



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ

Θερμική-διηλεκτρική-μηχανική καταπόνηση αγωγών του δικτύου διανομής υπό το μέγιστο ρεύμα λειτουργίας και υπό βραχυκύκλωμα

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αθανάσιος Γ. Τσιτούρας

Επιβλέπων : Δημήτριος Ε. Μανωλάκος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2016



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ

Θερμική-διηλεκτρική-μηχανική καταπόνηση αγωγών (ACSR 16 mm² , Al 16 mm²) του δικτύου διανομής υπό το μέγιστο ρεύμα λειτουργίας και υπό βραχυκύκλωμα

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αθανάσιος Γ. Τσιτούρας

Επιβλέπων : Δημήτριος Ε. Μανωλάκος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 25^η Οκτωβρίου 2016.

.....
Γεώργιος-Χριστόφορος Βοσνιάκος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Δημήτριος Μανωλάκος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

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

Αθήνα, Οκτώβριος 2016

.....

Αθανάσιος Γ. Τσιτούρας

Διπλωματούχος Μηχανολόγος Μηχανικός Ε.Μ.Π.

Copyright © Αθανάσιος Γ. Τσιτούρας, 2016

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας διπλωματικής 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.

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία αναφέρεται στη μελέτη της δυσμενέστερης θερμικής, διηλεκτρικής και μηχανικής συμπεριφοράς των αγωγών του δικτύου διανομής και μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Για το σκοπό αυτό εφαρμόστηκε υπολογιστικό μαθηματικό μοντέλο προς μελέτη των πλέον δυσμενών, από άποψη αντοχής, αγωγών. Συγκεκριμένα μελετήθηκαν αγωγοί αλουμινίου και συνεστραμμένων καλωδίων (ACSR) ισοδύναμης διατομής χαλκού 16mm^2 που χρησιμοποιούνται στις γραμμές διανομής χαμηλής και μέσης τάσης.

Στο δεύτερο κεφάλαιο καθορίζεται ο σκοπός της διπλωματικής εργασίας και περιγράφεται σύντομα η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για τον υπολογισμό της μέγιστης καταπόνησης των υπό εξέταση αγωγών.

Στο τρίτο κεφάλαιο περιγράφεται η θερμική συμπεριφορά των αγωγών του δικτύου διανομής χαμηλής και μέσης τάσης υπό το μέγιστο ρεύμα λειτουργίας και υπό βραχυκύκλωμα.

Στο τέταρτο κεφάλαιο ορίζονται οι βασικές έννοιες που αφορούν τη διηλεκτρική αντοχή των μονώσεων. Γίνεται περιγραφή της εκδήλωσης του φαινομένου των στεμματοειδών μερικών εκκενώσεων (φαινόμενο Corona) και για την αποφυγή του καθορίζεται η ελάχιστη απόσταση μόνωσης καθώς και η ελάχιστη απόσταση προστασίας μεταξύ γυμνών αγωγών του δικτύου διανομής χαμηλής και μέσης τάσης.

Στο πέμπτο κεφάλαιο γίνεται η ανάλυση της μηχανικής καταπόνησης που δέχονται οι αγωγοί υπό τις δυσμενέστερες περιβαλλοντολογικές συνθήκες.

Στο έκτο κεφάλαιο παρουσιάζονται υπό μορφή πινάκων και διαγραμμάτων τα αποτελέσματα της μελέτης.

Στο έβδομο κεφάλαιο γίνεται η εξαγωγή συμπερασμάτων επί των αποτελεσμάτων.

Στο όγδοο και τελευταίο κεφάλαιο παρατίθεται η χρησιμοποιηθείσα βιβλιογραφία για τη συγγραφή της διπλωματικής εργασίας.

Λέξεις Κλειδιά:

θερμική καταπόνηση, διηλεκτρική συμπεριφορά, μηχανική καταπόνηση, δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, αγωγοί, συνεστραμμένα καλώδια, μέγιστο ρεύμα λειτουργίας, βραχυκύκλωμα, φαινόμενο Corona.

Abstract

This diploma thesis refers to the study of the most unfavorable thermal, dielectric and mechanical behavior of the electricity distribution network conductors. For this purpose a computing mathematical model was applied in order to study the most unfavorable ,in terms of durability, conductors. Specifically two types of conductors are studied, aluminum conductors and aluminum conductors steel reinforced cables (ACSR) with equivalent cross-section of 16mm^2 , which are used in low and medium voltage distribution lines.

In the first chapter a brief description of the distribution network is carried out and an extensive reference to the quality control testing of electrical equipment installations is made. The basic characteristics of the distribution network conductors are also given and the definition of the short-circuit condition for the low voltage network is described.

The second chapter establishes the scope of this thesis and briefly describes the methodology used for the calculation of the maximum stress of the examined conductor.

The third chapter describes the thermal behavior of conductors in the low and medium voltage distribution network under the maximum operating current and under short-circuit.

In the fourth chapter the basic principles related to the dielectric behavior of the conductor's insulation are defined. A description of the Corona phenomenon is given and in order to avoid this the minimum insulation distance and the minimum distance between bare conductors of low and medium voltage distribution networks is determined.

The fifth chapter refers to the analysis of the conductors' mechanical stress under the most adverse environmental conditions.

In the sixth chapter the results of the study in the form of tables and graphs are presented.

In the seventh chapter the conclusions on the results are extracted.

In the eighth and last chapter the literature used for writing the diploma thesis is cited.

Key words:

thermal stress, dielectric behavior, mechanical stress, electricity distribution network, conductors, ACSR (Aluminum-Conductor Steel-Reinforced) , maximum operating current, short-circuit, Corona phenomenon.

Ευχαριστίες

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέπων της διπλωματικής μου εργασίας κ. Δημήτριο Μανωλάκο, Καθηγητή Ε.Μ.Π. για την εμπιστοσύνη και την ευκαιρία που μου έδωσε ώστε να ασχοληθώ με την παρούσα διπλωματική εργασία, το θέμα της οποίας τυγχάνει του άμεσου ενδιαφέροντος μου.

Η εκπόνηση της διπλωματική εργασίας δεν θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί χωρίς την πολύτιμη βοήθεια του κ. Περικλή Μπούρκα, Ομ. Καθηγητή Ε.Μ.Π. και θα ήθελα να τον ευχαριστήσω θερμά για τις πολύτιμες συμβουλές και γνώσεις που μου προσέφερε καθώς και για τον απεριόριστο χρόνο που αφιέρωσε σε κάθε στάδιο εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τους γονείς μου, Γεώργιο και Παρασκευή, για την ατέρμονη αγάπη και υποστήριξη που μου παρείχαν όλα αυτά τα χρόνια και με βοήθησαν να φτάσω μέχρι εδώ. Επίσης ευχαριστώ τον αδερφό μου, Βασίλη, για την αμέριστη ηθική υποστήριξη του καθώς και όλους τους συγγενείς και φίλους.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω την κοπέλα μου, Ευαγγελία, για την υπομονή και τη βοήθεια που μου προσέφερε όχι μόνο κατά τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας αλλά και καθ'όλη τη διάρκεια του κύκλου σπουδών μου.

Περιεχόμενα

1	Εισαγωγή.....	16
1.1	Παράδειγμα δικτύου διανομής.....	16
1.2	Δοκιμές ποιοτικού ελέγχου.....	18
1.2.1	Η δοκιμή υπερθέρμανσης (ή ανύψωσης της θερμοκρασίας).....	20
1.2.2	Διηλεκτρικές δοκιμές.....	21
1.2.3	Η δοκιμή μηχανικής αντοχής	22
1.2.4	Η δοκιμή υπό βραχυκύκλωμα	23
1.2.5	Ειδικές δοκιμές	23
1.3	Πίνακας τιμών για αγωγούς.....	24
1.4	Η συνθήκη βραχυκύκλωσης (ή ουδετέρωσης) στις γραμμές διανομής χαμηλής τάσης.....	26
2	Σκοπός της εργασίας	30
3	Η θερμική συμπεριφορά των αγωγών του δικτύου διανομής.....	32
3.1	Η θερμική συμπεριφορά των αγωγών του δικτύου διανομής υπό το μέγιστο ρεύμα λειτουργίας.....	32
3.2	Η θερμική συμπεριφορά των αγωγών του δικτύου διανομής υπό το ρεύμα βραχυκύκλωσης.....	37
3.2.1	Οι συνιστώσες του ρεύματος βραχυκύκλωσης και το ρεύμα διακοπής.....	37
3.2.2	Υπολογισμός του εναλλασσόμενου ρεύματος βραχυκύκλωσης σε γραμμές μέσης τάσης.....	40
3.2.2.1	Ο πλήρης υπολογισμός.....	40

3.2.2.2	Προσεγγιστικός υπολογισμός μέσω του μετασχηματιστή που προηγείται της θέσης βραχυκύκλωσης.....	45
3.2.2.3	Προσεγγιστικός υπολογισμός μέσω των αντιστάσεων της γραμμής και του μετασχηματιστή που προηγείται της θέσης βραχυκύκλωσης.....	46
3.2.3	Υπολογισμός της αύξησης θερμοκρασίας κατά το βραχυκύκλωμα σε γραμμές MT.....	48
3.2.4	Υπολογισμός της αύξησης θερμοκρασίας κατά το βραχυκύκλωμα σε γραμμές XT	52
4	Διηλεκτρική συμπεριφορά των αγωγών του δικτύου διανομής.....	53
4.1	Καθορισμός εννοιών για την ηλεκτρική (ή διηλεκτρική) αντοχή των μονώσεων	53
4.2	Η ελάχιστη απόσταση μόνωσης και η απόσταση προστασίας μεταξύ γυμνών αγωγών και γυμνών αγωγών του δικτύου διανομής MT.....	56
4.3	Η ελάχιστη απόσταση μόνωσης και η απόσταση προστασίας μεταξύ γυμνών αγωγών του δικτύου διανομής XT	58
4.4	Η αδυναμία εκδήλωσης του φαινομένου των σπινθηρισμών (δηλαδή του φαινομένου Corona) στους γυμνούς αγωγούς του δικτύου διανομής και η εκδήλωση του εν λόγω φαινομένου παρουσία καπναιθάλης και γενικότερα λόγω ρύπανσης.....	63
4.4.1	Γενικά περί σπινθηρισμών και ερπουσών εκκενώσεων.....	63
4.4.2	Η εκδήλωση σπινθηρισμών σε γυμνούς αγωγούς μέσης τάσης.....	65
4.4.3	Η αδυναμία εκδήλωσης σπινθηρισμών σε γυμνούς αγωγούς χαμηλής τάσης.....	69
5	Η μηχανική συμπεριφορά των γραμμών διανομής	70
6	Υπολογισμός της δυσμενέστερης θερμικής-διηλεκτρικής-μηχανικής συμπεριφοράς των αγωγών ACSR 16 mm² και αλουμινίου 16 mm².....	76

6.1	Θερμική συμπεριφορά.....	76
6.2	Διηλεκτρική συμπεριφορά.....	83
6.3	Μηχανική συμπεριφορά.....	86
7	Συμπεράσματα	92
7.1	Αξιολόγηση της θερμικής συμπεριφοράς αγωγών.....	92
7.2	Αξιολόγηση της διηλεκτρικής συμπεριφοράς αγωγών	92
7.3	Αξιολόγηση της μηχανικής συμπεριφοράς αγωγών.....	93
7.4	Μελλοντική αξιοποίηση της διπλωματικής εργασίας	93
8	Βιβλιογραφία.....	94

1

Εισαγωγή

1.1 Παράδειγμα δικτύου διανομής

Στο σχήμα 1.1-1 δίνεται απλοποιημένα ένα παράδειγμα διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα μέσω υπαίθριων γραμμών. Σύμφωνα με αυτό, από το μετασχηματιστή υψηλής τάσης (π.χ. 150 kV/20 kV, 25 MVA) του Κέντρο Υψηλής Τάσης (ΚΥΤ) αναχωρούν μέσω αυτόματων διακοπών ελαίου (ΑΔΕ) διάφορες υπαίθριες γραμμές μέσης τάσης (15 ή 20 kV), που η καθεμία αφορά τη διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας σε μία ευρύτερη περιοχή. Οι γραμμές αυτές ονομάζονται «γραμμές κορμού» και συμβολίζονται στα σχέδια με το γράμμα R και ένα αριθμό (π.χ. R 23).

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

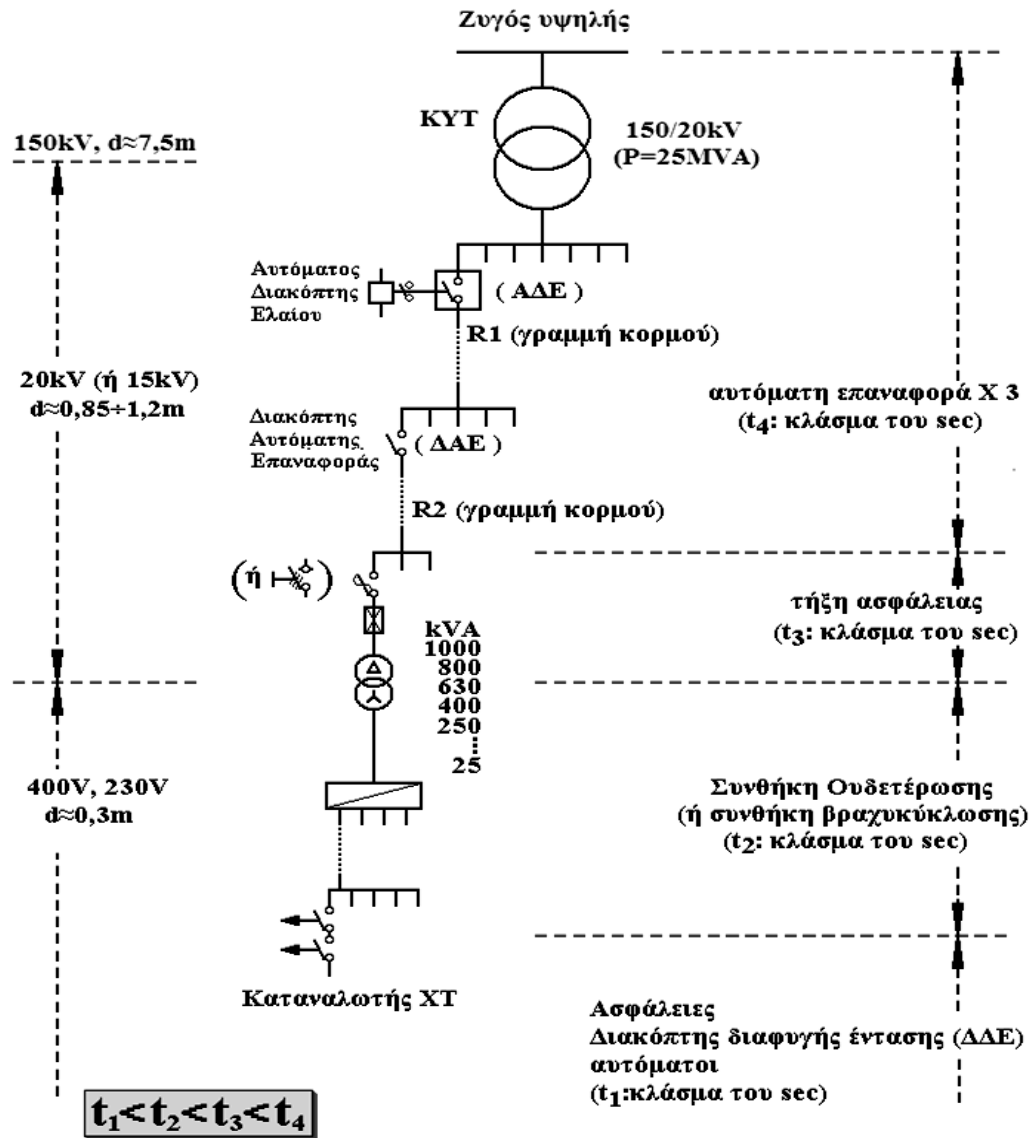
Όταν συμβεί ένα σφάλμα σε μία γραμμή κορμού (π.χ. βραχυκύκλωμα λόγω πτώσης ενός κλαδιού στη γραμμή), τότε ο διακόπτης προστασίας (ΑΔΕ ή ο ΔΑΕ) θα διακόψει αυτομάτως την ηλεκτροδότηση της συγκεκριμένης γραμμής και θα τεθεί αμέσως αυτομάτως στη θέση εντός για να ηλεκτροδοτηθεί η γραμμή και αν υπάρχει

ακόμα το σφάλμα θα γίνει και πάλι αυτόματη διακοπή και ακολούθως αυτόματη εκ νέου ηλεκτροδότηση. Αν και κατά τη δεύτερη αυτή αυτόματη προσπάθεια του διακόπτη συνεχίζει να υπάρχει το σφάλμα, θα γίνει και μία τρίτη «αυτόματη διακοπή - εκ νέου ηλεκτροδότηση» και μόνο αν εξακολουθεί να υπάρχει το σφάλμα θα συμβεί πλέον οριστική διακοπή ρεύματος της εν λόγω γραμμής κορμού. Είναι προφανές ότι η προαναφερθείσα σε «τρεις κύκλους λειτουργία» των ΑΔΕ και των ΔΑΕ αποσκοπεί, σε περιπτώσεις εμφάνισης παροδικών σφαλμάτων, τόσο στην προσπάθεια για απρόσκοπτη ηλεκτροδότηση μίας μεγάλης περιοχής, όσο και στην αποφυγή άσκοπων μετακινήσεων συνεργείων.

Όπως φαίνεται στο σχήμα 1.1-1, οι γραμμές κορμού μέσω των ΔΑΕ διακλαδίζονται με τη σειρά τους σε διάφορες γραμμές που καταλήγουν σε υποσταθμούς υποβιβασμού της μέσης τάσης σε χαμηλή τάση (20 kV/400V, 230 V). Οι υπαίθριοι υποσταθμοί μέσης τάσης εγκαθίστανται συνήθως επί στύλων (και σπανίως σε μεταλλικούς ημιυπόγειους οικίσκους σε πλατείες ή άλλους ελεύθερους κοινόχρηστους χώρους) και η ισχύς των μετασχηματιστών τους είναι συνήθως μέχρι 400 kVA. Στους υπαίθριους υποσταθμούς η γραμμή μέσης τάσης ηλεκτροδοτεί τον μετασχηματιστή μέσω μονοπολικών ασφαλειοαποξευκτών ή τριπολικών αποξευκτών, ενώ στους υποσταθμούς εσωτερικού χώρου η ηλεκτροδότηση του μετασχηματιστή (η ισχύς του οποίου είναι πάνω από 400 kVA) γίνεται μέσω συγκροτήματος πινάκων. Σημειώνεται ότι για λόγους διασύνδεσης ή απομόνωσης υπαίθριων γραμμών μέσης τάσης (σε περιπτώσεις π.χ. πυρκαγιών, εργασιών συντήρησης και εργασιών αποκατάστασης βλαβών) υπάρχουν στις γραμμές μέσης τάσης μονοπολικοί ασφαλειοαποξευκτές και τριπολικοί αποξευκτές μη εντασσόμενοι σε υπαίθριους υποσταθμούς.

Η παροχή χαμηλής τάσης (400 V, 230 V) σε καταναλωτές χαμηλής τάσης γίνεται μέσω γραμμών χαμηλής τάσης (από γυμνούς αγωγούς ή συνεστραμμένα καλώδια) που ξεκινούν από τον πίνακα χαμηλής τάσης (ασφαλειοκιβώτιο) του υποσταθμού (σχήμα 1.1-1).

Η παροχή μέσης τάσης σε καταναλωτές αφορά απορροφημένες εντάσεις ρεύματος άνω των 200 A ανά φάση, όπως συμβαίνει συνήθως σε βιομηχανίες, νοσοκομεία άνω των 100 κλινών, μεγάλα ξενοδοχεία, κτίρια ΑΕΙ, κτίρια εταιρειών, υπουργεία, κ.λ.π.



Σχήμα 1.1-1: Απλοποιημένο παράδειγμα δικτύου διανομής μέσης και χαμηλής τάσης.

- Σημειώσεις:**
1. Μετασχηματιστές άνω των 630 kVA ηλεκτροδοτούνται από συγκροτήματα πινάκων.
 2. Μετασχηματιστές 630 kVA ηλεκτροδοτούνται από συγκροτήματα πινάκων αλλά εγκαθίστανται και σε υπαίθριους υποσταθμούς.
 3. Μετασχηματιστές 25÷400 kVA είναι σε υπαίθριους υποσταθμούς.

1.2 Δοκιμές ποιοτικού ελέγχου

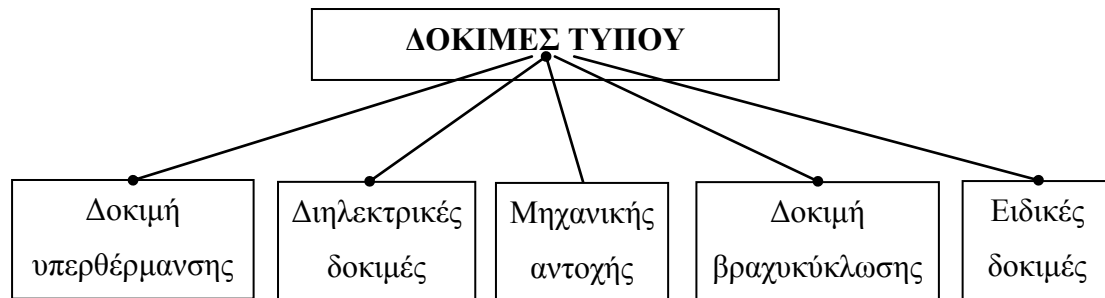
Προκειμένου να εξασφαλιστεί η αξιοπιστία μίας ηλεκτροτεχνικής κατασκευής, πρέπει, πριν αυτή διατεθεί σε χρήση, να δοκιμαστεί υπό συνθήκες λειτουργίας, που θα αντιστοιχούν στις μελλοντικές μέγιστες καταπονήσεις της στο δίκτυο. Οι δοκιμές αυτές, που συνήθως αποτελούν την τελευταία φάση της παραγωγικής διαδικασίας, προβλέπονται στους κανονισμούς (VDE, IEC, κ.λ.π.) και διακρίνονται στις δοκιμές τύπου και στις δοκιμές σειράς.

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).

Όταν μία συσκευή δεν αντεπεξέλθει επιτυχώς σε κάποια από τις προβλεπόμενες γι' αυτή δοκιμές τύπου και σειράς, τότε κρίνεται ακατάλληλη και η ζημιά για τον κατασκευαστή μπορεί να είναι αρκετά μεγάλη. Επειδή της παραγωγής προηγείται μελέτη και κατασκευή δείγματος (που έχει υποστεί επιτυχώς τις δοκιμές τύπου και σειράς), είναι φυσικό οι τυχόν αποτυχίες δοκιμών τύπου και σειράς να οφείλονται σε λάθη κατά την παραγωγική διαδικασία, ή ακόμα σε ελαττώματα που μπορεί να έχουν οι πρώτες ύλες. Γι' αυτό, προς ελαχιστοποίηση των βλαβών στην τελευταία φάση της παραγωγής, επιβάλλεται έλεγχος ποιότητας, τόσο στις πρώτες ύλες, όσο και στις διάφορες φάσεις της παραγωγής (δοκιμές πρώτων υλών και δοκιμές παραγωγής αντίστοιχα).

Οι δοκιμές τύπου δεν είναι ίδιες για κάθε ηλεκτροτεχνική κατασκευή, αλλά εξαρτώνται από το είδος της (μετασχηματιστής, καλώδιο, αποζεύκτης, διακόπτης ισχύος κ.λ.π.), τα ονομαστικά στοιχεία (τάση, ρεύμα, κ.λ.π.) 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, κ.λ.π.).

Σύμφωνα με τους διάφορους κανονισμούς που προβλέπονται για τις δοκιμές τύπου προκύπτει η κατωτέρω κατηγοριοποίηση τους:



Σχήμα 1.2-1: Κατάταξη των δοκιμών τύπου σε 5 βασικές κατηγορίες.

1.2.1 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 κ.λ.π.). Η χρονική διάρκεια της δοκιμής εξαρτάται από το είδος της κατασκευής (π.χ. στους μετασχηματιστές ελαίου 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 περίπου την τιμή $\Delta\theta_N \approx 40\text{ }^\circ\text{C}$ (αφορά τις γραμμές του δικτύου διανομής σύμφωνα με τους κανονισμούς). Η τιμή $\Delta\theta_N$ είναι δηλαδή η ονομαστική αύξηση της θερμοκρασίας (ως προς τη θερμοκρασία περιβάλλοντος) υπό ονομαστικό ρεύμα I_N . Το όριο αυτό των $40\text{ }^\circ\text{C}$ ικανοποιεί τις πρακτικές εφαρμογές, γιατί από τις οικονομοτεχνικές επιλογές των κατασκευών, που εφαρμόζονται επί αρκετά έτη, διαπιστώνεται ότι δεν αποσταθεροποιούνται οι επαφές λυόμενων ηλεκτρικών συνδέσμων και δεν δημιουργούνται προβλήματα υπερθέρμανσης στο λάδι μετασχηματιστών, λόγω ηλεκτρικών επαφών εντός αυτού.

Η εν λόγω οριακή τιμή σε στατικές επαφές (όπως επαφές ασφαλειοθηκών, επαφές αποζευκτών, επαφές σφικτήρων, επαφές αυτόματων διακοπών στη θέση εντός, κ.λ.π.) πρέπει να αντικατοπτρίζει στην πράξη έναν ηλεκτρικό σύνδεσμο, που η αντίσταση διάβασής του είναι άνευ σημασίας για αύξηση της θερμοκρασίας μέχρι

περίπου 40 °C ως προς τη θερμοκρασία περιβάλλοντος (ακόμη και υπό συνθήκες υψηλού καύσωνα για υπαίθριες κατασκευές). Κατά τον τρόπο αυτό διασφαλίζεται ότι δεν θα αυξηθεί η αντίσταση διάβασης του ηλεκτρικού συνδέσμου, διαφορετικά για $\Delta\theta > \Delta\theta_N$ θα συμβεί αποσταθεροποίηση του λυόμενου ηλεκτρικού συνδέσμου, με επακόλουθο την αύξηση της αντίστασής του και την περαιτέρω αύξηση της θερμοκρασίας, που είναι βέβαιο ότι θα οδηγήσει σε μείωση του ονομαστικού ρεύματος με εμφανή ίχνη συγκόλλησης των δύο μερών της επαφής και σε αρκετές περιπτώσεις και δημιουργία τηγμάτων μετάλλου. Αυτός είναι ο λόγος που επιβάλλεται προγραμματισμένα ο έλεγχος των ηλεκτρικών επαφών και μέσω της θερμοκάμερας ο ετήσιος έλεγχος των ηλεκτρικών συνδέσμων στα δίκτυα (όπως σφικτήρες, γέφυρες, συνδέσεις επί μονωτήρων, κ.λ.π.).

1.2.2 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, 150 kV, κ.λ.π. 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). Επειδή κάθε ηλεκτροτεχνική κατασκευή ισοδυναμεί ως προς τη διηλεκτρική της αντοχή με έναν πυκνωτή, οι διηλεκτρικές δοκιμές στοχεύουν στην εξακρίβωση της ικανότητας να λειτουργεί ο εν λόγω πυκνωτής στην πράξη χωρίς να αναιρείται η μονωτική ικανότητά του. 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 ονομαστική τάση, όταν η κατασκευή διαθέτει την απαιτούμενη προς τούτο στάθμη μόνωσης.

Εκτός από τις δύο παραπάνω βασικές δοκιμές προβλέπονται, ανάλογα με το είδος της κατασκευής, και άλλες διηλεκτρικές δοκιμές, όπως: η διεξαγωγή των παραπάνω δοκιμών σε μονωτήρες βαρέως τύπου υπό συνθήκες βροχής (οι μονωτήρες

αυτοί χρησιμοποιούνται σε περιοχές, όπου συνήθως επικρατούν ρύπανση και κακές καιρικές συνθήκες), η δοκιμή στάθμης θορύβου (λόγω μερικών εκκενώσεων) σε μετασχηματιστές, η μέτρηση της tgδ (που γίνεται και κατά τις εργασίες συντήρησης, όπως π.χ. σε μετασχηματιστές μέτρησης και μετασχηματιστές του δικτύου μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας), κ.λ.π.

1.2.3 Η δοκιμή μηχανικής αντοχής

Η δοκιμή μηχανικής αντοχής αφορά κυρίως την ικανότητα σε ονομαστικό ρεύμα των επαφών των διακοπών μετά από ένα μεγάλο αριθμό χειρισμών, ενώ παράλληλα ελέγχεται η στιβαρότητα της κατασκευής (ενδεχομένως παραμορφώσεις των επαφών ή τυχόν αποσυναρμολογήσεις ή ακατάλληλα ελατήρια κ.λ.π.). Ένας αποζεύκτης π.χ. 20 kV/400 A θα πρέπει να έχει μετά από 1000 πλήρεις κύκλους χειρισμών την ίδια ικανότητα σε ονομαστικό ρεύμα (400 A). Μετά το πέρας δηλαδή της δοκιμής αυτής, θα πρέπει να γίνει η δοκιμή υπερθέρμανσης. Η προαναφερθείσα δοκιμή μηχανικής αντοχής στον αποζεύκτη είναι δοκιμή τύπου. Εκτός από αυτήν υπάρχει και δοκιμή σειράς για τη μηχανική αντοχή των διακοπών, σύμφωνα με την οποία μετά από μερικούς κύκλους χειρισμού γίνεται μόνο οπτικός έλεγχος για την κατάσταση των επαφών.

Σε αρκετές κατασκευές ελέγχεται η μηχανική αντοχή του περιβλήματος τους, όπως το δοχείο ελαίου των μετασχηματιστών διανομής, η μεταλλική επένδυση πινάκων μέσης τάσης, κ.λ.π. Η δοκιμή αυτή γίνεται π.χ. με μία σφαίρα (υπό μορφή εκκρεμούς), η οποία προσκρούοντας στο περίβλημα της κατασκευής δεν πρέπει να προκαλεί το παραμικρό βαθούλωμα στη λαμαρίνα. Με τον τρόπο αυτό ελέγχεται ουσιαστικά η καταλληλότητα του πάχους της λαμαρίνας, για να εξασφαλιστεί κατά τη μεταφορά, εγκατάσταση και λειτουργία η στιβαρότητα της κατασκευής.

1.2.4 Η δοκιμή υπό βραχυκύκλωμα

Με τη δοκιμή υπό βραχυκύκλωμα ελέγχεται η καταπόνηση μίας ηλεκτροτεχνικής κατασκευής από τις μεγάλες δυνάμεις και θερμοκρασίες που αναπτύσσονται κατά το βραχυκύκλωμα. Η δοκιμή διαρκεί 1 s, αρκετό δηλαδή χρόνο, ως προς εκείνον ενεργοποίησης των μέσων προστασίας του δικτύου. Κατά τη δοκιμή μετρώνται οι συνιστώσες του ρεύματος βραχυκύκλωσης, ανάλογα με την απαιτούμενη ισχύ βραχυκύκλωσης, που καθορίζεται από τη θέση της κατασκευής στο δίκτυο. Η δοκιμή θεωρείται επιτυχής όταν, μετά το πέρας της, δεν έχουν αναιρεθεί η στάθμη μόνωσης και η ικανότητα σε ονομαστικό ρεύμα (δηλαδή, στη συνέχεια πραγματοποιούνται στο συγκεκριμένο δοκίμιο οι διηλεκτρικές δοκιμές και η δοκιμή υπερθέρμανσης).

1.2.5 Ειδικές δοκιμές

Οι δοκιμές, που χαρακτηρίζονται ως «ειδικές», αναφέρονται στις ειδικές απαιτήσεις που χαρακτηρίζουν μία κατασκευή και περιλαμβάνονται αναλυτικά στους κανονισμούς, ανάλογα με την περίπτωση. Έτσι, η μέτρηση π.χ. των απωλειών ενός μετασχηματιστή, ο έλεγχος της ποιότητας βαφής ενός πίνακα εξωτερικού χώρου, κ.λ.π., αποτελούν, κατά το παραπάνω σκεπτικό, ειδικές δοκιμές, γιατί αναφέρονται σε συγκεκριμένες ειδικές απαιτήσεις που καθορίζονται από το είδος και τη χρήση της κατασκευής.

1.3 Πίνακες τιμών για αγωγούς

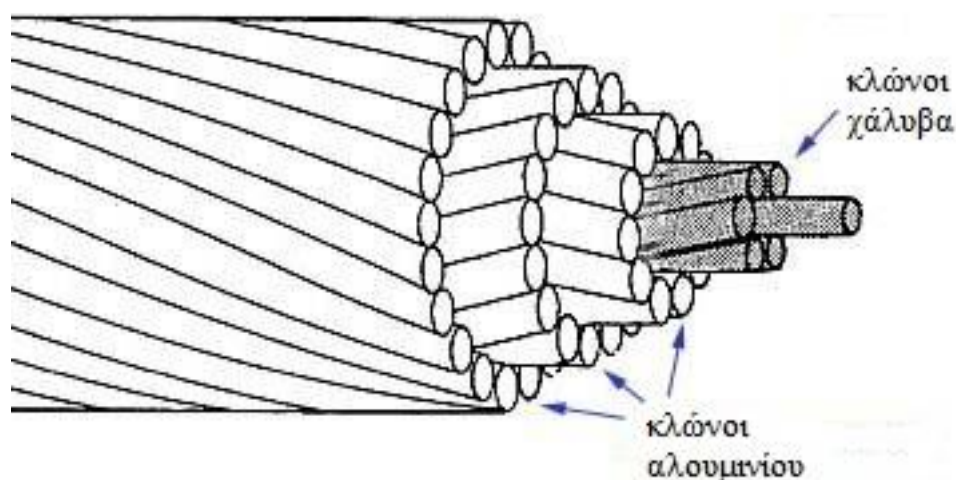
Στα εναέρια δίκτυα διανομής χρησιμοποιούνται κυρίως αγωγοί φτιαγμένοι από χαλκό (Cu) ή αλουμίνιο (Al). Ο χαλκός εμφανίζει υψηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα και όταν είναι σκληρής ολκήσεως έχει μεγάλη μηχανική αντοχή. Παρόλα αυτά παρουσιάζει ως μειονέκτημα το βάρος του. Σε αντίθεση το αλουμίνιο είναι πιο φτωχό από τον χαλκό στην ηλεκτρική αγωγιμότητα και την αντοχή, αλλά είναι ελαφρύτερο και πιο οικονομικό. Επίσης ο αγωγός από αλουμίνιο δέχεται μεγαλύτερη επιφόρτιση από τον πάγο και τον άνεμο λόγω της μεγαλύτερης του επιφάνειας, αλλά ταυτόχρονα περιορίζονται σε αυτόν οι απώλειες λόγω του φαινομένου Corona.

Το αλουμίνιο ακόμα και σε κανονικές ατμοσφαιρικές συνθήκες οξειδώνεται και σκουριάζει επιφανειακά, ωστόσο το στρώμα αυτό της οξείδωσης είναι πολύ λεπτό και προστατεύει τον υπόλοιπο αγωγό από περαιτέρω οξείδωση.

Παρόλα αυτά σε περίπτωση που αγωγοί αλουμινίου τοποθετηθούν πολύ κοντά σε θάλασσα (μέχρι και 1 km) παρουσιάζουν ακόμη πιο έντονη οξείδωση. Λόγω αυτού λοιπόν, καθώς επίσης και λόγω της μικρής μηχανικής αντοχής του αλουμινίου, οι αγωγοί αλουμινίου χρησιμοποιούνται κυρίως σε περιβάλλον μακριά από τη θάλασσα και σε γραμμές χαμηλής τάσης καθώς τα μήκη των γραμμών υψηλής τάσης είναι πολύ μεγάλα, άρα και οι δυνάμεις που αναπτύσσονται στους αγωγούς. Παρόλα αυτά, το αλουμίνιο είναι δυνατόν να αποκτήσει την κατάλληλη μηχανική αντοχή αν συνδυαστεί με χάλυβα ο οποίος παρουσιάζει εξαιρετική μηχανική αντοχή. Σε αυτήν την περίπτωση ο αγωγός δεν είναι συμπαγής αλλά αποτελείται από ένα πλήθος συνεστραμμένων κλώνων για λόγους ευκαμψίας. Με την τεχνική των συνεστραμμένων καλωδίων διευκολύνεται η ενσωμάτωση συρμάτων χάλυβα μέσα στον αγωγό αλουμινίου, πράγμα που καθιστά στο σύνολό του τον αγωγό πιο ανθεκτικό μηχανικά. Έτσι προκύπτει ο αγωγός αλουμινίου με ενίσχυση χάλυβα (Aluminum Conductor Steel Reinforced-ACSR). Αυτός ο τύπος αγωγού έχει στο κέντρο του κλώνους από χάλυβα οι οποίοι είναι διατεταγμένοι σε στρώματα που αποτελούν τον πυρήνα του αγωγού και γύρω από τον πυρήνα είναι διατεταγμένα στρώματα κλώνων αλουμινίου όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1.3-1.

Σε κάθε περίπτωση η επιλογή του κατάλληλου αγωγού βασίζεται στις μηχανικές και ηλεκτρικές απαιτήσεις της γραμμής. Τα υλικά θα πρέπει να διαθέτουν

υψηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα, υψηλή μηχανική αντοχή, μικρό ειδικό βάρος και χαμηλή οξείδωση στον αέρα.



Σχήμα 1.3-1: Μορφή αγωγών αλουμινίου ενισχυμένου με χάλυβα-ACSR.

Συνήθως για τον χαρακτηρισμό των αγωγών αλουμινίου ή τύπου ACSR δίνεται η ισοδύναμη διατομή αγωγού χαλκού, η διατομή δηλαδή που θα είχε ένας αγωγός ίδιας αντίστασης κατασκευασμένος όμως από χαλκό. Κατά αυτή τη λογική δίνεται στους Πίνακες 1.3-1 και 1.3-2 το ονομαστικό ρεύμα διάφορων τύπων αγωγών του δικτύου διανομής χαμηλής και μέσης τάσης.

Διατομή σε mm ²	Ονομαστικό ρεύμα γυμνών αγωγών ισοδύναμης διατομής χαλκού σε A	Ονομαστικό ρεύμα συνεστραμμένων καλωδίων σε A
16	145	
35	239	126
70		194

Πίνακας 1.3-1: Ονομαστικό ρεύμα αγωγών αλουμινίου και συνεστραμμένων καλωδίων του δικτύου διανομής χαμηλής τάσης.

Διατομή σε mm ²	Ονομαστικό ρεύμα γυμνών αγωγών ισοδύναμης διατομής χαλκού σε A	Ονομαστικό ρεύμα αγωγών ACSR σε A
16	115	136
35	185	224
95	352	448

Πίνακας 1.3-2: Ονομαστικό ρεύμα αγωγών αλουμινίου και ACSR του δικτύου διανομής μέσης τάσης.

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

Στους παρακάτω πίνακες δίνονται (κατά τον κανονισμό ΟΔ-22/ΔΕΔ-ΤΤΕ Δ-4/4-7-88 της ΔΕΗ και την βιβλιογραφία γενικότερα) οι τιμές των ασφαλειών σε πίνακες χαμηλής τάσης του δικτύου διανομής, ανάλογα με τον μετασχηματιστή και το μήκος της γραμμής. Το μικρότερο μήκος αφορά την γραμμή χωρίς το καλώδιο παροχής (συγκεντρικό καλώδιο 2x6 mm² μήκους 30 m) και το μεγαλύτερο μήκος τη γραμμή με το καλώδιο παροχής.

Ισχύς kVA	Ασ- φά- λεια A	Γομνοί αγωγοί	Γομνοί αγωγοί	Γομνοί αγωγοί	Γομνοί 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 380	
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 1.4-1: Τιμές ασφαλειών σε πίνακες χαμηλής τάσης του δικτύου διανομής (400V/230V) για μετασχηματιστές 15÷200 kVA.

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- 400	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
	125	240 160	460 310	600 420	740 540	360 240	500 330
500- 630	160	180 110	360 210	470 280	580 360	280 160	400 220
	200		280 140	370 180	460 240	220 100	310 140
750- 1000	250		230 80	300 100	360 140		250 80
	315			230 40	280 50		
	400				220		
	500						

Πίνακας 1.4-2: Τιμές ασφαλειών σε πίνακες χαμηλής τάσης του δικτύου διανομής (400V/230V) για μετασχηματιστές 250÷1000 kVA.

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. Για τη μετατροπή α μέτρων αγωγού αντίστασης Z_α (σε Ω/km) σε αντίσταση Z_β (σε Ω/km) ισχύει η σχέση:

$$\beta = \alpha (Z_\alpha/Z_\beta) \quad (1.4-1)$$

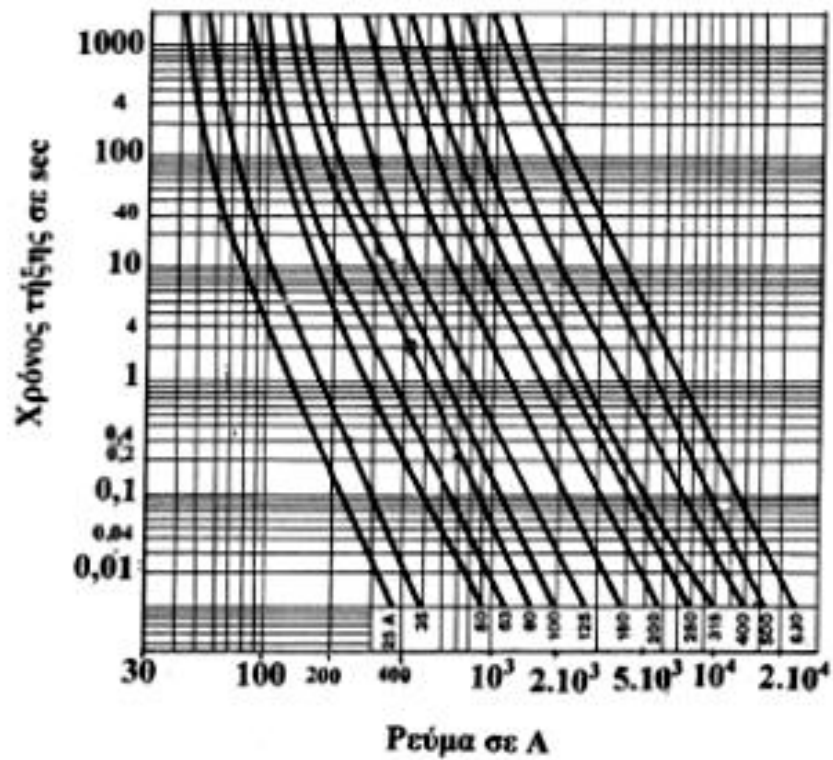
Στον πίνακα 1.4-3 δίνεται το πηλίκο Z_α/Z_β για γυμνούς αγωγούς και συγκεντρικά καλώδια.

Διατομή γυμνού αγωγού Cu ή ισοδύναμου Al	16 mm ² (Z _β =2,570 Ω/km)	35 mm ² (Z _β =1,310 Ω/km)	50 mm ² (Z _β =0,967 Ω/km)	70 mm ² (Z _β =0,797 Ω/km)
16 mm ² (Z _α =2,570 Ω/km)	Z _α /Z _β = 1,000	Z _α /Z _β = 1,962	Z _α /Z _β = 2,658	Z _α /Z _β = 3,224
35 mm ² (Z _α =1,310 Ω/km)	Z _α /Z _β = 0,509	Z _α /Z _β = 1,000	Z _α /Z _β = 1,355	Z _α /Z _β = 1,644
50 mm ² (Z _α =0,967 Ω/km)	Z _α /Z _β = 0,376	Z _α /Z _β = 0,738	Z _α /Z _β = 1,000	Z _α /Z _β = 1,213
70 mm ² (Z _α =0,797 Ω/km)	Z _α /Z _β = 0,310	Z _α /Z _β = 0,608	Z _α /Z _β = 0,824	Z _α /Z _β = 1,000
Διατομή συγκεντρικού καλωδίου Cu				
6 mm ² (Z _α =7,754 Ω/km)	Z _α /Z _β = 3,017	Z _α /Z _β = 5,917	Z _α /Z _β = 8,020	Z _α /Z _β = 9,730
10 mm ² (Z _α =4,334 Ω/km)	Z _α /Z _β = 1,685	Z _α /Z _β = 3,307	Z _α /Z _β = 4,482	Z _α /Z _β = 5,438
16 mm ² (Z _α =2,804 Ω/km)	Z _α /Z _β = 1,091	Z _α /Z _β = 2,140	Z _α /Z _β = 2,900	Z _α /Z _β = 3,518
25 mm ² (Z _α =1,788 Ω/km)	Z _α /Z _β = 0,695	Z _α /Z _β = 1,364	Z _α /Z _β = 1,850	Z _α /Z _β = 2,243

Πίνακας 1.4-3: Τιμές Z_α/Z_β για γυμνούς αγωγούς Cu ή ισοδύναμου Al και συγκεντρικά καλώδια.

Όταν ικανοποιούνται οι απαιτήσεις κατά τους ανωτέρω πίνακες, τότε ισχύει η συνθήκη ουδετέρωσης (ή βραχυκύκλωσης), που σημαίνει ότι κατά το βραχυκύκλωμα συμβαίνει ακαριαία (σε κλάσμα του δευτερολέπτου) τήξη της ασφάλειας, με αποτέλεσμα να θερμαίνονται οι αγωγοί μόνο μερικούς βαθμούς Κελσίου και συνεπώς να μη δημιουργούνται τήγματα αλουμινίου από αυτούς. Σημειώνεται ότι, ακόμα και αν υποθεθεί ότι δημιουργήθηκαν (άγνωστο πως) τήγματα αλουμινίου, κατά την πρόσκρουσή τους στο έδαφος έχουν ήδη αποπυρακτωθεί.

Στο σχήμα 1.4-1 δίνονται χαρακτηριστικές ρεύματος-χρόνου τήξης ασφαλειών σε πίνακες διανομής χαμηλής τάσης.



Σχήμα 1.4-1: Χαρακτηριστικές «ρεύματος - χρόνου τήξεις» ασφαλειών σε πίνακες διανομής χαμηλής τάσης.

2

Σκοπός της εργασίας

Οι αγωγοί μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας αποτελούν ένα από τα σημαντικότερα στοιχεία του δικτύου αφού εκτείνονται σε εκατομμύρια χιλιόμετρα και διέρχονται από πληθώρα γεωγραφικών περιοχών. Μεταξύ των περιοχών αυτών υπάρχει ποικιλία ηλεκτρικών φορτίων καθώς και διαφορετικές περιβαλλοντολογικές συνθήκες που καταπονούν τους αγωγούς. Συνεπώς είναι πολύ σημαντικός ο υπολογισμός της αντοχής τους στις διάφορες καταπονήσεις που δέχονται ώστε να αποφευχθούν τυχόν φαινόμενα τήξεως ή αποκοπής αγωγών ή μία ενδεχόμενη εμφάνιση σπινθηρισμών. Τέτοια φαινόμενα αποτελούν απειλή όχι μόνο για το ίδιο το δίκτυο αλλά και για το περιβάλλον, τον άνθρωπο κ.λ.π.

Η παρούσα διπλωματική εργασία στοχεύει στη μελέτη της δυσμενέστερης θερμικής, διηλεκτρικής και μηχανικής συμπεριφοράς των αγωγών ενός ιδανικού δικτύου διανομής. Η μελέτη αφορά αγωγούς αλουμινίου και συνεστραμμένων καλωδίων με χαλύβδινη ψυχή (ACSR) ,ισοδύναμης διατομής χαλκου 16mm^2 , χαμηλής και μέσης τάσης.

Για το δίκτυο που αναφέρθηκε υπολογίζουμε την αύξηση της θερμοκρασίας των γραμμών μεταφοράς και διανομής όταν δέχεται το μέγιστο ρεύμα λειτουργίας και στην περίπτωση που δέχεται το ρεύμα βραχυκυκλώσεως. Υπολογίζουμε επίσης την ελάχιστη απαιτούμενη πεδιακή ένταση του ηλεκτρικού πεδίου για την εκδήλωση

σπινθηρισμών καθώς και τη μηχανική καταπόνηση των αγωγών υπό τις δυσμενέστερες περιβαλλοντολογικά συνθήκες που μπορεί να επικρατούν σε κάποια περιοχή. Τα αποτελέσματα θα προκύψουν μέσα από κατάλληλα μαθηματικά μοντέλα που θα περιγραφούν αναλυτικά σε επόμενα κεφάλαια.

3

Η θερμική συμπεριφορά των αγωγών του δικτύου διανομής

3.1 Η θερμική συμπεριφορά των αγωγών του δικτύου διανομής υπό το μέγιστο ρεύμα λειτουργίας

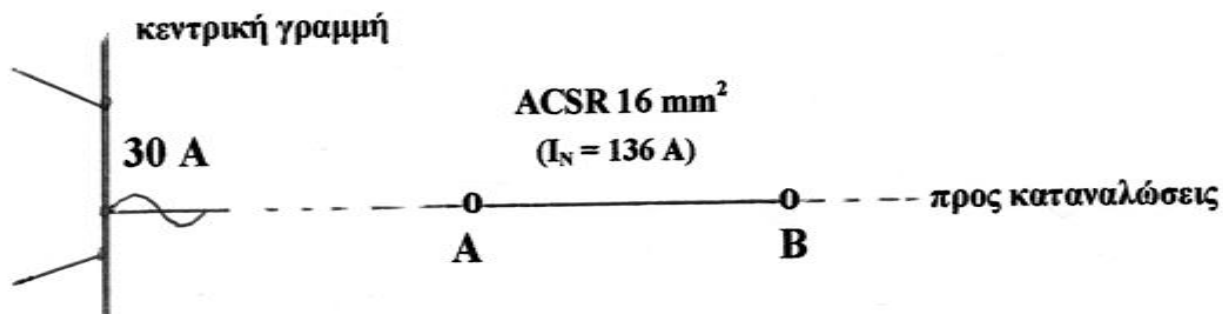
Η τιμή $\Delta\theta_N$ μπορεί να αξιοποιηθεί σε πολλές περιπτώσεις στην πράξη. Το θέμα αυτό εξετάζεται ακολούθως μέσω ενός παραδείγματος από το δίκτυο διανομής, που αφορά π.χ. τη θερμική καταπόνηση μεταξύ δύο στύλων ενός γυμνού αγωγού ACSR 16 mm² σε λειτουργία υπό ρεύμα I_Λ για το οποίο ισχύει κατά κανόνα λόγω των μέσων προστασίας (ασφαλειοαποζεύκτες, διακόπτες αυτόματης επαναφοράς και ελαιοδιακόπτες):

$$I_\Lambda \leq I_N \quad (3.1-1)$$

όπου $I_N = 136$ A για τον συγκεκριμένο αγωγό.

Αναζητώντας στοιχεία από ηλεκτρολογικά σχέδια για το τμήμα του δικτύου όπου είναι εγκατεστημένος ο εν λόγω αγωγός μεταξύ των δύο στύλων (τμήμα AB), διαπιστώνεται π.χ. ότι η μέγιστη δυνατή ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος (I_Λ) σε

αυτόν δεν μπορούσε να υπερβεί τα 30 A γιατί περιορίζεται από το ονομαστικό ρεύμα των 30 A των ασφαλειών των ασφαλειοαποζευκτών στην αρχή της γραμμής (βλ. σχήμα 3.1-1).



Σχήμα 3.1-1: Απλοποιημένο σχέδιο του τμήματος AB μίας γραμμής μέσης τάσης με ασφαλειοαποζεύκτες 30 A στην αρχή της γραμμής.

Αν R είναι η αντίσταση ενός αγωγού μεταξύ των δύο στύλων (όπου ενδιαφέρει η αύξηση της θερμοκρασίας ως προς τη θερμοκρασία περιβάλλοντος), τότε για λειτουργία υπό I_L ισχύει περίπου:

$$I_L^2 \cdot R \approx \kappa \cdot A \cdot \Delta\theta \quad (3.1-2)$$

όπου κ ένας συντελεστής θερμοπερατότητας, A η επιφάνεια απαγωγής της θερμότητας και $\Delta\theta$ η αύξηση της θερμοκρασίας.

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

$$I_N^2 \cdot R \approx \kappa \cdot A \cdot \Delta\theta_N \quad (3.1-3)$$

όπου $\Delta\theta_N \approx 40 \text{ }^\circ\text{C}$. Από τις σχέσεις 3.1-2 και 3.1-3 έπεται ότι:

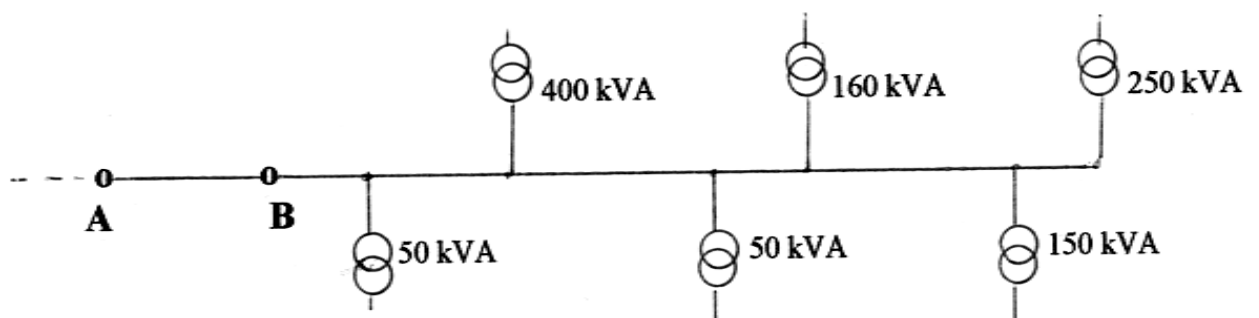
$$\Delta\theta = \Delta\theta_N \cdot (I_L/I_N)^2 = 40 \cdot (30/136)^2 \approx 1,95 \text{ }^\circ\text{C} \quad (3.1-4)$$

Επομένως, αν θεωρηθεί ότι επικρατούσε καύσωνας με θερμοκρασία π.χ. 44°C κατά την Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία, η συνολική θερμοκρασία στο τμήμα AB του αγωγού θα ήταν:

$$\Theta = 44 + \Delta\theta = 45,95 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (3.1-5)$$

Από την παραπάνω συνολική θερμοκρασία του εν λόγω αγωγού προκύπτει π.χ. το συμπέρασμα ότι αποκλείεται παντελώς να συμβεί τήξη του αγωγού λόγω του ηλεκτρικού φορτίου του, γιατί η θερμοκρασία τήξης είναι για το αλουμίνιο 660 °C και τον χάλυβα 1350÷1500 °C. Υπάρχει περιορισμός της τιμής του ρεύματος από τα μέσα προστασίας, όπως εν προκειμένω από τους ασφαλειοαποζεύκτες των 30 A, γεγονός που αποτρέπει τυχόν αποκοπή αγωγών ή τη δημιουργία τηγμάτων. Για το παράδειγμα που προαναφέρθηκε, σημειώνεται, ότι στην ίδια περίπτωση θερμοκρασία καταλήγει κανείς αν υπολογίσει το συνολικό ρεύμα των ηλεκτρικών φορτίων (εν προκειμένου τα ονομαστικά ρεύματα των επιμέρους υποσταθμών), που ηλεκτροδοτούνται μέσω του υπό εξέταση τμήματος AB της γραμμής, ακόμη και αν δεν ληφθεί υπόψη ο συντελεστής ετεροχρονισμού. Πράγματι, αν θεωρηθεί π.χ. ότι μέσω του τμήματος AB της γραμμής ηλεκτροδοτούνται οι μετασχηματιστές: 50 kVA, 400 kVA, 250 kVA, 50 kVA, 160 kVA, 160 kVA, 150 kVA και 250 kVA (βλ. σχήμα 3.1-2), τότε το μέγιστο δυνατό συνολικό ηλεκτρικό φορτίο είναι:

$$P = 50+400+250+50+160+160+150+250 = 1470 \text{ kVA} \quad (3.1-6)$$



Σχήμα 3.1-2: Απλοποιημένο σχέδιο των ηλεκτρικών φορτίων στο τμήμα AB μίας γραμμής μέσης τάσης.

Επομένως η τιμή I_{Λ} θα ήταν (για δίκτυο των 20 kV):

$$I_{\Lambda} = P/(1,73 \cdot 20) \approx 42,5 \text{ A} \quad (3.1-7)$$

Επειδή η παραπάνω τιμή ρεύματος είναι μεγαλύτερη από το ονομαστικό ρεύμα των ασφαλειών των ασφαλειοαποζευκτών (30 A) θα γινόταν απαραίτητως τήξη των ασφαλειών των 30 A και συνεπώς η αύξηση της θερμοκρασίας θα ήταν ασήμαντη. Αν παρά τα ανωτέρω θεωρηθεί, ως υπόθεση, ότι υπήρξε μία αύξηση της θερμοκρασίας λόγω των 42,5 A (στο χρόνο δηλαδή μέχρι να συμβεί τήξη των ασφαλειών των 30 A), τότε, κατ' αντιστοιχία προς τη σχέση 3.1-4 ανωτέρω, η τιμή της θα ήταν:

$$\Delta\theta = \Delta\theta_N \cdot (I/I_N)^2 = 60 \cdot (42,5/136)^2 \approx 6 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (3.1-8)$$

Συνεπώς, η συνολική μέγιστη δυνατή θερμοκρασία του εν λόγω τμήματος των αγωγών, (υπό θερμοκρασία περιβάλλοντος 44°C κατά την Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία), θα ήταν:

$$\Theta = 44 + \Delta\theta = 50 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (3.1-9)$$

Στην πράξη βέβαια θα πρέπει να λάβει κανείς υπόψη τον συντελεστή ετεροχρονισμού των ηλεκτρικών φορτίων ο οποίος είναι της τάξεως του 0,4. Στην περίπτωση δηλαδή αυτή η ισχύς είναι:

$$P = 0,4 \cdot 1470 = \text{kVA} \quad (3.1-10)$$

Επομένως η τιμή I_{Λ} θα ήταν (για δίκτυο των 20 kV):

$$I_{\Lambda} = P/(1,73 \cdot 20) \approx 16,8 \text{ A} \quad (3.1-11)$$

Επομένως, η υπερθέρμανση που προκαλείται από την παραπάνω τιμή ρεύματος είναι πολύ μικρότερη των 6 °C.

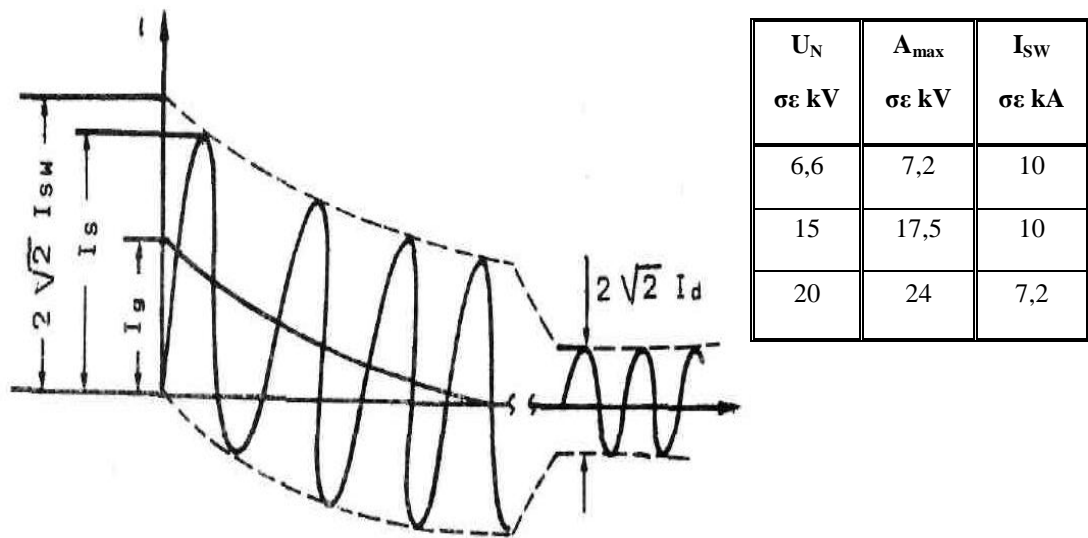
Από το προαναφερθέν παράδειγμα φαίνεται ότι μπορεί να γίνει και το αντίστροφο, δηλαδή από την αύξηση της θερμοκρασίας $\Delta\theta$ να βρεθεί προσεγγιστικά το ρεύμα μίας γραμμής διανομής χαμηλής ή μέσης τάσης, αρκεί προς τούτο να

μετρηθεί με θερμοκάμερα η θερμοκρασία των αγωγών και να είναι γνωστή η θερμοκρασία περιβάλλοντος. Αυτό μπορεί να είναι χρήσιμο στον έλεγχο π.χ. της τιμής του ρεύματος στις ώρες αιχμής, στον έλεγχο της οικονομοτεχνικής αξιοποίησης ενός υποσταθμού σε σχέση με τις καταναλώσεις του, κ.λ.π.

Επισημαίνεται ότι, όπως έχει προαναφερθεί, η μέτρηση της θερμοκρασίας ενδιαφέρει ιδιαίτερα για την κατάσταση λειτουργίας ορισμένων εξαρτημάτων του δικτύου (γέφυρες, σφικτήρες λυόμενοι σύνδεσμοι, κ.λ.π.), όπου η τιμή $\Delta\Theta$ ενδέχεται να αυξηθεί σε τιμή μεγαλύτερη από τη $\Delta\Theta_N$. Τέτοια προβλήματα αντιμετωπίζονται στην πράξη με θερμογραφήματα, στα πλαίσια των προγραμματισμένων ετήσιων εργασιών επιθεώρησης του δικτύου.

3.2 Η θερμική συμπεριφορά των αγωγών του δικτύου διανομής υπό το ρεύμα βραχυκύκλωσης

3.2.1 Οι συνιστώσες του ρεύματος βραχυκύκλωσης και το ρεύμα διακοπής



Σχήμα 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

Οι συνιστώσες του ρεύματος βραχυκύκλωσης δίνονται στο σχήμα 3.2.1-1. Για το εναλλασσόμενο ρεύμα βραχυκύκλωσης (I_{sw}) ισχύει η σχέση:

$$I_{sw} = \frac{1,1 \cdot U_N}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{R_{ολ}^2 + X_{ολ}^2}} \quad (3.2.1-1)$$

όπου U_N η ονομαστική τάση και $R_{ολ}$ και $X_{ολ}$ η συνολική ωμική και επαγωγική αντίσταση αντίστοιχα μέχρι τη θέση βραχυκύκλωσης.

Η Δυναμική καταπόνηση προκαλείται από το κρουστικό ρεύμα βραχυκύκλωσης (I_S) για το οποίο ισχύει:

$$I_S = \kappa \cdot \sqrt{2} \cdot I_{SW} \quad (3.2.1-2)$$

όπου κ ένας συντελεστής που βρίσκεται από τον πίνακα 3.2.1-1.

Η εξάσκηση δύναμης λόγω του I_S είναι:

$$F = (\mu_0 \cdot I_S^2 \cdot L) / (2 \cdot \pi \cdot d) \quad (3.2.1-3)$$

όπου $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{ V} \cdot \text{s} / \text{A} \cdot \text{m}$, L το μήκος των αγωγών και d η μεταξύ τους απόσταση.

Η θερμική καταπόνηση οφείλεται στο διαρκές ρεύμα βραχυκύκλωσης (I_d) για το οποίο ισχύει η σχέση:

$$I_d = \mu_d \cdot I_{SW} \quad (3.2.1-4)$$

όπου μ_d ένας συντελεστής που βρίσκεται από τον πίνακα 3.2.1-1.

R_{0l}/X_{0l}	κ	I_{SW}/I_G	μ_d
0,00	1,800	0,1	1
0,05	1,680	0,2	0,97
0,10	1,590	0,3	0,96
0,15	1,500	0,4	0,93
0,20	1,440	0,5	0,9
0,25	1,380	0,6	0,89
0,30	1,330	0,7	0,87
0,35	1,290	0,8	0,85
0,40	1,250	0,9	0,82
0,45	1,220	1	0,8
0,50	1,190	1,6	0,7
0,55	1,170	2	0,67
0,60	1,140	3	0,58
0,65	1,120	4	0,52
0,70	1,110	5	0,49
0,75	1,100	6	0,44
0,80	1,095	7	0,41
0,85	1,090	8	0,4
0,90	1,080	9	0,39
0,95	1,075	10	0,35
1,00	1,070		
1,05	1,065		
1,10	1,060		
1,15	1,055		
1,20	1,050		

Πίνακας 3.2.1-1: Συντελεστές κ και μ_d (I_G είναι το ρεύμα της πηγής).

Σε περίπτωση εκδήλωσης βραχυκυκλώματος σε μία γραμμή περιορίζεται η τιμή του από τα μέσα προστασίας. Ως ρεύμα διακοπής (I_a) θεωρείται το εναλλασσόμενο τμήμα του ρεύματος βραχυκύκλωσης τη χρονική στιγμή της διακοπής της ηλεκτροδότησης από το μέσο προστασίας και υπολογίζεται από τη σχέση:

$$I_a = \mu \cdot I_{SW} \quad \text{σε kA} \quad (3.2.1-5)$$

όπου μ ένας συντελεστής (βλ. πίνακα 3.2.1-2). Στο δίκτυο μέσης τάσης το ρεύμα διακοπής περιορίζεται συνήθως μέσω ηλεκτρονόμων προστασίας στα 80 A.

I_{SW} / I_G	για $\cos\phi=0,8$	
	$\mu_{0,1s}$	$M_{0,25s}$
από 0,1 έως 1,6	1,0	1,0
2	0,97	0,95
3	0,90	0,85
4	0,85	0,77
5	0,80	0,72
6	0,79	0,70
7	0,70	0,67
8	0,75	0,65
9	0,74	0,63
10	0,74	0,62

Πίνακας 3.2.1-2: $\mu = f \cdot (I_{SW}/I_G)$ για $\cos\phi=0,8$

$\mu_{0,1s}$: τιμή για χρόνο διακοπής ~ 0,1 s

$\mu_{0,25s}$: τιμή για χρόνο διακοπής ~ 0,25 s

I_G : ονομαστικό ρεύμα της πηγής.

Η ισχύς διακοπής P_α δίνεται από τη σχέση:

$$P_\alpha = \sqrt{3} \cdot U_N \cdot I_\alpha \quad \text{σε kA} \quad (3.2.1-6)$$

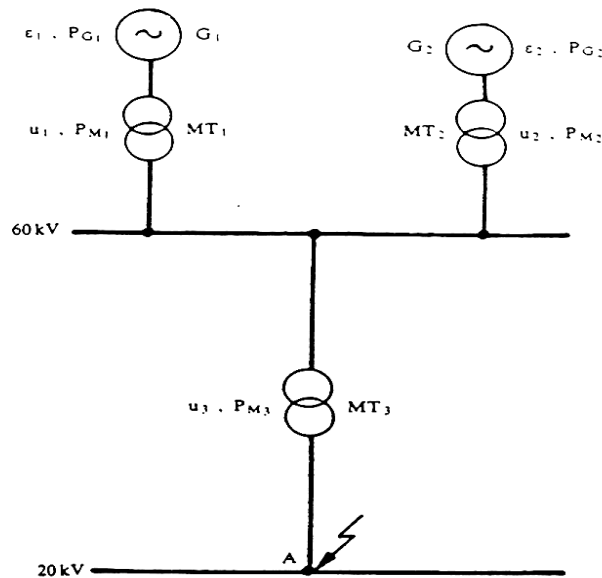
όπου U_N η ονομαστική τάση στη θέση σφάλματος.

3.2.2 Υπολογισμός του εναλλασσόμενου ρεύματος βραχυκύκλωσης σε γραμμές μέσης τάσης

3.2.2.1 Ο πλήρης υπολογισμός

Ο υπολογισμός είναι πλήρης, αν ληφθούν υπ' όψη όλες οι αντιστάσεις της διαδρομής βραχυκύκλωσης (από τη θέση βραχυκύκλωσης μέχρι και το εργοστάσιο παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας.), κάτι που στην πράξη είναι σχεδόν αδύνατο, όταν πρόκειται για εκτίμηση καταστάσεων σε πολύ περιορισμένο τμήμα του δικτύου, όπως π.χ. ο υπολογισμός της θερμοκρασίας στη θέση βραχυκύκλωσης μίας γραμμής διανομής, η μηχανική καταπόνηση ενός μονωτήρα, κ.λ.π. Γι' αυτό ο υπολογισμός των ρευμάτων βραχυκύκλωσης σε πραγματογνωμοσύνες και τεχνικές εκθέσεις γίνεται με τις προσεγγιστικές μεθόδους που θα αναφέρουμε παρακάτω.

Ακολούθως δίνεται ένα παράδειγμα ενός κατά το δυνατό πλήρους υπολογισμού της συνολικής αντίστασης μέχρι τη θέση βραχυκύκλωσης. Αν υποθεθεί ότι το τριφασικό βραχυκύκλωμα αφορά το σημείο A της εγκατάστασης του σχήματος 3.2.2.1-1, τότε η συνολική ισχύς του δικτύου θα οδεύσει προς το σημείο αυτό. Το ρεύμα βραχυκύκλωσης είναι η τιμή του ρεύματος στο σημείο A. Η τιμή αυτή εξαρτάται από την ισχύ του δικτύου μέχρι το σημείο βραχυκύκλωσης.



Σχήμα 3.2.2.1-1: Παράδειγμα τριφασικού βραχυκυκλώματος.

ε_1 και ε_2 : οι κρουστικές τάσεις διασποράς των γεννητριών G_1 και G_2 αντίστοιχα.

P_{G1} και P_{G2} : ονομαστική ισχύς των γεννητριών G_1 και G_2 αντίστοιχα.

u_1, u_2 και u_3 : σχετική τάση βραχυκύκλωσης των μετασχηματιστών MT_1, MT_2 και MT_3 αντίστοιχα.

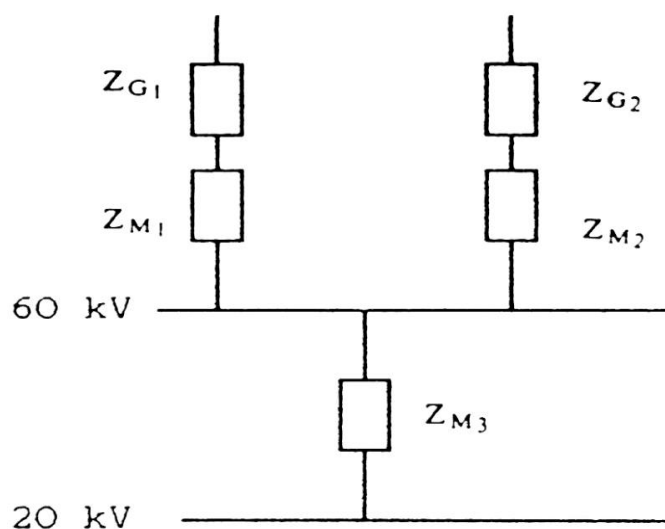
P_{M1}, P_{M2}, P_{M3} : ονομαστική ισχύς των μετασχηματιστών MT_1, MT_2 και MT_3 αντίστοιχα.

Στο σχήμα 3.2.2.1-2 δίνεται το ισοδύναμο κύκλωμα όλων των αντιστάσεων της διαδρομής βραχυκύκλωσης κατά το σχήμα 3.2.2.1-1.

Στις εγκαταστάσεις μέσης και υψηλής η τιμή $R_{ολ}$ θεωρείται συνήθως αμελητέα συγκριτικά προς την τιμή $X_{ολ}$. Στην περίπτωση αυτή η ολική σύνθετη αντίσταση $Z_{ολ}$ ισούται περίπου με $X_{ολ}$ και δίνεται από τη σχέση:

$$Z_{ολ} \cong X_{ολ} = \varepsilon_{ολ} \cdot \frac{U_N^2}{P_G} \cdot 10^{-2} + X_\gamma \quad \text{σε } \Omega / \text{φάση} \quad (3.2.2.1-2)$$

όπου U_N η ονομαστική τάση (μεταξύ των φάσεων) σε kV, P_G η ονομαστική ισχύς σε MVA, $\varepsilon_{ολ}$ το άθροισμα των επιμέρους ε και u σε % και X_γ η επαγωγική αντίδραση της γραμμής.



Σχήμα 3.2.2.1-2: Ισοδύναμο κύκλωμα των αντιστάσεων του δικτύου κατά το σχήμα 3.2.2.1-1.

Z_{G1} και Z_{G2} : αντιστάσεις των γεννητριών G_1 και G_2 αντίστοιχα.

Z_{M1} , Z_{M2} και Z_{M3} : αντιστάσεις των μετασχηματιστών $M\Sigma_1$, $M\Sigma_2$ και $M\Sigma_3$ αντίστοιχα.

Ο υπολογισμός των επιμέρους αντιστάσεων γίνεται με αναγωγή στην τάση των 10 kV. Η αναγωγή γενικά μίας αντίστασης X υπό τάση U_1 σε μία άλλη τάση U_2 γίνεται με τη σχέση:

$$X_2 = X_1 \cdot \left(\frac{U_2}{U_1}\right)^2 \quad (3.2.2.1-3)$$

Από τη σχέση 3.2.2.1-2 για $X_\gamma = 0$ και τη σχέση 3.2.2.1-3 για τάση αναγωγής 10 kV, έπεται ότι:

$$X_{ολ} = \frac{\varepsilon_{ολ} \cdot 10^2}{P_G} \cdot 10^{-2} = \frac{\varepsilon_{ολ}}{P_G} \quad \text{σε } \Omega / \text{φάση} \quad (3.2.2.1-4)$$

Με βάση την παραπάνω σχέση ισχύει:

1) για γεννήτριες:

$$X_{10} = \frac{\varepsilon}{P_G} \quad \text{σε } \Omega / \text{φάση} \quad (3.2.2.1-5)$$

2) για μετασχηματιστές και στραγγαλιστικά πηνία:

$$X_{10} = \frac{u}{P_G} \quad \text{σε } \Omega / \text{φάση} \quad (3.2.2.1-6)$$

Σύμφωνα με τις παραπάνω σχέσεις, για τον υπολογισμό των αντιστάσεων των γεννητριών, των μετασχηματιστών και των στραγγαλιστικών πηνίων πρέπει να γνωρίζει κανείς:

- 1) για τις γεννήτριες: την ονομαστική ισχύ (P_G) σε MVA και τη σχετική τάση διασποράς (ε) σε %.
- 2) για τους μετασχηματιστές: την ονομαστική ισχύ (P_N) σε MVA και τη σχετική τάση βραχυκύκλωσης (u) σε % .
- 3) για στραγγαλιστικά πηνία: τη διερχόμενη ισχύ (P_N) σε MVA και τη σχετική τάση βραχυκύκλωσης (u) σε % .

Σε ότι αφορά τις γραμμές, είναι απαραίτητη η γνώση της επαγωγικής αντίδρασης X_γ σε Ω . Με βάση την τιμή αυτή και την τάση λειτουργίας της γραμμής βρίσκεται από τον πίνακα 7.1.2-2 η τιμή ε/P της γραμμής.

Για μία π.χ. γραμμή μήκους $L = 20$ km και $X = 0,4$ Ω/km , που λειτουργεί στα 60 kV, η τιμή ε/P υπολογίζεται ως ακολούθως:

$$X_\gamma = L \cdot X = 20 \cdot 0,4 = 8 \Omega$$

Η τιμή ε/P κατά τον πίνακα 3.2.2.1-2 (για $X_\gamma = 8$ Ω και τάση λειτουργίας $U_\pi = 60$ kV) είναι:

$$\varepsilon/P = 0,22 \Omega / \text{φάση}$$

Κατόπιν των ανωτέρω με τάση αναγωγής 10 kV και $Z_{ολ} \approx X_{ολ}$ για υπολογισμό του εναλλασσόμενου ρεύματος βραχυκύκλωσης (I_{SW}) ισχύει σύμφωνα με τη σχέση 3.2.2.1-1:

$$I_{SW10} = \frac{1,1 \cdot 10}{\sqrt{3} \cdot X_{ολ10}} = \frac{6,35}{X_{ολ10}} \quad \text{σε kA} \quad (3.2.2.1-7)$$

και

$$I_{SW} = I_{SW10} \cdot \frac{10}{U_N} \quad \text{σε kA} \quad (3.2.2.1-8)$$

X_γ σε Ω	Πολική τάση λειτουργίας της γραμμής (U_π σε kV)												
	3	5	6	10	15	20	30	40	50	60	100	150	200
	ε/P σε Ω / φάση												
0,1	1,2	0,4	0,27	0,1	0,05								
0,2	2,3	0,8	0,55	0,2	0,09	0,05							
0,3	3,5	1,25	0,8	0,3	0,14	0,08							
0,4	3,8	1,6	1,1	0,4	0,19	0,1	0,05						
0,5	5,8	2	1,4	0,5	0,23	0,13	0,06						
0,6	6,9	2,5	1,55	0,6	0,27	0,15	0,07						
0,7	8	2,9	1,9	0,7	0,3	0,17	0,08						
0,8	9	3,1	2	0,8	0,33	0,2	0,09	0,05					
0,9	10	3,5	2,5	0,9	0,4	0,22	0,1	0,06					
1		4	2,55	1	0,45	0,25	0,12	0,07					
2		8	5	2	0,9	0,5	0,22	0,13	0,08	0,06			
3			8	3	1,45	0,7	0,32	0,19	0,12	0,08			
4			10	4	1,55	1	0,42	0,25	0,16	0,11			
5				5	2,1	1,25	0,5	0,3	0,2	0,14	0,05		
6				6	2,6	1,5	0,65	0,38	0,25	0,17	0,06		
7				7	3	1,75	0,8	0,41	0,27	0,2	0,07		
8				8	3,5	2	0,9	0,5	0,3	0,22	0,08		
9				9	4	2,2	1	0,55	0,35	0,25	0,09		
10				10	4,2	2,5	1,05	0,6	0,4	0,27	0,1		
15					6,5	3,3	1,6	0,9	0,6	0,4	0,15	0,07	
20					8,5	5	2	1,25	0,75	0,55	0,2	0,09	0,05
25					10	6	2,5	1,5	0,95	0,69	0,25	0,11	0,06
30						7	3,05	1,7	1,2	0,8	0,3	0,14	0,08
40						10	4	2,5	1,5	1,1	0,4	0,19	0,1
50							5	3	2	1,4	0,5	0,24	0,12
60							6	3,5	2,4	1,6	0,6	0,27	0,15
70							7	4	2,7	1,9	0,7	0,3	0,17
80							8	4,9	3	2,1	0,8	0,37	0,2
90							9	5,1	3,2	2,5	0,9	0,4	0,22
100							10	6	3,4	2,6	1	0,45	0,25

Πίνακας 3.2.2.1-2 : Τιμή ε/P για γραμμές, ανάλογα με την επαγωγική αντίδραση (X_γ) και την τάση λειτουργίας U_π (τάση μεταξύ των φάσεων).

Επίσης, επειδή η τιμή $R_{ολ}$ είναι αμελητέα ως προς την $X_{ολ}$, είναι $\kappa=1,8$ (βλ. πίνακα 3.2.2.1-1) και επομένως από τη σχέση 3.2.2.1-2 ισχύει για το κρουστικό ρεύμα βραχυκύκλωσης (I_s):

$$I_s = 1,8 \cdot \sqrt{2} \cdot I_{SW} \quad \text{σε kA} \quad (3.2.2.1-9)$$

Η τιμή αυτή ενδιαφέρει ιδιαίτερα στους υπολογισμούς μηχανικών καταπονήσεων, οι οποίες εκδηλώνονται στο αρχικό στάδιο του βραχυκυκλώματος (π.χ.: εξάσκηση δυνάμεων μεταξύ των ζυγών ενός πίνακα μέσης τάσης, εξάσκηση δυνάμεων στους κοχλίες ηλεκτρικών συνδέσμων, κ.λ.π.).

3.2.2.2 Προσεγγιστικός υπολογισμός μέσω του μετασχηματιστή που προηγείται της θέσης βραχυκύκλωσης

Ισχύει ότι:

$$I_{SW} \leq 100 \cdot I_N / u_k \quad (3.2.2.2-1)$$

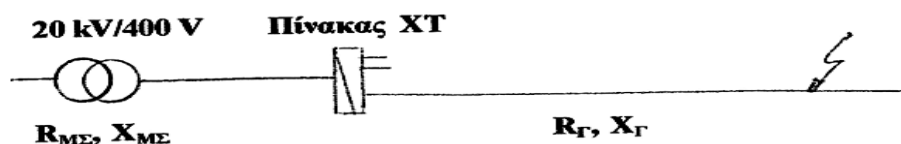
όπου I_N και u_k είναι αντίστοιχα το ονομαστικό ρεύμα και η σχετική τάση βραχυκύκλωσης του μετασχηματιστή προ της θέσης βραχυκύκλωσης. Δεν λαμβάνονται δηλαδή υπόψη οι αντιστάσεις της διαδρομής βραχυκύκλωσης, σαν να πρόκειται για βραχυκύκλωμα στους ακροδέκτες του μετασχηματιστή.

Οι υπολογιζόμενες τιμές είναι μεγαλύτερες από τις πραγματικές, όσο αυξάνει η θέση βραχυκύκλωσης από την πηγή.

3.2.2.3 Προσεγγιστικός υπολογισμός μέσω των αντιστάσεων της γραμμής και του μετασχηματιστή που προηγείται της θέσης βραχυκύκλωσης

Η τιμή I_{SW} που υπολογίζεται είναι μεγαλύτερη από την πραγματική τιμή, αφού η αντίσταση της διαδρομής βραχυκύκλωσης περιορίζεται μέχρι και τον μετασχηματιστή που προηγείται είναι και ως εκ τούτου είναι μικρότερη από την πραγματική τιμή της. Πρόκειται για προσεγγιστική μέθοδο ακριβέστερη από την προηγούμενη.

Παράδειγμα υπολογισμού βραχυκύκλωμα σε γραμμή χαμηλής τάσης κατά το παρακάτω σχήμα:



Η διαδικασία υπολογισμού των ρευμάτων βραχυκύκλωσης έχει ως ακολούθως:

- υπολογίζεται η αντίσταση: $Z \approx [(R_{MΣ} + R_{Γ})^2 + (X_{MΣ} + X_{Γ})^2]^{0.5}$
- βρίσκεται η τιμή I_{SW} : $I_{SW} = 230/Z$
- $R_{ολ} / X_{ολ} \leq R_{MΣ} / X_{MΣ} \rightarrow$ λαμβάνεται $R_{ολ} / X_{ολ} = R_{MΣ} / X_{MΣ}$
- με βάση το πηλίκο $R_{MΣ} / X_{MΣ}$ από τον πίνακα 3.2.1-1 βρίσκεται ο συντελεστής κ
- υπολογίζεται το κρουστικό ρεύμα βραχυκύκλωσης: $I_S = \kappa \cdot \sqrt{2} \cdot I_{SW}$
- Από τον πίνακα 3.2.1-1 βρίσκεται ο συντελεστής μ_d :
 $I_{SW_{ολ}} / I_G \approx I_{SW} / I_N \rightarrow \mu_d$
- υπολογίζεται το διαρκές ρεύμα βραχυκύκλωσης: $I_d = \mu_d \cdot I_{SW}$

Στον πίνακα 3.2.2.3-1 δίνονται τιμές των αντιστάσεων για μετασχηματιστές διανομής και γραμμές μέσης και χαμηλής τάσης.

(α) Μετασχηματιστές ΜΤ

P_N kVA	15	25	50	75	100	150	200	250	400	500	630	750	1000
R mΩ	356	175	75	40	29	18,3	13,4	10,5	5,7	4,5	3,6	3,0	2,2
X mΩ	320	228	122	86,8	65,5	44,5	33,5	26,8	17	13,7	10,8	9,1	6,9

(β) Γραμμές ΜΤ (οι ωμικές αντιστάσεις ισχύουν για θερμοκρασία αγωγών 50 °C)

Γραμμή ΜΤ	Πραγματική διατομή σε mm ²	R σε Ω/km	ωL σε Ω/km
ACSR 3x16	29 (25/4)	1,268	0,422
ACSR 3x35	65 (59/9)	0,576	0,397
ACSR 3x95	175 (150/25)	0,215	0,334
Cu 3x16	16	1,274	0,417
Cu 3x35	35	0,596	0,393
Cu 3x95	95	0,220	0,358

(γ) Γραμμές ΧΤ (η διατομή αφορά ισοδύναμη χαλκού)

Είδος γραμμής χαμηλής τάσης	R σε [mΩ/km]	X σε [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	888 + 630	443 + 630
Συνεστραμμένα καλώδια 3x70 mm ² + 54,6 mm ²	1127	100

Πίνακας 3.2.2.3-1: Αντιστάσεις μετασχηματιστών διανομής και γραμμών μέσης τάσης (ΜΤ) και χαμηλής τάσης (ΧΤ).

3.2.3 Υπολογισμός της αύξησης της θερμοκρασίας κατά το βραχυκύκλωμα σε γραμμές μέσης τάσης

Η αύξηση της θερμοκρασίας $\Delta\theta$ λόγω του διαρκούς ρεύματος βραχυκύκλωσης (I_d) δίνεται από την σχέση:

$$\Delta\theta = \kappa \cdot I_d^2 \cdot [t + T \cdot (I_{sw}/I_d)^2] / A^2 \quad (3.2.3-1)$$

όπου:

- 1) I_d και I_{sw} σε A
- 2) $\Delta\theta$ σε °C
- 3) κ : σταθερά του υλικού (για τον χαλκό 0,0058 και για το αλουμίνιο 0,0135)
- 4) A : η διατομή του αγωγού σε mm²
- 5) t : ο χρόνος σε sec για τη διακοπή του βραχυκυκλώματος
- 6) T : ένας συντελεστής χρόνου η τιμή του οποίου είναι :
 - για τριφασικό βραχυκύκλωμα : $T = 0,3$ έως $0,15$
 - για διφασικό βραχυκύκλωμα : $T = 0,6$ έως $0,25$

Η τιμή T μειώνεται με την απόσταση από τη θέση βραχυκύκλωσης.

Για θερμοκρασία περιβάλλοντος θ_0 η συνολική θερμοκρασία είναι:

$$\Theta = \theta_0 + \Delta\theta \quad (3.2.3-2)$$

Ως οριακές θερμοκρασίες λειτουργίας θεωρούνται:

- 1) για γυμνούς αγωγούς:
 - από χαλκό : 200 °C
 - από αλουμίνιο : 180 °C
- 2) για τα καλώδια ισχύουν οι τιμές του παρακάτω πίνακα.

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

Πίνακας 3.2.3-1: Θερμοκρασία λειτουργίας και οριακή θερμοκρασία για καλώδια.

Ο υπολογισμός της $\Delta\theta$ με την σχέση 3.2.3-1 δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα. Σημειώνεται ότι η τιμή $\Delta\theta$ υπολογίζεται με μεγαλύτερη ακρίβεια κατά IEC 865-1 όπου η αύξηση της θερμοκρασίας δίνεται από τη σχέση:

$$\Delta\theta = \left(e^{\frac{S^2 \cdot t \cdot \alpha}{\sigma \cdot \gamma \cdot c}} - 1 \right) / \alpha \quad (3.2.3-3)$$

όπου S η πυκνότητα του ρεύματος βραχυκύκλωσης, α ο θερμικός συντελεστής του υλικού, σ η αγωγιμότητα του αγωγού, γ η πυκνότητα του αγωγού, και c η θερμοχωρητικότητα του αγωγού. Οι τιμές α , σ , γ και c δίνονται στον πίνακα 3.2.3-2 και η πυκνότητα του ρεύματος βραχυκύκλωσης S υπολογίζεται από την σχέση:

$$S = 10^6 \cdot I_{th} / A \quad \text{σε } A/m^2 \quad (3.2.3-4)$$

όπου A η διατομή σε mm^2 και I_{th} είναι το ισοδύναμο θερμικό ρεύμα βραχυκύκλωσης για το οποίο ισχύει:

$$I_{th} = I_{sw} \cdot (m+n)^{1/2} \quad (3.2.3-5)$$

όπου m και n δυο συντελεστές που προκύπτουν από τα σχήματα 3.2.3-1 και 3.2.3-2 αντίστοιχα.

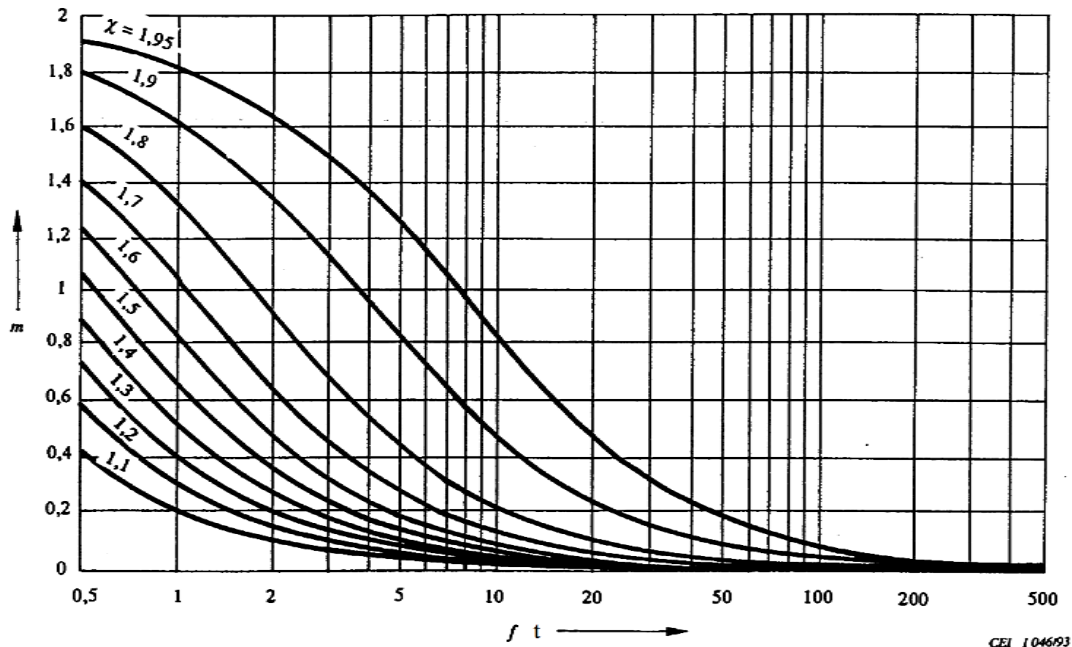
Για τον συντελεστή m απαιτείται ο υπολογισμός του συντελεστή χ ο οποίος δίνεται από την σχέση:

$$\chi = 1,02 + 0,98 \cdot e^{(-R_{\gamma\rho}/X_{\gamma\rho})} \quad (3.2.3-6)$$

όπου $R_{\gamma\rho}$ και $X_{\gamma\rho}$ η ωμική και επαγωγική αντίσταση μέχρι τη θέση του σφάλματος. Όταν γίνεται χρήση της προσεγγιστικής μεθόδου για τον υπολογισμό του I_{sw} , το χ λαμβάνεται ίσο με 1,95 (η δυσμενέστερη περίπτωση).

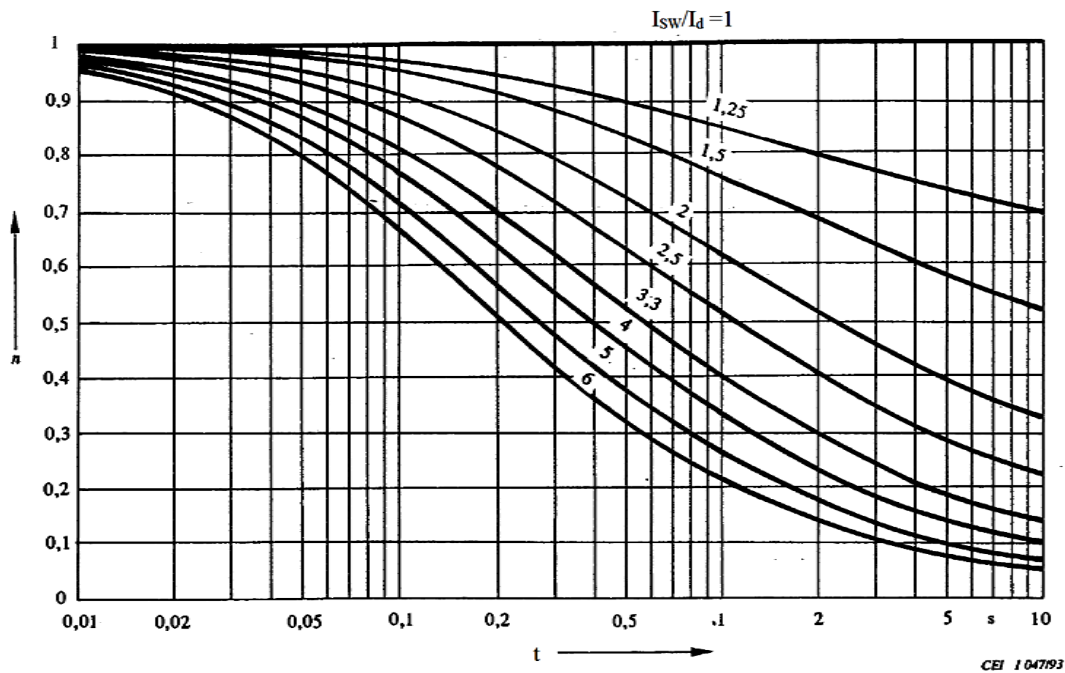
Είδος αγωγού	α [1/°C]	σ [[1/Ωm]	γ [kg/m ³]	c [Joule/Kg °C]
Χαλκός	0,0039	56,0·10 ⁶	8900	390
Αλουμίνιο	0,0040	34,8·10 ⁶	2700	910
Σίδηρος	0,0045	7,25·10 ⁶	7850	480

Πίνακας 3.2.3-2: Τιμές α , σ , γ και c ανάλογα με το υλικό των αγωγών.



Σχήμα 3.2.3-1: Συντελεστής m της δε συνιστώσας του ρεύματος βραχυκύκλωσης.

- Ο οριζόντιος άξονας είναι το: γινόμενο της συχνότητας του συστήματος (δηλαδή $f = 50$ Hz) και του χρόνου διακοπής.
- Οι καμπύλες του σχήματος αντιστοιχούν στον συντελεστή: $\chi = 1,02 + 0,98 \cdot \exp(-R_{\gamma\rho}/X_{\gamma\rho})$



Σχήμα 3.2.3-1: Συντελεστής η της ac συνιστώσας του ρεύματος βραχυκύκλωσης.

Οι καμπύλες του σχήματος αντιστοιχούν στους διάφορους λόγους I_{sw}/I_d .

3.2.4 Υπολογισμός της αύξησης της θερμοκρασίας κατά το βραχυκύκλωμα σε γραμμές χαμηλής τάσης

Η αύξηση της θερμοκρασίας $\Delta\theta$ κατά το βραχυκύκλωμα σε γραμμές χαμηλής τάσης δίνεται από την σχέση:

$$W_{\theta} = V \cdot c \cdot \Delta\theta = A \cdot L \cdot c \cdot \Delta\theta \quad (3.2.4-1)$$

όπου V ο όγκος, c η ειδική θερμότητα, A η διατομή του αγωγού και L το μήκος του. Για την ηλεκτρική ενέργεια W_{η} στην αντίσταση R του αγωγού λόγω του ρεύματος βραχυκύκλωσης ενεργού τιμής I_{β} ισχύει:

$$W_{\eta} = I_{\beta}^2 \cdot R \cdot t = I_{\beta}^2 \cdot \rho \cdot (L/A) \cdot t \quad (3.2.4-2)$$

όπου ρ η ειδική αντίσταση και t ο χρόνος βραχυκύκλωσης.

Από τις δύο ανωτέρω σχέσεις έπεται ότι:

$$\Delta\theta = \kappa \cdot I_{\beta}^2 \cdot t / A^2 \quad (3.2.4-3)$$

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

Η παραπάνω σχέση υπολογισμού της αύξησης της θερμοκρασίας $\Delta\theta$ δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα. Στη μέθοδο αυτή λαμβάνεται ως διαρκές ρεύμα βραχυκύκλωσης I_{β} για χρόνο $t = 5 \text{ sec}$ το τριπλάσιο του ονομαστικού ρεύματος της ασφάλειας:

$$I_{\beta} = 3 \cdot I_N \quad (3.2.4-4)$$

4

Διηλεκτρική συμπεριφορά των αγωγών του δικτύου διανομής

4.1 Καθορισμός εννοιών για την ηλεκτρική (ή διηλεκτρική) αντοχή των μονώσεων

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

Με τον όρο διάσπαση εννοεί κανείς την αγωγήμη σύνδεση δύο μεταξύ τους μονωμένων ηλεκτροδίων μέσω ηλεκτρικής εκκένωσης. Όταν η διάσπαση συμβαίνει με εκκένωση επί της επιφάνειας ενός στερεού μονωτικού ονομάζεται επιφανειακή διάσπαση. Η διάσπαση στο περιβάλλον μέσο ενός στερεού μονωτικού, λόγω μείωσης της απόστασης μόνωσης του στερεού μονωτικού από αγωγίμες ξένες επικαθίσεις στην επιφάνειά του (όπως π.χ. συμβαίνει σε ρυπασμένους μονωτήρες) χαρακτηρίζεται

ως υπερπήδηση. Η διάσπαση μέσω του όγκου ενός στερεού μονωτικού υλικού καλείται διάτρηση. Ως διηλεκτρική αντοχή (E_d) ενός μονωτικού υλικού εντός ομογενούς πεδίου έχει οριστεί το πηλίκο της ελάχιστης τιμής της τάσης για τη διάσπαση προς την απόσταση των ηλεκτροδίων και μας δείχνει τη διηλεκτρική αντοχή ενός μονωτικού υλικού.

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

Η διηλεκτρική αντοχή του αέρα μεταβάλλεται σε συνδυασμό με την εκάστοτε επικρατούσα πίεση και θερμοκρασία. Η τιμή E_d για κανονικές συνθήκες λειτουργίας είναι $E_d \approx 21 \text{ kV/cm}$ και η μέγιστη τιμή της είναι $\sqrt{2} \cdot E_d \approx 30 \text{ kV}$. Η διηλεκτρική του σταθερά διαφέρει ελάχιστα από τη μονάδα (βλέπετε πίνακα 4.1-1) και πρακτικά μπορεί να θεωρηθεί ίση με εκείνη του κενού χώρου.

Υλικό	ϵ_r	Υλικό	ϵ_r
Αέρας(κανονικές συνθήκες)	1,000594	Πάγος	2-3
Αέρας υγρός	1,5	Pertinax	4,8-5,4
Απεσταγμένο νερό	8	PVC	4-6
Βακελίτης	3,5-8,2	Plexiglas	2,6-3,5
Condesa	4-8	Πορσελάνη	5,5-6
Glimmer	4-8	Presspann	2,5-3,4
Γυαλί	5-16	Ρητίνη	2,2
Θερμοπλαστικά συνθετικά	2-5	SF ₆	1,002049
Μονωτικό λάδι	2-2,5	Στεατίτης	6,4
Λάστιχο	2,8-6,5	Teflon	2,1
Mikanit	4-6	Χαλαζίας	3-7
Ξύλο	2,5-6,5	Χαρτί	1,8-2,6

Πίνακας 4.1-1: Σχετική διηλεκτρική σταθερά ορισμένων υλικών στους 20 °C

Η δημιουργία γενικά ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων στα ηλεκτρομονωτικά αέρια ονομάζεται ιονισμός. Μία από τις περιπτώσεις ιονισμού είναι ο ιονισμός με κρούσεις (από μετρήσεις είναι γνωστό, ότι στον αέρα αναπαράγονται το δευτερόλεπτο, λόγω κοσμικών ακτινοβολιών και φυσικής ραδιενέργειας, περίπου $5 \div 20$ ζεύγη φορέων ανά $\text{cm}^3 \cdot \text{s}$ ως αρχικοί ελεύθεροι ηλεκτρικοί φορείς. Έτσι, τα προϋπάρχοντα κυρίως ελεύθερα ηλεκτρόνια στον αέρα είναι διαθέσιμα ως αρχικά ηλεκτρόνια του ιονισμού).

Για να συμβεί ιονισμός με κρούση ενός ελεύθερου ηλεκτρικού φορέα επί ενός ατόμου ηλεκτρομονωτικού αερίου, θα πρέπει:

$$E \cdot \lambda \geq U_i \quad (4.1-1)$$

όπου E : η πεδιακή ένταση σε απόσταση r από το κέντρο του μητρικού πυρήνα απομακρυσμένου ηλεκτρονίου,

U_i : η τάση ιονισμού, και

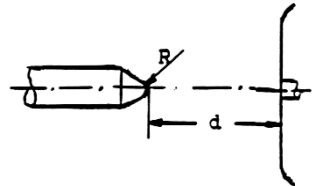
λ : το μήκος κύματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας

Η παραπάνω σχέση είναι γνωστή ως συνθήκη ιονισμού.

Κατα την εκδήλωση φαινομένων ιονισμού στα μονωτικά υλικά δημιουργούνται χωρικά φορτία, δηλαδή ένα νέφος ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων. Σε μία δεδομένη διάταξη δύο ηλεκτροδίων τα χωρικά φορτία συγκεντρώνονται προ του ηλεκτροδίου με την αντίθετη προς αυτά πολικότητα και σχηματίζουν έτσι ένα νέφος χωρικών φορτίων. Το πεδίο είναι ηλεκτροστατικό (ή ακριβέστερα χωρικό πεδίο), όταν τα χωρικά φορτία του νέφους αυτού είναι αμετακίνητα. Μπορεί κανείς να υποθέσει, ότι μέχρι μία τιμή της εφαρμοζόμενης τάσης (ή της εφαρμοζόμενης πεδιακής έντασης) συμβαίνει μία κατάσταση ισορροπίας μεταξύ των εξασκούμενων δυνάμεων Coulomb, ώστε το πεδίο να εξακολουθεί να είναι χωρικό. Όταν μετά την παραπάνω τιμή του εφαρμοζόμενου πεδίου καταστρέφεται η κατάσταση ισορροπίας (χωρίς να συμβαίνει η διάσπαση), τότε εκδηλώνονται περιορισμένης έκτασης εκκενώσεις, που ονομάζονται μερικές εκκενώσεις. Οι μερικές εκκενώσεις στον όγκο ενός στερεού μονωτικού χαρακτηρίζονται ως εσωτερικές μερικές εκκενώσεις και εκείνες στην επιφάνειά του εξωτερικές μερικές εκκενώσεις. Οι μερικές εκκενώσεις στον αέρα γύρω από γυμνούς αγωγούς έχουν τη ξεχωριστή ονομασία στεμματοειδείς μερικές εκκενώσεις (ή Corona). Το θέμα αυτό εξετάζεται αναλυτικά σε επόμενη παράγραφο.

4.2 Η ελάχιστη απόσταση μόνωσης και η απόσταση προστασίας μεταξύ γυμνών αγωγών και γυμνών αγωγών του δικτύου διανομής μέσης τάσης

Για την αξιολόγηση της μονωτικής ικανότητας μεταξύ των αγωγών μίας γραμμής μέσης τάσης (π.χ. 20 kV) σε περιβάλλον ατμοσφαιρικού αέρα εξετάζεται ακολούθως η ικανότητα μόνωσης για τη δυσμενέστερη περίπτωση ηλεκτροδίων των πρακτικών εφαρμογών, που είναι η διάταξη «ακίδα-πλάκα» (βλέπετε σχήμα 4.2-1) . Υποτίθεται δηλαδή ότι σε έναν αγωγό υπάρχει μία πολύ μικρή προεξοχή (ακίδα), που για το λόγο αυτό ο απέναντι αγωγός προς την ακίδα μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι το ηλεκτρόδιο «πλάκα».



Σχήμα 4.2-1: Διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα με R η ακτίνα καμπυλότητας της ακίδας.

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 :

$$d \geq (0,935 \div 0,99) U/E_d \quad (4.2-1)$$

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).

Γραμμή	Ελάχιστη απόσταση μόνωσης (d_{\min})	Απόσταση προστασίας μεταξύ αγωγών σε γραμμές	Σύνηθες ύψος γραμμής από το έδαφος
MT 20 kV	5,34 cm ÷ 5,66 cm	85 cm ÷ 125 cm	≈10

Πίνακας 4.2-1: Αποστάσεις μόνωσης και προστασίας σε γραμμές μέσης τάσης.

Στον πίνακα 4.2-1 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 (MT) είναι, για λόγους αυξημένης ασφάλειας και αξιόπιστης λειτουργίας, πολλαπλάσιες της απόστασης μόνωσης.

4.3 Η ελάχιστη απόσταση μόνωσης και η απόσταση προστασίας μεταξύ γυμνών αγωγών και γυμνών αγωγών του δικτύου διανομής χαμηλής τάσης

Για τα φαινόμενα ιονισμού με κρούσεις του αέρα που αφορά την περιοχή βγ της χαρακτηριστικής ρεύματος-τάσης $S = f(U)$ του σχήματος 4.3-1, κατά την καταπόνηση με εναλλασσόμενη τάση (υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας) σε μικρά διάκενα (λόγω της χαμηλής τάσης των 400 V) ισχύει κατά τη βιβλιογραφία η θεωρία Townsend.

Στη χαρακτηριστική $S=f(U)$ επισημαίνονται δύο βασικές περιοχές της εκκένωσης (μη αυτοσυντηρούμενη εκκένωση και αυτοσυντηρούμενη) καθώς και διάφορες υποπεριοχές τους (νόμος του Ohm, κορεσμός, ιονισμός με κρούσεις, φωτεινή εκκένωση και εκκένωση τόξου).

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

Κατά την ηλεκτρική διάσπαση με τον μηχανισμό Townsend η πρώτη χιονοστιβάδα των ηλεκτρονίων ενεργοποιείται συνήθως από κάποιο εξωτερικό παράγοντα, όπως π.χ. προϋπάρχουσα ακτινοβολία η οποία έχει εισάγει ένα σχετικά μικρό αριθμό ελεύθερων ηλεκτρονίων στον όγκο του αερίου μονωτικού. Οι διαδοχικοί ιονισμοί που προξενούνται από αυτή την χιονοστιβάδα ενεργοποιούν μία ή περισσότερες χιονοστιβάδες που ονομάζονται δευτερεύουσες, και οι οποίες με τη σειρά τους ενεργοποιούν άλλες δευτερεύουσες χιονοστιβάδες. Μία συνεχής αλυσίδα από χιονοστιβάδες δημιουργεί μία αυτοσυντηρούμενη ηλεκτρική εκκένωση (ηλεκτρικό τόξο).

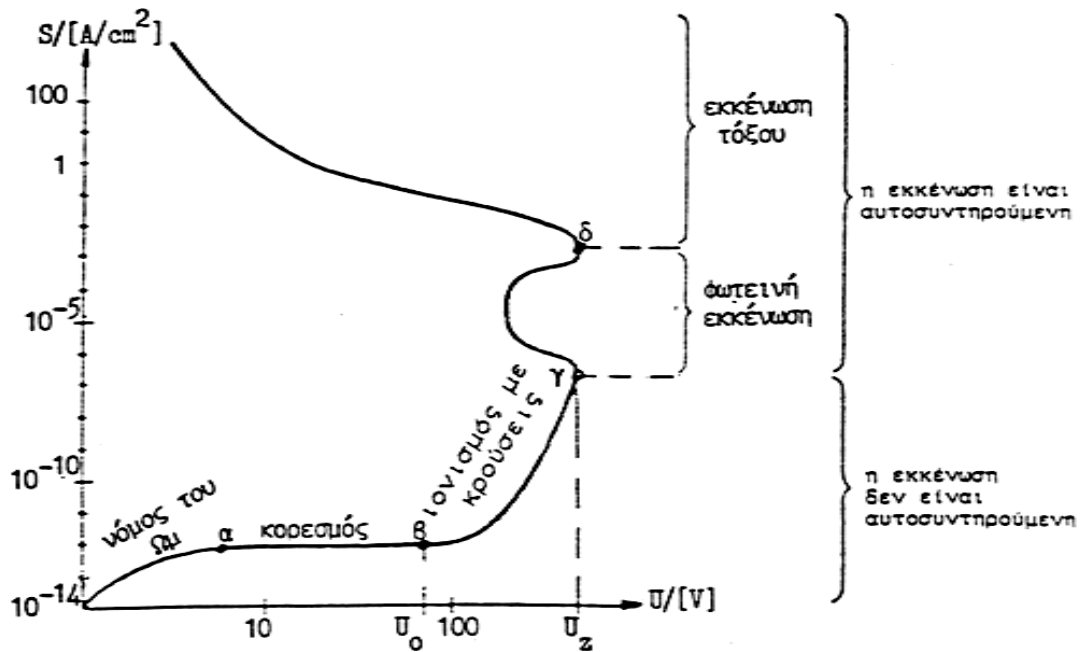
Τα αρχικά ηλεκτρόνια που ενεργοποιούν τις δευτερεύουσες χιονοστιβάδες είναι δυνατόν να δημιουργηθούν από πολλές διαφορετικές αιτίες. Για παράδειγμα, μπορούν να δημιουργηθούν στην κάθοδο από προσκρούσεις θετικών ιόντων ή φωτονίων ή τέλος από προσκρούσεις μορίων που βρίσκονται σε μετασταθή κατάσταση και τα οποία έχουν ικανοποιητικά μεγάλο χρόνο ζωής και διαχέονται προς την κάθοδο πριν επανέλθουν στη θεμελιώδη τους κατάσταση. Λόγω της στατιστικής φύσεως του φαινομένου, το κάθε εξωτερικά δημιουργούμενο ηλεκτρόνιο

δεν έχει την δυνατότητα να ενεργοποιήσει μία αυτοσυντηρούμενη ηλεκτρική εκκένωση. Όταν όμως το εφαρμοζόμενο ηλεκτρικό πεδίο παμένει αρκετά ισχυρό (δηλαδή 0,1 MV/cm) η έναρξη μιας αυτοσυντηρούμενης ηλεκτρικής εκκένωσης είναι πλέον θέμα χρόνου.

Σαν αποτέλεσμα του γρήγορου και επαναλαμβανόμενου φαινομένου της χιονοστιβάδας ο αριθμός των φορτισμένων σωματιδίων αυξάνει με το χρόνο και η περαιτέρω εξέλιξη του φαινομένου ελέγχεται από το "χωρικό πεδίο", το οποίο ανά πάσα στιγμή καθορίζεται από τη συγκεκριμένη θέση που καταλαμβάνουν τα φορτισμένα σωματίδια μέσα στον όγκο του αερίου μονωτικού. Για ένα αρχικά ομογενές ηλεκτρικό πεδίο, η εισαγωγή των ευκίνητων ηλεκτρικών φορτίων συνήθως καταλήγει σε μία ασταθή κατάσταση όπου το ρεύμα αυξάνει πολύ γρήγορα ενώ η εφαρμοζόμενη τάση σταδιακά καταρρέει (αρνητική διαφορική αντίσταση). Όταν το πεδίο γύρω από τα ηλεκτρόδια γίνει κατά τόπους πολύ ισχυρό, (έντονα ανομοιογενές πεδίο) τότε τα συσσωρευμένα ιόντα γύρω από τα μεταλλικά ηλεκτρόδια δημιουργούν ένα είδος ηλεκτροστατικής θωράκισης και ενδέχεται να αναστείλουν την εμφάνιση της αυτοσυντηρούμενης ηλεκτρικής εκκένωσης ή ακόμα και να προξενήσουν σβέση σε μία ήδη υπάρχουσα. Στην περίπτωση αυτή, η προκύπτουσα εκκένωση χαρακτηρίζεται ως στεματοειδής και το συνολικό ρεύμα που την χαρακτηρίζει να είναι είτε παλμικής είτε συνεχούς μορφής με μέση τιμή εντάσεως που ενδέχεται να ποσο φθάνει σημαντικιά του ενός ampere.

Ένα μακροσκοπικό μοντέλο για την παραγωγή των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων κατά Townsend δίνεται στο σχήμα 4.3-2. Σύμφωνα με αυτό η δημιουργία των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων αποδίδεται σε τρεις δυνατότητες ιονισμού με κρούσεις:

- 1) με κρούσεις από ηλεκτρόνια επί ατόμων ή μορίων του αερίου
- 2) με κρούσεις από θετικά ιόντα επί ατόμων ή μορίων του αερίου
- 3) με κρούσεις θετικών ιόντων στην επιφάνεια της καθόδου (επιφανειακός ιονισμός)



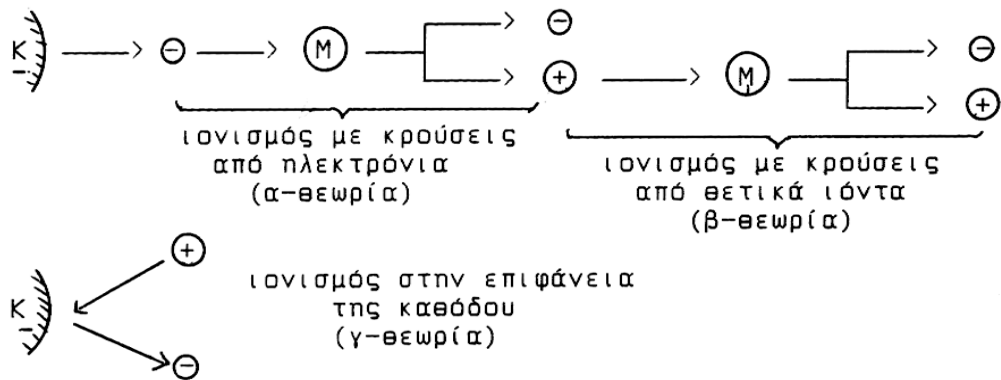
Σχήμα 4.3-1: Χαρακτηριστική «τάσης-πυκνότητας ροής» ενός αερίου υπό κανονικές συνθήκες (κατά G. Oberdorffer).

U_0 : τάση έναρξης του ιονισμού

U_z : τάση έναυσης

S : πυκνότητα ροής

Σε αντιστοιχία προς τον συντελεστή ιονισμού α για τον ιονισμό με κρούσεις από ελεύθερα ηλεκτρόνια, έχουν οριστεί: για τον ιονισμό με κρούσεις από θετικά ιόντα επί ατόμων (ή μορίων του αερίου) ο συντελεστής ιονισμού β και για τον επιφανειακό ο συντελεστής ιονισμού γ .



Σχήμα 4.3-2: Ένα μακροσκοπικό μοντέλο για τις περιπτώσεις ιονισμού με κρούσεις κατά τη θεωρία Townsend .

K: κάθοδος

- : ηλεκτρόνιο

+: θετικό ιόν

M: Μόριο

Ο ιονισμός με κρούσεις από θετικά ιόντα επί ατόμων (ή μορίων) του αερίου και ο επιφανειακός ιονισμός θεωρείται ότι εκδηλώνονται σε συνδυασμό με τον ιονισμό από ελεύθερα ηλεκτρόνια. Έτσι, γίνεται διάκριση σε δύο περιπτώσεις ιονισμού με κρούσεις:

- 1) ιονισμός με κρούσεις από ελεύθερα ηλεκτρόνια επί ατόμων (ή μορίων του αερίου) και επιφανειακός ιονισμός (α-γ θεωρία)
- 2) ιονισμός με κρούσεις επί ατόμων (ή μορίων του αερίου) από ελεύθερα ηλεκτρόνια και από θετικά ιόντα (α-β θεωρία)

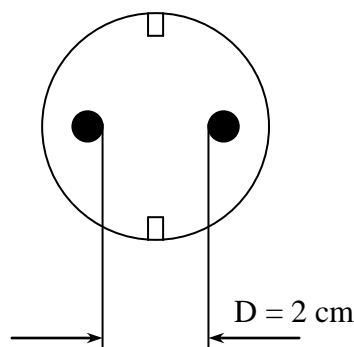
Η συνθήκη ιονισμού κατά την α-γ θεωρία (που είναι κυρίως ο μηχανισμός δημιουργίας ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων κατά Townsend), δίνεται από την σχέση :

$$\alpha \cdot d = \ln[1+(1/\gamma)] \quad (4.3-1)$$

όπου α τα παραγόμενα ζεύγη ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων (ελεύθερα ηλεκτρόνια και ισάριθμα θετικά ιόντα), d η απόσταση του διακένου και γ ο συντελεστής ιονισμού, ο οποίος για το χαλκό είναι $\gamma = 0,025$, οπότε η παραπάνω σχέση γίνεται:

$$\alpha \cdot d = [1+(1/0,025)] = 3,71 \quad (4.3-2)$$

Επομένως για $d > 3,7 \text{ mm}$ δεν συμβαίνει ιονισμός (γιατί είναι $\alpha < 1$). Επομένως, η ελάχιστη απόσταση μόνωσης είναι $d_{\min} = 3,7 \text{ mm}$, που σημαίνει ότι η απόσταση π.χ. των 2 cm μεταξύ των ακροδεκτών στις πρίζες των κτιριακών εγκαταστάσεων (Σχήμα 4.3-3) είναι ικανοποιητική, πολύ δε περισσότερο η απόσταση των 30 cm μεταξύ των σωστά τανυσμένων γυμνών αγωγών σε γραμμές διανομής χαμηλής τάσης αφού η απαιτούμενη απόσταση μόνωσης είναι μερικά mm υπό κανονικές συνθήκες. Αυτό γίνεται για να διατηρείται η μηχανική και διηλεκτρική συμπεριφορά των γραμμών σε δυσμενείς καιρικές συνθήκες και γι' αυτό σε αποστάσεις μεταξύ στύλων πάνω από περίπου 50 m τοποθετούνται μονωτικοί αποστάτες, ώστε να αποκλείεται η επαφή μεταξύ αγωγών σε περίπτωση θυελλωδών ανέμων. Ακόμα και η απόσταση των 2 εκατοστών μεταξύ των ακροδεκτών στις πρίζες είναι πολύ μεγάλη για λόγους ασφαλείας, γιατί η απόσταση μόνωσης στη χαμηλή τάση είναι πολύ μικρή (πρακτικά μικρότερη των 3,7 χιλιοστών και περίπου ίση με 2,5 χιλιοστά) και για τη δημιουργία βραχυκυκλώματος απαιτείται επαφή των αγωγών.



Σχήμα 4.3-3: Απλοποιημένη παράσταση ρευματοδότη.

Επομένως οι προαναφερθείσες αποστάσεις ασφαλείας μπορούν να συνοψισθούν στην παρακάτω σχέση:

$$d_{\text{γραμμής}} \approx 30 \text{ cm} = 15 \cdot d_{\text{πρ}} \quad (4.3-3)$$

4.4 Η αδυναμία εκδήλωσης του φαινομένου των σπινθηρισμών (δηλαδή του φαινομένου Corona) στους γυμνούς αγωγούς του δικτύου διανομής και η εκδήλωση του εν λόγω φαινομένου παρουσία καπναιθάλης και γενικότερα λόγω ρύπανσης

4.4.1 Γενικά περί σπινθηρισμών και ερπυσίων εκκενώσεων

Με τον όρο σπινθηρισμούς επί των μονωτήρων εννοεί κανείς φωτεινές μερικές εκκενώσεις (δηλαδή εκκενώσεις περιορισμένης διαδρομής επί της επιφάνειας των μονωτήρων) συνοδευόμενες από θόρυβο και συνηθίζεται να αποκαλούνται επίσης στην πράξη και οι φωτεινές μερικές εκκενώσεις περί τους αγωγούς, που συνοδεύονται με θόρυβο (φαινόμενο Corona).

Οι σπινθηρισμοί είναι ένα αρκετά σύνηθες ηλεκτρικό φαινόμενο στις γραμμές υψηλής τάσης (π.χ. στα 150 kV) και στις γραμμές μέσης τάσης (π.χ. στα 20 kV). Αποτελούν ένα θεαματικό φαινόμενο αλλά ακίνδυνο για το περιβάλλον, γιατί πρόκειται για φωτεινή ακτινοβολία και ήχο (που αποδίδονται κατά την εξαναγκασμένη συλλογή των ελεύθερων κυρίως ηλεκτρονίων από την άνοδο) και όχι για κάποια πυρακτωμένα τεμαχίδια μονωτήρων ή αγωγών.

Οι σπινθηρισμοί παρουσιάζονται αρχικά επί των μονωτήρων λόγω ξένων επικαθίσεων (π.χ. σκόνη, καπναιθάλη κ.λ.π.). Οι μερικές αυτές εκκενώσεις 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 διακόπτη προστασίας της γραμμής) ή ακόμα σε περίπτωση διατεταγμένης προστασίας και το «Black-out» (διακοπή της τάσης σε πολλές γραμμές). Οι σπινθηρισμοί 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 όπως για παράδειγμα στην περίπτωση ύπαρξης καπναιθάλης στην ατμόσφαιρα όπου μεταξύ των αγωγών παρεμβάλλονται τα αιωρούμενα σωματίδια που σχηματίζουν αγώγιμες

διαδρομές και έτσι μειώνουν τη μονωτική ικανότητα του αέρα. Στην περίπτωση αυτή είναι δυνατό να προκληθούν σπινθηρισμοί (μερικές εκκενώσεις). Όταν απομακρυνθεί η καπναιθάλη τότε αποκαθίσταται η μονωτική ικανότητα του αέρα. Είναι απαραίτητο να συνυπάρχουν και οι δύο αυτές συνθήκες για να δημιουργηθούν οι προϋποθέσεις σπινθηρισμών μετά έρπουσών ηλεκτρικών εκκενώσεων, επιφανειακής διάσπασης ή υπερπήδησης. Για το 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 πρωϊνές ώρες της ημέρας, σε γραμμές υψηλής και μέσης τάσης (όπως προαναφέρθηκε) και σε περιοχές όπου υπάρχουν επικαθίσεις ρύπων στις επιφάνειες των μονωτήρων (από καθαλατώσεις, σκόνη, καπναιθάλη, κ.λ.π.). 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. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι, σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, έχουν διαπιστωθεί σπινθηρισμοί καθώς και διακοπές ρεύματος σε δίκτυα μέχρι 500 kV, που προήλθαν από περιττώματα πουλιών στους μονωτήρες, διότι έχουν μεγάλη περιεκτικότητα σε αλάτι (βλ. τεύχος της διεθνούς Cigre: Αύγουστου 1998, Polluted Insulators).

Σε ένα απλοποιημένο μοντέλο για τους σπινθηρισμούς και τις έρπουσες εκκενώσεις, οι σπινθηρισμοί είναι φωτεινή ακτινοβολία και ήχος (κυρίως λόγω συλλογής ελεύθερων ηλεκτρονίων από την άνοδο) και οι έρπουσες εκκενώσεις η διαρροή επί του μονωτήρα λόγω της ωμικής αντίστασης που παρουσιάζει ο συνδυασμός «ρύπανση-υγρασία υπό μορφή δρόσου». Στην πρώτη περίπτωση ομιλεί κανείς για στεγνές ζώνες επί του μονωτήρα και στη δεύτερη για υγρές ζώνες.

4.4.2 Η εκδήλωση σπινθηρισμών σε γυμνούς αγωγούς μέσης τάσης

Οι σπινθηρισμοί γύρω από τους αγωγούς οφείλονται επίσης στη συνύπαρξη των δύο παραγόντων, που προαναφέρθηκαν (υγρασία και ρυπογόνο περιβάλλον) ενίοτε κατά τους φθινοπωρινούς μήνες. Για την εκδήλωση σπινθηρισμών 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 πεδιακή ένταση για την έναρξη μερικών εκκενώσεων στους αγωγούς μίας γραμμής π.χ. μέσης τάσης υπό ατμοσφαιρικό αέρα δίνεται από την σχέση:

$$E = m_1 \cdot m_2 \cdot \delta \cdot 30 \cdot [1 + (0,3)/(\delta \cdot R)^{1/2}] \quad \text{σε kV/cm} \quad (4.4.2-1)$$

όπου r η ακτίνα του αγωγού σε mm, $m_1 = 0,98-0,83$ (ανάλογα με την κατάσταση των αγωγών), $m_2 = 1$ για ξηρασία, $m_2 = 0,8$ για υγρασία και δ ένας συντελεστής ($\delta \approx 0,91$) για τον ακριβή υπολογισμό του οποίου ισχύει:

$$\delta = 293 \cdot p / (1013 \cdot \Theta) \quad (4.4.2-2)$$

όπου p η πίεση σε mbar και Θ η θερμοκρασία σε $^{\circ}\text{K}$.

Για να συμβούν επομένως σπινθηρισμοί (μερικές εκκενώσεις) απαιτείται τουλάχιστον η ανωτέρω τιμή E .

Σε ένα ανομοιογενές πεδίο το διάνυσμα της έντασης του πεδίου δεν έχει παντού την ίδια διεύθυνση και την ίδια απόλυτη τιμή. Κάθε ανομοιογενές πεδίο έχει μία μέγιστη τιμή της έντασης του πεδίου (E_{\max}). Σε μία δεδομένη διάταξη ηλεκτροδίων, υπό υψηλή τάση, η E_{\max} έχει ιδιαίτερη σημασία για την πράξη, γιατί εκφράζει τη μέγιστη δύναμη, που εξασκείται από το πεδίο.

Από την εμπειρία είναι γνωστό, ότι η μέγιστη τιμή της έντασης του πεδίου, σε μία δεδομένη διάταξη ηλεκτροδίων, εκδηλώνεται στις θέσεις, όπου οι μεταλλικές επιφάνειες έχουν τη μικρότερη ακτίνα καμπυλότητας. Ο εμπειρικός αυτός κανόνας αποδεικνύεται εύκολα πειραματικά με το φορτισμένο δοχείο Faraday (μεταλλικό δοχείο σφαιρικού σχήματος επί μονωτικής βάσης), μέσω του οποίου επιχειρείται η φόρτιση μίας αφόρτιστης μεταλλικής σφαίρας (με μονωτική λαβή), μέσω

βραχύχρονης επαφής της στο δοχείο. Το πείραμα δείχνει (μέσω του ηλεκτροσκοπίου), ότι το δοχείο δεν φέρει ηλεκτρισμό στην εξωτερική του επιφάνεια, αλλά μόνο την εσωτερική του, που σημαίνει ότι το ηλεκτρικό φορτίο συγκεντρώνεται στο περισσότερο "αιχμηρό" μέρος μίας επιφάνειας.

Στο ομογενές πεδίο δεν υπάρχει η έννοια της E_{\max} , γιατί η ένταση του πεδίου είναι σε κάθε σημείο η ίδια. Διαπιστώνεται ότι για τον σφαιρικό και τον κυλινδρικό πυκνωτή μπορεί να δοθεί η ακόλουθη σχέση για την E_{\max} .

$$E_{\max} = \frac{U}{d \cdot \eta} \quad (4.4.2-3)$$

όπου για τον σφαιρικό πυκνωτή:

$$\eta = \frac{R_2}{R_1} \quad (4.4.2-4)$$

και για τον κυλινδρικό πυκνωτή:

$$\eta = \frac{R_1 \cdot \ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)}{R_2 - R_1} \quad (4.4.2-5)$$

Με την εισαγωγή δηλαδή του συντελεστή αυτού η μέγιστη τιμή της έντασης του πεδίου (E_{\max}) είναι η ίδια με εκείνη ενός πυκνωτή επιπέδων πλακών με απόσταση $\eta \cdot d$ μεταξύ των πλακών.

Ο συντελεστής $0 < \eta < 1$ (κατά Schweiger), που ονομάζεται συντελεστής χρησιμοποίησης (ή βαθμός ομοιογένειας) υπολογίζεται (όπως φαίνεται από τις παραπάνω σχέσεις) από το πηλίκο:

$$\eta = \frac{E_{\mu}}{E_{\max}} \quad (4.4.2-6)$$

όπου E_{μ} η μέση πεδιακή ένταση:

$$E_{\mu} = \frac{U}{d} \quad (4.4.2-7)$$

Η γεωμετρική σταθερά (p) του πεδίου μεταξύ δύο αγωγών με ακτίνα R (που απέχουν μεταξύ τους κατά απόσταση ίση με d υπολογίζεται από την σχέση:

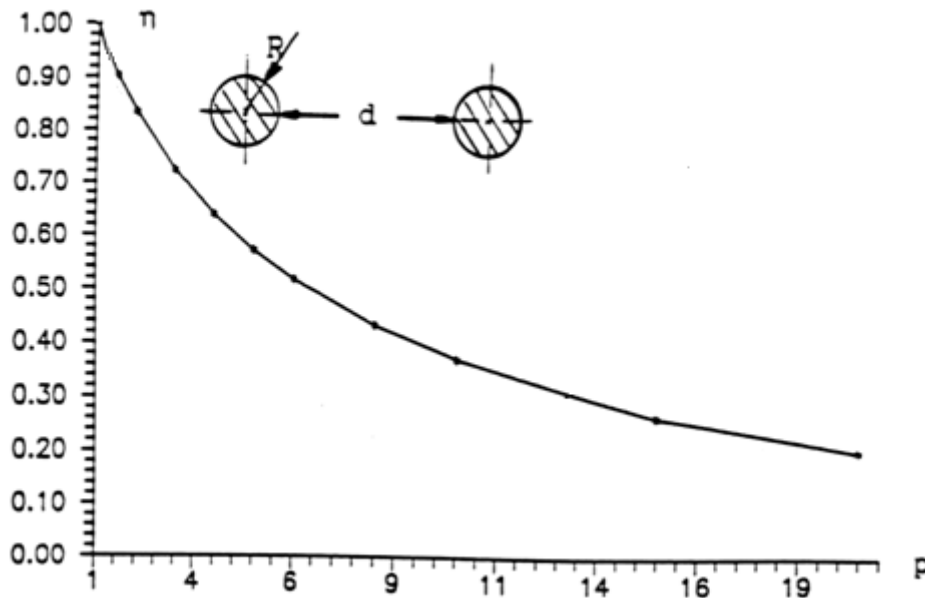
$$p = (R+d)/R \quad (4.4.2-8)$$

Για μία απόσταση μεταξύ των αγωγών π.χ. $d = 1.000 \text{ mm}$ είναι: $p > 19,6$.

Για το συντελεστή χρησιμοποίησης του πεδίου (η) με βάση την ανωτέρω τιμή p για τη διάταξη κύλινδρο-κύλινδρο ($R = R$) ισχύει περίπου:

$$\eta \approx \frac{2 \cdot R \cdot \ln \left[2 + \left(\frac{d}{R} \right) \right]}{d} \quad (4.4.2-9)$$

Όταν η γεωμετρική σταθερά (p) έχει τιμή μικρότερη ή ίση με αυτή της προαναφερθείσας τότε ο συντελεστής χρησιμοποίησης του πεδίου (η) προκύπτει από το σχήμα 4.4.2-1 .



Σχήμα 4.4.2-1: $\eta = f(p)$ για κύλινδρο-κύλινδρο ($R = R$) για $p \leq 19,6$.

Η πεδιακή ένταση E_1 για τάση $U = 20$ kV είναι:

$$E_1 = U / (\eta \cdot d) = 20 / (0,08 \cdot 100) = 2,5 \text{ kV/cm}$$

Η τιμή E_1 είναι περίπου 10 φορές μικρότερη από την τιμή E ανωτέρω 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. Η ειδική αγωγιμότητα του άνθρακα είναι $\rho_{av} = 0,083$ έως $33,3 \mu\Omega \cdot m$ και του

ατμοσφαιρικού αέρα $\rho > 1.000 \text{ T}\Omega\cdot\text{m}$. Γι' αυτό, η καπναιθάλη δημιουργεί αγωγίμες διαδρομές στον αέρα, προκαλώντας έτσι την εκδήλωση σπινθηρισμών ή ακόμα και τη διάσπαση. Πράγματι, η αντίσταση μόνωσης θεωρείται γενικά ως κατάλληλη όταν είναι τουλάχιστον $1.000 \text{ }\Omega/\text{V}$. Μία κυλινδρική π.χ. στήλη ατμοσφαιρικού αέρα διατομής 1 mm^2 μεταξύ των αγωγών έχει αντίσταση μόνωσης:

$$R_1 = \rho \cdot (l/A) = 1 \cdot 10^{15} / 10^{-6} = 10 \cdot 10^{20} \text{ }\Omega$$

Επειδή η ανωτέρω τιμή υπερπληρεί 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:

$$R_2 = U/I = 20.000 / 10 \cdot 10^{-3} = 2.000.000 \text{ }\Omega$$

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 $R \geq 20.000.000 \text{ }\Omega$). Η ειδική αντίσταση ρ_2 του εν λόγω μείγματος αέρα καπναιθάλης είναι:

$$\rho_2 = R_2 \cdot (A/l) = 20 \text{ }\Omega\cdot\text{m}$$

Από την ανωτέρω τιμή R_2 (ή την ρ_2) συμπεραίνεται, ότι δεν υπάρχει πλέον σωστή μόνωση, γιατί έχει δημιουργηθεί μία αγωγή μεταξύ των δύο αγωγών, με αποτέλεσμα την εκδήλωση σπινθηρισμών.

4.4.3 Η αδυναμία εκδήλωσης σπινθηρισμών σε γυμνούς αγωγούς χαμηλής τάσης

Στις γραμμές χαμηλής τάσης (400 V/230 V) με γυμνούς αγωγούς ισχύει $d = 30$ cm. Αν υποθεθεί για λόγους σύγκρισης των αποτελεσμάτων, ότι πρόκειται για τους γυμνούς αγωγούς, που προαναφέρθηκαν, τότε είναι:

$$E = m_1 \cdot m_2 \cdot \delta \cdot 30 [1 + (0,3)/(\delta \cdot R)^{1/2}] \approx 0,83 \cdot 0,91 \cdot 30 [1 + (0,34)] \approx 30,55 \text{ kV/cm.}$$

Επίσης επειδή $p > 19,6$ προκύπτει ότι είναι $\eta \approx 0,21$ και επομένως:

$$E_1 = U / (\eta \cdot d) = 0,38 / (0,31 \cdot 30) \approx 0,06 \text{ kV/cm}$$

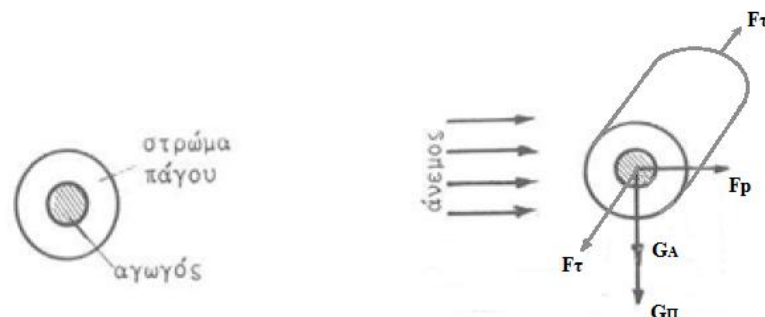
Δηλαδή ισχύει ότι: $E \approx 509 \cdot E_1$

Είναι φανερό ότι για να συμβούν σπινθηρισμοί σε γυμνούς αγωγούς χαμηλής τάσης απαιτείται πάρα πολύ ρυπασμένο περιβάλλον συγκριτικά προς τις εναέριες γραμμές μέσης τάσης, που συνήθως δεν συναντάται στην πράξη. Αυτός είναι ο λόγος, που οι σπινθηρισμοί είναι ένα αρκετά σύνηθες ηλεκτρικό φαινόμενο στις γραμμές υψηλής τάσης και στις γραμμές μέσης τάσης (όταν βεβαίως συνυπάρχουν ρύπανση και υγρασία υπό μορφή δρόσου) και όχι στους γυμνούς αγωγούς των γραμμών χαμηλής τάσης.

5

Η μηχανική συμπεριφορά των γραμμών διανομής

Σε αρκετές περιπτώσεις ενδιαφέρει (εκτός από την ηλεκτρική καταπόνηση των αγωγών) και η μηχανική καταπόνηση τους όπου ισχύουν οι κανόνες της μηχανικής αντοχής. Ο υπολογισμός της μηχανικής αντοχής ενός αγωγού μεταφοράς ή διανομής γίνεται με βάση την κατακόρυφη δύναμη (που είναι το βάρος του αγωγού (G_A) και το βάρος λόγω της επίστρωσης πάγου επί αυτού (G_{Π})), την οριζόντια δύναμη λόγω της ανεμοπίεσης στην μετωπική επιφάνεια του αγωγού (F_P), και τη δύναμη τάνυσης (F_T), οπότε η συνολική επιφόρτιση $F_{ολ}$ του αγωγού είναι η συνισταμένη των ανωτέρω δυνάμεων όπως φαίνεται στο σχήμα 5-1.



Σχήμα 5-1: Σχηματική αναπαράσταση των ασκούμενων δυνάμεων σε αγωγό του δικτύου διανομής ηλεκτρικού ρεύματος.

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 επιφόρτιση του αγωγού (που είναι η μέγιστη):

$$F_{ολ} = G_A + G_{\Pi} + F_P + F_{\tau} \quad (5-1)$$

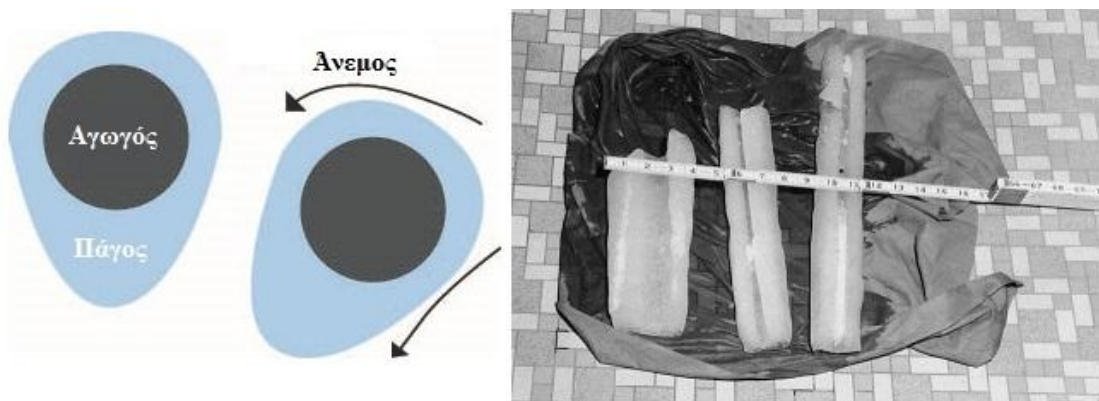
όπου:

- G_A το βάρος του αγωγού το οποίο μπορεί να υπολογιστεί από το βάρος του στη μονάδα του μήκους (πίνακας 5-1) και το μήκος του στο επίμαχο άνοιγμα μεταξύ των στύλων. Η αναλυτική σχέση υπολογισμού του βάρους του αγωγού είναι:

$$G_A = (\pi \cdot d_A^2 / 4) \cdot S \cdot \gamma_A$$

όπου γ_A το ειδικό βάρος του αγωγού ($2,7 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$ για αγωγό αλουμινίου).

- G_{Π} η επιφόρτιση του αγωγού λόγω της επίστρωσης πάγου επί αυτού (σχήμα 5-2) και δίνεται στους πίνακες 5-2 και 5-3 (από το εγχειρίδιο μηχανικού διανομής της ΔΕΗ)



Σχήμα 5-1: Μοντελοποιημένη και πραγματική μορφή της επικαθίσεως πάγου σε αγωγούς του δικτύου διανομής ηλεκτρικού ρεύματος.

- F_p η εξασκούμενη στην μετωπική επιφάνεια του αγωγού δύναμη λόγω της ανεμοπίεσης και υπολογίζεται ως

$$F_p = P_m \cdot d \cdot S$$

όπου : d : η διάμετρος του αγωγού

S : το άνοιγμα μεταξύ των στύλων

P_m : η πίεση του αέρα για την οποία ισχύει:

$$P_m = (\rho/2) \cdot v^2$$

όπου ρ η πυκνότητα του αέρα ($0,125 \text{ kg s}^2/\text{m}^4$) και v η ταχύτητα του αέρα (βλέπε πίνακα 5-4).

- F_t η δύναμη τάνυσης που δίνεται απο το Εγχειρίδιο Τυποποιημένων Κατασκευών Διανομής 1^η έκδοση 1985 της ΔΕΗ (πινακας 5-5)

Διατομή αγωγού mm^2	Αγωγός χαλκού kg/m	Αγωγός αλουμινίου		Αγωγός ACSR	
		kg/m	mm^2	kg/m	mm^2
16	0,144	0,0746	26,85	0,1022	29,59
35	0,316	0,1568	57,00	0,2246	65,06
50	0,453	0,2291	82,41	0,3210	92,87
70	0,634	0,3206	115,33	-	-
95	0,857			0,6090	175,55
107				0,7000	196,00

Πίνακας 5-1: Βάρος γυμνών αγωγών ανά μέτρο (G) σε [kg/m] και πραγματική διατομή.

Διατομή αγωγού (Ισοδ. Χαλκού) [mm ²]	Αριθμός κλώνων και διάμετρός του [mm]	εξωτερική διάμετρος [Mm]	Φορτίο θραύσης [kg]	Βάρος αγωγού + πάγου [kg/m]	Εγκάρσια επιφόρτιση ανέμου 20 kg/m ² [kg/m]	Συνισταμένη [kg/m]	Ολική επιφόρτιση + σταθερά 0,3 [kg/m]	Εγκάρσια επιφόρτιση ανέμου 60 kg/m ² [kg/m]
16	6/1/2,32	6,96	965	0,353	0,399	0,533	0,833	0,417
35	6/1/3,44	10,32	2005	0,538	0,466	0,712	1,012	0,619
50	6/1/4,11	12,33	2820	0,672	0,507	0,842	1,142	0,740
70	26/2,33 Al 7/1,81 St	14,75	4225	0,842	0,555	1,008	1,308	0,885
95	26/2,72 Al 7/2,12 St	17,24	5685	1,051	0,605	1,212	1,512	1,034

Πίνακας 5-2: Επιφόρτιση αγωγών αλουμινίου με χαλύβδινη ψυχή (μόνο για Μ.Τ.)

Διατομή αγωγού (Ισοδ. Χαλκού) [mm ²]	Αριθμός κλώνων και διάμετρός του [mm]	εξωτερική διάμετρος [mm]	Φορτίο θραύσης [kg]	Βάρος αγωγού + πάγου [kg/m]	Εγκάρσια επιφόρτιση ανέμου 20 kg/m ² [kg/m]	Συνισταμένη [kg/m]	Ολική επιφόρτιση + σταθερά 0,3 [kg/m]	Εγκάρσια επιφόρτιση ανέμου 60 kg/m ² [kg/m]
16	7/2,21	6,33	470	0,319	0,393	0,506	0,806	0,398
35	7/3,22	9,675	940	0,459	0,453	0,645	0,945	0,580
50	19/2,35	11,70	1442	0,568	0,494	0,753	1,053	0,702
70	19/2,78	14,00	2018	0,702	0,540	0,886	1,186	0,840

Πίνακας 5-3: Επιφόρτιση αγωγών αλουμινίου (μόνο για Χ.Τ.).

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 5-4: Ανεμομετρική κλίμακα Μποφόρ.

ΤΑΝΥΣΕΙΣ ΚΑΙ ΕΠΙΦΟΡΤΙΣΕΙΣ ΑΓΩΓΩΝ

1. Τα διαγράμματα και οι πίνακες CS αφορούν την προτάνυση και την τάνυση αγωγών και συνεστραμμένων καλωδίων. Αρχικά, οι αγωγοί και τα καλώδια προτανύονται με δύναμη κατά 15% μεγαλύτερη από τη δύναμη τάνυσης που προκύπτει όταν οι αγωγοί ή τα καλώδια βρίσκονται σε πλήρη επιφόρτιση. Στη συνέχεια χαλαρώνονται μέχρις ότου η δύναμη τάνυσης πάρει την τιμή που αντιστοιχεί στη θερμοκρασία περιβάλλοντος κατά την ώρα της τάνυσης και για αφόρτιστη κατάσταση, σύμφωνα με τους πίνακες και τα διαγράμματα.
2. Κατά τον υπολογισμό φορτίσεως των αγωγών και των συνεστραμμένων καλωδίων ελήφθησαν οι εξής τιμές για επικάλυψη πάγου, πίεση ανέμου, θερμοκρασία κλπ.
- 2.1. Ελαφριά επιφόρτιση
 Πάχος πάγου επικάλυψης κατά την ακτίνα 0 mm
 Ελάχιστη θερμοκρασία - 1°C
 Οριζόντια πίεση ανέμου 44kg/m²
 Σταθερή προσαύξηση 0,075kg/m
- 2.2. Μέση (Κανονική) επιφόρτιση
 Πάχος πάγου επικάλυψης κατά την ακτίνα 6,5 mm
 Ελάχιστη θερμοκρασία - 10°C
 Οριζόντια πίεση ανέμου 20kg/m²
 Σταθερή προσαύξηση 0,33kg/m
- 2.3. Βαριά επιφόρτιση
 Πάχος πάγου επικάλυψης κατά την ακτίνα 13 mm
 Ελάχιστη θερμοκρασία - 20°C
 Οριζόντια πίεση ανέμου 20kg/m²
 Σταθερή προσαύξηση 0,46kg/m
- 2.4. Υπερβαριά επιφόρτιση
 Πάχος πάγου επικάλυψης κατά την ακτίνα 25,4 mm
 Ελάχιστη θερμοκρασία - 20°C
 Οριζόντια πίεση ανέμου 20kg/m²
 Σταθερή προσαύξηση 1kg/m
- 2.5. Εξαιρετικά βαρεία επιφόρτιση
 Ελάχιστη θερμοκρασία - 20°C
 Οριζόντια πίεση ανέμου 20kg/m²
- 5.1. ΕΒ/20
 Πάχος πάγου επικάλυψης κατά την ακτίνα, περίπου 75 mm
- 5.2. ΕΒ/40
 Πάχος πάγου επικάλυψης κατά την ακτίνα, περίπου 110 mm
- 5.3. ΕΒ/60
 Πάχος πάγου επικάλυψης κατά την ακτίνα, περίπου 140 mm
- Ειδικό βάρος πάγου 912kg/m³
 - Μέγιστη δύναμη τάνυσης αγωγού με επιφόρτιση 48%
 ως ποσοστό του φορτίου θραύσεως
 - Μέγιστη δύναμη τάνυσης αφόρτιστου αγωγού +16°C 20%
 ως ποσοστό του φορτίου θραύσεως

DKT. 1982

Πίνακας 5-5: Πίνακας CS-1 από το Εγχειρίδιο Τυποποιημένων Κατασκευών Διανομής 1^η έκδοση 1985 της ΔΕΗ.

6

Υπολογισμός της δυσμενέστερης θερμικής- διηλεκτρικής- μηχανικής συμπεριφοράς των αγωγών ACSR 16 mm² και αλουμινίου 16 mm²

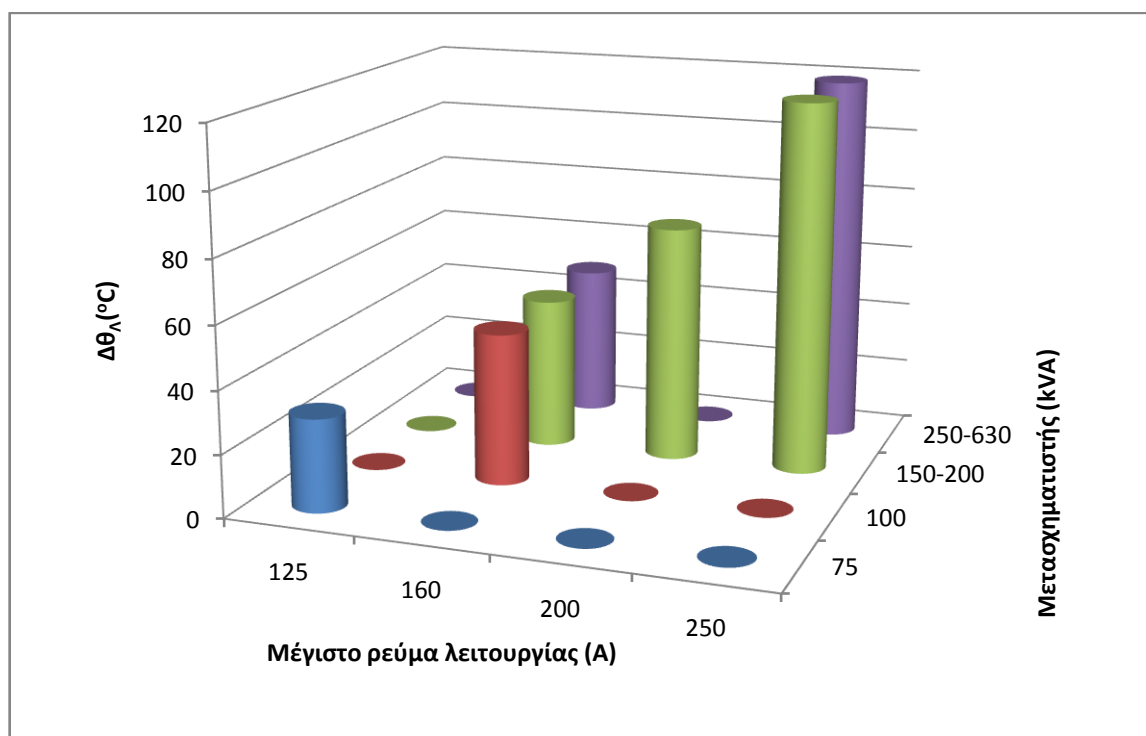
6.1 Θερμική συμπεριφορά

Εδώ παρατίθενται τα αποτελέσματα της μελέτης για τη θερμική συμπεριφορά των γραμμών μεταφοράς και διανομής του δικτύου χαμηλής και μέσης τάσης για τις εξής δυσμενείς περιπτώσεις:

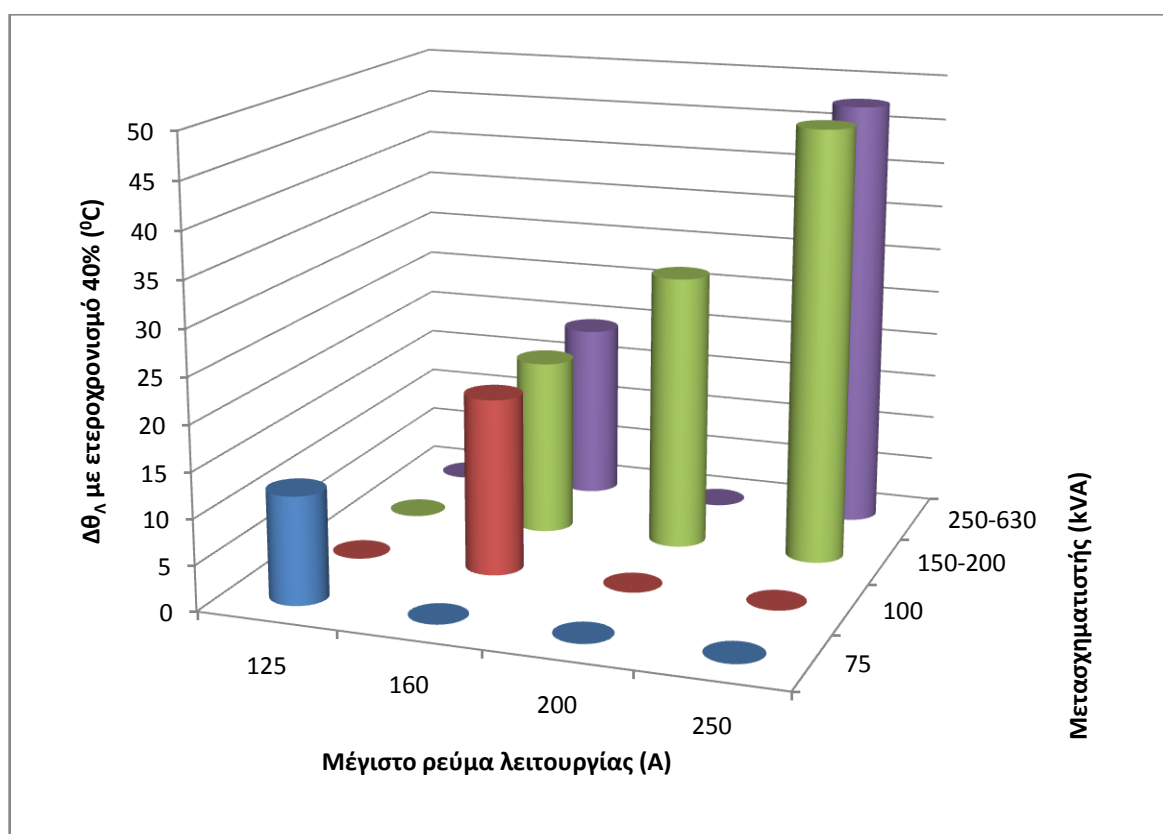
α) Γραμμές αγωγών αλουμινίου 16 mm² χαμηλής τάσης υπό το μέγιστο ρεύμα λειτουργίας.

Μετασχηματιστής (kVA)	Μέγιστο ρεύμα λειτουργίας (A)	Δθ _Λ (°C)	Δθ _Λ με ετεροχρονισμό 40% (°C)
75	125	29,73	11,9
100	160	48,70	19,5
150÷200	160	48,70	19,5
	200	76,10	30,4
	250	118,91	47,6
250÷630	160	48,70	19,5
	250	118,91	47,6

Πίνακας 6.1-1: Αύξηση της θερμοκρασίας αγωγών αλουμινίου 16 mm² και ονομαστικού ρεύματος 145 A υπό το μέγιστο ρεύμα λειτουργίας.



Σχήμα 6.1-1: Αύξηση της θερμοκρασίας αγωγών αλουμινίου 16 mm² και ονομαστικού ρεύματος 145 A υπό το μέγιστο ρεύμα λειτουργίας.

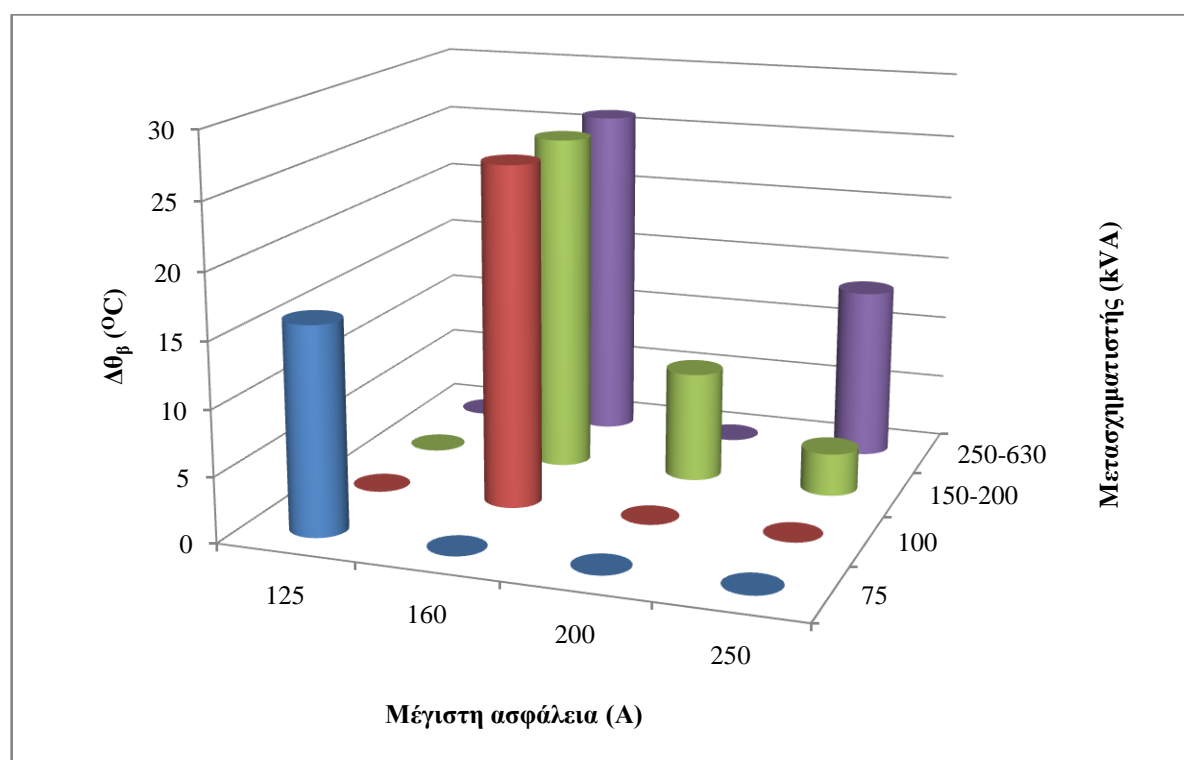


Σχήμα 6.1-2: Αύξηση της θερμοκρασίας αγωγών αλουμινίου 16 mm² και ονομαστικού ρεύματος 145 A υπό το μέγιστο ρεύμα λειτουργίας με ετεροχρονισμό 40%.

β) Γραμμές χαμηλής τάσης υπό το ρεύμα βραχυκύκλωσης (I_{β}).

Μετασχηματιστής (kVA)	Μέγιστη ασφάλεια (I_{NA}) (A)	Ρεύμα βραχυκύκλωσης ($I_{\beta}=3 \cdot I_{NA}$) (A)	Δυσμενέστερη διατομή κατά περίπτωση (mm ²)	$\Delta\theta_{\beta}$ (t=5 sec) (°C)
75	125	375	16	15,9
100	160	480	16	26,1
150÷200	160	480	16	26,1
	200	600	35	8,5
	250	750	70	3,3
250÷630	160	480	16	26,1
	250	750	35	13,3

Πίνακας 6.1-2: Αύξηση θερμοκρασίας για χρόνο διακοπής t=5 sec συναρτήσει του ονομαστικού ρεύματος.

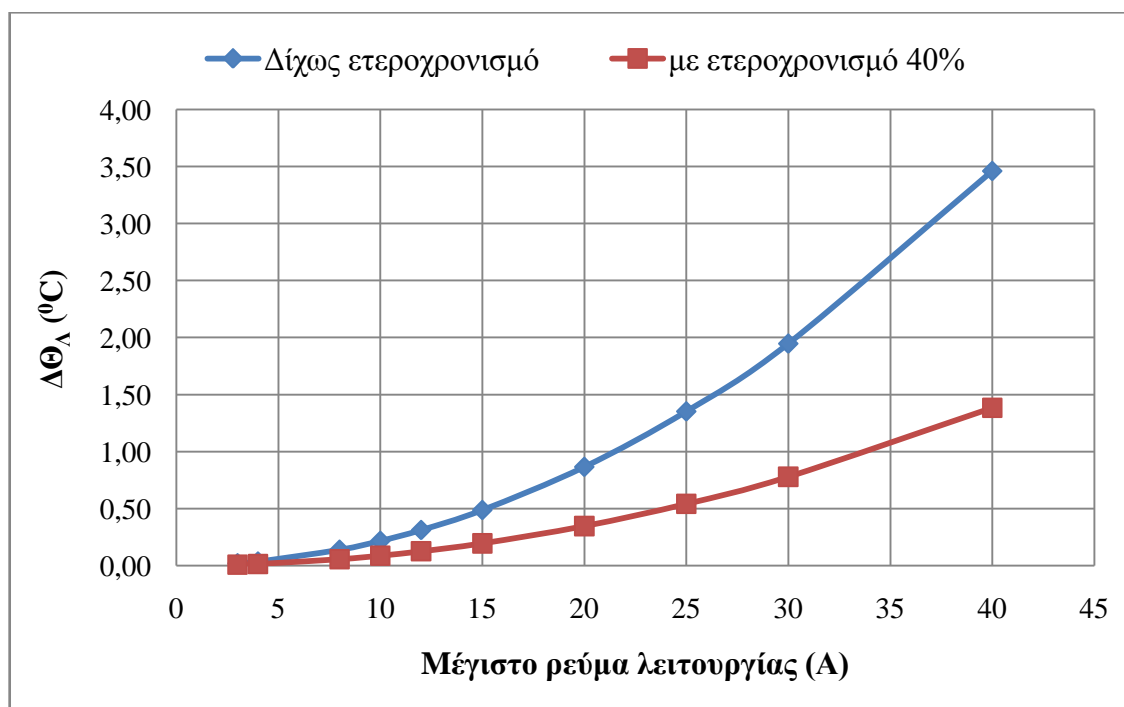


Σχήμα 6.1-3: Αύξηση θερμοκρασίας για χρόνο διακοπής t=5 sec συναρτήσει του ονομαστικού ρεύματος.

γ) Γραμμές ACSR 16 mm² (με ονομαστικό ρεύμα = 136 A) μέσης τάσης υπό το μέγιστο ρεύμα λειτουργίας.

Μέγιστο ρεύμα λειτουργίας (A)	Δθ _λ (°C)	Δθ _λ με ετεροχρονισμό 40% (°C)
3	0,02	0,01
4	0,03	0,01
8	0,14	0,06
10	0,22	0,09
12	0,31	0,12
15	0,49	0,19
20	0,87	0,35
25	1,35	0,54
30	1,95	0,78
40	3,46	1,38

Πίνακας 6.1-3: Αύξηση της θερμοκρασίας αγωγών ACSR 16 mm² και ονομαστικού ρεύματος 136 A υπό το μέγιστο ρεύμα λειτουργίας.

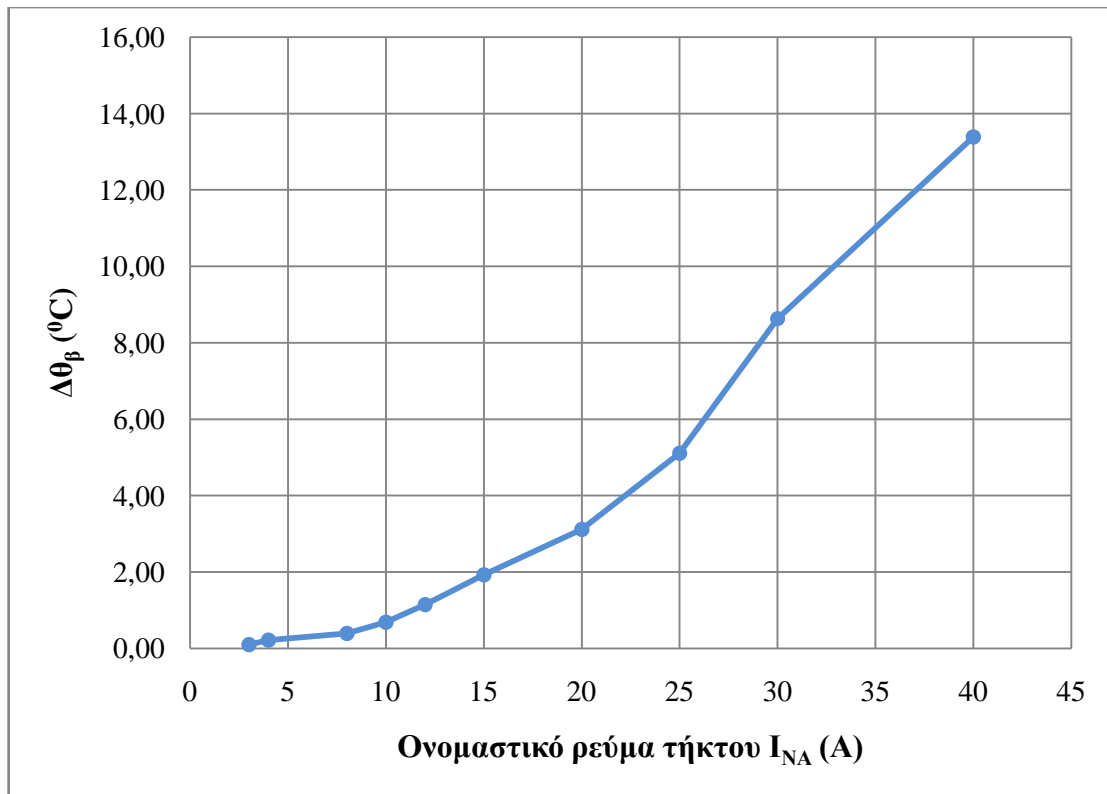


Σχήμα 6.1-4: Αύξηση της θερμοκρασίας αγωγών ACSR 16 mm² και ονομαστικού ρεύματος 136 A υπό το μέγιστο ρεύμα λειτουργίας (με και χωρίς ετεροχρονισμό).

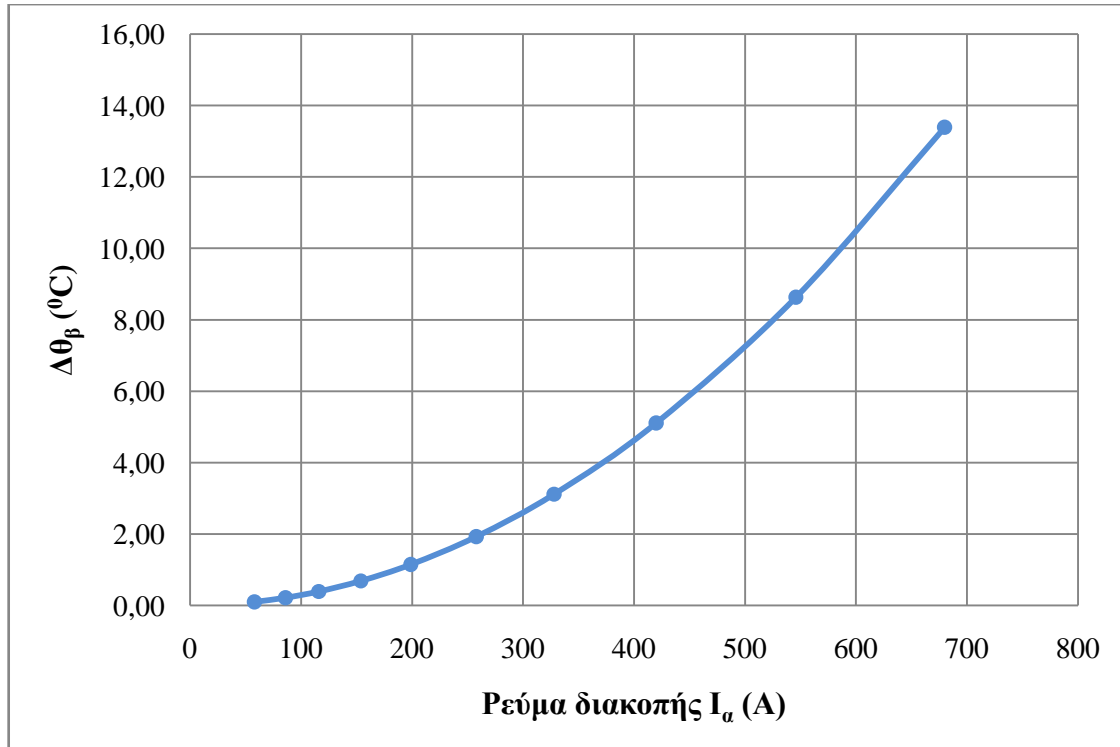
δ) Γραμμές μέσης τάσης υπό το ρεύμα βραχυκύκλωσης (I_{β}).

Ονομαστικό ρεύμα τηκτού (I_{NA}) (A)	I_{α} για $t=0,1$ sec και $T=0,6$ (κατά ANSI C37.42,1969) (A)	I_{SW} (A)	$\Delta\theta_{max}$ ($^{\circ}C$)
3	58	78,4	0,10
4	86	116,2	0,21
8	116	156,8	0,39
10	154	208,1	0,69
12	199	268,9	1,15
15	258	348,6	1,93
20	328	443,2	3,12
25	420	567,6	5,11
30	546	737,8	8,63
40	680	918,9	13,39

Πίνακας 6.1-2: Αύξηση θερμοκρασίας για χρόνο διακοπής $t=0,01$ sec συναρτήσει του ονομαστικού ρεύματος και του ρεύματος διακοπής.



Πίνακας 6.1-2: Αύξηση θερμοκρασίας για χρόνο διακοπής $t=0,1$ sec συναρτήσει του ονομαστικού ρεύματος.



Πίνακας 6.1-2: Αύξηση θερμοκρασίας για χρόνο διακοπής $t=0,1$ sec συναρτήσει του ρεύματος διακοπής.

6.2 Διηλεκτρική συμπεριφορά

Όλοι οι υπολογισμοί αφορούν αγωγούς που δεν βρίσκονται στην καλύτερη δυνατή κατάσταση (φθαρμένοι αγωγοί $\rightarrow m_1 \approx 0,83$), ευρισκόμενοι σε περιβάλλον ύπαρξης υγρασίας ($m_2 \approx 0,8$).

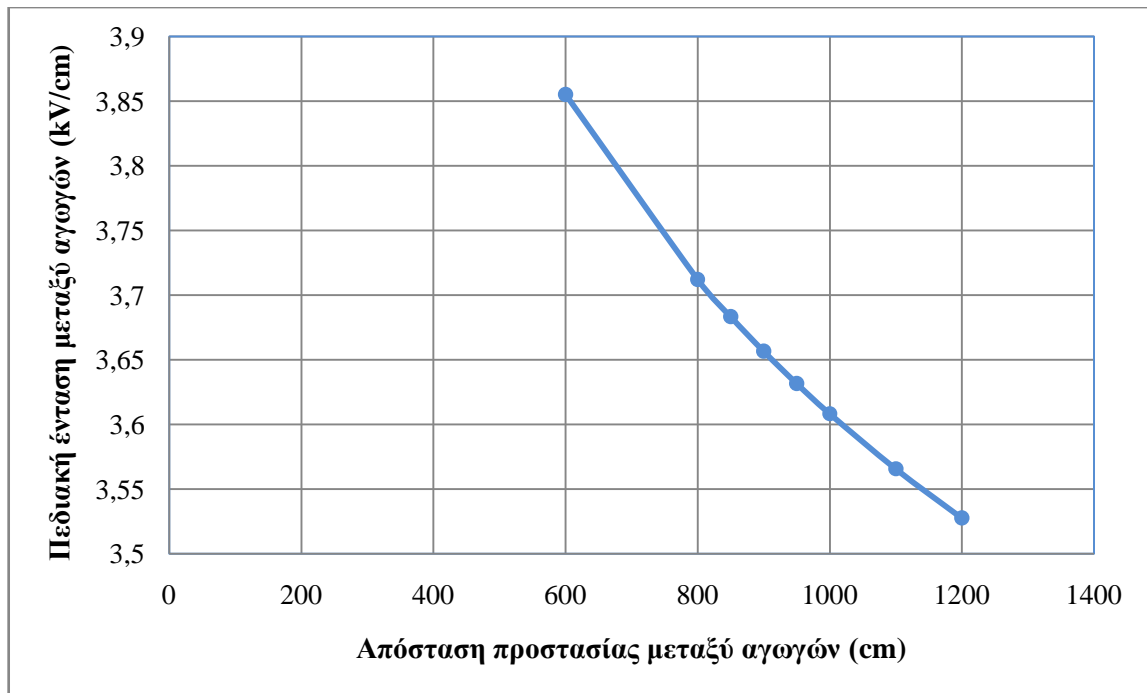
α) Γραμμές μέσης τάσης (δυσμενέστερη περίπτωση: αγωγός ACSR 16 mm²)

Η ελάχιστη απαιτούμενη ένταση του ηλεκτρικού πεδίου για την εκδήλωση σπινθηρισμών, υπό τάση 20 kV και θερμοκρασία περιβάλλοντος 40⁰C είναι $E_{\sigma\pi} = 21,77$ kV/cm.

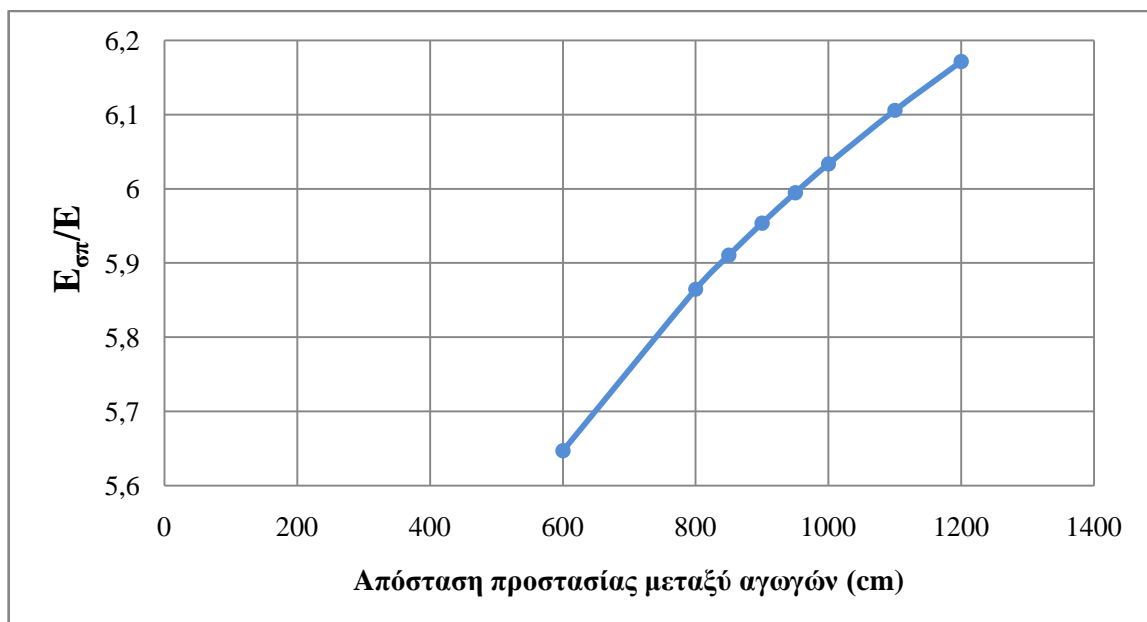
Απόσταση προστασίας μεταξύ αγωγών(d) (cm)	Πεδιακή ένταση μεταξύ αγωγών (E) (kV/cm)	$E_{\sigma\pi}/E$
1200	3,53	6,17
1100	3,57	6,11
1000	3,61	6,03
950	3,63	5,99
900	3,66	5,95
850	3,68	5,91
800	3,71	5,86
600	3,86	5,65

Πίνακας 6.2-1: Τιμή περίπου σε γραμμές διανομής 20 kV: α) της ελάχιστης απαιτούμενης έντασης του ηλεκτρικού πεδίου για την εκδήλωση σπινθηρισμών και β) της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου μεταξύ δύο αγωγών.

600 cm: συνήθης τάξη μεγέθους της απόστασης μόνωσης στην κατακόρυφη διάταξη των αγωγών.



Σχήμα 6.2-1: Τιμή περίπου σε γραμμές διανομής 20 kV: α) της ελάχιστης απαιτούμενης έντασης του ηλεκτρικού πεδίου για την εκδήλωση σπινθηρισμών και β) της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου μεταξύ δύο αγωγών.



Σχήμα 6.2-2: Τιμή περίπου σε γραμμές διανομής 20 kV: α) της ελάχιστης απαιτούμενης έντασης του ηλεκτρικού πεδίου για την εκδήλωση σπινθηρισμών και β) της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου μεταξύ δύο αγωγών.

β) Γραμμές χαμηλής τάσης (αγωγός αλουμινίου 16 mm²)

Η ελάχιστη απόσταση μόνωσης μεταξύ γυμνών αγωγών σε γραμμές διανομής χαμηλής τάσης (400 V) είναι 30 cm.

Η ελάχιστη απαιτούμενη ένταση του ηλεκτρικού πεδίου για την εκδήλωση σπινθηρισμών, υπό τάση 400 V και θερμοκρασία περιβάλλοντος 40⁰C είναι $E_{\sigma\pi}=21,925$ kV/cm.

Απόσταση προστασίας μεταξύ αγωγών (d) (cm)	Πεδιακή ένταση μεταξύ αγωγών (E) (kV/cm)	$E_{\sigma\pi}/E$
30	0,138197958	158,649

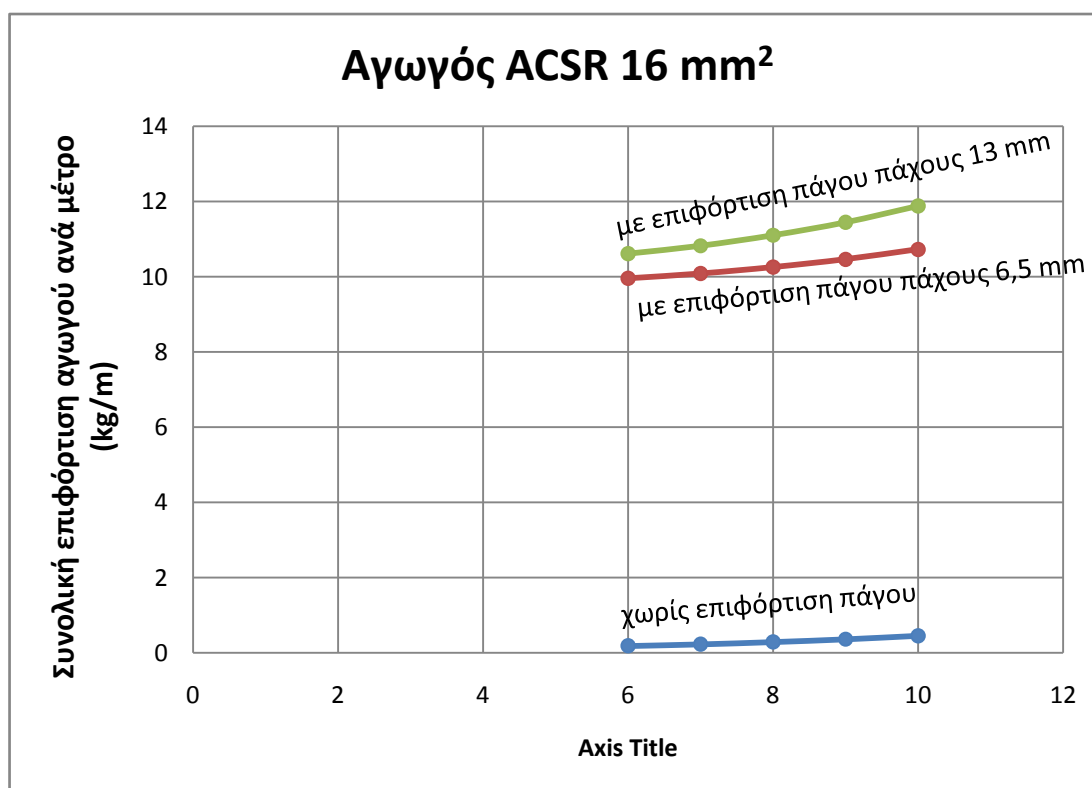
Πίνακας 6.2-2: Τιμή περίπου σε γραμμές διανομής 400 V: α) της ελάχιστης απαιτούμενης έντασης του ηλεκτρικού πεδίου για την εκδήλωση σπινθηρισμών και β) της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου μεταξύ δύο αγωγών.

6.3 Μηχανική συμπεριφορά

Οι τιμές έχουν υπολογιστεί υπό συνθήκες στροβιλισμού του αέρα, έτσι ώστε η ανεμοπίεση να συμπίπτει με τη διεύθυνση του βάρους (υπολογισμός σε βάρος του αγωγού).

Αγωγός ACSR 16 mm ²				
Ένταση ανέμου (Μποφόρ)	Ταχύτητα ανέμου (m/sec)	F _{ολ} χωρίς επιφόρτιση πάγου (kg/m)	F _{ολ} με επιφόρτιση πάγου 6,5mm (kg/m)	F _{ολ} με επιφόρτιση πάγου 13 mm (kg/m)
6	13,8	0,185	9,96	10,61
7	17,1	0,229	10,09	10,82
8	20,7	0,289	10,25	11,10
9	24,4	0,361	10,46	11,44
10	28,4	0,453	10,73	11,88

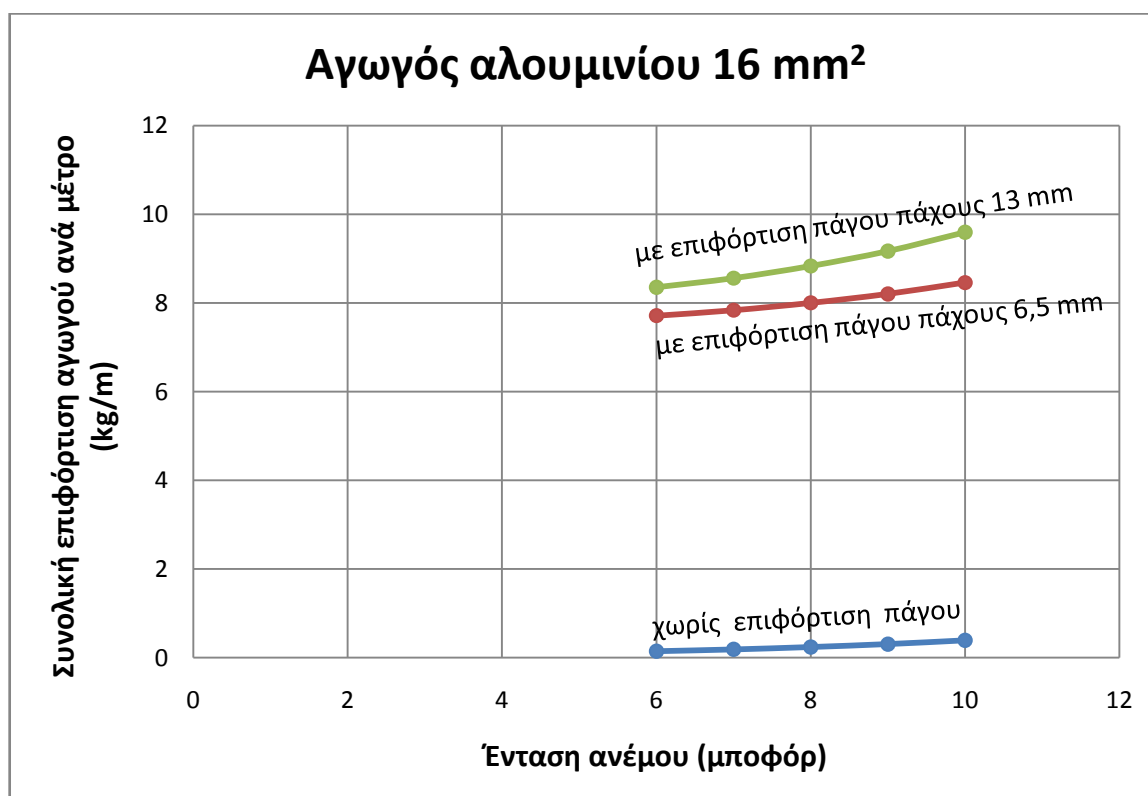
Πίνακας 6.3-1: Μέγιστη επιφόρτιση αγωγών (ACSR 16mm²) ανά μέτρο συναρτήσει της έντασης του ανέμου.



Σχήμα 6.3-1: Μέγιστη επιφόρτιση αγωγών (ACSR 16mm²) ανά μέτρο συναρτήσει της έντασης του ανέμου.

Αγωγός Αλουμινίου 16 mm ²				
Ένταση ανέμου (Μποφόρ)	Ταχύτητα ανέμου (m/sec)	F _{ολ} χωρίς επιφόρτιση πάγου (kg)	F _{ολ} με επιφόρτιση πάγου 6,5mm (kg)	F _{ολ} με επιφόρτιση πάγου 13 mm (kg)
6	13,8	0,15	7,71	8,35
7	17,1	0,19	7,84	8,56
8	20,7	0,244	8,00	8,85
9	24,4	0,31	8,20	9,17
10	28,4	0,394	8,46	9,60

Πίνακας 6.3-2: Μέγιστη επιφόρτιση αγωγών (αλουμινίου 16 mm²) ανά μέτρο συναρτήσει της έντασης του ανέμου.

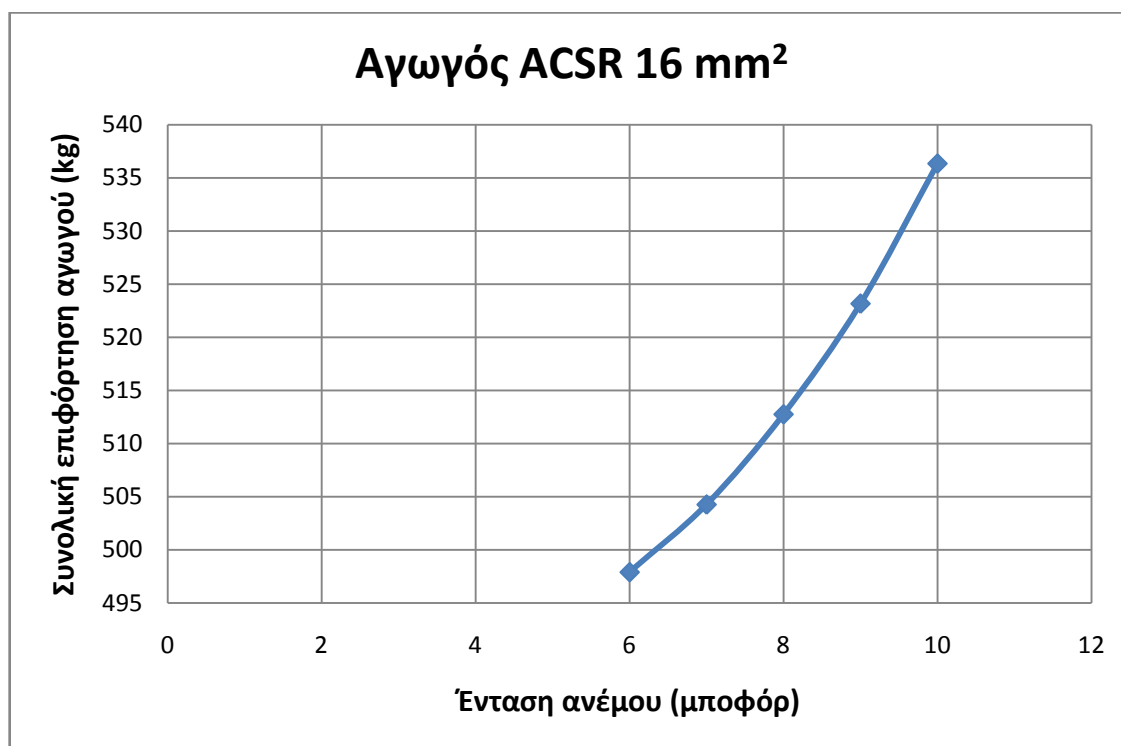


Σχήμα 6.3-2: Μέγιστη επιφόρτιση αγωγών (αλουμινίου 16 mm²) ανά μέτρο συναρτήσει της έντασης του ανέμου.

Στους παρακάτω πίνακες παρουσιάζεται η συνολική επιφόρτιση των αγωγών μήκους 50 m.

Πάχος πάγου επικάλυψης κατά την ακτίνα αγωγού ACSR 16 mm ² = 6,5 mm		
Ένταση ανέμου (Μποφόρ)	Ταχύτητα ανέμου (m/sec)	F _{ολ} για S=50 m (kg)
6	13,8	497,9
7	17,1	504,3
8	20,7	512,7
9	24,4	523,2
10	28,4	536,3

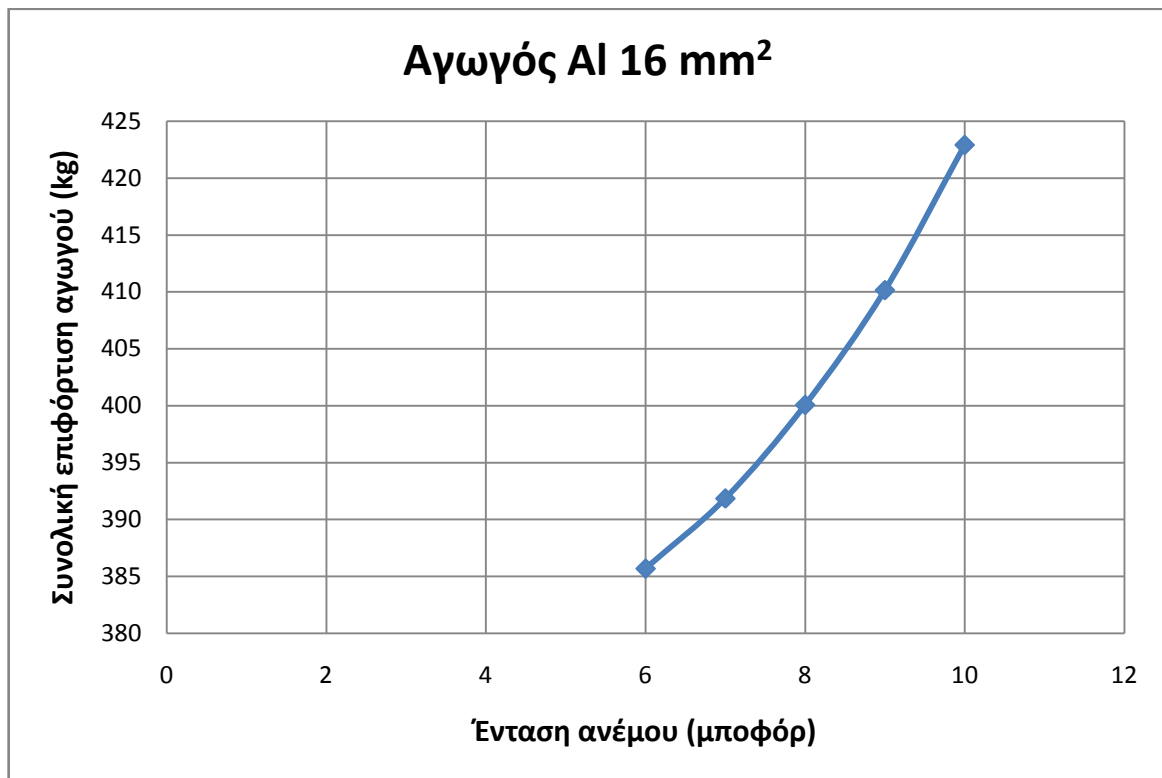
Πίνακας 6.3-3: Μέγιστη επιφόρτιση αγωγών (ACSR 16 mm²) συναρτήσει της έντασης του ανέμου.



Σχήμα 6.3-3: Μέγιστη περίπου δύναμη αγωγών ACSR 16 mm² ανάλογα την ένταση του αέρα.

Πάχος πάγου επικάλυψης κατά την ακτίνα αγωγού Αλουμινίου $16 \text{ mm}^2 = 6,5 \text{ mm}$		
Ένταση ανέμου (Μποφόρ)	Ταχύτητα ανέμου (m/sec)	$F_{ολ}$ για $S=50 \text{ m}$ (kg)
6	13,8	385,7
7	17,1	391,9
8	20,7	400,1
9	24,4	410,2
10	28,4	422,9

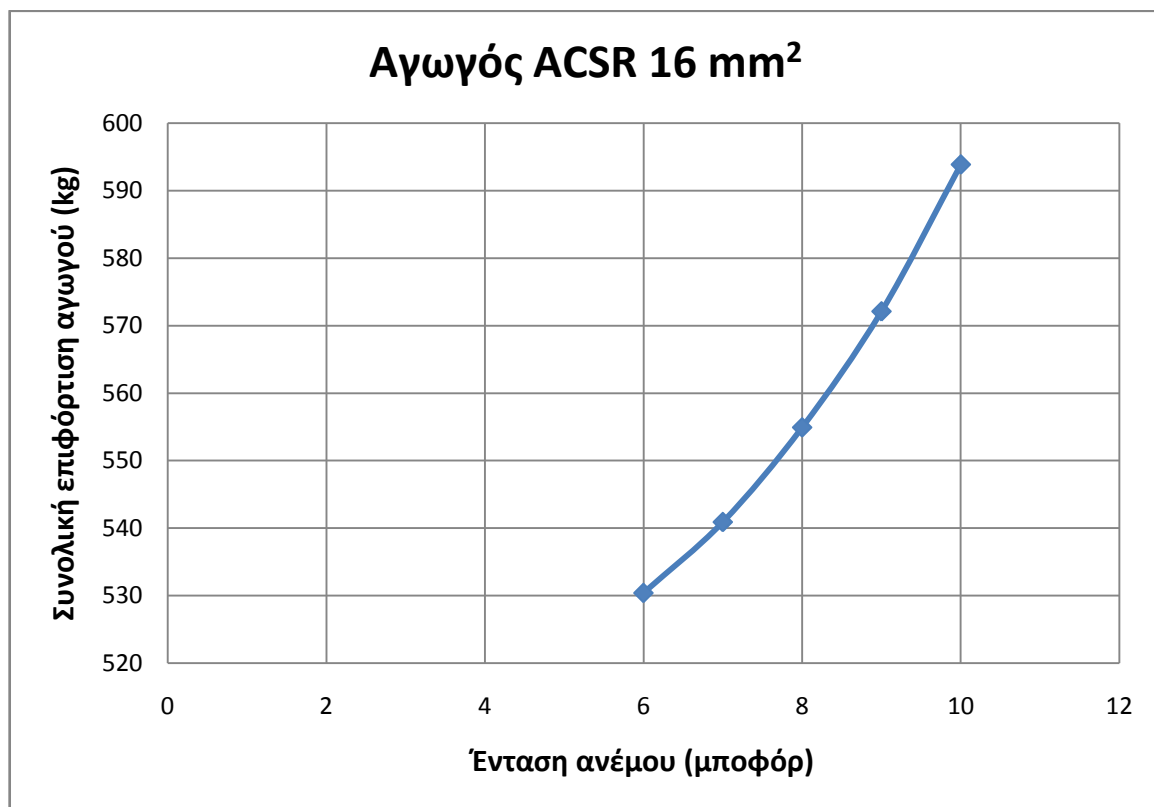
Πίνακας 6.3-4: Μέγιστη επιφόρτιση αγωγών (ACSR 16 mm^2) συναρτήσει της έντασης του ανέμου.



Σχήμα 6.3-4: Μέγιστη περίπου δύναμη αγωγών αλουμινίου 16 mm^2 ανάλογα την ένταση του αέρα.

Πάχος πάγου επικάλυψης κατά την ακτίνα αγωγού ACSR 16 mm ² = 13 mm		
Ένταση ανέμου (Μποφόρ)	Ταχύτητα ανέμου (m/sec)	F _{ολ} για S=50 m (kg)
6	13,8	530,4
7	17,1	540,9
8	20,7	554,9
9	24,4	572,1
10	28,4	593,9

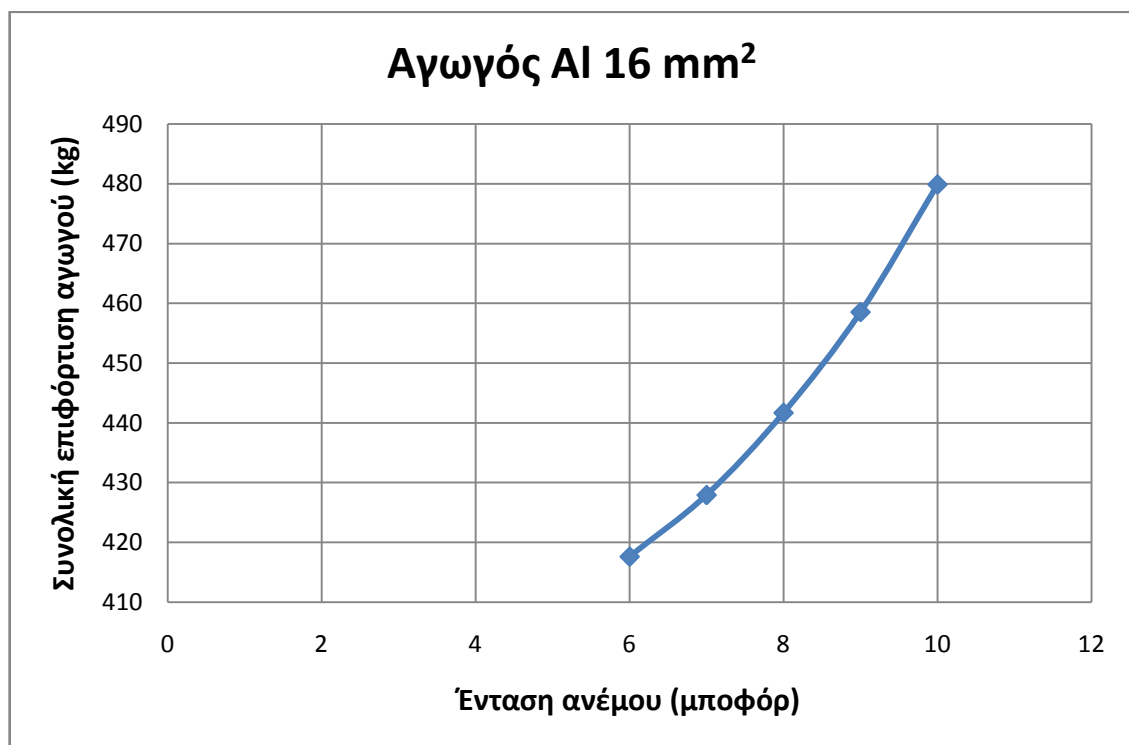
Πίνακας 6.3-5: Μέγιστη επιφόρτιση αγωγών (ACSR 16 mm²) συναρτήσει της έντασης του ανέμου.



Σχήμα 6.3-5: Μέγιστη περίπου δύναμη αγωγών ACSR 16 mm² ανάλογα την ένταση του αέρα.

Πάχος πάγου επικάλυψης κατά την ακτίνα αγωγού Αλουμινίου $16 \text{ mm}^2 = 13 \text{ mm}$		
Ένταση ανέμου (Μποφόρ)	Ταχύτητα ανέμου (m/sec)	$F_{ολ}$ για $S=50 \text{ m}$ (kg)
6	13,8	417,6
7	17,1	427,9
8	20,7	441,7
9	24,4	458,5
10	28,4	479,9

Πίνακας 6.3-6: Μέγιστη επιφόρτιση αγωγών (αλουμινίου 16 mm^2) συναρτήσει της έντασης του ανέμου.



Σχήμα 6.3-6: Μέγιστη περίπου δύναμη αγωγών αλουμινίου 16 mm^2 ανάλογα την ένταση του αέρα.

7

Συμπεράσματα

7.1 Αξιολόγηση της θερμικής συμπεριφοράς αγωγών

Σε μία θερμή ημέρα με θερμοκρασία περιβάλλοντος 41°C, η συνολική μέγιστη θερμοκρασία που αναπτύσσεται στον αγωγό δεν ξεπερνά τους 160°C (αναφέρεται σε αγωγούς αλουμινίου 16 mm² του δικτύου διανομής χαμηλής τάσης υπό το μέγιστο ρεύμα λειτουργίας) όταν οι οριακές θερμοκρασίες ανοχής γυμνών αγωγών αλουμινίου και χαλκού είναι 180°C και 200°C αντίστοιχα. Πρακτικά βέβαια, θα πρέπει να λάβει κανείς υπόψη τον συντελεστή ετεροχρονισμού των ηλεκτρικών φορτίων ο οποίος είναι της τάξης του 0,4 και μας δίνει συνολική μέγιστη θερμοκρασία επί του αγωγού μικρότερη των 89°C. Συνεπώς, είναι εμφανές ότι δεν εμφανίζεται υπερθέρμανση και αποκλείεται να συμβεί τήξη του αγωγού λόγω του ηλεκτρικού φορτίου του, γιατί η θερμοκρασία τήξης είναι για το αλουμίνιο 660 °C και τον χάλυβα 1350÷1500 °C.

7.2 Αξιολόγηση της διηλεκτρικής συμπεριφοράς αγωγών

Από τα αποτελέσματα προκύπτει ότι η πεδιακή ένταση μεταξύ των αγωγών (E) είναι τουλάχιστον 5,65 φορές μικρότερη από την ελάχιστη απαιτούμενη ένταση του ηλεκτρικού πεδίου για την εκδήλωση σπινθηρισμών (E_{στ}). Αυτό σημαίνει ότι αποκλείεται παντελώς η εκδήλωση σπινθηρισμών.

7.3 Αξιολόγηση της μηχανικής συμπεριφοράς αγωγών

Η μέγιστη μηχανική καταπόνηση που δέχονται οι αγωγοί αλουμινίου και ACSR 16mm² είναι 479,9 kg και 593,9 kg αντίστοιχα. Αυτό συμβαίνει για μήκος αγωγού 50 m, ένταση ανέμου ίση με 10 μποφόρ και πάχος πάγου επικαλύψεως κατά την ακτίνα του αγωγού ίσο με 13mm. Το όριο θραύσεως αγωγών αλουμινίου και ACSR 16mm² είναι 739 kg και 965 kg αντίστοιχα και συνεπώς δεν υπάρχει περίπτωση αποκοπής αγωγών.

7.4 Μελλοντική αξιοποίηση της διπλωματικής εργασίας

Οι πληροφορίες που προέκυψαν με την περαίωση της διπλωματικής εργασίας μπορούν να αξιοποιηθούν από τον εκάστοτε μηχανικό που εργάζεται στην εγκατάσταση ή επίβλεψη του δικτύου με σκοπό την επιλογή κατάλληλων αγωγών και αντικατάσταση των ακατάλληλων με βάση τα όρια αντοχής που υπολογίσθηκαν. Επίσης μπορεί να αποτελέσει πολύτιμο εργαλείο για τους πραγματογνώμονες οι οποίοι γνωμοδοτούν έναντι ατυχημάτων που λαμβάνουν χώρα στο δίκτυο διανομής. Τελος μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως εκπαιδευτικό υλικό προς κατανόηση της αντίστοιχης θεωρίας είτε για ερευνητικό σκοπό με στόχο τη βελτίωση της προκύπτουσας γνώσης.

8

Βιβλιογραφία

- [1] Μπούρκας Π.Δ., Πολυκράτη Α.Δ., Βιομηχανικές Ηλεκτρικές Εγκαταστάσεις, Τόμος ΙΙ, Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα 2012.
- [2] Μπούρκας Π.Δ., Καραγιαννόπουλος Κ.Γ., Βιομηχανικές ηλεκτρικές διατάξεις και υλικά, Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα 2003.
- [3] 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.
- [4] Halevidis C.D., Anagnostatos S.D., Polykrati A.D., Koufakis E.I., Bourkas P.D., Proposal of a protection method against probable consequences to humans and the environment from short-circuit or abruption, IET, Generation, Transmission & Distribution, accept for publication 23-2-2010, in press.

- [5] Μπούρκας Π.Δ., Ασκήσεις Βιομηχανικών και Κτιριακών Εγκαταστάσεων, Ε.Μ.Π, Αθήνα 2008.
- [6] Σιμιτζής Α., Προσδιορισμός της θερμικής καταπόνησης των γυμνών αγωγών και των συνεστραμμένων καλωδίων του δικτύου χαμηλής τάσης κατά το βραχυκύκλωμα, Διπλωματική Εργασία στη Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, Αθήνα, Σεπτέμβριος 2008.
- [7] Ψαρρός Ε.Γ., Υπαίθριες γραμμές διανομής χαμηλής τάσης σε περιβάλλον πυρκαγιών, Διδακτορική Διατριβή, ΕΜΠ, Αθήνα 2009.
- [8] Psarros E.G., Polykrati A.D., Karagiannopoulos C.G., Bourkas P.D., A model for calculating the temperature of aluminium particles ejected from overhead voltage lines due to short-circuit, *International Journal of Wildland Fire*, 2009, 18, 722-726.
- [9] Γ. Σουλινάρης, Αξιολόγηση συμπεριφοράς γραμμής ηλεκτρικής ενέργειας σε περιβάλλον πυρκαγιάς, Διδακτορική Διατριβή στην Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, Αθήνα 2015.
- [10] G.K. Soulinaris, C.D. Halevidis, A.D. Polykrati, P.D. Bourkas, Evaluation of the thermal stress and dielectric phenomena in the investigation of the causes of wildfires involving distribution power lines, *Electric Power Systems Research* του οίκου ELSEVIER, V 117 pp. 76-83, 2014.
- [11] Σ. Κουγιουμτζή, Θερμική συμπεριφορά αγωγού διανομής μέσης τάσης τύπου ACSR κατά τη διακοπή της λειτουργίας του από ασφαλειοαποζεύκτη, Διπλωματική Εργασία στην Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, Αθήνα 2014.

- [12] Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού, Τυποποιημένες κατασκευές διανομής, Τόμος Ι, έκδοση 3^η, Αθήνα 1984.
- [13] Σ. Μερτζανάκης, Στατιστική ανάλυση αλμάτων δυναμικού σε δοκίμια πεπερασμένου χαρτιού υπό κρουστική τάση μορφής 250/2500 μs , Διπλωματική Εργασία στην Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, Αθήνα 2008.