



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΥ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

**Συγκριτική επισκόπηση μεθόδων ανίχνευσης και
εντοπισμού σφαλμάτων σε υπόγεια δίκτυα
καλωδίων-Μελέτη και υλοποίηση διάταξης
ανίχνευσης σφαλμάτων με χρήση της
μεθόδου Murray.**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Επαμεινώνδας Καρακώστας 7373

Επιβλέπων: Δρ. Βασίλειος Χαραλαμπάκος
Επίκουρος Καθηγητής

Πάτρα, Σεπτέμβριος 2022



UNIVERSITY OF PELOPONNESE
SCHOOL OF ELECTRICAL AND COMPUTER ENGINEERING
DIVISION OF ELECTRICAL POWER SYSTEMS

**Comparative overview of detection & location
methods in underground cable networks – Study,
Design & Construction of a fault detection device
based on Murray method.**

DIPLOMA THESIS

Epameinondas Karakostas 7373

Supervisor: Dr. Vasileios Charalambakos
Associate Professor

Patras, September 2022

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή

Πάτρα, Ημερομηνία
2/11/2022

ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ

1. Ονοματεπώνυμο, Υπογραφή
Γεωργάκας Κωνσταντίνος, Επίκουρος Καθηγητής
2. Ονοματεπώνυμο, Υπογραφή
Δροσόπουλος Αναστάσιος, Καθηγητής
3. Ονοματεπώνυμο, Υπογραφή
Χαραλαμπίκος Βασίλειος, Επίκουρος Καθηγητής

Υπεύθυνη Δήλωση Φοιτητή

Βεβαιώνω ότι είμαι συγγραφέας αυτής της εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης έχω αναφέρει τις όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε αυτές αναφέρονται ακριβώς είτε παραφρασμένες. Επίσης βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία προετοιμάστηκε από εμένα προσωπικά ειδικά για τη συγκεκριμένη εργασία.

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Πανεπιστημίου Πελοποννήσου δεν υποδηλώνει απαραίτητως και αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα εκ μέρους του Τμήματος.

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία του φοιτητή Επαμεινώνδα Καρακώστα που την εκπόνησε. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης ο συγγραφέας/δημιουργός εκχωρεί στο Πανεπιστήμιο Πελοποννήσου, μη αποκλειστική άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, προσαρμογής, δημόσιου δανεισμού, παρουσίασης στο κοινό και ψηφιακής διάχυσής τους διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος και για όλο το χρόνο διάρκειας των δικαιωμάτων πνευματικής ιδιοκτησίας. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο για μελέτη και ανάγνωση δεν σημαίνει καθ' οιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας του συγγραφέα/δημιουργού ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, αποθήκευση, πώληση, εμπορική χρήση, μετάδοση, διανομή, έκδοση, εκτέλεση, «μεταφόρτωση» (downloading), «ανάρτηση» (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με οποιονδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση του συγγραφέα/δημιουργού. Ο συγγραφέας/δημιουργός διατηρεί το σύνολο των ηθικών και περιουσιακών του δικαιωμάτων.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω από καρδιάς για την ουσιαστική και αμοιβαία επωφελή συνεργασία που είχαμε, τον επιβλέπων καθηγητή της Διπλωματικής μου εργασίας κ. Βασίλειο Χαραλαμπάκο, καθηγητή του τομέα Ηλεκτρικής Ενέργειας και Ενεργειακών Συστημάτων και υπευθύνου του εργαστηρίου Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας της σχολής Μηχανικών του τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Η/Υ του Πανεπιστημίου Πελοποννήσου, για την ενίσχυση που μου παρείχε και την εμπιστοσύνη που μου επέδειξε, καθ' όλη τη διάρκεια του εγχειρήματος μου, δεδομένων των μεγάλων προκλήσεων και απαιτήσεων που κλήθηκα να διαχειριστώ.

Πολύ σημαντική ήταν επίσης η συνδρομή του κ. Παναγιώτη Ράπτη, μέλος Ειδικού Τεχνικού & Εργαστηριακού προσωπικού της σχολής Μηχανικών του τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Η/Υ του Πανεπιστημίου Πελοποννήσου, καθοδηγώντας με και παρέχοντας μου τις απαραίτητες- τεχνικής φύσεως -υποδείξεις κατά την εκπόνηση της πειραματικής διάταξης.

Οφείλω να ευχαριστήσω από καρδιάς το κ. Παναγιώτη Κορκόντζηλα για την παραχώρηση των ξύλινων σανίδων που χρησιμοποιήθηκαν ως βάση της πειραματικής διάταξης.

Στη συνέχεια θα ήθελα να ευχαριστήσω από καρδιάς τον κ. Γιώργο Τζουρά για την διάθεση των οργάνων μέτρησης προς λήψη μετρήσεων και διασφάλιση της λειτουργικότητας της διάταξης, το κ.Χρήστο Φιλιππακόπουλο Τεχνικό αποκατάστασης βλαβών πεδίου στο ΤΤΛΠ ΟΤΕ Αχαΐας , χωρίς τη συνδρομή του οποίου, τις άρτιες τεχνικές του γνώσεις και την εμπειρία του δεν θα ήταν δυνατή η υλοποίηση του κατασκευαστικού μέρους της πειραματικής διάταξης.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια και τους φίλους μου για την αμέριστη στήριξη, την υπομονή και τη κατανόηση που μου επέδειξαν όλο αυτό το διάστημα που απαιτήθηκε για την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, αλλά και γενικότερα σε όλη τη περίοδο των φοιτητικών μου χρόνων.

Περιεχόμενα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	1
ABSTRACT	2
ΣΥΝΤΟΜΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ	3

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ-ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ

1.1 Εισαγωγή.....	6
1.2 Σταθμοί Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας.....	7
1.3 Υποσταθμοί Μετασχηματισμού Τάσης	9
1.4 Γραμμές Μεταφοράς.....	10
1.4.1 Εναέρια γραμμές	12
1.4.2 Υπόγειες γραμμές	14
1.4.3 Υποβρύχιες γραμμές	15

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΚΑΛΩΔΙΩΝ-ΣΦΑΛΜΑΤΑ ΣΕ ΥΠΟΓΕΙΑ ΚΑΛΩΔΙΑ-ΑΙΤΙΕΣ ΣΦΑΛΜΑΤΩΝ ΚΑΛΩΔΙΩΝ

2.1 Δομή Υπόγειων Καλωδίων Ισχύος	17
2.1.1 Ηλεκτρικοί Αγωγοί.....	20
2.1.2 Εξομαλυντικά Ημιαγώγιμα Στρώματα.....	20
2.1.3 Μόνωση	21
2.1.4 Εξωτερικός Γειωμένος Αγωγός(ή μανδύας ή μεταλλικός μανδύας ή ηλεκτρική θωράκιση ή μεταλλική θωράκιση).....	22
2.1.5 Ζώνη Μηχανικής Ενίσχυσης ή Θωράκιση	23
2.1.6 Εξωτερικό Προστατευτικό Στρώμα ή Εξωτερικός Μανδύας	23
2.2 Βλάβες και αστοχίες υπογείων καλωδίων.....	25
2.2.1 Ορισμός σφάλματος και κατηγορίες σφαλμάτων	25
2.2.2 Είδη σφαλμάτων.....	26
2.2.2.1 Βραχυκυκλώματα.....	26
2.2.2.2 Ανοικτό κύκλωμα (Open-Conductor Faults).....	28
2.2.3 Αιτίες σφαλμάτων και βλαβών καλωδίων	30
2.2.3.1 Μηχανικές Βλάβες.....	30
2.2.3.2 Διάβρωση του μανδύα.....	30
2.2.3.3 Γήρανση.....	31

2.2.3.4 Αστοχία Μόνωσης Καλωδίου.....	36
2.2.3.5 Αστοχία συνδέσμων(ματίσεων).....	37
2.2.3.6 Θέρμανση Καλωδίων	38
2.2.3.7 Υπερτάσεις λόγω κεραυνών.....	38
2.2.3.8 Δόνηση	39

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗΣ ΚΑΙ ΑΚΡΙΒΟΥΣ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ ΣΦΑΛΜΑΤΩΝ ΣΕ ΥΠΟΓΕΙΑ ΚΑΛΩΔΙΑ

3. Κατηγοριοποίηση των μεθόδων ανίχνευσης σφαλμάτων.....	40
3.1 Τεχνικές ακροδεκτών	41
3.1.1 Μέθοδος Γέφυρας	41
3.1.2 Μέθοδος Radar(αντήχησης παλμών)(Pulse Reflection Method).....	50
3.1.3 Μέθοδος Συντονισμού(Standing Wave differential Method)	52
3.2 Τεχνικές ανίχνευσης	56
3.2.1 Μέθοδος Κρουστικών Τάσεων(Impulse Voltage Method)	56
3.2.2 Μέθοδος Δυναμικού Γης(Earth gradient method).....	62
3.2.3 Μέθοδος Radar με ανάκλαση τόξου(Arc Reflection Method).....	64
3.2.4 Μέθοδος ανίχνευσης ρεύματος(Tracing Current Method)	66
3.2.5 Μέθοδος Ακουστικής Συχνότητας(Acoustic Method).....	69

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΜΕΛΕΤΗ ΕΠΙΛΟΓΗΣ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΔΙΑΤΑΞΗΣ

4.1 Γενικά	72
4.2 Χρησιμοποιούμενα υλικά	72
4.3 Χαρακτηριστικά υλικών κατασκευής	73
4.3.1 Χορδή Χρωμιονικελίνης	73
4.3.2 Όργανο ισορροπίας.....	75
4.3.3 Υπό δοκιμή αγωγός	77
4.3.4 Τροφοδοσία διάταξης	78
4.4 Διαδικασία κατασκευής	79
4.5 Προβλήματα κατά το στάδιο των πειραματικών δοκιμών	88
4.5.1 Όργανο ισορροπίας.....	88
4.5.2 Αντίσταση προστασίας.....	90
4.5.3 Τροφοδοσία διάταξης	93
4.5.4 Τελική μελέτη υλικών.....	94

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ΠΡΟΣΟΜΙΩΣΗ ΤΗΣ ΥΠΟ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΔΙΑΤΑΞΗΣ- ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ- ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

5.1 Προσομοίωση της υπό διερεύνηση διάταξης	95
5.1.1 Γενικά	95
5.1.2 Προσομοίωση της διάταξης εντοπισμού σφαλμάτων με χρήση βρόχου Murray ..	96
5.1.3 Επιλογή των παραμέτρων εξομοίωσης	96
5.1.4 Αποτελέσματα της προσομοίωσης	98
5.2 Συνδεσμολογία πειραματικής διάταξης	101
5.3 Πειραματική διαδικασία	106
5.4 Πειραματικά αποτελέσματα	107

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΕΥΡΕΣΗΣ ΣΦΑΛΜΑΤΟΣ ΣΤΟ ΠΕΔΙΟ ΜΕ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΕ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΚΟ ΔΙΚΤΥΟ

111

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 ΤΕΛΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

7.1 Αξιολόγηση της διάταξης	120
7.2 Προκλήσεις και Προβλήματα	121
Βιβλιογραφία	123

Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 1 Περίληψη των παραγόντων γήρανσης στα καλώδια	32
Πίνακας 2 Αρχική υλικοτεχνική μελέτη της διάταξης.	72
Πίνακας 3 Τιμή της αντίστασης ενός σύρματος Constantan για διαφορετική διάμετρο σύρματος.....	74
Πίνακας 4 Τιμή της αντίστασης ενός σύρματος χρωμιοκελίνης(NCr) για διαφορετικές διαμέτρους σύρματος	74
Πίνακας 5 Τελική υλικοτεχνική μελέτη της διάταξης.....	94

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η συντήρηση και επισκευή του υπογείου δικτύου μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας είναι απαραίτητη για την απρόσκοπτη και ορθή λειτουργία του δικτύου και την εξασφάλιση των αναγκών σε ενέργεια των καταναλωτών. Ορισμένοι φυσικοί ή ανθρώπινοι παράγοντες διαταράσσουν τη λειτουργία των υπόγειων καλωδίων, και τα καθιστούν ευάλωτα σε διάφορα σφάλματα. Ο εντοπισμός των σφαλμάτων των καλωδίων αποτελεί τη σημαντικότερη εργασία που πραγματοποιείται επι των γραμμών μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Η ταχύτητα και η ακρίβεια αυτής της εργασίας είναι ιδιαίτερα σημαντική γιατί τα σφάλματα των καλωδίων προκαλούν διακοπές τροφοδότησης, οι οποίες κοστίζουν τόσο στο καταναλωτή όσο και στο πάροχο. Έτσι, στην εργασία αυτή πραγματοποιείται μια συγκριτική μελέτη των κυριότερων μεθόδων εντοπισμού σφαλμάτων, αναλύοντας τα χαρακτηριστικά και τις τεχνικές απαιτήσεις της κάθε μίας από αυτές.

Αρχικά γίνεται μια εισαγωγή στην έννοια του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας που αποτελείται από 3 μέρη, το σύστημα παραγωγής, το σύστημα μεταφοράς και το δίκτυο διανομής. Ως προς το σύστημα παραγωγής παρουσιάζονται συνοπτικά οι κατηγορίες των σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και οι ιδιαιτερότητες αυτών. Ως προς το σύστημα μεταφοράς και διανομής, παρουσιάζονται οι κατηγορίες υποσταθμών μετασχηματισμού τάσης ενώ η ανάλυση εστιάζει στις γραμμές μεταφοράς και διανομής. Η συνέχεια επικεντρώνεται στην ανάλυση των κατασκευαστικών χαρακτηριστικών των υπογείων καλωδίων. Έπειτα παρουσιάζονται και αναλύονται τα είδη σφαλμάτων σε υπόγεια καλώδια και παρατίθενται οι κυριότερες αιτίες αστοχιών και σφαλμάτων των καλωδίων. Ακολουθεί η συγκριτική μελέτη των μεθόδων εντοπισμού σφαλμάτων σε υπόγεια καλώδια. Ακόμη, με αναφορά τη μέθοδο ανίχνευσης σφαλμάτων με χρήση βρόχου Murray(Murray Loop), καταδεικνύονται τα απαιτούμενα βήματα για την μελέτη και κατασκευή μιας πειραματικής διάταξης εντοπισμού της θέσης σφάλματος, η οποία βασίζεται στη λογική της γέφυρας μετρήσεων. Τέλος, για λόγους πληρότητας της εργασίας παρουσιάζεται η αρχή λειτουργίας μιας πραγματικής συσκευής εντοπισμού σφαλμάτων υπογείων καλωδίων καθώς και η μεθοδολογία/προϋποθέσεις εφαρμογής της μεθόδου ανίχνευσης σφαλμάτων με χρήση βρόχου Murray(Murray Loop) στο πεδίο.

ABSTRACT

The maintenance and repair of the underground electricity transmission and distribution network is essential for the smooth and proper operation of the network and also to ensure the energy needs of consumers. Certain natural or human factors disturb the operation of underground cables, making them vulnerable to various faults. Cable fault detection is the most important work carried out on electricity transmission and distribution lines. The speed and accuracy of this work is particularly important because cable faults cause power outages, which are costly for both the consumer and the provider. Thus, in this paper a comparative study of the main fault detection methods is carried out, analyzing the characteristics and technical requirements of each of them.

Firstly, an introduction to the concept of the power system is given which consists of 3 parts, the generation system, the transmission system and the distribution network. As for the generation system, the categories of power plants and their characteristics are briefly presented. As for the transmission and distribution system, the categories of voltage transformation substations are presented while the analysis focuses on transmission and distribution lines. The following section focuses on the analysis of the construction characteristics of underground cables. Then the types of faults in underground cables are presented and analysed and the main causes of cable failures, faults are listed. This is followed by a comparative study of fault detection methods in underground cables. Finally, with reference to the fault location method of Murray Loop, the steps required to design and construct an experimental fault location device based on the measurement bridge logic are demonstrated. Finally, for the sake of completeness of the paper, the operating principle of a real underground cable fault detection device is presented as well as the methodology/requirements for applying the Murray Loop fault detection method in the field.

ΣΥΝΤΟΜΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ

Ορισμός προβλήματος

Προκειμένου να εξασφαλιστεί η απρόσκοπτη και ορθή λειτουργία του υπογείου δικτύου μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας είναι αναγκαία η τακτική συντήρηση και επισκευή του. Ορισμένοι φυσικοί ή ανθρώπινοι παράγοντες διαταράσσουν τη λειτουργία των υπόγειων καλωδίων, και τα καθιστούν ευάλωτα σε διάφορα σφάλματα. Σε τηλεπικοινωνιακά καλώδια, σε καλώδια μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, μονοπολικά ή περισσοτέρων της μιας φάσης είναι δυνατό να συμβούν σφάλματα, η θέση των οποίων είναι μερικές φορές αδύνατο να εντοπισθεί με απλή επιθεώρηση. Ο εντοπισμός των σφαλμάτων των καλωδίων αποτελεί τη σημαντικότερη εργασία που πραγματοποιείται επι των γραμμών μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Η ταχύτητα και η ακρίβεια αυτής της εργασίας είναι ιδιαίτερα σημαντική γιατί τα σφάλματα των καλωδίων προκαλούν διακοπές τροφοδότησης, οι οποίες κοστίζουν τόσο στο καταναλωτή όσο και στο πάροχο.

Ωστόσο, είναι σπάνια μεν, αλλά υπαρκτή η πιθανότητα ένα υπόγειο καλώδιο κυρίως χαμηλής τάσης να εμφανίσει ελαφρά, αρχικά, φθορά ή αδυναμία της μόνωσής του σε κάποιο σημείο, πιθανώς από συγκαλυμμένο ελάττωμα του υλικού και να προκληθεί εξ αυτού τήξη της προτεταγμένης ασφάλειας προστασίας της γραμμής και συνακόλουθα διακοπή ηλεκτροδότησης. Στην περίπτωση αυτή(διαλείπον σφάλμα μεγάλης αντιστάσεως) περιορίζονται οι επιλογές των μεθόδων που δύναται να εντοπίσουν το σφάλμα ,ώστε συνεπακόλουθα να γνωρίζουμε σε ποιο σημείο θα πρέπει να κάνουμε εκσκαφή, αποκάλυψη, επισκευή του καλωδίου και εν τέλει αποκατάσταση της βλάβης. Βεβαίως ύστερα από περιορισμένο αριθμό τήξεων και εξέλιξη της φθοράς μόνωσης των καλωδίων, είναι εφικτός ο εντοπισμός της θέσης του σφάλματος και συνεπώς η αποκατάσταση της βλάβης. Παράλληλα, η εκδήλωση ενός παροδικού σφάλματος σε υπόγειο καλώδιο, ίσως προκαλέσει λανθασμένη εντύπωση μόνιμης βλάβης οπότε να μην είναι εφικτός ο εντοπισμός της θέσης σφάλματος με συσκευές εντοπισμού σφαλμάτων. Τέλος, οι περιβαλλοντικές/καιρικές συνθήκες συμβάλουν καίρια στην επιχειρησιακή δυνατότητα των συσκευών εντοπισμού σφαλμάτων. Από τα παραπάνω καθίσταται σαφές ότι η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου εντοπισμού σφαλμάτων είναι καίριας σημασίας για έγκαιρη αποκατάσταση μιας βλάβης στο δίκτυο.

Συνεισφορά και στόχοι της Διπλωματικής

Σε αυτή τη διπλωματική εργασία πραγματοποιείται μια συγκριτική μελέτη των κυριότερων μεθόδων εντοπισμού σφαλμάτων, αναλύοντας τα χαρακτηριστικά και τις

τεχνικές απαιτήσεις της κάθε μίας από αυτές. Παράλληλα παρουσιάζεται αναλυτικά η διαδικασία εξαγωγής προδιαγραφών, ανάπτυξης(ανάλυση, σχεδίαση, κατασκευή συστήματος), επαλήθευσης και εξέλιξης που ως σκοπό έχει την υλοποίηση μιας διάταξης εντοπισμού σφαλμάτων χαμηλής αντίστασης με φάσμα εφαρμογής τόσο σε καλώδια μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας όσο σε τηλεπικοινωνιακά καλώδια.

Ως προς τη πρώτη συνεισφορά, δηλαδή τη συγκριτική επισκόπηση των μεθόδων εύρεσης σφαλμάτων, έχουν αναπτυχθεί αρκετές μέθοδοι ανίχνευσης σφαλμάτων σε καλώδια από σχετικές μελέτες, κατασκευάστριες εταιρίες ανάλογου εξοπλισμού, workshops, και ειδικούς του χώρου (19), είναι δυνατόν ωστόσο να κατηγοριοποιηθούν σε δυο γενικές κατηγορίες:

1. Τεχνικές ακροδεκτών(Terminal Techniques) Οι τεχνικές ακροδεκτών εφαρμόζονται στο ένα ή και τα δύο άκρα του καλωδίου, όπου και λαμβάνουν μετρήσεις. Γενικά, είναι περισσότερο χρήσιμες στο προεντοπισμό σφαλμάτων καθώς δεν υποδεικνύουν με ακρίβεια τη θέση σφάλματος (13) (19)
2. Τεχνικές ανίχνευσης(Tracer Techniques) Η ανίχνευση σφαλμάτων με χρήση τεχνικών ακροδεκτών απαιτεί κίνηση κατά μήκος της διαδρομής για τον εντοπισμό ενός ηχητικού ή ηλεκτρομαγνητικού σήματος. Αυτές οι μέθοδοι είναι πιο χρήσιμες για τον ακριβή εντοπισμό της θέσης σφάλματος μετά τον κατά προσέγγιση προσδιορισμό της θέσης του σφάλματος. Γενικά, για την εφαρμογή μεθόδων ανίχνευσης απαιτούνται δύο άτομα. Ένας για το χειρισμό της πηγής παραγωγής σήματος και ένας άλλος για να κινηθεί κατά μήκος της διαδρομής του καλωδίου. Για να ανιχνευθεί το σήμα ιχνηλάτισης κατά μήκος της διαδρομής του καλωδίου, ένας τεχνικός πεδίου πρέπει να ακολουθήσει το καλώδιο κατά μήκος της διαδρομής του ή να εισέλθει στις φρεάτια ώστε να αποκτήσει πρόσβαση στο καλώδιο (19).

Για κάθε μια από τις παραπάνω κατηγορίες διακρίνουμε τις διάφορες μεθόδους που χρησιμοποιούνται για τον εντοπισμό σφαλμάτων, οι οποίες θα αναλυθούν στο 3^ο Κεφάλαιο. Συγκεκριμένα για τις **τεχνικές ακροδεκτών** διακρίνουμε τις μεθόδους Γέφυρας, Radar(αντήχησης παλμών), Μέθοδος Συντονισμού, ενώ για τις **τεχνικές ανίχνευσης** τη Μέθοδο Κρουστικών Τάσεων, τη Μέθοδο Δυναμικού Γης, τη Μέθοδο Radar με ανάκλαση τόξου, τη Μέθοδο ανίχνευσης ρεύματος και τη Μέθοδο Ακουστικής Συχνότητας.

Ως προς τη δεύτερη συνεισφορά, δηλαδή την υλοποίηση διάταξης εντοπισμού σφαλμάτων χαμηλής αντίστασης, επιχειρείται η αναλυτική παρουσίαση της μεθοδολογίας που ακολουθήθηκε προκειμένου η κατασκευή να είναι λειτουργική. Ως πρώτη κίνηση, ορίστηκαν οι επιθυμητές λειτουργικές δυνατότητες και οι περιορισμοί που διέπουν τη λειτουργία της συσκευής. Έπειτα, ελήφθησαν υπόψιν οι απαιτήσεις αυτές με σκοπό το σχεδιασμό του

συστήματος, με παράλληλο προσδιορισμό των σχέσεων μεταξύ των τμημάτων του συστήματος. Ακολούθησαν οι πρώιμες δοκιμές για την εξασφάλιση ότι ικανοποιούνται οι λειτουργικές απαιτήσεις της συσκευής. Τέλος, πραγματοποιήθηκε επαύξηση των λειτουργικών χαρακτηριστικών της συσκευής ή τροποποίηση υπαρχουσών, προκειμένου να ικανοποιούνται οι πραγματικές λειτουργικές απαιτήσεις της συσκευής, δηλαδή η επικύρωση της λειτουργίας της συσκευής.

Στόχος και πρόκληση για την υλοποίηση της διάταξης ήταν να υπερκεραστούν τα προβλήματα που προέκυψαν κατά το στάδιο επικύρωσης/πειραματικών δοκιμών. Συγκεκριμένα, η επιλογή κλίμακας του οργάνου ισορροπίας ήταν κρίσιμη για τη λειτουργικότητα της διάταξης καθώς από την ένδειξη του οργάνου εξαρτιόνταν και η ακρίβεια ή μη του προσδιορισμού της θέσης σφάλματος. Ακόμη, ζωτικής σημασίας για τη ορθότητα των ενδείξεων του οργάνου και την προστασία των μπαταριών της διάταξης ήταν η επιλογή κατάλληλης αντίστασης προστασίας, η οποία επιλέχθηκε έπειτα από μια σειρά δοκιμών που περιγράφονται στη παράγραφο 4.5.2, όπου και ελήφθησαν υπόψιν-εκτός των μεγεθών της αντίστασης-τα μεγέθη της μέγιστης μεταφοράς ισχύος και της μέγιστης ισχύς διασποράς. Τέλος, η επιλογή κατάλληλης τροφοδοτικής διάταξης ήταν ακόμη ένα πρόβλημα για τη λειτουργικότητα της διάταξης καθότι η χρήση συστοιχίας μπαταριών είχε ως αποτέλεσμα διαφορετικές ενδείξεις του οργάνου ισορροπίας σε περίπτωση επανάληψης της δοκιμής εύρεσης σφάλματος, παρόλο που η λήψη στο κλάδο αντιστάθμισης παρέμενε ίδια και είχε επιλεγεί η κατάλληλη αντίσταση προστασίας. Οι δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν για την επιλογή της κατάλληλης τροφοδοτικής διάταξης περιγράφονται στη παράγραφο 4.5.3.

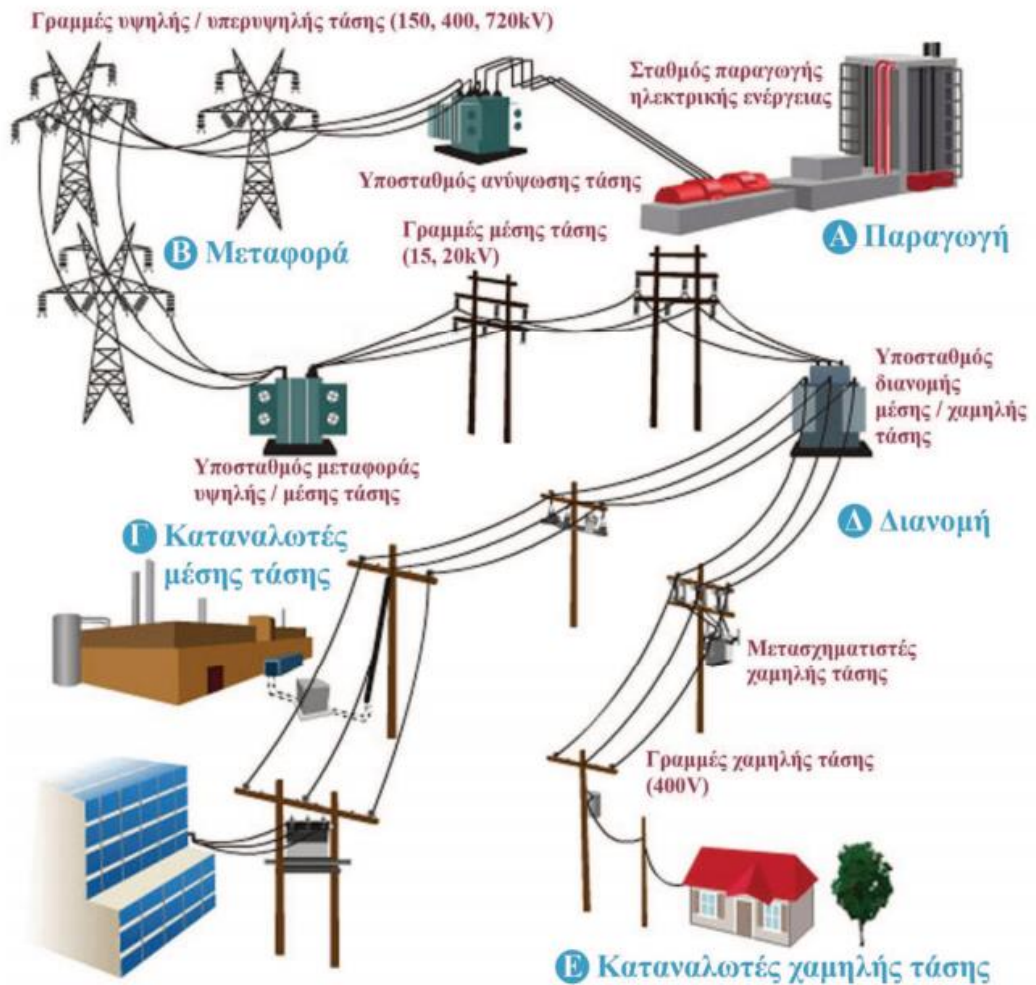
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ - ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ

1.1 Εισαγωγή

Ένα Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας είναι ένα δίκτυο από ηλεκτρικά στοιχεία που έχει αναπτυχθεί για να παράγει, μεταφέρει και χρησιμοποιεί ηλεκτρικό ρεύμα. Ένα παράδειγμα ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας είναι το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας, το οποίο προμηθεύει με ενέργεια μια απομακρυσμένη περιοχή. Αντικειμενικός στόχος ενός ΣΗΕ είναι η άμεση παροχή ηλεκτρικής ενέργειας σε οποιοδήποτε σημείο υπάρχει ζήτηση, με το μικρότερο κόστος, με τη εξασφάλιση σταθερής συχνότητας, σταθερής τάσης και μεγαλύτερη δυνατή αξιοπιστία. Η άμεση διαθεσιμότητα της ηλεκτρικής ενέργειας εξαρτάται από τη δομή του συστήματος, η οποία καθορίζεται από το μέγεθος του. Ένα ΣΗΕ αποτελείται από τα παρακάτω συστήματα:

- **Σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας**, οι οποίοι παράγουν ηλεκτρική ενέργεια χάρη στις γεννήτριες που διαθέτουν
- **Υποσταθμούς μετασχηματισμού τάσης**, οι οποίοι ανυψώνουν τη τάση για μεταφορά και υποβιβάζουν τη τάση για διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας
- **Γραμμές μεταφοράς Υψηλής τάσης**, που μεταφέρουν ενέργεια από τους απομακρυσμένους σταθμούς παραγωγής στα κέντρα ζήτησης(καταναλωτές)
- **Γραμμές διανομής χαμηλής και μέσης τάσης**, που συνδέουν ξεχωριστούς πελάτες
- **Καταναλωτές**, οι οποίοι ανάλογα με τις ανάγκες τους κατατάσσονται σε καταναλωτές μέσης και χαμηλής τάσης. (1) (2)



Εικόνα 1.1 Δομή ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. (1)

1.2 Σταθμοί Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, αποτελεί το πρώτο τμήμα ενός δικτύου Σ.Η.Ε. και αποσκοπεί στη εκμετάλλευση διαφόρων πρωτογενών πηγών ενέργειας. Οι εκμεταλλεύσιμοι ενεργειακοί πόροι ποικίλουν (π.χ. λιγνίτης, φυσικό αέριο, ηλιακή ή αιολική ενέργεια κτλ.) και κατηγοριοποιούνται στις συμβατικές πηγές ενέργειας που βασίζονται σε ορυκτά στερεά, υγρά ή αέρια καύσιμα και στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (Α.Π.Ε.) που αξιοποιούν ανεξάντλητες πηγές. (3) (4)

Η μετατροπή των πρωτογενών ενεργειακών πόρων σε δευτερογενή μορφή ενέργειας υλοποιείται στους σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, οι

οποίοι, ανάλογα με την πηγή πρωτογενούς ενέργειας που χρησιμοποιούν διαχωρίζονται σε:

- **Θερμοηλεκτρικοί σταθμοί**, στους οποίους η χημική ενέργεια που είναι αποθηκευμένη στο ορυκτό καύσιμο (λιγνίτης, λιθάνθρακας, φυσικό αέριο, πετρέλαιο) μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια. Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας επιτυγχάνεται μέσω κάποιου θερμοδυναμικού κύκλου, κατά την καύση του καυσίμου, όπου αξιοποιείται για τη παραγωγή μηχανικού έργου και τελικά η μηχανική ενέργεια μετατρέπεται σε ηλεκτρική μέσω μίας γεννήτριας αυτεπαγωγής.
- **Υδροηλεκτρικοί σταθμοί**, όπου η δυναμική ενέργεια των υδάτων μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια. Η υδροδυναμική ενέργεια λόγω της υψομετρικής διαφοράς από το σταθμό, αρχικά μετατρέπεται σε κινητική (περιστροφική) ενέργεια μέσω υδροστροβίλου και έπειτα σε ηλεκτρική με χρήση ηλεκτρογεννήτριας.
- **Πυρηνικοί σταθμοί**, στους οποίους ο ελεγχόμενος πυρηνικός αντιδραστήρας λειτουργεί σαν πηγή θερμικής ενέργειας. Η θερμική ενέργεια που απελευθερώνεται κατά τη διάρκεια της σχάσης, χρησιμοποιείται για την κίνηση μιας ηλεκτρικής γεννήτριας ατμού. Τα σχάσιμα στοιχεία που απαιτούνται για την πυρηνική ενέργεια είναι το ουράνιο και το πλουτόνιο.
- **Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (Α.Π.Ε.)**, όπως φωτοβολταϊκοί σταθμοί, αιολικά πάρκα, σταθμοί γεωθερμίας, σταθμοί βιομάζας, ηλιοθερμικοί σταθμοί. Η χρήση εξαιρετικά περιορισμένων πηγών ενέργειας επιφέρει σημαντικές επιπτώσεις στο περιβάλλον και την ανθρώπινη ζωή (εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα κτλ.) καθώς επίσης δεν πρέπει να αγνοούνται οι περιπτώσεις άμεσης απειλής από την χρήση πυρηνικής ενέργειας. Λαμβάνοντας υπόψιν τις παραπάνω ανησυχίες οι ειδικοί παρέπεμψαν στην παραγωγή ενέργειας μέσω ανανεώσιμων πηγών, οι οποίες αποσκοπούν σε σταδιακή απομάκρυνση του κινδύνου εξάντλησης

των ενεργειακών αποθεμάτων και την μείωση της περιβαλλοντικής ρύπανσης. (1) (4)

Υπάρχουν δύο πρότυπα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Η συγκεντρωμένη παραγωγή και η διεσπαρμένη παραγωγή.

Συγκεντρωμένη παραγωγή: η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από διαφόρους σταθμούς παραγωγής διαμοιράζεται σε συστήματα μεταφοράς και στην συνέχεια στα τοπικά δίκτυα διανομής και τους καταναλωτές.

Διεσπαρμένη παραγωγή: η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας πραγματοποιείται από ανεξάρτητες μονάδες παραγωγής εγκατεστημένες κοντά στα σημεία κατανάλωσης. Αυτά τα συστήματα ηλεκτρικής ισχύος δεν ελέγχονται κεντρικά, συνδέονται συνήθως στο δίκτυο διανομής, στα 15-20KV και τροφοδοτούν με την παραγόμενη ισχύ κυρίως τοπικά φορτία, ενώ τυχόν περίσσειμα ισχύος επιστρέφει στο δίκτυο διανομής. Τα συστήματα παραγωγής περιλαμβάνουν micro-στροβίλους, κυψέλες καυσίμου, φωτοβολταϊκά συστήματα και μικρούς υδροστροβίλους. Η διανεμημένη παραγωγή αποβλέπει στην κάλυψη κυμαινόμενων ή βασικών φορτίων (π.χ. κάποιον μικρό οικισμό), την εκμετάλλευση τοπικών ή ενεργειακών πόρων, την εξομάλυνση αιχμών ζωής, τη συμπαραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας. (4) (5)

1.3 Υποσταθμοί Μετασχηματισμού Τάσης

Υποσταθμός (Υ/Σ) γενικά ονομάζεται το σύνολο του εξοπλισμού και η ηλεκτρική εγκατάσταση στη οποία γίνεται μετασχηματισμός τάσης, είτε για μεταφορά είτε για διανομή ηλεκτρικής ενέργειας. Ανάλογα με την τάση τροφοδοσίας και την τάση που μετασχηματίζει χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: τους υποσταθμούς μεταφοράς και τους υποσταθμούς ανύψωσης.

- Οι υποσταθμοί μεταφοράς βρίσκονται στο δίκτυο μεταφοράς ενός Σ.Η.Ε. και ανάλογα με την εφαρμογή τους προκύπτουν τρεις κατηγορίες.

1. Υποσταθμοί ζεύξεως, συνδέονται γραμμές μεταφοράς (υψηλής τάσης) χωρίς να είναι απαραίτητος κάποιος μετασχηματισμός τάσης.
2. Υποσταθμοί ανύψωσης, συνδεδεμένοι με τους σταθμούς παραγωγής με σκοπό την ανύψωση της τάσης παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος (15KV και 20KV) στην τιμή τα τάσεως αναφοράς (150KV ή 400KV). Οι υποσταθμοί ανύψωσης αποσκοπούν στην μείωση της πτώσης τάσεως του ρέματος και των απωλειών ισχύος, αφού εξαρτώνται άμεσα από την απόσταση μεταφοράς, μέχρι να φτάσει στον καταναλωτή.
3. Υποσταθμοί διανομής, είναι οι ενδιάμεσοι κόμβοι μεταξύ δικτύων μεταφοράς και δικτύων διανομής. Μετασχηματίζεται η τάση μεταφοράς σε τάση διανομής (15KV και 20KV).
 - Οι υποσταθμοί διανομής υποβιβάζουν την μέση τάση του δικτύου διανομής (15KV και 20KV) σε χαμηλή τάση κατανάλωσης 0.4KV. Οι υποσταθμοί διανομής ανάλογα με τον τρόπο κατασκευής τους διακρίνονται σε : εναέριους σταθμούς διανομής, επίγειους σταθμούς (κλειστού ή υπαίθριου τύπου) και υπόγειους σταθμούς (1) (2) (3) (4) (5).

1.4 Γραμμές Μεταφοράς

Οι γραμμές μεταφοράς (powerlines) αποτελούν το υλικό μέσο, το οποίο χρησιμοποιείται για τη μεταφορά και διανομή μεγάλων ποσοτήτων ηλεκτρικής ισχύος από το σταθμό παραγωγής στους καταναλωτές (5) (6). Το συνολικό μήκος των αγωγών μεταφοράς ενέργειας σε ένα ΣΗΕ μπορεί να φτάσει σε μερικές εκατοντάδες χιλιόμετρα (7). Σε ένα σύστημα μεταφοράς μπορεί να χρησιμοποιηθούν διάφορα επίπεδα τάσεως μεταφοράς, τα οποία εξαρτώνται από την απόσταση και το μέγεθος της ισχύος που πρέπει να μεταφερθεί. Πρέπει να σημειωθεί ότι επικρατέστερος τρόπος μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας είναι με χρήση εναλλασσόμενου ρεύματος, ενώ η μεταφορά με συνεχές ρεύμα είναι περιορισμένη (5) (8).

Κριτήριο για την επιλογή μίας τάσης μεταφοράς είναι η ελαχιστοποίηση του κόστους. Η διατήρηση της υψηλής τάσης κατά τη μεταφορά, ελαχιστοποιεί τις απώλειες της γραμμής και προσφέρει οικονομικότερη λειτουργία. Μέχρι ενός ορισμένου σημείου, η αύξηση της τάσης έχει ως αποτέλεσμα μικρότερες απώλειες λειτουργία για δεδομένο μέγεθος αγωγού ενώ σε άλλες έχει ως αποτέλεσμα τη χρήση μικρότερου αγωγού για δεδομένες απώλειες. Ως γνωστόν η ισχύς($P = U^2/R$) είναι ανάλογη του τετράγωνου της τάσης, και αφού η ωμική αντίσταση(R) της γραμμής είναι σταθερή, ο ρόλος της υψηλής τάσης στην επίτευξη της μεγαλύτερης δυνατής ισχύς μεταφοράς είναι προφανής (1) (8) (5).

Ωστόσο, η ελαχιστοποίηση του κόστους των χρησιμοποιούμενων αγωγών(με βάση τη παραπάνω ανάλυση), αντισταθμίζεται σημαντικά και σε ορισμένες περιπτώσεις δεν αξιοποιείται λόγω :

- Των μεγάλων πεδριακών εντάσεων των αγωγών που προκαλούν ιονισμό του αέρα, ο οποίος προκαλεί αυξημένες διηλεκτρικές απώλειες στο περιβάλλον.
- Του υψηλού επενδυτικού κόστους για αγορά εξοπλισμού(μονωτήρων, διακοπών κλπ), το οποίο κορυφώνεται για εξοπλισμό υψηλών τάσεων, με αποκορύφωμα μία συγκεκριμένη τιμή, πάνω από την οποία η μεταφορά κρίνεται ασύμφορη (5)

Τα ηλεκτρικά δίκτυα ανάλογα με το μέσο που χρησιμοποιούν διακρίνονται στις εξής κατηγορίες, οι οποίες αποτελούν και ένα τρόπο διαχωρισμού των γραμμών μεταφοράς:

- **Εναέριες γραμμές**, δηλαδή διέλευση των αγωγών επάνω από το έδαφος σε ασφαλές ύψος.
- **Υπόγειες γραμμές**, δηλαδή διέλευση των αγωγών εντός εδάφους.
- **Υποβρύχιες γραμμές**, δηλαδή διέλευση των αγωγών κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας (5) (6)

1.4.1 Εναέριες γραμμές

Τα εναέρια δίκτυα χρησιμοποιούνται ως δίκτυα μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Είναι τα πλέον διαδεδομένα και παρουσιάζουν ευκολία στη κατασκευή, στην επιθεώρηση και στη συντήρησή τους. Διακρίνονται σε δύο υποκατηγορίες:

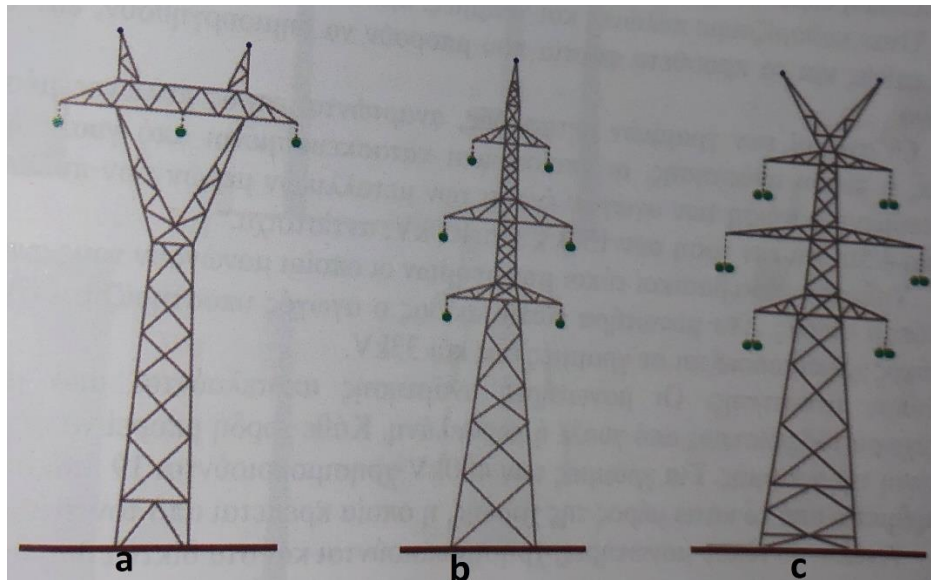
- **Εναέρια δίκτυα μεταφοράς ή γραμμές μεταφοράς.**

Ζητούμενο των γραμμών μεταφοράς είναι η διοχέτευση μεγάλης ηλεκτρικής ισχύος από το σημείο παραγωγής της στους τόπους κατανάλωσης (5). Στόχος είναι η παροχή σταθερής τάσης καθώς και η διατήρηση της ισορροπίας μεταξύ των τριφασικών τάσεων (8). Αυτό σημαίνει ότι η τάση στην τάση της γραμμής δεν πρέπει να διαφέρει σημαντικά από τη τάση στην αναχώρησή της, η συχνότητα λειτουργίας να παραμένει σταθερή και οι απώλειες κατά τη μεταφορά να είναι όσο το δυνατόν μικρότερες (5). Επίσης, για την επίτευξη μεγαλύτερης δυνατής ασφάλειας και την αποφυγή διακοπών, οι γραμμές χωρίζονται σε δυο παράλληλα κυκλώματα, ώστε η μεταφερόμενη ισχύς να μη περνάει μόνο από μια γραμμή, οπότε αν βρεθεί εκτός λειτουργίας να διακοπεί η παροχή ηλεκτρικού ρεύματος. Απαραίτητη προϋπόθεση για την εγκατάσταση γραμμών μεταφοράς είναι η ύπαρξη κατάλληλης ζώνης εδάφους για την όδυσή της, εκτεινόμενη σε όλο το μήκος της διαδρομής της. Τα συστατικά στοιχεία των γραμμών μεταφοράς είναι:

- a) **Πυλώνες ή στύλοι**, στους οποίους παγιώνονται οι αγωγοί των εναέριων γραμμών μεταφοράς ή διανομής. Για υψηλές τάσεις χρησιμοποιούνται ξύλινοι στύλοι με εγκάρσιους βραχίονες κοντά στη κορυφή προς στήριξη των αγωγών. Για υπερύψηλές τάσεις εφαρμόζονται λύσεις ξύλινων κατασκευών, χαλύβδινων στύλων ή χαλύβδινων πυλώνων.
- b) **Μονωτήρες**, μέσω των οποίων αναρτώνται στους πυλώνες οι αγωγοί γραμμών, ενώ ταυτόχρονα προσφέρουν την απαιτούμενη μόνωση των

αγωγών έναντι των μεταλλικών μερών των πυλώνων. Υλικό κατασκευής είναι πορσελάνη ή γυαλί.

- c) **Αγωγοί**, κυρίως από χαλκό και αλουμίνιο. Στις γραμμές υψηλής τάσης απλού κυκλώματος είναι συνήθως τρεις και στις γραμμές διπλού κυκλώματος είναι έξι. Στη περίπτωση του απλού κυκλώματος, οι δύο παράλληλες γραμμές στηρίζονται τις περισσότερες φορές στους ίδιους πυλώνες, με αποτέλεσμα να προκύπτουν δυο συστήματα μεταφοράς που ονομάζονται διπλές γραμμές μεταφοράς. Αποφεύγεται η χρήση ουδέτερου αγωγού για λόγους οικονομίας (1) (6) (7).



Εικόνα 1.2 Τυποποιημένες μορφές Πυλώνων δικτύων μεταφοράς Υ.Τ και Υ.Υ.Τ α)Απλού κυκλώματος(150KV) b) 150KVc)Διπλού Κυκλώματος, δίδυμης τριφασικής γραμμής(400KV) (5)

- **Εναέρια δίκτυα διανομής**

Στους υποσταθμούς μεταφοράς τερματίζουν οι γραμμές μεταφοράς και αναχωρούν οι γραμμές διανομής. Οι γραμμές διανομής χαμηλής τάσης, όσο και πολλές γραμμές διανομής μέσης τάσης οδεύουν, συνήθως, κατά μήκος των οδών και των λεωφόρων. Ορισμένοι καταναλωτές συνδέονται κατευθείαν στη μέση τάση(M.T) , οπότε στους υποσταθμούς διανομής δεν πραγματοποιείται μετασχηματισμός της τάσης, αλλά αναχωρούν εκ νέου

γραμμές μέσης τάσης(M.T) προς τους αντίστοιχους καταναλωτές(εικόνα

1.1). Το δίκτυο διανομής απαρτίζεται από:

- a) το **δίκτυο διανομής μέσης τάσης(M.T)** (20kV) που μεταφέρει την ηλεκτρική ενέργεια από τους υποσταθμούς μεταφοράς στους υποσταθμούς διανομής.
- b) το **δίκτυο διανομής χαμηλής τάσης(X.T)** (230/4000V) που μεταφέρει την ηλεκτρική ενέργεια από τους υποσταθμούς διανομής στους καταναλωτές. (1) (4) (6)

Τα συστατικά στοιχεία των γραμμών διανομής είναι:

- a) **Στύλοι**, στους οποίους στηρίζονται οι αγωγοί των εναέριων γραμμών. Στις γραμμές διανομής χαμηλής τάσης, οι αγωγοί στηρίζονται σε ξύλινους στύλους με εγκάρσιους βραχίονες.
- b) **Μονωτήρες**, μέσω των οποίων αναρτώνται στους πυλώνες οι αγωγοί γραμμών, ενώ ταυτόχρονα προσφέρουν την απαιτούμενη μόνωση των αγωγών έναντι των μεταλλικών μερών των πυλώνων. Υλικό κατασκευής είναι πορσελάνη ή γυαλί
- c) **Αγωγοί**, κυρίως από χαλκό και αλουμίνιο. Στη διανομή εκτός των τριών αγωγών, κάθε ένας αντιπροσωπεύει μία φάση, χρησιμοποιείται και ουδέτερος, επειδή οι καταναλωτές χαμηλής τάσης τροφοδοτούνται είτε με φασική(230V) είτε με πολική(380V) τάση. Ο ουδέτερος ξεκινάει από τους μετασχηματιστές διανομής και αποτελεί κοινό ουδέτερο για όλους τους καταναλωτές που τροφοδοτούνται από αυτόν τον μετασχηματιστή. (5) (6)

1.4.2 Υπόγειες γραμμές

Η χρήση υπόγειων δικτύων προτιμάται σε πόλεις για περιβαλλοντικούς, οικονομικούς, αισθητικούς, χωροταξικούς λόγους. Επίσης, εντός πόλεων, εγείρονται ζητήματα ασφαλείας και χάραξης ζωνών διελεύσεως(για εναέριες γραμμές), οπότε η μεταφορά με εναέριες γραμμές καθίσταται ανεπιθύμητη ή και ανέφικτη. Για τη κατασκευή τους απαιτούνται ειδικά ακροκιβώτια και καλώδια οπότε το κόστος κατασκευής τους είναι

πολλαπλάσιο έναντι των εναερίων. Η καλή μόνωση σε όλο το μήκος της γραμμής αυξάνει και εκείνη το κόστος εγκατάστασης. Κατά τις διαβάσεις των υπόγειων γραμμών κάτω από τα καταστρώματα των οδών, τα καλώδια τοποθετούνται μέσα σε σωλήνες από τσιμέντο, ή σίδηρο (τα τριπολικά) με διάμετρο λίγο μεγαλύτερη από εκείνη των καλωδίων. Με αυτόν τον τρόπο αποφεύγεται η εκσκαφή του δρόμου σε περίπτωση βλάβης ή άλλης εργασίας επί των καλωδίων, ενώ ταυτόχρονα μέσω των σωλήνων παρέχεται ενισχυμένη μηχανική προστασία σε αυτά.

Το κόστος εγκατάστασης των υπογείων καλωδιακών δικτύων, σε σχέση με αυτό των εναερίων, είναι πολύ υψηλότερο εξαιτίας των απαιτήσεων για καλή μόνωση κατά μήκος του. Το κόστος αυτό αμβλύνεται, μειώνοντας τη τάση μεταφοράς. Ταυτόχρονα, αναπτύσσονται υψηλές θερμοκρασίες στο μονωτικό υλικό των υπογείων καλωδίων, αν δεν περιοριστεί η φόρτιση τους. Αυτά έχουν ως αποτέλεσμα να μπαίνουν όρια στο μέγεθος των αγωγών και στο ρεύμα που μπορούν να μεταφέρουν. Τα υπόγεια καλώδια διακρίνονται σε καλώδια Χ.Τ, Μ.Τ, Υ.Τ και Υ.Υ.Τ, με τη χρήση καλωδίων για Χ.Τ και Μ.Τ να επικρατεί. Οι αγωγοί των υπογείων καλωδίων είναι πάντα μονωμένοι. Συνήθως, χρησιμοποιείται ως μονωτικό υλικό εμποτισμένο μονωτικό λάδι ή ύφασμα εμποτισμένο με βερνίκι ή κάποια άλλη ουσία. Στο επόμενο κεφάλαιο θα αναλυθούν τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά και η δομή των υπογείων καλωδίων (5) (9).

1.4.3 Υποβρύχιες γραμμές

Τα υποβρύχια δίκτυα χρησιμοποιούνται για την διασύνδεση των νησιών με το εθνικό ηπειρωτικό δίκτυο, τη διάσχιση λιμνών, ποταμών και λιμανιών. Στα υποβρύχια δίκτυα η πόντιση των καλωδίων γίνεται με ειδικά πλοία βύθισης καλωδίων. Λόγω των ιδιαίτερων περιβαλλοντικών συνθηκών που επικρατούν κάτω από το νερό τα υποβρύχια καλώδια φέρουν ειδική μόνωση η οποία τα προστατεύει από την υψηλή πίεση του νερού ή κάποια πιθανή

καταστροφή από άγκυρες ή μηχανές ψαρέματος. Μετά την πόντιση του καλωδίου , η πρόσβαση και προσέγγιση στο υποβρύχιο δίκτυο για πιθανή αποκατάσταση βλάβης αποτελεί μία δύσκολη και δαπανηρή διαδικασία, για το λόγο αυτό είναι απαραίτητη η ορθή μελέτη του δικτύου καθώς και η χρήση αγωγών με ειδικούς προστατευτικούς μανδύες (5) (10).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΚΑΛΩΔΙΩΝ–ΣΦΑΛΜΑΤΑ ΣΕ ΥΠΟΓΕΙΑ ΚΑΛΩΔΙΑ-ΑΙΤΙΕΣ ΣΦΑΛΜΑΤΩΝ ΚΑΛΩΔΙΩΝ

2.1 Δομή Υπόγειων Καλωδίων Ισχύος

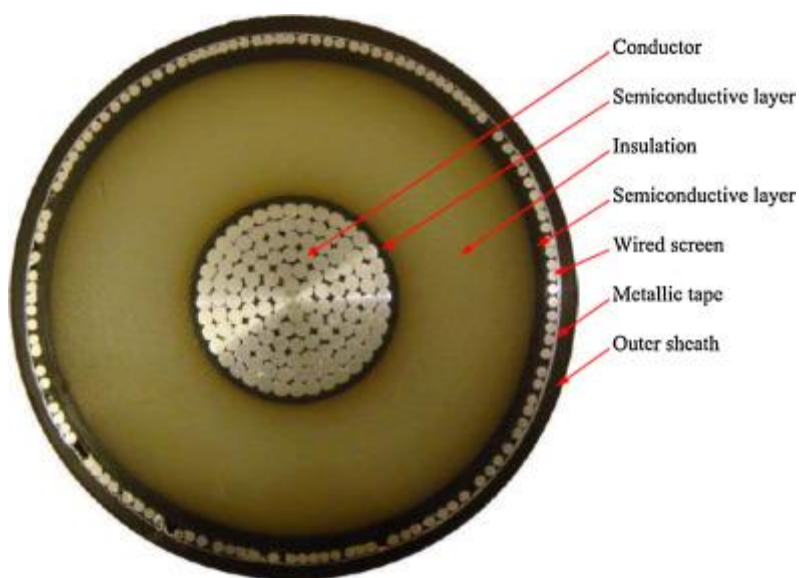
Ένα καλώδιο υψηλής είναι ο φορέας μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας σε υψηλή τάση. Τα υπόγεια καλώδια διακρίνονται σε καλώδια υψηλής(Υ.Τ), μέσης(M.T) και χαμηλής τάσης(X.T), με τα καλώδια ΜΤ και ΥΤ να παρουσιάζουν πού μεγάλες ομοιότητες. Η δομή των καλωδίων ισχύος είναι ομοαξονική, δηλαδή διαθέτουν έναν κεντρικό αγωγό(μονοπολικό) ή περισσότερους αγωγούς(τριπολικά) σε τάση γραμμής, μία εξωτερική μόνωση επαπτόμενη στον αγωγό και έναν εξωτερικό γειωμένο αγωγό στο δυναμικό της γης. Η κατασκευαστική-δομική διαφορά των καλωδίων Υ.Τ σε σχέση με αυτά της Χ.Τ συνίσταται στη χρήση εσωτερικών στρωμάτων στο περίβλημα της μόνωσης για τον έλεγχο του ηλεκτρικού πεδίου γύρω από τον αγωγό, όπως ο εξωτερικός γειωμένος αγωγός. Δεδομένου ότι κάθε καλώδιο εναλλασσόμενης τάσης αντιπροσωπεύει μια φάση σε ένα σύστημα τριών φάσεων, ο εξωτερικός γειωμένος αγωγός(μεταλλικός μανδύας) χρησιμοποιείται για τη μεταφορά απωλειών ρεύματος ή παρασιτικών σφαλμάτων. Για κυκλώματα με τάση λειτουργίας μεγαλύτερη των 2kV, ο μονωμένος αγωγός ίσως περιβάλλεται από ζώνη μηχανικής ενίσχυσης(θωράκιση), δηλαδή ένα οπλισμό αποτελούμενο από ατσαλοσύρματα ή σιδηροταινίες. Εάν τα καλώδια είναι μονοπολικά και προορίζονται για χρήση με εναλλασσόμενο ρεύμα τότε ο οπλισμός κατασκευάζεται με μη μαγνητικό υλικό(χαλκός,αλουμίνιο, ανοξείδωτο ατσάλι κτλ.) (11) (12) (13) (14).

Ωστόσο, η ύπαρξη ασυνεχειών ή κενών στο στρώμα της μόνωσης, εντείνουν την ηλεκτρική καταπόνηση του καλωδίου και μπορεί να οδηγήσουν ακόμη και σε πρόωρη αστοχία του καλωδίου. Για να ξεπεραστεί αυτό, ένας πολυμερής ημιαγωγός(ημιαγώγιμο στρώμα), μια αγώγιμη πολυμερής σύνθεση τοποθετείται

και στις δύο πλευρές της μόνωσης. Τα ημιαγώγιμα στρώματα εξασφαλίζουν την ακεραιότητα της μόνωσης, δηλαδή ότι οι ασυνέχειες της δεν γεμίζουν με αέρα, οπότε δεν θα προκληθούν ηλεκτρικές εκκενώσεις που θα βλάψουν το μονωτικό υλικό (11) (13).

Τα πρώτα καλώδια χρησιμοποιούσαν **μόνωση** από χαρτί, το οποίο τυλίγονταν με μία στρώση χαρτιού εμποτισμένου σε λάδι (MIND). Ταυτόχρονα, χρησιμοποιούνταν ως υλικό το EPDM(Μ αιθυλοπροπυλένιο). Ωστόσο, η ηλεκτρική μόνωση που κυριάρχησε στα υπόγεια καλώδια μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, μετά την ανάπτυξη των πλαστικών, είναι το δικτυωτό διασυνδεδεμένο πολυαιθυλένιο (XLPE) ή διασταυρωμένο πολυαιθυλένιο (2) (10).

Τέλος, το καλώδιο καλύπτεται από ένα μη αγώγιμο υλικό το οποίο ονομάζεται **εξωτερικό προστατευτικό στρώμα(jacket)**. Χρησιμοποιείται για τη παροχή προστασίας από υγρασία. Παλαιότερα, για τη κατασκευή του χρησιμοποιούνταν PVC, μόλυβδος ή ίνες γιούτας με πίσσα. Σήμερα, χρησιμοποιείται PVC, PE, HDPE ή CR(νεοπρένιο) (2) (7) (12) (13).



Εικόνα 2.1 Τομή ενός καλωδίου ισχύος (15)



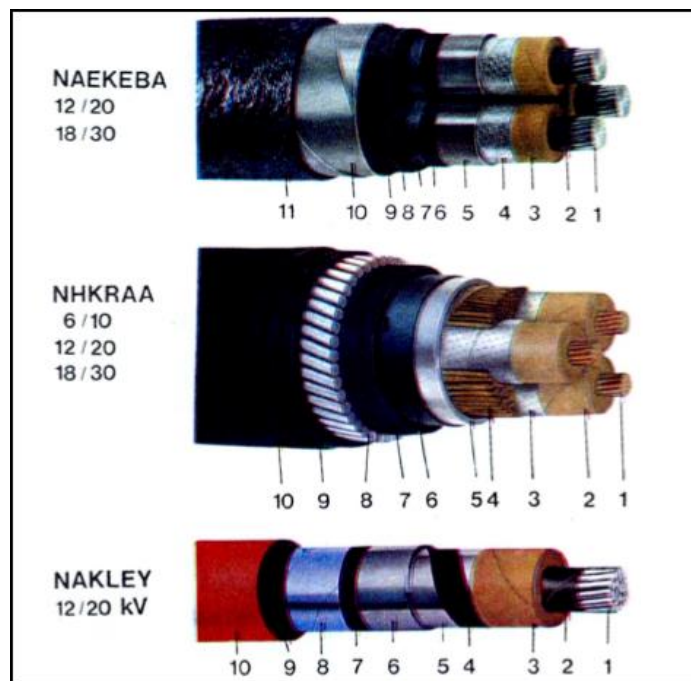
α



β

Εικόνα 2.2 α) Τυπική Δομή Μονοπολικού Καλωδίου Ισχύος: 1.Πολύκλωνος στρογγυλός αγωγός χαλκού ή αλουμινίου, 2.Εσωτερικό ημιαγωγίμο στρώμα XLPE, 3.Μόνωση XLPE, 4.Εξωτερικό ημιαγωγίμο στρώμα XLPE, 5.Ηλεκτρική Θωράκιση αποτελούμενη από σύρματα χαλκού τυλιγμένα ελικοειδώς(χάλκινη ταινία προαιρετική κατόπιν παραγγελίας),6. Πλαστική ταινία(προαιρετική), 7.Εξωτερικός Μανδύας PVC (10)

β) Τυπική δομή Πολυπολικού Καλωδίου Ισχύος. Διαφοροποιείται από το α στο γεγονός ότι διαθέτει ζώνη μηχανικής ενίσχυσης(Galvanized Steel Wire Armour) (64)



Εικόνα 2.3 Καλώδια MT ακτινικού πεδίου παλαιού τύπου : α.) Καλώδιο τριών μανδυών NAEKEBA 12/20...18/30kV: 1) αγωγός, 2) εξομαλυντικό ημιαγωγίμο στρώμα, 3) μόνωση, 4) ταινίες από αλουμίνιο, 5) μόλυβδος, 6,7,8,9) προστατευτικά στρώματα, 10) ταινία χαλύβδινη, 11) προστατευτικό στρώμα από εμποτισμένες ίνες(νήματα γιούτας) β.) Καλώδιο Hochstadter NHKRAA : 1) αγωγός, 2) μόνωση χαρτί-μάζα, 3) φύλλα αλουμινίου (Hochstadter), 4) γέμιση, 5) μόλυβδος, 6,7) προστατευτικά

στρώματα, 8) ενίσχυση από χαλύβδινα σύρματα, 9,10) διπλό προστατευτικό στρώμα από εμπεποτισμένες ίνες. γ.) Καλώδιο μονοπολικό NAKLEY 12/20kV: 1) αγωγός, 2) εξομαλυντικό ημιαγώγιμο στρώμα, 3) χαρτί-μάζα, 4) ημιαγώγιμο χαρτί, 5) ταινία συγκράτησης, 6) μόλυβδος, 7,8,9) προστατευτικά στρώματα από μάζα παχύρευστη με ταινίες πλαστικού, 10) προστατευτικό στρώμα από PVC. (7)

2.1.1 Ηλεκτρικοί Αγωγοί

Ένας ή τρεις αγωγοί φέρουν το ρεύμα του φορτίου. Για την κατασκευή των αγωγών χρησιμοποιείται αλουμίνιο και χαλκός. Τα μέταλλα αυτά έχουν υποστεί μία θερμική κατεργασία ώστε να είναι εύκαμπτα. Ο χαλκός έχει υψηλή αγωγιμότητα και όταν είναι σκληρής ολκήσεως, εμφανίζει μεγάλη μηχανική αντοχή. Βασικά μειονεκτήματα είναι το βάρος του και το υψηλό κόστος σε σύγκριση με το αλουμίνιο, περίπου 50% ακριβότερο. Το αλουμίνιο υστερεί του χαλκού σε αγωγιμότητα και αντοχή, αλλά έχει λιγότερο κόστος και είναι πολύ ελαφρύτερο. Μειονέκτημα του, είναι επίσης ότι δε συγκολλάται με μαλακή κόλληση χαμηλού σημείου τήξεως (π.χ. κασσιτεροκόλληση) και ότι διαβρώνεται ευκολότερα λόγω ηλεκτροχημικών δράσεων.

Η μορφή της διατομής μπορεί να είναι κυκλική ή να αποτελείται από κυκλικούς τομείς. Οι κυκλικές διατομές μπορεί να είναι συμπαγείς μέχρι 16mm για χαλκό και 50mm για αλουμίνιο. Για μεγαλύτερες διατομές οι αγωγοί γίνονται για λόγους ευκαμψίας πολύκλωνοι. Για πολυπολικά καλώδια μεγάλων διατομών χρησιμοποιούνται διατομές κυκλικού τομέα. Αν σε πολύκλωνους αγωγούς επιβληθεί συμπίεση των συρματιδίων (συμπιεσμένοι αγωγοί), εξοικονομείται όγκος, μειώνοντας τη γεωμετρική διατομή του αγωγού. Πάνω από 35mm οι πολύκλωνοι αγωγοί συμπιέζονται. Κοίλες και ελλειπτικές διατομές συναντώνται σε καλώδια με μόνωση χαρτιού-λαδιού και εξωτερικής πίεσης αντίστοιχα, για να κυκλοφορεί το λάδι και μεταδίδεται καλύτερα η πίεση (14) (10).

2.1.2 Εξομαλυντικά Ημιαγώγιμα Στρώματα

Στην επιφάνεια των πολύκλωνων αγωγών παρατηρείται μία μορφολογική ανωμαλία, με αποτέλεσμα η πεδιακή ένταση (KV/mm) στην επιφάνεια τους να

είναι υψηλότερη σε σχέση με τους μονόκλωνους. Για να μειωθεί η πεδιακή ένταση στην επιφάνεια των πολύκλωνων αγωγών τοποθετούνται, μεταξύ αγωγού και μανδύα, στρώματα από ημιαγώγιμα υλικά (όπως χαρτί με γραφίτη ή πλαστικά με γραφίτη). Τα πρόσθετα ημιαγώγιμα στρώματα αποτρέπουν την εμφάνιση κενών μεταξύ αγωγού και μόνωσης, που θα οδηγούσαν σε ηλεκτρικές εκκενώσεις και βαθμιαία καταστροφή της μόνωσης. Τέλος τα στρώματα αυτά αυξάνουν τη θερμική και μηχανική αντοχή της μόνωσης κατά τη διάρκεια βραχυκυκλωμάτων (14) (10).

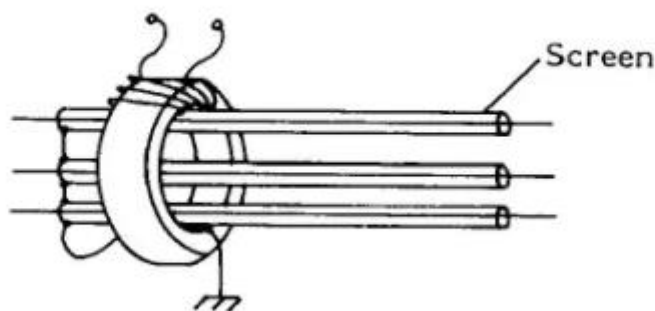
2.1.3 Μόνωση

Ως μονωτικά υλικά των καλωδίων μεταφοράς και διανομής χρησιμοποιούνται συνήθως **χαρτί εμποτισμένο με λάδι(MIND), PE, EPR, XLPE**. Η ηλεκτρική αντοχή του καλωδίου σε τάση αλλά και η επιτρεπόμενη ένταση του ρεύματος φόρτισης του αγωγού, προσδιορίζονται από το είδος και το πάχος του μονωτικού υλικού. Το είδος της μόνωσης καθορίζει τόσο τη μέγιστη συνεχή όσο και την παροδικά επιτρεπόμενη θερμοκρασία. Το είδος της εφαρμογής, με διαφορετικές ηλεκτρικές, θερμικές και μηχανικές ιδιότητες ανάλογα με αυτή, καθώς και η ανάγκη εύκολης εγκατάστασης του καλωδίου(που καθορίζει την ευκαμψία ή μηχανική αντοχή του) καθορίζουν το είδος της μόνωσης που θα χρησιμοποιηθεί. Οι μονωτικές ιδιότητες στα καλώδια χαρακτηρίζονται κυρίως από τη διηλεκτρική αντοχή σε kV/mm, την ωμική αντίσταση του υλικού, το συντελεστή απωλειών $\tan\delta$ και το μέγεθος των μικροεκκενώσεων(μη αυτοσυντηρούμενες εκκενώσεις στο διηλεκτρικό). Οι ηλεκτρικές εκκενώσεις διαβρώνουν βαθμιαία το μονωτικό υλικό και μπορεί να βλάψουν τη μόνωση του καλωδίου, οπότε χρησιμοποιούνται εξομαλυντικά ημιαγώγιμα στρώματα για τη προστασία της (10).

Στα υπόγεια δίκτυα MT και XT έχει γενικευτεί η χρήση συνθετικής μόνωσης(XLPE,PE,EPR κλπ), ενώ η χρήση μόνωσης χαρτιού τείνει να εκλείψει. Μάλιστα, στην Ελλάδα, η χρήση των καλωδίων με συνθετική μόνωση έχει γενικευτεί στα δίκτυα XT ενώ στα δίκτυα MT πρόκειται να υποκαταστήσει

πλήρως τη χρήση καλωδίων με εμποτισμένο χαρτί. Σε γραμμές Υ.Τ και Υ.Υ.Τ κυριαρχεί ήδη η χρήση καλωδίων με συνθετική μόνωση (14).

2.1.4 Εξωτερικός Γειωμένος Αγωγός(ή μανδύας ή μεταλλικός μανδύας ή ηλεκτρική θωράκιση ή μεταλλική θωράκιση)



Εικόνα 2.4 Αποψη ενός μεταλλικού μανδύα στερεωμένου σε έναν δακτύλιο όπου και γειώνεται.

Ο εξωτερικός γειωμένος αγωγός περιβάλλει τα καλώδια τάσης, διαχωρίζοντας τους φέροντας τάση αγωγούς, έτσι ώστε να μην υπάρχει κίνδυνος να τεθούν υπό τάση τα περί το καλώδιο τμήματα της εγκατάστασης. Μέσω των γειωμένων αγωγών ρέουν ρεύματα (χωρητικά ή βραχυκυκλωμάτων), δια μέσω μικρής αντίστασης και κατά τρόπο ελεγχόμενο, ως προς τη γη. Ακόμα σε κάποιες περιπτώσεις ο αγωγός λειτουργεί ταυτόχρονα και ως το τμήμα του καλωδίου που φέρει το ρεύμα του ουδετέρου. Οι αγωγοί αυτοί, γειώνονται πάντοτε σε ένα τουλάχιστον σημείο. Με τον τρόπο αυτόν αποφεύγονται ηλεκτρικές διασπάσεις σε περιπτώσεις σφαλμάτων καθώς και η εμφάνιση τάσης ως προς γη υπό κανονική λειτουργία. Επιπρόσθετα , ο γειωμένος αγωγός έχει συχνά και προστατευτικό χαρακτήρα εμποδίζοντας την διείσδυση υγρασίας ή άλλων χημικών επιδράσεων από έξω προς τη μόνωση. Ο μεταλλικός μανδύας κατασκευάζεται από μόλυβδο ή αλουμίνιο, ενώ σε ειδικές κατασκευές χρησιμοποιείται χάλκινη ταινία ή χάλκινα συρματίδια για τη βελτίωση της αγωγιμότητας προς όλες τις κατευθύνσεις (14) (10).

2.1.5 Ζώνη Μηχανικής Ενίσχυσης ή Θωράκιση

Η μηχανική ενίσχυση είναι απαραίτητη σε ειδικές περιπτώσεις όπου τα καλώδια καταπονούνται μηχανικά. Στα υπόγεια καλωδιακά συστήματα, τα καλώδια τραβιούνται από μηχανές έλξης μέσα σε σωλήνες ή χαντάκια κατά την εγκατάστασή τους, διότι για να περάσει ένα καλώδιο μέσα από το σωλήνα χρειάζεται μια δύναμη εφελκυσμού ανάλογη με το μήκος του, οπότε καταπονούνται μηχανικά. Η μηχανική προστασία επιτυγχάνεται μέσω της θωράκισης των καλωδίων. Η θωράκιση προστασίας συνήθως κατασκευάζεται από χαλύβδινες ταινίες για καλώδια μόνιμης εγκατάστασης ή σε καλώδια που ποντίζονται, χαλύβδινα συρματίδια. Η χρήση του χάλυβα, σε μονοπολικά καλώδια, μπορεί να προξενήσει μαγνητική υστέρηση και απώλειες λόγω κυκλικών ρευμάτων, με αποτέλεσμα τη μείωση της ικανότητας μεταφοράς ρεύματος (14) (10).

Ωστόσο, η αντίσταση που παρουσιάζει ο εξωτερικός μανδύας(jacket), ελαττώνεται με την ύπαρξη συρματιδίων(ο μανδύας και η θωράκιση είναι συνδεδεμένα εν παραλλήλω). Όταν η αντίδραση του μανδύα γίνει ίση με την αντίσταση του, τότε μεγιστοποιούνται οι απώλειες λόγω κυκλικών ρευμάτων. Χωρίς συρματίδια θωράκισης, η αντίδραση του πυρήνα είναι πολύ πιο μικρή από την αντίσταση του. Συνεπώς, προτιμάται η κατασκευή των συρματιδίων θωράκισης με τη χρήση κράματος χαλκού-πυριτίου-μαγγανίου για την ελαχιστοποίηση των επιμέρους απωλειών. Όταν οι αποστάσεις των καλωδιακών δικτύων είναι μεγάλες, η τιμή της αντίδρασης αυξάνεται. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, δύναται να χρησιμοποιηθεί θωράκιση χαμηλής αντίστασης, δεδομένου ότι η προκύπτουσα αντίσταση θα είναι πολύ μικρότερη από την αντίδραση, με αποτέλεσμα τη μείωση των απωλειών (11) (14).

2.1.6 Εξωτερικό Προστατευτικό Στρώμα ή Εξωτερικός Μανδύας

Η πλειοψηφία των καλωδίων ισχύος, και ιδιαίτερα εκείνων που θάβονται στο έδαφος, διαθέτουν εξωτερικά προστατευτικά στρώματα. Το καλώδιο, ο μεταλλικός μανδύας και η μηχανική ενίσχυση πρέπει να προστατευτούν κατά

της διάβρωσης, κατά των χημικών επιδράσεων και κατά της διείσδυσης της υγρασίας. Για τη κατασκευή αυτού του στρώματος προστασίας χρησιμοποιούνται συνθετικά υλικά ή ίνες εμποτισμένες με πίσσα. Καλώδια που διαθέτουν μηχανική ενίσχυση(όπως της φωτογραφίας 2.1β), εκτός του εξωτερικού προστατευτικού στρώματος(outer sheath) έξω από τη ζώνη μηχανικής ενίσχυσης, υπάρχουν προστατευτικά στρώματα(inner sheath) μεταξύ του μεταλλικού μανδύα και της ζώνης μηχανικής ενίσχυσης (14) (10).

Όσον αφορά τη προστασία με ίνες εμποτισμένες με πίσσα, οι ίνες είναι φυτικές(γιούτα) ή υαλίνες ή συνθετικές ίνες, ενώ μεταξύ τους υπάρχουν πλαστικές ταινίες για να δημιουργούν φράγματα στην υγρασία. Ταυτόχρονα, το καλώδιο του συγκεκριμένου τύπου, περιχαρακώνεται με κιμωλία ή ταλκ για να μη κολλάει επάνω στο τύμπανο που βρίσκεται κατά τη μεταφορά του και επίσης να μη δυσχεραίνεται η εγκατάστασή του (10).

Όσον αφορά τη προστασία με χρήση στρωμάτων από PVC ή πολυαιθυλένιο(PE) ή νεοπρένιο(CR), η χρήση τους περιορίζεται σε καλώδια με ηλεκτρική θωράκιση από αλουμίνιο ή χάλυβα. Οι μεταλλικοί μανδύες περιβάλλονται καταρχήν με αυτοβουλκανιζόμενες, αυτοκόλλητες ταινίες μερικών mm πάχους και ακολούθως συμπιέζεται πάνω τους ένας μανδύας χωρίς ραφή, από PVC ή πολυαιθυλένιο ή νεοπρένιο(CR), πάχους 4-6mm (2) (10).

2.2 Βλάβες και αστοχίες υπογείων καλωδίων

Παρά το γεγονός ότι τα υπόγεια καλώδια είναι θαμμένα στο έδαφος, και θεωρητικά περισσότερο προστατευμένα συγκριτικά με εξωτερικά καλώδια μεταφοράς, δεν είναι εντελώς ανεπηρέαστα από φυσικούς και ανθρώπινους παράγοντες. Επίσης, οι επιζήμιοι αυτοί παράγοντες, τα καθιστούν ευάλωτα σε διάφορα σφάλματα. Κατά τη διάρκεια ενός σφάλματος, οι γραμμές μεταφοράς του ηλεκτρικού συστήματος υπόκειται σε θερμικές και μηχανικές καταπονήσεις, οι οποίες μπορούν να προκαλέσουν καταστρεπτικά αποτελέσματα και να αποτελέσουν καθοριστικό συντελεστή στη λειτουργία της γραμμής, στην περίπτωση της μη έγκαιρης εξουδετέρωσης τους. Η μη έγκαιρη απομόνωση του σφάλματος, μπορεί να δημιουργήσει και προβλήματα αστάθειας στο σύστημα. Οι λόγοι αυτοί, δημιουργούν την ανάγκη εντοπισμού του σημείου του σφάλματος, προκειμένου να επισπευθεί η επισκευή, να βελτιωθεί η αξιοπιστία του συστήματος και να μειωθεί η περίοδο διακοπής (6) (13) (16).

2.2.1 Ορισμός σφάλματος και κατηγορίες σφαλμάτων

α) Ορισμός σφάλματος

Με τον όρο σφάλμα σε ένα σύστημα Σ.Η.Ε., ορίζεται ένα μη φυσιολογικό ηλεκτρικό ρεύμα το οποίο παρακάμπτει την κανονική πορεία του κυκλώματος και προκαλεί διαταραχές στη γραμμή μεταφοράς (17) (18).

β) Ο χρόνος που η γραμμή θα παραμείνει εκτός λειτουργίας διαχωρίζει τα είδη των σφαλμάτων σε τρεις επιμέρους κατηγορίες οι οποίες είναι τα παροδικά, τα μόνιμα και τα παραμένοντα.

- Παροδικό σφάλμα: είναι το σφάλμα που θέτει μια γραμμή μεταφοράς εκτός λειτουργίας για πολύ μικρό χρονικό διάστημα (λίγα δευτερόλεπτα), έπειτα η γραμμή επανατίθεται αυτόματα σε κανονική λειτουργία χωρίς την επέμβαση τεχνικών.
- Μόνιμο σφάλμα: είναι το σφάλμα το οποίο θέτει μία γραμμή μεταφοράς μόνιμα εκτός λειτουργίας. Σε αυτή την περίπτωση σφάλματος, απαιτείται η επέμβαση τεχνικών, ώστε να εντοπιστεί η βλάβη, στη συνέχεια να επισκευαστεί και να ξαναμπει η γραμμή σε λειτουργία. Τα μόνιμα

σφάλματα είναι τα πιο σημαντικά και αποτελούν βασικό παράγοντα αξιοπιστίας σε μία γραμμή μεταφοράς και γενικότερα σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας.

- Παραμένον σφάλμα: είναι το σφάλμα που εμφανίζεται σε μία ηλεκτρική γραμμή μεταφοράς, όταν είναι εκτός λειτουργίας (μόνιμο σφάλμα) και μετά από κάποιο χρονικό διάστημα, χωρίς να επέμβουν οι τεχνικοί, επανέρχεται σε κανονική λειτουργία. Για αυτούς τους λόγους το παραμένον σφάλμα ορίζεται ως ένα ενδιάμεσο μεταξύ του παροδικού και του μόνιμου σφάλματος (13) (17) (18).

2.2.2 Είδη σφαλμάτων

2.2.2.1 Βραχυκυκλώματα

Με τον όρο βραχυκυκλώματα σε ένα Σ.Η.Ε., χαρακτηρίζουμε οποιαδήποτε λειτουργική κατάσταση που συμβάλει στη ροή ρευμάτων στους διαφόρους κλάδους του συστήματος, πολύ μεγαλύτερου μεγέθους από τα αντίστοιχα κατά την ονομαστική λειτουργία και τα οποία προκαλούνται από απότομες αλλαγές της τοπολογίας του δικτύου. Τα σφάλματα αυτά προέρχονται, όταν μία ή περισσότερες φάσεις του δικτύου έρθει σε επαφή με τη γη, είτε απευθείας είτε μέσω αντίστασης σφάλματος, ή και στις περιπτώσεις όπου δύο ή περισσότερες φάσεις έρθουν σε επαφή μεταξύ τους είτε απευθείας είτε μέσω αντίστασης σφάλματος (16).

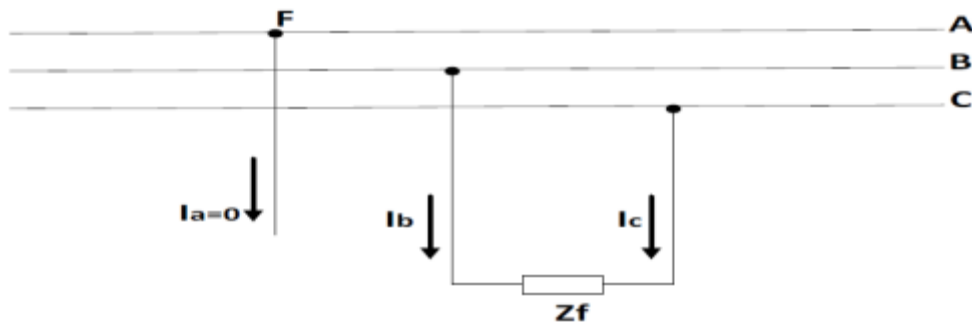
A) Σφάλματα διαρροής προς τη γη

- Σφάλμα χαμηλής αντίστασης προς γη (Shorted Faults): Ένα σφάλμα γης χαρακτηρίζεται από μια χαμηλής αντίστασης διαδρομή προς γη (shunted fault). Η αντίσταση από τον αγωγό προς τη γη είναι χαμηλότερη από την αντίσταση κύματος του καλωδίου για ένα σφάλμα διαρροής προς γη χαμηλής αντίστασης.
- Σφάλμα υψηλής αντίστασης προς γη (High-Impedance Faults): Ένα σφάλμα υψηλής σύνθετης αντίστασης περιλαμβάνει μια υψηλής αντίστασης διαδρομή προς τη γη (shunted fault) που είναι μεγάλη σε

σύγκριση με την αντίσταση κύματος του καλωδίου. Αυτός ο τύπος σφάλματος μπορεί επίσης να επιδείξει μη γραμμικά χαρακτηριστικά ως προς την αντίσταση τους που επιτρέπουν την πλασματική αντίσταση να ποικίλει ανάλογα με το επίπεδο της εφαρμοζόμενης τάση ή ρεύματος (19).

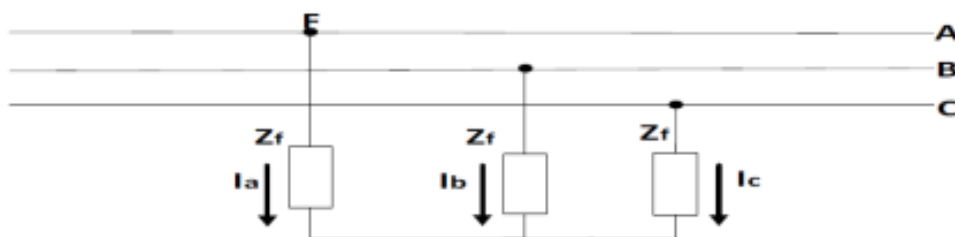
B) Σφάλματα μεταξύ φάσεων

- Σφάλμα μεταξύ δύο φάσεων: το σφάλμα φάσης με φάση εμφανίζεται όταν δύο αγωγοί βραχυκυκλωθούν, έρθουν σε επαφή ο ένας όπως φαίνεται στο Εικόνα 2.5. Για παράδειγμα οι φάσεις B και C.



Εικόνα 2.5 Απεικόνιση σφάλματος φάση με φάση (13).

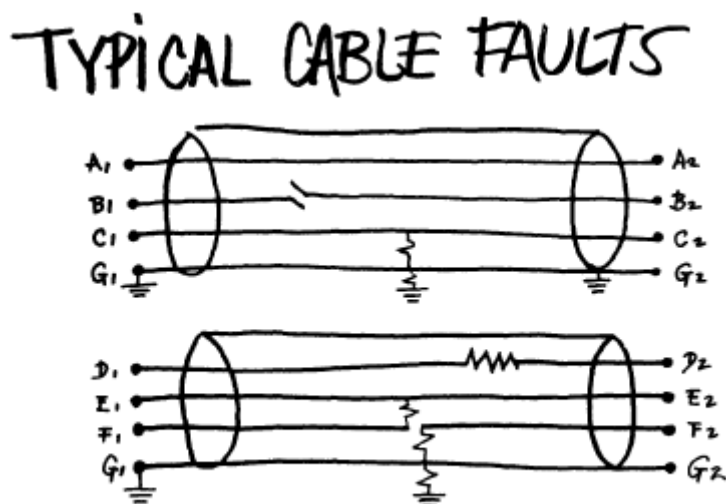
- Σφάλμα μεταξύ τριών φάσεων: είναι από τα λιγότερο πιθανά σφάλματα αλλά και τα πιο σοβαρά, και οι τρεις φάσεις βραχυκυκλώνονται μεταξύ τους. Το βραχυκύκλωμα μεταξύ τριών φάσεων είναι το σοβαρότερο σφάλμα που μπορεί να συμβεί στο σύστημα όπως αναφέρθηκε παραπάνω. Συνεπώς οι μηχανικοί χρησιμοποιούν τα εν λόγω σφάλματα ως βάση για τον υπολογισμό της αντοχής του υλικού που απαιτείται για τα καλώδια διανομής ή για άλλο εξοπλισμό του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Ένα τέτοιο σφάλμα απεικονίζεται και στο Εικόνα 2.6.



Εικόνα 2.6 Απεικόνιση σφάλματος μεταξύ τριών φάσεων (13)

2.2.2.2 Ανοικτό κύκλωμα (Open-Conductor Faults)

Ένα σφάλμα ανοικτού κυκλώματος παρατηρείται όταν ο αγωγός ενός καλωδίου έχει σπάσει εντελώς ή παρουσιάζει διακοπή στη θέση σφάλματος του καλωδίου. Είναι πιθανό να παρουσιαστεί σφάλμα υψηλής αντίστασης (προς γη) στη μία ή και στις δύο πλευρές της θέσης του αγωγού που έχει υποστεί βλάβη (13).



Εικόνα 2.7. Τυπικά σφάλματα καλωδίων (20)

Αναφερόμενοι στην **εικόνα 2.7**, το A είναι υγιής αγωγός, το B είναι ανοικτό κύκλωμα, το C είναι ένα γειωμένο κύκλωμα και το G αντιπροσωπεύει είτε στρώμα μόνωσης, ένα μεταλλικό περίβλημα, έναν αγωγό ή τη γη. Το D παρουσιάζει σφάλμα υψηλής αντίστασης, το οποίο είναι χαρακτηριστικό των αγωγών αλουμινίου. Τα E και F είναι βραχυκυκλωμένα. Το F είναι επίσης παρουσιάζει ασυνέχεια ανάμεσα στο άκρο 1 και 2, μια κατάσταση που δεν είναι ασυνήθιστη. Οποτεδήποτε κάποιες από αυτές τις συνθήκες πληρούνται, μπορεί να επαληθευτούν λαμβάνοντας μετρήσεις από ένα ή περισσότερα άκρα των καλωδίων. Σημειώστε ότι, εκτός από το ανοικτό κύκλωμα, όλα τα σφάλματα και οι διαρροές προς γης φαίνεται ότι έχουν κάποια συγκεκριμένη τιμή αντίστασης που αντιπροσωπεύει το κάθε σφάλμα και διευκολύνει την ανίχνευση του. Το σφάλμα ανοικτού κυκλώματος και σφάλμα υψηλής αντίστασης ταξινομούνται και τα δύο ως σφάλματα σειράς και μπορεί να εντοπιστούν από τη μέτρηση οποιασδήποτε αλλαγής από τη πραγματική τιμή της αντίστασης του αγωγού. Τέτοιου είδους σφάλματα παρουσιάζουν μικρή πιθανότητα εμφάνισης. Το

μεγαλύτερο ποσοστό σφαλμάτων που παρουσιάζονται είναι βραχυκυκλώματα και σφάλματα διαρροής προς γη και μπορούν να εκτιμηθούν με μέτρηση οποιουδήποτε αλλαγής από την τυπική αντίσταση της μόνωσης του αγωγού (20).

Σε μία γραμμή μεταφοράς, τα σφάλματα μπορεί να επηρεάσουν ταυτόχρονα και τις τρεις φάσεις του δικτύου, τότε χαρακτηρίζονται ως συμμετρικά σφάλματα. Τα συμμετρικά σφάλματα τα συναντάμε συνήθως στα εξωτερικά μέρη του δικτύου μεταφοράς, συμβαίνει σπάνια και η ανάλυση του σφάλματος είναι σχετικά εύκολη. Εάν μόνο μερικές φάσεις επηρεάζονται, αυτού του είδους τα σφάλματα χαρακτηρίζονται ως ασύμμετρα σφάλματα. Σε αντίθεση με τα συμμετρικά, τα ασύμμετρα σφάλματα είναι συχνότερα αλλά έχουν δυσκολότερο τρόπο ανάλυσης καθώς χάνεται η συμμετρία των φάσεων. Από τα παραπάνω σφάλματα στις γραμμές μεταφοράς, μόνο το 5% είναι συμμετρικά, δηλαδή επηρεάζουν και τις τρεις φάσεις με τον ίδιο τρόπο, τα περισσότερα σφάλματα είναι ασύμμετρα (17) (16).

Shunt fault	Balanced faults	Three phases direct (L-L-L) fault Three phases to earth (L-L-L-E) fault
	Unbalanced faults	Single phase to earth (L-E) fault Double phases to earth (L-L-E) fault Phase to phase (L-L) fault
Series fault	Single phase open Double phase open	

Εικόνα 2.8 Είδη σφαλμάτων (21).

2.2.3 Αιτίες σφαλμάτων και βλαβών καλωδίων

Οι αιτίες που προκαλούνται σφάλματα και βλάβες σε καλώδια ισχύος οφείλονται σε πολλούς λόγους και εξαρτώνται από πολλούς παράγοντες. Ακολουθεί ανάλυση των κυριότερων αιτιών σφαλμάτων και βλαβών σε καλώδια ισχύος.

2.2.3.1 Μηχανικές Βλάβες

Αυτή είναι ίσως η πιο διαδεδομένη αιτία αστοχίας ενός καλωδίου και μπορεί να οδηγήσει σε άμεση καταστροφή του καλωδίου, ή μήνες βλάβης, ή ακόμα και χρόνια, μετά τη ζημιά, εάν αυτή δεν είναι τόσο σοβαρή. Οι μηχανικές βλάβες οφείλονται συχνά σε ένα χτύπημα ή ένα κόψιμο όταν έχουν πραγματοποιηθεί εργασίες ανασκαφής κοντά στη διαδρομή του καλωδίου ή σε υπόγεια φρεάτια, ή σε τραυματισμό του καλωδίου ενώ βρίσκεται τυλιγμένο (πριν τη διαδικασία της εγκατάστασης) ή σε κακή διαχείριση στο σημείο της εκσκαφής. 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. Αυτές οι παρατηρήσεις ισχύουν ιδιαίτερα για τα υπόγεια και εμποτισμένα καλώδια. Όταν ένα καλώδιο είναι εκτεθειμένο (εναέριο), συνήθως υπόκειται σε άλλες μορφές ζημιών, όπως φωτιά, σαμποτάζ κ.λπ. (22) (23).

2.2.3.2 Διάβρωση του μανδύα



Εικόνα 2.9 Διάβρωση του μανδύα σε καλώδιο Μ.Τ (24)

Η διάβρωση του εξωτερικού μανδύα μπορεί να οφείλεται είτε σε χημική είτε σε ηλεκτρολυτική δράση, ή σε συνδυασμό και των δύο. Το πρώτο εξαρτάται από τη φύση του εδάφους στο οποίο είναι τοποθετημένο το καλώδιο, και αυτό διαφέρει κατά τόπους. Σε ορισμένα μέρη, όπου το έδαφος είναι γενικά καλό από αυτή την άποψη, η διάβρωση προκαλείται από την τοποθέτηση του καλωδίου σε έδαφος μολυσμένο από απόβλητα χημικά ή οργανικά απορρίμματα. Η ηλεκτρολυτική διάβρωση προκαλείται από παρασιτικά ρεύματα στον εξωτερικό μανδύα των καλωδίων, τα οποία οφείλονται συχνά σε ρεύματα επιστροφής από ηλεκτρικά κινητήρια συστήματα.

Η διάβρωση του εξωτερικού μανδύα του καλωδίου θα εισάγει υγρασία στο στρώμα της μόνωσης, ενισχύοντας τη πιθανότητα αστοχίας ή βλάβης του. Η διάβρωση του μανδύα μπορεί να αποτραπεί με την εφαρμογή καθοδικής προστασίας(ειδικό προστατευτικό φινίρισμα), δηλαδή εφαρμογή μονωτικών χρωμάτων, που παρέχουν ταυτόχρονα επαρκή αποστράγγιση, απομακρύνοντας με αυτό τον τρόπο τη πηγή της χημικής μόλυνσης (22) (23).

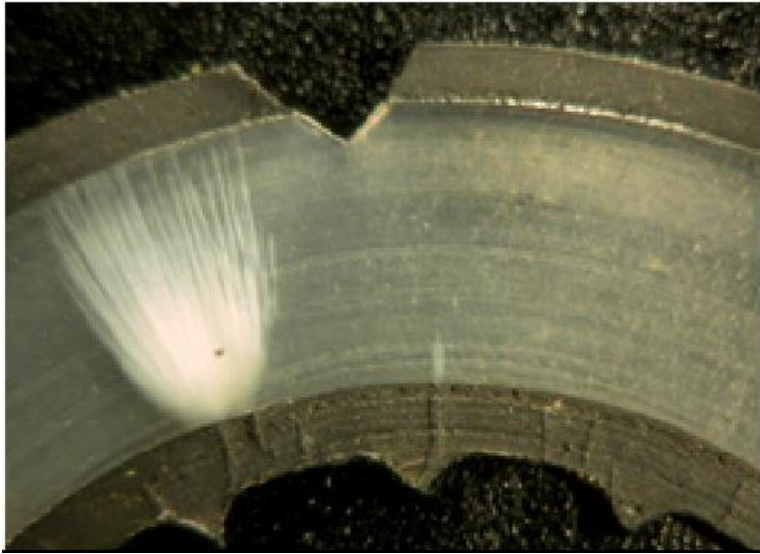
2.2.3.3 Γήρανση

Η καταπόνηση της μόνωσης είναι ένα αναπόφευκτο φαινόμενο στα υπόγεια καλώδια, ενώ σε πολλές περιπτώσεις οδηγεί στη καταστροφή της. Η γήρανση προκαλείται από απλή ή ταυτόχρονη δράση διαφόρων παράγοντες γήρανσης, δηλαδή θερμικούς, ηλεκτρικούς, μηχανικούς και περιβαλλοντικούς. Οι επίμονοι παράγοντες γήρανσης προκαλούν αστοχία στη μόνωση του καλωδίου μέσω μιας σειράς μηχανισμών που συνοψίζονται στον Πίνακα . Η ενεργοποίηση των παραγόντων γήρανσης είτε μεταβάλλει τις κυριότερες ιδιότητες των μονωτικών υλικών που αναφέρονται ως ενδογενής γήρανση είτε προκαλεί υποβάθμιση γνωστή ως εξωγενής γήρανση, η οποία είναι αποτέλεσμα αλληλεπίδρασης των αναφερθέντων παραγόντων γήρανσης του πίνακα . Η υποβάθμιση είναι αποτέλεσμα της παρουσίας κηλίδων, ελαττωμάτων, κενών και προεξοχών στο υλικό της μόνωσης και την συσχέτιση τους με διαφόρους παράγοντες γήρανσης (25).

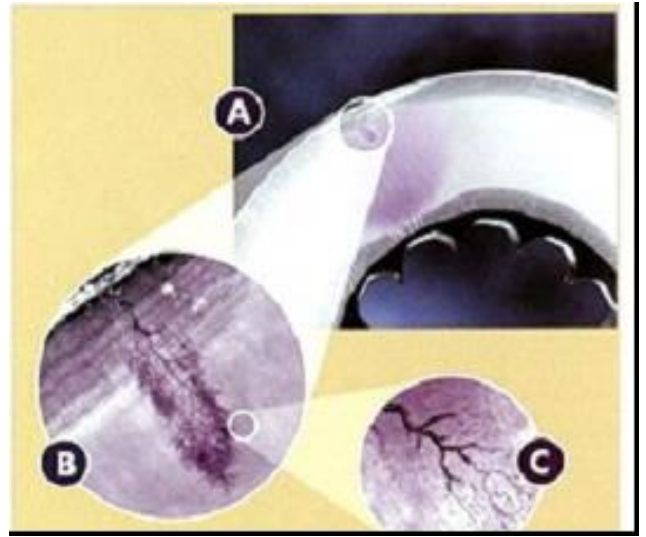
Πίνακας 1 Περίληψη των παραγόντων γήρανσης στα καλώδια (25)

Παράγοντες Γήρανσης		Μηχανισμοί 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

A)Υδάτινοι δενδρίτες



α)



β)

Εικόνα 2.10 α) Παράδειγμα πορώδους δομής στη μόνωση ενός καλωδίου (που υποδεικνύεται από το λευκό βέλος) με ένα μεγάλο υδάτινο δενδρίτη που αναπτύσσεται μόνωση του αγωγού σε ένα καλώδιο XLPE μέσης τάσης μετά τη θέρμανση . Σημειώστε ότι δεν αναπτύσσονται υδάτινοι δενδρίτες από τις ρωγμές / κατασκευές που προκαλούν ασυνέχεια σε ένα αγωγό.
β) Μικρογραφία ενός υδάτινου δενδρίτη σε μόνωση από πολυαιθυλένιο(PE) (65)

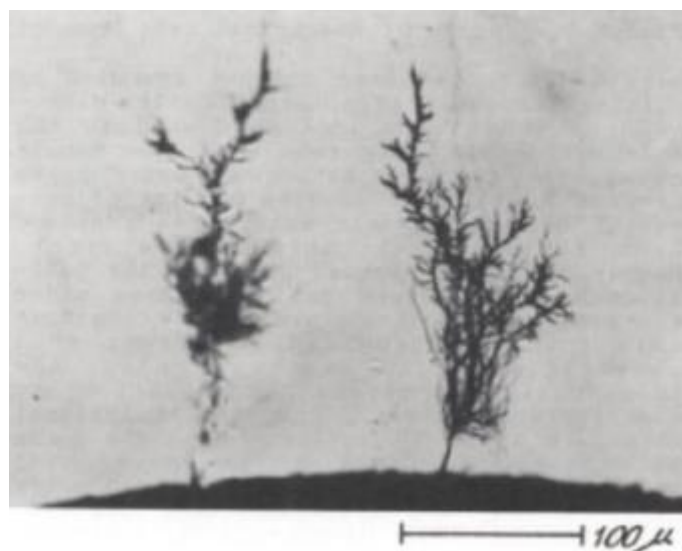
Είναι γνωστό από τεχνικής άποψης ότι, μετά από χρόνια παραμονή σε ένα γεμάτο υγρασία περιβάλλον, μπορεί να δημιουργηθούν υδάτινοι δενδρίτες στη μόνωση των καλωδίων, αλλά για ορισμένους λόγους καλώδια με την ίδια κατασκευή δομή που υπόκεινται στο ίδιο φορτίο και περιβαλλοντικές συνθήκες, μπορεί να συμπεριφέρονται διαφορετικά όσον αφορά την συχνότητα εμφάνισης υδάτινων δενδριτών, ακόμη και η μορφή των υδάτινων δενδριτών ίσως διαφέρει από καλώδιο σε καλώδιο.

Οι υδάτινοι δενδρίτες σε καλώδια χαρακτηρίζονται από μόνιμου χαρακτήρα, τοπικές αλλαγές της μορφολογίας της μόνωσης, πιθανώς σχετιζόμενες με χημικές μεταβολές, αλλά σε κάθε περίπτωση με τοπικά ιζήματα υγρού νερού. Η επικινδυνότητα των υδάτινων δενδριτών συνίσταται στο γεγονός ότι αυτά τα ιζήματα επηρεάζουν τις μονωτικές(διηλεκτρικές) ιδιότητες του πολυμερούς. Υπό συνθήκες συντήρησης, η πυκνότητα του ηλεκτρικού πεδίου γειτονικά των υδάτινων δενδριτών αλλάζει και λόγω των ρευμάτων μετατόπισης ή της κίνησης

των φορέων ηλεκτρισμού εντός των υδάτινων δενδριτών, ενώ ενδέχεται να προκύψει τοπική θέρμανση και ειδικά στην περίπτωση υπερτάσεων οι υδάτινοι δενδρίτες μπορεί να οδηγήσουν σε βλάβη του καλωδίου.

Είναι γενικά αποδεκτό ότι, η ανάπτυξη υδάτινων δέντρων, προϋποθέτει ύπαρξη ηλεκτρικού πεδίου, υγρασίας και συγκεκριμένων σημείων ενεργοποίησης. Στο πλαίσιο αυτό, εκτός από τους ρύπους στη μόνωση που δημιουργούν δενδρίτες σε σχήμα παπιγιόν(bow-tie trees), καθοριστικό ρόλο παίζουν ξένες προσμίξεις ή ιόντα στη δημιουργία υδάτινων δενδριτών. Από αυτά τα ευρήματα και την πειραματικά επαληθευμένη επίδραση των σωματιδίων αλατιού στη δημιουργία δενδριτών σε σχήμα παπιγιόν, μπορεί να συναχθεί το συμπέρασμα ότι τα ιόντα, ειδικότερα, μπορούν να διαδραματίσουν σημαντικό ρόλο στη διαδικασία δημιουργίας υδάτινων δενδριτών στη μόνωση (26).

B) Ηλεκτρικοί δενδρίτες



Εικόνα 2.11 Ηλεκτρικοί δενδρίτες που αναπτύσσονται από ελαττώματα ενίσχυσης πεδίου στη διασύνδεση ημιαγώγιμου στρώματος και μόνωσης σε καλώδιο με μόνωση από πολυαιθυλένιο. Με την πρόοδο στην παραγωγή καλωδίων, σπάνια παρατηρείται αυτός ο τύπος δενδριτών (27).

Οι ηλεκτρικοί δενδρίτες μπορούν να σχηματιστούν από διαβρωμένες επιφάνειες κατά τη διάρκεια μιας ηλεκτρικής εκκένωσης και επίσης σε καταπονημένες επιφάνειες χωρίς ηλεκτρικές εκκενώσεις. Για τις τελευταίες,

υπάρχουν δύο φάσεις ανάπτυξης ηλεκτρικών δενδριτών: Μία αρχική περίοδος – κατά την οποία η κίνηση του ηλεκτρικού φορτίου ανά μισό κύκλο της εφαρμοζόμενης τάσης οδηγεί σε σταδιακή επιδείνωση του πολυμερούς με αποτέλεσμα τον σχηματισμό ενός μικρού κενού ` και μία περίοδος αύξησης που προκύπτει από την επέκταση του αρχικού κενού οδηγώντας στον σχηματισμό ενός δενδροειδούς δικτύου από κλάδους εξαιτίας της ηλεκτρικής εκκένωσης μεταξύ αυτών. Είναι ευρέως γνωστό ότι κατά τη διάρκεια μίας ηλεκτρικής εκκένωσης η πίεση που δέχεται η αιχμή από την τάση εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά της εκκένωσης παρά από το σχήμα του ηλεκτροδίου από το οποίο αυτή προκλήθηκε. Επομένως, εφόσον έχει σχηματιστεί ένα ηλεκτρικό δενδρίτη η ανάπτυξή του δεν εξαρτάται από το εάν προκλήθηκε από μία ακίδα ή από άλλη ατέλεια στο σύστημα μόνωσης του καλωδίου (28) (29).

Ένας ηλεκτρικός δενδρίτης που είναι περιχαρακωμένος μέσα στη μόνωση (που εμφανίζεται με τη μορφή μίας βελόνας ή με τη μορφή ενός ρύπου) συχνά διαδίδεται με διακοπές. Αυτές οι διακοπές θα προκαλέσουν αύξηση του χρόνου διάδοσης του. Μερικές εκκενώσεις μπορούν να αναπτύξουν μεγάλες πιέσεις εντός των καναλιών των δενδριτών, η οποία με τη σειρά της μπορεί να ανακόψει τις εκκενώσεις για κάποιο χρονικό διάστημα (λεπτά έως ώρες). Οι εκκενώσεις επανεμφανίζονται αφού τα αέρια διαχέονται από τα κανάλια των δενδριτών στη μόνωση. Αυτό το φαινόμενο πίεσης μπορεί να αυξήσει την χρόνο διάδοσης του δέντρου από 16 λεπτά(εικόνα) σε ώρες ή ακόμη και ημέρες. Από άποψη λειτουργίας του καλωδίου, η χρονική διάρκεια του διαστήματος διάδοσης, είτε λεπτά είναι είτε και ημέρες, είναι ουσιαστικά άνευ σημασίας. Η κρίσιμη χρονική περίοδος καθορισμού της διάρκειας ζωής του καλωδίου είναι ο χρόνος έναρξης σχηματισμού των δενδριτών. Στη δοκιμή ακίδας, ο χρόνος αυτός μειώνεται σημαντικά (αρκετές τάξεις μεγέθους) από την υψηλή αναλογία της εφαρμοζόμενης τάσης σε σχέση με τη πραγματική που εμφανίζεται στο άκρο της βελόνας. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων του χρόνου έναρξης του δέντρου μέσω δοκιμών βελόνας είναι πολύ ασυνεπή επειδή η μόνωση δεν είναι ομοιογενής και μόνο μία μικρή αναλογία τάσης στην άκρη μιας βελόνας

εμπλέκεται σε κάθε μία δοκιμή. Είναι επίσης εξαιρετικά δύσκολο να διατηρηθεί το ίδιο επίπεδο μερικής εκφόρτισης σε επόμενες δοκιμές ακίδας που είναι απαραίτητο για την αναπαραγωγή επαναλαμβανόμενων αποτελεσμάτων. Κατά την αξιολόγηση των δοκιμών με ακίδες, η έννοια της διάδοσης των δενδριτών χρησιμοποιείται συνήθως για την εκτίμηση του συνολικού χρόνου έναρξης των δένδριτών συν του χρόνου διάδοσης τους. Ωστόσο, επειδή δεν υπάρχει συσχέτιση μεταξύ της έναρξης και της διάδοσης τους, η δοκιμή ακίδας έχει αμφίβολη αξία ως μέθοδος πιστοποίησης μόνωσης. Η δοκιμή ακίδας, ωστόσο, αποτελεί πολύτιμο εργαλείο για τη μελέτη του μηχανισμού εκκενώσεων σε ηλεκτρικούς δενδρίτες (29).

Έτσι, οι μερικές εκκενώσεις στους ηλεκτρικούς δενδρίτες είναι ένας κρίσιμος παράγοντας γήρανσης των καταπονημένων συστημάτων μόνωσης. Γνώση της συμπεριφοράς τους σε συνθήκες κανονικής λειτουργίας, με δεδομένες ορισμένες ηλεκτρικές, θερμικές και μηχανικές καταπονήσεις, μπορούν να επιτρέψουν στους χρήστες να κάνουν καλύτερη εκτίμηση της κατάστασης των καλωδιακών τους συστημάτων (28).

2.2.3.4 Αστοχία Μόνωσης Καλωδίου

A. Εξαιτίας κατασκευής και κακής λειτουργίας

Ένα καλώδιο, που λειτουργεί με την καθορισμένη τάση και ρεύμα για τα οποία κατασκευάστηκε, έχει σχεδόν απεριόριστο χρόνο ζωής, αλλά κακής κατασκευής ή υπερφορτισμένα καλώδια, ενδέχεται να υποστούν βλάβη, λόγω αστοχίας της μόνωσης. Όταν βλαφθεί η ακεραιότητα της μόνωσης, για διάφορους λόγους που έχουν ήδη αναφερθεί, μπορεί να αποτύχει ηλεκτρικά. Κατά συνέπεια, το στρώμα της μόνωσης αδυνατεί να συγκρατήσει τη ροή ηλεκτρικού ρεύματος μέσα στον αγωγό. Αυτά τα σφάλματα μπορεί να έχουν τη μορφή φάσης-προς-γη ή φάσης-προς-φάση και μερικές φορές δεν υπάρχουν εξωτερικές ενδείξεις στο σημείο της βλάβης. Ορισμένες αστοχίες που είναι δύσκολο να ανιχνευτούν είναι οι εξής:

- 1) Διόγκωση του μανδύα.
- 2) Έλλειψη ή κενό στο στρώμα της μόνωσης (22) (23).

B. Εξαιτίας υγρασίας

Η είσοδος υγρασίας στο στρώμα της μόνωσης έχει ως αποτέλεσμα την καταστροφή του καλωδίου, ενώ μπορεί να οφείλεται σε μηχανική βλάβη του καλωδίου ή σε φθορά από κάποιο απρόσεκτο εργάτη ή άλλο λόγο. Οι κυριότερες ενδείξεις που υποδεικνύουν την ύπαρξη βλάβης εξαιτίας υγρασίας είναι οι παρακάτω:

- 1) Ξεθωριασμένο ή εμποτισμένο με νερό χαρτί, σε περίπτωση που χρησιμοποιείται μόνωση χαρτιού.
- 2) Δυσκολία στην αφαίρεση των ταινιών των ημιαγωγίμων στρωμάτων.
- 3) Κηλίδες ή λεκέδες στην εσωτερική επιφάνεια του μανδύα.
- 4) Ύπαρξη νερού.
- 5) Ύπαρξη σκόνης στην επιφάνεια του αγωγού (22).

2.2.3.5 Αστοχία συνδέσμων(ματίσεων)



Εικόνα 2.12 Αστοχία σε μια εγκατεστημένη μάτιση δύο καλωδίων (30).

Η αστοχία στις ενώσεις των καλωδίων προκαλείται συχνά από τη "μετανάστευση" της παχύρευστου γράσου ή αλλού λιπαντικού από τη μάτιση στο καλώδιο, λόγω της διαστολής του εξωτερικού μανδύα στο φορτίο. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία μερικής εκκένωσης, κατά την οποία εμφανίζεται μια στιγμιαία εκτόνωση από τον αγωγό στο περίβλημα του (23). Αυτό μπορεί να υποδειχθεί από τα ακόλουθα:

1. Ορατή αλλαγή στην λιπαντικό υλικό
2. Δημιουργία στρώσης κεριού, σε περίπτωση ορυκτελαίου (22)

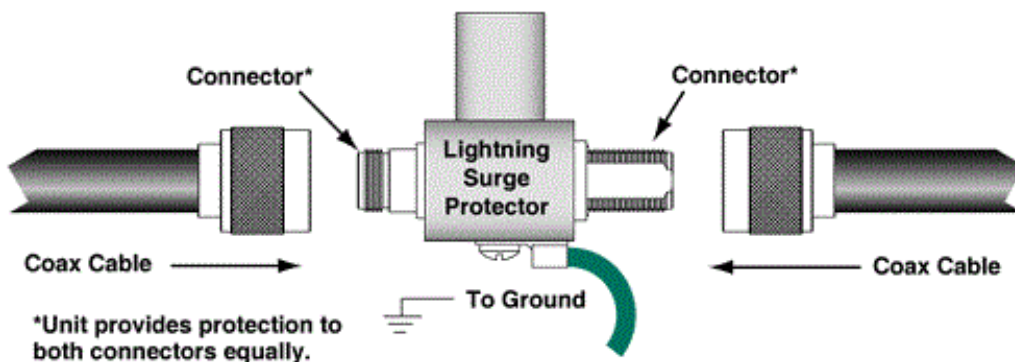
Η παρουσία ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος της μόνωσης, λόγω του κακού ελέγχου της ηλεκτρικής καταπόνησης, είναι μια άλλη αστοχία των ματίσεων και εντοπίζεται μόνο σε παλιά δίκτυα τροφοδοσίας υψηλής τάσης (23).

2.2.3.6 Θέρμανση Καλωδίων

Είναι γνωστό ότι η μεγάλη θερμική καταπόνηση του καλωδίου μπορεί να οδηγήσει σε υποβιβασμό ή αστοχία της μόνωσης του. Το αυξημένο θερμικό φορτίο στο εσωτερικό του καλωδίου, μπορεί να οφείλεται σε υπερφόρτιση του, σε υψηλές θερμοκρασίες του περιβάλλοντος, ανεπαρκή εξαερισμό, μαγνητική επαγωγή των γειτονικών αγωγών, ή από άλλες εξωτερικές πηγές θερμότητας. Η προστασία της μόνωσης του καλωδίου από θερμική καταπόνηση είναι αντικείμενο μελέτης.

Η προστασία της μόνωσης του καλωδίου γίνεται με την αναγνώριση των περιβαλλοντικών και λειτουργικών παραγόντων, οι οποίοι θα καθορίσουν τη σωστή επιλογή της μόνωσης του καλωδίου και του μέγεθος του αγωγού. Η ακεραιότητα και η μεγάλη διάρκεια ζωής του καλωδίου εξασφαλίζεται με τακτική συντήρηση και επιθεώρηση του, αφού προηγουμένως επιλέγουν η κατάλληλη μόνωση και στρώματα προστασίας (22).

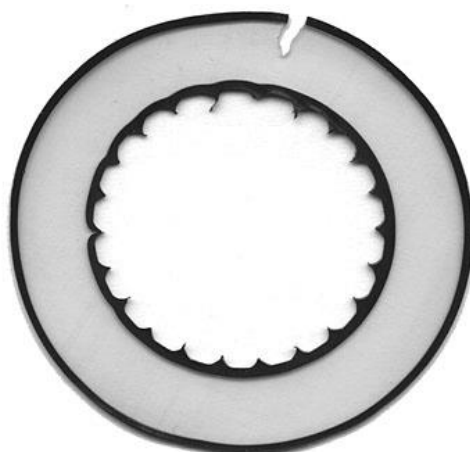
2.2.3.7 Υπερτάσεις λόγω κεραυνών



Εικόνα 2.13 Αλεξικέραυνο για τη προστασία καλωδίων (31)

Για την ελαχιστοποίηση της πιθανότητας εμφάνισης σφαλμάτων και βλαβών που οφείλονται στις υπερτάσεις που προκαλούνται από κεραυνούς, είναι απαραίτητη η εγκατάσταση αλεξικέραυνων, για προστασία, στο σημείο που τα συνδέονται με τις εναέριες γραμμές (22)

2.2.3.8 Δόνηση



Εικόνα 2.14 Αστοχία καλωδίου λόγω δονήσεων (67).

Το αποτέλεσμα της συνεχούς δόνησης είναι η δημιουργία μιας διαηγούς ρωγμής στην επιφάνεια του εξωτερικού μανδύα ενός καλωδίου, με αποτέλεσμα υγρασία να διεισδύσει στη μόνωση του καλωδίου και τελικά να προκαλέσει βλάβη. Ο εξωτερικός μανδύας του καλωδίου είναι ευαίσθητος σε βλάβες που προκαλούνται από δονήσεις. Σε μέρη όπου συμβαίνουν σοβαρές δονήσεις, καλώδια με ταινία αλουμινίου κάτω από τον εξωτερικό μανδύα έχουν αποτελεσματικά υπό συνθήκες έντονης δόνησης (23).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗΣ ΚΑΙ ΑΚΡΙΒΟΥΣ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ ΣΦΑΛΜΑΤΩΝ ΣΕ ΥΠΟΓΕΙΑ ΚΑΛΩΔΙΑ

3. Κατηγοριοποίηση των μεθόδων ανίχνευσης σφαλμάτων

Όλα αυτά τα χρόνια έχουν αναπτυχθεί αρκετές μέθοδοι ανίχνευσης σφαλμάτων από σχετικές μελέτες, κατασκευάστριες εταιρίες ανάλογου εξοπλισμού, workshops, και ειδικούς του χώρου (19). Πολλές από αυτές έχουν εξελιχθεί ενώ έχουν προκύψει και άλλες καινούργιες μέθοδοι (19). Οι βασικότερες από αυτές συνοψίζονται στο παρόν κεφάλαιο, όπου αναλύεται η διαδικασία εφαρμογής τους και η διαφορετική προσέγγιση που ακολουθεί η κάθε μέθοδος (19). Οι μέθοδοι για τον εντοπισμό σφαλμάτων σε καλώδια μπορεί να χωριστούν σε δύο γενικές κατηγορίες:

3. **Τεχνικές ακροδεκτών**(Terminal Techniques) Οι τεχνικές ακροδεκτών εφαρμόζονται στο ένα ή και τα δύο άκρα του καλωδίου, όπου και λαμβάνουν μετρήσεις. Γενικά, είναι περισσότερο χρήσιμες στο προεντοπισμό σφαλμάτων καθώς δεν υποδεικνύουν με ακρίβεια τη θέση σφάλματος (13) (19)
4. **Τεχνικές ανίχνευσης**(Tracer Techniques) Η ανίχνευση σφαλμάτων με χρήση τεχνικών ακροδεκτών απαιτεί κίνηση κατά μήκος της διαδρομής για τον εντοπισμό ενός ηχητικού ή ηλεκτρομαγνητικού σήματος. Αυτές οι μέθοδοι είναι πιο χρήσιμες για τον ακριβή εντοπισμό της θέσης σφάλματος μετά τον κατά προσέγγιση προσδιορισμό της θέσης του σφάλματος. Γενικά, για την εφαρμογή μεθόδων ανίχνευσης απαιτούνται δύο άτομα. Ένας για το χειρισμό της πηγής παραγωγής σήματος και ένας άλλος για να κινηθεί κατά μήκος της διαδρομής του καλωδίου. Για να ανιχνευθεί το σήμα ιχνηλάτισης κατά μήκος της διαδρομής του καλωδίου, ένας τεχνικός πεδίου πρέπει να ακολουθήσει το καλώδιο κατά μήκος της διαδρομής του ή να εισέλθει στις φρεάτια ώστε να αποκτήσει πρόσβαση στο καλώδιο (19).

Ορισμένες τεχνικές ανίχνευσης μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν εντοπίσουν το καλώδιο ή τη διαδρομή του (19). Συνήθως, οι τεχνικές ακροδεκτών προηγούνται των τεχνικών ανίχνευσης στη διαδικασία εντοπισμού ενός σφάλματος. Η γνώση της διαδρομής του καλωδίου είναι σημαντική δεδομένου ότι πολλές από τις τεχνικές ανίχνευσης παράγουν σήματα που μπορούν ανιχνευτούν μόνο σε περιορισμένο εύρος του καλωδίου (19). Μεγάλες αποκλίσεις του χειριστή της διάταξης ανίχνευσης από τη διαδρομή του καλωδίου κατά την εφαρμογή μεθόδων ανίχνευσης μπορεί να καταστήσει την ανίχνευση του σφάλματος δύσκολη (19).

3.1 Τεχνικές ακροδεκτών

Οι τεχνικές ακροδεκτών, αφού πραγματοποιήσουν μέτρηση των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών του ελαττωματικού αγωγού από έναν ακροδέκτη του, συγκρίνουν τα χαρακτηριστικά του ελαττωματικού αγωγού με αυτά ενός υγιούς αγωγού, οπότε εξακριβώνεται το σημείο που υπάρχει βλάβη. Η αποτελεσματικότητα τους εξαρτάται από το ιστορικό των μετρήσεων σε υγιείς αγωγούς. Οι πιο συνήθεις τεχνικές ακροδεκτών που χρησιμοποιούνται είναι η μέθοδος γέφυρας, ραντάρ, και η μέθοδος συντονισμού (13).

3.1.1 Μέθοδος Γέφυρας

Η συγκεκριμένη μέθοδος χρησιμοποιείται για το εντοπισμό των παρακάτω σφαλμάτων:

- Σφάλματα χαμηλής αντίστασης προς γή(Φάση-Γη, Φάση-Φάση-Γη, Φάση-Φάση-Φάση και Γη) για ακαμπτα καλώδια με μεταλλικό μανδύα
- Σφάλματα Υψηλής αντίστασης προς γή(Φάση-Γη, Φάση-Φάση-Γη, Φάση-Φάση-Φάση και Γη) για ακαμπτα καλώδια με μεταλλικό μανδύα
- Σφάλματα μεταξύ φάσεων των αγωγών σε καλώδια χαμηλής τάσης χωρίς μεταλλικό μανδύα (19).

Η μέθοδος αυτή εφευρέθηκε πριν 100 χρόνια και με διάφορες τροποποιήσεις μπορεί να καλύψει ένα ευρύ φάσμα βλαβών. Ο εντοπισμός σφαλμάτων δύναται να πραγματοποιηθεί με τη χρήση διαφόρων τύπων γέφυρας. Οι διαφορετικοί τυποι γέφυρας παρουσιάζονται παρακάτω.

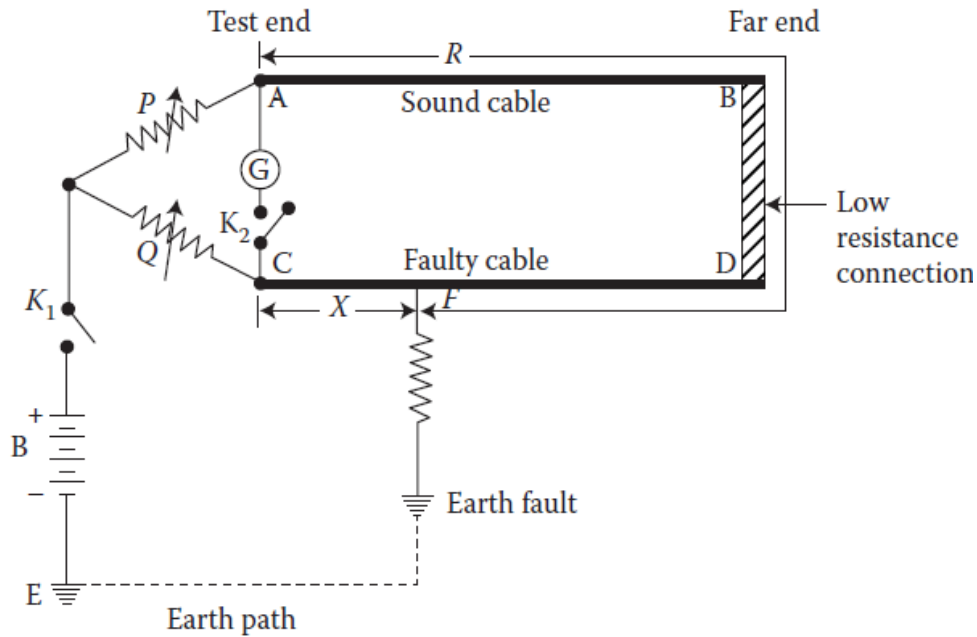
3.1.1.1 Βρόχος Murray(Murray loop bridge)

Η πλέον διαδεδομένη μέθοδος γέφυρας είναι ο βρόχος Murray(Murray Loop). Κατασκευαστικά αποτελείται από δύο κλάδους, ενός υγιούς αγωγού(τμήμα AB) και του αγωγού που φέρει τη βλάβη(τμήμα CD). Ο υγιής και ελαττωματικός αγωγός συνδέονται μεταξύ τους στο ένα άκρο, και μια μεταβλητή αντίσταση, με δύο set αντιστάσεων, συνδέονται κατά μήκος των βρόχων που σχηματίζουν τα καλώδια στο άκρο δοκιμής όπως φαίνονται στην **Εικόνα 3.1**. Ένα γαλβανόμετρο είναι επίσης συνδεδεμένο κατά μήκος του βρόχου, ενώ η πηγή συνεχούς τάσης είναι συνδεδεμένη μεταξύ των μεταβλητών αντιστάσεων και της γης (13) (23).

Έστω **R** η αντίσταση του βρόχου του αγωγού από το κοντινότερο άκρο δοκιμής A μέχρι σημείο σφάλματος και **X**, η αντίσταση από το κοντινότερο άκρο δοκιμής C μέχρι σημείο σφάλματος του βρόχου(Elements of Power Systems).

Σημειώνεται ότι τα **P, Q, R και X** είναι οι τέσσερις βραχίονες(κλάδοι) της γέφυρας Wheatstone. Η ισορροπία επιτυγχάνεται μεταβάλλοντας τα

ποτενσιόμετρα των μεταβλητών αντιστάσεων, δηλαδή οι αντιστάσεις **P** και **Q** μεταβάλλονται έως ότου το γαλβανόμετρο δείξει μηδενική απόκλιση (23) (31).



Εικόνα 3.1 Σχηματική αναπαράσταση του βρόχου Murray(Murray Loop) για σφάλμα διαρροής προς γή (31)

Η αρχή ισορροπίας είναι η εξής:

$$\frac{P}{Q} = \frac{R}{X} \Rightarrow \frac{P}{Q} + 1 = \frac{R}{X} + 1 \Rightarrow \frac{P+Q}{Q} = \frac{R+X}{X}$$

Οπότε αν r η αντίσταση κάθε καλωδίου, έχουμε $R + X = 2r$

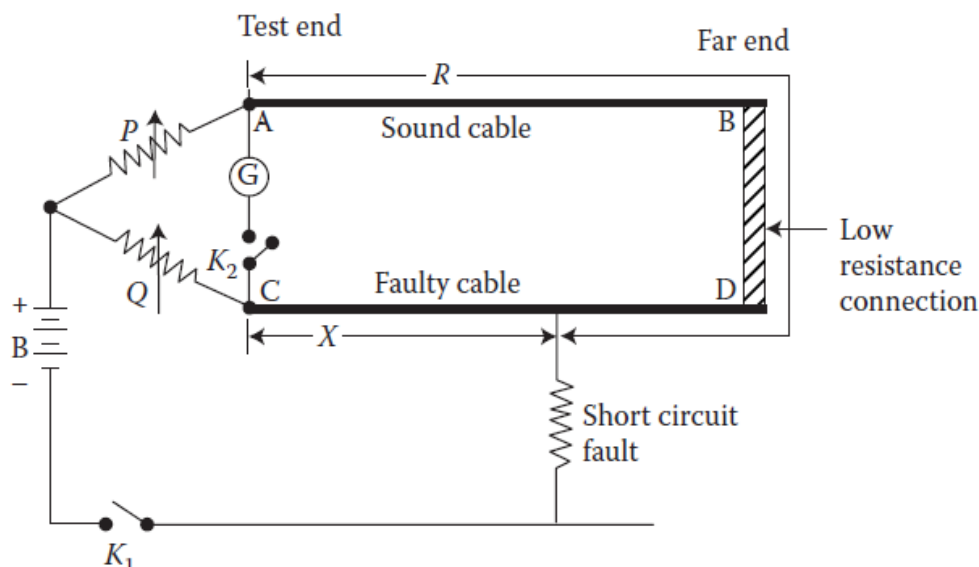
$$\frac{P+Q}{Q} = \frac{2r}{X}$$

Αν l είναι το μήκος κάθε ενός καλωδίου, τότε η αντίσταση ανα μέτρο του καλωδίου είναι $= r/l$.

Συνεπώς, η απόσταση από το πιο κοντινό ακρο δοκιμής C έως το σημείο σφάλματος είναι:

$$d = \frac{X}{r/l} = \frac{Q}{P+Q} * 2r * \frac{1}{r} = \frac{Q}{P+Q} * 2l \Rightarrow$$

$$d = \frac{Q}{P+Q} * \text{Μήκοςβρόχου}$$



Εικόνα 3.2 Σχηματική αναπαράσταση του βρόχου Murray (Murray Loop) για σφάλμα βραχυκυκλώματος μεταξύ δυο αγωγών (31)

Έστω **R** η αντίσταση του βρόχου του αγωγού από το κοντινότερο άκρο δοκιμής A μέχρι σημείο σφάλματος και **X**, η αντίσταση από το κοντινότερο άκρο δοκιμής C μέχρι σημείο σφάλματος του βρόχου (31).

Σημειώνεται ότι τα **P**, **Q**, **R** και **X** είναι οι τέσσερις βραχίονες(κλάδοι) της γέφυρας Wheatstone. Η ισορροπία επιτυγχάνεται μεταβάλλοντας τα ποτενσιόμετρα των μεταβλητών αντιστάσεων, δηλαδή οι αντιστάσεις **P** και **Q** μεταβάλλονται έως ότου το γαλβανόμετρο δείξει μηδενική απόκλιση (31) (23).

Οπότε παρομοια με τη περίπτωση σφάλματος διαρροής προς γή, για την απόσταση από το πιο κοντινό ακρο δοκιμής C εως το σημείο σφάλματος, προκύπτει η παρακάτω σχέση:

$$d = \frac{Q}{P+Q} * \text{Μήκοςβρόχου} \quad (31)$$

Η τάση της πηγής ΣΡ εξαρτάται από την αντίσταση του σφάλματος. Μια συμβατική μπαταρία με περιορισμό στην ισχύ τροφοδοσίας(στα 1kΩ αντίσταση σφάλματος) είναι ικανή να χρησιμοποιηθεί ,αλλά εάν απαιτείται παροχή υψηλότερης τάσης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια συμβατική γεννήτρια δοκιμής μόνωσης. Όπου η αντίσταση σφάλματος παραμένει πολύ υψηλή, είναι απαραίτητη η τροφοδοσία της γέφυρας από έναν ανορθωτή τάσης. Με αυτόν τον τύπο γέφυρας, σφάλματα της τάξης των μερικών mA, σε καλώδια της τάξης των 20kV ή παραπάνω, μπορούν να ανιχνευτούν (23).

Στο κλάδο του καλωδίου, ο βρόχος που περιλαμβάνει τον υγιή αγωγό διαρρέεται από μικρότερη ποσότητα ρεύματος σε σχέση με το βρόχο του ελαττωματικού καλωδίου οπότε το γαλβανόμετρο συνδέεται παράλληλα του κλάδου αντιστάθμισης, εισάγοντας στη γέφυρα μικρότερη παρασιτική αντίσταση (23).

Ένας εντοπισμός στο ένα άκρο ή στο άλλο της διαδρομής χρειάζεται προσεκτικό έλεγχο πριν γίνει αποδεκτός ως σωστός, όταν οι εκτός βρόχου αγωγοί υποδεικνύουν ένα σφάλμα στο πιο απομακρυσμένο άκρο, ενώ μία λανθασμένη γείωση σε κάποιο σημείο του βρόχου θα δώσει ένα προφανές σφάλμα σε αυτή τη θέση (23).

3.1.1.2 Βρόχος Varley (Varley loop bridge)

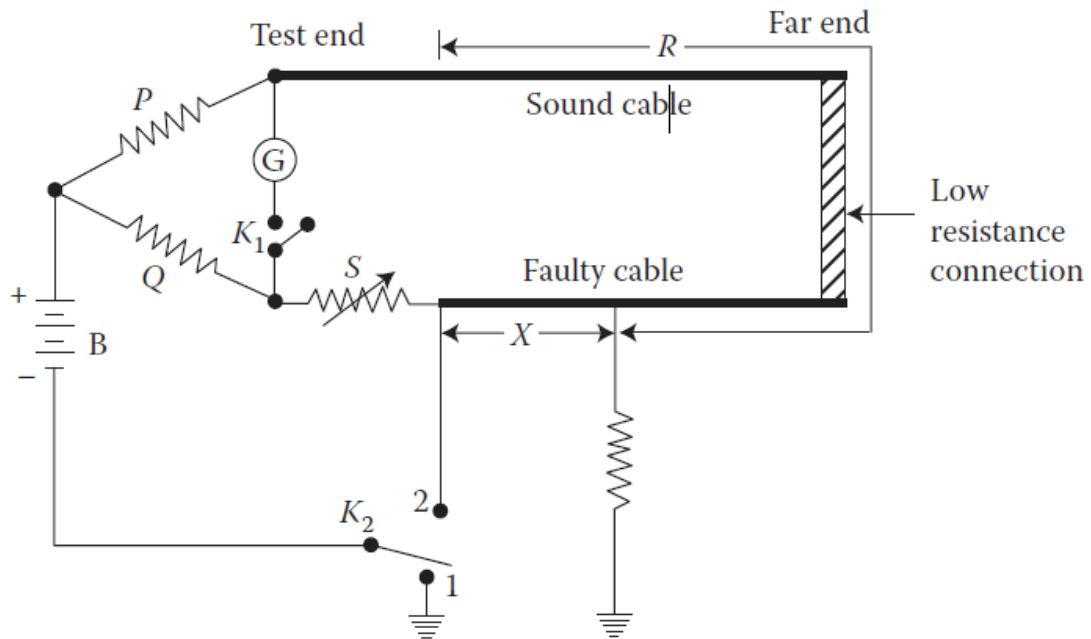
Η δοκιμή με χρήση βρόχου Varley εφαρμόζεται επίσης για τον εντοπισμό σφάλματων προς γή ή για σφάλματα μεταξύ φάσεων των αγωγών σε υπόγεια καλώδια. Και αυτή η δοκιμή βασίζεται στην αρχή λειτουργίας της γέφυρας Wheatstone. Διαφέρει από τη δοκιμή με χρήση βρόχου Murray στο γεγονός ότι οι κλάδοι P και Q είναι σταθερές αντιστάσεις. Η ισορροπία της γέφυρας επιτυγχάνεται μεταβάλλοντας τη τιμή της μεταβλητής αντίστασης S που είναι συνδεδεμένη στο κοντινότερο άκρο δοκιμής του ελαττωματικού καλωδίου. Η συνδεσμολογία για τον εντοπισμό σφάλματων προς γή ή για σφάλματα μεταξύ φάσεων των αγωγών με τη δοκιμή βρόχου Varley φαίνονται στο **Σχήμα 3.3** και στο **Σχήμα 3.4**, αντίστοιχα (31).

Για σφάλματα προς γή ή επαφής μεταξύ αγωγών, το κλειδί K2 ρυθμίζεται στη θέση 1. Η μεταβλητή αντίσταση S μεταβάλλεται μέχρι να επιτευχθεί ισορροπία στη γέφυρα για τιμή αντίστασης S1 (31). Τότε,

$$\frac{P}{Q} = \frac{R}{X + S_1} \Rightarrow \frac{P + Q}{Q} = \frac{R + X + S_1}{X + S_1}$$

ή

$$X = \frac{Q(R + X) - PS_1}{P + Q} \quad (1)$$



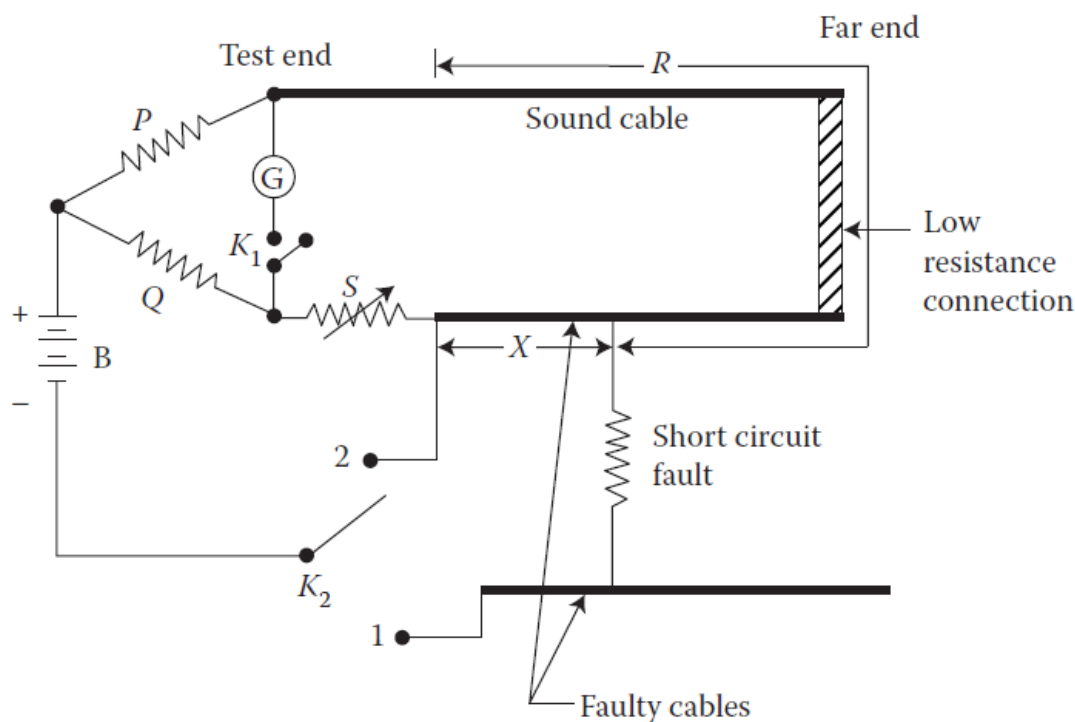
Εικόνα 3.3 Σχηματική αναπαράσταση του βρόχου Varley(Varley Loop) για σφάλμα διαρροής προς γή (31)

Τώρα, το κλειδί K2 δύναται ρυθμιστεί στη θέση 2(τόσο για σφάλματα προς γή όσο και για βραχυκυκλώματα μεταξύ δυο αγωγών) και η γέφυρα πλέον ισορροπεί για μια νέα τιμή αντίστασης S2 (31). Έχουμε,

$$\frac{P}{Q} = \frac{R + X}{S_2} \Rightarrow (R + X)Q = PS_2 \quad (2)$$

Από τις σχέσεις 1 και 2 έχουμε:

$$X = \frac{P(S_2 - S_1)}{P + Q}$$



Εικόνα 3.4 Σχηματική αναπαράσταση του βρόχου Varley(Varley Loop) για σφάλμα βραχυκυκλώματος μεταξύ δυο αγωγών (31)

Για αντιστάσεις P , Q , S_1 , και S_2 γνωστές, η απόσταση X μπορεί να εκφραστεί ως (31):

$$R + X = \frac{P}{Q} S_2$$

Πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι η τιμή της αντίστασης στον αγωγό επιστροφής δεν επηρεάζει ούτε την ισορροπία της γέφυρας ούτε τους υπολογισμούς για την αντίσταση σφάλματος Varley. Η τιμή της αντίστασης στον αγωγό επιστροφής δεν επηρεάζει την ευαισθησία της γέφυρας και, κατά συνέπεια, την ακρίβεια της (32).

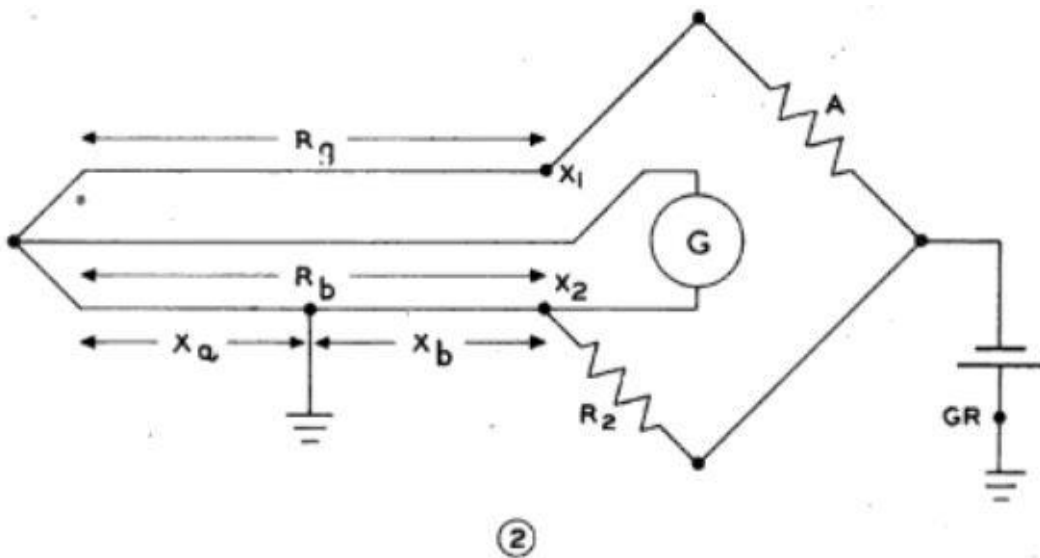
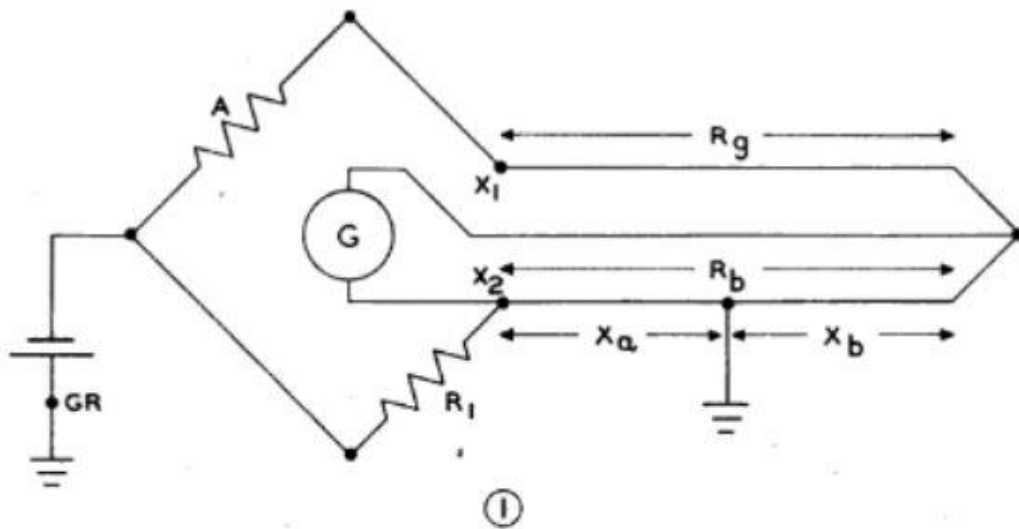
3.1.1.3 Βρόχος Hiborn(Hiborn loop bridge)

Αυτή η μέθοδος είναι χρήσιμη για τον εντοπισμό σφαλμάτων στα μήκη τομής(section lengths) των καλωδίων. Εκτός του υπο δοκιμή αγωγού, για τη πραγματοποίηση αυτής της δοκιμής απαιτούνται δυο ακόμη αγωγοί αναφοράς(υγιής αγωγοί), ενός εκ των οποίων η αντίσταση πρέπει να είναι γνωστή. Οι συνδέσεις(σχήμα 3.5 α) διαφέρουν σε σχέση με το βρόχο Murray στο γεγονός ότι η αντίσταση αντιστάθμισης-εκείνη δηλαδή που τον αντιπροσωπεύει- του καλού αγωγού δεν είναι συνδεδεμένη στο ακρο του γαλβανομέτρου. Η γέφυρα ισορροπεί μεταβάλλοντας την αντίσταση $R1$. Όταν η γέφυρα ισορροπήσει, η τιμή της αντίστασης $R1$, η αντίσταση κλάδου A , η

γνωστή αντίσταση του αγωγού αναφοράς R_g και ο υπο δοκιμή αγωγός R_b ικανοποιούν τη παρακάτω σχέση

$$\frac{A+R_g}{R_1} = \frac{X_b}{R_b-X_b} \Rightarrow X_b = \frac{A+R_g}{A+R_g+R_1} * R_b$$

,δηλαδή η αντίσταση από το σφάλμα μέχρι το πιο απομακρυσμένο ακρο του βρόχου (32).



Εικόνα 3.5 Σχηματική αναπαράσταση του βρόχου Hiborn(Hiborn Loop) για σφάλμα διαρροής προς γή (32)

Μετά για να επιβεβαιωθεί η μέτρηση, επαναλαμβάνεται η δοκιμή αλλάζοντας συνδεσμολογία σύμφωνα με το σχήμα 2, χρησιμοποιώντας τους ίδιους αγωγούς αναφοράς και την ίδια συνδεσμολογία με τη πρώτη περίπτωση. Όταν η γέφυρα ισορροπήσει η αντίσταση από το πρώτο σημείο δοκιμής μέχρι το σφάλμα θα δοθεί από τη σχέση (32),

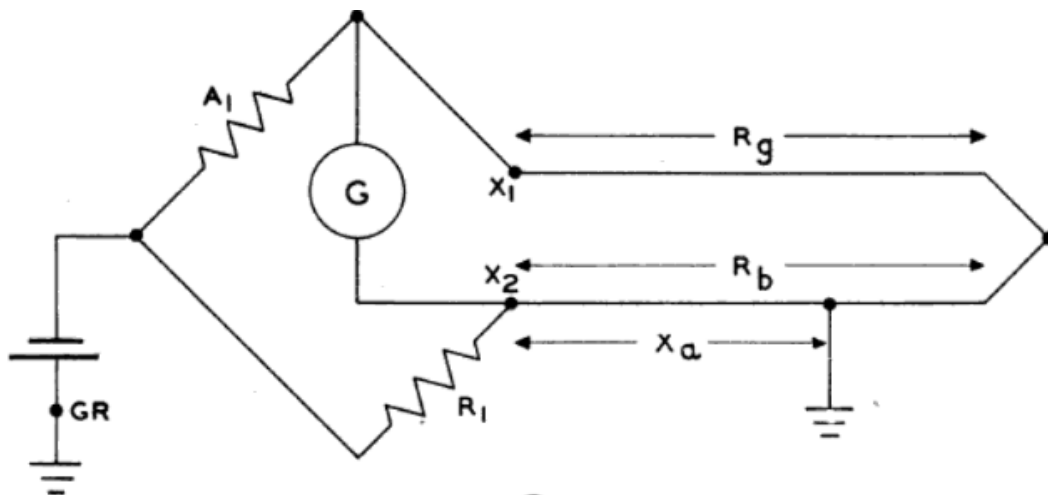
$$X_a = \frac{A + R_g}{A + R_g + R_2} * R_b$$

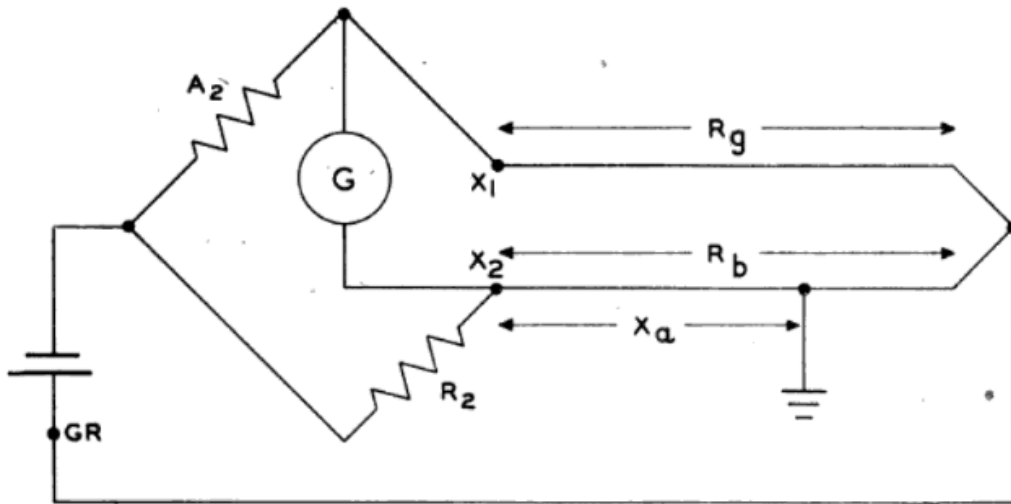
Η μέθοδος αυτή είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για σφάλματα μεταξύ αγωγών καλωδίων μεγάλης διατομής, καθώς οι διπλές συνδέσεις στον υπό δοκιμή αγωγό σε κάθε άκρο διασφαλίζουν ότι οι αντιστάσεις των συνδέσεων και οι παρασιτικές αντιστάσεις δοκιμής βρίσκονται στα κυκλώματα κλάδων γέφυρας και γαλβανομέτρου, όπου δεν επηρεάζουν την ισορροπία της γέφυρας. Χρησιμοποιείται επίσης για τον εντοπισμό σφαλμάτων αγωγού προς τη γη, και σε μικρά μήκη καλωδίου όπου χρησιμοποιείται ένα εδαφιαίο συνεστραμμένο καλώδιο ως επιστροφή (23) (33).

3.1.1.4 Βρόχος Fischer(Fischer loop bridge)

Η μέθοδος αυτή είναι χρήσιμη όταν όλοι οι αγωγοί σε ένα καλώδιο είναι «κακοί»(με σφάλμα), κρίνοντας επιβεβλημένη τη χρήση βοηθητικών αγωγών, εκτός αυτών του καλωδίου, για τη διεξαγωγή της δοκιμής. Χρησιμοποιούνται, λοιπόν, δυο επιπλέον αγωγοί, ανεξαρτήτου μήκους ή διατομής. Η μόνη απαίτηση είναι να τερματίζουν στο ίδιο σημείο με αυτό της δοκιμής του κυκλώματος (32).

Εκτελούνται δύο τεστ. Το πρώτο τεστ ταυτίζεται με δοκιμή βρόχου Murray, και οι συνδέσεις γίνονται, χρησιμοποιώντας το 1ο βοηθητικό αγωγό ως αγωγό αναφοράς(R_g)(Εικόνα 3.6 α). Στο δεύτερο τεστ(Εικόνα 3.6 β), η γείωση της μπαταρίας(πηγής τάσης) καταργείται και συνδέεται απευθείας μέσω του δεύτερου αγωγού αναφοράς στο απομακρυσμένο άκρο της γέφυρας. Έστω ότι η R_b είναι συνολική αντίσταση του υπό δοκιμή αγωγού, X_a είναι η αντίσταση μέχρι το σημείο σφάλματος και R_g είναι η αντίσταση του 1ου αγωγού αναφοράς. Η αντίσταση του υπό δοκιμή αγωγού, πρέπει να είναι γνωστή σε αντίθεση με την αντίσταση του 1ου αγωγού αναφοράς που δεν είναι απαραίτητο (32).





Εικόνα 3.6 Σχηματική αναπαράσταση του βρόχου Fischer (Fischer Loop) για σφάλμα διαρροής προς γή (32)

Για δεδομένη αντίσταση αναλογίας $A1$ και για μεταβλητή αντίσταση $R1$ έχουμε

$$\frac{A1}{R1} = \frac{R_g + R_b - X_a}{X_a}$$

Από το 2ο τεστ, για δεδομένη αντίσταση αναλογίας $A2$ και για μεταβλητή αντίσταση $R2$ έχουμε, έχουμε:

$$\frac{A2}{R2} = \frac{R_g}{R_b}$$

Απλοποιώντας την R_g και από τις 2 εξισώσεις, προκύπτει

$$X_a = \frac{(A2 + R2)R1}{(A1 + R1)R2} R_b$$

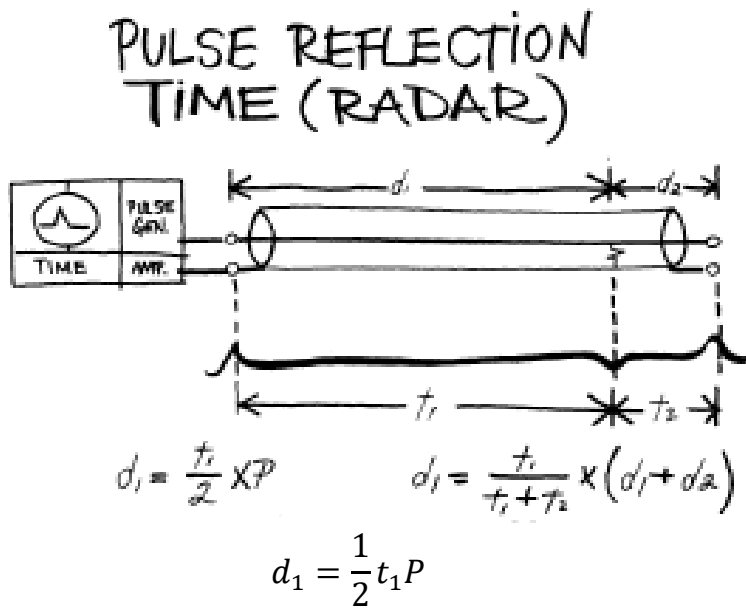
Αυτό είναι ένα δεύτερο κύκλωμα γέφυρας που απαιτεί τη χρήση δύο αγωγών αναφοράς και είναι μια εναλλακτική υλοποίηση του βρόχου Hilborn. Μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για να ελέγξει εάν οι αντιστάσεις του υπο δοκιμή αγωγού και των αγωγών αναφοράς ενός βρόχου είναι πανομοιότυπες (23).

3.1.2 Μέθοδος Radar(αντήχησης παλμών)(Pulse Reflection Method)

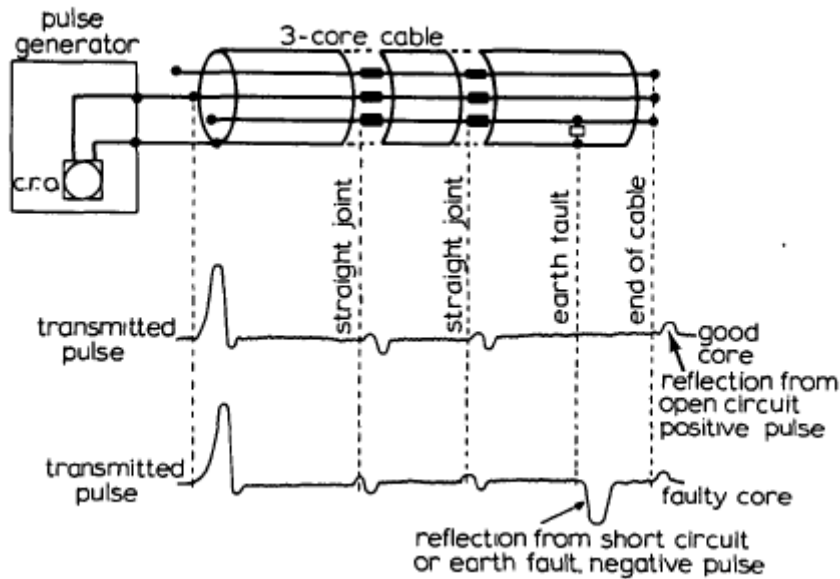
Η συγκεκριμένη μέθοδος χρησιμοποιείται για το εντοπισμό των παρακάτω σφαλμάτων:

- Σφάλματα ανοικτού κυκλώματος
- Σφάλματα χαμηλής αντίστασης προς γη(Φάση-Γη, Φάση-Φάση-Γη, Φάση-Φάση-Φάση και Γη) (34)

Η μέθοδος Radar(ή ανάκλασης παλμού) βασίζεται στην ανάκλαση ενός εγχέομενου παλμού στη θέση σφάλματος (23).Ένας d.c. παλμός εγχέεται στο υπό δοκιμή καλώδιο. Ο παλμός ταξιδεύει κατά μήκος του καλωδίου έως ότου εντοπίσει μεταβολή της τιμής της αντίστασης όπως μούφες , κόμβους ή ανοιχτό κύκλωμα ή βραχυκύκλωμα. Η αναντιστοιχία προκαλεί μια αντανάκλαση, η οποία επιστρέφει στο άκρο του καλωδίου και λαμβάνεται από το όργανο δοκιμής (34).Η απόσταση d του σημείου που έγινε το σφάλμα μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση:



όπου t_1 είναι ο απαιτούμενος χρόνος για να ταξιδέψει ο παλμός και να επιστρέψει πίσω και P η ταχύτητα διάδοσης του παλμού (20).



Εικόνα 3.7 Τυπικές κυματομορφές που φαίνονται στην οθόνη ενός παλμογράφου με την εφαρμογή της μεθόδου ανάκλασης παλμών. Στο σχήμα συγκρίνονται οι κυματομορφές ενός υγιούς αγωγού(επάνω) και ενός αγωγού με σφάλμα(κάτω) (34)

Η θέση των αναντιστοιχιών, όπως μούφες ,κόμβοι ,και το πραγματικό σφάλμα, θα εμφανιστούν απευθείας σε σημεία του χρονικού άξονα ανάλογα με το σημείο της βλάβης .Το είδος της βλάβης μπορεί να προσδιοριστεί από το τύπο του ανακλώμενου παλμού, δηλαδή ένας παλμός με φορά προς τα πάνω σημαίνει ότι έχουμε σφάλμα ανοιχτού κυκλώματος, ή ένας παλμός με φορά προς τα κάτω σηματοδοτεί εάν σφάλμα διαρροής προς γη (34).Ένα βραχυκύκλωμα(διαρροή προς γη) θα υποδεικνύεται στην οθόνη με μίας αντίθετης πολικότητας αντίδραση σε σχέση με τον εφαρμοσμένο παλμό. Η απόσταση έως την αναντιστοιχία που προκαλεί εάν σφάλμα, προκύπτει από τη μέτρηση του χρονικού διαστήματος που μεσολαβεί , σε μs , μεταξύ της αποστολής του παλμού και της λήψης της αντανάκλασης του. Οι ταχύτητες διάδοσης ενός παλμού για κάθε τύπο καλωδίου είναι γνωστές , ενώ η απόσταση έως το σφάλμα(σε μέτρα) προκύπτει από το μετρούμενο χρονικό διάστημα και τη γνωστή(διαφορετική για κάθε τύπο καλωδίου) ταχύτητα διάδοσης σε m/s² . Επειδή ο παλμός ταξιδεύει έως το σφάλμα και επιστρέφει , είναι βολικό να χρησιμοποιήσουμε τη μισή τιμή της ταχύτητας διάδοσης, δηλαδή $V / 2$ (34).

Γίνεται χρήση παλμού μικρής διάρκειας και βρίσκει εφαρμογή στον εντοπισμό συγκεκριμένων σφαλμάτων σε μονωμένα καλώδια ισχύος. Η διάρκεια του παλμού είναι μικρή, το duty cycle είναι χαμηλό, οπότε η μέση τιμή της εφαρμοζόμενης τάσης στο σφάλμα είναι χαμηλή. Ο χρόνος διάδοσης του παλμού μέχρι το σφάλμα είναι πολύ μεγαλύτερος της διάρκειας του εγχεόμενου παλμού. Το κυριότερο πλεονέκτημα της χρήσης παλμού μικρής διάρκειας είναι η δυνατότητα απρόσκοπτης απεικόνισης στην οθόνη του παλμογράφου. Όσο ελκυστική και αν είναι η μέθοδος Radar, έχει περιορισμούς. Σφάλματα

καλωδίων μεταξύ του κεντρικού αγωγού και του μανδύα με τιμές αντίστασης μεγαλύτερες από δέκα φορές τη χαρακτηριστική αντίσταση του καλωδίου(σφάλματα υψηλής αντίστασης) έχουν μικρές ανακλάσεις και δεν μπορούν εύκολα να διακριθούν από τις ανακλάσεις κάποιων άλλων ασυνεχειών του καλωδίου(ματίσεις, συγκολλήσεις, μετασχηματιστές, σφάλματα, αλλαγές στον τύπο καλωδίου, καθώς και το μακρύτερο άκρο του καλωδίου). Σε αυτή τη περίπτωση είναι απαραίτητη η σύγκριση των κυματομορφών ενός υγιούς και ενός ελαττωματικού αγωγού ώστε να εξαχθούν ασφαλή συμπεράσματα (19) (35) (13).

Η μέθοδος αυτή μπορεί να εφαρμοστεί σε καλώδια μεταφοράς μεγάλου μήκους και είναι επίσης χρήσιμη σε συστήματα διανομής τα οποία δεν έχουν την ίδια διατομή καλωδίου σε όλο το μήκος τους (23).

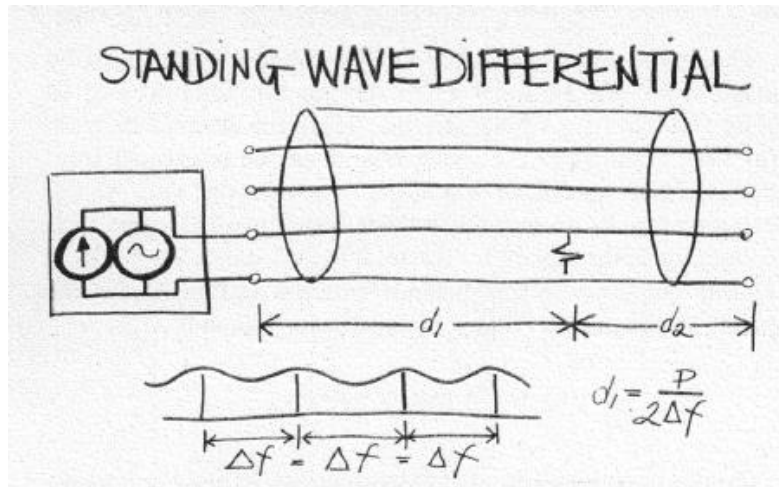
3.1.3 Μέθοδος Συντονισμού(Standing Wave differential Method)

Η συγκεκριμένη μέθοδος χρησιμοποιείται για το εντοπισμό των παρακάτω σφαλμάτων:

- Σφάλματα ανοικτού κυκλώματος
- Σφάλματα χαμηλής αντίστασης προς γή(Φάση-Γη, Φάση-Φάση-Γη, Φάση-Φάση-Φάση και Γη) (34)

Η μέθοδος συντονισμού βασίζεται στην αρχή της ανάκλασης κυμάτων, ενώ ταυτόχρονα εξαρτάται από το φαινόμενο που εμφανίζεται στις γραμμές μεταφοράς, γνωστό και ως συντονισμός κύματος (13) (34).Μια πηγή τάσης μεταβλητής συχνότητας τροφοδοτεί το κύκλωμα και η τάση που εφαρμόζει ρυθμίζεται μέχρις ότου να διαμορφωθεί η βασική αρμονική (για την οποία η αντίσταση εισόδου είναι ελάχιστη), και καθοριστεί η δεύτερη αρμονική. Γνωρίζοντας την ταχύτητα διάδοσης του καλωδίου και τη διαφορά μεταξύ δύο αρμονικών (δηλ. 1 έως 2, 2 έως 3 κ.λπ.),μπορεί να προσδιοριστεί η θέση του σφάλματος (19).Το μήκος κύματος θα συντονίζεται με μια τάση ημιτονοειδούς

μορφής, δηλαδή για μια συχνότητα αναφοράς f_1 , το μήκος κύματος του καλωδίου όπου υπάρχει σφάλμα θα αντιπροσωπεύει μια ποσότητα του μήκους κύματος (πχ $\frac{1}{4}, \frac{1}{2}, \frac{1}{3}$ κλπ.) (34).



Εικόνα 3.8 Εφαρμογή της μεθόδου συντονισμού για εντοπισμό σφάλματος διαρροής προς γη (20)

Το διάστημα συχνοτήτων, Δf , μεταξύ διαδοχικών σημείων συντονισμού είναι συνεχές, και το μήκος του καλωδίου όπου εντοπίζεται το σφάλμα δίνεται από το τύπο:

$$l = \frac{u}{N_1 * \Delta f} = \frac{u}{f_r * N}$$

όπου u η ταχύτητα διάδοσης

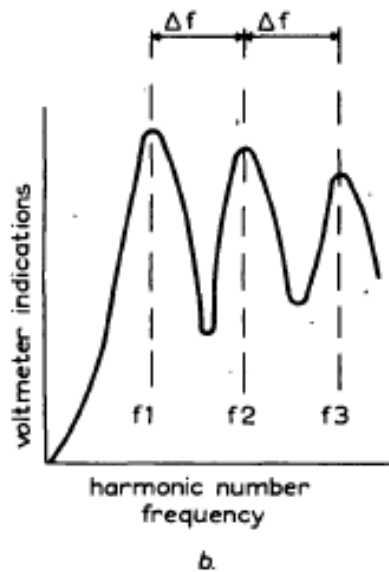
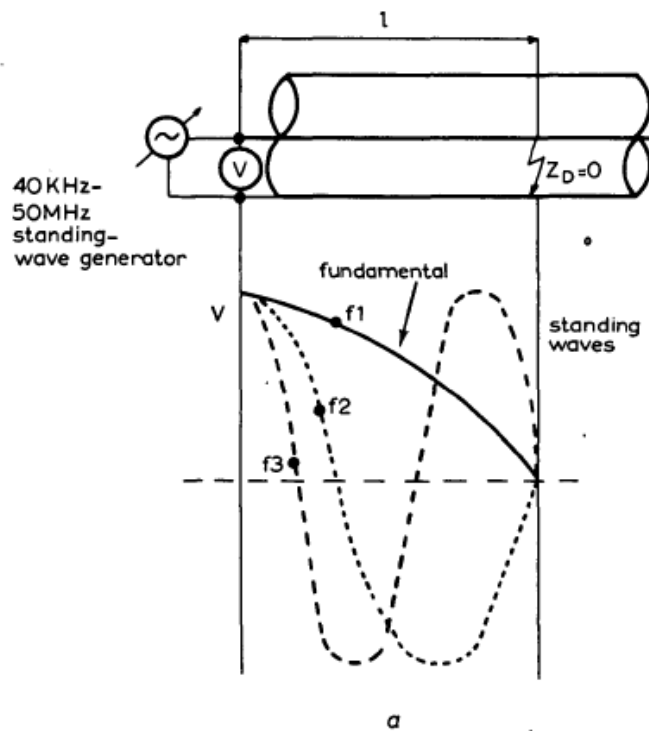
N_1 ο αριθμός των υποαρμονικών

f_r η συχνότητα συντονισμού

N ο αριθμός των κυμάτων

(ενός τετάρτου ή μισού)

Η ελάχιστη συχνότητα του διαστήματος συχνοτήτων Δf , καθορίζεται από το μήκος του καλωδίου, ενώ η μέγιστη καθορίζεται από την απόσταση του πλησιέστερου σημείου από το σφάλμα (13). Γνωρίζοντας την ταχύτητα διάδοσης του καλωδίου και τη διαφορά μεταξύ δύο αρμονικών (δηλ. 1 έως 2, 2 έως 3 κ.λπ.), μπορεί να προσδιοριστεί η θέση του σφάλματος. Σφάλματα χαμηλής αντίστασης προς γη που οφείλονται στη διάβρωση της μόνωσης του καλωδίου εντοπίζονται σε μήκη κύματος της τάξεως του ενός τετάρτου του μήκους κύματος της αρμονικής συχνότητας, ενώ τα ανοικτά σφάλματα εντοπίζονται σε μήκη κύματος ίσα με το μισό της αρμονικής συχνότητας (19).



Εικόνα 3.9 Αρχή λειτουργίας της μεθόδου συντονισμού κυμάτων α) Στάσιμα κύματα που αναπτύσσονται κατά μήκος ενός καλωδίου με σφάλμα βραχυκυκλώματος σε διάφορες αρμονικές συχνότητες β) Φάσμα διαφόρων αρμονικών συχνοτήτων (34)

Το πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι μπορεί να εφαρμοστεί για οποιοδήποτε είδος σφάλματος. Ωστόσο, η μορφή των κορυφών της κυματομορφής συντονισμού εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την απόκλιση της αντίστασης σφάλματος σε σχέση με την αντίσταση του κύματος. Σε ανοιχτά

κυκλώματα έχοντας άπειρη αντίσταση, ή σε βραχυκυκλώματα και διαρροές προς τη γη έχοντας μηδενική αντίσταση σφαλμάτων, οι κορυφές είναι σχετικά έντονες. Δυστυχώς, αυτές οι κορυφές γίνονται λιγότερο έντονες σε αναλογία με οποιαδήποτε αντίσταση που συμβαίνει κατά μήκος της απόστασης του καλωδίου, και οι κορυφές τελικά εξαφανίζονται όταν υπάρχει αντίσταση κατά μήκος του σφάλματος . Επί πλέον η ύπαρξη τυχόν ασυνεχών, όπως ματίσματα, διακλαδώσεις, ή σε σειρά σφάλματα δημιουργούν παρεμβολές που δρουν σκοτεινά και ενδεχομένως να επηρεάσουν τις κορυφές των βλαβών. Τέτοιες ασυνέχειες μπορεί να χρησιμοποιηθούν για σημεία αναφοράς όπου είναι γνωστές οι τοποθεσίες τους (20).

3.2 Τεχνικές ανίχνευσης

Οι τεχνικές ανίχνευσης εκχέουν ένα ηλεκτρικό σήμα(ηλεκτρικό, ακουστικό) στον ελαττωματικό αγωγό στο ένα ή και τα δύο άκρα του, το οποίο ανιχνεύεται με τη βοήθεια κατάλληλων δεκτών σε όλη τη διάρκεια της διαδρομής του καλωδίου(ακολουθώντας κατά μήκος της διαδρομή του καλωδίου). Οι κυριότερες μέθοδοι ανίχνευσης είναι οι εξής (13) (19):

1. **Μέθοδος κρουστικών τάσεων** (Impulse Voltage)
2. **Δυναμικό γής** (Earth gradient)
3. **Μέθοδος Radar με εφαρμογή παλμών υψηλής τάσης ή μέθοδος ανάκλασης τόξου** (Arc Reflection)
4. **Ανίχνευση ρεύματος** (Tracing Current)
5. **Ακουστική συχνότητα** (ανίχνευση τόνου) (Audio Frequency)

3.2.1 Μέθοδος Κρουστικών Τάσεων(Impulse Voltage Method)

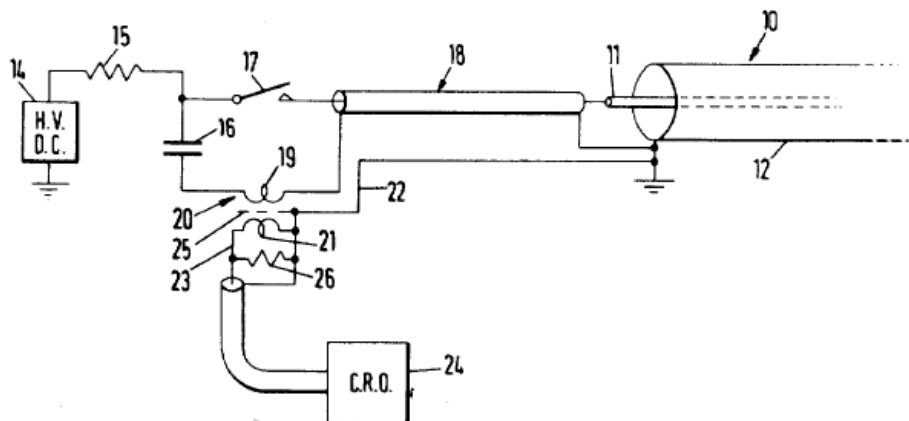
Η συγκεκριμένη μέθοδος διατηρεί όλα τα πλεονεκτήματα της μεθόδου Radar (**ανάκλασης παλμού**). Στους ακροδέκτες εξόδου μιας γεννήτριας εκκένωσης πυκνωτή συνδέεται παλμογράφος με τη χρήση πυκνωτή ζεύξης υψηλής χωρητικότητας. Η μέθοδος κρουστικών τάσεων για εντοπισμό της θέσης σφάλματος συνήθως χρησιμοποιείται για όλους τους τύπους σφαλμάτων εκεί όπου η αντίσταση του σφάλματος δεν είναι τόσο μεγάλη ώστε να απαιτείται η εφαρμογή της τεχνικής καύσης της αντίστασης σφάλματος προηγουμένως **(36)**. Όπως φαίνεται και από το παρακάτω σχήμα, η μέθοδος έχει επιλεγεί για να ικανοποιήσει την αυξανόμενη απαίτηση για προεντοπισμό σφαλμάτων σε διακλαδισμένα δίκτυα με δοκιμές σε ένα μόνο άκρο του καλωδίου(τερματικό) **(36)**. Ο πυκνωτής C_g φορτίζεται μέσω της γεννήτριας παλμών, ενώ κατά την εκφόρτιση μεταδίδει έναν παλμό υψηλής ενέργειας, μεταξύ του ελαττωματικού αγωγού και της γης **(13)**.

Η θέση σφάλματος μπορεί να εντοπιστεί είτε με ακρόαση του ηχητικού παλμού είτε με τον εντοπισμό μαγνητικού πεδίου που παράγεται από τη δημιουργία τόξου στο σφάλμα είτε αναλύοντας τις κυματομορφές ρεύματος και τάσης που επιστρέφουν από τον ελαττωματικό αγωγό **(13)**. Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται τόσο σε συστήματα μεταφοράς όσο και σε συστήματα διανομής, κυρίως σε διακλαδισμένα συστήματα όπου η μέθοδος ανάκλασης παλμού αποτυγχάνει.

A) Λήψη Κρουστικού Ρεύματος

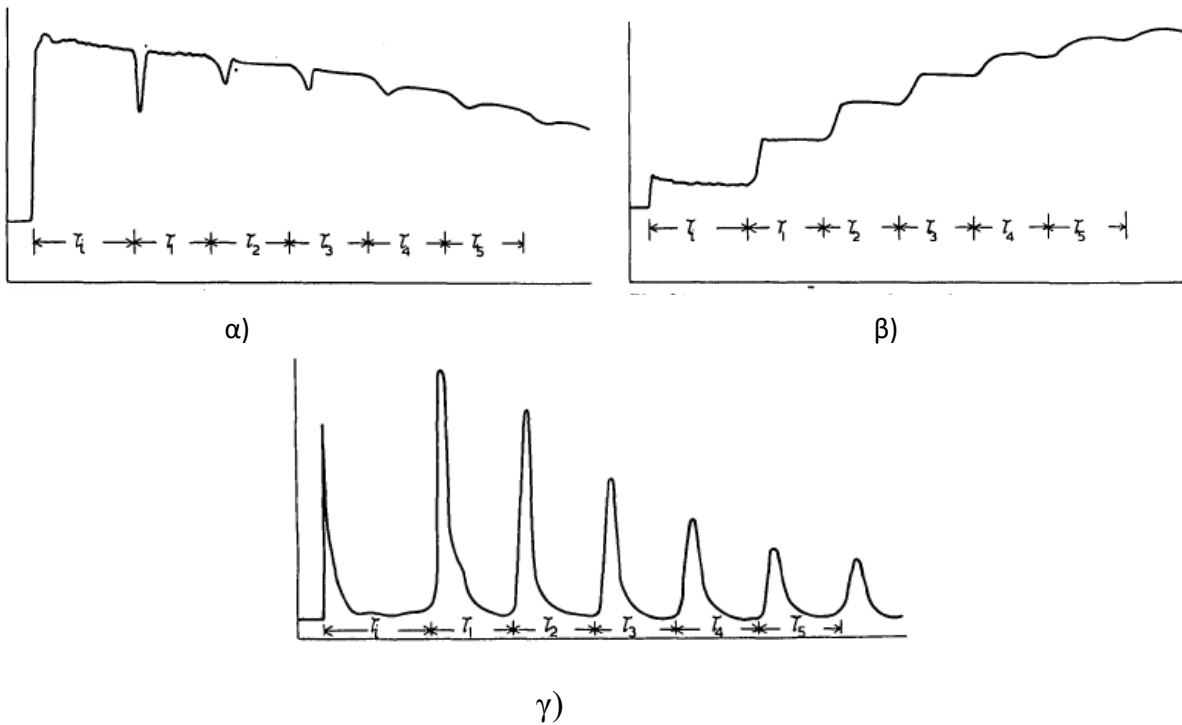
Η μέθοδος αυτή λαμβάνει υπόψιν το παλμικό ρεύμα. Όσο μεγαλύτερη είναι η χωρητικότητα μιας γεννήτριας παλμών (16) τόσο περισσότερο σχεδόν προσομοιάζει τη συμπεριφορά μιας πηγής σταθερής τάσης, κάτι που

υποδηλώνει ότι θα ήταν πιο λογικό να ανιχνεύσουμε και να εμφανίσουμε την κυματομορφή του ρεύματος παρά την κυματομορφή της τάσης (36).



Εικόνα 3.10 Τυπική διάταξη της μεθόδου κρουστικών τάσεων με λήψη κρουστικού ρεύματος (37).

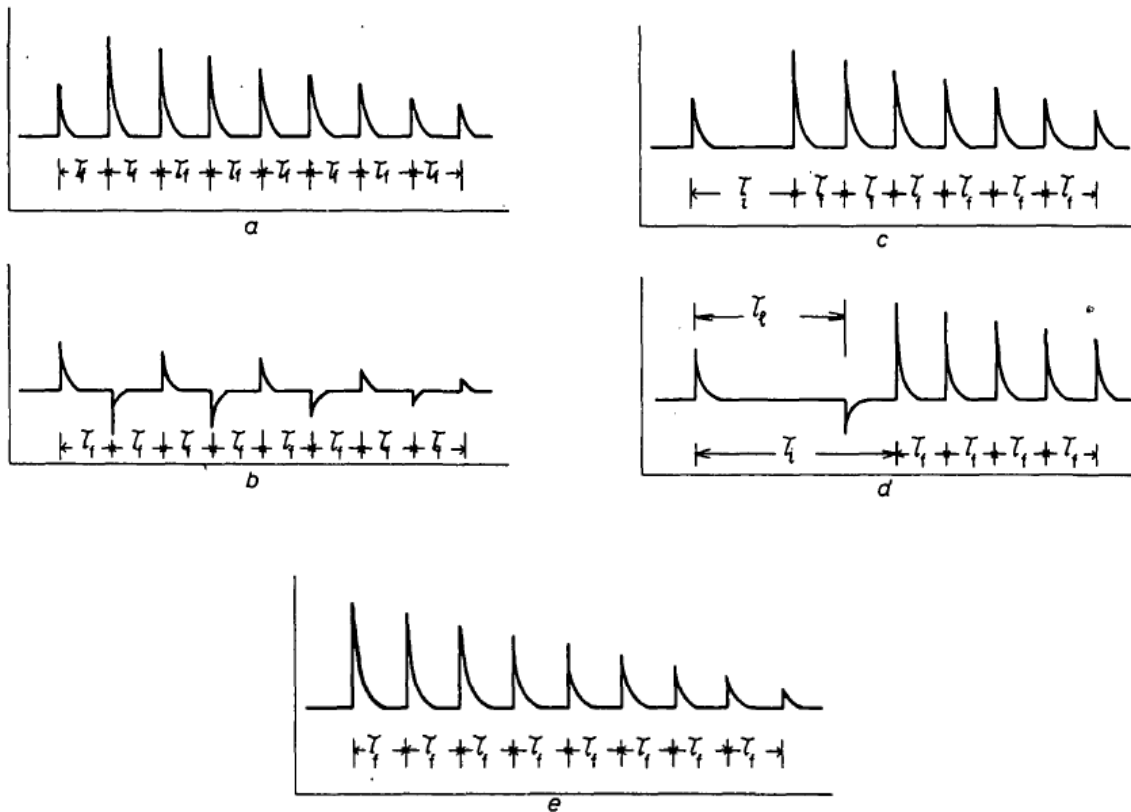
Εάν το καλώδιο έχει σφάλμα με μια αντίσταση να αλλοιώνει τα χαρακτηριστικά της κρουστικής τάσης του καλωδίου ή ένα σφάλμα που προκαλεί κατάρρευσή του όταν εφαρμόζεται η κρουστική τάση στο καλώδιο, λοιπόν, με αυτήν τη μέθοδο, όταν εφαρμόζεται ένα κρουστικό σήμα στο καλώδιο (από μια γεννήτρια παλμών), θα προκύψει μια κυματομορφή, της οποίας η μορφή θα εξαρτάται από τη φύση του σφάλματος. Για ένα σφάλμα χαμηλής αντίστασης, η βηματική αντίδραση ρεύματος θα έχει την ίδια πολικότητα με το εφαρμοζόμενο παλμό και θα προκαλέσει διπλασιασμό της μέσης τιμής του ρεύματος στη γεννήτρια παλμών, παράγοντας έτσι ένα περαιτέρω βήμα στη κυματομορφή ρεύματος που είναι συνεπώς μια διαδοχή βημάτων δίνοντας αυξανόμενου πλάτους ρεύμα. Αναφερόμενοι στο παραπάνω σχήμα, το υπό δοκιμή καλώδιο (10) απεικονίζεται ως αγωγός (11) εντός γειωμένου εξωτερικού περιβλήματος (12). Το γραμμικό φίλτρο (20) ωστόσο λαμβάνει το παράγωγο αυτής της κυματομορφής δίνοντας έτσι ένα σήμα στην έξοδο που είναι ένας παλμός σχετικά μικρής διάρκειας κάθε φορά μια αντανάκλαση της πρωτεύουσας κρουστικής αντίδρασης γυρίζει στη γεννήτρια παλμών. Έτσι η κυματομορφή απλοποιείται και γίνεται πιο βολικό από ό, τι με απεικόνιση της τάσης και η ανάλυση μπορεί να γίνει πολύ πιο εύκολα. Η αυξανόμενη απόκριση συχνότητας του φίλτρου δίνει έμφαση στα τμήματα υψηλής συχνότητας στα εμπρός τμήματα των ανακλάσεων και έτσι, στην οθόνη του παλμογράφου (24), απεικονίζεται καλύτερα η κυματομορφή. Η κυματομορφή του ρεύματος, που προκύπτει από την εφαρμοζόμενη κρουστική τάση, εξαρτάται από το τύπο του σφάλματος (37).



Εικόνα 3.11 Αφού εφαρμοστεί η τάση της γεννήτριας παλμών λαμβάνονται οι παρακάτω κυματομορφές
 α)Κυματομορφή της τάσης στην έξοδο του καλωδίου β) Κυματομορφή του ρεύματος στην έξοδο του καλωδίου γ)
 Κυματομορφή του ρεύματος στην έξοδο του καλωδίου, αφού περάσει από γραμμικό φίλτρο(21) **(37)**.

Ένας διακόπτης(17) χρησιμοποιείται για τη σύνδεση του κλάδου υψηλής τάσης του πυκνωτή με έναν αγωγό του υπό δοκιμή καλωδίου, ενώ η πλευρά χαμηλής τάσης συνδέεται μέσω του γραμμικού φίλτρου(20) με ένα γειωμένο αγωγό του υπό δοκιμή καλωδίου **(37)**.

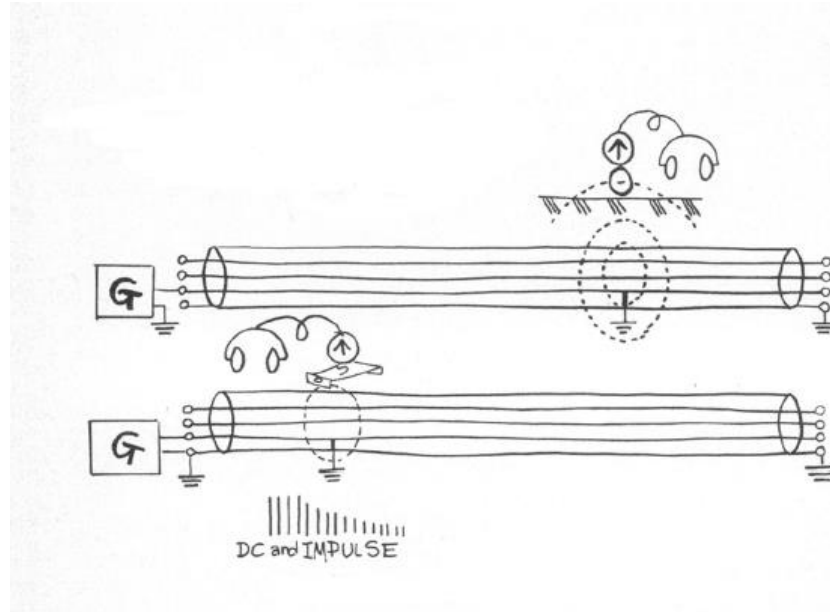
Οι πραγματικές κυματομορφές των κρουστικών ρευμάτων λαμβάνονται με τη χρήση ενός δεύτερου γραμμικού φίλτρου(21) που ενσωματώνεται στη διάταξη και διαφοροποιούνται για το κάθε τύπο σφάλματος **(36)**.



Εικόνα 3.12 Πραγματικές κυματομορφές του ρεύματος στην έξοδο του καλωδίου, αφού περάσουν από γραμμικό φίλτρο για διαφόρους τύπους σφαλμάτων α) Σφάλμα χαμηλής αντίστασης προς γη β) Σφάλμα ανοικτού κυκλώματος γ) Σφάλμα υψηλής αντίστασης προς γη δ) Σφάλμα υψηλής αντίστασης προς γη με πτώση τάσης ε) Σφάλμα που μπορεί να οφείλεται σε αστοχία εξοπλισμού **(36)**

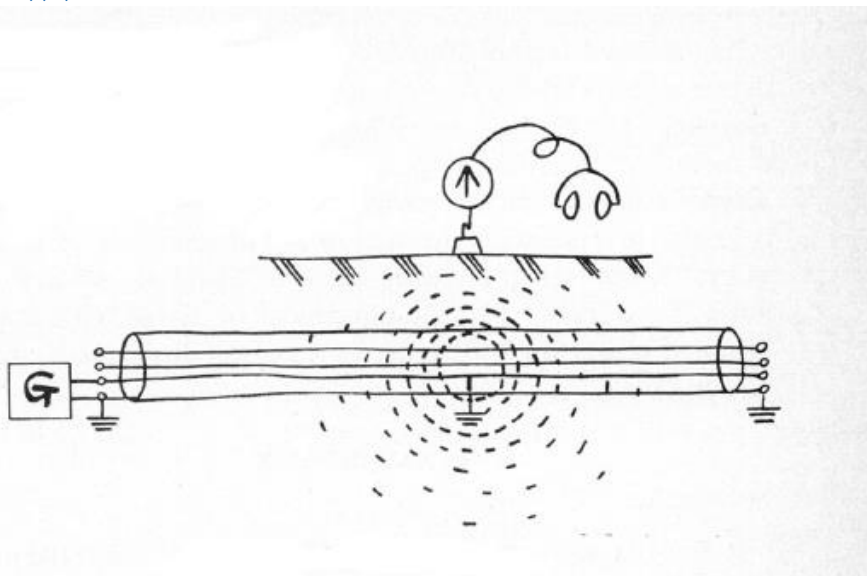
Οι κυματομορφές που λαμβάνονται με τον γραμμικό ζεύκτη για διάφορους τύπους σφάλματος παρουσιάζονται προσεγγιστικά στην εικόνα 3.12. Τα χρονικά διαστήματα που επισημαίνονται ως τ είναι οι χρόνοι που αντιπροσωπεύουν το σημείο του σφάλματος και συνήθως εμπεριέχουν κάποιο χρόνο καθυστέρησης λόγω ιονισμού, ενώ τα διαστήματα που επισημαίνονται ως τ_f είναι χρόνοι μετάβασης έως το σφάλμα. Το σχήμα 3.12α φαίνεται η κυματομορφή ρεύματος για σφάλμα βραχυκυκλώματος πολύ χαμηλής αντίστασης. Το διάκενο σπινθήρων δεν διασπάται στο Σχ. 3.12α, και επομένως δεν παράγεται ακουστικό σήμα. Το Σχ. 3.12b, η κυματομορφή από σφάλμα ανοικτού κυκλώματος, δείχνει μια χαρακτηριστική κυματομορφή όπως φαίνεται στην οθόνη ενός παλμογράφου. Το σχήμα 3.12c δείχνει την κυματομορφή που προκύπτει από ένα σφάλμα όπου το διάκενο σπινθήρων διασπάται, ενώ η επίδραση του χρόνου καθυστέρησης λόγω ιονισμού είναι πολύ εμφανής **(36)**.

B) Ηλεκτρομαγνητική λήψη



Εικόνα 3.13 Ένας Ηλεκτρομαγνητικός ανιχνευτής (20)

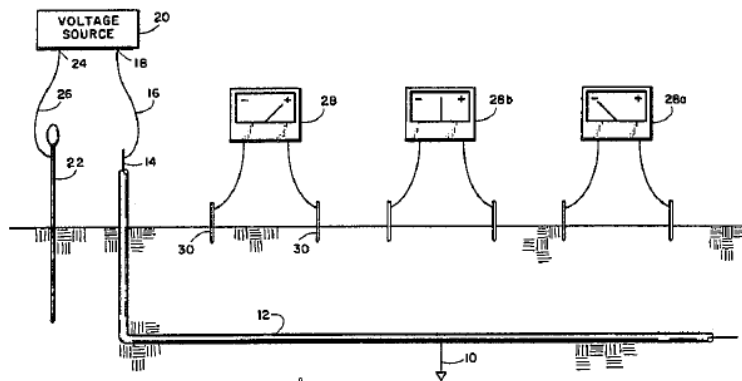
Για συγκεκριμένους τύπους σφαλμάτων παράγεται μία ηχητική εκτόνωση από τη διάσπαση του διακένου(το διάκενο δημιουργείται από το σφάλμα). Χαρακτηριστικές περιπτώσεις αποτελούν σφάλματα όπως βραχυκυκλώματα μεταξύ δύο φάσεων ή μεταξύ τριών φάσεων ή μεταξύ φάσης και γης και σφάλματα υψηλής αντίστασης σε συνδυασμό με οξείδωση στη περιοχή σφάλματος (13). Συνεπώς κρίνεται αναγκαία η χρήση μιας διαφορετικής τεχνικής ανίχνευσης. Ένας ηλεκτρομαγνητικός ανιχνευτής ανιχνεύει το πλάτος του μαγνητικού πεδίου που προκύπτει όταν μέρος του μεταδιδόμενου σήματος επιστρέφει στη γεννήτρια παλμών μέσω της γείωσης και μέρος αυτού χάνεται στην μόνωση του καλωδίου(όταν αυτή υπάρχει). Εκτός από τα σήματα εντοπισμού εναλλασσόμενου ρεύματος, ανιχνεύει επίσης την κατεύθυνση του κυρίαρχου ρεύματος. Για το διακοπτόμενο DC και τα παλμικά σήματα, ο δείκτης αντιδρά σε κάθε παλμό. Αυτό το συγκεκριμένο όργανο ονομάζεται επίσης βαλλιστικός ανιχνευτής γιατί έχει σχεδιαστεί για να υποδεικνύει το μέγεθος και την κατεύθυνση του κρουστικού παλμού. Ταυτόχρονα λειτουργεί και με διακοπτόμενα DC σήματα, όπου ο δείκτης του οργάνου(γαλβανόμετρο) αντιδρά αντίθετα με κάθε απόκλιση, εξαιτίας της αυξομείωσης κάθε παρεμβολής (20).



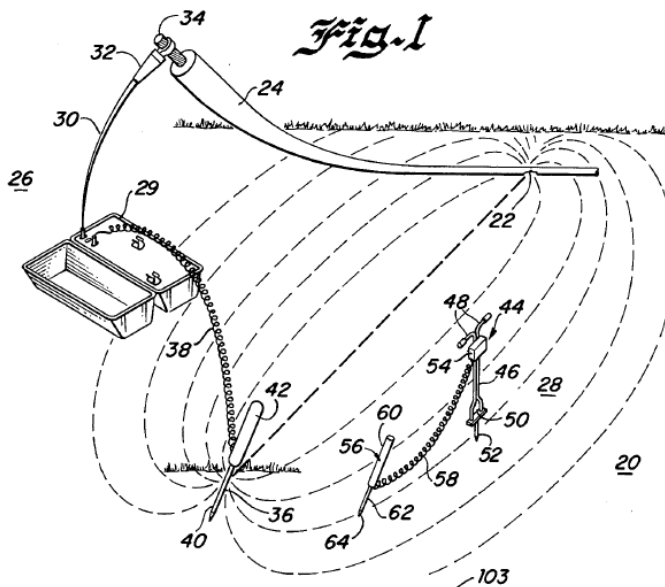
Εικόνα 3.14 Ακουστικός ανιχνευτής (20).

Η γεννήτρια παλμών μεταδίδει έναν παλμό υψηλής τάσης κατά μήκος του καλωδίου. Στο σημείο του σφάλματος συμβαίνει διάσπαση του, όταν ο παλμός φτάσει στο σημείο **(38)**. Τότε ακούγεται ένα σήμα, το οποίο χτυπά το μανδύα στη θέση σφάλματος ή κοντά σε αυτή **(23)**. Εξαιτίας των διαδοχικών παλμών τάσης παράγονται περισσότερες από μια ηχητικές εκτόνωσεις (χτυπήματα), οι οποίες εντοπίζονται από την επιφάνεια του εδάφους χρησιμοποιώντας ένα μικρόφωνο εδάφους, έναν δέκτη και ακουστικά **(38)**. Ο δέκτης συνήθως περιλαμβάνει έναν ενισχυτή διότι η ηχητική εκτόνωση πολλές φορές γίνεται βουβή και δεν ακούγεται πάντα πάντα με τη βοήθεια του μικροφώνου **(20)**. Όσο πιο κοντά είναι η απόσταση του μικρόφωνου από το σφάλμα, τόσο μεγαλύτερο είναι το πλάτος της ηχητικής εκτόνωσης που θα ανιχνευτεί και που οφείλεται στο θόρυβο διάσπασης. Εάν τοποθετηθεί ακριβώς πάνω από τη θέση σφάλματος, το μεγαλύτερο μέρος του θορύβου διάσπασης μπορεί να εντοπιστεί. Χρησιμοποιώντας γεννήτρια μεγαλύτερης ονομαστικής ικανότητας θα είχε καλύτερη επίδραση στη δημιουργία μεγαλύτερης ηχητικής εκτόνωσης **(38)**.

3.2.2 Μέθοδος Δυναμικού Γης(Earth gradient method)



α)



β)

Εικόνα 3.15 α,β) Σχηματική αναπαράσταση της μεθόδου δυναμικού γης με τη χρήση probes. (39)

Η συγκεκριμένη μέθοδος χρησιμοποιείται για το εντοπισμό των παρακάτω σφαλμάτων:

- Σφάλματα βραχυκυκλωμάτων μεταξύ αγωγών(Φάση-Φασή, Φάση-Φάση-Φάση)
- Σφάλματα υψηλής αντίστασης προς γή(Φάση-Γη, Φάση-Φάση-Γη, Φαση-Φαση-Φαση και Γη) (19) (23).

Μια τάση εφαρμόζεται μεταξύ του ελλαττωματικού αγωγού και της γης (19). Όταν η τάση αυτή(παλμική τάση) διαπεράσει την αντίσταση που προκαλεί το σφάλμα (αποκαλύπτοντας το σφάλμα), ένα ρεύμα ταξιδεύει από το σημείο του σφάλματος στη γείωση (39). Στο σημείο όπου ένα ρεύμα διαρροής εισέρχεται στη γη από έναν ελλαττωματικό αγωγό, δημιουργείται διαφορά δυναμικού στην επιφάνεια της γης, και αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επιβεβαίωση της θέσης σφάλματος ενός καλωδίου (23). Η κατεύθυνση αυτού του πεδίου μπορεί να ανιχνευτεί συνήθως με τη χρήση ενισχυτή μεγάλου κέρδους, ενώ το σύστημα εντοπισμού διαθέτει και ένα γαλβανόμετρο (39). Το ρεύμα σφάλματος που επιστρέφει μέσω της γης, μπορεί να εντοπιστεί είτε με τη χρήση ενός βολτομέτρου, είτε με τη χρήση δύο probe (19).

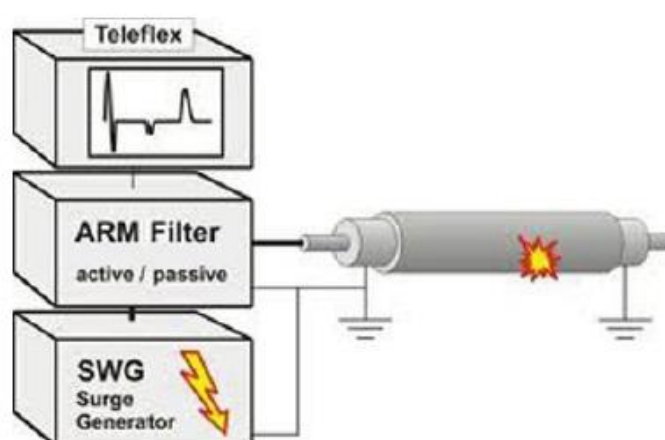
Στη περίπτωση που χρησιμοποιηθεί βολτόμετρο, η διαδικασία εντοπισμού βασίζεται στην αρχή ότι η πτώση τάσης ανάμεσα σε οποιαδήποτε σημεία της επιφάνειας του εδάφους μπορεί να μετρηθεί. Συνήθως, η κατεύθυνση της πτώσης τάσης υποδεικνύει τη κατεύθυνση του σφάλματος. Όσο κινούμαστε κατά μήκος της γραμμής και προσεγγίσουμε τη θέση σφάλματος, η απόκλιση της βελόνας του βολτομέτρου μειώνεται έως ότου φτάσουμε ακριβώς πάνω από τη θέση σφάλματος, οπότε και μηδενίζεται(0V). Όταν απομακρυνθούμε πάλι από τη θέση σφάλματος, η απόκλιση του βολτομέτρου αυξάνεται πάλι. Απαραίτητη προϋπόθεση για τη χρήση ενός βολτομέτρου στον εντοπισμό του δυναμικού που αναπτύσσεται στο έδαφος, είναι η ακριβής γνώση της διαδρομής που ακολουθεί το ελλαττωματικό καλώδιο (13).

Σε περίπτωση που χρησιμοποιηθούν probes για τον εντοπισμό του δυναμικού της γης, οι είσοδοι του ανιχνευτή είναι δύο καλώδια(probes) που μπορούν να θαφτούν στο έδαφος για να ανιχνευτεί το δυναμικό τάσης που υπάρχει. Ο ανιχνευτής μετακινείται κατά μήκος της διαδρομής του ελλαττωματικού καλωδίου και, σε τακτικά διαστήματα, τα καλώδια του θάβονται στη γη σε θέσεις που ισαπέχουν μεταξύ τους. Το σημείο όπου τοποθετήθηκαν τα καλώδια του ανιχνευτή και βρισκόταν πιο κοντά στο σημείο του σφάλματος θα φανεί από τη διέγερση της βελόνας του γαλβανομέτρου, αποκλίνοντας όλο και πιο κοντά στο +. Εάν ο ανιχνευτής απομακρυνθεί από σφάλμα, η βελόνα του γαλβανομέτρου εκτρέπεται προς την αντίθετη κατεύθυνση(δηλαδή το -), επειδή το αντίθετο καλώδιο εισόδου είναι τώρα πιο κοντά στο σφάλμα. Όταν τα δύο καλώδια βρίσκονται σε ίση απόσταση από τη θέση του σφάλματος, η βελόνα δεν θα εκτραπεί καθόλου. Λόγω της αναμενόμενα υψηλής αντίστασης στο σημείο του σφάλματος, η μέθοδος εφαρμόζει παλμική τάση υψηλής τάξης αρχικά στο υπό βλάβη καλώδιο ή κοντά στη μέγιστη τάση που μπορεί να παράγει η πηγή, για παράδειγμα μερικές χιλιάδες volts. Μετά την εγκατάσταση του δυναμικού (δηλ.μετά την εμφάνιση του σφάλματος), η αντίσταση μειώνεται και αυτόματα μειώνεται και η τάση καθώς αυξάνεται η τιμή του ρεύματος αυξάνεται, λόγω του περιορισμού ισχύος στην έξοδο της πηγής τάσης. Ένας μετρητής ρεύματος ,που συνδέεται στον αγωγό γείωσης, χρησιμοποιείται συνήθως για την εξακρίβωση της εγκατάστασης του δυναμικού τάσης . Εάν η

αντίσταση σφάλματος αυξηθεί για οποιονδήποτε λόγο μετά την εγκατάσταση του δυναμικού τάσης, η τάση εξόδου επιτρέπεται επίσης να αυξηθεί ανάλογα, ακόμη και στη μέγιστη τιμή της τάσης της πηγής, εάν είναι απαραίτητο (39).

Το κύριο πρόβλημα με την προαναφερθείσα συμβατική πρακτική είναι ότι το καλώδιο συχνά καταπονείται όταν υποβάλλεται σε τάση πολύ υψηλότερη από τη τάση λειτουργίας του, και πολύ υψηλότερη από ό, τι χρειάζεται για να ανακαλυφθεί το σφάλμα. Η αρχική εφαρμογή μιας υπερβολικά υψηλής τάσης, ακόμη και αν για λίγους παλμούς, μπορεί να προκαλέσει σοβαρή ζημιά σε ένα καλώδιο. Εάν μια τέτοια υψηλή τάση επιτρέπεται να εφαρμοστεί ξανά μετά την αρχική εγκατάσταση του δυναμικού, ο κίνδυνος ζημιάς μεγαλώνει (39).

3.2.3 Μέθοδος Radar με ανάκλαση τόξου(Arc Reflection Method)



Εικόνα 3.16 Σχηματική αναπαράσταση της μεθόδου ανάκλασης τόξου (40)

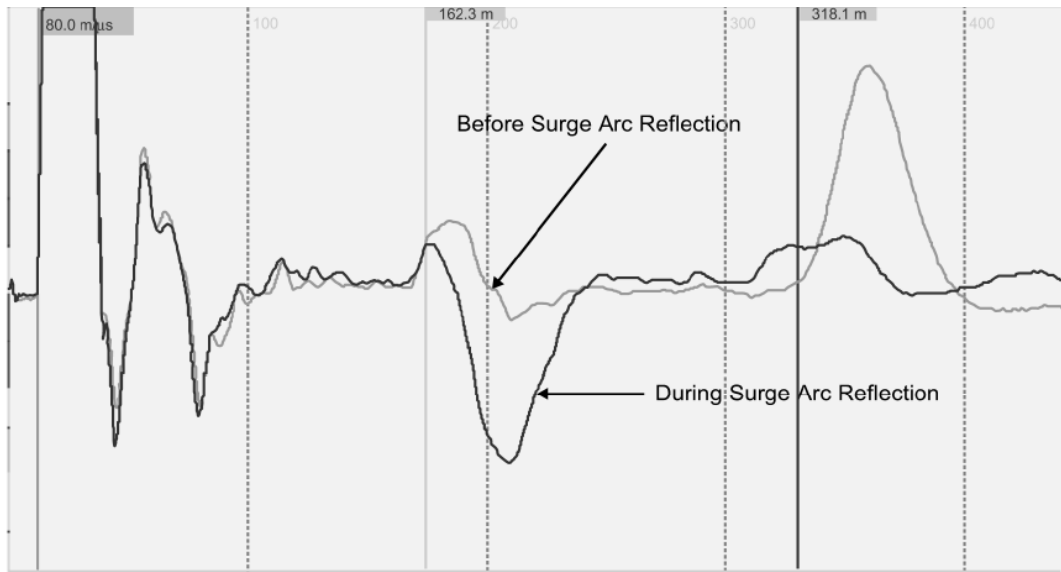
Η μέθοδος **ανάκλασης τόξου υπέρτασης** επιτρέπει τον εντοπισμό σφαλμάτων στα υπόγεια καλώδια ισχύος με τη χρήση των χαμηλότερων δυνατών επίπεδων ΥΤ και ελαχιστοποιεί το κίνδυνο μόνιμης βλάβης του υπο δοκιμή αγωγού. Με μια γεννήτρια κρουστικών τάσεων, τα σφάλματα υψηλής αντίστασης μπορούν προσωρινά να μετατραπούν σε σφάλματα με τιμές αντίστασης πολύ μικρότερες από την αρχική χαρακτηριστική σύνθετη αντίσταση του σφάλματος. Ο συνδυασμός ενός παλμοχόμετρου (**TDR**) με τη γεννήτρια κρουστικών τάσεων(**SWG**) επιτρέπει τον εντοπισμό των προσωρινά σχηματιζόμενων σφαλμάτων χαμηλής αντίστασης. Οι κρουστικοί παλμοί ΥΤ(HV) απομονώνονται από τους παλμούς υψηλής συχνότητας του TDR μέσω ενός φίλτρου διαχωρισμού(**ARM filter**) και μέσω αυτού διασφαλίζεται η απουσία βραχυκυκλωμάτων ή επικαλύψεων μεταξύ των παλμών υψηλής συχνότητας του TDR και των κρουστικών τάσεων της γεννήτριας κρουστικών τάσεων (41). Παράλληλα, μέσω του φίλτρου διαχωρισμού η εφαρμοζόμενη ΥΤ

διαμορφώνεται σε μια επίπεδα τάσης, ώστε να δημιουργηθεί στο σημείο σφάλματος ένα τόξο υπέρτασης (13).

Κατά το 1^ο στάδιο της δοκιμής, από την εφαρμογή μόνο παλμών TDR, στην ανακλώμενη εικόνα του καλωδίου στην οθόνη είναι ορατά το πιο κοντινό ακρο του καλωδίου, οι μούφες, τα splices(συγκολήσεις), οι μετασχηματιστές, το πιο απομακρυσμένο ακρο του καλωδίου, αλλά και όλες οι ασυνέχειες του καλωδίου. Δηλαδή, σφάλματα υψηλής αντίστασης ή σφάλματα ασυνεχειών λειτουργίας(διαλείψεως), δεν ανακλούν τους παλμούς, και κατά συνέπεια δεν αναπαρίστανται στην οθόνη (35) (41).

Κατά το 2ο στάδιο της δοκιμής, γίνεται ενεργοποίηση της γεννήτριας κρουστικών παλμών. Για να δημιουργηθεί τόξο στη θέση σφάλματος, διαμορφώνεται ανάλογη στάθμη πλάτους των παλμών YT, τόση ώστε να είναι ικανή να προκαλέσει διάσπαση της αντίστασης σφάλματος (35) (41). Οι ανακλάσεις που παράγονται, οφείλονται στην επαφή του σχηματιζόμενου τόξου με το παλμό TDR, ενώ στην οθόνη(CRT) φαίνεται μια αντίθετης πολικότητας αντανάκλασης, η οποία είναι εικόνα του πλασματικού σφάλματος χαμηλής αντίστασης που σχηματίστηκε. Αυτή η αντανάκλαση υποδεικνύει τη θέση σφάλματος. Μόλις εξαφανιστεί το τόξο, επανέρχεται η αρχική κατάσταση στο σφάλμα(υψηλή αντίσταση) (35) (41). Το καλώδιο, λοιπόν, καταπονείται στιγμιαία, σε αντίθεση με τις παραπάνω μεθόδους ανίχνευσης.

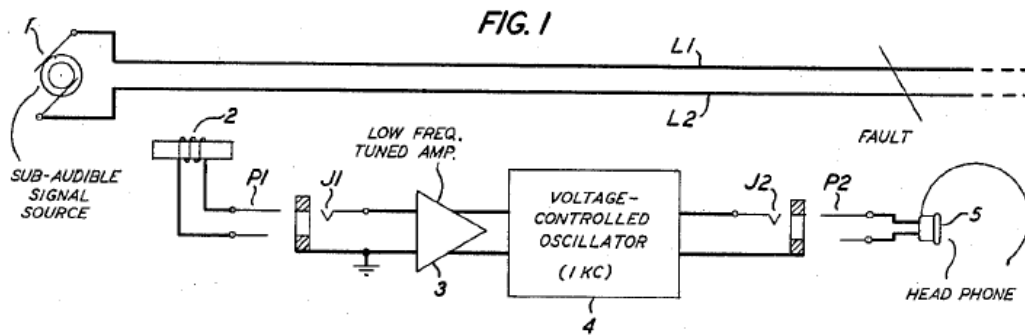
Παρακάτω γίνεται σύγκριση του καλωδίου με και χωρίς εφαρμογή παλμών YT(HV). Κατά τη διάρκεια των των διαστημάτων μεταξύ του τόξου, όταν η γεννήτρια κρουστικών τάσεων βρίσκεται στη λειτουργία φόρτισης, η ανακλώμενη εικόνα του καλωδίου, από την αρχή μέχρι το τέλος του βρόχου, αναπαριστά όλες τις ασυνέχειες του καλωδίου. Κατά τη διάρκεια του τόξου, το σφάλμα υψηλής αντίστασης μεταπηδά σε κατάσταση χαμηλής αντίστασης και στην οθόνη χαμηλής τάσης εμφανίζεται μια αντίθετης πολικότητας αντανάκλαση. Η θέση του σφάλματος προσδιορίζεται εύκολα, όχι μόνο ως απόσταση σε πόδια, γιάρδες ή μέτρα από την αρχή ή το τέλος του καλωδίου, αλλά και σε σύγκριση με τα άλλα σημεία ανάκλασης ασυνεχειών (41).



Εικόνα 3.17 Η ενδειξη της οθόνης(CRT) και η ανάδειξη του σημείου σφάλματος (41)

3.2.4 Μέθοδος ανίχνευσης ρεύματος(Tracing Current Method)

Η συγκεκριμένη μέθοδος χρησιμοποιεί στην εφαρμογή της τόσο πηγές ΣΡ όσο ΕΡ, κατά κύριο λόγο χρησιμοποιούνται πηγές ΕΡ. Ταυτόχρονα, μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο σε διακλαδισμένα όσο και μη διακλαδισμένα καλωδιακά δίκτυα, αλλά και υπόγειες εγκαταστάσεις καλωδίων μέσα σε σωλήνες. Παρόλο που η συγκεκριμένη μέθοδος υστερεί σε ακρίβεια σε σχέση με τις υπόλοιπες μεθόδους ακριβούς εντοπισμού, η χρήση σε υπόγεια καλωδιακά συστήματα ενδείκνυται διότι είναι αρκετός ο προσεγγιστικός προσδιορισμός της θέσης σφάλματος, δεδομένου ότι είναι επιβεβλημένη η αντικατάσταση ολοκλήρου του τμήματος του καλωδίου που βρίσκεται θαμμένο ανάμεσα σε φρεάτια (13).



Εικόνα 3.18 Μπλοκ διάγραμμα τυπικής διάταξης που χρησιμοποιεί τη συγκεκριμένη μέθοδο. Το πηνίο παραλαβής φαίνεται με τον αριθμό 2 ενώ η ακουστική συσκευή με τον αριθμό 5. (42)

Η μέθοδος ανίχνευσης ρεύματος συνίσταται στη χρήση μιας πηγής ανίχνευσης, η οποία περιλαμβάνει μια πηγή εναλλασσόμενου ρεύματος μιας θεμελιώδους συχνότητας, στον ελαττωματικό αγωγό ενός καλωδίου (42). Στο εμπρός άκρο του καλωδίου συνδέεται η πηγή ανίχνευσης ενώ το πιο απομακρυσμένο άκρο του καλωδίου συνδέεται στη γη, και μετά να υπάρχει σε διαφορετικά σημεία κατά μήκος της εξωτερικής επιφάνειας του καλωδίου ένα πηνίο παραλαβής, του οποίου οι ακροδέκτες είναι συνδεδεμένοι σε έναν ακουστικό δεκτή (43). Όταν το πηνίο παραλαβής περάσει από τη θέση σφάλματος μια πτώση στη τιμή του ρεύματος σφάλματος, προκαλεί μεταβολή στη τάση παραλαβής σε εκείνο το σημείο, καθιστώντας δυνατό τον εντοπισμό του σφάλματος (42). Η θεωρία είναι ότι η ηλεκτρομαγνητική επαγωγή μεταξύ του αγωγού και του πηνίου παραλαβής θα προκαλέσει έναν ήχο στο ακουστικό έως ότου το πηνίο παραλαβής απομακρυνθεί από το σημείο όπου ο αγωγός παρουσιάζει επαφή με τη γη, και πέρα από αυτό το σημείο δεν θα εντοπίζεται ηχητικό σήμα από το ακουστικό (43). Όμως, στη πραγματικότητα έχει παρατηρηθεί σημαντική δυσκολία στον εντοπισμό σφαλμάτων με αυτή τη μέθοδο επειδή οι ήχοι στο τηλέφωνο θα συνεχίσουν να ακούγονται ακόμα και όταν το πηνίο παραλαβής απομακρυνθεί από το σημείο όπου υπάρχει επαφή (43).

Όταν ένας αγωγός του καλωδίου εμφανίσει επαφή με το περίβλημα, το ρεύμα διάσπασης, αφού περάσει από τον αγωγό στο περίβλημα, θα διαιρεθεί, και μέρος αυτού θα οδηγηθεί (μέσω του περιβλήματος στο σημείο σφάλματος) στη κοντινότερη γείωση και μετά πίσω στη πηγή, ενώ το υπόλοιπο θα ρέει σε όλο το πλάτος του περιβλήματος μέχρι τη πλησιέστερη γη, και από εκεί πάλι πίσω στη πηγή (43). Το φαινόμενο διάχυσης ρεύματος στο μεταλλικό περίβλημα προκαλεί πρόβλημα στο προσδιορισμό της ακριβούς θέσης του σφάλματος, επειδή ενεργεί επαγωγικά στο πηνίο παραλαβής με τον ίδιο τρόπο όπως το ρεύμα που ρέει από τον ελαττωματικό αγωγό στην γείωση, προκαλώντας έτσι ήχο στο ακουστικό ακόμα και όταν το πηνίο παραλαβής απομακρυνθεί από το σημείο σφάλματος (43). Το φαινόμενο διάχυσης ρεύματος μπορεί να αντιμετωπιστεί. Αυτό επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας ένα πηνίο παραλαβής με δύο περιελίξεις συνδεδεμένες εσωτερικά, και τοποθετώντας αυτές τις περιελίξεις συμμετρικά σε σχέση με το καλώδιο, έτσι ώστε τα επαγόμενα πεδία και στις δύο πλευρές λόγω του ρεύματος στο περίβλημα να είναι ίσα και αντίθετα και να εξουδετερώνουν

το ένα το άλλο, χωρίς να παράγεται ήχος στο τηλέφωνο (43). Οι αγωγοί στο εσωτερικό του καλωδίου, ωστόσο, τοποθετούνται σπειροειδώς, και δεν είναι συμμετρικοί σε σχέση με το περίβλημα, αλλά θα ποικίλλουν σε θέση, καθώς βρίσκονται σε ορισμένα σημεία πλησιέστερα στη μία πλευρά του καλωδίου και σε άλλα μέρη πιο κοντά στην άλλη πλευρά (43). Το διακοπτόμενο ρεύμα που ρέει στον ελαττωματικό αγωγό παράγει έτσι μια άνιση μαγνητική επαγωγή που επηρεάζεται από τις εν λόγω περιελίξεις και συνεπώς προκαλεί το χαρακτηριστικό ήχο στο τηλέφωνο, έως ότου οι εν λόγω περιελίξεις φτάσουν στο σημείο όπου το βρίσκεται το σφάλμα, οπότε από εκείνο το σημείο και μετά ο θόρυβος θα σταματήσει (43).

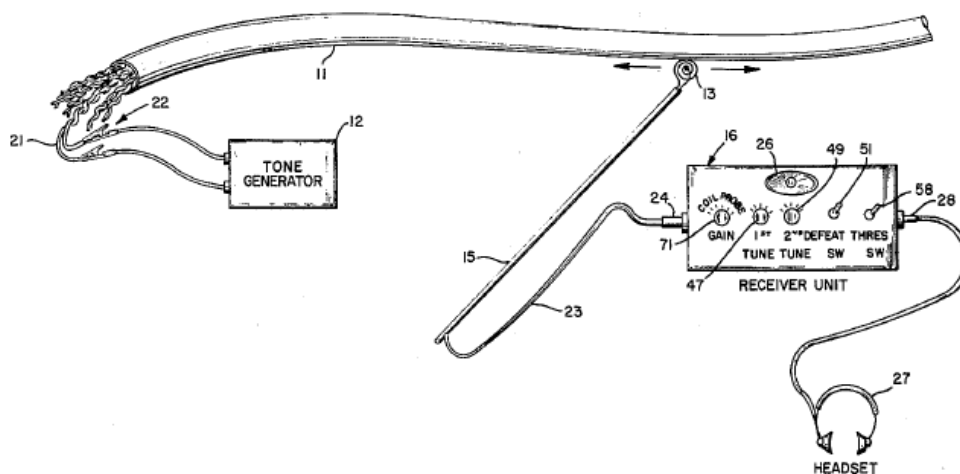
Σύγχρονες διατάξεις που βασίζονται στη συγκεκριμένη μέθοδο, περιλαμβάνουν γεννήτρια συχνοτήτων των 20 κύκλων ανά δευτερόλεπτο για να εισάγει το ρεύμα ιχνηλάτισης στον ελαττωματικό αγωγό. Η συσκευή παραλαβής περιλαμβάνει ένα πηνίο παραλαβής, έναν ψηφιακό ενισχυτή, ανορθωτή και μεγάλης ευαισθησίας αμπερόμετρο συνεχούς ρεύματος, δίνοντας έτσι μια οπτική ένδειξη της διαδικασίας παραλαβής του πηνίου εξερεύνησης που μεταφέρεται κατά μήκος του ελαττωματικού καλώδιου σε αναζήτηση του σφάλματος. Η χαμηλή συχνότητα των 20 κύκλων ανά δευτερόλεπτο χρησιμοποιείται συνήθως για να ελαχιστοποιήσει την εξασθένηση του ρεύματος σφάλματος. Ωστόσο η χρήση συχνότητας κοντά στους 20 κύκλους/δευτερόλεπτο προκαλεί πρόβλημα στην εφαρμογή της μεθόδου, κυρίως σε καλώδια με συχνότητα λειτουργίας κοντά στους 25 κύκλους/δευτερόλεπτο. Γι' αυτό, καθίσταται απαραίτητη η χρήση αρκετά διαφορετικής συχνότητας ρεύματος σφάλματος από τη συχνότητα της γραμμής ισχύος ώστε να παρέχει την απαραίτητη διάκριση που θα διευκολύνει τον ακριβή εντοπισμό της θέσης σφάλματος. Η αύξηση της συχνότητας, μειώνει την αντίσταση χωρητικότητας μεταξύ των αγωγών, η οποία επηρεάζεται με αύξηση της συχνότητας, και επομένως, η μεταβολή της τιμής του ρεύματος στη γραμμή από τη μία πλευρά του σφάλματος στην άλλη δεν είναι αρκετά μεγάλη για να προσφέρει την απαιτούμενη διάκριση. Έχει διαπιστωθεί ότι μια συχνότητα 10 κύκλων ανά δευτερόλεπτο είναι ικανοποιητική και παρέχει επαρκή διάκριση έναντι των ρευμάτων με συχνότητα της τάξεως 25 κύκλων ανά δευτερόλεπτο που είναι και η συχνότητα της γραμμής ισχύος (42).

Ενώ έχουμε αναφερθεί σε έναν δέκτη τηλεφώνου ως το προτιμώμενο όργανο για την ανίχνευση των ρευμάτων που παράγονται επαγωγικά στο Πηνίο εξερεύνησης, θα είναι προφανές ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί οποιαδήποτε συσκευή ανίχνευσης ηλεκτρικού ρεύματος επαρκούς ευαισθησίας (43).

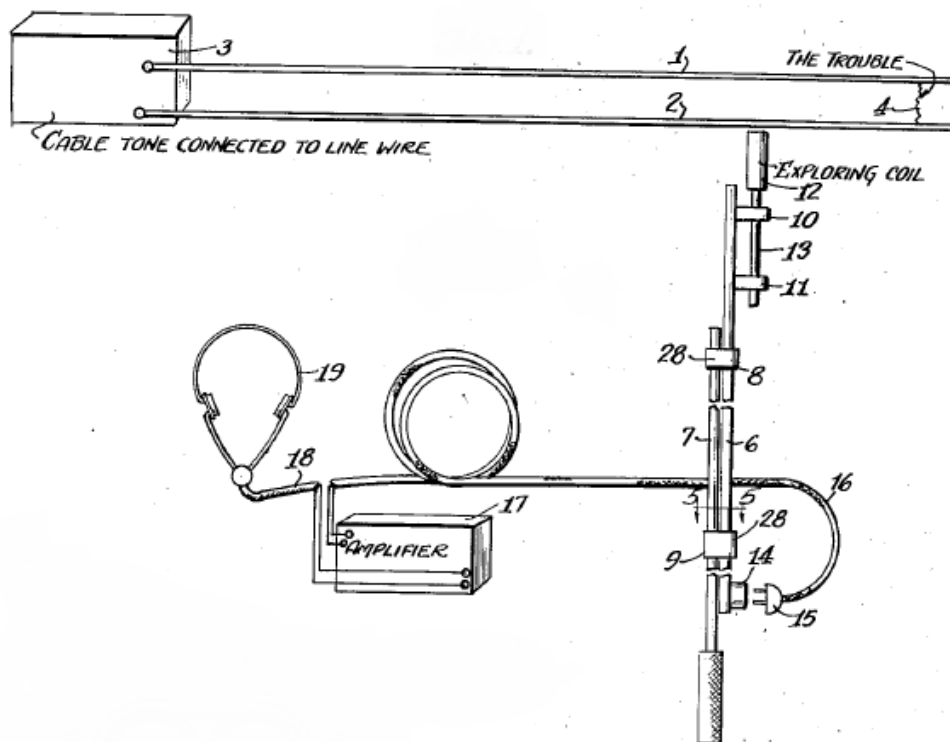
3.2.5 Μέθοδος Ακουστικής Συχνότητας(Acoustic Method)

Η συγκεκριμένη μέθοδος χρησιμοποιείται για το εντοπισμό των παρακάτω σφαλμάτων:

- Σφάλματα βραχυκυκλωμάτων μεταξύ αγωγών(Φάση-Φασή, Φάση-Φάση-Φάση ή τριφασικό βραχυκύκλωμα)
- Σφάλματα υψηλής και χαμηλής αντίστασης προς γή(Φάση-Φάση-Γη, Φάση-Φάση-Φάση- Γη) (34)



Εικόνα 3.19 Σχηματική αναπαράσταση μιας τυπικής διάταξης εντοπισμού σφαλμάτων με την μέθοδο της ακουστικής συχνότητας (45)



Εικόνα 3.20 Ακόμα μία διάταξη εντοπισμού σφαλμάτων με τη μέθοδο της ακουστικής συχνότητας, όπου είναι εμφανής η κατασκευαστική δομή της κεραίας μαγνητικού βρόχου. (44)

Αυτή η μέθοδος συνίσταται στην εισαγωγή ενός τόνου ή σήματος χαμηλής συχνότητάς στον ελαττωματικό αγωγό και στη συνέχεια στην ανίχνευση ή εντοπισμό της παρουσίας του σήματος ξεκινώντας από τη θέση στην οποία εισάγεται το σήμα στο ζευγάρι των αγωγών και καταλήγοντας μακριά από την πηγή μέχρι να εξαφανιστεί το σήμα (45). Με μια διαδικασία παρεμβολής, εντοπίζεται η ακριβής θέση του σφάλματος (45). Το σήμα ή ο τόνος που εφαρμόζεται στο ελαττωματικό ζεύγος κινείται κατά μήκος του ενός αγωγού μέχρι το σημείο του σφάλματος και επιστρέφει πίσω στη πηγή μέσω του άλλου αγωγού (45). Το ταλαντωμένο ρεύμα που αντιπροσωπεύει το εφαρμοζόμενο σήμα δημιουργεί ένα μαγνητικό πεδίο, και είναι η παρουσία ή η απουσία αυτού του πεδίου που επιτρέπει τον ακριβή εντοπισμό της θέσης σφάλματος (45). Η συσκευή αυτή περιλαμβάνει μια απλή κεραία μαγνητικού βρόχου, η οποία στο ένα άκρο της διαθέτει ένα πηνίο παραλαβής (exploring coil), ενισχυτή σήματος, ακουστικά ή μετρητή (δέκτης) (34) (44).

Η ισχύς του σήματος που ποικίλλει ανάλογα με τις σχετικές θέσεις των πυρήνων ενός αγωγού καθώς επίσης η άνοδος και η πτώση στη τιμή της εξαιτίας της γεωμετρίας των αγωγών ενός καλωδίου, επιβεβαιώνουν ότι ανιχνεύεται το επιθυμητό σήμα (34). Επιπλέον δύναται να πραγματοποιηθεί ανάλυση του μαγνητικού πεδίου σε οριζόντιες και κατακόρυφες συνιστώσες με σκοπό το προσδιορισμό της πιθανής θέσης σφάλματος (13). Το μαγνητικό πεδίο που

οφείλεται στα αμφίδρομα μετακινούμενα ρεύματα τείνει να ακυρωθεί, αλλά, αν πραγματοποιηθεί ανάλυση, οι συνιστώσες του μαγνητικού πεδίου(για κάθε άξονα) μπορούν να ανιχνευθούν πάνω από την επιφάνεια του έδαφος με το πηνίο παραλαβής και το δέκτη (34). Η κεραία μαγνητικού βρόχου, στη θέση σφάλματος, φτάνει στη μέγιστη διέγερσή της (13). Όταν το πηνίο παραλαβής μετακινείται κατά μήκος του καλωδίου, αλλά χωρίς να έρθει σε επαφή με αυτό, θα παραλάβει επαγωγικά μια μικρή ποσότητα ρεύματος όταν βρεθεί πάνω από τη διαδρομή του ρεύματος που προέρχεται από την γεννήτρια συχνοτήτων (44). Όπως είναι προφανές, ένα ενισχυμένο σήμα θα ληφθεί στον δέκτη(ακουστική συσκευή ή μετρητής) οπουδήποτε εντοπιστεί διάχυση του ταλαντώμενου ρεύματος(σημείο με μέγιστη διέγερση), έτσι ώστε ο χειριστής να μπορεί εύκολα να εντοπίσει τη διαδρομή του ρεύματος και άρα τη θέση σφάλματος (44).

Αν και αυτή η τεχνική λειτουργεί καλά αν εξασφαλίσουμε ότι το εκπεμπόμενο σήμα είναι ισχυρό , πολλές φορές το ανιχνεύσιμο σήμα που δημιουργείται από το εγκατεστημένο μαγνητικό πεδίο, είναι τόσο αδύναμο που η συσκευή λήψης δεν μπορεί να ξεχωρίσει το επιθυμητό ηχητικό σήμα από άλλα παρεμβαλλόμενα σήματα (45). Αυτό ισχύει ακόμη και αν τα σήματα που λαμβάνονται από το πηνίο ενισχύονται και εφαρμόζονται σε ακουστική μορφή σε ένα ακουστικό ή ένα ηχείο (45). Αυτή η δυσκολία στον εντοπισμό του εισαγόμενου ηχητικού σήματος, παρουσία παρασιτικών σημάτων και παρεμβολών, μπορεί να αποδοθεί στην έλλειψη ευαισθησίας εξοπλισμού της προηγούμενης τεχνολογίας (45). Συνήθως, χρησιμοποιείται μια γεννήτρια συχνοτήτων με ονομαστική συχνότητα περίπου 500 Hertz, αλλά η χρησιμοποιούμενη συχνότητα ποικίλλει από όργανο σε όργανο (45). Συνεπώς, οι ενισχυτές της προηγούμενης τεχνολογίας που χρησιμοποιούνται στις μονάδες λήψης πρέπει να είναι ευαίσθητοι σε ένα εύρος ή ζώνη συχνοτήτων γύρω από την ονομαστική συχνότητα γεννήτριας συχνοτήτων, όπως 500 Hertz, για να επιτρέπουν τη λήψη σημάτων από οποιαδήποτε από τις γεννήτριες συχνοτήτων, παρόλο που η συχνότητα δεν έχει ρυθμιστεί ακριβώς στα 500 Hertz (45). Κατασκευάζοντας τον ενισχυτή του δέκτη να προσαρμόζεται σε ένα εύρος συχνοτήτων, και όχι σε μια συγκεκριμένη συχνότητα γνωστής τιμής, η ανάλυση του συστήματος είναι ουσιαστικά περιορισμένη και η παρεμβολή από παρασιτικά σήματα, καθίσταται κρίσιμος περιορισμός στην ικανότητα εντοπισμού της θέσης του σφάλματος (45). Σε όλα τα κυκλώματα ηχητικού τόνου, δημιουργούνται αρμονικές υψηλότερης συχνότητας της θεμελιώδους συχνότητας. Αυτές οι αρμονικές ταξιδεύουν όχι μόνο πάνω από τα καλώδια που πρόκειται να ελεγχθούν αλλά επηρεάζουν και γειτονικά καλώδια, ακόμη και πέρα από τη ζώνη σφάλματος. Επειδή το όργανο λήψης είναι ευαίσθητο σε αυτές τις αρμονικές, το πραγματικό σήμα χάνεται και το πρόβλημα δεν εντοπίζεται εύκολα (44)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΜΕΛΕΤΗ ΕΠΙΛΟΓΗΣ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΔΙΑΤΑΞΗΣ

4.1 Γενικά

Στο κεφάλαιο αυτό θα περιγράψουμε την διαδικασία κατασκευής της διάταξης εύρεσης σφαλμάτων με χρήση βρόχου Murray, θα δούμε τον τρόπο επιλογής όλων των στοιχείων της κατασκευής, τον τρόπο υπολογισμού των τιμών τους, και τα ποιοτικά χαρακτηριστικά τους. Η διαδικασία που περιγράφεται παρακάτω, συνιστά πρώτη μελέτη κατασκευής της διάταξης, καθώς κατά στο στάδιο των δοκιμών πραγματοποιήθηκαν ποιοτικές και ποσοτικές παρεμβάσεις προκειμένου να διασφαλιστεί η λειτουργικότητα της διάταξης. Οι παρεμβάσεις αυτές περιγράφονται στο επόμενο κεφάλαιο.

4.2 Χρησιμοποιούμενα υλικά

Πίνακας 2 Αρχική υλικοτενική μελέτη της διάταξης.

Υλικό	Κόστος	Ποσότητα
Μεζούρα ραπτικής (150cm)	0,62 €	1
Ξύλινος πήχης μήκους 1.5m	3 €	1
Ξύλινες βάσεις σύρματος	1 €	2
Ξυλόβιδες	1 €	
Σύρμα χρωμιονικελίνης 1m (3mm)	3,60 €	1
Μπορνα C 015B	1,20 €	3
Μπορνα Ασφαλείας 4mm	6,60 €	3
Μαχαιρωτος διακόπτης με μπόρνες	4,465 €	1
Καλώδιο μπανάνα-μπανάνα θυληκό 4mm	14,20 €	4
Καλώδιο κροκοδειλάκι-μπανάνα θυληκό 4mm	11,56 €	3
Αναλογικό Αμπερομετρο FC60P +-30A	11,62 €	1
Αντίσταση προστασίας άνθρακα 1κΩ(0.25W)	0,20 €	1
Καλώδιο συνδέσεων 2mm2(καρούλι)	5 €	1
11m καλώδιο NYM 3X1.5mm2	10,45 €	1
Ξύλινη Βάση 0.70mX0.25m	5 €	1
Βάση δύο Μπαταριών(3V)	5 €	4
Αλκαλικές μπαταρίες AA(1.5V)	8 €	8
Σύνολο:	92 €	36

4.3 Χαρακτηριστικά υλικών κατασκευής

4.3.1 Χορδή Χρωμονικελίνης

Το Nichrome (γνωστό και ως NiCr, νικέλιο-χρώμιο ή χρώμιο-νικέλιο) είναι μια οικογένεια κραμάτων που περιέχουν νικέλιο, χρώμιο και συχνά σίδηρο(και πιθανώς άλλα στοιχεία) που χρησιμοποιούνται συνήθως στη κατασκευή συρμάτων αντίστασης, θερμαντικών στοιχείων σε τοστιέρες, ηλεκτρικές θερμάστρες κλπ, σε ορισμένες οδοντικές αποκαταστάσεις (σφραγίσματα) και σε μερικές άλλες εφαρμογές (46).

Ένα κοινό κράμα νικελίου-χρωμίου είναι περιεκτικότητας 80% νικέλιο και 20% χρώμιο, κατά μάζα, αλλά υπάρχουν πολλοί άλλοι συνδυασμοί μετάλλων για τις διάφορες εφαρμογές (46).

Είναι ένα κράμα μετάλλου το οποίο έχει ιδιαίτερα χαμηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα(αναλόγως και του πάχους), σημείο τήξης υψηλότερο από εκείνο του καθαρού χαλκού, μη οξειδώσιμο σε μεγάλο βαθμό, και μπορεί να διαμορφωθεί κατάλληλα ώστε να σχηματίσει ιδιαίτερα ανθεκτικές, αποδοτικές λωρίδες, κλώνους ή νήματα κατάλληλα για χρήση στις διάφορες συνδέσεις, όπου είναι επιθυμητές ηλεκτρικές αντιστάσεις (47).

Κυριότερα χαρακτηριστικά του κράματος Nichrome (48):

· ΠΑΡΑΜΕΙΝΕΙ ΟΛΚΙΜΟ ΜΕΤΑ ΤΗ ΧΡΗΣΗ

Το Nichrome είναι γνωστό ότι παραμένει όλκιμο, ακόμη και μετά από μακρά χρήση.

· ΥΨΗΛΟΤΕΡΗ ΘΕΡΜΙΚΗ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΗ

Σε σύγκριση με άλλα κράματα αντοχής στον αέρα, τα κράματα Nichrome έχουν υψηλότερη αντοχή σε θερμική και μηχανική καταπόνηση.

· ΥΨΗΛΟΤΕΡΗ ΕΚΟΜΠΗ

Όταν οξειδώνονται πλήρως, τα κράματα Nichrome έχουν υψηλότερη εκπομπή σε σύγκριση με άλλα μη οξειδωτικά κράματα . Αυτό σημαίνει ότι για το ίδιο επιφανειακό φορτίο, η θερμοκρασία του στοιχείου του Nichrome είναι χαμηλότερη από άλλα κράματα.

· ΜΗ-ΜΑΓΝΗΤΙΚΑ

Σε ορισμένες εφαρμογές χαμηλής θερμοκρασίας, προτιμάται ένα μη μαγνητικό υλικό. Το Nichrome είναι μη μαγνητικό, καθιστώντας την προτιμώμενη επιλογή

έναντι άλλων μη οξειδωτικών κραμάτων , τα οποία είναι μόνο μη μαγνητικά πάνω από 600 ° C (1100 ° F).

· ANTOXH ΣΕ ΥΓΡΗ ΔΙΑΒΡΩΣΗ

Ενώ υπάρχουν κάποιες εξαιρέσεις (όπως ατμόσφαιρες που περιέχουν θείο και ορισμένες ελεγχόμενες ατμόσφαιρες), τα κράματα Nichrome έχουν συνήθως καλύτερη αντοχή στη διάβρωση σε θερμοκρασία δωματίου σε σύγκριση με άλλα μη οξειδωτικά κράματα

Πίνακας 3 Τιμή της αντίστασης ενός σύρματος Constantan για διαφορετική διάμετρο σύρματος (49)

Dia.(mm)	Cross-sectional area (mm ²) [±]	Weight/Meter (g/m) [±]	Resistance/Meter at 20°C (Ω/m) [±]
0.018 [±]	0.0002550 [±]	0.002117 [±]	3410-4610 [±]
1.500 [±]	1.767 [±]	15.69 [±]	0.261-0.282 [±]

Πίνακας 4 Τιμή της αντίστασης ενός σύρματος χρωμιοκελίνης(NiCr) για διαφορετικές διαμέτρους σύρματος (70)

Diameter (mm)	Tolerance of Diameter	Cross Sectional Area (mm ²)	N80CR20			N60CR15			Tolerance of conductor resistance (%)
			Resistance per metre (20°C Ω/m)	Length per kg (m/kg)	Weight per metre (kg/m)	Resistance per metre (20°C Ω/m)	Length per kg (m/kg)	Weight per metre (kg/m)	
3.500	± 0.050	9.621	0.1133	12.373	0.08082	0.1164	12.676	0.07889	± 5
3.650	± 0.050	10.465	0.1042	11.375	0.08791	0.1070	11.662	0.08575	± 5
3.750	± 0.050	11.046	0.0987	10.777	0.0928	0.10138	11.049	0.09051	± 5
4.000	± 0.063	12.57	0.08674	9.470	0.1056	0.08913	9.709	0.1030	± 5
4.500	± 0.063	15.91	0.06853	7.485	0.1336	0.07042	7.669	0.1304	± 5
5.000	± 0.063	19.63	0.05551	6.064	0.1649	0.05704	6.211	0.1610	± 5
5.500	± 0.080	23.76	0.04588	5.010	0.1996	0.04714	5.133	0.1948	± 5
6.000	± 0.080	28.27	0.03855	4.211	0.2375	0.03961	4.314	0.2318	± 5
6.500	± 0.080	33.18	0.03285	3.588	0.2787	0.03375	3.675	0.2721	± 5
7.000	± 0.080	34.48	0.02832	3.093	0.3233	0.02910	3.169	0.3156	± 5

Η χρήση σύρματος κράματος NiCr για την συγκεκριμένη εφαρμογή είναι προτιμότερη σε σύγκριση με σύρμα κράματος Constantan. Όπως αναλύθηκε παραπάνω, κράματα που δεν περιέχουν χαλκό ή σίδηρο, στη προκειμένη το NiCr, υπερέχουν. Ακόμη συγκρίνοντας το Π1 με το Π2, διαπιστώνουμε ότι για την προσομοίωση μιας αντίστασης οποιασδήποτε τιμής απαιτείται μεγαλύτερη διάμετρος σύρματος NiCr σε σχέση με σύρμα Constantan. Συνεπώς, προτιμάμε τη χρήση σύρματος NiCr και για λόγους πρακτικότητας και ευκολίας χρήσης της διάταξης, καθότι είναι ευκολότερη η διενέργεια λήψης με το κροκοδειλάκι.

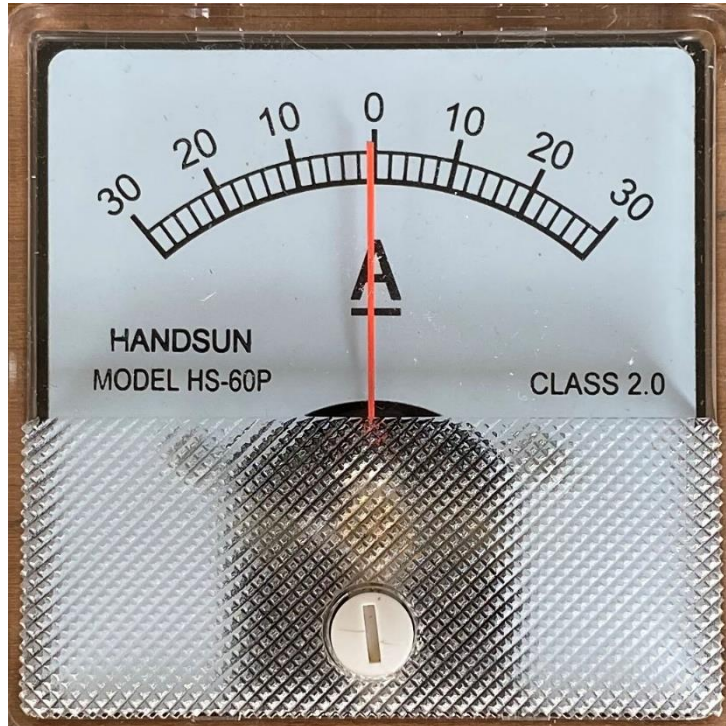
Έγινε επιλογή σύρματος χρωμιονικελίνης 3.5mm, το οποίο σύμφωνα με το Π2 έχει αντίσταση 0,1133 στους 20°C, ώστε η αντίσταση του σύρματος να έχει περίπου την ίδια τιμή με τη συνολική αντίσταση του υπο δοκιμή αγωγού.

4.3.2 Όργανο ισοροπίας

Για το προσδιορισμό της θέσης σφάλματος είναι απαραίτητη η χρήση ενός οργάνου ένδειξης της ισοροπίας. Σχεδόν το σύνολο των διατάξεων εντοπισμού σφαλμάτων του εμπορίου, χρησιμοποιούν για το σκοπό αυτό ένα όργανο που ονομάζεται γαλβανόμετρο συνεχούς ρεύματος. Ένα γαλβανόμετρο συνεχούς ρεύματος είναι ένα αμπερόμετρο με κινούμενο πηνίο. Συνεπώς επιλέξαμε ένα **αμπερόμετρο δύο κατευθύνσεων**, το οποίο λειτουργεί με παρόμοιο τρόπο (50).

Τα όργανα κινητού πηνίου είναι αναλογικά ηλεκτρομηχανικά όργανα. Τα όργανα αυτά ανήκουν στη κατηγορία των ηλεκτρομηχανικών οργάνων καθώς η συνύπαρξη των ηλεκτρικών ή μηχανικών ποσοτήτων στο εσωτερικό τους έχει ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη μηχανικής δύναμης ή ροπής. Αποτελούνται από ένα κινητό μέρος που διαθέτει μια αρχική θέση ηρεμίας, στο οποίο επενεργεί η ροπή-ως αποτέλεσμα της συνύπαρξης των διαφόρων ηλεκτρικών και μηχανικών ποσοτήτων- δημιουργώντας κίνηση. Στην ανάπτυξη κινητήριας ροπής οδήγησης αντιδρά η διάταξη επαναφοράς, που και εκείνη προσπαθεί να αναπτύξει ροπή, ανάλογη με τη ποσότητα της κινητήριας ροπής που δέχεται το κινητό μέρος, ώστε όταν πάψει η δράση της κινητήριας ροπής το κινητό μέρος να επανέλθει στην αρχική του θέση ηρεμίας (50).

Από την αλληλεπίδραση των δύο ροπών προκαλείται μια γωνιακή απόκλιση η οποία είναι ανάλογη της μετρούμενης ποσότητας, δηλαδή η μετατόπιση της ένδειξης του οργάνου είναι ανάλογη της ροής του ρεύματος στο κινούμενο πηνίο(γραμμικότητα) (50). Η αναλογικότητα της ένδειξης του οργάνου με τη ροή ρεύματος στο κινούμενο πηνίο είναι βασικότερος ο λόγος επιλογής του συγκεκριμένου τύπου οργάνου.



Εικόνα 4.1 Το αναλογικό αμπερόμετρο δύο κατευθύνσεων που χρησιμοποιήθηκε στη διάταξη

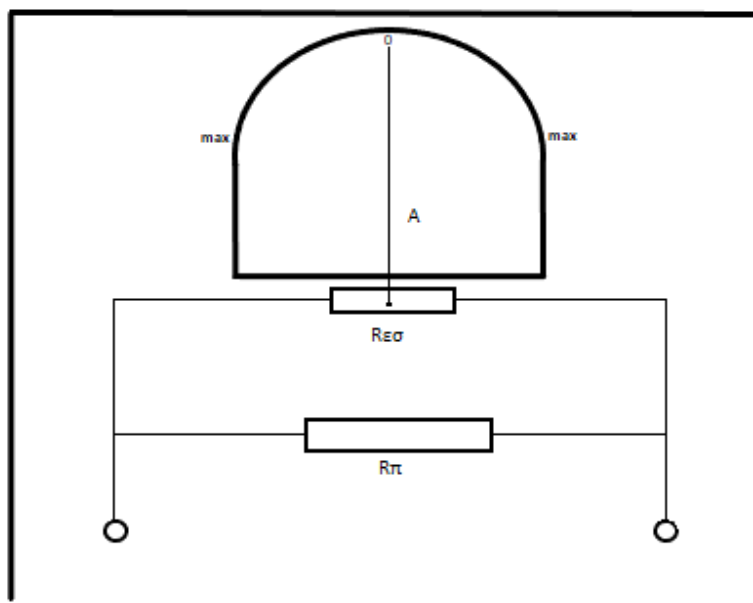
Το εύρος μέτρησης του οργάνου που επελέγη είναι διπλό, αφού είναι όργανο διπλής πολικότητας, δηλαδή 0 έως 30A και 0 έως -30A. Το συγκεκριμένο εύρος μέτρησης επετεύχθη κατασκευαστικά, χρησιμοποιώντας ένα βασικό όργανο και πραγματοποιώντας επέκταση κλίμακας του, τοποθετώντας παράλληλα της εσωτερικής αντίστασης($R_{εσ}$) του οργάνου μία προστατευτική αντίσταση(R_{π})(εικόνα 4.2). Ανοίγοντας το όργανο και καταγράφοντας τα ποιοτικά και ποσοτικά χαρακτηριστικά των εσωτερικών του στοιχείων, η εσωτερική αντίσταση μετρήθηκε 0.2Ω ενώ η αντίσταση προστασίας μετρήθηκε πρακτικά 0. Για να προσδιορίσουμε με ακρίβεια την αντίσταση προστασίας, αφαιρέσαμε το σύρμα(R_{π}) που είχε τοποθετηθεί παράλληλα στην εσωτερική αντίσταση και εφαρμόσαμε στα άκρα του οργάνου κατάλληλη τάση-μέσω ενός τροφοδοτικού συνεχούς τάσης-ώστε να επιτύχουμε μέγιστη απόκλιση της βελόνας, αφού προηγουμένως παρεμβάλαμε μεταξύ του τροφοδοτικού και του οργάνου μια αντίσταση των 10Ω για να μη κάψουμε το όργανο και ένα φορητό πολύμετρο για να μετρήσουμε το ρεύμα. Εφαρμόσαμε μέσω του τροφοδοτικού τάση 1V και το ρεύμα που διαρρέει το κύκλωμα μετρήθηκε περίπου 215mA(υπο τάση 43.14mV) (51).Γνωρίζοντας από το κατασκευαστή το εύρος μέτρησης του οργάνου, πριν την αφαίρεση της προστατευτικής αντίστασης(R_{π}), μπορούμε να κάνουμε τους παρακάτω υπολογισμούς:

- Η σταθερά που δείχνει πόσες φορές πρέπει να κάνουμε επέκταση κλίμακας είναι $K = \frac{30[A]}{215 \cdot 10^{-3}[A]} = 139$

- Η ακριβής τιμή της προστατευτικής αντίστασης του οργάνου είναι

$$R_{\pi} = \frac{R_{\varepsilon\sigma}}{K - 1} = \frac{0.2\Omega}{139 - 1} = 1.45m\Omega$$

Συμπερασματικά, το εύρος μέτρησης του βασικού οργάνου είναι από 0 έως 215mA και 0 έως -215mA, ενώ το εύρος μέτρησης του οργάνου με επέκταση κλίμακας(όπως αγοράστηκε) είναι από 0 έως 30A και 0 έως -30A. Αποφασίσαμε να χρησιμοποιήσουμε το όργανο με την επέκταση κλίμακας. Ωστόσο κατά το στάδιο των δοκιμών της διάταξης, αντιμετωπίσαμε διάφορα προβλήματα από την επιλογή αυτή, τα οποία θα αναλυθούν σε επόμενο κεφάλαιο.



Εικόνα 4.2 Κάτοψη του εσωτερικού του οργάνου

4.3.3 Υπό δοκιμή αγωγός

Η μέθοδος ανίχνευσης σφαλμάτων με χρήση βρόχου Murray, χρησιμοποιείται τόσο σε συστήματα καλωδίων χαμηλής τάσης(XT) και τηλεπικοινωνιακά καλώδια όσο σε συστήματα καλωδίων υψηλής τάσης(YT) (20). Για λόγους πρακτικότητας, επιλέξαμε τη χρήση καλωδίου εσωτερικών εγκαταστάσεων(XT) για τη διεξαγωγή της δοκιμής. Το καλώδιο που χρησιμοποιούμε είναι NYM 3X1,5mm², το οποίο είναι ελαφρύ, με άκαμπτο αγωγό, ενώ εκτός από μανδύα διαθέτει και μόνωση στο εσωτερικό του (52). Παράλληλα διαθέτει 3 αγωγούς(πυρήνες), συνεπώς μπορούμε να προσομοιάσουμε κάθε τύπο σφάλματος.

Ανατρέχοντας στο technical data sheet του συγκεκριμένου καλωδίου, παρατηρούμε ότι η αντίσταση του κάθε πυρήνα του καλωδίου είναι 12,1 Ω/km. Προφανώς, όσο μεγαλύτερο μήκος καλωδίου χρησιμοποιήσουμε, τόσο

καλύτερη ορθότητα και επαναληψιμότητα θα έχουν και οι ενδείξεις του οργάνου. Από την επιλογή του μήκους καλωδίου και τύπου του καλωδίου καθορίζεται και το πάχος του σύρματος χρωμιονικελίνης, το οποίο χρησιμοποιείται στο κλάδο αντιστάθμισης. Στη κατασκευή της διάταξης επιλέξαμε, ως υπό δοκιμή αγωγό, ένα εύκαμπτο, τριπολικό, μονωμένο καλώδιο NYM 3x1,5mm², παρότι η αντίσταση του συγκεκριμένου αγωγού ανά μέτρο είναι μεγαλύτερη από ένα καλώδιο MT. Ωστόσο, ανατρέχοντας σε άλλες διατάξεις εντοπισμού σφαλμάτων με τη συγκεκριμένη μέθοδο εντοπισμού, διαβάσαμε ότι μπορεί και ένα τηλεφωνικό καλώδιο, το οποίο έχει μεγαλύτερη αντίσταση ανά μέτρο ακόμη και από τα καλώδια εσωτερικών ηλεκτρικών εγκαταστάσεων, να χρησιμοποιηθεί ως υπό δοκιμή αγωγός. Το μήκος του καλωδίου που πρέπει να χρησιμοποιηθεί για τη συγκεκριμένη εφαρμογή δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 5m (53). Γνωρίζοντας ότι η αντίσταση του συγκεκριμένου καλωδίου είναι 12,1Ω/km, αν χρησιμοποιήσουμε 5m αγωγού η συνολική αντίσταση του αγωγού(υπό δοκιμή αγωγός και αγωγός αντιστάθμισης) είναι $R_{5m_{20^{\circ}C}} = (12,1 \left[\frac{\Omega}{km} \right] * 5[m])/1000[m] = 0,0605\Omega$, δηλαδή πρέπει να επιλεγεί σύρμα χρωμιονικελίνης πάχους 4,5mm. Ωστόσο, εξαιτίας περιορισμένης εμπορικής διάθεσης, δεν κατέστη δυνατή η εύρεση σύρματος χρωμιονικελίνης με τα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά, επιλέξαμε σύρμα χρωμιονικελίνης πάχους 3,5m, και κατά συνέπεια χρησιμοποιήσαμε 10m καλωδίου με αντίσταση $R_{10m_{20^{\circ}C}} = 12,1[\Omega/km] * 10[m]/1000[m] = 0,121\Omega$



Εικόνα 4.3 Άποψη ενός αγωγού 3X1.5mm²

4.3.4 Τροφοδοσία διάταξης

Από τη θεωρητική ανάλυση της διάταξης Murray στην **ενότητα 3.1.1**, η τάση τροφοδοσίας της διάταξης εξαρτάται από την αντίσταση σφάλματος. Θεωρούμε

αυθαίρετα ότι η αντίσταση του σφάλματος έχει μηδενική τιμή. Από τη παραπάνω ανάλυση, είναι προφανές ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια συμβατική πηγή τάσης(πχ μπαταρία), εφόσον η τιμή της αντίστασης σφάλματος είναι μικρότερη από $1k\Omega$ όπου υπάρχει δέσμευση να χρησιμοποιηθεί διαφορετικός τύπος τροφοδοσίας(ανορθωτής τάσης, γεννήτρια δοκιμής μόνωσης). Κάθε εφαρμογή χρειάζεται μια ελάχιστη τάση λειτουργίας, και το επίπεδο τάσης που είναι αρκετό για κάθε εφαρμογή αναφέρεται συνήθως ‘‘τάση αποκοπής’’, ακόμη και αν για την εφαρμογή απαιτείται μια συστοιχία μπαταριών (54). Η τάση τροφοδοσίας στην οποία μπορεί να λειτουργήσει ικανοποιητικά η διάταξη μπορεί να επιλεγεί από ένα πεδίο τιμών, μεταξύ των οποίων 4V, 6V, 8V, 12V. Ωστόσο, η επιλογή μιας πηγής τάσης των 12V είναι προτιμότερη (23) (55)

Προκειμένου να εξασφαλιστεί η ευκολία μεταφοράς της διάταξης, σε περίπτωση που καταστεί αναγκαίο, και κατ’ επέκταση η λειτουργικότητα της σε περιπτώσεις έλλειψης πηγής τροφοδοσίας, επιλέξαμε τη χρήση συστοιχίας μπαταριών AA αντί μιας συμβατικής πηγής τάσης(τροφοδοτικού). Η τάση μιας αλκαλικής μπαταρίας κυμαίνεται συνήθως μεταξύ 1.55V και 1.65V(**τάση ανοικτού κυκλώματος**), κάτι το οποίο επιβεβαιώσαμε και με μέτρηση. Η ονομαστική της τάση, ωστόσο, θεωρείται πως είναι 1.5V (54). Η απαίτηση για τάση της τάξεως των 12V, ικανοποιείται συνδέοντας σε σειρά 4 βάσεις αλκαλικών μπαταριών AA, κάθε μια από τις οποίες παρέχει θεωρητικά 3V(έχει υποδοχή για 2 μπαταρίες AA).

Ο βαθμός της πτώσης τάσης κατά τη χρήση, εξαρτάται από το είδος της εφαρμογής και την απαίτηση του φορτίου που συνδέεται στη μπαταρία, ενώ ταυτόχρονα καθορίζεται και από τη χωρητικότητα της μπαταρίας. Μετρώντας τη τάση ανοικτού κυκλώματος παίρνουμε μόνο μια πρόχειρη ιδέα της χωρητικότητας μιας μπαταρίας και/ή της κατάστασης της μπαταρίας (54). Στο στάδιο των δοκιμών για την εξασφάλιση της λειτουργικότητας της διάταξης, μας απασχόλησε η πτώση τάσης των μπαταριών κατά τη χρήση, καθώς από αυτή θα εξαρτηθεί εν πολλοίς η ορθότητα των ενδείξεων του οργάνου ισορροπίας και κατά συνέπεια ο ακριβής εντοπισμός του σημείου σφάλματος. Η φύση του προβλήματος και η αντιμετώπιση του θα αναλυθούν σε επόμενο κεφάλαιο.

4.4 Διαδικασία κατασκευής

Αρχικά, χρησιμοποιώντας ένα τρυπάνι με το κατάλληλο ξυλουργικό ποτήρι δημιουργήσαμε στην ξύλινη επιφάνεια την βάση υποδοχής για το γαλβανόμετρο.



Βιδώσαμε την μετροταινία στον ξύλινο πήχη



Προχωρήσαμε στην στερέωση του σύρματος χρωμονικελίνης . Κόψαμε δύο μικρούς ξύλινους κύβους τους οποίους τρυπήσαμε στο κέντρο τους, με τρυπάνι διατομής 3.5mm, και βάλαμε τις άκρες του σύρματος στις οπές που δημιουργήσαμε, ώστε να μπορούμε να λαμβάνουμε εύκολη μέτρηση με το κροκοδειλάκι.



Έπειτα, βιδώσαμε τους ξύλινους κύβους στον πύλο με την μετροταινία.

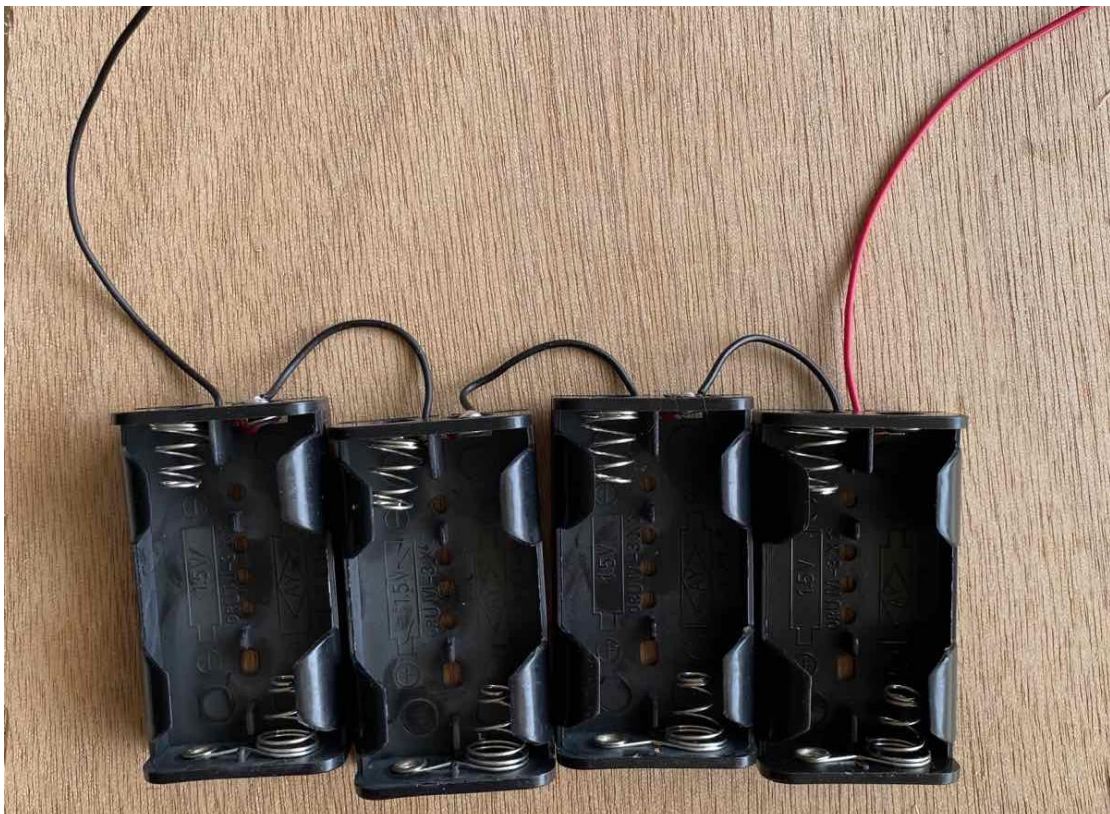
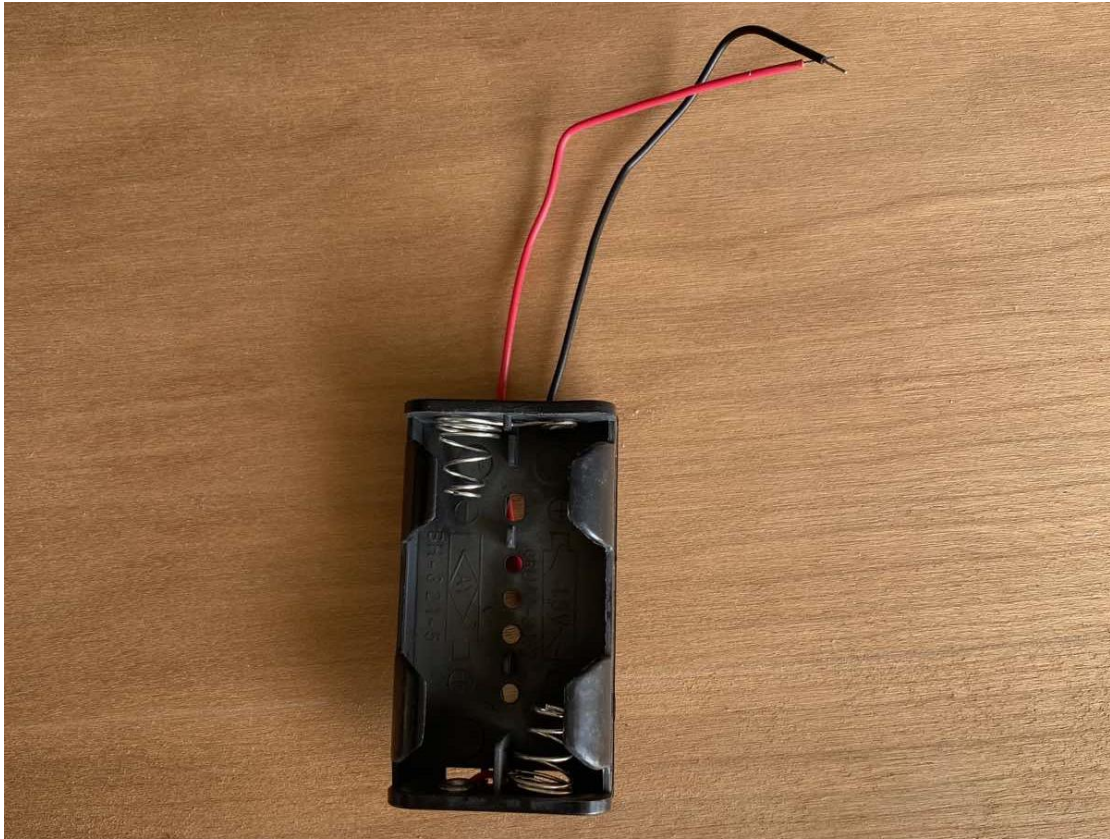




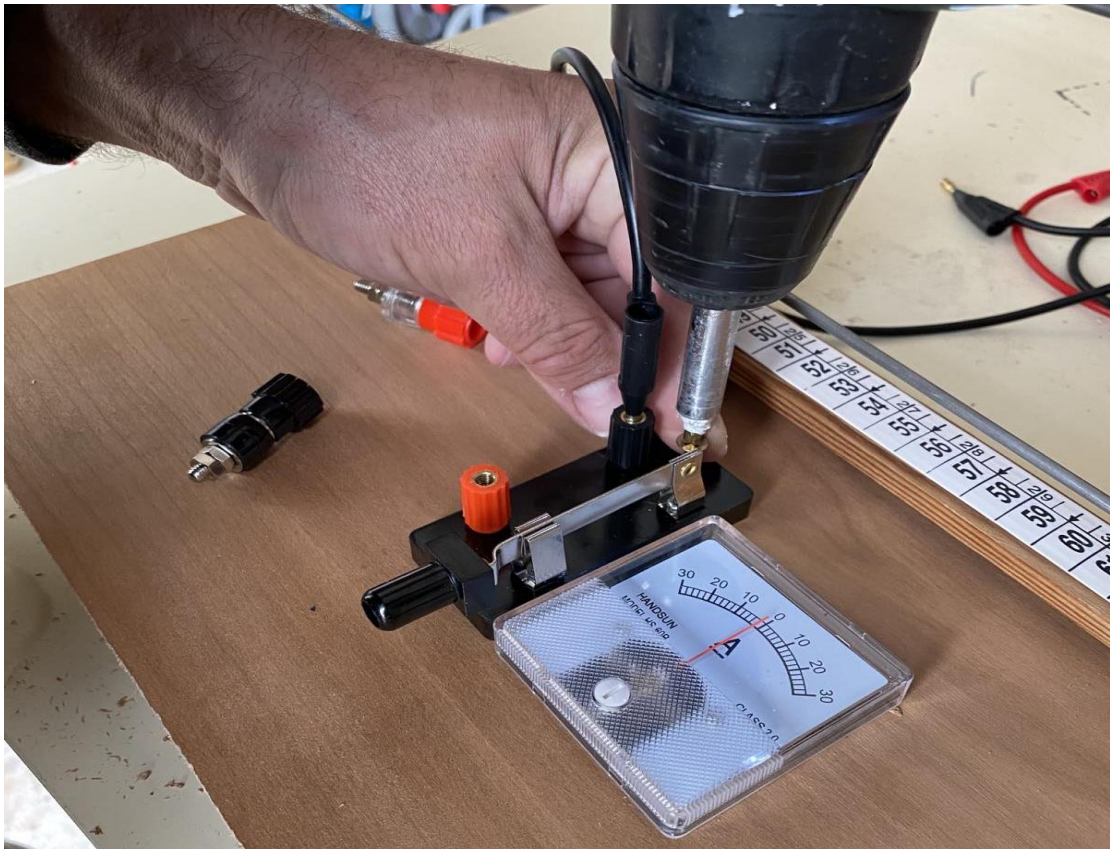
Κολλήσαμε με ξυλόκολλα τον πήχη με το πλαίσιο.



Για την τροφοδοσία χρησιμοποιήσαμε 4 θήκες μπαταρίας AA, 2 θέσεων, όπου τις συνδέσαμε σε σειρά και τις θερμοκολλήσαμε με σιλικόνη στην κάτω πλευρά του πλαισίου.

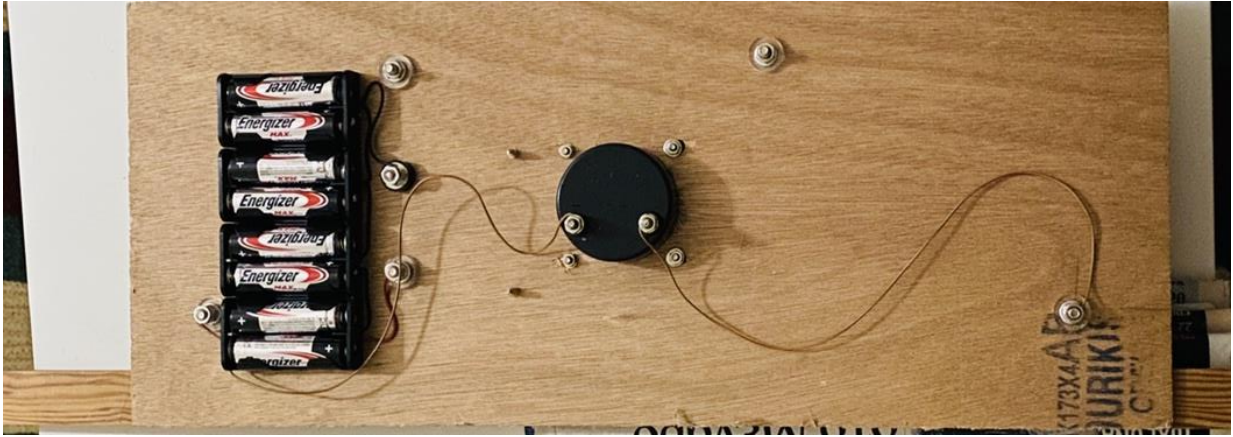


Στην συνέχεια , βιδώσαμε τον μαχαιρωτό διακόπτη του κυκλώματος και ανοίξαμε με το τρυπάνι κατάλληλες διατομές αντίστοιχα για κάθε μπόρνα.



Πραγματοποιήσαμε την συνδεσμολογία με τα κατάλληλα μήκη καλωδίων.

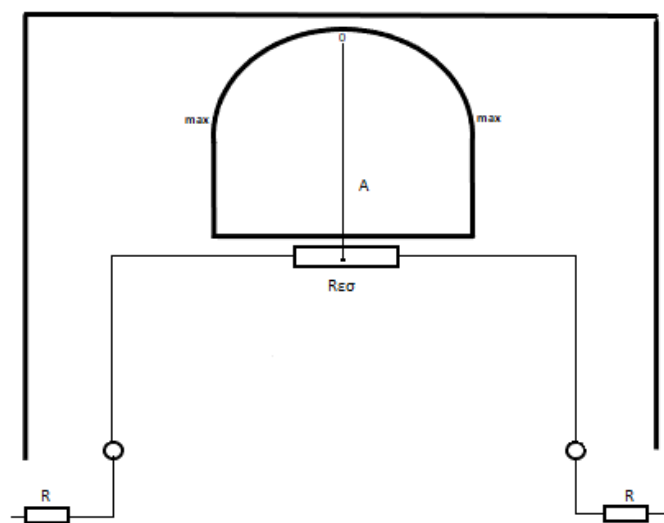




4.5 Προβλήματα κατά το στάδιο των πειραματικών δοκιμών

4.5.1 Όργανο ισορροπίας

Η επιλογή που, κατά συνθήκη, κάναμε σε προηγούμενο κεφάλαιο να χρησιμοποιήσουμε το όργανο όπως το αγοράσαμε με την επέκταση κλίμακας, δηλαδή με εύρος μέτρησης -30A έως 30A , οδήγησε στη μη λειτουργικότητα της διάταξης. Εφόσον από την ένδειξη του οργάνου ισορροπίας εξαρτάται και ο προσδιορισμός της θέσης σφάλματος του καλωδίου, η χαμηλή ευαισθησία του οργάνου μέτρησης δεν μας δίνει τη δυνατότητα εκτίμησης της θέσης σφάλματος. Είναι ενδεικτικό να αναφέρουμε ότι μεταβάλλοντας τη λήψη με το κροκοδειλάκι, ακόμα και στην ακραία περίπτωση όπου το σφάλμα συνέβη στο 100% του εσφαλμένου αγωγού, όπου κάνουμε λήψη στο 50% της αντίστασης ισοστάθμισης(η χορδή χρωμιονικελίνης παίζει το ρόλο αυτής της αντίστασης), η απόκλιση της βελόνας δεν ξεπέρασε ούτε το μισό τετραγωνάκι προς τα δεξιά. Το ίδιο σχεδόν συνέβη και στην άλλη ακραία περίπτωση όπου το σφάλμα συνέβη στο 0% του εσφαλμένου αγωγού, όπου κάνουμε λήψη στο 0% της αντίστασης ισοστάθμισης(η χορδή χρωμιονικελίνης παίζει το ρόλο αυτής της αντίστασης).

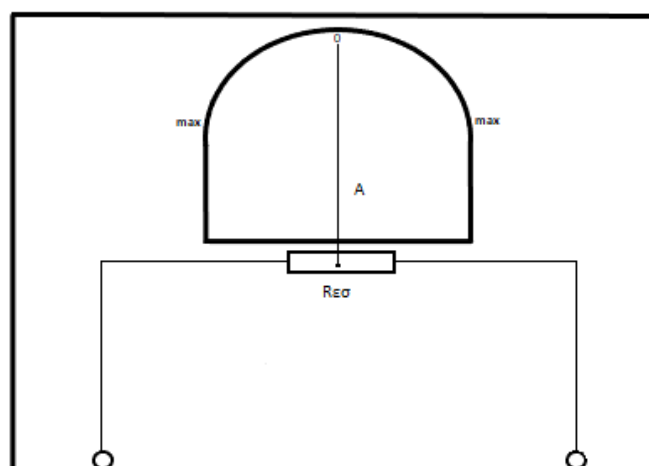


Εικόνα 4.4 Συνδεσμολογία οργάνου

Έπειτα, πραγματοποιήσαμε δοκιμές με αντιστάσεις προστασίας διαφόρων τιμών(R_{π}). Συγκεκριμένα χρησιμοποιήσαμε αντίσταση προστασίας των 400Ω και των 200Ω . Ακολουθώντας τη ίδια διαδικασία που περιγράψαμε παραπάνω, είδαμε την απόκλιση της βελόνας να μην ξεπερνά το 1 τετραγωνάκι και το 1.5 τετραγωνάκι αντίστοιχα. Έτσι ακολουθήσαμε διαφορετική στρατηγική, αφαιρώντας εντελώς την προστατευτική αντίσταση(R_{π}) του οργάνου, δηλαδή λειτουργώντας το ως βασικό όργανο. Ωστόσο, εξαιτίας του γεγονότος ότι η διαφορά δυναμικού στα άκρα του κλάδου του οργάνου ισορροπίας μας ήταν άγνωστη, προτιμήσαμε για προστασία του οργάνου τη χρήση δύο αντιστάσεων(R), όπως φαίνεται στην **εικόνα 4.4**. Χρησιμοποιήσαμε δυο

αντιστάσεις των 12Ω και δυο αντιστάσεις 8Ω . Ακολουθήσαμε την ίδια διαδικασία που περιγράψαμε παραπάνω, χωρίς μεγάλη βελτίωση, αφού είδαμε τη βελόνα να προσεγγίζει τα 2 τετραγωνάκια για αντιστάσεις των 12Ω και να τα ξεπερνάει ελαφρώς για αντιστάσεις των 8Ω .

Παρατηρώντας ότι η ευαισθησία του οργάνου εξακολουθούσε να είναι χαμηλή, αφαιρέσαμε τις δύο αντιστάσεις που είχαμε τοποθετήσει αντιδιαμετρικά και **προτιμήσαμε τη λειτουργία του ως βασικό όργανο**(εικόνα 4.5). Πραγματοποιώντας δοκιμές για να επιβεβαιώσουμε την επιθυμητή λειτουργία της διάταξης παρατηρήσαμε ότι μεταβάλλοντας τη λήψη με το κροκοδειλάκι, ακόμα και στην ακραία περίπτωση όπου το σφάλμα συνέβη στο 100% του εσφαλμένου αγωγού, όπου κάνουμε λήψη στο 50% της αντίστασης ισοστάθμισης(η χορδή χρωμιονικελίνης παίζει το ρόλο αυτής της αντίστασης), η απόκλιση της βελόνας ξεπέρασε τα 5 τετραγωνάκια προς τα δεξιά(ένδειξη 10, όπως φαίνεται στο όργανο). Το ίδιο σχεδόν συνέβη και και στην άλλη ακραία περίπτωση όπου το σφάλμα συνέβη στο 0% του εσφαλμένου αγωγού, όπου κάνουμε λήψη στο 0% της αντίστασης ισοστάθμισης(η χορδή χρωμιονικελίνης παίζει το ρόλο αυτής της αντίστασης). Όμως, στη κατάσταση ισορροπίας, δηλαδή με λήψη στο 25% της χορδής χρωμιονικελίνης, παρατηρούμε ότι η βελόνα του οργάνου δεν ισορροπεί εντελώς αλλά παρουσιάζει μια απόκλιση κατά σχεδόν 1 τετραγωνάκι. Το γεγονός αυτό-όπως αναλύσαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο-οφείλεται αφενός μεν στην ανισότητα των αντιστάσεων του κλάδου αντιστάθμισης, οποίος αποτελείται από τη χορδή χρωμιονικελίνης, και του κλάδου του καλωδίου, ο οποίος αποτελείται από τον αγωγό αναφοράς μαζί με τον υπό δοκιμή αγωγό. Αφετέρου, όπως θα αναλύσουμε και παρακάτω, διαπιστώσαμε ότι στο συγκεκριμένο πρόβλημα συνέβαλαν το φαινόμενο της εκφόρτισης των μπαταριών και η αντίσταση προστασίας της διάταξης, αποτρέποντας τη παροχή σταθερής τάσης τροφοδοσίας από τη συστοιχία μπαταριών.



Εικόνα 4.5 Συνδεσμολογία οργάνου ισοροπίας που καταλήξαμε

4.5.2 Αντίσταση προστασίας

Θεωρητικά, η διάταξη Murray μπορεί να λειτουργήσει αποτελεσματικά ανεξαρτήτως της ποσότητας του ρεύματος που θα δεχθεί από τη πηγή τροφοδοσίας. Στη πράξη, δεν θα ικανοποιείται η συνθήκη για μια ελάχιστη τάση λειτουργίας (τάση αποκοπής), οι μπαταρίες θα προσπαθήσουν να εφαρμόσουν όσο μεγαλύτερη τάση μπορούν έως ότου εκφορτιστούν εντελώς. Δηλαδή, σε περίπτωση ανυπαρξίας αντίστασης προστασίας, η πηγή καλείται να δώσει θεωρητικά άπειρο ρεύμα. Για το λόγο αυτό κρίνεται απαραίτητη η χρήση προστατευτικής αντίστασης περιορισμού του ρεύματος που διαρρέει τους κλάδους τη γέφυρας.

Ανατρέχοντας σε διατάξεις εντοπισμού σφαλμάτων, και συγκεκριμένα σε διατάξεις της εταιρείας Leeds & Northrup (56), παρατηρούμε ότι χρησιμοποιούνται δυο προστατευτικές αντιστάσεις των $9\text{k}\Omega$ και $1\text{k}\Omega$ οι οποίες προστατεύουν τόσο τη μπαταρία όσο και τη διάταξη από υπερφόρτωση λόγω ροής μεγάλου ρεύματος. Ωστόσο, λαμβάνοντας υπόψιν ότι τέτοιες διατάξεις είναι πολυμορφικές-δηλαδή δέχονται τάσεις τροφοδοσίας διαφόρων σταθμών, ανάλογα και της αντίστασης του σφάλματος-η αντίσταση των $9\text{k}\Omega$ βραχυκυκλώνεται και χρησιμοποιείται μόνο αυτή των $1\text{k}\Omega$. Συνεπώς, επιλέγουμε να χρησιμοποιήσουμε μια αντίσταση άνθρακα των $1\text{k}\Omega/0,25\text{W}$.



Εικόνα 4.6 Άποψη μιας αντίστασης άνθρακα 1kΩ 1/4W

Ωστόσο με τη χρήση αντίστασης προστασίας του 1kΩ, είδαμε την απόκλιση της βελόνας του οργάνου να μην ξεπερνά το 1 τετραγωνάκι για ακραίες λήψεις. Συνεπώς η χαμηλή ευαισθησία της διάταξης και η τιμή της αντίστασης, δεν μας επιτρέπει τη χρήση της συγκεκριμένης αντίστασης. Έπειτα, πραγματοποιήσαμε δοκιμές με αντιστάσεις προστασίας διαφόρων τιμών. Συγκεκριμένα χρησιμοποιήσαμε αντίσταση προστασίας των 200Ω/0,25W και των 100Ω/0,25W. Τροφοδοτώντας με τάση το κύκλωμα, είδαμε την βελόνα του οργάνου να αποκλίνει περισσότερο. Προτιμήσαμε, όμως, τη χρήση διαφορετικής αντίστασης προστασίας καθώς το εύρος μέτρησης του οργάνου δεν ήταν το επιθυμητό στις ακραίες λήψεις, κατά συνέπεια και η ακρίβεια εντοπισμού της θέσης σφάλματος. Έπειτα χρησιμοποιήσαμε δυο αντιστάσεις των 10Ω/0,25W και 8Ω/0,25W. Παρατηρήσαμε σημαντική βελτίωση, αφού είδαμε τη βελόνα να ξεπερνά τα 10 τετραγωνάκια για τις δύο ακραίες λήψεις της αντίστασης αντιστάθμισης(χορδή χρωμιονικελίνης). Για τιμή της αντίστασης 10Ω, και λαμβάνοντας υπόψιν πως οι αντιστάσεις των κλάδων της γέφυρα έχουν πολύ μικρές τιμές, συμπεραίνουμε ότι το συνολικό ρεύμα που απορροφά το κύκλωμα από τη πηγή είναι κοντά στα 1,2A, αφού $I = 12[V]/10[\Omega] = 1,2A$. Στη πράξη, με χρήση φορητού πολυμέτρου, το ρεύμα αυτό μετρήθηκε πάνω από 1,25A, ενώ στιγμιαία ξεπερνούσε τη τιμή αυτή. Έτσι δύναται να υπολογιστεί και η **μέγιστη μεταφορά ισχύος**(Resistor Power Rating) που απαιτείται $P = V * I = 12 * 1,2 = 14,4W$, η οποία είναι όση ενέργεια καταναλώνει η αντίσταση και τη μετατρέπει σε θερμότητα (57). Η αντίσταση άνθρακα των 10Ω έχει μέγιστη μεταφορά ισχύος 0,25W. Όπως κάθε αντίσταση, έτσι και η συγκεκριμένη, έχει μία **μέγιστη ισχύ διασποράς**(Maximum Dissipated Power Rating) η οποία είναι η μέγιστη ποσότητα ισχύος που μπορεί να μετατραπεί σε θερμότητα. Οι αντιστάσεις που ξεπερνούν τη μέγιστη επιτρεπόμενη μεταφορά ισχύος, τείνουν να καταστραφούν οι ίδιες αλλά και να καταστρέψουν και το κύκλωμα στο οποίο είναι συνδεδεμένες (57). Συνεπώς δεν είναι δυνατόν να χρησιμοποιήσουμε τη συγκεκριμένη αντίσταση ως αντίσταση προστασίας. Έτσι η χρήση των δύο

αυτών αντιστάσεων είχε ως αποτέλεσμα την υπερθέρμανση και μέσα σε λίγα δευτερόλεπτα τη καταστροφή τους, ενώ παράλληλα, δεν μας εξασφαλίζουν ότι η ποσότητα του ρεύματος που απορροφά το κύκλωμα είναι σταθερή.

Για την επιλογή αντίστασης για μία συγκεκριμένη εφαρμογή, είναι απαραίτητο να λάβουμε υπόψιν τη μέγιστη μεταφορά ισχύος στην αντίσταση αυτή. Ο ρόλος μιας αντίστασης είναι να αντιστέκεται στη ροή ρεύματος, η οποία παράγεται από μια διαφορά δυναμικού επάνω σε αυτή, ενός κυκλώματος και αυτό το καταφέρνει διαχέοντας την περίσσεια ενέργεια ως θερμότητα στο περιβάλλον. Η επιλογή μιας αντίστασης με μικρή τιμή ισχύος όταν δέχεται μεγάλη ισχύ, όπως αναλύσαμε και παραπάνω, θα προκαλέσει υπερβολική διάχυση θερμότητας στην αντίσταση, καταστρέφοντας τόσο την αντίσταση όσο και το κύκλωμα. Γι' αυτό κρίθηκε απαραίτητη η χρήση βαττικής αντίστασης ισχύος ως αντίσταση προστασίας. Εξάλλου, οι αντιστάσεις ισχύος έχουν σχεδιαστεί για να αντέχουν και να μπορούν να μετατρέψουν σε θερμότητα μεγάλες τιμές ισχύος. Ένα κοινό χαρακτηριστικό όλων των αντιστάσεων ισχύος είναι ότι έχουν κατασκευαστεί για να μπορούν να μετατρέψουν σε θερμότητα μεγάλες τιμές ισχύος, ενώ παράλληλα να καταλαμβάνουν μικρό όγκο(δηλαδή να έχουν μικρό μέγεθος) (57). Μόνο με τη προσθήκη βαττικής αντίστασης προστασίας το ρεύμα που απορροφά η αντίσταση σταθεροποιήθηκε, ενώ διαρρέεται απρόσκοπτα από ρεύμα ανεξαρτήτως χρόνου. Η αντίσταση των 10Ω/15W μπορεί να μετατρέψει σε θερμότητα μεγαλύτερη ποσότητα ενέργειας και ζεσταίνεται λιγότερο, σε σχέση με μια αντίσταση των 9Ω/10W που δοκιμάσαμε και η οποία έχει χαμηλότερο όριο μέγιστης μεταφοράς ισχύος από τα 14,4W.



Εικόνα 4.7 Άποψη μιας βαττικής αντίστασης 10Ω/15W

4.5.3 Τροφοδοσία διάταξης

Όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 4.3.4, στο στάδιο των δοκιμών για την εξασφάλιση της λειτουργικότητας της διάταξης, μας απασχόλησε η πτώση τάσης των μπαταριών που στελεχώνουν τη συστοιχία μπαταριών, καθώς από αυτή εν πολλοίς θα εξαρτηθεί η ορθότητα των ενδείξεων του οργάνου ισορροπίας και κατά συνέπεια ο ακριβής εντοπισμός της θέσης σφάλματος. Αρχικά δεν χρησιμοποιήσαμε αντίσταση προστασίας. Τότε η ποσότητα του ρεύματος που δύναται να απορροφήσει το κύκλωμα είναι θεωρητικά άπειρη, λαμβάνοντας υπόψιν πως οι αντιστάσεις των κλάδων της γέφυρα έχουν πολύ μικρές τιμές. Στη πράξη, η ποσότητα του ρεύματος που απορροφούσε το κύκλωμα ήταν διαρκώς μεταβαλλόμενη, ενώ μετρήθηκε πάνω 8A καθώς η κάθε μία αλκαλική μπαταρία αν βραχυκυκλωθεί μπορεί να εκφορτιστεί με 1A μέγιστο ρεύμα. Για τη δεδομένη τιμή της αντίστασης που καταλήξαμε παραπάνω(10Ω), και λαμβάνοντας υπόψιν πως οι αντιστάσεις των κλάδων της γέφυρα έχουν πολύ μικρές τιμές, συμπεραίνουμε ότι το συνολικό ρεύμα που απορροφά το κύκλωμα από τη πηγή είναι κοντά στα 1,2A, αφού $I = 12[V]/10[\Omega] = 1,2A$. Στη πράξη, με χρήση φορητού πολυμέτρου, το ρεύμα αυτό μετρήθηκε πάνω από 1,2A, ενώ στιγμιαία ξεπερνούσε τη τιμή αυτή.

Μετά τις δοκιμές που διεξάγαμε, όπου δεν χρησιμοποιήσαμε προστατευτική αντίσταση, διαπιστώσαμε ιδιαίτερα ασταθή λειτουργία της διάταξης. Η πτώση τάσης των μπαταριών ήταν πολύ μεγάλη, με αποτέλεσμα αυτές να εκφορτίζονται πολύ γρήγορα και να μη παρέχουν την επιθυμητή τάση των 1.5V η κάθε μία. Συνεπώς εφόσον δεν εξασφαλιζόνταν η απαίτηση για σταθερή τάση 12V, η λειτουργικότητα της διάταξης ήταν περιορισμένη, δηλαδή παρατηρήσαμε ότι κάθε φορά που δίναμε τάση στο κύκλωμα είχαμε και διαφορετική απόκλιση της βελόνας παρόλο που η λήψη στο κλάδο αντιστάθμισης(σύρμα χρωμιονικελίνης) παρέμενε ίδια.

Μετά τις δοκιμές που διεξάγαμε, όπου χρησιμοποιήσαμε προστατευτική αντίσταση, διαπιστώσαμε ότι παρόλο που οι μπαταρίες δεν εκφορτίζονταν με τον ίδιο ρυθμό, ωστόσο κάθε φορά που δίναμε τάση στο κύκλωμα η απόκλιση της βελόνας ήταν διαφορετική παρόλο που η λήψη στο κλάδο αντιστάθμισης(σύρμα χρωμιονικελίνης) παρέμενε ίδια.

Λαμβάνοντας υπόψιν τις παραπάνω παρατηρήσεις, κρίθηκε απαραίτητη η αντικατάσταση της συστοιχίας μπαταριών με μια συμβατική πηγή σταθερής τάσης. Για το σκοπό αυτό επιλέξαμε ένα τροφοδοτικό συνεχούς τάσης(DC), το οποίο προσφέρει με τη βοήθεια ενός κυκλώματος εσωτερικά-προστασία από βραχυκύκλωμα. Με τη χρήση του τροφοδοτικού, ικανοποιήθηκε η απαίτηση για σταθερή τάση, και ταυτόχρονα η απόκλιση της βελόνας κάθε φορά που δίναμε τάση στο κύκλωμα ήταν ίδια.

4.5.4 Τελική μελέτη υλικών

Πίνακας 5 Τελική υλικοτεχνική μελέτη της διάταξης.

Υλικό	Κόστος	Ποσότητα
Μεζούρα ραπτικής (150cm)	0,62 €	1
Ξύλινος πήχης μήκους 1.5m	3 €	1
Ξύλινες βάσεις σύρματος	1 €	2
Ξυλόβιδες	1 €	
Σύρμα χρωμιονικελίνης 1m (3.5mm)	3,60 €	1
Μπορνα C 015B	1,20 €	3
Μπορνα Ασφαλείας 4mm	6,60 €	3
Μαχαιρωτος διακόπτης με μπόρνες	4 €	1
Καλώδιο μπανάνα-μπανάνα θηλυκό 4mm	14,20 €	4
Καλώδιο κροκοδειλάκι-μπανάνα θηλυκό 4mm	11,56 €	3
Αναλογικό Αμπερομετρο FC60P +-30A	11,62 €	1
Βαττική αντίσταση προστασίας 10Ω(15W)	0,50 €	1
Καλώδιο συνδέσεων 2mm ² (καρούλι)	5 €	1
11m καλώδιο NYM 3X1.5mm ²	10,45 €	1
Ξύλινη Βάση 0.70mX0.25m	5 €	1
Τροφοδοτικό 15V 5A DC	119 €	1
Σύνολο:	198.35 €	25

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΥΠΟ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΔΙΑΤΑΞΗΣ- ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ- ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

5.1 Προσομοίωση της υπό διερεύνηση διάταξης

5.1.1 Γενικά

Με χρήση ενός προγράμματος εξομοίωσης δύναται να μελετηθεί η επίδραση στη συμπεριφορά ενός κυκλώματος, αλλάζοντας τις τιμές διαφόρων παραμέτρων. Παράλληλα, ερμηνεύοντας τα αποτελέσματα της εξομοίωσης του κυκλώματος, μπορούμε να έχουμε μία σαφή εικόνα για τη δυναμική συμπεριφορά των στοιχείων, τις τάσεις και τα ρεύματα που θα τους εφαρμοστούν και τις καταπονήσεις των στοιχείων (58).

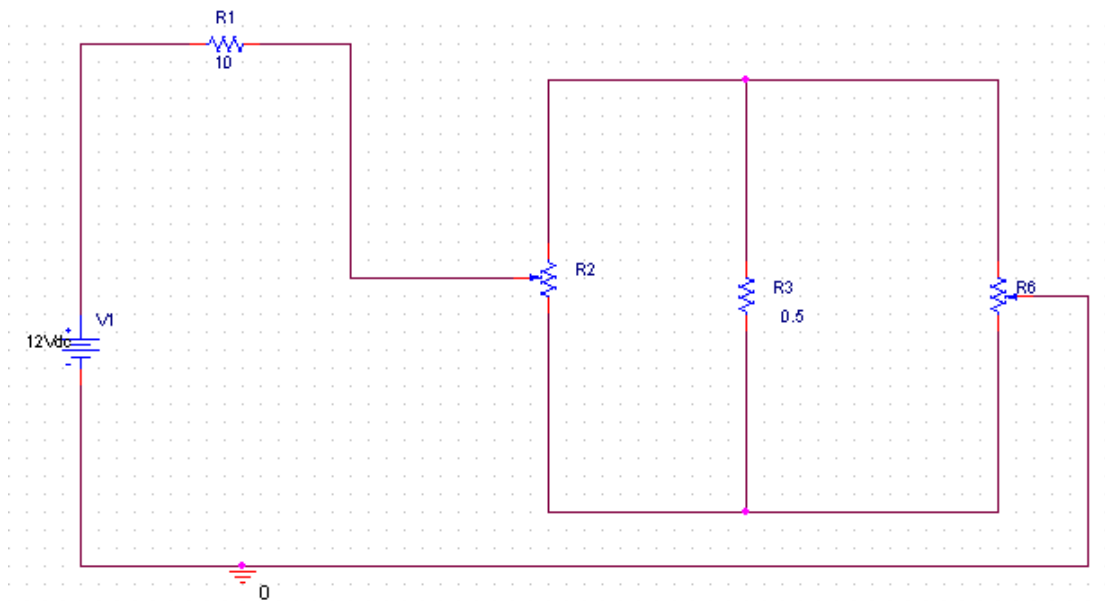
Οι προσομοιώσεις έγιναν μέσω του προγράμματος P-Spice, ενός προγράμματος προσανατολισμένο προς το κύκλωμα. Αφού σχεδιαστεί στο περιβάλλον Capture η τοπολογία του κυκλώματος, δώσουμε τις τιμές των στοιχείων και τις λεπτομέρειες των μοντέλων των στοιχείων, το πρόγραμμα χρησιμοποιεί διάφορους αλγορίθμους επίλυσης, κατά τους οποίους αρχικά σχηματίζονται οι κανονικές μη γραμμικές διαφορικές εξισώσεις και στη συνέχεια επιλύεται ένα σύστημα διαφορικών εξισώσεων. Με άλλα λόγια, κάθε κατάσταση του κυκλώματος περιγράφεται από ένα σύστημα διαφορικών εξισώσεων. Η δημιουργία των εξισώσεων βασίζεται στις γνωστές εξισώσεις επίλυσης κυκλωμάτων που προκύπτουν από τους νόμους των ρευμάτων και τάσεων του Kirchhoff (58).

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι ανάλυσης που εκτελεί το Spice. Οι πιο συνηθισμένες είναι η γραμμική DC, η bias point, η μη γραμμική transient και η γραμμική AC. Το συγκεκριμένο κύκλωμα είναι μη γραμμικό κύκλωμα, ενώ ταυτόχρονα δεν χρησιμοποιούνται διακοπτικά ηλεκτρονικά στοιχεία (πχ IGBT) που να μεταβάλλονται συναρτήσει του χρόνου (58).

Για την υπό διερεύνηση διάταξη, πραγματοποιήθηκε εξομοίωση του κυκλώματος χρησιμοποιώντας ανάλυση bias point, η οποία υπολογίζει τα ρεύματα και τις τάσεις κάθε κόμβου που αναπτύσσονται από τα διάφορα στοιχεία του κυκλώματος, κάτω από σταθερές συνθήκες λειτουργίας (58).

5.1.2 Προσομοίωση της διάταξης εντοπισμού σφαλμάτων με χρήση βρόχου Murray

Τα σχηματικό διάγραμμα του κυκλώματος είναι το εξής:



Εικόνα 5.1 Σχηματικό κύκλωμα του διάταξης Murray(Βρόχος Murray) (58)

5.1.3 Επιλογή των παραμέτρων εξομοίωσης

Για αναπαράσταση της πηγής τάσης χρησιμοποιήθηκε το στοιχείο Vdc από τη βιβλιοθήκη Source, όπου θέσαμε στη παράμετρο value τη τιμή **12V** (58).

Παρατηρώντας το κύκλωμα της **εικόνας 5.1**, διαπιστώνουμε ότι υπάρχει μια αντίσταση που παρεμβάλλεται μεταξύ της πηγής τάσης και του βρόχου ισορροπίας(**R1**). Για αναπαράσταση της αντίστασης προστασίας χρησιμοποιήθηκε το στοιχείο R από τη βιβλιοθήκη ANALOG, όπου θέσαμε στη παράμετρο value τη τιμή **10Ω**. Η επιλογή της συγκεκριμένης τιμής για αυτή την αντίσταση, προέκυψε από το στάδιο των πρακτικών δοκιμών της κατασκευής ενώ τα χαρακτηριστικά της αντίστασης που επιλέχθηκε θα αναλυθούν στο επόμενο κεφάλαιο. Ταυτόχρονα, η αντίσταση **R3** αντιπροσωπεύει την εσωτερική αντίσταση του οργάνου μέτρησης της ισορροπίας της γέφυρας(γαλβανόμετρο), για την αναπαράσταση της οποίας χρησιμοποιήθηκε το στοιχείο R από τη βιβλιοθήκη ANALOG, όπου θέσαμε στη παράμετρο value τη τιμή **0,5Ω**, της οποίας η επιλογή προέκυψε επίσης από το στάδιο των πρακτικών δοκιμών της κατασκευής (58).

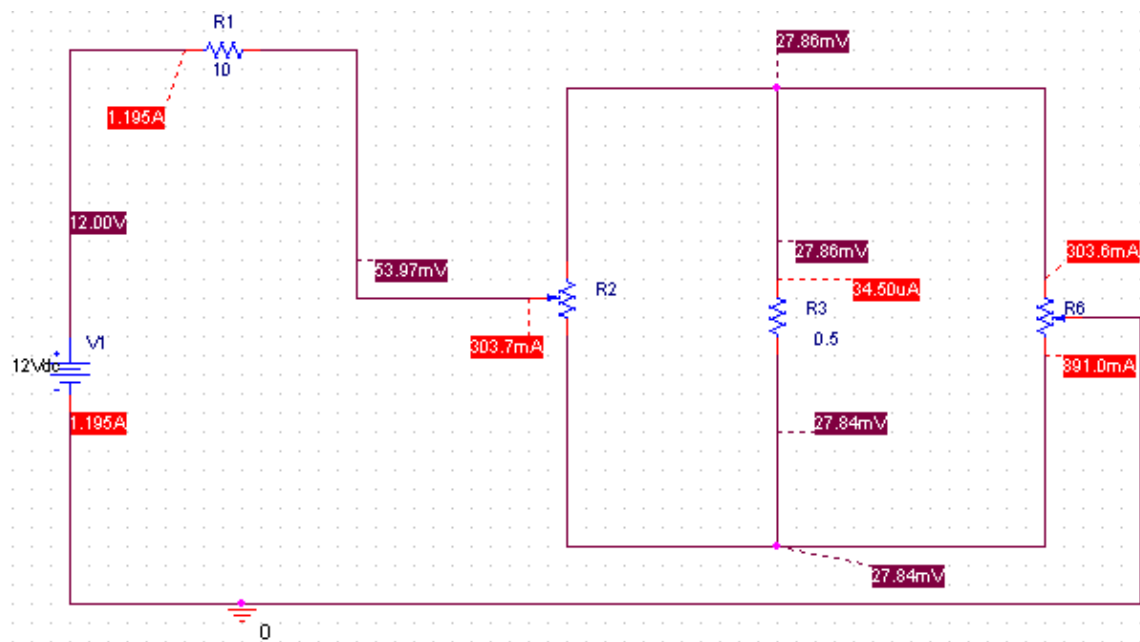
Το στοιχείο **R6** αντιπροσωπεύει τη συνολική αντίσταση του υπό δοκιμή αγωγού-ο οποίος περιέχει και το σφάλμα- και του αγωγού αναφοράς. Στο στάδιο

των πρακτικών δοκιμών, επιλέχθηκε καλώδιο μήκους 10m με αντίσταση 0,121Ω. Σε πραγματικές συνθήκες, όπου ενδεχομένως να απαιτείται εντοπισμός σφαλμάτων σε ένα δίκτυο υπογείων καλωδίων μήκους ακόμη και μερικών χιλιομέτρων, η τιμή αυτής της αντίστασης θα είναι πολλαπλάσια. Οπότε, για αναπαράσταση της αντίστασης αυτής χρησιμοποιήθηκε το στοιχείο POT από τη βιβλιοθήκη BREAKOUT, όπου θέσαμε στη παράμετρο value τη τιμή **0,121Ω** (58).

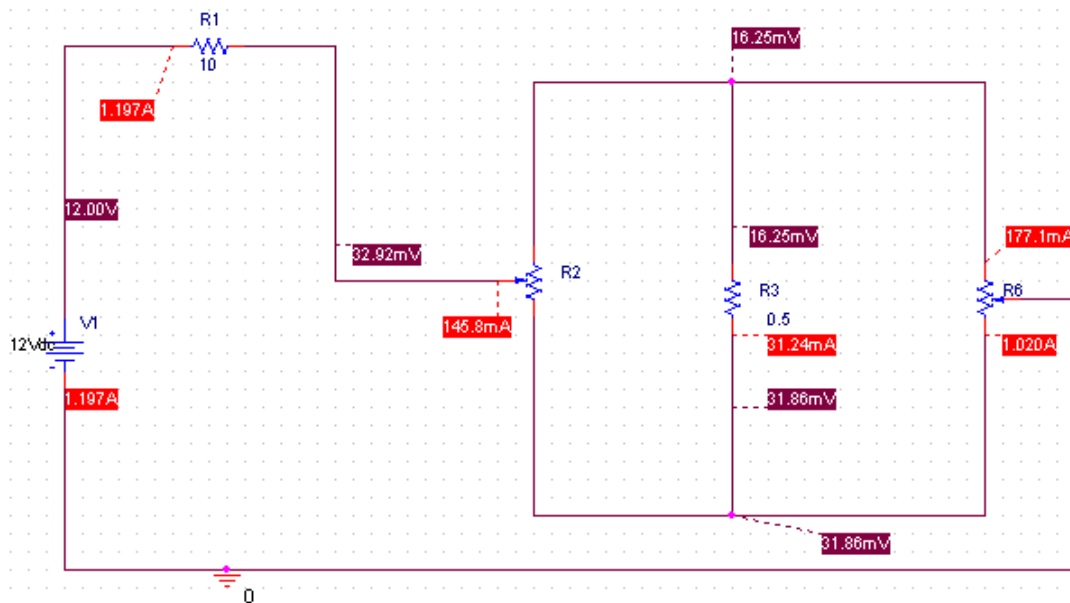
Το στοιχείο **R2** αντιπροσωπεύει τη μεταβλητή αντίσταση που χρησιμοποιείται για την επίτευξη της ισορροπίας της γέφυρας Murray, καθώς μεταβάλλοντας τη λήψη του ποτενσιόμετρου έχουμε εικόνα του σημείου όπου υπάρχει σφάλμα. Όπως διαπιστώσαμε και από το στάδιο της επιλογής υλικών, η αντίσταση αυτή αντιπροσωπεύεται από μια χορδή(μεταλλικό σύρμα) κατασκευασμένη από πρόσμιξη χρωμιονικελίνης. Οπότε, για αναπαράσταση της αντίστασης αυτής χρησιμοποιήθηκε το στοιχείο POT από τη βιβλιοθήκη BREAKOUT, όπου θέσαμε στη παράμετρο value τη τιμή **0,1133Ω**, όση είναι και η αντίσταση του σύρματος (58).

5.1.4 Αποτελέσματα της προσομοίωσης

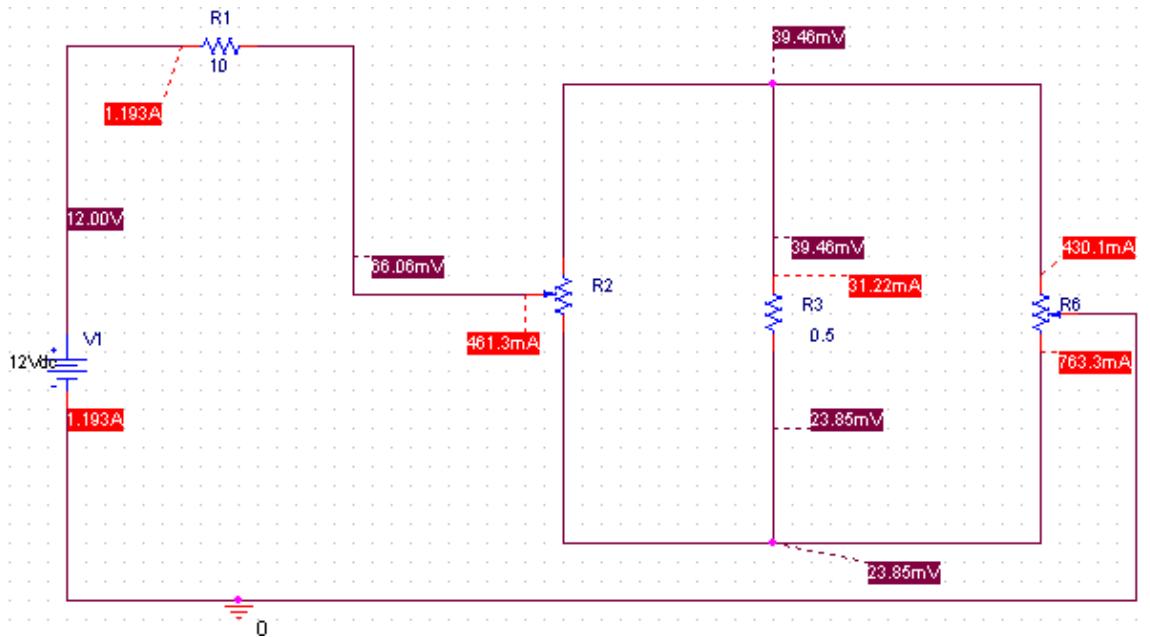
Τα σχηματικά διαγράμματα του κυκλώματος είναι τα εξής:



Εικόνα 5.2 Σχηματικό κύκλωμα του διάταξης σε κατάσταση ισορροπίας (58)



Εικόνα 5.3 Σχηματικό κύκλωμα της διάταξης σε κατάσταση ανισορροπίας(λήψη στο 0%) (58)



Εικόνα 5.4 Σχηματικό κύκλωμα της διάταξης σε κατάσταση ανισορροπίας(λήψη στο 50%) (58)

Παρατηρώντας τα αποτελέσματα της εξομοίωσης Bias Point, διαπιστώνουμε ότι επιβεβαίωσαν την ιδέα και τη διαδικασία σχεδιασμού της διάταξης που καταγράφηκε βιβλιογραφικά για πρώτη φορά το 1871 (61). Η διάταξη ισορροπεί σε μια προκαθορισμένη θέση της μεταβλητής αντίστασης **R2**, άμεσα εξαρτώμενη από το σημείο σφάλματος(αντιπροσωπεύεται από την μεταβλητή αντίσταση **R6**) (58).

Τα αποτελέσματα της εικόνας 2, προέκυψαν ρυθμίζοντας τη λήψη της μεταβλητής αντίστασης **R2** στο **25% της συνολικής αντίστασης** ισοστάθμισης. Η αντίσταση **R6** από την άλλη έχει τη λήψη της στο 25%, δηλαδή στο 50% του υπό δοκιμή αγωγού εκεί όπου συνέβη και το σφάλμα, αφού και η αντίσταση R6 αντιπροσωπεύει τη συνολική αντίσταση του υπό δοκιμή αγωγού- ο οποίος περιέχει και το σφάλμα- και του αγωγού αναφοράς. Ορίζοντας στο πρόγραμμα τις παραπάνω παραμέτρους, η διάταξη ισορροπεί. Αξιοσημείωτο βέβαια ήταν και το γεγονός, ότι το ρεύμα που διαρρέει το κλάδο του οργάνου δεν είναι ακριβώς 0 αλλά της τάξης μερικών εκατοντάδων μA , πράγμα που καταδεικνύει ότι η βελόνα του οργάνου θα αποκλίνει ελαφρώς, δηλαδή δεν θα έχουμε απόλυτη ισορροπία. Τροποποιώντας, ωστόσο, στο κύκλωμα της διάταξης τη τιμή της μεταβλητής αντίστασης R2 από $0,1133\Omega$ σε $0,121\Omega$, το ρεύμα που θα διαρρέει πλέον το κλάδο του οργάνου θα είναι ακριβώς 0. Στη πράξη μια τέτοια δοκιμή θα ήταν αδύνατη καθώς δεν είναι δυνατή η ανεύρεση χορδής χρωμιονικελίνης με αντίσταση ίση με $0,121$ (58).

Τα αποτελέσματα της εικόνας 3, προέκυψαν ρυθμίζοντας τη λήψη της μεταβλητής αντίστασης **R2** στο **0% της συνολικής αντίστασης** ισοστάθμισης. Η αντίσταση **R6** από την άλλη έχει τη λήψη της στο 25%, δηλαδή στο 50% του

υπό δοκιμή αγωγού, αφού και η αντίσταση R6 αντιπροσωπεύει τη συνολική αντίσταση του υπό δοκιμή αγωγού- ο οποίος περιέχει και το σφάλμα- και του αγωγού αναφοράς(όπως στη προηγούμενη περίπτωση). Ορίζοντας στο πρόγραμμα τις παραπάνω παραμέτρους, αναπτύσσεται μεγαλύτερη διαφορά δυναμικού στα άκρα της αντίστασης στο κλάδο του οργάνου, πράγμα το οποίο σημαίνει ότι αυξάνεται και το ρεύμα το οποίο διέρχεται από το κλάδο. Συνεπώς, η διάταξη οδηγείται σε πλήρη ανισορροπία. Αυτό σημαίνει ότι πρέπει να επαναφέρουμε σιγά σιγά τη λήψη στο 25% της αντίστασης ισοστάθμισης(R2), οπότε και το ρεύμα θα αρχίσει πάλι να μειώνεται μέχρι να φτάσουμε στο 25% όπου θα ελαχιστοποιηθεί (58).

Τα αποτελέσματα της εικόνας 4, προέκυψαν ρυθμίζοντας τη λήψη της μεταβλητής αντίστασης **R2** στο **50% της συνολικής αντίστασης** ισοστάθμισης. Η αντίσταση **R6** από την άλλη έχει τη λήψη της στο 25%, δηλαδή στο 50% του υπό δοκιμή αγωγού, αφού και η αντίσταση R6 αντιπροσωπεύει τη συνολική αντίσταση του υπό δοκιμή αγωγού-ο οποίος περιέχει και το σφάλμα- και του αγωγού αναφοράς(όπως στη προηγούμενη περίπτωση). Ορίζοντας στο πρόγραμμα τις παραπάνω παραμέτρους, αναπτύσσεται μεγαλύτερη διαφορά δυναμικού στα άκρα της αντίστασης στο κλάδο του οργάνου, πράγμα το οποίο σημαίνει ότι αυξάνεται και το ρεύμα το οποίο διέρχεται από το κλάδο. Συνεπώς, η διάταξη οδηγείται σε πλήρη ανισορροπία. Αυτό σημαίνει ότι πρέπει να επαναφέρουμε σταδιακά τη λήψη στο 25% της αντίστασης ισοστάθμισης(R2), οπότε και το ρεύμα θα αρχίσει πάλι να μειώνεται μέχρι να φτάσουμε στο 25%, όπου θα ελαχιστοποιηθεί (58).

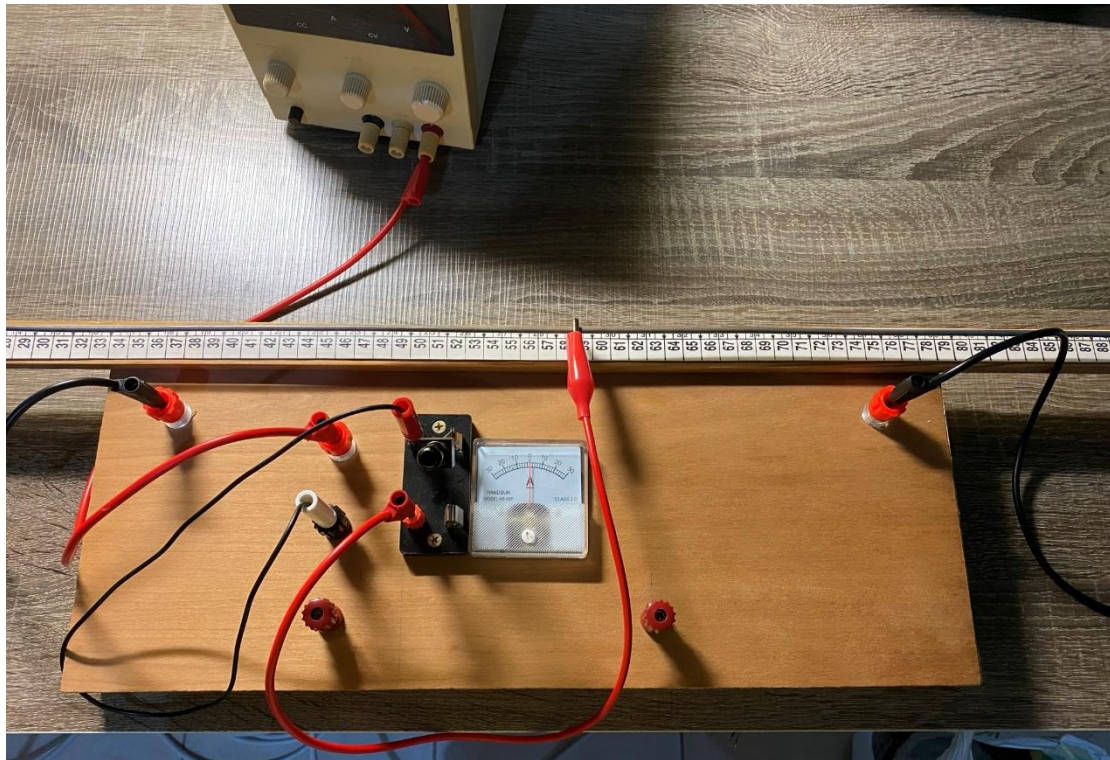
5.2 Συνδεσμολογία πειραματικής διάταξης

Στη παράγραφο αυτή θα παρατεθούν τα βήματα που απαιτούνται για τη πραγματοποίηση της επιθυμητής συνδεσμολογίας, απαραίτητη προϋπόθεση για τη εξαγωγή των πειραματικών αποτελεσμάτων.

1. Αρχικά συνδέουμε το κλάδο αντιστάθμισης, ο οποίος περιέχει τη χορδή χρωμιονικελίνης σε βαθμονομημένο άξονα, με το κυρίως “σώμα” της γέφυρας (58)

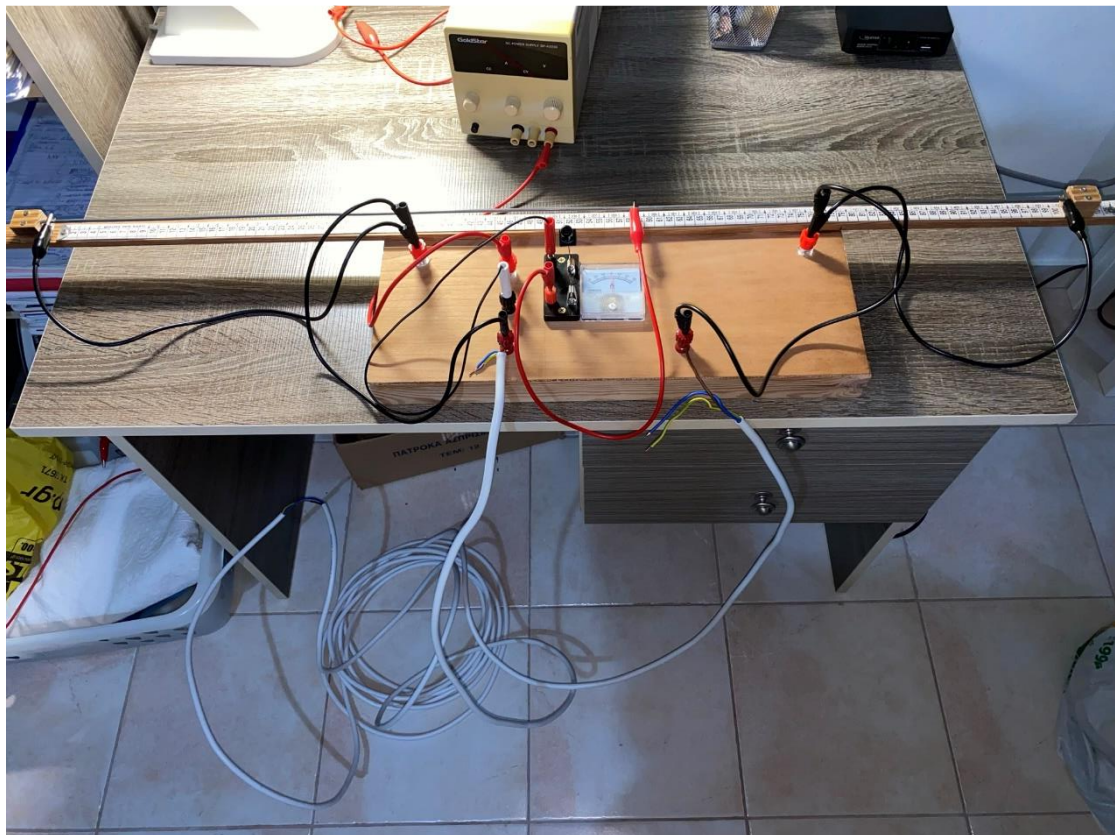


2. Μέσω ενός τροφοδοτικού Goldstar Power Supply GP-4303D, τροφοδοτούμε τη γέφυρα με την επιθυμητή τάση εισόδου. Τη διερχόμενη ισχύ στο κύκλωμα τη ρυθμίζουμε μέσω μιας αντίστασης προστασίας σταθερής τιμής, η οποία παρεμβάλλεται μεταξύ του τροφοδοτικού και του διακόπτη. Τα ποιοτικά και ποσοτικά χαρακτηριστικά της αντίστασης προστασίας που επελέγη, αναλύθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο (58).

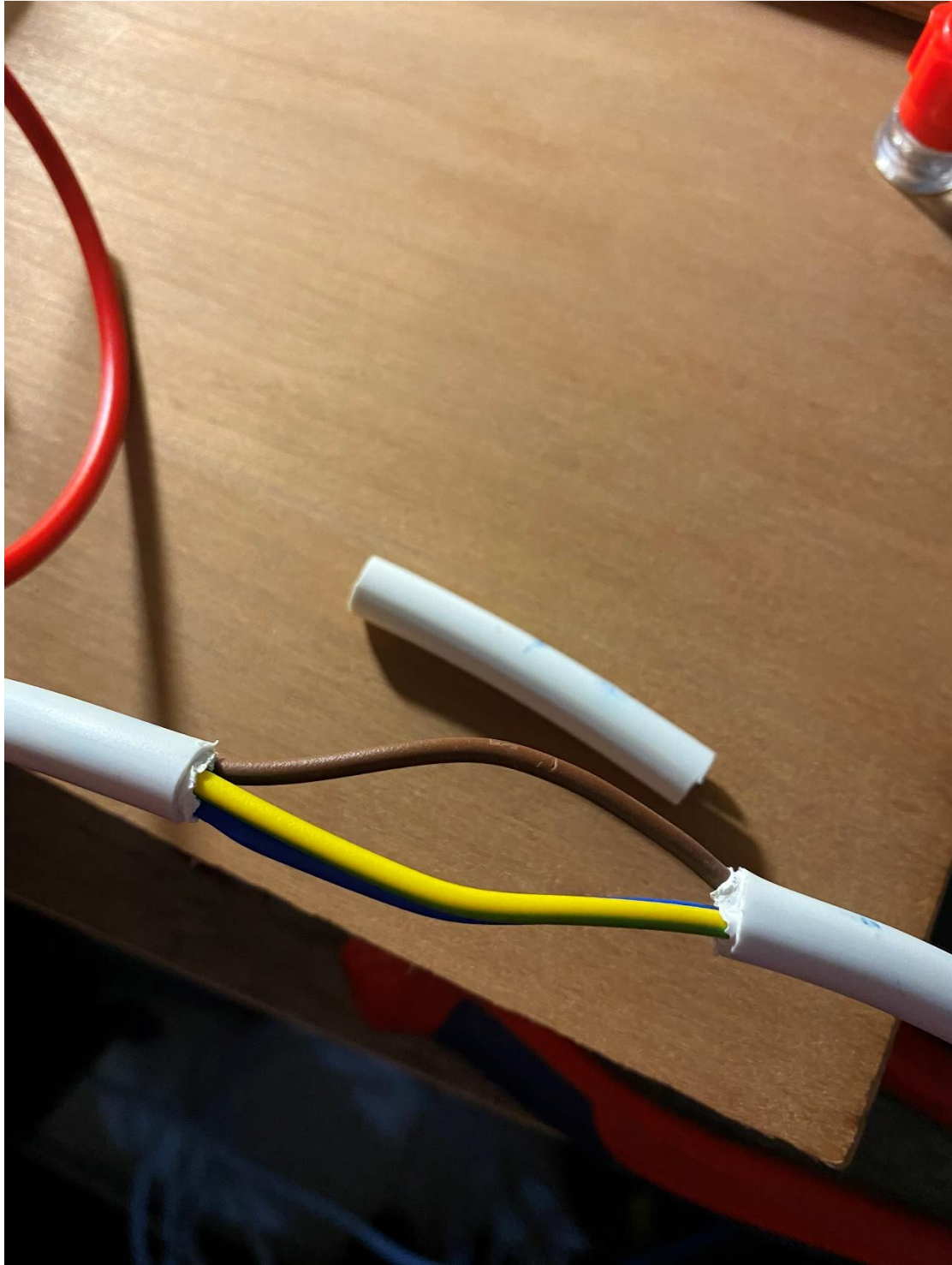


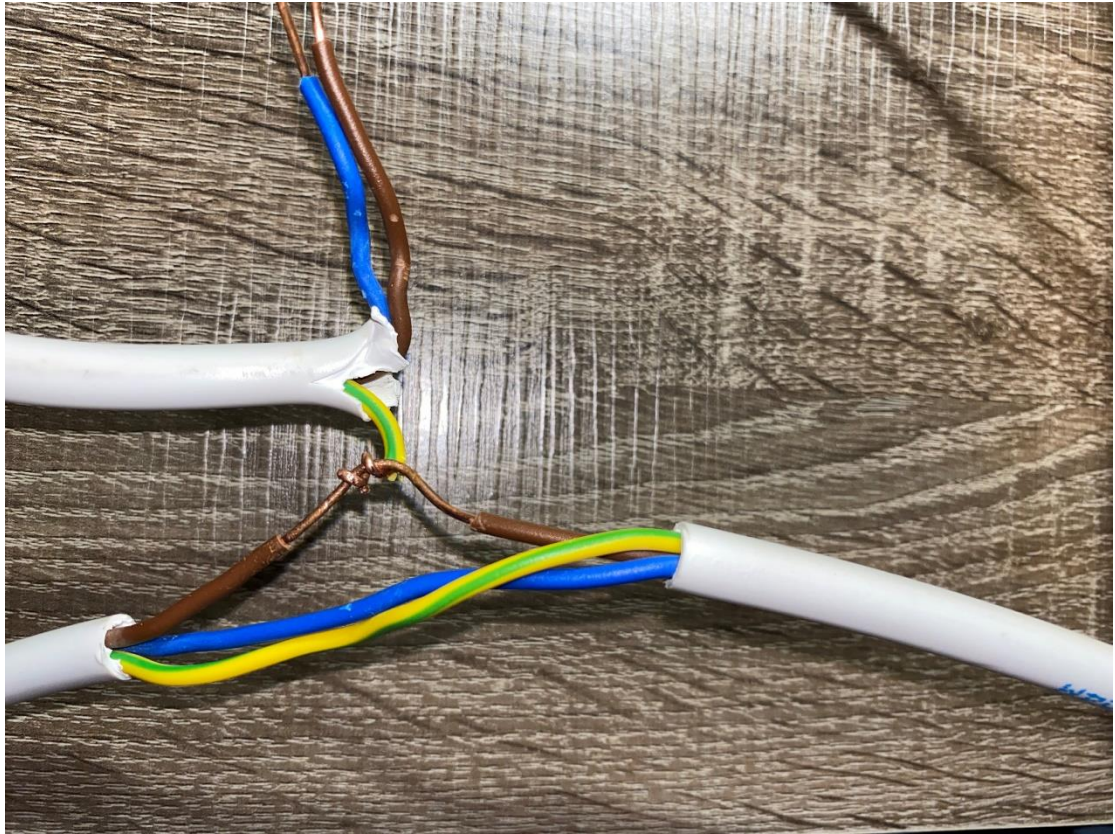
3. Δημιουργούμε το κλάδο του καλωδίου, παγιώνοντας το υπό δοκιμή καλώδιο μαζί με τον αγωγό αναφοράς επάνω στις δύο υπολειπόμενες μπόρνες. Με τον τρόπο αυτό, σχηματίζονται δύο παράλληλοι κλάδοι, αυτός της αναφοράς και αυτός του καλωδίου, ενώ ενδιάμεσα τους βρίσκεται το όργανο που δείχνει την ισορροπία (58).





4. Προσπαθώντας να προσομοιώσουμε ένα σφάλμα φάσης-γης, χρησιμοποιούμε περίπου 1m καλωδίου ίδιου τύπου με το υπό δοκιμή καλώδιο, το οποίο δένουμε πάνω στη φάση(καφέ αγωγός) και μέσω αυτού επιστρέφουμε στον αρνητικό ακροδέκτη (-) του τροφοδοτικού (58).





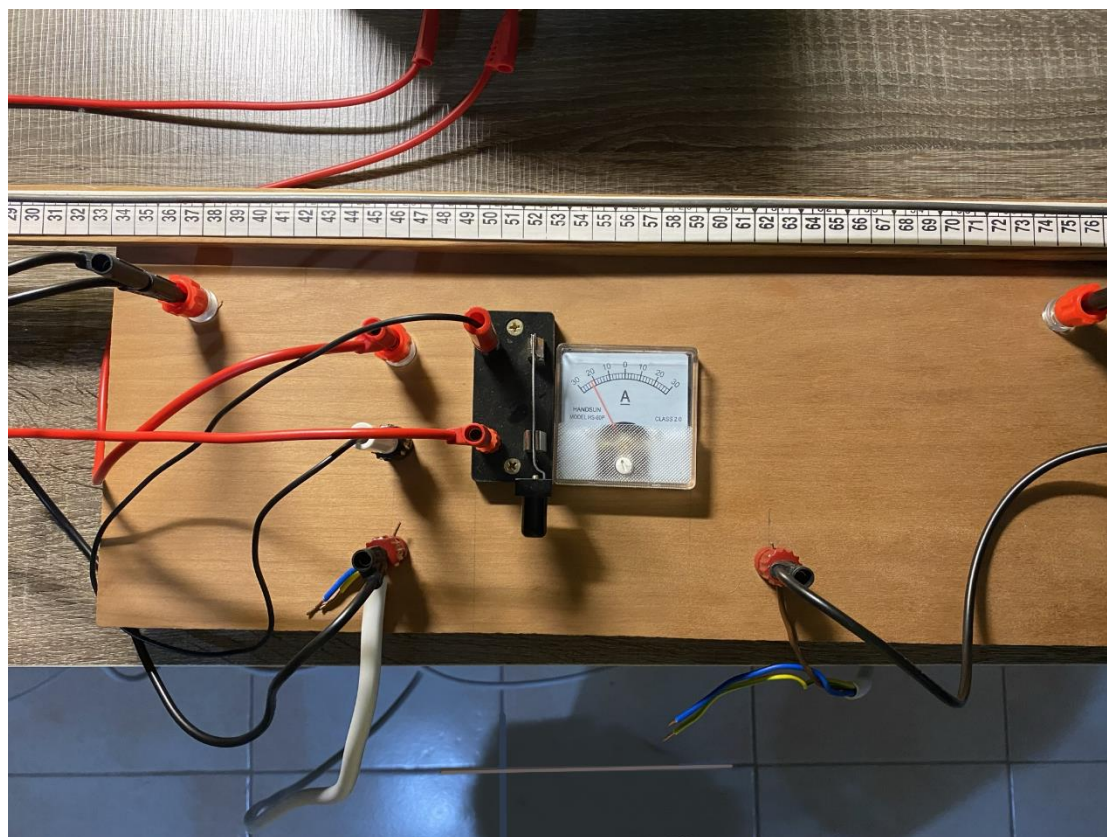
5.3 Πειραματική διαδικασία

- 1) Πραγματοποιούμε όλες τις απαραίτητες συνδέσεις
- 2) Τροφοδοτούμε τη διάταξη, με χρήση του τροφοδοτικού **Goldstar Power Supply GP-4303D**, το οποίο ρυθμίζουμε σε κάθε περίπτωση να μας δίνει την επιθυμητή τάση εισόδου, για τη συγκεκριμένη εφαρμογή **12VDC**. Ωστόσο, η διάταξη δεν λειτουργεί ακόμη διότι δεν έχει κλείσει ο διακόπτης, άρα δεν έχει “κλείσει” κύκλωμα.
- 3) Ρυθμίζουμε τη λήψη, από το 0-50 της κλίμακας, δηλαδή από το 0% μέχρι το 100% του υπό δοκιμή αγωγού, όπως έχει εξηγηθεί και παραπάνω. Στη προηγούμενη παράγραφο, φαίνεται και στη φωτογραφία, ρυθμίσαμε τη λήψη με το κροκοδειλάκι στο 50 της κλίμακας, δηλαδή στο 100% του υπό δοκιμή αγωγού. Προφανώς, είναι στη διακριτική ευχέρεια του καθενός το σημείο που θα ρυθμίσει τη λήψη.
- 4) Κλείνουμε το διακόπτη. Το κύκλωμα πλέον τροφοδοτείται κανονικά υπό τάση 12V. Καταγράφουμε την απόκλιση του οργάνου ισορροπίας.
- 5) Δοκιμάζουμε να μεταβάλλουμε τη λήψη με το κροκοδειλάκι ,σύροντας το αριστερά ή δεξιά, παρατηρώντας την απόκλιση της βελόνας και για τις δύο περιπτώσεις.
- 6) Μεταβάλλουμε τη λήψη με το κροκοδειλάκι, σύροντας το προς τη πλευρά(αριστερά ή δεξιά) που διαπιστώσαμε ότι η απόκλιση της βελόνας τείνει να ελαχιστοποιηθεί, δηλαδή τείνει προς το 0, έως ότου η απόκλιση του οργάνου(γαλβανόμετρου) να γίνει μηδέν. Το σημείο όπου η βελόνα του γαλβανόμετρου δεν αποκλίνει, είναι και το σημείο ισορροπίας της γέφυρας, δηλαδή το σημείο όπου συνέβη το σφάλμα.
- 7) Ανοίγουμε το διακόπτη, διακόπτοντας τη τροφοδοσία του κυκλώματος.
- 8) Ρυθμίζουμε τη λήψη με το κροκοδειλάκι στο 0 της κλίμακας, δηλαδή στο 0% του υπό δοκιμή αγωγού. Επαναλαμβάνουμε τα βήματα 4-7.

5.4 Πειραματικά αποτελέσματα

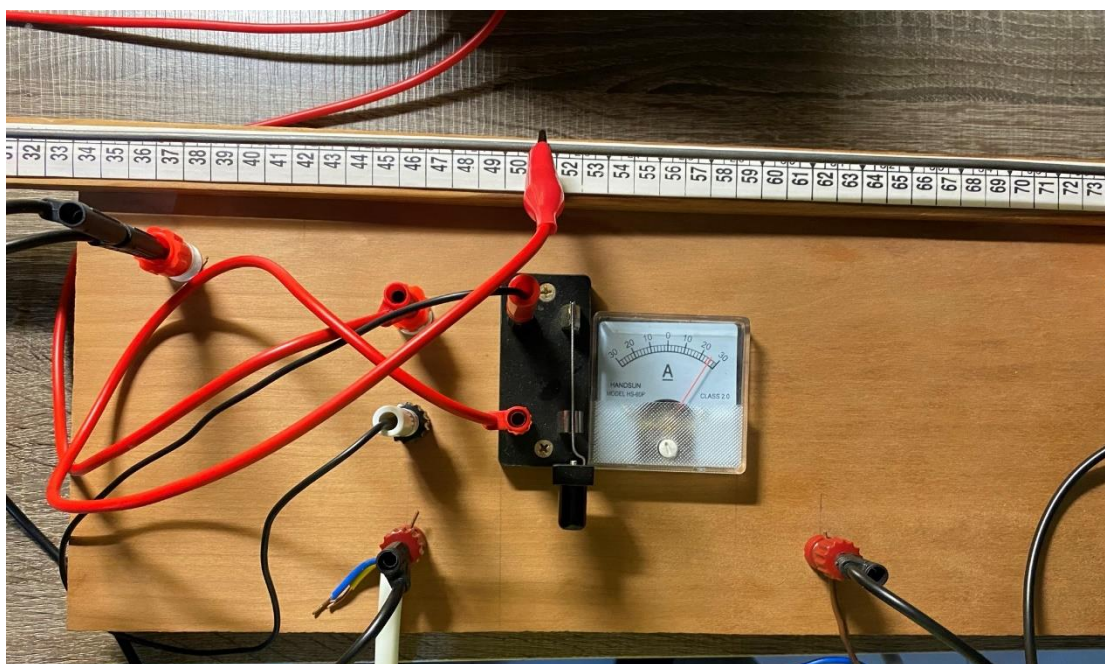
Στη παράγραφο αυτή, παρουσιάζονται οι μετρήσεις που λήφθηκαν από τη διάταξη εντοπισμού που κατασκευάσαμε, ώστε να εξετάσουμε αν αυτές επαληθεύουν την εξομοίωση και τη θεωρητική ανάλυση που προηγήθηκαν, και κατ' επέκταση αν εξασφαλίζεται η λειτουργικότητα της διάταξης (58).

Οι δοκιμές της διάταξης πραγματοποιήθηκαν, όπως και στην παράγραφο της εξομοίωσης, για σφάλμα που έχει συμβεί στο 50% του υπό δοκιμή αγωγού. Για δεδομένο σημείο σφάλματος, πραγματοποιήσαμε διάφορες λήψεις στο κλάδο αντιστάθμισης στο εύρος 0-50 της κλίμακας. Αυτό έγινε για να παρατηρήσουμε την απόκλιση της βελόνας για τις διαφορετικές περιπτώσεις. Έπειτα ρυθμίσαμε τη λήψη στον κλάδο αντιστάθμισης στο 0 και στο 50 της κλίμακας, ώστε να εξετάσουμε τη συμπεριφορά της διάταξης για τις δύο ακραίες περιπτώσεις. Τέλος, ρυθμίσαμε τη λήψη στον κλάδο αντιστάθμισης στο 25 της κλίμακας, ώστε να εξετάσουμε αν η διάταξη ισορροπεί, εφόσον εκείνο το σημείο της κλίμακας αντιπροσωπεύει το σημείο σφάλματος, δηλαδή το 50% του μήκους του υπό δοκιμή αγωγού. Τα αποτελέσματα επιβεβαίωσαν τη θεωρητική ανάλυση και η συμπεριφορά της διάταξης ήταν αναμενόμενη (58).



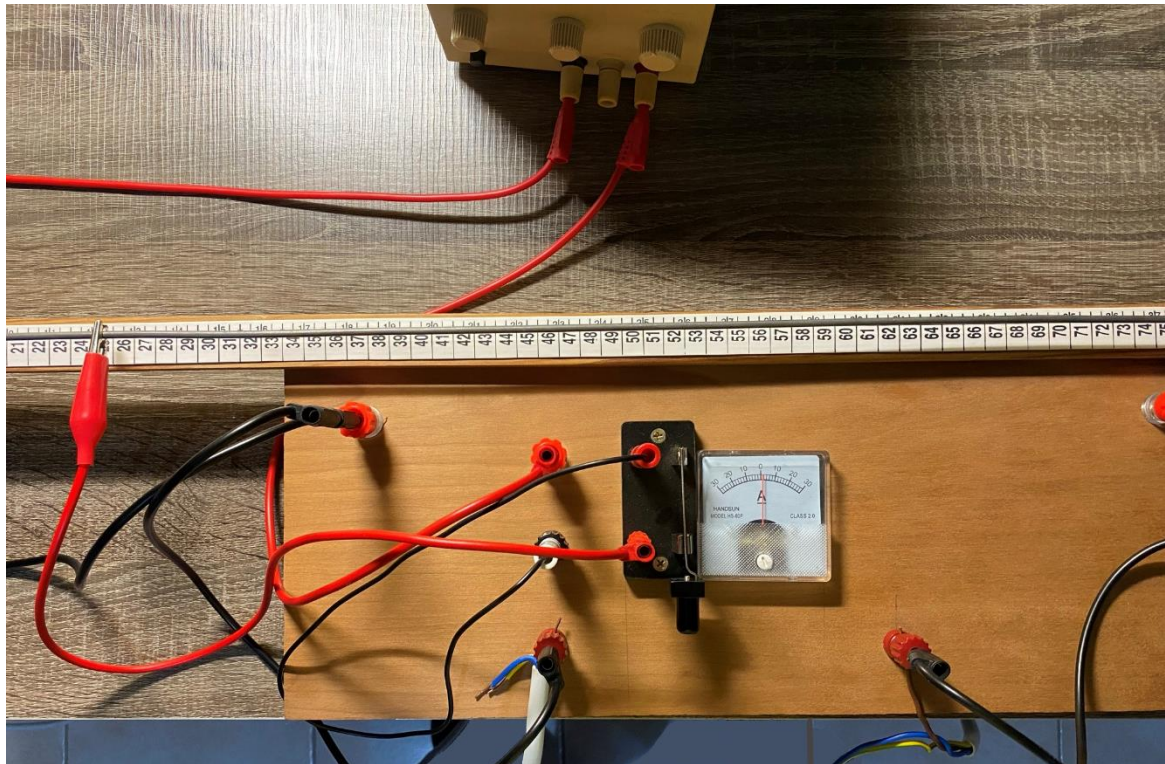
Εικόνα 5.5 Επιβεβαίωση λειτουργίας της διάταξης για λήψη στο 0 της κλίμακας του κλάδου αντιστάθμισης (58)

Τα αποτελέσματα της **εικόνας 5.5**, προέκυψαν ρυθμίζοντας τη λήψη του κλάδου αντιστάθμισης στο **0** της κλίμακας. Έτσι, αναπτύσσεται διαφορά δυναμικού στα άκρα του κλάδου του οργάνου, πράγμα το οποίο σημαίνει ότι διέρχεται ταυτόχρονα ρεύμα από το κλάδο του οργάνου. Συνεπώς, η διάταξη οδηγείται σε πλήρη ανισορροπία, ενώ παρατηρούμε μέγιστη απόκλιση της βελόνας του οργάνου προς τα αριστερά. Αυτό σημαίνει ότι πρέπει να επαναφέρουμε σταδιακά τη λήψη στο 25 της κλίμακας της αντίστασης ισοστάθμισης, οπότε και το ρεύμα στο κλάδο του οργάνου θα αρχίσει πάλι να μειώνεται μέχρι να φτάσουμε στο 25 όπου θα ελαχιστοποιηθεί (58).



Εικόνα 5.6 Επιβεβαίωση λειτουργίας της διάταξης για λήψη στο 50 της κλίμακας του κλάδου αντιστάθμισης (58)

Τα αποτελέσματα της **εικόνας 5.6**, προέκυψαν ρυθμίζοντας τη λήψη του κλάδου αντιστάθμισης στο **50** της κλίμακας. Έτσι, αναπτύσσεται διαφορά δυναμικού στα άκρα του κλάδου του οργάνου, πράγμα το οποίο σημαίνει ότι διέρχεται ταυτόχρονα ρεύμα από το κλάδο του οργάνου. Συνεπώς, η διάταξη οδηγείται σε πλήρη ανισορροπία, ενώ παρατηρούμε μέγιστη απόκλιση της βελόνας του οργάνου προς τα αριστερά. Αυτό σημαίνει ότι πρέπει να επαναφέρουμε σταδιακά τη λήψη στο 25 της κλίμακας της αντίστασης ισοστάθμισης, οπότε και το ρεύμα στο κλάδο του οργάνου θα αρχίσει πάλι να μειώνεται μέχρι να φτάσουμε στο 25 όπου θα ελαχιστοποιηθεί (58).



Εικόνα 5.7 Επιβεβαίωση λειτουργίας της διάταξης για λήψη στο 25 της κλίμακας του κλάδου αντιστάθμισης (58)

Τα αποτελέσματα της **εικόνας 5.7**, προέκυψαν ρυθμίζοντας τη λήψη του κλάδου αντιστάθμισης στο **25** της κλίμακας. Ρυθμίσαμε τη λήψη στον κλάδο αντιστάθμισης στο 25 της κλίμακας, ώστε να επιβεβαιώσουμε ότι η διάταξη ισορροπεί, εφόσον εκείνο το σημείο της κλίμακας αντιπροσωπεύει το σημείο σφάλματος, δηλαδή το 50% του μήκους του υπό δοκιμή αγωγού. Πράγματι, παρατηρούμε ότι η διάταξη ισορροπεί. Αυτό συμβαίνει διότι ο λόγος μεταξύ των μηκών της χορδής προς τα αριστερά και τα δεξιά στο κλάδο αντιστάθμισης είναι ίσος με τον λόγο μεταξύ των μηκών του αγωγού εκατέρωθεν του σημείου σφάλματος, οπότε δεν αναπτύσσεται διαφορά δυναμικού στα άκρα του κλάδου του οργάνου, πράγμα το οποίο σημαίνει ταυτόχρονα ότι δεν διέρχεται ρεύμα από το κλάδο του οργάνου (58).

Αφού συμβουλευτήκαμε την ενότητα 3.1.1, εξάγουμε τις παρακάτω παρατηρήσεις /συμπεράσματα (58):

- Το μήκος του αγωγού αναφοράς είναι **$L=5m$**
- Το μήκος του υπό δοκιμή αγωγού είναι επίσης **$5m$**

- Η αντίσταση $R_{0-100} = 0,1133\Omega$, οπότε στην ισορροπία η αντίσταση $R_{0-\alpha} = 0,25 * 0,1133 = 0,028325\Omega$, ενώ η αντίσταση $R_{\alpha-100} = 0,75 * 0,1133 = 0,084975\Omega$
- Η συνθήκη που είναι απαραίτητη για την επίτευξη ισορροπίας της διάταξης, κατά την οποία υπολογίζεται το σημείο σφάλματος, είναι η παρακάτω:

$$x = 2 * L * \left(\frac{R_{0-\alpha}}{R_{0-\alpha} + R_{\alpha-100}} \right) \Rightarrow$$

$$x = 2 * 5[m] * \left(\frac{0,028325[\Omega]}{0,028325[\Omega] + 0,084975[\Omega]} \right) = 2,5m$$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΕΥΡΕΣΗΣ ΣΦΑΛΜΑΤΟΣ ΣΤΟ ΠΕΔΙΟ ΜΕ

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΕ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΚΟ ΔΙΚΤΥΟ

Η μεθοδολογία εντοπισμού βλαβών με χρήση διατάξεων test set παρότι βασίζεται στη θεωρητική ανάλυση των διαφόρων μεθόδων, ανάλογα ποια από τις μεθόδους ανίχνευσης σφαλμάτων υποστηρίζει η κάθε διάταξη, εντούτοις διαφοροποιείται από την θεωρητική ανάλυση ως προς τον τρόπο εφαρμογής. Στο παρόν κεφάλαιο, ως αντιπαραβολή της παραπάνω πειραματικής διάταξης που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της διπλωματικής μου εργασίας, θα παρουσιαστεί εκτός της αρχής λειτουργίας μιας τέτοιας διάταξης και η μεθοδολογία/προυποθέσεις εφαρμογής της μεθόδου ανίχνευσης σφαλμάτων με χρήση βρόχου Murray(Murray Loop) στο πεδίο.

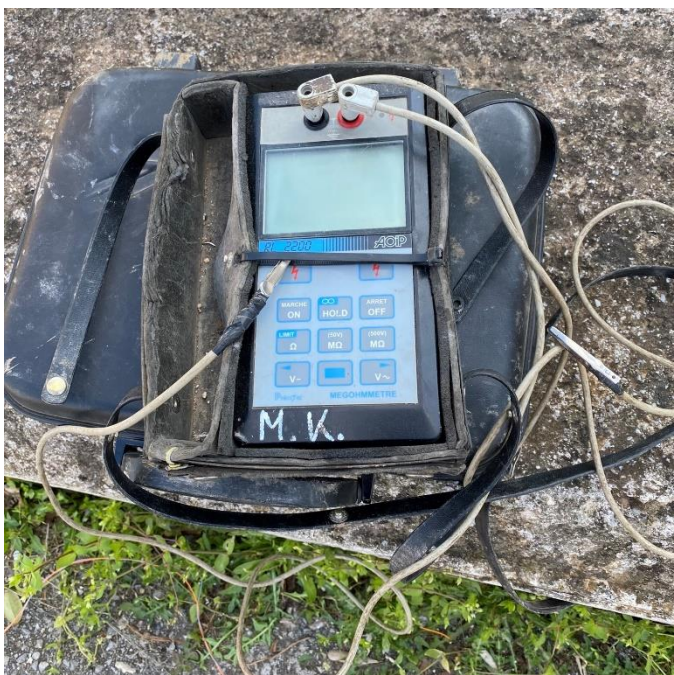
Όπως, αναφέρθηκε και στα προηγούμενα κεφάλαια, η μέθοδος ανίχνευσης σφαλμάτων με χρήση βρόχου Murray έχει ευρύ πεδίο εφαρμογής καθώς θεωρείται από τις πιο ακριβείς μεθόδους ανίχνευσης σφαλμάτων. Το πεδίο εφαρμογής της μεθόδου αφορά τόσο υπόγεια καλώδια τηλεπικοινωνιών όσο υπόγεια καλώδια ΧΤ αλλά και ΜΤ, με ή χωρίς μεταλλικό μανδύα θωράκισης. Η εφαρμογή, ωστόσο, της μεθόδου έγινε παρουσία μου σε τηλεπικοινωνιακά καλώδια **δικτύου χαλκού** στο Δίκτυο του ΟΤΕ. Οι συνδρομητές παραπονέθηκαν για χαμηλές ταχύτητες συγχρονισμού και τακτική απώλεια σύνδεσης internet. Εφόσον οι τεχνικοί διαπίστωσαν ότι η αιτία των προβλημάτων δεν οφείλονταν σε αστοχία υλικού του εξοπλισμού συνδρομητών ή παρόχου, κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι το πρόβλημα οφείλεται σε βλάβη των αγωγών του απερχομένου δικτύου χαλκού, συνεπώς κρίθηκε επιβεβλημένη η διαπίστωση της φύσεως του σφάλματος των αγωγών. Από τη πρακτική εμπειρία των τεχνικών καλωδιακών βλαβών που επιλήφθηκαν του συμβάντος, υποτέθηκε ότι επρόκειτο **είτε για βλάβη αγωγού προς γη(σφάλμα διαρροής) είτε για επαφή μεταξύ αγωγών του ίδιου καλωδίου(βραχυκύκλωμα αγωγών)**.

Και τα δύο είδη σφαλμάτων μπορούν να εντοπιστούν με ακρίβεια χρησιμοποιώντας τη μέθοδο Murray. Για τη διεξαγωγή της δοκιμής χρησιμοποιήθηκε η διάταξη γέφυρας(εικόνα 6.1) σε συνδυασμό με ένα Megger Tester(εικόνα 6.2). Η τροφοδοσία της διάταξης γέφυρας γίνεται από δύο DC μπαταρίες συνδεδεμένες σε σειρά, μια μπαταρία πλακέ 4,5V και μία των 9V. Η τροφοδοσία της διάταξης με τόσο υψηλά επίπεδα τάσης είναι επιβεβλημένη για να εξασφαλιστεί η αξιοπιστία της μέτρησης, καθώς ο σχηματιζόμενος βρόχος πολλές φορές ξεπερνάει το 1km και η εκσκαφή διατρημάτων για αποκατάσταση της βλάβης είναι μια χρονοβόρα διαδικασία. Η διάταξη Megger Tester

χρησιμοποιείται για την επιστροφή του ρεύματος σφάλματος, μέσω της γης, πίσω στην διάταξη και ταυτόχρονα επιβεβαιώνει το σφάλμα διαρροής προς γη με μέτρηση της αντίστασης προς γη.



Εικόνα 6.1 Η διάταξη γέφυρας(test set)

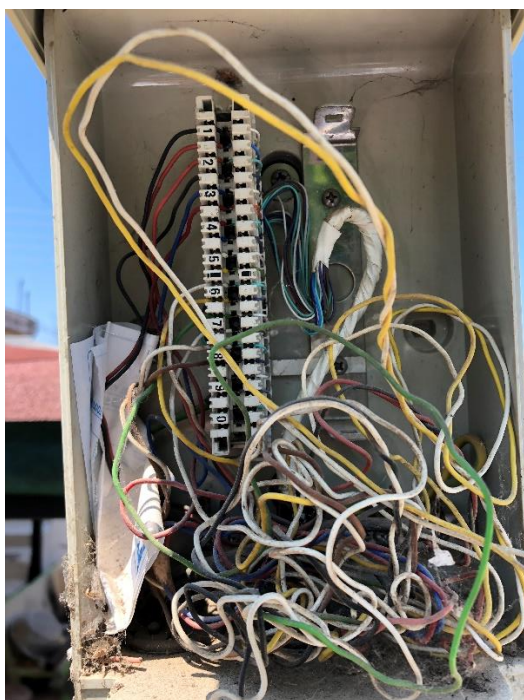


Εικόνα 6.2 Η διάταξη Megger Test

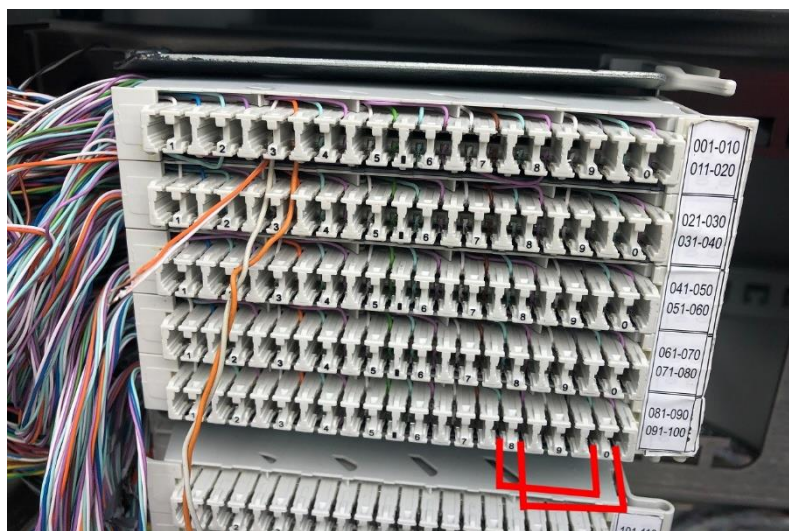
Η διαδικασία διεξαγωγής της δοκιμής σφάλματος περιλαμβάνει δυο σκέλη:

- A) Το προσδιορισμό της **αντίστασης όλου του βρόχου**(R_{BP}), η οποία αντιπροσωπεύει τόσο την αντίσταση του υπό δοκιμή αγωγού όσο και την αντίσταση του αγωγού αναφοράς, χωρίς να έχει γίνει επιστροφή του ρεύματος σφάλματος μέσω της γης.
- B) Το προσδιορισμό της **αντίστασης(σημείο) σφάλματος**(R_X), η οποία αντιπροσωπεύει την αντίσταση του υπό δοκιμή αγωγού από τον ακροδέκτη της γέφυρας μέχρι το σημείο σφάλματος.

Στο BOX/Escalit του δικτύου καταλήγει το υπόγειο καλώδιο, το οποίο περιέχει 10 συνεστραμμένα ζεύγη καλωδίου Τύπου 8 PET. Από αυτά τα 10 ζευγάρια, ελλαττωματικά ζευγάρια είναι το 8^ο και το 9^ο. Θα διεξαχθούν δυο ξεχωριστές δοκιμές σφάλματος για κάθε ένα από αυτά τα ζευγάρια. Ως αγωγό αναφοράς, και για τις 2 δοκιμές θα χρησιμοποιηθεί το 10^ο ζευγάρι(εικόνα 6.3). Αρχικά, παγιώνουμε τον επάνω πόλο του 8^{ου} ζευγαριού(8^η θέση του Rack) στον ακροδέκτη F της γέφυρας, τον επάνω πόλο του 10^{ου} ζευγαριού(10^η θέση του Rack) στον ακροδέκτη H της γέφυρας και αποκλίνουμε το διακόπτη στη θέση R. Ο ακροδέκτης E παραμένει ασύνδετος(εικόνα 6.4). Η αφετηρία του υπογείου καλωδίου που καταλήγει στο BOX/Escalit είναι σε μια υπαίθρια καμπίνα ONU FTTC. Απαραίτητη προϋπόθεση για τη δημιουργία του βρόχου είναι να βραχυκυκλωθούν τα ζεύγη στο πιο απομακρυσμένο άκρο του βρόχου, το οποίο στη προκειμένη είναι η καμπίνα ONU FTTC. Στη πράξη ενώνουμε μεταξύ τους τα ζευγάρια 8 και 10, δηλαδή τον υπό δοκιμή αγωγό και τον αγωγό αναφοράς αντίστοιχα, ενώ οι συνδέσεις θα γίνουν όπως φαίνονται παρακάτω(εικόνα 6.4β).



Εικόνα 6.3 Το BOX/Escalit που τερματίζει το υπόγειο καλώδιο PET τύπου 8



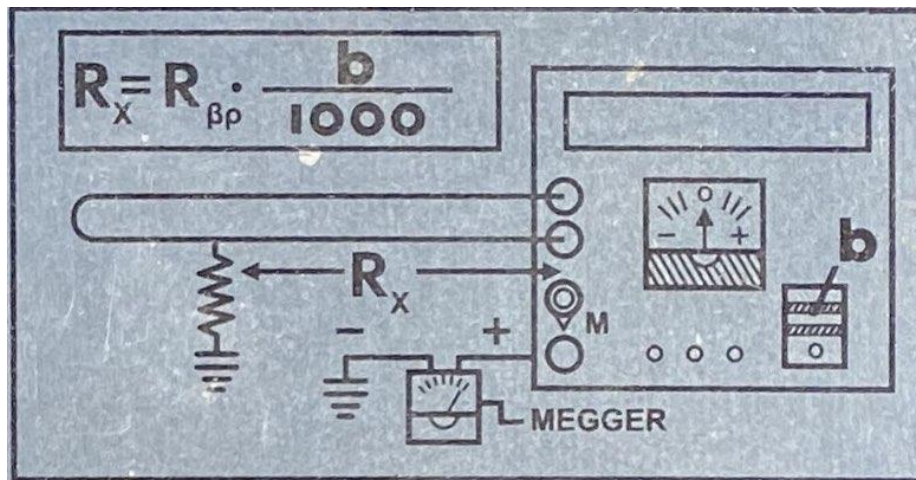
Εικόνα 6.4 α) Άποψη της καμπίνας ONU DSLAM FTC, στην οποία βρίσκεται η αναχώρηση του υπογείου καλωδίου τύπου 8 ΡΕΤ. β) Ο τρόπος συνδεσμολογίας για τη βραχυκύκλωση των ζευγαριών στα οποία διεξάγεται η δοκιμή σφάλματος. Το 8ο ζευγάρι αντικατοπτρίζει τον υπό δοκιμή αγωγό και το 10ο ζευγάρι τον αγωγό αναφοράς

Αφού ακολουθηθεί η παραπάνω διαδικασία, ο βρόχος τροφοδοτείται στιγμιαία υπό τάση 13.5V. Παρατηρώντας την ψηφιακή ένδειξη της οθόνης(εικόνα 6.1), παρατηρούμε μια τιμή. Αυτή αντιπροσωπεύει το διαφορικό ρεύμα που διαρρέει το κλάδο του γαλβανομέτρου, και το οποίο είναι αναγκαίο να ελαχιστοποιηθεί για να επιτευχθεί ισορροπία στη γέφυρα και προσδιοριστεί η θέση σφάλματος. Μεταβάλλοντας το ποτενσιόμετρο(εικόνα 6.1), επιτυγχάνουμε ισορροπία της γέφυρας, δηλαδή μηδενική ένδειξη στην οθόνη. Όταν μηδενιστεί η ψηφιακή ένδειξη της οθόνης, η αναλογική ένδειξη του ποτενσιόμετρου έχει διαφοροποιηθεί σε σχέση με προηγούμενως. Για το προσδιορισμό της αντίστασης βρόχου R_{BP} , χρησιμοποιείται η αναλογική ένδειξη του ποτενσιόμετρου, αντικαθιστώντας τη τιμή αυτή στη παρακάτω εμπειρική σχέση:

$$R_{BP} = 100 \frac{a}{1000 - a} = \frac{100 * 237}{1000 - 237} = 31.06m$$

,η οποία εκφράζεται σε μέτρα. Αυτή η τιμή δεν αντιπροσωπεύει, ωστόσο, το μήκος του βρόχου. Για να προσδιορίσουμε το μήκος του βρόχου πρέπει να πολλαπλασιαστεί με την εξωτερική διάμετρο του καλωδίου(δηλ. **7.2mm**), και η τιμή που θα προέκυπτε είναι 223.632m, η οποία επιβεβαιώνει και την εκτίμηση του μήκους του βρόχου που έγινε δεδομένων των αποστάσεων μεταξύ BOX/Escalit και CAB.

Ωστόσο, η παραπάνω ένδειξη($a=237$) δεν είναι ακριβής και αρά αποδεκτή για δοκιμές ακριβούς εντοπισμού της θέσης σφάλματος στο πεδίο. Για εισαχθεί ένα παραπάνω επίπεδο ακρίβειας στη δοκιμή, χρησιμοποιείται η διάταξη Megger Tester για την επιστροφή του ρεύματος σφάλματος, μέσω της γης, πίσω στην διάταξη και ταυτόχρονα επιβεβαιώνει το σφάλμα διαρροής προς γη με μέτρηση της αντίστασης προς γη(εικόνα 6.2). Η αντίσταση προς γη, υπό κανονικές συνθήκες, θα ήταν θεωρητικά άπειρη, βάση πρακτικής εμπειρίας είναι της τάξεως των **1370MΩ**. Η τιμή της διάταξης Megger Tester που ελήφθη για το βρόχο δοκιμής ήταν **0.7MΩ** με κυκλική ένδειξη, η οποία υποδηλώνει πως υπάρχει σφάλμα διαρροής προς γη. Το κύκλωμα παραμένει ως είχε στη 1^η δοκιμή για την εύρεση της R_{BP} ωστόσο στον ακροδέκτης E συνδέεται το ένα από τα δύο probes της διάταξης Megger Tester. Ταυτόχρονα, ο διακόπτης αποκλίνει στη θέση M, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Εικόνα 6.5 Μπλοκ διάγραμμα της συνδεσμολογίας για το προσδιορισμό της θέσης σφάλματος

Αφού γίνουν τα παραπάνω βήματα, τροφοδοτείται υπό τάση 13.5V το κύκλωμα και παρατηρείται ανισορροπία της διάταξης, παρόλο που η αναλογική ένδειξη του ποτενσιόμετρου παρέμεινε 237. Μεταβάλλοντας το ποτενσιόμετρο(εικόνα 6.1), επιτυγχάνουμε ισορροπία της γέφυρας, δηλαδή μηδενική ένδειξη στην οθόνη(διατύπωση). Όταν μηδενιστεί η ψηφιακή ένδειξη της οθόνης, η αναλογική ένδειξη του ποτενσιόμετρου έχει διαφοροποιηθεί σε σχέση τη προηγούμενη δοκιμή για το προσδιορισμό της R_{BP} . Η νέα αναλογική ένδειξη του ποτενσιόμετρου ήταν 226. Για το προσδιορισμό της αντίστασης σφάλματος R_x , χρησιμοποιείται η αναλογική ένδειξη του ποτενσιόμετρου, αντικαθιστώντας τη τιμή αυτή στη παρακάτω εμπειρική σχέση:

$$R_x = R_{BP} * \frac{b}{1000} * \text{εξ. διαμετρος_καλωδίου} = 31.06 * \frac{226}{1000} * 7.2 = 50.54m$$

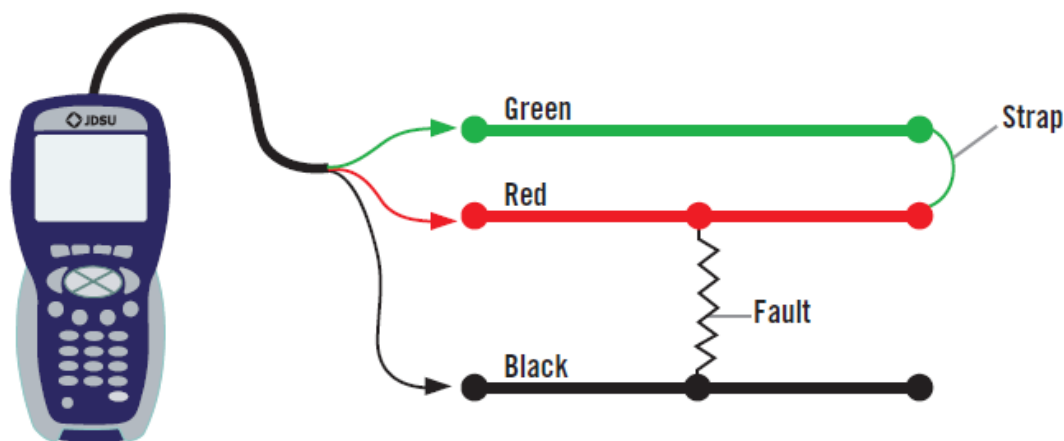
,η οποία εκφράζεται σε μέτρα. Αυτή η τιμή αντιπροσωπεύει το σημείο του υπό δοκιμή αγωγού όπου υπάρχει σφάλμα, για μήκος υπό δοκιμή αγωγού $223.632/2= 111.8m$. Ωστόσο, η ένδειξη αυτή δεν μπορεί να θεωρηθεί πλήρως αξιόπιστη, γι' αυτό είναι απαραίτητη η επιβεβαίωση της με χρήση ενός εξειδικευμένου οργάνου δοκιμής.

Στη συνέχεια, οι τεχνικοί χρησιμοποίησαν μια μέθοδο δοκιμής που ονομάζεται εντοπισμός σφάλματος υψηλής αντίστασης(RFL) για να προσδιορίσουν γρήγορα και με ακρίβεια τη θέση του σφάλματος. Συνήθως, το RFL είναι η τελευταία δοκιμή που εκτελείται επειδή άλλες δοκιμές θα πρέπει να εκτελεστούν πρώτα για τον εντοπισμό προβλημάτων. Ωστόσο, όταν ένα σφάλμα έχει αναγνωριστεί ως σφάλμα αντίστασης μικρότερης από 20 MΩ και ο ελαττωματικός αγωγός είναι γνωστός, το RFL μπορεί να βοηθήσει στον εντοπισμό της θέσης του σφάλματος. Η μέθοδος αυτή, εκτός από σφάλματα διαρροής προς γη, μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για βραχυκυκλώματα μεταξύ αγωγών. Η διαδικασία δοκιμής με το συγκεκριμένο όργανο μπορεί να

πραγματοποιηθεί με δυο διαφορετικές παραλλαγές, τη δοκιμή με χρήση του ενός πόλου του ζεύγους ως υπό δοκιμή αγωγού(Single pair method) και τη δοκιμή με χρήση και των δυο πόλων του ζεύγους ως υπό δοκιμή αγωγού(Separate pair method) (62).

Η δοκιμή που διεξάχθηκε από τους τεχνικούς ήταν η Single pair method. Η δοκιμή αυτή πραγματοποιείται όταν δεν υπάρχει γνωστό υγιές ζευγάρι για να χρησιμοποιηθεί ως ζευγάρι αναφοράς και εάν μόνο ο ένας πόλος του υπό δοκιμή ζεύγους έχει βλάβη (63). Στη περίπτωση μας, συμβαίνει ο ένας πόλος του δυο ζεύγους να έχει βλάβη, παρόλο που υπάρχει γνωστό υγιές ζευγάρι για να χρησιμοποιηθεί.

Για την εφαρμογή της μεθόδου, αφαιρούμε τη διάταξη γέφυρας από το βρόχο, και ενώνουμε μεταξύ τους τους δυο πόλους του 8^{ου} ζευγαριού(εικόνα 6.3) στο BOX/Escalit. Τα σημεία αυτά πλέον αποτελούν το πιο απομακρυσμένο άκρο του βρόχου. Έπειτα, μεταφερόμαστε στην ONU FTTC CAB, όπου παγιώνουμε τον επάνω πόλο του 8ου ζευγαριού(8η θέση του Rack) στον κόκκινο ακροδέκτη του οργάνου JDSU, τον άλλο πόλο του 8ου ζευγαριού στον πράσινο ακροδέκτη του οργάνου JDSU και στον μαύρο ακροδέκτη του οργάνου JDSU συνδέουμε τη μπάρα γείωσης της καμπίνας. Στη συνέχεια, είναι απαραίτητο να εισαχθεί η διάμετρος του καλωδίου και η θερμοκρασία των αγωγών και το όργανο εκτελεί μια σειρά μετρήσεων ωμικών αντιστάσεων. Αφού το όργανο αναλύσει τα αποτελέσματα των μετρήσεων του ωμόμετρου του και πραγματοποιήσει μια μετατροπή των Ω σε μέτρα, ο τεχνικός θα είναι σε θέση να προσδιορίσει το μέγεθος και τη θέση ενός σφάλματος. Κατά τη διάρκεια αυτής της δοκιμής, η αντίσταση του γεφυρώματος του υπό δοκιμή αγωγού με τον αγωγό αναφοράς προστίθεται στη τιμή της αντίστασης σφάλματος. Τα αποτελέσματα παρέχουν πληροφορίες όπως DTF (απόσταση μέχρι σφάλμα), DTS (απόσταση μέχρι το πιο απομακρυσμένο άκρο του βρόχου) και DSTF (απόσταση από το σημείο σφάλματος μέχρι το πιο απομακρυσμένο άκρο).



Εικόνα 6.6 Σχηματική αναπαράσταση των συνδέσεων του οργάνου δοκιμής RLF (63)



Εικόνα 6.7 Τα αποτελέσματα του οργάνου για δοκιμή RLF(single pair method). Όπως παρατηρούμε και στην οθόνη, η DTF(απόσταση μέχρι σφάλμα) είναι 85m , η DTS(απόσταση μέχρι το πιο απομακρυσμένο άκρο του βρόχου) είναι 118m, η DSTF(απόσταση από το σημείο σφάλματος μέχρι το πιο απομακρυσμένο άκρο) είναι 33m.

Ως προς τα αποτελέσματα της δοκιμής RLF(εικόνα 6.7), συγκρίνοντας με τα αποτελέσματα της μεθόδου γέφυρας, επαληθεύεται ότι το μήκος του βρόχου είναι περίπου 223m. Η απόσταση από το πιο κοντινό άκρο, το οποίο βρίσκεται στην CAB ONU FTTC, μέχρι το πιο απομακρυσμένο άκρο, το οποίο βρίσκεται στο BOX/Escalit, είναι περίπου 118m. Τα αποτελέσματα από την εφαρμογή της μεθόδου γέφυρας υποδεικνύουν τη θέση σφάλματος στα 50.54m, με μέτρηση από το BOX/Escalit προς τη καμπίνα. Ωστόσο, τα αποτελέσματα από την εφαρμογή της δοκιμής RLF(single pair method) υποδεικνύουν τη θέση σφάλματος σε διαφορετικό σημείο. Η απόκλιση των δυο αποτελεσμάτων είναι δεσμευτική, καθώς απαιτείται ταύτιση αυτών για να λάβει χώρα η εκσκαφή του διατρήματος και η αποκατάσταση της βλάβης. Από τη πρακτική εμπειρία των τεχνικών, είναι γνωστό ότι στις μούφες- εκεί όπου γίνονται οι συνδέσεις των καλωδίων-της CAB ONU FTTC, τοποθετούνται αναμονές(πλεόνασμα καλωδίου σε κουλούρες) του τύπου 8 καλωδίου, οι οποίες μπορεί να ανέρχονται σε 15-20m. Συνεπώς, στην απόσταση DTF συνυπογίζεται και αυτή η απόσταση, η οποία προηγουμένως δεν είχε ληφθεί υπόψιν, καθώς στις μούφες του BOX/Escalit δεν υπάρχουν αναμονές. Συμπερασματικά, οι τεχνικοί κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η θέση σφάλματος βρίσκεται μεταξύ 50-52m, οπότε προχώρησαν στη

διαδικασία εκσκαφής του διατρήματος και εν τέλει στην αποκατάσταση της βλάβης.



Εικόνα 6.8 Η εκσκαφή του διατρήματος για τον εντοπισμό και την αποκατάσταση της βλάβης. Επαναλήφθηκε η δοκιμή με τη μέθοδο γέφυρας για να επαληθευτεί ο ακριβής εντοπισμός της θέσης σφάλματος. Έπειτα έλαβαν τόπο οι διαδικασίες αποκατάστασης της βλάβης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

ΤΕΛΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

7.1 Αξιολόγηση της διάταξης

Το τελικό σύστημα που αναπτύχθηκε κατά της διάρκεια της παρούσας εργασίας αποτελείται από δύο κλάδους, τον κλάδο δοκιμής όπου προσαρτάται ο προς δοκιμή αγωγός και τον κλάδο αντιστάθμισης μέσω του οποίου γίνεται η μέτρηση, ένα τροφοδοτικό συνεχούς τάσης και ένα γαλβανόμετρο για την επιβεβαίωση της μέτρησης. Συγκεκριμένα, η διάταξη αποτελείται από το τροφοδοτικό Goldstar Power Supply GP-4303D(15V 5A DC), μια βαττική αντίσταση 10Ω/15W που χρησιμοποιείται για τη προστασία του οργάνου και τον περιορισμό της μέγιστης μεταφοράς ισχύος της διάταξης, τον κλάδο δοκιμής όπου προσαρτάται το υπό δοκιμή καλώδιο με έναν από τους αγωγούς του να έχει σφάλμα μεταξύ μίας άλλης φάσης ή προς γη και ο αγωγός αναφοράς, τον κλάδο αντιστάθμισης όπου βρίσκεται παγιωμένο ένα σύρμα χρωμιονικελίνης σε βαθμονομημένη κλίμακα χρησιμοποιούμενο για τον προσδιορισμό του σημείου σφάλματος ως ποσοστό του συνολικού του μήκους(κλίμακα 0-50, δηλαδή 0%-100%) και το κλάδο του οργάνου όπου ένα αμπερόμετρο διπλής κλίμακας(γαλβανόμετρο) χρησιμοποιείται για να επιβεβαιώσει ή μη την ισορροπία της γέφυρας. Για τις ανάγκες του πειράματος χρησιμοποιήθηκε ένα καλώδιο NYM 3X1,5mm² μήκους 10m με σφάλμα διαρροής προς γη στα 2,5m, ώστε να επιβεβαιωθεί η ισορροπία της διάταξης για δεδομένη θέση σφάλματος.

Η ακρίβεια των μετρήσεων του οργάνου ισορροπίας κρίθηκε ιδιαίτερα ικανοποιητική, σε σχέση με τις μετρήσεις που ελήφθησαν κατά την εξομοίωση στο πρόγραμμα PsSpice, όπου για την ανάλυση του κυκλώματος χρησιμοποιήθηκαν τα μαθηματικά εργαλεία της Bias Point analysis. Όπως φάνηκε και στη παράγραφο 5.4, με ρύθμιση της λήψης στο κλάδο αντιστάθμισης στο 25 της κλίμακας, επιτυγχάνεται σχεδόν απόλυτη ισορροπία της διάταξης, δηλαδή καταδεικνύεται με ακρίβεια η θέση σφάλματος στο 50% του υπό δοκιμή αγωγού(2,5m).

Το κόστος της τελικής διάταξης υπολογίστηκε στα 198,35€, συνυπολογίζοντας σε αυτό και το αντικειμενικά υψηλό κόστος απόκτησης του τροφοδοτικού(119€) το οποίο φυσικά μπορεί να περιοριστεί αγοράζοντας ένα οικονομικότερο τροφοδοτικό που βέβαια καλό θα είναι να έχει τη δυνατότητα παροχής ρεύματος μέγιστης τιμής μεγαλύτερης των 2A.

7.2 Προκλήσεις και Προβλήματα

Η περιγραφή του 4^{ου} Κεφαλαίου που αφορούσε την υλοποίηση της διάταξης κατέδειξε τα προβλήματα και τις προκλήσεις που έπρεπε να ξεπεραστούν κατά το στάδιο επικύρωσης/πειραματικών δοκιμών. Συγκεκριμένα, η επιλογή κλίμακας του οργάνου ισορροπίας ήταν κρίσιμη για τη λειτουργικότητα της διάταξης καθώς από την ένδειξη του οργάνου εξαρτιόνταν και η ακρίβεια ή μη του προσδιορισμού της θέσης σφάλματος, ωστόσο το πρόβλημα επιλύθηκε με την επιλογή βασική κλίμακας στο όργανο ισορροπίας. Ακόμη, ζωτικής σημασίας για τη ορθότητα των ενδείξεων του οργάνου και την προστασία των μπαταριών της διάταξης ήταν η επιλογή κατάλληλης αντίστασης προστασίας, η οποία επιλέχθηκε έπειτα από μια σειρά δοκιμών που περιγράφονται στη παράγραφο 4.5.2, όπου και ελήφθησαν υπόψιν-εκτός των μεγεθών της αντίστασης-τα μεγέθη της μέγιστης μεταφοράς ισχύος και της μέγιστης ισχύς διασποράς. Με την επιλογή της κατάλληλης βαττικής αντίστασης εξασφαλίστηκε η προστασία του οργάνου και ο περιορισμό της μέγιστης μεταφοράς ισχύος της διάταξης. Ακόμη, η εξασφάλιση της λειτουργικότητας του συστήματος προϋπέθετε την επιλογή κατάλληλης τροφοδοτικής διάταξης καθότι με τη χρήση συστοιχίας μπαταριών παρατηρήθηκε ασυνέπεια ενδείξεων του οργάνου ισορροπίας σε περίπτωση επανάληψης της δοκιμής εύρεσης σφάλματος, παρόλο που η λήψη στο κλάδο αντιστάθμισης παρέμενε ίδια και είχε επιλεγεί η κατάλληλη αντίσταση προστασίας. Τέλος, παρατηρήθηκε πως σημαντικός παράγοντας για την επίτευξη της μεγαλύτερης κατά το δυνατόν ισορροπίας ήταν η επιλογή ενός τροφοδοτικού με βιδωτές μπόρνες, ικανές να «προσδέσουν» τον αγωγό επιστροφής μεταξύ σφάλματος και αρνητικού ακροδέκτη του τροφοδοτικού. Χρησιμοποιώντας τέτοιου είδους τροφοδοτικό για το πείραμα επιτυγχάνεται σχεδόν πλήρης ισορροπία της διάταξης. Επαναλαμβάνοντας, ωστόσο, το πείραμα με ένα άλλο τροφοδοτικό που δεν διέθετε βιδωτές μπόρνες, δεν επετεύχθη τέτοια ακρίβεια στις μετρήσεις του οργάνου ισορροπίας.

Συνοψίζοντας, εξασφαλίστηκε ο αρχικός σχεδιασμός για τη λειτουργικότητα της διάταξης, η οποία δύναται να προσδιορίσει με αρκετά μεγάλη ακρίβεια τη θέση σφάλματος, για ένα σφάλμα χαμηλής αντίστασης προς γη ή χαμηλής αντίστασης μεταξύ δυο φάσεων. Αδυνατεί, όμως, να προσδιορίσει τη θέση σφάλματος για υπό δοκιμή καλώδια μήκους μεγαλύτερα των 20m. Ο κατασκευαστικός περιορισμός έγκειται στην αντίσταση του σύρματος χρωμιονικελίνης στο κλάδο αντιστάθμισης. Άλλες διατάξεις Test & Set με δυνατότητα εφαρμογής της μεθόδου Murray διαθέτουν ένα variate μεταβλητών αντιστάσεων(συρμάτων), μέσω του οποίου επιλέγεται η τάξη μεγέθους της αντίστασης σύρματος αντιστάθμισης δίνοντας έτσι τη δυνατότητα

προσδιορισμού της θέσης σφάλματος και σε μεγαλύτερου μήκους υπό δοκιμή καλώδια.

Βιβλιογραφία

1. **Κατσαπρακάκης, Ιωάννης Αλ.** *Σύνθεση Ενεργειακών Συστημάτων*. s.l. : ΣΕΑΒ, ΚΑΛΛΙΠΟΣ, 2015.
2. **Γιαννόπουλος, Νεκτάριος.** *ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΥΠΟΣΤΑΘΜΩΝ ΔΙΑΝΟΜΗΣ Υ.Τ/Μ.Τ.* [επιμ.] ΑΤΕΙ ΠΕΙΡΑΙΑ. Αιγάλεω, Ελλάδα : s.n., Ιούλιος 2017.
3. **Ψαρράς, Ιωάννης Στ.** *Σύστημα Ελέγχου Φόρτισης Ηλεκτρικών Οχημάτων με Βέλτιστη Λειτουργία στο Δίκτυο Διανομής*. [επιμ.] ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ. Χανιά, Ελλάδα : s.n., Μάρτιος 2018.
4. **Φίλος, Γεώργιος.** *Σχεδιασμός Ανάπτυξης δικτύου Διασύνδεσης νέων έργων ΑΠΕ με το Σύστημα Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας με χρήση Ευρετικών Αλγορίθμων*. [επιμ.] ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ. Χανιά, Ελλάδα : s.n., Ιούνιος 2017. Διπλωματική Εργασία.
5. **ΠΟΛΥΖΑΚΗΣ, ΑΠΟΣΤΟΛΟΣ.** *ΣΤΑΘΜΟΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ ΘΕΩΡΙΑ - ΛΥΜΕΝΕΣ ΑΣΚΗΣΕΙΣ*. Πτολεμαΐδα : POWER HEAT COOL, 2017.
6. **Εξαδάκτυλος, Κωνσταντίνος.** *Μελέτη Σφαλμάτων σε Γραμμές Μεταφοράς*. [επιμ.] ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ. Πάτρα, Ελλάδα : s.n. Διπλωματική Εργασία.
7. **Τσίχλης, Χρήστος.** *Αγωγοί και καλώδια για τη μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας*. [επιμ.] ΤΕΙ ΚΑΒΑΛΑΣ. Καβάλα, Ελλάδα : s.n., 2012. Διπλωματική Εργασία.
8. **Βουρνάς, Γ. Κονταξής.** *Εισαγωγή στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας*. s.l. : Συμμετρία, 2010.
9. **Χαραλαμπίκη, Κωνσταντίνα.** *Τεχνικές απαιτήσεις – λύσεις για την επίτευξη μεγάλης κλίμακας αξιοποίησης των ΑΠΕ*. [επιμ.] ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ. Χανιά, Ελλάδα : s.n., 2016. Μεταπτυχιακή Διατριβή.
10. **Οικονόμου Λάμπρος, Φώτης Γεώργιος, Χριστοδούλου Χρήστος.** *Υψηλές Τάσεις*. s.l. : Εκδόσεις Τζίοια, 2016.
11. **ΚΑΡΑΚΩΣΤΑΣ, ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ.** *Μελέτη ηλεκτρομαγνητικών πεδίων σε εγκαταστάσεις υπογείων καλωδίων υψηλής τάσης*. [επιμ.] ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ. Πάτρα, Ελλάδα : s.n. Διπλωματική Εργασία.
12. **ΠΗΞΑΡΑΣ, ΣΤΑΥΡΟΣ.** *Μελέτες Κατασκευής Δικτύων Διανομής*. [επιμ.] ΤΕΙ ΚΑΒΑΛΑΣ. Καβάλα, Ελλάδα : s.n., Ιούνιος 2005. Πτυχιακή Εργασία.
13. **ΜΑΥΡΗΣ, ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ.** *Συγκριτική αξιολόγηση των μεθοδολογιών και των οργάνων που χρησιμοποιούνται για την εύρεση βλαβών σε υπόγεια καλώδια ισχύος*. [επιμ.] ΑΤΕΙ ΠΕΙΡΑΙΑ. Αιγάλεω, Ελλάδα : s.n., Ιούλιος 2017. Πτυχιακή Εργασία.
14. **ΖΟΥΡΑΚΗ, ΜΑΡΙΑ.** *Υπολογισμός μεταφερόμενης ισχύος σε υπόγειο καλώδιο μέσης τάσης*. [επιμ.] ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΕΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ. Αθήνα, Ελλάδα : s.n., Ιούλιος 2012. Διπλωματική Εργασία.
15. **INMR.** <https://www.powerandcables.com/svls-sheath-voltage-limiters-for-protection-of-mv-hv-cables/>. *Thorne & Derrick*. [Ηλεκτρονικό] 2019 April 29.
16. **Μαλατέστας, Παντελής.** *Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας*. s.l. : Εκδόσεις Τζίοια, 2015.

17. **ΚΑΡΑΜΠΟΓΙΑΣ, ΧΡΗΣΤΟΣ.** *Μελέτη Σφαλαμάτων σε Γραμμές Μεταφοράς.* [επιμ.] Πανεπιστήμιο Πατρών. Πάτρα, Ελλάδα : s.n., 10 Ιούλιος 2014. Διπλωματική Εργασία.
18. **ΕΥΘΥΜΙΟΥ , ΝΙΚΟΛΑΣ ΑΝΔΡΕΑ.** *Σφαλαματα σε γραμμές υψηλής τάσης της Κύπρου.* [επιμ.] ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ. Πάτρα, Ελλάδα : s.n., Ιούνιος 2016. Διπλωματική Εργασία.
19. *Computerized underground cable fault location expertise.* **Bascom , E. C., Von Dollen, D. W. και Ng, H. W. .** Chicago, IL, USA, USA : IEEE, 1994. Proceedings of IEEE/PES Transmission and Distribution Conference. σσ. 376-382.
20. **Maloney, Charles A. .** Locating Cable Faults. [επιμ.] IEEE. *IEEE Transactions on Industry Applications.* Ιούλιος 1973, Τόμ. Volume: IA-9, σσ. 380 - 394.
21. **Kuan, K. K. και Warwick, K. .** Real-time expert system for fault location on high voltage underground distribution cables. [επιμ.] IET. *IEE Proceedings C - Generation, Transmission and Distribution.* Μαιος 1992, Τόμ. Volume: 139, σσ. 235 - 240.
22. **GILL, PAUL.** *ELECTRICAL POWER EQUIPMENT MAINTENANCE AND TESTING.* 2η. s.l. : CRC PRESS, 1998.
23. **Gooding, H. T.** Cable-fault location on power systems. *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers.* Ιανουαριος 1966, Τόμ. Vol. 113, σσ. 111 - 119.
24. **Dodds, Chris .** Cable joints. [Ηλεκτρονικό] 24th January 2017.
<https://www.cablejoints.co.uk/blog/article/cable-corrosion-repair>.
25. **MIR RASOUL JAAFARI MOUSAVI.** *UNDERGROUND DISTRIBUTION CABLE INCIPIENT FAULT DIAGNOSIS SYSTEM.* 2005.
26. **Patsch, R. και Jung, J.** Water trees in cables: generation and detection. *IEE Proceedings - Science, Measurement and Technology.* Σεπτεμβριος 1999, Τόμ. Vol. 146, No. 5, σσ. p. 253 – 259.
27. **Eichhorn, R. M.** Treeing in Solid Extruded Electrical Insulation. [επιμ.] Union Carbide Technical Center. *IEEE Transactions on Electrical Insulation.* Feb. 1977, Τόμ. Volume: EI-12, σσ. 2 - 18.
28. **Densley, J.** Characteristics of PD pulses in electrical trees and interfaces in extruded cables. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation.* Μάρτιος 2001, Τόμ. Volume: 8 , σσ. 48 - 57.
29. **Bahder, G. , και συν.** Electrical and Electro-Chemical Treeing Effect in Polyethylene and Crosslinked Polyethylene Cables. [επιμ.] IEEE. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems.* Μαιος 1974, Τόμ. Volume: PAS-93, σσ. 977 - 989.
30. **Dodds, Chris; Thorne & Derrick.** Thorne & Derrick International. [Ηλεκτρονικό]
<https://www.powerandcables.com/tag/scotchcast/>.
31. **Sadhu, Pradip Humar και Das, Soumya.** *Elements of Power Systems.* 1st. s.l. : CRC press, 2015. 9781498734462.
32. **War Department Technical Team.** *War Department Technical Manual.* 2019. Washington : U.S. Government Printing Office, 1944. Τόμ. 11.

33. **Neier, Tobias.** *Cable Fault Location in LV, MV and HV Underground Cable Networks(Πρακτική Εφαρμογή).* [επιμ.] BAUR Prüf- und Messtechnik GmbH. 2. 2013. Τόμ. 1.
34. **Clegg, B. και Lord , N. G. .** Modern cable-fault-location methods. *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers.* Απρίλιος 1975, Τόμ. Volume 122,, Issue 4,, σσ. p. 395 – 402.
35. *Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena,*. **Gnerlich, R. H.** Leesburg, VA, USA, USA : IEEE, 29 Oct.-2 Nov. 1989. Cable testing and cable fault locating with minimum risk to good cable. σσ. p. 265-271.
36. **Gale, P. F. και Tech, B.** Cable-fault location by impulse-current method. *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers.* Απρίλιος 1975, Τόμ. Volume: 122 , Issue: 4, σσ. 403 - 408.
37. **Gale,, Philip F. , Clwyd και Wales.** *CABLE FAULT LOCATION.* 4,165,482 United States, 21 Αυγούστου 1979. Field Application.
38. *2016 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD).* **Cheung, Gilbert , Tian, Yuan και Neier, Tobias .** Xi'an, China : IEEE, 25-28 Sept. 2016. Technics of locating underground cable faults inside conduits. σσ. p. 619-622.
39. **Haddon, Merrill και Moulton, Clifford H.** *Method of nondestructively establishing an earth gradient for cable fault locating.* 4,697,137 United States, 29 September 1987. Field Application.
40. **Touaibia, Imene και Azzag, El-Bahi .** Cable fault location in medium voltage of Sonelgaz underground. *Revue des Sciences et de la Technologie,Synthèse.* 21 12 2018, Τόμ. numéro 1, σσ. 33-44.
41. *IEEE Guide for Fault-Locating Techniques.* **Society, IEEE Power and Energy.** New York : IEEE, 2019. 978-1-5044-5691-3.
42. **Hays, James B. , Summit, Jr και J., N. .** *FAULT DETECTOR,*. 2,651,021 United States, 1 Sept. 1953. Field Application.
43. **PENNELL, W. O. και HOFFMANN, H. L.** *FAULT-LOCATOR FOR ELECTRIC CABLES.* 925,594 United States, 8 May 1908. Field application.
44. **Cummings, Rodney B .** *Trouble finder cable tone device.* 2,291,533 United States, 28 July, 1942. Field Application.
45. **Simmonds, James F.** *Method and apparatus for detecting faults and locating conductors in multi-conductor cables.* 3,882,287 United States, May 6, 1975. Field Application.
46. **Wikipedia.** *Nichrome.* [Ηλεκτρονικό] https://en.wikipedia.org/wiki/Nichrome#cite_note-2.
47. **Marsh, Albert L .** *ELECTRIC RESISTANCE ELEMENT.* 811,859 United States, 6 Φεβρουαρίου 1906.
48. <https://ucfilament.com/materials/nichrome/>. **UCF.** [Ηλεκτρονικό] 2007.
49. **CHENGXIN.** Alibaba. https://www.alibaba.com/product-detail/new-constantan-copper-nickel-alloy-resistance_60726717772.html. [Ηλεκτρονικό] 2021.

- 50. Ψωμόπουλος, Κωνσταντίνος Στ.** *Ηλεκτρικές Μετρήσεις*. 2η έκδοση. σ.λ. : Εκδόσεις Τσότρας, 2015.
- 51.** Σημειώσεις Τεχνολογίας Μετρήσεων. Πάτρα : ΤΕΙ ΠΑΤΡΑΣ.
- 52. Nexans. Kafkas.** [Ηλεκτρονικό] 2021. https://www.kafkas.gr/ilektrologiko-yliko/kalodia/esot-egkatastaseon/nym-h05vv-u-h05vv-r/kalodio-esoterikon-egkatastaseon-nym-a05vv-u-3x1-5mm-_191501/.
- 53.** *Εξετάσεις πιστοποίησης Ηλεκτρολόγων Α' Ειδικότητας*. 2017, σσ. 36-37.
- 54.** PANASONIC ALKALINE HANDBOOK. [Ηλεκτρονικό] www.panasonic.com.
- 55. Spon, E. N. και Spon, F. N.** *Electrical Tables and Formulæ: For Use of Telegraph Inspectors and Operators*. [επιμ.] WILLIAM CLOCES. London : s.n., 1871.
- 56. Nehemiah Hawkins&Staff.** *Hawkins Electrical Guide Questions, Answers, & Illustrations, A progressive course of study for engineers, electricians, students*. NEW YORK : THEO. AUDEL & CO., 1914, Τόμ. 3, CHAPTER XXVII, σσ. 510-517.
- 57. EEPower.** <https://eepower.com/resistor-guide/resistor-applications/power-resistor/#>. [Ηλεκτρονικό] 2021.
- 58. Κορκόντζηλας, Σπυρίδων Ι. και Καρακώστας, Επαμεινώνδας Ε.** *Μέθοδοι ανίχνευσης σφαλαμάτων σε υπόγεια καλώδια*. Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Πελοποννήσου. Πάτρα : s.n., 2022. σ. 98, Πτυχιακή εργασία.
- 59. Κωνσταντάτου, Φωτεινή Διονύσιος.** *ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΑΝΥΨΩΣΗΣ ΤΑΣΗΣ ΓΙΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΑ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ ΧΑΜΗΛΗΣ ΤΑΣΗΣ*. Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Πατρών. Πάτρα : s.n., 2008. σσ. 67-78, Διπλώματική Εργασία.
- 60. Σουλιώτης, Γεώργιος.** *Εξομοίωση κυκλωμάτων με Η/Υ*. Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών ΤΕ, ΤΕΙ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ. Πάτρα : s.n., 2017. σσ. 1-3, Σημειώσεις Εργαστηρίου.
- 61. Wikipedia.** https://en.wikipedia.org/wiki/Murray_loop_bridge. [Ηλεκτρονικό]
- 62. JDSU TEAM.** *HST-3000 VDSL QUICK CARD RESISTIVE FAULT LOCATION TESTING(RFL)*. March 2012.
- 63. JDSU team.** *JDSU datasheet template*. 2012.
- 64. Zhenglan Cable.** <http://xlpeinsulatedcables.sell.everychina.com>. [Ηλεκτρονικό] Zhenglan Cable Technology Co., Ltd.
- 65. Terézia, Skoršepová . Posterus.** [Ηλεκτρονικό] 30 September 2013. <http://www.posterus.sk/?p=16307>.
- 66. Berry, Stuart .** ITM components. [Ηλεκτρονικό] 04 September 2017. <https://itm-components.co.uk/blogs/news/surge-protectors-the-best-option-to-protect-your-wireless-network>.
- 67. Buchholz, Vern;** Director of Electrical Technologies, Powertech Labs Inc. Electricenergyonline. [Ηλεκτρονικό] December 2004. https://electricenergyonline.com/show_article.php?article=186.

68. Gajbhiye, Shweta και Karmore, P. S. . Cable Fault Monitoring and Indication: A Review. [επιμ.] D-LAR Labs. *International Journal of Computer Science and Network(IJCSN)*. August 2013, Τόμ. Vol 2, 4, σσ. 20-24.

69. Estes, Phillip H και Orris, Mcginnis . *METHOD OF LOCATING FAULTS IN CABLE CONDUCTORS*. 1,958,361 United States, 8 May 1934.

70. NOCKERS ENGINEERING PRODUCTS. NOCKERS. <https://www.nockers.co.za/>. [Ηλεκτρονικό] 2021.