμιαία τιμή).

Δu : Αλμα δυναμικού.

ΔQ : Αύξηση δυναμικού.

Με βάση τις παραπάνω έννοιες έχουν σχεδιαστεί διάφορες χαρακτηριστικές, όπως : η χαρακτηριστική $Q = f(\hat{U}_k)$, η χαρακτηριστική $u_0 = f(\hat{U}_k)$, ο χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων σε συνάρτηση με την μέγιστη τιμή της τάσης, κλπ. . Οι τιμές των χαρακτηριστικών αυτών βασίζονται συνήθως σε μετρήσεις επί ενός αρκετά μεγάλου αριθμού δοκιμίων. Ιδιαίτερη σημασία έχει η χαρακτηριστική $Q = f(\hat{U}_k)$, η οποία φαίνεται ότι είναι εκθετικής μορφής (σχήμα 4.1.6-4), με αποκλίσεις από αυτήν, που έχουν αποδοθεί στη στατιστικότητα των ανομοιογενειών των στερεών μονωτικών των πρακτικών εφαρμογών,

καθώς και στην εκδήλωση και άλλων παραγόντων μείωσης της διηλεκτρικής αντοχής, όπως π.χ. των δυνάμεων Coulomb κατά την καταπόνηση οργανικών στερεών μονωτικών με κρουστικές τάσεις της μορφής 1,2/50μs ή 10/200μs, όπου παρατηρούνται μηχανικές βλάβες (θραύσματα) στο υλικό σε βάρος της εκδήλωσης των μερικών εκκενώσεων. Στο σχήμα 4.1.6-5 δίνεται ένα τυπικό παράδειγμα τεχνητής γήρανσης, από όπου φαίνεται η σημαντική μείωση των αλμάτων δυναμικού κατά την 90^η κρούση, ως προς την 60^η. Από ταυτόχρονες παρατηρήσεις της εικόνας των επιφανειακών διαταραχών, εύκολα διαπιστώνεται, ότι η μείωση των αλμάτων δυναμικού (και επομένως του φορτίου Q στον πυκνωτή μέτρησης) σχετίζεται με τις μηχανικές κακώσεις (θραύσματα) στην επιφάνεια του μονωτικού.



Σχήμα 4.1.6-2 : Απλοποιημένο κύκλωμα μέτρησης των μερικών εκκενώσεων μέσω «ωμικού – χωρητικού» τετράπολου μέτρησης, κατά την καταπόνηση του δοκιμίου με εναλλασσόμενη τάση 50 Hz [1].

H.T. : Μετασχηματιστής υψηλής τάσης.

C_k : Πυκνωτής υψηλής τάσης.

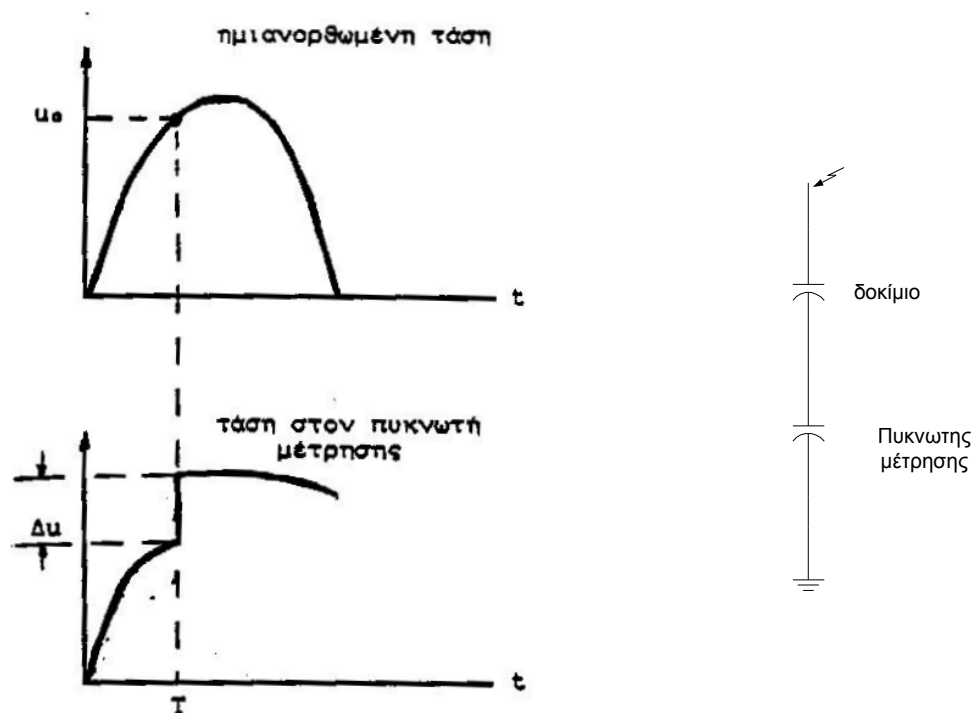
u : Στιγμιαία τιμή της εναλλασσόμενης τάσης (η οποία μετράται σε ένα ωμικό-χωρητικό τετράπολο).

u_m : Στιγμιαία τιμή της τάσης στο ωμικό – χωρητικό τετράπολο μέτρησης των μερικών εκκενώσεων.

u_k : Στιγμιαία τιμή της εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης.

I_m : Στιγμιαία τιμή του ρεύματος λόγω μερικών εκκενώσεων.

Δu : Μεταβολές στην εφαρμοζόμενη τάση λόγω μερικών εκκενώσεων.

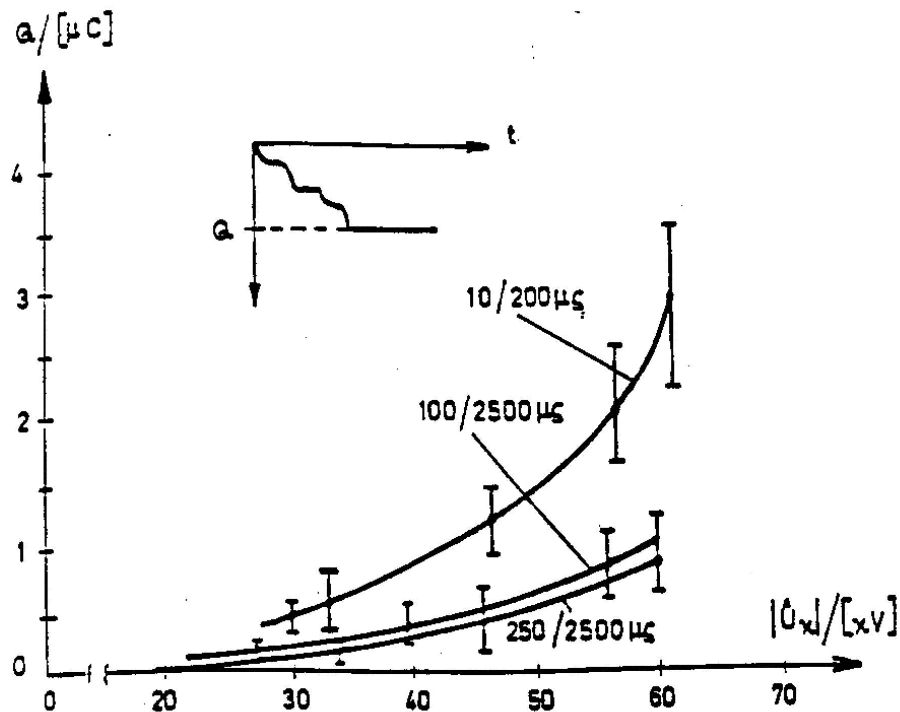


Σχήμα 4.1.6-3 : Παράδειγμα καθορισμού ορισμένων εννοιών για τη στατιστική μελέτη των μερικών εκκενώσεων σε στερεά μονωτικά, των πρακτικών εφαρμογών, υπό ημιανορθωμένες τάσεις καταπόνησης [1].

T : χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων.

u_0 : τάση έναρξης των μερικών εκκενώσεων.

Δu : άλμα δυναμικού.

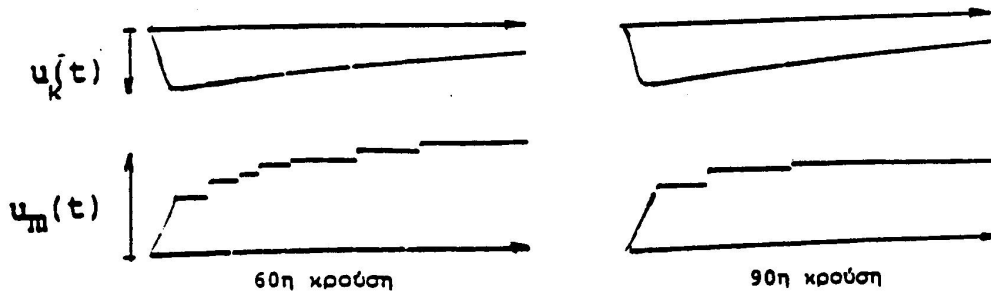


Σχήμα 4.1.6-4 : Χαρακτηριστική $Q = f(\hat{U}_k)$ για το βακελίτη (πάχους 2mm), υπό κρουστικές τάσεις 10/200 μs , 100/2500 μs και 250/2500 μs [1].

Περιβάλλον μέσο : μονωτικό λάδι.

Διάταξη ηλεκτροδίων : ακίδα - πλάκα.

C_m : 1000 nF.



Σχήμα 4.1.6-5 : Αλματα δυναμικού κατά την 60^η και την 90^η κρούση στο pertinax (πάχους 2mm) [1].

Μορφή τάσης : 1,2/50μs ($\hat{U}_k = 99,7 \text{ kV}$)

Περιβάλλον μέσο : μονωτικό λάδι.

Διάταξη ηλεκτροδίων : ακίδα - πλάκα.

C_m : 210 nF.

Ένα σημαντικό αποτέλεσμα των ερευνών του είδους αυτού είναι ο διαχωρισμός μεταξύ των εσωτερικών και εξωτερικών μερικών εκκενώσεων στο διάγραμμα της χρονικής μεταβολής της εφαρμοζόμενης τάσης στο στερεό μονωτικό. Έχει διαπιστωθεί ότι :

- 1) οι εσωτερικές μερικές εκκενώσεις εμφανίζονται στην περιοχή μηδενισμού της τάσης, ή γενικότερα στην περιοχή της μέγιστης χρονικής μεταβολής της.
- 2) οι εξωτερικές μερικές εκκενώσεις εμφανίζονται στην περιοχή, όπου δεν μηδενίζεται η τάση.

Τα παραπάνω σημαίνουν π.χ. για καταπονήσεις με κρουστικές τάσεις, ότι : οι εσωτερικές μερικές εκκενώσεις εμφανίζονται κατά τη διάρκεια του μετώπου της κρουστικής τάσης, ενώ οι εξωτερικές μερικές εκκενώσεις κατά τη διάρκεια της ουράς της κρουστικής τάσης.

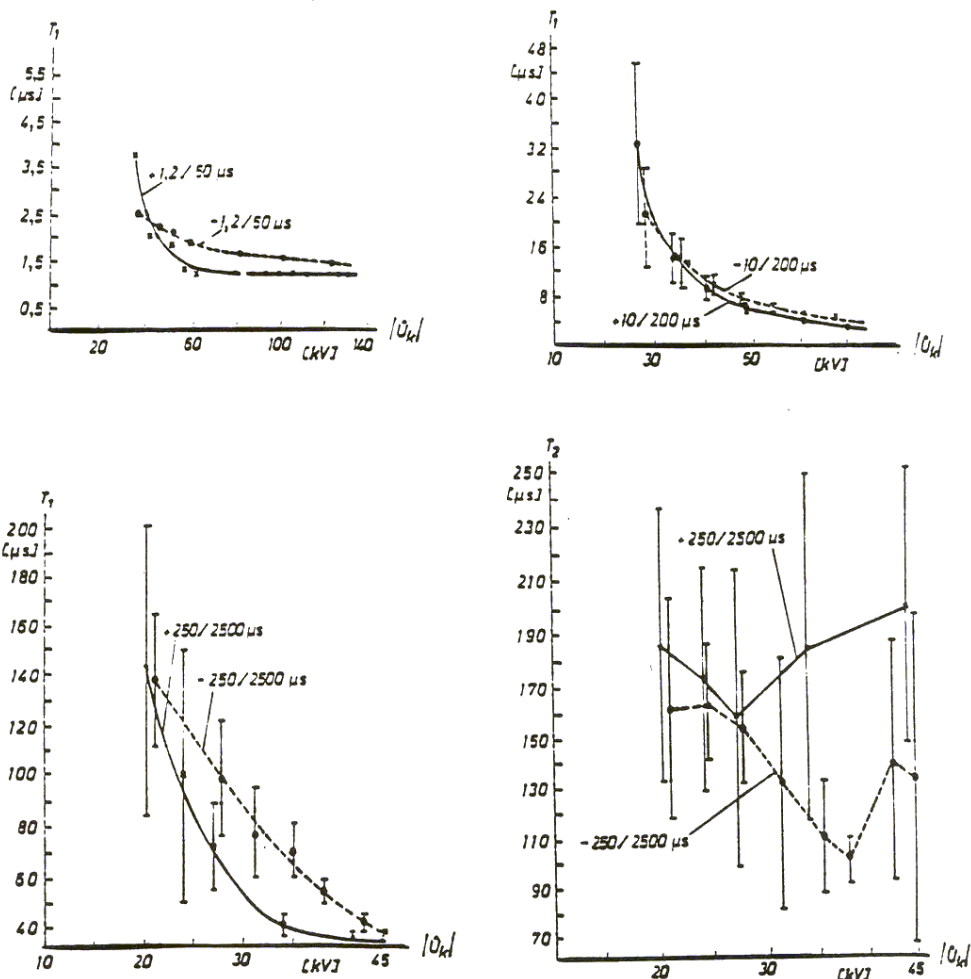
Μια πειραματική προσέγγιση του παραπάνω διαχωρισμού, μεταξύ εσωτερικών και εξωτερικών μερικών εκκενώσεων, έχει δοθεί από παλμογραφήματα των αλμάτων δυναμικού σε στερεά οργανικά μονωτικά, με κρουστικές τάσεις διαφόρων μορφών (σε περιβάλλον μονωτικού ελαίου και διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα). Στον πίνακα 4.1.6-1 δίνονται αποτελέσματα των στατιστικών αυτών μετρήσεων, που αφορούν οργανικά στερεά μονωτικά με $\epsilon_r \approx 2,5 \div 4,5$, από τα οποία συμπεραίνεται ο διαχωρισμός μεταξύ εσωτερικών και εξωτερικών μερικών εκκενώσεων, που προαναφέρθηκε. Φαίνεται επίσης, ότι οι κρουστικές τάσεις μεγάλης χρονικής

διάρκειας (τάσεις χειρισμών) προκαλούν κυρίως εσωτερικές μερικές εκκενώσεις (ενισχύοντας έτσι τη γήρανση των στερεών μονωτικών υλικών), ενώ οι κεραυνικές τάσεις (μορφή κρουστικής τάσης 1,2/50μs) σχετίζονται περισσότερο με εξωτερικές μερικές εκκενώσεις.

Μορφή τάσης σε μs	Δενδρίτης	Εικόνα επιφανειακών διαταραχών	Αλματα δυναμικού	Συμπεράσματα για τις μερικές εκκενώσεις
1,2/50	ΝΑΙ	ΝΑΙ	στην ουρά	εξωτερικές μερικές εκκενώσεις
10/200	ΝΑΙ (αλλά μικρότερος από εκείνον κατά την καταπόνηση με κρουστική τάση 1,2/50 μs)	ΝΑΙ (αλλά μικρότερος από εκείνον κατά την καταπόνηση με κρουστική τάση 1,2/50 μs)	στην ουρά και στο μέτωπο	εξωτερικές και εσωτερικές μερικές εκκενώσεις
250/2500	ΟΧΙ	ΟΧΙ	στο μέτωπο	εσωτερικές μερικές εκκενώσεις

Πίνακας 4.1.6-1 : Αποτελέσματα της συσχέτισης μεταξύ εμφάνισης των αλμάτων δυναμικού και της εικόνας των επιφανειακών διαταραχών [1].

Μία άλλη πειραματική προσέγγιση του διαχωρισμού μεταξύ εσωτερικών και εξωτερικών μερικών εκκενώσεων, ως προς τον χρόνο εκδήλωσής τους (υπό κρουστικές τάσεις καταπόνησης), έχει βασιστεί σε χαρακτηριστικές $T_1 = f(\hat{U}_k)$ και $T_2 = f(\hat{U}_k)$ σε συνδυασμό με οπτικές παρατηρήσεις για την εικόνα των επιφανειακών διαταραχών.



Σχήμα 4.1.6-6 : 1) Χαρακτηριστική $\hat{T}_1 = f(|\hat{U}_k|)$ κατά την καταπόνηση στερεών οργανικών μονωτικών (πάχους 2 mm και $\epsilon_r \approx 2,5 \div 4,5$) με κρουστικές τάσεις 1,2/50μs, 10/200μs και 250/2500μs.

: 2) Χαρακτηριστική $T_2 = f(|\hat{U}_k|)$ κατά την καταπόνηση των υλικών αυτών με κρουστικές τάσεις 250/2500μs [1].

Περιβάλλον μέσο : μονωτικό λάδι.

Διάταξη ηλεκτροδίων : ακίδα - πλάκα.

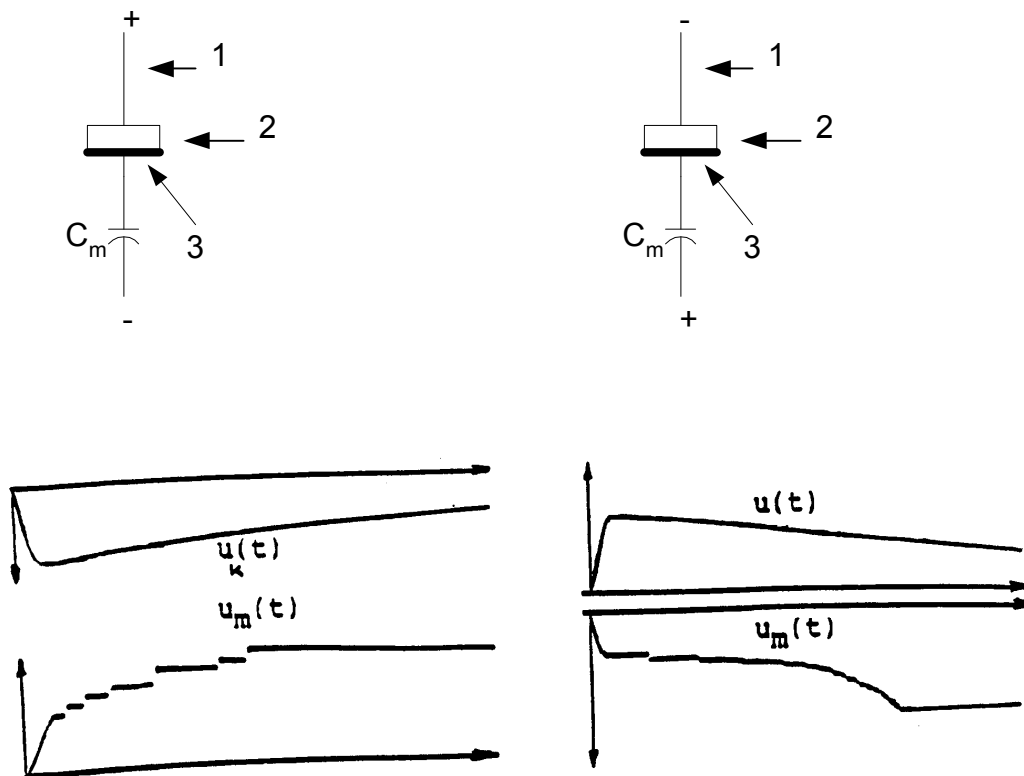
l : 2 φορές η τυπική απόκλιση

Στο παραπάνω σχήμα φαίνεται ο χρόνος έναρξης (T_1) των μερικών εκκενώσεων (στα μονωτικά υλικά και το είδος της καταπόνησης, που προαναφέρθηκαν) καθώς και ο χρόνος περαίωσης των μερικών εκκενώσεων (T_2), υπό κρουστικές τάσεις 250/2500 μs), ώστε σε συνδυασμό με τις

παρατηρήσεις του πίνακα 4.1.6-1 για την εικόνα των επιφανειών, να καταλήγει κανείς στο ίδιο συμπέρασμα [1].

4.1.7 Το φαινόμενο της πολικότητας σε πολυμερή στερεά μονωτικά κατά την εκδήλωση μερικών εκκενώσεων

Από την μέση καμπύλη των χαρακτηριστικών του σχήματος 4.1.6-6 γίνεται επίσης φανερό η εκδήλωση του φαινομένου της πολικότητας, όπως και κατά τη διάτρηση (βλέπετε πίνακα 4.1.2-1). Οι επικαλύψεις τιμών, που παρατηρούνται μπορούν να αποδοθούν στη διαφορετική κατανομή των θέσεων διαταραχής από δοκίμιο σε δοκίμιο (τα οργανικά στερεά μονωτικά είναι ανομοιογενή και δεν είναι δυνατό να υπάρχει συμμετρική κατανομή των θέσεων διαταραχής από δοκίμιο σε δοκίμιο). Πάντως, το φαινόμενο της πολικότητας γίνεται φανερό στα άλματα δυναμικού από την κύρτωση (παρέκκλιση) της $u_m(t)$ προς τον άξονα του χρόνου (σχήμα 4.1.7-1) [1].



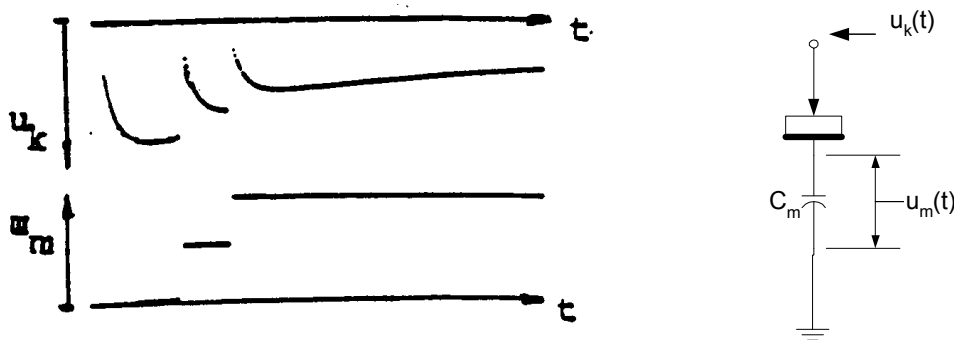
Σχήμα 4.1.7-1 : Τυπικά παλμογραφήματα των αλμάτων δυναμικού κατά την καταπόνηση πολυμερών στερεών μονωτικών εντός μονωτικού ελαίου, υπό κρουστικές τάσεις της μορφής 1,2/50μs [1].
(1: Ηλεκτρόδιο – ακίδα, 2: Δοκίμιο, 3: Ηλεκτρόδιο – πλάκα και C_m : Πυκνωτής μέτρησης).

4.2 Η επιφανειακή διάσπαση και η υπερπήδηση

Η εκδήλωση των εξωτερικών μερικών εκκενώσεων στη διαχωριστική επιφάνεια του συνδυασμού «στερεό μονωτικό - αέριο μονωτικό», ή του συνδυασμού «στερεό μονωτικό - υγρό μονωτικό» θα οδηγήσει σε επιφανειακή διάσπαση, όταν μία ομάδα ελεύθερων ηλεκτρονίων (η οποία, με βάση τις οπτικές παρατηρήσεις, μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι μία διαδρομή της δένδροειδούς φωτεινής ακτινοβολίας, που εκδηλώνεται) θα προκαλέσει μείωση της απόστασης μεταξύ των ηλεκτροδίων (δηλαδή μείωση της απόστασης μόνωσης), ώστε τελικά να συμβεί ένας οχετός διάσπασης στην επιφάνεια του στερεού (επιφανειακή διάσπαση), ή στο περιβάλλον μέσο του (υπερπήδηση).

Από πειράματα είναι γνωστό, ότι στα φαινόμενα παραγωγής ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων (κυρίως ηλεκτρόνια) στην επιφάνεια των στερεών μονωτικών συμμετέχει και η ίδια η επιφάνεια σε βάθος μέχρι 30 Å. Έτσι, εκτός από τις εξωτερικές μερικές εκκενώσεις (οι οποίες οφείλονται σε ξένες επικαθίσεις και έχουν συνήθως τον κυρίαρχο ρόλο στη μείωση της διηλεκτρικής αντοχής στην επιφάνεια), μπορεί κανείς να υποθέσει ότι εκδηλώνονται και οι άλλοι παράγοντες (απώλειες Joule, δυνάμεις Coulomb και θερμότητα του περιβάλλοντος), όπως κατά τη διάτρηση. Μπορεί επομένως να θεωρηθεί, ότι οι μερικές εκκενώσεις στο επιφανειακό φιλμ (δηλαδή στο συνδυασμό «επιφάνεια του στερεού μέχρι βάθος 30 Å - περιβάλλον μέσο») είναι συνήθως ο κυρίαρχος παράγοντας για την επιφανειακή διάσπαση ή την υπερπήδηση.

Πειραματικές έρευνες σε στερεά μονωτικά των πρακτικών εφαρμογών με κρουστικές τάσεις, δείχνουν ότι υπάρχει ομοιότητα των παλμογραφημάτων της διάτρησης ως προς εκείνα της επιφανειακής διάσπασης, με τη διαφορά ότι η επιφανειακή διάσπαση εκδηλώνεται στην ουρά της κρουστικής τάσης (παλμογράφημα του σχήματος 4.2-1) [1].



Σχήμα 4.2.1 : Τυπικό παλμογράφημα της επιφανειακής διάσπασης πολυμερών στερεών μονωτικών (πάχους 2 mm) εντός μονωτικού ελαίου, υπό κρουστική τάση 10/200μs και διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα – πλάκα [1].

$$C_m : 1835 \text{ nF}$$

$$\hat{U}_k : 70 \text{ kV}$$

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

Σύμφωνα με τα αναφερόμενα στις παραγράφους 4.1 και 4.2 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 συσχέτιση του με φωτεινά φαινόμενα και καταπονήσεις, που παρατηρούνται στο υλικό (θερμικές, ή μηχανικές, ή και τα δύο), που θα έδινε περισσότερες πληροφορίες για τη μείωση της διηλεκτρικής αντοχής.

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 : βλέπετε σχήμα 4.3.1-5),

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 θεωρεία 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 1.5-1 :

$$\sigma = \sigma_0 e^{(-W/kT)} = \sigma_0 e^{\beta W}$$

όπου : σ_0 : Η ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα για διαφορά θερμοκρασίας θ ως προς το περιβάλλον.

σ : Η αρχική ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα.

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

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

T : Η απόλυτη θερμοκρασία.

β : Ένας συντελεστής του υλικού (π.χ. για presspan $\beta \approx 0,02$).

4) Για μεγαλύτερες τιμές πεδίου από προηγουμένως, οι ελεύθεροι ηλεκτρικοί φορείς γίνονται αρκετά περισσότεροι και δεν ισχύει η σχέση 1.5-1. 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**. Το φάσμα της εκπεμπόμενης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας εξαρτάται από το περίσσειμα της ενέργειας των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων κατά την εξαναγκασμένη επιβράδυνση τους στα ηλεκτρόδια [1].

Παρακάτω εξετάζονται αναλυτικά τα προαναφερόμενα, με βάση τυπικά παραδείγματα, τα περισσότερα των οποίων είναι ήδη γνωστά από τη βιβλιογραφία.

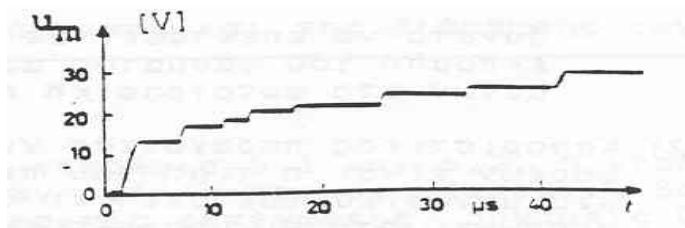
4.3.1 Φαινόμενα προ της διάσπασης των στερεών μονωτικών υλικών

Ένα τυπικό παράδειγμα κβαντομηχανικής ερμηνείας των φαινομένων γήρανσης και διάσπασης σε στερεά μονωτικά των πρακτικών εφαρμογών είναι το παρακάτω:

Στα σχήματα 4.3.1-1 ως 4.3.1-3 δίνονται ενδεικτικά παλμογραφήματα της τεχνητής γήρανσης στερεών πολυμερών μονωτικών με κρουστικές τάσεις σε περιβάλλον μονωτικού ελαίου και στο σχήμα 4.3.1-4 ένα παλμογράφημα των κρούσεων φορτίου. Η διάταξη μέτρησης έχει σχεδιαστεί απλοποιημένα στο σχήμα 4.3.1-5. Ταυτόχρονα με τις μετρήσεις αυτές διαπιστώθηκε ότι :

α) Μετά από μία τιμή $\hat{U}_k \approx 45 \text{ kV}$, κατά την καταπόνηση με κρουστικές τάσεις 1,2/50μs ή 10/200μs, εκδηλώνεται επιφανειακός δένδριτης, στα ίχνη του οποίου παρατηρείται στην επιφάνεια του μονωτικού μόνιμη αλλαγή της μοριακής δομής (σχήμα 4.3.1-6). Υπό σταθερή τιμή της τάσης ο δένδριτης, καθώς και η αντίστοιχη προς αυτόν αλλαγή της μοριακής δομής, έχουν μικρότερες διαστάσεις.

β) Κατά την καταπόνηση με κρουστικές τάσεις 250/2500μs δεν παρατηρήθηκε, υπό σταθερή τιμή της τάσης (που δεν οδηγεί στη διάσπαση), η εκδήλωση του παραπάνω δένδριτη, ούτε προκλήθηκε αλλαγή της μοριακής δομής.

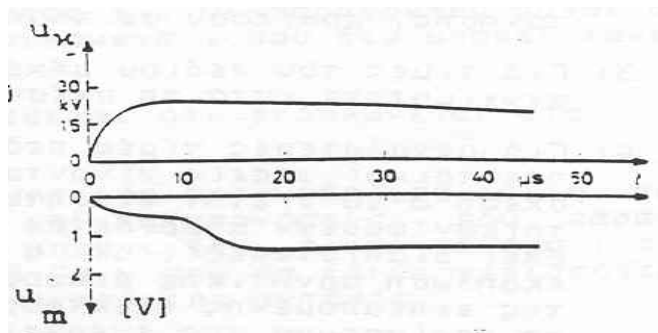


Σχήμα 4.3.1-1 : Άλματα δυναμικού υπό κρουστική τάση 1,2/50 μs [1].

$$\hat{U}_k : 100kV$$

$$E : 0,8MV/cm$$

$$C_m : 210nF$$

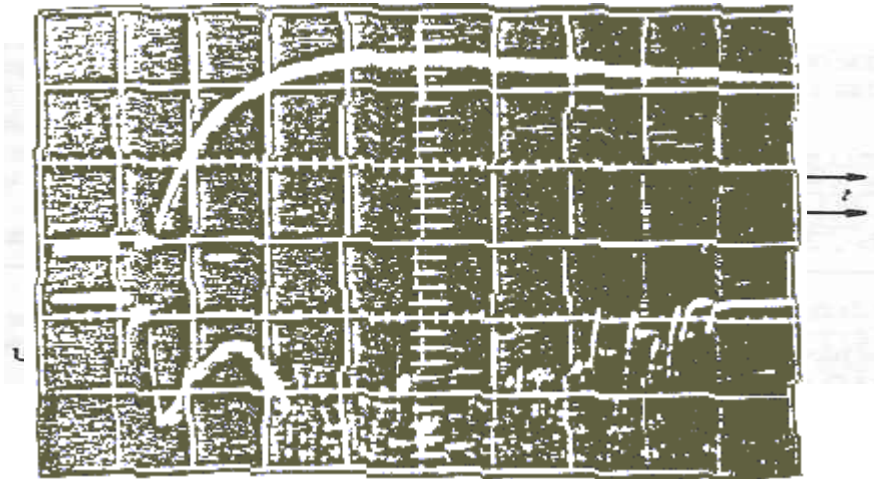


Σχήμα 4.3.1-2 : Πρώτο άλμα δυναμικού υπό κρουστική τάση 10/200 μs [1].

$$\hat{U}_k : 26,6kV$$

$$E : 0,38MV/cm$$

$$C_m : 210nF$$

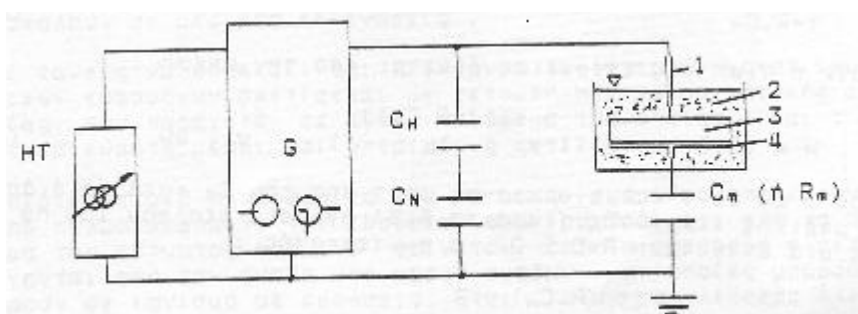


Σχήμα 4.3.1-4 : Κρούσεις φορτίου υπό κρουστική τάση 10/200μs [1].

Κλίμακα χρόνου : 5 μsec/div

\hat{U}_k : 81 kV

E : 0,86 MV/cm

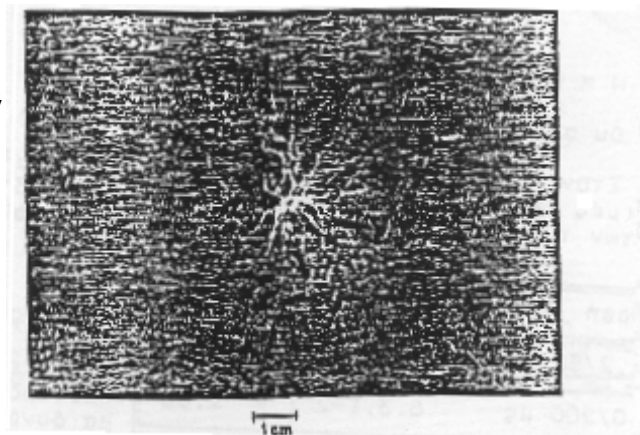


Σχήμα 4.3.1-5

: Απλοποιημένη διάταξη μέτρησης των αλμάτων δυναμικού ή των κρούσεων φορτίου σε στερεά μονωτικά, υπό κρουστικές τάσεις καταπόνησης [1].

- HT : Μετασχηματιστής υψηλής τάσης.
- G : Γεννήτρια κρουστικών τάσεων.
- C_H & C_N : Καταμεριστής για τη μέτρηση της κρουστικής τάσης.
- 1 : Ηλεκτρόδιο ακίδα.
- 2 : Μονωτικό λάδι.
- 3 : Δοκίμιο (πάχους 2mm).
- 4 : Ηλεκτρόδιο πλάκα.
- C_m : Πυκνωτής μέτρησης των αλμάτων δυναμικού.
- R_m : Αντίσταση μέτρησης των κρούσεων φορτίου (δηλαδή του ρεύματος).

Σχήμα 4.3.1-6:
Εικόνα επιφανειακών διαταραχών
υπό κρουστική τάση 1,2/50 μs,
 $\hat{U}_k = 85 \text{ kV}$, $E=0,8 \text{ MV/cm}$. [1]



Για λόγους σύγκρισης των συμπερασμάτων, μεταξύ μακροσκοπικής και κβαντομηχανικής ερμηνείας των φαινομένων γήρανσης στα στερεά μονωτικά, εξετάζονται (με τα παραπάνω δεδομένα) και οι δύο αυτές περιπτώσεις :

α) Μακροσκοπική εμπειρία

Αν οι παραπάνω μετρήσεις και οπτικές παρατηρήσεις ερμηνευτούν με τη μακροσκοπική θεωρία, τότε καταλήγει κανείς στο συμπέρασμα του πίνακα 4.1.6-1. Η εκδήλωση των αλμάτων δυναμικού (ή των κρούσεων φορτίου) κατά τη θεωρία αυτή ερμηνεύονται από το ισοδύναμο κύκλωμα των μερικών εκκενώσεων.

β) Κβαντομηχανική ερμηνεία:

Κατά τη θεωρία αυτή ενδιαφέρουν τα ενεργειακά επίπεδα των ελευθέρων ηλεκτρικών φορέων κατά την εκδήλωση μερικών εκκενώσεων και όχι ο διαχωρισμός των τελευταίων σε εσωτερικές και εξωτερικές. Η ενέργεια των ελευθέρων ηλεκτρικών φορέων (κυρίως ηλεκτρόνια), πάνω από την ενέργεια Fermi του ηλεκτροδίου, μπορεί να υπολογιστεί από την ενέργεια στον πυκνωτή μέτρησης C_m ανά άλμα δυναμικού, με τη σχέση $W = 0,5 q_e \Delta u$ (όπου: q_e το φορτίο του ηλεκτρονίου και Δu το άλμα δυναμικού). Η σχέση αυτή ισχύει για μηδενική τιμή της ωμικής αντίστασης R από τον πυκνωτή μέτρησης μέχρι και το ηλεκτρόδιο γείωσης. Για $R > 0$ θα πρέπει να πάρει κανείς υπ' όψη το μεταβατικό φαινόμενο με σταθερά χρόνου :

$$\tau = R C_m \quad (4.3.1-1)$$

οπότε η τιμή της ενέργειας δίνεται από τη σχέση :

$$W = \frac{(0,5 \Delta u)}{\left(1 - e^{-\left[\frac{t}{(R C_m)}\right]}\right)} \quad \text{σε eV} \quad (4.3.1-2)$$

όπου: Δu σε V και t ο χρόνος φόρτισης του C_m κατά τη διάρκεια μίας μερικής εκκένωσης (κατά τη βιβλιογραφία περίπου 100 ns).

Για μία αντίσταση $R=0,5 \Omega$, ο συντελεστής :

$$f = \frac{1}{\left(1 - e^{-\left[\frac{t}{(R C_m)}\right]}\right)} \quad (4.3.1-3)$$

Δίνεται στον πίνακα 4.3.1-1, για χωρικά τετράπολα μέτρησης, που συνήθως χρησιμοποιούνται στις μετρήσεις αυτές. Για τους πυκνωτές του πίνακα αυτού και για $R=0,5 \Omega$, ισχύει επομένως:

C _m σε nF	10	20	210	1000	1835
F	1	1	1,62	5,51	9,6

Πίνακας 4.2.1-1 : Τιμές του συντελεστή f για R=0,5 Ω [1]

$$W = 0,5 \cdot f \cdot \Delta u \quad \text{σε eV} \quad (4.3.1-4)$$

όπου Δu σε V.

Μορφή τάσης	Σχήμα	W σε eV
1,2/50 μs	4.3.1-1	≈ 10,50
10/200 μs	4.3.1-2	≈ 1,60
250/2500 μs	4.3.1-3	≈ 0,16

Πίνακας 4.3.1-2 :

Τιμές ενέργειας των ελευθέρων ηλεκτρονίων κατά το πρώτο άλμα δυναμικού [1].

Στον πίνακα 4.3.1-2 έχουν υπολογιστεί με την παραπάνω σχέση οι τιμές της ενέργειας W για το πρώτο άλμα δυναμικού των παλμογραφημάτων των σχημάτων 4.3.1-1, 4.3.1-2 και 4.3.1-3. Από τις τιμές αυτές φαίνεται, ότι η γήρανση των στερεών μονωτικών σχετίζεται με την εκπομπή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, που μπορεί να περιλαμβάνει υπεριώδεις ακτίνες και υπέρυθρες ακτίνες. Έτσι :

1) από τις τιμές της ενέργειας κατά τον πίνακα 4.3.1-2.

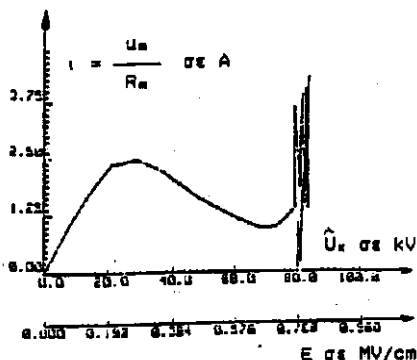
2) τη φωτεινή ακτινοβολία, που παρατηρείται στην πράξη σε αρκετές περιπτώσεις εκδήλωσης μερικών εκκενώσεων (και η οποία με υπολογισμό της ενέργειας W εύκολα διαπιστώνεται σε άλματα δυναμικού του παλμογραφήματος του σχήματος 4.3.1-1), και

3) τις ραδιοφωνικές παρεμβολές και τα ακουστικά κύματα, που συχνά προκαλούν οι μερικές εκκενώσεις,

μπορεί κανείς να υποθέσει ότι η γήρανση των στερεών μονωτικών των πρακτικών εφαρμογών σχετίζεται με εκπομπή ηλεκτρομαγνητικής

ακτινοβολίας, που παράγεται σε αυτά, το φάσμα της οποίας είναι : από ακουστικά κύματα μέχρι και υπεριώδεις ακτίνες.

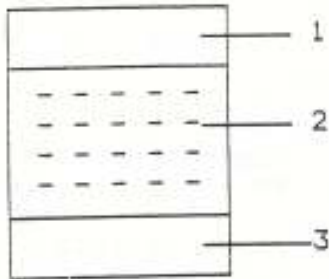
Περισσότερες πληροφορίες για το μηχανισμό γήρανσης έχουν δοθεί από παλμογράφημα των κρούσεων φορτίου. Πράγματι από το παλμογράφημα του σχήματος 4.3.1-6 φαίνεται ότι τα ελεύθερα ηλεκτρόνια συλλέγονται από την άνοδο υπό μορφή ομάδων, οι οποίες μπορούν να αποδοθούν σε ιονισμό με κρούσεις. Έτσι, όταν τα ελεύθερα ηλεκτρόνια φτάνουν στην άνοδο, εξαναγκάζονται σε επιβράδυνση αποδίδοντας το περίσσειμά της ενέργειάς τους (ανάλογα με την ενεργειακή στάθμη που είχαν) σε ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία (πίνακας 4.3.1-2). Ο δένδριτης επομένως, που παρατηρείται, είναι το ορατό φάσμα της παραπάνω ακτινοβολίας. Μπορούμε, να υποθέσουμε, ότι αντίστοιχες δένδροειδούς μορφής εκπομπές συμβαίνουν και σε άλλες περιοχές του φάσματος της παραγόμενης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Από το παλμογράφημα των κρούσεων φορτίου (σχήμα 4.3.1-5) φαίνεται επίσης, ότι ο ιονισμός με κρούσεις σχετίζεται με την εκδήλωση αρνητικής διαφορικής αντίστασης (κατά την αύξηση της τάσης παρατηρείται μείωση του ρεύματος). Η αντίσταση αυτή, που προηγείται του ιονισμού με κρούσεις, δίνεται αναλυτικότερα στην χαρακτηριστική "ρεύματος – τάσης" του σχήματος 4.3.1-7.



Σχήμα 4.3.1-7:
Χαρακτηριστική ρεύματος-τάσης κατά το παλμογράφημα των κρούσεων φορτίου του σχήματος 4.3.1-4 [1] .

Από τα παραπάνω μπορεί να καταλήξει κανείς στο συμπέρασμα ότι μία διαδρομή της δένδροειδούς μορφής εκπεμπόμενης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, αντιστοιχεί σε μία κρούση φορτίου, η οποία περιλαμβάνει ελεύθερα ηλεκτρόνια, που είχαν την ίδια ενεργειακή στάθμη (κατά την άφιξή τους στην άνοδο προκάλεσαν εκπομπή του ίδιου μήκους κύματος). Μπορούμε να υποθέσουμε, λόγω του εύρους της παραπάνω ακτινοβολίας, ότι υπάρχουν στο υλικό διάφορες **ενεργειακές στάθμες διαταραχής** μέσα στην απαγορευμένη ζώνη, που είναι καθοριστικής σημασίας για την εκδήλωση του ιονισμού (σχήμα 4.3.1-8). Οι στάθμες διαταραχής φαίνεται ότι αντιστοιχούν στις θέσεις διαταραχής του ισοδύναμου κυκλώματος των μερικών εκκενώσεων κατά Gemant και Philipoff (σχήμα 4.1.3-4). Από τις στάθμες διαταραχής

συμμετέχουν περισσότερο στο φαινόμενο της γήρανσης οι πλησιέστερες προς τη ζώνη αγωγιμότητας.



Σχήμα 4.3.1-8 : Διάγραμμα ενεργειακών ζωνών του ανομοιογενούς στερεού μονωτικού [1].

- 1 : ζώνη αγωγιμότητας
- 2 : στάθμες διαταραχής μέσα στην απαγορευμένη ζώνη
- 3 : ζώνη σθένους

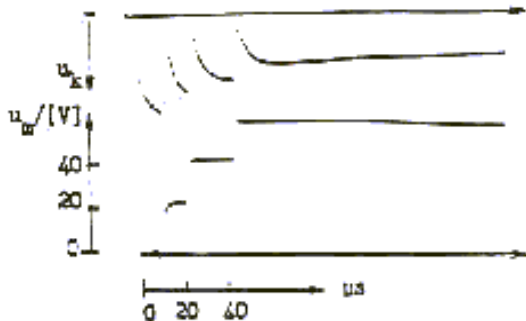
Από πρόσφατες έρευνες, που έχουν γίνει κατά τη γήρανση στερεών μονωτικών των πρακτικών εφαρμογών, υπό εναλλασσόμενη (ή συνεχή) τάση καταπόνησης, διαπιστώνεται επίσης η εκπομπή του φάσματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, που έχει προαναφερθεί για την τεχνητή γήρανση με κρουστικές τάσεις. Και στις δύο αυτές περιπτώσεις καταπόνησης ο υπολογισμός της ενέργειας των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων (πάνω από την ενέργεια Fermi) μπορεί να γίνει, κατά την εκδήλωση αλμάτων δυναμικού, με την σχέση 4.3.1-2 [1].

4.3.2 Το φάσμα της εκπεμπόμενης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας κατά τη διάτρηση

Η διάτρηση έχει διερευνηθεί με καταπονήσεις στερεών μονωτικών με σχετική διηλεκτρική σταθερά περίπου $2,5 \div 4,5$ (διάφορα χαρτιά μετασχηματιστών, πεπιεσμένο χαρτί, βακελίτης, Pertinax, πανίτης, κλπ.). Οι τάσεις δοκιμής, που έχουν χρησιμοποιηθεί για την κβαντομηχανική ερμηνεία του μηχανισμού διάτρησης, είναι κυρίως κρουστικής μορφής (1,2/50μs, 10/200μs, 250/2500μs, κλπ.). Πειράματα έχουν γίνει επίσης με εναλλασσόμενες και ημιανορθωμένες τάσεις καταπόνησης.

Παρακάτω εξετάζεται ένα παράδειγμα με κρουστικές τάσεις, ώστε να υπάρχουν συγκρίσιμες μετρήσεις με εκείνες της γήρανσης κατά την προηγούμενη παράγραφο. Για το λόγο αυτό, οι μετρήσεις έγιναν σύμφωνα με τη διάταξη πειραματισμού του σχήματος 4.3.1-5. Τυπικά παλμογραφήματα του φαινομένου δίνονται στα σχήματα 4.3.2-1 και 4.3.2-2. Η ενέργεια των ελεύθερων ηλεκτρονίων (W) μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση 4.3.1.-7, όπως φαίνεται κατά τη γήρανση. Έτσι, για το πρώτο π.χ. άλμα δυναμικού και $R=0,5 \Omega$ (που ήταν η αντίσταση από τον πυκνωτή μέτρησης μέχρι και το

ηλεκτρόδιο γείωσης) η τιμή W υπολογίζεται ότι είναι περίπου 105eV. Μπορούμε επομένως να υποθέσουμε, ότι η διάτρηση σχετίζεται με εκπομπή μαλακών ακτίνων Χ.



Σχήμα 4.3.2.-1

Τυπικό παλμογράφημα αλμάτων δυναμικού κατά τη διάτρηση πολυμερών στερεών μονωτικών (πάχους 1 mm) εντός μονωτικού ελαίου [1].

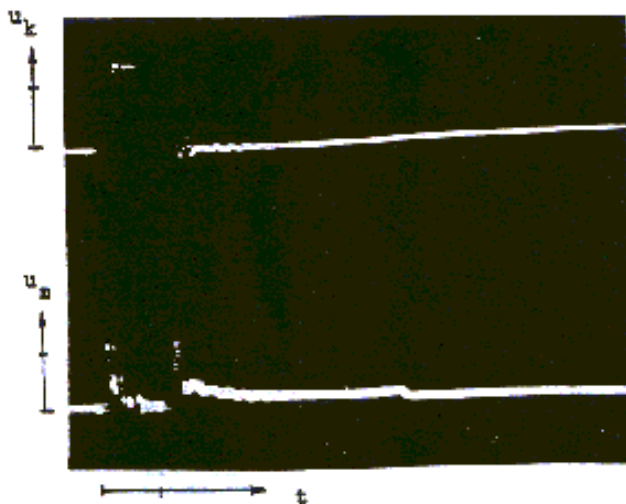
Κρουστική τάση : 1,2/50 μ s

R της ακίδας \approx 1 mm

\hat{U}_k : 85 kV

E : 1,2 MV/cm

C_m : 1835 nF



Σχήμα 4.3.2-2 :

Τυπικό παλμογράφημα κρούσεων φορτίου κατά τη διάτρηση πολυμερών στερεών μονωτικών (πάχους 1 mm) εντός μονωτικού ελαίου, υπό κρουστική τάση [1].

R της ακίδας \approx 1 mm

Μορφή τάσης 1,2/50 μ s

\hat{U}_k : 85 kV

E : 1,2 MV/cm

R_m : 150 Ω

u_m : 20 V/div

t : 2 μ s/div

Από το παλμογράφημα των κρούσεων φορτίου παρατηρεί κανείς την εκδήλωση αρνητικής διαφορικής αντίστασης. Ο αριθμός των κρούσεων περιορίζεται ως προς εκείνον κατά τη γήρανση, αλλά η τιμή του ρεύματος αυξάνει σημαντική (συγκρίνατε με το παλμογράφημα του σχήματος 4.3.1-3). Μπορεί να υποθέσει κανείς, ότι ο μηχανισμός της διάτρησης έχει τα ίδια γνωρίσματα με εκείνον της γήρανσης.

Θα πρέπει να σημειωθεί, ότι το φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, που παράγεται στα στερεά μονωτικά κατά την πραγματοποίηση των πειραμάτων της γήρανσης και της διάτρησης εξαρτάται σημαντικά από τον

συντελεστή χρησιμοποίησης της διάταξης των ηλεκτροδίων. Όσο περισσότερο ανομοιογενές είναι το πεδίο, τόσο μειώνεται το εύρος της παραπάνω ακτινοβολίας. Όταν ακίδα έχει π.χ. ακτίνα καμπυλότητας 0.3 mm (αντί του ≈ 1 mm), τότε (όπως έχει διαπιστωθεί πειραματικά) η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία επεκτείνεται μέχρι το ορατό τμήμα της [1].

4.3.3 Θεωρητική προσέγγιση του ιονισμού με κρούσεις προ και κατά τη διάτρηση στερεών μονωτικών

Ένα σημαντικότατο συμπέρασμα, από την θεωρητική μελέτη του ιονισμού με κρούσεις στα στερεά μονωτικά δίνεται από την παρακάτω σχέση :

$$Q = Q_0 e^{-\left[\frac{A(E^2 - E_0^2)}{E_0^2} \right]} \quad (4.3.3-1)$$

όπου (κατά το σχήμα 4.1.6-1) :

- E_0 η πεδιακή ένταση έναρξης των μερικών εκκενώσεων ($E > 0,2$ MV/cm) και Q_0 το φορτίο κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων.
- E η εφαρμοζόμενη πεδιακή ένταση, λόγω της οποίας το φορτίο αποκτά την τιμή Q .
- A ένας συντελεστής του υλικού, που εξαρτάται από τον χρόνο.

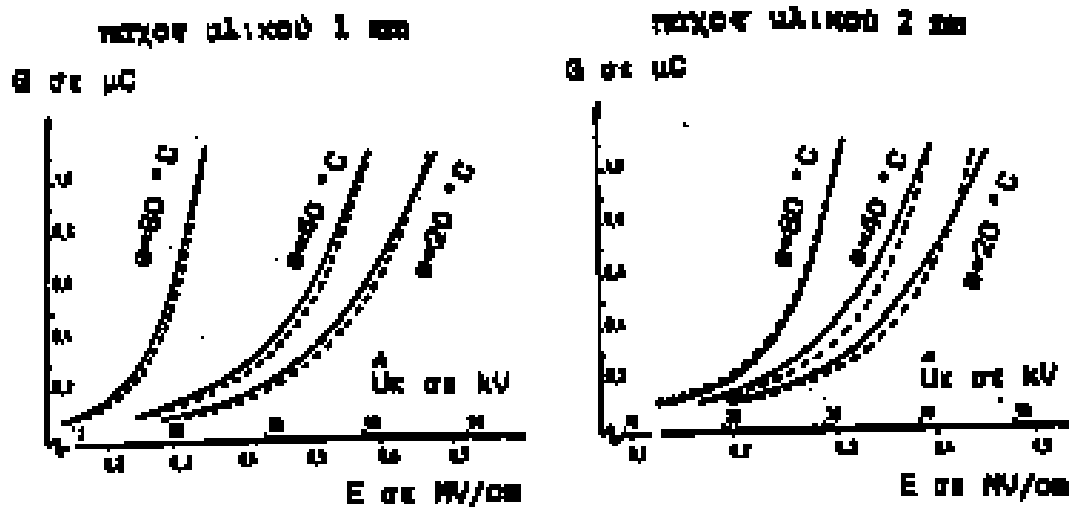
Με βάση την σχέση αυτή έχει γίνει μία προσέγγιση πειραματικών χαρακτηριστικών $Q=f(\hat{U}_k)$ κατά την καταπόνηση πολυμερών στερεών μονωτικών (πάχους 1 mm ή 2 mm) με κρουστικές τάσεις χειρισμών (μορφή 250/2500μs), η οποία (ως γνωστό από τον πίνακα 4.1.6-1) προκαλεί μόνο εσωτερικές μερικές εκκενώσεις. Η διάταξη, που έγιναν τα πειράματα, έχει δοθεί απλοποιημένα στο σχήμα 4.3.1-5. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε τρεις διαφορετικές θερμοκρασίες (20 °C, 40 °C και 80 °C), ώστε :

- 1) να εξαχθούν συμπεράσματα για την επίδραση της θερμοκρασίας στη παραγωγή ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων, και
- 2) να εναρμονίζονται οι μετρήσεις με τα παραδεκτά όρια λειτουργίας του μονωτικού ελαίου των μετασχηματιστών, που ενδιαφέρει ιδιαίτερα στην πράξη.

Στα παρακάτω σχήματα δίνονται οι πειραματικές χαρακτηριστικές για δύο μονωτικά καθώς και οι θεωρητικές χαρακτηριστικές κατά την σχέση 4.3.3-1, (με προσδιορισμό του συντελεστή A για κάθε υλικό). Όπως φαίνεται, υπάρχει

ικανοποιητική ταύτιση μεταξύ θεωρίας και πειραμάτων. Η θεωρητική προσέγγιση έδειξε ότι :

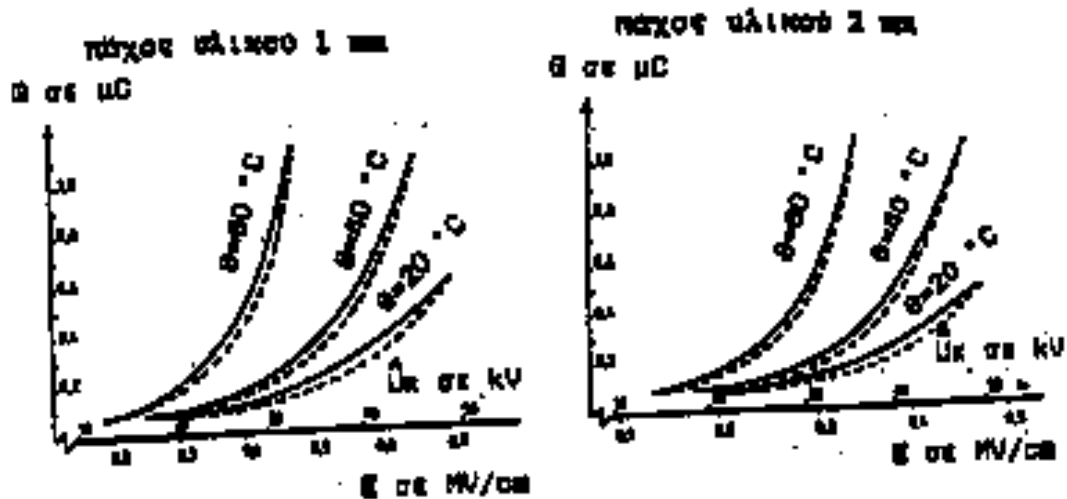
- 1) οι μερικές εκκενώσεις αρχίζουν σε τιμές πεδίου περίπου $E = 0,2 \text{ MV/cm}$.
- 2) για τιμές πεδίου περίπου μέχρι $0,5 \text{ MV/cm}$ η αύξηση της ειδικής αγωγιμότητας διέπεται από τη σχέση 1.5-1 ($\sigma = \sigma_0 e^{(-W/kT)} = \sigma_0 e^{\beta\theta}$).
- 3) για μεγαλύτερες τιμές πεδίου ισχύει η σχέση 4.3.3-1, με αποτέλεσμα να μπορεί να υποθέσει κανείς, ότι συμβαίνει ιονισμός με κρούσεις.
- 4) η θερμοκρασία του περιβάλλοντος ενισχύει σημαντικά τα φαινόμενα ιονισμού. Φαίνεται ότι η σχέση, που διέπει τον συνδυασμό των μερικών εκκενώσεων με τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος, είναι η 4.3.3-1.



Σχήμα 4.3.3-1 : Χαρακτηριστικές $Q=(\hat{U}_k)$ για το pertinax (εντός μονωτικού ελαίου), υπό κρουστικές τάσεις 250/2500μs [1].

Διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα.

$A=0,48$



Σχήμα 4.3.3-2 : Χαρακτηριστικές $Q=f(\hat{U}_k)$ για τον βακελίτη (εντός μονωτικού ελαίου), υπό κρουστικές τάσεις 250/2500μs [1].

Διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα.

$$A=0,44$$

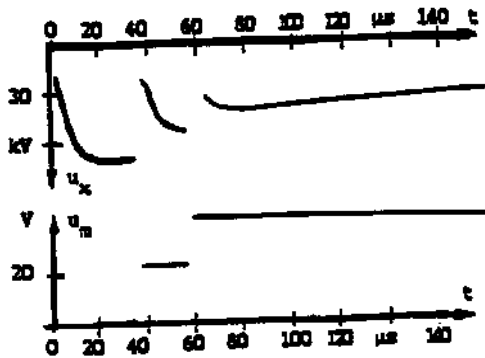
Από την μεγάλη αύξηση των παραγόμενων ελεύθερων ηλεκτρονίων με τη θερμοκρασία του μονωτικού ελαίου, που στη πράξη γίνεται αντιληπτή σε συνδυασμούς "στερεό-υγρό μονωτικό" με την αρκετά μεγάλη tgδ, φαίνεται ότι θα πρέπει να γίνει μία βελτίωση των προδιαγραφών ως προς τη δοκιμή υπερθέρμανσης. Με τυπικό παράδειγμα τους μετασχηματιστές ελαίου (και ιδιαίτερα τους μετασχηματιστές έντασης του δικτύου μεταφοράς, που ως γνωστό από την πράξη παρουσιάζουν προβλήματα κατά την αύξηση της tgδ), κρίνεται σκόπιμο να πραγματοποιούνται οι διηλεκτρικές δοκιμές, αμέσως μετά το πέρας της δοκιμής υπερθέρμανσης (ή δοκιμής ανύψωσης της θερμοκρασίας). Κατά τον τρόπον αυτόν θα συνεξετάζεται δηλαδή η πιθανή εκδήλωση φαινομένων ιονισμού στα ανεκτά όρια της θερμοκρασιακής κατάστασης του μετασχηματιστή ($\approx 80^\circ\text{C}$) [1].

4.3.4 Φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας κατά την επιφανειακή διάσπαση

Από πειράματα, που έχουν γίνει για τη μελέτη των φαινομένων, που εκδηλώνονται προ και κατά την επιφανειακή διάσπαση, σε περιβάλλον μονωτικού ελαίου ή ατμοσφαιρικού αέρα, φαίνεται ότι ισχύει ότι και

προηγουμένως για τον μηχανισμό της γήρανσης και της διάτρησης. Παρακάτω εξετάζεται (για λόγους σύγκρισης με τη διάτρηση) ένα τυπικό παράδειγμα επιφανειακής διάσπασης πολυμερών στερεών μονωτικών πάχους 2 mm σε περιβάλλον μονωτικού ελαίου, υπό κρουστικές τάσεις 10/200μs και διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα (βλέπετε σχήμα 4.3.1-5). Δεν θα γίνει αναφορά στα παλμογράφημα της γήρανσης, γιατί είναι προφανές ότι τα φαινόμενα δεν εξαρτώνται, με το αν θα ακολουθήσει η διάτρηση ή η επιφανειακή διάσπαση.

Από το τυπικό παλμογράφημα της επιφανειακής διάσπασης του σχήματος 4.3.4-1 υπολογίζεται με την σχέση 4.3.1-2 η ενέργεια W των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων. Η ενέργεια αυτή για το πρώτο και το τελευταίο άλμα δυναμικού είναι αντίστοιχα : 122eV και 96,5eV. Όπως φαίνεται η επιφανειακή διάσπαση σχετίζεται (όπως και η διάτρηση) με την εκπομπή μαλακών ακτίνων Χ.



Σχήμα 4.3.4-1 :

Παλμογράφημα αλμάτων δυναμικού κατά την επιφανειακή διάσπαση του *perlinax* (πάχους 2 mm και με διάμετρο της επιφανείας του 150 mm), υπό κρουστικές τάσεις 10/200μs σε περιβάλλον μονωτικού ελαίου [1].

Ηλεκτρόδια εφαρμογής της τάσης: ακίδα-πλάκα.

Αν τελικά συμβαίνει εκπομπή ακτίνων Χ κατά τη διάτρηση και την επιφανειακή διάσπαση, τότε θα πρέπει να προσβάλλεται το φωτογραφικό φιλμ και να απεικονίζονται αντικείμενα (όπως π.χ. συμβαίνει με τις λυχνίες των ακτινολογικών μηχανημάτων). Το ίδιο θα πρέπει να ισχύει και κατά την εκπομπή υπεριώδους ακτινοβολίας (τουλάχιστον σε τιμές πεδίου πλησίον της διάσπασης, όπου αυτή να είναι αρκετά eV). Από πειράματα που έγιναν για τον σκοπό αυτό, φαίνεται ότι προσβάλλεται το φωτογραφικό φιλμ και απεικονίζονται αντικείμενα, καθώς και βιολογικοί οργανισμοί. Στα σχήματα 4.3.4-2, 4.3.4-3 και 4.3.4-5 δίνονται ορισμένες από τις φωτογραφίες αυτές. Επίσης, στα σχήματα 4.3.4-4 και 4.3.4-5 δίνονται φωτογραφίες επιφανειακών δενδριτών, που αφορούν αντίστοιχα τη γήρανση και τη διάσπαση. Οι παραπάνω φωτογραφίες αφορούν την επιφανειακή διάσπαση δοκιμίων (πάχους 1 έως 2 mm και διαμέτρου 150 mm), υπό κρουστικές τάσης 1,2/50μs σε περιβάλλον ατμοσφαιρικού αέρα. Οι φωτογραφίες σε περιβάλλον μονωτικού ελαίου, καθώς και εκείνες της διάτρησης (στον αέρα ή στο λάδι), οδηγούν στα ίδια συμπεράσματα.

Σχετικά με την απεικόνιση των δενδριτών στο φωτογραφικό φιλμ μπορούμε να υποθέσουμε, ότι ο δενδρίτης στη φωτογραφία του σχήματος 4.3.4-4 σχετίζεται με την υπεριώδη ακτινοβολία, ενώ εκείνος του σχήματος 4.3.4-5 με υπεριώδεις ακτίνες και ακτίνες Χ. Κατά τον τρόπο αυτό δίνεται μία φυσική ερμηνεία για τις γνωστές εικόνες Lichtenberg. Μπορεί επίσης να συμπεράνει κανείς, ότι ο φωτεινός δενδρίτης και ο σχετός διάσπασης, που παρατηρούνται κατά την ηλεκτρική καταπόνηση ενός στερεού μονωτικού, αφορούν το ορατό φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, που παράγεται στο υλικό [1].



Σχήμα 4.3.4-2 :

Προσβολή του φωτογραφικού φιλμ κατά την καταπόνηση πολυμερούς στερεού μονωτικού πλησίον της περιοχής τιμών για την επιφανειακή διάσπαση στον αέρα, υπό κρουστική τάση 1,2/50μs [1].
(φωτογράφιση ενός φύλλου δένδρου)



Σχήμα 4.3.4-3 :

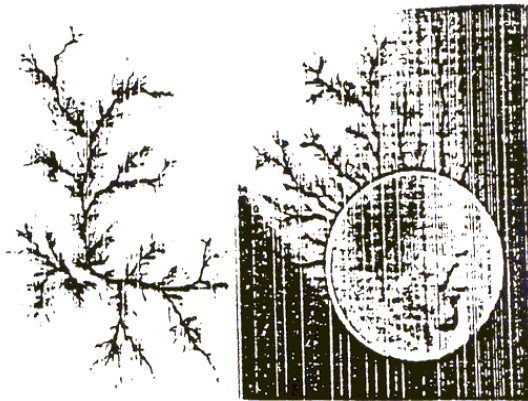
Προσβολή του φωτογραφικού φιλμ κατά την επιφανειακή διάσπαση στον αέρα πολυμερούς στερεού μονωτικού, υπό κρουστική τάση 1,2/50 μs.

Διάταξη ηλεκτροδίων : ακίδα-πλάκα [1].

α) Φωτογράφιση φύλλου δένδρου.

β) Φωτογράφιση βιολογικού οργανισμού (σκαθάρι).

γ) Φωτογράφιση μεταλλικών αντικειμένων.



Σχήμα 4.3.4-4 :

Φωτογράφιση ενός εικοσάδραχμου κατά την επιφανειακή διάσπαση στον αέρα πολυμερών στερεών μονωτικών υπό κρουστική τάση 1,2/50μs (διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα – πλάκα) [1].



Σχήμα 4.3.4-5 : Φωτογραφίες δενδριτών κατά την καταπόνηση πολυμερών στερεών μονωτικών στον αέρα, υπό κρουστική τάση 1,2/50μs (διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα – πλάκα) [1].

α) Δενδρίτης σε τιμές πεδίου πλησίον της περιοχής τιμών για την επιφανειακή διάσπαση.

β) Δενδρίτης κατά την επιφανειακή διάσπαση.

4.4 Ενας συνδυασμός της μακροσκοπικής και της κβαντομηχανικής θεωρίας για τα φαινόμενα προ και κατά τη διάσπαση των στερεών μονωτικών των πρακτικών εφαρμογών

Από τα αναφερόμενα στο κεφάλαιο 4.3 φαίνεται ότι η κβαντομηχανική θεωρία των φαινομένων προ και κατά τη διάσπαση των στερεών μονωτικών δίνει πληροφορίες για το μη ορατό φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, που παράγεται στα υλικά αυτά κατά την ηλεκτρική καταπόνησή τους. Οι πληροφορίες αυτές δεν μπορούν να εξαχθούν από τη μακροσκοπική θεώρηση των παραπάνω φαινομένων. Πλεονέκτημα όμως της μακροσκοπικής θεωρίας για τη γήρανση και τη διάσπαση των στερεών μονωτικών φαίνεται ότι είναι ο διαχωρισμός μεταξύ εσωτερικών και εξωτερικών μερικών εκκενώσεων στο διάγραμμα της χρονικής μεταβολής της εφαρμοζόμενης τάσης, που ενδιαφέρει ιδιαίτερα στην πράξη. Ο διαχωρισμός αυτός των μερικών εκκενώσεων δεν μπορεί να δοθεί από την θεωρία του ιονισμού με κρούσεις, γιατί ο συντελεστής A στην σχέση 4.3.3-1 αφορά το μονωτικό και όχι το περιβάλλον του και η τιμή της θα πρέπει να εξαρτάται από την διαχρονική μεταβολή της μοριακής δομής του υλικού. Αν π.χ. πραγματοποιήσει κανείς τα πειράματα της παραγράφου 4.3.3 με κρουστικές τάσεις $1,2/50\mu\text{s}$ (ή με $10/200\mu\text{s}$) και προσεγγίσει ακολούθως τις πειραματικές χαρακτηριστικές $Q = f(\hat{U}_κ)$ με την σχέση 4.3.3-1, θα διαπιστώσει ότι ο συντελεστής A έχει διαφορετική τιμή, από εκείνη κατά την καταπόνηση με κρουστικές τάσεις $250/2500 \mu\text{s}$. Η διαφορετική αυτή τιμή του συντελεστή A (κατά την καταπόνηση με κρουστικές τάσεις $1,2/50\mu\text{s}$, ή $10/200\mu\text{s}$) μπορεί να θεωρηθεί μόνο ως μία ένδειξη ότι συμβαίνει ιονισμός με κρούσεις, χωρίς όμως να καθορίζεται η περιοχή εκδήλωσής του (στον όγκο του μονωτικού, ή στην επιφάνεια του, ή στον όγκο και στην επιφάνεια του μονωτικού). Γι' αυτό, δεν μπορεί να καταλήξει κανείς, μέσω της κβαντομηχανικής θεώρησης των φαινομένων προ και κατά τη διάσπαση των στερεών μονωτικών, στον διαχωρισμό των μερικών εκκενώσεων στα παλμογραφήματα των αλμάτων δυναμικού.

Από τα παραπάνω φαίνεται, ότι για την ερμηνεία των φαινομένων προ και κατά τη διάσπαση των στερεών μονωτικών χρειάζεται να συνδυαστούν οι δύο θεωρίες, ώστε να δίνουν περισσότερες πληροφορίες για την πράξη. Ένα ισοδύναμο κύκλωμα, που έχει προταθεί για τον σκοπό αυτό, δίνεται στο σχήμα 4.4-1. Πρόκειται ουσιαστικά για μία συμπλήρωση του ισοδύναμου κυκλώματος των Gemant-Philippoff (σχήμα 4.1.3-4), όπου όμως η τιμή του εφαρμοζόμενου πεδίου έχει σημασία για την εκδήλωση των επιμέρους φαινομένων. Αν υποθέσει κανείς, ότι η έναρξη των μερικών εκκενώσεων συμβαίνει στην τιμή της πεδιακής E_0 (κατά την παράγραφο 4.3.3 περίπου $0,2\text{MV/cm}$), τότε, τα φαινόμενα, που εκδηλώνονται στο μονωτικό, αποδίδονται από το ισοδύναμο κύκλωμα του σχήματος 4.4-1 ως ακολούθως :

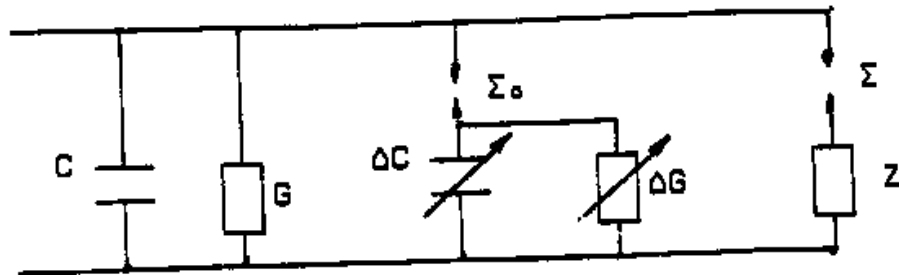
- 1) Για $E < E_0$: Η συμπεριφορά του υλικού είναι ιδανική (δεν διασπώνται οι σπινθηριστές Σ_0 και Σ).
- 2) Για $E > E_0$: Εκδηλώνονται μερικές εκκενώσεις (διασπάται ο Σ_0) και η αύξηση της ειδικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας διέπεται από

την σχέση: $\sigma = \sigma_0 e^{(-W/kT)}$.

3) Για $E \gg E_0$: Εμφανίζεται αρνητική διαφορική αντίσταση και εκδηλώνεται ιονισμός με κρούσεις. Δεν ισχύει η σχέση $\sigma = \sigma_0 e^{(-W/kT)}$,

αλλά η σχέση : $Q = Q_0 e^{\left[\frac{A(E^2 - E_0^2)}{E_0^2} \right]}$

Το φάσμα της ακτινοβολίας, που εκπέμπεται, εξαρτάται από τη τιμή E. Για τιμές $W > 20$ eV συμβαίνει διάτρηση.



Σχήμα 4.4-1 : Ένα ισοδύναμο κύκλωμα συνδυασμού της μακροσκοπικής και της κβαντομηχανικής θεωρίας για τη γήρανση και τη διάτρηση [1].

C : Ιδανική χωρητικότητα.

G : Ιδανική αγωγιμότητα.

ΔC : Αύξηση της χωρητικότητας λόγω μερικών εκκενώσεων.

ΔG : Αύξηση της αγωγιμότητας λόγω μερικών εκκενώσεων.

Z : Αρνητική διαφορική αντίσταση.

Σ_0 : Σπινθηριστής έναρξης των μερικών εκκενώσεων.

Σ : Σπινθηριστής εκδήλωσης της Z.

B. Ο ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Κάθε ηλεκτροτεχνική κατασκευή, αποτελείται από ένα πλήθος επαφών και μονώσεων. Είναι, λοιπόν, καθοριστικής σημασίας η μελέτη και κατανόηση της συμπεριφοράς των μονώσεων, για την σωστή λειτουργία του ηλεκτρολογικού εξοπλισμού. Η σπουδαιότητα των μονώσεων, δημιουργεί την ανάγκη για βαθύτερη γνώση των φαινομένων που αφορούν την αντοχή μιας μόνωσης στις ηλεκτρικές τάσεις που την καταπονούν.

Σκοπός της παρούσης διπλωματικής εργασίας είναι η παρουσίαση μελετών που έχουν γίνει επί του τομέα των ηλεκτρικών μονώσεων. Αν και η εργασία αυτή, εστιάζει σε μεγαλύτερο βαθμό στους τύπους των υγρών μονωτικών, θεωρούμε απαραίτητη την παράθεση πληροφοριών και για τους άλλους δύο τύπους μονωτικών (στερεά και αέρια), καθώς σε πολλές περιπτώσεις είναι απαραίτητος ο συνδυασμός μονωτικών(είτε της ίδιας φυσικής κατάστασης, είτε όχι) για την επίτευξη της κατάλληλης μόνωσης του εξοπλισμού (π.χ. σύστημα μόνωσης χαρτιού-λαδιού στην μόνωση των μετασχηματιστών).

Η ύπαρξη μεγεθών που χαρακτηρίζουν την κατάσταση των μονωτικών είναι απαραίτητη, καθώς μέσω αυτών λαμβάνουμε πληροφορίες για τις δυνατότητες της μόνωσης και αξιολογούμε το κατά πόσον μπορεί το υλικό να ανταποκριθεί στις τεχνικές προδιαγραφές. Το θεωρητικό υπόβαθρο της εργασίας μας περιέχει πληροφορίες σχετικά με τα κριτήρια αξιολόγησης των μονωτικών. Επιπλέον, όμως, στα πειράματα που παραθέτονται στην συνέχεια παρατηρούμε την τάση των επιστημόνων να μελετήσουν τα "όρια" των ηλεκτρικών μονώσεων ως προς τους παράγοντες που μειώνουν την διηλεκτρική τους αντοχή και επίσης προκαλούν την γήρανση των μονώσεων. Γίνεται προσπάθεια σύγκρισης των μονωτικών και κατάταξής τους ανάλογα με παράγοντες που αφορούν τις τεχνικές τους προδιαγραφές αλλά και το κόστος τους.

Γ. ΕΡΕΥΝΑ ΣΤΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΠΑΡΕΛΘΟΝΤΙΚΩΝ ΕΡΓΑΣΙΩΝ ΣΕ ΘΕΜΑΤΑ ΔΙΑΣΠΑΣΗΣ ΥΓΡΩΝ ΜΟΝΩΤΙΚΩΝ

Η ηλεκτρική διάσπαση των υγρών μονωτικών είναι μία σύνθετη διαδικασία και δεν υπάρχει μία μοναδική θεωρία που εξηγεί όλα τα πειραματικά αποτελέσματα. Οι συνθήκες, υπό τις οποίες διεξάγεται το κάθε πείραμα, παίζουν καθοριστικό ρόλο για το ποιός μηχανισμός θα επεξηγή τα αποτελέσματα σε ικανοποιητικό βαθμό.

Ο έλεγχος της καθαρότητας των υγρών μονωτικών ήταν περιορισμένος πριν το 1950. Ως αποτέλεσμα οι ευρείας κλίμακας μετρήσεις, επί της διηλεκτρικής αντοχής των υγρών μονωτικών, προέκυπταν συναρτήσεως μιας πληθώρας παραγόντων. Κατά τη δεκαετία του 1950, έγινε εφικτή η μέτρηση της διηλεκτρικής αντοχής του μονωτικού, εξαρτώμενη από έναν και μόνο παράγοντα, διατηρώντας όλους τους υπόλοιπους σταθερούς. Αυτό επετεύχθη με χρήση φυσικών και χημικών μεθόδων φιλτραρίσματος των δειγμάτων, με έλεγχο της επιφάνειας και της γεωμετρίας των ηλεκτροδίων, καθώς και με τη χρήση παλμών τάσης. Υπό αυτές τις "αποστειρωμένες" συνθήκες εργαστηρίου, είναι δυνατή η απομόνωση των εξωτερικών παραγόντων. Οι τιμές λοιπόν των πειραματικών διαδικασιών παρέχουν πλέον ένα πεδίο για την ανάπτυξη θεωριών που εξηγούν το φαινόμενο διάσπασης.

Νέοι μηχανισμοί αναπτύχθηκαν για την διερεύνηση παροδικών φαινομένων προ και κατά τη διάσπαση. Παρείχαν επιπρόσθετα στοιχεία στους μηχανισμούς, κατά τους οποίους ο ιονισμός οδηγούσε σε δημιουργία αγώγιμης σύνδεσης μεταξύ των ηλεκτροδίων[4].

2. ΕΞΕΛΙΞΗ ΣΤΟΝ ΤΟΜΕΑ ΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΤΩΝ ΥΓΡΩΝ ΜΟΝΩΤΙΚΩΝ

Κατά την περίοδο 1960-1990 έγιναν σημαντικές αλλαγές στους τύπους υλικών που χρησιμοποιούνταν ως υγρά μονωτικά. Αυτές προέκυψαν, με τη διαπίστωση, ότι κάποια μέχρι τότε σε χρήση υλικά, ήταν καταστροφικά για το περιβάλλον και τους ανθρώπους που έρχονταν σε επαφή μαζί τους. Ήταν λοιπόν αναγκαία η δημιουργία υποκατάστατων υλικών προς αντικατάσταση αυτών που αποσύρονταν. Επίσης την ίδια περίοδο σημειώνεται πρόοδος στην κατανόηση των ηλεκτρικών φορτίων και του τρόπου ροής τους δια μέσου των μονωτικών υγρών υπό την επίδραση ηλεκτρικών πεδίων.

Κατά την αναφερόμενη περίοδο τα κομβικά γεγονότα στον τομέα των υγρών μονωτικών ήταν :

- α) η απαγόρευση του PCB (ή Askarel)
- β) η εισαγωγή μεθανελαίων, ως έλαια μετασχηματιστών, αντί των ναφθανελαίων,
- γ) η ευαισθητοποίηση για τις επιπτώσεις, των υγρών μονωτικών, στο περιβάλλον.

Η απαγόρευση του Askarel άνοιξε τον δρόμο για δημιουργία υλικών που θα το αντικαθιστούσαν. Άλλαξε την κατάσταση στην ηλεκτρική βιομηχανία, καθώς οι μέχρι τότε έλεγχοι είχαν σχεδιαστεί για την διασφάλιση της ποιότητας του Askarel παρά για την απόδοσή του. Γενικότερα η ανησυχία για το περιβάλλον, έφερε αλλαγές σε όλες τις μέχρι τότε τεχνικές προδιαγραφές, κάνοντας αναγκαία την δημιουργία νέων και αυστηρότερων ελέγχων για τις ιδιότητες των νέων προϊόντων που επρόκειτο να αναπτυχθούν. Επίσης η μελέτη των φαινομένων διάσπασης υπό άλλο πρίσμα, απαιτούσε νέες μεθόδους όπως οι ηλεκτροπτικές. Έτσι, αναπτύχθηκε τεχνολογία και με μεθόδους όπως lasers και κάμερες μετατροπής εικόνας, έγινε εφικτή μια πιο αναλυτική γνώση επί των συμβάντων (μικροσκοπικά) που οδηγούν σε διάσπαση του μονωτικού.

Το Askarel, μέχρι τη στιγμή της κατάργησής του, είχε τον κυρίαρχο ρόλο ως υγρό μονωτικό των πυκνωτών και των μετασχηματιστών. Το θεωρούσαν ως το καλύτερο μονωτικό διότι ήταν αδιάβρωτο, είχε όλες τις επιθυμητές ηλεκτρικές ιδιότητες και ήταν άκαυστο. Η διαδικασία αντικατάστασης του δημιούργησε ερωτήματα σχετικά με τα επίπεδα επιτρεπτότητας των νέων υγρών μονωτικών και των σημείων ανάφλεξης τους. Ήταν δύσκολο τα υποψήφια προς αντικατάσταση του να το προσομοιώσουν (π.χ. τα σιλικονούχα έλαια ήταν άκαυστα αλλά η επιτρεπτότητά τους μικρή και το κόστος τους μεγάλο, τα ναφθανέλαια ήταν οικονομικά με τιμές επιτρεπτότητας εντός λογικών ορίων αλλά είχαν πολύ χαμηλό σημείο ανάφλεξης). Η τελική επιλογή ήταν μίγματα υγρών μονωτικών κατά τρόπο τέτοιο ώστε να επιτυγχάνονται οι επιθυμητές ιδιότητες στο υγρό μονωτικό.

Για μελέτες επί των μονωτικών χρησιμοποιήθηκαν όργανα όπως το ηλεκτρόμετρο (πολύ μεγάλη αντίσταση εισόδου που του επιτρέπει τη μέτρηση dc ρευμάτων τάξης pA) και χρήση μπαταριών ως πηγή ισχύος. Ηλεκτρονικές μετρήσεις με χρήση παλμογράφων και εφαρμογή, επί μονωτικών, ακτινών X. Επίσης χρησιμοποιήθηκαν ηλεκτρόδια αλκαλικών μετάλλων αντί συμβατικών. Μεγάλες δυνατότητες, τέλος, έδωσε η χρήση νέων φωτογραφικών τεχνικών υπερύψηλης ταχύτητας (ακτίνες laser, κάμερα μετατροπής εικόνας)[5].

3. ΕΡΕΥΝΕΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΣΕ ΜΕΤΡΑ ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ, ΣΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΜΟΝΩΣΗΣ ΧΑΡΤΙΟΥ-ΛΑΔΙΟΥ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗ

3.1 Εισαγωγή

Διηλεκτρικές δοκιμές, στο πεδίο του χρόνου και της συχνότητας, εφαρμόζονται ευρέως, για την εκτίμηση της κατάστασης του συστήματος μόνωσης χαρτιού – λαδιού του μετασχηματιστή. Τα αποτελέσματα των δοκιμών εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τη θερμοκρασία λειτουργίας. Η διανομή, μεταφορά και εξισορρόπηση της υγρασίας μεταξύ χαρτιού και λαδιού στο σύνθετο μονωτικό σύστημα εξαρτάται έντονα από τη θερμοκρασία (όταν η θερμοκρασία αυξάνεται, υγρασία μεταφέρεται από το χαρτί στο λάδι και αντίστροφα).

Η διάρκεια ζωής των μετασχηματιστών επηρεάζεται από την υποβάθμιση των μονωτικών του υλικών, η οποία προκαλείται από την θερμική καταπόνηση του συστήματος χαρτιού – λαδιού. Η θερμοκρασία, η οξειδωση και η υγρασία είναι παράγοντες που επιταχύνουν τη διαδικασία της γήρανσης των μονωτικών.

Η τάση ανάκτησης (recovery voltage – RV) και τα ρεύματα πόλωσης και αποπόλωσης (polarization and depolarization current – PDC), χρησιμοποιούνται ως δείκτες της κατάστασης γήρανσης του μονωτικού συστήματος χαρτιού – λαδιού στους μετασχηματιστές [6].

Για την μελέτη των μέτρων διηλεκτρικής ανταπόκρισης (RV) και (PDC) εφαρμόζουμε ένα παλμό δυναμικού :

$$U(t) = \begin{cases} U_0, & 0 \leq t \leq t_1 \\ 0, & \text{αλλού} \end{cases} \quad (3.1-1)$$

σε σύστημα μόνωσης, αρχικά ευρισκόμενο σε ηρεμία. Κατά τη διάρκεια της περιόδου φόρτισης ($0 \leq t \leq t_1$), το ρεύμα φόρτισης (ρεύμα πόλωσης) δίνεται από την σχέση :

$$i_{pol}(t) = C_0 \cdot U_0 \cdot \left[\frac{\sigma_r}{\epsilon_0} + f(t) \right] \quad (3.1-2)$$

όπου : $C_0 = C/\epsilon_r$: γεωμετρική χωρητικότητα

C : μετρήθαισα χωρητικότητα σε βιομηχανική συχνότητα

ϵ_r : επιτρεπτικότητα μονωτικού συστήματος

ϵ_0 : επιτρεπτικότητα του κενού

σ_r : μέση αγωγιμότητα μονωτικού συστήματος

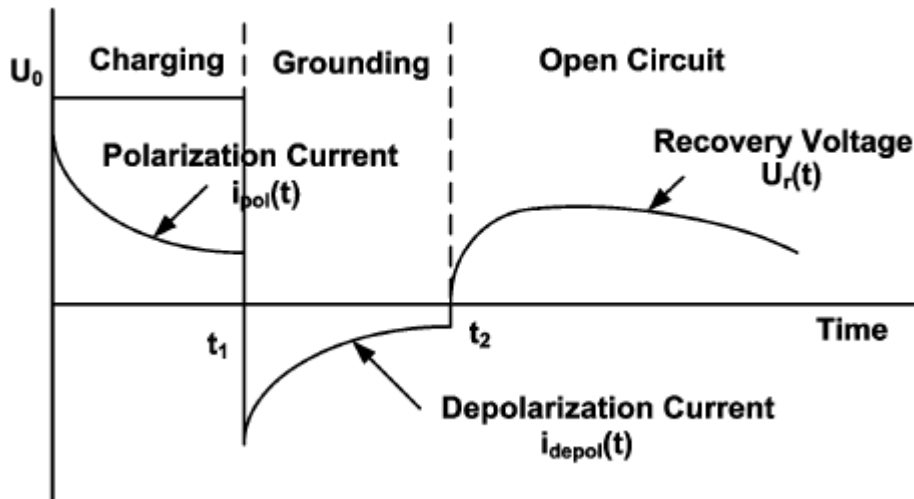
$f(t)$: συνάρτηση διηλεκτρικής ανταπόκρισης του μονωτικού συστήματος (δίνει πληροφορίες περί των ιδιοτήτων των μονωτικών).

Έπειτα το μονωτικό σύστημα γειώνεται κατά την περίοδο $t_1 \leq t \leq t_2$.

Η αποφόρτιση συμβαίνει με το ρεύμα αποπόλωσης, το οποίο δίνεται :

$$i_{depol}(t) = C_0 \cdot U_0 \cdot [f(t) - f(t + t_1)] \quad (3.1-3)$$

Την στιγμήν $t = t_2$, η γείωση αφαιρείται και συνδέουμε βολτόμετρο κατά μήκος του μονωτικού. Ανάλογα με το χρονικό διάστημα, στο οποίο το μονωτικό υπήρξε γειωμένο, πρώην πολωμένα μόρια έρχονται σε πλήρη χαλάρωση, ενώ κάποια άλλα όχι. Η πλήρης χαλάρωση του συνόλου του μονωτικού θα συμβεί μετά το διάστημα, στο οποίο ήταν γειωμένο, δίνοντας μια τάση ανάκτησης (RV) κατά μήκος των ηλεκτροδίων της μόνωσης. Η διαδικασία φαίνεται παραστατικά στο σχήμα (3.1-1).



Σχήμα 3.1-1 : Ρεύματα πόλωσης – αποπόλωσης και τάση ανάκτησης [6],

όπου: Time : χρόνος
 U_0 : εφαρμοζόμενο δυναμικό
 Polarization Current : ρεύμα πόλωσης
 Depolarization Current : ρεύμα αποπόλωσης
 Recovery Voltage : τάση ανάκτησης
 Charging : φόρτιση
 Grounding : γείωση
 Open Circuit : ανοικτοκύκλωμα.

Η εκτίμηση της αγωγιμότητας του μονωτικού συστήματος μπορεί να γίνει ως εξής [6]. Φόρτιση και αποφόρτιση του μονωτικού συστήματος, για κατάλληλο χρόνο ώστε $f(t+t_1) \approx 0$. Τότε από τις σχέσεις 3.1-2 και 3.1-3 έχουμε :

$$\sigma_r \approx \frac{\epsilon_0}{C_0 \cdot U_0} \cdot (i_{pol}(t) - i_{depol}(t)) \quad (3.1-4)$$

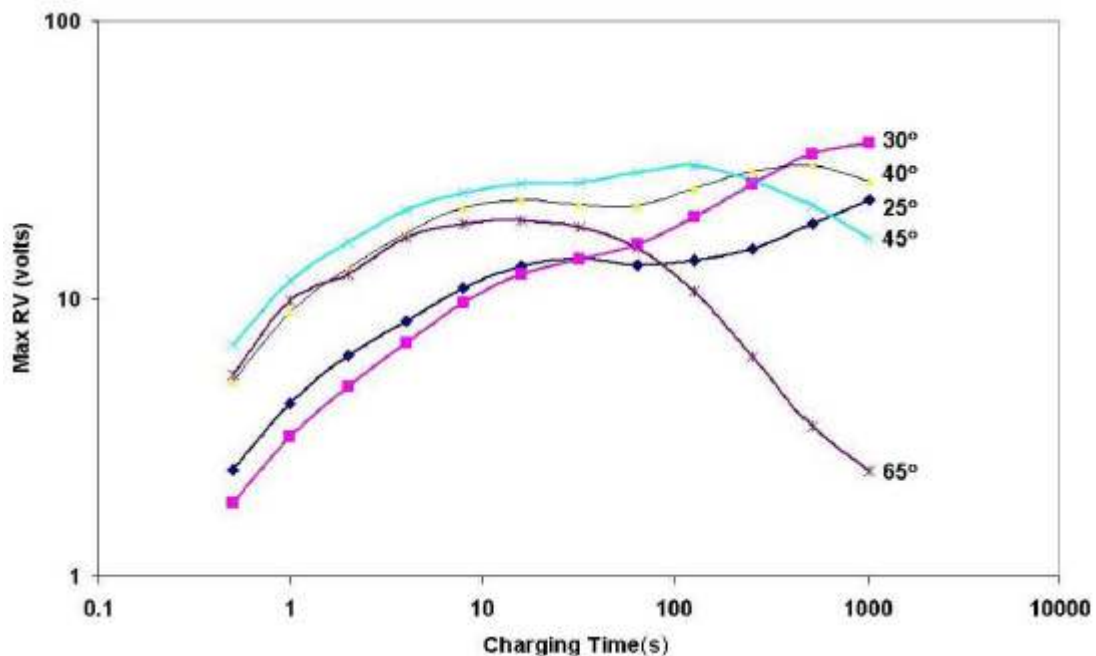
όπου : ϵ_0 : επιτρεπτότητα κενού
 C_0 : γεωμετρική χωρητικότητα
 U_0 : εφαρμοζόμενο δυναμικό

3.2 Πειραματική διαδικασία

Το μονωτικό σύστημα του μετασχηματιστή (3Φ) αποτελείται από τρία τυλίγματα μονωμένα με χαρτί και λάδι. Ένας αισθητήρας θερμότητας τύπου 100Ω Pt385 εισάγεται στο δοχείο για τη μέτρηση της πραγματικής θερμοκρασίας. Ο λόγος μαζών λαδιού/χαρτιού της μόνωσης είναι 5,8/1. Η θερμοκρασία ρυθμίστηκε στις τιμές 25,30,40,45,65°C. Για την κάθε τιμή αφέθηκε δέκα ημέρες. Αυτό εξασφάλισε σταθεροποίηση παραγόντων εξαρτημένων από την θερμοκρασία (μετά τις επτά ημέρες οι συνθήκες ήταν ικανοποιητικές). Η σχετική υγρασία ρυθμίστηκε στο 65%. Κατόπιν εξασφάλισαν ότι τα αποτελέσματα εξαρτώνται μόνο από την θερμοκρασία ελήφθησαν μετρήσεις για τα (PDC) και (RV) [6].

3.3 Ανάλυση αποτελεσμάτων

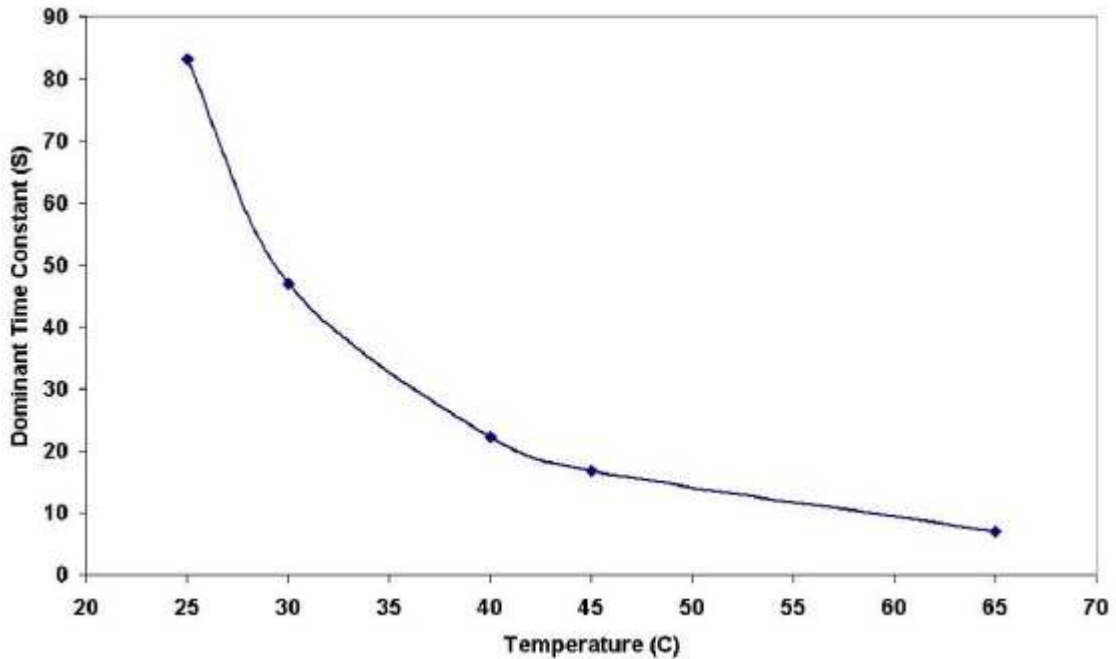
Για την δημιουργία RV γραφήματος σε δεδομένη θερμοκρασία (ο λόγος χρόνου φόρτισης-αποφόρτισης ρυθμίστηκε ίσος με δύο) μετρήθηκαν οι κορυφές των κύκλων φόρτισης-αποφόρτισης και οι αντίστοιχοι χρόνοι. Η διαδικασία επαναλήφθηκε για χρόνους από 0,5s ως 1024s με αύξηση ισχύος ανά 2s. Οι κορυφές των RV ως προς τον αντίστοιχο χρόνο φόρτισης φαίνονται στο σχήμα 3.3-1.



Σχήμα 3.3-1 : Γράφημα RV ως προς το χρόνο φόρτισης (Charging time) σε διάφορες θερμοκρασίες [6].

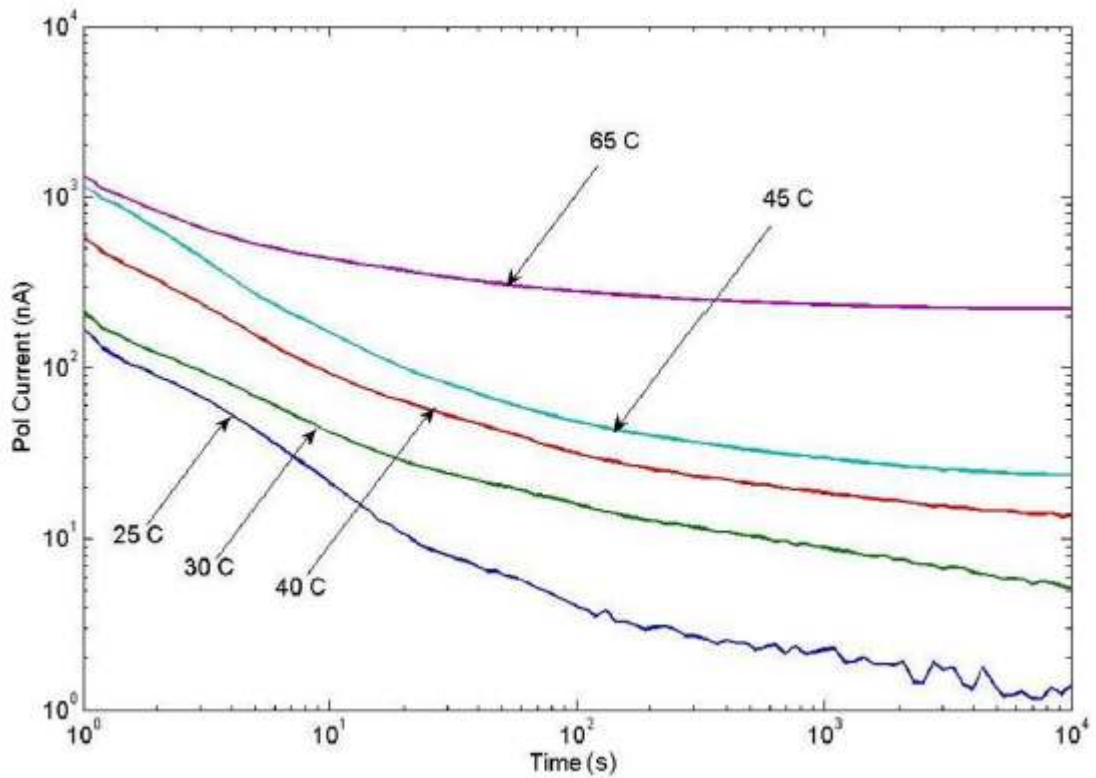
Είναι εμφανές ότι η θερμοκρασία προκαλεί μετατόπιση του γραφήματος. Για υψηλότερες θερμοκρασίες, οι αντίστοιχες κορυφές, συναντώνται σε μικρότερους χρόνους φόρτισης. Αυτό αποδίδεται στην αύξηση υγρασίας στο λάδι, η οποία μεταφέρεται από το χαρτί κι αυτό συμβαίνει λόγω αύξησης της θερμοκρασίας. Το γράφημα RV είναι ενδεικτικό της κατάστασης της μόνωσης.

Η χρονική στιγμή, που συμβαίνουν οι κορυφές, ορίζεται ως κύρια σταθερά χρόνου. Στο σχήμα 3.3-2 βλέπουμε την εξάρτησή της από την θερμοκρασία.

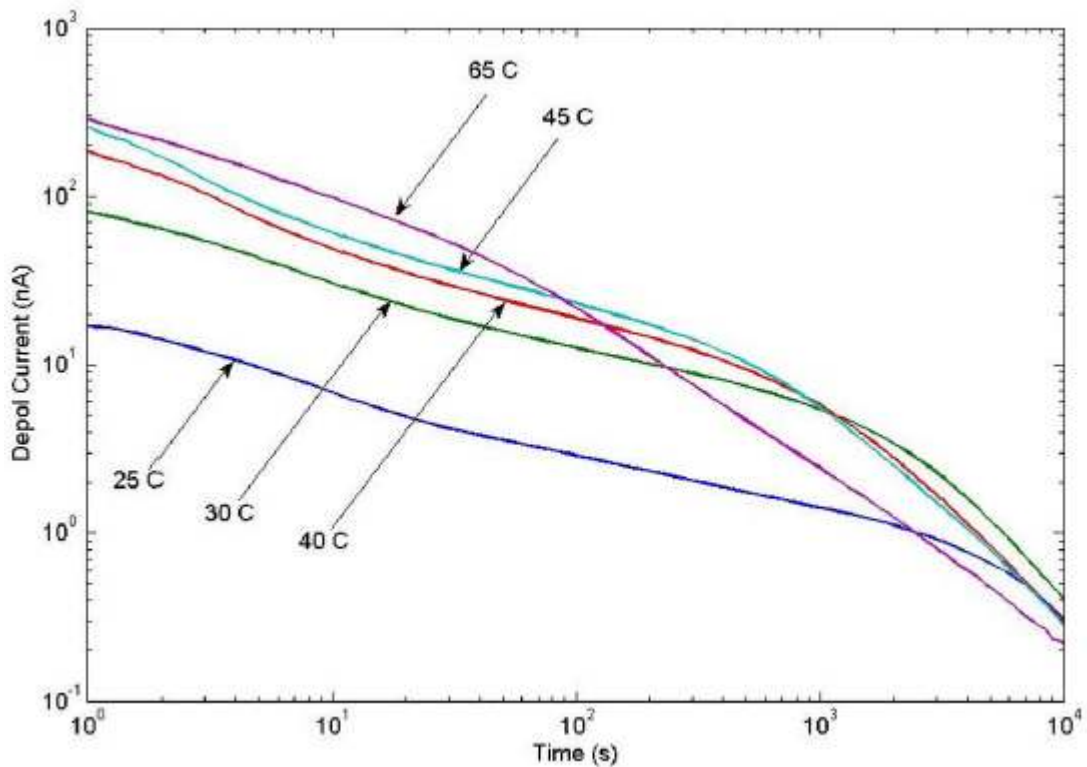


Σχήμα 3.3-2 : Κύρια σταθερά χρόνου (Dominant Time Constant) ως προς την θερμοκρασία (Temperature) [6].

Η μέτρηση των PDC έγινε με φόρτιση του μετασχηματιστή στα 500V για 10.000s και αποφόρτιση για 10.000s. Προέκυψαν λοιπόν τα διαγράμματα όπως φαίνονται στα σχήματα 3.3-3 και 3.3-4 . Η θερμοκρασία επιδρά στα ρεύματα πόλωσης και αποπόλωσης, καθώς όπως φαίνεται τα διαγράμματα μετατοπίζονται προς υψηλότερες τιμές με την αύξηση της θερμοκρασίας [6].

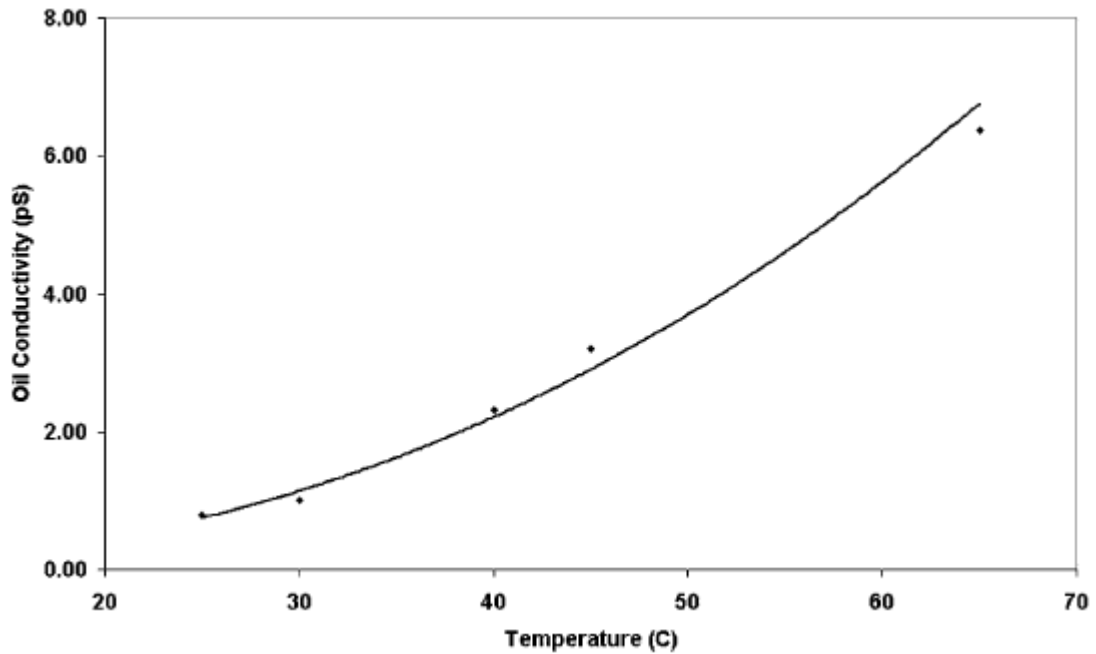


Σχήμα 3.3-3 : Ρεύματα πόλωσης (Pol Current) ως προς τον χρόνο (Time) για διάφορες τιμές της θερμοκρασίας (Temperature) [6].

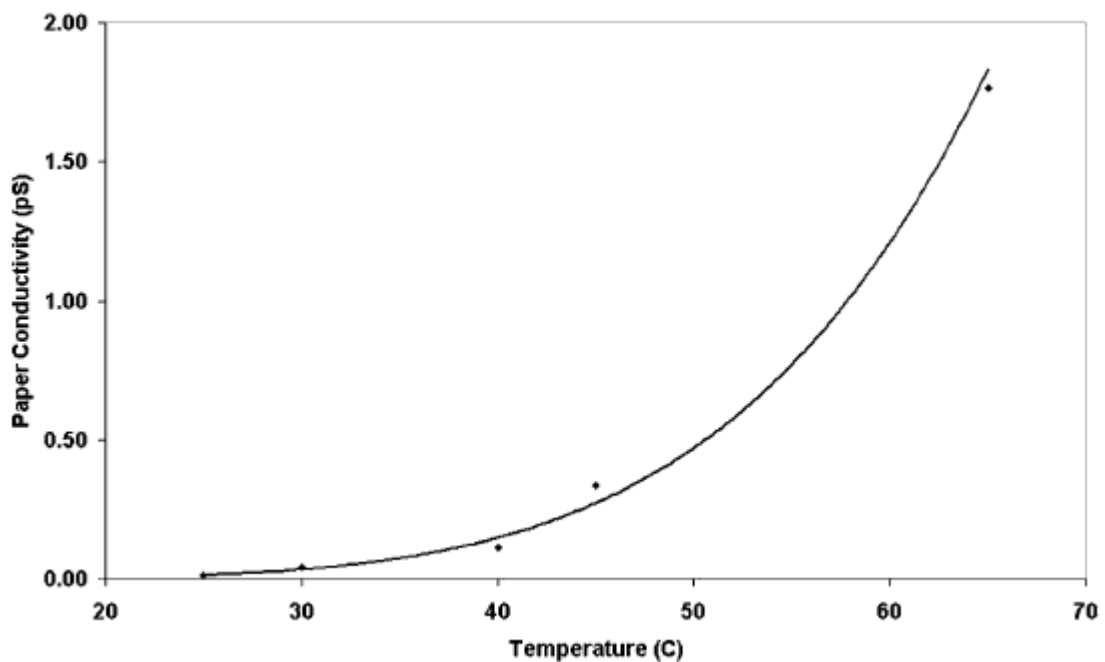


Σχήμα 3.3-4 : Ρεύματα αποπόλωσης (Depol Current) ως προς το χρόνο (Time) για διάφορες τιμές της θερμοκρασίας [6].

Στα σχήματα 3.3-5 και 3.3-6 δίνονται οι αγωγιμότητες του λαδιού και του χαρτιού αντίστοιχα ως προς τη θερμοκρασία.



Σχήμα 3.3-5 : Αγωγιμότητα λαδιού (Oil Conductivity) ως προς τη θερμοκρασία (Temperature) [6].



Σχήμα 3.3-6 : Αγωγιμότητα χαρτιού (Paper Conductivity) ως προς τη θερμοκρασία (Temperature) [6].

3.4 Σχόλια

Η μέτρηση των PDC και RV, είναι μέτρο διάγνωσης της κατάστασης της μόνωσης των μετασχηματιστών. Είναι απαραίτητη η πλήρης κατανόηση των θερμοκρασιακών επιδράσεων, για την σωστή ανάλυση και ερμηνεία των δεικτών, καθώς με την θερμοκρασία επηρεάζονται οι συνθήκες που επικρατούν στο μονωτικό σύστημα (π.χ. υγρασία).

4. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΣΕ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΔΙΑΡΡΕΟΝΤΟΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ ΣΕ ΣΙΛΙΚΟΝΟΥΧΟ ΕΛΑΙΟ

4.1 Εισαγωγή

Με σκοπό την ανάπτυξη ηλεκτρολογικού εξοπλισμού που πληροί τις απαιτούμενες προδιαγραφές, αλλά και φιλικό προς το περιβάλλον, εξετάζεται η απόδοση του σιλικονούχου ελαίου. Δεδομένα σχετικά με αυτό είναι λιγοστά. Γίνεται επίσης σύγκριση χαρακτηριστικών διαρρέοντος ηλεκτρικού φορτίου (streaming electrification) και ηλεκτρικής διάσπασης, σιλικονούχου ελαίου και ορυκτελαίου. Όσον αφορά το σιλικονούχο έλαιο, διερευνάται η εξάρτηση, του διαρρέοντος ηλεκτρικού φορτίου και της πυκνότητας φορτίου, από την θερμοκρασία του ελαίου [7].

4.2 Πειραματική διαδικασία

Έγινε χρήση δύο τύπων σιλικονούχων ελαίων στα πειράματα : KF96-20 και KF96-50 με κινητικό ιξώδες 20 και 50 cSt (cSt : mm²/s) αντίστοιχα. Το έλαιο τοποθετήθηκε στο πειραματικό δοχείο, αφού προηγουμένως φορτίστηκε περνώντας μέσα από κατάλληλο φίλτρο. Κατόπιν αποπίεσης (10 Pa), απουγροποίησης, και επαναφοράς σε ατμοσφαιρική πίεση, ελαχιστοποιήθηκε η υγρασία στο έλαιο. Έπειτα το δείγμα αφέθηκε για 24 ώρες σε ηρεμία. Οι εργαστηριακές συνθήκες, για την μέτρηση της ηλεκτρικής ροής, περιελάμβαναν ροή 2,5 lt/min, σχετική υγρασία 60%. Η θερμοκρασία τοποθετήθηκε στους 30,50,70,100,130°C αυξανόμενη σταδιακά. Όταν οι συνθήκες σταθεροποιήθηκαν, μετρήθηκε το δυναμικό στο εσωτερικό ηλεκτρόδιο του πειραματικού δοχείου [7]. Μέσω της σχέσης (από v.Gauss) :

$$\rho_{oil} = \frac{2 \cdot \epsilon_{oil}}{d^2} \cdot V_{oil} \quad (4.2-1)$$

όπου : ρ_{oil} : πυκνότητα φορτίου

V_{oil} : δυναμικό εσωτερικού ηλεκτροδίου

d : απόσταση εσωτερικού ηλεκτροδίου και γειωμένων ηλεκτροδίων

ϵ_{oil} : σχετική επιτρεπτικότητα ελαίου.

υπολογίζεται έμμεσα η πυκνότητα φορτίου.

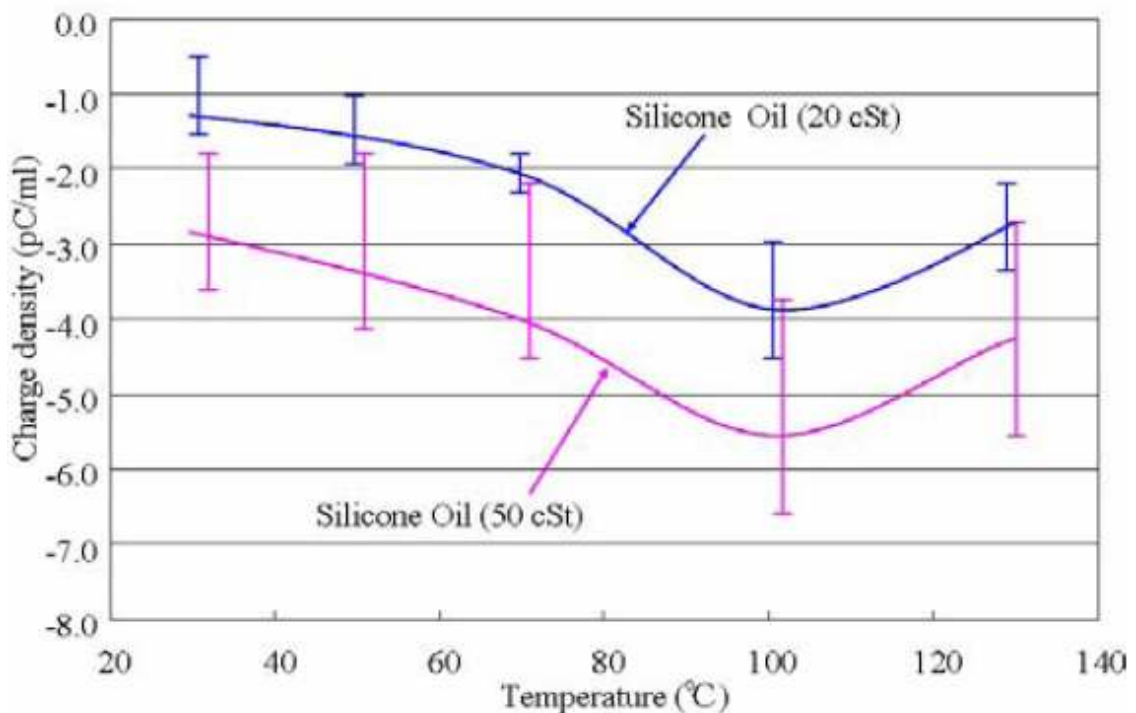
4.3 Ανάλυση αποτελεσμάτων

Στον πίνακα 4.3-1 φαίνονται η ελάχιστη, η μέγιστη και η μέση τιμή της πυκνότητας φορτίου για τους δύο τύπους σιλικονούχου ελαίου (20 και 50 cSt)

που χρησιμοποιήθηκαν. Στο σχήμα 4.3-1 φαίνεται η εξάρτηση, της πυκνότητας φορτίου, ως προς τη θερμοκρασία.

Temperature (°C)	Charge density (pC/ml)					
	20 (cSt)			50 (cSt)		
	min	ave	max	min	ave	max
30	-0.6	-1.3	-1.5	-1.8	-2.9	-3.6
50	-1.0	-1.4	-1.9	-1.7	-3.3	-4.0
70	-1.8	-2.1	-2.3	-2.1	-4.0	-5.0
100	-3.4	-3.8	-4.5	-3.7	-5.6	-6.5
130	-2.1	-2.8	-3.3	-2.7	-4.3	-5.6

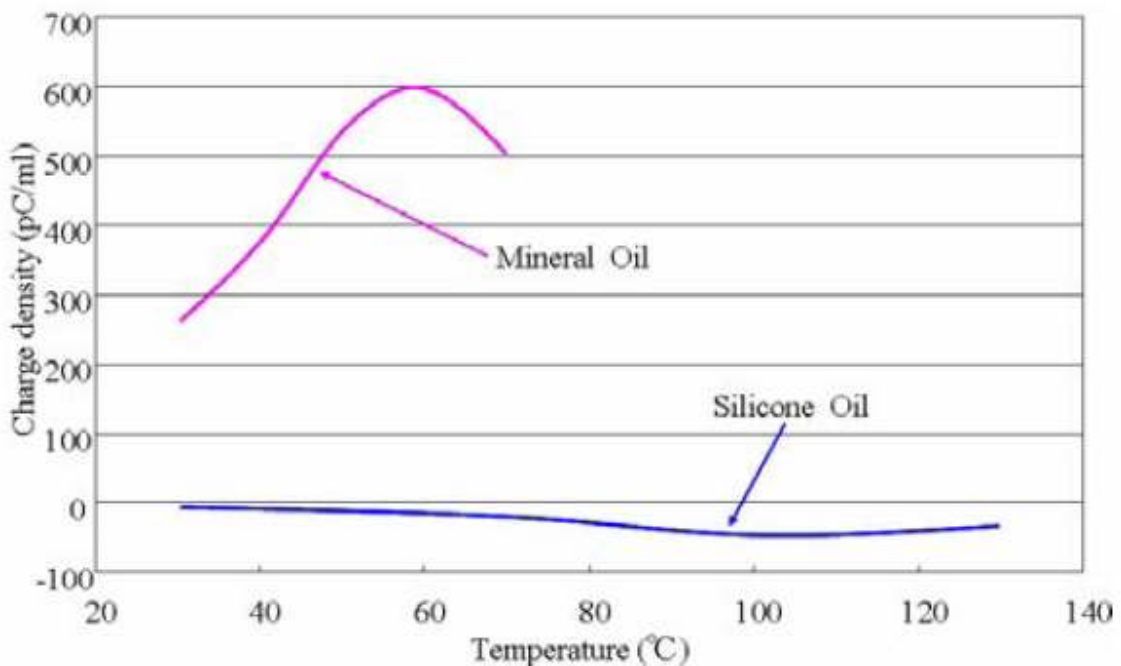
Πίνακας 4.3-1 : Πυκνότητα φορτίου (Charge density) σιλικονούχου ελαίου για 20 και 50 cSt [7].



Σχήμα 4.3-1 : Πυκνότητα φορτίου (Charge density) σιλικονούχου ελαίου (Silicone Oil) για 20 και 50 cSt ως προς την θερμοκρασία (Temperature) [7].

Από τον πίνακα 4.3-1 φαίνεται ότι η πυκνότητα φορτίου ήταν αρνητική για όλες τις τιμές της θερμοκρασίας, παρ'όλα αυτά υπάρχει εξάρτηση των τιμών από την θερμοκρασία. Η μέση πυκνότητα φορτίου, για το έλαιο των 20cSt, παρουσιάζει αύξηση (κατ' απόλυτη τιμή) μέχρι την θερμοκρασία των 100°C ενώ μετά μειώνεται (κατ' απόλυτη τιμή). Το τελευταίο επιβεβαιώνεται και από το σχήμα 4.3-1, όπου φαίνεται να παρουσιάζεται μέγιστο (κατ' απόλυτη τιμή) περί τους 100°C. Οι τιμές πυκνότητας φορτίου για το έλαιο των 50cSt ήταν μεγαλύτερες (κατ' απόλυτη τιμή) από το έλαιο των 20cSt. Η μεταβολή τους, όμως, σε σχέση με την θερμοκρασία, ήταν παρόμοια με αυτή του άλλου ελαίου. Αυτό μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η πυκνότητα φορτίου, για το σιλικονούχο έλαιο, ως συνάρτηση της θερμοκρασίας δεν εξαρτάται από την τιμή του κινηματικού ιξώδους.

Στο σχήμα 4.3-2 δίνεται μια σύγκριση των μεταβολών ηλεκτρικής φόρτισης ως προς την θερμοκρασία, μεταξύ σιλικονούχου ελαίου και ορυκτελαίου. Φαίνεται ότι οι πυκνότητες φορτίου αυξάνονται με την αύξηση της θερμοκρασίας (για το σιλικονούχο έλαιο, η αύξηση κατ' απόλυτη τιμή) και παρουσιάζουν ένα μέγιστο σε μια ορισμένη τιμή θερμοκρασίας. Αυτή η τιμή θερμοκρασίας διαφέρει μεταξύ σιλικονούχου ελαίου (100°C) και ορυκτελαίου (60°C). Επιπλέον οι τιμές μέγιστων πυκνοτήτων φορτίου (κατ' απόλυτη τιμή) διαφέρουν μεταξύ τους στο εξής : αυτή του σιλικονούχου ελαίου είναι πολύ μικρότερη από την αντίστοιχη του ορυκτελαίου. Το τελευταίο υποδηλώνει ανωτερότητα του σιλικονούχου ελαίου ως προς το ορυκτέλαιο, σε χαρακτηριστικό διαρρέοντος ηλεκτρικού φορτίου [7].



Σχήμα 4.3-2 : Πυκνότητα φορτίου (Charge density) ως προς την θερμοκρασία (Temperature) για σιλικονούχο έλαιο (Silicone Oil) και ορυκτέλαιο (Mineral Oil) [7].

4.4 Σχόλια

Το σιλικονούχο έλαιο μελετήθηκε, με την διερεύνηση της σχέσης μεταξύ διαρρέοντος ηλεκτρικού φορτίου και της θερμοκρασίας. Οι κύριες παρατηρήσεις ήταν οι αρνητικές τιμές πυκνότητας φορτίου και η αύξηση τους (κατ' απόλυτη τιμή) με την αύξηση της θερμοκρασίας. Εμφάνιση κορυφής πυκνότητας φορτίου στους 100°C και μη εξάρτηση μεταβολών της (ως προς θερμοκρασία) από την τιμή του κινηματικού ιξώδους. Τέλος συγκρινόμενο με το ορυκτέλαιο το σιλικονούχο έλαιο παρουσίασε πολύ μικρότερη κορυφή (απόλυτη τιμή) πυκνότητας ροής. Αυτό σημαίνει ότι είναι λιγότερο πιθανή η εκδήλωση ηλεκτρικής διάσπασης στο σιλικονούχο έλαιο.

5. ΘΕΡΜΙΚΗ ΕΞΑΡΤΗΣΗ ΤΟΥ ΙΞΩΔΟΥΣ ΚΑΙ ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΓΙΑ ΗΛΕΚΤΡΟΜΟΝΩΤΙΚΑ ΕΛΑΙΑ. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΜΙΓΜΑΤΩΝ ΕΛΑΙΩΝ.

5.1 Εισαγωγή

Τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των μιγμάτων μονωτικών ελαίων, ενδιαφέρουν ιδιαίτερα, για χρήση σε ηλεκτροτεχνικό εξοπλισμό υψηλών τάσεων, καθώς επίσης και για την κατανόηση βασικών διηλεκτρικών θεωριών. Η μίξη μονωτικών, με σκοπό την δημιουργία αποτελέσματος με τα επιθυμητά ηλεκτρικά χαρακτηριστικά, είναι ένα σημαντικό ζήτημα. Γίνεται λοιπόν μία προσπάθεια για εύρεση μεθόδων, που υπολογίζουν ή προβλέπουν τις διηλεκτρικές απώλειες ή συντελεστή απωλειών (dissipation factor), των σύνθετων υγρών μονωτικών. Τα αποτελέσματα προκύπτουν συναρτήσει των χαρακτηριστικών των συνιστωσών του μίγματος, καθώς επίσης και των αναλογιών τους στο μίγμα. Φαίνεται ότι ο συντελεστής απωλειών δεν παρουσιάζει γραμμική εξάρτηση από τις αναλογίες των συνθετικών [9].

5.2 Πειράματα

Στο παρόν εδάφιο δεν θα αναφέρουμε λεπτομέρειες για τις πειραματικές διαδικασίες που πραγματοποιήθηκαν επί μακρά χρονική περίοδο (ο αναγνώστης μπορεί να αναζητήσει περισσότερες πληροφορίες γι' αυτές σε δημοσιεύσεις του συγγραφέα B.P Kang [8,9,10]).

Αρχικά πραγματοποιήθηκαν πειράματα με μίξη τριών ελαίων και αργότερα με μίξη δέκα ελαίων. Για το ιξώδες του τελικού μίγματος παρατηρήθηκε ότι ισχύει η σχέση (με μέγιστη απόκλιση $\pm 10\%$) [9].

$$\log\left(\frac{1}{\eta}\right) = x_1 \cdot \log\left(\frac{1}{\eta_1}\right) + x_2 \cdot \log\left(\frac{1}{\eta_2}\right) \quad (5.2-1)$$

όπου : η : το ιξώδες του μίγματος
 η_1 : το ιξώδες του συστατικού 1
 η_2 : το ιξώδες του συστατικού 2
 x_1 : το ποσοστό του συστατικού 1
 x_2 : το ποσοστό του συστατικού 2

5.3 Ανάλυση αποτελεσμάτων

Από τα αποτελέσματα που προέκυψαν φαίνεται ότι ο συντελεστής απωλειών στα 60Hz (USA) δεν παρουσιάζει γραμμική εξάρτηση ως προς τις αναλογίες των συνθετικών του μίγματος (πληθώρα πειραματικών τιμών του συντελεστή απωλειών, καθώς και διαγράμματα εξάρτησης του ως προς τη θερμοκρασία, για διάφορους συνδυασμούς μίξης ελαίων, μπορούν να αναζητηθούν από τον αναγνώστη στις δημοσιεύσεις του συγγραφέα B.P Kang [8,9,10]).

Για ένα μονωτικό έλαιο, ο συντελεστής απωλειών, ως προς κάποια γνωστή τιμή του σε μία θερμοκρασία, δίνεται από την παρακάτω σχέση :

$$\delta = \delta_1 \cdot C_\delta \cdot (\alpha - \alpha_1) \cdot 10^4 \quad (5.3-1)$$

όπου : δ : ο ζητούμενος συντελεστής απωλειών
 δ_1 : ο συντελεστής απωλειών στη γνωστή θερμοκρασία
 α : το αντίστροφο της ζητούμενης θερμοκρασίας σε °K
 α_1 : το αντίστροφο της γνωστής θερμοκρασίας σε °K
 C_δ : μία σταθερά συντελεστή απωλειών του ελαίου

Για μία εξαιρετικά υψηλή θερμοκρασία (όπου $\alpha_1 = 0$) για τον συντελεστή απωλειών θα ισχύουν (ως προς την τιμή του στη θερμοκρασία αυτή : δ_∞) οι εξής ισοδύναμες σχέσεις :

$$\delta = \delta_\infty \cdot C_\delta^{10^4 \cdot \alpha} \quad (5.3-2)$$

$$\Leftrightarrow \delta = \delta_\infty \cdot e^{10^4 \cdot \alpha \cdot \ln C_\delta} \quad (5.3-3)$$

$$\Leftrightarrow \ln \delta = 10^4 \cdot \alpha \cdot \ln C_\delta + \ln \delta_\infty \quad (5.3-4)$$

Οι σχέσεις 5.3-1 ως 5.3-4 αποδεικνύονται ακριβείς σε ικανοποιητικό βαθμό βάσει των πειραματικών αποτελεσμάτων. Αναφέρονται, όμως, στον υπολογισμό του συντελεστή απωλειών ενός μονωτικού ελαίου, ενώ εμείς προσπαθούμε να υπολογίσουμε τον αντίστοιχο συντελεστή του μίγματος ελαίων. Η χρήση των εξισώσεων ξεχωριστά για κάθε έλαιο και υπολογισμός του συντελεστή απωλειών του μίγματος, βάσει των συστατικών του, κάνει το πρόβλημα εξαιρετικά πολύπλοκο, αν όχι αδύνατο. Στην πράξη χρησιμοποιούμε μία σταθερά του ελαίου (C_δ) αντί για δυο [9]. Βάσει της σταθεράς C_δ του κάθε ελαίου υπολογίζουμε μια σταθερά συντελεστή απωλειών όλου του μίγματος από την σχέση :

$$C_\delta = \left[\frac{1}{n} \cdot (a \cdot C_{\delta a} + b \cdot C_{\delta b} + \dots + z \cdot C_{\delta n}) \right]^{1/n} \quad (5.3-5)$$

όπου : C_δ : σταθερά συντελεστή απωλειών μίγματος ελαίων
 $C_{\delta a}, \dots, C_{\delta n}$: σταθερές συντελεστή απωλειών του κάθε ελαίου
 n : πλήθος συνιστωσών του μίγματος
 a, b, \dots, z : ποσοστό κάθε ελαίου στο μίγμα ($a+b+\dots+z = 1$).

Βάσει πειραματικών αποτελεσμάτων προκύπτει η σχέση :

$$\delta = 5 \cdot 10^{-5} \cdot e^{(10^4 \cdot \alpha - 36) \cdot \ln C_\delta} \quad (5.3-6)$$

Συνδυασμός των σχέσεων 5.3-5 και 5.3-6 δίνει τον συντελεστή απωλειών του μίγματος ελαίων :

$$\delta = 5 \cdot 10^{-5} \cdot \exp \left\{ [10^4 \cdot \alpha - 36] \cdot \frac{1}{n} \cdot \ln \left[\frac{1}{n} \cdot (a \cdot C_{\delta a} + b \cdot C_{\delta b} + \dots + z \cdot C_{\delta n}) \right] \right\} \quad (5.3-7)$$

5.4 Σχόλια

Με χρήση των δεδομένων από τα πειράματα, έγινε προσπάθεια μελέτης των μιγμάτων μονωτικών ελαίων ως προς το ιξώδες και του συντελεστή απωλειών. Καταλήξαμε σε σχέσεις ικανοποιητικής ακρίβειας. Η γνώση των χαρακτηριστικών των "σύνθετων" μονωτικών ελαίων είναι θεμελιώδους σημασίας για τις ηλεκτροτεχνικές κατασκευές, καθώς μέσω των μίξεων γίνεται προσπάθεια επίτευξης των ζητούμενων ηλεκτρικών χαρακτηριστικών που χρειάζονται σε κάθε περίπτωση.

6. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΑΚΑΘΑΡΣΙΩΝ ΕΠΙ ΤΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ ΤΩΝ ΥΓΡΩΝ ΜΟΝΩΤΙΚΩΝ

6.1 Εισαγωγή

Η παρουσία αιωρούμενων σωματιδίων, στο μονωτικό λάδι του ηλεκτρολογικού εξοπλισμού, είναι αναπόφευκτη. Αυτή η "μόλυνση", επηρεάζει τις ηλεκτρομονωτικές ιδιότητες του λαδιού, επομένως και την ακεραιότητα του όλου εξοπλισμού από άποψης ηλεκτρικής μόνωσης.

Στην πράξη, στα μονωτικά συστήματα, συναντώνται διάφορες συγκεντρώσεις αγώγιμων και μη αγώγιμων σωματιδίων και σε διάφορα μεγέθη. Τα συνηθέστερα σωματίδια που βρίσκονται σε λάδια μετασχηματιστών, είναι από σίδηρο, χαλκό, αλουμίνιο και κυτταρίνη. Επίσης κατά τις ηλεκτρικές εκκενώσεις που συμβαίνουν στο λάδι, δημιουργούνται σωματίδια άνθρακα, τα οποία εμφανίζονται εντός του μονωτικού λαδιού στους διακόπτες και τους μετασχηματιστές.

Έχουν παρατηρηθεί δύο τύποι ηλεκτρικής διάσπασης, εξαρτώμενη από την παρουσία των αιωρούμενων σωματιδίων. Ο πρώτος, για χαμηλή ένταση ηλεκτρικού πεδίου (περίπου 0,6 kV/mm), όταν ένα σύννεφο σωματιδίων εμφανίζεται στο χώρο μεταξύ των ηλεκτροδίων. Ο δεύτερος για υψηλότερες εντάσεις ηλεκτρικού πεδίου (μεγαλύτερες των 12 kV/mm), ενώ τα σωματίδια είναι διασκορπισμένα εντός του δοχείου.

Η συγκέντρωση των αιωρούμενων σωματιδίων στο μονωτικό λάδι, μπορεί να μειωθεί μέσω φιλτραρίσματος, παρ' όλα αυτά είναι αδύνατη η πλήρης απομάκρυνση όλων των σωματιδίων. Το ηλεκτρικό φορτίο που μεταφέρουν τα σωματίδια καθώς και η ταχύτητα με την οποία κινούνται μεταξύ των ηλεκτροδίων, εξαρτώνται από την διάμετρό τους D και το εφαρμοζόμενο ηλεκτρικό πεδίο. Η συμπεριφορά των μεγαλύτερων σωματιδίων ($D > 3\mu\text{m}$), τα οποία εμφανίζονται σε συνεχή κίνηση μεταξύ των ηλεκτροδίων, είναι σε μεγάλο βαθμό κατανοητή. Αντίθετα για τα μικρότερα σωματίδια οι γνώσεις μας είναι περιορισμένες (μελέτες δείχνουν ότι σωματίδια $D \approx 1\mu\text{m}$, όταν φορτιστούν συμπεριφέρονται σαν ιόντα) [11].

6.2 Πειραματική διαδικασία

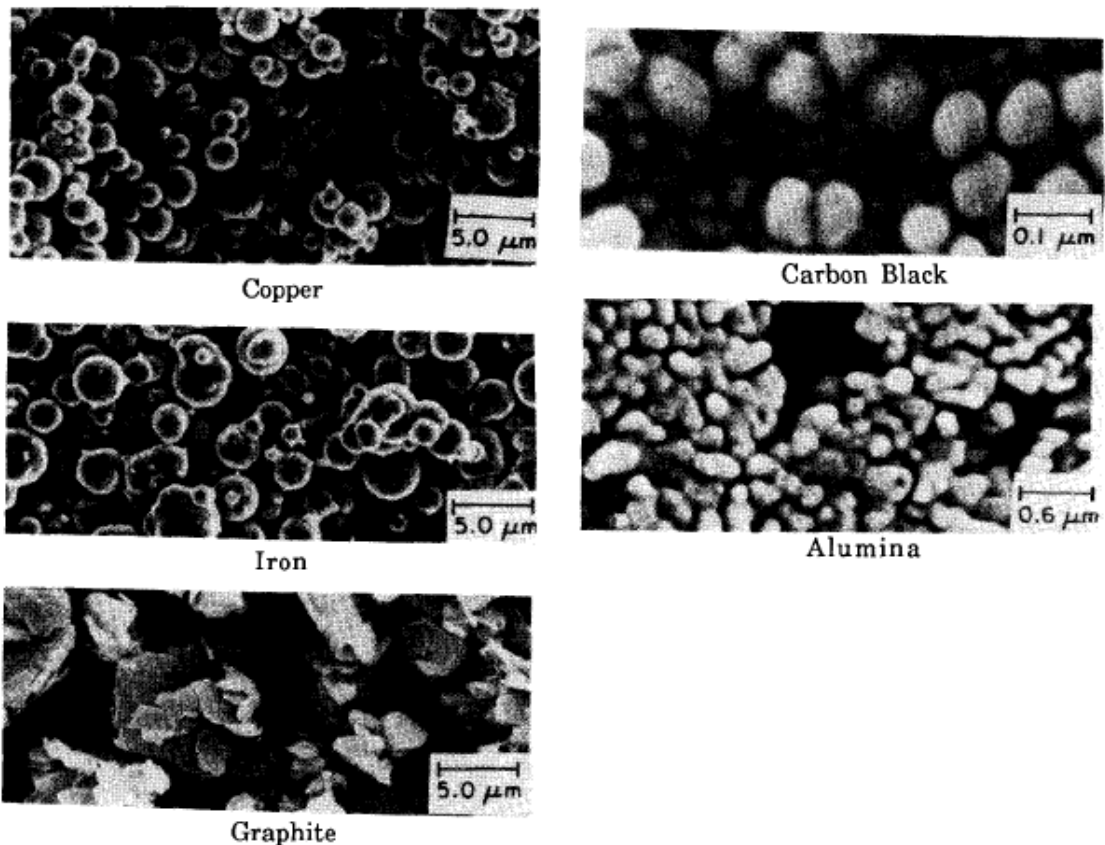
Η πραγματοποίηση των πειραμάτων, έγινε με σκοπό τη διερεύνηση της επίδρασης των αιωρούμενων σωματιδίων, στην ηλεκτρική αγωγιμότητα των υγρών μονωτικών. Εφαρμόστηκε παλμός δυναμικού μεταξύ ηλεκτροδίων σε μορφή παράλληλων δίσκων.

Τα λάδια που χρησιμοποιήθηκαν για τα πειράματα ήταν τα εξής. Το βιομηχανικής ποιότητας ναφθανέλαιο μετασχηματιστών Voltesso 35A, το μεθανέλαιο QS 2598A και το μεθανέλαιο Norpar 12 (της μορφής C_nH_{2n+2}). Πραγματοποιήθηκαν επίσης πειράματα σε δείγματα λαδιών, τα οποία ελήφθησαν από μετασχηματιστές και είχαν ήδη διανύσει τμήμα της διάρκειας ζωής τους. Έτσι λοιπόν ελήφθη το Voltesso 35B από μετασχηματιστή υποσταθμού 50 MVA, 0,4/14,2 kV, εφοδιασμένο με σύστημα αλλαγής τάσης υπό φορτίο, μέγιστη αύξηση θερμοκρασίας λαδιού 55°C , σε συντήρηση για 20 έτη. Το λάδι φιλτραριζόταν και ανακυκλωνόταν μια φορά το έτος και η δειγματοληψία του Voltesso 35B έγινε 8 εβδομάδες μετά την τελευταία

ανακύκλωση. Επίσης ελήφθη το Voltesso 35C από υπαίθριο μετασχηματιστή 6,7 MVA, 14,2/4,2 kV , μέγιστη αύξηση θερμοκρασίας λαδιού 55°C , σε συντήρηση για 24 έτη. Στα 23 έτη έγινε αντικατάσταση του λαδιού με καινούριο. Το δείγμα λοιπόν του Voltesso 35C που ελήφθη, ήταν σε χρήση για 1 έτος.

Με σκοπό την διερεύνηση της επίδρασης των σωματιδίων, στις μονωτικές ιδιότητες των λαδιών, τα λάδια υπέστησαν φιλτράρισμα διαφόρων επιπέδων, με χρήση φίλτρων 0,20 , 0,45 , 0,80 , 1,20 και 5,00 μm . Η πίεση άντλησης ήταν $4 \cdot 10^4$ Pa για τα λάδια μετασχηματιστών και $1,3 \cdot 10^4$ Pa για τα υπόλοιπα. Φιλτραρισμένα και μη δείγματα, υποβλήθηκαν στον παλμό δυναμικού και κατεγράφησαν τα αντίστοιχα ρεύματα μεταφοράς [11].

Η επίδραση των ακαθαρσιών μελετήθηκε επίσης, με την προσθήκη επιπλέον σωματιδίων χαλκού, σιδήρου, γραφίτη, άνθρακα και αλουμινίου σε δείγματα λαδιών. Τα σωματίδια χαλκού και σιδήρου ήταν σφαιρικά σε μορφή ($D < 2\mu\text{m}$). Τα σωματίδια γραφίτη ήταν ακανόνιστης μορφής και μεγαλύτερου μεγέθους ($D \approx 4\mu\text{m}$). Τα σωματίδια άνθρακα, κι αυτά σφαιρικής μορφής, είχαν μέγεθος $D \approx 0,07\mu\text{m}$ και τα σωματίδια αλουμινίου $D \approx 0,20\mu\text{m}$. Τα παραπάνω, όπως φαίνονται από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο, απεικονίζονται στο σχήμα 6.2-1 .



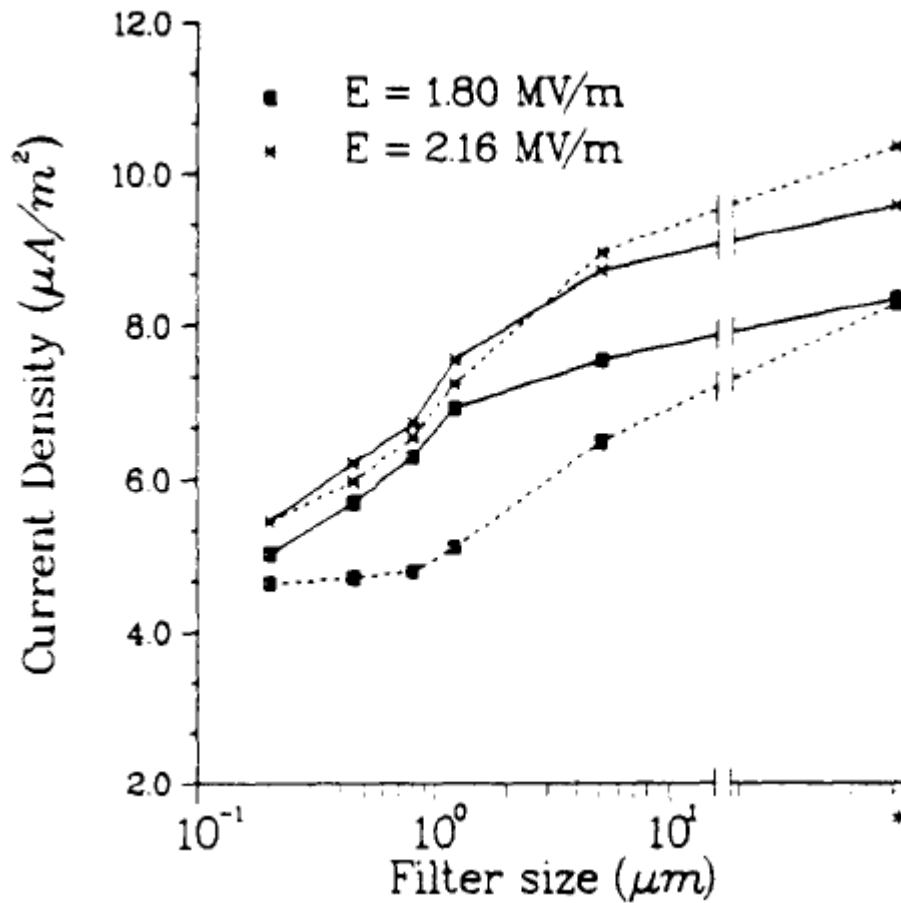
Σχήμα 6.2-1 : Σωματίδια χαλκού(Copper), σιδήρου(Iron), γραφίτη(Graphite), άνθρακα(Carbon Black), και αλουμινίου(Alumina), όπως καταγράφονται από το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο [11].

Να σημειώσουμε ότι το κενό μεταξύ των ηλεκτροδίων της διάταξης ήταν 4mm. Ο παλμός δυναμικού εφαρμόστηκε σε ένα εκ των ηλεκτροδίων, ενώ το άλλο ήταν γειωμένο. Το μεταφερόμενο ρεύμα κατεγράφη από παλμογράφο. Το ρεύμα αφού έφτασε μια κορυφή, μετά από χρόνο περίπου 2s , πήρε τη σταθερή του τιμή (steady state current I_{ss}), ελαφρώς μικρότερη της κορυφής.

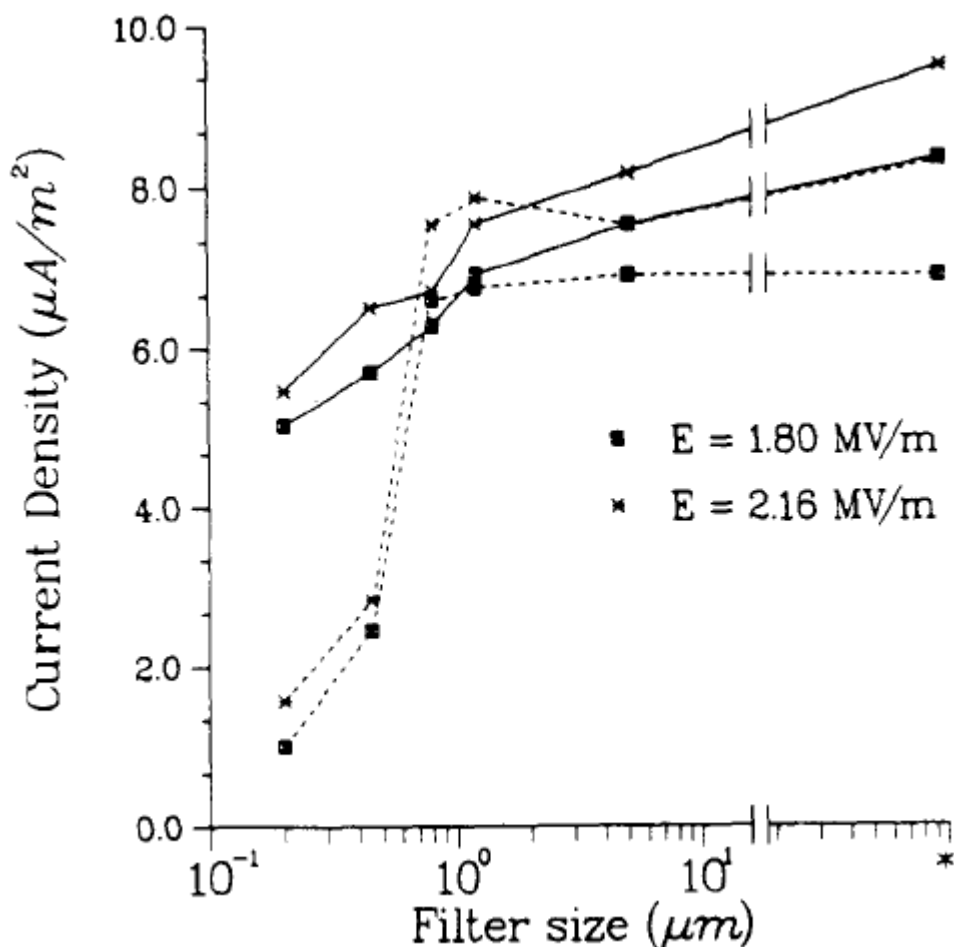
6.3 Ανάλυση αποτελεσμάτων

6.3.1 Επίδραση φιλτραρίσματος

Η επίδραση των διαφόρων τύπων φιλτραρίσματος φαίνεται παραστατικά στα σχήματα 6.3.1-1 και 6.3.1-2 . Από το σχήμα 6.3.1-1 φαίνεται να μην υπάρχει μεγάλη διαφορά στη μεταβολή του ρεύματος με το μέγεθος του φίλτρου, μεταξύ των λαδιών Voltesso 35A και QS 2598A. Μια σύγκριση, της μεταβολής των ρευμάτων (I_{ss}) με το μέγεθος του φίλτρου, μεταξύ των λαδιών Voltesso 35A και Norpar 12 , δίνεται στο 6.3.1-2 . Για σχετικά υψηλό ιξώδες το Voltesso 35A , με την βελτίωση του επιπέδου φιλτραρίσματος από 5 σε 1,2 μm , εμφανίζει μείωση της πυκνότητας ρεύματος (J_{ss}) κατά 9% , ενώ περαιτέρω βελτίωση του φιλτραρίσματος από 1,2 σε 0,2 μm , έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του J_{ss} κατά 38% . Να σημειωθεί ότι το φιλτραρισμένο (δια μέσου φίλτρου 5 μm) Voltesso 35A εμφανίζει μειωμένη πυκνότητα ρεύματος κατά 10-15% σε σχέση με το μη φιλτραρισμένο. Όσον αφορά το Norpar 12 (χαμηλού ιξώδους), εμφανίζεται μια απότομη μείωση της πυκνότητας ρεύματος (80-85%) με την βελτίωση του φιλτραρίσματος από 1,2 σε 0,2 μm . Αυτή η μείωση είναι τριπλάσια της αντίστοιχης που παρατηρείται στο Voltesso 35A . Το φιλτραρισμένο Norpar 12 με φίλτρο μεγαλύτερο των 1,2 μm , εμφανίζει μικρή πτώση πυκνότητας ρεύματος (5-8%) σε σχέση με το μη φιλτραρισμένο [11].



Σχήμα 6.3.1-1 : Μεταβολή της πυκνότητας ρεύματος (Current Density) σε σχέση με το μέγεθος του φίλτρου (Filter size) για το Voltesso 35A (συνεχής γραμμή) και το QS 2598A (διακεκομμένη γραμμή). Τα γραφήματα με * αναφέρονται στις τιμές πυκνότητας ρεύματος που είχαν τα λάδια χωρίς φιλτράρισμα [11].



Σχήμα 6.3.1-2 : Μεταβολή της πυκνότητας ρεύματος (Current Density) σε σχέση με το μέγεθος του φίλτρου (Filter size) για το Voltesso 35A (συνεχής γραμμή) και το Norpar 12 (διακεκομμένη γραμμή). Τα γραφήματα με * αναφέρονται στις τιμές πυκνότητας ρεύματος που είχαν τα λάδια χωρίς φιλτράρισμα [11].

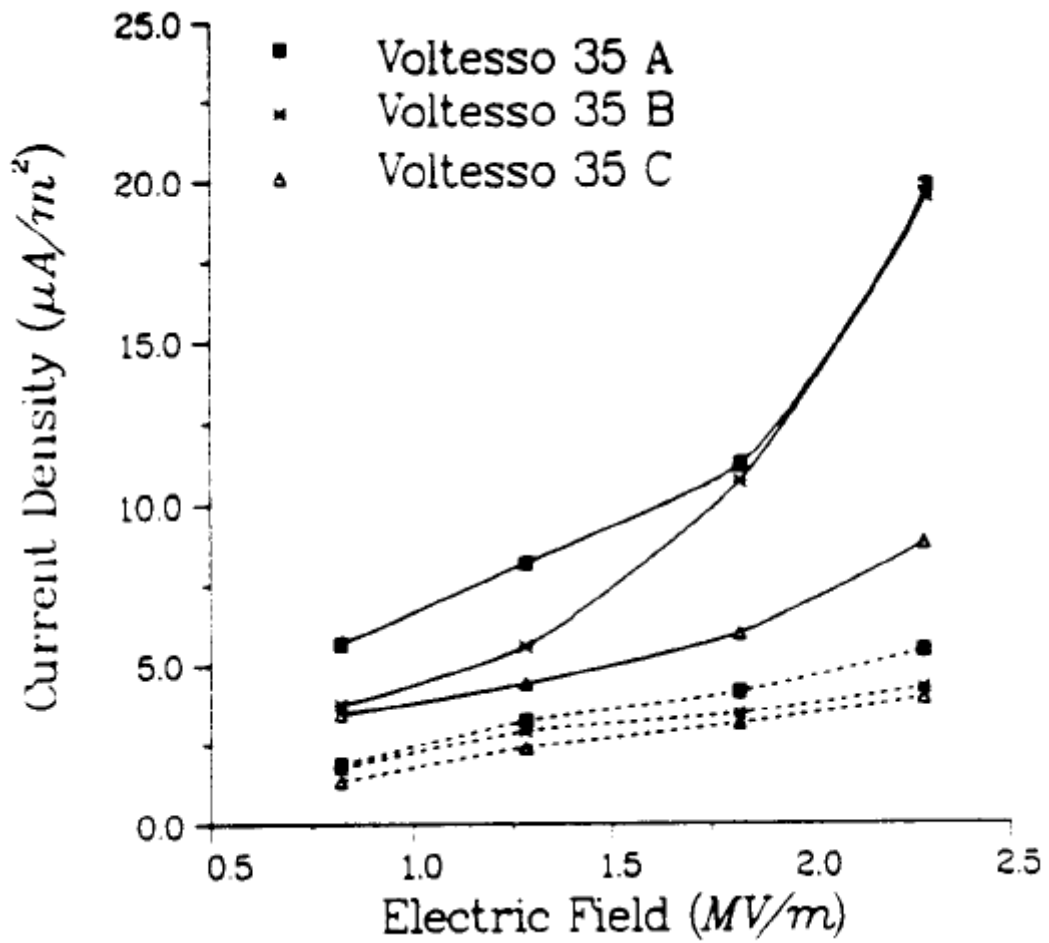
6.3.2 Επίδραση της έντασης ηλεκτρικού πεδίου

Στο σχήμα 6.3.2-1 φαίνεται η μεταβολή της πυκνότητας ρεύματος, σε σχέση με την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου, για τα λάδια (φιλτραρισμένα και μη) Voltesso 35A, 35B, 35C και για διάκενο μήκους 4mm. Παρατηρείται μια σταδιακή αύξηση της πυκνότητας ρεύματος, για τα μη φιλτραρισμένα λάδια, μέχρι την τιμή έντασης 1,3 MV/m. Περαιτέρω αύξηση της έντασης πεδίου, είχε σαν αποτέλεσμα την απότομη αύξηση της πυκνότητας ρεύματος για το Voltesso 35A και 35B, ενώ η τελευταία απουσίαζε για το Voltesso 35C.

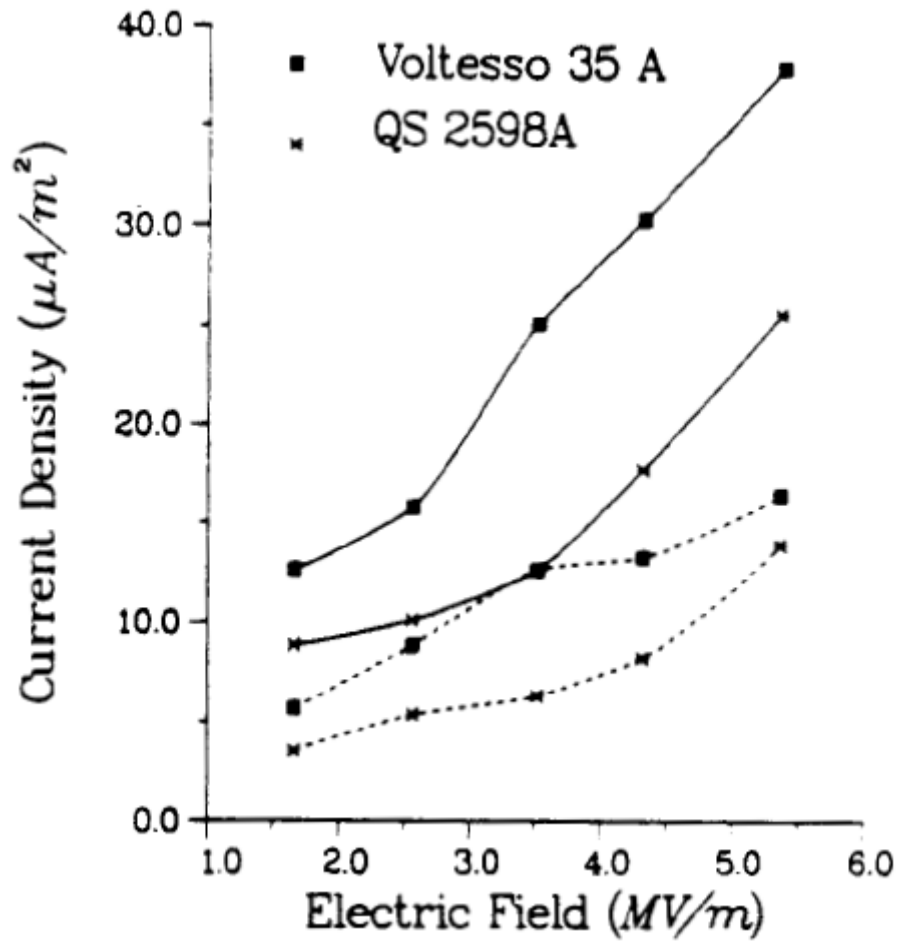
Στο σχήμα 6.3.2-2 φαίνεται η μεταβολή της πυκνότητας ρεύματος, σε σχέση με την ένταση πεδίου, για τα λάδια Voltesso 35A και QS 2598A (φιλτραρισμένα και μη) για μικρότερο διάκενο (2mm). Τα χαρακτηριστικά που παρουσίαζε η πυκνότητα ρεύματος, ήταν παρόμοια με αυτά που συναντώνται στο σχήμα 6.3.2-1.

Στο σχήμα 6.3.2-3 δίνονται οι χαρακτηριστικές πυκνότητας ρεύματος-έντασης πεδίου για το Norpar 12. Παρατηρήθηκε αύξηση της πυκνότητας ρεύματος, με την αύξηση της έντασης πεδίου και για τους δύο τύπους λαδιού (φιλτραρισμένο

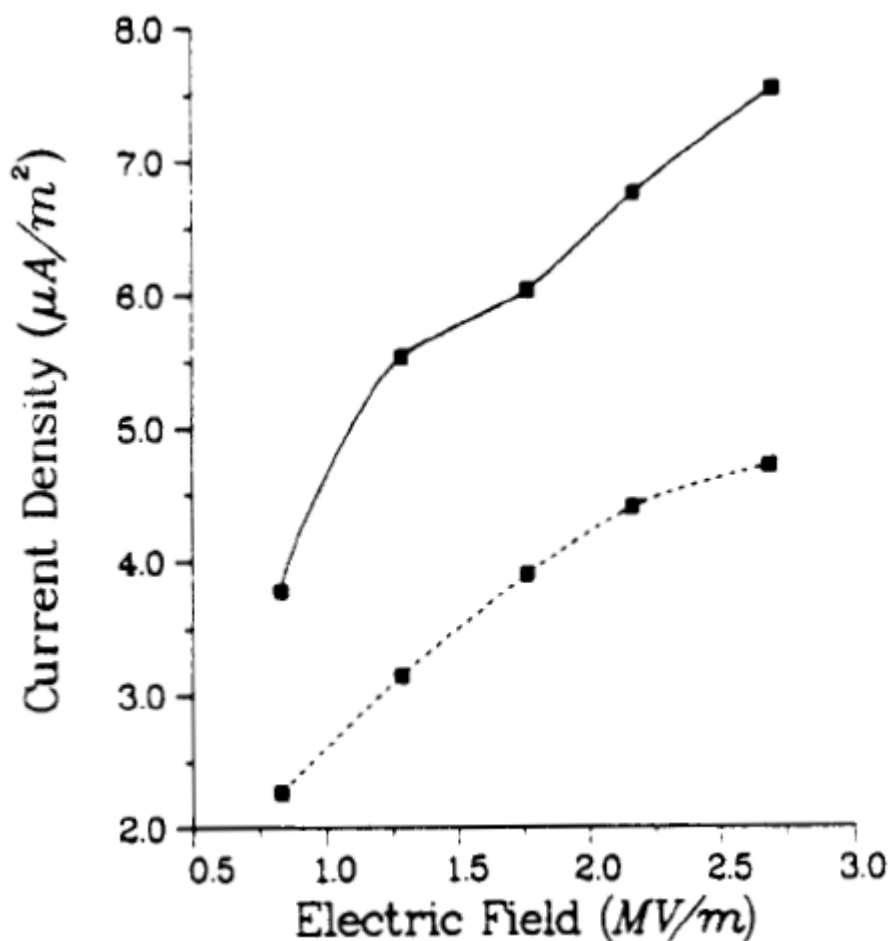
και μη). Οι τιμές πυκνότητας ρεύματος ήταν χαμηλότερες, όπως ήταν φυσικό, για το φιλτραρισμένο λάδι και για αντίστοιχες τιμές έντασης πεδίου [11].



Σχήμα 6.3.2-1 : Πυκνότητα ρεύματος(Current Density) ως συνάρτηση της έντασης πεδίου(Electric Field) για φιλτραρισμένα(διακεκομμένη γραμμή) και μη φιλτραρισμένα(συνεχής γραμμή) λάδια μετασχηματιστών Voltesso και διάκενο ηλεκτροδίων 4mm [11].



Σχήμα 6.3.2-2 : Πυκνότητα ρεύματος(Current Density) ως συνάρτηση της έντασης πεδίου(Electric Field) για φιλτραρισμένα(διακεκομμένη γραμμή) και μη φιλτραρισμένα(συνεχής γραμμή) λάδια μετασχηματιστών και διάκενο ηλεκτροδίων 2mm [11].



Σχήμα 6.3.2-3 : Πυκνότητα ρεύματος(Current Density) ως συνάρτηση της έντασης πεδίου(Electric Field) για το λάδι Norpar 12 φιλτραρισμένο(διακεκομμένη γραμμή) και μη φιλτραρισμένο(συνεχής γραμμή) [11].

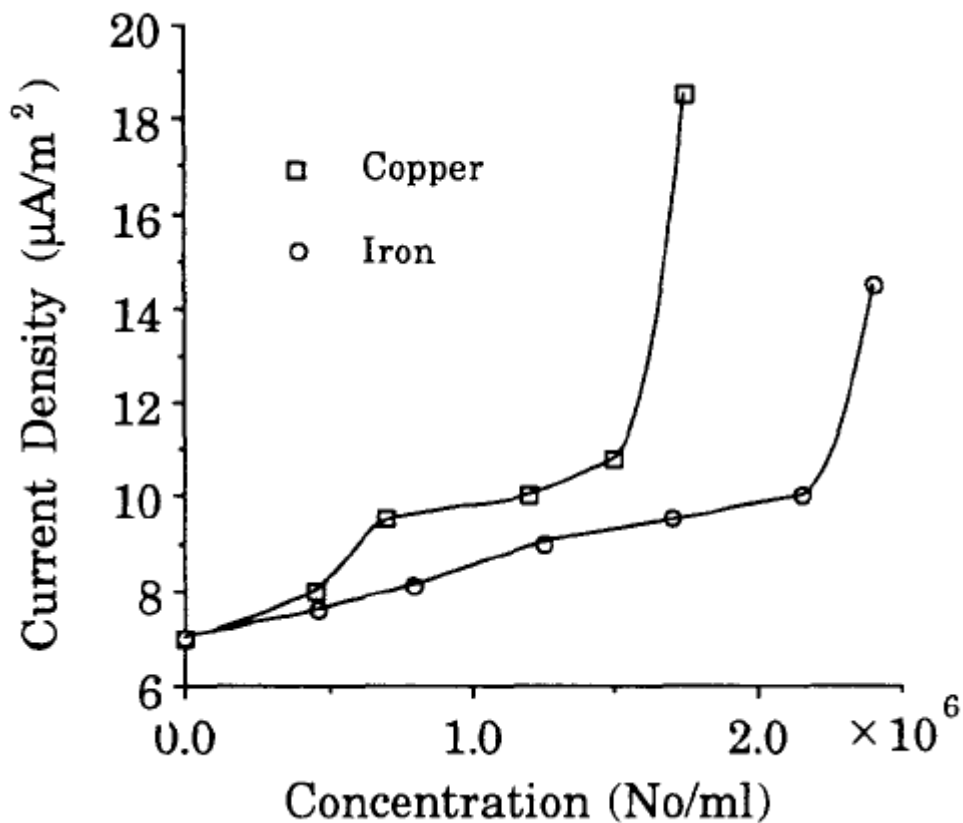
6.3.3 Επίδραση συγκέντρωσης σωματιδίων

Η μεταβολή της πυκνότητας ρεύματος, ως προς τη συγκέντρωση των σωματιδίων χαλκού και σιδήρου, για το Voltesso 35A , δίνεται στο σχήμα 6.3.3-1 . Τα αποτελέσματα αναφέρονται σε σταθερή ένταση πεδίου 1,8 MV/m. Τα δύο μεγέθη παρουσιάζουν περίπου γραμμική εξάρτηση, μέχρι ενός σημείου. Περαιτέρω αύξηση της συγκέντρωσης, έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση μιας αλματώδους αύξησης της πυκνότητας ρεύματος. Η τιμή συγκέντρωσης, στην οποία εμφανίζεται το άλμα είναι $1,5 \cdot 10^6$ σωμα./ml για το χαλκό και $2,1 \cdot 10^6$ σωμα./ml για το σίδηρο. Το γεγονός ότι οι χαρακτηριστικές χαλκού και σιδήρου είναι παρόμοιας μορφής, εξηγείται από το ότι τα δύο σωματίδια είναι όμοιας μορφής και σχήματος (όπως φαίνεται κι από το σχήμα 6.2-1). Από το σχήμα 6.3.3-2 , είναι εμφανές ότι παρόμοιες χαρακτηριστικές πυκνότητας ρεύματος-συγκέντρωσης σωματιδίων (χαλκού και σιδήρου), εμφανίζουν και τα λάδια Voltesso 35B,35C.

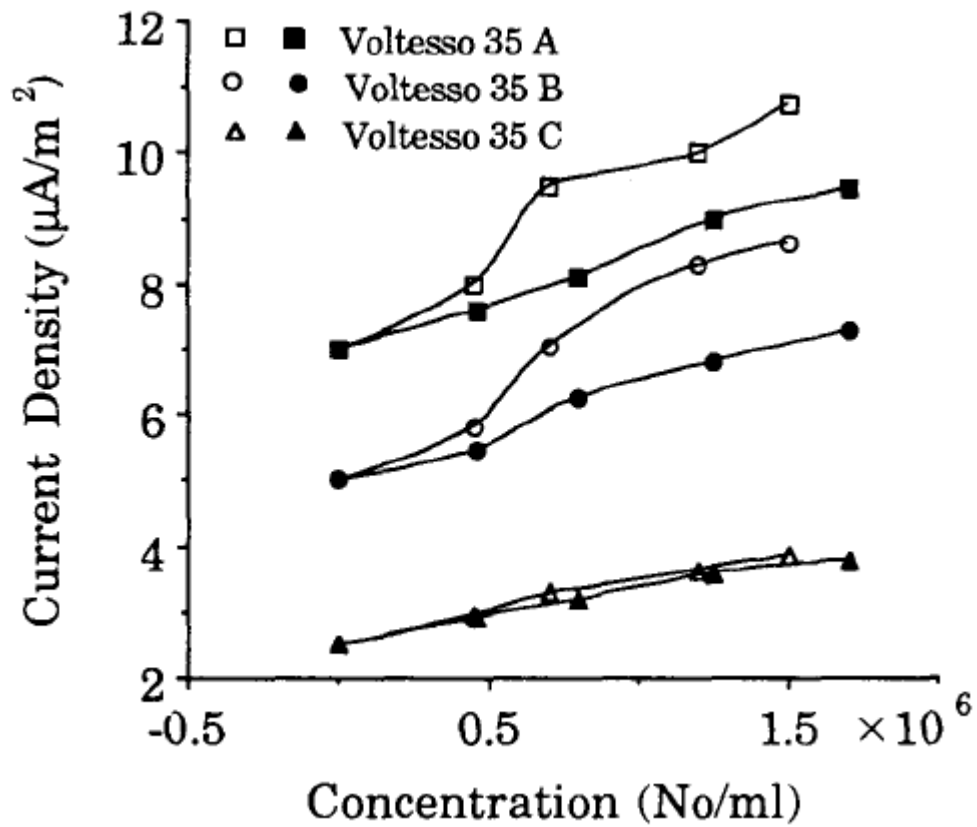
Η επίδραση των σωματιδίων άνθρακα (υπό μορφή γραφίτη), στην πυκνότητα ρεύματος φαίνεται στο σχήμα 6.3.3-3 . Να παρατηρήσουμε ότι για πολύ μικρότερες συγκεντρώσεις σωματιδίων γραφίτη (τάξης 10^4), έχουμε πολύ

μεγαλύτερες πυκνότητες ρεύματος σε σχέση με τις αντίστοιχες που εμφανίζονται λόγω σωματιδίων χαλκού και σιδήρου (για συγκεντρώσεις σωματιδίων της τάξης 10^6) [11].

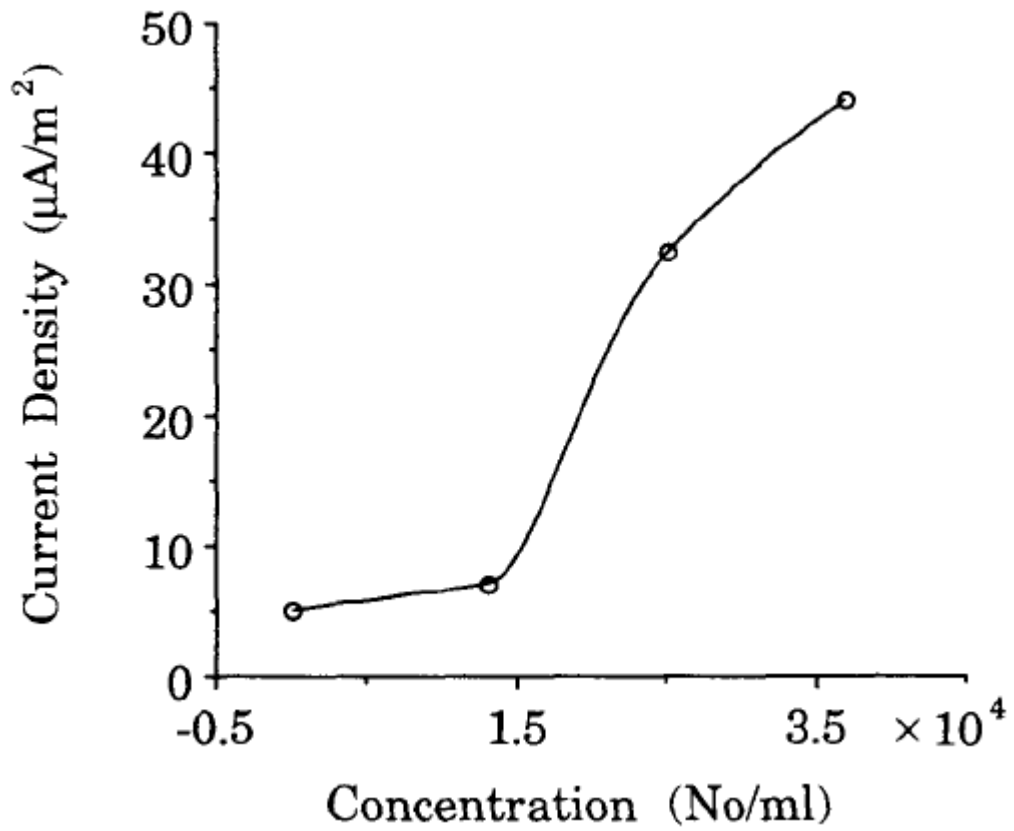
Τέλος, η πυκνότητα ρεύματος σε σχέση με την συγκέντρωση σωματιδίων αλουμινίου, φαίνεται να μένει σχεδόν σταθερή, όπως φαίνεται στο σχήμα 6.3.3-4 .



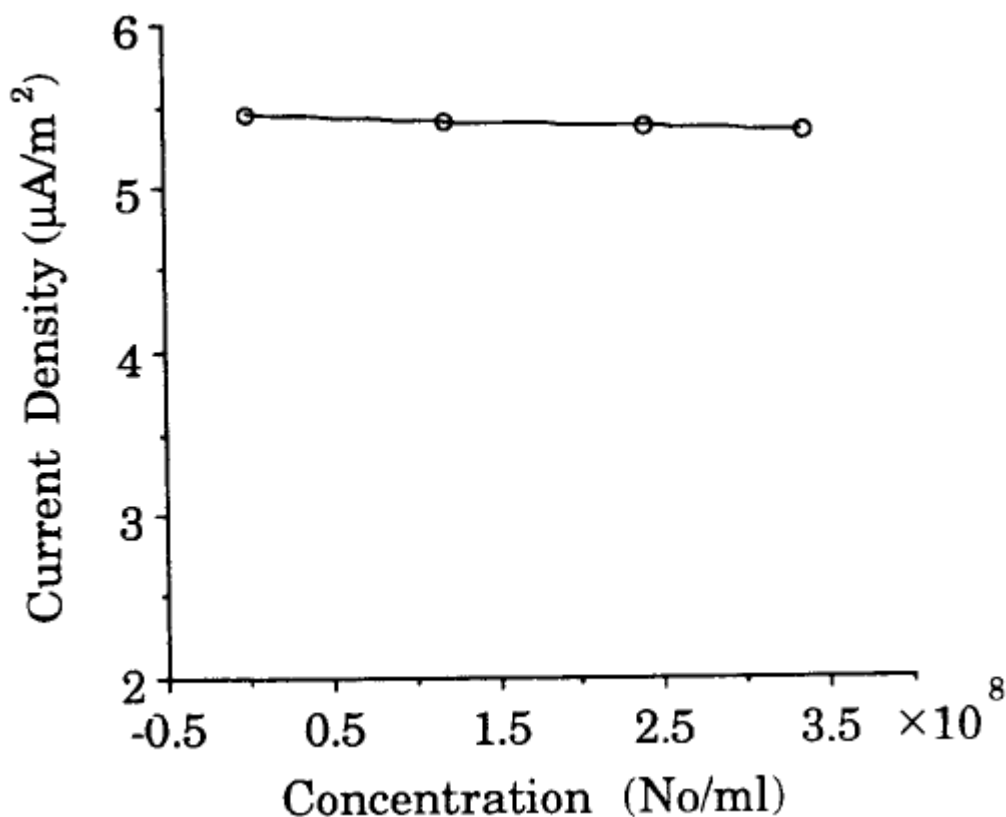
Σχήμα 6.3.3-1 : Πυκνότητα ρεύματος(Current Density) ως προς την συγκέντρωση(Concentration) σωματιδίων χαλκού(Copper) και σιδήρου(Iron) για το Voltesso 35A ($E=1,8\text{MV}/\text{m}$) [11].



Σχήμα 6.3.3-2 : Πυκνότητα ρεύματος(Current Density) ως προς την συγκέντρωση(Concentration) σωματιδίων χαλκού(για ανοιχτόχρωμα σύμβολα) και σιδήρου(για σκιασμένα σύμβολα) για τα λάδια μετασχηματιστών Voltesso (E=1,8MV/m) [11].



Σχήμα 6.3.3-3 : Πυκνότητα ρεύματος(Current Density) ως προς την συγκέντρωση(Concentration) σωματιδίων γραφίτη για το Voltesso 35A (E=1,8MV/m) [11].



Σχήμα 6.3.3-4 : Πυκνότητα ρεύματος(Current Density) ως προς την συγκέντρωση(Concentration) σωματιδίων αλουμινίου για το Voltesso 35A (E=1,8MV/m) [11].

6.4 Σχόλια

Τα πειραματικά αποτελέσματα, τα οποία δίνονται μέσω των αντίστοιχων διαγραμμάτων, δείχνουν πτώση της πυκνότητας ρεύματος (και ισοδυνάμως των ρευμάτων μεταφοράς I_{ss}), με την αύξηση του επιπέδου φιλτραρίσματος. Είναι εμφανές ότι οι τιμές πυκνότητας ρεύματος είναι μεγαλύτερες για τα μη φιλτραρισμένα δείγματα λαδιών. Γενικότερα οι αυξημένες συγκεντρώσεις σωματιδίων εντός του λαδιού, προκαλούν αύξηση των πυκνοτήτων ρεύματος που εμφανίζονται σε αυτό. Τα στοιχεία λοιπόν οδηγούν στο συμπέρασμα, ότι η ύπαρξη των αιωρούμενων σωματιδίων στο μονωτικό λάδι, διευκολύνει τη μεταφορά ηλεκτρικών φορτίων και επομένως μειώνει τη διηλεκτρική του αντοχή.

7. ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΥΓΡΩΝ ΜΟΝΩΤΙΚΩΝ ΣΕ ΧΑΜΗΛΕΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΕΣ

7.1 Εισαγωγή

Η διηλεκτρική φασματοσκοπία είναι μια μέθοδος για τη μελέτη φαινομένων πόλωσης και αγωγής που συμβαίνουν στα μονωτικά υγρά. Σε γενικές γραμμές, οι διηλεκτρικές ιδιότητες ενός υγρού μονωτικού, για χαμηλές συχνότητες μέχρι και βιομηχανικές (50Hz), περιγράφονται από τους παράγοντες της αγωγής ιόντων, της προέλευσης διπόλων και της χωρικής ηλεκτρικής φόρτισης [13]. Για ένα βιομηχανικό υγρό μονωτικό, στις αναφερθείσες συχνότητες, το μεγαλύτερο μέρος των διηλεκτρικών του απωλειών, οφείλεται στην αγωγή ιόντων. Τα φαινόμενα πόλωσης εξαρτώνται από τη μοριακή δομή του μονωτικού. Η εμφανιζόμενη χωρική φόρτιση εξαρτάται από παράγοντες όπως το πλάτος και η συχνότητα της εφαρμοζόμενης τάσης, η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου και το υλικό των ηλεκτροδίων.

Σε αυτό το εδάφιο θα δειχθεί, ότι η χωρική φόρτιση συμβαίνει στις χαμηλές συχνότητες, ειδικά για γηρασμένα λάδια. Η χωρική φόρτιση μειώνει την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου, έτσι η επιτρεπτικότητα (χωρητικότητα) του λαδιού αυξάνεται, ενώ η αγωγιμότητα και ο παράγοντας απωλειών μειώνονται [12].

Δύο μεγέθη, που αφορούν τα φαινόμενα αγωγής, είναι ο χρόνος μεταφοράς (transit time) και η ενέργεια ενεργοποίησης (activation energy). Χρόνος μεταφοράς, ορίζεται το αναγκαίο χρονικό διάστημα που χρειάζεται ένα φορτίο, για να διασχίσει το διάκενο μεταξύ των ηλεκτροδίων. Η ενέργεια ενεργοποίησης είναι ένα μέγεθος που απεικονίζει τη θερμοκρασιακή εξάρτηση της αγωγιμής διαδικασίας. Αν ΔH_{dc} η ενέργεια ενεργοποίησης για dc αγωγή, τότε ορίζεται η αντίσταση του μονωτικού για τις διάφορες θερμοκρασίες, κατά την εξίσωση του Arrhenius :

$$R_{dc}(T) = R_0 \cdot \exp\left(\frac{\Delta H_{dc}}{k \cdot T}\right) \quad (7.1-1)$$

όπου : R_{dc} : η dc αντίσταση στη θερμοκρασία T
 R_0 : σταθερή dc αντίσταση ($T \rightarrow \infty$)
T : απόλυτη θερμοκρασία
k : σταθερά Boltzmann.

7.2 Πειραματική διαδικασία

Χρησιμοποιήθηκαν κυλινδρικά ηλεκτρόδια, γεωμετρικής χωρητικότητας 23 pF , διακένου 2,5 mm. Στο δοκίμιο εφαρμόστηκαν συνδέσεις για εφαρμογή των τάσεων και όργανο εντός για μέτρηση ρευμάτων πόλωσης και αποπόλωσης (PDC σε pA). Επίσης χρησιμοποιήθηκε το όργανο "IDA 200" για μελέτη υπό το πρίσμα της φασματοσκοπίας FDS(frequency domain spectroscopy) [14].

Για τη μείωση της επίδρασης της χωρικής φόρτισης στα αποτελέσματα, οι μετρήσεις ελήφθησαν με την ακόλουθη σειρά : FDS στα 10V (4V/mm), PDC

στα 10V (χρόνος μεταφοράς περίπου 500s), FDS σε 140V (56V/mm) και τέλος PDC σε 100V (40V/mm , χρόνος μεταφοράς περίπου 50s).

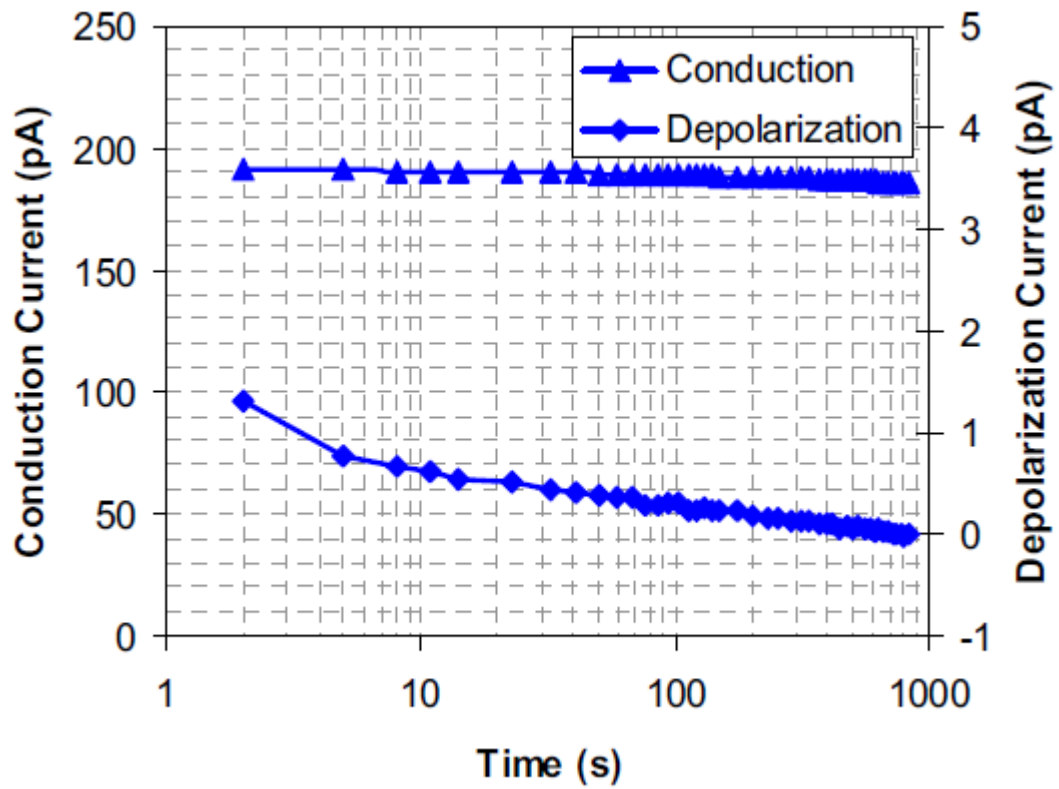
Προκλήθηκε τεχνητά θερμική γήρανση των δειγμάτων στους 135°C για 135 , 500 και 2000 h. Προστέθηκαν 2,5 gr/L Cu,Fe και 0,5 gr/L Zn,Al. Ο λόγος μαζών στο πειραματικό δείγμα για λάδι : Cu : Fe : Al : Zn ήταν 100 : 0,3 : 0,3 : 0,06 : 0,06 . Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν σε δείγματα ορυκτελαίων και δείγματα ναφθαλμεθανελαίων [12].

7.3 Ανάλυση αποτελεσμάτων

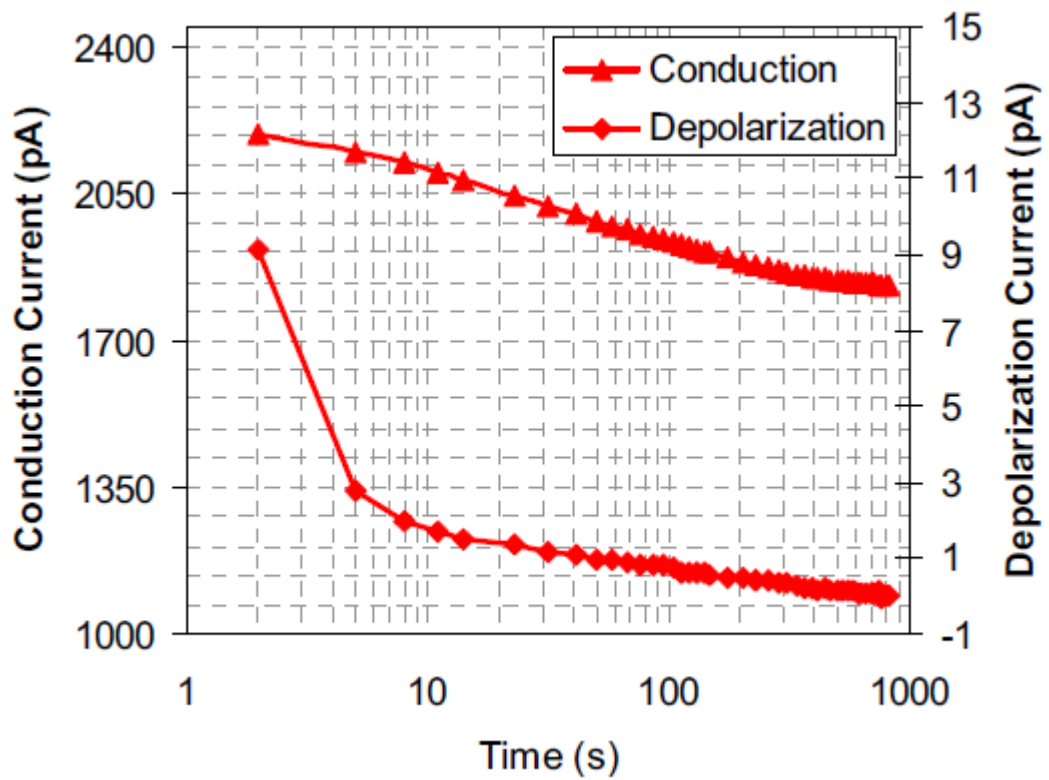
Τα αποτελέσματα ελήφθησαν με βάση τρεις παραμέτρους : χρόνου, συχνότητας και θερμοκρασιακής επίδρασης. Ο χρόνος φόρτισης ήταν από 2 ως 1000s και ο χρόνος αποφόρτισης 1000s. Το διάστημα των συχνοτήτων, της διηλεκτρικής φασματοσκοπίας, ήταν από 1mHz ως 1kHz. Η θερμοκρασιακή εξάρτηση μελετήθηκε για θερμοκρασίες δωματίου μέχρι 70°C [12].

7.3.1 Χρόνος

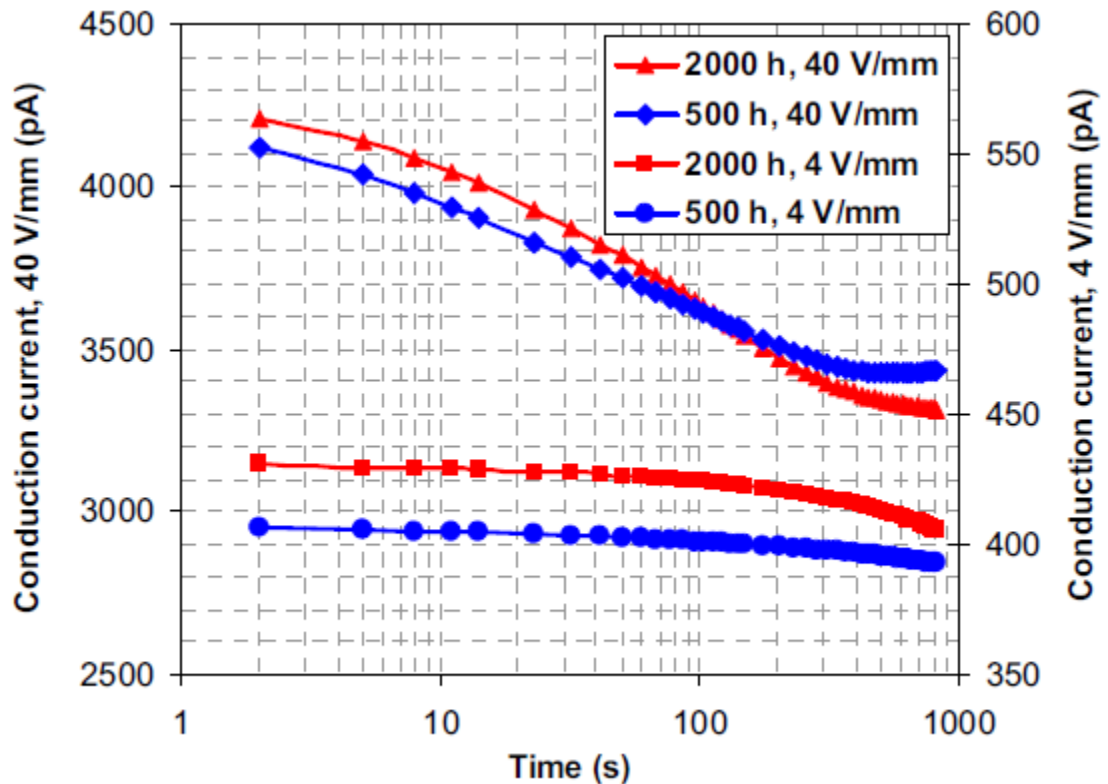
Στα σχήματα 7.3.1-1 και 7.3.1-2 δίνονται τα ρεύματα πόλωσης και αποπόλωσης για ορυκτέλαιο, το οποίο έχει υποστεί θερμική καταπόνηση για 135h , για διαφορετικές εντάσεις πεδίου. Το ρεύμα πόλωσης ή ρεύμα αγωγής(conduction current) είναι μεγαλύτερο από το ρεύμα αποπόλωσης(depolarization current). Η μείωση του ρεύματος αγωγής, όπως παρατηρείται στα διαγράμματα, οφείλεται στη μείωση των φορέων φορτίου και της χωρικής φόρτισης [12]. Το ρεύμα αποπόλωσης του νέου λαδιού είναι μικρό και πηγαίνει προς το μηδέν, ενώ για πιο γηρασμένο λάδι η μείωσή του γίνεται με πιο αργό ρυθμό. Αυτό φαίνεται πιο παραστατικά στο σχήμα 7.3.1-3 όπου δίνονται τα αντίστοιχα ρεύματα για δείγματα λαδιών με καταπόνηση για 500 ως 2000h.



Σχήμα 7.3.1-1 : Ρεύμα πόλωσης(Conduction Current) και ρεύμα αποπόλωσης(Depolarization Current) ορυκτελαίου ως προς το χρόνο(Time). (Θερμοκρασία δωματίου , 4V/mm) [12].



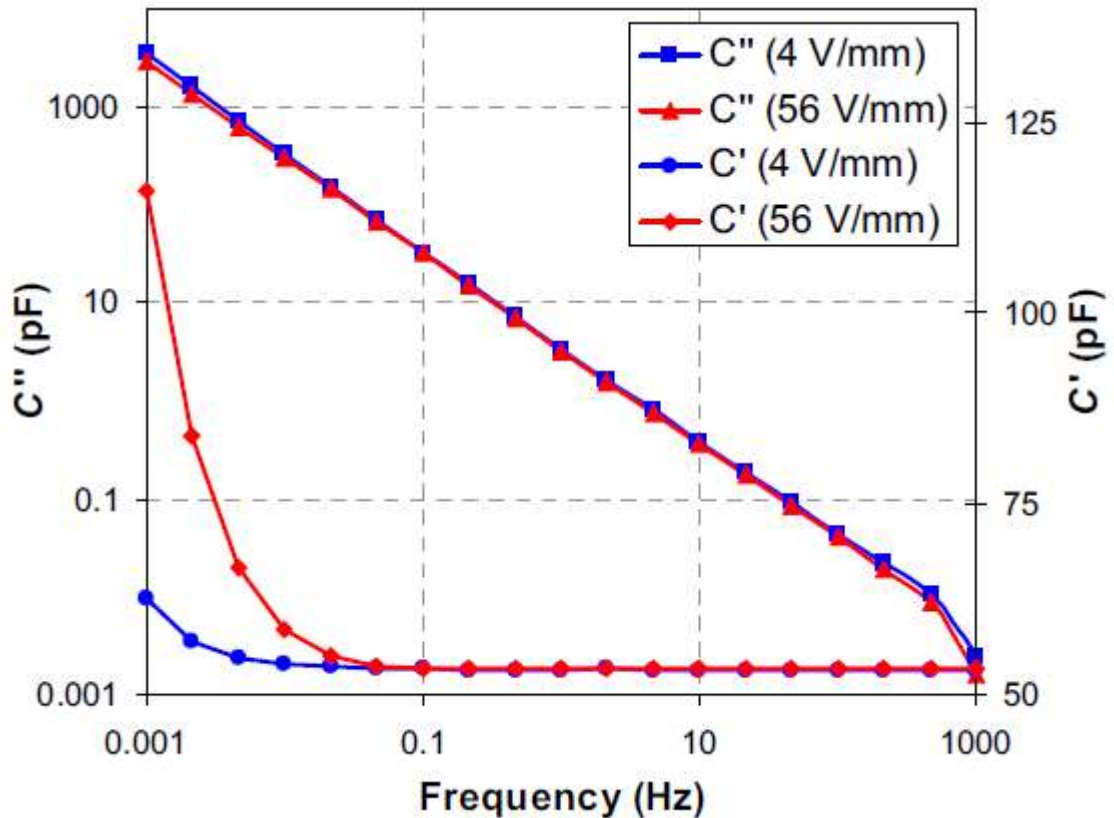
Σχήμα 7.3.1-2 : Ρεύμα πόλωσης(Conduction Current) και ρεύμα αποπόλωσης(Depolarization Current) ορυκτελαίου ως προς το χρόνο(Time). (Θερμοκρασία δωματίου , 40V/mm) [12].



Σχήμα 7.3.1-3 : Σύγκρισης ρευμάτων πόλωσης(Conduction Current) και ρευμάτων αποπόλωσης(Depolarization Current) ορυκτελαίου ως προς το χρόνο(Time) για διάφορες ώρες γήρανσης και έντασης πεδίου [12].

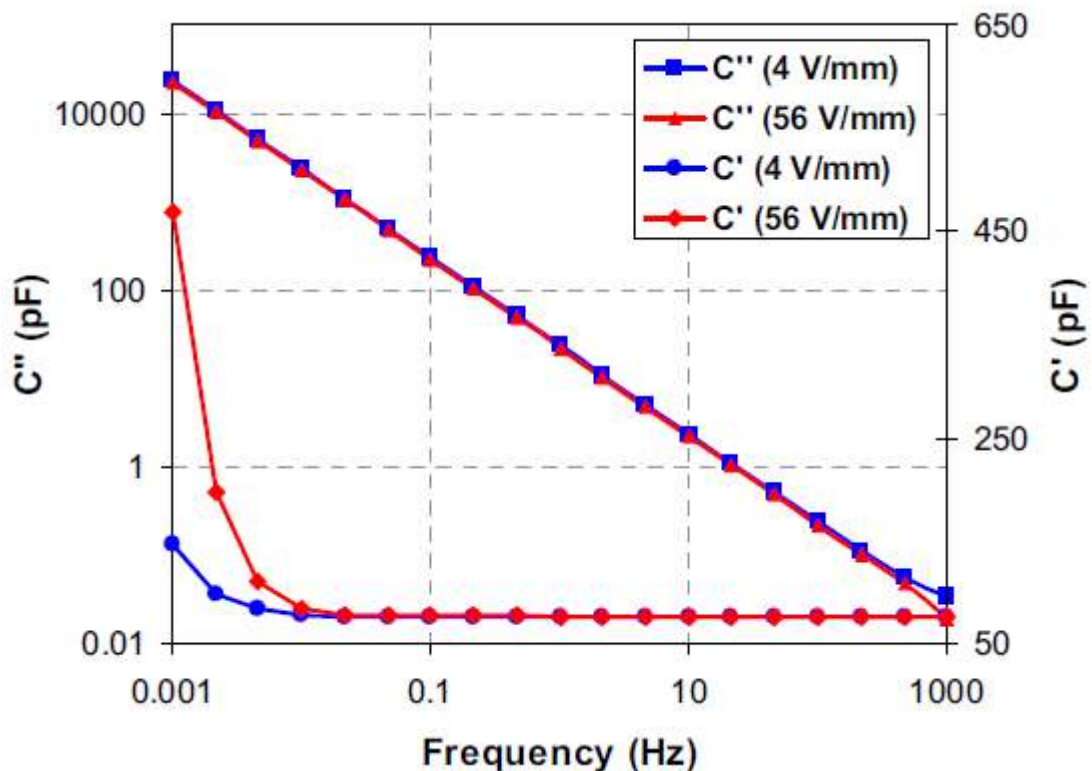
7.3.2 Συχνότητα

Το σχήμα 7.3.2-1 δίνει τα αποτελέσματα της φασματοσκοπίας (FDS) για ορυκτέλαιο σε θερμοκρασία δωματίου. Το φανταστικό μέρος της χωρητικότητας(C'') είναι γραμμικό με κλίση -1 στη λογαριθμική κλίμακα. Η χωρική φόρτιση παρατηρείται με την αύξηση της χωρητικότητας(C') στις χαμηλές συχνότητες.



Σχήμα 7.3.2-1 : FDS ορυκτελαίου(θερμική καταπόνηση 135h) σε θερμοκρασία δωματίου και διαφορετικές εντάσεις πεδίου.(Ο οριζόντιος άξονας αφορά την συχνότητα(Frequency)) [12].

Τα αντίστοιχα αποτελέσματα της φασματοσκοπίας για το ναφθαλμεθανέλαιο δίνονται στο σχήμα 7.3.2-2 . Παρουσιάζει όμοια συμπεριφορά με το ορυκτέλαιο, παρ' όλα αυτά η αύξηση της χωρητικότητας που συμβαίνει στις χαμηλές συχνότητες είναι μεγαλύτερη της αντίστοιχης για το ορυκτέλαιο [12].

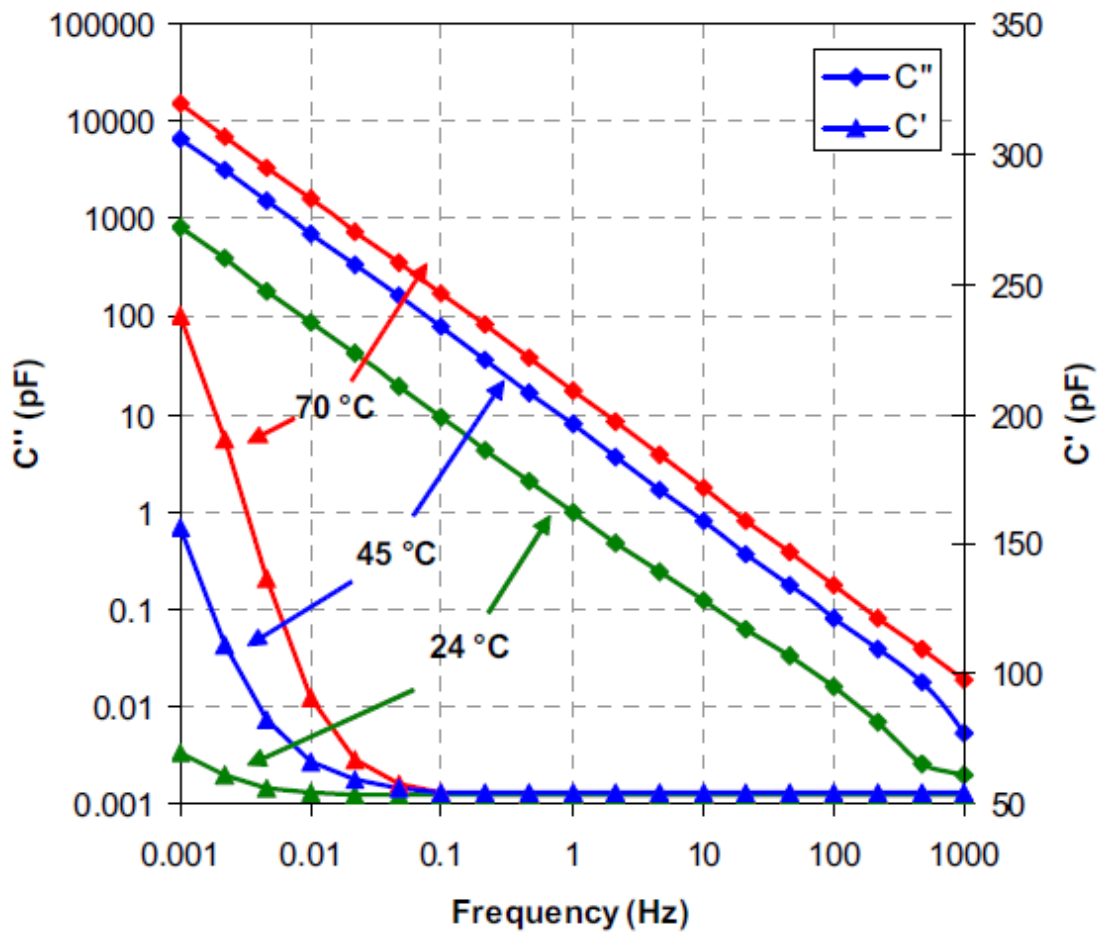


Σχήμα 7.3.2-2 : FDS ναφθαλμεθανελαίου σε θερμοκρασία δωματίου για διαφορετικές εντάσεις πεδίου. (Ο οριζόντιος άξονας αφορά την συχνότητα(Frequency)) [12].

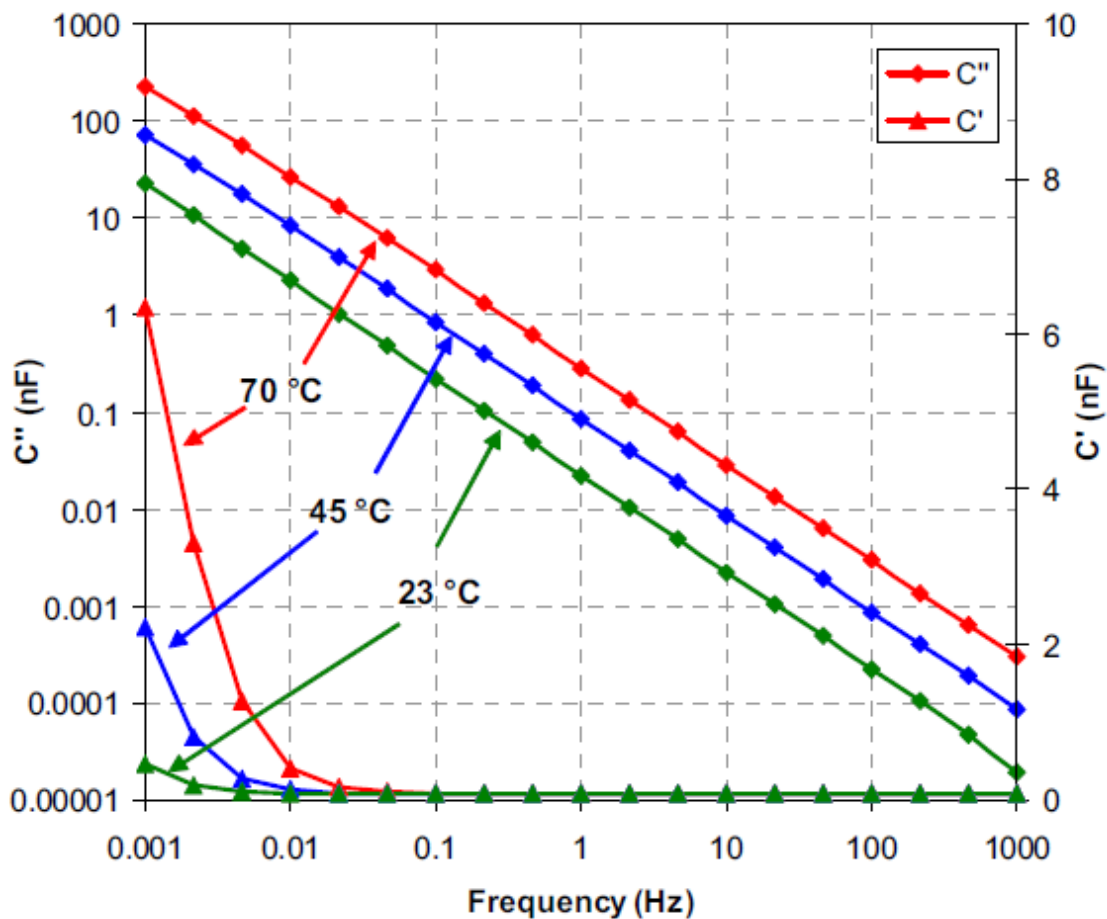
7.3.3 Θερμοκρασιακή επίδραση

Στα μονωτικά υγρά, με την αύξηση της θερμοκρασίας, το ιξώδες μειώνεται, ενώ τα ιόντα αυξάνονται.

Στα σχήματα 7.3.3-1 και 7.3.3-2 φαίνονται τα αποτελέσματα της φασματοσκοπίας για δείγματα ορυκτελαίου και ναφθαλμεθανελαίου, όπως προκύπτουν για τις διάφορες τιμές της θερμοκρασίας. Φαίνεται και πάλι μεγαλύτερη αύξηση της χωρητικότητας, για τις αντίστοιχες θερμοκρασίες, στις χαμηλές συχνότητες για το ναφθαλμεθανέλαιο σε σχέση με το ορυκτέλαιο (τιμές χωρητικότητας του σχήματος 7.3.3-2 σε nF ενώ του σχήματος 7.3.3-1 σε pF).

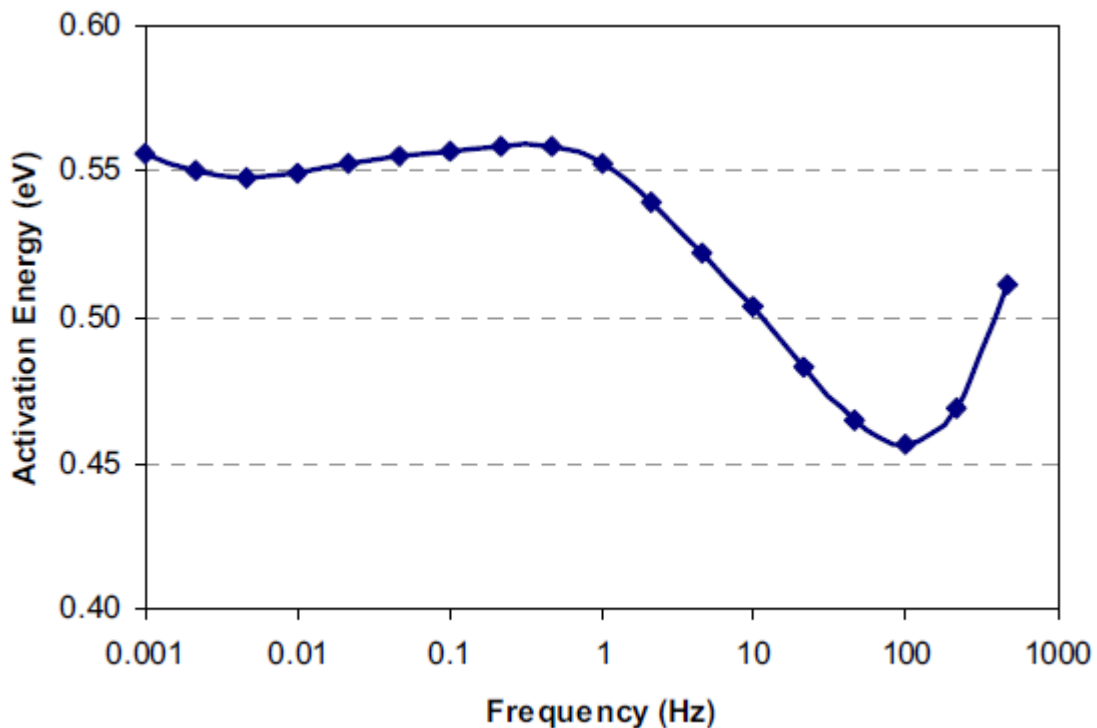


Σχήμα 7.3.3-1 : Θερμοκρασιακή εξάρτηση του FDS για δείγμα ορυκτελαίου.(Ο οριζόντιος άξονας αφορά την συχνότητα(Frequency)) [12].

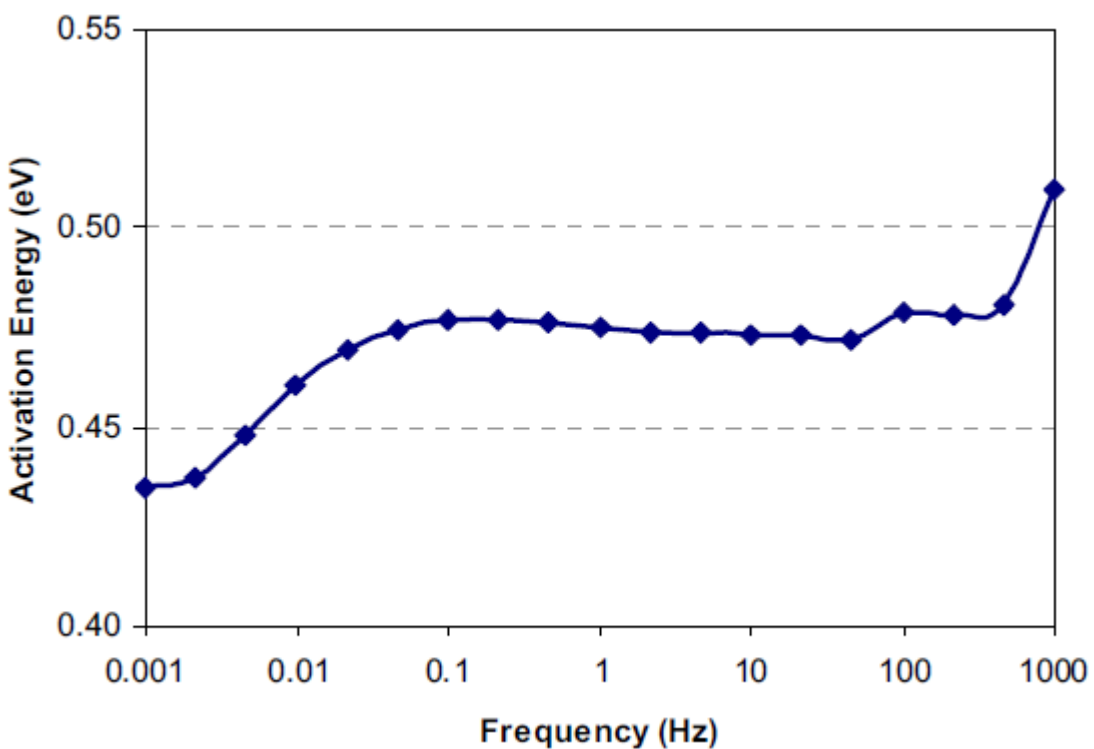


Σχήμα 7.3.3-2 : Θερμοκρασιακή εξάρτηση του FDS για δείγμα ναφθαλμεθανελαίου. (Ο οριζόντιος άξονας αφορά την συχνότητα(Frequency)) [12].

Οι ενέργειες ενεργοποίησης υπολογίζονται με βάση την σχέση 7.1-1 και τις κλίσεις των λογαριθμικών διαγραμμάτων. Γενικά, η ενέργεια ενεργοποίησης, δεν είναι σταθερή για το υγρό μονωτικό σε όλες τις συνθήκες [12]. Με βάση τα αποτελέσματα της φασματοσκοπίας, όπως δίνονται στα σχήματα 7.3.3-1 και 7.3.3-2, προκύπτουν οι ενέργειες ενεργοποίησης ως συναρτήσεις της συχνότητας και δίνονται στα σχήματα 7.3.3-3 και 7.3.3-4 αντίστοιχα.



Σχήμα 7.3.3-3 : Ενέργεια ενεργοποίησης(Activation Energy) ορυκτελαίου ως προς την συχνότητα(Frequency) [12].



Σχήμα 7.3.3-4 : Ενέργεια ενεργοποίησης(Activation Energy) ναφθαλμεθαιλαίου ως προς την συχνότητα(Frequency) [12].

7.4 Σχόλια

Η διηλεκτρική φασματοσκοπία μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως μέτρο ένδειξης της κατάστασης, στην οποία βρίσκεται το μονωτικό λάδι. Μη γραμμικότητα λόγω της αύξησης του ηλεκτρικού πεδίου και χωρική φόρτιση, αλλάζουν με την γήρανση στα μονωτικά λάδια. Η μελέτη των παραμέτρων σε κάποια χρονική στιγμή της διάρκειας ζωής του λαδιού και σύγκριση με πρότυπα στοιχεία, δίνει την δυνατότητα αξιολόγησής του.

8. ΜΟΝΩΤΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΥΓΡΩΝ ΜΟΝΩΤΙΚΩΝ ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΕΚΔΗΛΩΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΤΟΞΟΥ

8.1 Εισαγωγή

Στον ηλεκτρολογικό εξοπλισμό (π.χ. πυκνωτές), μονωμένο ηλεκτρικά με χρήση υγρού μονωτικού, μπορεί να συμβεί εκδήλωση ηλεκτρικού τόξου. Αυτό που ενδιαφέρει, είναι το κατά πόσο το μονωτικό υγρό είναι σε θέση να επανακτήσει τις μονωτικές του ιδιότητες, μετά την εκδήλωση του τόξου.

Γενικά κατά την εκδήλωση του τόξου κάποια μόρια μετατρέπονται σε άτομα ($C_nH_m \rightarrow nC + mH$). Η ενέργεια που απελευθερώνεται, είναι ίση με την ενέργεια των χημικών δεσμών που διασπάστηκαν. Το μονωτικό, στη συνέχεια, μπαίνει στην διαδικασία "αυτοθεραπείας" (self-healing), αναδομώντας τα μόριά του. Όσο περισσότερα άτομα άνθρακα έχουν προκληθεί, μετά την εκδήλωση του ηλεκτρικού τόξου, τόσο δυσκολότερη είναι η αναδόμησή του, επομένως και η ανάκτηση των μονωτικών του ιδιοτήτων. Είναι σημαντικός για την μελέτη του φαινομένου, ο λόγος $q = (\text{άτομα C})/(\text{άτομα H})$ στα μόρια του υγρού [15].

8.2 Πειραματική διαδικασία

Το πειραματικό δοκίμιο αποτελείται από ηλεκτρόδια σε μορφή σφαιράς (από ανοξείδωτο ασάλι) και ρυθμιζόμενο μεταξύ τους διάκενο. Το δοχείο ήταν γυάλινο, ώστε να είναι εμφανής η εκδήλωση των ηλεκτρικών τόξων εντός του, από εξωτερικό παρατηρητή. Το δυναμικό, το οποίο εφαρμοζόταν στα ηλεκτρόδια, αυξανόταν συνεχώς, μέχρι την τιμή της τάσης διάσπασης, όπου εκδηλωνόταν το ηλεκτρικό τόξο. Έπειτα επανερχόταν στο μηδέν, αφήνοντας χρόνο στο μονωτικό να επανακτήσει τις ηλεκτρικές του ιδιότητες και η διαδικασία επαναλαμβανόταν. Μεταξύ δύο διαδοχικών ηλεκτρικών τόξων (i-1) και (i) στο δείγμα (j), η εφαρμοζόμενη τάση δίνεται από την σχέση :

$$U(t) = U_0(j) \cdot \{1 - \exp[-(t - t_{i-1})/\tau]\} \quad (8.2-1)$$

όπου : $U(t)$: η εφαρμοζόμενη τάση
 $U_0(t)$: η αρχική τάση διάσπασης ($t=0$) για το δείγμα (j)
 t_{i-1} : χρονική στιγμή εμφάνισης του τόξου (i-1)
 τ : χαρακτηριστική σταθερά χρόνου της διάταξης

Η σταθερά χρόνου (τ) ρυθμίζεται μέσω των ηλεκτρικών στοιχείων της διάταξης (R,C). Αν $t_i - t_{i-1} = \Delta t_i$, το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί μεταξύ δύο διαδοχικών τόξων, τότε η τάση διάσπασης για το i-τόξο ($U_i(j)$) δίνεται, βάσει της σχέσης 8.2-2, από την σχέση :

$$U_i(j) = U_0(j) \cdot \{1 - \exp[-(\Delta t_i / \tau)]\} \quad (8.2-2)$$

Ένα μονωτικό θεωρείται ότι επανακτά πλήρως τις ηλεκτρικές του ιδιότητες, αν τα διαδοχικά ηλεκτρικά τόξα συμβαίνουν για τάσεις διασπάσεων ίσες με την αρχική.

Ένα χρήσιμο μέγεθος για την αξιολόγηση του μονωτικού είναι η μέση τάση διάσπασης των ηλεκτρικών τόξων που ακολουθούν μετά την πρώτη διάσπαση. Δίνεται από την σχέση :

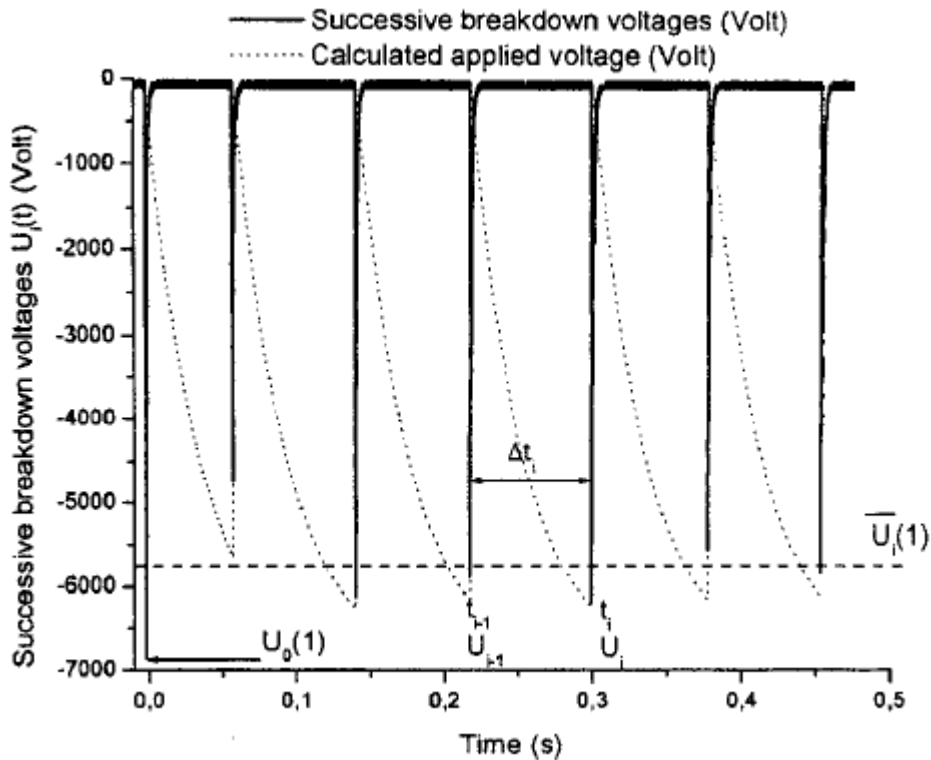
$$\overline{U}_i(j) = \frac{\sum_{i=1}^{N_j} U_i(j)}{N_j} \quad (8.2-3)$$

όπου : $\overline{U}_i(j)$: μέση τάση διάσπασης τόξων στο δείγμα (j)
 $U_i(j)$: τάση διάσπασης (i) τόξου στο δείγμα (j)
 N_j : πλήθος τόξων που εμφανίζονται μετά την εμφάνιση του πρώτου.

Τα μονωτικά στα οποία έγιναν τα πειράματα ήταν ο αέρας(πίεσης 1atm) και τα υγρά μονωτικά μοριακής δομής $C_{10}H_{22}$ (decane), μοριακής δομής $C_{16}H_{32}$ (polybutene) και μοριακής δομής $C_{18}H_{30}$ (dodecylbenzene) [15].

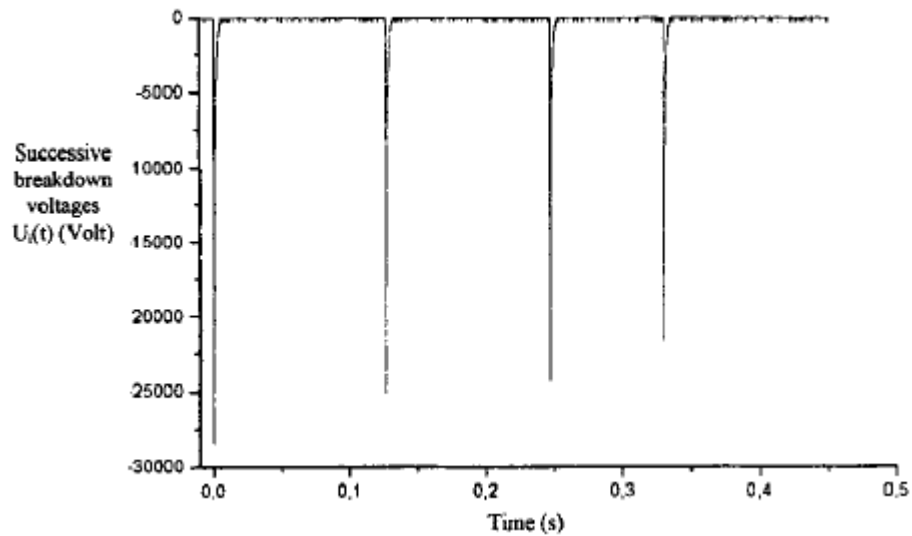
8.3 Ανάλυση αποτελεσμάτων

Για τον αέρα(1 atm), η χαρακτηριστική σταθερά χρόνου της διάταξης ήταν $\tau=34,2ms$, ενώ το διάκενο μεταξύ των σφαιρικών ηλεκτροδίων ήταν $d=1,5mm$. Το σχήμα 8.3-1 δίνει την εικόνα του παλμογράφου για τις τάσεις διασπάσεων στα διαδοχικά ηλεκτρικά τόξα. Με συνεχή γραμμή δίνονται οι τάσεις για τις οποίες επετεύχθη διάσπαση(Successive breakdown voltages), ενώ με διακεκομμένη γραμμή οι υπολογισθείσες εφαρμοζόμενες τάσεις(Calculated applied voltages) όπως αυτές προκύπτουν από την σχέση 8.2-2 . Η μέση τάση διάσπασης του αέρα υπολογίστηκε $\overline{U}_i(j) = 6kV$.



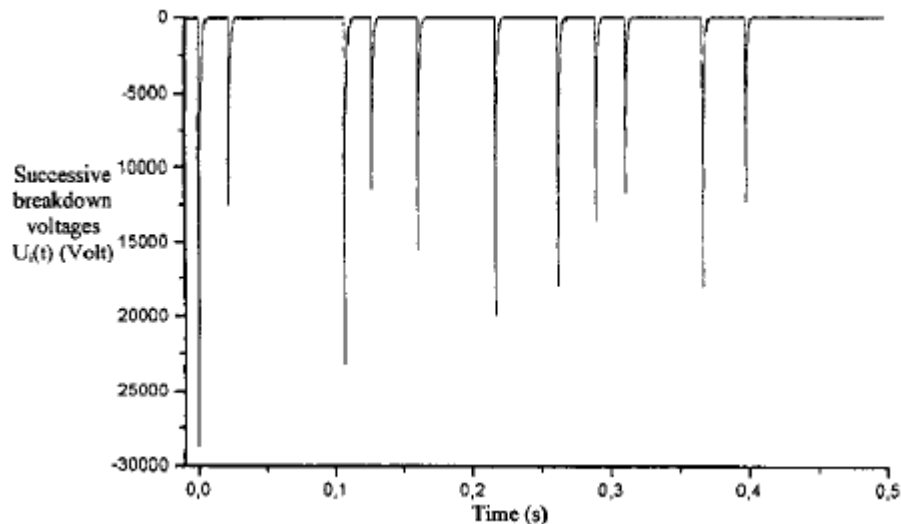
Σχήμα 8.3-1 : Τάσεις διασπάσεων(Successive breakdown voltages) $U_i(t)$ των ηλεκτρικών τόξων, για τον αέρα(1atm), στην κλίμακα του χρόνου(Time) [15].

Για το υγρό μονωτικό, μοριακής δομής $C_{10}H_{22}$, η παράμετρος $q=C/H=0,45$. Η χαρακτηριστική σταθερά χρόνου ρυθμίστηκε $\tau=30,6ms$ και το διάκενο μεταξύ των ηλεκτροδίων $d=0,6mm$. Στο σχήμα 8.3-2 φαίνεται η συμπεριφορά του. Η αρχική τάση διάσπασης ήταν $28,5kV$, ενώ ακολούθησαν άλλα 3 τόξα, από τα οποία η μέση τάση διάσπασης υπολογίστηκε ίση με $23,6kV$.



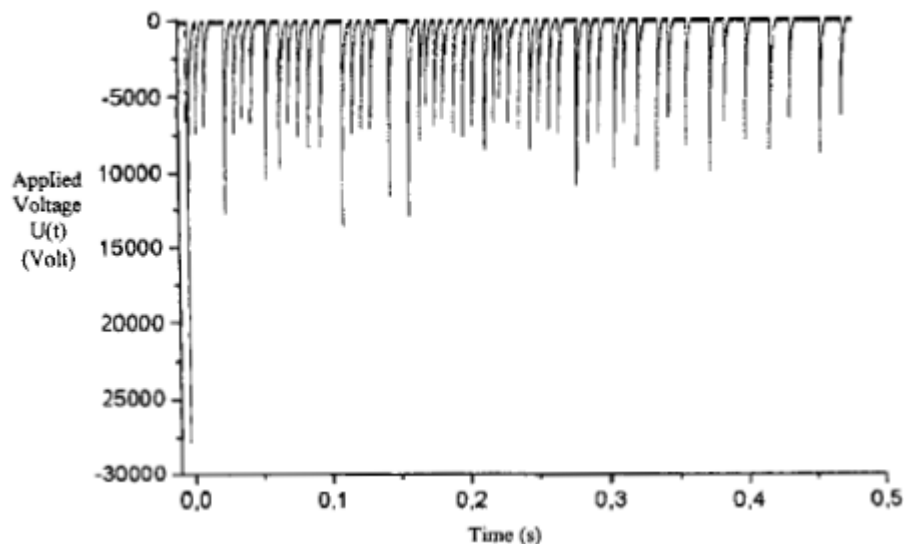
Σχήμα 8.3-2 : Τάσεις διασπάσεων(Successive breakdown voltages) $U_i(t)$ των ηλεκτρικών τόξων, για το υγρό μονωτικό μοριακής δομής $C_{10}H_{22}$ (decane), στην κλίμακα του χρόνου(Time) [15].

Για το υγρό μονωτικό, μοριακής δομής $C_{16}H_{32}$, η παράμετρος $q=C/H=0,5$. Η χαρακτηριστική σταθερά χρόνου ρυθμίστηκε $\tau=30,6ms$ και το διάκενο μεταξύ των ηλεκτροδίων $d=0,6mm$. Η συμπεριφορά του μονωτικού φαίνεται στο σχήμα 8.3-3 . Η αρχική τάση διάσπασης ήταν $28,7kV$, ακολούθησαν άλλα 10 τόξα, από τα οποία η μέση τάση διάσπασης υπολογίστηκε ίση με $16kV$.



Σχήμα 8.3-3 : Τάσεις διασπάσεων(Successive breakdown voltages) $U_i(t)$ των ηλεκτρικών τόξων, για το υγρό μονωτικό μοριακής δομής $C_{16}H_{32}$ (polybutene), στην κλίμακα του χρόνου(Time) [15].

Το υγρό μονωτικό, μοριακής δομής $C_{18}H_{30}$, έχει παράμετρο $q=C/H=0,6$. Η χαρακτηριστική σταθερά χρόνου ρυθμίστηκε $\tau=34,2ms$ και το διάκενο μεταξύ των ηλεκτροδίων $d=0,6mm$. Η εικόνα που παρουσίασε φαίνεται στο σχήμα 8.3-4 . Η αρχική τάση διάσπασης ήταν $27,8kV$, ακολούθησαν άλλα 50 τόξα, από τα οποία η μέση τάση διάσπασης υπολογίστηκε ίση με $8,1kV$ [15].



Σχήμα 8.3-4 : Τάσεις διασπάσεων (Applied Voltage) $U(t)$ των ηλεκτρικών τόξων, για το υγρό μονωτικό μοριακής δομής $C_{18}H_{30}$ (dodecylbenzene), στην κλίμακα του χρόνου (Time) [15].

8.4 Σχόλια

Φαίνεται ότι τα μονωτικά $C_{10}H_{22}$ και $C_{16}H_{32}$, παρουσιάζουν καλή συμπεριφορά ανάκτησης των ηλεκτρικών τους ιδιοτήτων. Λιγότερο ικανοποιητική συμπεριφορά παρουσιάζει το μονωτικό $C_{18}H_{30}$. Βασικός λόγος που συμβαίνει αυτό, έχει να κάνει με την παράμετρο q . Γενικότερα, ένα μονωτικό παρουσιάζει καλή συμπεριφορά ανάκτησης των ηλεκτρικών του ιδιοτήτων για $0,25 < q < 0,5$.

Θα πρέπει να σημειωθεί επίσης, η επίδραση της χαρακτηριστικής σταθεράς χρόνου (τ) της διάταξης. Είναι μέγεθος ενδεικτικό του "χρόνου ανάπαυσης" που δίνεται στο μονωτικό, για την ανάκτηση των ιδιοτήτων του. Όπως φαίνεται κι από την σχέση 8.2-2, μείωση του (τ) ισοδυναμεί με μεγαλύτερη καταπόνηση του μονωτικού.

Δ. ΣΧΟΛΙΑ

Δεδομένης της σπουδαιότητας του αντικειμένου, ήταν απαραίτητο να μελετηθούν οι παράγοντες που επηρεάζουν την διηλεκτρική αντοχή των μονωτικών. Με χρήση φυσικών και χημικών μεθόδων, οι επιστήμονες κατάφεραν να μελετήσουν την διηλεκτρική αντοχή των υγρών μονωτικών ως προς έναν και μόνο παράγοντα, διατηρώντας όλους τους υπόλοιπους σταθερούς. Το τελευταίο ήταν πολύ σημαντικό για την μελέτη των φαινομένων, καθώς μόνο τότε θα μπορούσαν να εξαχθούν σωστά συμπεράσματα για την επίδραση των παραγόντων στη συμπεριφορά τους, διαφορετικά στην περίπτωση που συνυπάρχουν όλοι οι παράγοντες ταυτόχρονα προκαλείται σύγχυση και μη ασφαλή συμπεράσματα. Παράγοντες όπως η επιβαλλόμενη τάση, η θερμοκρασία, η υγρασία και τα αιωρούμενα σωματίδια εντός του λαδιού, παίζουν σημαντικό ρόλο στην απόδοση του μονωτικού.

Η αύξηση της επιβαλλόμενης τάσης, έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση του αριθμού των ελεύθερων ηλεκτρονίων και συνεπώς ενισχύεται ο ιονισμός με κρούσεις. Το αυξημένο φορτίο συνεπάγεται αύξηση των μερικών εκκενώσεων που συμβαίνουν στο μονωτικό (μικρότερος χρόνος έναρξης μερικών εκκενώσεων, μεγαλύτερη διάρκεια φαινομένου και αυξημένη ενέργεια μερικών εκκενώσεων).

Η θερμοκρασία και η υγρασία, είναι παράγοντες, η αύξηση των οποίων έχει ως αποτέλεσμα την μείωση της διηλεκτρικής αντοχής του μονωτικού. Μάλιστα οι παράγοντες αυτοί μπορούν να αλληλεπιδρούν μεταξύ τους, όπως για παράδειγμα στο σύστημα μόνωσης χαρτιού-λαδιού. Πιο συγκεκριμένα οι αυξομειώσεις της θερμοκρασίας επιδρούν στην μεταφορά της υπάρχουσας υγρασίας από το χαρτί στο λάδι και αντίστροφα (η αύξηση της θερμοκρασίας προκαλεί μεταφορά υγρασίας από το χαρτί στο λάδι).

Τα αιωρούμενα σωματίδια, τα οποία υπάρχουν αναπόφευκτα στο μονωτικό λάδι, κάνουν ευκολότερη την γεφύρωση του διακένου μεταξύ των επαφών που πρέπει να κρατηθούν μονωμένες από το λάδι. Το αποτέλεσμα είναι γενικά να προκαλείται μείωση της διηλεκτρικής αντοχής του μονωτικού, λόγω της ύπαρξής τους. Η δημιουργία αγώγιμης γέφυρας, μέσω αυτών, εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου, το πλήθος των σωματιδίων αλλά ακόμα κι από το είδος τους (παίζει ρόλο το μέγεθός τους και η μορφή τους).

Η συμπεριφορά του μονωτικού λαδιού, εξαρτάται από την δομή των μορίων που το αποτελούν. Γίνεται προσπάθεια κατάταξης των μονωτικών λαδιών ανάλογα με τα τεχνικά τους χαρακτηριστικά, το κόστος τους, αλλά και την επίδραση στο περιβάλλον. Πολλές φορές δεν υπάρχει ένα λάδι που πληροί τις απαιτούμενες προδιαγραφές, έτσι είναι σημαντική η γνώση μεθόδων που αφορούν μίγματα λαδιών με σκοπό την δημιουργία του κατάλληλου μονωτικού.

Είναι γνωστό ότι η διηλεκτρική αντοχή των μονωτικών υπό συνεχή τάση ($f=0\text{Hz}$) είναι μεγαλύτερη σε σχέση με την διηλεκτρική του αντοχή υπό

εναλλασσόμενη ($f=50\text{Hz}$). Αυτό αναδεικνύει την εξάρτηση της απόδοσης του μονωτικού από τον παράγοντα της συχνότητας. Η μελέτη λοιπόν των μονωτικών υπό το πρίσμα της φασματοσκοπίας, μπορεί να δώσει χρήσιμες πληροφορίες για την επίδραση του παράγοντα της συχνότητας στην μόνωση που παρέχεται.

Ενδιαφέρον, τελικά, παρουσιάζει η ικανότητα του μονωτικού να επανακτά τις μονωτικές του ιδιότητες μετά την εκδήλωση ηλεκτρικού τόξου σε αυτό. Παρατηρείται ότι αυτή η ικανότητα είναι αποτέλεσμα παραγόντων όπως η μοριακή δομή του μονωτικού υλικού αλλά και των πολλαπλά εφαρμοζόμενων τάσεων επί αυτού.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Π.Δ. Μπούρκας, Κ.Γ.Καραγιαννόπουλος : "Βιομηχανικές Ηλεκτρικές Διατάξεις και Υλικά" , Εκδόσεις Ε.Μ.Π. , Αθήνα 2003
- [2] Π.Δ. Μπούρκας : "Εφαρμογές Κτιριακών και Βιομηχανικών Εγκαταστάσεων" , Εκδόσεις Ε.Μ.Π. , Αθήνα 1998
- [3] Γ.Β. Κορδαλής : "Μετρήσεις Μερικών Εκκενώσεων σε Βιομηχανικά Μονωτικά Υλικά υπό Κρουστικές Τάσεις της Μορφής 250/2500μs" , Διπλωματική Εργασία , Αθήνα 2005
- [4] A.H. Sharbaugh, J.C. Devins, S.J. Rzed : "Review Of Past Work On Liquid Breakdown" , IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. EI-15 , No. 3 , June 1980
- [5] E.O. Forster : "Progress in the Field of Electric Properties of Dielectric Liquids" , IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. 25 , No. 1 , February 1990
- [6] T.K. Saha, P. Purkait : "Investigations of Temperature Effects on the Dielectric Response Measurements of Transformer Oil-Paper Insulation System" , IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 23 , No. 1 , January 2008
- [7] T. Ishikawa, K. Yasuda, T. Igarashi, S. Yanabu, G. Ueta, S. Okabe : "Effect of Temperature on the Streaming Electrification Characteristics of Silicone Oil" , IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 16 , No. 1 , February 2009
- [8] B.P. Kang : "Thermal Dependency of Viscosity, Power Factor, and Ion Content of Electrical Insulating Oils" , IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-84 , September 1965
- [9] B.P. Kang : "Thermal Dependency of Viscosity, Power Factor, and Ion Content of Electrical Insulating Oils-II Characteristics of Blended Insulating Oils" , IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. EI-2 , No. 1 , April 1967
- [10] B.P. Kang : "The Influence of the Concentration and Mobility of Ions on Dielectric Loss of Insulating Oils" , AIEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. 65 , 1946

- [11] S. Jayaram, J.D. Cross : "Influence of Impurities on Electroconvection in Insulating Liquids" , IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. 27 , No. 2 , April 1992
- [12] A.S. Akmal, H. Borsi, E. Gockenbach, V.Wasserberg, H. Mohseni : "Dielectric Behavior of Insulating Liquids at Very Low Frequency" , IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 13 , No. 3 , June 2006
- [13] R.Bartnikas : "Dielectric Loss in Insulating Liquids" , IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. 2 , 1967
- [14] Insulation diagnostics spectrometer IDA, Programma Electric AB, Eldarv.4, SE-187 75 Täby, Sweden
- [15] J.H. Tortai, N. Bonifaci, A. Denat : "Insulating Properties of Some Liquids after an Electrical Arc" , IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 9 , No. 1 , February 2002