



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

**Αξιολόγηση συμπεριφοράς γραμμής ηλεκτρικής ενέργειας
σε περιβάλλον πυρκαγιάς**

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Γεώργιος Κ. Σουλινάρης

Επιβλέπων: Περικλής Δ. Μπούρκας
Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Ιανουάριος 2015



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

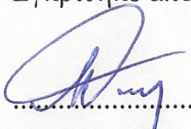
**Αξιολόγηση συμπεριφοράς γραμμής ηλεκτρικής ενέργειας
σε περιβάλλον πυρκαγιάς**

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

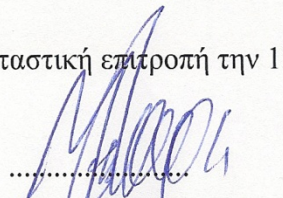
Γεώργιος Κ. Σουλινάρης

Συμβουλευτική επιτροπή: Περικλής Δ. Μπούρκας
Κωνσταντίνος Γ. Καραγιαννόπουλος
Νικόλαος Ι. Θεοδώρου

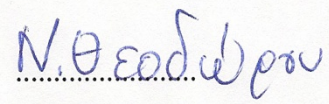
Εγκρίθηκε από την επταμελή εξεταστική επιτροπή την 13.02.2015.


.....
Π. Μπούρκας

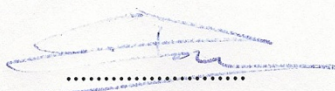
Ομότιμος Καθηγητής Ε.Μ.Π.


.....
Κ. Καραγιαννόπουλος

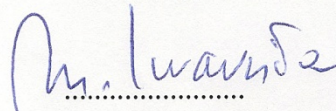
Καθηγητής Ε.Μ.Π.


.....
Ν. Θεοδώρου

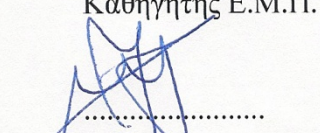
Καθηγητής Ε.Μ.Π.


.....
Κ. Δέρβος

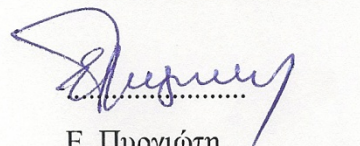
Καθηγητής Ε.Μ.Π.


.....
Μ. Ιωαννίδου

Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.


.....
Ι. Ψαρράς

Καθηγητής Ε.Μ.Π.


.....
Ε. Πυργιώτη

Επίκουρος Καθηγήτρια
Πανεπιστημίου Πατρών

.....

Γεώργιος Κ. Σουλινάρης

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

Copyright © Γεώργιος Κ. Σουλινάρης,

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.

Πρόλογος

Η διατριβή αυτή πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο Υψηλών Τάσεων και Ηλεκτρικών Μετρήσεων του Τομέα Ηλεκτρικών Βιομηχανικών Διατάξεων και Συστημάτων Αποφάσεων της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών υπό την επίβλεψη του Ομότιμου Καθηγητή κ. Περικλή Μπούρκα. Οφείλω στο σημείο αυτό να τον ευχαριστήσω, καθώς οι πολύτιμες συμβουλές του, η επιστημονική του καθοδήγηση και η ηθική υποστήριξή του υπήρξαν καθοριστικοί παράγοντες για την εκπόνηση αυτής της διατριβής. Θερμές ευχαριστίες οφείλω επίσης και στα μέλη της τριμελούς συμβουλευτικής επιτροπής Καθηγητές κ.κ. Νικόλαο Θεοδώρου και Κωνσταντίνο Καραγιαννόπουλο για τη βοήθεια και συμπαράστασή τους. Εκφράζω ακόμα τις ευχαριστίες μου σε όλα τα μέλη της επταμελούς εξεταστικής επιτροπής για τις εποικοδομητικές τους παρατηρήσεις. Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τους συναδέλφους μου, διδάκτορες μηχανικούς, Αικατερίνη Πολυκράτη και Κωνσταντίνο Χαλεβίδη για την άριστη συνεργασία μας.

Γεώργιος Κ. Σουλινάρης
Αθήνα, Ιανουάριος 2015

*Αφιερώνεται
στην οικογένειά μου*

Περίληψη

Η διατριβή αυτή ερευνά την αξιολόγηση της συμπεριφοράς γραμμών ηλεκτρικής ενέργειας σε περιβάλλον πυρκαγιών.

Στο κεφάλαιο 1.1 της εισαγωγής γίνεται αρχικά μια σύντομη αναφορά στο σκεπτικό των δοκιμών ποιοτικού ελέγχου σε ηλεκτροτεχνικές κατασκευές εστιάζοντας στη δοκιμή υπερθέρμανσης, στις διηλεκτρικές δοκιμές, στη δοκιμή μηχανικής αντοχής, στη δοκιμή υπό βραχυκύκλωμα και στις ειδικές δοκιμές.

Στο κεφάλαιο 1.2 γίνεται μία περιληπτική παρουσίαση των φαινομένων προ και κατά τη διάσπαση των ηλεκτρομονωτικών υλικών (αέρα, λαδιού, στερεών) καθώς και της μακροσκοπικής και της κβαντομηχανικής θεωρίας των φαινομένων της γήρανσης και της διάσπασης των στερεών ηλεκτρομονωτικών υλικών. Επίσης, παρατίθεται ένα ισοδύναμο κύκλωμα που συνδυάζει τις δύο προαναφερόμενες θεωρίες αναφορικά με τη γήρανση και τη διάσπαση των στερεών ηλεκτρομονωτικών υλικών των πρακτικών εφαρμογών.

Στο κεφάλαιο 1.3 εξετάζεται η θερμική συμπεριφορά των αγωγών ηλεκτρικής ενέργειας τόσο υπό το μέγιστο ρεύμα λειτουργίας όσο και κατά το βραχυκύκλωμα. Αναφορικά με τη θερμική καταπόνηση των αγωγών κατά το βραχυκύκλωμα, παρουσιάζεται ο υπολογισμός της αύξησης της θερμοκρασίας σε γραμμές της ηλεκτρικής ενέργειας. Επίσης, εξετάζεται η θερμική καταπόνηση των γραμμών διανομής σε περιβάλλον πυρκαγιάς. Επιπλέον, αναφορικά με το δίκτυο χαμηλής τάσης, παρουσιάζεται η συνθήκη βραχυκύκλωσης, επισημαίνεται η αναγκαιότητα της εφαρμογής της και παρατίθενται πειραματικές διερευνήσεις, που αφορούν την επαφή γυμνών αγωγών του δικτύου τόσο με δένδρα όσο και με τον αγωγό δημοτικού φωτισμού. Επιπρόσθετα, για τους γυμνούς αγωγούς των γραμμών διανομής δίνεται υπολογισμός της θερμοκρασίας υποθετικών τηγμάτων αλουμινίου κατά την πρόσκρουσή τους στο έδαφος.

Στη συνέχεια αναφορικά με τη διηλεκτρική συμπεριφορά των εναερίων γραμμών ηλεκτρικής ενέργειας, εξετάζεται το θέμα των αποστάσεων μόνωσης και προστασίας, η εκδήλωση σπινθηρισμών σε γυμνούς αγωγούς, σε μονωτήρες και σε λυόμενους ηλεκτρικούς συνδέσμους του δικτύου. Τέλος, γίνεται σύντομη αναφορά σχετικά με τη μηχανική συμπεριφορά των εναερίων γραμμών της ηλεκτρικής ενέργειας.

Στο κεφάλαιο 1.4 γίνεται σύντομη αναφορά για την αποκοπή του ουδετέρου σε γραμμές χαμηλής τάσης καθώς και με τις πιθανές συνέπειες για τον άνθρωπο και το περιβάλλον από την αποκοπή αγωγού του δικτύου διανομής χαμηλής τάσης.

Στο κεφάλαιο 2 παρατίθεται ο σκοπός της διατριβής, σε ό,τι αφορά τις μετρήσεις που έγιναν αφενός για τη διερεύνηση της διηλεκτρικής συμπεριφοράς της υδρόφοβου σιλικονούχου επάλειψης μονωτήρων και αφετέρου για τη μείωση της διηλεκτρικής συμπεριφοράς μονωτήρων πορσελάνης σε περιβάλλον πυρκαγιάς καθώς και για την πειραματική διερεύνηση της θερμοκρασίας υποθετικών τηγμάτων κατά την άφιξή τους στο έδαφος.

Το κεφάλαιο 3 περιλαμβάνει τις μετρήσεις που έγιναν. Πιο συγκεκριμένα, πρώτα παρατίθεται η διαδικασία και τα αποτελέσματα των μετρήσεων των μερικών εκκενώσεων σε δοκίμια στερεών ηλεκτρομονωτικών υλικών, από πρεσπάρ και πέρτιναξ, με ή χωρίς υδρόφοβο σιλικονούχο επάλειψη, υπό κρουστικές τάσεις της μορφής $1,2/50 \mu s$, σε περιβάλλον ατμοσφαιρικού αέρα. Στη συνέχεια παρουσιάζεται η διαδικασία και τα αποτελέσματα των μετρήσεων της αντίστασης μόνωσης δοκιμίων εκ μονωτήρων πορσελάνης (από εξοπλισμό του δικτύου διανομής μέσης τάσης) κατά τη θερμική καταπόνησή τους. Στο τρίτο μέρος του κεφαλαίου παρουσιάζεται η διαδικασία και τα αποτελέσματα των μετρήσεων της θερμοκρασίας υποθετικών τηγμάτων αλουμινίου κατά την άφιξή τους στο έδαφος κατόπιν ελεύθερης πτώσης από ύψος 5 m.

Στο κεφάλαιο 4 δίνονται δύο τυπικά παραδείγματα θερμικής, διηλεκτρικής και μηχανικής συμπεριφοράς γραμμών διανομής μέσης τάσης ηλεκτρικής ενέργειας σε περιβάλλον πυρκαγιάς.

Τα σχόλια επί των αποτελεσμάτων των προαναφερομένων μετρήσεων περιλαμβάνονται στο κεφάλαιο 5. Συγκεκριμένα, η υδρόφοβος σιλικονούχος επάλειψη των στερεών μονωτικών πρεσπάρ και πέρτιναξ φαίνεται ότι περιορίζει την εκδήλωση των μερικών εκκενώσεων. Η μείωση της ειδικής αντίστασης της πορσελάνης με την αύξηση της θερμοκρασίας, μπορεί να οδηγήσει σε αναίρεση της μονωτικής της ικανότητας. Από τη μέτρηση της θερμοκρασίας υποθετικών τηγμάτων αλουμινίου κατά την άφιξή τους στο έδαφος, ύστερα από την ελεύθερη πτώση τους από ύψος 5 m, προέκυψε ότι η αύξηση της θερμοκρασίας ήταν $29 \text{ }^\circ\text{C}$ πάνω από εκείνη του περιβάλλοντος και δεν παρατηρήθηκαν ίχνη καψίματος ή μαυρίσματος.

Στο έκτο κεφάλαιο δίνεται περιληπτικά η συνεισφορά της εργασίας στην έρευνα και τις πρακτικές εφαρμογές.

Abstract

This thesis investigates the behavior of power lines in case of wildfires.

The first chapter includes a short review of the quality tests generally conducted in electrotechnical constructions, focusing especially on thermal stress, dielectric, mechanical, short-circuit and special tests.

Chapter 1.2 refers to the phenomena before and after the breakdown of insulating materials (air, oil, solids) and shortly presents the phenomena of macroscopic and quantum theory of ageing and breakdown of solid insulating materials. Moreover, an equivalent circuit that combines the above theories of solid insulating materials of practical applications is also introduced.

In chapter 1.3 the thermal stress of conductors due either to their maximum operating current or to a short circuit, is introduced. Additionally, the calculation of temperature rise in power lines due to a short circuit and the conductors' thermal stress due to a wildfire, are also presented.

Referring to low voltage network, the necessity of neutralization condition is introduced, and experiments concerning the aspects of wildfire forensics, are shown as well. Furthermore, the calculation of temperature of hypothetical molten aluminium particles when they hit the ground, is also examined

There is also a short reference on the dielectric phenomena that can occur on conductors, insulators and electric conducts in a distribution network, relevant to a fire investigation, as well as on the mechanical behavior of overhead conductors.

In chapter 1.4 the abruption of neutral conductor in low voltage power lines is shortly introduced and possible consequences for the people and the environment, due to the abruption of low voltage conductors, are shown.

The aim of this thesis is presented in chapter 2 referring to the following: the investigation of dielectric behavior of hydrophobic silicon rubber coating on insulators, the reduction of dielectric behaviour of porcelain insulators during a wildfire and the experimental investigation of temperature measurements of hypothetical molten aluminum particles at the moment they hit the ground after having been released from a 5 m height.

Next chapter, No 3, describes the process as well as the experimental results of the thesis. Firstly, the measurements of partial discharges on served specimens of solid insulating materials (like presspan and pertinax) that are coated by hydrophobic silicon rubber, under impulse voltages 1,2/50 μ s, in air, are presented. Secondly, the measurements of insulating resistance on specimens of porcelain insulators during their thermal stress, are presented. In the last part, the procedure combined with the results of the temperature measurements of hypothetical molten aluminum particles at the moment they hit the ground after being released from a 5 m height, is demonstrated.

In chapter 4, two typical examples of the thermal, dielectric and mechanical behavior of the medium voltage distribution lines, during wildfires, are presented.

Discussion on the above experiment results is made in chapter 5. More specific, the results showed that partial discharges are reduced in case of silicon coated presspan and pertinax specimens. Additionally, the reduction of special resistivity of porcelain with the temperature rise may reduce its insulating capability. Last but not least, the measurement results of hypothetical molten aluminum particles, at the moment they hit the ground after releasing them from a height of 5 m, showed a temperature rise of 29 °C over the ambient while no trace of burning was observed on the ground.

The contribution of this thesis to further research and its practical applications, is analyzed in the sixth chapter.

Λέξεις Κλειδιά

Γραμμές ηλεκτρικής ενέργειας, πυρκαγιά, μερικές εκκενώσεις, μονωτικά υλικά, υποθετικά τήγματα αλουμινίου, υδρόφοβος σιλικονούχος επάλειψη.

Key Words

Power lines, wildfire, partial discharges, insulating materials, hypothetical molten aluminum particles, hydrophobic silicon rubber coating.

Περιεχόμενα

Πρόλογος	5
Περίληψη	7
Abstract	9
Περιεχόμενα	11
Πίνακας συμβόλων	17
1 Εισαγωγή	23
1.1 Το σκεπτικό των δοκιμών ποιοτικού ελέγχου σε ηλεκτροτεχνικές κατασκευές	23
1.1.1 Η δοκιμή υπερθέρμανσης (ή ανύψωσης της θερμοκρασίας)	24
1.1.2 Οι διηλεκτρικές δοκιμές	25
1.1.3 Η δοκιμή μηχανικής αντοχής	26
1.1.4 Η δοκιμή υπό βραχυκύκλωμα	26
1.1.5 Ειδικές δοκιμές	26
1.2 Φαινόμενα προ και κατά τη διάσπαση των ηλεκτρομονωτικών υλικών	27
1.2.1 Τα φαινόμενα γήρανσης και διάσπασης στον ατμοσφαιρικό αέρα	27
1.2.2 Τα φαινόμενα γήρανσης και διάσπασης στο μονωτικό λάδι	27
1.2.3 Φαινόμενα προ και κατά τη διάσπαση των στερεών ηλεκτρομονωτικών υλικών	28
1.2.3.1 Η μακροσκοπική θεωρία των φαινομένων προ και κατά τη διάσπαση των στερεών ηλεκτρομονωτικών υλικών	29
1.2.3.2 Η κβαντομηχανική θεωρία της γήρανσης και της διάσπασης των στερεών ηλεκτρομονωτικών υλικών	31
1.2.3.3 Φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας κατά την επιφανειακή διάσπαση	33
1.2.3.4 Ένα ισοδύναμο κύκλωμα που συνδυάζει τη μακροσκοπική και την κβαντική θεωρία της γήρανσης και της διάσπασης των στερεών ηλεκτρομονωτικών υλικών των πρακτικών εφαρμογών	33
1.3 Θερμική, διηλεκτρική και μηχανική συμπεριφορά γραμμών ηλεκτρικής ενέργειας	35

1.3.1	Θερμική συμπεριφορά των αγωγών της ηλεκτρικής ενέργειας υπό το μέγιστο ρεύμα λειτουργίας	35
1.3.2	Θερμική συμπεριφορά των αγωγών της ηλεκτρικής ενέργειας κατά το βραχυκύκλωμα	37
1.3.2.1	Συνιστώσες του ρεύματος βραχυκύκλωσης	38
1.3.2.2	Υπολογισμός της αύξησης της θερμοκρασίας κατά το βραχυκύκλωμα σε γραμμές της ηλεκτρικής ενέργειας σύμφωνα με το πρότυπο IEC 60865-1	40
1.3.2.3	Προσεγγιστικός υπολογισμός της αύξησης της θερμοκρασίας σε γραμμές της ηλεκτρικής ενέργειας κατά το βραχυκύκλωμα	42
1.3.3	Η θερμική καταπόνηση των γραμμών διανομής σε περιβάλλον πυρκαγιάς	45
1.3.3.1	Η παραμένουσα επιμήκυνση επιτόνων του δικτύου διανομής σε περίπτωση πυρκαγιάς στο περιβάλλον των γραμμών ηλεκτρικής ενέργειας	49
1.3.3.2	Η παραμένουσα επιμήκυνση αγωγών ACSR σε περίπτωση πυρκαγιάς στο περιβάλλον των γραμμών ηλεκτρικής ενέργειας	50
1.3.4	Πειραματικές διερευνήσεις σε γραμμές διανομής χαμηλής τάσης	50
1.3.4.1	Η συνθήκη βραχυκύκλωσης (ή ουδετέρωσης) στις γραμμές διανομής χαμηλής τάσης	50
1.3.4.2	Πειραματική διερεύνηση των συνεπειών της επαφής γυμνών αγωγών του δικτύου διανομής χαμηλής τάσης με φυλλώματα και κλαδιά δένδρων	56
1.3.4.3	Πειραματική διερεύνηση αγώγιμων επαφών μεταξύ αγωγού του δημοτικού φωτισμού και του υπερκείμενού του αγωγού φάσεως	56
1.3.5	Η θερμοκρασία υποθετικών τηγμάτων αλουμινίου κατά την πρόσκρουσή τους στο έδαφος	57
1.3.6	Διηλεκτρική συμπεριφορά των γραμμών της ηλεκτρικής ενέργειας	60
1.3.6.1	Αποστάσεις μόνωσης και προστασίας σε γραμμές ηλεκτρικής ενέργειας	61
1.3.6.1.1	Η ελάχιστη απόσταση μόνωσης στη μέση και υψηλή τάση στον ατμοσφαιρικό αέρα υπό κανονικές συνθήκες και η απόσταση προστασίας μεταξύ των αγωγών σε εναέριες γραμμές διανομής μέσης τάσης και μεταφοράς υψηλής τάσης	61
1.3.6.1.2	Η ελάχιστη απόσταση μόνωσης στη χαμηλή τάση στον ατμοσφαιρικό αέρα υπό κανονικές συνθήκες και η απόσταση	

προστασίας μεταξύ γυμνών αγωγών σε εναέριες γραμμές διανομής χαμηλής τάσης	63
1.3.6.2 Αποστάσεις προστασίας γυμνών αγωγών διανομής μέσης τάσης από κτίρια και από επικλινή εδάφη και γυμνών αγωγών διανομής (μέσης και χαμηλής τάσης) από δέντρα	64
1.3.6.2.1 Ελάχιστες αποστάσεις προστασίας από κτίρια και επικλινή εδάφη	64
1.3.6.2.2 Ελάχιστη απόσταση ασφάλειας γραμμών διανομής μέσης τάσης από το δώμα κτιρίων	65
1.3.6.2.3 Αποστάσεις δέντρων (κατά το ετήσιο κλάδεμά τους) από γυμνούς αγωγούς διανομής	65
1.3.6.3 Οι στεμματοειδείς εκκενώσεις (φαινόμενο Corona)	66
1.3.6.3.1 Η εκδήλωση σπινθηρισμών σε γυμνούς αγωγούς του δικτύου διανομής	67
1.3.6.4 Το μήκος ερπυσμού κεραμικών και γυάλινων μονωτήρων	68
1.3.6.5 Μερικές εκκενώσεις (σπινθηρισμοί) επί κεραμικών και γυάλινων μονωτήρων και η μείωσή τους με συνθετικούς μονωτήρες	72
1.3.6.6 Σπινθηρισμοί σε λυόμενους ηλεκτρικούς σύνδεσμους λόγω μεγάλης μεταβολής της αντίστασης διάβασης	73
1.3.7 Μηχανική συμπεριφορά εναέριων γραμμών της ηλεκτρικής ενέργειας	74
1.4 Αποκοπή αγωγών	75
1.4.1 Αποκοπή του ουδέτερου σε γραμμή διανομής χαμηλής τάσης	75
1.4.2 Πιθανές συνέπειες για τον άνθρωπο και το περιβάλλον από την αποκοπή αγωγού του δικτύου διανομής χαμηλής τάσης και μέσα προστασίας στο δίκτυο και στην εγκατάσταση του καταναλωτή	76
2 Σκοπός της εργασίας	78
3 Οι μετρήσεις που έγιναν	81
3.1 Πειραματική διερεύνηση της εκδήλωσης των μερικών εκκενώσεων σε στερεά ηλεκτρομονωτικά των πρακτικών εφαρμογών (με ή χωρίς υδρόφοβο σιλικονούχο επάλειψη τύπου Midsun 570), υπό κρουστικές τάσεις της μορφής 1,2/50 μs σε περιβάλλον ατμοσφαιρικού αέρα	81
3.1.1 Η διαδικασία των μετρήσεων των μερικών εκκενώσεων στα δοκίμια, υπό κρουστικές τάσεις της μορφής 1,2/50 μs, σε περιβάλλον ατμοσφαιρικού αέρα	81

3.1.1.1	Η επιλογή των δοκιμών	81
3.1.1.2	Η επιλογή της κρουστικής τάσης 1,2/50 μs ως τάσης δοκιμής και η διάταξη των ηλεκτροδίων εφαρμογής της τάσης	83
3.1.1.3	Τα τετράπολα μέτρησης	84
3.1.1.4	Το κύκλωμα των μετρήσεων και η διαδικασία των μετρήσεων	85
3.1.1.5	Τα αποτελέσματα των μετρήσεων	88
3.2	Μέτρηση της αντίστασης μόνωσης δοκιμών εκ μονωτήρων πορσελάνης (από εξοπλισμό του δικτύου διανομής μέσης τάσης) κατά τη θερμική καταπόνησή τους	94
3.2.1	Η διαδικασία των μετρήσεων της αντίστασης μόνωσης δοκιμών εκ μονωτήρων πορσελάνης κατά τη θερμική καταπόνησή τους	94
3.2.2	Τα αποτελέσματα των μετρήσεων της θερμικής καταπόνησης των εκ πορσελάνης δοκιμών	95
3.3	Πειραματική διερεύνηση της θερμοκρασίας υποθετικών τηγμάτων αλουμινίου (περίπου σφαιρικής μορφής διαμέτρου 1 mm) κατά την πρόσκρουσή τους στο έδαφος κατόπιν ελεύθερης πτώσης από ύψος 5μ. υπό πνέοντα άνεμο 2 μποφόρ	96
3.3.1	Διάταξη πειραματισμού και διαδικασία των μετρήσεων	96
3.3.1.1	Κατασκευή των δοκιμών	96
3.3.1.2	Αύξηση της θερμοκρασίας των δοκιμών στην επιθυμητή τιμή	97
3.3.1.3	Ύψος ελεύθερης πτώσης των δοκιμών	98
3.3.1.4	Πνέοντες άνεμοι κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων	98
3.3.1.5	Άμεσος εντοπισμός δοκιμών κατά την άφιξή τους στο έδαφος	98
3.3.1.6	Μέτρηση της θερμοκρασίας δοκιμών κατά την άφιξή τους στο έδαφος	99
3.3.2	Τα αποτελέσματα των μετρήσεων της θερμοκρασίας υποθετικών τηγμάτων αλουμινίου κατά την άφιξή τους στο έδαφος.	99
4	Παραδείγματα εμπλοκής γραμμών διανομής μέσης τάσης σε περιβάλλον πυρκαγιάς	101
4.1	1^ο Παράδειγμα	101
4.1.1	Θερμική συμπεριφορά των αγωγών	102
4.1.1.1	Θερμοκρασία των αγωγών υπό το μέγιστο ρεύμα λειτουργίας των 30 A (ονομαστικό ρεύμα των ασφαλειών)	102
4.1.1.2	Θερμοκρασία των αγωγών ACSR 16 mm ² υπό βραχυκύκλωμα	103

4.1.2	Διηλεκτρική συμπεριφορά του εξοπλισμού στον ξύλινο στύλο (τυποποιημένη κατασκευή P-27T)	103
4.1.3	Μηχανική αντοχή των ανοιγμάτων του επίμαχου στύλου υπό υποθετικούς ανέμους 10 μποφόρ	106
4.1.4	Η θερμοχημική διάσπαση του εκ πορσελάνης μονωτήρα του ασφαλειοαποζεύκτη μέσης τάσης (20 kV)	109
4.2	2^ο Παράδειγμα	112
4.2.1	Θερμική καταπόνηση των αγωγών μέσης τάσης (ACSR 16 mm ² , Al 16 mm ² και Cu 16 mm ²) του εν λόγω υποσταθμού	115
4.2.1.1	Θερμοκρασία των εν λόγω αγωγών υπό το μέγιστο ρεύμα λειτουργίας	115
4.2.1.2	Θερμοκρασία των εν λόγω αγωγών υπό το ρεύμα βραχυκύκλωσης	115
4.2.1.3	Θερμοκρασία των στατικών ηλεκτρικών συνδετήρων υπό το μέγιστο ρεύμα λειτουργίας και υπό βραχυκύκλωμα	115
4.2.2	Διηλεκτρική συμπεριφορά των γραμμών μέσης τάσης	117
5	Σχόλια επί των πειραματικών αποτελεσμάτων	120
5.1	Σχόλια επί των αποτελεσμάτων εκδήλωσης των μερικών εκκενώσεων σε στερεά ηλεκτρομονωτικά των πρακτικών εφαρμογών (με ή χωρίς υδρόφοβο επάλειψη), υπό κρουστικές τάσεις της μορφής 1,2/50 μs σε περιβάλλον ατμοσφαιρικού αέρα	120
5.2	Σχόλια επί των αποτελεσμάτων των μετρήσεων της θερμικής καταπόνησης των δοκιμών πορσελάνης	121
5.3	Σχόλια επί των αποτελεσμάτων των μετρήσεων της θερμοκρασίας υποθετικών τηγμάτων αλουμινίου κατά την πρόσκρουσή τους στο έδαφος	123
6	Συμβολή της εργασίας στην έρευνα και στις πρακτικές εφαρμογές	125
7	Βιβλιογραφία	128

Πίνακας συμβόλων

R_I	Αντίσταση μόνωσης
R	Ωμική αντίσταση
R_1	Αντίσταση του τόξου του σπινθηριστή $\Sigma\pi_1$
R_2	Αντίσταση του τόξου του σπινθηριστή $\Sigma\pi_2$
R_π	Αντίσταση του τόξου του σπινθηριστή $\Sigma\pi$
$R_{o\lambda}$	Ολική ωμική αντίσταση
R_M	Ωμική αντίσταση μετασχηματιστή
R_Γ	Ωμική αντίσταση αγωγού
r_Γ	Ωμική αντίσταση αγωγού ανά μονάδα μήκους
R_π	Αντίσταση προστασίας
R_μ	Αντίσταση μετώπου
R_e	Αντίσταση ουράς
Z	Μη γραμμική αντίσταση, που αποδίδει τα φαινόμενα κατά τη κβαντική θεωρία της γήρανσης και διάσπασης
G	Αγωγιμότητα λόγω των απωλειών του διηλεκτρικού καθώς και την ενίσχυσή τους από τις μερικές εκκενώσεις και τη θερμότητα του περιβάλλοντος
ρ	Ειδική αντίσταση ή πυκνότητα αγωγού
ρ_{200}, ρ_o	Ειδική αντίσταση σε θερμοκρασία 200 °C, ειδική αντίσταση υπό συνήθεις θερμοκρασίες
ρ_{av}	Ειδική αντίσταση άνθρακα
σ	Ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα σε θερμοκρασία θ
σ_o	Αρχική ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα
$X_{o\lambda}$	Ολική επαγωγική αντίσταση
X_M	Επαγωγική αντίσταση μετασχηματιστή
X_Γ	Επαγωγική αντίσταση αγωγού
x_Γ	Επαγωγική αντίσταση αγωγού ανά μονάδα μήκους
C	Χωρητικότητα πυκνωτή (ιδανική)
C_m	Χωρητικότητα πυκνωτή μέτρησης
C_I	Χωρητικότητα, που παριστάνει τις εσωτερικές θέσεις διαταραχών (κυρίως φυσαλίδες αερίων)

C_2	Χωρητικότητα, που παριστάνει το υπόλοιπο υγιές τμήμα του στερεού μονωτικού
C_3	Χωρητικότητα, που παριστάνει το υπόλοιπο υγιές τμήμα του επιφανειακού φιλμ
C_ε	Χωρητικότητα, που παριστάνει τις εξωτερικές θέσεις διαταραχών
C_π	Χωρητικότητα, που παριστάνει την πόλωση του υλικού για τη διάτρηση από τις δυνάμεις του πεδίου
C_κ	Χωρητικότητα πυκνωτή κρούσης
C_1, C_2	Χωρητικότητα πυκνωτών καταμερισμού
I_N	Ονομαστικό ρεύμα (μέγιστο ρεύμα συνεχούς λειτουργίας)
I_A	Μέγιστο ρεύμα λειτουργίας
I_s	Κρουστικό ρεύμα βραχυκύκλωσης
I_{sw}	Εναλλασσόμενο ρεύμα βραχυκύκλωσης
I_g	Συνεχές ρεύμα βραχυκύκλωσης
I_d	Διαρκές ρεύμα βραχυκύκλωσης
S_{th}	Πυκνότητα ρεύματος βραχυκύκλωσης
I_a	Ρεύμα διακοπής
I_F	Ονομαστικό ρεύμα ασφάλειας γραμμής
U	Τάση
U_N	Ονομαστική τάση
U_d	Τάση επιφανειακής διάσπασης χωρίς υγρασία
$U_{d,v}$	Τάση επιφανειακής διάσπασης με υγρασία
$U_{d,\varepsilon,v}$	Τάση επιφανειακής διάσπασης λόγω ξένων επικαθίσεων και υγρασίας
$u_m(t)$	Τάση στον πυκνωτή μέτρησης
u_m	Κυματομορφή τάσης $u_m(t)$ στα άκρα του C_m
$u_k(t)$	Κρουστική τάση
U_κ	Μέγιστη τιμή κρουστικής τάσης
ΔU	Ολικό πλάτος αλμάτων δυναμικού
Δu	Άλμα δυναμικού
q	Φορτίο
q_e	Φορτίο ηλεκτρονίου

q_o	Φορτίο κατά την έναρξη μερικών εκκενώσεων.
Δq	Αύξηση φορτίου
E_o	Πεδιακή ένταση έναρξης μερικών εκκενώσεων
E	Ελάχιστη τιμή πεδιακής έντασης μεταξύ αγωγών για την εκδήλωση σπινθηρισμών
E_{ACSR}	Ελάχιστη τιμή πεδιακής έντασης μεταξύ αγωγών ACSR για την εκδήλωση σπινθηρισμών
E_I	Ένταση του ηλεκτρικού πεδίου μεταξύ αγωγών
p	Πίεση ατμοσφαιρικού αέρα ή γεωμετρική σταθερά πεδίου
p_o	Ατμοσφαιρική πίεση σε κανονικές συνθήκες
m_1	Συντελεστής ανάλογος της κατάστασης των αγωγών
m_2	Συντελεστής ανάλογος της σχετικής υγρασίας
η	Συντελεστής χρησιμοποίησης του πεδίου
η_{ACSR}	Συντελεστής χρησιμοποίησης του πεδίου μεταξύ αγωγών ACSR
γ_I	Συντελεστής ιονισμού
d_{min}	Ελάχιστη απόσταση μόνωσης
L_{min}	Μήκος ερπυσμού
d_o	Απόσταση πηγής και επιφάνειας στόχου
r	Ακτίνα αγωγού
d	Απόσταση αγωγών
l	Μήκος ή βάθος καιόμενης επιφάνειας της φωτιάς
L	Μέγιστη τιμή του l ή χαρακτηριστικό μήκος ή άνοιγμα μεταξύ δύο στύλων
D	Διάμετρος
H	Ύψος ή ύψος φλόγας
W	Ενέργεια ενεργοποίησης (ενέργεια για τη μεταφορά ηλεκτρονίων από τη ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας)
ΔW	Ενέργεια ελεύθερων ηλεκτρονίων πάνω από την ενέργεια Fermi
W_η	Ηλεκτρική ενέργεια αγωγού
W_θ	Θερμική ενέργεια αγωγού
P_N	Ονομαστική φαινομένη ισχύς
Q_k	Ενεργός θερμότητα καύσης
Q_{cf}	Ροή μεταφερόμενης θερμότητας

Q	Ολικό ποσοστό απελευθέρωσης θερμότητας της πηγής
Q_{rf}	Προσπίπτουσα ροή ακτινοβολίας
X_r	Κλάσμα ακτινοβολίας, που αντιπροσωπεύει το ποσοστό της θερμότητας που απελευθερώνεται από την πηγή ως ακτινοβολούμενη θερμότητα
θ	Θερμοκρασία λειτουργίας
θ_o	Θερμοκρασία περιβάλλοντος
T	Απόλυτη θερμοκρασία σε K
T_2	Θερμοκρασία φλόγας
$\Delta\theta_N$	Μεταβολή θερμοκρασίας αγωγού λόγω του I_N ως προς τη θερμοκρασία περιβάλλοντος
$\Delta\theta_A$	Αύξηση της θερμοκρασίας (ως προς τη θερμοκρασία περιβάλλοντος) υπό το μέγιστο ρεύμα λειτουργίας I_A
$\Delta\theta_{max}$	Μέγιστη αύξηση της θερμοκρασίας (ως προς τη θερμοκρασία περιβάλλοντος) υπό το μέγιστο ρεύμα λειτουργίας I_A
θ_1	Αρχική θερμοκρασία
θ_2	Τελική θερμοκρασία
$\Delta\theta_{0,1s}$	Αύξηση θερμοκρασίας για χρόνο διακοπής σφάλματος 0,1 sec
$\Delta\theta_\tau$	Διαφορά της αρχικής θερμοκρασίας του υλικού του τήγματος (θ_1) από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος
$\Delta\theta$	Διαφορά της τελικής θερμοκρασίας άφιξης του τήγματος στο έδαφος (θ_2) από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος
μ_d	Συντελεστής [$\mu_d = f(I_{sw} / I_g)$]
κ_1	Συντελεστής [$\kappa_1 = f(R_{o\lambda}, X_{o\lambda})$]
m	Συντελεστής της dc συνιστώσας του ρεύματος βραχυκύκλωσης ή μάζα
n	Συντελεστής της ac συνιστώσας του ρεύματος βραχυκύκλωσης
χ	Συντελεστής για την εύρεση του συντελεστή m
α	Θερμικός συντελεστής αντίστασης
F	Δύναμη
F_P	Δύναμη στη μετωπική επιφάνεια αγωγού λόγω ανεμοπίεσης
F_τ	Δύναμη τάνυσης
F_{max}	Μέγιστη εφελκυστική δύναμη
G_{Al}	Βάρος αγωγού αλουμινίου
G_π	Βάρος πάγου
P_m	Δύναμη ανεμοπίεσης

γ	Ειδικό βάρος
c	Ειδική θερμότητα ή θερμοχωρητικότητα
κ	Συντελεστής υλικού ή θερμικός συντελεστής
V	Όγκος
t	Χρόνος
T_k	Χρονική διάρκεια σφάλματος
f	Συχνότητα
f_δ	Συντελεστής διόρθωσης
g	Επιτάχυνση της βαρύτητας
v	Ταχύτητα
δ	Σχετική πυκνότητα αέρα
N	Αριθμός ελεύθερων ηλεκτρονίων
Re	Αριθμός Reynolds
k	Σταθερά Boltzmann ($k = 1,37 \cdot 10^{-23}$ Ws/K)
X_r	Κλάσμα ακτινοβολίας, που αντιπροσωπεύει το ποσοστό της θερμότητας που απελευθερώνεται από την πηγή ως ακτινοβολούμενη θερμότητα
ε	Συντελεστής εκπομπής της φλόγας
μ_o	Μαγνητική διαπερατότητα ($\mu_o = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Vs/Am)
σ_{SB}	Σταθερά Stefan-Boltzmann ($\sigma_{SB} = 5,67 \cdot 10^{-11}$ kWm ⁻² K ⁻⁴)
F_{I2}	Συντελεστής προβολής
k_I	Συντελεστής απορροφητικότητας της φλόγας
f_I	Συντελεστής μεταφοράς θερμότητας
P	Απώλεια μάζας ανά μονάδα επιφανείας και μονάδα χρόνου
h	Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας με μεταφορά
Nu	Αριθμός Nusselt
Re	Αριθμός Reynolds
ν_I	Κινηματικό ιξώδες του ρευστού
μ	Δυναμικό ιξώδες του ρευστού
$ACSR 95$	Αγωγός διατομής 95mm ² (Aluminium Conductor Steel Reinforced)
$d_{ACSR 95}$	Διάμετρος αγωγού ACSR διατομής 95mm ²
M/Σ	Μετασχηματιστής

<i>Kγ</i>	Κρουστική γη
<i>Αν</i>	Ανορθωτής
<i>Σπ</i>	Σπινθηριστής σφαιρών
<i>Σ</i>	Σπινθηριστής
<i>Π</i>	Παλμογράφος

1 Εισαγωγή

Η εργασία αυτή έχει ως αντικείμενο τη διερεύνηση της συμπεριφοράς γραμμών της ηλεκτρικής ενέργειας σε περιπτώσεις πυρκαγιών, όπου συνήθως διερωτάται κανείς αν κάποια γραμμή (εντός του περιγράμματος της πυρκαγιάς) υπήρξε η αιτία του συμβάντος ή αν η φωτιά προκλήθηκε από αίτιο μη προερχόμενο από την εν λόγω γραμμή.

Γι' αυτό ακολούθως γίνεται μία σύντομη αναφορά, τόσο στο σκεπτικό της αξιολόγησης του ηλεκτροτεχνικού εξοπλισμού των γραμμών της ηλεκτρικής ενέργειας (από όπου εξαρτάται σημαντικά η σωστή θερμική – διηλεκτρική – μηχανική λειτουργία της γραμμής), όσο και στα φαινόμενα γήρανσης και διάσπασης των μονωτικών υλικών, καθώς και σε βασικά θέματα που δίνονται στη βιβλιογραφία για τη θερμική, διηλεκτρική και μηχανική συμπεριφορά των γραμμών της ηλεκτρικής ενέργειας σε περιβάλλον πυρκαγιών [1-34, 36, 37, 42, 53, 54, 61, 85].

1.1 Το σκεπτικό των δοκιμών ποιοτικού ελέγχου σε ηλεκτροτεχνικές κατασκευές

Για την εξασφάλιση της αξιοπιστίας μίας ηλεκτροτεχνικής κατασκευής, πρέπει, πριν αυτή διατεθεί σε χρήση, να δοκιμαστεί υπό συνθήκες λειτουργίας, που θα αντιστοιχούν στις μελλοντικές μέγιστες καταπονήσεις της στο δίκτυο. Οι δοκιμές αυτές, που συνήθως αποτελούν την τελευταία φάση της παραγωγικής διαδικασίας, προβλέπονται στους κανονισμούς (VDE, IEC, κλπ.) και διακρίνονται στις δοκιμές τύπου και στις δοκιμές σειράς [1].

Οι δοκιμές τύπου γίνονται σε περιορισμένο αριθμό των παραχθέντων και έτοιμων προς διάθεση προϊόντων (π.χ. για παραγωγή εκατό μετασχηματιστών διανομής 20 kV/400 V, 400kVA σε ένα μόνο τυχαίο δείγμα), ενώ οι δοκιμές σειράς πραγματοποιούνται σε όλα ανεξαιρέτως τα τεμάχια (π.χ. και στους εκατό παραπάνω μετασχηματιστές) [1].

Όταν μία ηλεκτροτεχνική κατασκευή δεν αντεπεξέλθει επιτυχώς σε κάποια από τις προβλεπόμενες γι' αυτή δοκιμές τύπου και σειράς, σημαίνει ότι υπάρχει κάποια κακοτεχνία και η ζημία για τον κατασκευαστή μπορεί να είναι σημαντική. Γι' αυτό, προς ελαχιστοποίηση των βλαβών γίνονται τόσο δειγματοληπτικοί έλεγχοι και

δοκιμές πρώτων υλών, όσο και δοκιμές παραγωγής για τον έλεγχο της ποιότητας στις διάφορες φάσης της παραγωγικής διαδικασίας [1].

Οι δοκιμές τύπου δεν είναι ίδιες για κάθε ηλεκτροτεχνική κατασκευή, αλλά εξαρτώνται από το είδος της (μετασχηματιστής, καλώδιο, αποζεύκτης, διακόπτης ισχύος κλπ.), τα ονομαστικά στοιχεία (τάση, ρεύμα, κλπ.) και τις συνθήκες λειτουργίας που πρόκειται να αντιμετωπίσει αυτή, κατά περίπτωση, στο δίκτυο (π.χ. για αποζεύκτες εξωτερικού χώρου προβλέπεται ως δοκιμή τύπου η εξακρίβωση της ικανότητας μόνωσης υπό βροχή, ενώ για αποζεύκτες εσωτερικού χώρου δεν έχει νόημα ο έλεγχος αυτός) [1].

Οι δοκιμές τύπου, που προβλέπονται στους κανονισμούς VDE, IEC κλπ, μπορεί να ομαδοποιηθούν στις παρακάτω: η δοκιμή υπερθέρμανσης (ή ανύψωσης θερμοκρασίας), οι διηλεκτρικές δοκιμές, η δοκιμή μηχανικής αντοχής, η δοκιμή βραχυκύκλωσης και οι ειδικές δοκιμές ανάλογα με το είδος της κατασκευής (π.χ. οι απώλειες χαλκού και σιδήρου στους μετασχηματιστές, το πάχος επιμετάλλωσης σε επαφές, κλπ.) [1].

1.1.1 Η δοκιμή υπερθέρμανσης (ή ανύψωσης της θερμοκρασίας)

Η δοκιμή υπερθέρμανσης (ή ανύψωσης της θερμοκρασίας) αφορά την εξακρίβωση του ονομαστικού ρεύματος I_N (μέγιστο ρεύμα συνεχούς λειτουργίας) μίας κατασκευής. Η τιμή αυτή δεν μπορεί να είναι τυχαία, γιατί πρέπει να ανταποκρίνεται σε προδιαγεγραμμένες τιμές ρεύματος (π.χ.: 10A, 200A, 400A κλπ.). Η χρονική διάρκεια της δοκιμής εξαρτάται από το είδος της κατασκευής (π.χ. στους μετασχηματιστές διανομής διαρκεί περίπου 24 ώρες και στους διακόπτες 1 ÷ 2 ώρες). Η δοκιμή θεωρείται επιτυχής όταν η αύξηση της θερμοκρασίας ως προς τη θερμοκρασία περιβάλλοντος δεν υπερβαίνει μία τιμή $\Delta\theta_N$, η οποία εξαρτάται από το είδος της ηλεκτροτεχνικής κατασκευής. Για τις γραμμές π.χ. του δικτύου διανομής η τιμή αυτή είναι $\Delta\theta_N = 40\text{ }^\circ\text{C}$ ή $50\text{ }^\circ\text{C}$ [1], για τις επαφές διακοπών είναι $\Delta\theta_N = 55\text{ }^\circ\text{C}$, κλπ.

Επισημαίνεται ότι η εν λόγω οριακή τιμή $\Delta\theta_N$ σε στατικές επαφές (όπως επαφές ασφαλειοθηκών, επαφές αποζευκτών, επαφές σφικτήρων, επαφές αυτόματων διακοπών στη θέση εντός, κλπ.) πρέπει να έχει ως αποτέλεσμα την πολύ

περιορισμένη αντίσταση διάβασης ώστε να αποκλείεται η αποσταθεροποίησή της. Η εν λόγω αντίσταση είναι συνήθως μικρότερη από 1 mΩ [1, 35]. Για μεγαλύτερες τιμές της αντίστασης διάβασης η αύξηση της θερμοκρασίας γίνεται μεγαλύτερη από την τιμή του $\Delta\theta_N$, που μπορεί να οδηγήσει σε μείωση του ονομαστικού ρεύματος και σε αρκετές περιπτώσεις σε συγκόλληση των δύο μερών της επαφής και σε δημιουργία τηγμάτων μετάλλου. Αυτός είναι ο βασικός λόγος που επιβάλλεται ο έλεγχος των στατικών ηλεκτρικών επαφών προγραμματισμένα στα δίκτυα διανομής και μεταφοράς μέσω της θερμοκάμερας.

1.1.2 Οι διηλεκτρικές δοκιμές

Η ονομαστική τάση (ή τάση σειράς) κάθε ηλεκτροτεχνικής κατασκευής δεν μπορεί να είναι μία τυχαία τιμή, γιατί πρέπει να ανταποκρίνεται στην προδιαγεγραμμένη διαβάθμιση των τάσεων του δικτύου, που είναι π.χ.: 0,4 kV, 6,6 kV, 15 kV, 20 kV, κλπ. Συνήθως γίνεται αναφορά, εκτός από την ονομαστική τάση (ή τάση σειράς), στη στάθμη μόνωσης της κατασκευής (μέγιστη τάση λειτουργίας), που είναι μεγαλύτερη από την ονομαστική τάση (π.χ.: για ονομαστική τάση 20 kV η στάθμη μόνωσης είναι 24 kV). Οι μετρήσεις, που γίνονται για τον έλεγχο της ικανότητας μόνωσης, αφορούν κυρίως τις μέγιστες μελλοντικές καταστάσεις λειτουργίας της κατασκευής (κυρίως υπερτάσεις από κεραυνούς και χειρισμούς), από τις οποίες επιβεβαιώνεται η στάθμη μόνωσης [1].

Εκτός από την αξιολόγηση της διηλεκτρικής αντοχής μέσω των προαναφερθέντων υπερτάσεων υπάρχουν δοκιμές ποιοτικού ελέγχου που αφορούν και άλλα μεγέθη στην πράξη, όπως: η $\text{tg}\delta$, η αντίσταση μόνωσης (R_I) με το Megger, η στάθμη θορύβου, κλπ. Οι εν λόγω μετρήσεις δεν είναι μόνο εργαστηριακές, καθόσον εφαρμόζονται ευρύτατα σε εργασίες συντήρησης. Ειδικότερα για την τιμή της αντίστασης μόνωσης ισχύει γενικά ο κανόνας: $R_I \geq 1000 \Omega/V$.

Είναι αξιοσημείωτο ότι από μετρήσεις της τιμής R_I μπορεί κανείς να καταλήξει σε εκτιμήσεις για τη διάρκεια ζωής του ηλεκτροτεχνικού εξοπλισμού [1, 28, 36].

1.1.3 Η δοκιμή μηχανικής αντοχής

Η δοκιμή μηχανικής αντοχής αφορά τη στιβαρότητα ενός ηλεκτροτεχνικού εξοπλισμού. Αφορά κυρίως μεταλλικά περιβλήματα κατασκευών (π.χ. το δοχείο ελαίου ενός μετασχηματιστή διανομής, το περίβλημα ενός πίνακα του δικτύου χαμηλής τάσης, κλπ.) και στατικές ηλεκτρικές επαφές.

Σε ό,τι αφορά τα μεταλλικά περιβλήματα εξετάζεται η ικανότητά τους να διατηρούν την απόσταση μόνωσης κατά τη συνήθη πρόσκρουση αντικειμένων επί αυτών (όπως μπορεί να συμβεί π.χ. κατά τη μεταφορά, μέσω οχήματος, μετασχηματιστών και πινάκων χαμηλής τάσης του δικτύου διανομής).

Η δοκιμή μηχανικής αντοχής των στατικών ηλεκτρικών επαφών γίνεται με ένα μεγάλο αριθμό χειρισμών (1000 πλήρεις κύκλοι χειρισμών). Μετά το πέρας της δοκιμής αυτής, θα πρέπει να γίνει η δοκιμή υπερθέρμανσης, για να επιβεβαιωθεί ότι δεν αυξήθηκε η θερμοκρασία πάνω από την τιμή $\Delta\theta_N$ [1].

1.1.4 Η δοκιμή υπό βραχυκύκλωμα

Κατά τη δοκιμή υπό βραχυκύκλωμα ελέγχεται η μηχανική και η θερμική συμπεριφορά της ηλεκτροτεχνικής κατασκευής για χρόνο καταπόνησης 1 sec, μεγαλύτερο δηλαδή ως προς εκείνο της ενεργοποίησης των μέσων προστασίας του δικτύου [1, 35]. Μετά το πέρας της εν λόγω δοκιμής (που είναι δοκιμή τύπου), θα πρέπει να επαναλαμβάνονται οι διηλεκτρικές δοκιμές και η δοκιμή υπερθέρμανσης, προκειμένου να επιβεβαιώνεται ότι δεν υπήρξε μεταβολή στη στάθμη μόνωσης και στην ικανότητα υπό ονομαστικό ρεύμα [1].

1.1.5 Ειδικές δοκιμές

Ειδικές δοκιμές μπορούν να χαρακτηριστούν εκείνες που περιγράφονται αναλυτικά στους κανονισμούς ως απαιτήσεις ανάλογα με το είδος και τη χρήση της εκάστοτε κατασκευής (όπως η μέτρηση της στάθμης θορύβου ενός μετασχηματιστή, ο έλεγχος της ποιότητας βαφής ενός πίνακα εξωτερικού χώρου, οι απώλειες χαλκού και σιδήρου ενός μετασχηματιστή, κλπ.) [1].

1.2 Φαινόμενα προ και κατά τη διάσπαση των ηλεκτρομονωτικών υλικών

1.2.1 Τα φαινόμενα γήρανσης και διάσπασης στον ατμοσφαιρικό αέρα

Τα φαινόμενα προ και κατά τη διάσπαση των ηλεκτρομονωτικών αερίων έχουν εξεξηγηθεί ικανοποιητικά. Αυτό οφείλεται βασικά στη μικρή σταθερότητα των μορίων τους, ως προς εκείνη των υγρών και προ πάντων των στερεών ηλεκτρομονωτικών, με αποτέλεσμα να επανέρχεται το αέριο μετά τη διάσπαση (ή τη διακοπή της εκδήλωσης μερικών εκκενώσεων) στην αρχική του κατάσταση. Η δημιουργία των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων (κυρίως ηλεκτρόνια) αποδίδεται στον ιονισμό με κρούσεις, υπό την επίδραση του ηλεκτρικού πεδίου. Σημειώνεται ότι, σύμφωνα με τον νόμο του Paschen στις γραμμές χαμηλής τάσης με γυμνούς αγωγούς δεν εκδηλώνονται φαινόμενα ιονισμού στον ατμοσφαιρικό αέρα [1, 2, 4, 18, 21].

1.2.2 Τα φαινόμενα γήρανσης και διάσπασης στο μονωτικό λάδι

Τα φαινόμενα γήρανσης και διάσπασης του μονωτικού ελαίου έχουν ερμηνευτεί ικανοποιητικά. 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 [1]. Η δυσκολία για τη μελέτη των παραπάνω παραγόντων στο λάδι, οφείλεται στην αλλαγή της μοριακής δομής του μετά από μία τιμή της εφαρμοζόμενης τάσης.

Εκτός από τους παράγοντες αυτούς, που αναφέρονται ακολούθως (για λόγους συνοχής των περιεχομένων) στα στερεά μονωτικά, η γήρανση και η διάσπαση του μονωτικού ελαίου αποδίδεται κυρίως στα αιωρούμενα σε αυτό ξένα σωματίδια, τα οποία φαίνεται ότι μειώνουν τις αποστάσεις μόνωσης, γιατί σχηματίζουν αγώγιμες γέφυρες μεταξύ των ρευματοφόρων μερών με διαφορετικό δυναμικό [1, 2, 37].

1.2.3 Φαινόμενα προ και κατά τη διάσπαση των στερεών ηλεκτρομονωτικών υλικών

Όπως αναφέρθηκε στην παρ. 1.2.1, τα φαινόμενα προ και κατά τη διάσπαση των ηλεκτρομονωτικών αερίων έχουν επεξηγηθεί ικανοποιητικά, λόγω της μικρής σταθερότητας των μορίων, εξ αιτίας της οποίας επανέρχεται το αέριο στην αρχική του κατάσταση μετά τη διάσπαση (ή την εκδήλωση μερικών εκκενώσεων σε περίπτωση διακοπής της τάσης). Στα στερεά μονωτικά, η ικανότητα δημιουργίας ιόντων είναι κατά πολύ μικρότερη από ότι στα υγρά ηλεκτρομονωτικά (πολύ δε περισσότερο από ότι στον αέρα και το SF₆) και γι' αυτό η διάτρηση έχει σαν αποτέλεσμα κάποια μόνιμη βλάβη σε αυτά (τήξη, μηχανικές κακώσεις, διάνοιξη οπής κλπ.). Επίσης, τα φαινόμενα που εκδηλώνονται προ της διάσπασης των στερεών μονωτικών, καθώς και εκείνα κατά την επιφανειακή διάσπαση ή την υπερπήδηση, προκαλούν συνήθως μόνιμες βλάβες σε βάρος της διηλεκτρικής αντοχής των στερεών διηλεκτρικών. Από τις διάφορες έρευνες, που έχουν γίνει, για τα φαινόμενα γήρανσης και διάσπασης των στερεών ηλεκτρομονωτικών υλικών μπορεί κανείς να ομαδοποιήσει τις μεθόδους, που εφαρμόζονται, σε δύο βασικές θεωρίες: Τη μακροσκοπική και την κβαντομηχανική θεωρία των φαινομένων προ και κατά τη διάσπαση των στερεών ηλεκτρομονωτικών [1, 5-13, 16-20, 22, 85].

Σύμφωνα με τη μακροσκοπική θεωρία, τα αποτελέσματα των ερευνών βασίζονται (ή αποσκοπούν), κατά την ανωτέρω βιβλιογραφία, σε κάποιο ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα, το οποίο πηγάζει συνήθως από τον 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, κατά την ανωτέρω βιβλιογραφία, 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.

1.2.3.1 Η μακροσκοπική θεωρία των φαινομένων προ και κατά τη διάσπαση των στερεών ηλεκτρομονωτικών υλικών

Η ανάγκη για να δοθεί μία εξήγηση στις αλλαγές των στερεών ηλεκτρομονωτικών υλικών (προ και κατά τη διάσπαση), οδήγησε στην αναζήτηση των διαφόρων παραγόντων που τις προκαλούν. Έτσι, από μετρήσεις, που έχουν γίνει σε διάφορα στερεά ηλεκτρομονωτικά (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 μονωτικής ικανότητας [1, 2, 5-13, 16-20, 22, 37]: οι απώλειες Joule, οι δυνάμεις Coulomb, οι μερικές εκκενώσεις και η θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Οι αντίστοιχες προς τους παραπάνω παράγοντες μορφές της διάσπασης είναι: η θερμική διάσπαση, η ηλεκτρομηχανική διάσπαση, η διάσπαση λόγω μερικών εκκενώσεων (ή γήρανση) και η θερμοχημική διάσπαση. Για τις άνω μορφές διάσπασης ισχύουν πολύ περιληπτικά τα ακόλουθα:

α) Η θερμική διάσπαση

Η μορφή της διάσπασης αυτής συναντάται κυρίως σε χαμηλές τιμές της τάσης, όταν το στερεό μονωτικό καταπονείται κυρίως 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 συμβαίνει η καταπόνηση [1, 37].

β) Η ηλεκτρομηχανική διάσπαση

Όταν η τάση, που εφαρμόζεται στο στερεό μονωτικό, είναι αρκετά μεγαλύτερη από εκείνη για τη θερμική διάσπαση, 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 διάσπαση του υλικού αποδίδεται κυρίως στις δυνάμεις Coulomb και ονομάζεται ηλεκτρομηχανική (ή ηλεκτρική) διάσπαση. Θεωρείται, ότι η διάσπαση οφείλεται σε αυτοσυντηρούμενο ιονισμό με κρούσεις (όπως στα αέρια μονωτικά) ή σε μηχανική τάνυση του υλικού (διαχωρισμό του σε

αρνητικούς και θετικούς φορείς, υπό την επίδραση των δυνάμεων του ηλεκτρικού πεδίου) ή σε συνδυασμό των δύο παραπάνω περιπτώσεων [1, 37].

γ) Η διάσπαση λόγω μερικών εκκενώσεων (ή γήρανση)

Η διάσπαση των στερεών μονωτικών μπορεί να έχει 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 επιφάνειά του (εξωτερικές εκκενώσεις). Από τη στιγμή της έναρξης των μερικών εκκενώσεων προκαλείται συνήθως σταδιακή αλλαγή της μοριακής δομής του στερεού μονωτικού, η οποία είναι ιδιαίτερα έντονη σε περιορισμένο τμήμα του, όπου δηλαδή έτυχε οι θέσεις ανομοιογένειας να είναι περισσότερο αγωγίμες. Πρόκειται για ένα ηλεκτροχημικό φαινόμενο, που σε κάποιο απροσδιόριστο χρονικό διάστημα οδηγεί στη διάσπαση του στερεού μονωτικού. Πρόκειται δηλαδή για βαθμιαία μείωση της διηλεκτρικής αντοχής, ανάλογα με τον ρυθμό αύξησης της χημικής μεταβολής και είναι συνήθως μακροπρόθεσμη, γι' αυτό ονομάζεται και γήρανση του μονωτικού υλικού.

Η μορφή της διάσπασης αυτής είναι γνωστή στο δίκτυο από τους σπινθηρισμούς που παρατηρούνται σε μονωτήρες εντός υψηλής ρύπανσης (παραθαλάσσιες περιοχές και βιομηχανική ρύπανση) [1, 37].

δ) Η θερμοχημική διάσπαση

Η διάσπαση που προκαλείται μόνο από τη θερμότητα του περιβάλλοντος του στερεού μονωτικού, ονομάζεται θερμοχημική. Η μορφή της διάσπασης αυτής συναντάται στην πράξη σε περιπτώσεις γραμμών σε περιβάλλον πυρκαγιάς, όπου συνήθως υπερθερμαίνονται οι μονωτήρες πορσελάνης και συνήθως ενισχύει τις άλλες μορφές διάσπασης γιατί προκαλεί αύξηση της ενέργειας των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων [1, 37].

1.2.3.2 Η κβαντομηχανική θεωρία της γήρανσης και της διάσπασης των στερεών ηλεκτρομονωτικών υλικών

Στην κβαντομηχανική θεωρία ενδιαφέρει κυρίως η ενέργεια των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων (κυρίως ηλεκτρόνια) [1, 5-13, 16-20, 22]. Η τιμή της ενέργειας αυτής, πάνω από την ενέργεια Fermi των ηλεκτροδίων διευκολύνει στην εξαγωγή συμπερασμάτων για τον μηχανισμό παραγωγής των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων. Τα βασικότερα συμπεράσματα από τη θεωρία αυτή είναι [1, 5-13, 16-20, 22]:

- 1) Η γήρανση και η διάσπαση, σχετίζονται με εκπομπή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που παράγεται στο υλικό. Έχει διαπιστωθεί, ότι:
 - α) το φάσμα της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας κατά τη γήρανση μπορεί να είναι από ακουστικά κύματα μέχρι υπεριώδεις ακτίνες.
 - β) το φάσμα της παραπάνω ακτινοβολίας κατά τη διάσπαση είναι δυνατό να επεκταθεί σε τιμές της ιονίζουσας περιοχής του (η εκπομπή του φάσματος αυτού προκαλεί την απεικόνιση αντικειμένων στη φωτογραφική πλάκα).
- 2) Καθοριστικός παράγοντας για τη δημιουργία ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων είναι η τιμή του πεδίου. Από μετρήσεις σε οργανικά στερεά ηλεκτρομονωτικά (με σχετική διηλεκτρική σταθερά $2,5 \div 4,5$) [1, 8] έχει διαπιστωθεί ότι οι μερικές εκκενώσεις, υπό κρουστικές τάσεις καταπόνησης, αρχίζουν σε τιμή πεδίου περίπου $0,2 \text{ MV/cm}$.
- 3) Για τιμές του πεδίου μέχρι περίπου $0,5 \text{ MV/cm}$ αυξάνει η ειδική αγωγιμότητα κατά τη σχέση:

$$\sigma = \sigma_0 e^{-W/kT} \quad (1.2.3.2-1)$$

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

σ_0 η αρχική ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα,

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

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

T η απόλυτη θερμοκρασία.

- 4) Για μεγαλύτερες τιμές πεδίου από προηγουμένως, οι ελεύθεροι ηλεκτρικοί φορείς γίνονται αρκετά περισσότεροι και δεν ισχύει η σχέση 1.2.3.2-1. Στην περίπτωση

αυτή η παραγωγή των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων αποδίδεται στον ιονισμό με κρούσεις. Έχει διαπιστωθεί, ότι ο ιονισμός με κρούσεις σχετίζεται με την εκδήλωση αρνητικής διαφορικής αντίστασης στο υλικό. Το φάσμα της εκπεμπόμενης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας εξαρτάται από το περίσσειμα της ενέργειας των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων κατά την εξαναγκασμένη επιβράδυνσή τους στα ηλεκτρόδια. Ένα σημαντικότατο συμπέρασμα, από τη θεωρητική μελέτη του ιονισμού με κρούσεις στα στερεά μονωτικά δίνεται από την παρακάτω σχέση [1, 8]:

$$q = q_0 e^{A_1(E^2 - E_0^2)/E_0^2} \quad (1.2.3.2-2)$$

όπου:

E_0 : η πεδιακή ένταση έναρξης των μερικών εκκενώσεων ($E > 0,2$ MV/cm)

και q_0 το φορτίο κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων.

E : η εφαρμοζόμενη πεδιακή ένταση, λόγω της οποίας το φορτίο αποκτά την τιμή q .

A_1 : ένας συντελεστής του υλικού, που εξαρτάται από τον χρόνο.

Κατά την κβαντομηχανική ερμηνεία ενδιαφέρουν τα ενεργειακά επίπεδα των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων κατά την εκδήλωση μερικών εκκενώσεων. Η ενέργεια των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων (κυρίως ηλεκτρόνια), πάνω από την ενέργεια Fermi του ηλεκτροδίου, μπορεί να υπολογιστεί από την ενέργεια στον πυκνωτή μέτρησης C_m ανά άλμα δυναμικού, μέσω της σχέσης [1, 6, 8, 9, 13]:

$$\Delta W = 0,5 q_e \Delta u \quad (1.2.3.2-3)$$

όπου: q_e το φορτίο του ηλεκτρονίου και Δu το άλμα δυναμικού.

Η σχέση αυτή ισχύει για μηδενική τιμή της ωμικής αντίστασης R από τον πυκνωτή μέτρησης μέχρι και το ηλεκτρόδιο γείωσης. Για $R > 0$ θα πρέπει να πάρει κανείς υπόψη το μεταβατικό φαινόμενο με σταθερά χρόνου:

$$\tau = R C_m \quad (1.2.3.2-4)$$

οπότε η τιμή της ενέργειας δίνεται από τη σχέση:

$$\Delta W = 0,5 \Delta u / (1 - e^{-t/RC_m}), \text{ σε eV} \quad (1.2.3.2-5)$$

όπου: Δu σε V και t ο χρόνος φόρτισης του C_m κατά τη διάρκεια μίας μερικής εκκένωσης (κατά τη βιβλιογραφία περίπου 100 ns) [1].

Θεωρώντας ως συντελεστή διόρθωσης f_δ :

$$f_\delta = 1/(1 - e^{-t/RC_m}) \quad (1.2.3.2-6)$$

προκύπτει ότι:

$$\Delta W = 0,5 f_\delta \Delta u, \text{ σε eV} \quad (1.2.3.2-7)$$

Εκτός από την ενέργεια ΔW για το πρώτο άλμα δυναμικού, μπορεί να υπολογιστεί ο συνολικός αριθμός των ελεύθερων ηλεκτρονίων N ως ακολούθως:

Το συνολικό ηλεκτρικό φορτίο κατά την εκδήλωση ενός ή περισσοτέρων αλμάτων δυναμικού (με συνολική αύξηση του δυναμικού κατά Δu) είναι:

$$\Delta q_m = C_m \Delta u \quad (1.2.3.2-8)$$

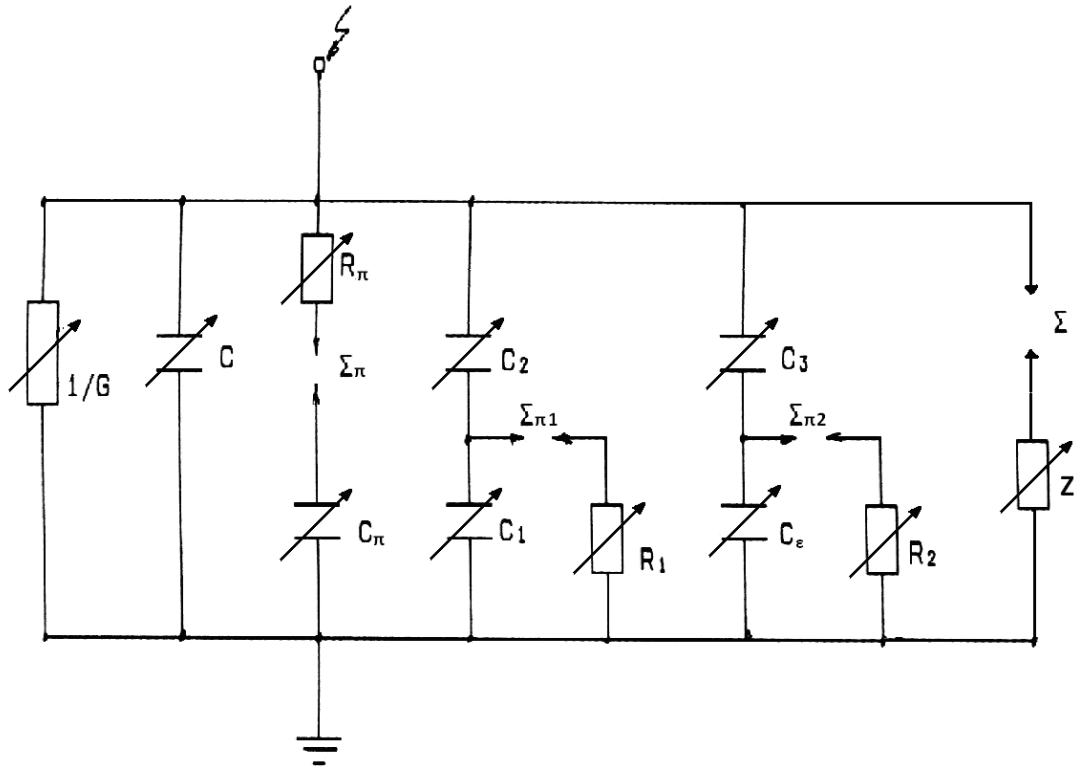
Έτσι, ο αριθμός των ελεύθερων ηλεκτρονίων δίνεται από τη σχέση:

$$N = \frac{\Delta q_m}{q_e} \quad (1.2.3.2-9)$$

1.2.3.3 Φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας κατά την επιφανειακή διάσπαση

Από πειράματα, που έχουν γίνει για τη μελέτη των φαινομένων, που εκδηλώνονται προ και κατά την επιφανειακή διάσπαση, σε περιβάλλον μονωτικού ελαίου ή ατμοσφαιρικού αέρα, φαίνεται ότι ισχύει ό,τι και προηγουμένως για τον μηχανισμό της γήρανσης και της διάτρησης [1, 8, 16].

1.2.3.4 Ένα ισοδύναμο κύκλωμα που συνδυάζει τη μακροσκοπική και την κβαντική θεωρία της γήρανσης και της διάσπασης των στερεών ηλεκτρομονωτικών υλικών των πρακτικών εφαρμογών



Σχήμα 1.2.3.4-1: Ένα ισοδύναμο κύκλωμα συνδυασμού όλων των παραγόντων γήρανσης και διάσπασης των στερεών ηλεκτρομονωτικών των πρακτικών εφαρμογών

- C : Ιδανική χωρητικότητα της διάταξης
- C_1 : Χωρητικότητα, που παριστάνει τις εσωτερικές θέσεις διαταραχών (κυρίως φυσαλίδες αερίων)
- C_2 : Χωρητικότητα, που παριστάνει το υπόλοιπο υγιές τμήμα του στερεού μονωτικού
- C_e : Χωρητικότητα, που παριστάνει τις εξωτερικές θέσεις διαταραχών
- C_3 : Χωρητικότητα, που παριστάνει το υπόλοιπο υγιές τμήμα του επιφανειακού φιλμ
- C_π : Χωρητικότητα, που παριστάνει την πόλωση του υλικού για τη διάτρηση από τις δυνάμεις του πεδίου
- R_1 : Αντίσταση του τόξου του σπινθηριστή $\Sigma\pi_1$
- R_2 : Αντίσταση του τόξου του σπινθηριστή $\Sigma\pi_2$
- $R_\pi, \Sigma\pi$: Διαδρομή εκκένωσης κατά τη διάσπαση του C_π (R_π αντίσταση του τόξου του σπινθηριστή $\Sigma\pi$)
- G : Αγωγιμότητα λόγω των απωλειών του διηλεκτρικού καθώς και την ενίσχυσή τους από τις μερικές εκκενώσεις και τη θερμότητα του περιβάλλοντος
- Z : Μη γραμμική αντίσταση, που αποδίδει τα φαινόμενα κατά την κβαντική θεωρία της γήρανσης και διάσπασης (Σ : Σπινθηριστής)

Το αποτέλεσμα του συνδυασμού των τεσσάρων παραγόντων γήρανσης και διάσπασης (απώλειες Joule, μερικές εκκενώσεις, δυνάμεις Coulomb και θερμότητα του περιβάλλοντος) εξαρτάται από το πώς αυτοί εκδηλώνονται διαχρονικά [1]. Στο σχήμα 1.2.3.4-1 αποδίδονται οι προαναφερθέντες παράγοντες, που εκπροσωπούν τη μακροσκοπική θεωρία. Η κβαντική θεωρία αποδίδεται στο ισοδύναμο κύκλωμα μέσω μιας μη γραμμικής αντίστασης Z . Οι σπινθηριστές στο κύκλωμα συμβολίζουν με τη διάσπασή τους τη συμμετοχή του αντίστοιχου παράγοντα που εκδηλώνεται κατά τη γήρανση ή κατά τη διάσπαση. Όλα τα στοιχεία του κυκλώματος προτείνεται να θεωρηθούν ως μεταβλητά για να εκφράζουν τη διαχρονική μεταβολή της διηλεκτρικής συμπεριφοράς του υλικού. Στο σχήμα 1.2.3.4-1 δίνονται αναλυτικά τα επιμέρους στοιχεία του κυκλώματος.

1.3 Θερμική, διηλεκτρική και μηχανική συμπεριφορά γραμμών ηλεκτρικής ενέργειας

1.3.1 Θερμική συμπεριφορά των αγωγών της ηλεκτρικής ενέργειας υπό το μέγιστο ρεύμα λειτουργίας

Το μέγιστο ρεύμα λειτουργίας μιας γραμμής του ελληνικού δικτύου διανομής μπορεί να προσδιοριστεί από το μέσο προστασίας της. Διακρίνονται οι ακόλουθες περιπτώσεις:

- Γραμμές χαμηλής τάσης που (ως γνωστό) προστατεύονται, μέσω μαχαιρωτών ασφαλειών σε ασφαλειοκιβώτια των υποσταθμών μέσης προς χαμηλή τάση [1, 38].
- Γραμμές μέσης τάσης 20 kV (γραμμές κορμού) που προστατεύονται από αυτόματους διακόπτες (ή διακόπτες ισχύος) [1, 39].
- Γραμμές διακλαδώσεων μέσης τάσης που προστατεύονται μέσω ασφαλειοαποζευκτών με τηκτά ονομαστικού ρεύματος (βλέπε παρ. 1.1.1) συνήθως μέχρι 30 A ή από διακόπτες απομόνωσης σε συνεργασία με τους διακόπτες ισχύος [1, 39].
- Γραμμές υψηλής τάσης (66 kV, 150 kV, 400 kV) που προστατεύονται από αυτόματους διακόπτες.

Η αύξηση της θερμοκρασίας $\Delta\theta_A$ (ως προς τη θερμοκρασία περιβάλλοντος) υπό το μέγιστο ρεύμα λειτουργίας I_A δίνεται από την σχέση [34, 40]:

$$\Delta\theta_A = \Delta\theta_N (I_A / I_N)^k \quad (1.3.1-1)$$

όπου $\Delta\theta_N$ η αύξηση της θερμοκρασίας (ως προς τη θερμοκρασία περιβάλλοντος) υπό ονομαστικό ρεύμα I_N (βλέπε παρ. 1.1.1) και k ένας συντελεστής του οποίου η τιμή ανήκει στο διάστημα:

$$k \in [3/2, 2] \quad (1.3.1-2)$$

Οι ανωτέρω σχέσεις μπορούν να προσεγγιστούν θεωρητικά για ένα άνοιγμα γραμμής (δηλαδή για μία απόσταση γραμμής μεταξύ δύο στύλων), ως ακολούθως:

Αν R είναι η αντίσταση ενός αγωγού μεταξύ των δύο στύλων A και B (βλέπε σχήμα 1.3.1-1), όπου ενδιαφέρει η αύξηση της θερμοκρασίας των αγωγών (ως προς τη θερμοκρασία περιβάλλοντος), οι οποίοι προστατεύονται μέσω ασφαλειοαποζευκτών των 30 A, τότε για λειτουργία υπό I_A ισχύει, σύμφωνα με τους κανόνες μετάδοσης θερμότητας:

$$I_A^2 R = \kappa A \Delta\theta + c d\theta/dt \quad (1.3.1-3)$$

όπου κ ένας θερμικός συντελεστής, A η επιφάνεια του αγωγού, $\Delta\theta$ η αύξηση της θερμοκρασίας αυτού και $c d\theta/dt$ η αύξηση της θερμοχωρητικότητάς του με τον χρόνο.

Με την παραδοχή ότι $\kappa A \Delta\theta \gg c d\theta/dt$, ισχύει περίπου:

$$I_A^2 R \approx \kappa A \Delta\theta \quad (1.3.1-4)$$

Για λειτουργία του ίδιου ακριβώς τμήματος του αγωγού υπό το ονομαστικό ρεύμα του I_N θα ήταν αντίστοιχα περίπου:

$$I_N^2 R \approx \kappa A \Delta\theta_N \quad (1.3.1-5)$$

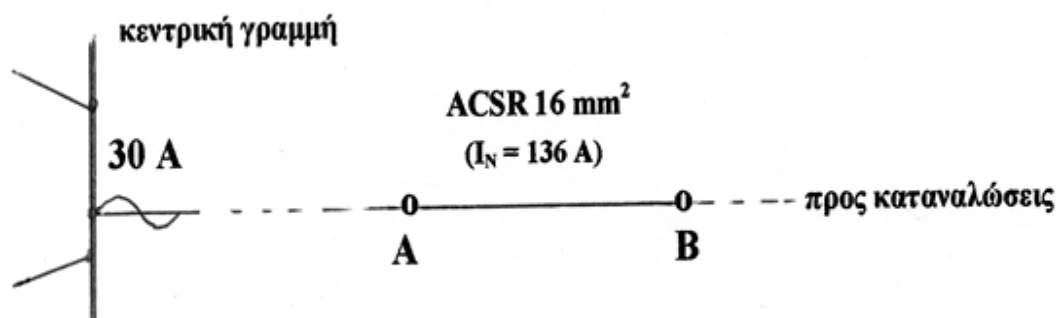
Από τις σχέσεις 1.3.1-3, 1.3.1-4 και 1.3.1-5 έπεται ότι:

$$\Delta\theta \leq \Delta\theta_N (I_A / I_N)^2 \quad (1.3.1-6)$$

Οπότε, η τιμή του συντελεστή k , που ενδείκνυται να εφαρμόζεται στην πράξη είναι:

$k = 2$, οπότε ισχύει:

$$\Delta\theta_{max} = \Delta\theta_N (I_A / I_N)^2 \quad (1.3.1-7)$$



Σχήμα 1.3.1-1: Απλοποιημένο σχέδιο του τμήματος AB μίας γραμμής μέσης τάσης με ασφαλειοαποζεύκτες 30 A στην αρχή της γραμμής

Επομένως, για ονομαστικό ρεύμα του αγωγού $I_N = 136$ A (βλέπε σχήμα 1.3.1-1) και $\Delta\theta_N = 40$ °C (βλέπε παρ. 1.1.1) [80], η αύξηση της θερμοκρασίας είναι:

$$\Delta\theta = 40 \cdot (30 / 136)^2 \approx 1,95$$
 °C

Συνεπώς, για θερμοκρασία περιβάλλοντος π.χ. 40 °C, η θερμοκρασία του αγωγού θα ήταν:

$$\theta = 40 + \Delta\theta = 41,95$$
 °C

Από τα παραπάνω, μπορεί γενικά να λεχθεί, ότι η θερμική καταπόνηση των αγωγών διανομής, λόγω του μέγιστου ρεύματος λειτουργίας τους, δεν συνεπάγεται τη δημιουργία τμημάτων μετάλλου, καθόσον τα σημεία τήξης του αλουμινίου, του χαλκού και του χάλυβα είναι αντίστοιχα περίπου 660, 1083 και $1350 \div 1500$ °C.

1.3.2 Θερμική συμπεριφορά των αγωγών της ηλεκτρικής ενέργειας κατά το βραχυκύκλωμα

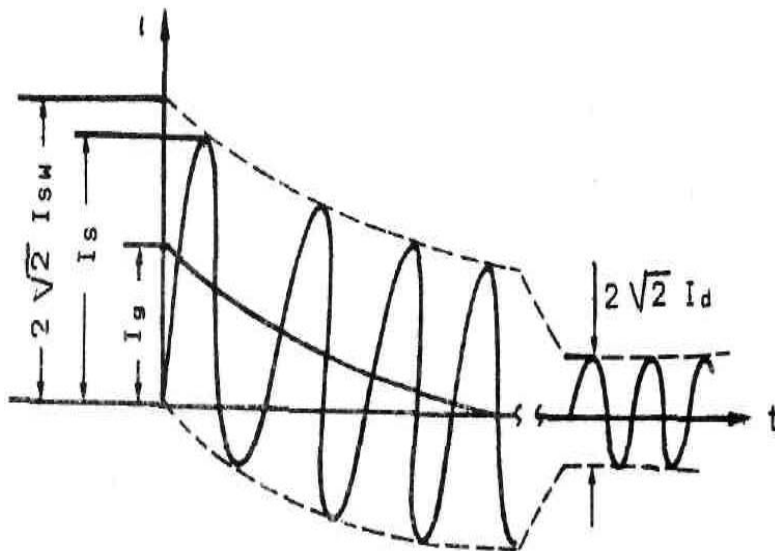
1.3.2.1 Συνιστώσες του ρεύματος βραχυκύκλωσης

Στο σχήμα 1.3.2.1-1 δίνονται οι συνιστώσες του ρεύματος βραχυκύκλωσης, το οποίο αρχικά εμφανίζεται ως ασύμμετρο και κατόπιν ως συμμετρικό.

Το ασύμμετρο τμήμα περιλαμβάνει το εναλλασσόμενο ρεύμα βραχυκύκλωσης I_{SW} και το συνεχές ρεύμα βραχυκύκλωσης I_g . Για το εναλλασσόμενο ρεύμα βραχυκύκλωσης I_{SW} ισχύει η σχέση [1, 41, 42]:

$$I_{SW} = \frac{1,1U_N}{\sqrt{3}\sqrt{R_{o\lambda}^2 + X_{o\lambda}^2}} \quad (1.3.2.1-1)$$

όπου U_N η ονομαστική τάση και $R_{o\lambda}$ και $X_{o\lambda}$ η συνολική ωμική και επαγωγική αντίσταση αντίστοιχα μέχρι τη θέση βραχυκύκλωσης [1, 41, 42]. Στην πράξη, επειδή είναι πρακτικά αδύνατο να γνωρίζει κανείς τις ανωτέρω συνολικές αντιστάσεις, ο υπολογισμός τους περιορίζεται από την θέση βραχυκύκλωσης μέχρι και τον μετασχηματιστή που προηγείται αυτής [1, 34]. Κατά τον τρόπο αυτό, η τιμή I_{SW} που υπολογίζεται είναι μεγαλύτερη από την πραγματική τιμή της, που σημαίνει ότι ο υπολογισμός είναι σε βάρος της γραμμής.



Σχήμα 1.3.2.1-1: Συνιστώσες του ρεύματος βραχυκύκλωσης
 I_s : Κρουστικό ρεύμα βραχυκύκλωσης
 I_{SW} : Εναλλασσόμενο ρεύμα βραχυκύκλωσης
 I_g : Συνεχές ρεύμα βραχυκύκλωσης
 I_d : Διαρκές ρεύμα βραχυκύκλωσης

Το συμμετρικό τμήμα βραχυκύκλωσης αποτελείται από το διαρκές ρεύμα βραχυκύκλωσης I_d στο οποίο οφείλεται η θερμική καταπόνηση του εξοπλισμού και για το οποίο ισχύει η σχέση:

$$I_d = \mu_d I_{SW} \quad (1.3.2.1-2)$$

όπου $\mu_d = f(I_{SW} / I_g)$ ένας συντελεστής που βρίσκεται από τους πίνακες τιμών που δίνονται στη βιβλιογραφία [1, 42].

Η μέγιστη τιμή του ρεύματος βραχυκύκλωσης I_s ονομάζεται κρουστικό ρεύμα βραχυκύκλωσης, από το οποίο προκαλείται η δυναμική καταπόνηση του εξοπλισμού και για το οποίο ισχύει:

$$I_s = \kappa_1 \sqrt{2} I_{SW} \quad (1.3.2.1-3)$$

όπου $\kappa_1 = f(R_{ol}, X_{ol})$, ένας συντελεστής που βρίσκεται από τους πίνακες τιμών που δίνονται στη βιβλιογραφία [1, 42].

Η εξασκούμενη δύναμη λόγω του I_s δίνεται από τη σχέση [1, 42]:

$$F = (\mu_o I_s^2 L) / (2\pi d) \quad 1.3.2.1-4)$$

όπου $\mu_o = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Vs/Am, L το μήκος των αγωγών και d η μεταξύ τους απόσταση.

Σε περίπτωση εκδήλωσης βραχυκυκλώματος σε μία γραμμή, η τιμή του ρεύματος περιορίζεται από τα μέσα προστασίας. Για τη μελέτη αντοχής σε τριφασικό βραχυκύκλωμα, εκτός του υπολογισμού της σύνθετης αντίστασης των στοιχείων της εγκατάστασης μέχρι το σημείο του σφάλματος και του υπολογισμού των I_{SW} , I_s και I_d , απαιτείται και η γνώση του συμμετρικού ρεύματος διακοπής I_a που είναι το εναλλασσόμενο τμήμα του ρεύματος βραχυκύκλωσης τη χρονική στιγμή της διακοπής της ηλεκτροδότησης από το μέσο προστασίας, για το οποίο ισχύει η σχέση:

$$I_{\alpha} = \mu I_{SW} \text{ σε kA} \quad (1.3.2.1-5)$$

όπου μ ένας συντελεστής που βρίσκεται από τους πίνακες τιμών που δίνονται στη βιβλιογραφία [1, 42].

1.3.2.2 Υπολογισμός της αύξησης της θερμοκρασίας κατά το βραχυκύκλωμα σε γραμμές της ηλεκτρικής ενέργειας σύμφωνα με το πρότυπο IEC 60865-1

Σύμφωνα με το πρότυπο IEC 60865-1[43], η αύξηση της θερμοκρασίας κατά το βραχυκύκλωμα δίνεται από τη σχέση:

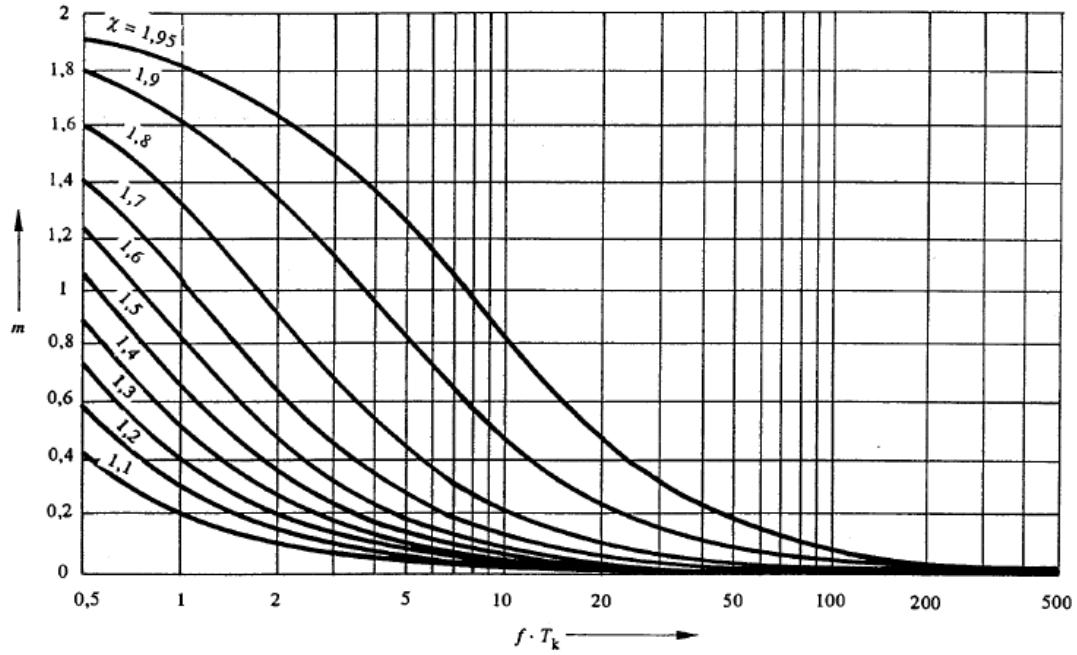
$$\Delta\theta = \frac{e^{\frac{S_{th}^2 t \alpha}{\sigma \rho c}} - 1}{\alpha} \quad (1.3.2.2-1)$$

όπου S_{th} η πυκνότητα του ρεύματος βραχυκύκλωσης, t ο χρόνος μέχρι τη διακοπή του βραχυκυκλώματος από το διακοπτικό μέσο, α ο θερμικός συντελεστής της αντίστασης, σ η αγωγιμότητα του αγωγού, ρ η πυκνότητα του αγωγού και c η θερμοχωρητικότητα του αγωγού. Η πυκνότητα του ρεύματος βραχυκύκλωσης S_{th} υπολογίζεται από την σχέση:

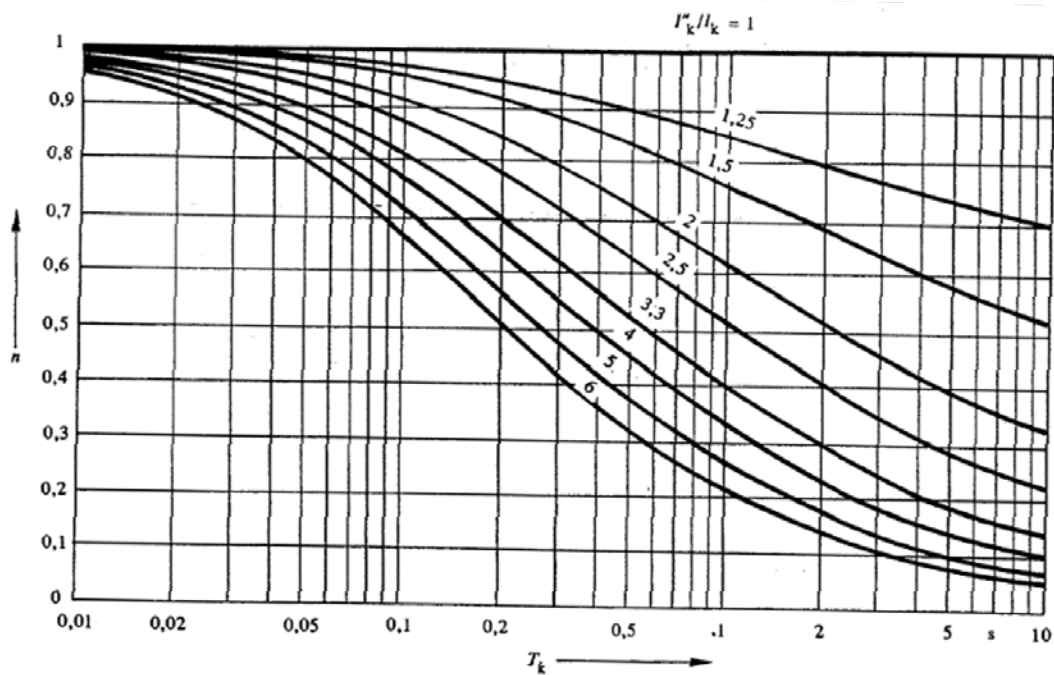
$$S_{th} = \frac{I_d}{A} \quad (1.3.2.2-2)$$

όπου A η διατομή του αγωγού και I_d είναι το ισοδύναμο θερμικό ρεύμα βραχυκύκλωσης για το οποίο ισχύει:

$$I_d = I_{SW} \sqrt{m+n} \quad (1.3.2.2-3)$$



Σχήμα 1.3.2.2-1: Συντελεστής m της dc συνιστώσας του ρεύματος βραχυκύκλωσης [43]. f : θεμελιώδης συχνότητα T_k : χρονική διάρκεια του σφάλματος



Σχήμα 1.3.2.2-2: Συντελεστής n της ac συνιστώσας του ρεύματος βραχυκύκλωσης [43]. T_k : χρονική διάρκεια του σφάλματος

όπου I_{SW} είναι το συμμετρικό ρεύμα βραχυκύκλωσης κατά την υπομεταβατική περίοδο, m ο συντελεστής της dc συνιστώσας του ρεύματος βραχυκύκλωσης και n ο συντελεστής της ac συνιστώσας του ρεύματος βραχυκύκλωσης. Οι συντελεστές αυτοί προκύπτουν από τα σχήματα 1.3.2.2-1 και 1.3.2.2-2 αντίστοιχα.

Για την εύρεση του συντελεστή m μέσω του σχήματος 1.3.2.2-1, απαιτείται ο υπολογισμός του συντελεστή χ , ο οποίος δίνεται από την σχέση:

$$\chi = 1,02 + 0,98 \cdot e^{-R_{o\lambda}/X_{o\lambda}} \quad (1.3.2.2-4)$$

όπου $R_{o\lambda}$ και $X_{o\lambda}$ η ωμική και επαγωγική αντίσταση μέχρι τη θέση του σφάλματος. Εναλλακτικώς, ο συντελεστής m μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση [43, 44]:

$$m = \frac{\exp(4ft \ln[0,02 + 0,98 \exp(-3R_{o\lambda}/X_{o\lambda})]) - 1}{2ft \ln[0,02 + 0,98 \exp(-3R_{o\lambda}/X_{o\lambda})]} \quad (1.3.2.2-5)$$

όπου f η θεμελιώδης συχνότητα.

1.3.2.3 Προσεγγιστικός υπολογισμός της αύξησης της θερμοκρασίας σε γραμμές της ηλεκτρικής ενέργειας κατά το βραχυκύκλωμα

Η αύξηση της θερμοκρασίας $\Delta\theta$, λόγω του διαρκούς ρεύματος βραχυκύκλωσης I_d , δίνεται από την σχέση [1, 23, 35, 42]:

$$\Delta\theta = \kappa I_d^2 [t + T (I_{SW}/I_d)^2] / A^2 \quad (1.3.2.3-1)$$

όπου: I_d και I_{SW} σε A, $\Delta\theta$ σε °C, κ ένας συντελεστής (για τον χαλκό 0,0058 και για το αλουμίνιο 0,0135), A η διατομή του αγωγού σε mm², t ο χρόνος βραχυκύκλωσης σε sec και T ένας συντελεστής χρόνου η τιμή του οποίου είναι: για τριφασικό βραχυκύκλωμα $0,3 \div 0,15$ και για διφασικό βραχυκύκλωμα $0,6 \div 0,25$ (η τιμή T μειώνεται με την απόσταση από τη θέση βραχυκύκλωσης).

Για θερμοκρασία περιβάλλοντος θ_o η συνολική θερμοκρασία είναι:

$$\theta = \theta_o + \Delta\theta \quad (1.3.2.3-2)$$

Ως οριακές θερμοκρασίες λειτουργίας για γυμνούς αγωγούς χαλκού και αλουμινίου θεωρούνται αντίστοιχα οι τιμές 200 °C και 180 °C [1]. Για τα καλώδια ισχύουν οι τιμές του πίνακα 1.3.2.3-1.

U [kV]	Θερμοκρασία λειτουργίας [°C]	θ [°C]
1...6	45	120
10...20	35	115
30...60	25	100
Για καλώδια χαμηλής τάσης		150

Πίνακας 1.3.2.3-1: Θερμοκρασία λειτουργίας και οριακή θερμοκρασία για καλώδια [1]

Ο υπολογισμός της $\Delta\theta$ με τη σχέση 1.3.2.3-1 δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα. Ως παράδειγμα υπολογισμού δίνεται ακολούθως η περίπτωση βραχυκυκλώματος μεταξύ δύο φάσεων, σε μία διακλάδωση κεντρικής γραμμής (γραμμής κορμού) μέσης τάσης, η οποία στην αρχή της έχει ως προτεταγμένο μέσο προστασίας ασφαλειοαποζεύκτες, με τηκτά 30 A, βραδείας τήξεως (T), οι δε αγωγοί της είναι διατομής 35 mm² ACSR. Η δυσμενέστερη περίπτωση δίνεται για $T = 0,6$ και $I_{SW} = I_d$. Για χρόνο διακοπής 0,1 sec η μέγιστη τιμή I_d (σύμφωνα με τον πίνακα 1.3.2.3-2) είναι 975 A [45], οπότε η τιμή της $\Delta\theta$ είναι:

$$\Delta\theta_{0,1s} = 0,0058 \cdot 975^2 \cdot [0,1 + 0,6] / 35^2 \approx 3,15 \text{ °C} \quad (1.3.2.3-3)$$

α) για τηκτά τύπου K

Ονομαστικό ρεύμα (A)	300 sec Ρεύμα (A)		10 sec Ρεύμα (A)		0.1 sec Ρεύμα (A)	
	Ελάχιστο	Μέγιστο	Ελάχιστο	Μέγιστο	Ελάχιστο	Μέγιστο
3	6	7,2	-	10	-	58
6	12,0	14.4	13,5	20,5	72	86
8	15	18	18	27	97	116
10	19,5	23.4	22,5	34	128	154
12	25	30	29,5	44	166	199
15	31,0	37.2	37,0	55	215	258
20	39	47	48,0	71	273	328
25	50	60	60	90	350	420
30	63	76	77,5	115	447	546
40	80	96	96	146	565	680
50	101	121	126	188	719	862
65	128	153	159	237	918	1100
80	160	192	205	307	1180	1420
100	200	240	258	388	1520	1820

β) για τηκτά τύπου T

Ονομαστικό ρεύμα (A)	300 sec Ρεύμα (A)		10 sec Ρεύμα (A)		0.1 sec Ρεύμα (A)	
	Ελάχιστο	Μέγιστο	Ελάχιστο	Μέγιστο	Ελάχιστο	Μέγιστο
3	6	7,2	-	11	-	100
6	12,0	14,4	15,3	23,0	120	144
8	15	18	20,5	31	166	199
10	19,5	23,4	26,5	40	224	269
12	25	30	34,5	52	296	355
15	31,0	37.2	44,5	67	388	466
20	39	47	57,0	85	496	595
25	50	60	73,5	109	635	762
30	63	76	93,0	138	812	975
40	80	96	120	178	1040	1240
50	101	121	152	226	1310	1570
65	128	153	195	291	1650	1975
80	160	192	248	370	2080	2500
100	200	240	319	475	2620	3150

Πίνακας 1.3.2.3-2: Ρεύματα και χρόνοι διακοπής για την τήξη ασφαλειών α) τύπου K (ταχείας τήξεως) και β) τύπου T (βραδείας τήξεως), ανάλογα με το ονομαστικό ρεύμα του τηκτού, σύμφωνα με το πρότυπο ANSI C37.42, 1989 [45]

1.3.3 Η θερμική καταπόνηση των γραμμών διανομής σε περιβάλλον πυρκαγιάς

Κατά τη διάρκεια μίας δασικής πυρκαγιάς οι εναέριοι αγωγοί μέσα στη καιόμενη περιοχή υφίστανται θερμική καταπόνηση λόγω της μετάδοσης θερμότητας προς αυτούς μέσω ακτινοβολίας και μεταφοράς αλλά και μέσω αγωγής. Έχουν αναπτυχθεί μοντέλα για την εκτίμηση της αύξησης της θερμοκρασίας των εναερίων αγωγών από τη μετάδοση θερμότητας προς αυτούς μέσω ακτινοβολίας και μέσω μεταφοράς [23, 28]. Η εκτίμηση της αύξησης της θερμοκρασίας του αγωγού που οφείλεται σε μια πυρκαγιά είναι δύσκολη, καθώς οι ακριβείς ιδιότητες των καυσίμων δεν είναι γνωστές. Ωστόσο, είναι χρήσιμο να επαληθευτεί ότι το διαθέσιμο θερμικό φορτίο φωτιάς είναι δυνατόν να προκαλέσει την τήξη αγωγού. Στα επόμενα, παρουσιάζεται μία μέθοδος για τον υπολογισμό της ροής θερμότητας, μέσω ακτινοβολίας και μεταφοράς.

Η ποσότητα της θερμότητας την οποία δέχεται με ακτινοβολία ένα σώμα που βρίσκεται σε απόσταση d_o από θερμαντική πηγή είναι αντιστρόφως ανάλογη προς το τετράγωνο της απόστασης. Πιο συγκεκριμένα, η ακτινοβολούμενη προσπίπτουσα θερμική ροή σε ένα αντικείμενο, που βρίσκεται σε περιβάλλον φωτιάς, δίνεται από τη σχέση [28, 46, 47]:

$$Q_{rf} = \frac{X_r Q}{4 \pi d_o^2} \quad (1.3.3-1)$$

όπου, Q_{rf} είναι η προσπίπτουσα ροή ακτινοβολίας (kW/m^2), d_o είναι η απόσταση έως την επιφάνεια του στόχου, X_r είναι το κλάσμα ακτινοβολίας, που αντιπροσωπεύει το ποσοστό της θερμότητας που απελευθερώνεται από την πηγή ως ακτινοβολούμενη θερμότητα, ίσο με 0,15 [28, 47] και Q είναι το συνολικό ποσοστό απελευθέρωσης θερμότητας της πηγής σε kW (συμπεριλαμβανομένης της ακτινοβολίας ροής θερμότητας). Η εξίσωση (1.3.3-1) ισχύει όταν η απόσταση d_o μεταξύ του στόχου (δηλ. του αγωγού) και της φωτιάς είναι μεγαλύτερη από δύο φορές το βάθος l της καιόμενης επιφάνειας της φωτιάς ($d_o > 2l$) [46, 47]. Ωστόσο, όταν αυτή η ανισότητα δεν ισχύει, η ροή θερμότητας μέσω ακτινοβολίας μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

$$Q_{rf} = \varepsilon \sigma_{SB} T_2^4 F_{12} \quad (1.3.3-2)$$

όπου ε είναι ο συντελεστής εκπομπής της φλόγας ($0 \leq \varepsilon \leq 1$), σ_{SB} είναι η σταθερά Stefan-Boltzmann ίση με $5,67 \cdot 10^{-11} \text{ kW m}^{-2} \text{ K}^{-4}$, T_2 είναι η θερμοκρασία της φλόγας (η οποία θεωρείται ίση με 1200 K [48, 49]) και F_{I2} είναι ο συντελεστής προβολής.

Ο συντελεστής προβολής F_{I2} είναι συνάρτηση της d_o και του ύψους καθώς και του πλάτους της φωτιάς. Μπορεί να υπολογιστεί αναλυτικά μέσω σύνθετων εξισώσεων ή μπορεί να ληφθεί από πίνακες [46]. Όταν το ύψος και το πλάτος της φωτιάς είναι πολύ μεγαλύτερα από την απόσταση d_o , ο συντελεστής προβολής δεν ακολουθεί τις μεταβολές του d_o [46], και έτσι η ροή θερμότητας μέσω ακτινοβολίας δεν αλλάζει σημαντικά με τις αλλαγές της απόστασης.

Ο συντελεστής εκπομπής της φλόγας μπορεί να εκτιμηθεί από τη σχέση [46]:

$$\varepsilon = 1 - e^{-k_1 l} \quad (1.3.3-3)$$

όπου k_1 είναι ο συντελεστής απορροφητικότητας της φλόγας ($\approx 0,1 \div 1,0 \text{ m}^{-1}$ για τυρβώδεις πυρκαγιές) και l το βάθος της καιόμενης επιφάνειας της φωτιάς [46].

Η μετάδοση θερμότητας με μεταφορά είναι ιδιότητα των υγρών και των αερίων. Στην προκειμένη περίπτωση, ως μετάδοση της θερμότητας με μεταφορά νοείται η θερμότητα μέσω ρευμάτων αέρα από το υπέρθερμο περιβάλλον της φλεγόμενης καύσιμης ύλης. Αυτή η θερμότητα συμβάλλει στην αύξηση της θερμοκρασίας των αγωγών μέσω της επιφάνειάς τους.

Μια γενική εξίσωση σχετική με τη μεταφορά θερμότητας είναι [28, 47]:

$$Q_{cf} = f_1(T_2 - T_1) = f_1 \cdot \Delta T \quad (1.3.3-4)$$

όπου Q_{cf} είναι η ροή μεταφερόμενης θερμότητας (kW/m^2), f_1 είναι συντελεστής μεταφοράς θερμότητας ($\text{kW/m}^2\text{K}$) η τιμή του οποίου εξαρτάται από τις ιδιότητες του αέρα και την ταχύτητα ροής και δίνεται στη βιβλιογραφία [46, 50] και $\Delta T = T_2 - T_1$ είναι η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των αγωγών και των ρευμάτων αέρα.

Η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των αγωγών και των ρευμάτων του αέρα, θεωρώντας ότι η T_1 είναι ίση με 293 K, μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση [50]:

$$\Delta T = 22 \frac{Q^{2/3}}{z^{5/3}} \quad (1.3.3-5)$$

όπου το z είναι το ύψος.

Θα πρέπει επίσης να αναφερθεί ότι στην πράξη υπάρχουν περιπτώσεις όπου η θερμική καταπόνηση των αγωγών είναι δυνατό να συμβεί με αγωγή θερμότητας από τη φλόγα. Αυτό μπορεί να γίνει σε περιπτώσεις όπου υψηλά δένδρα βρίσκονται πλησίον των αγωγών.

Ο υπολογισμός της μετάδοσης της θερμότητας με αγωγή βασίζεται στον ρυθμό έκλυσης της ενέργειας Q π.χ. ενός δένδρου διαστάσεων περίπου $1,5 \times 1,5 \times 6 \text{ m}^3$, για τον οποίο ισχύει η σχέση [1, 51]:

$$Q = P A Q_k = 11 \cdot \{5 \cdot (1,5 \cdot 1,5)\} \cdot 15 = 1856 \text{ kW} \quad (1.3.3-6)$$

όπου P η απώλεια μάζας ανά μονάδα επιφάνειας και μονάδα χρόνου (για το ξύλο $11 \text{ gr/m}^2 \text{ s}$), A η επιφάνεια σε m^2 (στην οποία αντιστοιχεί κυκλική επιφάνεια διαμέτρου D , που ακολούθως χρειάζεται στους υπολογισμούς) και Q_k η ενεργός θερμότητα καύσης (η οποία για το ξύλο είναι $13 \div 15 \text{ kJ/gr}$).

Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία [26, 51, 52, 86-88] υπάρχουν διάφοροι τρόποι υπολογισμού του ύψους της φλόγας H , όπως:

- Η μέθοδος κατά Heskestad, όπου το ύψος της φλόγας υπολογίζεται από τη σχέση:

$$H = 0,23 Q^{0,4} - 1,02 D \quad (1.3.3-7)$$

- Ο υπολογισμός κατά Zukofski:

$$H = 3,3 D \{Q / [1,2 (273 + \theta) (g D)^{0,5} D^2]\}^{0,66} \quad (1.3.3-8)$$

όπου θ η θερμοκρασία περιβάλλοντος.

- Ο υπολογισμός κατά Thomas:

$$H = 42 D \{P / (\rho [g D]^{1/2})\}^{0,61} \quad (1.3.3-9)$$

όπου P η απώλεια μάζας ανά μονάδα επιφάνειας, ρ η πυκνότητα του αέρα, και $g = 9,81 \text{ m/sec}^2$.

- Η μέθοδος Cox & Chitty.
- Η μέθοδος Steward.
- Ο υπολογισμός από πειραματικά δεδομένα.
- Το πρόγραμμα στο διαδίκτυο για τον υπολογισμό του ύψους της φλόγας κατά τις ανωτέρω μεθόδους (Flame Height Correlation Calculator).
- Τα δύο προγράμματα στη διδακτορική διατριβή του Ε. Ψαρρού στο ΕΜΠ [26] για τον υπολογισμό του ύψους της φλόγας κατά τις ανωτέρω μεθόδους, αλλά και με βάση τη μορφή (το σχήμα) του δένδρου ή του θάμνου.

Σχετικά με την εικόνα που παρουσιάζει ένας ρευματοφόρος αγωγός λόγω τήξης του από ηλεκτρικό τόξο ως προς την εικόνα του λόγω τήξης από τη φωτιά, αναφέρονται τα εξής: Ο ερευνητής V. Babrauskas μελέτησε ένα μεγάλο αριθμό επιστημονικών εργασιών (43 εργασίες), που αφορούν μεθόδους γνωμάτευσης για το αν η εικόνα που παρουσιάζει ένας ρευματοφόρος αγωγός στη θέση τήξης του οφείλεται σε ηλεκτρικό τόξο ή σε εκδήλωση πυρκαγιάς. Το αποτέλεσμα της πολυσέλιδης αυτής έρευνας [83], είναι περιληπτικά το παρακάτω [1]:

«Μία μεγάλη ποικιλία φυσικών ή χημικών μεθόδων εξέτασης έχει προταθεί για τη διαφοροποίηση μεταξύ ενός τήγματος οφειλόμενου σε ηλεκτρικό τόξο που προκάλεσε μία φωτιά έναντι ενός που προκλήθηκε από φωτιά. Όλες οι μέθοδοι θεωρούν ανεπιφύλακτα ότι υπάρχει κάποια κατηγορηματική διαφορά ανάμεσα στα δύο αυτά είδη τήγματος. Μία εξάπλωση της φωτιάς στον χώρο οδηγεί στο συμπέρασμα ότι δεν μπορούμε να ισχυριστούμε κατηγορηματικά ότι είναι διαφορετικές οι θερμικές ή χημικές διεργασίες σε αυτές τις δύο περιπτώσεις. Επιπλέον, οι περισσότερες προτεινόμενες μέθοδοι μελέτης του θέματος βασίζονται σε υποκειμενικά ποιοτικά κριτήρια για τη διάκριση των τηγμάτων που προκάλεσαν ή όχι μία φωτιά. Σημειώνεται ότι οι μελέτες αυτές έχουν βασιστεί σε μικρό αριθμό δειγμάτων και ότι καμία από τις μεθόδους που εφαρμόστηκαν δεν έχει αναπαραχθεί επιτυχώς σε εργαστήρια πέραν αυτών των υποστηρικτών τους, ενώ αρκετές έχει αποδειχθεί ρητά ότι δεν είναι δυνατόν να αναπαραχθούν. Κατά συνέπεια, παρά τη βοήθεια στη διερεύνηση μίας φωτιάς που πιθανόν να δινόταν, πρέπει να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι καμία από τις προτεινόμενες μεθόδους δεν είναι ελπιδοφόρα». Συνεπώς, δεν μπορεί να γίνει διάκριση αν η εικόνα τήξης ενός αγωγού οφείλεται σε εκδήλωση ηλεκτρικού τόξου ή αν προκλήθηκε από πυρκαγιά.

Ειδικότερα όμως, σε ότι αφορά την εικόνα τήξης που παρουσιάζουν αγωγοί του δικτύου σε περιβάλλον πυρκαγιών, διευκρινίζονται τα εξής [1]:

1) Αίτια της εικόνας τήξης ενός αγωγού αλουμινίου (ή κλώνων αυτού) του δικτύου διανομής χαμηλής τάσης όταν ισχύει η συνθήκη ουδετέρωσης.

Όταν ισχύει η συνθήκη ουδετέρωσης σε μία γραμμή χαμηλής τάσης, τότε η εικόνα που παρουσιάζει ένας αγωγός του δικτύου διανομής χαμηλής τάσης στη θέση τήξης του, είναι αποτέλεσμα πυρκαγιάς πλησίον αυτού, και τούτο διότι αποκλείεται θερμική καταπόνηση του αγωγού κατά την εκδήλωση βραχυκυκλώματος, αφού συμβαίνει πρακτικά ακαριαία (σε κλάσμα δευτερολέπτου) τήξη της ασφάλειας της γραμμής, με αποτέλεσμα να προστατεύονται οι αγωγοί από υπερθέρμανση και να μη

δημιουργούνται σπινθηρισμοί ή τήγματα μετάλλου από αυτούς [1, 26, 75, 82].

Θα πρέπει να σημειώνεται ότι επειδή η θερμοκρασία της φλόγας είναι συνήθως από 750 °C έως 1020 °C προκαλείται όχι μόνο τήξη κλώνων αλλά αποκοπή αγωγών, γιατί το αλουμίνιο τήκεται στους 660 °C.

2) Αίτια της εικόνας τήξης των κλώνων αλουμινίου σε αγωγούς ACSR (ή αλουμινίου) του δικτύου διανομής μέσης τάσης καθώς και της εικόνας τήξης κλώνων αλουμινίου αγωγών υψηλής τάσης με χαλύβδινη ψυχή.

Όταν σε περίπτωση βραχυκυκλώματος επενεργεί άμεσα (σε κλάσμα του sec), η προτεταγμένη προστασία μίας γραμμής μέσης τάσης από αγωγούς ACSR (ή αλουμινίου) ή μίας γραμμής υψηλής τάσης από κλώνους αλουμινίου με χαλύβδινη ψυχή, τότε η εικόνα τήξης που παρουσιάζουν οι κλώνοι αλουμινίου είναι αποτέλεσμα πυρκαγιάς πλησίον αυτού, και τούτο διότι λόγω του μικρού διαθέσιμου χρόνου αποκλείεται η θερμική καταπόνηση του αγωγού.

1.3.3.1 Η παραμένουσα επιμήκυνση επιτόνων του δικτύου διανομής σε περίπτωση πυρκαγιάς στο περιβάλλον των γραμμών ηλεκτρικής ενέργειας

Οι επίτονοι είναι κατασκευασμένοι από κλώνους χάλυβα και αποσκοπούν στη σωστή τάνυση των γραμμών διανομής. Από πειραματικές και θεωρητικές έρευνες που έχουν γίνει [1, 26, 53, 54] προκύπτει, ότι σε περίπτωση εκδήλωσης πυρκαγιάς στο περιβάλλον μίας γραμμής διανομής και για θερμοκρασίες του επιτόνου άνω των 500 °C (λόγω πυρκαγιάς) μειώνεται το μέτρο ελαστικότητάς του περίπου στο 1/3. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να αποκτά ακολούθως ο επίτονος (λόγω της ψύξης του σε συνήθη θερμοκρασία περιβάλλοντος μετά την παρέλευση της πυρκαγιάς) μία παραμένουσα επιμήκυνση, εξ αιτίας της οποίας μεταβάλλονται οι δυνάμεις τάνυσης της γραμμής. Γι' αυτό, σε περιπτώσεις εκδήλωσης πυρκαγιών μπορεί να συμβεί αύξηση του βέλους κάμψης των αγωγών, που σε περιπτώσεις μεγάλων ανεμοπιέσεων μπορεί να οδηγήσει σε διακοπή ρεύματος λόγω βραχυκυκλώματος. Επομένως, θα πρέπει να επιθεωρούνται οι επίτονοι όταν η φωτιά έχει περάσει από αυτούς. Επίσης, στα πλαίσια των προγραμματισμένων εργασιών κλαδέματος κρίνεται σκόπιμο να κόβονται οι θάμνοι στη θέση στήριξής τους.

1.3.3.2 Η παραμένουσα επιμήκυνση αγωγών ACSR σε περίπτωση πυρκαγιάς στο περιβάλλον των γραμμών ηλεκτρικής ενέργειας

Τα προαναφερθέντα περί παραμένουσας επιμήκυνσης επιτόνων, σε περίπτωση πυρκαγιάς, ισχύουν λόγω της χαλύβδινης ψυχής και για τους αγωγούς ACSR [1, 30].

1.3.4 Πειραματικές διερευνήσεις σε γραμμές διανομής χαμηλής τάσης

1.3.4.1 Η συνθήκη βραχυκύκλωσης (ή ουδετέρωσης) στις γραμμές διανομής χαμηλής τάσης

Για να λειτουργήσει αποτελεσματικά η προστασία μίας γραμμής χαμηλής τάσης, σε περίπτωση βραχυκυκλώματος, θα πρέπει να ισχύει η συνθήκη [1, 38]:

$$I_d \geq 3 I_F \quad (1.3.4.1-1)$$

όπου I_d το διαρκές ρεύμα βραχυκύκλωσης και I_F το ονομαστικό ρεύμα της ασφάλειας της γραμμής. Η συνθήκη αυτή ονομάζεται συνθήκη βραχυκύκλωσης (ή ουδετέρωσης) και πρέπει να ισχύει προκειμένου να εφαρμοστεί η γείωση του ουδετέρου σαν μέθοδος προστασίας έναντι τάσεων επαφής.

Όταν σε μία γραμμή διανομής χαμηλής τάσης υπάρχει μονοφασικό βραχυκύκλωμα μεταξύ αγωγού φάσης και ουδετέρου, σε απόσταση l από τον μετασχηματιστή διανομής, τότε η συνολική αντίσταση Z του κυκλώματος θα είναι:

$$Z = \sqrt{(R_M + R_F)^2 + (X_M + X_F)^2} \quad (1.3.4.1-2)$$

όπου R_M η ωμική αντίσταση του μετασχηματιστή, X_M επαγωγική αντίσταση του μετασχηματιστή, R_F η ωμική αντίσταση του αγωγού και X_F η επαγωγική αντίσταση του αγωγού μέχρι τη θέση βραχυκύκλωσης.

Επομένως, για το διαρκές ρεύμα βραχυκύκλωσης, ισχύει η σχέση:

$$I_d = \frac{U}{Z} \quad (1.3.4.1-3)$$

Μετά την αντικατάσταση των ωμικών αντιστάσεων R_T και επαγωγικών X_T με τις αντίστοιχες ωμικές r_T και επαγωγικές x_T αντιστάσεις ανά μονάδα μήκους αγωγού, η ανίσωση (1.3.4.1-1) γράφεται:

$$\frac{U}{3I_F} \geq \sqrt{(R_M + r_T l)^2 + (X_M + x_T l)^2} \quad (1.3.4.1-4)$$

ή

$$l^2 + 2l \frac{R_M r_T + X_M x_T}{r_T^2 + x_T^2} - \left(\frac{U}{3I_F \sqrt{r_T^2 + x_T^2}} \right)^2 + \frac{R_M^2 + X_M^2}{r_T^2 + x_T^2} \leq 0 \quad (1.3.4.1-5)$$

Από την ανισότητα (1.3.4.1-5) προκύπτει η ακόλουθη μέγιστη τιμή L για το l :

$$L = -\frac{R_M r_T + X_M x_T}{r_T^2 + x_T^2} + \sqrt{\left(\frac{U}{3I_F \sqrt{r_T^2 + x_T^2}} \right)^2 - \left(\frac{r_T X_M - x_T R_M}{r_T^2 + x_T^2} \right)^2} \quad (1.3.4.1-6)$$

Σημειώνεται ότι η σχέση 1.3.4.1-6 ισχύει για βραχυκυκλώματα προς γη. Για βραχυκυκλώματα μεταξύ αγωγών το μήκος της αντίστασης του αγωγού πρέπει να γίνει διπλάσιο. Εφαρμόζοντας την παραπάνω σχέση 1.3.4.1-6 για τις αντίστοιχες τιμές των ωμικών (r_T) και επαγωγικών (x_T) αντιστάσεων ανά μέτρο γυμνών αγωγών χαμηλής τάσης (βλέπε πίνακα 1.3.4.1-1) αλλά και των ωμικών (R_M) και επαγωγικών (X_M) αντιστάσεων των μετασχηματιστών διανομής, που χρησιμοποιούνται στα δίκτυα διανομής χαμηλής τάσης (βλέπε πίνακα 1.3.4.1-2), με τις αντίστοιχες ασφάλειές τους (I_F), προκύπτουν οι πίνακες 1.3.4.1-3 και 1.3.4.1-4, που περιέχουν τα μέγιστα μήκη (L) γραμμών χαμηλής τάσης για τα οποία ισχύει η συνθήκη 1.3.4.1-1.

Είδος γραμμής χαμηλής τάσης	r_T [mΩ/km]	x_T [mΩ/km]
Γυμνοί αγωγοί 4x 16 mm ²	1140	330
Γυμνοί αγωγοί 4x 35 mm ²	533	306
Γυμνοί αγωγοί 4x 50 mm ²	381	294
Γυμνοί αγωγοί 4x 70 mm ²	277	284
Συνεστραμμένα καλώδια 3x35 mm ² + 54,6 mm ²	868 + 630	100
Συνεστραμμένα καλώδια 3x70 mm ² + 54,6 mm ²	443 + 630	100

Πίνακας 1.3.4.1-1: Ωμικές (r_T) και επαγωγικές (x_T) αντιστάσεις ανά km εναερίων αγωγών γραμμών χαμηλής τάσης (η διατομή αφορά ισοδύναμη χαλκού) [1, 38]

P_N (kVA)	25	50	75	100	150	200	250	400	630	750	1000
R_M (mΩ)	175	75	40	29	18,3	13,4	10,5	5,7	3,6	3	2,2
X_M (mΩ)	228	122	86,8	65,5	44,5	33,5	26,8	17	10,8	9,1	6,9

Πίνακας 1.3.4.1-2: Ωμικές (R_M) και επαγωγικές (X_M) αντιστάσεις μετασχηματιστών διανομής αναλόγως της ονομαστικής ισχύος P_N [1, 38]

Στους πίνακες 1.3.4.1-3 και 1.3.4.1-4 δίνονται δύο μήκη, εκ των οποίων το μεγαλύτερο μήκος αφορά τη γραμμή χωρίς το καλώδιο παροχής και το μικρότερο μήκος τη γραμμή με το καλώδιο παροχής (συγκεντρικό καλώδιο μήκους 30 m προς τον καταναλωτή) [1, 38].

Σε περίπτωση που μία γραμμή αποτελείται από γυμνούς αγωγούς διαφορετικών διατομών, τότε το ισοδύναμο μήκος της γραμμής βρίσκεται με μετατροπή των επιμέρους αγωγών σε ένα είδος αγωγού σταθερής διατομής [1].

Ισχύς [kVA]	Ασ- φά- λεια [A]	Γυμνοί αγωγοί	Γυμνοί αγωγοί	Γυμνοί αγωγοί	Γυμνοί αγωγοί	Συνεστραμ- μένο καλώδιο	Συνεστραμ- μένο καλώδιο
		16 mm ²	35 mm ²	50 mm ²	70 mm ²	3x35+54,6 mm ²	3x70+54,6 mm ²
Μήκος γραμμής σε m							
15	25	1030 950					
	32	760 690					
25	32	850 770					
	40	660 580				1000	
50	50	560 480	1070 930			840 720	1130 1010
	63	440 360	830 690	1090 920		660 540	920 750
	80	330 250	630 490	830 660	1010 820	500 380	700 530
75	63	450 370	870 730	1140 970		680 560	950 780
	80	350 270	670 530	880 710	1080 880	530 410	740 570
	100	280 200	530 380	690 510	840 640	420 300	580 410
	125	220 140	410 270	530 360	650 450	330 210	450 290
100	63	460 380	890 750	1160 990		690 570	970 800
	80	360 280	690 550	900 730	1110 910	540 420	760 580
	100	280 210	540 400	710 530	870 670	430 310	600 430
	125	220 150	420 270	550 380	680 480	340 220	470 300
	160	170 90	320 180	420 240	510 310	260 140	360 190
150- 160- 200	80	370 290	710 570	940 760	1150 950	550 430	770 600
	100	300 210	570 420	740 560	910 710	440 320	610 440
	125	230 150	450 300	590 410	720 510	350 230	480 320
	160	180 100	350 200	450 270	560 340	270 150	370 210
	200		270 130	360 170	440 220	210 90	300 130
	250		210 70	280 90	340 110		230 70

Πίνακας 1.3.4.1-3: Πίνακας μηκών εναερίων αγωγών χαμηλής τάσης για την τήρηση της συνθήκης ουδετέρωσης ανάλογα με τις τιμές ασφαλειών του δικτύου χαμηλής τάσης (400V/230V) και τις τιμές μετασχηματιστών 15 ÷ 200 kVA (σύμφωνα με την Οδηγία Διανομής Νο22 [38]). Οι τιμές των ωμικών αντιστάσεων υπολογίστηκαν σε θερμοκρασία 35 °C

Ισχύς [kVA]	Ασ- φά- λεια [A]	Γυμνοί αγωγοί	Γυμνοί αγωγοί	Γυμνοί αγωγοί	Γυμνοί αγωγοί	Συνεστραμ- μένο καλώδιο	Συνεστραμ- μένο καλώδιο
		16 mm ²	35 mm ²	50 mm ²	70 mm ²	3x35+54,6 mm ²	3x70+54,6 mm ²
Μήκος γραμμής σε m							
250-	80	370 290	720 580	960 770	1170 970	560 440	780 610
	100	300 220	580 480	760 580	940 730	450 330	620 460
400	125	240 160	460 310	600 420	740 540	360 240	500 330
	160	180 110	360 210	470 280	580 360	280 160	400 220
500-	200		280 140	370 180	460 240	220 100	310 140
	250		230 80	300 100	360 140		250 80
630	315			230 40	280 50		
	400				220		
750-	500						
1000							

Πίνακας 1.3.4.1-4: Πίνακας μηκών εναερίων αγωγών χαμηλής τάσης για την τήρηση της συνθήκης ουδετέρωσης ανάλογα με τις τιμές ασφαλειών του δικτύου χαμηλής τάσης (400V/230V) και τις τιμές μετασχηματιστών 250 ÷ 1000 kVA(σύμφωνα με την Οδηγία Διανομής Νο22 [38]). Οι τιμές των ωμικών αντιστάσεων υπολογίστηκαν σε θερμοκρασία 35 °C

Όταν σε μία γραμμή χαμηλής τάσης εφαρμόζονται οι πίνακες 1.3.4.1-3 και 1.3.4.1-4, τότε ισχύει η συνθήκη βραχυκύκλωσης, σύμφωνα με την οποία, κατά το βραχυκύκλωμα συμβαίνει ακαριαία (σε κλάσμα του δευτερολέπτου) η τήξη της ασφάλειας και ως εκ τούτου οι αγωγοί θερμαίνονται μόνο μερικούς βαθμούς Κελσίου και συνεπώς δεν δημιουργούνται τήγματα μετάλλου από αυτούς [1, 26, 54, 77]. Η ακαριαία τήξη της ασφάλειας επιβεβαιώνεται από το γεγονός, ότι η συνολική αντίσταση της διαδρομής βραχυκύκλωσης είναι το πολύ 1 Ω με αποτέλεσμα το ρεύμα βραχυκύκλωσης να έχει πολύ μεγαλύτερη τιμή από $3I_F$, που ως εκ τούτου προκαλεί τήξη της ασφάλειας σε χρόνο μικρότερο του ενός δευτερολέπτου [43].

Επί των ανωτέρω θα πρέπει να σημειωθεί ότι, επειδή η τυποποιημένη τιμή της τάσης είναι $U \pm 10\%$ (που σημαίνει ότι η φασική τάση μπορεί να κυμαίνεται από 207 V μέχρι 253 V), θα πρέπει να αναθεωρηθούν τα μήκη των γραμμών στους πίνακες 1.3.4.1-3 και 1.3.4.1-4 λαμβάνοντας υπόψη τη δυσμενέστερη περίπτωση που αποδίδεται για φασική τάση 207 V.

Επισημαίνεται ότι από πειραματικές διερευνήσεις, που έχουν γίνει για τη συνθήκη ουδετέρωσης σε γραμμές διανομής χαμηλής τάσης, έχει διαπιστωθεί ότι όταν ισχύει η συνθήκη ουδετέρωσης δεν δημιουργούνται κατά το βραχυκύκλωμα μεταξύ αγωγών τήγματα μετάλλου, γιατί η αύξηση της θερμοκρασίας είναι ασήμαντη [1, 25, 26, 54]. Σημειώνεται ότι η εν λόγω αύξηση της θερμοκρασίας μπορεί να προσεγγιστεί υπολογιστικά ως ακολούθως [1, 26, 54]:

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

$$W_\eta = I_\beta^2 R t = I_\beta^2 \rho (L / A) t \quad (1.3.4.1-7)$$

όπου ρ η ειδική αντίσταση και t ο χρόνος βραχυκύκλωσης.

Για μεταβολή της θερμοκρασίας του αγωγού κατά $\Delta\theta$, η αντίστοιχη ενέργεια W_θ είναι:

$$W_\theta = V c \Delta\theta = A L c \Delta\theta \quad (1.3.4.1-8)$$

όπου V ο όγκος, c η ειδική θερμότητα, A η διατομή του αγωγού και L το μήκος του.

Από τις δύο ανωτέρω σχέσεις, για $W_\eta \approx W_\theta$, έπεται ότι:

$$\Delta\theta = \kappa I_\beta^2 t / A^2 \quad (1.3.4.1-9)$$

όπου $\kappa = \rho / c$. Για τον χαλκό είναι $\rho = 1/50 \Omega \text{ mm}^2/\text{m}$ και $c = 3,44 \text{ Ws} / ^\circ\text{C cm}^3$ και επομένως είναι $\kappa = 0,0058$. Για το αλουμίνιο αντίστοιχα ότι ισχύει $\kappa = 0,0135$.

1.3.4.2 Πειραματική διερεύνηση των συνεπειών της επαφής γυμνών αγωγών του δικτύου διανομής χαμηλής τάσης με φυλλώματα και κλαδιά δέντρων

Από πειράματα, που έχουν γίνει, για τη διερεύνηση των συνεπειών της επαφής γυμνών αγωγών χαμηλής τάσης με φυλλώματα και κλαδιά δέντρων, έχει διαπιστωθεί ότι δεν προκαλούνται ρεύματα διαρροής και δε μεταβάλλεται η θερμοκρασία των αγωγών, ανεξαρτήτως του εάν τα φυλλώματα και τα κλαδιά είναι χλωρά ή ξερά ή βρεγμένα ή στεγνά [1, 26, 33]. Επομένως, το κλάδεμα των δέντρων, που γίνεται ετησίως πλησίον γραμμών διανομής χαμηλής τάσης λόγω της πίεσης που ασκείται στους αγωγούς από τα κλαδιά κυρίως των δέντρων [55, 56], αποσκοπεί στην προστασία του ανθρώπου και του περιβάλλοντος από κομμένους αγωγούς [1, 77]. Επί των ανωτέρω επισημαίνεται ότι οι γυμνοί αγωγοί αλουμινίου του δικτύου διανομής χαμηλής τάσης κόβονται εύκολα υπό την πίεση κλαδιών δέντρων γιατί το αλουμίνιο είναι μαλακό μέταλλο και έχει μικρή μηχανική τάση αποκοπής συγκριτικά προς τον χάλυβα [57].

Εννοείται ότι με το εν λόγω κλάδεμα των δέντρων αποφεύγονται και διακοπές ρεύματος λόγω βραχυκυκλώματος μεταξύ των αγωγών.

1.3.4.3 Πειραματική διερεύνηση αγώγιμων επαφών μεταξύ αγωγού του δημοτικού φωτισμού και του υπερκείμενού του αγωγού φάσεως

Από πειράματα που έχουν γίνει [1, 26] κατά τις επαναλαμβανόμενες αγώγιμες γεφυρώσεις μεταξύ αγωγού του δημοτικού φωτισμού (αγωγός αλουμινίου διατομής 16 mm^2) και του υπερκείμενού του αγωγού φάσης (π.χ. αγωγός αλουμινίου διατομής 50 mm^2), με τον δημοτικό φωτισμό εντός ή εκτός λειτουργίας, έχει διαπιστωθεί ότι οι σπινθηρισμοί, που εμφανίζονται, είναι άνευ υλικής υφής και μπορούν να αποδοθούν στο διακοπτικό φαινόμενο που εκδηλώνεται λόγω της διαφοράς δυναμικού μεταξύ των δύο αγωγών. Επίσης, έχει διαπιστωθεί ότι δεν αυξάνεται η θερμοκρασία των αγωγών και δεν δημιουργούνται τήγματα αλουμινίου.

1.3.5 Η θερμοκρασία υποθετικών τηγμάτων αλουμινίου κατά την πρόσκρουσή τους στο έδαφος

Όπως έχει προαναφερθεί στην παρ. 1.3.4.1, όταν ισχύει η συνθήκη ουδετέρωσης σε γραμμές διανομής χαμηλής τάσης, η αύξηση της θερμοκρασίας κατά το βραχυκύκλωμα είναι άνευ σημασίας και ως εκ τούτου δεν μπορούν να δημιουργηθούν τήγματα από τους αγωγούς. Αυτό συμβαίνει, γιατί στην περίπτωση των γραμμών χαμηλής τάσης τήκεται σχεδόν ακαριαία (σε κλάσμα δευτερολέπτου) η ασφάλεια της γραμμής με αποτέλεσμα να είναι ανεπαρκής ο χρόνος για να αυξηθεί η θερμοκρασία (βλέπε σχέση 1.3.4.1-9). Επίσης, η αύξηση της θερμοκρασίας κατά το βραχυκύκλωμα σε γραμμές διανομής μέσης τάσης και σε γραμμές υψηλών τάσεων είναι ασήμαντη, γιατί και στις περιπτώσεις αυτές ο χρόνος διακοπής από το προτεταγμένο μέσο προστασίας είναι κλάσμα δευτερολέπτου. Παρά τα ανωτέρω, αν θεωρηθεί ότι δημιουργήθηκαν τήγματα αλουμινίου από αγωγούς του δικτύου (άγνωστο πως, αφού όπως προαναφέρθηκε δεν υπάρχει προς τούτο ο απαιτούμενος χρόνος), τότε, όπως φαίνεται από θεωρητικούς υπολογισμούς, τα εν λόγω υποθετικά τήγματα θα είχαν ουσιαστικά αποπυρακτωθεί κατά την πρόσκρουσή τους στο έδαφος (η θερμοκρασία τους θα ήταν της τάξεως των $50 \div 70 \text{ }^\circ\text{C}$) [1, 26, 27, 82].

Για τον προσδιορισμό της θερμοκρασίας ενός υποθετικού τήγματος (μάζας m) κατά τη διάρκεια της πτώσης του από ύψος H , θεωρείται σύμφωνα με τη βιβλιογραφία [26] ότι το σώμα δεν ακτινοβολεί καθόλου και γι' αυτό μελετάται η μεταβολή της θερμοκρασίας του σώματος μόνο λόγω μεταφοράς θερμότητας μέσω του αέρα. Η παραδοχή αυτή είναι ρεαλιστική αφού η συμμετοχή της ακτινοβολίας θερμότητας στο ρυθμό απώλειας θερμότητας από το τήγμα είναι μικρή (καθόσον η ακτινοβολία παίζει σημαντικό ρόλο μόνο σε περιπτώσεις ελεύθερης μεταφοράς ενώ σε περιπτώσεις εξαναγκασμένης μεταφοράς θεωρείται αμελητέα, ειδικότερα σε περιπτώσεις σωμάτων με μικρό συντελεστή εκπομπής) [26].

Σύμφωνα με τα ανωτέρω, το ισοζύγιο της θερμότητας στο τήγμα περιγράφεται από τη διαφορική εξίσωση:

$$m c \frac{d\theta}{dt} = h A \Delta\theta \quad (1.3.5-1)$$

όπου $\Delta\theta$ η διαφορά θερμοκρασίας του τήγματος ως προς τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος τη χρονική στιγμή t , c η ειδική θερμότητα του υλικού του τήγματος,

A η εξωτερική επιφάνεια του τήγματος και h ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας με μεταφορά.

Θεωρώντας ότι ο ρυθμός μεταβολής της θερμοκρασίας ισούται με τον ρυθμό μεταβολής της διαφοράς της θερμοκρασίας, ισχύει ότι:

$$\frac{d\Delta\theta}{dt} = \frac{h A}{m c} \Delta\theta \quad (1.3.5-2)$$

ή

$$\frac{d\Delta\theta(t)}{dt} = \frac{h A}{m c} \Delta\theta(t) \quad (1.3.5-3)$$

Ο συντελεστής h δίνεται ως συνάρτηση του αριθμού Nusselt (Nu) και είναι:

$$h = Nu \cdot \frac{k}{L} \quad (1.3.5-4)$$

όπου k η αγωγιμότητα του ρευστού και L το χαρακτηριστικό μήκος. Ο αριθμός Nusselt υπολογίζεται εμπειρικά από τη σχέση:

$$Nu = 0,37 \cdot (Re)^{0,6} \quad (1.3.5-5)$$

όταν ισχύει $25 \leq Re \leq 10^5$

Ο αριθμός Reynolds (Re) ορίζεται με την παρακάτω σχέση:

$$Re = v \frac{L}{\nu_1} = \rho v \frac{L}{\mu} \quad (1.3.5-6)$$

όπου v ταχύτητα του ρευστού σε μεγάλη απόσταση από το σώμα, L το χαρακτηριστικό μήκος, ρ η πυκνότητα του ρευστού, ν_1 το κινηματικό ιξώδες του ρευστού και μ το δυναμικό ιξώδες του ρευστού.

Με βάση τις σχέσεις 1.3.5-4, 1.3.5-5, 1.3.5-6, η σχέση 1.3.5-3 γράφεται:

$$\frac{d\Delta\theta(t)}{\Delta\theta(t)} = \frac{0,37 \cdot \left(\frac{\rho L}{\mu}\right)^{0,6} k A}{m c L} \{v(t)\}^{0,6} dt \quad (1.3.5-7)$$

Λαμβάνοντας υπόψη την οριακή συνθήκη σύμφωνα με την οποία, τη χρονική στιγμή $t=0$, η μεταβολή της θερμοκρασίας είναι $\Delta\theta_t$ (ίση με τη διαφορά της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος από την αρχική θερμοκρασία του υλικού του τήγματος), προκύπτει ότι η λύση της εξίσωσης 1.3.5-7 είναι:

$$\Delta\theta = \Delta\theta_{\tau} \exp \left[\frac{0,37 \cdot \left(\frac{\rho L}{\mu}\right)^{0,6} k A}{m c L} \int_0^t \{v(t)\}^{0,6} dt \right] \quad (1.3.5-8)$$

Με βάση τη σχέση 1.3.5-8 και τη θεωρία της ρευστοδυναμικής, υπολογίζεται η θερμοκρασία του τήγματος τη στιγμή t_1 κατά την πρόσκρουσή του στο έδαφος [26].

Ο ανωτέρω υπολογισμός της μεταβολής της θερμοκρασίας του τήγματος, μπορεί να γίνει σύμφωνα και με τη θεωρία της ελεύθερης βολής.

Πράγματι, από τη σχέση 1.3.5-3 προκύπτει:

$$\int_{\Delta\theta_{\tau}}^{\Delta\theta} \frac{d\Delta\theta}{\Delta\theta} = \int_0^t (h A / m c) dt \quad (1.3.5-9)$$

Για θερμοκρασία περιβάλλοντος π.χ. $\theta_o = 40 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (καύσωνα) και θερμοκρασία τήξης του αλουμινίου $660 \text{ }^{\circ}\text{C}$ είναι:

$$\Delta\theta_{\tau} = 660 - 40 = 620 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (1.3.5-10)$$

Από τις σχέσεις 1.3.5-9 και 1.3.5-10, προκύπτει:

$$\ln\Delta\theta = \ln 620 - (t h A) / (m c) \quad (1.3.5-11)$$

Αν D η διάμετρος του τήγματος και γ το ειδικό βάρος του, η 1.3.5-11 γράφεται:

$$\Delta\theta = \exp[6,43 - (6 t h) / (D \gamma c)] \quad (1.3.5-12)$$

Για τον συντελεστή h ισχύει κατά τον R. Holm η σχέση [1, 81]:

$$h = 7 + 400 v(t) \quad (1.3.5-13)$$

Ο χρόνος πτώσης κατά την θεωρία της ελεύθερης βολής από ύψος πτώσης H είναι:

$$t_1 = (2H / g)^{0,5} \quad (1.3.5-14)$$

Με $D = 0,005 \text{ m}$, $\gamma = 2700 \text{ kg/m}^3$ και θεωρώντας ως v την ταχύτητα ανέμου π.χ. 6 μποφόρ (13,8 m/s), και για ύψος (π.χ. $H = 9 \text{ m}$) και $g = 9,81 \text{ m/sec}^2$, από τις σχέσεις 1.3.5-12, 1.3.5-13 και 1.3.5-14 υπολογίζονται αντίστοιχα οι τιμές h και $\Delta\theta$:

$$h = 7 + 400 \cdot 13,6 = 5447 \text{ W/(m}^2 \text{ }^\circ\text{C)} = 5447 \cdot 0,000239 \text{ kcal/(m}^2\text{ }^\circ\text{C s)} = 1,3 \text{ kcal/(m}^2\text{ }^\circ\text{C s)}$$

και

$$\Delta\theta = \exp\{6,43 \cdot (6 \cdot 1,354 \cdot 1,30) / (5 \cdot 2,7 \cdot 0,22)\} = 18 \text{ }^\circ\text{C}$$

Επομένως, υπό συνθήκες υψηλού καύσωνα ($\theta_o = 40^\circ\text{C}$), η θερμοκρασία θ είναι περίπου:

$$\theta = \theta_o + \Delta\theta = 40 + 18 = 58 \text{ }^\circ\text{C}$$

Συνεπώς, η θερμοκρασία των υποθετικών τηγμάτων κατά την πρόσκρουσή τους στο έδαφος θα ήταν περίπου $58 \text{ }^\circ\text{C}$, θερμοκρασία καλώς ανεκτή σε επαφή με το χέρι, που δεν είναι δυνατό να προκαλέσει ανάφλεξη σε ξερά χόρτα, κλαδιά κλπ. τα οποία αναφλέγονται σε κατά πολύ υψηλότερες θερμοκρασίες.

Στα ίδια συμπεράσματα καταλήγει κανείς και μέσω της θεωρίας της ρευστομηχανικής, στην οποία, όπως προαναφέρθηκε, λαμβάνεται υπόψη στους υπολογισμούς, τόσο η οριακή ταχύτητα των σφαιρικών τηγμάτων αλουμινίου κατά την πτώση τους, όσο και η οριζόντια μετατόπισή τους λόγω του πνέοντος ανέμου [1,26].

Σημειώνεται ότι, σε περιπτώσεις πυρκαγιών στο περιβάλλον γραμμών ηλεκτρικής ενέργειας είναι συνήθως απαραίτητο να υπολογιστεί τόσο το ύψος της φλόγας (από δέντρα και θάμνους πλησίον της γραμμής, βλέπε παρ.1.3.3), όσο και η θερμοκρασία υποθετικών τηγμάτων κατά την πρόσκρουσή τους στο έδαφος. Στη βιβλιογραφία υπάρχουν προγράμματα που διευκολύνουν τους σχετικούς υπολογισμούς [26].

1.3.6 Διηλεκτρική συμπεριφορά των γραμμών της ηλεκτρικής ενέργειας

Κάθε ηλεκτροτεχνική κατασκευή ισοδυναμεί ως προς την ηλεκτρομονωτική της ικανότητα με κάποιον πυκνωτή, ο οποίος πρέπει να ανταπεξέρχεται επιτυχώς στις

προβλεπόμενες διηλεκτρικές δοκιμές. Ακολούθως εξετάζεται το θέμα των αποστάσεων μόνωσης και προστασίας καθώς και το μήκος ερπυσμού των μονωτήρων, που ενδιαφέρουν ιδιαίτερα στην αξιολόγηση της ηλεκτρομονωτικής ικανότητας των γραμμών της ηλεκτρικής ενέργειας.

1.3.6.1 Αποστάσεις μόνωσης και προστασίας σε γραμμές ηλεκτρικής ενέργειας

1.3.6.1.1 Η ελάχιστη απόσταση μόνωσης στη μέση και υψηλή τάση στον ατμοσφαιρικό αέρα υπό κανονικές συνθήκες και η απόσταση προστασίας μεταξύ των αγωγών σε εναέρια γραμμές διανομής μέσης τάσης και μεταφοράς υψηλής τάσης

Για την αξιολόγηση της μονωτικής ικανότητας μεταξύ των αγωγών μίας γραμμής μέσης ή υψηλής τάσης σε περιβάλλον ατμοσφαιρικού αέρα εξετάζεται ακολούθως η ικανότητα μόνωσης για τη δυσμενέστερη περίπτωση ηλεκτροδίων των πρακτικών εφαρμογών, που είναι η διάταξη «ακίδα - πλάκα», η οποία αντιστοιχεί π.χ. σε ένα κομμένο κλώνο αλουμινίου ενός αγωγού, ο οποίος (κλώνος) είναι κάθετα προσανατολισμένος προς γειτονικό αγωγό ή προς γειωμένα μεταλλικά μέρη της κατασκευής). Συνεπώς, εξετάζοντας το θέμα με την προαναφερθείσα διάταξη ηλεκτροδίων ικανοποιείται κάθε άλλη διάταξη με ολιγότερο ανομοιογενές πεδίο, όπως είναι η διάταξη κύλινδρος-κύλινδρος που αντιστοιχεί σε δύο μεταξύ τους παράλληλους αγωγούς. Για την απόσταση μόνωσης μίας διάταξης ηλεκτροδίων ακίδα - πλάκα σε περιβάλλον ατμοσφαιρικού αέρα υπό μέση ή υψηλή εναλλασσόμενη τάση ισχύει [1, 2]:

$$d \geq (0,935 \div 0,99) U / E_d \quad (1.3.6.1.1-1)$$

όπου U η ενεργός τιμή της τάσης και E_d η ειδική πεδιακή ένταση, για την οποία ισχύει: για d μέχρι 150 cm $E_d \approx 3,5$ kV/cm και για $d > 150$ cm η τιμή E_d μεταβάλλεται (σύμφωνα με πειράματα στα 200 cm $E_d \approx 2,5$ kV/cm και στα 300 cm $E_d \approx 3$ kV/cm) [1, 2].

Ονομαστική τάση γραμμής	Ελάχιστη απόσταση μόνωσης (d_{min})	Απόσταση προστασίας μεταξύ αγωγών σε γραμμές	Σύνηθες ύψος γραμμής από το έδαφος
20 kV	5,34 cm ÷ 5,66 cm	85 cm ÷ 125 cm	≈10 m
150 kV	40 cm ÷ 42,4 cm	150 cm	≈20 m

Πίνακας 1.3.6.1.1-1: Αποστάσεις μόνωσης και προστασίας σε γραμμές μέσης και υψηλής τάσης

Στον πίνακα 1.3.6.1.1-1 έχουν δοθεί τα αποτελέσματα υπολογισμού της απόστασης μόνωσης (d_{min}), καθώς και οι αποστάσεις προστασίας που ισχύουν στην πράξη, από όπου φαίνεται ότι η απόσταση προστασίας στις γραμμές μέσης τάσης και στις γραμμές υψηλών τάσεων είναι, για λόγους αυξημένης ασφάλειας και αξιόπιστης λειτουργίας, πολλαπλάσιες της απόστασης μόνωσης.

Σημειώνεται ότι δεν υφίσταται πρόβλημα διηλεκτρικής αντοχής και σε περιπτώσεις που οι αγωγοί τοποθετούνται, για λόγους αλλαγής της διεύθυνσης της γραμμής, από την οριζόντια διάταξη στην κατακόρυφη (ή αντιστρόφως), όπου αναγκαστικά μειώνονται στην κατακόρυφη διάταξη οι αποστάσεις μόνωσης, γιατί πάντοτε η ελάχιστη απόσταση προστασίας είναι πολλαπλάσια της d_{min} .

1.3.6.1.2 Η ελάχιστη απόσταση μόνωσης στη χαμηλή τάση στον ατμοσφαιρικό αέρα υπό κανονικές συνθήκες και η απόσταση προστασίας μεταξύ γυμνών αγωγών σε εναέριες γραμμές διανομής χαμηλής τάσης

Για τα φαινόμενα ιονισμού του αέρα σε μικρά διάκενα (λόγω της χαμηλής τάσης των 400 V) ισχύει κατά τη βιβλιογραφία η θεωρία Townsend. Η συνθήκη ιονισμού κατά την α-γ θεωρία (που είναι κυρίως ο μηχανισμός δημιουργίας ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων κατά Townsend), δίνεται από την σχέση [2, 3]:

$$\alpha d = \ln[1+(1 / \gamma_I)] \quad (1.3.6.1.2-1)$$

όπου α τα παραγόμενα ζεύγη ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων (ελεύθερα ηλεκτρόνια και ισάριθμα θετικά ιόντα), d η απόσταση του διακένου και γ_I ο συντελεστής ιονισμού.

Από την παραπάνω σχέση, δεδομένου ότι ο συντελεστής ιονισμού για τον χαλκό είναι 0,025 [3], προκύπτει:

$$\alpha d = 3,71 \quad (1.3.6.1.2-2)$$

Επομένως για $d > 3,7$ mm δεν συμβαίνει ιονισμός (γιατί είναι $\alpha < 1$). Επομένως, η ελάχιστη απόσταση μόνωσης είναι $d_{min}=3,71$ mm, που σημαίνει ότι η απόσταση π.χ. των 2 cm μεταξύ των ακροδεκτών στις πρίζες των κτιριακών εγκαταστάσεων είναι ικανοποιητική, πολύ δε περισσότερο η απόσταση των 30 cm μεταξύ των σωστά τανυσμένων γυμνών αγωγών σε γραμμές διανομής χαμηλής τάσης.

1.3.6.2 Αποστάσεις προστασίας γυμνών αγωγών διανομής μέσης τάσης από κτίρια και από επικλινή εδάφη και γυμνών αγωγών διανομής (μέσης και χαμηλής τάσης) από δέντρα

1.3.6.2.1 Ελάχιστες αποστάσεις προστασίας από κτίρια και επικλινή εδάφη

Οι αποστάσεις προστασίας γυμνών αγωγών μέσης τάσης από κτίρια και από επικλινή εδάφη δίνονται στο Εγχειρίδιο Τυποποιημένων Κατασκευών Διανομής [58]. Όπως προκύπτει από τους υπολογισμούς της παραγράφου 1.3.6.1.1, οι αποστάσεις προστασίας, που εφαρμόζονται στην Ελλάδα [58], είναι πολύ μεγαλύτερες από την ελάχιστη απόσταση μόνωσης. Επισημαίνεται όμως ότι, αν και οι αποστάσεις προστασίας είναι πολύ ικανοποιητικές ως προς τη διηλεκτρική αντοχή, απαιτείται οπωσδήποτε μεγάλη προσοχή, ώστε να μην προσεγγίζονται οι γραμμές μέσω αγωγίμων αντικειμένων (όπως μεταλλικοί σωλήνες, μεταλλικές ράβδοι, κοντάρια αλουμινίου ελαιοχρωματιστών, κλπ.). Επίσης, κίνδυνος προσέγγισης των αγωγών μπορεί να συμβεί από βαριά οχήματα (μπετονιέρες, πρέσες, κλπ.), ο οποίος αυξάνει όταν μειώνονται με επιχρωματώσεις οι αποστάσεις των γραμμών από το έδαφος. Επισημαίνεται ότι τα συνεργεία των εταιρειών ηλεκτρισμού δεν είναι δυνατό να εντοπίσουν (στα πλαίσια της ετήσιας επιθεώρησης που γίνεται σύμφωνα με σχετικές οδηγίες [56]) τις επικίνδυνες θέσεις στο δίκτυο, γι' αυτό προς αποφυγή ατυχημάτων σε περιπτώσεις έργων που γίνονται στο περιβάλλον των γραμμών ηλεκτρικής ενέργειας, πρέπει να ειδοποιείται άμεσα η εταιρεία ηλεκτρισμού από τις εμπλεκόμενες κρατικές αρχές, τους επιβλέποντες, τους τεχνικούς ασφαλείας και τους ιδιοκτήτες των έργων.

1.3.6.2.2 Ελάχιστη απόσταση ασφάλειας γραμμών διανομής μέσης τάσης από το δώμα κτιρίων

Σύμφωνα με το άρθρο 234,Γ,4,α1, πίνακας 4 του Κανονισμού για την Εγκατάσταση και Συντήρηση Υπαίθριων Γραμμών Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΚΕΣΥΓΗΕ) [55], η ελάχιστη απόσταση ασφάλειας από το δώμα κτιρίων για άνοιγμα γραμμής (δηλαδή απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών στύλων) L_1 μέχρι 45 m, πρέπει να είναι:

$$H_{min} = 2,5 \text{ m} \quad (1.3.5.2-1)$$

Σε περίπτωση ανοιγμάτων $L_2 > 45 \text{ m}$, σύμφωνα με το άρθρο 234,Γ,4,2 του εν λόγω Κανονισμού, πρέπει να γίνεται προσαύξηση της ελάχιστης απόστασης ασφάλειας κατά 1 εκατοστό του μέτρου για κάθε μέτρο άνω των 45 m. Ισχύει δηλαδή (για L_2 σε m) η σχέση:

$$H_{min} = 2,5 + (L_2 - 45) / 100 \text{ m} \quad (1.3.5.2-2)$$

Οι ανωτέρω τιμές H_{min} κρίνεται σκόπιμο να αφορούν στη δυσμενέστερη περίπτωση βέλους κάμψης, που παρουσιάζεται σε περίπτωση υψηλού καύσωνα ($40 \text{ }^\circ\text{C}$) ή έστω σε θερμοκρασία $35 \text{ }^\circ\text{C}$ και όχι να αφορούν θερμοκρασία περιβάλλοντος $16 \text{ }^\circ\text{C}$.

Επισημαίνεται ότι ο ανωτέρω υπολογισμός μπορεί να έχει εφαρμογή και για την απόσταση των αγωγών από την οριζόντια επιφάνεια τοιχίων περιμετρικά του δώματος, υπό την προϋπόθεση όμως ότι τα τοιχία αυτά είναι βατά (ότι δηλαδή μπορεί να βαδίζει επί αυτών ακινδύνως ο άνθρωπος, όπως στο δώμα).

1.3.6.2.3 Αποστάσεις δέντρων (κατά το ετήσιο κλάδεμά τους) από γυμνούς αγωγούς διανομής

Όπως έχει ήδη αναφερθεί στην παρ. 1.3.4.2 οι γυμνοί αγωγοί του δικτύου διανομής χαμηλής τάσης δεν πρέπει να έρχονται σε επαφή με φυλλώματα και κλαδιά δέντρων γιατί, ενώ δεν συντρέχουν λόγοι διαρροής ρεύματος, υπάρχει κίνδυνος να κοπούν, επειδή το αλουμίνιο είναι μαλακό μέταλλο και ως εκ τούτου έχει μικρή μηχανική τάση αποκοπής. Στους αγωγούς όμως διανομής μέσης τάσης, οι οποίοι ως γνωστό περιλαμβάνουν κατά μήκος του άξονά τους συνεστραμμένους κλώνους

χάλυβα (που στην πράξη αποκαλούνται χαλύβδινη ψυχή και περιβάλλονται από συνεστραμμένους κλώνους αλουμινίου), ενώ δεν γεννάται θέμα αποκοπής του αγωγού από κλαδιά δέντρων (γιατί οι χαλύβδινοι κλώνοι έχουν μεγάλη μηχανική τάση αποκοπής [59]), υπάρχει πρόβλημα διηλεκτρικής αντοχής, δεδομένου ότι τα φυλλώματα και τα κλαδιά των δέντρων δεν διαθέτουν την απαιτούμενη διηλεκτρική αντοχή υπό μέση τάση. Έτσι, σε μία απόσταση μικρότερη περίπου από $5,66 / \sqrt{3}$ cm (λόγω της τάσης των $20 / \sqrt{3}$ kV προς γη) συντρέχουν λόγοι εκδήλωσης σπινθηρισμών από τους αγωγούς προς τα πλησιέστερα προς αυτούς φυλλώματα του δέντρου. Επακόλουθο των σπινθηρισμών αυτών είναι συνήθως το καψάλισμα των φύλλων από την αύξηση της θερμοκρασίας που προκαλείται επί αυτών, που μπορεί να οδηγήσει σε διακοπή ρεύματος λόγω σφάλματος προς γη.

Οι ελάχιστες αποστάσεις κλαδέματος των δέντρων, που πρέπει να γίνεται ετησίως, δίνονται στο Εγχειρίδιο Τυποποιημένων Κατασκευών Διανομής [58].

1.3.6.3 Οι στεμματοειδείς εκκενώσεις (φαινόμενο Corona)

Η εμφάνιση ιονισμού σε ομογενή πεδία οδηγεί σε διάσπαση του διακένου. Ωστόσο σε ανομοιογενή πεδία, φωτεινές και ακουστικές εκκενώσεις προηγούνται της ολικής διάσπασης. Οι εκκενώσεις αυτές, που μπορεί να είναι μεταβατικές ή μόνιμες, είναι γνωστές στη βιβλιογραφία ως φαινόμενο Corona (ή στεμματοειδείς εκκενώσεις), γιατί εμφανίζονται περίξ των αγωγών. Το φαινόμενο αυτό προκαλεί σημαντικές απώλειες ενέργειας σε γραμμές μεταφοράς.

Η απαιτούμενη πεδιακή ένταση E για την εμφάνιση στεμματοειδών εκκενώσεων σε γυμνούς αγωγούς δίνεται προσεγγιστικά από την σχέση του Peek [3]:

$$E = m_1 m_2 E_o \delta (1 + K/\sqrt{r\delta}) \quad (1.3.6.3-1)$$

όπου m_1 ένας συντελεστής ανάλογος της κατάστασης των αγωγών (τραχύτητα της επιφάνειας), η τιμή του οποίου είναι $0,98 \div 0,93$, m_2 ένας συντελεστής ανάλογος της επικρατούσας σχετικής υγρασίας ($m_2 = 1$ για ξηρασία, $m_2 = 0,8$ για υγρασία), E_o μια σταθερά (ίση προς 30 kV/cm [1]), r η ακτίνα του αγωγού σε cm, K μια σταθερά ίση προς 0,3 και δ η σχετική πυκνότητα αέρα η οποία δίνεται από τη σχέση:

$$\delta = \frac{p}{p_o} \frac{T_o}{T} \quad (1.3.6.3-2)$$

όπου p_o η ατμοσφαιρική πίεση στις κανονικές συνθήκες, T_o η θερμοκρασία σε Κ στις κανονικές συνθήκες (ίση προς 293 Κ), p η πίεση του ατμοσφαιρικού αέρα στην υπό εξέταση περιοχή και T η θερμοκρασία σε Κ στην υπό εξέταση περιοχή.

1.3.6.3.1 Η εκδήλωση σπινθηρισμών σε γυμνούς αγωγούς του δικτύου διανομής

Για την εκδήλωση σπινθηρισμών μεταξύ των αγωγών του δικτύου διανομής μέσης τάσης, πολύ δε περισσότερο για τη διάσπαση μεταξύ αυτών, απαιτείται δραστική μείωση της μονωτικής ικανότητας (ή διηλεκτρικής αντοχής) του αέρα από αγωγίμους ρύπους, όπως αυτό συμβαίνει μέσω της καπναιθάλης. Πράγματι, η πεδιακή ένταση για την έναρξη μερικών εκκενώσεων στους αγωγούς μίας γραμμής 20 kV υπό ατμοσφαιρικό αέρα υπολογίζεται από την σχέση 1.3.6.3-1. Έτσι, για αγωγό π.χ. τύπου ACSR ισοδύναμης διατομής χαλκού 95 mm², με ακτίνα του αγωγού $r = 8,62$ mm, $m_1 = 0,83$, $m_2 = 1$ για ξηρασία, και $\delta \approx 0,91$ (ακριβής υπολογισμός του δ από τη σχέση 1.3.6.3-2), η τιμή του ηλεκτρικού πεδίου για την εκδήλωση σπινθηρισμών (μερικών εκκενώσεων) υπολογίζεται ότι είναι :

$$E = 25,15 \text{ kV / cm}$$

Η γεωμετρική σταθερά p του πεδίου μεταξύ δύο αγωγών με ακτίνα r (που απέχουν μεταξύ τους κατά d) υπολογίζεται από την σχέση [1]:

$$p = (r + d) / r \quad (1.3.6.3.1-1)$$

Για μία απόσταση μεταξύ των αγωγών π.χ. $d = 1$ m, είναι: $p > 19,6$ και επομένως ο συντελεστής χρησιμοποίησης του πεδίου η υπολογίζεται από την σχέση [1]:

$$\eta = [2 r \ln(2 + (d / r))] / d \quad (1.3.6.3.1-2)$$

οπότε με αριθμητική αντικατάσταση ο συντελεστής χρησιμοποίησης του πεδίου η είναι $\eta = 0,08$.

Επομένως, η πεδιακή ένταση E_I της διάταξης για τάση U , είναι:

$$E_I = U / (\eta d) \quad (1.3.6.3.1-3)$$

οπότε με αριθμητική αντικατάσταση, για $U = 20$ kV, προκύπτει: $E_I = 2,5$ kV/cm.

Η τιμή E_I είναι κατά πολύ μικρότερη από την τιμή της πεδιακής έντασης για την έναρξη μερικών εκκενώσεων και συνεπώς αποκλείεται η εκδήλωση σπινθηρισμών, πολύ δε περισσότερο αποκλείεται η διάσπαση μεταξύ των αγωγών. Για να συμβούν σπινθηρισμοί απαιτείται να συνυπάρχουν υγρασία και ρυπασμένο περιβάλλον, ώστε να μειωθεί δραστικά η διηλεκτρική αντοχή του αέρα, όπως αυτό συμβαίνει π.χ. από την καπναιθάλη. Πράγματι, η ειδική αγωγιμότητα του άνθρακα είναι $\rho_{av} = 0,083$ έως $33,3$ $\mu\Omega\text{m}$ και του ατμοσφαιρικού αέρα είναι $\rho > 1000$ $\text{T}\Omega\text{m}$. Γι' αυτό, η καπναιθάλη στην περίπτωση των αγωγών μέσης και υψηλής τάσης, δημιουργεί (λόγω μείωσης της διηλεκτρικής αντοχής του αέρα) αγωγίμες διαδρομές εντός αυτού, προκαλώντας έτσι την εκδήλωση σπινθηρισμών ή ακόμα και τη διάσπαση. Ως εκ τούτου, οι σπινθηρισμοί, που είναι ένα σύνηθες ηλεκτρικό φαινόμενο στις γραμμές υψηλής τάσης (υπό μορφή κυρίως θορύβου), εκδηλώνονται σε γραμμές μέσης τάσης κυρίως με την παρουσία καπναιθάλης ή με τη συνύπαρξη υγρασίας και ρυπασμένου περιβάλλοντος.

Τέλος, όπως έχει προαναφερθεί στην παράγραφο 1.3.6.1.2, στους γυμνούς αγωγούς διανομής χαμηλής τάσης δεν εκδηλώνονται φαινόμενα ιονισμού και συνεπώς δεν υπάρχουν σπινθηρισμοί, οι οποίοι όμως μπορεί να εμφανιστούν υπό συνθήκες πολύ έντονης καπναιθάλης.

1.3.6.4 Το μήκος ερπυσμού κεραμικών και γυάλινων μονωτήρων

Στον πίνακα 1.3.6.4-1, που προέρχεται από το πρότυπο IEC 60815 [60], δίνεται το μήκος ερπυσμού κεραμικών και γυάλινων μονωτήρων. Για τους μονωτήρες αυτούς ενδιαφέρει στην πράξη η εκδήλωση ρευμάτων διαρροής και η μείωση της τάσης επιφανειακής διάσπασης τόσο λόγω υγρασίας όσο προ πάντων λόγω ξένων επικαθίσεων (ρύπανση) σε συνδυασμό με την υγρασία. Το ρεύμα διαρροής λόγω

ξένων επικαθίσεων είναι συνήθως $10 \div 100$ mA. Για την ενεργό τιμή της τάσης επιφανειακής διάσπασης λόγω ξένων επικαθίσεων και υγρασίας ($U_{d,\varepsilon,v}$) και την ενεργό τιμή της τάσης επιφανειακής διάσπασης χωρίς υγρασία (U_d) ισχύει για τους εν λόγω μονωτήρες περίπου [1]:

$$U_{d,\varepsilon,v} \approx (0,20 \div 0,30) U_d \quad (1.3.6.4-1)$$

Από την ανωτέρω σχέση και από τεχνικά χαρακτηριστικά προαναφερθέντων μονωτήρων του δικτύου διανομής 20 kV στην Ελλάδα, προκύπτουν τιμές της τάσης (βλέπε πίνακα 1.3.6.4-2), που αν δεν οδηγήσουν σε επιφανειακή διάσπαση, θα προκαλέσουν εκδήλωση σπινθηρισμών (μερικών εκκενώσεων), όπως εξ άλλου διαπιστώνεται στην πράξη. Όπως προκύπτει από τον πίνακα 1.3.6.4-2, η υγρασία επί των μονωτήρων αυτών προκαλεί μείωση της τάσης για την επιφανειακή διάσπαση στην τιμή $U_{d,v}$ για την οποία ισχύει περίπου [1]:

$$U_{d,v} \approx 0,63 U_d \quad (1.3.6.4-2)$$

Επίσης, στον πίνακα 1.3.6.4-2 δίνεται και το μήκος ερπυσμού των εν λόγω μονωτήρων, ανάλογα με το οποίο καθορίζεται το περιβάλλον για το οποίο είναι κατάλληλοι.

a/a	Επίπεδο Ρύπανσης	Τυπικό παράδειγμα περιβάλλοντος	L_{min} [cm] $U_N=20kV$	L_{min} [cm] $U_N=15kV$
I	Μικρό (0,006 mg/cm ²)	1. Περιοχές χωρίς βιομηχανίες και με μικρή πυκνότητα σπιτιών με κεντρική θέρμανση. 2. Περιοχές με χαμηλή πυκνότητα εργοστασίων ή σπιτιών υπό συνήθεις ανέμους και/ή βροχές. 3. Αγροτικές περιοχές (η χρήση λιπασμάτων μπορεί να οδηγήσει σε υψηλότερο επίπεδο ρύπανσης). <u>Σημείωση:</u> Οι προαναφερθείσες περιοχές θα πρέπει να απέχουν τουλάχιστον 10 km έως 20 km από τη θάλασσα και να μην εκτίθενται σε ανέμους που έρχονται από τη θάλασσα.	32	24
II	Μεσαίο (0,20 mg/cm ²)	1. Περιοχές με εργοστάσια που δεν παράγουν ρυπαντικό καπνό και/ή με μέση πυκνότητα σπιτιών εξοπλισμένων με κεντρική θέρμανση. 2. Περιοχές με υψηλή πυκνότητα σπιτιών και/ή εργοστάσια, αλλά εκτεθειμένες σε συνήθεις ανέμους και/ή βροχοπτώσεις. 3. Περιοχές εκτεθειμένες σε ανέμους προερχόμενους από τη θάλασσα, αλλά όχι τόσο κοντά στην ακτή (το λιγότερο σε απόσταση αρκετών km).	40	30
III	Υψηλό (0,60 mg/cm ²)	1. Περιοχές με μεγάλη πυκνότητα εργοστασίων και προάστια μεγάλων πόλεων με μεγάλη πυκνότητα εγκαταστάσεων θέρμανσης που παράγουν καπνό. 2. Περιοχές κοντά στη θάλασσα ή σε κάθε περίπτωση εκτεθειμένες σε σχετικά ισχυρούς ανέμους προερχόμενους από τη θάλασσα.	50	37,5
IV	Πολύ Υψηλό (>0,60 mg/cm ²)	1. Περιοχές γενικά μέτριας έκτασης εκτεθειμένες σε αγωγίμες σκόνες και σε βιομηχανικό καπνό ο οποίος παράγει ειδικά λεπτές αγωγίμες επικαθίσεις. 2. Περιοχές γενικά μέτριας έκτασης πολύ κοντά στην ακτή ή εκτεθειμένες σε πολύ ισχυρό αέρα προερχόμενο από τη θάλασσα. 3. Περιοχές ερήμου, που χαρακτηρίζονται από την απουσία βροχής για μεγάλες χρονικές περιόδους, εκτεθειμένες σε ισχυρούς ανέμους που μεταφέρουν άμμο και αλάτι.	62	46,6

Πίνακας 1.3.6.4-1: Ελάχιστο μήκος ερπυσμού (L_{min}) κεραμικών και γυάλινων μονωτήρων σύμφωνα με το πρότυπο IEC 60815 [1, 60]

Τύπος μονωτήρα	Μήκος ερπυσμού [cm]	U_d [kV]	$U_{d,v}$ [kV]	$U_{d,\varepsilon,v}$ [kV]
20 kV κώδωνος	33,0	95	60	19,0 ÷ 28,5
20 kV κώδωνος	43,0	110	70	22,0 ÷ 33,0
20 kV κώδωνος	43,2	110	70	22,0 ÷ 33,0
20 kV κώδωνος για μολυσμένη ατμόσφαιρα	53,0	100	45	20,0 ÷ 30,0
20 kV κώδωνος για μολυσμένη ατμόσφαιρα	53,0	125	80	25,0 ÷ 37,5
20 kV κώδωνος για πολύ μολυσμένη ατμόσφαιρα	68,0	140	95	28,0 ÷ 42,0
20 kV κώδωνος ομίχλης	53,0	110	70	22,0 ÷ 33,0
20 kV κώδωνος ομίχλης	>53,0	110	70	22,0 ÷ 33,0

Πίνακας: 1.3.6.4-2: Τάση επιφανειακής διάσπασης ορισμένων τύπων μονωτήρων του δικτύου διανομής μέσης τάσης (20 kV) σε περίπτωση ξηρασίας, υγρασίας και υγρασίας σε συνδυασμό με ρύπανση [1]

U_d : Τάση επιφανειακής διάσπασης σε περίπτωση ξηρασίας

$U_{d,v}$: Τάση επιφανειακής διάσπασης σε περίπτωση υγρασίας

$U_{d,\varepsilon,v}$: Τάση επιφανειακής διάσπασης σε περίπτωση ξένων επικαθίσεων και υγρασίας

1.3.6.5 Μερικές εκκενώσεις (σπινθηρισμοί) επί κεραμικών και γυάλινων μονωτήρων και η μείωσή τους με συνθετικούς μονωτήρες

Ως σπινθηρισμούς επί των μονωτήρων εννοεί κανείς φωτεινές μερικές εκκενώσεις (δηλαδή εκκενώσεις περιορισμένης διαδρομής επί της επιφάνειας των μονωτήρων) συνοδευόμενες από θόρυβο.

Οι μερικές εκκενώσεις παρουσιάζονται αρχικά επί των μονωτήρων λόγω ξένων επικαθίσεων. Οι εκκενώσεις αυτές εξελίσσονται ενίοτε (λόγω πάρα πολύ μεγάλου ποσοστού ρύπων και υγρασίας) και σε έρπουσες διαρροές επί των μονωτήρων, που μπορεί να προκαλέσουν επιφανειακή διάσπαση ή υπερπήδηση, με αποτέλεσμα τη διακοπή της τάσης από το μέσο προστασίας της γραμμής (από τις ασφάλειες ή από τον αυτόματο διακόπτη προστασίας της γραμμής ανάλογα με την περίπτωση) [1].

Οι μερικές εκκενώσεις και η εξέλιξή τους σε έρπουσες εκκενώσεις επί των μονωτήρων οφείλονται κατά κανόνα σε ταυτόχρονη επίδραση υγρασίας της ατμόσφαιρας (που επικάθεται στην επιφάνεια των μονωτήρων υπό μορφή δρόσου) και ρύπανσης στην επιφάνεια των μονωτήρων (από καθαλατώσεις, σκόνη, καπναιθάλη, κλπ.). Είναι απαραίτητο να συνυπάρχουν και οι δύο αυτές συνθήκες για να δημιουργηθούν οι προϋποθέσεις έρπουσών ηλεκτρικών εκκενώσεων, επιφανειακής διάσπασης ή υπερπήδησης. Για τον λόγο αυτό, τέτοια φαινόμενα παρουσιάζονται ενίοτε κατά τους φθινοπωρινούς μήνες (Οκτώβριο και Νοέμβριο), όταν υπάρχει παρατεταμένη ανομβρία (πριν η πρώτη βροχή πλύνει τους μονωτήρες) και έντονη υγρασία κατά τις πρώτες μεταμεσονύκτιες και πρωινές ώρες της ημέρας, σε γραμμές υψηλής και μέσης τάσης (όπως προαναφέρθηκε) και σε περιοχές όπου υπάρχουν επικαθίσεις ρύπων στις επιφάνειες των μονωτήρων. Αυτό συμβαίνει σε γραμμές παραθαλάσσιες ή σε γραμμές που βρίσκονται πολύ κοντά σε ρυπογόνες βιομηχανίες, όπου στη μεν πρώτη περίπτωση είναι ενδεχόμενο να υπάρχουν καθαλατώσεις, στη δε δεύτερη έντονη βιομηχανική ρύπανση στους μονωτήρες [1]. Ας σημειωθεί ότι έχουν διαπιστωθεί σπινθηρισμοί καθώς και διακοπές ρεύματος σε δίκτυα μέχρι 500 kV, που προήλθαν από περιτώματα πουλιών στους μονωτήρες, διότι έχουν μεγάλη περιεκτικότητα σε αλάτι [1, 61].

Τα τελευταία χρόνια, ως αποτελεσματική λύση για την μείωση των ρευμάτων διαρροής, χρησιμοποιούνται συνθετικοί μονωτήρες. Οι συνθετικοί μονωτήρες παρουσιάζουν σημαντικά πλεονεκτήματα έναντι των κεραμικών, όπως το πολύ ελαφρύ βάρος, υδροφοβικές ιδιότητες, αντιρρυπαντική συμπεριφορά και χαμηλό κόστος [62, 63, 64]. Στα κύρια μειονεκτήματά τους συγκαταλέγονται η άγνωστη διάρκεια ζωής και η δυσκολία στην ανίχνευση των σφαλμάτων που παρουσιάζουν [65]. Πολλές ερευνητικές εργασίες έχουν ασχοληθεί με την γήρανση των συνθετικών μονωτήρων [65, 66, 67, 68, 69, 70]. Σημειώνεται ότι, όπου τοποθετούνται πλέον νέοι μονωτήρες στο ελληνικό δίκτυο μέσης τάσης προτιμώνται κυρίως οι συνθετικοί. Όμως η αντικατάσταση των ήδη υπάρχοντων κεραμικών μονωτήρων στο δίκτυο διανομής με συνθετικούς μονωτήρες δεν είναι στις περισσότερες φορές πρακτική και συμφέρουσα. Σ' αυτές τις περιπτώσεις και ιδιαίτερα σε περιβάλλοντα με μεγάλη ρύπανση (όπως πολύ κοντά στη θάλασσα, όπου η συντήρηση των κεραμικών μονωτήρων με πλύσιμο απαιτείται να γίνεται συχνά), ως πρακτική για τη βελτίωση της αντιρρυπαντικής συμπεριφοράς των εν λόγω μονωτήρων χρησιμοποιείται η σιλικονούχος επένδυσή τους με room temperature vulcanized (RTV) [71, 72, 73].

1.3.6.6 Σπινθηρισμοί σε λυόμενους ηλεκτρικούς σύνδεσμους λόγω μεγάλης μεταβολής της αντίστασης διάβασης

Όταν σε λυόμενο ηλεκτρικό σύνδεσμο αυξηθεί υπέρμετρα η αντίσταση διάβασης, μπορεί να δημιουργηθούν σπινθηρισμοί. Η μέτρηση της θερμοκρασίας με θερμοκάμερα (που γίνεται κατά τον κανονισμό σε ετήσια βάση) έχει δείξει στην πράξη ότι είναι επαρκής για τον εντοπισμό τέτοιων αντιστάσεων [1, 56]. Στους ηλεκτρικούς συνδέσμους του δικτύου είναι στην πράξη ουσιαστικά αδύνατη η εμφάνιση του φαινομένου αυτού, όχι μόνο λόγω της ετήσιας επιθεώρησης και των μετρήσεων με θερμοκάμερα, αλλά κυρίως γιατί η αύξηση της θερμοκρασίας, τόσο υπό το μέγιστο ρεύμα λειτουργίας όσο και υπό βραχυκύκλωμα, είναι ασήμαντη (βλέπε παρ.1.3.1, 1.3.2.2.1). Επίσης, η αντίσταση διάβασης των λυόμενων συνδέσμων είναι πάντοτε (λόγω της πλαστικής παραμόρφωσής τους εξ αιτίας της σύσφιγξής τους) πολύ μικρή. Πράγματι, για αντίσταση π.χ. διάβασης το πολύ $R = 1 \text{ m}\Omega$ σε κοχλιοσυνδετήρα υπαίθριου υποσταθμού μέσης τάσης 160 kVA και τιμή ρεύματος το πολύ $I = 4,63 \text{ A}$ (που είναι το ονομαστικό ρεύμα του εν λόγω

μετασχηματιστή) η θερμική ροή στην επιφάνεια διάβασης του κοχλιοσυνδετήρα (περίπου 1 cm^2) είναι της τάξεως:

$$I^2 R = 4,63^2 \cdot 1 = 21,44 \text{ mW/cm}^2 \quad (1.3.6.6-1)$$

Με την ανωτέρω θερμική ισχύ δεν μπορούν να προκληθούν σπινθηρισμοί, γιατί η τιμή της είναι περίπου 5 φορές μικρότερη από την μέγιστη δυνατή θερμική ροή του ήλιου σε επιφάνεια 1 cm^2 .

1.3.7 Μηχανική συμπεριφορά εναέριων γραμμών της ηλεκτρικής ενέργειας

Οι γραμμές της ηλεκτρικής ενέργειας ανταποκρίνονται γενικά σε καιρικές συνθήκες που έχουν εκδηλωθεί σε βάθος χρόνου στην εκάστοτε περιοχή του δικτύου. Γι' αυτό, σχεδόν όλες οι γραμμές του ελληνικού δικτύου διατηρούν τη θερμική και διηλεκτρική συμπεριφορά υπό θυελλώδεις ανέμους.

Ο υπολογισμός της μηχανικής αντοχής ενός αγωγού μεταξύ π.χ. δύο στύλων γίνεται με βάση την κατακόρυφη δύναμη (που είναι το βάρος του αγωγού και ο πάγος επί αυτού) και την οριζόντια δύναμη λόγω της ανεμοπίεσης στη μετωπική επιφάνεια του αγωγού, οπότε η συνολική επιφόρτιση $F_{ολ}$ του αγωγού είναι η συνισταμένη των ανωτέρω δυνάμεων και της δύναμης τάνυσης F_{τ} [1, 55, 59]. Παρά την προαναφερθείσα μέθοδο υπολογισμού, εξετάζεται ακολούθως η πλέον δυσμενής περίπτωση σε βάρος της γραμμής (που ενδείκνυται να εφαρμόζεται σε γνωμοδοτήσεις [1]), κατά την οποία υποτίθεται (τελείως θεωρητικά) ότι στροβιλίζεται ο αέρας, ώστε η διεύθυνση της ανεμοπίεσης να συμπίπτει κάποια στιγμή με τη διεύθυνση του βάρους), οπότε ισχύει για τη συνολική μέγιστη επιφόρτιση του αγωγού [1]:

$$F_{ολ} = G_{Al} + G_{\pi} + F_P + F_{\tau} \quad (1.3.7-1)$$

όπου: G_{Al} το βάρος του αγωγού, G_{π} το βάρος του πάγου, F_P η εξασκούμενη στη μετωπική επιφάνεια του αγωγού δύναμη λόγω της ανεμοπίεσης και F_{τ} η δύναμη τάνυσης.

Αν θεωρηθεί π.χ. ότι πρόκειται για αγωγό ACSR 35 mm², (σε ένα ισοϋψές άνοιγμα 70 m), μίας γραμμής 20 kV, που είναι ταυτισμένος με 252 kg (και ο οποίος έχει φορτίο θραύσης 2005 kg και διάμετρο $d_{Al}=10,32$ mm [1, 59]), χωρίς πάγο επί αυτού και ότι η ένταση του ανέμου είναι 10 μποφόρ, τότε ισχύουν τα ακόλουθα:

Το βάρος του αγωγού είναι:

$$G_{Al} = (\pi d_{Al}^2 / 4) l \gamma_{Al} \approx 15,8 \text{ kg} \quad (1.3.7-2)$$

όπου γ_{Al} το ειδικό βάρος του αλουμινίου ($2,7 \cdot 10^3$ kg/m³) και l το μήκος του αγωγού.

Η ανεμοπίεση υπό 10 μποφόρ είναι [1]:

$$P_m = 0,0625 v^2 = 0,0625 \cdot 28,4^2 = 50,41 \text{ kg/m}^2 \quad (1.3.7-3)$$

οπότε η εξασκούμενη δύναμη λόγω ανεμοπίεσης, σε κάθε αγωγό της γραμμής μεταξύ των δύο στύλων, θα είχε την τιμή:

$$F_P = P_m d l = 50,41 \cdot 0,01032 \cdot 70 \approx 36,42 \text{ kg} \quad (1.3.7-4)$$

Έτσι, η μέγιστη δυνατή επιφόρτιση κάθε αγωγού μεταξύ των δύο στύλων θα ήταν:

$$F_{ολ} = G_{Al} + F_P + F_t = 15,8 + 36,42 + 252 \approx 304,22 \text{ kg} \quad (1.3.7-5)$$

Επομένως, η εξασκούμενη στον αγωγό δύναμη των 304,22 kg είναι περίπου 2,6 φορές μικρότερη από το επιτρεπόμενο όριο επιφόρτισης [57, 74], το οποίο είναι 40 % του ορίου θραύσης. Συνεπώς, η εν λόγω γραμμή δεν έχει πρόβλημα μηχανικής αντοχής και ως εκ τούτου λόγω των πολύ μεγάλων αποστάσεων προστασίας (βλέπε πίνακα 1.3.6.1.1-1) δεν έχει ούτε πρόβλημα διηλεκτρικής αντοχής.

1.4 Αποκοπή αγωγών

1.4.1 Αποκοπή του ουδετέρου σε γραμμή διανομής χαμηλής τάσης

Σύμφωνα με το ΦΕΚ 470/β/5-3-2004 (που επικυρώνει το πρότυπο ΕΛΟΤ HD 384/2002) ο καταναλωτής πρέπει να προστατεύει την ηλεκτρική εγκατάστασή του με

δικά του μέσα. Στα απαιτούμενα μέσα περιλαμβάνονται οπωσδήποτε: τα σωστά μεγέθη ασφαλειών ανά γραμμή, ο διακόπτης διαφυγής έντασης, οι ισοδυναμικές συνδέσεις, η πολύ μικρή αντίσταση γείωσης, η αντικεραυνική προστασία, η προστασία από διακυμάνσεις της τάσης του δικτύου και η προστασία από την αποκοπή αγωγού του δικτύου [1, 27, 31]. Σε ότι αφορά την αποκοπή του ουδετέρου του δικτύου, διακρίνει κανείς δύο περιπτώσεις: την αποκοπή του ουδετέρου όταν αυτός γειώνεται προ του μετρητή και την αποκοπή του όταν γειώνεται στον μετασχηματιστή [1, 27, 31], όπου συνήθως στην πρώτη περίπτωση τα μεταλλικά μέρη των ηλεκτρικών συσκευών αποκτούν επικίνδυνη τάση για τον άνθρωπο (τάση άνω των 50 V), ενώ στη δεύτερη περίπτωση συνδέονται σε σειρά φορτία υπό φασική τάση με επικίνδυνες συνέπειες λόγω υπερθερμάνσεων (που έχουν συνήθως ως επακόλουθο την καταστροφή ηλεκτρικών συσκευών ή ακόμη και την πυρκαγιά αυτών) [1].

1.4.2 Πιθανές συνέπειες για τον άνθρωπο και το περιβάλλον από την αποκοπή αγωγού του δικτύου διανομής χαμηλής τάσης και μέσα προστασίας στο δίκτυο και στην εγκατάσταση του καταναλωτή

Όπως συμπεραίνεται από τις παρ.1.3.1, 1.3.2, 1.3.6, 1.3.7, τόσο η θερμική συμπεριφορά των γραμμών ηλεκτρικής ενέργειας υπό το μέγιστο ρεύμα λειτουργίας και υπό βραχυκύκλωμα, όσο και η μεγάλη διηλεκτρική και μηχανική συμπεριφορά τους, αποκλείουν την αποκοπή αγωγού από αίτιο προερχόμενο από το δίκτυο. Γι' αυτό, η αποκοπή αγωγού του δικτύου οφείλεται σε βίαιη καταπόνηση των αγωγών από εξωτερικό αίτιο, όπως συμβαίνει συνήθως από τη θερμότητα του περιβάλλοντος σε περιπτώσεις πυρκαγιών ή από αποκοπή κλώνων αλουμινίου από σκάγια κυνηγητικών όπλων ή από κλαδιά δέντρων που εμπλέκονται στους αγωγούς.

Οι συνέπειες σε βάρος του ανθρώπου και του περιβάλλοντος μπορεί να είναι πολύ μεγάλες από την αποκοπή αγωγού. Ήδη, όπως προκύπτει από τα αναφερόμενα στην προηγούμενη παράγραφο, η αποκοπή του ουδετέρου στο δίκτυο μπορεί να προκαλέσει θανατηφόρο ηλεκτροπληξία σε άνθρωπο (που ήλθε σε αγωγήμη επαφή με το τμήμα του κομμένου αγωγού υπό τάση, επειδή π.χ. δεν συνέβη τήξη της

ασφάλειας στο ασφαλειοκιβώτιο του υποσταθμού, λόγω πτώσης του αγωγού σε βραχώδες έδαφος) ή και να γίνει η αιτία πυρκαγιάς. Επομένως, χρειάζεται να προβλέπονται διατάξεις στο δίκτυο, ώστε να αποκλείονται οι προαναφερθείσες δυσμενείς επιπτώσεις για τον άνθρωπο και το περιβάλλον, που μπορεί να παρουσιαστούν από την αποκοπή οποιουδήποτε αγωγού του δικτύου διανομής χαμηλής τάσης.

Ως παράδειγμα προστασίας (από την πλευρά του δικτύου) για τον άνθρωπο και το περιβάλλον από την αποκοπή γενικά αγωγού του δικτύου, αναφέρεται η ενεργοποίηση ενός συστήματος GSM εγκατεστημένου στον τελευταίο στύλο μίας γραμμής (ώστε να αντιλαμβάνεται πάντοτε τη διακοπή ρεύματος ανεξαρτήτως της θέσης αποκοπής), να τίθεται σε λειτουργία ένα άλλο σύστημα GSM στον αυτόματο διακόπτη του υποσταθμού, που θα τον θέτει εκτός λειτουργίας [1, 27, 75].

Η προστασία όμως έναντι αποκοπής του ουδετέρου του δικτύου (αλλά και έναντι αποκοπής αγωγού φάσεως) μπορεί να γίνει και με μέσα προστασίας στην εγκατάσταση του καταναλωτή, ώστε να μην υπάρξει πρόβλημα τόσο για τους ανθρώπους όσο και για την ίδια την ηλεκτρική εγκατάσταση. Για τον σκοπό αυτό, χρησιμοποιούνται επιτηρητές τάσης, που εγκαθίστανται στον πίνακα του καταναλωτή και διακόπτουν άμεσα την λειτουργία της εγκατάστασης, αφενός σε περίπτωση αποκοπής οποιουδήποτε αγωγού του δικτύου και αφετέρου σε περίπτωση διακυμάνσεων της τάσης πέραν της τυποποιημένης τιμής της $U \pm 10\%$ [1, 31].

2 Σκοπός της εργασίας

Από τα αναφερόμενα στο κεφάλαιο 1, μπορεί κανείς να υποθέσει, ότι, όταν ένα δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας είναι διεθνών προδιαγραφών και επιθεωρείται - συντηρείται όπως προβλέπεται στους διεθνείς κανονισμούς, τότε δεν μπορεί να αποτελέσει αιτία πυρκαγιάς, λόγω των πολύ καλών θερμικών, διηλεκτρικών και μηχανικών ιδιοτήτων του. Ειδικότερα, όταν ο εξοπλισμός του δικτύου έχει υποστεί επιτυχώς τις δοκιμές ποιοτικού ελέγχου (βλέπε παρ. 1.1) και όταν δεν συντρέχουν εξωγενείς παράγοντες σε βάρος των γραμμών, όπως π.χ.: α) η αποκοπή αγωγού (με όλες τις δυσμενείς συνέπειες που μπορεί να έχει αυτό (βλέπε παρ. 1.4) λόγω εκδήλωσης πυρκαγιάς στο περιβάλλον μίας γραμμής (βλέπε παρ. 1.3.3, 1.3.3.1 και 1.3.3.2) ή λόγω καιρικών φαινομένων, που δεν έχουν ληφθεί υπόψη στη μελέτη (γιατί δεν είχαν εκδηλωθεί στην περιοχή της γραμμής σε βάθος χρόνου – βλέπε παρ. 1.3.7) ή εξ αιτίας πτώσης δέντρου σε γραμμή ή από σκάγια κυνηγητικών όπλων [1, 75], κλπ. και β) η μείωση της μονωτικής ικανότητας του αέρα στο περιβάλλον των γραμμών από την καπναιθάλη (σε περίπτωση πυρκαγιάς – βλέπε παρ. 1.3.6.3.1), που μπορεί να έχει ως επακόλουθο τη διακοπή ρεύματος ή τη μείωση της διηλεκτρικής αντοχής (ή και τη διάσπαση) σε μονωτήρες λόγω φαινομένων ιονισμού (βλέπε παρ. 1.3.6.4), κλπ., τότε:

- 1) Η αναπτυσσόμενη αύξηση θερμοκρασίας στους αγωγούς των γραμμών και στα εξαρτήματά τους υπό το μέγιστο δυνατό ρεύμα λειτουργίας (βλέπε παρ. 1.3.1 και παρ. 1.3.6.6) και υπό βραχυκύκλωμα (βλέπε παρ. 1.3.2.2) είναι άνευ σημασίας, γιατί διακόπτεται άμεσα (σε κλάσμα του δευτερολέπτου) η λειτουργία από το μέσο προστασίας (σε υποθετική αστοχία του οποίου επενεργεί επίσης σε κλάσμα του δευτερολέπτου το επόμενο μέσο προστασίας κλπ.) και επομένως δεν υπάρχει επαρκής διαθέσιμος χρόνος για να αυξηθεί η θερμοκρασία, με αποτέλεσμα να αποκλείεται παντελώς η δημιουργία τηγμάτων μετάλλου.
- 2) Η διηλεκτρική αντοχή μεταξύ των αγωγών του δικτύου είναι πολύ μεγάλη, δεδομένου ότι η απόσταση προστασίας μεταξύ των αγωγών είναι πολλαπλάσια της ελάχιστης απαιτούμενης απόστασης μόνωσης και ως εκ τούτου δεν μπορούν να εκδηλωθούν φαινόμενα ιονισμού (βλέπε παρ. 1.3.6.1). Αναφέρεται ως παράδειγμα ότι, υπό κανονικές συνθήκες: α) η απόσταση προστασίας μεταξύ των αγωγών μέσης τάσης είναι τουλάχιστον 15 φορές μεγαλύτερη από την ελάχιστη απαιτούμενη και β) η ελάχιστη απαιτούμενη απόσταση μόνωσης στον αέρα υπό

χαμηλή τάση (400 V/230 V) είναι περίπου 3,71 mm ενώ η απόσταση προστασίας μεταξύ των εναερίων γυμνών αγωγών χαμηλής τάσης είναι 30 cm (απόσταση προστασίας δηλαδή που είναι 80 φορές μεγαλύτερη συγκριτικά με την ελάχιστη απαιτούμενη απόσταση μόνωσης και 15 φορές μεγαλύτερη συγκριτικά με την απόσταση προστασίας των 2 cm στους ρευματοδότες των κτιριακών εγκαταστάσεων, οι οποίες, ως γνωστό, έχουν την ίδια τάση με το δίκτυο χαμηλής τάσης).

- 3) Η μηχανική αντοχή των γραμμών είναι πολύ μεγάλη, δεδομένου ότι, όπως προαναφέρθηκε (βλέπε παρ. 1.3.7) τα δίκτυα μελετώνται και κατασκευάζονται για να αντέχουν σε καιρικά φαινόμενα, που έχουν εκδηλωθεί και μετρηθεί (στην περιοχή εγκατάστασής τους) σε βάθος χρόνου, έτσι ώστε να διαθέτουν πάντοτε πολύ μεγάλη θερμική και διηλεκτρική ικανότητα.

Στο εισαγωγικό κεφάλαιο της εργασίας αυτής έχει ήδη γίνει μία προσπάθεια αξιολόγησης της θερμικής και διηλεκτρικής συμπεριφοράς των γραμμών της ηλεκτρικής ενέργειας (καθώς και της μηχανικής συμπεριφοράς αυτών) σε περιβάλλον πυρκαγιών, όπως ο υπολογισμός της αύξησης της θερμοκρασίας στους αγωγούς υπό το μέγιστο ρεύμα λειτουργίας και υπό βραχυκύκλωμα.

Ακολούθως στην εργασία αυτή γίνεται μία προσπάθεια φυσικής ερμηνείας της μείωσης της διηλεκτρικής αντοχής κεραμικών μονωτήρων σε περιβάλλον πυρκαγιάς καθώς και της βελτίωσης της διηλεκτρικής συμπεριφοράς στερεών ηλεκτρομονωτικών υλικών των πρακτικών εφαρμογών, μέσω υδρόφοβου σιλικονούχου επάλειψης τύπου Midsun 570. Επιπλέον, διερευνήθηκε πειραματικά η θερμοκρασία υποθετικών τηγμάτων αλουμινίου κατά την πρόσκρουσή τους στο έδαφος.

Για τον σκοπό αυτό έγιναν μετρήσεις στο εργαστήριο υψηλών τάσεων και ηλεκτρικών μετρήσεων του Ε.Μ.Πολυτεχνείου. Η εν λόγω έρευνα κρίθηκε αναγκαία, γιατί στο ελληνικό δίκτυο διανομής μέσης τάσης (που συχνά εμπλέκεται σε πυρκαγιές), υπάρχει ένας πολύ μεγάλος αριθμός μονωτήρων πορσελάνης, όπως: μονωτήρες ανάρτησης των γραμμών επί των στύλων, μονωτήρες μονοπολικών ασφαλειοαποζευκτών, κλπ. Επίσης, η πειραματική επιβεβαίωση της θεωρητικής ανάλυσης της θερμοκρασίας υποθετικών τηγμάτων αλουμινίου κατά την πρόσκρουσή τους στο έδαφος, κρίθηκε αναγκαία προκειμένου να διευκολύνει την απάντηση ερωτημάτων που εγείρονται σε πραγματογνωμοσύνες πυρκαγιών, αν δηλαδή μία γραμμή διανομής ηλεκτρικής ενέργειας ευθύνεται για την πρόκληση φωτιάς ή αν η

γραμμή υπήρξε θύμα πυρκαγιάς πλησίον αυτής. Σε συνέχεια των μετρήσεων δίνονται δύο τυπικά παραδείγματα θερμικής, διηλεκτρικής και μηχανικής συμπεριφοράς γραμμών διανομής μέσης τάσης ηλεκτρικής ενέργειας σε περιβάλλον πυρκαγιάς.

3 Οι μετρήσεις που έγιναν

3.1 Πειραματική διερεύνηση της εκδήλωσης των μερικών εκκενώσεων σε στερεά ηλεκτρομονωτικά των πρακτικών εφαρμογών (με ή χωρίς υδρόφοβο σιλικονούχο επάλειψη τύπου Midsun 570), υπό κρουστικές τάσεις της μορφής 1,2/50 μ s σε περιβάλλον ατμοσφαιρικού αέρα

3.1.1 Η διαδικασία των μετρήσεων των μερικών εκκενώσεων στα δοκίμια, υπό κρουστικές τάσεις της μορφής 1,2/50 μ s, σε περιβάλλον ατμοσφαιρικού αέρα

3.1.1.1 Η επιλογή των δοκιμίων

Ως δοκίμια χρησιμοποιήθηκαν τα οργανικά στερεά ηλεκτρομονωτικά πρεσπάν και πέρτιναξ σε περιβάλλον ατμοσφαιρικού αέρα με ή χωρίς υδρόφοβο σιλικονούχο επάλειψη (τύπου Midsun 570). Η επιλογή αυτή έγινε γιατί είναι ήδη γνωστή η εκδήλωση των μερικών εκκενώσεων στα εν λόγω υλικά χωρίς υδρόφοβο επάλειψη (τόσο εντός ηλεκτρομονωτικού ελαίου [1, 5, 8, 10, 35, 76, 77, 78] όσο και σε περιβάλλον ατμοσφαιρικού αέρα [79]).

Τα προαναφερθέντα δοκίμια από πρεσπάν ή πέρτιναξ (με ή χωρίς υδρόφοβο σιλικονούχο επάλειψη) ετοιμάστηκαν κατάλληλα σε τετραγωνική μορφή 150 mm x 150 mm. Συγκεκριμένα, τα πάχη των μη επενδεδυμένων δοκιμίων ήταν 1,0 mm και 1,5 mm για τα δοκίμια από πρεσπάν και 1,0 mm και 2,0 mm για τα δοκίμια από πέρτιναξ. Προκειμένου, για λόγους σύγκρισης τα επενδεδυμένα δοκίμια να έχουν ίδιο πάχος με τα μη επενδεδυμένα, χρησιμοποιήθηκαν:

- Δοκίμια από πρεσπάν πάχους 0,8 mm και 1,3 mm, τα οποία επενδύθηκαν με σιλικονούχο επάλειψη από τη μία επιφάνειά τους (150 mm x 150 mm), έτσι ώστε το ολικό τους πάχος να είναι ίσο με 1,0 mm και 1,5 mm αντίστοιχα.

- Δοκίμια από πέριναξ πάχους 0,8 mm και 1,8 mm, τα οποία επενδύθηκαν με σιλικονούχο επάλειψη από την μία επιφάνειά τους (150 mm x 150 mm), έτσι ώστε το ολικό τους πάχος να είναι ίσο με 1,0 mm και 2,0 mm αντίστοιχα.

Η συμμετοχή της υδρόφοβου επάλειψης στην εκδήλωση των επιφανειακών φαινομένων ιονισμού θα πρέπει να θεωρηθεί ως δεδομένη, γιατί από πειράματα είναι γνωστό [89], ότι στα φαινόμενα δημιουργίας ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων (κυρίως ηλεκτρονίων) στην επιφάνεια των στερεών ηλεκτρομονωτικών συμμετέχει και η ίδια η επιφάνεια σε βάθος μέχρι 30 Å, πολύ δε περισσότερο που η υδρόφοβος επάλειψη έχει πάχος πολύ μεγαλύτερο από 30 Å.

Επισημαίνεται ότι λόγω του μεγάλου αριθμού των απαιτούμενων δοκιμών για τη στατιστική ανάλυση [35, 76, 77, 78, 79] δεν κρίθηκε σκόπιμο να γίνουν μετρήσεις σε μονωτήρες πορσελάνης, στους οποίους εξ άλλου είναι γνωστή από την πράξη η δραστική μείωση των σπινθηρισμών (δηλαδή των μερικών εκκενώσεων) μέσω της υδρόφοβου επάλειψης, σε περιβάλλον όπου εκδηλώνονταν ισχυροί σπινθηρισμοί λόγω καθαλατώσεων. Επί αυτού αναφέρονται ακολούθως τυπικά παραδείγματα όπως:

1) Στη μικτή γραμμή των 150 kV, Καστράκι – Άκτιο – Λευκάδα – Κεφαλλονιά – Ζάκυνθος, επελέγησαν 35 από τους 500 πύργους στους οποίους αλλάχτηκαν οι αλυσίδες των μονωτήρων με έτοιμους βαμμένους με υδρόφοβο σιλικονούχο επάλειψη. Η επιλογή των θέσεων για την εν λόγω επάλειψη έγινε με βάση τη ρύπανση στο περιβάλλον της προαναφερθείσας γραμμής (καθαλατώσεις και βιομηχανική ρύπανση σε συνδυασμό με μεγάλη υγρασία), όπου μάλιστα υπήρξαν και διαμαρτυρίες πολιτών για θόρυβο και σπινθηρισμούς στους μονωτήρες. Το αποτέλεσμα ήταν άμεσο (εκμηδενίστηκαν οι διακοπές ρεύματος σ' αυτές τις περιοχές και σταμάτησαν οι οχλήσεις και οι ανησυχίες από τους πολίτες). Επισημαίνεται ότι μετά από 10 χρόνια λειτουργίας οι μονωτήρες λειτουργούν ήδη χωρίς να απαιτείται συντήρησή τους.

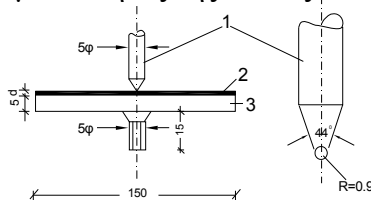
2) Παρόμοια αποτελέσματα παρατηρήθηκαν στην Κρήτη, με υδρόφοβο σιλικονούχο επάλειψη μονωτήρων σε υποσταθμούς υψηλής τάσης (150/20 kV), σε ένα μεγάλο μέρος του δικτύου που είναι παραθαλάσσιο όπου η συντήρηση των μονωτήρων ήταν πολύ συχνή.

3) Ανάλογα αποτελέσματα υπήρξαν σε γραμμή μέσης τάσης της περιοχής Ρεθύμνου Κρήτης, που γειτνιάζει με τη θάλασσα, όπου έγιναν επαλείψεις σε 150 μονωτήρες κώδωνος, σε 45 μονωτήρες ασφαλειοαποζευκτών και σε μονωτήρες 20 υποσταθμών διανομής 20/0,4 kV.

3.1.1.2 Η επιλογή της κρουστικής τάσης 1,2/50 μ s ως τάσης δοκιμής και η διάταξη των ηλεκτροδίων εφαρμογής της τάσης

Στο εργαστήριο υψηλών τάσεων και ηλεκτρικών μετρήσεων του Ε.Μ. Πολυτεχνείου έχει εφαρμοστεί η πειραματική έρευνα των μερικών εκκενώσεων σε στερεά μονωτικά εντός ηλεκτρομονωτικού ελαίου υπό κεραυνικές κρουστικές τάσεις (1,2/50 μ s) καθώς και υπό κρουστικές τάσεις μεγαλύτερης χρονικής διάρκειας [1, 5, 6, 7, 10, 77] και τούτο διότι η κρουστική τάση 1,2/50 μ s παρέχει πρακτικά τη δυνατότητα, λόγω της μικρής χρονικής διάρκειάς της, για τη διερεύνηση των μερικών εκκενώσεων στην έναρξή τους. Με την έννοια αυτή, όπως φαίνεται από την ανωτέρω βιβλιογραφία, η εφαρμογή ενός αριθμού κρουστικών τάσεων σε μικρή χρονική απόσταση μεταξύ τους, έχει δώσει σημαντικές πληροφορίες για τη διαχρονική εκδήλωση των μερικών εκκενώσεων. Η μέθοδος αυτή εφαρμόστηκε και στις μετρήσεις που έγιναν στα πλαίσια της εργασίας αυτής.

Η διάταξη των ηλεκτροδίων καθορίζει την επίδραση της μορφής του πεδίου στο φαινόμενο που εξετάζεται. Μία συχνά χρησιμοποιούμενη διάταξη μέτρησης των μερικών εκκενώσεων σε οργανικά στερεά ηλεκτρομονωτικά υλικά, είναι ένας πυκνωτής με ηλεκτρόδια ακίδα - πλάκα και μονωτικό το υπό εξέταση υλικό. Όσο μικρότερη είναι η ακτίνα καμπυλότητας της ακίδας τόσο αυξάνει η τιμή του πεδίου.



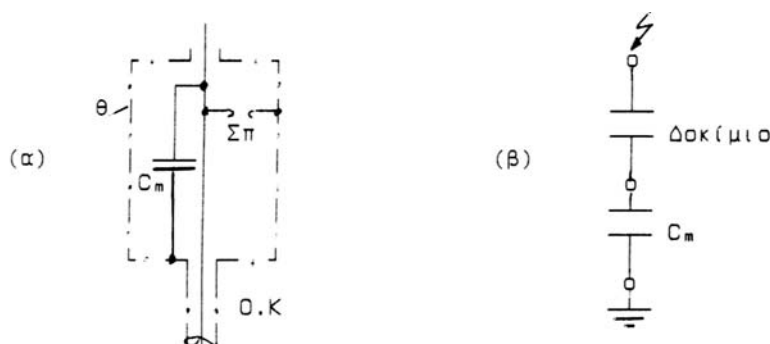
Σχήμα 3.1.1.2-1: Διάταξη ηλεκτροδίων και διαστάσεις

- 1: Ορειχάλκινη ακίδα
 - 2: Δοκίμιο 150X150
 - 3: Ορειχάλκινη πλάκα 150X150
- (Οι διαστάσεις σε mm)

Η παραπάνω διάταξη των ηλεκτροδίων ενδείκνυται για ερευνητικούς σκοπούς περισσότερο από κάθε άλλη, γιατί δίνει τη δυνατότητα έρευνας των μερικών εκκενώσεων στη δυσμενέστερη περίπτωση των πρακτικών εφαρμογών [1, 5, 6, 7, 10, 35, 76, 77, 78]. Για λόγους σύγκρισης των αποτελεσμάτων η ανωτέρω διάταξη χρησιμοποιήθηκε και στην έρευνα αυτή (βλέπε σχήμα 3.1.1.2-1).

3.1.1.3 Τα τετράπολα μέτρησης

Οι μετρήσεις σε ένα δοκίμιο, το οποίο καταπονείται με υψηλές τάσεις, γίνονται συνήθως με καταμερισμό της τάσης, κατά τον οποίο η διάταξη του δοκιμίου είναι ο πυκνωτής υψηλής τάσης. Οι μετρήσεις επομένως των μεταβολών της ηλεκτρικής κατάστασης στο δοκίμιο γίνονται με ένα τετράπολο μέτρησης σε σειρά με τη διάταξη του δοκιμίου (συνήθως χωρητικό, ή ωμικό, ή χωρητικό και ωμικό). Η τάση στο δοκίμιο μετράται σε παλμογράφο ή σε ηλεκτρονικό υπολογιστή μέσω κατάλληλου A/D μετατροπέα [1]. Το τετράπολο μέτρησης πρέπει να είναι απαλλαγμένο από την παρεμβολή παρασίτων. Στο σχήμα 3.1.1.3-1 δίνεται ένα παράδειγμα χωρητικού τετράπολου μέτρησης με θωράκιση καθώς και ο καταμεριστής τάσης μεταξύ αυτού και του δοκιμίου.



Σχήμα 3.1.1.3-1: Απλοποιημένη παράσταση ενός χωρητικού τετράπολου μέτρησης με θωράκιση [1]

C_m : Πυκνωτής μέτρησης

$\Sigma\pi$: Σπινθηριστής προστασίας του C_m

θ : Θωράκιση

Ο.Κ. : Ομοαξονικό καλώδιο

α) Τετράπολο μέτρησης

β) Παράδειγμα καταμεριστή τάσης μεταξύ της χωρητικότητας ενός δοκιμίου και του C_m

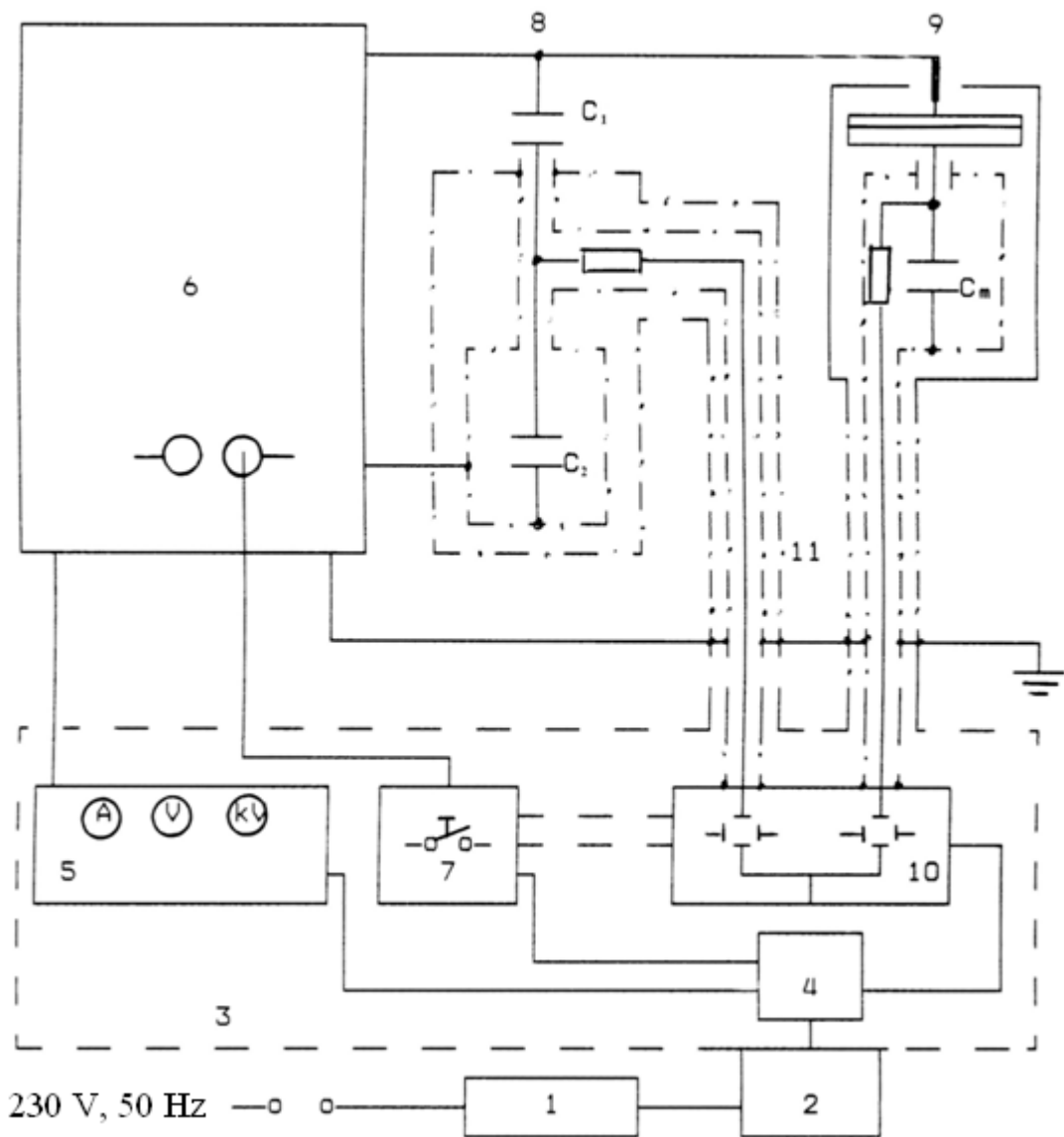
3.1.1.4 Το κύκλωμα των μετρήσεων και η διαδικασία των μετρήσεων

Το σημαντικότερο πρόβλημα που χρειάζεται να αντιμετωπιστεί κατά τη μέτρηση των μερικών εκκενώσεων είναι η παρεμβολή παρασίτων. Για το σκοπό αυτό, χρησιμοποιήθηκαν θωρακισμένα τετράπολα (βλέπε παρ. 3.1.1.3) και τα ομοαξονικά καλώδια θωρακίστηκαν επιπλέον. Επίσης, το κύκλωμα των μετρήσεων εγκαταστάθηκε με μεγάλη σχολαστικότητα, ώστε να αποκλείεται η δημιουργία κλειστών βρόγχων μέτρησης. Στο σχήμα 3.1.1.4-1 δίνεται ένα μπλοκ διάγραμμα πλήρους κυκλώματος μέτρησης των μερικών εκκενώσεων στο εργαστήριο υψηλών τάσεων και ηλεκτρικών μετρήσεων του Ε.Μ.Πολυτεχνείου (μέσω χωρητικού, ή ωμικού τετράπολου μέτρησης). Στο σχήμα 3.1.1.4-2 δίνεται απλοποιημένα το κύκλωμα της μονοβάθμιας γεννήτριας κρουστικών τάσεων 1,2/50 μs , τα στοιχεία της οποίας είναι λυόμενα.

Ένας χωρητικός καταμεριστής, $C_1=1,2$ nF, $C_2=478,8$ nF, χρησιμοποιήθηκε για να μειώσει την τιμή της εφαρμοζόμενης υψηλής τάσης με σκοπό να καταγραφεί από τον παλμογράφο. Το δοκίμιο συνδέθηκε σε σειρά με έναν πυκνωτή μέτρησης C_m ίσο με 20 nF. Μία αντίσταση R ίση με 75 Ω χρησιμοποιήθηκε για λόγους προσαρμογής στο ομοαξονικό καλώδιο προς τον παλμογράφο. Η κυματομορφή της τάσης u_m στα άκρα του C_m παρέχει πληροφορίες σχετικά με τις μερικές εκκενώσεις στο δοκίμιο [6, 7, 9]. Οι εμφανιζόμενες μερικές εκκενώσεις στις διαχωριστικές επιφάνειες στερεού - αέρα ανιχνεύονται μέσω διακριτών αλμάτων δυναμικού στα άκρα του C_m .

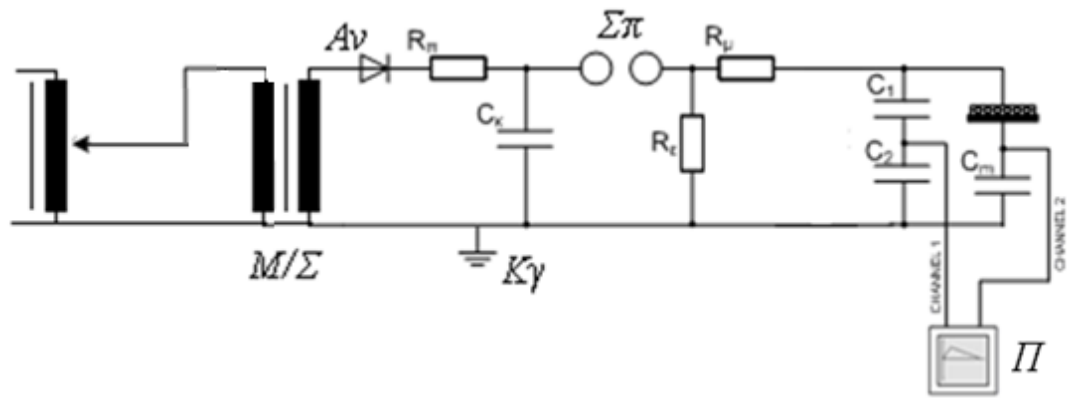
Αρχικά, έγιναν μετρήσεις προκειμένου να ευρεθεί η κατάλληλη ελάχιστη τιμή της εφαρμοζόμενης τάσης, με την οποία εμφανίζονταν άλματα δυναμικού [1, 5, 6, 7, 10, 76, 77, 78]. Η τάση αυτή ήταν περίπου 5 kV. Από αυτό το επίπεδο τάσης (5 kV), συνεχίστηκε η διαδικασία των μετρήσεων με τη σταδιακή αύξηση της εφαρμοζόμενης τάσης σε βήματα του 1 kV έως και το επίπεδο τάσεως των 16 kV.

Σε κάθε επίπεδο τάσης γινόταν αλλαγή δοκιμίου, στο οποίο εφαρμόζονταν 10 κρούσεις. Για κάθε είδος δοκιμίου πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις σε 20 δοκίμια ανά επίπεδο τάσης, συνολικά σε χίλια εννιακόσια είκοσι (1920) δοκίμια.



Σχήμα 3.1.1.4-1: Μπλοκ διάγραμμα ενός κυκλώματος για τη διερεύνηση των φαινομένων προ και κατά τη διάσπαση στερεών μονωτικών

- 1 : Σταθεροποιητής τάσης
- 2 : Φίλτρο ισχύος υψηλών συχνοτήτων
- 3 : Θωρακισμένος θάλαμος
- 4 : Μετασχηματιστής γαλβανικής απομόνωσης
- 5 : Ρύθμιση της τάσης
- 6 : Μετασχηματιστής υψηλής τάσης και γεννήτρια κρουστικών τάσεων
- 7 : Διάταξη συγχρονισμού
- 8 : Καταμεριστής για τη μέτρηση της υψηλής τάσης
- 9 : Ηλεκτρόδια, δοκίμιο και πυκνωτής μέτρησης C_m ή αντίσταση μέτρησης R_m
- 10: Παλμογράφος κρουστικών τάσεων
- 11: Ομοαξονικό καλώδιο μέτρησης και αντίσταση προσαρμογής



Σχήμα 3.1.1.4-2 : Μονοβάθμια γεννήτρια κρουστικών τάσεων 1,2/50μs

M/Σ : Μετασχηματιστής υψηλής τάσης

$K\gamma$: Κρουστική γη

$A\nu$: Ανορθωτής

$R\pi$: Αντίσταση προστασίας (2,5 MΩ)

$C\kappa$: Πυκνωτής κρούσης (100 nF)

$\Sigma\pi$: Σπινθηριστής σφαιρών

$R\mu$: Αντίσταση μετώπου (350 Ω)

$R\epsilon$: Αντίσταση ουράς (677 Ω)

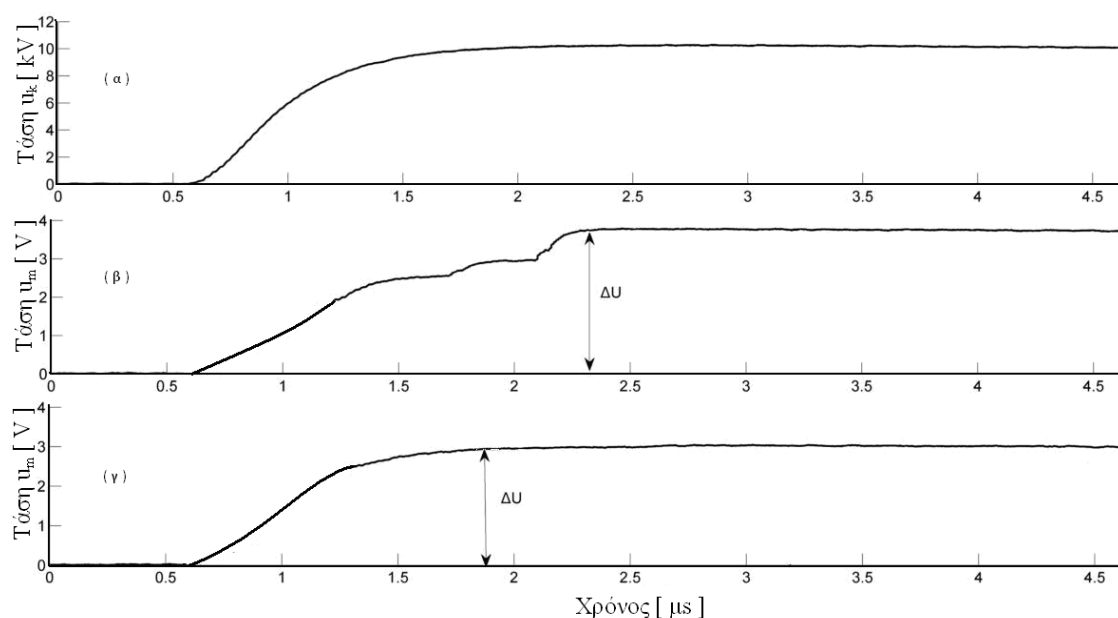
C_1, C_2 : Πυκνωτές καταμερισμού ($C_1=1,2$ nF, $C_2=478,8$ nF)

C_m : Πυκνωτής μέτρησης (20 nF)

Π : Παλμογράφος

3.1.1.5 Τα αποτελέσματα των μετρήσεων

Στο σχήμα 3.1.1.5-1 δίνονται τρία ενδεικτικά παλμογραφήματα των μετρήσεων: της κυματομορφής της εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης 1.2/50 μs (α), της κυματομορφής σε δοκίμιο πρεσπών πάχους 1 mm (β) και της κυματομορφής σε δοκίμιο πρεσπών με υδρόφοβο σιλικονούχο επάλειψη συνολικού πάχους 1 mm (γ). Στα παλμογραφήματα της κυματομορφής της τάσης στα δοκίμια έχει σχεδιαστεί το μέγιστο πλάτος της τάσης ΔU , το οποίο χρησιμοποιήθηκε στους υπολογισμούς για την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με τις μερικές εκκενώσεις.



Σχήμα 3.1.1.5-1: (α) $u_k(t)$ κρουστική τάση μέγιστης τιμής 10,4 kV
(β) $u_m(t)$ τάση στον πυκνωτή μέτρησης για δοκίμιο πρεσπών (πάχους 1 mm) υπό κρουστική τάση 1,2/50 μs
(γ) $u_m(t)$ τάση στον πυκνωτή μέτρησης για δοκίμια πρεσπών με υδρόφοβο σιλικονούχο επάλειψη (πάχους 1 mm) υπό κρουστική τάση 1,2/50 μs
 ΔU μέγιστο πλάτος τάσης στον πυκνωτή μέτρησης

Πράγματι, πληροφορίες για την εμφάνιση μερικών εκκενώσεων μπορεί να δοθούν από την αύξηση του φορτίου Δq , που παρήχθη από τον ιονισμό με κρούσεις και από την ενέργεια των ελευθέρων ηλεκτρικών φορέων (κυρίως ηλεκτρονίων), πάνω από την ενέργεια Fermi [7, 8, 16].

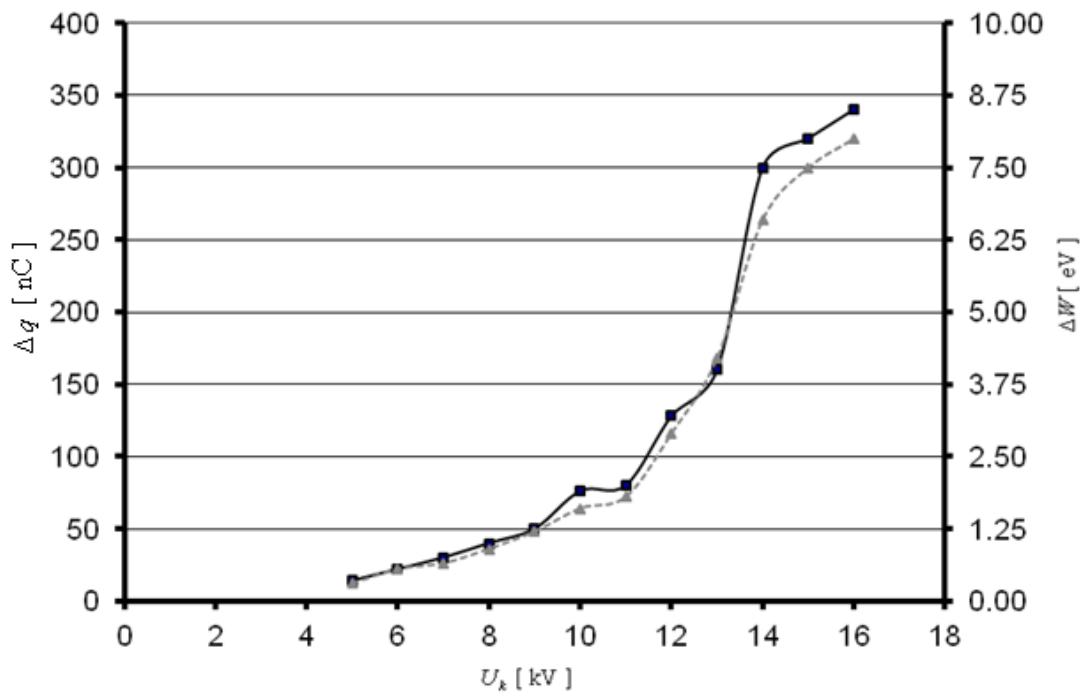
Η συνολική αύξηση του φορτίου μπορεί να βρεθεί από το συνολικό πλάτος των αλμάτων δυναμικού ΔU , με βάση τη σχέση 1.2.3.2-8:

$$\Delta q = C_m \Delta U \quad (3.1.1.5-1)$$

Ένας προσεγγιστικός υπολογισμός της ενέργειας των ηλεκτρικών φορέων γίνεται χρησιμοποιώντας τα παλμογραφήματα της τάσης στα άκρα του C_m . Θεωρώντας ότι η μεταβολή της ενέργειας στον πυκνωτή μέτρησης μετατρέπεται εντελώς σε κινητική ενέργεια στα ηλεκτρόνια αγωγιμότητας, συνεπάγεται ότι η μέση κινητική ενέργεια μπορεί να δοθεί ως η αύξηση της τάσης στα άκρα του C_m , μέσα από άλματα δυναμικού. Σύμφωνα με τα παραπάνω, και με βάση τη σχέση 1.2.3.2-3, η μέση ενέργεια των ελεύθερων ηλεκτρονίων δίνεται σε eV από τη σχέση:

$$\Delta W = 0,5 \Delta U \quad (3.1.1.4-2)$$

Παρακάτω παρατίθενται οι γραφικές παραστάσεις, που προέκυψαν από τα πειραματικά δεδομένα, για δοκίμια πρεσπάν και πέρτιναξ, με ή χωρίς σιλικονούχο υδρόφοβο επάλειψη, οι οποίες απεικονίζουν τη μέση αύξηση επί του συνόλου των δοκιμίων του φορτίου Δq και της ηλεκτρικής ενέργειας ΔW στον πυκνωτή μέτρησης σε συνάρτηση με την επιβαλλόμενη μέγιστη τιμή της τάσης (U_k). Τα σχήματα 3.1.1.5-2 και 3.1.1.5-3 αναφέρονται σε δοκίμια από πρεσπάν πάχους 1,0 mm και 1,5 mm αντίστοιχα. Τα σχήματα 3.1.1.5-4 και 3.1.1.5-5 αναφέρονται σε δοκίμια από πέρτιναξ πάχους 1,0 mm και 2,0 mm αντίστοιχα.



Σχήμα 3.1.1.5-2: $\Delta q = f(U_k)$ και $\Delta W = f(U_k)$ για δοκίμια πρεσπών, πάχους 1,0 mm

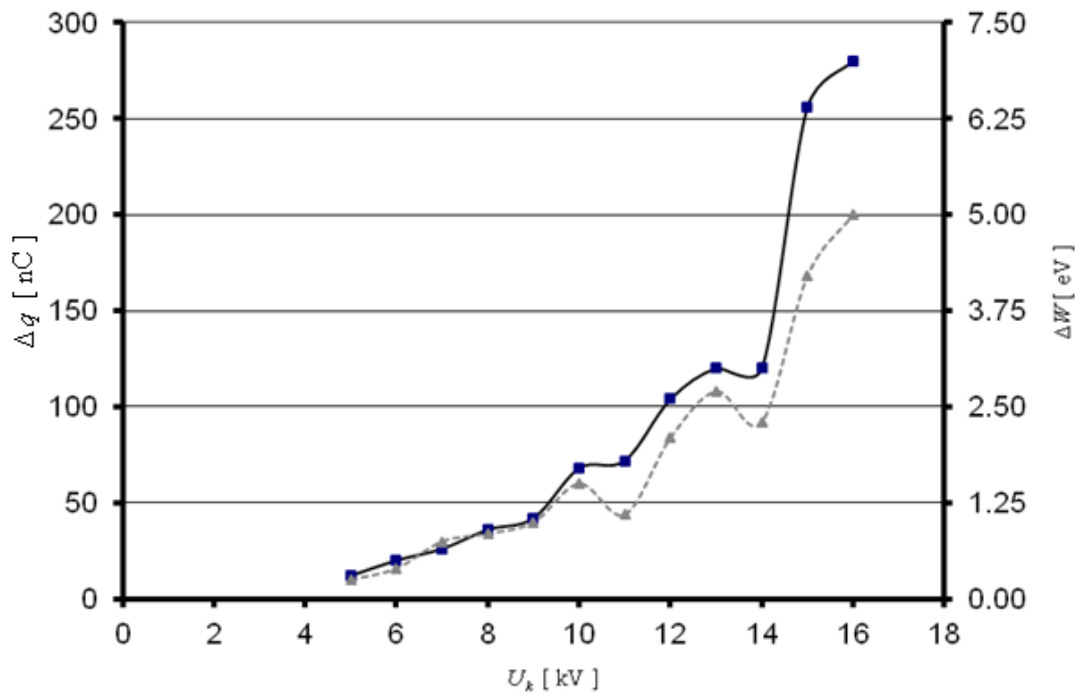
U_k : Μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης σε kV

Δq : Η αύξηση φορτίου στον πυκνωτή μέτρησης σε nC

ΔW : Η αύξηση της ηλεκτρικής ενέργειας σε eV

—■— Δοκίμια χωρίς σιλικονούχο επένδυση

- - -▲- - Δοκίμια με σιλικονούχο επένδυση



Σχήμα 3.1.1.5-3: $\Delta q = f(U_k)$ και $\Delta W = f(U_k)$ για δοκίμια πρεσπών, πάχους 1,5 mm

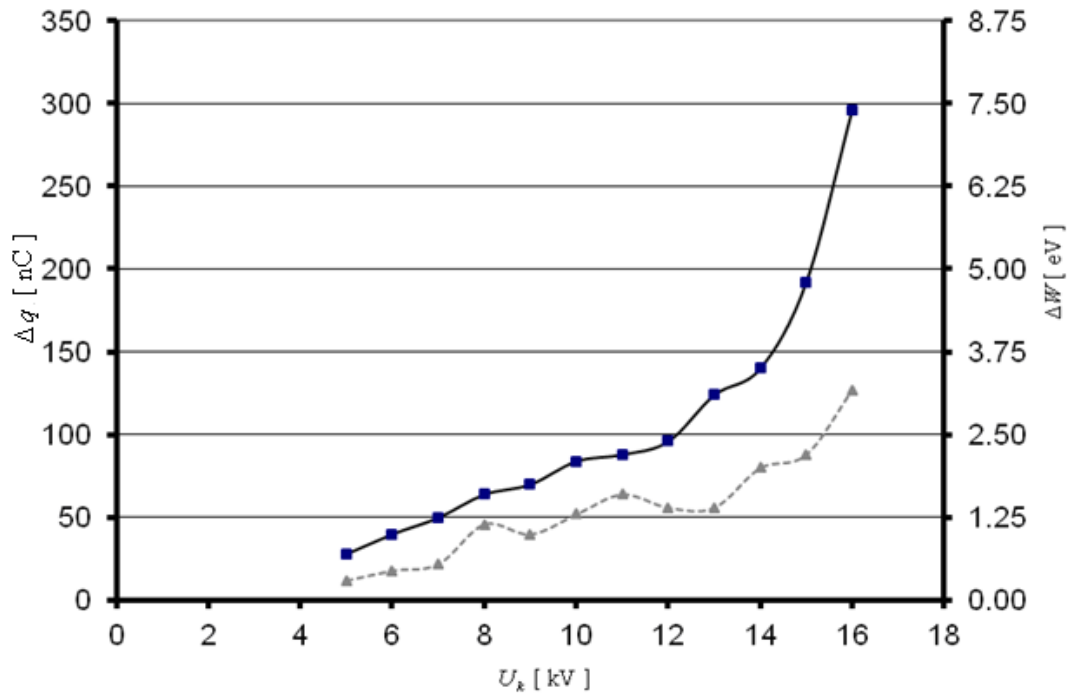
U_k : Μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης σε kV

Δq : Η αύξηση φορτίου στον πυκνωτή μέτρησης σε nC

ΔW : Η αύξηση της ηλεκτρικής ενέργειας σε eV

—■— Δοκίμια χωρίς σιλικονούχο επένδυση

- - -▲- - Δοκίμια με σιλικονούχο επένδυση



Σχήμα 3.1.1.5-4: $\Delta q = f(U_k)$ και $\Delta W = f(U_k)$ για δοκίμια πέριναξ, πάχους 1,0 mm

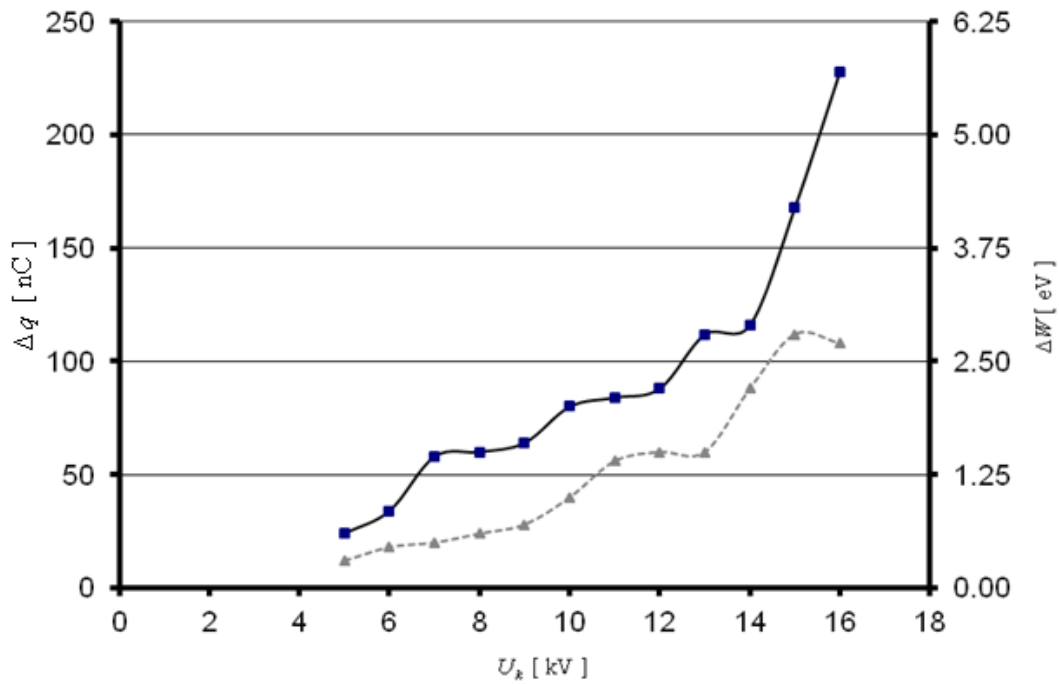
U_k : Μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης σε kV

Δq : Η αύξηση φορτίου στον πυκνωτή μέτρησης σε nC

ΔW : Η αύξηση της ηλεκτρικής ενέργειας σε eV

—■— Δοκίμια χωρίς σιλικονούχο επένδυση

- - -▲- - Δοκίμια με σιλικονούχο επένδυση



Σχήμα 3.1.1.5-5: $\Delta q = f(U_k)$ και $\Delta W = f(U_k)$ για δοκίμια πέριναξ, πάχους 2,0 mm

U_k : Μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης σε kV

Δq : Η αύξηση φορτίου στον πυκνωτή μέτρησης σε nC

ΔW : Η αύξηση της ηλεκτρικής ενέργειας σε eV

—■— Δοκίμια χωρίς σιλικονούχο επένδυση

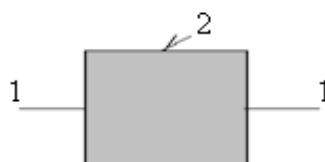
- - -▲- - Δοκίμια με σιλικονούχο επένδυση

3.2 Μέτρηση της αντίστασης μόνωσης δοκιμίων εκ μονωτήρων πορσελάνης (από εξοπλισμό του δικτύου διανομής μέσης τάσης) κατά τη θερμική καταπόνησή τους

3.2.1 Η διαδικασία των μετρήσεων της αντίστασης μόνωσης δοκιμίων εκ μονωτήρων πορσελάνης κατά τη θερμική καταπόνησή τους

Αντικείμενο των μετρήσεων είναι η διερεύνηση της επίδρασης της θερμικής καταπόνησης της πορσελάνης σε μονωτήρες ασφαλειοαποζευκτών και μονωτήρες ανάρτησης γραμμών του δικτύου των 20 kV. Η μέτρηση αφορά την αντίσταση της πορσελάνης τόσο σε θερμοκρασία εργαστηριακού περιβάλλοντος (θερμοκρασία περίπου 20 °C) όσο και την αντίστασή της μέχρι τους 250 °C (θερμοκρασία που ενδιαφέρει σε περίπτωση πυρκαγιάς στο περιβάλλον γραμμής διανομής μέσης τάσης). Για την πραγματοποίηση των μετρήσεων αυτών τεμαχίστηκαν μονωτήρες σε μικρά τεμάχια διαστάσεων 1 cm x 2 cm x 4 cm περίπου, ώστε να είναι η ίδια σχεδόν θερμοκρασία σε όλο τον όγκο τους εντός του θερμομονωμένου χώρου.

Στο σχήμα 3.2.1-1 δίνεται απλοποιημένα η πειραματική διάταξη. Σύμφωνα με το σχήμα αυτό οι ακροδέκτες του Megger εφαρμόζονται σε δύο άκρα (1) του δοκιμίου και η μέτρηση της θερμοκρασίας γινόταν μέσω θερμοστοιχείων (2) στο μέσο του δοκιμίου.



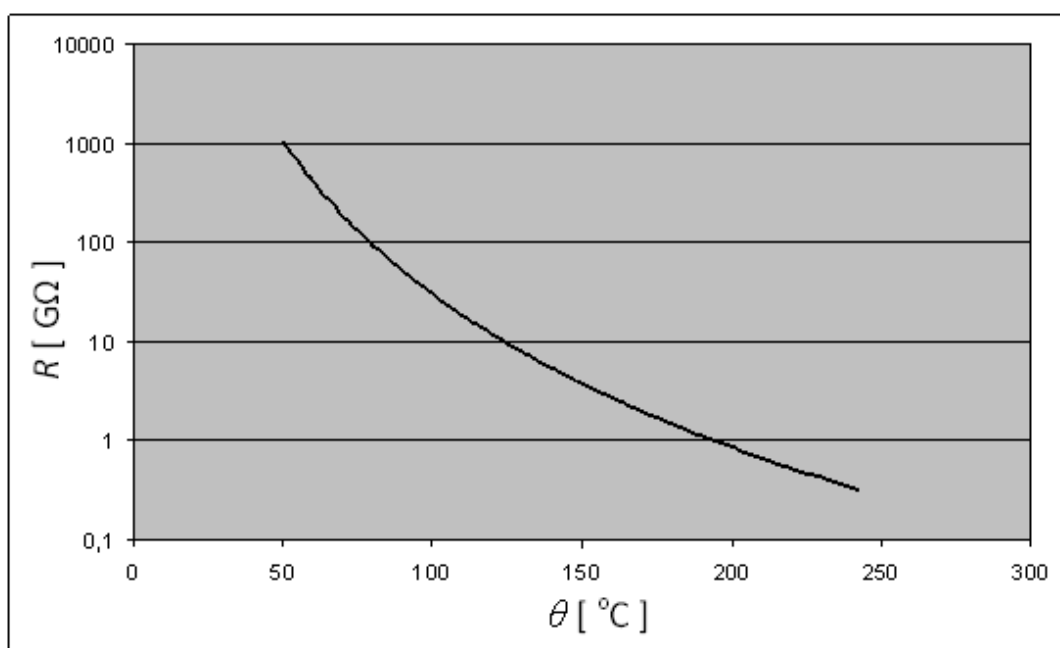
Σχήμα 3.2.1-1: Απλοποιημένο διάγραμμα της πειραματικής διάταξης μέτρησης της αντίστασης μόνωσης δοκιμίων από μονωτήρες πορσελάνης (Διαστάσεις δοκιμίου 1 cm x 2 cm x 4 cm)

1. Ηλεκτρόδια του Megger
2. Θερμοστοιχείο

Οι μετρήσεις των αντιστάσεων, πραγματοποιήθηκαν με Megger (του εργαστηρίου ηλεκτρικών μετρήσεων του Ε.Μ.Πολυτεχνείου και της ΔΕΗ ΑΕ). Μετρήθηκαν συνολικά 20 δοκίμια σε θερμοκρασίες 20 °C, 50 °C, 100 °C, 150 °C, 200 °C και 250 °C. Τα αποτελέσματα αφορούν τη μέση τιμή ανά επίπεδο θερμοκρασίας. Σημειώνεται ότι τα δοκίμια θερμαίνονταν μέσα σε φούρνο, μέχρι την κατά περίπτωση επιθυμητή θερμοκρασία μέτρησης και στη συνέχεια παρέμεναν στη θερμοκρασία αυτή του φούρνου για 20 min περίπου, προκειμένου τα δοκίμια να αποκτήσουν σε όλο τον όγκο τους τη θερμοκρασία αυτή, η μέτρηση της οποίας γίνονταν μέσω θερμοστοιχείου Fe-Konstantan με ψηφιακή ένδειξη.

3.2.2 Τα αποτελέσματα των μετρήσεων της θερμικής καταπόνησης των εκ πορσελάνης δοκιμίων

Ο μέσος όρος, επί 20 δοκιμίων, της αντίστασης μόνωσης των δοκιμίων πορσελάνης, ανάλογα με τη θερμοκρασία περιβάλλοντος, δίνεται στο σχήμα 3.2.2-1.



Σχήμα 3.2.2-1: Χαρακτηριστική $R = f(\theta)$ των δοκιμίων πορσελάνης

R : Αντίσταση μόνωσης

Σημείωση:

Οι τιμές της R είναι η μέση τιμή επί 20 δοκιμίων διαστάσεων μήκους 1 cm και διατομής 8 cm² περίπου

3.3 Πειραματική διερεύνηση της θερμοκρασίας υποθετικών τηγμάτων αλουμινίου (περίπου σφαιρικής μορφής διαμέτρου 1 mm) κατά την πρόσκρουσή τους στο έδαφος κατόπιν ελεύθερης πτώσης από ύψος 5μ. υπό πνέοντα άνεμο 2 μποφόρ

Τα πειράματα που ακολουθούν αφορούν μετρήσεις της θερμοκρασίας δοκιμίων αλουμινίου (περίπου σφαιρικής μορφής, διαμέτρου περίπου 1 mm) κατά την αφιξή τους στο έδαφος (τελική θερμοκρασία θ_2), κατόπιν ελεύθερης πτώσης τους από ύψος περίπου 5 m υπό θερμοκρασία μόλις προ της ελεύθερης πτώσης τους 629 °C (αρχική θερμοκρασία θ_1) και υπό πνέοντες ασθενείς ανέμους (2 μποφόρ).

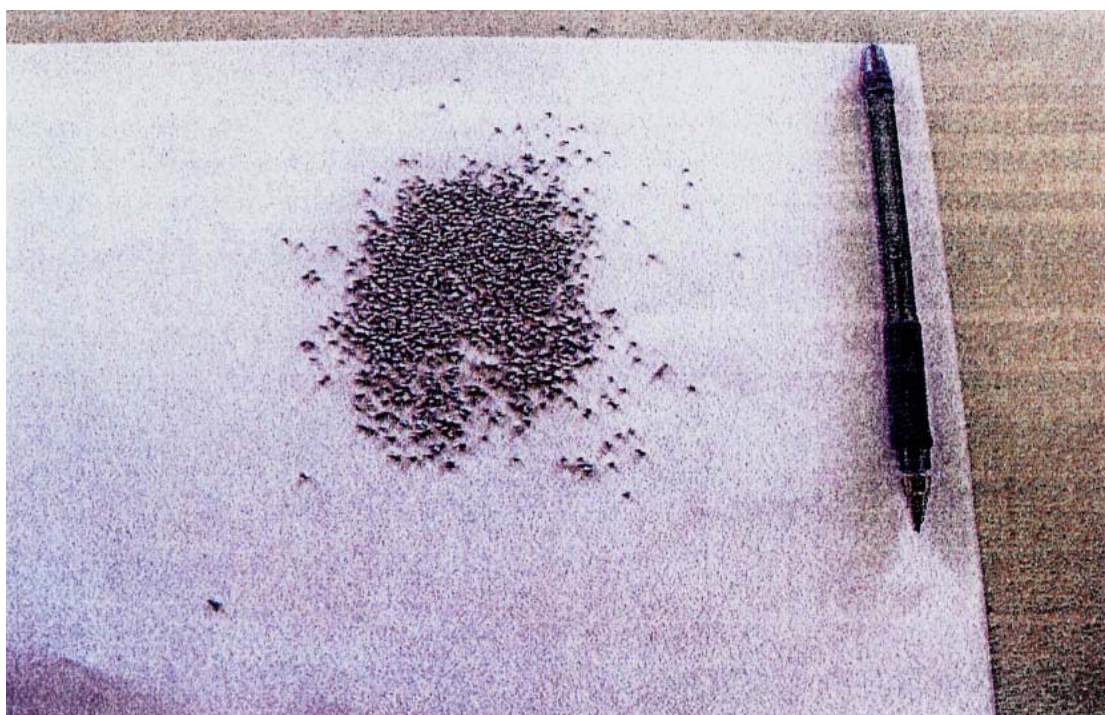
Πρόκειται για μία πειραματική διερεύνηση που δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα για την αποπυράκτωση τηγμάτων αλουμινίου των άνω διαστάσεων υπό τις προαναφερθείσες προϋποθέσεις ελεύθερης πτώσης.

Οι άνω επιλογές για το ύψος της ελεύθερης πτώσης των δοκιμίων και για την ένταση των ανέμων έγιναν γιατί ευνοείται η ανάπτυξη μεγαλύτερης τελικής θερμοκρασίας τους τόσο ως προς την ελεύθερη πτώση τους άνω των 5 m, όσο και συγκριτικά με πνέοντες ανέμους άνω των 2 μποφόρ. Συνεπώς, τα αποτελέσματα των μετρήσεων υπερκαλύπτουν την τελική θερμοκρασία τηγμάτων αλουμινίου τόσο κατά την ελεύθερη πτώση τους από ύψη άνω των 5 m, όσο και κατά την πτώση τους με πνέοντες ανέμους μεγαλύτερους από 2 μποφόρ, ή και τα δύο.

3.3.1 Διάταξη πειραματισμού και διαδικασία των μετρήσεων

3.3.1.1 Κατασκευή των δοκιμίων

Τα δοκίμια κατασκευάστηκαν στο εργαστήριο υψηλών τάσεων και ηλεκτρικών μετρήσεων του Ε.Μ.Πολυτεχνείου από γυμνούς αγωγούς χαμηλής τάσης εξ αλουμινίου. Η μορφή τους ήταν περίπου σφαιρική, διαμέτρου 1 mm (βλέπε φωτογραφία 3.3-1).



Φωτογραφία 3.3-1: Δοκίμια αλουμινίου διαμέτρου περίπου 1 mm

3.3.1.2 Αύξηση της θερμοκρασίας των δοκιμίων στην επιθυμητή τιμή

Η αύξηση της θερμοκρασίας των δοκιμίων στην επιθυμητή περίπου τιμή έγινε στη θέση όπου θα ακολουθούσε αμέσως η ελεύθερη πτώση τους από ύψος 5 m, ώστε να μη μεσολαβεί στην πράξη χρόνος αποθέρμανσης των σφαιριδίων προ της ελεύθερης πτώσης τους.

Η αύξηση της θερμοκρασίας των δοκιμίων ήταν μικρότερη των 660 °C, ώστε να αποφευχθεί η τήξη και ενοποίησή τους (κατά τη διαδικασία θέρμανσης) σε μία ενιαία μάζα. Έτσι, η θερμοκρασία των δοκιμίων, προ της ελεύθερης πτώσης τους, ήταν 629 °C.

3.3.1.3 Ύψος ελεύθερης πτώσης των δοκιμίων

Η ελεύθερη πτώση των δοκιμίων (η πτώση τους χωρίς την παραμικρή ώθηση, ως να επρόκειτο δηλαδή για σταγόνες μετάλλου από έναν υπέρθερμο αγωγό) έγινε από ύψος 5 m. Η επιλογή αυτή του ύψους προτιμήθηκε γιατί ευνοείται η αύξηση της θερμοκρασίας, αφού οι γυμνοί αγωγοί χαμηλής τάσης απέχουν από το έδαφος περισσότερο από 5 μέτρα και όσο μεγαλύτερο είναι το ύψος της ελεύθερης πτώσης τόσο περισσότερο ψύχονται τα υπό εξέταση δοκίμια (και συνεπώς και τα αντίστοιχα προς αυτά υποθετικά τήγματα) μέχρι την άφιξή τους στο έδαφος.

3.3.1.4 Πνέοντες άνεμοι κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων

Τα πειράματα έγιναν υπό ασθενείς ανέμους (της τάξεως των 2 μποφόρ), δηλαδή υπό ανέμους που ήταν αισθητοί στο πρόσωπο, χωρίς να κινούνται οι μικροί κλώνοι των δένδρων και των φυτών. Για τον σκοπό αυτό επελέγη τσιμεντόστρωτη επί του εδάφους εσοχή του κτιρίου της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του ΕΜΠ (σε συνέχεια εσωτερικού κήπου διαστάσεων 20 m x 20 m περίπου), ώστε να αποφευχθούν σημαντικές διακυμάνσεις της ισχύος των πνεόντων ανέμων (ριπές) κατά τον χρόνο διεξαγωγής των μετρήσεων.

Η επιλογή της διεξαγωγής των πειραμάτων υπό ασθενείς ανέμους έγινε γιατί ευνοείται η αύξηση της θερμοκρασίας των δοκιμίων έναντι ισχυρότερων ανέμων (όσο μικρότερη είναι η ένταση των ανέμων τόσο λιγότερο ψύχονται τα δοκίμια και συνεπώς αντίστοιχα και τα υποθετικά τήγματα από αγωγούς).

3.3.1.5 Άμεσος εντοπισμός δοκιμίων κατά την άφιξή τους στο έδαφος

Τα δοκίμια ήταν ορατά και εύκολα αναγνωρίσιμα γιατί το αλουμίνιο λαμπιρίζει. Για να διακρίνονται ακόμα περισσότερο τα εξ αλουμινίου σφαιρίδια, αλλά και για να παρέχεται η δυνατότητα εύκολου οπτικού ελέγχου για ενδεχόμενα ίχνη καύσης από αυτά επί εύφλεκτων υλικών, έγινε επίστρωση της επιφάνειας άφιξής τους επί του τσιμεντόστρωτου δαπέδου με ανοιχτόχρωμο καφέ χαρτί, του οποίου οι διαστάσεις ήταν 6 m x 6 m.

3.3.1.6 Μέτρηση της θερμοκρασίας δοκιμίων κατά την άφιξή τους στο έδαφος

Η μέτρηση της θερμοκρασίας των δοκιμίων τόσο προ της ελεύθερης πτώσης τους όσο και κατά την άφιξή τους στο έδαφος γινόταν μέσω θερμοστοιχείου Fe-Konstantan με ψηφιακή ένδειξη.

Από τη χρονική στιγμή άφιξης ενός δοκιμίου στο χαρτί επίστρωσης του τσιμεντόστρωτου δαπέδου μέχρι τον εντοπισμό του και ακολούθως τη μέτρηση της θερμοκρασίας του μεσολαβούσε ένας χρόνος ορισμένων δευτερολέπτων, ο οποίος όμως δεν επηρέαζε ουσιαστικά τις μετρήσεις, γιατί είχε ήδη προηγηθεί κατά την πτώση των δοκιμίων η απότομη μείωση της θερμοκρασίας τους (αποπυράκτωση), και λόγω της μικρής πλέον διαφοράς της θερμοκρασίας τους από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος ήταν πρακτικά άνευ σημασίας για τα λίγα αυτά δευτερόλεπτα η περαιτέρω αποθέρμανσή τους ($1 \div 2$ °C). Η διαπίστωση αυτή προηγήθηκε των μετρήσεων, τόσο με μετρήσεις αποπυράκτωσης των δοκιμίων υπό αρχική θερμοκρασία 100 °C χωρίς ελεύθερη πτώση (όπου το όργανο μέτρησης έδειχνε αδιάκοπα τη θερμοκρασία τους), όσο και με μετρήσεις της τελικής θερμοκρασίας θ_2 από μεγαλύτερα των 5 m ύψη.

3.3.2 Τα αποτελέσματα των μετρήσεων της θερμοκρασίας υποθετικών τηγμάτων αλουμινίου κατά την άφιξή τους στο έδαφος

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων καθώς και οι οπτικές παρατηρήσεις σχετικά με τα ίχνη καψίματος ή μαυρίσματος στο χαρτί επίστρωσης της επιφάνειας άφιξης των δοκιμίων δίνονται συγκεντρωτικά στον πίνακα 3.3.2-1.

α/α πειράματος	θ_0	θ_1	θ_2	$\Delta\theta=\theta_2 - \theta_0$	Παρατηρήσεις
1	31	629	58	27	Κατά τον οπτικό έλεγχο δεν παρατηρήθηκε κανένα απολύτως ίχνος καψίματος ή μαυρίσματος στο χαρτί επίστρωσης της επιφάνειας άφιξης των δοκιμίων στο έδαφος.
2	31	629	60	29	
3	31	630	56	25	

Πίνακας 3.3.2-1: Αποτελέσματα των μετρήσεων κατά την ελεύθερη πτώση των δοκιμίων από ύψος 5 m υπό πνέοντες ασθενείς ανέμους

θ_0 : Θερμοκρασία περιβάλλοντος

θ_1 : Αρχική θερμοκρασία (θερμοκρασία δοκιμίων μόλις προ της ελεύθερης πτώσης τους)

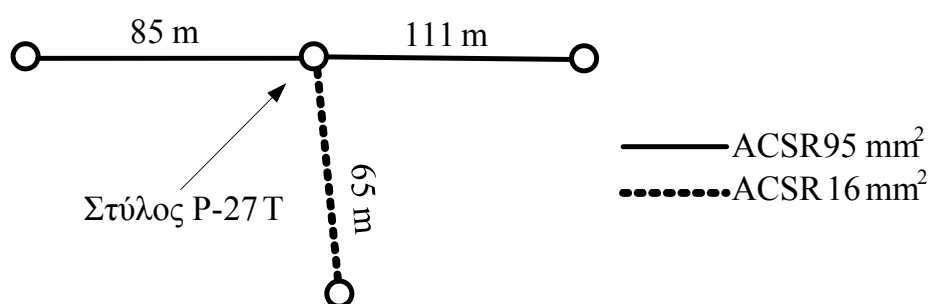
θ_2 : Τελική θερμοκρασία (θερμοκρασία δοκιμίων κατά την άφιξή τους στο έδαφος)

4 Παραδείγματα εμπλοκής γραμμών διανομής μέσης τάσης σε περιβάλλον πυρκαγιάς

Ακολούθως εξετάζονται δύο τυπικά παραδείγματα, που βασίζονται σε πραγματικά γεγονότα εμπλοκής γραμμών διανομής μέσης τάσης σε περιβάλλον πυρκαγιάς.

4.1 1^ο Παράδειγμα

Στο σχήμα 4.1-1 δίνεται απλοποιημένα ένα σκαρίφημα σχεδίου τμήματος δικτύου μέσης τάσης (20 kV), που αποτελείται από μία κεντρική τριφασική γραμμή με αγωγούς ACSR 95 mm² και μία διακλάδωση αυτής από αγωγούς ACSR 16 mm². Στον στύλο όπου γίνεται η διακλάδωση, η γραμμή (από αγωγούς ACSR 16 mm²) προστατεύεται μέσω τριών ασφαλειοαποζευκτών με τηκτά των 30 A τύπου T. Σημειώνεται ότι σύμφωνα με τη βιβλιογραφία [1, 59], ο αγωγός ACSR 95 mm² αποτελείται από 26 κλώνους αλουμινίου περιελιγμένους γύρω από 7 χαλύβδινους κλώνους και έχει συνολικά ονομαστικό ρεύμα 448 A, ο δε αγωγός ACSR 16 mm² αποτελείται από 6 κλώνους αλουμινίου περιελιγμένους γύρω από 1 χαλύβδινο κλώνα και το ονομαστικό ρεύμα του είναι 136 A.



Σχήμα 4.1-1: Σκαρίφημα των επίμαχων γραμμών μέσης τάσης

Ο: Στύλος

Η τάνυση της κεντρικής γραμμής (αποτελούμενης από αγωγούς ACSR 95 mm²) είχε γίνει σύμφωνα με τον κανονισμό CS-31 των Τυποποιημένων Κατασκευών Διανομής της ΔΕΗ [58], ενώ της διακλάδωσης (από αγωγούς ACSR 16 mm²)

σύμφωνα με τον κανονισμό CS-12. Όπως φαίνεται από το σχήμα 4.1-1, τα ανοίγματα (αποστάσεις μεταξύ διαδοχικών στύλων) είναι τα εξής:

- α) Άνοιγμα 111 m αγωγών ACSR 95 mm² (τάνυση κατά CS-31).
- β) Άνοιγμα 85 m αγωγών ACSR 95 mm² (τάνυση κατά CS-31).
- γ) Άνοιγμα 65 m αγωγών ACSR 16 mm² (τάνυση κατά CS-12).

Στην περιοχή που ήταν οι παραπάνω γραμμές μέσης τάσης εκδηλώθηκε πυρκαγιά. Παρά τις έρευνες που έγιναν από τους πραγματογνώμονες της Πυροσβεστικής Υπηρεσίας, δεν κατέστη δυνατή η εξακρίβωση της αιτίας πρόκλησης της πυρκαγιάς. Από την έρευνα που έγινε διαπιστώθηκε ότι κατά την διάρκεια της πυρκαγιάς είχε γίνει διακοπή ρεύματος γιατί έσπασε ο μονωτήρας του ασφαλειοαποζεύκτη της μεσαίας φάσης, με επακόλουθο (από τη μετακίνηση του αποκομμένου ρευματοφόρου τμήματος του εν λόγω ασφαλειοαποζεύκτη, εξ αιτίας των ισχυρών ανέμων) να προκληθεί βραχυκύκλωμα μεταξύ του μεσαίου αγωγού και του αγωγού μίας φάσης.

Ακολούθως θα διερευνηθεί αν το τμήμα των δύο γραμμών μέσης τάσης επί του στύλου (βλέπε σχήμα 4.1-1) υπέστη τις συνέπειες της πυρκαγιάς ή αν υπήρχε σε αυτό αίτιο που προκάλεσε την πυρκαγιά. Σημειώνεται ότι οι εν λόγω γραμμές είχαν εγκατασταθεί προ 15 ετών και ότι μέχρι την ημέρα του συμβάντος λειτουργούσαν κανονικά χωρίς κανένα πρόβλημα.

4.1.1 Θερμική συμπεριφορά των αγωγών

4.1.1.1 Θερμοκρασία των αγωγών υπό το μέγιστο ρεύμα λειτουργίας των 30 A (ονομαστικό ρεύμα των ασφαλειών)

Σύμφωνα με την σχέση 1.3.1-7 η αύξηση της θερμοκρασίας είναι περίπου: στους αγωγούς ACSR 95 mm² 1,18 °C και στους αγωγούς ACSR 16 mm² περίπου 1,95 °C. Επομένως, δεν θα μπορούσε να συμβεί τήξη αγωγού, γιατί η θερμοκρασία τήξης του αλουμινίου είναι περίπου 660 °C.

4.1.1.2 Θερμοκρασία των αγωγών ACSR 16 mm² υπό βραχυκύκλωμα

Όπως έχει αναφερθεί στην παράγραφο 4.1, η προστασία των αγωγών ACSR 16 mm² επιτυγχάνεται μέσω των ασφαλειοαποζευκτών με τηκτά τύπου T ονομαστικού ρεύματος 30 A, που είναι εγκατεστημένοι επί του εν λόγω στύλου. Οι τιμές χρόνου - ρεύματος διακοπής για τηκτά τύπου T δίνονται κατά το πρότυπο ANSI C37.42-1969 στον πίνακα 1.3.2.3-2. Για την αύξηση της θερμοκρασίας κατά το βραχυκύκλωμα ισχύει η σχέση 1.3.2.3-1. Έτσι, με αριθμητική αντικατάσταση για $I_{SW} = I_d$ (που είναι η δυσμενέστερη περίπτωση), προκύπτει: $\Delta\theta_{0,1s} = 15,07$ °C. Επομένως, δεν θα μπορούσε να συμβεί τήξη αγωγού, γιατί η θερμοκρασία τήξης του αλουμινίου είναι περίπου 660 °C.

4.1.2 Διηλεκτρική συμπεριφορά του εξοπλισμού στον ξύλινο στύλο (τυποποιημένη κατασκευή P-27T [58])

Σύμφωνα με τον πίνακα 1.3.6.1.1-1, η διηλεκτρική αντοχή της ηλεκτρικής διάταξης στην κορυφή του στύλου ήταν πολύ μεγάλη, δεδομένου ότι οι αποστάσεις προστασίας είναι πολλαπλάσιες της ελάχιστης απόστασης μόνωσης.

Για την εκδήλωση σπινθηρισμών (δηλαδή των μερικών εκκενώσεων) μεταξύ των αγωγών, πολύ δε περισσότερο για τη διάσπαση μεταξύ αυτών, απαιτείται δραστική μείωση της μονωτικής ικανότητας (ή διηλεκτρικής αντοχής) του αέρα από αγωγίμους ρύπους, όπως αυτό συμβαίνει μέσω της καπναιθάλης. Πράγματι, η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου για την έναρξη μερικών εκκενώσεων στους αγωγούς μίας γραμμής των 20 kV υπό ατμοσφαιρικό αέρα δίνεται από τη σχέση 1.3.6.3-1. Για να αξιολογηθεί κατά πόσο εκδηλώνονται σπινθηρισμοί, χρειάζεται να υπολογιστεί η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου της διάταξης (E_I). Για να μη συμβαίνουν σπινθηρισμοί θα πρέπει να ισχύει:

$$E_I < E \quad (4.1.2-1)$$

Ένας προσεγγιστικός υπολογισμός της τιμής E_I μπορεί να γίνει μέσω της γεωμετρικής σταθεράς p και του συντελεστή χρησιμοποίησης του πεδίου η (βλέπε παρ. 1.3.6.3.1).

Αναλόγως της τιμής p βρίσκεται από τη βιβλιογραφία [1] ο συντελεστής χρησιμοποίησης του πεδίου (η), οπότε για την τιμή E_I ισχύει η σχέση 1.3.6.3.1-3.

Στον πίνακα 4.1.2-1 δίνονται τα αποτελέσματα των υπολογισμών (με βάση την προαναφερθείσα διαδικασία υπολογισμού), από όπου προκύπτει η αδυναμία εκδήλωσης σπινθηρισμών στις γραμμές επί της επίμαχης διάταξης, γιατί σε όλες τις περιπτώσεις η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου (E_I) είναι πολύ μικρότερη από την ελάχιστη απαιτούμενη για την εκδήλωση σπινθηρισμών (E). Συγκεκριμένα:

- για την απόσταση προστασίας των 80 cm στους αγωγούς ACSR 95 mm² της διάταξης του επίμαχου στύλου η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου είναι μικρότερη κατά 9,84 φορές από την ελάχιστη απαιτούμενη για την εκδήλωση σπινθηρισμών.
- για την απόσταση προστασίας των 80 cm στους αγωγούς ACSR 16 mm² της διάταξης του επίμαχου στύλου η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου είναι μικρότερη κατά 5,76 φορές από την ελάχιστη απαιτούμενη για την εκδήλωση σπινθηρισμών.

Επισημαίνεται ότι, για να συμβούν σπινθηρισμοί απαιτείται να συνυπάρχουν έντονη υγρασία και ρυπασμένο περιβάλλον, ώστε να μειωθεί δραστικά η διηλεκτρική αντοχή του αέρα, όπως αυτό συμβαίνει π.χ. από την καπναιθάλη.

1) Γραμμή από αγωγούς ACSR 16 mm²

Ελάχιστη απαιτούμενη ένταση του ηλεκτρικού πεδίου για την εκδήλωση σπινθηρισμών, υπό τάση δικτύου 20 kV και θερμοκρασία περιβάλλοντος 40 °C: $E = 30,41 \text{ kV/cm}$		
Απόσταση μεταξύ των αγωγών (d) [mm]	Ένταση του ηλεκτρικού πεδίου μεταξύ των αγωγών (E_I) [kV/cm]	E/E_I
1150	4,95	6,15
1000	5,07	6,00
950	5,12	5,94
900	5,17	5,89
850	5,22	5,83
800	5,28	5,76
600	5,57	5,46

2) Γραμμή από αγωγούς ACSR 95 mm²

Ελάχιστη απαιτούμενη ένταση του ηλεκτρικού πεδίου για την εκδήλωση σπινθηρισμών, υπό τάση δικτύου 20 kV και θερμοκρασία περιβάλλοντος 40 °C: $E = 25,08 \text{ kV/cm}$		
Απόσταση μεταξύ των αγωγών (d) [mm]	Ένταση του ηλεκτρικού πεδίου μεταξύ των αγωγών (E_I) [kV/cm]	E/E_I
1400	2,27	11,03
1000	2,43	10,32
950	2,46	10,21
900	2,49	10,09
850	2,52	9,97
800	2,55	9,84
600	2,72	9,24

Πίνακας 4.1.2-1: Τιμές E και E_I σε γραμμές διανομής μέσης τάσης (20 kV) όπως οι γραμμές στον εν λόγω στύλο

E : Ελάχιστη τιμή περίπου της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου για την εκδήλωση σπινθηρισμών

E_I : Τιμή περίπου της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου μεταξύ δύο αγωγών ACSR

Η ειδική αντίσταση του άνθρακα είναι $\rho_{av} = 0,083$ έως $33,3 \text{ } \mu\Omega\text{m}$ και του ατμοσφαιρικού αέρα είναι $\rho > 1000 \text{ T}\Omega\text{m}$. Γι' αυτό, η καπναιθάλη δημιουργεί αγωγίμες διαδρομές στον αέρα, προκαλώντας έτσι την εκδήλωση σπινθηρισμών, ή ακόμα και τη διάσπαση. Πράγματι, η αντίσταση μόνωσης (R_I) θεωρείται γενικά ως κατάλληλη όταν: $R_I \geq 1000 \text{ } \Omega/\text{V}$. Μία κυλινδρική π.χ. στήλη ατμοσφαιρικού αέρα, μεταξύ των αγωγών, διατομής 1 mm^2 , μήκους 1 m , έχει αντίσταση μόνωσης:

$$R_I = \rho l / A = 1 \cdot 10^{15} / 10^{-6} \text{ } \Omega = 10^{21} \text{ } \Omega \quad (4.1.2-2)$$

Επειδή η ανωτέρω τιμή υπερπληροί την προαναφερθείσα ανισότητα, η εν λόγω στήλη είναι καταλληλότερη ως μόνωση. Η τιμή του ρεύματος (I) κατά την εκδήλωση σπινθηρισμών είναι μερικά mA (π.χ. $I = 10 \text{ mA}$). Έτσι, αν θεωρηθεί ότι η προηγούμενη στήλη έγινε μείγμα αέρος και καπναιθάλης, τότε η τιμή R_2 της αντίστασης του μείγματος αυτού θα είναι:

$$R_2 = U/I = 20000/(10 \cdot 10^{-3}) \Omega = 2 \text{ M}\Omega \quad (4.1.2-3)$$

Η τιμή όμως αυτή δεν παρέχει πλέον την απαιτούμενη μονωτική ικανότητα, γιατί σύμφωνα με την προαναφερθείσα ανισότητα θα έπρεπε να είναι τουλάχιστον 10 φορές μεγαλύτερη (δηλαδή $R \geq 20 \text{ M}\Omega$). Η ειδική αντίσταση ρ_2 του εν λόγω μείγματος αέρα καπναιθάλης είναι:

$$\rho_2 = R_2 A / l = 2 \Omega\text{m} \quad (4.1.2-4)$$

4.1.3 Μηχανική αντοχή των ανοιγμάτων του επίμαχου στύλου υπό υποθετικούς ανέμους 10 μποφόρ

Ακολούθως διερευνάται η μηχανική αντοχή υπό υποθετικούς ανέμους 10 μποφόρ των ανοιγμάτων (αποστάσεις μεταξύ δυο διαδοχικών στύλων) του επίμαχου στύλου μέσης τάσης, τυποποιημένης κατασκευής P-27T. Όπως έχει προαναφερθεί, η τάνυση της κεντρικής γραμμής είχε γίνει σύμφωνα με τον κανονισμό CS-31 των Τυποποιημένων Κατασκευών Διανομής της ΔΕΗ, ενώ της διακλάδωσης σύμφωνα με τον κανονισμό CS-12.

Για τον υπολογισμό της μηχανικής αντοχής μίας γραμμής χρειάζεται να γνωρίζει κανείς την ταχύτητα του αέρα (ανάλογα με την έντασή του) ώστε να υπολογιστεί η δύναμη λόγω ανεμοπίεσης. Οι αγωγοί ACSR 95 mm² και 16 mm² έχουν φορτίο θραύσης 5650 kg και 950 kg αντίστοιχα, ενώ η διάμετρος των αγωγών είναι $D_{ACSR\ 95} = 17,24 \text{ mm}$ και $D_{ACSR\ 16} = 6,96 \text{ mm}$ [1, 59].

Ο υπολογισμός γενικά της μηχανικής αντοχής ενός αγωγού μεταφοράς ή διανομής γίνεται με βάση την κατακόρυφη δύναμη (που είναι το βάρος του αγωγού και η επίστροψη πάγου επί αυτού, η οποία στην υπό εξέταση περίπτωση δεν υπήρχε) και την οριζόντια δύναμη λόγω της ανεμοπίεσης στη μετωπική επιφάνεια του αγωγού, οπότε η συνολική επιφόρτιση $G_{ολ}$ του αγωγού είναι η συνισταμένη των ανωτέρω δύο δυνάμεων [1, 59]. Παρά την προαναφερθείσα μέθοδο υπολογισμού, εξετάζεται ακολούθως η πλέον δυσμενής περίπτωση, κατά την οποία υποτίθεται (τελείως θεωρητικά) ότι στροβιλίζεται ο αέρας, ώστε η διεύθυνση της ανεμοπίεσης να

συμπίπτει κάποια στιγμή με τη διεύθυνση του βάρους), οπότε ισχύει για τη συνολική μέγιστη επιφόρτιση του αγωγού:

$$G_{ολ} = G + F_P \quad (4.1.3-1)$$

όπου G το βάρος του αγωγού και F_P η εξασκούμενη στη μετωπική επιφάνεια του αγωγού δύναμη λόγω της ανεμοπίεσης.

Το βάρος του αγωγού υπολογίζεται από το βάρος του ανά μέτρο και το μήκος του στο επίμαχο άνοιγμα. Η ανεμοπίεση υπολογίζεται ως [1]:

$$P_m = \rho v^2 / 2 \quad (4.1.3-2)$$

όπου ρ η πυκνότητα του αέρα και v η ταχύτητα του αέρα (βλέπε πίνακα 4.1.3-1).

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 και άνω	Εξαιρετικά σοβαρές καταστροφές.

Πίνακας 4.1.3-1: Ανεμομετρική κλίμακα Μποφόρ

Τελικά, η εξασκούμενη δύναμη, λόγω ανεμοπίεσης σε κάθε αγωγό της γραμμής μεταξύ δύο στύλων υπολογίζεται:

$$F_P = P_m D L \quad (4.1.3-3)$$

όπου D η διάμετρος του αγωγού και L το άνοιγμα των στύλων.

Επιφόρτιση των αγωγών των επίμαχων γραμμών μέσης τάσης υπό υποθετικούς ανέμους 10 μποφόρ			
Μήκος ανοίγματος [m]	Τύπος αγωγού ACSR [mm ²]	Συνολική επιφόρτιση [kg]	Επιφόρτιση ανά μονάδα μήκους [kg / m]
111	95	164,07	1,478
85	95	125,64	1,478
65	16	29,45	0,453

Πίνακας 4.1.3-2: Επιφορτίσεις των αγωγών των εν λόγω γραμμών μέσης τάσης

Στον πίνακα 4.1.3-2 δίνονται, σύμφωνα με την ανωτέρω διαδικασία, τα αποτελέσματα των υπολογισμών της επιφόρτισης των εν λόγω αγωγών (για τα τρία ανοίγματα κατά το σχήμα 4.1-1).

Στη συνέχεια υπολογίζεται η μέγιστη εφελκυστική δύναμη που ασκείται στους αγωγούς των εν λόγω ανοιγμάτων. Η δύναμη τάνυσης F_T σύμφωνα με τον κανονισμό CS-31 [58] σε θερμοκρασία περιβάλλοντος 40 °C ή 30 °C για αγωγό ACSR 95 mm² και μέση επιφόρτιση, είναι 706 kg και 854 kg αντίστοιχα. Αντιστοίχως, η δύναμη τάνυσης F_T σύμφωνα με τον κανονισμό CS-12 σε θερμοκρασία περιβάλλοντος 40 °C ή 30 °C για αγωγό ACSR 16 mm² και μέση επιφόρτιση, είναι 68 kg και 74 kg αντίστοιχα. Η μέγιστη εφελκυστική δύναμη για ισοϋψή ανάρτηση δίνεται ως [59]:

$$F_{max} = F_T + (G_{ολ}^2 L^2 / 8 F_T) \quad (4.1.3-4)$$

Τα αποτελέσματα της μέγιστης εφελκυστικής δύναμης παρουσιάζονται στον πίνακα 4.1.3-3.

Επομένως, η μέγιστη εξασκούμενη στον αγωγό ACSR 95 mm² (σε θερμοκρασία περιβάλλοντος 40 °C) εφελκυστική δύναμη των 710,77 kg είναι περίπου 7,9 φορές μικρότερη του ορίου θραύσης του των 5650 kg, και γι' αυτό η κατασκευή των

γραμμών του εν λόγω στύλου ικανοποιούσε τις απαιτήσεις για ανέμους έντασης 10 μποφόρ. Ακόμα, η μέγιστη εξασκούμενη στον αγωγό ACSR 16 mm² (σε θερμοκρασία περιβάλλοντος 40 °C) εφελκυστική δύναμη των 69,59 kg είναι περίπου 13,7 φορές μικρότερη του ορίου θραύσης του των 950 kg, και γι' αυτό και η κατασκευή της διακλάδωσης στο υπό εξέταση άνοιγμα ικανοποιούσε τις απαιτήσεις για ανέμους έντασης 10 μποφόρ.

Μέγιστη εφελκυστική δύναμη στους αγωγούς υπό υποθετικούς ανέμους 10 μποφόρ			
Μήκος ανοίγματος [m]	Τύπος αγωγού ACSR [mm²]	Μέγιστη εφελκυστική δύναμη σε θερμοκρασία περιβάλλοντος 30 °C [kg]	Μέγιστη εφελκυστική δύναμη σε θερμοκρασία περιβάλλοντος 40 °C [kg]
111	95	857,94	710,77
85	95	856,31	708,76
65	16	75,46	69,59

Πίνακας 4.1.3-3: Εφελκυστικές δυνάμεις των αγωγών των επίμαχων γραμμών μέσης τάσης

4.1.4 Η θερμοχημική διάσπαση του εκ πορσελάνης μονωτήρα του ασφαλειοαποξεύκτη μέσης τάσης (20 kV)

Όπως έχει αναλυθεί στην παράγραφο 1.2.3.1, οι παράγοντες γήρανσης των στερεών ηλεκτρομονωτικών των πρακτικών εφαρμογών είναι:

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

Οι αντίστοιχες προς τους παραπάνω παράγοντες μορφές της διάσπασης είναι:

- α) η θερμική διάσπαση,
- β) η ηλεκτρομηχανική διάσπαση,
- γ) η διάσπαση λόγω μερικών εκκενώσεων (ή γήρανση) και
- δ) η θερμοχημική διάσπαση.

Για τις ανωτέρω μορφές διάσπασης ισχύουν πολύ περιληπτικά τα ακόλουθα:

Η θερμική διάσπαση συναντάται όταν το στερεό μονωτικό καταπονείται κυρίως θερμικά μόνο από τις απώλειες Joule, σε περίπτωση μεγάλων τιμών του ρεύματος. Η εικόνα που παρουσιάζει το θερμικά διασπώμενο ηλεκτρομονωτικό υλικό είναι συνήθως το κάψιμο και το λιώσιμο στην περιοχή όπου συμβαίνει η καταπόνηση.

Όταν η τάση, που εφαρμόζεται στο στερεό μονωτικό, είναι αρκετά μεγαλύτερη από εκείνη που απαιτείται για τη θερμική διάσπαση, τότε η αναίρεση της μόνωσης αποδίδεται κυρίως στις δυνάμεις Coulomb και ονομάζεται ηλεκτρομηχανική (ή ηλεκτρική) διάσπαση. Η μορφή της διάσπασης αυτής παρουσιάζεται συνήθως σε περιπτώσεις υπερτάσεων.

Η διάσπαση των στερεών μονωτικών μπορεί να έχει την αφετηρία της στις μερικές εκκενώσεις στην επιφάνεια και στον όγκο τους. Πρόκειται για ένα ηλεκτροχημικό φαινόμενο, που σε κάποιο απροσδιόριστο χρονικό διάστημα οδηγεί στη διάσπαση του στερεού μονωτικού, ανάλογα με το ρυθμό αύξησης της χημικής μεταβολής σε βάρος της διηλεκτρικής αντοχής (που είναι συνήθως μακροπρόθεσμη και γι' αυτό ονομάζεται και γήρανση).

Η διάσπαση που προκαλείται μόνο από τη θερμότητα του περιβάλλοντος του στερεού μονωτικού, ονομάζεται θερμοχημική. Η μορφή της διάσπασης αυτής συνδυάζεται συνήθως με τις άλλες μορφές διάσπασης γιατί προκαλεί αύξηση της ενέργειας των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων.

Στην πράξη βέβαια συνδυάζονται και υποβοηθούνται οι προαναφερθέντες παράγοντες από διάφορες ειδικές συνθήκες που επικρατούν (μορφή ηλεκτρικού πεδίου, συνθήκες περιβάλλοντος, κλπ.), έτσι ώστε η αναίρεση της ικανότητας μόνωσης του υλικού να είναι κάποιο συνολικό αποτέλεσμα. Έτσι, σε περιπτώσεις πολύ μεγάλων θερμοκρασιών, όπως συμβαίνει σε πυρκαγιές υπαίθρου (όπου η φλόγα έχει θερμοκρασία $870 \div 1020$ °C), είναι πολύ πιθανό να συμβεί συνδυασμός της θερμοχημικής διάσπασης με τις άλλες μορφές διάσπασης, γιατί μειώνεται η αντίσταση μόνωσης από τη θερμοκρασία (βλέπε π.χ. σχήμα 3.2.2-1 που αφορά την πορσελάνη), γεγονός που υποδηλώνει ευκινησία των ελεύθερων ηλεκτρονίων, με επακόλουθο την αύξηση των απωλειών Joule, την ενίσχυση των μερικών εκκενώσεων και την εκδήλωση μεγαλύτερων δυνάμεων Coulomb. Πράγματι, η ειδική αντίσταση της πορσελάνης υπό συνήθεις θερμοκρασίες είναι περίπου $\rho_0 = 10^{12}$ Ωcm ενώ για θερμοκρασία 200 °C αποκτά την τιμή $\rho_{200} = 10^9$ Ωcm.

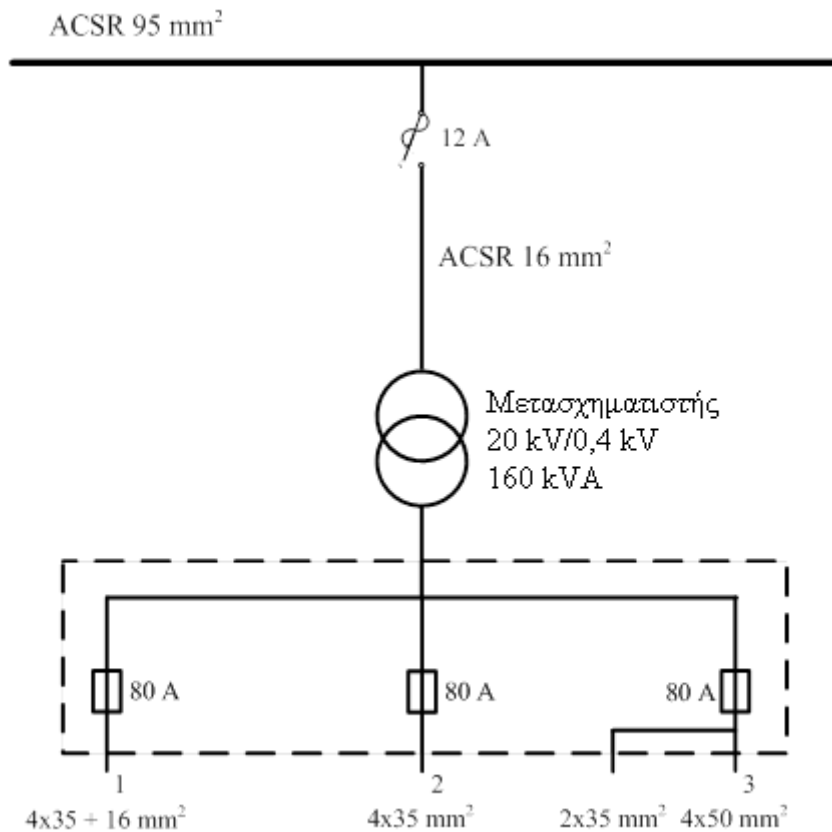
Σύμφωνα με τα ανωτέρω και λαμβάνοντας υπόψη:

- την επί σειρά ετών απρόσκοπτη λειτουργία του εν λόγω ασφαλειοαποζεύκτη (όχι μόνο στην εν λόγω θέση, αλλά παντού στο δίκτυο),
- ότι δεν συνέτρεχαν λόγοι εκδήλωσης απωλειών Joule, γιατί πρόκειται για μέση τάση με ασήμαντες τιμές ρεύματος (το πολύ 30 A με βάση το τηκτό του ασφαλειοαποζεύκτη), που ήταν αδύνατο να αυξήσουν τη θερμοκρασία της πορσελάνης πάνω από μερικούς βαθμούς Κελσίου, δεδομένου ότι το ονομαστικό ρεύμα του ασφαλειοαποζεύκτη ήταν της τάξης των 100 A,

φαίνεται ότι ο μονωτήρας του εν λόγω ασφαλειοαποζεύκτη υπέστη διάσπαση λόγω του υπέρθερμου περιβάλλοντος και ότι η θραύση του συνέβη λόγω ενίσχυσης των δυνάμεων Coulomb από την πολύ μεγάλη θερμότητα του περιβάλλοντος εξ αιτίας της πυρκαγιάς.

4.2 2^ο Παράδειγμα

Σε αγροτική έκταση (με ελαιόδεντρα, ξηρά χόρτα και θάμνους) εκδηλώθηκε πυρκαγιά. Εντός της καμένης έκτασης υπήρχε υπαίθριος υποσταθμός μέσης προς χαμηλή τάση (20 kV / 0,4 kV, ισχύος 160 kVA), ο οποίος ηλεκτροδοτείτο μέσω εναέριας τριφασικής γραμμής αποτελούμενης από αγωγούς ACSR 16 mm² ονομαστικού ρεύματος 136 A. Η εν λόγω γραμμή ήταν η διακλάδωση κεντρικής τριφασικής γραμμής μέσης τάσης, αποτελούμενης από αγωγούς ACSR 95 mm² ονομαστικού ρεύματος 448 A, και προστατεύετο από ασφαλειοαποζεύκτες, με τηκτά τύπου K ονομαστικού ρεύματος 12 A, που ήταν εγκατεστημένοι στην έναρξη της διακλάδωσης (βλέπε σχήμα 4.2-1). Ο μετασχηματιστής τροφοδοτούσε με χαμηλή τάση (400 V, 230 V) το κάτωθεν αυτού εγκατεστημένο ασφαλειοκιβώτιο, το οποίο διέθετε τρεις αναχωρήσεις χαμηλής τάσης, που κάθε μία προστατεύεται σε αυτό μέσω ασφαλειών χαμηλής τάσης ονομαστικού ρεύματος 80 A. Στο σχήμα 4.2-2 δείχνεται απλοποιημένα ο τρόπος σύνδεσης μεταξύ των αγωγών του εν λόγω υποσταθμού, σύμφωνα με το οποίο κάθε αγωγός ACSR 16 mm² της γραμμής μέσης τάσης στηρίζετο επί του στύλου μέσω μονωτήρα μέσης τάσης. Οι αγωγίμες διασυνδέσεις μέσης τάσης στον εν λόγω υποσταθμό είχαν γίνει με αγωγούς χαλκού διατομής 16 mm² (Cu 16 mm²) ονομαστικού ρεύματος 145 A ή με αγωγούς αλουμινίου ισοδύναμης διατομής χαλκού 16 mm² (Al 16 mm²). Για τις συνδέσεις αυτές είχαν χρησιμοποιηθεί, ανάλογα με τις ανάγκες της σύνδεσης, σφικτήρες παραλλήλων αυλάκων με δύο βίδες, κοχλιοσυνδετήρες και διμεταλλικοί σύνδεσμοι (βλέπε σχήμα 4.2-2). Ο εν λόγω υποσταθμός είχε επιθεωρηθεί και συντηρηθεί τρεις μήνες πριν την πυρκαγιά και λειτουργούσε κανονικά. Η διακοπή της λειτουργίας του κατά την ημέρα της πυρκαγιάς έγινε εκουσίως προς διευκόλυνση του έργου της πυρόσβεσης. Από πραγματογνώμονα της πυροσβεστικής υπηρεσίας διατυπώθηκε ο ισχυρισμός ότι η πυρκαγιά μπορεί να προκλήθηκε από τήγματα αλουμινίου που δημιουργήθηκαν στις γραμμές μέσης τάσης και στις ηλεκτρικές συνδέσεις αυτών επί του στύλου. Ζητούμενο είναι να διερευνηθεί αν ευσταθεί επιστημονικά ο ανωτέρω ισχυρισμός.



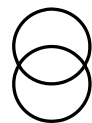
Σχήμα 4.2-1: Απλοποιημένο μονογραμμικό σχέδιο του εν λόγω υποσταθμού μέσης τάσης προς χαμηλή τάση (20 kV/0,4 kV)

ACSR 95 mm²: Κεντρική γραμμή μέσης τάσης

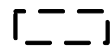
ACSR 16 mm²: Γραμμή ηλεκτροδότησης του μετασχηματιστή με μέση τάση (διακλάδωση της κεντρικής γραμμής)



: Ασφαλειοαποζεύκτης τύπου K, 12 A



: Μετασχηματιστής 160 kVA, 20 kV/0,4 kV



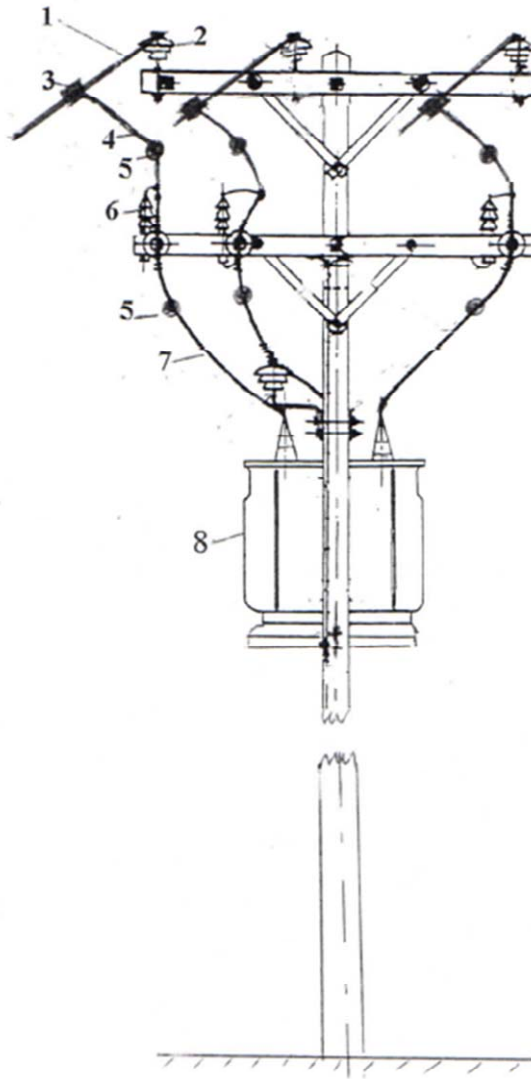
: Ασφαλειοκιβώτιο χαμηλής τάσης (400 V, 230 V)

1, 2 και 3 : Οι 3 αναχωρήσεις χαμηλής τάσης με τις ασφάλειές τους των 80 A

Αναχώρηση 1: Γραμμή 4x35 + 16 mm²

Αναχώρηση 2: Γραμμή 4x35 mm²

Αναχώρηση 3: Γραμμές 2x35 mm² και 4x50 mm²



Σχήμα 4.2-2: Απλοποιημένη παράσταση των αγωγικών διασυνδέσεων των αγωγών μέσης τάσης του υποσταθμού

1. Αγωγός ACSR 16 mm^2
2. Μονωτήρας 20 kV
3. Σφιγκτήρας παραλλήλων αυλάκων με δύο βίδες
4. Αγωγός Al 16 mm^2
5. Διμεταλλικός σύνδεσμος ή κοχλιοσυνδετήρας
6. Καθοδικό αλεξικέραυνο
7. Αγωγός Cu 16 mm^2
8. Μετασχηματιστής μέσης προς χαμηλή τάση (20 kV / 0,4 kV, 160 kVA)

4.2.1 Θερμική καταπόνηση των αγωγών μέσης τάσης (ACSR 16 mm², Al 16 mm² και Cu 16 mm²) του εν λόγω υποσταθμού

4.2.1.1 Θερμοκρασία των εν λόγω αγωγών υπό το μέγιστο ρεύμα λειτουργίας

Σύμφωνα με την σχέση 1.3.1-7 η αύξηση της θερμοκρασίας είναι για τους αγωγούς ACSR 16 mm² περίπου 0,4 °C, για τους αγωγούς Al 16 mm² περίπου 0,3 °C και για τους αγωγούς Cu 16 mm² περίπου 0,3 °C. Επομένως, δεν θα μπορούσε να συμβεί τήξη αγωγού, γιατί η θερμοκρασία τήξης του αλουμινίου είναι περίπου 660 °C.

4.2.1.2 Θερμοκρασία των εν λόγω αγωγών υπό το ρεύμα βραχυκύκλωσης

Όπως έχει προαναφερθεί, η προστασία των αγωγών ACSR 16 mm², Al 16 mm² και Cu 16 mm² επιτυγχάνεται μέσω των ασφαλειοαποζευκτών τύπου K ονομαστικού ρεύματος 12 A. Οι τιμές χρόνου - ρεύματος διακοπής για τηκτά τύπου K δίνονται κατά το πρότυπο ANSI C37.42-1969 στον πίνακα 1.3.2.3-2. Για την αύξηση της θερμοκρασίας κατά το βραχυκύκλωμα ισχύει η σχέση 1.3.2.3-1. Έτσι, με αριθμητική αντικατάσταση για $t = 0,1$ sec και για $I_{SW} = I_d$ (που είναι η δυσμενέστερη περίπτωση) προκύπτει ότι η αύξηση της θερμοκρασίας είναι: $\Delta\theta_{0,1s} \approx 0,6$ °C. Επομένως, δεν θα μπορούσε να συμβεί τήξη αγωγού, γιατί η θερμοκρασία τήξης του αλουμινίου είναι περίπου 660 °C.

4.2.1.3 Θερμοκρασία των στατικών ηλεκτρικών συνδετήρων υπό το μέγιστο ρεύμα λειτουργίας και υπό βραχυκύκλωμα

Η διερεύνηση της θερμικής συμπεριφοράς των σφικτήρων παραλλήλων αυλάκων, των διμεταλλικών συνδέσμων και των κοχλιοσυνδετήρων (βλέπε σχήμα 4.2-2) δεν ήταν δυνατό να υπολογιστεί, γιατί το ονομαστικό ρεύμα τους δεν δίνεται

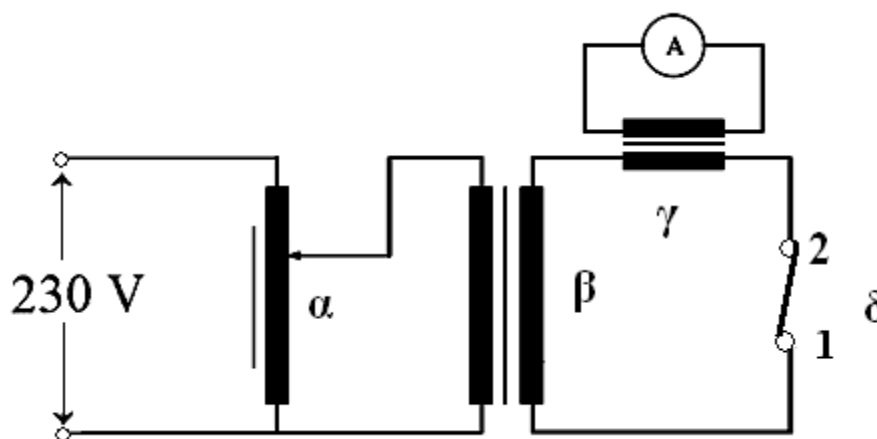
στη βιβλιογραφία (όπως γενικά δεν δίνεται στη βιβλιογραφία το ονομαστικό ρεύμα όλων σχεδόν των σφικτήρων). Για τον λόγο αυτό έγινε μέτρηση της αύξησης της θερμοκρασίας στους εν λόγω στατικούς συνδέσμους, τόσο υπό το μέγιστο ρεύμα λειτουργίας των 12 A όσο και υπό το ρεύμα βραχυκύκλωσης των 199 A (που είναι το ρεύμα διακοπής στα τηκτά τύπου K για χρόνο 0,1 sec - βλέπε πίνακα 1.3.2.3-2).

Στο σχήμα 4.2.1.3-1 δίνεται το κύκλωμα των μετρήσεων, σύμφωνα με το οποίο ένας μετασχηματιστής ρεύματος τροφοδοτείται από το δίκτυο μέσω ενός αυτομετασχηματιστή.

Η μέτρηση της αύξησης της θερμοκρασίας στους ηλεκτρικούς συνδέσμους (ως προς τη θερμοκρασία περιβάλλοντος) υπό το μέγιστο ρεύμα λειτουργίας έγινε σε χρόνο 0 έως 60 min (σε βήματα των 10 min), γιατί στα 60 min σταθεροποιήθηκε η θερμοκρασία.

Η μέτρηση της αύξησης της θερμοκρασίας των ηλεκτρικών συνδέσμων (ως προς τη θερμοκρασία περιβάλλοντος) υπό το ρεύμα βραχυκύκλωσης έγινε σε μεγαλύτερο χρόνο (1 sec αντί 0,1 sec).

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων υπό το μέγιστο ρεύμα λειτουργίας δίνονται στον πίνακα 4.2.1.3-1.



Σχήμα 4.2.1.3-1: Απλοποιημένο κύκλωμα της πειραματικής διάταξης για τη μέτρηση της θερμοκρασίας στα δοκίμια
 α: αυτομετασχηματιστής 230 V / 230 V
 β: μετασχηματιστής 1 A έως 1200 A
 γ: μετασχηματιστής έντασης 1200 / 5 A
 δ: δοκίμιο (κοχλιοσυνδετήρας ή διμεταλλικός σύνδεσμος ή σφικτήρας παραλλήλων αυλάκων)

Η αύξηση της θερμοκρασίας (ως προς τη θερμοκρασία περιβάλλοντος) των κοχλιοσυνδετήρων, των διμεταλλικών συνδέσμων και των σφικτήρων παράλληλων αυλάκων, υπό το ρεύμα βραχυκύκλωσης των 199 A για χρόνο 1 sec, ήταν 1 °C περίπου.

t [min]	$\Delta\theta_{\text{κοχλιοσυνδετήρα}}$ [°C]	$\Delta\theta_{\text{διμεταλλικού συνδέσμου}}$ [°C]	$\Delta\theta_{\text{σφικτήρα παράλληλων αυλάκων}}$ [°C]
0	0,0	0,0	0,0
10	0,1	0,2	0,1
20	0,2	0,3	0,1
30	0,2	0,3	0,1
40	0,2	0,2	0,2
50	0,3	0,3	0,2
60	0,2	0,3	0,2

Πίνακας 4.2.1.3-1: Μετρήσεις της αύξησης θερμοκρασίας (ως προς τη θερμοκρασία περιβάλλοντος) των κοχλιοσυνδετήρων, των διμεταλλικών συνδέσμων και των σφικτήρων παράλληλων αυλάκων, υπό το μέγιστο ρεύμα λειτουργίας (12 A ανά φάση)

4.2.2 Διηλεκτρική συμπεριφορά των γραμμών μέσης τάσης

Σύμφωνα με τον πίνακα 1.3.6.1.1-1 η διηλεκτρική αντοχή της ηλεκτρικής διάταξης στην κορυφή του στύλου ήταν πολύ μεγάλη, δεδομένου ότι οι αποστάσεις προστασίας είναι πολλαπλάσιες της ελάχιστης απόστασης μόνωσης.

Οι υπολογισμοί για την εκδήλωση ή μη σπινθηρισμών έγιναν σύμφωνα με τη διαδικασία που έχει αναφερθεί στην παράγραφο 4.1.2. Τα αποτελέσματα, για απόσταση προστασίας 1 m μεταξύ των αγωγών, δίνονται ακολούθως:

α) Αγωγοί ACSR 16 mm²

Η ακτίνα του ανωτέρω αγωγού ACSR 16 mm² είναι 3,48 mm. Επομένως, για τον ανωτέρω αγωγό ισχύει:

$$E_{ACSR} = 0,83 \cdot 0,91 \cdot 30 \cdot [1 + (0,3 / (0,91 \cdot 3,48))^{1/2}] = 26,48 \text{ kV/cm} \quad (4.2.2.1-1)$$

Ο συντελεστής χρησιμοποίησης του πεδίου είναι:

$$\eta_{ACSR} = [2 \cdot 3,48 \cdot \ln\{2 + (1000 / 3,48)\}] / 1000 = 0,0394 \quad (4.2.2.1-2)$$

και η πεδιακή ένταση $E_{I,ACSR}$ για τάση $U = 20$ kV είναι:

$$E_{I,ACSR} = 20 / (0,0394 \cdot 100) = 5,07 \text{ kV/cm} \quad (4.2.2.1-3)$$

Η τιμή $E_{I,ACSR}$ είναι περίπου 5,2 φορές μικρότερη από την τιμή E_{ACSR} ανωτέρω και συνεπώς αποκλείεται η εκδήλωση σπινθηρισμών, πολύ δε περισσότερο αποκλείεται η διάσπαση μεταξύ των αγωγών ACSR 16 mm².

β) Αγωγοί Al 16 mm²

Η ακτίνα του ανωτέρω αγωγού Al 16 mm² είναι 3,31 mm. Επομένως, για τον ανωτέρω αγωγό ισχύει:

$$E_{Al} = 0,83 \cdot 0,91 \cdot 30 \cdot [1 + (0,3 / (0,91 \cdot 3,31))^{1/2}] = 26,57 \text{ kV/cm} \quad (4.2.2.1-4)$$

Ο συντελεστής χρησιμοποίησης του πεδίου είναι:

$$\eta_{Al} = [2 \cdot 3,31 \cdot \ln\{2 + (1000 / 3,31)\}] / 1000 = 0,0378 \quad (4.2.2.1-5)$$

και η πεδιακή ένταση $E_{I,Al}$ για τάση $U = 20$ kV είναι:

$$E_{I,Al} = 20 / (0,0378 \cdot 100) = 5,28 \text{ kV/cm} \quad (4.2.2.1-6)$$

Η τιμή $E_{I,Al}$ είναι περίπου 5,0 φορές μικρότερη από την τιμή E_{Al} ανωτέρω και συνεπώς αποκλείεται η εκδήλωση σπινθηρισμών, πολύ δε περισσότερο αποκλείεται η διάσπαση μεταξύ των αγωγών Al 16 mm².

γ) Αγωγοί Cu 16 mm²

Η ακτίνα του ανωτέρω αγωγού Cu 16 mm² είναι 2,57 mm. Επομένως, για τον ανωτέρω αγωγό ισχύει:

$$E_{Cu} = 0,83 \cdot 0,91 \cdot 30 \cdot [1 + (0,3 / (0,91 \cdot 2,57)^{1/2})] = 27,10 \text{ kV/cm} \quad (4.2.2.1-7)$$

Ο συντελεστής χρησιμοποίησης του πεδίου είναι:

$$\eta_{Cu} = [2 \cdot 2,57 \cdot \ln\{2 + (1000 / 2,57)\}] / 1000 = 0,0307 \quad (4.2.2.1-8)$$

και η πεδιακή ένταση $E_{I,Cu}$ για τάση $U = 20 \text{ kV}$ είναι:

$$E_{I,Cu} = 20 / (0,0307 \cdot 100) = 6,51 \text{ kV/cm} \quad (4.2.2.1-9)$$

Η τιμή $E_{I,Cu}$ είναι περίπου 4,2 φορές μικρότερη από την τιμή E_{Cu} ανωτέρω και συνεπώς αποκλείεται η εκδήλωση σπινθηρισμών, πολύ δε περισσότερο αποκλείεται η διάσπαση μεταξύ των αγωγών Cu 16 mm².

Σημειώνεται ότι, λόγω των πολύ μικρών τιμών E_I (συγκριτικά με την κατά περίπτωση τιμή E), η ελάχιστη μεταβολή της διατομής και της απόστασης μεταξύ των αγωγών στις θέσεις των στατικών ηλεκτρικών συνδέσμων (διμεταλλικοί σφικτήρες ή κοχλιοσυνδετήρες ή συνδετήρες παραλλήλων αυλάκων – βλέπε σχήμα 4.2-2) δεν επηρεάζει ουσιωδώς την τάξη μεγέθους των τιμών E_I και E , που υπολογίστηκαν ανωτέρω.

5 Σχόλια επί των πειραματικών αποτελεσμάτων

5.1 Σχόλια επί των αποτελεσμάτων εκδήλωσης των μερικών εκκενώσεων σε στερεά ηλεκτρομονωτικά των πρακτικών εφαρμογών (με ή χωρίς υδρόφοβο επάλειψη), υπό κρουστικές τάσεις της μορφής 1,2/50 μs σε περιβάλλον ατμοσφαιρικού αέρα

Από τα σχήματα 3.1.1.5-1β και 3.1.1.5-1γ φαίνεται ότι το μέγεθος των αλμάτων δυναμικού στα δοκίμια του πρεσπάν πάχους 1 mm, υπό εφαρμοζόμενη τάση 10,4 kV, μειώθηκε στην περίπτωση των δειγμάτων με υδρόφοβο σιλικονούχο επάλειψη. Παρόμοια αποτελέσματα παρατηρήθηκαν στα παλμογραφήματα για όλα τα δείγματα πρεσπάν και πέρτιναξ για όλα τα επίπεδα τάσης (5 kV έως 16 kV).

Από τα σχήματα 3.1.1.5-2 και 3.1.1.5-3, που αφορούν δοκίμια πρεσπάν με ή χωρίς υδρόφοβο σιλικονούχο επάλειψη και τα σχήματα 3.1.1.5-4 και 3.1.1.5-5 (που αφορούν αντίστοιχα δοκίμια πέρτιναξ με ή χωρίς υδρόφοβο σιλικονούχο επάλειψη), τα οποία απεικονίζουν τη μέση αύξηση του φορτίου Δq και της ηλεκτρικής ενέργειας ΔW στον πυκνωτή μέτρησης σε σχέση με την εφαρμοζόμενη τάση u_k , φαίνεται ότι η υδρόφοβος σιλικονούχος επάλειψη προκαλεί μείωση των τιμών Δq και ΔW , γιατί η εν λόγω επάλειψη προκαλεί μείωση των αλμάτων δυναμικού, δηλαδή μείωση του ρόλου των μερικών εκκενώσεων.

Μία ερμηνεία της βελτίωσης της διηλεκτρικής αντοχής των στερεών ηλεκτρομονωτικών υλικών πρεσπάν και πέρτιναξ μέσω της υδρόφοβου σιλικονούχου επένδυσης επί αυτών (συγκριτικά προς δοκίμια ισοδύναμου πάχους χωρίς την εν λόγω επένδυση (βλέπε παρ. 3.1.1.5) μπορεί να δοθεί από το ισοδύναμο κύκλωμα του σχήματος 1.2.3.4-1. Μπορεί κανείς να υποθέσει ότι η μείωση της ενέργειας των ηλεκτρικών φορέων συμβολίζεται μέσω της σύνθετης αντίστασης Z .

Περισσότερες πληροφορίες περί αυτού έχουν δοθεί από παλμογραφήματα των κρούσεων φορτίου, σύμφωνα με τα οποία ο ιονισμός με κρούσεις σχετίζεται με την εκδήλωση αρνητικής διαφορικής αντίστασης που ως εκ τούτου η τιμή της αντίστασης Z υποτίθεται ότι μειώνεται όταν αυξάνεται η ενέργεια των ελευθέρων ηλεκτρικών φορέων.

5.2 Σχόλια επί των αποτελεσμάτων των μετρήσεων της θερμικής καταπόνησης των δοκιμίων πορσελάνης

Όπως αναφέρθηκε στην παρ. 1.2 τα φαινόμενα προ και κατά τη διάσπαση των βιομηχανικών στερεών ηλεκτρομονωτικών αποδίδονται σε τέσσερις παράγοντες γήρανσης και διάσπασης, που είναι:

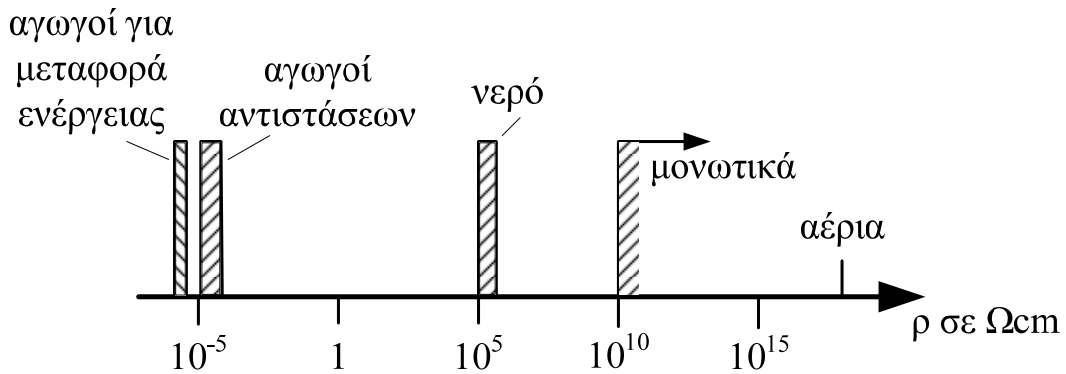
- α) οι απώλειες Joule,
- β) οι δυνάμεις Coulomb,
- γ) οι μερικές εκκενώσεις και
- δ) η θερμοκρασία του περιβάλλοντος.

Οι αντίστοιχες προς τους παραπάνω παράγοντες μορφές της διάσπασης είναι:

- α) η θερμική διάσπαση,
- β) η ηλεκτρομηχανική διάσπαση,
- γ) η διάσπαση λόγω μερικών εκκενώσεων (ή γήρανση) και
- δ) η θερμοχημική διάσπαση.

Στην πράξη βέβαια συνδυάζονται και υποβοηθούνται οι προαναφερθέντες παράγοντες από διάφορες ειδικές συνθήκες που επικρατούν (μορφή ηλεκτρικού πεδίου, συνθήκες περιβάλλοντος, κλπ., έτσι ώστε η αναίρεση της ικανότητας μόνωσης του στερεού ηλεκτρομονωτικού υλικού να είναι κάποιο συνολικό αποτέλεσμα. Επομένως, σε περιπτώσεις πολύ μεγάλων θερμοκρασιών, όπως συμβαίνει σε πυρκαγιές υπαίθρου (όπου η φλόγα έχει θερμοκρασία $870 \div 1020$ °C [1, 26]), είναι πολύ πιθανό να συμβεί, σε μονωτήρες πορσελάνης (λόγω μετάδοσης θερμότητας με ακτινοβολία και μεταφορά, βλέπε παρ. 1.3.3), συνδυασμός της θερμοχημικής διάσπασης με τις άλλες μορφές διάσπασης, γιατί μειώνεται η ειδική αντίσταση της πορσελάνης με τη θερμοκρασία (βλέπε π.χ. σχήμα 5.2-1), γεγονός που υποδηλώνει ευκινησία των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων (κυρίως των ηλεκτρονίων), με επακόλουθο την αύξηση των απωλειών Joule, την ενίσχυση των μερικών εκκενώσεων και την εκδήλωση μεγαλύτερων δυνάμεων Coulomb. Πράγματι, η ειδική αντίσταση της πορσελάνης υπό συνήθεις θερμοκρασίες είναι περίπου $\rho_o = 10^{12}$ Ωcm [1, 37, 57]. Έτσι, από το σχήμα 3.2.2-1 επιβεβαιώνεται ότι για θερμοκρασία περίπου 200 °C και για διαστάσεις δοκιμίων 1 cm x 2 cm x 4 cm περίπου, μειώνεται η ειδική αντίσταση της πορσελάνης σε τιμή της τάξεως $\rho_{200} = 10^9$ Ωcm, και ως εκ τούτου δεν διαθέτει πλέον τη διηλεκτρική αντοχή που είχε, όπως

διαπιστώνεται και από το σχήμα 5.2-1 [1, 37], σύμφωνα με το οποίο η τιμή ρ στους 200 °C είναι στην περιοχή πλέον αναίρεσης της μόνωσης. Συνεπώς, εκ των ανωτέρω φαίνεται ότι είναι δυνατό, όχι μόνο να μειωθεί η μονωτική ικανότητα του μονωτήρα πορσελάνης ενός π.χ. ασφαλειοαποζεύκτη 20 kV σε περιβάλλον πυρκαγιάς (ή ενός μονωτήρα πορσελάνης ανάρτησης 20 kV, κλπ.), αλλά να συμβεί ακόμη και η θραύση του από τις δυνάμεις Coulomb.



Σχήμα 5.2-1: Κατάταξη των υλικών ανάλογα με την τιμή της ειδικής αντίστασής τους [1,37]

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι, από μετρήσεις που έχουν γίνει για την επίδραση της θερμοκρασίας του ηλεκτρομονωτικού ελαίου σε στερεά μονωτικά των πρακτικών εφαρμογών εντός αυτού [1, 8], έχει διαπιστωθεί μεγάλη αύξηση των μερικών εκκενώσεων κατά την αύξηση της θερμοκρασίας του ηλεκτρομονωτικού ελαίου. Γι' αυτό, σε συνδυασμό με τα πειραματικά αποτελέσματα που έγιναν στην εργασία αυτή, μπορεί κανείς να υποθέσει ότι, κατά την αύξηση της θερμοκρασίας του αέρα (πολύ δε περισσότερο του μείγματος του αέρα με καπναιθάλη στο περιβάλλον μονωτήρων πορσελάνης σε περίπτωση πυρκαγιάς πλησίον γραμμής μέσης τάσης), προκαλείται σημαντική αύξηση των μερικών εκκενώσεων, που μπορεί να έχει ως τελικό αποτέλεσμα και τη θραύση μονωτήρων όταν ενισχυθούν προς τούτο οι δυνάμεις Coulomb (βλέπε παρ. 1.2.3.1). Μπορεί κανείς να υποθέσει ότι αυτός είναι ο λόγος θραύσης μονωτήρων που έχουν διαπιστωθεί ορισμένες φορές στην πράξη σε περιπτώσεις πυρκαγιών πολύ μεγάλου πυροθερμικού φορτίου (πυρκαγιές δασών) πλησίον γραμμών διανομής μέσης τάσης, όπου η βλάβη παρουσιάζεται συνήθως σε μονωτήρα της μεσαίας φάσης, γιατί πλήττεται θερμικά περισσότερο από τους μονωτήρες των δύο άλλων φάσεων (οι οποίοι διαθέτουν μεγαλύτερη επιφάνεια απαγωγής θερμότητας από τον μονωτήρα της μεσαίας φάσης).

Σε συνέχεια των ανωτέρω, η θερμική συμπεριφορά των μονωτήρων πορσελάνης σε εξοπλισμό του δικτύου διανομής σε περιβάλλον πυρκαγιάς (όπως συμβαίνει στην πράξη σε μονωτήρες ασφαλειοαποζευκτών, μονωτήρες ανάρτησης γραμμών, κλπ.) μπορεί να ερμηνευτεί και από το ισοδύναμο κύκλωμα του σχήματος 1.2.3.4-1. Φαίνεται ότι, λόγω αύξησης της θερμότητας στην πορσελάνη μέσω ακτινοβολίας και μεταφοράς από το υπέρθερμο περιβάλλον εξ αιτίας της πυρκαγιάς (πολύ δε περισσότερο με αγωγή, λόγω της φλόγας, σε περίπτωση καιγόμενων υψηλών δέντρων σε μικρή απόσταση από τη γραμμή), μειώνεται δραστικά η διηλεκτρική αντοχή της πορσελάνης γιατί ενισχύεται ο ρόλος όλων των παραγόντων γήρανσης και διάσπασης. Από την θερμική καταπόνηση μπορεί να συμβεί πρόωρη γήρανση λόγω ενίσχυσης του ρόλου των μερικών εκκενώσεων (κυρίως των εξωτερικών μερικών εκκενώσεων λόγω και της καπναιθάλης – κλάδος με στοιχεία C_3 , C_6 , R_2 στο ισοδύναμο κύκλωμα του σχήματος 1.2.3.4-1) με επακόλουθο, σε συνδυασμό με τους άλλους παράγοντες τη δημιουργία επιφανειακού δενδρίτη [1]. Γι' αυτό, σε περίπτωση εκδήλωσης πυρκαγιάς στο περιβάλλον γραμμών διανομής μέσης τάσης θα πρέπει μετά την πυρκαγιά να καθαρίζεται η επιφάνεια των μονωτήρων και ακολούθως να γίνεται οπτικός έλεγχος για τυχόν επιφανειακές αλλοιώσεις.

5.3 Σχόλια επί των αποτελεσμάτων των μετρήσεων της θερμοκρασίας υποθετικών τηγμάτων αλουμινίου κατά την πρόσκρουσή τους στο έδαφος.

Από τα αποτελέσματα των μετρήσεων προκύπτει ότι για θερμοκρασία περιβάλλοντος 31 °C η θερμοκρασία των εξ αλουμινίου δοκιμίων (και συνεπώς και των τηγμάτων αλουμινίου) κατά την άφιξή τους στο έδαφος είναι της τάξεως των 58 °C, θερμοκρασία μη δημιουργούσα έγκαυμα σε επαφή με το χέρι, δηλαδή που δεν είναι δυνατόν να προκαλέσει ανάφλεξη σε ξερά χόρτα, κλαδιά, κ.λπ., τα οποία αναφλέγονται σε κατά πολύ υψηλότερες θερμοκρασίες. Λόγω της ανωτέρω μικρής θερμοκρασίας των σφαιριδίων ήταν επόμενο να μην υπάρξουν ίχνη καπνίσματος ή μαυρίσματος στην επίστρωση από χαρτί της επιφάνειας άφιξης των σφαιριδίων στο έδαφος.

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων υπερκαλύπτουν την τελική θερμοκρασία υποθετικών τηγμάτων αλουμινίου τόσο κατά την ελεύθερη πτώση τους από ύψη άνω

των 5 m όσο και κατά την πτώση τους με πνέοντες ανέμους μεγαλύτερους από 2 μποφόρ, ή και τα δύο.

Μεταξύ των πειραματικών αποτελεσμάτων της παραγράφου 3.3.2 (θερμοκρασία άφιξης των σφαιριδίων στο έδαφος 58 °C) και των θεωρητικών αποτελεσμάτων (βλέπε παρ.1.3.5 - θερμοκρασία άφιξης των σφαιριδίων στο έδαφος) διαπιστώνεται ικανοποιητική ταύτιση με μικροαποκλίσεις, οι οποίες δικαιολογούνται από τις αναπόφευκτες χρονικές μικροδιαφορές που έχουν αναφερθεί στην παράγραφο 3.3.1.6.

6 Συμβολή της εργασίας στην έρευνα και στις πρακτικές εφαρμογές

Στην εργασία έγινε μία προσπάθεια αξιολόγησης της θερμικής και διηλεκτρικής συμπεριφοράς των γραμμών ηλεκτρικής ενέργειας, έτσι ώστε οι απαιτούμενοι υπολογισμοί να είναι πάντοτε σε βάρος των γραμμών. Αυτό κρίθηκε αναγκαίο, γιατί συχνά εμπλέκονται οι εν λόγω γραμμές σε περιπτώσεις πυρκαγιών στο περιβάλλον τους (δεδομένου ότι σχεδόν πάντοτε υπάρχουν γραμμές της ηλεκτρικής ενέργειας εντός της έκτασης που κάηκε) και γι' αυτό είναι χρήσιμο η αξιολόγησή τους (ως αιτία ή μη της πυρκαγιάς) να γίνεται επί το αυστηρότερο. Συγκεκριμένα:

- Η αξιολόγηση της θερμικής συμπεριφοράς γραμμής της ηλεκτρικής ενέργειας υπό το μέγιστο ρεύμα λειτουργίας της, κρίνεται σκόπιμο να γίνεται με βάση την σχέση 1.3.1-7, που δίνει μεγαλύτερη αύξηση της θερμοκρασίας, αντί της σχέσης 1.3.1-1.
- Ο υπολογισμός της αντίστασης μέχρι την θέση βραχυκύκλωσης σε μία γραμμή της ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να γίνεται μέχρι και τον μετασχηματιστή που προηγείται αυτής. Ο υπολογισμός αυτός είναι επαρκής [90], γιατί το υπολογιζόμενο ρεύμα βραχυκύκλωσης είναι ουσιαστικά ελάχιστα μεγαλύτερο από την πραγματική τιμή του (η οποία, εξ άλλου, στις περισσότερες περιπτώσεις είναι στην πράξη αδύνατο να υπολογιστεί).
- Η αύξηση της θερμοκρασίας κατά το βραχυκύκλωμα σε γραμμή της ηλεκτρικής ενέργειας κρίνεται σκόπιμο να γίνεται μέσω της σχέσης 1.3.2.3-1, γιατί η υπολογιζόμενη θερμοκρασία έχει μεγαλύτερη τιμή από εκείνη που προκύπτει από τη σχέση 1.3.2.2-1 κατά IEC 60865-1 [43].

Επίσης επισημάνθηκαν τα εξής:

- Όταν μία γραμμή επιθεωρείται και συντηρείται κανονικά, δεν υφίσταται θέμα μείωσης της διηλεκτρικής αντοχής της, γιατί οι αποστάσεις προστασίας μεταξύ των αγωγών (και των αγωγών προς γη) είναι πολύ μεγάλες.
- Επιπρόσθετα, αναφορικά με τον υπολογισμό του μήκους γραμμής για την τήρηση της συνθήκης ουδετέρωσης στο δίκτυο χαμηλής τάσης, προτείνεται η αναθεώρηση των πινάκων 1.3.4.1-3 και 1.3.4.1-4 για την ικανοποίηση

της δυσμενέστερης περίπτωσης όπου η φασική τάση είναι 207 V (βλέπε παρ. 1.3.4.1).

- Στο σχήμα 1.2.3.4-1, δίνεται ένα ισοδύναμο κύκλωμα που συνδυάζει τη μακροσκοπική και την κβαντική θεωρία της γήρανσης και της διάσπασης των στερεών ηλεκτρομονωτικών υλικών των πρακτικών εφαρμογών, με τη θεώρηση ως μεταβλητών όλων των στοιχείων του κυκλώματος, για να εκφράζουν τη διαχρονική μεταβολή της διηλεκτρικής συμπεριφοράς του υλικού.

Εκτός των ανωτέρω στην εργασία αυτή έγινε μία προσπάθεια φυσικής ερμηνείας της διηλεκτρικής συμπεριφοράς στερεών ηλεκτρομονωτικών των πρακτικών εφαρμογών (πρεσπάν και πέρτιναξ, με ή χωρίς υδρόφοβο σιλικονούχο επάλειψη) καθώς και της αντίστασης της πορσελάνης σε εξοπλισμό του δικτύου διανομής μέσης τάσης, υπό θερμοκρασία έως τους 250 °C (θερμοκρασία δηλαδή που μπορεί να εκδηλωθεί στην πράξη επί μονωτήρων σε περίπτωση πυρκαγιάς στο περιβάλλον γραμμών διανομής μέσης τάσης, λόγω μετάδοσης θερμότητας σε αυτούς, μέσω ακτινοβολίας και μεταφοράς). Συγκεκριμένα:

- 1) Έγινε μία προσπάθεια φυσικής ερμηνείας της βελτίωσης της διηλεκτρικής συμπεριφοράς στερεών ηλεκτρομονωτικών υλικών των πρακτικών εφαρμογών σε περίπτωση υδρόφοβου επάλειψής τους. Από τις μετρήσεις που έγιναν φαίνεται ότι η υδρόφοβος επάλειψη των ανωτέρω στερεών μονωτικών περιορίζει την εκδήλωση των μερικών εκκενώσεων, γιατί δεν διευκολύνεται η εκδήλωση του ιονισμού με κρούσεις.

Η εν λόγω υδρόφοβος επάλειψη φαίνεται ότι ενδείκνυται να εφαρμόζεται σε παραθαλάσσιες γραμμές με μονωτήρες πορσελάνης (και γενικότερα σε περιοχές με βιομηχανική ρύπανση), δεδομένου ότι η αντικατάσταση του μεγάλου αριθμού των μονωτήρων αυτών με συνθετικούς μονωτήρες είναι ένα σημαντικό κόστος, πέραν του ότι η διάρκεια ζωής των συνθετικών μονωτήρων δεν είναι προς το παρόν γνωστή.

- 2) Από τις μετρήσεις που έγιναν για τη θερμική συμπεριφορά της πορσελάνης σε θερμοκρασία μέχρι 250 °C (δηλαδή σε θερμοκρασία που μπορεί να αποκτήσουν οι μονωτήρες πορσελάνης σε περίπτωση πυρκαγιάς στο περιβάλλον μίας γραμμής μέσης τάσης, όπως: μονωτήρες ανάρτησης, μονωτήρες ασφαλειοαποξευκτών, κλπ.), φαίνεται ότι μειώνεται δραστικά η ειδική αντίσταση της πορσελάνης συγκριτικά προς την ειδική αντίστασή της στους 20 °C, που

μπορεί να έχει ως επακόλουθο την εκδήλωση μερικών εκκενώσεων (σπινθηρισμών) ή και τη διάσπαση. Κατόπιν αυτού κρίνεται σκόπιμο, σε περιπτώσεις πυρκαγιών στο περιβάλλον γραμμών διανομής μέσης τάσης, να ελέγχονται μακροσκοπικά οι μονωτήρες για τυχόν μόνιμες επιφανειακές αλλοιώσεις που μπορεί να έχουν δημιουργηθεί από τη μετάδοση θερμότητας σε αυτούς, λόγω ακτινοβολίας και μεταφοράς.

- 3) Επίσης, έγιναν μετρήσεις της θερμοκρασίας υποθετικών τηγμάτων κατά την άφιξή τους στο έδαφος, περίπου σφαιρικής μορφής διαμέτρου 1 mm (δηλαδή τηγμάτων που κατασκευάστηκαν για τις ανάγκες του πειράματος, δεδομένου ότι δεν δημιουργούνται τήγματα από τους αγωγούς των γραμμών της ηλεκτρικής ενέργειας – βλέπε παρ. 1.3.1 και 1.3.3), σύμφωνα με τις οποίες η τιμή της θερμοκρασίας ήταν 58 °C και δεν παρατηρήθηκε κανένα απολύτως ίχνος καψίματος ή μαυρίσματος στο χαρτί επίστρωσης της επιφάνειας άφιξης των δοκιμών στο έδαφος.

Προτάσεις:

- Θα ήταν πολύ χρήσιμο να γίνει κάποιος κανονισμός που να αφορά τη συμπεριφορά των γραμμών της ηλεκτρικής ενέργειας σε περιβάλλον πυρκαγιών αφού βεβαίως ληφθεί υπόψη η πολύχρονη εμπειρία των στελεχών που έχουν συνδράμει σε πραγματογνωμοσύνες πυρκαγιών πλησίον του δικτύου.
- Από την μείωση των μερικών εκκενώσεων λόγω της υδρόφοβου επάλειψης επί στερεών ηλεκτρομονωτικών υλικών σε περιβάλλον ατμοσφαιρικού αέρα, μπορεί κανείς να υποθέσει, ότι αναμένεται παρόμοια συμπεριφορά και σε περιβάλλον ηλεκτρομονωτικού ελαίου, κάτι που κρίνεται σκόπιμο να ερευνηθεί για τη βελτίωση της διηλεκτρικής συμπεριφοράς ηλεκτροτεχνικών κατασκευών, όπως π.χ. η αναμενόμενη βελτίωση της διηλεκτρικής συμπεριφοράς του οργανικού στερεού ηλεκτρομονωτικού υλικού των μεταγωγέων τάσης στους μετασχηματιστές ελαίου, ή του πεπιεσμένου χαρτιού εντός ηλεκτρομονωτικού ελαίου κλπ.

7 Βιβλιογραφία

- [1] Π.Δ. Μπούρκας, Α.Δ. Πολυκράτη, Βιομηχανικές Ηλεκτρικές Εγκαταστάσεις, (Εφαρμογές βιομηχανικών ηλεκτρικών διατάξεων), Τόμος ΙΙ, Αθήνα, 2012.
- [2] Philippow H., Taschenbuch Elektrotechnik, Band 2, Starkstromtechnik, Berlin, 1983F.
- [3] W. Peek, Dielectric Phenomena in High Voltage Engineering. New York: McGraw-Hill, 1920.
- [4] Kuffel E., Zaengl W.S., High Voltage Engineering Fundamentals, Pergamon Press, 1984.
- [5] Μπούρκας Π.Δ., Δέρβος Κ., Καγιάφας Ε.Α., Φαινόμενα γήρανσης στο συνδυασμό «βακελίτης-μονωτικό λάδι» κατά την καταπόνηση με κρουστικές τάσεις ζεύξης, Τεχνικά Χρονικά, Β, 1988, Τομ. 8, Τεύχος 4, σελ. 29-42.
- [6] Bourkas P.D., Kayafas E.A., Dervos C., and Stathopoulos I.A., A possible interpretation of light discharges on solid insulators under impulse voltages, Ein mogliche Erklauung der Glimmerntladungen in Festen Isolierstoffen beim Stossspannungsbeanspruchung, etz Archiv. 1989, 11, (5), pp. 163-166.
- [7] Dervos C., Bourkas P.D., Kayafas E.A., Potential profile of dielectrics during impulse application, Physika Status Solidi (a), 112, 1989, 123-130.
- [8] Dervos C., Bourkas P.D., Kayafas E.A., and Stathopoulos I., Enhanced partial discharges due to temperature increase in the combined system of a solid-liquid dielectric, IEEE Transactions on Electrical Insulators, 1990, 25, pp. 469-474.
- [9] Bourkas P. D., Dervos C., Eleftheriou M., and Kagarakis C., Impact Ionization Phenomenon during the Surface Breakdown of Solid Organic Insulators”, Ionisationvorgange beim Gleitdurchschlag der festen organischen Isolierstoffen, Physica Scripta, 1990, 42, pp. 737-740.
- [10] Bourkas P.D., Stathopoulos I.A., Topalis F.V., Breakdown of the Pressboard-Oil Insulation under Repeated Stress by Impulse Voltages, International Journal of Energy Systems, Vol. 10, No 1, 1990, p.p. 24-27.
- [11] Dervos C., Bourkas P.D., Kagarakis C.A., Uzunoglu N.K., Millimeter Wavelength Radiation during Dielectric Ageing, International Journal of Infrared & Millimeter Waves, Vol. 11, No 1, January 1990.
- [12] C. Dervos P.D. Bourkas and C.A. Kagarakis. Charge transport through a metal-thick insulator-metal structure during impulse voltage excitation. J. Electrostatics, 26, 1991, 121-132.
- [13] Σταθόπουλος Ι.Α., Μπούρκας Π.Δ., Τοπαλής Φ.Β., Μετρήσεις και δοκιμές Υψηλών Τάσεων, Ε.Μ.Π., 1991.
- [14] Hilgarth G., Hochspannungstechni, B.G. Teubner Stuttgart, 1992.
- [15] Kind D., High-Voltage Experimental Technique, ISBN 3-528-08383-2, Βιβλιοθήκη ΕΜΠ, 1992.

- [16] Moronis A.X., and Bourkas P.D., Impact Ionization Effects at Interfaces Between Solid Dielectrics and Page 13 of 17 IET Review Copy Only IET Science, Measurement & Technology Insulating Oil or Air, During High Voltage Pulse Applications, Interface Science, 1994, 2, pp. 281-287.
- [17] Bourkas P.D., Radiation emission phenomena in metal-dielectric-metal model under high electric fields, International Journal of Power and Energy Systems, Vol. 15, No 2, p.p. 37-41, 1995.
- [18] Μπούρκας Π.Δ., Εφαρμογές Υψηλών Τάσεων, Σημειώσεις Σεμιναρίου για Τεχνικούς της Δ.Ε.Η., (1996).
- [19] Tsitsoglou I., Halaris P.G., Karagiannopoulos C.G., and Bourkas P.D., Dielectric ageing of solid insulators relative to impact ionization, Int. J. of Power and Energy Systems, 1999, 19, (2), pp. 125-128.
- [20] Agoris D.P., Karagiannopoulos C.G., Bourkas P.D., and Psomopoulos C.S., Aging effects on solid insulators considering the form of the stressing pulses, Int. J. of Power and Energy Systems, 2000, 20, (2), pp. 86-90.
- [21] E. Kuffel; et al., High Voltage Engineering: Fundamentals. Oxford: Newnes, 2000.
- [22] Ψωμόπουλος Κ.Σ., Μη γραμμικά φαινόμενα σε μονωτές και επαφές διακοπών υψηλών τάσεων μέσω αναλογικών/ψηφιακών μετατροπέων, Διδακτορική Διατριβή, Ε.Μ.Π., Αθήνα, 2002.
- [23] G.K. Soulinaris, D.D. Dimitriadou, M.P. Paisios, P.T. Tsarabaris, P.D. Bourkas, Measurements of external partial discharges on solid dielectric prespan in air. Proc. of 8th IASTED Int. Conf. on Power and Energy Systems, EuroPES 2008, June 23rd- 25th, 2008, Corfu, Greece, 318-321.
- [24] P.D. Bourkas, C.G. Karagiannopoulos, P.T. Tsarabaris, Experimental Investigation of Short Circuit Condition in Low Voltage Distribution Networks, Proceedings of the Eighth International Conference Power and Energy Systems (EuroPES 2008) June 23-25, 2008 Corfu, Greece, p.p. 297-302.
- [25] Πείραμα ΕΜΠ για τήγματα αλουμινίου διαμέτρου 0,5mm και 1mm, Αθήνα 2008.
- [26] Ψαρρός Ε.Γ., Υπαίθριες γραμμές διανομής χαμηλής τάσης σε περιβάλλον πυρκαγιών, Διδακτορική Διατριβή, ΕΜΠ, Αθήνα, 2009.
- [27] C.D. Halevidis, S.D. Anagnostatos, A.D. Polykrati, E.I. Koufakis, P.D. 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, Generation, Transmission & Distribution, IET, 4 (2010) 793-800.
- [28] E.I. Koufakis, P.T. Tsarabaris, J.S. Katsanis, C.G. Karagiannopoulos, P.D. Bourkas, A Wildfire Model for the Estimation of the Temperature Rise of an Overhead Line Conductor, Power Delivery, IEEE Transactions on, 25 (2010) 1077-1082.
- [29] Halevidis C., Anagnostatos S., Koufakis E., Polykrati A., Bourkas P.D., Causes and consequences of sparks on the surface of insulators of middle voltage lines, Interflam, Nottingham, UK, July 2010, pp.1641-1646.

- [30] S.D. Anagnostatos, C.D. Halevidis, A.D. Polykrati, E.I. Koufakis, P.D. Bourkas, High-Voltage Lines in Fire Environment, Power Delivery, IEEE Transactions on, 26 (2011) 2053-2054.
- [31] Χαλεβίδης Κ.Δ., Κουφάκης Ε.Ι., Μπούρκας Π.Δ., Συστήματα προστασίας έναντι διακυμάνσεων της τάσεως και αποκοπής αγωγού (φάσεως ή ουδέτερου) σε γραμμές χαμηλής τάσης, Ελληνική Επιτροπή Cigre, Σύνοδος «Αθήνα 2011», 15 & 16 Δεκεμβρίου 2011, σελ. 1-12.
- [32] C.D. Halevidis, C.G. Karagiannopoulos, P.D. Bourkas, Thermal Effect of the Recloser Operation Cycle on Bare Overhead Conductors, Power Delivery, IEEE Transactions on, 27 (2012) 568-574.
- [33] C.D. Halevidis, Wooden pole ladder network model development and verification using finite element analysis, International Transactions on Electrical Energy Systems, 23 (2013) 62-71.
- [34] G.K. Soulinaris, C.D. Halevidis, F. S. Karagrigoriou, P.G. Halaris, and P.D. Bourkas: Partial Discharges Measurements on Coated and Non-Coated Solid Dielectric in Air, 10th Int. Conf. Power and Energy Systems (EuroPES 2011), Crete, Greece, 22-24 June 2011, pp. 458-451.
- [35] Α.Δ. Πολυκράτη, Συμπεριφορά στατικών ηλεκτρικών συνδέσμων υπό ταχέως μεταβαλλόμενες ηλεκτρικές καταπονήσεις, Διδακτορική Διατριβή, ΕΜΠ, Αθήνα, 2005.
- [36] Ε.Ι. Κουφάκης, Μια προσέγγιση της διάρκειας ζωής εξοπλισμού των δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας με παράδειγμα τους μετασχηματιστές διανομής, Διδακτορική Διατριβή, ΕΜΠ, Αθήνα, 2008.
- [37] Lesch G., Lehrbuch der Hochspannungstechnik, Spriger Verlag, 1959.
- [38] Οδηγία Διανομής Νο 22, Προστασία Μετασχηματιστών και Δικτύων Χαμηλής Τάσης, ΔΕΗ/ΔΕΔ/ΤΤΕ/1988.
- [39] Οδηγία Διανομής Νο 21, Προστασία Εναερίων Δικτύων Μέσης Τάσης έναντι Βραχυκυκλωμάτων, ΔΕΗ/ΔΕΔ/ΤΤΕ/1973.
- [40] IEC 60943, Guidance concerning the permissible temperature rise for parts of electrical equipment in particular for terminals, 1998.
- [41] Δ.Κ. Τσανάκας, Συμμετρικές Συνιστώσες και Ανάλυση Σφαλμάτων στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας, Ξάνθη, 1985.
- [42] AEG, Hilfsbuch für elektrische Licht und Kraft-Anlagen, 7 Aufgabe, Verlag W. Girardet, Essen, 1957.
- [43] IEC 60865-1, Short-circuit currents – calculation of effects – Part 1, 1993.
- [44] IEC 60909-0, Short-circuit currents in three-phase a.c. systems – Part 0: Calculation of currents, 2001.
- [45] ANSI C37.42, 1989, Distribution Cutouts and Fuse Links – Specifications.
- [46] J.G. Quintiere, Principles of Fire Behavior, 1st ed., Delmar Publishers, New York, 1997.
- [47] D.J. Icove, J.D. DeHaan, Forensic Fire Scene Reconstruction, 1st ed., Pearson Prentice Hall, New Jersey, 2004.

- [48] L. Zárate, J. Arnaldos, J. Casal, Establishing safety distances for wildland fires, *Fire Safety Journal*, 43 (2008) 565-575.
- [49] B. Butler, J. Cohen, Firefighter Safety Zones: A Theoretical Model Based on Radiative Heating, *International Journal of Wildland Fire*, 8 (1998) 73-77.
- [50] D. Drysdale, *An Introduction to Fire Dynamics*, 3rd ed., John Wiley & Sons, 2011.
- [51] Quintiere J.G., *Principles of Fire Behaviour*, Delmar Publishers, 1998.
- [52] Heskestad G., Flame Heights of Fuel Arrays With Combustion in Depth, *Proceedings of the Fifth International Symposium of Fire Safety Science*, International Association of Fire Safety Science, p.p. 427-438, 1997.
- [53] Psarros E.G., Kondokostas Ch. K., Tsarabaris P.T., Karagiannopoulos C.G., Bourkas P.D., Investigating The Insulation Distance Reduction Of Bare Conductors Overhead Lines Due To Residual Expansion Of Stay Wires During Fire, *Proceedings of the Eighth International Conference Power and Energy Systems (EuroPES 2008) June 23-25, 2008 Corfu, Greece*, p.p. 291-302.
- [54] E.G. Psarros, C.K. Kontokostas, P.T. Tsarabaris, C.G. Karagiannopoulos, P.D. Bourkas, Overhead lines insulation distance reduction due to stay wire's expansion from ground fires, *Generation, Transmission & Distribution, IET*, 3 (2009) 237-241.
- [55] Κανονισμοί δια την Εγκατάστασιν και Συντήρησιν Υπαίθριων Γραμμών Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΚΕΣΥΓΗΕ), ΦΕΚ-608/Β/06.10.1967, ΦΕΚ-476/Β/25.07.1969, ΦΕΚ-829/Β/19.12.1969 και ΦΕΚ 687/Β/24.08.1971).
- [56] Οδηγία Διανομής Νο 9, Προγραμματισμός και παρακολούθηση των εργασιών συντήρησης των εγκαταστάσεων διανομής, ΔΕΗ/ΔΚΣΔ, Αθήνα, 2003.
- [57] Europa Lehrmittel, Tabellenbuch Elektrotechnik, Europa Nr. 30103, S. 250.
- [58] Εγχειρίδιο Τυποποιημένων Κατασκευών Διανομής, ΔΕΗ/1η έκδοση, 1985.
- [59] Λαμπρόπουλος Κ., Μηχανική αντοχή εναερίων δικτύων διανομής, ΔΕΗ/ΓΔΔ/ΔΚΣΔ, 2002.
- [60] IEC, TR 60815: Guide for the Selection of Insulators in Respect of Polluted Conditions, ed, 1986.
- [61] CIGRE WG 33-04 Taskforce 01, A review of current knowledge: Polluted Insulators, 1998.
- [62] Hackam R., Outdoor HV composite polymeric insulators, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul*, 1999 6, pp. 557-585.
- [63] Kikuchi T., Nishimura S., Nagao M., Izumi K., Kubota Y., and Sakata M., Survey on use of non-ceramic composite insulators in the world, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul*, 1999, 6, pp. 548-556.
- [64] Gubanski S. M., Modern outdoor insulation-concerns and challenges, *IEEE Electr. Insul. Mag.*, 2005, 21, (6), pp. 5-11. Page 12 of 17 IET Review Copy Only IET Science, Measurement & Technology.

- [65] El-Hag A. H., Jayaram S. H. and Cherney E. A., "Fundamental and Low Frequency Harmonic Components of Leakage Current as a Diagnostic Tool to Study Aging of RTV and HTV Silicone Rubber in Salt-Fog", IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul, 2003, 10, pp. 128-136.
- [66] Z. Tiebin and R. A. Bernstorf, Ageing tests of polymeric housing materials for non-ceramic insulators, Electrical Insulation Magazine, IEEE, vol. 14, pp. 26-33, 1998.
- [67] M.A.R.M. Fernando and S. M. Gubanski, Leakage currents on non-ceramic insulators and materials, Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on, vol. 6, pp. 660-667, 1999.
- [68] R. J. Chang and L. Mazeika, Analysis of electrical activity associated with inclined-plane tracking and erosion of insulating materials, Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on, vol. 7, pp. 394-400, 2000.
- [69] N. Vasudev, et al., Long term ageing performance of Silicone rubber insulators under different conditions, in Properties and Applications of Dielectric Materials, 2009. ICPADM 2009. IEEE 9th International Conference on the, 2009, pp. 276-280.
- [70] M. A. R. M. Fernando and S. M. Gubanski, Ageing of silicone rubber insulators in coastal and inland tropical environment, Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on, vol. 17, pp. 326-333, 2010.
- [71] Devendranath D., Channakeshava, and Rajkumar A. D., Leakage Current and Charge in RTV Coated Insulators Under Pollution Conditions, IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul, 2002, 9, pp. 294-299.
- [72] Suwarno, Silicone Compound Coating on Ceramics Insulators Under Various Environmental Conditions, International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, Nagoya, Japan, June 2003, pp. 1015-1018.
- [73] Suwarno and Pratomosiwi F., Application of RTV Silicone Rubber Coating for Improving Performances of Ceramic Outdoor Insulator under Polluted Condition, International Conference on Electrical Engineering and Informatics, Selangor, Malaysia, August 2009, pp. 581-587.
- [74] Chmelka F., Melan E., Einführung in die Festigkeitslehre, Springer-Verlag, Vien, 1960, S. 63, 290.
- [75] Κ.Δ. Χαλεβίδης, Δηλεκτρικά και θερμικά φαινόμενα σε γραμμές μεταφοράς και διανομής, Διδακτορική Διατριβή, ΕΜΠ, Αθήνα, 2012.
- [76] Τσιτσόγλου Η., Μερικές εκκενώσεις υπό εναλλασσόμενη τάση και ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις σε πολυμερή στερεά μονωτικά. PhD thesis, ΕΜΠ, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, 1995.
- [77] Μορώνης Α.Ξ., Ηλεκτρονική συμπεριφορά των στερεών ηλεκτρομονωτικών υλικών υπό την επίδραση υψηλών ταχέως μεταβαλλόμενων ηλεκτρικών πεδίων. PhD thesis, ΕΜΠ, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, 1995.

- [78] Χάλαρης Π.Γ., Μερικές εκκενώσεις σε πολυμερή στερεά ηλεκτρομονωτικά υλικά εντός ηλεκτρομονωτικού ελαίου υπό υψηλές συνεχείς τάσεις καταπόνησης. PhD thesis, ΕΜΠ, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, 1996.
- [79] D.D. Dimitriadou, G.K.Soulinaris, P.T. Tsarabaris, C.G. Karagiannopoulos, and P.D.Bourkas: External Partial Discharges of Pertinax in Air , 8th Int. Conf. Power and Energy Systems (EuroPES 2008), Crete, Greece, 23-25 June 2008, pp. 313-317.
- [80] Οδηγία Διανομής Νο26, Μέγιστες επιτρεπόμενες φορτίσεις καλωδίων και γυμνών αγωγών ΔΕΗ/ΔΕΔ/ΤΕΕ, 1990.
- [81] R. Holm, Electric Contacts Theory and Applications, fourth ed., Springer Verlag, Berlin, 1979.
- [82] E.G. Psarros, A.D. Polykrati, C.G. Karagiannopoulos, P.D. Bourkas, A model for calculating the temperature of aluminium particles ejected from overhead low-voltage lines owing to a short-circuit, International Journal of Wildland Fire, 18 (2009) 722-726.
- [83] V. Babrauskas, Arc Beads from Fires: Can ‘Cause’ Beads be Distinguished from ‘Victim’ Beads by Physical or Chemical Testing?, Journal of Fire Protection Engineering, 14 (2004) 125-147.
- [84] Siderakis K. and Agoris D., Performance of RTV silicone rubber coatings installed in coastal systems, Electric Power Systems Research, 2008, 78, pp. 248-254.
- [85] Sparks M., Mills D.L., Warren R., Hostein T., Maradudin A.A., Sham L.J., Loh E., King D.F. Theory of Electron- Avalanche Breakdown in Solids, Phys. Rev. B, 24(5), 1981, 3519-3536.
- [86] Heskestad G., Fire Plumes, Section 2, Chapter 2-2, SEPE Handbook of Fire Protection Engineering, 2nd Edition, P.J. DiNenno, Editor-in-Chief, National Fire Protection Association, Quincy, Massachusetts, 1995.
- [87] Quantitative Fire Hazard Analysis Methods for U.S. Nuclear Regulatory Commission Fire protection Programme, Final Report, Division of System Safety and Analysis Office of Nuclear Reactor Regulation U.S. Nuclear Regulatory Commission Washington, DC 20555-0001, 2004.
- [88] Thomas P.H., The Size of Flames from Nature Fires, Nine Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh, Pennsylvania, p.p. 844-859, 1962.
- [89] Ritsko J., Electronic Properties of Polymers, ed. J. Mort and G. Pfister, New York, Wiley, 1982.
- [90] G.K. Soulinaris, C.D. Halevidis, A.D. Polykrati, P.D. Bourkas, Evaluation of the thermal stresses and dielectric phenomena in the investigation of the causes of wildfires involving distribution power lines, Electric Power Systems Research 117 (2014) 76–83.

“Μέτρον ἄριστον”

Κλεόβουλος ο Ρόδιος