



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

**Επίδραση των παραμέτρων σχεδιασμού ενός συστήματος
γείωσης του δικτύου διανομής, σε μη ομοιόμορφη δομή
εδάφους στην απόδοση αυτού**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Χαραλαμπία Γεωργιλιά

Επιβλέπων: Χρήστος Α. Χριστοδούλου, Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ
Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών
Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων και Ηλεκτρικών Μετρήσεων

Αθήνα, Οκτώβριος 2023



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

**Επίδραση των παραμέτρων σχεδιασμού ενός συστήματος
γείωσης του δικτύου διανομής, σε μη ομοιόμορφη δομή
εδάφους στην απόδοση αυτού**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Χαραλαμπία Γεωργιά

Επιβλέπων: Χρήστος Α. Χριστοδούλου, Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ
Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών
Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων και Ηλεκτρικών Μετρήσεων

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή, την 31^η Οκτωβρίου 2023

.....
Χρήστος Α.
Χριστοδούλου
Επ. Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Πάυλος Σ.
Γεωργιάκης
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Ιωάννης Φ.
Γκόνος
Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Οκτώβριος 2023

.....
Χαραλαμπία Γεωργιά

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π

Copyright © Χαραλαμπία Γεωργιά, 2023.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση αυτής της εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερω τον επιβλέποντα καθηγητή κύριο Χρήστο Χριστοδούλου για την καθοδήγηση και την επίβλεψή του, καθώς επίσης και τον υποψήφιο διδάκτορα Μανόλη Έλληνα για την σημαντική συνεισφορά και για τις συμβουλές τους σε όλη τη διάρκεια της εργασίας.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου και τους κοντινούς μου ανθρώπους για τη θερμή υποστήριξή τους σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα δίκτυα διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας μέσης τάσης ήταν αρχικά σχεδιασμένα να λειτουργούν ακτινικά, όπου η ροή ενέργειας είναι μονόδρομη, κάνοντας με αυτόν τον τρόπο την τη μελέτη των συστημάτων αυτών, όπως σε θέματα προστασίας, βραχυκυκλωμάτων και άλλων μία σχετικά απλή διαδικασία. Όμως, η ενεργειακή μετάβαση στις πράσινες μορφές ενέργειας, που έχει ως αποτέλεσμα τη διεύθυνση όλο και περισσότερων Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ), μετέτρεψε αυτού του είδους τα συστήματα σε βροχοειδή, κάνοντας τελικά τη μελέτη για το θέμα αυτό πιο περίπλοκο. Ο σωστός λοιπόν σχεδιασμός ενός συστήματος γείωσης αποτελεί ένα βασικό στοιχείο, που βοηθά στην πιο αποτελεσματική και σωστή λειτουργία του συστήματος προστασίας, έτσι ώστε να αποφευχθεί οποιοδήποτε σφάλμα στο δίκτυο, ενώ παράλληλα περιορίζει και τυχόν επικίνδυνες δυναμικές, που μπορεί να βλάψουν το προσωπικό ή να προκαλέσουν ζημιές στον εξοπλισμό.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετάται η επίδραση του διστρωματικού εδάφους στη συμπεριφορά ενός συστήματος γείωσης του δικτύου διανομής κατά την εμφάνιση μονοφασικού βραχυκυκλώματος ως προς γη, σε διάφορα σημεία μιας τυπικής γραμμής ΜΤ με διεσπαρμένη παραγωγή.

Στο πρώτο κεφάλαιο περιγράφεται γενικά το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας και πώς αυτό λειτουργεί. Επιπλέον, αναλύεται η δομή του δικτύου διανομής, μεταξύ διαφόρων δικτύων, όπως εναέριο, το υπόγειο και το υποβρύχιο.

Στο δεύτερο κεφάλαιο προσδιορίζουμε την έννοια του βραχυκυκλώματος και της προστασίας των δικτύων διανομής. Επιπλέον, παρουσιάζονται τα μέσα προστασίας των δικτύων διανομής, καθώς και ο τρόπος με τον οποίο μπορεί η επιλογική συνεργασία μπορεί να επιτευχθεί.

Στο τρίτο κεφάλαιο εισάγονται βασικές έννοιες γειώσεων και ασφάλειας στο δίκτυο διανομής. Παρουσιάζονται οι βασικότερες μέθοδοι γείωσης και τα είδη ηλεκτροδίων γείωσης. Επιπλέον, αναφέρεται ο τρόπος υπολογισμού της αντίστασης γείωσης αλλά και οι παράγοντες από τους οποίους εξαρτάται. Τέλος, γίνεται αναφορά στο μοντέλο εδάφους στο οποίο εγκαθίσταται το σύστημα γείωσης καθώς επίσης και στον σχεδιασμό αυτών.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζεται το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε για τις προσομοιώσεις (SES AutoGrid Pro / PowerFactory), τα μοντέλα προσομοίωσης και η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε. Επιπρόσθετα, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της μελέτης με τη μορφή διαγραμμάτων, όπως επίσης και οι μετρήσεις που έγιναν για την ακόλουθη προσομοίωση.

Λέξεις Κλειδιά

Γείωση, Πλέγμα Γείωσης, Αντίσταση Γείωσης, Τάση Επαφής, Βηματική Τάση, Ειδική Αντίσταση Εδάφους, Προσομοίωση, Σύστημα Γείωσης, AutoGrid Pro, CDGES, PowerFactory

ABSTRACT

The distribution networks of medium voltage were initially designed to operate radially, where the flow of energy is unidirectional, making the study of these systems, like matters of protection, short circuits and others, a relatively simple process. However, the energy transition towards green forms of energy, which results in the penetration of an increasing number of Renewable Energy Sources (RES), has transformed these systems into looped networks, ultimately making the study of selective coordination of electrical energy protection systems more complex. Therefore, the right design process of a grounding system is a crucial fact, which helps a more efficient and correct operation of the protection system, in order to avoid any fault in the network, while at the same time limiting any dangerous potentials, which may harm personnel or may cause equipment damage.

In this thesis we examine the effect of layered soil on the behavior of a grounding system in a distribution network during the occurrence of single-phase earth faults at various points of a typical MV (medium voltage) line with dispersed generation.

The first chapter provides a general description of the electrical power system and how it works. Additionally, it analyzes the structure of different distribution networks, distinguishing between overhead, underground and submarine ones.

In the second chapter introduces the concept of short circuits and the protection of distribution networks. In addition, we present the means of protection for distribution networks, as well as how selective coordination can be achieved.

The third chapter introduces basic concepts of grounding and safety in the distribution network. It presents the main grounding methods and types of grounding electrodes. Furthermore, it discusses the calculation of grounding resistance and the factors on which it depends. Finally, the chapter refers to the soil model in which the grounding system is installed, as well as the design of these systems.

The fourth chapter presents the software used for simulations (SES AutoGrid Pro/PowerFactory), simulation models, and the methodology followed. Additionally, it presents the results of the study in the form of diagrams, as well as the measurements taken for the subsequent simulation.

Key Words

Grounding, Grounding Grid, Grounding Resistance, Touch Voltage, Step Voltage, Soil Resistivity, Simulation Grounding System, AutoGrid Pro, CDEGS, PowerFactory

Περιεχόμενα

Περιεχόμενα

Περιεχόμενα.....	8
Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή – Γενική Περιγραφή Δικτύου Διανομή Ηλεκτρικής Ενέργειας.	11
1.1 Περιγραφή Συστήματος	11
1.1.1 Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας.....	12
1.1.2 Διανομή Ηλεκτρικής Ενέργειας	12
1.2 Διαχειριστής Ελληνικού Συστήματος Διανομής (ΔΕΔΔΗΕ)	13
1.3 Υποσταθμοί Μεταφοράς (ΥΤ/ΜΤ).....	13
1.4 Δίκτυα Διανομής Μέσης Τάσης.....	14
1.4.1 Εναέρια Δίκτυα Διανομής ΜΤ	15
1.4.2 Υπόγεια Δίκτυα Διανομής ΜΤ.....	16
1.4.3 Υποβρύχια Δίκτυα ΜΤ.....	17
1.5 Δίκτυα Διανομής Χαμηλής Τάσης.....	17
1.5.1 Εναέρια Δίκτυα Διανομής ΧΤ.....	18
1.5.2 Υπόγεια Δίκτυα Διανομής ΧΤ	19
1.6 Υποσταθμοί ΜΤ/ΧΤ.....	19
1.6.1 Εναέριοι Υποσταθμοί ΧΤ/ΜΤ	19
1.6.2 Επίγειοι Υποσταθμοί ΜΤ/ΧΤ.....	20
1.6.3 Υπόγειοι Υποσταθμοί ΧΤ/ΜΤ	21
1.7 Δίκτυο Διανομής και Διασυνδέσεις.....	22
1.7.1 Σύνδεση με Κρήτη.....	23
Κεφάλαιο 2: Περιγραφή βραχυκυκλωμάτων και λειτουργίας της Προστασίας στο Δίκτυο Διανομής	24
2.1 Εισαγωγή.....	24
2.2 Είδη Σφαλμάτων.....	25
2.3 Συστήματα και Μέσα Προστασίας.....	26
2.4 Έλεγχος λειτουργίας Συστήματος	27
2.5 Ένταση Βραχυκυκλώσεως	28
2.6 Βασικές Αρχές και Επιθυμητή Λειτουργία της Προστασίας.....	29
2.7 Βασικός Εξοπλισμός Προστασίας Δικτύου Διανομής	30
2.7.1 Διακόπτες ισχύος (Δ/I) και Ηλεκτρονόμοι (H/N)	30

2.7.2	Διακόπτες Φορτίου (Δ/Φ).....	31
2.7.3	Διακόπτες Αυτόματης Επαναφοράς.....	31
2.7.4	Ασφάλειες και Ασφαλειοαποζεύκτες (A/Z).....	32
2.7.5	Διακόπτες Απομόνωσης (Δ/A).....	34
2.7.6	Συστοιχίες πυκνωτών	34
2.7.7	Μονοφασικοί Βηματικοί Ρυθμιστές Τάσης	35
2.8	Επιλογική Συνεργασία	35
2.8.1	Επιλογική συνεργασία ασφαλειών	36
2.8.2	Επιλογική συνεργασία Δ/AE -ασφαλειών.....	36
2.8.3	Επιλογική συνεργασία Δ/I - Ασφαλειών.....	36
2.8.4	Επιλογική συνεργασία Δ/I - Δ/AE	36
2.8.5	Επιλογική συνεργασία Δ/AE - Δ/AE	37
	Κεφάλαιο 3: Περιγραφή βασικών εννοιών γειώσεων στο δίκτυο διανομής.....	38
3.1	Εισαγωγή	38
3.2	Η Γείωση	38
3.2.1	Ορισμοί.....	38
3.3	Βασικές Μέθοδοι Γείωσης Δικτύων Διανομής	40
3.3.1	Άμεση Γείωση	41
3.3.2	Ουδετέρωση	41
3.3.3	Προβλέψεις του ΚΕΗΕ	42
3.4	Γείωση του Δικτύου Διανομής	42
3.5	Είδη Ηλεκτροδίων Γείωσης	43
3.5.1	Το ημισφαιρικό ηλεκτρόδιο	43
3.5.2	Ο ραβδοειδής γειωτής	44
3.5.3	Γειωτής Ταινίας.....	45
3.5.4	Γειωτής Πλάκας	45
3.5.5	Ακτινικός Γειωτής.....	46
3.5.6	Γειωτής Πλέγματος	47
3.6	Αντίσταση Γείωσης.....	48
3.6.1	Μέτρηση της Αντίστασης Γείωσης με τη μέθοδο της Πτώσης Δυναμικού	49
3.6.2	Μέτρηση της Αντίστασης Γείωσης με τη μέθοδο χρήση μιας αμπεροτσιμπίδας....	50
3.6.3	Μέτρηση της Αντίστασης Γείωσης με τη μέθοδο χρήσης δύο αμπεροτσιμπίδων ..	51
3.7	Χαρακτηριστικά Εδάφους	52
3.7.1	Ειδική αντίσταση εδάφους (ρ).....	52

3.7.2	Τρόποι Μέτρησης της ειδικής αντίστασης εδάφους	53
3.7.3	Επίδραση Διαφοράς Δυναμικού.....	56
3.7.4	Επίδραση Έντασης Ηλεκτρικού Ρεύματος.....	56
3.7.5	Επίδραση υγρασίας, θερμοκρασίας και χημικού περιεχομένου.....	56
3.8	Δομή και Μοντέλο Εδάφους.....	57
3.8.1	Υλικά επίστρωσης υψηλής ειδικής αντίστασης	57
3.8.2	Μοντέλο ομοιόμορφου εδάφους	58
3.8.3	Μοντέλο διστρωματικού εδάφους.....	58
Κεφάλαιο 4: Παρουσίαση Λογισμικού Προσομοιώσεων και Μετρήσεων και Παράθεση Αποτελεσμάτων Προσομοίωσης.....		60
4.1	Εισαγωγή.....	60
4.2	Παρουσίαση Λογισμικού SES AutoGrid Pro.....	64
4.3	Μοντέλα και Μεθοδολογία Προσομοίωσης.....	67
4.4	Αποτελέσματα Προσομοίωσης.....	73
4.5	Υπολογισμοί Προσομοίωσης.....	90
4.6	Συμπεράσματα.....	95
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....		96

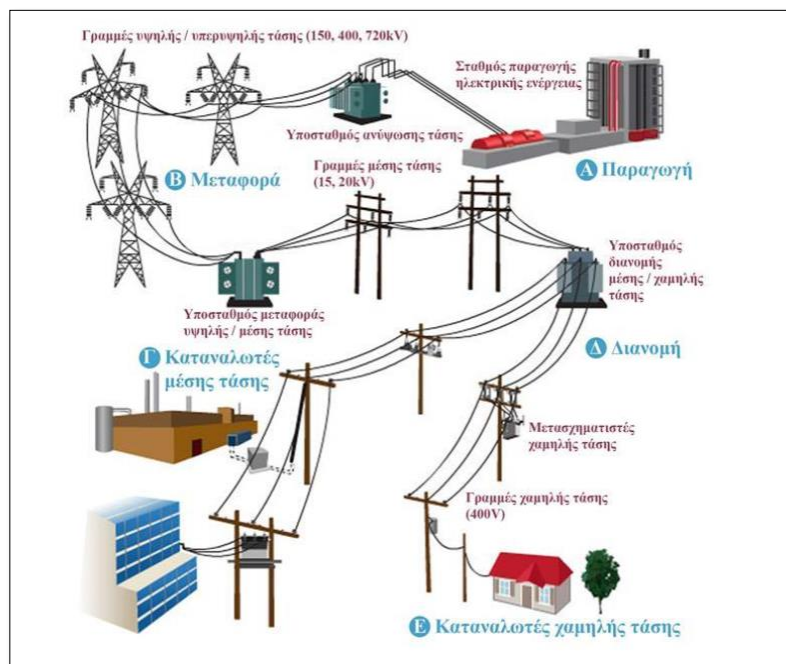
Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή – Γενική Περιγραφή Δικτύου Διανομή Ηλεκτρικής Ενέργειας

1.1 Περιγραφή Συστήματος

Το Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ) αποτελείται από την συνδυαστική χρήση όλων των στοιχείων που χρειάζονται (όπως διάφορες εγκαταστάσεις και άλλα μέσα), για να παρέχουν την απαιτούμενη ηλεκτρική ενέργεια σε περιοχές που έχουν ανάγκη από αυτή. Βασικός παράγοντας για την αποτελεσματική λειτουργία ενός τέτοιου συστήματος είναι να τροφοδοτεί με την ενέργεια αυτή περιοχές που υπάρχει ζήτηση, με όσο είναι δυνατόν λιγότερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις, με όσο το δυνατόν χαμηλότερο κόστος, καθώς και με σταθερή τάση, συχνότητα, τροφοδότηση, αλλά και με την απαιτούμενη πάντα αξιοπιστία.

Η τροφοδότηση σε κάθε καταναλωτή, προϋποθέτει τις παρακάτω τρεις λειτουργίες:

- ✓ Την παραγωγή (σταθμοί παραγωγής, Υ/Σ ανύψωσης τάσης-μεταφορά ηλεκτρικού ρεύματος υπό υψηλή τάση)
- ✓ Τη μεταφορά (δίκτυα γραμμών υψηλής τάσης, Υ/Σ ζεύξης αυτών των δικτύων, Υ/Σ μετασχηματισμού μεταξύ διαφόρων τάσεων του δικτύου, όπως από υψηλή σε μέση κ.λπ.)
- ✓ Τη διανομή (δίκτυα διανομής μέσης και χαμηλής τάσης, Υ/Σ διανομής μέσω των οποίων η μέση τάση υποβιβάζεται σε χαμηλή)



Εικόνα 1.1.1 Δομή Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας [24]

Από την παραγωγή μέχρι και το σημείο κατανάλωσης, η ηλεκτρική ενέργεια ρέει συνεχώς χωρίς να σταματά και σε αυτό το σημείο πρέπει να τονιστεί ότι επειδή δεν είναι εύκολη η αποθήκευση αυτής, είναι απαραίτητο να παράγεται την ίδια στιγμή που θα καταναλωθεί. Αν και το μέγεθος των συστημάτων της ηλεκτρικής ενέργειας διαφέρει, ωστόσο πρέπει να σημειωθεί ότι υπάρχουν αρκετά κοινά σημεία, όπως για παράδειγμα είναι τριφασικά, 50 ή 60 Hz, εναλλασσόμενου ρεύματος, όμως σε ειδικές περιπτώσεις γίνεται χρήση και συστημάτων για συνεχή παροχή ρεύματος. Οι γραμμές που

χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας έχουν 3 αγωγούς φάσεων, ενώ για την περίπτωση της χαμηλής τάσης υπάρχει και ένας ακόμη ουδέτερος αγωγός. Όσον αφορά τα δίκτυα υψηλής και μέσης τάσης, αυτά χρησιμοποιούνται κυρίως από μεγάλες βιομηχανικές μονάδες (με τριφασικές συνδέσεις), ενώ οι οικείες, αλλά και ένας μεγάλος αριθμός εμπορικών καταστημάτων χρησιμοποιούν ως επί το πλείστον δίκτυα χαμηλής τάσης. [1]

1.1.1 Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας

Η παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας λαμβάνει χώρα στους σταθμούς παραγωγής. Στις μέρες μας, η σύγχρονη βιομηχανία παραγωγής της βασίζεται σε διάφορες σύγχρονες μεθόδους, αλλά και σε νέα τεχνολογικά μέσα, ώστε να γίνεται η μετατροπή σε θερμική ενέργεια μέσα από διάφορα ορυκτά, όπως πετρέλαιο, άνθρακα, φυσικό αέριο και μηχανική ενέργεια από υδάτινες ροές και υδατοπτώσεις. Όσον αφορά το θέμα μεταφοράς της από τα εργοστάσια που παράγεται προς όλους τους καταναλωτές (είτε σε οικείες και καταστήματα είτε σε μεγάλες βιομηχανικές μονάδες) χρησιμοποιούνται υπερυψηλής και υψηλής τάσης γραμμές, ώστε να μεταφερθεί η ενέργεια σε κεντρικά σημεία δικτύου, δηλαδή στους διάφορους υποσταθμούς. Από τα σημεία αυτά, ξεκινούν τα δίκτυα μέσης τάσης γραμμών (380/220V για τις χώρες της Ευρώπης), μέσα από τα οποία διανέμεται η ηλεκτρική ενέργεια στους καταναλωτές[1]

1.1.2 Διανομή Ηλεκτρικής Ενέργειας

Η διανομή της αναφέρεται στις διαδικασίες εκείνες οι οποίες είναι απαραίτητες για να διανεμηθεί η ενέργεια προς όλους τους καταναλωτές. Τα δίκτυα που βοηθούν ως προς αυτή τη διαδικασία συμπεριλαμβάνουν τις γραμμές εκείνες από τις οποίες μεταφέρεται η ενέργεια στους υποσταθμούς, οι οποίοι συνδέονται με το όλο σύστημα της μεταφοράς. [1]

Υπάρχουν δύο ειδών βαθμίδες διανομής:

- ✓ Η διανομή MT (πρωτεύουσα διανομή), η οποία τροφοδοτείται από τους Υ/Σ υποβιβασμού ΥΤ/ΜΤ και τροφοδοτεί τους Υ/Σ διανομής ΜΤ/ΧΤ και τους καταναλωτές ΜΤ. Τα δίκτυα ΜΤ, αν και λειτουργούν ακτινικά, τις περισσότερες περιπτώσεις είναι βροχοειδή, με τις τιμές της μέσης τάσης να κυμαίνονται μεταξύ 6.6kV έως 20kV)
- ✓ Η διανομή ΧΤ (δευτερεύουσα διανομή)

Τα δίκτυα διανομής φτάνουν μέχρι τον μετρητή, που μετράει την παρεχόμενη ενέργεια ή ισχύ που προωθείται στον καταναλωτή. Μετά τον μετρητή, ακολουθεί η εσωτερική ηλεκτρική εγκατάσταση, που συμπεριλαμβάνονται τις ανάλογες συσκευές για κατανάλωση, καθώς και όλα τα απαραίτητα υλικά για το εσωτερικό δίκτυο. Σε αυτό το σημείο πρέπει να σημειωθεί ότι ο όρος "σύστημα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας", τα τελευταία χρόνια, περιλαμβάνει τα δίκτυα διανομής, όλες τις απαραίτητες εσωτερικές εγκαταστάσεις, καλύπτοντας έτσι όλη τη διαδικασία για να ολοκληρωθεί η παροχή ενέργειας. [1]

Αυτά τα δίκτυα μπορούν να διακριθούν σε δύο κατηγορίες: τα εναέρια και τα υπόγεια. Τα πρώτα έχουν το πλεονέκτημα του χαμηλότερου κόστους, καθώς και της πιο γρήγορης αποκατάστασης σε περίπτωση βλάβης. Στις πυκνοκατοικημένες περιοχές των πόλεων συνήθως προτιμάται η κατασκευή υπόγειων δικτύων, για διάφορους λόγους, όπως για παράδειγμα για να μην καταλαμβάνεται αστικός χώρος, αλλά και για να διασφαλιστεί η ασφάλεια των κατοίκων, καθώς και για θέματα καλής αισθητικής μιας περιοχής. Ωστόσο, πρέπει να διευκρινιστεί ότι υπάρχουν και περιοχές στις οποίες χρησιμοποιούνται και οι δύο κατηγορίες, δηλαδή και τα εναέρια και τα υπόγεια δίκτυα, κάτι που συναντάται κυρίως σε προάστια μεγαλουπόλεων, ανάλογα με τα δεδομένα και τις ανάγκες της εκάστοτε περιοχής κάθε φορά.

Η μετατροπή της τάσης από μέση σε χαμηλή εκτελείται σε υπόγεια μέρη, όπως κάτω από πλατείες, πεζοδρόμια ή και στα υπόγεια σπιτιών ή πολυκατοικιών. Βέβαια, αν και αυτό είναι κάτι που μπορεί να

συμβεί πολύ σπάνια, ενδέχεται, οι υποσταθμοί υποβιβασμού να κατασκευαστούν και μέσα σε οικίσκους. Επίσης, πρέπει να επισημανθεί ότι η μετατροπή σε μέση τάση από υψηλή γίνεται μέσα σε ειδικά διαμορφωμένους υποσταθμούς, που έχουν κατασκευαστεί έτσι για το σκοπό αυτόν. [1]

1.2 Διαχειριστής Ελληνικού Συστήματος Διανομής (ΔΕΔΔΗΕ)

Η ΔΕΔΔΗΕ Α.Ε. (Διαχειριστής του Ελληνικού Δικτύου Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας) ξεκίνησε τη λειτουργία της αφού η ΔΕΗ αποχώρησε, σύμφωνα με την ανάλογη ευρωπαϊκή Οδηγία (2009/72/ΕΚ), καθώς και σύμφωνα με τις διατάξεις του ανάλογου νόμου (Ν. 4001/2011). Βασικό μέλημά της είναι να εποπτεύει και να λειτουργεί σωστά το δίκτυο σε όλη την ελληνική επικράτεια, καθώς και να έχει την εποπτεία της ανάπτυξης, της συντήρησης και εν γένει σωστής και συνεχούς λειτουργίας, χωρίς διακοπές και άλλα προβλήματα. Παράλληλα, βάσει του νόμου, πρέπει να λειτουργεί ανεξάρτητα σε κάθε επίπεδο (διοικητικό και λειτουργικό), καθώς και να διασφαλίζει την ασφαλή και σωστή πρόσβαση σε ενέργεια για όλους τους καταναλωτές, χωρίς καμία εξαίρεση. Πρέπει να σημειωθεί ότι το υπάρχον δίκτυο καλύπτει μία έκταση που εκτείνεται σε 239.236 χιλιόμετρα, κάποια από τα οποία αφορούν τα δίκτυα μέσης τάσης (περίπου 112.291 χλμ.) και κάποια τα δίκτυα χαμηλής τάσης (περίπου 126.941 χλμ.), όπου υπάρχουν και ανάλογοι υποσταθμοί διαφόρων τάσεων. Στο σύνολο εξυπηρετούνται περίπου 7.543.107 πελάτες σε όλη την επικράτεια της χώρας. [12]

1.3 Υποσταθμοί Μεταφοράς (ΥΤ/ΜΤ)

Ανάλογα με τη χρήση του συστήματος μεταφοράς, οι υποσταθμοί (Υ/Σ) διακρίνονται σε υποσταθμούς διανομής (Υ/Σ Διανομής ΜΤ) και υποσταθμούς μεταφοράς (Υ/Σ Μεταφοράς). Ο ρόλος του υποσταθμού διανομής είναι να υποβιβάζει την τάση του συστήματος σε μέση τάση (ΜΤ), έτσι ώστε στους καταναλωτές να φτάσει η ενέργεια ΜΤ.

Ο υποσταθμός μεταφοράς λειτουργεί ώστε να συνδέει τις γραμμές μεταφοράς, προκειμένου να εξασφαλιστεί με τον πιο σωστό τρόπο η διαχείριση αυτών. Συνήθως στον υποσταθμό μεταφοράς υπάρχει ενσωματωμένος και ο υποσταθμός διανομής, ο οποίος αποτελείται από τα παρακάτω τμήματα:

- ✓ Το Τμήμα Υψηλής Τάσεως ή Τμήμα Συνδέσεως, που περιλαμβάνει τις βασικές πύλες των γραμμών μεταφοράς υψηλής τάσης, τις πύλες υψηλής τάσης των μετασχηματιστών ισχύος και τους ζυγούς υψηλής τάσης. Η λειτουργία του τμήματος έχει ανατεθεί στον ΑΔΜΗΕ.
- ✓ Το Τμήμα Μέσης Τάσεως ή τους βασικούς υποσταθμούς και το οποίο απαρτίζεται από τους μετασχηματιστές ισχύος, τις πύλες μέσης τάσης, τις πύλες αποχώρησης των γραμμών διανομής μέσης τάσης και τα βοηθητικά του υποσταθμού. Η λειτουργία του τμήματος έχει ανατεθεί στον Διαχειριστή Δικτύου (ΓΔΔ/ΔΕΗ).

Στους υποσταθμούς μεταφοράς περιλαμβάνονται και τα κέντρα υπερευψηλής τάσης (ΚΥΤ), τα οποία λειτουργούν ως υποσταθμοί υποβιβασμού ή ανύψωσης – σε μονάδες παραγωγής - για την άμεση σύνδεση μεταξύ συστημάτων μεταφοράς υπερευψηλής τάσης (400kV) και μέσης τάσης (150kV).

Στα ΚΥΤ υπάρχουν τα παρακάτω βασικά τμήματα:

- ✓ Η πλευρά ΥΥΤ (400 kV), η οποία συνίσταται από τους Ζυγούς ΥΥΤ, συνήθως τριπλούς, όπου συνδέονται οι Γραμμές Μεταφοράς ΥΥΤ, οι πύλες ΥΥΤ των Αυτομετασχηματιστών και οι πύλες ΥΥΤ των Μετασχηματιστών των μονάδων παραγωγής.
- ✓ Η πλευρά ΥΤ (150 kV), η οποία περιλαμβάνει τους ζυγούς ΥΤ (διπλούς ή τριπλούς), που συνδέονται με τις πύλες των γραμμών μεταφοράς ΥΤ και οι πύλες ΥΤ των αυτομετασχηματιστών.
- ✓ Οι δύο πλευρές συνδέονται μέσω διαφόρων τοποθετημένων αυτομετασχηματιστών 400/150/30 kV.

- ✓ Η πλευρά ΜΤ (30 kV), για τα βοηθητικά του ΚΥΤ. Συνήθως στους Ζυγούς ΥΤ των ΚΥΤ συνδέονται και πύλες Μετασχηματιστών Υποβιβασμού (150/20 kV), οι οποίοι τροφοδοτούν Γραμμές Διανομής [3]

Οι υποσταθμοί ΥΤ/ΜΤ κατασκευάζονται είτε σε υπαίθριο χώρο είτε είναι κλειστού τύπου, οι οποίοι περιέχουν εξοπλισμό μόνωσης αερίου SF₆ (Gas Uninsulated Substations – GIS). Οι Υ/Σ κλειστού τύπου με υπόγεια τροφοδότηση είναι γνωστοί ευρέως ως Κέντρα Διανομής (ή, αλλιώς, ως Κ/Δ).

Υπάρχουν συνολικά 244 υποσταθμοί ΥΤ/ΜΤ, οι οποίοι εξυπηρετούν φορτία διανομής στο συνολικό δίκτυο της επικράτειας. Οι υπαίθριοι υποσταθμοί διαθέτουν μετασχηματιστές ισχύος (20/25 MVA ή 40/50 MVA Dyn1 σε όλη τη χώρα, εκτός της Αττικής), ενώ τροφοδοτούνται από εναέριες πύλες υψηλής τάσης. Η πλευρά ΜΤ συμπεριλαμβάνει μία σειρά από πίνακες μεταλλοεπενδεδυμένους, οι οποίοι εγκαθίστανται μέσα στο κτίριο, ενώ στα παλιότερα χρόνια ο εξοπλισμός αυτών των υποσταθμών (που συμπεριελάμβαναν διακόπτες κ.λπ.) ήταν υπαίθριος, ενώ υπήρχαν και βοηθητικοί ζυγοί για περίπτωση ανάγκης (π.χ. ζυγοί μέσης τάσης).

Το δίκτυο μεταφοράς (22/6,6 kV) εγκαταστάθηκε πρώτα στο λεκανοπέδιο Αθηνών. Πρόκειται για ένα δίκτυο, το οποίο λειτουργεί ως ένα βοηθητικό σύστημα μεταφοράς, μέσα από το οποίο στη σημερινή εποχή τροφοδοτούνται στην ευρύτερη περιοχή της Αθήνας 59 υποσταθμοί (22/6,6 kV), καθώς και κάποιοι πελάτες μέσης τάσης που τροφοδοτούνται άμεσα από το δίκτυο 22 kV. Παρ' όλα αυτά, πρέπει να σημειωθεί ότι ήδη έχει ξεκινήσει η κατάργησή του, η οποία γίνεται σταδιακά, κυρίως λόγω της παλαιότητάς του.

1.4 Δίκτυα Διανομής Μέσης Τάσης

Το Ελληνικό Σύστημα Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας (ή, αλλιώς, ΕΣΜΗΕ), στην Ελλάδα, ιδιοκτησίας της ΑΔΜΗΕ Α.Ε. σύμφωνα με τον ανάλογο νόμο (Ν. 4001/2011) συμπεριλαμβάνει τρία στοιχεία: α) γραμμές υψηλής τάσης, β) διεθνείς διασυνδέσεις και γ) όλες τις απαραίτητες εγκαταστάσεις, καθώς και τον αναγκαίο εξοπλισμό, για τη συνεχή μεταφορά ενέργειας, με ασφαλή τρόπο, από υπερυψηλή και υψηλή τάση σε χαμηλότερες τάσεις, σε ανάλογους υποσταθμούς. Σε αυτά δεν συμπεριλαμβάνονται γραμμές υψηλής τάσης, οι ανάλογες εγκαταστάσεις για παραγωγή, καθώς και τα δίκτυα υψηλής τάσης νησιών, τα οποίας δεν είναι συνδεδεμένα. Πρέπει να σημειωθεί ότι το δίκτυο αυτό διανομής στη χώρα μας ανήκει στη ΔΕΗ και αποτελείται από γραμμές διαφόρων τάσεων. [5]

Πριν από το 1970, ωστόσο, η διαδικασία αυτή δεν ήταν ίδια με τη σημερινή. Τότε, τα δίκτυα Μ.Τ. λειτουργούσαν σε όλη την χώρα στην τάση των 15 kV, εκτός από την ευρύτερη περιοχή της Αττικής, όπου γινόταν χρήση του δικτύου 22 kV, που υφίσταται και σήμερα, σε συνδυασμό, βέβαια, με το δίκτυο διανομής 6,6 kV της ΗΕΑΠ (Ηλεκτρική Εταιρεία Αθηνών Πειραιώς), που ίσχυε παλιότερα. Οι λόγοι που οδήγησαν στην αλλαγή, αλλά και στην καθιέρωση των 20 kV ήταν κυρίως οικονομικοί, αλλά και έγιναν σύμφωνα με τις υποδείξεις της ΕΕ, που έπρεπε επίσης να ακολουθηθούν. Έτσι, πρέπει να τονιστεί, ότι στη σημερινή εποχή, στη χώρα μας, τα περισσότερα δίκτυα διανομής Μ.Τ. λειτουργούν στα 20 kW, ενώ τα υπόλοιπα στα 15 kV (δηλαδή, όπως γινόταν πριν από το 1970), ωστόσο υπάρχουν σχέδια και για τη σταδιακή μετατροπή αυτών στα 20 kV. Για να ξεκινήσει η χρήση των 20 kV, στη χώρα μας, υιοθετήθηκαν διάφορες πρακτικές, όπως επίπεδα μόνωσης (όπως π.χ., για περίπτωση βραχυκυκλωμάτων κλπ.). Ωστόσο όλα τα δίκτυα είναι γειωμένα, τριφασικά, διαθέτουν ουδέτερο κόμβο, καθώς και όλα τα απαραίτητα υλικά για την ενίσχυση της ασφάλειας. Ως προς την δομή του, το δίκτυο ΜΤ χωρίζεται στις εξής διαβαθμίσεις:

- ✓ βροχοειδές (βασική δομή)
- ✓ αραχοειδές (στην Αττική κυρίως και σε άλλες αστικές περιοχές)
- ✓ ακτινικό (σε δύσβατες περιοχές και σε νησιά). [7]

Ο αριθμός των χρηστών MT ανέρχεται στους 13.075, εκ των οποίων οι 12.668 είναι ενεργοί και οι 407 ανενεργοί, με ετήσια κατανάλωση το 2020 ίση με 10.950 GWh. [11]

1.4.1 Εναέρια Δίκτυα Διανομής MT

Οι γραμμές διανομής MT κατά βάση διέρχονται από βασικές αρτηρίες δρόμων, έτσι ώστε να είναι άμεσα προσβάσιμες σε περίπτωση ανάγκης ή και για λόγους συντήρησης, επιδιόρθωσης κ.λπ. Στις γραμμές αυτές συμπεριλαμβάνονται τα εξής:

- ✓ Οι αγωγοί, που έχουν κατασκευαστεί από αλουμίνιο, με χαλύβδινη ενίσχυση, και είναι παρόμοιοι με τους αγωγούς που χρησιμοποιούνται στις υψηλές τάσεις.
- ✓ Οι στύλοι, οι οποίοι είναι παρόμοιοι με εκείνους των γραμμών υψηλής τάσης, μικρότερων διαστάσεων, χωρίς ωστόσο να χρησιμοποιούνται σε αυτή την περίπτωση μεταλλικοί πυλώνες. Πολλές φορές σε ένα στύλο μέσης τάσης συνυπάρχει και γραμμή χαμηλής τάσης.
- ✓ Οι μονωτήρες, οι οποίοι είναι σταθεροί και όχι σε μορφή αλυσίδας
- ✓ Συστήματα ελέγχου και προστασίας που είναι τόσο οι αυτόματοι διακόπτες απομόνωσης της γραμμής σε περίπτωση ανωμαλίας, όσο και οι ασφάλειες υψηλής τάσης που τοποθετούνται στα σημεία διακλάδωσης και είναι κυλινδρικές με σύρια που τήκεται σε περίπτωση βραχυκυκλώματος.

Τα εναέρια αυτά δίκτυα έχουν μορφή δενδροειδή, ενώ πρέπει να τονιστεί ότι συμπεριλαμβάνουν εκτός από την κύρια γραμμή και διάφορες διακλαδώσεις, που συνδέονται μέσης και χαμηλής τάσης υποσταθμοί. Η βασική γραμμή συμπεριλαμβάνει μεγαλύτερους αγωγούς από αυτούς που χρησιμοποιούνται στις διακλαδώσεις. Τα είδη αυτών των αγωγών είναι τα παρακάτω:

- ✓ Γυμνοί Αγωγοί:
 - ACSR (αλουμίνιο ενισχυμένο με χάλυβα) 16 mm^2 , 35 mm^2 , 95 mm^2
 - Cu 16 mm^2 , 35 mm^2 , 95 mm^2
- ✓ Συνεστραμμένα καλώδια (θωρακισμένου τύπου):
 - $3 \times 50 \text{ mm}^2 \text{ Al} + 50 \text{ mm}^2 \text{ St}$
 - $3 \times 150 \text{ mm}^2 \text{ Al} + 50 \text{ mm}^2 \text{ St}$ [8]

Για την επιλογή των διατομών των αγωγών λαμβάνονται υπόψιν οι παρακάτω περιορισμοί:

- ✓ Αντοχή της Γραμμής (σε μηχανικό επίπεδο)
- ✓ Μέγιστη επιτρεπόμενη πτώση τάσης,
- ✓ καθώς και η μέγιστη επιτρεπτή ένταση (θερμικό όριο)

Επίσης, πρέπει να επισημανθεί ότι η επιλογή των αγωγών δεν γίνεται τυχαία, αλλά σύμφωνα με κάποια κριτήρια, όπως οικονομικοί λόγοι, που ως σκοπό έχουν τη μείωση του κόστους, καθώς επίσης και σύμφωνα με το ευρύτερο φυσικό περιβάλλον που θα τοποθετηθούν. Για παράδειγμα, σε περιοχές με κανονική διαβρωτικότητα, χρησιμοποιούνται αγωγοί τύπου ACSR, ενώ οι αγωγοί από χαλκό προτιμώνται κυρίως σε παραθαλάσσια και άλλα μέρη, που παρουσιάζουν έντονο το φαινόμενο της διάβρωσης. [8]



Εικόνα 1.4.1 Μορφή αγωγών αλουμινίου με ενίσχυση χάλυβα (ACSR)

1.4.2 Υπόγεια Δίκτυα Διανομής ΜΤ

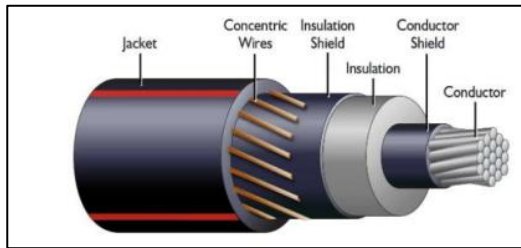
Η κατασκευή υπόγειων γραμμών έχει πολλαπλάσιο κόστος σε σχέση με τις εναέριες. Οι γραμμές αυτές χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο για λόγους ασφαλείας ή για θέματα αισθητικής ή και όταν υπάρχουν διάφορες δυσκολίες, όπως ανοιχτές ζώνες διέλευσης, όπως μπορεί να συμβαίνει συχνά σε κατοικημένες περιοχές. [10]

Η εύρεση κατάλληλων υπόγειων διαβάσεων είναι ένα βασικό ζήτημα για τις γραμμές αυτές. Συνήθως εγκαθίστανται είτε κάτω από τα πεζοδρόμια, είτε κάτω από τις οδικές επιφάνειες. Στην περιοχή της Αθηνών-Πειραιώς, τα καλώδια 150kV εγκαθίστανται σε βάθος περίπου 1.50 μέτρου, τα καλώδια 20kV σε βάθος περίπου 1.00 μέτρου και τα καλώδια ΧΤ σε βάθος περίπου 0.70 μέτρου. Για να εξασφαλιστεί η καλύτερη απαγωγή της θερμότητας, αλλά και να αποφευχθούν διάφορα προβλήματα, όπως είναι για παράδειγμα ο τραυματισμός των καλωδίων, το χώμα που τοποθετείται πάνω από αυτά είναι λεπτόκοκκο και χωρίς να υπάρχουν σε αυτό πέτρες. Επίσης, πάνω από τα καλώδια τοποθετούνται επιμήκεις πλάκες ή τούβλα από σκυρόδεμα, με αναγνωριστικές ενδείξεις, για να προστατεύσουν μηχανικά τα καλώδια. [10] Τα υπόγεια καλώδια αποτελούνται από τα εξής παρακάτω στοιχεία:

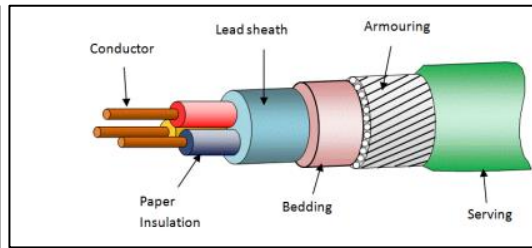
- ✓ Τους αγωγούς που συνήθως είναι κατασκευασμένοι από αλουμίνιο ή από χαλκό
- ✓ Τα μονωτικά και προστατευτικά στρώματα (π.χ. PVC, XLPE κ.λπ.)

Οι αγωγοί τοποθετούνται σε ελικοειδή διάταξη και κάθε ένας είναι μονωμένος από τους υπόλοιπους μέσω ενός ή περισσότερων μονωτικών στρωμάτων. Ωστόσο, κάποιες φορές, γίνεται η τοποθέτηση ενός μανδύα μολύβδινου στο τελικό μονοπάτι. Ιδιαίτερα στην περίπτωση πολλαπλών αγωγών στο αυλάκι, η ψύξη τους είναι δύσκολη και πολύ χειρότερη από αυτή των εναέριων αγωγών. Τα τυποποιημένα είδη τέτοιων καλωδίων είναι:

- ✓ Τριπολικά καλώδια, με αλουμινένιους αγωγούς αλουμινίου και ανάλογη μόνωση (όπως με εμποτισμένο χαρτί), τριών μολύβδινων μανδύων (που είναι ανεξάρτητοι μεταξύ τους) διατομής $3 \times 240 \text{ mm}^2$, οι οποίοι διαθέτουν και χαλύβδινο σπλισμό (ΝΑΕΚΒΑ)
- ✓ Τρία μονοπολικά καλώδια, με μόνωσης και θωράκιση, με αγωγούς αλουμινίου, καθώς και με εξωτερικό PVC μανδύα, διατομής 200 mm^2 , που περιβάλλεται από μολύβδινο μανδύα, τα οποία για λόγους απλούστευσης σημειώνονται και ως $3 \times 240 \text{ mm}^2 \text{ Al} + 25 \text{ mm}^2 \text{ Al}$. [7]



Εικόνα 1.4.2 Μονοπολικό Υπόγειο καλώδιο MT



Εικόνα 1.4.3 Τριπολικό καλώδιο MT

Πρέπει να επισημανθεί ότι η περίπτωση σφαλμάτων στα υπόγεια δίκτυα είναι πολύ μικρότερη σε σχέση με τα εναέρια. Όμως, σε αντίθεση με τις εναέρια γραμμές, στις οποίες τα σφάλματα είναι κυρίως παροδικά, στις υπόγειες, τα σφάλματα είναι κυρίως μόνιμα και υπό αυτή την έννοια απαιτούν και την επέμβαση συνεργείου, για να γίνουν όλες οι επιδιορθώσεις ή αλλαγές, ώστε να εξαλειφθούν τα προβλήματα. Ο εντοπισμός σφαλμάτων στα υπόγεια δίκτυα είναι μία δύσκολη διαδικασία και γι' αυτό κατασκευάζονται κατά κύριο λόγο με την βροχοειδή δομή, έτσι ώστε σε περίπτωση βλάβης να εξασφαλίζεται η αδιάληπτη τροφοδοσία των Υ/Σ και κατ' επέκταση των καταναλωτών. [7]

1.4.3 Υποβρύχια Δίκτυα MT

Τα υποβρύχια καλώδια MT είναι εγκατεστημένα σε διάφορα σημεία για τους παρακάτω λόγους:

- ✓ για τη διασύνδεση νησιών με την υπόλοιπη χώρα
- ✓ για τη διασύνδεση νησιών με άλλα μη συνδεδεμένα
- ✓ σε σημεία όπου μεσολαβούν λιμνοθάλασσες ή μικροί κόλποι είτε σε νησιά είτε στην υπόλοιπη χώρα

Οι υπάρχουσες υποθαλάσσιες συνδέσεις διαθέτουν είτε 4 καλώδια (μονοπολικά) καθώς και ένα ακόμη, που λειτουργεί ως εφεδρικό, είναι από ένα καλώδιο (τριπολικό). Το συνολικό δίκτυο της ΔΕΔΔΗΕ των υποθαλάσσιων καλωδίων MT έχει 161 υποθαλάσσια καλώδια, καταγεγραμμένα σε 68 σημεία σύνδεσης, συνολικού μήκους 1082,68 χιλιόμετρα. Το σημαντικότερο μειονέκτημά τους, ωστόσο, είναι το κόστος εγκατάστασής τους και η επιρρέπεια τους σε βλάβες. Πιο συγκεκριμένα, τα καλώδια αυτά είναι καθημερινά εκτεθειμένα σε διάφορους κινδύνους, που μπορεί να προκαλέσουν σημαντικά προβλήματα και βλάβες, είτε αυτά βρίσκονται σε κάποιο υποθαλάσσιο μέρος είτε στη στεριά. [11]



Εικόνα 1.4.4 Υποβρύχιο καλώδιο MT

1.5 Δίκτυα Διανομής Χαμηλής Τάσης

Η διανομή χαμηλής τάσης εξυπηρετεί τους οικιακούς καταναλωτές. Τα δίκτυα αυτά ξεκινούν από τους διάφορους υποσταθμούς και έτσι η ενέργεια μεταφέρεται σε οικείες και νοικοκυριά στους

καταναλωτές. Κατά κανόνα, τα δίκτυα αυτά που χρησιμοποιούνται για αστικούς ιστούς, με πυκνή κατοίκηση, είναι συνήθως υπόγεια, για την αποφυγή διαφόρων προβλημάτων.

Για τις παροχές χαμηλής τάσης, ανάλογα με το αν είναι τριφασικές ή μονοφασικές, αναφερόμαστε σε δύο τιμές, όπου η πρώτη είναι η πολική τάση και η δεύτερη η φασική τάση του συστήματος. Στις διάφορες χώρες του κόσμου υπάρχουν δύο βασικά τριφασικά συστήματα XT: το 380/220V και το 190/110V [2].

Τα δίκτυα διανομής μπορούν να είναι εναέρια ή υπόγεια, ανάλογα με την κατασκευή τους. Τα εναέρια έχουν το πλεονέκτημα της μικρότερης δαπάνης, αλλά είναι δυνατή και πιο άμεση και η αποκατάσταση τυχόν προβλημάτων ή βλαβών που μπορεί να προκύψουν, κάτι που δεν συμβαίνει και με τα υπόγεια δίκτυα. Παράλληλα πρέπει να ειπωθεί ότι οι στύλοι που χρησιμοποιούνται στην πλειονότητα των περιπτώσεων είναι είτε από τσιμέντο είτε από ξύλο, ενώ σε πιο σπάνιες περιπτώσεις είναι κατασκευασμένοι από μέταλλο. Επίσης, οι αγωγοί είναι από αλουμίνιο σε δίκτυα XT ή στην περίπτωση υψηλής τάσης είναι από χάλυβα ενισχυμένο (κυρίως λόγω της μεγάλης απόστασης που υπάρχει μεταξύ τους) ή, ακόμη, μπορεί να είναι και από κράματα αλουμινίου. Βέβαια, τα τελευταία χρόνια υπάρχουν και πιο σύγχρονες κατασκευές γραμμών, με ειδικά συστήματα, τα οποία τείνουν να εξαλείψουν τη χρήση των γυμνών αγωγών που παρουσιάζουν περισσότερα προβλήματα. Έτσι, επιτυγχάνεται αυξημένη ασφάλεια λειτουργίας, ενώ παράλληλα ελαττώνεται και η όχληση στο περιβάλλον [1]. Υπάρχουν τρεις κύριες κατηγορίες συστημάτων XT:

- ✓ **Ακτινικό:** Πρόκειται για το πιο απλό σύστημα, το οποίο χρησιμοποιείται κυρίως στα εναέρια δίκτυα σε αγροτικές περιοχές της χώρας. Περιλαμβάνει μία βασική κεντρική γραμμή και από αυτήν μετά υπάρχουν διάφορες διακλαδώσεις, ωστόσο με πολύ μικρότερη διατομή. Οι καταναλωτές συνδέονται είτε με το κεντρικό σύστημα είτε με κάποια διακλάδωση αυτού.
- ✓ **Βροχοειδές:** Η κεντρική γραμμή ξεκινά σε αυτή την περίπτωση από τους ζυγούς XT ενός άλλου Υ/Σ. Υπάρχει μια τομή στο ηλεκτρικό μέσο της γραμμής, που επιτυγχάνεται είτε με αφαίρεση γεφυρών (στην εναέρια περίπτωση), είτε με αφαίρεση αποζευκτών κιβωτίων (υπόγεια). Κατά μήκος των υπόγειων δικτύων, μπορούν να υπάρχουν κιβώτια ζεύξης. Προκειμένου να αυξηθεί η αξιοπιστία του δικτύου, ενδέχεται να υπάρχουν διάφορα κιβώτια ζεύξης, έτσι ώστε σε τυχόν ειδικές περιπτώσεις (όπως κάποια βλάβη), να υπάρχει η δυνατότητα απομόνωσης τμημάτων.
- ✓ **Αραχνοειδές:** Όλες οι αναχωρήσεις σε αυτή την περίπτωση έχουν δυνατότητα διασύνδεσης με 2 - 3 άλλες αναχωρήσεις. Χρησιμοποιείται μόνο σε υπόγεια δίκτυα αστικών ιστών.

Η ισχύς των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ), που λειτουργούν στο Διασυνδεδεμένο Σύστημα είναι 2785.4 MW για τη ΜΤ και 1196.4 MW για τη ΧΤ. Η ισχύς των ΑΠΕ που λειτουργούν στα Μη Διασυνδεδεμένα Νησιά ανέρχεται σε 443.8 MW [4].

1.5.1 Εναέρια Δίκτυα Διανομής XT

Τα εναέρια δίκτυα XT είναι συνήθως τριφασικά συστήματα, δηλαδή αποτελούνται από τρεις φάσεις και έναν ουδέτερο. Ορισμένες φορές, όμως, οι γραμμές είναι μονοφασικές (δηλαδή μία φάση και ένας ουδέτερος), κάτι που συμβαίνει τις περισσότερες φορές κυρίως σε αγροτικές περιοχές της χώρας. Στις εναέριες γραμμές, χρησιμοποιούνται γυμνά χάλκινα σύρματα. Οι στύλοι σε αυτές τις περιπτώσεις είναι κατασκευασμένοι είτε από ξύλο, είτε από τσιμέντο, με διαστάσεις μικρότερες σε σχέση με άλλους στύλους, όπως στην περίπτωση ΜΤ. Καθώς η τάση τους είναι χαμηλή, συχνά βρίσκονται κοντά σε κατοικίες. Τα είδη αυτών των αγωγών και μεγεθών που χρησιμοποιούνται είναι τα παρακάτω [7]:

- ✓ Γυμνοί Αγωγοί
 - Αγωγοί Al 16 mm², 35 mm², 50 mm² (Διατομές ισοδύναμες χαλκού)
 - Αγωγοί Cu 16 mm², 35 mm², 50 mm²
- ✓ Συνεστραμμένα καλώδια

- 3 x 35 mm² Al + 54,6 mm² AAAC
- 3 x 70 mm² Al + 54,6 mm² Al

Οι μονωτήρες των γραμμών αυτών σε σύγκριση με αυτούς της ΜΤ είναι μικρότεροι, παρ' όλα αυτά κατασκευάζονται από τα ίδια υλικά (δηλαδή, από γυαλί ή από πορσελάνη), καθώς και έχουν ίδια όψη. Για περισσότερη προστασία, τοποθετούνται σε σημεία διακλάδωσης, ώστε σε περίπτωση πυρκαγιάς για παράδειγμα, να απομονώνεται το τμήμα που παρουσιάζει το πρόβλημα και έτσι να μην επεκτείνεται ο κίνδυνος. [8]

1.5.2 Υπόγεια Δίκτυα Διανομής ΧΤ

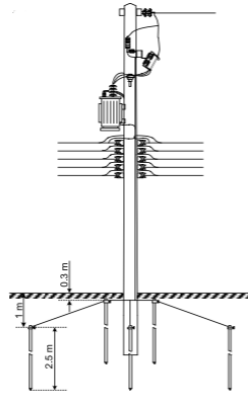
Οι γραμμές αυτές κατασκευάζονται εντός των πόλεων για να εξασφαλιστεί μεγαλύτερη ασφάλεια, αλλά και για λόγους καλαισθησης και ομοιομορφίας, και λόγους αισθητικής. Αποτελούνται από υπόγεια καλώδια, τα οποία τοποθετούνται σε αυλάκια που έχουν δημιουργηθεί προηγουμένως για το σκοπό αυτό, είναι ίδιου τύπου με αυτά της μέσης τάσης, ωστόσο έχουν μικρότερη διατομή. Επιπλέον, διαθέτουν όλα τα απαραίτητα υλικά που έχουν συνήθως τα ΜΤ υπόγεια καλώδια, ενώ τα κιβώτια διασύνδεσης και σύνδεσης τοποθετούνται κάτω από τη γη, όπως κάτω από πεζοδρόμια, όμως μπορεί να τοποθετηθούν και επίγεια, για διευκόλυνση, ενώ σε αυτή την περίπτωση έχουν δικλίδες ασφαλείας, με συνδέσμους για αποφυγή προβλημάτων. [8]

1.6 Υποσταθμοί ΜΤ/ΧΤ

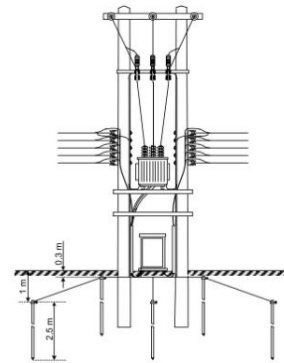
Οι υποσταθμοί διανομής αποτελούν κυρίως τους κόμβους του δικτύου διανομής μέσης τάσης (ΜΤ), δηλαδή τα σημεία αφετηρίας για τη διανομή της ενέργειας (που είναι συνήθως από 20 kV σε 400 V/230 V). Σε αυτούς τους υποσταθμούς γίνεται η υποβίβαση της τάσης μέσω των μετασχηματιστών διανομής, οι οποίοι αποτελούν τον βασικό εξοπλισμό αυτών των υποσταθμών. Το είδος των υποσταθμών διανομής ποικίλλει ανάλογα με την περιοχή φορτίου και τον τύπο του δικτύου διανομής μέσης τάσης (ΜΤ). Σε πυκνοκατοικημένες περιοχές, είναι υποσταθμοί διανομής τύπου εσωτερικού ή υπόγειου, εγκατεστημένοι στα υπόγεια ή στο ισόγειο πολυκατοικιών, μεγάλων κτιρίων, κάτω από πλατείες κλπ. Σε άλλες περιπτώσεις, είναι υποσταθμοί διανομής εναέριου τύπου, δηλαδή εγκατεστημένοι σε στύλους ή επίγειοι, δηλαδή επάνω στο έδαφος. [2]

1.6.1 Εναέριοι Υποσταθμοί ΧΤ/ΜΤ

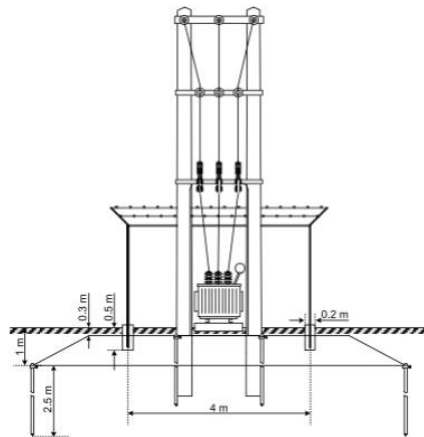
Οι εναέριοι Υ/Σ διανομής εξυπηρετούν τα δίκτυα ΜΤ και ΧΤ και αποτελούνται συνήθως από έναν μετασχηματιστή συνολικής ισχύος 250 kVA. Συναντώνται κατά κανόνα εκτός των κέντρων πόλεων για λόγους ασφαλείας, αλλά και αισθητικούς λόγους. Όλη η κατασκευή, συμπεριλαμβανομένου του μετασχηματιστή, στηρίζεται σε έναν ή δύο στύλους, ανάλογα με τις απαιτήσεις κάθε φορά, όπως είναι το βάρος της κατασκευής. Επάνω σε αυτήν επίσης βρίσκονται οι μονωτήρες, οι οποίοι στηρίζουν την γραμμή ΜΤ, η οποία καταλήγει μέσω μιας διακλάδωσης της στον μετασχηματιστή. Αφού ο μετασχηματιστής υποβιβάσει το επίπεδο τάσης, και αφού η ΧΤ περάσει μέσω ενός ειδικού κιβωτίου που περιέχει ασφάλειες και όργανα προστασίας, ηλεκτρική ενέργεια ρέει πλέον στο δίκτυο ΧΤ. Το μεγαλύτερο πρόβλημα στους εναέριους Υ/Σ είναι τα σφάλματα και οι βλάβες που προκαλούνται λόγω των καιρικών φαινομένων και συνεπώς απαιτούν συχνή συντήρηση. [8]



Εικόνα 1.6.1 Εναέριος Υ/Σ ΜΤ/ΧΤ - Μετασχηματιστής στηριζόμενος σε ένα στύλο



Εικόνα 1.6.2 Εναέριος Υ/Σ ΜΤ/ΧΤ - Μετασχηματιστής στηριζόμενος σε 2 στύλους



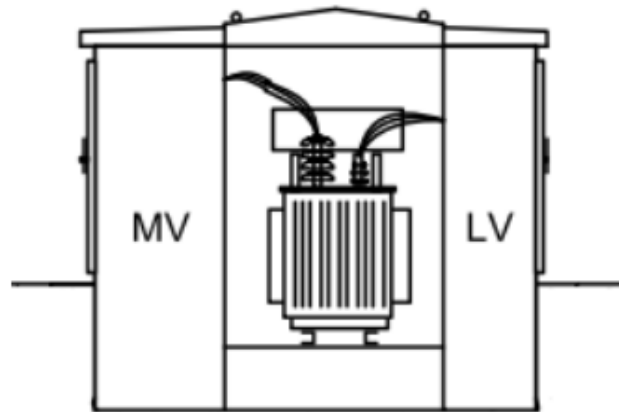
Εικόνα 1.6.3 Εναέριος Υ/Σ ΜΤ/ΧΤ - Επίγειος Μετασχηματιστής

1.6.2 Επίγειοι Υποσταθμοί ΜΤ/ΧΤ

Αυτοί οι υποσταθμοί τοποθετούνται πάνω από το έδαφος, με σκοπό να εξυπηρετήσουν μεγάλες ηλεκτρικές ισχείς ή για διάφορους άλλους λόγους, όπως ασφάλεια. Μπορεί να είναι κλειστοί ή ανοιχτοί, ενώ τοποθετούνται σε αυτά τα σημεία για να εξυπηρετήσουν διάφορα δίκτυα, είτε πρόκειται για υπόγεια είτε για εναέρια. Επίσης, πρέπει να σημειωθεί ότι στην περίπτωση των στεγασμένων υποσταθμών, αυτοί συνήθως υπάρχουν σε ειδικά διαμορφωμένους χώρους, που έχουν κατασκευαστεί για αυτόν το λόγο. Εκτός από τους μετασχηματιστές, οι εγκαταστάσεις περιλαμβάνουν τα όργανα μέτρησης, τους αυτόματους διακόπτες, τις ασφάλειες και τα αλεξικέραυνα. Εκτός από τους κλασικούς

μονωτήρες ανάρτησης, χρησιμοποιούνται και οι μονωτικοί διακόπτες διέλευσης στους επίγειους υποσταθμούς, οι οποίοι τοποθετούνται στον τοίχο του κτιρίου και στη μία πλευρά τους συνδέεται η γραμμή, ενώ στην άλλη οι ακροδέκτες του μετασχηματιστή, προηγουμένως προστατευμένοι από τα αντίστοιχα συστήματα προστασίας.

Η ψύξη σε αυτούς τους σταθμούς έχει μεγάλη σημασία, γι' αυτό το λόγο άλλωστε υπάρχουν και συστήματα εξαερισμού ή ανεμιστήρες, ώστε σε περίπτωση που οι συνθήκες ψύξης δεν είναι ευνοϊκές να μπορεί να υπάρξει λύση. Για τον έλεγχο, τα διάφορα όργανα έχουν τοποθετηθεί σε εύκολα προσβάσιμους εξωτερικούς χώρους. Πρέπει να σημειωθεί επίσης ότι τα τελευταία χρόνια πολλά από τα μηχανήματα που χρησιμοποιούνται σε τέτοιους υποσταθμούς είναι τοποθετημένα σε κιβώτια, τα οποία χρειάζεται απλώς να συνδεθούν μεταξύ τους. Συνήθως η ισχύς τους είναι μεγαλύτερη από αυτή των εναέριων, ενώ το οικονομικό κόστος τους μικρότερο από αυτό των στεγασμένων.[8]



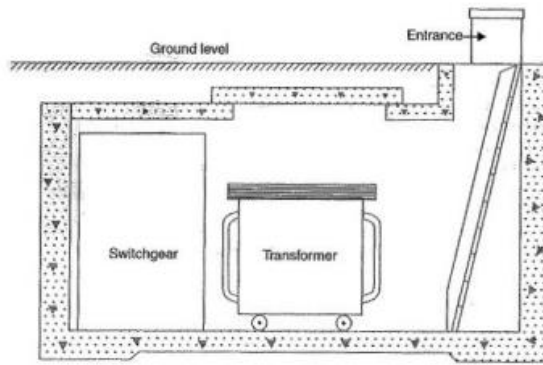
Εικόνα 1.6.4 Επίγειος Υ/Σ Διανομής

1.6.3 Υπόγειοι Υποσταθμοί ΧΤ/ΜΤ

Κατασκευάζονται κάτω από το έδαφος, συνήθως στα κέντρα των πόλεων (όπου δεν είναι δυνατή η εναέρια ή επίγεια κατασκευή), συνήθως κάτω από πεζοδρόμια ή πλατείες. Ένα πρόβλημα επίσης που μπορεί να προκύψει εκτός από το θέμα της ψύξης, είναι η περίπτωση της στεγανότητας. Επίσης, τα όργανα που χρησιμοποιούνται για ελέγχους στους σταθμούς διατηρούνται σε ειδικά κιβώτια, τα οποία είναι αδιάβροχα, με συστήματα εξαερισμούς, και συνήθως βρίσκονται σε εύκολα προσβάσιμη θέση, στο επίπεδο του εδάφους. Αυτοί οι υποσταθμοί προμηθεύουν ηλεκτρισμό σε καταναλωτές μέσης τάσης, οι οποίοι αναλαμβάνουν τη μετατροπή σε χαμηλή τάση. Η ηλεκτρική εταιρεία είναι υπεύθυνη μόνο για τη μεσαία τάση, που φτάνει στον μετασχηματιστή, ενώ είναι βασικό να υπάρχουν τμήματα που μπορούν να απομονωθούν. Αυτοί οι υποσταθμοί χρησιμοποιούνται για λόγους οικονομίας. [7], [8]

Ο χώρος του υποσταθμού ΜΤ αποτελείται από 4 χώρους:

- ✓ Χώρος ΔΕΗ (4.5 m x 3.5 m)
- ✓ Χώρος Μέσης Τάσης
- ✓ Χώρος Μετασχηματιστών (και εφεδρικών)
- ✓ Χώρος Χαμηλής Τάσης



Εικόνα 1.6.5 Υπόγειος Υ/Σ Διανομής

1.7 Δίκτυο Διανομής και Διασυνδέσεις

Η μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας πραγματοποιείται μέσω καλωδίων υψηλής τάσης και, πιο συγκεκριμένα, 66, 150 και 400 kV. Η διανομή της είναι εφικτή μέσω καλωδίων MT (μεταξύ 15 και 20 kV), και έπειτα μέσω καλωδίων XT (400 V). Οι καλωδιακές γραμμές μεταφοράς είναι συνήθως εναέριες. Ωστόσο, όταν υπάρχουν περιοχές με δυνητικές παρενοχλήσεις, όπως αστικά τμήματα, με πολλές κατοικίες ή σε περίπτωση μεταφοράς υποθαλασσίως, τότε είναι απαραίτητα καλώδια υψηλής τάσης, όπως για παράδειγμα τα 400 kV, 150 kV, 66 kV ή 20 kV.

Αξίζει να σημειωθεί ότι στην Ελλάδα, όσον αφορά τη χρονιά του 2010, σύμφωνα με εκτιμήσεις, το συνολικό μήκος των γραμμών μεταφοράς ήταν περίπου 12.200 χιλιόμετρα, ενώ τα 10.900 χλμ. από αυτά αφορούσαν εναέριες γραμμές, τα 250 χιλιόμετρα ήταν υπόγεια καλώδια και τα 150 χιλιόμετρα σχετιζόνταν με υποβρύχια γραμμές. Επίσης, το σύστημα μεταφοράς περιλάμβανε περίπου 517 μετασχηματιστές και αυτομετασχηματιστές (ισχύος 40.353 MVA).

Η βάση του διασυνδεδεμένου συστήματος μεταφοράς αποτελείται από 3 γραμμές διπλού κυκλώματος 400 kV, οι οποίες μεταφέρουν στη Δ. Μακεδονία ηλεκτρική ενέργεια κυρίως από το κύριο ενεργειακό κέντρο παραγωγής, το οποίο αποτελεί το σημαντικότερο για τη χώρα μας. Είναι βασικό να αναφερθεί ότι σε αυτήν την περιοχή παράγεται περίπου το 70% της συνολικής ηλεκτροπαραγωγής ολόκληρης της επικράτειας, η οποία στη συνέχεια μεταφέρεται και σε άλλα μέρη, όπου η κατανάλωση ανέρχεται σε ένα ποσοστό της τάξεως του 65% περίπου. Παράλληλα, το διασυνδεδεμένο σύστημα μεταφοράς συμπεριλαμβάνει γραμμές (υπόγειες και εναέριες), καθώς και υποβρύχια καλώδια 150 kV, που συνδέουν τα νησιά της Δυτικής Ελλάδας με το σύστημα αυτό. Παράλληλα το σύστημα αυτό είναι επίσης συνδεδεμένο με τα γειτονικά ηλεκτρικά συστήματα των Βαλκανικών χωρών, καθώς και πρόσφατα με το ηλεκτρικό σύστημα της Ιταλίας. Πιο συγκεκριμένα, οι διασυνδέσεις με τα γειτονικά κράτη είναι οι εξής [4] :

- ✓ Με Αλβανία: Μια γραμμή μεταφοράς των 400 kV και μια που είναι προς το παρόν ανενεργή των 150 kV
- ✓ Με ΠΓΔΜ: Μια γραμμή μεταφοράς των 400 kV και μια των 150 kV (για την οποία υπάρχουν σχέδια αναβάθμισης σε 400 kV)
- ✓ Με Βουλγαρία: μια γραμμή των 400 kV
- ✓ Με Ιταλία: διασύνδεση συνεχούς ρεύματος περίπου 270km, όπου υπάρχουν 163 υποβρύχια γραμμές, με 400 kV, ισχύος 500 MW.

Το ρεύμα που διανέμεται από τη Δ.Ε.Η. παρέχει ηλεκτρική ενέργεια σε 6,8 εκατ. καταναλωτές περίπου, με διάφορες τάσεις. [8]

1.7.1 Σύνδεση με Κρήτη

Η Κρήτη μετά την ολοκλήρωση της διασύνδεσής της με την Πελοπόννησο (Μικρή Διασύνδεση) αποτελεί μια ιδιαίτερη περίπτωση, καθώς δεν εντάσσεται ούτε στα Μη Διασυνδεδεμένα Νησιά, ούτε στο Ηπειρωτικό Διασυνδεδεμένο Σύστημα. Αποτελεί, δηλαδή, ένα Υβριδικό Μοντέλο, το οποίο χαρακτηρίζεται ως Μικρό Συνδεδεμένο Σύστημα (ΜΣΣ). Στο εν λόγω μοντέλο/καθεστώς, που θα διαρκέσει μέχρι την ολοκλήρωση της δεύτερης διασύνδεσής της με την Αττική (Μεγάλη Διασύνδεση), οπότε το Σύστημα της Κρήτης θα ενσωματωθεί στο Σύστημα Μεταφοράς, τα πάγια και η διαχείριση του Συστήματος ΥΤ της Κρήτης έχουν περιέλθει στην κυριότητα του ΑΔΜΗΕ και, συνεπώς, δεν ανήκουν πλέον στο Δίκτυο Διανομής (ΕΔΔΗΕ). Η διασύνδεση αυτή εκτιμάται ότι θα ολοκληρωθεί σε δύο μέρη. Η πρώτη φάση (Διασύνδεση Κρήτης - Πελοποννήσου ή Μικρή Διασύνδεση) έχει ολοκληρωθεί και έχει ήδη τεθεί σε λειτουργία (ολοκλήρωση έργων καλοκαίρι 2021, επίσημη ημερομηνία έναρξης Υβριδικού Μοντέλου 21.10.2021). Η διασύνδεση της 1ης φάσης δεν επαρκεί να καλύψει το συνολικό φορτίο της Κρήτης και έως την ολοκλήρωση της δεύτερης φάσης, κρίθηκε σκόπιμο να υιοθετηθεί το Υβριδικό Μοντέλο Αγοράς της Κρήτης. Στο εν λόγω Υβριδικό μοντέλο, η Αγορά του Διασυνδεδεμένου Συστήματος «βλέπει» μόνο το συνολικό φορτίο της Μικρής Διασύνδεσης ως μία εικονική Οντότητα με Ευθύνη Εξισορρόπησης (η οποία δύναται είτε να απορροφά ενέργεια από το Σύστημα Μεταφοράς είτε να εγχέει ενέργεια στο ΕΣΜΗΕ), ενώ το πρόγραμμα Κατανομής της Κρήτης είναι ανεξάρτητο από αυτό του Διασυνδεδεμένου Συστήματος. Η δεύτερη φάση (Διασύνδεση Κρήτης-Αττικής ή Μεγάλη Διασύνδεση) αναμένεται να τεθεί σε λειτουργία το 2023. Τα τεχνικά στοιχεία των δύο προαναφερθέντων διασυνδέσεων είναι ως εξής:

- ✓ Τεχνικά στοιχεία Μικρής Διασύνδεσης (Κρήτη - Πελοπόννησος)
 - AC υποβρύχιο καλώδιο 150kV
 - 2x200 MVA
 - 150 km
- ✓ Τεχνικά στοιχεία Μεγάλης Διασύνδεσης (Κρήτη - Αθήνα)
 - DC υποβρύχιο καλώδιο 500 KV DC (τεχνολογία VSC)
 - 2x350 MW
 - 400 km

Κεφάλαιο 2: Περιγραφή βραχυκυκλωμάτων και λειτουργίας της Προστασίας στο Δίκτυο Διανομής

2.1 Εισαγωγή

Βραχυκύκλωμα

Το Βραχυκύκλωμα, γνωστό αλλιώς και ως σφάλμα, περιγράφει την επαφή κάποιου τμήματος από το δίκτυο με το έδαφος ή με γειωμένα άλλα μεταλλικά μέρη των εγκαταστάσεων, καθώς και την επαφή 2 ξεχωριστών τμημάτων αυτού με διαφορετικές μεταξύ του τάσεις. Συνήθως προκαλούν έντονες και ξαφνικές εντάσεις, πολλαπλάσιες της κανονικής λειτουργίας του δικτύου. Είναι προφανές ότι η διέλευση των ρευμάτων βραχυκύκλωσης μέσω των αγωγών μπορεί να προκαλέσει διάφορες καταπονήσεις (πχ., θερμικές), με αποτέλεσμα να υπάρξουν καταστροφικά γεγονότα.

Τα βραχυκυκλώματα διακρίνονται σε μονοφασικά (που είναι και τα πιο συνηθισμένα), αν συμβαίνουν μεταξύ μιας φάσης και του εδάφους, σε διφασικά, όταν υπάρχει επαφή μεταξύ δύο φάσεων, σε τριφασικά με το έδαφος και σε τριφασικά, όταν περιλαμβάνουν τρεις φάσεις. Η μόνωση του αέρα είναι πιο ευάλωτη σε σχέση με την υγρή ή στερεή, η οποία χρησιμοποιείται σε συσκευές ισχύος και καλώδια. Έτσι, στις εναέριες γραμμές μπορεί να υπάρξουν πολύ μεγαλύτερα προβλήματα με τυχόν βραχυκυκλώματα, ενώ τα καλώδια, οι μετασχηματιστές και οι διακόπτες υποφέρουν λιγότερο.

Η μελέτη των βραχυκυκλωμάτων αποσκοπεί στο να υπολογιστούν τα μέγιστα ρεύματα που μπορεί να προκληθούν σε διάφορα σημεία του δικτύου [1].

Υπερτάσεις

Οι υπερτάσεις που μπορεί να εμφανιστούν στο ηλεκτρικό σύστημα αποτελούν μια ανεπιθύμητη ενέργεια, που μοιάζει με αυτή ενός βραχυκυκλώματος. Αν και διαρκούν μικρό διάστημα, ωστόσο έχουν υψηλή τιμή, ενώ διακρίνονται σε ατμοσφαιρικές (εξωτερικές υπερτάσεις) ή λειτουργικές (εσωτερικές υπερτάσεις).

Οι ατμοσφαιρικές υπερτάσεις προέρχονται από διάφορα φαινόμενα της ατμόσφαιρας, όπως είναι για παράδειγμα οι κεραυνοί ή μπορεί να προκληθούν και από άλλους λόγους (π.χ., απηλέκτριση νεφών). Η υπέρταση που δημιουργείται κινείται με ταχύτητα φωτός, προκαλώντας διηλεκτρικές καταπονήσεις στους μονωτήρες των αγωγών, καθώς και στις εγκαταστάσεις των υποσταθμών, όπου οι γραμμές τερματίζουν.

Οι λειτουργικές υπερτάσεις προέρχονται από μεταβολές στα κυκλώματα του ίδιου του συστήματος, με τις κυριότερες να είναι οι υπερτάσεις που προκύπτουν σε περιπτώσεις διακοπών των γραμμών ή ζεύξεων στις γραμμές ή στους μετασχηματιστές κλπ. Μεταξύ αυτών, ξεχωρίζουν περισσότερο οι υπερτάσεις επανάζευξης ή και ενεργοποίησης στις γραμμές μεταφοράς, καθώς και αυτές που προκύπτουν από διακοπή πηνίων και πυκνωτών αντιστάθμισης αέργου ισχύος στο σύστημα. Η μελέτη των υπερτάσεων αποσκοπεί στο να προβλέψει τη μέγιστη φόρτιση που πρέπει να αντέξει η μόνωση του συστήματος (για περιορισμένο χρονικό διάστημα) για να αποφευχθούν δυνητικές βλάβες [1].

ΣΗΕ και ζητήματα Προστασίας

Ένα ηλεκτρικό κύκλωμα πρέπει να προστατεύεται από τυχόν δυσλειτουργίες κατά τη λειτουργία του, ιδιαίτερα από οποιουδήποτε τύπου βραχυκυκλωμάτων, μέσω ενός ειδικού συστήματος προστασίας. Το εν λόγω σύστημα αποτελεί τον κύριο υποστηρικτικό μηχανισμό που εξοπλίζει το κύκλωμα. Το σύστημα προστασίας ενεργοποιείται αυτόματα, όταν ανιχνεύεται ένα βραχυκύκλωμα και προκαλεί την άμεση απενεργοποίηση των πλησιέστερων διακοπών ισχύος. Αυτοί οι διακόπτες απομονώνουν το τμήμα του κυκλώματος που προκάλεσε τη βλάβη (όπως μια γραμμή ή ένας μετασχηματιστής), αποτρέποντας την επέκταση του βραχυκυκλώματος και διακόπτοντας την τροφοδοσία του.

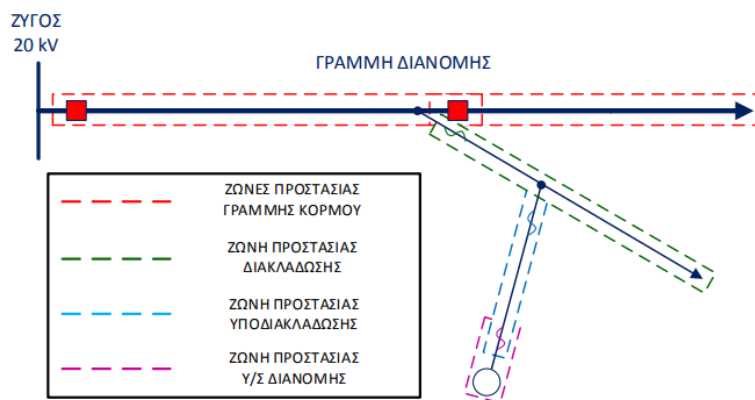
Το σύστημα συμπεριλαμβάνει ηλεκτρονόμους (relay), που μπορούν να αντιληφθούν οποιοδήποτε σφάλμα και να ειδοποιήσουν [1].

Σκοπός της προστασίας των ΣΗΕ

Με τα συστήματα προστασίας των ΣΗΕ, επιδιώκεται:

- ✓ Η διακοπή τροφοδότησης σε περίπτωση προβλημάτων, ώστε να αποφεύγονται ατυχήματα, όπως υλικές ζημιές ή κίνδυνος για την ανθρώπινη ζωή.
- ✓ Η έκταση και η διάρκεια της διακοπής να είναι κατά το δυνατό περιορισμένες, ελαχιστοποιώντας περαιτέρω προβλήματα στο υπόλοιπο δίκτυο [14].

Για να ικανοποιηθούν οι προηγούμενες απαιτήσεις, τα συστήματα προστασίας εφαρμόζονται ως ζεύγη πρωτεύουσας-δευτερεύουσας προστασίας (primary - backup protection). Όλες οι προστατευόμενες περιοχές ενός ΔΔΗΕ, που διαθέτουν κοινή πρωτεύουσα προστασία, συνιστούν μία ζώνη προστασίας, όπως για παράδειγμα ζώνη προστασίας γραμμής κορμού, διακλάδωσης, υποδιακλάδωσης κ.λπ. (Εικόνα 2.1.1). Πιο συγκεκριμένα, η πρωτεύουσα προστασία είναι υπεύθυνη για τη γρήγορη διακοπή παροχής όταν υπάρξει κάποιο λάθος, ενώ η δευτερεύουσα προστασία θα πρέπει να αναλαμβάνει δράση μόνο εάν αστοχήσει η πρωτεύουσα προστασία και έπειτα από χρονικό διάστημα της τάξης των 0.3–0.4 s, γνωστό και ως χρόνος διαβάθμισης. Η εν λόγω διαβάθμιση μεταξύ πρωτεύουσας και δευτερεύουσας προστασίας καλείται κοινώς επιλογική συνεργασία των προστασιών (protection coordination) [13].



2.1.1 Ζώνες Προστασίας ΔΔΗΕ

2.2 Είδη Σφαλμάτων

Με την έννοια του σφάλματος, αναφερόμαστε στο φαινόμενο του βραχυκυκλώματος, το οποίο προκαλείται όταν υπάρχει μειωμένη αντίσταση μόνωσης σε κάποιο μέρος μιας γραμμής. Ωστόσο, ενδέχεται να υπάρξουν και άλλα προβλήματα και σφάλματα, τα οποία μπορεί να μη σχετίζονται με τέτοια θέματα (όπως πχ. ένα βραχυκύκλωμα), παρ' όλα αυτά, οι περιπτώσεις αυτές είναι εξαιρετικά σπάνιες. Τα σφάλματα μπορούν να χωριστούν σε 2 κατηγορίες σε σχέση με το χρονικό διάστημα κατά το οποίο παραμένουν ενεργά στη γραμμή:

- ✓ **Παροδικά Σφάλματα:** Αυτά μπορούν να διορθωθούν και χωρίς να χρειαστεί η επέμβαση ενός ειδικού για τα θέματα αυτά, στο σημείο εμφάνισης του. Αυτά διακρίνονται σε:
 - **Αυτοαποσβεννόμενα:** διορθώνονται εύκολα ακόμη και χωρίς τη διακοπή του δικτύου, όπως για παράδειγμα τόξο, λόγω μήκους.
 - **Κυρίως παροδικά:** Αναφέρονται σε αυτά που μπορούν να εξαφανιστούν με μια στιγμιαία διακοπή λειτουργίας για λιγότερο από ένα δέκατο του δευτερολέπτου.

- **Ημιμόνιμα:** Αφορούν αυτά που απαιτούν μια διακοπή λειτουργίας για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα (<1 δευτερόλεπτο) για να εξουδετερωθούν και να αποκατασταθούν.
- ✓ **Μόνιμα Σφάλματα:** Είναι τα σφάλματα τα οποία παραμένουν στη γραμμή ανεξαρτήτως τροφοδότησης ή μη και απαιτείται επέμβαση εξειδικευμένου προσωπικού για την απόσβεσή τους.

Μετά από στατιστική ανάλυση, έχει διαπιστωθεί ότι μόνο το 10% περίπου των σφαλμάτων στο δίκτυο διανομής, είναι κυρίως μόνιμα σφάλματα. Τα υπόλοιπα διορθώνονται εύκολα και θεωρούνται παροδικά ή ημιμόνιμα, καταλαμβάνοντας το υπόλοιπο 90%. Εκτός από τον χρόνο παραμονής τους, τα σφάλματα διακρίνονται επίσης και ανάλογα τον τρόπο εκδήλωσης τους στις παρακάτω κατηγορίες:

- ✓ **Φασικά Σφάλματα:** είναι εκείνα, που συμβαίνουν μεταξύ δύο (διφασικά, 2Φ) ή τριών (τριφασικά, 3Φ) φάσεων μιας γραμμής. Αποτελούν το 15% των σφαλμάτων των δικτύων διανομής.
- ✓ **Σφάλματα Γης:** εκείνα, τα οποία σχετίζονται με τη στην μειωμένη αντίσταση μονώσεων και ενδέχεται να είναι μονοφασικά, διφασικά ή και τριφασικά. Τα πιο συχνά είναι τα μονοφασικά, καταλαμβάνοντας ένα ποσοστό της τάξεως του 70% των σφαλμάτων στο ΔΔΗΕ. Τα 2Φ σφάλματα γης έχουν πιθανότητα εμφάνισης 10%. Τα 3Φ σφάλματα γης είναι τα πιο σοβαρά σφάλματα και η πιθανότητα εμφάνισης τους είναι 5% [7], [14].

2.3 Συστήματα και Μέσα Προστασίας

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, το σύστημα προστασίας είναι πολύ βασικό, διότι έχει ως στόχο να προστατεύσει το δίκτυο από δυσάρεστες καταστάσεις (π.χ. ανωμαλίες που μπορεί να προκύψουν), κυρίως από βραχυκυκλώματα. Προστασία έναντι βραχυκυκλωμάτων έχουν οι μονάδες παραγωγής, οι μετασχηματιστές, οι γραμμές και οι ζυγοί ΥΤ. Υπάρχουν πολλές κατηγορίες και είδη προστασιών κατά των βραχυκυκλωμάτων, εκ των οποίων αναφέρονται τα πιο βασικά:

- ✓ Προστασία αποστάσεως και υπερεντάσεως
- ✓ Διαφορική προστασία
- ✓ Προστασία συγκρίσεως φάσεων
- ✓ Προστασία Buchholtz
- ✓ Προστασία υπερθερμάνσεως

Οι προστασίες των εναέριων γραμμών μεταφοράς και διανομής ΜΤ περιλαμβάνουν συνήθως και διατάξεις επαναζεύξεως, προς αυτόματη και ταχεία αποκατάσταση της ανωμαλίας. Πρέπει να τονιστεί ότι τα συστήματα αυτά διαθέτουν διάφορα κυκλώματα ελέγχου, τα οποία είναι εγκατεστημένα σε διάφορους σταθμούς και υποσταθμούς. Τα κύρια όργανα προστασίας είναι οι ηλεκτρονόμοι ή ρελαί, που μπορούν να αναγνωρίζουν ένα πρόβλημα και να δίνονται ανάλογες εντολές στους διακόπτες, ώστε να διευθετείται η κατάσταση. Η προστασία του σημαντικότερου εξοπλισμού τους συστήματος, είναι πολλαπλή:

1. Η διακοπή των βραχυκυκλωμάτων μπορεί να γίνει με διακόπτες ισχύος (ή αυτόματοι διακόπτες) στα ηλεκτρικά δίκτυα μεταφοράς και διανομής, ενώ εξαιρούνται τα δίκτυα ΧΤ και ενίοτε ΜΤ, όπου χρησιμοποιούνται ασφάλειες. Κατόπιν αυτού, ο ρόλος, τον οποίο διαδραματίζουν οι διακόπτες στην προστασία του δικτύου και την ταχεία αποκατάσταση του προβλήματος είναι εξαιρετικά ουσιαστικός. Πέρα από το κύριο αυτό καθήκον, οι διακόπτες ισχύος χρησιμοποιούνται και σε άλλες περιπτώσεις, όπως για διάφορους χειρισμούς, όπως για παράδειγμα ζεύξεις γραμμών, μετασχηματιστών κλπ. Το μέγεθος ισχύος βραχυκυκλώσεως, την οποία μπορεί να διακόψει ο διακόπτης και ο χρονοδιακόπτης, αποτελούν δύο βασικά χαρακτηριστικά, που διαθέτουν πολύ ισχυρούς, αλλά και εξαιρετικά πολύπλοκους μηχανισμούς, οι οποίοι βρίσκονται πάντοτε σε κατάσταση ετοιμότητας, παρ' ότι μπορεί να παραμείνουν σε αδράνεια πολύ καιρό. Οι συνολικοί χρόνοι λειτουργίας των διακοπών σήμερα έχουν κατέλθει στην τάξη των 20/40 χιλιοστών του

δευτερολέπτου. Σε αυτό το σημείο είναι βασικό να σημειωθεί ότι ιδιαίτερα για τα μεγάλα δίκτυα, έχει πολύ μεγάλη σημασία ο χρόνος λειτουργίας του διακόπτη, διότι σε σχέση με την ώρα που δέχεται την εντολή, δίνει το χρόνο εκκαθαρίσεως του σφάλματος ή, αντίστοιχα, διατηρήσεως της ανωμαλίας σε αυτό. Στα διασυνδεδεμένα δίκτυα μεταφοράς είναι βασική η ορθή και ταχεία λειτουργία του διακόπτη στη διατήρηση της ευστάθειας του συστήματος μετά από βραχυκύκλωμα. Υπάρχουν διάφοροι τύποι διακοπών, όπως στην περίπτωση υψηλής τάσεως είναι οι διακόπτες πεπιεσμένου αέρος, ελαίου και εξαφθοριούχου θείου.

2. Ένα μέσο προστασίας υπερτάσεων είναι το αλεξικέραυνο. Πρόκειται για συσκευές, μέσω των οποίων εξουδετερώνονται οι ατμοσφαιρικές κυρίως υπερτάσεις, οι οποίες πλήττουν τα δίκτυα μεταφοράς και διανομής. Βρίσκονται κατά κανόνα στους υποσταθμούς για προστασία κυρίως των μετασχηματιστών ισχύος, κοντά στους οποίους και εγκαθίστανται. Τα αλεξικέραυνα ενεργούν σαν μη γραμμικές αντιστάσεις και εμφανίζουν μεγάλη τιμή αντιστάσεως στα ημιτονοειδή ρεύματα της συχνότητας του δικτύου και πολύ μικρή στα ρεύματα κρουστικής μορφής. Η διάσπαση του αλεξικέραυνου είναι ταχύτατη, το κρουστικό ρεύμα εκκενώνεται μέσω του αλεξικέραυνου προς γη και η υπέρταση εξουδετερώνεται. Μετά την εκκένωση το αλεξικέραυνο επανέρχεται αυτόματα στη μονωτική του κατάσταση χωρίς να προκαλέσει διακοπή στη λειτουργία του δικτύου. Βασικά χαρακτηριστικά των αλεξικέραυνων είναι η διηλεκτρική αντοχή τους στη συχνότητα του δικτύου, οι τάσεις διασπάσεως στις κρουστικές υπερτάσεις και τις υπερτάσεις χειρισμών, η πτώση τάσεως κατά μήκος τους κατά τη διάρκεια της εκκενώσεως, καθώς και το κρουστικό ρεύμα, το οποίο μπορεί να εκκενωθεί προς τη γη δια μέσου αυτών [2].

2.4 Έλεγχος λειτουργίας Συστήματος

Ο έλεγχος της λειτουργίας ενός συστήματος βασίζεται στη συλλογή πληροφοριών για την κατάσταση λειτουργίας των διαφόρων τμημάτων αυτού και επιτυγχάνεται κατά διαφόρους τρόπους, οι οποίοι αρχίζουν από την απλή χειροκίνητη επέμβαση και φθάνουν μέχρι το τελειότερο σύγχρονο σύστημα αυτομάτου ελέγχου με ψηφιακούς υπολογιστές. Ο έλεγχος μπορεί να περιλαμβάνει οποιοδήποτε τμήμα του δικτύου, δηλαδή να είναι *τοπικός*, όταν αφορά στη λειτουργία ενός σταθμού παραγωγής ή ενός υποσταθμού, *περιφερειακός*, όταν ελέγχει περιφερειακό τμήμα του συστήματος, πχ ομάδα διασυνδεδεμένων θερμικών σταθμών παραγωγής, ή *κεντρικός*, όταν εκτείνεται σε ολόκληρο το σύστημα παραγωγής και μεταφοράς με τις διασυνδέσεις του προς άλλα συστήματα. Με τον έλεγχο επιδιώκεται η διατήρηση του συστήματος σε συνεχή κατάσταση ομαλής και οικονομικής λειτουργίας. Τα διάφορα στοιχεία που συλλέγονται από το υπάρχον σύστημα και χρησιμοποιούνται για τον έλεγχό του, δίνονται βασικά υπό μορφή αναγγελιών και μετρήσεων. Οι αναγγελίες ειδοποιούν για τις αλλαγές, οι οποίες συμβαίνουν στο σύστημα και οφείλονται κυρίως σε ανωμαλίες. Οι μετρήσεις αφορούν διάφορα μεγέθη της λειτουργίας του συστήματος ήτοι συχνότητα, τάσεις, εντάσεις, ισχείς, γωνίες και γενικά παρέχουν πληροφορίες για την κατάσταση του δικτύου. Οι ενδείξεις των αναγγελιών και των μετρήσεων συγκεντρώνονται στη αίθουσα ελέγχου, ή αίθουσα κατανομής φορτίου, όπως ονομάζεται συνήθως. Από απόψεως δυνατοτήτων ελέγχου, το σύστημα αυτό δύναται να ελέγχεται με τοπική επέμβαση, να είναι τηλεχειριζόμενο (έλεγχος εξ αποστάσεως) ή αυτόματα ελεγχόμενο (αυτόματος έλεγχος). Πρέπει να σημειωθεί, ωστόσο, ότι ο έλεγχος με τοπική επέμβαση είναι ο απλούστερος και χαμηλότερης ποιότητας. Βασίζεται στις τηλεπικοινωνίες του συστήματος, με τις οποίες μεταβιβάζονται οι αναγγελίες και οι μετρήσεις από το δίκτυο προς το κέντρο και οι εντολές χειρισμών από το κέντρο προς το σύστημα. Οι χειρισμοί γίνονται από το προσωπικό εκμεταλλεύσεως απ' ευθείας στο σύστημα ή μέσω τοπικών αιθουσών ελέγχου. Το σύστημα αυτό είναι βραδύ, δεν μπορεί να επιτύχει εύκολα βέλτιστη εκμετάλλευση του συστήματος. Ο έλεγχος εξ αποστάσεως με τηλεχειρισμούς είναι ποιοτικά ανώτερος του προηγούμενου κατά μία βαθμίδα. Εξαρτάται από τις τηλεπικοινωνίες, με τις οποίες πλην των εντολών και μετρήσεων επιτυγχάνονται και οι εξ

αποστάσεως χειρισμοί των διακοπών του συστήματος. Είναι ταχύτερο σύστημα από το προηγούμενο, μπορεί να αποτρέψει περισσότερες γενικές ανωμαλίες και να επιτύχει καλύτερη εκμετάλλευση του συστήματος. Ο αυτόματος έλεγχος είναι ο καλύτερος όλων και συνδυάζει την ασφάλεια λειτουργίας του συστήματος με τα ην οικονομική λειτουργίας του. Ένα σύγχρονο κεντρικό σύστημα αυτόματου ελέγχου εκτελεί επεξεργασία των πληροφοριών, οι οποίες έρχονται από το δίκτυο αυτόματα και με μεγάλη συχνότητα με ψηφιακούς υπολογιστές, εκδίδει ταχύτατα τη βέλτιστη απόφαση σε κάθε περίπτωση ομαλής λειτουργίας ή ανωμαλίας, με κριτήρια την ασφάλεια του συστήματος, την αποκατάσταση της ανωμαλίας και την οικονομική λειτουργία αυτού και προχωράει στην εκτέλεση της αποφάσεως αυτής. Πρόκειται για το πιο πολυσύνθετο και δαπανηρό σύστημα ελέγχου. Ωστόσο, η εξυπηρέτηση, την οποία προσφέρει σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας, είναι και η καλύτερη δυνατή [2].

2.5 Ένταση Βραχυκυκλώσεως

Ένταση βραχυκυκλώσεως ονομάζεται το ρεύμα που διαρρέει την γραμμή, όταν σε αυτή συμβαίνει ένα σφάλμα. Κατά συνέπεια, είναι ιδιαίτερα σημαντικό να υπάρχει ανάλογη και εξειδικευμένη γνώση για ζητήματα βραχυκυκλώματος (όπως για παράδειγμα η έντασή του), σε κάθε σημείο της γραμμής (π.χ., αρχή, μέση, τέλος) κατά τον σχεδιασμό των συστημάτων προστασίας της γραμμής. Η τιμή του ρεύματος βραχυκύκλωσης εξαρτάται επίσης από:

- ✓ τον τύπο του σφάλματος,
- ✓ την ένταση της βραχυκύκλωσης, αλλά και των πηγών που τροφοδοτούν το εκάστοτε σφάλμα,
- ✓ την τάση στο δίκτυο πριν το σφάλμα,
- ✓ την αντίσταση που παρεμβάλλεται μεταξύ της πηγής και του σημείου σφάλματος,
- ✓ την αντίσταση του ίδιου του σφάλματος,
- ✓ τη μέθοδο γείωσης του δικτύου, ειδικά σε περίπτωση σφάλματος γης.

Ωστόσο, για να επιλεγεί κατάλληλος εξοπλισμός προστασίας, αλλά και για να γίνουν οι απαραίτητες ρυθμίσεις, χρειάζεται να υπάρχει η κατάλληλη γνώση όσον αφορά το μέγιστο και το ελάχιστο ρεύμα στην περίπτωση του προβλήματος μιας βραχυκύκλωσης, κατά μήκος των τμημάτων του δικτύου, τα οποία αποτελούν ξεχωριστές ζώνες προστασίας. Με αυτόν τον τρόπο προσδιορίζεται και η περιοχή που υπάρχει το πρόβλημα με τη βραχυκύκλωση σε κάθε ζώνης προστασίας, ενώ εντός αυτής θα πρέπει να εξασφαλίζεται η ταχύτερη λειτουργία της πρωτεύουσας προστασίας, καθώς επίσης και επιλογική συνεργασία με τα μέσα που παρέχουν δευτερεύουσα προστασία. Ο καθορισμός και ο υπολογισμός των μεγίστων κι ελαχίστων ρευμάτων βραχυκύκλωσης γίνεται ξεχωριστά για σφάλματα φάσης και γης ως εξής [13], [14]:

- ✓ Το μέγιστο σφάλμα φάσης προκύπτει σε βραχυκύκλωμα, το οποίο μπορεί να είναι πλήρες ή μεταλλικό (τριφασικό (3Φ)) βραχυκύκλωμα στην αρχή της ζώνης προστασίας, με τιμή ρεύματος:

$$I_{\Phi,max} = \frac{U_n}{\sqrt{3}Z_T} \quad (1)$$

- ✓ Το ελάχιστο σφάλμα φάσης προκύπτει σε 2Φ βραχυκύκλωμα με αντίσταση σφάλματος στο πέρας της ζώνης προστασίας, με τιμή ρεύματος:

$$I_{\Phi,min} = 0.7I_{\Phi,max} \quad (2)$$

- ✓ Το μέγιστο σφάλμα γης για πλήρες 1Φ βραχυκύκλωμα προκύπτει στην αρχή της ζώνης προστασίας, με τιμή ρεύματος:

$$I_{\Gamma,max} = \frac{U_n}{\sqrt{3}Z_G} \quad (3)$$

- ✓ Το ελάχιστο σφάλμα γης προκύπτει για 1Φ βραχυκύκλωμα με αντίσταση σφάλματος 40 Ω στο πέρασ της ζώνης προστασίας, με τιμή ρεύματος:

$$I_{G,min} = \frac{U_n}{\sqrt{3}(Z_G+40)} \quad (4)$$

Στις προηγούμενες σχέσεις, όπου όλα τα ρεύματα υπολογίζονται σε kA, είναι:

U_n η ονομαστική τάση του δικτύου σε kV,

Z_T η συνολική αντίσταση του δικτύου μέχρι το σημείο 3Φ σφάλματος σε Ω, και

Z_G η συνολική αντίσταση του δικτύου μέχρι το σημείο 1Φ σφάλματος σε Ω.

Σημειώνεται ότι οι σχέσεις αυτές ισχύουν για τα συμβατικά ΔΔΗΕ, τα οποία τροφοδοτούν τα φορτία τους ακτινικά με μοναδική πηγή τον Υποσταθμό Μεταφοράς όπου συνδέονται (Y/Σ YT/MT).

2.6 Βασικές Αρχές και Επιθυμητή Λειτουργία της Προστασίας

Κάθε γραμμή διανομής αποτελείται από τα παρακάτω τμήματα (τα οποία φαίνονται και στην Εικόνα 2.1.1), τα οποία προστατεύονται ως εξής:

- ✓ Η γραμμή κορμού προστατεύεται από το διακόπτη ισχύος (Δ/Ι) που βρίσκεται στο σημείο εκκίνησης της γραμμής εντός του υποσταθμού YT/MT. Επιπλέον, υπάρχει εγκατεστημένος διακόπτης αυτόματης επαναφοράς (Δ/ΑΕ) στο μέσο της γραμμής.
- ✓ Όλες οι διακλαδώσεις που υπάρχουν καθώς και οι υποδιακλαδώσεις προστατεύονται από διακόπτες απομόνωσης (Δ/Α) ή ασφαλειοαποξεύκτες (Α/Ζ), οι οποίοι είναι εγκατεστημένοι στην αρχή τους.
- ✓ Οι Y/Σ διανομής προστατεύονται επίσης από Α/Ζ, που είναι τοποθετημένοι είτε πάνω στο ικρίωμα είτε στην αρχή της υποδιακλάδωσης από την οποία τροφοδοτούνται.

Η επιθυμητή λειτουργία των μέσων προστασίας στα ΔΔΗΕ επιτυγχάνεται, όταν πληρούνται οι παρακάτω προϋποθέσεις [6]:

1. Για κυρίως παροδικά σφάλματα σε οποιοδήποτε σημείο του δικτύου δεν είναι καλό να προκαλούνται διάφορα θέματα, όπως για παράδειγμα μόνιμη διακοπή του ρεύματος, άρα και τήξη της ασφάλειας, αλλά δύναται να υπάρχει μια διακοπή η οποία να είναι μόνο στιγμιαία και αυτόματη επαναφορά του διακόπτη ισχύος.
2. Για μόνιμα σφάλματα, είναι θεμιτό να απομονώνονται τα τμήματα. Για παράδειγμα, θα πρέπει να γίνεται απομόνωση της μικρότερης δυνατής περιοχής του δικτύου, ώστε να μην μπλοκάρονται περισσότερα τμήματα. Κάτι που σημαίνει ότι η κύρια προστασία πρέπει σε κάθε περίπτωση να είναι σε λειτουργία, ώστε να διακόπτει την παροχή μόνο σε ένα συγκεκριμένο τμήμα που υπάρχει η βλάβη, έως αυτή να αποκατασταθεί.
3. Επίσης για μόνιμα σφάλματα, η κύρια προστασία θα πρέπει να λειτουργεί μέσα σε ένα καθορισμένο πλαίσιο χρόνου ($\leq 4 - 5$ s), ακόμη και στην περίπτωση ενός πολύ μικρού σφάλματος, ώστε να μειώνεται το ποσοστό για περαιτέρω ζημιές στο δίκτυο.

Η πρώτη απαίτηση δεν δύναται να εξασφαλιστεί, στην πράξη, για μη μόνιμα σφάλματα, διότι χρησιμοποιούνται ασφάλειες βάσει της ονομαστικής ισχύος του μετασχηματιστή (M/Σ) που τήκονται ακαριαία σε περίπτωση βραχυκυκλώματος. Επιπλέον, δεν εξασφαλίζεται και στις περιπτώσεις ημιμόνιμων σφαλμάτων σε κάθε είδους διακλαδώσεις και υποδιακλαδώσεις, που είναι προστατευμένες για θέματα ασφαλείας από Α/Ζ. Αντίθετα, οι άλλες δύο απαιτήσεις είναι απαραίτητο να ικανοποιούνται πάντα.

2.7 Βασικός Εξοπλισμός Προστασίας Δικτύου Διανομής

2.7.1 Διακόπτες ισχύος (Δ/Ι) και Ηλεκτρονόμοι (Η/Ν)

Οι Δ/Ι (Διακόπτες Ισχύος - Circuit Breaker) ή, γνωστοί αλλιώς, και ως αυτόματοι διακόπτες (Α/Δ) διαθέτουν ικανότητα διακοπής ρεύματος βραχυκύκλωσης μέσω ειδικού μηχανισμού, χρησιμοποιούνται για την προστασία των γραμμών κορμού και μεγάλων πελατών ΜΤ στα δίκτυα διανομής, και κατηγοριοποιούνται βάσει του μέσου διακοπής τους. Στο Ελληνικό ΔΔΗΕ χρησιμοποιούνται διακόπτες ΜΤ ελαίου, κενού, καθώς και εξαφθοριούχου θείου (SF6). Τα πεδία Δ/Ι ΜΤ αποτελούνται από τα παρακάτω στοιχεία (μόνο όσα αφορούν την προστασία):

- ✓ τον κυρίως Δ/Ι,
- ✓ τους Μ/Σ έντασης (και Μ/Σ τάσης, αν το απαιτεί η εφαρμογή),
- ✓ τους ηλεκτρονόμους (Η/Ν) που ελέγχουν το διακόπτη.

Τα χαρακτηριστικά των Δ/Ι ΜΤ είναι:

- ✓ η ονομαστική τάση λειτουργίας (24 kV),
- ✓ η ονομαστική ένταση (630 ή 1250 A),
- ✓ η ικανότητα διακοπής έντασης βραχυκύκλωσης (14.5 kA στα 20 kV, συμμετρική ένταση rms),
- ✓ η ικανότητα ζεύξης σε βραχυκύκλωμα (2.5 φορές η ικανότητα διακοπής, τιμή peak),
- ✓ ο ονομαστικός χρόνος διακοπής (≤ 80 ms για ρεύμα 100% της ικανότητας διακοπής),
- ✓ ο ονομαστικός κύκλος λειτουργίας (O-3 min).

Στους παλαιούς υποσταθμούς, οι μετρητές/συσκευές έντασης (Μ/Σ έντασης) τις περισσότερες φορές ενσωματώνονταν στους μονωτήρες που υπάρχουν στον διακόπτη ισχύος (Δ/Ι). Αντίθετα, στους εξελιγμένους υποσταθμούς, στη σύγχρονη κοινωνία, οι μετρητές/συσκευές έντασης εγκαθίστανται σε διαφορετικά σημεία από τον διακόπτη, εντός των πεδίων της μέσης τάσης. Οι μετρητές/συσκευές έντασης δίνουν παροχή ρεύματος και στους ηλεκτρονόμους (Η/Ν), οι οποίοι με τη σειρά τους ελέγχουν τους διακόπτες ισχύος (Δ/Ι). Οι ηλεκτρονόμοι, στα δίκτυα διανομής, είναι εφοδιασμένοι με τα ακόλουθα στοιχεία προστασίας:

- ✓ φάση στιγμιαίας λειτουργίας (ΣΛ), 50P,
- ✓ φάση χρονικής καθυστέρησης (ΧΚ), 51P,
- ✓ υπερέντασης γης ΣΛ, 50G/N,
- ✓ υπερέντασης γης ΧΚ, 51G/N

Στην πλειονότητα των εφαρμογών, οι Δ/Ι εκτελούν αυτόματες επαναφορές για την αποφυγή μόνιμης διακοπής της γραμμής κορμού σε παροδικό σφάλμα, με χρήση είτε ξεχωριστού Η/Ν είτε του Η/Ν υπερέντασης, εάν διαθέτει στοιχείο αυτόματης επαναφοράς [13].



2.7.1 Διακόπτης ισχύος κενού

2.7.2 Διακόπτες Φορτίου (Δ/Φ)

Οι διακόπτες φορτίου εγκαθίστανται για να δίδεται η δυνατότητα χειρισμών υπό κανονική λειτουργία του συστήματος σε εξειδικευμένα συνεργεία. Μπορούν, ανάλογα με τις περιστάσεις, να ανοίξουν ή να κλείσουν τις επαφές τους, όταν διαρρέονται από ονομαστικά ρεύματα και φυσικά από μηδενικά ρεύματα. Ομοίως, με τους Δ/I κατά το άνοιγμα των επαφών τους μπορεί να δημιουργηθεί τόξο και γι' αυτό υπάρχει θάλαμος σβέσης του τόξου, στον οποίο βρίσκεται κάποιο μέσο απόσβεσης. Ανάλογα με το μέσο απόσβεσης διακρίνονται στα παρακάτω είδη διακοπών:

- ✓ Με μονωτικά τοιχώματα
- ✓ Εξαφθοριούχου θείου (SF_6)
- ✓ Κενού

Για την ταχύτερη και καλύτερη εκμετάλλευση του δικτύου ΜΤ, εγκαθίστανται τριπολικό διακόπτες φορτίου (Δ/Φ). Μπορεί να είναι εσωτερικού ή εξωτερικού χώρου και τοποθετούνται σε Y/Σ διανομής εσωτερικού χώρου ή χρηστών ΜΤ (στο υπόγειο δίκτυο), σε στύλο και σε σημείο τέτοιο ώστε να διευκολύνει τους εκάστοτε χειρισμούς για διευθέτηση σφαλμάτων όταν χρειαστεί, όπως για παράδειγμα σε γραμμή ΜΤ ή ακόμη και σε περιπτώσεις που έχουν προγραμματιστεί να γίνουν συντηρήσεις ή επιδιορθώσεις ή έλεγχος (στο εναέριο δίκτυο). Ο χειρισμός τους μπορεί να γίνει είτε από το σημείο του προβλήματος ή από μακριά, μέσα από ειδικό σύστημα ελέγχου, όμως στην περίπτωση αυτή οι διακόπτες πρέπει να είναι τηλεχειριζόμενοι.



Εικόνα 2.7.2 Τηλεχειριζόμενος τριπολικός Δ/Φ εξαφθοριούχου θείου (SF_6) εξωτερικού χώρου.

2.7.3 Διακόπτες Αυτόματης Επαναφοράς

Οι διακόπτες αυτόματης επαναφοράς (Δ/AE), γνωστοί και ως "reclosers," εγκαθίστανται κοντά στο μέσο τμήμα των γραμμών κορμού, όταν οι διακόπτες ισχύος (Δ/I) στις αναχωρήσεις δεν είναι ικανοί να προστατεύσουν ολόκληρο το μήκος τους. Στην περίπτωση αυτών, η λειτουργία τους στηρίζεται στις συνεχόμενες πτώσεις και επαναφορές του διακόπτη, με βασικό στόχο την απομάκρυνση προσωρινών προβλημάτων, ώστε να μην προκληθεί μόνιμη διακοπή της τροφοδοσίας στο δίκτυο. Τα βασικά στοιχεία ενός διακόπτη αυτόματης επαναφοράς είναι ο κύριος διακόπτης ισχύος και το κύκλωμα ελέγχου (υδραυλικό ή ηλεκτρονικό), το οποίο δίνει εντολές λειτουργίας στον διακόπτη ισχύος, ενώ τα χαρακτηριστικά που προδιαγράφονται από τους κατασκευαστές είναι παρόμοια με αυτά των διακοπών ισχύος [13]. Για την ορθή λειτουργία των Δ/AE απαιτείται η ρύθμιση των ακολούθων παραμέτρων (τυπικά εύρη τιμών ρύθμισης Δ/AE στο Ελληνικό $\Delta\Delta\text{ΗΕ}$) [6]:

- ✓ αριθμός επαναφορών (0 ως 3, δηλαδή 1 ως 4 πτώσεις),
- ✓ χρόνος επαναφοράς, δηλαδή το νεκρό διάστημα κατά τη διάρκεια του οποίου ο Δ/AE παραμένει ανοικτός (0.5–2–10–15–30–45–60 s),
- ✓ ελάχιστη ένταση λειτουργίας για σφάλματα γης (25, 50, 70 A) και σφάλματα φάσης (100, 140, 200, 280, 400, 560, 800, 1120 A),

- ✓ καμπύλες ρεύματος-χρόνου στην περίπτωση της Στιγμιαίας Λειτουργίας) και Χρονικής Καθυστερήσης (ΧΚ), φάσης και γης ξεχωριστά (καμπύλες αντιστρόφου χρόνου παρόμοιες με των Η/Ν),
- ✓ αριθμός στιγμιαίων πτώσεων, ξεχωριστά για σφάλματα φάσης και γης εάν απαιτείται (1 ως 4),
- ✓ χρόνος επαναφοράς στην αρχική κατάσταση μετά από έλεγχο (60, 90, 120, 150, 180, 300 s).



(α)



(β)

Εικόνα 2.7.3 (α) Μονοφασικοί Δ/ΑΕ (single-phase recloser) (β) Τριφασικός Δ/ΑΕ με δυνατότητα μονοπολικής πτώσης/επαναφοράς (triple-single recloser)

2.7.4 Ασφάλειες και Ασφαλειοαποζεύκτες (Α/Ζ)

Οι ασφάλειες αποτελούν μέσα προστασίας έναντι βραχυκυκλωμάτων. Οι ασφάλειες που χρησιμοποιούνται στην ΜΤ χωρίζονται σε δύο κατηγορίες (διακρινόμενες βάσει της αρχής της οποίας πραγματοποιείται η σβέση του τόξου κατά τη διακοπή):

- ✓ **Ασφάλειες εκτόνωσης:** χρησιμοποιούνται κυρίως στα εναέρια δίκτυα ΜΤ. Σε περίπτωση υπερέντασης προκλείεται τήξη της ασφάλειας, ενώ παράλληλα εκλύονται αέρια. Αξίζει να τονιστεί ότι αυτά τα αέρια είναι τοξικά και, κατά συνέπεια, οι ασφάλειες εκτόνωσης δεν εγκαθίστανται σε εσωτερικούς χώρους, όπου χρησιμοποιούνται ασφάλειες κόνεως. Επιπλέον, οι ασφάλειες στα εναέρια δίκτυα διανομής συνοδεύονται από μέσο απόζευξης, το οποίο ανοίγει το κύκλωμα σε περίπτωση τήξης (σε σφάλμα) της ασφάλειας.
- ✓ **Ασφάλειες κόνεως:** σε αυτές τις ασφάλειες, μέσα στο φυσίγγιο, γίνεται όπως απαιτείται η σβέση του τόξου διά απαγωγής της θερμότητας.

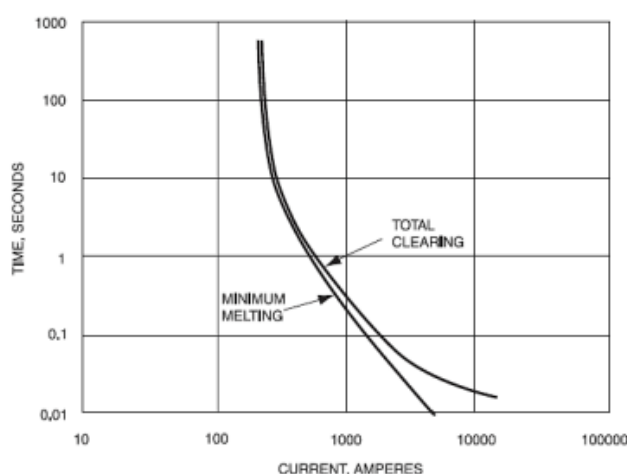


Εικόνα 2.7.4 (α) A/Z MT, (β) Λειτουργία A/Z σε σφάλμα

Τα κύρια χαρακτηριστικά των ασφαλειών MT είναι:

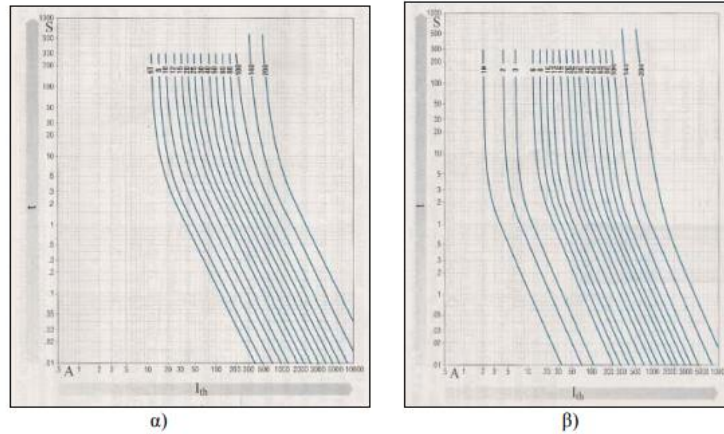
- ονομαστική τάση και ένταση,
- ικανότητα διακοπής έντασης βραχυκυκλώματος (kA) και
- η καμπύλη χρόνου-εντάσεων

Οι κατασκευαστές δημοσιεύουν τη χαρακτηριστική λειτουργία των ασφαλειών τους σε λογαριθμικό διάγραμμα ρεύματος-χρόνου, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα. Σε αυτήν παρατηρείται ότι η χαρακτηριστική λειτουργία των ασφαλειών εκτόνωσης αποτελείται από την καμπύλη «ελαχίστου χρόνου τήξης» (minimum melting time), η οποία αντιστοιχεί στον αντίστοιχο χρόνο που είναι απαραίτητος για να αρχίσει η τήξη του τηκτού, καθώς και στην καμπύλη «πλήρους χρόνου διακοπής» (maximum clearing time), που είναι αποτέλεσμα του αθροίσματος του ελαχίστου χρόνου τήξης και του χρονικού διαστήματος που απαιτείται για τη σβέση του τόξου. Για τις ασφάλειες κόνεως, ο χρόνος εκδήλωσης του τόξου είναι συγκριτικά πολύ μικρότερος συγκριτικά με αυτές εκτόνωσης, και επίσης πρέπει να σημειωθεί ότι η χαρακτηριστική λειτουργία τους αποτελείται από μια μοναδική καμπύλη.



Εικόνα 2.7.5 Τυπική Καμπύλη χαρακτηριστικής Λειτουργίας ασφαλειών εκτόνωσης

Στο Ελληνικό εναέριο ΔΔΗΕ χρησιμοποιούνται ασφάλειες εκτόνωσης «βραδείας τήξης» (τύπου T) και «ταχείας τήξης» (τύπου K) ασφάλειες εκτόνωσης.



Εικόνα 2.7.6 (α) Χαρακτηριστική ασφάλειας εκτόνωσης βραδείας τήξης (τύπου T), και (β) Αντίστοιχα, Ταχείας Τήξης (τύπου K)

2.7.5 Διακόπτες Απομόνωσης (Δ/A)

Για την απομόνωση των διακλαδώσεων του συστήματος σε περίπτωση μόνιμου σφάλματος, χρησιμοποιούμε Διακόπτες Απομόνωσης (Δ/A). Παρόλο που εφαρμόζονται ως μέτρο προστασίας, στην πραγματικότητα δεν λειτουργούν ως αυτόνομο μέσο προστασίας, καθώς δεν διαθέτουν ικανότητα διακοπής ρεύματος βραχυκύκλωσης (η δυνατότητα διακοπής τους είναι ανάλογη με των διακοπών φορτίου).

Συνεπώς, οι Διακόπτες Απομόνωσης (Δ/A) πάντα πρέπει να τοποθετούνται σε συνάρτηση με Διακόπτες Αυτόματης Επαναφοράς ($\Delta/ΑΕ$) ή Διακόπτες Ισχύος (Δ/I), που μετά την απομόνωση του τμήματος, εκτελούν επαναφορές αυτόματα, έτσι ώστε να επαναφερθεί η τροφοδοσία του συστήματος μετά την αποκατάσταση του σφάλματος. Τα βασικά χαρακτηριστικά τους είναι τα ακόλουθα:

- ✓ η ονομαστική τάση (kV) και ένταση (A)
- ✓ το ρεύμα διέγερσης (A), 160% της ονομαστικής έντασης,
- ✓ η ικανότητα διακοπής φορτίου (A).

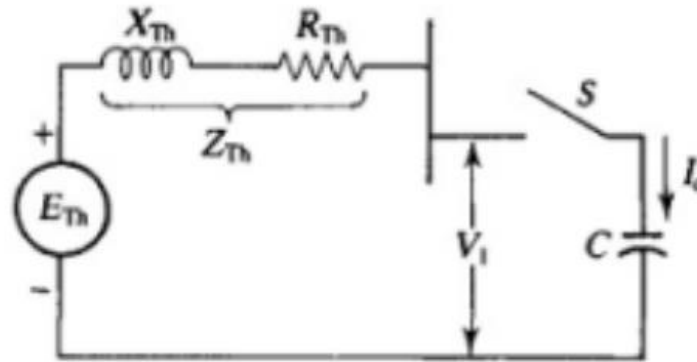
Πολλές φορές, στα δίκτυα διανομής προτιμάται να γίνεται χρήση αντί για A/Z η χρήση Δ/A , καθώς παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα. Για παράδειγμα, δεν απαιτείται αντικατάστασή τους έπειτα από την λειτουργία τους. Επιπλέον, οι Δ/A μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε περιοχές με υψηλά ρεύματα βραχυκύκλωσης, όπου ο συνδυασμός ασφαλειών μεταξύ $\Delta/ΑΕ$ και Δ/I είναι ανέφικτος. Τέλος, οι ΔA δεν υλοποιούν χαρακτηριστική ρεύματος-χρόνου και για το λόγο αυτό προσφέρουν περαιτέρω ασφάλεια σε συσκευές που έχουν μικρές διαβαθμίσεις. Ωστόσο, οι A/Z χρειάζονται ελάχιστη συντήρηση και επιπλέον θεωρούνται πιο αξιόπιστοι.

2.7.6 Συστοιχίες πυκνωτών

Ο Διαχειριστής του ΕΔΔΗΕ προμηθεύεται εναέριες παράλληλες συστοιχίες πυκνωτών (Shunt capacitor banks), που τοποθετούνται είτε σε στύλους ΜΤ διανομής, είτε σε ένα συγκεκριμένο τμήμα που υπάρχουν ζυγοί ΜΤ, μέσω κατάλληλου διακοπτικού εξοπλισμού. Σε μία γραμμή ΜΤ, η συστοιχία πυκνωτών, μεγέθους 900 kVAr, τοποθετείται προς το τέλος του συνολικού μήκους της γραμμής (περίπου στα 2/3) για βέλτιστο αποτέλεσμα. Η λειτουργία τους συνίσταται στην προσθήκη φορτίου, που έχει την ικανότητα να αντισταθμίζει το επαγωγικό φορτίο της γραμμής, μειώνοντας παράλληλα με αυτόν τον τρόπο τυχόν απώλειες.

Κατά τον ίδιο τρόπο συμπεριφέρεται και η συστοιχία πυκνωτών, που τοποθετείται στους ζυγούς ΜΤ, ενός Υ/Σ ΥΤ/ΜΤ, μεγέθους 12 ΜVAr. Επειδή το μέγεθος του χωρητικού φορτίου που συνδέεται είναι σημαντικό και προκειμένου να μην παρατηρούνται μεγάλες διακυμάνσεις τάσης, η ζεύξη-απόζευξη

της συστοιχίας γίνεται βαθμιαία και σε τρία στάδια των 4 MVA. Η αποζεύξιμη συστοιχία πυκνωτών διαθέτει επί πλέον της μόνιμης, που περιγράφεται παραπάνω, ένα τριπολικό ή τρεις διακόπτες (μονοπολικούς), καθώς και έναν κεντρικό πίνακα για έλεγχο, αλλά και ένα Μ/Σ τάσης για την τροφοδότηση αυτού. Ο διακόπτης ή οι διακόπτες της συστοιχίας, με κατάλληλες εντολές που δέχονται από τον πίνακα ελέγχου, με κριτήριο διάφορα χαρακτηριστικά, όπως μεταξύ άλλων την ισχύ ή την τάση της γραμμής, επιτρέπουν τη ζεύξη ή απόζευξη της συστοιχίας. Ο πίνακας ελέγχου είναι ψηφιακού τύπου και μπορεί να επικοινωνεί αμφίδρομα με ένα κέντρο ελέγχου, δίνοντας πληροφορίες στον εκάστοτε χειριστή (π.χ., για την τάση ή ένταση της γραμμής και άλλα στοιχεία, έτσι ώστε να χειριστεί ON - OFF τη συστοιχία, να αλλάξει τις ρυθμίσεις κ.λπ.). [14] [7]



Εικόνα 2.7.7 Μονοφασικό Ισοδύναμο Συστοιχίας Πυκνωτών [14]

2.7.7 Μονοφασικοί Βηματικοί Ρυθμιστές Τάσης

Για να αντιμετωπισθεί η πτώση τάσης στο εναέριο δίκτυο διανομής, λόγω του μεγάλου συνήθως μήκους της αναχώρησης και της αύξησης των φορτίων, από έναν Υ/Σ υποβιβασμού ΥΤ/ΜΤ και πέραν της ρύθμισης της τάσης υπό φορτίο (ΣΑΤΥΦ) του ίδιου του Μ/Σ ΥΤ/ΜΤ, εγκαθίστανται στο δίκτυο διανομής μονοφασικοί βηματικοί ρυθμιστές τάσης 20 kV, 330 A, ονομαστικής ισχύος 660 kVA, ή διερχόμενης τριφασικής ισχύος 10 MVA. Επειδή το τριφασικό σύστημα στη ΜΤ είναι τριών αγωγών, εγκαθίστανται είτε δύο μονοφασικοί ρυθμιστές τάσης σε συνδεσμολογία ανοικτού τριγώνου με μέγιστη τριφασική ρύθμιση της τάσης $\pm 10\%$, είτε τρεις σε συνδεσμολογία κλειστού τριγώνου με μέγιστη τριφασική ρύθμιση της τάσης $\pm 15\%$. Οι ρυθμιστές τάσης είναι βηματικοί δεδομένου ότι μέγιστη ανύψωση ή ελάττωση της τάσης επιτυγχάνεται σε 32 βήματα (16 βήματα για ανύψωση της τάσης και 16 για ελάττωση της τάσης). Σε κάθε βήμα επομένως η τάση σε ένα μονοφασικό ρυθμιστή μεταβάλλεται κατά 5/8% (σύνολο $\pm 10\%$). Ο τρόπος αυτός ρύθμισης της τάσης στο εναέριο δίκτυο διανομής είναι πλέον οικονομικός συγκρινόμενος με άλλους τρόπους ρύθμισης της τάσης, όπως πχ η αντικατάσταση αγωγών με άλλους μεγαλύτερης διατομής, ή η κατασκευή Υ/Σ ΥΤ/ΜΤ για τη μείωση του μήκους της γραμμής ΜΤ. Θεωρητικά θα μπορούσαν να εγκατασταθούν άπειροι ρυθμιστές τάσης, όμως περιορίζονται από την αύξηση του φορτίου της γραμμής. Η εγκατάσταση των ρυθμιστών γίνεται πάνω σε τσιμεντένια βάση στο έδαφος, σε περιφραγμένο χώρο ανάμεσα σε δύο στύλους. Στην κατασκευή προβλέπεται παρακαμπτήριος τριπολικός αποζεύκτης, μονοπολικοί αποζεύκτες εισόδου – εξόδου των ρυθμιστών και Δ/ΑΕ. Σημειώνεται ότι σε περίπτωση ελέγχου ή χειρισμών οι ρυθμιστές πρέπει να βρίσκονται στην θέση N (NEUTRAL) στο δείκτη της θέσης του ρυθμιστή (position indicator) και να ανάβει η αντίστοιχη ενδεικτική λυχνία, διαφορετικά αναπτύσσεται ρεύμα στο βρόχο πολύ υψηλό (της τάξεως kA) [14].

2.8 Επιλογική Συνεργασία

Η συνεργασία αυτή αφορά το μέσο προστασίας, που βρίσκεται πιο κοντά στην περιοχή που έχει διαπιστωθεί ότι έχει εμφανιστεί κάποιο σφάλμα και είναι αυτό που θα χρησιμοποιηθεί για να διακόψει

το ρεύμα πρώτο. Επιπλέον, με την επιλογική συνεργασία εξασφαλίζεται η μη λειτουργία των υπόλοιπων συστημάτων προστασίας, εφόσον το σφάλμα περιοριστεί απ' το εν λόγω μέσο. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται η άμεση διακοπή επικίνδυνων ρευμάτων στον ελάχιστο δυνατό χρόνο, με τον τεχνοοικονομικά πιο συμφέροντα τρόπο και με την διακοπή του μικρότερου δυνατού τμήματος της γραμμής. Είναι βασικό η συνεργασία να εξασφαλίζεται σε όλα αυτά τα μέσα που παρέχουν προστασία της αλυσίδας. Η επιλογική συνεργασία που αναφέρεται στην ευαισθησία του εξοπλισμού προστασίας αξιολογείται πρώτα, κάτι που προκύπτει από το γεγονός ότι οι συσκευές, εκτός από την ικανότητα διακοπής, πρέπει να έχουν αρκετή ευαισθησία, ώστε να διακρίνουν το ρεύμα κανονικής λειτουργίας από το ελάχιστο ρεύμα βραχυκυκλώματος [7].

2.8.1 Επιλογική συνεργασία ασφαλειών

Για την επίτευξη επιλογικής συνεργασίας μεταξύ A/Z σε κύριες και δευτερεύουσες διακλαδώσεις, πρέπει να εξασφαλίζεται ότι ο πλήρης χρόνος διακοπής της πρωτεύουσας προστασίας (protecting fuse) είναι μικρότερος του ελαχίστου χρόνου τήξης της εφεδρικής προστασίας (protected fuse). Με την ικανοποίηση αυτής της συνθήκης, η ασφάλεια που παρέχει εφεδρική προστασία δε θα υποστεί βλάβη για σφάλμα γειτονικής ζώνης.

2.8.2 Επιλογική συνεργασία Δ/ΑΕ-ασφαλειών

Το σχήμα προστασίας που χρησιμοποιεί A/Z για πρωτεύουσα προστασία των διακλαδώσεων και Δ/ΑΕ για πρωτεύουσα προστασία γραμμών κορμού και δευτερεύουσα για τις διακλαδώσεις, συναντάται στη συντριπτική πλειονότητα των δικτύων διανομής παγκοσμίως. Αντικειμενικός στόχος του εν λόγω σχήματος είναι η αποτροπή της τήξης των ασφαλειών για παροδικά σφάλματα στις διακλαδώσεις (fuse-saving scheme), ελαχιστοποιώντας το κόστος και το χρόνο αποκατάστασης της ομαλής λειτουργίας.

Μέγιστη επιλογική συνεργασία μεταξύ Δ/ΑΕ και A/Z γενικώς επιτυγχάνεται με ρύθμιση του Δ/ΑΕ για εκτέλεση δύο στιγμιαίων λειτουργιών (ΣΛ) και δύο καθυστερημένων πτώσεων (ΧΚ), δίνοντας δύο ευκαιρίες σε κυρίως παροδικά σφάλματα να εκκαθαριστούν χωρίς να προκαλέσουν τήξη της ασφάλειας. Επιλογική συνεργασία επιτυγχάνεται σε μικρότερο βαθμό όταν οι Δ/ΑΕ ρυθμίζονται για εκτέλεση μίας στιγμιαίας πτώσης, διότι η εκκαθάριση ενός κυρίως παροδικού σφάλματος ενδέχεται να αποτύχει με μία διακοπή του κυκλώματος. Η λογική αυτή εφαρμόζεται ως επί το πλείστο σε δίκτυα που υπάρχουν εγκατεστημένοι Δ/Α μεταξύ Δ/ΑΕ και ασφάλειας.

2.8.3 Επιλογική συνεργασία Δ/Ι - Ασφαλειών

Το σχήμα προστασίας όπου έχουμε A/Z στην πλευρά φορτίων και τον Δ/Ι στην αναχώρηση της γραμμής (ο οποίος όμως δεν εκτελεί αυτόματες επαναφορές), συνήθως χρησιμοποιείται σε υπόγεια δίκτυα με καλώδια όπου τα σφάλματα είναι μόνιμα. Ωστόσο, εφαρμόζεται και σε εναέρια δίκτυα όπου είναι επιθυμητή η αδιάλειπτη τροφοδοσία για λόγους ποιότητας ισχύος ή παρουσίας κρίσιμων φορτίων. Εάν ο Δ/Ι εκτελεί αυτόματες επαναφορές, ισχύουν οι ίδιες αρχές με το σχήμα Δ/ΑΕ-A/Z.

2.8.4 Επιλογική συνεργασία Δ/Ι - Δ/ΑΕ

Η χρήση ψηφιακών H/N για τον έλεγχο των Δ/Ι στις αναχωρήσεις των γραμμών διανομής διευκολύνει την προσπάθεια επίτευξης επιλογικής συνεργασίας, λόγω της γρήγορης απόκρισης και της στιγμιαίας επαναφοράς (reset) που υλοποιούν, όταν το ρεύμα σφάλματος διακόπτεται από το Δ/ΑΕ. Συνήθης πρακτική είναι η ρύθμιση των H/N έτσι ώστε να επιτυγχάνεται χρόνος διαβάθμισης τουλάχιστον 0.4s όταν ο Δ/ΑΕ διαθέτει υδραυλικό σύστημα ελέγχου (hydraulically controlled), ή 0.3 s όταν χρησιμοποιείται σύγχρονος Δ/ΑΕ που ελέγχεται από ηλεκτρονικό σύστημα (electronically controlled). Αντίθετα, η επιλογική συνεργασία μεταξύ Δ/Ι και Δ/ΑΕ δεν είναι τετριμμένη διαδικασία, όταν ο H/N που ελέγχει το Δ/Ι είναι ηλεκτρομηχανικός (ο οποίος ελέγχει το Δ/Ι), λόγω της επαναφοράς του H/N

κατά τη διάρκεια των νεκρών διαστημάτων μεταξύ πτώσης και αυτόματης επαναφοράς του Δ/ΑΕ. Η καθυστερημένη επαναφορά μπορεί να προκαλέσει ανεπιθύμητη λειτουργία του Η/Ν και πτώση του Δ/Ι πριν προλάβει ο Δ/ΑΕ να αναλάβει δράση. Ένας αξιόπιστος εμπειρικός κανόνας είναι:

$$t_{REL} \geq 2t_{REC} \quad (5)$$

όπου, REL t είναι ο χρόνος λειτουργίας του Η/Ν, ενώ REC t ο ανάλογος χρόνος του Δ/ΑΕ, σε όλο το εύρος των ρευμάτων βραχυκύκλωσης εντός της ζώνης προστασίας του Δ/ΑΕ.

2.8.5 Επιλογική συνεργασία Δ/ΑΕ - Δ/ΑΕ

Η επιλογική συνεργασία δύο ή περισσότερων διαδοχικών Δ/ΑΕ σε μία γραμμή διανομής επιτυγχάνεται με εξασφάλιση επαρκούς χρόνου διαβάθμισης, μεταξύ πρωτεύουσας και δευτερεύουσας προστασίας. Πρόκειται για μία ιδιαίτερη περίπτωση, από την οποία μπορεί να προκύψει ταυτόχρονη λειτουργία διαδοχικών Δ/ΑΕ ή ακόμη και ανεπιθύμητη πτώση Δ/ΑΕ για μόνιμο σφάλμα εκτός της ζώνης προστασίας του, όταν ο Δ/ΑΕ πλησίον του σφάλματος εκτελεί αργές πτώσεις. Ο τρόπος προσέγγισης και αντιμετώπισης των εν λόγω προκλήσεων εξαρτάται από την τεχνολογία των Δ/ΑΕ.

Τα ηλεκτρονικά συστήματα ελέγχου Δ/ΑΕ μπορούν να αντιμετωπίσουν αποτελεσματικά τις προηγούμενες προκλήσεις, λόγω του στοιχείου επιλογικής αλληλουχίας λειτουργιών (sequence coordination) που διαθέτουν. Συγκεκριμένα, ο Δ/ΑΕ που παρέχει δευτερεύουσα προστασία ανιχνεύει και μετράει τις στιγμιαίες πτώσεις του Δ/ΑΕ στα κατάντη του δικτύου, χωρίς να δίνει σήμα για πτώση, και εν συνεχεία μεταβαίνει σε λειτουργία με χρήση του στοιχείου ΧΚ το οποίο είναι ρυθμισμένο με χρονική διαβάθμιση. Έτσι, δίνεται η ευκαιρία στον Δ/ΑΕ πλησίον του σφάλματος να λειτουργήσει πρώτος σε μόνιμο σφάλμα, επιτυγχάνοντας παράλληλα αδιάλειπτη τροφοδοσία του υγιούς μέρους του δικτύου καθώς αποτρέπονται οι στιγμιαίες διακοπές του Δ/ΑΕ στα ανάντη.

Κεφάλαιο 3: Περιγραφή βασικών εννοιών γειώσεων στο δίκτυο διανομής.

3.1 Εισαγωγή

Τα Δίκτυα Διανομής που τροφοδοτούν τις εσωτερικές εγκαταστάσεις πρέπει να πληρούν κάποιες προϋποθέσεις, οι οποίες αποβλέπουν:

- ✓ στην προστασία των ατόμων από τις αναπτυσσόμενες βηματικές τάσεις και τάσεις επαφής
- ✓ στην προστασία με ειδικές κατασκευές για προστασία από κεραυνοπληξία
- ✓ στην εξασφάλιση της ομαλής λειτουργίας του ηλεκτρικού κυκλώματος

Ο Κανονισμός Εσωτερικών Ηλεκτρικών Εγκαταστάσεων προβλέπει δύο βασικές μεθόδους προστασίας των ατόμων από τάσεις επαφής, την ουδετέρωση και την άμεση γείωση. Η επιλογή της μεθόδου προστασίας που εφαρμόζεται σε μια περιοχή αποτελεί αρμοδιότητα του Διανομέα Ηλεκτρικής Ενέργειας [16].

3.2 Η Γείωση

Το σύστημα γείωσης αφορά ένα συνδυασμό που αποτελείται από διάφορους τύπους γειωτών, οι οποίοι μπορεί να είναι ομοειδείς ή μη, καθώς και από μία σειρά από εξαρτήματα, τα οποία είναι απαραίτητα για τη μεταξύ τους στήριξη, αλλά και σύνδεση. Η γείωση αφορά τη σύνδεση ενός ηλεκτρικού κυκλώματος ή μιας συσκευής με τη γη ή με αγωγίμο σώμα τέτοιου μεγέθους που να μπορεί να συμπεριφέρεται όπως η γη. Βασικός σκοπός της είναι η διατήρηση του δυναμικού της γης ή του αγωγίμου σώματος στους αγωγούς που συνδέονται μ' αυτό. Είναι βασικό να τονιστεί σε αυτό το σημείο ότι η σύνδεση αγωγιμότητας με το έδαφος επιτυγχάνεται με το ανάλογο σύστημα γείωσης κάθε φορά, κάτι που γίνεται με τοποθέτηση αγωγών και ηλεκτρόδια ή αλλιώς γειωτές.

Το ηλεκτρικό ρεύμα ακολουθεί πάντα μία τυπική διαδρομή και, πιο συγκεκριμένα, αυτή με την χαμηλότερη συνολική αντίσταση, καθώς ρέει προς το σημείο με το χαμηλότερο δυναμικό. Το δυναμικό του εδάφους θεωρείται μηδενικό κατά σύμβαση και η αντίσταση του εδάφους θεωρείται προσεγγιστικά μηδενική. Όμως, όταν παρουσιάζονται διάφορα σφάλματα στο σύστημα από διάφορους λόγους, όπως από κεραυνικά ή άλλα ρεύματα, για παράδειγμα, τότε δημιουργούνται προβλήματα όπως για π.χ. πέφτει η τάση και υπάρχουν κίνδυνο για τους ανθρώπους που βρίσκονται σε κοντινή απόσταση, όπως να πάθουν ηλεκτροπληξία.

3.2.1 Ορισμοί

- ✓ Αγωγός γείωσης είναι η αγωγίμη σύνδεση μεταξύ του σημείου του υπό γείωση κυκλώματος και του γειωτή [22].
- ✓ Ο Γειωτής (ή, αλλιώς, το ηλεκτρόδιο γείωσης) αναφέρεται στο σύστημα ενός ή περισσότερων αγωγών (απλών ηλεκτροδίων ή ενός συγκεκριμένου γεωμετρικού σχήματος) που τοποθετούνται κάτω από την επιφάνεια του εδάφους σε κάποιο βάθος. Μέσω αυτού του συστήματος επιτυγχάνεται η αποτελεσματική διάχυση του ρεύματος σφάλματος ή του κεραυνικού ρεύματος στο έδαφος. Τα ηλεκτρόδια γείωσης πρέπει να πληρούν κυρίως δύο κρίσιμες προϋποθέσεις. Πρώτον, να έχουν υψηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα, ώστε να μπορούν να διευκολύνουν την ροή του ρεύματος. Δεύτερον, να είναι ανθεκτικά και σταθερά στον χρόνο, προκειμένου να αντέχουν τα φαινόμενα διάβρωσης και καταπόνησης. Συνήθως, οι γειωτές κατασκευάζονται από υλικά όπως χαλκός ή χάλυβας, ο οποίος μπορεί να είναι ανοξείδωτος ή επιψευδαργυρωμένος [22] [18].

- ✓ Τα μεταλλικά αντικείμενα είναι τα διάφορα εξαρτήματα (αγώγιμα) συσκευών ή διαφόρων εγκαταστάσεων, που δεν έχουν κάποιο είδος μόνωσης από το περιβάλλον και δεν έχουν τάση προς γη στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας. Ωστόσο, όταν προκύπτει κάποιο φαινόμενο διαρροής ή υπερπήδησης ή άλλου προβλήματος στις μονώσεις, μπορεί να βρεθούν υπό τάση προς το έδαφος. Στους Υ/Σ ΜΤ/ΧΤ, χαρακτηρίζονται ως "μεταλλικά ΜΤ" τα διάφορα εξαρτήματα που ενδέχεται να έχουν τάση από τη ΜΤ προς το έδαφος, όπως είναι για παράδειγμα, οι πίνακες ΜΤ, το κέλυφος ενός μετασχηματιστή ή οι μεταλλικές συσκευές που στηρίζουν στοιχεία ΜΤ, όπως είναι για παράδειγμα το ασφαλειοκιβώτιο της ΧΤ [16].
- ✓ Αντίσταση γείωσης ενός ηλεκτροδίου ή ενός συστήματος γείωσης είναι η αντίσταση προς τη λεγόμενη «άπειρη γη» [16].
- ✓ Άπειρη γη είναι ένα σημείο που βρίσκεται σε άπειρη απόσταση από τον γειωτή και είναι επίσης στην επιφάνεια του εδάφους. Η τάση της άπειρης γης θεωρείται ίση με μηδέν και το σημείο αυτό λαμβάνεται ως σημείο αναφοράς των δυναμικών [22].
- ✓ Τάση σφάλματος (δυναμικό προς άπειρη γη) ορίζεται ως η διαφορά δυναμικού που εμφανίζεται μεταξύ ενός τμήματος της εγκατάστασης (το οποίο λόγω του σφάλματος βρίσκεται υπό τάση) και ενός απομακρυσμένου σημείου με μηδενικό δυναμικό.
- ✓ Συνολική αντίσταση γείωσης του ουδέτερου σε ένα δίκτυο ΧΤ μπορεί να υπάρξει από τη μέτρηση του Υ/Σ ΜΤ/ΧΤ που τροφοδοτεί το δίκτυο αυτό. Όταν υπάρχουν δίκτυα (π.χ. ΧΤ), που γειτονεύουν, σε κοινούς τερματικούς στύλους με γέφυρα ουδέτερου, η συνολική αντίσταση γείωσης του ενός δικτύου λαμβάνει υπόψη τις γειώσεις του άλλου, προϋποθέτοντας τουλάχιστον δύο κοινούς τερματικούς στύλους των δικτύων αυτών. Σε περίπτωση περισσότερων γειτονικών δικτύων (όπου ισχύει η παραπάνω προϋπόθεση), λαμβάνονται υπόψη οι γειώσεις εκείνες που αφορούν δίκτυα γειτονικά, ενώ πρέπει να σημειωθεί ότι ακόμη κι αν υπάρχει ένα τρίτο δίκτυο, το οποίο δεν θεωρείται ως άμεσα γειτονικό, τότε αυτό δεν λαμβάνεται καθόλου υπόψιν [16].
- ✓ Οι ανεξάρτητες γειώσεις αφορούν δύο συστήματα γείωσης, που αν συνδεθούν με έναν αγωγό με αμελητέα αντίσταση μεταξύ τους, τότε εμφανίζουν αντίσταση γείωσης που είναι ίση με την περίπτωση που υπάρχουν δύο γειώσεις. Αξίζει να ειπωθεί ότι ανεξάρτητες θεωρούνται δύο γειώσεις όταν μεταξύ τους υπάρχει αρκετή απόσταση, έτσι ώστε η μία να μην εμποδίζει τη ροή της άλλης. Πιο συγκεκριμένα, στην πράξη, όταν τα συστήματα αυτά έχουν έκταση μέχρι το πολύ 3 μέτρα (δηλαδή, όταν θεωρούνται μικρά), τότε χαρακτηρίζονται ως ανεξάρτητα όταν τα τμήματά του που βρίσκονται κάτι από το έδαφος απέχουν πάνω από 10 μέτρα και δεν είναι μονωμένα. [16]
- ✓ Το πλέγμα γείωσης αποτελείται από μία σειρά από αγώγιμα σώματα (όπως ταινίες, πλάκες, σωλήνες, σύρματα και άλλα παρόμοια), τα οποία είναι συνδεδεμένα μεταξύ τους και τοποθετούνται εντός του εδάφους, με τέτοιο τρόπο ώστε να διασφαλίζεται η αποτελεσματική γείωση [16].
- ✓ Αποτελεσματική γείωση, είναι αυτή, η οποία δεν αφήνει περιθώρια για επικίνδυνες τάσεις να εκδηλωθούν σε όλη την περιοχή που καλύπτει, ακόμη και στη δυσμενέστερη περίπτωση ροής ρεύματος σφάλματος προς τη γη [16].
- ✓ Η απλή γείωση αφορά την προστασία από σφάλματα που μπορεί να προκύψουν προς τα στοιχεία που είναι μεταλλικά και συνδέονται με αυτή. Σε περίπτωση σφάλματος, όλες οι δικλείδες ασφαλείας που υπάρχουν, λειτουργούν για απόζευξη, αλλά δεν μπορεί να εξασφαλιστεί ότι δεν θα υπάρξουν επικίνδυνες τάσεις επαφής ή βηματικές τάσεις κατά το χρονικό διάστημα μέχρι να γίνει η απόζευξη [16].
- ✓ Βηματική τάση είναι η διαφορά δυναμικού στην επιφάνεια του εδάφους που εφαρμόζεται μεταξύ των ποδιών ενός ατόμου, το οποίο κάνει βήμα ανοίγματος 1m (και βρίσκεται μέσα στο πεδίο ροής του ρεύματος σφάλματος), ενώ δεν έχει επαφή με κάποιο στοιχείο το οποίο είναι γειωμένο και δεν έρχεται σε επαφή με άλλο γειωμένο αντικείμενο [18] [19].

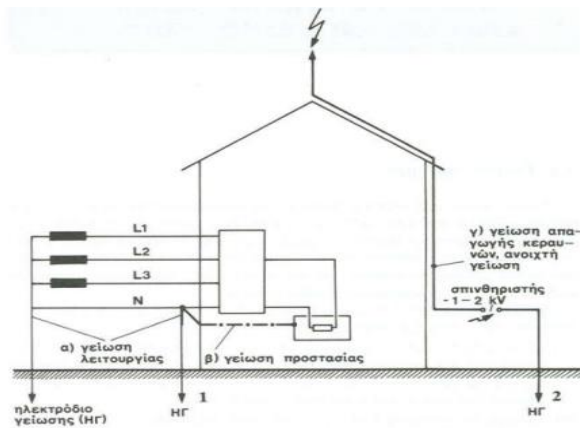
- ✓ Τάση επαφής αποτελεί το μέρος της τάσης σφάλματος, το οποίο δέχεται το ανθρώπινο σώμα όταν γεφυρώνει δύο σημεία, ένα μεταλλικό και το έδαφος ή μεταξύ τους δύο μεταλλικά σημεία. Είναι δηλαδή η τάση που αναπτύσσεται μεταξύ χεριού και ποδιού ή μεταξύ των δύο χεριών του ατόμου [22].

3.3 Βασικές Μέθοδοι Γείωσης Δικτύων Διανομής

Ανάλογα με τον λειτουργικό τους σκοπό οι γειώσεις σε μια ηλεκτρική εγκατάσταση διακρίνονται σε τρεις βασικούς τύπους, παρ' όλο που στην πράξη δύνανται να συνυπάρχουν σ' ένα σύστημα γείωσης. Οι τύποι αυτοί είναι οι ακόλουθοι:

1. Η γείωση λειτουργίας είναι αναγκαία για να μπορέσει ένα σύστημα να λειτουργήσει σωστά και ομαλά χωρίς προβλήματα, σε μια εγκατάσταση, καθώς αποτελεί αναπόσπαστο μέρος του. Συναντάται κυρίως στη γείωση του ουδέτερου κόμβου του μετασχηματιστή υποβιβασμού ΜΤ/ΧΤ και στην περιοχή γείωσης του ουδέτερου ενός δικτύου ΧΤ. Επίσης, μπορεί να συμπεριλαμβάνει και άλλες αντιστάσεις, όπως επαγωγικές, ωμικές και άλλες για να περιορίζεται το ρεύμα ενός βραχυκυκλώματος. Η γείωση λειτουργίας μπορεί να είναι
 - a. άμεση (χωρίς άλλες αντιστάσεις) ή
 - b. έμμεση (που μπορεί να συμπεριλαμβάνει και άλλες αντιστάσεις, πχ. επαγωγικές κ.ά.).[7] [18]
2. Η γείωση ασφαλείας χρησιμοποιείται για να μπορέσει να γίνει η μεταφορά ηλεκτρικών φορτίων (τα οποία είναι στατικά), ενώ σε αυτή δεν συγκαταλέγονται η περίπτωση των αλεξικέραυνων, που αξίζει να σημειωθεί ότι χρησιμοποιούνται για την απευθείας ανταλλαγή ηλεκτρικών φορτίων ανάμεσα σε ένα ηλεκτρικό νέφος και στη γη [7].
3. Η γείωση προστασίας σχετίζεται με την αγωγή σύνδεση με τη γη των μεταλλικών τμημάτων σε μια εγκατάσταση (ηλεκτρική). που δεν ανήκουν στο κύκλωμα λειτουργίας. Αυτά περιλαμβάνουν τις γειώσεις των μεταλλικών μερών των εγκαταστάσεων, τα μεταλλικά περιβλήματα των μετασχηματιστών και των διακοπών, τους μολύβδινους μανδύες και τους οπλισμούς των καλωδίων, καθώς και τα μεταλλικά μέρη του εξοπλισμού των εναέριων γραμμών κ.λπ. Σκοπός είναι να αποτραπούν επικίνδυνες τάσεις σε αυτά τα τμήματα. Στον αγωγό γείωσης προσπαθούμε να επιτύχουμε όσο είναι εφικτό πιο μικρή αντίσταση, ώστε να διέλθει το μέγιστο ρεύμα. Η γείωση προστασίας μπορεί να υλοποιηθεί με
 - a. άμεση γείωση: η αγωγή σύνδεση των μεταλλικών περιβλημάτων των συσκευών με το ηλεκτρόδιο γείωσης
 - b. με ουδέτερωση: αγωγή σύνδεση με τον ουδέτερο αγωγό

Πρέπει να σημειωθεί ότι αυτή η γείωση είναι απαραίτητα να χρησιμοποιείται κάθε φορά σε κάθε εγκατάσταση, ώστε να παρέχεται ασφάλεια για τον άνθρωπο, από τυχόν κινδύνους που μπορεί να προκύψουν από τις τάσεις [7] [18].



Εικόνα 3.3.1 Τύποι Γειώσεων σε οικιακή εγκατάσταση

3.3.1 Άμεση Γείωση

Η άμεση γείωση αφορά την αγωγή σύνδεση των μεταλλικών στοιχείων που πλαισιώνουν τις συσκευές με το ηλεκτρόδιο γείωσης. Σύμφωνα με τους κανονισμούς, δίκτυα με άμεση γείωση ονομάζονται τα δίκτυα TT (όπου το πρώτο T αναφέρεται στη γείωση του ουδέτερου κόμβου και το δεύτερο αφορά στην άμεση γείωση). Τα μεταλλικά περιβλήματα, τα οποία πρέπει να σημειωθεί ότι προστατεύονται από κοινή διάταξη προστασίας πρέπει να συνδέονται με κοινό ηλεκτρόδιο γείωσης. Το ίδιο ισχύει και για συσκευές, με τις οποίες ο άνθρωπος μπορεί να έρθει σε επαφή ταυτόχρονα [7]. Πρακτικά μπορεί να εφαρμοστεί κάτι τέτοιο, μόνο στην περίπτωση που στην περιοχή υπάρχει εκτεταμένο μεταλλικό δίκτυο υδρεύσεως, γιατί μόνο όταν τα υπό γείωση αντικείμενα των εσωτερικών ηλεκτρικών εγκαταστάσεων συνδεθούν με ένα τέτοιο δίκτυο, είναι δυνατή, χωρίς υπέρογκες δαπάνες, η επίτευξη των πολύ χαμηλών αντιστάσεων γείωσης που χρειάζονται, για να είναι αποτελεσματική η προστασία, όπως καθορίζει ο Κανονισμός Εσωτερικών Ηλεκτρικών Εγκαταστάσεων (ΚΕΗΕ). Ωστόσο, τα τελευταία χρόνια, έχει αρχίσει η χρησιμοποίηση μη μεταλλικών σωλήνων ύδρευσης, που πλέον αρχίζουν να χρησιμοποιούνται και σε περιπτώσεις αντικαταστάσεων όπου μπορεί να έχει προκύψει κάποιο πρόβλημα, αλλά και όπου κρίνεται απαραίτητο να γίνουν ανάλογες επεκτάσεις του δικτύου ύδρευσης. Επίσης, χρησιμοποιούνται σε ορισμένες περιπτώσεις σύνδεσμοι που διακόπτουν την ηλεκτρική συνέχεια των μεταλλικών σωλήνων. Για τους λόγους αυτούς, η εφαρμογή της άμεσης γείωσης και ιδιαίτερα η διατήρηση των συνθηκών, που απαιτεί ο ΚΕΗΕ, για να είναι πραγματικά αποτελεσματική, είναι εξαιρετικά αντιοικονομική. Για τον λόγο αυτό, έχει αποφασιστεί η εφαρμογή της ουδετέρωσης να γίνεται σταδιακά, ώστε να μην υπάρχει ιδιαίτερη επιβάρυνση, και στις περιοχές που ήδη υφίσταται η άμεση γείωση [16].

3.3.2 Ουδετέρωση

Σύμφωνα με τους κανονισμούς, η ουδετέρωση αφορά τα λεγόμενα δίκτυα TN (όπου το T αναφέρεται στη γείωση του ουδέτερου κόμβου χωρίς πρόσθετες αντιστάσεις και το N στη σύνδεση των μεταλλικών στοιχείων με το ουδέτερο). Ο αγωγός προστασίας συνδέεται με τον ουδέτερο πριν από τον μετρητή. Πρέπει να σημειωθεί ότι όπου υπάρξει βλάβη στην μόνωση, τότε, το κύκλωμα κλείνει μέσω του ουδέτερου αγωγού. Επειδή, ωστόσο, ο ουδέτερος αγωγός συνδέεται με το κέλυφος των συσκευών, είναι απαραίτητο το δυναμικό του να μην αποκτήσει σε καμία περίπτωση επικίνδυνες τιμές ούτε κατά τη διάρκεια της κανονικής λειτουργίας, ούτε σε περίπτωση σφαλμάτων.

Στο παρελθόν, η ΔΕΗ είχε επιλέξει την ουδετέρωση ως κύρια μέθοδο γείωσης. Ωστόσο, πλέον, παρουσιάζονται σημαντικά πλεονεκτήματα στην περίπτωση της άμεσης γείωσης. Έτσι, η εφαρμογή της άμεσης γείωσης απαιτεί πρακτικά την ύπαρξη ενός εκτεταμένου μεταλλικού δικτύου ύδρευσης, στο οποίο είναι βασικό να γίνουν ανάλογα έργα, όπως να συνδεθούν και να γειωθούν μεταλλικά

αντικείμενα, έτσι ώστε να επιτευχθούν, σύμφωνα με τον κανονισμό, οι ανάλογες μικρές αντιστάσεις γείωσης, χωρίς υπερβολικό κόστος. Ωστόσο, η αλλαγή του δικτύου ύδρευσης σε πλαστικούς σωλήνες ακύρωσε τα πλεονεκτήματα αυτής της μεθόδου γείωσης. [7]

3.3.3 Προβλέψεις του ΚΕΗΕ

Για να μπορεί να γίνει χρήση ουδετέρωσης σε μια εγκατάσταση, σύμφωνα με το άρθρο 19 του ΚΕΗΕ, πρέπει να τηρούνται σε κάθε περίπτωση τα παρακάτω:

1. Σε περίπτωση βραχυκυκλώματος χωρίς αντίσταση, μεταξύ αγωγού φάσεως και ουδέτερου, σε κάποιο σημείο του δικτύου ΧΤ, η ένταση του βραχυκυκλώματος πρέπει να είναι ίση ή, ακόμη, και μεγαλύτερη από το τριπλάσιο της ονομαστικής εντάσεως της ασφάλειας, που υπάρχει πριν από το σημείο του βραχυκυκλώματος.
2. Ο ουδέτερος αγωγός είναι βασικό να ακολουθεί κάποιες προδιαγραφές, όπως να έχει την ανάλογη μηχανική αντοχή αλλά και την αγωγιμότητα που απαιτείται. Οι μόνες εξαιρέσεις που μπορούν να γίνουν είναι στα καλώδια και, πιο ειδικά, για τους εναέριους αγωγούς, διατομής 70mm^2 ή και μεγαλύτερης.
3. Ο ουδέτερος αγωγός πρέπει να είναι γειωμένος:
 - a. Στον Υ/Σ ΜΤ/ΧΤ
 - b. Στα εναέρια δίκτυα, στα τέρματα των κυρίων γραμμών και των διακλαδώσεων και οπωσδήποτε κάθε 300m. Ωστόσο, στο ενδεχόμενο που χρειαστεί να προστεθούν επιπλέον γειώσεις, αυτές γειώσεις είναι βασικό να τοποθετηθούν ομοιόμορφα σε όλο δίκτυο, ώστε να μην υπάρχουν διαφορές.
 - c. Στο άκρο κάθε παροχής, είτε αυτή είναι εναέρια είτε υπόγεια και πάντα προς την πλευρά του καταναλωτή.
4. Η συνολική αντίσταση γείωσης του αγωγού αυτού πρέπει να είναι μικρότερη ή ίση των 10 Ω. Σε περίπτωση που υπερβαίνει το 1 Ω, τότε απαιτείται επιπλέον μια ξεχωριστή γείωση, ανεξάρτητη από τον ουδέτερο, και επιπλέον σε αυτήν πρέπει να συνδεθούν τα "μεταλλικά ΜΤ" του Υ/Σ (δηλαδή, τα εξαρτήματα που μπορούν να έχουν τάση προς τη γη, όπως κελύφη μετασχηματιστών κ.λπ.). Ειδικά για εναέριους Υ/Σ ΜΤ/ΧΤ που έχουν ξύλινους στύλους, το όριο αυτό αυξάνεται σε 2 Ω, διότι διαφορετικά η υπερπήδηση είναι αδύνατη. Αν υπάρχει κάποιο υπόγειο καλώδιο, πρέπει να διευκρινιστεί ότι το όριο δεν αυξάνεται, δηλαδή παραμένει στο 1 Ω. Σε γενικές γραμμές, είναι εφικτή η κοινή γείωση διαφόρων στοιχείων, όπως ουδέτερου με μεταλλικά, μέχρι 2 Ω, αρκεί να υπάρχουν οι ανάλογες ασφάλειες (μέχρι 30 Α). Όταν σε ένα Υ/Σ ΜΤ/ΧΤ καταλήγουν υπόγεια καλώδια ΜΤ ή ΧΤ με μανδύα από μέταλλα, με μήκος πάνω από 1.200 μ., τότε μπορεί να γίνει κοινή γείωση μέσω της σύνδεσης μεταξύ ουδέτερου και μεταλλικών στοιχείων (ΜΤ), διότι σε αυτή την περίπτωση ο μεταλλικός μανδύας εξασφαλίζει την απαιτούμενη χαμηλή τιμή αντίστασης. Όταν πραγματοποιείται ξεχωριστή γείωση για τα "μεταλλικά ΜΤ", η τιμή της αντίστασης είναι βασικό να είναι κάτω από τα 40 Ω.
5. Ο ουδέτερος, πρέπει να διασφαλίζεται ότι συνεχίζεται χωρίς καμία διακοπή, από οποιοδήποτε στοιχείο, είτε αυτό είναι διακόπτης (αυτόματος ή μη) ή κάποιο άλλο στοιχείο, όπως καλώδιο και άλλα και γενικά πρέπει να λαμβάνονται όλα τα μέτρα.

Όσον αφορά στον ΚΕΗΕ πρέπει να τονιστεί ότι αυτός διευκρινίζει ότι απαγορεύεται η συνύπαρξη των δύο μεθόδων προστασίας, είτε πρόκειται για άμεση, είτε για ουδετέρωση, εκτός αν η συνολική αντίσταση γείωσης του ουδέτερου είναι μικρότερη ή ίση με 1Ω.

3.4 Γείωση του Δικτύου Διανομής

Αυτή πραγματοποιείται με τους παρακάτω τρόπους:

1. **Το Δίκτυο ΧΤ** αποτελείται από τέσσερις αγωγούς (δηλαδή, 3 φάσεις και 1 γειωμένος ουδέτερος). Παράλληλα, χρησιμοποιείται η ουδετέρωση (γνωστή αλλιώς και ως μέθοδος TN), σύμφωνα με την οποία όλα τα εκτεθειμένα μέρη των εγκαταστάσεων των οικείων συνδέονται με τον ουδέτερο αγωγό του δικτύου. Ο αγωγός αυτός γειώνεται σε έναν υποσταθμό (όπου έχει εγκατασταθεί και ο ανάλογος μετρητής για τον κάθε χρήστη), καθώς και σε άλλα σημεία των γραμμών ΧΤ. Σε ορισμένες περιοχές, στην ευρύτερη περιφέρεια της Αττικής και σε κάποιες περιοχές που δεν δύναται η εφαρμογή της ουδετέρωσης χρησιμοποιείται η μέθοδος μέθοδος TT (δηλαδή, της άμεσης γείωσης), κατά την οποία τα εκτεθειμένα μέρη των ηλεκτρικών εγκαταστάσεων των χρηστών, συνδέονται με το σύστημα γείωσης, αλλά όχι με τον ουδέτερο αγωγό. Πρέπει να τονιστεί ότι αυτός ο ουδέτερος αγωγός γειώνεται σε ανάλογα σημεία κατά μήκος των γραμμών ΧΤ και σε υποσταθμούς ΜΤ/ΧΤ.
2. Ο ουδέτερος κόμβος των μετασχηματιστών των Υ/Σ ΥΤ/Μ, στο **Δίκτυο ΜΤ** γειώνεται με μια ωμική αντίσταση, προκειμένου να μειωθεί η ένταση σφάλματος προς τη γη σε 1000 Α κατά μέγιστο. Ωστόσο υπάρχουν οι παρακάτω εξαιρέσεις:
 - a. Τα παλαιά δίκτυα (όπως για παράδειγμα των 6,6 kV και 22 kV)
 - b. Στους τοπικούς σταθμούς παραγωγής των νησιών που δεν είναι συνδεδεμένα
 - c. Το Δίκτυο ΜΤ κάποιων νησιών που δεν είναι διασυνδεδεμένα, όπου ο ουδέτερος κόμβος ΜΤ είναι αγείωτος.
3. **Στο Δίκτυο ΥΤ** σε όποιο σημείο υπάρχει ουδέτερος κόμβος, σε όλες τις περιπτώσεις αυτός είναι απευθείας γειωμένος.

3.5 Είδη Ηλεκτροδίων Γείωσης

Υπάρχουν διάφοροι τύποι γειωτών, η τιμή της αντίστασης των οποίων εξαρτάται τόσο από την ειδική αντίσταση του εδάφους, όσο και από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά τους.

3.5.1 Το ημισφαιρικό ηλεκτρόδιο

Αποτελεί τον απλούστερο τύπο ηλεκτροδίου για θεωρητική προσέγγιση. Από τον ορισμό της αντίστασης προκύπτει ότι η αντίσταση γείωσης ενός σφαιρικού ηλεκτροδίου είναι:

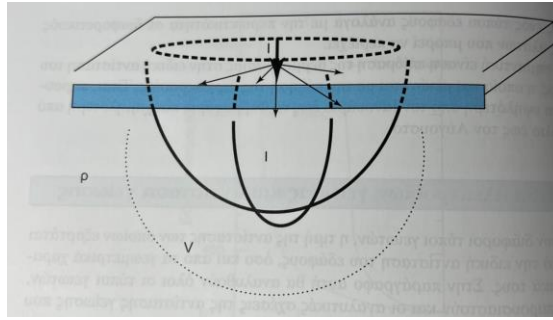
$$R = \frac{\rho}{2\pi r} (\Omega) \quad (6)$$

(το ρ αφορά την ειδική αντίσταση του μέσου (Ωm), ενώ το r , την ακτίνα της σφαίρας).

Η ειδική αντίσταση ρ του χώματος σε Ωm δίνει την αντίσταση σε Ω ενός κύβου χώματος πλευράς 1m [22].



Εικόνα 3.5.1 Τρισδιάστατη γεωμετρία με εξαιρετικά καλής ποιότητας διαίρεση του χώρου. Ημισφαιρικό Ηλεκτρόδιο ακτίνας $r=0.5m$ [26].



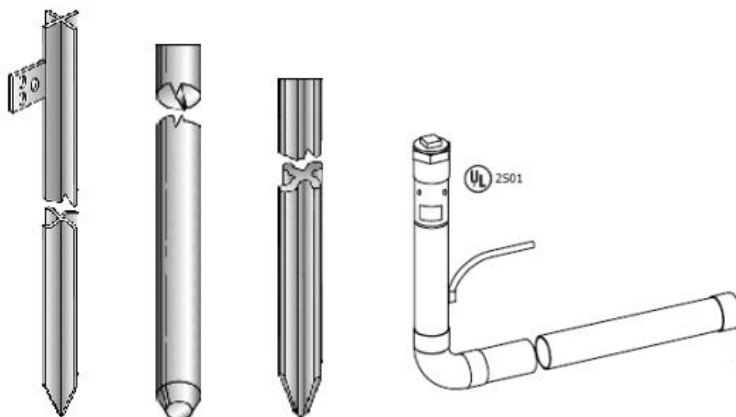
3.5.2 Ημισφαιρικό ηλεκτρόδιο θαμμένο σε ομογενές έδαφος [22].

Διευκρινίζεται σε αυτό το παράδειγμα το σφαιρικό ηλεκτρόδιο δεν έχει κάποια πρακτική έννοια χρήσης, απλώς χρησιμοποιείται για λόγους πληρότητας.

3.5.2 Ο ραβδοειδής γειωτής

Ο ραβδοειδής γειωτής είναι ένας από τους πιο απλούς και οικονομικούς τύπους ηλεκτροδίων γείωσης. Η αντίσταση γείωσης R την οποία έχει ένας ραβδοειδής γειωτής μήκους l , ο οποίος βρίσκεται σε έδαφος με ειδική αντίσταση ρ , μπορεί να υπολογιστεί αν προσομοιαστεί με ελλειψοειδές εκ περιστροφής, έχοντας έναν άξονα ίσο με την διάμετρο του d . Επομένως προκύπτει:

$$R = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \left(\frac{4l}{d} \right) \quad (7)$$



Εικόνα 3.5.3 Μορφές Γειωτών Ράβδου. [27]

Η αντίσταση γείωσης μίας και μόνο ράβδου δεν είναι αρκετά χαμηλή, με αποτέλεσμα να χρησιμοποιείται ένας αριθμός ράβδων συνδεδεμένων παράλληλα, με αρκετά μεγάλη απόσταση μεταξύ τους, ώστε να μην υπάρχουν περιοχές αλληλοεπικάλυψης.

Ο ραβδοειδής γειωτής έχει διάφορα μήκη, που κυμαίνονται από 1 έως 3m και καρφώνεται στο έδαφος κατακόρυφα. Πιο συγκεκριμένα, το κάτω μέρος του έχει μορφή ακίδας, προκειμένου η τοποθέτησή του με σφυρί να γίνεται πιο εύκολα. Επίσης, οι γειωτές αυτοί φέρουν στο επάνω μέρος τους σπείρωμα, ώστε να επιτρέπεται η επιμήκυνσή τους, αν χρειαστεί, με χρήση ορειχάλκινων συνδέσμων. Πρέπει να επισημανθεί, ωστόσο, ότι η τιμή της αντίστασης του γειωτή αυτού μειώνεται με την αύξηση του μήκους του, ενώ η διατομή του δεν παίζει ιδιαίτερο ρόλο. Ανάλογα με το είδος της διατομής του διακρίνεται σε ραβδοειδή κυκλικής διατομής και σε ραβδοειδή διατομής σταυρού. Συνήθως, οι ραβδοειδείς γειωτές είναι κατασκευασμένοι από επιχαλκωμένο χάλυβα, με πάχος επιχάλκωσης τουλάχιστον 250μm ή από χάλυβα επιψευδαργυρωμένο, με ανάλογα πάχος που ξεκινά

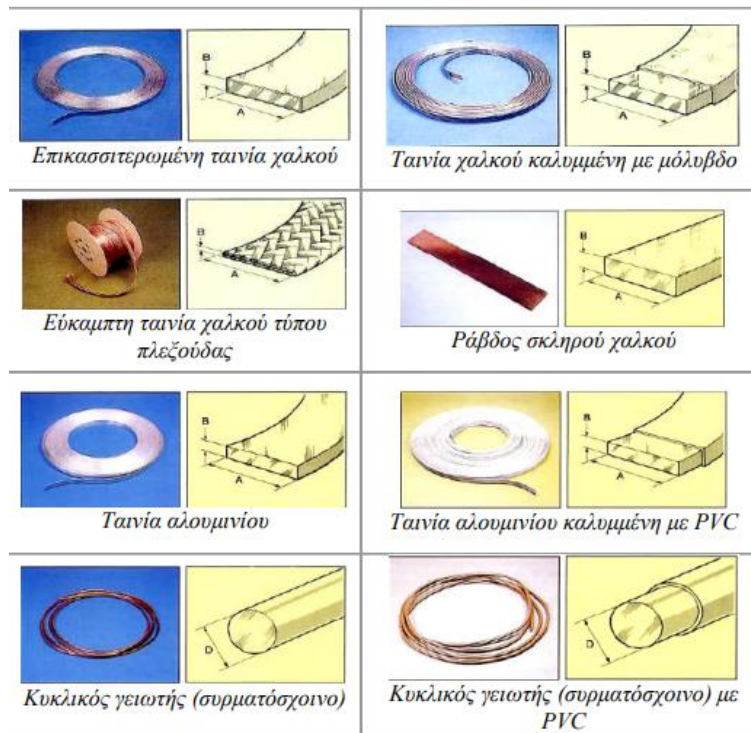
από τα 50mm, έτσι ώστε κατά την τοποθέτησή τους σε σκληρά εδάφη να μπορούν να μην έρχεται σε επαφή ο χάλυβας με το έδαφος, κάτι το οποίο οδηγεί στην γρήγορη διάβρωση του γειωτή [22].

3.5.3 Γειωτής Ταινίας

Ο γειωτής ταινίας αποτελείται από ταινία διαφόρων διαστάσεων που έχει κατασκευαστεί από χαλκό ή χάλυβα. Το βάθος τοποθέτησης του προτιμάται να είναι μεταξύ 70 και 100cm, έτσι ώστε να υπάρχει υγρό έδαφος. Η τοποθέτησή της μπορεί να γίνει με διάφορους τρόπους, όπως π.χ. ευθύγραμμα ή κυκλικά (γειωτής βρόχου), γύρω από την εγκατάσταση. Η τιμή της αντίστασης γείωσης μειώνεται όσο μεγαλώνει το μήκος της ταινίας που βρίσκεται εντός του εδάφους. Οι συνήθεις διαστάσεις της ταινίας χαλκού είναι $30 \times 2mm^2$, $30 \times 3mm^2$, $40 \times 3mm^2$. Οι συνήθεις διαστάσεις της χαλύβδινης ταινίας είναι $30 \times 2mm^2$, $30 \times 3.5mm^2$, $40 \times 4mm^2$, με επιφάνεια 500 ή 300 gr/m^2 .

Ένας γειωτής ταινίας, πλάτους d και μήκους l , ο οποίος βρίσκεται σε έδαφος με ειδική αντίσταση ρ και έχει τοποθετηθεί κάθετα στο έδαφος, έχει αντίσταση R [22]:

$$R = \frac{\rho}{\pi l} \ln \left(\frac{2l}{d} \right) \cong \frac{2\rho}{l} \quad (8)$$

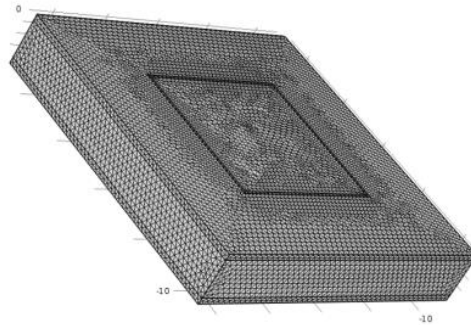


Εικόνα 3.5.4 Διάφορα είδη γειωτών ταινίας [27].

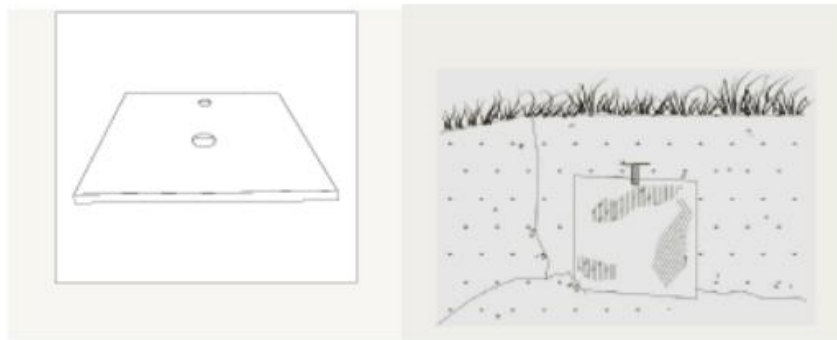
3.5.4 Γειωτής Πλάκας

Πρόκειται για πλάκα, σε σχήμα παραλληλογράμμου, διαφόρων διαστάσεων (ελάχιστο 500mm x 500mm x 2mm), που βυθίζεται κάτω από το έδαφος, σε βάθος που φτάνει τουλάχιστον τα 100cm, ενώ η επιφάνειά της είναι κατακόρυφη. Υπάρχουν, επίσης, γειωτές πλάκας, οι οποίοι ενταφιάζονται στο έδαφος με την επιφάνειά τους οριζόντια, όπως επίσης και γειωτές με σχήμα κυκλικού δίσκου αντί παραλληλόγραμμου. Πρέπει να σημειωθεί ότι όσο οι διαστάσεις της πλάκας μεγαλώνουν, αλλά και όσο πιο βαθιά ενταφιάζεται κάτω από την επιφάνεια της γης, τόσο η τιμή της αντίστασης αυτής μειώνεται. Κατασκευάζεται από χαλκό (με 2mm ελάχιστο πάχος) ή γαλβανισμένο χάλυβα (3mm ελάχιστο πάχος). Συνηθίζεται να χρησιμοποιείται παραπάνω από ένας γειωτής για καλύτερη συμπεριφορά της γείωσης και για να επιτευχθεί μικρότερη αντίσταση γείωσης. Πρέπει να υπάρχει και

η ανάλογη απόσταση μεταξύ των πλακών, η οποία πρέπει να φτάνει τουλάχιστον στα τρία μέτρα, ενώ η σύνδεσή τους γίνεται με χάλκινο αγωγό διατομής 50mm^2 για χάλκινες πλάκες ή με χαλύβδινο θερμά επιψευδαργυρωμένο αγωγό διαμέτρου 10mm για χαλύβδινες πλάκες. Αποφεύγεται η συνύπαρξη στον ίδιο χώρο των γειωτών από διαφορετικά υλικά, ώστε να μην υπάρχει ηλεκτροχημική διάβρωση.



Εικόνα 3.5.5 Τρισδιάστατη Γεωμετρία με παράλληλες πλάκες [26]



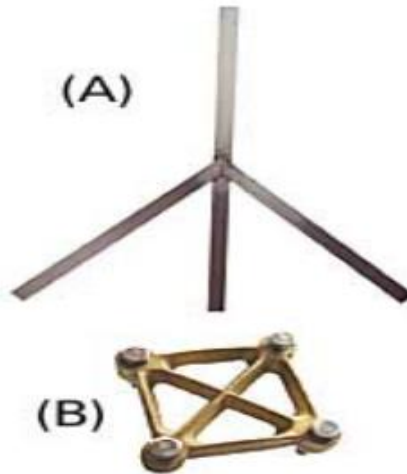
Εικόνα 3.5.6 Εγκατάσταση Γειωτή Πλάκας [27].

Η αντίσταση γείωσης για τετράγωνο γειωτή πλάκας τοποθετημένο κατακόρυφα σε έδαφος με ειδική αντίσταση ρ και με μήκος πλευράς a , είναι:

$$R = \frac{\rho}{4.5a} \quad (9)$$

3.5.5 Ακτινικός Γειωτής

Ο ακτινικός γειωτής είναι κατασκευασμένος από ράβδους ή ταινίες, που δημιουργούν μορφή αστέρα, διαθέτοντας πολλές ακτίνες. Ο αστέρας τοποθετείται οριζόντια και το βάθος τοποθέτησής του κάτω από το έδαφος ξεκινά από τα 0.8m . Ο ακτινικός γειωτής κατασκευάζεται από γαλβανισμένο ή επιχλωμένο χάλυβα, καθώς και από χαλκό.



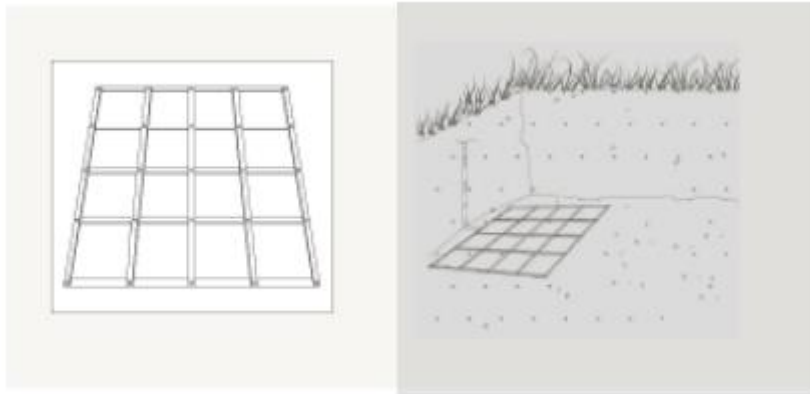
Εικόνα 3.5.7 Ακτινικός γειωτής [27]

Η αντίσταση γείωσης ενός ακτινικού γειωτή (με 4 ακτίνες), με μήκος ακτίνας l , ο οποίος είναι τοποθετημένος σε βάθος h και σε έδαφος ειδικής αντίστασης ρ δίνεται από τη σχέση [22]:

$$R = \frac{r}{8\pi l} \left[\ln \left(\frac{4l^2}{dh} + 2.9 - 2.12 \frac{h}{l} + 2.6 \frac{h^2}{l^2} \right) \right] \quad (10)$$

3.5.6 Γειωτής Πλέγματος

Ο γειωτής αυτός είναι στην ουσία ένα πλέγμα, που αποτελείται από ταινίες, διαθέτοντας ανοίγματα σε τετράγωνα σχήματα (με πλάτος που κυμαίνεται από 0.5- έως 2m) και τοποθετείται σε βάθος κάτω από το έδαφος που κυμαίνεται μεταξύ μισού και ενός μέτρου. Πρέπει να σημειωθεί ότι το βασικό προτέρημα αυτού του πλέγματος είναι ότι οι βηματικές τάσεις στο έδαφος, πάνω από το πλέγμα, είναι αμελητέες. Δηλαδή, όσο μικρότερα είναι τα ανοίγματα, τόσο μικρότερες είναι και αυτές οι τάσεις.



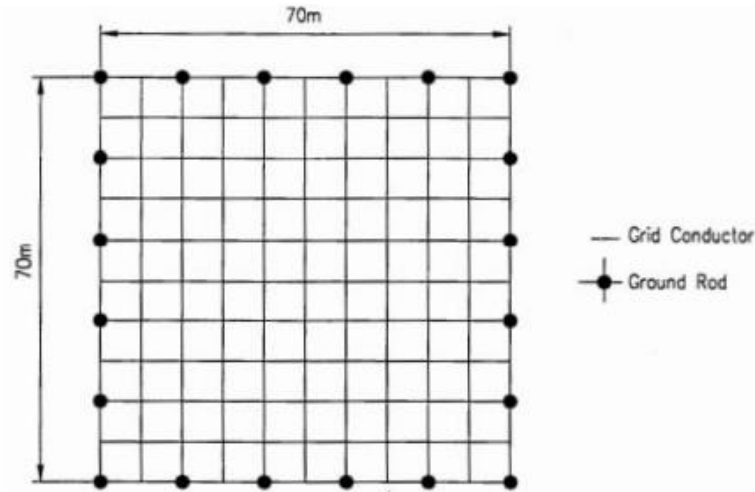
Εικόνα 3.5.8 Γειωτής πλέγματος [27].

Η αντίσταση γείωσης για πλέγμα σε βάθος 0.5-1m, με μήκος l και πλάτος b , το οποίο βρίσκεται σε έδαφος με ειδική αντίσταση ρ , είναι [22]:

$$R \cong \frac{\rho}{2D} + \frac{\rho}{l_{tot}} \cong \frac{\rho}{2D}, \text{ όπου } D = \sqrt{\frac{4bl}{\pi}} \quad (11)$$

Το πλέγμα αυτό αποτελείται από μια ομάδα ηλεκτροδίων γείωσης, που είναι τοποθετημένα οριζόντια και θαμμένα στο έδαφος. Αυτά τα ηλεκτρόδια συνδέονται μεταξύ τους, έτσι ώστε να παρέχουν σε συγκεκριμένες περιοχές κοινή γείωση για πολλών ειδών συσκευές, όπως μεταλλικές, ηλεκτρικές και άλλες.

Συνήθως, τα συστήματα αυτά έχουν δύο τύπους γείωσης: τα πρωτεύοντα είναι ειδικά σχεδιασμένα για τους σκοπούς της γείωσης, ενώ υπάρχουν και τα βοηθητικά, τα οποία αποτελούνται από διάφορες υπόγειες μεταλλικές κατασκευές που χρησιμοποιούνται για άλλους σκοπούς και δεν σχετίζονται άμεσα με τη γείωση. Τα τυπικά πρωτεύοντα ηλεκτρόδια γείωσης περιλαμβάνουν πλέγματα γείωσης, ράβδους γείωσης, φρεάτια γείωσης και άλλα, ενώ τα βοηθητικά συμπεριλαμβάνουν μεταξύ άλλων μεταλλικές κατασκευές (υπόγειες) και ράβδους που εγκαθίστανται στο σκυρόδεμα. Μερικά τυπικά πλέγματα γείωσης αποτελούν ορθογώνια, τετράγωνα, τρίγωνα, L - μορφής, T - μορφής κλπ.[7].



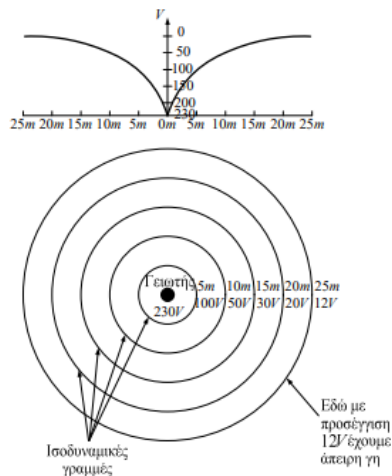
3.5.9 Τετράγωνο πλέγμα γείωσης με 20 ράβδους γείωσης. [7]

3.6 Αντίσταση Γείωσης

Η αντίσταση γείωσης αναφέρεται σε αυτήν την αντίσταση που εμφανίζεται από το ηλεκτρόδιο γείωσης προς την γη, σε περίπτωση που στο έδαφος δεν υφίστανται άλλα ηλεκτρόδια. Για να διευκολυνθούν οι μετρήσεις, αλλά και για διάφορους άλλους πρακτικούς λόγους, η «άπειρη απόσταση» θεωρείται 5 με 10 φορές μεγαλύτερη από τη μεγαλύτερη διάσταση που μπορεί να έχει ένας γειωτής.

Το δυναμικό αντιστοιχεί στο 2% του δυναμικού της ράβδου, στην απόσταση της άπειρης γης. Όταν ένας γειωτής τεθεί υπό τάση U ($= 100\%$) τότε σε αυτή την περίπτωση δημιουργείται ένα πεδίο ροής και δυναμικού κοντά στην περιοχή του γειωτή. Όσο, όμως, πιο μακρινή είναι η απόσταση από τον γειωτή, τόσο περισσότερο το δυναμικό αυτό μειώνεται. Το διάγραμμα που προσδιορίζει τη σχέση δυναμικού-απόστασης ονομάζεται «χοάνη δυναμικού» του γειωτή. Μέσω αυτής, μπορούμε να υπολογίσουμε τη βηματική με τις τάσεις επαφής Επιπλέον, η χοάνη αυτή δίνει, την περιοχή επίδρασης του γειωτή ή την απόσταση της άπειρης γης.

Όταν το έδαφος είναι ομοιογενές, η χοάνη δεν εξαρτάται από την ειδική αντίσταση του εδάφους. Επιπλέον, η χοάνη δυναμικού χρησιμοποιείται για να εκτιμηθεί το σφάλμα στη μέτρηση της αντίστασης γείωσης. Για παράδειγμα, αν μετρήσουμε την αντίσταση γείωσης του γειωτή (που αναφέραμε παραπάνω) από το ηλεκτρόδιο μέχρι και 25 μέτρα μακριά, τότε η μετρούμενη αντίσταση θα είναι το 95% της πραγματικής.



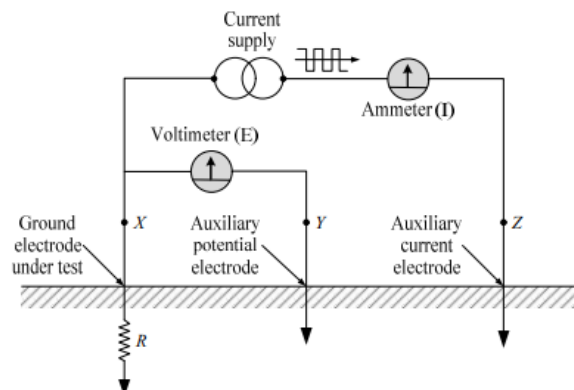
3.6.1 Διάγραμμα δυναμικού - απόστασης [27]

Ο ορισμός της αντίστασης γείωσης, περιγράφεται από τον λόγο της διαφοράς δυναμικού μεταξύ του σημείου σύνδεσης του ηλεκτροδίου και ενός σημείο το οποίο είναι απομακρυσμένο από το σημείο της προς την ένταση του ρεύματος, δηλαδή $R=U/I$ [18].

Η αντίσταση γείωσης του ηλεκτροδίου δεν είναι μια επιφανειακή αντίσταση του ηλεκτροδίου και εκφράζει την ωμική αντίσταση σε σχέση με το έδαφος. Αντιθέτως, αντιπροσωπεύει την αντίσταση που αντιμετωπίζει το ρεύμα, καθώς διαβαίνει από το αγωγικό υλικό του ηλεκτροδίου προς το περιβάλλον έδαφος. Επομένως, μπορεί να θεωρηθεί ως η συνολική επίδραση των απειροστών αντιστάσεων διαβάσεως R_{δ} , που αναπτύσσονται ακτινικά προς την επιφάνεια του ηλεκτροδίου. Κατά συνέπεια, ένα συμπέρασμα που μπορεί εύλογα να διεξαχθεί είναι ότι η αντίσταση γείωσης εξαρτάται από το έδαφος και πιο συγκεκριμένα από την ειδική αντίσταση και είναι αντιστρόφως ανάλογη προς την επιφάνεια επαφής του ηλεκτροδίου με το έδαφος [19].

3.6.1 Μέτρηση της Αντίστασης Γείωσης με τη μέθοδο της Πτώσης Δυναμικού

Η πιο γνωστή, αλλά και αυτή η τεχνική που χρησιμοποιείται περισσότερο για τη μέτρηση της αντίστασης γείωσης, είτε για σημεία γείωσης, είτε για εκτεταμένες γειώσεις, είναι η λεγόμενη μέθοδος της πτώσης δυναμικού (Fall of Potential Method). Παρέχει, με αξιόπιστη ακρίβεια την τιμή της αντίστασης γείωσης και χρησιμοποιείται σε όλα τα είδη εφαρμογών, είτε χρησιμοποιείται ως έχει, είτε με διάφορες παραλλαγές, ανάλογα με τη θέση των ηλεκτροδίων, αλλά και σύμφωνα πάντα με τα διεθνή πρότυπα. Το παρακάτω σχήμα παρουσιάζει τη διάταξη της μεθόδου που χρησιμοποιείται [18]:



3.6.2 Μέθοδος της πτώσης δυναμικού για την μέτρηση της αντίστασης γείωσης. [18]

Αν, για παράδειγμα, έχουμε τρία ηλεκτρόδια: το X (ηλεκτρόδιο γείωσης), το οποίο επιδιώκουμε να μετρήσουμε, το Y (βοηθητικό τάσης) και το Z (βοηθητικό ηλεκτρόδιο ρεύματος). Το Z τοποθετείται σε απόσταση τουλάχιστον πέντε φορές της μεγαλύτερης διάστασης του ηλεκτροδίου X και χρησιμοποιείται για να διέλθει το ρεύμα που εισάγουμε. Επίσης, με αμπερόμετρο γίνεται η μέτρηση της έντασης αυτού του ρεύματος. Για τη μέτρηση του δυναμικού του εδάφους, τοποθετούμε το Y (ηλεκτρόδιο) σε απόσταση ίση με το 62% της απόστασης XZ ή σε απόσταση XZ/2 από το ηλεκτρόδιο X. Για τη μέτρηση της τάσης U_{XY} , γίνεται σύνδεση μεταξύ του βολτομετρικού στοιχείου μεταξύ των X και Y, όπως φαίνεται στον παρακάτω τύπο:

$$R_G = \frac{U_{XY}}{I} \quad (12)$$

Για να εξασφαλιστεί ότι οι περιοχές επιρροής δεν επικαλύπτονται, τότε διεξάγονται δύο επιπλέον μετρήσεις, κάτι που μπορεί να γίνει με τη μετακίνηση του Y, το οποίο μετακινείται κατά περίπου 5 με 7 μ. πιο κοντά προς τη γείωση X, έτσι ώστε σε κάθε περίπτωση οι μετρήσεις να εκτελούνται σε μια περιοχή με σταθερή αντίσταση. Στη συνέχεια, εάν τα αποτελέσματα αυτών των τριών μετρήσεων συμπίπτουν σχεδόν ακριβώς, η τιμή της αντίστασης γείωσης για το ηλεκτρόδιο X υπολογίζεται ως μέσος όρος των τριών τιμών. Αν υπάρχει διαφορά μεταξύ των μετρήσεων, τότε επαναλαμβάνονται οι μετρήσεις με αύξηση μεταξύ των X και Y [18],[19].

Η μέθοδος πτώσης δυναμικού [22]:

- ✓ Δίνει ακριβή αποτελέσματα από 0 Ω έως 1000 Ω.
- ✓ Δεν είναι κατάλληλη για πολύ εκτεταμένα συστήματα γείωσης ή για διασυνδεδεμένα συστήματα γείωσης, γιατί τα βοηθητικά ηλεκτρόδια πρέπει να τοποθετηθούν σε μεγάλες αποστάσεις από το προς μέτρηση σύστημα γείωσης.
- ✓ Σε συστήματα τροφοδότησης TN ο εισερχόμενος αγωγός (PE ή PEN) πρέπει να αποσυνδέεται.

3.6.2 Μέτρηση της Αντίστασης Γείωσης με τη μέθοδο χρήση μιας αμπεροτσιμπίδας

Για μέτρηση της αντίστασης γείωσης ανεξάρτητων ράβδων γείωσης δεν απαιτείται η αποσύνδεση των ράβδων. Χρησιμοποιούνται δύο βοηθητικά ηλεκτρόδια R_p και R_c , καθώς και μία αμπεροτσιμπίδα. Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται η συνδεσμολογία προκειμένου να μετρηθεί η αντίσταση R_{E2} . Ισχύει ότι [22]:

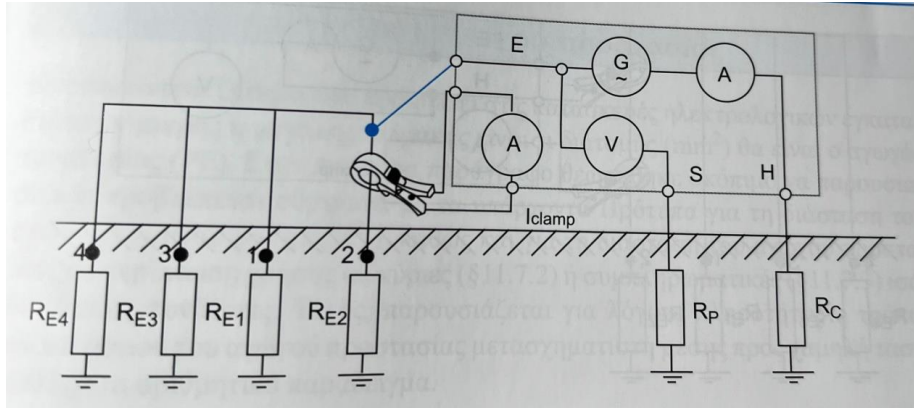
$$R_{EH} = \frac{U_V}{I_{clamp}N} = \frac{U_V}{I_{RE2}} \quad (13)$$

όπου:

I_{clamp} : το ρεύμα που μετρά η αμπεροτσιμπίδα ίσο με: $\frac{(R_{E1}/R_{E2}/R_{E3}/R_{E4}/\dots)}{R_{E2}} I_{gen}$

N : ο λόγος μετασχηματισμού της αμπεροτσιμπίδας,

I_{gen} : το ρεύμα δοκιμής της γεννήτριας του μετρητικού οργάνου.



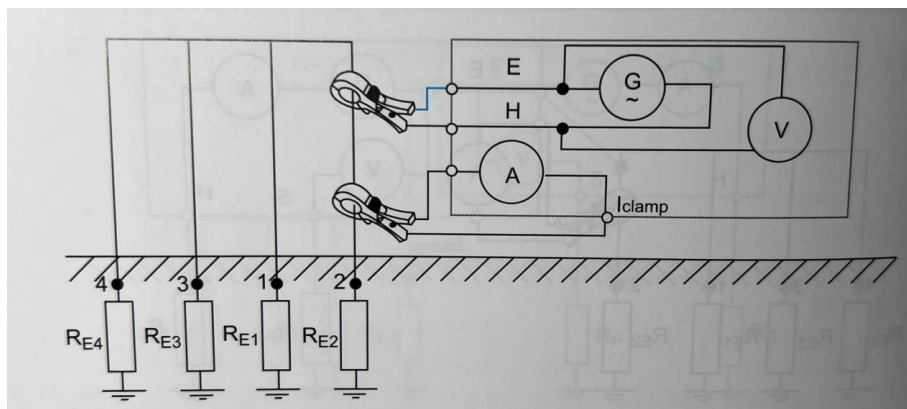
3.6.3 Μέτρηση της αντίστασης γείωσης με τη χρήση μίας αμπεροτσιμπίδας και δύο βοηθητικών ηλεκτροδίων [22]

Τονίζεται ότι [22]:

- ✓ Η δοκιμή αυτή δεν είναι κατάλληλη για εκτεταμένα συστήματα γείωσης, γιατί τα βοηθητικά ηλεκτρόδια θα πρέπει να τοποθετηθούν σε μεγάλες αποστάσεις από το μετρούμενο σύστημα γείωσης.
- ✓ Σε εκτεταμένα συστήματα γείωσης το μετρούμενο ρεύμα από την αμπεροτσιμπίδα είναι μόλις ένα μικρό μέρος του ρεύματος δοκιμής I_{gen} . Συνεπώς, θα πρέπει να ληφθεί υπόψη η ακρίβεια μέτρησης μικρών ρευμάτων και η ατρωσία του εξοπλισμού έναντι θορύβου και παρεμβολών.
- ✓ Η δοκιμή αυτή δεν προτείνεται για συστήματα γείωσης που αποτελούνται από παραπάνω από 10 ράβδους γείωσης.
- ✓ Η μέθοδος δεν έχει πλεονεκτήματα συγκρινόμενη με την δοκιμή με χρήση δύο αμπεροτσιμπίδων (επόμενη παράγραφος).

3.6.3 Μέτρηση της Αντίστασης Γείωσης με τη μέθοδο χρήσης δύο αμπεροτσιμπίδων

Για τη μέτρηση της αντίστασης γείωσης ανεξάρτητων ράβδων γείωσης δεν απαιτείται η αποσύνδεση των ράβδων, αλλά αντίθετα απαιτείται το σύστημα γείωσης να σχηματίζει βρόχο. Χρησιμοποιούνται δύο αμπεροτσιμπίδες. Η μία (driver clamp) προκαλεί μια εξ επαγωγής τάση στο σύστημα γείωσης, η οποία προκαλεί ένα εξ επαγωγής ρεύμα, το οποίο μετρά η δεύτερη αμπεροτσιμπίδα, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα [22]:



3.6.4 Μέτρηση της αντίστασης γείωσης στη μόνιμη κατάσταση με τη χρήση δύο αμπεροτσιμπίδων. [22]

Ισχύει ότι:

$$R_{E2} + (R_{E1} // R_{E2} // R_{E3} // R_{E4} // \dots) = \frac{U_{generator} \cdot \frac{1}{N}}{I_{Rclamp}} \cong R_{E2} \quad (14)$$

Όπου:

$U_{generator}$: η τάση της γεννήτριας η οποία προκαλεί το εξ επαγωγής ρεύμα

I_{clamp} : το ρεύμα που μετρά η αμπεροτσιμπίδα

N : ο λόγος μετασχηματισμού της αμπεροτσιμπίδας η οποία προκαλεί το εξ επαγωγής ρεύμα

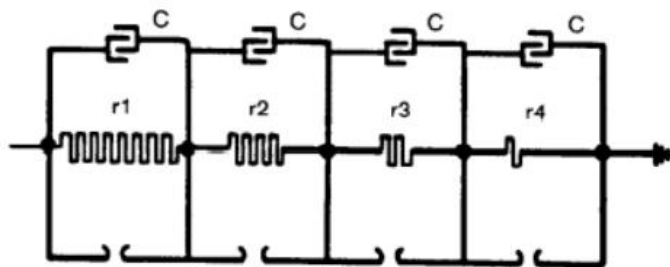
Τονίζεται ότι, η μέτρηση αυτή:

- ✓ Είναι κατάλληλη για συστήματα τα οποία έχουν πολλά παράλληλα ηλεκτρόδια γείωσης.
- ✓ Είναι κατάλληλη για μέτρηση της αντίστασης γείωσης σε υποσταθμούς.
- ✓ Προτείνεται για μετρήσεις σε αστικές περιοχές, όπου υπάρχει πρόβλημα χώρου για την τοποθέτηση των βοηθητικών ηλεκτροδίων.
- ✓ Είναι εξαιρετικά γρήγορη, αφού δεν απαιτείται η χρήση βοηθητικών ηλεκτροδίων και η απομόνωση του υπό μέτρηση ηλεκτροδίου.
- ✓ Είναι εξαιρετικά ακριβής για τιμές αντιστάσεων μικρότερη των 10Ω και αυτό γιατί όσο αυξάνεται η τιμή της αντίστασης μειώνεται το ρεύμα που μετράται (της τάξης των mA) με αποτέλεσμα ο θόρυβος και ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές να καθιστούν τις μετρήσεις αναξιόπιστες.

Για τη μέτρηση αυτή, η απόσταση που πρέπει να υπάρχει μεταξύ των δύο αμπεροτσιμπίδων πρέπει να φτάνει τουλάχιστον 30cm (εκτός και αν είναι θωρακισμένες).

3.7 Χαρακτηριστικά Εδάφους

Η συμπεριφορά ενός ηλεκτροδίου γείωσης που είναι θαμμένο στο έδαφος μπορεί να αναλυθεί μέσω του κυκλώματος του Σχήματος 3.7.1. Όπως φαίνεται, τα περισσότερα εδάφη συμπεριφέρονται τόσο ως αγωγός αντίστασης, r , όσο και ως διηλεκτρικό. Εκτός από τις υψηλές συχνότητες και τα κύματα απότομου μετώπου που διαπερνούν ένα έδαφος μεγάλης αντίστασης, το ρεύμα φόρτισης σε σχέση με το ρεύμα διαρροής χαρακτηρίζεται ως αμελητέο και, κατά συνέπεια, το έδαφος μπορεί να αναπαρασταθεί με μια απλή αντίσταση [7] [17].



3.7.1 Μοντέλο Εδάφους

3.7.1 Ειδική αντίσταση εδάφους (ρ)

Η ειδική αυτή αντίσταση (ρ) σχετίζεται με το πόσο μπορεί να αντισταθεί ένα υλικό στη ροή του ηλεκτρικού ρεύματος. Όταν ένα υλικό έχει χαμηλή ειδική αντίσταση, θεωρείται ότι είναι καλός αγωγός, διότι η ροή του ρεύματος γίνεται εύκολα. Η ειδική αντίσταση εδάφους εξαρτάται από την πυκνότητα και τη σύστασή του και οι παράγοντες που το επηρεάζουν είναι:

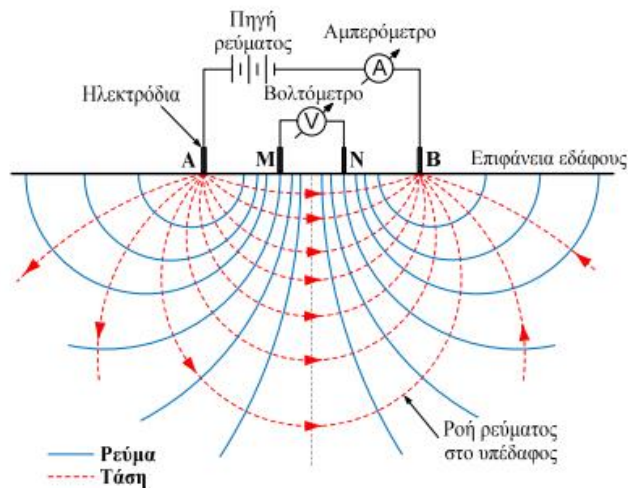
- ✓ Ο τύπος του εδάφους,
- ✓ Το ποσοστό υγρασίας που υπάρχει σε αυτό,
- ✓ Η μορφή της τάσης,

- ✓ Το μέγεθος των κόκκων εδάφους,
- ✓ Τα διαλυμένα άλατα στο νερό,
- ✓ Η ένταση του πεδίου (voltage gradient),
- ✓ Η θερμοκρασία και η πίεση.

Η γη έχει πολλά και διαφορετικά είδη εδαφών, όπως για παράδειγμα βραχώδη, αμμώδη, ξηρά και άλλα, τα οποία είναι ανομοιογενή μεταξύ τους, ενώ έχουν και διαφορετικές τιμές, όπως είναι φυσικό, των ειδικών αντιστάσεων. Για παράδειγμα, όσο πιο πετρώδες ή ξηρό μπορεί να χαρακτηριστεί ένα έδαφος, τόσο μεγαλύτερη είναι η ειδική του αντίσταση (που συμβολίζεται με το γράμμα ρ), η οποία μετριέται σε $\Omega \cdot m$ (δηλαδή, ohm-meter). Είναι γεγονός, επίσης, ότι η ειδική αντίσταση του εδάφους ενδέχεται να επηρεαστεί από διάφορους παράγοντες, όπως π.χ., από την ποσότητα του νερού. Κατά συνέπεια, η αγωγιμότητά του επηρεάζεται από την ύπαρξη νερού στο έδαφος και ουσιαστικά γίνεται αγωγιμότητα μέσω του νερού, δημιουργώντας ένα ηλεκτρολυτικό περιβάλλον. Σε έδαφη με μη ομοιογενή δομή, η ειδική αντίσταση διαφέρει στις διάφορες περιοχές γύρω από το ηλεκτρόδιο γείωσης και παρουσιάζει μη γραμμική συμπεριφορά. [18][19].

3.7.2 Τρόποι Μέτρησης της ειδικής αντίστασης εδάφους

Για να μετρηθεί η ειδική αντίσταση του εδάφους, είναι απαραίτητο να περνά μέσα από αυτό ρεύμα, κάτι που επιτυγχάνεται με την τοποθέτηση ηλεκτροδίων. Πιο αναλυτικά, το ηλεκτρικό ρεύμα μπορεί να περάσει στο υπέδαφος μέσω ενός θετικού ηλεκτροδίου A και εξέρχεται από το αρνητικό ηλεκτρόδιο B, κάτι που έχει ως αποτέλεσμα να δημιουργηθεί ηλεκτρικό πεδίο, το οποίο εξαρτάται κάθε φορά από τα χαρακτηριστικά και τις ιδιαιτερότητες του υπεδάφους. Για να μετρηθεί η διαφορά δυναμικού (ΔU) του εδάφους, χρησιμοποιούνται δύο άλλα ηλεκτρόδια M και N (ηλεκτρόδια δυναμικού). Αυτά τα ηλεκτρόδια τοποθετούνται σε σημεία εκτός της περιοχής των ηλεκτροδίων ρεύματος και χρησιμοποιούνται για να μετρηθεί η διαφορά του δυναμικού μεταξύ τους (ΔU). Η συνδυασμένη χρήση των ηλεκτροδίων ρεύματος και δυναμικού μας επιτρέπει να αξιολογήσουμε την ειδική αντίσταση του εδάφους [18].



3.7.2 Πειραματική διάταξη μέτρησης ειδικής αντίστασης [19]

Η τάση σε οποιοδήποτε σημείο υπολογίζεται ως εξής:

$$U = \frac{\rho I}{2\pi} \cdot \left(\frac{1}{r_A} - \frac{1}{r_B} \right) \quad (15)$$

Όπου:

r_A, r_B : η απόσταση του υπ' όψιν σημείου από τα A, B αντίστοιχ.

Οπότε η διαφορά δυναμικού U_{MN} υπολογίζεται από τον τύπο:

$$U_{MN} = U_M - U_N = \frac{\rho I}{2\pi} \cdot \left[\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} \right) - \left(\frac{1}{AN} - \frac{1}{BN} \right) \right] \quad (16)$$

Όπου:

U_M, U_N : το δυναμικό στα σημεία M,N αντίστοιχα

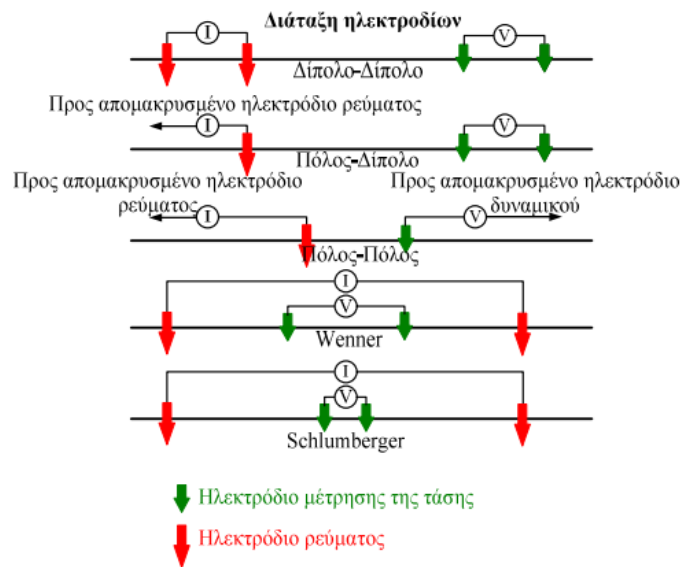
AM, BM, AN, BN : οι αποστάσεις μεταξύ των ηλεκτροδίων A και M,B και M,A και N,B και N, αντίστοιχα

Μέσω των μετρήσεων του ρεύματος και της διαφοράς δυναμικού, μπορεί να υπολογιστεί με ανάλογο τρόπο και η ειδική ηλεκτρική αντίσταση (φαινόμενη) του υπεδάφους, η οποία εξαρτάται όχι μόνο από την αντίσταση των πετρωμάτων, που συναντώνται στο έδαφος, αλλά και από τη διάταξη και την τοποθέτηση των ηλεκτροδίων ρεύματος και δυναμικού σε αυτό. Πιο συγκεκριμένα, επεξεργαζόμενοι τη ειδική ηλεκτρική αντίσταση, καταλήγουμε στην κατανομή της πραγματικής ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στο υπέδαφος. Με άλλα λόγια, αναδύεται η γεωηλεκτρική δομή του υπεδάφους, που μας δίνει πληροφορίες για τις ιδιότητες του εδάφους και τη συνθήκη του υπεδάφους σε διάφορα σημεία. Στις περιοχές, όπου ενδέχεται να αλλάζει σύμφωνα με το βάθος η ειδική αντίσταση, υπάρχει η περίπτωση οι μετρήσεις αυτές να μην είναι αρκετές. Κατά συνέπεια, μπορεί να χρειαστεί να υπάρξουν περαιτέρω ρυθμίσεις κάτω από διαφορετικούς άξονες (ή κατευθύνσεις) ή ακόμη και να χρειαστεί να υπάρξουν άλλου είδους μεταβολές, όπως π.χ., αλλαγή αποστάσεων μεταξύ ράβδων. Οι κυριότερες μέθοδοι μέτρησης σύμφωνα με τα διεθνή πρότυπα, είναι οι παρακάτω: [18]:

- ✓ Μέθοδος των 4 σημείων
- ✓ Μέθοδος των 3 σημείων
- ✓ Μέθοδος των 2 σημείων

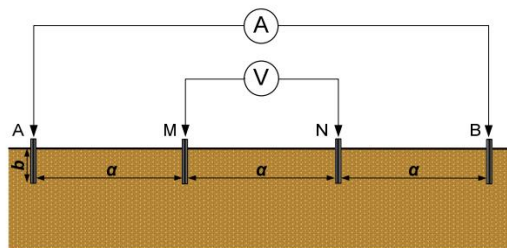
Η πιο γνωστή και διαδεδομένη μέθοδος είναι η μέθοδος των "τεσσάρων σημείων". Η εφαρμογή της γίνεται με ποικίλους τρόπους, σχετικά με τη διάταξη των 4 ηλεκτροδίων μέτρησης της ειδικής αντίστασης (όπως φαίνεται στο σχήμα παρακάτω). Οι κύριες παραλλαγές είναι [18]:

- ✓ Μέθοδοι Wenner, Schlumberger-Palmer, Lee
- ✓ Μέθοδος διπόλου - διπόλου,
- ✓ Τετραγωνική διάταξη,
- ✓ Διάταξη κεντρικού ηλεκτροδίου.



3.7.3 Περιγραφή διατάξεων μέτρησης της ειδικής αντίστασης [19].

Συνήθως προτιμάται η μέθοδος Wenner, λόγω της άμεσης και γρήγορης εφαρμογής της, ειδικά όταν δεν είναι απαραίτητο να υπάρχουν ειδικές γνώσεις και ειδικός εξοπλισμός. Για να μετρηθεί η ειδική αντίσταση με αυτή τη μέθοδο, γίνεται χρήση 4 ηλεκτροδίων (προτιμώνται τα μικρού μήκους), τα οποία τοποθετούνται σε οριζόντια απόσταση a μεταξύ τους, καθώς και σε βάθος b (Σχήμα 3.7.4). Η έγχυση του ρεύματος γίνεται στα ηλεκτρόδια $C_1(A)$ και $C_2(B)$, ενώ η τάση μετρείται ανάμεσα στα ηλεκτρόδια $P_1(M)$ και $P_2(N)$ [18].



3.7.4 Η διάταξη Wenner [19]

Αξίζει να αναφερθεί ότι ο λόγος της διαφοράς δυναμικού προς την ένταση του ρεύματος ορίζεται ως φαινόμενη αντίσταση και εξαρτάται από τη γεωμετρία του ηλεκτροδίου και την ειδική αντίσταση του εδάφους. Η φαινόμενη ειδική αντίσταση του εδάφους ρ υπολογίζεται χρησιμοποιώντας την ακόλουθη σχέση [19]:

$$\rho = \frac{4\pi a R}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4b^2}} \frac{2a}{\sqrt{4a^2 + 4b^2}}} = \frac{4\pi a R}{n} \quad (17)$$

Όπου:

R : η φαινόμενη αντίσταση (η ένδειξη το οργάνου μέτρησης) και το n που εξαρτάται από τον λόγο b/a , λαμβάνει τιμές μεταξύ 1 και 2

Στην περίπτωση που $a \ll b$, τότε: $\rho = 4\pi a R$

Ενώ αν $b \ll a$, τότε: $\rho = 2\pi a R$

η οποία δίνει την ειδική αντίσταση του εδάφους που φαίνεται σε βάθος a .

3.7.3 Επίδραση Διαφοράς Δυναμικού

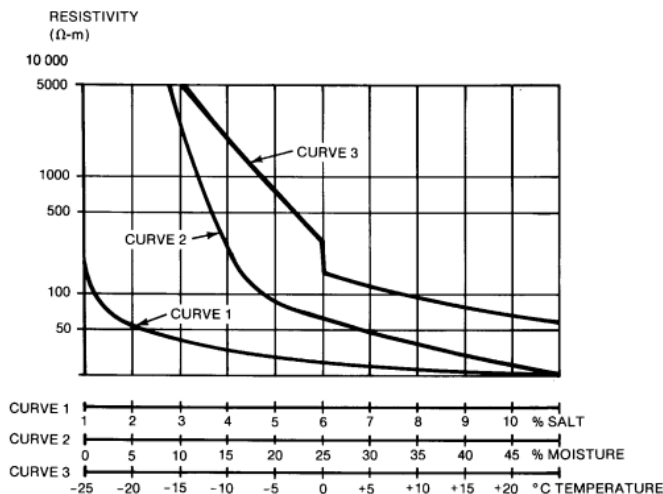
Η ειδική αντίσταση του εδάφους συνήθως δεν επηρεάζεται από τη διαφορά δυναμικού, εκτός ελαχίστων εξαιρέσεων, όπως για παράδειγμα αν αυτή υπερβεί ένα συγκεκριμένο όριο, kg. Ωστόσο, αυτή η τιμή μπορεί να διαφέρει, κάτι που έρχεται σε συνάρτηση και με την ποιότητα και το υλικό του εδάφους, αλλά συνήθως κυμαίνεται στα μερικά kV ανά cm. Όταν η τιμή υπερβαίνει το όριο, τότε παράγονται τόξα στο ηλεκτρόδιο (και πιο συγκεκριμένα στην επιφάνειά του), τα οποία με τη σειρά τους εξαπλώνονται στο έδαφος, μέχρις ότου η διαφορά δυναμικού μειωθεί σε επιτρεπτές τιμές για το έδαφος. Ωστόσο, τα συστήματα γείωσης των υψηλής τάσης συνήθως σχεδιάζονται με αυστηρότερα κριτήρια έτσι ώστε η διαφορά δυναμικού μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι πάντα εντός αποδεκτών ορίων [7], [17].

3.7.4 Επίδραση Έντασης Ηλεκτρικού Ρεύματος

Υπάρχει η περίπτωση να αλλάξει η ειδική αντίσταση του εδάφους κοντά στα ηλεκτρόδια από το ρεύμα που διέρχεται από τα ηλεκτρόδια προς το περιβάλλον του εδάφους. Τα χαρακτηριστικά θερμικής αγωγιμότητας, καθώς και το ποσοστό υγρασίας που υπάρχει καθορίζουν εάν το ρεύμα συγκεκριμένης έντασης, αλλά και συγκεκριμένης διάρκειας έχει τη δυνατότητα να μειώσει σημαντικά την υγρασία του εδάφους. Σύμφωνα με την διεθνή βιβλιογραφία, μια συντηρητική τιμή για την πυκνότητα ρεύματος, είναι να μην υπερβαίνει τα 200 A/m² για χρονικό διάστημα 1s [7], [17].

3.7.5 Επίδραση υγρασίας, θερμοκρασίας και χημικού περιεχομένου

Η ηλεκτρική αγωγιμότητα του εδάφους σχετίζεται με τον τρόπο ευκολίας που μπορεί το ηλεκτρικό ρεύμα να περνά από το υλικό του εδάφους και πρέπει να διευκρινιστεί ότι πρόκειται για μία ηλεκτρολυτική διαδικασία. Είναι γνωστό πως η ειδική αντίσταση των εδαφών στην πλειονότητα των περιπτώσεων αυξάνεται απότομα, όταν το ποσοστό της υγρασίας τους είναι μικρότερο από το 15% του βάρους του εδάφους. Η υγρασία που υπάρχει προκύπτει από πολλούς παράγοντες, όπως το μέγεθος και η συμύκνωση κόκκων, καθώς και η μεταβλητότητα του μεγέθους των κόκκων στο έδαφος. Παρ' όλα αυτά, παρατηρείται ότι επηρεάζεται σε πολύ μικρό ποσοστό η ειδική αντίσταση του εδάφους όταν το ποσοστό υγρασίας υπερβεί περίπου το 22%, όπως παρουσιάζεται στην καμπύλη 2. Η επίδραση της θερμοκρασίας στην ειδική αντίσταση του εδάφους θεωρείται αμελητέα για θερμοκρασίες πάνω από το σημείο πήξης. Στους 0 °C, το νερό στο έδαφος αρχίζει να παγώνει και η ειδική αντίσταση αυξάνεται απότομα. Η καμπύλη 3 δείχνει αυτήν την τυπική μεταβολή για αμμώδες έδαφος περιεκτικότητας 15,2% σε υγρασία. Η σύνθεση και η ποσότητα των αλάτων, οξέων ή αλκαλίων που υπάρχουν στο έδαφος ενδέχεται να επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό την ειδική του αντίσταση. Για παράδειγμα, η καμπύλη 1 του σχήματος 3.7.5 απεικονίζει ποσοτικά την επίδραση του άλατος (χλωριούχο νάτριο) στην ειδική αντίσταση ενός εδάφους που περιέχει 30 % υγρασία κατά βάρος [7].



3.7.5 Επίδραση Υγρασίας, θερμοκρασίας και άλατος στην ειδική αντίσταση εδάφους [17]

3.8 Δομή και Μοντέλο Εδάφους

Για να επιτευχθεί ο σωστός σχεδιασμός για σύστημα γείωσης, απαιτείται να υπάρχει εξειδικευμένη γνώση του θέματος, όπως η δομή του εδάφους, η περιοχή που εξετάζεται για την εγκατάσταση κ.λπ. Έτσι, το πρώτο και θεμελιώδες βήμα κατά τη φάση της μελέτης και του σχεδιασμού είναι να προσδιοριστούν τα χαρακτηριστικά και οι ιδιαιτερότητες του εδάφους, όπως π.χ, το βάθος και η δομή του εδάφους [19]

3.8.1 Υλικά επίστρωσης υψηλής ειδικής αντίστασης

Η επίστρωση υψηλής ειδικής αντίστασης είναι μια από τις πιο κρίσιμες παραμέτρους για τον ασφαλή, οικονομικό, και αξιόπιστο σχεδιασμό του πλέγματος γείωσης του Υ/Σ. Γενικά, μια λεπτή επίστρωση από επιφανειακό υλικό, όπως θρυμματισμένος ασβεστόλιθος, γρανίτης ή άσφαλτος με πολύ υψηλή ειδική αντίσταση χρησιμοποιείται για την κάλυψη του υποσταθμού. Συνήθως το πάχος της επιφανειακής στρώσης είναι από 10cm έως 15cm. Προκύπτει ότι τα επιτρεπόμενα όρια τάσεων ασφαλείας αυξάνονται, καθώς αυξάνεται η ειδική αντίσταση της επιφάνειας και με αυτόν τον τρόπο περιορίζονται οι επικίνδυνες τάσεις επαφής και οι επικίνδυνες βηματικές τάσεις. Ωστόσο, η συμπεριφορά της γείωσης για όλες τις επιφανειακές αντιστάσεις είναι η ίδια. Οι τοπικές συνθήκες, το μέγεθος, ο τύπος του πετρώματος και άλλα έχουν τη δυνατότητα να προκαλέσουν διακυμάνσεις στην τιμή της ειδικής αντίστασης του υλικού επίστρωσης. Συνεπώς, θεωρείται απαραίτητο να μετράται η ειδική αντίσταση πετρωμάτων σε μία συγκεκριμένη περιοχή [23], [7].

Σημαντικό πλεονέκτημα από την επίστρωση της περιοχής γείωσης με υλικό υψηλής ειδικής αντίστασης, είναι η επιβράδυνση της εξάτμισης της υγρασίας και, συνεπώς, ο περιορισμός της αφυδάτωσης ή ξήρανσης των επιφανειακών στρωμάτων του εδάφους κατά τη διάρκεια παρατεταμένων θερμών περιόδων. Ακόμη πιο σημαντικό πλεονέκτημα που συνοδεύεται με την προσθήκη τέτοιων υλικών, είναι η μείωση των κρουστικών ρευμάτων [7].

Δοκιμές έχουν δείξει ότι χαλίκι ποταμιού που χρησιμοποιήθηκε ως επίστρωση του περιβάλλοντος χώρου Υ/Σ είχε ειδική αντίσταση 5000 Ωm. Ένα στρώμα χαλικιού ή άλλου υλικού πάχους 0,1-0,15m, συγκρινόμενο με υγρό έδαφος χωρίς καμία επίστρωση, μπορεί να μειώσει τον συντελεστή επικινδυνότητας (λόγος του ρεύματος σώματος προς το ρεύμα βραχυκύκλωσης) κατά αναλογία 10:1 [7]. Το επιτρεπτό όριο των τιμών της ειδικής αντίστασης για το επιφανειακό στρώμα υλικού σχετίζεται με διάφορους παράγοντες, κάποιιοι από τους οποίους είναι τα διάφορα είδη των πετρωμάτων, το μέγεθος τους, η σύστασή τους, η περιεκτικότητα σε υγρασία και η ατμοσφαιρική

μόλυνση. Η ειδική αντίσταση του νερού με το οποίο βρέχεται το πέτρωμα έχει σημαντική επίδραση στη ειδική αντίσταση του υλικού επίστρωσης. Έτσι, κάποιο υλικό που έχει βραχεί από θαλασσινό νερό, μπορεί να έχει σημαντικά χαμηλότερη ειδική αντίσταση από το ίδιο υλικό σε ξηρό περιβάλλον [7].

Ανάλογα με την ειδική αντίσταση εδάφους, μπορούν να γίνουν πολλές κατηγοριοποιήσεις ως προς τον τύπο του εδάφους. Μία βασική κατηγοριοποίηση όπως περιγράφεται στο πρότυπο IEEE Std-80 είναι η εξής [7]:

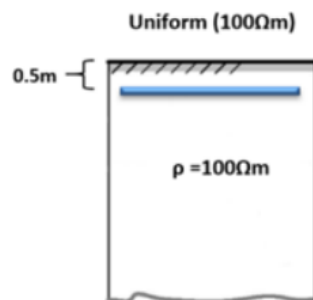
- ✓ Ποτισμένο οργανικό έδαφος ($10 \Omega\text{m}$)
- ✓ Υγρό ($10^2 \Omega\text{m}$)
- ✓ Ξηρό έδαφος ($10^3 \Omega\text{m}$)
- ✓ Βραχώδες έδαφος ($10^4 \Omega\text{m}$)

3.8.2 Μοντέλο ομοιόμορφου εδάφους

Αυτό το μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί, όποτε το μοντέλο δύο ή περισσότερων στρωμάτων υπολογιστικά δεν είναι εφικτό να υπολογιστεί. Δυστυχώς, ένα ανώτερο όριο του σφάλματος σε όλες τις σχετικές γειώσεις παραμέτρων είναι δύσκολο να εκτιμηθεί στην γενικότητα. Παρ' όλα αυτά, όταν δεν υπάρχει πολύ μεγάλη διαφορά μεταξύ των αντιστάσεων των διαφόρων στρωμάτων, μια μέση τιμή της ειδικής αντίστασης του εδάφους μπορεί να φανεί χρήσιμη, ως μια αρχική προσέγγιση ή για τον καθορισμό της τάξης μεγέθους. Η κατά προσέγγιση ομοιόμορφη ειδική αντίσταση του εδάφους μπορεί να ληφθεί με τη λήψη του αριθμητικού μέσου όρου των μετρούμενων δεδομένων φαινόμενης ειδικής αντίστασης, όπως αποτυπώνεται στην παρακάτω πράξη, όπου n είναι ο αριθμός των μετρήσεων και $\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n$ οι μετρήσεις της ειδικής αντίστασης [7]:

$$\rho = \frac{\rho_1 + \rho_2 + \dots + \rho_n}{n} \quad (18)$$

Παρακάτω φαίνεται ένα παράδειγμα ομοιόμορφου εδάφους ειδικής αντίστασης $\rho=100 \Omega\text{m}$ [23]:



3.8.1 Ομοιόμορφο έδαφος ($100\Omega\text{m}$) με πλέγμα γείωσης σε βάθος 0.5m [23]

3.8.3 Μοντέλο διστρωματικού εδάφους

Η διστρωματική προσέγγιση αποτελεί μια καλή μέθοδο για την αναπαράσταση πολλών δομών εδάφους και παρέχει πιο ακριβή αναπαράσταση της διαστρωμάτωσης και των συνθηκών του. Γίνεται αντιληπτό ότι σε αυτή την περίπτωση μια καλή επιλογή δεν θα ήταν ένα ομοιόμορφο μοντέλο για την αναπαράσταση πολλών δομών, καθώς το έδαφος παρουσιάζει ποικιλομορφία (δηλαδή, δεν είναι ομαλό) Το διστρωματικό μοντέλο, το οποίο αποτελείται από το ανώτερο και το κατώτερο στρώμα, διαθέτει ειδικές αντιστάσεις και ύψη ρ_1, h_1 και ρ_2 άπειρο, αντίστοιχα [19].

Για τον προσδιορισμό του πολυστρωματικού μοντέλου σε τοποθεσίες όπως φωτοβολταϊκά πάρκα, ανεμογεννήτριες, υποσταθμούς και άλλες παρόμοιες εγκαταστάσεις, τις περισσότερες φορές γίνονται μετρήσεις μέσω δύο αξόνων μέτρησης που είναι σε σχήμα ορθογώνιο ή σταυρού, ανάλογα με τον αριθμό των αξόνων που χρησιμοποιούνται (δύο, τέσσερις ή πέντε άξονες). Η επιλογή της γεωμετρίας

του ηλεκτροδίου γείωσης και οι τιμές των παραμέτρων (ρ_1 , ρ_2 και h) καθορίζουν την αποτελεσματικότητα της γείωσης. Επιπλέον, πρέπει να ληφθούν υπόψη και τα όρια που επιτρέπονται στις τάσεις, ώστε να μην υπάρξει πρόβλημα ασφάλειας για τα άτομα (προσωπικό ή επισκέπτες) που βρίσκονται σε κοντινή απόσταση από την εγκατάσταση. Πρέπει να σημειωθεί ότι τα μέγιστα επιτρεπόμενα όρια σε συγκεκριμένο τύπο εδάφους για τις τάσεις καθώς και για προσδιορισμένο χρόνο εκκαθάρισης σφάλματος, αλλά και για άτομο με βάρος με 70 κιλά κατά μέσο όρο παρουσιάζονται στις παρακάτω πράξεις [19]:

$$E_{step70} = (1000 + 6C_s \times \rho_s) \frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \quad (19)$$

$$E_{touch70} = (1000 + 1.5C_s \times \rho_s) \frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \quad (20)$$

Όπου:

ρ_s : η ειδική αντίσταση του υλικού επιφάνεια

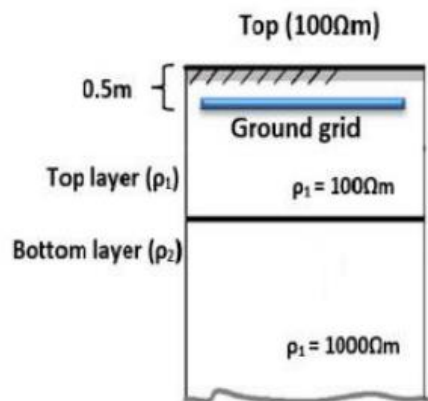
C_s : ο συντελεστής εξαρτώμενος από την ειδική αντίσταση του εδάφους, την ειδική αντίσταση και το πάχος του υλικού

t_s : ο χρόνος εκκαθάρισης του σφάλματος

Η μεταβολή που εκτελείται απότομα στα όρια κάθε εδαφικού στρώματος μπορεί να αποτυπωθεί μέσω ενός συντελεστή K , που ονομάζεται συντελεστής ανάκλασης. Ο συντελεστής K ορίζεται από την παρακάτω εξίσωση, όπου ρ_1 και ρ_2 είναι η ειδική αντίσταση εδάφους, αντίστοιχα του άνω και του κάτω στρώματος [7]:

$$K = \frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1 + \rho_2} \quad (21)$$

Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται ένα παράδειγμα διστρωματικού εδάφους ειδικών αντιστάσεων άνω και κάτω στρώματος $\rho_1 = 100\Omega m$ και $\rho_2 = 1000\Omega m$ αντίστοιχα [23]:



3.8.2 Διστρωματικό έδαφος $\rho_1=100\Omega m$, $\rho_2=1000\Omega m$ με πλέγμα γείωσης σε $h=0.5m$ [23]

Κεφάλαιο 4: Παρουσίαση Λογισμικού Προσομοιώσεων και Μετρήσεων και Παράθεση Αποτελεσμάτων Προσομοίωσης

4.1 Εισαγωγή

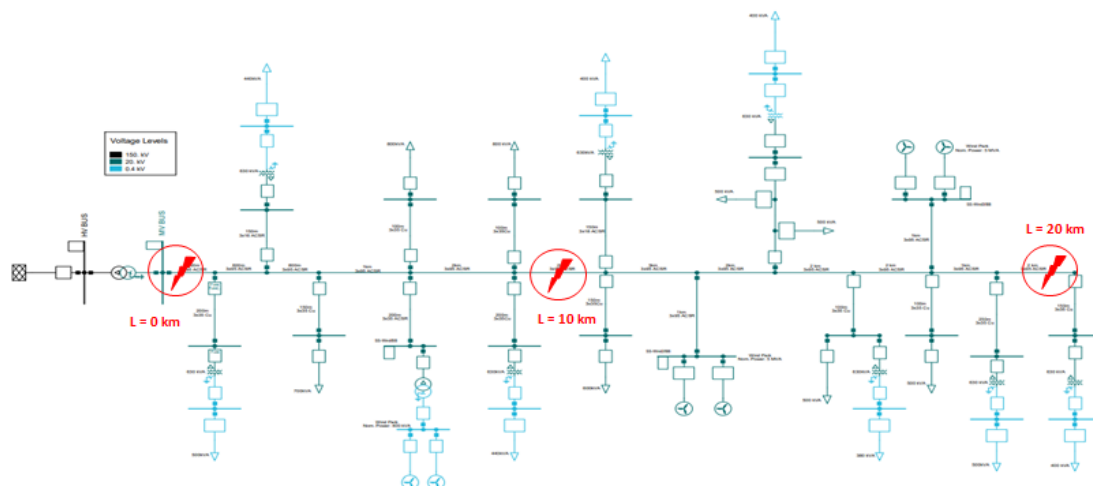
Στη μελέτη που ακολουθεί, εξετάζεται η επίδραση των παραμέτρων σχεδιασμού ενός συστήματος γείωσης του δικτύου διανομής, σε μη ομοιόμορφη δομή εδάφους στην απόδοση αυτού. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό SES AutoGridPro και το λογισμικό PowerFactory.

Στο SES AutoGridPro εξομοιώθηκε το πλέγμα και μελετήθηκε η κατανομή των τάσεων που αναπτύσσονται, όπως επίσης εξήχθησαν η συνολική αντίσταση γείωσης του εκάστοτε συστήματος και τα ασφαλή όρια των τάσεων. Με χρήση του λογισμικού PowerFactory, προσομοιώθηκε μία γραμμή MT και έγινε μελέτη βραχυκυκλωμάτων σε τρία διαφορετικά σημεία της. Γνωρίζοντας την συνολική αντίσταση γείωσης, υπολογίστηκε το ρεύμα βραχυκυκλώσεως για την περίπτωση μονοφασικού σφάλματος Γης, σε διάφορα σημεία, όπως στην αρχή, στο μέσο, καθώς και στο τέλος της γραμμής MT. Στην συνέχεια, αυτό χρησιμοποιήθηκε στο SES AutoGridPro για να γίνουν οι υπολογισμοί.

4.1.1 Παρουσίαση Λογισμικού PowerFactory

Το PowerFactory, που έχει αναπτυχθεί από την DigSILENT, είναι ένα λογισμικό ανάλυσης βιομηχανικών συστημάτων (π.χ. μεταφοράς, παραγωγής και διανομής). Καλύπτει όλο το φάσμα της λειτουργικότητας, από τα τυπικά χαρακτηριστικά έως πολύ σύγχρονες και εξελιγμένες εφαρμογές, όπως είναι για παράδειγμα η αιολική ενέργεια. Οι δυνατότητες του λογισμικού συμπεριλαμβάνουν πολλές διαφορετικές λειτουργίες και μαθηματικές διαδικασίες ανάλυσης συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας όπως:

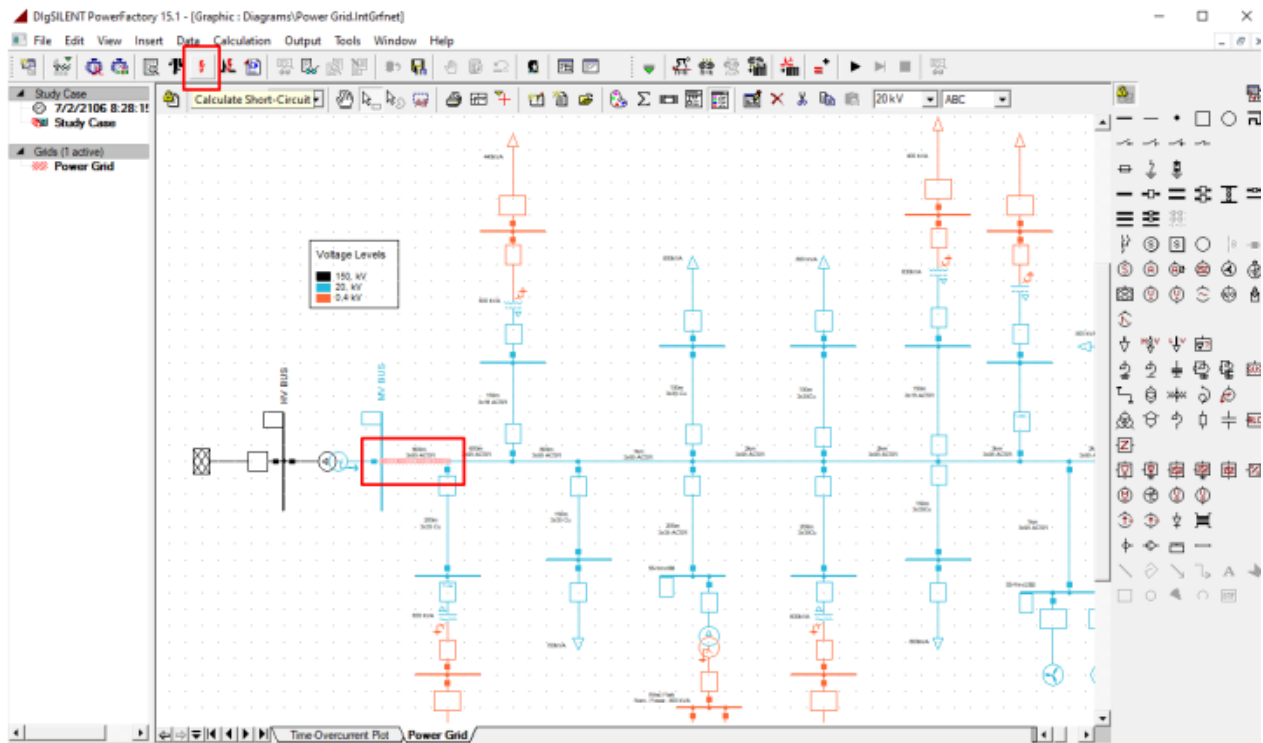
- ✓ Ανάλυση ροής φορτίου
- ✓ Μελέτη βραχυκυκλωμάτων
- ✓ Ανάλυση ευστάθειας συστήματος
- ✓ Μελέτη προστασίας
- ✓ Εκτίμηση κατάστασης
- ✓ Αρμονική ανάλυση
- ✓ Δυναμική ανάλυση



Εικόνα 4.1.1 Τυπική Εναέρια Γραμμή MT Δικτύου Διανομής μήκους L=20km

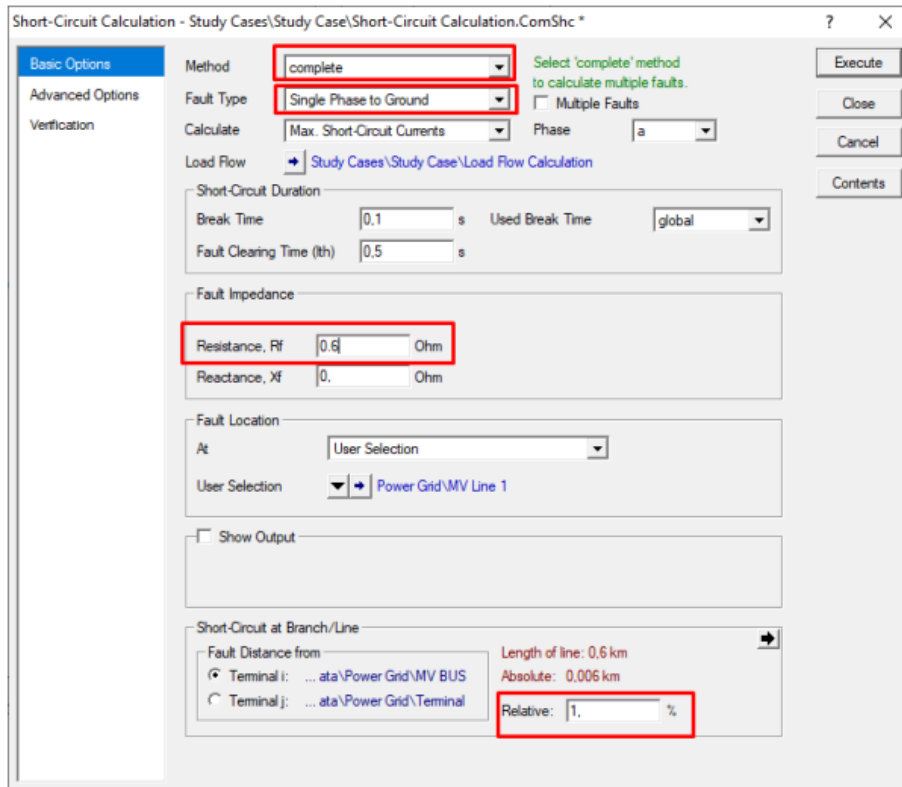
Μεθοδολογία χρήσης :

1. Υπολογισμός Βραχυκυκλωμάτων: στην περίπτωση αυτής της μελέτης, χρειαζόμαστε το ρεύμα μονοφασικού σφάλματος Γης.
 - a. Επιλέγουμε το τμήμα της γραμμής, στο οποίο θέλουμε να υπολογίσουμε το ρεύμα σφάλματος (στα σημεία που φαίνονται στην παραπάνω εικόνα)
 - b. Πατάμε το κουμπί “Calculate Short-Circuit”.



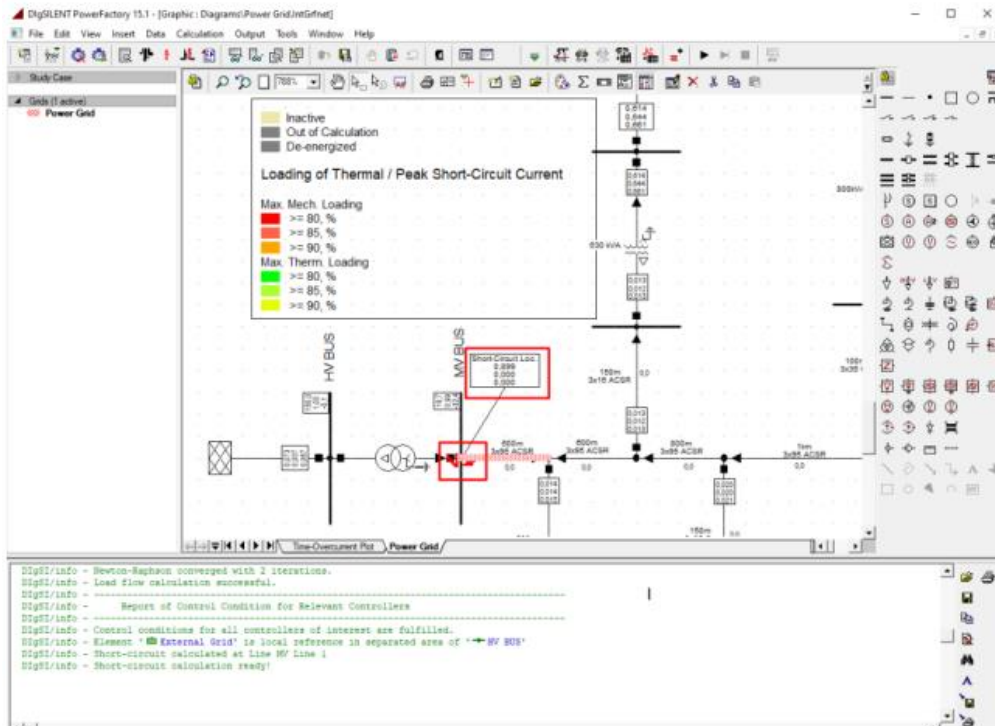
Εικόνα 4.1.2 Εξομοίωση Βραχυκυκλώματος στο PowerFactory [7]

- c. Στο παράθυρο που εμφανίζεται επιλέγουμε την μέθοδο “*complete*” (για την ένταση βραχυκύκλωσης), μονοφασικό σφάλμα ως προς Γη (στον τύπο σφάλματος), και προσθέτουμε την συνολική αντίσταση γείωσης. Τέλος, στο κάτω μέρος του παραθύρου ορίζουμε το ακριβές σημείο του τμήματος που επιλέξαμε, στο οποίο συμβαίνει το βραχυκύκλωμα.



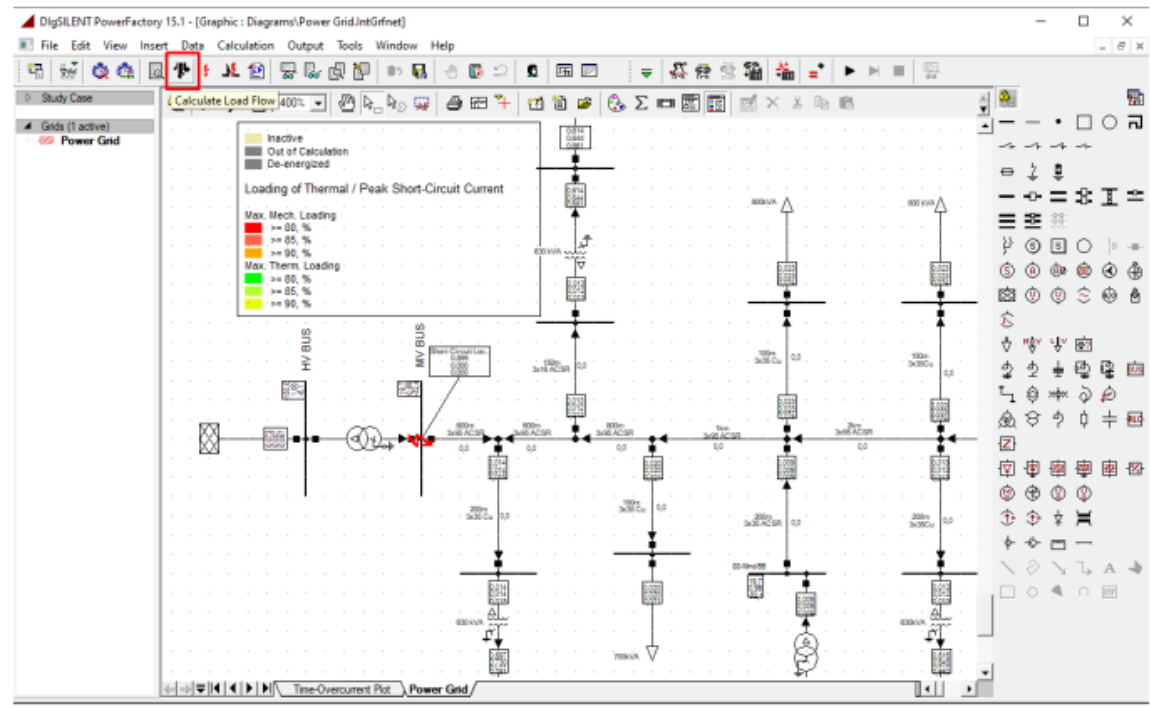
Εικόνα 4.1.3 Επιλογές Βραχυκυκλώματος [7]

- d. Πατάμε το κουμπί **“Execute”** και το PowerFactory εκτελεί τους μαθηματικούς υπολογισμούς για τον υπολογισμό του ρεύματος βραχυκύκλωσης στο σημείο του τμήματος της γραμμής MT που ορίσαμε. Η τιμή αυτή, σε Ampere, εμφανίζεται στο μαύρο κουτί πάνω από το σημείο του σφάλματος.



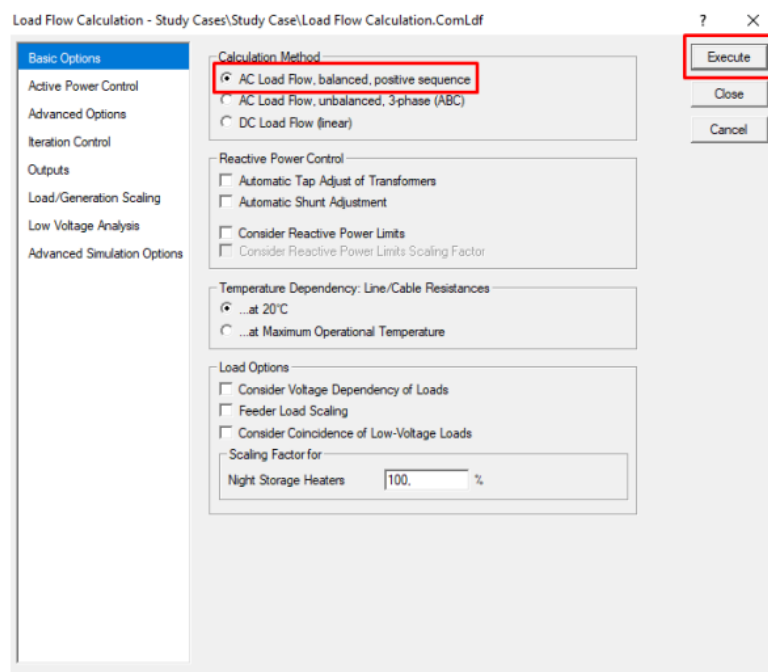
Εικόνα 4.1.4 Υπολογισμός Έντασης Βραχυκυκλώματος στο PowerFactory [7]

2. Για την εκτέλεση της ροής φορτίου:
 - a. Πατάμε το κουμπί “Load Flow”.



Εικόνα 4.1.5 Εξομοίωση Ροής Φορτίου στο PowerFactory [7]

- b. Στο παράθυρο που ανοίγει, πατάμε “Execute”, έχοντας επιλέξει ως μέθοδο υπολογισμού, την μέθοδο “AC Load Flow, balanced, positive sequence”.



Εικόνα 4.1.6 Επιλογές Ροής Φορτίου [7]

- c. Επιστρέφουμε στην αρχική μας κατάσταση και μπορούμε να τρέξουμε νέο υπολογισμό βραχυκυκλώματος στη γραμμή.

4.2 Παρουσίαση Λογισμικού SES AutoGrid Pro

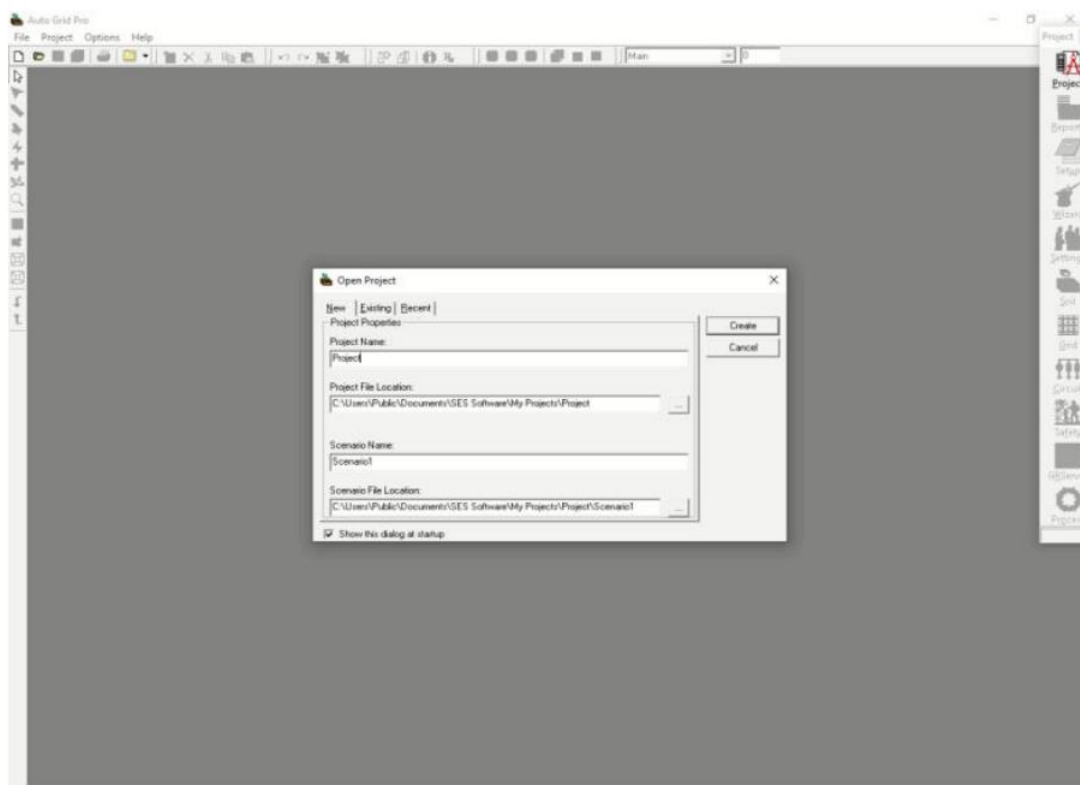
Το SES AutoGridPro αποτελεί ένα απλό και ενοποιημένο περιβάλλον εργασίας, ειδικά σχεδιασμένο για τη μελέτη συστημάτων γείωσης. Αποτελεί ενσωματωμένο εργαλείο του CDEGS (λογισμικό). Μέσω του SES AutoGridPro γίνεται μελέτη της αποτελεσματικότητας του συστήματος γείωσης, ως προς την ασφάλεια που παρέχεται και για τον κίνδυνο που μπορεί να διατρέχει ο άνθρωπος, αλλά και σε συνάρτηση με την προστασία του εξοπλισμού.

4.2.1 Μεθοδολογία χρήσης του λογισμικού SES AutoGrid Pro-CDEGS

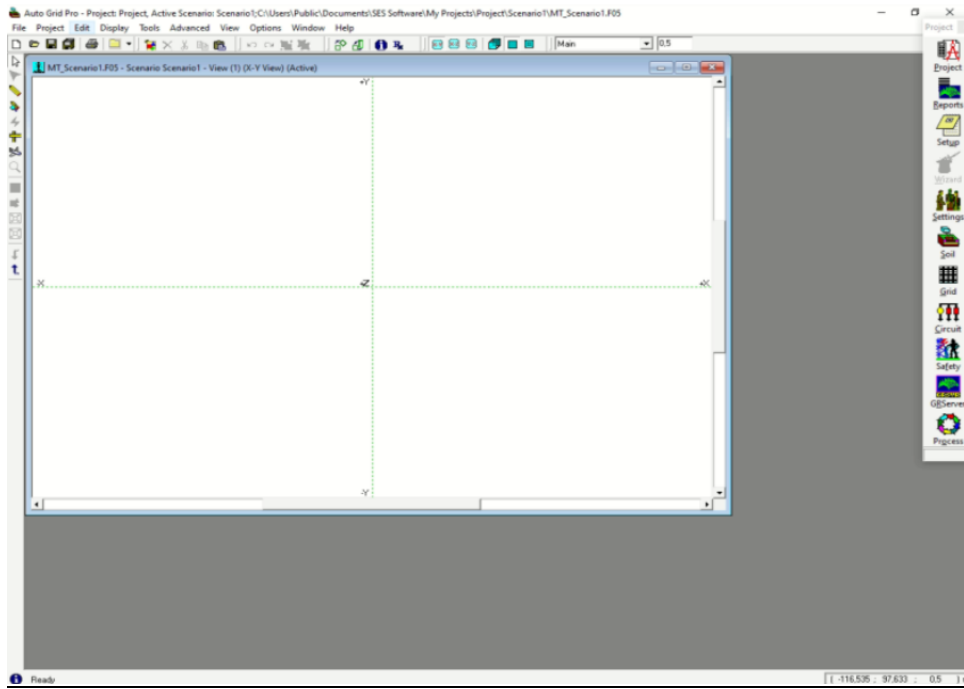
Η διαδικασία που ακολουθείται κατά την χρήση του λογισμικού SES AutoGrid Pro – CDEGS, περιλαμβάνει αρχικά την καταχώρηση δεδομένων. Ορίζονται δηλαδή οι παράμετροι του εδάφους και του συστήματος γείωσης. Στη συνέχεια, προσομοιώνεται η λειτουργία του συστήματος με τις συνθήκες που έχουν οριστεί. Τέλος παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, μέσω των γραφημάτων, αλλά και αριθμητικά. Πιο αναλυτικά η διαδικασία παρουσιάζεται παρακάτω.

1. Νέο Project:

- a. Ανοίγοντας το λογισμικό SES AutoGrid Pro εμφανίζεται ένα παράθυρο, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.
- b. Πατάμε “New”.
- c. Συμπληρώνουμε το “Project Name” και το “Project File Location” (σημείο αποθήκευσης του αρχείου στον χώρο του υπολογιστή). Στην συνέχεια εμφανίζεται ο χώρος εργασίας, με το λευκό παράθυρο και την μπάρα εργαλείων στο δεξί μέρος του παραθύρου, όπως φαίνεται στην δεύτερη φωτογραφία.



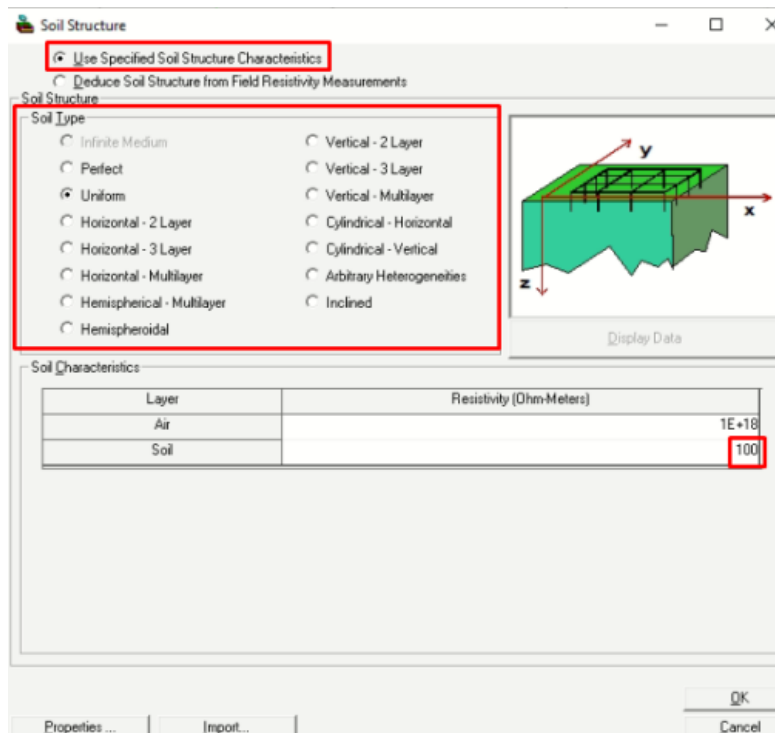
Εικόνα 4.2.1 Παράθυρο δημιουργίας νέας εργασίας [7]



Εικόνα 4.2.2 Παράθυρο εργασίας [7]

2. Χαρακτηριστικά εδάφους:

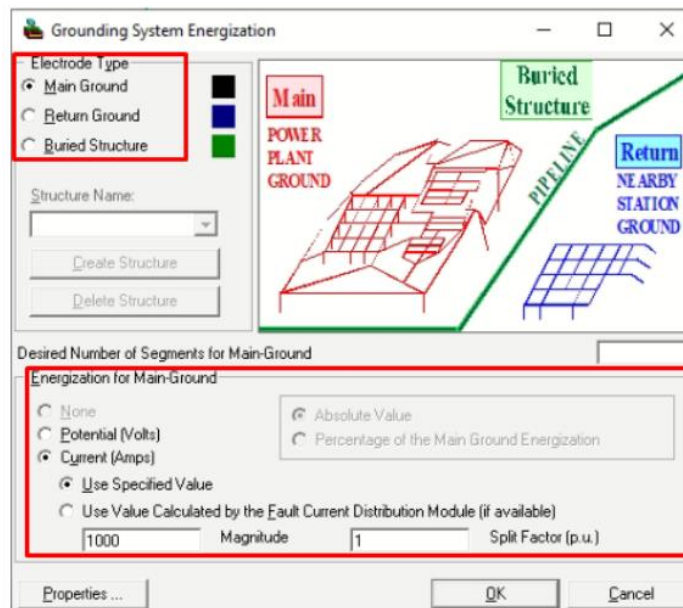
- a. Στην δεξιά μπάρα εργαλείων, πατάμε το κουμπί **“Soil”**.
- b. Όπως διακρίνεται στην παρακάτω εικόνα (παράθυρο), επιλέγουμε ένα από τα διαθέσιμα τυποποιημένα μοντέλα εδάφους (ομοιόμορφο ή διστρωματικό και άλλα). Οι προσομοιώσεις στην δική μας περίπτωση έγιναν σε ομοιόμορφο έδαφος **“Uniform Soil”** καθώς και σε οριζόντιο διστρωματικό **“Horizontal - 2 Layer”**.
- c. Στο πεδίο **“Soil Characteristics”** συμπληρώνουμε την τιμή της ειδικής αντίστασης εδάφους ρ .



Εικόνα 4.2.3 Παράθυρο επιλογής χαρακτηριστικών εδάφους [7]

3. Επιλογές συστήματος γείωσης:

- Στην πλαϊνή μπάρα εργαλείων πατάμε την επιλογή **“Grid”**.
- Στο παράθυρο που ανοίγει, ακολουθώντας τις οδηγίες του manual, αφήνουμε την επιλογή **“Main Ground”**
- Ορίζουμε το μέγιστο ρεύμα το οποίο θα περάσει από το προς σχεδίαση πλέγμα γείωσης. Το ρεύμα αυτό, είναι συνάρτηση της αντίστασης γείωσης και της απόστασης από τους υποσταθμούς και το έχουμε υπολογίσει από το λογισμικό PowerFactory, όπως είδαμε σε προηγούμενη παράγραφο.



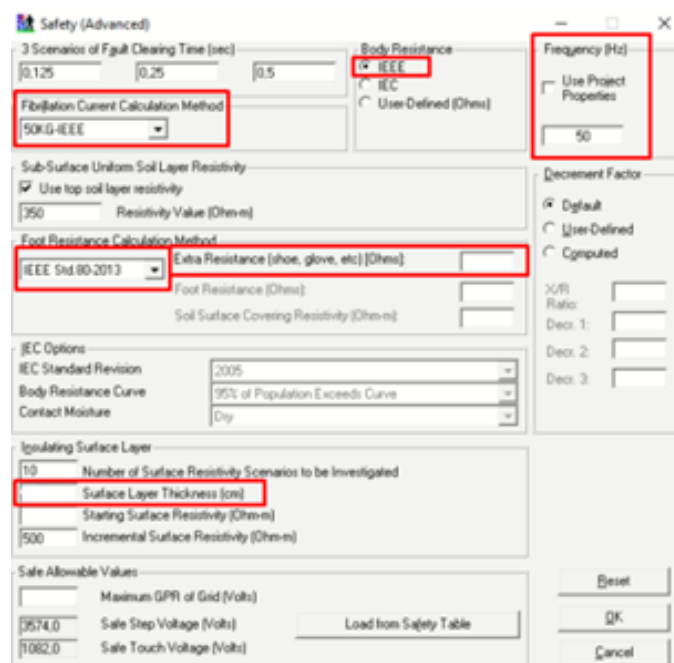
Εικόνα 4.2.4 Παράθυρο επιλογής χαρακτηριστικών πλέγματος γείωσης [7]

4. Ασφαλή Επίπεδα Τάσης και Παράμετροι:

- Στην πλαϊνή μπάρα εργαλείων επιλέγουμε **“Safety”**.
- Στο παράθυρο που εμφανίζεται συμπληρώνουμε το χρόνο εκκαθάρισης σφάλματος. Στην περίπτωση μας, η προσομοίωση γίνεται για την στιγμιαία λειτουργία του ηλεκτρονόμου και γι’ αυτό ο χρόνος εκκαθάρισης τίθεται **0.15 sec**.
- Έτσι, λαμβάνουμε αυτόματα τα ασφαλή επίπεδα τάσης επαφής και βηματικής τάσης.
- Από το παράθυρο αυτό μπορούμε επίσης να επιλέξουμε την ειδική αντίσταση του υλικού επίστρωσης (π.χ. 2500 Ωm), καθώς και τα όρια της περιοχής στην οποία κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης ελέγχονται η βηματική και η τάση επαφής. Στην περίπτωση μας, τα όρια έχουν τεθεί ακριβώς στο περίγραμμα του πλέγματος και, επίσης, δεν χρησιμοποιούμε υλικό επίστρωσης.
- Στην επιλογή **“Advanced”**, λαμβάνουμε υπόψη την αντίσταση του σώματος του ανθρώπου με βάση κάποιο από τα διαθέσιμα πρότυπα (IEEE, IEC) και ορίζουμε την συχνότητα στα 50 Hz. Στην επιλογή «Surface Layer Thickness (cm)», ορίζουμε το πάχος τοποθέτησης του υλικού επίστρωσης, το οποίο δεν θα πρέπει να ξεπερνά τα 10 cm. Ωστόσο, στο πλαίσιο της συγκεκριμένης διπλωματικής δεν χρησιμοποιήθηκε υλικό επίστρωσης.



Εικόνα 4.2.5 Παράθυρο επιλογών ασφαλείας [7]



Εικόνα 4.2.6 Παράθυρο προχωρημένων επιλογών ασφαλείας [7]

4.3 Μοντέλα και Μεθοδολογία Προσομοίωσης

4.3.1 Αντικείμενο της μελέτης

Όπως έχει προαναφερθεί, ο σωστός σχεδιασμός ενός συστήματος γείωσης αποτελεί σημαντικό παράγοντα τόσο για την ελάττωση των επικίνδυνων αναπτυσσόμενων δυναμικών, όσο και για την

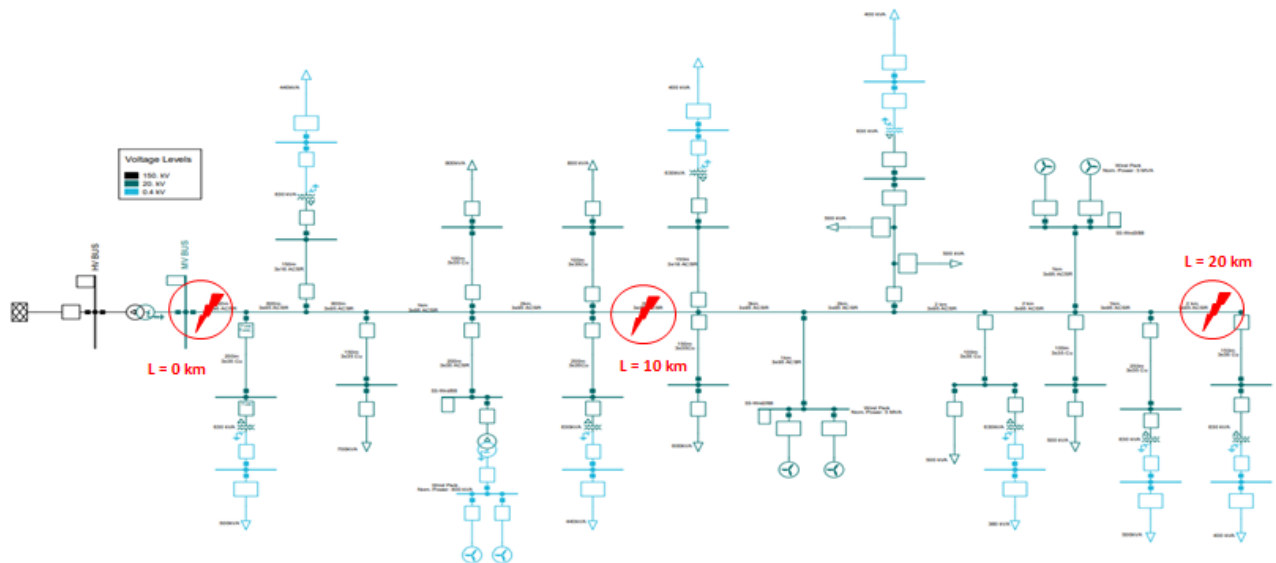
ασφάλεια του εξοπλισμού και τους προσωπικού. Ένας σωστός σχεδιασμός ενός συστήματος γείωσης έχει ως απώτερο στόχο την αποτελεσματική λειτουργία του σχήματος προστασίας του δικτύου, το οποίο συνεπάγεται την απομόνωση όσο το δυνατόν μικρότερου τμήματος του δικτύου σε περίπτωση σφάλματος. Γι' αυτό το λόγο, η εργασία αυτή μελετά την επίδραση του διστρωματικού εδάφους στη συμπεριφορά ενός συστήματος γείωσης του δικτύου διανομής και εξάγοντας συγκριτικά γραφήματα σε σχέση με το μονοστρωματικό έδαφος. Πιο συγκεκριμένα, οι παράμετροι που θα εξετασθούν είναι οι εξής:

1. Συγκριτική μελέτη πλεγμάτων σε μονοστρωματικό και διστρωματικό έδαφος,
2. Παραλλαγές διαστάσεων πλεγμάτων στις παραπάνω περιπτώσεις,
3. Παραλλαγές βάθους τοποθέτησης,
4. Παραλλαγές μήκους και πλήθους ράβδων γείωσης,
5. Παραλλαγές με το μήκος των στρώσεων του εδάφους.

Για όλα τα παραπάνω σενάρια πραγματοποιήθηκαν συγκριτικά γραφήματα - ραβδογράμματα για την εξαγωγή συμπερασμάτων. Τα λογισμικά που χρησιμοποιήθηκαν είναι το SES CDEGS και το DIgSILENT PowerFactory (τα οποία περιγράφηκαν αναλυτικά στις προηγούμενες παραγράφους), με πραγματικά δεδομένα του ΕΔΔΗΕ.

4.3.2 Μοντέλο Γραμμής Μέσης Τάσης

Η προσομοίωση βασίστηκε σε μια τυπική Γραμμή Διανομής 20 kV, μήκους 20 km, με διεσπαρμένη παραγωγή. Η γραμμή αυτή φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 4.3.1 Μονογραμμικό Διάγραμμα Γραμμής Μέσης Τάσης (MT) 20kV, μήκους L=10km

Με μαύρο χρώμα απεικονίζεται το επίπεδο υψηλής τάσης (150 kV), με σκούρο μπλε χρώμα, το επίπεδο μέσης τάσης (20kV), και με μπλε ανοιχτό το επίπεδο χαμηλής τάσης (0.4kV). Αποτελεί ένα τριφασικό δίκτυο τριών αγωγών γειωμένο στην πλευρά της αναχώρησης, μέσω αντίστασης, η οποία σε περίπτωση μονοφασικού σφάλματος Γης, περιορίζει την ένταση βραχυκύκλωσης στα 1000 A μέγιστη τιμή. Στους παρακάτω πίνακες παρατίθενται τα κύρια χαρακτηριστικά της γραμμής.

Πίνακας 1 - Στοιχεία άπειρου ζυγού

Χαρακτηριστικά	Μέγιστη Τιμή	Ελάχιστη Τιμή
Ισχύς Βραχυκύκλωσης S_k	8054.036 MVA	7794.229 MVA
Ένταση Βραχυκύκλωσης I_k	31 kA	30 kA
R/X	0.1	0.1
Z_2/Z_1	1	1

X_0/X_1	1	1
R_0/X_0	0.1	0.1

Πίνακας 2 Στοιχεία Αγωγών

Τύπος Αγωγού	I_{max} (A)	Αντίσταση μονοφασικού σφάλματος γης, R_{1f} (Ω/km)	Αντίδραση μονοφασικού σφάλματος γης X_{1f} (Ω/km)
3x95 ASCR	448	0.264	0.741
3x50 ASCR	296	0.453	0.785
3x35 ASCR	224	0.625	0.796
3x50 Cu	232	0.475	0.785
3x35 Cu	185	0.654	0.8

Πίνακας 3 Στοιχεία Μετασχηματιστή YT/MT

Χαρακτηριστικά	Τιμή
Ονομαστική Ισχύς	50 MVA
Ονομαστική Συχνότητα	50 Hz
Πλευρά YT	150 kV
Πλευρά MT	20 kV
Τάση Βραχυκυκλώσεως u_k	20 %
Τάση Βραχυκυκλώσεως, u_{k0}	20 %
Χαρακτηριστικός αριθμός M/Σ	Dyn1
Αντίσταση κατά Αστέρα, R_c	12 Ω

Πίνακας 4 Στοιχεία Μετασχηματιστή MT/XT

Ονομαστική Ισχύς M/Σ (kVA)	Τάση Βραχυκύκλωσης u_k (%)	Τάση Βραχυκύκλωσης u_{k0} (%)	Αριθμός ομάδας μετασχηματιστή
100	4	3	Yzn11
160	4	3	Dyn11
250	4	3	Dyn11
400	4	3	Dyn11
630	4	3	Dyn11
1000	6	3	Dyn11

Το σύστημα προστασίας που ακολουθήθηκε στην γραμμή MT, αποτελείται από:

- ✓ Έναν διακόπτη ισχύος, ένα H/N (ρελέ) υπερέντασης και ένα μετασχηματιστή ρεύματος. Ο μετασχηματιστής αυτός εποπτεύει την κύρια τροφοδότηση, ενώ ο διακόπτης ισχύος και ο H/N ανιχνεύουν και εκκαθαρίζουν αμέσως και με ασφαλή τρόπο τυχόν βραχυκυκλώματα που μπορεί να προκύπτουν κατά μήκος της γραμμής MT.
- ✓ A/Z (Ασφάλειες τύπου T), οι οποίες είναι εγκατεστημένες στους Y/Σ MT/XT, τύπου 30T (για τις διακλαδώσεις)

Αναλυτικότερα, μοντελοποιήθηκαν τα στοιχεία ορισμένου χρόνου (definite time) και υπερβολικά αντιστρόφου χρόνου (Extremely Inverse Time-EIT) του τυποποιημένου εμπορικού H/N ABB REF 615 (μπλοκ λειτουργίας: 51P, 50P1, 51N, 50N) με την βοήθεια του λογισμικού Power Factory. Ο Κύκλος Λειτουργίας του H/N υπερέντασης ετέθη σε μία Στιγμαία Λειτουργία και τρεις Λειτουργίες Χρονικής Καθυστέρησης. Στην παρούσα εργασία, εξετάστηκε η περίπτωση της Στιγμαίας Λειτουργίας, για χρόνο εκκαθάρισης $t=0.15$ sec.

Η Λειτουργία Χρονικής Καθυστέρησης ορίστηκε, με βάση το πρότυπο IEC Extremely Inverse TCC, επιλέγοντας τις σταθερές $a=2$ και $B=80$ A στην παρακάτω εξίσωση:

$$t = \frac{k \times B}{\left(\frac{I}{I_s}\right)^a - 1} \quad (22)$$

Όπου:

t : ο χρόνος λειτουργίας (sec),

k : πολλαπλασιαστή χρόνου (TMS)

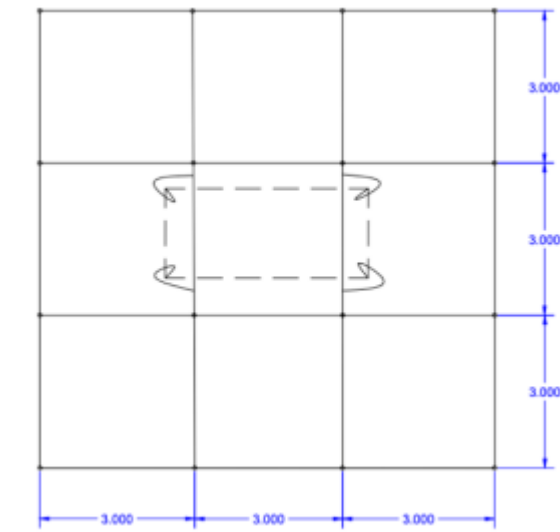
I : ένταση ρεύματος σφάλματος (A)

I_s : ρύθμιση έντασης ρεύματος (A)

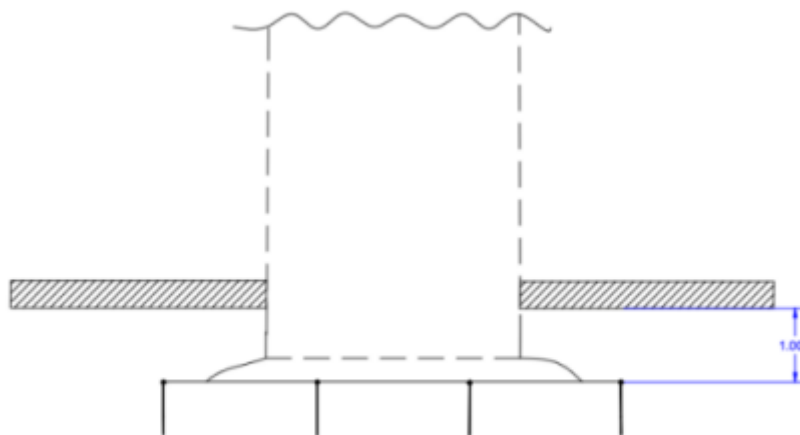
Σημειώνεται ότι για να επιτευχθεί επιλογική συνεργασία μεταξύ του Δ/I της κύριας τροφοδοσίας και των A/Z , απαιτείται απόσταση τουλάχιστον 0.4 sec μεταξύ των δύο χαρακτηριστικών.

4.3.3 Εξεταζόμενο Πλέγμα Γείωσης

Το πλέγμα γείωσης, που εξετάστηκε απεικονίζεται στις παρακάτω εικόνες (κάτοψη - τομή), αποτελείται από αγωγούς $35 \text{ mm}^2 \text{ Cu}$. Συνίσταται από 9 τετραγωνικά πλέγματα διαστάσεων $3 \text{ m} \times 3 \text{ m}$, τα οποία δημιουργούν ένα πλέγμα συνολικών διαστάσεων $9 \text{ m} \times 9 \text{ m}$. Το πλέγμα είναι θαμμένο στα 1 m υπό της γης, όπου είναι τοποθετημένες 16 ράβδοι γείωσης. Το πλέγμα μελετήθηκε τόσο για την περίπτωση μονοστρωματικού όσο και διστρωματικού μοντέλου εδάφους.



Εικόνα 4.3.2 Εξεταζόμενο Πλέγμα Γείωσης (κάτοψη)



Εικόνα 4.3.3 Εξεταζόμενο Πλέγμα Γείωσης (Πλάγια τομή)

4.3.4 Μεθοδολογία και Σενάρια Μελέτης

Για τους σκοπούς τις παρούσας διπλωματικής, μελετήθηκαν κάποια σενάρια σε

- ✓ ομοιόμορφη δομή εδάφους και
- ✓ σε διστρωματική δομή εδάφους.

Πιο συγκεκριμένα, θεωρήθηκαν δύο διαφορετικά αντιπροσωπευτικά σενάρια μονοστρωματικής δομής εδάφους. Το πρώτο αφορά ειδική αντίσταση $\rho = 100\Omega m$ και το δεύτερο $\rho = 1000\Omega m$. Στη συνέχεια μελετήθηκαν για αυτά τα εδάφη διαφορετικές παραλλαγές του πλέγματος γείωσης προκειμένου να γίνουν συγκριτικά γραφήματα με τις αντίστοιχες μετρήσεις στην περίπτωση διστρωματικής οριζόντιας δομής εδάφους, στην οποία επίσης θεωρήθηκαν δύο διαφορετικά σενάρια. Στο πρώτο είχαμε $\rho_1 = 100\Omega m$ & $\rho_2 = 1000\Omega m$ ενώ στο δεύτερο $\rho_1 = 1000\Omega m$ & $\rho_2 = 100\Omega m$, όπου:

ρ_1 : ειδική αντίσταση εδάφους άνω στρώματος,
 ρ_2 : ειδική αντίσταση εδάφους, κάτω στρώματος,
προκειμένου να εξάγονται αξιόπιστες μετρήσεις.

Το ύψος του άνω στρώματος στο διστρωματικό έδαφος θεωρήθηκε σταθερό και ίσο με **4m**, για να διευκρινιστεί περαιτέρω η επίδραση που έχει το βάθος τοποθέτησης των ράβδων.

Στη συνέχεια, τρέχοντας κάθε σενάριο υπολογίστηκε η **Συνολική Αντίσταση Γείωσης** από το πρόγραμμα SES CDEGS.

Με την χρήση του προγράμματος DigSILENT PowerFactory και την αντίσταση γείωσης που βρήκαμε προηγουμένως υπολογίσαμε το **Ρεύμα Μονοφασικό Σφάλμα** ως προς γη σε τρία σημεία της γραμμής:

1. Κοντά στον Υ/Σ ΥΤ/ΜΤ (σχεδόν στην αρχή της γραμμής)
2. 10km μακριά από τον Υ/Σ ΥΤ/ΜΤ (στη μέση της γραμμής)
3. 20km μακριά από τον Υ/Σ ΥΤ/ΜΤ (στο τέλος της γραμμής)

Εξετάστηκε ένα σενάριο αναφορικά με το χρόνο εκκαθάρισης του σφάλματος. Αυτό, σχετίζεται με τα παροδικά σφάλματα που πιθανώς εμφανίζονται στο δίκτυο και γι' αυτά ο χρόνος εκκαθάρισης θεωρήθηκε η **Στιγμιαία Λειτουργία του Δ/Ι (0.15 s)**. Μελετήθηκαν οι ακόλουθες παραλλαγές του παραπάνω συστήματος γείωσης:

Διάσταση Πλέγματος (Grid Size)

Αρχικά κάνουμε σύγκριση στις τιμές που προκύπτουν ανάλογα με το μέγεθος του πλέγματος (grid size). Δοκιμάζουμε τα μεγέθη με σταθερό το mesh size στα 3x3:

- ✓ $9m \times 9m$
- ✓ $4.5m \times 4.5m$ (μείωση 50%),
- ✓ $12m \times 12m$ (αύξηση 50% για λόγους μελέτης της επίδρασης των διαστάσεων αποκλειστικά)

Οι παραπάνω παραλλαγές γίνονται χωρίς να έχουν προστεθεί επιπλέον κατακόρυφοι ράβδοι στο πλέγμα γείωσης.

Πυκνότητα Πλέγματος (Mesh Size)

Στη συνέχεια, κρατώντας σταθερό το μέγεθος του πλέγματος (grid size) στις αρχικές του διαστάσεις $9m \times 9m$, μεταβάλλουμε την τιμή του mesh size:

- ✓ στα 9×9 και
- ✓ στα 3×3 .

Οι παραπάνω παραλλαγές γίνονται χωρίς να έχουν προστεθεί επιπλέον κατακόρυφοι ράβδοι στο πλέγμα γείωσης.

Όταν ολοκληρωθούν οι συγκρίσεις μεταξύ του grid size και του mesh size, προσθέτουμε ράβδους σε πλέγμα με σταθερό μέγεθος $9m \times 9m$ και mesh size 3×3 .

Πλήθος Ράβδων

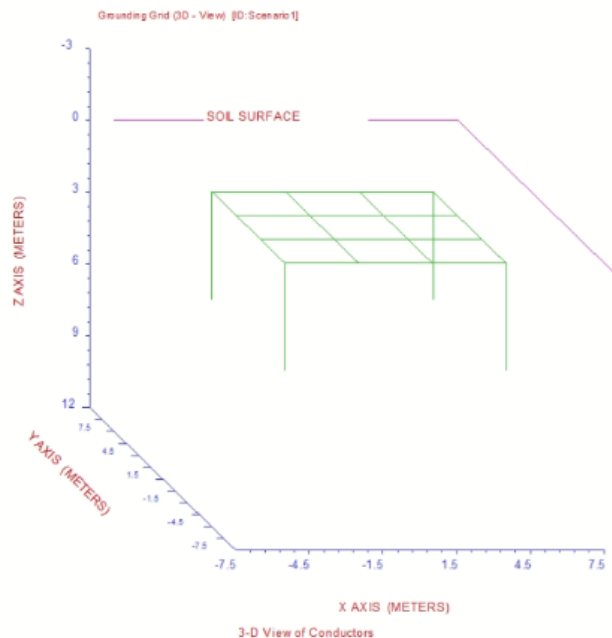
Οι ράβδοι τοποθετούνται στις γωνίες και περιμετρικά στο πλέγμα γείωσης. Σε αυτό το σημείο της ανάλυσης κρατάμε σταθερό το ύψος των ράβδων στα 2.5m και μεταβάλλουμε το πλήθος τους ως εξής:

- ✓ 4 ράβδοι
- ✓ 8 ράβδοι
- ✓ 16 ράβδοι

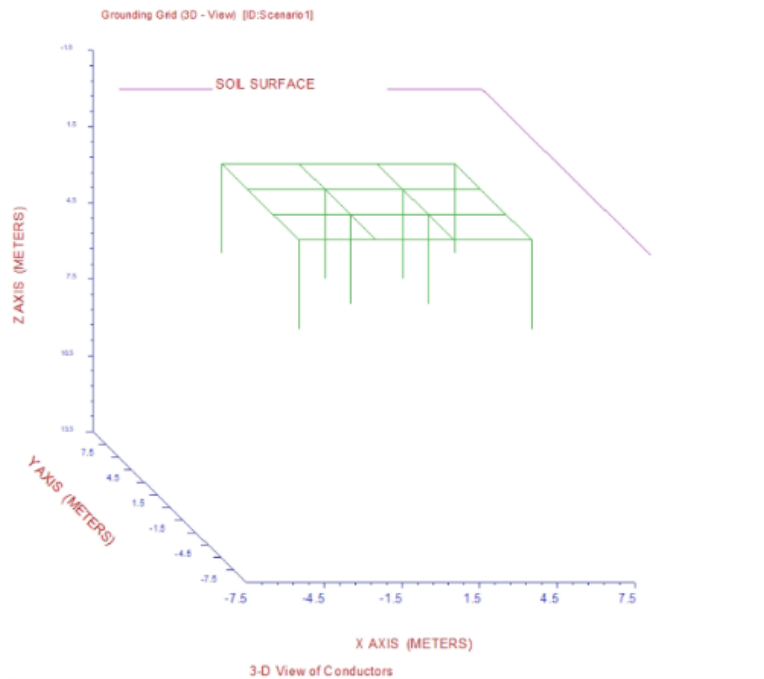
Μήκος Ράβδων

Στο τελευταίο στάδιο της ανάλυσης, κρατάμε σταθερό τον πλήθος των ράβδων (4 ράβδοι) και μεταβάλλουμε το ύψος τους. Οι τιμές που δοκιμάσαμε είναι:

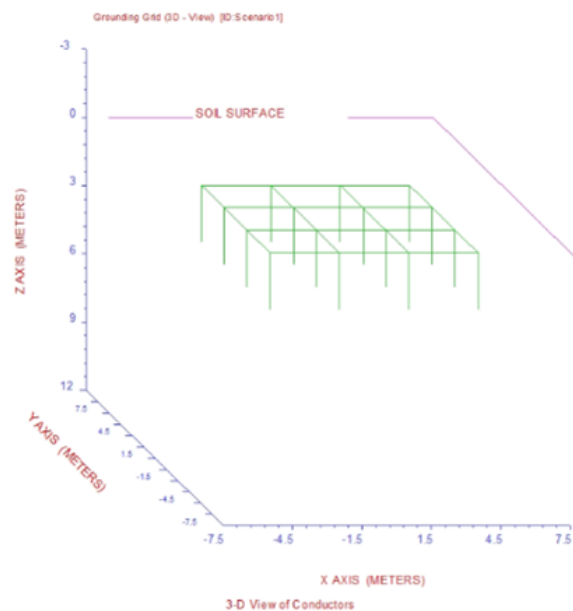
- ✓ 2.5m
- ✓ 3.5m
- ✓ 4.5m



Εικόνα 4.3.4 Πλέγμα Γείωσης με 4 ράβδους μήκους 4.5m η καθεμία



Εικόνα 4.3.5 Πλέγμα Γείωσης με 8 ράβδους μήκους 3.5m η καθεμία



Εικόνα 4.3.6 Πλέγμα Γείωσης με 16 ράβδους μήκους 2.5m η καθεμία

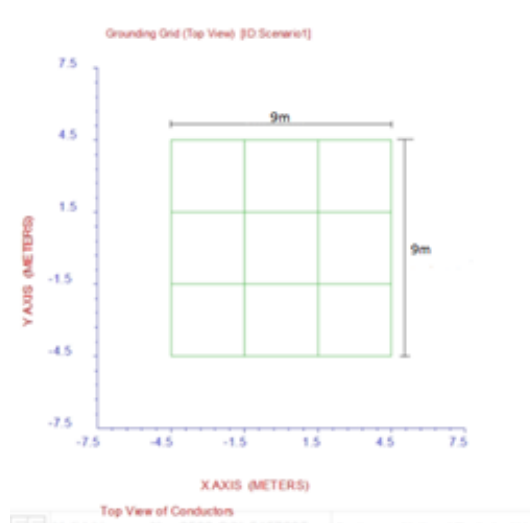
4.4 Αποτελέσματα Προσομοίωσης

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται με την μορφή γραφικών παραστάσεων και πινάκων τα αποτελέσματα που εξήχθησαν από τα εργαλεία PowerFactory και SES AutoGridPro. Ακολουθεί αναλυτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων.

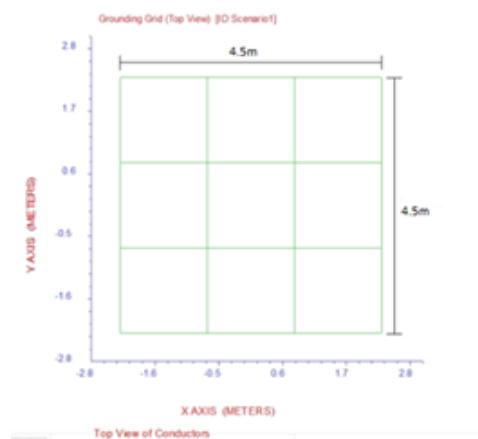
Παρουσιάζονται διαγράμματα, στα οποία φαίνονται οι συγκρίσεις μεταξύ των διαφόρων τύπων εδάφους, ανάλογα με τα σενάρια που μελετήθηκαν στην παρούσα διπλωματική. Οι τιμές που φαίνονται στα παρακάτω διαγράμματα των βηματικών τάσεων, αφορούν τις μέγιστες τιμές αυτών, ενώ για τις τάσεις επαφής λαμβάνουμε τις τιμές του μέγιστου ορίου, δηλαδή μέγιστες χειρότερες τιμές που μπορεί να προκαλέσουν θανατηφόρο ατύχημα.

4.4.1 Σύγκριση με βάση το Grid Size

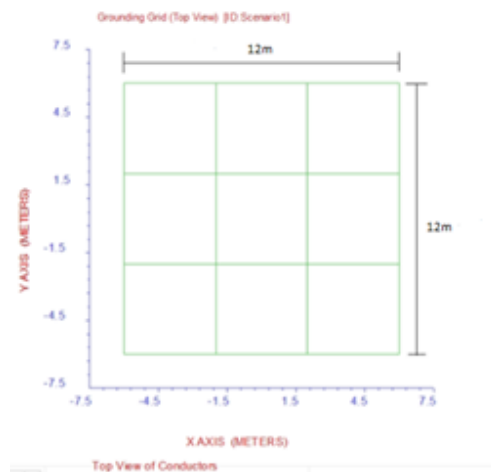
Εξετάζουμε το πλέγμα **χωρίς ράβδους**, κρατώντας σταθερό το mesh size 3x3 και μεταβάλλουμε το grid size από 4.5m x 4.5m σε 9m x 9m και 12m x 12m.



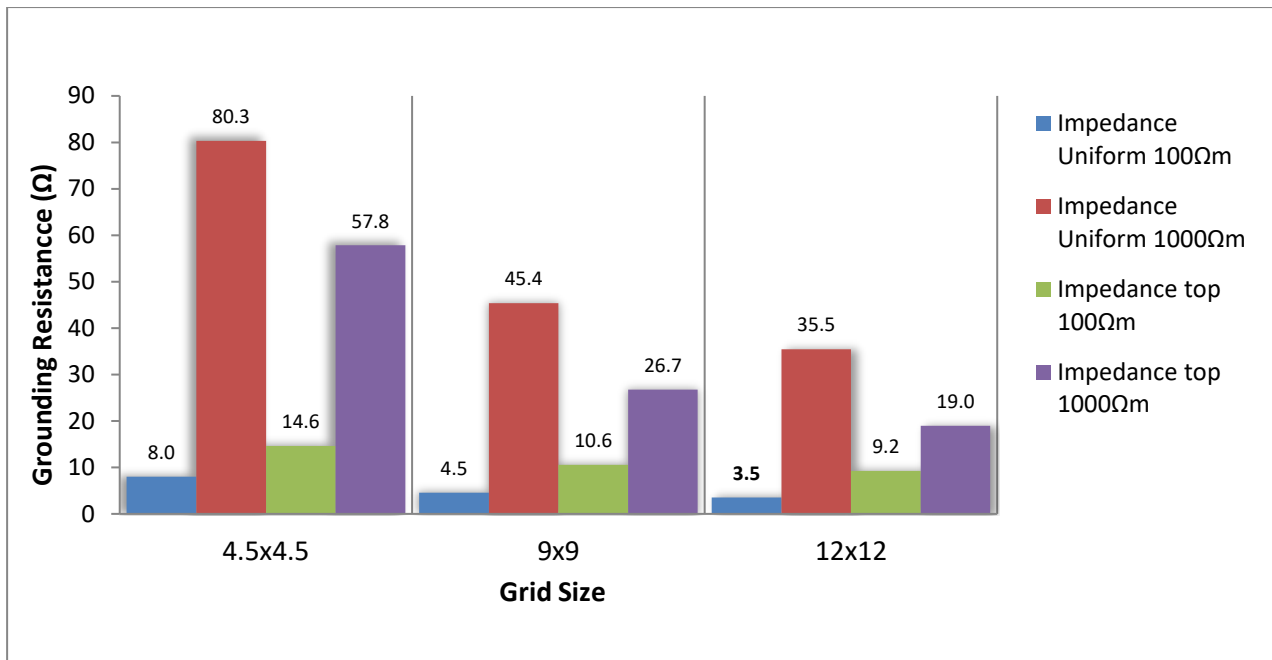
Εικόνα 4.4.1 Πλέγμα Γείωσης με διαστάσεις (grid size) 9m x 9m



Εικόνα 4.4.2 Πλέγμα γείωσης με διαστάσεις (grid size) 4.5m x 4.5m



Εικόνα 4.4.3 Πλέγμα Γείωσης με διαστάσεις (grid size) 12m x 12m

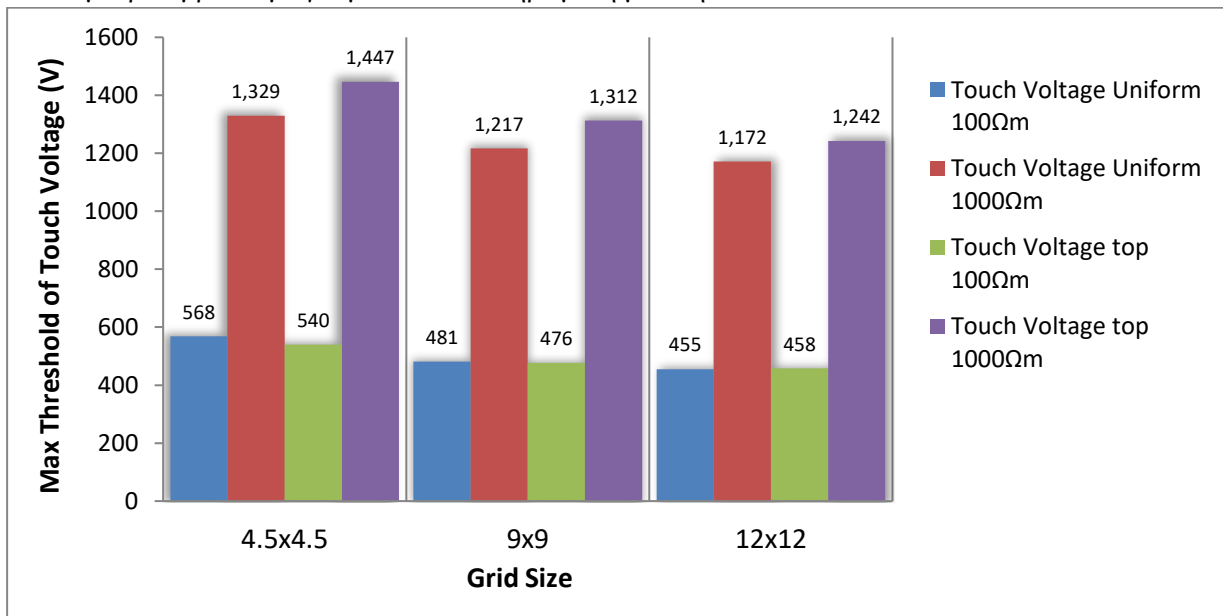


Διάγραμμα 1 Επίδραση Επιφάνειας Πλέγματος στην αντίσταση Γείωσης για διάφορες δομές εδάφους (mesh size 3x3)

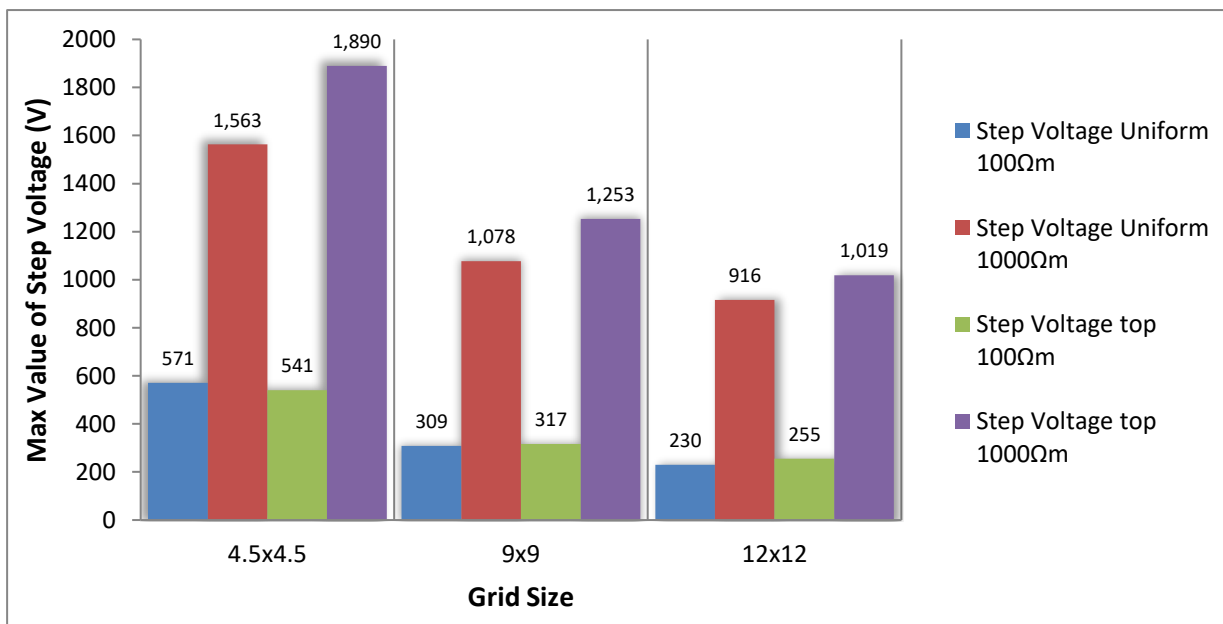
Παρατηρούμε ότι:

1. Η αντίσταση γείωσης στο μονοστρωματικό με $\rho = 1000 \Omega\text{m}$ είναι 10% μεγαλύτερη από την αντίστοιχη όταν το έδαφος είναι μονοστρωματικό με $\rho=100 \Omega\text{m}$, ανεξάρτητα με το πλέγμα γείωσης και την επιφάνειά του. Κάτι που ήταν αναμενόμενο, καθώς γνωρίζουμε ότι όσο μεγαλύτερη είναι η ειδική αντίσταση εδάφους, τόσο μικρότερες είναι η αντίσταση γείωσης και οι τάσεις (επαφής και βηματικές). Σε ένα πλέγμα γείωσης, γενικά στοχεύουμε σε χαμηλή τιμή αντίστασης γείωσης, αφού η χαμηλή αντίσταση συμβάλλει στη διασφάλιση αποτελεσματικής γείωσης και στην ελαχιστοποίηση του κινδύνου ηλεκτρικών βλαβών ή κινδύνων. Η χαμηλή αντίσταση γείωσης επιτρέπει την ομαλή και αποτελεσματική διάχυση των ηλεκτρικών ρευμάτων στο έδαφος, παρέχοντας προστασία από ηλεκτροπληξία και συμβάλλοντας στη σταθεροποίηση του ηλεκτρικού συστήματος.
2. Η αντίσταση γείωσης του διστρωματικού εδάφους με $\rho=100 \Omega\text{m}$ στο άνω στρώμα είναι κατά 83% μεγαλύτερη από την αντίστοιχη του μονοστρωματικού με $\rho=100 \Omega\text{m}$. Αυτό δείχνει, ότι ενώ το πλέγμα γείωσης είναι εξ' ολοκλήρου στο άνω στρώμα στο διστρωματικό έδαφος, η υψηλή ειδική αντίσταση εδάφους στο κάτω στρώμα φαίνεται να επηρεάζει άμεσα την επίδοση του συστήματος γείωσης.
3. Αντιθέτως, στην περίπτωση που το έδαφος είναι διστρωματικό με άνω στρώμα ίσο με $\rho=1000 \Omega\text{m}$ (υψηλή ειδική αντίσταση στο άνω στρώμα), τότε η αντίσταση γείωσης είναι μικρότερη κατά ένα ποσοστό της τάξεως του 28% από την αντίστοιχη όταν το έδαφος είναι μονοστρωματικό, με ειδική αντίσταση ίση με $1000 \Omega\text{m}$. Αυτό συμβαίνει λόγω της χαμηλής ειδικής αντίστασης $100\Omega\text{m}$ του κάτω στρώματος.
4. Οι περιπτώσεις #2 και #3 αφορούν την περίπτωση όπου το πλέγμα γείωσης είναι διαστάσεων $4.5\text{m} \times 4.5\text{m}$. Για πλέγματα γείωσης μεγαλύτερα ($9\text{m} \times 9\text{m}$ και $12\text{m} \times 12\text{m}$) οι αντίστοιχες ποσοστιαίες διαφορές είναι μεγαλύτερες. Ωστόσο, ακολουθούν το ίδιο «μοτίβο».
5. Όσο αυξάνεται η επιφάνεια που καταλαμβάνει το πλέγμα γείωσης (grid size) τόσο μειώνεται η αντίσταση γείωσης για όλες τις περιπτώσεις των δομών του εδάφους. Πιο συγκεκριμένα, υπό συνθήκες παρατηρείται μια μείωση της τάξης του 40% για μετάβαση από πλέγμα διαστάσεων $4,5\text{m} \times 4,5\text{m}$ σε $9\text{m} \times 9\text{m}$. Κατά αντιστοιχία, παρατηρείται μια μείωση και στη μετάβαση από $9\text{m} \times 9\text{m}$ σε $12\text{m} \times 12\text{m}$. Παρόλα αυτά, αξίζει να αναφερθεί ότι το πλέγμα $12\text{m} \times 12\text{m}$ θεωρείται

αρκετά μεγάλο και ενδεχομένως να δημιουργεί πρόβλημα χωροθέτησης του. Παρόλα αυτά το συμπεριλαμβάνουμε για μια πιο ολοκληρωμένη μελέτη.



Διάγραμμα 2 Επίδραση Επιφάνειας Πλέγματος στην αναπτυσσόμενη τάση επαφής για διάφορες δομές εδάφους (mesh size 3x3)



Διάγραμμα 3 Επίδραση Επιφάνειας Πλέγματος στην αναπτυσσόμενη βηματική τάση για διάφορες δομές εδάφους (mesh size 3x3)

6. Παρόμοια αποτελέσματα λαμβάνουμε και για τα αποτελέσματα των τάσεων επαφής και των βηματικών τάσεων. Για παράδειγμα, όσον αφορά την τάση επαφής παρατηρείται μια μείωση της τάξης από 9% - 15% για μετάβαση από πλέγμα διαστάσεων από 4.5m x 4.5 m σε 9m x 9m. Ενώ όσον αφορά την βηματική τάση παρατηρείται μια μείωση της τάξης από 30% - 40% για μετάβαση από πλέγμα διαστάσεων 4.5m x 4.5 m σε 9m x 9m, για όλους τους τύπους εδάφους
7. Σε ένα έδαφος δύο στρωμάτων με υψηλή ειδική αντίσταση στο ανώτερο στρώμα, η βηματική, αλλά και η τάση επαφής αναμένονται να είναι μικρότερες σε σύγκριση με ένα ομοιόμορφο έδαφος, με την ίδια συνολική ειδική αντίσταση. Ο λόγος για αυτό είναι ότι η υψηλή ειδική

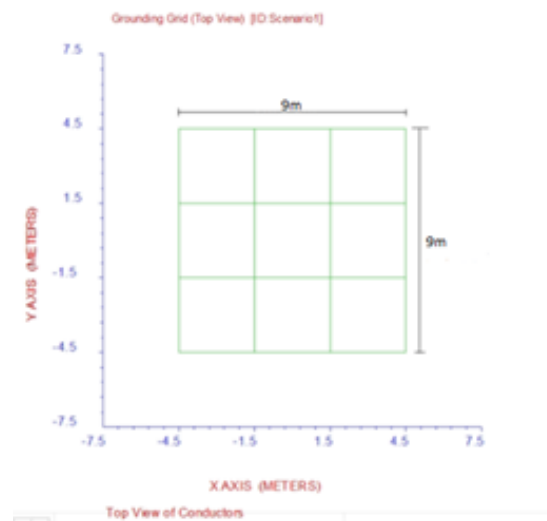
αντίσταση του άνω στρώματος περιορίζει τη ροή του ηλεκτρικού ρεύματος, προκαλώντας τη ροή μεγαλύτερου ρεύματος μέσω του κατώτερου στρώματος, το οποίο έχει συνήθως χαμηλότερη ειδική αντίσταση. Ως αποτέλεσμα, η πτώση τάσης στο επάνω στρώμα είναι μεγαλύτερη, μειώνοντας τις επικίνδυνες τάσεις και τον κίνδυνο ηλεκτροπληξίας. Αντίθετα, σε ένα ομοιόμορφο έδαφος με την ίδια ειδική αντίσταση, το ρεύμα κατανέμεται πιο ομοιόμορφα σε όλο το έδαφος, με αποτέλεσμα υψηλότερη τάση επαφής. Αυτό αυξάνει τον κίνδυνο ηλεκτροπληξίας.

8. Ωστόσο, στην περίπτωση των παραπάνω μετρήσεων δεν φαίνεται κάτι τέτοιο να επιβεβαιώνεται. Αντίθετα, γίνεται εμφανές ότι τόσο η τάση επαφής όσο και η βηματική, στο διστρωματικό έδαφος, με ειδική αντίσταση άνω στρώσης 100 Ωm (100/1000) είναι λίγο μικρότερες απ' ό,τι στο μονοστρωματικό με ειδική αντίσταση 100 Ωm. Ενώ στο διστρωματικό 1000Ωm/100Ωm είναι λίγο μεγαλύτερη από το μονοστρωματικό 1000 Ωm. Αυτό υποδηλώνει ότι το σύστημα γείωσης μπορεί να μην λειτουργεί όπως προβλέπεται και να εγκυμονεί πιθανούς κινδύνους. Μερικοί πιθανοί λόγοι για αυτή την κατάσταση είναι οι εξής:
 - a. Ανεπαρκής σχεδιασμός συστήματος γείωσης: Το σύστημα γείωσης μπορεί να μην έχει σχεδιαστεί σωστά, λαμβάνοντας υπόψη τις ειδικές συνθήκες του εδάφους και την κατανομή της ειδικής αντίστασης. Αυτό θα μπορούσε να οδηγήσει σε αναποτελεσματική κατανομή ηλεκτρικού ρεύματος και υψηλότερες τάσεις επαφής.
 - b. Ανεπαρκές ηλεκτρόδιο γείωσης: Το ηλεκτρόδιο γείωσης, όπως οι ράβδοι γείωσης ή οι πλάκες, ενδέχεται να μην έχει το σωστό μέγεθος ή υπάρχει και η περίπτωση να μην έχει γίνει σωστά η τοποθέτηση. Κάτι όμως που ενδέχεται να οδηγήσει σε αυξημένη αντίσταση και υψηλότερες τάσεις αφής.
 - c. Εσφαλμένες συνδέσεις: Οι κακές συνδέσεις μεταξύ των στοιχείων του συστήματος γείωσης, όπως καλώδια ή αγωγοί, μπορεί να αυξήσουν την αντίσταση και να οδηγήσουν σε υψηλότερες τάσεις αφής.
 - d. Περιεκτικότητα σε υγρασία του εδάφους: Η περιεκτικότητα σε υγρασία του εδάφους μπορεί να επηρεάσει σημαντικά την ειδική αντίστασή του. Εάν η περιεκτικότητα σε υγρασία του εδάφους δεν ληφθεί υπόψη ή δεν ελέγχεται, μπορεί να επηρεάσει τη συνολική κατανομή της ειδικής αντίστασης και να οδηγήσει σε υψηλότερες τάσεις αφής.
 - e. Ανακριβείς μετρήσεις ειδικής αντίστασης εδάφους: Εάν οι μετρήσεις ειδικής αντίστασης των στρωμάτων εδάφους είναι ανακριβείς, μπορεί να οδηγήσει σε εσφαλμένες υποθέσεις και ακατάλληλο σχεδιασμό του συστήματος γείωσης.
9. Στην περίπτωση της παρούσας προσομοίωσης είναι πιθανόν να προκύπτουν αυτά τα μη αναμενόμενα αποτελέσματα, καθώς για λόγους απλότητας δεν έχει τοποθετηθεί στην επιφάνεια του εδάφους υλικό επίστρωσης υψηλής ειδικής αντίστασης. Ένας ακόμη λόγος για τον οποίο μπορεί να μην έχουμε τα αναμενόμενα αποτελέσματα είναι να μην έχει τοποθετηθεί το πλέγμα σε σωστό βάθος στο έδαφος.
10. Συνεπώς, θα ήταν πιο λογικό στο παραπάνω διάγραμμα η τάση επαφής στο διστρωματικό έδαφος με ειδική αντίσταση άνω στρώματος 100Ωm (100/1000) να είναι λίγο μεγαλύτερη από το μονοστρωματικό έδαφος με ειδική αντίσταση 100 Ωm και αντίθετα στο διστρωματικό έδαφος με ειδική αντίσταση άνω στρώματος 1000 Ωm (1000/100) να είναι λίγο μικρότερη από το μονοστρωματικό έδαφος με ειδική αντίσταση 1.000 Ωm.

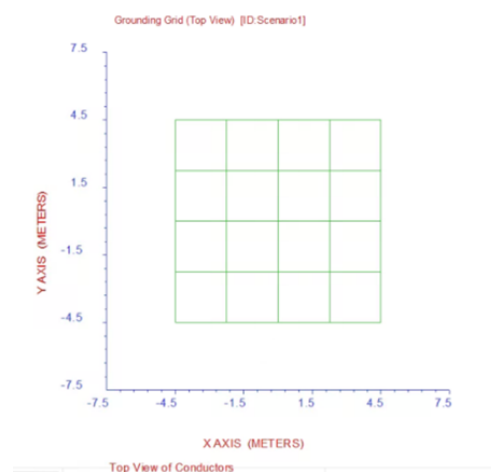
4.4.2 Σύγκριση με βάση το Mesh Size

Εξετάζουμε την επίδραση του mesh size (τετραγωνικά ανοίγματα) για πλέγμα γείωσης συνολικής επιφάνειας 9m × 9m. Στην περίπτωση αυτή παρατηρείται ένα παρόμοιο μοτίβο με τα διαγράμματα που παρουσιάστηκαν προηγουμένως. Μερικά αποτελέσματα που αναμένουμε, αυξάνοντας την πυκνότητα του πλέγματος είναι:

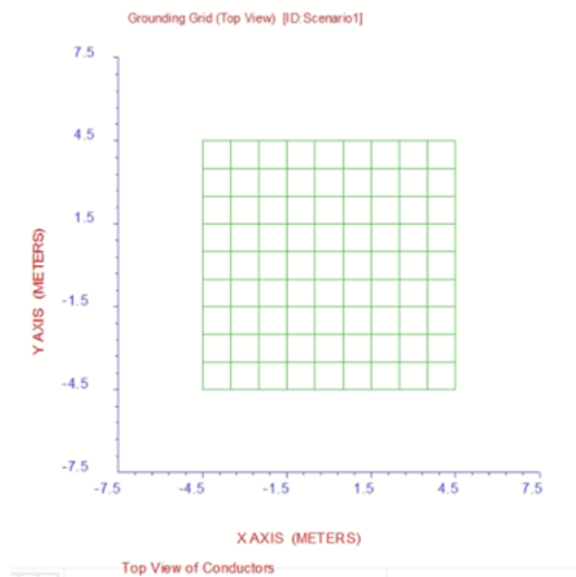
1. Μειωμένη αντίσταση: Με ένα πιο πυκνό πλέγμα, η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων γείωσης μειώνεται, γεγονός που μειώνει την αντίσταση μεταξύ τους. Ως αποτέλεσμα, η σύνθετη αντίσταση του δικτύου (αντίσταση γείωσης) μειώνεται.
2. Βελτιωμένη κατανομή ρεύματος: Ένα πιο πυκνό πλέγμα βοηθά στην πιο ομοιόμορφη κατανομή του ηλεκτρικού ρεύματος στο σύστημα γείωσης. Αυτό μπορεί να βοηθήσει στην αποφυγή εντοπισμένων περιοχών υψηλής αντίστασης και στη βελτίωση της συνολικής απόδοσης του συστήματος γείωσης.
3. Ενισχυμένη διαρροή ρεύματος σφάλματος: Το πυκνότερο πλέγμα επιτρέπει την καλύτερη διασπορά των ρευμάτων σφάλματος στο έδαφος. Αυτό βοηθά στη μείωση του κινδύνου ηλεκτροπληξίας και στην ελαχιστοποίηση της ζημιάς στον εξοπλισμό.
4. Χαμηλότερες βηματικές τάσεις και τάσεις επαφής: Μια χαμηλότερη συνολική αντίσταση γείωσης που προκύπτει από ένα πιο πυκνό πλέγμα μπορεί να βοηθήσει στη μείωση των επικίνδυνων τάσεων, οι οποίες είναι σημαντικοί παράγοντες για τη διασφάλιση της ηλεκτρικής ασφάλειας για το προσωπικό.



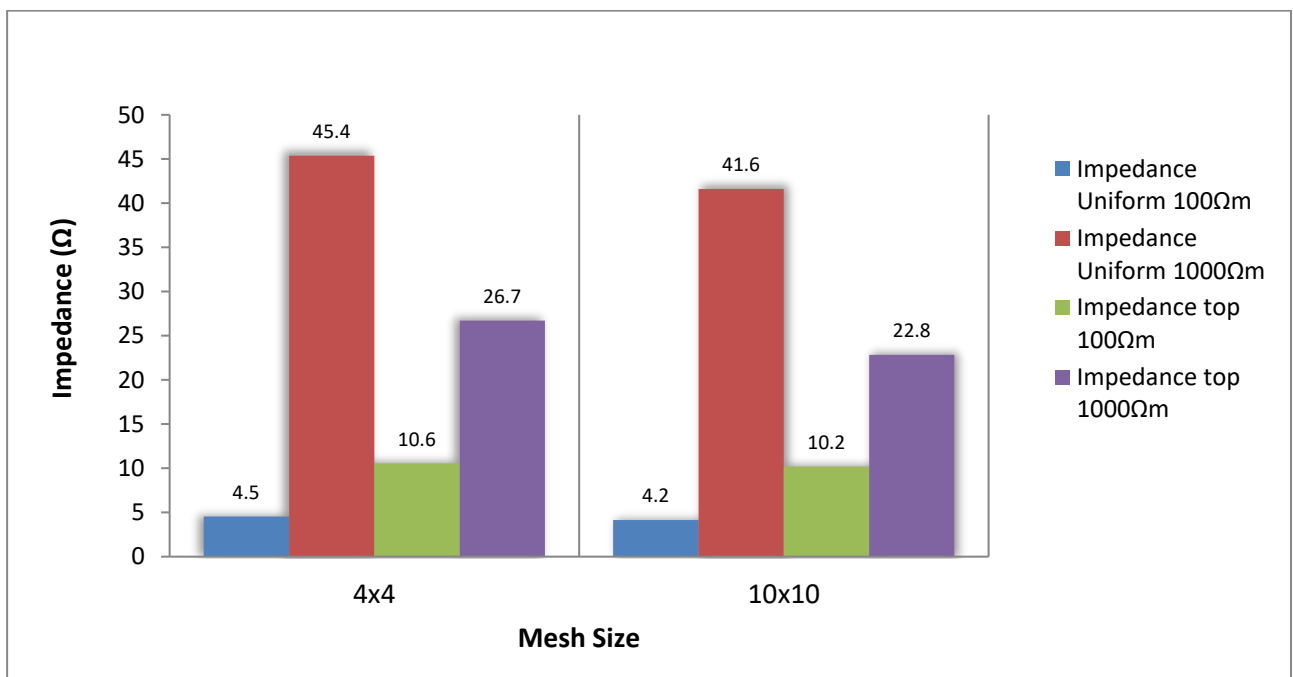
Εικόνα 4.4.4 Πλέγμα Γείωσης - mesh size 3x3



Εικόνα 4.4.5 Πλέγμα Γείωσης - mesh size 4x4



Εικόνα 4.4.6 Πλέγμα Γείωσης - mesh size 9x9



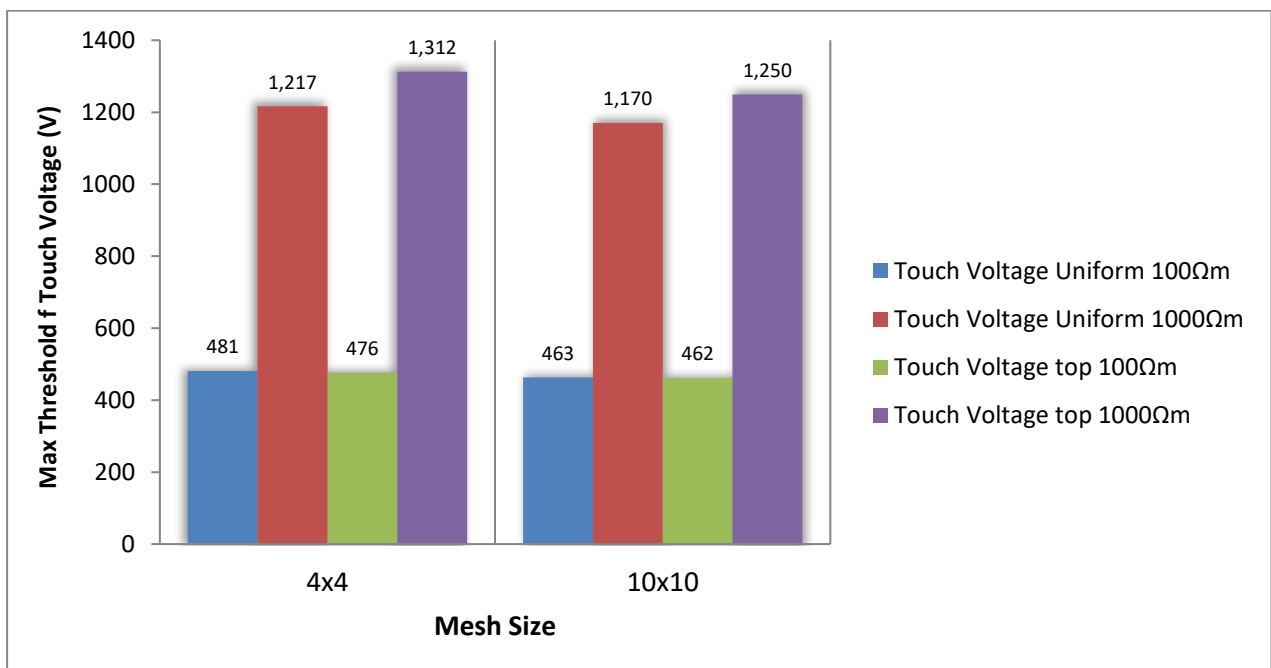
Διάγραμμα 4 Επίδραση mesh size στην αντίσταση Γείωσης για διάφορες δομές εδάφους (grid size: 9x9)

Παρατηρούμε ότι:

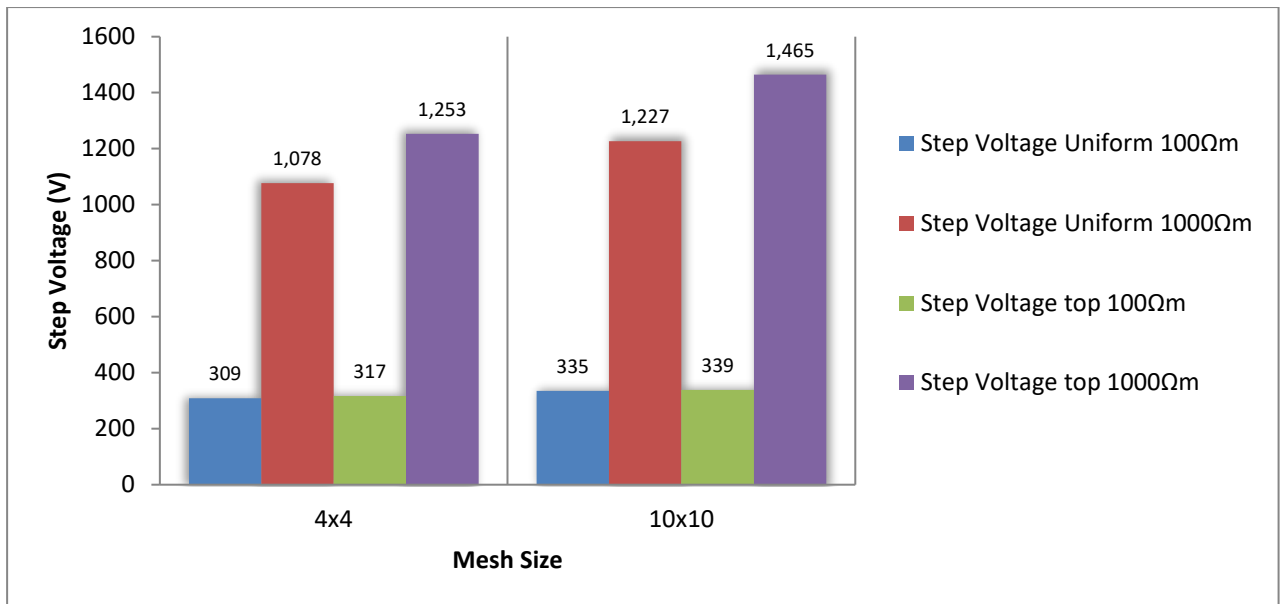
1. Η αντίσταση γείωσης στο μονοστρωματικό με $\rho=1000 \Omega\text{m}$ είναι 10% μεγαλύτερη από την αντίστοιχη όταν το έδαφος είναι μονοστρωματικό με $\rho=100 \Omega\text{m}$, ανεξάρτητα από το πλέγμα.
2. Η αντίσταση γείωσης του διστρωματικού εδάφους με $\rho=100 \Omega\text{m}$ στο άνω στρώμα είναι τουλάχιστον δύο φορές μεγαλύτερη από την αντίστοιχη του μονοστρωματικού με $\rho=100 \Omega\text{m}$. Αυτό δείχνει, ότι η υψηλή ειδική αντίσταση, στο κάτω στρώμα του διστρωματικού εδάφους, έχει αρνητική επίδραση στην επίδοση του συστήματος γείωσης.
3. Αντιθέτως, στην περίπτωση που το έδαφος είναι διστρωματικό με άνω στρώμα ίσο με $1000 \Omega\text{m}$ (υψηλή ειδική αντίσταση στο άνω στρώμα), τότε είναι μικρότερη κατά ένα ποσοστό της τάξεως του 41% η αντίσταση του εδάφους από την αντίστοιχη όταν το έδαφος είναι μονοστρωματικό με ειδική αντίσταση ίση με $1000 \Omega\text{m}$. Αυτό δείχνει ότι να υπάρχει χαμηλή ειδική αντίσταση στο

κάτω στρώμα του διστρωματικού εδάφους, είναι σημαντικό για την επίδοση του συστήματος γείωσης.

4. Οι περιπτώσεις #2 και #3 αφορούν την περίπτωση όπου το πλέγμα γείωσης είναι διαστάσεων 9x9. Για πλέγματα γείωσης μεγαλύτερα (12x12) οι αντίστοιχες ποσοστιαίες διαφορές ενδέχεται να είναι μεγαλύτερες. Ωστόσο, στην παρούσα διπλωματική έγινε μελέτη στο mesh size, όταν το μέγεθος του πλέγματος (grid size) ήταν 9x9.
5. Όσο αυξάνεται το mesh size του πλέγματος γείωσης (πιο πυκνό πλέγμα γείωσης) τόσο μειώνεται η αντίσταση γείωσης για όλες τις περιπτώσεις των δομών του εδάφους. Πιο συγκεκριμένα, υπό συνθήκες παρατηρείται μια μείωση της τάξης από 8 -15 % για μετάβαση από mesh size 3x3 σε 9x9. Αυτό ήταν αναμενόμενο καθώς, ένα πιο πυκνό πλέγμα παρέχει περισσότερες διαδρομές για τη ροή του ηλεκτρικού ρεύματος, μειώνοντας τη συνολική αντίσταση του δικτύου.
6. Όσο αυξάνεται το mesh size, μειώνεται ελαφρώς η αναπτυσσόμενη τάση επαφής για όλες τις περιπτώσεις των δομών του εδάφους. Πιο συγκεκριμένα, υπό συνθήκες παρατηρείται μια μείωση της τάξης από 3% - 4% για διπλασιασμό του mesh size. Αυτό ήταν επίσης αναμενόμενο καθώς, ένα πιο πυκνό πλέγμα παρέχει περισσότερες διαδρομές για τη ροή του ηλεκτρικού ρεύματος έχοντας αποτελεσματικότερη διαρροή της τάσης.
7. Όσο αυξάνεται το mesh size, αυξάνεται ελαφρώς η βηματική τάση για όλες τις περιπτώσεις των δομών του εδάφους. Πιο συγκεκριμένα, μια αύξηση 8%-17% παρατηρείται για διπλασιασμό του mesh size.
8. Παρατηρούμε όμοια αποτελέσματα με προηγουμένως συγκρίνοντας την βηματική τάση και τάση επαφής στο διστρωματικό και στο μονοστρωματικό έδαφος. Πιο συγκεκριμένα, θα ήταν πιο λογικό η βηματική τάση και η τάση επαφής στο διστρωματικό έδαφος με χαμηλή αντίσταση γείωσης (100Ωm) στο άνω στρώμα (100/1000) να είναι λίγο μεγαλύτερη από το την αντίστοιχη τιμή στο μονοστρωματικό έδαφος με ειδική αντίσταση 100Ωm και αντίθετα στο διστρωματικό έδαφος με υψηλή αντίσταση γείωσης (1000Ωm) στο άνω στρώμα (1000/100) να είναι λίγο μικρότερη από το μονοστρωματικό με ειδική αντίσταση 1000Ωm. Ωστόσο, κάτι τέτοιο επίσης δεν επιβεβαιώνεται, για τους λόγους που αναφέρθηκαν και στην προηγούμενη παράγραφο.



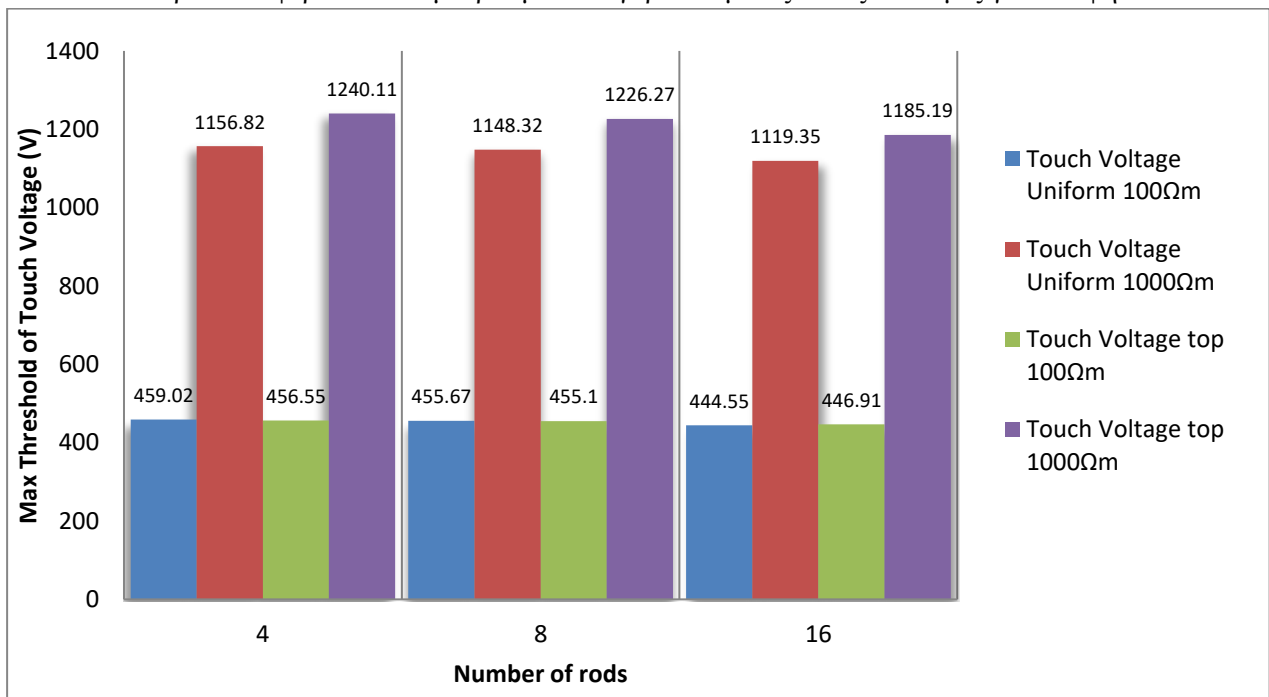
Διάγραμμα 5 Επίδραση mesh size στην τάση επαφής για διάφορες δομές εδάφους (grid size: 9x9)



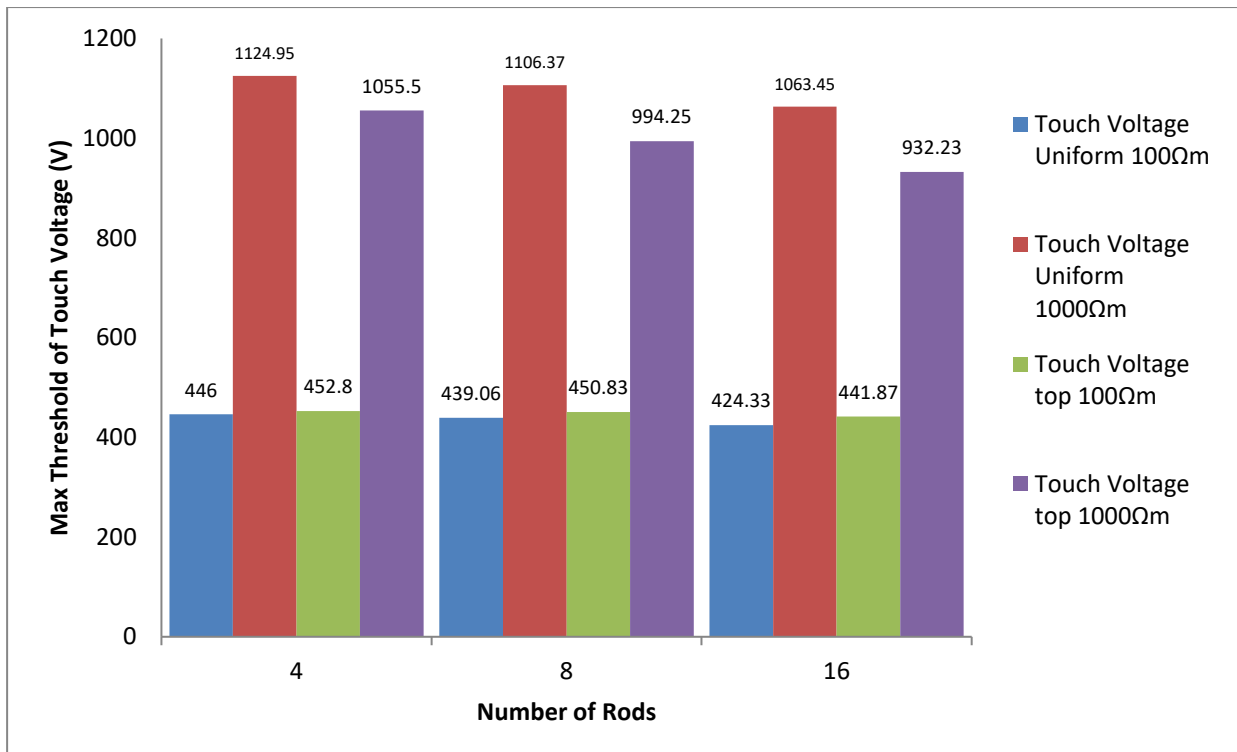
Διάγραμμα 6 Επίδραση mesh size στη βηματική τάση για διάφορες δομές εδάφους (grid size:9x9)

4.4.3 Σύγκριση με βάση το Ύψος Ράβδων

Στα παρακάτω διαγράμματα εξετάζουμε το πλέγμα όταν έχει grid size (μέγεθος πλέγματος) 9mx9m και mesh size (τετραγωνικά ανοίγματα) 4x4. Προσθέτουμε σταδιακά ράβδους σε πλήθος 4, 8 και 16, ύψους αρχικά 2.5m και μετά 4.5m. Στην πρώτη περίπτωση (2.5m ράβδοι), οι ράβδοι είναι μόνο στο άνω στρώμα του διστρωματικού εδάφους, ενώ στην δεύτερη περίπτωση (4.5m ράβδοι) οι ράβδοι αγγίζουν και το κάτω στρώμα του διστρωματικού εδάφους. Δεν χρησιμοποιήσαμε τις μετρήσεις για ύψος ράβδων 3.5m (οι οποίες φαίνονται στους πίνακες στο τέλος της εργασίας), καθώς δεν είχε κάποιο ιδιαίτερο ενδιαφέρον στα συμπεράσματα συγκριτικά με τις άλλες δύο τιμές για τα ύψη.



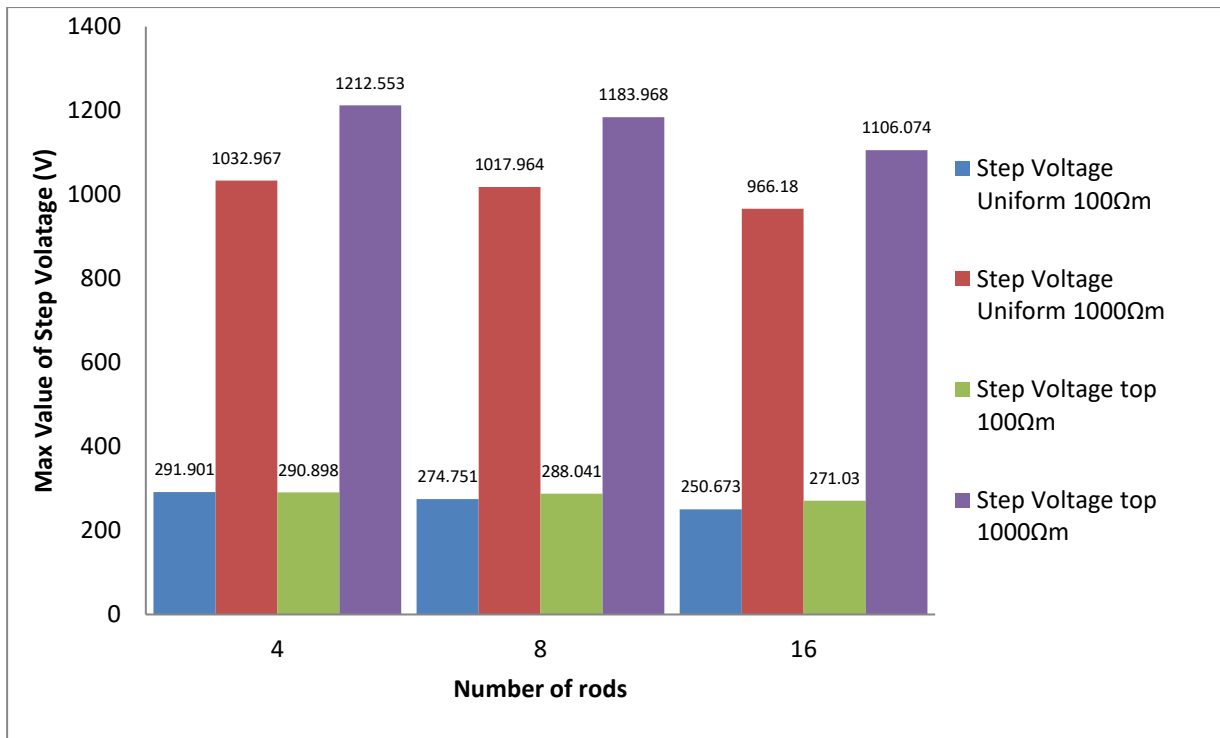
Διάγραμμα 7 Επίδραση του πλήθους ράβδων στη αναπτυσσόμενη τάση επαφής (2.5m rods, grid size 9x9, mesh size 3x3)



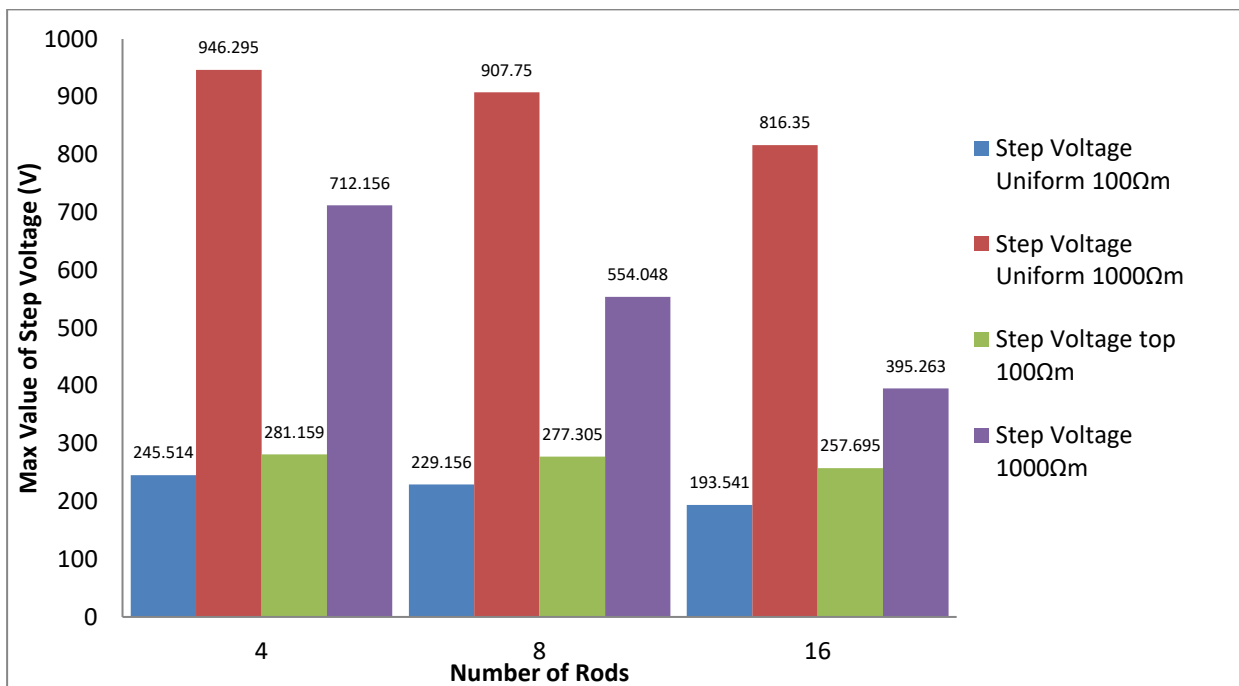
Διάγραμμα 8 Επίδραση του πλήθους ράβδων στη αναπτυσσόμενη τάση επαφής (4.5 m, grid size 9m×9m, mesh size 3×3)

Παρατηρούμε ότι:

1. Η μείωση στην τάση επαφής είναι σχεδόν ίδια μεταξύ μονοστρωματικού με $\rho=100\Omega\text{m}$ και μονοστρωματικού με $\rho=1000\Omega\text{m}$.
2. Στην περίπτωση που έχουμε ράβδους των 4.5m, βλέπουμε ότι η μείωση της βηματικής τάσης είναι αρκετά μεγαλύτερη στο διστρωματικό έδαφος.
3. Στην περίπτωση των ράβδων των 2.5m (οι οποίες δεν διεισδύουν στο κάτω στρώμα) η τάση επαφής στο μονοστρωματικό με $1000\Omega\text{m}$ είναι μικρότερη από αυτή στο διστρωματικό με άνω στρώμα $1000\Omega\text{m}$, ενώ στην περίπτωση των ράβδων των 4.5m (οι οποίες διεισδύουν στο κάτω στρώμα), στο μονοστρωματικό με $1000\Omega\text{m}$, έχουμε μεγαλύτερη τάση επαφής απ' ό τι στο διστρωματικό με $1000\Omega\text{m}$.



Διάγραμμα 9 Επίδραση του πλήθους ράβδων στη αναπτυσσόμενη βηματική τάση (2.5m, grid size 9m x 9m, mesh size 3x3)



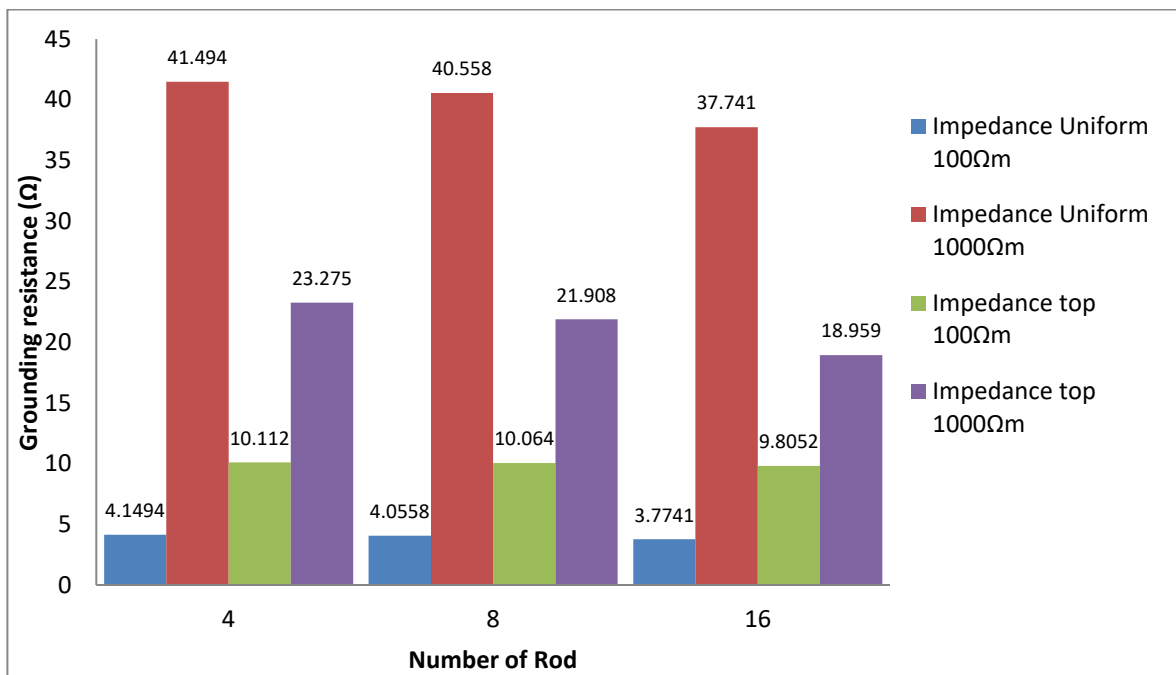
Διάγραμμα 10 Επίδραση του πλήθους ράβδων στη αναπτυσσόμενη βηματική τάση (4.5m, grid size 9x9, mesh size 3x3)

4. Στην περίπτωση που οι ράβδοι έχουν ύψος 2.5m, η βηματική τάση είναι μικρότερη στο μονοστρωματικό έδαφος με 1000Ωm, απ' ότι στο διστρωματικό έδαφος με άνω στρώμα 1000Ωm.
5. Αντίθετα στην περίπτωση που οι ράβδοι έχουν ύψος 4.5m, η βηματική τάση είναι μεγαλύτερη στο μονοστρωματικό έδαφος με 1000Ωm, απ' ότι στο διστρωματικό έδαφος με άνω στρώμα 1000Ωm.

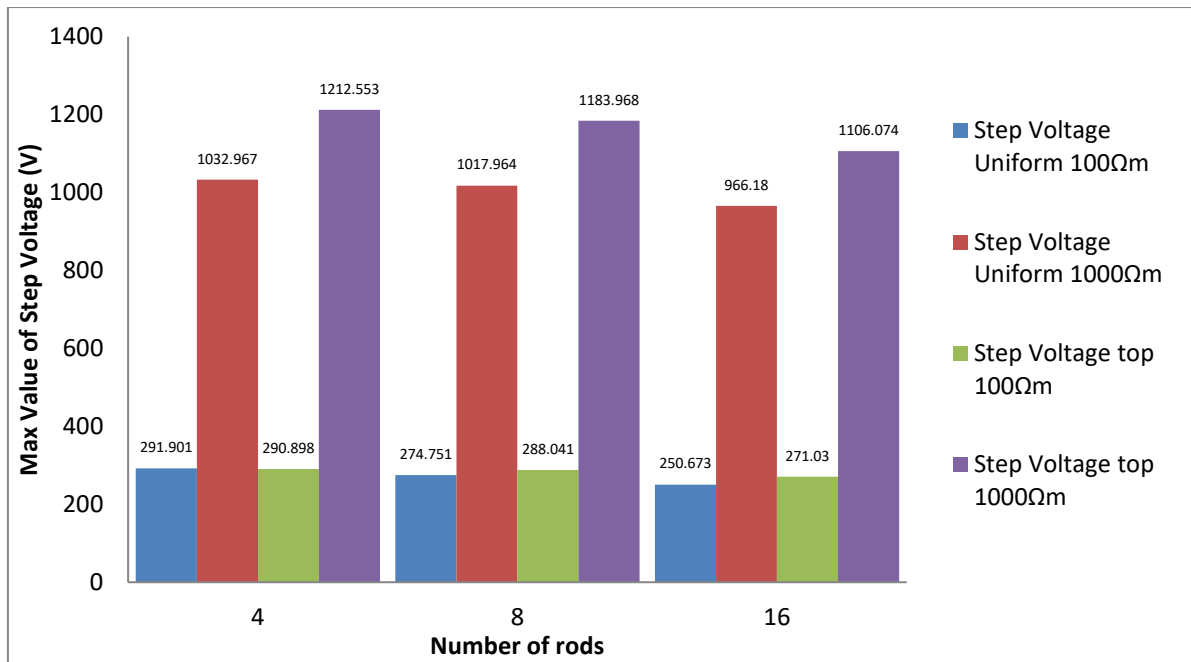
6. Αξίζει να σημειωθεί ότι, εάν όλες οι ράβδοι γείωσης εγκατασταθούν στο επάνω στρώμα ενός εδάφους δύο στρωμάτων και δεν έρχονται σε επαφή με το κάτω στρώμα, μπορεί να οδηγήσει σε αναποτελεσματική γείωση και πιθανά προβλήματα. Μερικές συνέπειες μπορεί να είναι οι εξής:
1. Ατελής διάχυση των ρευμάτων σφάλματος: Όταν τα ρεύματα σφάλματος ρέουν μέσω του συστήματος γείωσης, ενδέχεται να μην διαχέονται επαρκώς στο κατώτερο στρώμα του εδάφους. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε υψηλότερες βηματικές τάσεις και τάσεις επαφής, αυξάνοντας τον κίνδυνο ηλεκτροπληξίας για το προσωπικό και πιθανή ζημιά στον εξοπλισμό.
 2. Αυξημένη αντίσταση: Η απουσία ράβδων γείωσης στο κάτω στρώμα σημαίνει ότι υπάρχουν λιγότερες διαδρομές για τη ροή του ηλεκτρικού ρεύματος. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε υψηλότερη αντίσταση στο σύστημα γείωσης, οδηγώντας σε υψηλότερες τάσεις και μειωμένη αποτελεσματικότητα στη διαρροή ρεύματος σφάλματος.
 3. Ανομοιόμορφη κατανομή ρεύματος: Χωρίς ράβδους γείωσης στο κάτω στρώμα, η κατανομή ρεύματος στο σύστημα γείωσης μπορεί να γίνει άνιση. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε εντοπισμένες περιοχές με υψηλότερη πυκνότητα ρεύματος, αυξάνοντας τον κίνδυνο ηλεκτρικών κινδύνων και πιθανής ζημιάς στον εξοπλισμό.
 4. Περιορισμένη προστασία έναντι μεταβατικών φαινομένων: Τα μεταβατικά φαινόμενα όπως οι κεραυνοί ή οι υπερτάσεις ισχύος ενδέχεται να μην εκτρέπονται αποτελεσματικά στο κατώτερο στρώμα του εδάφους. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε υπερτάσεις και πιθανή ζημιά στο ηλεκτρικό σύστημα.

4.4.4 Σύγκριση με βάση το Πλήθος Ράβδων

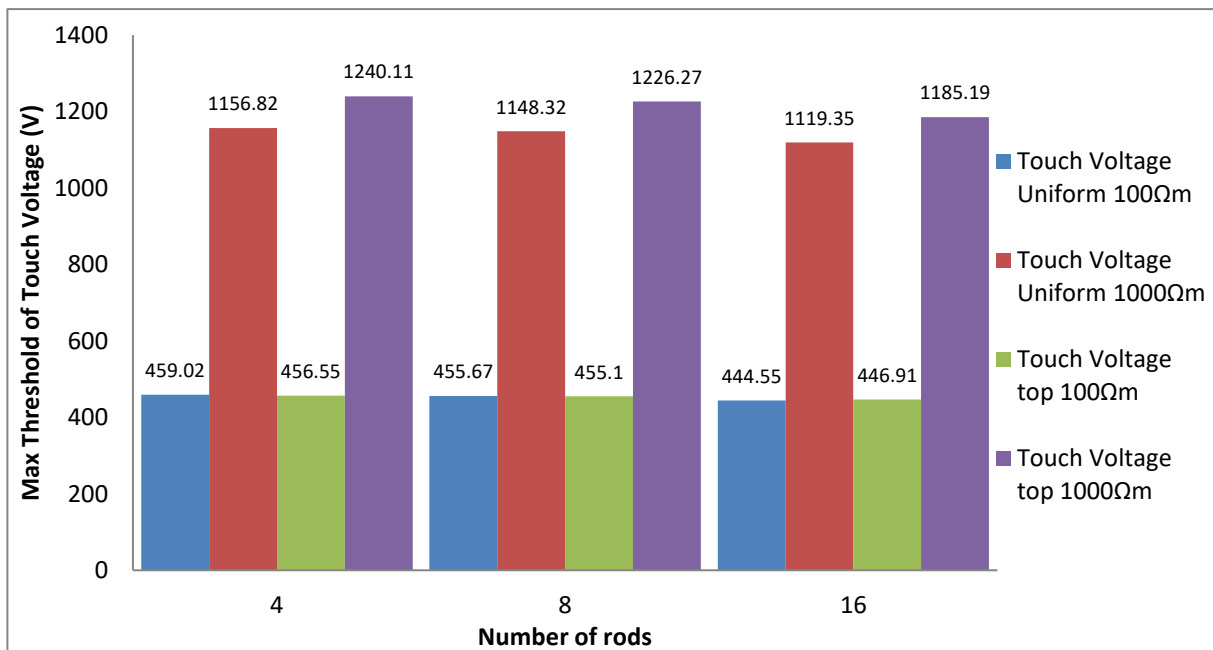
Σε αυτό το σημείο γίνονται οι συγκρίσεις έχοντας ως μέγεθος πλέγματος (grid size) 9x9m και πυκνότητα πλέγματος (mesh size) 3x3.



Διάγραμμα 11 Επίδραση του πλήθους ράβδων στη αντίσταση γείωσης (2.5m, grid size 9mx9m, mesh size 3x3)



Διάγραμμα 12 Επίδραση του πλήθους ράβδων στη αναπτυσσόμενη βηματική τάση (2.5m, grid size 9x9, mesh size 3x3)



Διάγραμμα 13 Επίδραση του πλήθους ράβδων στη αναπτυσσόμενη τάση επαφής (2.5m rods, grid size 9x9, mesh size 3x3)

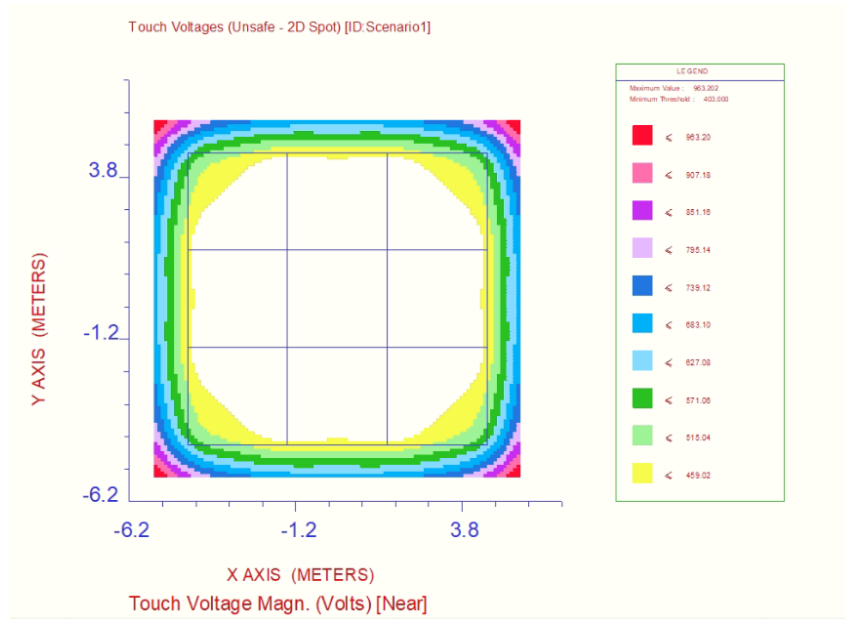
Παρατηρούμε ότι:

1. Η αντίσταση γείωσης, η τάση επαφής και η βηματική τάση μειώνονται, καθώς αυξάνουμε το πλήθος των ράβδων.
2. Καθώς αυξάνουμε το πλήθος των ράβδων από 4 σε 16, παρατηρούμε μία μείωση της τάξης του 2%-4% για την τάση επαφής, και αντίστοιχα, μία μείωση 6%-9% για την βηματική τάση. Αυτό μας δείχνει ότι, η προσθήκη επαρκούς αριθμού ράβδων γείωσης έχει αξιοσημείωτο αντίκτυπο στη βελτίωση των παραμέτρων κατοφλίου ασφαλείας (βηματικές τάσεις, τάσεις επαφής) του πλέγματος γείωσης, ανεξάρτητα από τη δομή του εδάφους.

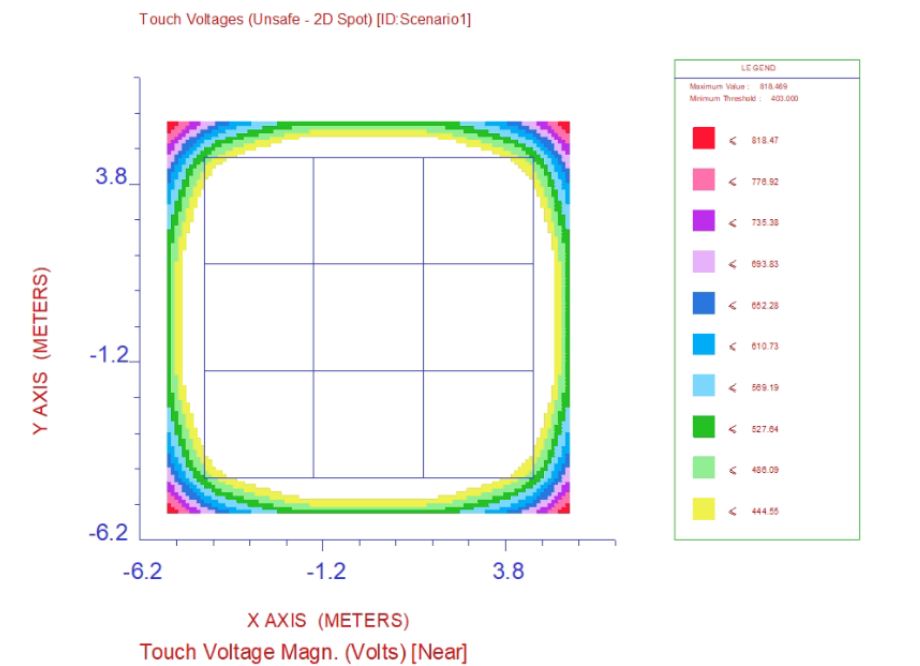
3. Παρατηρούμε μεγαλύτερη μείωση στην αντίσταση γείωσης, στην βηματική τάση και στην τάση επαφής, όταν έχουμε μονοστρωματικό έδαφος με $\rho=1000\Omega\text{m}$ ή διστρωματικό έδαφος με $\rho=1000\Omega\text{m}$ στο άνω στρώμα.
4. Μπορεί επίσης να παρατηρηθεί ότι, όταν η ειδική αντίσταση εδάφους τείνει προς το χειρότερο σενάριο (υψηλές τιμές σε Ωm), η προσθήκη επιπλέον ράβδων γείωσης είναι πιο ωφέλιμη στην επίδοση του συστήματος γείωσης, σε σύγκριση με την περίπτωση όπου η ειδική αντίσταση εδάφους τείνει στο καλύτερο σενάριο (μικρές τιμές σε Ωm). Αυτό βοηθά στην αντιστάθμιση της υψηλότερης ειδικής αντίστασης και εξασφαλίζει ένα πιο αποτελεσματικό σύστημα γείωσης. Ακολουθούν ορισμένοι λόγοι για τους οποίους η προσθήκη περισσότερων ράβδων γείωσης σε τέτοια σενάρια (υψηλή ειδική αντίσταση) είναι συμφέρουσα:
 1. Μειωμένη αντίσταση γείωσης: Ο πρωταρχικός στόχος είναι η μείωση της αντίστασης. Προσθέτοντας περισσότερες ράβδους, αυξάνεται η επιφάνεια του συστήματος γείωσης, γεγονός που συμβάλλει στη μείωση της συνολικής αντίστασης. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό σε σενάρια υψηλής ειδικής αντίστασης όπου το έδαφος προσφέρει φυσικά μεγαλύτερη αντοχή.
 2. Βελτιωμένη διάχυση του ρεύματος σφάλματος: Η υψηλότερη ειδική αντίσταση στο έδαφος μπορεί να εμποδίσει τη διασπορά των ρευμάτων σφάλματος. Περισσότερες ράβδοι γείωσης παρέχουν πρόσθετες αγωγίμες διαδρομές για τη ροή των ρευμάτων σφάλματος, διευκολύνοντας την καλύτερη διάχυση και μειώνοντας τον κίνδυνο ηλεκτροπληξίας.
 3. Μειωμένες βηματικές τάσεις και τάσεις επαφής: Σε σενάρια υψηλής ειδικής αντίστασης, οι βηματικές τάσεις και οι τάσεις επαφής μπορεί να είναι υψηλότερες. Με την αύξηση του αριθμού των ράβδων γείωσης, μειώνονται οι τάσεις, βελτιώνοντας την ηλεκτρική ασφάλεια για το προσωπικό.

Παρακάτω φαίνονται ενδεικτικά μερικά διαγράμματα κατανομής της τάσης επαφής, όπως προέκυψαν από το πρόγραμμα SES AutoGridPro.

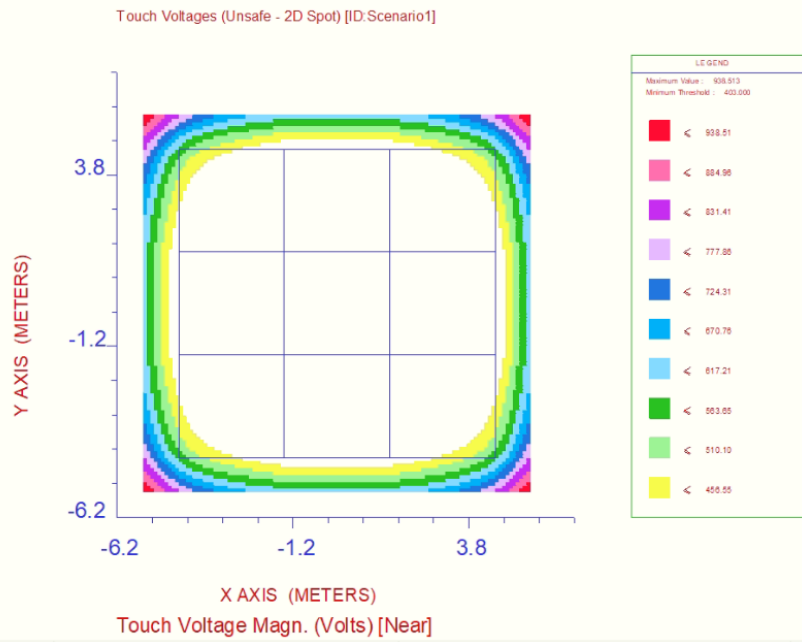
- Στις δύο πρώτες εικόνες, βλέπουμε πως μεταβάλλεται η επικινδυνότητα των αναπτυσσόμενων τάσεων επαφής, (όταν έχω πλέγμα γείωσης με grid size 9x9, mesh size 3x3) σε μονοστρωματικό έδαφος, αρχικά έχοντας 4 ράβδους και στη συνέχεια έχοντας 16 ράβδους. Βλέπουμε ότι με την προσθήκη ράβδων, έχουμε επικίνδυνες τιμές για την τάση επαφής μόνο στις άκρες του πλέγματος (σχεδόν έξω από αυτό), ενώ έχοντας λιγότερο αριθμό ράβδων η επικινδυνότητα αυξάνεται και προς το κέντρο του πλέγματος.
- Στην τρίτη και στην τέταρτη εικόνα, βλέπουμε πως μεταβάλλεται η επικινδυνότητα των αναπτυσσόμενων τάσεων επαφής, (όταν έχω πλέγμα γείωσης με grid size 9x9, mesh size 3x3) σε διστρωματικό έδαφος με χαμηλότερη ειδική αντίσταση στο άνω στρώμα ($100\Omega\text{m}$), αρχικά έχοντας 4 ράβδους και στη συνέχεια έχοντας 16 ράβδους. Σε αυτή τη περίπτωση δεν παρατηρούμε ιδιαίτερη διαφορά στην κατανομή της τάσης επαφής. Ωστόσο, μπορεί να παρατηρηθεί και πάλι μια καλύτερη εικόνα στην περίπτωση που έχουμε περισσότερες ράβδους.
- Τέλος, στην Πέμπτη και στην έκτη εικόνα, βλέπουμε πως μεταβάλλεται η επικινδυνότητα των αναπτυσσόμενων τάσεων επαφής, (όταν έχω πλέγμα γείωσης με grid size 9x9, mesh size 3x3) σε διστρωματικό έδαφος με υψηλότερη ειδική αντίσταση στο άνω στρώμα ($1000\Omega\text{m}$), αρχικά έχοντας 4 ράβδους και στη συνέχεια έχοντας 16 ράβδους. Όπως φαίνεται η προσθήκη ηλεκτροδίων είναι σημαντική σε αυτή τη περίπτωση, καθώς έχοντας τέσσερις ράβδους, η επικινδυνότητα είναι υψηλή σε όλη την επιφάνεια του πλέγματος, ενώ καθώς προσθέτουμε ράβδους φαίνεται να μειώνεται η επικινδυνότητα στο κέντρο του πλέγματος.



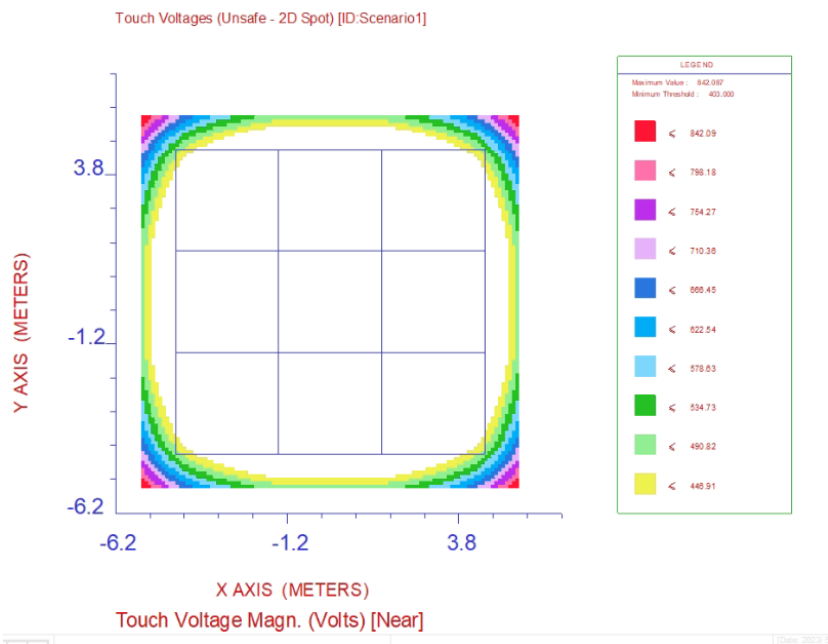
Εικόνα 4.4.7 Αναπτυσσόμενη Τάση Επαφής (στο μέσον της ΓΜ-10km) σε μονοστρωματικό έδαφος με 4 ράβδους ύψους 2.5m (grid size: 9x9m, mesh size: 3x3)



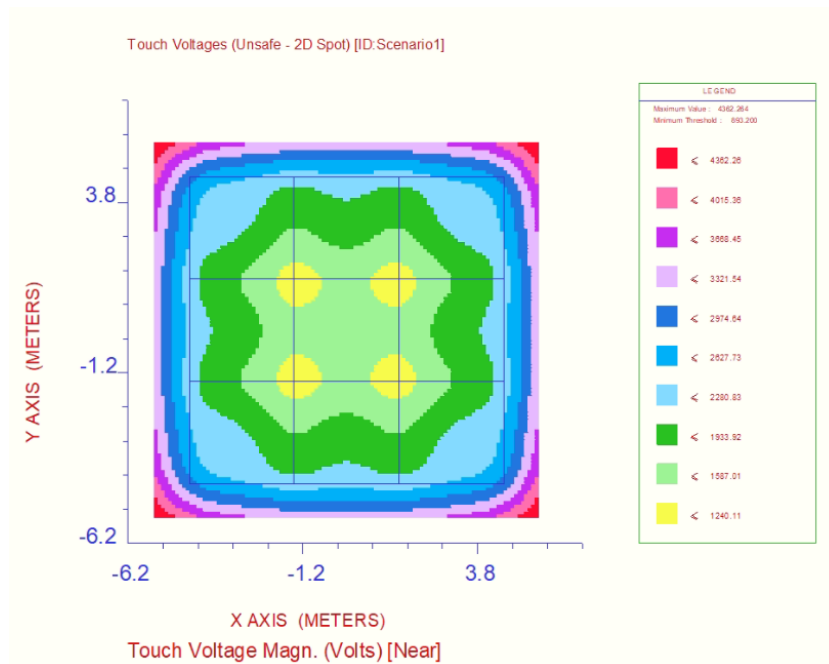
Εικόνα 4.4.8 Αναπτυσσόμενη Τάση Επαφής (στο μέσον της ΓΜ - 10km) σε μονοστρωματικό έδαφος με 16 ράβδους ύψους 2.5m (grid size: 9x9m, mesh size: 3x3)



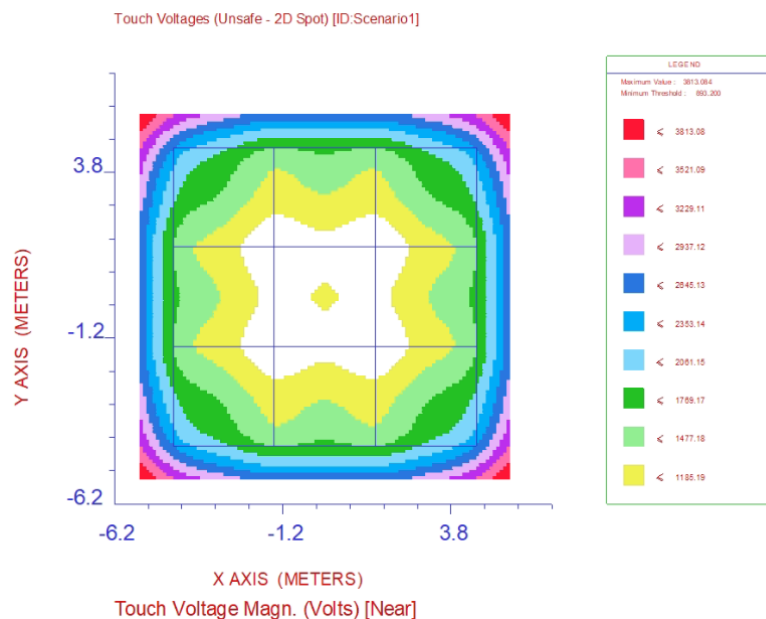
Εικόνα 4.4.9 Αναπτυσσόμενη Τάση Επαφής (στο μέσον της ΓΜ - 10km) σε διαστρωματική δομή εδάφους (top 100Ωm) με 4 ράβδους ύψους 2.5m (grid size: 9x9m, mesh size: 3x3)



Εικόνα 4.4.10 Αναπτυσσόμενη Τάση Επαφής (στο μέσον της ΓΜ - 10km) σε διστρωματική δομή εδάφους (top 100Ωm) με 16 ράβδους ύψους 2.5m (grid size: 9x9, mesh size: 3x3)



Εικόνα 4.4.11 Αναπτυσσόμενη Τάση Επαφής (στο μέσον της ΓΜ - 10km) σε διστρωματική δομή εδάφους (top 1000Ωm) με 4 ράβδους ύψους 2.5m (grid size: 9x9m, mesh size: 3x3)



Εικόνα 4.4.12 Αναπτυσσόμενη Τάσης Επαφής (στο μέσον της ΓΜ - 10km) σε διστρωματική δομή εδάφους (top 100Ωm) με 16 ράβδους ύψους 2.5m (grid size: 9x9m, mesh size: 3x3)

Όπως φαίνεται και στα παραπάνω διαγράμματα από το λογισμικό CDEGS (AutoGrid Pro), με την προσθήκη ράβδων γείωσης οι επικίνδυνες τάσεις επαφής, περιορίζονται στις γωνίες και εξωτερικά του πλέγματος γείωσης. Επομένως και από εδώ συμπεραίνεται ότι η προσθήκη ράβδων γείωσης επιδρά θετικά στην απόδοση του συστήματος γείωσης.

4.5 Υπολογισμοί Προσομοίωσης

Παρακάτω παρατίθενται πίνακες με όλους τους υπολογισμούς που πραγματοποιήθηκαν σε αυτή τη προσομοίωση:

Έλεγχος Τάσεων Επαφής και Βηματικών Τάσεων																				
ΜΟΝΟΣΤΡΩΜΑΤΙΚΟ ΕΔΑΦΟΣ																				
ΚΑΝΟΝΙΚΕΣ ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ (grid size: 9X9) (mesh size: 4X4)																				
ρ (Ωm)		100									1000									
Vt		403									893,2									
Vs		566,4									2527,2									
0m (Υ/Σ)																				
μήκος ράβδων πλήθος ράβδων	χωρίς ράβδους	2,5			3,5			4,5			χωρίς ράβδους	2,5			3,5			4,5		
		4	8	16	4	8	16	4	8	16		4	8	16	4	8	16	4	8	16
R (Ω)	4,5367	4,1494	4,0558	3,7741	3,9767	3,8337	3,4909	3,7906	3,5886	3,2057	45,367	41,494	40,558	37,741	39,767	38,337	34,909	37,906	35,886	32,057
Ir (A)	695	712	716	728	719	726	741	728	737	755	201	216	220	232	223	229	246	231	241	262
Vt	513,72	485,49	482,42	468,53	477,68	427,24	454,95	470,41	461,78	443,35	1240,65	1179,42	1171,73	1141,15	1160,5	1147,6	1110,14	1145,66	1127,88	1083,74
Vs	394,154	362,298	353,817	324,14	341,044	194,17	269,994	317,467	297,339	253,639	1139,93	1099,11	1087,15	1032,97	1057,76	1034,08	962,73	1007,35	972,302	860,18
μέση																				
μήκος ράβδων πλήθος ράβδων	χωρίς ράβδους	2,5			3,5			4,5			χωρίς ράβδους	2,5			3,5			4,5		
		4	8	16	4	8	12	4	8	16		4	8	16	4	8	16	4	8	16
R (Ω)	4,5367	4,1494	4,0558	3,7741	3,9767	3,8337	3,4909	3,7906	3,5886	3,2057	45,367	41,494	40,558	37,741	39,767	38,337	34,909	37,906	35,886	32,057
Ir (A)	545	554	556	563	558	562	570	563	568	577	190	203	206	217	209	215	229	217	225	243
Vt	481,13	459,02	455,67	444,55	451,93	447,05	433,66	446	439,06	424,33	1216,75	1156,82	1148,32	1119,35	1138,11	1126,58	1088,97	1124,95	1106,37	1063,45
Vs	309,085	291,901	274,751	250,67	264,676	253,78	223,072	245,514	229,156	193,541	1077,54	1032,97	1017,96	966,18	991,351	970,062	896,201	946,295	907,75	816,35
τέλος																				
μήκος ράβδων πλήθος ράβδων	χωρίς ράβδους	2,5			3,5			4,5			χωρίς ράβδους	2,5			3,5			4,5		
		4	8	16	4	8	16	4	8	16		4	8	16	4	8	16	4	8	16
R (Ω)	4,5367	4,1494	4,0558	3,7741	3,9767	3,8337	3,4909	3,7906	3,5886	3,2057	45,367	41,494	40,558	37,741	39,767	38,337	34,909	37,906	35,886	32,057
Ir (A)	423	428	429	432	430	432	436	432	435	440	178	189	192	201	194	199	211	201	207	222
Vt	454,62	437,11	434,43	425,5	431,46	427,54	416,98	428,82	421,18	409,7	1190,67	1132,48	1124,91	1096,09	1114,12	1102,57	1066,56	1101,28	1082,17	1041,02
Vs	239,895	217,186	211,993	192,35	203,962	195,08	170,631	188,387	175,499	147,516	1009,49	961,718	948,782	894,941	920,202	895,61	825,756	876,522	835,131	745,501

Έλεγχος Τάσεων Επαφής και Βηματικών Τάσεων																				
ΔΙΣΤΡΩΜΑΤΙΚΟ ΕΛΔΑΦΟΣ																				
ΚΑΝΟΝΙΚΕΣ ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ (grid size: 9x9) (mesh size: 4x4)																				
ρ1 (Ωm)	100										1000									
ρ2 (Ωm)	1000										100									
Vt	403										893,2									
Vs	566,4										2527,2									
0m (Υ/Σ)																				
μήκος ράβδων πλήθος ράβδων	χωρίς ράβδους	2,5			3,5			4,5			χωρίς ράβδους	2,5			3,5			4,5		
		4	8	16	4	8	16	4	8	16		4	8	16	4	8	16	4	8	16
R (Ω)	10,56	10,112	10,064	9,8052	10,021	9,9618	9,6911	9,9944	9,9268	9,6291	26,727	23,275	21,908	18,959	15,19	11,744	8,3577	10,524	7,7849	5,6149
Ir (A)	511	521	522	528	523	524	531	524	525	532	298	327	340	372	424	485	565	511	582	653
Vt	497,38	474,34	472,57	463,07	470,71	408,57	458,8	470	467,62	456,9	1358,88	1285,79	1271,67	1231,13	1187,14	1127,83	1047,73	1101,52	1035,67	964,75
Vs	375,288	346,024	342,499	323,035	336,895	332,776	312,067	334,834	330,129	307,387	1367,41	1339,54	1311,22	1241,58	1086,95	939,741	726,781	842,367	674,594	495,406
μέση																				
μήκος ράβδων πλήθος ράβδων	χωρίς ράβδους	2,5			3,5			4,5			χωρίς ράβδους	2,5			3,5			4,5		
		4	8	16	4	8	16	4	8	16		4	8	16	4	8	16	4	8	16
R (Ω)	10,56	10,112	10,064	9,8052	10,021	9,9618	9,6911	9,9944	9,9268	9,6291	26,727	23,275	21,908	18,959	15,19	11,744	8,3577	10,524	7,7849	5,6149
Ir (A)	431	438	439	443	440	441	445	440	441	446	273	296	307	332	371	414	467	432	478	521
Vt	476,3	456,55	455,1	446,91	453,57	451,8	443,24	452,8	450,83	441,87	1312,32	1240,11	1226,27	1185,19	1139,23	1080,41	1005,43	1055,5	994,25	932,23
Vs	316,535	290,898	288,041	271,03	263,39	280,066	261,525	281,159	277,305	257,695	1252,7	1212,55	1183,97	1106,07	951,08	802,717	600,72	712,156	554,048	395,263
τέλος																				
μήκος ράβδων πλήθος ράβδων	χωρίς ράβδους	2,5			3,5			4,5			χωρίς ράβδους	2,5			3,5			4,5		
		4	8	16	4	8	16	4	8	16		4	8	16	4	8	16	4	8	16
R (Ω)	10,56	10,112	10,064	9,8052	10,021	9,9618	9,6911	9,9944	9,9268	9,6291	26,727	23,2275	21,908	18,959	15,19	11,744	8,3577	10,524	7,7849	5,6149
Ir (A)	357	361	362	364	362	363	366	363	363	366	246	264	272	290	317	346	379	357	385	410
Vt	456,79	440,05	438,89	431,89	437,46	436,04	428,94	437,03	435,24	427,5	1262,04	1192,95	1178,11	1136,95	1090,42	1014,95	967,45	1011,82	957,21	904,89
Vs	262,187	239,759	237,519	222,697	233,152	230,53	215,097	231,957	226,26	211,472	1126,6	1081,47	1048,98	967,896	951,08	612,286	487,521	588,517	446,252	311,051

Έλεγχος Τάσεων Επαφής και Βηματικών Τάσεων			Έλεγχος Τάσεων Επαφής και Βηματικών Τάσεων			Έλεγχος Τάσεων Επαφής και Βηματικών Τάσεων		
ΜΟΝΟΣΤΡΩΜΑΤΙΚΟ ΕΔΑΦΟΣ			ΜΟΝΟΣΤΡΩΜΑΤΙΚΟ ΕΔΑΦΟΣ			ΜΟΝΟΣΤΡΩΜΑΤΙΚΟ ΕΔΑΦΟΣ		
grid size: 4,5X4,5 / mesh size: 4X4			grid size: 12X12 / mesh size: 4X4			grid size: 9X9 / mesh size: 5X5		
ρ (Ω m)	100	1000	ρ (Ω m)	100	1000	ρ (Ω m)	100	1000
Vt	403	893,2	Vt	403	893,2	Vt	403	893,2
Vs	566,4	2527,2	Vs	566,4	2527,2	Vs	566,4	2527,2
0m (Υ/Σ)			0m (Υ/Σ)			0m (Υ/Σ)		
μήκος ράβδων	χωρίς ράβδους	χωρίς ράβδους	μήκος ράβδων	χωρίς ράβδους	χωρίς ράβδους	μήκος ράβδων	χωρίς ράβδους	χωρίς ράβδους
πλήθος ράβδων			πλήθος ράβδων			πλήθος ράβδων		
R (Ω)	8,0293	80,293	R (Ω)	3,5457	35,457	R (Ω)	4,4044	44,044
Ir (A)	575	125	Ir (A)	739	243	Ir (A)	701	206
Vt	612,22	1346,32	Vt	482,47	1197,71	Vt	506,18	1225,51
Vs	584,03	1614,49	Vs	298,129	980,314	Vs	400,201	1176,064
μέση			μέση			μέση		
μήκος ράβδων	χωρίς ράβδους	χωρίς ράβδους	μήκος ράβδων	χωρίς ράβδους	χωρίς ράβδους	μήκος ράβδων	χωρίς ράβδους	χωρίς ράβδους
πλήθος ράβδων			πλήθος ράβδων			πλήθος ράβδων		
R (Ω)	8,0293	80,293	R (Ω)	3,5457	35,457	R (Ω)	4,4044	44,044
Ir (A)	473	121	Ir (A)	569	227	Ir (A)	548	194
Vt	567,96	1328,96	Vt	454,92	1171,78	Vt	474,86	1200,95
Vs	570,85	1562,826	Vs	229,547	915,768	Vs	312,854	1107,547
τέλος			τέλος			τέλος		
μήκος ράβδων	χωρίς ράβδους	χωρίς ράβδους	μήκος ράβδων	χωρίς ράβδους	χωρίς ράβδους	μήκος ράβδων	χωρίς ράβδους	χωρίς ράβδους
πλήθος ράβδων			πλήθος ράβδων			πλήθος ράβδων		
R (Ω)	8,0293	80,293	R (Ω)	3,5457	35,457	R (Ω)	4,4044	44,044
Ir (A)	383	117	Ir (A)	435	209	Ir (A)	424	182
Vt	528,9	1311,6	Vt	433,2	1142,61	Vt	449,48	1176,39
Vs	494,679	1511,162	Vs	175,488	543,152	Vs	242,062	1009,039

Έλεγχος Τάσεων Επαφής και Βηματικών Τάσεων			Έλεγχος Τάσεων Επαφής και Βηματικών Τάσεων			Έλεγχος Τάσεων Επαφής και Βηματικών Τάσεων		
ΜΟΝΟΣΤΡΩΜΑΤΙΚΟ ΕΔΑΦΟΣ			ΔΙΣΤΡΩΜΑΤΙΚΟ ΕΔΑΦΟΣ			ΔΙΣΤΡΩΜΑΤΙΚΟ ΕΔΑΦΟΣ		
grid size: 9X9 / mesh size: 10X10			grid size: 4,5X4,5 / mesh size: 4X4			grid size: 12X12 / mesh size: 4X4		
ρ (Ωm)	100	1000	ρ TOP (Ωm)	100	1000	ρ TOP (Ωm)	100	1000
Vt	403	893,2	Vt	403	893,2	Vt	403	893,2
Vs	566,4	2527,2	Vs	566,4	2527,2	Vs	566,4	2527,2
0m (Y/Σ)			0m (Y/Σ)			0m (Y/Σ)		
μήκος ράβδων	χωρίς ράβδους	χωρίς ράβδους	μήκος ράβδων	χωρίς ράβδους	χωρίς ράβδους	μήκος ράβδων	χωρίς ράβδους	χωρίς ράβδους
πλήθος ράβδων			πλήθος ράβδων			πλήθος ράβδων		
R (Ω)	4,1595	41,595	R (Ω)	14,599	57,81	R (Ω)	9,2118	18,997
Ir (A)	711	215	Ir (A)	433	165	Ir (A)	543	372
Vt	490,85	1191,39	Vt	566,32	1475,36	Vt	476,87	1294,91
Vs	429,302	1296,174	Vs	571,87	1973,814	Vs	305,486	1141,48
μέση			μέση			μέση		
μήκος ράβδων	χωρίς ράβδους	χωρίς ράβδους	μήκος ράβδων	χωρίς ράβδους	χωρίς ράβδους	μήκος ράβδων	χωρίς ράβδους	χωρίς ράβδους
πλήθος ράβδων			πλήθος ράβδων			πλήθος ράβδων		
R (Ω)	4,1595	41,595	R (Ω)	14,599	57,81	R (Ω)	9,2118	18,997
Ir (A)	554	203	Ir (A)	377	158	Ir (A)	453	332
Vt	462,55	1169,76	Vt	539,99	1446,87	Vt	457,94	1242,11
Vs	334,506	1226,716	Vs	540,814	1890,077	Vs	254,852	1018,74
τέλος			τέλος			τέλος		
μήκος ράβδων	χωρίς ράβδους	χωρίς ράβδους	μήκος ράβδων	χωρίς ράβδους	χωρίς ράβδους	μήκος ράβδων	χωρίς ράβδους	χωρίς ράβδους
πλήθος ράβδων			πλήθος ράβδων			πλήθος ράβδων		
R (Ω)	4,1595	41,595	R (Ω)	14,599	57,81	R (Ω)	9,2118	18,997
Ir (A)	427	189	Ir (A)	322	150	Ir (A)	370	290
Vt	439,66	1144,53	Vt	514,12	1414,31	Vt	440,49	1186,67
Vs	257,823	1141,184	Vs	461,915	1794,377	Vs	208,158	889,863

Έλεγχος Τάσεων Επαφής και Βηματικών Τάσεων			Έλεγχος Τάσεων Επαφής και Βηματικών Τάσεων		
ΔΙΣΤΡΩΜΑΤΙΚΟ ΕΔΑΦΟΣ			ΔΙΣΤΡΩΜΑΤΙΚΟ ΕΔΑΦΟΣ		
grid size: 9X9 / mesh size: 5X5			grid size: 9X9 / mesh size: 10X10		
ρ TOP (Ω m)	100	1000	ρ TOP (Ω m)	100	1000
Vt	403	893,2	Vt	403	893,2
Vs	566,4	2527,2	Vs	566,4	2527,2
0m (Y/Σ)			0m (Y/Σ)		
μήκος ράβδων πλήθος ράβδων	χωρίς ράβδους	χωρίς ράβδους	μήκος ράβδων πλήθος ράβδων	χωρίς ράβδους	χωρίς ράβδους
R (Ω)	10,435	25,329	R (Ω)	10,195	22,844
Ir (A)	513	309	Ir (A)	519	331
Vt	491,62	1339,74	Vt	480,17	1297,28
Vs	378,167	1420,067	Vs	402,216	1621,916
μέση			μέση		
μήκος ράβδων πλήθος ράβδων	χωρίς ράβδους	χωρίς ράβδους	μήκος ράβδων πλήθος ράβδων	χωρίς ράβδους	χωρίς ράβδους
R (Ω)	10,435	25,329	R (Ω)	10,195	22,844
Ir (A)	433	282	Ir (A)	437	299
Vt	471,51	1292,91	Vt	461,61	1249,58
Vs	319,193	1295,984	Vs	338,688	1465,115
τέλος			τέλος		
μήκος ράβδων πλήθος ράβδων	χωρίς ράβδους	χωρίς ράβδους	μήκος ράβδων πλήθος ράβδων	χωρίς ράβδους	χωρίς ράβδους
R (Ω)	10,435	25,329	R (Ω)	10,195	22,844
Ir (A)	358	253	Ir (A)	361	266
Vt	452,67	1242,62	Vt	441,41	1200,39
Vs	263,906	1162,709	Vs	279,789	1303,412

4.6 Συμπεράσματα

Όταν σχεδιάζεται ένα σύστημα γείωσης, πρέπει να λαμβάνεται υπόψη μία σειρά από παραμέτρους, όπως τα χαρακτηριστικά εδάφους, το μέγεθος και η πυκνότητα του πλέγματος γείωσης, καθώς και το πλήθος των ράβδων γείωσης που εγκαθίστανται στο πλέγμα γείωσης. Σε αυτή τη μελέτη γίνεται αναζήτηση της συσχέτισης μεταξύ των παραμέτρων σχεδιασμού του πλέγματος γείωσης και στην απόδοση ασφάλειας των τυπικών συστημάτων γείωσης, που χρησιμοποιούνται στα δίκτυα διανομής, ώστε να προστατεύσουν τους υποσταθμούς MT/XT, υπολογίζοντας την επίδραση που έχουν στην αντίσταση γείωσης, στην τάση επαφής και στην βηματική τάση, σε περίπτωση μονοφασικών σφαλμάτων ως προς γη σε μια τυπική γραμμή διανομής μέσης τάσης 20km.

Όπως ήταν αναμενόμενο, η αύξηση των διαστάσεων του πλέγματος γείωσης, έχει θετική επίδραση στην αντίσταση γείωσης, στην βηματική τάση και στην τάση επαφής. Καθώς στους υποσταθμούς YT, το μέγεθος ενός πλέγματος γείωσης είναι εκ των πραγμάτων πολύ μεγάλο, δεν συμβαίνει το ίδιο με τους υποσταθμούς MT, όπου το μέγεθος του πλέγματος, φαίνεται να είναι η πιο ισχυρή παράμετρος, την οποία πρέπει να εξετάσει ένας μηχανικός, ώστε να μειώσει τα ασφαλή όρια της βηματικής και της τάσης επαφής.

Επιπλέον, το να αυξάνουμε την πυκνότητα του πλέγματος γείωσης (mesh size), επηρεάζει θετικά την αντίσταση γείωσης και την τάση επαφής. Ωστόσο, φαίνεται να μην έχει θετικό αντίκτυπο στην ασφάλεια του πλέγματος από τις βηματικές τάσεις, στο διστρωματικό έδαφος με υψηλή ειδική αντίσταση στο άνω στρώμα, καθώς παρατηρείται μια αύξηση της τάξης του 17%.

Η προσθήκη επιπλέον ράβδων γείωσης στο πλέγμα φαίνεται να είναι ένας τρόπος να μειώσουμε την αντίσταση γείωσης, καθώς και τη βηματική, αλλά τάση επαφής. Όμως, η πιο αξιοσημείωτη παρατήρηση είναι ότι σε κακές συνθήκες εδάφους, η προσθήκη ράβδων γείωσης, σημειώνει σημαντική βελτίωση στην ασφάλεια του συστήματος, ενώ σε καλές συνθήκες εδάφους, η ίδια προσθήκη φαίνεται να έχει πολύ μικρότερη επίδραση στον σχεδιασμό του συστήματος γείωσης.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] «Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας» - Βουρνάς Κ., Κονταξής Γ.
- [2] «Ανάλυση Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας – Τόμος 1 – Μόνιμη Κατάσταση Λειτουργίας» - Βασίλειου Κ. Παπαδιά
- [3] «Ο Υποσταθμός Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας» - Βασίλειος Β. Πασχαλίδης
- [4] «Σχέδιο Ανάπτυξης Δικτύου 2021-2025» - ΔΕΔΔΗΕ
- [5] <https://www.rae.gr/>
- [6] «Μελέτη Δικτύων Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας» - Ηλίας Ψαθάς, Διπλωματική Εργασία, Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών
- [7] «Μελέτη επάρκειας συστήματος γείωσης υπαίθριων επίγειων υποσταθμών πόλεως (ΜΤ / ΧΤ) του δικτύου διανομής ηλεκτρικής ενέργειας» - Κωνσταντίνος Μερεντίτης, Διπλωματική Εργασία, Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών
- [8] «Ανάλυση Σφαλμάτων δικτύου Μέσης Τάσης (Διανομής) Νήσου Ρόδου από Πλήγματα Κεραυνών» - Εμμανουήλ Έλληνας, Διπλωματική Εργασία, Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών
- [9] «Μελέτη Πραγματικού Μέρους Δικτύου Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας» - Μπουνταλής Χρήστος, Γκόγκο Σκερντιάν, Διπλωματική Εργασία, ΤΕΙ Δυτικής Ελλάδας, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών ΤΕ
- [10] «Γραμμές Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας» - Βασίλειος Κ. Παπαδιάς
- [11] “Σχέδιο Ανάπτυξης Δικτύου” (ΣΑΔ) ΔΕΔΔΗΕ 2019 - 2023, Αθήνα, Ιούλιος 2018
- [12] <https://deddie.gr/>
- [13] “Ανάλυση προβλημάτων επιλογικής συνεργασίας των προστασιών του δικτύου λόγω της υψηλής διείδυσης μονάδων ΔΠ – Προτάσεις βελτίωσης της λειτουργίας των υφιστάμενων προστασιών” , Γ. Κορρές, Β. Παπασπηλιωτόπουλος, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Ιούλιος 2016
- [14] «Οδηγία Διανομής Νο21 – Προστασία Εναέριων Δικτύων Μ.Τ έναντι βραχυκυκλωμάτων» - ΔΕΗ
- [15] <https://new.abb.com/>
- [16] «Οδηγία Διανομής Νο119 – Γειώσεις Δικτύων Διανομής» - ΔΕΗ
- [17] IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding, IEEE Std 80-2000
- [18] «Υπολογισμός μέγιστης επιτρεπόμενης αντίστασης γείωσης σε Υποσταθμούς (Υ/Σ) Διανομής Μέσης Τάσης / Χαμηλής Τάσης (ΜΤ/ΧΤ)» - Γεώργιος Αρ. Πουλημένος, Μεταπτυχιακή Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών «Παραγωγή και Διαχείριση Ενέργειας»

- [19] «Συμβολή στη μελέτη της συμπεριφοράς συστημάτων γείωσης με προσθήκη βελτιωτικών υλικών» - Βασίλειος Π. Ανδροβιτσάνεας, Διδακτορική Διατριβή, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Ιούλιος 2016
- [20] «Κώδικας Διαχείρισης του Ελληνικού Δικτύου Διανομής ηλεκτρικής Ενέργειας (ΕΔΔΗΕ)» - ΡΑΕ, Αθήνα, Αύγουστος 2017
- [21] <https://www.sasehe.gr/ilektrologika/>
- [22] «Υψηλές Τάσεις» - Λάμπρος Οικονόμου, Γεώργιος Φώτης, Χρήστος Χριστοδούλου, 3^η έκδοση, ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΤΖΙΟΛΑΣ
- [23] “Impact of Substation Grounding Grid Design Parameters in Non-Homogenous Soil to the Grid Safety Threshold Parameters” – N. Permal, M. Osman, A.M. Ariffin, M.Z.A.A. Kadir - IEEE Access, March 2021
- [24] «Μελέτη Δικτύων Μέσης Τάσης» - Ασλανίδης Ηλίας, Διπλωματική Εργασία, Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών
- [25] <http://www.elemko.gr/el/exartimata-geiosis>
- [26] «Μέτρηση των ηλεκτρικών ιδιοτήτων του εδάφους συναρτήσει της συχνότητας: διερεύνηση και σχεδίαση διατάξεων πεδίου με χρήση της μεθόδου FEM» - Στάικος Ευάγγελος, Διπλωματική Εργασία, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Υπολογιστών.
- [27] «Επίδραση μικροεδάφους σε συστήματα γείωσης εγκαταστάσεων» - Βασίλειος Π. Ανδροβιτσάνεας, Μεταπτυχιακή Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών «Παραγωγή και Διαχείριση Ενέργειας»