



**Α.Ε.Ι. ΠΕΙΡΑΙΑ Τ.Τ.
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε.**

“Συγκριτική αξιολόγηση των μεθοδολογιών και των οργάνων που χρησιμοποιούνται για την εύρεση βλαβών σε υπόγεια καλώδια ισχύος”



Επιβλέπων Καθηγητής: Ψωμόπουλος Κωνσταντίνος
Σπουδαστής: Μαυρής Κωνσταντίνος (Α.Μ. 20921)

**Αθήνα
Ιούλιος 2017**

Copyright © Ανώτατο Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Πειραιά Τ.Τ.

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 την χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται στον 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 Ανώτατου Εκπαιδευτικού Ιδρύματος Πειραιά Τ.Τ..

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Ολοκληρώνοντας αυτή την πτυχιακή εργασία θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στον επιβλέποντα καθηγητή μου κ.Ψωμόπουλο Κωνσταντίνο για την βοήθεια, καθοδήγηση και συμπαράσταση που μου παρείχε όχι μόνο κατά την εκπόνηση της αλλά και σε όλη την διάρκεια των σπουδών μου. Τον ευχαριστώ θερμά και ειλικρινά λοιπόν για την ευγενική, ανθρώπινη και αξιοπρεπή στάση του και συμπεριφορά.

Ένα πολύ μεγάλο ευχαριστώ στην αγαπημένη μου οικογένεια για την υποστήριξη και την υπομονή που έδειξαν σε όλο το διάστημα αυτό. Η εργασία αυτή είναι στο μεγαλύτερο βαθμό αφιερωμένη σε εκείνους και ειδικά στον μαστρο Φώτη, τον πατέρα μου.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τον συνάδελφο μου και φίλο μου Γιάννη Γιαννουλόπουλο για την αφύπνιση που μου προσέφερε και την παρότρυνση του να επιστρέψω στην Σχολή για την περάτωση των σπουδών μου αποσκοπώντας στην επαγγελματική μου και προσωπική μου βελτίωση.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	iii
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	iv
ΛΙΣΤΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ	ix
ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ	xii
SUMMARY	xiii
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	xiv
1^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ “Εισαγωγή στα Δίκτυα Διανομής και στην Μεταφορά Ενέργειας”	
1.1. Δίκτυα διανομής και μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας.....	1
1.1.1. Δομή ενός Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας.....	1
1.1.2. Σύστημα παραγωγής.....	3
1.1.3. Σύστημα μεταφοράς.....	4
1.1.4. Σύστημα διανομής.....	5
1.2. Γενικά χαρακτηριστικά του Ελληνικού Συστήματος Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας.....	6
1.3. Διαθεσιμότητα και Δείκτες Απόδοσης του Ελληνικού Διασυνδεδεμένου Συστήματος Μεταφοράς.....	10
1.3.1. Διαθεσιμότητα Κυκλωμάτων και Διασυνδέσεων.....	10
1.3.2. Διαθεσιμότητα ΑΜΣ και Μετασχηματιστών.....	11
1.3.3. Διαθεσιμότητα Συστήματος Μεταφοράς.....	11
1.3.4. Μη τροφοδοτούμενη Ενέργεια.....	11
2^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ “Κατασκευαστικά και τεχνικά στοιχεία υπόγειων καλωδίων ισχύος”	
2.1. Κατηγοριοποιήσεις τάσης (X.T. ,M.T. ,Y.T. και Y.Y.T.).....	12
2.2. Καλώδια ισχύος.....	12
2.3. Η χρήση των καλωδίων.....	13
2.4. Δομή καλωδίου ισχύος.....	14
2.5. Κατασκευή καλωδίων.....	14
2.5.1. Αγωγοί.....	15
2.5.2. Ημιαγωγίμα στρώματα.....	17
2.5.3. Μόνωση.....	18
2.5.4. Εξωτερικός μανδύας.....	19
2.5.5. Μανδύας.....	19
2.5.6. Ακροκιβώτια.....	20

2.5.7. Σύνδεσμοι.....	20
2.6. Τεχνικές διαφορές υπόγειας και εναέριας μεταφοράς ηλεκτρικής ισχύος.....	22
2.6.1. Ηλεκτρική μόνωση.....	22
2.6.2. Μεταφορά θερμότητας.....	23
2.6.3. Κατασκευή και εγκατάσταση.....	25
2.7. Διάταξη καλωδίων και σχεδιασμός του συστήματος σε καλώδια τύπου XLPE	
M.T. και Y.T.....	29
2.7.1. Ηλεκτρικό πεδίο.....	30
2.7.2. Χωρητικότητα, ρεύμα φόρτισης.....	31
2.7.3. Αυτεπαγωγή ,επαγωγική αντίσταση.....	31
2.7.4. Απώλειες σε καλώδια.....	32
2.7.4.1. Απώλειες εξαρτώμενες από την τάση.....	32
2.7.4.2. Απώλειες εξαρτώμενες από το ρεύμα.....	33
2.7.4.2.1. Ωμικές απώλειες του αγωγού.....	33
2.7.4.2.2. Απώλειες μέσω του επιδερμικού φαινομένου.....	33
2.7.4.2.3. Απώλειες μέσω του φαινομένου εγγύτητας.....	33
2.7.4.2.4. Απώλειες στον μεταλλικό μανδύα.....	34
2.8. Πρότυπα καλωδιακών συστημάτων και καλωδίων XLPE.....	34
2.8.1. Πρότυπα IEC.....	34
2.8.2. Πρότυπα CENELEC.....	35
3^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ “Βλάβες και αστοχίες καλωδίων”	
3.1. Εισαγωγή.....	36
3.1.1. Ορισμός του σφάλματος.....	36
3.1.2. Συμμετρικό και ασύμμετρο σφάλμα.....	36
3.1.3. Τύποι σφαλμάτων καλωδίων.....	39
3.2. Αιτίες σφαλμάτων-αστοχιών καλωδίων και η ανάλυση τους.....	40
3.2.1. Μηχανικές βλάβες.....	40
3.2.2. Γήρανση.....	40
3.2.2.1. Υδάτινοι δενδρίτες.....	41
3.2.2.2. Ηλεκτρικοί δενδρίτες.....	42
3.2.3. Διάβρωση του μανδύα.....	43
3.2.4. Υγρασία στην μόνωση.....	43
3.2.5. Θέρμανση των καλωδίων.....	44
3.2.6. Υπερτάσεις λόγω κεραυνών.....	44

3.2.7. Ηλεκτρική διάτρηση.....	44
4^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ “Μέθοδοι και όργανα εύρεσης βλαβών και αστοχιών”	
4.1. Εισαγωγή.....	45
4.2. Οφέλη της εκτίμησης τοποθεσίας ενός σφάλματος.....	45
4.2.1. Εξοικονόμηση χρόνου και προσπαθειών.....	45
4.2.2. Βελτίωση της διαθεσιμότητας του συστήματος.....	45
4.2.3. Οικονομικοί παράγοντες.....	46
4.3. Ακρίβεια στον εντοπισμό σφάλματος.....	46
4.4. Όργανα εύρεσης σφαλμάτων σε υπόγεια καλώδια.....	46
4.5. Ανάλυση του συστήματος εντοπισμού.....	47
4.5.1. Γεννήτρια κρουστικών τάσεων.....	47
4.5.1.1. Ανάλυση του συστήματος μιας κρουστικής γεννήτριας.....	50
4.5.2. Παλμοχόμετρο.....	55
4.5.2.1. Ταχύτητα διάδοσης.....	57
4.5.2.2. Χαρακτηριστική αντίσταση.....	59
4.5.2.3. Συντελεστής ανάκλασης.....	59
4.5.3. Γέφυρα μέτρησης.....	60
4.5.4. Σει εντοπισμού.....	61
4.5.4.1. Περιγραφή του σει εντοπισμού.....	62
4.5.4.2. Λειτουργίες και διαδικασίες.....	62
4.5.4.3. Πεδία εφαρμογής.....	62
4.5.4.4. Γεννήτρια ακουστικών συχνοτήτων.....	63
4.5.4.5. Δέκτης ακουστικών συχνοτήτων.....	65
4.5.4.6. Μαγνητικοί και ακουστικοί αισθητήρες.....	67
4.5.4.6.1. Μικρόφωνο εδάφους.....	67
4.5.4.6.2. Ακουστικά.....	67
4.5.4.6.3. Ράβδος με πηνίο εντοπισμού.....	68
4.6. Κατηγοριοποίηση των μεθόδων εντοπισμού σφαλμάτων.....	68
4.6.1. Τεχνικές ακροδεκτών (Terminal Techniques).....	69
4.6.1.1. Μέθοδοι γέφυρας (Bridge Methods).....	69
4.6.1.2. Μέθοδος ραντάρ (Radar Method).....	72
4.6.1.3. Μέθοδος συντονισμού (Resonance Method).....	74
4.6.2. Τεχνικές ανάχνευσης (Tracer Techniques).....	75
4.6.2.1. Μέθοδος ανάχνευσης ρεύματος (Tracing Current Method).....	75

4.6.2.2.	Μέθοδος ακουστικής συχνότητας (Audio Frequency Method)..	77
4.6.2.3.	Μέθοδος κρουστικών τάσεων (Impulse Method).....	77
4.6.2.3.1.	Ακουστική λήψη σήματος (Acoustic Signal Pickup).....	78
4.6.2.3.2.	Ηλεκτρομαγνητική λήψη (Electromagnetic Pickup).....	78
4.6.2.3.3.	Λήψη κρουστικού ρεύματος (Impulse Current Pickup)..	78
4.6.2.4.	Μέθοδος ανάκλασης τόξου (Arc Reflection Method).....	79
4.6.2.5.	Μέθοδος δυναμικού γης (Earth Gradient Method).....	80
4.7.	Πρακτική εμπειρία του εντοπισμού σφαλμάτων με το σύστημα.....	81
4.7.1.	Γενικά.....	81
4.7.1.1.	Σύνθετη κυματική αντίσταση.....	81
4.7.1.2.	Συντελεστής ανάκλασης.....	82
4.7.2.	Φυσικές δυνατότητες ενός παλμοχόμετρου.....	82
4.7.2.1.	Σφάλμα χαμηλής αντίστασης.....	82
4.7.2.2.	Σφάλμα υψηλής αντίστασης.....	83
4.7.3.	Κατηγορίες σφαλμάτων και μέθοδοι εντοπισμού σύμφωνα με τους κατασκευαστές των οργάνων.....	83
4.7.4.	Μέτρα ασφαλείας.....	84
4.7.5.	Έλεγχος του καλωδίου.....	85
4.7.6.	Κατηγορίες μεθόδων εντοπισμού.....	86
4.7.7.	Μέθοδοι προεντοπισμού.....	86
4.7.7.1.	Μέθοδος ανάκλασης παλμού (Pulse Reflection).....	86
4.7.7.2.	Μέθοδος ανάκλασης τόξου (Arc Reflection).....	88
4.7.7.3.	Μέθοδος ανάκλασης κρουστικού παλμού (Impulse Current).....	92
4.7.7.4.	Μέθοδος γέφυρας (Bridge Method).....	94
4.7.7.4.1.	Αρχή λειτουργίας της γέφυρας Wheatstone.....	95
4.7.7.4.2.	Κύκλωμα μέτρησης σύμφωνα με Murray.....	95
4.7.7.4.3.	Κύκλωμα μέτρησης σύμφωνα με Glaser.....	96
4.7.8.	Μέθοδος εντοπισμού διαδρομής υπογείου καλωδίου.....	99
4.7.9.	Μέθοδοι ακριβούς εντοπισμού.....	99
4.7.9.1.	Μέθοδος των συνεστραμμένων πεδίων (Twist Method).....	100
4.7.9.2.	Μέθοδος κρουστικών τάσεων (Surge Voltage Method).....	102
4.7.9.3.	Μέθοδος βηματικής τάσης (Step Voltage Method).....	103

5ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ “Συγκριτική παρουσίαση των μεθόδων - Συμπεράσματα”

5.1.	Εισαγωγή.....	105
------	---------------	-----

5.2. Στρατηγική εντοπισμού σφαλμάτων σε υπόγεια καλώδια.....	106
5.3. Συγκριτική παρουσίαση των μεθόδων προεντοπισμού.....	106
5.3.1. Διαίρεση του καλωδίου.....	106
5.3.2. Γέφυρα - βραχυκυκλώματα < 200 ΜΩ.....	107
5.3.3. Ανάκλαση παλμού - βραχυκυκλώματα < 200 Ω και όλα τα ανοιχτοκυκλώματα.....	108
5.3.4. Ανάκλαση τόξου - όλα στα σφάλματα που “σκάνε”.....	110
5.3.5. Μέθοδος ανάκλασης κρουστικού παλμού.....	111
5.4. Ακρίβεια οργάνων.....	112
5.4.1. Γέφυρα.....	112
5.4.2. Παλμοηχόμετρο.....	112
5.5. Ακρίβεια των μεθόδων.....	114
5.6. Συμπεράσματα.....	115
Βιβλιογραφία.....	118

ΛΙΣΤΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1.1-Εξέλιξη του Ελληνικού Δικτύου Διανομής ΧΤ & ΜΤ (km).....	8
Σχήμα 1.2-Εξέλιξη των Γραμμών Μεταφοράς ΥΤ (km).....	8
Σχήμα 2.1-Τομή ενός καλωδίου ισχύος.....	15
Σχήμα 2.2- Τεχνική αντιμετάθεσης μανδύων (cross-bonding).....	17
Σχήμα 2.3- Σχετικά μεγέθη ενός καλωδίου XLPE 400kV και ενός αγωγού μιας εναέριας γραμμής αντίστοιχης ονομαστικής τιμής.....	24
Σχήμα 2.4- Εγκατάσταση καλωδίου 110kV σε αστικό δρόμο.....	25
Σχήμα 2.5-Επίπεδος (flat) και τριγωνοειδής (trefoil) σχηματισμός.....	26
Σχήμα 2.6- Κατασκευαστικό σχέδιο τυπικού φρεατίου διέλευσης καλωδίων.....	27
Σχήμα 2.7-Κατασκευαστικό σχέδιο τυπικού φρεατίου διελεύσεως καλωδίων με εξόδους εγκιβωτισμένων σωλήνων.....	27
Σχήμα 2.8-Λεπτομέρεια όδευσης καλωδίων Μ.Τ. κάτω από την λωρίδα έκτακτης ανάγκης (ΛΕΑ) σε κατάστρωμα αυτοκινητόδρομου.....	28
Σχήμα 2.9-Κατασκευαστικό σχέδιο διέλευσης καλωδίου Μ.Τ. στο αριστερό έρεισμα (ΑΕ) σε κατάστρωμα αυτοκινητόδρομου.....	28
Σχήμα 2.10-Κατασκευαστικό σχέδιο φρεατίου διέλευσης καλωδίων σε pillar οδοφωτισμού αυτοκινητόδρομου.....	29
Σχήμα 2.11-Κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου σε ένα καλώδιο XLPE Υ.Τ.....	30
Σχήμα 2.12-Τριγωνοειδής σχηματισμός τοποθέτησης.....	31
Σχήμα 2.13-Επίπεδος σχηματισμός τοποθέτησης.....	32
Σχήμα 3.1-Απεικόνιση ενός σφάλματος φάσης με γη.....	37
Σχήμα 3.2-Απεικόνιση ενός σφάλματος δύο φάσεων με την γη.....	37
Σχήμα 3.3-Απεικόνιση σφάλματος φάσης με φάση.....	38
Σχήμα 3.4-Απεικόνιση σφάλματος τριών φάσεων με γη.....	38
Σχήμα 3.5-Επίδραση ενός κενού-ελαττώματος στο ηλεκτρικό πεδίο καλωδίου XLPE.....	42
Σχήμα 3.6-Διάδοση “ηλεκτρικών δενδριτών” στην μόνωση καλωδίου XLPE.....	42
Σχήμα 3.7-Απεικόνιση ενός “υδάτινου δενδρίτη”(WT) και ενός “ηλεκτρικού δενδρίτη”(ET).....	43
Σχήμα 4.1-Απλοποιημένο κύκλωμα σύνδεσης κρουστικής γεννήτριας με ένα υπό βλάβη καλώδιο.....	47
Σχήμα 4.2-Τυπική Χαρακτηριστική Καμπύλη Σπινθηρισμού Διακένου G.....	48
Σχήμα 4.3-Επίδραση του μήκους του καλωδίου στην εφαρμόσιμη τάση.....	50

Σχήμα 4.4-Απεικόνιση στοιχείων κρουστικής γεννήτριας SWG 1750 της SebaKMT.....	51
Σχήμα 4.5-Ρύθμιση της κλίμακας της τάσης σε γεννήτρια κρουστικών κυμάτων (SSG)...	53
Σχήμα 4.6-Ισοδύναμο κύκλωμα κρουστικής γεννήτριας.....	53
Σχήμα 4.7-Σύνδεση με καλώδιο σε τοποθεσία όπου υπάρχει καλή γείωση.....	54
Σχήμα 4.8-Σύνδεση με καλώδιο σε τοποθεσία όπου δεν υπάρχει καλή γείωση.....	54
Σχήμα 4.9-Παλμοηχόμετρο (IRG 3000) της Baur τοποθετημένο σε βαν με εξοπλισμό για εντοπισμό σφαλμάτων σε καλώδια.....	56
Σχήμα 4.10-Σχηματικό διάγραμμα των γραφημάτων ανάκλασης TDR.....	60
Σχήμα 4.11-Γέφυρα μέτρησης DMB5 της Baur.....	60
Σχήμα 4.12-Ένδειξη της γέφυρας σε εντοπισμό σφάλματος ,δίνεται η απόσταση του σφάλματος (m) και η θέση του σφάλματος σε ποσοστό (%) του ολικού μήκους του καλωδίου.....	61
Σχήμα 4.13-Γεννήτρια ακουστικών συχνοτήτων TG600 της Baur.....	63
Σχήμα 4.14-Απεικόνιση στοιχείων στην πρόσοψη της γεννήτριας TG600 της Baur.....	64
Σχήμα 4.15-Απεικόνιση στοιχείων στην πλάτη της γεννήτριας TG600.....	65
Σχήμα 4.16-Δέκτης ακουστικών συχνοτήτων.....	65
Σχήμα 4.17-Απεικόνιση του δέκτη ακουστικών συχνοτήτων UL 30 σε συνεργασία με το μικρόφωνο εδάφους BM 30.....	67
Σχήμα 4.18-Απεικόνιση των ακουστικών KH 30.....	68
Σχήμα 4.19-Απεικόνιση του πηνίου με ράβδο SP 30.....	68
Σχήμα 4.20-Μέθοδος γέφυρας βρόχου Murray (Murray loop bridge).....	70
Σχήμα 4.21-Μέθοδος γέφυρας χωρητικότητας.....	70
Σχήμα 4.22-Μέθοδος ρεύματος φόρτισης για τον εντοπισμό σφάλματος.....	71
Σχήμα 4.23-Τυπικές κυματομορφές σε συνθήκες ανοιχτοκυκλώματος και βραχυκυκλώματος στο καλώδιο.....	73
Σχήμα 4.24- Γραφήματα ανακλάσεων στην οθόνη του παλμοηχόμετρου.....	87
Σχήμα 4.25- Σχηματικό διάγραμμα της μεθόδου ανάκλασης παλμού.....	87
Σχήμα 4.26- Σχηματικό διάγραμμα της μεθόδου ανάκλασης τόξου.....	89
Σχήμα 4.27- Απεικόνιση διαγράμματος εξόδου γεννήτριας κρουστικών τάσεων.....	90
Σχήμα 4.28- Απεικόνιση διαγράμματος εξόδου γεννήτριας κρουστικών τάσεων με την παρεμβολή του φίλτρου.....	90
Σχήμα 4.29- Γράφημα ακολουθιών παλμοηχόμετρου, προβολή της αυτόματα μετρημένης πολλαπλής ακολουθίας.....	92
Σχήμα 4.30- Σχηματικό διάγραμμα της μεθόδου ανάκλασης κρουστικού παλμού.....	93

Σχήμα 4.31- Γράφημα μέτρησης παλμοηχόμετρου με την μέθοδο ανάκλασης κρουστικού παλμού.....	94
Σχήμα 4.32- Κύκλωμα Wheatstone.....	95
Σχήμα 4.33- Κύκλωμα μέτρησης σύμφωνα με Murray.....	96
Σχήμα 4.34- Κύκλωμα μέτρησης σύμφωνα με Glaser.....	97
Σχήμα 4.35-Μέθοδος εντοπισμού διαδρομής καλωδίου.....	97
Σχήμα 4.36-Μέθοδος μέγιστου σήματος.....	98
Σχήμα 4.37-Μέθοδος ελάχιστου σήματος.....	98
Σχήμα 4.38-Σύνδεση του πομπού με χρήση αμπεροτσιμπίδας.....	99
Σχήμα 4.39-Καθορισμός βάθους του καλωδίου με την μέθοδο ελάχιστου σήματος.....	99
Σχήμα 4.40-Απεικόνιση του H/M σήματος σε εφαρμογή της μεθόδου συνεστραμμένων πεδίων σε βραχυκύκλωμα μεταξύ δύο αγωγών.....	101
Σχήμα 4.41-Απεικόνιση του H/M σήματος σε εφαρμογή της μεθόδου συνεστραμμένων πεδίων σε βραχυκύκλωμα μεταξύ αγωγού και γης.....	102
Σχήμα 4.42-Απεικόνιση του H/M σήματος σε εφαρμογή της μεθόδου των κρουστικών τάσεων.....	103
Σχήμα 4.43-Απεικόνιση μεθόδου βηματικής τάσης.....	103
Σχήμα 5.1-Μέθοδος διαίρεσης καλωδίου.....	107
Σχήμα 5.2-Μέθοδος Γέφυρας.....	108
Σχήμα 5.3-Μέθοδος ανάκλασης παλμού για τον εντοπισμό σφαλμάτων.....	109
Σχήμα 5.4-Μέθοδος ανάκλασης τόξου για τον εντοπισμό σφαλμάτων.....	111
Σχήμα 5.5-Μέθοδος ανάκλασης κρουστικού παλμού.....	112
Σχήμα 5.6-Διαφορετικές διατάξεις υπόγειων καλωδιακών συστημάτων.....	113

ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

<i>Πίνακας 1.1-Μήκη κυκλωμάτων ΕΔΣΜ στις 31/12/2015.....</i>	<i>6</i>
<i>Πίνακας 1.2-Μήκος Οδεύσεων Γραμμών Μεταφοράς ΕΔΣΜ στις 31/12/2015.....</i>	<i>9</i>
<i>Πίνακας 1.3-Μετασηματιστές περί και εντός του ΕΔΣΜ στις 31/12/2015.....</i>	<i>9</i>
<i>Πίνακας 2.1-Πλεονεκτήματα-μειονεκτήματα διαφόρων τύπων μόνωσης.....</i>	<i>18</i>
<i>Πίνακας 2.2-Λειτουργίες των διάφορων τμημάτων του καλωδίου.....</i>	<i>21</i>
<i>Πίνακας 2.3- Σύγκριση χαρακτηριστικών αγωγού υπογείου καλωδίου και αγωγού εναέριας γραμμής.....</i>	<i>24</i>
<i>Πίνακας 3.1-Διάφοροι τύποι σφαλμάτων ,περιγραφή και πιθανότητα εμφάνισης.....</i>	<i>39</i>
<i>Πίνακας 3.2-Περίληψη των μηχανισμών γήρανσης στα καλώδια.....</i>	<i>42</i>
<i>Πίνακας 4.1-Γενικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των μετρήσεων του TDR.....</i>	<i>57</i>
<i>Πίνακας 4.2-Πίνακας ενδεικτικών ταχυτήτων διάδοσης ($v/2$) για διάφορους τύπους καλωδίων ισχύος.....</i>	<i>58</i>
<i>Πίνακας 5.1-Περίληψη των μεθόδων εντοπισμού σφαλμάτων καλωδίων.....</i>	<i>105</i>
<i>Πίνακας 5.2-Ακρίβεια οργάνων και μεθόδων εντοπισμού σφαλμάτων σε καλώδια.....</i>	<i>114</i>
<i>Πίνακας 5.3-Συγκεντρωτικός πίνακας μεθόδων εντοπισμού σφαλμάτων καλωδίων.....</i>	<i>119</i>

SUMMARY

This thesis aims at describing the available methods for detecting faults in underground power cables as well as the instruments used for this purpose.

In the first chapter we describe the structure and operation of a complete Electric System and then we present the general characteristics of the Greek Electricity Transmission System.

In the second chapter we describe the construction and technical elements of power cables as well as the standards applied in their construction and control.

In the third chapter we describe and analyze the mechanism of occurrence of faults and failures in the cables used as well as the basic types of cable faults.

In the fourth chapter we describe the operation and the mechanism of the instruments and methods used to detect faults in underground power cables both in theory and in their practical application. Their advantages and disadvantages are presented in the same chapter.

In the fifth and final chapter we will summarize the existing methods of pre-location while listing the advantages and disadvantages of each method. In finishing this thesis we will present in the form of a text and a summary table their scope and the characteristics of the faults according to each available method of pre-location and pinpoint location.

Key words: Power cables, cable faults, cable fault location methods, instruments used for fault location

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία έχει ως σκοπό την περιγραφή των διαθέσιμων μεθόδων για τον εντοπισμό σφαλμάτων - βλαβών σε υπόγεια καλώδια ισχύος καθώς και των οργάνων που χρησιμοποιούνται για τον σκοπό αυτό.

Στο πρώτο κεφάλαιο περιγράφεται αρχικά η δομή και λειτουργία ενός Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας και στην συνέχεια παραθέτονται τα γενικά χαρακτηριστικά του Ελληνικού Συστήματος Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας.

Στο δεύτερο κεφάλαιο περιγράφονται τα κατασκευαστικά και τεχνικά στοιχεία των καλωδίων ισχύος καθώς και των προτύπων που εφαρμόζονται στην κατασκευή και έλεγχο αυτών.

Στο τρίτο κεφάλαιο περιγράφονται και αναλύονται οι μηχανισμοί εμφάνισης βλαβών και αστοχιών στα υπό χρήση καλώδια καθώς και των βασικών τύπων σφαλμάτων.

Στο τέταρτο κεφάλαιο περιγράφεται η λειτουργία των οργάνων και των μεθόδων που χρησιμοποιούνται για τον εντοπισμό σφαλμάτων σε υπόγεια καλώδια ισχύος τόσο στην θεωρία όσο και στην πρακτική εφαρμογή τους. Ταυτόχρονα αναφέρονται τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα τους.

Στο πέμπτο και τελευταίο κεφάλαιο παρουσιάζονται περιληπτικά οι υπάρχουσες μέθοδοι προεντοπισμού παραθέτοντας παράλληλα τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της κάθε μεθόδου. Ολοκληρώνοντας την εργασία δίνεται ένας συγκεντρωτικός πίνακας με τα πεδία εφαρμογής των μεθόδων και τα χαρακτηριστικά των σφαλμάτων ανά διαθέσιμη μέθοδο προεντοπισμού και ακριβούς εντοπισμού.

Λέξεις κλειδιά: Καλώδια ισχύος, σφάλματα καλωδίων, μέθοδοι εντοπισμού σφαλμάτων, όργανα εντοπισμού σφαλμάτων καλωδίων

1^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

“Εισαγωγή στα Δίκτυα Διανομής και στην Μεταφορά Ενέργειας”

1.1. Δίκτυα διανομής και μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας

Για να λυθεί το πρόβλημα της μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας σε μεγάλες αποστάσεις, ο William Stanley κατασκεύασε το πρώτο επαγωγικό πηνίο, που αποτέλεσε τον προάγγελο του σύγχρονου ηλεκτρικού μετασχηματιστή καθώς και το πλήρες σύστημα μεταφοράς εναλλασσομένου ρεύματος υψηλής τάσης, το οποίο αποτελείται από γεννήτριες, μετασχηματιστές και υψηλής τάσης γραμμές μεταφοράς, που αποτέλεσε την βάση της σύγχρονης διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Έτσι όλη η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται στους σταθμούς παραγωγής, αρχικά μεταφέρεται σε κοντινούς μετασχηματιστές που μετατρέπουν την χαμηλή τάση της ηλεκτρικής ενέργειας σε υψηλή. Με αυτόν τρόπο η ηλεκτρική ενέργεια μεταφέρεται με τις γραμμές μεταφοράς σε πολύ μεγάλες αποστάσεις με λιγότερες απώλειες, καθώς οι σταθμοί παραγωγής είναι συνήθως μακριά από μεγάλα αστικά κέντρα. Το δίκτυο μεταφοράς μεταφέρει την ηλεκτρική ενέργεια στους υποσταθμούς μέσης και χαμηλής τάσης, στους οποίους μετατρέπεται η τάση της ηλεκτρικής ενέργειας από υψηλή σε μέση και χαμηλή τάση, προκειμένου με την βοήθεια εναέριων γραμμών να διανεμηθεί σε βιομηχανίες που χρησιμοποιούν μέση τάση και σε σπίτια που χρησιμοποιούν χαμηλή τάση [1].

Υπάρχουν δύο βασικοί τύποι δικτύου, ανάλογα με την τάση της ηλεκτρικής ενέργειας που εφαρμόζεται, το δίκτυο (Σύστημα) Μεταφοράς από 66kV και κάτω και το δίκτυο Διανομής από 66kV και πάνω.

1.1.1. Δομή ενός Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας

Οι ποικίλες βιομηχανικές, εμπορικές και αστικές δραστηριότητες, απαιτούν τη χρήση διαφόρων μορφών ενέργειας (θερμική, μηχανική, ηλεκτρική κ.λπ.). Στις περισσότερες περιπτώσεις, οι φυσικές πηγές ενέργειας βρίσκονται σε απομακρυσμένες θέσεις σχετικά με τις περιοχές (κέντρα) κατανάλωσης. Η ηλεκτρική ενέργεια, αποτελεί την πιο καθαρή και φιλική προς το περιβάλλον μορφή ενέργειας. Το πλεονέκτημα της εύκολης μεταβολής των χαρακτηριστικών της ηλεκτρικής ενέργειας (τάση-ένταση) και της αποδοτικής μεταφοράς της σε μεγάλες αποστάσεις, την έχουν καταστήσει ως τον

συνδετικό κρίκο μεταξύ διαφόρων μορφών ενέργειας. Αυτό που πρέπει να τονιστεί είναι το ότι, η δυνατότητα μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας με εξαιρετικά υψηλές τάσεις, παρείχε την ουσιαστική συμβολή για την γεωγραφική απεξάρτηση των κέντρων παραγωγής από τα κέντρα κατανάλωσης της ηλεκτρικής ενέργειας [2].

Περιβαλλοντικά και τεχνικοοικονομικά κριτήρια, καθορίζουν το εάν οι σταθμοί θα βρίσκονται πλησίον ή σε μεγάλες αποστάσεις από τα κέντρα κατανάλωσης, καθώς επίσης και από τις πηγές των φυσικών ενεργειακών φορέων [2].

Ως σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας (Σ.Η.Ε.), ορίζεται το σύνολο των εγκαταστάσεων, του εξοπλισμού, των μέσων και γενικότερα όλων των υποδομών, που απαιτούνται για την ασφαλή και ποιοτική εξυπηρέτηση των αναγκών ενός συνόλου καταναλωτών διεσπαρμένων γεωγραφικά σε ηλεκτρική ενέργεια, σε τοπικό, σε εθνικό ή ακόμα και σε διεθνές επίπεδο. Δηλαδή, ο σκοπός ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, είναι η συνεχής, η ασφαλής και η ποιοτική παροχή ηλεκτρικής ενέργειας από τα κέντρα παραγωγής προς τα κέντρα κατανάλωσης [2].

Τα σύγχρονα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, μπορούν να διακριθούν στα ακόλουθα τμήματα:

1. Στους σταθμούς (κέντρα) παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας.
2. Στα δίκτυα μεταφοράς, που διασυνδέουν τους σταθμούς παραγωγής μεταξύ τους και μεταφέρουν την ηλεκτρική ενέργεια σε μεγάλες αποστάσεις και ποσότητες, στα κέντρα κατανάλωσης.
3. Στα δίκτυα διανομής, μέσω των οποίων η ηλεκτρική ενέργεια διανέμεται στους καταναλωτές μέσης και χαμηλής τάσης.

Τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, ανήκουν στο σύνολο τους ή κατά τμήματα, σε δημόσιες ή και σε ιδιωτικές επιχειρήσεις ηλεκτρισμού. Τα δίκτυα των επιχειρήσεων ηλεκτρισμού, εκτείνονται κατά γενικό κανόνα μέχρι τα όρια ιδιοκτησίας των καταναλωτών τους, όπου και εγκαθίστανται οι διατάξεις μέτρησης της παρεχόμενης ηλεκτρικής ενέργειας [2].

Η τροφοδότηση (σύνδεση) των καταναλωτών από το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας, γίνεται ανάλογα με την μέγιστη απορροφώμενη ισχύ τους. Στο ελληνικό σύστημα της Δημόσιας Επιχείρησης Ηλεκτρισμού (Δ.Ε.Η.) υπάρχουν οι ακόλουθες τρεις κατηγορίες καταναλωτών:

1. Καταναλωτές υψηλής τάσης (Υ.Τ.) στα 150kV, για ισχύς $\geq 10\text{MW}$
2. Καταναλωτές μέσης τάσης (Μ.Τ.) στα 20kV, για ισχύς $\geq 200\text{MW}$
3. Καταναλωτές χαμηλής τάσης (Χ.Τ.) στα 230/400V, για ισχύς $\leq 200\text{KW}$

Το σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, περιλαμβάνει τους σταθμούς παραγωγής, μαζί με τους απαιτούμενους υποσταθμούς για την ανύψωση της τάσης σε κατάλληλη τιμή (στα ελληνικά δίκτυα 150kV και 400kV) και την είσοδο της στο σύστημα μεταφοράς. Το σύστημα μεταφοράς, περιλαμβάνει όλο τον απαιτούμενο εξοπλισμό για την μεταφορά μεγάλων ποσοτήτων ηλεκτρικής ενέργειας σε διάφορα επίπεδα υψηλής τάσης, μεταξύ των κέντρων παραγωγής και των κέντρων κατανάλωσης, καθώς και για την διασύνδεση με άλλα Σ.Η.Ε.. Πιο συγκεκριμένα περιλαμβάνει τα δίκτυα των γραμμών υψηλής τάσης, τους υποσταθμούς ζεύξης των δικτύων αυτών, τους υποσταθμούς για την μετατροπή των τάσεων σε διάφορα επίπεδα τιμών κατάλληλα για την μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας, τους υποσταθμούς για την διασύνδεση των διαφορετικών Σ.Η.Ε., καθώς επίσης και τους υποσταθμούς από υψηλή σε μέση τάση για την διασύνδεση με τα δίκτυα διανομής. Υπάρχουν βέβαια και καταναλωτές Υ.Τ. (κυρίως βιομηχανικές μονάδες μεγάλης ισχύος) οι οποίες τροφοδοτούνται απευθείας από τα δίκτυα υπομεταφοράς (150kV, 66kV), μέσω κατάλληλων υποσταθμών. Το δίκτυο διανομής αποτελεί τον συνδετικό κρίκο μεταξύ των δικτύων μεταφοράς και των κέντρων κατανάλωσης μέσης (22kV) και χαμηλής τάσης (230/400V) και περιλαμβάνει όλα τα δίκτυα διανομής μέσης και χαμηλής τάσης, μαζί με τους υποσταθμούς διανομής [2].

Αν και το μέγεθος των Σ.Η.Ε. διαφέρει από χώρα σε χώρα, εμφανίζουν μεταξύ τους κοινά χαρακτηριστικά. Τα συστήματά τους είναι τριφασικά εναλλασσομένου ρεύματος με συχνότητες λειτουργίας 50Hz ή 60Hz. Λόγοι καλής λειτουργίας, απαιτούν την διατήρηση των τιμών του μεγέθους και της συχνότητας των τάσεων τροφοδοσίας των καταναλωτών στις αντίστοιχες ονομαστικές τιμές. Σε αντίθεση με τις γραμμές των δικτύων μεταφοράς οι οποίες διαθέτουν (τρεις αγωγούς), οι γραμμές των δικτύων διανομής διαθέτουν τέσσερις αγωγούς (επιπλέον των τριών φάσεων και τον ουδέτερο αγωγό) [2].

1.1.2. Σύστημα παραγωγής

Το είδος των σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας σε μια χώρα καθορίζεται από το είδος των φυσικών πόρων που διαθέτει. Η Ελλάδα από την αρχή του εξηλεκτρισμού της, εκμεταλλεύεται τα πλούσια αποθέματα λιγνίτη που διαθέτει το υπέδαφος της και ακόμα και μέχρι σήμερα το 40-50% περίπου της συνολικά παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας προέρχεται από λιγνιτικές μονάδες. Ένα ποσοστό 20-30%, προέρχεται από υδροηλεκτρικές μονάδες και επιπλέον ποσοστό 10-15% από

μονάδες φυσικού αερίου. Στα νησιωτικά δίκτυα, τα οποία στο μεγαλύτερο ποσοστό τους δεν είναι διασυνδεδεμένα με το ηπειρωτικό δίκτυο, λειτουργούν ως αυτόνομα συστήματα και παράγουν την ηλεκτρική τους ενέργεια, κυρίως μέσω πετρελαϊκών μονάδων [2].

Στους ατμοηλεκτρικούς σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, το καύσιμο καίγεται σε ειδική εστία και παράγεται ατμός σε κατάλληλη θερμοκρασία και πίεση. Στην συνέχεια ο ατμός οδηγείται σε στρόβιλο, μέσω του οποίου η θερμική ενέργεια του ατμού μετατρέπεται σε κινητική ενέργεια και μέσω μιας ηλεκτρικής γεννήτριας, η μηχανική ενέργεια μετατρέπεται σε αντίστοιχη ηλεκτρική ενέργεια [2].

Η πυρηνική ενέργεια, χρησιμοποιείται ευρέως τις τελευταίες δεκαετίες για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Σαν πυρηνικό καύσιμο χρησιμοποιείται το ουράνιο, το οποίο βρίσκεται σε σχετική αφθονία στην φύση ως ορυκτό. Το φυσικό ουράνιο είναι μίγμα δύο ισοτόπων, του ουρανίου 235 και του ουρανίου 238. Από τα δύο αυτά ισότοπα, μόνο το ουράνιο 235 είναι σχάσιμο. Η σχάση του πυρήνα του ουρανίου 235, έχει σαν αποτέλεσμα την έκλυση τεράστιων ποσοτήτων ενέργειας, σε σχέση με την ατομική κλίμακα των μεγεθών [2].

Όμως τα αποθέματα σε συμβατικά καύσιμα, δεν είναι απεριόριστα. Η συνεχής αύξηση της εκμετάλλευσης των συμβατικών πηγών ενέργειας τα τελευταία 100 χρόνια, είχε σαν αποτέλεσμα την κατανάλωση τεράστιων ποσοτήτων ενέργειας και το γεγονός αυτό με την σειρά του οδήγησε στο να διαφανεί το φάσμα της εξάντλησης των ενεργειακών πόρων [2].

Η διαρκής μείωση των αποθεμάτων των φυσικών πόρων, οδήγησε τις έρευνες για εντονότερη, οικονομικότερη και αποδοτικότερη εκμετάλλευση των λεγόμενων «ανανεώσιμων πηγών ενέργειας», όπως για παράδειγμα, της ηλιακής, της αιολικής, της γεωθερμικής και παλιρροιακής ενέργειας [2].

Ιδιαίτερα, τα ενεργειακά αποθέματα της ηλιακής ενέργειας σε σχέση με τις ενεργειακές ανάγκες της ανθρωπότητας είναι πρακτικά ανεξάντλητα [2].

1.1.3. Σύστημα μεταφοράς

Όπως προαναφέραμε το σύστημα μεταφοράς ενός Σ.Η.Ε. διασυνδέει όλους τους σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς και τα διαφορετικά Σ.Η.Ε. με τα οποία είναι διασυνδεδεμένο και μέσω κατάλληλου εξοπλισμού (γραμμές μεταφοράς, υποσταθμοί, κ.λπ.), μεταφέρει την ηλεκτρική ενέργεια σε τεράστιες ποσότητες, υπό υψηλή τάση και σε πολύ μεγάλες αποστάσεις, προς τα κέντρα κατανάλωσης. Λόγοι

καλύτερης εξυπηρέτησης, αποδοτικότερης λειτουργίας, καθώς και αυξημένης αξιοπιστίας σε σχέση με την συνέχεια της τροφοδότησης των καταναλωτών, έχουν επιβάλλει στα δίκτυα μεταφοράς την βροχοειδή διάταξη. Πράγματι σε αντίθεση με την ακτινική, η βροχοειδής διάταξη εξασφαλίζει περισσότερους συνδυασμούς διαδρομών της ηλεκτρικής ενέργειας, με αποτέλεσμα την καλύτερη διαχείριση και την αποδοτικότερη εξυπηρέτηση του φορτίου [2].

Τα δίκτυα υπομεταφοράς, αποτελούν υποσυστήματα των δικτύων μεταφοράς και κατά κανόνα αποτελούν τα δίκτυα μεταφοράς παρελθόντων ετών. Σε σχέση με τα δίκτυα μεταφοράς, τα δίκτυα υπομεταφοράς τροφοδοτούνται μέσω υποσταθμών από τους ζυγούς παραγωγής, με επίπεδα τιμών της υψηλής τάσης χαμηλότερα από εκείνα των δικτύων μεταφοράς. Κατά τα άλλα, ο ρόλος των υποσυστημάτων μεταφοράς είναι ακριβώς ο ίδιος με εκείνο των συστημάτων μεταφοράς με τις διαφορές ότι, μεταφέρουν μικρότερα ποσά ενέργειας, σε μικρότερες αποστάσεις και όπως προαναφέρθηκε σε χαμηλότερα επίπεδα τιμών υψηλής τάσης. Προφανώς στα πρόσφατα αναπτυχθέντα Σ.Η.Ε., δεν υφίστανται τα συστήματα υπομεταφοράς [2].

1.1.4. Σύστημα διανομής

Με τον όρο «διανομή» της ηλεκτρικής ενέργειας, εννοούμε το σύνολο της υλικοτεχνικής υποδομής (υποσταθμοί, δίκτυα διανομής, διατάξεις διακοπής, ελέγχου και προστασίας) μέσω της οποίας η ηλεκτρική ενέργεια διανέμεται στα κέντρα κατανάλωσης μέσης και χαμηλής τάσης. Τα δίκτυα διανομής, παραλαμβάνουν την ηλεκτρική ενέργεια που μεταφέρεται μέσω των δικτύων μεταφοράς από τα κέντρα παραγωγής και τροφοδοτούν τις καταναλώσεις μέσης και χαμηλής τάσης. Δηλαδή, μέσω των δικτύων διανομής, η ηλεκτρική ενέργεια διανέμεται σε όλη την εξυπηρετούμενη περιοχή, μέχρι και τον τελευταίο καταναλωτή [2].

Ανάλογα με το μέγεθος της τάσης τροφοδοσίας τους, τα δίκτυα διανομής διακρίνονται σε δίκτυα διανομής μέσης τάσης (Μ.Τ.) και σε δίκτυα διανομής χαμηλής τάσης (Χ.Τ.). Αντιπροσωπευτικές τιμές Μ.Τ. για τον ελλαδικό χώρο είναι τα 6,6kV και τα 22kV. Η τροφοδοσία των δικτύων αυτών γίνεται από τα δίκτυα μεταφοράς, μέσω κατάλληλων υποσταθμών Υ.Τ./Μ.Τ.. Τα δίκτυα Μ.Τ. είναι συνήθως βροχοειδή, αλλά λειτουργούν και ακτινικά. Η βροχοειδής δομή, επιτρέπει οικονομία γραμμών, μεγαλύτερη αξιοπιστία και συνέχεια της τροφοδότησης, για τον ίδιο βαθμό εξυπηρέτησης. Αντίθετα, η ακτινική δομή χαρακτηρίζεται από την απλότητα των μέσων προστασίας και της ροής ενέργειας [2].

Το είδος των περιοχών κατανάλωσης (αστικές, βιομηχανικές, αγροτικές) καθώς επίσης η πυκνότητα των φορτίων και η δόμηση, καθορίζουν τον τύπο των δικτύων μέσης τάσης, δηλαδή εάν είναι εναέρια η υπόγεια. Αυτό σημαίνει ότι, στα κέντρα των πόλεων η σε περιοχές μεγάλης πυκνότητας φορτίου τα δίκτυα Μ.Τ. είναι υπόγεια, ενώ στις υπόλοιπες περιοχές τα δίκτυα είναι εναέρια [2].

Τα δίκτυα Χ.Τ., αναχωρούν από τους σταθμούς διανομής Μ.Τ./Χ.Τ. και καταλήγουν μέχρι τα φυσικά όρια των καταναλωτών Χ.Τ.. Τα δίκτυα Χ.Τ. έχουν ακτινική δομή και στις πυκνοκατοικημένες περιοχές είναι κατά κανόνα υπόγεια [2].

1.2. Γενικά χαρακτηριστικά του Ελληνικού Συστήματος Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας

Το Ελληνικό Σύστημα μεταφοράς Ηλεκτρικής ενέργειας αποτελείται από το Διασυνδεδεμένο Σύστημα του ηπειρωτικού τμήματος της χώρας το οποίο λειτουργεί σε δυο επίπεδα τάσεων 400kV (Υπερψηλή τάση) και 150kV (υψηλή τάση) και των Διασυνδεδεμένων με αυτών νησιών στα επίπεδα κυρίως 150kV (υψηλή τάση) και εν μέρει μέσω 66kV. Το δίκτυο υπογείων (Υ/Γ) καλωδίων Υ.Τ. που υπηρετεί ακτινικά τις ανάγκες της περιοχής της πρωτεύουσας είναι στην αρμοδιότητα του Διαχειριστή του δικτύου, ο οποίος είναι υπεύθυνος για την λειτουργία του και τον προγραμματισμό της ανάπτυξης του [3].

Το συνολικό μήκος των κυκλωμάτων που περιλαμβάνονται στο ΕΔΣΜ (Εθνικό Διασυνδεδεμένο Σύστημα Μεταφοράς) παρουσιάζεται αναλυτικά στον πίνακα 1.1 για τις διάφορες κατηγορίες γραμμών μεταφοράς οι οποίες φέρουν τα κυκλώματα [3].

Πίνακας 1.1-Μήκη κυκλωμάτων ΕΔΣΜ στις 31/12/2015 [3]

Μήκος Κυκλωμάτων (km)	Περιγραφή Γραμμής Μεταφοράς
238,6	Β'Β': Εναέρια Γ.Μ. 400kV, απλού κυκλώματος, δύο αγωγοί ανά φάση
378,8	Β'Β'Β': Εναέρια Γ.Μ. 400kV, απλού κυκλώματος, τρεις αγωγοί ανά φάση
3880,4	2Β'Β': Εναέρια Γ.Μ. 400kV, διπλού κυκλώματος
107	Εναέρια 400kV DC
2308,1	Ε : Εναέρια Γ.Μ. 150kV, απλού κυκλώματος, αγωγός ελαφρού τύπου (336,4cm)

Πίνακας 1.1-... (Συνέχεια)

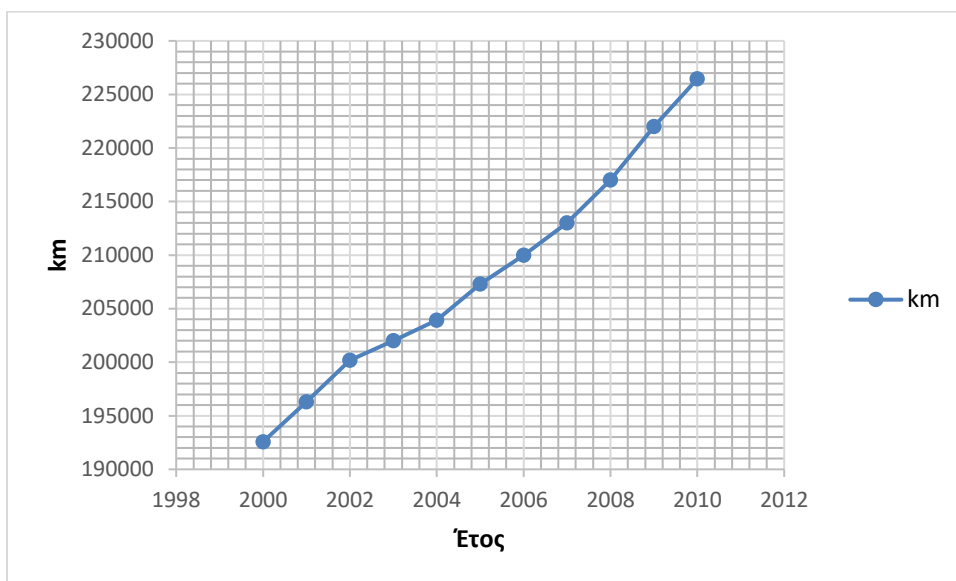
Μήκος Κυκλωμάτων (km)	Περιγραφή Γραμμής Μεταφοράς
39	Ε : Εναέρια Γ.Μ. 66kV, απλού κυκλώματος, αγωγός ελαφρού τύπου (336,4cm)
171,2	2BE : Εναέρια Γ.Μ. 150kV, απλού κυκλώματος, αγωγός ελαφρού τύπου (336,4cm) σε πύργους κατάλληλους για αγωγό βαρέως τύπου
2146,7	Β : Εναέρια Γ.Μ. 150kV, απλού κυκλώματος, αγωγός βαρέως τύπου (636cm)
7188,2	2B : Εναέρια Γ.Μ. 150kV, διπλού κυκλώματος, αγωγός βαρέως τύπου (636cm)
27,5	ZCIR : Εναέρια Γ.Μ. 150kV, απλού κυκλώματος, αγωγού αυξημένου θερμικού ορίου
31,35	Υπόγειο καλώδιο 400kV
191,35	Υπόγειο καλώδιο 150kV
177,23	Υποβρύχιο καλώδιο 150kV
15	Υποβρύχιο καλώδιο 66kV
62,9	Εναέρια Γ.Μ. 400kV, διπλού κυκλώματος που λειτουργεί στα 150kV

Σύμφωνα με τα στοιχεία που δημοσίευσε η ΔΕΔΔΗΕ για το έτος 2015 τα ποσοτικά μεγέθη του ελληνικού δικτύου διανομής και μεταφοράς έχουν ως εξής [3]:

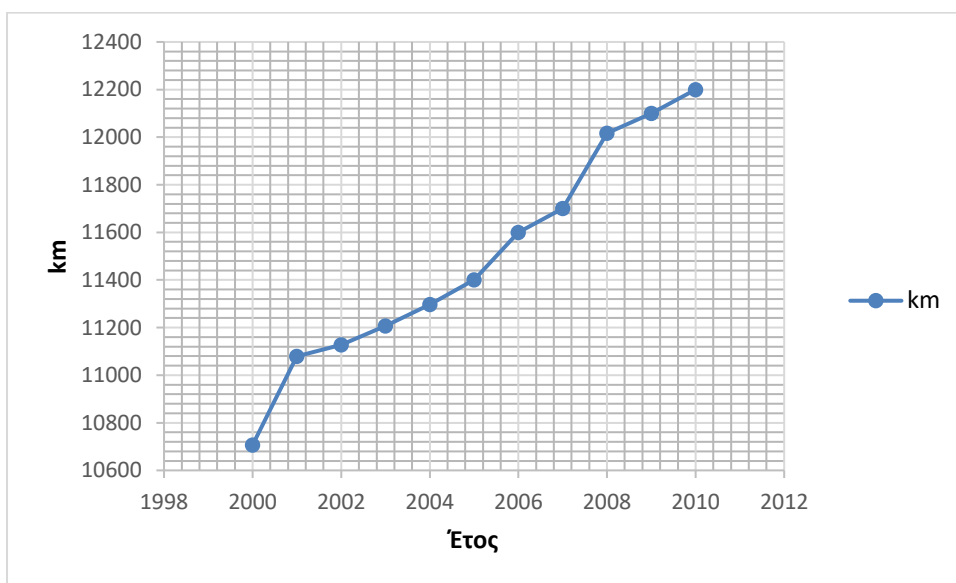
- 111.130km Δίκτυο Μέσης Τάσης (Μ.Τ.).
- 125.160 km Δίκτυο Χαμηλής Τάσης (Χ.Τ.).
- 945km Δίκτυο Υψηλής Τάσης (Υ.Τ.) εκ των οποίων 200km στην Αττική και 745km στα μη διασυνδεδεμένα νησιά.

Συνολικά 236.290km Δικτύου για το δίκτυο Χ.Τ και ΜΤ και 945km για το δίκτυο Υ.Τ. Επίσης έχουμε συνολικά :

- 161.180 Υποσταθμούς Μέσης προς Χαμηλής Τάσης (Υ/Σ ΜΤ/ΧΤ)
- 225 Υποσταθμούς Υψηλής προς Μέσης Τάσης (Υ/Σ ΥΤ/ΜΤ) εκ των οποίων 19 κλειστού τύπου, κατανεμημένοι 199 στο Διασυνδεδεμένο Σύστημα και 26 στα μη Διασυνδεδεμένα νησιά .



Σχήμα 1.1-Εξέλιξη του Ελληνικού Δικτύου Διανομής XT & MT (km) [3]



Σχήμα 1.2-Εξέλιξη των Γραμμών Μεταφοράς YT (km) [3]

Τα μήκη των οδεύσεων των γραμμών μεταφοράς του ΕΔΣΜ περιγράφονται στον Πίνακα 1.2. Επισημαίνουμε ότι η έννοια γραμμή μεταφοράς (Γ.Μ.) αφορά τον κατασκευαστικό-χωροταξικό τρόπο που συγκροτούνται τα κυκλώματα του ΕΔΣΜ, τα οποία και αποτελούν τους φυσικούς κλάδους του ηλεκτρικού δικτύου της χώρας. Οι πληροφορίες για την ισχύ και το πλήθος των Αυτομετασχηματιστών (ΑΜΣ) και Μετασχηματιστών (Μ/Σ) του ΕΔΣΜ καθώς και των Μ/Σ στο όριο Συστήματος-Δικτύου παρουσιάζονται αναλυτικά στον Πίνακα 1.3 [3].

Πίνακας 1.2-Μήκος Οδεύσεων Γραμμών Μεταφοράς ΕΔΣΜ στις 31/12/2015 [3]

Γραμμές μεταφοράς (km)					
Τύπος	400kV	Σ.Ρ 400kV	150kV	66kV	Σύνολο
Εναέρειες	2647	107	8157	39	10950
Υποβρύχιες			191,35	15	206,35
Υποβρύχιες (Υ/Γ Τμήμα)			16,17		16,17
Υπόγειες	31,35		161,06		192,41
Σύνολο	2678,35	107	8525,58	54	11364,93

Πίνακας 1.3-Μετασηματιστές περί και εντός του ΕΔΣΜ στις 31/12/2015 [3]

Μετασηματιστές			
Τύπος	Τάση (kV)	Πλήθος Μ/Σ	Ισχύς (MVA)
ΑΜΣ	400/150	58	15790
ΑΜΣ	150/66	1	50
Μ/Σ Σταθμού Μετατροπής	400	1	597
Υποβιβασμού	150/66	2	50
Σύνολο		62	16487

Μετασηματιστές				
Τύπος	Τάση (kV)	Πλήθος Μ/Σ	Ισχύς (MVA)	Ιδιοκτησία
Ανύψωσης	400	18	5808	ΔΕΗ / Παραγωγή
	150	68	7673	
	20	2	7	
Υποβιβασμού	20	5	212	
Υποβιβασμού Βοηθητικοί	150	21	966	
Σύνολο		114	14666	
Υποβιβασμού	150/20	401	16884	ΔΕΔΔΗΕ
	66/20	3	75	
Σύνολο		404	16959	
Υποβιβασμού	150/20	13	650	ΔΕΗ / Ορυχεία
Γενικό Σύνολο		531	32275	

Υποσταθμοί & Μ/Σ Παραγωγών - ΠΥΤ			
Τύπος	No	Πλήθος Μ/Σ	Ισχύς (MVA)
Σύνδεσης / Παραγωγός	43	58	5493
Σύνδεσης / Πελάτης	38	98	2937
Σύνολο	81	156	8430

1.3. Διαθεσιμότητα και Δείκτες Απόδοσης του Ελληνικού Διασυνδεδεμένου Συστήματος Μεταφοράς

Τα γεγονότα που αφορούν τις περιπτώσεις διακοπής λειτουργίας εξοπλισμού του Συστήματος Μεταφοράς καταγράφονται στα Δελτία Απομονώσεων και Χειρισμών (ΔΑΧ), που συμπληρώνονται και διατηρούνται από τον Διαχειριστή του Συστήματος Μεταφοράς. Στα ΔΑΧ καταγράφεται το σύνολο των χειρισμών (προγραμματισμένων και εκτάκτων) που εκτελούνται στο Σύστημα. Οι χειρισμοί σχετίζονται με διακοπές λειτουργίας εξοπλισμού του Συστήματος, κυκλώματα και Αυτομετασχηματιστές (ΑΜΣ), αλλά και εξοπλισμού που δεν ανήκει στο σύστημα αλλά στο δίκτυο όπως Μετασχηματιστές 150kV/20kV. Στα ΔΑΧ καταγράφονται δεδομένα όπως περιοχή συμβάντος, αιτία χειρισμών, τρόποι χειρισμών (αυτόματοι, χειροκίνητοι), χρόνοι χειρισμών (ανοίγματα - κλεισίματα) Διακοπών, αποζευκτών οι οποίοι κατά συνέπεια ορίζουν χρόνους έναρξης και λήξης απομόνωσης τμημάτων του Συστήματος Μεταφοράς. Επίσης καταγράφονται οι υποσταθμοί ή γραμμές μεταφοράς που επηρεάζονται, χαρακτηρισμοί των γεγονότων απομόνωσης (προγραμματισμένη / ανωμαλία), περιγραφές για την πιθανή εναλλακτική τροφοδότηση που είχαν οι καταναλωτές από τα χαμηλότερα επίπεδα τάσεως και άλλες πληροφορίες που θεωρούνται σημαντικές για την απομόνωση [3].

1.3.1. Διαθεσιμότητα Κυκλωμάτων και Διασυνδέσεων

Ως διαθεσιμότητα των κυκλωμάτων (ΔΚ) για μια χρονική περίοδο ορίζεται η ποσότητα:

$$\Delta K = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (\text{χρον. διάρκεια διακοπής } i \text{ σε λεπτά}) * (\text{μήκος κυκλώματος εκτός λειτ.})}{(\text{συνολικά λεπτά της χρον. περιόδου (έτος)}) * \sum_{i=1}^M (\text{μήκος κυκλωμάτων } i)} \quad (1.1)$$

όπου Ν το πλήθος των διακοπών λειτουργίας κυκλωμάτων και Μ το σύνολο των κυκλωμάτων του Συστήματος.

Οι παραπάνω ορισμοί μπορούν να εφαρμοστούν για τα κυκλώματα στα διάφορα επίπεδα τάσης λειτουργίας (400kV/150kV/66kV) και για τα κυκλώματα που αφορούν τις Διεθνείς Διασυνδέσεις ώστε να υπολογιστούν οι αντίστοιχοι δείκτες διαθεσιμότητας.

Με την επεξεργασία των δεδομένων των ΔΑΧ, υπάρχει η δυνατότητα υπολογισμού του δείκτη διαθεσιμότητας κυκλωμάτων στις τρεις κατηγορίες των τάσεων λειτουργίας (400kV/150kV/66kV) [3].

1.3.2. Διαθεσιμότητα ΑΜΣ και Μετασηματιστών

Ως διαθεσιμότητα των μετασηματιστών (ΔΜ) για μια χρονική περίοδο ορίζεται η ποσότητα:

$$\Delta M = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{i=K} (\text{χρον.διάρκεια διακοπής } i \text{ σε λεπτά}) * (\text{ισχύς MVA M/Σ εκτός λειτ.})}{(\text{συνολικά λεπτά της χρον.περιόδου (έτος)}) * \sum_{i=1}^{i=L} (\text{ισχύς μετασχ.}i)} \quad (1.2)$$

όπου K είναι το πλήθος των διακοπών λειτουργίας που εμφανίστηκαν στους ΑΜΣ και L το πλήθος τους.

Με την επεξεργασία των δεδομένων των ΔΑΧ, υπάρχει η δυνατότητα υπολογισμού του δείκτη διαθεσιμότητας ΑΜΣ και Μ/Σ [3].

1.3.3. Διαθεσιμότητα Συστήματος Μεταφοράς

Ως διαθεσιμότητα Συστήματος Μεταφοράς για μια χρονική περίοδο ορίζεται :

$$\Delta SM = \frac{(\text{σύνολο ωρών διαθεσιμότητας όλων των κυκλωμάτων})}{(\text{πλήθος κυκλωμάτων}) * (\text{πλήθος ωρών χρονικής περιόδου})} * 100\% \quad (1.3)$$

1.3.4. Μη Τροφοδοτούμενη Ενέργεια

Η μη τροφοδοτούμενη ενέργεια λόγω προγραμματισμένων εργασιών οφείλεται σε ένα βαθμό σε διακοπές 5λεπτου. Ως 5λεπτο ορίζεται η σύντομη διακοπή τροφοδότησης (της τάξεως 5 λεπτών) συγκεκριμένου Υ/Σ του Συστήματος, ο οποίος με την σύντομη απομόνωση του «νεκρώνει» στοιχεία του συστήματος στα οποία πρόκειται να γίνει χειρισμός εκτός τάσεως [3].

Ως Δείκτης συνολικής Τροφοδότησης του Συστήματος Μεταφοράς (ΔΑΤ) για μια χρονική περίοδο ορίζεται:

$$\Delta AT = \left[1 - \frac{\text{Εκτιμώμενη μη διατεθείσα ενέργεια}}{\text{Συνολική ενέργεια που θα είχε διατεθεί από το Σύστημα}} \right] * 100\% \quad (1.4)$$

2° ΚΕΦΑΛΑΙΟ

“Κατασκευαστικά και τεχνικά στοιχεία υπόγειων καλωδίων ισχύος”

2.1. Κατηγοριοποιήσεις τάσης (Χ.Τ. ,Μ.Τ. ,Υ.Τ. και Υ.Υ.Τ.)

Σύμφωνα με την πολική τάση του δικτύου μπορούμε να κατηγοριοποιήσουμε τις τάσεις ως εξής:

- Χαμηλή Τάση (Χ.Τ.) Αφορά πολική τάση έως 1kV AC ή 1,5 kV DC
- Μέση Τάση (Μ.Τ.) Αφορά πολική τάση 1 – 66 kV
- Υψηλή Τάση (Υ.Τ.) Αφορά πολική τάση 66– 150 kV
- Υπερυψηλή Τάση (Υ.Υ.Τ.) Αφορά τάση 400kV (η παραπάνω)

Δεν υπάρχει καμία συνοχή όσον αφορά την διάκριση της μεταφοράς και της διανομής σε διεθνές επίπεδο. Στο Ηνωμένο Βασίλειο, η μεταφορά είναι στα επίπεδα των 275 KV και 400 KV, δηλαδή χρησιμοποιώντας γραμμές και καλώδια Υ.Υ.Τ. ενώ στην Ιταλία για παράδειγμα η μεταφορά ξεκινάει στα επίπεδα των 150 KV. Στην συνέχεια οι διανομείς διανέμουν την ενέργεια από το σύστημα μεταφοράς και μέσω των τοπικών συστημάτων κατανομής στον τελικό καταναλωτή.

Τα καλώδια που χρησιμοποιούνται για τον σκοπό της μεταφοράς και διανομής της τάσης γενικά κατηγοριοποιούνται ως εξής ανάλογα με την τάση του δικτύου:

- Καλώδια Χαμηλής Τάσης : $U_N < 1kV$
- Καλώδια Μέσης Τάσης : $1kV < U_N < 45kV$
- Καλώδια Υψηλής Τάσης : $U_N > 60kV$

2.2. Καλώδια ισχύος

Η ονομασία καλώδιο δίνεται σε συσκευές οι οποίες μεταφέρουν ενέργεια και φέρουν την δικιά τους μόνωση και παρουσιάζουν μια γειωμένη εξωτερική επιφάνεια. Στο πλαίσιο αυτό, οι εναέριες γραμμές μεταφοράς δεν θεωρούνται καλώδια [4].

Ο όρος καλώδια ισχύος περιλαμβάνει τους ακόλουθους τύπους καλωδίων:

- Καλώδιο πρωτογενούς διανομής υψηλής τάσης
- Καλώδιο δευτερογενούς διανομής (υπόγειες και εναέριες γραμμές)
- Καλώδιο τροφοδοσίας εμπορικής και βιομηχανικής χαμηλής και μέσης τάσης
- Καλώδιο ελέγχου

Οι περισσότερες μονωμένες εναέριες καλωδιώσεις είναι σε δευτερεύουσες γραμμές διανομής που μεταφέρουν 300-600V. Το PVC δεν χρησιμοποιείται για την μόνωση ισχύος πάνω από τα 600V λόγω της χαμηλής μονωτικής ιδιότητας του. Οι τύποι PE που χρησιμοποιούνται για καλώδια ισχύος είναι χαμηλής πυκνότητας δικτυωμένου πολυαιθυλενίου (XLPE), θερμοπλαστικό μέσης πυκνότητας πολυαιθυλένιο (MDPE) και υψηλής πυκνότητας πολυαιθυλένιο (HDPE). Στο παρελθόν, το MDPE ήταν το μονωτικό πολυμερές επιλογής για τις εναέριες γραμμές, αλλά το XLPE έχει καταλάβει πια μεγάλο μέρος της αγοράς [4].

Τα υπόγεια καλώδια, θαμμένα με ή χωρίς αγωγούς, είναι μονωμένα με XLPE, MDPE ή HDPE και μπορεί να έχουν μανδύα PVC, μανδύα XLPE ή κανένα από τα δύο. Η αφαίρεση του μανδύα επιτρέπει την επιλογή αγωγών μεγαλύτερης διαμέτρου, μεγαλύτερης χωρητικότητας, για την χρήση τους σε αγωγούς όδευσης [4].

Ένα μονωμένο καλώδιο ισχύος φαίνεται να είναι μια απλή συσκευή. Ωστόσο, αυτό το καλώδιο είναι ένα ηλεκτρικά εξελιγμένο σύστημα εξαρτημάτων. Για την κατανόηση αυτού του συστήματος, μια σύντομη εισαγωγή των εξαρτημάτων του και των βασικών χαρακτηριστικών της λειτουργίας του δίνεται παρακάτω [4].

2.3. Η χρήση των καλωδίων

Τα υπόγεια καλώδια ισχύος χρησιμοποιούνται συνήθως σε υπόγειες ή υποβρύχιες συνδέσεις. Τα υπόγεια καλώδια τοποθετούνται σε στρατηγικά σημεία του δικτύου μεταφοράς για την συμπλήρωση των εναέριων γραμμών, ή σε ορισμένες περιπτώσεις, αποτελούν τον κύριο κορμό του [5].

Τα καλώδια χρησιμοποιούνται σε συστήματα τόσο εναλλασσομένου ρεύματος (E.P.) όσο και συνεχούς ρεύματος (Σ.P.). Παρόλα αυτά ο λεπτομερής σχεδιασμός και τα υλικά που χρησιμοποιούνται είναι πολύ διαφορετικά [5].

Η εναλλασσόμενη τάση (E.P.) είναι το προτιμώμενο μέσο μεταφοράς ηλεκτρικής ισχύος παγκοσμίως. Αυτή η μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας καθιστά εύκολη την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και τον υποβιβασμό ή ανύψωση της τάσης. Αυτό το μέσο μεταφοράς ενέργειας αντιπροσωπεύει ποσοστό περισσότερο από 98% των υποδομών ενέργειας παγκοσμίως. Σε συστήματα μεταφοράς μεγάλων αποστάσεων υπάρχουν σημαντικά πλεονεκτήματα της χρήσης συνεχούς τάσης (Σ.P.) έναντι της εναλλασσόμενης (E.P.) [5].

2.4. Δομή καλωδίων ισχύος

Τα καλώδια ισχύος έχουν μια ομοαξονική δομή: ουσιαστικά, περιλαμβάνουν ένα κεντρικό αγωγό μεταφοράς ρεύματος σε τάση γραμμής, μια μόνωση που περιβάλλει τον αγωγό και ένα εξωτερικό αγωγό στο δυναμικό της γης. Τα καλώδια εναλλασσόμενης τάσης εγκαθίστανται γενικά σαν ένα σύστημα τριών φάσεων και ως εκ τούτου ο εξωτερικός αγωγός θα μεταφέρει μόνο σφάλματα και απώλειες ρεύματος. Στην πράξη, υιοθετείται μια πιο εξελιγμένη κατασκευή. Τα σημεία επαφής μεταξύ των μεταλλικών αγωγών και της πολυμερούς μόνωσης τείνουν να περιλαμβάνουν προεξοχές και κενά: χαρακτηριστικά που θα οδηγούσαν σε ενίσχυση της ηλεκτρικής καταπόνησης και σε πρόωρη αστοχία. Για να ξεπεραστεί αυτό, ένας πολυμερής ημιαγωγός, μια αγώγιμη πολυμερής σύνθεση, τοποθετείται και στις δυο επιφάνειες. Ο εσωτερικός ημιαγωγός, η μόνωση και ο εξωτερικός ημιαγωγός συν-εξωθούνται για να εξασφαλιστεί ότι τα σημεία επαφής αυτά θα είναι λεία και ελεύθερα ρύπων. Γύρω από αυτό το καλώδιο υπάρχουν στρώματα που το προστατεύουν κατά την διάρκεια της εγκατάστασης / λειτουργίας και για την μεταφορά των σφαλμάτων / απωλειών ρεύματος. Αυτά τα στρώματα χρησιμοποιούνται επίσης για να κρατάνε έξω το νερό, που μπορεί να οδηγήσει στο φαινόμενο των υδάτινων δενδριτών (water treeing) [5].

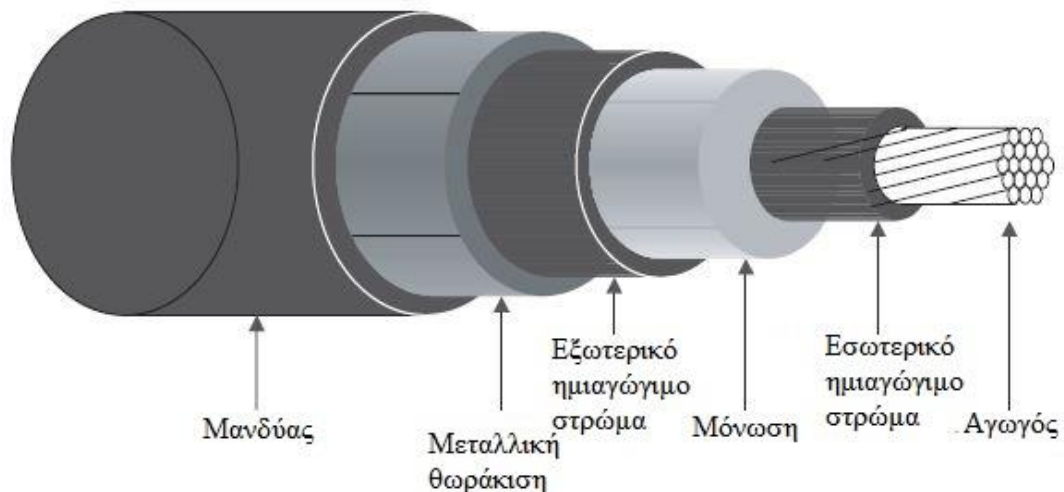
2.5. Κατασκευή καλωδίων

Τα τμήματα που από τα οποία αποτελείται ένα καλώδιο ισχύος είναι τα εξής:

- Αγωγοί : Μπορεί να είναι ένας (μονοπολικό καλώδιο) ή τρεις (τριπολικό καλώδιο) και είναι φτιαγμένοι από αλουμίνιο ή χαλκό.
- Εξομαλυντικά ημιαγώγιμα στρώματα : Χρησιμοποιούνται για την μείωση του ηλεκτρικού πεδίου και την ανύψωση της διηλεκτρικής αντοχής
- Μόνωση : Συνήθως είναι χαρτί εμποτισμένο με λάδι ή παχύρευστη μάζα, PVC, PE, XLPE κ.α.
- Εξωτερικός γειωμένος αγωγός (ή μανδύας ή μεταλλικός μανδύας ή ηλεκτρική θωράκιση ή μεταλλική θωράκιση): Είναι σχετικά λεπτός και δεν φέρει μεγάλα ρεύματα, εκτός και αν υπάρχει περίπτωση σφάλματος.
- Ζώνη μηχανικής ενίσχυσης: Είναι ένα περίβλημα από ατσάλινα σύρματα και ταινίες.

- Εξωτερικός μανδύας (η εξωτερικό προστατευτικό στρώμα): Ο μανδύας παρέχει προστασία από την υγρασία και είναι συνήθως φτιαγμένος από συνθετικό (PVC), μόλυβδο ή ίνες γιούτας με πίσσα.
- Ακροκιβώτια: Χρησιμοποιούνται στα άκρα των καλωδίων για την αποφυγή ηλεκτρικών τόξων και υπερπηδήσεων.
- Σύνδεσμοι ή μούφες: Χρησιμεύουν στην σύνδεση δυο καλωδίων, για διακλαδώσεις αλλά και ως παγίδες υδροστατικής πίεσης.
- Σύστημα επιβολής και ελέγχου πίεσης: Χρησιμοποιείται στα καλώδια με λάδι ή αέριο υπό πίεση.
- Σύστημα κυκλοφορίας ψυκτικού υγρού: Χρησιμοποιείται στην ψύξη με βεβιασμένη κυκλοφορία νερού ή λαδιού.

Στο Σχήμα 2.1 φαίνεται η τομή ενός τυπικού υπόγειου καλωδίου ισχύος.



Σχήμα 2.1-Τομή ενός καλωδίου ισχύος [5]

2.5.1. Αγωγοί

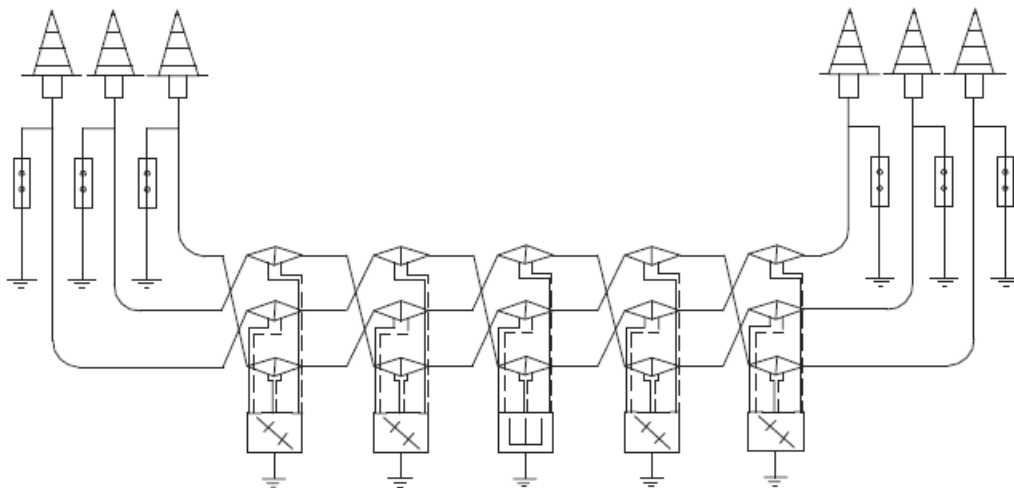
Στα καλώδια χρησιμοποιούνται διαφόρων ειδών αγωγοί, με βασικά υλικά τον χαλκό και το αλουμίνιο. Το μικρό βάρος του αλουμινίου δεν προσφέρει τόσα πλεονεκτήματα για τα καλώδια όσα για τις εναέριες γραμμές, όπου οι αγωγοί καταπονούνται μηχανικά από το ίδιο το βάρος τους. Εξάλλου η μεγαλύτερη διάμετρος του έναντι του χαλκού, για την ίδια αγωγιμότητα, δεν είναι και τόσο απαραίτητη από απόψεως Corona, και

συνεπάγεται μεγαλύτερο κόστος μονώσεως, μανδύα, εξωτερικού περιβλήματος, όπως και μεγαλύτερη συνολική διάμετρο καλωδίου για την ίδια ισχύ. Παρόλα αυτά, λόγω των γνωστών οικονομικών και εμπορικών πλεονεκτημάτων του έναντι του χαλκού, το αλουμίνιο χρησιμοποιείται όλο και περισσότερο στα καλώδια. Επειδή τα καλώδια δεν υπόκεινται κατά κανόνα σε αισθητές διαμήκεις καταπονήσεις, ο χρησιμοποιούμενος για τους αγωγούς χαλκός είναι συνήθως ανοπτημένος (ανόπτηση ονομάζεται στην μεταλλουργία η θερμική κατεργασία στην οποία υποβάλλεται ένα μέταλλο ή κράμα που έχει υποστεί κάποια κατεργασία π.χ. σφυρηλάτηση ή ενδοτράχυνση, προκειμένου στην συνέχεια υποβαλλόμενο σε ψύξη να βελτιωθεί η ευκαμψία του και να γίνει λιγότερο εύθρυπτο), και όχι σκληρής ολκίσεως όπως στις εναέριες γραμμές. Η ανόπτηση του χαλκού μειώνει την μηχανική αντοχή, αλλά αυξάνει την ευκαμψία και ελαφρά την αγωγιμότητα [6], [7], [8].

Στα ελληνικά υπόγεια δίκτυα οι κυριότερες από τις χρησιμοποιούμενες σήμερα διατομές καλωδίων είναι:

- 150 kV: 250 mm² και 500 mm² χαλκού
- 150 kV: 600 mm² , 700 mm² και 800 mm² αλουμινίου
- 20 kV : 3 x 150mm² και 3 x 240mm² αλουμινίου
- Καλώδια X.T. : 3 x 150+70mm² , 3 x 95+50mm² και 4x50mm² αλουμινίου (η τέταρτη διατομή των καλωδίων X.T. ανήκει στον ουδέτερο αγωγό τους).

Στα μονοπολικά καλώδια το μαγνητικό πεδίο του ρεύματος επάγει τάσεις στους μολύβδινους ή στους μανδύες αλουμινίου. Εάν οι μανδύες των τριών μονοπολικών καλωδίων μιας γραμμής είναι συνδεδεμένοι μεταξύ τους, όπως συμβαίνει στα άκρα των γραμμών και σε ενδιάμεσες ενδεχομένως θέσεις, όπου γειώνονται οι μανδύες, κυκλοφορούν δια μέσω αυτών ρεύματα τα οποία προκαλούν πρόσθετες απώλειες και μειώνουν την ψύξη των κύριων αγωγών. Για την εξουδετέρωση των επιζήμιων αυτών ρευμάτων εφαρμόζεται πολλές φορές η τεχνική της αντιμετάθεσης των μανδύων, γνωστή ως “cross-bonding”, κατά αντιστοιχία προς την αντιμετάθεση των αγωγών των εναέριων γραμμών, για εξισορρόπηση των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών αυτών. Αυτό γίνεται με απομόνωση των μανδύων από την γη και κυκλική σύνδεση του ενός με κάθε ένα από τους άλλους δύο, σε ενδιάμεσες θέσεις της γραμμής επί ορισμένες φορές. Αυτή η κυκλική διασύνδεση των μανδύων έχει ως αποτέλεσμα μικρότερες διατομές καλωδίου για την ίδια μεταφερόμενη ισχύ [6], [7], [8].



Σχήμα 2.2- Τεχνική αντιμετάθεσης μανδύων (cross-bonding) [9]

Ο ρόλος του πυρήνα του αγωγού είναι η μεταφορά της ενέργειας με χαμηλές απώλειες. Συνήθως, οι αγωγοί των υπογείων καλωδίων που χρησιμοποιούνται στα συστήματα μεταφοράς υψηλής ενέργειας, είναι συνεστραμμένοι για την μείωση του επιδερμικού φαινομένου. Η αντίσταση, εξαρτώμενη από το υλικό, την εγκάρσια διατομή και το μήκος του αγωγού θα υπολογίζεται ως εξής:

$$R_{\text{πυρήνα}} = \frac{\rho_T \cdot l}{A} \quad (2.1)$$

όπου:

ρ_T , η ειδική αντίσταση του αγωγού ($\Omega \cdot m$)

l , το μήκος του αγωγού (m)

A , η επιφάνεια εγκάρσιας διατομής του αγωγού (m^2)

2.5.2. Ημιαγωγία στρώματα

Λόγω της ανωμαλίας που παρουσιάζουν οι πολύκλωνοι αγωγοί (σε αντίθεση με τους μονόκλωνους), η πεδιακή τους ένταση (V/km) είναι αυξημένη. Έτσι, για να μειωθεί η πεδιακή ένταση στην επιφάνεια τους, τοποθετούνται στρώματα από ημιαγωγία υλικά. Τα ημιαγωγία αυτά στρώματα εμποδίζουν την εμφάνιση κενών μεταξύ του αγωγού και της μόνωσης, που ευθύνονται για την σταδιακή καταστροφή της μόνωσης. Επιπλέον τα στρώματα αυτά μειώνουν την θερμική και μηχανική καταπόνηση της μόνωσης κατά την διάρκεια βραχυκυκλωμάτων [6], [7], [8].

2.5.3. Μόνωση

Οι αγωγοί των καλωδίων είναι πάντοτε μεμονωμένοι αγωγοί. Η μόνωση περιβάλλει τους αγωγούς με μονωτικό υλικό ορισμένου πάχους, το οποίο είναι συνήθως μονωτικό χαρτί εμποτισμένο με μονωτικό λάδι, ελαστικό, συνθετική ουσία ή ύφασμα εμποτισμένο με βερνίκι. Συνθετικά υλικά, χρησιμοποιούμενα συνήθως για την μόνωση των καλωδίων είναι το PVC και το πολυαιθυλένιο, απλό ή κυρίως διασταυρωμένης δομής. Το μονωτικό και το πάχος του προσδιορίζει την ηλεκτρική αντοχή του καλωδίου σε τάση, αλλά και την επιτρεπόμενη ένταση του ρεύματος φόρτισης του αγωγού. Η επιλογή της μόνωσης γίνεται ανάλογα με την εφαρμογή, λαμβάνοντας υπόψη τις ηλεκτρικές, θερμικές και μηχανικές ιδιότητες, καθώς και την δυνατότητα εύκολης εγκατάστασης του καλωδίου, σε σχέση με την ευκαμψία του ή την μηχανική αντοχή του [6], [7], [8].

Πίνακας 2.1-Πλεονεκτήματα-μειονεκτήματα διαφόρων τύπων μόνωσης

Τύπος μόνωσης	Πλεονεκτήματα - Μειονεκτήματα
PE (χαμηλής έντασης πολυαιθυλένιο)	Χαμηλές διηλεκτρικές απώλειες
	Ευαίσθητο στην υγρασία κάτω από πιέσεις τάσης
XLPE (Δικτυωμένο πολυαιθυλένιο)	Ελαφρά υψηλότερες απώλειες από το PE
	Γερνάει καλύτερα από το PE ,λιγότερο ευαίσθητο στην υγρασία
EP (EPR/EPDM)	Υψηλότερες διηλεκτρικές απώλειες από τα XLPE και TRXLPE
	Πιο εύκαμπτο , λιγότερο ευαίσθητο στην υγρασία από τα XLPE και τα PE
TR-XLPE	Παρόμοιο με το XLPE αλλά με λίγο περισσότερες απώλειες
	Λόγω προσθέτων ;λιγότερες απώλειες από το EPR
	Γερνάει καλύτερα από το XLPE, λιγότερο ευαίσθητο στην υγρασία
PILC	Υψηλή αξιοπιστία
	Κατέχει μολύβδινη θωράκιση
PVC	Πρέπει να περιέχει πλαστικοποιητή για ευελιξία
	Υψηλές διηλεκτρικές απώλειες
	Δεν καίγεται αλλά παράγει τοξικά αέρια

Η μόνωση του υπογείου καλωδίου παίζει τον ρόλο ενός «τοιίχους» και αποτρέπει την ροή ρεύματος από τον αγωγό στο μανδύα. Η επαγωγή εξαρτάται από την σχετική διαπερατότητα της μόνωσης.

$$L = \mu_{ins,r} * \mu_o * N^2 * \pi * (r_2^2 - r_1^2)(\Omega) \quad (2.2)$$

όπου :

$\mu_{ins,r}$, η σχετική διαπερατότητα της μόνωσης

N , ο αριθμός των σπειρών ανά μέτρο του καλωδίου

r_2 , η εσωτερική ακτίνα του μανδύα (m)

r_1 , η εξωτερική ακτίνα του αγωγού (m)

2.5.4. Εξωτερικός μανδύας

Τα καλώδια, τα οποία προορίζονται για απευθείας εγκατάσταση μέσα στο έδαφος και υπόκεινται επομένως σε μηχανικές καταπονήσεις, φέρουν πάνω στο μολύβδινο μανδύα επίστρωση από μαλακό υφασμάτινο υλικό, στην οποία επικάθεται ο οπλισμός. Το υφασμάτινο επίστρωμα του μολύβδινου μανδύα χρησιμεύει για την προστασία του τελευταίου από τραυματισμούς, τους οποίους θα προκαλούσαν τυχόν σπασμένα αιχμηρά ελάσματα του χαλύβδινου οπλισμού. Τα ελάσματα ή σύρματα του χαλύβδινου οπλισμού είναι ανοξειδωτά ή γαλβανισμένα. Τέλος πάνω στον οπλισμό τοποθετείται στρώμα από γιούτα εμποτισμένη με ασφαλούχο ουσία (πίσσα) ή και στρώμα συνθετικού υλικού, το οποίο αποτελεί το εξωτερικό περίβλημα και προστατεύει τον οπλισμό από εκδορές κυρίως κατά την εγκατάσταση του καλωδίου [6], [7], [8].

2.5.5. Μανδύας

Η μόνωση, η οποία περιβάλλει τους αγωγούς, προστατεύεται από την υγρασία του εδάφους, η οποία είναι καταστρεπτική ιδίως για την μόνωση χάρτου, με συνεχές στεγανό περίβλημα, το οποίο ονομάζεται μανδύας. Αυτός για τα καλώδια μέσης και υψηλής τάσης αποτελείται συνήθως από μόλυβδο, αλλά και από αλουμίνιο. Στην τελευταία περίπτωση το καλώδιο αποκτά και μηχανική αντοχή έναντι εξωτερικών αιτιών, την οποία δεν έχει ο μόλυβδος [6], [7], [8].

Ο μανδύας του καλωδίου αποτελείται από δύο στρώματα: το συνθετικό στρώμα και το συρμάτινο στρώμα. Το πρώτο στρώμα αποτρέπει την είσοδο της υγρασίας στον αγωγό. Δεδομένου ότι τμήματα του ρεύματος μπορεί να μεταδίδονται από τον εσωτερικό αγωγό στον μανδύα, το δεύτερο στρώμα χρησιμοποιεί ένα μεταλλικό

κάλυμμα για να επιστρέψει το ρεύμα φορτίσεως προς την γείωση. Η παράλληλη αγωγιμότητα και χωρητικότητα σχετιζόμενη με τον μανδύα δίνεται από τους εξής τύπους:

$$G = \frac{2 \cdot \pi}{\rho \cdot \ln \frac{r_2}{r_1}} \text{ (S/m)} \quad (2.3)$$

$$C = \frac{2 \cdot \pi \cdot \epsilon}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \text{ (F/m)} \quad (2.4)$$

όπου:

ρ , η ειδική αγωγιμότητα του μονωτικού υλικού

ϵ , η ηλεκτρική διαπερατότητα του μονωτικού υλικού

2.5.6. Ακροκιβώτια

Οι τερματισμοί των καλωδίων ή ακροκιβώτια αποτελούνται συνήθως από μονωτήρες διελεύσεως από πορσελάνη, ένα για κάθε αγωγό, οι οποίοι καλύπτουν τα άκρα του καλωδίου και εξασφαλίζουν αφ' ενός την μόνωση των αγωγών, οι οποίοι εισέρχονται ελαιοστεγώς στο εσωτερικό των μονωτήρων αυτών, αφ' ετέρου την ηλεκτρική συνέχεια του κυκλώματος από το ελεύθερο άκρο του. Στα μονοπολικά καλώδια και γενικώς στα καλώδια με χωριστό μανδύα ανά αγωγό φάσεως, τα ακροκιβώτια είναι μονοπολικά. Στα καλώδια υψηλής τάσεως τα ακροκιβώτια είναι κατά κανόνα μονοπολικά, ακόμα και αν το καλώδιο είναι τριπολικό με ένα μανδύα. Αυτό γίνεται, γιατί τα τριπολικά ακροκιβώτια υψηλής τάσεως παρουσιάζουν πολλές δυσχέρειες στην κατασκευή τους και είναι συχνά αιτίες βλαβών [6], [7], [8].

2.5.7. Σύνδεσμοι

Οι σύνδεσμοι χρησιμοποιούνται για την σύνδεση των καλωδίων και στα σημεία διακλαδώσεων αυτών. Οι σύνδεσμοι των καλωδίων είναι τριπολικοί ή μονοπολικοί, ανάλογα με τον τύπο του καλωδίου. Η κατασκευή των μονοπολικών συνδέσμων είναι πιο ασφαλής, όπως και στα ακροκιβώτια και προτιμάται ιδίως στα καλώδια υψηλής τάσης. Τα δύο άκρα των καλωδίων, τα οποία πρόκειται να ενωθούν με τον σύνδεσμο, εισέρχονται και από τις δυο πλευρές με τον μολύβδινο μανδύα τους. Ο τελευταίος συγκολλάται στην είσοδο με το περίβλημα του συνδέσμου, το οποίο είναι δυνατόν συχνά να αποτελείται από μολύβδο ή χαλκό και το οποίο αποτελεί κατά κάποιο τρόπο την συνέχεια του μανδύα. Τα καλώδια απογυμνώνονται σταδιακά μέχρι το κέντρο του συνδέσμου όπου και αποκαλύπτονται τα άκρα των αγωγών, τα οποία συνενώνονται

μεταξύ τους μέσω κοίλου κυλινδρικού στοιχείου, με το οποίο συγκολλώνται ή συμπιέζονται. Στην συνέχεια αποκαθίσταται η μόνωση του καλωδίου στο εσωτερικό του συνδέσμου με διαδοχικά στρώματα από χάρτινη ταινία, η οποία διαμορφώνεται κατάλληλα ώστε να ευνοεί την κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου [6], [7], [8].

Πίνακας 2.2-Λειτουργίες των διάφορων τμημάτων του καλωδίου

Τμήμα καλωδίου	Λειτουργία
Αγωγός	<ul style="list-style-type: none"> • μεταφορά ρεύματος • αντοχή πιέσεων κατά την εγκατάσταση του καλωδίου
Εσωτερικός ημιαγωγός	<ul style="list-style-type: none"> • για την πρόληψη της συγκέντρωσης του ηλεκτρικού πεδίου στην επιφάνεια ανάμεσα στην μόνωση και τον εσωτερικό ημιαγωγό • για να εξασφαλίσει την στενή επαφή με την μόνωση • για την εξομάλυνση του ηλεκτρικού πεδίου στον αγωγό
Μόνωση	<ul style="list-style-type: none"> • για την αντοχή των διαφόρων πιέσεων από τα πεδία τάσης κατά την διάρκεια της ζωής του καλωδίου
Εξωτερικός ημιαγωγός	<ul style="list-style-type: none"> • για να εξασφαλίσει την στενή επαφή ανάμεσα στην μόνωση και την θωράκιση • για την πρόληψη της συγκέντρωσης του μαγνητικού πεδίου στην επιφάνεια ανάμεσα στην θωράκιση και τον εξωτερικό ημιαγωγό
Μεταλλική θωράκιση	<p>Για να παρέχει:</p> <ul style="list-style-type: none"> • μεταλλική θωράκιση • ακτινική στεγανοποίηση (αποφυγή επαφής ανάμεσα στην μόνωση και το νερό) • μια συνεισφορά στην μηχανική προστασία
Εξωτερικός προστατευτικός μανδύας	<ul style="list-style-type: none"> • για την μόνωση της μεταλλική θωράκισης από τα περιβάλλοντα μέσα • για την προστασία της μεταλλικής θωράκισης από την διάβρωση • για την συνεισφορά στην μηχανική προστασία • για την μείωση της συνεισφοράς των καλωδίων στην διάδοση φωτιάς

2.6. Τεχνικές διαφορές υπόγειας και εναέριας μεταφοράς ηλεκτρικής ισχύος

Τα υπόγεια καλώδια σε δίκτυα μεταφοράς γενικά χρησιμοποιούνται σε περιοχές που δεν είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν εναέριες γραμμές. Αυτό είναι συχνά λόγω των περιορισμών χώρου (π.χ. σε πυκνοκατοικημένες αστικές περιοχές ή εντός υποσταθμών) ή για τεχνικούς λόγους (π.χ. σε πλατιά ποτάμια η θαλάσσιες διαβάσεις). Η προτίμηση για εναέριες γραμμές είναι κυρίως για λόγους κόστους και όσο αυξάνεται το επίπεδο της τάσης γίνεται και ισχυρότερη [10].

Οι κύριες τεχνικές διαφορές μεταξύ της εναέριας και υπόγειας μεταφοράς ηλεκτρικής ισχύος μπορεί να εξεταστεί στο πλαίσιο τριών αλληλένδετων επικεφαλίδων [10]:

1. Ηλεκτρική μόνωση του αγωγού
2. Μεταφορά θερμότητας για την αποφυγή υπερθέρμανσης
3. Κατασκευαστικές εργασίες απαραίτητες για την εγκατάσταση του κυκλώματος

2.6.1. Ηλεκτρική μόνωση

Οι εναέριοι αγωγοί του δικτύου μεταφοράς λειτουργούν σε μια τάση πολύ υψηλή σε σχέση με την γη. Αυτοί οι γυμνοί αγωγοί αιωρούνται μεταξύ πύργων από χάλυβα οι οποίοι συνήθως βρίσκονται σε θεμέλια από μπετόν. Στους εναέριους αυτούς αγωγούς ο αέρας παρέχει την απαραίτητη ηλεκτρική μόνωση ως προς την γη [10].

Όταν οι αγωγοί θάβονται στο έδαφος, μονωτικό υλικό πρέπει να εφαρμοστεί στους αγωγούς για να μπορούν να λειτουργήσουν με ασφάλεια σε υψηλή τάση. Παραδοσιακά τα υπόγεια καλώδια ήταν μονωμένα με χαρτί εμποτισμένο με λάδι. Το λάδι το οποίο κυκλοφορεί μέσω ενός κεντρικού αγωγού θα πρέπει να είναι υπό πίεση για να διατηρείται το υψηλό επίπεδο μόνωσης. Πιο πρόσφατα έχουν αναπτυχθεί καλώδια που χρησιμοποιούν μόνωση από δικτυωμένο πολυαιθυλένιο (XLPE). Αυτά άρχισαν να χρησιμοποιούνται εκτενώς σε τάσεις ως και 60kV στην δεκαετία του 1960 και του 1970. Η ανάπτυξη του συνεχίστηκε σταθερά και αυτός ο τύπος καλωδίου χρησιμοποιείται ευρέως ακόμα και σε επίπεδα τάσης των 400 και 500kV. Ο αγωγός και η ηλεκτρική μόνωση πρέπει να προστατεύονται από την υγρασία και την φθορά, και την αλλοίωση. Αυτό εξασφαλίζεται από ένα εξωτερικό μεταλλικό μανδύα (συνήθως από αλουμίνιο, χαλκό ή χάλυβα) [10].

2.6.2. Μεταφορά θερμότητας

Ένα σημαντικό ποσοστό του πρόσθετου κόστους και της πολυπλοκότητας της τοποθέτησης των κυκλωμάτων υπόγεια είναι αποτέλεσμα του προβλήματος της απορριπτόμενης θερμότητας από το καλώδιο [10].

Για ένα αγωγό εναέριας γραμμής, η ενέργεια χάνεται κυρίως λόγω της αντίστασης του αγωγού. Η χαμένη ενέργεια μετατρέπεται σε θερμότητα και είναι ανάλογη με το τετράγωνο του ρεύματος που διαρρέει τον αγωγό [10].

Ένα υπόγειο καλώδιο έχει επίσης αυτή την απώλεια του αγωγού, αλλά έχει και επιπλέον απώλειες που επάγονται στον μανδύα και σε απώλειες στην μόνωση (ή το διηλεκτρικό). Οι απώλειες στο διηλεκτρικό είναι ανάλογες με το τετράγωνο της τάσης πάνω στο καλώδιο [10].

Προκειμένου να αποτραπεί η υποβάθμιση της μόνωσης του καλωδίου, είναι σχεδιασμένο να λειτουργεί σε θερμοκρασίες μέχρι τους 90 °C. Οι αγωγοί στις εναέριες γραμμές λειτουργούν σε παρόμοιες θερμοκρασίες, αλλά σε αυτή την περίπτωση το όριο καθορίζεται από την ανάγκη να περιοριστεί η έκταση στην οποία ο αγωγός βυθίζεται (λόγω θερμικής διαστολής) προκειμένου να αποφευχθεί η παραβίαση των αποστάσεων ασφαλείας. Στα 400kV μια τυπική ελάχιστη απόσταση σε μια επιφάνεια του δρόμου είναι στα 8 μέτρα [10].

Για μια εναέρια γραμμή, ο περιβάλλον αέρας όχι μόνο παρέχει την απαραίτητη ηλεκτρική μόνωση, αλλά δροσίζει και τους αγωγούς. Σε ένα υπόγειο καλώδιο, η ηλεκτρική μόνωση ενεργεί επίσης ως θερμική μόνωση και παρεμποδίζει την μεταφορά θερμότητας μακριά από τον αγωγό. Η θερμότητα που παράγεται από τις διάφορες απώλειες στο καλώδιο πρέπει να διέλθει μέσα από την δομή του καλωδίου, μέσα στο έδαφος και ακολούθως έξω στην ατμόσφαιρα. Το έδαφος μπορεί να αποτελέσει ένα σημαντικό θερμικό φράγμα, ιδιαίτερα αν είναι ξερό. Είναι κοινή πρακτική να περιβάλλουμε το καλώδιο με κατάλληλα υλικά επίχωσης για να ενισχυθεί η διάχυση της θερμότητας στην ατμόσφαιρα [10].

Ένα υπόγειο καλώδιο δεν έχει μόνο πρόσθετες πηγές απώλειας σε σύγκριση με την εναέρια γραμμή, αλλά έχει επίσης λιγότερο αποτελεσματική απαγωγή της θερμότητας. Επομένως, είναι σημαντικό να διατηρούμε τις απώλειες του καλωδίου όσο το δυνατόν πιο χαμηλά, ιδίως για κυκλώματα υψηλής ισχύος. Αυτό επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας ένα αγωγό μεγαλύτερης διατομής από την ισοδύναμη εναέρια γραμμή προκειμένου να μειώσουμε την ηλεκτρική αντίσταση. Μια περαιτέρω μείωση επιτυγχάνεται με την χρήση χαμηλής αντίστασης χαλκού για τον αγωγό. Οι εναέριες γραμμές γενικά

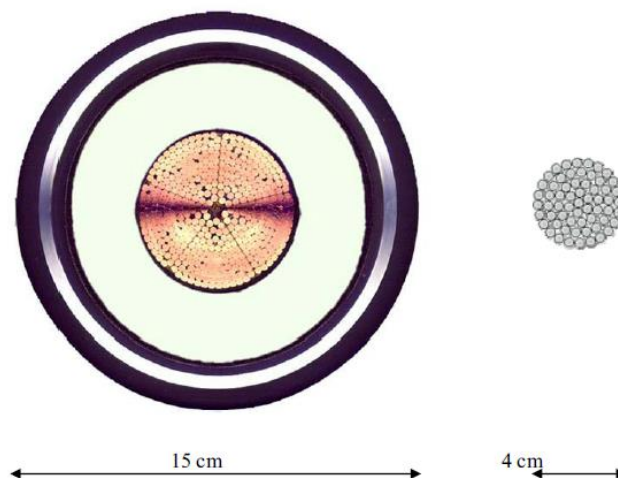
χρησιμοποιούν αγωγούς αλουμινίου για να μειωθεί το βάρος. Ενώ το προκύπτον υπόγειο καλώδιο έχει σημαντικά χαμηλότερη αντίσταση από το αντίστοιχο της εναέριας γραμμής, η χρήση όμως ενός μεγάλου χάλκινου αγωγού έχει σαν αποτέλεσμα ένα αγωγό καλωδίου που είναι ουσιαστικά βαρύτερος από τον αντίστοιχο του ισοδύναμου εναέριας γραμμής. Ο πίνακας 2.3 συγκρίνει το βάρος, διάμετρο και ηλεκτρική αντίσταση του εναέριου αγωγού και ενός υπογείου καλωδίου ίδιας χωρητικότητας [10].

Για να λάβουμε λοιπόν μια αντίστοιχης μετάδοσης χωρητικότητα θα χρειαστούμε ένα υπόγειο καλώδιο από χαλκό επιφάνειας 2500mm^2 για να αντικαταστήσουμε ένα αγωγό από κράμα αλουμινίου επιφάνειας 800mm^2 μίας εναέριας γραμμής [10].

Πίνακας 2.3- Σύγκριση χαρακτηριστικών αγωγού υπογείου καλωδίου και αγωγού εναέριας γραμμής [10]

	Υλικό	Επιφάνεια (mm^2)	Διάμετρος (mm)	Μάζα ανά μονάδα μήκους (kg/m)	Αντίσταση (Ω/km)
Εναέριος αγωγός	Αλουμίνιο	821	37,3	2,3	0,0039
Υπόγειος αγωγός (μόνο)	Χαλκός	2500	64	22	0,007
Πλήρες υπόγειο καλώδιο			149	39	

Τα σχετικά μεγέθη των δύο συστημάτων φαίνονται στο παρακάτω Σχήμα 2.3.



Σχήμα 2.3- Σχετικά μεγέθη ενός καλωδίου XLPE 400kV και ενός αγωγού μιας εναέριας γραμμής αντίστοιχης ονομαστικής τιμής [10]

2.6.3. Κατασκευή και εγκατάσταση

Η υπογειοποίηση των καλωδίων αποτελεί ένα σημαντικό μέρος του κόστους ενός έργου. Το κόστος ποικίλει σημαντικά ανάλογα με την ευκολία της πρόσβασης κατά μήκος της διαδρομής και της ποσότητας της ενέργειας που πρέπει να μεταδοθεί [10].

Στις αστικές περιοχές, το κόστος της εγκατάστασης ενός υπογείου καλωδίου τείνει να είναι σημαντικά υψηλότερο από ότι στην εξοχή. Στην πόλη, είναι πιθανό να υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός υπηρεσιών διέλευσης, για παράδειγμα αέριο, νερό, τηλεπικοινωνίες (Σχήμα 2.4). Αυτό περιορίζει την χρήση μηχανικών εκσκαφών και τα μέρη της τάφρου πρέπει να απομακρύνονται με το χέρι. Επιπρόσθετα κόστη προκύπτουν από την ανάγκη διαχείρισης της ροής κυκλοφορίας και από τους περιορισμούς που προκύπτουν στις ώρες εργασίας προκειμένου να μειωθεί η ταλαιπωρία για τους κατοίκους της περιοχής [10].

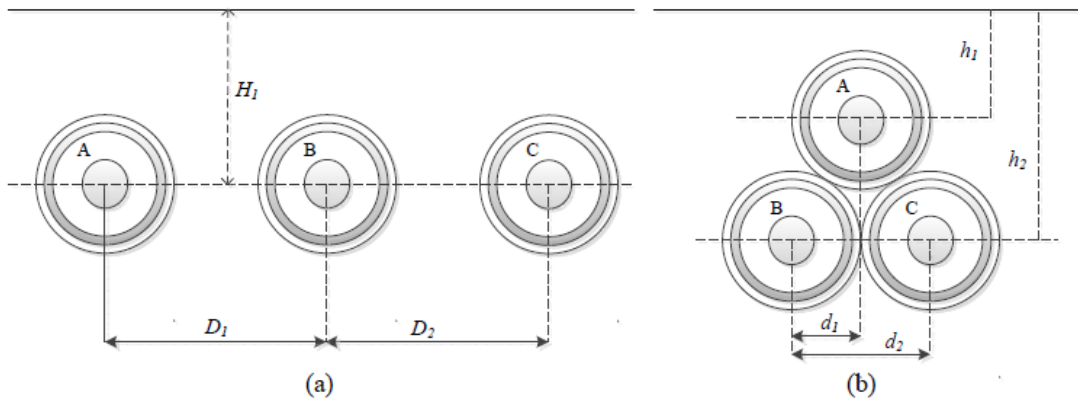


Σχήμα 2.4- Εγκατάσταση καλωδίου 110kV σε αστικό δρόμο[10]

Το χρονικό διάστημα που ένα χαράκωμα πρέπει να μείνει ανοιχτό μπορεί να μειωθεί αν έχει προηγηθεί κατά την κατασκευή εγκατάσταση αγωγών (συχνά πλαστικών ή χαλύβδινων σωλήνων). Αυτό είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικό σε ελαφριά, μικρότερα καλώδια. Το μέγεθος και η απόσταση των ορυγμάτων σε μεγάλο βαθμό υπαγορεύεται από την ονομαστική τιμή του καλωδίου. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, όσο υψηλότερη είναι η τάση στην οποία ένα ηλεκτρικό κύκλωμα λειτουργεί, τόσο μεγαλύτερη είναι η ισχύς που μπορεί να μεταφέρει και τόσο υψηλότερες οι απώλειες. Συνέπεια αυτού, τα καλώδια υψηλότερης τάσης τείνουν να απέχουν περισσότερο μεταξύ τους και περισσότερη προσοχή πρέπει να καταβληθεί για την απαγωγή της θερμότητας [10].

Για την ευκολία της εγκατάστασης και του ηλεκτρικού σχεδιασμού ευνοείται η τοποθέτηση των καλωδίων των τριών φάσεων τόσο κοντά όσο είναι δυνατόν. Ως εκ

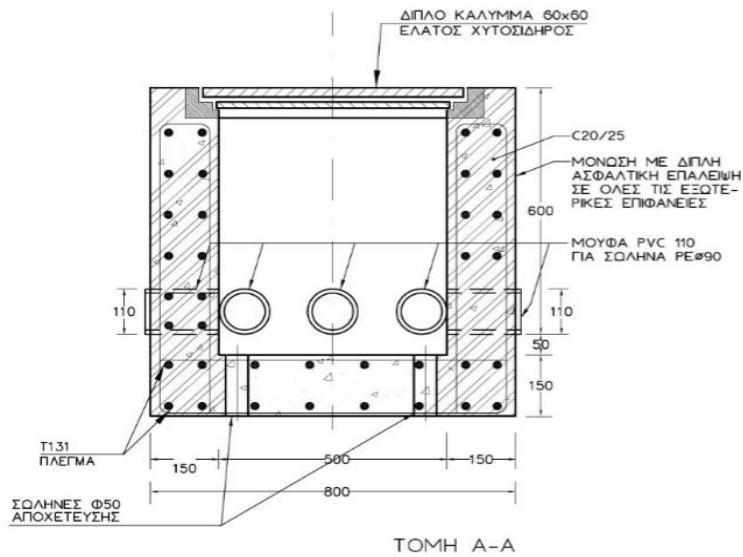
τούτου, καλώδια χαμηλής και μέσης τάσης τείνουν να θάβονται σε τριγωνοειδή (trefoil) σχηματισμό. Για μετάδοση πολύ υψηλής ισχύος, η ανάγκη για καλύτερη απαγωγή της θερμότητας σημαίνει ότι τα καλώδια θα πρέπει να απέχουν περισσότερο, γενικά σε επίπεδη (flat) διαμόρφωση. Αυτό αντιπροσωπεύει μια συμβιβαστική λύση μεταξύ θερμικών και ηλεκτρικών απαιτήσεων [10].



Σχήμα 2.5-Επίπεδος (flat) και τριγωνοειδής (trefoil) σχηματισμός [11]

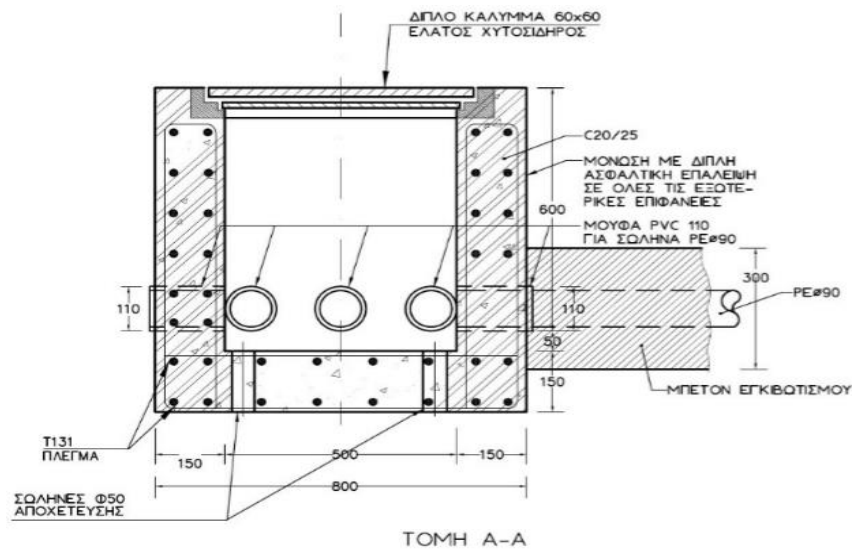
Για το υπόγειο δίκτυο π.χ. της Δανίας οι αποστάσεις αυτές έχουν ως εξής [11]:

- Σε επίπεδο σχηματισμό (Σχήμα 2.5(a)): θαμμένα στο έδαφος με $H_1=1,3\text{m}$ και απόσταση μεταξύ τους ίση $0,4\text{m}$ ($D_1=D_2=0,4\text{m}$)
- Σε τριγωνοειδή σχηματισμό (Σχήμα 2.5(b)): θαμμένα στο έδαφος με $h_1=1,3\text{m}$ και $h_2 = \sqrt{d_2^2 - r^2}$ όπου r η ακτίνα του καλωδίου .



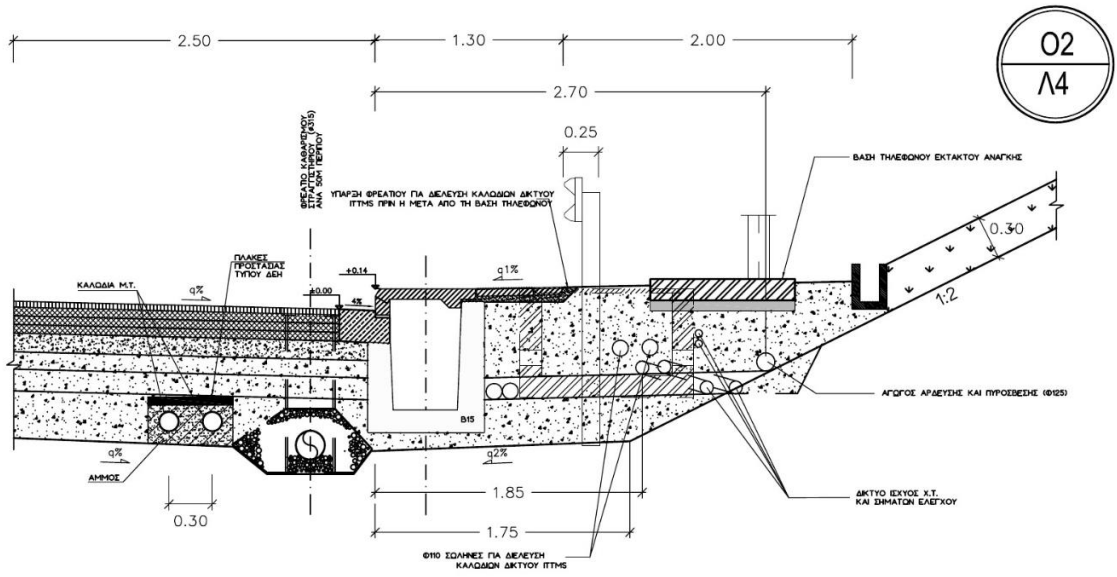
ΛΕΠΤΟΜΕΡΕΙΑ 'Α'
ΤΥΠΙΚΟ ΦΡΕΑΤΙΟ ΔΙΕΛΕΥΣΕΩΣ
ΚΑΛΩΔΙΩΝ
 ΚΛ. : 1:10

Σχήμα 2.6- Κατασκευαστικό σχέδιο τυπικού φρεατίου διέλευσης καλωδίων



ΛΕΠΤΟΜΕΡΕΙΑ 'Β'
ΤΥΠΙΚΟ ΦΡΕΑΤΙΟ ΔΙΕΛΕΥΣΕΩΣ
ΚΑΛΩΔΙΩΝ ΜΕ ΕΞΟΔΟΥΣ
ΕΓΚΙΒΩΤΙΣΜΕΝΩΝ ΣΩΛΗΝΩΝ
 ΚΛ. : 1:10

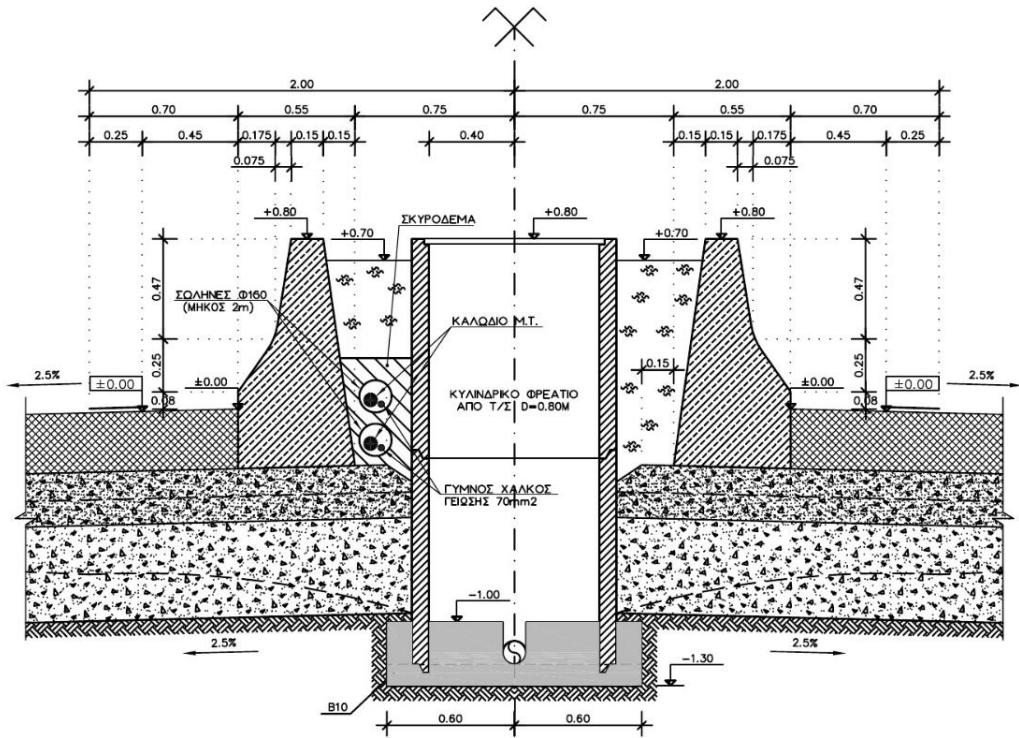
Σχήμα 2.7-Κατασκευαστικό σχέδιο τυπικού φρεατίου διελεύσεως καλωδίων με εξόδους εγκιβωτισμένων σωλήνων



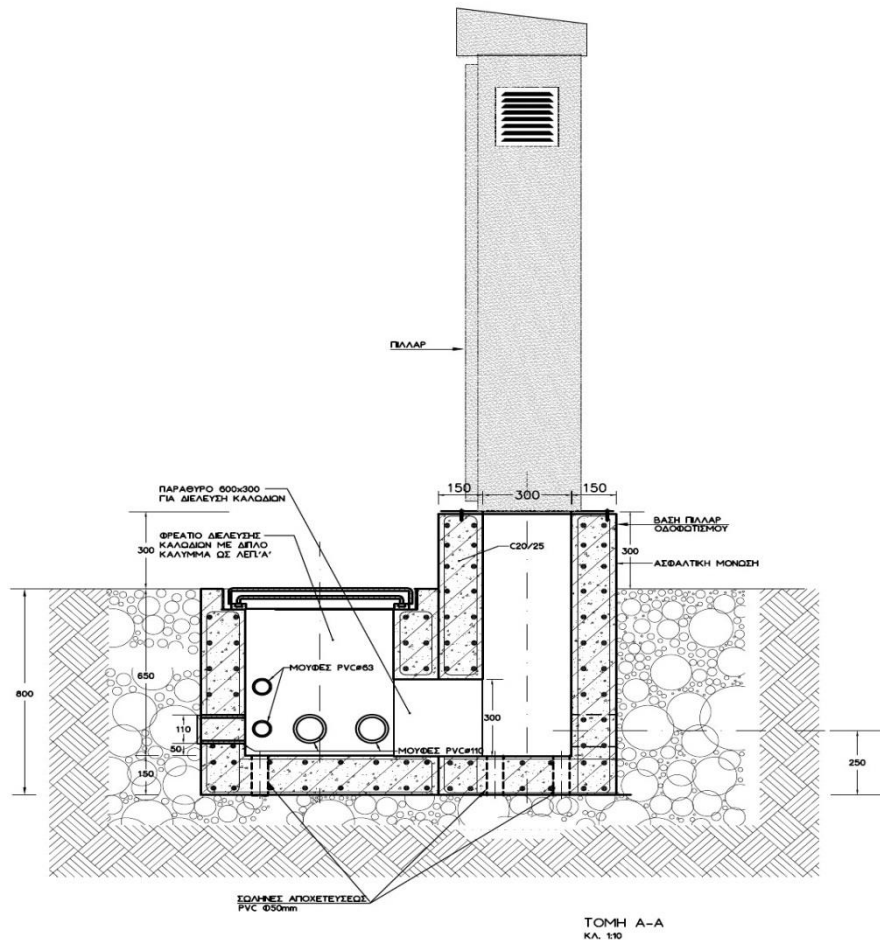
ΙΣΧΥΕΙ ΓΙΑ ΤΙΜΕΣ ΤΗΣ ΕΠΙΚΛΙΣΗΣ από 0% έως -7%

ΛΕΠΤΟΜΕΡΕΙΑ ΟΔΕΥΣΗΣ ΚΑΛΩΔΙΩΝ Μ.Τ. ΚΑΤΩ ΑΠΟ ΤΗ ΛΕΑ

Σχήμα 2.8-Λεπτομέρεια όδευσης καλωδίων Μ.Τ. κάτω από την λωρίδα έκτακτης ανάγκης (ΛΕΑ) σε κατάστρωμα αυτοκινητόδρομου



Σχήμα 2.9-Κατασκευαστικό σχέδιο διέλευσης καλωδίου Μ.Τ. στο αριστερό έρεισμα (ΑΕ) σε κατάστρωμα αυτοκινητόδρομου



ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗ
ΑΠΟ ΤΙΣ ΕΞΟΔΟΥΣ ΜΕ ΜΟΥΦΑ PVC ΘΑ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΘΟΥΝ ΑΥΤΕΣ
ΠΟΥ ΑΠΑΙΤΟΥΝΤΑΙ ΚΑΙ ΜΕ ΟΤΙ ΔΙΑΜΕΤΡΟ ΑΡΧΑΙΤΕΙΤΑΙ ΓΙΑ ΝΑ ΠΙΝΟΥΝ
ΟΙ ΣΥΝΔΕΣΕΙΣ ΠΟΥ ΔΕΚΝΟΝΤΑΙ ΣΤΙΣ ΚΑΤΩΣΕΙΣ.

Σχήμα 2.10-Κατασκευαστικό σχέδιο φρεατίου διέλευσης καλωδίων σε pillar οδοφωτισμού αυτοκινητόδρομου

2.7. Διάταξη καλωδίων και σχεδιασμός του συστήματος σε καλώδια τύπου XLPE Μ.Τ. και Υ.Τ.

Η διαστασιολόγηση ενός καλωδιακού συστήματος Μ.Τ. και Υ.Τ. βασίζεται πάντα στις προδιαγραφές και απαιτήσεις του έργου. Οι ακόλουθες λεπτομέρειες είναι απαραίτητες για τον υπολογισμό [12]:

- Ο τύπος της μόνωσης του καλωδίου
- Ονομαστική και μέγιστη τάση λειτουργίας
- Χωρητικότητα βραχυκυκλώματος και ρεύμα βραχυκυκλώματος με δήλωση του χρόνου επίδρασης

- Χωρητικότητα μετάδοσης ή ονομαστικό ρεύμα
- Λειτουργία: μόνιμη λειτουργία ή λειτουργία μερικού φορτίου (Συντελεστές φορτίου)
- Συνθήκες περιβάλλοντος
 - Τύπος εγκατάστασης
 - Θερμοκρασίες περιβάλλοντος
 - Ειδική θερμική αντίσταση του εδάφους

2.7.1. Ηλεκτρικό πεδίο

Στην αρχική εκτίμηση, η κύρια μόνωση του καλωδίου ενός καλωδίου XLPE Υ.Τ. μπορεί να θεωρηθεί ένας ομογενής κύλινδρος. Η κατανομή του πεδίου ή η διαβάθμιση της τάσης παρουσιάζεται ως ένα ομογενές ακτινωτό πεδίο. Η τιμή της διαβάθμισης της τάσης σε ένα σημείο x στο εσωτερικό της μόνωσης μπορεί να υπολογιστεί ως εξής [12]:

$$E_x = \frac{U_o}{r_x \cdot \ln\left(\frac{r_a}{r_i}\right)} \text{ (kV/mm)} \quad (2.5)$$

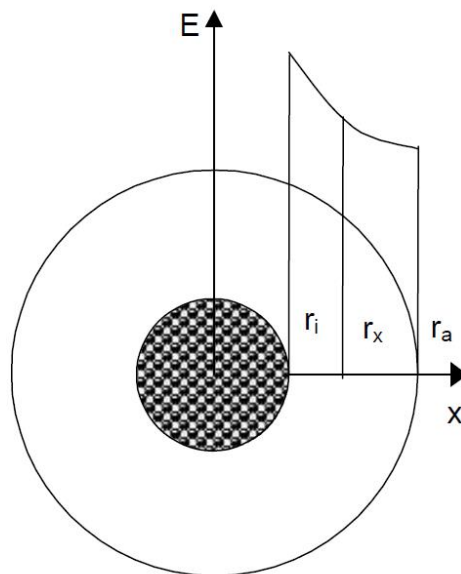
όπου:

U_o , η τάση λειτουργίας (kV)

r_x , η ακτίνα σε ένα σημείο x (mm)

r_a , η εξωτερική ακτίνα πάνω από την μόνωση (mm)

r_i , η ακτίνα του εσωτερικού οριοθέτη του πεδίου



Σχήμα 2.11-Κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου σε ένα καλώδιο XLPE Υ.Τ. [12]

Η δύναμη του ηλεκτρικού πεδίου είναι μεγαλύτερη στον εσωτερικό ημιαγωγό και μικρότερη πάνω από την μόνωση (κάτω από τον εξωτερικό ημιαγωγό, $r_x = r_a$) [12].

2.7.2. Χωρητικότητα ,ρεύμα φόρτισης

Η χωρητικότητα λειτουργίας εξαρτάται από τον τύπο της μόνωσης και την γεωμετρία της. Η ακόλουθη εξίσωση εφαρμόζεται σε όλα τα καλώδια ακτινωτού πεδίου [12]:

$$C_b = \frac{5,56 * \epsilon_r}{\ln\left(\frac{D}{d}\right)} \text{ (}\mu\text{F/km)} \quad (2.6)$$

όπου:

ϵ_r , η σχετική διαπερατότητα (για τα καλώδια τύπου XLPE :2,4)

D , η διάμετρος πάνω από την κύρια μόνωση (mm)

d , η διάμετρος πάνω από τον εσωτερικό ημιαγωγό (mm)

Τα μονοπολικά καλώδια Υ.Τ. τύπου XLPE αντιπροσωπεύουν μια εκτεταμένη χωρητικότητα με ομοιογενή ακτινοειδή κατανομή πεδίου. Έτσι ένα χωρητικό ρεύμα φόρτισης στην γη οδηγεί στην ακόλουθη εξίσωση [12]:

$$I_c = U_0 * \bar{\omega} * C_b \text{ (A/km)} \quad (2.7)$$

όπου:

U_0 , η τάση λειτουργίας (kV)

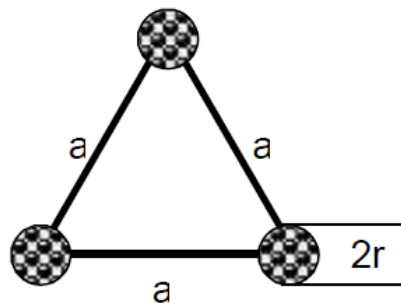
ω , η γωνιακή συχνότητα (1/s)

C_b , η χωρητικότητα λειτουργίας ($\mu\text{F/km}$)

2.7.3. Αυτεπαγωγή, επαγωγική αντίσταση

Η αυτεπαγωγή λειτουργίας γενικά εξαρτάται από την σχέση μεταξύ του διαστήματος του άξονα του αγωγού και της διαμέτρου του εξωτερικού αγωγού. Πρακτικά πρέπει να εξεταστούν δύο περιπτώσεις [12]:

Σχηματισμός τοποθέτησης: τριγωνοειδής



Σχήμα 2.12-Τριγωνοειδής σχηματισμός τοποθέτησης [12]

Η αυτεπαγωγή λειτουργίας και για τις τρεις φάσεις υπολογίζεται ως εξής :

$$L = 2 * 10^{-4} * \ln\left(\frac{a}{0,779*r_L}\right) (H/km) \quad (2.8)$$

όπου:

a , η απόσταση άξονα της φάσης (mm)

r_L , η διάμετρος του αγωγού πάνω από το εσωτερικό ημιαγωγίμο στρώμα (mm)

Σχηματισμός τοποθέτησης: επίπεδος



Σχήμα 2.13-Επίπεδος σχηματισμός τοποθέτησης [12]

Η μέση αυτεπαγωγή λειτουργίας και για τις τρεις φάσεις υπολογίζεται ως εξής :

$$L_m = 2 * 10^{-4} * \ln\left(\frac{a'}{0,779*r_L}\right) (H/km) \quad (2.9)$$

όπου:

$a * \gamma' = \sqrt[3]{2} * a$, η μέση γεωμετρική απόσταση (mm)

a , η απόσταση άξονα της φάσης (mm)

r_L , η διάμετρος του αγωγού πάνω από το εσωτερικό ημιαγωγίμο στρώμα (mm)

Η επαγωγική αντίσταση του καλωδιακού συστήματος θα υπολογίζεται και στις δύο περιπτώσεις ως εξής [12]:

$$X = \bar{\omega} * L [\Omega/km] \quad (2.10)$$

όπου:

ω , η γωνιακή συχνότητα (1/s)

2.7.4. Απώλειες σε καλώδια

Απώλειες ισχύος που εξαρτώνται από την τάση και το ρεύμα απαντώνται στα καλώδια .

2.7.4.1. Απώλειες εξαρτώμενες από την τάση

Απώλειες ισχύος εξαρτώμενες από την τάση προκαλούνται από επιδράσεις της πόλωσης στο εσωτερικό της κύριας μόνωσης. Υπολογίζονται ως εξής [12]:

$$P_d = U_o^2 * \bar{\omega} * C_b * \tan \delta (W/km) \quad (2.11)$$

όπου:

U_o , η τάση λειτουργίας (kV)

ω , η γωνιακή συχνότητα (1/s)

C_b , η χωρητικότητα λειτουργίας (μF/km)

Οι συντελεστές διηλεκτρικής απώλειας ισχύος $\tan \delta$ για τυπικές μονώσεις καλωδίων είναι:

- XLPE (1,5 έως 3,5) 10^{-4}
- EPR (10 έως 30) 10^{-4}
- Λαδιού (18 έως 30) 10^{-4}

2.7.4.2. Απώλειες εξαρτώμενες από το ρεύμα

Απώλειες ισχύος εξαρτώμενες από το ρεύμα αποτελούνται από τα ακόλουθα στοιχεία [12]:

- Ωμικές απώλειες του αγωγού
- Απώλειες μέσω του επιδερμικού φαινομένου
- Απώλειες μέσω του φαινομένου εγγύτητας
- Απώλειες στον μεταλλικό μανδύα

2.7.4.2.1. Ωμικές απώλειες του αγωγού

Οι ωμικές απώλειες εξαρτώνται από το υλικό και την θερμοκρασία. Για τον υπολογισμό των ωμικών απωλειών $I^2 * R$, η προβλεπόμενη αντίσταση του αγωγού στους 20°C (R_o) πρέπει να μετατραπεί στην θερμοκρασία λειτουργίας θ του καλωδίου [12]:

$$R = R_o [1 + a * (\theta - 20^\circ\text{C})] [\Omega/\text{km}] \quad (2.12)$$

όπου:

a , για τον χαλκό είναι 0,0393

a , για το αλουμίνιο είναι 0,0403

Η εγκάρσια διατομή του αγωγού και οι αποδεκτές αντιστάσεις Σ.Ρ. στους 20°C (R_o) ανταποκρίνονται στα πρότυπα σύμφωνα με IEC 60228 [12].

2.7.4.2.2. Απώλειες μέσω του επιδερμικού φαινομένου

Οι απώλειες που οφείλονται στο επιδερμικό φαινόμενο (Skin effect), δηλαδή της μετατόπισης του ρεύματος πάνω στην επιφάνεια του αγωγού, αυξάνονται περίπου τετραγωνικά με την συχνότητα. Το φαινόμενο αυτό μπορεί να περιοριστεί με την κατάλληλη κατασκευή αγωγών, π.χ. κατανεμημένους αγωγούς [12].

2.7.4.2.3. Απώλειες μέσω του φαινομένου εγγύτητας

Το φαινόμενο εγγύτητας (Proximity effect) εντοπίζει τις επιπρόσθετες απώλειες που οφείλονται στα μαγνητικά πεδία των παραλλήλων αγωγών μέσω δινορευμάτων (eddy currents) και φαινομένων μετατοπίσεων ρεύματος στον αγωγό και τον μανδύα του καλωδίου. Στην πράξη, η επιρροή τους είναι λιγότερο σημαντική. Η αύξηση της αντίστασης μέσω των φαινομένων εγγύτητας σε σχέση με την αντίσταση του αγωγού είναι κατώτερη της τάξης του 10% [12].

2.7.4.2.4. Απώλειες στον μεταλλικό μανδύα

Τα καλώδια Υ.Τ. είναι εφοδιασμένα με μεταλλικούς μανδύες ή θωρακίσεις οι οποίες πρέπει να είναι γειωμένες κατάλληλα [12].

Οι απώλειες στον μανδύα εμφανίζονται μέσω :

- Κυκλοφορούντα ρεύματα στο σύστημα
- Δινορεύματα στον μανδύα του καλωδίου
- Προκύπτοντα ρεύματα στον μανδύα που προκαλούνται από την επαγόμενη τάση στον μανδύα.

Οι απώλειες στον μανδύα, ειδικά τα ρεύματα υψηλής κυκλοφορίας, μπορούν να μειώσουν σημαντικά την ισχύ του φορτίου υπό ορισμένες συνθήκες. Μπορούν να μειωθούν σημαντικά με την βοήθεια ειδικών μεθόδων γείωσης [12].

2.8. Πρότυπα καλωδιακών συστημάτων και καλωδίων XLPE

Τα καλωδιακά συστήματα XLPE σχεδιάζονται ώστε να ανταποκρίνονται στις απαιτήσεις διεθνών και/ή εθνικών προτύπων. Μερικά από αυτά αναφέρονται παρακάτω [13].

2.8.1. Πρότυπα IEC

Τα καλωδιακά συστήματα XLPE που ορίζονται σύμφωνα με το πρότυπο IEC (International Electrotechnical Commission) είναι αποδεκτά και μεταξύ πολλών άλλων προτύπων. Τα πρότυπα IEC θεωρούνται ότι εκφράζουν μια διεθνή συνείδηση γνώμης. Μερικά συχνά χρησιμοποιούμενα πρότυπα είναι τα εξής [13]:

- IEC 60228, αγωγοί μονωμένων καλωδίων
- IEC 60287, ηλεκτρικά καλώδια - υπολογισμός επιτρεπόμενου ρεύματος
- IEC 60332, δοκιμές σε ηλεκτρικά καλώδια σε συνθήκες φωτιάς

- IEC 60502, καλώδια ισχύος με εξωθημένη μόνωση και τα εξαρτήματα τους για ονομαστική τάση από 1kV ($U_m = 1,2 \text{ kV}$) έως 30kV ($U_m = 36 \text{ kV}$)
- IEC 60840, καλώδια ισχύος με εξωθημένη μόνωση και τα εξαρτήματα τους για ονομαστική τάση από 30kV ($U_m = 36 \text{ kV}$) έως 150kV ($U_m = 170 \text{ kV}$). Μέθοδοι δοκιμών και προδιαγραφές.
- IEC 61443, όρια θερμοκρασιών βραχυκυκλωμάτων σε ηλεκτρικά καλώδια με ονομαστική τάση πάνω από 30kV ($U_m = 36 \text{ kV}$)
- IEC 62067, καλώδια ισχύος με εξωθημένη μόνωση και τα εξαρτήματα τους για ονομαστική τάση πάνω από 150kV ($U_m = 170 \text{ kV}$) έως 500kV ($U_m = 550 \text{ kV}$). Μέθοδοι δοκιμών και προδιαγραφές .

2.8.2. Πρότυπα CENELEC

Στην Ευρώπη, τα πρότυπα των καλωδίων εκδίδονται από την CENELEC (European Committee for Electrotechnical Standardization). Είναι κατά κανόνα υλοποιήσεις των προδιαγραφών IEC. Ειδικά χαρακτηριστικά στον σχεδιασμό ενδέχεται να προκύψουν ανάλογα με τις εθνικές απαιτήσεις. Μερικά συχνά χρησιμοποιούμενα πρότυπα είναι τα εξής [13]:

- HD 620, καλώδια διανομής με εξωθημένη μόνωση για ονομαστική τάση από 3,6/6 (7,2)kV έως και 20,8/36 (42)kV
- HD 632, καλώδια ισχύος με εξωθημένη μόνωση και τα εξαρτήματα τους για ονομαστική τάση πάνω από 36 kV ($U_m = 42 \text{ kV}$) έως 150 kV ($U_m = 170 \text{ kV}$). Μέρος 1ο - Γενικές προδιαγραφές δοκιμών. Το μέρος 1ο βασίζεται στο πρότυπο IEC 60840.

3^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

“Βλάβες και αστοχίες καλωδίων”

3.1. Εισαγωγή

Τα υπόγεια καλώδια χρησιμοποιούνται κυρίως στα δίκτυα μεταφοράς στα επίπεδα της Μ.Τ. (Μέσης Τάσης) και Υ.Τ.(Υψηλής Τάσης). Παρόλο που τα υπόγεια καλώδια είναι θαμμένα στο έδαφος, δεν είναι εντελώς απρόσβλητα σε δυσμενείς καιρικές συνθήκες. Είναι επίσης εκτεθειμένα σε διάφορες καιρικές συνθήκες που τα καθιστούν ευάλωτα σε διάφορα σφάλματα που σχετίζονται με τα δίκτυα διανομής και μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Τα σφάλματα αποτελούν μια σημαντική διατάραξη του συστήματος, εξ ου και η ανάγκη για τον εντοπισμό του σημείου του σφάλματος προκειμένου να διευκολυνθεί η ταχύτερη επισκευή, να βελτιωθεί η αξιοπιστία του συστήματος και να μειωθεί η περίοδος της διακοπής.

3.1.1. Ορισμός του σφάλματος

Ένας ορισμός της λέξης σφάλματος είναι ο εξής:

Σφάλμα: Μια φυσική κατάσταση που προκαλεί σε μια συσκευή, σε ένα εξάρτημα, ή σε ένα στοιχείο την αστοχία της λειτουργίας του κατά ένα συγκεκριμένο τρόπο. Για παράδειγμα σε ένα καλώδιο, το ανοιχτοκύκλωμα (κόψιμο) ή το βραχυκύκλωμα του. Σαν σφάλμα καλωδίου θεωρούμε :

- Κάθε ελάττωμα
- Ασυνέπεια
- Αδυναμία ή μη-ομοιογένεια που μπορεί να επηρεάσει την απόδοση του καλωδίου
- Την εκτροπή του ρεύματος από την προτιθέμενη πορεία του
- Το σπάσιμο (κόψιμο) του αγωγού και την αστοχία της μόνωσης του

3.1.2. Συμμετρικό και ασύμμετρο σφάλμα

Ως συμμετρικό ή ισορροπημένο σφάλμα ορίζουμε το ταυτόχρονο βραχυκύκλωμα και στις τρεις φάσεις. Συμβαίνει σπάνια και η ανάλυση του σφάλματος είναι σχετικά εύκολη. Οι πιο κοινοί τύποι είναι οι εξής [14]:

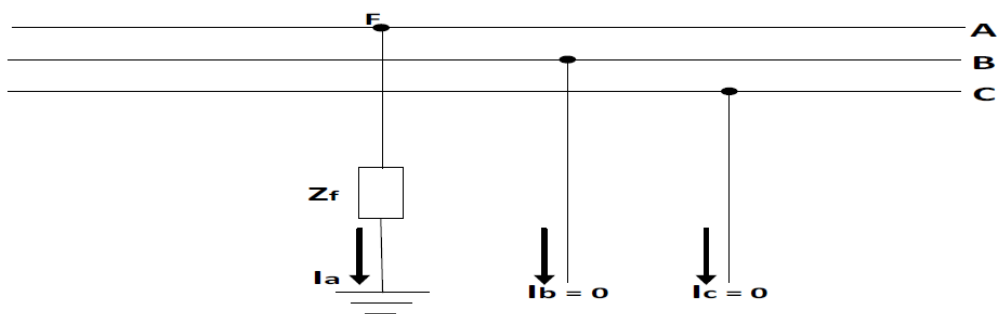
- Σφάλμα και στις τρεις φάσεις

- Σφάλμα και των τριών φάσεων με την γη

Σε αντίθεση με το συμμετρικό, ένα ασύμμετρο σφάλμα είναι το σφάλμα που δεν είναι ισορροπημένο. Στην πράξη, τα περισσότερα σφάλματα είναι ασύμμετρα. Οι πιο κοινοί τύποι είναι [14] :

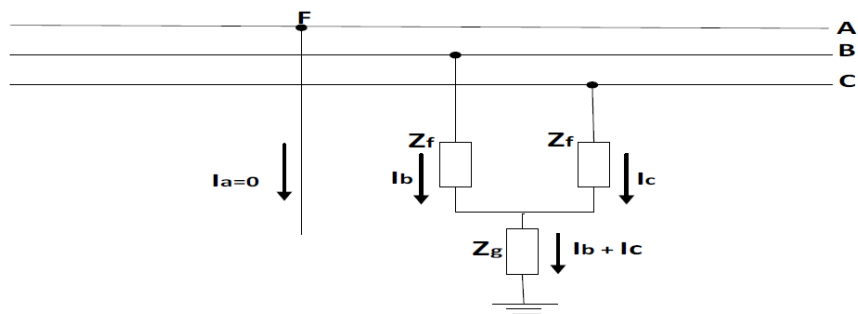
- Σφάλμα φάσης με γη
- Σφάλμα φάσης με φάση
- Σφάλμα δύο φάσεων με γη

Στο σφάλμα μιας φάσης με την γη, μόνο μια φάση έχει μη-μηδενικό ρεύμα σφάλματος. Το σφάλμα αυτό απεικονίζεται στο Σχήμα 3.1 [15].



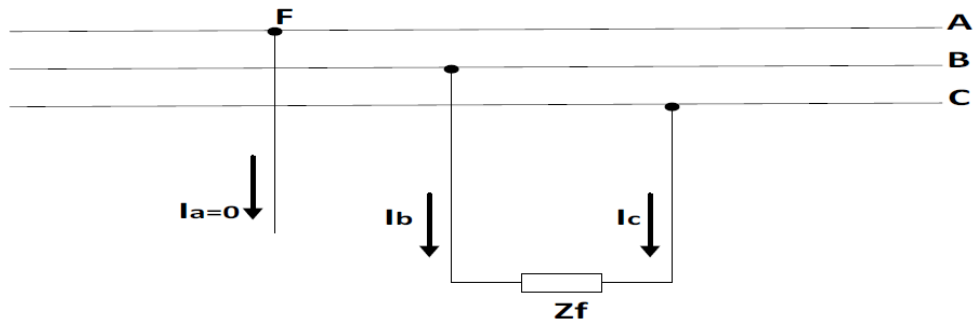
Σχήμα 3.1-Απεικόνιση ενός σφάλματος φάσης με γη [15]

Το σφάλμα δύο φάσεων με την γη εμφανίζεται όταν βραχυκυκλωθούν όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.2. Οι δύο αγωγοί έρχονται σε επαφή μεταξύ τους και με την γείωση [15].



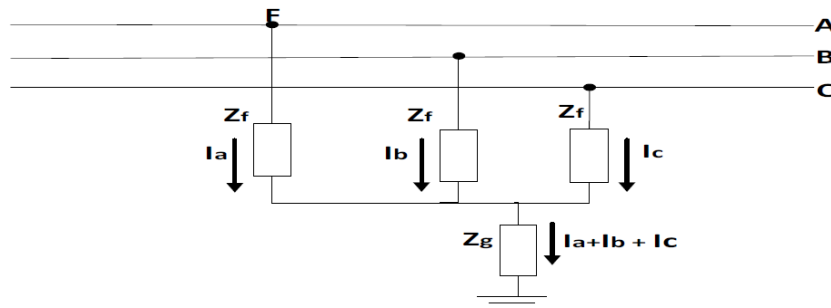
Σχήμα 3.2-:Απεικόνιση ενός σφάλματος δύο φάσεων με την γη [15]

Το σφάλμα φάσης με φάση εμφανίζεται όταν δύο αγωγοί βραχυκυκλωθούν όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.3. Τα σφάλματα φάσης με φάση εμφανίζονται όταν οι δύο αγωγοί έρθουν σε επαφή ο ένας με τον άλλο. Για παράδειγμα οι φάσεις B και C [15].



Σχήμα 3.3-Απεικόνιση σφάλματος φάσης με φάση [15]

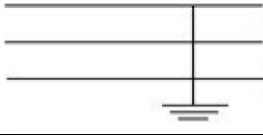
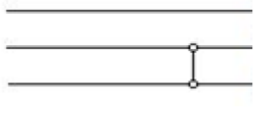
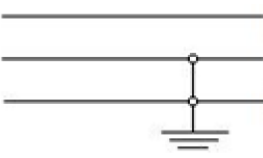
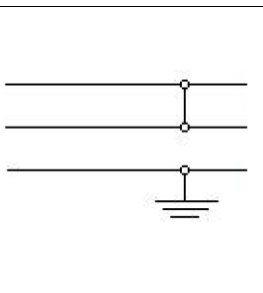
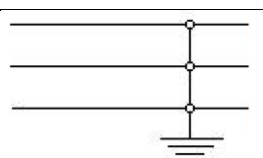
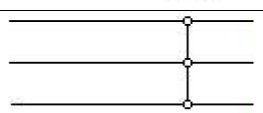
Τα σφάλματα τριών φάσεων με γη είναι τα λιγότερο πιθανά σφάλματα αλλά και τα πιο σοβαρά. Ένα τέτοιο σφάλμα απεικονίζεται στο Σχήμα 3.4 [15].



Σχήμα 3.4-Απεικόνιση σφάλματος τριών φάσεων με γη [15]

Στον πίνακα 3.1 δίνονται τα ιστορικά δεδομένα των πιθανοτήτων εμφάνισης κάθε σφάλματος. Το βραχυκύκλωμα μεταξύ τριών φάσεων είναι το σοβαρότερο σφάλμα που μπορεί να συμβεί στο σύστημα όπως αναφέρθηκε παραπάνω. Συνεπώς οι μηχανικοί χρησιμοποιούν το εν λόγω σφάλμα ως βάση για τον υπολογισμό της αντοχής του υλικού που απαιτείται για τα καλώδια διανομής ή για άλλο εξοπλισμό του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας [15].

Πίνακας 3.1-Διάφοροι τύποι σφαλμάτων, περιγραφή και πιθανότητα εμφάνισης [16]

A/A	Τύπος βραχυκυκλώματος	Περιγραφή	Αναπαράσταση	Ποσοστό εμφάνισης
1	Μια φάση με γη	Λόγω φθοράς στην μόνωση μεταξύ μιας φάσης και γείωσης		70%
2	Φάση με φάση	Λόγω φθοράς στην μόνωση μεταξύ των δύο φάσεων		15%
3	Δύο φάσεις με γη	Λόγω φθοράς στην μόνωση μεταξύ δύο φάσεων και γείωσης		10%
4	Φάση με φάση και η τρίτη φάση με γη	Λόγω φθοράς στην μόνωση κάποιας από τις δύο φάσεις και ταυτόχρονα φθορά στην μόνωση μεταξύ της τρίτης φάσης και της γείωσης		2 ή 3%
5	Και οι τρεις φάσεις με γη	Λόγω φθοράς στην μόνωση μεταξύ και των τριών φάσεων και γείωσης		2 ή 3%
6	Και οι τρεις φάσεις βραχυκυκλωμένες	Λόγω φθοράς στην μόνωση μεταξύ των τριών φάσεων		2 ή 3%

3.1.3. Τύποι σφαλμάτων καλωδίων

Τα σφάλματα των υπόγειων καλωδίων μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε τρεις βασικούς τύπους:

1. Σφάλμα ανοιχτοκυκλώματος
2. Σφάλμα βραχυκυκλώματος
3. Σφάλμα γείωσης

Τα σφάλματα μπορεί να είναι :

- Μόνιμο σφάλμα: είναι αυτό που το σύστημα έχει υποστεί μόνιμη βλάβη. Σε αυτή την κατηγορία περιλαμβάνονται οι αστοχίες της μόνωσης, το κόψιμο του καλωδίου ή αστοχία του εξοπλισμού. Σχεδόν όλα τα σφάλματα στα υπόγεια καλώδια είναι μόνιμα.

- Σφάλματα τύπου διαλείψεως: τα σφάλματα αυτά έχουν το χαρακτηριστικό ότι εμφανίζονται μόλις η τάση λειτουργίας του καλωδίου ξεπεράσει κάποιο όριο (κατώφλι). Κάτω από το όριο αυτό το καλώδιο λειτουργεί κανονικά.
- Παροδικά σφάλματα: ένα παροδικό σφάλμα δεν προκαλεί μόνιμη ζημιά στον εξοπλισμό του συστήματος. Αν το κύκλωμα διακοπεί και ξανακλείσει με καθυστέρηση το σύστημα λειτουργεί κανονικά. Τα προσωρινά σφάλματα μπορούν να εξελιχτούν σε μόνιμα σφάλματα. Αν στο σφάλμα επιτραπεί να παραμείνει καιρό το τόξο του σφάλματος μπορεί να προκαλέσει μόνιμη ζημιά στους αγωγούς, στην μόνωση ή σε άλλο εξοπλισμό του καλωδίου.

Οι περισσότεροι κατασκευαστές προτείνουν τις παρακάτω κατηγορίες σφαλμάτων:

1. Σφάλμα χαμηλής αντίστασης :από 0 έως 100 (-200 Ω)
2. Ωμικό σφάλμα υψηλής αντίστασης :πάνω από 100 Ω (200 Ω)
3. Τέλειο ανοιχτοκύκλωμα
4. Σφάλματα τύπου διαλείψεως
5. Σφάλματα στον μανδύα του καλωδίου

3.2. Αιτίες σφαλμάτων και αστοχιών καλωδίων και η ανάλυση τους

Η αστοχίες και βλάβες των καλωδίων μπορεί να οφείλονται σε πολλούς λόγους. Μερικές από τις κυριότερες και σημαντικότερες αιτίες των αστοχιών και βλαβών αυτών θα παρουσιαστούν παρακάτω.

3.2.1. Μηχανικές βλάβες

Οι μηχανικές βλάβες μπορεί να οφείλονται σε σπασίματα ή ελαττώματα του υλικού του περιβλήματος, μηχανικά τρυπήματα από ανθρώπους ή μηχανές, η ρωγμές που οφείλονται σε απότομη κάμψη ή δόνηση. Όποτε συμβεί μηχανική βλάβη στο περίβλημα του καλωδίου, η είσοδος της υγρασίας θα προκαλέσει αργή επιδείνωση του μονωτικού υλικού με αποτέλεσμα την ενδεχόμενη αποτυχία του καλωδίου. Είναι σημαντικό επομένως να ληφθούν οι απαραίτητες προφυλάξεις ώστε οι πιθανότητες για άμεση ή έμμεση μηχανική βλάβη να ελαχιστοποιούνται με την σωστή επιλογή, εγκατάσταση και συντήρηση των καλωδιακών συστημάτων.

3.2.2. Γήρανση

Ένα υπόγειο καλώδιο συνήθως αντιμετωπίζει παράγοντες γήρανσης, που προκαλούν μη αναστρέψιμες αλλαγές στις ιδιότητες του υλικού σε ένα σύστημα μόνωσης. Αυτοί οι

παράγοντες μπορούν να δράσουν μόνοι τους ή σε συνεργασία με άλλους. Μερικοί από αυτούς τους παράγοντες αναφέρονται στον πίνακα 3.2. Για παράδειγμα, ζημιά λόγω γήρανσης που οφείλεται σε περιβαλλοντικούς παράγοντες. Ένας άλλος τύπος παράγοντα γήρανσης γνωστός ως εξωγενής γήρανση λαμβάνει χώρα ως αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης των αναφερθέντων παραγόντων γήρανσης στον πίνακα 3.2 με προσμίξεις, ελαττώματα, προεξοχές και κενά στο μονωτικό υλικό .

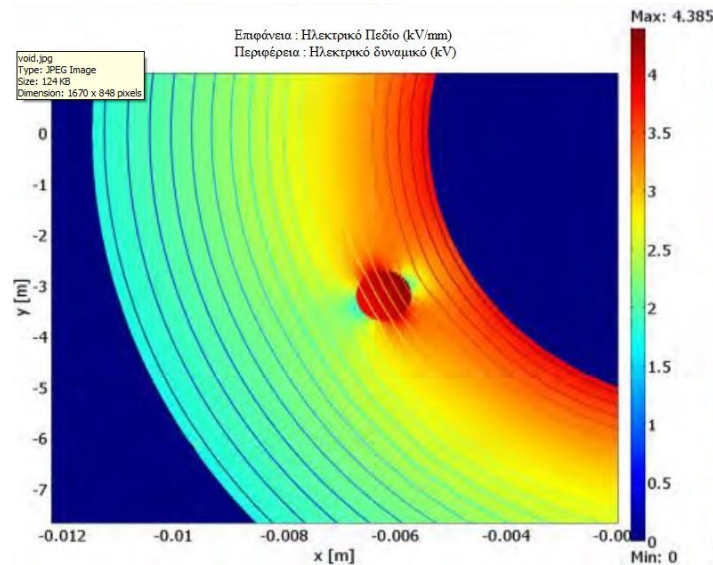
Πίνακας 3.2-Περίληψη των μηχανισμών γήρανσης στα καλώδια [17]

Παράγοντες γήρανσης		Μηχανισμός γήρανσης
Θερμικοί	Υψηλή θερμοκρασία	Διάχυση
		Χημική αντίδραση
		Τήξη μόνωσης
		Θερμική διαστολή
	Χαμηλή θερμοκρασία	Ράγισμα
		Θερμική συστολή
Ηλεκτρικοί	Τάση, Σ.Ρ., Ε.Ρ., Κρουστική τάση	Μερικές εκφορτίσεις
		Ηλεκτρικοί δενδρίτες
		Υδάτινοι δενδρίτες
		Εγγενής διακοπή
	Διηλεκτρικές απώλειες και χωρητικότητα	
Ρεύμα	Υπερθέρμανση	
Μηχανικοί	Κραδασμοί, καταπόνηση, συμπίεση	Υποχώρηση των υλικών
		Ράγισμα
		Ρήξη
Περιβαλλοντικοί	Νερό, υγρασία, μόλυνση, υγρά, αέρια	Υδάτινοι δενδρίτες
		Διάβρωση
		Διηλεκτρικές απώλειες και χωρητικότητα
	Ραδιενέργεια	Αύξηση του ρυθμού χημικής αντίδρασης

3.2.2.1. Υδάτινοι δενδρίτες

Οι υδάτινοι δενδρίτες νερού είναι γνωστό ότι προκαλούν την γήρανση των υπογείων καλωδίων. Όπως υποδηλώνει το όνομα, έχουν την μορφή ανάπτυξης δέντρου στο υλικό της μόνωσης που προκλήθηκαν από την παρουσία νερού ή υγρασίας στην μόνωση του καλωδίου. Δημιουργούνται από νερό που γεμίζει τα κενά στην μόνωση ή άλλους διαλυτούς ρύπους στην μόνωση του καλωδίου. Από την άποψη της γήρανσης, τα κενά γεμισμένα με νερό δεν επηρεάζουν σημαντικά την δύναμη “σκασίματος” του καλωδίου αλλά σε υψηλές θερμοκρασίες, αναπτύσσονται γρήγορα σαν αποτέλεσμα του ρυθμού διάχυσης της υγρασίας. Οι υδάτινοι δενδρίτες που προκαλούνται από διαλυτούς ρύπους συνεχίζουν να αναπτύσσονται με την πάροδο του χρόνου αλλά επηρεάζονται λίγο από

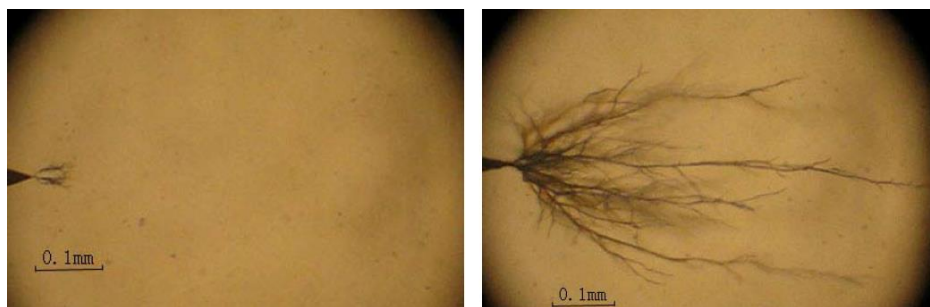
την θερμοκρασία και την μηχανική πίεση. Οι υδάτινοι δενδρίτες χρειάζονται την ταυτόχρονη ύπαρξη υγρασίας και του ηλεκτρικού πεδίου για την ανάπτυξη τους [18], [19].



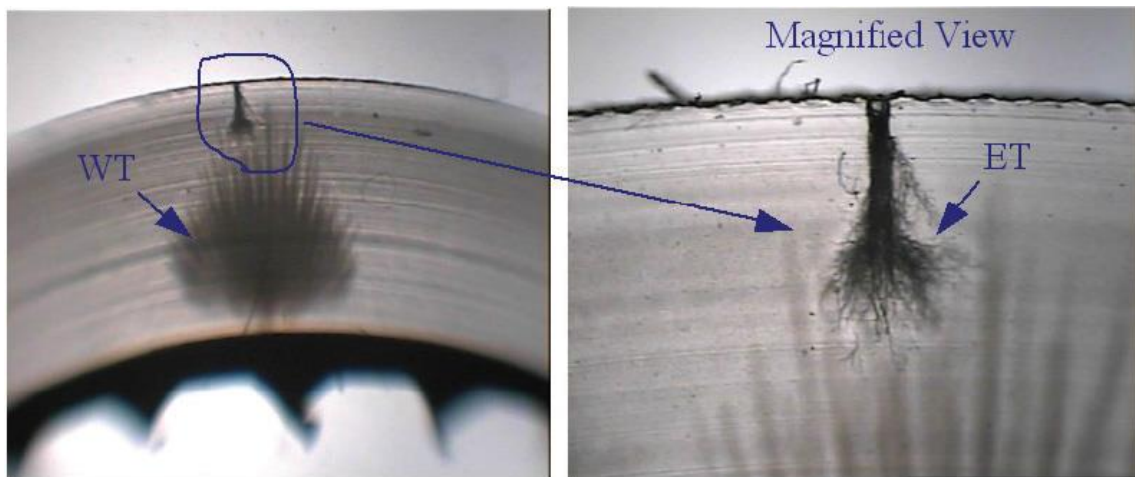
Σχήμα 3.5-Επίδραση ενός κενού-ελαττώματος στο ηλεκτρικό πεδίο καλωδίου XLPE [19]

3.2.2.2. Ηλεκτρικοί δενδρίτες

Ένας ηλεκτρικός δενδρίτης είναι ένα μοτίβο ατελειών στην μόνωση ενός καλωδίου που μπορεί να προκαλέσει το σφάλμα του. Η δημιουργία ηλεκτρικών δενδριτών όπως και των υδάτινων δενδριτών συμβάλλει σημαντικά στην γήρανση και στην δημιουργία σφαλμάτων στα υπόγεια καλώδια. Τα κανάλια μορφής δέντρου αυτού του μηχανισμού βλάβης διαδίδονται σχετικά γρήγορα στο εσωτερικό της μόνωσης προκαλώντας το σφάλμα. Το φαινόμενο των ηλεκτρικών δενδριτών είναι ένα συνήθης σφάλμα στα καλώδια Υ.Τ. και μια πηγή ηλεκτρικών σφαλμάτων στα υπόγεια καλώδια. Παρόλα αυτά, εμφανίζονται και στα υπόγεια καλώδια Χ.Τ.. Ένας ηλεκτρικός δενδρίτης θα μπορούσε να δημιουργηθεί από διαβρωμένες επιφάνειες σε ένα κενό και από υδάτινους δενδρίτες [18], [19].



Σχήμα 3.6-Διάδοση ηλεκτρικών δενδριτών στην μόνωση καλωδίου XLPE [19]



Σχήμα 3.7-Απεικόνιση ενός “υδάτινου δενδρίτη”(WT) και ενός “ηλεκτρικού δενδρίτη”(ET) [20]

3.2.3. Διάβρωση του μανδύα

Η διάβρωση του μανδύα μπορεί να συμβεί λόγω των ακόλουθων παραγόντων:

1. Ανόμοιες επιπτώσεις εδάφους
2. Γαλβανική δράση
3. Οξύτητα και αλκάλιο στους αγωγούς
4. Χημική μόλυνση του εδάφους

Η διάβρωση του μανδύα θα επιτρέψει την διείσδυση της υγρασίας στο σύστημα μόνωσης προκαλώντας την ενδεχόμενη αστοχία ή βλάβη του καλωδίου. Η διάβρωση του μανδύα μπορεί να ελαχιστοποιηθεί με την σωστή εφαρμογή της καθοδικής προστασίας, εφαρμογή μονωτικών χρωμάτων, παρέχοντας επαρκή αποστράγγιση, και απομακρύνοντας την πηγή της χημικής μόλυνσης .

3.2.4. Υγρασία στην μόνωση

Λόγω μηχανικής βλάβης ή για άλλους λόγους, η είσοδος της υγρασίας στο σύστημα μόνωσης θα επιδεινώσει την κατάσταση του καλωδίου, και όλα τα προληπτικά μέτρα θα πρέπει να ληφθούν για την αποφυγή αυτής της εισόδου. Οι βλάβες λόγω υγρασίας μπορεί να υποδεικνύονται από τα ακόλουθα:

1. Ξεθωριασμένο ή υγρό χαρτί
2. Αντοχή στο σκίσιμο των ταινιών
3. Κηλίδα ή λεκές στην εσωτερική επιφάνεια του μανδύα
4. Ορατή ύπαρξη νερού

5. Υπόλευκη σκόνη στον αγωγό αλουμινίου

3.2.5. Θέρμανση των καλωδίων

Όπως έχει αναφερθεί παραπάνω, αυξημένη άνοδος της θερμότητας στο καλώδιο μπορεί να οδηγήσει στον υποβιβασμό της μόνωσης του. Η θερμότητα αυτή μπορεί να οφείλεται σε υπερφόρτωση, υψηλές θερμοκρασίες περιβάλλοντος, ανεπαρκή εξαερισμό, θερμότητα που προκαλείται από την εγκατάσταση καλωδίων πολύ κοντά το ένα στο άλλο, ή από άλλες εξωτερικές πηγές θερμότητας. Πρέπει λοιπόν να ληφθεί μέριμνα να μην υπερβαίνει την άνοδο της θερμοκρασίας του συστήματος μόνωσης του καλωδίου.

Αυτό μπορεί να γίνει αρχικά με την αναγνώριση των περιβαλλοντικών και λειτουργικών παραγόντων που θα καθορίσουν την σωστή επιλογή της μόνωσης του καλωδίου και του μεγέθους του αγωγού. Μόλις γίνει η σωστή επιλογή και εγκατάσταση του καλωδίου, η τακτική συντήρηση του και επιθεώρηση του θα εξασφαλίσει την ασφάλεια και την μεγάλη διάρκεια ζωής του καλωδίου.

3.2.6. Υπερτάσεις λόγω κεραυνών

Αλεξικέραυνα πρέπει να εγκατασταθούν για να προστατέψουν το καλώδιο εκεί που συνδέεται με εναέριες γραμμές για την ελαχιστοποίηση των σφαλμάτων και αστοχιών λόγω των υπερτάσεων που προκαλούνται από κεραυνούς.

3.2.7. Ηλεκτρική διάτρηση

Μόλις η μόνωση εξασθενήσει συνέπεια των λόγων που έχουν ήδη συζητηθεί, μπορεί να αποτύχει ηλεκτρικά. Δηλαδή, το σύστημα μόνωσης δεν μπορεί να περιορίσει την ροή ηλεκτρικού ρεύματος μέσα στον αγωγό. Το σφάλμα αυτό μπορεί να είναι ένα σφάλμα φάσης με γη, τριών φάσεων με γη ή φάση με φάση. Προφανώς, αν το σφάλμα είναι ένα βραχυκύκλωμα που οφείλεται σε ελαττωματικούς αγωγούς, θα ανιχνευθεί από την προστατευτική διάταξη του κυκλώματος. Μερικές από τις όχι και τόσο εύκολες να ανιχνευθούν αστοχίες είναι οι εξής :

1. Διόγκωση του μανδύα
2. Έλλειψη στην σύνθεση της μόνωσης

4^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

“Μέθοδοι και όργανα εύρεσης βλαβών και αστοχιών”

4.1. Εισαγωγή

Οι τεχνικές για τον εντοπισμό σφαλμάτων στα υπόγεια καλώδια ισχύος χρησιμοποιούνται για τον ακριβή εντοπισμό των θέσεων των σφαλμάτων. Τα οφέλη από τον ακριβή εντοπισμό των σφαλμάτων είναι [21]:

1. Γρήγορη επισκευή για την επαναφορά του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας
2. Βελτίωση της διαθεσιμότητας και απόδοσης του συστήματος
3. Μείωση λειτουργικού κόστους και εξοικονόμηση του χρόνου που απαιτείται για τον εντοπισμό του σφάλματος

4.2. Οφέλη της εκτίμησης τοποθεσίας ενός σφάλματος

4.2.1. Εξοικονόμηση χρόνου και προσπαθειών

Δεδομένου ότι τα δίκτυα μεταφοράς εξαπλώνονται για μερικές εκατοντάδες χιλιόμετρα σε διάφορες περιβαλλοντικές και γεωγραφικές συνθήκες, ο εντοπισμός των σφαλμάτων αυτών με βάση την ανθρώπινη εμπειρία και τις διαθέσιμες πληροφορίες για την κατάσταση των παραμέτρων της γραμμής στην υπό βλάβη περιοχή είναι ανεπαρκής και χρονοβόρα. Αυτές οι προσπάθειες μπορούν με επιτυχία να περιορίσουν το σφάλμα σε ένα τμήμα της γραμμής αλλά δεν μπορούν να εντοπίσουν την ακριβή θέση του. Έτσι γίνεται πολύ σημαντική η χρήση τεχνικών αποκλειστικά για τον εντοπισμό σφαλμάτων [21].

4.2.2. Βελτίωση της διαθεσιμότητας του συστήματος

Δεν υπάρχει καμία αμφιβολία ότι οι γρήγορες και αποτελεσματικές διαδικασίες συντήρησης οδηγούν άμεσα στην διαθεσιμότητα της ενέργειας στους καταναλωτές. Αυτό κατά συνέπεια ενισχύει την συνολική αποτελεσματικότητα των δικτύων ενέργειας. Οι έννοιες αυτές (διαθεσιμότητα, συνέπεια, ποιότητα κ.τ.λ.) έχουν ακόμα μεγαλύτερη σημασία στην εποχή μας λόγω των νέων εμπορικών πολιτικών που προκύπτουν από την απορρύθμιση και απελευθέρωση της ηλεκτρικής ενέργειας και των ενεργειακών αγορών.

4.2.3. Οικονομικοί παράγοντες

Όλα τα προαναφερόμενα οφέλη μπορούν να αναθεωρηθούν υπό το πρίσμα του οικονομικού κέρδους. Δεν υπάρχει αμφιβολία ότι η εξοικονόμηση χρόνου, η αύξηση της διαθεσιμότητας της ενέργειας και η αποφυγή μελλοντικών συμβάντων μπορεί να μεταφραστεί άμεσα σε μείωση του κόστους και αύξηση των κερδών. Αυτή είναι μια βασική έννοια της ανταγωνιστικής εμπορικής πολιτικής. Έτσι είναι προφανής η σημασία των κατάλληλων τεχνικών στον εντοπισμό σφαλμάτων για τις εταιρίες παροχής ηλεκτρικής ενέργειας .

4.3. Ακρίβεια στον εντοπισμό σφάλματος

Ο εξής ορισμός δίνεται στο σφάλμα κατά τον εντοπισμό βλαβών και αστοχιών καλωδίων:

Ποσοστιαίο σφάλμα στην εκτίμηση κατά τον εντοπισμό σφαλμάτων καλωδίων με βάση το συνολικό μήκος της γραμμής=(ένδειξη οργάνου-ακριβής απόσταση του σφάλματος) διαιρεμένο με (συνολικό μήκος γραμμής)

Ο παραπάνω ορισμός μπορεί να δοθεί με την ακόλουθη σχέση:

$$\text{Σφάλμα (\%)} = \frac{d-d_{exact}}{l} * 100\% \quad (4.1)$$

όπου:

d , η μέτρηση του οργάνου

d_{exact} , η ακριβής απόσταση του σφάλματος

l , το συνολικό μήκος της γραμμής

4.4. Όργανα εύρεσης σφαλμάτων σε υπόγεια καλώδια

Ένα πλήρες σύστημα εντοπισμού σφαλμάτων μπορεί να αποτελείται από τις παρακάτω συσκευές [22], [23]:

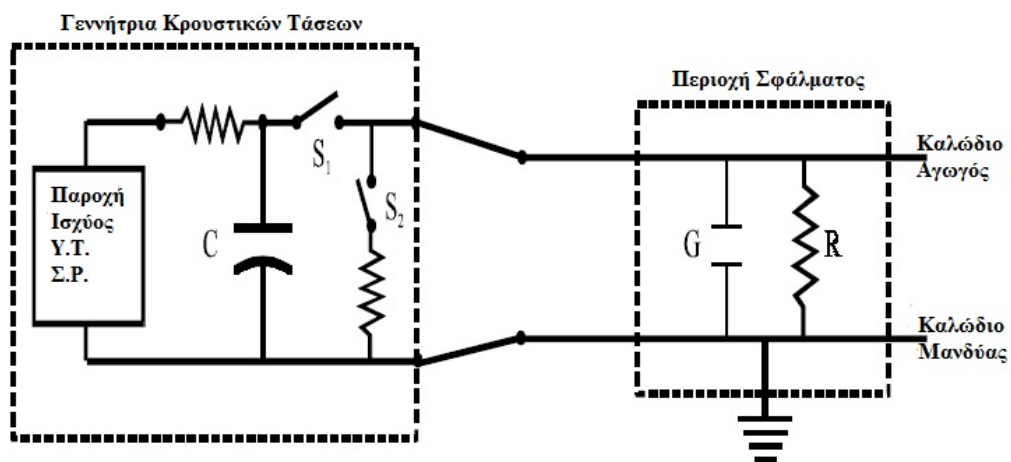
- Γεννήτρια τάσεως Σ.Ρ. ή VLF (Very Low Frequency)
- Παλμοηχόμετρο (Time Domain Reflectometer)
- Γεννήτρια κρουστικών τάσεων
- Μονάδα σύζευξης γεννήτριας κρουστικών τάσεων με το παλμοηχόμετρο
- Πομπός ακουστικών συχνοτήτων
- Δέκτης ακουστικών συχνοτήτων με τα παρελκόμενα του
- Γέφυρα

4.5. Ανάλυση του συστήματος εντοπισμού

4.5.1 Γεννήτρια κρουστικών τάσεων

Η γεννήτρια κρουστικών τάσεων είναι μια από τις πιο παλιές και πιο διαδεδομένες διατάξεις για τον εντοπισμό σφαλμάτων σε υπόγεια καλώδια ισχύος. Η προέλευση της γεννήτριας κρουστικών τάσεων χρονολογείται από τα μέσα/τέλη του 1940 όπου και παρουσιάστηκε το πρώτο εμπορικά διαθέσιμο όργανο για τον εντοπισμό σφαλμάτων σε καλώδια. Το όργανο χρησιμοποιούσε μια τεχνική γνωστή ως “εκφόρτιση πυκνωτή” και χρησιμοποιούταν για την ανίχνευση και τον ακριβή εντοπισμό του σφάλματος. Σήμερα η γεννήτρια κρουστικών τάσεων είναι η ραχοκοκαλιά πολλών μεθόδων και συστημάτων εντοπισμού σφαλμάτων [24].

Η τεχνική εκφόρτισης του πυκνωτή εφαρμόζεται με την χρήση της γεννήτριας κρουστικών τάσεων. Αυτή η συσκευή μετατρέπει την ισχύ της γραμμής σε παλμούς Υ.Τ. οι οποίοι μεταδίδονται στο υπό βλάβη καλώδιο. Ένα απλοποιημένο κύκλωμα της γεννήτριας κρουστικών τάσεων σε σύνδεση με το υπό βλάβη καλώδιο απεικονίζεται στο Σχήμα 4.1 [24].



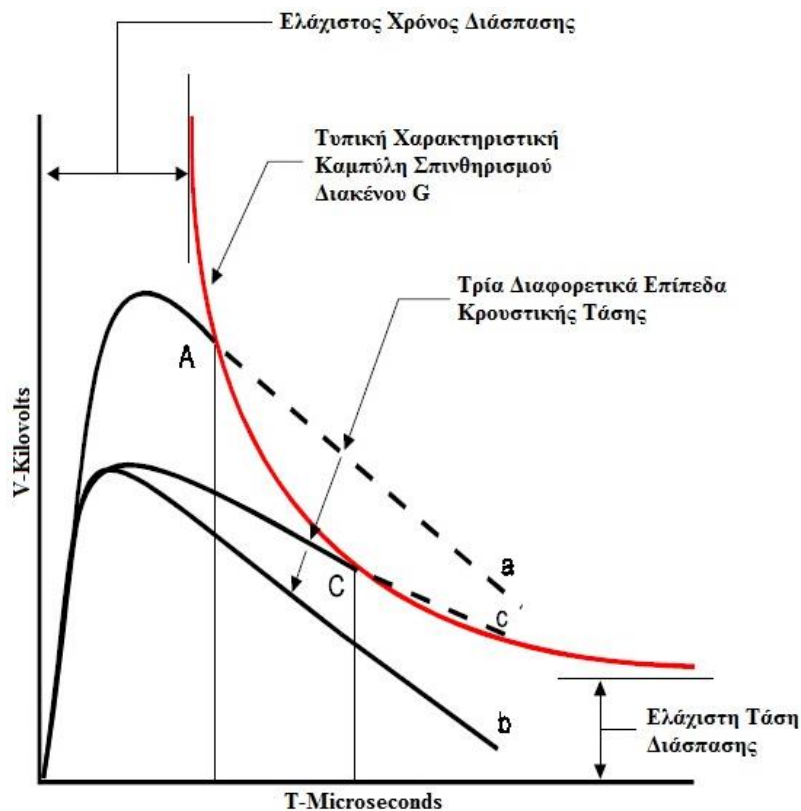
Σχήμα 4.1-Απλοποιημένο κύκλωμα σύνδεσης κρουστικής γεννήτριας με ένα υπό βλάβη καλώδιο [24]

Ο πυκνωτής C φορτίζει μέχρι την τάση της παροχής ισχύος. Όταν κλείσει ο διακόπτης S_1 ο πυκνωτής C εκφορτίζεται στο υπό έλεγχο καλώδιο με την μορφή ενός παλμού Υ.Τ.. Η κόκκινη γραμμή του σχήματος 4.2 απεικονίζει τον τρόπο με τον οποίο ο χρόνος επηρεάζει την τάση στην οποία ένα διάκενο θα σπινθηρίσει. Το διάκενο G του σχήματος 4.1 θα συμπεριφερθεί με αυτό τον τρόπο. Εφαρμόζοντας διαδοχικά

υψηλότερες τάσεις στο διάκενο και σχεδιάζοντας την χρονική υστέρηση μέχρις ότου δημιουργηθούν σπινθήρες δημιουργείται η καμπύλη. Η καμπύλη μας δείχνει πως [24]:

1. Όσο μεγαλύτερη η εφαρμόσιμη τάση, τόσο μικρότερη η χρονική υστέρηση μέχρι την εμφάνιση του σπινθηρισμού.
2. Υπάρχει πάντα ένας ελάχιστος χρόνος υστέρησης, όπως αναφέρεται από τον “Ελάχιστο Χρόνο Διάσπασης”, κάτω από τον οποίο το διάκενο δεν θα σπινθηρίσει ποτέ.
3. Υπάρχει μια ελάχιστη τάση, που αναφέρεται ως “Ελάχιστη Τάση Διάσπασης”, κάτω από την οποία ένα διάκενο δεν θα σπινθηρίσει ποτέ κατά την διάρκεια μιας τυπικής περιόδου δοκιμής μερικών λεπτών.

Η καμπύλη μας δείχνει πως για να “σκάσει” ένα σφάλμα σε καλώδιο πρέπει ο εφαρμόσιμος παλμός να φτάσει μια συγκεκριμένη τάση και πρέπει να διαρκέσει για μια συγκεκριμένη περίοδο χρόνου [24].



Σχήμα 4.2-Τυπική Χαρακτηριστική Καμπύλη Σπινθηρισμού Διακένου G [24]

Το σχήμα 4.2 επίσης μας δείχνει τρεις διαφορετικούς παλμούς για τον εντοπισμό του σφάλματος που εφαρμόζονται στο διάκενο. Παρατηρούμε ότι η αύξηση είναι σύντομη και αφού φτάσουν μια ελεγχόμενη μέγιστη τιμή (peak) το πλάτος τους εξασθενεί με

ποικίλους ρυθμούς. Ο παλμός (a) έχει επαρκή τάση και διάρκεια να περάσει την χαρακτηριστική καμπύλη σε ένα σημείο A και να προκαλέσει σπινθηρισμό. Ο παλμός (b) έχει επαρκή τάση αλλά είναι πολύ σύντομος σε διάρκεια για να διασταυρωθεί με την χαρακτηριστική καμπύλη και έτσι δεν θα προκαλέσει σπινθηρισμό. Ο παλμός (c) έχει το ίδιο πλάτος κορυφής (peak) όπως ο παλμός (b) αλλά έχει μεγαλύτερη διάρκεια, αρκετή για να διασταυρωθεί με την χαρακτηριστική καμπύλη στο σημείο C και να προκαλέσει σπινθηρισμό [24].

Η απόδοση της γεννήτριας κρουστικών τάσεων βασίζεται στην τάση εξόδου και την ενεργειακή ικανότητα. Όπως προαναφέρθηκε, όταν κλείσει ο διακόπτης S₁ ο πυκνωτής C εκφορτίζεται στο υπό έλεγχο καλώδιο με την μορφή ενός παλμού Υ.Τ.. Όσο μεγαλύτερη η τιμή του πυκνωτή C τόσο μεγαλύτερη και η ποσότητα διαθέσιμης ενέργειας για εκφόρτιση στο σφάλμα. Η διαθέσιμη ενέργεια μιας γεννήτριας κρουστικών τάσεων μπορεί να υπολογιστεί ως εξής [24]:

$$E = \left(\frac{C}{2}\right) * V^2 \text{ (Joules)} \quad (4.2)$$

όπου:

C, η χωρητικότητα του πυκνωτή σε μF

V, η εφαρμόσιμη τάση σε kV

Το μήκος του καλωδίου μπορεί να επηρεάσει το μέγιστο εύρος της τάσης που φτάνει στο σφάλμα. Οι επιπτώσεις του μήκους του καλωδίου στην εφαρμοζόμενη τάση μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

$$V_E = V_A * \left(\frac{C_S}{C_S + C_C}\right) \quad (4.3)$$

όπου:

V_E, η τάση που θα εμφανιστεί το σφάλμα

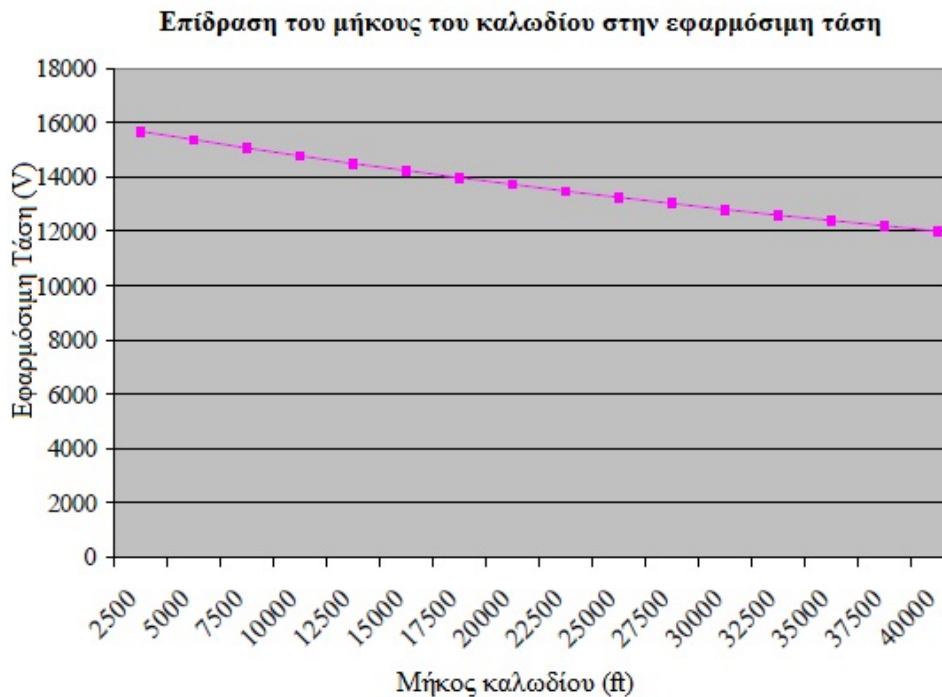
V_A, η εφαρμοζόμενη τάση στο καλώδιο

C_S, η τιμή του πυκνωτή της γεννήτριας κρουστικών τάσεων

C_C, η χωρητικότητα του υπό έλεγχο καλωδίου

Η χωρητικότητα του καλωδίου ποικίλει και υπολογίζεται βάση του μήκους του καλωδίου. Το σχήμα 4.3 απεικονίζει την επίδραση του μήκους του καλωδίου σε εφαρμοζόμενη τάση 16kV. Η τυπική εφαρμογή της κρουστικής γεννήτριας είναι ο εντοπισμός σφαλμάτων που έχουν λάβει χώρα κατά την διάρκεια της λειτουργίας. Η συντριπτική πλειοψηφία των σφαλμάτων στα καλώδια “σκάνε” σε επίπεδα τάσεων κάτω από 8kV. Παρόλα αυτά υπάρχουν περιπτώσεις που μπορεί να απαιτούνται μεγαλύτερες τάσεις. Σαν γενικό κανόνα η ικανότητα τάσης της κρουστικής γεννήτριας

θα πρέπει να είναι ίση με την ονομαστική τάση λειτουργίας του καλωδίου ώστε να επιτευχθεί μέγιστη αποδοτικότητα στον εντοπισμό του σφάλματος [24].



Σχήμα 4.3-Επίδραση του μήκους του καλωδίου στην εφαρμόσιμη τάση [24]

Η αποθηκευμένη ενέργεια μιας κρουστικής γεννήτριας επηρεάζεται από το μήκος του καλωδίου. Για να επιτευχθεί ένα μέγιστο επίπεδο απόδοσης στον εντοπισμό σφαλμάτων θα πρέπει η γεννήτρια κρουστικών τάσεων να μπορεί να διαθέτει επαρκή χωρητικότητα για να ξεπεράσει την χωρητικότητα του υπό έλεγχο καλωδίου. Επαρκής ενέργεια παρέχει ισχυρά τόξα τα οποία χρησιμοποιούνται από τα όργανα εντοπισμού (παλμοχόμετρο, ακουστικοί και ηλεκτρομαγνητικοί αισθητήρες) [24].

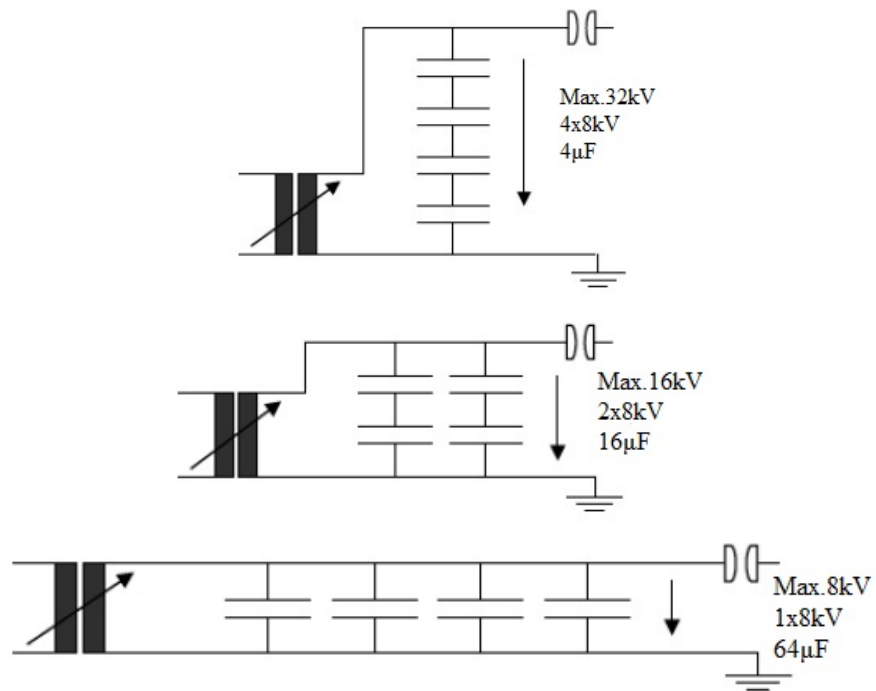
Η γεννήτρια κρουστικών τάσεων υπηρετεί ως ένα πολύ σημαντικό στοιχείο στον εντοπισμό σφαλμάτων καλωδίων. Η τάση λειτουργίας και η ικανότητα ενέργειας της συσκευής καθορίζει την αποτελεσματικότητα στην οποία ένα σφάλμα μπορεί να “σκάσει” και να εντοπιστεί [24].

4.5.1.1. Ανάλυση του συστήματος μιας κρουστικής γεννήτριας

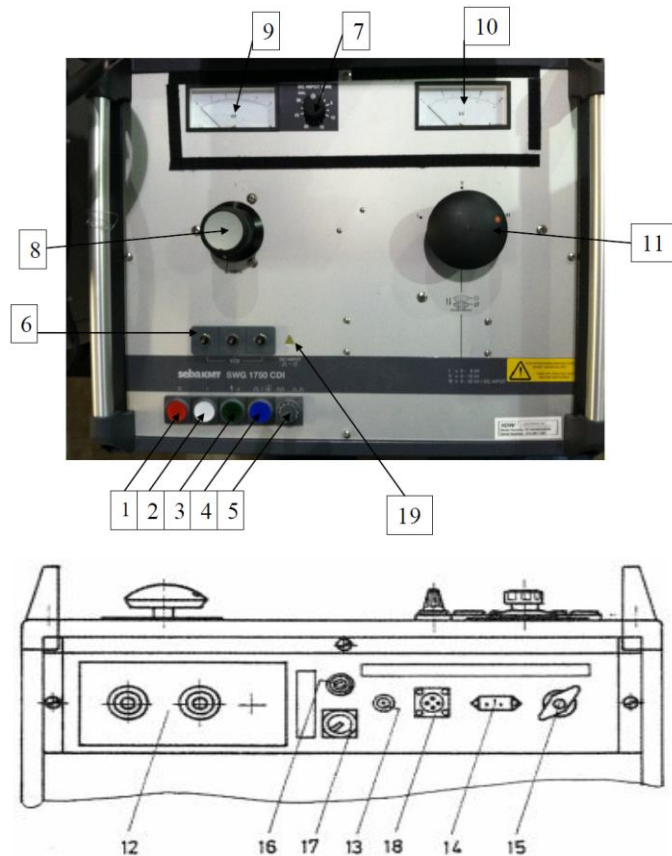
Ένα κύκλωμα υψηλής τάσεως μπορεί να αποτελείται από 4 επί μέρους πηγές υψηλής τάσεως, αποδίδοντας [22], [23]:

- 8kV όταν είναι όλες παράλληλα
- 16kV όταν είναι 2 παράλληλα και 2 σε σειρά

- 32kV όταν είναι όλες σε σειρά



Η αλλαγή από κλίμακα σε κλίμακα γίνεται με την βοήθεια μεταγωγικού διακόπτη. Κάθε πηγή αποτελείται από ένα μετασχηματιστή, ένα ανορθωτή, μια αντίσταση και ένα κρουστικό πυκνωτή [22], [23].



Σχήμα 4.4-Απεικόνιση στοιχείων κρουστικής γεννήτριας SWG 1750 της SebaKMT [25]

Στοιχεία προβολής [25]:

1. Κόκκινο κουμπί “Y.T. OFF”
2. Λευκό κουμπί “E.P. ON”
3. Πράσινο κουμπί “Y.T. ON”
4. Μπλε κουμπί “Λειτουργία Μονής Λήψης” και “Ένδειξη Προστασίας από Υπερθέρμανση”
5. Διακόπτης Συχνότητας Παλμού
6. Διακόπτης κυκλώματος
7. Χρονοδιακόπτης κυκλώματος ελέγχου της διηλεκτρικής αντοχής της ηλεκτρικής μόνωσης και της συνέχειας του κυκλώματος γείωσης (HiPot) Σ.Ρ.
8. Διακόπτης Ελέγχου Τάσης (Βάριακ)
9. Μετρητής Διαρροής Ρεύματος
10. Βολτόμετρο kV
11. Διακόπτης Ρύθμισης Εύρους Τάσης
12. Καλώδιο Εξόδου Y.T.
13. Έξοδος BNC (Bayonet Neill-Concelman) για Κρουστικό Παλμό
14. Σύνδεση Καλωδίου Τροφοδοσίας E.P.
15. Ακροδέκτης Γείωσης Ασφαλείας
16. Μη Διαθέσιμο
17. Διακόπτης Τύπου Κλειδιού Interlock
18. Μη Διαθέσιμο
19. Ένδειξη κυκλώματος ελέγχου της διηλεκτρικής αντοχής της ηλεκτρικής μόνωσης και της συνέχειας του κυκλώματος γείωσης (HiPot) Σ.Ρ.

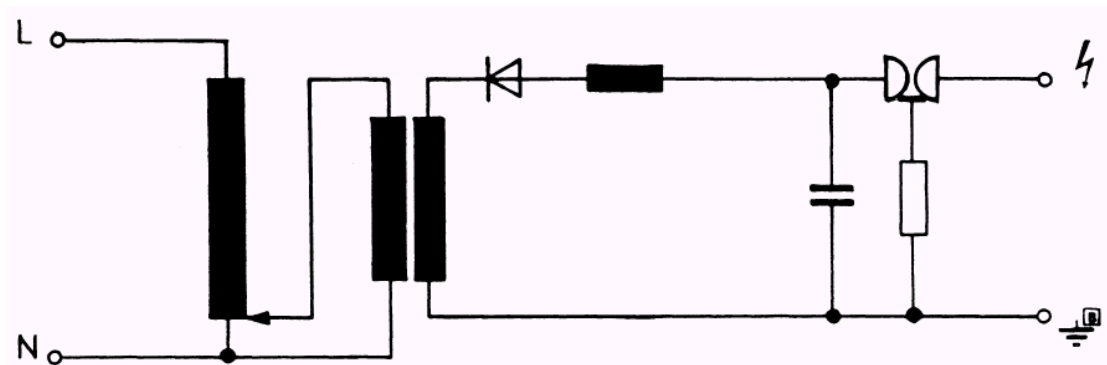


Σχήμα 4.5-Ρύθμιση της κλίμακας της τάσης σε γεννήτρια κρουστικών κυμάτων (SSG) της Baur[26]

Τα κρουστικά κύματα επιτυγχάνονται με διάταξη δύο φορτιζόμενων ημισφαιρικών ηλεκτροδίων που, καθώς έρχονται σε επαφή, απελευθερώνουν την ενέργεια στην έξοδο. Η κίνηση γίνεται από το ένα ηλεκτρόδιο, όπου οδηγείται από σύγχρονο κινητήρα. Υπάρχει δυνατότητα [22], [23]:

- Αναμονής για απελευθέρωση ενός κρουστικού κύματος με το πάτημα του αντίστοιχου πλήκτρου.
- Απελευθέρωσης διαδοχικών κρουστικών κυμάτων με επιλεγόμενο αριθμό κυμάτων / λεπτό.
- Παροχής συνεχούς τάσης στην έξοδο, με τα δύο ηλεκτρόδια συνεχώς σε επαφή.

Το βάριακ ρύθμισης τάσης έχει προστασία ώστε η ρύθμιση να ξεκινάει πάντα από το μηδέν (Zero Interlock) όταν η γεννήτρια τίθεται σε λειτουργία. Αν το βάριακ δεν βρίσκεται στην μηδενική θέση, η γεννήτρια δεν μπορεί να ενεργοποιηθεί [22], [23].



Σχήμα 4.6-Ισοδύναμο κύκλωμα κρουστικής γεννήτριας [22], [23]

Θέση σε λειτουργία

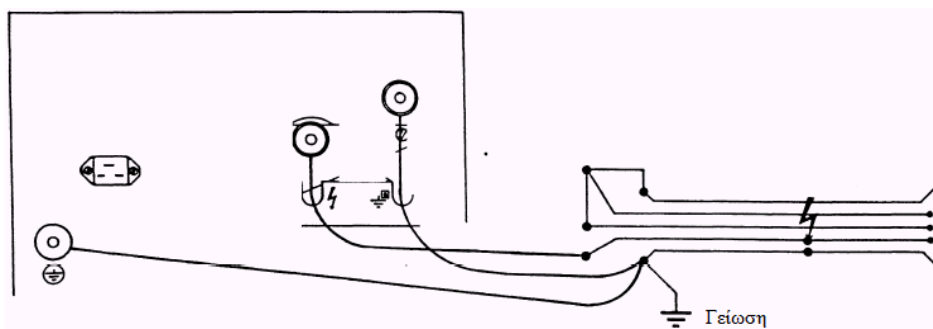
- Το σύστημα πρέπει να είναι σωστά γειωμένο
- Η απόσταση του συστήματος από την άκρη του καλωδίου πρέπει να είναι η μικρότερη δυνατή
- Το καλώδιο τροφοδοσίας να συνδεθεί με 220V/50Hz
- Επιλογή της επιθυμητής κλίμακας υψηλής τάσεως

Αν ο επιλογέας δεν “κουμπώσει” καλά η γεννήτρια δεν μπορεί να ενεργοποιηθεί (Interlock).

- Το βάριακ ρύθμισης τάσεως πρέπει να είναι στο μηδέν
- Επιλέγεται ο επιθυμητός ρυθμός κρουστικών κυμάτων στην έξοδο (ή λειτουργία Σ.Ρ.)
- Άνοιγμα του διακόπτη ON/OFF

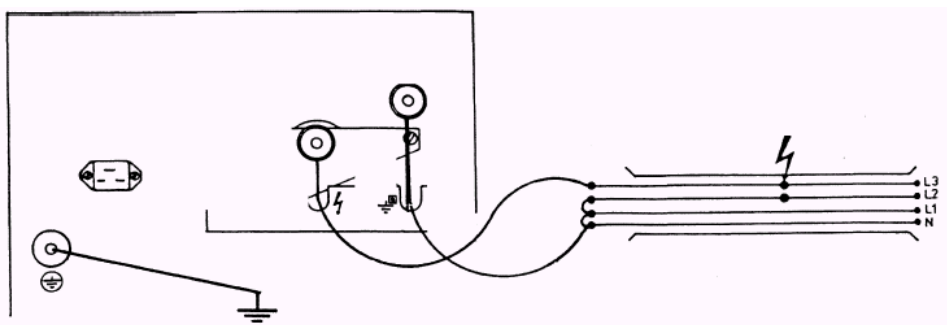
Σύνδεση με το υπό έλεγχο καλώδιο

Σύνδεση με καλώδιο σε τοποθεσία όπου υπάρχει καλή γείωση:



Σχήμα 4.7-Σύνδεση με καλώδιο σε τοποθεσία όπου υπάρχει καλή γείωση[22],[23]

Σύνδεση με καλώδιο σε τοποθεσία όπου δεν υπάρχει καλή γείωση:



Σχήμα 4.8-Σύνδεση με καλώδιο σε τοποθεσία όπου δεν υπάρχει καλή γείωση [22],[23]

Προσοχή, η γη πρέπει να συνδέεται στο υπό έλεγχο καλώδιο και όχι στην γεννήτρια.

Θέση εκτός λειτουργίας

- Γυρίζουμε το βάριακ ρύθμισης τάσεως στο μηδέν
- Γυρίζουμε τον επιλογέα ρυθμού κρουστικών κυμάτων στην θέση για απελευθέρωση ενός κρουστικού κύματος
- Πατάμε το πλήκτρο για απελευθέρωση ενός κρουστικού κύματος για την εκφόρτιση του πυκνωτή
- Κλείνουμε τον διακόπτη ON/OFF. Αμέσως θα ακουστεί η εκφόρτιση των πυκνωτών εξόδου

4.5.2. Παλμοηχόμετρο (Time Domain Reflectometer)

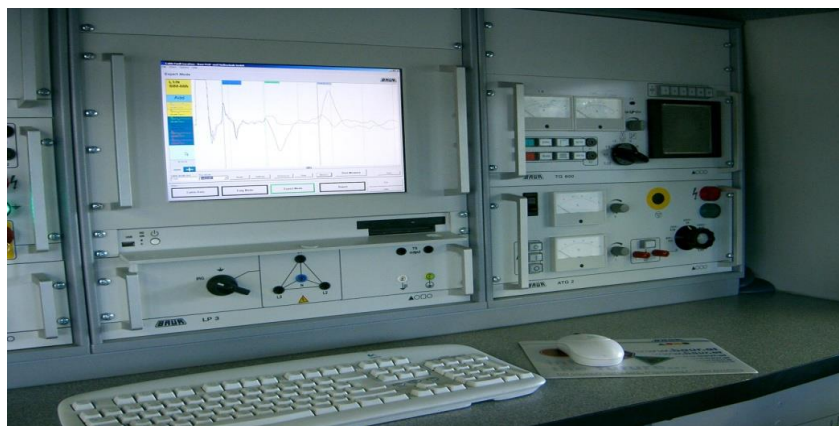
Το παλμοηχόμετρο είναι το πιο εύχρηστο όργανο για τον προεντοπισμό σφαλμάτων σε υπόγεια καλώδια καθώς και για την μέτρηση του μήκους ενός καλωδίου. Ένα παλμοηχόμετρο αποτελείται από ένα κύκλωμα γεννήτριας παλμών το οποίο συνδέεται με μια οθόνη παρόμοια με ένα φασματογράφο και τα δύο αυτά συνδεδεμένα σε μια εξωτερική σύνδεση με τους υπό έλεγχο αγωγούς. Τα περισσότερα παλμοηχόμετρα περιλαμβάνουν κύκλωμα για την ρύθμιση της ενίσχυσης των εξερχόμενων και εισερχόμενων παλμών, κέρσορες για την μέτρηση του χρόνου και του πλάτους του παλμού, εσωτερικές μπαταρίες και άλλα στοιχεία [27].

Η θεωρία του παλμοηχομέτρου είναι ότι μεταδίδει ένα παλμό ενέργειας ο οποίος ταξιδεύει ή διαδίδεται κατά μήκος του καλωδίου. Ένα μέρος της ενέργειας θα ανακλαστεί πίσω στο άκρο αποστολής του παλμού όποτε διέρχεται από μια αλλαγή στην σύνθετη αντίσταση του καλωδίου. Ο χρόνος που απαιτείται για τις ανακλάσεις να επιστρέψουν είναι ανάλογος της απόστασης. Αν γνωρίζουμε την κατά προσέγγιση ταχύτητα του παλμού στο καλώδιο και την πολλαπλασιάσουμε με τον χρόνο που απαιτείται για τον παλμό να επιστρέψει, υπολογίζουμε πολύ εύκολα την απόσταση της “ανωμαλίας”. Τα περισσότερα παλμοηχόμετρα υπολογίζουν αυτόματα την απόσταση και την προβάλλουν σε μέτρα (m) ή σε πόδια (ft) [27].

Η πολικότητα της ανάκλασης επίσης μας δίνει πολλές πληροφορίες για το σφάλμα. Ένας ανακλώμενος παλμός που αυξάνεται σε πλάτος μας δίνει πληροφορία ότι στο σημείο του σφάλματος έχουμε ένα ανοιχτόκύκλωμα. Αν ο παλμός επιστρέφει με αρνητική πολικότητα μας υποδεικνύει ελάττωση της σύνθετης αντίστασης ή βραχυκύκλωμα [27].

Η ταχύτητα του παλμού στο καλώδιο δεν είναι ίση με την ταχύτητα του φωτός όπως θα περιμέναμε αλλά πιο κοντά στην μισή τιμή της. Αυτή την μέτρηση ταχύτητας την ονομάζουμε “Ταχύτητα Διάδοσης” (Velocity of Propagation) ή “Συντελεστή Ταχύτητας Διάδοσης” (Propagation Velocity Factor). Ο μεγαλύτερος παράγοντας που επηρεάζει την σύνθετη αντίσταση και ως εκ τούτου την ταχύτητα είναι το υλικό μόνωσης [27].

Η παράμετρος $V/2$ είναι ενδεικτική της ταχύτητας με την οποία διαδίδεται ο παλμός (H/M σήμα) μέσα στην μόνωση του καλωδίου και εξαρτάται μόνο από τον τύπο του καλωδίου. Η διόρθωση της στην τιμή που αντιστοιχεί στο υπό έλεγχο καλώδιο γίνεται πολύ απλά (calibration) [22],[23].



Σχήμα 4.9-Παλμοχόμετρο (IRG 3000) της Baur τοποθετημένο σε βαν με εξοπλισμό για εντοπισμό σφαλμάτων σε καλώδια [26]

Το πλάτος του παλμού ρυθμίζεται για δύο λόγους. Ένας ευρύς παλμός θα έχει περισσότερη ενέργεια και θα είναι σε θέση να δοκιμάσει μεγαλύτερες αποστάσεις και να εμφανίσει μικρότερα σφάλματα. Στενοί παλμοί δίνουν πιο εύχρηστη ανάλυση αλλά όχι τόση ακρίβεια [27].

Τα καλωδιακά συστήματα έχουν μια αντίδραση παλμού η οποία παραμορφώνει τον αρχικό παλμό του TDR καθώς “ταξιδεύει” μέσα στο σύστημα. Η παραμόρφωση προκαλείται από διάφορες καλωδιακές απώλειες οι οποίες εξαρτώνται από την συχνότητα. Όσο μεγαλύτερο το καλώδιο τόσο μεγαλύτερη η παραμόρφωση. Οι φυσικές διαδικασίες που χαρακτηρίζουν τις απώλειες είναι γνωστές και καθορισμένες. Αυτές είναι [27]:

- Το επιδερμικό φαινόμενο
- Διηλεκτρικές απώλειες
- Αντανακλάσεις και ακτινοβολία

Πίνακας 4.1-Γενικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των μετρήσεων του TDR [27]

Πλεονεκτήματα	<ul style="list-style-type: none"> • Εύκολο στην χρήση • Χρησιμοποιεί Χ.Τ. • Περιοδικές δοκιμές παρέχουν ιστορικά δεδομένα χρήσιμα για την παρατήρηση αλλαγών με την πάροδο του χρόνου • Εντοπίζει περιοχές του καλωδιακού συστήματος με αλλαγές στην σύνθετη αντίσταση του
Ανοιχτά Ζητήματα	<ul style="list-style-type: none"> • Σωστή ερμηνεία των δεδομένων του παλμογράφου μπορεί να απαιτεί το ιστορικό κατασκευής του καλωδιακού συστήματος • Η τάση δοκιμής ενός παλμογράφου (Χ.Τ.) μπορεί να μην είναι επαρκής για τον εντοπισμό ορισμένων διηλεκτρικών ατελειών • Είναι δύσκολη η ερμηνεία μερικών ασυνεχειών της σύνθετης αντίστασης • Η επιλογή του εύρους παλμού για την καλύτερη ανάλυση και απόσταση μπορεί να είναι δύσκολη στην πράξη • Η μέτρηση του μήκους του καλωδίου απαιτεί την αναγνώριση της αφετηρίας του παλμού του παλμογράφου, στην πράξη μπορεί να είναι δύσκολο
Μειονεκτήματα	<ul style="list-style-type: none"> • Απαιτεί την δοκιμή και ανάλυση των δεδομένων από έμπειρο προσωπικό • Ηλεκτρικό θόρυβος μπορεί να παρεμβληθεί με το σήμα Χ.Τ. του παλμογράφου • Επιτυχής εντοπισμός ασυνεχειών στην σύνθετη αντίσταση του καλωδίου εξαρτάται από την επιλογή της σωστής ταχύτητας διάδοσης σε συνδυασμό με τα σχέδια για την διάταξη του καλωδιακού συστήματος

4.5.2.1. Ταχύτητα διάδοσης

Όπως προαναφέραμε πρέπει να παρέχουμε στο TDR ορισμένες πληροφορίες για να μπορέσει να μας παρέχει πληροφορίες για την απόσταση. Η πιο σημαντική είναι η ταχύτητα διάδοσης, η ταχύτητα με την οποία ο παλμός ταξιδεύει κατά μήκος του υπό έλεγχο καλωδίου. Αυτή η τιμή χρησιμοποιείται από τον αναλυτή για την μετατροπή του μετρούμενου χρόνου σε απόσταση [28].

Η μέση ταχύτητα διάδοσης σε ένα καλώδιο δίνεται από τον εξής τύπο :

$$V = \frac{v_0}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (4.4)$$

όπου:

v_0 , η ταχύτητα του φωτός : 300 m/s

ϵ_r , η διηλεκτρική σταθερά του υλικού μόνωσης

Ο ακόλουθος πίνακας παρουσιάζει την ταχύτητα διάδοσης για διάφορους τύπους καλωδίων :

Πίνακας 4.2-Πίνακας ενδεικτικών ταχυτήτων διάδοσης ($v/2$) για διάφορους τύπους καλωδίων ισχύος

Τύπος καλωδίου	Μόνωση	Διατομή σε mm ²	Τάση (kV)	Ταχύτητα παλμού v/2 (m/μs)
StYHS2Y	PE	1 x 25 rm/10	Έως 110	69,6
A2YHS2Y	PE	1 x 300 rm/50	110	86,7-87,6
A2YHS2Y	PE	1 x 300 rm/50	30	86,7
NHEKBA	Χάρτου/Λαδιού	3 x 70 rm	30	80
NHEKEBA	Χάρτου/Λαδιού	3 x 95 rm	30	80
NHKBA	Χάρτου/Λαδιού	3 x 70 rm	30	80
A2YHSY	PE	1 x 50 rm/16	20	85
A2XHS2Y	PE	1 x 120 rm/16	20	83,5-84
A2YHSY	PE	1 x 150 rm/25	20	86,1-87
A2YHSY	PE	1x185 rm	20	87
NHEKBA	Χάρτου/Λαδιού	3 x 50 rm	20	73
NHEKBA	Χάρτου/Λαδιού	3 x 120 rm	20	73,5
NAKLEY	Χάρτου/Λαδιού	1 x 120 rm		
NKBA	Χάρτου/Λαδιού	3 x 25 sm	10	81,5-82,5
NKBA	Χάρτου/Λαδιού	3 x 35 sm	10	82,5-83,5
NKBA	Χάρτου/Λαδιού	3 x 70	10	79
NKY	Χάρτου/Λαδιού	3 x 50	10	58,5
NA2YSY	PE	3 x 150/16	10	76
NA2XS (F) 2Y	VPE	3 x 150 rm/25	10	81
NAKBA	Χάρτου/Λαδιού	3 x 95 sm	10	81,5
NAKBA	Χάρτου/Λαδιού	3 x 185 sm	10	82
NAKBA	Χάρτου/Λαδιού	3 x 240 sm	10	81,5
NEKBA	Χάρτου/Λαδιού	3 x 120 rm	10	74
NKBA	Χάρτου/Λαδιού	4 x 10 re	1	73
NKBA	Χάρτου/Λαδιού	4 x 25 sm	1	78,5
NKBA	Χάρτου/Λαδιού	4 x 50 sm	1	74,5-80
NKBA	Χάρτου/Λαδιού	3 x 70/35 sm	1	87-88
NAKLEY	Χάρτου/Λαδιού	3 x 95 sm	1	87,5
NAKLEY	Χάρτου/Λαδιού	3 x 95 se	1	81,5
NYY	PVC	4 x 1.5 Cu	1	90
NYY	PVC	4 x 4 Cu	1	79
NYY	PVC	4 x 10 Cu	1	76
NYY	PVC	4 x 16 Cu	1	74,5
NYY	PVC	4 x 70 Cu	1	86,5
NYYCY	PVC	3 x 16/16	1	75

Πίνακας 4.2-... (Συνέχεια)

Τύπος καλωδίου	Μόνωση	Διατομή σε mm ²	Τάση (kV)	Ταχύτητα παλμού v/2 (m/μs)
NYCY	PVC	4 x 120/70	1	79
NA5CWY	PVC	3 x 95 /95	1	69
NA2XY	VPE	4 x 95	1	80
NA2XY	VPE	4 x 95+1.5	1	80
NA2XY	VPE	4 x 150	1	N/A

4.5.2.2.Χαρακτηριστική αντίσταση

Αν θεωρήσουμε πως ένα καλώδιο είναι μια γραμμή με κατανεμημένους παραμέτρους, όπου [28]:

l , γραμμική αυτεπαγωγή (H/m)

c , γραμμική χωρητικότητα (F/m)

Η χαρακτηριστική αντίσταση του καλωδίου θα δίνεται από τον τύπο :

$$Z_c = \sqrt{\frac{l}{c}} \quad (4.5)$$

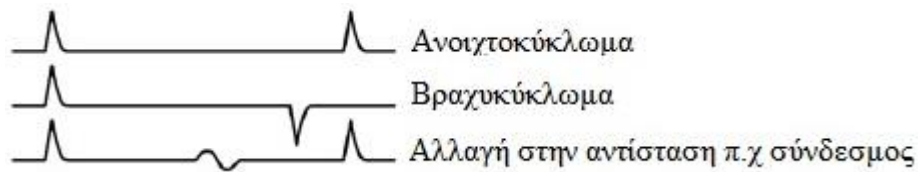
Στα καλώδια ισχύος η χαρακτηριστική αντίσταση κυμαίνεται από 10 έως 40 Ω [28].

4.5.2.3.Συντελεστής ανάκλασης

Ένας παλμός τάσης V_i στέλνεται στο καλώδιο και ανακλάται σε κάθε αλλαγή της αντίστασης του καλωδίου (ενώσεις, σφάλματα). Το μέγεθος των ανακλάσεων των παλμών εξαρτάται από πόσο διαφέρει η αντίσταση σφάλματος Z_r από την χαρακτηριστική αντίσταση Z_c . Η ανάκλαση μπορεί να υπολογιστεί από την ακόλουθη εξίσωση [28]:

$$r = \frac{Z_r - Z_c}{Z_r + Z_c} \quad (4.6)$$

Για ένα βραχυκύκλωμα θα έχουμε $Z_r = 0$ και $r = -1$, που σημαίνει πως ο παλμός θα ανακλαστεί στην μορφή ενός αρνητικού παλμού. Για ένα ανοιχτοκύκλωμα όπου $Z_r = \infty$ και $r = +1$, που σημαίνει ότι ο παλμός θα ανακλαστεί με την μορφή ενός θετικού παλμού [28].



Σχήμα 4.10-Σχηματικό διάγραμμα των γραφημάτων ανάκλασης TDR [28]

Η οθόνη LCD του οργάνου απεικονίζει τα διαγράμματα ανάκλασης του παλμού και με την βοήθεια δύο κέρσορων γίνεται η μέτρηση της απόστασης .

4.5.3. Γέφυρα μέτρησης

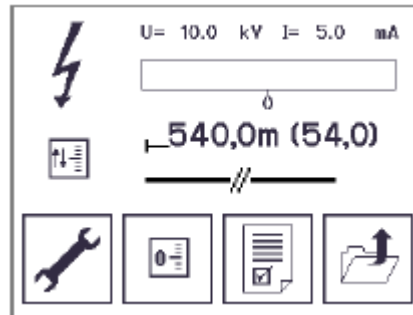
Ένα ιδιαίτερο χαρακτηριστικό της μικρής και εύκολης σε λειτουργία γέφυρας μέτρησης (DMB 5) είναι η μεγάλη ακρίβεια της. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον εντοπισμό σφαλμάτων σε καλώδια Χ.Τ., Μ.Τ. και Υ.Τ. καθώς και για τον εντοπισμό σφαλμάτων στον μανδύα [26].



Σχήμα 4.11-Γέφυρα μέτρησης DMB5 της Baur[26]

Διάφορες μέθοδοι μέτρησης π.χ. σύμφωνα με Glaser, Murray και Wheatstone είναι εφαρμόσιμες αλλάζοντας απλά τους ακροδέκτες του καλωδίου. Η ένδειξη του γαλβανομέτρου της γέφυρας μέτρησης είναι σταθερή σε υψηλές τάσεις και ανθεκτική στους κραδασμούς. Για την καταστολή της παροδικής και της συχνής παρεμβολής ένα φίλτρο LC συνδέεται σε σειρά με το κύκλωμα μέτρησης [26].

Ο ενισχυτής τροφοδοτείται από μια μπαταρία των 9V. Για την παροχή της μέτρησης τάσης παρέχεται μια εσωτερική πηγή με 6V. Σαν επιλογή είναι διαθέσιμη μια εξωτερική μονάδα παροχής ισχύος (BS 3000) με 6 επίπεδα τάσης από 10V έως 2500V Σ.Ρ. και ενσωματωμένο περιορισμό του ρεύματος [26].



Σχήμα 4.12-Ένδειξη της γέφυρας σε εντοπισμό σφάλματος, δίνεται η απόσταση του σφάλματος (m) και η θέση του σφάλματος σε ποσοστό (%) του ολικού μήκους του καλωδίου [26]

Τα χαρακτηριστικά της γέφυρας μέτρησης είναι τα εξής:

- Μέτρηση τάσης μέχρι 6kV
- Απευθείας ένδειξη της απόστασης του σφάλματος σε % του ολικού μήκους του καλωδίου
- Μέτρηση αντίστασης σύμφωνα με Wheatstone
- Ιδιαίτερα εφαρμόσιμη σε σφάλματα στον μανδύα του καλωδίου

4.5.4. Σετ εντοπισμού

Σε συνεργασία με γεννήτριες κρουστικών τάσεων (SSG-STG) ή γεννήτριες ακουστικών συχνοτήτων (TG20/50 και TG600) και εξαρτήματα όπως μικρόφωνο εδάφους (BM30), ράβδους εντοπισμού, η συσκευή εντοπισμού χρησιμοποιείται για [22], [23]:

- Ακριβή εντοπισμό σφαλμάτων καλωδίων
- Ανίχνευση διαδρομής υπογείων καλωδίων ή μεταλλικών σωλήνων
- Μέτρηση του χρόνου διάδοσης
- Εντοπισμός σφάλματος στον μανδύα του καλωδίου
- Συνδυασμένη ανίχνευση και εντοπισμό

Με την βοήθεια ενός πομπού ακουστικών συχνοτήτων (TG20/50 ή TG600) στο εσωτερικό του καλωδίου παράγεται ένα ηλεκτρομαγνητικό πεδίο. Ανάλογα με την επιλεγόμενη μέθοδο ανίχνευσης και μέτρησης, ο εντοπισμός γίνεται από ένα ηλεκτρομαγνητικό αισθητήρα [22], [23].

Τα λαμβανόμενα ηλεκτρομαγνητικά και ακουστικά σήματα ενισχύονται και υποδεικνύονται από τον δέκτη ακουστικών συχνοτήτων (UL30) [22], [23]:

- Ακουστικά από το ενσωματωμένο ηχείο ή από τα ακουστικά (αν συνδεθούν)
- Οπτικά από την ενσωματωμένη οθόνη LCD

Σε συνεργασία με μια γεννήτρια κρουστικών τάσεων (SSG) ο παλμός κρουστικής τάσης (μαγνητικό πεδίο) επισημαίνεται στον δέκτη (UL30). Ο ήχος πρόσκρουσης θα ακουστεί από το ηχείο ή από τα ακουστικά [22], [23].

Με την μέτρηση του χρόνου διάδοσης υπολογίζεται η χρονική διαφορά μεταξύ μαγνητικού και ακουστικού παλμού. Το ελάχιστο της χρονικής διαφοράς υποδεικνύει την θέση του σφάλματος [22], [23].

4.5.4.1. Περιγραφή του σετ εντοπισμού

Το σύστημα εντοπισμού ακουστικών συχνοτήτων χρησιμοποιείται για την ανίχνευση διαδρομής και εντοπισμό σφαλμάτων σε :

- Ηλεκτρικά καλώδια
- Μεταλλικούς σωλήνες

4.5.4.2. Λειτουργίες και διαδικασίες

Με την βοήθεια ενός πομπού ακουστικών συχνοτήτων (TG20/50 και TG600) παράγεται ένα ηλεκτρομαγνητικό πεδίο στο καλώδιο. Το πεδίο ανιχνεύεται από αισθητήρες (π.χ. την ράβδο εντοπισμού SP30) [22], [23].

Το σήμα ενισχύεται από τον δέκτη ακουστικών συχνοτήτων (UL30) και επισημαίνεται ακουστικά μέσω του ενσωματωμένου ηχείου (ή ακουστικών) ή οπτικά στην οθόνη [22], [23].

4.5.4.3. Πεδία εφαρμογής

Με την βοήθεια διαφόρων αισθητήρων και επιλέγοντας συγκεκριμένες μεθόδους ανίχνευσης και εντοπισμού είναι δυνατή μια ευρεία γκάμα εφαρμογών [22], [23].

- Διαδρομή καλωδίων και μεταλλικών σωλήνων

- Καθορισμός βάθους καλωδίων και μεταλλικών σωλήνων
- Επιλογή καλωδίου
- Εντοπισμός καλωδίου ακόμα και σε ενεργά καλώδια ή γραμμές
- Εντοπισμός ενώσεων και διακλαδώσεων καλωδίων
- Ακριβή εντοπισμό σφάλματος σύμφωνα με την μέθοδο συνεστραμμένων πεδίων (Twist Method) της Baur σε συνδυασμό με ένα ισχυρό πομπό ακουστικών συχνοτήτων (TG20/50 ή TG600)
- Ακριβή εντοπισμό σφάλματος σε συνδυασμό με μια γεννήτρια κρουστικών τάσεων (Surge Voltage Generator)
- Ακριβή εντοπισμό σφάλματος σε καλώδια μέσα σε σωλήνες με εφαρμογή της μέτρησης του χρόνου ακουστικής διάδοσης

4.5.4.4. Γεννήτρια ακουστικών συχνοτήτων (TG600)

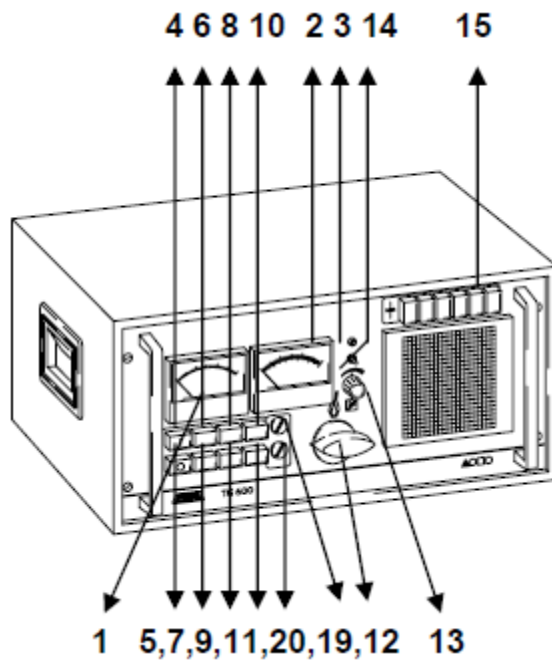
Ο πομπός ακουστικών συχνοτήτων TG600 είναι ειδικά σχεδιασμένος για τον ακριβή εντοπισμό της θέσης σφαλμάτων και ενώσεων σε καλώδια [22], [23].

Λόγω της ένδειξης του ρεύματος εισόδου και εξόδου, διευκολύνεται η επιλογή της σωστής ρύθμισης.



Σχήμα 4.13-Γεννήτρια ακουστικών συχνοτήτων TG600 της Baur [26]

Εκτός από την χρήση για τον εντοπισμό σφαλμάτων σε καλώδια ,είναι δυνατή και η καύση σφαλμάτων με υψηλές συχνότητες σε καλώδια σημάτων ή τηλεπικοινωνιών. Το μέγιστο ρεύμα εξόδου μπορεί να ρυθμιστεί μεταξύ 60VA και 600VA [22], [23].



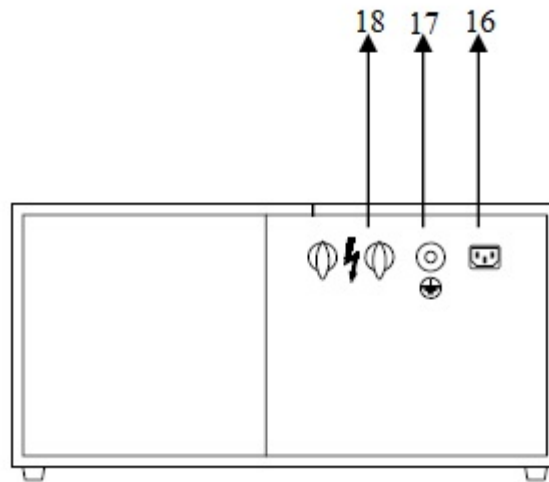
Σχήμα 4.14-Απεικόνιση στοιχείων στην πρόσοψη της γεννήτριας TG600 της Baur [22]

Στοιχεία προβολής [22]:

1. Ρεύμα εισόδου του μετασχηματιστή ρύθμισης
2. Ρεύμα εξόδου του μετασχηματιστή ρύθμισης,
3. Ένδειξη υπερθέρμανσης
4. Λειτουργία ON
5. Λειτουργία OFF
6. Επιλογήας συχνότητας 2kHz
7. Επιλογήας συχνότητας 10kHz
8. Επιλογήας συνεχούς σήματος στην έξοδο
9. Επιλογήας διακοπτόμενου σήματος στην έξοδο
10. Ισχύς στην έξοδο 60VA
11. Ισχύς στην έξοδο 600VA
12. Επιλογήας αντίστασης (Z_i)
13. Έλεγχος ισχύος
14. Επιλογήας εύρους μέτρησης για το ρεύμα εξόδου
15. Πλήκτρα ενεργοποίησης πυκνωτών αντιστάθμισης
16. Σύνδεση τροφοδοσίας
17. Ακροδέκτης γείωσης
18. Υποδοχές εξόδου

19. Ασφάλεια F1

20. Ασφάλεια F2



Σχήμα 4.15-Απεικόνιση στοιχείων στην πλάτη της γεννήτριας TG600 [22]

4.5.4.5. Δέκτης ακουστικών συχνοτήτων (UL30)

Ο δέκτης UL30 είναι φορητός και χρησιμοποιείται για την εφαρμογή των εξής μεθόδων [29]:

- Ακριβής εντοπισμός σφαλμάτων
- Ανίχνευση διαδρομής υπογείων καλωδίων

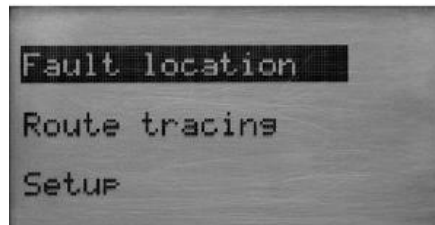
Υποδοχές εισόδου για ράβδους
σφαλμάτων μανδύα



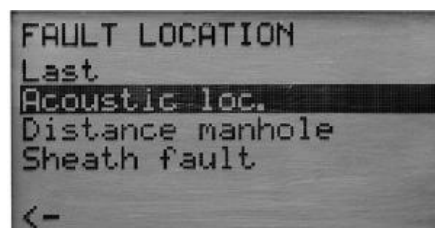
Σχήμα 4.16-Δέκτης ακουστικών συχνοτήτων [22]

Μενού:

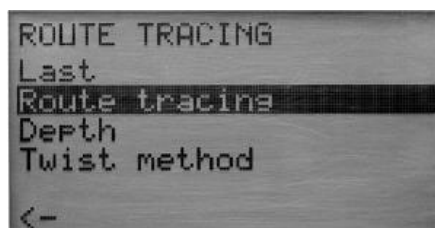
Μια δομή μενού με προσανατολισμό εφαρμογών επιτρέπει την γρήγορη και εύκολη λειτουργία του δέκτη UL30. Στο κύριο μενού μπορεί να επιλεγεί η εφαρμογή. Τα ακόλουθα υπό-μενού περιέχουν τον ειδικό εντοπισμό σφάλματος - αντίστοιχα τις μεθόδους ανίχνευσης [29].



Εντοπισμός σφάλματος:



Ανίχνευση διαδρομής :



Ρυθμίσεις:



4.5.4.6. Μαγνητικοί και ακουστικοί αισθητήρες

Διάφοροι αισθητήρες είναι διαθέσιμοι για την λήψη ακουστικών και μαγνητικών σημάτων τα οποία χρησιμοποιούνται ανάλογα με την επιλεγόμενη μέθοδο μέτρησης ή ανίχνευσης [29].

4.5.4.6.1. Μικρόφωνο εδάφους (BM30)

Η υψηλότερη ευαισθησία του μικρόφωνου εδάφους κυμαίνεται στα επίπεδα των 200Hz. Επομένως είναι πιο κατάλληλη για τον ακριβή εντοπισμό σφαλμάτων που “σκάνε” σύμφωνα με την μέθοδο κρουστικών τάσεων. Το ειδικό στιβαρό περίβλημα του καταστέλλει πιθανούς περιβαλλοντικούς ήχους [29].

Στο εσωτερικό του μικρόφωνου εδάφους BM30 περιλαμβάνεται ένας μαγνητικός αισθητήρας που επιτρέπει την μέτρηση του χρόνου διάδοσης και την ανίχνευση της καλωδιακής γραμμής κατά τον ακριβή εντοπισμό [29].

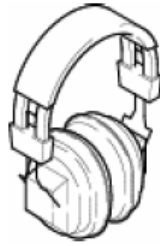


Σχήμα 4.17-Απεικόνιση του δέκτη ακουστικών συχνοτήτων UL 30 σε συνεργασία με το μικρόφωνο εδάφους BM 30 [29]

4.5.4.6.2. Ακουστικά (KH30)

Τα ακουστικά συνδέονται με τον δέκτη ακουστικών συχνοτήτων. Για την καταστολή περιβαλλοντικών ήχων χρησιμοποιείται ο τύπος ακουστικών KH20/S [29].

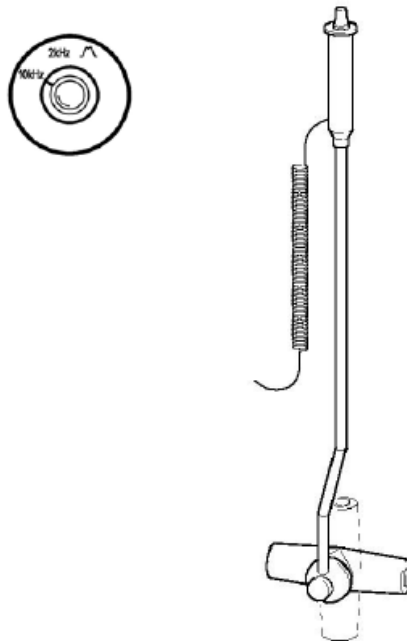
ΚΗ 30



Σχήμα 4.18-Απεικόνιση των ακουστικών ΚΗ 30[29]

4.5.4.6.3. Πηνίο με ράβδο (SP 30)

Η ράβδος εντοπισμού αποτελείται από ένα πηνίο αντίχενωσης που ρυθμίζεται πάνω σε ένα κύκλωμα ταλάντωσης. Χρησιμοποιώντας τον διακόπτη στην λαβή της ράβδου εντοπισμού η συχνότητα μπορεί να προσαρμοστεί στην συχνότητα του σήματος της γεννήτριας ακουστικών συχνοτήτων. Το αρθρωτό πηνίο αντίχενωσης έχει δυνατότητα περιστροφής κατά 45° ή 90° . Η θέση των 45° χρησιμοποιείται για τον καθορισμό του βάθους των θαμμένων καλωδίων [29].



Σχήμα 4.19-Απεικόνιση του πηνίου με ράβδο SP 30 [29]

4.6. Κατηγοριοποίηση των μεθόδων εντοπισμού σφαλμάτων

Η προσέγγιση που χρησιμοποιείται από επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας για τον εντοπισμό σφαλμάτων εξαρτάται από τον τύπο της εγκατάστασης. Ο εντοπισμός

σφαλμάτων στα υπόγεια κυκλώματα διανομής είναι δυσκολότερος από ότι στα υπόγεια κυκλώματα μεταφοράς. Αρκετές τεχνικές αναπτύχθηκαν από φιλολογικές έρευνες και από τους κατασκευαστές εξοπλισμού για τον εντοπισμό σφαλμάτων. Κάθε μια από αυτές τις τεχνικές θα αναπτυχθεί στις ακόλουθες παραγράφους όπου περιγράφεται η γενική διαδικασία και θεωρία για κάθε μια από αυτές τις μεθόδους. Οι μέθοδοι για τον εντοπισμό σφαλμάτων σε καλώδια μπορεί να χωριστούν σε δύο γενικές κατηγορίες [30]:

1. Τεχνικές ακροδεκτών (Terminal Techniques) : Στις τεχνικές αυτές στηρίζομαστε στις μετρήσεις που λαμβάνουμε σε ένα ή και στα δύο άκρα του καλωδίου για τον προ-εντοπισμό του σφάλματος, αλλά με όχι αρκετή ακρίβεια για να προχωρήσουμε στην διαδικασία του σκαψίματος .
2. Τεχνικές ανίχνευσης (Tracer Techniques) : Στις τεχνικές αυτές στηρίζομαστε στις μετρήσεις που λαμβάνουμε κατά μήκος του καλωδίου για τον ακριβή εντοπισμό του σφάλματος.

Οι τεχνικές ακροδεκτών προηγούνται των τεχνικών ανίχνευσης στην διαδικασία εντοπισμού ενός σφάλματος. Μετά τον προ-εντοπισμό του σφάλματος με τις τεχνικές ακροδεκτών θα ακολουθήσει ο ακριβής εντοπισμός του σημείου του σφάλματος [30].

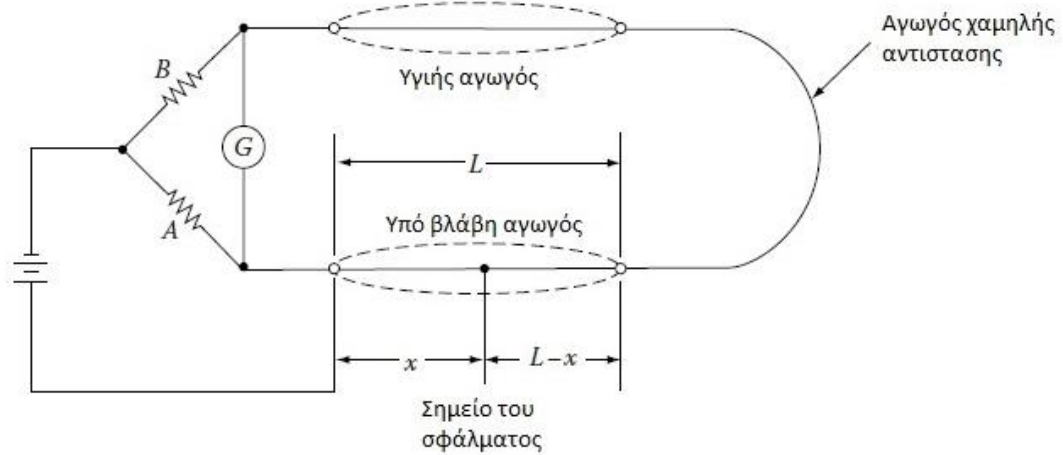
4.6.1. Τεχνικές ακροδεκτών (Terminal Techniques)

Αυτές περιλαμβάνουν την μέτρηση μερικών ηλεκτρικών χαρακτηριστικών του υπό βλάβη αγωγού από ένα από τους ακροδέκτες του καλωδίου και εν συνεχεία σύγκριση με τα χαρακτηριστικά ενός υγιούς αγωγού σε σχέση με την απόσταση της βλάβης. Η αποτελεσματικότητα της μεθόδου είναι συνάρτηση της ακρίβειας των αρχείων εγκατάστασης. Η κατηγορία των τεχνικών των ακροδεκτών μπορεί να υποδιαιρεθεί περαιτέρω σύμφωνα με τις πραγματικές μεθόδους που χρησιμοποιούνται, όπως η μέθοδοι της γέφυρας, ραντάρ και μέθοδοι συντονισμού [30].

4.6.1.1. Μέθοδοι γέφυρας (Bridge Methods)

Διάφοροι τύποι διαμόρφωσης γέφυρας μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον εντοπισμό σφαλμάτων. Οι πιο γνωστές είναι ο βρόχος Murray (Murray loop) και η γέφυρα χωρητικότητας (Capacitance bridge). Η γέφυρα του βρόχου Murray χρησιμοποιεί ένα αναλογικό μέτρο έτσι ώστε να μην είναι απαραίτητο να γνωρίζουμε την πραγματική αντίσταση του καλωδίου. Η αρχή λειτουργίας της περιλαμβάνει ένα συνεχές βρόχο καλωδίου για να σχηματιστούν τα δύο σκέλη της γέφυρας. Είναι

απαραίτητο να υπάρχει ένας υγιής αγωγός διαθέσιμος για να σχηματιστεί ένας τέτοιος βρόχος. Επίσης, απαιτεί ένα αγωγό μικρής αντίστασης να συνδεθεί στο άκρο του καλωδίου. Οι συνδέσεις της γέφυρας Murray φαίνονται στο Σχήμα 4.19 [30].

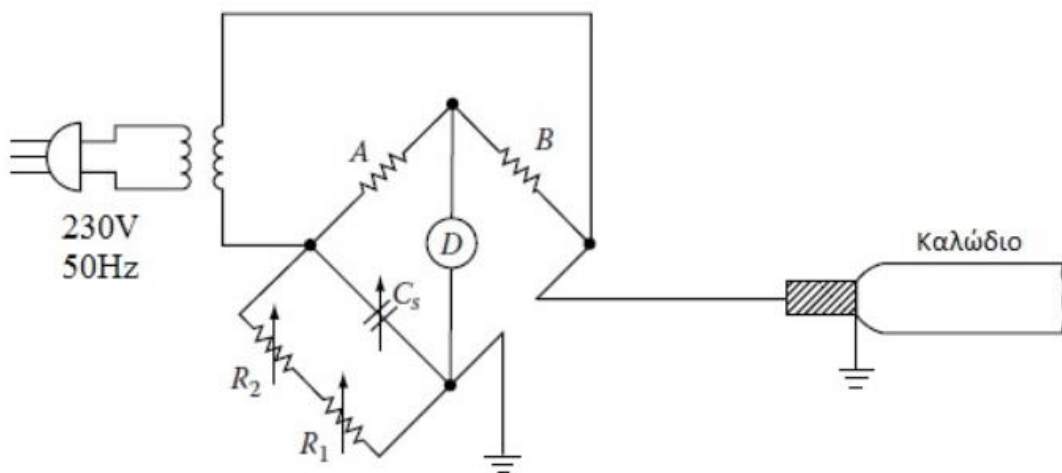


Σχήμα 4.20-Μέθοδος γέφυρας βρόχου Murray (Murray loop bridge) [30]

Όταν η γέφυρα είναι υπό ισορροπία, η απόσταση του σφάλματος μπορεί να βρεθεί από την ακόλουθη σχέση [30]:

$$X = 2 * L \left(\frac{A}{A+B} \right) \quad (4.7)$$

Η τεχνική της γέφυρας χωρητικότητας απλά μετρά την χωρητικότητα από το ένα άκρο του υπό βλάβη καλωδίου ως προς την γη και το συγκρίνει ως προς την απόσταση με την χωρητικότητα του υγιούς αγωγού στο ίδιο καλώδιο. Στο Σχήμα 4.20 παρουσιάζεται η διάταξη της γέφυρας χωρητικότητας [30].



Σχήμα 4.21-Μέθοδος γέφυρας χωρητικότητας [30]

Αντί μιας γέφυρας, το ρεύμα φόρτισης του υπό βλάβη καλωδίου και του υγιούς καλωδίου μπορεί να συγκριθεί χρησιμοποιώντας εκατοντάδες ή χιλιάδες volt τάσης και συχνότητας 60Hz. Το διάγραμμα σύνδεσης δίνεται στο Σχήμα 4.21. Η απόσταση L_1 μέχρι το σφάλμα θα δίνεται από την ακόλουθη σχέση [30] :

$$L_1 = L_2 \left(\frac{I_1}{I_2} \right) \quad (4.8)$$

όπου:

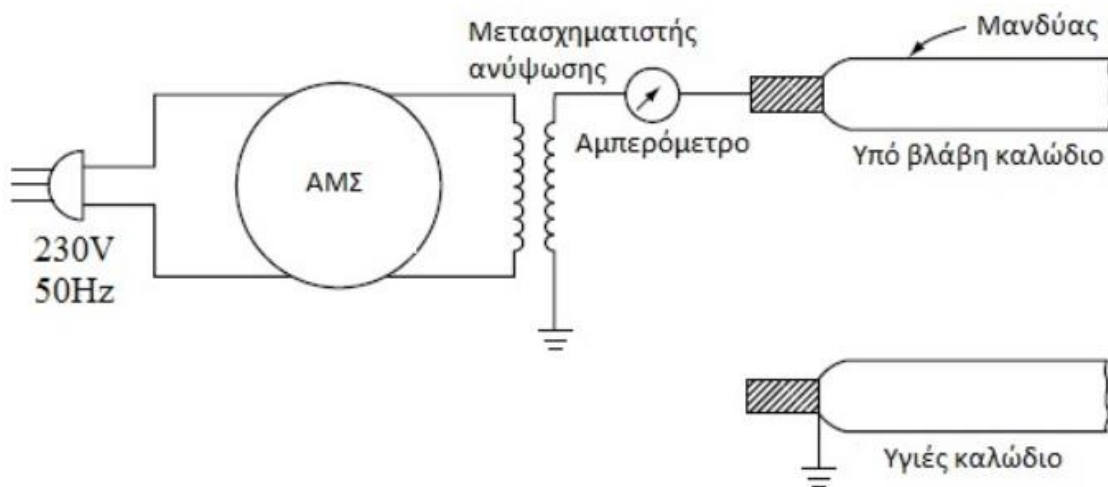
L_1 ,η απόσταση μέχρι το σφάλμα

I_1 ,το ρεύμα στον υπό βλάβη αγωγό

I_2 ,το ρεύμα στον υγιή αγωγό

Και L_2 το μήκος του υγιούς αγωγού

Η εφαρμογή των μεθόδων γέφυρας μπορεί χρησιμοποιηθεί σε όλους τους τύπους των καλωδίων. Η γέφυρα βρόχου Murray είναι αποτελεσματική όπου η παράλληλη αντίσταση σφάλματος είναι χαμηλή ή η τάση της γέφυρας είναι υψηλή. Είναι αναποτελεσματική σε ανοιχτοκυκλώματα. Τα ανοιχτοκυκλώματα μπορούν να εντοπιστούν με την γέφυρα χωρητικότητας [30].



Σχήμα 4.22-Μέθοδος ρεύματος φόρτισης για τον εντοπισμό σφάλματος [30]

Τα κυριότερα μειονεκτήματα της μεθόδου γέφυρας είναι τα εξής:

1. Απαιτεί πρόσβαση και στα δύο άκρα του καλωδίου
2. Η σύνδεση πρέπει να είναι χαμηλής αντίστασης
3. Τα καλώδια πρέπει να είναι ίδιου μήκους
4. Απαιτεί μεγάλη επιδεξιότητα από τον χειριστή
5. Δύσκολο να χρησιμοποιηθεί σε διακλαδισμένα συστήματα

4.6.1.2. Μέθοδος ραντάρ (Radar Method)

Η μέθοδος ραντάρ (ανάκλασης ή αντήχησης παλμού) βασίζεται στην μέτρηση του χρόνου που χρειάζεται ο παλμός να φτάσει στο σφάλμα και να επιστρέψει πίσω. Η απόσταση d του σφάλματος μπορεί να υπολογιστεί από την παρακάτω σχέση [30]:

$$d = \frac{v \cdot t}{2} \quad (4.9)$$

όπου :

v , η ταχύτητα διάδοσης

t , ο απαιτούμενος χρόνος για τον παλμό να ταξιδέψει στο σφάλμα και να επιστρέψει πίσω

Υπάρχουν δύο τύποι διάρκειας του παλμού εξόδου που χρησιμοποιούνται στην συγκεκριμένη μέθοδο [30].

Ο τύπος παλμού μικρής διάρκειας χρησιμοποιείται κυρίως σε σύνολα δοκιμών ραντάρ για τον έλεγχο καλωδίων ισχύος. Η διάρκεια του παλμού είναι μικρή σε σύγκριση με τον χρόνο διάδοσης στο σφάλμα. Το πλάτος του παλμού είναι συνήθως αρκετά ευρύ ώστε να είναι δυνατό να παρατηρηθεί στον παλμογράφο. Πρακτικά το εύρος του παλμού πρέπει να είναι 1% μεγαλύτερο του συνολικού χρόνου διέλευσης του συνολικού μήκους του καλωδίου υπό έλεγχο. Στον εξοπλισμό που κυκλοφορεί στο εμπόριο υπάρχουν διατάξεις για την αλλαγή του εύρους του παλμού σύμφωνα με το μήκος του καλωδίου. Τα μεγέθη των παλμών είναι πολύ μικρά, συνήθως της τάξης των λίγων Volt. Ο βραχύς παλμός δεν προσφέρεται για την καλή ερμηνεία των δεδομένων λόγω των ανακλάσεων από ενώσεις ή λόγω της ανομοιομορφίας του μεγέθους του καλωδίου [30].

Το σύστημα μακρύ παλμού χρησιμοποιεί παλμούς με μεγάλο βήμα σε σύγκριση με τον χρόνο διέλευσης του σήματος από το ένα άκρο του καλωδίου στο σφάλμα, και πίσω. Οι τυχόν ασυνέχειες στο καλώδιο φαίνονται ως αλλαγές στο επίπεδο τάσης του βήματος του παλμού. Είναι ευκολότερη η ανάλυση των δεδομένων στο σύστημα μακρύ παλμού. Δηλαδή, τα σφάλματα μπορούν να διαφοροποιηθούν από ενώσεις, και αλλαγές στο μέγεθος του καλωδίου μπορούν εύκολα να παρατηρηθούν [30].

Στα συστήματα ραντάρ το πεδίο του ίχνους (στον φασματογράφο) δείχνει το μεταδιδόμενο και ανακλώμενο σήμα. Το ανακλώμενο κύμα μπορεί να εκφραστεί σε σχέση με το μεταδιδόμενο κύμα και τις σταθερές του κυκλώματος ως εξής [30]:

$$l_r = \frac{R-Z}{R+Z} * l_t \quad (4.10)$$

όπου:

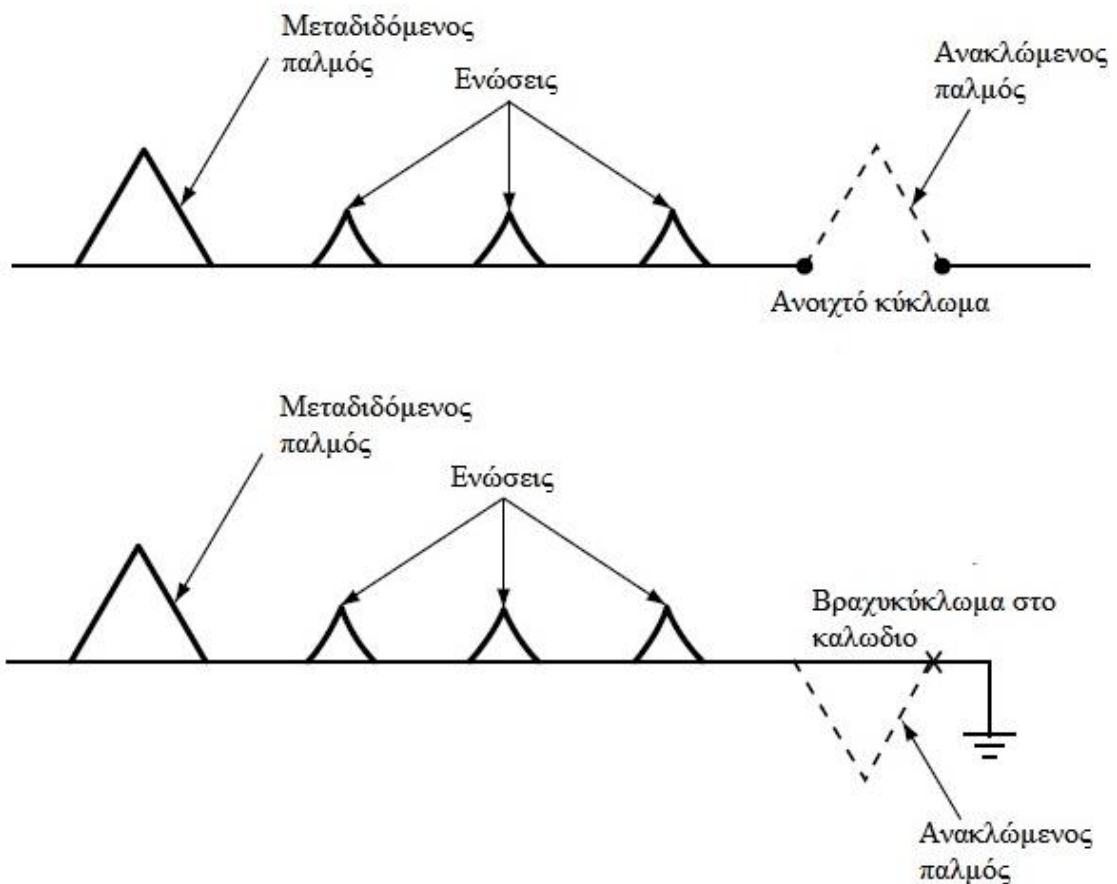
l_r , το ανακλώμενο κύμα

l_t , το μεταδιδόμενο κύμα

R , η αντίσταση στο τέλος της γραμμής

Z , η σύνθετη αντίσταση της γραμμής

Αν η γραμμή είναι ανοιχτοκυκλωμένη, τότε $R = \infty$ και το ανακλώμενο κύμα θα είναι $l_r = l_t$. Επομένως, το ανακλώμενο κύμα θα είναι του ίδιου μεγέθους και πολικότητας με το μεταδιδόμενο κύμα. Αν η γραμμή είναι βραχυκυκλωμένη, τότε $R = 0$ και το ανακλώμενο κύμα θα έχει τιμή $l_r = -l_t$. Επομένως, το ανακλώμενο κύμα στην περίπτωση αυτή θα είναι αντίστοιχου μεγέθους αλλά με διαφορά φάσης 180° . Αυτές οι δύο περιπτώσεις φαίνονται στο παρακάτω σχήμα [30].



Σχήμα 4.23-Τυπικές κυματομορφές σε συνθήκες ανοιχτοκυκλώματος και βραχυκυκλώματος στο καλώδιο [30]

Η μέθοδος ραντάρ μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε όλους τους τύπους των καλωδιακών συστημάτων αρκεί η ταχύτητα διάδοσης να είναι σταθερή σε όλο το μήκος του καλωδίου. Το σύστημα ραντάρ δεν λειτουργεί πολύ καλά στα μη γραμμικά σφάλματα.

Ωστόσο μπορεί να χρησιμοποιηθεί όταν η αντίσταση του μη γραμμικού σφάλματος “καίγεται” σε μια τιμή χαμηλής αντίστασης. Για να παρέχει αυτή την ευελιξία, υπάρχουν τρεις κύριες παραλλαγές των συστημάτων ραντάρ [30]:

1. Το σύστημα τόξου
2. Το σύστημα ελεύθερης ταλάντωσης
3. Το σύστημα διαφορικής

4.6.1.3. Μέθοδος συντονισμού (Resonance Method)

Η μέθοδος συντονισμού βασίζεται στην αρχή της ανάκλασης κυμάτων. Η μέθοδος συντονισμού για τον εντοπισμό σφαλμάτων μετρά την συχνότητα στην οποία το μήκος του καλωδίου ανάμεσα στο τερματικό και το σφάλμα συντονίζονται. Η συχνότητα συντονισμού είναι αντιστρόφως ανάλογη του μήκους του κύματος. Η απόσταση d μπορεί να υπολογιστεί από την ακόλουθη έκφραση [30]:

$$d = \frac{V}{f_r * N} \quad (4.11)$$

όπου:

V , η ταχύτητα διάδοσης

f_r , η συχνότητα συντονισμού

N , ο αριθμός των κυμάτων (ενός τετάρτου ή μισού μήκους)

Για τον εντοπισμό βραχυκυκλωμάτων θα έχουμε $N = 4$ ενώ για τον εντοπισμό ανοιχτοκυκλωμάτων θα έχουμε $N = 2$. Η τεχνική συντονισμού χρησιμοποιεί μια γεννήτρια συχνότητας (ή ταλαντωτή) η οποία είναι συνδεδεμένη στο άκρο του υπό βλάβη καλωδίου. Η συχνότητα μεταβάλλεται μέχρι να επιτευχθεί συντονισμός. Κατά τον συντονισμό η τάση αλλάζει ραγδαία σε σύγκριση με την τάση κατά τον μη συντονισμό. Η τάση θα αυξηθεί στα βραχυκυκλώματα και θα μειωθεί στα ανοιχτοκυκλώματα αντίστοιχα [30].

Η ελάχιστη συχνότητα καθορίζεται από το μήκος του καλωδίου, ενώ η μέγιστη καθορίζεται από την απόσταση από το πλησιέστερο σημείο που θα εμφανιστεί το σφάλμα. Για μονωμένα καλώδια η μετατόπιση φάσης καθορίζει την ταχύτητα του μεταδιδόμενου και ανακλώμενου κύματος προς το σφάλμα και πίσω. Η μετατόπιση φάσης είναι μια συνάρτηση της διηλεκτρικής σταθεράς και του υλικού της μόνωσης. Συνήθως η ταχύτητα διάδοσης στα μονωμένα καλώδια ποικίλει ανάμεσα στο ένα τρίτο ή ένα τέταρτο της ταχύτητας διάδοσης στους «γυμνούς» αγωγούς, δηλαδή 299.92 m/μs.

Επομένως, για τον εντοπισμό του σφάλματος θα πρέπει να είναι γνωστή η διηλεκτρική σταθερά κάθε μονωτικού μέσου. Η σχέση ανάμεσα στην απόσταση του σφάλματος και την συχνότητα δίνεται από την ακόλουθη έκφραση [30]:

$$d = \frac{466 \cdot N}{f_r \cdot K} \quad (4.12)$$

όπου:

N , ο αριθμός των κυμάτων (μισού μήκους ή ενός τετάρτου)

f_r , η συχνότητα συντονισμού (MHz)

K , η διηλεκτρική σταθερά του καλωδίου

d , η απόσταση από το σφάλμα

Η μέθοδος αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε όλους του τύπους των καλωδίων και δουλεύει καλά σε συστήματα με διακλαδώσεις. Δεν δουλεύει πολύ καλά σε μη γραμμικά σφάλματα [30].

4.6.2. Τεχνικές ανίχνευσης (Tracer Techniques)

Οι τεχνικές ανίχνευσης είναι αυτές που περιλαμβάνουν την τοποθέτηση ενός ηλεκτρικού σήματος στον υπό βλάβη αγωγό στο ένα ή και στα δύο άκρα του, το οποίο μπορεί να ανιχνευτεί στο σφάλμα από την αλλαγή των χαρακτηριστικών του σήματος. Στο πλαίσιο αυτής της ταξινόμησης έχουμε τις εξής μεθόδους [30]:

1. Ανίχνευση ρεύματος (Tracing Current)
2. Ακουστική συχνότητα (ανίχνευση τόνου) (Audio Frequency)
3. Μέθοδος κρουστικών τάσεων (Impulse Voltage)
4. Ανάκλαση τόξου (Arc Reflection)
5. Δυναμικό γής (Earth gradient)

4.6.2.1. Μέθοδος ανίχνευσης ρεύματος (Tracing Current Method)

Στην εφαρμογή αυτή χρησιμοποιούνται μέθοδοι Ε.Ρ. και Σ.Ρ.. Αυτή η μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον εντοπισμό βλαβών τόσο σε διακλαδισμένα συστήματα όσο και σε ένα ευθύ ενιαίο καλωδιακό σύστημα. Το ρεύμα σφάλματος εγχέεται στο κύκλωμα που σχηματίζεται από τον υπό βλάβη αγωγό και την γείωση, και ένας ανιχνευτής χρησιμοποιείται για την μέτρηση του ρεύματος στο καλώδιο σε επιλεγμένα σημεία φρεατίων. Αυτή η τεχνική είναι εφαρμόσιμη όπου η αντίσταση του σφάλματος είναι χαμηλή ή όταν η τάση του σετ δοκιμής είναι αρκετά υψηλή ώστε να στείλει ένα επαρκές ρεύμα μέσα από τον υπό βλάβη αγωγό. Αυτή η μέθοδος

χρησιμοποιείται κυρίως σε εγκαταστάσεις καλωδίων μέσα σε αγωγούς (ή σωλήνες) διότι είναι αρκετό να εντοπίσουμε το σφάλμα ανάμεσα στα φρεάτια, δεδομένου ότι ολόκληρο το τμήμα του καλωδίου ανάμεσα στα φρεάτια θα πρέπει να αντικατασταθεί όταν εντοπιστεί το σφάλμα [30].

Το μείζον ζήτημα για την χρήση αυτής της μεθόδου είναι η διασφάλιση ότι η επιστροφή ενός σημαντικού σε τιμή ρεύματος θα συμβεί μέσω της γείωσης και όχι από τον ουδέτερο. Αν όλο το ρεύμα περάσει από τον ουδέτερο, το ρεύμα που θα μετρήσει ο ανιχνευτής θα είναι μηδενικό, και δεν θα υπάρχει σήμα στην έξοδο [30].

Η μέθοδος ανίχνευσης Σ.Ρ. χρησιμοποιεί μια διαμορφωμένη πηγή Σ.Ρ. τάσης που κυμαίνεται από 500V έως 20kV και ρεύματος που κυμαίνεται από 0,25 έως 12,5A. Ο ανιχνευτής μπορεί να είναι είτε ένα ηλεκτρομαγνητικά συζευγμένο κύκλωμα που χρησιμοποιεί ένα πηνίο εντοπισμού και ένα γαλβανόμετρο που με την σειρά του ανιχνεύει ένα κατευθυντήριο σήμα, ή μπαστούνια δοκιμής με την χρήση ενός κυκλώματος πτώσης δυναμικού με ένα γαλβανόμετρο για την ανίχνευση του σήματος κατεύθυνσης [30].

Η μέθοδος ανίχνευσης Ε.Ρ. χρησιμοποιεί ένα διαμορφωμένο πομπό συχνότητας 25 ή 60Hz που αποτελείται από 100% ρύθμιση της επαγωγής ή ένα μετασχηματιστή σταθερού ρεύματος. Οι ανιχνευτές μπορεί να αποτελούνται είτε από ένα μετασχηματιστή ρεύματος αποσπώμενου πυρήνα (split core) και ένα αμπερόμετρο ή ένα κύκλωμα ανίχνευσης πτώσης μανδύα (sheath drop detection circuit) που αποτελείται από μπαστούνια δοκιμής (test prods - εξοπλισμός σε μορφή ράβδου με ενσωματωμένο ηλεκτρόδιο δοκιμής που επιτρέπει την ασφαλή επαφή με την υπό έλεγχο εγκατάσταση σε τάσεις ακόμα και πάνω από τα 30kV) και ένα βολτόμετρο. Το σετ δοκιμής έχει εύρος από 15 έως 450KVA, και διατίθεται με ενισχυτές ήχου, μετρητές εξόδου, ακουστικά ή ηχεία [30].

Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται σε καλώδια με μόνωση άμεσα θαμμένα στο έδαφος για σφάλματα βραχυκύκλωσης ως προς γη. Δεν είναι αποτελεσματική για άλλους τύπους καλωδίων ή άλλες διατάξεις αυτών. Λόγω της εφαρμογής της σε μονωμένα καλώδια, η ακουστική συχνότητα χρησιμοποιείται περισσότερο στον εντοπισμό δευτερογενών σφαλμάτων. Αυτή η μέθοδος είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική για σφάλματα που παρουσιάζουν αντίσταση κοντά στο μηδέν. Δεν είναι τόσο αποτελεσματική για σφάλματα αντίστασης πάνω από μερικά ohm. Αυτή η μέθοδος είναι ιδιαίτερα εφαρμόσιμη σε συστήματα χαμηλής τάσης [30].

4.6.2.2. Μέθοδος ακουστικής συχνότητας (Audio Frequency Method)

Στην μέθοδο αυτή μια ακουστική συχνότητα εγχέεται στο κύκλωμα που σχηματίζει ο υπό βλάβη αγωγός και η γείωση. Η ροή του ρεύματος μέσα από τον αγωγό δημιουργεί ένα μαγνητικό πεδίο που υπάρχει τόσο στον αέρα όσο και στο έδαφος. Το μαγνητικό πεδίο αυτό μπορεί να ανιχνευτεί με μια κεραία απλού μαγνητικού βρόχου. Επιπλέον αυτό το μαγνητικό πεδίο μπορεί να αναλυθεί σε κατακόρυφες και οριζόντιες συνιστώσες με σκοπό την πρόβλεψη της θέσης της κεραίας. Η κεραία βρόχου που ανταποκρίνεται στην οριζόντια συνιστώσα του μαγνητικού πεδίου φτάνει στην μέγιστη διέγερση της ακριβώς πάνω από το καλώδιο, ενώ η κεραία βρόχου που ανταποκρίνεται στην κάθετη συνιστώσα φτάνει στην ελάχιστη διέγερση της. Επίσης το μαγνητικό πεδίο ποικίλει στην περιοχή της βλάβης. Τα χαρακτηριστικά του μαγνητικού πεδίου αλλάζουν πέρα από το σφάλμα γιατί δεν υπάρχει ροή ρεύματος, και ως εκ τούτου η έξοδος της οριζόντιας πολωμένης κεραίας πέφτει γρήγορα. Η αλλαγή στα χαρακτηριστικά του μαγνητικού πεδίου της κατακόρυφης συνιστώσας δεν είναι τόσο έντονα όταν απομακρύνεσαι από την περιοχή του σφάλματος. Τα μαγνητικά πεδία είναι μια συνάρτηση του ρεύματος που διαρρέει το καλώδιο και επομένως ουσιαστικά σταθερά κατά μήκος της διαδρομής του καλωδίου. Οι ανιχνευτές κατασκευάζονται συνήθως από πηνία εντοπισμού [30].

4.6.2.3 Μέθοδος κρουστικών τάσεων (Impulse Method)

Αυτή η μέθοδος συνίσταται στην χρήση ενός πυκνωτή φορτίου ο οποίος μεταδίδει ένα παλμό υψηλής ενέργειας ανάμεσα στο υπό βλάβη καλώδιο και την γείωση. Ο παλμός δημιουργεί ένα τόξο στο σφάλμα, που με την σειρά του παράγει θερμότητα στον περιβάλλοντα αέρα, και η ενέργεια απελευθερώνεται ως ένας ηχητικός γδούπος (σαν γροθιά). Η θέση του σφάλματος μπορεί να βρεθεί είτε με την ακρόαση του ηχητικού γδούπου ή με τον εντοπισμό του μαγνητικού πεδίου που παράγεται από το τόξο [30].

Η πηγή είναι ένα κύκλωμα χωρητικής εκφόρτισης και αποτελείται από μια παροχή ισχύος, μια συστοιχία πυκνωτών και ένα διακόπτη υψηλής τάσης. Το κρουστικό σήμα μπορεί να ανιχνευθεί με μια κεραία μαγνητικού βρόχου, ένα μικρόφωνο, ένα ανιχνευτή δυναμικού γης (earth gradient detector) ή ένα σεισμικό αισθητήριο. Η σχέση μεταξύ της έντασης του σήματος και της διάρκειας εξαρτάται από την φυσική αίσθηση. Συνήθως η ένταση αυξάνεται με την διάρκεια, παρόλα αυτά μετά από ένα ορισμένο σημείο η

επίπτωση στην ένταση είναι αμελητέα. Αυτή η μέθοδος εφαρμόζεται τόσο σε δευτεροβάθμια συστήματα όσο και σε συστήματα Υ.Τ. [30].

Η κύρια εφαρμογή της μεθόδου είναι σε σφάλματα που το τόξο σχηματίζεται άμεσα. Η ανίχνευση του σήματος μπορεί να χωριστεί στις εξής μεθόδους :

1. Ακουστική λήψη του σήματος (Acoustic Signal Pickup)
2. Ηλεκτρομαγνητική λήψη (Electromagnetic Pickup)
3. Λήψη κρουστικού ρεύματος (Impulse Current Pickup)

4.6.2.3.1. Ακουστική λήψη του σήματος (Acoustic Signal Pickup)

Στην περίπτωση αυτή το σφάλμα υψηλής αντίστασης δημιουργεί ένα τόξο λόγω των περιοδικών παλμών τάσης, παράγοντας ένα βαρύγδουπο ήχο. Η ανίχνευση μπορεί να γίνει πολύ απλά περπατώντας κατά μήκος της γραμμής και ακούγοντας τον θόρυβο της εκφόρτισης της τάσης. Ενισχυτές ήχου με κατάλληλη λήψη ηλεκτρονικού τύπου, ακουστικά, ή στηθοσκόπιο μπορούν να χρησιμοποιηθούν [30].

4.6.2.3.2. Ηλεκτρομαγνητική λήψη (Electromagnetic Pickup)

Όταν ένα σφάλμα μηδενικής αντίστασης εντοπίζεται τότε σίγουρα δεν υπάρχει θόρυβος. Επίσης, ακόμα και σφάλματα υψηλής αντίστασης που περιβάλλονται από λάσπη και νερό δεν θα δώσουν έντονο θόρυβο. Σφάλματα φάσης με φάση ή αγωγός με μανδύα, όπου ο εξωτερικός μανδύας δεν έχει σπάσει, δεν θα προκαλέσουν έντονο θόρυβο. Σε αυτές τις περιπτώσεις ένας ανιχνευτής ηλεκτρομαγνητικής σύζευξης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανίχνευση του κρουστικού σήματος στο σφάλμα. Αποτελείται από ένα πηνίο λήψης και ένα ανιχνευτή. Ο ανιχνευτής ενισχύει το σήμα και η ανίχνευση μπορεί να γίνει στην συνέχεια με ένα γαλβανόμετρο. Είναι αποτελεσματική για περιπτώσεις όδευσης σε αγωγούς (ή σωλήνες) ή σε θαμμένα καλώδια χωρίς μόλυβδο [30].

4.6.2.3.3. Λήψη κρουστικού ρεύματος (Impulse Current Pickup)

Στην μέθοδο αυτή τα σήματα των κρουστικών ρευμάτων προέρχονται από ένα γραμμικό συζεύκτη που μπορεί να ενσωματωθεί στην γεννήτρια κρουστικών τάσεων ή ένας εξωτερικός γραμμικός συζεύκτης μπορεί να χρησιμοποιηθεί με οποιαδήποτε γεννήτρια κρουστικών τάσεων ή σετ δοκιμών Υ.Τ. Σ.Ρ. . Ο εξωτερικός συζεύκτης είναι και στις δύο περιπτώσεις στο κύκλωμα επιστροφής της γης στην γεννήτρια κρουστικών τάσεων ή το σετ δοκιμών Υ.Τ. Σ.Ρ.. Σφάλματα υψηλής αντίστασης, σφάλματα που

“σκάνε” και σφάλματα διαλείψεως που “σκάνε” εντοπίζονται με την χρήση των εξωτερικών παλμών που παράγονται από την γεννήτρια κρουστικών τάσεων Υ.Τ.. Τα σήματα που παράγονται αποθηκεύονται στην μνήμη του σετ δοκιμής. Η αποθηκευμένη κυματομορφή μπορεί να εξαχθεί συνεχώς από την ψηφιακή μνήμη και να προβληθεί σε ένα χαμηλής ταχύτητας παλμογράφο. Οι μετρήσεις της θέσης του σφάλματος μπορούν να μετρηθούν άμεσα ψηφιακά σε μικροδευτερόλεπτα, υπολογίζοντας έτσι με ακριβή εκτίμηση την απόσταση του σφάλματος από την ακόλουθη σχέση [30]:

$$L = \frac{T \cdot V_p}{2} \quad (4.13)$$

όπου:

L , η απόσταση του σφάλματος (μετρημένη σε πόδια)

T , ο χρόνος (σε μs)

V_p , η ταχύτητα διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων για το διηλεκτρικό του καλωδίου. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι ο συντελεστής διάδοσης ποικίλει ανάλογα με την απόσταση από το σφάλμα. Κατά συνέπεια αυτή η αδυναμία της μεθόδου περιορίζει την ακρίβεια της [30].

4.6.2.4. Μέθοδος ανάκλασης τόξου (Arc Reflection Method)

Η μέθοδος ανάκλασης τόξου συνδυάζει μια γεννήτρια κρουστικών τάσεων συνδεδεμένη με ένα παλμογράφο (Time Domain Reflectometer) μέσα από ένα φίλτρο ανάκλασης τόξου. Αυτός ο συνδυασμός εξοπλισμού παρέχει ένα ολοκληρωμένο σύστημα για τον εντοπισμό όλων των βλαβών καλωδίων. Για σφάλματα (μη-γραμμικά) υψηλής αντίστασης η μέθοδος εφαρμόζει ένα ταλαντευόμενο Υ.Τ. κρουστικό παλμό στο υπό έλεγχο καλώδιο. Ο παλμός αυτός προκαλεί το “σκάσιμο” του σφάλματος υψηλής αντίστασης, δημιουργώντας ένα τόξο χαμηλής αντίστασης στο σημείο του σφάλματος. Ο αναλυτής της ανάκλασης τόξου εφαρμόζει ταυτόχρονα στο καλώδιο παλμούς χαμηλής τάσης, υψηλής συχνότητας ώστε να αντανακλώνται στο χαμηλής αντίστασης τόξο. Οι ανακλώμενοι παλμοί μετατοπίζονται ως αρνητικές διαλείπουσες ανακλάσεις στην οθόνη αναλυτή του τόξου. Το φίλτρο ανάκλασης τόξου προστατεύει τον αναλυτή από την Υ.Τ. της κρουστικής γεννήτριας. Το φίλτρο επίσης περιορίζει την εφαρμοζόμενη Υ.Τ. σε επίπεδα αρκετά ώστε να προκαλέσει το “σκάσιμο” στο σημείο του σφάλματος. Η μέθοδος ανάκλασης τόξου μπορεί να εντοπίσει ανοιχτούς ουδετέρους ή φάσεις, σφάλματα χαμηλής αντίστασης ($< 200\Omega$) ανάμεσα σε φάσεις ή

ανάμεσα σε φάση και ουδέτερο, κορεσμό νερού, και διακρίνει τις καλές από κακές ενώσεις. Το ίχνος της οθόνης του αναλυτή θα προβάλλει μια χαρακτηριστική υπογραφή για κάθε μια από τις παραπάνω περιπτώσεις. Για τον καθορισμό της θέσης του σφάλματος ο αναλυτής ανάκλασης θα προβάλλει αυτόματα την απόσταση από το σφάλμα σε μέτρα (m) ή πόδια (feet) με βάση την σταθερά ταχύτητας διάδοσης του καλωδίου [30].

4.6.2.5. Μέθοδος δυναμικού γης (Earth Gradient Method)

Αυτή η μέθοδος εντοπίζει σφάλματα εγχέοντας ένα ρεύμα σφάλματος στο υπό βλάβη κύκλωμα που σχηματίζει ο αγωγός και η επιστροφή της γης. Το ρεύμα εξαπλώνεται στο έδαφος, και δυναμικό αναπτύσσεται στο έδαφος ανάμεσα στο σφάλμα και το σημείο διοχέτευσης του ρεύματος. Η πτώση τάσης ανάμεσα σε δύο οποιαδήποτε σημεία στην επιφάνεια του εδάφους μπορεί να μετρηθεί. Συνήθως η κατεύθυνση της πτώσης τάσης δείχνει προς την κατεύθυνση του σφάλματος. Όσο κινούμαστε κατά μήκος της γραμμής και πλησιάζουμε το σφάλμα, η απόκλιση του βολτομέτρου μειώνεται μέχρι την μηδενική ένδειξη που επιτυγχάνεται ακριβώς πάνω από το σημείο του σφάλματος. Παρόλα αυτά, μόλις περάσουμε το σημείο του σφάλματος η απόκλιση του βολτομέτρου θα αρχίσει να αυξάνεται ξανά. Σε αυτή την μέθοδο ο ακριβής εντοπισμός του καλωδίου είναι αναγκαίος για την επισημάνση της θέσης του σφάλματος [30].

Όπου η ακριβής όδευση του καλωδίου δεν είναι γνωστή, ένα παλμικό ρεύμα ή Σ.Ρ. μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την τεχνική βηματικής τάσης. Σε αυτή την περίπτωση η κατεύθυνση της μέτρησης θα δείχνει πάντα προς την κατεύθυνση του σφάλματος. Μια απλή διαδικασία ακολουθείται για να ελαχιστοποιηθούν οι δυσκολίες και να γίνει η μέτρηση που απαιτείται για τον εντοπισμό του σφάλματος σε λογικό χρόνο. Ο αρνητικός ακροδέκτης (negative probe) τοποθετείται πρώτα και ο θετικός (positive probe) μετακινείται για να επιτυγχάνουμε την μέγιστη δυνατή απόκλιση στο βολτόμετρο. Ακολουθώντας την διαδικασία αυτή η απόκλιση θα είναι πάντα με κατεύθυνση προς το σφάλμα. Αυτή η μέθοδος είναι στην καλύτερη περίπτωση χρονοβόρα, στην χειρότερη δε δεν θα λειτουργήσει καθόλου, ειδικά αν η θέση του καλωδίου δεν είναι γνωστή. Ο περιορισμός της μεθόδου έχει να κάνει με την ευαισθησία της μέτρησης, καθώς το δυναμικό του εδάφους είναι μια συνάρτηση του βάθους του καλωδίου και της απόστασης του σφάλματος [30].

Η πηγή του ρεύματος σφάλματος μπορεί να είναι Ε.Ρ., ένας παλμός, ή μια τάση Σ.Ρ.. Με ένα Σ.Ρ., το βολτόμετρο θα δείξει ένα εύρος μεγάλου μεγέθους σε κάθε πλευρά του σφάλματος, ενώ το εύρος θα πέσει όσο απομακρυνόμαστε από το σημείο του σφάλματος. Επίσης, θα πρέπει να ληφθεί μέριμνα ώστε να ελαχιστοποιηθεί η παρεμβολή των 50Hz. Η πηγή Σ.Ρ. χρησιμοποιείται ευρέως καθώς παρέχει επαρκή ροή ρεύματος μέσα από μη-γραμμικά σφάλματα. Η πηγή παλμού είναι παρόμοια με την πηγή Σ.Ρ. με μια εξαίρεση ότι παρέχει υψηλότερα ρεύματα σφάλματος. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό σφαλμάτων μεταξύ αγωγού και γης. Αυτή η μέθοδος δεν μπορεί να εφαρμοστεί σε καλώδια με ομόκεντρο ουδέτερο (concentric neutral cables) επειδή το ρεύμα επιστρέφει μέσα από τον ουδέτερο και όχι από την γείωση, κάνοντας την μέτρηση δύσκολη. Επομένως αυτή η μέθοδος εφαρμόζεται κυρίως σε μονωμένα καλώδια που βρίσκονται κυρίως σε δευτερογενή συστήματα διανομής [30].

4.7. Πρακτική εμπειρία του εντοπισμού σφαλμάτων με το σύστημα

Ένα σύστημα εντοπισμού σφαλμάτων πρέπει να είναι κατάλληλο όπως προαναφέραμε για [22], [23]:

- Έλεγχο καλωδίων για τυχόν βλάβες
- Προ-εντοπισμό βλαβών
- Ακριβή εντοπισμό βλαβών

Οι βλάβες αυτές μπορεί να είναι :

- Βραχυκύκλωμα μεταξύ αγωγών ή μεταξύ αγωγού και γης
- Ανοιχτοκύκλωμα (κόψιμο) του καλωδίου
- Σφάλμα χαμηλής αντίστασης στην μόνωση του καλωδίου
- Σφάλμα υψηλής αντίστασης στην μόνωση του καλωδίου
- Σφάλμα τύπου διαλείψεως στην μόνωση του καλωδίου

4.7.1. Γενικά

4.7.1.1. Σύνθετη (κυματική) αντίσταση

Όταν ένα κύμα διαδίδεται μεταξύ δύο αγωγών τότε το μονωτικό μέσο ανάμεσα στους δύο αγωγούς χαρακτηρίζεται σε κάθε σημείο από ένα μέγεθος από ένα μέγεθος, την σύνθετη κυματική αντίσταση Z_i [22], [23].

Το μέγεθος αυτό εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά (π.χ. τις γεωμετρικές διαστάσεις της μόνωσης). Θα ισχύει για κάθε σημείο (i) [22], [23]:

$$Z_i = \sqrt{\frac{L_i}{C_i}} \quad (4.14)$$

Εάν πρόκειται για αγωγούς ενός συνεχούς καλωδίου, τότε η τιμή Z_i είναι σταθερή κατά μήκος του καλωδίου (κοινή για όλα τα σημεία του) και χαρακτηρίζει το καλώδιο.

Εάν η μόνωση μεταξύ δύο αγωγών του καλωδίου έχει σε κάποιο σημείο σφάλμα, τότε η αντίσταση Z_R του σφάλματος αυτού είναι παράλληλη προς την σύνθετη κυματική αντίσταση σε εκείνο το σημείο [22], [23].

4.7.1.2. Συντελεστής ανάκλασης

Το καλώδιο χαρακτηρίζεται ακόμα από το συντελεστή ανάκλασης μεταξύ δύο διαδοχικών σημείων του (1) και (2), που ορίζεται ως το ποσοστό του κύματος που ανακλάται μόλις το κύμα φτάσει στο σημείο (2). Θα ισχύει [22], [23]:

$$R = \frac{(Z_2 - Z_1)}{(Z_2 + Z_1)} \quad (4.15)$$

Έτσι σε ένα υγιές καλώδιο όπου $Z_2 = Z_1$ για όλα τα διαδοχικά σημεία του, ισχύει :

$$R = 0 \quad (4.16)$$

Δηλαδή το κύμα που διαδίδεται κατά μήκος του καλωδίου δεν ανακλάται σε κανένα σημείο παρά μόνο στο ελεύθερο άκρο του όπου $Z_2 = \infty$. Τότε $R = 1$, δηλαδή ολόκληρο το κύμα ανακλάται και επιστρέφει [22],[23].

4.7.2. Φυσικές δυνατότητες ενός παλμοηχόμετρου

Πρακτικά η τιμή της σύνθετης κυματικής αντίστασης της μόνωσης κατά μήκος ενός ενεργειακού καλωδίου είναι περίπου $Z_1 = 50\Omega$. Οι φυσικές δυνατότητες ενός παλμοηχόμετρου για ανίχνευση ενός σφάλματος χαμηλής αντίστασης και ενός σφάλματος υψηλής αντίστασης αξιολογούνται αναλόγως [22], [23]:

4.7.2.1. Σφάλμα χαμηλής αντίστασης

Εάν σε ένα σημείο (2) της μόνωσης του καλωδίου υπάρχει ένα σφάλμα κάποιων δεκάδων Ohm, π.χ. 80Ω , τότε η σύνθετη κυματική αντίσταση στο σημείο αυτό θα είναι (αντίσταση 50Ω παράλληλα με αντίσταση 80Ω) [22], [23]:

$$Z_2 = \frac{(50 \cdot 80)}{(50 + 80)} = 160\Omega \quad (4.17)$$

Ο συντελεστής ανάκλασης στο σημείο του σφάλματος θα είναι, για $Z_1 = 50\Omega$:

$$R = \frac{(Z_2 - Z_1)}{(Z_2 + Z_1)} = \frac{110}{210} = 0,52 \quad (4.18)$$

Έτσι ένα ποσοστό 52% του κύματος θα ανακλαστεί μόλις φτάσει στο σημείο του σφάλματος και θα επιστρέψει προς την αρχή του καλωδίου [22], [23].

Η αρχή λειτουργίας του παλμοηχόμετρου στηρίζεται στην διοχέτευση ενός κύματος στο υπό έλεγχο καλώδιο και ανίχνευση του ποσοστού που επιστρέφει λόγω ανάκλασης στο σημείο του σφάλματος [22], [23].

Ένα ποσοστό της τάξης του 52% είναι εύκολα ανιχνεύσιμο από οποιοδήποτε παλμοηχόμετρο [22], [23].

4.7.2.2. Σφάλμα υψηλής αντίστασης

Εάν στο σημείο (2) της μόνωσης του καλωδίου υπάρχει σφάλμα μερικών δεκάδων χιλιάδων Ohm, π.χ. 30KΩ τότε η σύνθετη ωμική αντίσταση στο σημείο αυτό είναι (50Ω παράλληλα με 30KΩ) [22], [23]:

$$Z_2 = \frac{(50 \cdot 30000)}{(50 + 30000)} = 49,92 \quad (4.19)$$

Ο συντελεστής ανάκλασης στο σημείο του σφάλματος θα είναι, για $Z_1 = 50\Omega$:

$$R = \frac{(Z_2 - Z_1)}{(Z_2 + Z_1)} = \frac{(49,92 - 50)}{(49,92 + 50)} = \frac{-0,08}{99,92} = -0,0008 \quad (4.20)$$

Επομένως μόνο ένα ποσοστό 0,08% του αρχικού κύματος θα ανακλαστεί μόλις φτάσει στο σημείο του σφάλματος και θα επιστρέψει στις αρχές του καλωδίου [22], [23].

Αν συνυπολογίσει κανείς τις ωμικές απώλειες κατά μήκος του καλωδίου, βλέπει πως ένα τέτοιο κύμα είναι μη ανιχνεύσιμο.

Ανεξαρτήτως κατασκευαστή λοιπόν, υπάρχουν κάποια όρια στην τιμή της αντίστασης ενός σφάλματος πέρα από τα οποία δεν μπορεί ένα παλμοηχόμετρο να χρησιμοποιηθεί για τον εντοπισμό του [22], [23].

Έτσι πριν από οτιδήποτε άλλο πρέπει να μετρηθεί η αντίσταση του σφάλματος ώστε να γίνει δυνατή η επιλογή των κατάλληλων οργάνων και της κατάλληλης μεθόδου εντοπισμού του [22], [23].

4.7.3. Κατηγορίες σφαλμάτων και μέθοδοι εντοπισμού σύμφωνα με τους κατασκευαστές των οργάνων

Οι περισσότεροι κατασκευαστές προτείνουν τις παρακάτω κατηγορίες σφαλμάτων [22], [23]:

1. Σφάλματα χαμηλής αντίστασης (από 0 έως 100Ω): Τα σφάλματα αυτά μπορούν να αντιμετωπιστούν με την βοήθεια του παλμομετρητή (TDR). Συμπεριλαμβάνεται και το τέλειο βραχυκύκλωμα όπου [22], [23]:

$$Z_2 = 0 \text{ και} \\ R = \frac{(0-50)}{(0+50)} = -1 \quad (4.21)$$

Δηλαδή ο παλμός ανακλάται εξ' ολοκλήρου στο βραχυκύκλωμα και επιστρέφει με ανεστραμμένη πολικότητα.

2. Σφάλμα υψηλής αντίστασης (πάνω από 100Ω): Η αντιμετώπιση αυτών των σφαλμάτων απαιτεί πιο σύνθετες μεθόδους όπως η μέθοδος ανάκλασης τόξου.
3. Τέλειο ανοιχτοκύκλωμα: Αντιμετωπίζεται εύκολα με το παλμομετρητή.
4. Σφάλματα τύπου διαλείψεως: Η αντιμετώπιση αυτών των σφαλμάτων γίνεται με σύνθετες μεθόδους όπως μέθοδος ανάκλασης τόξου.
5. Σφάλμα στον μανδύα του καλωδίου : Αντιμετωπίζεται με την μέθοδο της βηματικής τάσης.

4.7.4. Μέτρα ασφαλείας

Κάποιες από τις συσκευές του συστήματος εντοπισμού σφαλμάτων παράγουν υψηλές τάσεις όπως η γεννήτρια τάσεως Σ.Ρ. ή η γεννήτρια κρουστικών τάσεων [22], [28].

Ο χειριστής του συστήματος πρέπει να είναι εξοικειωμένος με το αντικείμενο των υψηλών τάσεων καθώς είναι υπεύθυνος για την εφαρμογή όλων των Κανονισμών Ηλεκτρικής Ασφάλειας [22], [23].

Κατά την χρήση του συστήματος πρέπει :

- Να λαμβάνονται όλα τα απαραίτητα μέτρα ώστε να είναι αδύνατη η τυχαία πρόσβαση τρίτων στην ευρύτερη περιοχή της δοκιμής
- Να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή ώστε η γείωση της συσκευής να συνδέεται με “καλή γείωση”. Το σημείο γείωσης πρέπει να βρίσκεται όσο πιο κοντά γίνεται στο σημείο δοκιμής.

Μόλις ολοκληρωθεί μια δοκιμή μπορεί να παρατηρηθεί επικίνδυνη συσσώρευση φορτίων στο καλώδιο που δοκιμάστηκε παρόλο που το σύστημα εντοπισμού μπορεί να έχει τεθεί εκτός λειτουργίας. Στην περίπτωση αυτή το καλώδιο δεν έχει προλάβει να εκφορτιστεί τελείως. Για λόγους ασφαλείας λοιπόν πρέπει το καλώδιο να παραμένει γειωμένο για μεγάλο χρονικό διάστημα μετά το τέλος της δοκιμής [22], [23].

Συνίσταται επίσης η χρήση ράβδου εκφόρτισης πριν επιχειρηθεί οποιαδήποτε σύνδεση ή αποσύνδεση του υπό δοκιμή καλωδίου με την συσκευή υψηλών τάσεων [22], [23].

4.7.5. Έλεγχος του καλωδίου

Αρχικά πρέπει να διαπιστωθεί μεταξύ ποιών (δύο) αγωγών υπάρχει το σφάλμα. Ο έλεγχος του καλωδίου γίνεται [22], [23]:

1. Αρχικά με ένα πολύμετρο. Η μέγιστη τάση δοκιμής αυτών των οργάνων είναι της τάξης των 10V. Εάν προκύψει ένδειξη τότε σίγουρα πρόκειται για ωμικό σφάλμα (αποκλείεται η περίπτωση τύπου διαλείψεως). Εάν δεν προκύψει ένδειξη τότε μπορεί οι αγωγοί που μετράμε να μην έχουν σφάλμα ή να μην έχουν σφάλμα τύπου διαλείψεως [22], [23].
2. Ο έλεγχος πρέπει να συνεχιστεί για επιβεβαίωση με ένα megger ή με μια γεννήτρια υψηλών τάσεων (Σ.Ρ.). Η τάση δοκιμής πρέπει να φτάσει στην μέγιστη επιτρεπόμενη από τους κανονισμούς τάση, ώστε να μετρηθεί η πραγματική διαρροή. Μπορεί π.χ. το πολύμετρο να δείξει σφάλμα 10 MΩ και το megger να δείξει ότι το ίδιο σφάλμα είναι 500 KΩ. Η τάση δοκιμής ανεβαίνει έως ότου σταθεροποιηθεί η μέτρηση [22], [23].
 - 1) Εάν από την μέτρηση προκύψει ότι το ωμικό σφάλμα είναι $< 100-500 \Omega$ χρησιμοποιούμε το παλμοσχόμετρο (TDR).
 - 2) Εάν προκύψει ωμικό σφάλμα $> 100-500 \Omega$ εφαρμόζουμε την μέθοδο ανάκλασης τόξου
 - 3) Εάν έχουμε ωμικό σφάλμα τότε η διαρροή αυξάνεται γραμμικά με την αύξηση της τάσεως δοκιμής. Έτσι καθώς περιστρέφουμε το βάριακ της γεννήτριας για να αυξήσουμε την τάση δοκιμής, παρατηρούμε ανάλογη αύξηση στην ένδειξη του μιλιαμπερομέτρου .
 - 4) Εάν έχουμε σφάλμα τύπου διαλείψεως τότε καθώς αυξάνουμε την τάση δοκιμής περιστρέφοντας το βάριακ:
 - i. Παρατηρούμε την αντίστοιχη ένδειξη στο κιλοβολτόμετρο να αυξάνει αντίστοιχα, ενώ το μιλιαμπερόμετρο έχει μηδενική ένδειξη.
 - ii. Μόλις η τάση δοκιμής φτάσει σε κάποιο όριο παρατηρείται ακαριαία βύθιση της βελόνας στο κιλοβολτόμετρο και αντίστοιχη ακαριαία αύξηση (τίναγμα) της βελόνας .

4.7.6. Κατηγορίες μεθόδων εντοπισμού

Μόλις ολοκληρωθεί ο έλεγχος του καλωδίου, και γνωρίζουμε μεταξύ ποιών αγωγών παρουσιάζεται το πρόβλημα, αλλά και τι τύπο σφάλματος έχουμε, προχωράμε στον εντοπισμό του [22], [23].

Όπως έχουμε προαναφέρει οι μέθοδοι εντοπισμού χωρίζονται στις εξής μεθόδους:

- Προεντοπισμού
- Ανίχνευσης διαδρομής υπογείου καλωδίου
- Ακριβούς εντοπισμού

4.7.7. Μέθοδοι προεντοπισμού

Ως προ-εντοπισμός ορίζεται ο εντοπισμός μιας περιοχής κάποιων μέτρων μέσα στην οποία βρίσκεται το σφάλμα. Στο σύστημα, ο προ-εντοπισμός βασίζεται κυρίως στο παλμοηχόμετρο. Οι μετρήσεις που μας δίνει το παλμοηχόμετρο εξαρτώνται από πολλούς παράγοντες και έχουν και ένα περιθώριο αβεβαιότητας. Ακόμα, δεν παρέχουν πληροφορία για την πορεία του υπογείου καλωδίου. Έτσι τα αποτελέσματα που παίρνουμε δεν είναι ακριβή, αλλά περιορίζουν το πρόβλημα σε μια μικρή περιοχή [22], [23].

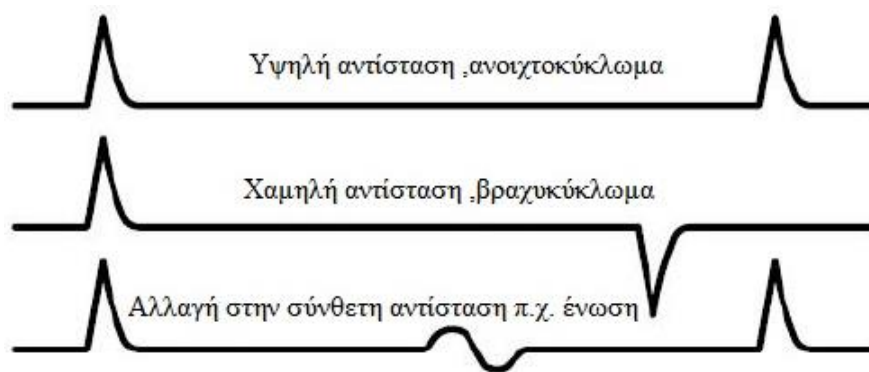
4.7.7.1. Μέθοδος ανάκλασης παλμού (Pulse Reflection Method)

Χρησιμοποιείται για την αντιμετώπιση σφαλμάτων χαμηλής αντίστασης, βραχυκυκλωμάτων και ανοιχτοκυκλωμάτων. Για την εφαρμογή της μεθόδου απαιτείται η χρήση μόνο του παλμοηχομέτρου (Time Domain Reflectometer) το οποίο συνδυάζει την λειτουργία ενός πομπού και ενός δέκτη. Στην ουσία η μέθοδος δημιουργεί ένα ηλεκτρονικό ή γραφικό χάρτη του υπόγειου καλωδίου προβάλλοντας μια σειρά γεγονότων κατά μήκος της διαδρομής. Το παλμοηχόμετρο χρησιμοποιείται αυτόνομα, οπότε πρέπει να αφαιρεθούν από τους ακροδέκτες του όλα τα καλώδια που το συνδέουν με την γεννήτρια και να χρησιμοποιηθεί το ειδικό καλώδιο μέτρησης του οργάνου [22], [23].

Κατά την εφαρμογή της μεθόδου αυτής το παλμοηχόμετρο στέλνει ένα παλμό Χ.Τ. στο υπό έλεγχο καλώδιο. Αυτός ο παλμός (μέγιστη τάση 160V) κινείται μέσα στο καλώδιο και ανακλάται θετικά στο τέλος του καλωδίου ή σε κάθε διακοπή του καλωδίου (π.χ. κόψιμο του καλωδίου). Σε σημείο βραχυκυκλώματος αυτός ο παλμός Χ.Τ θα ανακλαστεί αρνητικά. Το παλμοηχόμετρο μετράει τον χρόνο ανάμεσα στην

απελευθέρωση και επιστροφή του παλμού Χ.Τ.. Μια αλλαγή στην σύνθετη αντίσταση του καλωδίου π.χ. μια ένωση (μούφα) θα προβληθεί ως ένα «ξαπλωμένο» S [22], [23].

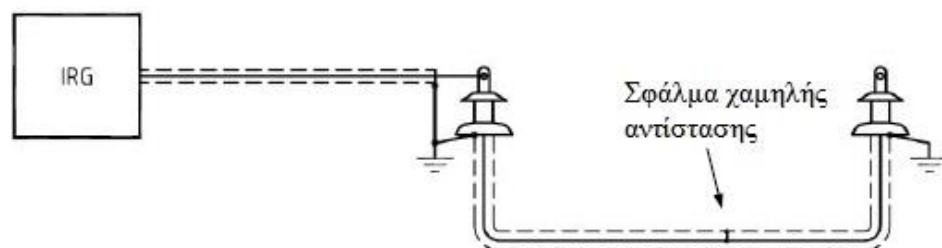
Το παλμοχόμετρο μας δίνει την δυνατότητα της μέτρησης του μήκους του καλωδίου καθώς και εύκολο εντοπισμό σφαλμάτων τα οποία είναι σε σειρά με την διαδρομή μετάδοσης του καλωδίου, όπως βραχυκυκλώματα και ανοιχτοκυκλώματα, χωρισμένες ενώσεις καθώς και ανάπτυξη σοβαρής διάβρωσης σε ένα ομόκεντρο ουδέτερο. Σε μικρότερο βαθμό η μέθοδος ανάκλασης παλμού μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον εντοπισμό παράλληλων σφαλμάτων ή σφαλμάτων σε διηλεκτρικά υλικά του καλωδίου, αρκεί η αντίσταση του σφάλματος της μόνωσης να είναι δέκα φορές μικρότερη της σύνθετης αντίστασης του καλωδίου [22], [23].



Σχήμα 4.24- Γραφήματα ανακλάσεων στην οθόνη του παλμοχόμετρου [26]

Η απόσταση που αναγράφεται στο παλμοχόμετρο έχει υπολογιστεί με βάση την τιμή της σταθεράς διάδοσης ($v/2$) που έχει το όργανο. Στην απόσταση αυτή περιλαμβάνεται και το καλώδιο μέτρησης [22], [23].

Η παράμετρος ($v/2$) αναφέρεται στην ταχύτητα με την οποία διαδίδεται ο παλμός (ηλεκτρομαγνητικό σήμα) μέσα στην μόνωση του καλωδίου και εξαρτάται μόνο από τον τύπο του καλωδίου [22], [23].



Σχήμα 4.25- Σχηματικό διάγραμμα της μεθόδου ανάκλασης παλμού [26]

Για να είναι λοιπόν σωστή η μέτρηση πρέπει ο αρχικός κέρσορας να πάει στο σημείο σύνδεσης του καλωδίου μέτρησης με το υπό έλεγχο καλώδιο, αλλά και η σταθερά $v/2$ να είναι αυτή που αντιστοιχεί στο καλώδιο [22], [23].

Μια ικανοποιητική τιμή για τις περισσότερες περιπτώσεις ενεργειακών καλωδίων 20kV είναι:

$$v/2 = 75 - 80m/sec$$

Εάν όμως γνωρίζουμε ότι το καλώδιο έχει μήκος π.χ. 108m και στο διάγραμμα μετράμε π.χ. 95m (χωρίς το καλώδιο μέτρησης) τότε συμπεραίνουμε πως η τιμή της σταθεράς διάδοσης ($v/2$) είναι σωστή [22], [23].

Πρακτική εμπειρία της εφαρμογής της μεθόδου έχει δείξει ότι ορισμένες φορές το συνολικό μήκος του καλωδίου είναι άγνωστο ή το καλώδιο αποτελείται από διαφορετικούς τύπους καλωδίων. Σε ένα τέτοιο μικτό καλώδιο, η ταχύτητα διάδοσης είναι άγνωστη. Στην περίπτωση αυτή εφαρμόζεται η μέθοδος και στα δύο άκρα του καλωδίου. Όταν εφαρμόζεται η μέτρηση και στα δύο άκρα του καλωδίου είναι ιδανικό το άθροισμα των αποστάσεων να μας δίνει το συνολικό μήκος του καλωδίου. Επηρεαζόμενη από την χρησιμοποιούμενη σταθερά διάδοσης μπορεί να παρατηρηθεί μια απόκλιση. Στην περίπτωση αυτή η πραγματική απόσταση του σφάλματος είναι ανάμεσα στα σημεία αυτά [22], [23].

4.7.7.2. Μέθοδος ανάκλασης τόξου (Arc Reflection Method)

Η μέθοδος ανάκλασης τόξου είναι η πιο ανεπτυγμένη διαθέσιμη μέθοδος προεντοπισμού. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται για την αντιμετώπιση σφαλμάτων υψηλής αντίστασης και σφαλμάτων διαλείψεως. Για την εφαρμογή της μεθόδου αυτής θα συνεργαστούν [22], [23]:

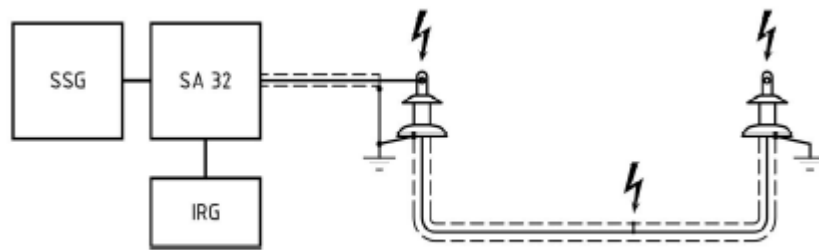
- Το παλμοηχόμετρο (TDR)
- Η γεννήτρια κρουστικών τάσεων με το ενσωματωμένο φίλτρο

Πρόκειται για την πιο αποτελεσματική και λιγότερο καταστροφική μέθοδος για το καλώδιο, που στοχεύει στο να κατεβάσει την αντίσταση του σφάλματος σε τιμές κάτω από 100Ω ώστε να είναι εφικτός ο εντοπισμός από το παλμοηχόμετρο [22], [23].

Παρόμοια μέθοδος είναι και η μέθοδος καύσης του σφάλματος, όπου διοχετεύεται συνεχώς ρεύμα στο σφάλμα ,μέχρις ότου αυτό καεί και αλλάξει αντίσταση. Η μέθοδος αυτή όμως καταπονεί το καλώδιο και για τον λόγο αυτό αποφεύγεται η εφαρμογή της [22], [23].

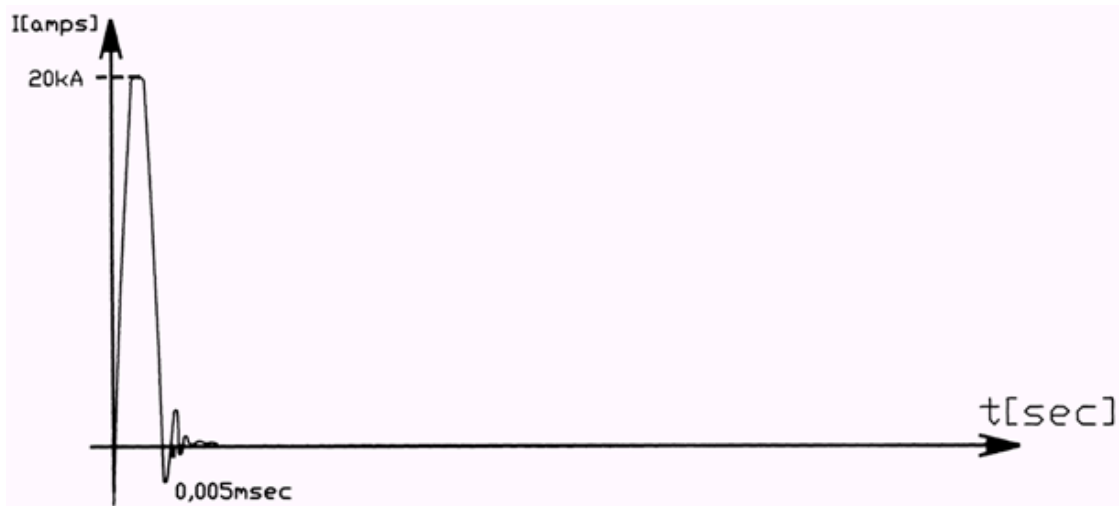
Η μέθοδος ανάκλασης τόξου αντίθετα, στοχεύει στο να μειώσει την αντίσταση του σφάλματος για χρονικό διάστημα τόσο όσο απαιτείται για να ληφθεί μέτρηση από το παλμογράφο. Στην συνέχεια η αντίσταση του σφάλματος επιστρέφει στην αρχική της τιμή. Πρόκειται δηλαδή για στιγμιαία καταπόνηση του καλωδίου [22], [23].

Το φίλτρο παρεμβάλλεται μεταξύ της γεννήτριας κρουστικών τάσεων και του υπό ελέγχου καλωδίου για να μεταβάλλει την μορφή της εξόδου της γεννήτριας ώστε να είναι δυνατή η μέτρηση από το παλμογράφο. Το παλμογράφο είναι συνδεδεμένο στον εξωτερικό ακροδέκτη σκανδαλισμού (trigger) της γεννήτριας. Όταν το κρουστικό κύμα από την γεννήτρια φτάσει στο σημείο του σφάλματος, τότε η ενέργεια του προκαλεί ιονισμό και, αν έχει αρκετά μεγάλη τιμή, οδηγεί σε εκδήλωση τόξου αγωγιμότητας (“σκάσιμο”). Όσο διαρκεί το τόξο αγωγιμότητας η αντίσταση έχει πρακτικά μηδενική τιμή. Έτσι, αν ένας παλμός από το παλμογράφο φτάσει στο σημείο του σφάλματος όσο διαρκεί το τόξο αγωγιμότητας, θα ανακλαστεί εξ’ ολοκλήρου, και επιστρέφοντας στο παλμογράφο, θα υποδείξει την θέση του σφάλματος. Πραγματικά, η εκδήλωση του τόξου αγωγιμότητας γίνεται αμέσως αντιληπτή από την είσοδο εξωτερικού σκανδαλισμού (trigger) του παλμογράφου απελευθερώνοντας τον παλμό μέτρησης από το παλμογράφο προς το σφάλμα. Για να επιτύχει η μέθοδος πρέπει ο παλμός να φτάσει στο σημείο του σφάλματος όταν σταθεροποιηθεί και όσο διαρκεί το τόξο αγωγιμότητας [22], [23].



Σχήμα 4.26- Σχηματικό διάγραμμα της μεθόδου ανάκλασης τόξου [26]

Η αλλαγή της μορφής της εξόδου της γεννήτριας επιβάλλεται για να διαρκέσει το φαινόμενο του τόξου πάνω στο σφάλμα όσο χρόνο απαιτείται για την μέτρηση. Αναλυτικότερα, η έξοδος (ένα κρουστικό κύμα) μιας γεννήτριας κρουστικών τάσεων έχει την μορφή [22], [23]:

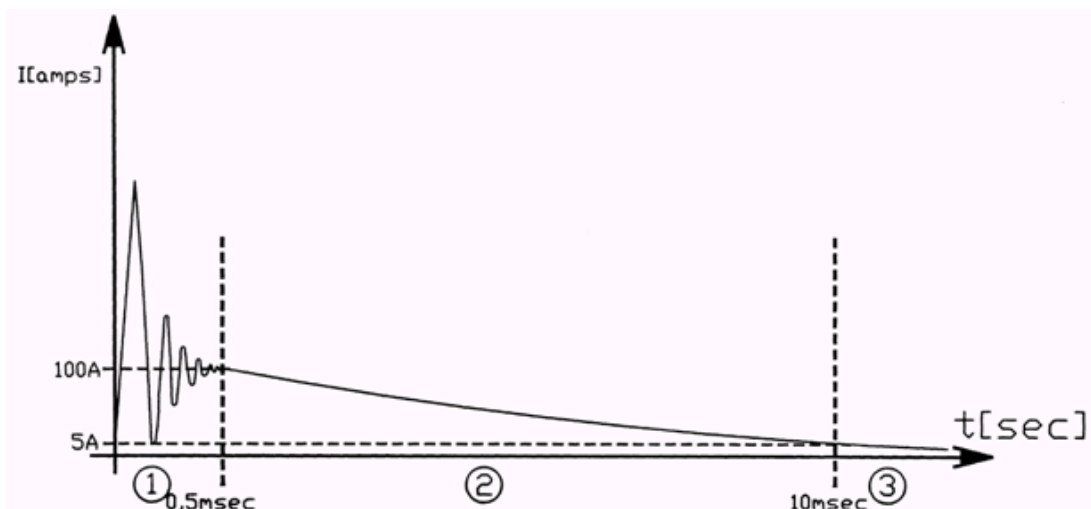


Σχήμα 4.27-Απεικόνιση διαγράμματος εξόδου γεννήτριας κρουστικών τάσεων [22], [23]

Δηλαδή το κύμα έχει υπερβολικά μεγάλο ύψος (10-20kA) και πολύ μικρή διάρκεια (κάποια μsec). Το παλμοχόμετρο δεν προλαβαίνει να πάρει μέτρηση σε τόσο μικρό χρονικό διάστημα. Ακόμα όμως και αν προλάβαινε κάτι τέτοιο, η μέτρηση δεν θα είχε πρακτικό ενδιαφέρον, γιατί η κυματομορφή του ρεύματος εξόδου δεν είναι σταθεροποιημένη [22], [23].

Για να γίνει η μέτρηση από το παλμοχόμετρο αρκεί να διαρρεύσουν από το σφάλμα από 100A έως 5A. Πρέπει επίσης το φαινόμενο να διαρκέσει κάποια msec .

Αυτό ακριβώς επιτυγχάνεται με την παρεμβολή του φίλτρου. Το κύμα “ανοίγει” χρονικά ενώ το ύψος του σταθεροποιείται σε μια τιμή γύρω στα 100A. Το κύμα στην έξοδο του φίλτρου θα πάρει την εξής μορφή [22], [23]:



Σχήμα 4.28-Απεικόνιση διαγράμματος εξόδου γεννήτριας κρουστικών τάσεων με την παρεμβολή του φίλτρου [22], [23]

Όταν αυτό το κύμα φτάσει στο σφάλμα, τότε μέσω του εξωτερικού σκανδαλισμού απελευθερώνεται παλμός μέτρησης από το παλμοχόμετρο. Ρυθμίζοντας τον επιλογέα καθυστέρησης σκανδαλισμού (trigger delay) στο παλμοχόμετρο επιτυγχάνουμε να φτάσει ο παλμός του παλμοχόμετρου στο σφάλμα την στιγμή που το ρεύμα έχει τιμή από 100A έως 5A, δηλαδή στην περιοχή 2 του διαγράμματος [22], [23].

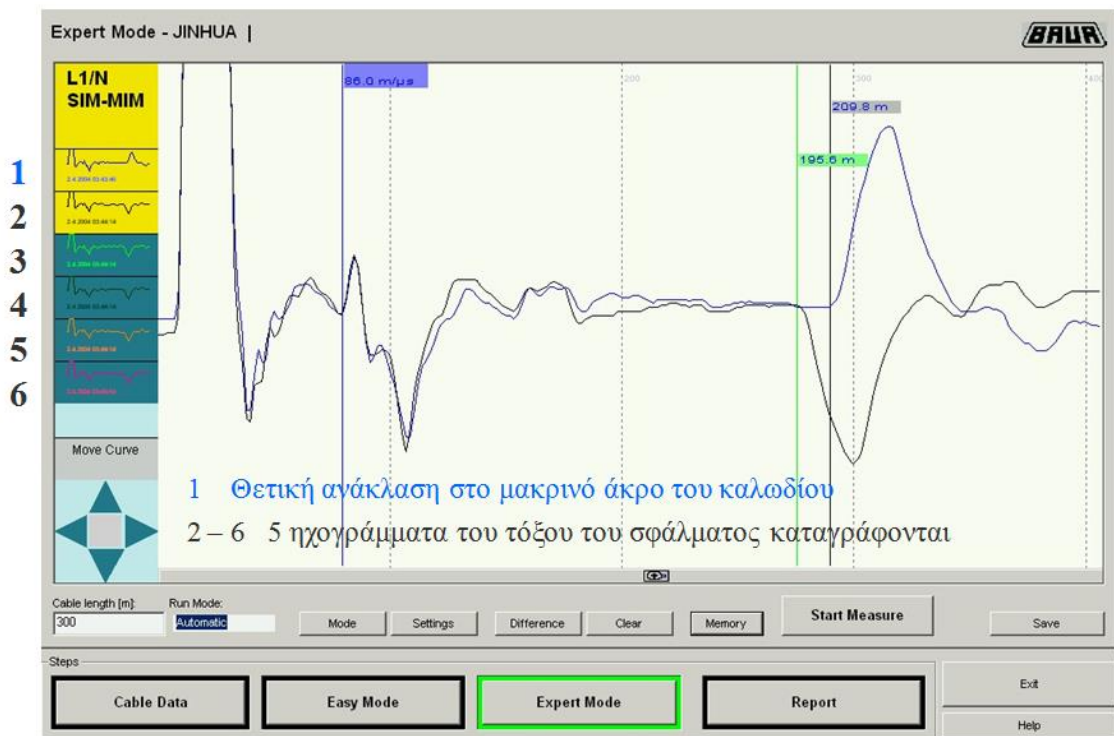
Στην περιοχή 1 του διαγράμματος ο παλμός έχει φτάσει πιο πριν στο σφάλμα, το ρεύμα δεν είναι σταθεροποιημένο και το διάγραμμα ανάκλασης που προκύπτει στην οθόνη του παλμοχόμετρου δεν μπορεί να ερμηνευθεί (συνήθως έχει την μορφή τετραγωνικών παλμών) [22], [23].

Στην περιοχή 3 του διαγράμματος ο παλμός έχει φτάσει πιο αργά στο σφάλμα, το ρεύμα έχει εξασθενήσει, και το τόξο έχει πρακτικά σβήσει. Επομένως ο παλμός του παλμοχόμετρου προσπερνάει το σφάλμα χωρίς να ανακλαστεί [22], [23].

Πρακτικά προτείνεται επιλογή καθυστέρησης σκανδαλισμού (trigger delay) στο παλμοχόμετρο της τάξης των 500μsec ή 1000μsec για καλώδια ισχύος κάποιων χιλιομέτρων [22], [23].

Οι παλμοί οι οποίοι στέλνονται από το παλμοχόμετρο σε ένα καλώδιο δεν εμφανίζουν ανάκλαση σε σφάλματα υψηλής αντίστασης. Επομένως ανιχνεύεται η θετική ανάκλαση του μακρινού άκρου του καλωδίου. Σε ένα δεύτερο βήμα το σφάλμα “σκάει” από ένα παλμό Υ.Τ. ή τάση Σ.Ρ. από μια γεννήτρια κρουστικών τάσεων και η εκφόρτιση εμφανίζεται ως ένα τόξο στο σημείο του σφάλματος. Ακριβώς την στιγμή της εμφάνισης του τόξου μια δευτερεύουσα ακολουθία παλμών μέτρησης απελευθερώνεται στο καλώδιο από το παλμοχόμετρο η οποία ανακλάται από το τόξο με αρνητική πολικότητα λόγω της χαμηλής αντίστασης του τόξου [22], [23].

Τα σύγχρονα παλμοχόμετρα χρησιμοποιούν ένα καταγραφικό 200MHz και στέλνουν 5 παλμούς Χ.Τ. οι οποίοι ανακλώνται στο σημείο του σφάλματος και καταγράφονται ανεξάρτητα. Η επίδραση αυτής της παραλλαγής της μεθόδου, είναι ότι με ένα μόνο παλμό Υ.Τ. μπορούν να καταγραφούν 5 γραφήματα σφάλματος σε μια ακολουθία. Η ταυτόχρονη προβολή και των δύο συνθηκών μας οδηγεί στην υψηλότερη ακρίβεια στην εκτίμηση της απόστασης του σφάλματος [26].

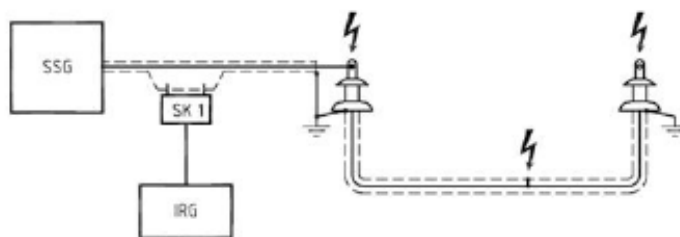


Σχήμα 4.29- Γράφημα ακολουθιών παλμοηχόμετρου ,προβολή της αυτόματα μετρημένης πολλαπλής ακολουθίας [26]

Η εικονιζόμενη ακολουθία γραφημάτων μας δίνει ένα παράδειγμα επιτυχημένης εφαρμογής της μεθόδου ανάκλασης τόξου [26].

4.7.7.3. Μέθοδος ανάκλασης κρουστικού παλμού (Impulse Current Method)

Οι προαναφερόμενες μέθοδοι προεντοπισμού βασιζόμενες στο παλμοηχόμετρο και στην παραγωγή παλμικών τάσεων επηρεάζονται είτε από την εξασθένηση του σήματος σε πολύ μεγάλα καλώδια είτε από ανακλάσεις σε ενώσεις κατά μήκος του καλωδίου. Αυτές οι ασυνήθιστες επιδράσεις απόσβεσης του σήματος οφείλονται είτε στην διάβρωση του μανδύα του καλωδίου είτε σε κάθε άλλη επίδραση στις ενώσεις που μπορούν να επηρεάσουν την αντίσταση του καλωδίου. Σε πολύ μεγάλα καλώδια η φυσική απόσβεση του καλωδίου μπορεί να προκαλέσει την απόσβεση του κρουστικού παλμού πριν την επιστροφή του στο παλμοηχόμετρο με αποτέλεσμα να μην μπορεί να εφαρμοστεί με επιτυχία [26].

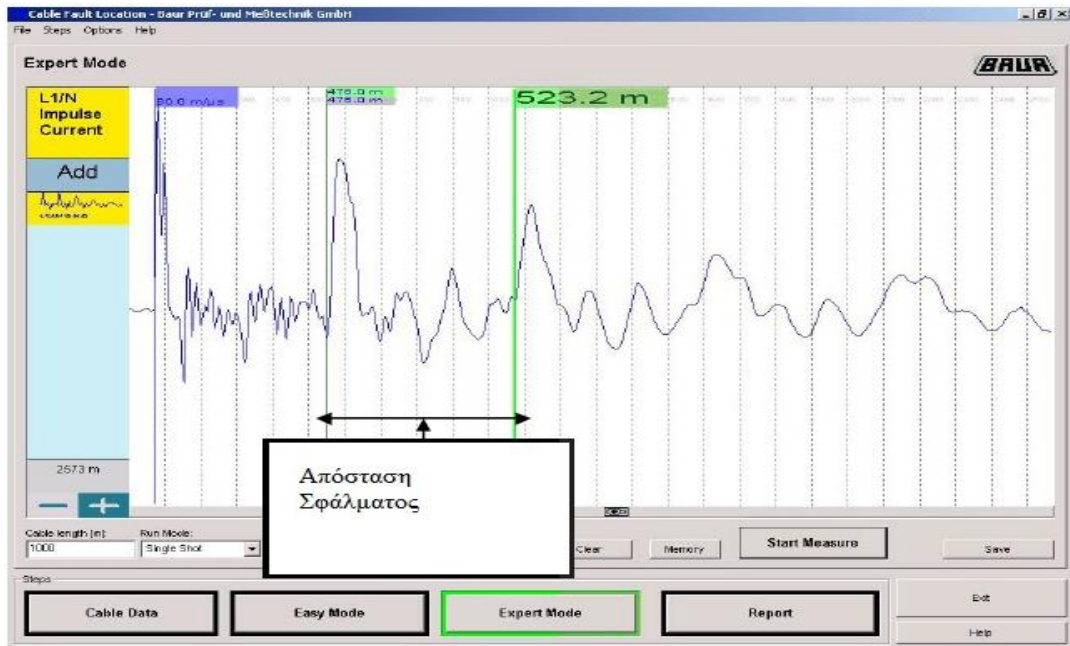


Σχήμα 4.29-Σχηματικό διάγραμμα της μεθόδου ανάκλασης κρουστικού παλμού[26]

Για να καλύψουμε την εφαρμογή του προεντοπισμού σφάλματος σε καλώδιο υπό αυτές τις συνθήκες, χρησιμοποιούμε την μέθοδο ανάκλασης του κρουστικού παλμού. Κατά την μέθοδο αυτή μια γεννήτρια κρουστικών τάσεων ελευθερώνει ένα παλμό Υ.Τ. ο οποίος προκαλεί “σκάσιμο” στο σημείο του σφάλματος. Αυτή η εκφόρτιση δημιουργεί ένα μεταβατικό κύμα ρεύματος το οποίο κινείται μέσω του μανδύα του καλωδίου ανάμεσα στην κρουστική γεννήτρια και το σημείο του σφάλματος. Το διάστημα επανάληψης αυτού του παλμού καθορίζεται ως η απόσταση του σφάλματος. Ως μονάδα ζεύξης, ένας επαγωγικός ζεύκτης (SK1D) συνδέεται στον μανδύα του καλωδίου στην έξοδο της γεννήτριας κρουστικών τάσεων. Το παλμοχόμετρο λειτουργεί με αυτόματη προσαρμογή όλων των ρυθμίσεων και οδηγεί σε σωστές μετρήσεις [26].

Καθώς το εύρος του μεταβαλλόμενου παλμού ρεύματος είναι αρκετά μεγάλο, η ακρίβεια της μεθόδου ανάκλασης κρουστικού παλμού είναι πολύ υψηλή σε μεγάλα καλώδια [26].

Η μέθοδος ανάκλασης κρουστικού παλμού ανιχνεύει το παλμικό ρεύμα που κινείται μέσω του μανδύα του καλωδίου κατά το “σκάσιμο” του σφάλματος. Η ακολουθία του ανακλώμενου ρεύματος μετράται από την μονάδα επαγωγικής ζεύξης. Κάθε αλλαγή στην φορά του ρεύματος του ανακλώμενου παλμού ανιχνεύεται από την μονάδα επαγωγικής ζεύξης. Με την βοήθεια της γνωστής ταχύτητας διάδοσης του καλωδίου ($v/2$) και του περιοδικού χρόνου του ανακλώμενου κύματος, η απόσταση του σφάλματος υπολογίζεται από το παλμοχόμετρο [26].



Σχήμα 4.31-Γράφημα μέτρησης παλμοχόμετρου με την μέθοδο ανάκλασης κρουστικού παλμού[26]

4.7.7.4. Μέθοδος γέφυρας (Bridge Method)

Όλα τα σφάλματα που εμφανίζονται μεταξύ 2 αγωγών και επομένως μεταξύ δύο παράλληλων αγωγών μπορούν να προεντοπιστούν με κάθε μια από τις προαναφερόμενες μεθόδους προεντοπισμού που βασίζονται στην παλμική ανακλαστικότητα. Ορισμένες κατασκευές καλωδίων επιτρέπουν την εμφάνιση σφαλμάτων από ένα αγωγό προς το εξωτερικό και επομένως προς το έδαφος [26].

Καθώς το σχετικό μέσο στην περίπτωση αυτή δεν είναι προσβάσιμο όπως π.χ. ένας γειωμένος μεταλλικός μανδύας, η θεωρία της ανακλαστικότητας δεν μπορεί να εφαρμοστεί. Τα σφάλματα στον μανδύα των καλωδίων, τα οποία είναι ελαττώματα στην εξωτερική προστατευτική μόνωση PVC, παρουσιάζουν την ίδια ηλεκτρική εικόνα όπως τα σφάλματα που αναφέρθηκαν παραπάνω. Τα σφάλματα στον μανδύα του καλωδίου δεν επηρεάζουν άμεσα την ηλεκτρική απόδοση ενός θωρακισμένου καλωδίου, αλλά έχουν αρνητική επίδραση στην μεσοπρόθεσμη λειτουργία του καλωδίου. Τα σφάλματα στον εξωτερικό μανδύα επιτρέπουν την είσοδο νερού από το έδαφος προς το καλώδιο. Η διάβρωση του μανδύα καθώς και η ανάπτυξη “ηλεκτρικών δενδριτών” μπορούν να οδηγήσουν στην βλάβη του καλωδίου αργότερα ή νωρίτερα [26].

Οι μέθοδοι γέφυρας εφαρμόζονται βασικά για τον προεντοπισμό σφαλμάτων χαμηλής αντίστασης. Χρησιμοποιώντας μια πηγή Υ.Τ. η οποία είναι ενσωματωμένη

στις τελευταίες διατάξεις γεφυρών μέτρησης ακόμα και σφάλματα υψηλής αντίστασης μπορούν να προεντοπιστούν. Όλες οι μέθοδοι γεφυρών μέτρησης οι οποίες λειτουργούν με Σ.Ρ. (Glaser και Murray) βασίζονται καταρχήν σε τροποποιημένα κυκλώματα Wheatstone [26].

Η διαφορά ανάμεσα στις μεθόδους Glaser και Murray αφορά μόνο τον τρόπο σύνδεσης και την εξίσωση που χρησιμοποιούμε για τον υπολογισμό της απόστασης. Το εσωτερικό κύκλωμα της γέφυρας του οργάνου είναι ακριβώς το ίδιο [26].

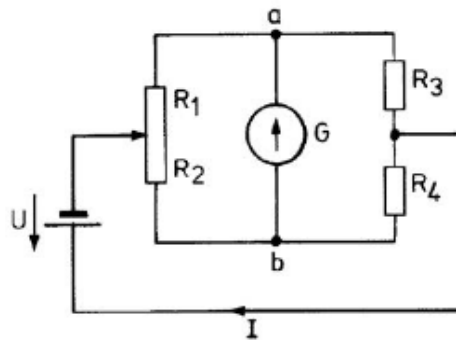
4.7.7.4.1. Αρχή λειτουργίας της γέφυρας Wheatstone

Η γέφυρα ισορροπεί όταν τα σημεία a και b έχουν το ίδιο δυναμικό. Στην περίπτωση αυτή το γαλβανόμετρο δείχνει μηδέν. Τα σημεία a και b έχουν το ίδιο δυναμικό όταν εκπληρώνεται η εξής συνθήκη [26]:

$$R_4 = \frac{R_2}{R_1} * R_3 \quad (4.22)$$

Αν η αντίσταση R_4 είναι η αντίσταση R_x της οποίας την τιμή ψάχνουμε, τότε θα έχουμε:

$$R_x = \frac{R_2}{R_1} * R_3 \quad (4.23)$$



Σχήμα 4.32- Κύκλωμα Wheatstone [39]

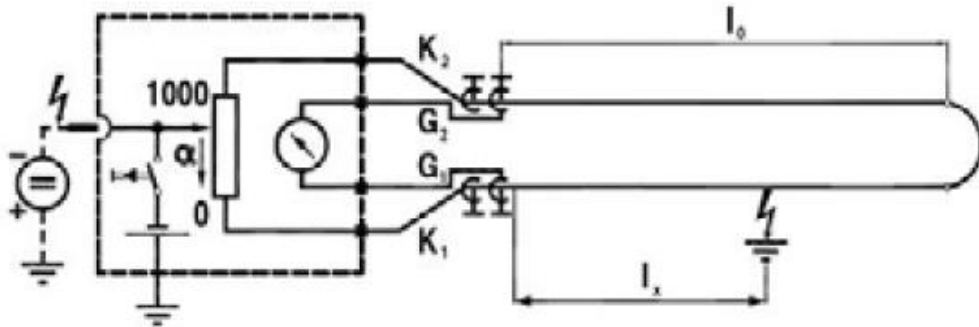
4.7.7.4.2. Κύκλωμα μέτρησης σύμφωνα με Murray

Το κύκλωμα μέτρησης γέφυρας σύμφωνα με Murray εφαρμόζεται σε διατάξεις όπου εκτός από τον υπό βλάβη αγωγό υπάρχει και ένας υγιής αγωγός ίδιας διαμέτρου και ίδιου υλικού. Η απόσταση του σφάλματος θα υπολογίζεται από την ακόλουθη εξίσωση [26]:

$$l_x = \frac{\alpha}{100} * 2l \quad (4.24)$$

Ο βαθμός ακρίβειας της γέφυρας εξαρτάται από τους ακόλουθους παράγοντες :

- Το ρεύμα της γέφυρας
- Την αντίσταση βρόγχου του καλωδίου βρόγχου
- Την αντιστοίχιση για την μεταφορά ισχύος της εσωτερικής σύνθετης αντίστασης του γαλβανομέτρου προς την αντίσταση της γέφυρας
- Την ευαισθησία του γαλβανομέτρου



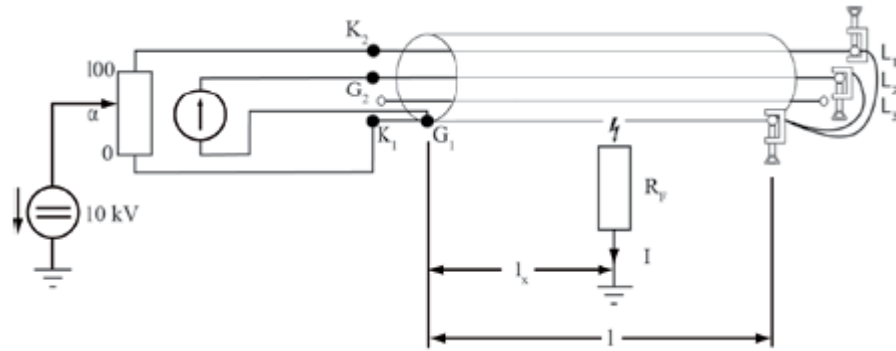
Σχήμα 4.33- Κύκλωμα μέτρησης σύμφωνα με Murray [26]

4.7.7.4.3. Κύκλωμα μέτρησης σύμφωνα με Glaser

Η γέφυρα μέτρησης σύμφωνα με Glaser μπορεί να χρησιμοποιηθεί για εντοπισμό σφαλμάτων στον μανδύα του καλωδίου σε ελαττωματικούς πλαστικούς μανδύες καλωδίων και σε μη θωρακισμένα πλαστικά καλώδια Χ.Τ.. Αυτή η μέθοδος απαιτεί την λειτουργία μέσω δύο βοηθητικών γραμμών ίσης διατομής και υλικού. Η διαφορά σε σχέση με την μέθοδο Murray είναι ότι η προς τα εμπρός διαδρομή που ορίζεται μέσω των δυο βοηθητικών γραμμών αντισταθμίζεται. Το υπόλοιπο ενεργητικό εξωτερικό κύκλωμα είναι ο μανδύας μόνο. Καθώς ο μανδύας έχει πάντα διαφορετική διάμετρο σε σχέση με τον αγωγό αυτή η αντιστάθμιση είναι ιδιαίτερα χρήσιμη [26].

Η απόσταση ανάμεσα το τέλος του καλωδίου και το σφάλμα θα δίνεται από την σχέση [26]:

$$l_x = \frac{\alpha}{100} * l \quad (4.25)$$



Σχήμα 4.34- Κύκλωμα μέτρησης σύμφωνα με Glaser [26]

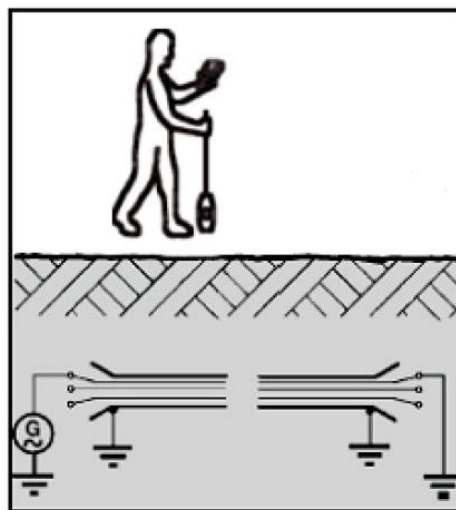
4.7.8. Μέθοδος εντοπισμού διαδρομής υπογείου καλωδίου

Ο εντοπισμός της διαδρομής του υπογείου καλωδίου είναι απαραίτητος για τον τελικό εντοπισμό του σφάλματος, αφού τα αποτελέσματα του προ-εντοπισμού είναι μόνο σε μέτρα καλωδίου από την αρχή του. Για την εφαρμογή της απαιτούνται οι παρακάτω συσκευές [22], [23] :

- Πομπός ακουστικών συχνοτήτων
- Δέκτης ακουστικών συχνοτήτων με πηνίο σε ράβδο
- Ακουστικά (προαιρετικά)

Κατά την εφαρμογή της μεθόδου δημιουργείται στο καλώδιο ένας βρόχος τον οποίο διαρρέει το ρεύμα υψηλής συχνότητας του πομπού [22], [23].

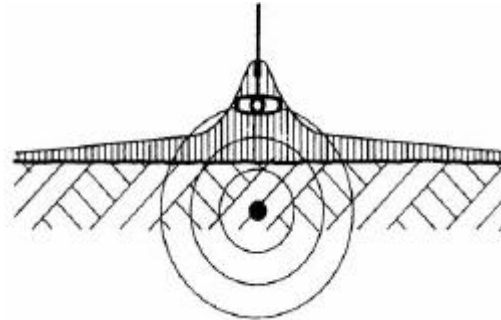
Ο ένας ακροδέκτης του καλωδίου μέτρησης του πομπού συνδέεται σε ένα υγιή αγωγό του υπό έλεγχο καλωδίου και ο άλλος συνδέεται στη γη. Παράλληλα ο αγωγός αυτός γειώνεται στο ελεύθερο άκρο του για να κλείσει ο βρόχος [22], [23].



Σχήμα 4.35-Μέθοδος εντοπισμού διαδρομής καλωδίου [26]

Για την επιστροφή χρησιμοποιείται η γη και όχι ο δεύτερος αγωγός του υπό έλεγχο καλωδίου για να μην εξουδετερώνεται το συνολικό σήμα. Ο χρήστης περπατάει πάνω από το καλώδιο κρατώντας την ράβδο με το πηνίο ψάχνοντας για μέγιστο σήμα (εάν το πηνίο είναι σε θέση 90° ως προς την ράβδο) ή για ελάχιστο (μηδενικό) σήμα εάν το πηνίο είναι παράλληλο με την ράβδο [22], [23].

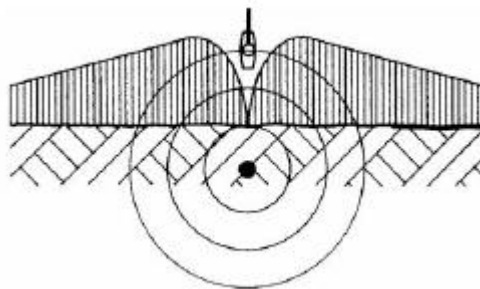
Στην μέθοδο μέγιστου σήματος το πηνίο εντοπισμού είναι όπως προαναφέραμε οριζόντιο στην διαδρομή της γραμμής [22], [23].



Σχήμα 4.36-Μέθοδος μέγιστου σήματος [26]

Το μέγιστο ακουστικό σήμα επιτυγχάνεται ακριβώς πάνω από την γραμμή. Η μέθοδος μέγιστου σήματος χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό της διαδρομής του καλωδίου καθώς και για την ανάλυση του σχηματισμού του εδάφους [22], [23].

Στην μέθοδο ελάχιστου σήματος το πηνίο εντοπισμού είναι κάθετο στην διαδρομή της γραμμής .

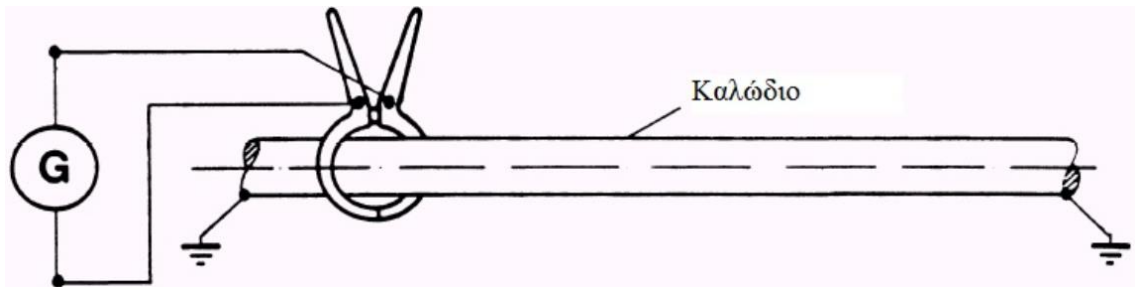


Σχήμα 4.37-Μέθοδος ελάχιστου σήματος [26]

Το ελάχιστο ακουστικό σήμα είναι ακριβώς πάνω από την γραμμή. Η μέθοδος ελάχιστου σήματος χρησιμοποιείται για τον καθορισμό του βάθους καθώς και για τον ακριβή εντοπισμό της θέσης του καλωδίου [22], [23].

Η ισχύς στην έξοδο του πομπού πρέπει να είναι σχετικά μικρή ώστε να μην επάγεται το σήμα σε γειτονικά καλώδια [22], [23].

Εάν δεν υπάρχει πρόσβαση σε κάποια ελεύθερη άκρη του υπό έλεγχο καλωδίου, τότε η σύνδεση του σήματος του πομπού γίνεται επαγωγικά με χρήση αμπεροτσιμπίδας σε κάποιο ενδιάμεσο σημείο [22], [23].

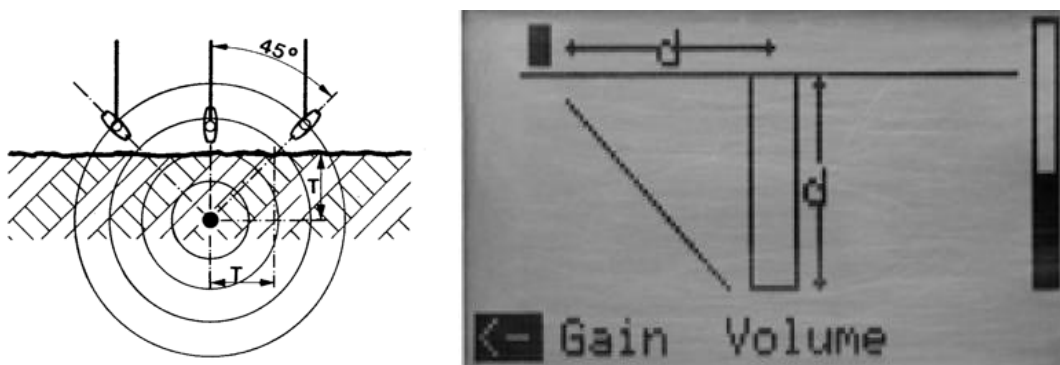


Σχήμα 4.38-Σύνδεση του πομπού με χρήση αμπεροτσιμπίδας [22],[23]

Ο καθορισμός του βάθους του καλωδίου επιτυγχάνεται με την χρήση του πηνίου σχηματίζοντας ένα ισοσκελές τρίγωνο [22], [23].

Τα βήματα του εντοπισμού του βάθους του καλωδίου είναι τα εξής:

1. Αρχικά καθορίζουμε την ακριβή θέση του καλωδίου
2. Ακολούθως περιστρέφουμε το πηνίο κατά 45°
3. Το ελάχιστο ακουστικό σήμα ακούγεται σε βάθος “d” σε αντίστοιχη απόσταση από την διαδρομή του καλωδίου .



Σχήμα 4.39-Καθορισμός βάθους του καλωδίου με την μέθοδο ελαχίστου σήματος [26]

4.7.9. Μέθοδοι ακριβούς εντοπισμού

Οι διάφορες παράμετροι που επηρεάζουν το αποτέλεσμα των μεθόδων προ-εντοπισμού (ακρίβεια παλμοηχομέτρου, σταθερά διάδοσης $v/2$) καθιστούν απαραίτητη

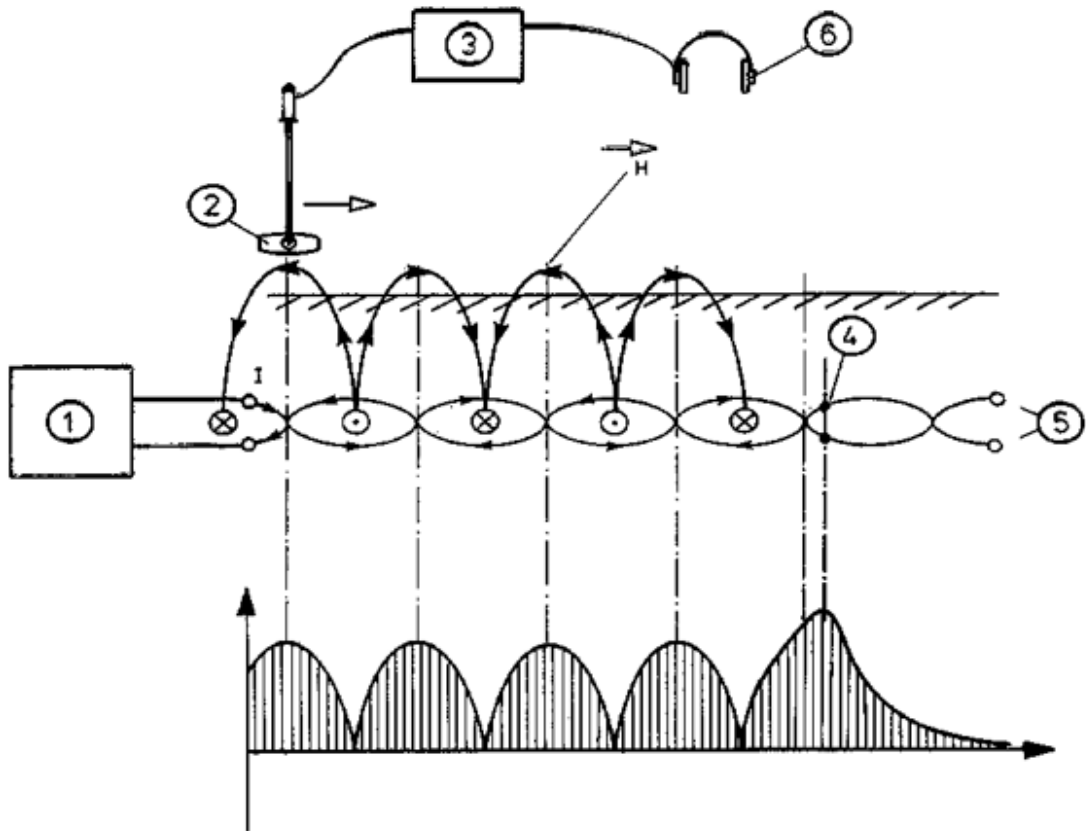
την εφαρμογή μεθόδων ακριβούς εντοπισμού του σφάλματος σε μια περιοχή αβεβαιότητας γύρω από το σημείο που έδειξε ο προ-εντοπισμός [22], [23].

4.7.9.1. Μέθοδος των συνεστραμμένων πεδίων (Twist Method)

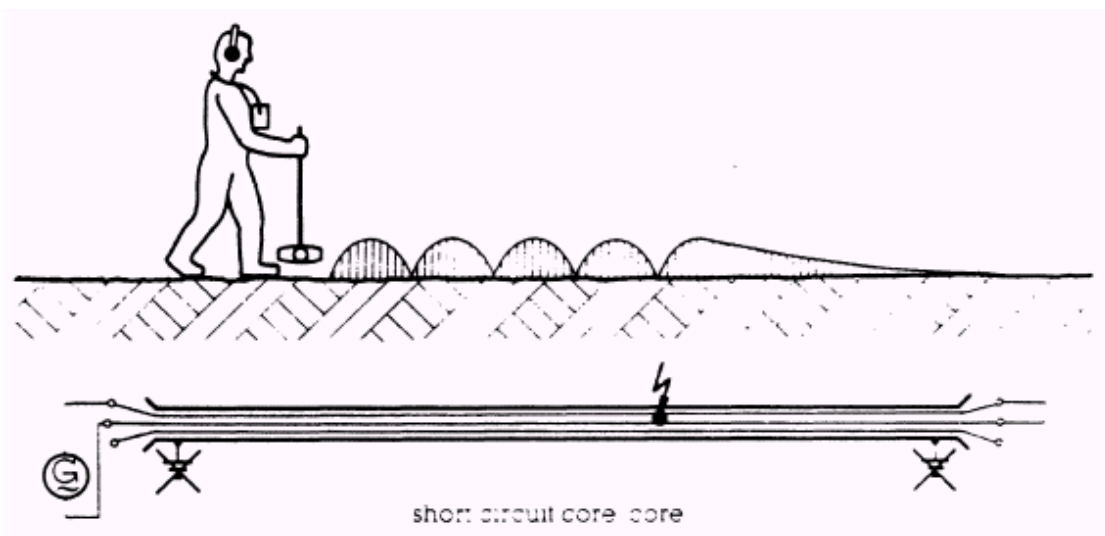
Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται για την αντιμετώπιση σφαλμάτων χαμηλής αντίστασης και βραχυκυκλωμάτων. Τα σφάλματα αυτά έχουν το χαρακτηριστικό ότι δεν “σκάνε”, δηλαδή δεν δημιουργείται τόξο σε αυτά όταν δεχτούν την ενέργεια ενός κρουστικού κύματος. Για τον λόγο αυτό η εφαρμογή μεθόδων ακριβούς εντοπισμού που βασίζεται στην γεννήτρια κρουστικών τάσεων δεν είναι αποτελεσματική [22], [23].

Ένας ισχυρός πομπός συνδέεται μεταξύ των αγωγών που παρουσιάζουν το σφάλμα. Στο σημείο του σφάλματος έχουμε τέλειο βραχυκύκλωμα ή σφάλμα χαμηλής αντίστασης, και επομένως σχηματίζεται βρόχος που διαρρέεται από το ρεύμα του πομπού. Γύρω από κάθε αγωγό παράγεται ένα ηλεκτρομαγνητικό πεδίο εξαιτίας της ροής του ρεύματος. Το ρεύμα πηγαινει από τον πομπό προς το σφάλμα στον ένα αγωγό και επιστρέφει από το σφάλμα στον πομπό στον δεύτερο αγωγό. Οι αγωγοί του καλωδίου είναι (από την κατασκευή του καλωδίου) συνεστραμμένοι μεταξύ τους [22], [23].

Η συνισταμένη από την συμβολή των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων των δύο αγωγών είναι ένα ηλεκτρομαγνητικό σήμα με διαδοχικά μέγιστα και ελάχιστα κατά μήκος της διαδρομής του καλωδίου, από την αρχή έως το σημείο του σφάλματος. Εάν ο ένας αγωγός βρεθεί πάνω από τον άλλο, το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο αλληλοεξουδετερώνεται (μηδενίζεται) στο κατακόρυφο επίπεδο, ενώ αν βρεθούν στο ίδιο οριζόντιο επίπεδο, τότε το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο διπλασιάζεται στο κατακόρυφο επίπεδο. Ο χρήστης περπατάει κατά μήκος του καλωδίου κρατώντας την ράβδο με το πηνίο, ψάχνοντας για διαδοχικά μέγιστα-ελάχιστα. Στο σημείο που αυτά χάνονται βρίσκεται το σφάλμα. Μετά το σημείο του σφάλματος, δεν υπάρχει ροή ρεύματος. Έτσι η ένταση του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου πέφτει σταδιακά στο μηδέν [22], [23].



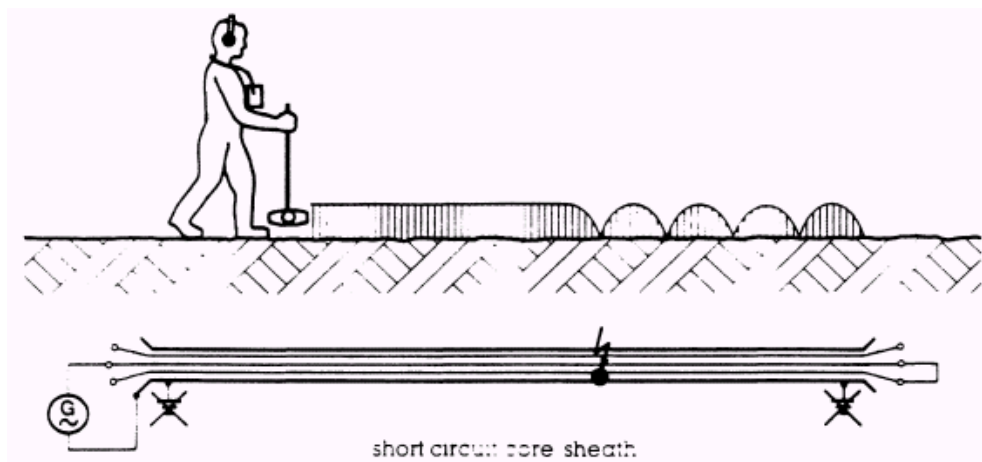
1. Πομπός
2. Ράβδος με πηνίο εντοπισμού
3. Δέκτης
4. Σφάλμα μεταξύ των αγωγών (<math><10\Omega</math>)
5. Ελεύθερη άκρη του καλωδίου
6. Ακουστικά του δέκτη



Σχήμα 4.40-Απεικόνιση του H/M σήματος σε εφαρμογή της μεθόδου συνεστραμμένων πεδίων σε βραχυκύκλωμα μεταξύ δύο αγωγών [22], [23]

Εάν το σφάλμα είναι μεταξύ αγωγού και γης (μεταλλικού μανδύα) τότε, ο αγωγός που έχει το σφάλμα βραχυκυκλώνεται στην ελεύθερη άκρη του με ένα υγιή αγωγό, αφαιρείται η γείωση από τον μεταλλικό μανδύα και ο πομπός συνδέεται μεταξύ μεταλλικού μανδύα και υγιούς αγωγού [22], [23].

Από τον πομπό μέχρι το σφάλμα ακούει συνεχές σήμα γιατί ο μεταλλικός μανδύας δεν είναι συνεστραμμένος με τον αγωγό. Μετά το σφάλμα όμως το ρεύμα ρέει μεταξύ δύο συνεστραμμένων αγωγών. Επομένως μόλις ο χρήστης περάσει το σφάλμα ακούει διαδοχικά μέγιστα και ελάχιστα [22], [23].



Σχήμα 4.41-Απεικόνιση του H/M σήματος σε εφαρμογή της μεθόδου συνεστραμμένων πεδίων σε βραχυκύκλωμα μεταξύ αγωγού και γης [22],[23]

Η μέθοδος των συνεστραμμένων πεδίων (Twist Method) χρησιμοποιείται και για τον εντοπισμό ενώσεων (μουφών) του υπογείου καλωδίου [22], [23].

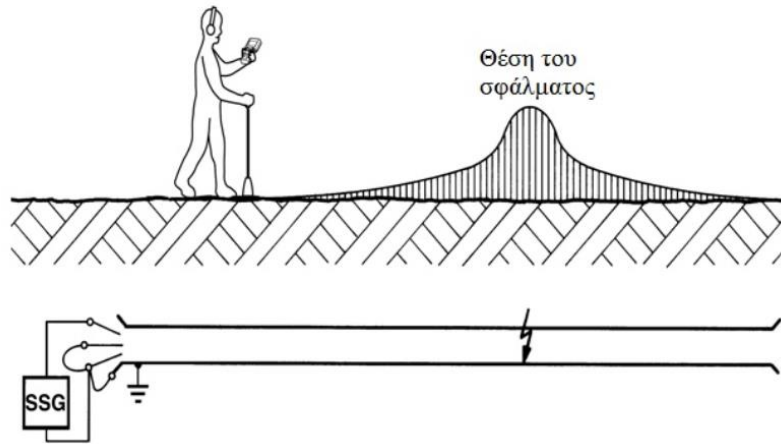
4.7.9.2. Μέθοδος κρουστικών τάσεων (Surge Voltage Method)

Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται για την αντιμετώπιση σφαλμάτων υψηλής αντίστασης καθώς και για σφάλματα τύπου διαλείψεως [22], [23].

Σύμφωνα με την μέθοδο αυτή, το σφάλμα δέχεται διαδοχικά κρουστικά κύματα από την γεννήτρια κρουστικών κυμάτων. Τα κρουστικά κύματα δημιουργούν τόξο (“σκάσιμο”) πάνω από το σφάλμα. Το τόξο προκαλεί ιονισμό του αέρα και διάδοση ακουστικών κυμάτων [22], [23].

Ο χρήστης ανιχνεύει τα ακουστικά κύματα στην επιφάνεια του εδάφους με τον δέκτη και το μικρόφωνο εδάφους.

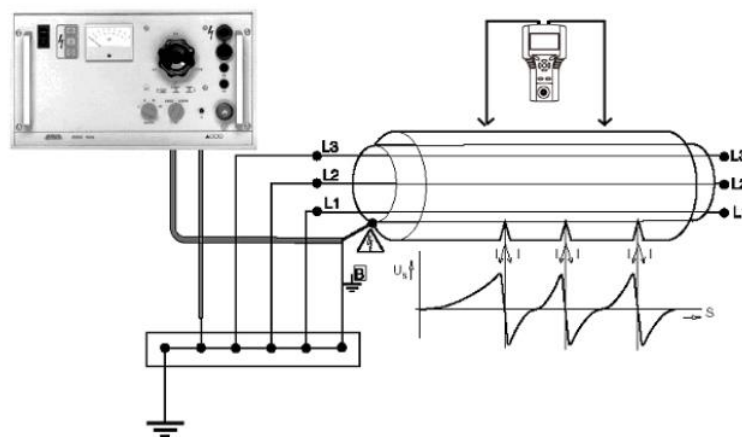
Όταν βρεθεί ακριβώς πάνω από το σφάλμα η απόσταση του μικροφώνου από αυτό γίνεται ελάχιστη και το λαμβανόμενο σήμα μεγιστοποιείται [22], [23].



Σχήμα 4.42-Απεικόνιση του H/M σήματος σε εφαρμογή της μεθόδου των κρουστικών τάσεων [22],[23]

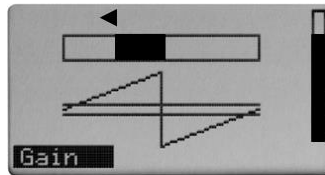
4.7.9.3. Μέθοδος βηματικής τάσης (Step Voltage Method)

Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται για την αντιμετώπιση σφαλμάτων στον μανδύα. Μεταξύ μεταλλικού μανδύα και γης διοχετεύονται διαδοχικά κρουστικά κύματα αρνητικής πολικότητας, τα οποία φορτίζουν τον μανδύα ως προς την γη (όλα τα άκρα είναι ελεύθερα). Αν υπάρχει σφάλμα σε κάποιο σημείο (πχ. της τάξης των κάποιων $k\Omega$), τότε στο σημείο αυτό το συσσωρευμένο φορτίο εκφορτίζεται μέσω του σφάλματος. Έχουμε ένα ισχυρό ρεύμα (peak), το οποίο ρέει απότομα προς την γη και δημιουργεί “δακτύλιους” τάσης γύρω από το σημείο του σφάλματος. Με τα δύο μαστούνια του δέκτη (UL3) μετράμε διαφορές δυναμικού (mV ή Volts ανάλογα με την τάση της κρουστικής γεννήτριας) που οφείλονται στο φαινόμενο αυτό [22], [23].

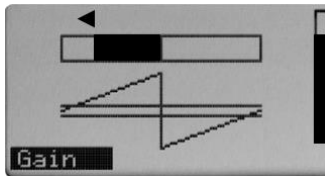


Σχήμα 4.43-Απεικόνιση μεθόδου βηματικής τάσης [22], [23]

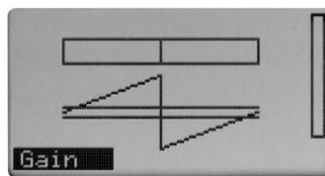
Όταν τα μαστούνια τοποθετηθούν στην περιοχή γύρω από το σημείο του σφάλματος (gradients), ο δέκτης εμφανίζει αυτόματα στην οθόνη ένδειξη στην μπάρα, τμήμα της οποίας γεμίζει προς τα αριστερά ή προς τα δεξιά. Εμφανίζεται ταυτόχρονα ένα βελάκι στην θέση του μέγιστου της ένδειξης που δείχνει προς ποια κατεύθυνση πρέπει να κινηθούμε (υπάρχει ταυτόχρονα ακουστικό σήμα ειδοποίησης) [22], [23].



Αν π.χ. η μπάρα αρχίζει να γεμίζει προς τα αριστερά, τότε συνήθως το βελάκι δείχνει προς τα αριστερά και προς αυτή την κατεύθυνση πρέπει να κινηθούμε. Η κίνηση μας πρέπει να γίνεται πάντα προς την κατεύθυνση που υποδεικνύει το βελάκι [22], [23].



Στην αμέσως επόμενη μετακίνηση προς τα αριστερά η ένδειξη στην μπάρα θα είναι ελάχιστη (zero crossing) [22], [23].



Η θέση με την μηδενική ένδειξη θα είναι η θέση του σφάλματος [22], [23].

5^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

“Συγκριτική παρουσίαση των μεθόδων - Συμπεράσματα”

5.1. Εισαγωγή

Ο εντοπισμός σφαλμάτων καλωδίων στο παρελθόν ήταν περισσότερο μια τέχνη παρά επιστήμη. Τα εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν ήταν μεγαωμόμετρα, φτυάρια και σιδεροπρίονα. Η συνήθης τεχνική που χρησιμοποιήθηκε ήταν η εξής: κόψιμο του καλωδίου στην μέση μετά την εκσκαφή του και μέτρηση της αντίστασης του με ένα μεγαωμόμετρο. Αν η τιμή της αντίστασης ήταν αποδεκτή, μετακίνηση στο ένα τέταρτο του μήκους της γραμμής, έπειτα στο ένα όγδοο του μήκους, και ούτω καθεξής. Έπειτα επανάληψη της διαδικασίας στο άλλο μισό του υπολειπόμενου μήκους μέχρι να βρεθεί το ακριβές σημείο του σφάλματος. Η τεχνική αυτή ήταν χρονοβόρα και δαπανηρή σε σύγκριση με τις μεθόδους που είναι διαθέσιμες σήμερα για τον εντοπισμό σφαλμάτων. Ο εξοπλισμός που είναι διαθέσιμος σήμερα χρησιμοποιείται για τον προ-εντοπισμό, εντοπισμό και ακριβή εντοπισμό ενός σφάλματος [30].

Πίνακας 5.1-Περίληψη των μεθόδων εντοπισμού σφαλμάτων καλωδίων [30]

Μέθοδος	Κριτήριο	Παράλληλο σφάλμα (Βραχυκύκλωμα)	Σφάλμα σε σειρά (Ανοιχτοκύκλωμα)
Τεχνικές μέτρησης ακροδεκτών			
Γέφυρα : Βρόχος Murray	Χρησιμοποιεί την ευαισθησία του μήκους του καλωδίου	Χαμηλή αντίσταση ($\leq 200\text{M}\Omega$)	—
Γέφυρα χωρητικότητας	Χρησιμοποιεί την χωρητικότητα ανάμεσα σε αγωγό και μανδύα	Υψηλή αντίσταση	Υψηλή αντίσταση
Ραντάρ: Παλμός	Παράγει ένα παλμό μικρής διάρκειας	Χαμηλή αντίσταση ($\leq 200\text{M}\Omega$)	Υψηλή αντίσταση
Συντονισμού	Παράγει ένα στάσιμο κύμα	Χαμηλή αντίσταση	Υψηλή αντίσταση
Τεχνικές ανίχνευσης			
Ανίχνευσης ρεύματος	Ρεύμα Σ.Ρ. Ρεύμα Ε.Ρ.	Χαμηλή αντίσταση Χαμηλή αντίσταση	— —
Ακουστικής συχνότητας	Μεταδίδει ακουστικούς τόνους	Χαμηλή αντίσταση	—

Πίνακας 5.1-... (Συνέχεια)

Μέθοδος	Κριτήριο	Παράλληλο σφάλμα (Βραχυκύκλωμα)	Σφάλμα σε σειρά (Ανοιχτοκύκλωμα)
Κρουστική	Μετάδοση ενός παλμού υψηλής ενέργειας	Χαμηλή αντίσταση	Υψηλή αντίσταση
Δυναμικού γης	Πτώση δυναμικού	Χαμηλή αντίσταση	–

5.2. Στρατηγική εντοπισμού σφαλμάτων σε υπόγεια καλώδια

Η στρατηγική για τον εντοπισμό του σφάλματος σε ένα καλώδιο αποτελείται από τα ακόλουθα βήματα [30]:

1. Έλεγχος του καλωδίου: Προσδιορισμός του τύπου του σφάλματος
2. Προεντοπισμός: Προσδιορισμός της απόστασης του σφάλματος
3. Ανίχνευση διαδρομής του υπόγειου καλωδίου: Προσδιορισμός της διαδρομής του καλωδίου
4. Ακριβής εντοπισμός: Προσδιορισμός της ακριβούς θέσης του σφάλματος του καλωδίου

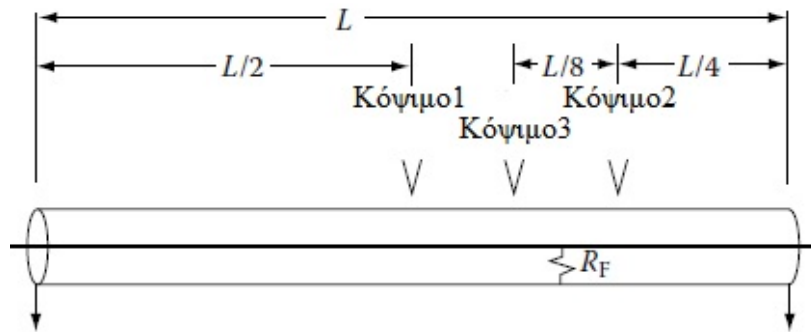
5.3. Συγκριτική παρουσίαση των μεθόδων προεντοπισμού

Η επιλογή της μεθόδου προ-εντοπισμού βασίζεται στον χαρακτήρα του σφάλματος. Στην ενότητα αυτή θα αναφερθούν οι ακόλουθες μέθοδοι [30]:

1. Διαίρεσης του καλωδίου - όλα τα σφάλματα
2. Γέφυρας - βραχυκυκλώματα < 200 MΩ
3. Ανάκλασης παλμού - βραχυκυκλώματα < 200 Ω και όλα τα ανοιχτοκυκλώματα
4. Ανάκλασης τόξου - όλα τα σφάλματα που μπορούν να “σκάσουν”
5. Ανάκλασης κρουστικού παλμού - όλα τα σφάλματα που μπορούν να “σκάσουν”

5.3.1. Διαίρεση του καλωδίου

Αυτή η μέθοδος περιγράφηκε σε προηγούμενη ενότητα. Στην μέθοδο αυτή το καλώδιο κόβεται και λαμβάνουμε διαδοχικές μετρήσεις της αντίστασης της μόνωσης. Καταγράφουμε τις μετρήσεις και ενώνουμε ξανά το καλώδιο. Αν η τιμή της αντίστασης είναι αποδεκτή, μετακινούμαστε στο ένα τέταρτο του μήκους της γραμμής, έπειτα στο ένα όγδοο του μήκους, και ούτω καθεξής. Συνεχίζουμε την διαδικασία μέχρι το σφάλμα να περιοριστεί σε ένα πολύ μικρό κομμάτι του καλωδίου [30].



Σχήμα 5.1-Μέθοδος διαίρεσης καλωδίου [30]

Πλεονεκτήματα:

- Το μόνο που χρειαζόμαστε είναι ένα σιδεροπρίονο, ένα φτυάρι, εξοπλισμός για την επανένωση (μούφα) του καλωδίου, ένα megger και αρκετός χρόνος .

Μειονεκτήματα:

- Δαπανηρή, χρονοβόρα, καταστροφική και ανεπαρκής .

5.3.2. Γέφυρα - βραχυκυκλώματα < 200 MΩ

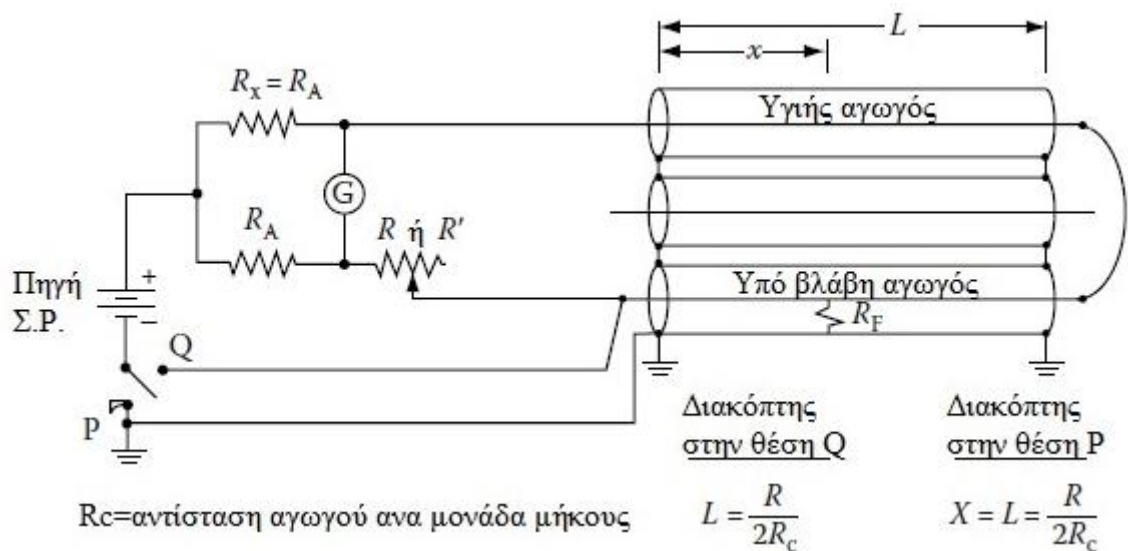
Προκειμένου να γίνει χρήση της μεθόδου γέφυρας, συχνά αναφέρεται ως μέθοδος του λόγου αντίστασης, το σφάλμα θα πρέπει να είναι ως προς την γη και μόνο ένα σφάλμα επιτρέπεται στο κομμάτι του καλωδίου υπό έλεγχο. Επίσης θα πρέπει να έχουμε διαθέσιμο ένα δεύτερο αγωγό ίδιου μήκους ώστε να εξασφαλίσουμε την επιστροφή με τον υπό βλάβη αγωγό. Όταν οι συνθήκες αυτές ικανοποιηθούν, η μέτρηση μπορεί να γίνει σε λίγα βήματα με την χρήση των πιο σύγχρονων γεφυρών υψηλής αντίστασης. Όταν όλες οι συνθήκες ικανοποιηθούν, η γέφυρα μπορεί να δώσει ακρίβειες της τάξης των 0,1524 m σε ένα μήκος βρόχου 152,4 m [30].

Πλεονεκτήματα:

- Εντοπίζει σφάλματα ως προς γη με αντίσταση έως 200 MΩ

Μειονεκτήματα: Η ακρίβεια αυτής της μέτρησης επηρεάζεται από

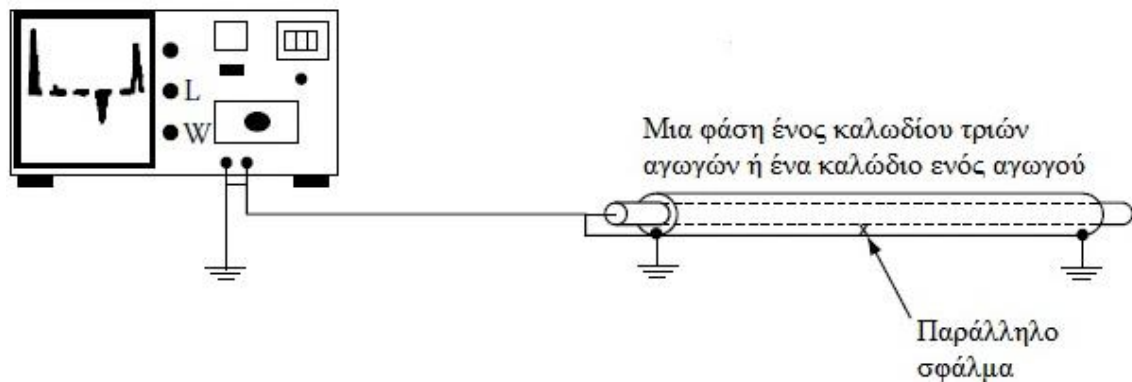
- Την παρουσία παραπάνω από ενός σφάλματος
- Αποκλίσεις στο μήκος του καλωδίου κατά μήκος του βρόχου
- Αποκλίσεις στην θερμοκρασία του αγωγού από αλουμίνιο ή χαλκό κατά μήκος του βρόχου
- Είναι απαραίτητη η ύπαρξη εναλλακτικού καλού καλωδίου για την δημιουργία του κυκλώματος βρόχου



Σχήμα 5.2-Μέθοδος Γέφυρας [30]

5.3.3. Ανάκλαση παλμού - βραχυκυκλώματα < 200 Ω και όλα τα ανοιχτοκυκλώματα

Τα παλμοηχόμετρα στέλνουν ένα παλμό υψηλής συχνότητας κατά μήκος της επιφάνειας του υπό έλεγχο αγωγού. Όταν ο παλμός φτάσει σε ένα σημείο όπου η χαρακτηριστική αντίσταση αλλάζει, μερική ή όλη η ενέργεια ανακλάται πίσω στο παλμοηχόμετρο όπου προβάλλεται στην οθόνη του παλμογράφου. Το παλμοηχόμετρο μετράει τον χρόνο που απαιτείται για τον παλμό να φτάσει στην αλλαγή της αντίστασης και τον χρόνο που απαιτείται για να επιστρέψει, λαμβάνει υπόψη την πραγματική ταχύτητα του παλμού και εμφανίζει την προκύπτουσα απόσταση μέχρι την αλλαγή της αντίστασης σε πόδια (ή μέτρα). Είναι αναγκαίο να ρυθμίσουμε στο παλμοηχόμετρο πόσο γρήγορα ο μεταδιδόμενος παλμός ταξιδεύει μέσα στην υπό χρήση μόνωση, ώστε να υπολογιστεί η σωστή απόσταση και να προβληθεί αυτόματα. Ένα υψηλής ποιότητας παλμοηχόμετρο θα προβάλλει σχεδόν όλες τις αλλαγές στην αντίσταση του καλωδίου υπό έλεγχο. Δεν θα προβάλλει σφάλματα προς γη που σε ένα καλώδιο ισχύος μπορούν να μετρηθούν έως και 200 Ω. Για τιμές αντίστασης από 200 Ω και πάνω άλλες μέθοδοι όπως η μέθοδος ανάκλασης τόξου μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Η μέθοδος ανάκλασης παλμού για τον εντοπισμό σφαλμάτων καλωδίων δίνεται στο Σχήμα 5.3 [30].



Σχήμα 5.3-Μέθοδος ανάκλασης παλμού για τον εντοπισμό σφαλμάτων [30]

Όπως εξηγήσαμε και νωρίτερα, είναι καλή ιδέα ο έλεγχος του καλωδίου και από τα δύο άκρα. Η επιπλέον προσπάθεια συχνά ανταμείβει τον χρήστη με επιπλέον πληροφορίες.

Πλεονεκτήματα:

- Εύκολος και γρήγορος εντοπισμός
- Ασφαλής δοκιμή υπό χαμηλή τάση
- Δεν καταπονεί το καλώδιο
- Οι μετρήσεις μπορούν να αποθηκευτούν για μελλοντική χρήση σαν διαγνωστικά εργαλεία ή για τον εντοπισμό σφαλμάτων (σύγκριση με άλλες φάσεις)

Μειονεκτήματα:

- Δεν μπορεί να εντοπίσει σφάλματα ως προς γη με αντίσταση μεγαλύτερη των 200 Ω
- Δύσκολη ερμηνεία των ανακλάσεων σε πολύπλοκα κυκλώματα
 - Στην περίπτωση αυτή συνίσταται η μέθοδος ανάκλασης παλμού με σύγκριση του υπό βλάβη καλωδίου με ένα υγιές και απεικόνιση στο παλμοηχόμετρο μόνο των διαφορετικών ανακλάσεων
- Δεν είναι δυνατό να μετρήσουμε παράλληλα σφάλματα με αντίσταση μεγαλύτερη δέκα φορές της χαρακτηριστικής σύνθετης αντίστασης του καλωδίου
 - Στην περίπτωση αυτή συνίσταται η μέθοδος ανάκλασης τόξου

Η μέθοδος ανάκλασης παλμού είναι η πιο γνωστή και διαδεδομένη μέθοδος μέτρησης για τον καθορισμό:

- του ολικού μήκους του καλωδίου
- του εντοπισμού σφαλμάτων χαμηλής αντίστασης

- του εντοπισμού διακοπών σε καλώδια
- του εντοπισμού ενώσεων κατά μήκος του καλωδίου

5.3.4. Ανάκλαση τόξου - όλα τα σφάλματα που “σκάνε”

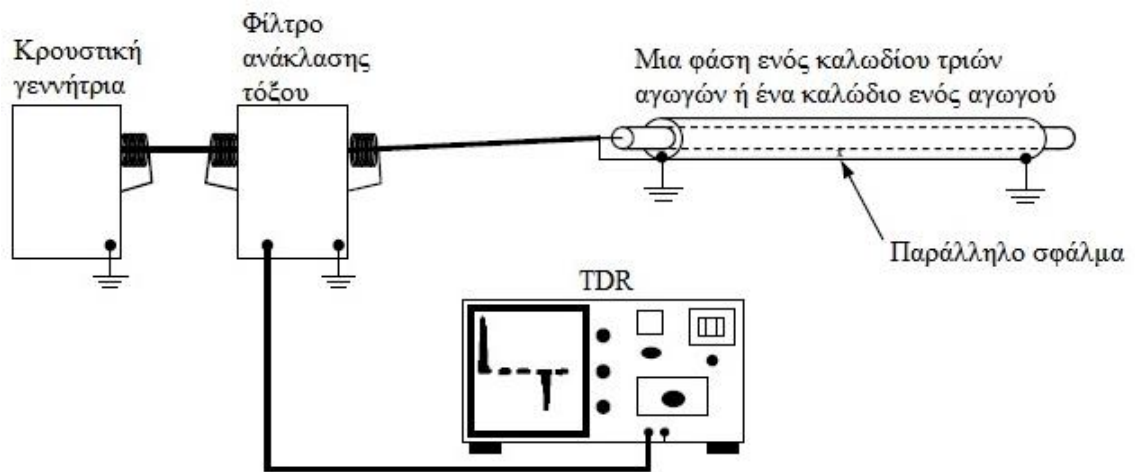
Ένα σφάλμα μπορεί να “σκάσει”, συχνά αναφέρεται ως σφάλμα που σπινθηρίζει, είναι ουσιαστικά ένα σφάλμα μηδενικής αντίστασης για τον χρόνο που διαρκεί η λάμψη. Έχοντας αυτό κατά νου, ένα φίλτρο έχει σχεδιαστεί που επιτρέπει στο παλμογράφο να στέλνει παλμούς κατά μήκος του υπό βλάβη αγωγού την ίδια στιγμή που μια κρουστική γεννήτρια στέλνει μια τάση “σκασίματος” στον ίδιο αγωγό. Ο παλμός του παλμογράφου ανακλάται από το στιγμιαίο τόξο και στην συνέχεια προβάλλεται στιγμιαία στην οθόνη του παλμογράφου. Κατά αυτό τον τρόπο το παλμογράφο είναι σε θέση να ανακλάσει παλμούς από όλα τα σφάλματα που μπορούν να σκάσουν. Η μέθοδος ανάκλασης τόξου δίνεται στο *Σχήμα 5.4* [30].

Πλεονεκτήματα:

- Μπορούν να εντοπιστούν όλα στα σφάλματα που μπορούν να “σκάσουν”
- Η τάση εξόδου του υπό έλεγχο καλωδίου κατά την χρήση της μεθόδου ρυθμίζεται από το σύστημα αυτόματα στο ελάχιστο που απαιτείται για να “σκάσει” (Δεν καταπονούμε το καλώδιο με αυτό τον τρόπο)
- Μειώνεται σημαντικά ο χρόνος του ακριβή εντοπισμού

Μειονεκτήματα:

- Δεν εντοπίζει σφάλματα που δεν “σκάνε”
- Δύσκολη ερμηνεία των ανακλάσεων σε πολύπλοκα κυκλώματα
 - Στην περίπτωση αυτή συνίσταται η μέθοδος ανάκλασης τόξου με σύγκριση του υπό βλάβη καλωδίου με ένα υγιές και απεικόνιση στο παλμογράφο μόνο των διαφορετικών ανακλάσεων
- Μεγάλα σε μήκος καλώδια με ιδιαίτερα εξασθενητικά διηλεκτρικά μπορεί να απορροφήσουν τους ανακλώμενους παλμούς της μεθόδου και η προσωρινή κατάσταση που το σφάλμα γίνεται χαμηλής αντίστασης δεν μπορεί να παρατηρηθεί
 - Στην περίπτωση αυτή συνίσταται η μέθοδος ανάκλασης κρουστικού παλμού



Σχήμα 5.4-Μέθοδος ανάκλασης τόξου για τον εντοπισμό σφαλμάτων [30]

5.3.5. Μέθοδος ανάκλασης κρουστικού παλμού

Όταν εκφορτίζεται μια κρουστική γεννήτρια σε ένα υπό βλάβη καλώδιο, η βηματική τάση ταξιδεύει κατά μήκος του καλωδίου. Ο παλμός αρχικά περνάει από την περιοχή του σφάλματος ανακλάται στο τέλος του καλωδίου, και επιστρέφει πίσω στο σφάλμα. Το ρεύμα που εισρέει προκαλεί στο σφάλμα την δημιουργία ενός τόξου χαμηλής αντίστασης και παράγει ένα νέο μέτωπο κυμάτων. Αυτό το νέο μέτωπο κυμάτων ταξιδεύει πίσω προς την κρουστική γεννήτρια. Όταν αυτό το μέτωπο κύματος φτάσει στην κρουστική γεννήτρια, βλέπει τον πυκνωτή της γεννήτριας σαν ένα βραχυκύκλωμα και ανακλάται πίσω στο σφάλμα, το οποίο επίσης εμφανίζεται ως βραχυκύκλωμα κατά την διάρκεια του “σκασίματος”. Το μέτωπο του κύματος θα συνεχίσει να μεταδίδεται μπρος και πίσω ανάμεσα στην γεννήτρια και το σφάλμα, μειώνοντας αργά το πλάτος του. Η μέθοδος ανάκλασης κρουστικού παλμού δίνεται στο Σχήμα 5.5 [30].

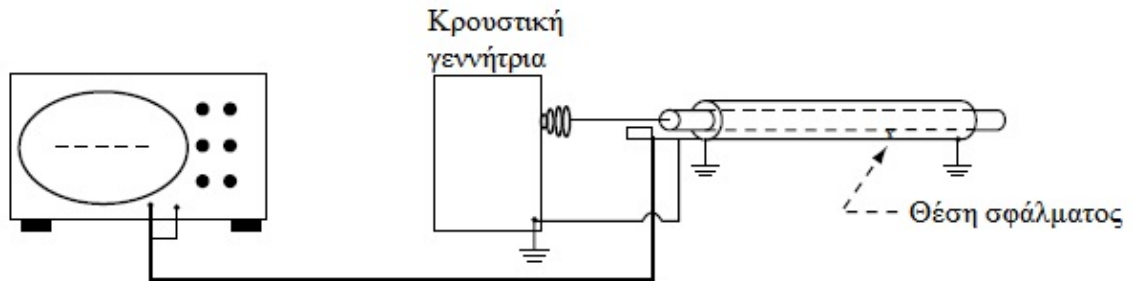
Πλεονεκτήματα:

- Εντοπίζει σφάλματα σε νερό ή λάδι
- Εντοπίζει σφάλματα που δεν μπορούν να εντοπιστούν με την μέθοδο ανάκλασης τόξου
- Ιδιαίτερα αποτελεσματική σε μεγάλα σε μήκος καλώδια όπου ο παλμός από το παλμοχόμετρο δεν έχει την απαιτούμενη ενέργεια να παράγει μια προβολή του ανακλώμενου χρόνου

Μειονεκτήματα:

- Πιο δύσκολη στο χειρισμό από την μέθοδο ανάκλασης τόξου, και λιγότερο ακριβής

- Δύσκολη ερμηνεία των κυματομορφών ακόμα και σε απλά κυκλώματα
- Μεγαλύτερα σφάλματα στον εντοπισμό λόγω του μεγάλου μήκους των καλωδίων



Σχήμα 5.5-Μέθοδος ανάκλασης κρουστικού παλμού για τον εντοπισμό σφάλματος [30]

5.4. Ακρίβεια των οργάνων

Οι πληροφορίες για την ακρίβεια των οργάνων που εκτελούν και καταγράφουν την μέτρηση και που χρησιμοποιούνται για τον εντοπισμό σφαλμάτων σε καλώδια μας παρέχονται από τους κατασκευαστές.

5.4.1. Γέφυρα

Η ακρίβεια μέτρησης των περισσότερων εμπορικά διαθέσιμων διατάξεων γέφυρας με σκοπό τον εντοπισμό σφαλμάτων σε καλώδια καθορίζεται σύμφωνα με τους κατασκευαστές των οργάνων σε ποσοστό $\pm 0,1\%$ της μέτρησης. Αυτό πρέπει να γίνει κατανοητό ως το $\pm 0,1\%$ της μέτρησης της γέφυρας. Δηλαδή, αν η γέφυρα μας δώσει ένδειξη για σφάλμα 500m από την αρχή του υπό ελέγχου καλωδίου η ακρίβεια της μέτρησης μας θα είναι $\pm 0,5m$ από το σημείο του σφάλματος. Το ποσοστό αυτό ακρίβειας ισχύει σε περίπτωση που ικανοποιούνται όλες οι συνθήκες που αναφέρονται στην παράγραφο 5.3.2..

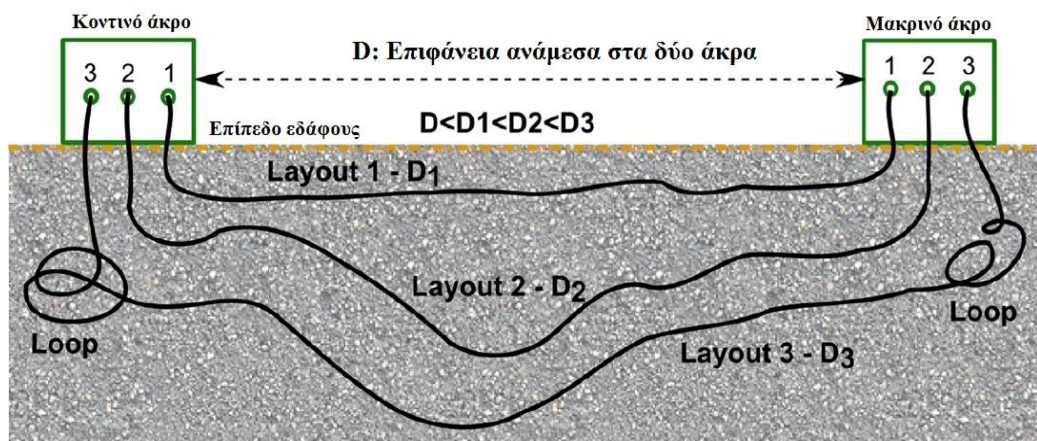
5.4.2. Παλμοηχόμετρο

Το παλμοηχόμετρο είναι ένα εξαιρετικά ακριβές όργανο. Η ακρίβεια της μέτρησης των περισσότερων εμπορικά διαθέσιμων παλμοηχόμετρων (TDR) με σκοπό τον εντοπισμό σφαλμάτων καθορίζεται σύμφωνα με τους κατασκευαστές σε ποσοστό $\pm 0,1\%$. Αυτό πρέπει να γίνει κατανοητό ως το $\pm 0,1\%$ της επιλεγόμενης περιοχής στο παλμοηχόμετρο. Δηλαδή, σε ένα καλώδιο μήκους 2000m η ακρίβεια μας θα είναι $\pm 2m$ του αποτελέσματος της μέτρησης. Ωστόσο, αν οι σταθερές και οι παράμετροι του

καλωδίου είναι λάθος τότε μπορεί να οδηγήσει σε λάθος ερμηνεία των δεδομένων. Το ποσοστό αυτό ακρίβειας ισχύει σε περίπτωση που γνωρίζουμε την ταχύτητα διάδοσης του καλωδίου και αυτό δεν είναι πάντα εφικτό. Μερικοί κατασκευαστές αναφέρουν την ταχύτητα διάδοσης (Velocity of Propagation) στα χαρακτηριστικά του καλωδίου τους ενώ άλλοι όχι. Στην πράξη τις περισσότερες φορές η ταχύτητα διάδοσης θα είναι άγνωστη και η ακρίβεια της μέτρησης θα επηρεάζεται από διάφορους παράγοντες.

Μερικοί από τους παράγοντες που επηρεάζουν την ακρίβεια της μέτρησης με το παλμοηχόμετρο είναι οι εξής:

- Δεν γνωρίζουμε την ταχύτητα διάδοσης του καλωδίου: στην περίπτωση αυτή μπορούμε να το υπολογίσουμε μετρώντας μια κουλούρα του ίδιου καλωδίου ανοιχτή στο άλλο άκρο, μήκους τουλάχιστον 100m.
- Αν δεν υπάρχει διαθέσιμο αυτό το του καλώδιο (ούτε κατάλληλο μήκος για την μέτρηση του VoP) και γνωρίζουμε το μήκος του υπό έλεγχο καλωδίου μπορούμε βραχυκυκλώνοντας το άκρο του καλωδίου να υπολογίσουμε την ταχύτητα διάδοσης ρυθμίζοντας το VoP μέχρι το TDR να μετρήσει το μήκος του καλωδίου.
- Στην περίπτωση που δεν γνωρίζουμε ούτε το μήκος του καλωδίου θα πρέπει να μετρήσουμε το μήκος με ένα τροχό μέτρησης μήκους. Και στην περίπτωση αυτή όμως θα μπορούσε η μέτρηση μας να είναι εσφαλμένη καθώς το καλώδιο μας μπορεί να μην “τρέχει” ακριβώς την διαδρομή που μετράμε. Δηλαδή εμείς με τον τροχό μας να μετρήσουμε ένα μήκος καλωδίου από άκρο σε άκρο 200m ενώ το καλώδιο μας να κατεβαίνει στα άκρα του σε βάθος 5m και να μην τρέχει την διαδρομή που μετράμε σε ευθεία γραμμή αλλά να σχηματίζει loop.



Σχήμα 5.6-Διαφορετικές διατάξεις υπόγειων καλωδιακών συστημάτων [27]

- Το καλώδιο υπό έλεγχο μπορεί να μην είναι ομοιογενές, δηλαδή να περιέχει δύο διαφορετικά είδη καλωδίου (με διαφορετικές ταχύτητες διάδοσης) ενωμένα μεταξύ τους με μούφα. Αυτό παρατηρείται πολλές φορές σε περιπτώσεις παλιών καλωδίων τύπου εμποτισμένου χάρτου ή EPR που αντικαθίστανται πλέον με XLPE.
- Η ταχύτητα διάδοσης μπορεί να αλλάξει με την πάροδο του χρόνου (γήρανση του καλωδίου) καθώς και από την αύξηση της θερμοκρασίας στο καλώδιο. Επίσης η ταχύτητα διάδοσης για τον ίδιο τύπο καλωδίου μπορεί να διαφέρει από κατασκευαστή σε κατασκευαστή. Τέλος άλλος ένας παράγοντας που επηρεάζει την ταχύτητα διάδοσης είναι η ύπαρξη νερού στο καλώδιο.

5.5. Ακρίβεια των μεθόδων

Η ακρίβεια των μεθόδων που χρησιμοποιούνται για τον εντοπισμό των σφαλμάτων εξαρτάται από την ακρίβεια των οργάνων που χρησιμοποιούνται για την μέτρηση κατά την εφαρμογή των μεθόδων αυτών, δηλαδή του παλμοηχομέτρου για τις μεθόδους ανάκλασης τόξου, ανάκλασης παλμού, ανάκλασης κρουστικού παλμού και της γέφυρας για την μέθοδο της γέφυρας. Οπότε είναι ασφαλές να ταυτίσουμε την ακρίβεια των οργάνων με την ακρίβεια των μεθόδων που αυτά χρησιμοποιούνται. Στην περίπτωση αυτή μπορούμε να συντάξουμε τον παρακάτω Πίνακα 5.2.

Πίνακας 5.2-Ακρίβεια οργάνων και μεθόδων εντοπισμού σφαλμάτων σε καλώδια

Μέθοδος	Όργανο μέτρησης	Ακρίβεια οργάνου	Παράδειγμα
Γέφυρας	Γέφυρα	0,1% της μέτρησης	Σε ένδειξη σφάλματος σε απόσταση 500m η ακρίβεια μας θα είναι $\pm 0,5m$
Ανάκλασης παλμού	Παλμοηχόμετρο	0,1% του μήκους του καλωδίου	Σε καλώδιο μήκους 2000m θα έχουμε ακρίβεια $\pm 2m$
Ανάκλασης τόξου	Παλμοηχόμετρο	0,1% του μήκους του καλωδίου	Σε καλώδιο μήκους 2000m θα έχουμε ακρίβεια $\pm 2m$
Ανάκλασης κρουστικού παλμού	Παλμοηχόμετρο	0,1% του μήκους του καλωδίου	Σε καλώδιο μήκους 2000m θα έχουμε ακρίβεια $\pm 2m$

Θεωρητικά, οι μέθοδοι που χρησιμοποιούν το παλμοηχόμετρο για την μέτρηση του σφάλματος μας δίνουν μια εντυπωσιακή ακρίβεια. Πρακτικά όμως όπως αναφέραμε στην ενότητα 5.4.1. αυτή η ακρίβεια είναι εφικτή υπό συνθήκες. Στην πράξη, καθώς όλοι οι παράμετροι του καλωδίου μπορεί να μην είναι γνωστοί το ποσοστό αυτό μπορεί να πέσει στο $\pm 1\%$, δηλαδή σε καλώδιο μήκους 2000m η απόκλιση μας να είναι $\pm 20m$. Στην περίπτωση αυτή και πάλι η εφαρμογή της μεθόδου μπορεί να θεωρηθεί επιτυχής, καθώς σκοπός των μεθόδων προεντοπισμού ειδικά σε καλώδια μεγάλου μήκους είναι ο περιορισμός του σφάλματος σε μια πολύ μικρή περιοχή (π.χ. $\pm 20m$) από μια πολύ μεγάλη περιοχή (π.χ. 2000m) για να ακολουθήσει μετά ο ακριβής εντοπισμός του σφάλματος “περπατώντας” μια πολύ μικρότερη απόσταση.

5.6. Συμπεράσματα

Ο εντοπισμός σφαλμάτων σε καλώδια τηλεπικοινωνιών και καλώδια ισχύος είναι ένας πολύ εξειδικευμένος τομέας ηλεκτρικής τεχνολογίας. Η απόδοση του αποτελεσματικού εντοπισμού σφάλματος εξαρτάται σε πολύ μεγάλο βαθμό από την σωστή χρήση του εξοπλισμού και την γνώση. Ο γρήγορος και αξιόπιστος εντοπισμός σφάλματος εξαρτάται από αυτούς τους παράγοντες αν θέλουμε ο προεντοπισμός του σφάλματος να γίνει μεγάλη ακρίβεια. Οι δοκιμές καλωδίων, οι διαγνώσεις καλωδίων και οι μετρήσεις μερικών εκφορτίσεων θα αποκτήσουν μεγαλύτερη σημασία στο μέλλον.

Η προληπτική συντήρηση των καλωδιακών δικτύων ,θα αντικαταστήσει όλο και περισσότερο την προσανατολισμένη στα συμβάντα συντήρηση των καλωδιακών εγκαταστάσεων. Μια καλή και λεπτομερής γνώση της κατασκευής των καλωδιακών δικτύων, των τύπων των καλωδίων και των εξαρτημάτων τους, απλοποιεί σημαντικά την αξιολόγηση των μετρούμενων αποτελεσμάτων. Οι προτεινόμενες μέθοδοι για κάθε είδος καλωδίου είναι οι εξής:

- Καλώδια ελέγχου
 - Μέθοδοι προεντοπισμού
 - Ανάκλασης παλμού
 - Μέθοδος Γέφυρας
- Καλώδια Χ.Τ.
 - Μέθοδοι προεντοπισμού
 - Ανάκλασης παλμού
 - Ανάκλασης τόξου

- Μέθοδος Γέφυρας
- Καλώδια Μ.Τ.
 - Μέθοδοι προεντοπισμού
 - Ανάκλασης παλμού
 - Ανάκλασης τόξου
 - Μέθοδος Γέφυρας
 - Ανάκλασης κρουστικού παλμού
- Καλώδια Υ.Τ.
 - Μέθοδοι προεντοπισμού
 - Ανάκλασης παλμού
 - Ανάκλασης τόξου
 - Ανάκλασης κρουστικού παλμού

Μετά την παραπάνω ανάλυση μπορούμε να κατηγοριοποιήσουμε τις διαθέσιμες μεθόδους προεντοπισμού σύμφωνα με το πεδίο εφαρμογής τους. Η προτεινόμενη μέθοδοι ανά εφαρμογή, τα χαρακτηριστικά τους καθώς και η ακρίβεια τους θα δοθούν στον παρακάτω συγκεντρωτικό πίνακα .

Πίνακας 5.3-Συγκεντρωτικός πίνακας μεθόδων εντοπισμού σφαλμάτων καλωδίων

Μέθοδος	Χαρακτηριστικά σφαλμάτων	Τύπος καλωδίου	Ακρίβεια
Γέφυρας	<ul style="list-style-type: none"> • Χαμηλής αντίστασης • Υψηλής αντίστασης • Σφάλματα μεταξύ αγωγών σε μη θωρακισμένα καλώδια 	<ul style="list-style-type: none"> • Ελέγχου • Χ.Τ. • Μ.Τ. 	0,1% της μέτρησης
Ανάκλασης παλμού	<ul style="list-style-type: none"> • Χαμηλής αντίστασης • Καθορισμός μήκους καλωδίων • Ανίχνευση ενώσεων (μουφών) κατά μήκους του καλωδίου 	<ul style="list-style-type: none"> • Ελέγχου • Χ.Τ. • Μ.Τ. • Υ.Τ. 	0,1% του μήκους του καλωδίου

Πίνακας 5.3-... (Συνέχεια)

Μέθοδος	Χαρακτηριστικά σφαλμάτων	Τύπος καλωδίου	Ακρίβεια
Ανάκλασης τόξου	<ul style="list-style-type: none"> • Υψηλής αντίστασης • Σφάλματα τύπου διαλείψεως • Εφαρμόζεται σε ποσοστό 80-90% όλων των σφαλμάτων 	<ul style="list-style-type: none"> • X.T. • M.T. • Y.T. 	0,1% του μήκους του καλωδίου
Ανάκλασης κρουστικού παλμού	<ul style="list-style-type: none"> • Υψηλής αντίστασης • Τύπου διαλείψεως • Εφαρμόζεται για τον εντοπισμό σφαλμάτων σε μεγάλα σε μήκος καλώδια 	<ul style="list-style-type: none"> • M.T. • Y.T. 	0,1% του μήκους του καλωδίου

Σκοπός της εφαρμογής των μεθόδων προεντοπισμού όπως προαναφέραμε είναι ο περιορισμός της περιοχής του σφάλματος ώστε να προχωρήσουμε έπειτα στον ακριβή εντοπισμό του.

Με βάση τον παραπάνω πίνακα μπορούμε να επιλέξουμε την κάθε μέθοδο που καλύπτει τις ανάγκες και ιδιαιτερότητες του καλωδιακού μας συστήματος. Στην πράξη όταν η μέθοδος δεν θα μας δίνει σωστή η καλή μέτρηση μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε μια άλλη. Για παράδειγμα αν η μέθοδος ανάκλασης παλμού δεν μας δίνει καθαρή μέτρηση μπορούμε να προχωρήσουμε στην εφαρμογή της μεθόδου ανάκλασης τόξου. Αντίστοιχα αν η μέθοδος ανάκλασης τόξου δεν μας ικανοποιήσει μπορεί να χρησιμοποιηθεί η μέθοδος ανάκλασης κρουστικού παλμού και ούτω καθεξής.

Άλλη μια τεχνική που χρησιμοποιείται σε περίπτωση που η μέτρηση μας είναι δύσκολο να ερμηνευτεί είναι η εκτέλεση της ίδιας μεθόδου στο δεύτερο άκρο του καλωδίου χρησιμοποιώντας την ίδια ταχύτητα διάδοσης (Velocity of Propagation). Κατά προτίμηση θα θέλουμε το άθροισμα των δύο μετρήσεων να μας δίνει το μήκος του καλωδίου. Στην περίπτωση που δεν συμβαίνει κάτι τέτοιο το σφάλμα μας θα είναι ανάμεσα στα δύο σημεία των μετρήσεων μας. Κατά βάση όμως η εφαρμογή των μεθόδων προεντοπισμού γίνονται στο ένα άκρο του καλωδίου.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας επίσημη ιστοσελίδα [Online]: <http://www.rae.gr>
- [2] Παντελής Μαλατέστας, “Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας”, 2015 .
- [3] ΑΔΜΗΕ, “Έκθεση για την απόδοση λειτουργίας του συστήματος μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας (Έτος 2015)”.
- [4] Ali Muhammad Ali Abu-Gurain, “Investigation and analysis of thermal aging of xlpe and pvc cable insulation materials manufactured in Saudi Arabia”, June 2003.
- [5] Edited by A.Haddad and D.Warne, “Advances in High Voltage Engineering, IET Power and Energy Series 40”.
- [6] Βασίλειος Κ. Παπαδιάς, “Γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας”, Αθήνα 1999.
- [7] Ζουραράκη Σ. Μαρία, “Υπολογισμός μεταφερόμενης ισχύος σε υπόγειο καλώδιο μέσης τάσης”, Ιούλιος 2012.
- [8] Ροζόπουλος Αλέξανδρος, “Ανίχνευση και επισκευή βλαβών σε καλώδια μέσης τάσης”, Ιούνιος 2012 .
- [9] Nexans, “60-500 kV High Voltage Underground Power Cables”.
- [10] Working Group B1.07, “Statistics of AC underground cables in Power networks”, 2007.
- [11] Christian Flytkjaer Jensen, “Online location of Faults on AC Cables in Underground Transmission Systems”.
- [12] Brugg Cables, “High voltage XLPE cable systems: Technical user guide” .
- [13] ABB, “XLPE Land Cable Systems”, Rev 5.
- [14] Shima Hassan Sayed Barakat, “Fault detection, classification and location in Underground Cables”, 2014.
- [15] Adeyemi Charles Adewole, “Investigation of methodologies for fault detection and diagnosis in electric power system protection”, October 2012.
- [16] Ankitkumar Naik, “Power system protection”, Canada 2015.
- [17] Mir Rasoul Jaafari Mousavi, “Underground distribution cable incipient fault diagnosis system”, December 2005.
- [18] Victor Otu Hayford, “Modeling of faults in low-voltage cables”, 2016.
- [19] Simon Anderjon , Dennis Honkanen, “Locating Faults on Energized Airfield Lighting Power Cables”, June 2016.
- [20] Zhihan Xu, “Fault Location and Incipient Fault Detection in Distribution Cables”, 2011.
- [21] M.M.Saha, J.Izykowski and E.Rosolowski, “Fault Location on Power Networks”.
- [22] Κακαβάς Αντώνης, “Έντοπισμός βλαβών σε καλώδια μέσης και υψηλής τάσης”, Ιούλιος 2013.
- [23] Advanced Technology Engineering, “Έντοπισμός σφαλμάτων υπογείων καλωδίων, Εγχειρίδιο”.
- [24] AVO International, “Selecting a Surge Generator for Maximum Efficiency”.
- [25] HDW, “Operating Manual Surge Generator Models SWG 1750”, 2011.
- [26] Baur, “Cable Fault Location in LV,MV and HV Underground Cable Networks, Practical Experience ”.
- [27] Jean Carlos Hernandez-Mejia, “Time Domain Reflectometry (TDR), CHAPTER 5”, 2016.
- [28] I. Touaibia , E. Azzag , O. Narjes , “Presentation of HVA faults in SONELGAZ underground network and methods of faults diagnostic and faults location”, 2015.
- [29] Baur, “User manual, Audio Frequency Locator Set TG20/50, TG600 and UL 30”, 2005.

- [30] Paul Gill, “Electrical Power Equipment Maintenance and Testing”, Second Edition.
- [31] Nurul Hidayah Binti Abdul Wahab, “Fault location of faulty underground cable in a noisy environment based on acoustic signals”, June 2015.
- [32] Junyu Han, “Fault Location on Mixed Overhead Line and Cable Network”, 2015 .
- [33] Tamer Amin Said Kawady, M. Sc., “Fault Location Estimation in Power Systems with Universal Intelligent Tuning”, 2005.
- [34] Western Power, “Underground cable installation manual”, 2006.
- [35] Nexans, “60-500 kV High Voltage Underground Power Cables”.
- [36] Edited by A.Haddad and D.Warne, “Advances in High Voltage Engineering, IET Power and Energy Series 40”.
- [37] International journal of innovations in engineering research and technology, “Underground cable fault distance locator”, Volume 2 , 2015.
- [38] Richard E.Brown, “Electric Power Distribution Reliability, Second Edition”, 2009.
- [39] C.F. Jensen, O.M.K.K. Nanayakkara, A. D. Rajapakse, U.S. Gudmundsdottir, and C.L. Bak, “Online Fault Location on AC Cables in Underground Transmission Systems using Sheath Currents”.
- [40] Baur επίσημη ιστοσελίδα [Online]: <http://www.baur.eu>
- [41] Megger επίσημη ιστοσελίδα [Online] [http:// www.megger.com/](http://www.megger.com/)