



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ
ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ

Διηλεκτρική συμπεριφορά γραμμών διανομής σε περιβάλλον φυλλωμάτων δένδρων

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Δημήτριος Ε. Ντάρδας

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

Αθήνα , Ιούλιος 2013



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

Διηλεκτρική συμπεριφορά γραμμών διανομής σε περιβάλλον φυλλωμάτων δένδρων

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Δημήτριος Ε. Ντάρδας

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

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 5^η Ιουλίου 2013

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

Ν. Ι. Θεοδώρου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Π. Δ. Μπούρκας
Ομ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα , Ιούλιος 2013

.....
Δημήτριος Ε. Ντάρδας

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

Copyright ©Δημήτριος Ε. Ντάρδας , Μάιος 2013
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

Πίνακας περιεχομένων

Τίτλος παραγράφου	Σελίδα
Περίληψη	9
Πρόλογος – Ευχαριστίες	11
1 Σύντομη αναφορά στο εναέριο δίκτυο διανομής στην Ελλάδα	12
1.1 Απλοποιημένο παράδειγμα για το εναέριο δίκτυο διανομής στην Ελλάδα	12
1.1.1 Η διάρκεια ζωής των υπαίθριων εγκαταστάσεων διανομής	14
1.1.2 Αγωγοί και καλώδια μέσης – χαμηλής τάσης	15
1.1.2.1 Αγωγοί από Χαλκό	15
1.1.2.2 Αγωγοί από Αλουμίνιο	15
1.1.2.3 Αγωγοί από Αλουμίνιο - Χάλυβα (ACSR)	16
1.1.2.4 Μηχανική συμπεριφορά – επιφόρτιση εναέριων γραμμών διανομής	17
1.1.2.4.1 Η πυρκαγιά στο περιβάλλον των γραμμών διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας	19
1.1.2.5 Ρεύμα βραχυκύκλωσης σε γραμμές χαμηλής τάσης	20
1.1.2.6 Επιλογή ασφαλειών σε γραμμές διανομής (συνθήκη ουδετέρωσης)	23
1.1.2.7 Ρεύμα βραχυκύκλωσης σε αγωγούς μέσης τάσης	26
1.1.2.7-1 Απλοποιημένο παράδειγμα βραχυκυκλώματος σε γραμμές διανομής μέσης τάσης	27
1.1.2.8 Σφάλμα λόγω ροής ρεύματος μέσω αντίστασης Z	30
1.1.2.9 Ρεύμα σφάλματος κατά την αποκοπή αγωγού	31
1.1.2.9-1 Η υποθετική δημιουργία τμημάτων αλουμινίου από τους αγωγούς και η θερμοκρασία τους κατά την πρόσκρουση στο έδαφος	32
1.1.2.9-2 Αίτια της εικόνας τήξης ενός αγωγού του δικτύου διανομής χαμηλής τάσης όταν ισχύει η συνθήκη ουδετέρωσης	34
1.1.2.9-3 Αίτια της εικόνας τήξης των κλώνων αλουμινίου σε αγωγούς ACSR (ή αγωγούς αλουμινίου) του δικτύου διανομής μέσης τάσης	34
1.1.2.9-4 Αποτελέσματα των μετρήσεων και των οπτικών παρατηρήσεων	34
1.1.2.9-5 Συμπεράσματα από τις μετρήσεις και τις παρατηρήσεις επί των πειραματικών διατάξεων	35
1.2 Το ηλεκτροστατικό πεδίο στους μονωτές	36
1.2.1 Διατάξεις ηλεκτροδίων με ένα διηλεκτρικό	36

1.2.2	Συμπεράσματα από το ηλεκτροστατικό πεδίο σε διατάξεις ηλεκτροδίων με ένα διηλεκτρικό	39
1.2.3	Διαχωριστικές επιφάνειες μεταξύ διηλεκτρικών	40
1.2.4	Μοντέλο μελέτης διηλεκτρικής συμπεριφοράς και αντίσταση μόνωσης	43
1.2.4.1	Οι βασικές μορφές διάσπασης	44
1.2.4.2	Βασικά κριτήρια αξιολόγησης των ηλεκτρομονωτικών υλικών	45
1.2.4.3	Η διηλεκτρική αντοχή και η διάσπαση σε ανομοιογενές πεδίο (για διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα και ακίδα-ακίδα)	45
1.2.4.4	Η σχετική διηλεκτρική σταθερά	46
1.2.4.5	Ο συντελεστής απωλειών	47
1.2.4.6	Η επιφανειακή αγωγιμότητα	48
1.2.4.7	Η θερμοκρασία και ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας	49
1.2.5	Γενικά περί σπινθηρισμών και ερπυσών εκκενώσεων	50
1.2.5.1	Η εκδήλωση σπινθηρισμών σε γυμνούς αγωγούς μέσης τάσης	51
1.2.5.2	Η εκδήλωση σπινθηρισμών στη γραμμή λόγω καπναιθάλης	51
1.2.5.3	Η ελάχιστη τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου για την εκδήλωση σπινθηρισμών περί τους αγωγούς	53
1.2.5.4	Η αδυναμία εκδήλωσης σπινθηρισμών σε γυμνούς αγωγούς χαμηλής τάσης	54
1.2.6	Οι αποστάσεις μόνωσης	55
1.2.6.1	Αποστάσεις μόνωσης στις γραμμές χαμηλής τάσης	55
1.2.6.2	Αποστάσεις γυμνών αγωγών μέσης τάσης από κτίρια και από επικλινή εδάφη	57
1.2.6.3	Ελάχιστη απόσταση ασφάλειας γραμμών διανομής μέσης τάσης από το δώμα κτιρίων	59
1.2.6.4	Τάξη μεγέθους της υποθετικής τάσης σε γραμμή διανομής τάσης και της αντίστοιχης προς αυτή υποθετικής τάσης διάσπασης από αγωγό προς γη ανάλογα με το ύψος των αγωγών από το έδαφος	59
1.3	Επιθεώρηση – εργασίες συντήρησης στο δίκτυο	62
1.3.1	Αποστάσεις γυμνών αγωγών διανομής από δένδρα – κλάδεμα δένδρων	63
1.3.2	Κανόνες ασφαλείας για το κλάδεμα δένδρων	68
1.4	Ελληνική χλωρίδα	70
1.4.1	Καρποφόρα δένδρα	70
1.4.2	Μη καρποφόρα δένδρα	70
1.4.3	Ηλεκτρική αντίσταση του ξύλου	71
1.4.3.1	Διηλεκτρικές ιδιότητες του ξύλου	71
1.4.3.2	Βακτήρια που προσβάλλουν το ξύλο	72

1.4.3.3	Μύκητες που προσβάλλουν το ξύλο	72
1.4.3.4	Τυπική εμφάνιση καστανής σήψης	73
1.3.3.5	Εμποτισμός – Υγροσκοπικότητα του ξύλου	73
1.4.4	Η πυκνότητα του ξύλου	73
1.4.4.1	Παράγοντες που επηρεάζουν την πυκνότητα του ξύλου	76
1.4.4.2	Υπολογισμός της πυκνότητας του ξύλου	76
1.4.4.3	Μεταβλητότητα της πυκνότητας του ξύλου	76
1.4.5	Υγροσκοπικότητα και μεταβολή των ιδιοτήτων του ξύλου	77
1.4.6	Καύση του ξύλου	78
2	Σκοπός της εργασίας	80
3	Υποθετική επαφή ανθρώπου με δένδρο το οποίο γειτνιάζει με γυμνούς αγωγούς δικτύου διανομής μέσης τάσης	81
3.1	Απλοποιημένη διάταξη γειτνιάζοντος δένδρου και αγωγού διανομής	81
3.1.1	Μελέτη της απόστασης μόνωσης όταν τηρείται η απόσταση ασφαλείας	82
3.1.2	Μελέτη της απόστασης μόνωσης όταν δεν τηρείται η απόσταση ασφαλείας (για τιμές της απόστασης αγωγού-δένδρου , πολύ κοντά στην ελάχιστη απόσταση μόνωσης)	83
3.1.3	Κυκλωματική μελέτη της αγωγίμης επαφής ανθρώπου με την διάταξη << αγωγός-δένδρο >>	84
4	Συμπεράσματα	87
	Βιβλιογραφία	88

Περιεχόμενα Σχήματα

Αρίθμηση	Περιγραφή	Σελ.
Σχήμα 1.1	: Απλοποιημένο παράδειγμα διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας	13
Σχήμα 1.1.2.3	: Μορφή αγωγών Αλουμινίου-Χάλυβα (ACSR)	16
Σχήμα 1.1.2.5-1	: Μορφή του ρεύματος κατά το τριφασικό βραχυκύκλωμα	21
Σχήμα 1.1.2.7-1	: Απλοποιημένο παράδειγμα βραχυκυκλώματος στη μέση τάση	27
Σχήμα 1.1.2.7-2	: Ισοδύναμο κύκλωμα (για το σχήμα 1.1.2.7-1) των σύνθετων αντιστάσεων του δικτύου	27
Σχήμα 1.2.3-1	: Διάθλαση των γραμμών του πεδίου στη διαχωριστική επιφάνεια δύο διηλεκτρικών	40
Σχήμα 1.2.3-2	: Ομογενές πεδίο με δύο διηλεκτρικά (1 και 2)	42
Σχήμα 1.2.3-3	: Ομογενές πεδίο με δύο μονωτικά με $\epsilon_1 = 2$ ϵ_2	43
Σχήμα 1.2.4.3-1	: Τάση διάσπασης διαφόρων αέριων μονωτικών (υπό συνθήκες λειτουργίας: 20 °C και 760 Torr)	46
Σχήμα 1.2.4.4-1	: Τάξη μεγέθους της ειδικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας διάφορων κατηγοριών υλικών	47
Σχήμα 1.2.4.5-1	: Ισοδύναμο κύκλωμα ενός πυκνωτή C με ομογενές διηλεκτρικό και απώλειες (λόγω της αγωγιμότητας G)	47
Σχήμα 1.2.4.5-2	: Συντελεστής απωλειών (tgδ) για το σκληρό χαρτί και την πορσελάνη	48
Σχήμα 1.2.4.7-1	: Επίδραση θερμοκρασίας (θ) στην ειδική αντίσταση (ρ) της πορσελάνης	49
Σχήμα 1.2.6.1	: Παράδειγμα απεικόνισης στύλου και επιτόνου	56
Σχήμα 1.2.6.2-1	: Αποστάσεις γυμνών αγωγών μέσης τάσης από κτίρια (σύμφωνα με το εγχειρίδιο τυποποιημένων κατασκευών της Δ.Ε.Η.	57
Σχήμα 1.2.6.2-2	: Αποστάσεις γυμνών αγωγών μέσης τάσης από επικλινές έδαφος (σύμφωνα με το εγχειρίδιο τυποποιημένων κατασκευών της Δ.Ε.Η.)	58
Σχήμα 1.2.6.4	: Ελάχιστες τιμές της υποθετικής τάσης της γραμμής και της αντίστοιχης προς αυτήν τάσης προς γη για την εκδήλωση ηλεκτρικού τόξου	60
Σχήμα 1.2.6.4-1	: Τάξη μεγέθους της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου μεταξύ γραμμής 20 kV και εδάφους , ανάλογα με το ύψος των αγωγών από το έδαφος	62
Σχήμα 1.3.1	: Απλοποιημένη παράσταση για το κλάδεμα δένδρων που γειτνιάζουν σε αγωγούς διανομής σύμφωνα με την σελίδα G-2 των τυποποιημένων κατασκευών της Δ.Ε.Η.	63
Σχήμα 1.3.2-1	: Σχοινί συγκράτησης	69
Σχήμα 1.3.2-2	: Ορθός τρόπος δέσης κλάδου	69
Σχήμα 1.4.2-3	: Ορθή θέση τεχνιτών κατά το κλάδεμα σε σχέση με το δίκτυο	69
Σχήμα 3.1-1	: Απλοποιημένη παράσταση της διάταξης μεταξύ δένδρου και αγωγού διανομής μέσης τάσης	81
Σχήμα 3.1.3	: Κύκλωμα των αντιστάσεων κατά την αγωγή επαφή ανθρώπου με δέντρο (μέσω μεταλλικού σωλήνα ή με τα χέρια)	85

Περιεχόμενα Πινάκων

Αρίθμηση	Περιγραφή Πίνακα	Σελ.
Πίνακας 1.1.2.4-1:	Χαρακτηριστικά γυμνών αγωγών εναέριων γραμμών	17
Πίνακας 1.1.2.4-2:	Κλίμακα έντασης πνέοντων ανέμων	18
Πίνακας 1.1.2.4.1:	Θερμοκρασία ανάφλεξης και αυτανάφλεξης ορισμένων στερεών υλικών που αποτελούν συνήθως καύσιμη ύλη σε πυρκαγιές υπαίθρου	20
Πίνακας 1.1.2.5-1:	Αντιστάσεις των γυμνών αγωγών αλουμινίου και των συνεστραμμένων καλωδίων που χρησιμοποιούνται σε γραμμές διανομής χαμηλής τάσης	22
Πίνακας 1.1.2.5-2:	Συντελεστής κ , με $\kappa = f(R_{0\lambda} + X_{0\lambda})$	22
Πίνακας 1.1.2.5-3:	Συντελεστής μ_d , με $\mu_d = f(I_{sw} / I_g)$	22
Πίνακας 1.1.2.6-1:	Τιμές ασφαλειών πινάκων Χ.Τ. αναλόγα με την ισχύ του μετασχηματιστή	23
Πίνακας 1.1.2.6-2:	Τιμές ασφαλειών πινάκων Χ.Τ. αναλόγα με την ισχύ του μετασχηματιστή	24
Πίνακας 1.1.2.6-3:	Αντίσταση γραμμών μέσης τάσης χαλκού και αλουμινίου	25
Πίνακας 1.1.2.7-1:	Αντιστάσεις των συνήθων μεγεθών των μετασχηματιστών μέσης προς χαμηλή τάση	28
Πίνακας 1.1.2.7-2:	Σχέσεις υπολογισμού του εναλλασσόμενου ρεύματος βραχυκύκλωσης αναλόγως του είδους του βραχυκυκλώματος	29
Πίνακας 1.1.2.8 :	Αντιστάσεις του μετασχηματιστή	31
Πίνακας 1.1.2.9-4:	Αποτελέσματα των μετρήσεων και των οπτικών παρατηρήσεων κατά την πειραματική διερεύνηση της συνθήκης ουδετέρωσης (ή βραχυκύκλωσης)	35
Πίνακας 1.2.1 :	Σχετική διηλεκτρική σταθερά ορισμένων υλικών στους $20^{\circ}C$	36
Πίνακας 1.2.2 :	Χωρητικότητα διατάξεων ηλεκτροδίων με ένα διηλεκτρικό	39
Πίνακας 1.2.4.7 :	Τιμές του συντελεστή ειδικής θερμικής αγωγιμότητας (λ) για ορισμένα μονωτικά υλικά	49
Πίνακας 1.2.5 :	Επίδραση περιβαλλοντικής ρύπανσης στο μήκος ερπυσμού μονωτήρων	51
Πίνακας 1.2.6-1 :	Απόσταση μεταξύ αγωγών σε γραμμές Μέσης Τάσης	55
Πίνακας 1.2.6.4 :	Τάξη μεγέθους της υποθετικής τάσης σε γραμμή διανομής μέσης τάσης (U_{gr}) και της αντίστοιχης προς αυτή υποθετικής τάσης διάσπασης από αγωγό προς γη (U_d), ανάλογα με το ύψος του αγωγού	60
Πίνακας 1.3.1-1:	Ελάχιστες κατακόρυφες αποστάσεις που πρέπει να επιτυγχάνονται κατά το κλάδεμα ανάμεσα στα εναέρια δίκτυα Διανομής και στα δένδρα	64
Πίνακας 1.3.1-2:	Ελάχιστες οριζόντιες αποστάσεις που πρέπει να επιτυγχάνονται κατά το κλάδεμα ανάμεσα στα εναέρια δίκτυα Διανομής μέσης τάσης και στα δένδρα (Σε Αστικά Δίκτυα στα Αρδευτικά και Υπεραστικό)	65
Πίνακας 1.3.1-3:	Ελάχιστες οριζόντιες αποστάσεις που πρέπει να επιτυγχάνονται κατά το κλάδεμα ανάμεσα στα εναέρια δίκτυα Διανομής και στα δένδρα	66
Πίνακας 1.4.1-4:	Προσαύξηση οριζόντιας απόστασης αγωγών ανάλογα με τις επιφορτίσεις που δέχονται οι αγωγοί	67
Πίνακας 1.4.4 :	Ξηρή – φαινομενική πυκνότητα δένδρων	75

Περίληψη

Ο σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι να εξετάσει την διηλεκτρική συμπεριφορά των γραμμών διανομής ηλεκτρικής ενέργειας σε περιβάλλον βλάστησης ώστε να διευκρινιστεί η πιθανότητα ηλεκτρικού ατυχήματος σε περίπτωση επαφής ή προσέγγισης ατόμων στην περιβάλλουσα των αγωγών βλάστηση , εστιάζοντας κυρίως στην περίπτωση της αλληλεπίδρασης των γραμμών διανομής ηλεκτρικής ενέργειας μέσης τάσης με δένδρα πλησίον αυτών .

Αφού περιγραφεί ο τρόπος που αλληλεπιδρούν οι , υπό τάση , αγωγοί μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας με την περιβάλλουσα ύλη , καταγράφονται οι τύποι και τα μεγέθη των σύνηθων στοιχείων ηλεκτροτεχνικού εξοπλισμού που χρησιμοποιούνται στην Ελλάδα ώστε να αναζητηθεί η δυσμενέστερη περίπτωση κατά την οποία είναι πιθανότερη η μείωση της μονωτικής ικανότητας .

Παράλληλα , εξετάζονται ως προς την διηλεκτρική συμπεριφορά τους τα συνήθη είδη δένδρων και βλάστησης που απαντώνται στη χώρα καθώς και οι διάφοροι περιβαλλοντικοί παράγοντες (καιρικές συνθήκες , ρύπανση κ.λ.π) και λοιποί παράμετροι (συντήρηση δικτύου , κλάδεμα δένδρων κ.λ.π.) που δύνανται να προκαλέσουν μείωση της μονωτικής ικανότητας .

Υπολογίζοντας την συνεισφορά κάθε παράγοντα είτε από την πλευρά εγκατάστασης και συντήρησης του δικτύου είτε από την πλευρά ενός υποκείμενου σε ατύχημα μπορούν να εξακριβωθούν οι συνθήκες , κάτω από τις οποίες , η επαφή ατόμων με βλάστηση , παρακείμενη σε αγωγούς διανομής ηλεκτρικής ενέργειας , μπορεί να προκαλέσει ηλεκτρικό ατύχημα .

Λέξεις Κλειδιά

αποστάσεις μόνωσης , φαινόμενο Corona , έρπουσες εκκενώσεις , διηλεκτρική συμπεριφορά κορμών και φυλλωμάτων δένδρων υπό μέση τάση , τάση διάσπασης , καρβουνίδια , ρινίσματα αλουμινίου , ηλεκτροπληξία , διαφυγόντα ρεύματα .

Abstract

The scope of this thesis is to examine the dielectric behavior of power distribution lines in an environment of vegetation in order to clarify the possibility of electrical accidents in case of contact or approach people in the surrounding conductors vegetation, mainly focusing on the case of the interaction of power distribution lines MV with trees in their vicinity .

After describing the way they interact, under voltage, electrical power lines with the surrounding material, record the types and sizes of standard data electrotechnical equipment used in Greece to look for the worst case where the accident is likely to happen .

Furthermore, consideration for the dielectric behavior of the usual types of trees and vegetation found in the country as well as environmental factors (weather, pollution, etc.) and other parameters (network maintenance, pruning trees etc.) which may make it more likely an accident.

Combining the above, the probability of an accident and the causes inducing potential and actual accidents. Calculating the contribution of each factor contributed to the increased risk of accidents and interpreting the dependence of errors, whether of the installation and maintenance of the network from either side of the taxable accident, attempting to ascertain the conditions under which, contact persons with vegetation adjacent to distribution pipelines electricity can cause electrical accident.

Keywords

insulation distances, Corona phenomenon, creeping discharge, dielectric behavior of logs and foliage of trees under medium voltage, breakdown voltage, charcoal powder, aluminum filings, electrocution, loss currents .

Πρόλογος – Ευχαριστίες

Η εκπόνηση της διπλωματικής αυτής εργασίας έγινε με σκοπό την ενοποιημένη καταγραφή, σε ένα μόνο κείμενο , της ευρύτερης αλληλεπίδρασης μεταξύ γραμμών διανομής και της παρακείμενης σε αυτές βλάστησης . Η βοήθεια των κυρίων καθηγητών Ε.Μ.Π. κ. Περικλή Μπούρκα και κ. Κωνσταντίνου Καραγιαννόπουλου σε όλα τα στάδια της προετοιμασίας της ήταν συνεχής και αμέριστη και τους ευχαριστώ ιδιαίτερος για την συμβολή τους στην συγγραφή του τελευταίου και σημαντικότερου κειμένου μου ως προπτυχιακός φοιτητής στο Ε.Μ.Π.

Εκτός της συγγραφής της διπλωματικής εργασίας , νιώθω την ανάγκη να ευχαριστήσω όλους τους διδάσκοντες μου κατά την διάρκεια των σπουδών μου , ιδιαίτερος τους καθηγητές Ε.Μ.Π. : κ. Περικλή Μπούρκα , κ. Μιχαήλ Θεολόγου και κ. Ιωάννη Χαΐνη για τις γνώσεις και την ανιδιοτελή στήριξη που μου προσέφεραν κατά την διάρκεια της φοίτησης .

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

1 Σύντομη αναφορά στο εναέριο δίκτυο διανομής στην Ελλάδα

Τα αναφερόμενα στην παράγραφο αυτή προέρχονται από την βιβλιογραφία [1] , όπως και τα σχήματα [1,2,4] .

Η ηλεκτρική ενέργεια μπορεί να μεταφέρεται σε μεγάλες αποστάσεις εύκολα και με μικρές απώλειες . Αυτό οφείλεται στους μετασχηματιστές μεταφοράς , με τους οποίους ανυψώνεται αρχικά η τάση (πχ. στα 150kV και στα 400kV) , ώστε στη συνέχεια στα κέντρα διανομής υψηλής τάσης (KYT) , να διανεμηθεί σε γραμμές κυρίως των 20kV (ή 15 kV) , απ' όπου , ακολούθως , ηλεκτροδοτούνται οι μετασχηματιστές διανομής , για να υποβιβαστεί η τάση στα 400 V / 230 V και να διανεμηθεί μέσω γραμμών στους καταναλωτές χαμηλής τάσης . Εκτός των καταναλωτών χαμηλής τάσης , υπάρχουν και καταναλωτές μέσης τάσης όταν τα φορτία τους ανά φάση είναι μεγαλύτερα από 200 A . Τα εναέρια δίκτυα μεταφοράς και διανομής πλεονεκτούν έναντι των υπογείων δικτύων λόγω του μικρού τους κόστους .

1.1 Απλοποιημένο παράδειγμα για το εναέριο δίκτυο διανομής στην Ελλάδα

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

Στο σχήμα 1.1 , δίνεται απλοποιημένα ένα παράδειγμα διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας . Σύμφωνα με αυτό , από το μετασχηματιστή υψηλής τάσης (150 kV / 20 kV , 25 MVA) του Κέντρου Υψηλής Τάσης (KYT) αναχωρούν μέσω αυτόματων διακοπών ελαίου (ΔΔΕ) διάφορες γραμμές μέσης τάσης (20 kV) , που η καθεμία αφορά τη διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας σε μία ευρύτερη περιοχή . Οι γραμμές αυτές ονομάζονται « γραμμές κορμού » και συμβολίζονται στα σχέδια με το γράμμα R και ένα αριθμό (π.χ. R23) .

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

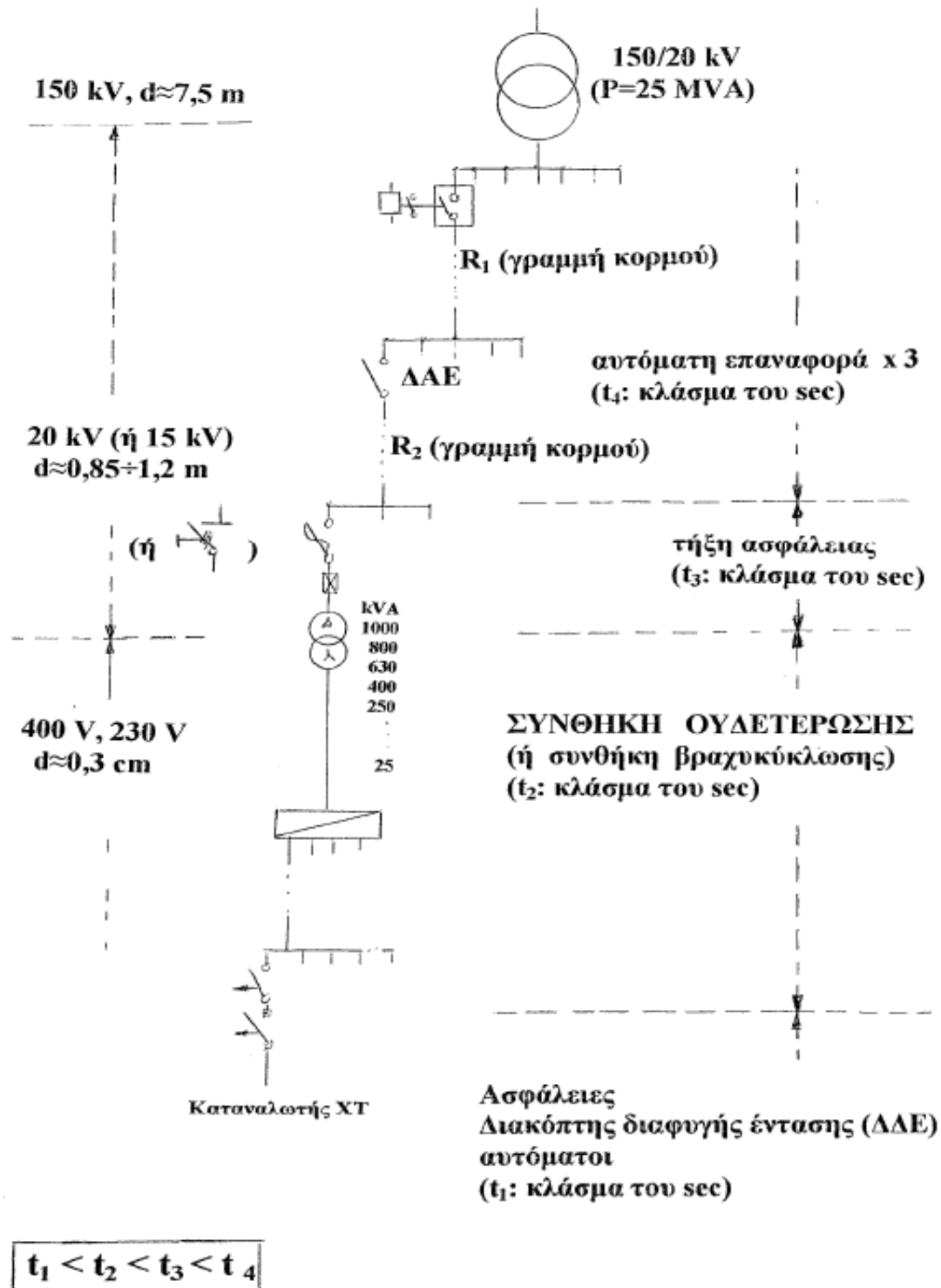
Όταν συμβεί ένα σφάλμα σε μία γραμμή κορμού , τότε ο διακόπτης προστασίας (ΔΔΕ ή ο ΔΔΕ) θα διακόψει αυτομάτως την ηλεκτροδότηση της συγκεκριμένης γραμμής και θα τεθεί αμέσως αυτομάτως στη θέση εντός , για να ηλεκτροδοτηθεί η γραμμή και αν υπάρχει ακόμα το σφάλμα , θα γίνει και πάλι αυτόματη διακοπή και ακολούθως αυτόματη εκ νέου ηλεκτροδότηση . Αν και κατά την δεύτερη αυτή αυτόματη προσπάθεια του διακόπτη συνεχίζει να υπάρχει το σφάλμα , θα γίνει και μία τρίτη αυτόματη « διακοπή - εκ νέου ηλεκτροδότηση » και μόνο αν εξακολουθεί να υπάρχει το σφάλμα θα συμβεί πλέον οριστική διακοπή ρεύματος της εν λόγω γραμμής κορμού .

Είναι προφανές ότι η προαναφερθείσα σε τρεις κύκλους λειτουργία των ΔΔΕ και των ΔΔΕ αποσκοπεί , σε περιπτώσεις εμφάνισης παροδικών σφαλμάτων, τόσο στην προσπάθεια για απρόσκοπτη ηλεκτροδότηση μίας μεγάλης περιοχής , όσο και στην αποφυγή άσκοπων μετακινήσεων συνεργείων.

Σημειώνεται ότι η διακοπή της ηλεκτροδότησης σε κάθε κύκλο λειτουργίας των ΔΔΕ και των ΔΔΕ συμβαίνει πάντοτε σε κλάσμα του δευτερολέπτου (σχεδόν ακαριαία διακοπή, π.χ. 0,15s , 0,35s κλπ.) , που στην πράξη σημαίνει πως δεν υπάρχει αρκετός διαθέσιμος χρόνος για την εκδήλωση αξιόλογων θερμικών φαινομένων (δεν προκαλείται υπερθέρμανση της γραμμής πάνω από τα ανεκτά όρια) .

Όπως φαίνεται στο σχήμα 1.1 , οι γραμμές κορμού μέσω των ΔΔΕ διακλαδίζονται με τη σειρά τους σε διάφορες γραμμές , που καταλήγουν σε υποσταθμούς υποβιβασμού της μέσης τάσης σε χαμηλή τάση (20 kV / 400 V , 230V) . Οι υποσταθμοί αυτοί διακρίνονται σε υπαίθριους επί

στύλων , ισχύος μέχρι 400 kVA και σε εσωτερικού χώρου (συνήθως σε υπόγεια πολυκατοικιών) μεγαλύτερης ισχύος από 400 kVA . Στους υπαίθριους υποσταθμούς η γραμμή μέσης τάσης ηλεκτροδοτεί τον μετασχηματιστή μέσω μονοπολικών ασφαλειοαποζευκτών ή τριπολικών αποζευκτών ενώ στους υποσταθμούς εσωτερικού χώρου η ηλεκτροδότηση του μετασχηματιστή γίνεται μέσω συγκροτήματος πινάκων .



Σχήμα 1.1 : Απλοποιημένο παράδειγμα διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας

Σημειώνεται ότι για λόγους διασύνδεσης ή απομόνωσης γραμμών μέσης τάσης (σε περιπτώσεις π.χ. πυρκαγιών, εργασιών συντήρησης και εργασιών αποκατάστασης βλαβών) , υπάρχουν στις γραμμές μέσης τάσης μονοπολικό ασφαλειοαποζεύκτης και τριπολικό αποζεύκτης 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 .

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 κλπ .

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

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

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

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

1.1.1 Η διάρκεια ζωής των υπαίθριων εγκαταστάσεων διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας

Η διάρκεια ζωής των υπαίθριων εγκαταστάσεων διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας εξαρτάται βασικά από εκείνη των μετασχηματιστών διανομής , των μονωτήρων , των αγωγών και των στύλων που στη συντριπτική πλειονότητά τους είναι ξύλινοι . Η φυσιολογική γήρανση των μονώσεων συμβαίνει κάτω από τιμές της πεδιακής έντασης , όπου η καταπόνηση μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι κυρίως θερμική . Θερμική καταπόνηση από τις απώλειες Joule υφίστανται τα ηλεκτρομονωτικά υλικά όλων των ηλεκτροτεχνικών κατασκευών , ιδιαίτερα όταν συμβαίνει κακή απαγωγή θερμότητας . Η εικόνα που παρουσιάζει μία θερμικά καταπονημένη μόνωση από στερεά μονωτικά είναι η απανθράκωση και τήξη τους στην περιοχή όπου οι απώλειες Joule είναι ιδιαίτερα αυξημένες .

Η διάρκεια ζωής στην πλειονότητα των μετασχηματιστών διανομής είναι της τάξεως των 50 ετών , δεδομένου ότι η θερμοκρασία λειτουργίας τους δεν υπερβαίνει συνήθως τους 800° C . Σε ότι αφορά τους αγωγούς (τόσο στη μέση τάση όσο και στη χαμηλή τάση) , στην από αλουμίνιο

επιφάνειά τους σχηματίζεται με την πάροδο του χρόνου αλουμίνα (Al_2O_3), που σε περιοχές μακριά από τη θάλασσα τους προστατεύει , γιατί είναι μονωτικό με μεγάλη διηλεκτρική αντοχή σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος . Γι' αυτό , η διάρκεια ζωής των γυμνών αγωγών στις γραμμές μέσης και χαμηλής τάσης είναι τουλάχιστον 50 έτη , όπως εξάλλου προκύπτει και από την αποκτηθείσα εμπειρία στα δίκτυα .

1.1.2 Αγωγοί και καλώδια μέσης και χαμηλής τάσης

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

1) Χαλκός εφελκυσμένος εν ψυχρώ .

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

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

Οι αγωγοί κατασκευάζονται μονόκλινοι ή πολύκλινοι . Στα εναέρια δίκτυα δεν χρησιμοποιούνται μονόκλινοι αγωγοί , γιατί έχουν πολύ μικρότερη μηχανική αντοχή από τους πολύκλινους . Επίσης , οι μονόκλινοι είναι δύσκαμπτοι και η διατομή τους είναι μέχρι 16 mm^2 . Οι αγωγοί χαλκού και αλουμινίου αποτελούνται από κλώνους της ίδιας διατομής ανά διατομή αγωγού και παίρνουν τη μορφή των συρματόσχοινων . Οι αριθμοί των κλώνων είναι κυρίως 7 , 19 , 37 , 61 κλπ .

1.1.2.1 Αγωγοί από Χαλκό

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

1.1.2.2 Αγωγοί από Αλουμίνιο

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

Έτσι ένας αγωγός αλουμινίου με ισοδύναμη διατομή με αγωγό από χαλκό έχει το $\frac{1}{2}$ του βάρους του και διάμετρο μεγαλύτερη κατά 1,6 φορές (60 % μεγαλύτερη) . Τα παραπάνω μας δείχνουν ότι ο αγωγός από αλουμίνιο δέχεται μεγαλύτερες επιφορτίσεις από τον άνεμο και τον πάγο

λόγω της μεγαλύτερης επιφάνειάς του . Το αλουμίνιο σε κανονικές ατμοσφαιρικές συνθήκες οξειδώνεται (σκουριάζει) επιφανειακά . Το στρώμα της οξείδωσης είναι πολύ λεπτό και προστατεύει τον αγωγό από την παραπέρα οξείδωση . Κοντά στη θάλασσα , όμως , (σε απόσταση μέχρι 1 Km περίπου) διαβρώνεται από το αλάτι που περιέχεται στον αέρα , σε βάθος μέχρι 3 mm.

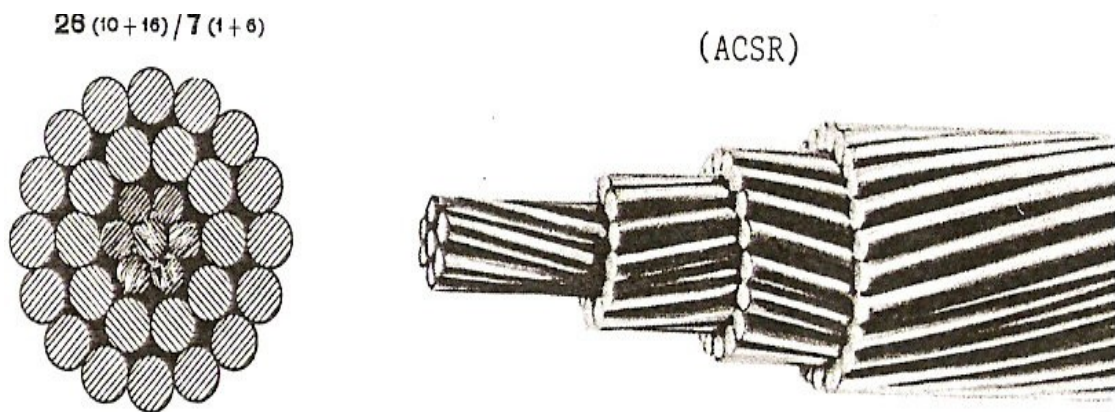
Οι αγωγοί αλουμινίου χρησιμοποιούνται κυρίως στις γραμμές χαμηλής τάσης και μακριά από τη θάλασσα . Στις γραμμές υψηλής και υπερυψηλής τάσης δεν χρησιμοποιούνται γιατί έχουν μικρή μηχανική αντοχή (οι πυλώνες απέχουν πολύ μεταξύ τους και οι αναπτυσσόμενες δυνάμεις στους αγωγούς είναι πολύ μεγάλες) .

1.1.2.3 Αγωγοί από Αλουμίνιο - Χάλυβα (ACSR)

Το μειονέκτημα των αγωγών αλουμινίου αντιμετωπίζεται με επιτυχία με τους αγωγούς ACSR . Αυτοί έχουν ψυχή από κλώνους με γαλβανισμένο χάλυβα , όπως φαίνεται και στο σχήμα 1.1.2.3 . Ο χάλυβας αναλαμβάνει τη μηχανική αντοχή και το αλουμίνιο την ηλεκτροδότηση . Το ρεύμα οδεύει κυρίως μέσα από το αλουμίνιο λόγω του επιδερμικού φαινομένου , δηλαδή το ρεύμα μέσα από το χάλυβα είναι αμελητέο .

Οι αγωγοί ACSR έχουν περίπου 50 % μεγαλύτερη αντοχή από τους αγωγούς χαλκού και είναι 20 % ελαφρύτεροι για ισοδύναμη διατομή με το χαλκό . Χρησιμοποιούνται στις γραμμές υψηλής τάσης και μέσης τάσης γιατί μπορεί να γίνει μεγαλύτερο άνοιγμα μεταξύ των θέσεων στήριξης (πυλώνων ή στύλων) .

Οι αγωγοί ACSR χαρακτηρίζονται κατά DIN ως εξής : Al / St = διατομή του Al / διατομή του St . (π.χ. Al/St 185/32 σημαίνει αγωγός με 185 mm^2 Al και 32 mm^2 St) . Σε σύνθετους αγωγούς η σχέση διατομών Al / St είναι συνήθως περίπου ίση με 6 , ενώ σε μεγάλες διατομές μπορεί να φτάσει και το 20 . Οι πολύκλωνοι ACSR αγωγοί αποτελούνται από 1 έως 3 στρώματα χαλύβδινων συρμάτων και 1 έως 3 στρώματα συρμάτων αλουμινίου . Τα σύρματα είναι συνεστραμμένα και μάλιστα η διεύθυνση συστροφής είναι αντίθετη σε δυο γειτονικά στρώματα , πράγμα που εξασφαλίζει μια καλή συνοχή του συρματόσχοινου .



Σχήμα 1.1.2.3 : Μορφή αγωγών Αλουμινίου-Χάλυβα (ACSR)

Συνήθως , στον χαρακτηρισμό των αγωγών ACSR ή αλουμινίου , δίνεται και η ισοδύναμη διατομή χαλκού . Αυτή είναι η διατομή που θα είχε ένας αγωγός ίσης αντίστασης , αν κατασκευαζόταν από χαλκό . Οι ωμικές αντιστάσεις των πολύκλωνων αγωγών προκύπτουν από την ονομαστική διατομή τους . Η αγωγιμότητα που πρέπει να ληφθεί στους υπολογισμούς είναι διαφορετική απ' ότι η αγωγιμότητα του καθαρού υλικού . Η μηχανική επεξεργασία και η συστρόφη των αγωγών αυξάνουν την αντίσταση του αγωγού .

1.1.2.4 Μηχανική συμπεριφορά– επιφόρτιση εναέριων αγωγών διανομής

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

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

Στον πίνακα 1.1.2.4-1 περιγράφονται τα μηχανικά χαρακτηριστικά των γυμνών αγωγών :

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΓΥΜΝΩΝ ΑΓΩΓΩΝ				
Διατομή Αγωγών mm^2	Βάρος Kg/m	Διάμετρος mm	Κλώνοι mm	Φορτίο θραύσεως Kg
ΑΓΩΓΟΙ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ ΜΕ ΧΑΛΥΒΑΙΝΗ ΨΥΧΗ (ACSR)				
16	0,102	6,96	6Al/1St/2,32	950
35	0,224	10,32	6Al/1St/3,44	2000
50	0,321	12,33	6Al/1St/4,11	2800
95	0,609	17,24	26/2,72Al+7/2,12St	5650
ΑΓΩΓΟΙ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ ΜΕ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΗ ΧΑΛΥΒΑΙΝΗ ΨΥΧΗ (ACSR-R)				
16	0,372	10,32	3Al/4St/3,44	4635
ΑΓΩΓΟΙ ΕΚ ΚΡΑΜΑΤΟΣ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ (AAAC)				
35	0,098	7,50	7/2,50	980
70	0,189	10,50	19/2,10	1880
95	0,269	12,50	19/2,50	2670
185	0,525	17,50	37/2,50	5170
ΑΓΩΓΟΙ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ (Al)				
16	0,074	6,63	7/2,21	470
35	0,158	9,66	7/3,22	940
50	0,229	11,75	19/2,35	1442
70	0,320	13,90	19/2,78	2018
ΑΓΩΓΟΙ ΧΑΛΚΟΥ (Cu)				
16	0,144	5,13	7/1,71	739
35	0,315	7,59	7/2,53	1566
50	0,453	9,20	19/1,83	2299
70	0,634	10,70	19/2,17	3162
Σημείωση:				
Οι διατομές αγωγών ACSR, ACSR-R και Al είναι ισοδύναμοι Χαλκού. Οι διατομές των αγωγών Χαλκού και AAAC είναι πραγματικές. Η ανοχή του βάρους των αγωγών είναι +2%.				

Πίνακας 1.1.2.4-1 : Χαρακτηριστικά γυμνών αγωγών εναέριων γραμμών

Οι αγωγοί διανομής του εναερίου δικτύου είναι εκτεθειμένοι σε κάθε καιρικό φαινόμενο και μέσα σε αυτά συγκαταλέγονται και οι άνεμοι , οι οποίοι ασκούν επιφορτίσεις στους αγωγούς . Η επιφόρτιση που ασκούν οι άνεμοι στους αγωγούς εξαρτάται από την ένταση με την οποία εμφανίζονται . Πιο συγκεκριμένα , η διαβάθμιση της έντασης των ανέμων γίνεται με βάση την ταχύτητα (σε m / s) με την οποία πνέουν όπως φαίνεται και στον πίνακα 1.1.2.4-2 .

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

Πίνακας 1.1.2.4-2 : Κλίμακα έντασης πνέοντων ανέμων

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

Με βάση τον πίνακα 1.2.2.4-2 , υπολογίζεται κατωτέρω η μηχανική ικανότητα μιας γραμμής από γυμνούς αγωγούς αλουμινίου διατομής 35 mm^2 με άνοιγμα μεταξύ στύλων 70 m και για ένταση του αέρα 10 μποφόρ (ισχυρή θύελλα) . Η μέγιστη ταχύτητα του για ένταση 10 μποφόρ είναι : $v = 28,4 \text{ m / s}$.

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

Έτσι , το βάρος του αγωγού G είναι :

$$G=(\pi.d^2/4).S.\gamma=15,8\text{ kg} \quad (1.1.2.4-1)$$

όπου : γ : το ειδικό βάρος του αλουμινίου ($2,7.10^3\text{ kg/m}^3$)

S : άνοιγμα μεταξύ στύλων

d : διατομή αγωγού αλουμινίου (35 mm^2)

Η ανεμοπίεση (P) υπό 10 Μποφόρ είναι :

$$P=a.v^2=0,0625.28,4^2=50,41\text{ kg/m}^2 \quad (1.1.2.4-2)$$

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

v : η ταχύτητα του αέρα σε m/s

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

$$Fp=P.d.S=50,41.0,01032.70=36,41\text{ kg} \quad (1.1.2.4-3)$$

όπου : d : διάμετρος αγωγού 35 mm^2

S : άνοιγμα μεταξύ στύλων (70 m)

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

$$F=G+Fp=15,8+36,41=52,22\text{ kg} \quad (1.1.2.4-4)$$

όπου G : το βάρος του αγωγού

Fp : η επιφόρτιση λόγω της ανεμοπίεσης

1.1.2.4.1 Η πυρκαγιά στο περιβάλλον των γραμμών διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας

Οι πυρκαγιές αρχίζουν συνήθως από μία μικρή εστία όταν συνυπάρχουν οι παρακάτω 4 παράγοντες :

- 1) η καύσιμη ύλη ,
- 2) η θερμότητα ικανή να διατηρήσει υψηλή θερμοκρασία (τη θερμοκρασία ανάφλεξης που εξαρτάται από το είδος της καύσιμης ύλης – βλ. πίνακα 1.1.2.4.1) ,
- 3) το οξυγόνο (ή γενικότερα ένα οξειδωτικό μέσο) , το οποίο είναι σε ποσοστό 21 % κατ' όγκο στον ατμοσφαιρικό αέρα και
- 4) η διαδικασία αυτοσυντήρησης της φωτιάς .

Πολλές φορές , υπό περιορισμένη ποσότητα οξυγόνου , μπορεί να υπάρξει καύση χωρίς ύπαρξη φλόγας που ονομάζεται αργή καύση και εμφανίζεται όταν μία στερεά επιφάνεια υφίσταται ταυτόχρονα πυράκτωση και αποτέφρωση . Αυτή η πυράκτωση είναι μία ένδειξη ότι η θερμοκρασία υπερβαίνει τους 1000°C . Περιπτώσεις αργής καύσης είναι η καύση στο τσιγάρο ή η καύση των κάρβουνων.

Αν μεταβληθούν οι συνθήκες καύσης , αυξάνοντας τη ροή αέρα (άρα και του οξυγόνου στην καιγόμενη επιφάνεια) , μπορεί η αργή καύση να μετατραπεί σε φλεγόμενη καύση με ύπαρξη φλόγας , όπως συμβαίνει για παράδειγμα φυσώντας τα χωρίς φλόγα καρβουνιασμένα ξύλα μέσα σε ένα τζάκι . Οι φωτιές μπορούν να σβήσουν με την απομάκρυνση ενός από τα 4 απαραίτητα στοιχεία για την ύπαρξή της , δηλαδή την καύσιμη ύλη ή το οξυγόνο ή την θερμότητα ή την αυτοσυντήρηση της φωτιάς . Η πυρόσβεση με νερό προκαλεί την ελάττωση της θερμότητας ενώ με διοξείδιο του άνθρακα προκαλείται μείωση της ποσότητας οξυγόνου . Η μείωση του οξυγόνου στο περιβάλλον της πυρκαγιάς μπορεί να προκαλέσει αίσθηση πνιγμού , ασφυξία και τελικά το θάνατο .

Στον πίνακα 1.1.2.4.1 , αναγράφονται οι θερμοκρασίες ανάφλεξης (καθώς και οι θερμοκρασίες αυτανάφλεξης , όπου είναι διαθέσιμες) , σύμφωνα με την βιβλιογραφία [2] .

Υλικό	Θερμοκρασία ανάφλεξης (°C)	Θερμοκρασία αυτανάφλεξης(°C)
άχυρα	175	-
βαμβάκι	230-266	254
εφημερίδες	185	-
χαρτί	230	-
μαλλί	200	-
πευκόξυλο	228-264	260
PVC	391	454

Πίνακας 1.1.2.4.1 : Θερμοκρασία ανάφλεξης και αυτανάφλεξης ορισμένων στερεών υλικών που αποτελούν συνήθως καύσιμη ύλη σε πυρκαγιές υπαίθρου

1.1.2.5 Ρεύμα βραχυκύκλωσης σε γραμμές χαμηλής τάσης

Ο υπολογισμός των ηλεκτρικών εγκαταστάσεων διανομής χαμηλής τάσης βασίζεται στην καταπόνησή τους υπό βραχυκύκλωμα . Αν θεωρηθεί ότι εκδηλώνεται τριφασικό βραχυκύκλωμα στο σημείο Α της γραμμής χαμηλής τάσης του σχήματος 1.1.2.5-1 , τότε η συνολική ισχύς του δικτύου θα οδεύσει προς το σημείο αυτό . Το ρεύμα βραχυκύκλωσης είναι η τιμή του ρεύματος στο σημείο Α . Η τιμή αυτή εξαρτάται από την ισχύ και την αντίσταση του δικτύου μέχρι το σημείο βραχυκύκλωσης .

Όπως φαίνεται στο σχήμα 1.1.2.5-1 , το ρεύμα βραχυκύκλωσης εμφανίζεται αρχικά ως ασύμμετρο και κατόπιν ως συμμετρικό . Το ασύμμετρο τμήμα περιλαμβάνει το εναλλασσόμενο ρεύμα βραχυκύκλωσης (I_{sw}) και το συνεχές ρεύμα βραχυκύκλωσης (I_g) . Το συμμετρικό τμήμα βραχυκύκλωσης αποτελείται από το διαρκές ρεύμα βραχυκύκλωσης (I_d) . Η μέγιστη τιμή του ρεύματος βραχυκύκλωσης (I_s) ονομάζεται κρουστικό ρεύμα βραχυκύκλωσης . Για τις παραπάνω τιμές του ρεύματος βραχυκύκλωσης (I_s) ισχύουν οι σχέσεις :

$$I_g = \kappa \cdot \sqrt{2} \cdot I_{sw} \quad (1.1.2.5.-1)$$

όπου : κ : ένας συντελεστής (η τιμή του δίνεται στον πίνακα 1.1.2.5-2) με $\kappa = f(R_{ολ} + X_{ολ})$

I_{sw} : εναλλασσόμενο ρεύμα βραχυκύκλωσης

$$I_{sw} = 1,1 U_N / (\sqrt{3} \sqrt{(R_{ολ})^2 + (X_{ολ})^2}) \quad (1.1.2.5-2)$$

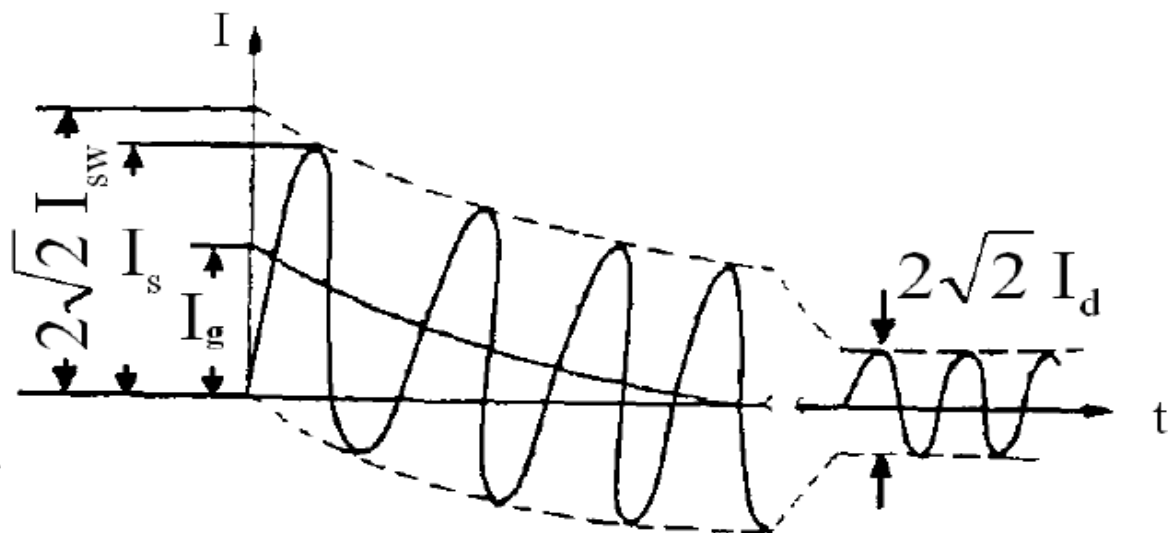
όπου : κ : ένας συντελεστής (η τιμή του δίνεται στον πίνακα 1.1.2.5-2) με $\kappa = f (R_{ολ} + X_{ολ})$
 U_N : ονομαστική τάση στη θέση βραχυκύκλωσης
 $R_{ολ}$: η ολική ωμική αντίσταση μέχρι το σημείο βραχυκύκλωσης
 $X_{ολ}$: ολική επαγωγική αντίδραση μέχρι το σημείο βραχυκύκλωσης

$$I_d = \mu_d I_{sw} \quad (1.1.2.5-3)$$

όπου : μ_d : ένας συντελεστής κατά τον πίνακα 1.1.2.5-3 : $\mu_d = f (I_{sw} / I_G)$
 I_G : το ονομαστικό ρεύμα της πηγής (των γεννητριών)

Επίσης ισχύει :

$$Z_{ολ}^2 = R_{ολ}^2 + X_{ολ}^2 \quad (1.1.2.5-4)$$



Σχήμα 1.1.2.5-1 : Μορφή του ρεύματος κατά το τριφασικό βραχυκύκλωμα

όπου : I_s : κρουστικό ρεύμα βραχυκύκλωσης
 I_{sw} : εναλλασσόμενο ρεύμα βραχυκύκλωσης
 I_d : διαρκές ρεύμα βραχυκύκλωσης
 I_g : συνεχές ρεύμα βραχυκύκλωσης

Λαμβάνεται ως διαρκές ρεύμα βραχυκύκλωσης I_p για χρόνο $t = 5 \text{ sec}$ το τριπλάσιο του ονομαστικού ρεύματος της ασφάλειας $I = 3 I_N$ και με υπολογιζόμενη $\Delta\theta$ αύξηση θερμοκρασίας :

$$\Delta\theta = k \cdot I_p^2 \cdot t / A^2 \quad (1.1.2.5-4)$$

όπου : I_p : το διαρκές ρεύμα βραχυκύκλωσης
 A : η επιφάνεια που διαρρέι κάθετα το ρεύμα
 κ : ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας (με $\kappa_{cu} = 0,0058$ και $\kappa_{Al} = 0,0135$)

Είδος γραμμής χαμηλής τάσης	R σε [mΩ/km]	X σε [mΩ/km]
Γυμνοί αγωγοί 4x16 mm ²	1140	330
Γυμνοί αγωγοί 4x35 mm ²	533	306
Γυμνοί αγωγοί 4x50 mm ²	381	294
Γυμνοί αγωγοί 4x70 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 1.1.2.5-1 : Αντιστάσεις των γυμνών αγωγών αλουμινίου και των συνεστραμμένων καλωδίων που χρησιμοποιούνται σε γραμμές διανομής χαμηλής τάσης

όπου R : η ωμική αντίσταση της γραμμής ανά μήκος του αγωγού

X : η επαγωγική αντίσταση της γραμμής ανά μήκος του αγωγού

Οι διατομές των γυμνών αγωγών που δίνονται στον πίνακα αφορούν ισοδύναμη διατομή χαλκού .

$R_{oλ}/X_{oλ}$	κ
0,00	1,800
0,05	1,680
0,10	1,590
0,15	1,500
0,20	1,440
0,25	1,380
0,30	1,330
0,35	1,290
0,40	1,250
0,45	1,220
0,50	1,190
0,55	1,170
0,60	1,140
0,65	1,120
0,70	1,110
0,75	1,100
0,80	1,095
0,85	1,090
0,90	1,080
0,95	1,075
1,00	1,070
1,05	1,065
1,10	1,060
1,15	1,055
1,20	1,050

Πίνακας 1.1.2.5-2 : $\kappa = f (R_{oλ} + X_{oλ})$

I_{sw}/I_G	μ_d για $\cos\phi=0,8$
0,1	1,00
0,2	0,97
0,3	0,96
0,4	0,93
0,5	0,90
0,6	0,89
0,7	0,87
0,8	0,85
0,9	0,82
1,0	0,80
1,6	0,70
2,0	0,67
3,0	0,58
4,0	0,52
5,0	0,49
6,0	0,44
7,0	0,41
8,0	0,40
9,0	0,39
10,0	0,35

Πίνακας 1.1.2.5-3 : $\mu_d = f (I_{sw}/I_G)$

Σημείωση : όπου κ : ο συντελεστής που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του ρεύματος βραχυκύκλωσης . Στον πίνακα 1.1.2.5-2 , ο κ υπολογίζεται ως άθροισμα της ωμικής ολικής αντίστασης ως το σημείο βραχυκύκλωσης ($R_{oλ}$) και της αντίστοιχης φανταστικής ($X_{oλ}$) ενώ στον πίνακα 1.1.2.5-3 , ως λόγος του εναλλασσόμενου ρεύματος βραχυκύκλωσης (I_{sw}) προς το αντίστοιχο συνεχές (I_G) .

1.1.2.6 Επιλογή ασφαλειών σε γραμμές διανομής (συνθήκη ουδετέρωσης)

Στους πίνακες 1.1.2.6-1 και 1.1.2.6-2, δίνονται 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 $2 \times 16 \text{ mm}^2$ μήκους 30 m) και το μεγαλύτερο μήκος, τη γραμμή με το καλώδιο παροχής. Τα μήκη των γραμμών στους πίνακες προκύπτουν από την παρακάτω σχέση η οποία έχει αποδειχθεί θεωρητικά [1]:

$$l \leq \sqrt{\left(\frac{220}{3Z_{\gamma}I_{Na}}\right)^2 - \left(\frac{R_{\gamma}X_{MT} - X_{\gamma}R_{MT}}{Z_{\gamma}^2}\right)^2 - \left(\frac{R_{\gamma}R_{MT} + X_{\gamma}X_{MT}}{Z_{\gamma}^2}\right)^2} \quad (1.1.2.6-1)$$

- όπου l : το μέγιστο επιτρεπόμενο μήκος δικτύου σε km
 I_{Na} : η ονομαστική τιμή της ασφάλειας της γραμμής (σε A) βάσει του σε σχήση M/Σ
 Z_{γ} : η σύνθετη αντίσταση της γραμμής (σε Ω/km)
 R_{γ}, X_{γ} : η ωμική και αυτεπαγωγική αντίσταση της γραμμής στη χαμηλή τάση (σε Ω)
 R_{MT}, X_{MT} : η ωμική και αυτεπαγωγική αντίσταση του M/Σ στη χαμηλή τάση (σε Ω)

Ισχύς P [KVA]	Ασφάλεια $I_{ασφ.}$ [A]	Γυμνοί	Γυμνοί	Γυμνοί	Γυμνοί	Συνεστραμμένο	Συνεστραμμένο
		Αγωγοί Al [16 mm ²]	Αγωγοί Al [35 mm ²]	Αγωγοί Al [50 mm ²]	Αγωγοί Al [70 mm ²]	Καλώδιο Al [3x35+54,6mm ²]	Καλώδιο Al [3x70+54,6mm 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 30			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

Πίνακας 1.1.2.6-1 : Τιμές ασφαλειών σε πίνακες X.T. ανάλογα με την ισχύ του μετασχηματιστή

Ισχύς P [KVA]	Ασφάλεια $I_{ασφ}$ [A]	Γυμνοί Αγωγοί Al [16 mm ²]	Γυμνοί Αγωγοί Al [35 mm ²]	Γυμνοί Αγωγοί Al [50 mm ²]	Γυμνοί Αγωγοί Al [70 mm ²]	Συνεστραμμένο Καλώδιο Al [3x35+54,6mm ²]	Συνεστραμμένο Καλώδιο Al [3x70+54,6mm ²]
		Μήκος γραμμής σε m					
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
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
	160	180 110	360 210	470 280	580 360	280 160	400 220
500- 630	200		280 140	370 180	460 240	220 100	310 140
	250		230 80	300 100	360 40		250 80
750- 1000	315			230 40	280 50		
	400				220		
	500						

Πίνακας 1.1.2.6-2: Τιμές ασφαλειών σε πίνακες Χ.Τ. ανάλογα με την ισχύ του μετασχηματιστή
 Σημείωση : οι αγωγοί είναι αλουμινίου και η διατομή που δίνεται αφορά ισοδύναμη χαλκού.

Στον πίνακα 1.1.2.6-3 , δίνονται οι τιμές αντιστάσεων αγωγών σε Ω / km , με βάση τις οποίες γίνεται η αναγωγή μίας γραμμής χαμηλής τάσης από αγωγούς διάφορων διατομών σε μία μοναδική διατομή για να εξεταστεί εάν ισχύει η συνθήκη ουδετέρωσης .

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

Πίνακας 1.1.2.6-3 : Τιμές αντιστάσεων (Z_α , Z_β) σε Ω / km για γυμνούς αγωγούς από χαλκό (Cu) , από αλουμίνιο (Al) και για συγκεντρικά καλώδια χαλκού (Cu)

Σημείωση : Με Z_α , Z_β συμβολίζονται (στην πρώτη στήλη και την πρώτη γραμμή αντίστοιχα) οι αντιστάσεις αγωγών διαφόρων διατομών ενώ στις υπόλοιπες θέσεις του πίνακα βρίσκεται το πηλίκο Z_α / Z_β που χρησιμοποιείται για την αναγωγή μίας γραμμής χαμηλής τάσης από αγωγούς διαφόρων διατομών σε μία μοναδική διατομή για να εξεταστεί εάν ισχύει η συνθήκη ουδετέρωσης .

Για την αναγωγή αυτή ισχύει η σχέση :

$$\beta = \alpha (Z_{\alpha} / Z_{\beta}) \quad (1.1.2.6-2)$$

όπου Z_α : η αντίσταση σε Ω / km του υπάρχοντος αγωγού

Z_β : η αντίσταση σε Ω / km του αγωγού που εξετάζεται προς αντικατάσταση του υπάρχοντος

α : ο συντελεστής αντικατάστασης

1.1.2.7 Ρεύμα βραχυκύκλωσης σε αγωγούς μέσης τάσης

Στη συνέχεια διερευνάται αν για τους αγωγούς ACSR 35 mm², ACSR 50 mm² και ACSR 95 mm² μπορεί να υπάρξει πρόβλημα υπερθέρμανσης κατά το βραχυκύκλωμα, σε περίπτωση που θα χρησιμοποιούνται ως γραμμές κορμού. Για την εύρεση της αντίστασης βραχυκύκλωσης Z ισχύει:

$$Z = \sqrt{(R\mu\sigma + R\gamma)^2 + (X\mu\sigma + X\gamma)^2} \quad (1.1.2.7-1)$$

όπου Rμσ : πραγματική αντίσταση μετασχηματιστή

Rγ : πραγματική αντίσταση γραμμής

Xμσ : φανταστική αντίσταση μετασχηματιστή

Xγ : φανταστική αντίσταση γραμμής

Ενώ για την αύξηση της θερμοκρασίας του αγωγού λόγω του βραχυκυκλώματος ισχύει:

$$\Delta\theta = k \cdot Id^2 \cdot [(t + T) (Isw^2 / Id^2) / A^2] \quad (1.1.2.7-2)$$

όπου κ : για τον χαλκό 0,0058 και για αλουμίνιο 0,0135

A : η διατομή του αγωγού σε mm

t : ο χρόνος βραχυκύκλωσης σε sec

T : για τριφασικό βραχυκύκλωμα 0,3 - 0,15s, για διφασικό βραχυκύκλωμα 0,6 - 0,25s

Id : διαρκές ρεύμα βραχυκύκλωσης

Isw : εναλλασσόμενο ρεύμα βραχυκύκλωσης

Γραμμή μέσης τάσης	Πραγματική διατομή σε mm ²	R σε Ω / km	ωL σε Ω / km
ACSR 3x16 mm ²	29 (25/4)	1,27	0.42
ACSR 3x35 mm ²	65 (59/9)	0,58	0.39
ACSR 3x95 mm ²	175 (150/25)	0,22	0.33
Cu 3x16 mm ²	16	1,27	0.42
Cu 3x35 mm ²	35	0,6	0.39
Cu 3x95 mm ²	95	0,22	0.36

Πίνακας 1.1.2.7 : Αντίσταση γραμμών μέσης τάσης αλουμινίου,χαλκού και τύπου ACSR

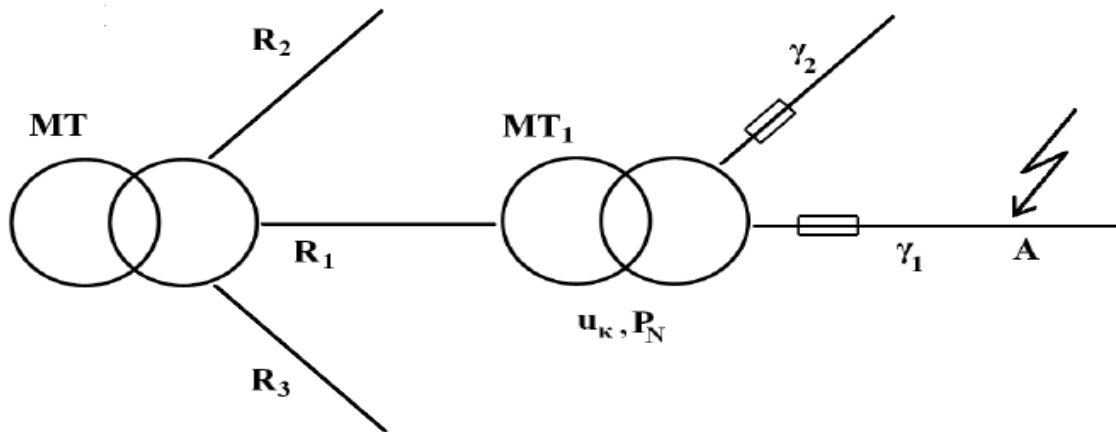
R : η ωμική αντίσταση της γραμμής ανά μήκος του αγωγού

ωL : η επαγωγική αντίσταση της γραμμής ανά μήκος του αγωγού

Οι διατομές των γυμνών αγωγών που δίνονται στον πίνακα αφορούν ισοδύναμη διατομή χαλκού.

1.1.2.7-1 Απλοποιημένο παράδειγμα βραχυκυκλώματος σε γραμμές διανομής Μέσης Τάσης

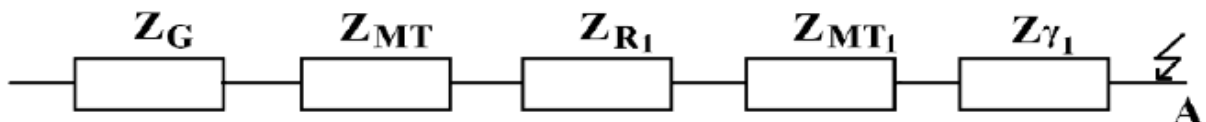
Αντίστοιχα , για το βραχυκύκλωμα σε γραμμές διανομής Μέσης Τάσης , χρησιμοποιείται το ακόλουθο παράδειγμα που απεικονίζεται στο σχήμα 1.1.2.7-1 , κατά το οποίο , ένας μετασχηματιστής υψηλής σε μέση τάση τροφοδοτεί τρεις γραμμές , εκ των οποίων η R1 τροφοδοτεί ένα μετασχηματιστή διανομής και μέσω αυτού τροφοδοτούνται δύο γραμμές γ_1 και γ_2 . Στην γραμμή γ_1 συμβαίνει βραχυκύκλωμα .



Σχήμα 1.1.2.7-1 : Απλοποιημένο παράδειγμα βραχυκυκλώματος στη μέση τάση

- Όπου : MT : μετασχηματιστής μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας (π.χ. 150kV / 20 kV) με σχετική τάση βραχυκύκλωσης u_k περίπου 20% για το φανταστικό μέρος
 u_r : τάση βραχυκύκλωσης M/Σ (0,6% για το πραγματικό μέρος)
 R_1, R_2, R_3 : γραμμές κορμού μέσης τάσης
 MT_1 : M/Σ διανομής ονομαστικής ισχύος P_N (u_k περίπου 4%)
 γ_1 : 1η γραμμή χαμηλής τάσης
 γ_2 : 2η γραμμή χαμηλής τάσης

Ακολουθώς στο σχήμα 1.1.2.7-2 , απεικονίζεται το ισοδύναμο κύκλωμα όλων των αντιστάσεων της διαδρομής βραχυκύκλωσης κατά το σχήμα 1.1.2.7-1 .



Σχήμα 1.1.2.7-2 : Ισοδύναμο κύκλωμα (για το σχήμα 1.1.2.7-1) των σύνθετων αντιστάσεων του δικτύου

- όπου : Z_G : σύνθετη αντίσταση της γεννήτριας
 Z_{MT} : σύνθετη αντίσταση του μετασχηματιστή μεταφοράς
 Z_{R_1} : σύνθετη αντίσταση της γραμμής μέσης τάσης
 Z_{MT_1} : σύνθετη αντίσταση του μετασχηματιστή διανομής
 Z_{γ_1} : σύνθετη αντίσταση της γραμμής μέχρι το σημείο βραχυκύκλωσης A

Η μελέτη αντοχής σε τριφασικό βραχυκύκλωμα περιλαμβάνει :

- 1) τον υπολογισμό της συνολικής σύνθετης αντίστασης ($Z_{ολ}$)
- 2) τον υπολογισμό των ρευμάτων I_{sw} , I_s και I_d

Η σύνθετη αντίσταση της γεννήτριας δίνεται από τη σχέση :

$$Z_G \approx \varepsilon \frac{U_G^2}{P_G} \quad (1.1.2.7-1)$$

όπου: ε : η σχετική τάση διασποράς
 U_G : η παραγόμενη τάση
 P_G : ονομαστική ισχύς της γεννήτριας

Για τον υπολογισμό της σύνθετης αντίστασης του μετασχηματιστή μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας ισχύουν οι σχέσεις :

$$R_{MT} = u_r \frac{U_2^2}{P_N}$$

και

$$X_{MT} = \sqrt{u_k^2 - u_r^2} \frac{U_2^2}{P_N} \quad (1.1.2.7-2)$$

όπου : U_2 : η τάση του δευτερεύοντος σε kV (20kV)
 P_N : η ονομαστική ισχύς του μετασχηματιστή σε MVA
 u_k, u_r : οι συνιστώσες της σχετικής τάσης βραχυκύκλωσης σε % (20% και 0,6% αντίστοιχα)

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

Πίνακας 1.1.2.7-1 : Αντιστάσεις των συνήθων μεγεθών των μετασχηματιστών μέσης προς χαμηλή τάση

όπου : P_N : η ονομαστική ισχύς του μετασχηματιστή
 R : η ωμική αντίσταση του μετασχηματιστή
 X : η επαγωγική αντίσταση του μετασχηματιστή

Για τον υπολογισμό της σύνθετης αντίστασης των γραμμών ACSR μέσης τάσης ισχύει ο

πίνακας 1.1.2.7 . Οι αντιστάσεις των συνήθων μεγεθών μετασχηματιστών διανομής δίνονται στον πίνακα 1.1.2.7-1 .

Στους προηγούμενους υπολογισμούς των ρευμάτων βραχυκύκλωσης μέσω των αντιστάσεων της διαδρομής βραχυκύκλωσης έχει σημασία αν το βραχυκύκλωμα είναι τριφασικό , διφασικό ή προς τη γη . Στον πίνακα 1.1.2.7-2 , δίνονται οι σχέσεις υπολογισμού αναλόγως της περίπτωσης του βραχυκυκλώματος . Στις σχέσεις του πίνακα αυτού δεν περιλαμβάνονται οι αντιστάσεις του μετασχηματιστή μεταφοράς της γραμμής μέσης τάσης και της γεννήτριας . Αυτό έγινε γιατί οι τιμές τους είναι πολύ μικρές ως προς τις αντιστάσεις του μετασχηματιστή διανομής των γραμμών χαμηλής τάσης και των άλλων αντιστάσεων που δίνονται στους πίνακες

a/a	Βραχυκύκλωμα	I_{SW}
1	Τριφασικό βραχυκύκλωμα στον αέρα	$I_{SW} = \frac{U_{\phi}}{\sqrt{3} \sqrt{(R_{\gamma} + R_{ME})^2 + (X_{\gamma} + X_{ME})^2}}$
2	Τριφασικό βραχυκύκλωμα προς γη	$I_{SW} = \frac{U_{\phi}}{\sqrt{3} \sqrt{(R_{\gamma} + R_{ME} + R_{\Delta})^2 + (X_{\gamma} + X_{ME})^2}}$
3	Διφασικό βραχυκύκλωμα στον αέρα	$I_{SW} = \frac{U_{\Pi}}{2 \sqrt{(R_{\gamma} + R_{ME})^2 + (X_{\gamma} + X_{ME})^2}}$
4	Διφασικό βραχυκύκλωμα προς γη	$I_{SW} = \frac{U_{\Pi}}{\sqrt{(2 R_{\gamma} + 2 R_{ME} + R_{\Delta})^2 + (2 X_{\gamma} + 2 X_{ME})^2}}$
5	Βραχυκύκλωμα 1 αγωγού προς γη	$I_{SW} = \frac{U_{\phi}}{\sqrt{(R_{\gamma} + R_{ME} + R_{\Delta} + R_T + R_{\gamma\eta\varsigma})^2 + (X_{\gamma} + X_{ME})^2}}$
6	Βραχυκύκλωμα μεταξύ αγωγού του ουδετέρου και του υποκείμενου του αγωγού φασής	$I_{SW} = \frac{U_{\phi}}{\sqrt{(2 R_{\gamma} + R_{ME})^2 + (2 X_{\gamma} + X_{ME})^2}}$

Πίνακας 1.1.2.7-2 : Σχέσεις υπολογισμού του εναλλασσόμενου ρεύματος βραχυκύκλωσης αναλόγως του είδους του βραχυκυκλώματος

- όπου : I_{sw} : εναλλασσόμενο ρεύμα βραχυκύκλωσης
 U_{ϕ} : φασική τάση
 U_{Π} : πολική τάση
 R_{γ}, X_{γ} : αντιστάσεις της γραμμής μέχρι τη θέση βραχυκύκλωσης
 R_{ME}, X_{ME} : αντιστάσεις του μετασχηματιστή
 R_{Δ} : αντίσταση διάβασης
 R_T : αντίσταση τόξου
 $R_{\gamma\eta\varsigma}$: αντίσταση διαδρομής επιστροφής μέσω γης

Σημειώνεται ότι οι τιμές των αντιστάσεων R_{Δ} , R_T και $R_{\gamma\eta\varsigma}$ πρέπει να προσδιορίζονται ανάλογα με τις συνθήκες που συνέβη το βραχυκύκλωμα (πετρώδες έδαφος , μεταλλική επαφή κλπ.) .

Από την εύρεση των τιμών των ρευμάτων βραχυκύκλωσης δίνεται ακολούθως η δυνατότητα να υπολογιστεί η δυναμική και θερμική καταπόνηση στη θέση βραχυκύκλωσης . Ειδικότερα , η θερμική καταπόνηση του αγωγού κατά το βραχυκύκλωμα μπορεί να υπολογισθεί από τη σχέση :

$$\Delta\theta = \frac{\kappa}{A^2} I_d^2 \left[t + T \left(I_{sw} / I_d \right)^2 \right] \text{ σε } ^\circ\text{C}$$

(1.1.2.7-4)

όπου : I_d : το διαρκές ρεύμα βραχυκύκλωσης

I_{sw} : η ενεργός τιμή του εναλλασσόμενου ρεύματος σε A

$\Delta\theta$: η αύξηση της θερμοκρασίας σε $^\circ\text{C}$

κ : σταθερά του υλικού (για χαλκό $\kappa= 0,0058$, για αλουμίνιο $\kappa= 0,0135$)

A : η διατομή του αγωγού σε

t : ο χρόνος σε sec από την εμφάνιση μέχρι τη διακοπή του βραχυκυκλώματος

T : συντελεστής χρόνου (η τιμή του για τριφασικό βραχυκύκλωμα $T= 0,15$ έως $0,3$)

Σημείωση : Η τιμή T μειώνεται με την απόσταση από τη θέση βραχυκύκλωσης ενώ για διαφασικό βραχυκύκλωμα η τιμή του κυμαίνεται μεταξύ $0,25$ και $0,6$.

Ο χρόνος του βραχυκυκλώματος είναι πάντοτε μικρότερος του 1 sec . Στην περίπτωση των αυτόματων διακοπών και των διακοπών αυτόματης επαναφοράς του δικτύου διανομής μέσης τάσης , πρόκειται για κλάσμα του δευτερολέπτου ενώ οι ασφάλειες χαμηλής τάσης στα ασφαλειοκιβώτια των υποσταθμών θεωρείται ότι διακόπτουν λόγω της συνθήκης ουδετέρωσης το βραχυκύκλωμα πρακτικά ακαριαία . Ως οριακές θερμοκρασίες θεωρούνται για γυμνούς αγωγούς από χαλκό οι 200°C , από αλουμίνιο οι 180°C και από χάλυβα οι 300°C [2] .

Ένας άλλος υπολογισμός της αύξησης της θερμοκρασίας κατά το βραχυκύκλωμα στην περιοχή της χαμηλής τάσης γίνεται μέσω του ονομαστικού ρεύματος I_{Na} της ασφάλειας . Ισχύει στο τέλος της γραμμής (με I_b να είναι μία προσέγγιση του διαρκούς ρεύματος βραχυκύκλωσης I_d) :

$$\Delta\theta = \frac{\kappa}{A^2} I_b^2 t \text{ σε } ^\circ\text{C}$$

(1.1.2.7-5)

όπου: κ : σταθερά του υλικού (για χαλκό $\kappa= 0,0058$, για αλουμίνιο $\kappa= 0,0135$)

I_b : $3I_{Na}$ σε A (όπου I_{Na} το ονομαστικό ρεύμα της ασφάλειας)

t : ο χρόνος από την εμφάνιση μέχρι τη διακοπή του βραχυκυκλώματος

1.1.2.8 Σφάλμα λόγω ροής ρεύματος μέσω αντίστασης Z

Συνολική αντίσταση Z

Όπως ήδη έχει αναφερθεί, στους υπολογισμούς των ρευμάτων διαρροής μέσω των αντιστάσεων της διαδρομής βραχυκύκλωσης έχει σημασία αν το βραχυκύκλωμα είναι τριφασικό, διφασικό ή προς γη. Στον πίνακα έχουν δοθεί οι σχέσεις υπολογισμού αναλόγως της περίπτωσης του βραχυκυκλώματος. Η περίπτωση που εξετάζεται όπου το βραχυκύκλωμα είναι μονοφασικό, η συνολική αντίσταση Z εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά της γραμμής, του μετασχηματιστή καθώς και από τη σύσταση του εδάφους. Συγκεκριμένα υπολογίζεται από τον εξής τύπο:

$$Z = \left((R_{\gamma\rho} + R_{M\Sigma} + R_\delta + R_T + R_{\gamma\eta\varsigma})^2 + (X_{\gamma\rho} + X_{M\Sigma})^2 \right)^{1/2} \quad (1.1.2.8)$$

όπου $R_{\gamma\rho}$, $X_{\gamma\rho}$: αντιστάσεις της γραμμής μέχρι τη θέση βραχυκύκλωσης

$R_{M\Sigma}$, $X_{M\Sigma}$: αντιστάσεις του μετασχηματιστή μεταφοράς

R_δ : αντίσταση διάβασης

R_T : αντίσταση τόξου

$R_{\gamma\eta\varsigma}$: αντίσταση γης

Αντίσταση διάβασης λέγεται η αντίσταση που παρουσιάζει μία επαφή κατά τη διέλευση του ηλεκτρικού ρεύματος. Για κοντινές αποστάσεις και γειωμένο κόμβο ισχύει $R_{\gamma\eta} \ll R_{\delta}$ οπότε μπορούμε να θεωρήσουμε την αντίσταση της γης αμελητέα. Επίσης εάν υπάρχει τόξο είναι $R_{\delta} \approx R_T$. Για $R \approx R_{\delta} + R_T$ (αντίσταση εδάφους), ο τύπος της συνολικής αντίστασης Z γίνεται :

$$Z = \left((R_{\gamma\rho} + R_{M\Sigma} + R) + (X_{\gamma\rho} + X_{M\Sigma}) \right)^{1/2} \quad (1.1.2.8-1)$$

Αντίσταση Μετασχηματιστών

Εξετάζονται τρεις περιπτώσεις μετασχηματιστών διανομής: 150kVA, 160kVA, 200kVA
Οι αντιστάσεις των μετασχηματιστών δίνονται από τους παρακάτω τύπους:

$$R_{M\Sigma} = 1000 \cdot \frac{u_r \cdot V^2}{P_n} \text{ σε } \Omega / \text{φάση} \quad \text{και} \quad X_{MS} = 1000 \cdot \frac{u_b \cdot V^2}{P_n} \text{ σε } \Omega / \text{φάση},$$

όπου u_r : σχετική ωμική τάση βραχυκύκλωσης σε %

u_b : σχετική επαγωγική τάση βραχυκύκλωσης σε %

V : πολική τάση σε kV (0.4kV)

P_n : ονομαστική ισχύς του μετασχηματιστή σε kVA

Οι τιμές των τάσεων βραχυκύκλωσης για τους συγκεκριμένους μετασχηματιστές είναι $u_r=0.6\%$ και $u_b=20\%$.

Λαμβάνοντας υπόψη την πολική τάση δικτύου και τα προαναφερθέντα, προκύπτει ο πίνακας :

P_n (kVA)	U_n (kV)	$R_{M\Sigma}$ (Ω)	$X_{M\Sigma}$ (Ω)
150	0,4	0,0064	0,21333
160	0,4	0,006	0,2
200	0,4	0,0048	0,16

Πίνακας 1.1.2.8 : Αντιστάσεις του μετασχηματιστή

Αντίσταση Γραμμών

Σύμφωνα με τον πίνακα 1.1.2.5-1, οι τιμές για τις αντιστάσεις των αγωγών ανά φάση είναι:

$$R_{\gamma\rho} = 1.14 \Omega/\text{km}$$

$$X_{\gamma\rho} = 0.33 \Omega/\text{km}.$$

1.1.2.9 Ρεύμα σφάλματος κατά την αποκοπή αγωγού

Για πολική τάση δικτύου $U=400V$, η φασική τάση είναι :

$$U_{\phi} = U / \sqrt{3} = 230V$$

Επομένως το ρεύμα σφάλματος κατά την αποκοπή του αγωγού (βλ. πίνακα 1.1.2.7-2) είναι:

$$I = \frac{U_{\phi}}{Z} = \frac{U_{\phi}}{\left((R_{\gamma\rho} + R_{M\Sigma} + R)^2 + (X_{\gamma\rho} + X_{M\Sigma})^2 \right)^{1/2}} \quad (1.1.2.9)$$

όπου $R_{\gamma\rho}, X_{\gamma\rho}$: αντίσταση γραμμής πραγματική ($R_{\gamma\rho}$) και φανταστική ($X_{\gamma\rho}$) ως τη θέση βραχυκύκλωσης

$R_{M\Sigma}, X_{M\Sigma}$: αντίσταση μετασχηματιστή πραγματική ($R_{M\Sigma}$) και φανταστική ($X_{M\Sigma}$)

1.1.2.9-1 Η υποθετική δημιουργία τηγμάτων αλουμινίου από τους αγωγούς και η θερμοκρασία τους κατά την πρόσκρουση στο έδαφος

Από τα προηγούμενα φαίνεται ότι κατά το χρονικό διάστημα που διαρκεί το βραχυκύκλωμα, δεν αναπτύσσονται θερμοκρασίες που να δικαιολογούν τη δημιουργία τηγμάτων από τους αγωγούς. Επισημαίνεται ότι η δημιουργία τηγμάτων από τους αγωγούς δεν έχει καμία σχέση με την εκδήλωση σπινθηρισμών γιατί τα τήγματα σχετίζονται με υπερθέρμανση των αγωγών, όταν δεν επενεργήσει η προτεταγμένη της θέσης βραχυκύκλωσης προστασία, (που όμως είναι σχεδόν απίθανο να συμβεί αυτό) ενώ οι σπινθηρισμοί με τη μείωση της διηλεκτρικής αντοχής της μόνωσης, λόγω π.χ. σκόνης επί των μονωτήρων (βλ. 1.2.5). Αν θεωρηθεί ότι δημιουργήθηκαν τήγματα από έναν γυμνό αγωγό αλουμινίου (π.χ. μίας γραμμής μέσης ή χαμηλής τάσης), τότε για τη θερμοδυναμική κατάσταση ενός τήγματος ισχύει η σχέση:

$$m.c. (d\Delta\theta / dt) + K.A.\Delta\theta = 0 \quad (1.1.2.9-1)$$

όπου : m : η μάζα του τήγματος
Δθ : η διαφορά θερμοκρασίας
c : 0,22 kcal / (kgr °C)
A : η επιφάνεια του τήγματος
K : ένας συντελεστής που αφορά την απαγωγή θερμότητας
t : ο χρόνος μεταβολής της θερμοκρασίας

Από την παραπάνω σχέση προκύπτει:

$$\int_{\Delta\theta 1}^{\Delta\theta 2} d\Delta\theta / \Delta\theta = \int_0^t (kA / m.c) dt \quad (1.1.2.9-1.1)$$

όπου : Δθ1 : η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ της θερμοκρασίας περιβάλλοντος και της θερμοκρασίας τήξης του αλουμινίου
Δθ2 : η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ θερμοκρασίας τήξης του αλουμινίου κατά την στιγμή της τήξης ως την στιγμή προσκρούσης στο έδαφος
c : 0,22 kcal/(kgr °C)
A : η επιφάνεια του τήγματος
K : ένας συντελεστής που αφορά την απαγωγή θερμότητας
t : ο χρόνος μεταβολής της θερμοκρασίας

Για θερμοκρασία περιβάλλοντος π.χ. θ_α = 40 °C (καύσωνας) και θερμοκρασία τήξης του αλουμινίου θ_τ = 660 °C [1] είναι:

$$\Delta\theta 1 = \theta_{\tau} - \theta_{\alpha} = 660 - 40 = 620 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (1.1.2.9-1.2)$$

όπου : θ_τ : η θερμοκρασία περιβάλλοντος
θ_α : η θερμοκρασία τήξης του αλουμινίου

Αντίστοιχα, χρησιμοποιώντας τους ίδιους συμβολισμούς, ισχύει για την Δθ2 :

$$\ln (\Delta\theta 2) = \ln 620 - (t . K . A) / m . c \quad (1.1.2.9-1.3)$$

$$\Delta\theta 2 = \exp \{ 6,43 - (t . K . A) / m . c \} \quad (1.1.2.9-1.4)$$

Με D τη διάμετρο του τήγματος και γ το ειδικό βάρος του αλουμινίου είναι :

$$\Delta\Theta_2 = \exp \{ 6,43 - (6 t.K) / (D.\gamma.c) \} \quad (1.1.2.9-1.5)$$

όπου : D : η διάμετρος του τήγματος σε mm^2
γ : το ειδικό βάρος του αλουμινίου ($\gamma = 2700 \text{ kg / m}$)
t : ο χρόνος μεταβολής της θερμοκρασίας
c : $0,22 \text{ kcal/(kg}^\circ\text{C)}$
K : για τον οποίο ισχύει , κατά Holm [1] , η σχέση :

$$K = 7 + 400.v \text{ W / (m}^2.\text{ }^\circ\text{C)} \quad (1.1.2.9-1.6)$$

όπου : v : η ταχύτητα του τήγματος σε m / sec
t : ο χρόνος πτήσης κατά την θεωρία της ελεύθερης βολής :

$$t = (2H/g)^{0.5} \quad (1.1.2.9-1.7)$$

όπου : H : το ύψος πτώσης (π.χ. $H=9 \text{ m}$)
g : $9,81 \text{ m / sec}^2$

Με $D = 0,005 \text{ m}$ (που είναι συνήθως η διάμετρος των τηγμάτων) , $\gamma = 2700 \text{ kg / m}$ και ανέμους π.χ. 6 μποφόρ ($v = 13,8 \text{ m / s}$) υπολογίζονται οι τιμές K και $\Delta\Theta_2$ (χρησιμοποιώντας τις σχέσεις 1.1.2.9.-1.3 ως 1.1.2.9-1.7) :

$$K = 7 + 400.13,6 = 5447 \text{ W / (m}^2.\text{ }^\circ\text{C)} \quad (1.1.2.9-1.8)$$

Χρησιμοποιώντας τις σχέσεις μετατροπής από Watt σε kcal / s :

$$1 \text{ Watt} = 0,000239 \text{ kcal / s} \quad (1.1.2.9-1.9)$$

η σχέση 1.1.2.9-1.8 λόγω της 1.1.2.9-1.9 μας δίνει τελικά την τιμή του K :

$$K = 1,30 \text{ kcal / (m}^2 \text{ }^\circ\text{C.s)} \quad (1.1.2.9-1.10)$$

και

$$\Delta\Theta_2 = \exp \{ 6,43 - (6,1,354. 1,30) / (5,2,7,0,22) \} = 18 \text{ }^\circ\text{C}$$

Επομένως , υπό συνθήκες υψηλού καύσωνα ($\theta_a = 40 \text{ }^\circ\text{C}$) η θερμοκρασία Θ_2 είναι περίπου:

$$\Theta_2 = \theta_a + \Delta\Theta_2 = 40+18 = 58 \text{ }^\circ\text{C} \quad (1.1.2.9-1.11)$$

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

Στα ίδια συμπεράσματα καταλήγει κανείς μέσω της θεωρίας ρευστομηχανικής , στην οποία λαμβάνεται υπόψιν στους υπολογισμούς τόσο η οριακή ταχύτητα των σφαιριδίων αλουμινίου κατά την πτώση τους από τηκόμενους αγωγούς αλουμινίου του δικτύου διανομής , όσο και η οριζόντια μετατόπιση τους από την κάθετο μεταξύ σημείου τήξης του αγωγού και του σημείου πρόσκρουσης του τήγματος στο έδαφος λόγω πνέοντων ανέμων [3] .

1.1.2.9-2 Αίτια της εικόνας τήξης ενός αγωγού του δικτύου διανομής χαμηλής τάσης όταν ισχύει η συνθήκη ουδετέρωσης

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

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι επειδή η θερμοκρασία της φλόγας είναι συνήθως από 750 °C έως 1020 °C προκαλείται όχι μόνο τήξη κλώνων αλλά αποκοπή αγωγών, γιατί το αλουμίνιο τήκεται στους 660° C [3] .

1.1.2.9-3 Αίτια της εικόνας τήξης των κλώνων αλουμινίου σε αγωγούς ACSR (ή αγωγούς αλουμινίου) του δικτύου διανομής μέσης τάσης

Όταν σε περίπτωση βραχυκυκλώματος , η προτεταγμένη προστασία μίας γραμμής μέσης τάσης από αγωγούς ACSR (ή αλουμινίου) επενεργεί άμεσα (σε κλάσμα του sec) , τότε η εικόνα τήξης που παρουσιάζουν οι κλώνοι αλουμινίου είναι αποτέλεσμα πυρκαγιάς πλησίον αυτού και τούτο διότι λόγω του μικρού διαθέσιμου χρόνου αποκλείεται η θερμική καταπόνηση του αγωγού . Επίσης , η εκδήλωση σπινθηρισμών στους αγωγούς (δηλαδή η φωτεινή ακτινοβολία και ο ήχος που εκδηλώνονται) είναι αποτέλεσμα της καπναιθάλης λόγω της πυρκαγιάς (βλ. 1.2.5-2) .

Για την αποκοπή αγωγών αλουμινίου ισχύουν τα προαναφερθέντα . Σε ότι αφορά τους αγωγούς ACSR , είναι επόμενο να τήκονται οι κλώνοι αλουμινίου , αλλά δεν προκαλείται αποκοπή του αγωγού , γιατί οι χαλύβδινοι κλώνοι τήκονται στους 1530 °C [3] . Συνεπώς , για να συμβεί αποκοπή των αγωγών ACSR δεν αρκεί από μόνη της η θερμική ενέργεια , αν δεν υπάρξει και μηχανική καταπόνηση , λόγω π.χ. μεταβολών στις τανύσεις .

1.1.2.9-4 Αποτελέσματα των μετρήσεων και των οπτικών παρατηρήσεων

Σύμφωνα με πειράματα που έγιναν στο Ε.Μ.Π [1] , για την πειραματική διερεύνηση των συνεπειών που προκαλούν περιπλεγμένα με τους αγωγούς κλαδιά δένδρων (στεγνά ή βρεγμένα) , ως φορτίο ανά φάση χρησιμοποιήθηκε λαμπτήρας 60 W . Σε σειρά με τις λάμπες είχαν τοποθετηθεί αμπερόμετρα . Τα κλαδιά ήταν στεγνά και κατόπιν βράχθηκαν με νερό .

Η τιμή του ρεύματος της διάταξης , υπό τάση 230 V , ήταν σε όλες τις περιπτώσεις περίπου 260 mA (όση ήταν δηλαδή η απορροφημένη ένταση ανά φάση) . Συνεπώς , δεν υπήρξε διαρροή ρεύματος (αν υπήρχε ρεύμα διαρροής θα προέκυπτε ως διαφορά των δύο ρευμάτων : τιμή ρεύματος χωρίς κλαδιά και τιμή ρεύματος με κλαδιά) . Επίσης , δεν παρατηρήθηκε αύξηση της θερμοκρασίας των αγωγών και των κλαδιών , ούτε συνέβη ανάφλεξη των κλαδιών .

Κατά τις επαναλαμβανόμενες αγωγίμες γεφυρώσεις , μεταξύ αγωγού του δημοτικού φωτισμού (AI 16 mm²) και του υπερκείμενου του αγωγού φάσης (AI 50 mm²) , με τον δημοτικό φωτισμό εντός λειτουργίας (φορτίο 1000 W) ή εκτός λειτουργίας (άνευ φορτίου) , διαπιστώθηκαν τα εξής:

- 1) Παρατηρήθηκαν σπινθηρισμοί, που μπορούν να αποδοθούν στο διακοπτικό φαινόμενο λόγω της διαφοράς δυναμικού μεταξύ των δύο αγωγών .
- 2) Δεν αυξήθηκε η θερμοκρασία των αγωγών .
- 3) Δεν δημιουργήθηκαν τήγματα αλουμινίου .

Είδος αγωγού	Ασφάλεια [A]	I _β [A]	t [sec]	θ _χ [°C]	θ [°C]	Δθ [°C]	Παρατηρήσεις
Al 16 mm ²	63	189 880 2850	5,00 0,08 0,00	25	33,7 25,8 25,0	8,7 0,8 0,0	Δεν δημιουργήθηκαν τήγματα και δεν παρατηρήθηκαν σπινθηρισμοί. Κατά τις επαναλαμβανόμενες αγωγίμες γεφυρώσεις προκλήθηκε ένα και μοναδικό βραχυκύκλωμα.
Al 35 mm ²	80	240 880 2850	5,00 0,08 0,00	25	28,0 25,6 25,0	3,0 0,6 0,0	Δεν δημιουργήθηκαν τήγματα και δεν παρατηρήθηκαν σπινθηρισμοί. Κατά τις επαναλαμβανόμενες αγωγίμες γεφυρώσεις προκλήθηκε ένα και μοναδικό βραχυκύκλωμα.
Al 50 mm ²	80	240 880 2850	5,00 0,08 0,08	25	26,5 25,3 25,0	1,5 0,3 0,0	Δεν δημιουργήθηκαν τήγματα και δεν παρατηρήθηκαν σπινθηρισμοί. Κατά τις επαναλαμβανόμενες αγωγίμες γεφυρώσεις προκλήθηκε ένα και μοναδικό βραχυκύκλωμα.

Πίνακας 1.1.2.9-4 : Αποτελέσματα των μετρήσεων και των οπτικών παρατηρήσεων κατά την πειραματική διερεύνηση της συνθήκης ουδετέρωσης (ή βραχυκύκλωσης)

όπου : I_β : μετρούμενο ρεύμα βραχυκύκλωσης

t : χρόνος βραχυκύκλωσης

θ_χ : θερμοκρασία περιβάλλοντος

θ : θερμοκρασία αγωγού

Δθ : διαφορά θερμοκρασίας αγωγού με περιβαλλοντική θερμοκρασίας

1.1.2.9-5 Συμπεράσματα από τις μετρήσεις και τις παρατηρήσεις επί των πειραματικών διατάξεων

Στις γραμμές χαμηλής τάσης του δικτύου διανομής , η εκδήλωση βραχυκυκλώματος συνεπάγεται (λόγω της συνθήκης ουδετέρωσης ή βραχυκύκλωσης) την πρακτικά ακαριαία (σε κλάσμα του δευτερολέπτου) τήξη της ασφάλειας , με αποτέλεσμα να προστατεύονται οι αγωγοί απο υπερθέρμανση και να μην δημιουργούνται τήγματα μετάλλων από αυτούς .

Τα ρεύματα διαρροής , διαμέσου περιπεπλεγμένων κλαδιών με τους γυμνούς αγωγούς χαμηλής τάσης του δικτύου διανομής , είναι ασήμαντα και δεν προκαλούν βραχυκύκλωμα ή αύξηση της θερμοκρασίας των αγωγών ή ανάφλεξη στα κλαδιά . Επίσης , δεν δημιουργούνται σπινθηρισμοί ή τήγματα . Κατά τις επαναλαμβανόμενες αγωγίμες γεφυρώσεις μεταξύ του γυμνού αγωγού του δημοτικού φωτισμού και του υπερκείμενού του γυμνού αγωγού φάσης (με το δημοτικό φωτισμό εντός ή εκτός λειτουργίας) , παρατηρήθηκε ότι μπορεί να εκδηλωθούν σπινθηρισμοί άνευ υλικής υφής (δεν αυξάνει η θερμοκρασία των αγωγών και δεν δημιουργούνται τήγματα αλουμινίου)

Από τα πειραματικά αποτελέσματα , προέκυψε ότι στις γραμμές χαμηλής τάσης του δικτύου διανομής δεν μπορούν να συμβούν αλληπάλληλα βραχυκυκλώματα γιατί με το πρώτο βραχυκύκλωμα τήκεται σχεδόν ακαριαίως η ασφάλεια . Αλληπάλληλα βραχυκυκλώματα στο δίκτυο διανομής , χωρίς άμεση οριστική διακοπή του ηλεκτρικού ρεύματος , μπορεί να υπάρξουν μόνο σε μεγάλες γραμμές (κορμούς) μέσης τάσης (15.000 V – 20.000 V) , που αφορούν την ηλεκτροδότηση μίας ευρύτερης περιοχής και τούτο διότι γίνεται αυτομάτως προσπάθεια επί τρεις φορές (σε κλάσμα δευτερολέπτου κάθε φορά) , από διακόπτες αυτομάτου επαναφοράς (ΔΑΕ) ή από ελαιοδιακόπτες , για να διακοπεί το βραχυκύκλωμα και να ηλεκτροδοτηθεί αμέσως η γραμμή , ώστε να μην διακόπτεται η παροχή τάσης αναίτια όταν δεν πρόκειται για μόνιμο αλλά παροδικό βραχυκύκλωμα (λ.χ. πτώση ενός κλαδιού δένδρου στους αγωγούς) .

1.2 Το ηλεκτροστατικό πεδίο στους μονωτές

1.2.1 Διατάξεις ηλεκτροδίων με ένα διηλεκτρικό

Για τη μελέτη του ηλεκτροστατικού πεδίου κατά τη χρησιμοποίηση ενός μονωτικού μεταξύ δύο ηλεκτροδίων εξετάζονται παρακάτω δύο περιπτώσεις :

- 1) η φόρτιση ενός πυκνωτή με ένα διηλεκτρικό και στη συνέχεια η αποσύνδεση του πυκνωτή από την πηγή συνεχούς τάσης και
- 2) η μόνιμη σύνδεση του πυκνωτή αυτού στην πηγή .

Εξετάζοντας την πρώτη περίπτωση για φόρτιση του πυκνωτή (με ένα διηλεκτρικό) και ακόλουθη αποσύνδεση του από την πηγή συνεχούς τάσης προκύπτουν τα ακόλουθα :

Όταν φορτιστεί ο πυκνωτής και μετά αποσυνδεθεί από την πηγή , τότε το φορτίο του είναι σταθερό , γιατί δεν μπορεί να συμβεί ροή ηλεκτρικών φορτίων . Από τη σύγκριση της χωρητικότητας του πυκνωτή C , ως προς εκείνη , της ίδιας ακριβώς διάταξης ηλεκτροδίων στο κενό χωρίς το διηλεκτρικό (C_0) , διαπιστώνεται ότι ισχύει η σχέση:

$$C = \epsilon_r \cdot C_0 \quad (1.2.1-1)$$

όπου $\epsilon_r > 1$ ένας αριθμός , που εξαρτάται από το είδος του μονωτικού και ονομάζεται σχετική διηλεκτρική σταθερά .

Στην ουσία πρόκειται για έναν συντελεστή , ο οποίος εξαρτάται και από τη στατιστικότητα των ανομοιογενειών στο υλικό (βλέπε πίνακα 1.2.1) .

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

Πίνακας 1.2.1 : Σχετική διηλεκτρική σταθερά ϵ_r ορισμένων υλικών στους $20^\circ C$

Αν εξεταστεί το παραπάνω θέμα με τις σχέσεις , που συνδέουν τα μεγέθη , τα οποία έχουν οριστεί για το ηλεκτροστατικό πεδίο , τότε (με: Q, U, D και F τα μεγέθη της διάταξης των ηλεκτροδίων με το διηλεκτρικό και Q₀ , U₀ , D₀ και E₀ εκείνα στο κενό χωρίς το διηλεκτρικό), ισχύει :

$$Q = Q_0 \quad (1.2.1-2)$$

όπου :Q : το ηλεκτρικό φορτίο της διάταξης των ηλεκτροδίων με διηλεκτρικό μέσο ανάμεσα τους
Q₀ : το ηλεκτρικό φορτίο της διάταξης των ηλεκτροδίων με κενό ως διηλεκτρικό μέσο

$$\vec{D} = \vec{D}_0 \quad (1.2.1-3)$$

όπου : \vec{D} : το διάνυσμα της διηλεκτρικής μετατόπισης της διάταξης των ηλεκτροδίων με διηλεκτρικό μέσο ανάμεσα τους
 \vec{D}_0 : το διάνυσμα της διηλεκτρικής μετατόπισης της διάταξης των ηλεκτροδίων με κενό ως διηλεκτρικό μέσο

$$U = U_0 / \epsilon_r \quad (1.2.1-4)$$

όπου : U : η τάση μεταξύ των ηλεκτροδίων με διηλεκτρικό μέσο ανάμεσα τους
U₀ : η τάση μεταξύ των ηλεκτροδίων με κενό ως διηλεκτρικό μέσο

$$\vec{E} = \vec{E}_0 / \epsilon_r \quad (1.2.1-5)$$

όπου : \vec{E} : το διάνυσμα της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου μεταξύ των ηλεκτροδίων με διηλεκτρικό μέσο ανάμεσα τους
 \vec{E}_0 : το διάνυσμα της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου μεταξύ των ηλεκτροδίων με κενό ως διηλεκτρικό μέσο

Χρησιμοποιώντας τις σχέσεις 1.2.1-2 ως 1.2.1-5 , στον τύπο του νόμου Coulomb , αυτός τροποποιείται ως ακολούθως :

$$\vec{F} = q \cdot Q \cdot \vec{r} / 4 \cdot \pi \cdot \epsilon \cdot r^2 \cdot r \quad (1.2.1-6)$$

όπου : ε : διηλεκτρική σταθερά που εξαρτάται λόγω του ε_r από το είδος του υλικού και την στατιστικότητα των θέσεων ομοιογένειας σε αυτό ενώ δίνεται από τον τύπο
 $\epsilon = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r$

Εξετάζοντας , στη συνέχεια , την δεύτερη περίπτωση κατά την οποία ο πυκνωτής είναι μόνιμα συνδεδεμένος με την πηγή συνεχούς τάσης προκύπτουν τα ακόλουθα :

Όταν ο πυκνωτής με το διηλεκτρικό συνδεθεί μόνιμως με την πηγή , τότε έχει μεταξύ των ηλεκτροδίων του την τάση U και ισχύουν :

$$U = U_0 \quad (1.2.1-7)$$

$$\vec{E} = \vec{E}_0 \quad (1.2.1-8)$$

$$Q = Q_0 \cdot \epsilon_r \quad (1.2.1-9)$$

$$\vec{D} = \vec{D}_0 \cdot \epsilon_r \quad (1.2.1-10)$$

Η μεγαλύτερη τιμή του ηλεκτρικού φορτίου , συγκριτικά με το Q_0 της διάταξης των ηλεκτροδίων στο κενό , είναι προφανές ότι προέρχεται από το διηλεκτρικό . Επειδή για $Q > Q_0$ δεν συμβαίνει αύξηση της πεδιακής έντασης , υποθέτουμε ότι μέσα στο διηλεκτρικό εκδηλώνεται ένα πεδίο από το φορτίο του διηλεκτρικού :

$$\Delta Q = Q - Q_0 \quad (1.2.1-11)$$

όπου : ΔQ : διαφορά φορτίου διάταξης ηλεκτροδίων με διηλεκτρικό ανάμεσα τους (Q) μείον το αντίστοιχο φορτίο όταν δεν υπάρχει διηλεκτρικό μεταξύ των ηλεκτροδίων (Q_0)

που αντιτίθεται στη αύξηση της πεδιακής έντασης μεταξύ των ηλεκτροδίων (λόγω συγκέντρωσης ηλεκτρικού φορτίου σε αυτά από την πηγή) , ώστε τελικά να ισχύει η 1.2.1-8 ($\vec{E} = \vec{E}_0$) .

Το παραπάνω πεδίο αντιστάθμισης , που εκδηλώνεται στον μονωτή , γίνεται αντιληπτό όταν διακόψει κανείς την τάση U , με αποτέλεσμα ο πυκνωτής να βρίσκεται φορτισμένος υπό τάση U_0/ϵ_r .

Από τα παραπάνω γίνεται φανερό , ότι εκδηλώνεται κάποιο φαινόμενο στο διηλεκτρικό , λόγω του οποίου , συμβαίνουν μετακινήσεις ηλεκτρικών φορτίων σε αυτό . Επειδή στους μονωτές συγκρατούνται τα ηλεκτρόνια από τις δυνάμεις των ατόμων (δεν υπάρχουν ελεύθερα ηλεκτρόνια) , μπορούμε να υποθέσουμε ότι οι μετακινήσεις των ηλεκτρικών φορτίων , που προαναφέρθηκαν , είναι ελαστικές και επιστρέψιμες (κατά την εκφόρτιση του πυκνωτή επανέρχονται τα ηλεκτρικά αυτά φορτία του μονωτή στην αρχική τους θέση) . Το φαινόμενο αυτό του προσανατολισμού των ελαστικών μετακινήσεων ηλεκτρικών φορτίων του διηλεκτρικού στη διεύθυνση του πεδίου είναι γνωστό ως πόλωση . Θεωρείται ότι πρόκειται για δίπολα , που προσανατολίζονται στη διεύθυνση του πεδίου U , δημιουργώντας έτσι το πεδίο αντιστάθμισης , που προαναφέρθηκε . Υπάρχουν μονωτικά που έχουν δίπολα ή που σχηματίζουν δίπολα υπό την επίδραση του πεδίου . Από τη σχέση 1.2.1-10 έπεται ότι :

$$\vec{D} = \vec{D}_0 + \vec{P} \quad (1.2.1-12)$$

όπου \vec{P} : η διηλεκτρική μετατόπιση λόγω του πεδίου αντιστάθμισης από τα δίπολα του διηλεκτρικού

Σύμφωνα με την παραπάνω σχέση η πόλωση στους μονωτές και η επαγωγή στους αγωγούς είναι δύο ανάλογα φαινόμενα, που αποδίδονται ταυτόχρονα από το διάνυσμα της διηλεκτρικής μετατόπισης D (ως συνιστώσες του) .

Για το διάνυσμα της πόλωσης (P) έχουμε κατά την παραπάνω σχέση :

$$\vec{P} = \vec{D} - \vec{D}_0 = \vec{D}_0 \cdot (\epsilon_r - 1) = \vec{D}_0 \cdot \delta \quad (1.2.1-13)$$

όπου : δ : ένας αριθμός , που ονομάζεται συντελεστής διηλεκτρικής απορρόφησης και είναι η έκφραση της συμμετοχής του διηλεκτρικού στη συνολική διηλεκτρική μετατόπιση \vec{D} .

Ισχύει , τέλος , για την ηλεκτρική ροπή ενός δίπολου $d\vec{M}$:

$$d\vec{M} = ql = \vec{P} \cdot l \cdot d\vec{A} = \vec{P} \cdot dV \quad (1.2.1-15)$$

$$\vec{P} = d\vec{M} \cdot l \cdot dV \quad (1.2.1-16)$$

(αν θεωρηθεί ότι το διηλεκτρικό αποτελείται από στοιχειώδους κυλίνδρους στη διεύθυνση της πόλωσης , που έχουν : dA : βάση στοιχειώδους κυλίνδρου

l : μήκος στοιχειώδους κυλίνδρου

dV : όγκος στοιχειώδους κυλίνδρου)

Η πόλωση μπορεί δηλαδή να θεωρηθεί ότι είναι η ηλεκτρική ροπή ($d\vec{M}$), στη μονάδα του όγκου του διηλεκτρικού (dV). Ο προσανατολισμός των δίπολων του μονωτικού στη διεύθυνση πεδίου σημαίνει ότι η πόλωση σχετίζεται με ζήτηση ενέργειας, η οποία όμως (με εξαίρεση τις θερμικές απώλειες για τα φαινόμενα των μετακινήσεων, προς δημιουργία του πεδίου αντιστάθμισης) αποθηκεύεται στο διηλεκτρικό ως επανααποδιδόμενη.

1.2.2 Συμπεράσματα από το ηλεκτροστατικό πεδίο σε διατάξεις ηλεκτροδίων με ένα διηλεκτρικό

α) Για τη χωρητικότητα (C), μίας διάταξης ηλεκτροδίων με ένα διηλεκτρικό, ισχύει :

$$C = \epsilon_r C_0 \quad (1.2.2-1)$$

όπου : C_0 : η χωρητικότητα της διάταξης στο κενό χωρίς το διηλεκτρικό
 ϵ_r : η σχετική διηλεκτρική σταθερά του διηλεκτρικού

- β) Για το ηλεκτροστατικό πεδίο στον αέρα ισχύει πρακτικά ότι για το κενό (λόγω της τιμής $\epsilon_r=1$).
- γ) Η πόλωση στους μονωτές και η επαγωγή στους αγωγούς αποδίδεται ταυτόχρονα με το διάνυσμα της διηλεκτρικής μετατόπισης.
- δ) Μία ηλεκτροστατική διάταξη με ένα διηλεκτρικό, που τίθεται εκτός τάσης, παραμένει φορτισμένη υπό τάση U_0/ϵ_r .

Με βάση τη σχέση 1.2.2-1, δίνονται στον πίνακα που ακολουθεί οι χωρητικότητες ορισμένων βασικών διατάξεων με ένα διηλεκτρικό.

Διάταξη ηλεκτροδίων	Χωρητικότητα
Πυκνωτής επίπεδων πλακών (κατά Rogowsky) που απέχουν κατά d μεταξύ τους	$C = \epsilon \cdot A \cdot d$
Ομόκεντρες σφαίρες που απέχουν κατά d οι περιφέρειες τους	$C = (4 \cdot \pi \cdot \epsilon \cdot R_1 \cdot R_2) / d$
Ομοαξονικοί κύλινδροι με d απόσταση παράπλευρων επιφανειών	$C = 2 \cdot \pi \cdot \epsilon \cdot l / [\ln (R_a / R_b)]$
Κύλινδρος – επίπεδο (καλώδιο – γη) με H πλησιέστερη απόσταση κυλίνδρου - επιπέδου	$C = 2 \cdot \pi \cdot \epsilon \cdot l / [\ln (H / R) \sqrt{((H^2/R^2)-1)}]$ για $H \gg R$
Παράλληλοι όμοιοι κύλινδροι (παράλληλοι αγωγοί) με d απόσταση κέντρων	$C = \pi \cdot \epsilon \cdot l / [\ln (d / 2R) + \sqrt{((d/2R)^2-1)}]$

Πίνακας 1.2.2 : Χωρητικότητα διατάξεων ηλεκτροδίων με ένα διηλεκτρικό

- όπου C : χωρητικότητα διάταξης
 A : εμβαδόν επίπεδης πλάκας
 R_1 : ακτίνα εσωτερικής σφαίρας
 R_2 : ακτίνα εξωτερικής σφαίρας
 R : ακτίνα κυλίνδρου
 l : μήκος κυλίνδρου

1.2.3 Διαχωριστικές επιφάνειες μεταξύ διηλεκτρικών

Στην πράξη συναντάται συχνότατα η χρησιμοποίηση μονωτικών σε συνδυασμό, όπως στερεά μονωτικά σε περιβάλλον αέρα ή μονωτικού λαδιού, στερεά μονωτικά το ένα πάνω στο άλλο κ.λ.π.

Στο σχήμα 1.2.3-1, δίνεται ένα παράδειγμα για δύο διηλεκτρικά με ϵ_1 και ϵ_2 . Στη διαχωριστική επιφάνεια των δύο αυτών μονωτικών συμβαίνει διάθλαση των γραμμών του πεδίου. Με εφαρμογή του κανόνα της ηλεκτροστατικής περί αστρόβιλου και πηγαιού πεδίου ισχύει για τη διαχωριστική επιφάνεια (που θεωρείται ότι είναι ισοδυναμική επιφάνεια του πεδίου) :

$$E_{t1} = E_{t2} \quad (1.2.3-1)$$

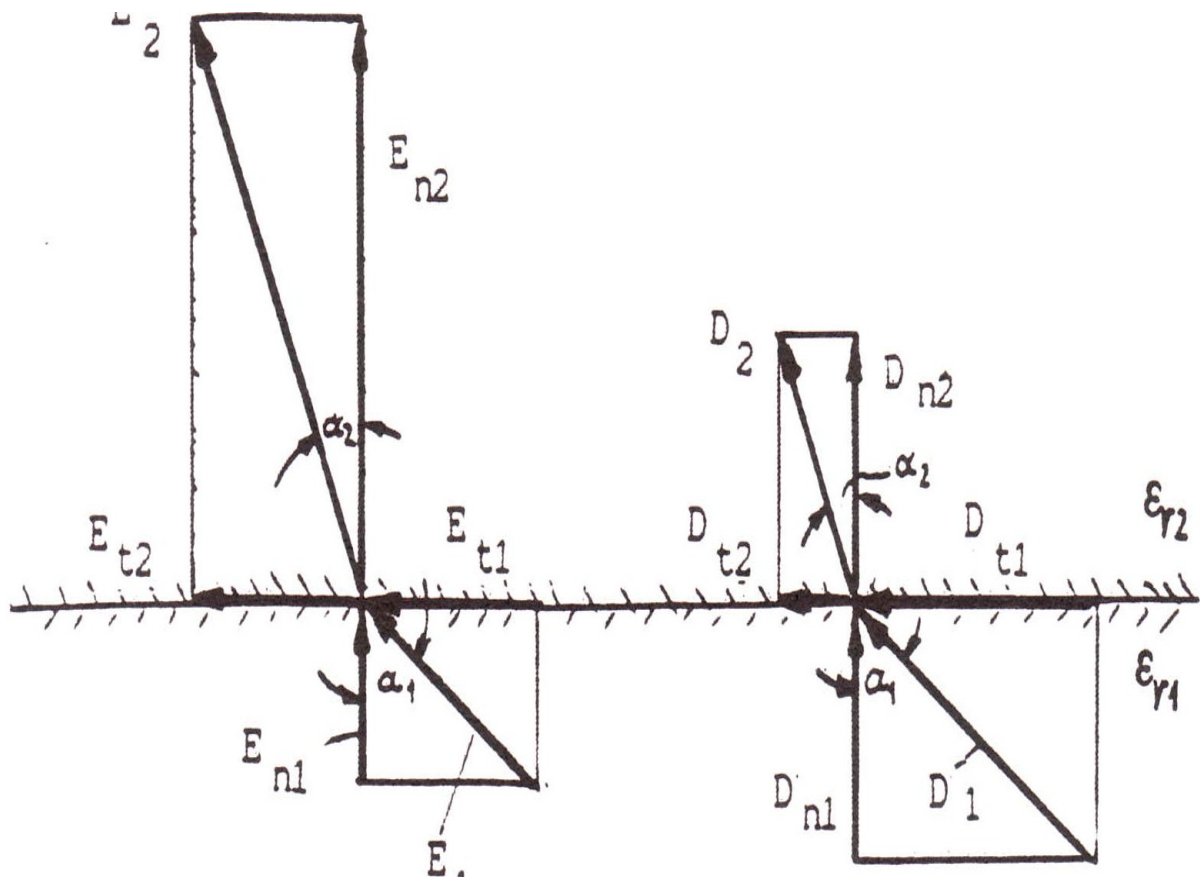
όπου : E_{t1} : η οριζόντια συνιστώσα της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στο διηλεκτρικό 1

E_{t2} : η οριζόντια συνιστώσα της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στο διηλεκτρικό 2

$$D_{n1} = D_{n2} \quad (1.2.3-2)$$

όπου : D_{n1} : η κάθετη συνιστώσα της διηλεκτρικής μετατόπισης στο διηλεκτρικό 1

D_{n2} : η κάθετη συνιστώσα της διηλεκτρικής μετατόπισης στο διηλεκτρικό 2



Σχήμα 1.2.3-1 : Διάθλαση των γραμμών του πεδίου στη διαχωριστική επιφάνεια δύο διηλεκτρικών

Επομένως με βάση την 1.2.3-1 έχουμε :

$$D_{t1} / D_{t2} = \epsilon_{r2} / \epsilon_{r1} = \epsilon_2 / \epsilon_1 \quad (1.2.3-3)$$

$$E_{n2} / E_{n1} = \epsilon_{r1} / \epsilon_{r2} = \epsilon_1 / \epsilon_2 \quad (1.2.3-4)$$

όπου : D_{t1} : η οριζόντια συνιστώσα της διηλεκτρικής μετατόπισης στο διηλεκτρικό 1
 D_{t2} : η οριζόντια συνιστώσα της διηλεκτρικής μετατόπισης στο διηλεκτρικό 2
 E_{n1} : η κάθετη συνιστώσα της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στο διηλεκτρικό 1
 E_{n2} : η κάθετη συνιστώσα της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στο διηλεκτρικό 2
 ϵ_{r1} : η σχετική διηλεκτρική σταθερά του διηλεκτρικού 1
 ϵ_{r2} : η σχετική διηλεκτρική σταθερά του διηλεκτρικού 2
 ϵ_1 : η διηλεκτρική σταθερά του διηλεκτρικού 1
 ϵ_2 : η διηλεκτρική σταθερά του διηλεκτρικού 2

Για τις γωνίες προκύπτουν :

$$\text{tga}_2 / \text{tga}_1 = (D_{t2} / D_{n2}) / (D_{t1} / D_{n1}) = D_{t2} / D_{t1} = (E_{t2} \cdot \epsilon_{r2} \cdot \epsilon_0) / (E_{t1} \cdot \epsilon_{r1} \cdot \epsilon_0) \quad (1.2.3-5)$$

όπου : tga_1 : η εφαπτομένη της γωνίας που σχηματίζεται μεταξύ της διεύθυνσης της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στο μονωτικό 1 και της καθέτου στην διαχωριστική επιφάνεια
 tga_2 : η εφαπτομένη της γωνίας που σχηματίζεται μεταξύ της διεύθυνσης της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στο μονωτικό 2 και της καθέτου στην διαχωριστική επιφάνεια

και για $E_{t1} = E_{t2}$, η 1.2.3-5 γίνεται :

$$\text{tga}_2 / \text{tga}_1 = \epsilon_{r2} / \epsilon_{r1} = \epsilon_2 / \epsilon_1 \quad (1.2.3-6)$$

Από τη σχέση 1.2.3-6 καταλήγουμε στα παρακάτω συμπεράσματα :

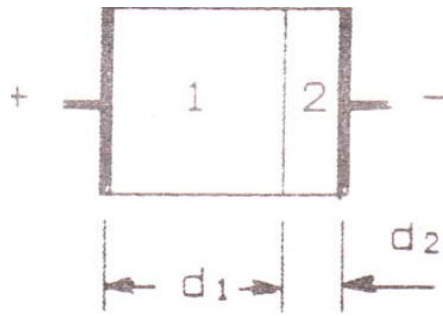
- 1) Για $\epsilon_2 \sim 1$ (δηλαδή όση περίπτωση είναι η τιμή της διηλεκτρικής σταθεράς του αέρα υπό κανονικές συνθήκες) , η γωνία εξόδου α_2 μειώνεται ανάλογα με την τιμή ϵ_1 . Για μεγάλες τιμές ϵ_1 (π.χ. πορσελάνη) , οι γραμμές του πεδίου εξέρχονται στον αέρα περίπου κάθετες στη διαχωριστική επιφάνεια.
- 2) Για $\epsilon_1 \sim 1$ (δηλαδή όση περίπτωση είναι η τιμή της διηλεκτρικής σταθεράς του αέρα υπό κανονικές συνθήκες) και μεγάλη τιμή ϵ_2 (π.χ. πορσελάνη) , οι γραμμές του πεδίου εισέρχονται στο μονωτικό με ϵ_2 περίπου κάθετα προς τη διαχωριστική επιφάνεια.

Όταν το πεδίο είναι ομογενές ($\alpha_1 = \alpha_2 = 90^\circ$: σχήμα 1.2.3-2) , τότε από τη σχέση 1.2.3-5 , έχουμε για την τιμή της διηλεκτρικής μετατόπισης :

$$D_1 = D_2 = D \quad (1.2.3-7)$$

και αντίστοιχα για τις τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου :

$$E_1 = (\epsilon_2 / \epsilon_1) \cdot E_2 \quad (1.2.3-8)$$



Σχήμα 1.2.3-2 : Ομογενές πεδίο με δύο διηλεκτρικά (1 και 2)

Από την παραπάνω σχέση φαίνεται ότι τα μονωτικά με την μικρότερη διηλεκτρική σταθερά καταπονούνται περισσότερο . Στο σχήμα 1.2.3-3 , έχει σχεδιαστεί ένα παράδειγμα εικόνας ομογενούς πεδίου για δύο μονωτικά , για τις διηλεκτρικές σταθερές των οποίων ισχύει : $\epsilon_1 = 2\epsilon_2$. Για την τάση U ισχύουν :

$$U = E_1 \cdot d_1 + E_2 \cdot d_2 = E_1 (d_1 + (\epsilon_1 \cdot d_1 / \epsilon_2)) \quad (1.2.3-9)$$

$$E_1 = U \cdot ((\epsilon_2) / (\epsilon_1 d_2 + \epsilon_2 d_1)) \quad (1.2.3.10)$$

και αντίστοιχα για το E_2 :

$$E_2 = U \cdot ((\epsilon_1) / (\epsilon_1 d_2 + \epsilon_2 d_1)) \quad (1.2.3.10)$$

Για την διαδοχική τοποθέτηση πολλών μονωτικών (1 ως n) , με διαφορετική τιμή ϵ εντός ενός ομογενούς πεδίου , που έχουν τις διαχωριστικές τους επιφάνειες κάθετες προς τις γραμμές του πεδίου , η συνολική τάση υπολογίζεται όπως προηγουμένως και ως άθροισμα όλων των επιμέρους τάσεων :

$$U = E_1 \cdot d_1 + E_2 \cdot d_2 + \dots + E_n \cdot d_n \quad (1.2.3.11)$$

Μπορεί να θεωρηθεί , δηλαδή , ότι οι $n-1$ διαχωριστικές επιφάνειες συμπεριφέρονται ως ηλεκτρόδια , έτσι ώστε να αθροίζονται οι τάσεις των σε σειρά υποτιθέμενων n πυκνωτών , όπως φαίνεται από το σχήμα που ακολουθεί όπου το διηλεκτρικό με την μικρότερη διηλεκτρική σταθερά καταπονείται περισσότερο .

Όταν έχουν τοποθετηθεί πολλά μονωτικά υλικά (n) σε έναν κυλινδρικό ή σφαιρικό πυκνωτή , με τις διαχωριστικές τους επιφάνειες κάθετες προς τις γραμμές του πεδίου (όπως συμβαίνει π.χ. με τις διάφορες στρώσεις μονωτικών στα καλώδια) , τότε ισχύει :

$$U = (E_{\max 1} / \eta_1 d_1) + (E_{\max 2} / \eta_2 d_2) + \dots + (E_{\max n} / \eta_n d_n) \quad (1.2.3.12)$$

όπου η_1, \dots, η_n , οι αντίστοιχοι συντελεστές χρησιμοποίησης του πεδίου

$$U = (D / \epsilon_0 \epsilon_{r1} \eta_1 d_1) + (D / \epsilon_0 \epsilon_{r2} \eta_2 d_2) + \dots + (D / \epsilon_0 \epsilon_{rn} \eta_n d_n) \quad (1.2.3.13)$$

Αρα για ίδια τιμή E_{\max} σε κάθε διαχωριστική επιφάνεια (εξομάλυνση πεδίου) πρέπει να ισχύει :

$$\epsilon_1 : \epsilon_2 : \dots : \epsilon_n = (1/d_1) : (1/d_2) : (1/d_n) \quad (1.2.3.14)$$

Ο ηλεκτροτεχνικός εξοπλισμός ελέγχεται στην τελευταία φάση της παραγωγικής διαδικασίας του με τις λεγόμενες διηλεκτρικές δοκιμές . Για την αντίσταση μόνωσης ισχύει γενικά ότι αυτή πρέπει να είναι :

$$R > 1000 \Omega / V \quad (1.2.4)$$

όπου R : η αντίσταση μόνωσης .

Για την τιμή της αντίστασης μόνωσης σε διάφορα επίπεδα τάσης ισχύει [2] :

$$1) \text{ για } 230 \text{ V πρέπει να είναι : } R > 230 \text{ k}\Omega \quad (1.2.4-1)$$

$$3) \text{ για } 400 \text{ V πρέπει να είναι : } R > 400 \text{ k}\Omega \quad (1.2.4-2)$$

$$3) \text{ για } 20 \text{ kV πρέπει να είναι : } R > 20 \text{ M}\Omega \quad (1.2.4-3)$$

Ακολουθως εξετάζεται ως παράδειγμα η αντίσταση μόνωσης του βρόχινου νερού μεταξύ γυμνών αγωγών χαμηλής τάσης κατά την βιβλιογραφία [1] . Εξετάζεται η περίπτωση της βροχόπτωσης σαν να πρόκειται για δέσμη νερού διατομής $2,5 \text{ mm}^2$ που εκτοξεύεται από σωλήνα αυτής της διατομής και στην τροχιά της δέσμης του νερού παρεμβάλλονται δύο όμοιοι αγωγοί χαμηλής τάσης .

Λαμβάνοντας την ειδική αντίσταση του βρόχινου νερού ως $\rho = 1,4 \cdot 10^7 \Omega \cdot \text{mm}^2 / \text{mm}$ [1] και ως απόσταση μεταξύ των αγωγών $d = 300 \text{ mm}$ έχουμε για την χαμηλή τάση :

$$R = (\rho \cdot d) / A = 1,4 \cdot 10^7 \cdot 300 / 2,5 = 1200 \text{ M}\Omega \quad \rightarrow \text{πολύ κατάλληλη μόνωση.} \quad (1.2.4-4)$$

όπου : R : αντίσταση μόνωσης

d : απόσταση αγωγών

ρ : ειδική αντίσταση βρόχινου νερού

1.2.4.1 Οι βασικές μορφές διάσπασης

Ως διάσπαση , χαρακτηρίζεται η αναίρεση της μονωτικής ικανότητας ενός ηλεκτρομονωτικού υλικού . Τα στερεά μονωτικά αποκτούν συνήθως μόνιμες βλάβες κατά τη διάσπαση . Η ανάγκη για να δοθεί μία εξήγηση στις αλλαγές των υλικών (προ και κατά τη διάσπαση) , οδήγησε στην αναζήτηση των διαφόρων παραγόντων που τις προκαλούν .

Έτσι , από μετρήσεις που έχουν γίνει σε διάφορα στερεά μονωτικά (κυρίως μετρήσεις της τάσης διάσπασης σε σχέση με το χρόνο και τη μορφή της τάσης) , οι οποίες έχουν συνδυαστεί με παρατηρήσεις σχετικά με την αλλαγή της μοριακής δομής , που προκαλείται στα υλικά αυτά , θεωρείται ότι υπάρχουν οι παρακάτω βασικοί παράγοντες μείωσης της μονωτικής ικανότητας [1] :

- 1) οι απώλειες Joule
- 2) οι δυνάμεις Coulomb
- 3) οι μερικές εκκενώσεις
- 4) η θερμοκρασία του περιβάλλοντος

Οι αντίστοιχες προς τους παραπάνω παράγοντες μορφές της διάσπασης είναι :

- 1) η θερμική διάσπαση
- 2) η ηλεκτρομηχανική διάσπαση
- 3) η διάσπαση λόγω μερικών εκκενώσεων (ή γήρανση)
- 4) η θερμοχημική διάσπαση

Για τις άνω μορφές διάσπασης ισχύουν πολύ περιληπτικά τα ακόλουθα:

α) Η θερμική διάσπαση

Η μορφή της διάσπασης αυτής συναντάται όταν το στερεό μονωτικό καταπονείται κυρίως θερμικά μόνο από τις απώλειες Joule . Η εικόνα που παρουσιάζει το θερμικά καταπονούμενο υλικό είναι συνήθως το κάψιμο και το λιώσιμο στην περιοχή όπου συμβαίνει η καταπόνηση .

β) Η ηλεκτρομηχανική διάσπαση

Όταν η τάση που εφαρμόζεται στο στερεό μονωτικό , είναι αρκετά μεγαλύτερη από εκείνη για τη θερμική διάσπαση , τότε αποδίδεται κυρίως στις δυνάμεις Coulomb και ονομάζεται ηλεκτρομηχανική (ή ηλεκτρική) διάσπαση .

γ) Η διάσπαση λόγω μερικών εκκενώσεων (ή γήρανση)

Η διάσπαση των στερεών μονωτικών μπορεί να έχει την αφετηρία της στις μερικές εκκενώσεις στην επιφάνεια και στον όγκο τους . Οι μερικές εκκενώσεις εμφανίζονται σε φυσαλίδες αερίων ή γενικά θέσεις ανομοιογένειας μέσα στον όγκο του μονωτικού (εσωτερικές μερικές εκκενώσεις) , καθώς και σε θέσεις ανομοιογένειας ή ξένες επικαθήσεις (ηλεκτρικές ακαθαρσίες) στην επιφάνεια του (εξωτερικές εκκενώσεις) .

Από τη στιγμή της έναρξης των μερικών εκκενώσεων , προκαλείται συνήθως σταδιακή αλλαγή της μοριακής δομής του στερεού μονωτικού , η οποία είναι ιδιαίτερα έντονη σε περιορισμένο τμήμα του , όπου δηλαδή έτυχε οι θέσεις ανομοιογένειας να είναι περισσότερο αγωγίμες . Πρόκειται για ένα ηλεκτροχημικό φαινόμενο , που σε κάποιο απροσδιόριστο χρονικό διάστημα οδηγεί στη διάσπαση του στερεού μονωτικού . Πρόκειται δηλαδή για βαθμιαία μείωση της διηλεκτρικής αντοχής , ανάλογα με το ρυθμό αύξησης της χημικής μεταβολής και είναι συνήθως μακροπρόθεσμη και για τον λόγο αυτό είναι γνωστή και ως γήρανση του μονωτικού .

δ) Η θερμοχημική διάσπαση

Η διάσπαση που προκαλείται μόνο από τη θερμότητα του περιβάλλοντος του στερεού μονωτικού , ονομάζεται θερμοχημική . Η μορφή της διάσπασης αυτής δεν συναντάται στην πράξη από μόνη της , αλλά συνήθως ενισχύει τις άλλες μορφές διάσπασης γιατί προκαλεί αύξηση της ενέργειας των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων .

1.2.4.2 Βασικά κριτήρια αξιολόγησης των ηλεκτρομονωτικών υλικών

Η ανάγκη για την αξιόπιστη διαχρονική συμπεριφορά των διαφόρων μονωτικών υλικών σε μία κατασκευή μέσης τάσης , έχει οδηγήσει σε ορισμένα βασικά κριτήρια αξιολόγησής τους , τα οποία δεν αφορούν μόνο τις ηλεκτρικές (ή διηλεκτρικές) ιδιότητές τους , άλλα και άλλες ιδιότητες που πρέπει να έχουν , ανάλογα με την κατασκευή όπως π.χ. : η θερμική αντοχή κατά την απαγωγή των απωλειών Joule των αγωγών , η ψυκτική ικανότητα κατά τη σβέση του ηλεκτρικού τόξου σε αυτόματους διακόπτες , η μηχανική αντοχή των μονωτήρων (π.χ. λόγω του βάρους της γραμμής) , η αντοχή κατά την εκδήλωση βραχυκυκλώματος κ.λ.π. Τα κριτήρια αυτά είναι κυρίως:

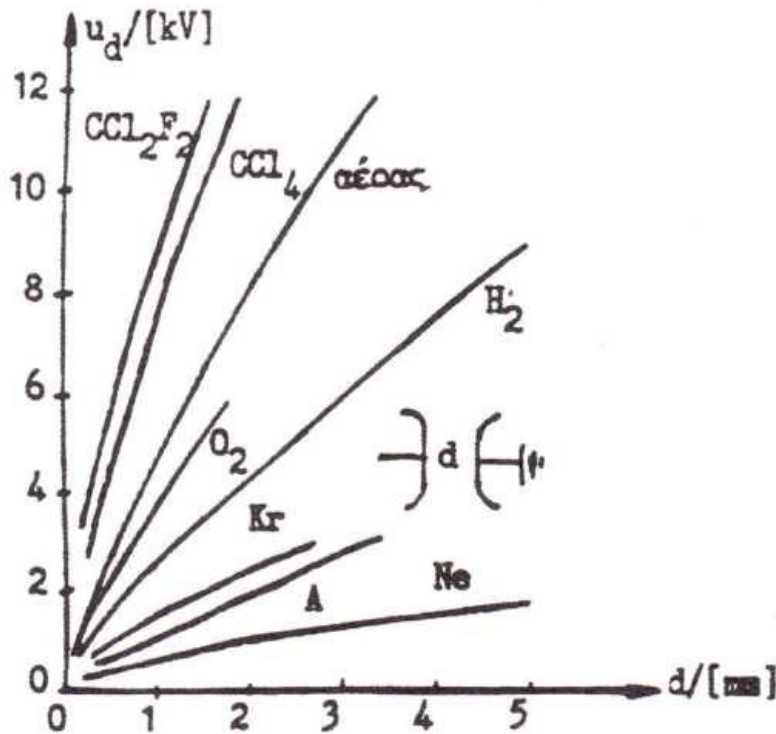
1.2.4.3 Η διηλεκτρική αντοχή και η διάσπαση σε ανομοιογενές πεδίο (διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα και ακίδα-ακίδα)

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

Η ενεργός τιμή της διηλεκτρικής αντοχής του αέρα είναι $E_d \sim 21$ kV/cm και η μέγιστη τιμή της είναι $E_d = 30$ kV [2] .

Σε αρκετές περιπτώσεις , ενδιαφέρει η διάσπαση ή μη ενός διηλεκτρικού εντός ανομοιογενούς πεδίου , όπως π.χ. του αέρα υπό εναλλασσόμενη τάση σε διάταξη ηλεκτροδίων << ακίδα-πλάκα >> ή << ακίδα-ακίδα >> , που χρειάζεται για την μελέτη του πεδίου μεταξύ μικρής προεξοχής στην επιφάνεια γυμνού αγωγού (λόγω τραυματισμένου ή ακόμη και κομμένου κλώνου) και μεταλλικής επιφάνειας ή γης .

Στο σχήμα 1.2.4.3-1 , δίνεται η τάση διάσπασης του αέρα, για διάταξη ηλεκτροδίων «ακίδα-πλάκα» και «ακίδα-ακίδα».



Σχήμα 1.2.4.3-1 : Τάση διάσπασης διαφόρων αέριων μονωτικών (υπό συνθήκες λειτουργίας: 20 °C και 760 Torr)

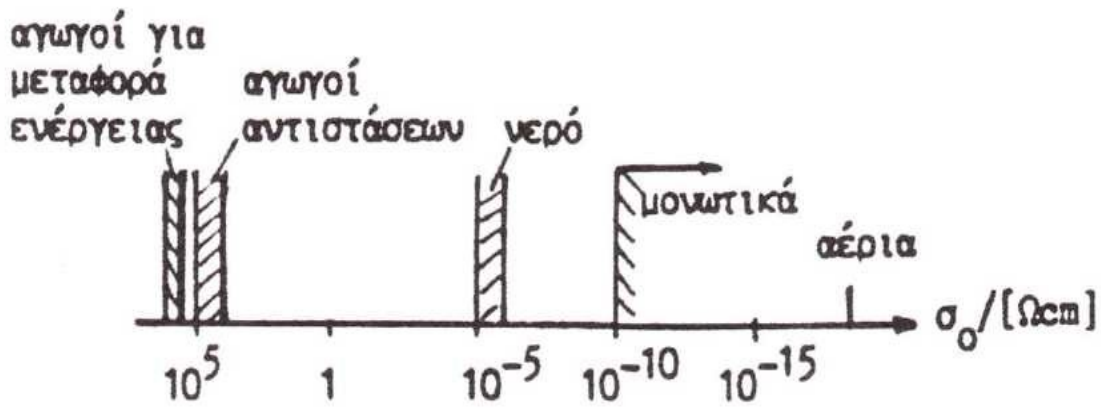
Οι χαρακτηριστικές του σχήματος 1.2.4.3-1 , δίνουν μία δυνατότητα σύγκρισης μεταξύ διαφόρων ηλεκτρομονωτικών αερίων ως προς την τάση διάσπασής τους (υπό συνθήκες λειτουργίας 20 °C και 760 Torr) .

1.2.4.4 Η σχετική διηλεκτρική σταθερά

Η σχετική διηλεκτρική σταθερά (ϵ_r) περιγράφει το πόσο μεγαλύτερη είναι η χωρητικότητα μίας διάταξης συγκριτικά προς εκείνη στο κενό ή στον αέρα . Οι σχετικές διηλεκτρικές σταθερές των διαφόρων μονωτικών , που συνθέτουν μία μόνωση (π.χ. περιελίξεις μετασχηματιστών και μονώσεις καλωδίων) , θα πρέπει να επιλέγονται κατά τρόπο , ώστε να εξομαλύνεται το πεδίο στις διαχωριστικές επιφάνειές τους , για να μη διευκολύνεται η εκδήλωση μερικών εκκενώσεων .

Η πληροφορία για την τάξη μεγέθους της μονωτικής ικανότητας ενός υλικού μπορεί να προκύψει και από το μέγεθος της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (ρ) ή από το αντίστροφο προς αυτή μέγεθος , που ονομάζεται ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα (σ) .

Στο σχήμα 1.2.4.4-1 , απεικονίζεται η τάξη μεγέθους της ειδικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας διαφόρων υλικών .



Σχήμα 1.2.4.4-1 : Τάξη μεγέθους της ειδικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας διάφορων κατηγοριών υλικών

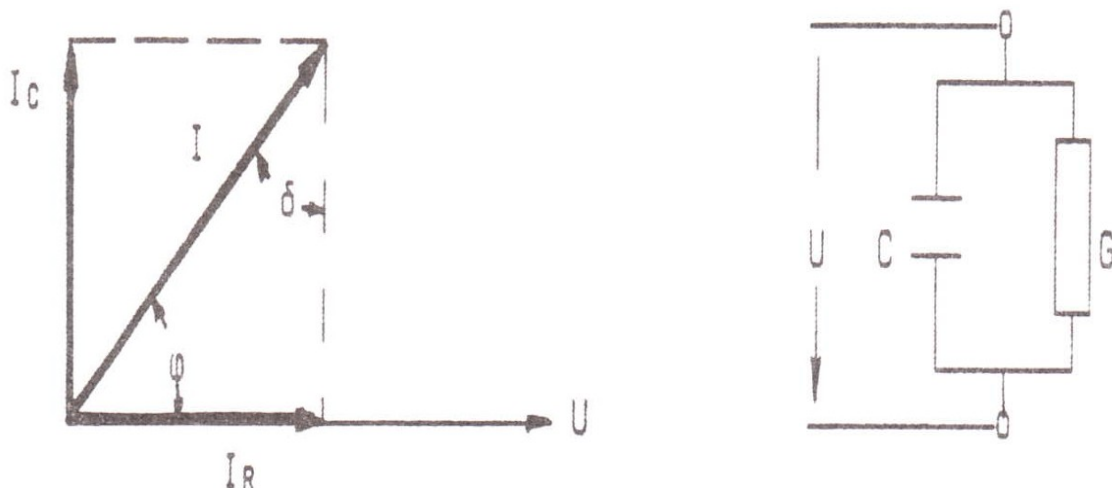
1.2.4.5 Ο συντελεστής απωλειών

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

- α) στην κατανάλωση ενέργειας κατά τη διαρκή εναλλαγή της φοράς της ηλεκτρικής ροπής των δίπολων στο ρυθμό της εναλλαγής της πολικότητας της εναλλασσόμενης τάσης, και
- β) στην πολύ μικρή ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα, που έχουν τα μονωτικά υλικά

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

Στο σχήμα 1.2.4.5-1 δίνεται το ισοδύναμο κύκλωμα ενός πυκνωτή C με ομογενές διηλεκτρικό και απώλειες (λόγω της αγωγιμότητας G του διηλεκτρικού του).



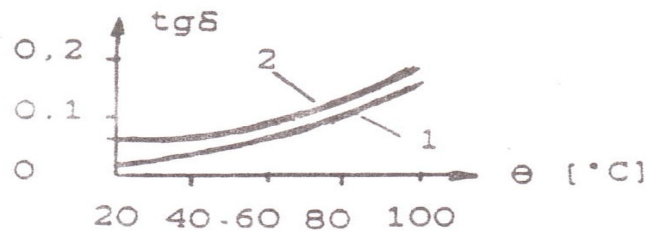
Σχήμα 1.2.4.5-1 : Ισοδύναμο κύκλωμα ενός πυκνωτή C με ομογενές διηλεκτρικό και απώλειες (λόγω της αγωγιμότητας G του διηλεκτρικού του)

Ο συντελεστής απωλειών $\text{tg}\delta$:

$$\text{tg}\delta = (I_R / I_C) = (G / \omega \cdot C) \quad (1.2.4.5-1)$$

όπου : I_R : ωμικό ρεύμα διαρροής
 I_C : χωρητικό ρεύμα

είναι ένα κριτήριο αξιολόγησης του διηλεκτρικού (ή μίας μονωτικής διάταξης γενικότερα) γιατί δίνει πληροφορίες για την αγωγιμότητά του (βλ. σχήμα 1.2.4.5-2) . Όπως φαίνεται στο σχήμα αυτό , η $\text{tg}\delta$ αυξάνει εκθετικά με τη θερμοκρασία .



**Σχήμα 1.2.4.5-2 : συντελεστής απωλειών $\text{tg}\delta$ δύο διηλεκτρικών : 1 : σκληρό χαρτί
 2 : πορσελάνη**

Οι απώλειες Joule (P_w) στην αγωγιμότητα G είναι :

$$P_w = I_R \cdot U = G \cdot U^2 = U^2 \cdot C \cdot \sigma_0 \cdot \text{tg}\delta = P_B \cdot \text{tg}\delta \quad (1.2.4.5-2)$$

όπου : P_B : η άεργος ισχύς (ισχύς στη χωρητικότητα C)
 I_R : ωμικό ρεύμα διαρροής
 I_C : χωρητικό ρεύμα
 $\text{tg}\delta$: ο συντελεστής απωλειών

1.2.4.6 Η επιφανειακή αγωγιμότητα

Η διηλεκτρική αντοχή των στερεών μονωτικών μειώνεται όταν η επιφάνειά τους περιλαμβάνει ξένες επικαθίσεις (σκόνη, υγρασία, κλπ.) . Το ίδιο συμβαίνει όταν καταπονηθεί θερμικά η επιφάνεια . Έχει διαπιστωθεί ότι στα φαινόμενα που εκδηλώνονται στην επιφάνεια των στερεών μονωτικών κατά την ηλεκτρική καταπόνησή τους (κυρίως αύξηση των απωλειών Joule και μερικές εκκενώσεις) , συμμετέχει η επιφάνειά τους σε πάχος μέχρι 30 \AA . Γι' αυτό , η επιφανειακή αγωγιμότητα είναι ένα κριτήριο για την προδιάθεση των διάφορων στερεών διηλεκτρικών στην εκδήλωση των παραπάνω φαινομένων . Επειδή οι παράγοντες που προκαλούν αύξηση της επιφανειακής αγωγιμότητας ποικίλλουν (ανάλογα με τις συνθήκες λειτουργίας) , η ειδική επιφανειακή αγωγιμότητα δεν είναι κάποια σταθερά των στερεών μονωτικών .

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

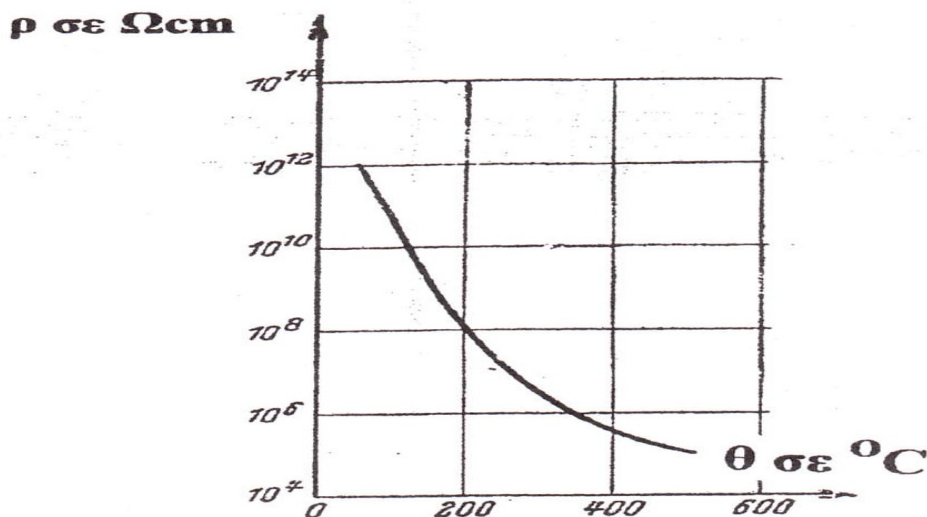
1.2.4.7 Η θερμοκρασία και ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας

Η θερμική καταπόνηση των μονωτικών υλικών σχετίζεται με την αύξηση του αριθμού των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων στις θέσεις, όπου η πεδιακή ένταση έτυχε να είναι αυξημένη (όπως π.χ. ανομοιογένειες στον όγκο ή στην επιφάνεια των στερεών μονωτικών, ανεπιθύμητα αιωρούμενα σωματίδια στο λάδι). Η θερμότητα για την εκδήλωση των παραπάνω φαινομένων υπάρχει πάντοτε κατά τη λειτουργία των διαφόρων κατασκευών (π.χ. από απώλειες Joule των αγωγών, απώλειες σιδήρου, θερμότητα στις επαφές των διακοπών κ.λ.π.). Επειδή, γενικά, ισχύει ότι η θερμική ειδική αγωγιμότητα (λ) συμβαδίζει με την ηλεκτρική ειδική αγωγιμότητα (σ), η τιμή λ αποτελεί (όπως και η τιμή σ) ένα κριτήριο για την αξιολόγηση των μονωτικών υλικών. Στον πίνακα 1.2.4.7, δίνονται τιμές του συντελεστή λ για διάφορα διηλεκτρικά.

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

Υλικό	Πάχος μόνωσης [mm]	λ W / cm grad
Πορσελάνη	0,5...3	0,008...0,015
Στεατίτης	0,5...3	0,02...0,026
Γυαλί	< 1	0,0075...0,012
Ξύλο	< 3	0,001...0,002
Χαρτόνι	0.3...1,5	0,003
Χαρτί στο λάδι	< 2	0,014...0,03

Πίνακας 1.2.4.7 : Τιμές του συντελεστή ειδικής θερμικής αγωγιμότητας (λ) για ορισμένα μονωτικά υλικά



Σχήμα 1.2.4.7-1 : Επίδραση θερμοκρασίας (θ) στην ειδική αντίσταση (ρ) της πορσελάνης

1.2.5 Γενικά περί σπινθηρισμών και ερπουσών εκκενώσεων

Ως σπινθηρισμούς επί των μονωτήρων , εννοεί κανείς φωτεινές μερικές εκκενώσεις (δηλαδή εκκενώσεις περιορισμένης διαδρομής επί της επιφάνειας των μονωτήρων), συνοδευόμενες από θόρυβο . Ως σπινθηρισμοί συνηθίζεται να αποκαλούνται επίσης στην πράξη και οι φωτεινές μερικές εκκενώσεις περί τους αγωγούς που συνοδεύονται με θόρυβο (φαινόμενο Corona) [2] .

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 τεμάχια μονωτήρων ή αγωγών .

Οι σπινθηρισμοί παρουσιάζονται αρχικά επί των μονωτήρων λόγω ξένων επικαθίσεων . 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 από καθαλατώσεις , σκόνη , καπναιθάλη , κλπ . Είναι απαραίτητο να συνυπάρχουν και οι δύο αυτές συνθήκες για να δημιουργηθούν οι προϋποθέσεις σπινθηρισμών μετά ερπουσών 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 πρωινές ώρες της ημέρας , σε γραμμές υψηλής και μέσης τάσης (όπως προαναφέρθηκε) και σε περιοχές όπου υπάρχουν επικαθίσεις ρύπων στις επιφάνειες των μονωτήρων . Αυτό συμβαίνει σε γραμμές παραθαλάσσιες ή σε γραμμές που βρίσκονται πολύ κοντά σε ρυπογόνες βιομηχανίες , όπου στη μεν πρώτη περίπτωση , είναι ενδεχόμενο να υπάρχουν καθαλατώσεις , στη δε δεύτερη , έντονη βιομηχανική ρύπανση στους μονωτήρες .

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι , σύμφωνα με τη βιβλιογραφία [1] , έχουν διαπιστωθεί σπινθηρισμοί ως και διακοπές ρεύματος σε δίκτυα μέχρι 500 kV που προήλθαν από πτώματα πουλιών στους μονωτήρες διότι έχουν μεγάλη περιεκτικότητα σε αλάτι (βλέπε 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 είναι 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 .

Εκτός από το ρεύμα βραχυκύκλωσης που καταπονεί το δίκτυο (και γενικότερα τις ηλεκτροτεχνικές κατασκευές) δυναμικά και θερμικά , ενδιαφέρει ιδιαίτερα και η διηλεκτρική συμπεριφορά του εξοπλισμού των εγκαταστάσεων διανομής και βασικά των μονωτήρων, ώστε να περιορίζονται οι σπινθηρισμοί σε περιοχές με βιομηχανική ρύπανση ή με καθαλατώσεις .

Στον πίνακα 1.2.5 δίνεται το μήκος ερπουσμού κεραμικών και γυάλινων μονωτήρων αναλόγως της περιβαλλοντικής ρύπανσης , ώστε να διασφαλίζεται η διηλεκτρική αντοχή ανάλογα με το επίπεδο της τάσης . Για τους πλαστικούς μονωτήρες που ήδη εγκαθίστανται στο δίκτυο , δεν υπάρχουν ακόμα ανάλογα στοιχεία με εκείνα του πίνακα . Πάντως , το πλεονέκτημά τους συγκριτικά με τους κεραμικούς είναι ότι δεν εκδηλώνονται σπινθηρισμοί , όπως προκύπτει από την αποκτηθείσα εμπειρία στα δίκτυα .

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

Πίνακας 1.2.5 : Επίδραση περιβαλλοντικής ρύπανσης στο μήκος ερπυσμού (I_{min}) μονωτήρων

Στον πίνακα 1.2.5 φαίνονται οι τιμές του μήκους ερπυσμού μονωτήρων (I_{min}) που χρησιμοποιούνται στη μέση τάση και πόσο αυτές διαφοροποιούνται ανάλογα με την περιβαλλοντική ρύπανση .

1.2.5.1 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 αυτών , απαιτείται δραστική μείωση της μονωτικής ικανότητας (διηλεκτρικής αντοχής) του αέρα από αγωγίμους ρύπους , όπως αυτό συμβαίνει λόγω της καπναιθάλης .

Πράγματι , η πεδιακή ένταση για την έναρξη μερικών εκκενώσεων στους αγωγούς μίας γραμμής π.χ. μέσης τάσης των 20 kV υπό ατμοσφαιρικό αέρα δίνεται από την σχέση [1] :

$$E = m \cdot m_2 \cdot \delta \cdot 30 [1 + (0,3) / (\delta \cdot R)^2] \text{ kV / cm} \quad (1.2.5.1-1)$$

Όπου : r : η ακτίνα του αγωγού σε mm (π.χ. $r = 8,62$ mm για αγωγό τύπου ACSR ισοδύναμης διατομής χαλκού 95 mm^2)

m_2 : 0,98-0,83 (ανάλογα με την κατάσταση των αγωγών , με $m_2=1$ για ξηρασία)

δ : περίπου 0.91

Για τον ανωτέρω αγωγό ισχύει:

$$E = 0,83 \cdot 0,91 \cdot 30 [1 + (0,3 / 2,8)] = 25,15 \text{ kV / cm}$$

Για να συμβούν επομένως μερικές εκκενώσεις απαιτείται τουλάχιστον η ανωτέρω τιμή E . Για τη γεωμετρική σταθερά (ρ) του πεδίου μεταξύ δυο αγωγών (που απέχουν μεταξύ τους κατά d) ισχύει κατά τη βιβλιογραφία η σχέση :

$$\rho = (r + d) / r \quad (1.2.5.1-2)$$

Για μία απόσταση μεταξύ των αγωγών π.χ. 1000 mm είναι $\rho > 19,6$. Ο συντελεστής χρησιμοποίησης του πεδίου (η) είναι με βάση την ανωτέρω τιμή ρ :

$$\eta = [2 \cdot r \cdot \ln \{ 2 + (d / r) \}] / d = [2 \cdot 8,62 \cdot \ln \{ 2 + (1000 / 8,62) \}] / 1000 = 0,08 \quad (1.2.5.1-3)$$

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

$$E_1 = U / (\eta \cdot d) \cdot 20 / (0,08 \cdot 100) = 2,5 \text{ kV / cm} \quad (1.2.5.1-4)$$

Η τιμή E_1 , είναι περίπου 10 φορές μικρότερη από την τιμή E και συνεπώς , αποκλείεται η εκδήλωση μεταξύ των αγωγών : θορύβου, σπινθηρισμών ή άλλων μορφών μερικών εκκενώσεων , πολύ δε περισσότερο 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 .

1.2.5.2 Η εκδήλωση σπινθηρισμών στη γραμμή λόγω της καπναιθάλης

Η ειδική αγωγιμότητα του άνθρακα είναι $\rho_{αν} = 0,083$ έως $33,3 \mu\Omega \cdot m$ και του ατμοσφαιρικού αέρα $\rho > 1000 \text{ T}\Omega \cdot m$ [2] . Για αυτό , η καπναιθάλη δημιουργεί αγωγίμες διαδρομές στον αέρα , προκαλώντας έτσι την εκδήλωση σπινθηρισμών ή ακόμα και τη διάσπαση . Πράγματι, η αντίσταση μόνωσης (R) θεωρείται γενικά ως κατάλληλη όταν:

$$R > 1000 \Omega / V \quad (1.2.5.2)$$

Μία κυλινδρική π.χ. στήλη ατμοσφαιρικού αέρα διατομής 1 mm^2 μεταξύ των αγωγών έχει αντίσταση μόνωσης:

$$R = \rho \cdot l / A = 1,0025 \cdot 10^{15} / 10^{-6} = 10 \cdot 10^{20} \ \Omega \quad (1.2.5.2-1)$$

Επειδή η ανωτέρω τιμή υπερπληρεί την 1.2.5.2 , η εν λόγω στήλη είναι καταλληλότερη ως μόνωση.

Η τιμή του ρεύματος (I) κατά την εκδήλωση σπινθηρισμών είναι μερικά mA (π.χ. $1=10\text{mA}$) Έτσι , αν θεωρηθεί ότι η προηγούμενη στήλη έγινε μείγμα αέρος και καπναιθάλης , τότε η τιμή R2 της αντίστασης του μείγματος αυτού θα είναι:

$$R2 = U / I = 20000 / 10 \cdot 10^{-3} = 2 \cdot 10^6 \ \Omega \quad (1.2.5.2-2)$$

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 $R > 200000000 \ \Omega$).

Η ειδική αντίσταση ρ_2 του εν λόγω μείγματος αέρα καπναιθάλης είναι :

$$\rho_2 = R2 \cdot A / l = 20 \ \Omega / \text{m} \quad (1.2.5.2-3)$$

Από την ανωτέρω τιμή R2 (ή την ρ_2) συμπεραίνεται , ότι δεν υπάρχει πλέον σωστή μόνωση γιατί έχει δημιουργηθεί μία αγωγίμη διαδρομή μεταξύ των δύο αγωγών , με αποτέλεσμα την εκδήλωση σπινθηρισμών .

1.2.5.3 Η ελάχιστη τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου για την εκδήλωση σπινθηρισμών περί τους αγωγούς

Η ελάχιστη ένταση του ηλεκτρικού πεδίου για την έναρξη του φαινομένου Corona (δηλαδή των μερικών εκκενώσεων περί τους αγωγούς μίας γραμμής υψηλών τάσεων , όπως π.χ. της γραμμής των 66 kV) , υπό ατμοσφαιρικό αέρα δίνεται από την σχέση [1] :

$$E_{\text{min}} = m \cdot m_2 \cdot \delta \cdot 30 [1 + (0,3) / (\delta \cdot r)^{1/2}] \ \text{kV/cm} \quad (1.2.5.3-1)$$

Όπου : r : η ακτίνα του αγωγού σε mm ($r \sim 6,15 \text{ mm}$ για αγωγό τύπου ACSR ισοδύναμης διατομής χαλκού 50 mm)

m : 0,98-0,83 (ανάλογα με την κατάσταση των αγωγών , με $m_2 = 1$ για ξηρασία)

δ : δίνεται από την ακόλουθη σχέση :

$$\delta = 293 \rho / (1013 \cdot \theta) \quad (1.2.5.3-2)$$

όπου ρ : η πίεση (στην υπό εξέταση περίπτωση σε τυπικές συνθήκες υψομέτρου 200 m $\rho \sim 1,087 \text{ mbar}$)

θ : η θερμοκρασία σε K.

Για την υπό εξέταση περίπτωση είναι:

$$\delta = 293 \cdot 1,087 / (1013 \cdot 306,8) = 1,024 \ \text{mbar}/^\circ\text{K} \quad (1.2.5.3-3)$$

Με $m = 0,98$ και $m_2 = 1$ η τιμή E_{min} για την επίμαχη γραμμή είναι :

$$E_{\min} = 0,98 \cdot 1,024 \cdot 30 [1 + \{ 0,3 / (1,024 \cdot 6,15) \}] = 33,7 \text{ kV / cm} \quad (1.2.5.3-4)$$

Επομένως, για να συμβούν μερικές εκκενώσεις απαιτείται τουλάχιστον η ανωτέρω τιμή E_{\min} . Παρατίθενται στη συνέχεια τα αποτελέσματα από τον υπολογισμό πεδίου σε περίπτωση που μεταξύ αγωγού και γης παρεμβάλλεται δένδρο σε απόσταση 10 cm από την γραμμή σύμφωνα με την βιβλιογραφία [1] :

Για τον υπολογισμό του ηλεκτρικού πεδίου της διάταξης « αγωγός -διάκενο αέρα 10 cm - δέντρο κωνοειδούς μορφής ύψους 12,5 m – γη » , χρησιμοποιήθηκε ειδικό πρόγραμμα στον ηλεκτρονικό υπολογιστή . Ακολουθώντας με βάση τον υπολογισμό αυτό προτείνεται , μέσω γνωστών σχέσεων της κλασικής ηλεκτρολογίας , μία προσέγγιση των τιμών του πεδίου που ενδιαφέρουν ιδιαίτερα , ώστε να έχει κανείς άμεσα μία ικανοποιητική εκτίμηση παρόμοιων προβλημάτων στην πράξη .

Με τα δεδομένα που προαναφέρθηκαν προέκυψε ότι:

- 1) το ηλεκτρικό πεδίο στον αέρα (και μάλιστα στη θέση του αγωγού) είναι: 1,8 kV / cm
- 2) το ηλεκτρικό πεδίο στην κορυφή του δένδρου (δηλαδή τη δυσμενέστερη θέση) είναι 0,7 kV /cm

1.2.5.4 Η αδυναμία εκδήλωσης σπινθηρισμών σε γυμνούς αγωγούς χαμηλής τάσης

Στις γραμμές χαμηλής τάσης (380 V / 220 V) για την απόσταση μεταξύ γυμνών αγωγών , ισχύει $d = 30 \text{ cm}$. Αν υποθεθεί για λόγους σύγκρισης των αποτελεσμάτων , ότι πρόκειται για τους γυμνούς αγωγούς , που αναφέρονται στην παράγραφο 1.2.5.1 , τότε είναι $\rho > 19,6$ και $\eta = 0,02$. Επομένως η πεδιακή ένταση E_1 για τάση $U = 0,38 \text{ kV}$ έχει την τιμή:

$$\begin{aligned} E_1 &= U / (\eta \cdot d) && (1.2.5.4-1) \\ &= 0,38 / (0,02 \cdot 30) \\ &= 0,0002 \text{ kV / cm} \end{aligned}$$

Δηλαδή ισχύει ότι:

$$E = 1,25 \cdot 108 \cdot E_1 \quad (1.2.5.4-2)$$

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 σύννηθες 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 .

Όπως προκύπτει από πειράματα , επιστημονικές εργασίες και βιβλία [1,2,3] , δεν μπορούν γενικά να συμβούν σπινθηρισμοί και τήγματα αλουμινίου από επαφή μεταξύ των εξ αλουμινίου γυμνών αγωγών των γραμμών διανομής χαμηλής τάσης ενώ δεν εκδηλώνονται στους αγωγούς διανομής χαμηλής τάσης ηλεκτρικά τόξα οφειλόμενα σε ηλεκτρικές εκκενώσεις . Από επιστημονικές εργασίες [3] προκύπτει , ότι σε υποθετική δημιουργία τηγμάτων αλουμινίου από γραμμές διανομής , τα τήγματα αλουμινίου δεν θα προκαλούσαν πυρκαγιά γιατί κατά την άφιξή τους στο έδαφος έχουν ουσιαστικά αποπυρακτωθεί .

Συνεπώς , ακόμα και αν θεωρηθεί ότι δημιουργήθηκαν (άγνωστο πως) τήγματα αλουμινίου σε μία γραμμή , δεν θα μπορούσαν να προκαλέσουν πυρκαγιά αφού από τα μέσα προστασίας διακόπτεται άμεσα το βραχυκύκλωμα και δεν υπάρχει διαθέσιμος χρόνος για την αύξηση της θερμοκρασίας) [3] .

1.2.6 Οι αποστάσεις μόνωσης

Οι γραμμές μεταφοράς και διανομής έχουν προδιαγεγραμμένο βέλος κάμψης για λόγους μηχανικής αντοχής τους στις διάφορες καιρικές συνθήκες . Για την αξιολόγηση της μονωτικής ικανότητας μεταξύ των αγωγών μιας γραμμής μέσης ή υψηλής τάσης σε περιβάλλον ατμοσφαιρικού αέρα , εξετάζεται ακολούθως η ικανότητα μόνωσης στην περίπτωση της δυσμενέστερης διάταξης ηλεκτροδίων των πρακτικών εφαρμογών που είναι η διάταξη << ακίδα – πλάκα >> .

Για μέση - υψηλή τάση ισχύει :

$$d > (0,935-0,99) U / Ed \quad (1.2.6)$$

όπου : U : η ενεργός τιμή της τάσης και

Ed : η ειδική ένταση του ηλεκτρικού πεδίου

Γραμμή	d σε cm	Απόσταση αγωγών στις γραμμές	Σύνηθες ύψος γραμμής
MT 20 kV	5,34 ως 5,66	85 cm ως 125 cm	10 m

Πίνακας 1.2.6-1 : Απόσταση μεταξύ αγωγών σε γραμμές Μέσης Τάσης

Όπως διαπιστώνεται , από τον ανωτέρω πίνακα , οι αποστάσεις μόνωσης στις γραμμές Μέσης Τάσης θα πρέπει να χαρακτηριστούν ως τεράστιες .

1.2.6.1 Αποστάσεις μόνωσης στις γραμμές χαμηλής τάσης

Για τα φαινόμενα ιονισμού του αέρα σε μικρά διάκενα (λόγω της τάσης των 400 V) , ισχύει κατά τη βιβλιογραφία [1] η θεωρία Townsend . Η συνθήκη ιονισμού κατά την α-γ θεωρία (που είναι κυρίως ο μηχανισμός δημιουργίας ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων κατά Townsend) , δίνεται από την σχέση :

$$\alpha = \ln (1+(1/\gamma)) \quad (1.2.6.1)$$

όπου : α : τα παραγόμενα ζεύγη ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων (ελεύθερα ηλεκτρόνια και ισάριθμα θετικά ιόντα)

d : η απόσταση του διακένου

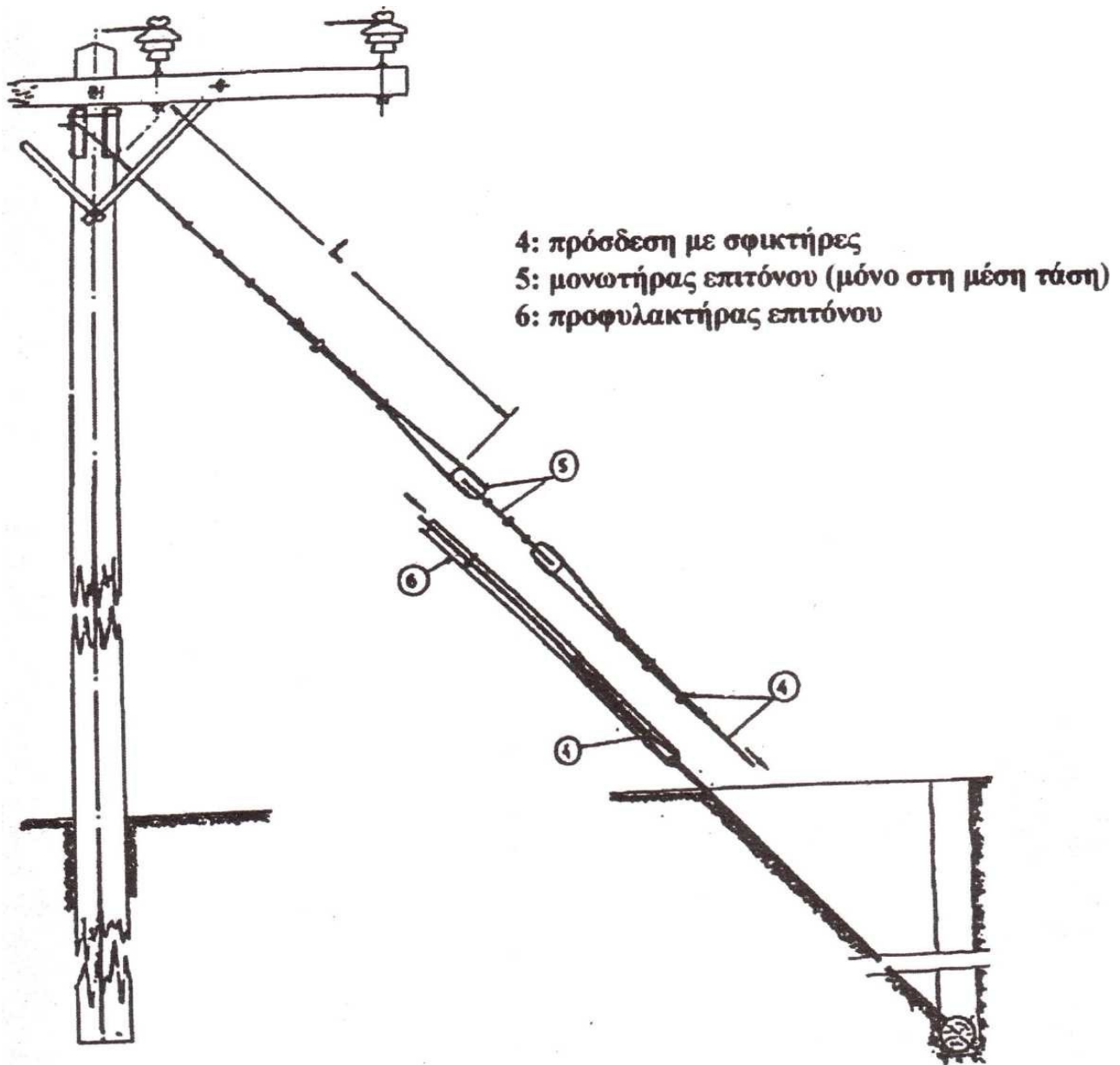
γ : ο συντελεστής ιονισμού (για το χαλκό είναι $\gamma = 0,025$)

οπότε η ως άνω σχέση γίνεται:

$$\alpha = \ln (1+(1/0,025))=3,71 \quad (1.2.6.1-1)$$

Επομένως για $d > 3,7$ mm δεν συμβαίνει ιονισμός (γιατί είναι $\alpha < 1$) , που σημαίνει ότι η απόσταση μόνωσης π.χ. των 30 cm μεταξύ των γυμνών αγωγών των γραμμών διανομής χαμηλής τάσης πρέπει να χαρακτηριστούν ως τεράστιες .

Για αποφυγή διαρροών ρεύματος προς το τμήμα του επιτόνου μεταξύ μονωτήρα και γης , μελετούμε την χωροταξική τοποθέτηση του επιτόνου . Η θέση του μονωτήρα πρέπει να είναι τέτοια ώστε , σε περίπτωση πτώσης του πλησιέστερου αγωγού προς τον επίτονο (λόγω π.χ θραύσης του μονωτήρα ή αποκοπής της τραβέρσας στη θέση του μονωτήρα κ.λ.π.) να αποκλείεται η επαφή του με το τμήμα του επιτόνου μεταξύ μονωτήρα και γης .

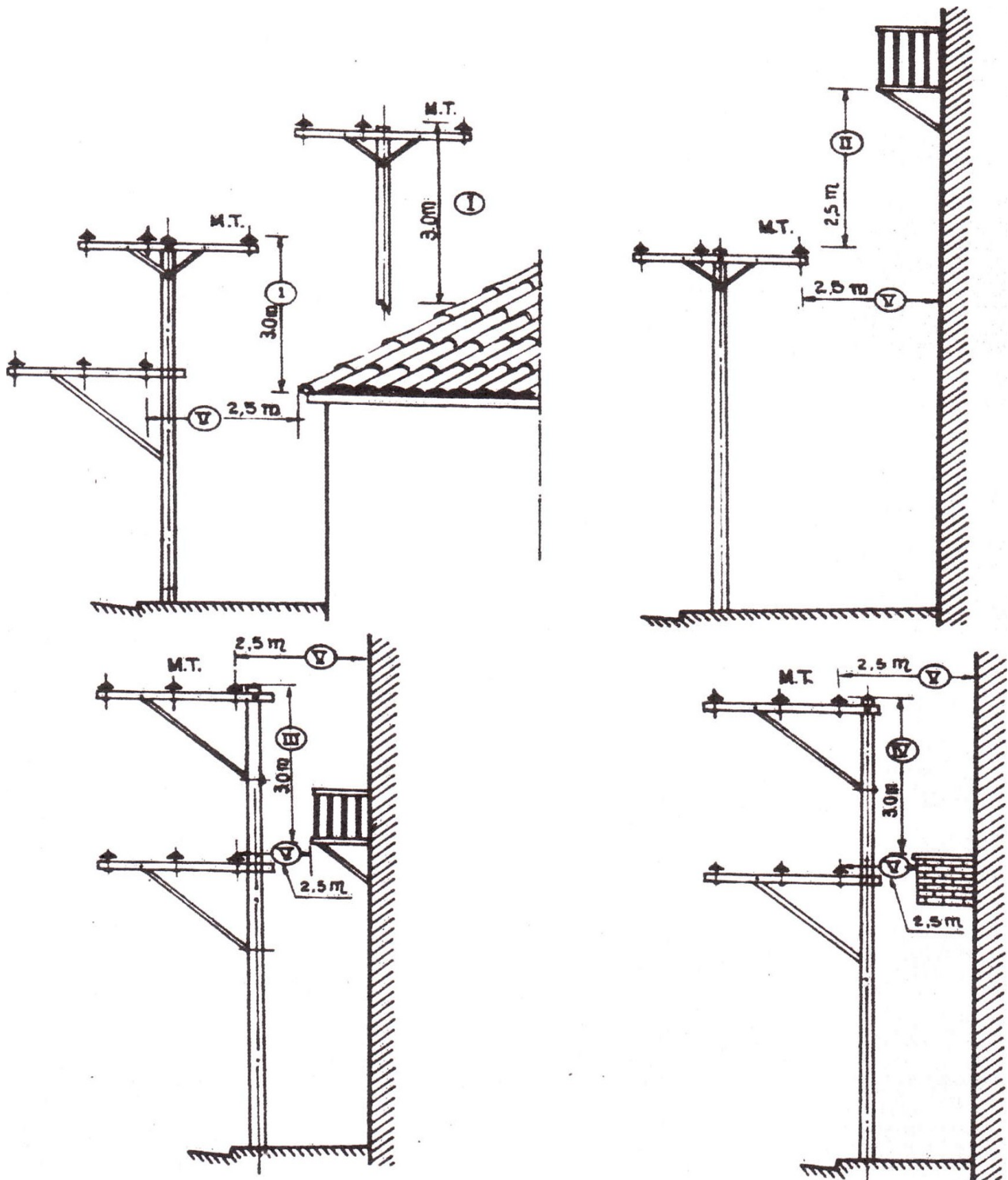


Σχήμα 1.2.6.1 : Παράδειγμα απεικόνισης στύλου και επιτόνου

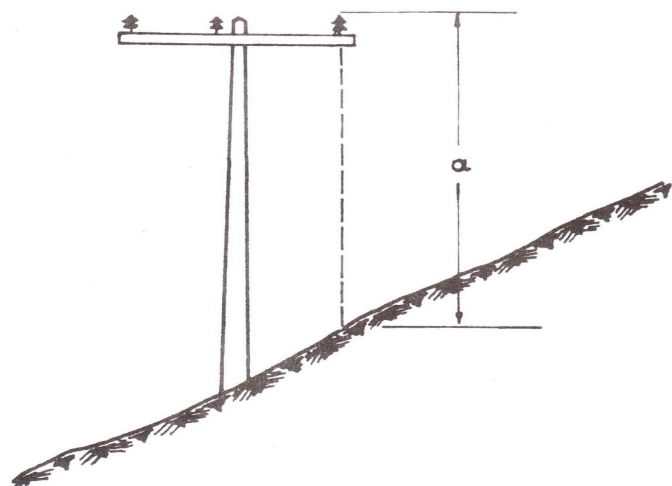
Όσον αφορά την διαρροή ρεύματος από τους αγωγούς προς δένδρα ή ξύλινους στύλους , στη χαμηλή τάση το ξύλο (σε περιβάλλον ατμοσφαιρικού αέρα) είτε ξερό είτε χλωρό είτε βρεγμένο είτε στεγνό , είναι μονωτής. Στη μέση τάση , το ξύλο (σε περιβάλλον ατμοσφαιρικού αέρα) δεν είναι μονωτής αλλά διευκολύνει την διαρροή ρεύματος . Ως παράδειγμα , αναφέρονται τα καψίματα σε ξύλινες τραβέρσες , τα οποία οφείλονται σε διαρροές ρεύματος λόγω σπινθηρισμών στους μονωτήρες που από το μπουλόνι στήριξης των μονωτήρων περνούν στην ξύλινη τραβέρσα .

1.2.6.2 Αποστάσεις γυμνών αγωγών μέσης από κτίρια και από επικλινή εδάφη

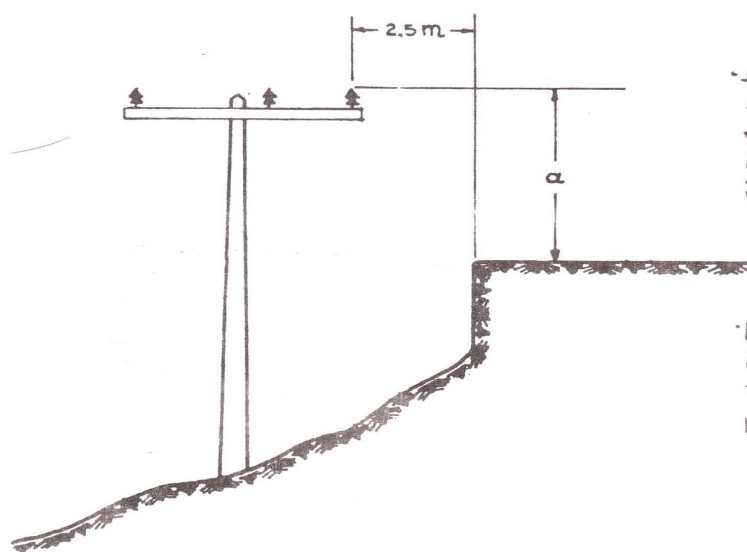
Στα σχήματα 1.2.6.2-1 και 1.2.6.2-2 , δίνονται αντίστοιχα (σύμφωνα με το τεχνικό εγχειρίδιο των τυποποιημένων κατασκευών της ΔΕΗ) οι αποστάσεις γυμνών αγωγών μέσης τάσης από κτίρια και από επικλινή εδάφη.



Σχήμα 1.2.6.2-1 : Αποστάσεις γυμνών αγωγών μέσης τάσης από κτίρια (σύμφωνα με το εγχειρίδιο τυποποιημένων κατασκευών της Δ.Ε.Η. , σελ. C7)



$a = 6,00\text{m}$ ἔξ' ὅσον ἡ γραμμὴ
εἶναι προβεβηθῆ σε ὄχηματα
 $a = 4,50\text{m}$ ἔξ' ὅσον ἡ γραμμὴ
εἶναι προβεβηθῆ μόνον σε πεζοὺς



Ἡ κατασκευὴ ἀνταποκρίνεται
στοὺς κανονισμοὺς ἔξ' ὅσον
τηρεῖται ἡ μὰ ἀπὸ τῆς δύο
ἀποστάσεις : 2,50μ ὁριζόντια
ἢ a κατακόρυφα.

Ἡ ἀπόσταση a νοεῖται
ἐκείνη τοῦ κατώτερου σημείου
τοῦ ἀγωγοῦ ἀπὸ τὸ ἔδαφος,
μετρούμενη κατακόρυφα.

Σχήμα 1.2.6.2-2: Αποστάσεις γυμνῶν ἀγωγῶν μέσης τάσης ἀπὸ επικλινῆς ἔδαφος (σύμφωνα με τὸ εγχειρίδιο τυποποιημένων κατασκευῶν τῆς Δ.Ε.Η. , σελ . C 14)

Ὅπως προκύπτει ἀπὸ τοὺς υπολογισμοὺς , οἱ ἀποστάσεις εἶναι πολὺ μεγαλύτερες ἀπὸ τὴν ελάχιστη ἀπόσταση μόνωσης . Οἱ ἀποστάσεις εἶναι μὲν πολὺ ικανοποιητικὲς , ὡς πρὸς τὴν διηλεκτρικὴ ἀντοχὴ ἀλλὰ ἀπαιτεῖται οπωσδήποτε μεγάλη προσοχή , ὥστε νὰ μὴν προσεγγίζονται οἱ γραμμὲς ἀπὸ ἀπόσταση , ὅπως π.χ. μέσω μεταλλικοῦ σωλήνα ἢ μεταλλικῆς ράβδου ἢ κοντάρι ἀλουμινίου (που χρησιμοποιεῖται σε χρωματισμοὺς τοίχων) .

Επίσης , κίνδυνος προσέγγισης τῶν ἀγωγῶν μπορεῖ νὰ συμβεῖ ἀπὸ βαριὰ οχήματα (μπετονιέρες , πρέσες , κ.λ.π.) , ὁ ὁποῖος αυξάνει , ὅταν μειώνονται με ἐπιχωματώσεις οἱ ἀποστάσεις τῶν γραμμῶν ἀπὸ τὸ ἔδαφος . Τα συνεργεῖα τῶν εταιρειῶν ηλεκτρισμοῦ δὲν μποροῦν νὰ εντοπίσουν επικίνδυνες θέσεις στο δίκτυο , γι' αὐτὸ πρὸς ἀποφυγὴ ατυχημάτων , πρέπει νὰ εἰδοποιεῖται ἡ εταιρεία ηλεκτρισμοῦ τόσο ἀπὸ τοὺς τεχνικοὺς ασφαλείας τῶν διαφόρων ἐπιχειρήσεων που πραγματοποιοῦν ἔργα στο περιβάλλον τῶν γραμμῶν , ὅσο καὶ ἀπὸ τοὺς ιδιοκτῆτες τῶν ἔργων .

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

Σύμφωνα με το άρθρο 234,Γ,4,α1, πίνακας 4 του Κανονισμού για την Εγκατάσταση και Συντήρηση Υπαίθριων Γραμμών Ηλεκτρικής Ενέργειας (Κ.Ε.Σ.Υ.Γ.Η.Ε) , που αποτελεί Νόμο του Κράτους (ΦΕΚ 608/Β/6-10-1967 , όπως τροποποιήθηκε με τα ΦΕΚ 476/Β/25-7-1969 , ΦΕΚ 829/Β/19-12-1969 και ΦΕΚ 687/Β/24-8-1971) , η ελάχιστη απόσταση ασφαλείας για άνοιγμα γραμμής (δηλαδή απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών στύλων) $L_1 = 45$ μέτρα , υπό θερμοκρασία περιβάλλοντος $16\text{ }^\circ\text{C}$ είναι :

$$H_{\min 45\text{m}, 16\text{ }^\circ\text{C}} = 2,5\text{m} \quad (1.2.6.3-1)$$

όπου : $H_{\min 45\text{m}, 16\text{ }^\circ\text{C}}$: η ελάχιστη απόσταση ασφαλείας για άνοιγμα γραμμής L_1 ως 45 m , υπό $16\text{ }^\circ\text{C}$

Σύμφωνα με το άρθρο 234,Γ,4,2 του παραπάνω Κανονισμού (όπως αυτό παραπέμπει στο άρθρο 232,Β, 1 για ανοίγματα $L_2 > 45\text{ m}$ πρέπει να γίνεται προσαύξηση της ελάχιστης απόστασης ασφαλείας κατά 1 εκατοστό του μέτρου για κάθε μέτρο άνω των 45 m . Ισχύει δηλαδή (για L_2 σε m) η σχέση :

$$H_{\min 160\text{ }^\circ\text{C}} = 2,5 + (L_2 - 45) / 100\text{ m} \quad (1.2.6.3.2)$$

όπου : $H_{\min 160\text{ }^\circ\text{C}}$: η ελάχιστη απόσταση ασφαλείας για άνοιγμα γραμμής $L_2 > 45\text{ m}$, υπό $16\text{ }^\circ\text{C}$

1.2.6.4 Τάξη μεγέθους της υποθετικής τάσης σε γραμμή διανομής μέσης τάσης και της αντίστοιχης προς αυτή υποθετικής τάσης διάσπασης από αγωγό προς γη , ανάλογα με το ύψος των αγωγών από το έδαφος

Στο περιβάλλον γραμμών διανομής μέσης τάσης (20 kV) , έχει διατυπωθεί ορισμένες φορές ο ισχυρισμός εκδήλωσης ηλεκτρικού τόξου από τους αγωγούς προς το έδαφος . Θα έπρεπε η τάση της γραμμής να ήταν πολλαπλάσια από τα 20 kV [2] .

Σύμφωνα με τον πίνακα 1.2.6.4 , για απόσταση π.χ. 10 μέτρων μεταξύ αγωγών και εδάφους (που είναι μία σύνηθης απόσταση ανάρτησης εναέριων αγωγών μέσης τάσης από το έδαφος) , θα έπρεπε να ήταν η τάση της γραμμής 2.768 kV , δηλαδή τάση περίπου 138 φορές μεγαλύτερη από την τάση των 20 kV του δικτύου μέσης τάσης ή τάση περίπου 7 φορές μεγαλύτερη από τη μέγιστη δυνατή υψηλή τάση των 400 kV του ελληνικού δικτύου μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας μέσω εναέριων γραμμών με πυλώνες .

Πρέπει να σημειωθεί ότι οι τιμές που δίνονται στον πίνακα αφορούν τη δυσμενέστερη περίπτωση στην πράξη , γιατί κατά τον υπολογισμό του πεδίου μεταξύ αγωγού και γης , θεωρήθηκε ότι ο αγωγός ήταν ένας κλώνος αλουμινίου κομμένος και στραμμένος προς γη , ώστε να πρόκειται για το ηλεκτρικό πεδίο μεταξύ του κομμένου κλώνου (υπό τη δυσμενή μορφή της ακίδας σε βάρος της γραμμής) και του εδάφους (που αντιστοιχεί σε ηλεκτρόδιο υπό μορφή πλάκας) .

Αν αντί της ακίδας , θεωρηθεί ότι πρόκειται για το ηλεκτρικό πεδίο μεταξύ κυλινδρικού αγωγού και γης , τότε οι τιμές U_{gr} και U_d είναι πολύ μεγαλύτερες από εκείνες που δίνονται στον πίνακα 1.2.6-4 .

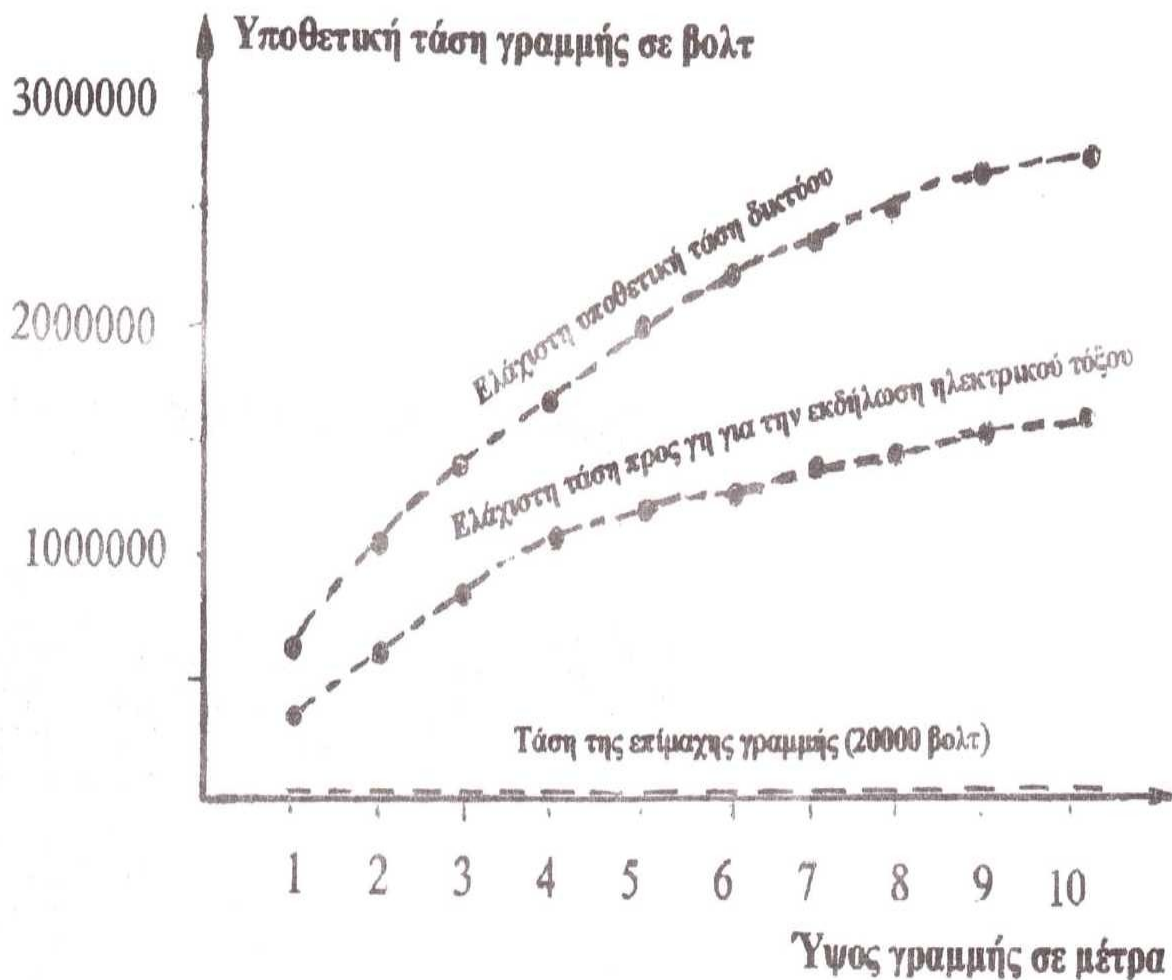
Εκτός των ανωτέρω , επισημαίνεται ότι στην εν λόγω γραμμή μέσης τάσης , όχι μόνο δεν θα μπορούσε να εκδηλωθεί ηλεκτρικό τόξο προς γη αλλά ότι θα ήταν αδύνατο να εμφανιστούν σπινθηρισμοί .

H (m)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
U _{γρ} (kV)	675	1073	1445	1748	2076	2267	2420	2595	2665	2768
U _d (kV)	390	620	835	1010	1200	1310	1400	1500	1540	1600

Πίνακας 1.2.6.4 : Τάξη μεγέθους της υποθετικής τάσης σε γραμμή διανομής μέσης τάσης (U_{γρ}) και της αντίστοιχης προς αυτή υποθετικής τάσης διάσπασης από αγωγό προς γη (U_d) , ανάλογα με το ύψος του αγωγού

όπου : U_{γρ} : υποθετική τάση γραμμής (πολική τάση)
 U_d : τάση διάσπασης προς γη (υποθετική φασική τάση γραμμής)
 H : απόσταση αγωγών από το έδαφος (ύψος γραμμής)

Στο σχήμα 1.2.6.4 δίνονται οι γραφικές παραστάσεις των τάσεων U_{γρ} και U_d ανάλογα με το ύψος της γραμμής (1-10 μέτρα) καθώς και η πολύ μικρότερη αυτών τάση των 20 kV που υπάρχει στη μέση τάση .



Σχήμα 1.2.6.4 : Ελάχιστες τιμές της υποθετικής τάσης της γραμμής και της αντίστοιχης προς αυτήν τάσης προς γη για την εκδήλωση ηλεκτρικού τόξου.

Πράγματι , στον πίνακα 1.2.6.4-1 , δίνονται για απόσταση 10 μέτρων μεταξύ αγωγών και εδάφους [1] :

α) η τάξη μεγέθους της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου, (που έχει υπολογιστεί μέσω προγράμματος σε ηλεκτρονικό υπολογιστή) για το ηλεκτρικό πεδίο μεταξύ αγωγών ACSR της γραμμής διανομής των 20 kV και της γης ($E_{αγ-γη}$)

β) η ελάχιστη απαιτούμενη ένταση του ηλεκτρικού πεδίου για την εκδήλωση σπινθηρισμών ($E_{Σπινθ}$) , από όπου προκύπτει ότι αποκλείεται παντελώς η εκδήλωση σπινθηρισμών αφού η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου της διάταξης ($E_{αγ-γη}$) είναι πολύ μικρότερη από την ελάχιστη απαιτούμενη για την εκδήλωση σπινθηρισμών ($E_{Σπινθ}$) .

Γι' αυτό, αποκλείεται κατά μείζονα λόγο και η εκδήλωση ηλεκτρικού τόξου (διάσπαση) μεταξύ αγωγών και γης.

ACSR [mm ²]	Διάμετρος [mm]	$E_{Σπινθ}$ [kV/cm]	$E_{αγ-γη}$ [kV/cm]
16	6,90	21,78	3,78
35	10,32	20,94	2,66
90	17,24	20,37	1,71

Πίνακας 1.2.6.4-1 : Ελάχιστη απαιτούμενη ένταση ηλεκτρικού πεδίου μεταξύ αγωγών μέσης τάσης για την έναρξη σπινθηρισμών και ελάχιστη απαιτούμενη ένταση του ηλεκτρικού πεδίου μεταξύ αγωγού και γης για διάσπαση του αέρα ανάμεσα τους

όπου : $E_{αγ-γη}$: Τάξη μεγέθους της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου μεταξύ των αγωγών ACSR της γραμμής των 20 kV (σε ύψος 10 μέτρων) και της γης

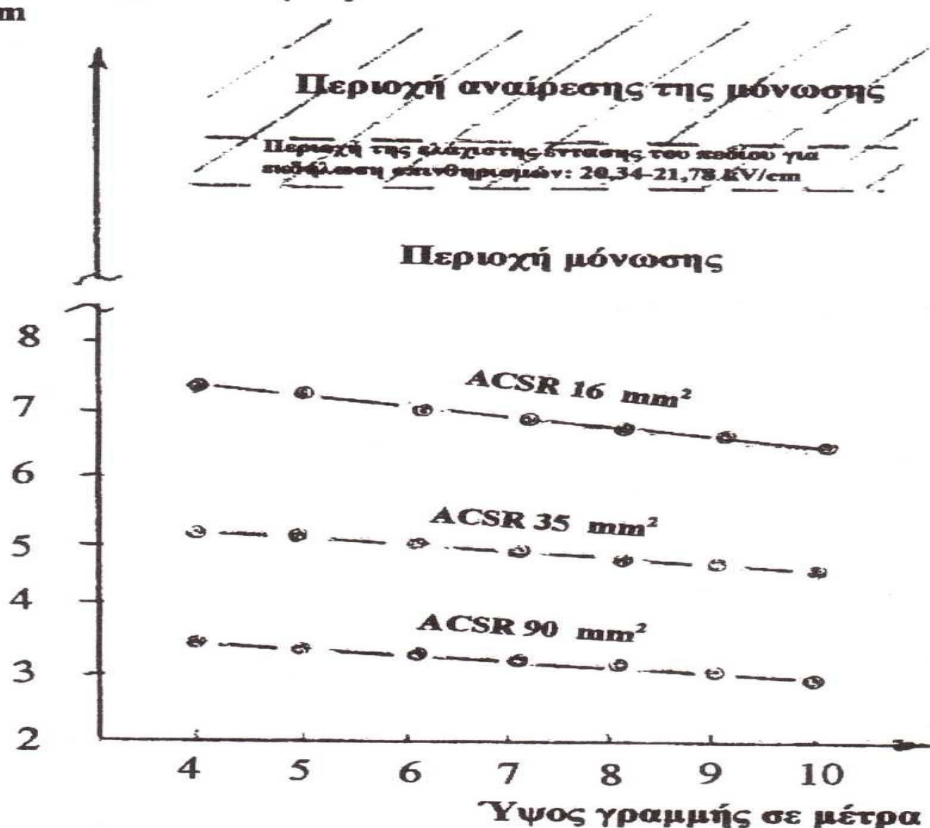
$E_{Σπινθ}$: Ελάχιστη απαιτούμενη ένταση του ηλεκτρικού πεδίου για την εκδήλωση σπινθηρισμών

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι τιμές $E_{αγ-γη}$ που δίνονται στον πίνακα 1.2.6.4-1 , αφορούν την δυσμενέστερη περίπτωση , στην πράξη , γιατί θεωρήθηκε ότι στον αγωγό υπήρχε ένας κλώνος , κομμένος και στραμμένος προς τη γη , ώστε να πρόκειται για το ηλεκτρικό πεδίο μεταξύ κομμένου κλώνου (υπό τη δυσμενή μορφή της ακίδας σε βάρος της γραμμής) και εδάφους (σαν να πρόκειται για ηλεκτρόδιο υπό μορφή πλάκας σε βάρος επίσης της γραμμής) .

Αν αντί της ακίδας , θεωρηθεί ότι επρόκειτο για το ηλεκτρικό πεδίο μεταξύ κυλινδρικών αγωγών προς γη , τότε η τιμή $E_{αγ-γη}$ θα ήταν πολύ μικρότερη από εκείνες που δίνονται στον πίνακα και ως εκ τούτου θα αποκλείονταν , κατά μείζονα λόγο , η εκδήλωση σπινθηρισμών .

Τέλος , στο σχήμα 1.2.6.4-1 δίνονται , (με βάση τους υπολογισμούς σε ηλεκτρονικό υπολογιστή) , οι γραφικές παραστάσεις για την τάξη μεγέθους της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου μεταξύ γραμμής και εδάφους , ανάλογα με τη διατομή των αγωγών και το ύψος της γραμμής , από όπου προκύπτει ότι η εν λόγω ένταση του πεδίου είναι ασήμαντη , συγκριτικά προς την απαιτούμενη ελάχιστη τιμή του πεδίου για την έναρξη των σπινθηρισμών , (η οποία είναι 20,34 kV / cm έως 21,78 kV / cm) . Γι' αυτό , αποκλείεται παντελώς να είχαν εκδηλωθεί σπινθηρισμοί προς γη , πολύ δε περισσότερο δεν μπορούσε να εκδηλωθεί ηλεκτρικό τόξο προς γη .

**Ένταση ηλεκτρικού πεδίου
μεταξύ γραμμής και εδάφους
σε kV/cm**



Σχήμα 1.2.6.4-1 : Τάξη μεγέθους της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου μεταξύ γραμμής 20 kV και εδάφους , ανάλογα με το ύψος των αγωγών από το έδαφος

Σημείωση : Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου είναι ασήμαντη ως προς την ελάχιστη απαιτούμενη για την εκδήλωση σπινθηρισμών αποκλείοντας εκδήλωση ηλεκτρικού τόξου προς γη.

1.3 Επιθεώρηση – εργασίες συντήρησης στο δίκτυο

Οι εναέρια γραμμές χαμηλής και μέσης τάσης μελετούνται και κατασκευάζονται με αυστηρούς κανονισμούς , τόσο στην Ελλάδα όσο και στις άλλες χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης , ώστε να μην αναιρούνται η μηχανική , η ηλεκτρική και η διηλεκτρική αντοχή τους , από ετήσια σε ετήσια επιθεώρηση .

Σύμφωνα με τις απαιτήσεις της σχετικής νομοθεσίας , που παρουσιάζεται στον Κανονισμό Εγκατάστασης Συντήρησης Υπαιθρίων Γραμμών Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΚΕΣΥΓΗΕ, άρθρο 281) , διενεργείται , σε ετήσια βάση κλάδεμα , των δέντρων που έρχονται σε επαφή ή γειτνιάζουν με εναέρια γραμμές χαμηλής τάσης και μέσης τάσης . Με το κλάδεμα αποφεύγονται επαφές των κλάδων των δέντρων με τις εναέρια εγκαταστάσεις που θα είχαν ως αποτέλεσμα βλάβες στο δίκτυο και όχληση των καταναλωτών .

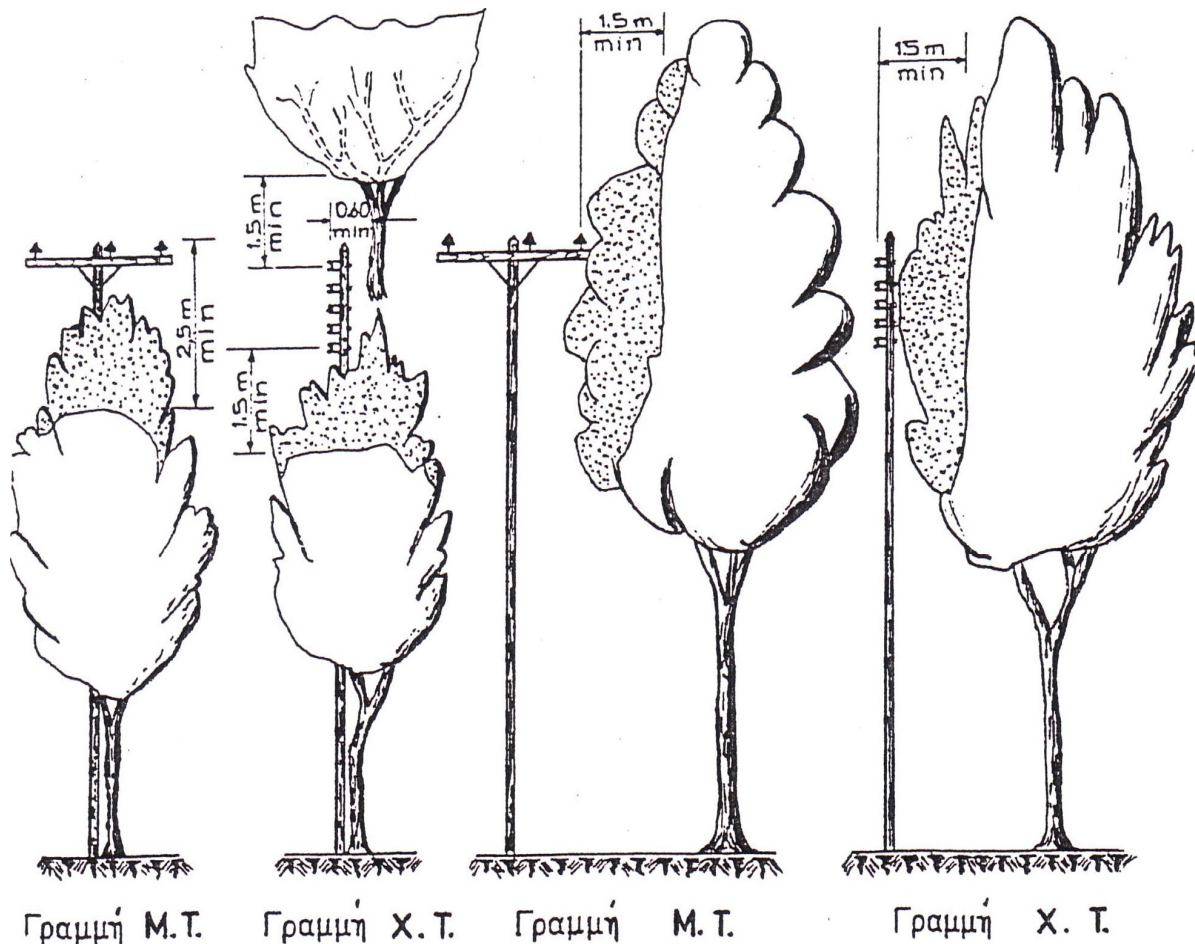
Σύμφωνα με τον ΚΕΣΥΓΗΕ , που διέπει τη λειτουργία των εναέριων δικτύων , οι αποστάσεις ασφαλείας που πρέπει να τηρούνται , αφορούν αποστάσεις από τους ηλεκτροφόρους αγωγούς (και όχι από τους στύλους πάνω στους οποίους είναι εγκατεστημένη η γραμμή μέσης τάσης) . Η ετήσια επιθεώρηση που διενεργείται (κατά τις οδηγίες Νο 9 και Νο 22 της ΔΕΗ) είναι ένας οπτικός έλεγχος με κυάλια που αφορά την κατάσταση των αγωγών , των μονωτήρων (καθαλατώσεις , σκόνη κτλ) και των λοιπών στοιχείων του δικτύου (διακόπτες , συσφίξεις επαφών κτλ) . Εκτός από τον οπτικό έλεγχο , γίνονται μετρήσεις με τη θερμοκάμερα , σε σημεία

σύνδεσης των αγωγών και γενικά σε στατικές επαφές , από όπου διαπιστώνεται αν υπάρχει πρόβλημα μεγάλων αντιστάσεων διάβασης . Όταν η θερμοκρασία είναι αυξημένη , τότε ο εν λόγω ηλεκτρικός σύνδεσμος έχει μεγάλη αντίσταση και ενδέχεται να προκαλέσει σφάλματα λειτουργίας λόγω κακών επαφών ή λιώσιμο των επαφών .

1.3.1 Αποστάσεις γυμνών αγωγών διανομής από δέντρα - κλάδεμα δένδρων

Η εμπλοκή κλαδιών δέντρων με αγωγούς χαμηλής τάσης δεν δημιουργεί προβλήματα διαρροής ρεύματος (το ξύλο είναι μονωτής στην χαμηλή τάση) . Δεν συμβαίνει όμως το ίδιο με τους γυμνούς αγωγούς μέσης τάσης . Ανεξαρτήτως των ανωτέρω , οι γυμνοί αγωγοί του δικτύου διανομής δεν πρέπει να έρχονται σε επαφή με δέντρα γιατί υπάρχει κίνδυνος αποκοπής τους . Στο σχήμα δίνονται, σύμφωνα με το εγχειρίδιο τυποποιημένων κατασκευών της ΔΕΗ (σελ. G-2) οι ελάχιστες αποστάσεις κλαδέματος των δέντρων, που πρέπει να γίνονται ετησίως .

Ακολουθώς , στο σχήμα 1.3.1 , οπτικοποιείται η οδηγία της Δ.Ε.Η. για το κλάδεμα των δένδρων που γειτνιάζουν με το δίκτυο διανομής και όσον αφορά ανοίγματα γραμμής μεταξύ στύλων 140 m για ελαφρά επιφόρτιση , 110 m για μέτρια επιφόρτιση και 95 m για βαριά επιφόρτιση .



Σχήμα 1.3.1 : Απλοποιημένη παράσταση για το κλάδεμα δένδρων που γειτνιάζουν σε αγωγούς διανομής σύμφωνα με την σελίδα G-2 των τυποποιημένων κατασκευών της ΔΕΗ

Σημείωση : Αναγράφονται οι ελάχιστες αποστάσεις βλάστησης- αγωγών ενώ τα γραμμοσκιασμένα μέρη του δένδρου χρήζουν κλαδέματος .

Όπως προκύπτει από τις σχέσεις των παραγράφων 1.2.6 και 1.2.6.1 , η απόσταση μεταξύ αγωγών ή μεταξύ αγωγών και γης είναι ο κύριος παράγοντας που επηρεάζει την πιθανότητα διάσπασης του αέρα μεταξύ τους .

Επίσης , στην παράγραφο 1.2.3 , που αναφέρεται στις διαχωριστικές επιφάνειες μεταξύ διηλεκτρικών γίνεται αντιληπτό ότι όταν παρεμβάλλεται και δεύτερο διηλεκτρικό μεταξύ της διαδρομής << αγωγός-αέρας-γη >> , η απόσταση μεταξύ αγωγού και διηλεκτρικού είναι πολύ σημαντική .

Εξαρτάται δε και από την φύση και την μονωτική ικανότητα του διηλεκτρικού που παρεμβάλλεται . Όταν το διηλεκτρικό είναι κάποια μορφή βλάστησης , τότε πρόκειται για ένα μίγμα υλικών (π.χ. σκόνη , δρόσος , επικαθίσεις επί των φυλλωμάτων) και η πιθανότητα διάσπασης του ή διαρροής ρεύματος επί της επιφάνειάς του , είναι μεγαλύτερη , όσο μειώνεται η απόσταση που διανύει το ρεύμα πάνω στην βλάστηση και εξαρτάται από το είδος της βλάστησης και τις καιρικές συνθήκες καθώς και την ρύπανση και τις επικαθίσεις επί αυτής .

Η Δ.Ε.Η. κατηγοριοποιεί τα συνήθη είδη δένδρων της ελληνικής χλωρίδας ανάλογα με το ρυθμό ανάπτυξης τους και ορίζει την ελάχιστη απόσταση ασφαλείας που θα πρέπει να τηρείται από το τεχνικό προσωπικό κατά την εκτέλεση εργασιών κλαδέματος .

Στον πίνακα 1.3.1-1 δίνονται οι αποστάσεις ασφαλείας που πρέπει να τηρούνται κατά το πέρας των εργασιών κλαδέματος .

ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ ΔΕΝΔΡΟΥ	ΔΙΚΤΥΑ Μ.Τ.		ΔΙΚΤΥΑ Χ.Τ.
	ΓΥΜΝΟΙ ΑΓΩΓΟΙ	ΓΥΜΝΟΙ ΑΓΩΓΟΙ	ΚΑΛΩΔΙΑ (ΣΥΝΕΣΤΡΑΜΜΕΝΑ ΚΑΙ ΠΑΡΟΧΕΣ)
	ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΔΕΝΔΡΩΝ-ΑΓΩΓΩΝ ΜΕΤΑ ΤΟ ΚΛΑΔΕΜΑ + ΠΡΟΣΑΥΞΗΣΗ (m)		
Καρποφόρα δέντρα (Μηλιές , αχλαδιές , ροδακινιές , ελιές , αμυγδαλιές , κλπ)	2 + 0,5	1 + 0,5	0,5 + 0,5
Μη καρποφόρα δέντρα εφάμιλλης ανάπτυξης με : Πεύκα , δρυς	2 + 0,5	0,5 + 0,5	0,1 + 0,5
Μη καρποφόρα δέντρα εφάμιλλης ανάπτυξης με : Κυπαρίσσια , λεύκες , πλατάνια κλπ.	2 + 1	0,5 + 1	0,1 + 1
Μη καρποφόρα δέντρα εφάμιλλης ανάπτυξης με : Ευκαλύπτους	2 + 1,5	0,5 + 1,5	0,1 + 1,5

Πίνακας 1.3.1-1 : Ελάχιστες κατακόρυφες αποστάσεις που πρέπει να επιτυγχάνονται κατά το κλάδεμα ανάμεσα στα εναέρια δίκτυα Διανομής και στα δένδρα

Οι οριζόντιες αποστάσεις (0,5 m , 1 m και 1.5 m) αντιστοιχούν σε κλάδεμα μια φορά το χρόνο . Για κλάδεμα ανά εξάμηνο οι αποστάσεις θα μειώνονται στο μισό (0,25 m 0,5 m και 0,75 m) , για κλάδεμα ανα 2 χρόνια θα διπλασιάζονται (1, 2, και 3 κοκ.) .

Η Προσαύξηση οριζόντιας απόστασης (X) μεταξύ εναέριων αγωγών υπεραστικών και αρδευτικών δικτύων Διανομής και δένδρων δίδεται στον πίνακα 1.3.1-3 , για ανοίγματα:

- 1) 140 m στην Ελαφριά επιφόρτιση
- 2) 110 m στη Μέση επιφόρτιση
- 3) 95 m στη Βαριά επιφόρτιση

Για τις παροχές χαμηλής τάσης , η ελάχιστη απόσταση θα λαμβάνεται ίση με αυτή των συνεστραμμένων καλωδίων χαμηλής τάσης . Η οδηγία αφορά στα έλατα , πεύκα , δρυς , καστανιές καθώς και οποιαδήποτε άλλα δένδρα Κατηγορίας I ή II που έχουν τον ίδιο ρυθμό ανάπτυξης .

Η κατηγοριοποίηση των δένδρων έχει ως εξής :

Κατηγορία I : Σε αυτήν ανήκουν όλα τα δένδρα στα οποία αναρριχώνται άτομα για την εκτέλεση εργασιών κλαδέματος ή συγκομιδής. Στην κατηγορία αυτή θεωρείται ότι ανήκουν όλα τα καρποφόρα δένδρα όπως π.χ. μηλιές, αχλαδιές, ροδακινιές, ελιές, αμυγδαλιές κλπ.

Κατηγορία II : Σε αυτήν ανήκουν όλα τα δένδρα στα οποία δεν αναρριχώνται άτομα για την εκτέλεση εργασιών κλαδέματος ή συγκομιδής. Στην κατηγορία αυτή θεωρείται ότι ανήκουν τα πεύκα, τα έλατα, οι λεύκες, τα πλατάνια, οι ευκάλυπτοι κλπ.

ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ ΔΕΝΔΡΟΥ	ΔΙΚΤΥΑ ΜΕΣΗΣ ΤΑΣΗΣ	
	Συνεστραμμένα καλώδια χωρίς αποτελεσματική γείωση της θωράκισης	Συνεστραμμένα καλώδια με αποτελεσματική γείωση της θωράκισης
Καρποφόρα δέντρα (Μηλιές , αχλαδιές , ροδακινιές , ελιές , αμυγδαλιές , κλπ)	$2 + 0,5 + X$	0,5 + 0,5
	$2 + 0,5$	
Μη καρποφόρα δέντρα εφάμιλλης ανάπτυξης με : Πεύκα , δρυς	$2 + 0,5 + X$	0,1 + 0,5
	$0,7 + 0,5$	
Μη καρποφόρα δέντρα εφάμιλλης ανάπτυξης με : Κυπαρίσσια , λεύκες , πλατάνια κλπ.	$2 + 1 + X$	0,1 + 1
	$2 + 1$	
Μη καρποφόρα δέντρα εφάμιλλης ανάπτυξης με : Ευκαλύπτους	$2 + 1,5 + X$	0,1 + 1,5
	$2 + 1,5$	

Πίνακας 1.3.1-2: Ελάχιστες οριζόντιες αποστάσεις που πρέπει να επιτυγχάνονται κατά το κλάδεμα ανάμεσα στα εναέρια δίκτυα Διανομής μέσης τάσης και στα δένδρα (Σε Αστικά Δίκτυα , στα Αρδευτικά και στο Υπεραστικό Δίκτυο)

Η προσαύξηση X λαμβάνεται ίση με 0 m (μηδέν), όταν η απόσταση μεταξύ των, εκατέρωθεν του δένδρου , στύλων Διανομής δεν είναι μεγαλύτερη από :

- 1) 140 m για ελαφριά επιφόρτιση
- 2) 110 m για μέση επιφόρτιση
- 3) 95 m για βαριά επιφόρτιση

Όταν τα δένδρα κλαδεύονται συχνότερα, η επιπρόσθετη απόσταση ασφαλείας 0,5 m που προστίθεται για να υπάρχει περιθώριο για την ανάπτυξη των δένδρων ανάμεσα σε δύο διαδοχικά κλαδέματα μειώνεται . Έτσι π.χ. για διπλάσια συχνότητα κλαδεμάτων (κλάδεμα ανά εξάμηνο) η υπόψη απόσταση θα μειώνεται στο ήμισυ , δηλαδή θα λαμβάνεται ίση με 0,25 m σε όλες τις περιπτώσεις .

ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ ΔΕΝΔΡΟΥ	ΔΙΚΤΥΑ ΜΤ	
	Συνεστραμμένα καλώδια (χωρίς αποτελεσματική γείωση της θωράκισης)	Συνεστραμμένα καλώδια (με αποτελεσματική γείωση της θωράκισης)
Καρποφόρα δέντρα (Μηλιές , αχλαδιές , ροδακινιές , ελιές , αμυγδαλιές , κλπ)	2 + 0,5	0,5 + 0,5
Μη καρποφόρα δέντρα εφάμιλλης ανάπτυξης με : Πεύκα , δρυς	2 + 0,5	0,1 + 0,5
Μη καρποφόρα δέντρα εφάμιλλης ανάπτυξης με : Κυπαρίσσια , λεύκες , πλατάνια κλπ.	2 + 1	0,1 + 1
Μη καρποφόρα δέντρα εφάμιλλης ανάπτυξης με : Ευκαλύπτους	2 + 1,5	0,1 + 1,5

Πίνακας 1.3.1-3 : Ελάχιστες οριζόντιες αποστάσεις που πρέπει να επιτυγχάνονται κατά το κλάδεμα ανάμεσα στα εναέρια δίκτυα Διανομής και στα δένδρα

Εντούτοις , κατά την διαδρομή του δικτύου διανομής στην Ελλάδα , σε αρκετές περιπτώσεις οι αποστάσεις μεταξύ διαδοχικών στύλων ή πυλώνων ξεπερνούν τις συγκεκριμένες προαναφερόμενες τιμές για το κάθε είδος επιφόρτισης .

Λόγοι οικονομίας κατά τον σχεδιασμό της εγκατάστασης ή λόγω του γεωγραφικού ανάγλυφου και λοιπών φυσικών ή τεχνητών εμποδίων που υπάρχουν κατά την διαδρομή του δικτύου , δύναται η τοποθέτηση διαδοχικών στύλων να υπερβεί τις αποστάσεις , για τις οποίες ισχύουν , ανάλογα με την περίπτωση , οι πίνακες 1.3.1-1 , 1.3.1-2 και 1.3.1-3 , που δίνουν την τιμή της προσαύξεσης X (σε m) , η οποία εφαρμόζεται επιπλέον της ελάχιστης οριζόμενης απόστασης που πρέπει να ισχύει μετά το κλάδεμα , μεταξύ του δικτύου διανομής και του πλησιέστερου προς αυτό εκ των σημείων της περιβάλλουσας βλάστησης .

Δεν υπάρχει κίνδυνος , όσον αφορά το βέλος κάμψης της γραμμής , αφού για αυτό γίνεται ειδική ξεχωριστή μελέτη , αλλάζει όμως το μήκος της προσαύξεσης X ανάλογα με το άνοιγμα της γραμμής και το κατά πόσον υπερβαίνει τις τιμές που αναφέρονται στους προηγούμενους πίνακες .

Στον πίνακα 1.3.1-4 , καταγράφονται οι τιμές της προσαύξεσης X (σε m) που τηρούνται ως επιπλέον αποστάσεις ασφαλείας από τις αναφερόμενες στην οδηγία της Δ.Ε.Η. για το κλάδεμα των δέντρων , σε περίπτωση υπέρβασης του μέγιστου μήκους μεταξύ δύο διαδοχικών στύλων ή πυλώνων , για κάθε περίπτωση φόρτισης των αγωγών (ελαφρά , μέση και βαριά επιφόρτιση) .

ΑΝΟΙΓΜΑ (m)	ΠΡΟΣΑΥΞΗΣΗ Χ (m) ΓΙΑ ΕΛΑΦΡΑ ΕΠΙΦΟΡΤΙΣΗ	ΠΡΟΣΑΥΞΗΣΗ Χ (m) ΓΙΑ ΜΕΣΗ ΕΠΙΦΟΡΤΙΣΗ	ΠΡΟΣΑΥΞΗΣΗ Χ (m) ΓΙΑ ΒΑΡΙΑ ΕΠΙΦΟΡΤΙΣΗ
Ως 95	0	0	0
100	0	0	0,3
110	0	0	0,8
120	0	0,4	1,3
130	0	0,8	1,8
140	0	1,2	2,3
150	0,3	1,6	2,8
160	0,6	2	3,3
170	0,9	2,4	3,8
180	1,2	2,8	4,3
190	1,5	3,2	4,8
200	1,8	3,6	5,3
210	2,1	4	5,8
220	2,4	4,4	6,3
230	2,7	4,8	6,8
240	3	5,2	7,3
250	3,3	5,6	7,8
260	3,6	6	8,3
270	3,9	6,4	8,8
280	4,2	6,8	9,3
290	4,5	7,2	9,8
300	4,8	7,6	10,3
310	5,1	8	10,8
320	5,4	8,4	11,3
330	5,7	8,8	11,8
340	6	9,2	12,3
350	6,3	9,6	12,8
360	6,6	10	-
370	6,9	10,4	-
380	7,2	10,8	-
390	7,5	11,2	-
400	7,8	11,6	-
410	8,1	12	-
420	8,4	12,4	-
430	8,7	12,8	-

Πίνακας 1.3.1-4 : Προσάυξηση οριζόντιας απόστασης αγωγών ανάλογα με τις επιφορτίσεις που δέχονται οι αγωγοί

1.3.2 Κανόνες ασφαλείας για το κλάδεμα δένδρων

Εκτός από την απόσταση ασφαλείας που επιβάλλει η Δ.Ε.Η. , ανάλογα με την κατηγορία των δένδρων , υπάρχουν και άλλες οδηγίες και εγχειρίδια που αφορούν την ασφάλεια του προσωπικού όπως το ακόλουθο : ΑΠΟΣΠΑΣΜΑ “Εγχειριδίου ασφαλών μεθόδων εργασίας” (Έκδοση ΔΕΗ/Τομέας Πρόληψης Ατυχημάτων/1981) .

Το κλάδεμα δένδρων τμήματα των οποίων βρίσκονται κοντά σε ηλεκτροφόρους αγωγούς είναι ενέργεια απαραίτητη για να προληφθούν ατυχήματα που οφείλονται σε βραχυκυκλώματα , διαρροές προς τη γη , ζημιές ή καταστροφή γραμμής λόγω ανέμου κ.ά. Οι κύριοι κίνδυνοι που ενδέχεται να αντιμετωπίσει το προσωπικό που ασχολείται με το κλάδεμα είναι:

- α) Επαφή με ηλεκτροφόρους αγωγούς.
- β) Πτώση από το δένδρο.
- γ) Πτώση κλάδων ή τμημάτων δένδρων.
- δ) Τραυματισμός από χρησιμοποιούμενα εργαλεία κ.ά.

Κατά περίπτωση οι κίνδυνοι αυτοί αντιμετωπίζονται:

α) Οι κίνδυνοι ηλεκτροπληξίας με λήψη των γνωστών απαραίτητων κατά περίπτωση μέτρων :

- 1) η κάλυψη γειτονικών γραμμών Χ.Τ. με τα ειδικά ελαστικά καλύμματα
- 2) η χρήση ελαστικών και προστατευτικών γαντιών
- 3) μερικές φορές η διακοπή της ενέργειας

β) Ο κίνδυνος πτώσεως με λήψη μέτρων όπως :

1) Η χρήση φορητής σκάλας σε καλή κατάσταση και κατάλληλου ύψους (όχι πολύ κοντή ή υψηλή). Η ασφαλής έδραση βάσεως και κορυφής της σκάλας είναι σημεία που πρέπει να προσεχθούν ιδιαίτερα. Επιπροσθέτως, η σκάλα θα κρατιέται από βοηθό εδάφους ή θα στερεώνεται (προσδένεται) καλά.

2) Η χρήση κράνους, ζώνης ασφαλείας, ρούχων εφαρμοστών (ποτέ φαρδιών) και παπουτσιών με σκληρό ποντίκι και σόλα ελαστική — σε καλή κατάσταση (που να μη γλιστράει).

3) Προτού αρχίσει ή δουλειά, προσεκτική εξέταση - επιθεώρηση του όλο δένδρου, για τη διαπίστωση της καταστάσεώς του και προετοιμασία της δουλειάς κατά φάσεις.

γ) Οι κίνδυνοι πτώσεων κλάδων, τμημάτων δένδρων κ.ά. με λήψη μέτρων όπως :

1) Η χρήση κράνους από τον τεχνίτη που κλαδεύει και από όλο το προσωπικό εδάφους.

2) Η απαγόρευση κινήσεως οχημάτων και τρίτων στην επικίνδυνη περιοχή, που πρέπει να επισημαίνεται με σχοινιά ή εμπόδια και φύλακες.

3) Η προσωρινή συγκράτηση και κατεύθυνση πτώσεως των κλάδων με κατάλληλα σχοινιά (για να πέσουν την κατάλληλη στιγμή, στην ασφαλέστερη θέση). Η κλίση του δένδρου ή στοιχείων και κλάδων του, και η κατεύθυνση και ένταση του αέρα, είναι σχετικά στοιχεία που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη. Τα σχοινιά συγκρατήσεως και κατευθύνσεως πρέπει να εξαρτώνται από δυνατά κλαδιά.

δ) Οι κίνδυνοι τραυματισμού από χρησιμοποιούμενα εργαλεία με μέτρα όπως :

1) Η χρήση μόνον εργαλείων που είναι σε καλή κατάσταση και συντηρημένα-έτοιμα για τη δουλειά.

2) Η μεταφορά γενικά των αιχμηρών-κοφτερών εργαλείων, μέσα σε ειδική θήκη ή κιβώτιο. Η εξοικείωση του τεχνίτη με τα εργαλεία και μηχανήματα που πρόκειται να χρησιμοποιήσει και με την εφαρμογή σωστών μεθόδων εργασίας.

Άλλα γενικά μέτρα ασφαλείας είναι τα ακόλουθα:

Κατά την αναρρίχηση ο τεχνίτης πρέπει:

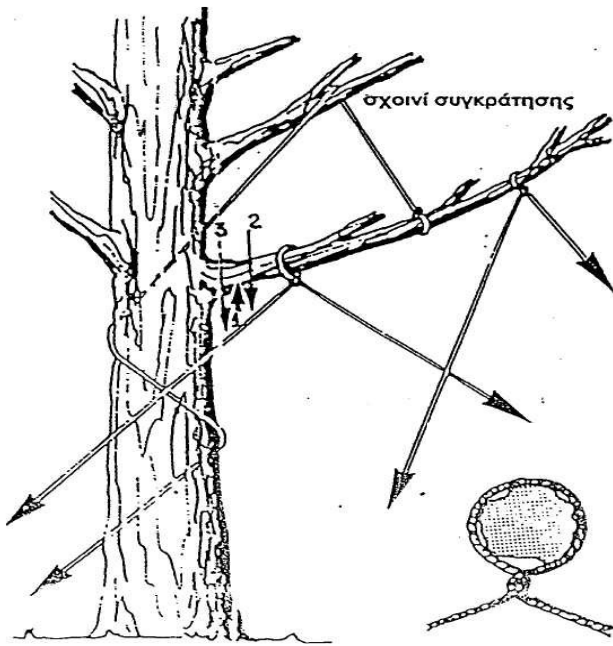
1) Κατά την ανάβασή του να κόβει τα επικίνδυνα κλαδιά.

2) Να μη βάζει ποτέ και τα δυο του χέρια στο ίδιο κλαδί.

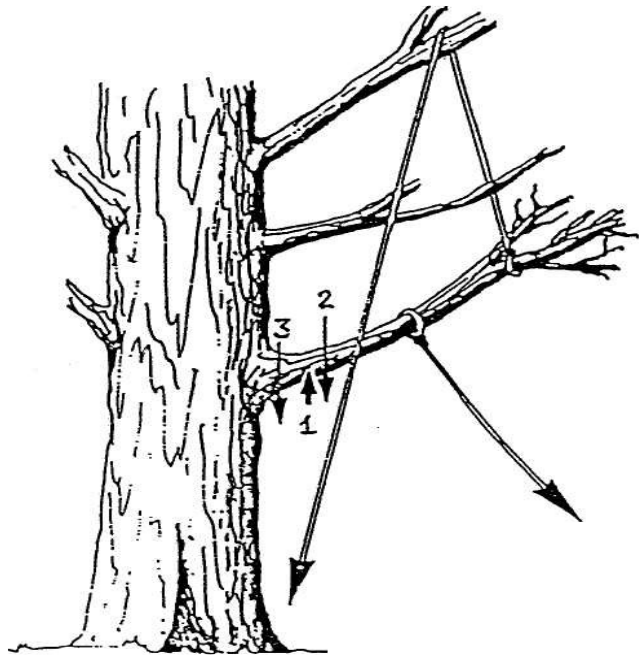
3) Πάνω στο δένδρο, προτού αρχίσει τη δουλειά, ο τεχνίτης πρέπει να περνάει τον ιμάντα ασφαλείας της ζώνης από γερό-σίγουρο κλαδί ή από στοιχείο πλήρως ακινητοποιημένης σκάλας .

Ο τεχνίτης αφού ανέβει και φθάσει στη θέση εργασίας του, παίρνει τα εργαλεία που χρειάζεται, ρίχνοντας στο βοηθό εδάφους το υπηρεσιακό του σχοινάκι για την πρόσδεση και ανύψωση τους.

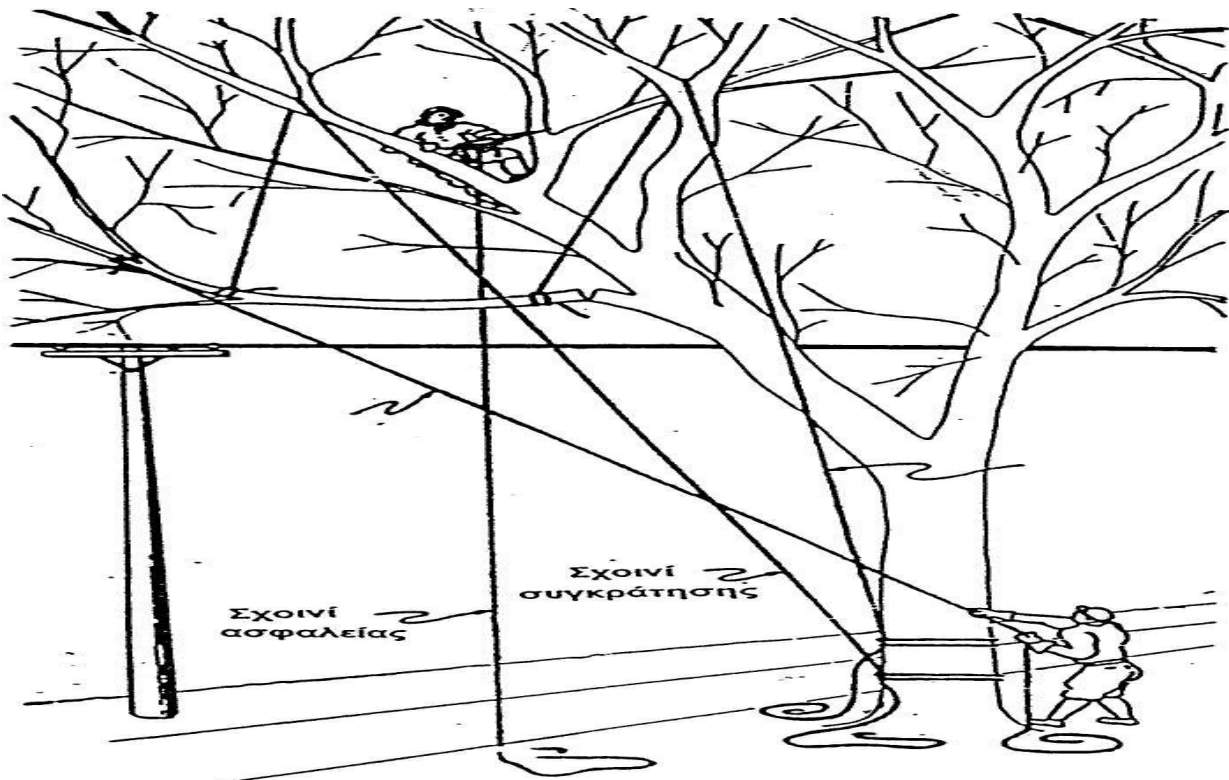
Στη συνέχεια , παραθέτονται σχήματα όπου απεικονίζονται οι ορθοί τρόποι δέσης και κοπής των δέντρων που χρήζουν κλαδέματος λόγω γειτνίασης με το εναέριο δίκτυο διανομής .



Σχήμα 1.3.2-1 : Σχοινί συγκράτησης



Σχήμα 1.3.2-2 : Ορθός τρόπος δέσης κλάδου



Σχήμα 1.3.2-3 : Ορθή θέση τεχνιτών κατά το κλάδεμα σε σχέση με το δίκτυο

1.4 Ελληνική γλωρίδα

Σύμφωνα με την βιβλιογραφία [7,8,9,10] , στη χώρα μας έχουν καταγραφεί αρκετές χιλιάδες είδη βλάστησης , που κατηγοριοποιούνται ποικιλοτρόπως με βάση βοτανολογικά κριτήρια . Για την ανάγκη της παρούσας εργασίας , θα ληφθούν υπόψιν μόνο όσα από αυτά απαντώνται συχνά στην επικράτεια και δύνανται να φτάσουν σε ύψος ικανό ώστε να έρθουν σε επαφή ή να αλληλεπιδράσουν με τις γραμμές διανομής ηλεκτρικής ενέργειας .

Η τεράστια ποικιλότητα των ειδών δένδρων , οδηγεί στην εξέταση μόνο των κυριοτέρων εκπροσώπων της κάθε κατηγορίας . Τα δένδρα , αρχικά , χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες που αποτελούν και το κριτήριο κατηγοριοποίησης τους από τους τεχνικούς κανονισμούς που εκδίδει η Δ.Ε.Η. . Έτσι , τα δένδρα διαχωρίζονται σε καρποφόρα , που απαντούνται συχνότερα εντός κατοικημένων περιοχών και σε μη καρποφόρα , που συνηθέστερα αποτελούν κομμάτι της γλωρίδας αγροτικών και δασικών περιοχών .

1.4.1 Καρποφόρα δένδρα

Στα καρποφόρα δένδρα συγκαταλέγονται αυτά που φέρουν καρπούς κατά την αντίστοιχη περίοδο καρποφορίας . Οι καρποί τους μπορεί να είναι βρώσιμοι ή μη . Είναι αρκετά σημαντικά από πλευρά ασφάλειας καθώς , συχνά , οι άνθρωποι αναρριχούνται σε αυτά για την συγκομιδή των καρπών , ερχόμενοι σε εγγύτητα με γραμμές διανομής ηλεκτρικής ενέργειας που τυχόν διέρχονται σε κοντινή απόσταση από αυτά . Επίσης , λόγω του γεγονότος ότι φύονται συνηθέστερα σε αστικά και κατοικημένα περιβάλλοντα ως καλλωπιστικά φυτά , τα φέρνει σε συχνότερη και εγγύτερη επαφή με τον άνθρωπο .

Σε αυτήν την κατηγορία ανήκουν δένδρα όπως νερατζιές , πορτοκαλιές , λεμονιές , μηλιές , αμυγδαλιές , καστανιές , ελιές , ροδακινιές κ.λ.π που συνήθως φυτεύονται ως καλλωπιστικά φυτά ή προς εκμετάλλευση του καρπού τους . Πρόκειται για δένδρα των οποίων το ύψος είναι αρκετά μικρότερο από τους σημαντικότερους εκπρόσωπους των μη καρποφόρων , τόσο λόγω προτίμησης φύτευσης χαμηλών σε ύψος ποικιλιών , ώστε να γίνεται ευκολότερη συγκομιδή καρπού , όσο και ως αποτέλεσμα κλαδέματος .

1.4.2 Μη καρποφόρα δένδρα

Σε αυτή την κατηγορία , εντάσσονται τα περισσότερα αυτοφυή δένδρα που απαντώνται κυρίως στην ύπαιθρο , με κυριότερους εκπροσώπους τους πλατάνους , τις πεύκες , τις ελάτες , τις οξιές , τις λεύκες , τους ευκαλύπτους κ.λ.π. Συνήθως , ξεπερνούν σε πλήρη ανάπτυξη το ύψος των καρποφόρων δένδρων χωρίς αυτό να είναι απόλυτο .

Παρά το γεγονός ότι δεν φέρουν καρπούς και ότι φύονται , κυρίως , σε μη κατοικημένες περιοχές , οπότε οι άνθρωποι έρχονται σε επαφή μαζί τους σπανιότερα , είναι εξίσου σημαντικά στην μελέτη μας αφού το μεγάλο ύψος τους και η απρόσκοπτη ανάπτυξη τους χωρίς να κλαδεύονται , τα καθιστά άξια μελέτης της αλληλεπίδρασης τους με τους εγγύς διερχόμενους αγωγούς διανομής .

Τα δένδρα κατηγοριοποιούνται και με βάση άλλα κριτήρια όπως π.χ εάν διατηρούν η αποβάλλουν το φύλλωμα τους κατά την διάρκεια τους έτους (φυλλοβόλα – αιθιαλή) , με βάση το είδος του καρπού τους (κωνοφόρα, εσπεριδοειδή κ.λ.π.) με βάση το είδος του φυλλώματος τους (πλατύφυλλα κ.λ.π.) , τα οποία δεν αποτελούν αντικείμενο της παρούσας εργασίας , αφού ενδιαφέρουν κυρίως τα διηλεκτρικά χαρακτηριστικά τους και όχι το είδος των δένδρων και για αυτό αφού γίνει σύντομη αναφορά των παραγόντων που επηρεάζουν την δομή τους και κατ επέκταση των διηλεκτρικών τους χαρακτηριστικών , καταγράφονται με βάση αυτή την διαχωρισμό.

1.4.3 Ηλεκτρική αντίσταση του ξύλου

Η ηλεκτρική αντίσταση του ξύλου χρησιμοποιείται κυρίως στα ηλεκτρικά υγρόμετρα για την εύρεση της περιεχομένης υγρασίας του ξύλου (κυρίως για υγρασίες από 5-25% περίπου) , [7,9] . Το απόλυτα ξηρό ξύλο είναι μονωτικό σώμα (δηλαδή δεν επιτρέπει τη διόδο ηλεκτρικού ρεύματος μέσα από τη μάζα του) . Συνεπώς , η ηλεκτρική αντίσταση του ξηρού ξύλου είναι πολύ υψηλή . Η ηλεκτρική αντίσταση του ξύλου επηρεάζεται κυρίως από την υγρασία του , και δευτερευόντως από την πυκνότητα, την κατεύθυνση διόδου του ρεύματος μέσα στο ξύλο , τη δομή του ξύλου , και τη θερμοκρασία του .

Η επίδραση , όμως , της υγρασίας είναι πολύ μεγαλύτερη από την επίδραση των άλλων παραγόντων . Η ηλεκτρική αντίσταση μειώνεται με την αύξηση της υγρασίας του ξύλου , ειδικά σε επίπεδο υγρασίας κάτω από το σημείο ινοκόρου , που αποτελεί την μέγιστη από την κατακρατούμενη περιβαλλοντική υγρασία από την μάζα του ξύλου που δεσμεύεται από τα τοιχώματα των κυττάρων .

Έτσι κάτω από το σημείο ινοκόρου (που συνήθως είναι της τάξης του 25-30 %) , όταν αυξάνεται η υγρασία του ξύλου , η ηλεκτρική αντίσταση μειώνεται κατά εκατομμύρια φορές , ενώ από το σημείο ινοκόρου έως τη μέγιστη υγρασία που μπορεί να συγκρατήσει το ξύλο , η μείωση της ηλεκτρικής αντίστασης είναι πολύ μικρή (όχι πάνω από 50 φορές) . Απολύτως ξηρό ξύλο δεν επιτρέπει τη διόδο του ρεύματος μέσα από τη μάζα του και μπορεί να συγκριθεί με τα καλύτερα μονωτικά υλικά όπως την πορσελάνη και την παραφίνη . Ορισμένα βαριά ξύλα , όπως λ.χ. το τροπικό *Lignum vitae* , χρησιμοποιούνται ως μονωτικό υλικό . Πρέπει να τονισθεί ακόμα ότι το ξύλο όταν είναι κορεσμένο από υγρασία συμπεριφέρεται περίπου όπως το νερό .

Η αξονική ηλεκτρική αντίσταση του ξύλου είναι περίπου 210 φορές μεγαλύτερη από την εγκάρσια . Η αντίσταση του ξηρού ξύλου αυξάνεται με τη μείωση της θερμοκρασίας του ξύλου . Ο εμποτισμός του ξύλου με υδατοδιαλυτά άλατα ή πισσέλαιο ελαττώνει σημαντικά την ηλεκτρική αντίσταση του (αυξάνει την ηλεκτρική αγωγιμότητα) .

Αντίθετα , ο εμποτισμός του με φαινολικές ρητίνες ή παραφίνη αυξάνει την ηλεκτρική αντίσταση του ξύλου , γιατί μειώνεται η υγροσκοπικότητα του ξύλου .

1.4.3.1 Διηλεκτρικές ιδιότητες του ξύλου

Οι διηλεκτρικές ιδιότητες του ξύλου είναι η διηλεκτρική σταθερά και ο συντελεστής ισχύος . Η διηλεκτρική σταθερά (ή ηλεκτρική διαπερατότητα) είναι μέτρο της μονωτικής αξίας του ξύλου κάτω από την επίδραση εναλλασσόμενου ρεύματος . Η διηλεκτρική σταθερά του κενού ισούται με τη μονάδα (1) , ενώ του ξηρού ξύλου κυμαίνεται μεταξύ 2 και 3 .

Η σταθερά αυτή αυξάνεται με την πυκνότητα , την υγρασία και τη θερμοκρασία του ξύλου , ενώ μειώνεται όταν αυξάνεται η συχνότητα του εναλλασσόμενου ρεύματος . Στη σχέση διηλεκτρικής σταθεράς και υγρασίας του ξύλου στηρίζεται η λειτουργία των ηλεκτρικών υγρομέτρων για τη μέτρηση της περιεχομένης υγρασίας του ξύλου .

Ο συντελεστής ισχύος του ξύλου είναι μέτρο της ταχύτητας με την οποία καταναλώνεται (απορροφάται) η ηλεκτρική ενέργεια από το ξύλο στη μονάδα του χρόνου , όταν βρίσκεται σε διηλεκτρικό πεδίο ρεύματος υψηλής συχνότητας . Η ενέργεια αυτή εμφανίζεται με τη μορφή θερμότητας και εξαρτάται κυρίως από την υγρασία του ξύλου . Σε υγρασία 15% ή μεγαλύτερη , ο συντελεστής ισχύος μπορεί να είναι μεγαλύτερος από 6 % , ανάλογα με τη συχνότητα του ρεύματος (μεγαλύτερος συντελεστής σε μεγαλύτερη συχνότητα) .

Σε μικρότερη υγρασία , ο συντελεστής αυτός κυμαίνεται από 2 ως 6 % . Σε απόλυτα ξηρό ξύλο , συναντάται η μικρότερη απορρόφηση υγρασίας . Ο συντελεστής ισχύος αυξάνεται με την πυκνότητα του ξύλου και είναι μεγαλύτερος παράλληλα προς τις ίνες του ξύλου . Η ιδιότητα αυτή έχει σημασία κατά την ξήρανση ή συγκόλληση του ξύλου με ρεύμα υψηλής συχνότητας .

Εξωτερικοί παράγοντες (π.χ. βακτήρια , μύκητες , έντομα , τερμίτες , μικροοργανισμοί) αλλά και κλιματικοί , μηχανικοί , χημικοί και θερμικοί παράγοντες μπορούν να προκαλέσουν αλλοίωση της εμφάνισης , της δομής και της χημικής σύστασης του ξύλου . Ο βαθμός αλλοίωσης ποικίλλει και μπορεί να είναι από απλή χρωματική αλλαγή μέχρι πλήρους αχρήστευσης του ξύλου .

Οι παραπάνω αλλοιώσεις μπορούν να λάβουν χώρα όταν το ξύλο είναι ακόμα ιστάμενο ως κορμός (στο ζωντανό δένδρο) , είτε είναι με τη μορφή πριστής ξυλείας, είτε σε ξύλινη κατασκευή ή τελική χρήση .

1.4.3.2 Βακτήρια που προσβάλλουν το ξύλο

Πρόκειται για μικρούς φυτικούς οργανισμούς , συνήθως μονοκύτταρους , οι οποίοι υπάρχουν σε μεγάλους πληθυσμούς και μπορούν να αναπτύσσονται σε περιβάλλον με πολύ λίγο ή καθόλου οξυγόνο , μέσα σε νερό ή μέσα σε υγρό έδαφος . Τα κυριότερα είδη βακτηρίων που προσβάλλουν το ξύλο ανήκουν στα γένη *Bacillus* , *Aerobacter* και *Pseudomonas* .

Η επίδραση βακτηρίων στο ξύλο είναι πολύ μικρή σε σύγκριση με τους μύκητες και τα έντομα . Προσβολές ξύλου από βακτήρια έχουμε μόνο σε ξύλινες κατασκευές μέσα σε νερό ή μέσα σε υγρό έδαφος , όπως λ.χ. σε αποβάθρες, μαρίνες, σκάφη, μεταλλεία, ψυκτικούς πύργους και περιφράξεις .

Η προσβολή των βακτηρίων περιορίζεται σε διάτρηση ή καταστροφή των μεμβρανών των βοθρίων , διάβρωση των κυτταρικών τοιχωμάτων και κατανάλωση του περιεχομένου των παρεγχυματικών κυττάρων (θρεπτικών στοιχείων) [8] .

Η προσβολή των βακτηρίων προκαλεί αύξηση της διαπερατότητας του ξύλου και μείωση της μηχανικής αντοχής σε κρούση , θλίψη και κάμψη . Η μείωση της μηχανικής αντοχής μπορεί να είναι σημαντική , μόνο εάν η δράση των βακτηρίων είναι μακροχρόνια .

Σε βακτήρια αποδίδεται και η δημιουργία του 'υγρού εγκεφάλου' ζωντανών δένδρων ελάτης και λεύκης , καθώς και μεταχρωματισμοί , μαλάκυνση εξωτερικών στρωμάτων ξύλου και υπερβολική ρίκνωση . Τα βακτήρια μπορεί να δράσουν ταυτόχρονα με τους μύκητες ή να ευνοήσουν προσβολές μυκήτων .

1.4.3.3 Μύκητες που προσβάλλουν το ξύλο

Οι μύκητες είναι φυτικοί οργανισμοί χωρίς χλωροφύλλη , οι οποίοι τρέφονται με οργανικό υλικό άλλων φυτών και ζώων . Οι μύκητες αρχίζουν τον κύκλο της ζωής τους με σπόρια , αόρατα με το μάτι , τα οποία κάτω από ευνοϊκές συνθήκες βλαστάνουν στο υπόστρωμα και παράγουν πολλές λεπτές υφές (μυκήλια) .

Σε προχωρημένο στάδιο ανάπτυξης του μύκητα , δημιουργούνται καρποσώματα , τα οποία απελευθερώνουν εκατομμύρια σπόρια για τη συνέχιση του κύκλου ζωής και τη διάδοσή τους , πολλαπλασιάζοντας την έκταση των αλλοιώσεων που προκαλούν στο ξύλο και αυξάνοντας την χρονική διάρκεια του σταδίου προσβολής .

Οι μύκητες προσβάλλουν το ξύλο και προκαλούν μεταχρωματισμό ή σήψη (σάπισμα) . Έτσι , διακρίνονται ανάλογα σε χρωστικούς μύκητες και σηπτικούς μύκητες . Η ενδιαφέρουσα , από ηλεκτρολογικής άποψης , είναι η περίπτωση των σηπτικών μυκήτων καθώς μεταβάλλει την χημική σύσταση και την υγροσκοπικότητα του ξύλου .

Οι μύκητες που προκαλούν λευκές σήψεις μπορούν να αποσυνθέτουν υδαάνθρακες, αλλά και λιγνίνη . Όσο προχωρεί η σήψη , το ξύλο γίνεται ανοικτότερο στο χρώμα και αποκτά σπογγώδη υφή με ινώδη εμφάνιση . Τα πλατύφυλλα είδη είναι ιδιαίτερα ευπαθή στους μύκητες λευκών σήψεων ενώ μεγάλης έκτασης αλλοιώσεις , δημιουργούνται στην επιφάνεια τους από προσβολή από μύκητα καστανής σήψης .

1.4.3.4 Τυπική εμφάνιση του μύκητα καστανής σήψης

Υπάρχουν πολλά είδη μυκήτων που προσβάλλουν την ξυλεία κορμού δένδρων και προξενούν στο ξύλο αλλοιώσεις, γνωστές ως καστανή σήψη. Οι μύκητες που προκαλούν αυτές τις αλλοιώσεις, αναφέρονται συχνά στην βιβλιογραφία ως ένας μύκητας που εμφανίζεται σε διάφορες μορφές, ανάλογα με το είδος τις ξυλείας που προσβάλλει και ανάλογα με τον τύπο και την έκταση των αλλοιώσεων που δημιουργεί επί του ξύλου.

Όταν προσβάλλει το ξύλο κωνοφόρων δένδρων εμφανίζεται υπό τις κάτωθι μορφές :

1) *Lenzites seriaria* : η οποία προσβάλλει κορμούς δένδρων, περιφράξεις, στύλους, γέφυρες κ.α. Προκαλεί καστανή σήψη. Σε δοκούς κατασκευών, η σήψη συνήθως περιορίζεται στο εσωτερικό, με ανέπαφο το εξωτερικό στρώμα.

2) *Peniophora gigantea* : η οποία απαιτεί μεγάλη υγρασία, τόσο ως ποσοστό περιβαλλοντικής υγρασίας όσο και ως ποσοστό υγρασίας κατακρατούμενη από το ξύλο. Γι' αυτό και προσβάλλει υγρούς κείμενους κορμούς και προκαλεί καστανή σήψη με χρώμα ανοικτό καστανοκίτρινο.

Ενώ όταν το ξύλο πλατύφυλλων δένδρων εμφανίζει εικόνα καστανής σήψης, τότε αυτό έχει, συνήθως, προσβληθεί από τον μύκητα *Polystictus versicolor*, ο οποίος, εκτός από το γεγονός ότι είναι ο πιο διαδεδομένος από όλους τους προσβάλλουν κορμούς πλατύφυλλων δένδρων, προκαλεί τις σημαντικότερες ζημιές από όλους τους μύκητες σε ξυλεία πλατύφυλλων. Σε ανθεκτικά είδη, όπως η δρύς, προσβάλλει μόνο το εξωτερικό φλοιό, ενώ σε άλλα λιγότερο ανθεκτικά, όπως η οξιά, μπορεί να προκαλέσει πλήρη καταστροφή.

1.4.3.5 Εμποτισμός – Υγροσκοπικότητα του ξύλου

Τα διάφορα είδη ξύλου ταξινομούνται στις ακόλουθες κατηγορίες ανάλογα με το μέγεθος της διαπερατότητας του σομού και εγκάρδιου ξύλου κατά τη διαδικασία εμποτισμού υπό πίεση με πισσέλαιο ή υδατοδιαλυτά συντηρητικά :

- Διαπερατά : Εμποτίζονται πλήρως .
- Μέτρια ανθεκτικά : Αρκετά εύκολα εμποτίζονται πλευρικά (εφαπτομενικά) σε ένα βάθος 18 mm σε περίπου 3 ώρες εμποτισμού .
- Ανθεκτικά : Δύσκολο να εμποτισθούν περισσότερο από 6 mm ακόμη και μετά από μακρά περίοδο εμποτισμού .
- Εξαιρετικά ανθεκτικά : Αδύνατο να εμποτισθούν σε οποιοδήποτε βάθος μετά από παρατεταμένη εφαρμογή πίεσης .

1.4.4 Η πυκνότητα του ξύλου

Πυκνότητα του ξύλου είναι το μέτρο μάζας που περιέχεται (περικλείεται) σε ορισμένο όγκο του και εκφράζεται με το πηλίκο της μάζας δια του όγκου . Η πυκνότητα και το ειδικό βάρος εκφράζονται με τον ίδιο αριθμό . Στις φυσικές επιστήμες ο υπολογισμός της πυκνότητας του ξύλου στηρίζεται πάντοτε στον υπολογισμό του βάρους και του όγκου του στο ίδιο ποσοστό υγρασίας .

Όταν το ποσοστό υγρασίας είναι 0 % , τότε το πηλίκο ξηρό βάρος προς ξηρό όγκο δίδει την ξηρή πυκνότητα . Ο προσδιορισμός όμως του ξηρού όγκου είναι δύσκολος γιατί το ξύλο είναι υγροσκοπικό υλικό . Για το λόγο αυτό , η πυκνότητα του ξύλου υπολογίζεται και από το πηλίκο του ξηρού βάρους προς το χλωρό όγκο .

Χλωρός όγκος (ή μέγιστος όγκος) είναι ο όγκος του ξύλου σε κατάσταση πλήρους διόγκωσης , δηλαδή ο όγκος του ξύλου με υγρασία από το σημείο ινοκόρου και πάνω . Η πυκνότητα αυτή ονομάζεται βασική πυκνότητα . Η ξηρή και η βασική πυκνότητα είναι συγκρίσιμα μεγέθη διότι ο υπολογισμός τους στηρίζεται σε σταθερά μεγέθη βάρους και όγκου .

Η πυκνότητα του ξύλου , πολλές φορές για πρακτικούς λόγους , υπολογίζεται και με βάση το βάρος και τον όγκο του ξύλου σε κάποια συγκεκριμένη υγρασία (συνήθως 8 % , 12 % , 15 %) ανάλογα με τον πρακτικό σκοπό που εξυπηρετείται (υπολογισμός του βάρους ορισμένου όγκου ξύλου σε συγκεκριμένη υγρασία) . Το μέγεθος όμως αυτό δεν είναι συγκρίσιμο. Η πυκνότητα αυτή ονομάζεται φαινομενική πυκνότητα .

Με την προϋπόθεση ότι αναφερόμαστε σε ξύλο χωρίς σφάλματα , η πυκνότητα είναι δείκτης της ποιότητας και της μηχανικής αντοχής του ξύλου . Η πυκνότητα των διαφόρων ειδών ξύλου , υπολογισμένη με βάση το ξηρό βάρος και τον ξηρό όγκο , ποικίλλει από $0,10 \text{ g/cm}^3$ για το ξύλο μπάλσα (Ochroma lagopus) μέχρι $1,30 \text{ g/cm}^3$ για τα τροπικά είδη ξύλου Guaiacum και Brosimum , που είναι τα βαρύτερα είδη ξύλου και βυθίζονται μέσα στο νερό (πυκνότητα νερού = $1,00 \text{ g/cm}^3$) . Η πυκνότητα των ελληνικών ειδών ξύλου , γενικά , κυμαίνεται από $0,30 \text{ g/cm}^3$ έως $0,90 \text{ g/cm}^3$. Με βάση την ξηρή πυκνότητά τους , τα ελληνικά είδη ξύλου διαχωρίζονται στις κατηγορίες :

- 1) τα ελαφρά ($0,30-0,45 \text{ g/cm}^3$)
- 2) τα μέτρια ($0,45-0,65 \text{ g/cm}^3$)
- 3) τα βαριά ($0,65-0,80 \text{ g/cm}^3$)
- 4) και τα πολύ βαριά ($0,80-1,00 \text{ g/cm}^3$)

με την πλειοψηφία των δένδρων , που φύονται στην ελληνική επικράτεια να ανήκει στις κατηγορίες των μετρίων και βαρέων ξύλων με βάση την ξηρή πυκνότητα τους .

Η πυκνότητα της ξυλώδους ύλης , πρακτικά δηλαδή της ύλης των κυτταρικών τοιχωμάτων του ξύλου με κανονική αναλογία σε λιγνίνη και κυτταρίνη , είναι σταθερή και κυμαίνεται από $1,35 \text{ g/cm}^3$ έως $1,60 \text{ g/cm}^3$ με μέσο όρο την τιμή $1,50 \text{ g/cm}^3$, που θεωρείται ως η πυκνότητα ξυλώδους ύλης .

Επειδή , όμως , το ξύλο είναι δομημένο έτσι ώστε να μην αποτελείται από 100% συμπαγή ξυλώδη ύλη αλλά να περιέχει πολλούς κενούς χώρους (όπως λ.χ. κυτταρικές κοιλότητες , πόρους κ.ά.) , η πυκνότητα που υπολογίζουμε ουσιαστικά αποτελεί το μέσο όρο όλων των παραπάνω .

Σίγουρα , λοιπόν , η μεγάλη διακύμανση της πυκνότητας των διαφόρων ειδών ξύλου οφείλεται και στη διαφορά της δομής και στη διαφορά περιεκτικότητας σε κενούς χώρους , πόρους , τριχοειδή , κ.ά. εντός της μάζας του ξύλου .

Στον πίνακα 1.4.4 , δίνονται οι συνήθεις τιμές πυκνότητας διάφορων ειδών ξύλου δένδρων που ευδοκιμούν στην Ελλάδα .

Η πυκνότητα είναι επομένως δείκτης των κενών χώρων που υπάρχουν στη μάζα του ξύλου . Ο υπολογισμός του ποσοστού κενών χώρων γίνεται από τη σχέση :

$$C (\%) = 100 - 66,7 \rho_0 \quad (1.4.4-1)$$

όπου C : ποσοστό κενών χώρων του ξύλου (% του συνολικού όγκου)

ρ_0 : ξηρή πυκνότητα

Όσο μικρότερη είναι η πυκνότητα του ξύλου , τόσο μεγαλύτερο είναι το ποσοστό των κενών χώρων . Τυπικά , στα διάφορα είδη ξύλου , το ποσοστό αυτό κυμαίνεται από 95 % σε πολύ ελαφρά ξύλα έως 15% σε πολύ βαριά ξύλα .

Διαφορές πυκνότητας και ποσοστού κενών χώρων του ξύλου κυρίως οφείλονται στην κυτταρική συγκρότηση και στους τύπους ξυλωδών κυττάρων (τραχειίδες , ίνες , μέλη αγγείων , ρητινοφόροι αγωγοί) , στο πάχος των κυτταρικών τοιχωμάτων και στο μέγεθος των κυτταρικών κοιλοτήτων .

Βέβαια , η αξιολόγηση και η σχετική επίδραση των παραπάνω είναι δύσκολη και απαιτεί μικροσκοπική μελέτη για τον ακριβή προσδιορισμό της πυκνότητας , όπου αυτό ζητείται , καθώς το ξύλο όντας ζωντανός οργανισμός παρουσιάζει ποικιλομορφία ως προς την δομή του στα διάφορα στάδια της ζωής του και επηρεάζεται από το περιβάλλον .

Είδος ξύλου	Πυκνότητα ξηρή	Πυκνότητα φαινομενική
Ελάτη κεφαληνιακή	0.40	0.42
Ελάτη λευκή	0.41	0.44
Ερυθρελάτη	0.41	0.44
Πεύκη χαλέπιος	0.71	0.75
Πεύκη τραχεία	0.57	0.60
Πεύκη κουκουναριά	0.52	0.56
Πεύκη μαύρη	0.52	0.55
Πεύκη λευκόδερμος	0.47	0.53
Ιτιά	0.49	0.52
Κυπαρίσσι	0.55	0.60
Καρυδιά	0.64	0.69
Λεύκη τρέμουσα	0.43	0.46
Λεύκη λευκή	0.46	0.50
Λεύκη μαύρη	0.39	0.41
Οξιά	0.70	0.74
Καστανιά	0.58	0.61
Πουρνάρι	0.90	0.94
Δρυς	0.82	0.87
Φτελιά	0.62	0.66
Ελιά	0.88	0.92
Μουριά	0.61	0.66
Πλατάνι	0.58	0.63
Ακακία	0.70	0.76
Σφενδάμι	0.62	0.66

Πίνακας 1.4.4 : Ξηρή – φαινομενική πυκνότητα δένδρων

1.4.4.1 Παράγοντες που επηρεάζουν την πυκνότητα του ξύλου

Η πυκνότητα του ξύλου επηρεάζεται από τρεις κύριους παράγοντες :

1) Υγρασία : Το ξύλο σαν υγροσκοπικό υλικό (υγροσκοπική ύλη) έχει την ιδιότητα να προσλαμβάνει πάντοτε υγρασία . Όταν προσλαμβάνει υγρασία αυξάνεται ταυτόχρονα η μάζα και ο όγκος του . Αντίθετα , απώλεια υγρασίας προκαλεί τη μείωσή τους . Κατά συνέπεια , η επίδραση της υγρασίας του ξύλου στην πυκνότητα είναι σημαντική και ακολουθεί μία ανάλογη σχέση .

2) Δομή : Οι διαφορές που παρατηρούνται στην πυκνότητα ξύλου διαφόρων ειδών οφείλονται κυρίως σε διαφορές δομής όπως λ.χ. διαφορετικό είδος ξυλωδών κυττάρων (κωνοφόρα : τραχειίδες , ρητινοφόροι αγωγοί – πλατύφυλλα : ίνες, μέλη αγγείων) , διαφορετική ποσοτική κατανομή αυτών , ποικίλο πάχος κυτταρικών τοιχωμάτων και μέγεθος κυτταρικών κοιλοτήτων . Η πολυπλοκότητα των μικροσκοπικών χαρακτηριστικών του ξύλου καθιστά δύσκολη την διατύπωση κανόνων επίδρασης των στοιχείων δομής στην πυκνότητα . Αυτό είναι δυνατό να γίνει μόνο σε συγκεκριμένες περιπτώσεις μετρήσιμων μεγεθών .

Στα δακτυλιόπορα πλατύφυλλα, η πυκνότητα αυξάνεται ως ένα όριο, όταν αυξάνεται το πλάτος των ετησίων δακτυλίων, ενώ στα διασπορόπορα δεν υπάρχει σαφής σχέση. Στα κωνοφόρα, όταν αυξάνεται το πλάτος των ετησίων δακτυλίων, συνήθως μειώνεται η πυκνότητα .

3) Χημική σύσταση : Τα χημικά συστατικά του ξύλου (κυτταρίνη , λιγνίνη , ημικυτταρίνες) έχουν διαφορετική πυκνότητα και κατά συνέπεια επηρεάζουν την πυκνότητα του ξύλου διαφορετικά . Η κυτταρίνη έχει μεγαλύτερη πυκνότητα από τη λιγνίνη [9] .

Σε περιπτώσεις ξύλου ανώμαλης δομής , όπου η περιεκτικότητα κυτταρίνης και λιγνίνης παρουσιάζει σημαντικές αποκλίσεις από την κανονική , η επίδραση στην πυκνότητα ενδέχεται να είναι σημαντική . Η επίδραση της χημικής σύστασης στην πυκνότητα, γενικά , είναι σχετικά μικρή .

1.4.4.2 Υπολογισμός της πυκνότητας του ξύλου

Ο πιο απλός τρόπος για την εκτίμηση της πυκνότητας ενός δοκιμίου (τεμαχίου) ξύλου , είναι να ζυγισθεί και μετά να βρεθεί ο όγκος του . Για τον υπολογισμό της ξηρής πυκνότητας εφαρμόζουμε την κλασική εργαστηριακή μέθοδο ξήρανσης - ζύγισης και της εμφάνισης σε νερό . Κατά την μέθοδο αυτή , χρησιμοποιούνται εργαστηριακός κλίβανος (πυριατήριο) , ξηραντήρας και ζυγός ακριβείας . Παίρνουμε δείγμα ξύλου χωρίς σφάλματα - εάν είναι δυνατό από το στηθαίο ύψος του δένδρου - και το τοποθετούμε στον εργαστηριακό κλίβανο στους $103^{\circ}C$ ώσπου να αποκτήσει σταθερό βάρος (σε 24 - 48 ώρες περίπου) . Η τελευταία ζύγιση , η οποία δεν διαφέρει από την αμέσως προηγούμενη , μας δίνει το ξηρό βάρος .

Για τον υπολογισμό του ξηρού όγκου , το δείγμα , μετά τη ζύγιση του τοποθετείται σε ξηραντήρα για κλιματισμό και μετά βυθίζεται για λίγα δευτερόλεπτα σε πολύ θερμή παραφίνη , η οποία χωρίς να επηρεάσει τον όγκο του δείγματος , εμποδίζει την πρόσληψη νερού και στη συνέχεια με τη μέθοδο της εμφάνισης στο νερό υπολογίζεται ο ξηρός όγκος του δείγματος (Αρχή του Αρχιμήδη) . Η βασική πυκνότητα (ξηρό βάρος προς χλωρό όγκο) υπολογίζεται με ζύγιση του απόλυτα ξηρού βάρους του δείγματος (W_0) και του βάρους (W_{max}) του ίδιου δείγματος κορεσμένου σε νερό .

1.4.4.3 Μεταβλητότητα της πυκνότητας του ξύλου

Η πυκνότητα του ξύλου παρουσιάζει έντονη μεταβλητότητα τόσο ανάμεσα σε διαφορετικά είδη ξύλου , όσο και σε ξύλα που ανήκουν στην ίδια κατηγορία δένδρων . Ακόμα , διαφορές παρατηρούνται , ως προς την πυκνότητα , σε δένδρα ίδιου είδους . Οι αποκλίσεις στην πυκνότητα του ξύλου , οφείλονται στη διαφορά δομής και στην επίδραση εξωτερικών παραγόντων .

Χαρακτηριστική διαφορά στη δομή του ξύλου είναι η παρουσία διαφορετικών τύπων κυττάρων (τραχειδών , ινών) , ρητινοφόρων αγωγών , αγγείων και ακτινών . Οι διαστάσεις των κυττάρων διαφέρουν και ειδικά το πάχος των κυτταρικών τοιχωμάτων. Μερική επίδραση ασκούν επίσης κληρονομικοί παράγοντες , παράγοντες του κλιματεδαφικού περιβάλλοντος (έδαφος , θερμοκρασία , άνεμος , βροχοπτώσεις , χιονοπτώσεις) και άλλα αίτια .

Γενικά , η γνώση , όσον αφορά τη μεταβλητότητα της πυκνότητας , δεν είναι πλήρης . Στην Ευρώπη , η μέση πυκνότητα των κωνοφόρων και της οξιάς μειώνεται με την αύξηση του υψομέτρου , όπως επίσης και προς την κατεύθυνση Νότου προς Βορρά . Γενική διαπίστωση είναι ότι η βάση των δένδρων περιέχει ξύλο μεγάλης πυκνότητας και ότι μικρότερη πυκνότητα έχει το ξύλο στο πάνω μέρος του δένδρου .

Η μεταβλητότητα της πυκνότητας , σε εγκάρσια τομή του κορμού , εκφράζεται σε μικρότερο βαθμό από ότι στο μήκος του κορμού και επηρεάζεται περισσότερο από το εύρος των ετησίων δακτυλίων και το ποσοστό (%) του όψιμου ξύλου . Στην πεύκη και την ελάτη , η πυκνότητα αυξάνεται από το κέντρο του κορμού προς τα έξω , μέχρι μια ηλικία , στην οποία οι ετήσιοι δακτύλιοι έχουν το μεγαλύτερο εύρος . Στη συνέχεια , σχηματίζονται στενότεροι ετήσιοι δακτύλιοι με μικρότερη πυκνότητα .

Στα πλατύφυλλα , κατά κανόνα , μεγαλύτερη πυκνότητα έχει το ξύλο κοντά στο κέντρο του κορμού . Δένδρα , τα οποία αναπτύσσονται σε πολύ πυκνή συστάδα , παράγουν ξύλο μικρής πυκνότητας , ενώ αραιώση της συστάδας συνεπάγεται και αύξηση της πυκνότητας . Το θλιμμενές ξύλο (ξύλο κωνοφόρων με ανώμαλη δομή) είναι 20 % - 40 % βαρύτερο από ότι το κανονικό ξύλο . Γενικά , το ξύλο των κλαδιών είναι βαρύτερο από το ξύλο του κορμού . Η πυκνότητα του εγκάρδιου ξύλου είναι μεγαλύτερη όταν το χρώμα του είναι σκούρο (εναπόθεση εκχυλισμάτων) .

Ξύλα που περιέχουν μεγάλη ποσότητα ανόργανων ουσιών είναι βαρύτερα και σκληρότερα . Η παρουσία τυλώσεων σε μέλη αγγείων (πλατύφυλλα) και ρητινοφόρων αγωγών (κωνοφόρα) αυξάνουν την πυκνότητα . Στα κωνοφόρα και στα δακτυλιόπορα πλατύφυλλα υπάρχει κάποια σχέση μεταξύ της πυκνότητας πρώιμου και όψιμου ξύλου . Το όψιμο ξύλο έχει μεγαλύτερη πυκνότητα από το πρώιμο γιατί τα κύτταρα του έχουν παχύτερα τοιχώματα . Έτσι , στην ελάτη , η σχέση πυκνότητα όψιμου ξύλου ÷ πυκνότητα πρώιμου ξύλου είναι 2,8 , ενώ στη μαύρη πεύκη είναι 2,0 , στην δρυ 2,0 - 2,9 και στην καστανιά 1,3 .

Για το λόγο αυτό , στα κωνοφόρα και στα δακτυλιόπορα πλατύφυλλα η πυκνότητα του ξύλου γενικά αυξάνεται όταν αυξάνεται το ποσοστό του όψιμου ξύλου . Η πυκνότητα του πρώιμου ξύλου μειώνεται ελαφρά από την εντεριώνη προς το φλοιό ή παραμένει στο ίδιο επίπεδο , ενώ αντίστοιχα μειώνεται από τη βάση προς την κορυφή του δένδρου .

Η πυκνότητα του όψιμου ξύλου αυξάνεται από την εντεριώνη προς το φλοιό και μειώνεται από τη βάση προς την κορυφή του δένδρου . Στα κωνοφόρα , η πυκνότητα αυξάνεται με τη μείωση του εύρους των ετησίων δακτυλίων , ενώ για τα είδη πεύκης και ελάτης , στην αρχή , υπάρχει μια αύξηση και μετά μία μείωση . Αντίθετα , στα δακτυλιόπορα πλατύφυλλα , ευρείς ετήσιοι δακτύλιοι συνεπάγονται μεγάλη πυκνότητα ξύλου .

1.4.5 Υγροσκοπικότητα και μεταβολή ιδιοτήτων του ξύλου

Το ξύλο έχει την ιδιότητα να προσλαμβάνει υγρασία από το περιβάλλον . Η υγρασία αυτή προσλαμβάνεται είτε σε υγρή μορφή (επαφή με νερό) ή σε μορφή υδρατμών από την ατμόσφαιρα. Η ιδιότητα αυτή του ξύλου ονομάζεται υγροσκοπικότητα . Πρόκειται για σημαντική ιδιότητα του ξύλου , γιατί η υγρασία που συγκρατεί το ξύλο επηρεάζει καθοριστικά τις άλλες ιδιότητές του .

Η υγροσκοπικότητα του ξύλου οφείλεται στη χημική σύνθεσή του , στο γεγονός δηλαδή ότι τα συστατικά του , κυτταρίνη , ημικυτταρίνες , πηκτινικές ουσίες και (λιγότερο) λιγνίνη είναι ουσίες υγροσκοπικές . Εξαιτίας της ιδιότητάς του αυτής (υγροσκοπικότητας) , το ξύλο περιέχει πάντοτε υγρασία είτε ως κορμός δένδρου , είτε ως πριστή ξυλεία .

Η υγρασία του ξύλου επηρεάζει σημαντικά : την πυκνότητα , τις μηχανικές ιδιότητες , την κατεργασία , τη θερμική και ηλεκτρική αγωγιμότητα και την ανθεκτικότητα του ξύλου στην προσβολή μυκήτων και εντόμων . Υγρασία του ξύλου (Y) ορίζεται ουσιαστικά το βάρος του νερού που περιέχεται (περικλείεται) στο ξύλο και εκφράζεται ως ποσοστό επί του απόλυτα ξηρού βάρους του ξύλου :

$$Y = 100 \cdot (W_x - W_o) \quad (1.4.5-1)$$

όπου : Y : Υγρασία του ξύλου (%)
 W_x : Αρχικό βάρος ή 'υγρό'
 W_o : Απόλυτα ξηρό βάρος (g)

Η μέγιστη υγρασία (Y_{max}) που μπορεί να συγκρατήσει το ξύλο εξαρτάται από τους κενούς χώρους που υπάρχουν στη μάζα του , που εξαρτώνται άμεσα από την πυκνότητα . Την μέγιστη υγρασία του ξύλου , σε σχέση με την πυκνότητα , μπορούμε να την υπολογίσουμε από την παρακάτω εξίσωση σε συνδυασμό με τις τιμές του Πίνακα 1.4.4 :

$$Y_{max} = Y \cdot 100 \cdot W_o / W_x \quad (1.4.5-2)$$

όπου Y_{max} : μέγιστη υγρασία ξύλου

Έτσι , η μέγιστη υγρασία ξύλου ελάτης ($\rho_o = 0,40 \text{ g/cm}^3$) είναι 213% και ξύλου οξιάς ($\rho_o = 0,70 \text{ g/cm}^3$) είναι 106 % . Από τα παραπάνω , γίνεται φανερό ότι όσο αυξάνεται η πυκνότητα του ξύλου , τόσο μειώνεται η μέγιστη υγρασία (Y_{max}) που μπορεί να συγκρατήσει το ξύλο και αυτό είναι συνέπεια της μείωσης του ποσοστού των κενών χώρων του .

1.4.6 Καύση του ξύλου

Καύση είναι η ιδιότητα του ξύλου να καίγεται (αποικοδομείται θερμικά) . Κατά την καύση του ξύλου με την αύξηση της θερμοκρασίας , πρώτα εξατμίζεται η υγρασία του ξύλου σε $100^\circ C$ και ακολουθούν τα επόμενα στάδια της διαδικασίας της καύσης :

- 1) εξαέρωση πτητικών ουσιών στους $90 - 150^\circ C$
- 2) επιφανειακή απανθράκωση και βραδεία έξοδος εύφλεκτων αερίων στους $150 - 220^\circ C$
- 3) ταχύτερη έξοδος αερίων και στη συνέχεια ανάφλεξη και πυράκτωση στους $220 - 370^\circ C$
- 4) ταχεία ανάφλεξη αερίων και σχηματισμός πυρακτωμένων ανθράκων στους $370 - 500^\circ C$

Στην θερμοκρασία των $275^\circ C$, παρουσία οξυγόνου , μπορεί να γίνει αυτόματη ανάφλεξη του ξύλου . Το ίδιο μπορεί να παρουσιασθεί από βραδεία οξειδωση και από την δράση μυκήτων , λόγω της υψηλής θερμοκρασίας που αναπτύσσεται . Αυτό μπορεί να συμβεί σε σωρούς ξυλόσκονης ή πριονιδιού . Ξύλα με μικρότερη πυκνότητα είναι περισσότερο εύφλεκτα . Με την αύξηση της θερμοκρασίας , το ξύλο γίνεται περισσότερο εύφλεκτο .

Για την επίδραση των διαστάσεων του ξύλου , κατά το στάδιο της ανάφλεξης αλλά και της καύσης , ισχύει , γενικά , ότι όσο μικρότερες είναι οι διαστάσεις του ξύλου , τόσο ευκολότερη είναι η ανάφλεξη και η καύση του . Πρέπει να γνωρίζουμε ότι οι ξύλινες κατασκευές μεγάλης διατομής (δοκοί , ζευκτά) καθώς και δένδρα με μεγάλη διατομή κύριου κορμού , παρουσιάζουν σημαντική αντοχή στην καύση , μεγαλύτερη από κοινές μεταλλικές κατασκευές , γιατί το ξύλο , λόγω της μικρής θερμοαγωγιμότητας και της μεγάλης ειδικής θερμότητας του , απανθρακώνεται μόνο στο επιφανειακό στρώμα , που σαν θερμομονωτικό καθυστερεί την καύση , ενώ οι μεταλλικές κατασκευές κάμπτονται και υποχωρούν σε υψηλές θερμοκρασίες ($800 - 1020^\circ C$) που αναπτύσσονται κατά την πυρκαγιά .

Συμπερασματικά , τα διηλεκτρικά χαρακτηριστικά του ξύλου , ως κορμού δένδρου , επηρεάζονται κυρίως από το είδος του δένδρου , την ηλικία του , την διατομή του κορμού , την αλλοίωση της δομής του από περιβαλλοντικούς και κλιματικούς παράγοντες και τέλος , από το ποσοστό υγρασίας που περιέχει .

Εάν πρόκειται για ζωντανό και υγιές δένδρο , οι προαναφερόμενες τιμές πυκνότητας καλύπτουν μεγάλο μέρος του φάσματος της ελληνικής χλωρίδας και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό της ειδικής αντίστασης του . Τα πράγματα διαφέρουν και χρειάζεται ειδική , κατά περίπτωση μελέτη , όταν το δένδρο είναι " νεκρό " λόγω γήρανσης , ξηρασίας ή προηγούμενης πυρκαγιάς ή όταν έχει προσβληθεί από μύκητες και βακτήρια .

Όπως αναφέρθηκε , η πυρκαγιά και αρκετά είδη μυκήτων και βακτηρίων δρουν κυρίως στον εξωτερικό φλοιό των δένδρων , μετατρέποντας τον ουσιαστικά σε νεκρό ξύλο . Η υγρασία του νεκρού ξύλου καθορίζεται αποκλειστικά από τις καιρικές συνθήκες και από περιβαλλοντικές αποθέσεις και εκχυλίσματα τα οποία , αν πρόκειται για κολλοειδούς υφής ζωικά και φυτικά εκχυλίσματα ή καπναιθάλη , λοιπά προϊόντα ατμοσφαιρικής ρύπανσης , καθαλατώσεις και νερό δικτύου πόλεως ή θαλάσσης , κατά περίπτωση μειώνεται αρκετά η διηλεκτρική αντοχή του φλοιού .

Τα φυλλώματα των δένδρων , έχουν πολύ μικρό πάχος και μεγαλύτερη επιφάνεια σε σχέση με το πάχος (σε σύγκριση με τον κορμό) και περιέχουν σημαντικά μεγαλύτερο ποσοστό υγρασίας από τον κορμό , ενώ ταυτόχρονα , λόγω σχήματος , ευνοούν την επικάλυψη εξωτερικών ρύπων και καθαλατώσεων . Αντίθετα , σε ξηρό περιβάλλον και κυρίως για τα φυλλοβόλα δέντρα , αποβάλλουν γρήγορα σχεδόν το σύνολο υγρασίας που περιέχουν ευνοώντας την ανάπτυξη πυρκαγιάς .

2 Διερεύνηση αν συντρέχει κίνδυνος για την ανθρώπινη ζωή από ενδεχόμενες διαρροές ρεύματος σε στύλους μέσης τάσης καθώς και σε δένδρα που βρίσκονται πλησίον των γραμμών ηλεκτρικής ενέργειας

Ακολούθως , θα διερευνηθεί κατά πόσον συντρέχει κίνδυνος για την ανθρώπινη ζωή από διαρροές ρεύματος σε στύλους Μέσης Τάσης και σε κορμούς και κλαδιά δένδρων , τα οποία βρίσκονται σε κοντινή απόσταση από αγωγούς διανομής . Οι υπολογισμοί που ακολουθούν στην παράγραφο 3 εντάσσονται στην διαδικασία διερεύνησης ενός υποθετικού γεγονότος που έχει ως ακολούθως :

Ένας αγρότης τραυματίστηκε από ηλεκτροπληξία επιχειρώντας να μεταφέρει σωλήνες αλουμινίου για αρδευτική χρήση , μέσω χωμάτινου κοινοτικού δρόμου , στο χωράφι του , που βρίσκεται παρακείμενα του δρόμου . Μεταξύ δρόμου και χωραφιού , υπήρχαν υψηλά χόρτα και δένδρα που ικανοποιούσαν τις αποστάσεις ασφαλείας από την παρακείμενη γραμμή Μέσης Τάσης 20 kV .

Εκ πρώτης όψεως και με δεδομένο ότι το βάρος των σωλήνων είναι περίπου 3 κιλά ενώ το μήκος τους 6 μέτρα , η διέλευση του αγρότη μέσω των χόρτων , κρατώντας τους σωλήνες σε οριζόντια θέση φαντάζει δυσχερής . Αντιθέτως , η μεταφορά τους σε κατακόρυφη θέση φαίνεται ευκολότερη .

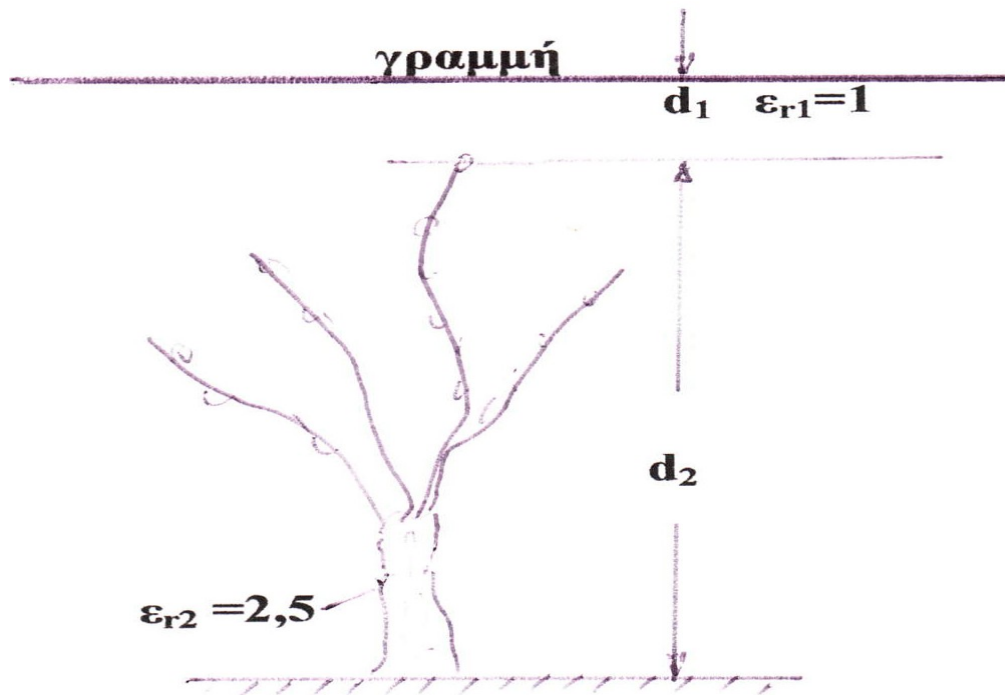
Ο εν λόγω αγρότης ισχυρίστηκε ότι υπέστη ηλεκτροπληξία στην προσπάθεια του να διαβεί τον αγρό μεταφέροντας τις σωλήνες σε οριζόντια θέση καθώς υπήρξε ισχυριζόμενη επαφή του σωλήνα με το δένδρο .

Η ηλεκτροπληξία δεν ήταν θανατηφόρος γιατί φορούσε ελαστικά υποδήματα που τον προστάτευσαν ενώ η ιατροδικαστική εξέταση υπέδειξε το στομάχι του ως σημείο εισόδου και το πόδι του ως έξοδο του ρεύματος . Σημειώνεται ότι η γραμμή δεν ετέθη εκτός τάσης .

3 Υποθετική επαφή ανθρώπου με δένδρο το οποίο γειτνιάζει με γυμνούς αγωγούς δικτύου διανομής μέσης τάσης

3.1 Απλοποιημένη διάταξη γειτνιάζοντος δένδρου και αγωγού διανομής

Στο σχήμα 3.1-1 , απεικονίζεται σε απλοποιημένη μορφή , η διάταξη γειτνίασης ενός δένδρου με έναν αγωγό διανομής μέσης τάσης .



Σχήμα 3.1-1 : Απλοποιημένη παράσταση της διάταξης μεταξύ δένδρου και αγωγού διανομής μέσης τάσης

όπου d_1 : ελάχιστη απόσταση μεταξύ αγωγού μέσης τάσης και δένδρου

d_2 : μέγιστη απόσταση μεταξύ γης και του πλησιέστερου εκ των σημείων του δένδρου ως προς τον αγωγό

ϵ_{r1} : σχετική διηλεκτρική σταθερά του αέρα

ϵ_{r2} : σχετική διηλεκτρική σταθερά του δένδρου

Χρησιμοποιώντας τα προαναφερόμενα στην παράγραφο 1.3.1 , για τις αποστάσεις ασφαλείας δένδρων που χρήζουν κλαδέματος , θα θεωρηθεί ότι τηρούνταν η ελάχιστη απόσταση ασφαλείας μεταξύ του αγωγού και του πλησιέστερου σημείου του δένδρου προς αυτόν , όπως εξάλλου αναφέρεται και στην διατύπωση του προβλήματος .

Σύμφωνα με τα προηγούμενα , η ελάχιστη απόσταση ασφαλείας μεταξύ αγωγού και βλάστησης είναι τα 2,5 m ενώ ανάλογα με το είδος του δένδρου , την επιφόρτιση της γραμμής και την συχνότητα επιθεώρησης του δικτύου και την πρόβλεψη της σύμβασης για το κλάδεμα , δύναται να υπάρχει προσαύξηση ως και 12,8 m (για αγωγούς που δέχονται μέτρια ή βαριά επιφόρτιση και άνοιγμα μεταξύ διαδοχικών στύλων 350 m και 430 m αντίστοιχα) .

Εντούτοις , τόσο ακραίες τιμές προσαύξησης , απαντώνται κυρίως σε πλαγιές και τοποθεσίες με ειδικού τύπου ανάγλυφο (π.χ. δυσπρόσιτες δασώδεις χαράδρες) όπου τα ανοίγματα είναι αρκετά μεγαλύτερα από την σύνηθη περίπτωση ενώ παράλληλα η σύμβαση κλαδέματος του εργολάβου είναι ετήσια και το δίκτυο επιθεωρείται σε ετήσια βάση .

Στην παρούσα περίπτωση , όπου το συμβάν θα θεωρηθεί ότι έλαβε χώρα σε αγροτική περιοχή που εξυπηρετείται από οδικό δίκτυο , η μέγιστη δυνατή προσαύξηση είναι της τάξης της απόστασης ασφαλείας , διπλασιάζοντας την περίπου . Αυτό συμβαίνει συχνά σε ορεινά δασικά τμήματα και για αγωγούς που δέχονται βαριά επιφόρτιση και σπανίως σε αγροτικές περιοχές .

3.1.1 Μελέτη της απόστασης μόνωσης όταν τηρείται η απόσταση ασφαλείας

Τελικά , η δυσμενέστερη περίπτωση , όταν τηρούνται οι συμβάσεις για το κλάδεμα , θα ήταν να θεωρηθεί ότι το δένδρο απέχει 2,5 m κατελάχιστον από την γραμμή και αυτό θα συνέβαινε κάποιες εβδομάδες αφού είχε περάσει ένας χρόνος από τις προηγούμενες εργασίες κλαδέματος και για κάποιους λόγους (π.χ. κακοκαιρία , φωτιές κλπ) υπήρξε μικρή υπέρβαση του χρονοδιαγράμματος των εργασιών κλαδέματος .

Σύμφωνα με την 1.2.6.4 , όταν εφαρμόζεται τακτικά η επιθεώρηση και οι εργασίες κλαδέματος , οι αποστάσεις μόνωσης των αγωγών του δικτύου της ηλεκτρικής ενέργειας είναι γενικά (για λόγους προστασίας του ανθρώπου και αξιόπιστης λειτουργίας των γραμμών ανεξαρτήτως των καιρικών συνθηκών) πολύ μεγαλύτερες από τις ελάχιστα απαιτούμενες .

Οπότε , με δεδομένο ότι έχουν τηρηθεί τα χρονοδιαγράμματος συντήρησης , η απόσταση μεταξύ γυμνού αγωγού και δένδρου (d_1) αναμένεται να υπερκαλύπτει την απόσταση μόνωσης . Αυτό μελετάται ακολούθως .

Για την αξιολόγηση της απόστασης μόνωσης (d) μεταξύ των αγωγών μίας γραμμής μέσης τάσης (20 kV) σε περιβάλλον ατμοσφαιρικού αέρα , ισχύει για τη δυσμενέστερη περίπτωση των πρακτικών εφαρμογών (που είναι υπό συνθήκες υγρασίας η διάταξη "ακίδα-πλάκα", όπως π.χ. είναι η ύπαρξη αιχμηρής προεξοχής σε ένα αγωγό ως προς τα φυλλώματα ενός δένδρου) η παρακάτω σχέση :

$$d \geq (U/Ed) \cdot 0,935 \div 0,99 \quad (3.1-1)$$

όπου : d : η απόσταση μόνωσης για αγωγούς μέσης τάσης

U : η τιμή της τάσης (στην υπό εξέταση περίπτωση $20\sqrt{3} = 11,56$ kV)

Ed : η ειδική ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ($Ed=3,5$ kV/cm)

Από την παραπάνω σχέση προκύπτει ότι η ελάχιστη απόσταση μόνωσης d_{min} στις γραμμές μέσης τάσης υπό κανονικές συνθήκες είναι :

$$d_{min} = 5,34 \div 5,66 \text{ cm} \quad (3.1-2)$$

όπου : d_{min} : η ελάχιστη απόσταση μόνωσης στις γραμμές μέσης τάσης (για λειτουργία υπό κανονικές συνθήκες)

Για λόγους , όμως , προστασίας του ανθρώπου και αξιόπιστης λειτουργίας των γραμμών , ανεξαρτήτως των καιρικών συνθηκών , η απόσταση ασφαλείας ($d_{ασφ}$) είναι , στην πράξη , πολύ μεγαλύτερη τόσο μεταξύ αγωγών , όσο κυρίως μεταξύ αγωγών και γης . Έτσι , η απόσταση ασφαλείας (dL) μεταξύ των αγωγών μέσης τάσης είναι [1] :

$$dL = 85 \div 125 \text{ cm} \quad (3.1-3)$$

όπου : dL : η απόσταση ασφαλείας μεταξύ αγωγών διανομής μέσης τάσης

και η ελάχιστη απόσταση του βέλους κάμψης προς γη H_{min} (δηλαδή του χαμηλότερου σημείου της

γραμμής προς γη) είναι κατά τον Κανονισμό , που είναι Νόμος του κράτους [1] :

$$H_{\min} = 5,5 \text{ m} \quad (3.1-4)$$

όπου : H_{\min} : η ελάχιστη απόσταση του βέλους κάμψης προς γη

Συνεπώς , όταν η απόσταση των φυλλωμάτων , του κοντινότερου προς τη γραμμή δέντρου , είναι μεγαλύτερη των 5,66 cm δεν μπορεί να συμβεί διαρροή ρεύματος προς γη μέσω των δέντρων .

Με αφετηρία αυτό το δεδομένο , συμπεραίνεται ότι και η απόσταση ασφαλείας που πρέπει να υπάρχει μεταξύ δένδρων και αγωγών μέσης τάσης χαρακτηρίζεται ως τεράστια αφού είναι πολλαπλάσια της απόστασης μόνωσης και μεγαλύτερη κατά 2 τάξεις μεγέθους (περίπου 40 φορές μεγαλύτερη) .

Καταδεικνύεται σαφώς , λοιπόν , ότι όσον αφορά τα ατυχήματα που συμβαίνουν από επαφή ανθρώπων με κορμούς δένδρων , τα οποία απέχουν λιγότερο μεν από 2,5 m από γυμνούς αγωγούς μέσης τάσης αλλά αρκετά περισσότερο από την $d_{\min} = 5,66 \text{ cm}$, δεν ευσταθεί ως αιτία ατυχήματος η ελάττωση της απόστασης ασφαλείας κατά κάποιες δεκάδες cm ως αποτέλεσμα ελλιπούς τήρησης των συμβάσεων κλαδέματος .

3.1.2 Μελέτη της απόστασης μόνωσης όταν δεν τηρείται η απόσταση ασφαλείας (για τιμές απόστασης αγωγού – δένδρου πολύ κοντά στην ελάχιστη απόσταση μόνωσης)

Οπότε , θα εξεταστεί και η περίπτωση κατά την οποία δεν τηρείται η απόσταση ασφαλείας ($d_{\text{ασφ}} = 2,5 \text{ m}$) μεταξύ δένδρων και αγωγού , τηρείται όμως οριακά η απόσταση μόνωσης ($d_{\min} = 5,66 \text{ cm}$) .

Θα ληφθούν δεδομένα , κατά την διερεύνηση αυτής της υπόθεσης , που αφορούν στην δυσμενή περίπτωση κατά την οποία ένας άνθρωπος έρχεται σε επαφή με δένδρο αρκετά ψηλό , τόσο ώστε να συγκρίνεται άμεσα η τάξη μεγέθους του με το σύνηθες ύψος στο οποίο αναρτώνται οι γραμμές μέσης τάσης , που είναι περίπου 10 m .

Πράγματι , αν θεωρηθεί ότι το ύψος ενός δέντρου είναι $d_2 = 10 \text{ m}$ και ότι τα φυλλώματα στην κορυφή του απέχουν από αγωγό μέσης τάσης (20 kV) κατά απόσταση $d_1 = 10 \text{ cm}$ (βλ. Σχήμα 3.1-1) , τότε για σχετική διηλεκτρική σταθερά του αέρα $\epsilon_1 = 1$ και σχετική διηλεκτρική σταθερά του δέντρου περίπου $\epsilon_2 = 2,5$, ισχύει η σχέση :

$$E_1 = \{ \epsilon_2 \cdot U / (\epsilon_2 \cdot d_1 + \epsilon_1 \cdot d_2) \} \cdot \{ 1/\eta \} \quad (3.1-5)$$

όπου : E_1 : η πεδιακή ένταση στο διάκενο του αέρα

U : η ενεργός τιμή της τάσης (στην υπό εξέταση περίπτωση $20\sqrt{3} = 11,56 \text{ kV}$)

η : ο συντελεστής χρησιμοποίησης του πεδίου

Στους υπολογισμούς που ακολουθούν θα θεωρηθεί ότι πρόκειται για την δυσμενέστερη περίπτωση των πρακτικών εφαρμογών που είναι η « ακίδα-πλάκα » . Προς τούτο , ισχύει , κατά προσέγγιση , ότι η διάταξη « αγωγός-αέρας-δέντρο-γη » αντιστοιχεί σε « ακίδα (δηλαδή μία πολύ μικρή προεξοχή επί του αγωγού)-αέρας-δέντρο-πλάκα » , όπου το ηλεκτρόδιο πλάκα είναι η γη , προσέγγιση που είναι ρεαλιστική λόγω της πολύ μικρής ακίδας σε σχέση με την υπόλοιπη διάταξη .

Επομένως , για τη διάταξη αυτή , λόγω της 1.2.5.1-3 , ισχύει η σχέση :

$$\eta = \{ R \cdot \ln (4d_1 / R) \} / (2 \cdot d_1) \quad (3.1-6)$$

$$\Rightarrow \eta = \{ 0,01 \cdot \ln (40 / 0,01) \} / (2 \cdot 10) = 0,00414629$$

$$\Leftrightarrow \eta \approx 0,00415 \quad (3.1-7)$$

όπου : R : η ακτίνα καμπυλότητας της ακίδας (θεωρήθηκε ότι έχει την δυσμενέστατη τιμή R=0,1 mm) .

Έτσι, η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου στο διάκενο του αέρα d1 είναι λόγω της 1.2.5.1-4 :

$$\begin{aligned} E_1 &= \{ 2,5 \cdot 11,56 / (2,5 \cdot 10 + 1000) \} \cdot \{ 1 / 0,00415 \} \\ &= (28,9 / 1025) \cdot (1 / 0,00415) \\ &= 6,8 \text{ kV / cm} \end{aligned} \quad (3.1-8)$$

Επομένως , για την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου στο δέντρο ισχύει λόγω της 1.2.3-8 :

$$\begin{aligned} E_2 &= \epsilon_{r1} \cdot E_1 / \epsilon_{r2} \\ &= 6,8 / 2,5 \\ &= 2,72 \text{ kV / cm} \end{aligned} \quad (3.1-9)$$

Συνεπώς , τόσο ο αέρας όσο και το δένδρο διατηρούν τη μονωτική ικανότητά τους, αφού ο αέρας και το ξύλο διασπώνται αντίστοιχα περίπου στα 21 kV / cm και 30 - 50 kV / cm .

Επιπλέον , λόγω των τιμών της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου για το ξύλο , οι υπολογισμοί καλύπτουν και την υποθετική επαφή του δένδρου με τον αγωγό , το οποίο μελετάται παρακάτω .

3.1.3 Κυκλωματική μελέτη της αγωγίμης επαφής ανθρώπου με την διάταξη << αγωγός-δένδρο >>

Τέλος , θεωρείται ότι ένας άνθρωπος ήλθε σε αγωγή επαφή με δέντρο , το οποίο είναι αρκετά ψηλό ώστε τα φυλλώματα του να ακουμπούν τον αγωγό έτσι ώστε να σχηματίζεται κύκλωμα αντιστάσεων κατά το σχήμα 3.1.3 (όπου Rδ1 και Rδ2 οι επιμέρους αντιστάσεις του δέντρου και Ra η αντίσταση του ανθρώπου .

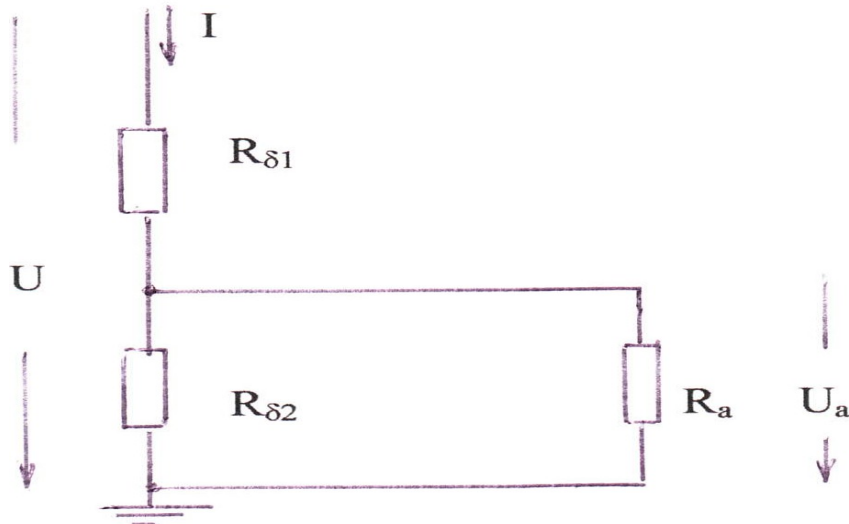
Λαμβάνονται ως δεδομένα για τις αντιστάσεις κάθε ενός από τα μέρη της διάταξης : << αγωγός-δένδρο-άνθρωπος-γη >> , τα δυσμενέστερα που κρίνονται ως ρεαλιστικά ώστε να διερευνηθεί ένα συνολικά δυσμενέστατο σενάριο .

Λαμβάνεται , λοιπόν , ως δεδομένο για ειδική αντίσταση του δέντρου ρ , μία τιμή της τάξης των $10^{10} \Omega \text{ cm}$, που είναι αντιπροσωπευτική για το ξύλο , κατά την βιβλιογραφία [2] .

Θα θεωρηθεί ότι το δένδρο είναι πολύ χαμηλό , ώστε να μειώνεται δραματικά η διαδρομή του ρεύματος επί του κορμού . Έτσι , συνολικά το δένδρο έχει ύψος 1,5 m (αλλά παρόλαυτα , έρχεται σε επαφή με τον αγωγό μέσης τάσης που συνήθως αναρτάται σε πολλαπλάσιο αυτού ύψος) και έχει διάμετρο κορμού $2 r = 0,15 \text{ m}$.

Ο άνθρωπος θεωρείται ότι έρχεται σε αγωγή επαφή με το δένδρο σε ύψος 1 m από το έδαφος και το δένδρο από το σημείο της επαφής του με τον άνθρωπο ως το σημείο επαφής του με τον αγωγό έχει μήκος 0,50 m . Οπότε , το δένδρο , για την κυκλωματική μελέτη χωρίζεται σε 2 μέρη με αντίστοιχα μήκη : $l_1 = 0,5 \text{ m}$ και $l_2 = 1 \text{ m}$ και αντιστάσεις Rδ1 και Rδ2 .

Επισημαίνεται ότι , για δένδρα τόσο μικρού ύψους είναι σχεδόν απίθανο να έρχονται σε επαφή με αγωγούς μέσης τάσης που αναρτώνται συνήθως σε ένα ύψος της τάξης των 10 m , εντούτοις , χρησιμοποιείται ως δυσμενέστατο παράδειγμα σε περίπτωση γειτνίασης βλάστησης με αγωγούς διανομής μέσης τάσης λόγω διέλευσης της γραμμής από κεκλιμένα εδάφη κατ'αντιστοιχία με το σχήμα 1.2.6.2-2 .



Σχήμα 3.1.3 : Κύκλωμα των αντιστάσεων κατά την αγώγιμη επαφή ανθρώπου με δέντρο (μέσω μεταλλικού σωλήνα ή με τα χέρια)

- όπου I : συνολικό ρεύμα προς γη
 U : τάση της γραμμής προς γη (11560 βολτ)
 U_a : πτώση τάσης επί της αντίστασης του ανθρώπου (R_a)
 $R_{\delta 1}$: αντίσταση του κορμού του δένδρου για μήκος 50 εκατοστά
 $R_{\delta 2}$: αντίσταση του κορμού του δένδρου για μήκος 100 εκατοστά
 R_a : αντίσταση του ανθρώπου (2125 Ω) [1]

Θεωρείται ότι το ρεύμα ρέει κατά την εγκάρσια τομή του κορμού που περιγράφεται από την σχέση :

$$R = \rho \cdot l / A \quad (3.1.3)$$

- όπου : R : η συνολική ηλεκτρική αντίσταση του αντικειμένου
 ρ : η ειδική αντίσταση του μέσου
 l : το συνολικό μήκος του μέσου
 A : η διατομή του μέσου την οποία διαρρέει σε κάθετη διεύθυνση το ρεύμα
 ίση με $\pi \cdot r^2$ για κυλινδρικής δομής μέσα με ακτίνα r

Με δεδομένη την ειδική αντίσταση του δέντρου $\rho = 10^{10} \Omega \text{ cm}$ έχουμε για τις αντίστοιχες τιμές αντίστασης , λόγω της 3.1.3 :

$$R_{\delta 1} = \rho \cdot l_1 / \pi \cdot r^2 = 10^{10} \cdot 0,5 / \pi \cdot 0,15^2 \approx 7,07 \cdot 10^{10} \quad (3.1.3-1)$$

$$R_{\delta 2} = \rho \cdot l_2 / \pi \cdot r^2 = 10^{10} \cdot 1 / \pi \cdot 0,15^2 \approx 14,14 \cdot 10^{10} \quad (3.1.3-2)$$

- όπου : $R_{\delta 1}$: αντίσταση του κορμού του δένδρου για μήκος $l_1 = 50 \text{ cm}$
 $R_{\delta 2}$: αντίσταση του κορμού του δένδρου για μήκος $l_2 = 100 \text{ cm}$
 r : η ακτίνα της κορμού του δένδρου (θεωρούμενος ως κύλινδρος ακτίνας r)

Τέλος , ως αντίσταση του ανθρώπου που έρχεται σε επαφή με το δένδρο , θα ληφθεί μία αρκετά μεγάλη τιμή , που σίγουρα δεν αντιπροσωπεύει κάποιον που έχει λάβει αντίστοιχα μέτρα μόνωσης – προφύλαξης από επαφή με ρεύμα , όπως γάντια , ελαστικά παπούτσια κλπ. Οπότε , επιλέγοντας μία τιμή για την συνολική αντίσταση του ανθρώπου $R_a = 2125 \Omega$, τηρείται η υπόθεση περί δυσμενών συνθηκών . Άρα , η συνολική αντίσταση της διάταξης είναι :

$$R_{ολ} = R_{δ1} + \{ R_{δ2} \cdot R_a / (R_{δ2} + R_a) \} \quad (3.1.3-3)$$

όπου : $R_{δ1}$: αντίσταση του κορμού του δένδρου για μήκος $l_1 = 50 \text{ cm}$
 $R_{δ2}$: αντίσταση του κορμού του δένδρου για μήκος $l_2 = 100 \text{ cm}$
 R_a : αντίσταση του ανθρώπου (2125Ω)

Ενώ , λόγω των 3.1.3-1 και 3.1.3-2 , η 3.1.3-3 γίνεται :

$$= [\rho \cdot l_1 / (\pi \cdot r^2)] + \{ [R_a \cdot \rho \cdot l_2 / (\pi \cdot r^2)] / [R_a + \rho \cdot l_2 / (\pi \cdot r^2)] \} \quad (3.1.3-4)$$

Οπότε , τελικά προκύπτει κατά προσέγγιση η ακόλουθη τιμή συνολικής αντίστασης $R_{ολ}$, για την θεωρούμενη διάταξη : << αγωγός-αέρας-δέντρο-άνθρωπος-γη >> :

$$\Leftrightarrow R_{ολ} \approx 29 \cdot 10^{10} \Omega \quad (3.1.3-5)$$

Θα πρέπει να σημειωθεί , ότι η παραπάνω προσομοίωση του δέντρου με τις δύο αντιστάσεις $R_{δ1}$ και $R_{δ2}$ (για μήκος δέντρου αντίστοιχα 50 cm και 100 cm , αντί μεγαλύτερων συνήθως αντιστάσεων λόγω των διαφόρων κλαδιών) , οδηγεί σε μεγαλύτερη καταπόνηση του ανθρώπου από την πραγματική , αφού όσο μικρότερη είναι η αντίσταση τόσο αυξάνει η τιμή του ρεύματος .

Επομένως , με τις προαναφερθείσες παραδοχές , η προσέγγιση του προβλήματος είναι αξιόπιστη γιατί δεν ενδιαφέρει η ακρίβεια των υπολογισμών αλλά η τάξη μεγέθους των αποτελεσμάτων , ώστε μέσω αυτών να είναι ασφαλή τα συμπεράσματα.

Έτσι, επειδή η τιμή του συνολικού ρεύματος θα ήταν περίπου :

$$I_{ολ} = U / R_{ολ} \quad (3.1.3-6)$$

όπου : $I_{ολ}$: η συνολική τιμή ρεύματος της διάταξης
 U : η ενεργός τιμή της τάσης
 $R_{ολ}$: η συνολική τιμή της αντίστασης της διάταξης

και με εφαρμογή στην 3.1.3-6 , των ήδη υπολογισμένων τιμών $R_{ολ} \approx 29 \cdot 10^{10} \Omega$ και $U = 20 \sqrt{3} \text{ kV} = 11,56 \text{ kV}$, η τιμή του συνολικού ρεύματος είναι περίπου :

$$I_{ολ} = 11560 / 29 \cdot 10^{10} = 4 \cdot 10^{-8} \text{ A} \quad (3.1.3-7)$$

η πτώση τάσης επί της αντίστασης του ανθρώπου (R_a) θα ήταν το πολύ :

$$U_a \approx I_{ολ} \cdot R_a \quad (3.1.3-8)$$

όπου : U_a : η πτώση τάσης επί της αντίστασης του ανθρώπου R_a
 ή εφαρμόζοντας τις αντίστοιχες τιμές για την R_a και το $I_{ολ}$ από τις 3.1.3-5 και 3.1.3-7 :

$$U_a = 4 \cdot 108 \cdot 2125 = 0,085 \text{ mV} \quad (3.1.3-9)$$

4 Συμπεράσματα

Στην παράγραφο 3.1.3 , κατά την κυκλωματική μελέτη του ισοδύναμου κυκλώματος της διάταξης : << αγωγός-αέρας-άνθρωπος-γη >> , λήφθηκαν ως δεδομένα , ακραία μεγέθη τιμών , που δεν απαντώνται συχνά στην πραγματικότητα και αρκετά δυσμενή σε βάρος της γραμμής .Χρησιμοποιώντας αυτά τα δυσμενή δεδομένα , προέκυψε ότι η πτώση τάσης επί ανθρώπου που έρχεται σε επαφή με δένδρο που γειτνιάζει με γυμνούς αγωγούς μέσης τάσης , είναι της τάξης των 0,085 mV , στην ακραία περίπτωση όπου το δένδρο έρχεται σε επαφή με τους αγωγούς .

Συνεπώς , επειδή η επικίνδυνη για τον άνθρωπο τάση είναι πάνω από 50 V , είναι προφανές ότι η τιμή της τάσης των 0,085 mV είναι παντελώς ακίνδυνη . Το μόνο που ενδεχομένως μπορεί να συμβεί σ' αυτές τις περιπτώσεις είναι τα καψαλίσματα σε ορισμένα φύλλα του δέντρου από την αποδιδόμενη σε αυτά ενέργεια .

Επίσης , το ότι δεν συντρέχει κίνδυνος ηλεκτροπληξίας από δέντρα πλησίον των αγωγών το αντιλαμβάνεται κανείς εύκολα από τους ίδιους τους ξύλινους στύλους της ΔΕΗ , τεράστιος αριθμός των οποίων είναι εγκατεστημένος σε κατοικημένες περιοχές (τόσο στην Ελλάδα , όσο και στις άλλες χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης) , χωρίς ποτέ να έχει δημιουργηθεί το παραμικρό πρόβλημα.

Αξιοσημείωτο είναι επίσης , ότι οι από άχυρο (δηλαδή ξύλο) φωλιές των πελαργών σε στύλους, δεν έχουν δημιουργήσει ποτέ προβλήματα ηλεκτροπληξίας , αν και είναι σε επαφή τόσο με τον στύλο όσο και με τους αγωγούς .

Κατόπιν των ανωτέρω , συμπεραίνεται ότι δεν μπορεί να προκληθεί ηλεκτροπληξία με διαρροή ρεύματος από δέντρο του οποίου τα φυλλώματα βρίσκονται σε επαφή με γραμμή μέσης τάσης . Η ηλεκτροπληξία είναι δεδομένη μόνο όταν ακουμπήσει κανείς τους αγωγούς με μεγάλου μήκους μεταλλικό αντικείμενο (μπετόβεργα , σωλήνας , κ.λ.π.) ή όταν τους προσεγγίσει με το αντικείμενο αυτό σε απόσταση μικρότερη από 5,66 cm , οπότε η αγώγιμη σύνδεση με την γραμμή γίνεται μέσω διάσπασης (ηλεκτρικού τόξου) μεταξύ αγωγού και μεταλλικού αντικειμένου .

Βιβλιογραφία

- [1] Μπούρκας Π.Δ. , Πολυκράτη Α.Δ. , Βιομηχανικές ηλεκτρικές εγκαταστάσεις Τόμος ΙΙ (Εφαρμογές βιομηχανικών ηλεκτρικών διατάξεων) , εκδόσεις Ε.Μ.Π. , Αθήνα 2012 .
- [2] Μπούρκας Π.Δ. , Καραγιαννόπουλος Κ.Γ. , Εφαρμογές ηλεκτρολογικών τεχνικών εκθέσεων πραγματογνωμοσύνης σε βιομηχανικές και κτιριακές εγκαταστάσεις , εκδόσεις Ε.Μ.Π , Αθήνα 2011 .
- [3] Ψαρρός Ε.Γ. , Υπαίθριες γραμμές διανομής χαμηλής τάσης σε περιβάλλον πυρκαγιών , Διδακτορική Διατριβή , Ε.Μ.Π . , Αθήνα 2009
- [4] Κανονισμός για την Εγκατάσταση και Συντήρηση Υπαίθριων Γραμμών Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΚΕΣΥΓΗΕ) , ΦΕΚ 608/Β/6-10-1967 , όπως τροποποιήθηκε με τα ΦΕΚ 476/Β/25-7-1969 , ΦΕΚ 829/Β/19-12-1969 και ΦΕΚ 697/Β/24-8-1971) .
- [5] Εγχειρίδιο τυποποιημένων κατασκευών της Δ.Ε.Η. .
- [6] Οδηγία Διανομής Ν^ο 38 της Δ.Ε.Η , για τις αποστάσεις ασφαλείας δικτύων διανομής .
- [7] http://portal.tee.gr/portal/page/portal/MATERIAL_GUIDES/KSILO/xil_1_5t.htm
- [8] Φυτολογία, Εκπαιδευτική Εγκυκλοπαίδεια Τόμος 10 , Εκδοτική Αθηνών , Αθήνα 1999
- [9] Μαντάνη Γ. , Δομή και ιδιότητες ξύλου , Διδακτικές σημειώσεις .
- [10] Αραμπατζής Θ. , Θάμνοι και δέντρα στην Ελλάδα , εκδόσεις Οικολογική Κίνηση Δράμας , Δράμα 1998 .
- [11] Διεθνής Cigre , Αύγουστος 1998 , Polluted Insulators