



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΚΑΙ
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ

Μελέτη Υποσταθμού του δικτύου διανομής (20kV/400V)

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Κοσμάς Κ. Γιαλλουράκης

Επιβλέπων : Κωνσταντίνος Καραγιαννόπουλος
Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα, Μάιος 2015



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΚΑΙ
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ

Μελέτη Υποσταθμού του δικτύου διανομής (20kV/400V)

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Κοσμάς Κ. Γιαλλουράκης

Επιβλέπων : Κωνσταντίνος Καραγιαννόπουλος
Καθηγητής Ε.Μ.Π

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 7^η Μαΐου 2015.

.....
Κωνσταντίνος
Καραγιαννόπουλος
Καθηγητής Ε.Μ.Π

.....
Περικλής Μπούρκας
Ομότιμος Καθηγητής

.....
Αικατερίνη Πολυκράτη
Ε.ΔΙ.Π

Αθήνα, Μάιος 2015

.....
Κοσμάς Κ. Γιαλλουράκης

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

Copyright © Κοσμάς Γιαλλουράκης, 2015

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

Περιεχόμενα

ΠΡΟΛΟΓΟΣ-Ευχαριστίες.....	7
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	8
ABSTRACT.....	9
Εισαγωγή.....	10
1. Γραμμές Διανομής.....	10
1.2 Το εναέριο δίκτυο διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας.....	11
1.3 Αγωγοί και καλώδια χαμηλής τάσης.....	13
1.3.1 Αγωγοί από Χαλκό.....	14
1.3.2 Αγωγοί από Αλουμίνιο.....	14
1.3.3 Αγωγοί από Αλουμίνιο - Χάλυβα (ACSR).....	15
1.4 Ασφάλειες.....	17
1.4.1 Ασφάλειες εσωτερικών ηλεκτρικών εγκαταστάσεων χαμηλής τάσης.....	17
1.4.2 Ασφάλειες τήξης.....	18
1.4.2.1 Ασφάλειες τύπου D, Diazed (μεγάλες βιδωτές).....	19
1.4.2.2 Ασφάλειες τύπου DO, Neozed (μικρές βιδωτές).....	19
1.4.2.3 Ασφάλειες τύπου NH, μαχαιρωτές, (High Rupture Capacity) HRC-Fuses,(High Breaking Capacity) HBC-Fuses.....	20
1.4.2.4 Μικροασφάλειες τύπου G, σε γυάλινο κύλινδρο.....	21
1.4.2.5 Ασφάλειες τύπου μικροαυτόματου.....	22
1.5 Ασφάλειες καταναλωτών Μέσης Τάσης.....	24
2. Μηχανική Αντοχή.....	27
2.1 Μηχανική συμπεριφορά- επιφόρτιση εναέριων αγωγών διανομής.....	27
2.2 Παράδειγμα Μηχανικής Αντοχής.....	29
3. Δηλεκτρική αντοχη.....	30
3.1 Απώλεια μονωτικής ικανότητας των μονωτήρων.....	30
4. Θερμική Αντοχή.....	34
4.1 Θερμική καταπόνηση των αγωγών κατά το βραχυκύκλωμα.....	34
4.2 Αναλυση Βραχυκυκλώματος.....	35
4.3 Θερμοκρασία των αγωγών υπό ρεύμα Id.....	37
5. Μαθηματική επεξεργασία της συνθήκης ουδετέρωσης σε δίκτυα X.T της Δ.Ε.Η.....	38
5.1 Μεγιστα μήκη γραμμών υπό τάση 230V ± 10 %.....	43
Παράρτημα I.....	54
1. Φαινόμενα ιονισμού επί των μονωτήρων μέσης τάσης των μετασχηματιστών διανομής.....	54
1.1. Οι στεμματοειδείς εκκενώσεις (ή εκκενώσεις Korona).....	55
2.Τα φαινόμενα γήρανσης και διάσπασης στο μονωτικό λάδι.....	55
2.1. Μέσα ελέγχου της μονωτικής ικανότητας του λαδιού κατά τη λειτουργία των μετασχηματιστών.....	57
3. Φαινόμενα προ και κατά τη διάσπαση στερεών ηλεκτρομονωτικών υλικών.....	59
3.1. Η μακροσκοπική θεωρία των φαινομένων προ και κατά τη διάτρηση των στερεών μονωτικών.....	60

3.1.1. Η θερμική διάτρηση.....	60
3.1.2. Η ηλεκτρική διάτρηση	63
3.1.3 Η διάσπαση λόγω μερικών εκκενώσεων (ηλεκτροχημική διάσπαση ή γήρανση της μόνωσης).....	67
3.1.4. Η θερμοχημική διάτρηση.....	74
3.2. Η Κβαντική θεωρία των φαινομένων προ και κατά τη διάτρηση των στερεών μονωτικών.....	74
3.3 Ένας συνδυασμός της μακροσκοπικής και της κβαντομηχανικής θεωρίας για τα φαινόμενα προ και κατά τη διάσπαση στερεών μονωτικών των πρακτικών εφαρμογών.....	74
6. Βιβλιογραφία	60

ΠΡΟΛΟΓΟΣ-Ευχαριστίες

Η εργασία αυτή πραγματοποιήθηκε στη Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, κατά το ακαδημαϊκό έτος 2013-2014, στα πλαίσια εκπαιδευτικών και ερευνητικών δραστηριοτήτων.

Η εκπόνηση της διπλωματικής αυτής εργασίας έγινε με σκοπό την καταγραφή και δημιουργία πινάκων με τις τιμές των ασφαλειών σε πινακες χαμηλής τάσης του δικτύου διανομής (400V/230V) για μετασχηματιστες 15:200 KVA. Υπολογίσαμε τα μέγιστα μήκη των γραμμών που κάθε ασφάλεια ορίζει σαν όριο της, υπό τάση 230V αλλά και με αποκλιση της τάξης του $\pm 10\%$.

Η βοήθεια του καθηγητή Ε.Μ.Π. κ. Περικλή Μπούρκα σε όλα τα στάδια της προετοιμασίας της ήταν συνεχής και αμέριστη και τον ευχαριστώ ιδιαίτερος για την συμβολή του στην συγγραφή του τελευταίου και σημαντικότερου κειμένου μου ως προπτυχιακός φοιτητής στο Ε.Μ.Π.

Ευχαριστώ επίσης τον καθηγητή μου κ. Καραγιαννόπουλο που μου συμπαραστάθηκε στην πραγματοποίηση την εργασίας αυτής.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για όλη την αγάπη και την συμμετοχή τους στην ολοκλήρωση των σπουδών μου που αποτελούσε όνειρο ζωής.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζεται η συνθήκη ουδετέρωσης σε δίκτυα διανομής χαμηλής τάσης (ΧΤ), τα χαρακτηριστικά μεγέθη, (όπως ισχύς του Μ/Σ, χρησιμοποιούμενες ασφάλειες, διατομές και μήκη των εναέριων γραμμών μεταφοράς), δίνονται σε σχετικούς πίνακες της ΔΕΗ.

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια εκτενής και γενική εισαγωγή για τις γραμμές διανομής και πιο συγκεκριμένα για το εναέριο δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Επίσης, αναλύονται τα χαρακτηριστικά των αγωγών, των καλωδίων της χαμηλής τάσης αλλά και των ασφαλειών, οι οποίες χρησιμοποιούνται ως μέσα προστασίας των εγκαταστάσεων, τόσο στη ΧΤ όσο και στη μέση τάση (ΜΤ). Συγκεκριμένα, παρουσιάζονται τα είδη των ασφαλειών, τα χαρακτηριστικά λειτουργίας τους, οι εφαρμογές τους καθώς επίσης και η μορφή τους, με τη βοήθεια των σχημάτων που δίνονται.

Στο επόμενο δυο κεφάλαια, γίνεται λόγος για την μηχανική και την διηλεκτρική αντοχή των αγωγών παρουσιάζοντας κάποια παραδείγματα.

Στο τέταρτο και πέμπτο κεφάλαιο, αναφέρεται με λεπτομέρειες η θερμική αντοχή των γραμμών χαμηλής τάσης, η συνθήκη ουδετέρωσης καθώς επίσης και το ρεύμα βραχυκύκλωσης. Τέλος, γίνεται η μαθηματική επεξεργασία της συνθήκης ουδετέρωσης, βάσει των πληροφοριών που αντλήθηκαν από τους σχετικούς πίνακες της ΔΕΗ.

Τέλος, παραθέτεται παράρτημα όπου γίνεται λόγος για τα φαινόμενα γήρανσης, διάσπασης και ιονισμού στους μετασχηματιστές διανομής, συγκεκριμένα για μονωτικό λάδι και μονωτικά στερεά. Αναφέρεται, η μακροσκοπική όπως επίσης και η κβαντική θεωρία των παραπάνω φαινομένων των στερεών μονωτικών.

Λέξεις κλειδιά : συνθήκη ουδετέρωσης, ασφάλειες, μήκη γραμμών, χαμηλή τάση

ABSTRACT

This thesis, investigates the neutralization condition in Low Voltage distribution networks. The features, such as the transformer's power, the fuses used, the bisections and lengths of the electric power air lines, are used according to the tables, released by the National Electric Company of Greece.

The first chapter includes an extensive and general introduction of the distribution lines and more specifically, of the overhead electric power distribution network. Furthermore, the characteristics of the conductors and the Low-Voltage cables are analyzed, in addition to the characteristics of the fuses, which are used as protection elements for the installations, both at Low Voltage as at Average Voltage. Precisely, the types of fuses, their function characteristics, their applications, as well as their forms are presented through the illustrations that are included.

The next two chapters refer to the mechanical and dielectric strength of the conductors, with a number of examples presented.

In the fourth and fifth chapter, a detailed reference of the thermal strength of the Low-Voltage lines, of the neutralization condition, as well as of the short-circuit current is made. The mathematic process of the neutralization condition, according to the information derived from the tables, provided by the National Electric Company of Greece, is embodied.

Finally, an appendix is given, where the aging, breakdown and ionizing phenomena in distribution transformers are discussed and more specifically, for transformer oil and solid insulating materials. A reference is made on the macroscopic, as well as on the quantum theory of the aforementioned phenomena in solid insulating materials.

Key Words : *neutralization condition, fuses, lengths of the electric power air lines, low voltage*

Εισαγωγή

1. Γραμμές Διανομής

Με τον όρο διανομή ηλεκτρικής ενέργειας εννοούνται οι εγκαταστάσεις που είναι απαραίτητες για την τροφοδοσία των καταναλωτών από τους υποσταθμούς μεταφοράς. Η διανομή ηλεκτρικής ενέργειας περιλαμβάνει τις γραμμές διανομής που ξεκινούν από τους υποσταθμούς μεταφοράς και καταλήγουν στους υποσταθμούς διανομής και είναι γνωστές σαν γραμμές μέσης τάσης, τους υποσταθμούς διανομής όπου μετασχηματίζεται η μέση τάση στην χαμηλή τάση και τέλος τις γραμμές διανομής χαμηλής τάσης που ξεκινούν από τους υποσταθμούς διανομής και καταλήγουν στους μετρητές ηλεκτρικής ενέργειας των καταναλωτών.

Η διανομή ηλεκτρικής ενέργειας είναι τυποποιημένη για την Ελλάδα και την Ευρώπη και γίνεται στη χαμηλή τάση με εναλλασσόμενο ρεύμα 50 Hz και τάση 230/400V. Οι γραμμές διανομής μέσης τάσης έχουν μόνο τρεις αγωγούς και λειτουργούν κυρίως με τάση πολική 20 KV αν και υπάρχουν ακόμα και άλλες τιμές τάσης. Οι γραμμές διανομής χαμηλής τάσης εκτός των τριών αγωγών φάσεων περιλαμβάνουν και ουδέτερο αγωγό και έναν ακόμη αγωγό για τον δημοτικό φωτισμό.[10]

Οι υποσταθμοί διανομής μετασχηματίζουν την μέση σε χαμηλή τάση, η παρεχόμενη ισχύς είναι μικρή και εγκαθίστανται μέσα σε πόλεις σε σημεία που εξυπηρετούν καλύτερα τους καταναλωτές. Σ' αυτούς καταλήγουν οι γραμμές διανομής μέσης τάσης και ακόλουθα την μετατρέπουν σε χαμηλή τάση. Από τους υποσταθμούς διανομής αναχωρούν μέσω ασφαλειοκιβωτίων οι γραμμές χαμηλής τάσης που καταλήγουν στους μετρητές ηλεκτρικής ενέργειας των καταναλωτών. Οι μετασχηματιστές διανομής χαρακτηρίζονται από την ισχύ τους και διακρίνονται ανάλογα με τον τόπο εγκατάστασης σε εναέριους και υπόγειους. Η θέση εγκατάστασης καθορίζεται από τις θέσεις και το μέγεθος των φορτίων που θα εξυπηρετηθούν.[10]

Οι Γραμμές διανομής χαμηλής τάσης μεταφέρουν ενέργεια από τον υποσταθμό διανομής στον καταναλωτή και μπορεί να είναι τόσο εναέριες όσο και υπόγειες.

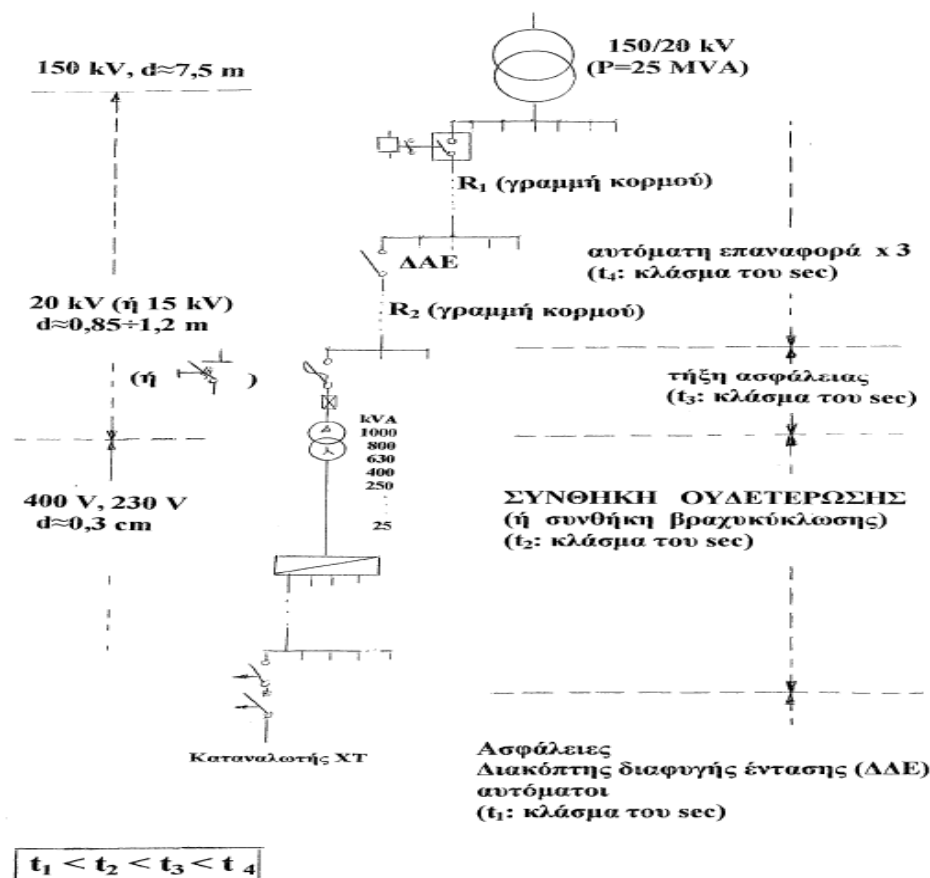
Στις εναέριες γραμμές χαμηλής τάσης χρησιμοποιούνται κυρίως γυμνοί αγωγοί αλουμινίου και συνεστραμένα καλώδια. Αποτελούνται από τρεις φάσεις και ουδέτερο. Ο πέμπτος αγωγός που φαίνεται να υπάρχει σε πολλές περιπτώσεις είναι ο αγωγός δημοτικού φωτισμού. Οι στύλοι είναι ξύλινοι ή τσιμεντένιοι με μικρότερες διαστάσεις εκείνων των γραμμών μέσης τάσης.

Οι μονωτήρες των γραμμών χαμηλής τάσης είναι μικρότεροι εκείνων της μέσης τάσης και κατασκευάζονται από πορσελάνη. Η προστασία στο ασφαλειοκιβώτιο γίνεται με ασφάλειες που όταν καίγεται το νήμα τους λόγω σφάλματος απομονώνουν τη γραμμή.

Οι υπόγειες γραμμές διανομής κατασκευάζονται μέσα στις πόλεις για

περισσότερη ασφάλεια και για λόγους αισθητικής. Αποτελούνται από υπόγεια καλώδια με μικρότερη διατομή εκείνων της μέσης τάσης, τοποθετούνται σε ειδικά αυλάκια και έχουν όλα τα εξαρτήματα των υπογείων καλωδίων της μέσης τάσης. [10]

1.2 Το εναέριο δίκτυο διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας



Σχήμα 1.2-1 : Απλοποιημένο παράδειγμα διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας [1]

Οι εναέριες γραμμές συστημάτων μεταφοράς υψηλής τάσης κατασκευάζονται από γυμνούς αγωγούς που αποτελούνται από κλώνους αλουμινίου με χαλύβδινη ψυχή (κλώνους χάλυβα). Οι αγωγοί αυτοί αναρτώνται σε πυλώνες μέσω αλυσίδων μονωτήρων από πορσελάνη ή γυαλί και καταλήγουν στο κέντρο διανομής υψηλής τάσης (ΚΥΤ), από όπου θα γίνει η διανομή της μέσης τάσης.

Στο σχήμα 1.2-1, δίνεται απλοποιημένα ένα παράδειγμα διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας. Σύμφωνα με αυτό, από το μετασχηματιστή υψηλής τάσης (150kV/20kV, 25MVA) του Κέντρου Υψηλής Τάσης (ΚΥΤ) αναχωρούν μέσω αυτόματων διακοπών ελαίου (ΑΔΕ) διάφορες γραμμές μέσης τάσης (20 kV), που η καθεμία αφορά τη διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας σε μία ευρύτερη περιοχή. Οι γραμμές αυτές ονομάζονται «γραμμές κορμού» και συμβολίζονται στα σχέδια με το γράμμα R και ένα αριθμό (π.χ R1).

Καθεμία από τις παραπάνω γραμμές διακλαδίζεται σε ορισμένες γραμμές, που αφορούν την ηλεκτροδότηση (τμημάτων της ευρύτερης περιοχής) μέσω διακοπών αυτόματης επαναφοράς (ΔΑΕ), οι οποίες ονομάζονται επίσης γραμμές κορμού (π.χ R2)

Όταν συμβεί ένα σφάλμα σε μία γραμμή κορμού, τότε ο διακόπτης προστασίας (ΑΔΕ ή ο ΔΑΕ) θα διακόψει αυτομάτως την ηλεκτροδότηση της συγκεκριμένης γραμμής και θα τεθεί αμέσως αυτομάτως στη θέση εντός για να ηλεκτροδοτηθεί η γραμμή και αν υπάρχει ακόμα το σφάλμα θα γίνει και πάλι αυτόματη διακοπή και ακολούθως αυτόματη εκ νέου ηλεκτροδότηση. Αν και κατά την δεύτερη αυτή αυτόματη προσπάθεια του διακόπτη συνεχίζει να υπάρχει το σφάλμα, θα γίνει και μία τρίτη αυτόματη «διακοπή-εκ νέου ηλεκτροδότηση» και μόνο αν εξακολουθεί να υπάρχει το σφάλμα θα συμβεί πλέον οριστική διακοπή ρεύματος της εν λόγω γραμμής κορμού. Είναι προφανές ότι η προαναφερθείσα σε τρεις κύκλους λειτουργία των ΑΔΕ και των ΔΑΕ αποσκοπεί, σε περιπτώσεις εμφάνισης παροδικών σφαλμάτων, τόσο στην προσπάθεια για απρόσκοπτη ηλεκτροδότηση μίας μεγάλης περιοχής, όσο και στην αποφυγή άσκοπων μετακινήσεων συνεργείων. Σημειώνεται ότι η διακοπή της ηλεκτροδότησης σε κάθε κύκλο λειτουργίας των ΑΔΕ και των ΔΑΕ συμβαίνει πάντοτε σε κλάσμα του δευτερολέπτου (σχεδόν ακαριαία διακοπή, π.χ. 0,15s , 0,35s , κλπ.), που στην πράξη σημαίνει πως δεν υπάρχει αρκετός διαθέσιμος χρόνος για την εκδήλωση αξιόλογων θερμικών φαινομένων (δεν προκαλείται υπερθέρμανση της γραμμής πάνω από τα ανεκτά όρια).

Όπως φαίνεται στο σχήμα 1.2-1, οι γραμμές κορμού μέσω των ΔΑΕ διακλαδίζονται με τη σειρά τους σε διάφορες γραμμές που καταλήγουν σε υποσταθμούς υποβιβασμού της μέσης τάσης σε χαμηλή τάση (20kV/400V, 230V). Οι υποσταθμοί αυτοί διακρίνονται σε υπαίθριους επί στύλων ισχύος μέχρι 400kVA και σε εσωτερικού χώρου (συνήθως σε υπόγεια πολυκατοικιών) μεγαλύτερης ισχύος από 400kVA. Στους υπαίθριους υποσταθμούς η γραμμή μέσης τάσης ηλεκτροδοτεί τον μετασχηματιστή μέσω μονοπολικών ασφαλειοαποζευκτών ή τριπολικών αποζευκτών (βλ. σχήμα 1.2-1), ενώ στους υποσταθμούς εσωτερικού χώρου η ηλεκτροδότηση του μετασχηματιστή γίνεται μέσω συγκροτήματος πινάκων. Σημειώνεται ότι για λόγους διασύνδεσης ή απομόνωσης γραμμών μέσης τάσης (σε περιπτώσεις π.χ. πυρκαγιών, εργασιών συντήρησης και εργασιών αποκατάστασης βλαβών) υπάρχουν στις γραμμές μέσης τάσης μονοπολικοί ασφαλειοαποζεύκτες και τριπολικοί αποζεύκτες μη εντασσόμενοι σε υπαίθριους υποσταθμούς.

Η παροχή χαμηλής τάσης (400V, 230V) σε καταναλωτές χαμηλής τάσης γίνεται μέσω γραμμών χαμηλής τάσης (από γυμνούς αγωγούς ή συνεστραμμένα καλώδια) που ξεκινούν από τον πίνακα χαμηλής τάσης (ασφαλειοκιβώτιο) του υποσταθμού (σχήμα 1.2-1). Τα δύο ανώτερα ήδη γραμμών είναι ισοδύναμα.

Η παροχή μέσης τάσης σε καταναλωτές αφορά απορροφημένες εντάσεις ρεύματος άνω των 200Α ανά φάση, όπως συμβαίνει συνήθως σε βιομηχανίες, νοσοκομεία άνω των 100 κλινών, μεγάλα ξενοδοχεία, κτήρια ΑΕΙ, κλπ..

Στη μέση τάση και στη χαμηλή τάση χρησιμοποιούνται ξύλινοι στύλοι και μερικές φορές στις πόλεις, τσιμεντένιοι (και σπανιότερα μεταλλικοί). Τα υλικά και η εγκατάσταση κάθε ξύλινου στύλου είναι τυποποιημένα.

Οι γυμνοί αγωγοί στα εναέρια δίκτυα χαμηλής τάσης είναι από κλώνους αλουμινίου (ή χαλκού). Στη μέση τάση χρησιμοποιούνται στα εναέρια δίκτυα γυμνοί αγωγοί ACSR, δηλαδή αγωγοί που αποτελούνται από κλώνους αλουμινίου με χαλύβδινη ψυχή (κλώνους χάλυβα).

Η τάση του δικτύου είναι εναλλασσόμενη, ημιτονοειδούς μορφής και η ενεργός τιμή της κυματομορφής θεμελιώδους συχνότητας 50Hz της τάσης αναφοράς καλείται ονομαστική τάση του δικτύου. Κάθε τμήμα του δικτύου σχεδιάζεται ώστε να λειτουργεί υπό ορισμένη ονομαστική τάση, και μπορεί να συνδέεται με διαφορετικά τμήματα του δικτύου που σχεδιάζονται να λειτουργούν υπό διαφορετική ονομαστική τάση μέσω μετασηματιστών. Το δίκτυο χωρίζεται σε 3 μέρη σύμφωνα με το επίπεδο τάσης. Η ονομαστική τάση για το επίπεδο χαμηλής τάσης (XT) σε δίκτυο που αποτελείται από 4-κατακόρυφα διατεταγμένους γυμνούς αγωγούς είναι 230V μεταξύ φάσεως και ουδετέρου και καλείται φασική τάση, και 400 V μεταξύ φάσεων και καλείται πολική τάση. Η ονομαστική τάση για το επίπεδο μέσης τάσης (MT) σε δίκτυο που αποτελείται από τρεις οριζόντια διατεταγμένους γυμνούς αγωγούς είναι 20 kV (ή 15 kV). Η μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας από τα εργοστάσια παραγωγής προς τα κέντρα διανομής υψηλής τάσης (KYT) γίνεται όπως προαναφέρθηκε με τις γραμμές υψηλής 66kV, 150kV και 400kV.

Η συχνότητα του δικτύου αναφέρεται στον ρυθμό επανάληψης του θεμελιώδους κύματος της τάσης ανά δευτερόλεπτο, και είναι ενιαία και ίση με τη συχνότητα λειτουργίας του συστήματος για ολόκληρο το διασυνδεδεμένο δίκτυο και ενιαία για έκαστο απομονωμένο ηλεκτρικό δίκτυο μη διασυνδεδεμένου νησιού. Η ονομαστική τιμή της συχνότητας του δικτύου είναι ίση με 50 Hz.

1.3 Αγωγοί και καλώδια χαμηλής τάσης

Οι αγωγοί πρέπει να αντέχουν στη μηχανική και στη θερμική καταπόνηση και στην περίπτωση της μέσης τάσης, να μην προκαλούν απώλειες Corona (δηλαδή μερικές εκκενώσεις του αέρα περί τον αγωγό). Ως αγωγοί χρησιμοποιούνται πολύκλινα συρματόσχοινα, για λόγους ευκαμψίας. Οι αγωγοί που χρησιμοποιούνται είναι χωρίς μόνωση και κατασκευάζονται από αλουμίνιο (Al) ή αλουμίνιο-χάλυβα (ACSR) και από χαλκό (Cu). Σε ειδικές περιπτώσεις χρησιμοποιούνται αγωγοί από άλλα υλικά και κράματα. Στη **χαμηλή τάση** εκσυγχρονίζονται πλέον τα δίκτυα μέσω συνεστραμμένων καλωδίων. Τα κύρια υλικά κατασκευής αγωγών είναι τα παρακάτω:

1) **Χαλκός εφελκυσμένος εν ψυχρώ.**

2) **Αλουμίνιο**, το οποίο είναι ή καθαρό αλουμίνιο 99,9% και λέγεται αλουμίνιο ηλεκτροτεχνίας E-Al ή το κράμα αλουμινίου Aldrey με περίπου εκατοστιαία σύνθεση: 0,3-0,5 Mg, 0,4-0,7 Si, 0,3 Fe και το υπόλοιπο αλουμίνιο.

3) **Σύνθετοι αγωγοί αλουμινίου-χάλυβα Al/St** . Έχουν και την ονομασία Aluminum Coated Steel Reinforced Conductors ή **ACSR** αγωγοί .

Στα εναέρια δίκτυα δεν χρησιμοποιούνται μονόκλωνοι αγωγοί , γιατί έχουν πολύ μικρότερη μηχανική αντοχή από τους πολύκλωνους . Επίσης , οι μονόκλωνοι είναι δύσκαμπτοι και η διατομή τους είναι μέχρι 16mm. Οι αγωγοί χαλκού και αλουμινίου αποτελούνται από κλώνους της ίδιας διατομής ανά διατομή αγωγού και παίρνουν τη μορφή των συρματόσχοινων. Οι αριθμοί των κλώνων είναι κυρίως 7 , 19 , 37 , 61 κλπ

1.3.1 Αγωγοί από Χαλκό

Ο χαλκός έχει μεγάλη ηλεκτρική αγωγιμότητα και καλή μηχανική αντοχή . Η αγωγιμότητα του μειώνεται όταν έχει ξένες προσμίξεις. Επίσης μειώνεται λίγο η αγωγιμότητά του όταν κατεργαστεί εν ψυχρώ . Αυτό όμως του δίνει μεγαλύτερη μηχανική αντοχή . Ένα άλλο πλεονέκτημά του είναι ότι δεν διαβρώνεται εύκολα και για αυτό ενδείκνυται η χρησιμοποίησή του σε δίκτυα που είναι κοντά στη θάλασσα . Σήμερα, επειδή το αλουμίνιο έχει μικρότερο κόστος αντικαθιστά το χαλκό κυρίως στους αγωγούς των εναέριων δικτύων. Εντούτοις , σε παραθαλάσσιες περιοχές ενδείκνυται ο χαλκός . [11]

1.3.2 Αγωγοί από Αλουμίνιο

Το αλουμίνιο είναι τρεις φορές ελαφρύτερο από τον χαλκό και έχει και μικρότερο κόστος , όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω. Μειονεκτεί όμως στο γεγονός ότι έχει το 60% περίπου της αγωγιμότητας του χαλκού, καθώς και μόνο το 50 % της μηχανικής αντοχής του.

Έτσι ένας αγωγός αλουμινίου με ισοδύναμη διατομή με αγωγό από χαλκό έχει το 1/2 του βάρους του και διάμετρο μεγαλύτερη κατά 1,6 φορές (60 % μεγαλύτερη) . Τα παραπάνω μας δείχνουν ότι ο αγωγός από αλουμίνιο δέχεται μεγαλύτερες επιφορτίσεις από τον άνεμο και τον πάγο λόγω της μεγαλύτερης επιφάνειάς του. Το αλουμίνιο σε κανονικές ατμοσφαιρικές συνθήκες οξειδώνεται (σκουριάζει) επιφανειακά. Το στρώμα της οξείδωσης είναι πολύ λεπτό και προστατεύει τον αγωγό από την παραπέρα οξείδωση. Κοντά στη θάλασσα, όμως, (σε απόσταση μέχρι 1 km περίπου) διαβρώνεται από το αλάτι που περιέχεται στον αέρα, σε βάθος μέχρι 3 mm.

Οι αγωγοί αλουμινίου χρησιμοποιούνται κυρίως στις γραμμές χαμηλής τάσης και μακριά από τη θάλασσα. Στις γραμμές υψηλής και υπερυψηλής τάσης δεν χρησιμοποιούνται γιατί έχουν μικρή μηχανική αντοχή (οι πυλώνες απέχουν πολύ μεταξύ τους και οι αναπτυσσόμενες δυνάμεις στους αγωγούς είναι πολύ μεγάλες).[11]

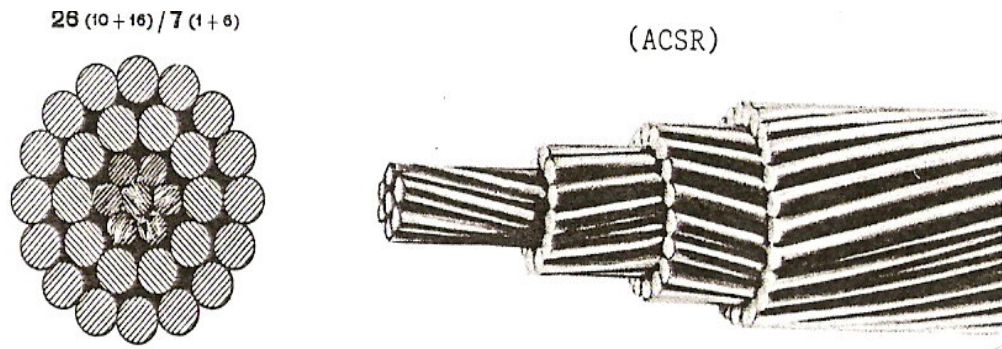


Σχήμα 1.3.2-1 : Μορφή αγωγών Αλουμινίου[11]

1.3.3 Αγωγοί από Αλουμίνιο - Χάλυβα (ACSR)

Το μειονέκτημα των αγωγών αλουμινίου αντιμετωπίζεται με επιτυχία με τους αγωγούς ACSR. Αυτοί έχουν ψυχή από κλώνους με γαλβανισμένο χάλυβα, όπως φαίνεται και στο σχήμα 1.3.3-1. Ο χάλυβας αναλαμβάνει τη μηχανική αντοχή και το αλουμίνιο την ηλεκτροδότηση. Το ρεύμα οδεύει κυρίως μέσα από το αλουμίνιο λόγω του επιδερμικού φαινομένου, δηλαδή το ρεύμα μέσα από το χάλυβα είναι αμελητέο. Οι αγωγοί ACSR έχουν περίπου 50 % μεγαλύτερη αντοχή από τους αγωγούς χαλκού και είναι 20 % ελαφρύτεροι για ισοδύναμη διατομή με το χαλκό. Χρησιμοποιούνται στις γραμμές υψηλής τάσης και μέσης τάσης γιατί μπορεί να γίνει μεγαλύτερο άνοιγμα μεταξύ των θέσεων στήριξης (πυλώνων ή στύλων).

Οι αγωγοί ACSR χαρακτηρίζονται κατά DIN ως εξής: Al / St = διατομή του Al / διατομή του St. (π.χ. Al/St 185/32 σημαίνει αγωγός με 185 Al και 32 St) . Σε σύνθετους αγωγούς η σχέση διατομών Al / St είναι συνήθως περίπου ίση με 6 , ενώ σε μεγάλες διατομές μπορεί να φτάσει και το 20 . Οι πολύκλωνοι ACSR αγωγοί αποτελούνται από 1 έως 3-στρώματα χαλύβδινων συρμάτων και 1 έως 3-στρώματα συρμάτων αλουμινίου. Τα σύρματα είναι συνεστραμμένα και μάλιστα η διεύθυνση συστροφής είναι αντίθετη σε δυο γειτονικά στρώματα, πράγμα που εξασφαλίζει μια καλή συνοχή του συρματόσχοινου.[11]



Σχήμα 1.3.3-1 : Μορφή αγωγών Αλουμινίου-Χάλυβα (ACSR) [11]

Συνήθως, στον χαρακτηρισμό των αγωγών ACSR ή αλουμινίου, δίνεται και η ισοδύναμη διατομή χαλκού. Αυτή είναι η διατομή που θα είχε ένας αγωγός ίσης αντίστασης, αν κατασκευαζόταν από χαλκό. Οι ωμικές αντιστάσεις των πολύκλωνων αγωγών προκύπτουν από την ονομαστική διατομή τους. Στον παρακάτω πίνακα δίνεται για διάφορους τύπους αγωγών ο αριθμός των κλώνων και η πραγματική τους διατομή :

Είδος αγωγού (Ισοδύναμη διατομή Cu)	Αριθμός κλώνων	$D_{\text{κλώνου}}$ (mm)	Πραγματική διατομή A (mm ²)
ACSR 16	6 Al 1 St	2,32 2,32	26
ACSR 35	6 Al 1 St	3,44 3,44	58
ACSR 50	6 Al 1 St	4,11 4,11	82
ACSR 70	26 Al 7 St	2,33 1,81	115
ACSR 95	26 Al 7 St	2,72 2,12	156
Al 16	7	2,21	27
Al 35	7	3,22	57
Al 50	19	2,35	82
Al 70	19	2,78	115

Πίνακας 1.3.3-1 : Πίνακας με τα ήδη αγωγών, των αριθμο κλώνων και την πραγματική τους διατομή

Η αγωγιμότητα που πρέπει να ληφθεί στους υπολογισμούς είναι διαφορετική απ' ό τι η αγωγιμότητα του καθαρού υλικού. Η μηχανική επεξεργασία και η συστροφή των αγωγών αυξάνουν την αντίσταση του αγωγού.

1.4 Ασφάλειες

1.4.1 Ασφάλειες εσωτερικών ηλεκτρικών εγκαταστάσεων χαμηλής τάσης

Οι ασφάλειες στη χαμηλή τάση, είναι όργανα προστασίας των διαφόρων κυκλωμάτων και συσκευών, σε περιπτώσεις υπερεντάσεως, υπερφορτίσεων και βραχυκυκλωμάτων. Διακρίνονται σε δύο τύπους :

- α) ασφάλειες τήξης
- β) ασφάλειες τύπου μικροαυτόματου

Οι ασφάλειες τήξης έχουν συγκριτικά προς τις αυτόματες ασφάλειες, ένα χρονικό όριο ανοχής σε απότομες μεταβολές του φορτίου. Γι' αυτό το λόγο, χρησιμοποιούνται στις κτιριακές εγκαταστάσεις ως γενικές ασφάλειες πινάκων. Τοποθετούνται επίσης ως προστασία για τη γραμμή της ηλεκτρικής κουζίνας και τη γραμμή του θερμοσίφωνα. Στις εγκαταστάσεις κίνησης , όπου κατά την εκκίνηση των κινητήρων αυξάνει σημαντικά η τιμή του ρεύματος, χρησιμοποιούνται αποκλειστικά ασφάλειες τήξης.

Οι ασφάλειες των γραμμών των κτιριακών και βιομηχανικών εγκαταστάσεων στην Ελλάδα, τοποθετούνται μόνο στους αγωγούς των φάσεων. Στους αγωγούς του ουδετέρου και της γείωσης απαγορεύεται η τοποθέτηση ασφαλείας.

Οι γενικές ασφάλειες του κεντρικού πίνακα προστατεύουν τη γραμμή μετρητή-πίνακα κυρίως από υπερφορτίσεις. Μπορεί όμως να χρησιμεύουν και σαν εφεδρική ασφάλεια σε βραχυκυκλώματα των γραμμών διανομής, που ξεκινούν από τον κεντρικό πίνακα. Οι ασφάλειες του γενικού πίνακα της κατοικίας είναι κατά κανόνα ένα μέγεθος κατώτερες από αυτές του μετρητή, λόγω επιλεκτικής προστασίας, πράγμα απαραίτητο γιατί δεν επιτρέπεται στον καταναλωτή η πρόσβαση στις ασφάλειες του μετρητή. Σε μονοφασικούς καταναλωτές η ασφάλεια είναι 50 A, 35 A ή 25 A όταν έχουμε στο μετρητή 63 A ή 40 A μικροαυτόματο, ή 35 A ασφάλεια αντίστοιχα.

Η θέση των ασφαλειών και των διακοπών σε ένα ηλεκτρικό πίνακα καταναλωτή, σε σχέση με την παροχή της τάσης (ή το φορτίο), υπαγορεύεται απ' το σκοπό που εξυπηρετεί καθένα από τα παραπάνω εξαρτήματα. Ο αποζεύκτης προηγείται των ασφαλειών, ως προς την παροχή της τάσης, γιατί διευκολύνει περισσότερο από αυτές στην απομόνωση του κυκλώματος του φορτίου από το δίκτυο. Έτσι γίνονται ακίνδυνα οι διάφορες εργασίες συντήρησης και επισκευών, μεταξύ των οποίων περιλαμβάνεται και η αλλαγή των ασφαλειών. Ο αυτόματος διακόπτης τοποθετείται ως μέσο χειρισμού και προστασίας του φορτίου, μετά τις ασφάλειες.

1.4.2 Ασφάλειες τήξης

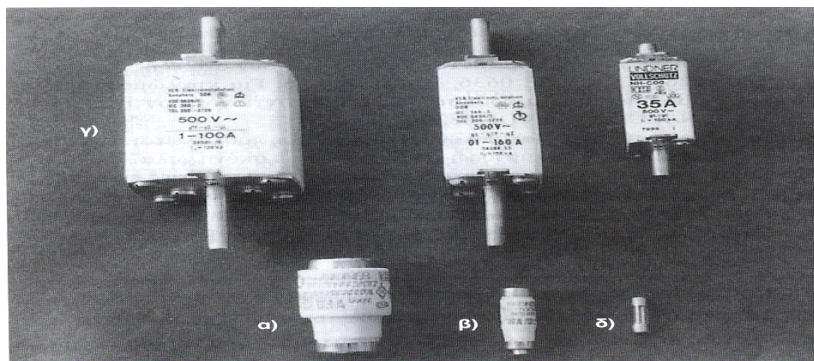
Οι ασφάλειες τήξης για κυκλώματα ισχύος αντιστοιχούν στα εξής πρότυπα : EN 60269, IEC 60269, DIN/VDE 0636, ΕΛΟΤ 446-86. Για τα κυκλώματα μικροσυσκευών χρησιμοποιούνται μικροασφάλειες που αντιστοιχούν στα πρότυπα VDE 0804, DIN/IEC 257 και VDE 0820.

Στις ασφάλειες τήξης η διακοπή ενός κυκλώματος προκαλείται από την τήξη ενός χάλκινου ή αργυρού σύρματος ή ταινίας μέσα σε σκόνη χαλαζία.

Σε αντιδιαστολή με τους μηχανικούς διακόπτες, οι ασφάλειες εισάγουν μετά την τήξη τους μια μεγάλη ωμική αντίσταση στο κύκλωμα. Αυτή η αντίσταση προκαλεί μια μείωση του ρεύματος βραχυκύκλωσης. Για χαμηλά ρεύματα (<20 A) μπορεί να χρησιμοποιούνται χάλκινα σύρματα. Για υψηλότερα ρεύματα έχουμε και αγωγούς (τηκτά) από άργυρο. Αυτό γίνεται για να μειωθούν οι απώλειες ισχύος στην αντίσταση του τηκτού.

Οι ασφάλειες τήξης εκλέγονται σύμφωνα με τα εξής στοιχεία :

- ονομαστική τάση, π.χ. 230/400 V,
- ονομαστική ισχύς διακοπής ή ρεύμα διακοπής (αυτό προσδιορίζει κυρίως τον τύπο της ασφάλειας). Υπάρχουν τύποι D, DO, NH με μέγιστα ρεύματα διακοπής 50 kA, 25 kA και 100 kA αντίστοιχα.
- χαρακτηριστικές χρόνου-ρεύματος. Αντί της χαρακτηριστικής ή μαζί με την χαρακτηριστική, μπορεί να δίνονται και το «μικρό» και το «μεγάλο» ρεύμα δοκιμής. Το μικρό ρεύμα δεν λιώνει την ασφάλεια σε ορισμένο χρόνο, που είναι συνήθως μία ώρα. Το μεγάλο ρεύμα λιώνει την ασφάλεια μέσα σε ορισμένο χρόνο (συνήθως 1 ώρα).



Σχήμα 1.4.2-1 : Ασφάλειες τήξης. [1]

- α) Βιδωτές ασφάλειες μεγάλες, DIAZED, D-system.
- β) Βιδωτές ασφάλειες μικρές, NEOZED, DO-system.
- γ) Μαχαιρωτές ασφάλειες XT, υψηλής ισχύος, NH.
- δ) Μικροασφάλειες (τύπου G) σε γυάλινο κύλινδρο.

Υπάρχουν σήμερα οι εξής τύποι ασφαλειών (σχήμα 1.4.2-1) :

- Ασφάλειες D (είναι οι μεγάλες βιδωτές). Λέγονται και Diazed-ασφάλειες.
- Ασφάλειες DO (είναι οι μικρές βιδωτές). Λέγονται και Neozed-ασφάλειες.
- Ασφάλειες NH ή HRC-Fuses ή HBC-Fuses (είναι οι μαχαιρωτές). Τα ονόματα προέρχονται από τον γερμανικό όρο Niederspannung-Hochleistungs-sicherungen ή αντίστοιχα από τους αγγλικούς όρους High Rupture Capacity Fuses ή High Breaking Current Fuses.
- Ασφάλειες G (είναι οι μικροασφάλειες σε κυλινδρικό γυάλινο σωλήνα) για συσκευές. Λέγονται και Gerateschutzsicherungen.

1.4.2.1 Ασφάλειες τύπου D, Diazed (μεγάλες βιδωτές)

Στις ασφάλειες αυτές ο αγωγός προς τήξη είναι σύρμα ή ταινία με σταθερή συνήθως διατομή. Οι ασφάλειες κατασκευάζονται από 2-125 A συνήθως, σε διαφορετικά χρώματα και διαμέτρους για τις διάφορες περιοχές ρευμάτων. Επιπλέον, μπορούν να διακόψουν ρεύματα μέχρι 50 kA, όπου το μέγιστο ρεύμα βραχυκύκλωσης είναι 10-15 φορές το ονομαστικό ρεύμα του μετασχηματιστή.

Παλιά υπήρχε η διάκριση σε ασφάλειες βραδείας και ταχείας τήξης. Από 01/08/76 δεν υπάρχει πλέον η διάκριση, αλλά οι κανονισμοί επιβάλλουν την τήρηση του μικρού και μεγάλου ρεύματος δοκιμής και ανοχές της χαρακτηριστικής.

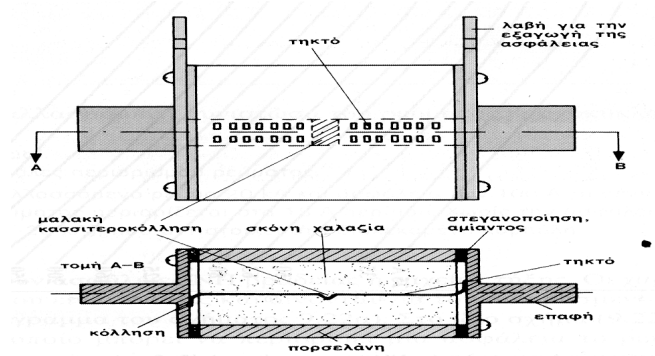
1.4.2.2 Ασφάλειες τύπου DO, Neozed (μικρές βιδωτές)

Τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά αυτών των ασφαλειών δεν διαφέρουν ουσιαστικά από αυτά των D ασφαλειών. Οι διάμετροι και το μήκος των DO ασφαλειών είναι μικρότερες από τις αντίστοιχες διαστάσεις των D ασφαλειών. Όπως και στις D ασφάλειες, δεν υπάρχει πλέον διαχωρισμός σε ασφάλειες βραδείας και ταχείας τήξης. Το ρεύμα απόξευξης των ασφαλειών DO είναι μικρότερο από αυτό των ασφαλειών D. Υπάρχει και ο τύπος NEOZED VBG-4 που εξασφαλίζει μεγαλύτερη προστασία στην περίπτωση έκρηξης της ασφάλειας.

1.4.2.3 Ασφάλειες τύπου NH, μαχαιρωτές, (High Rupture Capacity) HRC-Fuses,(High Breaking Capacity) HBC-Fuses

Τέτοιες ασφάλειες χρησιμοποιούνται για μεγάλα ρεύματα βραχυκύκλωσης, όπως για παράδειγμα στη διανομή χαμηλής τάσης 80. Τα τηκτά των ασφαλειών είναι ταινίες με στενές περιοχές και μία μαλακή συγκόλληση στο μέσον (σχήμα 1.4.2.3-1). Αυτά βρίσκονται σε σκόνη χαλαζία. Μετά την τήξη σε βραχυκυκλώματα, σχηματίζονται πολλά τόξα σε σειρά. Σε υπερφορτίσεις με ρεύματα λίγο μεγαλύτερα από το μεγάλο ρεύμα δοκιμής, οι ασφάλειες NH λιώνουν στο μέσον, στη θέση της συγκόλλησης. Η κατασκευή αυτή μειώνει την αντίσταση στην κανονική λειτουργία και αυξάνει την ικανότητα διακοπής ρεύματος.

Οι μαχαιρωτές ασφάλειες αναπτύσσουν επίσης και μεγάλη αντίσταση στο κύκλωμα μετά την τήξη τους. Έτσι, περιορίζουν το ρεύμα βραχυκύκλωσης. Αν, π.χ. χωρίς ασφάλεια το εναλλασσόμενο ρεύμα βραχυκύκλωσης είναι 20 kA και το μέγιστο κρουστικό ρεύμα είναι $2 \cdot \sqrt{2} \cdot 20 = 56,5$ kA, με ασφάλεια, το μέγιστο κρουστικό ρεύμα θα περιοριστεί στα 14 kA.



Σχήμα 1.4.2.3-1 : Ασφάλειες ισχύος NH, μαχαιρωτές. [9]

Δεν υπάρχουν ασφάλειες NH βραδείας ή ταχείας τήξης. Γι' αυτό το λόγο οι χαρακτηριστικές ρεύματος-χρόνου είναι ενιαίες και δίνονται μόνο για τον συνηθισμένο τύπο κατηγορίας gL. Τα ονομαστικά στοιχεία των μαχαιρωτών ασφαλειών NH, δίνονται στον πίνακα 1.4.2.3-1.

Όνομαστικό ρεύμα I_N (A)	Μικρό ρεύμα δοκιμής. Η ασφάλεια δε λιώνει. I_1 (A)	Μεγάλο ρεύμα δοκιμής. Η ασφάλεια λιώνει. I_2 (A)	Χρόνος δοκιμής t (h)
0 - 4	1,5 I_N	2,10 I_N	1
4 - 10	1,5 I_N	1,90 I_N	1
10 - 25	1,4 I_N	1,75 I_N	1
25 - 63	1,3 I_N	1,60 I_N	1
63 - 160	1,3 I_N	1,60 I_N	2
160 - 400	1,3 I_N	1,60 I_N	3
> 400	1,3 I_N	1,60 I_N	4

Πίνακας 1.4.2.3-1 : Ρεύματα δοκιμής μαχαιρωτών ασφαλειών τύπου NH κατά DIN/VDE 0636, Teil 21.

Οι ασφάλειες NH κατασκευάζονται σε 7 μεγέθη, διαφορετικών διαστάσεων. Σε κάθε μέγεθος αντιστοιχεί μία περιοχή ρευμάτων. Υπάρχουν τα μεγέθη 00, 0, 1, 2, 3, 4 και 4a. [9]

1.4.2.4 Μικροασφάλειες τύπου G, σε γυάλινο κύλινδρο

Οι ασφάλειες αυτές είναι κυλινδρικές, διαμέτρου 5 mm και μήκους 20 ή 25 ή 30 mm. Το τηκτό βρίσκεται μέσα σε γυάλινο κενό σωλήνα με δύο ακροδέκτες. Μπορεί να υπάρχει και σκόνη χαλαζία στο σωλήνα. Χρησιμοποιούνται για την προστασία συσκευών μικρής ισχύος και χωρίζονται κατά DIN 41571 σε πέντε κατηγορίες :

FF : πολύ ταχείας τήξης, σπάνια χρήση,

F : ταχείας τήξης,

M : μεσαίας τήξης,

T : βραδείας τήξης,

TT : πολύ βραδείας τήξης, σπάνια χρήση.

Η ικανότητα απόξευξης (σε Ampere) των μικροασφαλειών, διαφέρει από ασφάλεια σε ασφάλεια. Υπάρχουν 5 κατηγορίες απόξευξης με διαφορετικά ρεύματα απόξευξης (πίνακας 1.4.2.4-1). Οι μικροασφάλειες φέρουν την ένδειξη F, M ή T, το ρεύμα σε A την τάση V και την κατηγορία απόξευξης B...G.

Π.χ :

F (0,25/250) C = ταχεία τήξη 0,25 A, 250V, κατηγορία C (ρεύμα απόξευξης 80 A) ή

T (0,4/250) B = βραχεία τήξη 0,40 A, 250 V, κατηγορία B (ρεύμα απόξευξης 50A)

Κατηγορία	B	C	D	E	G
Ρεύμα απόξευξης (A)	50	80	300	1000	1500

Πίνακας 1.4.2.4-1 : Κατηγορίες ρευμάτων απόξευξης μικροασφαλειών G (ασφάλειες σε γυάλινο κύλινδρο).

1.4.2.5 Ασφάλειες τύπου μικροαυτόματου

Οι πιο γνωστές αυτόματες ασφάλειες E.H.E. είναι :

- i. Οι πωματοαυτόματοι μεγίστου (σχήμα 6).
- ii. Οι αυτόματοι ασφαλειοδιακόπτες τύπου W, WL, και SL (σχήμα 7)

Πωματοαυτόματος μεγίστου

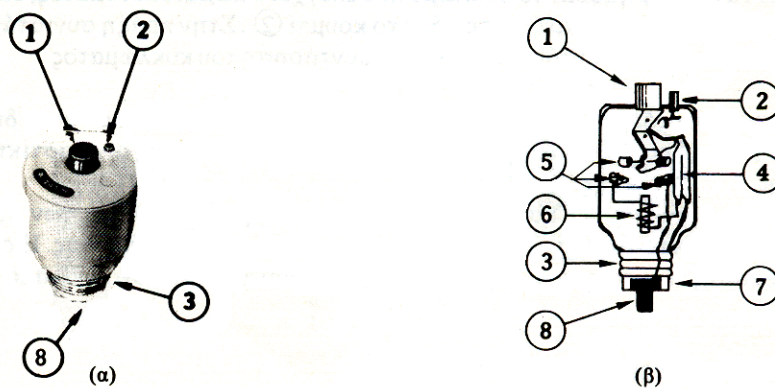
Ο πωματοαυτόματος μεγίστου είναι αυτόματος διακόπτης αέρα και χρησιμοποιείται κυρίως στους πίνακες φωτισμού. Ο διακόπτης αυτός αντικαθιστά τις ασφάλειες. Στην πράξη είναι γνωστός και σαν μικροαυτόματος ή αυτόματη ασφάλεια.

Στο σχήμα 6 φαίνεται ένας πολύ κοινός τύπος του εμπορίου του διακόπτη αυτού, γνωστός και σαν μικροαυτόματος ή πωματοαυτόματος.

Το ρεύμα εισέρχεται από το μεταλλικό άκρο (8) και με τη βοήθεια του συνδετικού αγωγού οδηγείται στις επαφές (5). Όταν οι επαφές είναι κλειστές, το ρεύμα περνάει μέσα από αυτές, μέσα από τον ηλεκτρομαγνήτη (6) και μέσα από το θερμικό στοιχείο (4) και με τη βοήθεια του μεταλλικού σπειρώματος (3), οδηγείται στους καταναλωτές.

Το μεταλλικό σπείρωμα εσωτερικά είναι μονωμένο με το μονωτικό (7). Έτσι ο αγωγός που συνδέεται στο άκρο (8) δεν έρχεται σε επαφή με το σπείρωμα.

Όταν οι επαφές (5) είναι κλειστές, τότε το κουμπί (1) είναι πιεσμένο μέσα στο μικροαυτόματο. Αν στο κύκλωμα που εξυπηρετεί ο μικροαυτόματος εμφανιστεί κάποια υπερένταση, τότε υπερθερμαίνεται το θερμικό στοιχείο και με κατάλληλο μηχανισμό εκτινάσσει το κουμπί (1) προς τα έξω. Έτσι ανοίγουν οι επαφές (5) και διακόπτεται το κύκλωμα.



- (α) : Αντιπροσωπευτικός τύπος. (β) : Εσωτερική συνδεσμολογία.
- ① : Κύριο κουμπί του πωματοαυτόματου.
 ② : Κουμπί (μπουτόν) ελέγχου ή δευτερεύον κουμπί του πωματοαυτόματου.
 ③ : Μεταλλικό σπείρωμα.
 ④ : Θερμικό στοιχείο.
 ⑤ : Επαφές.
 ⑥ : Ηλεκτρομαγνητικό στοιχείο.
 ⑦ : Μονωτικό στοιχείο (πορσελάνη).
 ⑧ : Μεταλλικό άκρο (επαφή).

Σχήμα 1.4.2.5-1 : Πωματοαυτόματος μεγίστου. [9]

Αν στο ίδιο κύκλωμα εμφανιστεί κάποιο βραχυκύκλωμα, τότε διεγείρεται ο ηλεκτρομαγνήτης (6) και με κατάλληλο μηχανισμό ανοίγουν και πάλι οι επαφές κι έτσι διακόπτεται το κύκλωμα.

Με τη βοήθεια του σπειρώματος (3) στερεώνεται ο πωματοαυτόματος επάνω στον πίνακα. Το κουμπί (2) χρησιμοποιείται για τον έλεγχο ή τη συντήρηση του κυκλώματος. Στην πράξη συνιστάται να ξεβιδώνεται ο πωματοαυτόματος για κάθε συντήρηση, εκτός από την περίπτωση αντικατάστασης λυχνιών. Πιέζοντας το κουμπί (2) πρέπει να εκτινάσσεται προς τα έξω το κουμπί (1). Αν δε συμβαίνει αυτό, τότε ο πωματοαυτόματος παρουσιάζει βλάβη.

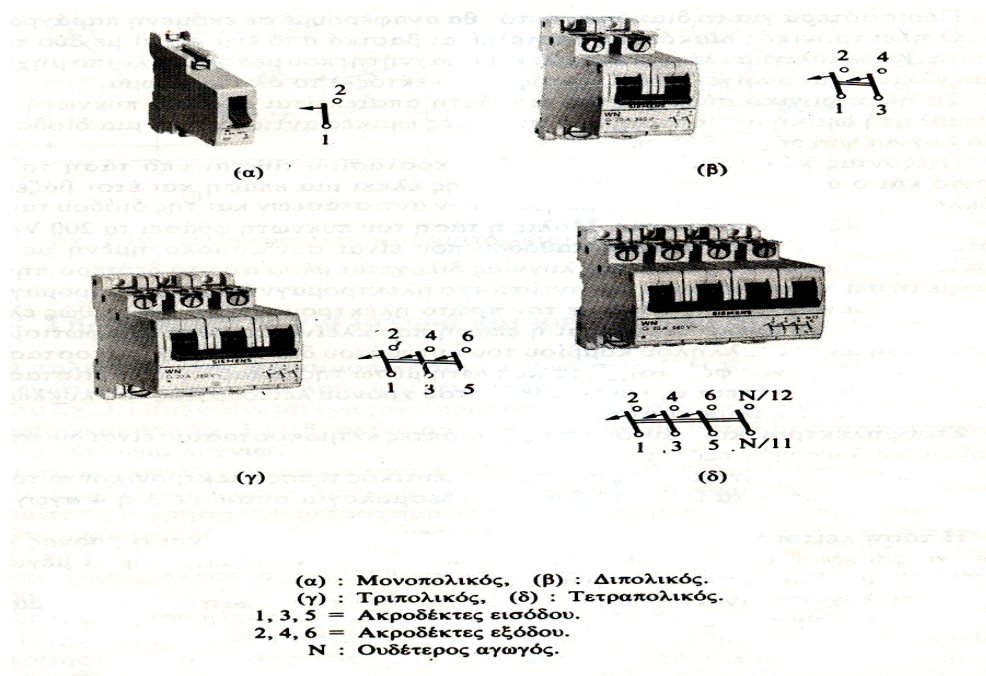
Ο πωματοαυτόματος προστατεύει ένα κύκλωμα φωτισμού, όταν αυτό διαρέεται από ρεύμα βραχυκύκλωσης κατά 1,6 φορές μεγαλύτερο της ονομαστικής του έντασης. Επίσης προστατεύει και από ρεύματα βραχυκύκλωσης μικρότερης έντασης, αλλά μεγαλύτερης διάρκειας.[9]

Αυτόματοι ασφαλειοαποζεύκτες

Οι μαχαιρωτές ασφάλειες τύπου NH, συνδυάζονται σε τριφασικά συστήματα και με μαχαιρωτούς αποζεύκτες (σχήμα 1.4.2.5-2), οπότε έχουμε τους λεγόμενους ασφαλειοαποζεύκτες. Έχουν διπλή λειτουργία σε πίνακες διανομής. Χρησιμοποιούνται σαν ασφάλειες και σαν γενικοί διακόπτες και γι' αυτό εφαρμόζονται συχνά σε εγκαταστάσεις ισχύος.

Γενικά οι ασφαλειοαποξεύκτες μπορούν να κλείνουν ή να ανοίγουν χειροκίνητα υπό φορτίο. Η κίνηση αυτή πρέπει να γίνεται όσο το δυνατόν γρηγορότερα για να μη διαρκεί πολύ χρόνο το ηλεκτρικό τόξο και επιβαρύνει τις επαφές.

Οι διακόπτες αυτοί υπάρχουν στο εμπόριο σε πολλές παραλλαγές. Οι πιο συνηθισμένοι και γνωστοί, είναι αυτοί της σειράς “W”, η οποία περιλαμβάνει τους τύπους “WH”, “WL”, “WG”, “SH”, “SL”, και “SG”. Υπάρχουν ασφαλειοαποξεύκτες μέχρι 1250 A. Συνδυάζονται συχνά και με βοηθητικές επαφές για σήμανση ή έλεγχο. Σε εγκαταστάσεις κίνησης στις οποίες δεν πρέπει να λείπει μία φάση, χρησιμοποιούνται ασφαλειοαποξεύκτες με σύστημα παρακολούθησης των ασφάλειων. Γι’ αυτό χρησιμοποιείται ένας αυτόματος υπερρεύματος παράλληλα στις ασφάλειες. Όταν καούν μία ή περισσότερες ασφάλειες, τότε το ρεύμα περνά από τον αυτόματο. Αυτός δίνει εντολή πτώσης στο ρελαί του κινητήρα και παράλληλα σήμανση.



Σχήμα 1.4.2.5-2: Αυτόματοι ασφαλειοδιακόπτες [9]

1.5 Ασφάλειες καταναλωτών Μέσης Τάσης

Οι ασφάλειες σε εγκαταστάσεις καταναλωτών MT χρησιμοποιούνται μόνο για την προστασία σε βραχυκυκλώματα και όχι σε υπερφόρτιση. Χρησιμοποιούνται σαν εναλλακτική φθηνή λύση αντί των διακοπών ισχύος. Πάντως, για να υπάρχει αποξευξιμότητα υπό φορτίο, όταν έχουμε ασφάλειες, εγκαθίσταται σε σειρά και ένας διακόπτης φορτίου. Διακρίνουμε δύο ειδών ασφάλειες υψηλής τάσης, ανάλογα με την αρχή πάνω στην οποία στηρίζονται.

- Ασφάλειες εκτόνωσης.
- Ασφάλειες σκόνης.

Οι ασφάλειες εκτόνωσης αποτελούνται από ένα μονωτικό σωλήνα εσωτερικής διαμέτρου 2-3 cm, μήκους 30-35 cm και για τάση 20 kV. Ο σωλήνας εσωτερικά έχει ένα στρώμα από βορικό οξύ. Μέσα στο σωλήνα βρίσκεται ένας αγωγός, το τηκτό, τανυσμένος π.χ. με ελατήριο. Η σβέση του τόξου γίνεται με τη δημιουργία ατμών όταν το τόξο έλθει σε επαφή με τα εσωτερικά τοιχώματα του σωλήνα. Η σβέση διαρκεί μερικούς κύκλους. Το ρεύμα βραχυκυκλώσεως δεν περιορίζεται γιατί η αντίσταση και η τάση κατά μήκος της ασφάλειας είναι μικρές (αυτό δε συμβαίνει στις ασφάλειες σκόνης). Κατά τη σβέση του τόξου δημιουργούνται τοξικά αέρια. Έτσι οι ασφάλειες αυτές χρησιμοποιούνται μόνο από τη ΔΕΗ ή τις επιχειρήσεις ηλεκτρισμού, σε υπαίθριες εγκαταστάσεις, για την ασφάλιση διακλαδώσεων σε δίκτυα ΜΤ. Επιπλέον, έχουν πολύ χαμηλότερο κόστος απ' αυτό των ασφαλειών σκόνης.

Ασφάλειες εκτόνωσης υπάρχουν σε δύο τύπους :

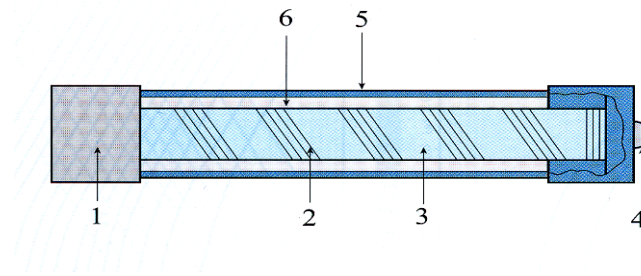
- ❖ Τις ασφάλειες εκτόνωσης βραδείας τήξης. Χαρακτηρίζονται με το γράμμα Τ.
- ❖ Τις ασφάλειες εκτόνωσης ταχείας τήξης. Χαρακτηρίζονται με το γράμμα Κ.

Οι ασφάλειες σκόνης (σχήμα 1.5-1) έχουν ένα σώμα από κεραμικό υλικό, πάνω στο οποίο είναι τυλιγμένος ο αγωγός, το τηκτό, που μπορεί να είναι άργυρος ή κράμα του, για να έχουμε καλή αγωγιμότητα. Ο τυλιγμένος αγωγός βρίσκεται σε σκόνη χαλαζία. Υπάρχει ένα περίβλημα από πορσελάνη. Η σβέση του τόξου γίνεται με ψύξη στη χαλαζιακή σκόνη.

Αν το ρεύμα υπερβεί μία τιμή, ο αγωγός λειώνει και λόγω της έντονης ψυκτικής ικανότητας της χαλαζιακής σκόνης, δημιουργείται μία μεγάλη αντίσταση κατά μήκος της ασφάλειας. Έτσι το ρεύμα βραχυκύκλωσης περιορίζεται και μηδενίζεται.

Οι ασφάλειες σκόνης έχουν τα εξής χαρακτηριστικά στοιχεία :

- Ονομαστική τάση του δικτύου/ μέγιστη επιτρεπόμενη τάση, U_N/ U_m , π.χ. 20/24 kV
- Ονομαστικό ρεύμα I_N σε Α, π.χ. 40 Α.
- Μέγιστο επαγωγικό ρεύμα I_k (ενεργός τιμή) που μπορεί να διακόψει, π.χ. 40 kA
- Ισχύς βραχυκύκλωσης $S_k = \sqrt{3} I_k U_N$, π.χ. 1400 MVA.
- Ελάχιστο ρεύμα διακοπής I_{min} , π.χ. 120 Α.
- Απώλειες στο ονομαστικό ρεύμα, π.χ. 120W.



Σχήμα 1.5-1 : Ασφάλειας σκόνης ΥΤ. [1]

- | | |
|------------------------|---|
| 1. κεφαλή | 4. δείκτης λειτουργίας σε θέση ένδειξης |
| 2. τηκτό | 5. κύλινδρος πορσελάνης |
| 3. κεραμικός κύλινδρος | 6. άμμος χαλαζία |

Προσοχή : Εάν σε τριφασικό σύστημα καεί μία μόνο ασφάλεια σε σφάλμα, τότε πρέπει να αντικατασταθούν και οι τρεις, όχι μόνο αυτή που κάηκε. Αυτό συμβαίνει γιατί μπορεί να έχουν εν μέρει αλλοιωθεί και οι άλλες δύο.[9]

2. Μηχανική Αντοχή

2.1 Μηχανική συμπεριφορά- επιφόρτιση εναέριων αγωγών διανομής

Ως αγωγοί διανομής στη χαμηλή τάση, χρησιμοποιούνται οι εξής τύποι (με την διατομή σε mm^2 να αφορά ισοδύναμη διατομή χαλκού σε τετραγωνικά χιλιοστά) :

- 1) Γυμνοί αγωγοί 4 x 16 mm^2
- 2) Γυμνοί αγωγοί 4 x 35 mm^2
- 3) Γυμνοί αγωγοί 4 x 50 mm^2
- 4) Γυμνοί αγωγοί 4 x 70 mm^2
- 5) Συνεστραμμένα καλώδια 3 x 35 mm^2
- 6) Συνεστραμμένα καλώδια 3 x 54,6 mm^2
- 7) Συνεστραμμένα καλώδια 3 x 70 mm^2

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΓΥΜΝΩΝ ΑΓΩΓΩΝ				
Διατομή Αγωγών mm^2	Βέρος Kg/m	Διάμετρος mm	Σλώνοι mm	Φορτίο θραύσεως Kg
ΑΓΩΓΟΙ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ ΜΕ ΧΑΛΥΒΑΙΝΗ ΎΨΗ (ACSR)				
16	0,102	6,96	6Al/1St/2,32	950
35	0,224	10,32	6Al/1St/3,44	2000
50	0,321	12,33	6Al/1St/4,11	2900
95	0,609	17,24	26/2,72Al+7/2,12St	5650
ΑΓΩΓΟΙ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ ΜΕ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΗ ΧΑΛΥΒΑΙΝΗ ΎΨΗ (ACSR-R)				
16	0,372	10,32	3Al/4St/3,44	4635
ΑΓΩΓΟΙ ΕΚ ΚΡΑΜΑΤΟΣ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ (AAAC)				
35	0,098	7,50	7/2,50	980
70	0,189	10,50	19/2,10	1880
95	0,269	12,50	19/2,50	2670
185	0,525	17,50	37/2,50	5170
ΑΓΩΓΟΙ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ (Al)				
16	0,074	6,63	7/2,21	470
35	0,158	9,66	7/3,22	940
50	0,229	11,75	19/2,35	1442
70	0,320	13,90	19/2,78	2018
ΑΓΩΓΟΙ ΧΑΛΚΟΥ (Cu)				
16	0,144	5,13	7/1,71	739
35	0,315	7,59	7/2,53	1566
50	0,453	9,20	19/1,83	2299
70	0,634	10,70	19/2,17	3162
Σημείωση:				
Οι διατομές αγωγών ACSR, ACSR-R και Al είναι ισοδύναμοι Χαλκού. Οι διατομές των αγωγών Χαλκού και AAAC είναι πραγματικές. Η ανοχή του βάρους των αγωγών είναι +2%.				

Πίνακας 2.1-1 : Χαρακτηριστικά γυμνών αγωγών εναέριων γραμμών [1]

Οι αγωγοί διανομής του εναερίου δικτύου είναι εκτεθειμένοι σε κάθε καιρικό φαινόμενο και μέσα σε αυτά συγκαταλέγονται και οι άνεμοι , οι οποίοι ασκούν επιφορτίσεις στους αγωγούς . Η επιφόρτιση που ασκούν οι άνεμοι στους αγωγούς εξαρτάται από την ένταση με την οποία εμφανίζονται . Πιο συγκεκριμένα , η διαβάθμιση της έντασης των ανέμων γίνεται με βάση την ταχύτητα (σε m / s) με την οποία πνέουν όπως φαίνεται και στον πίνακα 2.1-2 .

Μποφόρ	Ονομασία	Ταχύτητα m/sec	Αποτέλεσμα
0	Νηνεμία	0 - 0,2	Άπνοια . Ο καπνός υψώνεται κατακόρυφα .
1	Υποπνέων	0,3 - 1,5	Ο καπνός υψώνεται σχεδόν κατακόρυφα .
2	Ασθενής	1,6 - 3,3	Άνεμος αισθητός στο πρόσωπο .
3	Λεπτός	3,4 - 5,4	Τα φύλλα και μερικά κλωνάρια κινούνται συνεχώς . Τεντώνει μικρή σημαία
4	Μέτριος	5,5 - 7,9	Σηκώνει σκόνη και φύλλα χαρτιού.Κινούνται μικρά κλωνάρια.
5	Λαμπρός	8,0-10,7	Αρχίζουν να λυγίζουν μικρά δένδρα . Σχηματίζονται κυματάκια στη θάλασσα .
6	Ισχυρός	10,8-13,8	Κινεί μεγάλα κλαδιά . Η ομπρέλα χρησιμοποιείται δύσκολα .
7	Σφοδρός	13,9-17,1	Κινεί ολόκληρο το δένδρο . Το βάδισμα αντίθετα προς τον άνεμο γίνεται δύσκολο .
8	Ορμητικός (θυελλώδης)	17,2- 20,7	Σπάζει κλαδιά δένδρων . Το βάδισμα γίνεται δύσκολο .
9	Θύελλα	20,8- 24,4	Ελαφρές ζημιές σε σπίτια . Σηκώνει κεραμίδια από τις στέγες .
10	Ισχυρή Θύελλα	24,5- 28,4	Ξεριζώνει δένδρα . Προκαλεί μεγάλες ζημιές σε σπίτια.
11	Σφοδρή θύελλα	28,5- 32,6	Μεγάλες ζημιές σε μεγάλες εκτάσεις .
12	Τυφώνας	32,7	Εξαιρετικά σοβαρές καταστροφές

Πίνακας 2.1-2: Κλίμακα έντασης πνέοντων ανέμων [1]

Σημειώνεται ότι οι λεγόμενες ριπές ανέμου είναι αυτές που προκαλούν συνήθως προβλήματα σε ανθρώπινες κατασκευές και λιγότερο συχνά κάποιας σταθερής έντασης άνεμος. [12]

2.2 Παράδειγμα Μηχανικής Αντοχής

Με βάση τον πίνακα 2.1-2, υπολογίζεται κατωτέρω η μηχανική ικανότητα μιας γραμμής από γυμνούς αγωγούς αλουμινίου διατομής 35mm με άνοιγμα μεταξύ στύλων 70 m και για ένταση του αέρα 10 μποφόρ (ισχυρή θύελλα). Η μέγιστη ταχύτητα του για ένταση 10 μποφόρ είναι : $v = 28,4 \text{ m / s}$.

Η μέγιστη επιφόρτιση στον αγωγό (F), κάτω από αυτές τις συνθήκες ανέμου, συμβαίνει όταν συμπίπτει η διεύθυνση του ανέμου με την διεύθυνση του βάρους του αγωγού και υπολογίζεται ως το άθροισμα του βάρους του αγωγού (G) και της ανεμοπίεσης (P) που δημιουργείται από πνέοντα άνεμο 10 Μποφόρ. [12]

Έτσι, το βάρος του αγωγού G είναι :

$$G = (\pi \cdot d^2 / 4) \cdot S \cdot \gamma = 15,8 \text{ kg} \quad (2.2-1)$$

όπου :

γ : το ειδικό βάρος του αλουμινίου ($2,7 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$)

S : άνοιγμα μεταξύ στύλων

d : διατομή αγωγού αλουμινίου (35 mm^2)

Η ανεμοπίεση (P) υπό 10 Μποφόρ είναι :

$$P = \alpha \cdot v^2 = 0,0625 \cdot 28,4^2 = 50,41 \text{ kg /m}^2 \quad (2.2-2)$$

όπου :

α : η ειδική πυκνότητα του αέρα σε kg / m^3

v : η ταχύτητα του αέρα σε m / s

Άρα, η εξασκούμενη δύναμη σε κάθε αγωγό λόγω της ανεμοπίεσης είναι :

$$F_p = P \cdot d \cdot S = 50,41 \cdot 0,01032 \cdot 70 = 36,41 \text{ kg} \quad (2.2-3)$$

όπου :

d : διάμετρος αγωγού 35

S : άνοιγμα μεταξύ στύλων (70 m)

Οπότε, η μέγιστη δυνατή συνολική εξασκούμενη επιφόρτιση F σε κάθε αγωγό μεταξύ των στύλων είναι :

$$F = G + F_p = 15,8 + 36,41 = 52,22 \text{ kg} \quad (2.2-4)$$

όπου

G : το βάρος του αγωγού

F_p : η επιφόρτιση λόγω της ανεμοπίεσης

Σημειώνεται ότι για την συνολική εξασκούμενη δύναμη στους αγωγούς θα πρέπει να ληφθεί υπ' όψιν και η δύναμη ταχύτητας (T) οπότε η συνολική δύναμη είναι:

$$F_{ολ} = F + T \quad (2.2-5)$$

3. Διηλεκτρική αντοχή

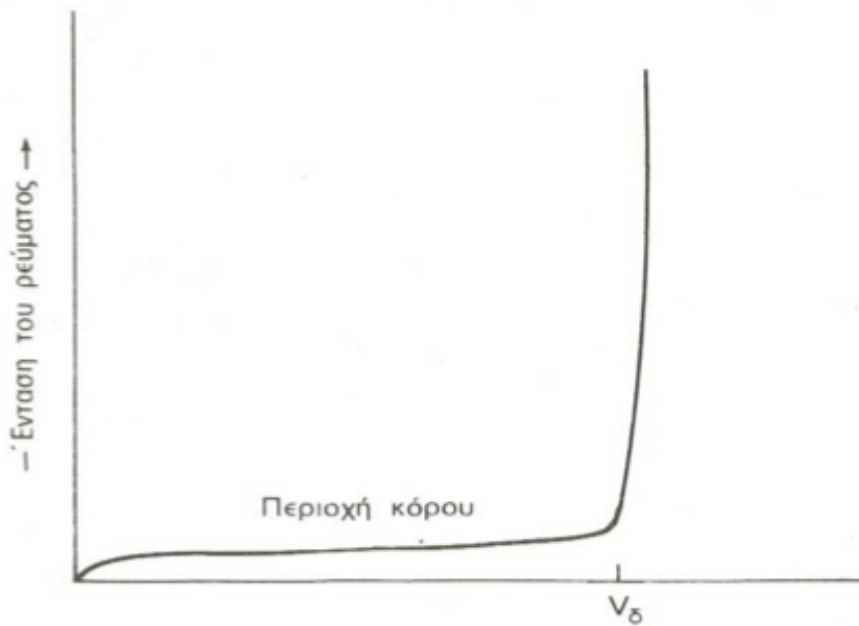
Η τάση λειτουργίας και ενδεχόμενες υπερτάσεις πρέπει να μην προκαλούν υπερπηδήσεις τόξου μεταξύ αγωγών, καταστροφές στα υλικά των στύλων ή διασπάσεις των μονωτικών υλικών. Οι μονωτήρες είναι διατάξεις που χρησιμοποιούνται προκειμένου να αποφευχθεί η διέλευση ηλεκτρικού ρεύματος μέσα από ηλεκτρικές συσκευές, καθώς και η απώλεια ενέργειας στις διατάξεις διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας λόγω της δημιουργίας αγωγίμου δρόμου ανάμεσα στις γραμμές διανομής και τους στύλους στήριξής τους. Ενδεχόμενη αστοχία των μονωτήρων, δηλαδή προσωρινή ή μόνιμη απώλεια της μονωτικής τους ικανότητας, μπορεί να προκαλέσει σημαντικές βλάβες στον ηλεκτρολογικό εξοπλισμό καθώς και στη λειτουργία των δικτύων διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο η μελέτη των φαινομένων της διάσπασης, αλλά κυρίως της υπερπήδησης του μονωτήρα χρήζουν ιδιαίτερης προσοχής. Περισσότερες πληροφορίες για την διηλεκτρική αντοχή των μονώσεων δίνεται στο παράρτημα Ι.

3.1 Απώλεια μονωτικής ικανότητας των μονωτήρων

Η εμφάνιση ηλεκτρικής αγωγιμότητας στα στερεά ηλεκτρομονωτικά υλικά είναι πρακτικά αναπόφευκτη λόγω των προσμίξεων στο εσωτερικό τους και των ξένων επικαλύψεων στην επιφάνειά τους. Ωστόσο, τα υλικά αυτά παρουσιάζουν μια ιδιομορφία, δηλαδή εκτός από την αγωγιμότητα δια μέσου της μάζας τους, εκδηλώνεται και μια επιφανειακή αγωγιμότητα με μετακίνηση φορέων κατά μήκος της εξωτερικής τους επιφάνειας. Οι δύο αυτοί μηχανισμοί αγωγιμότητας είναι ανεξάρτητοι ο ένας από τον άλλο. Οι αντίστοιχες ειδικές αγωγιμότητας ονομάζονται, "ειδική αγωγιμότητα όγκου" (σ) και "ειδική επιφανειακή αγωγιμότητα" (σ_e).

Στα περισσότερα μονωτικά υλικά η αγωγιμότητα όγκου είναι πολύ μικρή και έτσι η επιφανειακή τους αγωγιμότητα αποκτά συχνά κυρίαρχη σημασία, ιδίως όταν ευνοείται από το γεωμετρικό τους σχήμα. Το ρεύμα που δημιουργεί η επιφανειακή αγωγιμότητα των στερεών μονωτικών σωμάτων ονομάζεται "ρεύμα ερπυσμού" διότι έρπει, δηλαδή, σέρνεται πάνω στην επιφάνειά τους. Τα ρεύματα ερπυσμού είναι σχετικά σταθερά όταν οι συνθήκες δεν μεταβάλλονται. Η κατανομή όμως της πυκνότητας των ρευμάτων αυτών δεν είναι ομοιόμορφη, διότι οι φορείς τους ακολουθούν κατά προτίμηση ορισμένους αγωγίμους δρόμους διαρροής στην επιφάνεια ή σε ρωγμές των σωμάτων.

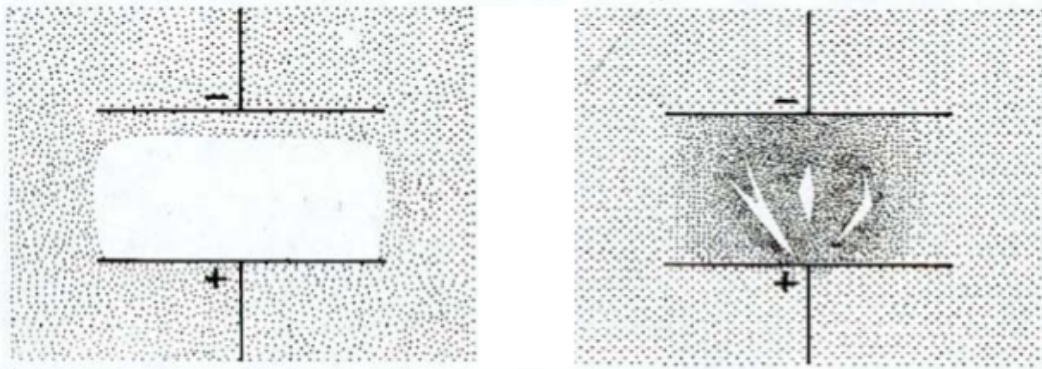
Ως αποτέλεσμα της ύπαρξης κάποιου βαθμού ηλεκτρικής αγωγιμότητας, στα μονωτικά υλικά εμφανίζεται ηλεκτρικό ρεύμα στο εσωτερικό τους. Στο σχήμα 3.1-1 που ακολουθεί παρουσιάζεται η μορφή των καμπυλών μεταβολής της έντασης του ρεύματος, που διαρρέει τη μάζα ενός αέριου, υγρού ή στερεού μονωτικού σώματος σε συνάρτηση με την επιβαλλόμενη τάση.



Σχήμα 3.1-1 : Γραφική παράσταση της έντασης του ρεύματος σε συνάρτηση με την τάσης του μονωτικού υλικού

Αρχικά, υπάρχει μια περιοχή όπου η ένταση του ρεύματος παρουσιάζει μια σχετικά μικρή τιμή (περίπου ανάλογη προς την τάση) και η οποία οφείλεται στα λίγα ελεύθερα ηλεκτρόνια και στις προσμίξεις του μονωτικού σώματος. Στη συνέχεια, ακολουθεί η "περιοχή κόρου", όπου η ένταση του ρεύματος διατηρείται περίπου σταθερή, διότι το πλήθος των φορέων μεταφοράς του ηλεκτρικού ρεύματος που εκπέμπονται από τα ηλεκτρόδια, ή που δημιουργεί το πεδίο ιονίζοντας τα συστατικά του σώματος, αντισταθμίζεται από το πλήθος τους που εξουδετερώνεται στα ηλεκτρόδια (οι φορείς δια μέσου του σώματος στο οποίο επιβάλλεται τάση κατευθύνονται από το ένα ηλεκτρόδιο στο άλλο όπου και εξουδετερώνονται λόγω αντίθετου φορτίου).

Η περιοχή αυτή των τάσεων ονομάζεται και περιοχή ιονισμού. Τέλος, με την αύξηση της τάσης πέρα από μια κρίσιμη τιμή V_{δ} , που ονομάζεται "τάση διάσπασης", η ένταση του ρεύματος αυξάνει απότομα και γίνεται ανεξέλεγκτη. Εμφανίζεται, δηλαδή, το φαινόμενο της ηλεκτρικής (ή διηλεκτρικής) διάσπασης του μονωτικού. Μαζί με την εκκένωση ισχυρού ηλεκτρικού ρεύματος διαμέσου του μονωτικού, η ηλεκτρική διάσπαση συνοδεύεται με την υπερθέρμανση του σώματος και με φωτεινά φαινόμενα. Διάφορα παραδείγματα παρουσιάζονται στο σχήμα 3.1-2.



Σχήμα 3.1-2 : Παραδείγματα ηλεκτρικής διάσπασης ανάμεσα σε δυο ακροδέκτες

Ειδικότερα, στα στερεά μονωτικά υλικά συγχρόνως με την ηλεκτρική διάσπαση πραγματοποιείται και η διάτρηση του σώματος. Δηλαδή, η μεγάλη θερμοκρασία που δημιουργεί η διέλευση του πολύ έντονου ρεύματος της διάσπασης, προκαλεί τοπικά την τήξη, καύση ή εξαέρωση του υλικού και έχει σαν αποτέλεσμα το σχηματισμό μιας λεπτής τρύπας στο σώμα κατά μήκος του πεδίου. Προκαλείται, επομένως, καταστροφή του υλικού και μόνιμη απώλεια της μονωτικής του ικανότητας. Αντίθετα, στα αέρια και υγρά μονωτικά η διάσπαση δεν προκαλεί σοβαρή μόνιμη βλάβη αφού, αν στη συνέχεια μειωθεί η τάση κάτω από την κρίσιμη τιμή, έχουμε αποκατάσταση των μονωτικών συνθηκών.

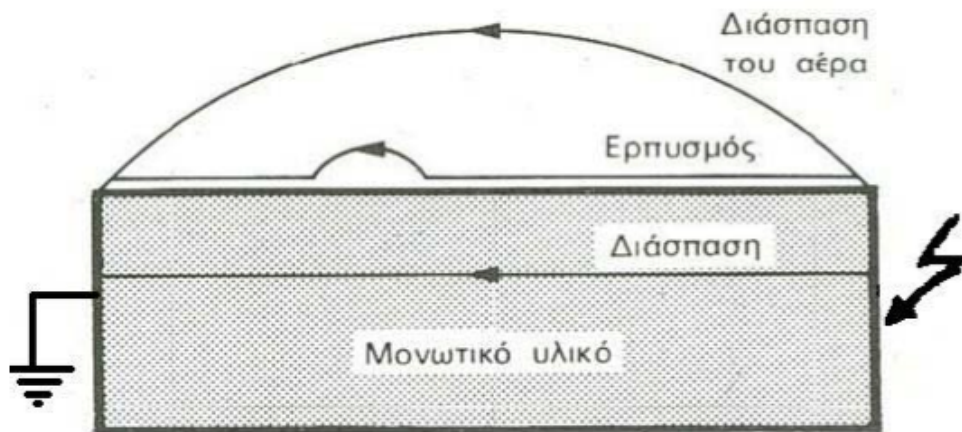
Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η ηλεκτρική διάσπαση στα στερεά μονωτικά υλικά που βρίσκονται σε αέριο περιβάλλον και κυρίως στον ατμοσφαιρικό αέρα. Τέτοιες διατάξεις είναι και οι μονωτήρες, στους οποίους απώλεια της μόνωσης μπορεί να επέλθει με τρεις διαφορετικούς τρόπους:

1. Ο πρώτος είναι η κανονική ηλεκτρική διάσπαση του μονωτήρα (διάτρηση) και η εκκένωση ρεύματος δια μέσου της μάζας του, φαινόμενο που εκδηλώνεται όταν η διαφορά δυναμικού ξεπεράσει την τάση διάσπασης του υλικού. Η διάτρηση του μονωτήρα είναι ένα εξαιρετικά σπάνιο φαινόμενο, αφού η ειδική αγωγιμότητα όγκου του μονωτικού υλικού είναι πολύ μικρότερη της ειδικής επιφανειακής αγωγιμότητας του. Έτσι, οι ενδεχόμενες ηλεκτρικές εκκενώσεις πραγματοποιούνται ως επί το πλείστον στην επιφάνεια του μονωτήρα ή μέσω διάσπασης μορίων του αέρα γύρω από αυτήν, παρά διαμέσου του υλικού του. Διάτρηση, βέβαια, μπορεί να επιτευχθεί και μέσα σε περιβάλλον ατμοσφαιρικού αέρα, εφόσον, όμως η επιβαλλόμενη τάση είναι κρουστική, μεγάλης τιμής και μεγάλης κλίσεως μετώπου (π.χ. κεραυνοπληξία).

2. Ο δεύτερος τρόπος με τον οποίο είναι δυνατό να επέλθει απώλεια της μόνωσης σε μια διάταξη μονωτήρα είναι η ανάπτυξη ενός ισχυρού ρεύματος ερπυσμού πάνω στην επιφάνεια του υλικού. Το ρεύμα ερπυσμού μπορεί να εκτείνεται σε όλο το μήκος της επιφάνειας του μονωτικού, ή συνήθως, σε διάφορα μέρη της που συνδέονται με μικρά ηλεκτρικά τόξα. Τα δημιουργημένα κατά την υπερπήδηση ηλεκτρικά τόξα έρχονται σε επαφή με το στερεό μονωτικό καθορίζοντας, ταυτόχρονα, (κατά ένα ποσοστό τουλάχιστο 50%) την "οδό διέλευσης" νέου ηλεκτρικού τόξου που, ενδεχόμενα, θα λάβει χώρα στο μέλλον.

3. Όταν η μεταξύ των δύο ακρότατων σημείων του μονωτήρα επιβαλλόμενη

τάση υπερβεί μια κρίσιμη τιμή, σημειώνεται υπερπήδηση (flashover) του μονωτήρα, δηλαδή γεφύρωση του διακένου μεταξύ του σημείου πρόσδεσης του αγωγού της γραμμής στο μονωτήρα και του προσγειωμένου σημείου στήριξης ή ανάρτησης του μονωτήρα με ηλεκτρικό τόξο που οδεύει διαμέσου του αέρα.

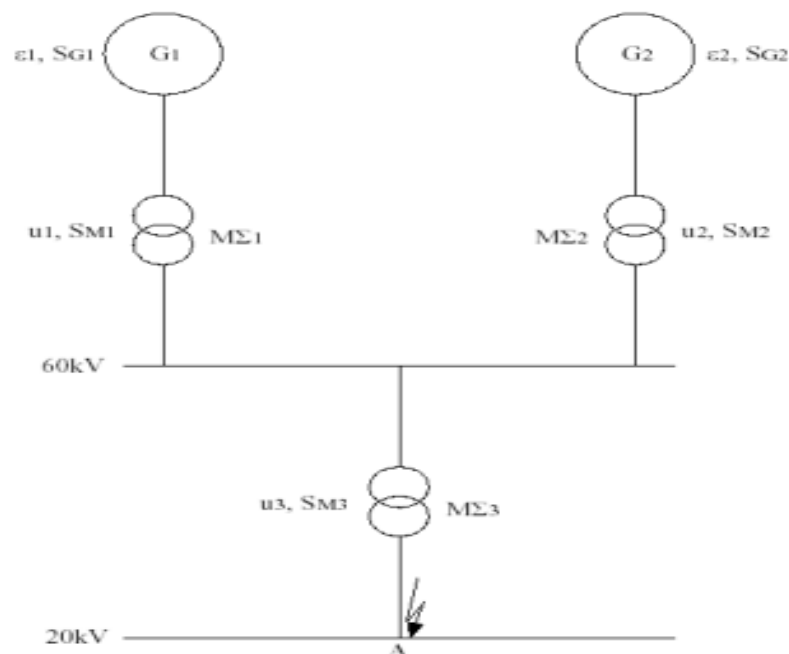


Σχήμα 11 : Διάσπαση του υλικού, του αέρα και ερπυσμός σε μονωτικό υλικό

4. Θερμική Αντοχή

4.1 Θερμική καταπόνηση των αγωγών κατά το βραχυκύκλωμα

Για τη θερμική καταπόνηση των αγωγών μελετάται η δυσμενέστερη κατάσταση λειτουργίας, η οποία θεωρείται ότι είναι το βραχυκύκλωμα. Το βραχυκύκλωμα προκαλεί στους αγωγούς, στις επαφές (λυόμενες ή μόνιμες) και στον εξοπλισμό γενικά μια επιπλέον θερμική καταπόνηση. Αν υποθεθεί ότι στο σημείο A της εγκατάστασης του σχήματος 4.1-1 εκδηλώνεται κάποιο βραχυκύκλωμα, τότε η συνολική ισχύς του δικτύου θα οδεύσει προς το σημείο αυτό. Το ρεύμα βραχυκύκλωσης είναι η τιμή του ρεύματος στο σημείο A. Η τιμή αυτή εξαρτάται από την αντίσταση του δικτύου μέχρι το σημείο βραχυκύκλωσης.



Σχήμα 4.1-1 : Παράδειγμα βραχυκυκλώματος [1]

ϵ_1 και ϵ_2 : οι κρουστικές τάσεις διασποράς των γεννητριών G1 και G2

SG1 και SG2 : ονομαστική ισχύς των γεννητριών G1 και G2 αντίστοιχα

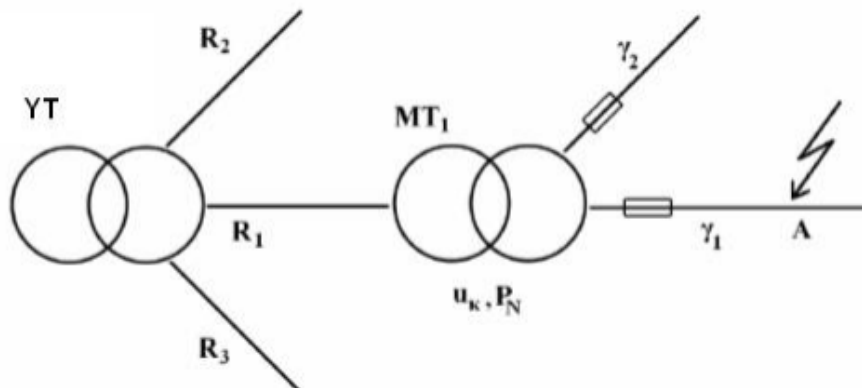
u1, u2 και u3 : σχετική τάση βραχυκύκλωσης των μετασχηματιστών

MΣ1, MΣ2 και MΣ3 αντίστοιχα

SM1, SM2 και SM3 : ονομαστική ισχύς των μετασχηματιστών MΣ1, MΣ2 και MΣ3

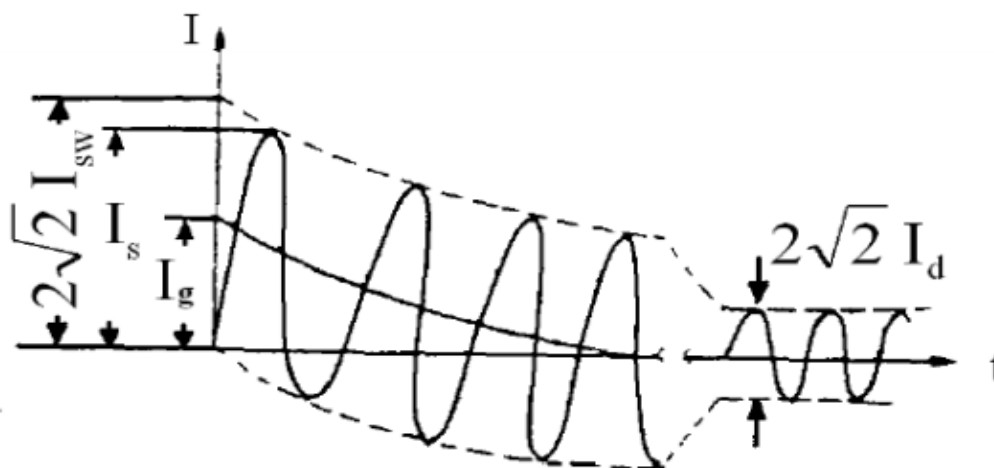
4.2 Αναλυση Βραχυκυκλώματος

Στις γραμμές διανομής χαμηλής τάσης ο σχεδιασμός λαμβάνει υπόψιν την καταπόνηση τους απο βραχυκύκλωμα.



Σχήμα 4.2-1: Απλοποιημένο παράδειγμα διανομής χαμηλής τάσης

Έστω το παραπάνω δίκτυο που τροφοδοτείται από ένα μετασχηματιστή υψηλής τάσης (YT) και στην συνέχεια ακολουθεί ένας μετασχηματιστής διανομής (MT1). Έστω στο σημείο A εκδηλώνεται συμμετρικό βραχυκύκλωμα και επομένως το σύνολο της ισχύος του δικτύου οδεύει προς το σημείο αυτό και έτσι η συνολική τιμή ρεύματος στο σημείο αυτό είναι το ρεύμα βραχυκυκλώσης. Το οποίο έχει την παρακάτω κυματομορφή.

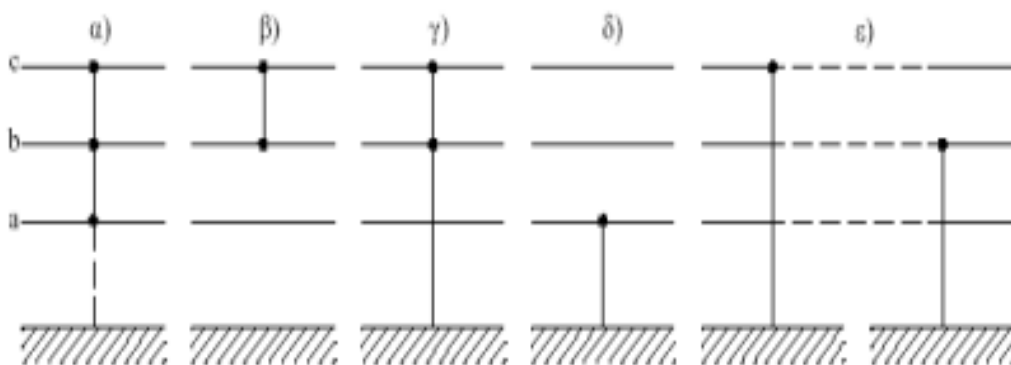


Σχήμα 4.2-2 : Κυματομορφή του ρεύματος βραχυκύκλωσης [1]

Όπως φαίνεται στο σχήμα 4.2-2 το ρεύμα βραχυκύκλωσης εμφανίζεται αρχικά ως ασύμμετρο και κατόπιν ως συμμετρικό. Το ασύμμετρο τμήμα περιλαμβάνει το εναλλασσόμενο (I_{sw}) και το συνεχές ρεύμα βραχυκύκλωσης (I_g). Το συμμετρικό τμήμα βραχυκύκλωσης αποτελείται από το διαρκές ρεύμα βραχυκύκλωσης (I_d). Η

μέγιστη τιμή του ρεύματος βραχυκύκλωσης ονομάζεται κρουστικό ρεύμα βραχυκύκλωσης (IS).

Το Σχήμα 4.2-3 δείχνει τα σπουδαιότερα βραχυκυκλώματα. Το τριφασικό και το διφασικό βραχυκύκλωμα χωρίς επαφή γης ή με επαφή γης προκαλεί μεγάλα ρεύματα βραχυκυκλώσεως. Επειδή το τριφασικό βραχυκύκλωμα είναι ένα συμμετρικό σφάλμα, τα ρεύματα βραχυκυκλώσεως δεν επηρεάζονται από την ενδεχόμενη ύπαρξη επαφής προς γη, που συμβολίζεται με διακεκομμένη γραμμή στο Σχήμα 4.2-3.α.



Σχήμα 4.2-3 : Είδη βραχυκυκλωμάτων: [1]

- α) Τριφασικό βραχυκύκλωμα
- β) Διφασικό βραχυκύκλωμα χωρίς επαφή γης
- γ) Διφασικό βραχυκύκλωμα με επαφή γης
- δ) Μονοφασικό βραχυκύκλωμα
- ε) Διπλό βραχυκύκλωμα

4.3 Θερμοκρασία των αγωγών υπό ρεύμα I_d

Για τη θερμότητα W_θ ενός αγωγού με ειδική θερμότητα c και όγκο V ισχύει η σχέση:

$$W_\theta = V \cdot c \cdot \Delta\theta = A \cdot L \cdot c \cdot \Delta\theta \quad (4.3.1)$$

όπου A η διατομή του αγωγού και L το μήκος του.

Για την ηλεκτρική ενέργεια W_η στην αντίσταση R του αγωγού λόγω του διαρκούς ρεύματος βραχυκύκλωσης ενεργού τιμής I_d ισχύει:

$$W_\eta = I_d^2 \cdot R \cdot t = I_d^2 \cdot \rho(L/A) \cdot t \quad (4.3.2)$$

Όπου ρ η ειδική αντίσταση και t ο χρόνος βραχυκύκλωσης.

Από τις δύο ανωτέρω σχέσεις έπεται ότι:

$$t = \Delta\theta \cdot A^2 / \kappa(I_d^2) \quad (4.3.3)$$

όπου $\kappa = \rho/c$. Για τον χαλκό είναι $\rho = 1/56 \text{ } \Omega \text{ mm}^2/\text{m}$ και $c = 3,44 \text{ Ws / } ^\circ\text{C cm}^3$ και επομένως: $\kappa = 0,0052$. Για το αλουμίνιο αποδεικνύεται αντίστοιχα ότι είναι $\kappa = 0,0135$.

Για την πτώση τάσης ΔU στον αγωγό αποδεικνύεται από τις ανωτέρω σχέσεις ότι ισχύει:

$$\Delta U^2 = L^2 \cdot (\Delta\theta \cdot \rho \cdot c) / t \quad (4.3.4)$$

Στον παρακάτω πίνακα δίνονται τιμές της ειδικής αντίστασης ρ , της ειδικής αγωγιμότητας σ και του συντελεστή θερμικής διαστολής α , που χρησιμεύουν σε διάφορους υπολογισμούς

Υλικό	ρ [$\Omega \text{ mm}^2/\text{m}$]	σ [S/m]	α [$^\circ\text{C}$]
Χαλκός	0,0170 - 0,0178	$(5,6 - 5,9) \cdot 10^7$	$3,9 \cdot 10^{-3}$
Αλουμίνιο	0,0280 - 0,03	$(3,3 - 3,6) \cdot 10^7$	$3,7 \cdot 10^{-3}$
Ψευδάργυρος	0,063	$1,6 \cdot 10^7$	$3,7 \cdot 10^{-3}$
Σίδηρος	0,09 - 0,15	$(0,67-1,1) \cdot 10^7$	$4,5 \cdot 10^{-3}$
Θαλασσινό νερό	$3 \cdot 10^5$	3	-
Τρεχούμενο νερό	$10^7 - 10^8$	$10^{-2} - 10^{-1}$	-
Αποσταγμένο νερό	$(1-4) \cdot 10^{10}$	$(0,2-0,1) \cdot 10^{-4}$	-
Γη	$10^8 - 10^{10}$	$10^{-4} - 10^{-2}$	

Πίνακας 4.3-1: Ενδεικτικές τιμές της ειδικής αντίστασης ρ , της ειδικής αγωγιμότητας σ και του συντελεστή θερμικής διαστολής α διαφόρων υλικών.

5. Μαθηματική επεξεργασία της συνθήκης ουδετέρωσης σε δίκτυα Χ.Τ της Δ.Ε.Η.

Στην παράγραφο αυτή εξετάζεται μια πολύ βασική παράμετρος απωλειών ενέργειας αλλά και επιβάρυνσης των εναέριων γραμμών μεταφοράς, αυτή της θερμικής καταπόνησης λόγω της διέλευσης του ηλεκτρικού ρεύματος. Συγκεκριμένα, έχοντας πάντα σαν βασικό άξονα τη συνθήκη ουδετέρωσης στα δίκτυα διανομής ΧΤ, ελέγχεται η καταπόνηση του ουδετέρου αγωγού του δικτύου ΧΤ κατά το βραχυκύκλωμα, λόγω της αύξησης της θερμοκρασίας του αγωγού, που προκαλείται από το αντίστοιχο ρεύμα βραχυκύκλωσης.[9]

Συγκεκριμένα, η ΔΕΗ παραθέτει έναν τύπο (ανίσωση 5.1) σύμφωνα με τον οποίο, υπολογίζονται (σε km) τα αναγραφόμενα, μέγιστα μήκη των πινάκων. Αρχικά, θέλουμε να επαληθεύσουμε την δοθείσα ανίσωση βάσει του ισοδύναμου κυκλώματος και για συνθήκες βραχυκύκλωσης όπου : $I_{\beta\rho\alpha\chi} \geq 3 \cdot I_{ov}$. Στη συνέχεια, χρησιμοποιώντας τον τύπο της ανίσωσης και αντικαθιστώντας σ' αυτόν τις τιμές των αγνώστων μεγεθών, όπως προκύπτουν από αντίστοιχους πίνακες, θα υπολογίσουμε τα μέγιστα μήκη (σε m και όχι km) των εναέριων γραμμών ΧΤ, τα οποία και τελικά θα συγκρίνουμε με τα αντίστοιχα των πινάκων της ΔΕΗ. [9]

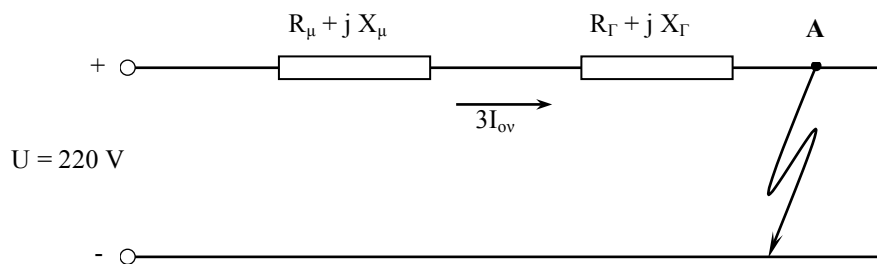
Η ανίσωση που δίνει η ΔΕΗ για τον υπολογισμό των μεγίστων μηκών (σε km) των εναέριων γραμμών ΧΤ, για συνθήκες βραχυκυκλώσεως όπου : $I_{\beta\rho\alpha\chi} \geq 3 \cdot I_{ov}$, έχει τη μορφή :

$$l \leq \sqrt{\left(\frac{220}{3Z_{\gamma}I_{ov}}\right)^2 - \left(\frac{R_{\gamma}X_{\mu} - X_{\gamma}R_{\mu}}{Z_{\gamma}^2}\right)^2 - \left(\frac{R_{\gamma}R_{\mu} + X_{\gamma}X_{\mu}}{Z_{\gamma}^2}\right)} \quad (5.1)$$

όπου $I_{\beta\rho\alpha\chi}$: το ρεύμα (σε A) που διαρέει το κύκλωμα τη στιγμή του βραχυκυκλώματος
 I_{ov} : η ονομαστική τιμή της ασφάλειας της γραμμής (σε A), η οποία επιλέγεται βάσει του Μ/Σ που χρησιμοποιείται κάθε φορά.
 Z_{γ} : η σύνθετη αντίσταση της γραμμής (σε Ω/km)
 Z_{μ} : η σύνθετη αντίσταση του Μ/Σ (σε Ω)

Θεωρούμε ότι το ισοδύναμο μονοφασικό κύκλωμα εναέριας γραμμής μεταφοράς, η οποία υφίσταται βραχυκύκλωμα στο σημείο Α, σε απόσταση l από την πηγή U , απεικονίζεται στο κύκλωμα που ακολουθεί. Ο Μ/Σ του δικτύου έχει σύνθετη αντίσταση

\hat{Z}_μ και συνδέεται σε σειρά με τη γραμμή μεταφοράς, η οποία για μήκος l έχει συνολική σύνθετη αντίσταση \hat{Z}_Γ .



Πιο αναλυτικά, η σύνθετη αντίσταση του Μ/Σ ισούται με :

$$\hat{Z}_\mu = R_\mu + j \cdot X_\mu \quad \text{σε } (\Omega)$$

Η σύνθετη αντίσταση της εναέριας γραμμής σε (Ω) , για μήκος l , ισούται με :

$$\hat{Z}_\Gamma = \hat{Z}_\gamma \cdot l = R_\gamma \cdot l + j \cdot X_\gamma \cdot l \quad \text{σε } (\Omega)$$

όπου το \hat{Z}_γ δίνεται σε (Ω/km) και το l (σε km).

Επομένως, η συνολική σύνθετη αντίσταση του κυκλώματος είναι :

$$\hat{Z} = \hat{Z}_\mu + \hat{Z}_\Gamma = \hat{Z}_\mu + \hat{Z}_\gamma \cdot l = \left(R_\mu + R_\gamma \cdot l \right) + j \left(X_\mu + X_\gamma \cdot l \right) \quad \text{σε } (\Omega)$$

το μέτρο της οποίας δίνεται από την σχέση που ακολουθεί :

$$|\hat{Z}| = \sqrt{\left(R_\mu + R_\gamma \cdot l \right)^2 + \left(X_\mu + X_\gamma \cdot l \right)^2}$$

Για να αποδείξουμε την ανίσωση (5.1), ξεκινώντας από τη συνθήκη βραχυκυκλώσεως που προαναφέραμε, προκύπτει :

$$I_{\beta\rho\alpha\chi} \cong 3 I_{\text{ov}} \quad (5.2)$$

Αντικαθιστώντας το $I_{\beta\rho\alpha\chi}$ με :

$$I_{\beta\rho\alpha\chi} = \frac{U}{|\hat{Z}|} = \frac{220}{|\hat{Z}|}$$

και λύνοντας την ανίσωση (5.2) ως προς $|\hat{Z}|$, προκύπτει :

$$\frac{220}{3I_{\text{ov}}} \geq \sqrt{\left(R_{\mu} + R_{\gamma} \cdot 1\right)^2 + \left(X_{\mu} + X_{\gamma} \cdot 1\right)^2} \Rightarrow$$

$$\frac{220}{3I_{\text{ov}}} \geq \sqrt{R_{\mu}^2 + R_{\gamma}^2 \cdot 1^2 + 2l \cdot R_{\mu} \cdot R_{\gamma} + X_{\mu}^2 + X_{\gamma}^2 \cdot 1^2 + 2l \cdot X_{\mu} \cdot X_{\gamma}}$$

Υψώνουμε τα δύο μέλη της ανίσωσης στο τετράγωνο και λύνουμε ως προς το l^2 . Προκύπτει επομένως η παρακάτω ανίσωση δευτέρου βαθμού :

$$l^2 + 2l \cdot \frac{R_{\mu}R_{\gamma} + X_{\mu}X_{\gamma}}{R_{\gamma}^2 + X_{\gamma}^2} - \left(\frac{220}{3I_{\text{ov}}Z_{\gamma}}\right)^2 + \frac{Z_{\mu}^2}{Z_{\gamma}^2} \leq 0 \quad (5.3)$$

Αναζητούμε τις λύσεις (δηλαδή τα l) για τις οποίες το τριώνυμο γίνεται αρνητικό ή μηδέν.

Υπολογίζουμε πρώτα τη διακρίνουσα του τριωνύμου :

$$\Delta = \frac{4}{Z_{\gamma}^4} \cdot (R_{\mu}R_{\gamma} + X_{\mu}X_{\gamma})^2 + 4 \cdot \left(\frac{220}{3I_{\text{ov}}Z_{\gamma}}\right)^2 - 4 \cdot \frac{Z_{\mu}^2}{Z_{\gamma}^2} \Rightarrow$$

$$\Delta = \frac{4}{Z_{\gamma}^2} \cdot \left[\left(\frac{R_{\mu}R_{\gamma} + X_{\mu}X_{\gamma}}{Z_{\gamma}}\right)^2 + \left(\frac{220}{3I_{\text{ov}}}\right)^2 - Z_{\mu}^2 \right] \Rightarrow$$

$$\sqrt{\Delta} = \frac{2}{Z_\gamma} \cdot \sqrt{\left(\frac{R_\mu R_\gamma + X_\mu X_\gamma}{Z_\gamma}\right)^2 + \left(\frac{220}{3I_{ov}}\right)^2 - R_\mu^2 - X_\mu^2} \Rightarrow$$

Οι λύσεις ενός τριωνύμου της μορφής : $\alpha l^2 + \beta l + \gamma = 0$, δίνονται από τις σχέσεις :

$$l_{1,2} = \frac{-\beta \pm \sqrt{\Delta}}{2\alpha} \Rightarrow$$

όπου :

$$l_1 = \frac{-\beta + \sqrt{\Delta}}{2\alpha} > 0 \quad (5.4)$$

και

$$l_2 = \frac{-\beta - \sqrt{\Delta}}{2\alpha} < 0 \quad (5.5)$$

άρα $l_2 < l_1$

Για τις τιμές του l που ανήκουν στο διάστημα $[l_2, l_1]$, το τριώνυμο έχει πρόσημο ετερόσημο του συντελεστή του l^2 , δηλαδή ετερόσημο του $+1$. Άρα στο παραπάνω διάστημα το τριώνυμο είναι μικρότερο ή ίσο του μηδενός. Επομένως για το l ισχύει ότι:

$$l_2 \leq l \leq l_1$$

Άρα η μέγιστη τιμή που μπορεί να πάρει το l είναι η τιμή l_1 . Από τη σχέση (5.4) υπολογίζουμε την l_1 :

$$l_1 = \frac{-2(R_\mu R_\gamma + X_\mu X_\gamma)}{2Z_\gamma^2} + \frac{2}{2Z_\gamma} \cdot \sqrt{\left(\frac{R_\mu R_\gamma + X_\mu X_\gamma}{Z_\gamma}\right)^2 + \left(\frac{220}{3I_{ov}}\right)^2 - R_\mu^2 - X_\mu^2} \Rightarrow$$

$$l_1 = -\left(\frac{R_\mu R_\gamma + X_\mu X_\gamma}{Z_\gamma^2}\right) + \frac{1}{Z_\gamma} \sqrt{\frac{(R_\mu R_\gamma + X_\mu X_\gamma)^2}{Z_\gamma^2} - \frac{Z_\gamma^2 \cdot (R_\mu^2 + X_\mu^2)}{Z_\gamma^2} + \left(\frac{220}{3I_{ov}}\right)^2} \Rightarrow$$

$$l_1 = -\left(\frac{R_\mu R_\gamma + X_\mu X_\gamma}{Z_\gamma^2}\right) + \sqrt{\left(\frac{220}{3 \cdot I_{ov} \cdot Z_\gamma}\right)^2 - \left(\frac{R_\gamma X_\mu - X_\gamma R_\mu}{Z_\gamma^2}\right)^2}$$

Άρα για $l \leq l_1$ αποδεικνύεται η ανίσωση (5.1) :

$$l \leq - \left(\frac{R_\mu R_\gamma + X_\mu X_\gamma}{Z_\gamma^2} \right) + \sqrt{\left(\frac{220}{3 \cdot I_{ov} Z_\gamma} \right)^2 - \left(\frac{R_\gamma X_\mu - X_\gamma R_\mu}{Z_\gamma^2} \right)^2}$$

Εφαρμόζοντας την παραπάνω ανίσωση για τις αντίστοιχες τιμές των ωμικών (R_γ) και επαγωγικών (X_γ) αντιστάσεων αγωγών Χ.Τ., αλλά και των ωμικών (R_μ) και επαγωγικών (X_μ) αντιστάσεων των Μ/Σ διανομής που χρησιμοποιούνται κάθε φορά, με τις αντίστοιχες ασφάλειές τους (I_{ov}), προκύπτει ο πίνακας 5 που περιέχει τα μέγιστα μήκη (l_{max}) γραμμών Χ.Τ. για τα οποία ισχύει η συνθήκη : $I_{βραχ} \geq 3 \cdot I_{ov}$.

Οι τιμές των ωμικών (R_γ) και επαγωγικών (X_γ) αντιστάσεων των αγωγών Χ.Τ., προέκυψαν από τον πίνακα 5-1, λαμβάνοντας όμως υπόψη κάθε φορά και την επιστροφή του ρεύματος μέσω του ουδετέρου. Δηλαδή, στις εναέριες γραμμές, χρησιμοποιήσαμε για τα R_γ και X_γ αντίστοιχα, τις διπλάσιες τιμές των R και X του πίνακα και στα συνεστραμμένα καλώδια χρησιμοποιήσαμε, για τα μεν R_γ , το άθροισμα των ωμικών αντιστάσεων R, φάσης και ουδετέρου, για τα δε X_γ , τις διπλάσιες τιμές των επαγωγικών αντιστάσεων X που δίνονται παρακάτω.[9]

<i>ΩΜΙΚΕΣ ΚΑΙ ΕΠΑΓΩΓΙΚΕΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΕΙΣ ΑΓΩΓΩΝ Χ.Τ. (ανα φάση)</i>				
<i>ΕΝΑΕΡΙΕΣ ΓΡΑΜΜΕΣ</i>				
<i>ΙΣΟΔΥΝΑΜΗ ΔΙΑΤΟΜΗ Cu (mm²)</i>	<i>4x16</i>	<i>4x35</i>	<i>4x50</i>	<i>4x70</i>
<i>R (Ω/km)</i>	<i>1,140</i>	<i>0,533</i>	<i>0,381</i>	<i>0,277</i>
<i>X (Ω/km)</i>	<i>0,330</i>	<i>0,306</i>	<i>0,294</i>	<i>0,284</i>
<i>ΣΥΝΕΣΤΡΑΜΜΕΝΑ ΚΑΛΩΔΙΑ</i>				
<i>ΔΙΑΤΟΜΗ Cu (mm²)</i>	<i>3x35 + 54,6</i>		<i>3x70 + 54,6</i>	
<i>R (Ω/km)</i>	<i>0,868</i>	<i>0,630</i>	<i>0,443</i>	<i>0,630</i>
<i>X (Ω/km)</i>	<i>0,1</i>		<i>0,1</i>	

Πίνακας 5-1 : Πίνακας ωμικών και επαγωγικών αντιστάσεων αγωγών Χ.Τ., ανα φάση.

Οι ανα φάση τιμές των ωμικών (R_{μ}) και επαγωγικών (X_{μ}) αντιστάσεων των Μ/Σ διανομής που χρησιμοποιήσαμε, περιέχονται στον πίνακα 5-2 .

<i>ΩΜΙΚΕΣ ΚΑΙ ΕΠΑΓΩΓΙΚΕΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΕΙΣ (σε Ω) Μ/Σ ΔΙΑΝΟΜΗΣ .</i>													
<i>kVA</i>	<i>15</i>	<i>25</i>	<i>50</i>	<i>75</i>	<i>100</i>	<i>150</i>	<i>200</i>	<i>250</i>	<i>400</i>	<i>500</i>	<i>630</i>	<i>750</i>	<i>1000</i>
R_{μ}	356	175	75	40	29	18,3	13,4	10,5	5,7	4,5	3,6	3	2,2
X_{μ}	320	228	122	86,8	65,5	44,5	33,5	26,8	17	13,7	10,8	9,1	6,9

Πίνακας 5-2 : Πίνακας ωμικών και επαγωγικών αντιστάσεων Μ/Σ διανομής, ανα φάση.

5.1 Μέγιστα μήκη γραμμών υπό τάση 230V ± 10 %

Από τα παραπάνω, προκύπτει ο πίνακας 5.1-1 στον οποίο δίνονται τα μέγιστα μήκη (l_{max} , σε m) γραμμών Χ.Τ. υπο τάση 230V για τα οποία ισχύει η συνθήκη : $I_{βραχ} \geq 3 \cdot I_{ov}$.

Στον πίνακα δίνονται οι τιμές για την επιλογή των ασφαλειών σε πίνακες χαμηλής τάσης της ΔΕΗ, ανάλογα με την ισχύ του μετασχηματιστή. Σε κάθε ασφάλεια αντιστοιχεί ένα μέγιστο μήκος γραμμής σε μέτρα (m). Το μέγιστο αναφέρεται στο μήκος της γραμμής απ' το μετασχηματιστή μέχρι και το μετρητή του καταναλωτή.

Απο τα παραπάνω έχει υπολογιστεί στους πίνακες 5.1-1α , 5.1-1β , 5.1-1γ τα μέγιστα μήκη μιας γραμμής Χ.Τ ανάλογα με το μέγεθος της ασφάλειας, της ονομαστικής ισχύς του μετασχηματιστή και το είδος του αγωγού. Στους πίνακες αυτούς η τιμή της φασικής τάσης θεωρείται 230V.

Πίνακας 5.1-1α: Μεγιστα μήκη γραμμών διανομής υπο τάση 230V με ισχύ μετασχηματιστή απο 15 KVA – 200 KVA

Ισχύς KVA	Ασφάλεια A	Γυμνοί αγωγοί 16 mm ²	Γυμνοί αγωγοί 35 mm ²	Γυμνοί αγωγοί 50 mm ²	Γυμνοί αγωγοί 70 mm ²	Συνεστραμμένο καλώδιο 3x35+54,6 mm ²	Συνεστραμμένο Καλώδιο 3x70+54,6 mm ²
Μήκος γραμμής σε m							
15	25	1107.45	2112.73	2681.80	3262.96	1759.78	2425.98
	32	823.99	1566.61	1984.80	2417.39	1313.67	1808.75
25	32	909.28	1731.20	2199.35	2659.66	1444.85	1992.07
	40	706.77	1340.86	1701.22	2055.64	1126.37	1551.29
50	50	600.08	1143.85	1453.08	1756.11	952.05	1313.42
	63	466.44	886.12	1124.12	1357.21	742.00	1022.65
	80	357.06	675.32	855.15	1031.14	569.97	784.57
75	63	485.43	925.61	1175.51	1419.76	769.62	1062.05
	80	376.24	714.96	906.61	1093.68	598.03	824.50
	100	295.20	558.70	707.21	851.94	470.64	648.17
	125	230.24	433.55	547.57	658.47	368.47	506.77
100	63	492.76	942.43	1198.42	1448.53	779.45	1076.51
	80	383.68	731.89	929.61	1122.59	608.07	839.23
	100	302.76	575.77	730.32	880.97	480.92	663.21
	125	237.95	450.79	570.81	687.63	379.06	522.20
	160	181.14	341.30	431.14	518.39	289.71	398.54
150-160	80	390.82	748.34	952.06	1151.41	617.62	853.28
	100	309.99	592.31	752.85	909.78	490.64	677.48
	125	245.29	467.46	593.44	716.45	389.00	536.76
	160					299.96	413.49
	200	148.10	280.00	354.19	426.36	236.24	325.30
	250	115.60	217.39	274.34	329.60	185.13	254.56
200	80	394.22	756.40	963.20	1165.74	622.05	859.88
	100	313.43	600.42	764.02	924.13	495.14	684.16
	125	248.77	475.61	604.66	730.83	393.58	543.54
	160	192.17	366.37	465.19	561.67	304.65	420.42
	200	151.71	288.30	365.53	440.82	241.07	332.40
	250	119.29	225.80	285.76	344.11	190.13	261.88

Πίνακας 5.1-1β: Μεγιστα μήκη γραμμών διανομής υπο τάση 230V με ισχύ μετασχηματιστή απο 250 KVA – 500 KVA

Ισχύς KVA	Ασφάλεια A	Γυμνοί αγωγοί 16 mm ²	Γυμνοί αγωγοί 35 mm ²	Γυμνοί αγωγοί 50 mm ²	Γυμνοί αγωγοί 70 mm ²	Συνεστραμμένο καλώδιο 3x35+54, 6 mm ²	Συνεστραμμένο Καλώδιο 3x70+54,6 mm ²
250	80	396.24	761.24	969.91	1174.38	624.66	863.77
	100	315.47	605.28	770.74	932.78	497.79	688.10
	125	250.83	480.49	611.40	739.49	396.26	547.53
	160	194.26	371.28	471.95	570.35	307.39	424.48
	200	153.82	293.25	372.32	449.52	243.87	336.54
	250	121.45	230.79	292.60	352.84	193.00	266.12
	315	94.70	179.20	226.75	273.02	150.95	207.91
	400	72.79	136.97	172.89	207.74	116.49	160.21
400	80	399.40	768.67	980.50	1187.49	628.80	869.91
	100	318.64	612.73	781.36	945.90	501.95	694.28
	125	254.03	487.97	622.03	752.63	400.47	553.76
	160	197.48	378.79	482.61	583.50	311.65	430.78
	200	157.08	300.80	383.02	462.70	248.20	342.92
	250	124.75	238.39	303.33	366.04	197.41	272.61
	315	98.05	186.86	237.54	286.25	155.47	214.54
	400	76.21	144.72	183.75	221.02	121.15	167.03
500	80	400.29	770.88	983.24	1191.53	629.91	871.58
	100	319.53	614.94	784.10	949.95	503.07	695.96
	125	254.92	490.18	624.78	756.68	401.59	555.46
	160	198.39	381.02	485.37	587.57	312.79	432.50
	200	157.99	303.03	385.78	466.76	249.35	344.66
	250	125.68	240.64	306.11	370.12	198.58	274.37
	315	98.99	189.12	240.33	290.34	156.66	216.33
	400	77.17	147.01	186.56	225.12	122.38	168.87

Πίνακας 5.1-1γ: Μεγιστα μήκη γραμμών διανομής υπο τάση 230V με ισχύ μετασχηματιστή απο 630 KVA – 1000 KVA

Ισχύς KVA	Ασφάλεια A	Γυμνοί αγωγοί 16 mm ²	Γυμνοί αγωγοί 35 mm ²	Γυμνοί αγωγοί 50 mm ²	Γυμνοί αγωγοί 70 mm ²	Συνεστραμμένο καλώδιο 3x35+54,6 mm ²	Συνεστραμμένο Καλώδιο 3x70+54,6 mm ²
-----------	------------	----------------------------------	----------------------------------	----------------------------------	----------------------------------	---	---

630	80	401.01	772.70	985.83	1194.95	630.77	872.91
	100	320.25	616.77	786.69	953.37	503.94	697.30
	125	255.65	492.02	627.38	760.11	402.47	556.80
	160	199.11	382.86	487.98	590.99	313.68	433.86
	200	158.73	304.88	388.40	470.20	250.25	346.03
	250	126.42	242.49	308.73	373.56	199.50	275.76
	315	99.74	190.99	242.97	293.79	157.60	217.75
	400	77.93	148.89	189.21	228.58	123.34	170.31
750	80	401.45	773.82	987.41	1197.02	631.33	873.75
	100	320.70	617.89	788.27	955.44	504.50	698.14
	125	256.10	493.14	628.96	762.17	403.03	557.65
	160	199.57	383.98	489.56	593.07	314.24	434.71
	200	159.18	306.01	389.99	472.27	250.82	346.89
	250	126.88	243.63	310.32	375.63	200.07	276.63
	315	100.20	192.13	244.56	295.87	158.18	218.62
	400	78.40	150.04	190.81	230.67	123.93	171.20
1000	80	402.04	775.28	989.73	1199.71	632.05	874.85
	100	321.29	619.35	790.59	958.13	505.23	699.25
	125	256.69	494.61	631.28	764.87	403.76	558.76
	160	200.16	385.45	491.88	595.76	314.98	435.83
	200	159.78	307.48	392.31	474.97	251.56	348.02
	250	127.48	245.11	312.65	378.34	200.82	277.76
	315	100.81	193.62	246.90	298.57	158.94	219.77
	400	79.01	151.53	193.15	233.38	124.70	172.37

Ο ανωτέρω πίνακας δίνεται στη βιβλιογραφία [1,6] και αποδεικνύεται ότι ισχύει μέσω της σχέσης 5-1. Ακόμα υπολογίστηκαν εκ νέου οι πίνακες αυτοί με τιμή τάσης 230+10% και 230-10%. Συγκεκριμένα στους πίνακες 5.1-2α , 5.1-2β ,5.1-2γ η τάση είναι 253V και στους πίνακες 5.1-3α , 5.1-3β , 5.1-3γ η τάση τώρα είναι 207V

Πίνακας 5.1-2α: Μεγιστα μήκη γραμμών διανομής υπο τάση 253V (230V+10%) με ισχύ μετασχηματιστή απο 15 KVA – 250 KVA

Ισχύς KVA	Ασφάλεια A	Γυμνοί αγωγοί 16 mm ²	Γυμνοί αγωγοί 35 mm ²	Γυμνοί αγωγοί 50 mm ²	Γυμνοί αγωγοί 70 mm ²	Συνεστραμμένο καλώδιο 3x35+54,6 mm ²	Συνεστραμμένο καλώδιο 3x70+54,6 mm ²
15	25	1236.92	2362.34	3000.43	3649.50	1963.41	2707.79
	32	925.27	1761.68	2233.73	2719.38	1473.13	2029.34
25	32	1010.45	1926.30	2448.37	2961.65	1603.90	2212.22
	40	787.81	1497.03	1900.48	2297.25	1253.84	1727.70
50	50	664.79	1268.71	1612.46	1949.41	1053.75	1454.20
	63	517.86	985.27	1250.65	1510.64	822.82	1134.53
	80	397.62	753.46	954.84	1151.99	633.78	872.87
75	63	536.79	1024.71	1302.02	1573.19	850.30	1173.75
	80	416.72	793.04	1006.28	1214.53	661.64	912.57
	100	327.63	621.22	786.99	948.65	521.62	718.74
	125	256.25	483.64	611.45	735.87	409.37	563.38
100	63	544.08	1041.48	1324.90	1601.90	860.07	1188.12
	80	424.11	809.92	1029.24	1243.38	671.60	927.18
	100	335.14	638.23	810.05	977.62	531.80	733.64
	125	263.89	500.79	634.63	764.97	419.83	578.63
	160	201.45	380.42	481.04	578.84	321.66	442.75
150-160	80	431.22	826.33	1051.66	1272.22	681.08	941.15
	100	342.32	654.73	832.54	1006.44	541.44	747.81
	125	271.18	517.41	657.21	793.79	429.67	593.06
	160					331.77	457.53
	200	164.32	311.27	394.09	474.73	261.74	360.60
	250	128.61	242.45	306.29	368.31	205.60	282.88
200	80	434.61	834.39	1062.79	1286.53	685.49	947.72
	100	345.75	662.82	843.70	1020.77	545.91	754.45
	125	274.64	525.54	668.41	808.15	434.21	599.80
	160	212.39	405.39	515.00	622.09	336.42	464.41
	200	167.90	319.53	405.40	489.16	266.51	367.62
	250	132.27	250.81	317.67	382.80	210.52	290.10
250	80	436.63	839.22	1069.48	1295.17	688.09	951.60
	100	347.78	667.66	850.41	1029.42	548.54	758.37
	125	276.69	530.41	675.14	816.81	436.87	603.76
	160	214.46	410.29	521.76	630.76	339.13	468.43
	200	170.00	324.47	412.18	497.86	269.28	371.72
	250	134.40	255.78	324.49	391.52	213.35	294.29
	315	104.99	199.05	252.08	303.72	167.13	230.31
	400	80.91	152.63	192.86	231.94	129.27	177.91

Πίνακας 5.1-2β: Μεγιστα μήκη γραμμών διανομής υπο τάση 253V (230V+10%) με ισχύ μετασχηματιστή απο 400 KVA, 500KVA, 630 KVA

Ισχύς KVA	Ασφάλεια A	Γυμνοί αγωγοί 16 mm ²	Γυμνοί αγωγοί 35 mm ²	Γυμνοί αγωγοί 50 mm ²	Γυμνοί αγωγοί 70 mm ²	Συνεστραμμένο καλώδιο 3x35+54,6 mm ²	Συνεστραμμένο Καλώδιο 3x70+54,6 mm ²
-----------	------------	----------------------------------	----------------------------------	----------------------------------	----------------------------------	---	---

400	80	439.78	846.64	1080.08	1308.28	692.22	957.72
	100	350.94	675.11	861.02	1042.53	552.69	764.53
	125	279.87	537.87	685.76	829.94	441.06	609.97
	160	217.68	417.79	532.41	643.91	343.37	474.71
	200	173.24	332.00	422.86	511.02	273.58	378.07
	250	137.68	263.35	335.21	404.70	217.73	300.74
	315	108.32	206.68	262.85	316.94	171.60	236.88
	400	84.31	160.34	203.68	245.20	133.87	184.64
500	80	440.67	848.84	1082.81	1312.32	693.32	959.39
	100	351.84	677.31	863.75	1046.58	553.80	766.21
	125	280.77	540.09	688.50	833.99	442.18	611.66
	160	218.58	420.01	535.16	647.96	344.51	476.41
	200	174.15	334.23	425.62	515.09	274.73	379.80
	250	138.60	265.60	337.98	408.78	218.89	302.49
	315	109.26	208.94	265.63	321.02	172.79	238.66
	400	85.26	162.62	206.49	249.29	135.09	186.46
630	80	441.38	850.67	1085.40	1315.74	694.19	960.72
	100	352.55	679.14	866.35	1050.00	554.67	767.54
	125	281.49	541.92	691.11	837.41	443.06	613.00
	160	219.30	421.84	537.76	651.39	345.39	477.77
	200	174.88	336.07	428.23	518.52	275.62	381.16
	250	139.34	267.45	340.60	412.21	219.80	303.87
	315	110.00	210.80	268.26	324.47	173.71	240.06
	400	86.01	164.50	209.13	252.75	136.03	187.89

Πίνακας 5.1-2γ: Μεγιστα μήκη γραμμών διανομής υπο τάση 230V (230V+10%) με ισχύ μετασχηματιστή απο 750 KVA και 1000 KVA

Ισχύς KVA	Ασφάλεια A	Γυμνοί αγωγοί 16 mm ²	Γυμνοί αγωγοί 35 mm ²	Γυμνοί αγωγοί 50 mm ²	Γυμνοί αγωγοί 70 mm ²	Συνεστραμμένο καλώδιο 3x35+54,6 mm ²	Συνεστραμμένο Καλώδιο 3x70+54,6 mm ²
750	80	441.83	851.79	1086.98	1317.81	694.74	961.55
	100	353.00	680.26	867.93	1052.07	555.23	768.38
	125	281.94	543.04	692.69	839.48	443.62	613.84
	160	219.76	422.97	539.35	653.46	345.95	478.62
	200	175.34	337.20	429.82	520.59	276.19	382.02
	250	139.80	268.58	342.19	414.29	220.37	304.73
	315	110.46	211.94	269.86	326.55	174.29	240.94
	400	86.48	165.64	210.73	254.83	136.62	188.78
1000	80	442.42	853.25	1089.29	1320.50	695.47	962.66
	100	353.59	681.72	870.24	1054.77	555.96	769.49
	125	282.53	544.51	695.00	842.18	444.35	614.95
	160	220.35	424.44	541.67	656.16	346.69	479.73
	200	175.93	338.67	432.14	523.29	276.93	383.14
	250	140.40	270.06	344.51	416.99	221.12	305.87
	315	111.07	213.42	272.19	329.25	175.05	242.08
	400	87.09	167.13	213.07	257.54	137.39	189.93

Πίνακας 5.1-3α: Μεγιστα μήκη γραμμών διανομής υπο τάση 207V (207KV-10%) με ισχύ μετασχηματιστή απο 15 KVA - 200 KVA

Ισχύς KVA	Ασφάλεια A	Γυμνοί αγωγοί 16 mm ²	Γυμνοί αγωγοί 35 mm ²	Γυμνοί αγωγοί 50 mm ²	Γυμνοί αγωγοί 70 mm ²	Συνεστραμμένο καλώδιο 3x35+54,6 mm ²	Συνεστραμμένο καλώδιο 3x70+54,6 mm ²
15	25	977.92	1863.10	2363.18	2876.42	1555.98	2143.97
	32	722.62	1371.51	1735.86	2115.39	1154.01	1587.91
25	32	808.06	1536.06	1950.30	2357.65	1285.69	1771.78
	40	625.66	1184.65	1501.92	1814.02	998.75	1374.70
50	50	535.33	1018.97	1293.67	1562.81	850.29	1172.56
	63	414.99	786.94	997.56	1203.77	661.10	910.68
	80	316.45	597.13	755.43	910.28	506.08	696.17
75	63	434.06	826.50	1048.99	1266.32	688.90	950.30
	80	335.74	636.85	806.93	972.82	534.36	736.37
	100	262.74	496.15	627.41	755.22	419.59	577.52
	125	204.20	383.43	483.66	581.05	327.49	450.06
100	63	441.44	843.36	1071.93	1295.15	698.82	964.87
	80	343.23	653.84	829.97	1001.78	544.51	751.24
	100	270.37	513.29	650.58	784.30	430.01	592.73
	125	212.00	400.76	506.98	610.27	338.25	465.71
	160	160.80	302.15	381.22	457.92	257.72	354.27
150-160	80	350.41	670.33	852.46	1030.60	554.14	765.39
	100	277.65	529.89	673.15	813.12	439.83	607.13
	125	219.40	417.50	529.66	639.11	348.31	480.43
	160					268.12	369.42
	200	131.86	248.71	314.27	377.99	210.71	289.96
	250	102.57	192.32	242.37	290.87	164.63	226.19
200	80	353.83	678.42	863.62	1044.93	558.60	772.02
	100	281.10	538.02	684.35	827.48	444.37	613.86
	125	222.90	425.68	540.91	653.50	352.94	487.27
	160	171.94	327.34	415.36	501.25	272.87	376.42
	200	135.51	257.06	325.65	392.47	215.61	297.16
	250	106.31	200.77	253.84	305.41	169.71	233.63
250	80	355.86	683.26	870.33	1053.58	561.23	775.94
	100	283.15	542.89	691.07	836.14	447.03	617.82
	125	224.97	430.57	547.65	662.17	355.64	491.28
	160	174.04	332.27	422.14	509.94	275.63	380.52
	200	137.64	262.02	332.46	401.19	218.44	301.34
	250	108.49	205.79	260.69	314.16	172.63	237.92
	315	84.39	159.34	201.41	242.30	134.75	185.48
	400	64.65	121.30	152.91	183.54	103.69	142.49

Πίνακας 5.1-3β: Μεγιστα μήκη γραμμών διανομής υπο τάση 207V (207V-10%) με ισχύ μετασχηματιστή απο 400 KVA, 500KVA, 630 KVA

Ισχύς KVA	Ασφάλεια A	Γυμνοί αγωγοί 16 mm ²	Γυμνοί αγωγοί 35 mm ²	Γυμνοί αγωγοί 50 mm ²	Γυμνοί αγωγοί 70 mm ²	Συνεστραμμένο καλώδιο 3x35+54,6 mm ²	Συνεστραμμένο Καλώδιο 3x70+54,6 mm ²
400	80	359.02	690.70	880.93	1066.69	565.38	782.09
	100	286.33	550.35	701.69	849.26	451.21	624.02
	125	228.18	438.06	558.30	675.31	359.87	497.54
	160	177.28	339.80	432.82	523.10	279.93	386.86
	200	140.92	269.60	343.18	414.37	222.81	307.77
	250	111.81	213.42	271.45	327.38	177.09	244.47
	315	87.78	167.03	212.23	255.56	139.32	192.19
	400	68.11	129.09	163.80	196.84	108.42	149.40
500	80	359.91	692.91	883.67	1070.74	566.49	783.77
	100	287.23	552.56	704.44	853.32	452.33	625.71
	125	229.08	440.28	561.05	679.37	361.00	499.25
	160	178.19	342.03	435.58	527.17	281.07	388.58
	200	141.84	271.84	345.95	418.44	223.97	309.52
	250	112.74	215.68	274.23	331.46	178.27	246.25
	315	88.72	169.31	215.03	259.65	140.53	194.00
	400	69.08	131.39	166.63	200.95	109.67	151.26
630	80	360.63	694.73	886.26	1074.16	567.36	785.10
	100	287.95	554.39	707.04	856.74	453.21	627.05
	125	229.80	442.12	563.65	682.80	361.88	500.60
	160	178.92	343.87	438.19	530.60	281.96	389.94
	200	142.57	273.69	348.56	421.88	224.87	310.90
	250	113.49	217.54	276.86	334.90	179.19	247.65
	315	89.48	171.18	217.67	263.10	141.48	195.43
	400	69.84	133.29	169.28	204.42	110.63	152.72

Πίνακας 5.1-3γ: Μέγιστα μήκη γραμμών διανομής υπο τάση 207V (207V-10%) με ισχύ μετασχηματιστή από 750 KVA, 1000KVA

Ισχύς KVA	Ασφάλεια A	Γυμνοί αγωγοί 16 mm ²	Γυμνοί αγωγοί 35 mm ²	Γυμνοί αγωγοί 50 mm ²	Γυμνοί αγωγοί 70 mm ²	Συνεστραμ- μένο καλώδιο 3x35+54, 6 mm ²	Συνεστραμ- μένο Καλώδιο 3x70+54,6 mm ²
--------------	---------------	--	--	--	--	---	---

750	80	361.08	695.85	887.84	1076.23	567.91	785.94
	100	288.40	555.51	708.62	858.81	453.76	627.89
	125	230.25	443.24	565.24	684.87	362.44	501.45
	160	179.38	345.00	439.77	532.67	282.53	390.80
	200	143.03	274.82	350.15	423.95	225.45	311.76
	250	113.95	218.67	278.46	336.98	179.77	248.52
	315	89.94	172.32	219.27	265.18	142.06	196.31
	400	70.32	134.44	170.89	206.50	111.23	153.63
1000	80	361.66	697.32	890.16	1078.92	568.64	787.05
	100	288.99	556.98	710.93	861.50	454.50	629.00
	125	230.85	444.71	567.55	687.57	363.18	502.56
	160	179.97	346.47	442.09	535.37	283.27	391.92
	200	143.63	276.30	352.48	426.66	226.19	312.89
	250	114.55	220.15	280.78	339.68	180.53	249.66
	315	90.55	173.81	221.60	267.89	142.83	197.46
	400	70.93	135.93	173.23	209.22	112.01	154.79

5.2 Συμπεράσματα

Η κατάλληλη προστασία του ηλεκτρολογικού εξοπλισμού και ιδιαίτερα των γραμμών διανομής χαμηλής τάσης αποτελεί μία από τις σημαντικότερες παραμέτρους ομαλής λειτουργίας των δικτύων διανομής ηλεκτρικής ενέργειας και διασφαλίζει την αδιάλειπτη παροχή ηλεκτρικής ισχύος και ενέργειας στο κοινωνικό σύνολο.

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν ο υπολογισμός του μέγιστου μήκους όλων των τύπων αγωγών που χρησιμοποιούνται στα ελληνικά δίκτυα διανομής ΧΤ, με δεδομένο την ισχύ του μετασχηματιστή διανομής (20kV/400V), το είδος του αγωγού και τις ασφάλειες των αναχωρήσεων. Από την εξίσωση (5.1) προκύπτει η μείωση του μέγιστου μήκους για τάση 230-10%V (βλέπε πίνακες 5.1-2α, 5.1-2β, 5.1-2γ) και αντίστοιχα αύξηση του μέγιστου μήκους, στην τιμή 230+10% V (βλέπε πίνακες 5.1-3α, 5.1-3β, 5.1-3γ).

Συνεπώς, λόγω του εύρους των επιτρεπτών τιμών τάσης στο ελληνικό δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας ($\pm 10\%$) συμπεραίνουμε ότι θα ήταν ασφαλέστερη η διαστασιολόγηση των γραμμών ΧΤ βάσει των τιμών των πινάκων (5.1-3α, 5.1-3β, 5.1-3γ) που αφορά τη μικρότερη επιτρεπτή τιμή τάσης (207 V) και κατά συνέπεια περιέχει τα μικρότερα δυνατά μήκη γραμμών. Κατα τον τρόπο αυτό θα εξασφαλίζεται περισσότερη προστασία των γραμμών ΧΤ.

Παράρτημα I

Φαινόμενα γήρανσης και διάσπασης των μονώσεων σε μετασχηματιστές διανομής

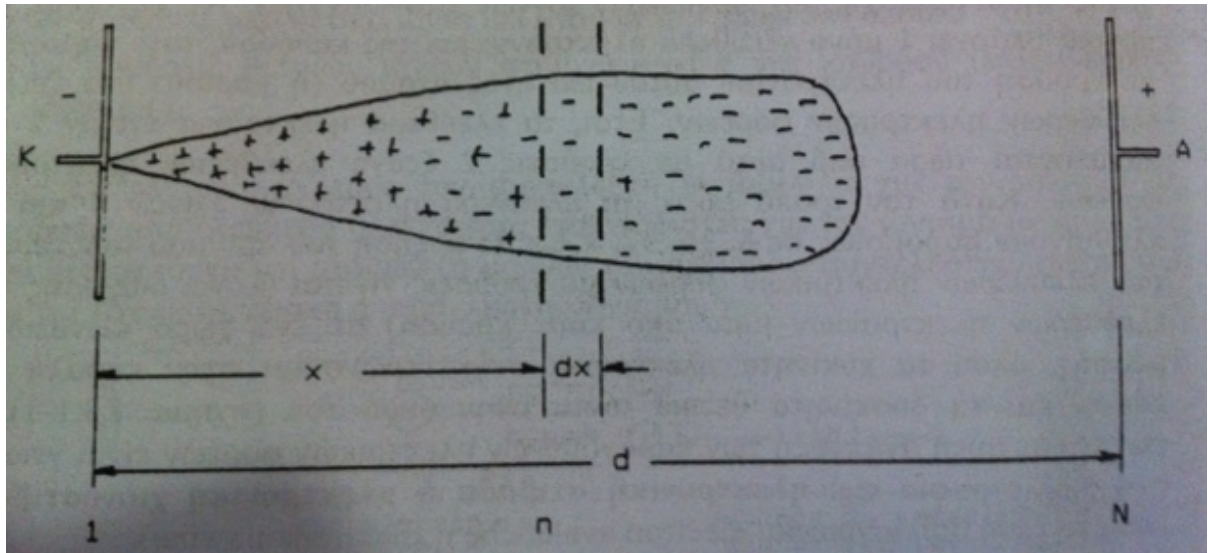
Τα φαινόμενα γήρανσης και διάσπασης των μονώσεων σε μετασχηματιστές διανομής διακρίνονται: α) στα φαινόμενα επί των μονωτήρων μέσης τάσης στον ατμοσφαιρικό αέρα, β) στα φαινόμενα εντός του μονωτικού ελαίου, και γ) στα φαινόμενα στα στερεά μονωτικά εντός του μονωτικού ελαίου. Ακολουθώς δίνονται χρήσιμες πληροφορίες για τα φαινόμενα αυτά, οι οποίες προέρχονται από το βιβλίο: Μπούρκας Π.Δ., Α. Δ. Πολυράτη, Βιομηχανικές Ηλεκτρικές Εγκαταστάσεις Τόμος II, Εκδόσεις Ε.Μ.Π, Αθήνα 2012.

1. Φαινόμενα ιονισμού επί των μονωτήρων μέσης τάσης των μετασχηματιστών διανομής

Τα φαινόμενα ιονισμού του ατμοσφαιρικού αέρα στο περιβάλλον μονωτήρων μέσης τάσης (όπως οι μονωτήρες των μετασχηματιστών διανομής) οφείλονται στον ιονισμό με κρούσεις. Ειδικότερα, η δημιουργία ελεύθερων ηλεκτρονίων από κρούσεις, μπορεί να συμβεί, όταν η προσδιδόμενη σε ένα ελεύθερο ηλεκτρόνιο ενέργεια είναι επαρκής, έτσι ώστε κατά την κρούση του επί ενός μορίου (ή ατόμου) να μπορεί να δημιουργηθεί ένα νέο ελεύθερο ηλεκτρόνιο, το οποίο με τη σειρά του θα δημιουργήσει με κρούση ένα άλλο ελεύθερο ηλεκτρόνιο, κλπ. Αυτό όμως μπορεί να συμβεί στους μονωτήρες μέσης τάσης των μετασχηματιστών διανομής μόνο υπό συνθήκες ρύπανσης, κυρίως λόγω της καπναιθάλης σε περιπτώσεις πυρκαγιών.

Στο σχήμα 1-1 δίνεται απλοποιημένα ο μηχανισμός διάσπασης του αέρα σύμφωνα με την θεωρία Townsend. Στην υπό εξέταση περίπτωση το σχήμα 1-1 αφορά τον ιονισμό με κρούσεις λόγω της καπναιθάλης

Επισημαίνεται ότι τα φαινόμενα ιονισμού δεν εκδηλώνονται σε γραμμές αι μονωτήρες χαμηλής τάσης.



Σχήμα 1-1 : Ένα μακροσκοπικό μοντέλο για τη δημιουργία ηλεκτρονικής στιβάδας (ή ηλεκτρονικής χιονοστιβάδας) κατά τον ιονισμό με κρούσεις, μέσω ελεύθερων ηλεκτρονίων.

A : άνοδος,

K : κάθοδος,

1, n, N : αριθμός ελεύθερων ηλεκτρονίων

1.1. Οι στεμματοειδείς εκκενώσεις (ή εκκενώσεις Κορονα)

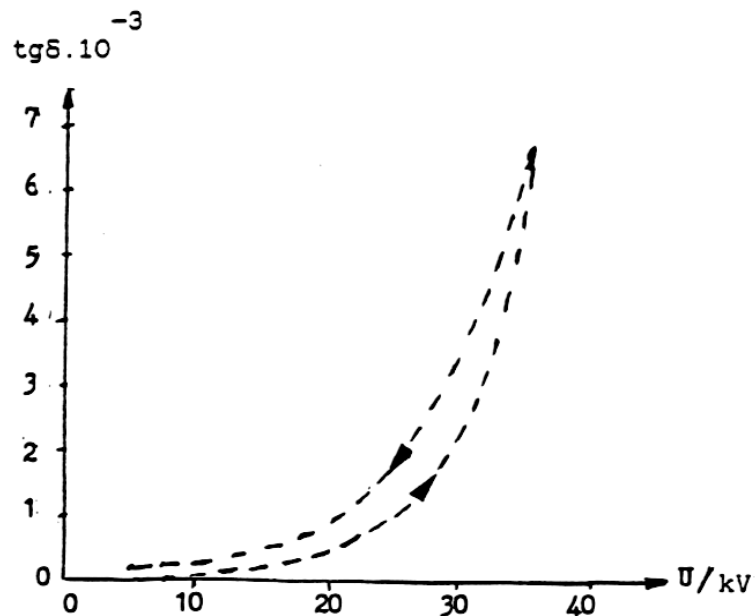
Ο όρος στεμματοειδείς εκκενώσεις (ή εκκενώσεις Κορονα) είναι ταυτόσημος με την εκδήλωση μερικών εκκενώσεων γύρω από τους αγωγούς των εναέριων γραμμών υψηλής τάσης. Επισημαίνεται ότι το φαινόμενο αυτό δεν εκδηλώνεται σε γραμμές διανομής μέσης τάσης, παρά μόνο παρουσία καπναιθάλης

2. Τα φαινόμενα γήρανσης και διάσπασης στο μονωτικό λάδι

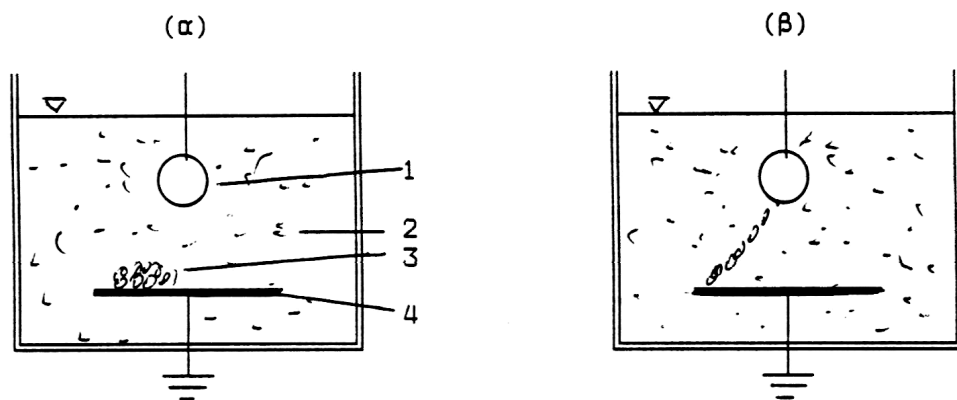
Τα φαινόμενα γήρανσης και διάσπασης του μονωτικού ελαίου δεν έχουν ερμηνευτεί πλήρως. Έχει διατυπωθεί η άποψη, ότι οι παράγοντες μείωσης της διηλεκτρικής αντοχής μπορεί να είναι οι ίδιοι με εκείνους κατά τη γήρανση και διάσπαση των στερεών μονωτικών. Η δυσκολία για τη μελέτη των παραπάνω παραγόντων στο λάδι, οφείλεται στην αλλαγή της μοριακής δομής του μετά από μία τιμή της εφαρμοζόμενης τάσης. Η αλλαγή αυτή διαπιστώνεται πειραματικά από την αύξηση της τιμής $tg\delta$ μετά από καταπόνηση (σχήμα 2-1).

Εκτός από τους παράγοντες αυτούς, που εξετάζονται στα στερεά μονωτικά (βλ. παρ. 3 ακολούθως), η γήρανση και η διάσπαση του μονωτικού ελαίου αποδίδεται κυρίως στα αιωρούμενα σε αυτό ξένα σωματίδια, τα οποία φαίνεται ότι μειώνουν τις αποστάσεις μόνωσης, γιατί σχηματίζουν αγωγίμες γέφυρες μεταξύ των ρευματοφόρων μερών με διαφορετικό δυναμικό. Το φαινόμενο αυτό μπορεί εύκολα να διαπιστωθεί πειραματικά με

τη διάταξη του σχήματος 2-2, όπου τα μικρά τεμάχια χαρτιού (3) διατάσσονται κατά την εφαρμογή της τάσης μεταξύ των ηλεκτροδίων.



Σχήμα 2-1 : $\text{tg}\delta=f(U)$ στο λάδι μετασχηματιστών.



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

- 1, 4 : ηλεκτρόδια εφαρμογής της τάσης
- 2 : μονωτικό λάδι
- 3 : τεμάχια χαρτιού

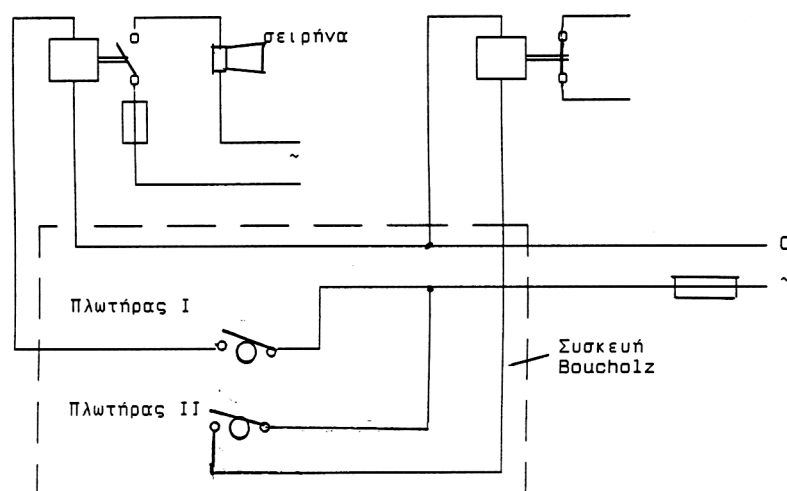
- α) Τεμάχια χαρτιού πάνω στο ηλεκτρόδιο πλάκα προ της εφαρμογής της τάσης.
- β) Διάταξη των τεμαχίων χαρτιού κατά την εφαρμογή της τάσης.

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

Η υγρασία και τα αέρια, που δημιουργούνται κατά τη γήρανση του μονωτικού λαδιού, μειώνουν δραστικά τη διηλεκτρική αντοχή του. Για το λόγο αυτό προβλέπονται (κατά τη λειτουργία των μετασχηματιστών) μέσα ελέγχου, που προειδοποιούν για τη μείωση της διηλεκτρικής αντοχής του μονωτικού λαδιού. Προβλέπεται επίσης προστασία του μετασχηματιστή, όταν η μείωση της διηλεκτρικής αντοχής του λαδιού είναι σημαντική. Πρόκειται για τον **αφυγραντήρα** και τη συσκευή **Boucholz**, που πρέπει να περιλαμβάνει ο μετασχηματιστής. Ο αφυγραντήρας τοποθετείται επί του δοχείου διαστολής του μετασχηματιστή. Περιέχει υλικό (το silicagel), που απορροφά την υγρασία. Από το γυάλινο μέρος του δοχείου του αφυγραντήρα παρακολουθεί κανείς το χρώμα του silicagel. Όταν το χρώμα είναι γαλάζιο, τότε έχει το υλικό αυτό τη δυνατότητα απορρόφησης υγρασίας. Όταν το χρώμα γίνει κόκκινο, τότε το παραπάνω υλικό είναι κορεσμένο από υγρασία και πρέπει να υποβληθεί σε ξήρανση (3 έως 6 ώρες σε θερμοκρασία 140°C το πολύ).

Η αρχή λειτουργίας της συσκευής Boucholz (σχήμα 2.1-1) βασίζεται στα αέρια, που παράγονται κατά τη μείωση της διηλεκτρικής αντοχής του λαδιού. Τα αέρια διέρχονται από τη συσκευή Boucholz, η οποία έχει δύο πλωτήρες (I και II). Όταν ο χώρος του Boucholz καταλαμβάνεται μόνο από λάδι, τότε οι πλωτήρες αυτοί είναι δύο ανοικτές επαφές. Κατά τη μείωση της διηλεκτρικής αντοχής του λαδιού εισχωρούν τα παραγόμενα αέρια στο χώρο του Boucholz. Όταν το ποσοστό τους είναι μικρό κλείνει ο πλωτήρας I και ενεργοποιείται έτσι το κύκλωμα της σειρήνας. Για μεγαλύτερο ποσοστό αερίων κλείνει και ο πλωτήρας II, με αποτέλεσμα να τεθεί εκτός λειτουργίας ο αυτόματος διακόπτης. Η συσκευή Boucholz διαθέτει χειροκίνητη βαλβίδα εξαερισμού, η οποία είναι απαραίτητη κατά την πρώτη εγκατάσταση (ή μετά την αλλαγή λαδιών). Έχει επίσης γυάλινο παραθυράκι για τον έλεγχο της θέσης των πλωτήρων.

Σχήμα .2.1-1 : Κύκλωμα της προστασίας Boucholz



Μία μέθοδος διάγνωσης της ποιότητας του λαδιού, που εφαρμόζεται από τις εταιρείες παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας, βασίζεται στα είδη των παραγόμενων αερίων (κυρίως: υδρογόνο, μεθάνιο, αιθάνιο, αιθυλένιο και ακετυλένιο) και στις σχετικές ποσότητές τους, μέσω χρωματογράφου αερίων. Μία μικρή αποσύνθεση γίνεται φανερή σε κανονικές θερμοκρασίες λειτουργίας, όπου παράγονται κυρίως υδρογόνο και μεθάνιο. Η παραγωγή του αιθανίου και του αιθυλενίου θεωρείται ότι σχετίζεται με θέσεις αυξημένης θερμοκρασίας του μετασχηματιστή. Το ακετυλένιο γίνεται σημαντικό ως ποσότητα σε πολύ μεγάλες θερμοκρασίες, που οφείλονται κυρίως στην εκδήλωση ηλεκτρικού τόξου και ισχυρών μερικών εκκενώσεων

Στον παρακάτω πίνακα δίνονται βασικές οδηγίες για τη συντήρηση των μετασχηματιστών ελαίου, που πρέπει να εφαρμόζονται για να εξασφαλίζεται η σωστή λειτουργία τους.

Χρονικό διάστημα	Είδος συντήρησης
Σε 3 μήνες (Μηνιαίως *)	<ol style="list-style-type: none"> 1) Έλεγχος στάθμης λαδιού 2) Έλεγχος θερμοκρασίας 3) Έλεγχος υγρασίας από τον αφυγραντήρα 4) Εξωτερικά μέρη και ειδικότερα οι μονωτήρες να καθαρίζονται από σκόνες κ.λ.π. 5) Καθαριότητα δαπέδου του χώρου 6) Έλεγχος για τυχόν εξωτερικές σκουριές
Ετησίως (Σε 6 μήνες *)	<ol style="list-style-type: none"> 1) Έλεγχος διηλεκτρικής αντοχής λαδιού (**) 2) Έλεγχος της προστασίας του μετασχηματιστή 3) Έλεγχος και σύσφιγξη λυομένων συνδέσμων 4) Λίπανση κινητήρων αερισμού (αν υπάρχουν) 5) Έλεγχος πυροσβεστήρων
Σε 2 έτη	Αλλαγή ρουλεμάν κινητήρων αερισμού (αν υπάρχουν)
Σε 5 έτη	Πλήρης έλεγχος του λαδιού και σε περίπτωση μη ικανοποιητικών αποτελεσμάτων αλλαγή (ή αναγέννηση)

Πίνακας 2.1-1 : Οδηγίες συντήρησης μετασχηματιστών.

*: Σε τσιμεντοβιομηχανίες, λατομεία και γενικά σε περιβάλλον που προκαλεί δραστική μείωση της διηλεκτρικής αντοχής.

** : 1 λίτρο σε τελείως στεγνό και καθαρό δοχείο.

3. Φαινόμενα προ και κατά τη διάσπαση στερεών ηλεκτρομονωτικών υλικών

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, κ.λ.π.). Επίσης, τα φαινόμενα που εκδηλώνονται προ της διάσπασης των στερεών μονωτικών, καθώς και εκείνα κατά την επιφανειακή διάσπαση ή την υπερπήδηση, προκαλούν συνήθως μόνιμες βλάβες σε βάρος της διηλεκτρικής αντοχής των στερεών διηλεκτρικών. Αυτή ακριβώς η ιδιότητα των στερεών μονωτικών υλικών, να μην επανέρχονται στην αρχική τους κατάσταση, αλλά να καταστρέφονται κατά τη διάσπαση ή να αποκτούν συνήθως μόνιμες βλάβες (λόγω επιφανειακής διάσπασης, υπερπήδησης και μερικών εκκενώσεων) είναι η βασική δυσκολία για τη μελέτη του μηχανισμού της γήρανσης της διάσπασής τους.

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

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

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

Στην κβαντομηχανική θεωρία ενδιαφέρει κυρίως η ενέργεια των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων (κυρίως ηλεκτρόνια), κατά την εξαναγκασμένη επιβράδυνσή τους στα ηλεκτρόδια. Πρόκειται δηλαδή για μία συσχέτιση των φαινομένων προ και κατά τη διάσπαση, με το φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, που εκπέμπεται, όπως ήδη έχει γίνει στην παράγραφο 4.8 για το εξαφθοριούχο θείο.

Στο κεφάλαιο αυτό εξετάζονται οι δύο θεωρίες, που προαναφέρθηκαν, καθώς και ο συνδυασμός τους. Επίσης, για λόγους ευκολότερης κατανόησης των περιεχομένων, εξετάζεται ξεχωριστά η διάτρηση από την επιφανειακή διάσπαση και την υπερπήδηση.

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

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

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

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

- α) **η θερμική διάτρηση,**
- β) **η ηλεκτρική διάτρηση** (που διακρίνεται στη **δενδροειδή** 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.

3.1.1. Η θερμική διάτρηση

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

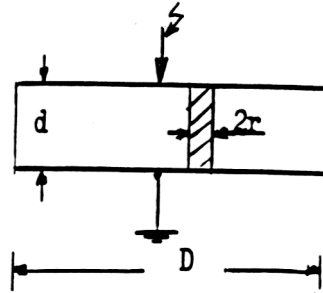
Ο σχετός διάτρησης δημιουργείται, όταν η ειδική αγωγιμότητα σε κάποια θέση του υλικού έχει αποκτήσει την απαιτούμενη για τη διάτρηση οριακή τιμή σ_1 , οπότε έχουμε:

$$\sigma_1 = \sigma_0 e^{\beta\theta} \quad (3.1.1-1)$$

Με την προϋπόθεση σταθερής διατομής (A) του οχετού διάτρησης (σχήμα 3.1.1-1) και ειδική αγωγιμότητα σ_1 , η θερμική ισχύς που παράγεται είναι:

$$P = \frac{U^2}{R} = \frac{U^2 \sigma_0 e^{\beta \theta} A}{d} \quad (3.1.1-2)$$

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



Σχήμα 3.1.1-1 : 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:

$$P = P_a + C_0 (d\theta / dt) \quad (3.1.1-3)$$

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

$$P_a = 2\pi \cdot r \cdot d \cdot \kappa \cdot \theta \quad (3.1.1-4)$$

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:

$$\frac{U^2 \sigma_0 e^{\beta \theta} A}{d} = 2\pi \cdot r \cdot d \cdot \kappa \cdot \theta \quad (3.1.1-5)$$

Η παραπάνω σχέση αποτελείται από δύο συναρτήσεις της θερμοκρασίας ($P=f(\theta)$ 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 διαφορίση ως προς θ , τόσο του αριστερού όσο και του δεξιού τμήματος της σχέσης 3.1.1-5, έχουμε:

$$\frac{\beta U_{\theta}^2 \sigma_0 e^{\beta \theta} A}{d} = 2\pi \cdot r \cdot d \cdot \kappa \quad (3.1.1-6)$$

Από τις σχέσεις 3.1.1-5 και 3.1.1-6 φαίνεται ότι:

$$\beta \cdot \theta = 1 \quad (3.1.1-7)$$

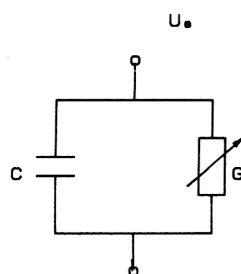
και

$$U_{\theta} = d \sqrt{\frac{2\kappa}{e\beta\sigma_0 r}} \quad (3.1.1-8)$$

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 3.1.1-2, 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 : σχέση 3.1.1-1), μία οριστική τιμή G_{\max} .

Σχήμα 3.1.1-2 : 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

3.1.2. Η ηλεκτρική διάτρηση

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

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

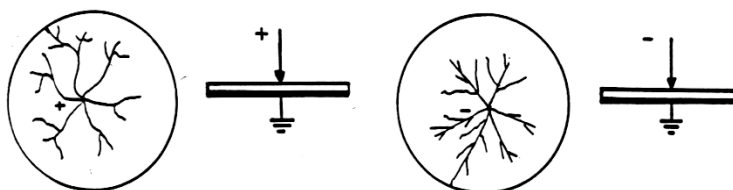
- α) αυτοσυντηρούμενο ιονισμό με κρούσεις (όπως στα αέρια μονωτικά), ή
- β) μηχανική τάνση του υλικού (διαχωρισμό του σε αρνητικούς και θετικούς φορείς, υπό την επίδραση των δυνάμεων του ηλεκτρικού πεδίου), ή
- γ) συνδυασμό των δύο παραπάνω περιπτώσεων.

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 οχető κατά τη διεύθυνση του πεδίου (ηλεκτρομηχανική).

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 3.1.2-1 δίνεται ένα παράδειγμα για τη μορφή του δενδρίτη (ανάλογα με την πολικότητα της τάσης) για τη δυσμενέστερη περίπτωση των πρακτικών εφαρμογών (ηλεκτρόδια ακίδα-πλάκα).

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.



Σχήμα 3.1.2-1: Προς επεξήγηση της μορφής του δενδρίτη

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 ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων και ηλεκτροδίων. Η χρονική διάρκεια του φαινομένου είναι μερικά μs. Η εικόνα, που παρουσιάζει το υλικό ότι 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 $U_{κmin}$, 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 3.1.1-3 και για έναν οχετό διατομής $A=\pi r^2$ (κατά το Σχήμα 3.1.1-1) ισχύει μόλις προ της διάτρησης ότι:

$$U_n^2 \sigma_2 \frac{A}{d} = \sigma_0 \frac{d\theta}{dt} \quad (3.1.2-1)$$

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 ενδεικνύμενη τιμή της τάσης για την ηλεκτρική διάσπαση του υλικού στην παραπάνω περιοχή.

Αν υποθέσουμε ότι, λόγω του μικρού διατιθέμενου χρόνου είναι $d\theta/d = \theta/T_\delta$, όπου T_δ ο χρόνος για την ηλεκτρική διάτρηση, τότε από τη σχέση 3.1.2-1 έχουμε:

$$U_n = \sqrt{d} \sqrt{\frac{C_0 \theta}{\sigma_2 A T_\delta}} \quad (3.1.2-2)$$

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

$$\hat{U}_{kn} = \sqrt{d} \sqrt{\frac{C_0 \theta}{\sigma_2 A T_S}} \quad (3.1.2-3)$$

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 (βλέπετε πίνακα 3.1.2-1). Κατά την καταπόνηση με εναλλασσόμενη

τάση ισχύει περίπου η αναλογία $U_n = f(1/\sqrt{T_\delta})$ (βλέπετε σχήμα 3.1.2-2).

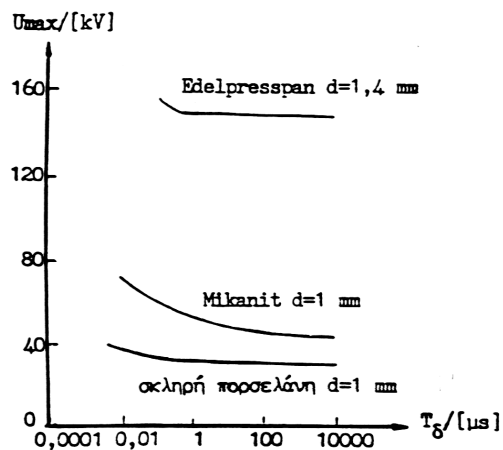
d [mm]	κρουστική τάση		\hat{U}_k 50% [kV]	περιοχή τιμών U_k για τη διάσπαση [kV]
	μορφή [μs]	πολικότητα		
1	1,2/50	θετική	80	78...90
	1,2/50	αρνητική	86	81...95
	10/200	θετική	74	69...78
	10/200	αρνητική	77	71...79
	250/2500	θετική	66	63...69
	250/2500	αρνητική	68	65...70
2	1,2/50	θετική	135	126...151
	1,2/50	αρνητική	148	132...165
	10/200	θετική	74	69...80
	10/200	αρνητική	70	67,5...71

Πίνακας 3.1.2-1 : Τιμές της τάσης διάσπασης του στερεού μονωτικού pertinax H1270 (πάχους 1 mm και 2 mm) κατά την καταπόνησή 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



Σχήμα 3.1.2-2 : Διάσπαση διαφόρων στερεών μονωτικών σε σχέση με το χρόνο καταπόνησης.

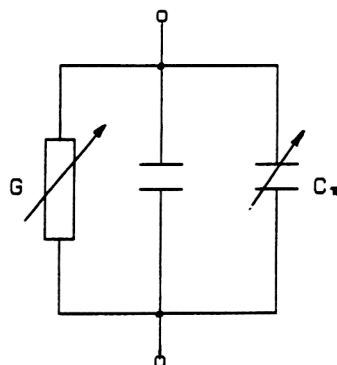
Για πολύ μικρούς χρόνους ισχύει η αναλογία: $U_{\max} = f(1/\sqrt{T_{\delta}})$

U_{\max} : η τιμή της εφαρμοζόμενης εναλλασσόμενης τάσης.

Μία ερμηνεία της ηλεκτρικής διάτρησης, μέσω ενός ισοδύναμου κυκλώματος, μπορεί να δοθεί ως ακολούθως:

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 (σχήματος 3.1.2-3), 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_{π} 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.



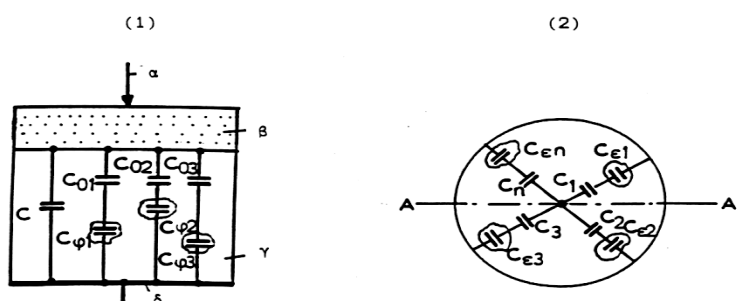
Σχήμα 3.1.2-3 : Ισοδύναμο κύκλωμα του στερεού μονωτικού κατά την ηλεκτρική διάτρηση.

- C : ιδανική χωρητικότητα
 $C_{\pi} = 0 \dots C_{\max}$: χωρητικότητα, που συμβολίζει την πόλωση του στερεού μονωτικού στη θέση θα συμβεί η διάτρηση.
 $G = 0 \dots G_{\max}$: αγωγιμότητα λόγω αύξησης των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων στη θέση όπου θα συμβεί η διάτρηση

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

1) Γενικά περί μερικών εκκενώσεων

Η διάσπαση των στερεών μονωτικών έχει, στις περισσότερες περιπτώσεις, την αφετηρία της στις μερικές εκκενώσεις στην επιφάνεια και στον όγκο τους. Οι μερικές εκκενώσεις εμφανίζονται σε φυσαλίδες αερίων ή γενικά θέσεις ανομοιογένειας μέσα στον όγκο του μονωτικού (εσωτερικές μερικές εκκενώσεις), καθώς και σε θέσεις ανομοιογένειας ή ξένες επικαθίσεις (ηλεκτρικές ακαθαρσίες) στην επιφάνεια του (εξωτερικές εκκενώσεις). Μία μακροσκοπική παράσταση των θέσεων διαταραχής δίνεται στο σχήμα 3.1.3-1. Σύμφωνα με αυτό, οι επιφανειακές θέσεις διαταραχής έχουν παρασταθεί με τους πυκνωτές $C_{\epsilon 1} \dots C_{\epsilon n}$ και οι εσωτερικές με τους πυκνωτές $C_{\phi 1} \dots C_{\phi n}$. Οι πυκνωτές $C_1 \dots C_n$ και $C_{01} \dots C_{0n}$ παριστάνουν αντίστοιχα το υπόλοιπο υγιές τμήμα του μονωτικού (κάθε ένας από αυτούς δίνει την ολική χωρητικότητα δύο πυκνωτών, εκ των οποίων ο ένας είναι η χωρητικότητα μεταξύ ακίδας και της θέσης διαταραχής και ο άλλος η χωρητικότητα μεταξύ της πλάκας και της θέσης διαταραχής).



Σχήμα 3.1.3-1 : Μία μακροσκοπική παράσταση των θέσεων διαταραχής σε στερεό μονωτικό εντός μονωτικού ελαίου

1) Τομή A-A της διάταξης πειραματισμού:

- α : ηλεκτρόδιο ακίδα
- β : επιφανειακό φιλμ του μονωτικού ελαίου και επιφάνεια του στερεού μονωτικού.
- γ : στερεό μονωτικό
- δ : ηλεκτρόδιο πλάκα

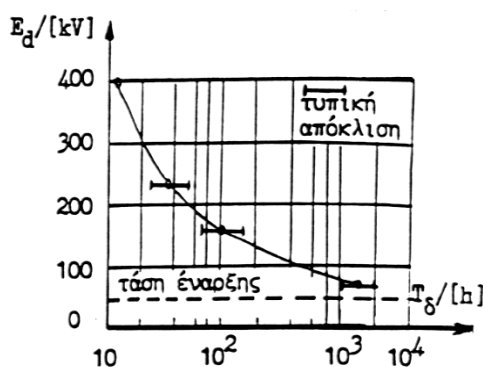
2) Κάτοψη της διάταξης πειραματισμού:

- $C_1 \dots C_n$: πυκνωτές του "υγιούς" τμήματος της επιφάνειας του στερεού μονωτικού και του επιφανειακού φιλμ ελαίου
- $C_{\epsilon 1} \dots C_{\epsilon n}$: πυκνωτές επιφανειακών (εξωτερικών) θέσεων διαταραχής

- C : ιδανική χωρητικότητα της διάταξης
 $C_{\varphi 1} \dots C_{\varphi n}$: πυκνωτές εσωτερικών θέσεων διαταραχής (κυρίως φυσαλίδες αερίων)
 $C_{01} \dots C_{0n}$: πυκνωτές του «υγιούς» τμήματος του στερεού μονωτικού

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

Συγκριτικά με τις άλλες μορφές διάσπασης, η ηλεκτροχημική διάσπαση προκαλεί **βαθμιαία μείωση της ηλεκτρικής αντοχής**, ανάλογα με το ρυθμό αύξησης της χημικής μεταβολής και είναι συνήθως μακροπρόθεσμη, γι' αυτό ονομάζεται και **γήρανση** του μονωτικού υλικού. Στο Σχήμα 3.1.3-2 δίνεται ένα παράδειγμα μείωσης της διηλεκτρικής αντοχής, λόγω γήρανσης του υλικού από τη μεγαλύτερη συμμετοχή των θέσεων διαταραχής.



Σχήμα 3.1.3-2 : Μείωση της διηλεκτρικής αντοχής στο νάιλον πάχος 0,125 mm, λόγω μερικών εκκενώσεων.
 Αριθμός δοκιμιών : 10 ανά σημείο μέτρησης.
 T_d : χρόνος διάσπασης.

2) Η τεχνητή γήρανση

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

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

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

Στην περίπτωση της καταπόνησης με εναλλασσόμενη τάση η τιμή του συντελεστή είναι:

$$\mu_{\varepsilon} = U_{\varepsilon} / U \quad (3.1.3-1)$$

όπου U η προβλεπόμενη τάση δοκιμής (π.χ.: 55 kV επί 1 min για ονομαστική τάση 20 kV) και U_{ε} εκείνη κατά την οποία μόλις εμφανίζεται η πρώτη μερική εκκένωση.

Κατά την καταπόνηση με κρουστικές τάσεις ισχύει αντίστοιχα:

$$\mu_0 = \hat{U}_{\kappa\varepsilon} / \hat{U}_{\kappa} \quad (3.1.3-2)$$

όπου $\hat{U}_{\kappa\varepsilon}$ η μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης, κατά την οποία μόλις εμφανίζεται η πρώτη μερική εκκένωση και \hat{U}_{κ} η μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης που προβλέπεται από τις προδιαγραφές για τη διηλεκτρική δοκιμή υπό κρουστική τάση 1,2/50 μ s.

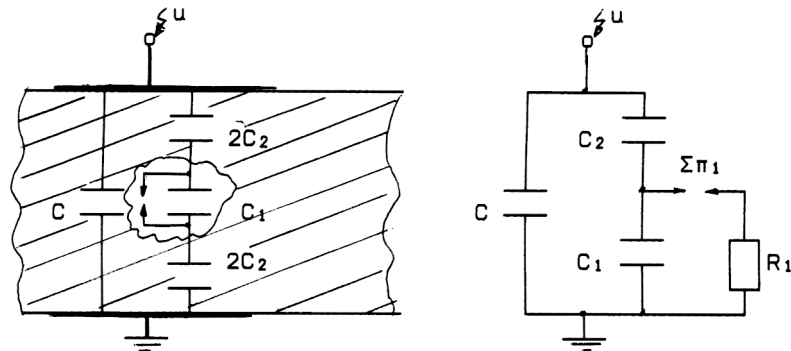
3) Τα ισοδύναμα κυκλώματα των μερικών εκκενώσεων

Όπως είναι γνωστό, με τη γέφυρα Schering μετρά κανείς το σύνολο των απωλειών ενός μονωτικού υλικού ή μιας διάταξης υψηλής τάσης, δηλαδή τις απώλειες αγωγιμότητας, πόλωσης και εκείνης λόγω εσωτερικών και εξωτερικών εκκενώσεων. Όταν άρχισε να γίνεται αντιληπτό το φαινόμενο της γήρανσης των μονωτικών υλικών εμφανίστηκε η πρώτη μέθοδος ανίχνευσης των μερικών εκκενώσεων. Πρόκειται για τη μέθοδο Callender, η οποία είναι παραλλαγή της γέφυρας Schering και με την οποία κατορθώθηκε η εξουδετέρωση των παράσιτων χωρητικότητων του κυκλώματος μέτρησης κατά το διαχωρισμό των απωλειών αγωγιμότητας και πόλωσης από εκείνες λόγω μερικών εκκενώσεων.

Η ανάγκη για τη φυσική εξήγηση και τη μαθηματική ανάλυση του φαινομένου των μερικών εκκενώσεων μέσα στον όγκο του στερεού μονωτικού, οδήγησε τους Gemant και Philipoff στο ισοδύναμο κύκλωμα του (σχήμα 3.1.3-3), γιατί διατυπώθηκε η άποψη ότι οι εσωτερικές μερικές εκκενώσεις οφείλονται σε φυσαλίδες αερίου.

Στο σχήμα 3.1.3-4 έχει συμπληρωθεί το μακροσκοπικό αυτό μοντέλο και για τις εξωτερικές μερικές εκκενώσεις, που οφείλονται σε θέσεις διαταραχής στην επιφάνεια του υλικού. Η ύπαρξη των εσωτερικών και εξωτερικών εκκενώσεων παριστάνεται στο ισοδύναμο κύκλωμα με την αύξηση της χωρητικότητας, η οποία επιτυγχάνεται αντίστοιχα κατά τη διάσπαση της φυσαλίδας (C_1) και του πυκνωτή εξωτερικών μερικών

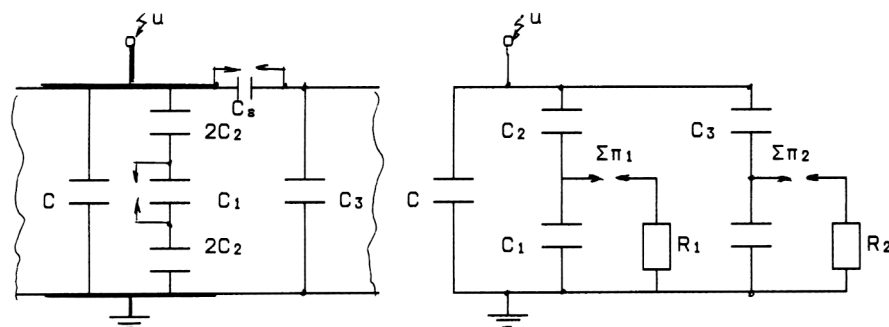
εκκενώσεων (C_e). Με τον τρόπο δηλαδή αυτό γίνεται παράλληλη σύνδεση του υπόλοιπου «υγιούς τμήματος» του μονωτικού (C_2 και C_3 αντίστοιχα) προς την ιδανική χωρητικότητα C . Οι σπινθήρες $\Sigma\pi_1$ και $\Sigma\pi_2$ στα ισοδύναμα κυκλώματα διασπώνται όταν διασπάται η



αντίστοιχη θέση διαταραχής. Έτσι, μέσω της αντίστασης του τόξου που σχηματίζεται (R_1, R_2) γίνεται η εκφόρτιση του αντίστοιχου πυκνωτή διαταραχής (C_1, C_e).

Σχήμα 3.1.3-3 : Σχηματική παράσταση και ισοδύναμο κύκλωμα ενός στερεού μονωτικού με φυσαλίδα αερίου στον όγκο του (κατά Gemant και Philipoff).

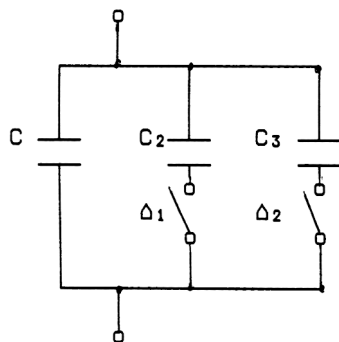
- α : σχηματική παράσταση
- β : ισοδύναμο κύκλωμα
- C : ιδανική χωρητικότητα της διάταξης
- C_1 : χωρητικότητα της φυσαλίδας
- C_2 : χωρητικότητα του υπόλοιπου υγιούς τμήματος του στερεού μονωτικού
- R_1 : αντίσταση του τόξου του σπινθηριστή $\Sigma\pi_1$



Σχήμα 3.1.3-4 : Σχηματική παράσταση και ισοδύναμο κύκλωμα ενός στερεού μονωτικού με φυσαλίδα αερίου στον όγκο του και με επιφανειακή θέση διαταραχής.

- α : σχηματική παράσταση
- β : ισοδύναμο κύκλωμα
- C : ιδανική χωρητικότητα της διάταξης
- C_1 : χωρητικότητα της φυσαλίδας
- C_e : χωρητικότητα της επιφανειακής θέσης διαταραχής
- C_2 : χωρητικότητα του υπόλοιπου υγιούς τμήματος του στερεού μονωτικού
- C_3 : χωρητικότητα του υπόλοιπου υγιούς τμήματος του επιφανειακού φιλμ
- R_1 : αντίσταση του τόξου του σπινθηριστή $\Sigma\pi_1$
- R_2 : αντίσταση του τόξου του σπινθηριστή $\Sigma\pi_2$

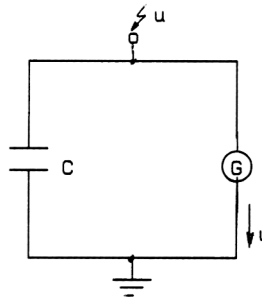
Η εκδήλωση μερικών εκκενώσεων κατά το ισοδύναμο κύκλωμα των Gemant και Philipoff σημαίνει αύξηση της τάσης στους ακροδέκτες της διάταξης, στο ρυθμό που διασπώνται χρονικά οι διάφορες θέσεις διαταραχής. Μπορούμε δηλαδή να υποθέσουμε, ότι οι θέσεις ανομοιογένειας επενεργούν ως ένα είδος διακόπτη. Με βάση την υπόθεση αυτή συναντά κανείς συχνά στη βιβλιογραφία το ισοδύναμο κύκλωμα των μερικών εκκενώσεων κατά το σχήμα 3.1.3-5.



Σχήμα 3.1.3-5 : Ισοδύναμο κύκλωμα των μερικών εκκενώσεων (παραλλαγή του ισοδύναμου κυκλώματος των Gemant και Philipoff).

- C : ιδανική χωρητικότητα της διάταξης
- C_2 : χωρητικότητα του υγιούς στον όγκο του μονωτικού
- C_3 : χωρητικότητα του υγιούς στην επιφάνεια του μονωτικού
- Δ_1, Δ_2 : διακόπτες, που όταν κλείνουν συμβολίζουν τη διάσπαση αντίστοιχα των εσωτερικών και των εξωτερικών μερικών εκκενώσεων.

Εκτός από το ισοδύναμο κύκλωμα των Gemant και Philipoff, έχουν προταθεί για τη μελέτη του φαινομένου της γήρανσης των στερεών μονωτικών και άλλα μακροσκοπικά ισοδύναμα ηλεκτρικά κυκλώματα, στα οποία λαμβάνονται υπ' όψη η αύξηση της αγωγιμότητας στις πλευρές της φουσαλίδας, οι απώλειες ενέργειας σε αυτές, η αγωγιμότητα του υλικού κλπ. Το ισοδύναμο κύκλωμα κατά Widmann δίνει επίσης μία ικανοποιητική μακροσκοπική ερμηνεία των μερικών εκκενώσεων (σχήμα 3.1.3-6). Σύμφωνα με αυτό, οι θέσεις διαταραχής αποδίδονται ως μία γεννήτρια μερικών εκκενώσεων G . Έτσι, όταν διεγείρεται η γεννήτρια G συμβαίνει αύξηση του δυναμικού στους ακροδέκτες της διάταξης.



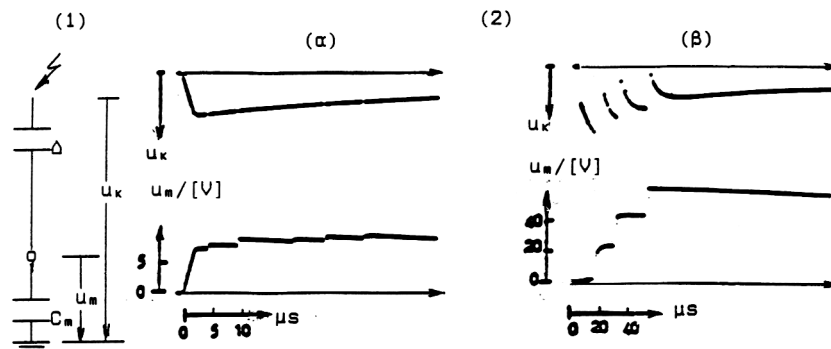
Σχήμα 3.1.3-6 : Ισοδύναμο κύκλωμα των μερικών εκκενώσεων κατά Widmann.

C : ιδανική χωρητικότητα της διάταξης

G : γεννήτρια μερικών εκκενώσεων

4) Παράδειγμα ερμηνείας παλμογραφημάτων των μερικών εκκενώσεων μέσω των ισοδύναμων ηλεκτρικών κυκλωμάτων

Στο σχήμα 3.1.3-7 δίνεται απλοποιημένα το κύκλωμα για τη μέτρηση των μερικών εκκενώσεων.



Σχήμα 3.1.3-7 : Τυπικά παλμογραφήματα κατά τη γήρανση και διάσπαση στερεών οργανικών μονωτικών

1 : απλοποιημένη διάταξη μέτρησης (u_{κ} : στιγμιαία τιμή της εφαρμοζόμενης τάσης, Δ : δοκίμιο, u_m : τάση στον πυκνωτή μέτρησης C_m).

2 : μετρήσεις με κρουστικές τάσεις της μορφής 10/200 μ s:

(α) : γήρανση: (τιμή πεδίου 1,11 MV/cm, $\hat{U}_{\kappa}=77,5$ kV, $C_m=210$ nF, υλικό: βακελίτης)

(β) : διάτρηση: (τιμή πεδίου 1,20 MV/cm, $\hat{U}_{\kappa}=85$ kV, $C_m=210$ nF, υλικό: pertinax)

Σύμφωνα με αυτό δοκίμια στερεών μονωτικών πάχους 1 mm (Δ), κατά DIN 7735, καταπονούνται με κρουστικές τάσεις της μορφής 10/200 μ s, υπό διάταξη ηλεκτροδίων «ακίδα-πλάκα» (με ακτίνα καμπυλότητας της ακίδας 0,9 mm). Το παλμογράφημα (α)

αφορά τη γήρανση του βακελίτη και το παλμογράφημα (β) τη διάτρηση του pertinax. Η διακεκομμένη γραμμή, που έχει σχεδιαστεί στο παλμογράφημα (α), δείχνει την ιδανική συμπεριφορά (όταν δεν εκδηλώνονται μερικές εκκενώσεις).

Ταυτόχρονα με τις μετρήσεις αυτές διαπιστώνεται ότι, μετά από μία τιμή $\hat{U}_K \approx 45$ kV (όπου \hat{U}_K η μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης) εκδηλώνεται κατά τη γήρανση επιφανειακός δενδρίτης, στα ίχνη του οποίου παρατηρείται στην επιφάνεια του μονωτικού μόνιμη αλλαγή της μοριακής δομής (σχήμα 3.1.3-8).

Κατά τη διάτρηση δεν εκδηλώνεται επιφανειακός δενδρίτης, αλλά ηλεκτρικό τόξο μεταξύ των ηλεκτροδίων. Η εικόνα, που παρουσιάζουν τα δοκίμια μετά τη διάτρηση, είναι μία μικρή τρύπα (μικρότερη από 0,1 mm) πλησίον της ακίδας.



Σχήμα 3.1.3-8 : Αλλαγή της μοριακής δομής στην επιφάνεια του μονωτικού pertinax κατά την εκδήλωση επιφανειακού δενδρίτη (μετά από πολλές κρούσεις 10/200 μs, μέγιστης τιμής 75 kV)

Οι παραπάνω μετρήσεις και οπτικές παρατηρήσεις ερμηνεύονται ως ακολούθως: Από το παλμογράφημα της γήρανσης (σχήμα 3.1.3-7α) φαίνεται ότι εκδηλώνονται μερικές εκκενώσεις υπό μορφή αλμάτων δυναμικού, τα οποία προκαλούνται, κατά το ισοδύναμο κύκλωμα του σχήματος 3.1.3-4 (ή του σχήματος 3.1.3-1), από τη σταδιακή διάσπαση διαφόρων θέσεων διαταραχής (C_1 , C_e). Μπορούμε να υποθέσουμε ότι στην περίπτωση αυτή ισχύει για τη σχέση καταμερισμού μεταξύ χωρητικότητας του δοκιμίου C και του πυκνωτή μέτρησης C_m :

$$u_m(t) = \frac{C_\delta + \Delta C_\delta}{C_m} u_K(t)$$

όπου ΔC_δ η αύξηση της χωρητικότητας, λόγω εκδήλωσης μερικών εκκενώσεων. Ο δενδρίτης μπορεί να ερμηνευθεί από τα παραπάνω ισοδύναμα κυκλώματα ως επέκταση του ίχνους της ακίδας μέχρι τις θέσεις διαταραχής, που διασπώνται. Η διάτρηση φαίνεται ότι συμβαίνει στη θέση διαταραχής, όπου η πεδιακή ένταση έχει τη μέγιστη τιμή της. Μπορεί κανείς να υποθέσει, ότι πρόκειται για ηλεκτρομηχανική διάτρηση.

3.1.4. Η θερμοχημική διάτρηση

Η μείωση της διηλεκτρικής αντοχής είναι δεδομένη κατά την αύξηση της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος μέσου, γιατί η παραγωγή ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων γίνεται μεγαλύτερη. Υπό την έννοια αυτή η θερμότητα του περιβάλλοντος ενισχύει τους άλλους τρεις παράγοντες γήρανσης και διάσπασης, όπως συμβαίνει συνήθως στην πράξη με την πρόωρη γήρανση (ή και θραύση) μονωτήρων γραμμών διανομής μέσης τάσης σε περιβάλλον πυρκαγιών.

3.2. Η Κβαντική θεωρία των φαινομένων προ και κατά τη διάτρηση των στερεών μονωτικών

Στην εν λόγω θεωρία ενδιαφέρει η ενέργεια των ελεύθερων ηλεκτρονίων, από την οποία εξαρτάται το είδος της ακτινοβολίας κατά την εξαναγκασμένη συλλογή τους από την άνοδο. Έχει διαπιστωθεί πειραματικά ότι το φάσμα της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας κατά την γήρανση είναι από ακουστικά κύματα μέχρι υπεριώδεις ακτίνες, ενώ κατά τη διάσπαση επεκτείνεται μέχρι τις μαλακές ακτίνες x.

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

Από τα αναφερόμενα φαίνεται ότι η κβαντομηχανική θεωρία των φαινομένων προ και κατά τη διάσπαση των στερεών μονωτικών, δίνει πληροφορίες για το μη ορατό φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, που παράγεται στα υλικά αυτά κατά την ηλεκτρική καταπόνησή τους. Οι πληροφορίες αυτές δε 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. Ο διαχωρισμός αυτός των μερικών εκκενώσεων δε μπορεί να δοθεί από τη θεωρία του ιονισμού με κρούσεις, γιατί ο συντελεστής A αφορά το μονωτικό και όχι το περιβάλλον του, και η τιμή του θα πρέπει να εξαρτάται από τη διαχρονική μεταβολή της μοριακής δομής του υλικού. Αν π.χ. πραγματοποιήσει κανείς τα πειράματα, με κρουστικές τάσεις $1,2/50\mu\text{s}$ (ή με $10/200\mu\text{s}$), και προσεγγίσει ακολούθως τις πειραματικές χαρακτηριστικές $Q=f(\dot{U}_k)$, θα διαπιστώσει ότι ο συντελεστής A έχει διαφορετική τιμή, από εκείνη κατά την καταπόνηση με κρουστικές τάσεις $250/2500\mu\text{s}$. Η διαφορετική αυτή τιμή του συντελεστή A (κατά την καταπόνηση με κρουστικές τάσεις $1,2/50\mu\text{s}$ ή $10/200\mu\text{s}$) μπορεί να θεωρηθεί μόνο ως μία ένδειξη ότι συμβαίνει ιονισμός με κρούσεις, χωρίς όμως να καθορίζεται η περιοχή εκδήλωσής του (στον όγκο του μονωτικού, ή στην επιφάνειά του, ή στον όγκο και στην επιφάνεια του μονωτικού). Γι' αυτό, δε μπορεί κανείς να καταλήξει, μέσω της κβαντομηχανικής θεώρησης των φαινομένων προ και κατά τη διάσπαση των στερεών

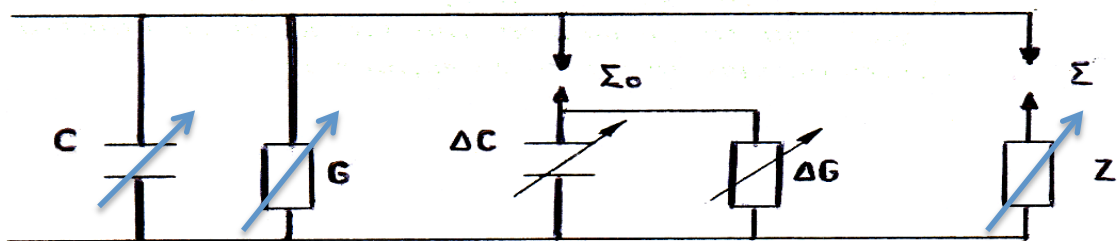
μονωτικών, στο διαχωρισμό των μερικών εκκενώσεων στα παλμογραφήματα των αλμάτων δυναμικού.

Από τα παραπάνω φαίνεται, ότι για την ερμηνεία των φαινομένων προ και κατά τη διάσπαση των στερεών μονωτικών, χρειάζεται να συνδυαστούν οι δύο θεωρίες, ώστε να δίνουν περισσότερες πληροφορίες για την πράξη. Ένα ισοδύναμο κύκλωμα, που έχει προταθεί για το σκοπό αυτό, δίνεται στο σχήμα 1.3-1. Πρόκειται, ουσιαστικά, για μία συμπλήρωση του ισοδύναμου κυκλώματος Gemant-Philipoff (σχήμα 1.1.3-1), όπου όμως η τιμή του εφαρμοζόμενου πεδίου έχει σημασία για την εκδήλωση των επιμέρους φαινομένων. Αν υποθέσει κανείς, ότι η έναρξη των μερικών εκκενώσεων συμβαίνει στην τιμή της πεδιακής E_0 (περίπου $0,2\text{MV/cm}$), τότε, τα φαινόμενα, που εκδηλώνονται στο μονωτικό, αποδίδονται από το ισοδύναμο κύκλωμα του σχήματος 1.3-1 ως ακολούθως:

- Για $E < E_0$: Η συμπεριφορά του υλικού είναι ιδανική (δε διασπώνται οι σπινθηριστές Σ_0 και Σ)
- Για $E > E_0$: Εκδηλώνονται μερικές εκκενώσεις (διασπάται ο Σ_0) και η αύξηση της ειδικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας διέπεται από τη σχέση : $\sigma = \sigma_0 \exp(-W/kT)$
- Για $E \gg E_0$: Εμφανίζεται αρνητική διαφορική αντίσταση και εκδηλώνεται ιονισμός με κρούσεις. Δεν ισχύει η σχέση $\sigma = \sigma_0 \exp(-W/kT)$, αλλά η σχέση:

$$Q = Q_0 \exp[A(E^2 - E_0^2)/E_0^2]$$

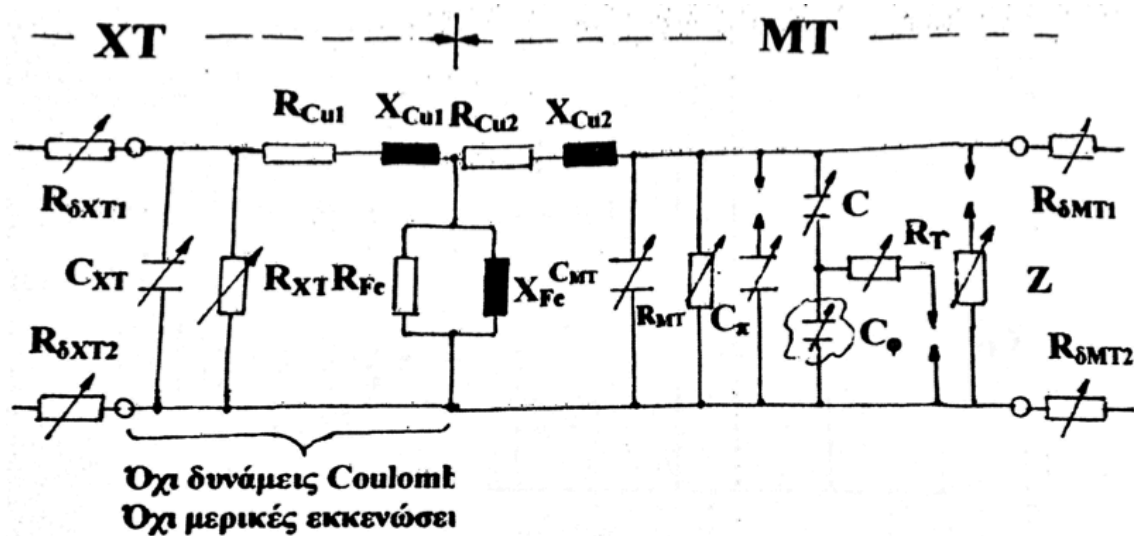
- Το φάσμα της ακτινοβολίας που εκπέμπεται, εξαρτάται από την τιμή E . για τιμές $W_e > 20\text{eV}$ συμβαίνει η διάτρηση.



Σχήμα 3.3-1 : Ένα ισοδύναμο κύκλωμα συνδυασμού της μακροσκοπικής και της κβαντομηχανικής θεωρίας για τη γήρανση και τη διάτρηση.

- C : ιδανική χωρητικότητα
- G : ιδανική αγωγιμότητα
- ΔC : αύξηση της χωρητικότητας λόγω μερικών εκκενώσεων
- ΔG : αύξηση της αγωγιμότητας λόγω μερικών εκκενώσεων
- Z : αρνητική διαφορική αντίσταση
- Σ_0 : σπινθηριστής έναρξης των μερικών εκκενώσεων
- Σ : σπινθηριστής εκδήλωσης της Z
- Z : Μη γραμμική αντίσταση

Τέλος με βάση τα ανωτέρω το ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα της διαχρονικής καταπόνησης ενός μετασχηματιστή διανομής δίνεται στο σχήμα 3.3-2.



XT : χαμηλή τάση

MT : μέση τάση

Αντιστάσεις διάβασης στους ακροδέκτες

$R_{\delta,XT1}$: Αντίσταση διάβασης του λυόμενου συνδέσμου No1, στην XT

$R_{\delta,XT2}$: Αντίσταση διάβασης του λυόμενου συνδέσμου No2. Στην XT

$R_{\delta,MT1}$: Αντίσταση διάβασης του λυόμενου συνδέσμου No1, στην MT

$R_{\delta,MT2}$: Αντίσταση διάβασης του λυόμενου συνδέσμου No2, στην MT

Απώλειες χαλκού και σιδήρου

R_{Cu1}, X_{Cu1} : Πηνίο XT

R_{Cu2}, X_{Cu2} : Πηνίο MT

R_{Fe}, X_{Fe} : Απώλειες σιδήρου

Μόνωση

C_{XT}, R_{XT} : Ιδανική χωρητική διάταξη στη XT

C_{MT}, R_{MT} : Ιδανική χωρητική διάταξη στη MT

C_{π} : Χωρητικότητα που συμβολίζει την πόλωση

C, C_{ϕ} : Καταμεριστής

R_T : Αντίσταση του τόξου κατά την διάσπαση της C_{ϕ}

Z: Σύνθετη αντίσταση λόγω των μη γραμμικών φαινομένων

Βιβλιογραφία:

- [1] Μπούρκας Π.Δ. , Πολυκράτη Α.Δ. , Βιομηχανικές ηλεκτρικές εγκαταστάσεις Τόμος II (Εφαρμογές βιομηχανικών ηλεκτρικών διατάξεων) , εκδόσεις Ε.Μ.Π. , Αθήνα 2012
- [2] Ψαρρός Ε.Γ. , Υπαίθριες γραμμές διανομής χαμηλής τάσης σε περιβάλλον πυρκαγιών , Διδακτορική Διατριβή , Ε.Μ.Π . , Αθήνα 2009
- [3] Πέτρος Ντοκόπουλος : «Ηλεκτρικές Εγκαταστάσεις Καταναλωτών» - Εκδόσεις ΖΗΤΗ (Θεσσαλονίκη 2005)
- [4] Κωνσταντίνος Χαλεβίδης, (Διηλεκτρικά και θερμικά φαινόμενα σε γραμμές μεταφοράς και διανομής), Διδακτορική διατριβή, Αθήνα 2012
- [5] Halevidis, Anagnostatos, Polykrati, Koufakis, Bourkas, (Proposal of a protection method against probable consequences to humans and the environment from short-circuit or abruption of a low-voltage distribution line conductor) , Paper, published in IET Generation, Transmission and Distribution, January 2010
- [6] Οδηγία διανομής Νο 22, (Προστασία Μ/Σ και Δικτύων Χ.Τ) ΔΕΔ/ΤΤΕ Δ-4, ΔΕΗ
- [7] Κ. Βουρνά, Γ. Κονταξή, Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας, Αθήνα 2001
- [8] Β. Κ. Παπαδιάς, Ανάλυση Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας, Τόμος II, Ασύμμετρες και Μεταβατικές Καταστάσεις, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα 1993
- [9] Αριστοτέλας Κατσούλου, (Έλεγχος Συνθήκης Ουδετέρωσης σε δίκτυα διανομής Χαμηλής Τάσης), Διπλωματική Εργασία , Αθήνα 2006
- [10] Ευάγγελος Μαρινάκης, (Μελέτη θερμικής και διηλεκτρικής καταπόνησης γραμμής μέσης τάσης (τύπου ACSR – 95) κατά το τριφασικό και διφασικό βραχυκύκλωμα στον αέρα), Διπλωματική Εργασία, Αθήνα 2009
- [11] Γιαννίκου Φώτης, (Ανάπτυξη λογισμικού για την εκτίμηση της διηλεκτρικής, θερμικής και μηχανικής συμπεριφοράς των εναέριων γραμμών υψηλής, μέσης και χαμηλής τάσης καθώς και των εξασκουμένων δυνάμεων μεταξύ τους), Διπλωματική Εργασία, Ιούλιος 2012.
- [12] Δημήτριος Ντάρδας, (Διηλεκτρική συμπεριφορά γραμμών διανομής σε περιβάλλον φυλλωμάτων δένδρων), Διπλωματική Εργασία, Ιούλιος 2013.