



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΩΝ
ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ΣΕ ΜΟΝΩΤΕΣ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ **ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΛΟΓΩ ΒΥΘΙΣΕΩΝ ΤΑΣΗΣ ΚΑΙ ΛΟΓΩ** **ΥΠΕΡΤΑΣΕΩΝ**



ΠΛΟΚΑΜΑΚΗΣ ΑΝΔΡΕΑΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: κ. ΚΑΡΑΓΙΑΝΝΟΠΟΥΛΟΣ Κ., ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π.

© ΑΘΗΝΑ 2015



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΩΝ
ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ΣΕ ΜΟΝΩΤΕΣ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ
ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΛΟΓΩ ΒΥΘΙΣΕΩΝ ΤΑΣΗΣ ΚΑΙ ΛΟΓΩ
ΥΠΕΡΤΑΣΕΩΝ

ΠΛΟΚΑΜΑΚΗΣ ΑΝΔΡΕΑΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: κ. ΚΑΡΑΓΙΑΝΝΟΠΟΥΛΟΣ Κ., ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π.

© ΑΘΗΝΑ 2015

.....

ΠΛΟΚΑΜΑΚΗΣ Γ. ΑΝΔΡΕΑΣ

Διπλωματούχος Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών
Ε.Μ.Π.

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.

Copyright © Πλοκαμάκης Γ. Ανδρέας, 2015

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΩΝ
ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ΣΕ ΜΟΝΩΤΕΣ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΔΙΑΝΟΜΗΣ
ΛΟΓΩ ΒΥΘΙΣΕΩΝ ΤΑΣΗΣ ΚΑΙ ΛΟΓΩ ΥΠΕΡΤΑΣΕΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΠΛΟΚΑΜΑΚΗΣ Γ. ΑΝΔΡΕΑΣ

Επιβλέπων καθηγητής: Κωνσταντίνος Γ. Καραγιαννόπουλος

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

.....
Θ. Αλεξόπουλος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Π. Μπούρκας
Ομ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 2015.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Το παρόν πόνημα αποτελεί την διπλωματική μου εργασία στα πλαίσια της Σχολής Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Η συνεχώς αυξανόμενη ζήτηση για συνεχή και αδιάκοπτη παροχή ηλεκτρικής ενέργειας καθιστά επιβεβλημένη τη μελέτη των φυσικών φαινομένων που αναπτύσσονται σε μονωτικά υλικά, εξ' αιτίας βυθίσεων τάσης και υπερτάσεων, ώστε να καταστεί δυνατή η βελτίωση τους, με στόχο την περισσότερο ποιοτική (με σταθερά χαρακτηριστικά) παροχή ενέργειας στους καταναλωτές. Έτσι, είναι απαραίτητη η ταξινόμηση όλων των φαινομένων που έχουν παρατηρηθεί κατά καιρούς σε ηλεκτρομονωτικά υλικά και η ανάπτυξη τρόπων αντιμετώπισής τους. Ο σκοπός λοιπόν αυτής της εργασίας είναι η βιβλιογραφική επισκόπηση των φυσικών φαινομένων που εμφανίζονται σε μονωτήρες του δικτύου μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας λόγω βυθίσεων τάσης και υπερτάσεων, η μελέτη των πολύπλοκων μηχανισμών που λαμβάνουν χώρα καθώς και προτάσεις για ενίσχυση των μονωτήρων έναντι φαινομένων διηλεκτρικής κατάρρευσης.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κύριο Π. Μπούρκα, ομότιμο καθηγητή της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστών του ΕΜΠ καθώς και τον κύριο Κ. Καραγιαννόπουλο για την άψογη συνεργασία και τη σωστή τους καθοδήγηση για την διεκπεραίωση της παρούσας εργασίας.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία χωρίζεται σε τρία βασικά μέρη. Στο πρώτο μέρος, πραγματοποιείται η βιβλιογραφική επισκόπηση, του υπό μελέτη θέματος. Πιο συγκεκριμένα, στο πρώτο κεφάλαιο δίνονται οι ορισμοί και τα χαρακτηριστικά των μονωτικών υλικών και μονωτήρων και στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζεται ο σκοπός της εργασίας. Στο τρίτο κεφάλαιο δίνονται οι ορισμοί της βύθισης τάσης και υπέρτασης και πως αυτές επηρεάζουν το δίκτυο διανομής και τους μονωτήρες, αναλύονται οι αιτίες δημιουργίας υπερτάσεων και βύθισης τάσης στο δίκτυο διανομής.

Στο δεύτερο μέρος παρουσιάζονται τα φυσικά φαινόμενα που εμφανίζονται στους μονωτήρες λόγω υπερτάσεων και βυθίσεων τάσης. Επίσης γίνεται μικροσκοπική μελέτη των φαινομένων που εμφανίζονται στους μονωτήρες λόγω υπερτάσεων και βυθίσεων.

Τέλος, στο τρίτο μέρος παρατίθενται σχόλια για την εργασία καθώς και συμπεράσματα που προκύπτουν ύστερα από την μελέτη των παραπάνω φαινομένων.

ABSTRACT

This thesis is divided into three basic parts. In the first part, literature survey of the thesis subject is made. Specifically, in the first chapter the specifications and characteristics of insulating materials and the purpose of the thesis are defined. In the third chapter, the definitions of the electrical overloading and voltage dip are given in conjunction with the origin of their creation and impact into the electrical distribution network.

In the second part, the purpose of the thesis as well as the natural effects which take place in insulators due to electrical overloading and voltage dip, are presented. In addition, the physical phenomena which occur within insulators due to overloading and voltage dips are analyzed through examination of their properties in atomic scale.

During the third part the comments of the thesis are stated along with the assumptions which stem from the examination of the above effects.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. Εισαγωγή	14
1.1 Το ελληνικό σύστημα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας	14
1.2 Ηλεκτρομονωτικά Υλικά	18
1.2.1 Κριτήρια Αξιολόγησης μονωτικών υλικών	19
1.2.2 Μονωτήρες	22
1.2.3 Είδη και βασικές κατηγορίες μονωτήρων	25
1.2.4 Κατηγορίες μονωτήρων ανάλογα με το υλικό κατασκευής	26
1.2.5 Κατηγορίες μονωτήρων ανάλογα με τον τρόπο σύνδεσής τους	27
1.2.6 Κατηγορίες μονωτήρων ανάλογα με τους χώρους χρήσης	28
1.2.7 Κατηγορίες μονωτήρων ανάλογα με το σχήμα και τη χρήση τους	28
1.3 Τα κύρια μέρη ενός μονωτήρα	33
2. Σκοπός της εργασίας	36
3. Διηλεκτρική συμπεριφορά των μονώσεων	37
3.1 Ηλεκτρική αντοχή μονώσεων	38
3.2 Βυθίσεις τάσης	38
3.3 Αιτίες Βυθίσεων	41
3.4 Υπερτάσεις σε ένα σύστημα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας ως αποτέλεσμα ατμοσφαιρικών εκκενώσεων	42
3.5 Αιτίες εμφάνισης υπερτάσεων στο σύστημα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας	46
3.5.1 Κεραυνός	47
3.5.2 Άμεσο κεραυνικό πλήγμα σε γραμμές Μέσης Τάσης	49
3.5.3 Επαγόμενες υπερτάσεις σε γραμμές Μέσης Τάσης από πτώση κεραυνού στο έδαφος κοντά στις γραμμές	50
4. Φαινόμενα σε μονωτήρες λόγω υπέρτασης ή βύθισης τάσης	51
4.1 Αρμονικές	51
4.2 Φαινόμενα που σχετίζονται με την εμφάνιση εξωτερικών υπερτάσεων σε ένα σύστημα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας	54

4.3 Φαινόμενα που εμφανίζονται κατά τη διάσπαση σε στέρεα μονωτικά υλικά.....	56
4.4 Φαινόμενα που εμφανίζονται στα ηλεκτρομονωτικά αέρια.....	57
4.4.1 Ελεύθεροι ηλεκτρικοί φορείς	58
4.4.2 Ιονισμός ηλεκτρομονωτικών αερίων	60
4.4.3 Η σημασία της πίεσης και της θερμοκρασίας για τον ιονισμό με κρούσεις.....	62
4.4.4 Οι συντελεστές ιονισμού α και $\bar{\alpha}$	64
4.5 Η μακροσκοπική θεωρία των φαινομένων προ και κατά τη διάτρηση.....	66
4.5.1 Η θερμική διάτρηση	66
4.5.2 Η ηλεκτρική διάτρηση.....	68
4.5.3 Δενδροειδής διάτρηση	69
4.5.4 Διάτρηση από μερικές εκκενώσεις	72
4.5.5 Θερμοχημική διάτρησης.....	72
4.6 Η κβαντομηχανική θεωρία των φαινομένων στα στερεά μονωτικά	73
4.7 Μια πιο θεωρητική προσέγγιση	75
4.7.1 Φάσμα εκπομπής ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας	77
4.7.2 Επιφανειακή διάσπαση	78
5. Σχόλια για τα φαινόμενα	82
5.1 Μειονεκτήματα του συνδυασμού του αέρα με τα στερεά και υγρά μονωτικά υλικά. .	82
5.2 Συνδυασμοί των παραγόντων γήρανσης και διάτρησης.	82
5.2.1 Η θερμότητα του περιβάλλοντος μέσου στους παράγοντες γήρανσης και διάτρησης.....	83
5.2.2 Ο συνδυασμός της θερμότητας του περιβάλλοντος μέσου με τους άλλους παράγοντες γήρανσης και διάτρησης	87
5.2.3 Ο συνδυασμός των τεσσάρων βασικών παραγόντων γήρανσης και διάτρησης	98
5.3 Το φαινόμενο της πολικότητας σε πολυμερή στερεά μονωτικά κατά την εκδήλωση μερικών εκκενώσεων.	103
5.4 Η επιφανειακή διάσπαση και η υπερπήδηση	104
5.5 Κβαντομηχανική ερμηνεία των φαινομένων γήρανσης και διάσπασης	104
5.5.1 Μακροσκοπική ερμηνεία	107
5.5.2 Κβαντομηχανική ερμηνεία	107

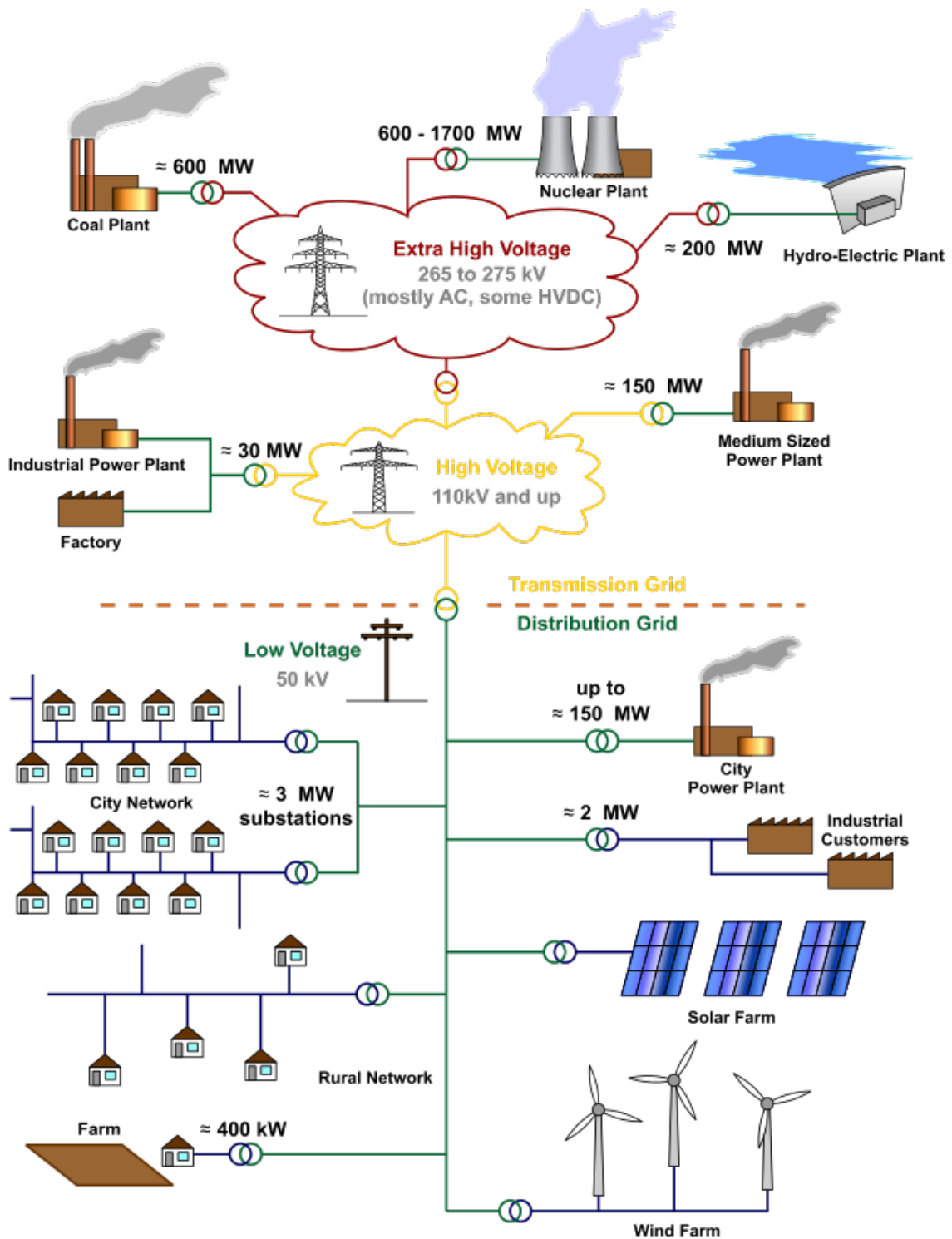
6. Συμπεράσματα	112
6.1 Οι υπερτάσεις στο δίκτυο.....	112
6.2 Συμπεράσματα για την περαιτέρω μελέτη του ιονισμού με κρούσεις.....	113
7. Συμβολή	114
8. Βιβλιογραφία	116

1. Εισαγωγή

1.1 Το ελληνικό σύστημα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας

Το ηλεκτρικό δίκτυο είναι ένα διασυνδεδεμένο δίκτυο για τη μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας από του παραγωγούς στους καταναλωτές. Συνίσταται από τρία μέρη:

- Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας: Τα εργοστάσια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας παράγουν ηλεκτρική ενέργεια χρησιμοποιώντας ορυκτά καύσιμα (άνθρακα, φυσικό αέριο, βιομάζα) ή τον αέρα, το νερό, τα πυρηνικά καύσιμα και τον ήλιο,
- Μεταφορά Ηλεκτρικής Ενέργειας: Οι γραμμές μεταφοράς μεταφέρουν την ηλεκτρική ενέργεια από τα εργοστάσια στα κέντρα ζήτησης,
- Διανομή Ηλεκτρικής Ενέργειας: Η ενέργεια φτάνει στους υποσταθμούς, γίνεται υποβιβασμός τάσης με τη βοήθεια μετασχηματιστών και μεταφέρεται μέσω γραμμών διανομής. με περαιτέρω υποβιβασμό τάσης, γίνεται κατάλληλη για χρήση από οικιακά δίκτυα.



Σχήμα 1.1-1: Αναπαράσταση δικτύου διανομής ηλεκτρικής ενέργειας από τον παραγωγό στον καταναλωτή.

Το ελληνικό ηλεκτρικό σύστημα χαρακτηρίζεται από τη σχετική απομόνωση της θέσης του από τα άλλα ευρωπαϊκά συστήματα, την οξεία αύξηση της κατανάλωσης την τελευταία δεκαετία, την ύπαρξη μεγάλου αριθμού μικρών καταναλωτών στα νησιά και την καθοριστική εξάρτησή του από το λιγνίτη.

Το ελληνικό σύστημα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας από τους Σταθμούς Παραγωγής στα μεγάλα αστικά κέντρα, περιλαμβάνει γραμμές 400 KV, 150 KV και 66 KV. Το συνολικό του μήκος ανέρχεται περίπου σε 9.500 km. Ακόμη, το σύστημα μεταφοράς τροφοδοτεί 23 μεγάλους βιομηχανικούς καταναλωτές, ενώ είναι διασυνδεδεμένο με τα αντίστοιχα ηλεκτρικά δίκτυα της Αλβανίας, της πρώην Γιουγκοσλαβίας και Βουλγαρίας, με γραμμές 400 KV και 150 KV.

Το σύστημα διανομής που μεταφέρει την ηλεκτρική ενέργεια στους τελικούς καταναλωτές έχει γραμμές μήκους περίπου 160.000 km και τροφοδοτεί περίπου 6 εκατομμύρια καταναλωτές μέσης (22 KV, 20 KV, 15 KV, 6.6 KV) και χαμηλής τάσης (400/280 V). Η ύπαρξη δικτύων σε διάφορες τάσεις εξηγείται από την ανάγκη οικονομικής μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας από τα σημεία παραγωγής στην τελική κατανάλωση. Η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται στους θερμοηλεκτρικούς και υδροηλεκτρικούς σταθμούς βρίσκεται, κατά κανόνα, σε μία τάση μεταξύ 6 και 21 kV. Αυτή η τάση είναι, όμως, πολύ χαμηλή για την μεταφορά της ενέργειας με τις μικρότερες δυνατές απώλειες, καθώς το σύστημα μεταφοράς έχει τις δικές του απώλειες ηλεκτρικής αντίστασης. Σύμφωνα με το βασικό νόμο του Ohm, αυτές προσδιορίζονται από τη σχέση $R = \rho \cdot (l/A)$ όπου ρ η ειδική ηλεκτρική αντίσταση l το μήκος του αγωγού και A η διατομή του

Επομένως, ένα χαλύβδινο καλώδιο με ειδική αντίσταση $\rho=0.18$ ($\Omega \cdot \text{mm}^2$)/m, μήκος 200 km και διατομή 600 mm^2 θα έχει μία αντίσταση 60Ω . Αν δεχτούμε ότι από το λιγνιτικό κέντρο Αγ. Δημητρίου μέσω του αγωγού θα μεταφερθεί ισχύς 500 MW, τότε εξαιτίας της ηλεκτρικής αντίστασης του αγωγού ένα μέρος της ηλεκτρικής ενέργειας θα μετατραπεί σε θερμική, λόγω των απωλειών Joule. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα η απώλεια ισχύος θα ισοδυναμεί περίπου με 34 MW ή αλλιώς 7% της αρχικής ισχύος, ποσοστό που είναι σαφώς ανεπίτρεπτα μεγάλο, αν αναλογιστεί κανείς ότι η απόσταση Αγ. Δημητρίου – Αθήνας είναι περίπου 400 km, οπότε οι απώλειες θα ήταν πρακτικά διπλάσιες, δηλαδή 14%. Η κατάσταση μάλιστα γίνεται ακόμη πιο δυσάρεστη, καθώς η ωμική αντίσταση, κι επομένως οι απώλειες, αυξάνεται συναρτήσει της θερμοκρασίας του αγωγού. Σε θερμές καλοκαιρινές μέρες η αντίσταση των αγωγών μπορεί να αυξάνεται ως και κατά 20%.

Ωστόσο, μπορεί κανείς να διακρίνει τις δυνατότητες να μειωθούν αυτές οι απώλειες, είτε μειώνοντας την αντίσταση είτε την ένταση της μεταφερόμενης ηλεκτρικής ενέργειας. Η πρώτη λύση προϋποθέτει τη χρήση υλικών με χαμηλότερη ειδική αντίσταση είτε αυξάνοντας τη διατομή του αγωγού. Και οι δύο αυτές δυνατότητες οδηγούν σε αύξηση του κόστους και δεν θεωρούνται εφαρμόσιμες, παρ' ότι δοκιμάζονται πειραματικά με τη μορφή υπεραγωγών ή αγωγών που ψύχονται σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες. Η δόκιμη λύση είναι μείωση της έντασης της ηλεκτρικής ενέργειας, μέσω της αύξησης της τάσης, ώστε να μεταφέρεται η ίδια ισχύς. Ο δεκαπλασιασμός της τάσης μειώνει την ένταση του ρεύματος στο ένα δέκατο της αρχικής και τις απώλειες ισχύος στο ένα εκατοστό, στο παράδειγμά μας δηλαδή στα 0.34 MW στα 200 km ή 0.7 MW στα 400 km. Στην πράξη ισχύει ο βασικός κανόνας ότι η μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να γίνει με αποδεκτές απώλειες σε απόσταση τόσων χιλιομέτρων όση είναι και η τάση της σε kV. Αυτός ο κανόνας εξηγεί την ύπαρξη των τεσσάρων βασικών επιπέδων τάσης στο σύστημα μεταφοράς και διανομής, ξεκινώντας από την αναγωγή της παραγόμενης ενέργειας σε υπερυψηλή τάση στους σταθμούς παραγωγής.

Η υπερυψηλή τάση (400 kV) χρησιμοποιείται για τη μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας από τη Δυτική Μακεδονία στην Αττική, σε εξαιρετικά μεγάλους βιομηχανικούς καταναλωτές καθώς και στη σύνδεση με τις όμορες χώρες. Η υψηλή τάση (150, 66 kV) χρησιμοποιείται για τη μεταφορά από τους σταθμούς σε αστικά κέντρα και σημεία εστίασης της κατανάλωσης. Η μέση τάση (22 KV, 20 KV, 15 KV, 6.6 KV) χρησιμοποιείται για τη μεταφορά σε οικισμούς (όπου θα μειωθεί στη χαμηλή τάση) και για βιομηχανικούς και άλλους μεγάλους καταναλωτές (π.χ. Πανεπιστήμια, Νοσοκομεία κλπ.) Η χαμηλή τάση, τέλος, αποτελεί το τέλος της αλυσίδας για του μικρούς καταναλωτές.

Η εύρυθμη και αξιόπιστη λειτουργία του συστήματος διανομής και ο εφησυχασμός των καταναλωτών μέσης και χαμηλής τάσης, αποτέλεσαν το έναυσμα για τη μελέτη των φαινομένων που αναπτύσσονται στους μονωτές, λόγω υπέρτασης και βύθισης τάσης, ώστε να ληφθούν τα απαραίτητα μέτρα για την αντιμετώπιση τους. Οι προσπάθειες αυτές απέδωσαν και η έρευνα βρίσκεται συνεχώς σε εξέλιξη^{1,2}.

1.2 Ηλεκτρομονωτικά Υλικά

Ηλεκτρομονωτής είναι κάθε υλικό το οποίο δεν επιτρέπει την ελεύθερη διέλευση του ηλεκτρικού φορτίου από τη μάζα του. Τέλειοι ηλεκτρομονωτές που να απαγορεύουν εντελώς τη διέλευση του ηλεκτρικού φορτίου από μέσα τους δεν υπάρχουν, αλλά όλα τα στερεά μονωτικά υλικά συμπεριφέρονται ως τέλειοι μονωτές, όταν διαθέτουν πολύ μεγαλύτερη διηλεκτρική αντοχή από την απαιτούμενη ώστε το ηλεκτρικό πεδίο να είναι ηλεκτροστατικό, όπως αυτό μπορεί να συμβεί για παράδειγμα με ένα μονωτήρα των 20 kV που βρίσκεται υπό τάση 400 V. Μερικά στερεά ηλεκτρομονωτικά είναι το πλαστικό, τα κεραμικά υλικά, το γυαλί. Επίσης ο ατμοσφαιρικός αέρας είναι μονωτής όταν το ηλεκτρικό πεδίο είναι ηλεκτροστατικό.

Σκοπός των μονώσεων σε μία ηλεκτροτεχνική κατασκευή είναι ο ηλεκτρικός διαχωρισμός μεταξύ ρευματοφόρων μερών, καθώς και ρευματοφόρων μερών προς τη γη.

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 ενώ όταν η διάσπαση συμβαίνει εν μέρει στην επιφάνεια ενός στερεού μονωτικού και ακολουθεί στον αέρα ονομάζεται υπερπήδηση.

Η διάσπαση διά του όγκου ενός μονωτικού υλικού καλείται διάτρηση. Η εκκένωση σε περιορισμένο μήκος του μονωτικού ονομάζεται μερική εκκένωση. Οι μερικές εκκενώσεις οφείλονται σε θέσεις ανομοιογένειας στον όγκο ή την επιφάνεια του υλικού. 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 Korona.

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

$$E_d = U_{dmin}/d \quad (1.2-1)$$

Η τιμή E_d είναι ένα κριτήριο για την επιλογή των διαφόρων ηλεκτρομαγνητικών.

1.2.1 Κριτήρια Αξιολόγησης μονωτικών υλικών

Σε μια κατασκευή υψηλών τάσεων ενδιαφερόμαστε ιδιαίτερα για την αξιόπιστη και διαχρονική συμπεριφορά των διαφόρων μονωτικών υλικών. Ορισμένα βασικά κριτήρια αξιολόγησης των μονωτικών υλικών τα οποία δεν αφορούν μόνο τις ηλεκτρικές ή διηλεκτρικές ιδιότητες τους, αλλά και άλλες ιδιότητες που πρέπει να έχουν, ανάλογα με την κατασκευή, είναι:

Η διηλεκτρική αντοχή (E_d), είναι ένας ορισμός για την αξιολόγηση των μονωτικών υλικών, μέσω της ελάχιστης τιμής της πεδιακής για τη διάσπαση εντός ομογενούς πεδίου.

Η σχετική διηλεκτρική σταθερά (ϵ_r), δίνει το πόσο μεγαλύτερη είναι η χωρητικότητα μιας διάταξης συγκριτικά προς εκείνη στο κενό ή στον αέρα. Οι σχετικές διηλεκτρικές σταθερές των διαφόρων μονωτικών, που συνθέτουν μία μόνωση, θα πρέπει να επιλέγονται κατά τέτοιο τρόπο ώστε να εξομαλύνεται το πεδίο στις διαχωριστικές επιφάνειες τους, για να μη διευκολύνεται η εκδήλωση μερικών εκκενώσεων.

Ο συντελεστής απωλειών ($\text{tg}\delta$), εμφανίζεται στις απώλειες ενέργειας. Σε μία μόνωση, που παρεμβάλλεται μεταξύ δύο ηλεκτροδίων με σκοπό τη δημιουργία ενός ηλεκτροστατικού πεδίου, υπάρχουν ενεργειακές απώλειες που οφείλονται στην κατανάλωση ενέργειας κατά τη διαρκή εναλλαγή της φοράς της ηλεκτρικής ροπής των δίπολων στο ρυθμό της εναλλαγής της πολικότητας της εναλλασσόμενης τάσης και στην πολύ μικρή ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα, που έχουν τα μονωτικά υλικά. Αποτέλεσμα είναι ο μονωτής να 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. Ο συντελεστής απωλειών

$$\text{tg}\delta = I_R/I_C \quad (1.2.1-1)$$

μας δίνει πληροφορίες για την αγωγιμότητα του διηλεκτρικού.

Η ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα (σ), εξαρτάται από τις συνθήκες λειτουργίας των ηλεκτρομονωτικών υλικών, τα οποία έχουν πολύ μικρή ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα. Η ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα αποτελεί σημαντικό κριτήριο αξιολόγησης 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 μόνο θερμική, δίνεται από τη σχέση:

$$\sigma = \sigma_0 e^{-W/kT} = \sigma e^{\beta\theta} \quad (1.2.1-2)$$

όπου σ_0 η ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα για διαφορά θερμοκρασίας θ ως προς το περιβάλλον, σ είναι η αρχική ειδική αγωγιμότητα, W είναι η ενέργεια ενεργοποίησης, k η σταθερά Boltzmann, T η απόλυτη θερμοκρασία και β είναι ένας συντελεστής του υλικού.

Από έρευνες σε οργανικά στερεά μονωτικά υλικά 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 οι μερικές εκκενώσεις συμμετέχουν μόνο στην αύξηση των απωλειών Joule. Αυτό μπορεί να συμβεί λόγω πχ 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 1.2.1-2.

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

$$\sigma = \sigma_0 \frac{e^{\beta\theta}}{(1 - \delta E)^2} \quad (1.2.1-3)$$

όπου E η πεδιακή ένταση στο τμήμα του υλικού, που δεν εκδηλώνονται μερικές εκκενώσεις (το οποίο χαρακτηρίζεται και 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 $\delta>0$.

Τέλος η αγωγιμότητα 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 ο διαχωρισμό των ηλεκτρονίων από τους μητρικούς τους πυρήνες και ανύψωση των ελεύθερων ηλεκτρονίων σε υψηλότερο ενεργειακό επίπεδο, με αποτέλεσμα την αύξηση της αγωγιμότητας των μονωτικών.

Ο συντελεστής $\epsilon\tau g\delta$, χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση των μονωτικών υλικών. Ισχύει ότι:

$$\varepsilon \cdot \operatorname{tg} \delta = \frac{\sigma_0}{\omega} e^{\beta \theta} \quad (1.2.1-4)$$

είναι ο συντελεστής του ομοιογενούς στερεού μονωτικού υλικού και αυξάνει εκθετικά με την θερμοκρασία όταν δεν εκδηλώνονται σε αυτό μερικές εκκενώσεις. Αν θεωρήσουμε την τιμή ε σταθερή, τότε από την παραπάνω σχέση έπεται ότι η αύξηση της $\operatorname{tg} \delta$ είναι εκθετική. Για την αύξηση της τιμής $\operatorname{tg} \delta$ στην περιοχή του στερεού μονωτικού, όπου οι μερικές εκκενώσεις στην αύξηση των απωλειών Joule, έχουμε αντίστοιχα:

$$\varepsilon \cdot \operatorname{tg} \delta = \frac{\sigma_0}{\omega} \frac{e^{\beta \theta}}{(1 - \delta E)^2} \quad (1.2.1-5)$$

Η επιφανειακή αγωγιμότητα, αποτελεί κριτήριο καθώς αυξάνεται στην εκδήλωση ορισμένων φαινομένων. Συγκεκριμένα, η διηλεκτρική αντοχή των μονωτικών μειώνεται, όταν η επιφάνεια τους περιλαμβάνει ξένες επικαθίσεις. Το ίδιο θα συμβεί όταν η επιφάνεια καταπονηθεί θερμικά. Έχει διαπιστωθεί δε ότι στα φαινόμενα που εκδηλώνονται στην επιφάνεια των στερεών μονωτικών κατά την ηλεκτρική καταπόνησή τους, συμμετέχει η επιφάνειά τους σε πάχος έως 30 Å. Καθώς οι παράγοντες που προκαλούν αύξηση της επιφανειακής αγωγιμότητας ποικίλουν, 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 πχ αντοχή σε ρεύμα διαρροής, αντοχή σε ηλεκτρικό τόξο, δυνατότητα απομάκρυνσης των επικαθίσεων κατά τη βροχή κλπ), που ενδιαφέρουν στην πράξη για κατασκευή για παράδειγμα μονωτήρων και φλογοθαλάμων διακοπών. Με κριτήριο για παράδειγμα 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.

Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας (λ), συμβαδίζει με την ηλεκτρική ειδική αγωγιμότητα και τα δύο αποτελούν κριτήριο αξιολόγησης των μονωτικών υλικών. Γενικότερα η θερμική καταπόνηση των μονωτικών υλικών σχετίζεται με την αύξηση του αριθμού των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων στις θέσεις όπου η πεδιακή ένταση έτυχε να είναι αυξημένη. Η θερμότητα για την εκδήλωση τέτοιων θέσεων διαταραχής υπάρχει πάντοτε κατά τη λειτουργία των διαφόρων κατασκευών.

Η μηχανική αντοχή, του υλικού έχει ιδιαίτερη σημασία καθώς το στερεό μονωτικό υλικό αποτελεί και «μηχανολογικό εξάρτημα». Στις κατασκευές λοιπόν μας ενδιαφέρουν εκτός τις ηλεκτρικές ιδιότητες των στερεών και οι μηχανικές τους ιδιότητες (αντοχή σε εφελκυσμό ενός μονωτικού, η δύναμη τάνυσης σε μονωτήρες των γραμμών μεταφοράς κλπ.) Οι κανόνες της μηχανικής αντοχής των υλικών ισχύουν για τον υπολογισμό της μηχανικής αντοχής του μονωτικού υλικού.

Για ένα ομογενές ηλεκτρομονωτικό υλικό σε ομογενές ηλεκτρικό πεδίο ισχύει ότι:

$$\varepsilon \cdot \tau g \delta = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \tau g \delta = \sigma / \omega \quad (1.2.1-6)$$

όπου $\varepsilon_0 = 8.857 \text{ pF/m}$ και ω η κυκλική συχνότητα.

Σε αρκετές κατασκευές ενδιαφέρει ιδιαίτερα η μηχανική αντοχή των μονωτικών υλικών, λόγω των μεγάλων δυνάμεων που εξασκούνται σε αυτά. Στις περιπτώσεις αυτές οι υπολογισμοί γίνονται με βάση τους κανόνες της μηχανικής αντοχής των υλικών. Τυπικό παράδειγμα είναι η αντοχή των μονωτήρων υψηλών τάσεων σε μηχανικές και ηλεκτρικές δυνάμεις³.

1.2.2 Μονωτήρες

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

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

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

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

Γενικά, τις καταπονήσεις που δέχεται η μόνωση του μονωτήρα μιας γραμμής μεταφοράς, κατατάσσουμε σε εξωτερικές και εσωτερικές:

- οι εξωτερικές καταπονήσεις, προερχόμενες από κεραυνοπληξίες της ηλεκτρικής γραμμής και διαδιδόμενες μέσω αυτής, καταπονούν με σοβαρές, συχνά, συνέπειες τον εξοπλισμό του δικτύου.
- οι εσωτερικές καταπονήσεις προέρχονται από το γεγονός ακριβώς της λειτουργίας της ηλεκτρικής γραμμής και υποδιαιρούνται:
 - στην τάση βιομηχανικής συχνότητας, με την οποία λειτουργεί υπό κανονικές συνθήκες η ηλεκτρική γραμμή,
 - στις παροδικές υπερτάσεις βιομηχανικής συχνότητας, με διάρκεια της τάξεως του δευτερολέπτου,
 - στις υπερτάσεις χειρισμών, με διάρκεια εκατοντάδων έως χιλιάδων μs.

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

Ωστόσο, οι πρώτες εφαρμογές των μονωτήρων δεν είχαν σχέση με τη μεταβίβαση ηλεκτρικής ισχύος. Αρχικά χρησιμοποιούνταν στα δίκτυα τηλεγράφων (1835), ενώ η πρώτη γραμμή μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας τέθηκε σε λειτουργία το 1882. Αυτή, ήταν συνεχούς τάσης (1343 V) και συνέδεε το Miesbach με το Μόναχο. Στη συνέχεια η ανάπτυξη ήταν ταχύτατη. Τα τελευταία πενήντα χρόνια η μεταφορά γίνεται με γραμμές

υψηλών τάσεων μήκους πολλών χιλιομέτρων, όπως συμβαίνει στις Η.Π.Α και στην πρώην Σοβιετική Ένωση, καθώς και σε πυκνά διασυνδεδεμένα δίκτυα στην Ευρώπη. Οι ηλεκτρικές και μηχανικές τάσεις στις οποίες έπρεπε να ανθίστανται οι τηλεγραφικοί μονωτήρες ήταν προφανώς αμελητέες σε σύγκριση με εκείνες που προκύπτουν από το φορτίο μιας εναέριας γραμμής μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Οι νέες απαιτήσεις αποκάλυψαν σοβαρές ελλείψεις όχι μόνο στα υλικά, αλλά και στα σχέδια των μονωτήρων, τα οποία αρχικά ήταν απλά αντίγραφα των τύπων τηλεγράφων. Ειδικότερα, η διάτρηση από την ηλεκτρική τάση των κεραμικών μονωτήρων που είχαν πόρους ή ελαττώματα, οι ρωγμές που προκαλούνταν από τη θερμική διαστολή ή οι διαβρωτικές συνέπειες στο μέταλλο ή το τσιμέντο και οι υπερπηδήσεις με τόξα, που δημιουργούνται από τους επιφανειακούς ρύπους σε συνδυασμό με την υγρασία, επέβαλλαν την εξέλιξη των σχεδιαστικών και κατασκευαστικών κανόνων. Μερικοί από τους μονωτήρες των αρχών του 19^{ου} αιώνα αναγνωρίζονται σαν εξελιγμένες κατασκευές των μονωτήρων τηλεγραφικών γραμμών. Ωστόσο, το μεγάλο μέγεθος και βάρος των αρχικών μονωτήρων στήριξης, αποτέλεσε ανασταλτικό παράγοντα στην κατασκευή, το χειρισμό και την εγκατάστασή τους. Οι αμερικανικοί μονωτήρες στήριξης αποτελούνταν από λεπτά περιβλήματα πορσελάνης και συνηθισμένο γυαλί, το οποίο είχε υποστεί ειδική κατεργασία σε υψηλές θερμοκρασίες. Μερικά τμήματα πορσελάνης συνδέονταν μεταξύ τους με γυαλί, το οποίο ήταν συνήθως στερεωμένο σε τσιμέντο.

Η ευρωπαϊκή τεχνολογία πορσελάνης όμως προηγούνταν της αμερικανικής, καθώς επέτρεπε την κατασκευή μεγάλων μονωτήρων ανάρτησης, οι οποίοι αποτελούνταν από ένα ή δύο τμήματα πορσελάνης αποφεύγοντας τις πολλαπλές εσωτερικές μεταλλικές ενθέσεις. Σε όλους αυτούς τους μονωτήρες το κεραμικό υλικό ή το γυαλί συμπιέζονταν μηχανικά. Ο βασικός μονωτήρας ωοειδούς σχήματος (ο οποίος χρησιμοποιείται έως και σήμερα ως ισχυρός διαχωριστής εναέριων γραμμών), οδήγησε το 1907 στην κατασκευή ενός δισκοειδούς μονωτήρα, του «Helwett». Ο μονωτήρας αυτός χαρακτηρίζεται από ένα μεγάλο μήκος ερπυσμού ανάμεσα στα ηλεκτρόδια, ασφαλή συμπεριφορά σε περίπτωση θραύσης από μηχανική κρούση κατά τη λειτουργία και απουσία συνδετικού τσιμέντου εσωτερικά. Υπήρχε βεβαία μεγάλη δυσκολία στην κατασκευή. Άξιο αναφοράς είναι το γεγονός ότι ενώ μονωτήρες του τύπου αυτού είναι πρακτικά αδύνατο να στηρίξουν μεγάλα φορτία, ο μονωτήρας αυτός χρησιμοποιήθηκε πολύ και για μεγάλο χρονικό διάστημα, ενώ βρίσκεται σε λειτουργία ακόμη και σήμερα, σε περιοχές όπου η διάβρωση έχει υπερνικήσει πιο σύγχρονες σχεδιάσεις μονωτήρων ανάρτησης.

Η πρόσφατη ιστορία ανάπτυξης των μονωτήρων δεν χαρακτηρίζεται από ιδιαίτερα τεχνολογικά επιτεύγματα, αλλά από διαρκείς αυξήσεις στο μέγεθος, προκειμένου να αντιμετωπιστούν επιτυχώς οι απαιτήσεις μεταφοράς συνεχούς ρεύματος και υπερυψηλών τάσεων.

Η εμπειρία της χρήσης και συνεπώς η ανάπτυξη των προϊόντων από γυαλί ή πορσελάνη για τους μονωτήρες γραμμών υψηλής τάσης, συγκεντρώνεται εδώ και πάνω από εκατό χρόνια. Οι μονωτήρες τύπου «cap & pin» από γυαλί ή πορσελάνη, μαζί με τους μονωτήρες πορσελάνης μεγάλου μήκους, κυριαρχούσαν στην αγορά μέχρι την εμφάνιση των εναλλακτικών μονωτήρων από πολυμερή τη δεκαετία του 1960.

Τα προβλήματα αξιοπιστίας αποδείχθηκαν και συνεχίζουν να αποδεικνύονται δύσκολα να επιλυθούν στην πράξη. Για τον λόγο αυτό, γίνονται προσπάθειες να αντιμετωπιστούν με επιτυχία οι απαιτήσεις μεταφοράς της υψηλής ή υπερυψηλής εναλλασσόμενης τάσης, καθώς και της συνεχούς.

Οι ιδιότητες των κατασκευαστικών υλικών, η ικανότητά τους να λειτουργούν κάτω από δυσμενείς συνθήκες και φυσικά το κόστος, είναι οι παράμετροι που καθορίζουν τον τρόπο κατασκευής των μονωτήρων.

Ένα από τα κρίσιμα σημεία για τους υπαίθριους μονωτήρες είναι η διεπιφάνεια (οι επιφάνειες δηλαδή μεταξύ διαφορετικών υλικών που έρχονται σε επαφή) μεταξύ του στερεού μονωτικού σώματος και του περιβάλλοντος αέρα. Τόσο το σώμα του στερεού, όσο και ο αέρας έχουν ορισμένες διηλεκτρικές ιδιότητες, που δεν επηρεάζονται από τη διεπιφάνεια. Οι λόγοι για τους οποίους η διεπιφάνεια προκαλεί προβλήματα προέρχονται από το γεγονός ότι η επιφάνεια του μονωτήρα μπορεί να ρυπανθεί.

1.2.3 Είδη και βασικές κατηγορίες μονωτήρων

Η βασική διάκριση των μονωτήρων αφορά στο υλικό κατασκευής τους. Υπάρχουν δύο κύριες κατηγορίες. Οι κεραμικοί, αυτοί δηλαδή που έχουν κέλυφος κατασκευασμένο από πορσελάνη ή γυαλί και οι συνθετικοί, που το κέλυφός τους κατασκευάζεται από υλικά, όπως το silicone rubber. Η πρώτη κατηγορία χρησιμοποιείται ήδη από τα πρώτα βήματα ανάπτυξης των δικτύων υψηλής τάσης και μέχρι και τη δεκαετία του 1990 αποτελούσε τη συνήθη επιλογή. Η δεύτερη κατηγορία διατέθηκε στην αγορά στα τέλη της δεκαετίας του 1960, κυρίως με σκοπό τη μείωση του βάρους των μονωτήρων, έγινε όμως αποδεκτή από

τις εταιρίες ηλεκτρισμού τα τελευταία δέκα με δεκαπέντε χρόνια, μετά από σημαντική ερευνητική δουλειά σε παγκόσμιο επίπεδο σε σχέση με τη διαχρονική απόδοσή τους και κυρίως λόγω της καλύτερης συμπεριφοράς των μονωτήρων αυτών σε συνθήκες ρύπανσης.

Μία ταξινόμηση των κυρίων τύπων μονωτήρων σύμφωνα με το υλικό και το σχήμα τους παρουσιάζεται παρακάτω³:

1. Κεραμικοί μονωτήρες
2. Γυαλιού
3. Πορσελάνης
4. Cap & Pin
5. Τύπου Pin
6. Στήριξης
7. Διέλευσης
8. Μεγάλου μήκους
9. Μη Κεραμικοί μονωτήρες (Πολυμερείς)
10. Σύνθετοι πολυμερείς (Στήριξης ή Διέλευσης)
11. Χυτής κυκλοαλιφατικής εποξειδικής ρητίνης

1.2.4 Κατηγορίες μονωτήρων ανάλογα με το υλικό κατασκευής

- **Πορσελάνης:** Η πορσελάνη είναι σύνθετη ύλη από αργίλιο, πυρίτιο και μαγνήσιο. Προκειμένου να επιτευχθεί μείωση της επίδρασης του περιβάλλοντος, αύξηση της επιφανειακής αντίστασης και ομογενές ηλεκτρικό πεδίο στους μονωτήρες, η πορώδης επιφάνειά τους καλύπτεται με διηλεκτρικά υλικά κρυσταλλικής μορφής, ελαττώνοντας έτσι τις απώλειες. Οι μονωτήρες από πορσελάνη είναι κατάλληλοι για χρήση σε σχετικά υψηλές τάσεις, αλλά σε χαμηλές συχνότητες (Εικόνα 1.2.7-1 α και Εικόνα 1.2.7-2).

- **Γυαλιού:** Το γυαλί έχει χαρακτηριστικά μονωτικού υλικού (σχετικά μεγάλη διηλεκτρική σταθερά και ειδική αντίσταση, όπως και μικρό θερμικό συντελεστή). Είναι μίγμα διαφόρων πυριτικών αλάτων (κυρίως του Na ή του K και του Ca), παρουσιάζεται με

τη μέθοδο της σύντηξης λεπτής άμμου χαλαζία και CaCO_3 , Na_2CO_3 ή K_2CO_3 . Η οριακή του θερμοκρασία είναι άνω των $200\text{ }^\circ\text{C}$. Κατασκευάζεται σε λεπτά φύλλα πάχους μέχρι $10\text{ }\mu\text{m}$.

- **Κεραμικών υψηλής συχνότητας:** Σαν κεραμικό υψηλής συχνότητας χρησιμοποιείται ο στεατίτης. Ανάλογα με την περίπτωση χρήσης τους διακρίνονται σε:

- μονωτήρες για υψίσυχνες κεραίες
- εξαρτήματα στήριξης
- κεραμικά πυκνωτών
- πορώδη κεραμικά
- Εποξειδικής ρητίνης: Χρησιμοποιείται γιατί είναι φθηνότερη από την πορσελάνη και δεν παρουσιάζει τεχνικά προβλήματα στην κατασκευή μονωτήρων. Το μειονέκτημά της είναι ότι όταν υπόκειται σε ένα ηλεκτρικό πεδίο και υπό την επήρεια των ατμοσφαιρικών συνθηκών, δημιουργείται μία αποσύνθεση και απελευθέρωση άνθρακα, ιδιαίτερα κοντά στους οπλισμούς του μονωτήρα.

1.2.5 Κατηγορίες μονωτήρων ανάλογα με τον τρόπο σύνδεσής τους

Ανάλογα με τον τρόπο σύνδεσής τους, οι μονωτήρες διακρίνονται στις παρακάτω κατηγορίες⁴:

- **Μονωτήρες ανάρτησης:** Χρησιμοποιούνται κυρίως για την ανάρτηση των γραμμών μεταφοράς υψηλής τάσης και αποτελούνται από μία ή δύο σειρές δισκοειδών μονωτήρων, διατεταγμένων σε μορφή αλύσου. Το πλήθος των δισκοειδών μονωτήρων σε μια διάταξη αλύσου, εξαρτάται προφανώς από την τάση λειτουργίας της γραμμής και από τη διηλεκτρική αντοχή έκαστου δισκοειδούς μονωτήρα.

- **Μονωτήρες στήριξης:** Χρησιμοποιούνται για τη στήριξη των αγωγών υψηλής τάσης και διακρίνονται σε μονωτήρες μεταφοράς και μονωτήρες σταθμών.

- **Μονωτήρες γραμμής:** Χρησιμοποιούνται στις γραμμές διανομής ηλεκτρικής ενέργειας μέχρι 70 kV .

- **Μονωτήρες διέλευσης:** Χρησιμοποιούνται στις θέσεις εξόδου των αγωγών από τους μετασχηματιστές.

1.2.6 Κατηγορίες μονωτήρων ανάλογα με τους χώρους χρήσης

Ανάλογα με τους χώρους χρήσης και κατ' επέκταση, με τον ειδικό τρόπο σχεδίασής τους, έχουμε τους εξής τύπους μονωτήρων:

- **Τύπου ομίχλης:** Χρησιμοποιούνται σε περιοχές όπου επικρατούν συνθήκες έντονης ρύπανσης (συνήθως, κοντά σε βιομηχανικές ή παραθαλάσσιες περιοχές). Οι μονωτήρες αυτοί έχουν μεγάλο μήκος ερπυσμού και τέτοια διαμόρφωση της εξωτερικής επιφάνειας, ώστε να παρέχεται η καλύτερη δυνατή προστασία έναντι επικάλυψης ακαθαρσιών.
- **Κανονικού τύπου:** Χρησιμοποιούνται σε σύνηθες περιβάλλον και έχουν μικρότερο μήκος ερπυσμού.
- **Εσωτερικού τύπου:** Χρησιμοποιούνται σε εσωτερικούς χώρους, κυρίως σε κλειστούς υποσταθμούς.

1.2.7 Κατηγορίες μονωτήρων ανάλογα με το σχήμα και τη χρήση τους

- **Μονωτήρες πορσελάνης τύπου pin:** Αυτός ο τύπος μονωτήρων χρησιμοποιήθηκε αρχικά για τις τηλεφωνικές γραμμές και τα αλεξικέραυνα, ενώ στη συνέχεια τροποποιήθηκε για να χρησιμοποιηθεί στις γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Μερικές παραλλαγές του είναι ακόμα σε χρήση στα συστήματα μέσης τάσης.
- **Μονωτήρες τύπου cap & pin:** Οι μονωτήρες αυτοί κατασκευάζονται από πορσελάνη ή γυαλί και είναι βασισμένοι στις ίδιες κατασκευαστικές αρχές με τους μονωτήρες τύπου pin. Ένας αριθμός τέτοιων μονάδων συνδέεται μέσω χαλύβδινων καλυμμάτων (caps) και πείρων (pins) σχηματίζοντας μια αλυσίδα μονωτήρων. Αυτές οι αλυσίδες χρησιμοποιούνται ως μονωτήρες ανάρτησης και στήριξης γραμμών μεταφοράς. Τα καλύμματα και ο πείρος είναι στερεωμένα στο γυάλινο ή πορσελάνινο δίσκο με τσιμέντο.

Οι κωνικές μορφές των συναρμολογήσεων εξασφαλίζουν υψηλή μηχανική αντοχή κατά την άσκηση δυνάμεων εφελκυσμού. Στους μονωτήρες τύπου «pin» και τύπου «cap & pin», η συντομότερη απόσταση μεταξύ των μεταλλικών ηλεκτροδίων μέσω της πορσελάνης ή του γυαλιού, είναι λιγότερη από το 50% της συντομότερης απόστασης μεταξύ των

ηλεκτροδίων μέσω του αέρα. Συνεπώς, η πορσελάνη ή το γυαλί μπορεί να διατηρηθεί κατόπιν μεγάλης ηλεκτρικής καταπόνησης. Η διαδικασία κατασκευής των μονωτήρων υάλου περιλαμβάνει τη θερμική ψύξη, που εξασφαλίζει ότι οι γυάλινοι δίσκοι θρυμματίζονται σε περίπτωση διάτρησης, οπότε ο ελαττωματικός δίσκος είναι εμφανής.

- **Μονωτήρες στήριξης:** Αυτοί οι μονωτήρες αποτελούνται από έναν συμπαγή κύλινδρο πορσελάνης με κυματοειδείς πτυχές, για να αυξάνεται το μήκος ερπυσμού, και από μεταλλικά ηλεκτρόδια σε κάθε άκρη. Οι μονωτήρες στήριξης έχουν μεγάλο μήκος. Διακρίνονται σε μονωτήρες μεταφοράς και μονωτήρες σταθμών. Χρησιμοποιούνται οριζόντια ή κάθετα για να στηρίξουν τον αγωγό υψηλής τάσης και τοποθετούνται στις βάσεις ή στους εγκάρσιους βραχίονες των γραμμών μεταφοράς. Στους μονωτήρες αυτούς η συντομότερη απόσταση μέσω της πορσελάνης υπερβαίνει το 50% της συντομότερης απόστασης μέσω του αέρα μεταξύ των ηλεκτροδίων, οπότε δεν διαρρηγνύονται εύκολα. Οι μονωτήρες τύπου στήριξης είναι μονωτήρες με έναν συμπαγή πυρήνα που χρησιμοποιούνται στον ηλεκτρολογικό εξοπλισμό ή απευθείας στους υποσταθμούς.

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

- **Μονωτήρες πορσελάνης μεγάλου μήκους:** Οι μονωτήρες μεγάλου μήκους είναι παρόμοιοι με τους μονωτήρες στήριξης, αλλά είναι ελαφρύτεροι, λεπτότεροι και χρησιμοποιούνται ως μονωτήρες ανάρτησης. Κατασκευάζονται και με σιλικονούχο επίχρισμα, το οποίο προσδίδει στην επιφάνειά τους υδροαπωθητικές ιδιότητες.

- **Σύνθετοι πολυμερείς μονωτήρες:** Αυτοί οι μονωτήρες είναι παρόμοιοι με τους πορσελάνινους μεγάλου μήκους ως προς το σχήμα (Εικόνα 1.2.7-1 β και Εικόνα 1.2.7-3), ωστόσο διαφέρουν ως προς τα υλικά κατασκευής, τα οποία είναι τα ακόλουθα:

- Ο πυρήνας, που είναι το εσωτερικό μονωτικό μέρος του πολυμερούς μονωτήρα και μεταφέρει το μηχανικό φορτίο. Αποτελείται κυρίως από ίνες γυαλιού που βρίσκονται σε μάζα ρητίνης, έτσι ώστε να επιτυγχάνεται μέγιστη δύναμη εφελκυσμού.

- Ένα ελαστομερές περίβλημα που προστατεύει τον πυρήνα από τις καιρικές συνθήκες.

- Ελαστομερείς δίσκοι, που αποσκοπούν στην αύξηση του μήκους ερπυσμού, ώστε να ανθίσταται ο μονωτήρας στις εντάσεις που επικρατούν στο σύστημα. Ακόμα, παρέχουν μια διακοπτόμενη διαδρομή για την αποστράγγιση του μονωτήρα από το νερό. Δύο ευρέως χρησιμοποιούμενα υλικά είναι το σιλικονούχο καουτσούκ (silicone rubber) και το αιθυλένιοπροπυλένιο-διένιο (Ethylene Propylene Diene Monomer - EDPM), μονομερές καουτσούκ.

- Μεταλλικά μέρη που μεταδίδουν το μηχανικό φορτίο στον πυρήνα.

- Η ζώνη σύνδεσης, που αποτελεί μέρος των μεταλλικών μερών, που μεταφέρει το φορτίο της γραμμής, στον πύργο ή σε έναν άλλο μονωτήρα. Δεν περιλαμβάνει τη διεπιφάνεια μεταξύ του πυρήνα και των μεταλλικών μερών.

- Διεπιφάνειες, δηλαδή οι επιφάνειες μεταξύ διαφορετικών υλικών, όπως είναι η διεπιφάνεια μεταξύ του περιβλήματος και των ελαστομερών δίσκων ή η διεπιφάνεια μεταξύ του πυρήνα και του περιβλήματος.

Οι μεταλλικοί ακροδέκτες αυτών των μονωτήρων είναι συνήθως στερεωμένοι πάνω στην εξωτερική πλευρά της ράβδου του πυρήνα και τα συγκεκριμένα σημεία επαφής μεταξύ του ελαστομερούς και των ακροδεκτών είναι πολύ σημαντικά. Ένα σημαντικό πλεονέκτημα των σύνθετων πολυμερών μονωτήρων είναι η μείωση βάρους μέχρι και 90%, σε σύγκριση με τους αντίστοιχους κεραμικούς. Οι πολυμερείς μονωτήρες λέγονται και σύνθετοι, που σημαίνει ότι αποτελούνται από τουλάχιστον δύο μονωτικά μέρη - έναν πυρήνα και το περίβλημα, εξοπλισμένα με τα μεταλλικά μέρη.

- **Μονωτήρες κυκλοαλιφατικής εποξειδικής ρητίνης:** Η κυκλοαλιφατική ρητίνη μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να χυτευτούν μονωτήρες παρόμοιοι με τους πορσελάνης και τύπου στήριξης για διανομή των τάσεων. Σε περιβάλλον με κακές καιρικές συνθήκες, οι επιφάνειες των μονωτήρων αυτών γίνονται τραχιές, γεγονός που μπορεί να έχει επιπτώσεις στην αξιοπιστία του μονωτήρα, αν δεν ληφθεί υπ' όψιν.

Οι περισσότεροι μονωτήρες των ηλεκτρικών εγκαταστάσεων και των δικτύων μεταφοράς και διανομής κατασκευάζονται από πορσελάνη ή γυαλί. Σε εσωτερικούς χώρους έχουν μεγάλη εφαρμογή οι εποξειδικές ρητίνες. Η επιφάνεια των μονωτήρων είναι λεία, ώστε να παρεμποδίζεται η συγκράτηση ξένων επικαθίσεων.

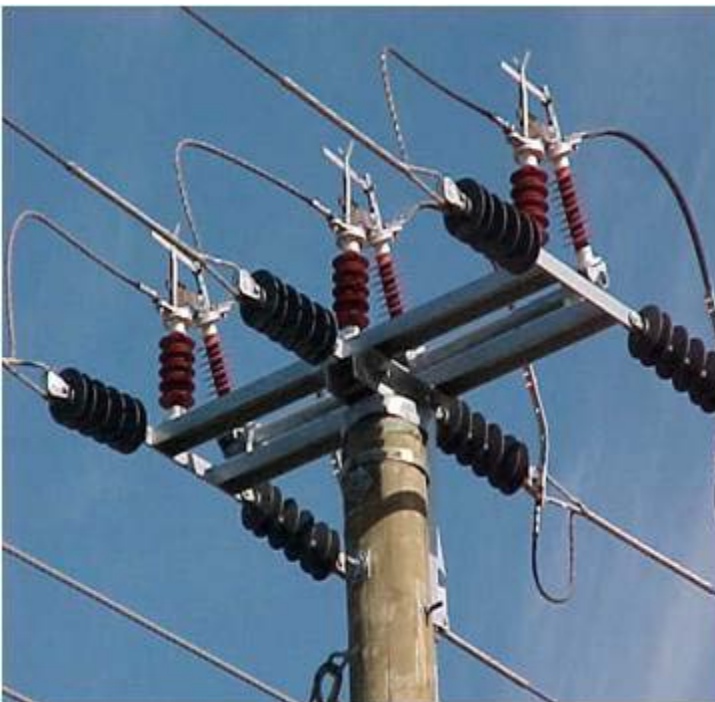
α)



β)



Εικόνα 1.2.7-1: α) Μονωτήρες πορσελάνης, β) Μονωτήρες συνθετικοί



Εικόνα 1.2.7-2: Μονωτήρες πορσελάνης



Εικόνα 1.2.7-3: Μονωτήρες συνθετικοί

1.3 Τα κύρια μέρη ενός μονωτήρα

Τα τρία βασικά μέρη των μονωτήρων είναι το μονωτικό (διηλεκτρικό), οι ακροδέκτες, που συνδέουν το διηλεκτρικό με την υπόλοιπη μηχανολογική δομή, και ενδιάμεσα υλικά στο εσωτερικό του μονωτήρα, όπως τσιμέντο ή λιπαντικά¹.

Το διηλεκτρικό, που είναι συνήθως πορσελάνη, γυαλί ή πολυμερές, απαιτείται να διατηρεί την εφαρμοσμένη διαφορά δυναμικού για αρκετές δεκαετίες χωρίς να αστοχήσει. Πρέπει, επίσης, να ανθίσταται σε καταπονήσεις κρουστικών τάσεων που προκαλούνται από κεραυνούς ή χειρισμούς διακοπών του δικτύου, χωρίς να διασπάται. Επειδή οι επιφάνειες των διηλεκτρικών είναι στην πράξη, πάντα, ηλεκτρικά αγωγίμες, εξαιτίας της υγρασίας και των επικαθήσεων, είναι απαραίτητη μία διαχρονική ανθεκτικότητα στις επιφανειακές ηλεκτρικές εκκενώσεις, τα ηλεκτροχημικά προϊόντα και τη διάβρωση.

Η βασική χημική δομή των διηλεκτρικών, που χρησιμοποιούνται σε μονωτήρες, με κυριότερους εκπροσώπους τα κεραμικά και τα πολυμερή υλικά, διαδραματίζει σπουδαίο ρόλο στον προσδιορισμό τόσο των ηλεκτρικών, όσο και των μηχανικών ιδιοτήτων των μονωτήρων. Τόσο τα κεραμικά, όσο και τα πολυμερή υλικά αποτελούνται από τετρασθενή

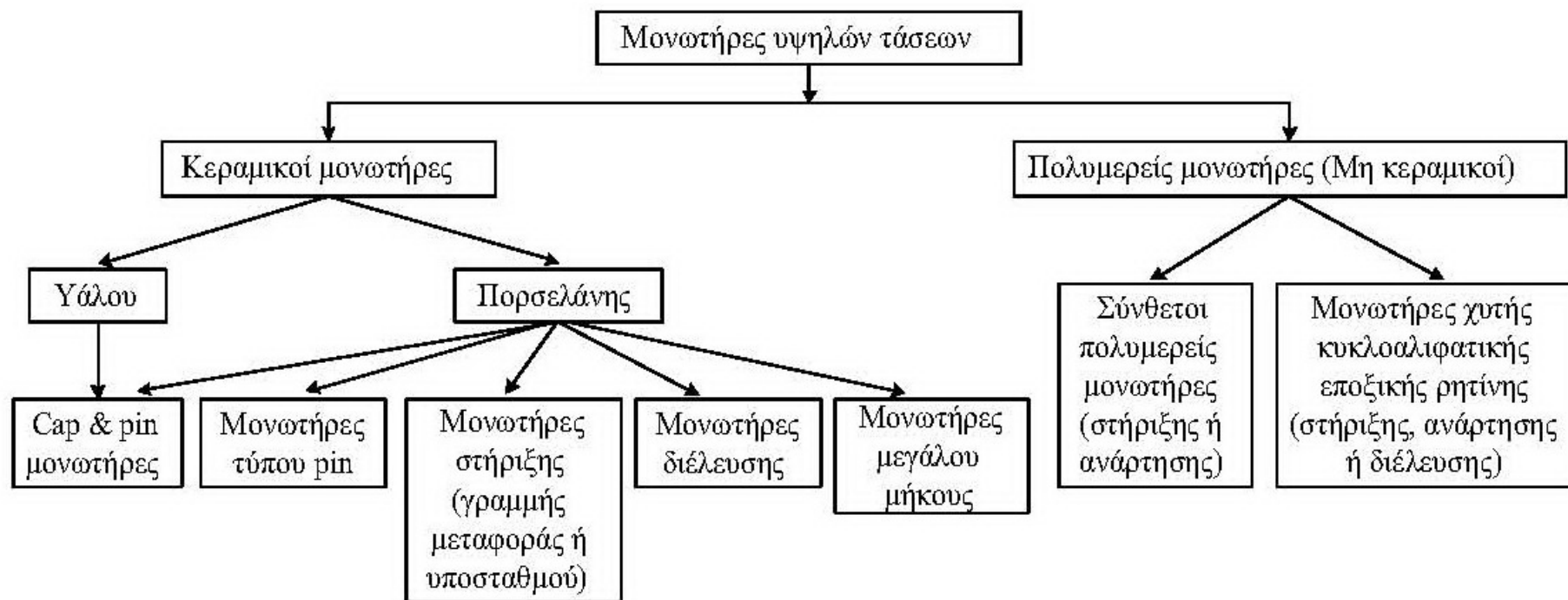
άτομα, τα οποία έχουν την ικανότητα σχηματισμού εκτεταμένων δομών. Το πυρίτιο αποτελεί το κυρίως επαναλαμβανόμενο άτομο στην περίπτωση των κεραμικών υλικών και ο άνθρακας στην περίπτωση των πολυμερών.

Η προφανής και θεμελιώδης διαφορά μεταξύ πολυμερών και κεραμικών υλικών βρίσκεται στη σταθερότητα. Οι ισχυροί ηλεκτροστατικοί δεσμοί πυριτίου – οξυγόνου που συγκρατούν τα κεραμικά υλικά (πορσελάνη και γυαλί) έχουν σαν αποτέλεσμα το υψηλό σημείο τήξεως, τη μεγάλη μηχανική αντοχή (αλλά και την ευθραυστότητα) και τέλος υψηλή αντίσταση διάβρωσης από χημικά μέσα. Η ύπαρξη των ισχυρών ηλεκτροστατικών χημικών δεσμών κοντά στην επιφάνεια συμβάλλει στην αύξηση της ελεύθερης ενέργειας, δηλαδή θερμοδυναμικής ιδιότητας που καθορίζει τη συνάφεια ή δύναμη συνάφειας των επιφανειακών προσμείξεων, και αποτελεί την κύρια αιτία για την οποία οι κεραμικοί μονωτήρες υγραίνονται και ρυπαίνονται εύκολα.

Αντίθετα οι δεσμοί των μορίων των πολυμερών είναι ασθενείς και κατά συνέπεια δεν παρατηρείται έντονη επιφανειακή ρύπανση. Όμως, όλα τα πολυμερή αποσυντίθεται σε θερμοκρασία μερικών εκατοντάδων βαθμών, υπόκεινται σε φωτόλυση, δηλαδή σε καταστροφή των επιφανειακών χημικών δεσμών τους από την πρόσπτωση της υπεριώδους ακτινοβολίας και είναι πιθανόν να αντιδράσουν κατά τη λειτουργία τους με το ατμοσφαιρικό οξυγόνο, προκαλώντας επιφανειακές ηλεκτρικές εκκενώσεις. Το σημαντικότερο μειονέκτημα των πολυμερών, πηγάζει από το γεγονός ότι το βασικό στοιχείο τους, ο άνθρακας, αποτελεί στις περισσότερες περιπτώσεις ένα καλό ηλεκτρικό αγωγό. Η πιθανή προσβολή της επιφάνειας, ιδιαίτερα από τις έρπουσες μερικές εκκενώσεις, αυξάνει τοπικά τη θερμοκρασία και δημιουργεί τελικά αγωγίμες επιφανειακές οδούς και είναι δυνατό να οδηγήσουν σε επιφανειακή διάσπαση και δημιουργία υψηλών θερμοκρασιών, οπότε τελικά καταστρέφεται ο μονωτήρας. Το σημαντικότερο πλεονέκτημα των πολυμερών υλικών είναι οι εξαιρετικά χαμηλές τιμές της ελεύθερης επιφανειακής ενέργειας.

Θερμοδυναμικά, το εξωτερικό περίβλημα των ατόμων υδρογόνου, που είναι συνδεδεμένα με τα άτομα του άνθρακα, παρέχει τη δυνατότητα στα πολυμερή να ανθίσταται στην υγρασία και την ατμοσφαιρική ρύπανση, περισσότερο απ' όσο τα κεραμικά υλικά.

Μια ταξινόμηση των κύριων τύπων μονωτήρων παρουσιάζεται στο Σχήμα.



Σχήμα 1.3-1: Κύριοι τύποι μονωτήρων.

2. Σκοπός της εργασίας

Σκοπός της εργασίας είναι η αναλυτική παρουσίαση των φαινομένων που εμφανίζονται στους μονωτήρες του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας, λόγω υπέρτασης και βύθισης τάσης, με σκοπό την καλύτερη κατανόηση των φαινομένων που αναπτύσσονται σε μικροσκοπική κλίμακα, για τη λήψη κατάλληλων μέτρων θωράκισης. Για το σκοπό αυτό εξετάζονται λεπτομερώς τα φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα σε καταστάσεις διηλεκτρικής κατάρρευσης από κβαντομηχανική σκοπιά και παρουσιάζονται βιβλιογραφικά αποτελέσματα της επίδρασης των παραπάνω φαινομένων στα ηλεκτρομονωτικά υλικά. Τέλος εξηγούνται τα αίτια δημιουργίας δένδρων από υπερτάσεις, στα εν λόγω υλικά, με στόχο τη βελτίωση της διηλεκτρικής τους αντοχής.

3. Διηλεκτρική συμπεριφορά των μονώσεων

Το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας είναι ένα δυναμικό μη γραμμικό σύστημα, το οποίο υφίσταται συνεχώς διάφορες μικρές και μεγάλες διαταραχές προερχόμενες από τη μεταβολή της ζήτησης και της παραγωγής, από τις διακοπές ή ζεύξεις στοιχείων του συστήματος, καθώς και από βραχυκυκλώματα ή άλλα σφάλματα. Η μελέτη της δυναμικής συμπεριφοράς των δικτύων καλύπτει μια μεγάλη περιοχή φαινομένων διαφορετικής φύσης, όπως ηλεκτρικά, μηχανικά και θερμικά φαινόμενα. Η χρονική περίοδος στην οποία εκδηλώνεται η μεταβατική συμπεριφορά του συστήματος ποικίλει από μερικά χιλιοστά του δευτερολέπτου για τις υπερτάσεις χειρισμών, έως πολλά λεπτά, όταν πρόκειται για φαινόμενα μεταβολής της συχνότητας και της ανταλλαγής ισχύος διασυνδεδεμένων δικτύων ή φαινόμενα τάσης.

Λαμβάνοντας υπ' όψη τη χρονική διάρκεια και τη φύση των μεταβατικών φαινομένων, αυτά μπορούν να ταξινομηθούν στις ακόλουθες κατηγορίες:

- ηλεκτρομαγνητικά, τα οποία διαρκούν από μερικά μικροδευτερόλεπτα έως μερικά χιλιοστά του δευτερολέπτου,
- ηλεκτρομηχανικά, τα οποία διαρκούν από μερικά δέκατα του δευτερολέπτου έως μερικά δευτερόλεπτα, και
- ενεργειακά, τα οποία διαρκούν αρκετά πρώτα λεπτά.

Τα ηλεκτρομαγνητικά φαινόμενα εμφανίζονται ως αποτέλεσμα των υπερτάσεων χειρισμών και των ατμοσφαιρικών υπερτάσεων. τα ηλεκτρομηχανικά μεταβατικά φαινόμενα συνδέονται με τη διατήρηση του συγχρονισμού μεταξύ των σύγχρονων γεννητριών και με τα συστήματα αυτομάτου ελέγχου των μηχανών αυτών. Τα ενεργειακά μεταβατικά φαινόμενα σχετίζονται με τη μεταβολή της παραγόμενης ισχύος από θερμικούς σταθμούς και την αυτόματη ρύθμιση φορτίου-συχνότητας. Στην ίδια χρονική κλίμακα με τα φαινόμενα αυτά παρατηρούνται και μεταβατικά φαινόμενα τάσης, που οφείλονται στη δυναμική συμπεριφορά των ηλεκτρικών φορτίων. Για τη μελέτη των παραπάνω κατηγοριών μεταβατικών φαινομένων απαιτούνται διαφορετικά μοντέλα για τα επιμέρους στοιχεία του συστήματος.

3.1 Ηλεκτρική αντοχή μονώσεων

Σκοπός των μονώσεων σε μια ηλεκτροτεχνική κατασκευή είναι ο διαχωρισμός μεταξύ των ρευματοφόρων μερών καθώς και των ρευματοφόρων μερών προς τη γη, κατά τρόπο ώστε το σχηματιζόμενο ηλεκτρικό πεδίο να είναι ηλεκτροστατικό. Η ανάγκη για την εκπλήρωση του σκοπού αυτού και η μελέτη των φαινομένων, που προκαλούν ολική ή μερική αναίρεση του ηλεκτροστατικού πεδίου σε μία κατασκευή, οδήγησαν στον καθορισμό ορισμένων εννοιών. Έτσι, σε αντιστοιχία προς την μηχανική αντοχή των υλικών, έχει αναπτυχθεί μία εξειδικευμένη περιοχή της ηλεκτρολογίας, που αφορά την ηλεκτρική αντοχή των μονώσεων.

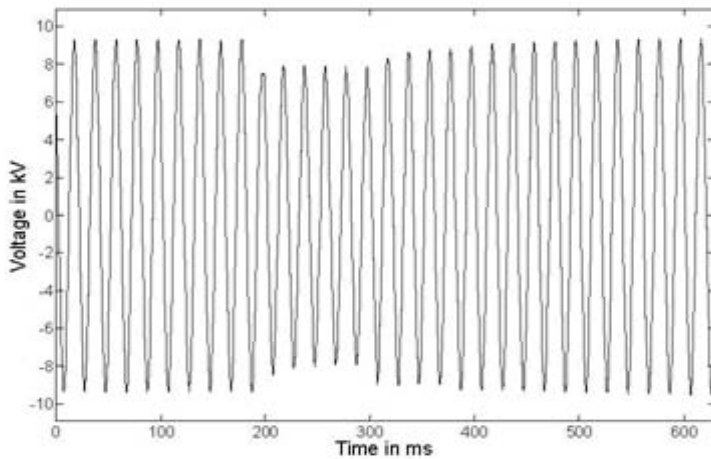
Με τον όρο διάσπαση εννοεί κανείς την αγωγή συνδεση δύο μεταξύ τους μονωμένων ηλεκτροδίων μέσω ηλεκτρικής εκκένωσης. Όταν η διάσπαση συμβαίνει με εκκένωση επί της επιφάνειας ενός στερεού μονωτικού ονομάζεται επιφανειακή διάσπαση. Η διάσπαση στο περιβάλλον μέσω ενός στερεού μονωτικού, λόγω μείωσης της απόστασης μόνωσης του στερεού μονωτικού από αγωγιμες ξένες επικαθίσεις στην επιφάνεια του χαρακτηρίζεται ως υπερπήδηση. Η διάσπαση μέσω του όγκου ενός στερεού μονωτικού υλικού καλείται διάτρηση. Ως διηλεκτρική αντοχή ενός μονωτικού υλικού εντός ομογενούς πεδίου έχει οριστεί το πηλίκο της ελάχιστης τιμής της τάσης για τη διάσπαση προς την απόσταση των ηλεκτροδίων. Η τιμή της διηλεκτρικής αντοχής είναι ένα κριτήριο για την επιλογή των διάφορων μονωτικών σε μία κατασκευή⁵.

3.2 Βυθίσεις τάσης

Βύθιση τάσης είναι η μικρής διάρκειας μείωση της ενεργού τιμής της τάσης κυρίως λόγω σφαλμάτων στο δίκτυο ή λόγω της εκκίνησης μεγάλων κινητήρων. Μπορεί να δημιουργήσει προβλήματα σε μεγάλο αριθμό συσκευών. Ηλεκτρονικοί υπολογιστές, κινητήρες ελεγχόμενης ταχύτητας (adjustable speed drives ASD), συστήματα ελέγχου (PLC) είναι φορτία ιδιαίτερα ευαίσθητα σε βυθίσεις τάσης. Κάποιες συσκευές δεν μπορούν να αντέξουν τάση κάτω από 90% της ονομαστικής για 1 ή 2 κύκλους. Πολλές ηλεκτρονικές συσκευές και κινητήρες ρυθμιζόμενης ταχύτητας παρουσιάζουν προβλήματα (λανθασμένη λειτουργία, αποσύνδεση λόγω λειτουργίας της προστασίας τους) για βυθίσεις τάσης κάτω από 70% για περισσότερο από 100 msec.

Μια μέτρηση βύθισης τάσης δίνεται στο σχήμα 3.2-1 και σχήμα 3.2-2. Το φαινόμενο διαρκεί περίπου 200 msec και η τάση για μία από τις φάσεις μειώνεται στο 60% της

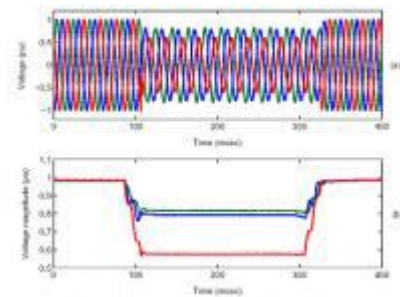
Βύθιση Τάσης



Σχήμα 3.2-1: Μέτρηση από βύθιση τάσης.

ονομαστικής για αυτό το διάστημα. Για ηλεκτρονικούς υπολογιστές, PLC, ηλεκτρονικές συσκευές μετρήσεων κα, η καμπύλη ITIC (Information Technology Industry Council) δείχνει την τυπική αντοχή τους σε κλίμακα μεγέθους-διάρκειας και μπορεί να χρησιμοποιηθεί προκειμένου να εξετασθεί το εάν μια βύθιση τάσης (ή μια υπέρταση) δημιουργεί πρόβλημα ή όχι αλλά και ως προδιαγραφή

για τους κατασκευαστές συσκευών. Η ευαισθησία των υπολογιστών σε διαταραχές έχει κάνει την χρήση UPS (Uninterruptible Power Supply) κοινή πρακτική. Για μεγαλύτερα φορτία υπάρχουν διάφορες λύσεις οι οποίες μπορούν να προσφέρουν προστασία στα ευαίσθητα φορτία από βυθίσεις τάσης είτε υποστηρίζοντας την τάση για μικρό χρονικό διάστημα είτε μεταφέροντας τα φορτία σε άλλη «καθαρή» περιοχή ισχύος.



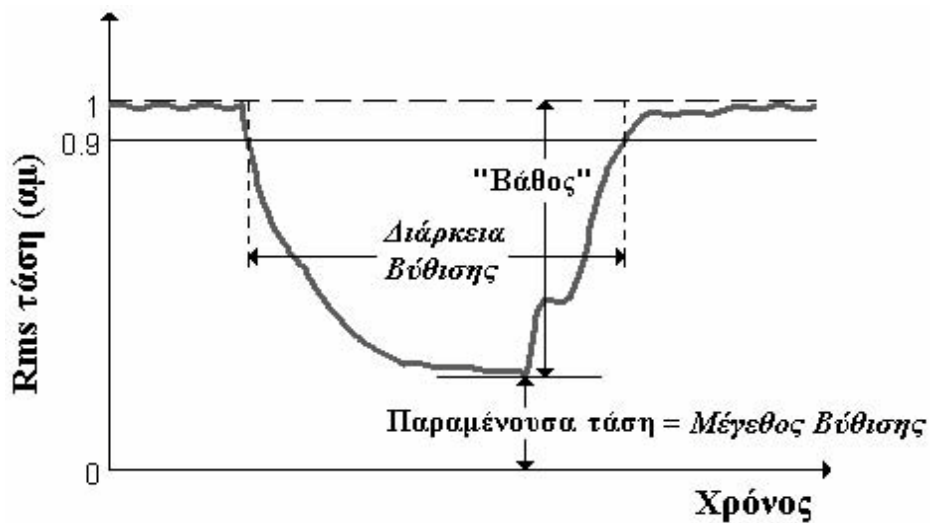
Σχήμα 3.2-2: Μέτρηση βύθισης τάσης

(α) Κυματομορφές τάσης

(β) Η ενεργός τιμή της τάσης για κάθε φάση

Τα κύρια χαρακτηριστικά μιας βύθισης τάσης είναι η διάρκειά της και το μέγεθος της τάσης (σχήμα 3.2-3). Για βυθίσεις λόγω σφαλμάτων, το μέγεθος της τάσης εξαρτάται από την απόσταση του σφάλματος από το φορτίο, τη συνολική σύνθετη αντίσταση του δικτύου, τις διασυνδέσεις του δικτύου καθώς και το πόσο δυνατό ή ασθενές είναι το δίκτυο (ισχύς βραχυκύκλωσης) στο PCC (point of common coupling - το σημείο όπου ενώνονται ηλεκτρικά το φορτίο, το σφάλμα και η παροχή ισχύος του δικτύου). Ο τύπος του

σφάλματος και οι συνδεσμολογίες των μετασχηματιστών μεταξύ του σφάλματος και του φορτίου επηρεάζουν το μέγεθος της τάσης. Η διάρκεια εξαρτάται κυρίως από την ταχύτητα λειτουργίας του συστήματος προστασίας προκειμένου να απομονωθεί το τμήμα του δικτύου όπου εμφανίστηκε το σφάλμα. Οι χρόνοι που υπεισέρχονται εδώ είναι τόσο ο χρόνος εντοπισμού του σφάλματος (δηλαδή ο τύπος προστασίας που χρησιμοποιείται) και το είδος συστήματος προστασίας (το είδος στοιχείου προστασίας έχει διάφορα είδη όπως: ασφάλειες, διακόπτες απομόνωσης, διακόπτες ισχύος) που υπάρχει καθώς και οι ρυθμίσεις του ώστε να υπάρχει επιλογική συνεργασία των διαφόρων μέσων, καθώς και ο χρόνος λειτουργίας των συσκευών διακοπής του ρεύματος. Τυπικός χρόνος για τη λειτουργία της προστασίας στο δίκτυο μεταφοράς είναι οι 5 κύκλοι (100 msec), ενώ μεγαλύτεροι χρόνοι παρατηρούνται σε δίκτυα χαμηλότερης τάσης. Βυθίσεις τάσης λόγω της σύνδεσης μεγάλων κινητήρων προκαλούνται λόγω των μεγάλων ρευμάτων εκκινήσεως, τα χαρακτηριστικά των οποίων εξαρτώνται από το μέγεθος των κινητήρων, τα τεχνικά δεδομένα τους (αδράνεια, τρόπος εκκίνησης κλπ), καθώς και από την ισχύ βραχυκύκλωσης στο ζυγό όπου συνδέεται ο κινητήρας.



Σχήμα 3.2-3:

Μέγεθος βύθισης: Η ελάχιστη rms τάση κατά τη διάρκεια του συμβάντος

Διάρκεια βύθισης: Το χρονικό διάστημα κατά το οποίο η τάση έχει τιμή μικρότερη από 90%.

3.3 Αιτίες Βυθίσεων

1. Εκκίνηση κινητήρων ή απότομη αλλαγή του φορτίου

- Απότομη πτώση, αργή ανάκαμψη
- Συμμετρική βύθιση

2. Ενεργοποίηση μετασχηματιστών

- Απότομη πτώση, αργή ανάκαμψη
- Ασύμμετρη βύθιση

3. Βραχυκυκλώματα (σφάλματα)

- Απότομη πτώση, απότομη ανάκαμψη
- Συμμετρική ή ασύμμετρη βύθιση

Εκτίμηση του αναμενόμενου αριθμού των βυθίσεων τάσης

Καταγραφή των βυθίσεων τάσης

- Η πιο δημοφιλής μέθοδος
- Δίνει πάντα και με ακρίβεια την πρόσφατη συμπεριφορά του ΣΗΕ
- Επαλήθευση-διόρθωση των αποτελεσμάτων μιας μεθόδου στοχαστικής εκτίμησης
- Παρέχει πληροφορίες και για άλλα (γνωστά ή άγνωστα) φαινόμενα τα οποία είναι δύσκολο να εκτιμηθούν με κάποια άλλη μέθοδο
- Παρέχει τα στοχαστικά δεδομένα που απαιτούνται από τις μεθόδους στοχαστικής εκτίμησης (ρυθμός σφάλματος, πιθανότητα εμφάνισης κάθε τύπου σφάλματος κλπ)
- Δαπανηρή μέθοδος
- Απαιτεί μεγάλη περίοδο καταγραφών για τη λήψη αποτελεσμάτων με καλή ακρίβεια λόγω: αλλαγής της διάταξης του ΣΗΕ, μεταβλητότητας των καιρικών συνθηκών κλπ.

Στοχαστική εκτίμηση του αναμενόμενου αριθμού των βυθίσεων τάσης λόγω σφαλμάτων

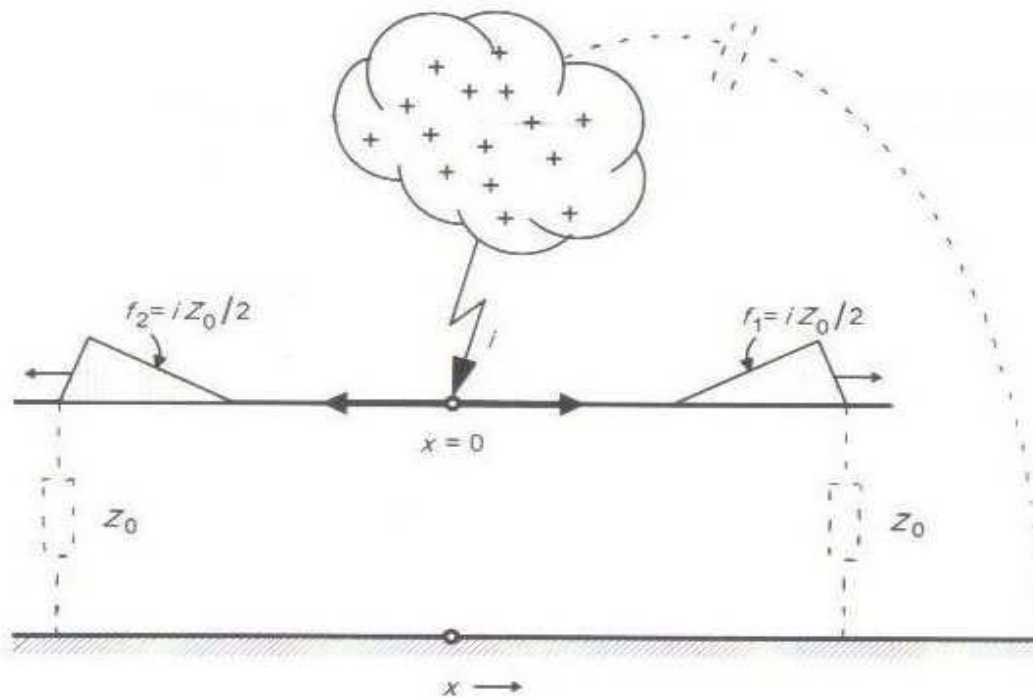
Τάση κατά το σφάλμα + Στοχαστικά δεδομένα (μ.ο.) = Εκτίμηση του αναμενόμενου αριθμού βυθίσεων

- Η απαιτούμενη ακρίβεια λαμβάνεται αμέσως
- Στοχαστική εκτίμηση και ενός ΣΗΕ κατά το σχεδιασμό ώστε να μελετηθούν διαφορετικές διαμορφώσεις αυτού,
- Καλύτερη εκτίμηση άλλων παραγόντων (αλλαγής της διάταξης του ΣΗΕ, μεταβλητότητας των καιρικών συνθηκών κλπ.)
- Δυνατότητα αξιολόγησης και των μεθόδων αντιμετώπισης των βυθίσεων
- Στηρίζεται στην ακρίβεια των στοχαστικών δεδομένων
- Περιλαμβάνει απλοποιήσεις κατά τη μοντελοποίηση των μεθόδων υπολογισμού και εκτίμησης των βυθίσεων.

3.4 Υπερτάσεις σε ένα σύστημα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας ως αποτέλεσμα ατμοσφαιρικών εκκενώσεων

Υπέρταση ονομάζεται μια μη φυσιολογική τάση που εμφανίζεται μεταξύ δύο σημείων του συστήματος, και η οποία είναι μεγαλύτερη από την υψηλότερη τιμή τάσης (πάνω από 10%) που αναμένεται μεταξύ των ίδιων σημείων σε συνθήκες κανονικής λειτουργίας. Οι μεταβατικές υπερτάσεις που παρουσιάζονται στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας προέρχονται από ατμοσφαιρικές εκκενώσεις ή από φυσιολογικούς χειρισμούς, είναι δε πιθανό να προκαλέσουν διάσπαση της μόνωσης του συστήματος. Οι μεταβατικές υπερτάσεις που οφείλονται σε χειρισμούς λέγονται εσωτερικές υπερτάσεις, ενώ εξωτερικές υπερτάσεις ή ατμοσφαιρικές υπερτάσεις λέγονται αυτές που δημιουργούνται από εκκενώσεις νεφών. Ο υπολογισμός αυτών των υπερτάσεων είναι σημαντικός, γιατί προσδιορίζουν¹:

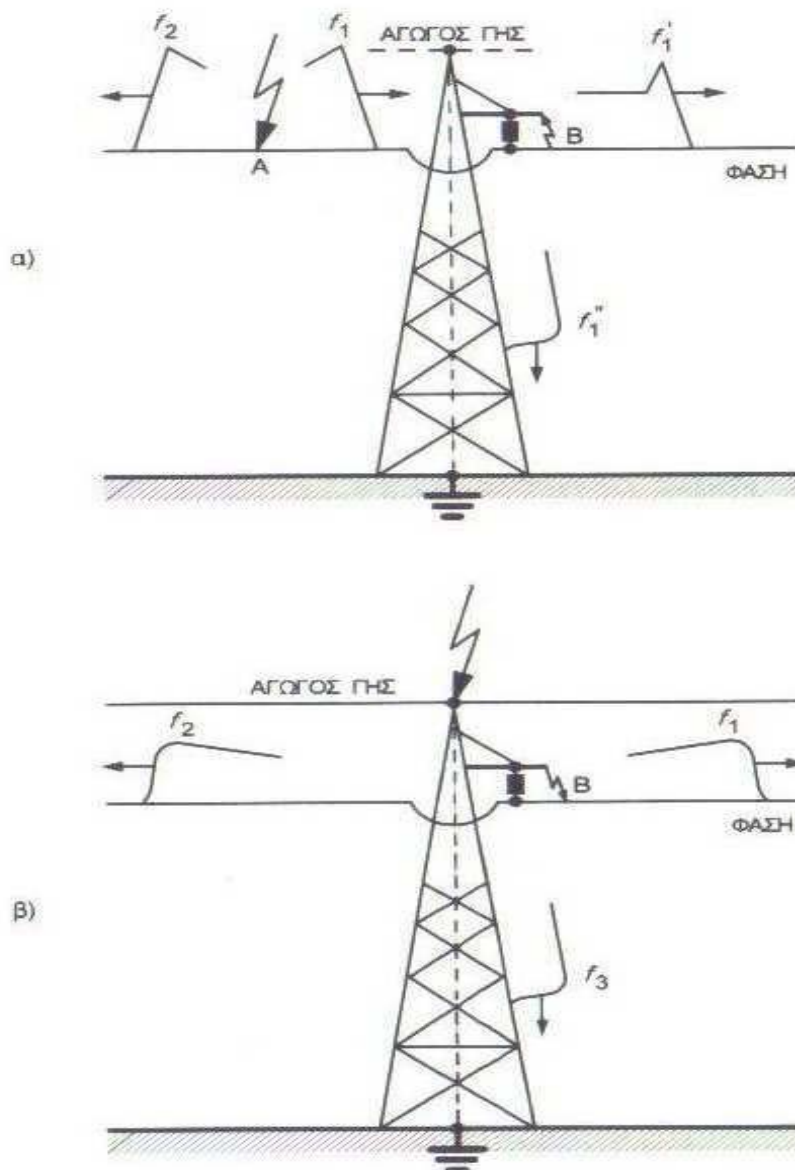
- το είδος, τις διαστάσεις και το κόστος της μόνωσης που πρέπει να χρησιμοποιηθεί σε ένα σύστημα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, και
- τα μέσα προστασίας.



Σχήμα 3.4-1: Το ηλεκτρικό κύκλωμα και τα οδεύοντα κύματα που δημιουργούνται (f_1 και f_2) κατά την πτώση κεραυνού σε εναέρια γραμμή. Το κύκλωμα είναι: νέφος – χωρητικότητα του ως προς τη γη – γείωση – κυματική αντίσταση γραμμής – ηλεκτρικό τόξο.

Ορισμός εξωτερικών υπερτάσεων

Οι εξωτερικές υπερτάσεις ή ατμοσφαιρικές υπερτάσεις εμφανίζονται ως οδεύοντα κύματα, είναι μονό φορές και προκαλούνται από πτώση κεραυνού πάνω στις γραμμές μεταφοράς (σχήμα 3.4-1), οπότε έχουν εύρος της τάξεως των μερικών MV, ή συνηθέστερα λόγω δευτερογενών υπερπηδήσεων (σχήμα 3.4-2) οπότε δεν υπερβαίνουν τις μερικές εκατοντάδες kV. Οι υπερτάσεις αυτές δεν εξαρτώνται από την ονομαστική τάση λειτουργίας της γραμμής $U_{nominal}$, αποτελούν δε τον μεγαλύτερο κίνδυνο για δίκτυα τάσεως λειτουργίας μέχρι και 400 kV περίπου.



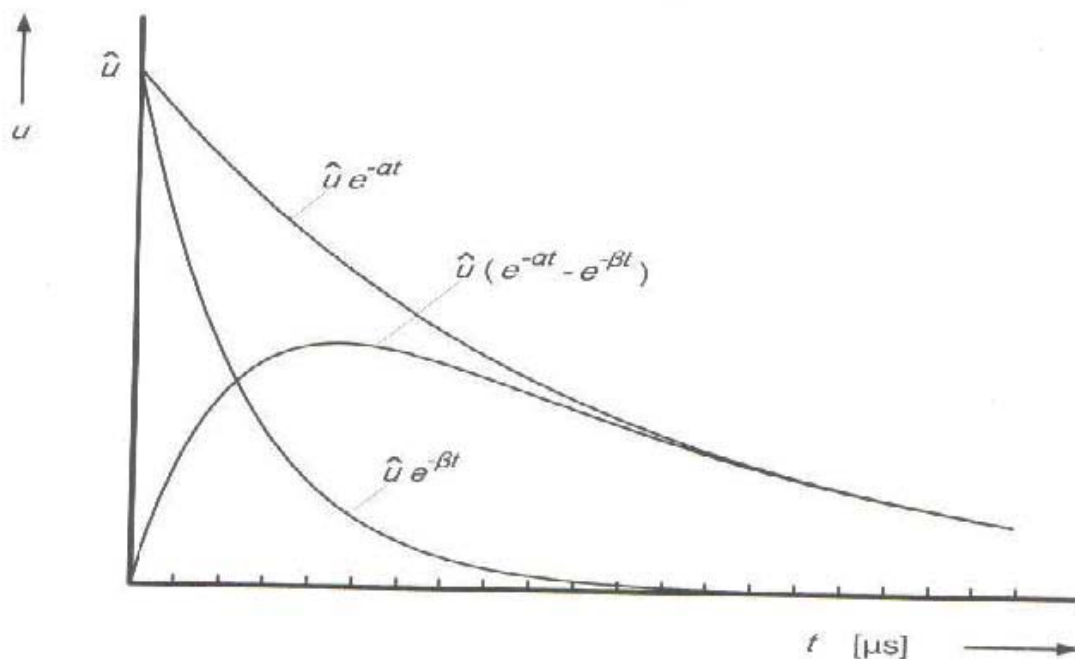
Σχήμα 3.4-2: Ανάπτυξη υπερτάσεων σε μία γραμμή μεταφοράς λόγω δευτερογενών υπερπηδήσεων. α) Ο κεραυνός πέφτει στο σημείο A του αγωγού μίας φάσης. Το κύμα f_1 οδεύει προς τον πυλώνα και δημιουργεί υπερπήδηση του μονωτήρα ανάρτησης στο σημείο B. Μετά την υπερπήδηση, το κύμα συνεχίζει να οδεύει στον αγωγό, με άλλη όμως μορφή f'_1 . Μέρος του ρεύματος f'_1 οδεύει μέσω του πυλώνα προς τη γη. β) Ο κεραυνός πέφτει στον αγωγό γης (προστασίας) και δημιουργεί υπερπήδηση του μονωτήρα ανάρτησης στο σημείο B. Μετά την υπερπήδηση, δύο κύματα f_1 και f_2 οδεύουν εκατέρωθεν του αγωγού φάσης, ενώ το μεγαλύτερο μέρος του ρεύματος f_3 οδεύει μέσω του πυλώνα προς τη γη.

Τυποποίηση εξωτερικών υπερτάσεων

Οι κεραυνοί στις γραμμές μεταφοράς προκαλούν εξωτερικές υπερτάσεις ως οδεύοντα κύματα που έχουν διάρκεια μετώπου τάξεως μεγέθους μερικών μs και ουράς τάξεως αρκετών δεκάδων μs ¹. Αν η τάση που επάγεται κατά την πτώση κεραυνού μετρηθεί, θα διαπιστωθεί ότι έχει τη μορφή διπλού εκθετικού κύματος που δίνεται από την σχέση:

$$u(t) = \hat{u} (e^{-at} - e^{-\beta t})$$

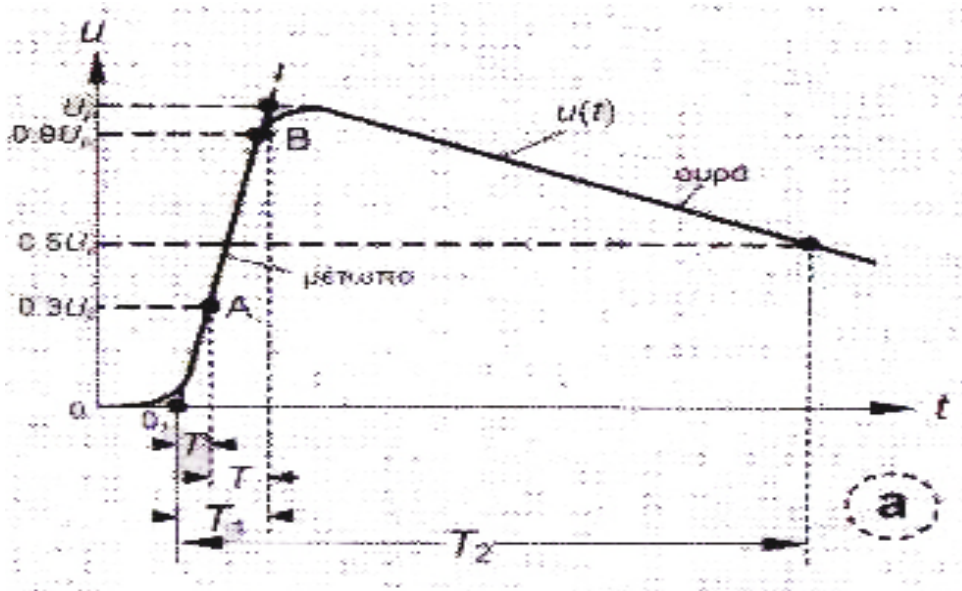
Όπως παρατηρείται, η κρουστική τάση αποτελείται από τη διαφορά δύο φθινουσών εκθετικών συναρτήσεων. Δεδομένου ότι $\alpha < \beta$, έπεται ότι η τάση ξεκινώντας από το μηδέν αυξάνεται γρήγορα μέχρι ένα μέγιστο και μετά φθίνει, πιο αργά, τείνοντας πάλι στο μηδέν. Το τμήμα από την αρχή των αξόνων μέχρι το μέγιστο λέγεται "μέτωπο", το δε τμήμα μετά το μέγιστο λέγεται "ουρά" της κρουστικής τάσης (σχήμα 3.4-3).



Σχήμα 3.4-3: Μορφή εξωτερικής υπέρτασης -Διπλό εκθετικό κύμα.

Στην πράξη, εξ' αιτίας κυρίως παράσιτων χωρητικοτήτων τα κρουστικά αυτά κύματα έχουν τη μορφή του σχήματος 3.4-4 και έχουν τυποποιηθεί σύμφωνα με τους διεθνείς κανονισμούς. Η τυποποίηση κρίθηκε απαραίτητη, επειδή τόσο το ύψος όσο και η κυματομορφή της κρουστικής τάσης επηρεάζει την αντοχή των μονωτικών υλικών και συσκευών του συστήματος. Σύμφωνα λοιπόν με τους κανονισμούς και το σχήμα 3.4-4, χρόνος μετώπου T_f ή T , ονομάζεται ο χρόνος μεταξύ των σημείων με 30% και 90% του μέγιστου της τάσης του κύματος, πολλαπλασιασμένος με ένα συντελεστή 1.67. Επίσης,

χρόνος ημίσεως εύρους T_t ή T_2 , ονομάζεται ο χρόνος μεταξύ των σημείων της υποθετικής αρχής των αξόνων O_1 και του σημείου με 50% της τάσης στην ουρά του κύματος. Ένα τυποποιημένο κρουστικό κύμα χαρακτηρίζεται από το εύρος του ή την τιμή κορυφής του, το χρόνο μετώπου του T_f και το χρόνο ημίσεως εύρους του T_t . Τυπική κυματομορφή κρουστικής τάσης είναι η 1.2/50 μs .



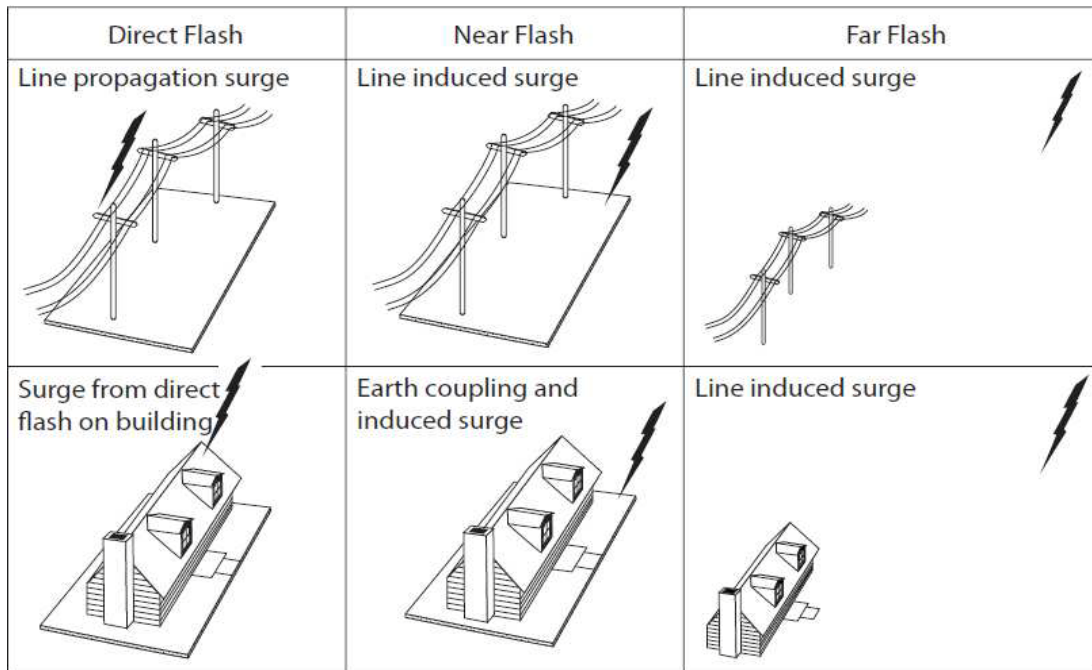
Σχήμα 3.4-4: Τυποποιημένη μορφή κρουστικής τάσης.

3.5 Αιτίες εμφάνισης υπερτάσεων στο σύστημα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας

Καθώς η χρήση ευαίσθητων ηλεκτρονικών συσκευών είναι πλέον ευρέως διαδεδομένη, η απαίτηση των καταναλωτών για αδιάλειπτη και καλής ποιότητας ενέργεια καθιστά αναγκαία τη μελέτη των πιθανών αιτιών εμφάνισης υπερτάσεων σε ένα σύστημα διανομής. Εξίσου απαραίτητη καθίσταται η διερεύνηση των πιθανών μηχανισμών μεταφοράς των υπερτάσεων από τα δίκτυα μέσης τάσης στα δίκτυα χαμηλής τάσης μέσω των Μ/Σ διανομής. Το φαινόμενο αυτό συναντάται πολύ συχνά στην καθημερινότητα και ευθύνεται για ένα μεγάλο αριθμό σφαλμάτων, δυσλειτουργιών ακόμα και καταστροφών του οικιακού και βιομηχανικού εξοπλισμού που συνδέεται στα δίκτυα χαμηλής τάσης¹.

3.5.1 Κεραυνός

Ο κεραυνός πλήττει ένα σύστημα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας με πολλούς τρόπους. Η διαφοροποίηση των υπερτάσεων που εμφανίζονται (μέγιστο, κυματομορφή), έγκειται κυρίως στο σημείο του πλήγματος του κεραυνού σε σχέση με το σύστημα διανομής ενέργειας (σχήμα 3.5.1-1). Το πλήγμα μπορεί να είναι άμεσο ή έμμεσο (επαγόμενες υπερτάσεις) στο δίκτυο μέσης τάσης. Τα ίδια φαινόμενα μπορεί να συμβούν και στο δίκτυο χαμηλής τάσης. Με άλλα λόγια, κάθε πιθανό σημείο του πλήγματος του κεραυνού στο σύστημα διανομής, μπορεί να προκαλέσει την εμφάνιση υπερτάσεων με χαρακτηριστικά που ποικίλλουν ανάλογα με την σοβαρότητα του συμβάντος (απευθείας πτώση κεραυνού σε γραμμή μέσης ή/και χαμηλής τάσης) και να εμφυσήσει άλλου είδους προσέγγιση και αντιμετώπιση.



Σχήμα 3.5.1-1: Πιθανά σημεία του κεραυνικού πλήγματος σε ένα σύστημα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας.

Αιτίες εμφάνισης υπερτάσεων σε γραμμές Μέσης Τάσης

Τέσσερις είναι οι κύριες αιτίες εμφάνισης υπερτάσεων σε γραμμές μέσης τάσης:

- Άμεσο κεραυνικό πλήγμα σε γραμμές μέσης τάσης.
- Επαγόμενες υπερτάσεις σε γραμμές μέσης τάσης από πτώση κεραυνού στο έδαφος κοντά στις γραμμές.

- Μεταφερόμενες υπερτάσεις στο δίκτυο μέσης τάσης λόγω πλήγματος κεραυνού στο δίκτυο υψηλής τάσης μέσω των Μ/Σ μεταφοράς.
- Μεταφερόμενες υπερτάσεις στο δίκτυο μέσης τάσης λόγω πλήγματος κεραυνού στο δίκτυο χαμηλής τάσης μέσω των Μ/Σ διανομής.



Εικόνες 3.5.1-2: Μετασχηματιστής τάσης ύστερα από κεραυνοπληξία. Φαίνονται τα πηνία καμένα στο εσωτερικό.

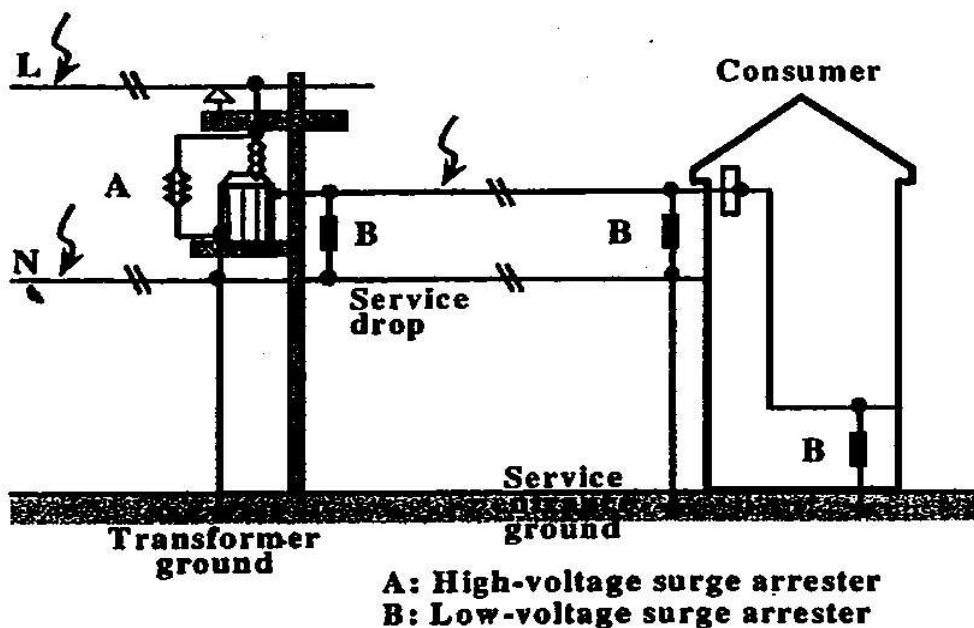


Εικόνες 3.5.1-1: Μετασχηματιστής τάσης ύστερα από κεραυνοπληξία.

3.5.2 Άμεσο κεραυνικό πλήγμα σε γραμμές Μέσης Τάσης

Η απευθείας πτώση κεραυνού πάνω σε μια γραμμή μέσης τάσης είναι ένα φαινόμενο που δεν συμβαίνει αρκετά συχνά. Ωστόσο, όταν συμβεί, έχει πολύ σοβαρές επιπτώσεις στα δίκτυα διανομής, καθώς οι υπερτάσεις που αναπτύσσονται στη γραμμή έχουν ιδιαίτερα υψηλή τιμή⁶.

Καθώς η αντίσταση του καναλιού του κεραυνού είναι πολύ μεγάλη, ο κεραυνός μπορεί να θεωρηθεί πρακτικά ως μια ιδανική πηγή ρεύματος η τιμή της οποίας κυμαίνεται από μερικές δεκάδες έως και μερικές εκατοντάδες χιλιάδες Amperes. Οι αναπτυσσόμενες υπερτάσεις καθορίζονται από την αντίσταση που “βλέπει” το ρεύμα του κεραυνού κατά την πορεία του προς τη γη. Για ένα κεραυνό που πλήττει τη φάση της γραμμής μέσης τάσης (σχήμα 3.5.2-1), η αντίσταση της γραμμής καθορίζεται από τη χαρακτηριστική αντίσταση της που κυμαίνεται γύρω στα 400Ω. Από τα παραπάνω, είναι φανερό ότι οι αναπτυσσόμενες υπερτάσεις έχουν υψηλές τιμές της τάξεως μερικών εκατοντάδων ως και χιλιάδων kV που είναι ικανές να προκαλέσουν σοβαρά προβλήματα τόσο στη γραμμή μέσης τάσης όσο και στα φορτία που είναι συνδεδεμένα στη γραμμή χαμηλής τάσης. Κάποια από αυτά τα προβλήματα, είναι οι πιθανές διασπάσεις στη μόνωση του δικτύου μέσης και χαμηλής τάσης που προσφέρουν μια επιπρόσθετη φυσική οδό στο ρεύμα του κεραυνού να διοχετευτεί στο έδαφος, η καταπόνηση των τυλιγμάτων του Μ/Σ διανομής και



Σχήμα 3.5.2-1: Πιθανά σημεία κεραυνικού πλήγματος σε ένα συνηθισμένο σύστημα διανομής.

φυσικά οι υψηλές υπερτάσεις που μεταφέρονται μέσω των Μ/Σ διανομής στο δίκτυο χαμηλής τάσης.

3.5.3 Επαγόμενες υπερτάσεις σε γραμμές Μέσης Τάσης από πτώση κεραυνού στο έδαφος κοντά στις γραμμές

Ένα άλλο είδος υπερτάσεων που εμφανίζονται σε δίκτυα μέσης τάσης είναι οι λεγόμενες επαγόμενες υπερτάσεις. Η ύπαρξη τους οφείλεται στη πτώση κεραυνών στο έδαφος κοντά στις γραμμές μέσης τάσης και στις ατμοσφαιρικές εκκενώσεις μεταξύ νεφών (συνήθως δεν αποτελούν άμεσο κίνδυνο). Το φαινόμενο αυτό συναντάται πιο συχνά σε ένα σύστημα διανομής και παρόλο που οι επαγόμενες υπερτάσεις δεν είναι τόσο υψηλές όσο αυτές που προκαλούνται από ένα άμεσο κεραυνικό πλήγμα στη γραμμή, η διαταραχή που δημιουργούν δε μπορεί να μην δεν ληφθεί υπόψη⁶.

4. Φαινόμενα σε μονωτήρες λόγω υπέρτασης ή βύθισης τάσης

Στο κεφάλαιο αυτό εξετάζονται οι δύο θεωρίες (μακροσκοπική και κβαντομηχανική), που προαναφέρθηκαν, καθώς και ο συνδυασμός τους.

Τα φαινόμενα γήρανσης και διάτρησης στα στερεά βιομηχανικά μονωτικά υλικά ερμηνεύονται με μεθόδους οι οποίες όπως είπαμε μπορούν να ομαδοποιηθούν στις δύο θεωρίες³.

Σύμφωνα με την μακροσκοπική θεωρία, τα αποτελέσματα των ερευνών βασίζονται σε κάποιο ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα από γραμμικά στοιχεία, το οποίο πηγάζει συνήθως από το συνδυασμό των ηλεκτρικών μετρήσεων με τις οπτικές παρατηρήσεις για την εκδήλωση φωτεινών φαινομένων και αλλαγές στην επιφάνεια του υλικού.

Στη κβαντομηχανική θεωρία μας 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. Η γήρανση και η διάσπαση, κατά τη θεωρία αυτή, σχετίζονται με την εκπομπή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που παράγεται στο υλικό. Έχει διαπιστωθεί, ότι το φάσμα της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας κατά τη γήρανση είναι από ακουστικά κύματα μέχρι υπεριώδης ακτινοβολία. Το φάσμα της παραπάνω ακτινοβολίας κατά τη διάτρηση είναι δυνατό να επεκταθεί σε τιμές αρκετά μεγαλύτερες από 20 eV.

Καθοριστικός παράγοντας για την δημιουργία ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων είναι η τιμή του πεδίου. Από μετρήσεις σε οργανικά στερεά μονωτικά υλικά, με σχετική διηλεκτρική σταθερά 3.6-4.5, έχει διαπιστωθεί ότι οι μερικές εκκενώσεις αρχίζουν σε τιμή του εφαρμοζόμενου περίπου ~ 0.2 MV/cm.

4.1 Αρμονικές

Η ύπαρξη αρμονικών στην τάση και την ένταση (υπέρθυση συχνοτήτων πολλαπλάσιων της θεμελιώδους - 50 Hz) οφείλεται κυρίως στην ύπαρξη μη γραμμικών φορτίων, φορτίων δηλαδή που απαιτούν ρεύμα διαφορετικής κυματομορφής από την τάση (άγουν ρεύμα

μόνο σε ορισμένες περιοχές της τάσης). Τέτοιου είδους κυματομορφές εντάσεως είναι συνηθισμένες για συσκευές εξοπλισμού γραφείων που λειτουργούν με συνεχές ρεύμα.

Το φάσμα των αρμονικών (ο μετασχηματισμός Fourier, δηλαδή της κυματομορφής, ώστε να υπολογισθεί το πλάτος των συχνοτήτων τις οποίες περιέχει) εξαρτάται από τη φύση αυτών των φορτίων. Μέσω της τάσης και σε συνάρτηση με την ισχύ βραχυκυκλώσεως του δικτύου, οι αρμονικές που παράγονται σε ένα σημείο μεταδίδονται και μπορούν να δημιουργήσουν προβλήματα σε άλλα φορτία. Αντίθετα από τα φαινόμενα που περιγράφονται παραπάνω (τα οποία είναι μικρής διάρκειας και μεταβατικής φύσεως), οι αρμονικές παρουσιάζονται κατά τη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας του συστήματος. Μη γραμμικά φορτία υπάρχουν τόσο σε οικιακούς όσο και σε βιομηχανικούς καταναλωτές. Τέτοια είναι:

- Φορτία με ηλεκτρονικά ισχύος: ανορθωτές, PLC, κ.ά.
- Φορτία που χρησιμοποιούν ηλεκτρικό τόξο: φούρνοι τόξου και λάμπες φθορισμού
- Φορτία που χρησιμοποιούν ηλεκτρονικά: τηλεοράσεις, φούρνοι μικροκυμάτων, φωτοαντιγραφικά, ηλεκτρονικοί υπολογιστές, εκτυπωτές κλπ.

Εξαιτίας των αρμονικών ενδέχεται να λειτουργήσουν λανθασμένα συσκευές προστασίας, ειδικά αυτές που χρησιμοποιούν θερμικά μοντέλα. Αν ο υπολογισμός της ενεργού τιμής της έντασης γίνεται χρησιμοποιώντας τη μέγιστη τιμή της κυματομορφής της, αυξάνεται η πιθανότητα λάθους και ανεπιθύμητης λειτουργίας της προστασίας. Για τον ίδιο λόγο λάθη παρουσιάζονται σε μετρητικές συσκευές. Οι αρμονικές επίσης είναι η αιτία για προβλήματα στη λειτουργία ηλεκτρονικών συστημάτων. Επίσης προκαλούν υπερφόρτιση (δηλαδή υπερθέρμανση) και αυξάνουν τις δονήσεις και το θόρυβο (μηχανική καταπόνηση) στον εξοπλισμό (μετασχηματιστές, μηχανές και πίνακες). Μακροχρόνια οι αρμονικές προκαλούν πρόωρη γήρανση του εξοπλισμού. Επίσης, καθώς προστίθενται τα αρμονικά ρεύματα στον αγωγό ουδέτερου, δίνουν ρεύματα κατά πολύ μεγαλύτερα από όταν τα φορτία είναι γραμμικά, με αποτέλεσμα την υπερθέρμανση. Οι πυκνωτές είναι επίσης ευαίσθητοι στις αρμονικές ιδιαίτερα αν η συχνότητα του συνδυασμού πυκνωτή και δικτύου παροχής μέχρι το σημείο σύνδεσης είναι ίδια με την αρμονική που παράγεται από το φορτίο. Κάτω από αυτές τις συνθήκες προκαλείται συντονισμός, αύξηση του πλάτους των αρμονικών, αύξηση της ενεργού τάσης και έντασης, υπερθέρμανση του πυκνωτή και ενδεχομένως καταστροφή του διηλεκτρικού του υλικού ή λειτουργία της προστασίας του και αποσύνδεσή του.

Η μέτρηση των αρμονικών γίνεται υπολογίζοντας το μέσο όρο των αρμονικών για κάποιο χρονικό διάστημα ανά τακτά χρονικά διαστήματα. Δύο μεγέθη που χρησιμοποιούνται ευρέως, ως άμεση εικόνα της ποιότητας του δικτύου σε ένα συγκεκριμένο σημείο, είναι η συνολική διαταραχή λόγω αρμονικών (Total Harmonic Distortion, THD) για την τάση και για το ρεύμα. Προκύπτει από τον παρακάτω τύπο:

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{\max}} M_h^2}}{M_1} \quad (4.1-1)$$

όπου M_h είναι το πλάτος της h αρμονικής όπως αυτή προκύπτει από το μετασχηματισμό Fourier. Το μέγεθος αυτό χρησιμοποιείται επίσης και για τον καθορισμό ορίων που αφορούν τις αρμονικές.

Οι αρμονικές συνδέονται άμεσα με τον συντελεστή ισχύος. Ο πραγματικός συντελεστής ισχύος (αυτός για τον οποίο καλούνται να πληρώσουν οι βιομηχανικοί καταναλωτές) είναι ο μέσος όρος της ενεργού ισχύος προς το γινόμενο της ενεργού τάσης με την ενεργό ένταση. Σε περιβάλλον χωρίς αρμονικές ο πραγματικός συντελεστής ισχύος (ΣI) ισούται με το συνημίτονο της γωνίας μεταξύ της τάσης και της έντασης (ΣI μετατόπισης). Η ύπαρξη αρμονικών οδηγεί σε μείωση του πραγματικού ΣI καθώς αυξάνεται η ενεργός τάση αλλά κυρίως η ενεργός ένταση. Ο πίνακας 4.1-1 δείχνει την επίδραση των αρμονικών στον πραγματικό ΣI για ένα ιδανικό φορτίο με ΣI μετατόπισης ίσο με 1. Αυτό μπορεί να θεωρηθεί ως ένδειξη της αύξησης των απωλειών στο δίκτυο λόγω των αρμονικών.

THD Έντασης (%)	Μέγιστος πραγματικός ΣI ενός μη-γραμμικού φορτίου
20	0.98
50	0.89
100	0.71

Πίνακας 4.1-1: Επίδραση των αρμονικών στον πραγματικό ΣI για ένα ιδανικό φορτίο με ΣI μετατόπισης ίσο με 1.

Για τη μείωση των αρμονικών μπορούν να χρησιμοποιηθούν φίλτρα (συνδυασμός πυκνωτών και πηνίων), τα οποία παγιδεύουν τις αρμονικές και δεν τους επιτρέπουν να διεισδύσουν στο δίκτυο.

4.2 Φαινόμενα που σχετίζονται με την εμφάνιση εξωτερικών υπερτάσεων σε ένα σύστημα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας

Έγινε ήδη κατανοητό ότι η υπέρταση που δημιουργείται από ατμοσφαιρικές εκκενώσεις, εμφανίζεται σε μία γραμμή μέσης ή/και χαμηλής τάσης ως ένα οδεύον ηλεκτρομαγνητικό κύμα. Η ταχύτητα όδευσης της υπέρτασης σε μία εναέρια γραμμή είναι περίπου ίση με τη ταχύτητα του φωτός (3×10^8 m/s). Αντίστοιχα στα καλώδια η ταχύτητα όδευσης της υπέρτασης υποδιπλασιάζεται (1.57×10^8 m/s). Κατά τη όδευση του κύματος πάνω στη γραμμή, η τελευταία παρουσιάζει μια χαρακτηριστική αντίσταση Z_0 η οποία δίνεται από τη σχέση³:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L'}{C'}} \quad (4.2-1)$$

όπου, L' και C' η ανά μονάδα μήκους αυτεπαγωγή και χωρητικότητα αντίστοιχα της γραμμής.

Είναι φανερό, ότι η χαρακτηριστική αντίσταση Z_0 που εμφανίζει η γραμμή πάνω στην οποία οδεύει η υπέρταση, εξαρτάται από τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά της. Τυπική τιμή της χαρακτηριστικής αντίστασης για τις εναέριες γραμμές στο ελληνικό σύστημα διανομής είναι περίπου 400 Ω. Αντίθετα η αντίσταση των καλωδίων κατά την όδευση τους από ένα κύμα διαμορφώνεται σε αρκετά μικρότερες τιμές. Η κυματική συμπεριφορά των εναερίων γραμμών και των καλωδίων ενδιαφέρει προκειμένου να υπολογιστεί το ύψος των υπερτάσεων που εμφανίζονται στο σύστημα κατά την πτώση κεραυνού πάνω σε αυτές (σχήμα 3.4-1).

Ένα άλλο ζήτημα που απασχολεί κατά την όδευση μιας υπέρτασης σε μία γραμμή είναι οι συνθήκες τερματισμού της. Αν και το κύμα αποσβέννυται κατά την όδευση του πάνω σε μια γραμμή (επιδερμικό φαινόμενο, φαινόμενο κορώνα κυρίως σε γραμμές υψηλών τάσεων), ο τερματισμός της στα άκρα της δημιουργεί ανακλάσεις και χαρακτηρίζεται ως εξαιρετικά ιδιόμορφος σε ορισμένες περιπτώσεις.

Η περίπτωση τερματισμού υπέρτασης που ενδιαφέρει στην παρούσα φάση, είναι ο τερματισμός της υπέρτασης σε ένα μετασχηματιστή διανομής (Μ/Σ διανομής). Ο Μ/Σ διανομής υποβιβάζει τη μέση τάση (συνήθως 20 kV ή 15 kV) σε χαμηλή τάση (400 V). Κατά την χρονική στιγμή της πρόπτωσης του κύματος στο Μ/Σ, ισχύει η συνθήκη άπειρης αντίδρασης του Μ/Σ με αποτέλεσμα το διπλασιασμό της τάσης που υφίστανται τα

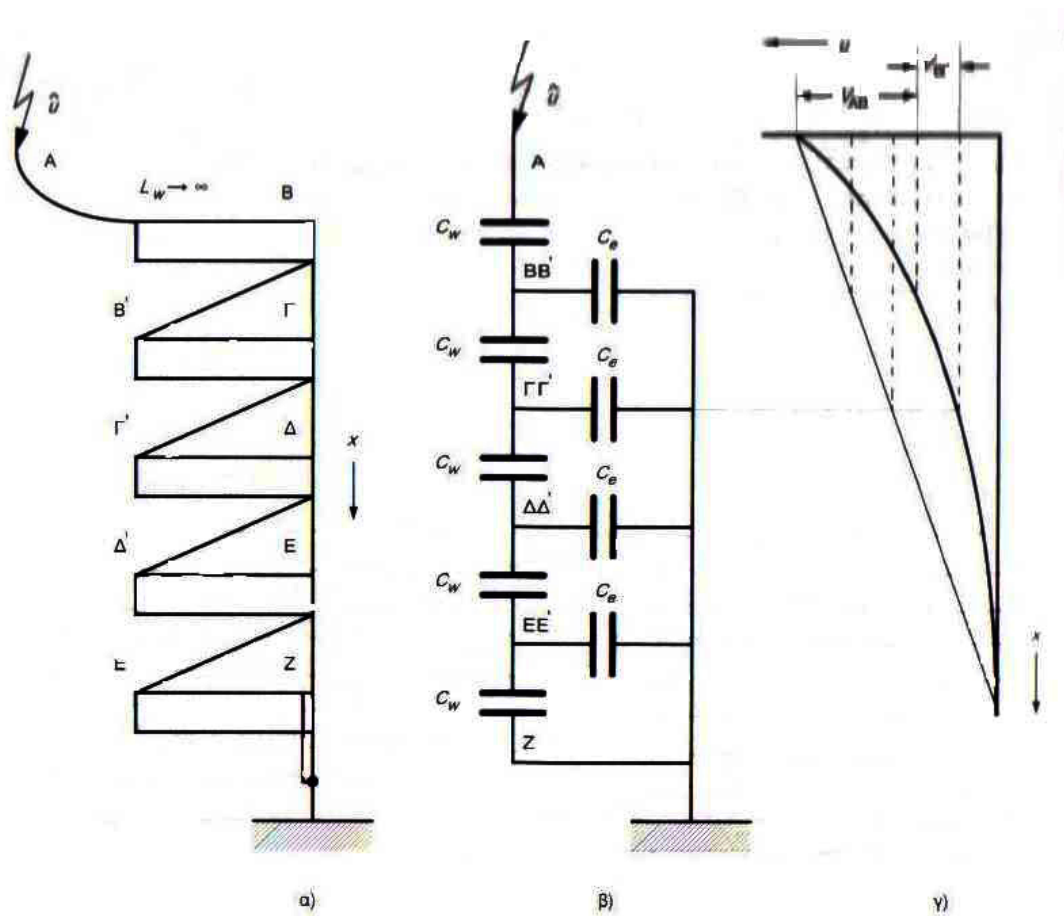
τυλίγματα του. Ωστόσο η καταπόνηση του Μ/Σ από οδεύοντα κύματα (υπερτάσεις) δεν οφείλεται μόνο στο ύψος της τάσης, το οποίο φτάνει στο διπλάσιο του ύψους του προσπίπτοντος κύματος, αλλά και στο ότι η κατανομή αυτής της τάσης στα τυλίγματά του είναι άνιση. Αυτό συμβαίνει γιατί, λόγω των υψηλών συχνοτήτων που περιέχονται στο οδεύον κύμα, η τάση κατανέμεται ανάλογα με τις χωρητικότητες των τυλιγμάτων. Είναι γνωστό ότι στις υψηλές συχνότητες οι αυτεπαγωγές παρουσιάζουν μεγάλη αντίδραση, ενώ οι χωρητικότητες μικρή. Στην κατανομή της τάσης, παίζουν όμως ρόλο οι μικρές αντιδράσεις, επομένως στην περίπτωση αυτή οι χωρητικότητες των τυλιγμάτων θα ρυθμίσουν την κατανομή.

Στο ισοδύναμο κύκλωμα του Μ/Σ του σχήματος 4.2-1 α φαίνονται σε τομή τα πέντε τυλίγματα της υψηλής τάσης που συνδέονται σε σειρά, καθώς και ο πυρήνας του Μ/Σ που είναι γειωμένος. Τα πρωτεύοντα τυλίγματα έχουν παραληφθεί, γιατί θεωρούνται ότι έχουν το ίδιο δυναμικό με τον πυρήνα. Κάθε ένα τύλιγμα έχει άπειρη αντίδραση $L\omega$, ενώ κάθε ένα από τα άκρα του εμφανίζει χωρητικότητες C_w ως προς τα γειτονικά τυλίγματα και C_e ως προς τη γη. Έτσι, το ισοδύναμο κύκλωμα είναι η αλυσίδα των πυκνωτών του σχήματος 4.2-1 β. Η πτώση τάσης κατά μήκος ενός πυκνωτή που διαρρέεται από ένα ρεύμα I σε μία υψηλή συχνότητα ω είναι $I/C_w\omega$. Είναι φανερό από το ισοδύναμο κύκλωμα ότι το ρεύμα στους πυκνωτές C_w αυξάνεται, όσο προσεγγίζεται ο ακροδέκτης A της υψηλής τάσης. Συνεπώς ο πρώτος πυκνωτής (δηλαδή το πρώτο τύλιγμα) θα δεχθεί υψηλότερη τάση από το δεύτερο, κ.ο.κ. Τέλος, το σχήμα 4.2-1 β δείχνει την πραγματική κατανομή της τάσης (καμπύλη), καθώς και την ομοιόμορφη κατανομή (ευθεία) που θα υπήρχε αν ο λόγος C_e/C_w ήταν ίσος με το μηδέν.

Συμπερασματικά, πρέπει να αναφερθεί ότι οι υπερτάσεις οι οποίες εμφανίζονται στις γραμμές μέσης τάσης και προσκρούουν στο Μ/Σ διανομής δεν καταπονούν μόνο τα τυλίγματα του αλλά εξακολουθούν να διαδίδονται μέσω αυτού και στο δευτερεύον του. Οι υπερτάσεις δηλαδή μεταφέρονται στο δίκτυο χαμηλής τάσης του συστήματος διανομής και δεν καταστέλλονται από την παρουσία του Μ/Σ. Όπως είναι φυσικό, η μορφή των μεταφερόμενων υπερτάσεων είναι αρκετά διαφορετική από την τυποποιημένη που προηγουμένως περιγράφηκε καθώς αυτή καθορίζεται από ένα πλήθος παραγόντων που θα αναλυθούν σε επόμενο κεφάλαιο.

Το φαινόμενο της μεταφοράς υπερτάσεων από τη μέση στη χαμηλή τάση μέσω Μ/Σ διανομής πρωταγωνιστεί στην εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, στόχος της οποίας είναι να απαντηθούν όλα τα καίρια ερωτήματα που απορρέουν από την

εκδήλωση αυτού του φαινομένου σε ένα σύστημα διανομής.



Σχήμα 4.2-1: Κατανομή της κρουστικής τάσης στα τυλίγματα υψηλής τάσης του Μ/Σ: α) Τα τυλίγματα του δευτερεύοντος, β) Ισοδύναμο κύκλωμα, γ) Πραγματική κατανομή της τάσης (καμπύλη) και υποθετική ομοιόμορφη κατανομή της τάσης (ευθεία).

4.3 Φαινόμενα που εμφανίζονται κατά τη διάσπαση σε στέρεα μονωτικά υλικά

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 διάσπασης 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 :

- Τη μακροσκοπική θεωρία των φαινομένων προ και κατά τη διάσπαση των στερεών μονωτικών, και
- 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 εκπέμπεται³.

4.4 Φαινόμενα που εμφανίζονται στα ηλεκτρομονωτικά αέρια

Αναλογιζόμενοι όμως τα εκατομμύρια χιλιόμετρα των εναέριων γραμμών, γίνεται φανερό ότι ο ατμοσφαιρικός αέρας αποτελεί αναπόσπαστο κομμάτι στη κατηγορία των ηλεκτρομονωτών. Αποτελεί επίσης τη μόνωση ενός πολύ μεγάλου αριθμού ηλεκτροτεχνικών κατασκευών, όπως διακόπτες μέσης τάσης (αποξεύκτες, γειωτές, διακόπτες φορτίου και ασφαλειοαποξεύκτες), 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 είναι

21 kV/cm. Η διηλεκτρική του σταθερά διαφέρει ελάχιστα από τη μονάδα και πρακτικά μπορεί να θεωρηθεί ίση με εκείνη του κενού χώρου.

4.4.1 Ελεύθεροι ηλεκτρικοί φορείς

Όταν ένας ελεύθερος ηλεκτρικός φορέας με φορτίο q και μάζα ηρεμίας m_0 κινείται ανεμπόδιστα (περίπου όπως ισχύει στο κενό) με ταχύτητα $u < 0.2c$ (όπου $c=300\text{m}/\mu\text{s}$ η ταχύτητα του φωτός), υπό την επίδραση ενός ομογενούς ηλεκτροστατικού πεδίου, τότε αποκτά την επιτάχυνση:

$$\ddot{x} = \frac{F}{m_0} = \frac{qE}{m_0} \quad (4.4.1-1)$$

Η κινητική ενέργεια του φορέα για μια διαδρομή x με διαφορά δυναμικού ΔV μεταξύ τέλους και αρχής της διαδρομής είναι:

$$W_K = q \int E dx = \frac{m_0 u^2}{2} = q \Delta V \quad (4.4.1-2)$$

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

$$u = \sqrt{\frac{2q_e \Delta V}{m_0}} \quad (4.4.1-3)$$

όπου $m_0=9.1 \cdot 10^{-31}$ kg και $q_e=1.6 \cdot 10^{-19}$ As. Έτσι η ταχύτητα του u στο τέλος της διαδρομής x είναι:

$$u = 600 \sqrt{\Delta V} \quad (4.4.1-4)$$

όπου ΔV σε Volt. Για ταχύτητα του ελευθέρου ηλεκτρονίου $u=0.2c$ είναι $\Delta V=10.25$ kV.

Όταν η ταχύτητα κίνησης του ελευθέρου ηλεκτρικού φορέα είναι $u=0.2c$, θα πρέπει να ληφθεί υπ' όψη στους υπολογισμούς η σχέση του Einstein:

$$m = m_0 \sqrt{1 - \left(\frac{u}{c}\right)^2} \quad (4.4.1-5)$$

Σε αυτή τη περίπτωση η κινητική ενέργεια είναι:

$$W_K = q_e \Delta V = mc^2 - m_0 c^2 \quad (4.4.1-6)$$

και η ταχύτητα

$$u = c \sqrt{1 - 1 / \left(\frac{q_e \Delta V}{m_0 c^2} + 1 \right)^2} \quad (4.4.1-7)$$

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 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 κίνησή 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:

$$\lambda = \frac{x}{z} \quad (4.4.1-8)$$

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:

$$V = \pi (r + R)^2 x \quad (4.4.1-9)$$

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

$$z = NV = N\pi (r + R)^2 x \quad (4.4.1-10)$$

Από τις σχέσεις (3.8.1-8) και (3.8.1-10) έπεται ότι:

$$\lambda = \frac{1}{N\pi (r + R)^2 x} \quad (4.4.1-11)$$

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:

$$\lambda_e = \frac{1}{N\pi R^2} \quad (4.4.1-12)$$

Για τον αέρα σε συνθήκες $p=1.013 \text{ bar}$ και $\theta=20 \text{ }^\circ\text{C}$ είναι: $\lambda_e=0.57 \text{ }\mu\text{m}$.

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

$$\lambda_i = \frac{1}{4N\pi R^2} \quad (4.4.1.-13)$$

αυτό σημαίνει ότι:

$$\lambda_i = \lambda_e / 4 \quad (4.4.1-14)$$

4.4.2 Ιονισμός ηλεκτρομονωτικών αερίων

Το αποτέλεσμα των κρούσεων, που αναφέραμε πριν, σχετίζονται με την τιμή της κινητικής ενέργειας των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων, ανάλογα προς την οποία η προσφερόμενη στα μόρια ενέργεια μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα τη διέγερση ή μη ηλεκτρικών φορέων, ή τον ιονισμό του αερίου³.

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 p_x του φορέα μέσα στην απαγορευμένη ζώνη. Η αύξηση p_x της απόστασης ενός ηλεκτρονίου από το μητρικό πυρήνα του σε ένα άτομο, λόγω μετάβασης του σε μια εξωτερική τροχιά (ή λόγω αύξησης της ακτίνας της τροχιάς σε περίπτωση ενός μόνο ηλεκτρονίου, όπως συμβαίνει στο άτομο του υδρογόνου) είναι μια διέγερση. Η ενεργειακή αυτή κατάσταση διαρκεί συνήθως $10 \div 100 \text{ ns}$ και ο φορέας επιστρέφει πάλι στην αρχική του στάθμη (αυτοδιέγερση), αποδίδοντας το περίσσειμα της ενέργειας του σε ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία (φωτόνια). Για τον υπολογισμό της παραπάνω ακτινοβολίας ισχύει η σχέση:

$$W = h \cdot f = h \cdot c / \lambda \quad (4.4.2-1)$$

όπου h : η σταθερά Planck $h=6.62 \cdot 10^{-34} \text{ Ws}^2$

f : η συχνότητα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας,

λ : το μήκος κύματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας

Η δημιουργία ελεύθερων ηλεκτρονικών φορέων από κρούσεις, μπορεί να συμβεί, όταν η προδιδόμενη 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 από την ζώνη σθένους στη 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 $\text{cm}^2 \cdot \text{s}$ ως αρχικοί ελεύθεροι ηλεκτρικοί φορείς. Έτσι, τα προϋπάρχοντα κυρίως ελεύθερα ηλεκτρόνια στον αέρα είναι διαθέσιμα ως αρχικά ηλεκτρόνια του ιονισμού),

β) η θερμοεκπομπή (κατά τη θέρμανση επίσης μίας καθόδου σχηματίζεται νέφος ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων)

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

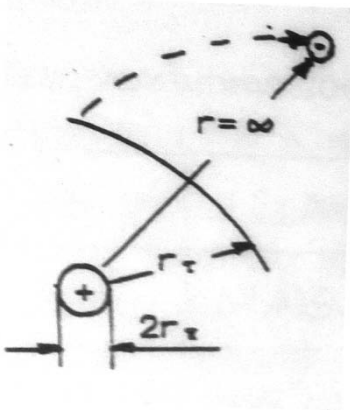
Το φως της ημέρας έχει μήκος κύματος $400 \div 800 \text{ nm}$ και επομένως δεν προκαλεί ιονισμό.

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 4.4.2-1).

Έτσι για το ηλεκτρόνιο εντός του σφαιρικού (κατά προσέγγιση) πεδίου του πυρήνα ισχύει:

$$W_i = \int_{r_T}^{\infty} \vec{F} d\vec{r} = q_e \int_{r_T}^{\infty} \vec{E} d\vec{r} = q_e V_i \quad (4.4.2-2)$$

όπου V_i η τάσης ιονισμού.



Εικόνα 4.4.2-1: Μακροσκοπική παράσταση της απομάκρυνσης ενός ηλεκτρονίου από το μητρικό πυρήνα του, λόγω ιονισμού.

+: πυρήνας

-: ηλεκτρόνιο (r_i απόσταση τροχιάς προ του ιονισμού)

Για την πεδιακή ένταση E σε απόσταση r από το κέντρο του πυρήνα έχουμε:

$$E = E_{\pi} (r_{\pi} / r)^2 \quad (4.4.2-3)$$

$$V_i = E_{\pi} r_{\pi}^2 / r \quad (4.4.2-4)$$

Για την πεδιακή ένταση στην επιφάνεια του πυρήνα, ισχύει:

$$E_{\pi} = \frac{q_e}{4\pi r_{\pi}^2 \epsilon_0} \quad (4.4.2-5)$$

Από τις σχέσεις (4.4.2-2) (4.4.2-4) και (4.4.2-5) η ενέργεια ιονισμού είναι:

$$W_i = q_e E_{\pi} r_{\pi}^2 \int_{r_T}^{\infty} \frac{dr}{r} = \frac{q_e E_{\pi} r_{\pi}^2}{r_T} = \frac{q_e^2}{4\pi \epsilon_0 r_T} \quad (4.4.2-6)$$

Η ενέργεια ιονισμού W_i στα ηλεκτρομονωτικά αέρια είναι ία ανάλογη έννοια προς την ενέργεια εξόδου (ή έργο εξόδου) των μετάλλων (W_a), γιατί και οι δύο αποτελούν προϋπόθεση παροχής ενέργειας προς το υλικό για την δημιουργία ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων.

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

Αρχικά για να συμβεί ιονισμός με κρούσεις ενός ελεύθερου ηλεκτρικού φορέα επί ενός ατόμου ηλεκτρομονωτικού αερίου, θα πρέπει³:

$$W_K = q \cdot \Delta\phi = q \cdot E \cdot \lambda \geq W_i \quad (4.4.3-1)$$

ή με $W_i = V_i \cdot q$, έχουμε:

$$E \cdot \lambda \geq V_i \quad (4.4.3-2)$$

γνωστή ως συνθήκη ιονισμού.

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:

$$N = \frac{P}{kT} \quad (4.4.3-3)$$

όπου k η σταθερά Boltzmann ($k=1.37 \cdot 10^{-23}$ Ws/K). Από τη σχέση (4.4.1-12) είναι $N=1/\rho \lambda_e R^2$, έχουμε:

$$\lambda_e = \frac{kT}{\pi p R^2} \quad (4.4.3-4)$$

Άρα για τη συνθήκη ιονισμού ισχύει:

$$E = \frac{kT}{\pi p R^2} \geq V_i \quad (4.4.3-5)$$

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) μια 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, ανάλογη με το είδος του αερίου (κυρίως αέρας και SF₆). Στους διακόπτες πχ 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 (2.5 at ή 6 at, ανάλογα με την κατασκευή).

4.4.4 Οι συντελεστές ιονισμού α και $\bar{\alpha}$

Με βάση τα προηγούμενα στον αέρα αναπαράγονται το δευτερόλεπτο (λόγω κοσμικών ακτινοβολιών και φυσικής ραδιενέργειας) ≈ 20 αρχικά ζεύγη ηλεκτρικών φορέων ανά cm^3s , όπου μπορούν να προκαλέσουν τον ιονισμό με κρούσεις, όταν πληρούται η συνθήκη ιονισμού. Υπάρχουν όμως αέρια όπως το SF_6 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. Με βάση την παραπάνω διαφορά γίνεται διάκριση σε^{3,5}:

- ηλεκτρομονωτικά αέρια (αέρας, H_2 , N_2 , CO_2 και τα ιδανικά αέρια), που διαθέτουν αρχικούς ηλεκτρικούς φορείς και ονομάζονται ηλεκτροθετικά.
- μονωτικά αέρια, που ονομάζονται ηλεκτραρνητικά (SF_6 , O_2 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 ($E \cdot \lambda \geq V_i$), 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 στην 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 τους ενέργεια ($W_k = q \cdot E \cdot \lambda$). Επειδή το μέσο ελεύθερο μήκος είναι αντιστρόφως ανάλογο με την πίεση του αερίου (σχέση 4.4.3-5), η τιμή W_k μειώνεται όσο αυξάνεται η πίεση του αερίου. Επομένως η κινητική ενέργεια W_k εξαρτάται ανάλογα

από μια συνάρτηση $f_1(E/p)$. Επειδή η πιθανότητα κρούσης αυξάνει με την πίεση p , ισχύει τελικά μια συνάρτηση:

$$W_K = pf_1\left(\frac{E}{p}\right) \quad (4.4.4-1)$$

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

$$a = f_2 W_K \quad (4.4.4-2)$$

Από τις συναρτήσεις (4.4.4-1) και (4.4.4-2) έπεται ότι:

$$\frac{a}{p} = f\left(\frac{E}{p}\right) \quad (4.4.4-3)$$

Η παραπάνω συνάρτηση είναι γνωστή ως συνάρτηση κρούσεων των ηλεκτροθετικών αερίων. Ο αριθμός a έχει ονομαστεί συντελεστής ιονισμού των ηλεκτροθετικών αερίων και δίνεται συνήθως σε ζεύγη ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων/cm. Η τιμή a 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. Αν υποθέσουμε ότι ενσωματώθηκαν n ελεύθερα ηλεκτρόνια (αρχικά ηλεκτρόνια και ηλεκτρόνια που δημιουργήθηκαν κατά τον ιονισμό), ο συντελεστής ιονισμού των ηλεκτραρνητικών αερίων είναι:

$$\bar{a} = a - n \quad (4.4.4-4)$$

Όπου n τα ενσωματωμένα και a τα παραχθέντα ηλεκτρόνια. Η τιμή του \bar{a} 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:

$$\frac{\bar{a}}{p} = \frac{a - n}{p} = f\left(\frac{E}{p}\right) \quad (4.4.4-5)$$

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.

4.5 Η μακροσκοπική θεωρία των φαινομένων προ και κατά τη διάτρηση

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^{3,5}:

- 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 αποτέλεσμα τους.

4.5.1 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^{3,7}.

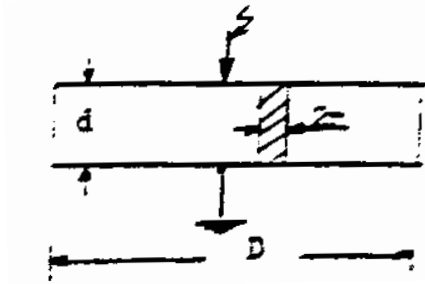
Ο οχετός διάτρησης δημιουργείται, όταν η ειδική αγωγιμότητα σε κάποια θέση του υλικού έχει αποκτήσει την απαιτούμενη για τη διάτρηση οριακή τιμή σ_1 , οπότε έχουμε:

$$\sigma_1 = \sigma_0 e^{\beta\theta} \quad (4.5.1-1)$$

Με την προϋπόθεση σταθερής διατομής (A) του οχετού διάτρησης (σχήμα 4.5.1-1) και ειδική αγωγιμότητα σ_1 , η θερμική ισχύς που παράγεται είναι:

$$P = \frac{U^2}{R} = \frac{U^2 \sigma_0 e^{\beta\theta} A}{d} \quad (4.5.1-2)$$

όπου U η ενδεικνυόμενη τιμή της τάσης, που εφαρμόζεται στα ηλεκτρόδια.



Σχήμα 4.5.1-1: Απλοποιημένη παράσταση του οχετού διάτρησης λόγω των απωλειών Joule του στερεού μονωτικού,
D: διάμετρος δοκιμίου
d: πάχος του μονωτικού
2r: διάμετρος του οχετού διάτρησης.

Αν P_a είναι η τιμή της απαγόμενης θερμικής ισχύος C_0 η θερμοχωρητικότητα και t ο χρόνος, ισχύει γενικά ότι:

$$P = P_a + C_0 (d\theta / dt) \quad (4.5.1-3)$$

Η απαγόμενη θερμική ισχύς είναι (για $d \gg r$):

$$P_a = 2\pi \cdot r \cdot d \cdot \kappa \cdot \theta \quad (4.5.1-4)$$

όπου κ ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας.

Στην περίπτωση όμως της θερμικής διάτρησης ισχύει, ότι η θερμική ισχύς, που παράγεται, είναι ίση με εκείνη που απάγεται, δηλαδή ότι:

$$\frac{U^2 \sigma_0 e^{\beta\theta} A}{d} = 2\pi \cdot r \cdot d \cdot \kappa \cdot \theta \quad (4.5.1-5)$$

Η παραπάνω σχέση αποτελείται από δύο συναρτήσεις της θερμοκρασίας ($P=f(B)$ και $P_a=f(\theta)$). Για το λόγο αυτό, η οριακή τιμή της τάσης για τη θερμική διάτρηση (U_θ) δίνεται

όταν εφάπτονται οι χαρακτηριστικές τους. Έτσι από τη διαφόριση ως προς θ , τόσο του αριστερού όσο και του δεξιού τμήματος της σχέσης (4.5.1-5), έχουμε:

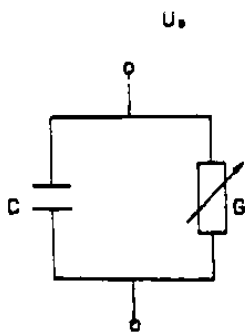
$$\frac{\beta U_{\theta}^2 \sigma_0 e^{\beta \theta} A}{d} = 2\pi \cdot r \cdot d \cdot \kappa \quad (4.5.1-6)$$

Παρατηρούμε λοιπόν από τις σχέσεις (4.5.1-5) και (4.5.1-6) ότι $\beta \cdot \theta = 1$ και

$$U_{\theta} = d \sqrt{\frac{2\kappa}{e\beta\sigma_0 t}} \quad (4.5.1-7)$$

Την αύξηση των απωλειών Joule του στερεού μονωτικού κατά την εφαρμογή της εναλλασσόμενης τάσης με ενεργό τιμή U_{θ} μπορεί να παραστήσει κανείς με ένα ισοδύναμο κύκλωμα, κατά το σχήμα 4.5.1-2, όπου η αύξηση των απωλειών Joule συμβολίζεται με μία μεταβλητή αγωγιμότητα G .

Η διάτρηση στην τιμή U_{θ} συμβαίνει, όταν η αγωγιμότητα αποκτήσει (λόγω αύξησης της ειδικής αγωγιμότητας από σ_0 στην τιμή σ_1), μία οριστική τιμή G_{\max} .



Σχήμα 4.5.1-2: Ισοδύναμο κύκλωμα του στερεού μονωτικού λόγω αύξησης των απωλειών Joule. $G = G_0 \dots G_{\max}$
 G_0 : αγωγιμότητα του ιδανικού μονωτή
 G_{\max} : αγωγιμότητα για τη διάτρηση
 C : χωρητικότητα του ιδανικού μονωτή

4.5.2 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 υλικό³.

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

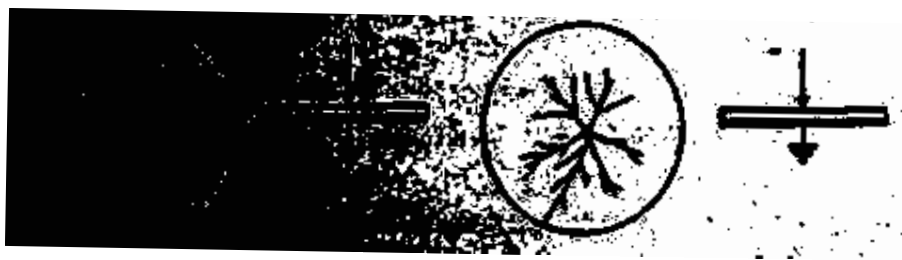
β) μηχανική τάνυση του υλικού (διαχωρισμό του σε αρνητικούς και θετικούς φορείς, υπό την επίδραση των δυνάμεων του ηλεκτρικού πεδίου), ή

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 οχέτου κατά τη διεύθυνση του πεδίου (ηλεκτρομηχανική).

4.5.3 Δενδροειδής διάτρηση

Η δενδροειδής διάτρηση είναι ένα θερμικό φαινόμενο μικρότερης χρονικής διάρκειας από εκείνο της θερμικής διάτρησης, γιατί λόγω της μεγαλύτερης τιμής της τάσης και επομένως της πεδιακής έντασης, δημιουργούνται ελεύθερα ηλεκτρόνια με κρούσεις. Η εικόνα του υλικού μετά τη διάτρηση σχετίζεται με θερμική καταπόνηση στα ίχνη του δενδρίτη. Η διάτρηση συμβαίνει όταν μία διακλάδωση του δενδρίτη ολοκληρώνει την πλήρη αγωγή σύνδεση των ηλεκτροδίων. Στο σχήμα 4.5.3-1 δίνεται ένα παράδειγμα για τη μορφή του δενδρίτη (ανάλογα με την πολικότητα της τάσης) για τη δυσμενέστερη περίπτωση των πρακτικών εφαρμογών (ηλεκτρόδια ακίδα-πλάκα)³.

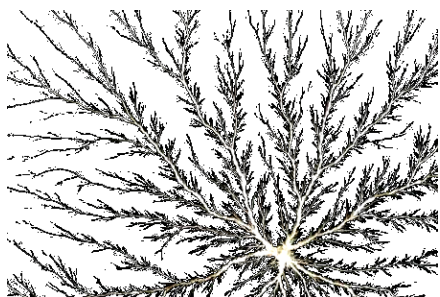


Σχήμα 4.5.3-1: Επεξήγηση της μορφής του δενδρίτη.

Στην περίπτωση της θετικής ακίδας ο δενδρίτης έχει, λόγω των δυνάμεων Coulomb που εξασκούνται μεταξύ των ελεύθερων αρνητικών ηλεκτρικών φορέων (κυρίως ηλεκτρόνια) κατά την κίνηση τους προς την ακίδα, αρκετές διακλαδώσεις (κατά κανόνα μη ευθύγραμμες).

Όταν όμως η ακίδα είναι αρνητική, οι δυνάμεις απομάκρυνσης μεταξύ των ελεύθερων αρνητικών ηλεκτρικών φορέων είναι, λόγω της μεγάλης ακτίνας, μικρότερες και έτσι οι

διαδρομές είναι περίπου οι ακτίνες του κύκλου, των οποίων όμως η λαμπρότητα μειώνεται προς την περιφέρειά του. Έχουμε δηλαδή, ανάλογα με την πολικότητα της ακίδας, ομοιότητα με τις εικόνες Lichtenberg κατά τη μέτρηση κεραυνών.



Εικόνα 4.5.3-1: Εικόνα Lichtenberg κατά τη μέτρηση κεραυνών

Η διάτρηση υπό μορφή οχετού (ή ηλεκτρομηχανική διάτρηση) οφείλεται στην πολύ μεγαλύτερη τιμή της πεδιακής έντασης, από ότι κατά τη δένδροειδή διάτρηση. Στα πολυμερή υλικά διαχωρίζονται τα μόρια σε αρνητικούς και θετικούς φορείς. Η διάτρηση συμβαίνει κυρίως από τις δυνάμεις Coulomb, που εξασκούνται μεταξύ ελεύθερον ηλεκτρικών φορέων και ηλεκτροδίων. Η χρονική διάρκεια του φαινομένου είναι μερικά μs. Η εικόνα, που παρουσιάζει το υλικό είναι κυρίως το αποτέλεσμα μίας ακαριαίας εξάσκησης δυνάμεων, στην περιοχή όπου η πεδιακή ένταση είναι ιδιαίτερα μεγάλη (μηχανική τάση ,υπό την επίδραση των δυνάμεων του πεδίου).

Κατά την καταπόνηση οργανικών στερεών μονωτικών με κρουστικές τάσεις έχει διαπιστωθεί, ότι πάνω από μία μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης U_{kmin} που εφαρμόζεται στο δοκίμιο, συμβαίνει η διάτρηση με μία κρούση υπό μορφή οχετού, αν και η τιμή της πεδιακής έντασης είναι αρκετά μικρότερη από εκείνη κατά την ηλεκτρομηχανική διάτρηση υπό εναλλασσόμενη τάση καταπόνησης. Η μορφή της διάτρησης αυτής χαρακτηρίζεται επίσης ως ηλεκτρομηχανική. Το φαινόμενο έχει αποδοθεί στην απότομη μεταβολή της πεδιακής έντασης, λόγω της οποίας δημιουργούνται ελεύθερα ηλεκτρόνια, με αποτέλεσμα την ηλεκτρομηχανική διάτρηση από τις δυνάμεις Coulomb μεταξύ του αρνητικού ηλεκτροδίου και των θετικών ηλεκτρικών φορέων, που συγκρατούνται στο πλέγμα των μορίων.

Λόγω της μικρής χρονικής διάρκειας για την ηλεκτρική διάτρηση και επειδή τα στερεά μονωτικά είναι και μονωτές θερμότητας, μπορούμε να υποθέσουμε ότι η θερμότητα που απάγεται μόλις πριν από τη διάτρηση είναι αμελητέα. Κατά τη σχέση επομένως (4.5.1-3) και για έναν οχετό διατομής $A=\pi r^2$ (κατά το Σχήμα 4.5.1-1) ισχύει μόλις προ της διάτρησης ότι:

$$U_n^2 \sigma_2 \frac{A}{d} = \sigma_0 \frac{d\theta}{dt} \quad (4.5.3-1)$$

όπου σ_2 η ειδική αγωγιμότητα σε κάποια ανομοιογένεια (λόγω της οποίας η πεδιακή ένταση έγινε ιδιαίτερα μεγάλη στην περιοχή εκείνη του υλικού) και U_n η ενδεικνυόμενη τιμή της τάσης για την ηλεκτρική διάσπαση του υλικού στην παραπάνω περιοχή.

Αν υποθέσουμε ότι, λόγω του μικρού διατιθέμενου χρόνου είναι $d\theta/dt = \theta/T_\delta$, όπου T_δ ο χρόνος για την ηλεκτρική διάτρηση, τότε προκύπτει από την σχέση (4.5.3-1) ότι:

$$U_n = \sqrt{d} \sqrt{\frac{C_0 \theta}{\sigma_2 A T_\delta}} \quad (4.5.3-2)$$

Για τη διάτρηση στη μέγιστη τιμή \hat{U}_{kn} μιας κρουστικής τάσης ισχύει αντίστοιχα

$$\hat{U} = \sqrt{d} \sqrt{\frac{C_0 \theta}{\sigma_2 A T_s}} \quad (4.5.3-3)$$

όπου T_s η διάρκεια του μετώπου της εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης.

Οι παραπάνω σχέσεις δίνουν μία ικανοποιητική ερμηνεία σε πειράματα, που έχουν γίνει. Πράγματι, όσο αυξάνει ο χρόνος T_s μίας κρουστικής τάσης, τόσο μειώνεται η διηλεκτρική αντοχή. Κατά την καταπόνηση με εναλλασσόμενη τάση ισχύει περίπου η αναλογία

$$U_n = f \cdot \frac{1}{\sqrt{(T\delta)}} \quad (4.5.3-4)$$

Όταν από την αύξηση των ηλεκτρικών φορέων, λόγω κάποιας ανομοιογένειας (δεν υπάρχουν πρακτικά ιδανικοί μονωτές), η ειδική αγωγιμότητα έχει αποκτήσει μία κρίσιμη για το υλικό τιμή σ_2 , η πόλωση του υλικού είναι αρκετή για να συμβεί η διάτρηση από τις δυνάμεις Coulomb μεταξύ ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων και ηλεκτροδίων. Η πόλωση αυτή του υλικού στην περιοχή, όπου θα συμβεί η διάτρηση, μπορεί να παρασταθεί σε ένα ισοδύναμο κύκλωμα, ως αύξηση της χωρητικότητας από την παράλληλη σύνδεση ενός μεταβλητού πυκνωτή C_{π} , (που συμβολίζει την πόλωση) προς την ιδανική χωρητικότητα C . Όταν η αγωγιμότητα G και ο πυκνωτής C , έχουν αποκτήσει μόλις προ της διάτρησης τις τιμές G_{\max} και C_{\max} , (που αντιστοιχούν στην κρίσιμη ειδική αγωγιμότητα σ_2 , λόγω κάποιας ανομοιογένειας), τότε συμβαίνει η διάτρηση.

4.5.4 Διάτρηση από μερικές εκκενώσεις

Η διάσπαση των στερεών μονωτικών υλικών έχει σε αρκετές περιπτώσεις την αφετηρία της στις μερικές εκκενώσεις στην επιφάνεια και τον 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).

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

Συγκριτικά με τις άλλες μορφές διάσπασης, η ηλεκτροχημική διάσπαση προκαλεί βαθμιαία μείωση της ηλεκτρικής αντοχής, ανάλογα με το ρυθμό αύξησης της χημικής μεταβολής και είναι συνήθως μακροπρόθεσμη, γι' αυτό ονομάζεται και γήρανση του μονωτικού υλικού³.

4.5.5 Θερμοχημική διάτρησης

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

Η διάτρηση που προκαλείται μόνο από τη θερμότητα του περιβάλλοντος του στερεού μονωτικού μέσου, ονομάζεται θερμοχημική. Έχει διαπιστωθεί 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 και δίνεται από τη σχέση:

$$U_a = \sqrt{a \frac{\kappa \cdot \theta}{\sigma_0}} \quad (4.5.5-1)$$

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 μέσω 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 τάσης απ' ό,τι σε κανονική θερμοκρασία (20 °C), με αποτέλεσμα να συμβαίνει ο ιονισμός δια κρούσεως σε αρκετά μικρότερες τιμές του πεδίου απ' ό,τι κατά την καταπόνηση σε θερμοκρασία περιβάλλοντος 20 °C.

Τα παραπάνω ερευνητικά αποτελέσματα οδηγούν στο πρακτικό συμπέρασμα ότι οι διηλεκτρικές δοκιμές τύπου θα πρέπει να διεξάγονται ακριβώς μετά τη δοκιμή ανύψωσης θερμοκρασίας (εφ' όσον βέβαια προβλέπεται η δοκιμή υπερθέρμανσης σε μία κατασκευή). Κατά τον τρόπο δηλαδή αυτόν, εξετάζεται ουσιαστικά η εκδήλωση των μερικών εκκενώσεων εντός των παραδεκτών ορίων υπερθέρμανσης μίας κατασκευής. Αν υποθέσουμε, ως παράδειγμα, ότι πρόκειται να γίνουν οι δοκιμές τύπου κατά τον ποιοτικό έλεγχο κάποιων μετασχηματιστών διανομής, τότε κρίνεται σκόπιμο να διεξάγονται οι διηλεκτρικές δοκιμές (δοκιμή υπό κρουστική τάση και δοκιμή με εναλλασσόμενη τάση βιομηχανικής συχνότητας) ακριβώς μετά το πέρας της δοκιμής ανύψωσης θερμοκρασίας, όπου η θερμοκρασία στο λάδι είναι της τάξης των 70 °C.

4.6 Η κβαντομηχανική θεωρία των φαινομένων στα στερεά μονωτικά

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

- ο ιονισμός με κρούσεις, που πιστεύεται ότι εκδηλώνεται στα στερεά μονωτικά, και

- το μη ορατό φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας και η συσχέτισή του μη φωτεινά φαινόμενα και καταπονήσεις, που παρατηρούνται στο υλικό (θερμικές, 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 (δηλαδή από παλμογράφημα),
- στις κρούσεις φορτίου, που είναι η κυματομορφή (το παλμογράφημα) της πτώσης τάσης σε ένα ωμικό τετράπολο μέτρησης,
- στην ανίχνευση του μη ορατού φάσματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας (που εκπέμπεται κατά τη γήρανση και τη διάσπαση)
- στην ικανοποιητική πειραματική και θεωρητική ταύτιση του μηχανισμού παραγωγής των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων

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

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

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

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

2) Καθοριστικός παράγοντας για την δημιουργία ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων είναι η τιμή του πεδίου. Από μετρήσεις σε οργανικά στερεά μονωτικά (με σχετική διηλεκτρική

σταθερά 2.5-4.5) έχει διαπιστωθεί ότι οι μερικές εκκενώσεις, υπό κρουστικές τάσεις καταπόνησης, αρχίζουν σε τιμή πεδίου περίπου 0.2 MV/cm.

3) Για τιμές του πεδίου μέχρι περίπου 0,5MV/cm αυξάνει η ειδική αγωγιμότητα κατά τη σχέση 1.2.1-2.

4) Για μεγαλύτερες τιμές πεδίου από προηγουμένως, οι ελεύθεροι ηλεκτρικοί φορείς γίνονται αρκετά περισσότεροι και δεν ισχύει η προηγούμενη σχέση. 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.

4.7 Μια πιο θεωρητική προσέγγιση

Ένα σημαντικότατο συμπέρασμα, από την θεωρητική μελέτη του ιονισμού με κρούσεις στα στερεά μονωτικά δίνεται από την παρακάτω σχέση³:

$$Q = Q_0 e^{A(E^2 - E_0^2)/E_0^2} \quad (4.7-1)$$

όπου

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 απόκτα την τιμή Q .

A ένας συντελεστής του υλικού, που εξαρτάται από τον χρόνο.

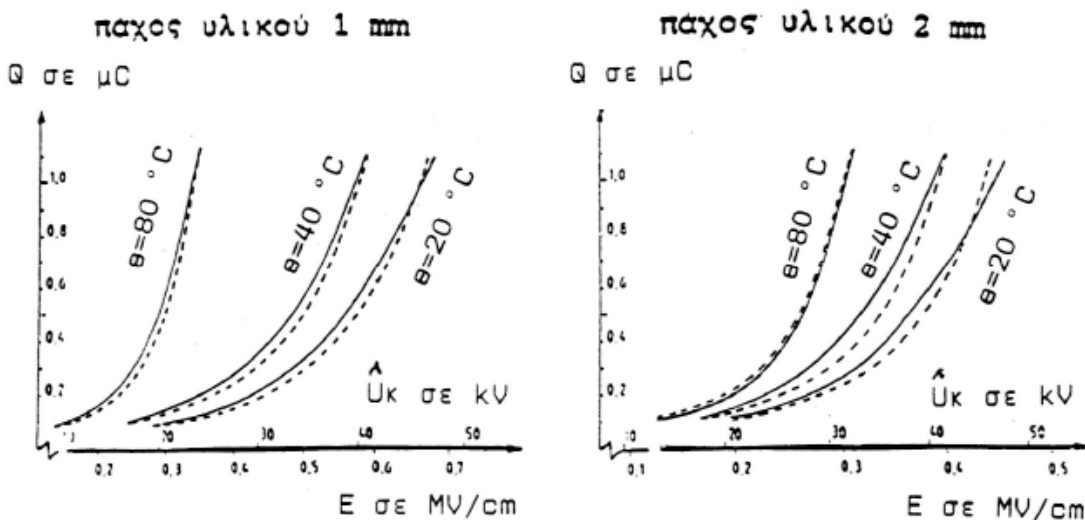
Με βάση την σχέση αυτή έχουν γίνει προσεγγίσεις πειραματικών χαρακτηριστικών $Q=f(\dot{U}_κ)$ κατά την καταπόνηση πολυμερών στερεών μονωτικών (πάχους 1 mm ή 2 mm) με κρουστικές τάσεις χειρισμών (μορφή 250/2500 μ s), η οποία προκαλεί μόνο εσωτερικές μερικές εκκενώσεις. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε τρεις διαφορετικές θερμοκρασίες (20 °C, 40 °C και 80 °C), ώστε :

α) να εξαχθούν συμπεράσματα για την επίδραση της θερμοκρασίας στη παραγωγή ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων, και

β) να εναρμονίζονται οι μετρήσεις με τα παραδεκτά όρια λειτουργίας του μονωτικού ελαίου των μετασχηματιστών, που ενδιαφέρει ιδιαίτερα στην πράξη.

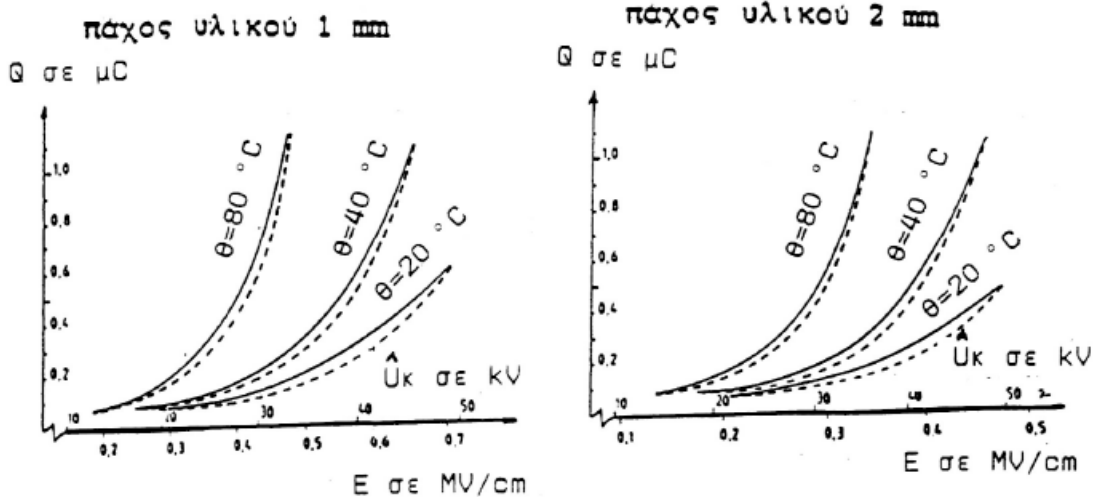
Στις εικόνες παρακάτω (4.7-2 και 4.7-3) δίνονται οι πειραματικές χαρακτηριστικές για δύο μονωτικά καθώς και οι θεωρητικές χαρακτηριστικές κατά την σχέση 4.7-1, (με προσδιορισμό του συντελεστή A για κάθε υλικό). Όπως φαίνεται, υπάρχει ικανοποιητική ταύτιση μεταξύ θεωρίας και πειραμάτων. Η θεωρητική προσέγγιση έδειξε ότι:

- οι μερικές εκκενώσεις αρχίζουν σε τιμές πεδίου περίπου $E=0.2$ MV/cm
- για τιμές πεδίου περίπου μέχρι 0.5 MV/cm η αύξηση της ειδικής αγωγιμότητας διέπεται από την σχέση $\sigma = \sigma_0 \exp(-W/kT)$
- για μεγαλύτερες τιμές πεδίου από προηγουμένως, ισχύει η σχέση 4.7-1, αποτέλεσμα να μπορεί να υποθέσει κανείς, ότι συμβαίνει ιονισμός με κρούσεις.
- 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 4.7-1.



Εικόνα 4.7-1: Χαρακτηριστικές $Q=f(\dot{U}_k)$ για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου, υπό κορουστικές τάσεις 250/2500 μs. Διατάραξη ηλεκτροδίων ακίδα πλάκα. $A=0.48$.

Από την μεγάλη αύξηση των παραγόμενων ελεύθερων ηλεκτρονίων θερμοκρασία του μονωτικού ελαίου, που στη πράξη γίνεται αντιληπτή σε συνδυασμούς "στερεό-υγρό μονωτικό" με την αρκετά μεγάλη $tg\delta$, φαίνεται ότι θα πρέπει να γίνει μία βελτίωση των προδιαγραφών ως προς τη δοκιμή υπερθέρμανση. Με τυπικό παράδειγμα τους μετασχηματιστές ελαίου (και ιδιαίτερα τους μετασχηματιστές έντασης του δίαυλου



Εικόνα 4.7-2: Χαρακτηριστικές $Q=f(\dot{U}_k)$ για τον βεκελίτη εντός μονωτικού ελαίου, υπό κορουστικές τάσεις 250/2500 μ s. Διατάραξη ηλεκτροδίων ακίδα πλάκα. $A=0.44$.

μεταφοράς, που ως γνωστό από την πράξη παρουσιάζουν προβλήματα κατά την αύξηση της $tg\delta$), 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 (~80 °C).

4.7.1 Φάσμα εκπομπής ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας

Από εργαστηριακά πειράματα που έχουν γίνει σε στερεών μονωτικών με σχετική διηλεκτρική σταθερά περίπου 2.5-4.5 (διάφορα χαρτιά μετασχηματιστών, πεπιεσμένο χαρτί, βακελίτης, pectinax, πανίτης, κλπ) για το φάσμα εκπομπής ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, παρουσιάζονται παρακάτω ορισμένα δεδομένα. Στα πειράματα που αναφέρω, οι τάσεις δοκιμής, που έχουν χρησιμοποιηθεί για την κβαντομηχανική ερμηνεία του μηχανισμού διάτρησης, είναι κυρίως κρουστικής μορφής (1.2/50 μ s, 10/200 μ s, 250/2500 μ s, κλπ). Πειράματα έχουν γίνει επίσης με εναλλασσόμενες και ημιανορθωμένες τάσεις καταπόνησης.

Σε ένα παράδειγμα με κρουστικές τάσεις, η ενέργεια των ελεύθερων ηλεκτρονίων (W) μπορεί να υπολογιστεί όπως και κατά την γήρανση. Έχει βρεθεί λοιπόν πως για αντίσταση $R=0.5 \Omega$ (που ήταν η αντίσταση από τον πυκνωτή μέτρησης μέχρι και το ηλεκτρόδιο

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

Από το παλμογράφημα των κρούσεων φορτίου από τα πειραματικά δεδομένα παρατηρεί κανείς την εκδήλωση αρνητικής διαφορικής αντίστασης. Ο αριθμός των κρούσεων περιορίζεται ως προς εκείνον κατά τη γήρανση, αλλά η τιμή του ρεύματος αυξάνει σημαντικά. 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.

4.7.2 Επιφανειακή διάσπαση

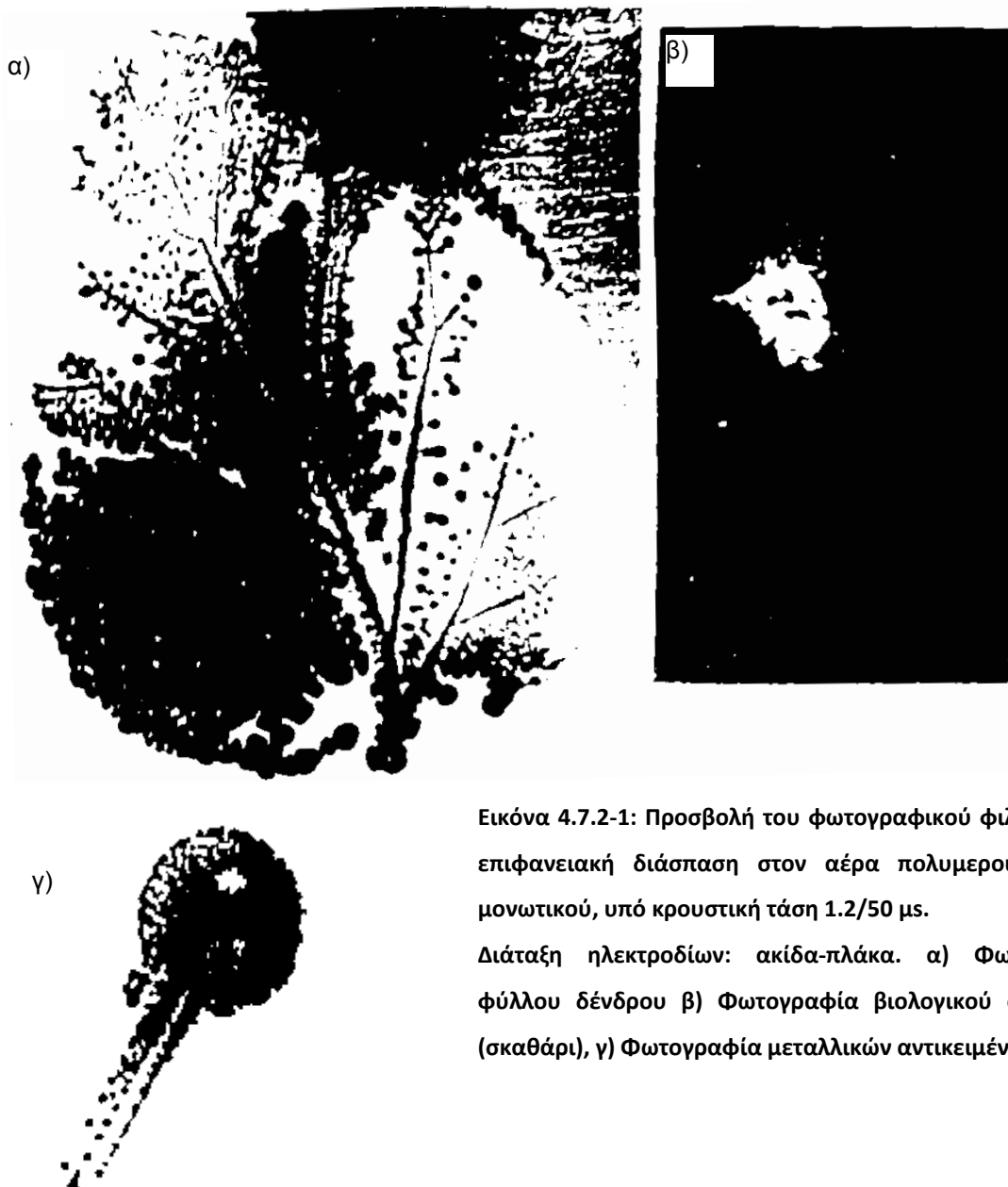
Από πειράματα, που έχουν γίνει για τη μελέτη των φαινομένων, που εκδηλώνονται προ και κατά την επιφανειακή διάσπαση, σε περιβάλλον μονωτικού ελαίου ή ατμοσφαιρικού αέρα, φαίνεται ότι ισχύει ότι και προηγουμένως για τον μηχανισμό της γήρανσης και της διάτρησης. Γίνεται λοιπόν προφανές ότι τα φαινόμενα δεν εξαρτώνται, με το αν θα ακολουθήσει η διάτρηση ή η επιφανειακή διάσπαση³.

Από τον πειραματικό υπολογισμό της ενεργείας W των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων, προκύπτει ότι, η ενέργεια αυτή για το πρώτο και το τελευταίο άλμα δυναμικού είναι αντίστοιχα: 122 eV και 96.5 eV. Όπως φαίνεται η επιφανειακή διάσπαση σχετίζεται (όπως και η διάτρηση) με την εκπομπή μαλακών ακτίνων-Χ.

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.

Παρακάτω παρατίθενται ορισμένες φωτογραφίες, από τη βιβλιογραφία³, με πειράματα προσβολής του φωτογραφικού φιλμ. Επίσης, παρατίθενται και 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 1.2/50 μ s σε περιβάλλον ατμοσφαιρικού αέρα. Οι φωτογραφίες στο σε περιβάλλον μονωτικού ελαίου, καθώς και εκείνες της διάτρησης

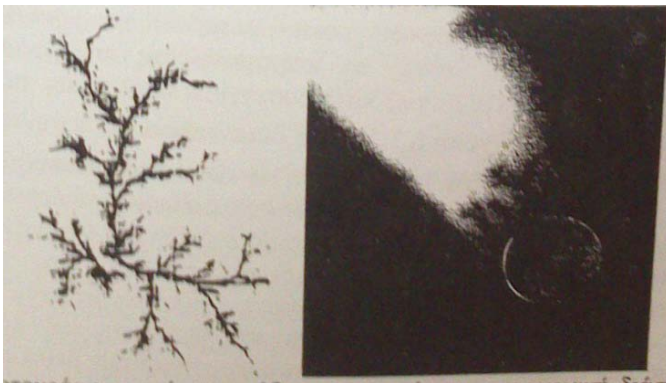


Εικόνα 4.7.2-1: Προσβολή του φωτογραφικού φιλμ κατά την επιφανειακή διάσπαση στον αέρα πολυμερούς στερεού μονωτικού, υπό κρουστική τάση 1.2/50 μ s.

Διάταξη ηλεκτροδίων: ακίδα-πλάκα. α) Φωτογράφιση φύλλου δένδρου β) Φωτογραφία βιολογικού οργανισμού (σκαθάρι), γ) Φωτογραφία μεταλλικών αντικειμένων.

(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 που ακολουθεί (εικόνα 4.7.2-2) σχετίζεται με την υπεριώδη ακτινοβολία, ενώ εκείνος της εικόνας 4.7.2-3 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.



Εικόνα 4.7.2-2: Φωτογράφιση εικοσάδραχμου



Εικόνα 4.7.2-3: Φωτογραφίες δενδριτών κατά την καταπόνηση πολυμερών στερεών μονωτικών στον αέρα

Από τα προαναφερθέντα στο Κεφάλαιο 4 φαίνεται, ότι η κβαντομηχανική θεωρία των φαινομένων προ και κατά τη διάσπαση των στερεών μονωτικών υλικών δίνει πληροφορίες για το μη ορατό φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, που παράγεται στα υλικά 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 μας 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 4.7-1 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 που αναφέρονται στην παράγραφο 4.7 με κρουστικές τάσεις 1.2/50 μs (ή με 10/200 μs) και προσεγγίσει ακολούθως τις πειραματικές χαρακτηριστικές $Q=f(\dot{U}_k)$ με την σχέση 4.7-1, θα διαπιστώσει ότι ο συντελεστής A έχει διαφορετική τιμή, από εκείνη κατά την καταπόνηση με κρουστικές τάσεις 250/2500 μs . Η διαφορετική αυτή τιμή του συντελεστή A (κατά την καταπόνηση με κρουστικές τάσεις 1.2/50 μs , ή 10/200 μs) μπορεί να θεωρηθεί μόνο ως μία ένδειξη ότι συμβαίνει ιονισμός με κρούσεις, χωρίς όμως να καθορίζεται η περιοχή εκδήλωσης 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 το παραπάνω φαίνεται, ότι γι αυτήν 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.

5. Σχόλια για τα φαινόμενα

5.1 Μειονεκτήματα του συνδυασμού του αέρα με τα στερεά και υγρά μονωτικά υλικά.

Τα αέρια μονωτικά έχουν το μειονέκτημα να προκαλούν βλάβες στα στερεά μονωτικά, που συνεργάζονται μαζί τους. Αυτό οφείλεται στις ξένες κυρίως επικαθήσεις, λόγω των οποίων μειώνονται οι αποστάσεις μόνωσης, με αποτέλεσμα την εκδήλωση εκκενώσεων στην επιφάνεια των στερεών μονωτικών. Προκαλούν επίσης βλάβες στα στερεά και υγρά μονωτικά, όταν εγκλωβίζονται σ' αυτά, γιατί τότε επενεργούν ως ανεπιθύμητες ανομοιογένειες, οι οποίες μειώνουν (κυρίως λόγω μερικών εκκενώσεων) τη διηλεκτρική αντοχή των στερεών και υγρών μονωτικών³.

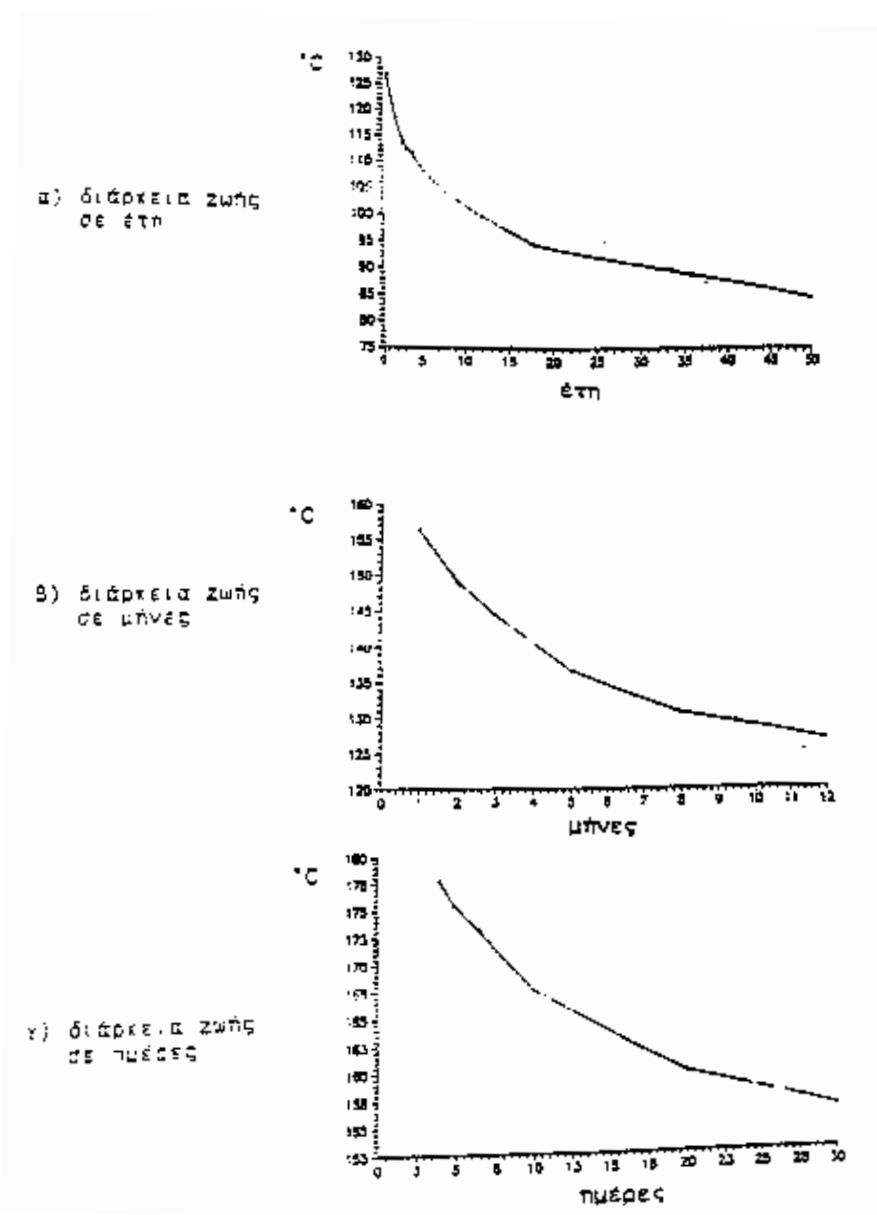
Ένα παράδειγμα που μπορούμε να αναφέρουμε, και συναντάται συχνά ως μονωτήρας σε μετασχηματιστές είναι ο συνδυασμός «χαρτί-μονωτικό λάδι». Ο συνδυασμός αυτός έχει δείξει στην πράξη ότι είναι μία πολύ καλή μόνωση γιατί εκτός του ότι τα δύο παραπάνω μονωτικά έχουν την ίδια περίπου τιμή ϵ , εμποτίζεται το λάδι στο χαρτί και δεν επιτρέπει έτσι την ύπαρξη αέρα. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα αποφυγής της ανεπιθύμητης συνεργασίας των αερίων μονωτικών με τα στερεά και υγρά μονωτικά είναι η πλήρωση του δοχείου των μετασχηματιστών υψηλής τάσης με μονωτικό λάδι υπό συνθήκες κενού.

5.2 Συνδυασμοί των παραγόντων γήρανσης και διάτρησης.

Σύμφωνα με τα αναφερόμενα στο κεφάλαιο 4 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 ή διάτρησης. Οι παράγοντες αυτοί συνδυάζονται στην πράξη με διαφορετική βαρύτητα, ανάλογα με την περίπτωση καταπόνησης του στερεού μονωτικού.

5.2.1 Η θερμότητα του περιβάλλοντος μέσω στους παράγοντες γήρανσης και διάτρησης

Όπως είναι γνωστό, οι διεθνείς προδιαγραφές προσδιορίζουν τα ανώτερα όρια υπερθέρμανσης των ηλεκτρολογικών κατασκευών υψηλής τάσης, βάσει των απωλειών καθορίζεται το ονομαστικό ρεύμα (δοκιμή υπερθέρμανσης ή ανύψωσης θερμοκρασίας). Έτσι, έχει γίνει αποδεκτό κάποιο όριο θέρμανσης, που είναι πχ της τάξης των 40-50 °C στο λάδι, λόγω του οποίου, σε συνδυασμό με τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος, η οριακή θερμοκρασία λειτουργίας να είναι της τάξης των 80-90°C. Όταν όμως συντρέχουν



Σχήμα 5.2.1-1: Διάρκεια ζωής του χαρτιού, ανάλογα με τη θερμοκρασία.

λόγοι μείωσης της διηλεκτρικής αντοχής από άλλους παράγοντες, η θερμότητα περιβάλλοντος μέσου ενισχύει συνήθως το ρόλο τους, γιατί^{3,7}:

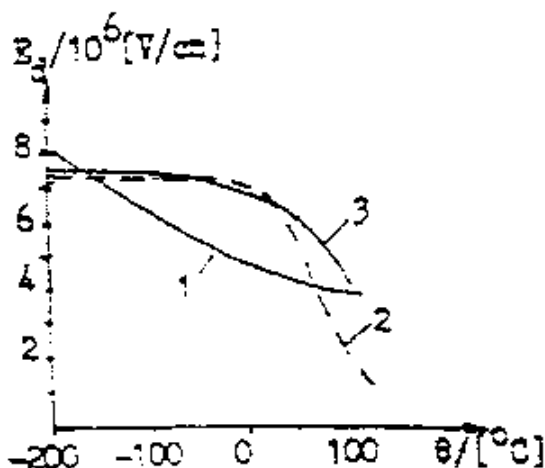
α) Αυξάνει η ειδική αγωγιμότητα (σχέση 1.2.1-2).

β) Διευκολύνεται η εξάσκηση δυνάμεων Coulomb, γιατί οι δεσμοί στο πλέγμα των μορίων των πολυμερών υλικών γίνονται ασθενέστεροι.

γ) Ενισχύεται ο ρόλος των μερικών εκκενώσεων, λόγω μεγαλύτερης ευκινησίας των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων, κυρίως στις φυσαλίδες αερίου (σχέση 1.2.1-3).

Έτσι, αυξάνει διαχρονικά η $t_{gδ}$ και μειώνεται η διάρκεια ζωής του στερεού μονωτικού και των ηλεκτροτεχνικών κατασκευών γενικότερα (βλέπετε διαγράμματα του σχήματος 5.2.1-1). Η καταπόνηση, που υφίσταται το στερεό μονωτικό, ανάλογα με τη θερμότητα του περιβάλλοντος μέσου του φαίνεται ότι προκαλεί μείωση της τάσης για την θερμική διάτρηση, λόγω αύξησης της αγωγιμότητας του (σχήμα 4.5.1-2). Επίσης, με την παραδοχή ότι στα στερεά μονωτικά εκδηλώνεται ιονισμός με κρούσεις κατά τη δένδροειδή ή την ηλεκτρομηχανική διάτρηση (παράγραφος 4.5.2), μπορούμε να υποθέσουμε ότι ισχύει μία αντίστοιχη σχέση προς την σχέση 4 4.3-5 των αερίων, σύμφωνα με την οποία η αύξηση της θερμοκρασίας σημαίνει μείωση του μέσου ελεύθερου μήκους (λ) των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων (κυρίως ηλεκτρόνια). Γι αυτό, η αύξηση της θερμότητας του περιβάλλοντος μέσου φαίνεται ότι προκαλεί μείωση και της τιμής της τάσης για την ηλεκτρική διάτρηση.

Στο σχήμα 5.2.1-2 δίνονται παραδείγματα μείωσης της διηλεκτρικής αντοχής διαφόρων

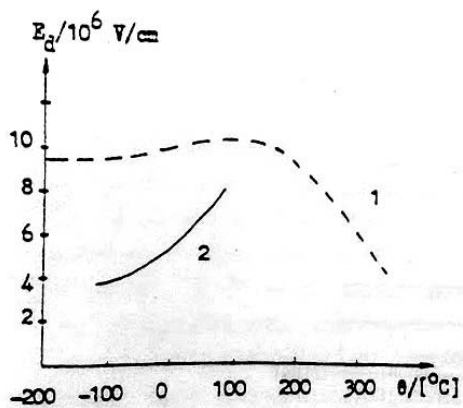


Σχήμα 5.2.1-2: Μείωση της διηλεκτρικής αντοχής σε στερεά μονωτικά υλικά κατά την αύξηση της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος μέσου.

1: Βακελίτης, 2: Πολυαιθυλένιο 3: Πολυστετυνόλη

μονωτικών υλικών, λόγω αύξησης της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος, η οποία μπορεί να ερμηνευθεί από τον παραπάνω συνδυασμό της επίδρασης της θερμότητας του περιβάλλοντος με τους υπόλοιπους παράγοντες γήρανσης και διάσπασης.

Υπάρχουν όμως περιπτώσεις στερεών μονωτικών υλικών όπου η αύξηση της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος δεν οδηγεί σε μείωση της διηλεκτρικής αντοχής, τουλάχιστον σε κάποια περιοχή τους. Στο σχήμα 5.2.1-3 φαίνονται δύο παραδείγματα που ανήκουν στην περίπτωση αυτή. Μία ερμηνεία, για τη διαφορετική αυτή ανασύνδεση της μίκας (Glimmer) και του χαλαζία (Quarz) μπορεί να αποδοθεί σε αλληλεξουδετέρωση των παραγομένων ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων.



Σχήμα 5.2.1-3: Διηλεκτρική αντοχή μίκας (1) και του κρυστάλλου χαλαζία (2) σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος.

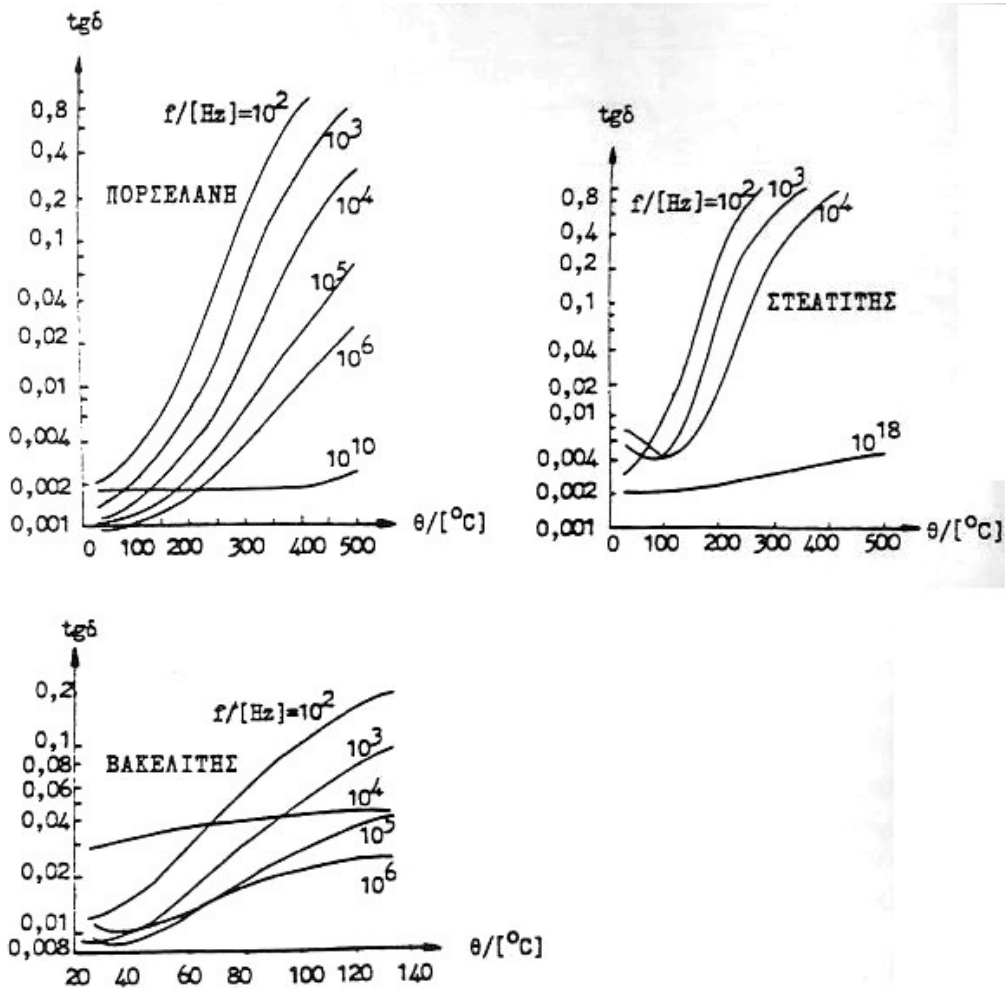
Αποτέλεσμα της παραπάνω εξουδετέρωσης φαίνεται ότι είναι η μείωση των ηλεκτρονίων αγωγιμότητας και κατά συνέπεια η αύξηση της διηλεκτρικής αντοχής. Στη μίκα παρουσιάζεται το φαινόμενο αυτό μεταξύ -200 °C έως 100 °C, ενώ στο χαλαζία εκδηλώνεται μόνο αύξηση της διηλεκτρικής αντοχής για τις θερμοκρασίες που δίνονται στο σχήμα.

Παρακάτω παρουσιάζονται οι χαρακτηριστικές $\text{tg}\delta=f(\theta)$ διαφόρων στερεών μονωτικών (σχήμα 5.2.1-4), δείχνουν επίσης την αύξηση των συνολικών απωλειών με τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος, λόγω των οποίων μειώνεται η διηλεκτρική αντοχή.

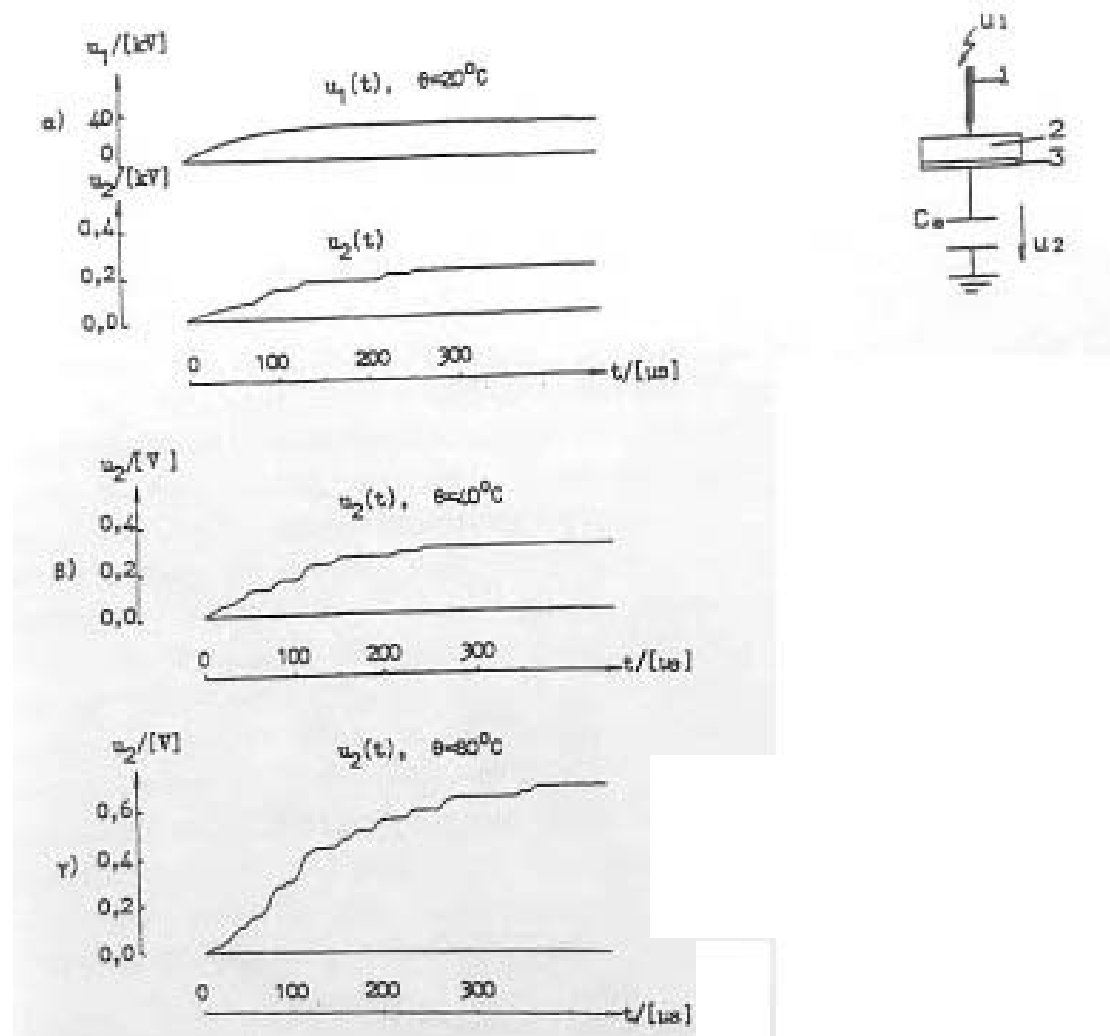
Η μείωση των απωλειών που παρατηρείται σε κάποια περιοχή ορισμένων χαρακτηριστικών του σχήματος 5.2.1-4, κατά την αύξηση της θερμοκρασίας και της συχνότητας, μπορεί πιθανώς να αποδοθεί σε επανασύνδεση των παραγόμενων φορέων.

Διάφορες μετρήσεις με κρουστικές τάσεις σε στερεά μονωτικά, κατά την καταπόνηση τους σε διάφορες θερμοκρασίες περιβάλλοντος (20 °C, 40 °C και 80 °C), οδηγούν επίσης στο συμπέρασμα ότι η αύξηση της ειδικής αγωγιμότητας (και επομένως η μείωση της

διηλεκτρικής αντοχής) είναι δεδομένη, όσο αυξάνει η θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Αυτό φαίνεται πολύ παραστατικά στα παλμογραφήματα του σχήματος 5.2.1-5 όπου οι μερικές εκκενώσεις γίνονται ισχυρότερες όταν αυξάνει η θερμοκρασία του περιβάλλοντος.



Σχήμα 5.2.1-4: $tg\delta=f(\theta)$ σε διάφορα στερεά μονωτικά.



Σχήμα 5.2.1-5: Αύξηση των μερικών εκκενώσεων λόγω μεγαλύτερης θερμοκρασίας στο περιβάλλον μέσο. α) $\theta=20\text{ }^{\circ}\text{C}$, β) $\theta=40\text{ }^{\circ}\text{C}$ και γ) $\theta=80\text{ }^{\circ}\text{C}$.

1: ηλεκτρόδιο ακίδα (ακτίνα καμπυλότητας $R=0.9\text{ mm}$)

2: δοκίμιο: Pertinax (πάχους 1 mm και διαμέτρου 150 mm)

3: ηλεκτρόδιο πλάκα (διαμέτρου 150 mm)

Μορφή κρουστικής τάσης: $\hat{U}_k=28.8\text{ kV}$

u_1 : στιγμιαία τιμή κρουστικής τάσης

u_2 : άλματα δυναμικού σε πυκνωτή μέτρησης $C_m=1000\text{ }\mu\text{F}$ σε σειρά με το δοκίμιο

5.2.2 Ο συνδυασμός της θερμότητας του περιβάλλοντος μέσου με τους άλλους παράγοντες γήρανσης και διάτρησης

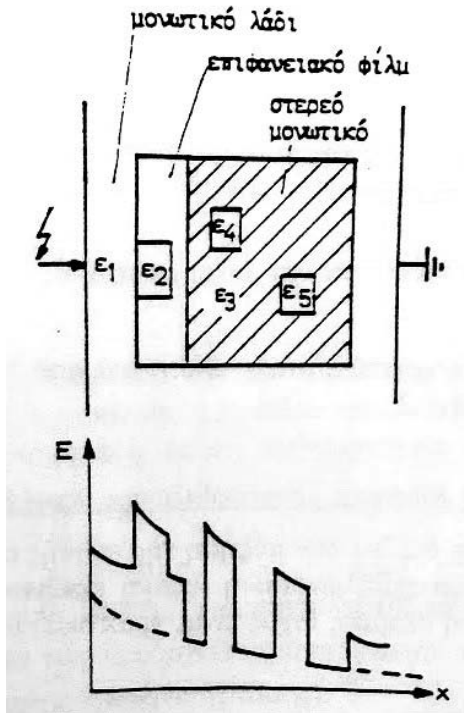
Οι μερικές εκκενώσεις θεωρείται ότι είναι ο κυρίαρχος παράγοντας γήρανσης και διάσπασης των μονώσεων στην πράξη. Μεταξύ των εξωτερικών και εσωτερικών μερικών εκκενώσεων, προεξέχοντα ρόλο έχουν οι τελευταίες, γιατί σχετίζονται με χημικές μεταβολές στον όγκο του υλικού (οι εξωτερικές μερικές εκκενώσεις από ξένες επικαθίσεις μπορούν να αντιμετωπιστούν με προγραμματισμένες εργασίες συντήρησης). Λόγω της μεγάλης σπουδαιότητας των μερικών εκκενώσεων, εξετάζονται παρακάτω διάφορες περιπτώσεις συνεργασίας τους με τους άλλους παράγοντες μείωσης της διηλεκτρικής αντοχής^{3,7,8}.

1) Συνδυασμός των μερικών εκκενώσεων με απώλειες Joule.

Στην παράγραφο 4.5.5 θεωρήθηκε ότι η θερμική διάτρηση αρχίζει σε μια θέση του μονωτικού υλικού, όπου αρχικά, λόγω κάποιας ανομοιογένειας, υπάρχει η αιτία για τοπική αύξηση της αγωγιμότητας. Για να μελετηθεί ειδικά η θερμική διάτρηση, δεν πάρθηκε υπ' όψη η αύξηση της αγωγιμότητας από τις μερικές εκκενώσεις, που εμφανίζονται λόγω της μικρότερης διηλεκτρικής αντοχής, στην ανομοιογένεια του υλικού.

Για να γίνει πιο κατανοητή η συμμετοχή των θέσεων διαταραχής, στον όγκο και την επιφάνεια του στερεού μονωτικού, έχει σχεδιαστεί στο σχήμα 5.2.2-1 η χαρακτηριστική $E=f(x)$ του στερεού μονωτικού, όταν αυτό καταλαμβάνει όλο το χώρο μεταξύ των ηλεκτροδίων και δεν έχει ανομοιογένειες στον όγκο του, συγκριτικά με εκείνη του ανομοιογενούς στερεού μονωτικού με περιβάλλον μέσο το μονωτικό λάδι. Παρατηρούμε ότι στις θέσεις ανομοιογένειας, όπου η αγωγιμότητα είναι αυξημένη έναντι του υπόλοιπου "υγιούς" τμήματος του συνδυασμού των δύο μονωτικών (στερεό μονωτικό-μονωτικό λάδι), η πεδιακή ένταση έχει μεγαλύτερες τιμές από ότι αν δεν υπάρχουν ανομοιογένειες.

Τη συμμετοχή αυτή των ανομοιογενειών στη μείωση της διηλεκτρικής αντοχής μπορεί να λάβει κανείς υπ* όψη σαν να πρόκειται για αύξηση της ειδικής αγωγιμότητας του υπόλοιπου "υγιούς τμήματος" του μονωτικού από την πεδιακή ένταση (σχέση 1.2.1-5)



Σχήμα 5.2.2-1: Αύξηση της πεδιακής έντασης στις θέσεις ανομοιογενειών του στερεού μονωτικού.

ϵ_1 έως ϵ_5 : διηλεκτρικές σταθερές

ϵ_1 : μονωτικό λάδι

ϵ_2 : ανομοιογένειες στο επιφανειακό φιλμ ($\epsilon_1 < \epsilon_2$)

ϵ_3 : στερεό μονωτικό ($\epsilon_3 > \epsilon_1$)

ϵ_4, ϵ_5 : ανομοιογένειες στον όγκο του στερεού μονωτικού ($\epsilon_3 > \epsilon_4$ και $\epsilon_3 > \epsilon_5$)

---: χαρακτηριστική του στερεού μονωτικού όταν δεν καταλαμβάνει όλο τον χώρο μεταξύ των ηλεκτροδίων και δεν έχει θέσεις διαταραχής στον όγκο του.

—: χαρακτηριστική με θέσεις διαταραχής και περιβάλλον το μονωτικό λάδι

Για το ανομοιογενές στερεό μονωτικό έχουμε επομένως κατά τη σχέση 4.5.1-3:

$$\frac{U^2 \sigma_0 e^{\beta\theta} A}{(1 - \delta E)^2 d} = 2\pi r k d \theta + C_0 \frac{d\theta}{dt} \quad (5.2.2-1)$$

και στην περίπτωση της διάτρησης (στην τιμή $U_{\theta\epsilon}$):

$$\frac{U_{\theta\epsilon}^2 \sigma_0 e^{\beta\theta} A}{(1 - \delta E)^2} = 2\pi r k d \theta \quad (5.2.2-2)$$

$$\eta \theta = \frac{U_{\theta\epsilon}^2 \sigma_0 e^{\beta\theta} A}{2\pi r^2 k d (1 - \delta E)^2} \quad (5.2.2-3)$$

Η οριακή τιμή δίνεται από τη διαφόριση του αριστερού και του δεξιού τμήματος της παραπάνω σχέσης ως προς θ :

$$1 = \frac{U_{\theta\epsilon}^2 \sigma_0 e^{\beta\theta} A}{2\pi r^2 k d (1 - \delta E)^2} \quad (5.2.2-4)$$

Από τις σχέσεις (5.2.2-3) και (5.2.2-4) φαίνεται ότι $\beta\theta=1$ και επομένως η οριακή τιμή της τάσης διάσπασης είναι:

$$U_{\theta\epsilon} = d(1 - \delta E) \sqrt{\frac{2\kappa}{e\beta\sigma_0 r}} \quad (5.2.2-5)$$

Σε συνδυασμό με τη σχέση 4.5.1-7, η μείωση της τάσης για τη θερμική διάτρηση (ΔU_1), λόγω συμμετοχής των μερικών εκκενώσεων είναι:

$$\Delta U_1 = U_\theta - U_{\theta\varepsilon} = \delta E d \sqrt{\frac{2\kappa}{e\beta\sigma_0 r}} \quad (5.2.2-6)$$

2) Η μείωση της τάσης για την ηλεκτρική διάτρηση, λόγω εκδήλωσης μερικών εκκενώσεων.

Αν πάρει κανείς υπ' όψη στη σχέση (4.5.3-1) την αύξηση της ειδικής αγωγιμότητας από τις μερικές εκκενώσεις στην θέση όπου εκδηλώνεται η μερική εκκένωση (σχέση 1.2.1-5), τότε με την παραδοχή ότι η απαγόμενη θερμική ισχύς είναι πρακτικά μηδενική (παράγραφος 4.5.2 ηλεκτρική διάτρηση) ισχύει:

$$\frac{u^2 \sigma A}{(1 - \delta E)^2 d} = C_0 \frac{d\theta}{dt} \quad (5.2.2-7)$$

και για τη διάτρηση στην τιμή $U_{\eta\varepsilon}$ (λόγω συνδυασμού μεταξύ των δυνάμεων Coulomb και των μερικών εκκενώσεων):

$$U_{\eta\varepsilon} = (1 - \delta E) \sqrt{d} \sqrt{\frac{C_0 \theta}{\sigma A T_\delta}} \quad (5.2.2-8)$$

Η τάση διάτρησης μειώνεται δηλαδή κατά την τιμή ΔU_2 :

$$\Delta U_2 = U_\eta - U_{\eta\varepsilon} = \delta E \sqrt{d} \sqrt{\frac{C_0 \theta}{\sigma A T_\delta}} \quad (5.2.2-9)$$

3) Η μείωση της θερμικής τάσης ανατροπής από τις μερικές εκκενώσεις.

Αν πάρει κανείς υπ' όψη τη σχέση (4.5.5-1), τότε η θερμική τάση ανατροπής $U_{x\varepsilon}$ (λόγω του συνδυασμού του περιβάλλοντος με τις μερικές εκκενώσεις θα είναι:

$$U_{x\varepsilon} = (1 - \delta E) \sqrt{\frac{a\kappa\theta}{\sigma_0}} \quad (5.2.2-10)$$

Για τη μείωση της τιμής της θερμικής τάσης ανατροπής λόγω μερικών εκκενώσεων ισχύει επομένως:

$$\Delta U_3 = U_x - U_{xe} = \delta E \sqrt{\frac{a\kappa_\theta \theta}{\sigma_0}} \quad (5.2.2-11)$$

4) Η διάτρηση μετά από έναν αριθμό κρούσεων (συνδυασμός των μερικών εκκενώσεων με τις απώλειες Joule και τις δυνάμεις Coulomb).

Ο συνδυασμός αυτός των παραγόντων γήρανσης και διάτρησης, κατά την καταπόνηση στερεών πολυμερών μονωτικών υλικών (εντός μονωτικού ελαίου) με ένα αριθμό κρούσεων m (της μορφής 1.2/50 μs , ή 10/200 μs , ή 250/2500 μs), που έχουν αρκετά μικρότερη μέγιστη τιμή από εκείνη για τη διάτρηση με μία κρούση, έχει αποδοθεί σε δύο φαινόμενα:

- Το θερμικό φαινόμενο (μείωση της διηλεκτρικής αντοχής, μόλις προ της εφαρμογής, τελευταίας κρούσης, λόγω αύξησης της ειδικής αγωγιμότητας από τις μερικές εκκενώσεις).
- Την ηλεκτρομηχανική διάτρηση κατά την τελευταία κρούση (m) στην τιμή \dot{U}_k ή πολύ πλησίον αυτής.

Το θερμικό φαινόμενο θεωρείται ότι είναι μία τεχνητή γήρανση μέχρι προ της εφαρμογής της τελευταίας κρούσης, λόγω του οποίου το υλικό απέκτησε σε μία περιοχή του (όπου εκδηλώνονται μερικές εκκενώσεις) την ειδική αγωγιμότητα:

$$\sigma = \sigma_0 e^{\beta_m \theta_m} \quad (5.2.2-12)$$

όπου θ_m : η θερμοκρασία και β_m ένας συντελεστής του υλικού, που εξαρτώνται από την τιμή θ , τη συχνότητα των κρούσεων (χρόνος μεταξύ των διαδοχικών κρούσεων) και τη μορφή της εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης.

Στην περιοχή δηλαδή, όπου συμβαίνουν οι μερικές εκκενώσεις, το υλικό άλλαξε, (λόγω των χημικών διεργασιών), τις φυσικές του ιδιότητες σε βάρος της διηλεκτρικής αντοχής του, ώστε τελικά να πρόκειται για ένα «άλλο» μονωτικό, το οποίο πλέον διασπάται ηλεκτρομηχανικά στη $m^{\text{η}}$ κρούση (όπως στην περίπτωση 2, που αναφέραμε παραπάνω). Κατά αντιστοιχία επομένως προς την σχέση (4.5.3-1) ισχύει:

$$u^2 \frac{\sigma_0 e^{\beta_m \theta_m}}{(1 - \delta E)^2} \frac{A}{d} = C_m \frac{d\theta}{dt} \quad (5.2.2-13)$$

όπου C_m , η θερμοχωρητικότητα, μόλις προ της εφαρμογής της τελευταίας κρούσης, η οποία εξαρτάται επίσης από τους παράγοντες, που προαναφέρθηκαν για τις τιμές β_m και θ_m . Έτσι για τη διάσπαση στην τιμή U_k έχουμε:

$$\hat{U}_k = (1 - \delta E) \sqrt{d \frac{C_m \theta_m e^{\beta_m}}{\sigma A T_s}} \quad (5.2.2-14)$$

όπου T_s ο χρόνος μετώπου της κρουστικής τάσης.

Επομένως, η μείωση της μέγιστης τιμής της κρουστικής τάσης για τη διάτρηση (συγκριτικά προς εκείνη κατά τη διάτρηση χωρίς προηγούμενη τεχνητή γήρανση) είναι:

$$\Delta u = \delta E \sqrt{\frac{d C_m \theta_m}{\sigma A T_s}} \quad (5.2.2-15)$$

Σύμφωνα με την προηγούμενη θεωρία φαίνεται, ότι μέχρι τη $m-1$ κρούση η ενέργεια, που παρέχεται στο στερεό μονωτικό, μετατρέπεται στη θερμότητα που παραμένει στη θέση της προσεχούς διάτρησης και σε εκείνη που μεταδίδεται στο υπόλοιπο υλικό (ανάλογα με τη συχνότητα των κρούσεων). Μπορεί κανείς να υποθέσει, ότι κατά την εφαρμογή της τελευταίας κρούσης (m) η θερμοκρασία στη συγκεκριμένη θέση του υλικού έχει αποκτήσει την κρίσιμη για τη διάτρηση τιμή της. Για το μέρος της ενέργειας επομένως, που παρέχεται επί m φορές στο στερεό μονωτικό ισχύει:

$$(m-1)a\hat{U}_k^2 + \gamma\hat{U}_k^2 = \sum_{i=1}^{i=m-1} W_{ai} + \sum_{i=1}^{i=m} \frac{W_{\theta i}}{(1-\delta E)^2} + \beta\hat{U}_k^2 \quad (5.2.2-16)$$

όπου

$(m-1)a\hat{U}_k^2$: το μέρος της ενέργειας, που παρέχεται στο υλικό μέχρι τη $m-1$ κρούση,

$\gamma\hat{U}_k^2$: το μέρος της ενέργειας που παρέχεται στο μονωτικό μόλις προ της διάτρησης κατά τη $m^{\text{η}}$ κρούση,

$\sum_{i=1}^{i=m-1} W_{ai}$: η θερμότητα, που μεταδίδεται μέχρι προ της εφαρμογής της $m^{\text{ης}}$ κρούσης,

$\sum_{i=1}^{i=m} \frac{W_{\theta i}}{(1-\delta E)^2}$: η θερμότητα, που έχει παραμείνει στη συγκεκριμένη θέση προ της διάτρησης,

και $\beta\hat{U}_k^2$: η ενέργεια κατά τη διάτρηση.

Επειδή κατά τη διάτρηση είναι:

$$\frac{W_{\theta i}}{(1-\delta E)^2} + \beta \hat{U}_k^2 = \gamma \hat{U}_k^2 \quad (5.2.2-17)$$

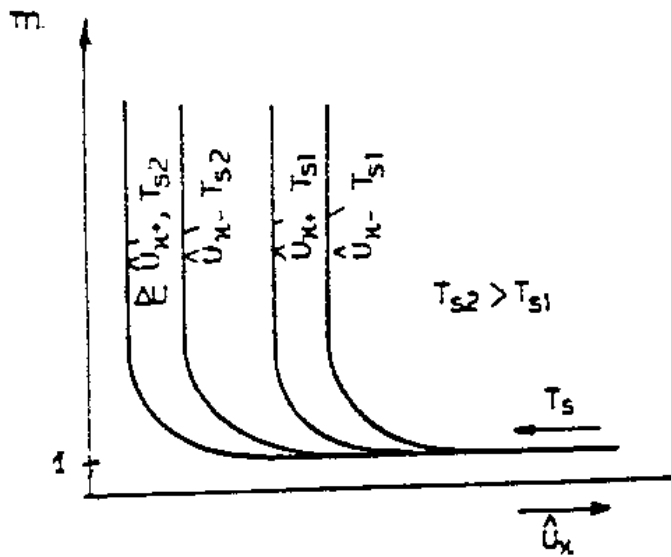
από τη σχέση (5.2.2-17) έπεται ότι:

$$(m-1)a\hat{U}_k^2 = \sum_{i=1}^{i=m-1} W_{ai} + \sum_{i=1}^{i=m} \frac{W_{\theta i}}{(1-\delta E)^2} \quad (5.2.2-18)$$

$$\text{ή } m = 1 + \frac{\sum_{i=1}^{i=m-1} W_{ai}}{a\hat{U}_k^2} + \frac{\sum_{i=1}^{i=m} W_{\theta i}}{(1-\delta E)^2 a\hat{U}_k^2}$$

$$\text{δηλαδή } m = 1 + \frac{a_1}{\hat{U}_k^2} + \frac{a_2}{\hat{U}_k^2} = 1 + \frac{a_3}{\hat{U}_k^2} \quad (5.2.2-19)$$

όπου a_1 , a_2 και a_3 συντελεστές, που εξαρτώνται από την τιμή \hat{U}_k , στη συχνότητα των κρούσεων, τη μορφή της τάσης και το πάχος του υλικού (το οποίο είναι καθοριστικό για την τιμή της πεδιακής έντασης). Αν λάβει κανείς υπ' όψη τη σημασία της πολικότητας της ακίδας και τη μείωση του χρόνου διάσπασης με την αύξηση της διάρκειας του μετώπου της κρουστικής τάσης (σχέση 4.5.3-3), τότε οι χαρακτηριστικές $m=f(|\hat{U}_k|, T_s)$ έχουν τη μορφή, που δίνεται στο σχήμα 5.2.2-2.



Σχήμα 5.2.2-2: χαρακτηριστικές $m=f(|\hat{U}_k|, T_s)$

m : Αριθμός κρούσεων για τη διάτρηση

T_s : Χρόνος μετώπου της κρουστικής τάσης

\hat{U}_k : Μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

Κατά την καταπόνηση του στερεού μονωτικού, που αναλύθηκε προηγουμένως θεωρήθηκε, ότι η μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης είναι αρκετά μικρότερη από εκείνη για τη διάτρηση με μία κρούση. Από πειράματα, που έχουν γίνει με κρουστικές τάσεις της μορφής 1.2/50 μs και 10/200 μs , σε τιμές \hat{U}_k πλησίον της περιοχής διάτρησης (πίνακας 5.2.2-1), έχει διαπιστωθεί ότι, εκτός από τη θερμική καταπόνηση, δημιουργούνται μικρά θραύσματα στη θέση προσεχούς διάσπασης. Μπορεί κανείς να υποθέσει, ότι στην περίπτωση αυτή συμμετέχουν στην τεχνητή γήρανση του υλικού (από κρούση σε κρούση) και οι δυνάμεις Coulomb. Η εικόνα, την οποία παρουσιάζει το δοκίμιο κατά τη γήρανση δίνεται στο σχήμα 5.2.2-3 και ονομάζεται εικόνα επιφανειακών διαταραχών. Πρόκειται για μία μόνιμη παραμόρφωση του υλικού, η οποία σχετίζεται με την εκδήλωση φωτεινής ακτινοβολίας (υπό μορφή δενδρίτη), που παρατηρεί κανείς κατά την πραγματοποίηση των πειραμάτων. Τα σπήλαια και ο κρατήρας έχουν αποδοθεί στη θερμική καταπόνηση του μονωτικού, γιατί φαίνεται ότι είναι αποτέλεσμα κάποιας τήξης του υλικού στα ίχνη του επιφανειακού δενδρίτη. Τα θραύσματα, που προαναφέρθηκαν, δημιουργούνται κυρίως στην περιοχή του κρατήρα, η οποία είναι και η θέση, όπου θα συμβεί η διάτρηση. Πειραματικές έρευνες έχουν δείξει ότι η εικόνα επιφανειακών διαταραχών συρρικνώνεται όσο αυξάνει η διάρκεια του μετώπου της κρουστικής τάσης (υπό σταθερή τιμή \hat{U}_k η εικόνα των επιφανειακών διαταραχών είναι πχ μεγαλύτερη κατά την καταπόνηση με κρουστική

d (mm) 1.2/50	Μορφή (μs)		\hat{U}_k 50% (kV)	Περιοχή τιμών \hat{U}_k για τη διάσπαση (kV)
	Μορφή (μs)	Πολικότητα		
1	1.2/50	θετική	80	78.....90
	1.2/50	αρνητική	86	81.....95
	10/200	θετική	74	69.....78
	10/200	αρνητική	77	71.....79
	250/2500	θετική	66	63.....69
	250/2500	αρνητική	68	65.....70
2	1.2/50	θετική	135	126.....151
	1.2/50	αρνητική	148	132.....165
	10/200	θετική	74	69.....80
	10/200	αρνητική	70	67.5.....71

Πίνακας 5.2.2-1: Τιμές της τάσης διάσπασης του στερεού μονωτικού Pertinax H1270 (πάχους 1 mm και 2 mm) κατά την καταπόνηση του με διάφορες μορφές κρουστικών τάσεων σε περιβάλλον μονωτικού ελαίου μετασχηματιστών.

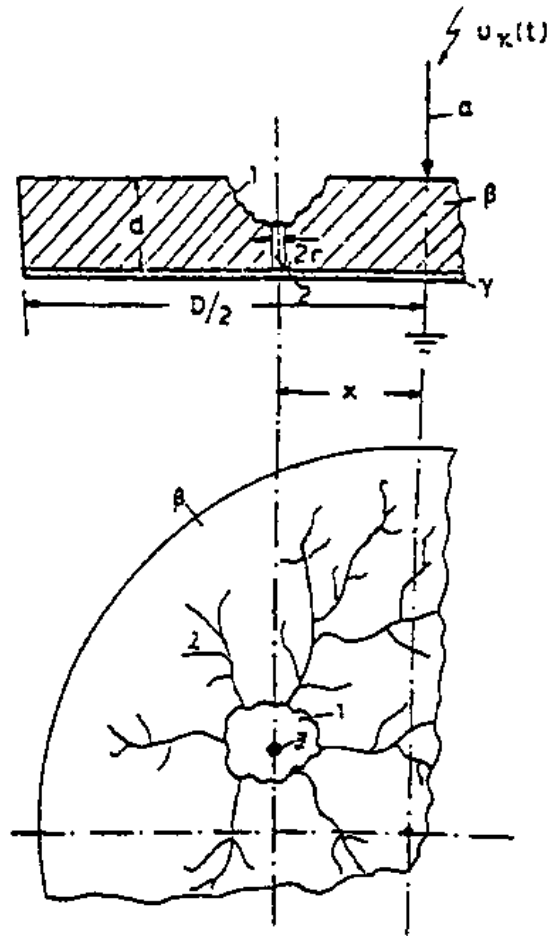
Διάμετρος δοκιμίων: 150 mm

Διάταξη ηλεκτροδίων: ακίδα-πλάκα

Ακτίνα καμπυλότητας της ακίδας: R=0.9 mm

τάση της μορφής 1.2/50 μs , ως προς εκείνη με κρουστική τάση 10/200 μs . Έχει επίσης διαπιστωθεί, ότι η εικόνα των επιφανειακών διαταραχών περιορίζεται, όσο μειώνεται ο συντελεστής χρησιμοποίησης της διάταξης των ηλεκτροδίων.

Όταν τελικά συμβεί η διάτρηση μετά από m κρούσεις, τότε παρατηρεί κανείς μία μικρή τρύπα διάτρησης (με διάμετρο μικρότερη από 0.1mm). ως προέκταση του κρατήρα (σχήμα 5.2.2-3).



Σχήμα 5.2.2-3: Παράδειγμα της εικόνας διάτρησης μετά από την καταπόνηση στερεών οργανικών μονωτικών με κρουστική τάση της μορφής 1.2/50 μs για τιμή \hat{U}_k πλησίον της περιοχής τιμών για τη διάτρηση.

α: ακίδα ($R=1 \text{ mm}$)

β: στερεό μονωτικό

γ: πλάκα

1: κρατήρας

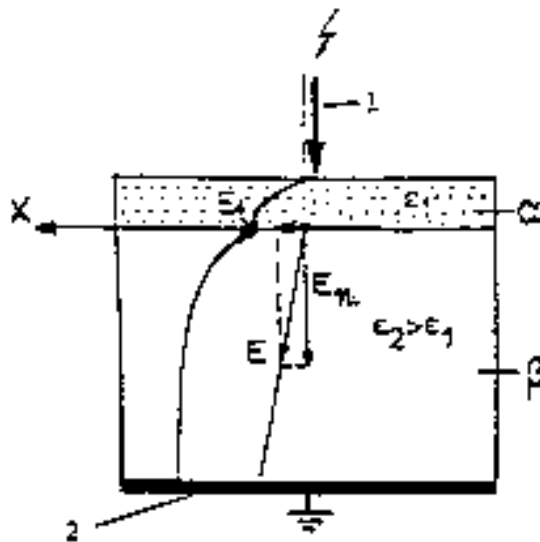
2: σπήλαια

3: οπή διάτρησης

Όπως δείχνεται στο σχήμα 5.2.2-3 ο κρατήρας και η τρύπα διάτρησης σχηματίζονται σε μία απόσταση x από την ακίδα (συνήθως μερικά mm), αν και η μέγιστη τιμή του πεδίου είναι στην κορυφή της ακίδας. Η ίδια παρατήρηση ισχύει για την τρύπα διάτρησης, όταν η διάτρηση συμβαίνει με μία μόνο κρούση. Αυτό φαίνεται ότι οφείλεται:

α) στην στατικότητα του φαινομένου (είναι στατιστικά αδύνατο να βρίσκεται ακριβώς κάτω από την ακίδα η επικρατέστερη θέση διαταραχής) και

β) σε πολύ μικρή απόσταση από την ακίδα μετακινούνται, υπό την επίδραση της επιφανειακής συνιστώσας της πεδιακής έντασης οι ετερόνυμοι προς αυτήν ελεύθεροι ηλεκτρικοί φορείς του επιφανειακού φιλμ, με αποτέλεσμα να δημιουργείται πρακτικά επέκταση του ίχνους της ακίδας (σχήμα 5.2.2-4).



Σχήμα 5.2.2-4: Επεξήγηση της σημασίας της επιφανειακής συνιστώσας της πεδιακής έντασης στον καθορισμό του κρατήρα και γενικότερα της θέσης διάτρησης, κατά την καταπόνηση στερεών μονωτικών με κρουστικές τάσης της μορφής 1.2/50 μ s και 10/200 μ s.

1: ακίδα

2: πλάκα

α) επιφανειακό φιλμ

β) στερεό μονωτικό

• : θέση όπου εκδηλώνεται ο κρατήρας (και γενικότερα η διάτρηση)

Η παραπάνω παρατήρηση για τη θέση της τρύπας διάτρησης ισχύει επίσης κατά την καταπόνηση με κρουστικές τάσεις χειρισμών (μορφή κρουστικής τάσης 250/2500 μ s), καθώς και εκείνη με εναλλασσόμενη ή συνεχή τάση. Από έρευνες που έχουν γίνει με τις παραπάνω μορφές τάσης (με ακτίνα καμπυλότητας της ακίδας 0.9 mm ή 1 mm) δεν έχει

διαπιστωθεί κατά την τεχνητή γήρανση πολυμερών στερεών μονωτικών (πάχους 1 mm ή 2 mm) η εκδήλωση κρατήρα ή σπηλαίων, ούτε έχει παρατηρηθεί η εκδήλωση επιφανειακού δενδρίτη (ανεξαρτήτως της τιμής της εφαρμοζόμενης τάσης). Η διαφορά αυτή ως προς την εικόνα των επιφανειακών διαταραχών, που παρουσιάζεται κατά την τεχνητή γήρανση με κρουστικές τάσεις 1.2/50 μ s και 10/200 μ s, είναι μία σημαντική παρατήρηση, που έχει οδηγήσει (σε συνδυασμό με μετρήσεις ηλεκτρικών μεγεθών) στο διαχωρισμό μεταξύ εσωτερικών και εξωτερικών μερικών εκκενώσεων στο διάγραμμα της χρονικής μεταβολής της εφαρμοζόμενης στο στερεό μονωτικό τάσης.

Από έρευνες που έχουν γίνει για το διαχωρισμό μεταξύ των εσωτερικών και εξωτερικών μερικών εκκενώσεων στο διάγραμμα της χρονικής μεταβολής της εφαρμοζόμενης τάσης στο στερεό μονωτικό, έχει διαπιστωθεί ότι:

α) οι εσωτερικές μερικές εκκενώσεις εμφανίζονται στην περιοχή μηδενισμού της τάσης, ή γενικότερα στην περιοχή της μέγιστης χρονικής μεταβολής της.

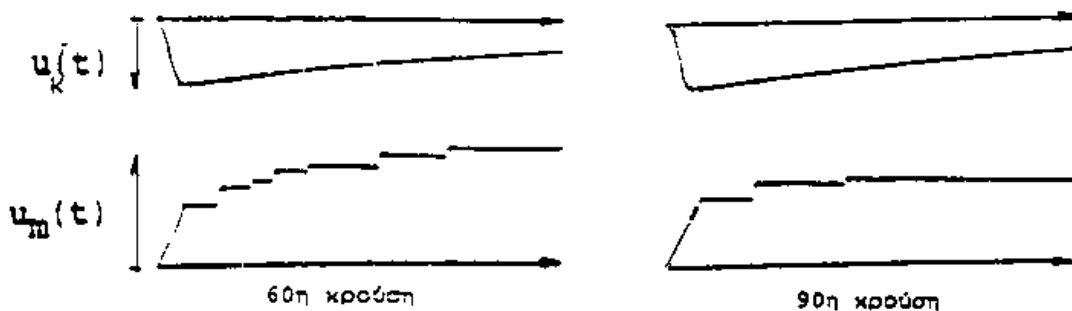
β) οι εξωτερικές μερικές εκκενώσεις εμφανίζονται στην περιοχή, όπου δεν μηδενίζεται η τάση.

Τα παραπάνω σημαίνουν πχ 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), που συνδυάστηκαν με ταυτόχρονες οπτικές παρατηρήσεις της εικόνας των επιφανειακών διαταραχών κατά το σχήμα 5.2.2-3. Στον πίνακα 5.2.2-2 δίνονται αποτελέσματα στατιστικών μετρήσεων, που αφορούν οργανικά στερεά μονωτικά με $\epsilon_r \approx 2.5-4.5$, 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 1.2/50 μ s) σχετίζονται περισσότερο με εξωτερικές μερικές εκκενώσεις.

Μία άλλη πειραματική προσέγγιση του διαχωρισμού μεταξύ εσωτερικών και εξωτερικών μερικών εκκενώσεων, ως προς τον χρόνο εκδήλωσης τους (υπό κρουστικές τάσεις

καταπόνησης), έχει βασιστεί σε χαρακτηριστικές $T_1=f|\dot{U}_k|$ και $T_2=f|\dot{U}_k|$ σε συνδυασμό με οπτικές παρατηρήσεις για την εικόνα των επιφανειακών διαταραχών. Στο σχήμα 5.2.2-5 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 5.2.2-2 για την εικόνα των επιφανειακών, να καταλήγει κανείς στο ίδιο συμπέρασμα.



Σχήμα 5.2.2-5: Άλματα δυναμικού κατά την 60^η και την 90^η κρούση στο Pertinax (πάχους 2mm).

Μορφή τάσης: 1.2/50 μs ($\dot{U}_k=99.7 \text{ kV}$).

Περιβάλλον μέσο: μονωτικό λάδι

Διάταξη ηλεκτροδίων: ακίδα-πλάκα

C_m : 210 nF

Μορφή τάσης σε μs	Δενδρίτης	Εικόνα επιφανειακών διαταραχών	Άλματα 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 μικρότερη από εκείνη 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 5.2.2-2: Αποτελέσματα της συσχέτισης μεταξύ εμφάνισης των αλμάτων δυναμικού και της εικόνας των επιφανειακών διαταραχών.

5.2.3 Ο συνδυασμός των τεσσάρων βασικών παραγόντων γήρανσης και διάτρησης

Το αποτέλεσμα του συνδυασμού των τεσσάρων παραγόντων γήρανσης και διάτρησης (απώλειες Joule, μερικές εκκενώσεις, δυνάμεις Coulomb και θερμότητα του περιβάλλοντος) εξαρτάται από το πώς αυτοί εκδηλώνονται διαχρονικά^{3,7,8}.

Αν θεωρηθεί πχ ότι πρόκειται για γήρανση του υλικού, τότε η καταπόνηση είναι κυρίως θερμική, οπότε από τις σχέσεις (4.5.1-3) και (1.2.1-3) έχουμε:

$$\frac{u^2 A}{d} \frac{e^{\beta\theta}}{(1-\delta E)^2} = 2\pi r \cdot d \cdot \kappa + C_0 \frac{d\theta}{dt} \quad (5.2.3-1)$$

όπου u η στιγμιαία τιμή της τάσης για τη διάτρηση και θ η διαφορά θερμοκρασίας ως προς το περιβάλλον. Από την παραπάνω σχέση και την σχέση (4.5.1-7) ο χρόνος διάτρησης είναι:

$$t = \frac{C_0 \beta}{2\pi r \cdot d \cdot \kappa} \int \frac{d\theta}{\left(\frac{U}{U_\theta}\right)^2 e^{\beta\theta} - \beta\theta} \quad (5.2.3-2)$$

Αν θεωρηθεί, ότι λόγω προηγούμενης γήρανσης, συμβαίνει τελικά η διάτρηση για $U > U_\theta$ (ηλεκτρική διάτρηση) και ότι:

$$\beta\theta \ll \left(\frac{U}{U_\theta}\right)^2 e^{\beta\theta}$$

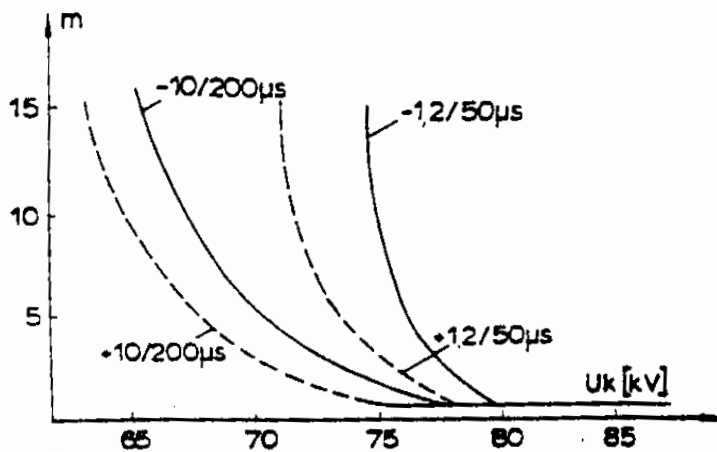
Τότε, από τη σχέση (5.2.3-2) έχουμε:

$$t \approx \frac{C_0 e}{2\pi r \cdot d \cdot \kappa \cdot \beta} \left(\frac{U_\theta}{U}\right)^2 \quad (5.2.3-3)$$

$$\text{ή } t \approx \frac{a}{U^2} \quad (5.2.3-4)$$

όπου a ένας συντελεστής του υλικού.

$$\hat{U}_k = 72 \text{ kV}$$



Σχήμα 5.2.3-1: $m=f(|\hat{U}_k|, T_s)$ για το στερεό μονωτικό Pertinax.

Ηλεκτρόδια: ακίδα-πλάκα

Δοκίμιο: Pertinax πάχους 1 mm εντός μονωτικού ελαίου

m: αριθμός κρούσεων για τη διάτρηση

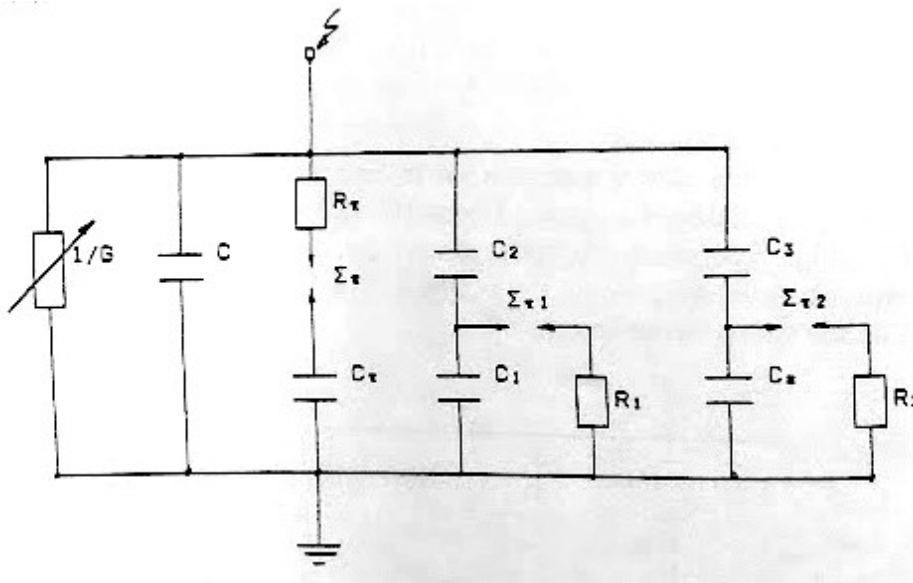
+: θετική πολικότητα της ακίδας

-: αρνητική πολικότητα της ακίδας

Η σχέση (5.2.3-4) δίνει μια πιθανή ερμηνεία για τη διάτρηση των στερεών μονωτικών, σε καταπονήσεις μικρής χρονικής διάρκειας. Πράγματι, η σχέση (5.2.2-10) για τη διάτρηση μετά από έναν αριθμό κρούσεων (τα σχήματα 5.2.2-2 και 5.2.3-1) φαίνεται ότι εναρμονίζεται με την σχέση (5.2.3-4), γιατί ο αριθμός των κρούσεων m σχετίζεται με τον χρόνο καταπόνησης.

Από διάφορες πειραματικές έρευνες έχει προταθεί ένα ισοδύναμο κύκλωμα, που αποδίδει ικανοποιητικά την ηλεκτρομηχανική διάτρηση και τις μερικές εκκενώσεις (σχήμα 5.2.3-2). Όπως φαίνεται πρόκειται ουσιαστικά για μία παράλληλη σύνδεση ενός πυκνωτή C_{π} , προς το ισοδύναμο κύκλωμα των Gemant και Philipoff. Ο πυκνωτής αυτός εκφράζει την πόλωση του υλικού, λόγω της οποίας συμβαίνει η μηχανική τάνυση του από τις δυνάμεις, του πεδίου. Η διαδρομή εκκένωσης εκφράζεται στην περίπτωση αυτή με τον σπινθηριστή Σ_{π} και την αντίσταση του τόξου R_{π} (υποτίθεται ότι ο Σ_{π} διασπάται ταυτόχρονα με τον πυκνωτή C_{π}). Για να αποδίδει το ισοδύναμο αυτό κύκλωμα το συνδυασμό όλων των παραγόντων γήρανσης και διάσπασης (κατά τη μακροσκοπική θεωρία), φαίνεται ότι θα πρέπει να γίνει η παράλληλη σύνδεση μίας μεταβλητής αγωγιμότητας, που θα εκφράζει τις θερμικές απώλειες (απώλειες Joule και ενίσχυσή τους

από τις μερικές εκκενώσεις) και την καταπόνηση του υλικού από τη θερμότητα του περιβάλλοντος.



Σχήμα 5.2.3-2: Ένα ισοδύναμο κύκλωμα συνδυασμού όλων των παραγόντων γήρανσης και διάτρησης.

C: Ιδανική χωρητικότητα της διάταξης.

C₁: Χωρητικότητα, που παριστάνει τις εσωτερικές θέσεις διαταραχών (κυρίως φυσαλίδες αερίων)

C₂: Χωρητικότητα, που παριστάνει το υπόλοιπο υγιές τμήμα του στερεού μονωτικού

C_π: Χωρητικότητα, που παριστάνει τις εξωτερικές θέσεις διαταραχών

C₃: Χωρητικότητα, που παριστάνει το υπόλοιπο υγιές τμήμα του επιφανειακού φιλμ

C_π: Χωρητικότητα, που παριστάνει την πόλωση του υλικού για τη διάτρηση από τις δυνάμεις του πεδίου

R₁: Αντίσταση του τόξου του σπινθηριστή Σπ₁

R₂: Αντίσταση του τόξου του σπινθηριστή Σπ₂

R_π, Σπ: Διαδρομή εκκένωσης κατά τη διάσπαση του C_π (R_π, αντίσταση του τόξου του σπινθηριστή Σπ).

G: αγωγιμότητα λόγω των απωλειών του διηλεκτρικού καθώς και την ενίσχυσή τους από τις μερικές εκκενώσεις και τη θερμότητα του περιβάλλοντος

Στον πίνακα 5.2.3-1 δίνονται συνοπτικά οι βασικές περιπτώσεις συνδυασμού των παραγόντων γήρανσης και διάτρησης, που είδαμε παραπάνω. Οι θεωρητικές σχέσεις του πίνακα 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.

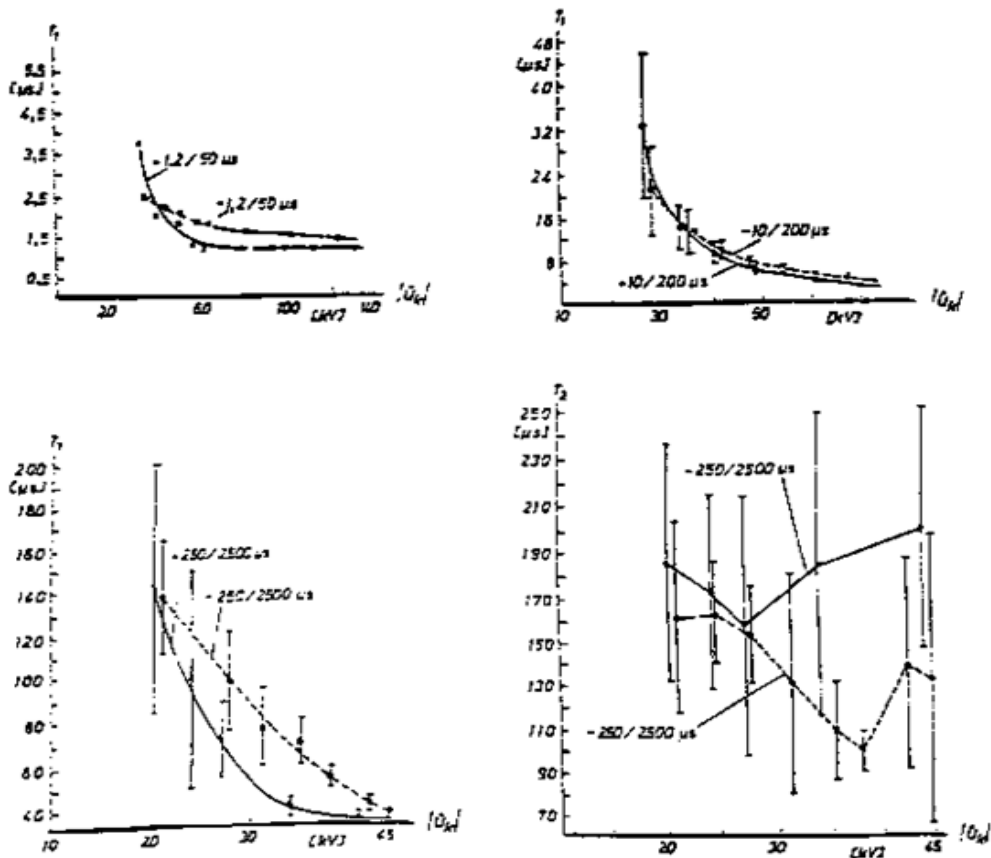
α/α	Παράγοντες που συμμετέχουν στην αλλαγή της μοριακής δομής	Θεμελιώδεις σχέσεις	Οριακή τιμή της τάσης για τη διάτρηση
1	Συνδυασμός της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος με άλλους παράγοντες διάτρησης	Η θερμότητα του περιβάλλοντος μέσου ενισχύει συνήθως όλους τους παράγοντες γήρανσης και διάτρησης.	
2	Μερικές εκκενώσεις και δυνάμεις Joule	$1) \sigma = \frac{\sigma_0 e^{\beta\theta}}{(1 - \delta E)^2}$ $2) \frac{\sigma_0 e^{\beta\theta} A}{(1 - \delta E)^2 d} = \kappa 2\pi r d \theta$	$u_{\theta\epsilon} = d(1 - \delta E) \sqrt{\frac{2\kappa}{e\beta\sigma_0}}$ (μείωση της τάσης για τη διάτρηση: $\Delta u_1 = u_\theta - u_{\theta\epsilon} = \delta E d \sqrt{\frac{2\kappa}{e\beta\sigma_0}}$
3	Μερικές εκκενώσεις και δυνάμεις Coulomb	$1) \sigma = \frac{\sigma_0 e^{\beta\theta}}{(1 - \delta E)^2}$ $2) \frac{u^2 \sigma A}{(1 - \delta E)^2 d} = C_0 \frac{d\theta}{dt}$	$u_{\eta\epsilon} = (1 - \delta E) \sqrt{d} \sqrt{\frac{C_0 \theta}{\sigma A T_\delta}}$ (μείωση της τάσης για τη διάτρηση: $\Delta u_3 = \delta E \sqrt{d} \sqrt{\frac{C_0 \theta}{\sigma A T_\delta}}$
4	Μερικές εκκενώσεις και θερμοκρασία περιβάλλοντος	$1) u_0 = \sqrt{a \frac{\kappa\theta}{\sigma}}$ $2) \sigma = \frac{\sigma_0 e^{\beta\theta}}{(1 - \delta E)^2}$	$u_{\theta\epsilon} = d(1 - \delta E) \sqrt{\alpha \frac{\kappa\theta}{\sigma_0}}$ (μείωση της τάσης για τη διάτρηση: $\Delta u_4 = u_\theta - u_{\theta\epsilon} = \delta E \sqrt{\frac{\kappa\theta}{\sigma_0}}$
5	Συνδυασμός των τεσσάρων* βασικών παραγόντων διάτρησης	$u^2 \frac{A}{d} \frac{e^{\beta\theta}}{(1 - \delta E)^2} =$ $= 2\pi r d \kappa \theta + C_0 \frac{d\theta}{dt}$	Εξαρτάται από τον παράγοντα που υπερισχύει κατά τη διάτρηση

Πίνακας 5.2.3-1: Βασικές σχέσεις μία θεωρητικής ερμηνείας για τη γήρανση και διάτρηση των στερεών μονωτικών.

*: μερικές εκκενώσεις, απώλειες Joule, δυνάμεις Coulomb και θερμοκρασία περιβάλλοντος.

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

Από την μέση καμπύλη των χαρακτηριστικών του σχήματος 5.3-1 γίνεται φανερή η εκδήλωση του φαινομένου της πολικότητας. 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 5.3-2)^{3,9}.



Σχήμα 5.3-1: 1) Χαρακτηριστική $T_1=f(|\dot{U}_κ|)$ κατά την καταπόνηση στερεών οργανικών μονωτικών (πάχους 2 mm και $\epsilon_r \approx 2.5-4.5$) με κρουστικές τάσεις 1.2/50 μs, 10/200 μs και 250/2500 μs. 2) Χαρακτηριστική $T_2=f(|\dot{U}_κ|)$ κατά την καταπόνηση στερεών οργανικών μονωτικών με 250/2500 μs. Περιβάλλον μέσο: μονωτικό λάδι. Διάταξη ηλεκτροδίων: ακίδα πλάκα. I: 2 φορές η τυπική απόκλιση

5.4 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) ^{3,9,10}.

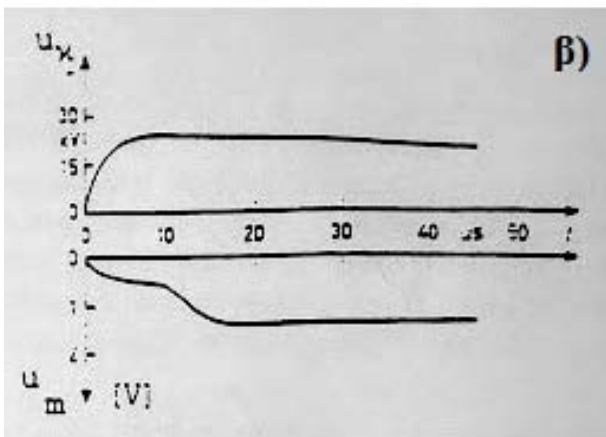
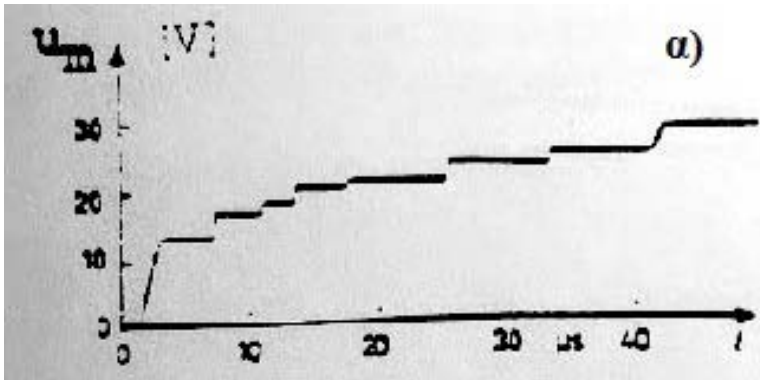
Από πειράματα που έχουν γίνει, είναι γνωστό, ότι στα φαινόμενα παραγωγής ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων (κυρίως ηλεκτρόνια) στην επιφάνεια των στερεών μονωτικών συμμετέχει και η ίδια η επιφάνεια σε βάθος μέχρι 30Å. Έτσι, εκτός από ης εξωτερικές μερικές εκκενώσεις (οι οποίες οφείλονται σε ξένες επικαθίσεις 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 ισχύει το ισοδύναμο κύκλωμα του σχήματος 5.2.3-2, όπου όμως 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.

5.5 Κβαντομηχανική ερμηνεία των φαινομένων γήρανσης και διάσπασης

Ένα τυπικό παράδειγμα κβαντομηχανικής ερμηνείας των φαινομένων γήρανσης και διάσπασης σε στερεό μονωτικά των πρακτικών εφαρμογών είναι το παρακάτω. Στο σχήμα

5.5-1 δίνονται ενδεικτικά παλμογραφήματα της τεχνητής γήρανσης στερεών πολυμερών μονωτικών με κρουστικές τάσεις σε περιβάλλον μονωτικού ελαίου και στο σχήμα 5.5-2 ένα παλμογράφημα των κρούσεων φορτίου. Η διάταξη μέτρησης φαίνεται στο σχήμα 5.5-3^{3,9}.

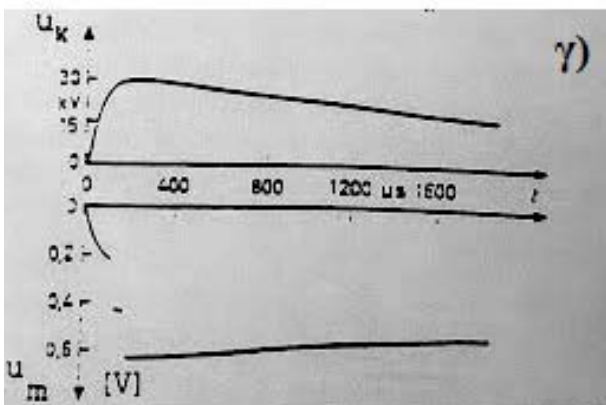


Σχήμα 5.5-1: α) άλματα δυναμικού υπό κρουστική τάση 1.2/50 μ s.

\hat{U}_k : 100kV, E: 0.8 MV/cm, C_m : 210 nF

β) πρώτο άλμα δυναμικού υπό κρουστική τάση 10/200 μ s.

\hat{U}_k : 26.6 kV, E: 0.38 MV/cm, C_m : 210 nF



γ) άλματα δυναμικού υπό κρουστική τάση 250/2500 μ s.

\hat{U}_k : 32 kV, E: 0.31 MV/cm, C_m : 1000 nF

Διαπιστώθηκε λοιπόν από τις μετρήσεις ότι:

α) μετά από μία τιμή $\hat{U}_k \approx 45$ kV, κατά την καταπόνηση με κρουστικές τάσεις 1.2/50 μ s ή 10/200 μ s, εκδηλώνεται επιφανειακός δένδριτης, στα ίχνη του οποίου παρατηρείται στην επιφάνεια του μονωτικού μόνιμη αλλαγή της μοριακής δομής (σχήμα 5.5-4). Υπό σταθερή

τιμή της τάσης ο δεινδρίτης, καθώς και η αντίστοιχη προς αυτόν αλλαγή της μοριακής δομής, έχουν μικρότερες διαστάσεις.

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

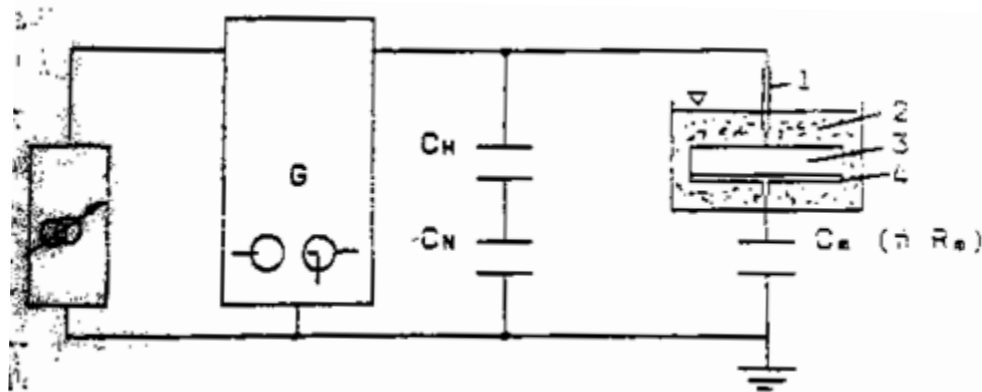


Σχήμα 5.5-2: Κρούσεις φορτίου υπό κρουστική τάση 10/200 μs .

Κλίμακα χρόνου 5 $\mu\text{s}/\text{div}$

Κλίμακα ρεύματος 1.3 A/div

\dot{U}_k : 81 kV, E: 0.86 MV/cm



Σχήμα 5.5-3: Διάταξη μέτρησης αλμάτων δυναμικού ή των κρούσεων φορτίου σε στερεά μονωτικά, υπό κρουστικές τάσης καταπόνησης.

H.T.: μετασχηματιστής υψηλής τάσης

G: γεννήτρια κρουστικών τάσεων

C_H και C_N : καταμεριστής για τη μέτρηση της κρουστικής τάσης

1: ηλεκτρόδιο ακίδα

4: ηλεκτρόδιο πλάκα

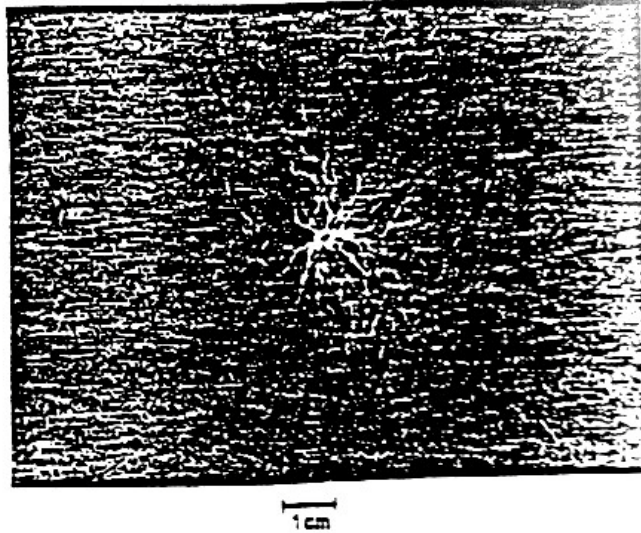
2: μονωτικό λάδι

C_m : πυκνωτής μέτρησης αλμάτων δυναμικού

3: δοκίμιο (πάχος 2mm)

R_e : αντίσταση μέτρησης κρούσεων φορτίου (ρεύματος)

Για λόγους σύγκρισης των συμπερασμάτων μεταξύ μακροσκοπικής και κβαντομηχανικής ερμηνεία των φαινομένων γήρανσης στα στερεά μονωτικά θα εξετάσουμε και τις ακόλουθες δύο περιπτώσεις.



Σχήμα 5.5-4: Εικόνα επιφανειακών διαταραχών υπό κρουστική τάση 1.2/50 μ s
 \dot{U}_k :85 kV, E: 0.8 MV/cm

5.5.1 Μακροσκοπική ερμηνεία

Αν οι μετρήσεις και οι οπτικές παρατηρήσεις ερμηνευτούν με τη μακροσκοπική θεωρία, τότε καταλήγουμε στο συμπέρασμα του πίνακα 5.2.2-2. Η εκδήλωση των αλμάτων δυναμικού (ή των κρούσεων φορτίου) σύμφωνα με τη μακροσκοπική θεωρία ερμηνεύονται από το ισοδύναμο κύκλωμα των μερικών εκκενώσεων³.

5.5.2 Κβαντομηχανική ερμηνεία

Κατά τη θεωρία αυτή μας ενδιαφέρουν τα ενεργειακά επίπεδα των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων κατά την εκδήλωση μερικών εκκενώσεων και όχι ο διαχωρισμός των τελευταίων σε εσωτερικές και εξωτερικές. Η ενέργεια των ελεύθερων 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 την σχέση³:

$$W = \frac{1}{2} \Delta u \quad (5.5.2-1)$$

($W=0.5q_e\Delta u$, 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:

$$t=R \cdot C_m \quad (5.5.2-2)$$

οπότε η τιμή της ενέργειας δίνεται από την σχέση:

$$W = \frac{(0,5\Delta u)}{(1 - e^{-t/(R \cdot C_m)})} \quad (5.5.2-3)$$

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:

$$f = \frac{1}{(1 - e^{-t/(R \cdot C_m)})} \quad (5.5.2-4)$$

δίνεται στον πίνακα 5.5.2-1, για χωρητικά τετράπολα μέτρησης, που συνήθως χρησιμοποιούνται στις μετρήσεις αυτές. Για τους πυκνωτές του πίνακα αυτού και για $R=0.5 \Omega$, ισχύει επομένως:

$$W = 0,5 \cdot f \cdot \Delta u \quad \text{σε eV} \quad (5.5.2-5)$$

όπου Δu σε V.

Cm σε nF	10	20	210	1000	1835
f	1	1	1.62	5.51	9.6

Πίνακας 5.5.2-1: Τιμές του συντελεστή f για $R=0.5 \Omega$.

Στον πίνακα 5.5.2-2 έχουν υπολογιστεί με την σχέση (5.5.2-5) οι τιμές της ενέργειας W για το πρώτο άλμα δυναμικού των παλμογραφημάτων του σχήματος 5.5-1. 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.

Μορφή τάσης	Σχήμα	W σε eV
1.2/50 μ s	α	≈ 10.50
10/200 μ s	β	≈ 1.60
250/2500 μ s	γ	≈ 0.16

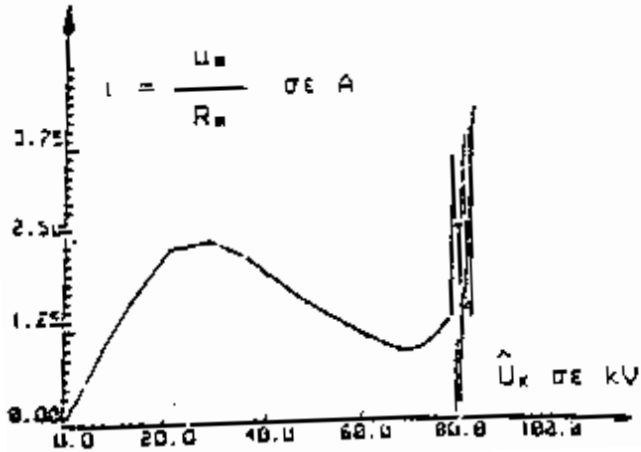
Πίνακας 5.5.2-2: Τιμές ενέργειας των ελεύθερων ηλεκτρονίων κατά το πρώτο άλμα δυναμικού.

Έτσι:

- από τις τιμές της ενέργειας κατά τον πίνακα 5.5.2-2,
- 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 5.5-1), και
- 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.

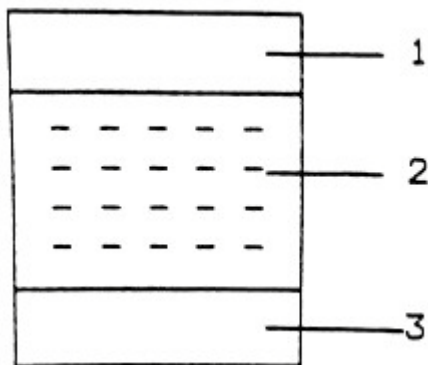
Περισσότερες πληροφορίες για το μηχανισμό γήρανσης έχουν δοθεί από παλμογραφήματα των κρούσεων φορτίου. Παρατηρεί κανείς ότι τα ελεύθερα ηλεκτρόνια συλλέγονται από την άνοδο υπό μορφή ομάδων, οι οποίες μπορούν να αποδοθούν σε ιονισμό με κρούσεις. Έτσι, όταν τα ελεύθερα ηλεκτρόνια φτάνουν στην άνοδο, εξαναγκάζονται σε επιβράδυνση αποδίδοντας το περίσσειμα της ενέργειάς τους (ανάλογα με την ενεργειακή στάθμη που είχαν) σε ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία (πίνακας 5.5.2-2). Ο δενδρίτης επομένως, που παρατηρείται, είναι το ορατό φάσμα της παραπάνω ακτινοβολίας. Μπορούμε, να υποθέσουμε, ότι αντίστοιχες δενδροειδούς μορφής εκπομπές συμβαίνουν και σε άλλες περιοχές του φάσματος της παραγόμενης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Από τα παλμογραφήματα των κρούσεων φορτίου 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, φαίνεται αναλυτικότερα στην χαρακτηριστική "ρεύματος-τάσης" του σχήματος 5.5.2-1.



Σχήμα 5.5.2-1: Χαρακτηριστική ρεύματος-τάσης κατά το παλμογράφημα των κρούσεων φορτίου του σχήματος 5.5-2.

Από τα παραπάνω μπορεί να καταλήξει κανείς στο συμπέρασμα ότι μια διαδρομή της δενδροειδούς μορφής εκπεμπόμενης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, αντιστοιχεί σε μια κρούση φορτίου, η οποία περιλαμβάνει ελεύθερα ηλεκτρόνια, που είχαν την ίδια ενεργειακή στάθμη (κατά την άφιξη 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 5.5.2-2).

Οι στάθμες διαταραχής φαίνεται ότι αντιστοιχούν στις θέσεις διαταραχής του ισοδύναμου κυκλώματος των μερικών εκκενώσεων κατά Gemant και Philipoff. Από τις στάθμες διαταραχής συμμετέχουν περισσότερο στο φαινόμενο της γήρανσης οι πλησιέστερες προς τη ζώνη αγωγιμότητας.



Σχήμα 5.5.2-2: Διάγραμμα ενεργειακών ζωνών του ανομοιογενούς στερεού μονωτικού.

- 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 (5.5.2-3).

6. Συμπεράσματα

Η εμπειρία από την πράξη και οι εργαστηριακές μετρήσεις διερεύνησης των φαινομένων γήρανσης και διάσπασης των μονωτικών υλικών, αποτελούν τις πηγές πληροφόρησης για τη βελτίωση των κατασκευών.

Οι διαδικασίες, που εφαρμόζονται για τις εργαστηριακές μετρήσεις διερεύνησης των παραπάνω φαινομένων δεν αποτελούν κάποια προδιαγεγραμμένη μεθοδολογία. Προϋποθέτουν όμως, για το αντικείμενο που ερευνάται, τη γνώση των ερευνών που έχουν γίνει, καθώς και την εμπειρία στο εργαστήριο και τις πρακτικές εφαρμογές.

6.1 Οι υπερτάσεις στο δίκτυο.

Κάθε τάση μεγαλύτερη από τη μέγιστη τιμή της ονομαστικής τάσης θεωρείται κατά τις προδιαγραφές ως υπέρταση. Οι υπερτάσεις διακρίνονται σε^{1,2,3}:

α) ατμοσφαιρικές υπερτάσεις, οι οποίες επιδρούν κυρίως σε εγκαταστάσεις εξωτερικού χώρου, όπως γραμμές μεταφοράς και εγκαταστάσεις χειρισμών και υποσταθμών. Οδεύουν μέσω των γραμμών μεταφοράς, με αποτέλεσμα να μπορούν να προκαλέσουν φαινόμενα γήρανσης και διάσπασης των μονώσεων (όπως αυτά που μελετήσαμε), τόσο στη θέση εκδήλωσής τους, όσο και σε απόσταση από τη θέση αυτή. Οι ατμοσφαιρικές υπερτάσεις δεν εξαρτώνται από την ονομαστική τάση (ή τάση λειτουργίας) και για το λόγο αυτό τα προκαλούμενα από αυτές φαινόμενα στους μονωτές μειώνονται, όσο μεγαλύτερη είναι η τάση λειτουργίας. Για παράδειγμα μια κεραυνική τάση 1MV σε μία ηλεκτροτεχνική κατασκευή του δικτύου των 20 kV έχει ως αποτέλεσμα σύμφωνα με τις προδιαγραφές μία υπέρταση τουλάχιστον 125 kV, η οποία με μεγάλη πιθανότητα θα οδηγήσει σε διάσπαση (λόγω ξένων επικαθίσεων στις μονώσεις και γενικά γήρανσης του εξοπλισμού). Δεν θα προκληθεί όμως διάσπαση με αυτή την κεραυνική τάση σε μονωτές του δικτύου των 380 kV.

β) υπερτάσεις λειτουργίας οι οποίες προκαλούνται κατά τους χειρισμούς διακοπών καθώς και κατά την εκδήλωση βραχυκυκλωμάτων μεταξύ αγωγών ή αγωγών προς τη γη. Για παράδειγμα η υπέρταση κατά τη θέση εκτός λειτουργίας μίας γραμμής υπό φορτίο μέσω ενός αυτόματου διακόπτη είναι αποτέλεσμα του ρεύματος μαγνήτισης (λόγω

αυτεπαγωγής στο δίκτυο), όσο χρόνο η μαγνητική ενέργεια αποθηκεύεται ως χωρητικότητα του δικτύου. Η αντιμετώπιση του ρεύματος αυτού είναι ένας βασικός λόγος χρησιμοποίησης των διακοπών με ισχύ διακοπής, αντί των αποζευκτών.

6.2 Συμπεράσματα για την περαιτέρω μελέτη του ιονισμού με κρούσεις.

Από όσα αναφέρθηκαν στις προηγούμενες παραγράφους για τον ιονισμό των ηλεκτρομονωτικών αερίων, καταλήγει κανείς περιληπτικά στα παρακάτω^{3,7}:

α) ο ιονισμός είναι ένας μηχανισμός παραγωγής ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων.

β) η ενέργεια εξόδου των μετάλλων είναι περίπου $t\%$ της ενέργειας ιονισμού των ηλεκτρομονωτικών αερίων.

γ) διακρίνει κανείς τις περιπτώσεις ιονισμού:

- τον ιονισμό με κρούσεις
- την θερμοεκπομπή
- τον φωτοϊονισμό

δ) τα ηλεκτροθετικά αέρια (όπως ο αέρας) διαθέτουν αρχικούς ηλεκτρικούς φορείς για τον ιονισμό με κρούσεις.

ε) τα ηλεκτραρνητικά αέρια (όπως το SF_6) ενσωματώνουν τους παραπάνω αρχικούς φορείς

στ) για να συμβεί ιονισμός με κρούσεις πρέπει να ισχύει η συνθήκη ιονισμού $E \cdot \lambda \geq U_i$.

ζ) ο συντελεστής ιονισμού δίνει τα ζεύγη των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων ανά cm (ή mm), που παράγονται κατά τον ιονισμό με κρούσεις.

η) 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.

θ) η διάσπαση συμβαίνει συνήθως σε τιμές της τάσης $U \geq U_z$.

ια) η διάσπαση των αερίων είναι μία τελευταία φάση του ιονισμού.

ιβ) η αποδιέγερση και τα φαινόμενα ιονισμού σχετίζονται με εκπομπή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας.

7. Συμβολή

Η λεπτομερής και εις βάθος κατανόηση των πολύπλοκων μηχανισμών που λαμβάνουν χώρα σε ηλεκτρομονωτικά υλικά, αποτελεί ένα από τα πιο σημαντικά τμήματα της επιστήμης των ηλεκτρονικών υλικών, και μεγάλο μέρος της επιστημονικής κοινότητας έχει στραφεί στη μελέτη αυτών των υλικών. Τα φαινόμενα της διηλεκτρικής κατάρρευσης ή διηλεκτρικής διάσπασης, λόγω κυρίως της στοχαστικής φύσης που τα διέπουν, αποτελούν τη συνηθέστερη αιτία αστοχίας αυτών των υλικών, και έτσι καθίσταται επιβεβλημένη η μελέτη αυτών των φαινομένων. Η συμβολή της παρούσας εργασίας σε αυτή την κατεύθυνση, επιτυγχάνεται μέσω αφενός της λεπτομερής μικροσκοπικής καταγραφής όλων των αιτιών που μπορούν να δημιουργήσουν υπερτάσεις στο δίκτυο διανομής και αφετέρου στην αναλυτική επεξεργασία των βασικών εξισώσεων που διέπουν τα φαινόμενα της διηλεκτρικής κατάρρευσης, με στόχο την εξαγωγή των βασικών παραμέτρων που επηρεάζουν τη διηλεκτρική διάσπαση. Έτσι, καθώς οι βυθίσεις τάσεις και η ανάπτυξη υπερτάσεων είναι αναπόσπαστο κομμάτι ενός δικτύου διανομής, η κατασκευή ηλεκτρομονωτών με καλύτερες διηλεκτρικές ιδιότητες μπορούν να θωρακίσουν τους ηλεκτρομονωτές του υπάρχοντος δικτύου διανομής έναντι των παραπάνω φαινομένων.

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελεί μια προσπάθεια μελέτης των φαινομένων διάσπασης στερεών μονωτικών υλικών και προσπαθεί να δώσει μια σαφή εικόνα των διαδικασιών που λαμβάνουν χώρα μέχρι την κατάρρευση της μόνωσης. Πέρα από την θεωρητική προσέγγιση γίνεται και μια προσπάθεια παρακολούθησης του φαινομένου μέσα από βιβλιογραφικά πειράματα που αφορούν την διάσπαση ηλεκτρομονωτικών υλικών. Οι μηχανισμοί στους οποίους υπόκειται ένα μονωτικό υλικό μέχρι την απώλεια των μονωτικών ιδιοτήτων είναι διάφοροι, γι' αυτόν τον λόγο γίνεται και μια προσπάθεια μελέτης τους από διάφορες σκοπιές. Ο ρόλος των μερικών εκκενώσεων είναι συνοδευτικός - συμπληρωματικός των φαινομένων των ηλεκτρικών δενδριτών. Τα δυο φαινόμενα υπάρχουν αλληλοεξαρτώμενα σε τέτοιο βαθμό που θα μπορούσε να καταγραφεί ότι οποτεδήποτε παρατηρείται ηλεκτρικός δενδρίτης έχουν προηγηθεί εκκενώσεις. Το αντίθετο δε συμβαίνει απαραίτητα. Οι ηλεκτρικοί δενδρίτες αποτελούν μια πολύ σημαντική αιτία υποβάθμισης της μονωτικής ικανότητας των διηλεκτρικών και από πολλούς ερευνητές θεωρούνται ως πρόδρομο φαινόμενο της ολικής (τελικής) διηλεκτρικής διασπάσεως. Επίσης οι μερικές εκκενώσεις στο εσωτερικό των καναλιών δημιουργούν τις κατάλληλες

προϋποθέσεις για την ταυτόχρονη μελέτη των διαφόρων σταδίων διάδοσης του δένδριτη με το πλήθος των παλμών αλλά και με τη φασική περιοχή που αυτές συμβαίνουν. Επιπρόσθετα, ο ρόλος των διαφόρων σωματιδίων στο εσωτερικό των υλικών, αντιμετωπίζεται από τη διεθνή βιβλιογραφία ως παράγοντας υποβάθμισης της μόνωσης. Περιγράφονται και υπολογίζονται διάφορα μεγέθη, οι τιμές των οποίων τροποποιούνται λόγω της παρουσίας σωματιδίων και σχισμών αέρος. Η παρούσα εργασία προσπαθεί να ρίξει περισσότερο φως στις αιτίες αυτής της συμπεριφοράς.

Έτσι, παρουσιάζονται εκτενώς όλες οι παράμετροι και τα μεγέθη που επηρεάζουν τη διάδοση των ηλεκτρικών δένδριτων. Αναφέρονται η διάσπαση σε στερεά και σε αέρια διηλεκτρικά με επισήμανση των κυριότερων σημείων των φαινομένων. Στη συνέχεια καταγράφονται τα βασικότερα σημεία από την θεωρία των μερικών εκκενώσεων με ταυτόχρονη παρουσίαση των πιο διαδεδομένων μοντέλων. Ακολούθως, περιγράφεται η σχέση μεταξύ μερικών εκκενώσεων και των διαφόρων σταδίων διάδοσης του δένδριτη, όπως αυτή έχει αποδειχτεί από ερευνητές στις αρχές της δεκαετίας του '80, αλλά και στα μέσα της δεκαετίας του '90. Επίσης παρουσιάζεται ένα μμοντέλο που θεμελιώνεται από φυσική και μαθηματική σκοπιά όσο το δυνατόν καλύτερα. Εισάγεται ο παράγοντας ανομοιογένειας, ο οποίος συνδέεται με τις επιτόπιες διακυμάνσεις της διηλεκτρικής σταθεράς ενώ ταυτόχρονα ενισχύεται θεωρητικά και ηλεκτροστατικά ότι σε τόσο μικρές αποστάσεις (π.χ. της τάξης των nm), το τοπικό πεδίο έχει σαφώς διαφορετική τιμή από το εξωτερικό μέσο ηλεκτρικό πεδίο.

Η δυναμική συμπεριφορά των παραπάνω φαινομένων και η ύπαρξη πολλών διαφορετικών παραμέτρων που επηρεάζουν τα φαινόμενα της διηλεκτρικής κατάρρευσης, καθιστά τη μελέτη αυτή αρκετά πολύπλοκη. Ωστόσο η εξακρίβωση του μη ντετερμινιστικού χαρακτήρα των φαινομένων διηλεκτρικής διάσπασης και η συνεχής διεξαγωγή εργαστηριακών πειραμάτων συνεπικουρούμενα από θεωρητικά μοντέλα και ολοκληρωμένα πακέτα προσομοίωσης, αναμένεται να ξεδιαλύνει ακόμα περισσότερο το τοπίο σε αυτό το εξαιρετικής σημασίας κομμάτι της επιστήμης των υλικών και να συντελέσει στη δημιουργία καινοτόμων μονωτήρων.

8. Βιβλιογραφία

- [1] Ε. Γιαννελάκη: Υπερτάσεις σε Μ/Σ διανομής 20/0.4 kV και στα διασυνδεδεμένα φορτία λόγω κεραυνικών πληγμάτων, Διπλωματική εργασία, Θεσσαλονίκη 2010.
- [2] Ι. Χαριτάκης: Μελέτη γραμμών μεταφοράς υψηλής τάσης σύμφωνα με το πρότυπο IEC-60826, Πτυχιακή εργασία, Κρήτη 2010.
- [3] Π. Δ. Μπούρκας, Κ. Γ. Καραγιαννόπουλος: Βιομηχανικές ηλεκτρικές διατάξεις και υλικά, Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα 2003.
- [4] Ι. Α. Σταθόπουλος: Υψηλές Τάσεις Ι, Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα.
- [5] Π. Δ. Μπούρκας : Εφαρμογές κτιριακών και βιομηχανικών εγκαταστάσεων, Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα 1998.
- [6] Π. Ν. Μικρόπουλος: Συστήματα αντικεραυνικής προστασίας, Πανεπιστημιακές παραδόσεις ΑΠΘ, Θεσσαλονίκη 2005.
- [7] Κ. Γ. Χαλεβίδης: Διηλεκτρικά και θερμικά φαινόμενα σε γραμμές μεταφοράς και διανομής, Διδακτορική διατριβή, Αθήνα 2012.
- [8] Γ. Π. Δραγουμάνος: Κρούσεις ρεύματος σε δοκίμια Pertinax εντός μονωτικού ελαίου αναλόγως την τάση έναρξης των μερικών εκκενώσεων υπό κρουστικές τάσεις 1.2/100 μs, Διπλωματική εργασία, Αθήνα 2011.
- [9] Σ. Λ. Φίλης: Διερεύνηση της έναρξης και της περάτωσης των μερικών εκκενώσεων σε πολυμερή στερεά μονωτικά υλικά υπό κεραυνικές τάσεις καταπόνησης 1.2/50 μs, Διπλωματική εργασία, Αθήνα 2010.
- [10] Β. Θ. Κονταργύρη: Συμβολή στη μελέτη της ηλεκτρικής συμπεριφοράς ρυπασμένων μονωτήρων, Διδακτορική διατριβή, Αθήνα 2007.