



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών
Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών
«Παραγωγή και Διαχείριση Ενέργειας»

Ηρώων Πολυτεχνείου 9, 157 73, Ζωγράφου – 210-7723655 – epminfo@power.ece.ntua.gr

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

*Μελέτη Επάρκειας Συστήματος Γείωσης στα
Δίκτυα Διανομής Μέσης Τάσης με Διεσπαρμένη
Παραγωγή υπό την Επίδραση Μεταβλητών
Παραμέτρων*

Του Μεταπτυχιακού Φοιτητή

Κυριάκος Φ. Ευγενίδης

Επιβλέπων

Ιωάννης Φ. Γκόνος, Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π., ΗΜΜΥ

Αθήνα, Οκτώβριος 2022

.....
Κυριάκος Φ. Ευγενίδης

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

Copyright © Κυριάκος Φ. Ευγενίδης 2022.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

Περίληψη

Τα δίκτυα διανομής μέσης τάσης, μέχρι σήμερα, ήταν σχεδιασμένα να λειτουργούν ακτινικά, όπου η ροή ενέργειας είναι μονόδρομη. Σε αυτή την περίπτωση, η ανάλυση βραχυκυκλωμάτων και η μελέτη επιλογικής συνεργασίας των συστημάτων προστασίας του δικτύου, αποτελούν σχετικά απλές διαδικασίες. Τα τελευταία χρόνια όμως, εξαιτίας των στόχων που έχουν θεσπιστεί από τους διεθνείς οργανισμούς και τις κυβερνήσεις για την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής, η διείδυση πολυάριθμων Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ), κυρίως αιολικών και φωτοβολταϊκών πάρκων, στα δίκτυα διανομής έχει αυξηθεί ραγδαία. Η σύνδεση αυτών των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής κοντά στην κατανάλωση έχει πολλαπλά οφέλη στην αξιοπιστία και ευστάθεια ολόκληρου του συστήματος, καθώς συνεισφέρει στη μείωση των απωλειών στο δίκτυο διανομής αλλά και στον περιορισμό της υπερφόρτισης του δικτύου μεταφοράς. Αυτού του είδους τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, στα οποία παρατηρείται μεγάλη διείδυση μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής, λειτουργούν ως βροχοειδή συστήματα και ως εκ τούτου, η μελέτη επιλογικής συνεργασίας των συστημάτων προστασίας ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται αρκετά πιο πολύπλοκη διαδικασία, με μεγάλη όμως σημασία.

Τα συστήματα γείωσης των δικτύων διανομής αποτελούν σημαντικό παράγοντα, όχι μόνο στον περιορισμό των επικίνδυνων αναπτυσσόμενων δυναμικών, τόσο για τον εξοπλισμό όσο και για το προσωπικό, αλλά και στην αποτελεσματική λειτουργία του σχήματος προστασίας του δικτύου (διακόπτες ισχύος, διακόπτες αυτόματης επαναφοράς, διακόπτες απομόνωσης) με σκοπό να απομονωθεί το μικρότερο δυνατό τμήμα του δικτύου σε περίπτωση σφάλματος. Συνεπώς, η επίτευξη χαμηλών τιμών αντίστασης γείωσης σύμφωνα με τα εθνικά και διεθνή πρότυπα είναι προαπαιτούμενο για την ασφαλή και αδιάκοπη λειτουργία των δικτύων διανομής μέσης τάσης.

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία, εκπονήθηκε στο εργαστήριο Υψηλών Τάσεων και Ηλεκτρικών Μετρήσεων του ΕΜΠ στο πλαίσιο της ερευνητικής δραστηριότητας αυτού, σε θέματα γειώσεων στα δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Σε αυτή την εργασία, εξετάστηκε η συμπεριφορά συστημάτων γείωσης δικτύων διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, πέραν του ελληνικού, υπό την επίδραση διαφορετικών σεναρίων και με χρήση των κατάλληλων λογισμικών πακέτων. Πιο συγκεκριμένα, με το λογισμικό ανάλυσης ροής φορτίου DIgSILENT PowerFactory προσομοιώθηκε ένα τυπικό δίκτυο διανομής, λαμβάνοντας υπόψη ολόκληρο το σχήμα προστασίας του και υπολογίστηκαν τα ρεύματα βραχυκύκλωσης (μονοφασικό) σε αντιπροσωπευτικές θέσεις του δικτύου. Για κάθε ένα από τα παραπάνω σφάλματα μελετήθηκαν τα αναπτυσσόμενα δυναμικά (τάσεις επαφής και βηματικές τάσεις) και αξιολογήθηκε η απόδοση των συστημάτων γείωσης, εκμεταλλευόμενοι τα χαρακτηριστικά παραμετροποίησης του λογισμικού SES CDEGS. Αξίζει να τονισθεί, ότι εξετάστηκαν ποικίλες μορφολογίες εδάφους (μονοστρωματικό, διστρωματικό) για στιγμιαία λειτουργία του μέσου προστασίας. Τα τελικά αποτελέσματα που προέκυψαν από τη συγκεκριμένη εργασία μπορούν να αποτελέσουν έναν οδηγό για τον βέλτιστο σχεδιασμό συστημάτων γείωσης σε δίκτυα διανομής.

Λέξεις – κλειδιά: σύστημα γείωσης, δίκτυο διανομής, διεσπαρμένη παραγωγή, ανάλυση βραχυκυκλώματος

Abstract

Medium voltage (MV) distribution networks, up to today, were designed to operate radially, with the power flowing in one direction, from their unique power source to their consumption. In this case, short-circuit analysis and studies of the power protection systems are relatively simple processes. However, in recent years, due to the objectives that have been set by the international organizations and governments to address climate change, the penetration of numerous Renewable Energy Sources (RES) -especially wind and solar- to the MV distribution power grids, has increased rapidly. The connection of these DG units, close to the power consumption, has several key benefits on the reliability and stability of the entire power system as it contributes to the reduction of the power losses on the distribution grid as long as to the limitation of the total overload on the power transmission grid. These type of power grids, with high DG penetration, operate as if they were loops and short circuit analysis and studies of the protection systems become much more complicated processes, but of an exceptional importance.

Grounding systems of distribution networks are a very crucial factor not only for the restriction of the hazardous developed potential, both for equipment and personnel, but also for the efficient operation of the protection scheme of the network (circuit breakers, reclosers, sectionalizers) in order to isolate the smallest possible part of the network, in case of a fault. Therefore, the achievement of low ground resistance values according to national and international standards is prerequisite for the safe and uninterrupted operation of the MV networks.

The present diploma thesis was prepared in the High Voltage Laboratory of NTUA as part of its research activity, in matters of grounding systems in distribution networks. In this thesis, the behavior of grounding systems in distribution networks, beyond the Greek one, was examined under the influence of various scenarios by using appropriate software tools. In details, by using the load flow analysis software DIgSILENT PowerFactory, a typical MV network was simulated including its entire protection scheme and short-circuit currents (1-phase) were calculated at representative locations across the power grid. For each one of the above mentioned faults, the developing potentials (touch and step voltages) were studied and the performance of the grounding systems was evaluated, taking advantage of the many customization features of SES CDEGS software tool. It is worth emphasizing that different soil structures (single-layer, two-layer) were examined for the instantaneous operation of the protection device. The final results extracted from this diploma thesis can be a guide for the optimal design of the grounding systems of the distribution networks.

Keywords: grounding system, distribution network, distributed generation, short-circuit analysis

Ευχαριστίες

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Ιωάννη Φ. Γκόνο για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε δίνοντάς μου την ευκαιρία να ασχοληθώ στην διπλωματική μου εργασία με ένα θέμα που επιθυμούσα καθώς και για τις συμβουλές του καθ' όλη την πορεία της διπλωματικής. Επίσης, ευχαριστώ θερμά τον Επίκουρο Καθηγητή Χρήστο Χριστοδούλου για τη συνεργασία που είχαμε κατά τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας. Ξεχωριστή αναφορά θα ήθελα να κάνω στον υποψήφιο διδάκτορα, Μανόλη Έλληνα, για την αμέριστη βοήθεια που μου προσέφερε όποτε του ζητήθηκε και για την όρεξή του για δουλειά. Ακόμα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φίλους και συναδέλφους μου, Κατερίνα, Βασιλική, Ιώνη, Γιώργο, Κωνσταντίνα, Ζώη, Κυριακή με τους οποίους είχα άριστη συνεργασία σε κάθε στάδιο των μεταπτυχιακών μου σπουδών και με την αρωγή και την ενθάρρυνση των οποίων έφτασα σε αυτό το σημείο. Τους εύχομαι τα καλύτερα σε κάθε επίπεδο της προσωπικής και επαγγελματικής τους ζωής. Τέλος, θα ήθελα προπάντων να ευχαριστήσω την οικογένειά μου και όλα τα κοντινά μου πρόσωπα που μου στάθηκαν και συνέβαλαν στο να ολοκληρώσω το ΔΠΜΣ Παραγωγή και Διαχείριση Ενέργειας του ΕΜΠ.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^Ο ΓΕΝΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	7
1.1 Βασική Δομή των ΣΗΕ.....	7
1.2 Σύστημα Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας.....	8
1.2.1 Συμβατικές – Μη Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας	8
1.2.1.1 Θερμοηλεκτρικοί Σταθμοί	9
1.2.1.2 Πυρηνικοί Σταθμοί	11
1.2.2 Ανανεώσιμες – Μη Συμβατικές Πηγές Ενέργειας	12
1.3 Σύστημα Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας.....	16
1.4 Σύστημα Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας.....	20
1.5 Υποσταθμοί ΣΗΕ.....	21
1.5.1 Υποσταθμοί Μεταφοράς.....	21
1.5.1.1 Υποσταθμοί Ανύψωσης Τάσης ΜΤ/ΥΤ	22
1.5.1.2 Υποσταθμοί Υποβιβασμού Τάσης ΥΤ/ΜΤ	22
1.5.1.3 Κέντρα Υπερυψηλής Τάσης (ΚΥΤ).....	24
1.5.2 Υποσταθμοί Διανομής	24
1.5.2.1 Εναέριοι Υποσταθμοί Διανομής	24
1.5.2.2 Επίγειοι Υποσταθμοί Διανομής	24
1.5.2.3 Υπόγειοι Υποσταθμοί Διανομής	26
1.6 Μορφή Συστημάτων Διανομής ΜΤ	27
1.6.1 Ακτινικό Σύστημα Διανομής ΜΤ.....	27
1.6.2 Βροχοειδές Σύστημα Διανομής ΜΤ	28
1.6.3 Αραχοειδές Σύστημα Διανομής ΜΤ	28
1.6.4 Ατρακτοειδές Σύστημα Διανομής ΜΤ	30
1.6.5 Σύστημα Διανομής ΜΤ Μικρών Βρόχων.....	30
1.7 Μορφή Συστημάτων Διανομής ΧΤ	32
1.7.1 Ακτινικό Σύστημα Διανομής ΧΤ	32
1.7.2 Βροχοειδές Σύστημα Διανομής ΧΤ.....	32
1.7.3 Αραχοειδές Σύστημα Διανομής ΧΤ.....	33
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^Ο ΑΝΑΛΥΣΗ ΒΡΑΧΥΚΥΚΛΩΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΗΣ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ ΔΙΑΝΟΜΗΣ	34
2.1 Ανάλυση Βραχυκυκλωμάτων	34
2.1.1 Είδη Σφαλμάτων.....	34
2.1.2 Ρεύμα Βραχυκύκλωσης	35
2.2 Ο Ρόλος και η Εφαρμογή της Προστασίας στα Δίκτυα Διανομής	36

2.3 Εξοπλισμός Προστασίας στα Δίκτυα Διανομής	38
2.3.1 Διακόπτες Ισχύος και Ηλεκτρονόμοι	38
2.3.1.1 Διακόπτες Ισχύος Ελαίου.....	42
2.3.1.2 Διακόπτες Ισχύος Πτωχού Ελαίου	43
2.3.1.3 Διακόπτες Ισχύος Κενού.....	44
2.3.1.4 Διακόπτες Ισχύος Πεπιεσμένου Αέρα	44
2.3.1.5 Διακόπτες Ισχύος Εξαφθοριούχου Θείου (SF ₆).....	45
2.3.2 Διακόπτης Αυτόματης Επαναφοράς.....	47
2.3.3 Ασφάλειες – Ασφαλειοαποζεύκτες	49
2.3.4 Διακόπτες Απομόνωσης.....	51
2.4 Η λειτουργία του Δικτύου Διανομής Μέσης Τάσης.....	53
2.4.1 Διακόπτες Φορτίου	53
2.4.2 Συστοιχίες Πυκνωτών.....	54
2.4.3 Συνεργασία Προστασιών στο Δίκτυο Μέσης Τάσης	55
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΒΑΣΙΚΩΝ ΕΝΝΟΙΩΝ ΓΕΙΩΣΕΩΝ	
ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ ΔΙΑΝΟΜΗΣ	56
3.1 Βασικές Έννοιες.....	56
3.1.1 Ορισμός της Γείωσης.....	56
3.1.2 Ανύψωση Δυναμικού Γης.....	57
3.1.3 Τάση Επαφής.....	57
3.1.4 Βηματική Τάση	58
3.2 Άλλοι Βασικοί Ορισμοί.....	59
3.3 Είδη Γείωσης	64
3.3.1 Γείωση Λειτουργίας.....	64
3.3.2 Γείωση Προστασίας.....	65
3.3.3 Γείωση Ασφαλείας ή Συστημάτων Αντικεραυνικής Προστασίας	65
3.4 Μέθοδοι Γείωσης.....	66
3.4.1 Άμεση Γείωση	66
3.4.2 Ουδετέρωση	67
3.4.3 Γείωση με Αποζεύκτη Διαφυγής Έντασης ή Τάσης	67
3.5 Συστήματα Σύνδεσης Γειώσεων	68
3.5.1 Δίκτυα TT	69
3.5.2 Δίκτυα TN.....	70
3.5.3 Δίκτυα IT.....	70
3.6 Ηλεκτρόδια Γείωσης	71
3.6.1 Γειωτής Ράβδου.....	71
3.6.2 Γειωτής Ταινίας ή Συρματόσχοινου	72
3.6.3 Γειωτής Πλάκας	73
3.6.4 Ακτινικός Γειωτής.....	73
3.6.5 Γειωτής Πλέγματος.....	73
3.6.6 Επιφανειακοί και Βαθείς Γειωτές.....	74
3.6.7 Αντιστάσεις Γειωτών.....	74

3.7 Συστήματα Γείωσης	76
3.7.1 Πολυγωνική Διάταξη.....	76
3.7.2 Γείωση με Πλάκες	76
3.7.3 Γείωση με Γειωτή τύπου “E”	77
3.7.4 Περιμετρική Γείωση	77
3.7.5 Θεμελιακή Γείωση.....	78
3.7.6 Συνδυασμός Γειώσεων	80

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΓΕΙΩΣΗΣ ΣΕ ΤΥΠΙΚΟ ΔΙΚΤΥΟ ΔΙΑΝΟΜΗΣ..... 81

4.1 Μοντελοποίηση Συστήματος Γείωσης Τυπικού Δικτύου Μέσης Τάσης	81
4.1.1 Σχεδιασμός Δικτύου ΜΤ στο Λογισμικό PowerFactory	81
4.1.2 Σχεδιασμός Συστήματος Γείωσης στο Λογισμικό AutoGridPRO	84
4.2 Αποτελέσματα Προσομοίωσης Συστήματος Γείωσης	86
4.2.1 Μονοστρωματικό Έδαφος	87
4.2.2 Διστρωματικό Έδαφος.....	94
4.3 Σύγκριση Συστημάτων Γείωσης	97
4.4 Τελικά Συμπεράσματα - Προοπτική.....	100
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	101

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο

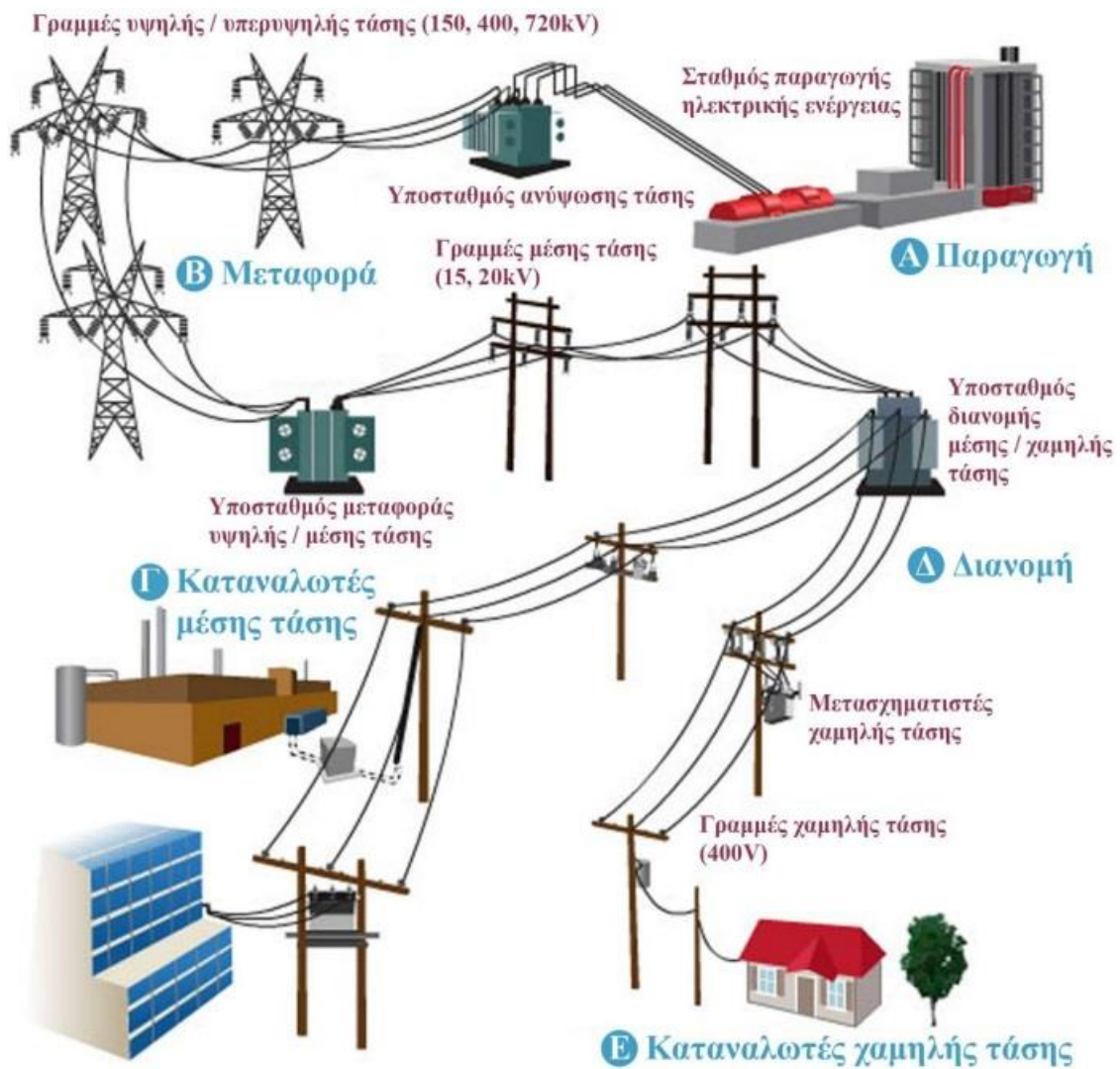
ΓΕΝΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

1.1 Βασική Δομή των ΣΗΕ

Ως Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ) ορίζεται το σύστημα των εγκαταστάσεων, του εξοπλισμού, των μέσων και γενικότερα όλων των υποδομών (γεννήτριες, μετασχηματιστές, γραμμές μεταφοράς, μέσα προστασίας, διακόπτες αντιστάθμισης κλπ.) που χρησιμοποιούνται με σκοπό την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας στους καταναλωτές. Βασική προϋπόθεση καλής λειτουργίας ενός ΣΗΕ είναι να παρέχει ηλεκτρική ενέργεια οπουδήποτε υπάρχει ζήτηση με το ελάχιστο δυνατό κόστος και τις ελάχιστες οικολογικές επιπτώσεις, εξασφαλίζοντας σταθερή τάση, σταθερή συχνότητα και υψηλή αξιοπιστία τροφοδότησης. Ο σχεδιασμός λοιπόν, ενός σύγχρονου ΣΗΕ βασίζεται σε τέσσερις βασικές αρχές: την ποιότητα, την αξιοπιστία, την εξοικονόμηση και το σεβασμό στο περιβάλλον [1].

Για την εξυπηρέτηση των αναγκών του συνόλου των καταναλωτών η ηλεκτρική ενέργεια μεταβαίνει από την φάση της παραγωγής σε αυτήν της μεταφοράς και τέλος στη διανομή. Επομένως, κάθε ΣΗΕ, ανεξάρτητα από το μέγεθος και τη δομή του, για να επιτύχει το επιθυμητό αποτέλεσμα αποτελείται από τρία επιμέρους συστήματα που το κάθε ένα από αυτά τελεί ξεχωριστό ρόλο: [1]

- Το σύστημα παραγωγής που περιλαμβάνει τους σταθμούς παραγωγής και τους μετασχηματιστές (Μ/Σ) ανύψωσης της τάσης για τη μεταφορά του ρεύματος υπό υπερυψηλή (ΥΥΤ) και υψηλή τάση (ΥΤ).
- Το σύστημα μεταφοράς που διασυνδέει όλους τους σταθμούς παραγωγής καθώς και διαφορετικά ΣΗΕ μεταξύ τους και μεταφέρει μεγάλα ποσά ισχύος σε μεγάλες αποστάσεις προς τα κέντρα κατανάλωσης στα μέγιστα δυνατά επίπεδα τάσης. Αποτελεί στην ουσία τη "ραχοκοκαλιά" του ΣΗΕ και περιλαμβάνει τα δίκτυα των γραμμών ΥΤ και ΥΥΤ, τους υποσταθμούς (Υ/Σ) ζεύξης αυτών των δικτύων καθώς και τους υποσταθμούς μετασχηματισμού μεταξύ των διαφόρων επιπέδων τάσης.
- Το σύστημα διανομής που περιλαμβάνει τα δίκτυα διανομής μέσης τάσης (ΜΤ) και χαμηλής τάσης (ΧΤ), στα οποία υπάγονται και οι Υ/Σ διανομής που υποβιβάζουν τη ΜΤ σε ΧΤ. Μέσω των δικτύων διανομής γίνεται επομένως, η διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας από τους Υ/Σ υψηλής τάσης προς μέση τάση (ΥΤ/ΜΤ) ή τους σταθμούς τοπικής παραγωγής (ΣΤΠ) προς τους καταναλωτές ΜΤ καθώς και στους καταναλωτές ΧΤ μέσω των Υ/Σ διανομής ΜΤ/ΧΤ.



Εικόνα 1. Βασική Δομή ΣΗΕ [2]

1.2 Σύστημα Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας παρουσιάζει σημαντικές διαφοροποιήσεις από χώρα σε χώρα. Καθοριστικοί παράγοντες που διαμορφώνουν το μείγμα ενεργειακής παραγωγής αποτελούν οι διαθέσιμοι εγχώριοι ενεργειακοί πόροι, οι γεωφυσικές, γεωλογικές και κλιματολογικές ιδιαιτερότητες της κάθε χώρας καθώς και η ενεργειακή πολιτική που ακολουθεί. Οι πηγές παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας διακρίνονται σε συμβατικές και μη συμβατικές ή αλλιώς ανανεώσιμες [2].

1.2.1 Συμβατικές – Μη Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

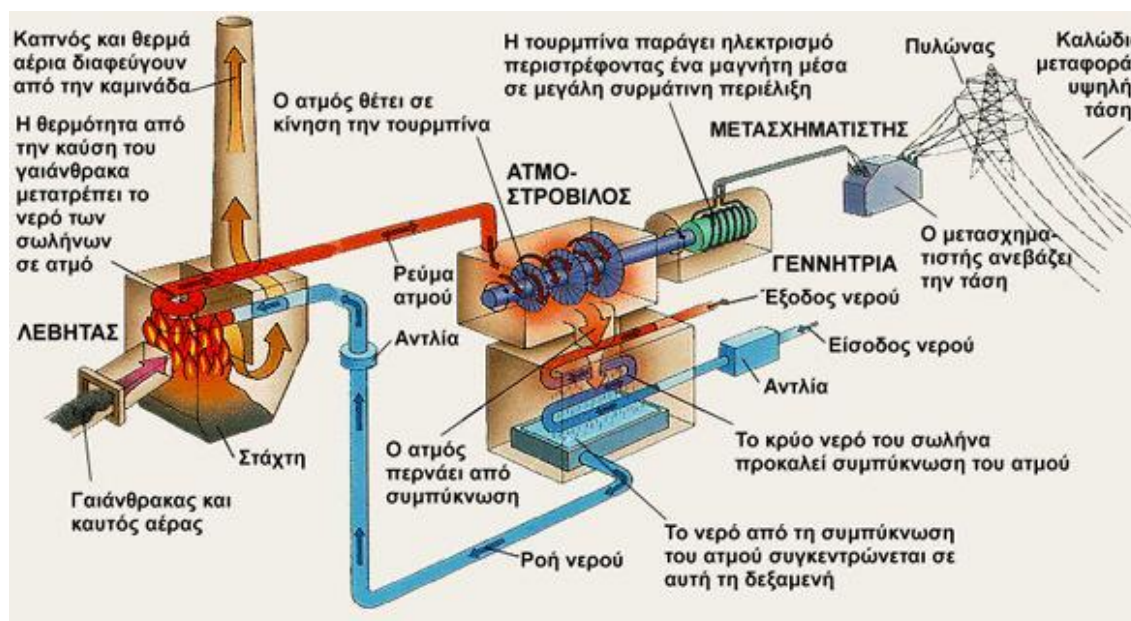
Συμβατικές ή μη ανανεώσιμες πηγές ενέργειας χαρακτηρίζονται αυτές οι οποίες δεν αναπληρώνονται από τις φυσικές διεργασίες ή αναπληρώνονται με πολύ αργούς ρυθμούς. Η χρήση τους στηρίξε και στηρίζει τη βιομηχανική ανάπτυξη και ανέβασε το βιοτικό επίπεδο των ανθρώπων χάρη στη μεγάλη πυκνότητα ενέργειας που διαθέτουν καθώς και στη σταθερή και

συνεχή παροχή ενέργειας. Η υπερεκμετάλλευσή τους όμως, οδήγησε σε μία σειρά από περιβαλλοντικά και κοινωνικά προβλήματα τα οποία η κοινωνία και η επιστήμη καλείται να αντιμετωπίσει σήμερα. Μονάδες παραγωγής συμβατικών πηγών ενέργειας αποτελούν οι θερμοηλεκτρικοί σταθμοί στους οποίους χρησιμοποιούνται ως πρώτη ύλη ορυκτά καύσιμα, όπως οι γαιάνθρακες (λιγνίτης, λιθάνθρακας, κλπ.), το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο, καθώς και οι πυρηνικοί σταθμοί όπου ως πυρηνικό καύσιμο χρησιμοποιείται το ουράνιο ή άλλα ραδιενεργά υλικά [2].

1.2.1.1 Θερμοηλεκτρικοί Σταθμοί

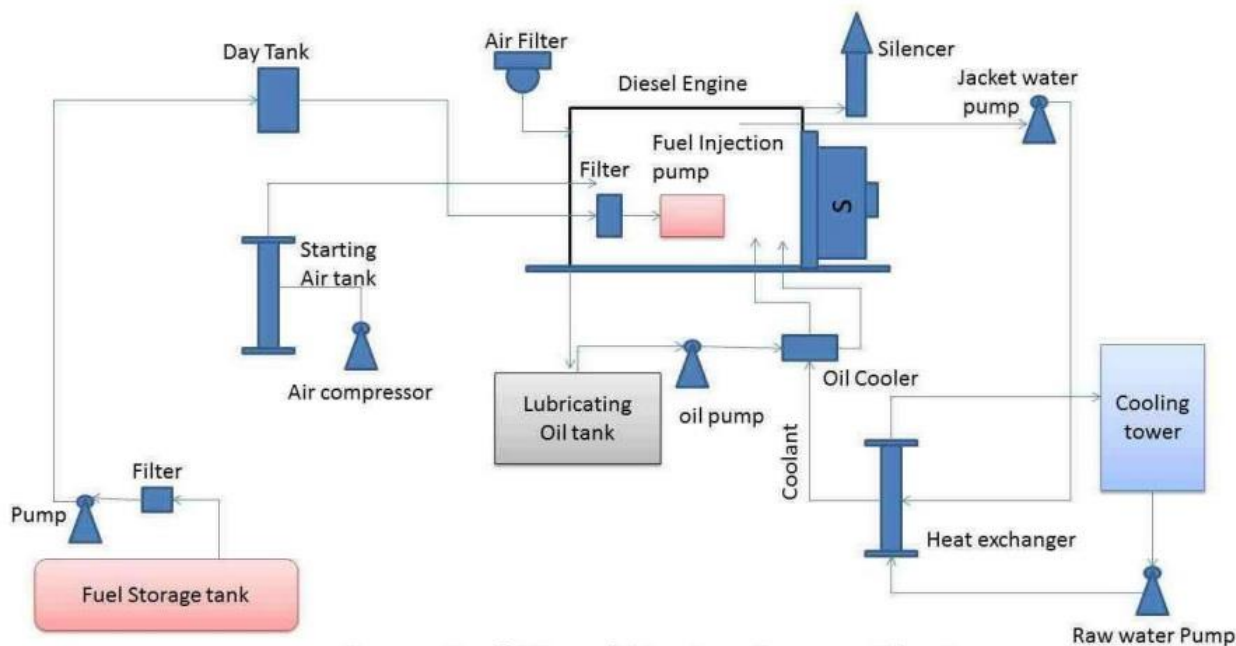
Οι θερμοηλεκτρικοί σταθμοί, ανάλογα με τον κύκλο λειτουργίας τους διακρίνονται στις τέσσερις παρακάτω κατηγορίες:

- Ατμοηλεκτρικοί σταθμοί, οι οποίοι χρησιμοποιούν ως πρώτη ύλη τα ορυκτά καύσιμα, το μαζούτ και το φυσικό αέριο. Ο βαθμός απόδοσής τους κυμαίνεται μεταξύ 30% και 45% και μέχρι πρότινος αποτελούσαν τους σταθμούς βάσης στην ελληνική επικράτεια, καθώς λόγω του φθηνού καυσίμου έχουν μικρό λειτουργικό κόστος. Τα μειονεκτήματά τους περιορίζονται στο γεγονός ότι η εκκίνησή τους είναι πολύωρη αλλά και κοστοβόρα, ενώ επιβαρύνεται σημαντικά και το περιβάλλον κατά τη λειτουργία τους. Η δομή και η λειτουργία ενός ατμοηλεκτρικού σταθμού παρουσιάζεται συνοπτικά στην ακόλουθη εικόνα [2].



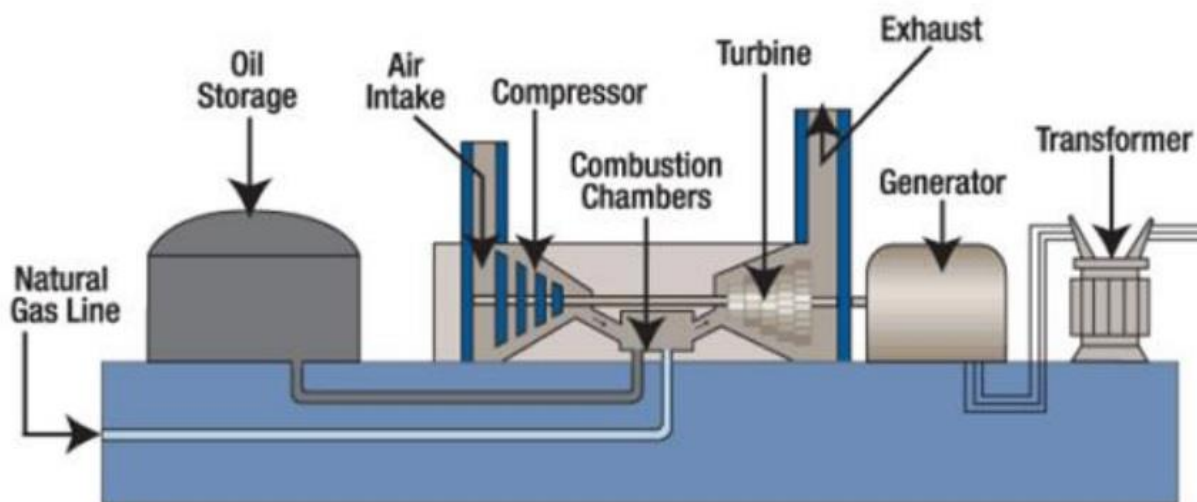
Εικόνα 2. Δομή και Λειτουργία Ατμοηλεκτρικού Σταθμού [2]

- Ντιζελοηλεκτρικοί σταθμοί, οι οποίοι αποτελούνται από εμβολοφόρους κινητήρες που χρησιμοποιούν ως καύσιμο το ντίζελ. Ο βαθμός απόδοσης αυτών των μονάδων μπορεί να φτάσει μέχρι και το 50%. Στο ελληνικό σύστημα οι ντιζελοηλεκτρικοί σταθμοί χρησιμοποιούνται ως σταθμοί βάσης σε νησιά που δεν είναι συνδεδεμένα με το κύριο ηλεκτρικό δίκτυο της χώρας, τα λεγόμενα μη διασυνδεδεμένα νησιά (ΜΑΝ) [2].



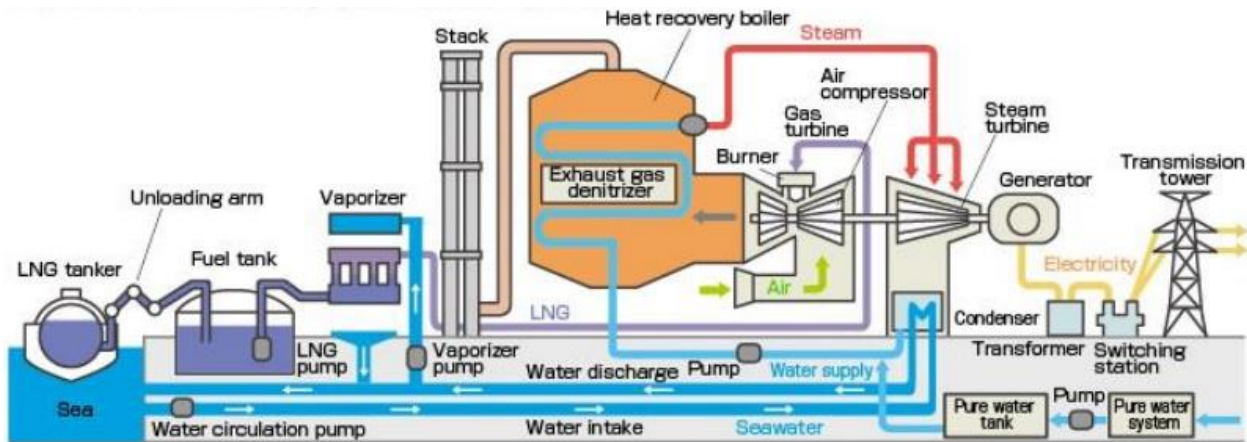
Εικόνα 3. Σχηματικό Διάγραμμα Λειτουργίας Ντιζελοηλεκτρικού Σταθμού [3]

- Αεροστροβιλικόι σταθμοί, οι οποίοι αποτελούνται από αεροστροβίλους των οποίων τα βασικά τμήματα είναι ο συμπιεστής, ο θάλαμος καύσης και ο στρόβιλος. Ως καύσιμο χρησιμοποιείται κυρίως φυσικό αέριο ή πετρέλαιο. Οι μονάδες αυτές έχουν μικρότερο βαθμό απόδοσης που κυμαίνεται μεταξύ 25% και 35%, όμως το γεγονός ότι μπορούν να επιτύχουν ταχύτατη εκκίνηση και να κάνουν γρήγορη ρύθμιση ισχύος σε συνδυασμό με το ότι απαιτούνται μικρότερες εκτάσεις για τις εγκαταστάσεις τους, τις κάνουν να χρησιμοποιούνται σε ειδικές περιπτώσεις κάλυψης των αιχμών ζήτησης, όπως για παράδειγμα στα ΜΔΝ.



Εικόνα 4. Δομή Αεροστροβιλικού Σταθμού [3]

- Σταθμοί συνδυασμένου κύκλου, οι οποίοι αποτελούν πρακτικά ένα συνδυασμό ενός ατμοηλεκτρικού σταθμού και μίας ή περισσότερων αεροστροβιλικών μονάδων. Ο συνολικός βαθμός απόδοσης αυτών των σταθμών μπορεί να φτάσει ή και να ξεπεράσει το 80%.



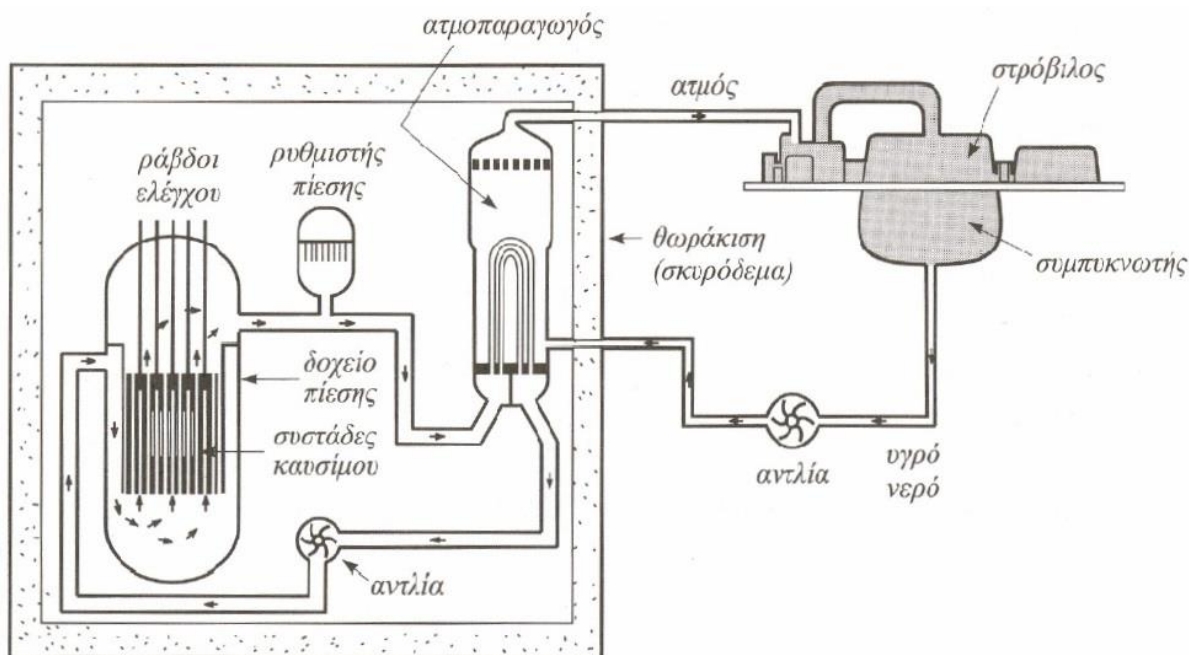
Εικόνα 5. Δομή Σταθμού Συνδυασμένου Κύκλου (Ατμοηλεκτρικός και Αεροστροβιλικός Σταθμός)

1.2.1.2 Πυρηνικοί Σταθμοί

Οι πυρηνικοί σταθμοί λειτουργούν με παρόμοιο τρόπο με αυτόν των θερμοηλεκτρικών σταθμών με τη διαφορά ότι στους πυρηνικούς δεν χρησιμοποιείται κάποιο ορυκτό καύσιμο για την παραγωγή ενέργειας, αλλά πραγματοποιούνται αντιδράσεις πυρηνικής σχάσης στους πυρηνικούς αντιδραστήρες. Το στοιχείο που χρησιμοποιείται ως καύσιμη ύλη σε αυτούς τους σταθμούς είναι το ουράνιο και ο βαθμός απόδοσής τους μπορεί να φτάσει το 40% [2].

Οι πυρηνικοί αντιδραστήρες κατηγοριοποιούνται κυρίως ανάλογα με το ψυκτικό μέσο που χρησιμοποιείται σε αυτούς. Οι αντιδραστήρες που χρησιμοποιούν νερό ως ψυκτικό μέσο ονομάζονται υδρόψυκτοι και ανάλογα με το είδος του νερού που χρησιμοποιείται ως επιβραδυντής διακρίνονται σε ελαφρού ύδατος (LWR) και σε βαρέος ύδατος (HWR). Οι ελαφρού ύδατος τώρα αντιδραστήρες διακρίνονται σε δύο επιμέρους τύπους: τους αντιδραστήρες πεπιεσμένου ύδατος (PWR) και ζέοντος ύδατος (BWR). Αυτοί οι δύο τύποι αποτελούν και το μεγαλύτερο ποσοστό των εγκατεστημένων πυρηνικών σταθμών ισχύος παγκοσμίως [4].

Στους αερόψυκτους πυρηνικούς αντιδραστήρες, όπως γίνεται φανερό και από την ονομασία τους, χρησιμοποιείται αέριο ψυκτικό μέσο και συγκεκριμένα διοξείδιο του άνθρακα ή ήλιο, ενώ ως επιβραδυντής χρησιμοποιείται γραφίτης. Τέλος, υπάρχουν και δύο άλλοι τύποι αντιδραστήρων, οι αναπαραγωγικοί αντιδραστήρες και πυρηνικοί αντιδραστήρες σύντηξης οι οποίοι κατέχουν σημαντικά μικρότερο ποσοστό συγκριτικά με τους υπόλοιπους [4].



Εικόνα 6. Σχηματικό Διάγραμμα Λειτουργίας Πυρηνικού Αντιδραστήρα PWR [4]

1.2.2 Ανανεώσιμες – Μη Συμβατικές Πηγές Ενέργειας

Ανανεώσιμες ή μη συμβατικές πηγές ενέργειας χαρακτηρίζονται αυτές οι οποίες δεν εξαντλούνται (ήλιος, άνεμος, νερό, κλπ.), είναι φιλικές προς το περιβάλλον και αποτελούν στην ουσία μία εναλλακτική λύση έναντι των συμβατικών ενεργειακών πόρων όπως είναι το πετρέλαιο, το φυσικό αέριο και ο άνθρακας. Εκτός του ότι συνεισφέρουν στην αντιμετώπιση του φαινομένου του θερμοκηπίου και στον περιορισμό των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα, συμβάλλουν και στην ενίσχυση της ενεργειακής ανεξαρτησίας και της ασφάλειας του ενεργειακού ανεφοδιασμού της κάθε χώρας σε εθνικό επίπεδο, καθώς αποτελούν εγχώρια παραγωγή. Επομένως, μειώνεται η εξάρτηση από ασταθείς και αναξιόπιστες αγορές, ως προς την ποσότητα και την τιμή των ορυκτών καυσίμων, ειδικότερα του πετρελαίου και του φυσικού αερίου. Τέλος, συμβάλλουν στην αποκεντροποίηση του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας των χωρών καθώς είναι διάσπαρτες γεωγραφικά με αποτέλεσμα να προσφέρουν τη δυνατότητα κάλυψης ενεργειακών αναγκών σε τοπικό επίπεδο μειώνοντας έτσι τις απώλειες μεταφοράς.

Οι διάφορες μορφές των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είναι: [5]

- Ηλιακή Ενέργεια, στην οποία εμπεριέχονται τα ακόλουθα συστήματα:
 1. Φωτοβολταϊκά Ηλιακά Συστήματα τα οποία μετατρέπουν την ηλιακή ενέργεια σε ηλεκτρική.
 2. Ενεργητικά Ηλιακά Συστήματα τα οποία μετατρέπουν την ηλιακή ακτινοβολία σε θερμότητα.
 3. Παθητικά Ηλιακά Συστήματα και Βιοκλιματικός Σχεδιασμός που αφορούν διάφορες αρχιτεκτονικές λύσεις και τη χρήση κατάλληλων δομικών υλικών για τη μεγιστοποίηση της απευθείας εκμετάλλευσης της ηλιακής ενέργειας για χρήσεις όπως θέρμανση, κλιματισμό και φωτισμό εσωτερικών χώρων.



Εικόνα 7. Φωτοβολταϊκό πάρκο με σύστημα ιχνηλάτησης διπλού άξονα

- Αιολική Ενέργεια, όπου η κινητική ενέργεια που παράγεται από τη δύναμη του ανέμου μετατρέπεται σε μηχανική ενέργεια (ανεμόμυλος) ή / και ηλεκτρική ενέργεια (ανεμογεννήτρια).



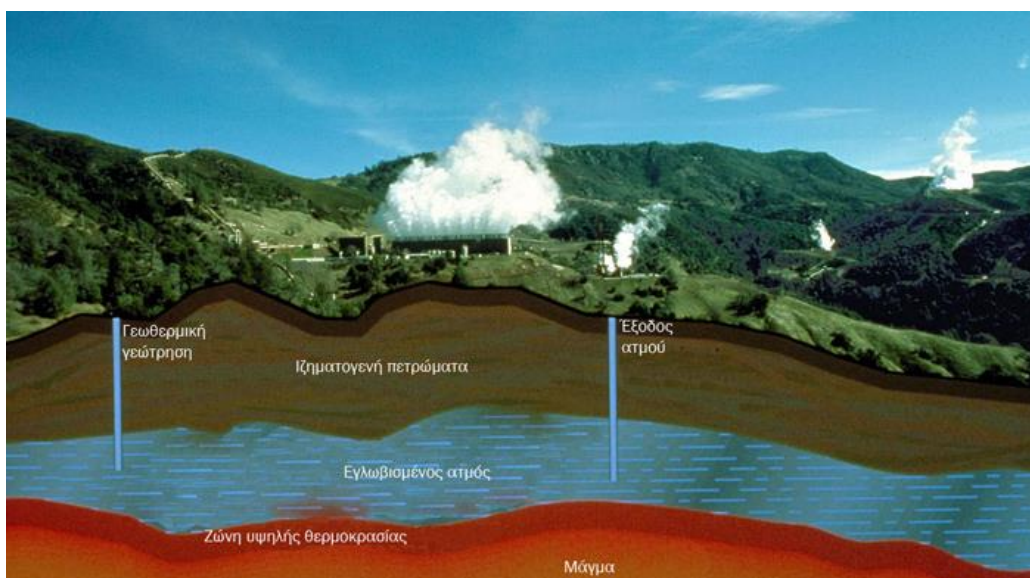
Εικόνα 8. Αιολικό πάρκο

- Υδραυλική Ενέργεια, που αποτελεί στην ουσία την ενέργεια των υδατοπτώσεων που αξιοποιούν τα μικρά υδροηλεκτρικά έργα (ΜΥΗΕ - ισχύος μέχρι 15MW), με στόχο την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ή / και μηχανικής ενέργειας (αντλιοσταμείωση).



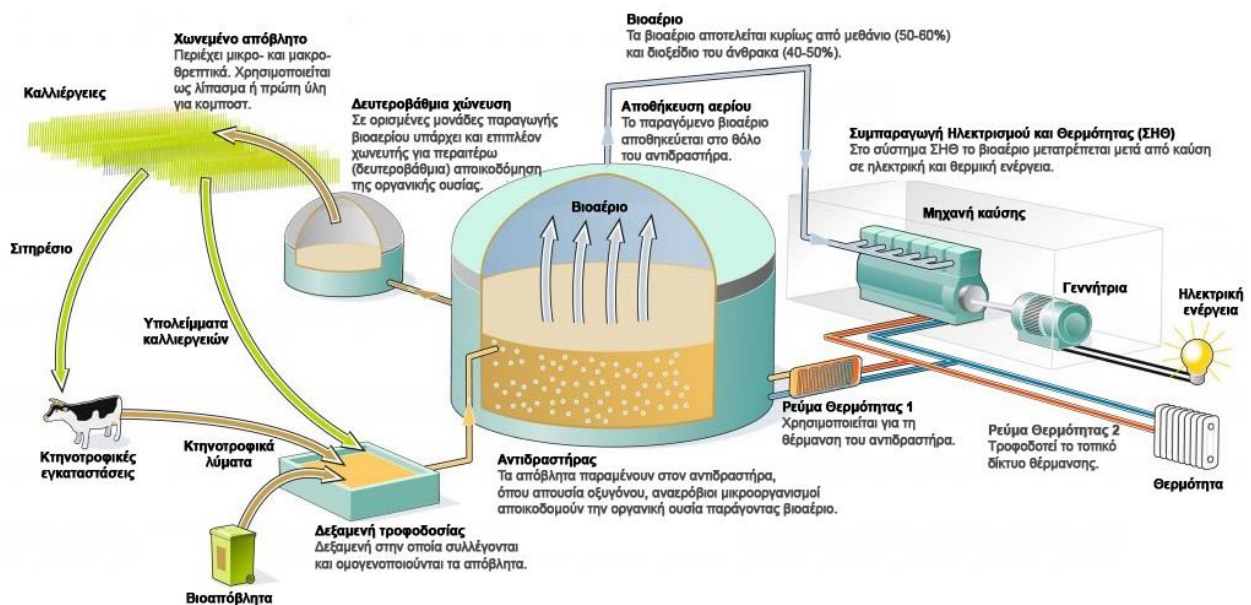
Εικόνα 9. Τυπική διάταξη ΜΥΗΕ [6]

- Γεωθερμική Ενέργεια, που είναι η θερμική ενέργεια που προέρχεται από το εσωτερικό της γης και διαχέεται προς την επιφάνεια μέσω θερμών πετρωμάτων (με αγωγή και συναγωγή) ή είναι συγκεντρωμένη σε προσιτό βάθος από την επιφάνεια όταν συναντάται σε φυσικούς ατμούς και σε επιφανειακά ή υπόγεια θερμά νερά.



Εικόνα 10. Γεωθερμικό πεδίο

- Βιομάζα, η οποία είναι το βιοαποικοδομήσιμο κλάσμα προϊόντων, αποβλήτων και καταλοίπων που προέρχονται είτε από τις γεωργικές δραστηριότητες, συμπεριλαμβανομένων φυτικών και ζωικών ουσιών, είτε από τις δασοκομικές και τις συναφείς βιομηχανικές δραστηριότητες, καθώς και το βιοαποικοδομήσιμο κλάσμα βιομηχανικών αποβλήτων και αστικών λυμάτων και απορριμμάτων.
- Βιοαέριο, που είναι το καύσιμο αέριο που παράγεται από τη βιομάζα ή από το βιοαποικοδομήσιμο κλάσμα βιομηχανικών και αστικών αποβλήτων (χώροι υγειονομικής ταφής – ΧΥΤΑ, εγκαταστάσεις βιολογικού καθαρισμού, κλπ.), το οποίο μπορεί να καθαριστεί και να “αναβαθμιστεί” σε ποιότητα φυσικού αερίου, για χρήση ως βιοκαύσιμο.

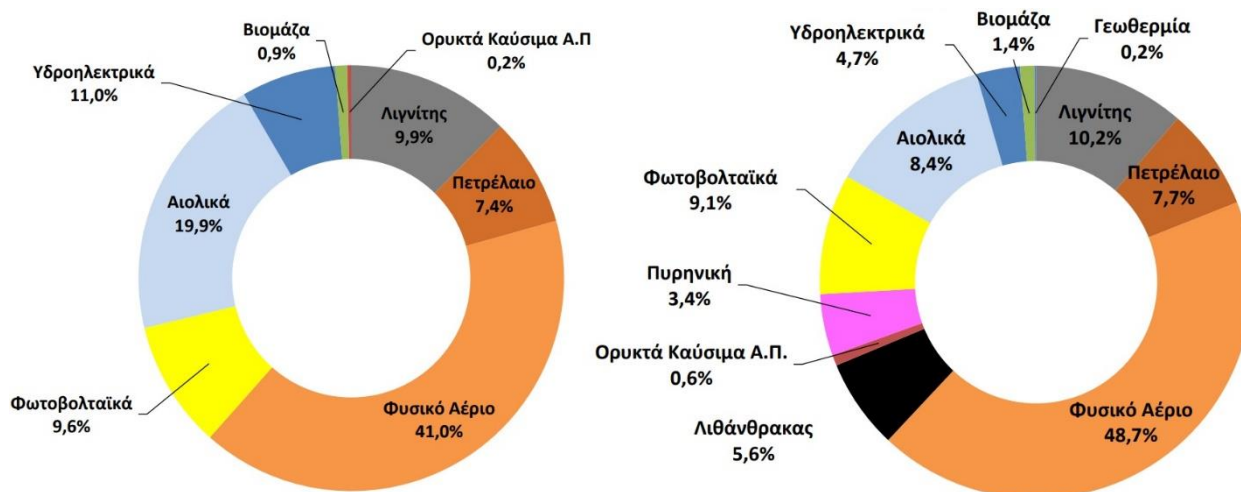


Εικόνα 11. Διάγραμμα λειτουργίας και ενεργειακή αξιοποίηση μονάδας παραγωγής βιοαερίου [7]

- Ενέργεια από τη θάλασσα και πιο συγκεκριμένα:
 1. Κυματική Ενέργεια, που γίνεται εκμετάλλευση της κινητικής ενέργειας των κυμάτων της θάλασσας.
 2. Παλιρροϊκή Ενέργεια, που γίνεται εκμετάλλευση της βαρύτητας του ήλιου και της σελήνης που προκαλεί ανύψωση της στάθμης του νερού.

Παρακάτω παρουσιάζονται το ενεργειακό μείγμα παραγωγής και το υπολειπόμενο ενεργειακό μείγμα παραγωγής της χώρας για το έτος 2021, για τα οποία ισχύει ότι: [8]

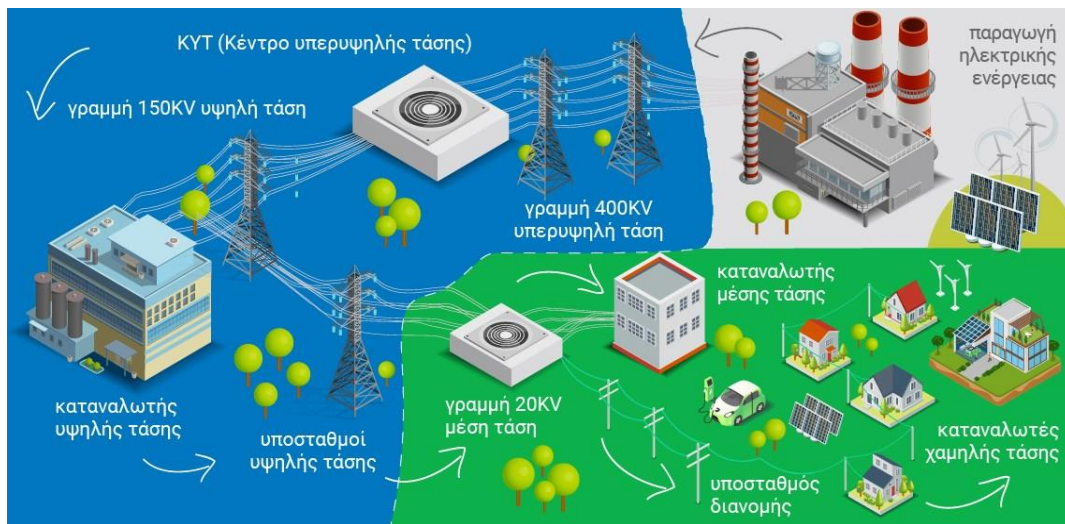
- Ενεργειακό μείγμα παραγωγής ορίζεται η κατανομή της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται στη χώρα, κατά τη διάρκεια ενός ημερολογιακού έτους, στις πρωτογενείς πηγές ενέργειας που καταναλώνονται ή χρησιμοποιούνται για την παραγωγή της.
- Υπολειπόμενο ενεργειακό μείγμα ορίζεται η κατανομή σε πρωτογενείς πηγές της προέλευσης της ηλεκτρικής ενέργειας που καταναλώνεται στη χώρα, για το μέρος της κατανάλωσης της οποίας η προέλευση δεν αποδεικνύεται με ανάκληση Εγγυήσεων Προέλευσης.



Εικόνα 12. Ενεργειακό μείγμα παραγωγής (αριστερά) και υπολειπόμενο ενεργειακό μείγμα παραγωγής (δεξιά) της χώρας για το 2021 [8]

1.3 Σύστημα Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας

Ο όρος “Σύστημα Μεταφοράς” αναφέρεται στο σύνολο των διαδικασιών λειτουργίας και ελέγχου των εγκαταστάσεων και των υποδομών που χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας μέσω των γραμμών μεταφοράς στο δίκτυο υψηλής και υπερυψηλής τάσης του διασυνδεδεμένου συστήματος, οι οποίες μεταφέρουν την ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από τους σταθμούς παραγωγής στους υποσταθμούς ΥΤ/ΜΤ από όπου ξεκινά το δίκτυο διανομής. [3] Τη σπονδυλική στήλη του Διασυνδεδεμένου Συστήματος Μεταφοράς (ΔΣΜ) αποτελούν οι τρεις γραμμές διπλού κυκλώματος των 400kV, που μεταφέρουν ηλεκτρική ενέργεια από το σπουδαιότερο κυρίως ενεργειακό κέντρο παραγωγής της χώρας που βρίσκεται στη Δυτική Μακεδονία. Στην περιοχή αυτή, παράγεται σχεδόν το 70% της συνολικής ηλεκτροπαραγωγής της χώρας που στη συνέχεια μεταφέρεται στα μεγάλα αστικά κέντρα κατανάλωσης, κυρίως σε αυτά της κεντρικής και της νότιας Ελλάδας που καταναλώνεται περίπου το 65% της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας. Η γεωγραφική αυτή ανισοκατανομή μεταξύ της παραγωγής (Βορράς) και της κατανάλωσης (Νότος) αποτελούσε για χρόνια ιδιαίτερα σημαντικό πρόβλημα κατά το παρελθόν, κυρίως τους καλοκαιρινούς μήνες που οι απαιτήσεις σε ηλεκτρική ενέργεια είναι μεγαλύτερες. Πλέον όμως, παρ’ όλη την αύξηση των καταναλώσεων με την πάροδο των χρόνων, υπάρχει καλύτερη διαχείριση της κατάστασης εξαιτίας της ένταξης επιπλέον μονάδων παραγωγής φορτίων βάσης καθώς και μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής ΑΠΕ στο νότιο σύστημα. Επίσης, το ΔΣΜ διαθέτει επιπλέον γραμμές των 400kV, εναέριες, υπόγειες γραμμές και υποβρύχια καλώδια των 150kV που συνδέουν την Άνδρο και τα νησιά της δυτικής Ελλάδας με το ΔΣΜ, καθώς και μία επιπλέον υποβρύχια σύνδεση της Κέρκυρας με την Ηγουμενίτσα των 66kV. Ο λόγος που επιλέγονται αυτά τα επίπεδα τάσης στο σύστημα μεταφοράς, όπου έχουμε μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας πολλές φορές για εκατοντάδες χιλιόμετρα, είναι για να μειωθούν οι απώλειες ισχύος και να υπάρχουν μικρότερες πτώσεις τάσης κατά μήκος των γραμμών μεταφοράς. [9]



Εικόνα 13. Δίκτυο ηλεκτρισμού [10]

Στην Ελλάδα, η διαχείριση του συστήματος μεταφοράς γίνεται από τον ΑΔΜΗΕ (Ανεξάρτητος Διαχειριστής Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας) που βασική του αποστολή είναι να διασφαλίσει την ασφαλή και αδιάλειπτη τροφοδοσία του Ελληνικού Συστήματος Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΕΣΜΗΕ). Η διαχείριση αυτή, διασφαλίζει την ισορροπία μεταξύ παραγωγής και κατανάλωσης κάθε χρονική στιγμή, κάτι εξαιρετικά δύσκολο με την ένταξη ολοένα και περισσότερων ΑΠΕ των οποίων η παραγωγή είναι στοχαστική και ευμετάβλητη κατά τη διάρκεια της ημέρας. Η εποπτεία της όλης διαδικασίας γίνεται από τα Κέντρα Ελέγχου Ενέργειας (ΚΕΕ) αφού προηγουμένως γίνει μία πρόβλεψη της λειτουργίας του συστήματος λαμβάνοντας υπόψη όλους τους παράγοντες που την επηρεάζουν και έχουν να κάνουν με τις καιρικές συνθήκες, τη χρονική περίοδο του έτους, διάφορα ειδικά γεγονότα, τη διαθεσιμότητα των μονάδων, κλπ. [2]

Συνοπτικά, τα βασικά στοιχεία που απαρτίζουν το σύστημα μεταφοράς είναι: [9]

- Εναέριες γραμμές μεταφοράς 400kV, 150kV και 66kV
- Υπόγειες και υποβρύχιες καλωδιακές γραμμές 400kV και 150kV
- Κέντρα υπερυψηλής τάσης 400/150kV
- Υποσταθμοί 150/20kV

ΤΥΠΟΣ ΓΡΑΜΜΩΝ	ΓΡΑΜΜΕΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ (km)				ΣΥΝΟΛΟ
	400 kV	Σ.Ρ. 400 kV	150 kV	66 kV	
ΕΝΑΕΡΙΕΣ ΓΡΑΜΜΕΣ	2.761,53	106,95	8.834,49	37,54	11.740,51
ΥΠΟΒΡΥΧΙΕΣ ΚΑΛ. ΓΡΑΜΜΕΣ			941,82	72,2	1.014,02
ΥΠΟΒΡΥΧΙΕΣ ΚΑΛ. ΓΡΑΜΜΕΣ (Υ/Γ τμήμα)			28,1	2,8	30,90
ΥΠΟΓΕΙΕΣ ΓΡΑΜΜΕΣ	31,45		373,27		404,71
ΣΥΝΟΛΟ	2.792,98	106,95	10.177,68	112,54	13.190,15

Εικόνα 14. Μήκη εγκατεστημένων γραμμών μεταφοράς (καταγραφές έως 30/06/2022) [11]



Εικόνα 15. Υποσταθμός 400/150kV

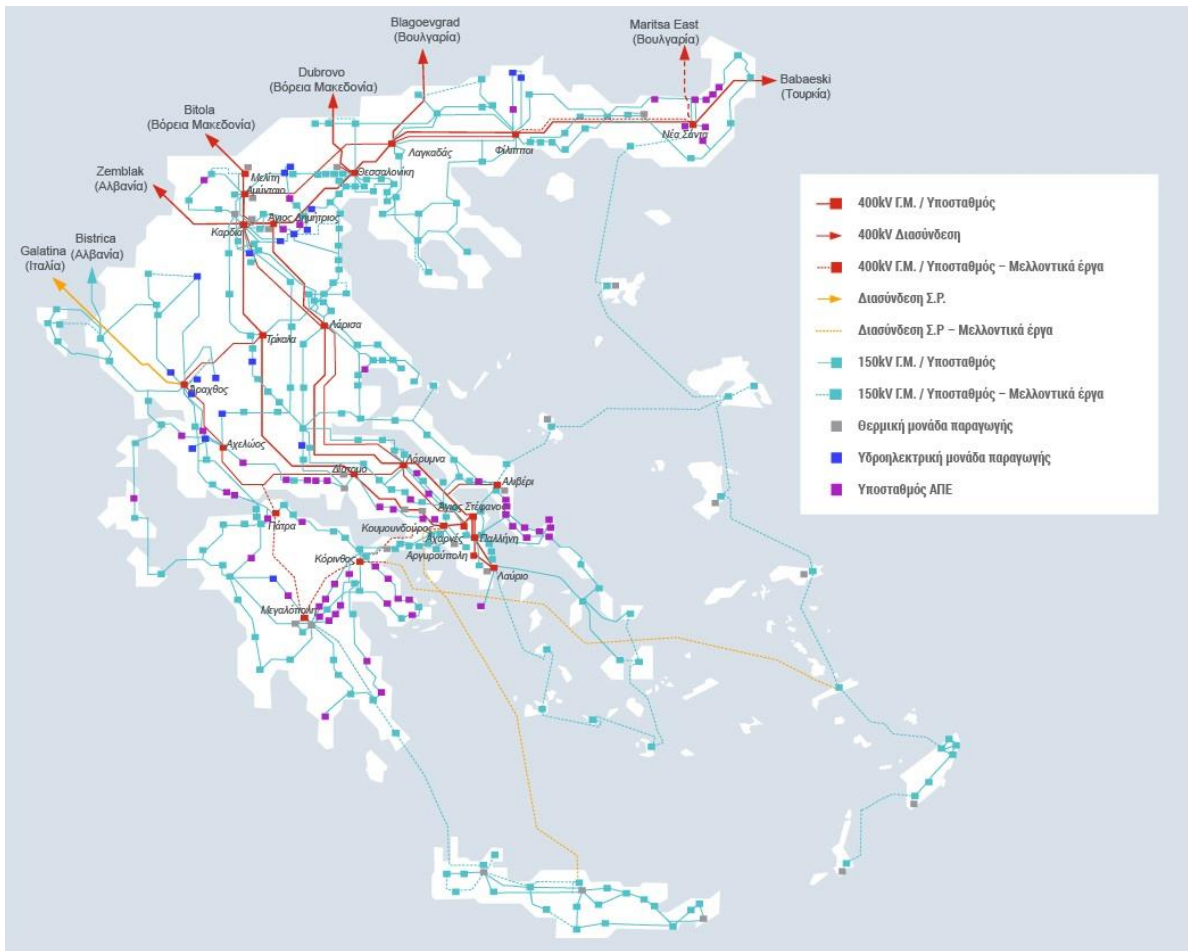
Οι εναέριες γραμμές μεταφοράς αποτελούνται από: [2]

- Πυλώνες ή πύργους, στους οποίους στηρίζονται οι αγωγοί των εναέριων γραμμών
- Μονωτήρες, μέσω των οποίων αναρτώνται στους πυλώνες οι αγωγοί των γραμμών
- Αγωγούς κυρίως από χαλκό ή αλουμίνιο

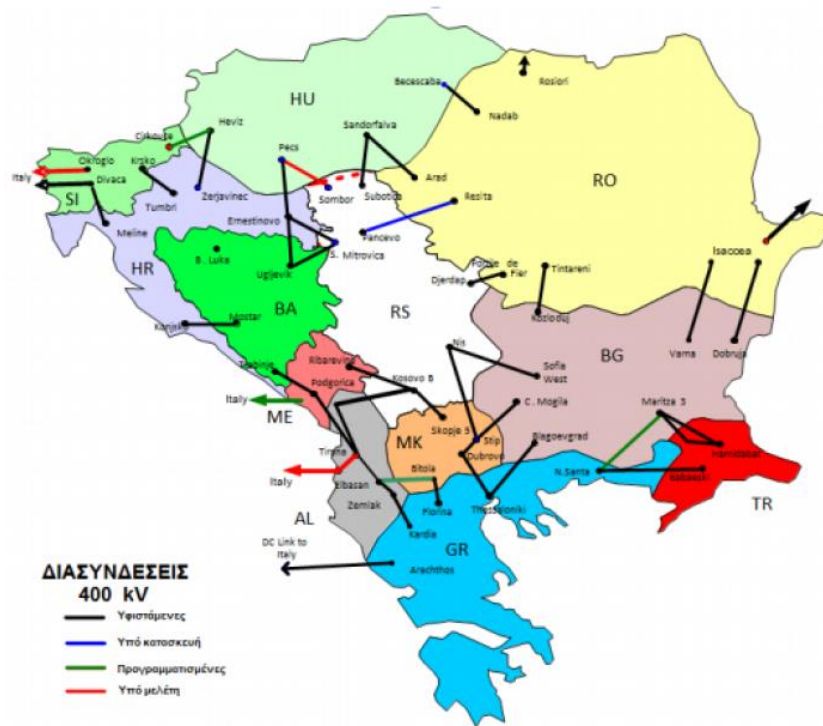
Για τη διασφάλιση της παροχής ηλεκτρικού ρεύματος ακόμα και στα πιο απομακρυσμένα σημεία της χώρας αλλά και της οικονομικότερης λειτουργίας τους συστήματος, είναι απαραίτητη η ύπαρξη του διασυνδεδεμένου συστήματος σε όσο το δυνατόν περισσότερες περιοχές. Αυτό γίνεται εύκολα αντιληπτό από την περίπτωση των ΜΔΝ όπου η παραγωγή, η μεταφορά και η διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας είναι αυτοτελής διεργασία, ανεξάρτητη από το υπόλοιπο διασυνδεδεμένο δίκτυο. Το παραπάνω όμως, έχει σαν αποτέλεσμα η όλη διαδικασία να είναι πιο κοστοβόρα αλλά και λιγότερο αξιόπιστη στις περιοχές αυτές συγκριτικά με αυτή που πραγματοποιείται στο διασυνδεδεμένο δίκτυο. Για τον λόγο αυτό, δρομολογούνται σημαντικά έργα που αποσκοπούν στην διασύνδεση ολόκληρης της χώρας.

Εκτός όμως των διασυνδέσεων που υπάρχουν στο εσωτερικό της χώρας, το Ελληνικό Σύστημα λειτουργεί σύγχρονα και παράλληλα με το διασυνδεδεμένο ευρωπαϊκό σύστημα υπό τον γενικότερο συντονισμό του ENTSO-E. Η παράλληλη λειτουργία του ελληνικού συστήματος με το ευρωπαϊκό επιτυγχάνεται μέσω διασυνδεδετικών γραμμών μεταφοράς, κυρίως 400kV, με τα συστήματα της Αλβανίας, της Βουλγαρίας, της Βόρειας Μακεδονίας και της Τουρκίας. Επιπλέον, το ελληνικό σύστημα συνδέεται ασύγχρονα μέσω υποβρυχίου συνδέσμου σταθερού ρεύματος τάσης 400kV με την Ιταλία. Συνοπτικά λοιπόν, οι υπάρχουσες διεθνείς διασυνδέσεις της Ελλάδος αυτή τη στιγμή είναι: [9]

- Ελλάδα – Αλβανία
- Ελλάδα – Βόρεια Μακεδονία
- Ελλάδα – Βουλγαρία
- Ελλάδα – Τουρκία
- Ελλάδα – Ιταλία



Εικόνα 16. Ελληνικό ΣΗΕ (Διασυνδεδεμένο Σύστημα Μεταφοράς – Διεθνείς Διασυνδέσεις) [12]

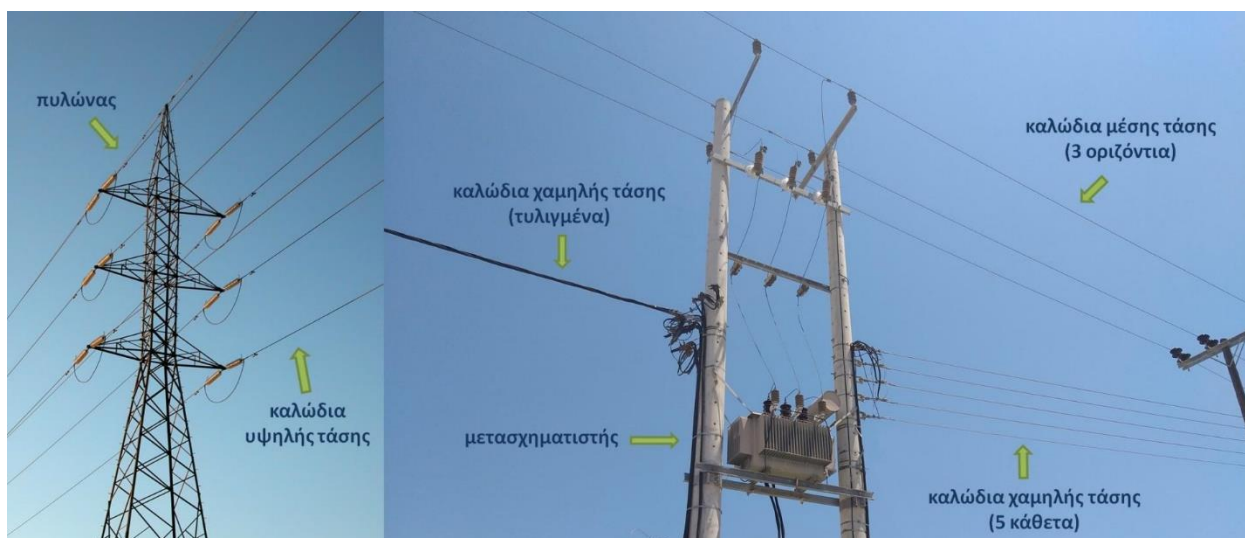


Εικόνα 17. Σχηματικό διάγραμμα των διεθνών διασυνδέσεων μεταξύ των Βαλκανικών χωρών [1]

1.4 Σύστημα Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας

Με τον όρο “Σύστημα Διανομής” αναφερόμαστε στο σύνολο των διαδικασιών λειτουργίας και ελέγχου καθώς και στις υλικοτεχνικές υποδομές με τις οποίες η ηλεκτρική ενέργεια διανέμεται μέχρι τους καταναλωτές μέσης και χαμηλής τάσης. Το δίκτυο διανομής αποτελείται από δύο δίκτυα, το δίκτυο διανομής MT (20kV, 15kV και 6,6kV) όπου έχουμε τη μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας από τους υποσταθμούς ΥΤ/ΜΤ στους υποσταθμούς διανομής ΜΤ/ΧΤ και στους καταναλωτές ΜΤ και το δίκτυο διανομής ΧΤ (400V) όπου μεταφέρει την ηλεκτρική ενέργεια από τους υποσταθμούς διανομής στις περιοχές κατανάλωσης ΧΤ. [13]

Τα δίκτυα διανομής, ανάλογα με το είδος της περιοχής και την πυκνότητα του φορτίου (αστικό κέντρο, αγροτικές περιοχές, κλπ.) μπορεί να είναι εναέρια, υπόγεια ή συνδυασμός αυτών. Συγκεκριμένα, στα κέντρα των πόλεων που είναι πυκνοκατοικημένες περιοχές και η πυκνότητα του φορτίου είναι υψηλή, τα δίκτυα διανομής είναι συνήθως υπόγεια δίνοντας προτίμηση στην αξιοπιστία και στην ασφάλεια έναντι του κόστους, ενώ εκτός του αστικού ιστού είναι εναέρια καθώς δίνεται βάση στη μείωση του κόστους μεταφοράς της ενέργειας. Σε ημιαστικές περιοχές ενδέχεται να υπάρχουν εναέρια δίκτυα, υπόγεια ή και συνδυασμός αυτών.



Εικόνα 18. Εναέρια δίκτυα ΥΤ, ΜΤ και ΧΤ

Στην Ελλάδα, ο φορέας που είναι υπεύθυνος για τη διαχείριση, τη λειτουργία, τη συντήρηση και την ανάπτυξη του δικτύου διανομής καθώς και για τη διασφάλιση της πρόσβασης όλων των καταναλωτών στην ηλεκτρική ενέργεια είναι ο Διαχειριστής Ελληνικού Δικτύου Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΔΕΔΔΗΕ). [2] Ο ΔΕΔΔΗΕ, εκτός από τα δίκτυα ΜΤ και ΧΤ, έχει υπό την εποπτεία του και δίκτυα ΥΤ στην Αττική και στα νησιά. Ο διαχειριστής είναι επίσης αρμόδιος για να εξετάζει τη δυνατότητα σύνδεσης σταθμών παραγωγής ΑΠΕ και σταθμών συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας υψηλής απόδοσης (ΣΗΘΥΑ), αλλά και να επιβλέπει τη συμμετοχή στην παραγωγική διαδικασία των μονάδων αυτών με στόχο την εύρυθμη και αποδοτική λειτουργία του ΣΗΕ της χώρας.

Συνοπτικά, τα βασικά στοιχεία που απαρτίζουν το σύστημα διανομής είναι: [14]

- Εναέριες και υπόγειες γραμμές ΜΤ (20kV, 15kV και 6,6kV)
- Εναέριες και υπόγειες γραμμές ΧΤ (400V)
- Κέντρα διανομής 150/20kV
- Υποσταθμοί διανομής 20/0,4kV

Τα βασικά ποσοτικά μεγέθη του συστήματος διανομής ηλεκτρικής ενέργειας που αφορούν το έτος 2020 είναι: [14]

- 113.358km Δικτύου ΜΤ
- 128.211km Δικτύου ΧΤ
- 165.290 Υποσταθμοί ΜΤ/ΧΤ
- 993km Δικτύου ΥΤ εκ των οποίων τα 218km στην Αττική και τα 775km στα ΜΔΝ
- 241 Υποσταθμοί ΥΤ/ΜΤ
- 7.593.412 Πελάτες, εκ των οποίων 12.668 ΜΤ και 7.580744 ΧΤ
- 41.983 GWh Καταναλώσεις Πελατών (10.950 στη ΜΤ και 31.033 στη ΧΤ)

1.5 Υποσταθμοί ΣΗΕ

Ως υποσταθμός ορίζεται η ηλεκτρική εγκατάσταση στην οποία γίνεται μετασχηματισμός της τάσης, καθώς και η κατανομή ή η διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας. Οι Υ/Σ ανάλογα με την τάση που τροφοδοτούνται διαχωρίζονται σε δύο κατηγορίες:

- Στους Υ/Σ μεταφοράς
- Στους Υ/Σ διανομής

Οι Υ/Σ επίσης, διαχωρίζονται και ανάλογα με το πού είναι τοποθετημένοι. Έτσι, υπάρχουν οι υπαίθριοι Υ/Σ ο εξοπλισμός των οποίων είναι εγκατεστημένος στην ύπαιθρο και γενικά βελτιστοποιημένος για υπαίθριες εγκαταστάσεις, αλλά και οι Υ/Σ εσωτερικού χώρου των οποίων ο εξοπλισμός συστεγάζεται σε έγκλειστο χώρο.

1.5.1 Υποσταθμοί Μεταφοράς

Οι Υ/Σ μεταφοράς ανάλογα με το σημείο του δικτύου που είναι τοποθετημένοι και τον σκοπό που εξυπηρετούν διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες: [15]

- Υ/Σ ανύψωσης, οι οποίοι βρίσκονται κοντά στους σταθμούς παραγωγής και σκοπός τους είναι να ανυψώσουν την τάση από τις παραγωγικές μονάδες στην τάση μεταφοράς.
- Υ/Σ υποβιβασμού, οι οποίοι βρίσκονται στο τέλος του δικτύου μεταφοράς και στόχος τους είναι να υποβιβάσουν την υψηλή τάση (150kV) του δικτύου μεταφοράς στη μέση τάση (15kV ή 20kV) του δικτύου διανομής.
- Υ/Σ ζεύξης ή διασύνδεσης, οι οποίοι συμβάλλουν αποκλειστικά στη ζεύξη των ηλεκτρικών κυκλωμάτων υψηλής τάσης χωρίς να γίνεται αναγκαία κάποιος μετασχηματισμός τάσης.

Στις περισσότερες περιπτώσεις όμως οι Υ/Σ είναι μικτοί, δηλαδή ανύψωσης και ζεύξης ή υποβιβασμού και ζεύξης ταυτόχρονα. [15]

Επίσης οι Υ/Σ μεταφοράς με βάση τον τρόπο και τον χώρο κατασκευής τους χωρίζονται σε: [15]

- Υπαίθριους Υ/Σ, οι οποίοι είναι κατασκευασμένοι σε υπαίθριο χώρο και αποτελούν μία απλή και οικονομική λύση σε περίπτωση που υπάρχει διαθέσιμος χώρος.
- Υποσταθμούς με μόνωση αερίου SF₆ ή εγκιβωτισμένους (Gas Insulated Substation – GIS), οι οποίοι αποτελούν μία αποτελεσματική, ασφαλή και οικονομική λύση που είναι απόρροια της έλλειψης χώρου και του ακριβού κόστους κτήσης γης στα αστικά κέντρα σε συνδυασμό με αισθητικούς λόγους και λόγους που σχετίζονται με τη ρύπανση των βιομηχανικών και παράκτιων περιοχών. Στους εγκιβωτισμένους Υ/Σ όλα τα τμήματα που βρίσκονται υπό ΥΤ (Μ/Σ τάσης και έντασης, αγωγοί σύνδεσης, διακόπτες, αποζεύκτες, κλπ.) είναι εγκιβωτισμένα μέσα σε στεγανά, γειωμένα μεταλλικά δοχεία τα οποία περιέχουν μονωτικό αέριο εξαφθοριούχου θείου (SF₆) υπό πίεση.
- Υπόγειους Υ/Σ, οι οποίοι αποτελούν πρακτικά Υ/Σ GIS με τη διαφορά ότι είναι υπογειοποιημένοι για μεγαλύτερη εκμετάλλευση του διαθέσιμου χώρου και για καλύτερο αισθητικό αποτέλεσμα στις πόλεις.

1.5.1.1 Υποσταθμοί Ανύψωσης Τάσης ΜΤ/ΥΤ

Οι υποσταθμοί ανύψωσης, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, είναι τοποθετημένοι κοντά στους σταθμούς παραγωγής και ανυψώνουν την τάση παραγωγής σε τάση μεταφοράς. Η ισχύς τους εξαρτάται από την παραγόμενη ενέργεια του σταθμού. Δίπλα στον Υ/Σ ανύψωσης βρίσκονται οι εγκαταστάσεις του Υ/Σ εσωτερικής υπηρεσίας που χρειάζονται για την εξασφάλιση της τροφοδότησης των βοηθητικών κυκλωμάτων του σταθμού παραγωγής. Ο Υ/Σ αυτός έχει διπλή τροφοδότηση τόσο από την ηλεκτρική γεννήτρια του σταθμού όσο και από τις γραμμές μεταφοράς με Μ/Σ υποβιβασμού ΥΤ/ΜΤ έτσι ώστε, ακόμα και σε περίπτωση βλάβης της γεννήτριας να είναι εξασφαλισμένη η τροφοδότηση των βοηθητικών κυκλωμάτων. [15]

Τα βασικά τμήματα που παρατηρούνται σε έναν Υ/Σ ανύψωσης ΜΤ/ΥΤ είναι: [15]

- Ο Μ/Σ ανύψωσης της τάσης παραγωγής στην τάση μεταφοράς
- Οι διακόπτες ισχύος και αποζεύκτες που χρησιμοποιούνται για τη διακοπή της ηλεκτρικής συνέχειας των γραμμών
- Οι ζυγοί (μπάρες) για τη διακλάδωση των γραμμών
- Διάφορες βοηθητικές διατάξεις (Μ/Σ τάσης / έντασης, αλεξικέρανα, κλπ.)

1.5.1.2 Υποσταθμοί Υποβιβασμού Τάσης ΥΤ/ΜΤ

Οι Υ/Σ υποβιβασμού βρίσκονται στο τέλος του δικτύου μεταφοράς πριν αρχίσει το δίκτυο διανομής και συνήθως συναντώνται έξω από τις πόλεις σε κατασκευές υπαίθριου τύπου που οι εκτάσεις γης είναι φθηνότερες και ο κίνδυνος για τους κατοίκους είναι μικρότερος σε περίπτωση πρόκλησης κάποιου ατυχήματος στον Υ/Σ ή στις γραμμές μεταφοράς. Η επιλογή της ακριβούς

θέσης ενός τέτοιου Υ/Σ είναι αποτέλεσμα αναλυτικής οικονομοτεχνικής μελέτης που σχετίζεται αφενός με το κόστος κατασκευής, λειτουργίας και κατασκευής του Υ/Σ και αφετέρου με το κόστος της ενέργειας και τις απώλειες που εξαρτώνται από την απόσταση μεταφοράς.

Τα βασικά τμήματα που βρίσκονται σε έναν Υ/Σ υποβιβασμού ΥΤ/ΜΤ είναι παρόμοια με αυτά του Υ/Σ ανύψωσης ΜΤ/ΥΤ, ενώ και πάλι η “καρδιά” του Υ/Σ είναι ο Μ/Σ. Για αυτό τον λόγο στην εγκατάσταση υπάρχουν διάφορα συστήματα προστασίας τα οποία θα απομονώσουν τον Μ/Σ σε περίπτωση που ενεργοποιηθούν. Πιο συγκεκριμένα, στην πλευρά της ΥΤ υπάρχει ένας ηλεκτροκίνητος ασφαλειοαποζεύκτης (Α/Ζ) και ένας αυτόματος διακόπτης, ενώ στην πλευρά της ΜΤ συνδέεται και εδώ ένας αυτόματος διακόπτης.

Όπως και στους Υ/Σ ανύψωσης, έτσι και στους Υ/Σ υποβιβασμού υπάρχει ένας ξεχωριστός Μ/Σ εσωτερικής υπηρεσίας ο οποίος χρησιμοποιείται αποκλειστικά για να καλύψει τις ανάγκες στα βοηθητικά κυκλώματα ΧΤ οι οποίες αφορούν: [15]

- Φωτισμό και πρίζες
- Θέρμανση και ψύξη των χώρων που πραγματοποιούνται οι χειρισμοί
- Λειτουργία των κινητήρων και των ανεμιστήρων για την ψύξη των Μ/Σ κλπ.

Συνοπτικά, τα ηλεκτρικά κυκλώματα που υπάρχουν σε έναν Υ/Σ μεταφοράς ΥΤ/ΜΤ είναι: [15]

- Κύκλωμα AC ΥΤ
- Κύκλωμα AC ΜΤ
- Βοηθητικά κυκλώματα AC του Υ/Σ ΧΤ
- Βοηθητικά κυκλώματα DC 110V ή 230V του Υ/Σ
- Βοηθητικά κυκλώματα μετρήσεων και λειτουργίας των ηλεκτρονόμων του Υ/Σ
- Εναέριο κύκλωμα ηλεκτρικής προστασίας
- Δίκτυο γείωσης



Εικόνα 19. Υποσταθμός υποβιβασμού ΥΤ/ΜΤ

1.5.1.3 Κέντρα Υπερυψηλής Τάσης (KYT)

Τα KYT αποτελούν κόμβους οι οποίοι συνδέουν το σύστημα ΥΥΤ των 400kV με το σύστημα ΥΤ των 150kV, χωρίς απαραίτητα να υπάρχει σε αυτά Μ/Σ ανύψωσης ή υποβιβασμού. Από τους κόμβους αυτούς αναχωρούν και σε αυτούς καταλήγουν γραμμές μεταφοράς. Ο ρόλος των KYT αποσκοπεί επίσης στην αποκοπή του κυκλώματος μεταφοράς σε περίπτωση βλάβης ή συντήρησης. Τα κύρια μηχανήματα που βρίσκονται σε ένα KYT είναι αποζεύκτες και ζυγοί [15].

Μέχρι τον Οκτώβριο του 2020 ήταν συνδεδεμένοι στο Ελληνικό σύστημα συνολικά 21 KYT, εκ των οποίων 19 μετασχηματισμού και 2 ζεύξης.

1.5.2 Υποσταθμοί Διανομής

Οι Υ/Σ διανομής χρησιμοποιούνται για να υποβιβάσουν την ΜΤ των 15kV ή 20kV στην τάση κατανάλωσης των 400V και όπως και οι αντίστοιχοι μεταφοράς χωρίζονται με βάση τον τρόπο και τον χώρο κατασκευής τους σε εναέριους, επίγειους και υπόγειους. [15]

1.5.2.1 Εναέριοι Υποσταθμοί Διανομής

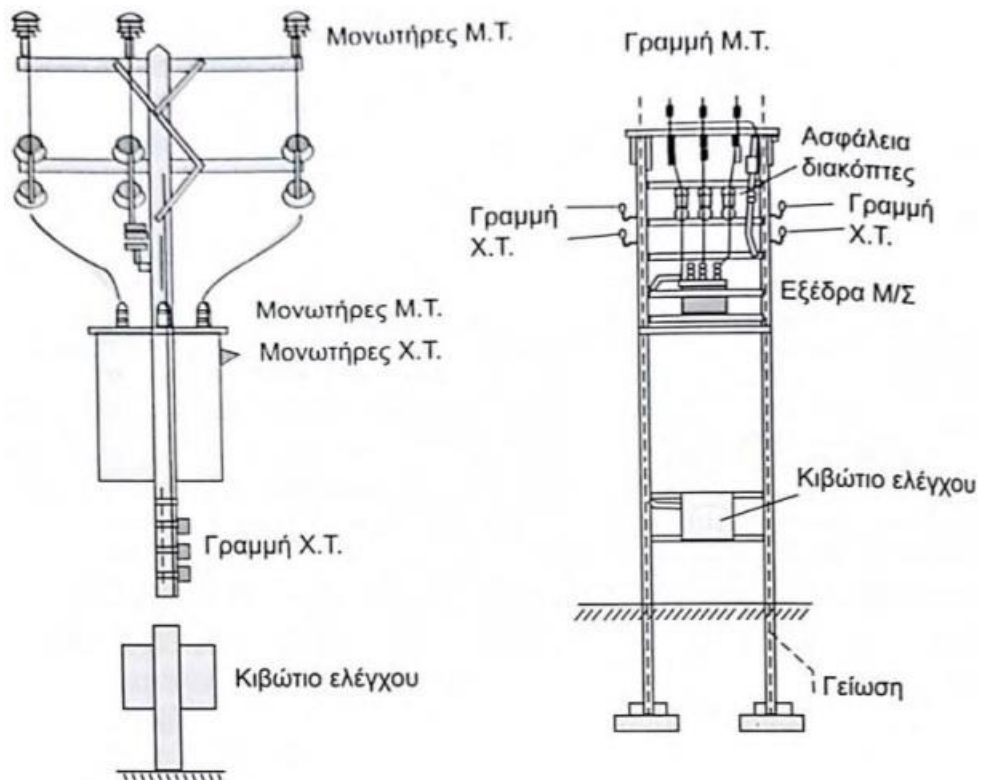
Οι εναέριοι Υ/Σ διανομής κατασκευάζονται πάνω σε στύλους και εγκαθίστανται εκεί όπου το επιτρέπει η διάταξη της γύρω περιοχής και σύμφωνα με τις ανάγκες του δικτύου. Χρησιμοποιούνται σχεδόν αποκλειστικά στα εναέρια δίκτυα διανομής και πλεονέκτημά τους είναι ότι αποτελούν οικονομική και απλή κατασκευή. Όσον αφορά τους στύλους πάνω στους οποίους τοποθετούνται οι Μ/Σ διανομής δεν υπάρχει κάποιος περιορισμός και μπορεί να είναι κάθε είδους (ξύλινοι, τσιμεντένιοι, σιδερένιοι) με την υποχρέωση απλά να είναι κατάλληλοι ώστε να αντέχουν το βάρος του Μ/Σ και των συσκευών μέσης και χαμηλής τάσης. [15]

1.5.2.2 Επίγειοι Υποσταθμοί Διανομής

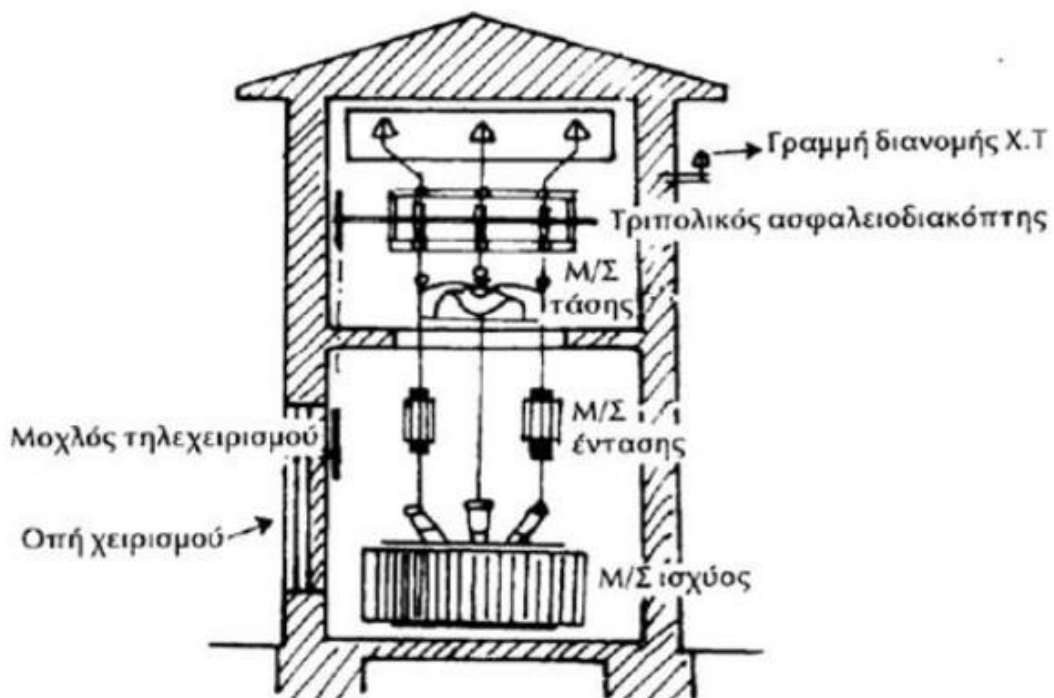
Οι επίγειοι Υ/Σ διακρίνονται ανάλογα με τον τρόπο κατασκευής τους σε: [15]

- Επίγειους Υ/Σ εσωτερικού τύπου, όπου οι Υ/Σ τοποθετούνται μέσα σε ήδη υπάρχοντα ή καινούρια κτίρια ή σε ειδικές μεταλλικές κατασκευές. Η κατασκευή αυτών των Υ/Σ συμβαίνει σε περιπτώσεις που το μέγεθος ισχύος του Υ/Σ ή ο περιβάλλοντας χώρος δεν επιτρέπουν την εγκατάσταση εναέριου. Η κατασκευή μίας τέτοιας διάταξης προϋποθέτει να ληφθούν ειδικά μέτρα που θα εξασφαλίζουν τις κατάλληλες συνθήκες λειτουργίας του Υ/Σ και σχετίζονται με τον επαρκή αερισμό του έτσι ώστε να μην αναπτυχθούν ακατάλληλες θερμοκρασίες για τη λειτουργία του Μ/Σ και τα υπόλοιπα ηλεκτρικά μηχανήματα.
- Επίγειους υπαίθριους Υ/Σ, οι οποίοι κατασκευάζονται σε περιπτώσεις όπου παρ' όλο που η ισχύς της διάταξης είναι μεγαλύτερη από τη συνηθισμένη των εναέριων Υ/Σ, οι τοπικές συνθήκες επιτρέπουν την υπαίθρια εγκατάστασή τους. Έτσι, εξοικονομείται μεγάλο μέρος του κόστους της δαπάνης για την κατασκευή της ειδικής εγκατάστασης. Σε πολλές

περιπτώσεις χρησιμοποιούνται τα ίδια μηχανήματα, υλικά και διατάξεις όπως στους επίγειους Υ/Σ εσωτερικού τύπου, με τη διαφορά ότι εδώ ο Μ/Σ είναι τοποθετημένος σε υπαίθριο χώρο.



Εικόνα 20. Εναέριοι Υ/Σ διανομής [13]



Εικόνα 21. Επίγειος Υ/Σ εσωτερικού τύπου σε ειδικό κτίριο [13]

1.5.2.3 Υπόγειοι Υποσταθμοί Διανομής

Οι υπόγειοι Υ/Σ κατασκευάζονται κάτω από την επιφάνεια του εδάφους σε σημεία του αστικού ιστού εξαιτίας κυρίως της έλλειψης διαθέσιμου υπέργειου χώρου στις πόλεις ή λόγω κατασκευής μεγάλου μεγέθους ισχύος Υ/Σ. Η εγκατάσταση αυτού του τύπου Υ/Σ γίνεται συνήθως σε υπόγεια κτιριακών εγκαταστάσεων, εκεί όπου επικρατούν οι κατάλληλες συνθήκες για την κατασκευή τους οι οποίες σχετίζονται με την ανθεκτικότητα του κτιρίου και τη στεγανότητά του. Επίσης, μία ακόμα σημαντική παράμετρος που λαμβάνεται υπόψη στο στάδιο κατασκευής του υπόγειου Υ/Σ είναι η καλή κυκλοφορία του αέρα που θα εξασφαλίζει την ψύξη της διάταξης. Τέλος, απαραίτητη κρίνεται η δημιουργία ενός κατάλληλου χαντακιού στο κάτω μέρος του εδάφους για τη συγκέντρωση του λαδιού του Μ/Σ σε περίπτωση διαρροής. [16]



Εικόνα 22. Μ/Σ σε υπόγειο Υ/Σ στην πόλη των Σερρών

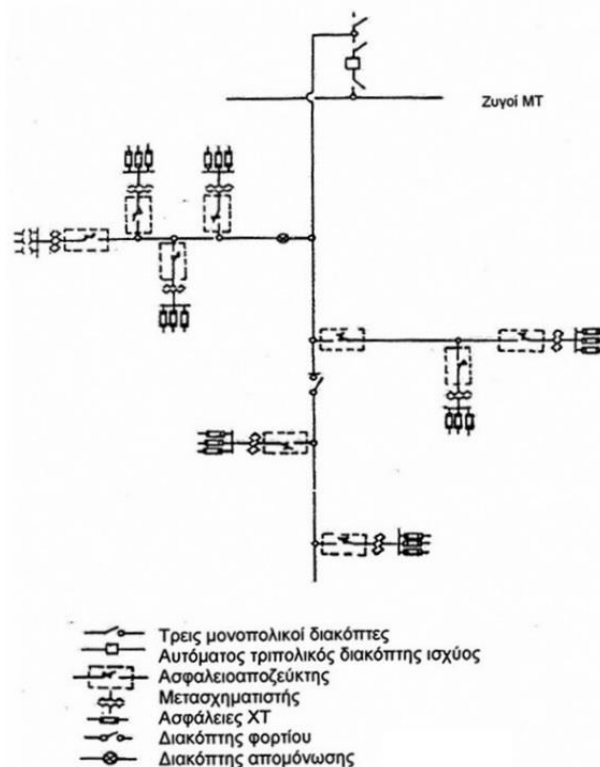
1.6 Μορφή Συστημάτων Διανομής ΜΤ

Η ανάπτυξη των συστημάτων διανομής ΜΤ στα εναέρια και υπόγεια δίκτυα γίνεται με τους τρόπους που θα αναλυθούν παρακάτω και τα κριτήρια επιλογής του καταλληλότερου συστήματος είναι: [17]

- Απλότητα
- Αξιοπιστία
- Κόστος εγκατάστασης
- Κόστος λειτουργίας
- Δυνατότητα μελλοντικής προσαρμογής

1.6.1 Ακτινικό Σύστημα Διανομής ΜΤ

Το ακτινικό σύστημα διανομής ΜΤ εφαρμόζεται κυρίως σε εναέρια δίκτυα που βρίσκονται σε αγροτικές περιοχές εκτός πόλεων και για την εξυπηρέτηση φορτίων που δεν απαιτούν υψηλό βαθμό αξιοπιστίας. Το σύστημα αποτελείται από μία κεντρική γραμμή, τον κορμό, και τις διακλαδώσεις του. Ο έλεγχος του κορμού πραγματοποιείται από έναν διακόπτη ισχύος που εκτελεί αυτόματες επαναφορές, ενώ τοποθετούνται και διακόπτες αυτόματης επαναφοράς όταν κριθεί αναγκαίο λόγω μεγάλου μήκους του δικτύου ή για να εξυπηρετηθούν λειτουργικές ανάγκες του δικτύου. Οι διακλαδώσεις ελέγχονται από ασφαλειοαποξεύκτες και από διακόπτες απομόνωσης. Γενικά, στην ΜΤ τα ακτινικά δίκτυα δεν είναι τόσο συνηθισμένα όσο στη ΧΤ και χρησιμοποιούνται σχεδόν αποκλειστικά στα νησιά και σε δυσπρόσιτα σημεία. [18]



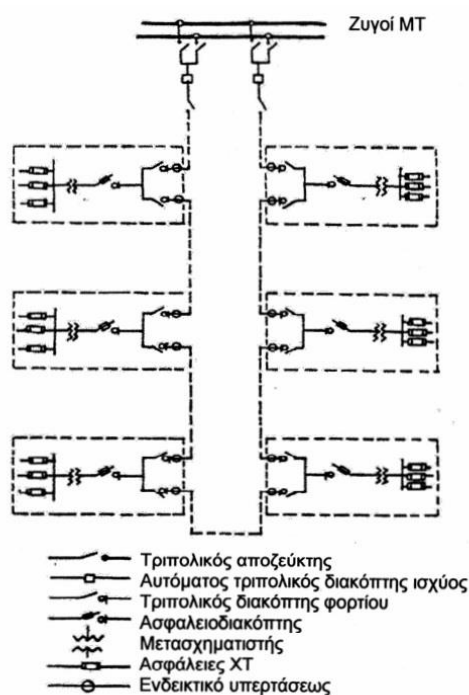
Εικόνα 23. Εναέριο ακτινικό σύστημα διανομής ΜΤ [19]

1.6.2 Βροχοειδές Σύστημα Διανομής MT

Σε περίπτωση εναέριου δικτύου, το βροχοειδές σύστημα διανομής MT είναι όμοιο με το ακτινικό με τη διαφορά ότι τροφοδοτείται από δύο σημεία του ίδιου ή διαφορετικού Υ/Σ. Η κεντρική γραμμή διαχωρίζεται από διακόπτη φορτίου ή τριπολικό αποζεύκτη. [18]

Στα υπόγεια τώρα δίκτυα, και πάλι ο βρόχος τροφοδοτείται από δύο διακόπτες που ανήκουν στον ίδιο ή σε διαφορετικούς Υ/Σ. Σε κάθε Υ/Σ διανομής υπάρχουν δύο διακόπτες φορτίου για τις αφίξεις των καλωδίων. Ο βρόχος παραμένει λειτουργικά ανοιχτός σε ένα διακόπτη φορτίου των Υ/Σ διανομής και για να αξιοποιηθεί πρέπει η κάθε αναχώρηση να φορτίζεται στην κανονική της λειτουργία μέχρι το 50% της ικανότητάς της. [18]

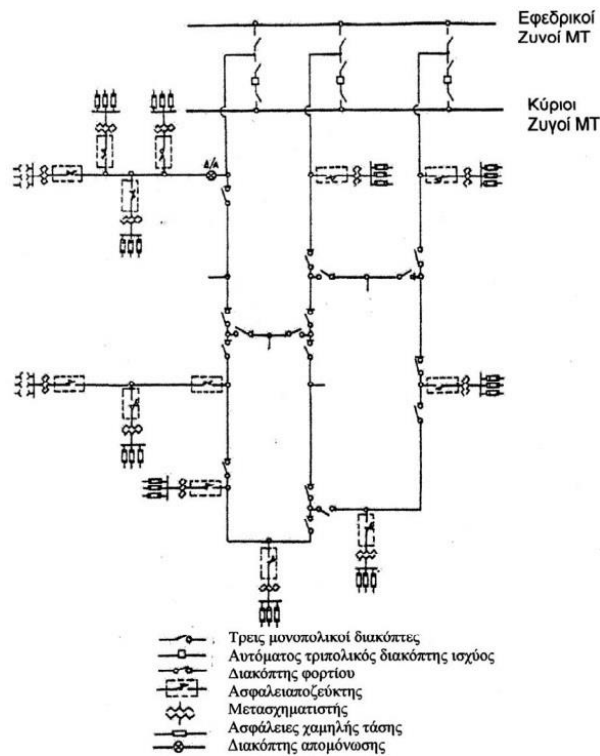
Σε περίπτωση σφάλματος, το βροχοειδές δίκτυο πρακτικά λειτουργεί σαν δύο ακτινικά δίκτυα μέχρι να αποκατασταθεί το σφάλμα.



Εικόνα 24. Υπόγειο βροχοειδές σύστημα διανομής MT [19]

1.6.3 Αραχοειδές Σύστημα Διανομής MT

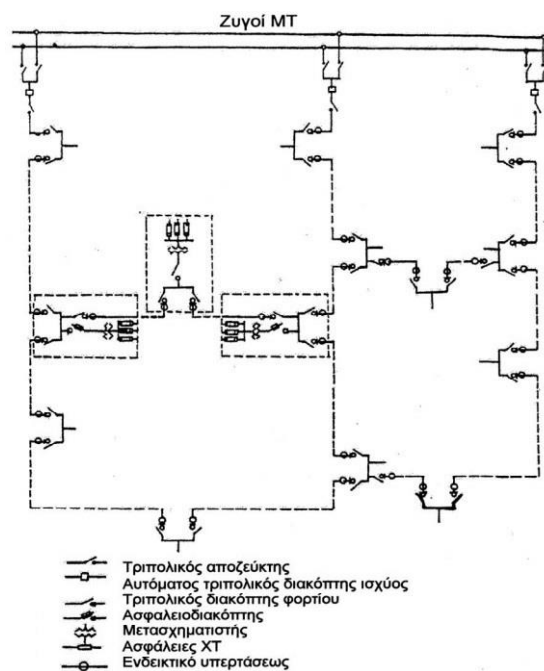
Σε περίπτωση εναέριου δικτύου, το αραχοειδές σύστημα διανομής MT είναι πρακτικά ίδιο με το βροχοειδές με τη διαφορά ότι οι συνεργαζόμενες γραμμές είναι τρεις αντί για δύο και ότι υπάρχουν και πλευρικές συνδέσεις. Σε περίπτωση σφάλματος σε μία από τις τρεις γραμμές, οι υπόλοιπες δύο αναλαμβάνουν την κάλυψη των φορτίων, επομένως κάθε αναχώρηση πρέπει να φορτίζεται μέχρι το 66% της ονομαστικής της ικανότητας στην κανονική λειτουργία της. Επίσης σε κατάλληλες θέσεις του δικτύου προβλέπονται ειδικοί διακόπτες φορτίου για τη μεταφορά φορτίων. [18]



Εικόνα 25. Εναέριο αραχνοειδές σύστημα διανομής MT [19]

Όσον αφορά τα υπόγεια δίκτυα, η βασική δομή του δικτύου δεν παρουσιάζει διαφορές σε σύγκριση με αυτή του εναέριου με τη διαφορά ότι: [18]

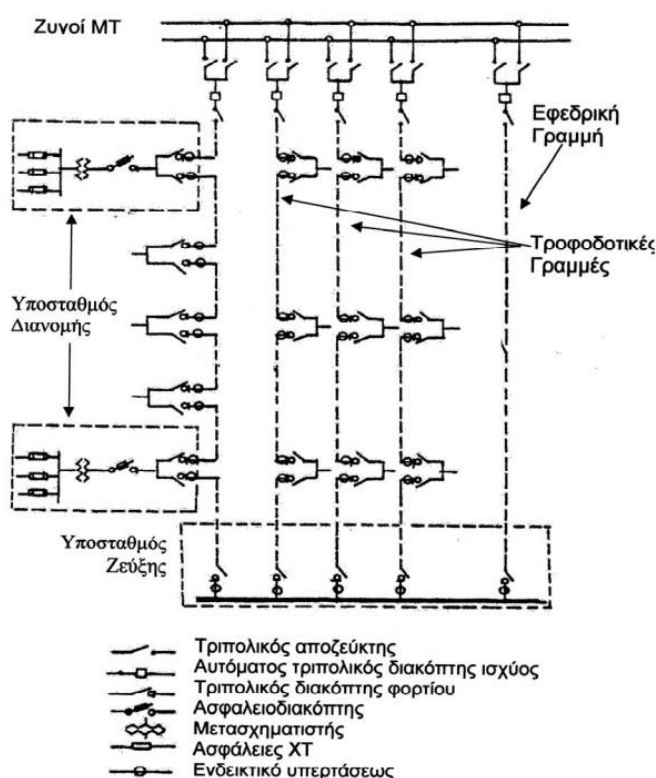
- Δεν επιτρέπεται να γίνονται ακτινικές διακλαδώσεις για την τροφοδοσία Υ/Σ και επομένως όλοι οι Υ/Σ εντάσσονται στον βρόχο.
- Οι χειρισμοί για τη μεταφορά φορτίων γίνονται με τη χρήση διακόπων φορτίου των Υ/Σ



Εικόνα 26. Υπόγειο αραχνοειδές σύστημα διανομής MT [19]

1.6.4 Ατρακτοειδές Σύστημα Διανομής MT

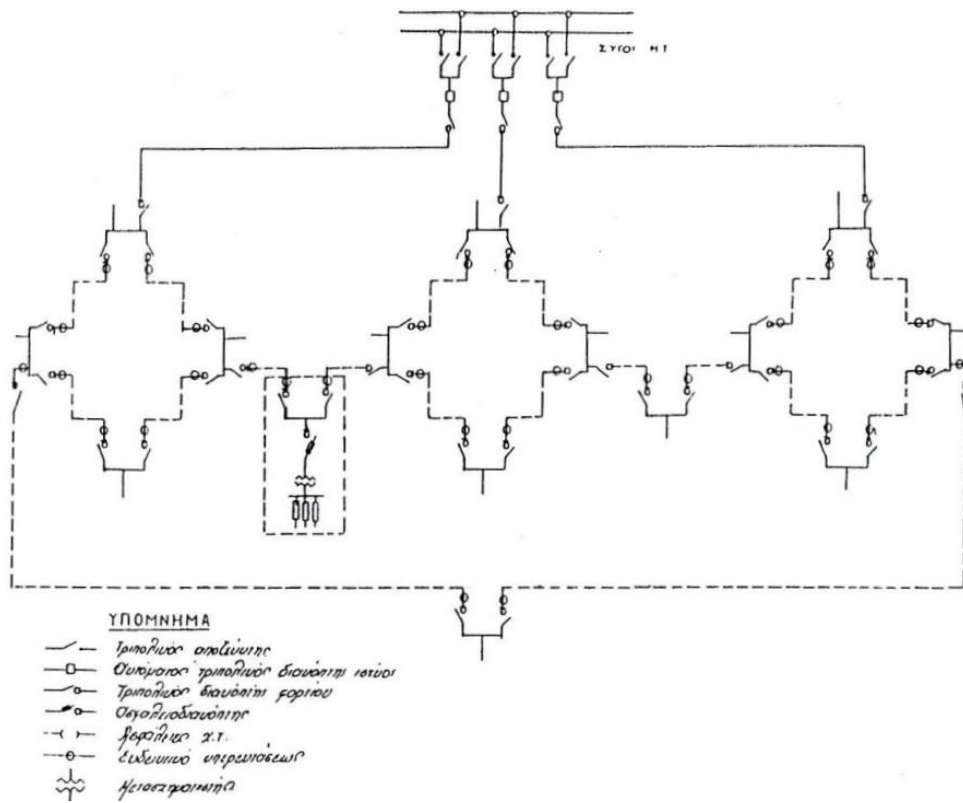
Το ατρακτοειδές δίκτυο διανομής εφαρμόζεται σχεδόν αποκλειστικά στα υπόγεια δίκτυα των αστικών κέντρων. Αποτελείται από μία ομάδα γραμμών που αναχωρούν από τον Υ/Σ διανομής και καταλήγουν σε έναν Υ/Σ ζεύξης, εκ των οποίων η μία είναι εφεδρική και πρέπει να είναι απαλλαγμένη από φορτία έτσι ώστε σε περίπτωση σφάλματος ή συντήρησης να μπορεί να παραλάβει όλα τα φορτία μίας άλλης γραμμής. Το σύνολο των συνεργαζόμενων γραμμών συμπεριλαμβανομένης και της εφεδρικής δεν πρέπει να υπερβαίνει τις έξι, καθώς σε διαφορετική περίπτωση μειώνεται σημαντικά ο βαθμός αξιοπιστίας του συστήματος. Στο ατρακτοειδές σύστημα ο βαθμός χρησιμοποίησης των γραμμών είναι πολύ υψηλός και κυμαίνεται περίπου στο 80% - 85% της ικανότητάς τους. [18]



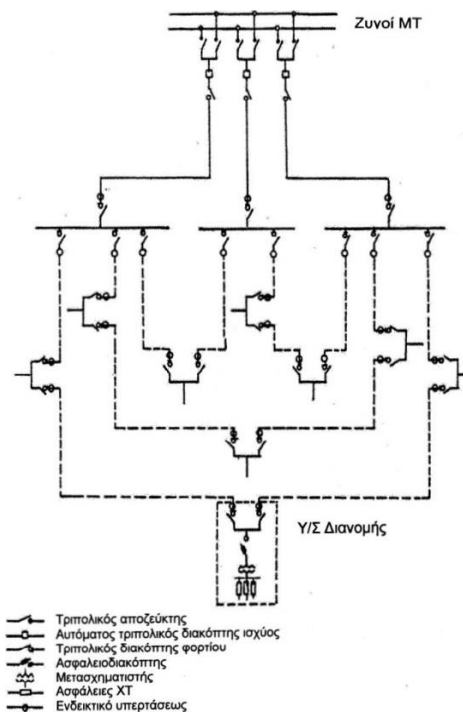
Εικόνα 27. Υπόγειο ατρακτοειδές σύστημα διανομής MT [19]

1.6.5 Σύστημα Διανομής MT Μικρών Βρόχων

Στο σύστημα διανομής μικρών βρόχων κάθε κύρια γραμμή διαχωρίζεται σε δύο δευτερεύουσες που σχηματίζουν βρόχο μεταξύ τους ή με δευτερεύουσες γραμμές άλλης αναχώρησης και οι σχηματιζόμενοι βρόχοι μπορούν να συνδεθούν μεταξύ τους με πλευρικές συνδέσεις. Το συγκεκριμένο σύστημα διανομής λόγω της δομής του προσφέρει πολλές δυνατότητες επανατροφοδότησης τμημάτων με βλάβη. Τέλος, οι γραμμές των βρόχων πρέπει να έχουν ικανότητα φόρτισης μέχρι το 50% των κύριων γραμμών, γεγονός που δίνει τη δυνατότητα ένταξης στο σύστημα παλιών υφιστάμενων καλωδίων μικρότερης διατομής. [18]



Εικόνα 28. Εναέριο σύστημα διανομής MT μικρών βρόχων [17]



Εικόνα 29. Υπόγειο σύστημα διανομής MT μικρών βρόχων [19]

Με βάση τα παραπάνω, εφόσον πρόκειται για καινούρια μελέτη που δεν επηρεάζεται από γειτονικά δίκτυα MT μικρών διατομών, προτείνεται η τελική επιλογή να περιορίζεται μεταξύ του βροχοειδούς, του αραχοειδούς και του ατρακτοειδούς συστήματος.

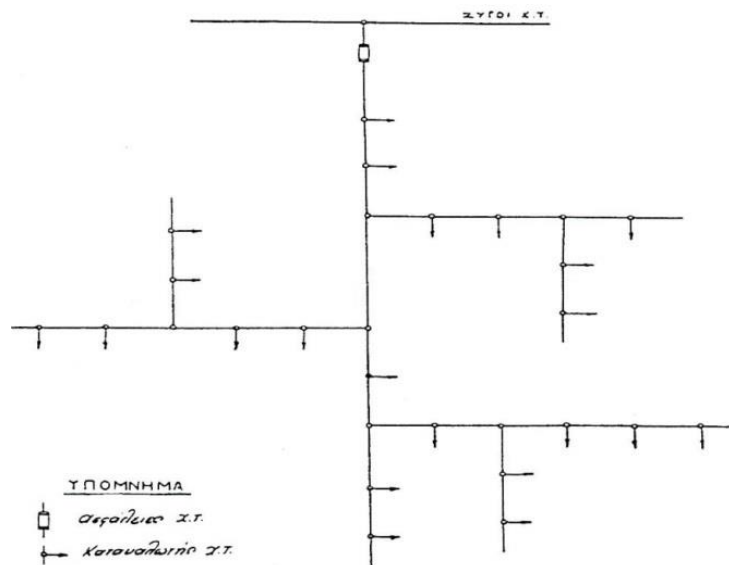
1.7 Μορφή Συστημάτων Διανομής ΧΤ

Η ανάπτυξη των συστημάτων διανομής ΧΤ στα εναέρια και υπόγεια δίκτυα γίνεται με τους εξής τρόπους οι οποίοι θα αναλυθούν παρακάτω:

- Ακτινικό σύστημα
- Βροχοειδές σύστημα
- Αραχοειδές σύστημα

1.7.1 Ακτινικό Σύστημα Διανομής ΧΤ

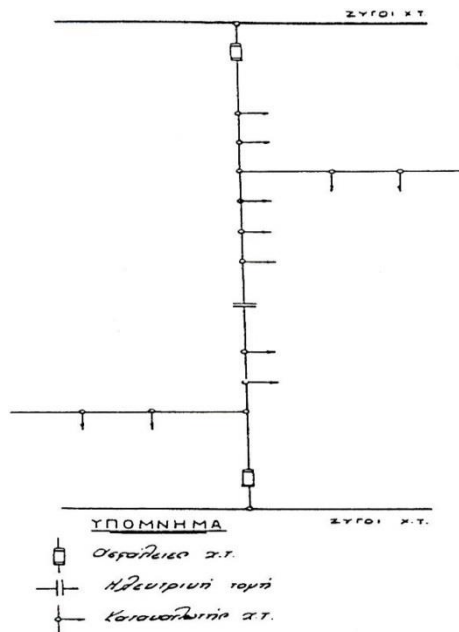
Το ακτινικό σύστημα διανομής ΧΤ είναι πρακτικά το ίδιο με το ακτινικό δίκτυο ΜΤ και χρησιμοποιείται ως επί το πλείστον στα εναέρια δίκτυα εκτός των πόλεων. Αποτελείται και αυτό από μία κύρια τροφοδοτική γραμμή που αναχωρεί από τους ζυγούς ΧΤ, τον κορμό, και από τις διακλαδώσεις του, που είναι γραμμές ίδιας ή μικρότερης διατομής. Οι καταναλωτές συνδέονται στο δίκτυο είτε απευθείας στον κορμό είτε σε κάποια διακλάδωση. [17]



Εικόνα 30. Εναέριο ακτινικό δίκτυο διανομής ΧΤ [17]

1.7.2 Βροχοειδές Σύστημα Διανομής ΧΤ

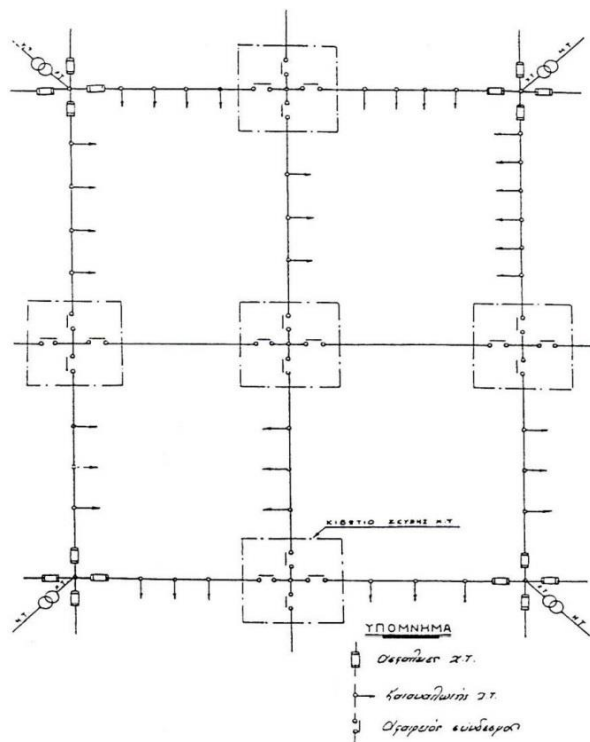
Και σε αυτή την περίπτωση, το βροχοειδές σύστημα διανομής ΧΤ είναι στην ουσία το ίδιο με το βροχοειδές ΜΤ. Το σύστημα αυτό λοιπόν, είναι ένα ακτινικό δίκτυο με τη διαφορά ότι η κεντρική γραμμή τροφοδοτείται από τους ζυγούς ΧΤ δύο διαφορετικών Υ/Σ. Στο ηλεκτρικό μέσο της κεντρικής γραμμής υπάρχει μία τομή η οποία υλοποιείται με αφαίρεση γεφυρών στα εναέρια δίκτυα και με την αφαίρεση αποζευκτών των κιβωτίων ζεύξης στα υπόγεια δίκτυα. Επίσης, κατά μήκος της κεντρικής γραμμής στα υπόγεια δίκτυα μπορεί να γίνει πρόβλεψη για εγκατάσταση κιβωτίων ζεύξης με σκοπό να αυξηθεί η αξιοπιστία του συστήματος και να μπορούν να απομονώνονται με κατάλληλους χειρισμούς τμήματα του δικτύου που εμφανίζουν κάποιο σφάλμα. [17]



Εικόνα 31. Εναέριο βροχοειδές σύστημα ΧΤ [17]

1.7.3 Αραχνοειδές Σύστημα Διανομής ΧΤ

Το αραχνοειδές σύστημα διανομής ΧΤ χρησιμοποιείται αποκλειστικά στα υπόγεια δίκτυα διανομής των πόλεων και η διαφορά του σε σχέση με το βροχοειδές, έγκειται στο γεγονός ότι στο αραχνοειδές υπάρχει η δυνατότητα διασύνδεσης των αναχωρήσεων με επιπλέον αναχωρήσεις και όχι μόνο με μία. [17]



Εικόνα 32. Υπόγειο δίκτυο διανομής ΧΤ [17]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο

ΑΝΑΛΥΣΗ ΒΡΑΧΥΚΥΚΛΩΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΗΣ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ ΔΙΑΝΟΜΗΣ

2.1 Ανάλυση Βραχυκυκλωμάτων

2.1.1 Είδη Σφαλμάτων

Με τον όρο σφάλμα ορίζουμε κάθε μορφή ανωμαλίας που μπορεί να προκύψει σε οποιοδήποτε σημείο του δικτύου, όπως για παράδειγμα βραχυκύκλωμα, ανοιχτοκύκλωμα, υπέρ-/υπόταση, υπερ-/υποσυχνότητα κλπ. Από εδώ και πέρα, ο συγκεκριμένος όρος θα ταυτίζεται με τον όρο βραχυκύκλωμα, αν και είναι γενικότερος αυτού, το οποίο δημιουργείται όταν παρατηρείται μειωμένη αντίσταση μόνωσης μεταξύ φάσεων ή μεταξύ κάποιας φάσης και γης σε κάποιο σημείο του δικτύου. [20]

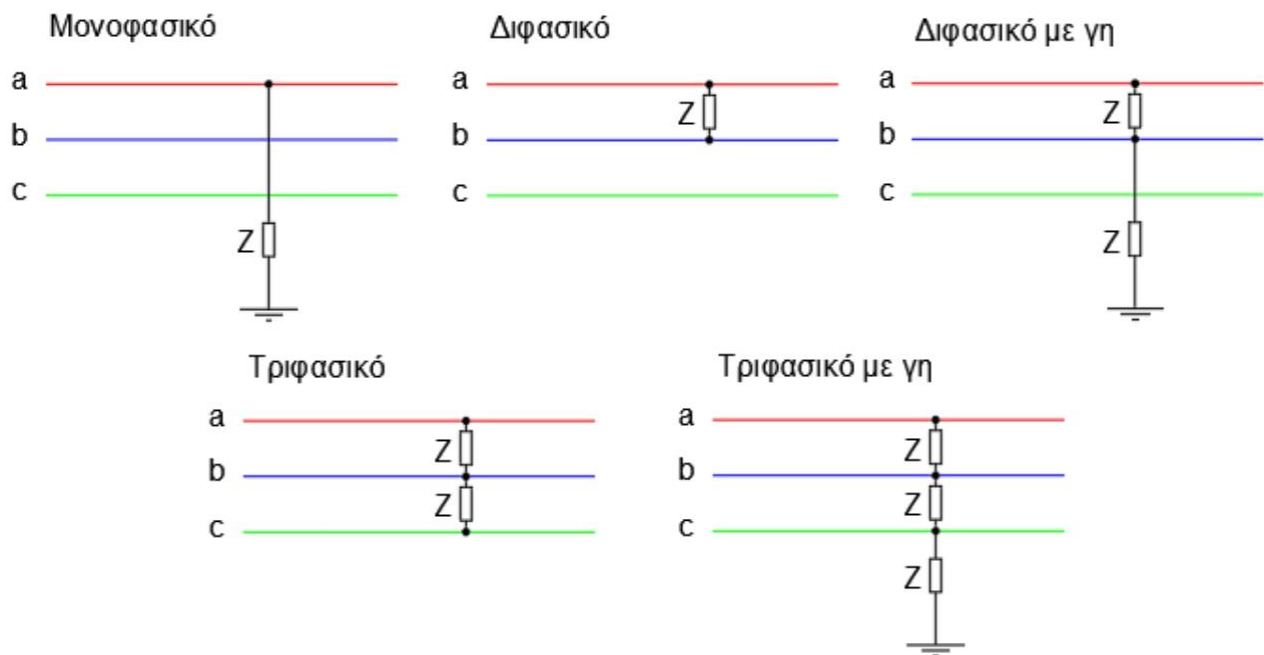
Τα σφάλματα διακρίνονται σύμφωνα με τον χρόνο παραμονής τους στο δίκτυο σε:

- Παροδικά σφάλματα που αποτελούν συνήθως το 80% - 90% των περιπτώσεων σφαλμάτων και οφείλονται κυρίως σε επαφή αγωγών λόγω ισχυρών ανέμων, παρουσίας πτηνών ή κλαδιών δέντρων, κεραυνών κλπ. Τα σφάλματα αυτά εκκαθαρίζονται χωρίς ανθρώπινη παρέμβαση και μπορούν να διακριθούν περαιτέρω σε: [20]
 1. Αυτοαποσβενύμενα, τα οποία απαλείφονται χωρίς να διακοπεί η τάση του δικτύου.
 2. Κυρίως παροδικά, τα οποία αποτελούν το 80% των παροδικών σφαλμάτων και εκκαθαρίζονται με στιγμιαία διακοπή της τάσης του κυκλώματος (διάρκεια διακοπής της τάξης δεκάτων του δευτερολέπτου).
 3. Ημιμόνιμα, τα οποία για να απαλειφθούν γίνεται διακοπή της τροφοδοσίας για λίγα δευτερόλεπτα.
- Μόνιμα σφάλματα που αποτελούν λιγότερο από το 20% των συνολικών σφαλμάτων και τα οποία δεν είναι δυνατόν να εκκαθαριστούν με διακοπή της τροφοδοσίας και προκαλούν βλάβη στον εξοπλισμό ισχύος. Η λειτουργία του δικτύου αποκαθίσταται μόνο μετά από ανθρώπινη επέμβαση και αντικατάσταση ή επισκευή του πληγέντος εξοπλισμού. Τα μόνιμα σφάλματα είναι φαινόμενο που παρατηρείται κυρίως στα υπόγεια δίκτυα, ενώ στα εναέρια δίκτυα δεν συναντάται σε ποσοστό μεγαλύτερο του 5% - 10%.

Επίσης, τα σφάλματα μπορούν να διαχωριστούν ανάλογα με τον τρόπο εκδήλωσής τους αλλά και των εμπλεκόμενων φάσεων σε: [20]

- Σφάλματα φάσεων που αφορούν περίπου το 70% των συνολικών σφαλμάτων και εκδηλώνονται λόγω της εμφάνισης μειωμένης αντίστασης μόνωσης μεταξύ των φάσεων. Ανάλογα με το πλήθος των εμπλεκόμενων φάσεων χωρίζονται σε:
 1. Διφασικά (2Φ)
 2. Τριφασικά (3Φ)

- Σφάλματα γης που αποτελούν το 20% του συνόλου των σφαλμάτων και τα οποία εμφανίζονται εξαιτίας της μειωμένης αντίστασης μόνωσης του αγωγού ή των αγωγών φάσεων και της γης και διακρίνονται σε:
 1. Μονοφασικά ως προς γη (1ΦΓ)
 2. Διφασικά ως προς γη (2ΦΓ)
 3. Τριφασικά ως προς γη (3ΦΓ)
- Εξελισσόμενα σφάλματα των οποίων η φύση αλλάζει κατά τη διάρκεια εκδήλωσής (π.χ. 1ΦΓ βραχυκύκλωμα που εξελίσσεται σε 3ΦΓ πριν εκκαθαριστεί) τους και αντιπροσωπεύουν περίπου το 10% των συνολικών σφαλμάτων.



Εικόνα 33. Τύποι σφαλμάτων (βραχυκυκλωμάτων) στο τριφασικό σύστημα

2.1.2 Ρεύμα Βραχυκύκλωσης

Ρεύμα βραχυκύκλωσης ονομάζεται η ένταση του ρεύματος που διαρρέει μία γραμμή του δικτύου σε περίπτωση σφάλματος και η τιμή του εξαρτάται από: [20]

- Το είδος του σφάλματος
- Την ισχύ βραχυκύκλωσης της πηγής ή των πηγών που τροφοδοτούν το σφάλμα
- Την αντίσταση της γραμμής από το σημείο της πηγής μέχρι αυτό του σφάλματος
- Την αντίσταση του ίδιου του σφάλματος
- Την τάση του δικτύου πριν το σφάλμα
- Τον τρόπο γείωσης του δικτύου σε περίπτωση σφάλματος ως προς γη

Για να γίνει η επιλογή του κατάλληλου εξοπλισμού προστασίας και στη συνέχεια να ρυθμιστεί αναλόγως, είναι απαραίτητη η γνώση του μέγιστου και του ελάχιστου ρεύματος βραχυκύκλωσης που αναμένεται να εκδηλωθεί στο τμήμα του δικτύου που πρόκειται να μελετηθεί. Ο προσδιορισμός και ο υπολογισμός του εύρους του ρεύματος βραχυκύκλωσης στο προς μελέτη

μέρος του δικτύου μπορεί να γίνει εάν και μόνο αν υπάρχει γνώση των βασικών χαρακτηριστικών του, όπως πχ η αντίσταση και το μήκος της γραμμής και καθορίζεται από το είδος του σφάλματος, σύμφωνα με τα οποία ισχύει ότι: [20]

- Η μέγιστη τιμή του ρεύματος βραχυκύκλωσης για σφάλματα φάσεων εμφανίζεται για πλήρες ή μεταλλικό (χωρίς αντίσταση σφάλματος) 3Φ βραχυκύκλωμα στην αρχή της γραμμής, με τιμή:

$$I_{PH,MAX} = \frac{U_n}{\sqrt{3}Z_T}$$

- Η ελάχιστη τιμή του ρεύματος βραχυκύκλωσης για σφάλματα φάσεων εμφανίζεται κατά το μη πλήρες 2Φ βραχυκύκλωμα στο τέλος της γραμμής με τιμή:

$$I_{PH,MIN} = 0,7I_{PH,MAX}$$

- Η μέγιστη τιμή του ρεύματος βραχυκύκλωσης ως προς γη προκύπτει για πλήρες 1ΦΓ βραχυκύκλωμα στην αρχή της γραμμής με τιμή:

$$I_{GR,MAX} = \frac{U_n}{\sqrt{3}Z_G}$$

- Η ελάχιστη τιμή του ρεύματος βραχυκύκλωσης ως προς γη προκύπτει για 1ΦΓ βραχυκύκλωμα με αντίσταση σφάλματος 40Ω στην αρχή της γραμμής με τιμή:

$$I_{GR,MAX} = \frac{U_n}{\sqrt{3}(Z_G + 40)}$$

Για όλους τους παραπάνω υπολογισμούς ισχύουν ότι:

- Οι τιμές των ρευμάτων βραχυκύκλωσης είναι υπολογισμένες σε kA
- U_n η ονομαστική τάση του δικτύου σε kV
- Z_T η συνολική αντίσταση του δικτύου μέχρι το σημείο του 3Φ βραχυκυκλώματος σε Ω
- Z_G η συνολική αντίσταση του δικτύου μέχρι το σημείο του 1ΦΓ βραχυκυκλώματος σε Ω

Επίσης, οι προηγούμενες σχέσεις ισχύουν για ακτινικά δίκτυα, όπου η μοναδική πηγή ενέργειας είναι ο Y/Σ μεταφοράς.

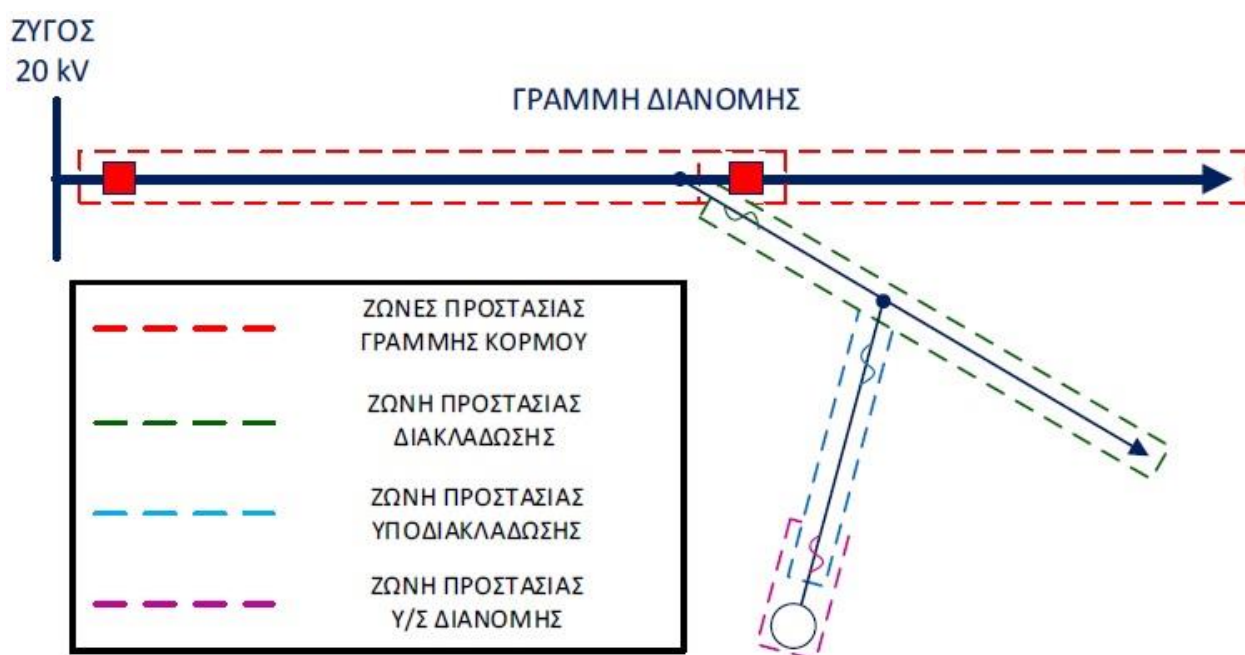
2.2 Ο Ρόλος και η Εφαρμογή της Προστασίας στα Δίκτυα Διανομής

Τα συστήματα προστασίας των δικτύων διανομής είναι αρμόδια για την άμεση ανίχνευση και ταχύτατη απομόνωση του τμήματος του δικτύου στο οποίο εκδηλώνεται ένα σφάλμα με πρωταρχικό σκοπό: [20]

- Την ελαχιστοποίηση της διάρκειας της διακοπής, περιορίζοντας τις επιπτώσεις του σφάλματος στα υγιή τμήματα του δικτύου (ευστάθεια συστήματος) και ελαχιστοποιώντας τη βλάβη στον πληγέντα εξοπλισμό και το κόστος επισκευής του.

- Τον περιορισμό του σφάλματος στο μικρότερο δυνατό τμήμα του δικτύου, έτσι ώστε να επηρεαστεί όσο είναι εφικτό μόνο ο πληγέντας εξοπλισμός.
- Την ελαχιστοποίηση του αριθμού των πελατών που επηρεάζονται από το σφάλμα και την αποφυγή πιθανής έκθεσης της ανθρώπινης ζωής σε κίνδυνο.

Για να επιτευχθούν οι παραπάνω απαιτήσεις, το σύστημα προστασίας του δικτύου εφαρμόζεται σε ζεύγη πρωτεύουσας – δευτερεύουσας προστασίας (primary – backup protection) με σκοπό την καλύτερη συνεργασία και εν τέλει προστασία του συστήματος. Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 34, όλα τα τμήματα του δικτύου που έχουν κοινή πρωτεύουσα προστασία αποτελούν μία ζώνη προστασίας (ζώνη προστασίας γραμμής κορμού, διακλάδωσης, υποδιακλάδωσης, Υ/Σ διανομής). Αρχικά, ενεργοποιείται η πρωτεύουσα προστασία η οποία εκτελεί στιγμιαία τη διακοπή της τροφοδοσίας σε περίπτωση εμφάνισης σφάλματος εντός της ζώνης της, ενώ η δευτερεύουσα προστασία ενεργοποιείται στη συνέχεια, στην περίπτωση μόνο που δεν λειτουργήσει σωστά η πρωτεύουσα και μετά από 0,3 – 0,4s. Η χρονική αυτή καθυστέρηση μεταξύ της λειτουργίας των προστασιών καλείται χρόνος διαβάθμισης, ενώ η ιεραρχία των προστασιών ονομάζεται αλλιώς και επιλογική συνεργασία (protection coordination). [20]



Εικόνα 34. Ζώνες προστασίας σε τμήμα ακτινικού δικτύου διανομής [20]

Κάθε γραμμή διανομής σε ένα ακτινικό δίκτυο απαρτίζεται από τον κορμό, τις διακλαδώσεις και τις υποδιακλαδώσεις καθώς και τους Υ/Σ διανομής. Τα παραπάνω τμήματα του δικτύου προστατεύονται με τον ακόλουθο τρόπο: [20]

- Ο κορμός προστατεύεται από τον διακόπτη ισχύος (Δ/I) που εγκαθίσταται στη μέση στον Υ/Σ ΥΤ/ΜΤ στην αναχώρηση της γραμμής και από διακόπτη αυτόματης επαναφοράς ($\Delta/ΑΕ$) σε περίπτωση που έχει εγκατασταθεί στο μέσο της γραμμής για καλύτερη προστασία.

- Οι διακλαδώσεις και οι υποδιακλαδώσεις προστατεύονται από διακόπτες απομόνωσης (Δ/A) ή ασφαλειοαποζεύκτες (A/Z) που είναι εγκατεστημένοι στην αρχή αυτών.
- Οι Y/Σ διανομής προστατεύονται από A/Z που εγκαθίστανται είτε επί του κριώματος του Y/Σ , είτε στην αρχή της υποδιακλάδωσης που βρίσκεται, εάν είναι μικρού μήκους.

Πιο συγκεκριμένα, η σωστή λειτουργία των μέσων προστασίας στα δίκτυα διανομής βασίζεται στην τήρηση των παρακάτω προϋποθέσεων: [20]

- Στην περίπτωση κυρίως παροδικών σφαλμάτων, πρέπει να παρατηρείται στο σημείο του σφάλματος στιγμιαία πτώση και επαναφορά του Δ/I και όχι μόνιμη διακοπή όπως πχ τήξη της ασφάλειας.
- Κατά την εμφάνιση μόνιμων σφαλμάτων, πρέπει να γίνεται απομόνωση του μικρότερου δυνατού τμήματος δικτύου χωρίς να επηρεάζονται γειτονικά υγιή τμήματα. Θα πρέπει επομένως να λειτουργεί ακαριαία η πρωτεύουσα προστασία διακόπτοντας την τροφοδοσία.
- Επίσης, κατά την εκδήλωση μόνιμων σφαλμάτων θα πρέπει να λειτουργεί η πρωτεύουσα προστασία εντός εύλογου χρονικού διαστήματος ($< 5s$), έτσι ώστε να αποφεύγεται οποιαδήποτε εκτεταμένη ζημιά στον εξοπλισμό του συστήματος.

2.3 Εξοπλισμός Προστασίας στα Δίκτυα Διανομής

Η προστασία του δικτύου διανομής επιτυγχάνεται με διάφορα διακοπτικά μέσα, τα οποία αποκαθιστούν και διακόπτουν τα ηλεκτρικά κυκλώματα σε περίπτωση σφάλματος ή συντήρησης, τοποθετούνται σε κατάλληλα σημεία του δικτύου με σκοπό να επιτευχθεί το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα.

2.3.1 Διακόπτες Ισχύος και Ηλεκτρονόμοι

Οι Δ/I (circuit breaker) ή αυτόματοι διακόπτες (A/Δ) είναι τα μέσα απόξευξης τα οποία μπορούν να διακόπτουν τα κυκλώματα υπό οποιοσδήποτε συνθήκες, διαχειρίζοντας τόσο ρεύματα κανονικού φορτίου όσο και υπερεντάσεις, καθώς και να αποκαθιστούν ακαριαία την ομαλή λειτουργία του δικτύου σε περίπτωση σφάλματος. Γι' αυτόν τον λόγο, χρησιμοποιούνται για την προστασία και τους συνήθεις χειρισμούς του δικτύου (πχ ζεύξεις / αποζεύξεις κύριων γραμμών, M/Σ , γεννητριών, κλπ.), καθώς και την ασφάλεια μεγάλων πελατών MT στα δίκτυα διανομής.

Οι Δ/I αποτελούνται από ένα ζεύγος επαφών, μία σταθερή και μία κινούμενη, τους ακροδέκτες, το θάλαμο σβέσης, το περίβλημα και τον μηχανισμό κίνησης. Ο μηχανισμός κίνησης μετακινεί την επαφή ώστε να κλείσει ή να διακόψει το κύκλωμα και μπορεί να είναι ένα απλό σωληνοειδές, ένας μηχανισμός φορτισμένου ελατηρίου, ένας υδραυλικός, πνευματικός ή μικτός υδραυλικοπνευματικός μηχανισμός. Όταν το κύκλωμα πρέπει να διακοπεί, τότε ο μηχανισμός αυτός κινεί τις επαφές, ανάμεσα στις οποίες σχηματίζεται ένα ηλεκτρικό τόξο. Ο Δ/I πρέπει να είναι σε θέση να σβέσει το τόξο που δημιουργείται ανάμεσα στις επαφές του, γιατί σε περίπτωση

αδυναμίας το τόξο παραμένει και προκαλεί έκρηξη του διακόπτη εξαιτίας των τεράστιων θερμοκρασιών και των κρουστικών ρευμάτων πίεσης που αναπτύσσονται. Η σβέση του τόξου επιτυγχάνεται με την εκτόξευση ενός μέσου πάνω στο τόξο (πχ μονωτικού ελαίου, πεπιεσμένου αέρα, κλπ.), το οποίο χαρακτηρίζει και τον τύπο του διακόπτη. Έτσι λοιπόν, οι κύριοι τύποι Δ/Ι οι οποίοι θα αναλυθούν παρακάτω είναι: [15]

- Διακόπτες ελαίου
- Διακόπτες πτωχού ελαίου
- Διακόπτες κενού
- Διακόπτες πεπιεσμένου αέρα
- Διακόπτες εξαφθοριούχου θείου (SF_6)

Τα πεδία ενός Δ/Ι ΜΤ αποτελούνται από τα παρακάτω διακριτά στοιχεία που αφορούν την προστασία:

- Τον κύριο Δ/Ι
- Τους Μ/Σ έντασης και αν απαιτούνται και τους Μ/Σ τάσης
- Τους ηλεκτρονόμους (Η/Ν) που ελέγχουν τον διακόπτη

Στους παλιότερους Υ/Σ οι Μ/Σ έντασης ήταν συνήθως ενσωματωμένοι στους μονωτήρες του Δ/Ι, ενώ στους σύγχρονους εγκαθίστανται πλέον ξεχωριστά από τον Δ/Ι εντός των πεδίων ΜΤ. Οι τυπικοί λόγοι μετασχηματισμού που χρησιμοποιούνται συνήθως στα δίκτυα διανομής είναι 200/5, 400/5 και 600/5. [20]



Εικόνα 35. Δ/Ι ΜΤ κενού (αριστερά) και ψηφιακός Η/Ν για την προστασία γραμμών (δεξιά)

Τα κύρια χαρακτηριστικά των Δ/Ι ΜΤ είναι (τυπικές τιμές για το Ελληνικό δίκτυο διανομής):

- Η ονομαστική τάση λειτουργίας (24kV)
- Η ονομαστική ένταση (630A ή 1250A)
- Η ικανότητα διακοπής έντασης βραχυκύκλωσης (14,5kA στα 20kV), η οποία πρέπει να είναι τουλάχιστον ίση με την ισχύ βραχυκύκλωσης του δικτύου στη θέση του διακόπτη
- Η ικανότητα ζεύξης σε βραχυκυκλώματα (2,5 φορές η ικανότητα διακοπής, peak τιμή)
- Ο ονομαστικός χρόνος διακοπής ($\leq 80\text{ms}$ για ρεύμα 100% της ικανότητας διακοπής)
- Ο ονομαστικός κύκλος λειτουργίας (O – 3min – CO – 3min – CO)

Οι Η/Ν είναι διατάξεις που προστατεύουν έναν διακόπτη ή ένα κύκλωμα από σφάλματα που είναι πιθανόν να προκύψουν. Η λειτουργία των Η/Ν στηρίζεται στη σύγκριση του μετρούμενου μεγέθους (ρεύμα ή τάση) με μία προκαθορισμένη τιμή αναφοράς που αποτελεί και τη λεγόμενη “ρύθμιση του Η/Ν”. Αναλόγως το αποτέλεσμα αυτής της σύγκρισης, πραγματοποιούνται ή όχι οι αναμενόμενες μεταβολές στον διακόπτη ή στο κύκλωμα. Οι Η/Ν δεν είναι απευθείας συνδεδεμένοι με τη διάταξη που προστατεύουν, αλλά παρεμβάλλονται μετασχηματιστές τάσης ή / και ρεύματος, οι οποίοι ονομάζονται Μ/Σ μέτρησης. Αυτοί οι Μ/Σ μέτρησης, που τροφοδοτούν τους Η/Ν υπερέντασης και ελέγχουν τους Δ/Ι, κάνουν τους κατάλληλους μετασχηματισμούς στις μετρούμενες τιμές (μείωση της μετρούμενης τάσης και του ρεύματος) έτσι ώστε αυτές να μπορούν να μετρηθούν από τα όργανα μέτρησης. [21]

Στην περίπτωση που έχουμε συνεργασία Η/Ν και Δ/Ι, τότε αναφερόμαστε σε Η/Ν υπερεντάσεως που επιτηρεί το ρεύμα που διαρρέει τον Δ/Ι. Όταν το ρεύμα που μετράει ο Η/Ν υπερβεί τη ρύθμισή του, τότε ενεργοποιείται και δίνει εντολή στον Δ/Ι να ανοίξει. Ανάλογα με το ρεύμα που επιτηρούν, οι Η/Ν υπερεντάσεως που χρησιμοποιούνται συμπληρωματικά με Δ/Ι χωρίζονται σε:

- Η/Ν φάσεων, που επιτηρούν το ρεύμα μεταξύ των φάσεων και προστατεύουν τον Δ/Ι από 1Φ, 2Φ και 3Φ βραχυκυκλώματα.
- Η/Ν γης, που επιτηρούν το ρεύμα που ρέει προς τη γη και επομένως προστατεύουν τον Δ/Ι από βραχυκυκλώματα ως προς γη.

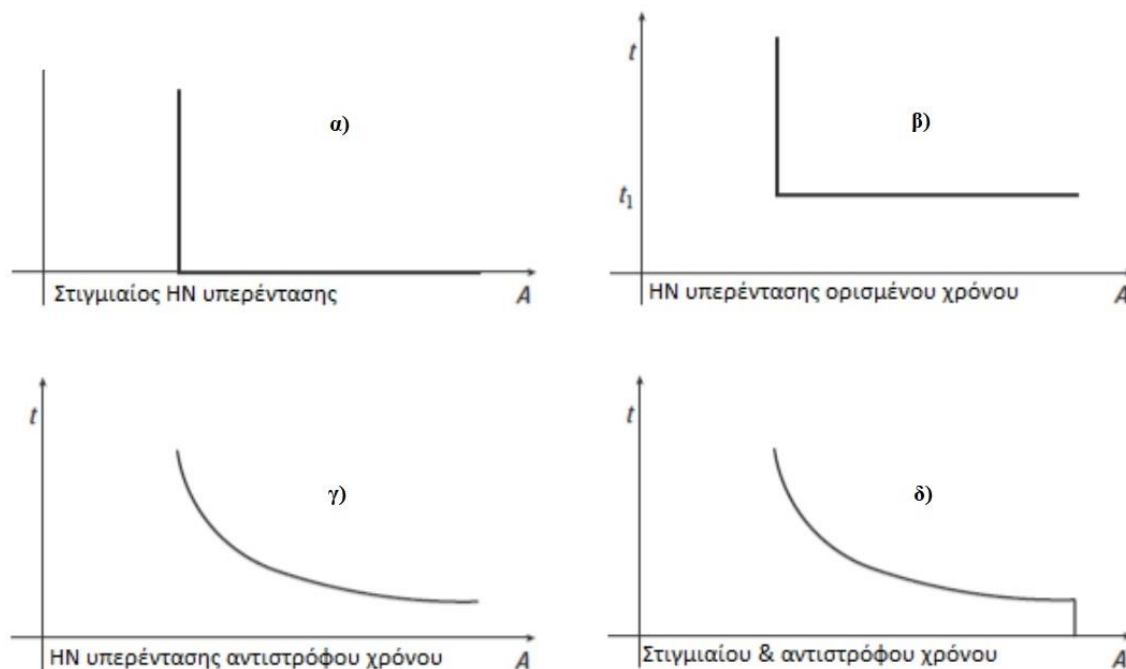
Τα ρεύματα αναφοράς στη ρύθμιση των Η/Ν φάσης και γης είναι διαφορετικά και ο λόγος που συμβαίνει αυτό, είναι ότι σε περίπτωση σφάλματος, τα φασικά ρεύματα είναι μεγαλύτερα από τα ρεύματα ως προς γη. Αυτό παρατηρείται, επειδή η αντίσταση γείωσης ενός Υ/Σ είναι σημαντικά μεγαλύτερη.

Ο τρόπος λειτουργίας των Η/Ν και οι εντολές που δίνουν στους Δ/Ι εξαρτώνται από την τιμή της έντασης διέγερσής τους και τον χρόνο καθυστέρησης λειτουργίας τους. Έτσι, οι Η/Ν υπερέντασης διακρίνονται σε δύο βασικές κατηγορίες: [22]

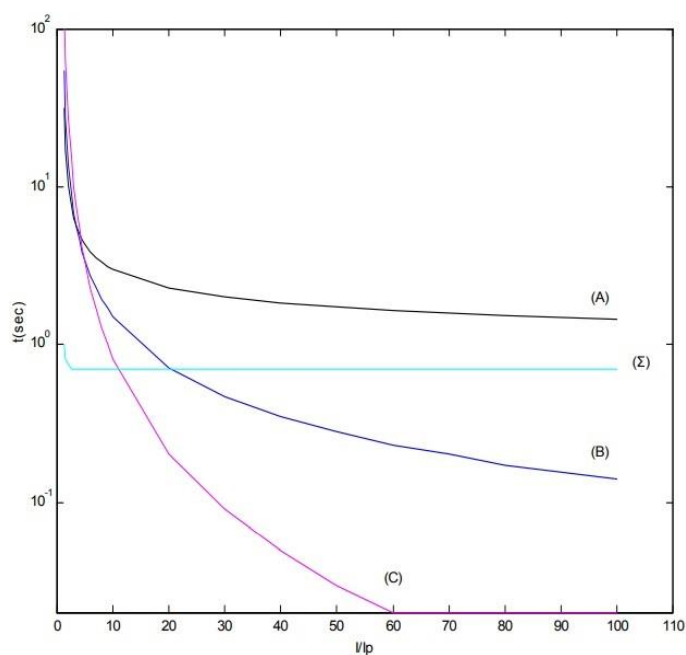
- Τους Η/Ν στιγμιαίας λειτουργίας – ΣΛ (instantaneous overcurrent relays), οι οποίοι ενεργοποιούνται σχεδόν ακαριαία (0,1s) μόλις η τιμή του ρεύματος που ανιχνεύσουν υπερβεί το όριο διέγερσής τους
- Τους Η/Ν χρονικής καθυστέρησης – ΧΚ (time overcurrent relays) η λειτουργία των οποίων ρυθμίζεται σκοπίμως με κάποια χρονική καθυστέρηση. Η μορφή της χαρακτηριστικής καμπύλης ρεύματος – χρόνου χαρακτηρίζει τους Η/Ν υπερέντασης ΧΚ, χωρίζοντάς τους σε δύο επιπλέον υποκατηγορίες:
 1. Τους Η/Ν σταθερού χρόνου (definite time), στους οποίους η χρονική καθυστέρηση είναι σταθερή και ανεξάρτητη από την ένταση του ρεύματος
 2. Τους Η/Ν αντιστρόφου χρόνου (inverse time), στους οποίους η χρονική καθυστέρηση μεταβάλλεται αντιστρόφως ανάλογα με το πλάτος της υπερέντασης (I)

Οι Η/Ν στα δίκτυα διανομής περιέχουν τα παρακάτω στοιχεία:

- Προστασία υπερέντασης φάσης ΣΛ, 50P
- Προστασία υπερέντασης φάσης ΧΚ, 51P
- Προστασία υπερέντασης γης ΣΛ, 50G/N
- Προστασία υπερέντασης γης ΧΚ, 51G/N



Εικόνα 36. Χαρακτηριστικές Η/Ν ΣΛ (α), σταθερού χρόνου (β), αντιστρόφου χρόνου (γ), ΣΛ και αντιστρόφου χρόνου (δ) [23]



Εικόνα 37. Χαρακτηριστικές Η/Ν αντιστρόφου χρόνου (Α), πολύ αντιστρόφου χρόνου (Β), εξαιρετικά αντιστρόφου χρόνου (C) και σταθερού χρόνου (Σ) [22]

2.3.1.1 Διακόπτες Ισχύος Ελαίου

Οι Δ/Ι ελαίου αποτελούν τον παλιότερο χρονικά χρησιμοποιούμενο τύπο Δ/Ι. Σε αυτούς τους διακόπτες χρησιμοποιείται το λάδι επειδή είναι δύσκολο να αναφλεχθεί και επειδή λειτουργεί ταυτόχρονα ως ψυκτικό και μονωτικό μέσο. Το κύριο όμως ψυκτικό μέσο στους Δ/Ι ελαίου είναι το υδρογόνο που αναπτύσσεται όταν το τόξο ατμοποιεί το υγρό λάδι. [24]

Ο συγκεκριμένος διακόπτης αποτελείται από δύο επαφές για κάθε πόλο, που ανοίγουν σε περιβάλλον λαδιού και κατά το άνοιγμα αυτών δημιουργείται το ηλεκτρικό τόξο. Στην περιοχή που δημιουργείται το τόξο, το λάδι υπερθερμαίνεται με αποτέλεσμα να παρατηρείται δημιουργία φυσαλίδων και απότομη αύξηση του όγκου του. Έτσι, προκαλείται γρήγορη κυκλοφορία του λαδιού μέσα από τις πλάκες του διακόπτη με συνέπεια να απομακρύνει την παραγόμενη θερμότητα από το τόξο και τελικά να σβήνει γρήγορα. Επίσης, υπάρχουν και αυτόματοι διακόπτες λαδιού στους οποίους το λάδι ενεργεί κατά μήκος του παραγόμενου τόξου από αντλία λαδιού. [15]

Οι Δ/Ι ελαίου χρησιμοποιούνται σχεδόν αποκλειστικά σε δίκτυα έως 66kV, καθώς για μεγαλύτερα επίπεδα τάσης απαιτείται περισσότερος όγκος λαδιού, κάτι που αυξάνει το κόστος σημαντικά και συνήθως δεν προτιμάται. [24]

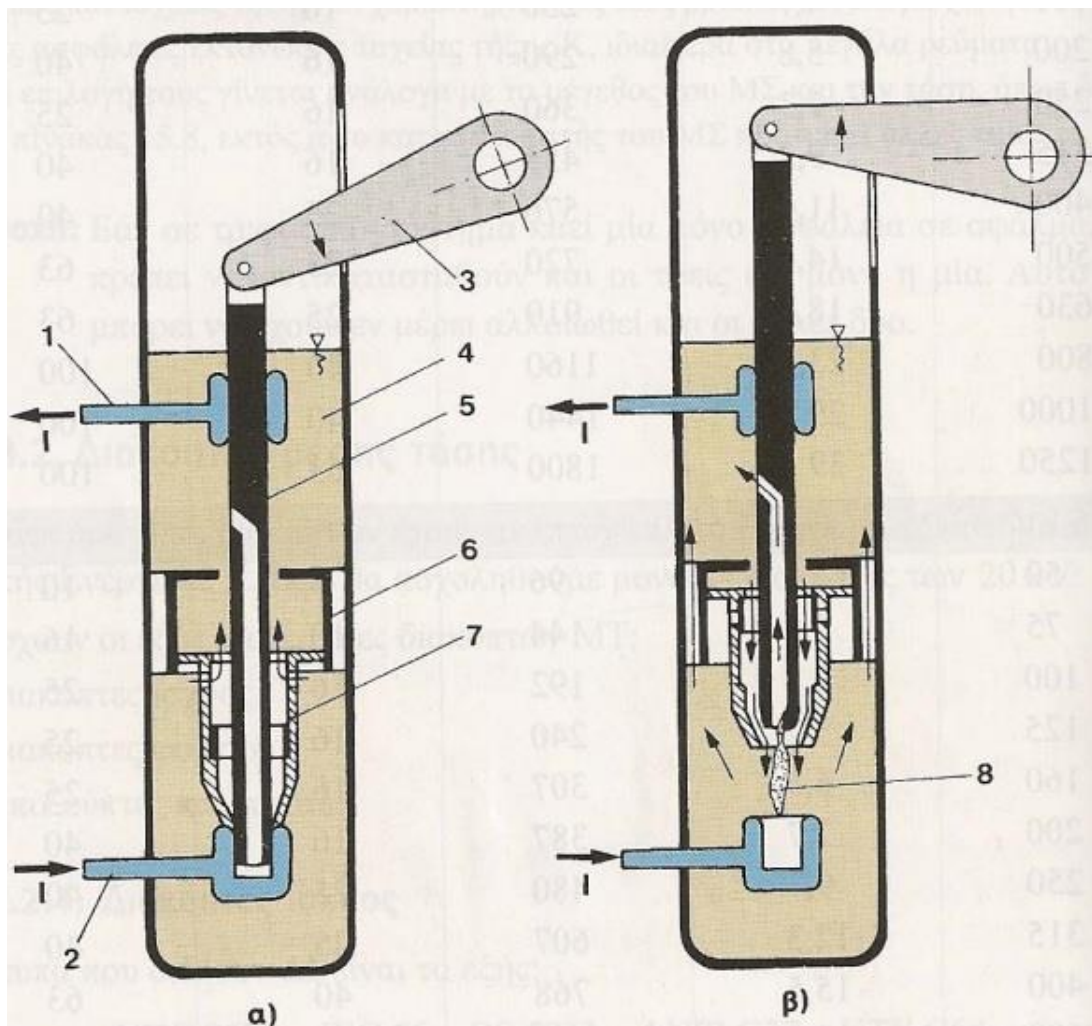


Εικόνα 38. Δ/Ι ελαίου στον Υ/Σ των Οινοφύτων [24]

2.3.1.2 Διακόπτες Ισχύος Πτωχού Ελαίου

Οι Δ/Ι πτωχού ελαίου συντέλεσαν στον περιορισμό της χρήσης λαδιού σε σχέση με τους Δ/Ι ελαίου και κατ' επέκταση στη μείωση του κόστους λειτουργίας τους. Στους διακόπτες αυτού του τύπου όμως, το λάδι χρησιμοποιείται μόνο για τη σβέση του τόξου και δεν αποτελεί μόνωση. Αυτή επιτυγχάνεται με τη χρήση στερεών, συνθετικών ή φυσικών διηλεκτρικών υλικών όπως η πορσελάνη, το χαρτί και η εποξειδική ρητίνη. [24]

Οι συγκεκριμένοι Δ/Ι χρησιμοποιούνται συνήθως σε επίπεδα τάσης 20kV-220kV με ικανότητα διακοπής 250MVA-7500MVA. Οι μοντέρνοι διακόπτες πτωχού ελαίου έχουν ανεπτυγμένους θαλάμους σβέσεως και αντιμετωπίζουν ακόμα και τις πιο δύσκολες καταστάσεις. Τα τελευταία χρόνια έχουν κατασκευαστεί Δ/Ι αυτού του τύπου για τάσεις μεγαλύτερες των 220kV, που αποτελούνται από περισσότερους θαλάμους σβέσεως. Η χρήση πολλαπλών θαλάμων σβέσεως στη σειρά εφαρμόζεται για τη διακοπή ενός ρεύματος υπό πολλαπλάσια τάση και αποτελεί τη βασική αρχή των Δ/Ι στα συστήματα ΥΥΤ. [15]



Εικόνα 39. Αρχή λειτουργίας [κλειστός διακόπτης – α) και ανοικτός διακόπτης – β)] και βασικά στοιχεία Δ/Ι πτωχού ελαίου (1-Ακροδέκτης, 2-Ακροδέκτης με επαφή, 3-Μηχανισμός κίνησης, 4-Λάδι, 5-Κινούμενη επαφή, 6-Κύλινδρος, 7-Έμβολο, 8-Τόξο) [21]



Εικόνα 40. Δ/I πτωχού ελαίου στον Υ/Σ των Οινοφύτων [24]

2.3.1.3 Διακόπτες Ισχύος Κενού

Οι Δ/I κενού χρησιμοποιούν ως μέσο διακοπής το κενό και προτέρημά τους είναι η ικανότητα διακοπής υψηλής συχνότητας και ο υψηλός ρυθμός αποκατάστασης της διηλεκτρικής αντοχής μετά τη σβέση του τόξου. Ως εκ τούτου, εφαρμόζεται σε συνεχώς υψηλότερα επίπεδα τάσης, καθώς παρακάμπτεται το εμπόδιο του μεγάλου του κόστους. [24]

Η διακοπή σε έναν Δ/I κενού γίνεται στον χώρο ανάμεσα στις επαφές του, κατά μήκος των επαφών του και στον χώρο μεταξύ των επαφών του και του εσωτερικού μανδύα. Οι εσωτερικές διαστάσεις του διακόπτη μπορούν να μειωθούν σε πολύ μεγάλο βαθμό εξαιτίας της σχετικά μεγάλης διηλεκτρικής αντοχής του κενού. Το συνολικό μήκος όμως του μονωτήρα ενός διακόπτη καθορίζεται κατά κύριο λόγο από την εξωτερική διηλεκτρική αντοχή. [15]

2.3.1.4 Διακόπτες Ισχύος Πεπιεσμένου Αέρα

Οι Δ/I πεπιεσμένου αέρα, όπως υποδηλώνει και το όνομά τους, χρησιμοποιούν ως μέσο σβέσεως του τόξου τον αέρα και συγκεκριμένα το άζωτο του συμπιεσμένου αέρα, ο οποίος διατηρείται σε σταθερή πίεση μέσα στη δεξαμενή με τη χρήση αεροσυμπιεστή για τη σωστή λειτουργία του Δ/I. Συναντώνται κυρίως στην ΥΤ και συγκεκριμένα σε επίπεδα τάσης άνω των 110kV. [24]

Οι Δ/I αέρος είναι ακριβότεροι συγκριτικά με τους διακόπτες λαδιού, όμως το βασικό τους πλεονέκτημα είναι ότι δεν χρειάζονται συντήρηση με αποτέλεσμα τα τελικά κόστη των δύο διακοπών να είναι αντίστοιχα. Επίσης, παρατηρείται μικρότερη μόλυνση του θαλάμου σβέσεως και η διακοπή του τόξου που γίνεται με το άνοιγμα των επαφών γίνεται ταχύτερα. [24]

Τα μειονεκτήματα που συναντώνται σε αυτού του τύπου τους Δ/Ι είναι η θορυβώδης λειτουργία τους και η σταθερή ικανότητα σβέσης, ανεξάρτητα από το διακοπόμενο ρεύμα, που οδηγεί στον απότομο μηδενισμό των ασθενών ρευμάτων, όπως για παράδειγμα τα επαγωγικά ρεύματα. Αυτό οδηγεί στην ανάπτυξη μεγάλης κλίμακας υπερτάσεων κατά τη στιγμή της διακοπής. [24]



Εικόνα 41. Δ/Ι πεπιεσμένου αέρα 275kV [24]

2.3.1.5 Διακόπτες Ισχύος Εξαφθοριούχου Θείου (SF₆)

Οι συγκεκριμένοι Δ/Ι χρησιμοποιούν κατά τη σβέση του τόξου το αδρανές αέριο SF₆ το οποίο δεν προσβάλλει τα μεταλλικά, πλαστικά και συνθετικά εξαρτήματα του διακόπτη ΥΤ και τοποθετούνται συνήθως σε διατάξεις ΜΤ και ΥΤ. Εξαιτίας της χρήσης του SF₆, συγκριτικά με τον αυτόματο διακόπτη αέρος, η σβέση του τόξου γίνεται ταχύτερα, ο διακόπτης έχει μικρότερο μέγεθος και λειτουργεί σε χαμηλότερες πιέσεις. Επιπρόσθετα, το μόριο του SF₆ δεν περιέχει άνθρακα που συνήθως μολύνει το χώρο σβέσης, ενώ έχει πολύ καλές διηλεκτρικές ιδιότητες και αποτελεί συγχρόνως και το μονωτικό του Δ/Ι στα μικρά επίπεδα τάσης. [24]

Εξαιτίας του αυξημένου κόστους κτήσης του SF₆, δεν αφήνεται ελεύθερο στην ατμόσφαιρα κατά τη στιγμή της διακοπής, αλλά είναι τοποθετημένο σε κλειστό κύκλωμα, γεγονός που συμβάλλει στην αθόρυβη λειτουργία του Δ/Ι. [24]



Εικόνα 42. Βασικά στοιχεία Δ/Ι με SF₆ [1-Στοιχεία Η/Ν προστασίας, 2-Άξονας τάνυσης του ελατηρίου, 3-Κουμπί ενεργοποίησης Η/Ν, 4-Κουμπί απενεργοποίησης Η/Ν, 5-Χρωματική ένδειξη λειτουργίας ελατηρίου συμπιεσμένο (κίτρινο) και χαλαρό (άσπρο), 6-Ένδειξη πίεσης SF₆ και μηχανισμός κλεισίματος, 7-Ένδειξη λειτουργίας του Δ/Ι (Ο/Ι), 8-Ακροδέκτες, 9-Ελεγκτές ρεύματος των Η/Ν, 10-Πόλος του Δ/Ι, 11-Κλειδί μανδάλωσης, 12-Μετρητής λειτουργίας] [21]



Εικόνα 43. Δ/Ι SF₆

2.3.2 Διακόπτης Αυτόματης Επαναφοράς

Οι Δ/ΑΕ (reclosers) τοποθετούνται περίπου στο μέσο γραμμών κορμού του δικτύου με μεγάλο μήκος με σκοπό την καλύτερη προστασία της γραμμής σε συνεργασία με τους Δ/Ι, όταν αυτοί δεν μπορούν να προσφέρουν πλήρη προστασία σε όλο το μήκος της και να ανιχνεύσουν σφάλματα στο άκρο της. Η λειτουργία τους βασίζεται στις διαδοχικές πτώσεις και επαναφορές (ανοιγοκλεισίματα) του διακόπτη έχοντας ως στόχο την εκκαθάριση παροδικών σφαλμάτων χωρίς να διακοπεί μόνιμα η τροφοδότηση στο τμήμα του δικτύου που παρατηρείται το σφάλμα, εκτός και αν πρόκειται για μόνιμο σφάλμα. Έτσι λοιπόν, αποσυνδέεται μικρότερο κομμάτι του δικτύου και τίθενται εκτός λιγότεροι καταναλωτές.

Τα βασικά στοιχεία ενός Δ/ΑΕ είναι ο κυρίως Δ/Ι και το υδραυλικό ή ηλεκτρονικό κύκλωμα ελέγχου που δίνει τις εντολές λειτουργίας στον Δ/Ι. Επειδή ο Δ/ΑΕ είναι ουσιαστικά ένας Δ/Ι, τα τεχνικά χαρακτηριστικά που προδιαγράφονται από τους κατασκευαστές είναι ίδια και για τους δύο διακόπτες.



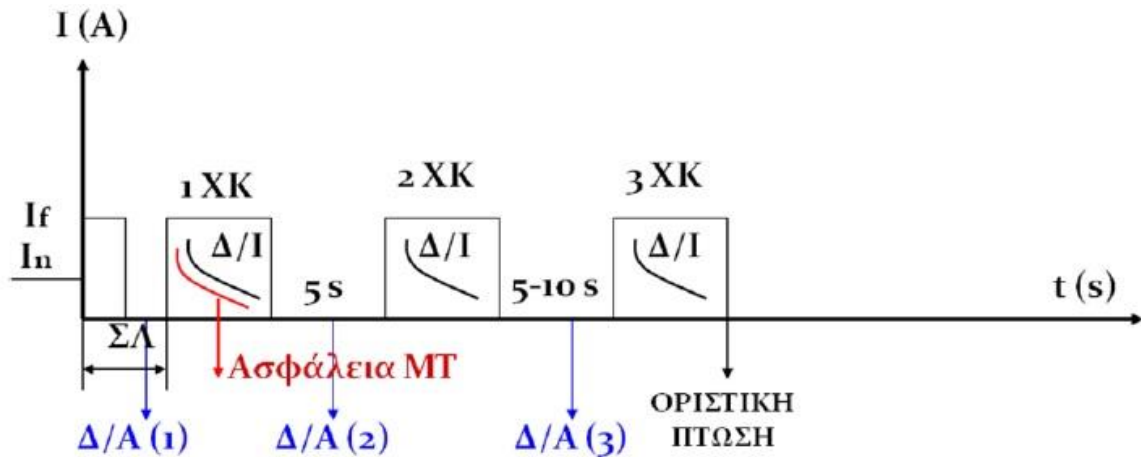
Εικόνα 44. Μονοπολικό Δ/ΑΕ (αριστερά) και τριπολικό Δ/ΑΕ με δυνατότητα μονοπολικής πτώσης και επαναφοράς (δεξιά) [20]

Η ρύθμιση του κύκλου λειτουργίας ενός Δ/ΑΕ καθορίζεται από τον εκάστοτε διαχειριστή και συνήθως ρυθμίζεται για δύο στιγμιαίες πτώσεις και τέσσερις συνολικά (2 ΣΛ και 2 ΧΚ) ή μία στιγμιαία πτώση στο σύνολο των τεσσάρων (1 ΣΛ και 3 ΧΚ).

Ο χρόνος ΣΛ κυμαίνεται στο εύρος 30-150ms και εξαρτάται από τον τύπο του ηλεκτρονόμου προστασίας και τον τύπο του Δ/ΑΕ. Η πλήρης επαναφορά της τάσης συμβαίνει μετά από χρονικό διάστημα της τάξεως των 0,5s. Ο χρόνος πτώσης με ΧΚ εξαρτάται από το μέγεθος του σφάλματος, καθώς και από την καμπύλη – έντασης ρεύματος του Δ/ΑΕ και η επαναφορά της τάσης ρυθμίζεται στα 5-10s. [25]

Οι παράμετροι που ρυθμίζονται σε έναν Δ/ΑΕ και συμβάλλουν στην ορθή λειτουργία του είναι:

- Ο αριθμός των επαναφορών
- Ο χρόνος επαναφοράς που αφορά το χρονικό διάστημα που παραμένει ανοικτός ο Δ/ΑΕ
- Η ελάχιστη ένταση λειτουργίας για σφάλματα φάσης και γης
- Οι καμπύλες έντασης ρεύματος – χρόνου για τα στοιχεία ΣΛ και ΧΚ, φάσης και γης ξεχωριστά
- Ο αριθμός των στιγμιαίων πτώσεων, για σφάλματα φάσης και γης ξεχωριστά
- Ο συνολικός χρόνος επαναφοράς του συστήματος στην αρχική του κατάσταση



ΣΛ: Στιγμιαία λειτουργία του Δ/Ι ή Δ/ΑΕ

1ΧΚ: Πρώτη λειτουργία με χρονική καθυστέρηση του Δ/Ι ή Δ/ΑΕ

2ΧΚ: Δεύτερη λειτουργία με χρονική καθυστέρηση του Δ/Ι ή Δ/ΑΕ

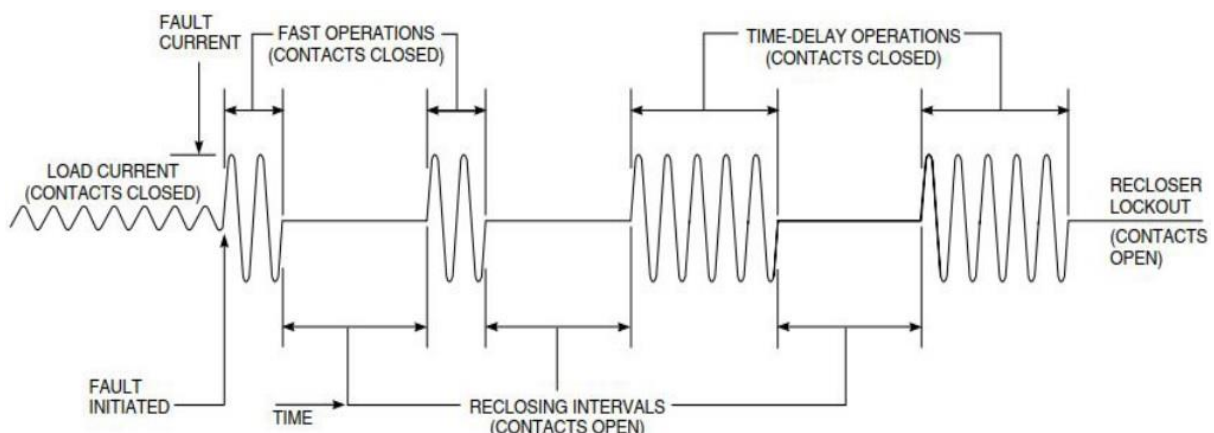
3ΧΚ: Τρίτη λειτουργία με χρονική καθυστέρηση του Δ/Ι ή Δ/ΑΕ

Δ/Α(1): Ρύθμιση Δ/Α σε μια λειτουργία

Δ/Α(2): Ρύθμιση Δ/Α σε δύο λειτουργίες

Δ/Α(3): Ρύθμιση Δ/Α σε τρεις λειτουργίες

Εικόνα 45. Κύκλος λειτουργίας Δ/Ι ή Δ/ΑΕ με μία στιγμιαία λειτουργία και τρεις με χρονική καθυστέρηση σε σύνολο τεσσάρων πτώσεων (1 ΣΛ + 3 ΧΚ) [25]



Εικόνα 46. Λειτουργία Δ/ΑΕ με τέσσερις πτώσεις, με δύο στιγμιαίες λειτουργίες και δύο με χρονική καθυστέρηση, (2 ΣΛ + 2 ΧΚ) κατά την εμφάνιση μόνιμου σφάλματος

2.3.3 Ασφάλειες – Ασφαλειοαποζεύκτες

Στα εναέρια δίκτυα διανομής η προστασία των διακλαδώσεων και των υποδιακλαδώσεων από βραχυκυκλώματα και υπερφορτίσεις επιτυγχάνεται με τη χρήση ασφαλειών εκτόνωσης. Αυτές διακρίνονται από τη μεριά τους σε βραδείας τήξεως ή τύπου T και ταχείας τήξεως ή τύπου K. Όπως αφήνεται να εννοηθεί και από την ονομασία τους, οι ασφάλειες ταχείας τήξεως τήκονται γρηγορότερα από τις βραδείας τήξεως και χρησιμοποιούνται για την προστασία των Μ/Σ διανομής, ενώ αντίστοιχα οι ασφάλειες βραδείας τήξεως αποτελούν μέσο προστασίας των διακλαδώσεων και υποδιακλαδώσεων των γραμμών κορμού του δικτύου. [26]

Οι ασφάλειες εκτόνωσης χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με μία βάση στην οποία τοποθετούνται και η οποία μπορεί να λειτουργήσει ως αποζεύκτης. Αυτός είναι και ο λόγος που η συγκεκριμένη διάταξη προστασίας ονομάζεται A/Z.

Πιο αναλυτικά, ένας ασφαλειοαποζεύκτης αποτελείται από τρία βασικά στοιχεία: [26]

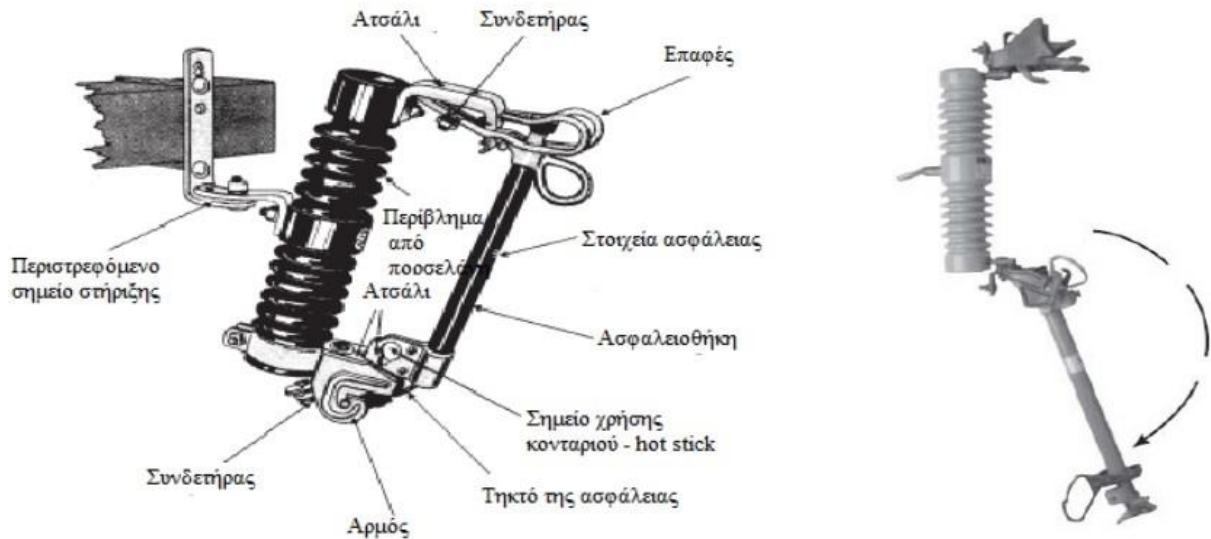
- Το σώμα διακοπής (cutout body) που είναι ένα πλαίσιο σε σχήμα C και υποστηρίζει τη βάση της ασφάλειας και έναν ραβδωτό μονωτήρα από πορσελάνη ή πολυμερές που απομονώνει ηλεκτρικά τα αγωγικά μέρη της διάταξης από τη βάση στην οποία είναι στερεωμένος ο μονωτήρας.
- Την ασφαλειοθήκη (fuse tube) η οποία είναι ένας μονωτικός κυλινδρικός σωλήνας που εμπεριέχει την ασφάλεια. Πιο συγκεκριμένα, όταν τακεί η ασφάλεια, η ασφαλειοθήκη πέφτει από την πάνω επαφή του σώματος διακοπής και κρέμεται στο κάτω μέρος του προκαλώντας διακοπή της ηλεκτροδότησης, ενώ συγχρόνως εκλύονται αέρια που βρίσκονται εντός του κυλινδρικού σωλήνα και βοηθούν αρχικά στην ψύξη και τελικά στη σβέση του τόξου. Τα αέρια αυτά είναι τοξικά και επομένως η χρήση αυτών των ασφαλειών επιτρέπεται μόνο στους εξωτερικούς χώρους. Αντίθετα, στους εσωτερικούς χώρους χρησιμοποιούνται ασφάλειες σκόνης.
- Την ασφάλεια, η οποία είναι και το αντικαταστάσιμο τμήμα της διάταξης και περιέχει το τηκτό. Το τηκτό είναι ένας αγωγός συνήθως από κασσίτερο ή κράμα αργύρου τανυσμένος με ελατήριο ο οποίος όταν εκτίθεται σε πολύ υψηλά ρεύματα, όπως στην περίπτωση βραχυκυκλώματος, λιώνει και προστατεύει την εγκατάσταση.

Οι A/Z τοποθετούνται με κλίση 20° από την κατακόρυφό τους, έτσι ώστε το κέντρο βάρους της ασφαλειοθήκης να είναι μετατοπισμένο και όταν τακεί η ασφάλεια, η βάση της να περιστραφεί και να πέσει λόγω του βάρους της. Αυτή η λειτουργία τους, τους επιτρέπει να γίνονται εύκολα αντιληπτοί όταν βρίσκονται υπό σφάλμα. Επίσης, κάθε ασφαλειοθήκη έχει επιπλέον προσκολλημένο στο επάνω μέρος της ένα δαχτυλίδι που χρησιμεύει στη χειροκίνητη απόξευση της ασφάλειας. Αυτή γίνεται με κατάλληλο εξοπλισμό με τον οποίο γίνεται τράβηγμα της ασφαλειοθήκης και ανοίγει ο A/Z. [26]

Οι A/Z λοιπόν έχουν διπλή συμπεριφορά. Πιο συγκεκριμένα, όταν βρίσκεται εντός λειτουργίας συμπεριφέρεται σαν αποζεύκτης και απαγορεύει τον χειρισμό του υπό φορτίο, ενώ όταν είναι εκτός λειτουργεί σαν αυτόματος διακόπτης και μπορεί να γίνει το κλείσιμό του υπό φορτίο. [26]

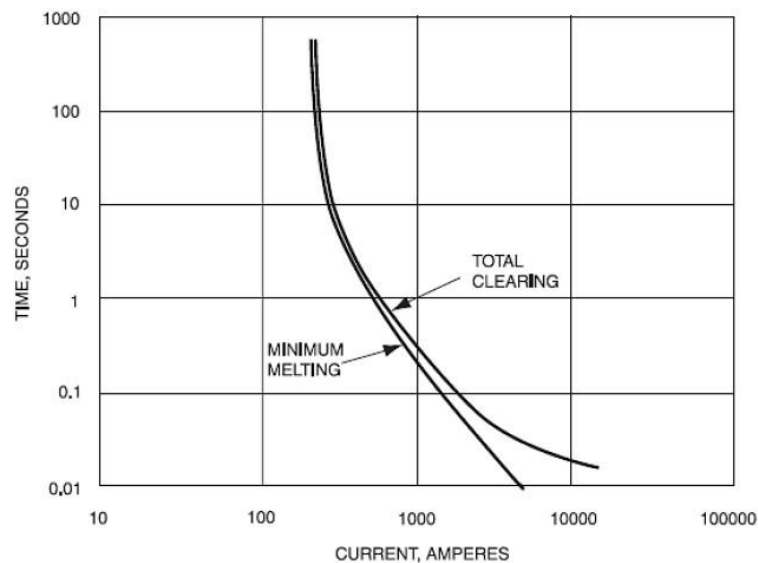
Τα κύρια χαρακτηριστικά των ασφαλειών ΜΤ είναι: [20]

- Η ονομαστική τάση
- Η ονομαστική ένταση ή το ρεύμα συνεχούς διέλευσης του τηκτού και της βάσης
- Η ικανότητα διακοπής ρεύματος βραχυκύκλωσης της ασφάλειας

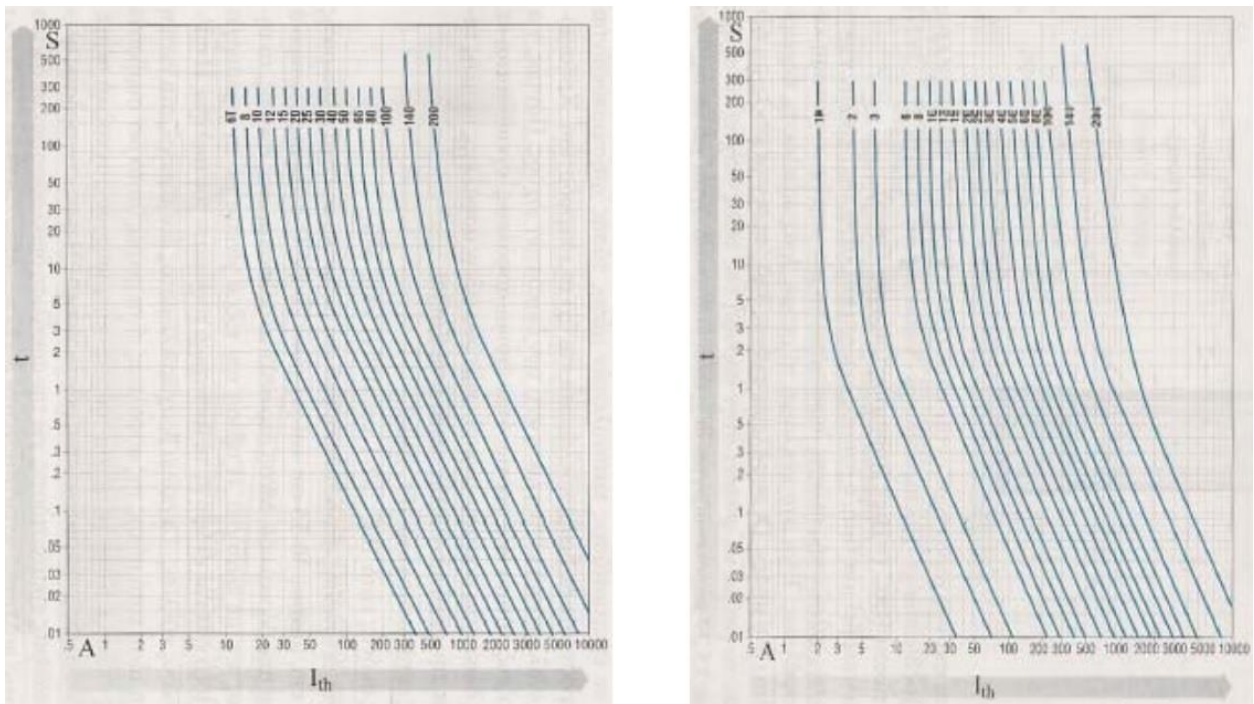


Εικόνα 47. Βασικά στοιχεία Α/Ζ (αριστερά) και λειτουργία Α/Ζ υπό συνθήκη σφάλματος (δεξιά)

Η χαρακτηριστική λειτουργίας των ασφαλειών εκτόνωσης (καμπύλη ρεύματος – χρόνου) αποτελείται από την καμπύλη ελάχιστου χρόνου τήξης, που αντιστοιχεί στον χρόνο που χρειάζεται το τηκτό για να αρχίσει να τήκεται, καθώς και την καμπύλη πλήρους χρόνου διακοπής, η οποία προκύπτει από το άθροισμα του ελάχιστου χρόνου τήξης και του χρονικού διαστήματος που απαιτείται για να γίνει η σβέση του τόξου. Στις ασφάλειες σκόνης, ο χρόνος εκδήλωσης του τόξου είναι σημαντικά μικρότερος σε σχέση με τις ασφάλειες εκτόνωσης οπότε και η χαρακτηριστική λειτουργίας τους αναπαρίσταται συχνά από μία μόνο καμπύλη. [20]



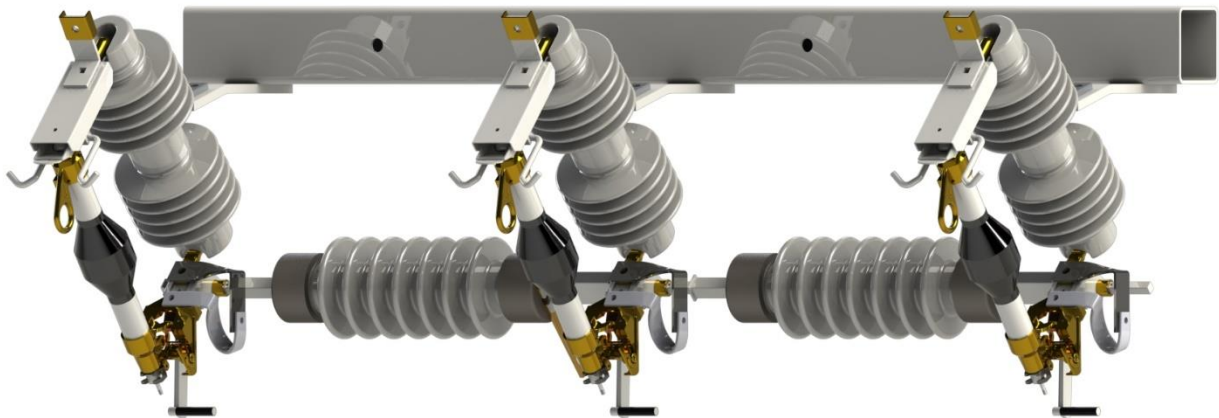
Εικόνα 48. Χαρακτηριστικές καμπύλες λειτουργίας ασφαλειών εκτόνωσης [26]



Εικόνα 49. Χαρακτηριστική καμπύλη ρεύματος – χρόνου ασφάλειας εκτόνωσης βραδείας τήξης (αριστερά) και ταχείας τήξης (δεξιά) [21]

2.3.4 Διακόπτες Απομόνωσης

Οι Δ/Α χρησιμοποιούνται αντί των ασφαλειών στα εναέρια δίκτυα διανομής για την απομόνωση των διακλαδώσεων σε περιπτώσεις μόνιμων σφαλμάτων. Εφαρμόζονται πάντα σε συνδυασμό με υπερκείμενο Δ/Ι ή Δ/ΑΕ που εκτελεί αυτόματες επαναφορές, καθώς στην πράξη δεν αποτελούν μέσο προστασίας επειδή δεν διαθέτουν ικανότητα διακοπής ρεύματος βραχυκύκλωσης. Η ικανότητα διακοπής τους είναι όμοια με αυτή των διακοπών φορτίου. [20]

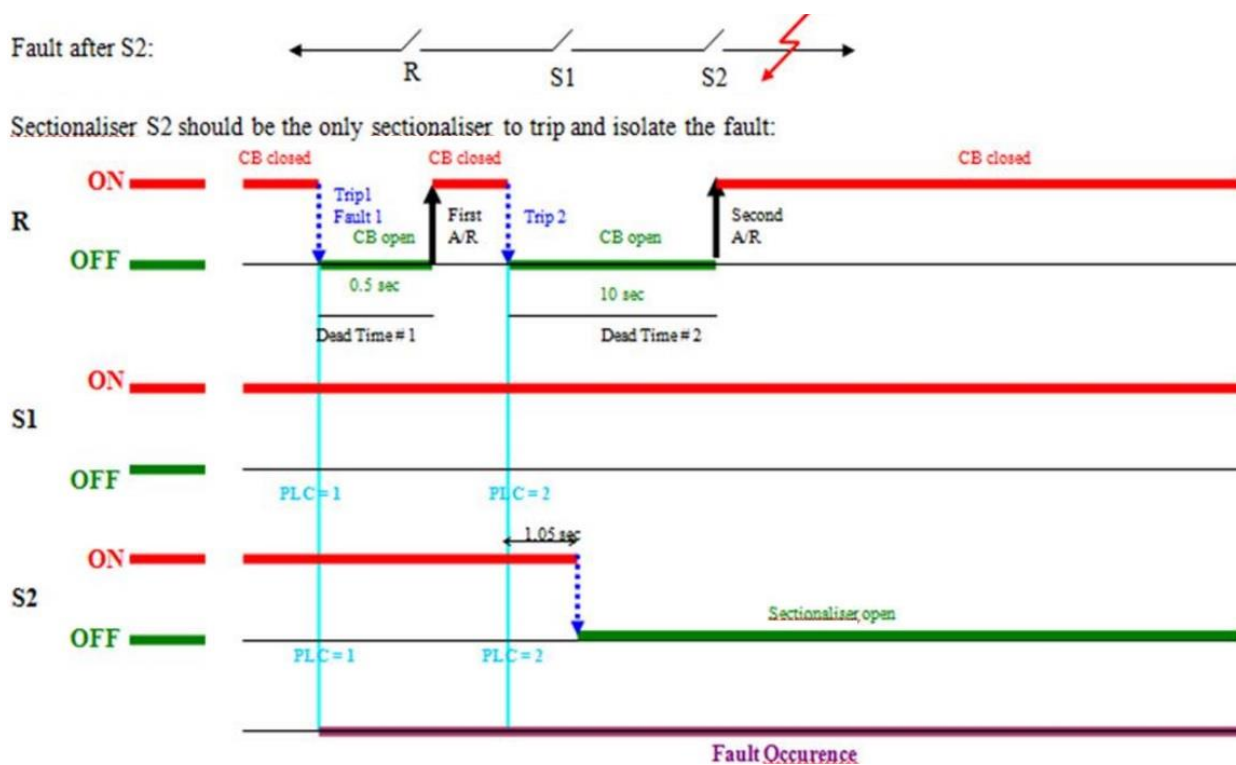


Εικόνα 50. Τριφασικός Δ/Α

Τα κύρια χαρακτηριστικά των Δ/Α είναι: [20]

- Η ονομαστική τάση
- Η ονομαστική ένταση
- Το ρεύμα διέγερσης
- Η ικανότητα διακοπής φορτίου

Η λειτουργία των Δ/Α βασίζεται στη μέτρηση του αριθμού των ζευγών διέλευσης – διακοπής του ρεύματος σφάλματος από τον Δ/Α. Η ρύθμισή τους κυμαίνεται συνήθως στις 1-3 μετρήσεις. Η αύξηση του μετρητή του διακόπτη κατά ένα βήμα γίνεται αφού πραγματοποιηθεί η πτώση του υπερκείμενου Δ/Ι ή Δ/ΑΕ, με την προϋπόθεση ότι η τιμή του ρεύματος σφάλματος έχει υπερβεί την τιμή του ρεύματος διέγερσης του Δ/Α. Αναλόγως τη ρύθμιση του διακόπτη, αν ο μετρητής λάβει τιμή ίση με αυτή της ρύθμισής του, τότε ανοίγει τις επαφές του και απομονώνει το τμήμα του δικτύου που εποπτεύει. [20]



Εικόνα 51. Λειτουργία (άνοιγμα) Δ/Α2 με ρύθμιση 2 μετρήσεων έναντι του Δ/Α1 με ρύθμιση 3 μετρήσεων για σφάλμα μετά τον Δ/Α2, αφού έχουν προηγηθεί 2 επαναφορές του υπερκείμενου Δ/Ι [27]

Γενικά, η χρήση των Δ/Α αντί των Α/Ζ στα δίκτυα διανομής είναι κατά γενική ομολογία προτιμότερη κυρίως λόγω της ελάχιστης συντήρησής τους και της αποφυγής αντικατάστασης του εξοπλισμού τους σε περίπτωση λειτουργίας τους, όπως συμβαίνει με τους Α/Ζ, αλλά και εξαιτίας της μεγαλύτερης αξιοπιστίας που παρουσιάζουν. Επιπρόσθετα, οι Δ/Α δεν έχουν χαρακτηριστική λειτουργία ρεύματος – χρόνου με αποτέλεσμα να μπορούν να χρησιμοποιηθούν μεταξύ συσκευών προστασίας που λειτουργούν με πολύ μικρό χρόνο διαβάθμισης, σε περιπτώσεις που απαιτείται επιπλέον προστασία. [20]

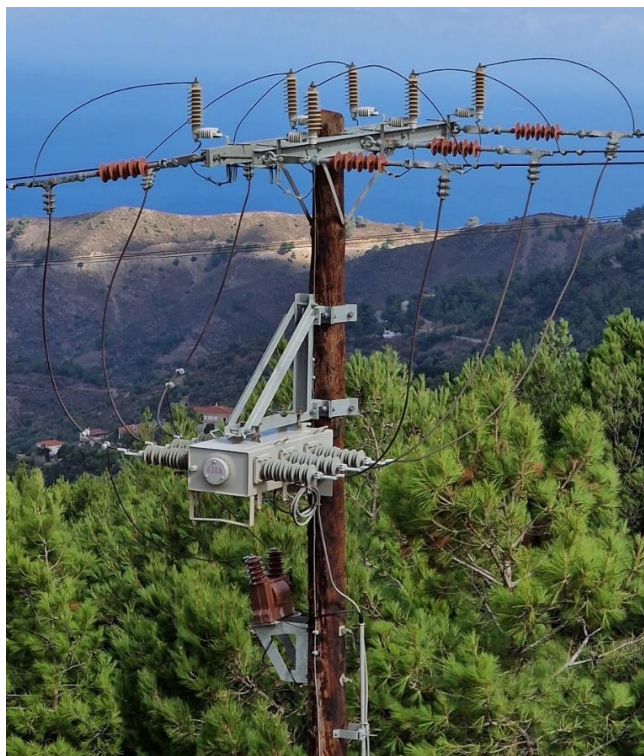
2.4 Η λειτουργία του Δικτύου Διανομής Μέσης Τάσης

2.4.1 Διακόπτες Φορτίου

Οι διακόπτες φορτίου (Δ/Φ) εγκαθίστανται στο δίκτυο διανομής ΜΤ για την καλύτερη εκμετάλλευσή του. Οι διακόπτες αυτοί δεν μπορούν να χαρακτηριστούν ως μέσα προστασίας υπό συνθήκες σφάλματος, επειδή μπορούν να υποβληθούν σε χειρισμούς μόνο σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας, δηλαδή όταν διαρρέονται από ονομαστικά ή μηδενικά ρεύματα. Δεν μπορούν επομένως να διαχειριστούν ρεύματα βραχυκύκλωσης. Γι' αυτόν τον λόγο, οι Δ/Φ χρησιμοποιούνται πάντα σε συνδυασμό με ασφάλειες και ονομάζονται αλλιώς ασφαλειοδιακόπτες φορτίου. [21]

Μπορούν να τοποθετηθούν σε εξωτερικό ή εσωτερικό χώρο, αφού πρώτα ληφθεί υπόψη η κατασκευή τους. Πιο συγκεκριμένα, τοποθετούνται στα υπόγεια δίκτυα σε $Υ/\Sigma$ διανομής εσωτερικού χώρου ή χρηστών ΜΤ, ενώ στο εναέριο δίκτυο συναντώνται σε στύλους και σε τέτοια σημεία που να εξυπηρετεί το φορτίο σε περιπτώσεις χειρισμών λόγω σφάλματος στη γραμμή ΜΤ ή λόγω προγραμματισμένης συντήρησης. Οι χειρισμοί στους οποίους υποβάλλονται μπορεί να γίνουν είτε επί τόπου, είτε εξ αποστάσεως από σύστημα κεντρικού ελέγχου, εφόσον οι διακόπτες είναι τηλεχειριζόμενοι. [25]

Οι Δ/Φ μπορούν να έχουν ορατές ή μη ορατές επαφές. Στη δεύτερη περίπτωση, πρέπει να εγκατασταθεί επιπλέον και αποζεύκτης, ο οποίος να έχει μανδάλωση με τον διακόπτη και συναντώνται ως συνδυασμένη μονάδα στο εμπόριο. [21]



Εικόνα 52. Τριπολικός $\Delta\Phi$ SF_6 σε στύλο εναέριου δικτύου διανομής στη Χίο

Κατά το άνοιγμα ή κλείσιμο των επαφών του διακόπτη σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας δημιουργείται ένα τόξο, του οποίου η σβέση γίνεται στον θάλαμο σβέσης που εμπεριέχεται στον Δ/Φ. Αναλόγως το μέσο που χρησιμοποιείται στον θάλαμο σβέσεως, γίνεται και η κατηγοριοποίηση των διαφόρων Δ/Φ σε: [21]

- Διακόπτες με μονωτικά τοιχώματα
- Διακόπτες SF₆
- Διακόπτες κενού

2.4.2 Συστοιχίες Πυκνωτών

Οι συστοιχίες πυκνωτών τοποθετούνται είτε πάνω σε στύλους στα δίκτυα διανομής ΜΤ, είτε στα τμήματα των ζυγών ΜΤ Υ/Σ υποβιβασμού ΥΤ/ΜΤ με τη χρήση κατάλληλου διακοπτικού εξοπλισμού. Η εγκατάστασή τους σε εναέρια γραμμή ΜΤ αφορά ουσιαστικά την προσθήκη χωρητικού φορτίου, η οποία αντισταθμίζει το επαγωγικό φορτίο της γραμμής και γι' αυτό τον λόγο ονομάζονται αλλιώς πυκνωτές αντιστάθμισης. Με αυτόν τον τρόπο, μειώνεται η άεργος συνιστώσα της συνολικής σύνθετης αντίστασης της γραμμής και εν τέλει οι απώλειες. [25]

Αντίστοιχα, όταν εγκαθίσταται σημαντική ποσότητα πυκνωτών αντιστάθμισης στους ζυγούς ΜΤ ενός Υ/Σ υποβιβασμού ΥΤ/ΜΤ, μπορεί να γίνει ζεύξη και απόζεύξη της συστοιχίας βαθμιαία έτσι ώστε να μην παρατηρηθούν φαινόμενα διακύμανσης της τάσης. Η αποζεύξιμη συστοιχία των πυκνωτών διαθέτει επιπλέον έναν τριπολικό ή τρεις μονοπολικούς διακόπτες, έναν πίνακα ελέγχου και έναν Μ/Σ τάσης για την τροφοδοσία του πίνακα ελέγχου. Ο πίνακας ελέγχου έχει αμφίδρομη επικοινωνία με το κέντρο ελέγχου δίνοντας πληροφορίες για το τμήμα του δικτύου που είναι συνδεδεμένοι οι πυκνωτές και επιτρέπει τον εξ αποστάσεως χειρισμό τους. Ο χειρισμός αυτός επιτυγχάνεται με κατάλληλες εντολές που δίνονται στον ή στους διακόπτες της συστοιχίας των πυκνωτών λαμβάνοντας υπόψη την τάση ή την άεργο ισχύ της γραμμής. [25]



Εικόνα 53. Πυκνωτές αντιστάθμισης εγκατεστημένοι σε στύλο (αριστερά) και σε ζυγό ΜΤ (δεξιά)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΒΑΣΙΚΩΝ ΕΝΝΟΙΩΝ ΓΕΙΩΣΕΩΝ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ ΔΙΑΝΟΜΗΣ

3.1 Βασικές Έννοιες

3.1.1 Ορισμός της Γείωσης

Ως γείωση, ορίζεται η αγώγιμη σύνδεση, σκόπιμη ή τυχαία, μέσω της οποίας μία εγκατάσταση, ένα ηλεκτρικό κύκλωμα ή μία συσκευή συνδέεται με τη γη ή με αγώγιμο σώμα τέτοιου μεγέθους που να συμπεριφέρεται όπως η γη. Το δυναμικό της άπειρης γης θεωρείται ότι έχει μηδενική τιμή και κατ' επέκταση η γείωση καθορίζει ένα δυναμικό αναφοράς. [28]

Εναλλακτικά, η γείωση μπορεί να οριστεί ως η αγώγιμη σύνδεση με το έδαφος των μη ρευματοφόρων μεταλλικών μερών μίας εγκατάστασης ή του ουδέτερου κόμβου των Μ/Σ και των γεννητριών, με σκοπό να βρίσκονται στο ίδιο δυναμικό με τη γη, δηλαδή μηδενικό. [29]

Είναι γνωστό ότι η ροή του ηλεκτρικού ρεύματος γίνεται πάντα από την πηγή τάσης ή ρεύματος προς το σημείο με το χαμηλότερο δυναμικό του συστήματος, οπότε πρακτικά η λειτουργία της γείωσης σχετίζεται με την εύρεση μίας ασφαλούς διαδρομής των ηλεκτρικών ρευμάτων που προέρχονται από σφάλμα προς τη γη. Ουσιαστικά όμως, ο σκοπός της γείωσης είναι να εξασφαλίζεται η ακεραιότητα, η αξιοπιστία και η συνέχεια λειτουργίας του εξοπλισμού όπως και η προστασία της εγκατάστασης κατά την εμφάνιση οποιουδήποτε σφάλματος, παρέχοντας μία ασφαλή διαδρομή χαμηλής αντίστασης για την απαγωγή του ρεύματος σφάλματος και την εκτόνωσή του στη γη. Εκτός αυτού, η όσο το δυνατόν μικρότερη επιθυμητή σύνθετη αντίσταση του συστήματος, η οποία αν είναι δυνατόν πρέπει να προσεγγίζει το μηδέν, έχει σαν αποτέλεσμα η όδευση των ρευμάτων σφάλματος να γίνεται αποκλειστικά μέσω της γείωσης, συμβάλλοντας έτσι στην προστασία από κεραυνοπληξία στα άτομα που δουλεύουν ή κινούνται στον περιβάλλοντα χώρο και διατηρώντας τις μέγιστες διαφορές δυναμικού που αναπτύσσονται κατά την εμφάνιση τάσεων επαφών και βηματικών τάσεων εντός των επιτρεπτών ορίων. Τέλος, η γείωση συνεισφέρει στη μείωση του ηλεκτρικού θορύβου, στην εξασφάλιση της ελάχιστης διαφοράς δυναμικού μεταξύ των διασυνδεδεμένων συσκευών, καθώς και στον περιορισμό των ηλεκτρικών και μαγνητικών ζεύξεων. [28]

Το σύστημα γείωσης είναι το σύνολο των γειωτών, ομοειδών ή μη, συνδεδεμένων με αγωγό γείωσης και το σύνολο των εξαρτημάτων που είναι απαραίτητα για τη σύνδεση και τη στήριξη αυτών αποτελώντας αναπόσπαστο και καίριας σημασίας τμήμα του συστήματος προστασίας των εγκαταστάσεων σε ένα ΣΗΕ (σταθμοί παραγωγής, Υ/Σ, γραμμές μεταφοράς κτιρίων τηλεπικοινωνιακών πύργων, κλπ.). Ο αποτελεσματικός σχεδιασμός του συστήματος γείωσης γίνεται αφού πραγματοποιηθούν οι απαραίτητες μετρήσεις στο έδαφος με σκοπό να γίνει γνωστή η δομή του εδάφους της περιοχής και αφορούν τη μέτρηση της ειδικής αντίστασης, το πάχος του στρώματος ή των στρωμάτων του υπεδάφους αν πρόκειται για παραπάνω από ένα, κλπ. [28]

Οι παράγοντες που επηρεάζουν τη μεταβατική συμπεριφορά των συστημάτων γείωσης είναι: [30]

- Το σχήμα και οι διαστάσεις του
- Η ειδική αντίσταση του εδάφους που περιβάλλει το σύστημα γείωσης
- Η ανάπτυξη ή όχι ιονισμού του εδάφους
- Το σημείο έγχυσης του ρεύματος
- Η κυματομορφή του εγχέομένου ρεύματος

3.1.2 Ανύψωση Δυναμικού Γης

Ανύψωση δυναμικού γης (Ground Potential Rise – GPR) ορίζεται το μέγιστο ηλεκτρικό δυναμικό που αναπτύσσει το σύστημα γείωσης σε σχέση με ένα απομακρυσμένο σημείο στην επιφάνεια του εδάφους, το δυναμικό της άπειρης γης, που είναι πρακτικά μηδέν. Η τάση αυτή, που υπό κανονικές συνθήκες θεωρείται ίση με μηδέν, ισούται με το γινόμενο της σύνθετης αντίστασης R_G του συστήματος γείωσης και του μέγιστου ρεύματος I_G που το διαρρέει. [31]

$$GPR = I_G \cdot R_G$$

Υπό συνθήκες όμως σφάλματος, το δυναμικό αυτό ανυψώνεται, γιατί το σύστημα γείωσης διαρρέεται από το ρεύμα σφάλματος που έχει υψηλή τιμή.

3.1.3 Τάση Επαφής

Τάση επαφής (Touch Voltage) ορίζεται η διαφορά δυναμικού ανάμεσα στην ανύψωση δυναμικού γης και στο δυναμικό επιφάνειας στο σημείο που στέκεται ένα άτομο, με το ένα χέρι του να βρίσκεται σε επαφή με τη γειωμένη μεταλλική δομή. Η δυσμενέστερη τάση επαφής που μπορεί να εμφανιστεί $p\chi$ σε έναν Y/Σ , είναι η διαφορά δυναμικού ανάμεσα στο χέρι και τα πόδια ενός ανθρώπου, όταν υπάρχει μεταλλική δομή στην άκρη της περιοχής υψηλού δυναμικού και το άτομο βρίσκεται σε επαφή με αυτήν, ενώ στέκεται στη μέγιστη δυνατή απόσταση. Η μέγιστη τάση επαφής που μπορεί να αναπτυχθεί επιτρέπεται να ξεπερνάει τα όρια που ορίζονται από τον ακόλουθο τύπο: [31]

$$E_{touch} = (R_B + 1,5C_s \cdot \rho_s) \frac{k}{\sqrt{t_s}}$$

όπου:

- E_{touch} (V) είναι η τάση επαφής
- R_B (Ω) είναι η αντίσταση του ανθρώπινου σώματος και θεωρείται ίση με 1000Ω
- ρ_s (Ωm) είναι η αντίσταση του υλικού επιφάνειας
- $k = 0,116$ ή $k = 1,157$ για βάρος ανθρώπινου σώματος $50kg$ ή $70kg$ αντίστοιχα
- t_s (s) είναι η διάρκεια ροής του ρεύματος σφάλματος
- C_s είναι ο συντελεστής μείωσης, που υπολογίζεται από τον τύπο:

$$C_s = 1 - \frac{0,09 \left(1 - \frac{\rho}{\rho_s} \right)}{2 \cdot h_s + 0,09}$$

Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός, ότι ο κίνδυνος ηλεκτροπληξίας από την τάση επαφής είναι μεγαλύτερος από τον αντίστοιχο της βηματικής τάσης, επειδή η τάση κατά το σφάλμα εφαρμόζεται κατά μήκος του σώματος και επομένως το ρεύμα διαρρέει το ανθρώπινο σώμα από το ένα χέρι προς τα πόδια και μπορεί να επηρεάσει ζωτικά όργανα όπως οι μύες της καρδιάς, προκαλώντας καρδιακή μαρμαρυγή. [28]

3.1.4 Βηματική Τάση

Βηματική τάση (Step Voltage) ορίζεται η διαφορά δυναμικού που βιώνει ένας άνθρωπος στην επιφάνεια του εδάφους και εφαρμόζεται μεταξύ των ποδιών του, τα οποία κατά σύμβαση έχουν άνοιγμα 1m, όταν δεν έρχεται σε επαφή με άλλο γειωμένο αντικείμενο. Η βηματική τάση παίρνει τη μέγιστη τιμή της όταν, υπό συνθήκες σφάλματος γης, το άτομο έχει το ένα του πόδι στην περιοχή της μέγιστης δυναμικής ανύψωσης και το άλλο του πόδι κατά ένα βήμα προς την άπειρη γη, γεγονός που εξηγεί ότι το δυναμικό στην περιοχή που βρίσκεται γύρω από το ηλεκτρόδιο είναι μεγαλύτερο από αυτό της άπειρης γης. Η μέγιστη βηματική τάση που μπορεί να αναπτυχθεί δεν πρέπει να ξεπερνάει τα όρια που ορίζονται από τον ακόλουθο τύπο: [31]

$$E_{step} = (R_B + 6C_s \cdot \rho_s) \frac{k}{\sqrt{t_s}}$$

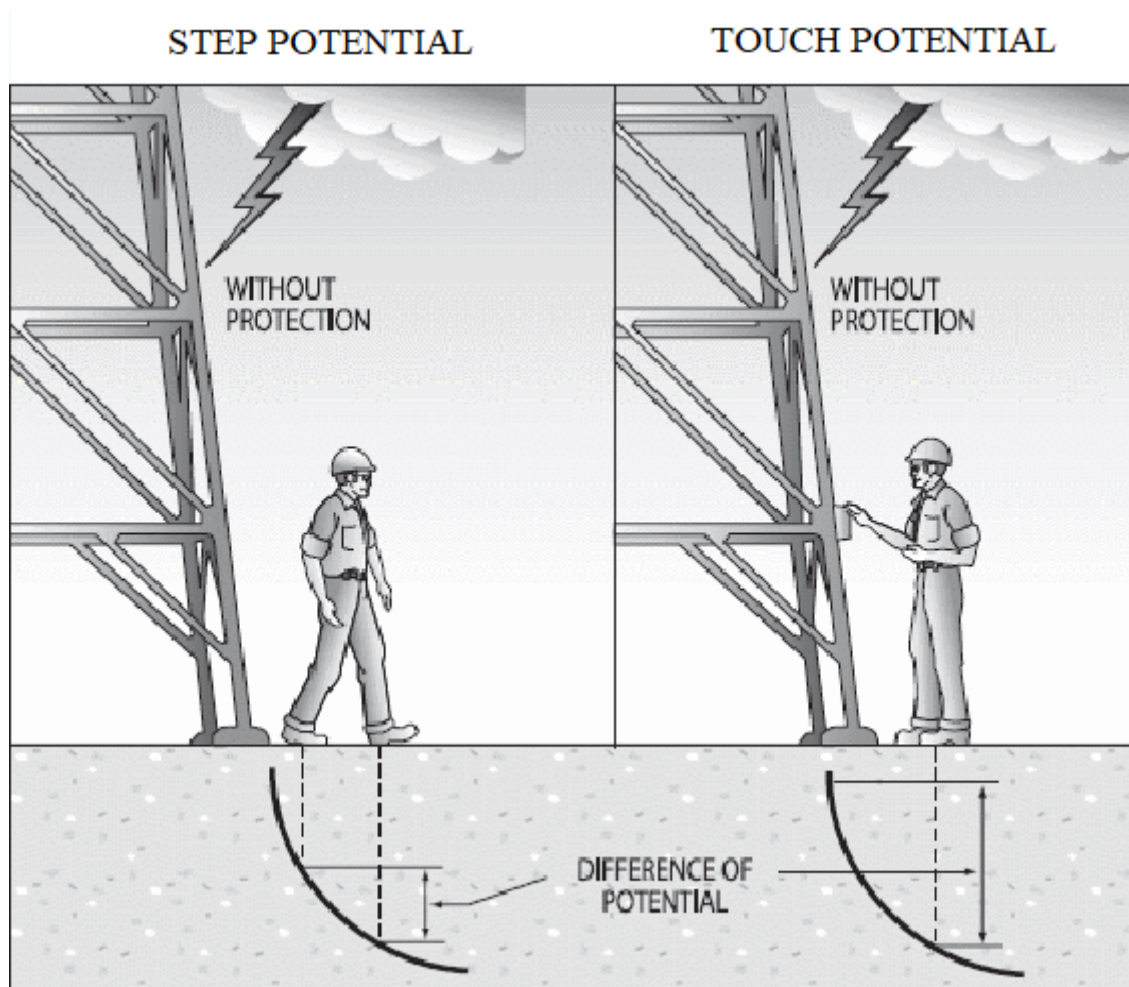
όπου:

- E_{step} (V) είναι η τάση επαφής
- R_B (Ω) είναι η αντίσταση του ανθρώπινου σώματος και θεωρείται ίση με 1000 Ω
- ρ_s (Ωm) είναι η αντίσταση του υλικού επιφάνειας
- $k = 0,116$ ή $k = 1,157$ για βάρος ανθρώπινου σώματος 50kg ή 70kg αντίστοιχα
- t_s (s) είναι η διάρκεια ροής του ρεύματος σφάλματος
- C_s είναι ο συντελεστής μείωσης, που υπολογίζεται από τον τύπο:

$$C_s = 1 - \frac{0,09 \left(1 - \frac{\rho}{\rho_s} \right)}{2 \cdot h_s + 0,09}$$

Ο σκοπός του υλικού επιφάνειας είναι να αυξήσει την αντίσταση ανάμεσα στο έδαφος και στα πόδια του ατόμου, καθώς η αντίσταση του εδάφους πρέπει να είναι μικρότερη από την αντίστοιχη του υλικού, έτσι ώστε να μειώνεται το ρεύμα που διέρχεται το ανθρώπινο σώμα. Σε αντίθετη περίπτωση, εγκυμονεί κίνδυνος για το άτομο εξαιτίας του υψηλού ρεύματος που ρέει στο υλικό επιφάνειας. [31]

Με τον καθορισμό της τάσης επαφής και της βηματικής τάσης σε ένα ηλεκτρικό σύστημα μπορεί να γίνει η μελέτη του σχεδιασμού του συστήματος γείωσης, το οποίο βασίζεται στην απόξευση του πιο επικίνδυνου σφάλματος γης, καθώς και στον συνολικό χρόνο εκκαθάρισης του σφάλματος με σκοπό την προστασία του εξοπλισμού, της εγκατάστασης, αλλά κυρίως των ατόμων που βρίσκονται σε αυτήν.



Εικόνα 56. Βηματική τάση (αριστερά) και τάση επαφής (δεξιά) [32]

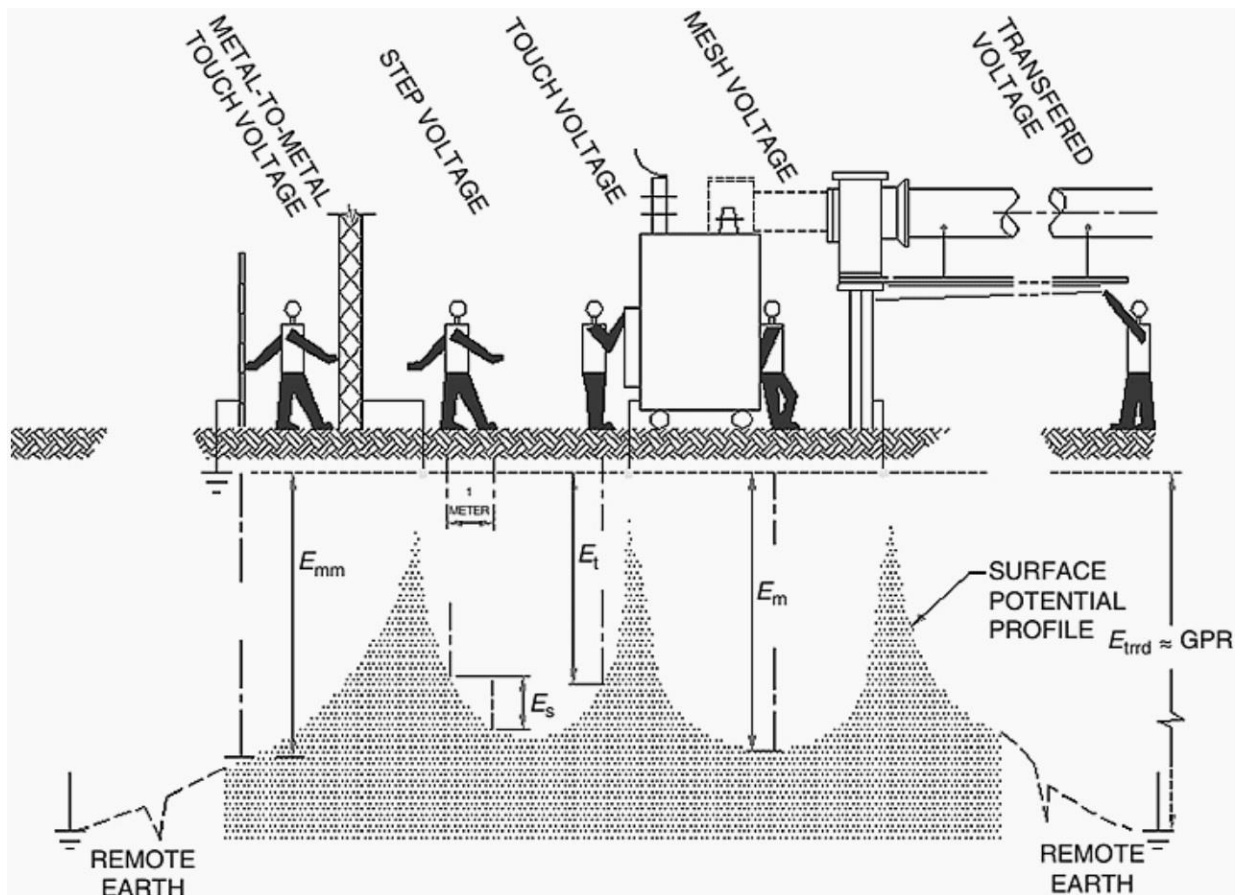
3.2 Άλλοι Βασικοί Ορισμοί

Τάση επαφής μετάλλου προς μέταλλο (Metal-to-metal touch voltage) ορίζεται η διαφορά δυναμικού μεταξύ των μεταλλικών αντικειμένων ή των δομών που βρίσκονται στην τοποθεσία του Υ/Σ και μπορούν να γεφυρωθούν με άμεση επαφή χέρι-με-χέρι ή χέρι-με-πόδι. Η τάση αυτή θεωρείται αμελητέα σε συμβατικούς Υ/Σ όταν εμφανίζεται μεταξύ μεταλλικών αντικειμένων ή δομών συνδεδεμένων στο πλέγμα γείωσης. Στην περίπτωση όμως που εμφανιστεί τάση επαφής μετάλλου προς μέταλλο μεταξύ μεταλλικών αντικειμένων ή δομών συνδεδεμένων στο μεταλλικό πλέγμα γείωσης και μεταλλικών αντικειμένων που υπάρχουν στον χώρο του Υ/Σ αλλά δεν είναι συνδεδεμένα στο πλέγμα γείωσης, όπως ένας μεταλλικός φράχτης, τότε αυτή μπορεί να μην είναι αμελητέα και να πρέπει να ληφθεί σοβαρά υπόψη. Από τη στιγμή που η μόνη αντίσταση στην τάση επαφής μετάλλου προς μέταλλο είναι η αντίσταση σώματος του ανθρώπου ($R_B = 1000\Omega$), το όριο τάσης είναι: [33]

$$E_{mm-touch} = \frac{1000k}{\sqrt{t_s}}$$

Μεταφερόμενη τάση (Transferred Voltage) ορίζεται μία ειδική περίπτωση εμφάνισης της τάσης επαφής, κατά την οποία η τάση μεταφέρεται προς ή από τον Υ/Σ, προς ή από ένα απόμακρο σημείο εκτός της τοποθεσίας του Υ/Σ. Η μεταφερόμενη τάση μπορεί να θέσει σε μεγάλο κίνδυνο το ανθρώπινο δυναμικό, καθώς η τάση που εφαρμόζεται στο άτομο μπορεί να είναι ένα μεγάλο ποσοστό του μέγιστου δυναμικού γης ή να φτάσει ακόμα και την πλήρη τιμή του. [33]

Τάση πλέγματος (Mesh Voltage) ορίζεται η τάση επαφής μέσα στο βρόχο ενός πλέγματος γείωσης.

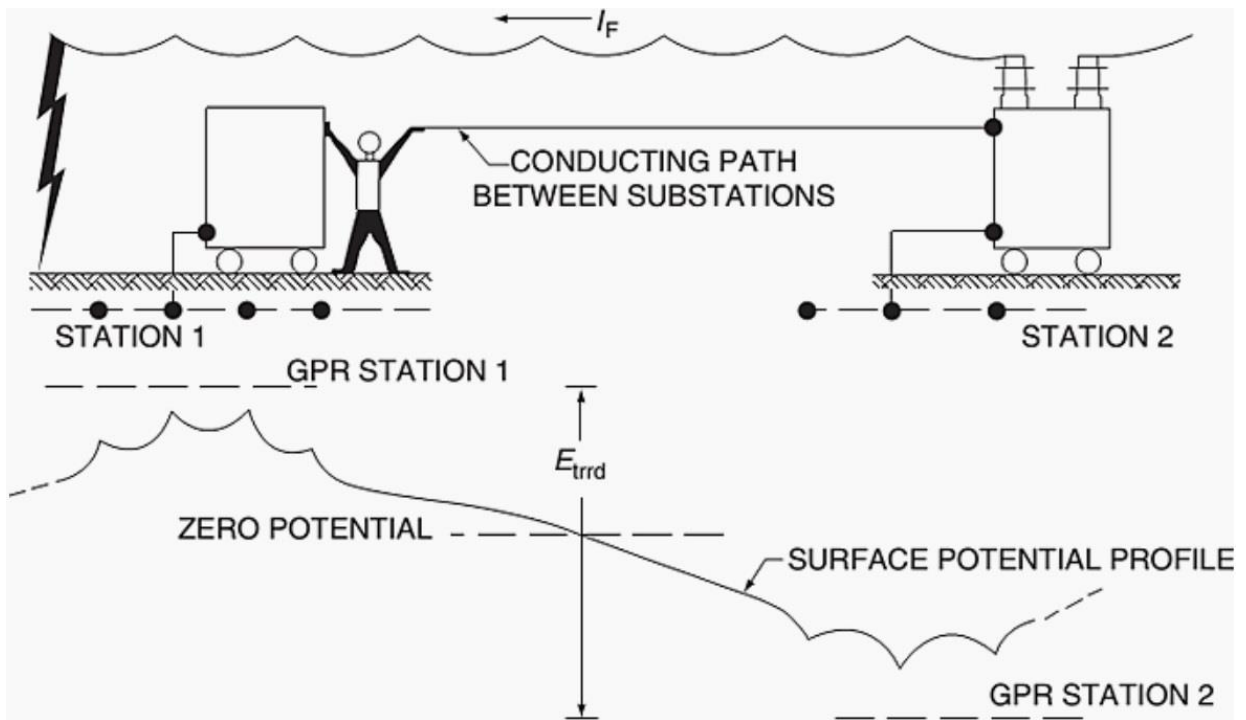


Εικόνα 57. Τάση επαφής μετάλλου προς μέταλλο, βηματική τάση, τάση επαφής, τάση πλέγματος και μεταφερόμενη τάση (από αριστερά προς δεξιά) [33]

Ηλεκτρόδιο γείωσης ή γειωτής είναι το αγώγιμο σώμα (ηλεκτρόδιο) που τοποθετείται κατακόρυφα ή οριζόντια μέσα στο έδαφος, μέσω του οποίου γίνεται η συλλογή και διάχυση των ηλεκτρικών ρευμάτων σφάλματος στη γη. [34]

Αποτελεσματική γείωση ονομάζεται η γείωση που δεν επιτρέπει την εμφάνιση επικίνδυνων τάσεων επαφής και βηματικών τάσεων στην περιοχή που καλύπτει. [35]

Πλέγμα γείωσης ορίζεται ένα σύνολο συνδεδεμένων ηλεκτροδίων που είναι τοποθετημένα μέσα στη γη με κατάλληλο τρόπο, έτσι ώστε να εξασφαλίζεται αποτελεσματική γείωση.



Εικόνα 58. Μεταφερόμενη τάση [33]

Άπειρη γη ορίζεται ένα σημείο του εδάφους σε άπειρη απόσταση από το ηλεκτρόδιο γείωσης, το οποίο θεωρείται ως σημείο αναφοράς των δυναμικών και έχει μηδενικό δυναμικό. Ως “άπειρη απόσταση” λογίζεται η απόσταση που είναι 5-10 φορές το μήκος της μεγαλύτερης διάστασης του ηλεκτροδίου.

Τάση ηλεκτροδίου γείωσης ορίζεται η διαφορά δυναμικού μεταξύ του ηλεκτροδίου γείωσης και της άπειρης γης, όταν το ηλεκτρόδιο διαρρέεται από ρεύμα.

Αγωγός γείωσης είναι ο αγωγός που ενώνει το ηλεκτρόδιο γείωσης με έναν ακροδέκτη ή ζυγό γείωσης.

Κύριος ακροδέκτης ή ζυγός γείωσης είναι ένας ακροδέκτης ή ζυγός στον οποίο συνδέονται οι αγωγοί γείωσης, προστασίας και, αν υπάρχουν, οι αγωγοί της γείωσης λειτουργίας. [33]

Αγωγός προστασίας είναι ο αγωγός που είναι απαραίτητος για εφαρμογή μέτρων προστασίας σε μία εγκατάσταση και προορίζεται για την ηλεκτρική σύνδεση των εκτεθειμένων αγωγίμων μερών της εγκατάστασης, όπως τον κύριο ακροδέκτη γείωσης, το ηλεκτρόδιο γείωσης, διάφορα ξένα αγωγίμα στοιχεία, το γειωμένο σημείο της πηγής τροφοδοσίας ή έναν γειωμένο τεχνητό ουδέτερο κόμβο. [33]

Τάση σφάλματος ή δυναμικό προς άπειρη γη είναι η τάση (U_f) που εμφανίζεται ανάμεσα στα προσιτά αγωγίμα στοιχεία, τα οποία δεν αποτελούν τμήμα του κυκλώματος, αλλά μπορεί να βρεθούν υπό τάση εξαιτίας βλάβης της μόνωσης και κάποιου επαρκώς απομακρυσμένου σημείου της γης. [35]

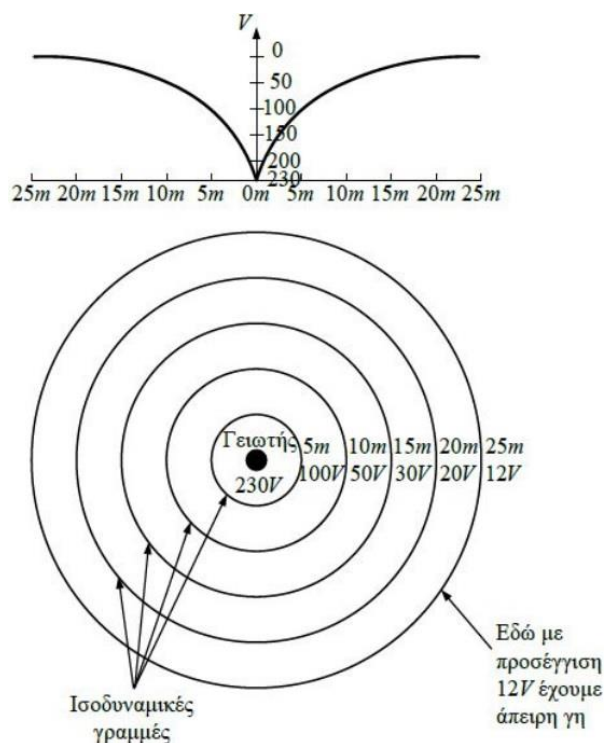
Ρεύμα γης ονομάζεται το ρεύμα που ρέει από ή προς τη γη, ή το ισοδύναμο γης.

Αντίσταση γείωσης ορίζεται ο λόγος της διαφοράς δυναμικού μεταξύ του ηλεκτροδίου γείωσης και της άπειρης γης προς την ένταση του ρεύματος εκφόρτισης και δίνεται από τον ακόλουθο τύπο: [34]

$$R_g = \frac{U}{I}$$

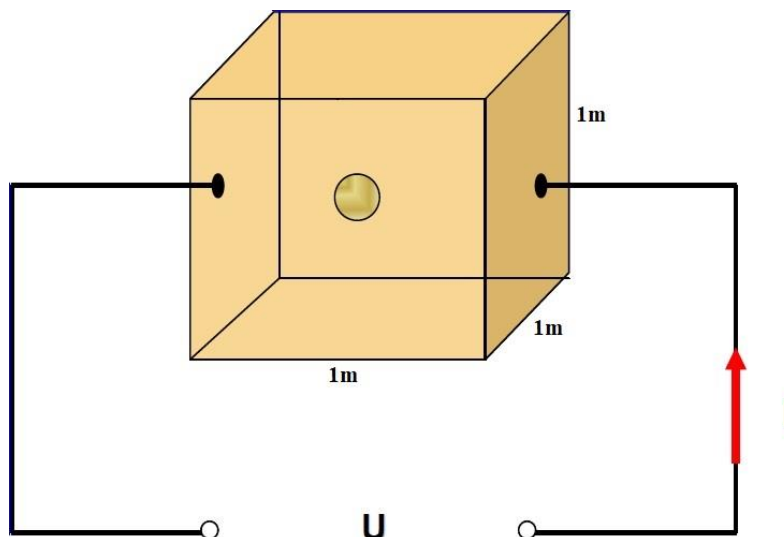
Ουσιαστικά, η αντίσταση γείωσης, η οποία μετράται σε ένα ηλεκτρόδιο γείωσης, εκφράζει την αντίσταση διαβάσεως του ρεύματος, από το αγώγιμο υλικό του ηλεκτροδίου προς το έδαφος που το περιβάλλει και είναι η συνισταμένη των εν παραλλήλω, αναπτυσσόμενων ακτινικά προς την επιφάνεια του ηλεκτροδίου, απειροστών αντιστάσεων διαβάσεως. Αποτελεί λοιπόν μία ωμική αντίσταση στο έδαφος γύρω από το ηλεκτρόδιο και όχι ένα είδος επιφανειακής αντίστασης του ηλεκτροδίου. Συνεπώς, εξαρτάται άμεσα από τη μορφή και τις διαστάσεις των ηλεκτροδίων γείωσης, από το βάθος της εγκατάστασης, ενώ είναι ανάλογη της ειδικής αντίστασης του εδάφους και αντιστρόφως ανάλογη της επιφάνειας επαφής του ηλεκτροδίου με το έδαφος. [34]

Χοάνη δυναμικού ονομάζεται το διάγραμμα τάσης – απόστασης του ηλεκτροδίου γείωσης, που χρησιμοποιείται για την εκτίμηση του σφάλματος στη μέτρηση της αντίστασης των ηλεκτροδίων και στο οποίο αποτυπώνεται η περιοχή επίδρασης των ηλεκτροδίων ή η απόσταση προς την άπειρη γη. Η χοάνη δυναμικού μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση των τάσεων επαφής και των βηματικών τάσεων. Πιο συγκεκριμένα, όταν ένας γειωτής τεθεί υπό τάση U ως προς την άπειρη γη, δημιουργείται ένα πεδίο ροής και δυναμικού γύρω από αυτόν. Όσο περισσότερο απομακρυνόμαστε από τον γειωτή, τόσο μειώνεται η τάση. [36]



Εικόνα 59. Χοάνη δυναμικού [36]

Η **ειδική αντίσταση εδάφους (ρ)**, από φυσικής ερμηνείας, εκφράζει την αντίσταση που προβάλλει το έδαφος στη διέλευση του ηλεκτρικού ρεύματος μέσα από αυτό. Ορίζεται ως η αντίσταση, από το υλικό του εδάφους που έχει ένας μοναδιαίος κύβος ($1 \times 1 \times 1 \text{m}^3$), όταν τοποθετούνται ηλεκτρόδια στις απέναντι πλευρές του κύβου και η τιμή της δίνεται συνήθως σε Ωm . [37]



Εικόνα 60. Ορισμός της ειδικής αντίστασης εδάφους

Η ειδική αντίσταση είναι ένας από τους παράγοντες που επηρεάζουν την αντίσταση γείωσης και επομένως αποτελεί σημαντικό παράγοντα στην αποτελεσματική σχεδίαση ενός συστήματος γείωσης.

Υπάρχουν διάφοροι παράγοντες που επηρεάζουν την ειδική αντίσταση εδάφους και πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά τη μελέτη σχεδιασμού ενός συστήματος γείωσης. Κάποιοι από αυτούς είναι η πυκνότητα και η σύσταση του εδάφους, η υγρασία, η περιεκτικότητα του εδάφους σε άλατα, μεταλλικά και χημικά στοιχεία και η θερμοκρασία. Γενικά, όσο ξηρότερο και περισσότερο πετρώδες είναι ένα έδαφος, τόσο μεγαλύτερη είναι η ειδική του αντίσταση. [37]

Τύπος εδάφους	Ειδική αντίσταση εδάφους (ρ) σε (Ωm)
Επιφάνεια εδάφους, παχύ χώμα κλπ.	1-50
Λάσπη, πηλός, χώμα	2-100
Άμμοχάλικο	50-1000
Επιφάνεια ασβεστόλιθου	100-10000
Σχιστόλιθος	5-100
Αμμόπετρα με χαλαζία και άμμο	20-2000
Γρανίτης, βασάλτης, κλπ.	1000
Διαλυόμενος γνευσίτης (ορυκτό)	50-500
Πλακόστρωτα	10-100

Πίνακας 1. Ειδική αντίσταση διαφορετικών τύπων εδάφους [37]

Υλικό επιφάνειας είναι ένα στρώμα υλικού που τοποθετείται πάνω από το έδαφος και μπορεί να αποτελείται από πέτρα, χαλίκι, άσφαλτο ή τεχνητά υλικά. Το υλικό επιφάνειας χρησιμοποιείται για λόγους προστασίας και μπορεί να μειώσει σημαντικά τις τιμές των τάσεων επαφής και βηματικών τάσεων, συμβάλλοντας στη διατήρησή τους εντός των επιτρεπτών ορίων.

Ενεργό μήκος ορίζεται το οριακό μήκος ενός ηλεκτροδίου γείωσης πέραν του οποίου η αύξησή του δεν συνεισφέρει σημαντικά στη μείωση της κρουστικής σύνθετης αντίστασης του ηλεκτροδίου και δεν συμφέρει οικονομικά. Η τιμή του ενεργού μήκους εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του εδάφους και το χρόνο μετώπου του κρουστικού ρεύματος του κεραυνού, μειώνεται δε τόσο περισσότερο, όσο μικρότερο είναι το μέτωπο της κυματομορφής. Το ενεργό μήκος ενός αγωγού υπολογίζεται σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση: [29]

$$l_{eff} = 1,4 \cdot \sqrt{(\rho \cdot T)}$$

όπου:

- ρ (Ωm) είναι η ειδική αντίσταση εδάφους
- T (μs) είναι ο χρόνος μετώπου της κυματομορφής

Το ενεργό μήκος ενός αγωγού πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά την αρχική μελέτη του σχεδιασμού ενός συστήματος γείωσης με σκοπό την επίτευξη αποτελεσματικής γείωσης με τον πιο οικονομικό τρόπο.

3.3 Είδη Γείωσης

Στις κτιριακές και βιομηχανικές εγκαταστάσεις, ανάλογα με το σκοπό ύπαρξής τους, συναντώνται τρία είδη γειώσεων, τα οποία μπορεί να συνυπάρχουν ή όχι και το κάθε ένα από αυτά εξυπηρετεί μία συγκεκριμένη λειτουργία.

3.3.1 Γείωση Λειτουργίας

Γείωση λειτουργίας ονομάζεται η γείωση που γίνεται για λειτουργικούς λόγους ή για την αποφυγή υπερτάσεων. Αναφέρεται στη γείωση ενός τμήματος του ενεργού κυκλώματος, όπως πχ ο ουδέτερος κόμβος Μ/Σ, γεννητριών ή γενικότερα άλλων στοιχείων του κυκλώματος συνδεδεμένων σε αστέρα και διακρίνεται σε: [29]

- Άμεση, όταν η μόνη αντίσταση που περιλαμβάνει είναι η αντίσταση γείωσης
- Έμμεση, όταν εκτός από την αντίσταση γείωσης περιλαμβάνει ωμικές, επαγωγικές και χωρητικές αντιστάσεις, όπως αντιστάσεις για τον περιορισμό του ρεύματος βραχυκύκλωσης κατά την εμφάνιση σφαλμάτων προς γη

Η γείωση μπορεί να χαρακτηριστεί ανοιχτή, όταν στη γραμμή γείωσης παρεμβάλλονται διάκενα σπινθηριστών ή ασφάλειες διάσπασης. Οι ανοιχτές γειώσεις δεν θεωρούνται γειώσεις λειτουργίας. [34]

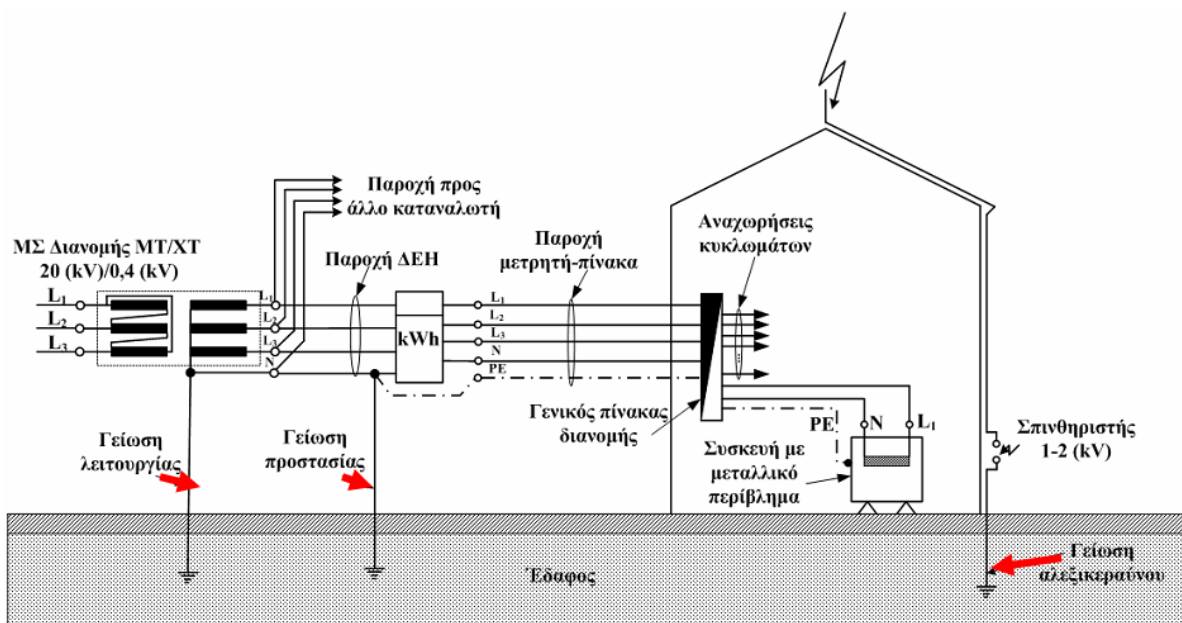
3.3.2 Γείωση Προστασίας

Γείωση προστασίας ονομάζεται η αγώγιμη σύνδεση των μεταλλικών μερών μίας εγκατάστασης με τη γη, τα οποία δεν ανήκουν στο κύκλωμα λειτουργίας και εφαρμόζεται υποχρεωτικά σε κάθε ηλεκτρική εγκατάσταση με σκοπό την εξασφάλιση της προστασίας των ατόμων που ενδέχεται να έρθουν σε επαφή με αυτή, από εμφάνιση επικίνδυνης τάσης στα μεταλλικά μέρη των συσκευών, τα οποία κανονικά δεν βρίσκονται υπό τάση. Στη συγκεκριμένη κατηγορία γείωσης συγκαταλέγονται οι γειώσεις των μεταλλικών μερών των εγκαταστάσεων, των μεταλλικών περιβλημάτων των Μ/Σ και των διακοπών, των μολύβδινων μανδύων και των οπλισμών των καλωδίων, των μεταλλικών μερών του εξοπλισμού των εναέριων γραμμών, κλπ. [29]

3.3.3 Γείωση Ασφαλείας ή Συστημάτων Αντικεραυνικής Προστασίας

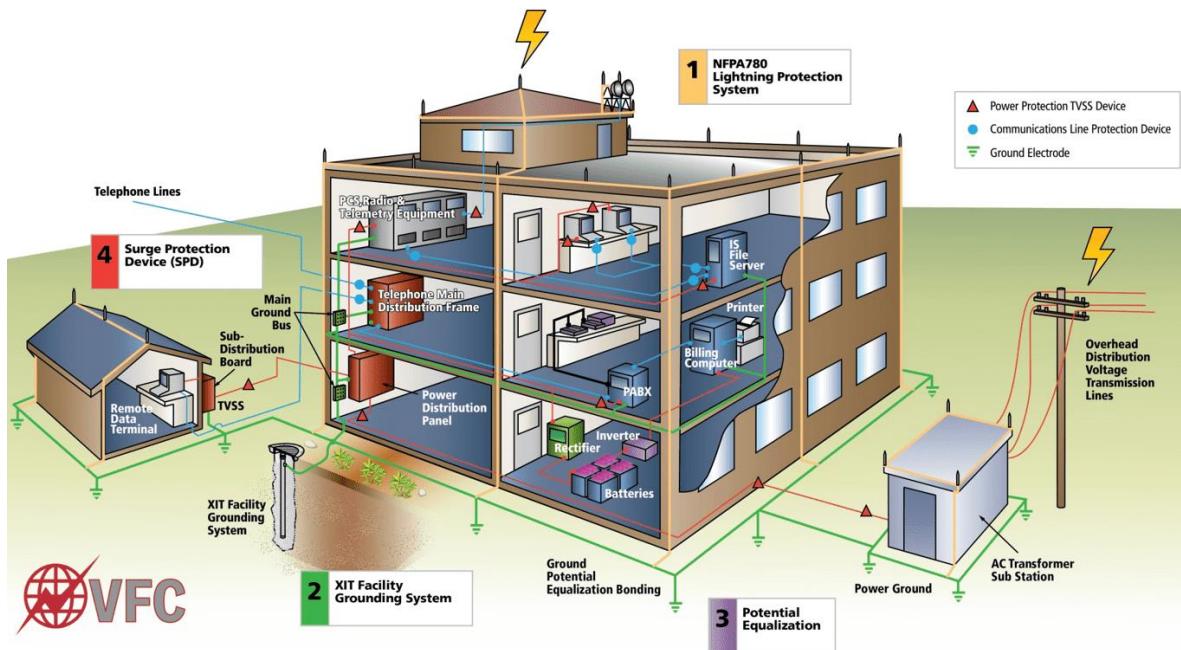
Η γείωση ασφαλείας ή συστημάτων αντικεραυνικής προστασίας (ΣΑΠ) ονομάζεται κάθε γείωση σε μία εγκατάσταση που χρησιμεύει για την ασφάλεια των παρευρισκόμενων σε αυτήν και τους προστατεύει από ρεύματα σφάλματος που προέρχονται από εξωτερικά αίτια όπως οι κερανοί, διοχετεύοντάς τα προς τη γη. Στην κατηγορία των γειώσεων ασφαλείας περιλαμβάνονται οι γειώσεις των αλεξικέραυνων και οι γειώσεις των αντιστατικών δαπέδων των χώρων επείγουσας ιατρικής και των χώρων με μηχανήματα προηγμένης τεχνολογίας. [29]

Σε περίπτωση εγκατάστασης που δεν αποτελεί οικία, οι γειώσεις προστασίας και ασφαλείας μπορούν να συνυπάρξουν σε μία διάταξη η οποία αποτελεί μέρος της συνολικής διάταξης αντικεραυνικής προστασίας.



Εικόνα 61. Είδη γειώσεων σε οικιακή εγκατάσταση

Εκτός των τριών παραπάνω είδη γειώσεων, χρησιμοποιούνται και άλλες διατάξεις γειώσεων όπως η γείωση συστημάτων επεξεργασίας πληροφοριών (ΣΕΠ) και η γείωση Υ/Σ ΜΤ. [38]



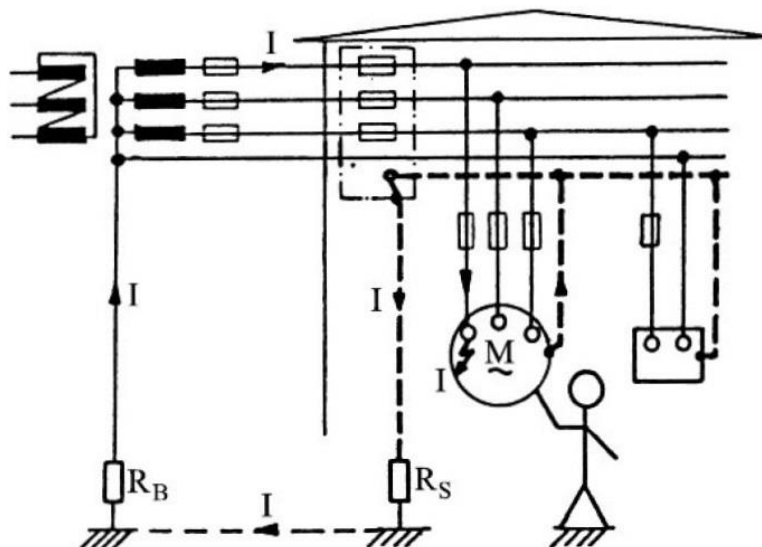
Εικόνα 62. Πλήρες σύστημα αντικεραυνικής προστασίας κτηριακής εγκατάστασης [39]

3.4 Μέθοδοι Γείωσης

Οι μέθοδοι γείωσης που χρησιμοποιούνται στις ηλεκτρικές εγκαταστάσεις είναι η άμεση γείωση, η ουδετέρωση και η γείωση μέσω διακόπτη διαφυγής έντασης (ΔΔΕ) ή τάσης (ΔΔΤ).

3.4.1 Άμεση Γείωση

Άμεση γείωση ορίζεται η απευθείας αγωγή με το σύστημα γείωσης του αγωγού γης, που είναι συνδεδεμένος με κάποιο αγώγιμο υλικό τοποθετημένο μέσα στη γη, όπως η πλάκα γείωσης, το ηλεκτρόδιο, το τρίγωνο, κλπ. [28]

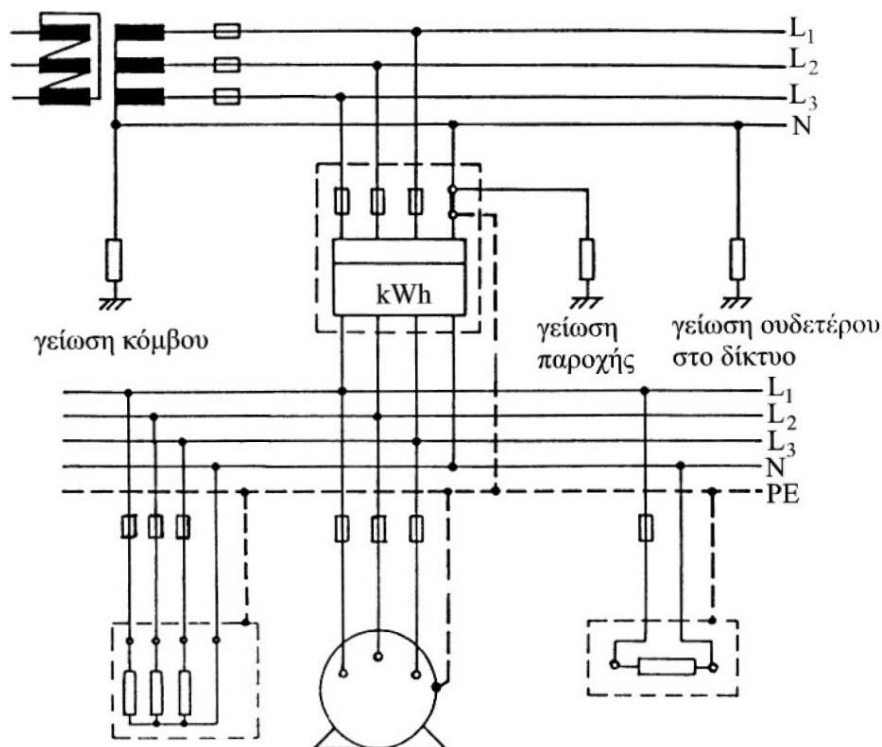


Εικόνα 63. Προστασία με άμεση γείωση [40]

3.4.2 Ουδετέρωση

Η ουδετέρωση αφορά τη σύνδεση των μεταλλικών μερών των συσκευών με αγωγό προστασίας, ο οποίος συνδέεται με τον ουδέτερο αγωγό στον πίνακα παροχής. Η σύνδεση του αγωγού γείωσης με τον ουδέτερο γίνεται στο σημείο παροχέτευσης πριν από τον μετρητή. [28]

Η ουδετέρωση, όπως και η άμεση γείωση, αποτελεί αποτελεσματική μέθοδο γείωσης απαιτώντας όμως μικρότερη αντίσταση γείωσης και χρησιμοποιείται στις περισσότερες ηλεκτρικές εγκαταστάσεις και κυρίως σε αυτές των αστικών κέντρων. [28]

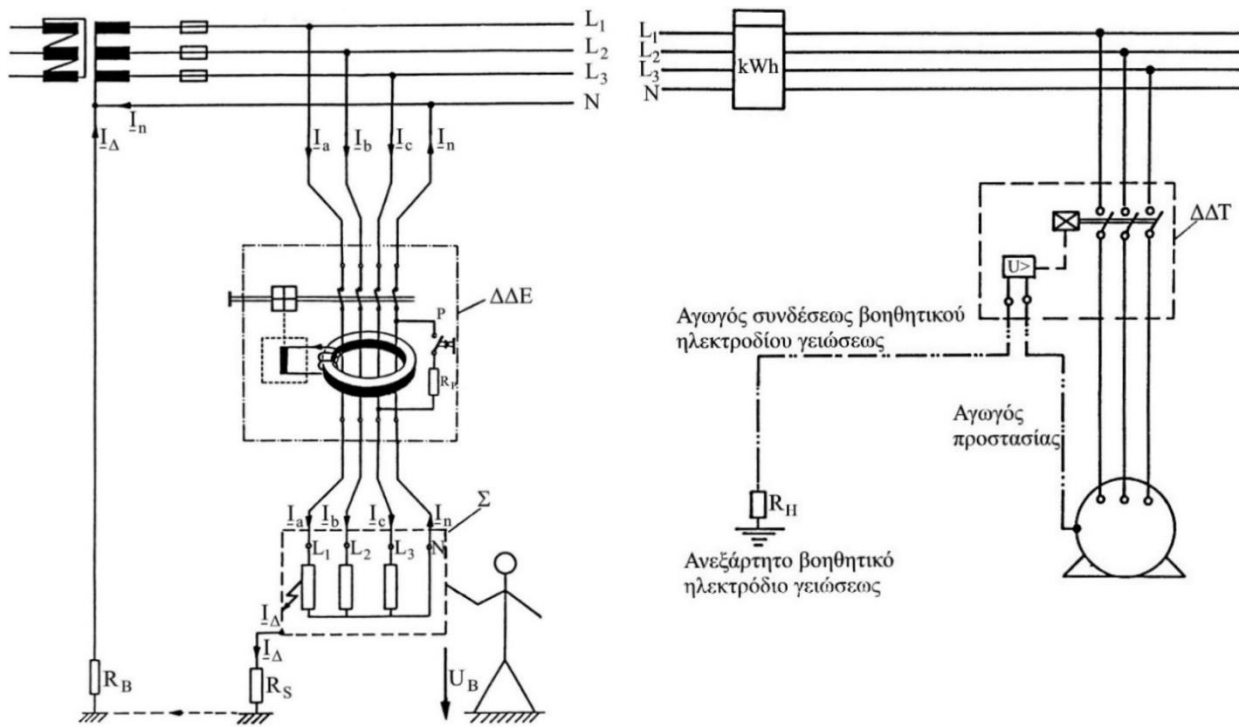


Εικόνα 64. Προστασία με ουδετέρωση [40]

3.4.3 Γείωση με Αποζεύκτη Διαφυγής Έντασης ή Τάσης

Η γείωση μέσω ΔΔΕ ή ΔΔΤ χρησιμοποιείται για την αυτόματη απομόνωση του μέρους της εγκατάστασης, στο οποίο το ρεύμα ή αντίστοιχα η τάση ξεπεράσει κάποιο προκαθορισμένο όριο. [28]

Η απόζευξη του τμήματος της εγκατάστασης που βρίσκεται υπό σφάλμα θα πρέπει να επιτυγχάνεται και στις τρεις μεθόδους γείωσης που αναφέρθηκαν προηγουμένως το πολύ μέσα σε χρονικό διάστημα 5s, αν η τάση κάποιου τμήματος της εγκατάστασης σε σχέση με τη γη εξακολουθεί να υπερβαίνει το όριο ασφαλείας των 50V. Σε περίπτωση που η τάση του υπό σφάλμα τμήματος είναι μικρότερη των 50V, τότε συνεχίζεται η απρόσκοπτη λειτουργία του συστήματος χωρίς κάποια περαιτέρω ενέργεια. [34]



Εικόνα 65. Προστασία με ΔΔΕ (αριστερά) και ΔΔΤ (δεξιά) [40]

3.5 Συστήματα Σύνδεσης Γειώσεων

Στα συστήματα παροχής ηλεκτρικής ενέργειας, τα συστήματα σύνδεσης των γειώσεων καθορίζουν το ηλεκτρικό δυναμικό μεταξύ των αγωγών και της γης. Η επιλογή του συστήματος έχει συνέπειες για την ασφάλεια και την ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα της παροχής ηλεκτρικού ρεύματος.

Σύμφωνα με το διεθνές πρότυπο IEC 60364, διακρίνονται τρεις κατηγορίες συστημάτων γείωσης (TN, TT, IT) για το συμβολισμό των οποίων χρησιμοποιούνται τα γράμματα T: Terre (Γη), N: Neutral (Ουδέτερος) και I: Isolated (Απομόνωση).

Το πρώτο γράμμα χαρακτηρίζει τον τρόπο σύνδεσης μεταξύ της γης και του συστήματος τροφοδοσίας: [41]

- T: άμεση σύνδεση ουδέτερου με τη γη
- I: κανένα σημείο συνδεδεμένο με τη γη ή ένα σημείο συνδεδεμένο με τη γη μέσω σύνθετης αντίστασης σημαντικής τιμής

Το δεύτερο γράμμα χαρακτηρίζει τον τρόπο σύνδεσης των εκτεθειμένων αγωγίμων μερών της εγκατάστασης με τη γη: [41]

- T: άμεση σύνδεση των εκτεθειμένων αγωγίμων μερών με τη γη, ανεξάρτητα από τη γείωση του ουδέτερου του συστήματος τροφοδοσίας
- N: άμεση σύνδεση των εκτεθειμένων αγωγίμων μερών με τον ουδέτερο του συστήματος τροφοδοσίας

Τα επόμενα γράμματα, αν υπάρχουν, αφορούν τη σχέση σύνδεσης μεταξύ του ουδέτερου και του αγωγού προστασίας και πιο συγκεκριμένα: [41]

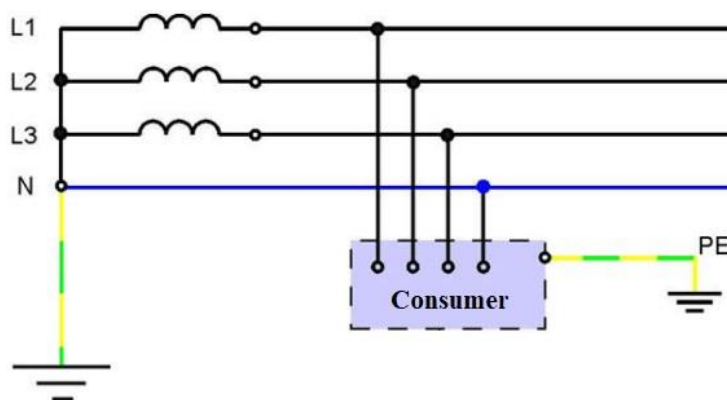
- S: η προστασία εξασφαλίζεται από ιδιαίτερο αγωγό προστασίας που είναι διαφορετικός του ουδέτερου
- C: οι λειτουργίες ουδέτερου και προστασίας συνδυάζονται σε έναν μόνο αγωγό (PEN)

Με βάση λοιπόν τους παραπάνω χαρακτηρισμούς, οι κατηγορίες και οι υποκατηγορίες των συστημάτων γείωσης αποτυπώνονται στον παρακάτω πίνακα:

α/α	Συμβολισμός	Περιγραφή
1	TT	Ο ουδέτερος συνδέεται με τη γη όπως και τα μεταλλικά μέρη των καταναλώσεων
2	TN	Ο ουδέτερος συνδέεται με τη γη και τα μεταλλικά μέρη των καταναλώσεων συνδέονται με τον ουδέτερο μέσω του αγωγού προστασίας
2.1	TN-S	Ο ουδέτερος συνδέεται με τη γη και τα μεταλλικά μέρη των καταναλώσεων συνδέονται με τον αγωγό προστασίας. Οι αγωγοί ουδέτερου και προστασίας είναι χωριστοί σε όλο το σύστημα
2.2	TN-C	Ο ουδέτερος συνδέεται με τη γη και τα μεταλλικά μέρη των καταναλώσεων συνδέονται με τον αγωγό προστασίας. Οι αγωγοί ουδέτερου και προστασίας είναι κοινός σε όλο το σύστημα
2.3	TN-C-S	Ο ουδέτερος συνδέεται με τη γη και τα μεταλλικά μέρη των καταναλώσεων συνδέονται με τον αγωγό προστασίας. Οι αγωγοί ουδέτερου και προστασίας είναι κοινός σε τμήμα του συστήματος και χωριστοί στο υπόλοιπο
3	IT	Ο ουδέτερος είναι μονωμένος από τη γη ή συνδέεται μέσω σύνθετης αντίστασης. Τα μεταλλικά μέρη των καταναλώσεων συνδέονται με τη γη

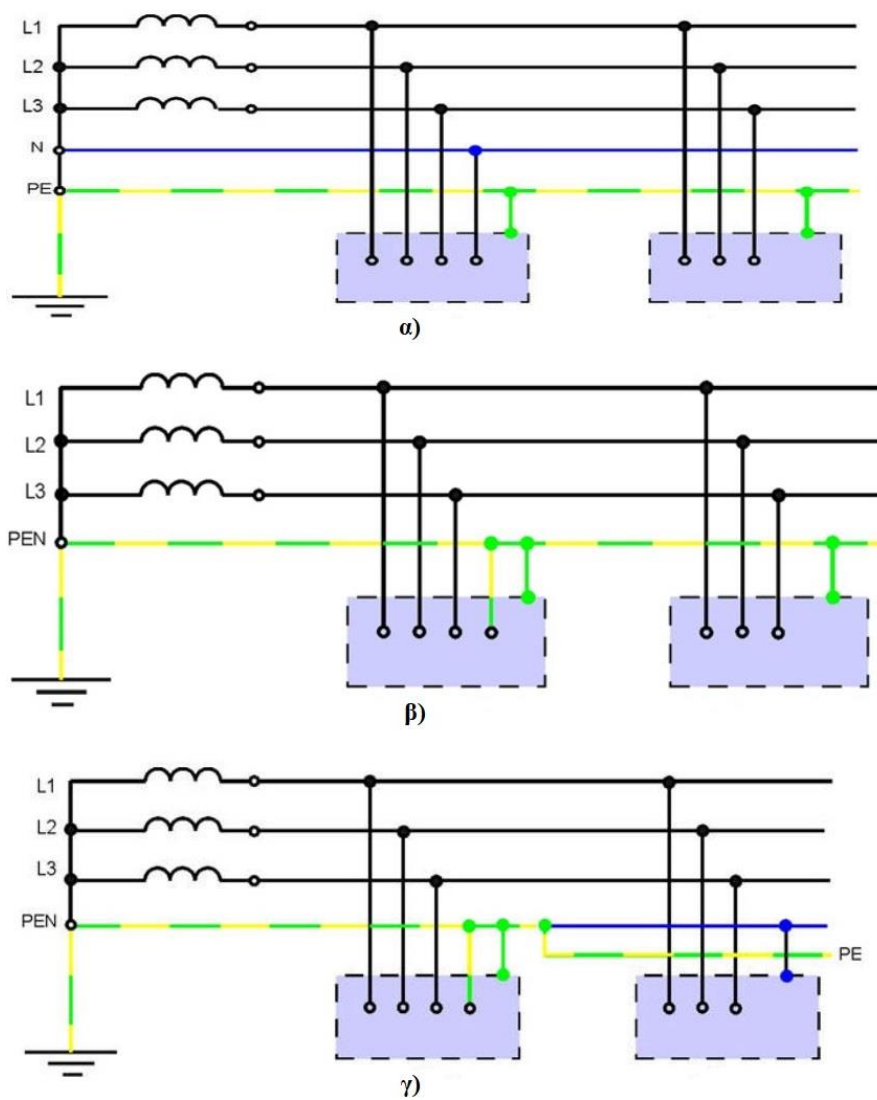
Πίνακας 2. Συστήματα σύνδεσης γείωσης

3.5.1 Δίκτυα TT



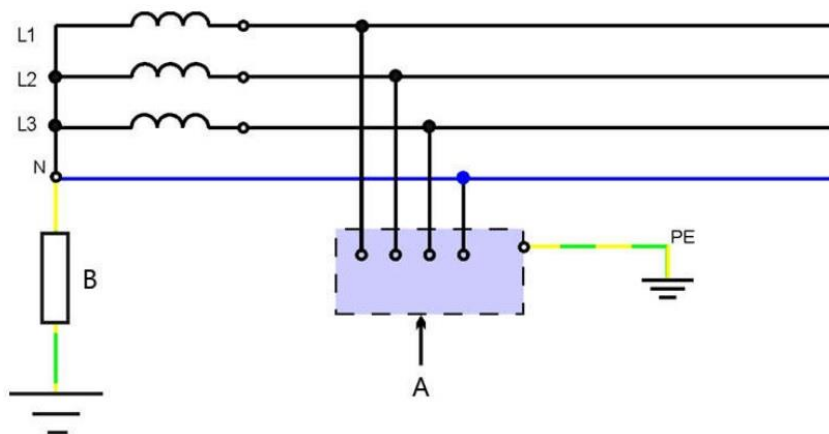
Εικόνα 66. Δίκτυο TT [41]

3.5.2 Δίκτυα TN



Εικόνα 67. α) Δίκτυο TN-S, β) Δίκτυο TN-C, γ) Δίκτυο TN-C-S [41]

3.5.3 Δίκτυα IT



Εικόνα 68. Δίκτυο IT [41]

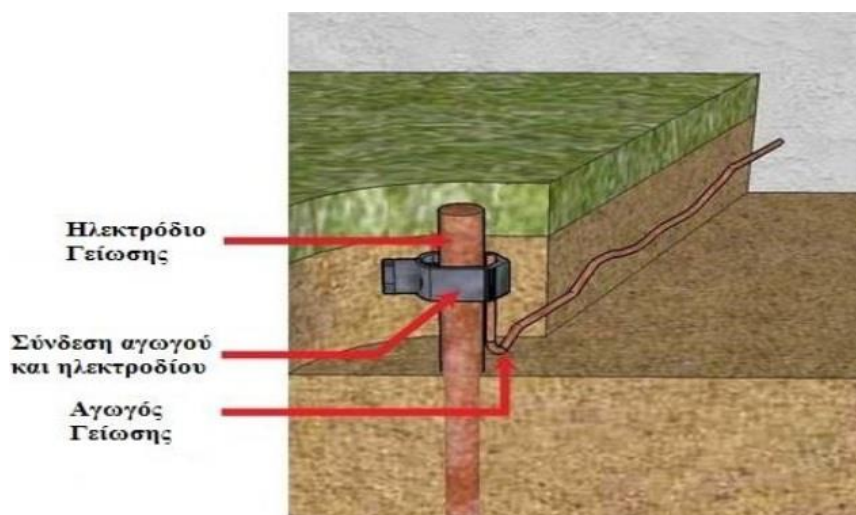
3.6 Ηλεκτρόδια Γείωσης

3.6.1 Γειωτής Ράβδου

Ο γειωτής ράβδου αποτελεί την απλούστερη μορφή γειωτή έχοντας σχήμα ράβδου κυκλικής διατομής ή διατομής σταυρού και συναντάται σε διάφορα μεγέθη. Η τοποθέτησή του γίνεται σε κατακόρυφη ή λοξή διάταξη σε βάθος περίπου 2,5m και προτείνεται γενικά η χρήση ηλεκτροδίων χαλκού και επιχαλωμένου ή επιμολυβδωμένου χάλυβα. Το κάτω μέρος του ηλεκτροδίου έχει τη μορφή ακίδας ώστε να μπορεί να καρφώνεται ευκολότερα στο έδαφος, ενώ το επάνω μέρος του τοποθετείται συνήθως σε φρεάτιο παρέχοντας έτσι τη δυνατότητα να γίνει επίσκεψη του σημείου σύνδεσης του αγωγού γείωσης με τη γη. [28]

Ένας γειωτής αποτελείται από τρία μέρη:

- Τον αγωγό γείωσης
- Τη σύνδεση του αγωγού γείωσης με το ηλεκτρόδιο γείωσης
- Το ηλεκτρόδιο γείωσης



Εικόνα 69. Στοιχεία γειωτή ράβδου [28]

Η αντίσταση του γειωτή είναι το άθροισμα των τριών παρακάτω συνιστωσών: [28]

- Της αντίστασης του ίδιου του ηλεκτροδίου γείωσης και των συνδέσεων σε αυτό, όπου η χαμηλή αντίσταση ενός ηλεκτροδίου γείωσης αποτελεί τη βασική προϋπόθεση για την κατασκευή του. Γι' αυτό λοιπόν, χρησιμοποιούνται υλικά υψηλής αγωγιμότητας και επιλέγονται κατάλληλου μεγέθους και διατομής ηλεκτρόδια, έτσι ώστε στο τέλος η αντίσταση του ίδιου του ηλεκτροδίου να αποτελεί αμελητέο ποσοστό σε σχέση με τη συνολική αντίσταση του συστήματος γείωσης.
- Της αντίστασης επαφής μεταξύ του ηλεκτροδίου και του εδάφους που το περιβάλλει, η οποία υπό κανονικές συνθήκες έχει αμελητέα τιμή, επειδή το ηλεκτρόδιο γείωσης τοποθετείται με τέτοιο τρόπο στο έδαφος, έτσι ώστε η περιβάλλουσα γη να εφάπτεται πολύ σταθερά σε αυτό.

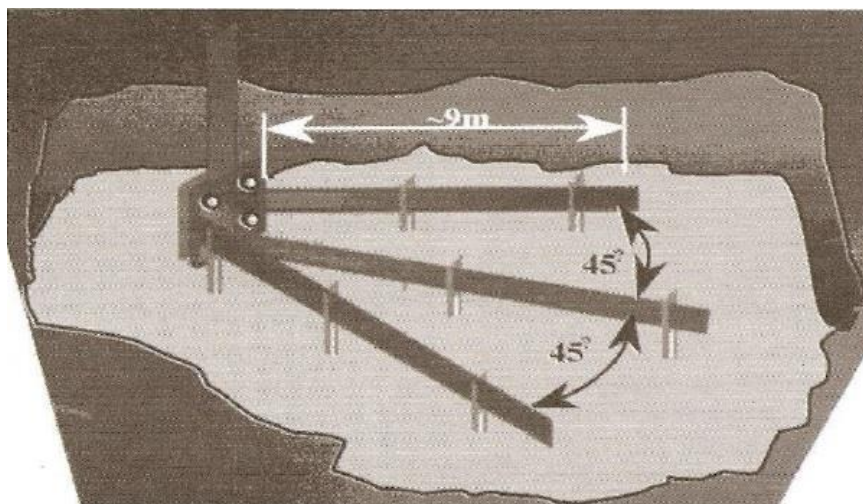
- Της περιβάλλουσας αντίστασης γύρω από το ηλεκτρόδιο γης, η οποία έχει τη μεγαλύτερη τιμή σε σχέση με τις άλλες δύο αντιστάσεις και εξαρτάται από το υλικό του εδάφους, τη θερμοκρασία και την υγρασία του.

Ακόμα, η αντίσταση του γειωτή είναι αντιστρόφως ανάλογη του μήκους της ράβδου και του βάθους διείσδυσης, ενώ δεν εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη διάμετρο και το πάχος της ράβδου. Για την επίτευξη μικρότερων τιμών αντίστασης γείωσης, προτείνεται η χρησιμοποίηση περισσότερων ηλεκτροδίων.

Δύο σημαντικές παράμετροι που μελετώνται κατά τον σχεδιασμό ενός συστήματος γείωσης είναι ο καθορισμός του τύπου και του βάθους τοποθέτησης των ηλεκτροδίων στο έδαφος, λαμβάνοντας υπόψη τη ξήρανση και το πάγωμα του εδάφους σε διάφορες περιόδους του χρόνου, καθώς και τη διάβρωση που υφίστανται, χαρακτηριστικά τα οποία μπορεί να αυξήσουν την αντίσταση γείωσης της εγκατάστασης πέρα από την επιτρεπτή τιμή. Επίσης, η επιλογή των υλικών κατασκευής των ηλεκτροδίων πρέπει να είναι τέτοια, ώστε να διατηρούν την ανθεκτικότητα και τις ιδιότητές τους.

3.6.2 Γειωτής Ταινίας ή Συρματόσχοινου

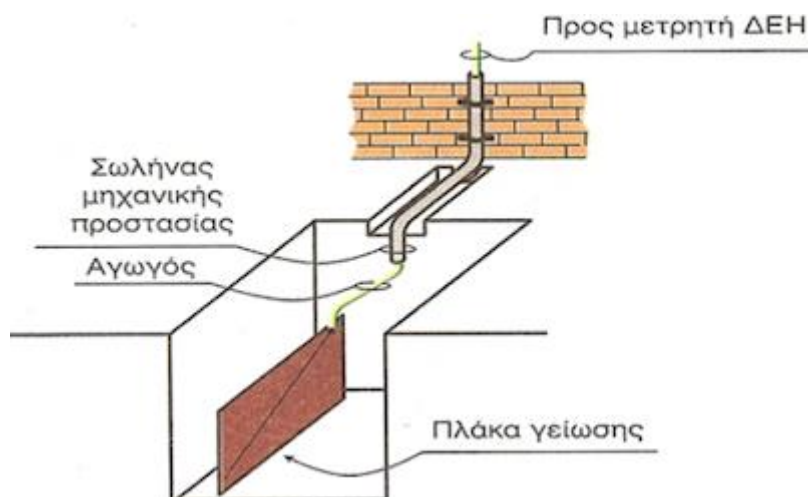
Ο γειωτής ταινίας ή συρματόσχοινου τοποθετείται ευθύγραμμο ή κυκλικά (γείωση βρόχου) γύρω από την εγκατάσταση σε χαντάκι βάθους 0,7-1m για να υπάρχει υγρασία στο έδαφος. Το υλικό της ταινίας μπορεί να είναι γαλβανισμένος, επιχαλκωμένος ή επιμολυβδωμένος χάλυβας. Η αντίσταση γείωσης είναι αντιστρόφως ανάλογη του μήκους της ταινίας που βρίσκεται μέσα στο έδαφος, κάτι που εξηγείται από το γεγονός ότι ο ευθύγραμμος γειωτής παρουσιάζει μικρότερη αντίσταση από κυκλικό γειωτή ίδιου μήκους, καθώς η επιφάνεια επαφής του με το έδαφος είναι σχεδόν η διπλάσια. Η χρήση της ταινίας ως ηλεκτρόδιο γείωσης προτιμάται από αυτή του συρματόσχοινου, επειδή παρουσιάζει μεγαλύτερη αντοχή στη διάβρωση. Στην περίπτωση που υπάρχουν χαλύβδινοι σωλήνες στην περιοχή του συστήματος γείωσης, αποφεύγονται τα χάλκινα ή επιχαλκωμένα ηλεκτρόδια γιατί προκαλούνται διαβρώσεις. [28]



Εικόνα 70. Γείωση με ταινία [28]

3.6.3 Γειωτής Πλάκας

Ο γειωτής πλάκας είναι μία πλάκα σε μορφή παραλληλογράμμου, η οποία ενταφιάζεται στο έδαφος σε βάθος τουλάχιστον 0,5m με την επιφάνειά της να είναι κατακόρυφη. Το υλικό κατασκευής της πλάκας μπορεί να είναι γαλβανισμένος, επιχαλκωμένος ή επιμολυβδωμένος χάλυβας με πάχος μεγαλύτερο των 3mm ή χαλκός ή μόλυβδος πάχους μεγαλύτερου των 2mm. Η τιμή της αντίστασης γείωσης είναι αντιστρόφως ανάλογη τόσο των διαστάσεων της πλάκας όσο και του βάθους τοποθέτησής της στη γη. [34]



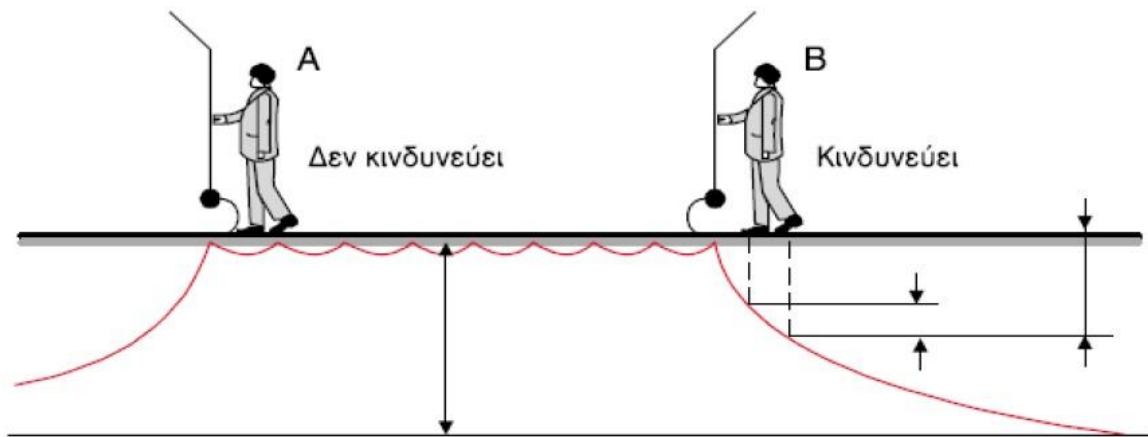
Εικόνα 71. Στοιχεία εγκατάστασης με γειωτή πλάκας

3.6.4 Ακτινικός Γειωτής

Ο ακτινικός γειωτής αποτελείται από ταινίες ή ράβδους, οι οποίες παίρνουν τη μορφή αστέρα με πολλές ακτίνες. Τοποθετείται σε οριζόντιο προσανατολισμό μέσα στο έδαφος σε βάθος τουλάχιστον 0,8m και τα υλικά κατασκευής του είναι όμοια με αυτά του γειωτή ταινίας. [34]

3.6.5 Γειωτής Πλέγματος

Ο γειωτής πλέγματος αποτελεί μία από τις πιο συχνά χρησιμοποιούμενες μορφές γειωτών και η συνηθέστερη υλοποίησή του γίνεται με τη μορφή πλέγματος από ταινίες ή χρησιμοποιώντας αγωγό κυκλικής ή άλλης διατομής. Τοποθετείται σε οριζόντια θέση σε βάθος περίπου 0,5-1m και έχει οριζόντια ανοίγματα πλάτους 0,7-2m. Τα ελάχιστα πάχη είναι της τάξεως των 2-4mm και ταυτίζονται με αυτά των γειωτών ταινίας. Σημαντικό πλεονέκτημα αυτών των γειωτών, είναι οι χαμηλές τιμές των βηματικών τάσεων που παρατηρούνται στην περιοχή ακριβώς πάνω από το πλέγμα. Ακόμα, όσο πιο πυκνό είναι το πλέγμα, τόσο μικρότερες είναι και οι βηματικές τάσεις που εμφανίζονται. [34]



Εικόνα 72. Βηματική τάση κατά μήκος πλέγματος γείωσης

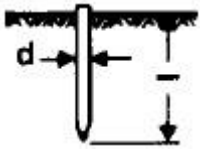
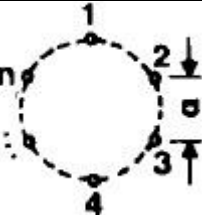
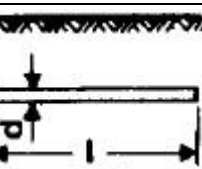
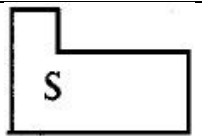
3.6.6 Επιφανειακοί και Βαθείς Γειωτές

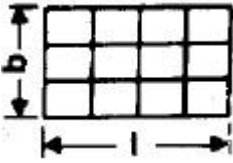
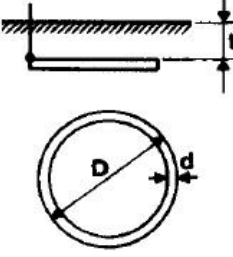
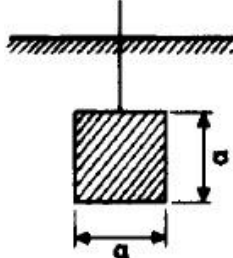
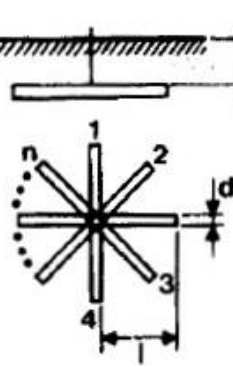
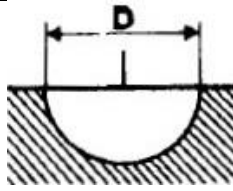
Οι γειωτές ανάλογα με το βάθος ενταφιασμού τους διακρίνονται στις παρακάτω δύο κατηγορίες:

- Επιφανειακούς γειωτές, όπως πχ οι γειωτές πλέγματος, ταινίας και οι ακτινικοί γειωτές
- Βαθείς γειωτές, όπως είναι οι γειωτές ράβδου

Η αντίσταση στους βαθείς γειωτές μεταβάλλεται σε μικρότερο βαθμό συγκριτικά με τους επιφανειακούς στην πάροδο του χρόνου, καθώς η θερμοκρασία και η υγρασία που επηρεάζουν την τιμή της αντίστασης του γειωτή δεν μεταβάλλονται ιδιαίτερα σε μεγάλα βάθη. [28]

3.6.7 Αντιστάσεις Γειωτών

Αναπαράσταση Γειωτή	Γειωτής	Τύπος	Προσεγγιστικός Τύπος
	Πάσσαλος (πλάγια όψη)	$R_{A1} = \frac{\rho}{2\pi l_{eff}} \ln\left(\frac{4l_{eff}}{d}\right)$ $l_{eff} \approx l - 0,5m$	$R_A \cong \frac{\rho}{l_{eff}}$
	Πολυγωνική διάταξη πασσάλων $\alpha \geq 1$ (κάτοψη)	$R_A = k \cdot \frac{1}{n} \cdot R_{A1}$ $\frac{\alpha}{l} = 3 : n = 5 : k \approx 1,2$ $R_{A1} = \text{αντίσταση πασσάλου}$	$K = (1 \dots 1,5)$ <p>για $n = 10 : k \approx 1,2$</p>
	Ταινία γείωσης ή επιφανειακός γειωτής (πλάγια όψη)	$R_A = \frac{\rho}{\pi l} \ln\left(\frac{2l}{d}\right)$	$R_A = \frac{2\rho}{l}$
	Θεμελιακή γείωση $D = \sqrt{\frac{4}{\pi} S}$, S (m ²)		$R_4 = \frac{2\rho}{\pi D}$

	<p>Πλέγμα γείωσης σε βάθος 0,5-1m</p> $D = \sqrt{\frac{4bl}{\pi}}$ <p>(κάτοψη)</p>	$R_A \approx \frac{\rho}{2D} + \frac{\rho}{lg}$ <p>$l \cdot g$: συνολικό μήκος αγωγού</p>	$R_A = \frac{\rho}{2D}$
	<p>Κυκλικός γειωτής (κάτοψη)</p>	$R = \frac{\rho}{2\pi^2 D} \ln \frac{8D}{d} \cdot \left(1 + \frac{\ln \frac{2D}{t}}{\ln \frac{8D}{d}} \right)$	$R = \frac{2\rho}{\pi D} *$
	<p>Γειωτής πλάκας (πλάγια όψη)</p>		$R = \frac{\rho}{4,5\alpha} **$
	<p>Ακτινικός γειωτής</p> <p>n=2</p> <p>n=3</p> <p>n=4</p> <p>n=5</p>	$R = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \left(\frac{l^2}{0,27td} \right)$ $R = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \left(\frac{l^2}{0,25td} \right)$ $R = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \left(\frac{l^2}{0,22td} \right)$ $R = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \left(\frac{l^2}{0,09td} \right)$	
	<p>Ημισφαιρικός γειωτής</p>	$R = \frac{\rho}{\pi D} ***$	
<p>Όπου εμφανίζεται το πάχος του αγωγού d, αυτό είναι το ισοδύναμο πάχος</p> $d = \sqrt{4 \frac{A}{\pi}}$ <p>όπου A είναι η διατομή του αγωγού.</p> <p>*Για ακανόνιστους βρόχους μπορεί να χρησιμοποιηθεί η ισοδύναμη διάμετρος $D = 0,33U$, όπου U είναι το μήκος του αγωγού.</p> <p>**Για πλάκες που δεν είναι τετράγωνες θέτουμε: $\alpha = \sqrt{S}$, όπου S είναι η επιφάνεια.</p> <p>***Για γειωτή όγκου V ακανόνιστου σχήματος, εφαρμόζεται ο τύπος του σφαιρικού γειωτή με $D = 1,57\sqrt[3]{V}$.</p>			

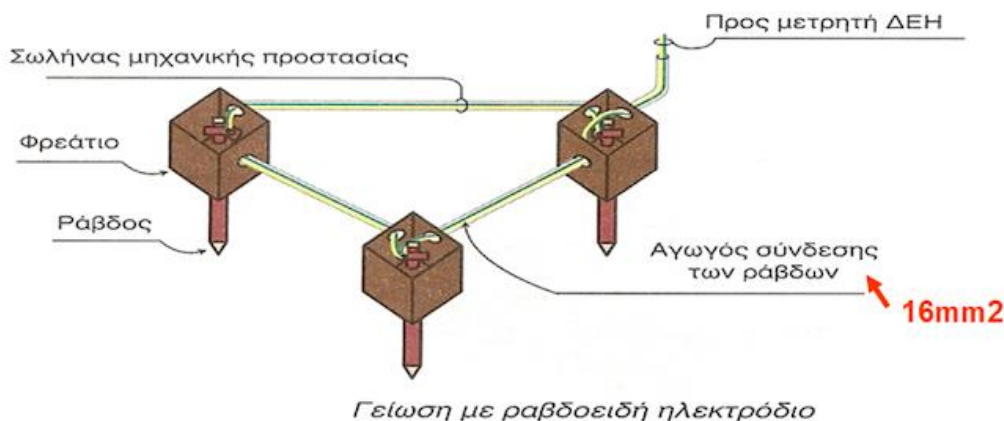
Πίνακας 3. Μαθηματικοί τύποι υπολογισμού των αντιστάσεων διάφορων γειωτών [36]

3.7 Συστήματα Γείωσης

Τα συστήματα γείωσης περιλαμβάνουν δύο ή περισσότερους γειωτές, συνδεδεμένους και διατεταγμένους με συγκεκριμένο τρόπο ανάλογα την περίπτωση. Η επιλογή του είδους του συστήματος γείωσης εξαρτάται κυρίως από το είδος της εγκατάστασης που θα προστατευτεί, το είδος του εδάφους, τον διαθέσιμο χώρο, τις κλιματολογικές συνθήκες της περιοχής και το συνολικό κόστος του συστήματος. Οι συνηθέστερες διατάξεις ηλεκτροδίων γείωσης είναι η πολυγωνική διάταξη (κυρίως η τριγωνική), το σύστημα γείωσης με πλάκες, η περιμετρική γείωση, η θεμελιακή γείωση, η γείωση τύπου “Ε”, καθώς και συνδυασμός των παραπάνω. [28]

3.7.1 Πολυγωνική Διάταξη

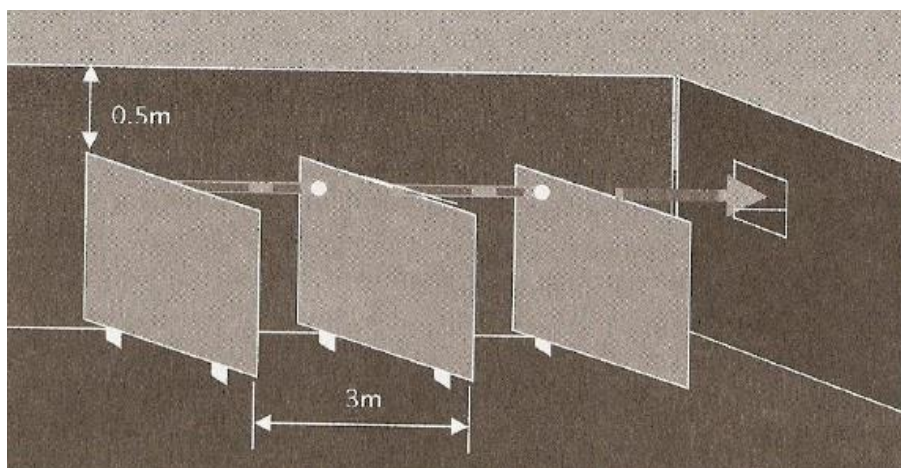
Στην πολυγωνική διάταξη γείωσης τοποθετούνται γειωτές ράβδου στις κορυφές ενός ισόπλευρου πολυγώνου. Η συνηθέστερη πολυγωνική διάταξη είναι αυτή του τριγώνου ή αλλιώς τρίγωνο γείωσης. Οι ράβδοι γείωσης συνδέονται μεταξύ τους με αγωγό γείωσης κατάλληλης διατομής ανάλογα με τις απαιτήσεις της εγκατάστασης. Για τη μείωση της συνολικής αντίστασης γείωσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν περισσότερα ηλεκτρόδια, ενώ σε περιπτώσεις που δεν υπάρχει ο απαιτούμενος διαθέσιμος χώρος για μία συγκεκριμένη πολυγωνική διάταξη, οι ράβδοι δύναται να τοποθετηθούν σε ευθεία ή κυκλική διάταξη, σε διάταξη τύπου “Τ”, κλπ. Ανεξάρτητα όμως από τη διάταξη που θα τοποθετηθούν οι γειωτές, η μεταξύ τους απόσταση πρέπει να είναι τουλάχιστον 1,5 φορά το βάθος τοποθέτησής τους, έτσι ώστε να μην αλληλοεπηρεάζονται οι περιοχές επιρροής τους. [28]



Εικόνα 73. Τρίγωνο γείωσης με γειωτή ράβδου

3.7.2 Γείωση με Πλάκες

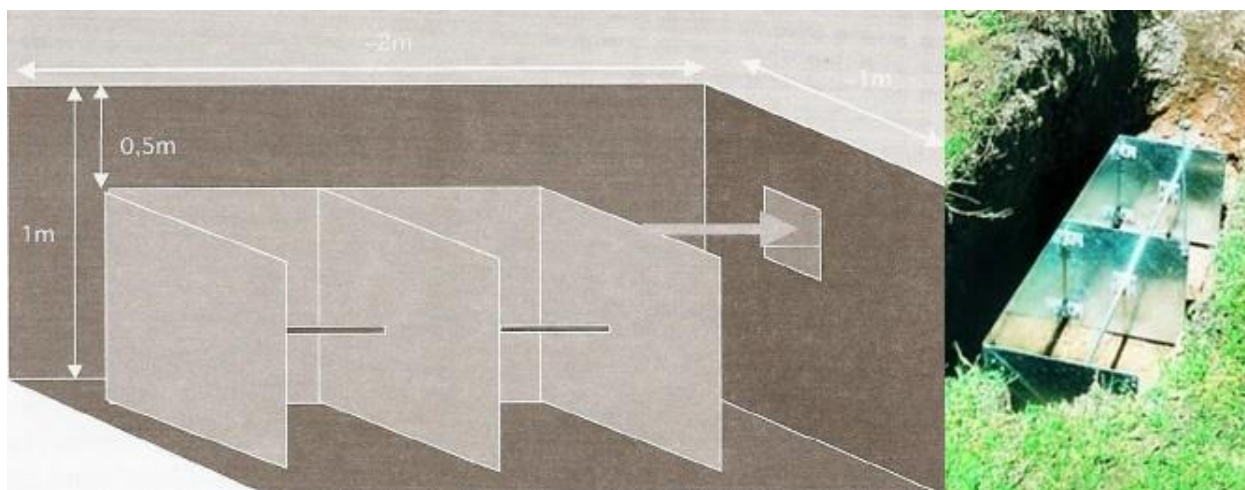
Στον συγκεκριμένο τύπο γείωσης οι πλάκες τοποθετούνται σε τυχαία διάταξη με την προϋπόθεση ότι η μεταξύ τους απόσταση δεν θα είναι μικρότερη των 3m και συνδέονται μεταξύ τους με αγωγό γείωσης κατάλληλης διατομής (συνήθως 50mm² Cu). Για την αποφυγή ηλεκτροχημικής διάβρωσης του συστήματος γείωσης, δεν πρέπει να συνυπάρχουν στο χώρο γειωτές από διαφορετικά υλικά, αλλά και να μην συνδέονται μεταξύ τους με αγωγούς από διαφορετικά υλικά. [34]



Εικόνα 74. Γείωση με πλάκες [28]

3.7.3 Γείωση με Γειωτή τύπου “E”

Ο γειωτής τύπου “E” αποτελείται από ένα στοιχείο τύπου “Π” και ένα στοιχείο τύπου “Γ”, ενώ μπορεί να επεκταθεί κάνοντας χρήση περισσότερων στοιχείων τύπου “Γ”. Τα στοιχεία συνδέονται μεταξύ τους με μεταλλικές γωνίες, κοχλίες και περικόχλια. Κατασκευάζεται από καθαρό ηλεκτρολυτικό χαλκό ή θερμά επιψευδαργυρωμένο χάλυβα και η τοποθέτησή του εντός εδάφους γίνεται σε χαντάκι βάθους τουλάχιστον 1m, πλάτους 0,75m και μήκους ανάλογου του αριθμού των στοιχείων “Γ” του γειωτή. [34]



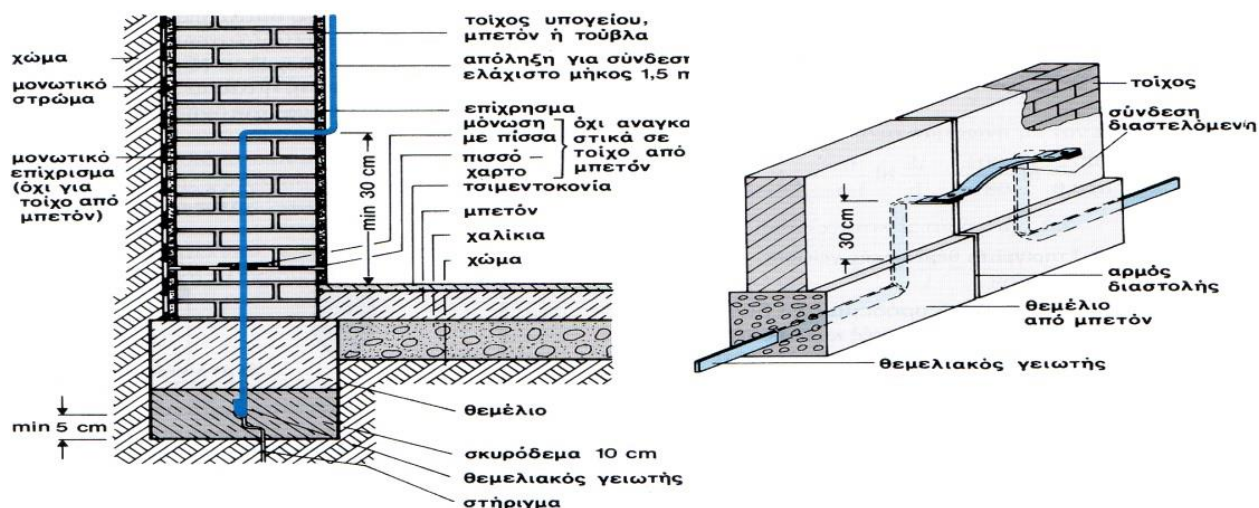
Εικόνα 75. Γειωτής τύπου “E” [34]

3.7.4 Περιμετρική Γείωση

Η περιμετρική γείωση κατασκευάζεται από γειωτή ταινίας και σπανιότερα από αγωγό κυκλικής διατομής. Η τοποθέτησή της γίνεται περιμετρικά του κτιρίου σε όρυγμα εντός του εδάφους για να υπάρχει υγρασία και η απόσταση από το κτίριο είναι περίπου 2m, καθώς το χώμα κοντά στο κτίριο δεν είναι αγώγιμο.

3.7.5 Θεμελιακή Γείωση

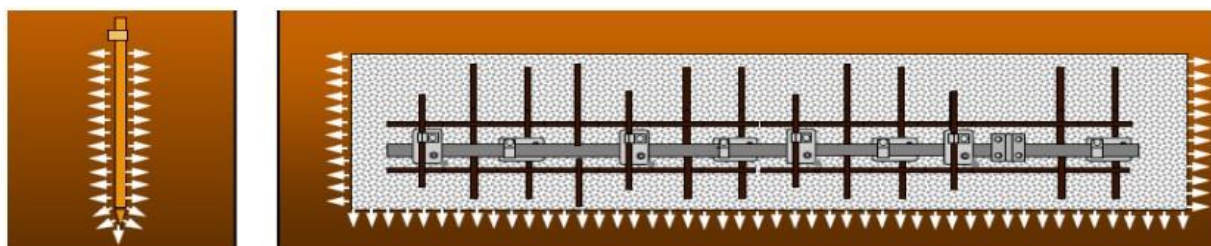
Η θεμελιακή γείωση κατασκευάζεται συνήθως από γειωτή ταινίας και τοποθετείται κάτω από τα θεμέλια ενός κτιρίου στη βάση των εξωτερικών τοίχων μέσα στο σκυρόδεμα έχοντας τη μορφή κλειστού βρόχου. Με αυτό τον τρόπο, η γείωση προστατεύεται από μηχανικές καταπονήσεις και έχει μεγαλύτερη αντοχή στη διάβρωση. Επίσης, επειδή το έδαφος και το σκυρόδεμα των θεμελίων είναι συνήθως υγρό καθ' όλη τη διάρκεια του έτους, τα συστήματα θεμελιακής γείωσης έχουν σχετικά χαμηλές αντιστάσεις γείωσης. Αν υπάρχει μόνωση κατά της υγρασίας, τότε η ταινία γείωσης τοποθετείται προς την πλευρά του εδάφους.



Εικόνα 76. Λεπτομέρειες τοποθέτησης θεμελιακής γείωσης [34]

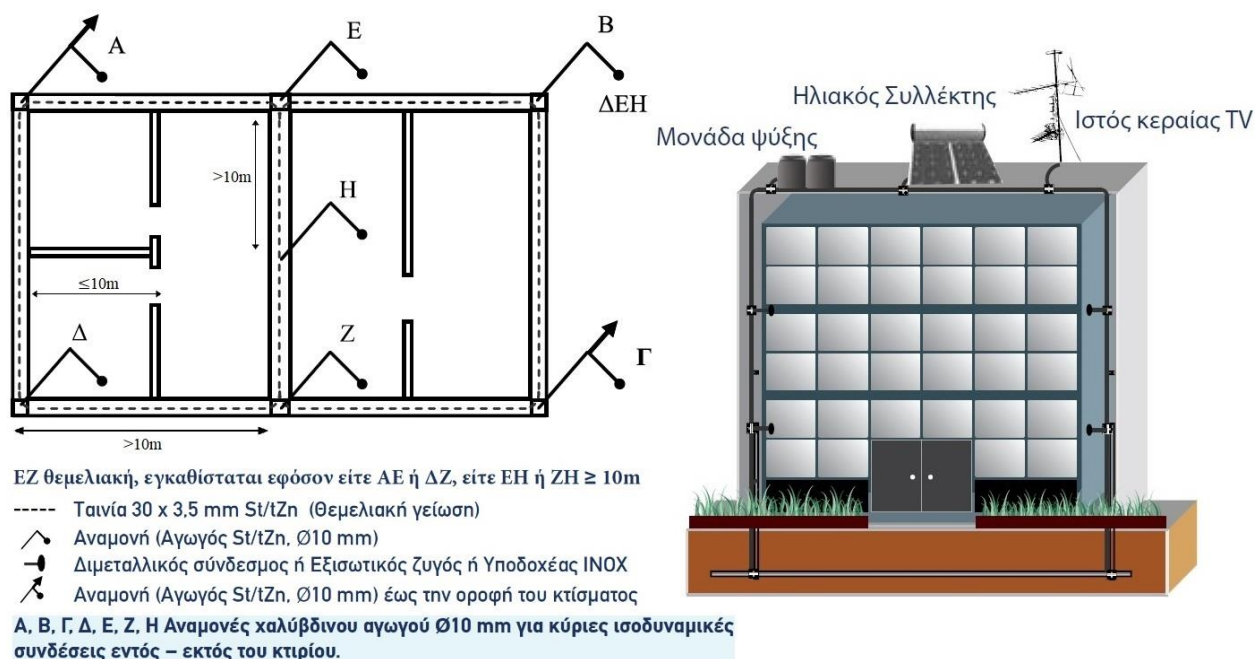


Εικόνα 77. Εφαρμογή θεμελιακής γείωσης σε κτιριακή εγκατάσταση



Εικόνα 78. Σχηματική απεικόνιση θεμελιακής γείωσης [34]

Σε κτίρια μεγάλων διαστάσεων, συνιστανται η τοποθέτηση εγκάρσιων και διαμηκών επεκτάσεων της περιμετρικής θεμελιακής γείωσης του κτιρίου με τμήματα ταινίας, έτσι ώστε κανένα σημείο του υπογείου να μην απέχει πάνω από 10m από τον γειωτή. [34]



Εικόνα 79. Σχηματική διάταξη θεμελιακής γείωσης σε κτίσμα [42]

Η εφαρμογή της θεμελιακής γείωσης παρουσιάζει μερικά σημαντικά πλεονεκτήματα έναντι των υπολοίπων συστημάτων γείωσης, τα οποία την καθιστούν πλέον υποχρεωτική για την προστασία των κτιριακών εγκαταστάσεων: [34]

- Χαμηλή αντίσταση γείωσης, γιατί εκτός του ότι εκμεταλλεύεται τις περιβαλλοντικές συνθήκες του υπεδάφους, συνδέεται αγωγή σε όλο το μήκος του οπλισμού του κτιρίου, αυξάνοντας έτσι τη συνολική επιφάνεια που περικλείει ο γειωτής, η οποία έρχεται σε επαφή με τον περιβάλλοντα χώρο.
- Σταθερή τιμή αντίστασης γείωσης καθ' όλη τη διάρκεια του έτους, λόγω των συνθηκών του υπεδάφους οι οποίες παραμένουν σχεδόν σταθερές ανεξάρτητα από τις ημερήσιες και εποχιακές μεταβολές στη θερμοκρασία και την υγρασία.
- Μηχανική προστασία και υψηλή αντοχή στη διάβρωση, εξαιτίας της τοποθέτησής της εντός του σκυροδέματος, γεγονός το οποίο εξισώνει τη διάρκεια ζωής της θεμελιακής γείωσης με αυτή του κτιρίου.
- Ευκολία στην τοποθέτησή της, καθώς η εγκατάστασή της γίνεται σε ήδη υπάρχουσα εκσκαφή.
- Επίτευξη χαμηλών τιμών βηματικών τάσεων, κάτω από τις μέγιστες αποδεκτές τιμές, χωρίς την ανάγκη λήψης πρόσθετων μέτρων που απαιτούν τα άλλα συστήματα γείωσης.
- Προστασία από επικίνδυνες τάσεις επαφής στις συσκευές και τις μεταλλικές εγκαταστάσεις, λόγω της ύπαρξης ισοδυναμικών επιφανειών στα αγωγά αυτά στοιχεία, αλλά και εύκολη πρόβλεψη αναμονών γείωσης σε οποιοδήποτε σημείο του εσωτερικού μέρους του κτιρίου αν απαιτηθούν πρόσθετες ισοδυναμικές επιφάνειες.

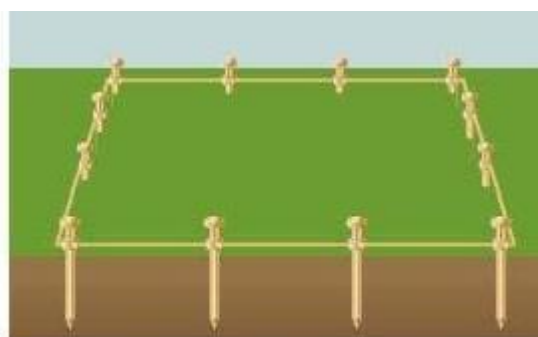
- Παράλληλη χρησιμοποίηση της θεμελιακής γείωσης και για γείωση συστήματος αντικεραυνικής προστασίας, καθώς και για την προστασία του ηλεκτρολογικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού με την τοποθέτηση απαγωγών κρουστικών υπερτάσεων σε κατάλληλα σημεία της ηλεκτρικής εγκατάστασης.

3.7.6 Συνδυασμός Γειώσεων

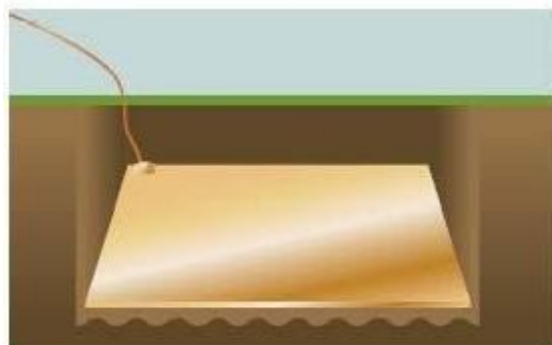
Σε πολλές περιπτώσεις, η μεγάλη αντίσταση του υπεδάφους (βραχώδες, ξηρή άμμος, κλπ.) ή / και η έλλειψη διαθέσιμου χώρου για γείωση δημιουργούν εμπόδια στην κατασκευή και εφαρμογή ενός συστήματος γείωσης. Γι' αυτόν τον λόγο, είναι δυνατόν να συνδυαστούν συστήματα γείωσης με σκοπό την επίτευξη της επιθυμητής αντίστασης γείωσης με συνηθέστερο παράδειγμα αυτό της περιμετρικής γείωσης κατά μήκος της οποίας τοποθετούνται ραβδοειδείς γειωτές. [28]



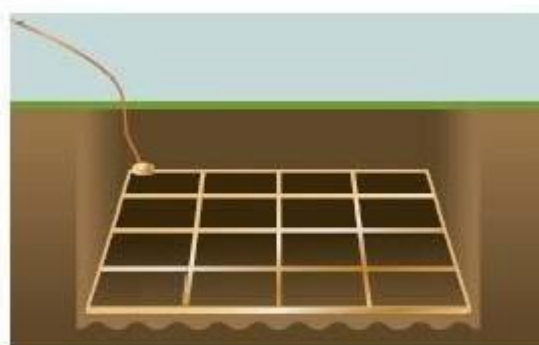
(α) ραβδοειδής γειωτής



(β) πυλυγωνική διάταξη γείωσης



(γ) γειωτής πλάκας



(δ) πλέγμα γείωσης

Εικόνα 80. Διάφοροι γειωτές [43]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο

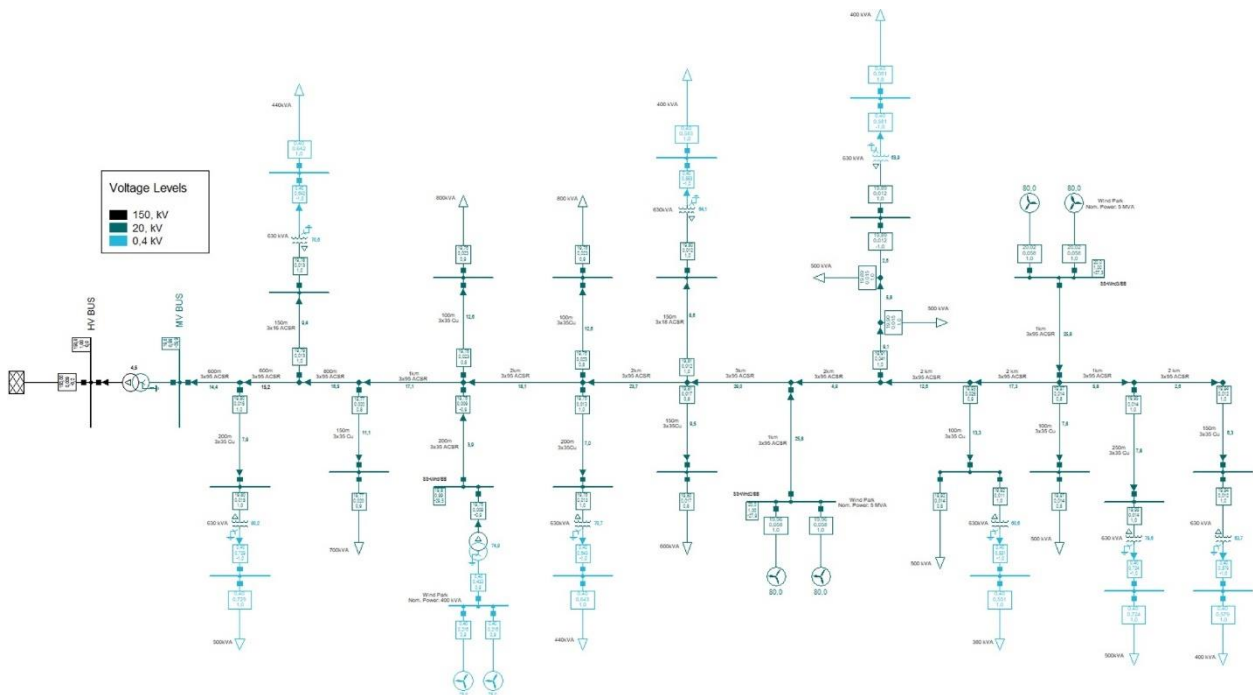
ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΓΕΙΩΣΗΣ ΣΕ ΤΥΠΙΚΟ ΔΙΚΤΥΟ ΔΙΑΝΟΜΗΣ

4.1 Μοντελοποίηση Συστήματος Γείωσης Τυπικού Δικτύου Μέσης Τάσης

4.1.1 Σχεδιασμός Δικτύου MT στο Λογισμικό PowerFactory

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, αρχικά σχεδιάστηκε στο λογισμικό PowerFactory της DIGSILENT ένα τυπικό δίκτυο MT λαμβάνοντας υπόψη ολόκληρο το σχήμα προστασίας του και υπολογίστηκαν τα ρεύματα βραχυκύκλωσης (μονοφασικό) σε αντιπροσωπευτικές θέσεις του δικτύου, έτσι ώστε στη συνέχεια να ακολουθήσει η σχεδίαση του υπό μελέτη συστήματος γείωσης στο module AutoGridPRO της σουίτας λογισμικών SES CDEGS και να αξιολογηθεί η απόδοσή του.

Η κύρια εναέρια γραμμή MT του εξεταζόμενου δικτύου έχει μήκος 20km και σε τμήματα των διακλαδώσεων της που υπάρχει δίκτυο XT υπάρχουν συνδεδεμένες μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής. Επίσης, τα διαφορετικά επίπεδα τάσης της εναέριας γραμμής αποτυπώνονται με διαφορετικά χρώματα για τον πιο εύκολο διαχωρισμό τους. Το σχεδιαζόμενο δίκτυο διανομής είναι ένα 3Φ δίκτυο, με μέγιστη τιμή ρεύματος βραχυκύκλωσης τα 1000A. Τα κύρια χαρακτηριστικά του παρουσιάζονται στους Πίνακες 4, 5 και 6.



Εικόνα 81. Τυπικό δίκτυο MT στο PowerFactory

Characteristics	Maximum Value	Minimum Value
SC Power S_k''	8054 MVA	7794 MVA
SC Current I_k''	31 kA	30 kA
R / X ratio	0,1	0,1
Z_2 / Z_1	1	1
X_2 / X_1	1	1
R_2 / X_0	0,1	0,1

Πίνακας 4. Χαρακτηριστικά Δικτύου YT

Characteristics	Value
Rated Power	50 MVA
Nominal Frequency	50 Hz
HV Side	150 kV
MV Side	21 kV
SC voltage, u_k	20 %
Copper losses	0 kW
SC voltage, u_{k0}	20 %
Vector Group	Dyn1
Star Point R_c	12 Ω

Πίνακας 5. Χαρακτηριστικά Μ/Σ YT/MT

Conductor Type	I_{max} (A)	Single line to ground fault Resistance, R_{1f} (Ω/km)	Single line to ground fault Reactance, 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	285	0.645	0.8

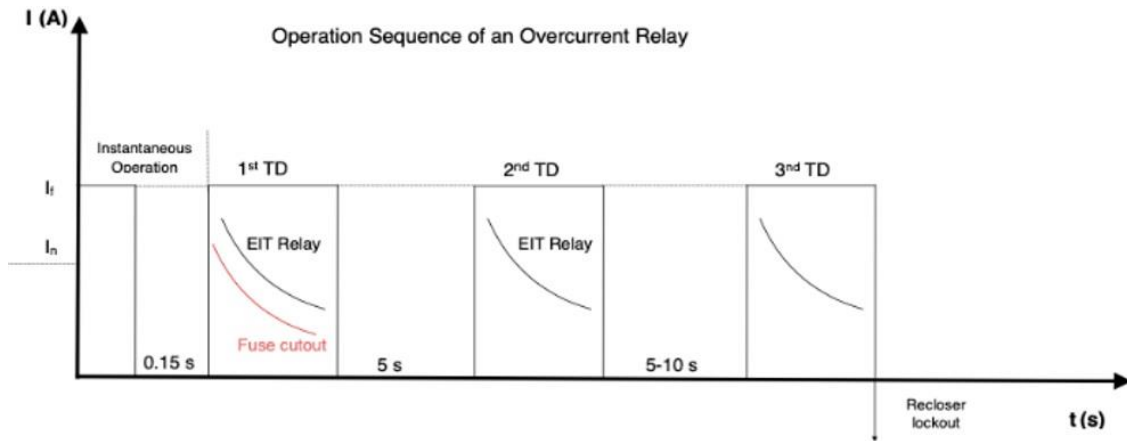
Πίνακας 6. Χαρακτηριστικά εναέριων γραμμών

Το σχήμα προστασίας της γραμμής MT του υπό μελέτη δικτύου αποτελείται από:

- Έναν Μ/Σ έντασης, έναν Η/Ν υπερέντασης και έναν Δ/Ι. Ο Μ/Σ έντασης επιβλέπει την κύρια αναχώρηση, ενώ οι υπόλοιπες διατάξεις είναι σχεδιασμένες να ανιχνεύουν και να απαλείφουν με ασφαλή τρόπο βραχυκυκλώματα που μπορεί να λάβουν χώρα σε διάφορες θέσεις του δικτύου διανομής.
- Ασφαλειοαποζεύκτες βραδείας τήξεως, οι οποίοι χρησιμοποιούνται για την προστασία των διακλαδώσεων που υπάρχουν κατά μήκος της κύριας γραμμής.

Ο Η/Ν υπερέντασης που χρησιμοποιήθηκε είναι ο ABB REF 610 και περιέχει τα στοιχεία 51P, 50P1, 51N, 50N για την προστασία υπερέντασης φάσης και γης.

Όσον αφορά τον Δ/Ι, έγινε ρύθμιση του κύκλου λειτουργίας του για μία ΣΛ και τρεις λειτουργίες με ΧΚ, όπως αποτυπώνεται και στην Εικόνα 82.

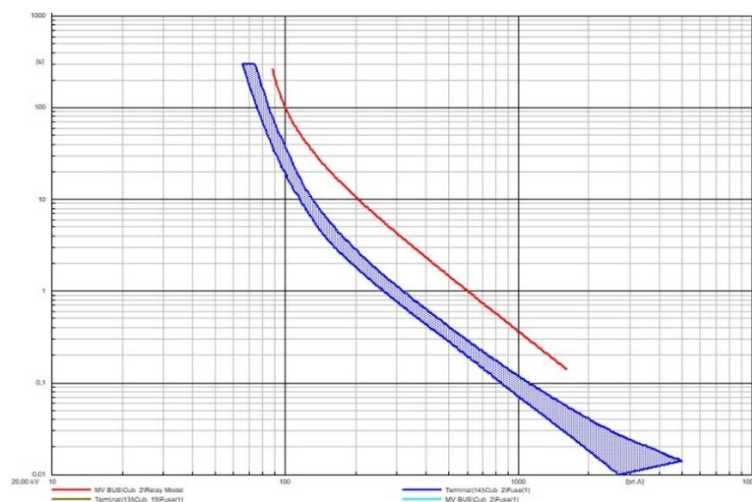


Εικόνα 82. Κύκλος λειτουργίας Δ/Ι

Η ΣΛ του Δ/Ι ορίστηκε στα 0,15s και οι λειτουργίες με ΧΚ έγιναν με καμπύλες εξαιρετικά αντιστρόφου χρόνου (EIT) επιλέγοντας $\alpha=2$, $ΧΚ=0,7$ και ρύθμιση Η/Ν στα 80Α.

$$t = \frac{k \cdot B}{\left(\frac{I}{I_s}\right)^\alpha - 1}$$

Οι ασφάλειες που επιλέχθηκαν για την προστασία των διακλαδώσεων είναι ονομαστικής τιμής 30Α και για να επιτυγχάνεται η επιθυμητή επιλογική συνεργασία τους με τον Δ/Ι του κορμού οι σχετικές καμπύλες ρεύματος – χρόνου έχουν απόσταση τουλάχιστον 0,4s. Οι χαρακτηριστικές των δύο μέσων προστασίας αποτυπώνονται στην Εικόνα 83.



Εικόνα 83. Επιλογική συνεργασία Δ/Ι και ασφαλειοαποζευκτών

4.1.2 Σχεδιασμός Συστήματος Γείωσης στο Λογισμικό AutoGridPRO

Το σύστημα γείωσης που μελετήθηκε είναι κατασκευασμένο από 35mm² Cu και αποτελείται από δύο επιμέρους διατάξεις. Η πρώτη αφορά πλέγμα γείωσης τετράγωνου σχήματος διαστάσεων 2x2m με διχτυωτό σχέδιο, το οποίο τοποθετήθηκε 0,3m κάτω από την επιφάνεια του εδάφους. Η δεύτερη διάταξη αποτελείται από έναν οριζόντιο αγωγό μήκους 10m τοποθετημένο σε βάθος 1m κάτω από το έδαφος, που συνδέεται μέσω χαλκού με το τετράγωνο πλέγμα και αποτελείται από 5 κάθετους γειωτές ράβδους μήκους 2,5m ο καθένας.

Για την ανάλυση περισσότερων αποτελεσμάτων με σκοπό την εξαγωγή πιο έγκυρων συμπερασμάτων κατασκευάστηκαν διάφορες παραλλαγές του παραπάνω συστήματος γείωσης και αξιολογήθηκε η επίδοση του καθενός από αυτά συγκριτικά με τα υπόλοιπα.

Σε μονοστρωματικό έδαφος εξετάστηκαν οι παρακάτω περιπτώσεις συστημάτων γείωσης που αποτελούνται από:

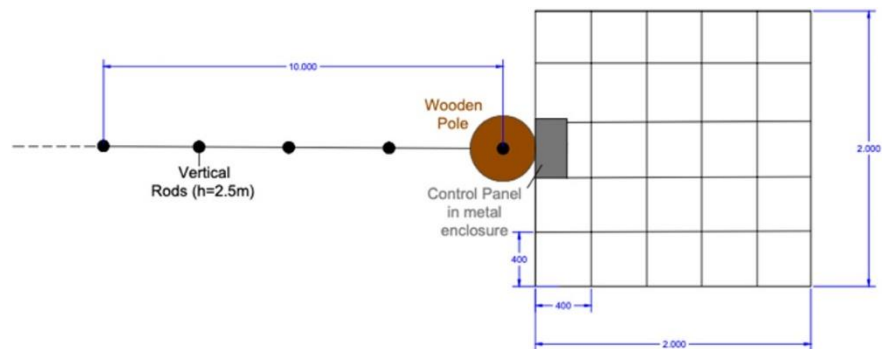
- Τετράγωνο διχτυωτό πλέγμα (11x11) διαστάσεων 2x2m σε βάθος 0,3m συνδεδεμένο με οριζόντιο αγωγό 10m σε βάθος 1,3m στον οποίο συνδέονται 5 κάθετοι γειωτές ράβδους με μήκος 2,5m ο καθένας.
- Τετράγωνο διχτυωτό πλέγμα (11x11) διαστάσεων 2x2m σε βάθος 0,3m συνδεδεμένο με οριζόντιο αγωγό 10m σε βάθος 1m στον οποίο συνδέονται 5 κάθετοι γειωτές ράβδους με μήκος 2,5m ο καθένας (**Grid c**).
- Τετράγωνο διχτυωτό πλέγμα (11x11) διαστάσεων 2x2m σε βάθος 0,3m συνδεδεμένο με οριζόντιο αγωγό 10m σε βάθος 0,7m στον οποίο συνδέονται 5 κάθετοι γειωτές ράβδους με μήκος 2,5m ο καθένας.
- Τετράγωνο διχτυωτό πλέγμα (8x8) διαστάσεων 2x2m σε βάθος 0,3m συνδεδεμένο με οριζόντιο αγωγό 10m σε βάθος 1m στον οποίο συνδέονται 5 κάθετοι γειωτές ράβδους με μήκος 2,5m ο καθένας (**Grid b**).
- Τετράγωνο διχτυωτό πλέγμα (8x8) διαστάσεων 2x2m σε βάθος 0,3m συνδεδεμένο με οριζόντιο αγωγό 10m σε βάθος 0,7m στον οποίο συνδέονται 5 κάθετοι γειωτές ράβδους με μήκος 2,5m ο καθένας.
- Τετράγωνο διχτυωτό πλέγμα (6x6) διαστάσεων 2x2m σε βάθος 0,3m συνδεδεμένο με οριζόντιο αγωγό 10m σε βάθος 1m στον οποίο συνδέονται 5 κάθετοι γειωτές ράβδους με μήκος 2,5m ο καθένας (**Grid a**).
- Τετράγωνο διχτυωτό πλέγμα (6x6) διαστάσεων 2x2m σε βάθος 0,3m συνδεδεμένο με οριζόντιο αγωγό 10m σε βάθος 0,7m στον οποίο συνδέονται 5 κάθετοι γειωτές ράβδους με μήκος 2,5m ο καθένας.

Σε διστρωματικό έδαφος εξετάστηκε η παρακάτω περίπτωση συστήματος γείωσης που αποτελείται από:

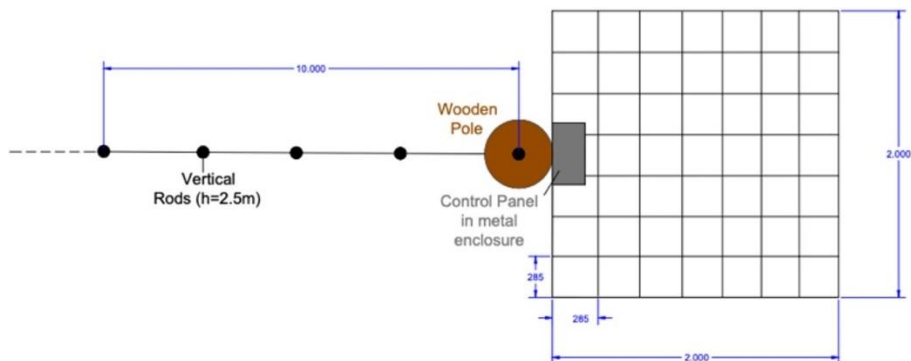
- Τετράγωνο διχτυωτό πλέγμα (11x11) διαστάσεων 2x2m σε βάθος 0,3m συνδεδεμένο με οριζόντιο αγωγό 10m σε βάθος 1m στον οποίο συνδέονται 5 κάθετοι γειωτές ράβδους με μήκος 2,5m ο καθένας.

Σε όλες τις προαναφερθείσες παραλλαγές, για τον υπολογισμό και την αξιολόγηση των αναπτυσσόμενων τάσεων επαφής και βηματικών τάσεων, επιλέχθηκε ευρύ φάσμα ειδικής αντίστασης ($15-1000\Omega\text{m}$ για μονοστρωματικά και $100-2000\Omega\text{m}$ για διστρωματικά εδάφη). Επιπροσθέτως, οι αναπτυσσόμενες τάσεις σε κάθε παραλλαγή προσομοιώθηκαν με χρήση ή όχι προστατευτικού εξοπλισμού (παπούτσια/γάντια) και τοποθέτηση στρώματος χαλκιού στο έδαφος πάνω από το σύστημα γείωσης. Πιο συγκεκριμένα:

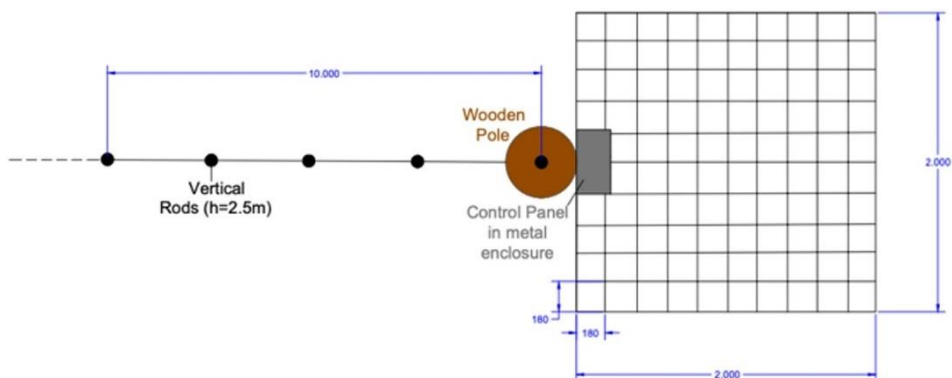
- Χωρίς προστατευτικό εξοπλισμό
- Με ειδικό μονωτικό εξοπλισμό με $\rho=1000\Omega\text{m}$
- Με ειδικό μονωτικό εξοπλισμό με $\rho=2000\Omega\text{m}$
- Με τοποθέτηση στρώματος χαλκιού με $\rho=2500\Omega\text{m}$



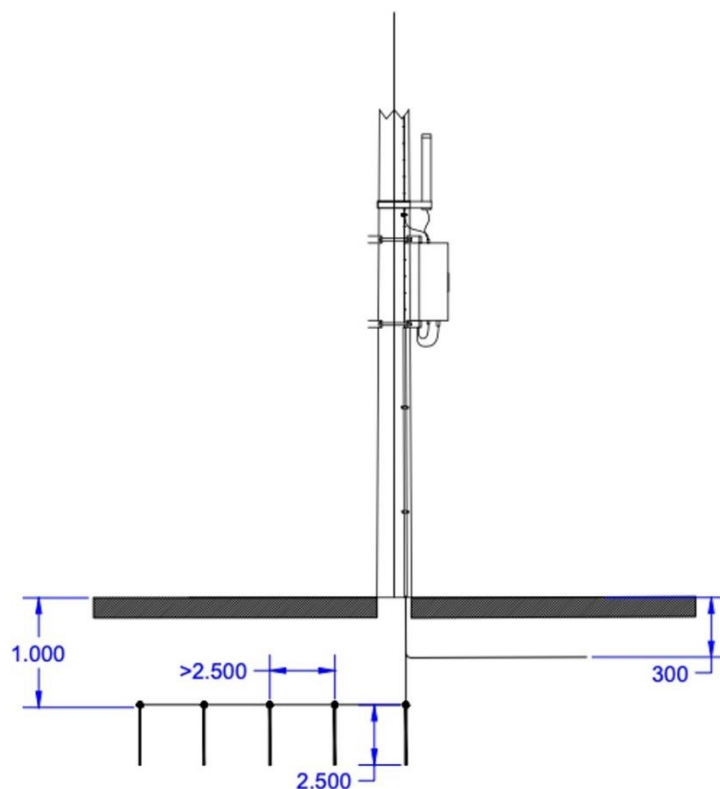
Εικόνα 84. Κάτοψη συστήματος γείωσης με πλέγμα 6x6 (Grid a)



Εικόνα 85. Κάτοψη συστήματος γείωσης με πλέγμα 8x8 (Grid b)



Εικόνα 86. Κάτοψη συστήματος γείωσης με πλέγμα 11x11 (Grid c)



Εικόνα 87. Πλάγια όψη συστήματος γείωσης (Grid a/b/c)

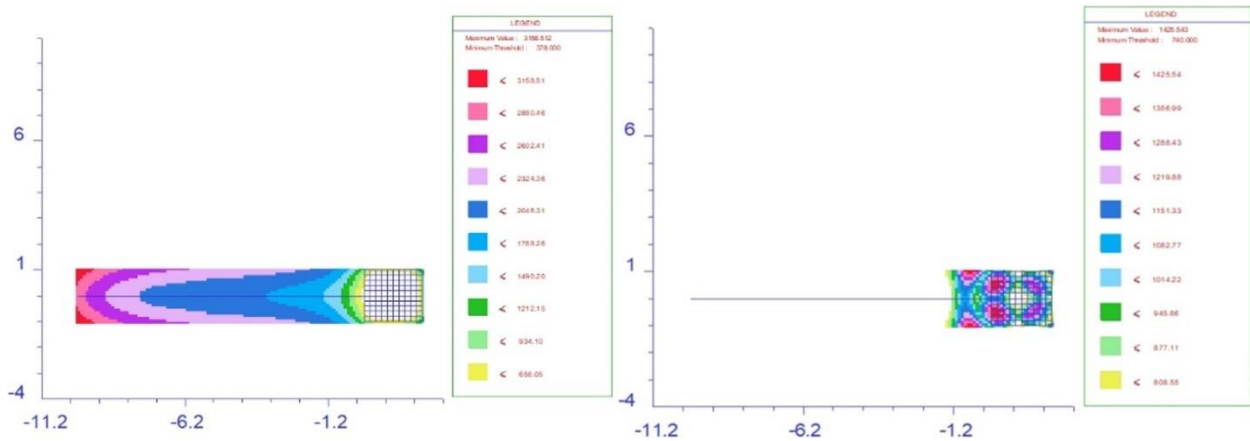
4.2 Αποτελέσματα Προσομοίωσης Συστήματος Γείωσης

Τα βήματα που ακολουθήθηκαν μέχρι την εξαγωγή των αποτελεσμάτων που αφορούν τις αναπτυσσόμενες τάσεις επαφής και βηματικές τάσεις, αλλά και τα υπόλοιπα προς ανάλυση στοιχεία για κάθε σύστημα γείωσης είναι τα εξής:

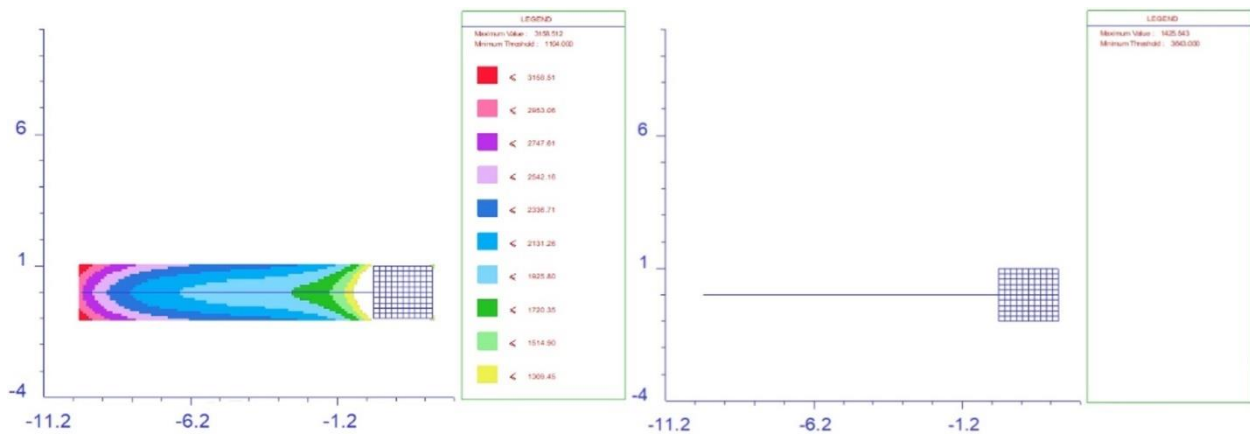
- Έγινε μελέτη για μονοστρωματικό έδαφος με ένα μεγάλο εύρος ειδικής αντίστασης γείωσης, ρ ($15\Omega\text{m}$ έως $1000\Omega\text{m}$). Αντίστοιχα, έγινε μελέτη για διστρωματικό έδαφος με μεγάλα εύρη ειδικής αντίστασης εδάφους, ρ_1 ($100\Omega\text{m}$ έως $1000\Omega\text{m}$) για τέσσερα διαφορετικά βάθη άνω στρώματος $h_1=0,75\text{m}-1\text{m}-3\text{m}-5\text{m}$ και ρ_2 ($100\Omega\text{m}$ έως $2000\Omega\text{m}$).
- Υπολογίστηκε η συνολική αντίσταση του συστήματος γείωσης για κάθε διαφορετική ειδική αντίσταση εδάφους ρ ή για κάθε διαφορετικό συνδυασμό $\rho_1 - \rho_2$.
- Έγινε προσδιορισμός και καταγραφή των ασφαλών ορίων τάσης επαφής και βηματικών τάσεων.
- Έγινε μελέτη για μονοφασικό (1Φ) βραχυκύκλωμα ως προς γη, σε τρία διαφορετικά σημεία της γραμμής MT. Πιο συγκεκριμένα, έξω από τον υποσταθμό ΥΤ/MT ($150/20\text{kV}$), στο μέσο της γραμμής καθώς και στο τέλος αυτής.
- Όσον αφορά τον χρόνο εκκαθάρισης του σφάλματος, εξετάστηκε η στιγμιαία λειτουργία του μέσου προστασίας στην αρχή της εναέριας γραμμής MT (Δ/I με κύκλο λειτουργίας προστασίας), ήτοι για χρόνο εκκαθάρισης 0.15s .
- Τέλος, έγινε προσδιορισμός των τάσεων επαφής και των βηματικών τάσεων σε σχέση με τα ασφαλή όρια αυτών.

4.2.1 Μονοστρωματικό Έδαφος

Από τις παρακάτω εικόνες, στις οποίες παρουσιάζονται οι αναπτυσσόμενες τάσεις επαφής και βηματικές τάσεις σε μονοστρωματικά εδάφη με ή χωρίς την προσθήκη στρώματος χαλκιού, γίνεται κατανοητό ότι όταν δεν χρησιμοποιηθεί ειδικός μονωτικός εξοπλισμός ή δεν τοποθετηθεί χαλίκι το σύστημα γείωσης προσφέρει επαρκή προστασία έναντι τάσεων επαφής, με εξαίρεση τις άκρες του πλέγματος, ενώ αντιθέτως δεν παρέχει καθόλου προστασία έναντι βηματικών τάσεων. Με την τοποθέτηση όμως χαλκιού οι αναπτυσσόμενες τάσεις ελαχιστοποιούνται.



Εικόνα 88. Αναπτυσσόμενες τάσεις επαφής (αριστερά) και βηματικές τάσεις (δεξιά) χωρίς ειδικό μονωτικό εξοπλισμό ή στρώμα χαλκιού ($\rho=300\Omega m$, $I_f=323A$)



Εικόνα 89. Αναπτυσσόμενες τάσεις επαφής (αριστερά) και βηματικές τάσεις (δεξιά) με τοποθέτηση στρώματος χαλκιού με $\rho=2500\Omega m$ ($\rho=300\Omega m$, $I_f=323A$)

Στους παρακάτω πίνακες αποτυπώνονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν για το **Grid c**. Με πράσινο χρώμα παρουσιάζονται τα επίπεδα των τάσεων επαφής και βηματικών τάσεων που βρίσκονται σε ασφαλή επίπεδα για το ανθρώπινο δυναμικό, ενώ με κόκκινο χρώμα αυτές που υπερβαίνουν τις μέγιστες επιτρεπτές τιμές. Εύκολα γίνεται αντιληπτό, ότι μόνο με τη χρήση μονωτικού εξοπλισμού με $\rho>2000\Omega m$ ή την τοποθέτηση χαλκιού η εγκατάσταση θεωρείται ασφαλής.

Αξίζει να αναφερθεί, ότι μερικές από τις παραλλαγές που εξετάστηκαν ήταν μη ασφαλείς ακόμα και με ειδικό μονωτικό εξοπλισμό με $\rho=2000\Omega m$, οπότε σε κάθε περίπτωση συστήνεται η εγκατάσταση του συστήματος γείωσης να συνοδεύεται από την επίστρωση χαλκιού.

Soil Resistivity	Grounding Resistance	Touch Voltage Threshold	Step Voltage Threshold	Substation, L=0km			L=10km			L=20km		
				ρ (Ωm)	R (Ω)	V_{t-safe} (V)	V_{s-safe} (V)	I_f (A)	V_t (V)	V_s (V)	I_f (A)	V_t (V)
15	0,99	263,6	281,7	873	68,5	192,7	638	50,1	140,8	470	36,9	103,7
50	3,30	277,7	338,0	743	194,3	546,5	573	149,9	421,5	438	114,6	322,2
100	6,61	297,8	418,5	612	320,1	900,4	498	260,5	732,6	398	208,2	585,5
150	9,91	317,9	499,0	520	408,0	1147,5	440	345,2	971,0	363	284,8	801,0
200	13,22	338,0	579,5	453	473,9	1332,9	393	411,1	1156,3	333	348,4	979,8
250	16,52	358,1	660,0	400	523,1	1471,2	355	464,2	1305,7	307	401,5	1129,1
300	19,83	378,3	740,4	359	563,3	1584,4	323	506,9	1425,5	284	445,7	1253,4
350	23,13	398,4	820,9	325	595,0	1673,4	296	541,9	1524,1	264	483,3	1359,3
400	26,44	418,5	901,4	297	621,4	1747,7	273	571,2	1606,5	247	516,8	1453,5
450	29,74	438,6	981,9	274	644,9	1813,9	254	597,9	1681,5	231	543,7	1529,3
500	33,05	458,8	1062,4	254	664,3	1868,4	237	619,8	1743,3	218	570,1	1603,6
550	36,35	478,9	1142,9	236	678,9	1909,6	222	638,7	1796,3	205	589,8	1658,7
600	39,65	499,0	1223,3	221	693,6	1950,7	209	655,9	1844,8	194	608,8	1712,4
700	46,26	539,2	1384,3	196	717,6	2018,4	187	684,7	1925,7	176	644,4	1812,5
800	52,87	579,5	1545,3	176	736,5	2071,4	169	707,2	1969,0	160	669,5	1883,1
900	59,48	619,7	1706,2	160	753,2	2118,5	154	725,0	2039,0	147	692,0	1946,3
1000	66,09	660,0	1867,2	146	763,7	2147,9	142	742,8	2089,0	136	711,4	2000,8

Πίνακας 7. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα Grid c χωρίς ειδικό μονωτικό εξοπλισμό

Soil Resistivity	Grounding Resistance	Touch Voltage Threshold	Step Voltage Threshold	Substation, L=0km			L=10km			L=20km		
				ρ (Ωm)	R (Ω)	V_{t-safe} (V)	V_{s-safe} (V)	I_f (A)	V_t (V)	V_s (V)	I_f (A)	V_t (V)
15	0,99	392,4	796,8	873	68,5	192,7	638	50,1	140,8	470	36,9	103,7
50	3,30	406,4	853,1	743	194,3	546,5	573	149,9	421,5	438	114,6	322,2
100	6,61	426,6	933,6	612	320,1	900,4	498	260,5	732,6	398	208,2	585,5
150	9,91	446,7	1014,1	520	408,0	1147,5	440	345,2	971,0	363	284,8	801,0
200	13,22	466,8	1094,6	453	473,9	1332,9	393	411,1	1156,3	333	348,4	979,8
250	16,52	486,9	1175,0	400	523,1	1471,2	355	464,2	1305,7	307	401,5	1129,1
300	19,83	507,0	1255,5	359	563,3	1584,4	323	506,9	1425,5	284	445,7	1253,4
350	23,13	527,2	1336,0	325	595,0	1673,4	296	541,9	1524,1	264	483,3	1359,3
400	26,44	547,3	1416,5	297	621,4	1747,7	273	571,2	1606,5	247	516,8	1453,5
450	29,74	567,4	1497,0	274	644,9	1813,9	254	597,9	1681,5	231	543,7	1529,3
500	33,05	587,5	1577,5	254	664,3	1868,4	237	619,8	1743,3	218	570,1	1603,6
550	36,35	607,6	1657,9	236	678,9	1909,6	222	638,7	1796,3	205	589,8	1658,7
600	39,65	627,8	1738,4	221	693,6	1950,7	209	655,9	1844,8	194	608,8	1712,4
700	46,26	668,0	1899,4	196	717,6	2018,4	187	684,7	1925,7	176	644,4	1812,5
800	52,87	708,2	2060,4	176	736,5	2071,4	169	707,2	1969,0	160	669,5	1883,1
900	59,48	748,5	2221,3	160	753,2	2118,5	154	725,0	2039,0	147	692,0	1946,3
1000	66,09	788,7	2382,3	146	763,7	2147,9	142	742,8	2089,0	136	711,4	2000,8

Πίνακας 8. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα Grid c με ειδικό μονωτικό εξοπλισμό με $\rho=1000\Omega m$

Soil Resistivity	Grounding Resistance	Touch Voltage Threshold	Step Voltage Threshold	Substation, L=0km			L=10km			L=20km		
				ρ (Ωm)	R (Ω)	$V_{t\text{-safe}}$ (V)	$V_{s\text{-safe}}$ (V)	I_f (A)	V_t (V)	V_s (V)	I_f (A)	V_t (V)
15	0,99	521,1	1311,9	873	68,5	192,7	638	50,1	140,8	470	36,9	103,7
50	3,30	535,2	1368,2	743	194,3	546,5	573	149,9	421,5	438	114,6	322,2
100	6,61	555,3	1448,7	612	320,1	900,4	498	260,5	732,6	398	208,2	585,5
150	9,91	575,5	1529,2	520	408,0	1147,5	440	345,2	971,0	363	284,8	801,0
200	13,22	595,6	1609,7	453	473,9	1332,9	393	411,1	1156,3	333	348,4	979,8
250	16,52	615,7	1690,1	400	523,1	1471,2	355	464,2	1305,7	307	401,5	1129,1
300	19,83	635,8	1770,6	359	563,3	1584,4	323	506,9	1425,5	284	445,7	1253,4
350	23,13	655,9	1851,1	325	595,0	1673,4	296	541,9	1524,1	264	483,3	1359,3
400	26,44	676,1	1931,6	297	621,4	1747,7	273	571,2	1606,5	247	516,8	1453,5
450	29,74	696,2	2012,1	274	644,9	1813,9	254	597,9	1681,5	231	543,7	1529,3
500	33,05	716,3	2092,6	254	664,3	1868,4	237	619,8	1743,3	218	570,1	1603,6
550	36,35	736,4	2173,0	236	678,9	1909,6	222	638,7	1796,3	205	589,8	1658,7
600	39,65	756,5	2253,5	221	693,6	1950,7	209	655,9	1844,8	194	608,8	1712,4
700	46,26	796,8	2414,5	196	717,6	2018,4	187	684,7	1925,7	176	644,4	1812,5
800	52,87	837,0	2575,5	176	736,5	2071,4	169	707,2	1969,0	160	669,5	1883,1
900	59,48	877,3	2736,4	160	753,2	2118,5	154	725,0	2039,0	147	692,0	1946,3
1000	66,09	917,5	2897,4	146	763,7	2147,9	142	742,8	2089,0	136	711,4	2000,8

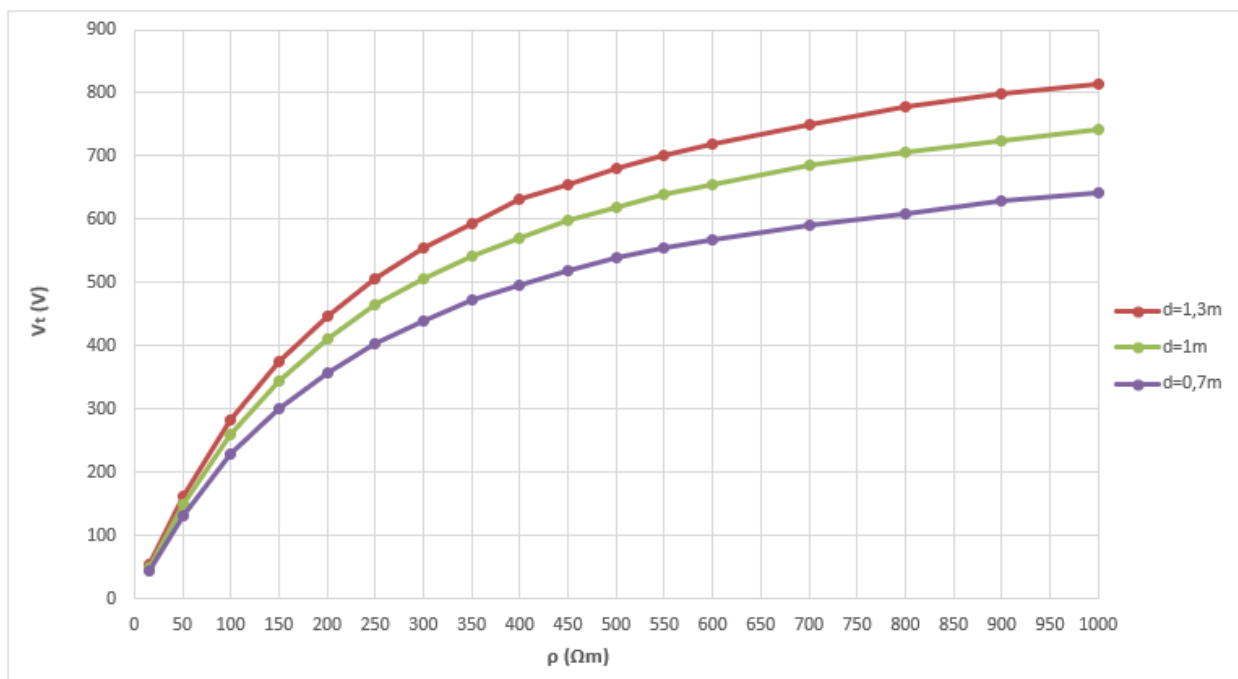
Πίνακας 9. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα Grid c με ειδικό μονωτικό εξοπλισμό με $\rho=2000\Omega\text{m}$

Soil Resistivity	Grounding Resistance	Touch Voltage Threshold	Step Voltage Threshold	Substation, L=0km			L=10km			L=20km		
				ρ (Ωm)	R (Ω)	$V_{t\text{-safe}}$ (V)	$V_{s\text{-safe}}$ (V)	I_f (A)	V_t (V)	V_s (V)	I_f (A)	V_t (V)
15	0,99	1074,8	3526,5	873	68,5	192,7	638	50,1	140,8	470	36,9	103,7
50	3,30	1078,6	3541,6	743	194,3	546,5	573	149,9	421,5	438	114,6	322,2
100	6,61	1083,8	3562,7	612	320,1	900,4	498	260,5	732,6	398	208,2	585,5
150	9,91	1089,0	3583,5	520	408,0	1147,5	440	345,2	971,0	363	284,8	801,0
200	13,22	1094,1	3603,9	453	473,9	1332,9	393	411,1	1156,3	333	348,4	979,8
250	16,52	1099,1	3623,9	400	523,1	1471,2	355	464,2	1305,7	307	401,5	1129,1
300	19,83	1104,1	3643,6	359	563,3	1584,4	323	506,9	1425,5	284	445,7	1253,4
350	23,13	1108,9	3662,9	325	595,0	1673,4	296	541,9	1524,1	264	483,3	1359,3
400	26,44	1113,6	3681,9	297	621,4	1747,7	273	571,2	1606,5	247	516,8	1453,5
450	29,74	1118,3	3700,6	274	644,9	1813,9	254	597,9	1681,5	231	543,7	1529,3
500	33,05	1122,9	3719,0	254	664,3	1868,4	237	619,8	1743,3	218	570,1	1603,6
550	36,35	1127,4	3737,1	236	678,9	1909,6	222	638,7	1796,3	205	589,8	1658,7
600	39,65	1131,9	3754,9	221	693,6	1950,7	209	655,9	1844,8	194	608,8	1712,4
700	46,26	1140,6	3789,7	196	717,6	2018,4	187	684,7	1925,7	176	644,4	1812,5
800	52,87	1149,0	3823,5	176	736,5	2071,4	169	707,2	1969,0	160	669,5	1883,1
900	59,48	1157,2	3856,2	160	753,2	2118,5	154	725,0	2039,0	147	692,0	1946,3
1000	66,09	1165,2	3888,1	146	763,7	2147,9	142	742,8	2089,0	136	711,4	2000,8

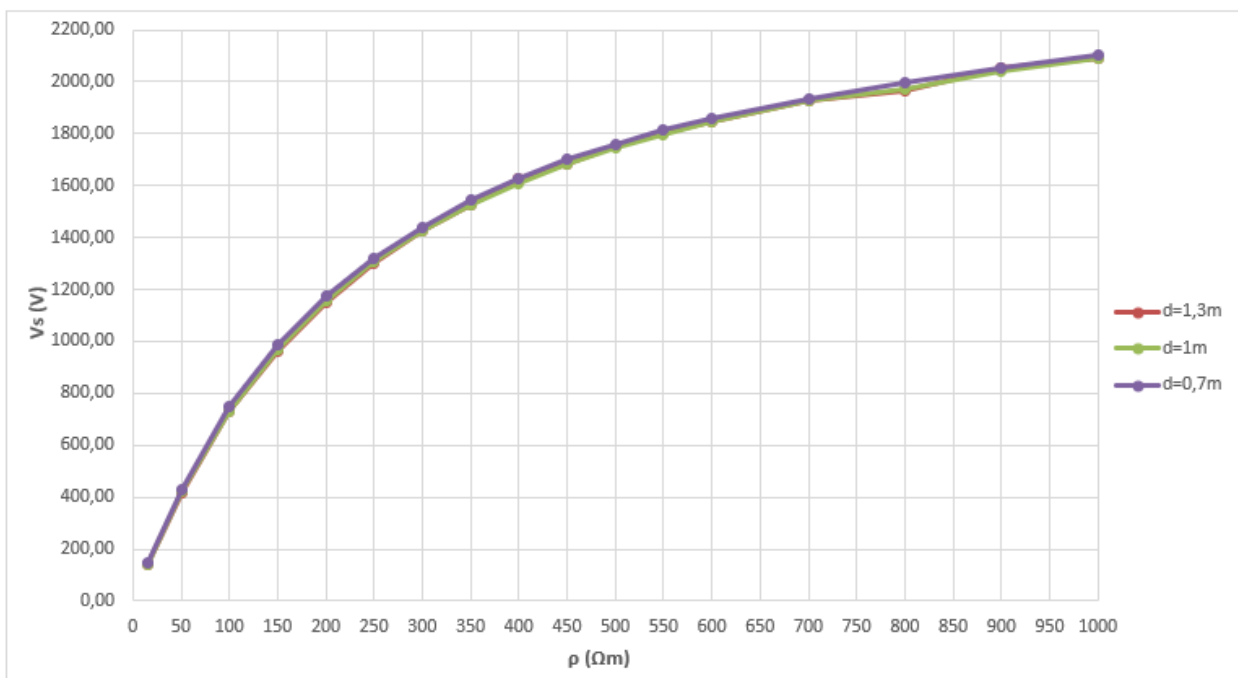
Πίνακας 10. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα Grid c με τοποθέτηση στρώματος χαλκιού με $\rho=2500\Omega\text{m}$

Ακολούθως, παρουσιάζονται μερικά διαγράμματα από τα οποία μπορούν να βγουν χρήσιμα συμπεράσματα σχετικά με τις αναπτυσσόμενες τάσεις επαφής και βηματικές τάσεις, το ρεύμα βραχυκύκλωσης (έξω από τον Υ/Σ, στο μέσο και στο άκρο της γραμμής) και τη συνολική αντίσταση γείωσης του συστήματος.

Από τα παρακάτω διαγράμματα γίνεται κατανοητό ότι το βάθος του οριζόντιου αγωγού επηρεάζει τις αναπτυσσόμενες τάσεις επαφής και πιο συγκεκριμένα, όταν ο αγωγός τοποθετηθεί σε μεγαλύτερο βάθος οι τάσεις επαφής έχουν υψηλότερες τιμές. Αντίθετα, οι τιμές των βηματικών τάσεων παραμένουν πρακτικά αμετάβλητες.

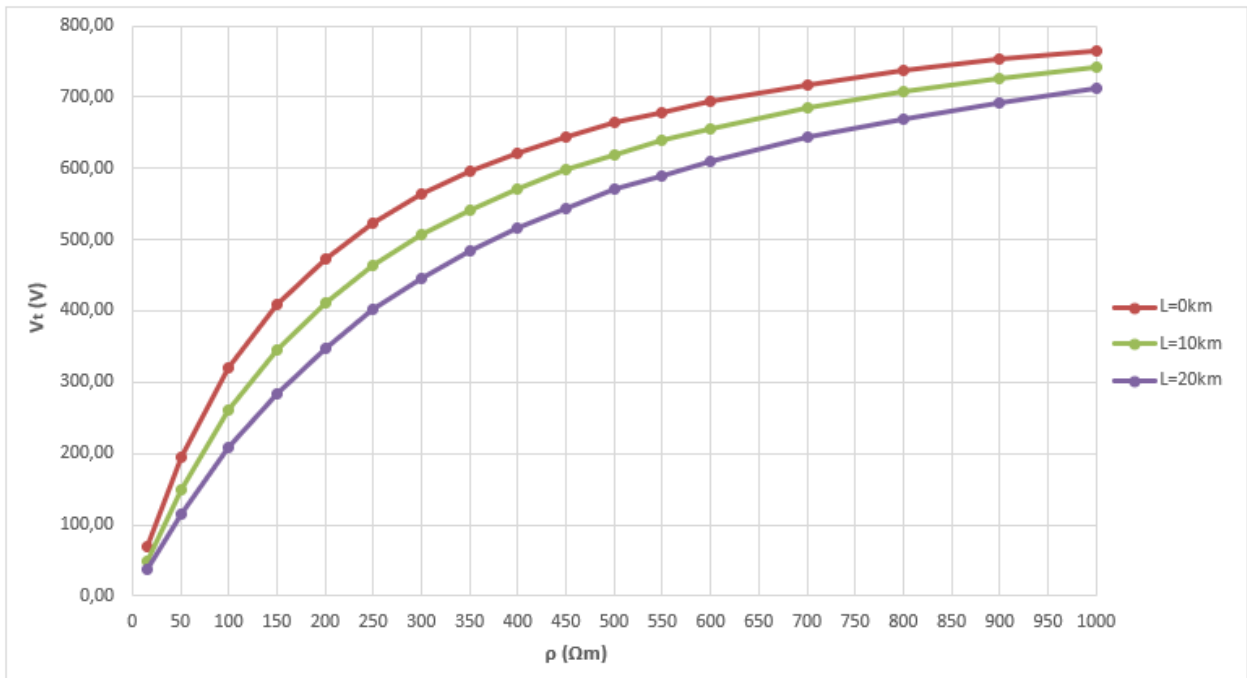


Διάγραμμα 1. $V_t - \rho$ για μεταβαλλόμενο βάθος του οριζόντιου αγωγού γείωσης

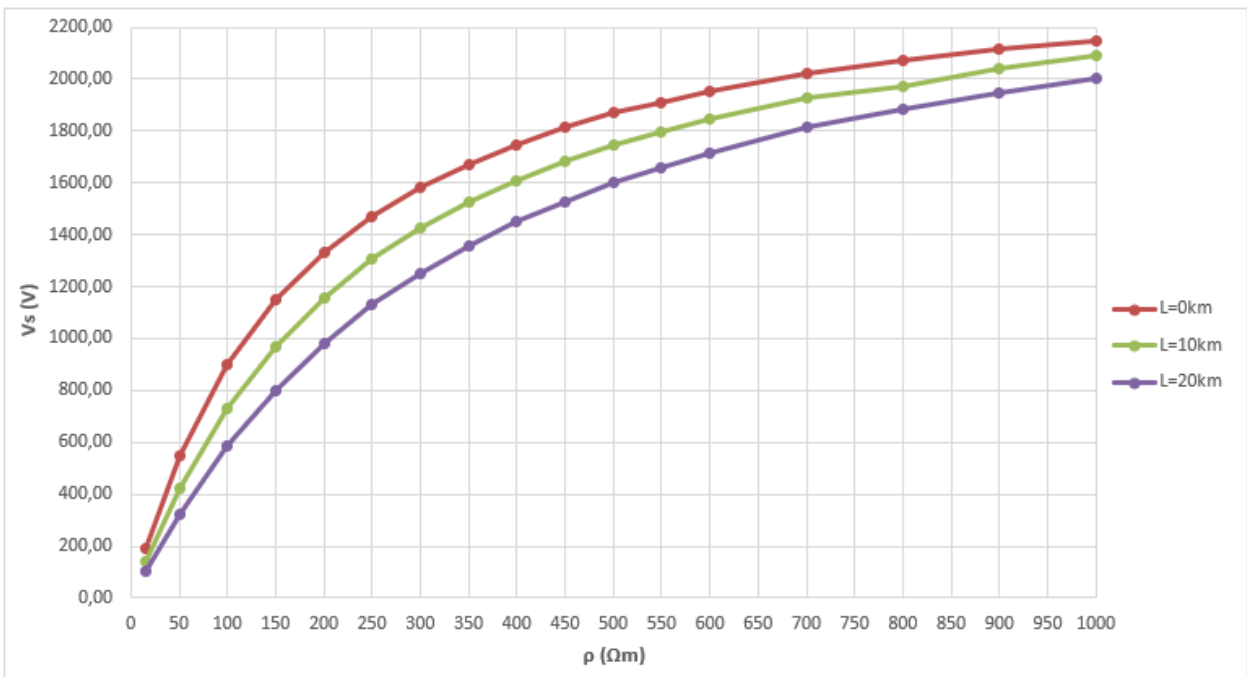


Διάγραμμα 2. $V_s - \rho$ για μεταβαλλόμενο βάθος του οριζόντιου αγωγού γείωσης

Συναρτήσει τώρα του σημείου εμφάνισης του ρεύματος βραχυκύκλωσης στη γραμμή, παρατηρείται ότι τόσο οι τάσεις επαφής όσο και βηματικές τάσεις εμφανίζουν υψηλότερες τιμές όταν το σφάλμα συμβεί πιο κοντά στον υποσταθμό, κάτι το οποίο είναι λογικό.

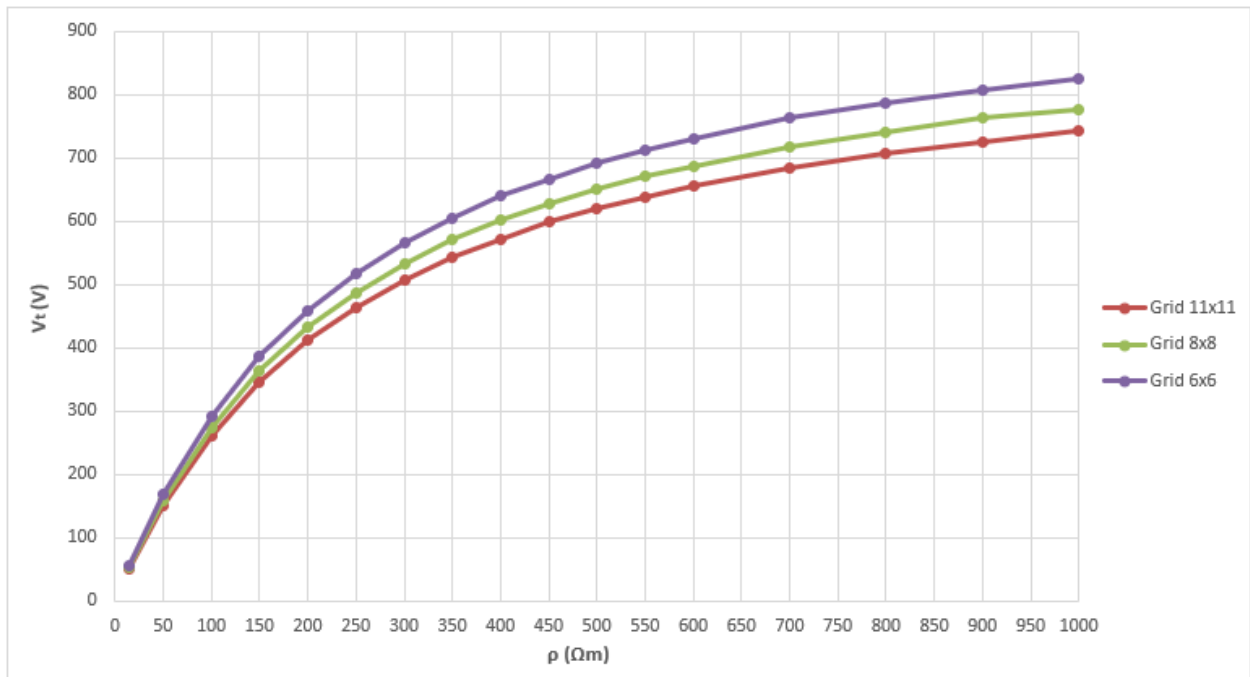


Διάγραμμα 3. $V_t - \rho$ ανάλογα με το σημείο εμφάνισης του σφάλματος

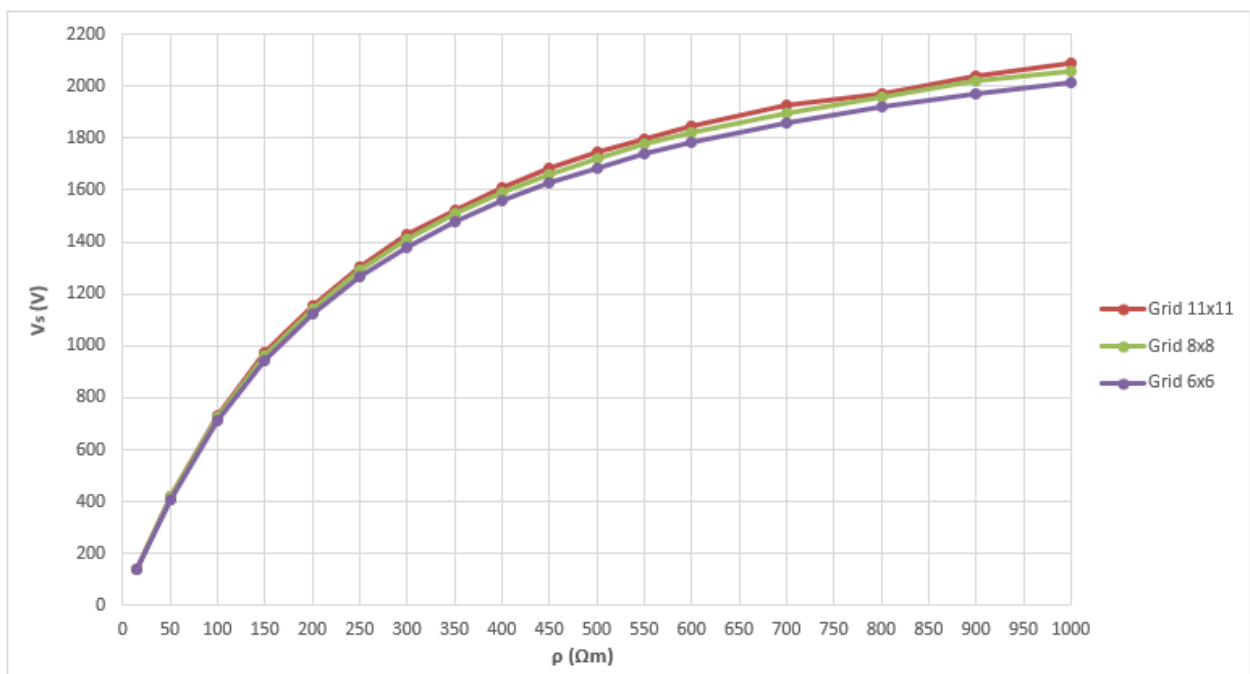


Διάγραμμα 4. $V_s - \rho$ ανάλογα με το σημείο εμφάνισης του σφάλματος

Επίσης, η διάταξη του πλέγματος γείωσης επηρεάζει με αντίστροφο τρόπο τις εμφανιζόμενες τάσεις. Πιο συγκεκριμένα, όσο πιο πυκνό το πλέγμα τόσο μικρότερη είναι η αναπτυσσόμενη τάση επαφής και τόσο μεγαλύτερη η βηματική τάση. Η διάταξη του πλέγματος επηρεάζει πιο έντονα την τάση επαφής συγκριτικά με τη βηματική τάση.

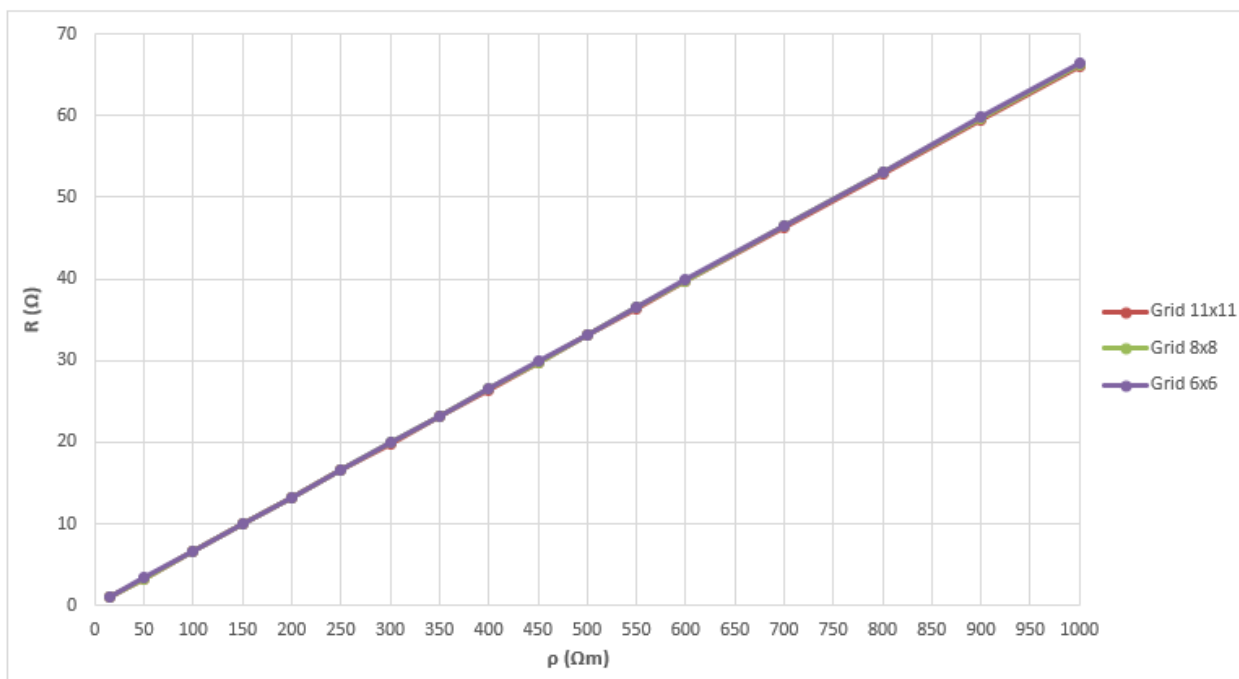


Διάγραμμα 5. $V_t - \rho$ ανάλογα με τη διάταξη του πλέγματος του συστήματος γείωσης

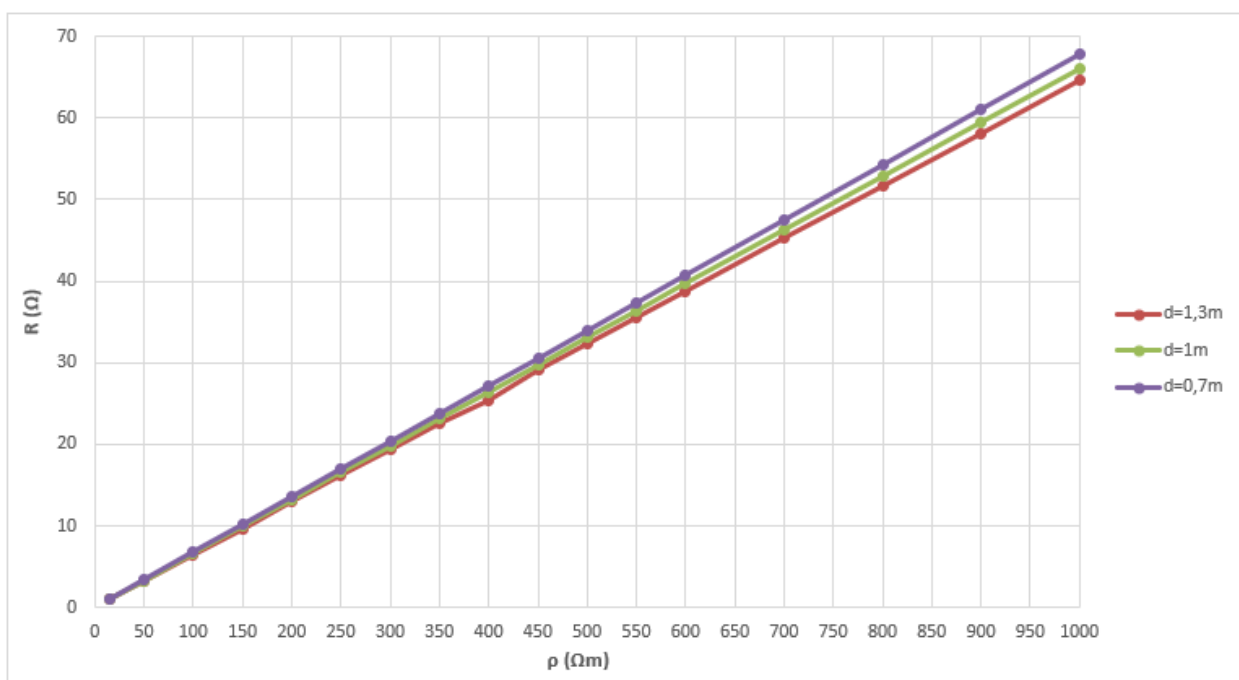


Διάγραμμα 6. $V_s - \rho$ ανάλογα με τη διάταξη του πλέγματος του συστήματος γείωσης

Από τα ακόλουθα διαγράμματα γίνεται αντιληπτό ότι σε ομοιογενή εδάφη υπάρχει γραμμική συσχέτιση της συνολικής αντίστασης γείωσης του συστήματος γείωσης και της ειδικής αντίστασης του εδάφους, ανεξάρτητα από τη διάταξη του πλέγματος ή το βάθος του οριζόντιου αγωγού. Πιο αναλυτικά, η συνολική αντίσταση γείωσης παραμένει ουσιαστικά αμετάβλητη και δεν επηρεάζεται από τις όποιες αλλαγές στη διάταξη του πλέγματος, ενώ παρουσιάζει μικρή μείωση καθώς αυξάνεται το βάθος τοποθέτησης του οριζόντιου αγωγού.

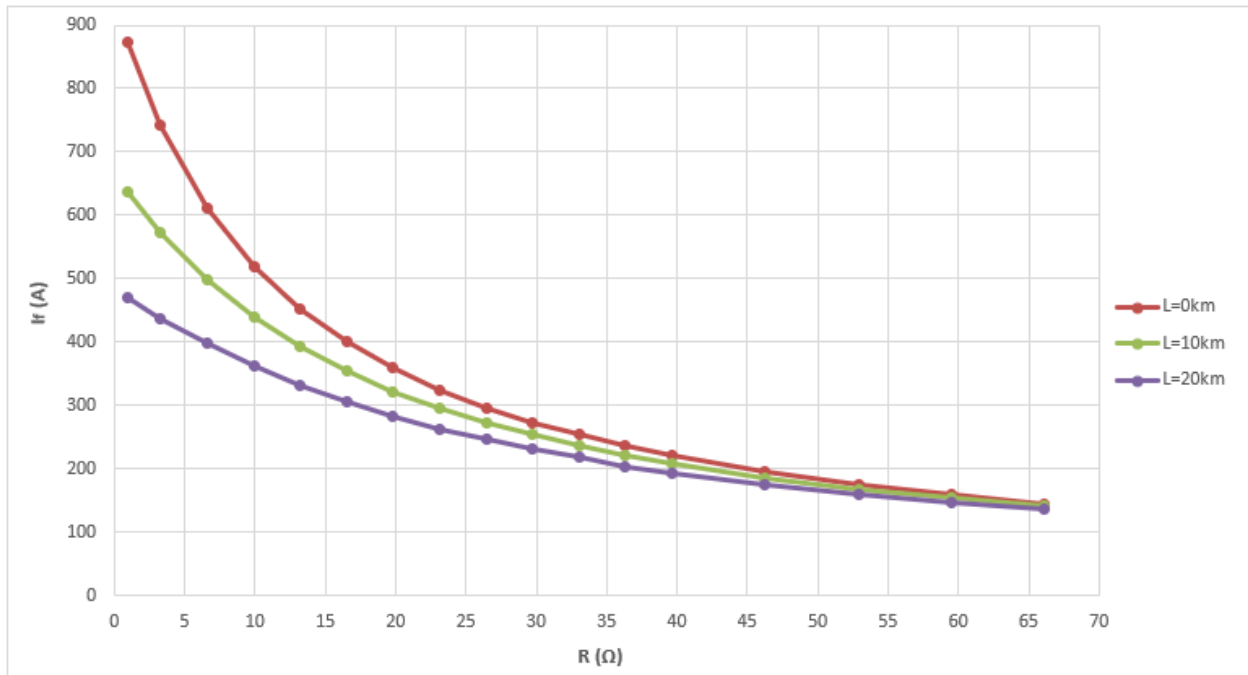


Διάγραμμα 7. $R - \rho$ ανάλογα με τη διάταξη του πλέγματος του συστήματος γείωσης



Διάγραμμα 8. $R - \rho$ για μεταβαλλόμενο βάθος του οριζόντιου αγωγού γείωσης

Όσον αφορά το ρεύμα βραχυκύκλωσης του μονοφασικού σφάλματος ως προς τη γη, αυτό όπως είναι φυσιολογικό αυξάνεται όταν το σφάλμα εμφανίζεται κοντά στον υποσταθμό, ενώ επίσης τείνει ασυμπτωτικά σε μία τιμή καθώς αυξάνεται η αντίσταση γείωσης. Επιπλέον, η διαφορά ΔI_f ανάμεσα σε βραχυκυκλώματα που συμβαίνουν σε διαφορετικά σημεία της γραμμής με την ίδια αντίσταση γείωσης τείνει στο μηδέν καθώς η αντίσταση γείωσης αυξάνεται. Συγκεκριμένα, το ελάχιστο ρεύμα βραχυκύκλωσης στο οποίο τείνουν ασυμπτωτικά οι καμπύλες είναι περίπου 140A και αντιστοιχεί σε ειδική αντίσταση εδάφους $\rho=1000\Omega\text{m}$.



Διάγραμμα 9. $I_f - R$ ανάλογα με το σημείο εμφάνισης του σφάλματος

4.2.2 Διστρωματικό Έδαφος

Στους παρακάτω πίνακες αποτυπώνονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν για το **Grid c** σε διστρωματικά εδάφη για ειδικές αντιστάσεις άνω στρώματος $\rho_1=100-1000\Omega\text{m}$ βάθους $h_1=1,5\text{m}$ και κάτω στρώματος $\rho_2=100-2000\Omega\text{m}$. Με πράσινο χρώμα παρουσιάζονται οι τάσεις που βρίσκονται κάτω από τα όρια ασφαλείας για το ανθρώπινο δυναμικό, ενώ με κόκκινο χρώμα αυτές που τα υπερβαίνουν. Όπως και στην περίπτωση ομοιογενούς εδάφους έτσι και στο διστρωματικό, γίνεται αντιληπτό ότι μόνο με τη χρήση μονωτικού εξοπλισμού με $\rho>2000\Omega\text{m}$ ή την τοποθέτηση χαλκιού η εγκατάσταση θεωρείται ασφαλής. Αξίζει να αναφερθεί, ότι μερικές από τις παραλλαγές που εξετάστηκαν ήταν μη ασφαλείς ακόμα και με ειδικό μονωτικό εξοπλισμό με $\rho=2000\Omega\text{m}$, οπότε σε κάθε περίπτωση συστήνεται η εγκατάσταση του συστήματος γείωσης να συνοδεύεται από την επίστρωση χαλκιού.

Upper Layer Resistivity	Bottom Layer Resistivity	Grounding Resistance	Touch Voltage Threshold	Step Voltage Threshold	Substation, L=0km			L=10km			L=20km		
					ρ_1 (Ωm)	ρ_2 (Ωm)	R (Ω)	$V_{t\text{-safe}}$ (V)	$V_{s\text{-safe}}$ (V)	I_f (A)	V_t (V)	V_s (V)	I_f (A)
100	250	11,45	297,8	418,5	486	383,9	916,2	417	329,4	786,2	348	274,9	656,1
	500	16,26	297,8	418,5	404	373,5	852,1	357	330,1	753,0	309	285,7	651,7
	750	19,50	297,8	418,5	363	361,6	812,0	326	324,8	729,2	286	284,9	639,8
	1000	21,97	297,8	418,5	336	349,7	775,9	305	317,4	704,3	271	282,1	625,8
	2000	28,30	297,8	418,5	284	318,0	697,6	262	293,3	643,6	238	266,5	584,6
250	100	8,63	358,1	660,0	553	434,3	1319,6	461	362,0	1100,1	376	295,3	897,2
	500	25,25	358,1	660,0	307	544,7	1379,7	281	498,5	1262,8	253	448,9	1137,0
	750	31,57	358,1	660,0	262	532,1	1275,0	244	495,5	1187,4	224	454,9	1090,0
	1000	36,55	358,1	660,0	236	516,7	1202,9	221	483,9	1126,5	205	448,8	1044,9
	2000	50,08	358,1	660,0	184	462,1	1036,6	176	442,0	991,5	166	416,9	935,2
500	100	9,87	458,8	1062,4	521	497,5	1585,4	440	420,2	1338,9	363	346,7	1104,6
	250	20,40	458,8	1062,4	353	641,8	1906,6	318	578,1	1717,5	280	509,1	1512,3
	750	42,65	458,8	1062,4	209	670,9	1745,2	198	635,6	1653,4	185	593,9	1544,8
	1000	50,50	458,8	1062,4	183	649,3	1644,8	175	620,9	1572,9	165	585,5	1483,0
	2000	73,09	458,8	1062,4	134	586,8	1366,0	130	569,2	1325,2	125	547,3	1274,3
1000	100	10,76	660,0	1867,2	501	539,3	1769,0	427	459,6	1507,7	355	382,1	1253,5
	250	23,77	660,0	1867,2	319	721,8	2270,2	291	658,5	2071,0	261	590,6	1857,5
	500	40,80	660,0	1867,2	217	789,0	2344,1	205	745,4	2214,4	191	694,5	2063,2
	750	54,46	660,0	1867,2	172	792,5	2248,1	165	760,3	2156,6	156	718,8	2039,0
	2000	101,00	660,0	1867,2	101	716,7	1815,6	99	702,5	1779,7	96	681,3	1725,7

Πίνακας 11. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα Grid c χωρίς ειδικό μονωτικό εξοπλισμό

Upper Layer Resistivity	Bottom Layer Resistivity	Grounding Resistance	Touch Voltage Threshold	Step Voltage Threshold	Substation, L=0km			L=10km			L=20km		
					ρ_1 (Ωm)	ρ_2 (Ωm)	R (Ω)	$V_{t\text{-safe}}$ (V)	$V_{s\text{-safe}}$ (V)	I_f (A)	V_t (V)	V_s (V)	I_f (A)
100	250	11,45	426,6	933,6	486	383,9	916,2	417	329,4	786,2	348	274,9	656,1
	500	16,26	426,6	933,6	404	373,5	852,1	357	330,1	753,0	309	285,7	651,7
	750	19,50	426,6	933,6	363	361,6	812,0	326	324,8	729,2	286	284,9	639,8
	1000	21,97	426,6	933,6	336	349,7	775,9	305	317,4	704,3	271	282,1	625,8
	2000	28,30	426,6	933,6	284	318,0	697,6	262	293,3	643,6	238	266,5	584,6
250	100	8,63	486,9	1175,0	553	434,3	1319,6	461	362,0	1100,1	376	295,3	897,2
	500	25,25	486,9	1175,0	307	544,7	1379,7	281	498,5	1262,8	253	448,9	1137,0
	750	31,57	486,9	1175,0	262	532,1	1275,0	244	495,5	1187,4	224	454,9	1090,0
	1000	36,55	486,9	1175,0	236	516,7	1202,9	221	483,9	1126,5	205	448,8	1044,9
	2000	50,08	486,9	1175,0	184	462,1	1036,6	176	442,0	991,5	166	416,9	935,2
500	100	9,87	587,5	1577,5	521	497,5	1585,4	440	420,2	1338,9	363	346,7	1104,6
	250	20,40	587,5	1577,5	353	641,8	1906,6	318	578,1	1717,5	280	509,1	1512,3
	750	42,65	587,5	1577,5	209	670,9	1745,2	198	635,6	1653,4	185	593,9	1544,8
	1000	50,50	587,5	1577,5	183	649,3	1644,8	175	620,9	1572,9	165	585,5	1483,0
	2000	73,09	587,5	1577,5	134	586,8	1366,0	130	569,2	1325,2	125	547,3	1274,3
1000	100	10,76	788,7	2382,3	501	539,3	1769,0	427	459,6	1507,7	355	382,1	1253,5
	250	23,77	788,7	2382,3	319	721,8	2270,2	291	658,5	2071,0	261	590,6	1857,5
	500	40,80	788,7	2382,3	217	789,0	2344,1	205	745,4	2214,4	191	694,5	2063,2
	750	54,46	788,7	2382,3	172	792,5	2248,1	165	760,3	2156,6	156	718,8	2039,0
	2000	101,00	788,7	2382,3	101	716,7	1815,6	99	702,5	1779,7	96	681,3	1725,7

Πίνακας 12. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα Grid c με ειδικό μονωτικό εξοπλισμό με $\rho=1000\Omega\text{m}$

Upper Layer Resistivity	Bottom Layer Resistivity	Grounding Resistance	Touch Voltage Threshold	Step Voltage Threshold	Substation, L=0km			L=10km			L=20km		
					ρ_1 (Ωm)	ρ_2 (Ωm)	R (Ω)	V_{t-safe} (V)	V_{s-safe} (V)	I_f (A)	V_t (V)	V_s (V)	I_f (A)
100	250	11,45	555,3	1448,7	486	383,9	916,2	417	329,4	786,2	348	274,9	656,1
	500	16,26	555,3	1448,7	404	373,5	852,1	357	330,1	753,0	309	285,7	651,7
	750	19,50	555,3	1448,7	363	361,6	812,0	326	324,8	729,2	286	284,9	639,8
	1000	21,97	555,3	1448,7	336	349,7	775,9	305	317,4	704,3	271	282,1	625,8
	2000	28,30	555,3	1448,7	284	318,0	697,6	262	293,3	643,6	238	266,5	584,6
250	100	8,63	615,7	1690,1	553	434,3	1319,6	461	362,0	1100,1	376	295,3	897,2
	500	25,25	615,7	1690,1	307	544,7	1379,7	281	498,5	1262,8	253	448,9	1137,0
	750	31,57	615,7	1690,1	262	532,1	1275,0	244	495,5	1187,4	224	454,9	1090,0
	1000	36,55	615,7	1690,1	236	516,7	1202,9	221	483,9	1126,5	205	448,8	1044,9
	2000	50,08	615,7	1690,1	184	462,1	1036,6	176	442,0	991,5	166	416,9	935,2
500	100	9,87	716,3	2092,6	521	497,5	1585,4	440	420,2	1338,9	363	346,7	1104,6
	250	20,40	716,3	2092,6	353	641,8	1906,6	318	578,1	1717,5	280	509,1	1512,3
	750	42,65	716,3	2092,6	209	670,9	1745,2	198	635,6	1653,4	185	593,9	1544,8
	1000	50,50	716,3	2092,6	183	649,3	1644,8	175	620,9	1572,9	165	585,5	1483,0
	2000	73,09	716,3	2092,6	134	586,8	1366,0	130	569,2	1325,2	125	547,3	1274,3
1000	100	10,76	917,5	2897,4	501	539,3	1769,0	427	459,6	1507,7	355	382,1	1253,5
	250	23,77	917,5	2897,4	319	721,8	2270,2	291	658,5	2071,0	261	590,6	1857,5
	500	40,80	917,5	2897,4	217	789,0	2344,1	205	745,4	2214,4	191	694,5	2063,2
	750	54,46	917,5	2897,4	172	792,5	2248,1	165	760,3	2156,6	156	718,8	2039,0
	2000	101,00	917,5	2897,4	101	716,7	1815,6	99	702,5	1779,7	96	681,3	1725,7

Πίνακας 13. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα Grid c με ειδικό μονωτικό εξοπλισμό με $\rho=2000\Omega m$

Upper Layer Resistivity	Bottom Layer Resistivity	Grounding Resistance	Touch Voltage Threshold	Step Voltage Threshold	Substation, L=0km			L=10km			L=20km		
					ρ_1 (Ωm)	ρ_2 (Ωm)	R (Ω)	V_{t-safe} (V)	V_{s-safe} (V)	I_f (A)	V_t (V)	V_s (V)	I_f (A)
100	250	11,45	1083,8	3562,7	486	383,9	916,2	417	329,4	786,2	348	274,9	656,1
	500	16,26	1083,8	3562,7	404	373,5	852,1	357	330,1	753,0	309	285,7	651,7
	750	19,50	1083,8	3562,7	363	361,6	812,0	326	324,8	729,2	286	284,9	639,8
	1000	21,97	1083,8	3562,7	336	349,7	775,9	305	317,4	704,3	271	282,1	625,8
	2000	28,30	1083,8	3562,7	284	318,0	697,6	262	293,3	643,6	238	266,5	584,6
250	100	8,63	1099,1	3623,9	553	434,3	1319,6	461	362,0	1100,1	376	295,3	897,2
	500	25,25	1099,1	3623,9	307	544,7	1379,7	281	498,5	1262,8	253	448,9	1137,0
	750	31,57	1099,1	3623,9	262	532,1	1275,0	244	495,5	1187,4	224	454,9	1090,0
	1000	36,55	1099,1	3623,9	236	516,7	1202,9	221	483,9	1126,5	205	448,8	1044,9
	2000	50,08	1099,1	3623,9	184	462,1	1036,6	176	442,0	991,5	166	416,9	935,2
500	100	9,87	1122,9	3719,0	521	497,5	1585,4	440	420,2	1338,9	363	346,7	1104,6
	250	20,40	1122,9	3719,0	353	641,8	1906,6	318	578,1	1717,5	280	509,1	1512,3
	750	42,65	1122,9	3719,0	209	670,9	1745,2	198	635,6	1653,4	185	593,9	1544,8
	1000	50,50	1122,9	3719,0	183	649,3	1644,8	175	620,9	1572,9	165	585,5	1483,0
	2000	73,09	1122,9	3719,0	134	586,8	1366,0	130	569,2	1325,2	125	547,3	1274,3
1000	100	10,76	1165,2	3888,1	501	539,3	1769,0	427	459,6	1507,7	355	382,1	1253,5
	250	23,77	1165,2	3888,1	319	721,8	2270,2	291	658,5	2071,0	261	590,6	1857,5
	500	40,80	1165,2	3888,1	217	789,0	2344,1	205	745,4	2214,4	191	694,5	2063,2
	750	54,46	1165,2	3888,1	172	792,5	2248,1	165	760,3	2156,6	156	718,8	2039,0
	2000	101,00	1165,2	3888,1	101	716,7	1815,6	99	702,5	1779,7	96	681,3	1725,7

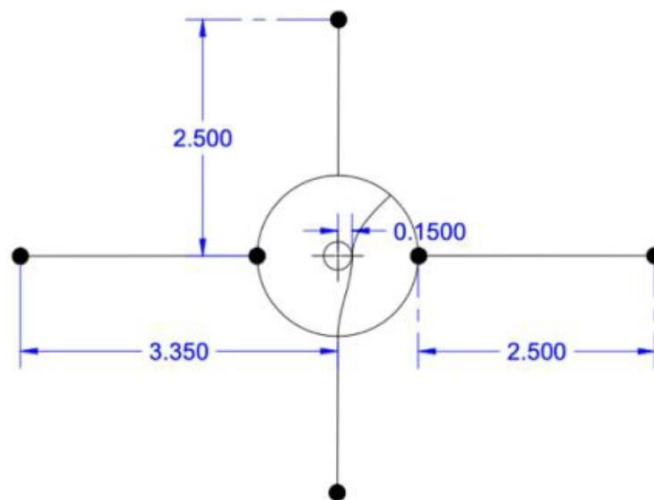
Πίνακας 14. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα Grid c με τοποθέτηση στρώματος χαλκιού με $\rho=2500\Omega m$

4.3 Σύγκριση Συστημάτων Γείωσης

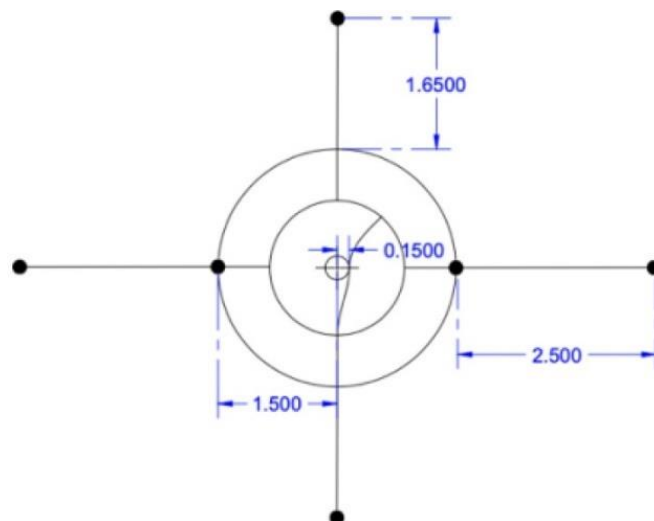
Για την καλύτερη κατανόηση των αποτελεσμάτων στο υπό μελέτη σύστημα γείωσης της παρούσας μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας, έγινε σύγκριση των εξαγόμενων αποτελεσμάτων με αυτά ενός τυπικού συστήματος γείωσης του Ελληνικού Δικτύου Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΕΔΔΗΕ).

Το συγκεκριμένο σύστημα γείωσης τοποθετείται κάτω από τον ξύλινο ή από οπλισμένο σκυρόδεμα στύλο ΜΤ σε βάθος 0,3-1m κάτω από την επιφάνεια του εδάφους και αποτελείται από έξι ράβδους μήκους 2,5m που κατασκευάζονται από 35mm² Cu.

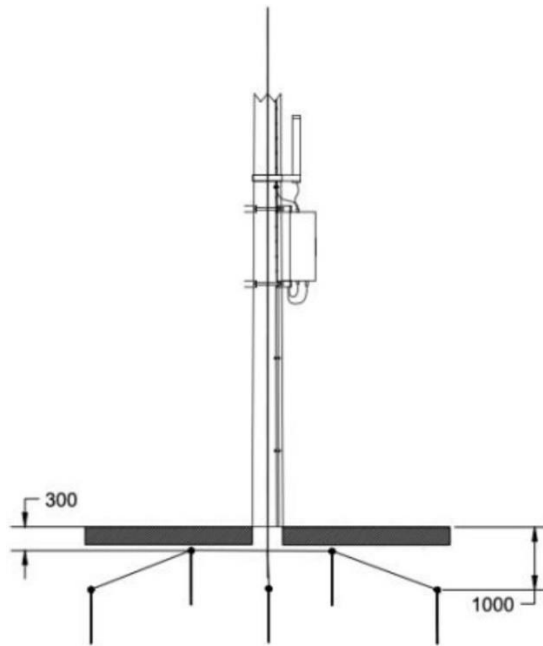
Οι κατόψεις και η πλάγια όψη του τυπικού και του ενισχυμένου συστήματος γείωσης, που σχεδιάστηκε για την επίτευξη καλύτερων αποτελεσμάτων, παρουσιάζονται στις ακόλουθες εικόνες.



Εικόνα 90. Κάτοψη τυπικού συστήματος γείωσης του Ελληνικού ΕΔΔΗΕ



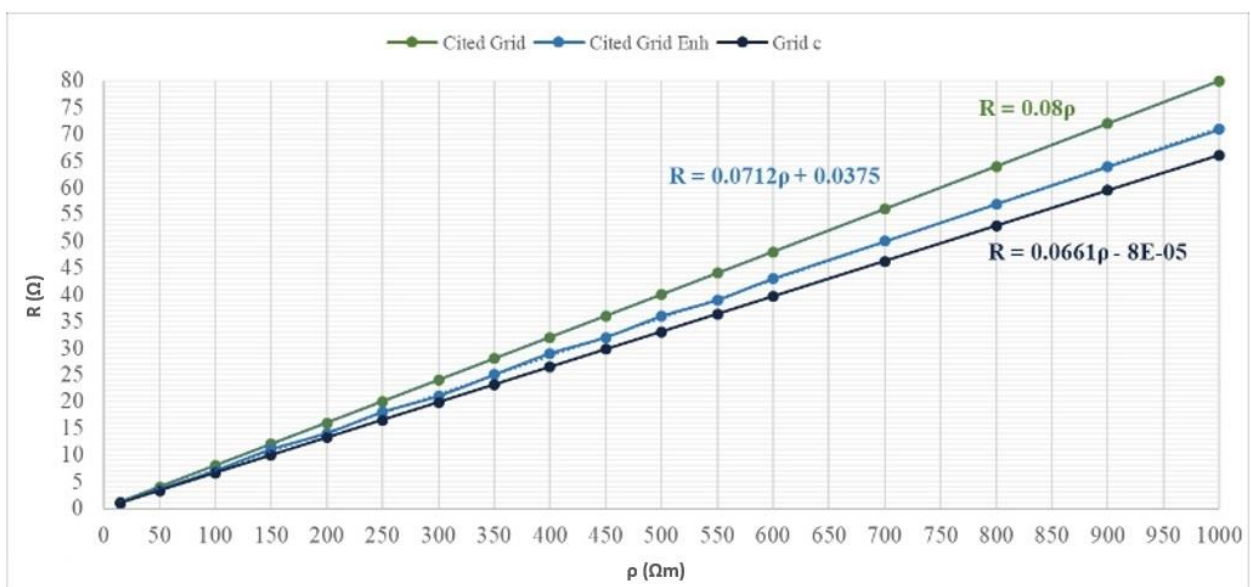
Εικόνα 91. Κάτοψη ενισχυμένου συστήματος γείωσης του Ελληνικού ΕΔΔΗΕ



Εικόνα 92. Πλάγια όψη συστήματος γείωσης του Ελληνικού ΕΔΔΗΕ

Ακολούθως, παρουσιάζονται μερικά διαγράμματα από τα οποία μπορούν να βγουν χρήσιμα συμπεράσματα σχετικά με την προστασία έναντι των αναπτυσσόμενων τάσεων επαφής και βηματικών τάσεων, αλλά και της συνολικής αντίστασης γείωσης των συστημάτων γείωσης.

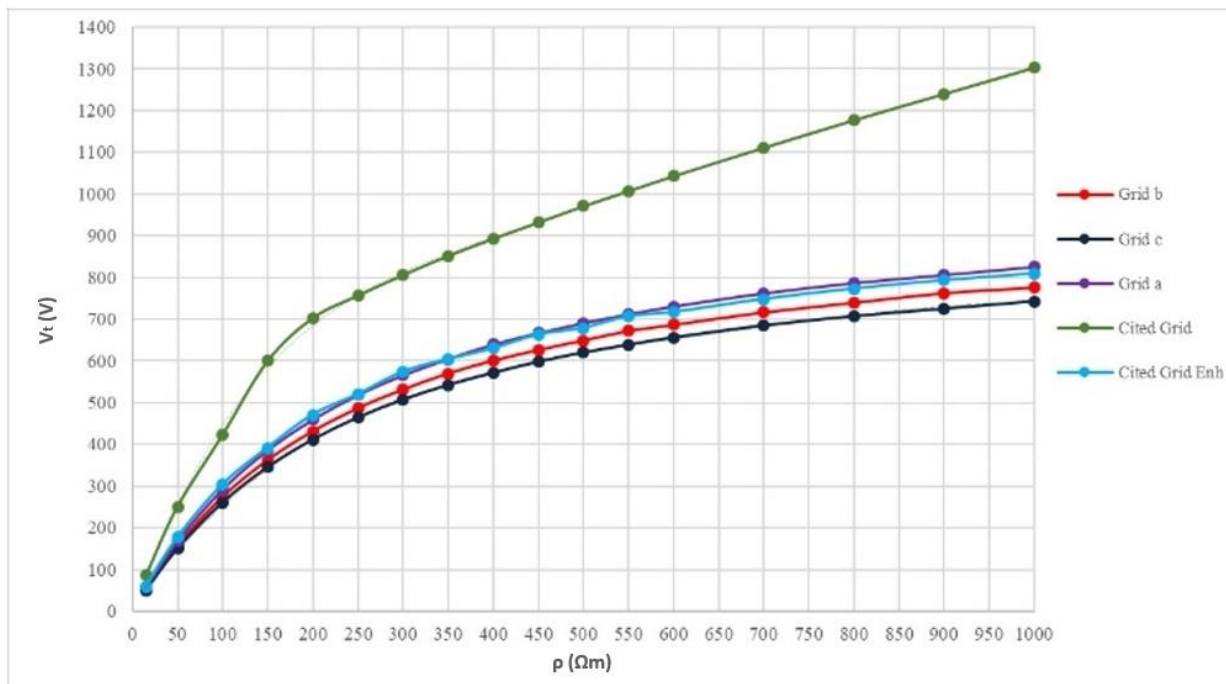
Πιο συγκεκριμένα, διαπιστώνεται ότι στην περίπτωση ομοιογενούς εδάφους στο σύστημα γείωσης του Ελληνικού ΕΔΔΗΕ υπάρχει και εδώ γραμμική συσχέτιση της συνολικής αντίστασης γείωσης του συστήματος γείωσης και της ειδικής αντίστασης του εδάφους, με τις τιμές των αντιστάσεων γείωσης και στα τρία συστήματα να βρίσκονται στα ίδια επίπεδα σε ολόκληρο το εύρος τιμών των ειδικών αντιστάσεων εδάφους.



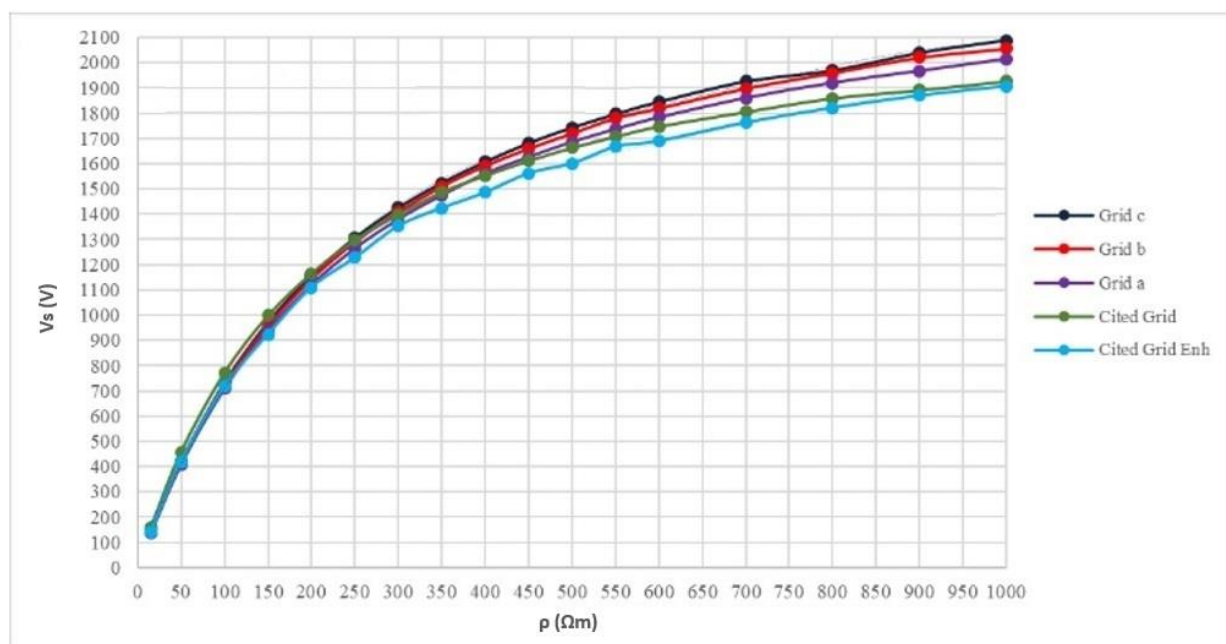
Διάγραμμα 10. R – ρ ανάλογα με το υπό μελέτη σύστημα γείωσης

Όσον αφορά τις αναπτυσσόμενες τάσεις, παρατηρείται ότι οι τάσεις επαφής στο σύστημα γείωσης του Ελληνικού ΕΔΔΗΕ είναι σημαντικά υψηλότερες συγκριτικά με τις παραλλαγές των συστημάτων γείωσης της παρούσας διπλωματικής. Η κατάσταση όμως βελτιώνεται στην περίπτωση του ενισχυμένου συστήματος γείωσης.

Οι βηματικές τάσεις σε όλα τα συστήματα γείωσης κυμαίνονται στα ίδια επίπεδα, με τις χαμηλότερες τιμές να παρουσιάζονται στο σύστημα του Ελληνικού ΕΔΔΗΕ.



Διάγραμμα 11. $V_t - \rho$ ανάλογα με το υπό μελέτη σύστημα γείωσης



Διάγραμμα 12. $V_s - \rho$ ανάλογα με το υπό μελέτη σύστημα γείωσης

4.4 Τελικά Συμπεράσματα - Προοπτική

Κάνοντας μία γενική ανασκόπηση των αποτελεσμάτων της παρούσας μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας, καταλήγουμε στα παρακάτω τελικά συμπεράσματα:

- Τα υπό μελέτη συστήματα γείωσης της παρούσας διπλωματικής εργασίας παρουσιάζουν λίγο μικρότερη αντίσταση γείωσης συγκριτικά με αυτά του Ελληνικού ΕΔΔΗΕ και αναμένεται να έχουν ελαφρώς καλύτερη απόδοση.
- Η δομή του πλέγματος γείωσης μπορεί να μην επηρεάζει σχεδόν καθόλου τις αναπτυσσόμενες βηματικές τάσεις, αντιθέτως, έχει σημαντική επίδραση στις αναπτυσσόμενες τάσεις επαφής, όπου ένα πυκνότερο πλέγμα γείωσης μπορεί να συμβάλλει στη μείωση των μέγιστων τιμών της.
- Σχετικά με τις αναπτυσσόμενες βηματικές τάσεις, τόσο το τυπικό όσο και το ενισχυμένο σύστημα γείωσης του Ελληνικού ΕΔΔΗΕ επιτυγχάνουν καλύτερες επιδόσεις σε σχέση με τα υπό μελέτη συστήματα γείωσης της συγκεκριμένης διπλωματικής. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα συστήματα γείωσης του Ελληνικού ΕΔΔΗΕ περιέχουν έναν επιπλέον γειωτή ράβδου (6 έναντι 5 στο σύνολο).
- Το βάθος του οριζόντιου αγωγού στο υπό μελέτη σύστημα γείωσης έχει αμελητέα επίδραση στις αναπτυσσόμενες βηματικές τάσεις, αλλά επηρεάζει σημαντικά τις αναπτυσσόμενες τάσεις επαφής και πιο συγκεκριμένα, η τοποθέτησή του σε μικρότερο βάθος αποτελεί καλύτερη επιλογή, καθώς σε αυτή την περίπτωση μειώνονται σε μεγάλο ποσοστό οι αναπτυσσόμενες τάσεις επαφής και υπάρχει μόνο μία πολύ μικρή αύξηση της συνολικής αντίστασης γείωσης.
- Λαμβάνοντας υπόψη όλα τα παραπάνω αποτελέσματα και συμπεράσματα, σε περίπτωση επιλογής χρησιμοποίησης του συστήματος γείωσης της παρούσας διπλωματικής, είναι προτιμότερη η επιλογή του συστήματος γείωσης που θα συνδυάζει το πυκνότερο πλέγμα γείωσης (11x11) με την τοποθέτηση του οριζόντιου αγωγού σε μικρό σχετικά βάθος ($d=0,7m$ ή $d=1m$).

Με βάση τα προαναφερθέντα συμπεράσματα, εξάγονται μερικές χρήσιμες κατευθυντήριες γραμμές:

- Δεν υπάρχει μέχρι σήμερα κάποια γενική προσέγγιση του συστήματος γείωσης στα δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Κάθε περίπτωση είναι μοναδική και πρέπει να μελετάται ξεχωριστά λαμβάνοντας υπόψη τη δομή του εδάφους, το ρεύμα σφάλματος και τον χρόνο εκκαθάρισης του σφάλματος από την αντίστοιχη διάταξη προστασίας.
- Τα ομοιογενή εδάφη αποτελούν ιδανικά σενάρια που χρησιμοποιούνται για διευκόλυνση στην εξαγωγή συμπερασμάτων. Στην πραγματικότητα όμως, η δομή των περισσότερων εδαφών αποτελείται από δύο ή περισσότερα στρώματα (οριζόντια ή κάθετα), τα οποία μπορούν να επηρεάσουν την απόδοση του συστήματος γείωσης, ειδικά στα όρια των στρωμάτων, κάτι που αφήνει πολλά περιθώρια για μελλοντική έρευνα στο συγκεκριμένο θέμα.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Α. Καρακούσης, «Μετάβαση στο Ευφύες Ηλεκτρικό Δίκτυο και Ανάπτυξη του Ευφυούς Συστήματος Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας,» Διπλωματική Εργασία, Αθήνα, 2015.
- [2] Η. Ασλανίδης, «ΜΕΛΕΤΗ ΔΙΚΤΥΩΝ ΜΕΣΗΣ ΤΑΣΗΣ - ΠΕΡΙΟΧΗ ΡΟΔΟΥ,» Διπλωματική Εργασία, Πάτρα, 2020.
- [3] Κ. Χαραλαμπίκη, «ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ - ΛΥΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΠΙΤΕΥΞΗ ΜΕΓΑΛΗΣ ΚΛΙΜΑΚΑΣ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΩΝ ΑΠΕ,» Διπλωματική Εργασία, Χανιά, 2016.
- [4] Γ. Νικολάου, Πυρηνική Τεχνολογία - Σημειώσεις Μαθήματος.
- [5] [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.terna-energy.com/i-etaireia/o-klados/>.
- [6] Ν. Μαμάσης, «ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΜΙΚΡΟΥ ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΕΡΓΟΥ (Μ.Υ.Η.Ε.),» Διπλωματική Εργασία, Αθήνα, 2016.
- [7] [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.biogasup.gr/biogas-upgrade-pretreatment/>.
- [8] ΔΑΠΕΕΠ, «ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟ ΜΕΙΓΜΑ 2021».
- [9] [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.admie.gr/systima/perigrafia/basika-stoixeia>.
- [10] [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://deddie.gr/el/deddie/to-diktuo-ilektrismou/>.
- [11] [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.admie.gr/systima/perigrafia/dedomena-diaheirisis-ragion>.
- [12] [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.admie.gr/press-kit/infographics>.
- [13] Β. Αδάμης, «ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΩΝ ΠΗΓΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΟ ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ,» Διπλωματική Εργασία, Βόλος, 2018.
- [14] [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://deddie.gr/el/deddie/to-diktuo-ilektrismou/vasika-megethi-tou-diktuou-ilektrismou/>.
- [15] Δ. Π. Μητροπούλου, «Συγκριτική μελέτη διατάξεων Υποσταθμών Μεταφοράς Υ.Τ/Μ.Τ και ΚΥΤ,» Διπλωματική Εργασία, Αθήνα, 2010.
- [16] Θ. Μανάφης, «Οι Πίνακες Μέσης Τάσης στους Υ/Σ Διανομής Πόλεως 20 kV/0,4 kV και στους Καταναλωτές Μέσης Τάσης του Ελληνικού Δικτύου Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας,» Διπλωματική Εργασία, Αθήνα, 2021.
- [17] Η. ΨΑΘΑΣ, «ΜΕΛΕΤΗ ΔΙΚΤΥΩΝ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ,» Διπλωματική Εργασία, Κοζάνη, 2013.

- [18] Α. ΒΑΓΓΕΛΟΓΛΟΥ και Χ. ΚΥΡΓΙΑΣ, «Κατασκευή εργαστηριακού μοντέλου δικτύου διανομής ηλεκτρικής ενέργειας,» Διπλωματική Εργασία, Θεσσαλονίκη, 2012.
- [19] Π. ΑΠΟΣΤΟΛΙΔΟΥ και Σ. ΤΣΙΟΥΓΚΟΣ, «ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΗΣ ΑΛΛΑΓΗΣ ΤΟΥ ΕΠΙΠΕΔΟΥ ΤΑΣΗΣ ΑΠΟ 15,75 kV ΣΕ 21 kV ΣΤΗ ΣΤΑΣΙΜΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ,» Διπλωματική Εργασία, Θεσσαλονίκη, 2006.
- [20] Γ. Ν. Κορρές και Β. Παπασπηλιωτόπουλος, «Ανάλυση προβλημάτων επιλογικής συνεργασίας των προστασιών του δικτύου λόγω υψηλής διείσδυσης μονάδων ΔΠ - Προτάσεις βελτίωσης της λειτουργίας των υφιστάμενων προστασιών,» Αθήνα, 2016.
- [21] Ι. Καλπακίδης, «Περιγραφή των Μέσων Προστασίας και των Εγκαταστάσεων Μέσης Τάσης της Δ.Ε.Η. και των Καταναλωτών,» Διπλωματική Εργασία, Θεσσαλονίκη, 2009.
- [22] Μ. ΤΣΙΑΗ, «ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΔΙΚΤΥΩΝ ΠΟΥ ΠΕΡΙΛΑΜΒΑΝΟΥΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ,» Διπλωματική Εργασία, Αθήνα, 2001.
- [23] Α. Βώσσος, «Βέλτιστη Επιλογική Συνεργασία Ηλεκτρονόμων Υπερέντασης και Απόστασης,» Διπλωματική Εργασία, 2018, 2018.
- [24] Γ. Μπάλτσιου, «ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΙΚΤΥΟΥ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΜΙΑΣ ΤΥΠΙΚΗΣ ΕΛΛΗΝΙΚΗΣ ΠΟΛΗΣ,» Διπλωματική Εργασία, Βόλος, 2014.
- [25] «Εισαγωγικές Σημειώσεις αναφορικά με την Προστασία σε Δίκτυα Διανομής Μέσης Τάσης».
- [26] Σ. Κουγιουμτζή, «Θρμική συμπεριφορά αγωγού διανομής μέσης τάσης τύπου ACSR κατά τη διακοπή της λειτουργίας του από ασφαλειοαποζεύκτη,» Διπλωματική Εργασία, Αθήνα, 2014.
- [27] «OPERATION OF AUTO RECLOSER AND SECTIONALIZER».
- [28] Α. Α. Αλεξοπούλου, «Συμβολή στη μελέτη συστημάτων γείωσης,» Διπλωματική Εργασία, Αθήνα, 2016.
- [29] Ι. Φ. Γκόνοσ, «Μεταβατική Συμπεριφορά Συστημάτων Γείωσης,» Διδακτορική Διατριβή, Αθήνα, 2002.
- [30] Ι. F. Gonos, «Experimental study of transient behavior of grounding grids using scale model,» *Measurement Science and technology*, αρ. 17, pp. 2022-2026, 2006.
- [31] Ε. Καραγιάννη και Κ. Κυπαρισσία, «ΜΕΛΕΤΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΓΕΙΩΣΗΣ ΤΥΠΙΚΩΝ ΥΠΟΣΤΑΘΜΩΝ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΥΠΟ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΚΕΡΑΥΝΙΚΟΥ ΠΛΗΓΜΑΤΟΣ,» Διπλωματική Εργασία, Θεσσαλονίκη, 2017.

- [32] M. Nassereddine, J. Rizk, M. Nagrial και A. Hellany, «Updated equation to compute the soil voltage contour under fault condition,» *INTERNATIONAL JOURNAL OF ENERGY AND ENVIRONMENT*, pp. 115-124, 2015.
- [33] «IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding,» *ANSI/IEEE Std 80-2000 (Revision of IEEE Std 80 – 1986)*, 2000.
- [34] Β. Π. Ανδροβιτσανέας, «Επίδραση μικροεδάφους σε συστήματα γείωσης εγκαταστάσεων,» Μεταπτυχιακή Εργασία, Αθήνα, 2011.
- [35] Δ. Γαλάνης, «Συμβολή στη Μελέτη Συστήματος Γείωσης Υποσταθμών Υψηλής Τάσης,» Διπλωματική Εργασία, Αθήνα, 2016.
- [36] Π. Ντοκόπουλος, Ηλεκτρικές εγκαταστάσεις καταναλωτών σύμφωνα με το νέο κανονισμό ΕΛΟΤ HD 384, Αθήνα: ΖΗΤΗ, 2005.
- [37] Γ. Π. Διάφας και Γ. Δογραματζάκης, «Χρονική μεταβολή ηλεκτρικών παραμέτρων εδάφους,» Διπλωματική Εργασία, Αθήνα, 2018.
- [38] [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://www.elemko.gr/el/systimata-efarmogis/systimata-geioseon>.
- [39] [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://vfclp.com>.
- [40] Α. Σαφηγιάννη, «Ηλεκτρικά Δίκτυα Καταναλωτών - Παραδόσεις Μαθήματος».
- [41] [Ηλεκτρονικό]. Available: https://www.ti-soft.com/el/support/help/electricaldesign/project/parameters/earthing_scheme.
- [42] Π. Πίττας, «ΘΕΜΕΛΙΑΚΗ ΓΕΙΩΣΗ - ΤΕΧΝΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ - ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ - ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ,» Αθήνα, 2010.
- [43] FLUKE, «Principles, testing methods and applications - Earth Ground Resistance».