



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
& ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΑΣΦΑΛΟΥΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΓΕΙΩΣΗΣ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΩΝ ΠΟΥ ΣΥΝΔΕΟΝΤΑΙ ΣΕ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕΣΗΣ ΚΑΙ ΥΨΗΛΗΣ ΤΑΣΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΟΥ

ΙΩΑΝΝΙΔΗ ΚΥΡΙΑΚΟΥ

Επιβλέπων: Ζαχαρίας Γ. Δάτσιος

Έκτακτο Εκπαιδευτικό Προσωπικό

ΚΟΖΑΝΗ/ΙΟΥΛΙΟΣ/2023

ΑΥΤΗ Η ΣΕΛΙΔΑ ΕΙΝΑΙ ΣΚΟΠΙΜΑ ΛΕΥΚΗ



HELLENIC DEMOCRACY
UNIVERSITY OF WESTERN MACEDONIA
SCHOOL OF ENGINEERING
DEPARTMENT OF ELECTRICAL
& COMPUTER ENGINEERING

INVESTIGATION OF THE SAFE GROUNDING SYSTEM DESIGN FOR TECHNICAL INSTALLATIONS CONNECTED TO MEDIUM AND HIGH VOLTAGE POWER SYSTEMS

THESIS

IOANNIDIS KIRIAKOS

SUPERVISOR: Zaharias G. Datsios
Adjunct Lecturer

KOZANI/JULY/2023

ΑΥΤΗ Η ΣΕΛΙΔΑ ΕΙΝΑΙ ΣΚΟΠΙΜΑ ΛΕΥΚΗ



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
& ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΔΗΛΩΣΗ ΜΗ ΛΟΓΟΚΛΟΠΗΣ ΚΑΙ ΑΝΑΛΗΨΗΣ ΠΡΟΣΩΠΙΚΗΣ ΕΥΘΥΝΗΣ

Δηλώνω ρητά ότι, σύμφωνα με το άρθρο 8 του Ν. 1599/1986 και τα άρθρα 2,4,6 παρ. 3 του Ν. 1256/1982, η παρούσα Διπλωματική Εργασία με τίτλο «Διερεύνηση της ασφαλούς σχεδίασης συστημάτων γείωσης τεχνικών εγκαταστάσεων που συνδέονται σε συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας μέσης και υψηλής τάσης» καθώς και τα ηλεκτρονικά αρχεία και πηγαίοι κώδικες που αναπτύχθηκαν ή τροποποιήθηκαν στα πλαίσια αυτής της εργασίας και αναφέρονται ρητώς μέσα στο κείμενο που συνοδεύουν, και η οποία έχει εκπονηθεί στο Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας, υπό την επίβλεψη του έκτακτου εκπαιδευτικού προσωπικού του Τμήματος κ. Ζαχαρία Γ. Δάτσιου, αποτελεί αποκλειστικά προϊόν προσωπικής εργασίας και δεν προσβάλλει κάθε μορφής πνευματικά δικαιώματα τρίτων και δεν είναι προϊόν μερικής ή ολικής αντιγραφής, οι πηγές δε που χρησιμοποιήθηκαν περιορίζονται στις βιβλιογραφικές αναφορές και μόνον. Τα σημεία όπου έχω χρησιμοποιήσει ιδέες, κείμενο, αρχεία ή / και πηγές άλλων συγγραφέων, αναφέρονται ευδιάκριτα στο κείμενο με την κατάλληλη παραπομπή και η σχετική αναφορά περιλαμβάνεται στο τμήμα των βιβλιογραφικών αναφορών με πλήρη περιγραφή. 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 μόνο.

Copyright (C) Κυριάκος Ιωαννίδης, Ζαχαρίας Γ. Δάτσιος, 2023, Κοζάνη

Υπογραφή Φοιτητή: Κυριάκος Ιωαννίδης

ΑΥΤΗ Η ΣΕΛΙΔΑ ΕΙΝΑΙ ΣΚΟΠΙΜΑ ΛΕΥΚΗ

Περίληψη

Η ηλεκτροκίνηση παγκοσμίως, γνωρίζει πλέον ιδιαίτερη απήχηση. Για τον λόγο αυτό, η δημιουργία αξιόπιστων υποδομών φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων (EV) κρίνεται αναγκαία. Ένας κρίσιμος παράγοντας που πρέπει να λαμβάνεται πάντα υπ' όψιν, είναι ο σχεδιασμός και η κατασκευή ενός αποτελεσματικού συστήματος γείωσης. Ένα σωστά σχεδιασμένο σύστημα γείωσης εγγυάται την ασφαλή και αποτελεσματική λειτουργία του σταθμού, ελαχιστοποιώντας τους πιθανούς κινδύνους τόσο για τα πρόσωπα που θα βρεθούν στον χώρο, όσο και για τον εξοπλισμό της εγκατάστασης. Στην παρούσα διπλωματική εργασία περιλαμβάνεται μια βιβλιογραφική ανασκόπηση και διερεύνηση μέσω προσομοιώσεων, προκειμένου να αξιολογηθούν οι υφιστάμενες πρακτικές γείωσης και να εντοπισθούν πιθανά σημεία για βελτίωση. Αρχικά, γίνεται μια εμβάθυνση στις θεμελιώδεις αρχές των συστημάτων γείωσης εγκαταστάσεων υψηλής τάσης, διερευνώντας τις θεωρητικές βάσεις και τα διεθνή πρότυπα που διέπουν τον σχεδιασμό και την εφαρμογή τους σε υποδομές φόρτισης EV. Αξιολογώντας τις τρέχουσες πρακτικές γείωσης που εφαρμόζονται σε σταθμούς μεγάλης ισχύος, η μελέτη εντοπίζει κοινές προκλήσεις και πιθανά τρωτά σημεία που σχετίζονται με τα συστήματα γείωσης. Παράγοντες όπως η ειδική αντίσταση του εδάφους, τα χαρακτηριστικά των ηλεκτροδίων γείωσης, τα ρεύματα σφάλματος και οι τοπολογίες των σταθμών φόρτισης θα ληφθούν υπ' όψιν προκειμένου να αξιολογηθεί η συνολική αποτελεσματικότητα των διαφόρων στρατηγικών γείωσης. Τα αποτελέσματα θα συμβάλουν στη βαθύτερη κατανόηση του τρόπου με τον οποίο ο σχεδιασμός του συστήματος γείωσης επηρεάζει τη σταθερότητα και την ασφάλεια ενός σταθμού φόρτισης. Τέλος, η παρούσα διπλωματική εργασία αποσκοπεί στην παροχή πρακτικών συστάσεων και κατευθυντήριων γραμμών για τη βελτιστοποίηση των συστημάτων γείωσης σε σταθμούς φόρτισης EV. Με την αντιμετώπιση των προκλήσεων στις τρέχουσες πρακτικές, τα αποτελέσματα της έρευνας θα συμβάλουν στην ανάπτυξη ασφαλέστερων υποδομών φόρτισης, προωθώντας την ευρεία υιοθέτηση των ηλεκτρικών οχημάτων.

Λέξεις Κλειδιά

Αντίσταση γείωσης, ανύψωση δυναμικού συστήματος γείωσης, βηματική τάση, σφάλμα γης, συστήματα γείωσης, τάση επαφής

Abstract

Electro-mobility is now gaining traction worldwide. For this reason, the construction of reliable electric vehicle (EV) charging infrastructure is necessary. A critical factor that must always be taken into consideration is the design and construction of an efficient grounding system. A properly designed grounding system guarantees the safe and efficient operation of the station, minimizing potential hazards to both persons on site and the facility's equipment. This thesis includes a comprehensive literature review and an investigation via simulations in order to evaluate existing grounding practices and identify potential areas for improvement. A deep dive into the fundamentals of grounding systems is firstly made, exploring the theoretical foundations, international standards governing their design, as well as common practices and applications in EV charging infrastructures. By evaluating current grounding practices applied in high power stations, the study identifies common challenges and potential vulnerabilities related to grounding systems. Factors such as soil resistivity, ground electrode characteristics, fault currents, and charging station topologies will be considered in order to evaluate the overall effectiveness of various grounding strategies. The results will contribute to a deeper understanding of how the design of the grounding system affects the reliable operation and safety of a charging station. Finally, this thesis aims to provide practical recommendations and guidelines for the optimization of grounding systems in EV charging stations. By addressing challenges in current practices, the results of the research will contribute to the development of safer charging infrastructures, promoting the widespread adoption of electric vehicles.

Keywords

Ground fault, ground potential rise (GPR), ground resistance, grounding system, step voltage, touch voltage

Ευχαριστίες

Με την εκτέλεση της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας, ολοκληρώνονται οι σπουδές μου στο τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας. Θα ήθελα λοιπόν, εφόσον μου δόθηκε η ευκαιρία, να ευχαριστήσω όλους όσους με στήριξαν τόσο κατά την εκπόνησή της όσο και κατά τη συνολική διάρκεια των σπουδών μου.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Ζαχαρία Γ. Δάτσιο, Έκτακτο Εκπαιδευτικό Προσωπικό του Τμήματος και επιβλέπων στην εργασία μου, για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με ένα πολύ ενδιαφέρον και επίκαιρο θέμα.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω το Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης με τη συνεργασία του οποίου έγινε εφικτή η εργασία αυτή με το λογισμικό CYMGrd.

Ευχαριστώ από καρδιάς όλους τους φίλους και συμφοιτητές μου, οι οποίοι ήταν δίπλα μου καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου. Εύχομαι σε όλους τα καλύτερα!

Τέλος, ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένεια μου, που πίστεψαν σε εμένα και με στήριξαν καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

ΚΟΖΑΝΗ/ΙΟΥΛΙΟΣ/2023

ΑΥΤΗ Η ΣΕΛΙΔΑ ΕΙΝΑΙ ΣΚΟΠΙΜΑ ΛΕΥΚΗ

Περιεχόμενα

Περίληψη	7
Λέξεις Κλειδιά	7
Abstract	8
Keywords	8
Ευχαριστίες	9
Περιεχόμενα	11
Κατάλογος Σχημάτων	13
Κατάλογος Πινάκων	15
Πρόλογος	17
Κεφάλαιο 1: Συστήματα γείωσης	19
Ενότητα 1.1: Ορισμός και χρησιμότητα συστημάτων γείωσης	19
Ενότητα 1.2: Ηλεκτρόδια γείωσης	20
Ενότητα 1.3: Αντίσταση γείωσης – Ειδική αντίσταση εδάφους	21
Ενότητα 1.4: Ροή ρεύματος από το σύστημα γείωσης προς το έδαφος	29
Ενότητα 1.5: Επιτρεπτά όρια βηματικής τάσης και τάσης επαφής	31
Ενότητα 1.6: Στόχος της διπλωματικής εργασίας	34
Κεφάλαιο 2: Σχεδίαση συστήματος γείωσης εγκατάστασης υψηλής τάσης	35
Ενότητα 2.1: Κριτήρια σχεδίασης και παράμετροι εισόδου για τη σχεδίαση ασφαλών συστημάτων γείωσης εγκαταστάσεων υψηλής τάσης	35
Ενότητα 2.2: Διαδικασία σχεδίασης	38
Κεφάλαιο 3: Σταθμοί φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων που συνδέονται στο δίκτυο διανομής μέσης τάσης	43
Ενότητα 3.1: Γενικά στοιχεία για τους σταθμούς φόρτισης	43
Ενότητα 3.2: Τοπολογίες σταθμών φόρτισης	48
Ενότητα 3.3: Βιβλιογραφική επισκόπηση σχετικά με την αντικεραυνική προστασία και τις γειώσεις σταθμών φόρτισης	56
Ενότητα 3.4: Ιδιαιτερότητες σταθμών φόρτισης που συνδέονται στο σύστημα διανομής μέσης τάσης από τη σκοπιά των γειώσεων	60
Ενότητα 3.5: Επιλεγμένο σύστημα προς διερεύνηση	62
Κεφάλαιο 4: Σχεδίαση συστήματος γείωσης σταθμού φόρτισης: Προσομοιώσεις, Αποτελέσματα	65

Ενότητα 4.1: Περιπτώσεις προς διερεύνηση	65
Ενότητα 4.2: Διαδικασία σχεδίασης συστήματος γείωσης	66
Ενότητα 4.3: Προσομοίωση αρχικού συστήματος γείωσης	74
Ενότητα 4.4: Αναθεώρηση σχεδίασης	80
Ενότητα 4.5: Αποτελέσματα και παραμετρική ανάλυσή τους	81
Κεφάλαιο 5: Συμπεράσματα	91
Βιβλιογραφία	93

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1: Χοάνη δυναμικού ενός γειωτή [3].	22
Σχήμα 2: Ορισμός ειδικής αντίστασης εδάφους [3].	23
Σχήμα 3: Επίδραση θερμοκρασίας, υγρασίας και αλάτων στην ειδική αντίσταση εδάφους [5].	25
Σχήμα 4: Μέθοδος Wenner ή τεσσάρων σημείων [5].	26
Σχήμα 5: Ειδική αντίσταση ρ_a – Απόσταση ηλεκτροδίων a (παράδειγμα πραγματικών μετρήσεων) [5].	28
Σχήμα 6: Γραφική μέθοδος του Sunde για την εύρεση διστρωματικού μοντέλου εδάφους από μετρήσεις [5].	29
Σχήμα 7: Τάση Επαφής [7].	30
Σχήμα 8: Βηματική Τάση [7].	31
Σχήμα 9: Τυπικές περιπτώσεις έκθεσης σε επικίνδυνες τάσεις [8].	31
Σχήμα 10: Διορθωτικός συντελεστής C_s – Σχέση του με το πάχος υλικού επιφάνειας h_s για διάφορες τιμές του συντελεστή $k = (\rho - \rho_s)/(\rho + \rho_s)$ [6].	33
Σχήμα 11: Σχήμα ροής για τον σχεδιασμό συστήματος γείωσης [6].	41
Σχήμα 12: Τυπική τοπολογία ενός on-board φορτιστή [12].	44
Σχήμα 13: Τυπική τοπολογία ενός off-board φορτιστή [12].	44
Σχήμα 14: Γενική τοπολογία φορτιστή ηλεκτρικού οχήματος [14].	45
Σχήμα 15: Κατηγορίες (modes) αγωγίμης φόρτισης [15].	47
Σχήμα 16: Σταθμός φόρτισης με back to back AC/DC/DC μετατροπείς [17].	49
Σχήμα 17: Σταθμός φόρτισης από τεχνική μελέτη [18].	50
Σχήμα 18: Σταθμός φόρτισης από τεχνική μελέτη [19].	50
Σχήμα 19: Σταθμός φόρτισης από τεχνική μελέτη [20].	51
Σχήμα 20: Σταθμός φόρτισης μονόδρομης ροής ισχύος [17].	52
Σχήμα 21: Σταθμός Multiport με κοινό AC ζυγό [21].	53
Σχήμα 22: Σταθμός με μετατροπείς πολλαπλών επιπέδων [17].	54

Σχήμα 23: Σταθμός με μετατροπείς πολλαπλών επιπέδων και BES [17].	55
Σχήμα 24: Κεραυνικά πλήγματα σε σταθμούς φόρτισης EV [27].	57
Σχήμα 25: Υπαίθριος σταθμός φόρτισης (α) χωρίς και (β) με γειτονικό ΣΑΠ [15], [27].	58
Σχήμα 26: Υπαίθριος σταθμός φόρτισης, με παροχή Μέσης Τάσης [15].	59
Σχήμα 27: Βάση οικίσκων Pad Mounted [30].	61
Σχήμα 28: Χώρος στάθμευσης σε σταθμό φόρτισης [31].	62
Σχήμα 29: Βασική τοπολογία υπό μελέτη συστήματος.	62
Σχήμα 30: Τρισδιάστατη απεικόνιση του συστήματος [15].	63
Σχήμα 31: Κάτοψη του συστήματος [15].	63
Σχήμα 32: Κτίσμα μετασχηματιστή [15].	64
Σχήμα 33: Χωροθέτηση του εξοπλισμού.	66
Σχήμα 34: Χωροθέτηση μέσων προστασίας.	67
Σχήμα 35: Καμπύλες χρόνου-ρεύματος μέσων προστασίας.	68
Σχήμα 36: Καμπύλες χρονικής διάρκειας έκθεσης ατόμων σε ηλεκτροπληξία.	69
Σχήμα 37: Παράδειγμα λειτουργίας μέσων προστασίας – Περίπτωση 1β.	69
Σχήμα 38: Πρώτη περίπτωση συστήματος γείωσης.	71
Σχήμα 39: Δεύτερη περίπτωση συστήματος γείωσης.	72
Σχήμα 40: Πρώτη περίπτωση συστήματος γείωσης (Σχήμα 38) – 3D.	73
Σχήμα 41: Δεύτερη περίπτωση συστήματος γείωσης (Σχήμα 39) – 3D.	73
Σχήμα 42: Περιοχές ενδιαφέροντος για τάσεις επαφής.	76
Σχήμα 43: Ενδεικτικά γραφήματα (Contour Plots) – Περίπτωση 1	77
Σχήμα 44: Ενδεικτικό σχέδιο – Περίπτωση 1.	79
Σχήμα 45: Παραμετρική ανάλυση – Περίπτωση 1 – 100 Ωm.	86
Σχήμα 46: Παραμετρική ανάλυση – Περίπτωση 1 – 300 Ωm.	87

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1: Επίδραση της υγρασίας στην ειδική αντίσταση εδάφους [5].	24
Πίνακας 2: Ειδική αντίσταση εδάφους σε σχέση με το υλικό εδάφους [5].	25
Πίνακας 3: Χαρακτηριστικά και διαφορές on-board και off-board φορτιστών [13].	44
Πίνακας 4: Επίπεδα φόρτισης σύμφωνα με τα διάφορα διεθνή πρότυπα [15].	46
Πίνακας 5: Σύγκριση τοπολογιών σταθμών φόρτισης [17].	55
Πίνακας 6: Περιπτώσεις προς διερεύνηση.	65
Πίνακας 7: Περιπτώσεις προς διερεύνηση – Πλήρης.	74
Πίνακας 8: Αποτελέσματα από τις προσομοιώσεις – GPR (για $I_G=1$ kA) και R_g (για $\rho=100$ Ωm).	75
Πίνακας 9: Αποτελέσματα αρχικής σχεδίασης.	78
Πίνακας 10: Αποτελέσματα προσομοιώσεων – Τάσεις Επαφής.	81
Πίνακας 11: Αποτελέσματα προσομοιώσεων – Βηματικές Τάσεις.	82
Πίνακας 12: Όρια βηματικών τάσεων και τάσεων επαφής (Σφάλμα 1β, $I_G=1$ kA, $\Delta t=0.355$ s).	82
Πίνακας 13: Συντελεστές αναλογίας για την παραμετρική ανάλυση.	84
Πίνακας 14: Αποτελέσματα παραμετρικής ανάλυσης - Τοπολογία 1.	85
Πίνακας 15: Αποτελέσματα παραμετρικής ανάλυσης – 1 kA.	88
Πίνακας 16: Αποτελέσματα παραμετρικής ανάλυσης – 250A.	89

ΑΥΤΗ Η ΣΕΛΙΔΑ ΕΙΝΑΙ ΣΚΟΠΙΜΑ ΛΕΥΚΗ

Πρόλογος

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια σύντομη παρουσίαση των βασικών εννοιών περί γειώσεων. Ακολουθεί αναφορά στη χρησιμότητα των συστημάτων γείωσης, στα στοιχεία που περιλαμβάνει ένα τέτοιο σύστημα, καθώς και στις παραμέτρους που καθορίζουν την ορθή και ασφαλή λειτουργία μιας εγκατάστασης τέτοιου τύπου. Τέλος, και αφού παρουσιαστούν τα παραπάνω, γίνεται μια συνοπτική αναφορά στον στόχο της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Στο δεύτερο κεφάλαιο, γίνεται μια εκτενής αναφορά στα κριτήρια που πρέπει να πληρούνται κατά τη σχεδίαση ασφαλών συστημάτων γείωσης σε εγκαταστάσεις υψηλής και μέσης τάσης. Τέλος, περιγράφεται λεπτομερώς η επαναληπτική διαδικασία που πρέπει να ακολουθηθεί κατά τη σχεδίαση ενός συστήματος τέτοιου τύπου.

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζονται κάποιες γενικές πληροφορίες για την ηλεκτροκίνηση και τους σταθμούς φόρτισης αρχικά. Στη συνέχεια, αναφέρονται οι διάφορες τοπολογίες σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία. Ακολουθεί μια βιβλιογραφική επισκόπηση σχετικά με την αντικεραυνική προστασία και τη γείωση των σταθμών φόρτισης, ενώ ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στις ιδιαιτερότητες που παρουσιάζουν τα συστήματα που συνδέονται στο δίκτυο διανομής μέσης τάσης. Τέλος, παρουσιάζεται το επιλεγμένο σύστημα προς μελέτη και τα βασικά χαρακτηριστικά του.

Στο τέταρτο κεφάλαιο, αναλύονται το επιλεγμένο προς διερεύνηση σύστημα, η σχεδίαση του συστήματος γείωσής του, καθώς και οι διάφορες περιπτώσεις προς διερεύνηση. Παρουσιάζονται οι διάφορες περιπτώσεις που εξετάστηκαν, ενώ έμφαση δίνεται στις διαφοροποιήσεις που αφορούν στο σύστημα γείωσης. Έπειτα, παρουσιάζεται λεπτομερώς η διαδικασία σχεδίασης που ακολουθήθηκε, καθώς και οι αντίστοιχες προσομοιώσεις ανά περίπτωση. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων αυτών, ενώ γίνεται και αναλυτική ερμηνεία τους. Τέλος, γίνεται παραμετρική ανάλυση, με στόχο τη γενίκευση και την περαιτέρω ερμηνεία τους.

Στο πέμπτο και τελευταίο κεφάλαιο, παρατίθενται τα συμπεράσματα, όπως αυτά προέκυψαν από τις προσομοιώσεις και την παραμετρική ανάλυση. Αναφέρονται τέλος κάποιοι τρόποι περιορισμού των επικίνδυνων δυναμικών που ενδέχεται να αναπτυχθούν σε έναν σταθμό φόρτισης.

ΑΥΤΗ Η ΣΕΛΙΔΑ ΕΙΝΑΙ ΣΚΟΠΙΜΑ ΛΕΥΚΗ

Κεφάλαιο 1: Συστήματα γείωσης

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται αρχικά μια σύντομη παρουσίαση των βασικών εννοιών περί γειώσεων. Ακολουθεί αναφορά στη χρησιμότητα των συστημάτων γείωσης, στα στοιχεία που περιλαμβάνει ένα τέτοιο σύστημα, καθώς και στις παραμέτρους που καθορίζουν την ορθή και ασφαλή λειτουργία μιας εγκατάστασης τέτοιου τύπου. Τέλος, και αφού παρουσιαστούν τα παραπάνω, γίνεται μια συνοπτική αναφορά στον στόχο της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Ενότητα 1.1: Ορισμός και χρησιμότητα συστημάτων γείωσης

Με τον όρο «γείωση» ορίζεται η αγώγιμη σύνδεση ενός ηλεκτρικού στοιχείου ή κυκλώματος, είτε με τη γη είτε με κάποιο άλλο αγώγιμο σώμα τέτοιας έκτασης, που να θεωρείται γη. Σκοπός των διατάξεων γείωσης είναι ο καθορισμός και η διατήρηση του μηδενικού δυναμικού, όπου αυτό απαιτείται [1]. Η κατηγοριοποίηση των γειώσεων γίνεται σύμφωνα με τη χρήση τους ως εξής [2], [3]:

- α) Γείωση λειτουργίας: Σκόπιμη γείωση ενός σημείου ενεργού κυκλώματος, απαραίτητη για τη λειτουργία του. Διακρίνεται σε άμεση, όπου η μόνη αντίσταση που περιλαμβάνεται στο σύστημα είναι η αντίσταση της γείωσης, και σε έμμεση, όπου πλέον στο σύστημα περιλαμβάνονται ωμικές, επαγωγικές και χωρητικές αντιστάσεις εκτός από την αντίσταση της γείωσης. Παράδειγμα εφαρμογής αποτελεί η γείωση του ουδέτερου κόμβου του μετασχηματιστή 20/0.4kV στην πλευρά της χαμηλής τάσης.
- β) Γείωση προστασίας: Γείωση ενός στοιχείου ή κυκλώματος, το οποίο υπό κανονικές συνθήκες δεν φέρει τάση. Παράδειγμα εφαρμογής είναι η γείωση των μεταλλικών, εκτεθειμένων στο περιβάλλον, μερών ενός υποσταθμού μέσης τάσης. Με τον τρόπο αυτό διασφαλίζεται η προστασία τόσο του εξοπλισμού, όσο και των ατόμων που θα βρεθούν στον χώρο.
- γ) Γείωση συστήματος αντικεραυνικής προστασίας: Γείωση των αγωγών καθόδου μιας εγκατάστασης σύλληψης, με στόχο την ασφαλή διοχέτευση κεραυνικών ρευμάτων προς τη γη.

Η αδιάλειπτη λειτουργία του συστήματος γείωσης σε μια εγκατάσταση κρίνεται απαραίτητη. Ένα άρτια σχεδιασμένο σύστημα τέτοιου τύπου, πρέπει να εξασφαλίζει τα εξής [2], [4]:

- ✓ Ασφαλή ροή ρευμάτων κανονικής λειτουργίας, ρευμάτων βραχυκύκλωσης και κεραυνικών ρευμάτων προς τη γη.
- ✓ Προστασία των ανθρώπων από θανατηφόρα ηλεκτροπληξία.

- ✓ Συνεχή και ασφαλή λειτουργία των μέσων προστασίας σε ένα Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας.
- ✓ Παροχή δυναμικού αναφοράς σε ηλεκτρικά συστήματα.
- ✓ Συνεισφορά στην ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα και στην προστασία από ηλεκτρομαγνητικό θόρυβο.
- ✓ Προστασία από στατικό ηλεκτρισμό.

Ενότητα 1.2: Ηλεκτρόδια γείωσης

Ως «ηλεκτρόδια γείωσης» ορίζονται τα αγωγίμα στοιχεία που εγκαθίστανται εντός του εδάφους και χρησιμοποιούνται για να συλλέγουν και να διαχέουν ρεύματα από και προς το έδαφος. Διαχωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες [2]:

1) Βασικά ηλεκτρόδια γείωσης: Πρόκειται για αγωγίμα στοιχεία τα οποία είτε χρησιμοποιούνται αυτούσια, είτε συνδυάζονται μεταξύ τους και δημιουργούν πολύπλοκες δομές. Παρακάτω αναφέρονται μερικά από αυτά:

- α) Γειωτής ράβδου: Σωλήνας ή ράβδος που καρφώνεται είτε ευθεία είτε λοξά στο έδαφος. Η αντίσταση εξαρτάται από το βάθος εγκατάστασης της ράβδου. Συνήθως χρησιμοποιούνται ηλεκτρόδια χαλκού ή επιχαλκωμένου χάλυβα διότι προσφέρουν ιδιαίτερη αντοχή στη διάβρωση, αν και υπάρχουν και ράβδοι ανοξειδώτου χάλυβα και επιψευδαργυρωμένου χάλυβα.
- β) Γειωτής ταινίας: Ταινία που τοποθετείται είτε ευθύγραμμα είτε κυκλικά γύρω από μια εγκατάσταση, σε χαντάκι βάθους συνήθως από 0.5 ως 1 μέτρο. Η αντίσταση εξαρτάται από το συνολικό μήκος της ταινίας. Συνήθως χρησιμοποιούνται είτε χάλκινα ηλεκτρόδια, είτε ηλεκτρόδια γαλβανισμένου ή επιχαλκωμένου χάλυβα.
- γ) Γειωτής πλάκας: Παραλληλόγραμμη πλάκα που ενταφιάζεται κατακόρυφα και σε βάθος μεγαλύτερο του ενός μέτρου. Το υλικό κατασκευής είναι συνήθως γαλβανισμένος ή επιχαλκωμένος χάλυβας.
- δ) Γειωτής ακτινικός: Σύστημα υπό μορφή αστέρα με πολλές ακτίνες. Για την κατασκευή του, χρησιμοποιούνται ταινίες και οριζόντιοι αγωγοί κυκλικής διατομής, ενώ η τελική διάταξη ενταφιάζεται οριζόντια σε βάθος μικρότερο του ενός μέτρου. Χρησιμοποιούνται υλικά όμοια με αυτά του γειωτή ταινίας.

ε) Γειωτής πλέγματος: Πλέγμα κατασκευασμένο από ταινίες και αγωγούς, με τετραγωνικά ανοίγματα πλάτους συνήθως μεγαλύτερο από 1 μέτρο. Τοποθετείται οριζόντια, σε βάθος 0.5 ως 1 μέτρο. Χρησιμοποιούνται υλικά όμοια με αυτά του γειωτή ταινίας.

2) Βοηθητικά ηλεκτρόδια γείωσης: Πρόκειται και πάλι για αγωγή στοιχεία, τα οποία όμως δεν έχουν σαν κύρια λειτουργία την παροχή συστήματος γείωσης. Παρ' όλα αυτά, υπό συνθήκες, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον σκοπό αυτό. Παραδείγματα τέτοιων κατασκευών είναι:

- α) Μεταλλικά δίκτυα σωληνώσεων ύδρευσης.
- β) Θεμέλια μεταλλικών κατασκευών.
- γ) Μεταλλικός οπλισμός θεμελίων από οπλισμένο σκυρόδεμα.

Στην περίπτωση που χρησιμοποιούνται βοηθητικά ηλεκτρόδια γείωσης σε μία εγκατάσταση πρέπει να διασφαλιστεί ότι η χρήση τους ως ηλεκτρόδια γείωσης δεν θα επηρεάσει τη βασική τους λειτουργία αλλά και δεν θα μειώσει τη διάρκεια ζωής τους λόγω διάβρωσης.

Ενότητα 1.3: Αντίσταση γείωσης – Ειδική αντίσταση εδάφους

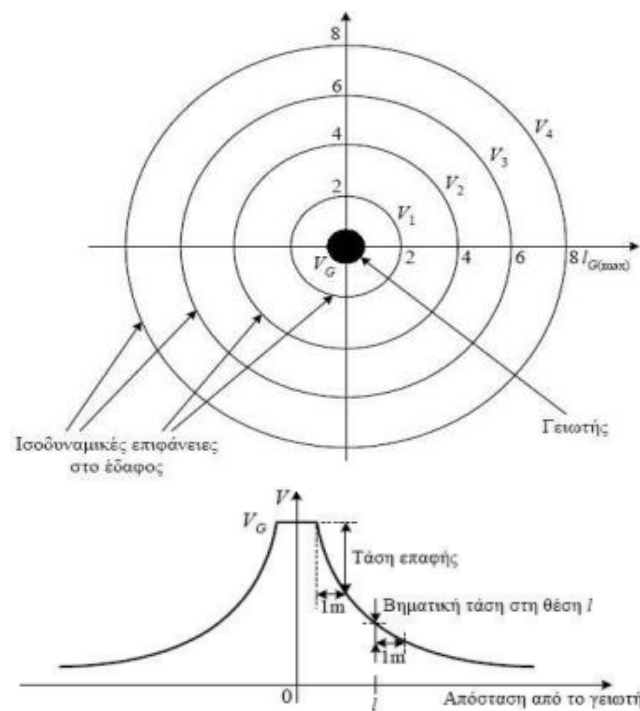
Ως «αντίσταση γείωσης» ορίζεται η ωμική αντίσταση που παρουσιάζεται ανάμεσα στο σύστημα γείωσης και την άπειρη γη. Θεωρητικά, όταν αναφερόμαστε στον όρο «άπειρη γη», εννοούμε ένα σημείο σε άπειρη απόσταση από τον γειωτή, όπου το δυναμικό είναι μηδενικό. Στην πράξη ωστόσο, αυτή η άπειρη απόσταση περιορίζεται σε 5-10 φορές επί τη μεγαλύτερη διάσταση του συστήματος γείωσης.

Για παράδειγμα σε μια απλή περίπτωση, όπου το σύστημα γείωσης αποτελείται από έναν μόνο γειωτή τύπου ράβδου με βάθος ενταφιασμού τα 3 μέτρα, η απόσταση της άπειρης γης είναι μεγαλύτερη από 20 μέτρα.

Πρόκειται για μια αρκετά καλή προσέγγιση, καθώς στο σημείο αυτό, το δυναμικό είναι ίσο με το 2% του δυναμικού της ράβδου.

Το παραπάνω μπορεί να παραστεί σε ένα Σχήμα τάσης-απόστασης, το οποίο ονομάζεται χοάνη δυναμικού (Σχήμα 1) και εξαρτάται αποκλειστικά από τη γεωμετρία του γειωτή, εφόσον το περιβάλλον έδαφος είναι ομοιογενές. Μέσω του σχήματος αυτού, διαπιστώνεται η τάση επαφής, η βηματική τάση, η περιοχή επίδρασης του γειωτή, η απόσταση της άπειρης γης και το σφάλμα στη μέτρηση

της αντίστασης γειωτών [2], [3]. Τα παραπάνω θα αναπτυχθούν σε επόμενη ενότητα.



Σχήμα 1: Χαάνη δυναμικού ενός γειωτή [3].

Η αντίσταση γείωσης εξαρτάται τόσο από τη γεωμετρία και τις διαστάσεις του συστήματος γείωσης, όσο και από την ειδική αντίσταση που παρουσιάζει το έδαφος που το περιβάλλει. Παρακάτω δίνεται η γενική σχέση (1) για τον υπολογισμό της, όταν το έδαφος είναι ομοιογενές και μπορεί να χαρακτηριστεί με μία τιμή ειδικής αντίστασης:

$$Rg = k_g * \rho \quad (1)$$

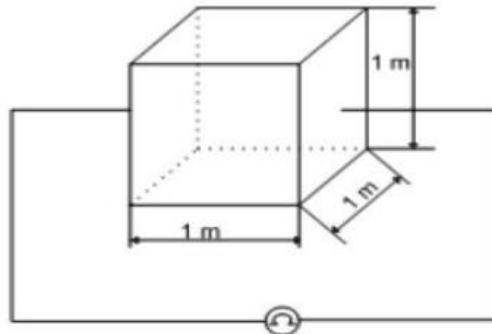
Όπου:

- k_g (m^{-1}), ο γεωμετρικός συντελεστής αναλογίας
- ρ (Ωm), η ειδική αντίσταση του εδάφους

Ο συντελεστής k_g μπορεί είτε να υπολογιστεί μέσω αναλυτικών σχέσεων για σχετικά απλές περιπτώσεις, είτε να εκτιμηθεί μέσω ειδικού λογισμικού όταν η γεωμετρία του συστήματος γείωσης γίνεται πολύπλοκη.

Όσον αφορά την «ειδική αντίσταση εδάφους», είναι η αντίσταση που παρουσιάζει ένας μοναδιαίος κύβος (Σχήμα 2), υλικού του υπό μελέτη εδάφους,

όταν τοποθετηθούν ηλεκτρόδια στις απέναντι πλευρές του [3]. Πρόκειται δηλαδή για ένα μέγεθος, το οποίο καθορίζει την ικανότητα του εδάφους να εμποδίζει τη διέλευση ρεύματος διαμέσου αυτού [5].



Σχήμα 2: Ορισμός ειδικής αντίστασης εδάφους [3].

Μερικοί από τους παράγοντες που διαμορφώνουν και επηρεάζουν την ειδική αντίσταση του εδάφους αναλύονται στη συνέχεια:

- 1) Πεδιακή ένταση: Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, οι αναπτυσσόμενες πεδιακές εντάσεις δεν επηρεάζουν την ειδική αντίσταση του εδάφους, εκτός αν αυτές υπερβούν κάποιες κρίσιμες τιμές. Στην περίπτωση αυτή, αναπτύσσονται ηλεκτρικές εκκενώσεις ή ακόμα και τόξα στην επιφάνεια των ηλεκτροδίων γείωσης και έτσι αυξάνεται το ενεργό μέγεθος του γειωτή [5]. Δηλαδή, το έδαφος γίνεται πιο αγωγίμο και αυτό μπορεί να εκληφθεί ως αύξηση των διαστάσεων των ηλεκτροδίων γείωσης. Τονίζεται ότι η επίδραση του φαινομένου αυτού είναι μικρή στα σφάλματα γης και μεγάλη στα κεραυνικά πλήγματα.
- 2) Μορφή της τάσης: Η ειδική αντίσταση του εδάφους επηρεάζεται από τη μορφή της τάσης που εφαρμόζεται στο σύστημα γείωσης (και τη μορφή ρεύματος που το διαρρέει). Αυτό συμβαίνει γιατί η ειδική αντίσταση αλλά και η διηλεκτρική σταθερά του εδάφους εξαρτώνται από τη συχνότητα διέγερσης. Οι συχνότητες είναι αυξημένες στα κρουστικά φαινόμενα, όπως τα κεραυνικά ρεύματα και ιδίως στο μέτωπο των κυματομορφών. Παράδειγμα φυσικών κρουστικών υπερτάσεων είναι οι κεραυνοί που καταλήγουν στο σύστημα γείωσης μέσω μιας αντικεραυνικής εγκατάστασης [2], [5].
- 3) Πυκνότητα ρεύματος: Γενικότερα, όταν ένας αγωγός διαρρέεται από σχετικά υψηλό ρεύμα, εκλύει θερμότητα στο περιβάλλον γύρω του. Έτσι, αν διέλθει από το σύστημα γείωσης ένα υψηλό ρεύμα σφάλματος, είναι πολύ πιθανό να προκληθεί ξήρανση του περιβάλλοντος εδάφους, εξαιτίας

της εκλυόμενης θερμότητας. Αποτέλεσμα αυτού θα είναι τελικά η αύξηση της ειδικής αντίστασης του εδάφους [5], όπως θα αναλυθεί και στην επόμενη παράγραφο.

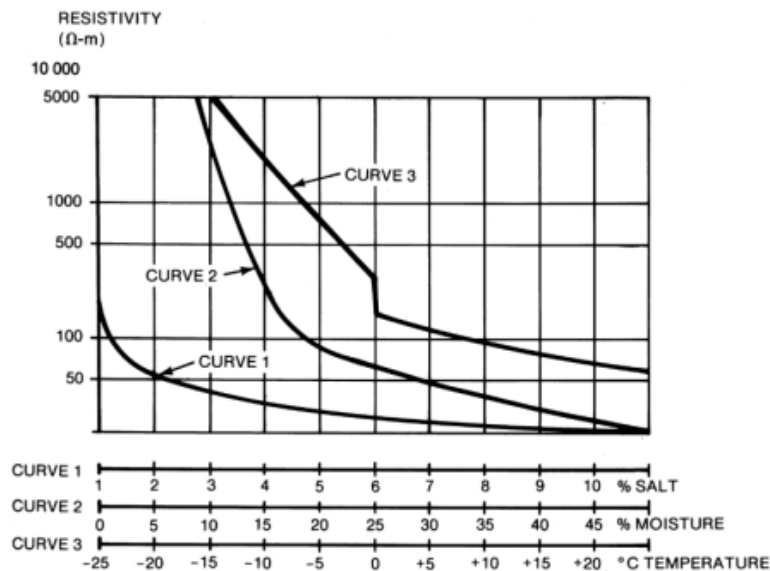
- 4) Υγρασία: Η αντίσταση του εδάφους, είναι μέγεθος αντιστρόφως ανάλογο της υγρασίας του. Έχει παρατηρηθεί ότι το έδαφος ξηραίνεται επιφανειακά κατά τη διάρκεια όλων των εποχών του έτους και όχι σε βάθος μεγαλύτερο του μισού μέτρου, ανάλογα φυσικά και το ύψος του υδροφόρου ορίζοντα σε μία περιοχή. Για τον λόγο αυτό, τόσο η εγκατάσταση γειωτών όσο και τυχόν υπολογισμοί που αφορούν αυτούς, γίνονται σε βάθη μεγαλύτερα από 0.5 μέτρο [2]. Στον Πίνακα 1 φαίνεται η επίδραση της υγρασίας στην ειδική αντίσταση εδάφους.

Πίνακας 1: Επίδραση της υγρασίας στην ειδική αντίσταση του εδάφους [5].

Περιεκτικότητα σε υγρασία (% κατά βάρος)	Ειδική αντίσταση (Ωm)	
	Άνω στρώμα	Κάτω στρώμα
0	$10000 \cdot 10^3$	$10000 \cdot 10^3$
2.5	2500	1500
5.0	1650	430
10.0	530	220
15.0	210	130
20.0	120	100
30.0	100	80

- 5) Θερμοκρασία: Η αντίσταση του εδάφους μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας. Αυτό συμβαίνει γιατί το έδαφος άγει ιοντικά. Έχει παρατηρηθεί ότι η μεταβολή αυτή δεν ξεπερνά συνήθως το 30% κατά τη διάρκεια του έτους, ενώ και σε αυτήν την περίπτωση, σημαντική επίδραση έχει το βάθος εγκατάστασης του γειωτή [2], δηλαδή η μεταβολή αυτή αφορά τα επιφανειακά στρώματα του εδάφους.
- 6) Πίεση: Σε συμπαγή εδάφη, όπου η πίεση είναι σαφώς υψηλότερη, έχουν παρατηρηθεί χαμηλότερες τιμές ειδικής αντίστασης [5].
- 7) Χημική σύσταση εδάφους: Τόσο η ποσότητα όσο και το είδος των αλάτων που βρίσκονται διαλυμένα στο νερό του εδάφους, επηρεάζουν σημαντικά την ειδική αντίσταση αυτού [5].

Στο Σχήμα 3 φαίνεται ένα παράδειγμα της επίδρασης της θερμοκρασίας, της υγρασίας και της περιεκτικότητας του νερού σε άλατα στην ειδική αντίσταση του εδάφους.



Σχήμα 3: Επίδραση θερμοκρασίας, υγρασίας και αλάτων στην ειδική αντίσταση εδάφους [5].

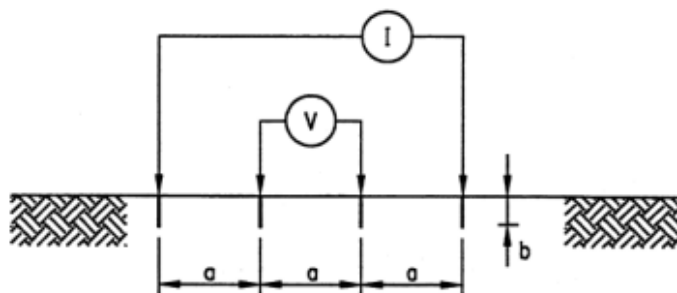
8) Είδος εδάφους: Τα υλικά που αποτελείται το υπό μελέτη έδαφος διαμορφώνουν διαφορετική τιμή ειδικής αντίστασης. Ένα τυπικό μοντέλο εδάφους, αποτελείται από πολλά, οριζόντια στρώματα υλικών. Επομένως, οι αλλαγές εντοπίζονται κυρίως κατακόρυφα και σταδιακά [5]. Στον Πίνακα 2 παρουσιάζονται κάποιες ενδεικτικές τιμές ειδικής αντίστασης ανάλογα με τον τύπο του υπό μελέτη εδάφους. Σημειώνεται ότι τα εύρη του Πίνακα 2 υποδηλώνουν μεγάλες μεταβολές με συνέπεια να πρέπει σε κάθε περίπτωση να μετριοούνται οι πραγματικές πηγές στη θέση ενδιαφέροντος.

Πίνακας 2: Ειδική αντίσταση εδάφους σε σχέση με το υλικό του εδάφους [5].

Υλικό εδάφους	Ειδική αντίσταση (Ωm)
Θαλασσινό νερό	0.5
Νερό λίμνης ή ποταμού	10-100
Χουμώδες έδαφος - Βάλτος	30-100
Οργωμένη γη	90-150
Μπετόν	150-500
Υγρή άμμος	200
Βρεγμένο χαλίκι	200-400
Στεγνή άμμος	500
Ξερή άμμος	1000
Ασβέστης	500-1000
Στεγνό χαλίκι	1000-2000
Πετρώδες έδαφος	1000-3000

Όσον αφορά τη μέτρηση της ειδικής αντίστασης εδάφους, γίνεται με διάφορες μεθόδους και ο προσδιορισμός της αποτελεί ίσως τη σημαντικότερη παράμετρο κατά τη σχεδίαση ενός συστήματος γείωσης. Η πιο διαδεδομένη μέθοδος, ονομάζεται «Μέθοδος Wenner ή τεσσάρων σημείων» και η διαδικασία [5] που ακολουθείται παρουσιάζεται παρακάτω αναλυτικά:

Αρχικά, εισάγονται τέσσερα ηλεκτρόδια σε ευθεία γραμμή και κατακόρυφα στο έδαφος. Τα ηλεκτρόδια θα πρέπει να απέχουν ίση απόσταση μεταξύ τους (a) και να τοποθετούνται σε ίσο βάθος (b) στο έδαφος, όπως φαίνεται στην Σχήμα 4.



Σχήμα 4: Μέθοδος Wenner ή τεσσάρων σημείων [5].

Έπειτα, μετράται το δυναμικό ανάμεσα στα δύο εσωτερικά ηλεκτρόδια και διαιρείται με το ρεύμα που διαρρέει τα δύο εξωτερικά. Το ρεύμα αυτό προκαλεί τα δυναμικά στο έδαφος.

Η φαινόμενη ειδική αντίσταση δίνεται τελικά από τη σχέση (2):

$$\rho_{\alpha} = \frac{4 * \pi * \alpha * R}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4b^2}} - \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}}} \quad (2)$$

Όπου:

- ρ_{α} (Ωm), η φαινόμενη ειδική αντίσταση εδάφους
- R (Ω), η μετρούμενη αντίσταση
- a (m), η απόσταση μεταξύ 2 ηλεκτροδίων
- b (m), το βάθος που φτάνουν τα ηλεκτρόδια.

Σε περίπτωση που το βάθος b είναι πολύ μικρότερο από την απόσταση των ηλεκτροδίων a , ισχύει ο προσεγγιστικός τύπος:

$$\rho_{\alpha} = 2 * \pi * \alpha * R \quad (3)$$

Η μέθοδος αυτή παρέχει τη δυνατότητα μέτρησης της ειδικής αντίστασης σε βάθος a , όπως έχει βρεθεί πειραματικά, και σε εδάφη όπου δεν υπάρχει μεγάλη διαφοροποίηση της στα διάφορα στρώματα του εδάφους.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η ειδική αντίσταση μεταβάλλεται ανάλογα με τις καιρικές συνθήκες, λόγω μεταβολής της θερμοκρασίας και της υγρασίας και με τη σύσταση του εδάφους, ενώ σημαντικές διακυμάνσεις παρατηρούνται και συναρτήσει του βάθους. Χρησιμοποιούνται λοιπόν τα εξής προσεγγιστικά μοντέλα εδάφους:

Ομοιογενές μοντέλο: Χρησιμοποιείται κυρίως όταν οι μετρήσεις της ειδικής αντίστασης δεν φέρουν ιδιαίτερες αποκλείσεις μεταξύ τους. Η προσεγγιστική τιμή της ειδικής αντίστασης δίνεται από τη σχέση [5]:

$$\rho_{av} = \frac{\rho_{a1} + \rho_{a2} + \dots + \rho_{an}}{n} \quad (4)$$

Όπου:

- ρ_{a1} (Ωm), ρ_{a2} (Ωm) ... ρ_{an} (Ωm) η φαινόμενη ειδική αντίσταση εδάφους που μετράται με τη μέθοδο Wenner για διαφορετικές αποστάσεις a .
- n , ο συνολικός αριθμός των μετρήσεων.

Διστρωματικό μοντέλο: Χρησιμοποιείται όταν το υπό μελέτη έδαφος μπορεί να προσεγγιστεί (από τη σκοπιά του ηλεκτρικού ισοδύναμου) με ένα ανώτερο στρώμα πεπερασμένου βάθους και ένα κατώτερο με άπειρο βάθος. Στα όρια των δύο στρωμάτων, αναμένεται απότομη μεταβολή της ειδικής αντίστασης. Για τον λόγο αυτό, ορίζεται ένας συντελεστής ανάκλασης K , και δίνεται από τη σχέση [5]:

$$K = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} \quad (5)$$

Όπου:

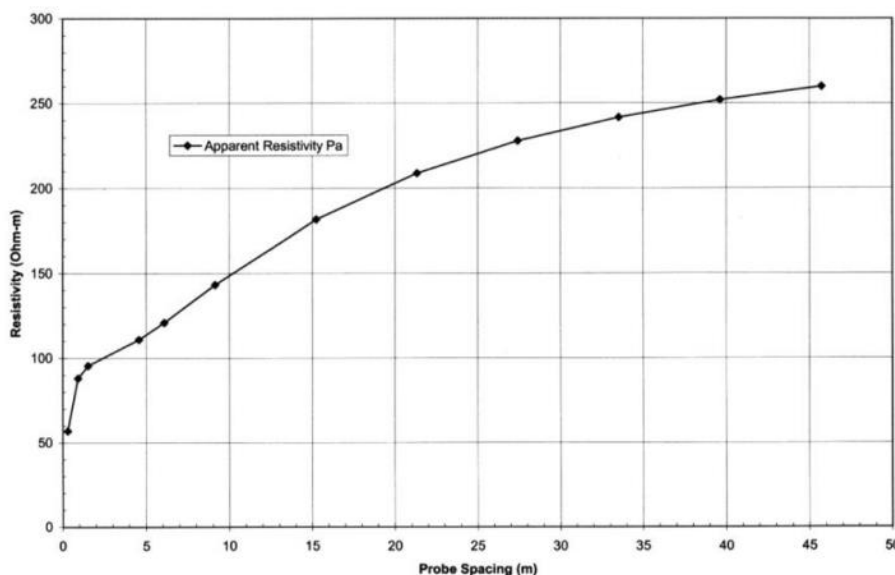
- ρ_1 (Ωm), η ειδική αντίσταση του ανώτερου στρώματος.
- ρ_2 (Ωm), η ειδική αντίσταση του κατώτερου στρώματος.

Οι τιμές των ρ_1 και ρ_2 στην περίπτωση αυτή μπορούν να βρεθούν γραφικά, με τη μέθοδο του Sunde. Τα βήματα που ακολουθούνται συνοψίζονται ως εξής [5]:

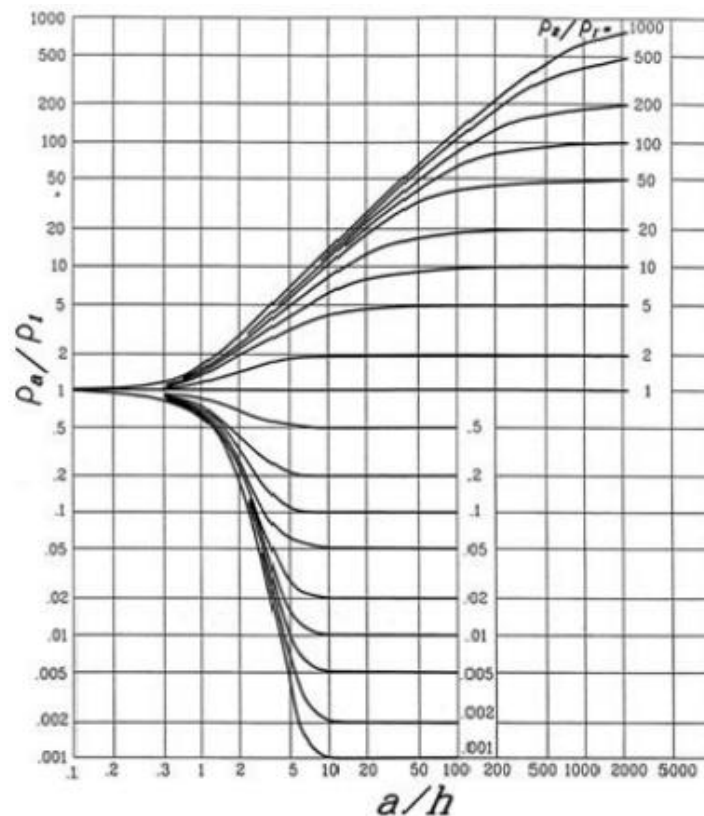
- Κατασκευάζεται το σχήμα ειδικής αντίστασης – απόστασης ηλεκτροδίων όπως φαίνεται στο Σχήμα 5, και ορίζονται οι τιμές των ρ_1 και ρ_2 από αυτό.

- Υπολογίζεται ο λόγος ρ_2/ρ_1 και επιλέγεται η κατάλληλη καμπύλη από το Σχήμα 6.
- Επιλέγεται η τιμή του ρ_a/ρ_1 στην περιοχή εντός της κλίσης της καμπύλης του Sunde, που αντιστοιχεί στο ρ_2/ρ_1 .
- Επιλέγεται η τιμή a/h που αντιστοιχεί στον λόγο ρ_a/ρ_1 , και υπολογίζεται η τιμή της ρ_a .
- Εντοπίζεται η τιμή του a από το Σχήμα 5, σύμφωνα με την υπολογισμένη ρ_a .
- Υπολογίζεται τέλος το βάθος h του ανώτερου στρώματος με βάση την τιμή του a .

Εκτός από την παραπάνω γραφική μέθοδο έχουν προταθεί και άλλες αντίστοιχες κατά καιρούς. Σήμερα τις περισσότερες φορές για την επεξεργασία των μετρήσεων ειδικής αντίστασης του εδάφους χρησιμοποιείται κάποιος αλγόριθμος βελτιστοποίησης, ο οποίος έχει ως στόχο να προσεγγίσει κατά το δυνατόν τις καμπύλες φαινόμενης ειδικής αντίστασης του εδάφους και απόστασης a που έχουν μετρηθεί με κάποιο διστρωματικό μοντέλο εδάφους.



Σχήμα 5: Ειδική αντίσταση ρ_a – Απόσταση ηλεκτροδίων a (παράδειγμα πραγματικών μετρήσεων) [5].



Σχήμα 6: Γραφική μέθοδος του Sunde για την εύρεση διστρωματικού μοντέλου εδάφους από μετρήσεις [5].

Πολυστρωματικό μοντέλο: Χρησιμοποιείται σε ειδικές περιπτώσεις όπου οι μετρούμενες τιμές αντιστάσεων έχουν μεγάλες αποκλίσεις μεταξύ τους και παρουσιάζουν τοπικά μέγιστα και τοπικά ελάχιστα κατά την μεταβολή τους με την απόσταση a μεταξύ των ηλεκτροδίων της μεθόδου Wenner. Περεταίρω ανάλυση του μοντέλου αυτού δεν γίνεται, καθώς είναι ιδιαίτερα περίπλοκο δεν χρησιμοποιείται τόσο συχνά. Τα τελευταία χρόνια πολλά λογισμικά περιλαμβάνουν μεθόδους εξαγωγής αντίστοιχων μοντέλων από αποτελέσματα μετρήσεων.

Ενότητα 1.4: Ροή ρεύματος από το σύστημα γείωσης προς το έδαφος

Ένα σύστημα γείωσης δεν φέρει ρεύμα υπό κανονικές συνθήκες. Αυτό σημαίνει ότι το δυναμικό του είναι ίσο με το δυναμικό της άπειρης γης, δηλαδή μηδενικό. Εξαιρέσεις αποτελούν κάποιες ιδιαίτερες εγκαταστάσεις, όπως τα συστήματα καθοδικής προστασίας επιβαλλόμενου ρεύματος και τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας με επιστροφή ρεύματος μέσω του εδάφους. Παραδείγματα

αντίστοιχων συστημάτων αποτελούν οι μονοπολικές διασυνδέσεις HVDC και η διανομή ηλεκτρικής ενέργειας μέσης τάσης με έναν ενεργό αγωγό και επιστροφή μέσω της γης στις αναπτυσσόμενες χώρες.

Η επιστροφή ρευμάτων μέσω του εδάφους ωστόσο, δεν επιτρέπεται σε πολλά κράτη εξαιτίας των προβλημάτων ασφαλείας και διάβρωσης που δημιουργούνται σε γειτονικές γειωμένες μεταλλικές κατασκευές.

Σε περίπτωση σφάλματος, το σύστημα γείωσης φέρει παροδικά ρεύματα για τη διάρκεια του σφάλματος, δηλαδή μέχρι τη διακοπή του από κάποιο μέσο προστασίας. Το σφάλμα ουσιαστικά είναι είτε σφάλμα γης σε ένα ΣΗΕ. Αντίστοιχα ένα σύστημα γείωσης φέρει ρεύμα μετά από πλήγμα κεραυνού σε ένα σύστημα αντικεραυνικής προστασίας, είτε να κατά τη λειτουργία των διατάξεων προστασίας έναντι υπερτάσεων ενός συστήματος. Στις περιπτώσεις αυτές, το δυναμικό του συστήματος γείωσης ως προς την άπειρη γη ανυψώνεται.

Η μέγιστη ανύψωση δυναμικού σε ένα σύστημα γείωσης (GPR), καθορίζεται από τη χειρότερη περίπτωση σφάλματος και χαρακτηρίζει τη συμπεριφορά του συστήματος κατά τη διέλευση μέγιστου ρεύματος σφάλματος [5], [6].

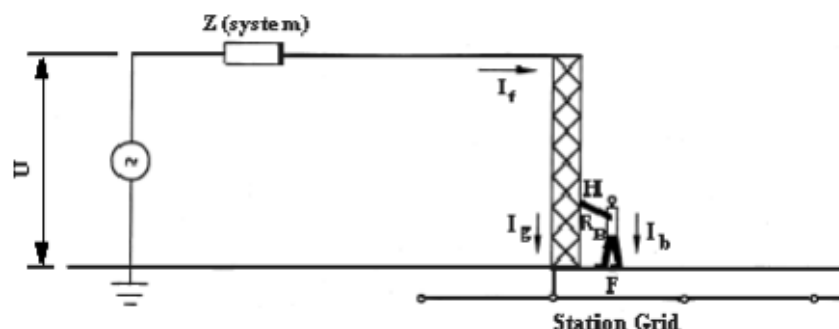
Η τιμή του δίνεται από τη σχέση:

$$GPR = I_G * R_G \quad (6)$$

Όπου:

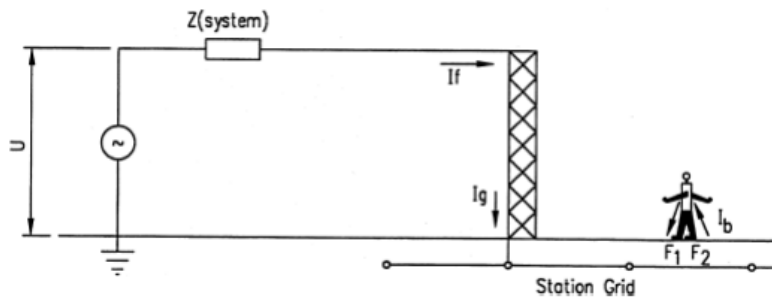
- I_G (A), το μέγιστο ρεύμα πλέγματος
- R_G (Ω), η αντίσταση γείωσης.

Όσο το σύστημα βρίσκεται υπό τάση, το ίδιο συμβαίνει και σε όλα τα γειτονικά, μεταλλικά, γειωμένα στοιχεία, ενώ δυναμικά αναπτύσσονται και στο έδαφος. Ορίζεται λοιπόν ως «τάση επαφής» το δυναμικό που αναπτύσσεται μεταξύ του χεριού του ανθρώπου που έρχεται σε επαφή με γειωμένο αντικείμενο και του ποδιού του που πατά στη γη, όπως φαίνεται στην Σχήμα 7 παρακάτω [7].



Σχήμα 7: Τάση επαφής [7].

Ορίζεται επίσης ως «βηματική τάση» το δυναμικό που αναπτύσσεται μεταξύ των δύο ποδιών του ανθρώπου που στέκεται στην επιφάνεια της γης, όπως φαίνεται στην Σχήμα 8 παρακάτω [7].

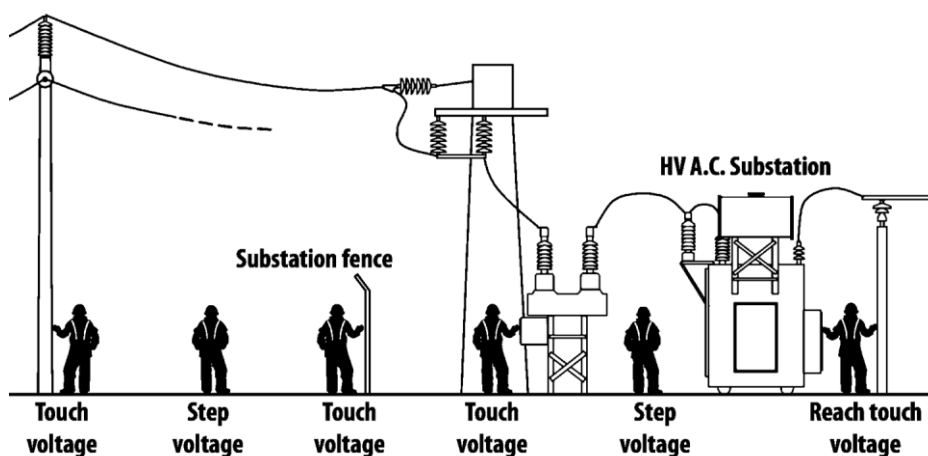


Σχήμα 8: Βηματική τάση [7].

Είναι προφανές ότι αυτές οι αναπτυσσόμενες διαφορές δυναμικού, μπορούν υπό συνθήκες να γίνουν επικίνδυνες τόσο για τον άνθρωπο όσο και για τα διάφορα στοιχεία του εξοπλισμού. Για τον λόγο αυτό, απαιτείται ακριβής υπολογισμός των πιθανών υπερτάσεων σε μια εγκατάσταση, ώστε να διασφαλιστεί η αξιόπιστη και ασφαλής λειτουργία της.

Ενότητα 1.5: Επιτρεπτά όρια βηματικής τάσης και τάσης επαφής

Η ασφάλεια του ανθρώπου σε περίπτωση σφάλματος καθορίζεται από τον χρόνο που απαιτείται μέχρι τα διακοπικά μέσα να αποκόψουν την τροφοδοσία, από την αντίσταση του υλικού επιφάνειας του εδάφους (εάν υπάρχει) και από άλλους, εξ ίσου σημαντικούς παράγοντες. Στο Σχήμα 9 φαίνονται κάποιες τυπικές περιπτώσεις έκθεσης σε επικίνδυνες τάσεις που μπορεί να θέσουν τη ζωή του ατόμου σε κίνδυνο.



Σχήμα 9: Τυπικές περιπτώσεις έκθεσης σε επικίνδυνες τάσεις [8].

Παρακάτω δίνονται οι σχέσεις υπολογισμού (7)-(10) των μεγίστων ορίων βηματικής τάσης και τάσης επαφής, για άνθρωπο 50 και 70 κιλών αντίστοιχα με βάση το διεθνές πρότυπο IEEE Std 80 [6]:

$$E_{step50} = (1000 + 6 * C_s * \rho_s) * \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \quad (7)$$

$$E_{step70} = (1000 + 6 * C_s * \rho_s) * \frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \quad (8)$$

$$E_{touch50} = (1000 + 1.5 * C_s * \rho_s) * \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \quad (9)$$

$$E_{touch70} = (1000 + 1.5 * C_s * \rho_s) * \frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \quad (10)$$

Όπου:

- E_{step} (V), η βηματική τάση
- E_{touch} (V), η τάση επαφής

- C_s , διορθωτικός συντελεστής, $C_s = 1 - \frac{0.09(1-\frac{\rho}{\rho_s})}{2*h_s+0.09}$ (11)

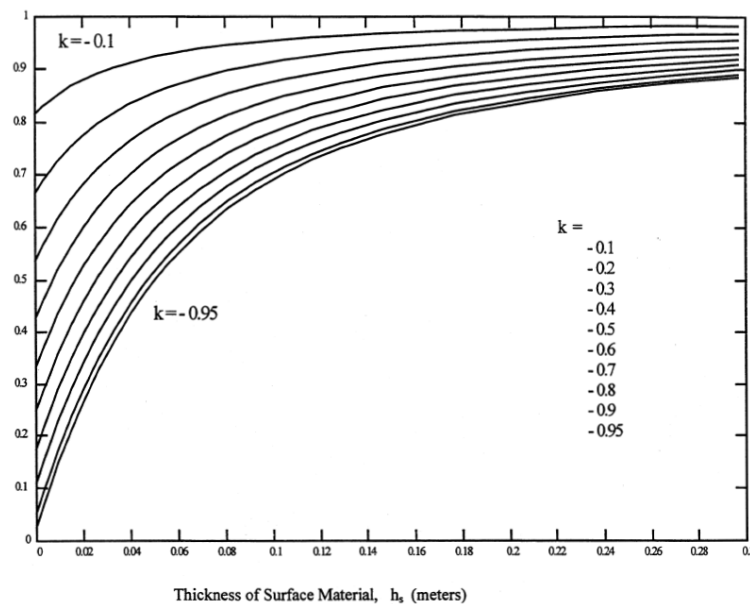
Όπου:

- ρ (Ωm), η ειδική αντίσταση του εδάφους
- ρ_s (Ωm), η ειδική αντίσταση του υλικού επιφάνειας
- h_s (m), το πάχος του υλικού επιφάνειας

Αν δεν χρησιμοποιείται υλικό επιφάνειας, $\rho_s = \rho$ και $C_s = 1$.

- ρ_s (Ωm), η ειδική αντίσταση του υλικού επιφάνειας
- t_s (s), η χρονική διάρκεια του σφάλματος

Από τη σχέση (11), γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι για δεδομένα υλικά, ο διορθωτικός συντελεστής εξαρτάται, εκτός από την ειδική αντίσταση του υλικού επιφανείας και του ίδιου του εδάφους, από το πάχος του στρώματος υλικού επιφάνειας. Στο Σχήμα 10 φαίνεται η συσχέτιση των δύο αυτών μεγεθών [6].



Σχήμα 10: Διορθωτικός συντελεστής C_s – Σχέση του με το πάχος υλικού επιφάνειας h_s για διάφορες τιμές του συντελεστή $k = (\rho - \rho_s) / (\rho + \rho_s)$ [6].

Όσον αφορά το υλικό επιφάνειας, σε ειδικές περιπτώσεις, απλώνεται ένα λεπτό στρώμα υλικού υψηλής ειδικής αντίστασης στην επιφάνεια της γης και πάνω από το πλέγμα γείωσης.

Αυτό γίνεται για να αυξηθεί η αντίσταση επαφής μεταξύ του εδάφους και των ποδιών των ανθρώπων και να διασφαλιστεί έτσι ότι το ρεύμα που θα περάσει μέσα από το ανθρώπινο σώμα σε περίπτωση σφάλματος, θα είναι όσο το δυνατόν χαμηλότερο. Το υλικό αυτό λόγω της μεγάλης ειδικής αντίστασής του δεν αλλοιώνει την κατανομή των δυναμικών στην επιφάνεια του εδάφους.

Τέλος, στο σημείο αυτό σημειώνεται ότι στην Ευρώπη κάποιες φορές εφαρμόζεται το πρότυπο EN 50522 [9] σχετικά με τον υπολογισμό των ορίων ασφαλείας για τις βηματικές τάσεις και τις τάσεις επαφής αν και το IEEE Std 80-2013 [6] είναι πιο διαδεδομένο.

Ενότητα 1.6: Στόχος της διπλωματικής εργασίας

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη και η σχεδίαση συστήματος γείωσης σε εγκαταστάσεις υψηλής και μέσης τάσης. Η σχεδίαση θα πρέπει να γίνει με τέτοιο τρόπο, ώστε να εξασφαλίζεται η προστασία του εξοπλισμού σε περίπτωση σφάλματος αλλά και η προστασία των ανθρώπων που θα βρεθούν στον χώρο από πιθανή θανατηφόρο ηλεκτροπληξία. Ταυτόχρονα, θα πρέπει το σύστημα γείωσης που σχεδιάζεται να είναι οικονομικό και βιώσιμο.

Με βάση τα παραπάνω παρουσιάζονται οι γενικές αρχές της σχεδίασης και η αντίστοιχη διαδικασία. Στη συνέχεια παρουσιάζεται μία εφαρμογή σε πραγματική εγκατάσταση. Πιο συγκεκριμένα, μελετήθηκε το σύστημα γείωσης μιας εγκατάστασης σταθμών φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων, συνδεδεμένη στο δίκτυο διανομής μέσης τάσης, λαμβάνοντας υπ' όψιν όλες τις ιδιαιτερότητες ενός τέτοιου συστήματος. Η σχεδίαση του συστήματος έγινε σύμφωνα με το πρότυπο IEEE Std 80-2013 [6], ενώ η τελική προσομοίωση και ο έλεγχος της παρεχόμενης ασφάλειας από αυτό, έγινε με χρήση του λογισμικού CYMGrd [10] της εταιρείας CYME.

Κεφάλαιο 2: Σχεδίαση συστήματος γείωσης εγκατάστασης υψηλής τάσης

Στο δεύτερο κεφάλαιο, γίνεται μια εκτενής αναφορά στα κριτήρια που πρέπει να πληρούνται κατά τη σχεδίαση ασφαλών συστημάτων γείωσης σε εγκαταστάσεις υψηλής και μέσης τάσης. Τέλος, περιγράφεται λεπτομερώς η επαναληπτική διαδικασία που πρέπει να ακολουθηθεί κατά τη σχεδίαση ενός συστήματος τέτοιου τύπου.

Ενότητα 2.1: Κριτήρια σχεδίασης και παράμετροι εισόδου για τη σχεδίαση ασφαλών συστημάτων γείωσης εγκαταστάσεων υψηλής τάσης

Η σχεδίαση ενός συστήματος γείωσης, θα πρέπει να γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε να προκύπτει ένα ασφαλές και ταυτόχρονα οικονομικό σύστημα που θα λειτουργήσει για όλη τη διάρκεια ζωής της εγκατάστασης.

Θα πρέπει να προσφέρονται τα απαραίτητα μέσα ώστε ανά πάσα στιγμή, να μεταφέρονται τόσο τα ρεύματα κανονικής λειτουργίας, όσο και τα ιδιαίτερα υψηλά ρεύματα σφαλμάτων, στη γη. Το ίδιο ισχύει και για τα κεραυνικά ρεύματα αν υπάρχει περίπτωση να διαρρέουν το σύστημα γείωσης. Προκειμένου λοιπόν να διασφαλιστεί η αδιάλειπτη λειτουργία του συστήματος, χωρίς αυτό να υπόκειται σε φθορά, θα πρέπει να μην υπερβαίνονται τα λειτουργικά όρια του εξοπλισμού προστασίας.

Θα πρέπει επίσης να διασφαλίζεται η προστασία των ανθρώπων, που θα βρεθούν στον χώρο αλλά και έξω από αυτόν, από τον κίνδυνο της θανατηφόρας ηλεκτροπληξίας. Στη συνέχεια αναφέρονται μερικές συνθήκες υπό τις οποίες η ζωή του ανθρώπου πιθανόν να διατρέχει κίνδυνο εξαιτίας λανθασμένης σχεδίασης του συστήματος γείωσης [3]:

- Πολύ μεγάλο ρεύμα σφάλματος ως προς γη, τέτοιο που να μην μπορεί να διοχετευτεί απ' το σύστημα γείωσης αποτελεσματικά (πιθανή καταστροφή αγωγών του συστήματος).
- Απουσία αντίστασης σε σειρά με το ανθρώπινο σώμα ώστε να περιορίζεται το ρεύμα που θα διαπεράσει τον άνθρωπο σε περίπτωση σφάλματος.
- Διάρκεια σφάλματος ικανή να προκαλέσει θανατηφόρα ηλεκτροπληξία εξαιτίας δυσλειτουργίας των στοιχείων προστασίας της εγκατάστασης.

Βάσει των παραπάνω, προκύπτουν κάποιες παράμετροι που πρέπει να τηρούνται προκειμένου να διασφαλίζεται η αρτιότητα του συστήματος γείωσης [3]:

- Τα ηλεκτρόδια γείωσης πρέπει να κατανέμονται σωστά στον χώρο της εγκατάστασης ώστε να ελέγχονται αποτελεσματικά οι πιθανές υπερτάσεις.
- Κάθε εκτεθειμένο, αγώγιμο μέρος του εξοπλισμού της εγκατάστασης, πρέπει να γειώνεται σε κοινό σύστημα γείωσης.
- Το σύστημα γείωσης πρέπει να αντέχει τα υψηλά ρεύματα σφαλμάτων χωρίς να υπόκειται σε θερμικές και μηχανικές βλάβες. Το ίδιο ισχύει και για τους αγωγούς ισοδυναμικών συνδέσεων αλλά και για τις συνδέσεις μεταξύ των ηλεκτροδίων και των αγωγών αυτών.
- Ο ουδέτερος αγωγός του μετασχηματιστή πολλές φορές συνδέεται με το σύστημα γείωσης μέσω μιας σύνθετης αντίστασης. Στόχος της αντίστασης αυτής είναι να περιορίζει το μέγεθος των ιδιαίτερα υψηλών ρευμάτων σφάλματος. Στα συστήματα μέσης τάσης συνήθως υφίσταται κάποια μέθοδος περιορισμού του ρεύματος σφάλματος γης. Αντίθετα αυτό συνήθως δεν συμβαίνει στην υψηλή τάση, με συνέπεια τα ρεύματα να είναι πού πιο μεγάλα.
- Έλεγχος και ελαχιστοποίηση ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών και των πιθανών υπερτάσεων σε γειτονικά συστήματα (π.χ. καλώδια ελέγχου).

Συνοψίζοντας, διαπιστώνεται το πόσο σημαντική είναι η σωστή μελέτη, σχεδίαση και κατασκευή ενός συστήματος γείωσης, για την προστασία τόσο του εξοπλισμού της εγκατάστασης όσο και των ατόμων που θα εκτεθούν σε πιθανά σφάλματα εντός αυτής. Η σχεδίαση με βάση το πρότυπο IEEE Std 80-2013 [6] γίνεται με τη θεώρηση ότι τη στιγμή του σφάλματος θα υπάρχει κάποιος άνθρωπος στην πιο επικίνδυνη θέση του συστήματος και η μόνη αντίσταση είναι του σώματος και των ποδιών προς το έδαφος. Επομένως γίνεται με τα πιο αυστηρά κριτήρια.

Όσον αφορά τις παραμέτρους που πρέπει να ληφθούν υπ' όψιν κατά τη σχεδίαση ενός συστήματος γείωσης, υπάρχουν κάποιες οι οποίες είναι ιδιαίτερης σημασίας [6]:

1) Μέγιστο ρεύμα πλέγματος (I_G):

Υπολογίζεται από τη σχέση:

$$I_G = D_f * I_g \quad (12)$$

Όπου:

- D_f (p.u.), ο παράγοντας μείωσης για τη συνολική διάρκεια σφάλματος t_f , για να ληφθεί υπ' όψιν η ύπαρξη συνεχούς συνιστώσας στο ρεύμα σφάλματος

- I_g (A), η ενεργός τιμή του συμμετρικού ρεύματος πλέγματος.

Η ενεργός τιμή του συμμετρικού ρεύματος πλέγματος υπολογίζεται από τη σχέση:

$$I_g = S_f * I_f \quad (13)$$

Όπου:

- S_f (p.u.), ο παράγοντας διαίρεσης ρεύματος σφάλματος
- I_f (A), η ενεργός τιμή του συμμετρικού ρεύματος σφάλματος γης.

Όσον αφορά τον παράγοντα S_f , αυτός αντιπροσωπεύει τον λόγο του ρεύματος που ρέει μεταξύ του συστήματος γείωσης και της περιβάλλουσας γης, προς το συμμετρικό ρεύμα σφάλματος [6]. Υπολογίζεται από τη σχέση:

$$S_f = \frac{I_g}{3I_o} \quad (14)$$

Όπου:

- I_g (A), η ενεργός τιμή του συμμετρικού ρεύματος πλέγματος
- I_o (A), το ρεύμα σφάλματος ομοπολικής συνιστώσας. Η σχέση που θα δώσει τον υπολογισμό του, εξαρτάται από τον τύπο του σφάλματος. Αυτό το ρεύμα είναι αποτέλεσμα της μελέτης βραχυκυκλωμάτων.

Δηλαδή, με τον συντελεστή αυτόν λαμβάνεται υπ' όψιν η επιστροφή ρεύματος προς την πηγή του χωρίς να ρέει μέσα από το έδαφος. Παραδείγματα είναι η επιστροφή μέσω αγωγών προστασίας και μανδύων καλωδίων ισχύος (αρκεί αυτοί να είναι γειωμένοι και στα δύο άκρα τους).

Τέλος, σημειώνεται ότι η χειρότερη συνθήκη σφάλματος γης για την ασφάλεια ατόμων δεν αντιστοιχεί πάντα στο μέγιστο ρεύμα γιατί εξαρτάται και από τη χρονική διάρκεια του σφάλματος.

2) Χρονική διάρκεια σφάλματος (t_f): Μαζί με τον λόγο X/R του συστήματος, καθορίζουν την τιμή του παράγοντα μείωσης D_f . Επίσης επηρεάζουν τη χρονική διάρκεια της ηλεκτροπληξίας.

3) Χρονική διάρκεια ηλεκτροπληξίας (t_s): Καθορίζει το επιτρεπτό όριο ρεύματος που μπορεί να διαπεράσει το ανθρώπινο σώμα, άρα και τα αντίστοιχα όρια βηματικής τάσης και τάσης επαφής. Εξαρτάται από τον χρόνο εκκαθάρισης σφάλματος που προσφέρουν τα μέσα προστασίας της εγκατάστασης. Μπορεί όμως οι χρόνοι αυτοί να μην είναι ίδιοι. Για παράδειγμα όταν εκτελούνται κύκλοι επαναφοράς σε εναέρια δίκτυα γραμμών μεταφοράς και διανομής, ο χρόνος ηλεκτροπληξίας είναι ο αθροιστικός χρόνος που ρέει το ρεύμα σφάλματος.

4) Ειδική αντίσταση του εδάφους (ρ): Τόσο η αντίσταση του συστήματος γείωσης, όσο και οι διάφοροι υπολογισμοί που αφορούν στα επιτρεπτά όρια τάσεων, εξαρτώνται από την ειδική αντίσταση του εδάφους. Η σημασία της έχει αναλυθεί διεξοδικά σε προηγούμενο κεφάλαιο.

5) Ειδική αντίσταση του υλικού επιφάνειας (ρ_s): Η σημασία του υλικού επιφάνειας και η επιπλέον αντίσταση που εισάγει σε σειρά με το ανθρώπινο σώμα, έχουν αναλυθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο.

6) Γεωμετρία του πλέγματος γείωσης: Παράμετροι όπως το μέγεθος της περιοχής προς γείωση, το βάθος ενταφιασμού του πλέγματος και οι αποστάσεις των αγωγών, επηρεάζουν σημαντικά την τάση πλέγματος και φυσικά την αντίσταση γείωσης. Αντίθετα, παράμετροι όπως η διάμετρος των αγωγών ή το πάχος του υλικού επιφάνειας, δεν έχουν σημαντική επιρροή. Γίνεται εύκολα αντιληπτό λοιπόν, ότι οι περιορισμοί που εισάγονται στην περίπτωση αυτή, εξαρτώνται από τη μορφολογία της περιοχής προς γείωση και από διάφορους οικονομικούς παράγοντες.

Ενότητα 2.2: Διαδικασία σχεδίασης

Η διαδικασία που ακολουθείται κατά τη σχεδίαση ενός συστήματος γείωσης απαιτεί κάποια βήματα, τα οποία έχουν καθοριστεί από το πρότυπο IEEE Std 80-2013 [6] (Σχήμα 11). Τα βήματα αυτά παρουσιάζονται στη συνέχεια αναλυτικά:

Βήμα 1: Αρχικά πρέπει να γίνει μια πρόχειρη εκτίμηση της περιοχής που πρέπει να γειωθεί εντός και περιμετρικά της εγκατάστασης, έως και τα όρια της ιδιοκτησίας. Στη συνέχεια θα πρέπει να γίνουν οι κατάλληλες μετρήσεις που αφορούν στην ειδική αντίσταση του εδάφους και σύμφωνα με αυτές, να γίνει η επιλογή του μοντέλου εδάφους (ομοιογενές, διστρωματικό ή πολυστρωματικό).

Βήμα 2: Ακολουθεί η διαστασιολόγηση των αγωγών γείωσης σύμφωνα με το μέγιστο αναμενόμενο ρεύμα σφάλματος και τον χρόνο εκκαθάρισης του (t_c). Ο στόχος είναι οι αγωγοί να αντέξουν το ρεύμα που θα δεχθούν λαμβάνοντας υπ' όψιν και την πιθανή διαίρεση του ρεύματος σε πολλές διαδρομές.

Βήμα 3: Υπολογίζονται τα επιτρεπτά όρια βηματικής τάσης και τάσης επαφής. Η αναμενόμενη χρονική διάρκεια πιθανής ηλεκτροπληξίας (t_s), εκτιμάται κατά τη σχεδίαση, λαμβάνοντας υπ' όψιν τη μελέτη βραχυκυκλωμάτων και τα μέσα προστασίας που έχουν εγκατασταθεί.

Βήμα 4: Γίνεται ο αρχικός σχεδιασμός. Θα πρέπει να περιλαμβάνει έναν αγωγό γείωσης περιμετρικά της εγκατάστασης, καθώς και επαρκείς εγκάρσιους αγωγούς για τη γείωση στοιχείων του εξοπλισμού κλπ. Τόσο οι αποστάσεις των αγωγών, όσο και οι θέσεις των ράβδων γείωσης (τοποθετούνται συνήθως περιμετρικά αλλά και σε σημεία όπου αναμένεται μεγάλο ρεύμα), εξαρτώνται από το μέγιστο ρεύμα (I_G).

Βήμα 5: Εφόσον ολοκληρωθεί ο αρχικός σχεδιασμός, υπολογίζεται η αντίσταση γείωσης με το κατάλληλο μοντέλο εδάφους βάσει των μετρήσεων.

Βήμα 6: Υπολογίζεται το ρεύμα I_G , το οποίο αντικατοπτρίζει τον χειρότερο τύπο και τη χειρότερη θέση σφάλματος, τον συντελεστή μείωσης (D_f) καθώς και οποιαδήποτε πιθανή μελλοντική επέκταση του συστήματος. Τέλος, για να αποφευχθεί ο υπερσχεδιασμός του συστήματος γείωσης, χρησιμοποιείται μόνο ένα μέρος του ρεύματος σφάλματος ($I_G/S_f = 3I_o$), όπου S_f ο συντελεστής διαίρεσης ρεύματος σφάλματος και $3I_o$ το ρεύμα σφάλματος.

Βήμα 7: Εφόσον έχει υπολογιστεί τόσο η αντίσταση γείωσης R_G όσο και το ρεύμα σφάλματος I_G , υπολογίζεται η αναμενόμενη ανύψωση δυναμικού ($GPR = I_G \cdot R_G$). Αν η τιμή αυτή είναι κάτω από τα επιτρεπτά όρια τάσης επαφής (γεγονός σπάνιο), δεν χρειάζεται κάποια περαιτέρω ανάλυση.

Βήμα 8: Υπολογίζονται η τάση πλέγματος (για αναλυτικούς υπολογισμούς βάσει του προτύπου), η τάση επαφής (όταν γίνονται προσομοιώσεις) και η βηματική τάση, με τρόπο ανάλογο του μοντέλου εδάφους που χρησιμοποιήθηκε για τους αναλυτικούς υπολογισμούς.

Βήμα 9: Αν η τάση πλέγματος που υπολογίστηκε τελικά είναι κάτω από το όριο της τάσης επαφής, η διαδικασία συνεχίζει με το βήμα 10. Αν ωστόσο υπολογιστεί μεγαλύτερη, θα πρέπει να γίνουν αλλαγές στον αρχικό σχεδιασμό (βήμα 11).

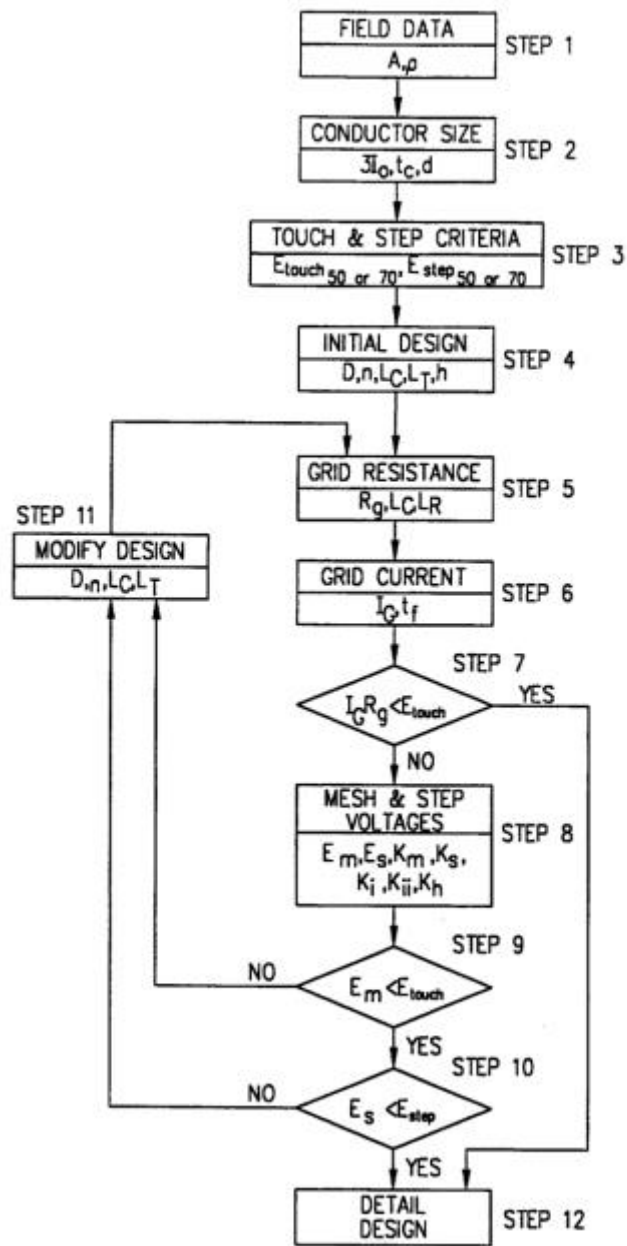
Βήμα 10: Εφόσον τόσο η τάση πλέγματος, όσο και η βηματική τάση είναι κάτω από τα ανώτερα επιτρεπτά όρια, ο σχεδιασμός ολοκληρώνεται εδώ. Οι μόνες

αλλαγές που πιθανόν να χρειαστεί να γίνουν, θα αφορούν μικρές αλλαγές στη γείωση του εξοπλισμού.

Βήμα 11: Αντίθετα, αν οι υπολογισμένες τιμές δεν συμμορφώνονται με τα όρια, θα πρέπει να γίνουν αλλαγές στον αρχικό σχεδιασμό. Οι αλλαγές αυτές μπορεί να είναι: μείωση των αποστάσεων ανάμεσα στους αγωγούς, προσθήκη επιπλέον ηλεκτροδίων γείωσης (οριζόντιων ή ράβδων), χρήση υλικού επιφανείας, αύξηση του πάχους του κλπ. Έπειτα, η διαδικασία επαναλαμβάνεται από το βήμα 5.

Βήμα 12: Όσον αφορά τυχόν ελλείψεις που θα προκύψουν κατά την επαρκή γείωση του εξοπλισμού, θα πρέπει και αυτές να καλυφθούν στο τέλος. Παραδείγματα αυτών είναι: η προσθήκη αγωγών γείωσης κοντά σε εξοπλισμό που απαιτεί γείωση και η προσθήκη ηλεκτροδίων για παροχή γείωσης λειτουργίας (π.χ. γείωση ουδετέρου του μετασχηματιστή). Ο τελικός σχεδιασμός, θα πρέπει επίσης να ελεγχθεί ώστε να εξαλειφθούν κίνδυνοι που οφείλονται σε μεταφερόμενα δυναμικά (δυναμικά που μεταφέρονται σε άλλες εγκαταστάσεις γειτονικές και μη) και σε περιοχές υψηλού κινδύνου εντός της ίδιας της εγκατάστασης.

Φυσικά πρέπει να λαμβάνονται υπ' όψιν όλες οι πιθανές ιδιαιτερότητες μίας εγκατάστασης, όπως για παράδειγμα πιθανή διαρροή των αγωγών του συστήματος γείωσης από συνεχή ρεύματα κτλ.



Σχήμα 11: Σχήμα ροής για τον σχεδιασμό συστήματος γείωσης [6].

ΑΥΤΗ Η ΣΕΛΙΔΑ ΕΙΝΑΙ ΣΚΟΠΙΜΑ ΛΕΥΚΗ

Κεφάλαιο 3: Σταθμοί φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων που συνδέονται στο δίκτυο διανομής μέσης τάσης

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζονται κάποιες γενικές πληροφορίες για την ηλεκτροκίνηση και τους σταθμούς φόρτισης αρχικά. Στη συνέχεια, αναφέρονται οι διάφορες τοπολογίες σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία.

Ακολουθεί μια βιβλιογραφική επισκόπηση σχετικά με την αντικεραυνική προστασία και τη γείωση των σταθμών φόρτισης, ενώ ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στις ιδιαιτερότητες που παρουσιάζουν τα συστήματα που συνδέονται στο δίκτυο διανομής μέσης τάσης.

Τέλος, παρουσιάζεται το επιλεγμένο σύστημα προς μελέτη και σχεδίαση του συστήματος γείωσής του και οι διάφορες περιπτώσεις προς διερεύνηση στην παρούσα εργασία.

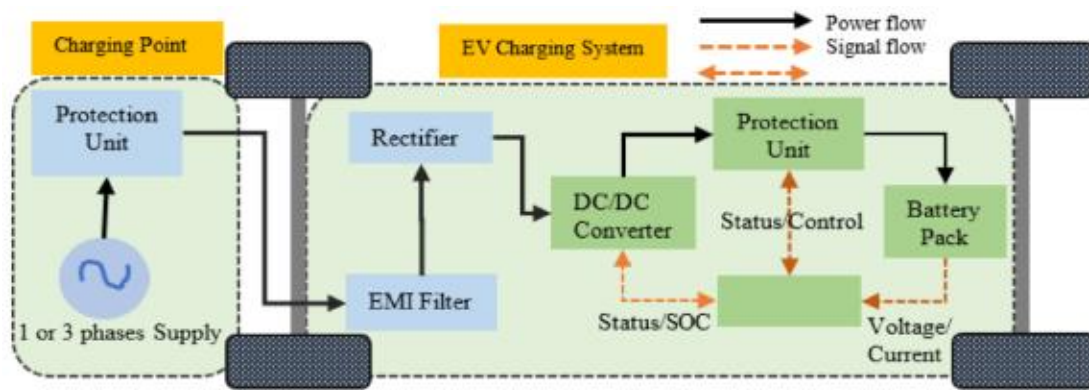
Ενότητα 3.1: Γενικά στοιχεία για τους σταθμούς φόρτισης

Η φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων διαχωρίζεται σε δύο βασικές κατηγορίες, την αγώγιμη και την επαγωγική. Στην πλειοψηφία των σταθμών φόρτισης, εφαρμόζονται τεχνικές αγώγιμης σύνδεσης για τη μεταφορά ισχύος.

Στα συστήματα επαγωγικής φόρτισης, η ισχύς μεταφέρεται χωρίς φυσική επαφή της πηγής και του οχήματος, μέσω της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής. Παρότι η μέθοδος αυτή είναι ιδιαίτερα ασφαλής λόγω της γαλβανικής απομόνωσης, οι υψηλές απώλειες και ο χαμηλός συντελεστής απόδοσης, περιορίζουν τις εφαρμογές της σε ελάχιστες, ειδικές περιπτώσεις [11].

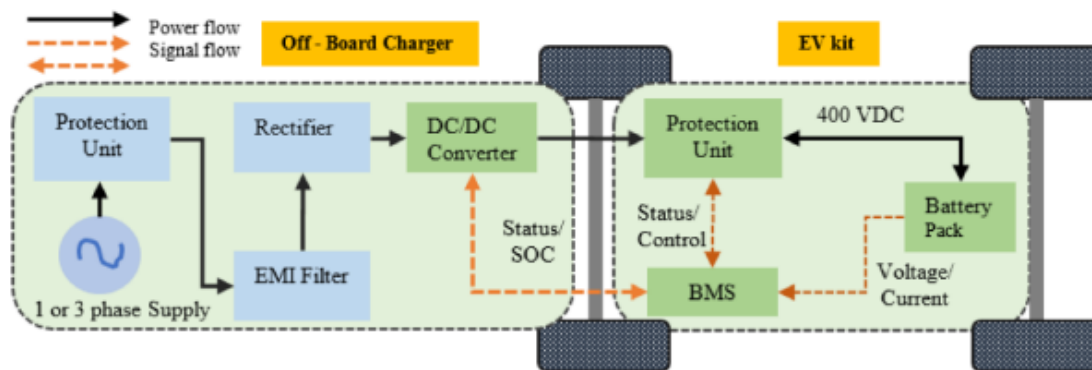
Όσον αφορά τα συστήματα αγώγιμης φόρτισης, η μεταφορά της ισχύος γίνεται με καλωδιακή σύνδεση μεταξύ του σταθμού φόρτισης και του ηλεκτρικού οχήματος. Πρόκειται για την πλέον διαδεδομένη μέθοδο η οποία χωρίζεται σε δύο υποκατηγορίες, την on-board και την off-board φόρτιση (Σχήματα 12 και 13).

Οι φορτιστές on-board προσφέρουν αργή φόρτιση, καθώς είναι σχεδιασμένοι να δέχονται εναλλασσόμενη τάση απευθείας από το δίκτυο της χαμηλής τάσης. Όλοι οι απαραίτητοι μετατροπείς βρίσκονται εντός του οχήματος.



Σχήμα 12: Τυπική τοπολογία ενός on-board φορτιστή [12].

Οι off-board φορτιστές προσφέρουν ταχύτερη φόρτιση, καθώς η μετατροπή της AC τάσης σε DC γίνεται εκτός του οχήματος, σε ειδικό εξοπλισμό του σταθμού φόρτισης. Τα χαρακτηριστικά των φορτιστών των δύο κατηγοριών παρουσιάζονται συνοπτικά στον Πίνακα 3 και μία γενική τοπολογία στο Σχήμα 14.

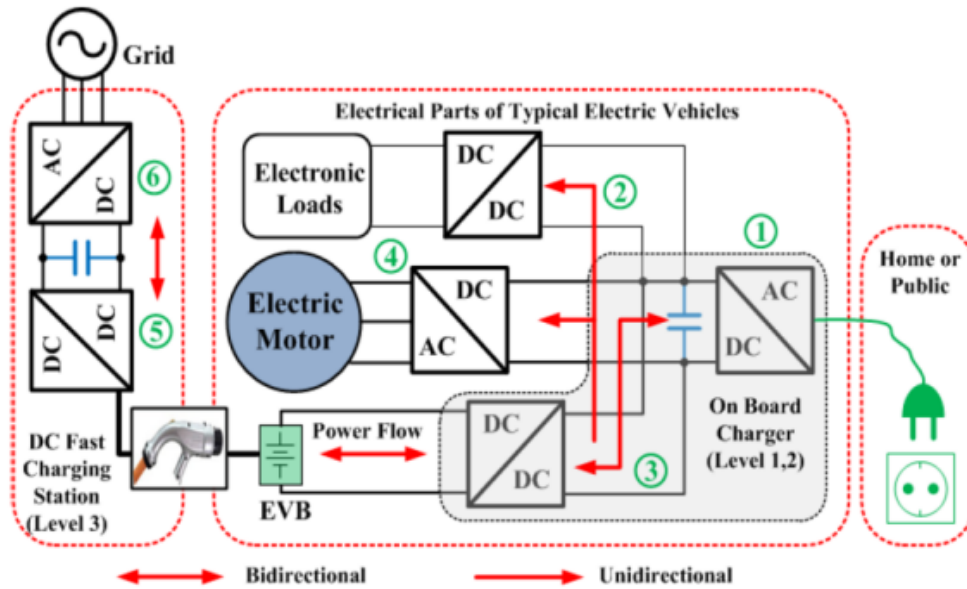


Σχήμα 13: Τυπική τοπολογία ενός off-board φορτιστή [12].

Πίνακας 3: Χαρακτηριστικά και διαφορές on-board και off-board φορτιστών [13].

Φορτιστές on-board	Φορτιστές off-board
Περιορισμένη ισχύς	Υψηλότερη ισχύς
Δεν προκαλούν υπερθέρμανση της μπαταρίας του οχήματος	Απαιτείται έλεγχος της θερμοκρασίας της μπαταρίας
Αργή ταχύτητα φόρτισης	Υψηλή ταχύτητα φόρτισης
Δυνατότητα φόρτισης με χρήση οικιακού ρευματοδότη	Έλλειψη ευελιξίας όσον αφορά την τοποθεσία της φόρτισης

Με τη χρήση κατάλληλου εξοπλισμού δίνεται η δυνατότητα αμφίδρομης ροής ισχύος, τόσο σε on-board όσο και σε off-board φορτιστές. Μέσω της ροής ισχύος από το όχημα στο δίκτυο (V2G) προκύπτουν σημαντικά οφέλη, τόσο υπέρ του δικτύου όσο και υπέρ του εκάστοτε ιδιοκτήτη ηλεκτρικού οχήματος. Η ανάλυση αυτών δεν αποτελεί αντικείμενο της παρούσας εργασίας.



Σχήμα 14: Γενική τοπολογία φορτιστή ηλεκτρικού οχήματος [14].

Κατηγοριοποίηση των σταθμών φόρτισης γίνεται επίσης σύμφωνα με την ισχύ φόρτισης που προσφέρουν, καθώς και τον τύπο τάσης (εναλλασσόμενη-AC ή συνεχής-DC). Τα επίπεδα φόρτισης (Charging Levels) ορίζονται από τους αρμόδιους φορείς και σύμφωνα με τα διεθνή πρότυπα.

Τα πρότυπα της Society of Automotive Engineers (SAE) εφαρμόζονται κυρίως στην Αμερική και στην Ιαπωνία, ενώ αυτά της International Electrotechnical Commission (IEC) εφαρμόζονται κυρίως στην Ευρώπη. Τέλος, το πρότυπο της CHAdeMO Association χρησιμοποιείται στην Ιαπωνία και αφορά στη DC φόρτιση [15]. Στον Πίνακα 4 φαίνονται τα πιο κοινά επίπεδα φόρτισης με βάση τα διεθνή πρότυπα.

Πίνακας 4: Επίπεδα φόρτισης σύμφωνα με τα διάφορα διεθνή πρότυπα [15].

Επίπεδα φόρτισης		Τοποθεσία φορτιστή	Επίπεδο ισχύος και ρεύματος	
AC και DC φόρτιση σύμφωνα με τα SAE STANDARDS				
AC	Level 1	V = 230 (EU) V = 120 (US)	Single Phase: On Board	P = 1.4 kW με (12A)
				P = 1.9 kW με (20A)
	Level 2	V = 400 (EU) V = 240 (US)	Single Phase/Three Phase: On Board	P = 4 kW με (17A)
				P = 8 kW με (32A)
				P = 19.2 kW με (80A)
	Level 3	V = 208-600	Three Phase: Off-Board	P = 50 kW
			P = 100 kW	
DC	Level 1	V = 200-450	Off-Board	P = 40 kW με (80A)
	Level 2	V = 200-450	Off-Board	P = 90 kW με (200A)
	Level 3	V = 200-600	Off-Board	P = 240 kW με (400A)
AC και DC φόρτιση σύμφωνα με τα IEC STANDARDS				
AC	Level 1		Single Phase: On Board	P = 4-7.5 kW με (16A)
	Level 2		Single Phase/Three Phase: On Board	P = 8-15 kW με (32A)
	Level 3		Three Phase: On Board	P = 60-120 kW με (250A)
DC Rapid Charging			Off-Board	P = 1000-2000 kW with (400A)
Πρότυπο φόρτισης CHAdeMO				
DC Rapid Charging			Off-Board	P = 62.5 kW με (125A)

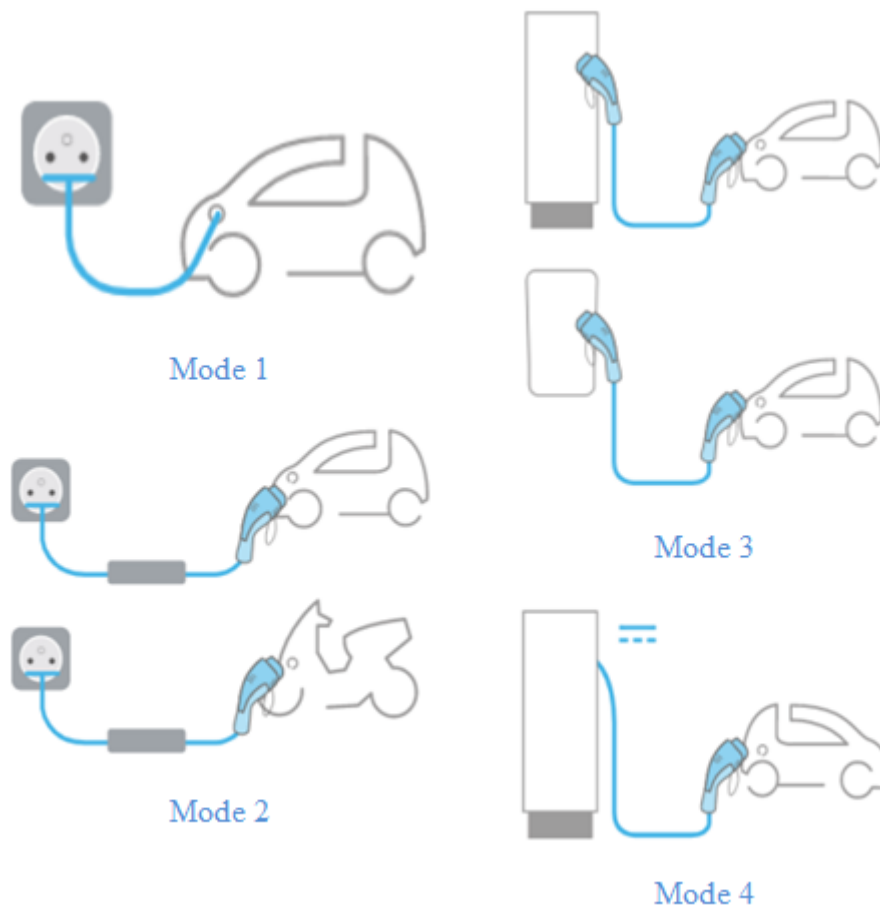
Σύμφωνα με το διεθνές πρότυπο IEC 61851 [16], ορίζονται τέσσερις κατηγορίες στα συστήματα αγωγίμης φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων ως εξής (Σχήμα 15) [15]:

Mode 1: Απευθείας σύνδεση στον οικιακό ρευματοδότη και χρήση του on-board φορτιστή χωρίς επιπλέον μέσα προστασίας, εποπτείας και ελέγχου. Το μέγιστο ρεύμα περιορίζεται στα 16 A , ενώ το επίπεδο τάσης στα 250 V για μονοφασικές και στα 480 V για τριφασικές εφαρμογές. Πρόκειται για την απλούστερη μέθοδο φόρτισης, η οποία ωστόσο μειονεκτεί σε θέματα ασφαλείας και απόδοσης.

Mode 2: Η σύνδεση γίνεται και πάλι στον οικιακό ρευματοδότη χρησιμοποιώντας τον on-board φορτιστή. Πλέον προστίθεται μια συσκευή ελέγχου και προστασίας στο καλώδιο σύνδεσης του οχήματος. Έτσι, παρέχεται δυνατότητα επιτήρησης του αγωγού γείωσης καθώς και προστασία έναντι υπερφόρτισης, υπερθέρμανσης και σφαλμάτων γης. Επιπλέον η ύπαρξη της συσκευής αυτής, επιτρέπει υψηλότερο ρεύμα φόρτισης (32 A), επιταχύνοντας έτσι τη φόρτιση.

Mode 3: Αφορά σταθερές εγκαταστάσεις φόρτισης συνδεδεμένες στο AC δίκτυο, εξοπλισμένες με τα απαραίτητα συστήματα προστασίας και ελέγχου. Παρέχει σημαντικά πλεονεκτήματα, τα οποία αφορούν την ταχύτητα φόρτισης, την ασφάλεια και τις διάφορες δυνατότητες ελέγχου και επικοινωνίας μεταξύ του αυτοκινήτου και του φορτιστή.

Mode 4: Η τελευταία κατηγορία αναφέρεται σε φόρτιση DC απευθείας στην μπαταρία του αυτοκινήτου. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι παρακάμπτεται ο on-board φορτιστής, καθώς όλα τα απαραίτητα μέσα για τη μετατροπή του AC ρεύματος σε DC, βρίσκονται ενσωματωμένα στον φορτιστή. Η ισχύς φόρτισης φτάνει τα 350 kW, επομένως μπορούν να επιτευχθούν ιδιαίτερα αυξημένες ταχύτητες συγκριτικά με τα προηγούμενα modes.



Σχήμα 15: Κατηγορίες (modes) αγωγίμης φόρτισης [15].

Ενότητα 3.2: Τοπολογίες σταθμών φόρτισης

Κατά τη σχεδίαση ενός σταθμού φόρτισης απαιτείται να τηρούνται κάποιες βασικές προϋποθέσεις. Οι σημαντικότερες από αυτές αναλύονται στη συνέχεια [11], [17]:

Υποστήριξη δικτύου: Η υψηλή απαίτηση ισχύος των σταθμών ταχείας φόρτισης προκαλεί σημαντικά προβλήματα στο δίκτυο. Οι σταθμοί αυτοί θα πρέπει να είναι σε θέση να εγχέουν άεργη ισχύ στο δίκτυο, ώστε να διατηρείται η τάση σε επιτρεπτά επίπεδα. Επιπλέον επικουρικές υπηρεσίες όπως η μείωση των αιχμών ζήτησης σε ισχύ και η ροή ισχύος από το όχημα προς το δίκτυο (V2G), κρίνονται απαραίτητες για την εύρυθμη λειτουργία του συστήματος. Για τον λόγο αυτό, απαιτούνται τοπολογίες οι οποίες θα υποστηρίζουν αμφίδρομη ροή ισχύος από και προς το δίκτυο.

Ενσωμάτωση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (RES): Η αξιοποίηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στους σταθμούς φόρτισης μπορεί να καλύψει ένα μέρος της απαιτούμενης ισχύος. Με τον τρόπο αυτό μειώνεται η ισχύς που απαιτείται από το δίκτυο και περιορίζονται φαινόμενα όπως οι υψηλές αιχμές φορτίου και οι βυθίσεις τάσης. Παρόλα αυτά, εξαιτίας της στοχαστικότητας της παραγωγής των μονάδων αυτού του τύπου, τα προβλήματα που δημιουργούνται από τους σταθμούς ταχείας φόρτισης δεν επιλύονται πλήρως.

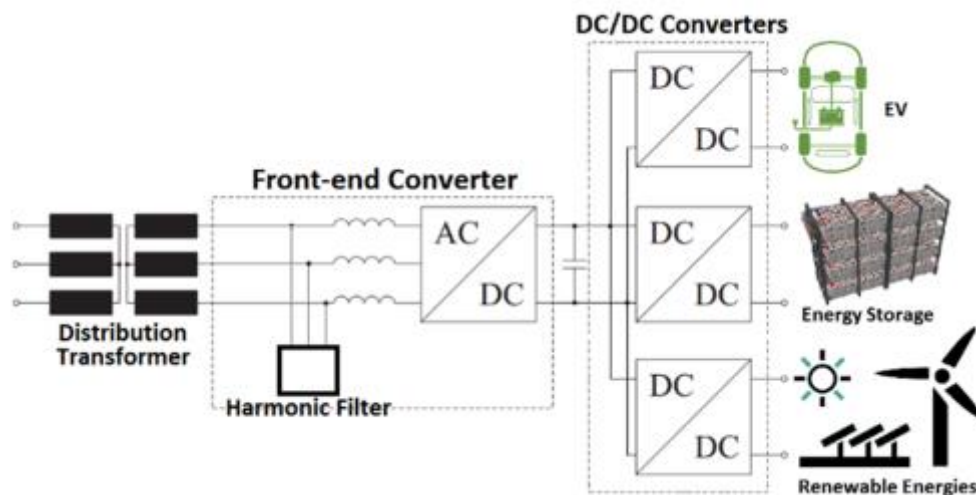
Ενσωμάτωση συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας (BES): Η χρήση συστημάτων τέτοιου τύπου στους σταθμούς φόρτισης μπορεί επίσης να βελτιώσει την απόδοση του συνολικού συστήματος. Παρόλα αυτά, για την πλήρη αξιοποίηση τους, απαιτείται ο συνδυασμός τους με συστήματα ανανεώσιμων πηγών. Με τον τρόπο αυτό, επιλύονται προβλήματα που αφορούν τη στοχαστικότητα και τη μεταβλητότητα της παραγωγής από μονάδες RES.

Πυκνότητα ισχύος: Ως πυκνότητα ισχύος ορίζεται ο λόγος της συνολικής διαθέσιμης ισχύος προς την επιφάνεια που καταλαμβάνει ο σταθμός φόρτισης. Το αποτύπωμα του σταθμού πρέπει να διατηρείται χαμηλό, κυρίως σε αστικές περιοχές.

Αξιοπιστία: Η πολυπλοκότητα του συστήματος θα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν χαμηλότερη. Ένα σύστημα με πολλά ηλεκτρονικά εξαρτήματα, έχει αυξημένη πολυπλοκότητα και άρα χαμηλή αξιοπιστία συνυπολογίζοντας και την ευαισθησία των ηλεκτρονικών σε αναπτυσσόμενες υπερτάσεις.

Στη διεθνή βιβλιογραφία, έχουν προταθεί διάφορες τοπολογίες σύμφωνα με τα παραπάνω. Ο διαχωρισμός τους μπορεί να γίνει σε τρεις γενικές κατηγορίες ως εξής [11], [17]:

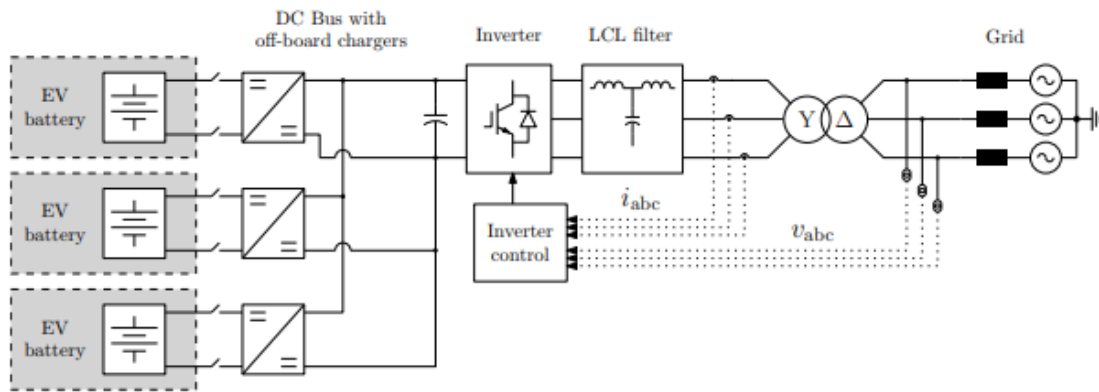
Τοπολογίες με back to back AC/DC/DC μετατροπείς: Στην περίπτωση αυτή χρησιμοποιείται ένας κεντρικός μετατροπέας AC τάσης σε DC. Ο μετατροπέας αυτός μπορεί να συνδεθεί είτε στο δίκτυο χαμηλής τάσης μέσω ενός φίλτρου αρμονικών, είτε στο δίκτυο μέσης τάσης, με τον μετασχηματιστή διανομής να παρεμβάλλεται πριν το φίλτρο. Το επίπεδο τάσης καθορίζεται από την απαιτούμενη ισχύ του σταθμού φόρτισης. Μετά τον μετατροπέα, δημιουργείται ένας DC ζυγός, στον οποίο συνδέονται όλοι οι επιμέρους απαιτούμενοι DC/DC μετατροπείς. Η ύπαρξη DC ζυγού και όχι AC προσφέρει σημαντική ευελιξία, καθώς σε αυτόν μπορούν να συνδεθούν απευθείας διάφορα υποσυστήματα όπως μονάδες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και συστήματα αποθήκευσης. Επιπλέον, λειτουργίες αμφίδρομης ροής ισχύος (V2G, S2G) μπορούν να υλοποιηθούν εύκολα με τη χρήση κατάλληλων μετατροπέων. Στο Σχήμα 16 παρουσιάζεται η γενική τοπολογία ενός σταθμού φόρτισης αυτού του τύπου.



Σχήμα 16: Σταθμός φόρτισης με back to back AC/DC/DC μετατροπείς [17].

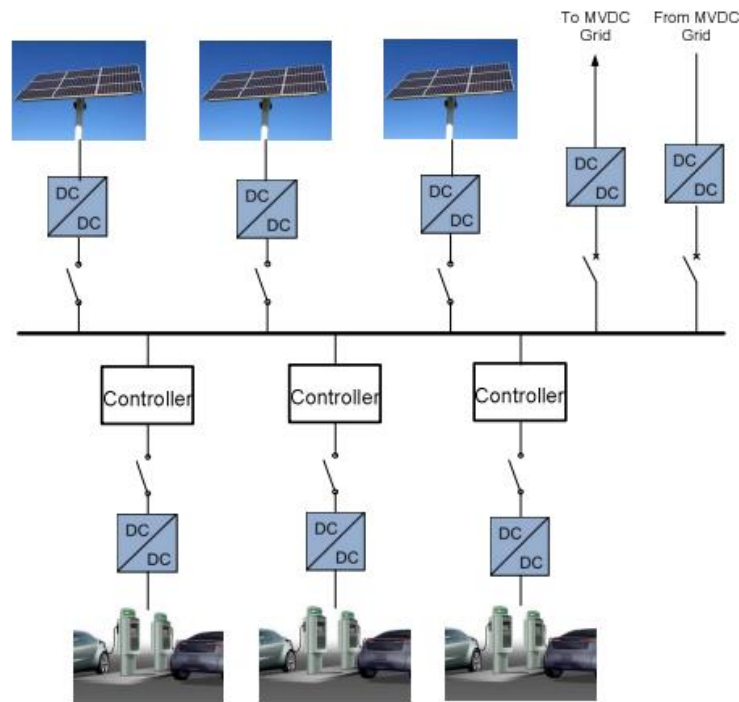
Πρόκειται για την πλέον διαδεδομένη μέθοδο υλοποίησης σταθμών φόρτισης, επομένως υπάρχουν πολλές τεχνικές δημοσιεύσεις στη διεθνή βιβλιογραφία. Οι σημαντικότερες από αυτές παρουσιάζονται στη συνέχεια επιγραμματικά.

Στην τεχνική μελέτη [18] υλοποιείται ένας σταθμός φόρτισης ο οποίος αποτελείται από έναν αμφίδρομο μετατροπέα AC/DC, έναν πυκνωτή εξομάλυνσης στη DC πλευρά και αμφίδρομους DC/DC μετατροπείς για τη φόρτιση των οχημάτων (Σχήμα 17). Η σύνδεση του σταθμού έγινε στο δίκτυο μέσης τάσης. Ο υπό μελέτη σταθμός αποτελείται από δέκα φορτιστές και έχει συνολική ισχύ 1050 kVA.



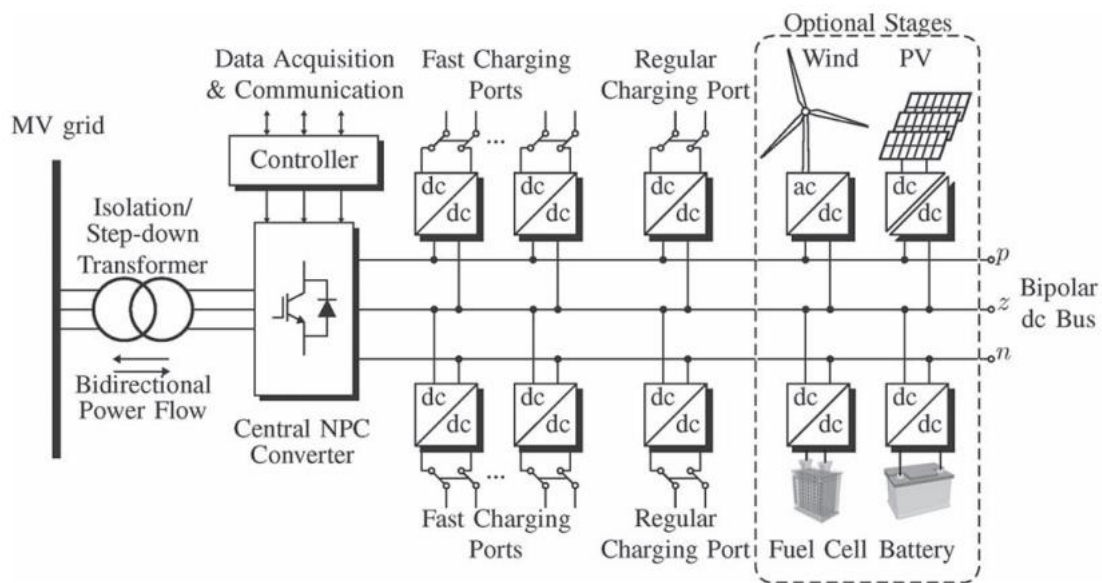
Σχήμα 17: Σταθμός φόρτισης από την τεχνική μελέτη [18].

Στην τεχνική μελέτη [19] υλοποιείται και πάλι ένας σταθμός φόρτισης ο οποίος υποστηρίζει αμφίδρομη ροή ισχύος (Σχήμα 18). Στην περίπτωση αυτή ωστόσο, ο σταθμός συνδέεται σε ένα δίκτυο MVDC. Ο υπό μελέτη σταθμός αποτελείται από τρεις φορτιστές των 50 kW.



Σχήμα 18: Σταθμός φόρτισης από την τεχνική μελέτη [19].

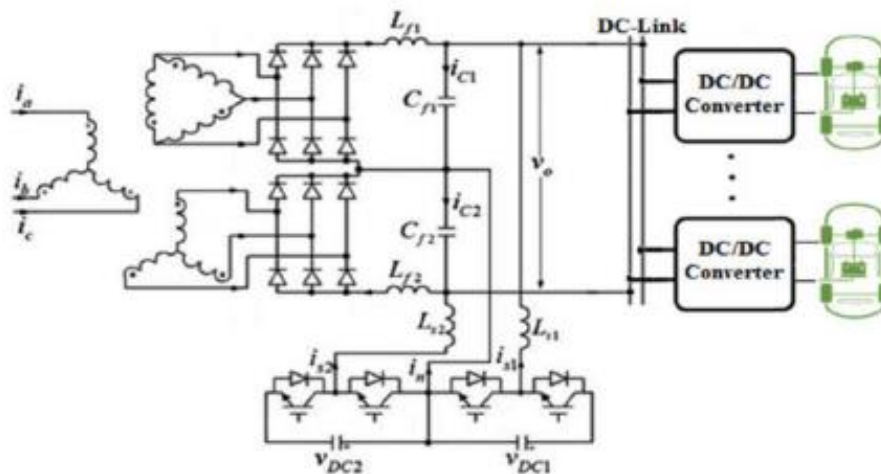
Στην τεχνική μελέτη [20] χρησιμοποιείται ως κύριος μετατροπέας AC/DC ένας μετατροπέας τύπου NPC (Neutral Point Clamped), ώστε να δημιουργηθεί ένας διπολικός DC ζυγός (Σχήμα 19). Ο σταθμός συνδέεται σε AC δίκτυο μέσης τάσης, ενώ υποστηρίζεται και πάλι αμφίδρομη ροή ισχύος.



Σχήμα 19: Σταθμός φόρτισης από την τεχνική μελέτη [20].

Οι παραπάνω μελέτες αφορούν σταθμούς φόρτισης με υποστήριξη αμφίδρομης ροής ισχύος. Καθώς αυτή κρίνεται απαραίτητη, η αναφορά σε σταθμούς με μονόδρομη ροή ισχύος θα είναι σύντομη και θα εξεταστεί μία μόνο σχετική τεχνική μελέτη [17].

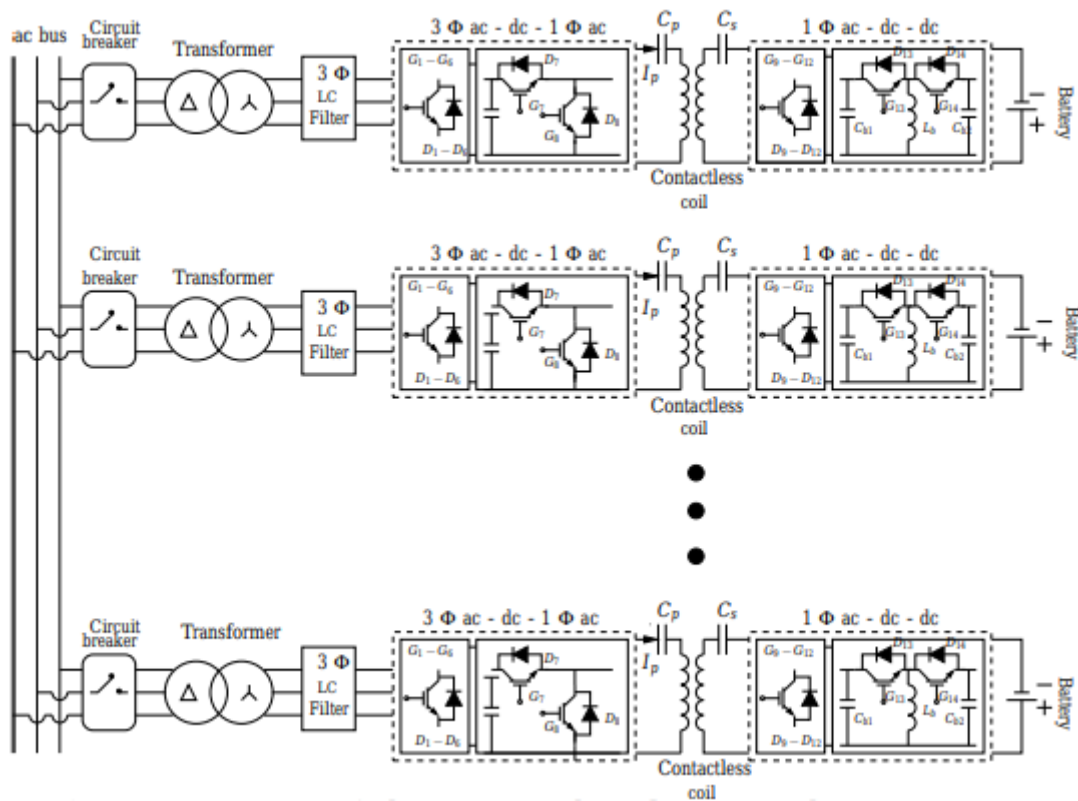
Η τοπολογία που παρουσιάζεται στο Σχήμα 20 βασίζεται στη χρήση ενός δωδεκαπαλικού ανορθωτή με διόδους στην θέση του βασικού AC/DC μετατροπέα. Ο έλεγχος της DC τάσης στον αντίστοιχο ζυγό γίνεται με τη χρήση DC/DC μετατροπέων υποβιβασμού-ανύψωσης (Buck-Boost). Οι μετατροπείς αυτοί φιλτράρουν τις αρμονικές που προκαλούνται από τον μη ελεγχόμενο κύριο AC/DC μετατροπέα. Συστήματα ανανεώσιμων πηγών και αποθήκευσης ενέργειας μπορούν να συνδεθούν στον DC ζυγό, προκειμένου να καλύψουν μέρος των αναγκών του σταθμού φόρτισης.



Σχήμα 20: Σταθμός φόρτισης μονόδρομης ροής ισχύος [17].

Τοπολογίες σταθμών Multiport με κοινό AC ζυγό: Σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία, οι σταθμοί αυτού του τύπου είναι χαμηλής ισχύος, επομένως η τροφοδοσία τους γίνεται από το δίκτυο χαμηλής τάσης. Στην παρούσα εργασία μας απασχολούν κυρίως οι σταθμοί μέσης τάσης, επομένως η αναφορά θα είναι σύντομη.

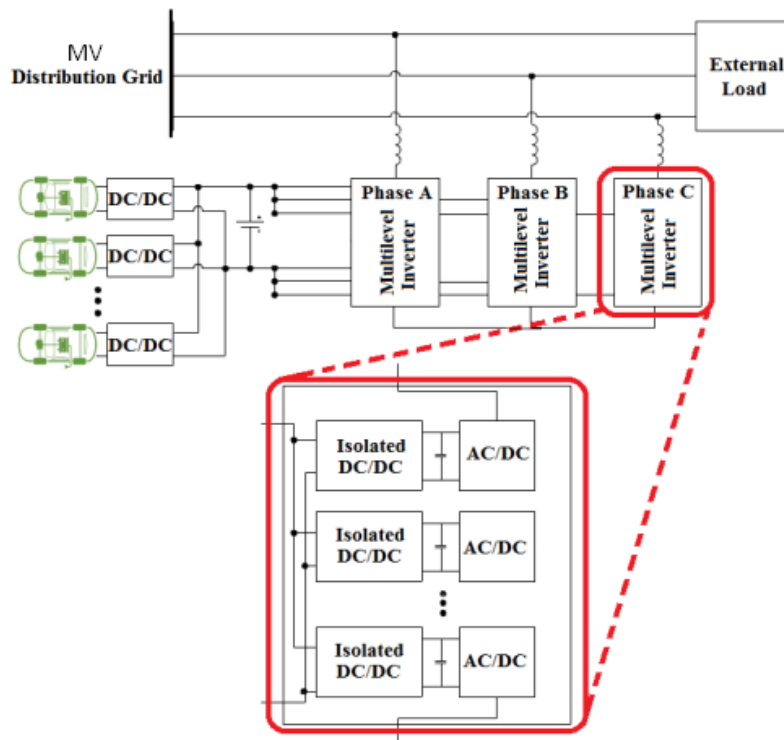
Στην τεχνική μελέτη [21] ο κάθε φορτιστής συνδέεται στο δίκτυο χαμηλής τάσης μέσω ενός μετασχηματιστή απομόνωσης. Ο κύριος μετατροπέας AC/DC μετατρέπει την τάση εισόδου σε DC, η οποία στη συνέχεια μετατρέπεται σε υψηλής συχνότητας AC τάση. Η τάση αυτή στη συνέχεια μεταφέρεται στον φορτιστή μέσω ειδικών πηνίων χωρίς πυρήνα. Βασικό μειονέκτημα της τοπολογίας αυτής είναι η χαμηλή απόδοση και αξιοπιστία εξαιτίας της αυξημένης πολυπλοκότητας. Στην Σχήμα 21 παρακάτω παρουσιάζεται η τοπολογία αυτή.



Σχήμα 21: Σταθμός Multiport με κοινό AC ζυγό [21].

Τοπολογίες χωρίς μετασχηματιστή: Σε κάποιες μελέτες, έχει επιλεγεί να αφαιρεθεί ο μετασχηματιστής. Έτσι προκύπτουν δύο περιπτώσεις: είτε το σύστημα συνδέεται στο δίκτυο της χαμηλής τάσης, κάτι το οποίο όπως αναφέρθηκε παραπάνω κρίνεται ακατάλληλο εξαιτίας της υψηλής απαίτησης σε ισχύ, είτε το σύστημα συνδέεται στη μέση τάση. Στη διεθνή βιβλιογραφία υπάρχουν κάποιες σημαντικές τεχνικές μελέτες, όπου το σύστημα επιλέγεται να συνδεθεί σε παροχή μέσης τάσης.

Σύμφωνα με τις τεχνικές μελέτες [22]-[25], δημιουργείται ένα σύστημα το οποίο συνδέεται κατευθείαν στο δίκτυο μέσης τάσης. Και πάλι δημιουργούνται DC ζυγοί στους οποίους μπορούν να συνδεθούν τόσο μονάδες ανανεώσιμων πηγών όσο και μονάδες αποθήκευσης ενέργειας. Η ροή ισχύος γίνεται αμφίδρομα από και προς το δίκτυο σε κάθε περίπτωση. Στο Σχήμα 22 φαίνεται η βασική τοπολογία που αναπτύχθηκε στις μελέτες αυτές.

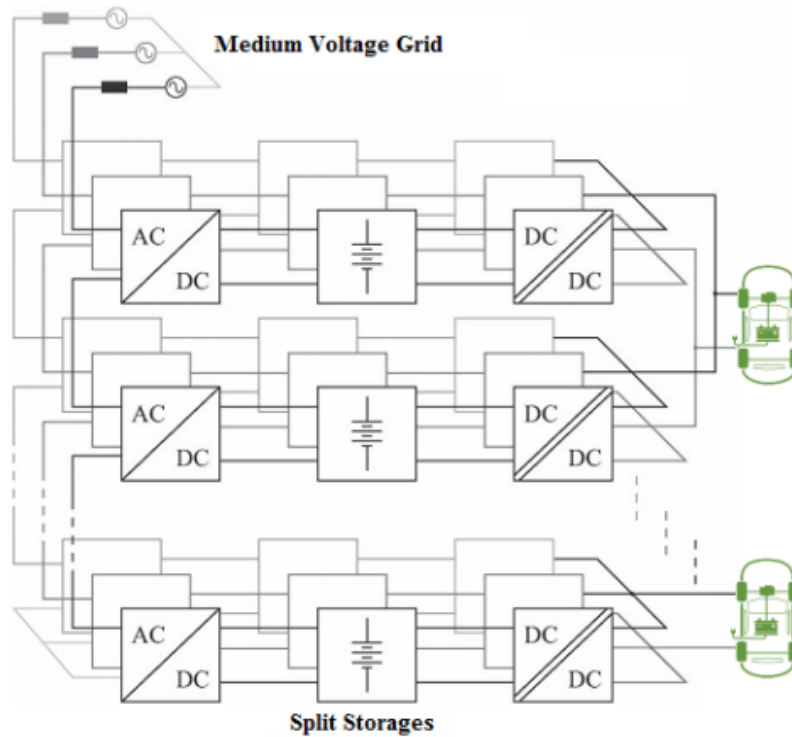


Σχήμα 22: Σταθμός με μετατροπείς πολλαπλών επιπέδων [17].

Παρόλο που η παραπάνω τοπολογία είναι ιδιαίτερα αποδοτική, αποτελείται από πολλά στοιχεία ηλεκτρονικών ισχύος. Αυτό σημαίνει ότι πρέπει να διερευνηθεί ο βαθμός απόδοσης και το κόστος υλοποίησής της. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, συστήματα με αυξημένη πολυπλοκότητα, συνήθως αποφεύγονται.

Στην τεχνική μελέτη [26] παρουσιάζεται μια διαφορετική τοπολογία, χωρίς μετασχηματιστή και πάλι. Η διαφορά είναι ότι πλέον δεν υπάρχει κοινός DC ζυγός και οι επιμέρους AC/DC μετατροπείς συνδέονται παράλληλα στο δίκτυο μέσης τάσης. Αυτό σημαίνει ότι πλέον η φόρτιση των τριών φάσεων γίνεται συμμετρικά. Ωστόσο, η έλλειψη DC ζυγού, μειώνει την ευελιξία του συστήματος, καθώς πλέον η ενσωμάτωση συστημάτων ανανεώσιμων πηγών και αποθήκευσης ενέργειας γίνεται δυσκολότερη.

Στο Σχήμα 23 φαίνεται η βασική τοπολογία που αναπτύχθηκε στη μελέτη αυτή.



Σχήμα 23: Σταθμός με μετατροπείς πολλαπλών επιπέδων και BES [17].

Σύγκριση τοπολογιών: Με βάση τα επιθυμητά χαρακτηριστικά ενός σταθμού ταχείας φόρτισης που αναφέρθηκαν και στην αρχή του κεφαλαίου, η ικανότητα παροχής αμφίδρομης ροής ισχύος και η ενσωμάτωση συστημάτων ανανεώσιμων πηγών και αποθήκευσης ενέργειας, κρίνεται απαραίτητη. Στον Πίνακα 5 συνοψίζονται τα χαρακτηριστικά των τοπολογιών που συζητήθηκαν.

Πίνακας 5: Σύγκριση τοπολογιών σταθμών φόρτισης [17].

Topology Type	Bidirectional	Grid Support	RES Integration	BES Integration	Power Density	Reliability	
						Component Count (PE)	Control Complexity
Bidirectional AC/DC/DC	Yes	All*	Yes	Yes	Medium	Low	Low
Unidirectional AC/DC/DC	No	APF	No	Yes	Medium	Low	Low
Multiport with common AC-bus	Yes	V2G	No	No	Low	High	Low
Transformerless with DC-link	Yes	All*	Yes	Yes	High	High	High
Transformerless without DC-link	Yes	All*	Yes	Yes	High	High	High

Επομένως, εάν η υψηλή πυκνότητα ισχύος δεν αποτελεί απαίτηση, οι τοπολογίες AC/DC/DC παρέχουν όλα τα επιθυμητά χαρακτηριστικά και έχουν πολύ καλές επιδόσεις.

Στην εργασία αυτή θα μελετηθεί η σχεδίαση συστήματος γείωσης σταθμού φόρτισης που συνδέεται στη Μέση Τάση σύμφωνα με το πρότυπο IEEE Std 80. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι στην περίπτωση αυτή πρέπει να ελέγχεται η ασφάλεια έναντι σφαλμάτων γης.

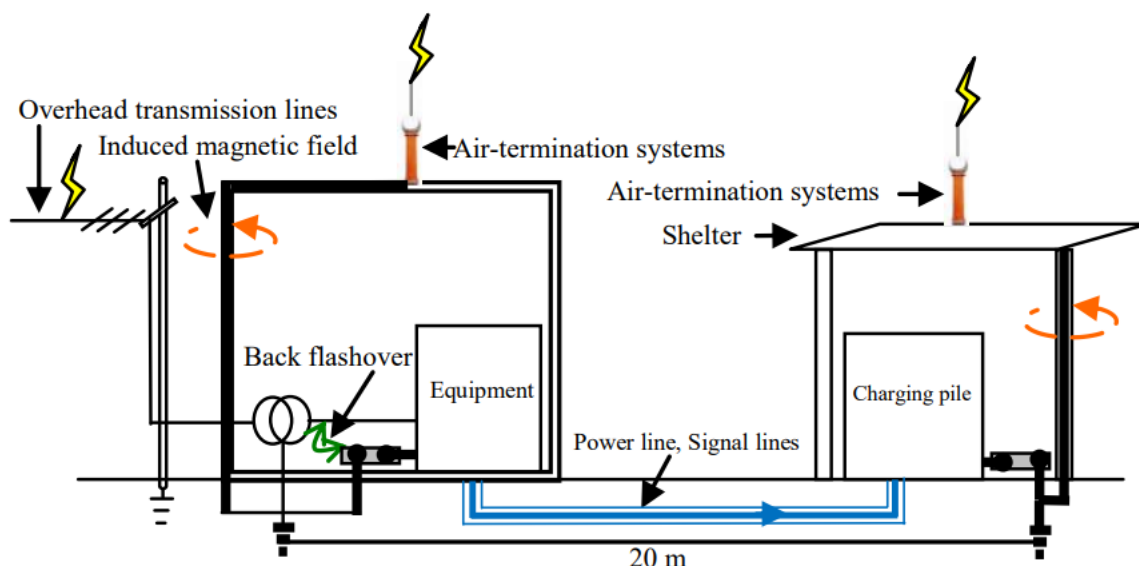
Ενότητα 3.3: Βιβλιογραφική επισκόπηση σχετικά με την αντικεραυνική προστασία και τις γειώσεις σταθμών φόρτισης

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, στις περισσότερες τοπολογίες σταθμών φόρτισης συναντώνται συστήματα ηλεκτρονικών ισχύος καθώς και ηλεκτρονικά κυκλώματα ελέγχου και επικοινωνιών. Πρόκειται για ιδιαίτερα ευαίσθητα στοιχεία, τα οποία είναι ευάλωτα σε υπερτάσεις. Η πρόκληση αυτών μπορεί να οφείλεται σε κεραυνικά πλήγματα, σε διακοπτικούς χειρισμούς, σε σφάλματα γης και σε βραχυκυκλώματα. Στην παρούσα ενότητα εξετάζεται η αντικεραυνική προστασία της εγκατάστασης, επομένως θα γίνει αναφορά σε υπερτάσεις που οφείλονται αποκλειστικά σε πλήγματα από κεραυνούς. Αυτά χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες: τα άμεσα και τα έμμεσα [15], [27].

Ένα άμεσο κεραυνικό πλήγμα θα μπορούσε να συμβεί στις εναέριες γραμμές διανομής ηλεκτρικής ενέργειας πλησίον του σταθμού φόρτισης, και να εισέλθει σε αυτή μέσω του μετασχηματιστή διανομής Μέσης Τάσης. Αν το πλήγμα γίνει στον ίδιο τον σταθμό, στο συλλεκτήριο σύστημα αντικεραυνικής προστασίας, το κεραυνικό ρεύμα θα οδηγηθεί στο σύστημα γείωσης, μέσω των αγωγών καθόδου, και θα προκαλέσει ανύψωση του δυναμικού και πιθανόν ανάστροφες διασπάσεις στον εξοπλισμό της εγκατάστασης.

Ένα έμμεσο κεραυνικό πλήγμα μπορεί να συμβεί οπουδήποτε πλησίον του σταθμού φόρτισης. Στην περίπτωση αυτή, το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο που δημιουργείται από το ρεύμα του οχető επιστροφής του κεραυνού, μπορεί να προκαλέσει επαγόμενες υπερτάσεις στα ηλεκτρονικά και στα τηλεπικοινωνιακά συστήματα του σταθμού. Άμεση συνέπεια θα είναι η δυσλειτουργία και πιθανόν η καταστροφή στοιχείων του εξοπλισμού.

Στο Σχήμα 24 παρακάτω, φαίνονται κάποιες από τις συχνότερες περιπτώσεις κεραυνικού πλήγματος σε εγκαταστάσεις σταθμών φόρτισης.



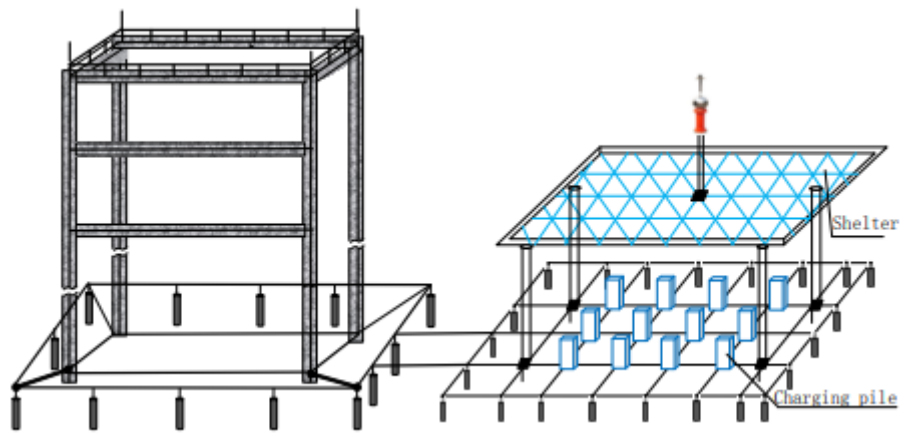
Σχήμα 24: Κεραυνικά πλήγματα σε σταθμούς φόρτισης EV [27].

Η κάθε εγκατάσταση σταθμού φόρτισης, απαιτεί ανάλογη προσαρμογή του συστήματος αντικεραυνικής προστασίας της. Εγκαταστάσεις οι οποίες βρίσκονται σε εξωτερικό χώρο και μακριά από άλλα κτήρια, συνίσταται να διαθέτουν στέγαστρο για μεγαλύτερη ασφάλεια. Όταν αυτό είναι μη-μεταλλικό, θα πρέπει να εφοδιάζεται με κατάλληλο συλλεκτήριο σύστημα, ώστε να είναι σε θέση να δέχεται τους κεραυνούς και να τους διοχετεύει στο σύστημα γείωσης με ασφάλεια. Σε κάθε περίπτωση, οι αγωγοί καθόδου θα πρέπει να είναι κατάλληλα συνδεδεμένοι τόσο με το σύστημα συλλογής όσο και με το σύστημα γείωσης της εγκατάστασης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 25α [27].

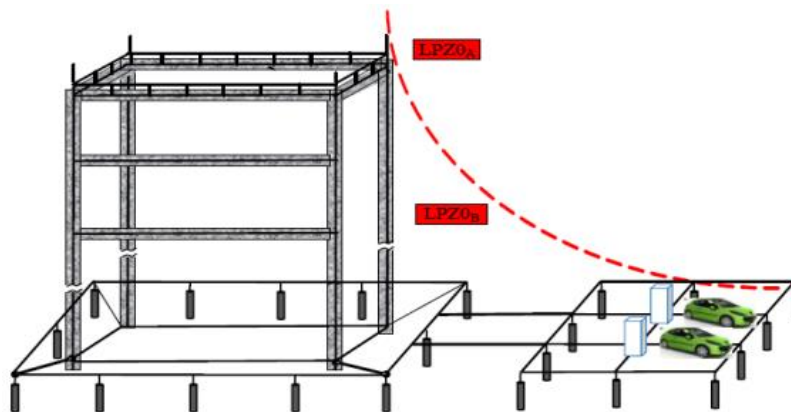
Στην περίπτωση που η εγκατάσταση βρίσκεται κοντά σε ψηλά κτήρια τα οποία διαθέτουν Σύστημα Αντικεραυνικής Προστασίας και καλύπτει την εγκατάσταση του σταθμού φόρτισης (Σχήμα 25β), η παρουσία του στεγάστρου δεν είναι απαραίτητη για την ασφάλεια της εγκατάστασης [15].

Όσον αφορά στο σύστημα γείωσης του σταθμού, στην πρώτη περίπτωση όπου η εγκατάσταση είναι αποκεντρωμένη, μακριά από άλλα κτήρια, αυτό αναγκαστικά θα είναι ανεξάρτητο. Ωστόσο στη δεύτερη περίπτωση συνίσταται να πραγματοποιούνται ισοδυναμικές συνδέσεις μεταξύ του συστήματος γείωσης του σταθμού και των γειτονικών κτηρίων, όπως φαίνεται στο Σχήμα 25β [15].

Εφόσον οι αποστάσεις εντός του σταθμού (Μετασχηματιστής, οικίσκοι φόρτισης (Charging Shelters), σημεία φόρτισης (Charging Points)) είναι μικρές, συνίσταται η κατασκευή ενός κοινού συστήματος γείωσης [27]. Σε κάθε άλλη περίπτωση, μετά από την απαραίτητη μελέτη, κατασκευάζεται ξεχωριστό σύστημα γείωσης για κάθε οικίσκο.



(α)



(β)

Σχήμα 25: Υπαίθριος σταθμός φόρτισης (α) χωρίς και (β) με γειτονικό ΣΑΠ [15], [27].

Κάθε εκτεθειμένη μεταλλική επιφάνεια, θα πρέπει επίσης να συνδέεται κατάλληλα στο σύστημα γείωσης προκειμένου να διασφαλίζεται η ασφάλεια των ατόμων που θα βρεθούν στον χώρο.

Τα μεταλλικά δομικά υλικά (ράβδοι θεμελίων, πλέγματα κλπ.) συνίσταται και αυτά να συνδέονται ηλεκτρικά με το σύστημα γείωσης. Κάποια από αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν και ως κύρια ηλεκτρόδια γείωσης υπό προϋποθέσεις. Για παράδειγμα, οι κατακόρυφοι ράβδοι των θεμελίων, μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως αγωγοί γείωσης για το Σύστημα Αντικεραυνικής Προστασίας [27].

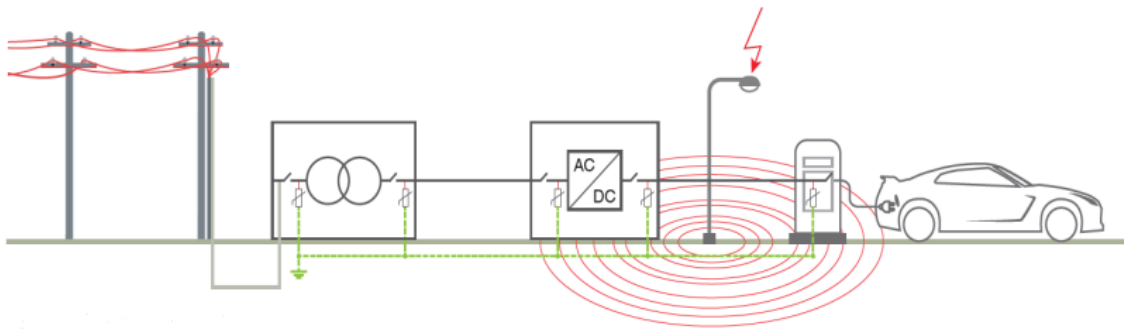
Όσον αφορά στην ηλεκτρομαγνητική θωράκιση της εγκατάστασης, αυτή διασφαλίζεται πρωτίστως από τη θωράκιση που παρέχουν οι οικίσκοι. Δεδομένου ότι το κεραυνικό ρεύμα μπορεί να ρέει μέσω των κατακόρυφων ράβδων οπλισμού στις περιφερειακές κολώνες του κάθε οικίσκου, ο εξοπλισμός εγκαθίσταται σε κεντρικό σημείο αυτού. Με τον τρόπο αυτό, η απόσταση από τις κολώνες γίνεται όσο το δυνατόν μεγαλύτερη και άρα το ηλεκτρομαγνητικό

πεδίο που δέχεται τελικά ο εξοπλισμός είναι όσο πιο εξασθενημένο γίνεται [27]. Ευμενέστερη περίπτωση είναι η χρήση μεταλλικών οικίσκων.

Στους υπαίθριους σταθμούς φόρτισης, συστήνεται κατά την όδευση των καλωδίων να αποφεύγονται μεγάλοι βρόχοι. Προτείνεται επίσης η χρήση καλωδίων τροφοδοσίας, ελέγχου και τηλεπικοινωνιών με θωράκιση και ο ενταφιασμός τους σε χαλύβδινους σωλήνες [15], [27].

Τέλος, όσον αφορά στην εγκατάσταση Εκτροπέων Υπέρτασης και διατάξεων προστασίας έναντι υπερτάσεων στη Χαμηλή Τάση (SAs, SPDs), θα πρέπει να τοποθετούνται όσο πιο κοντά στον εξοπλισμό προς προστασία, με όσο το δυνατόν κοντότερους αγωγούς σύνδεσης. Θα πρέπει επίσης να επιλέγονται κατάλληλα, ώστε στην πρώτη διάταξη των εκτροπέων της εγκατάστασης να διοχετευτεί όσο το δυνατόν μεγαλύτερο ποσοστό κεραυνικού ρεύματος [15]. Με τον τρόπο αυτό, προστατεύεται το μεγαλύτερο μέρος της εγκατάστασης. Οι επόμενες διατάξεις, θα πρέπει να είναι σε θέση να περιορίζουν τις αναπτυσσόμενες υπερτάσεις έτσι ώστε να μην υπερβαίνεται η διηλεκτρική αντοχή του εξοπλισμού σε κάθε σημείο του σταθμού φόρτισης [15].

Στην περίπτωση υπαίθριου σταθμού φόρτισης, μεγάλης ισχύος (Σχήμα 26), συστήνεται η τοποθέτηση ενός Surge Arrester (SA) από την πλευρά της Μέσης Τάσης του μετασχηματιστή. Στα υπόλοιπα σημεία της εγκατάστασης, συστήνεται η τοποθέτηση SPDs σε όλες τις εισόδους και εξόδους των καλωδίων στους οικίσκους [15].



Σχήμα 26: Υπαίθριος σταθμός φόρτισης, με παροχή Μέσης Τάσης [15].

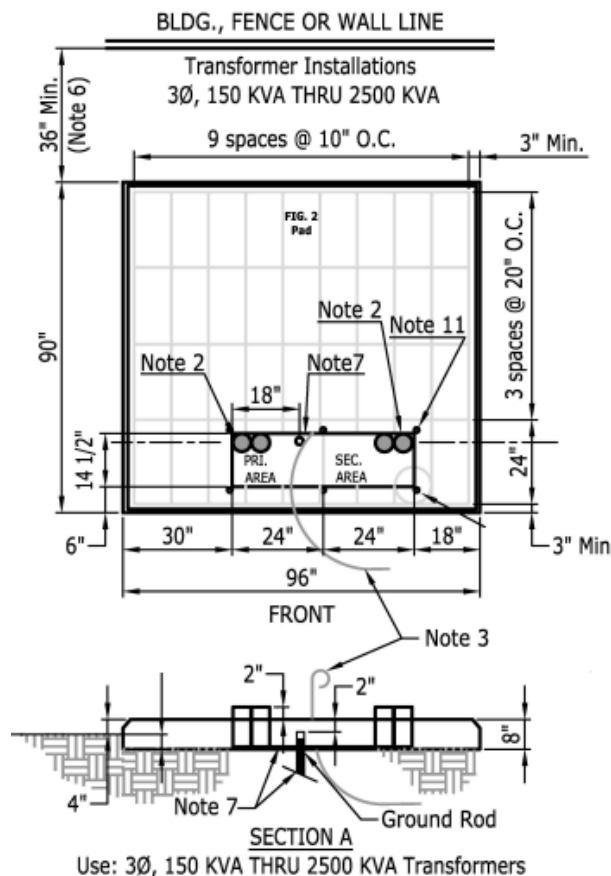
Ενότητα 3.4: Ιδιαιτερότητες σταθμών φόρτισης που συνδέονται στο σύστημα διανομής μέσης τάσης από τη σκοπιά των γειώσεων

Γενικά, όλα τα συστήματα γείωσης εγκαταστάσεων που συνδέονται σε συστήματα διανομής μέσης τάσης πρέπει να προκύπτουν μέσω μελέτης για την ασφάλεια ατόμων σε περίπτωση σφάλματος γης. Η μελέτη αυτή γίνεται είτε με το διεθνές πρότυπο IEEE Std 80-2013 [6] είτε με το ευρωπαϊκό πρότυπο EN 50522:2022 [9]. Επίσης πρέπει να ικανοποιείται και το πρότυπο IEC 62305-3 [28] που αφορά την αντικεραυνική προστασία. Παρακάτω αναλύονται κάποιες ιδιαιτερότητες των σταθμών φόρτισης που συνδέονται στο σύστημα διανομής μέσης τάσης από τη σκοπιά των γειώσεων.

Στην περίπτωση που δεν υπάρχει διαθέσιμη μελέτη βραχυκυκλωμάτων για μια εγκατάσταση συνδεδεμένη στη Μέση Τάση στο ελληνικό σύστημα, η οποία δεν τροφοδοτεί το σφάλμα όπως ένας σταθμός φόρτισης, χρησιμοποιείται ως ρεύμα βραχυκύκλωσης το 1 kA. Πρόκειται για τη μέγιστη τιμή ρεύματος στην περίπτωση μονοφασικού σφάλματος ως προς γη. Αυτό συμβαίνει διότι στο δίκτυο Μέσης Τάσης ο ουδέτερος των μετασχηματιστών 150/20kV, στους οποίους το δευτερεύον τύλιγμα έχει πάντα συνδεσμολογία αστέρα (Y), γειώνεται μέσω μιας αντίστασης με τιμή 12 Ω. Η αντίσταση αυτή στην πράξη περιορίζει το ρεύμα σφάλματος ως προς γη σε τιμές μικρότερες του 1 kA. Άλλοι παράμετροι όπως η σύνθετη αντίσταση των μετασχηματιστών, των γραμμών διανομής και του ίδιου του συστήματος γείωσης, περιορίζουν ακόμα περισσότερο την τιμή του ρεύματος. Τελικά, η πραγματική του τιμή καταλήγει να είναι πολύ μικρότερη από 1 kA. Σε άλλα συστήματα που χρησιμοποιούν άλλες τεχνικές γείωσης του ουδέτερου μπορεί να εμφανιστούν μεγαλύτερα ή και μικρότερα ρεύματα σφάλματος γης.

Όσον αφορά τη θεμελιακή γείωση των οικίσκων, αυτή δεν υφίσταται με την κλασική της έννοια, καθώς οι οικίσκοι είναι συνήθως Pad Mounted (Σχήμα 27). Αυτό στην πράξη σημαίνει ότι η βάση από οπλισμένο σκυρόδεμα του κάθε οικίσκου, απλώς πατάει επάνω σε συμπιεσμένο έδαφος. Σύμφωνα με το πρότυπο IEC 62305-3 [28] ο οπλισμός της βάσης θα πρέπει να συνδέεται με το σύστημα γείωσης της εγκατάστασης, ενώ η ηλεκτρική του συνέχεια κρίνεται απαραίτητη και θα πρέπει να ελέγχεται σε κάθε περίπτωση. Αυτό συμβαίνει διότι το τσιμέντο είναι ένα σχετικά αγώγιμο υλικό, με ειδική αντίσταση που κυμαίνεται από 30 Ωm και πάνω, έως και εκατοντάδες Ωm. Η προσομοίωση του οπλισμού κρίνεται απαραίτητη για τη ρεαλιστικότερη εκτίμηση των δυναμικών λόγω σφάλματος γης.

Όσον αφορά τα μεταλλικά αντικείμενα στην περιοχή του σταθμού φόρτισης, όπως οι στύλοι φωτισμού και οι κρουνοί πυρόσβεσης, πρέπει να ληφθούν υπόψη στην μελέτη γείωσης διότι μπορεί να είναι συνδεδεμένα στο σύστημα γείωσης της Μέσης Τάσης μέσω του αγωγού PE και άρα να βρεθούν υπό επικίνδυνα δυναμικά. Αυτό μπορεί να συμβεί ακόμα και αν είναι γειωμένα ξεχωριστά λόγω ανάπτυξης δυναμικών στο έδαφος. Σύμφωνα με έρευνα που έγινε στο διαδίκτυο, περιμετρικός φράχτης ασφαλείας δεν υπάρχει στις περισσότερες περιπτώσεις και έτσι οι οικίσκοι είναι εκτεθειμένοι στο ευρύ κοινό. Για τον λόγο αυτό, προτείνεται η χρήση των ορίων των 50 kg για τις εγκαταστάσεις αυτές, καθώς τα όρια αυτά είναι πιο αυστηρά. Σε περίπτωση που υπάρχει μεταλλικός φράχτης, θα πρέπει η μελέτη να συμπεριλαμβάνει και τη γείωση αυτού. Οι στύλοι του φράχτη μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως βοηθητικά ηλεκτρόδια γείωσης [29].



Σχήμα 27: Βάση οικίσκων (Pad Mounted) [30].

Τέλος, στους χώρους στάθμευσης των οχημάτων χρησιμοποιείται κυρίως άσφαλτος ως υλικό επιφανείας (Σχήμα 28). Πρόκειται για μονωτικό υλικό με ειδική αντίσταση μεγαλύτερη των 10 kΩm. Σε ελάχιστες περιπτώσεις ωστόσο, χρησιμοποιείται τσιμέντο αντί για άσφαλτο. Το τσιμέντο όπως αναφέρθηκε και παραπάνω είναι σχετικά αγώγιμο υλικό. Στην περίπτωση αυτή, απαιτείται η

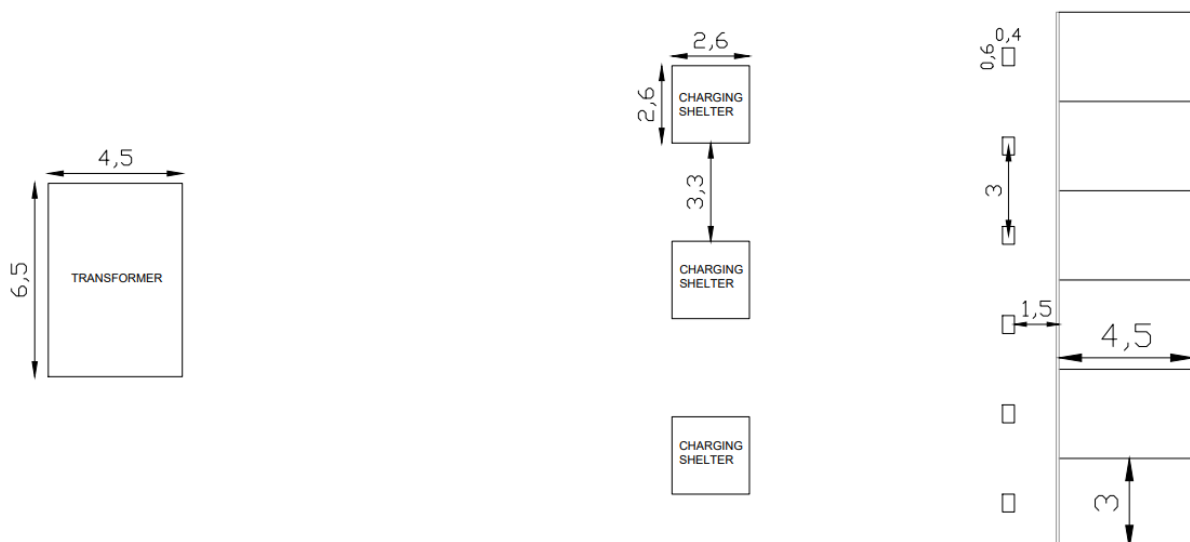
εγκατάσταση ισοδυναμικού πλέγματος σε όλη την επιφάνειά του για λόγους ασφαλείας.



Σχήμα 28: Χώρος στάθμευσης σε σταθμό φόρτισης [31].

Ενότητα 3.5: Επιλεγμένο σύστημα προς διερεύνηση

Το σύστημα που επιλέχθηκε προς μελέτη, αποτελείται από έναν μετασχηματιστή 20/0.4 kV και τρεις επί μέρους μετατροπείς AC/DC. Ο κάθε μετατροπέας οδηγεί σε δύο σημεία φόρτισης, επομένως ο σταθμός διαθέτει συνολικά έξι σημεία ταχείας φόρτισης. Παρακάτω, στο Σχήμα 29, διακρίνονται οι διαστάσεις των οικίσκων, καθώς και αποστάσεις μεταξύ σημείων ενδιαφέροντος.

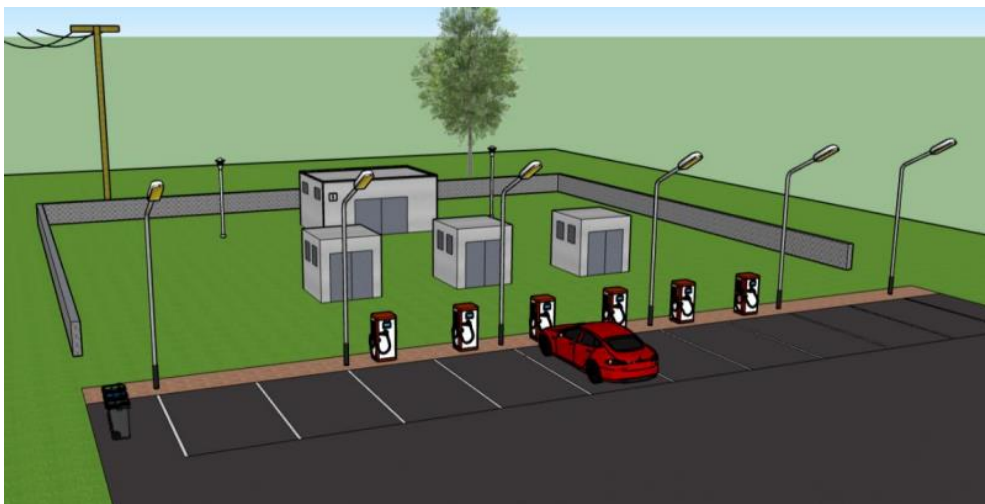


Σχήμα 29: Βασική τοπολογία υπό μελέτη συστήματος.

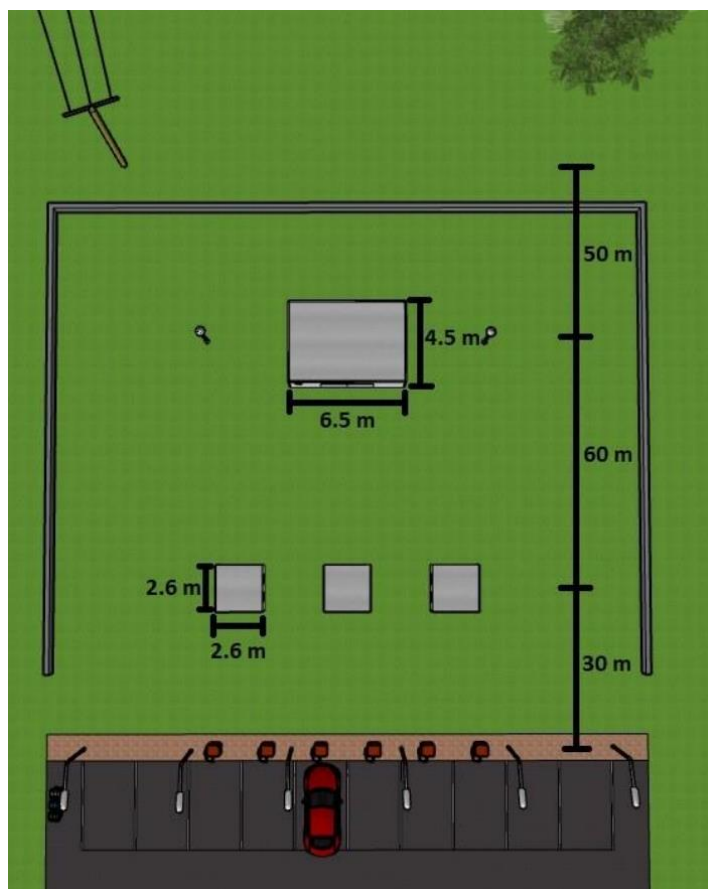
Η παραπάνω τοπολογία βασίζεται σε προγενέστερη διπλωματική εργασία [15], από την οποία προκύπτουν τα εξής στοιχεία:

- Ο μετασχηματιστής διανομής 20/0.4kV έχει ισχύ 1 MVA.
- Ο κάθε οικίσκος φόρτισης αποτελείται από ένα φίλτρο LCL, έναν μετατροπέα ισχύος 300 kW και ένα DC φίλτρο.
- Το κάθε σημείο φόρτισης αποδίδει 150 kW μέγιστη ισχύ.

Στο Σχήμα 30 φαίνεται μια τρισδιάστατη μοντελοποίηση του αρχικού συστήματος, ενώ στο Σχήμα 31 παρουσιάζεται η κάτοψη της τοπολογίας, που περιλαμβάνει τις διαστάσεις της βασικής περίπτωσης που εξετάστηκε. Οι διαστάσεις επιπλέον περιπτώσεων αναφέρονται στο επόμενο κεφάλαιο. Οι σύλοι φωτισμού και ο μεταλλικός φράχτης είναι ενδεικτικοί και δεν ελήφθησαν υπ' όψιν. Σε προηγούμενη ενότητα, έχει αναλυθεί ο τρόπος με τον οποίο αντιμετωπίζονται οι μεταλλικές κατασκευές σε εγκαταστάσεις τέτοιου τύπου.



Σχήμα 30: Τρισδιάστατη απεικόνιση του συστήματος [15].



Σχήμα 31: Κάτοψη του συστήματος [15].

Όσον αφορά στην ηλεκτρική παροχή της εγκατάστασης, αυτή γίνεται με την υπογειοποίηση των εναέριων γραμμών Μέσης Τάσης, πενήντα μέτρα πριν τον μετασχηματιστή. Οι συνδέσεις μεταξύ των επιμέρους στοιχείων του εξοπλισμού χαμηλής τάσης, γίνεται επίσης με υπόγεια καλώδια. Η διαστασιολόγηση των καλωδίων σε κάθε περίπτωση γίνεται λαμβάνοντας υπ' όψιν τη θερμική και τη μηχανική καταπόνησή τους, καθώς και την αναμενόμενη πτώση τάσης κατά μήκος των αγωγών [15].

Τέλος, οι οικίσκοι θεωρούνται μεταλλικοί (π.χ. κτίσμα μετασχηματιστή στο Σχήμα 32) και δεν θα ληφθεί υπ' όψιν ύπαρξη ξεχωριστού συλλεκτήριου συστήματος και αγωγών καθόδου. Οι πόρτες όλων των οικίσκων θεωρούνται συρόμενες, επομένως δεν εκτείνονται εκτός των ορίων των κτηρίων.



Σχήμα 32: Κτίσμα μετασχηματιστή [15].

Κεφάλαιο 4: Σχεδίαση συστήματος γείωσης σταθμού φόρτισης: Προσομοιώσεις, Αποτελέσματα

Στο τέταρτο κεφάλαιο, αναλύεται το επιλεγμένο προς διερεύνηση σύστημα. Παρουσιάζονται οι διάφορες περιπτώσεις που εξετάστηκαν, ενώ έμφαση δίνεται στις διαφοροποιήσεις που αφορούν στο σύστημα γείωσης. Έπειτα, παρουσιάζεται λεπτομερώς η διαδικασία σχεδίασης που ακολουθήθηκε, καθώς και οι αντίστοιχες προσομοιώσεις ανά περίπτωση. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων αυτών, ενώ γίνεται και μια αναλυτική ερμηνεία τους. Τέλος, γίνεται παραμετρική ανάλυση, με στόχο τη γενίκευση και την περαιτέρω ερμηνεία τους.

Ενότητα 4.1: Περιπτώσεις προς διερεύνηση

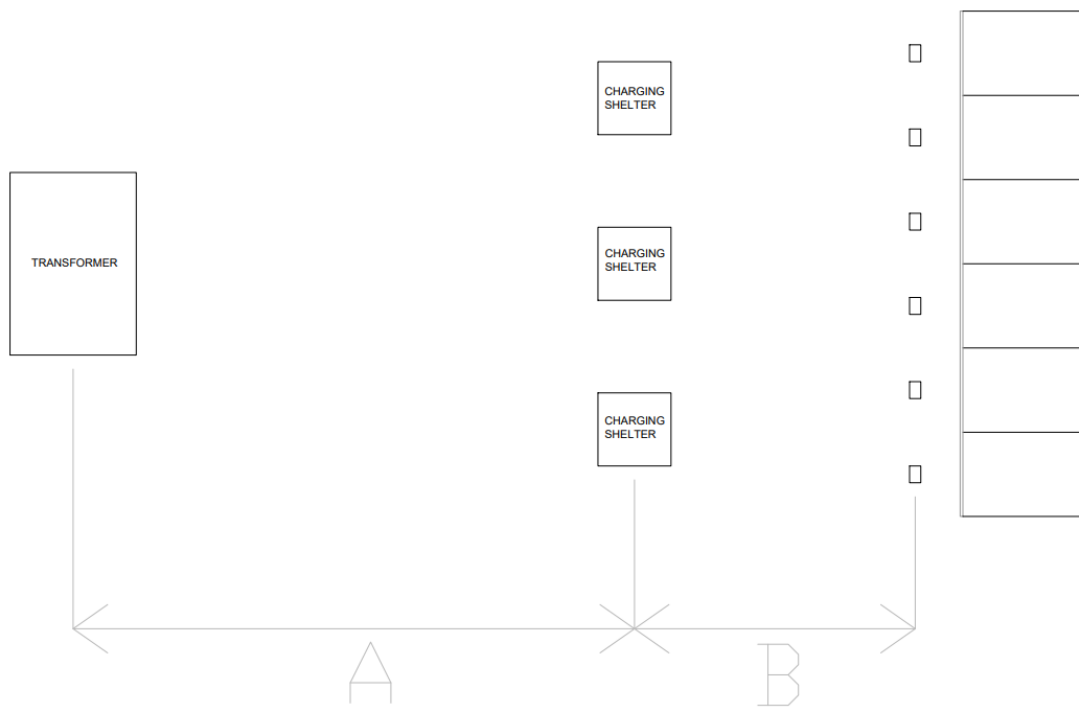
Στην παρούσα εργασία εξετάστηκαν συνολικά τέσσερις τοπολογίες, οι οποίες βασίζονταν όλες στο σύστημα που παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Ο σταθμός φόρτισης δηλαδή αποτελείται από έναν μετασχηματιστή διανομής, τρεις μετατροπείς και έξι σημεία φόρτισης σε κάθε περίπτωση.

Η βασική παράμετρος που μεταβάλλεται ανά περίπτωση είναι η απόσταση του μετασχηματιστή από τους μετατροπείς (A) και η απόσταση των σημείων φόρτισης από τους μετατροπείς (B). Στο Σχήμα 33 παρακάτω ορίζονται οι αποστάσεις αυτές, ενώ στον Πίνακα 6 φαίνονται οι τιμές τους ανά περίπτωση.

Σύμφωνα με έρευνα στη διαθέσιμη βιβλιογραφία αλλά και στο διαδίκτυο, υπάρχουν περιπτώσεις όπου σταθμοί φόρτισης μεγάλης ισχύος, οι οποίοι τροφοδοτούνται από το δίκτυο Μέσης Τάσης, καταλαμβάνουν μεγάλη επιφάνεια εδάφους. Αντίστοιχα, υπάρχουν περιπτώσεις όπου εξαιτίας περιορισμού στον διαθέσιμο χώρο, οι σταθμοί συμπιέζονται και καταλαμβάνουν πολύ λιγότερο χώρο. Επομένως, για λόγους πληρότητας, προσομοιώθηκαν περιπτώσεις για διάφορες τιμές των αποστάσεων A και B.

Πίνακας 6: Περιπτώσεις προς διερεύνηση.

Τοπολογίες	A (m)	B (m)
1 ^η	60	30
2 ^η	60	60
3 ^η	30	60
4 ^η	10	10



Σχήμα 33: Χωροθέτηση του εξοπλισμού.

Οι άλλες παράμετροι που μεταβάλλονται (ειδική αντίσταση εδάφους και ρεύμα σφάλματος γης) αφορούν τη διαδικασία σχεδίασης του συστήματος γείωσης (αποτελούν παραμέτρους εισόδου) και θα αναλυθούν σε επόμενη ενότητα.

Ενότητα 4.2: Διαδικασία σχεδίασης συστήματος γείωσης

Για τη σχεδίαση του συστήματος γείωσης απαιτείται ο προσδιορισμός των ρευμάτων που θα διαρρέουν το σύστημα γείωσης προς τη γη. Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, η χειρότερη περίπτωση αφορά σε μονοφασικό σφάλμα γης στη Μέση Τάση, με ρεύμα σφάλματος 1 kA. Επίσης, το ελάχιστο ρεύμα που ανιχνεύουν οι ηλεκτρονόμοι γης στο συγκεκριμένο σύστημα είναι 80 A. Στην παρούσα εργασία επομένως, επιλέχθηκε να γίνει παραμετρική ανάλυση μεταξύ των 80 A και του 1 kA.

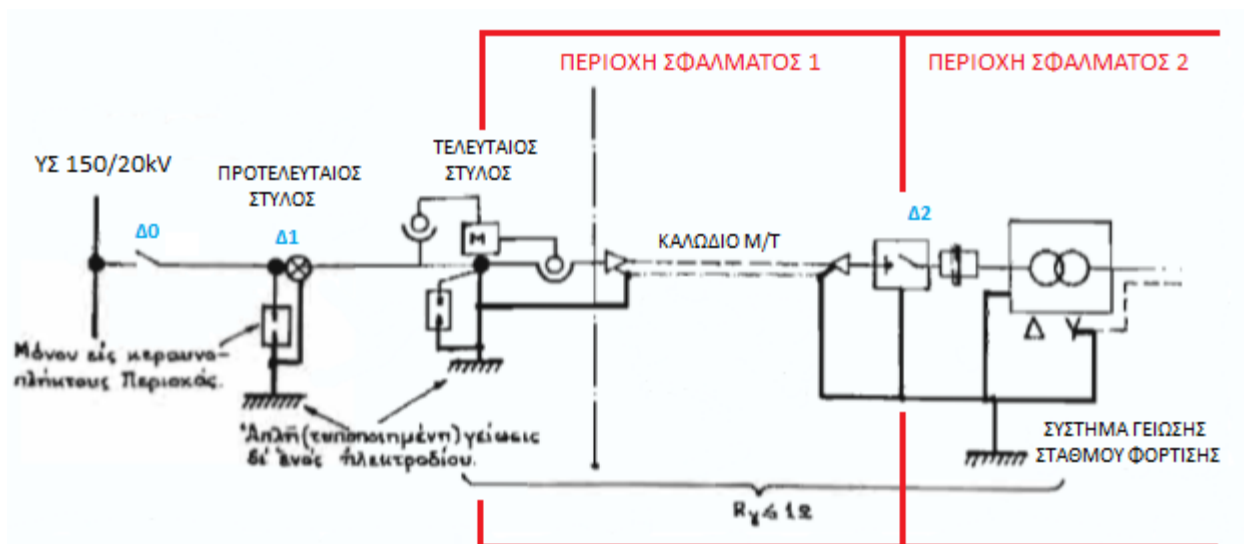
Έπειτα θα πρέπει να προσδιοριστούν οι χρόνοι σφαλμάτων των μέσων προστασίας του συστήματος και των ρυθμίσεών τους. Γενικά, υπάρχουν δύο είδη ηλεκτρονόμων: οι ηλεκτρονόμοι φάσης και οι ηλεκτρονόμοι γης. Οι χρόνοι στους οποίους λειτουργούν οι ηλεκτρονόμοι αυτοί εξαρτώνται από το είδος του συστήματος (εναέριες γραμμές, καλώδια ισχύος, συνδυασμός). Τα μέσα προστασίας που επιλέγονται στον υποσταθμό του καταναλωτή, θα πρέπει να προηγούνται τουλάχιστον κατά 0.4 s από αυτά του συστήματος διανομής. Στην

παρούσα εργασία εξετάζονται οι ηλεκτρονόμοι γης, καθώς αυτοί θα κληθούν να λειτουργήσουν σε ένα σφάλμα φάσης-γης. Επομένως, οι ηλεκτρονόμοι γης στον υποσταθμό του καταναλωτή θα πρέπει να λειτουργούν σε χρονικό διάστημα μικρότερο ή ίσο των 0.6 s [2].

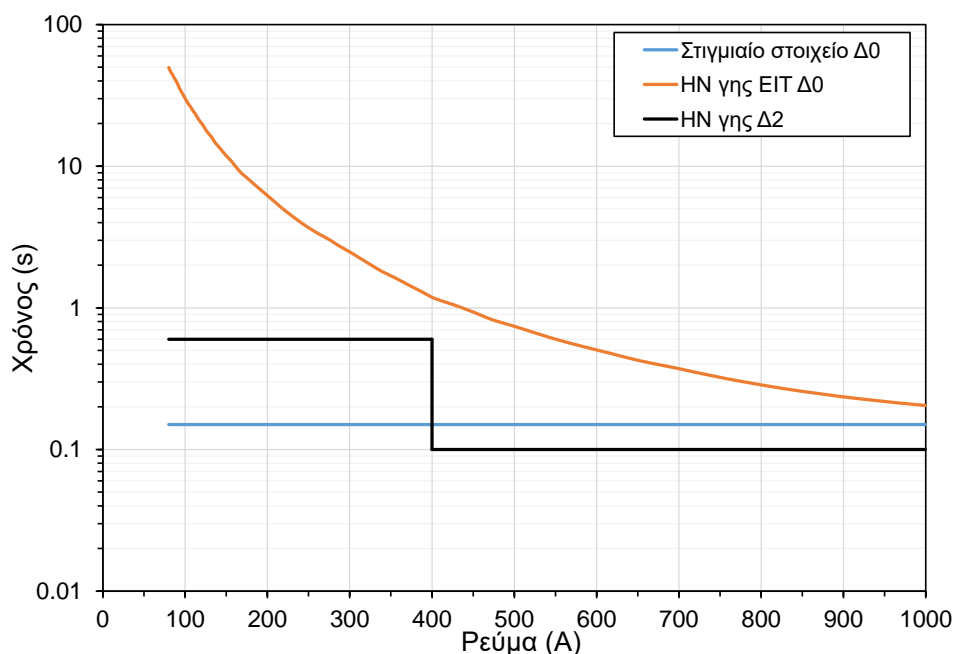
Η παροχή του σταθμού φόρτισης είναι τύπου A2 (εναέρια 20 kV) και προστατεύεται με διακόπτη απομόνωσης (sectionalizer), επομένως η προστασία της θα γίνεται ως εξής [2]:

- **Δ0** (μέσο προστασίας στον υποσταθμό 150/20kV, στον ζυγό των 20 kV): Διακόπτης ισχύος με ηλεκτρονόμο γης (ρύθμιση 80 A, χαρακτηριστική ισχυρά αντίστροφου χρόνου, Extremely Inverse Time) και στιγμιαίο στοιχείο (λειτουργία σε 0.15 s). Ο διακόπτης αυτός ρυθμίζεται σε 3 κύκλους πτώσης-επαναφοράς για την εκκαθάριση προσωρινών .
- **Δ1** (μέσο προστασίας εναέριας παροχής, στον προτελευταίο στύλο του ΔΕΔΔΗΕ): Διακόπτης απομόνωσης με 2 κύκλους υπερέντασης-διακοπής.
- **Δ2** (μέσο προστασίας στον σταθμό φόρτισης): Διακόπτης ισχύος με ηλεκτρονόμο γης και ρύθμιση για απομόνωση σε 0.6 s για ρεύματα 80-400 A και 0.1 s για ρεύματα μεγαλύτερα των 400 A. Ο διακόπτης αυτός ρυθμίζεται χωρίς κύκλους επαναφοράς καθώς τα σφάλματα που θα εκκαθαρίσει αναμένονται να είναι μόνιμα.

Η θέση των μέσων προστασίας φαίνεται στο Σχήμα 34, ενώ οι καμπύλες χρόνου-ρεύματος αυτών, στο Σχήμα 35.



Σχήμα 34: Χωροθέτηση μέσων προστασίας. Προσαρμόστηκε από [32].



Σχήμα 35: Καμπύλες χρόνου-ρεύματος μέσω προστασίας.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται όλες οι πιθανές περιπτώσεις σφαλμάτων γης, που θα οδηγήσουν σε διαρροή ρεύματος προς γη από το σύστημα γείωσης του σταθμού φόρτισης, καθώς και το μέσο προστασίας που λειτουργεί σε κάθε μία από αυτές. Στόχος είναι ο προσδιορισμός του συνολικού χρόνου έκθεσης ατόμων σε ηλεκτροπληξία (Σχήμα 36).

Σφάλματα τα οποία θα συμβούν στον προτελευταίο στύλο, όπου βρίσκεται ο διακόπτης απομόνωσης ($\Delta 1$), δεν εξετάζονται. Αυτό συμβαίνει διότι το σύστημα γείωσης του στύλου αυτού δεν είναι κοινό με αυτό του σταθμού φόρτισης.

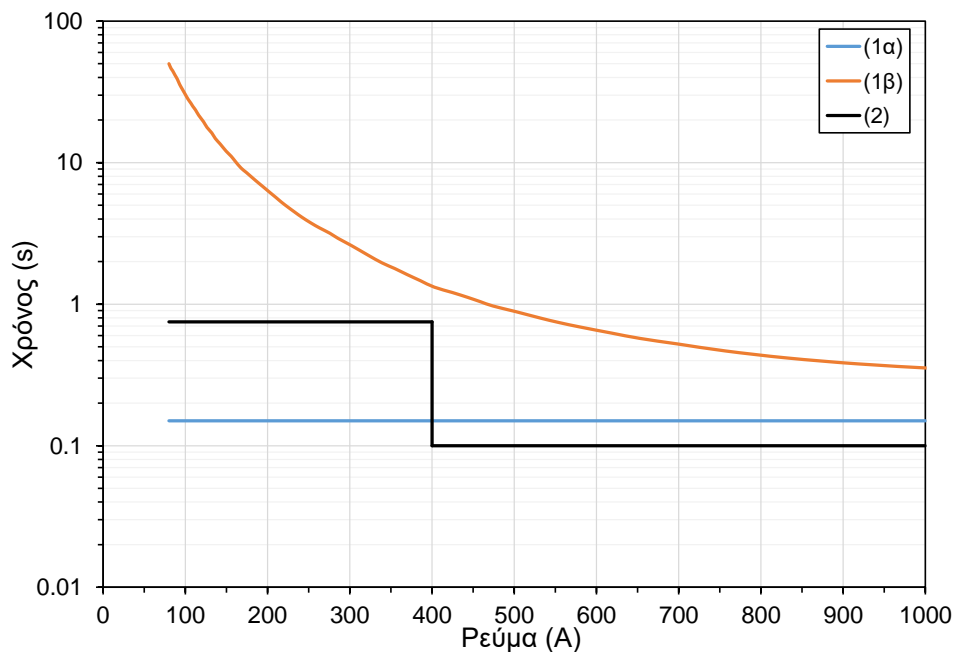
Για σφάλματα που συμβαίνουν από τον τελευταίο στύλο, όπου βρίσκονται τα μετρητικά και το καλώδιο Μέσης Τάσης προς τον σταθμό φόρτισης, έως και το μέσο προστασίας $\Delta 2$, θα λειτουργήσει το $\Delta 0$ σε συνεργασία με το $\Delta 1$.

- Αν το σφάλμα είναι παροδικό, ανεξάρτητα από την τιμή του ρεύματος, θα διακοπεί από το στιγμιαίο στοιχείο του $\Delta 0$ σε 0.15 s (Σχήμα 36 – 1α).
- Αν το σφάλμα είναι μόνιμο, θα διακοπεί από το $\Delta 1$ μετά από 2 κύκλους. Άρα λειτουργεί το στιγμιαίο στοιχείο και ο ηλεκτρονόμος γης του $\Delta 0$. Ο χρόνος εκκαθάρισης του σφάλματος είναι 0.15 s + χρόνος ηλεκτρονόμου γης (Σχήμα 36 – 1β).

Τα σφάλματα που συμβαίνουν μετά το μέσο προστασίας $\Delta 2$ (εντός του σταθμού), δεν μπορούν να είναι παροδικά καθώς θα συμβούν εντός των οικίσκων (Σχήμα 36 – 2).

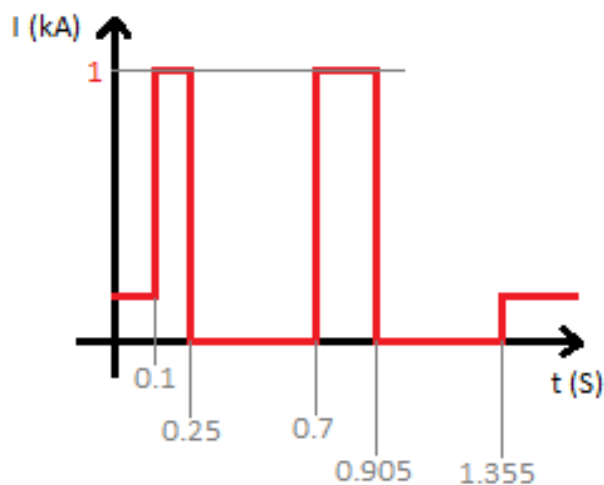
- Για μόνιμα σφάλματα ≤ 400 A θα λειτουργήσει αρχικά το στιγμιαίο στοιχείο του μέσου $\Delta 0$ και μετά το μέσο $\Delta 2$. Άρα ο συνολικός χρόνος θα είναι $0.15+0.6=0.75$ s.

- Για μόνιμα σφάλματα >400 A θα λειτουργήσει το στιγμιαίο στοιχείο του μέσου Δ2. Άρα ο συνολικός χρόνος εκκαθάρισης θα είναι 0.1 s.



Σχήμα 36: Καμπύλες χρονικής διάρκειας έκθεσης ατόμων σε ηλεκτροπληξία.

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι η περίπτωση μόνιμου σφάλματος πριν το Δ2 καταλήγει στα πιο επικίνδυνα βραχυκυκλώματα. Αυτό συμβαίνει διότι στην περίπτωση αυτή αναμένεται ίδια τιμή ρεύματος για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα. Παρακάτω, στο Σχήμα 37, παρουσιάζεται ένα παράδειγμα λειτουργίας των μέσων προστασίας για αυτήν την περίπτωση, με ρεύμα σφάλματος ίσο με 1 kA. Το στιγμιαίο στοιχείο λειτουργεί σε 0.15 s και ο ηλεκτρονόμος γης σε 0.205 s. Η χρονική διάρκεια του σφάλματος προκύπτει επομένως 0.355 s.



Σχήμα 37: Παράδειγμα λειτουργίας μέσων προστασίας (ρεύμα στην αναχώρηση της εναέριας γραμμής) – Περίπτωση 1β.

Το επόμενο βήμα της σχεδίασης ήταν η διαστασιολόγηση και η επιλογή υλικού των ηλεκτροδίων γείωσης. Η διαδικασία αυτή πρέπει να γίνεται με ιδιαίτερη προσοχή, καθώς αφενός τα επιλεγμένα ηλεκτρόδια θα πρέπει να συμμορφώνονται με τα διεθνή πρότυπα, αφετέρου θα πρέπει να είναι και διαθέσιμα στην αγορά.

Για τον υπολογισμό της διατομής των ηλεκτροδίων, χρησιμοποιήθηκε το μη συμμετρικό ρεύμα σφάλματος γης και όχι το μέρος του ρεύματος που ρέει προς τη γη, διότι ένα μέρος του μπορεί να κυκλοφορεί και να επιστρέφει στην πηγή μέσα από τους αγωγούς του συστήματος γείωσης χωρίς να διέρχεται από το έδαφος. Οι υπολογισμοί έγιναν σύμφωνα με το πρότυπο IEEE Std 80-2013 [6] και οι τελικές διατομές συμφωνούν με το πρότυπο της αντικεραυνικής προστασίας IEC 62305-3 [28].

Όσον αφορά τη διατομή των οριζόντιων αγωγών, επιλέγονται τα 10 mm (78.5 mm²), λαμβάνοντας υπ' όψιν και έναν συντελεστή ασφαλείας. Σύμφωνα με το πρότυπο IEEE Std 80-2013 [6], προτείνεται η επιλογή μεγαλύτερου μεγέθους αγωγού, ώστε να αντιμετωπιστεί το φαινόμενο της διάβρωσης ενταφιασμένων αγωγών. Ο αγωγός είναι μονόκλωνος χάλκινος ηλεκτρολυτικός (Cu-E), ο οποίος προτείνεται κυρίως όταν συνυπάρχουν στο έδαφος αγωγοί και συστήματα θεμελιακής και περιμετρικής γείωσης, ώστε να μη διαβρωθούν. Η επεξεργασία που γίνεται σε αυτού του είδους τον χαλκό, είναι η θέρμανση του σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες, με αποτέλεσμα να είναι εύκαμπτος και να έχει μεγαλύτερη ειδική αγωγιμότητα.

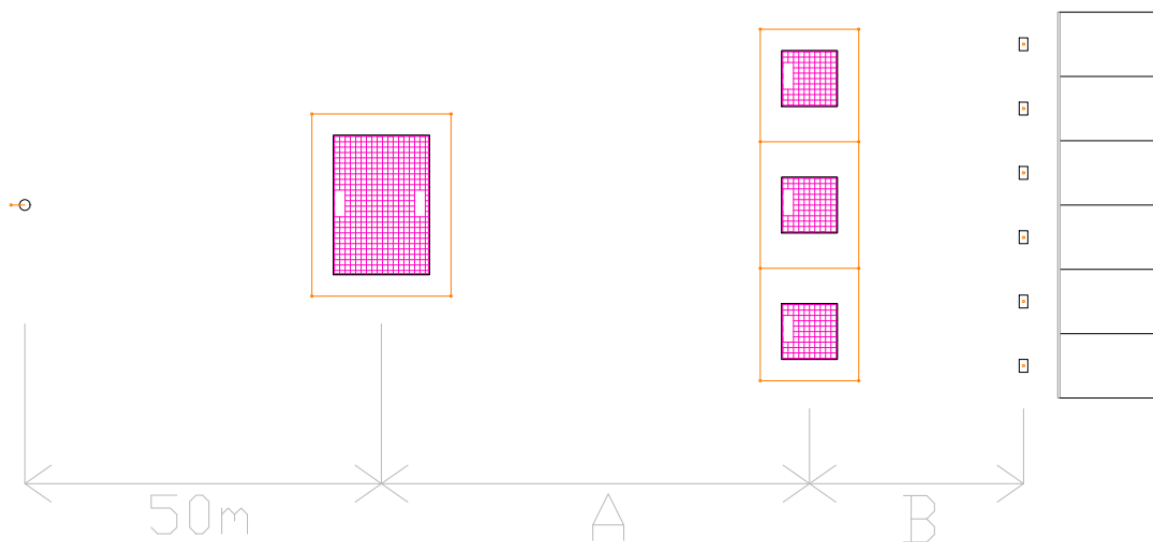
Όσον αφορά τη διατομή των ράβδων, επιλέγεται η διάμετρος των 15 mm, ενώ το συνολικό μήκος της κάθε ράβδου είναι 3 μέτρα. Στην περίπτωση αυτή, ο χαλκός συνήθως είναι hard drawn. Δεν έχει υποστεί δηλαδή κάποια θέρμανση και έχει μικρότερη ειδική αγωγιμότητα και μεγαλύτερη αντίσταση σε εφελκυσμό. Οι ράβδοι αυτού του τύπου δεν πρέπει να θερμαίνονται σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 250°C σύμφωνα με το πρότυπο IEEE Std 80-2013 [6].

Εφόσον ολοκληρώθηκε και η διαστασιολόγηση των ηλεκτροδίων, επόμενο βήμα ήταν να γίνει η σχεδίαση του συστήματος γείωσης του σταθμού. Η τεχνική που χρησιμοποιήθηκε επιβάλλει την περιμετρική γείωση όλων των μεταλλικών κατασκευών και αυτών που έχουν μεταλλικά στοιχεία (οικίσκοι, σημεία φόρτισης), καθώς και τη χρήση ράβδων γείωσης όπου κρίνεται απαραίτητο για τη σταθεροποίηση της εποχικής αλλαγής αντίστασης γείωσης. Σύμφωνα με το πρότυπο IEC 62305-3 [28], το ελάχιστο βάθος ενταφιασμού των ηλεκτροδίων συνιστάται να είναι 0.5 m, επομένως επιλέγεται αυτό.

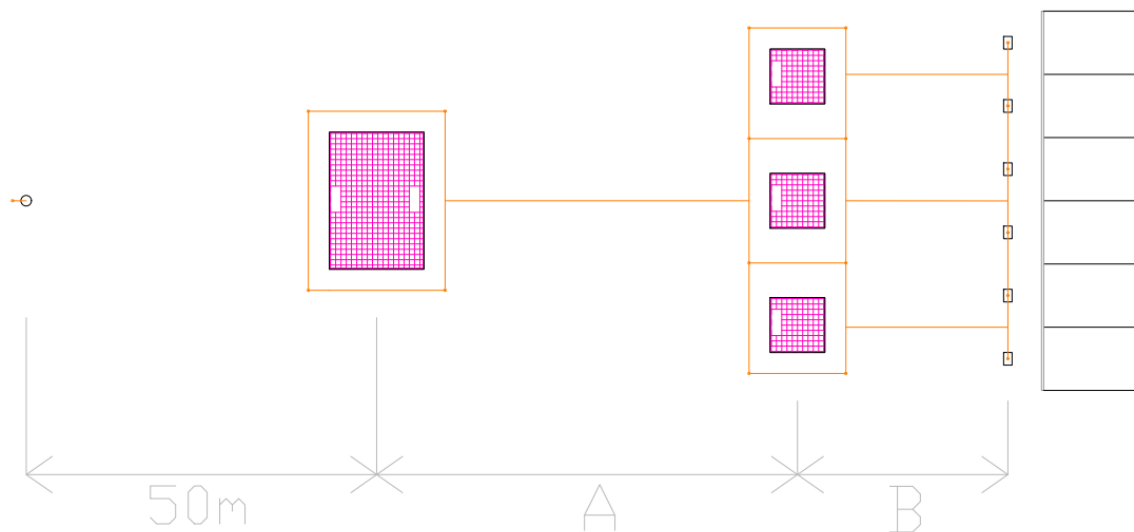
Τα συστήματα που κατασκευάστηκαν, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, ήταν δύο. Στην πρώτη περίπτωση (Σχήμα 38) τα συστήματα συνδέονται μεταξύ τους μόνο με τον αγωγό προστασίας PE που διανέμεται με τα καλώδια, θεωρώντας ότι η διατομή του επαρκεί για το ρεύμα σφάλματος, ενώ στη δεύτερη (Σχήμα 39) η σύνδεση γίνεται και με γυμνούς αγωγούς. Η όδευση των αγωγών αυτών γίνεται παράλληλα με τα καλώδια ισχύος της εγκατάστασης. Πρόκειται για μια συνηθισμένη πρακτική, η οποία προσφέρει ακόμα μεγαλύτερη προστασία.

Αξίζει να σημειωθεί εδώ ότι οι οικίσκοι είναι Pad Mounted, επομένως σχεδιάστηκε και ο οπλισμός της βάσης τους, καθώς αποτελεί βοηθητικό ηλεκτρόδιο γείωσης, εφόσον είναι συνδεδεμένος ισοδυναμικά και με το σύστημα γείωσης. Ο οπλισμός της βάσης προσομοιώθηκε ως πλέγμα στην επιφάνεια του εδάφους, καθώς οι βάσεις είναι επιφανειακές, με μάτι 25 cm. Ο οπλισμός έχει διάμετρο 12.7 mm. Σύμφωνα με το πρότυπο IEC 62305-3 [28], η ελάχιστη διάμετρος είναι 8 mm.

Στο σύστημα γείωσης του σταθμού προσομοιώθηκε επίσης και η ράβδος γείωσης του τελευταίου στύλου (εντός του οικοπέδου). Στη ράβδο αυτή γειώνεται ο μανδύας των καλωδίων Μέσης Τάσης και οι εκτροπείς υπέρτασης. Ένας οριζόντιος αγωγός στο σημείο αυτό συνδέει τη ράβδο με τον στύλο. Η ράβδος αυτή είναι συνδεδεμένη με το σύστημα γείωσης του σταθμού φόρτισης μέσω των μανδύων των καλωδίων.



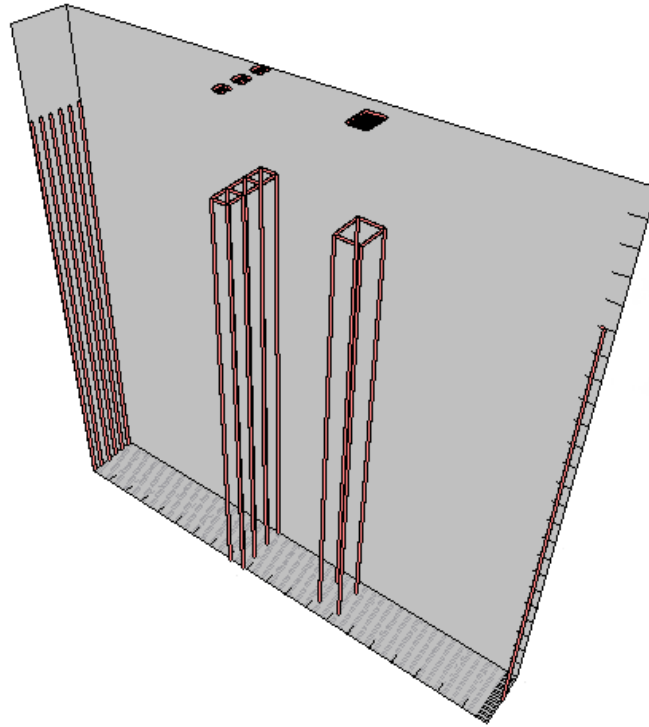
Σχήμα 38: Πρώτη περίπτωση συστήματος γείωσης. Σύνδεση μεταξύ των επιμέρους συστημάτων με τους αγωγούς PE. Οικίσκος μετασχηματιστή: περιμετρική με 4 ράβδους. Οικίσκος φόρτισης: περιμετρική με 8 ράβδους. Σημεία φόρτισης: 1 ράβδος ανά σημείο. Τελευταίος στύλος ΔΕΔΔΗΕ: 1 ράβδος. Λαμβάνεται υπ' όψιν και ο οπλισμός των βάσεων.



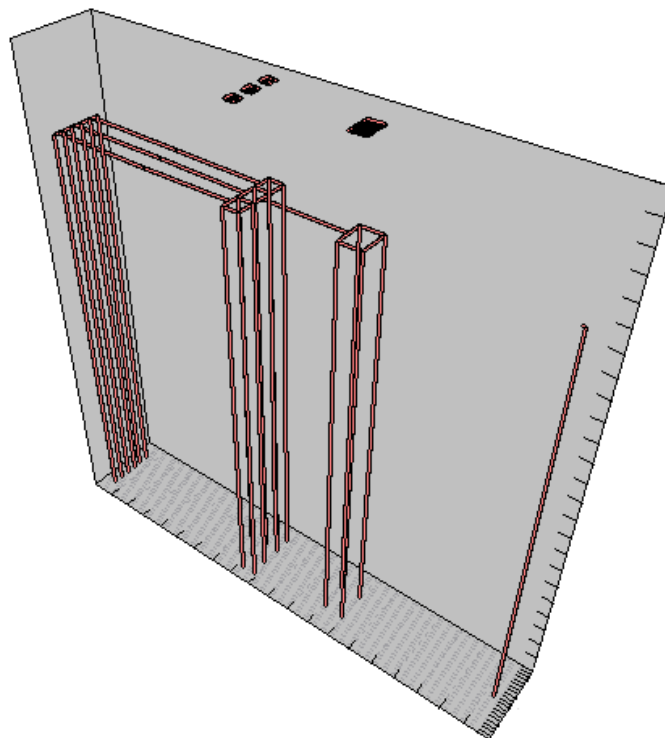
Σχήμα 39: Δεύτερη περίπτωση συστήματος γείωσης. Επιπλέον χρησιμοποιούνται οριζόντιοι αγωγοί γείωσης μέσα στα ορύγματα των καλωδίων.

Στο επόμενο βήμα, έγιναν έλεγχοι οι οποίοι αφορούσαν στη γείωση του συστήματος αντικεραυνικής προστασίας της εγκατάστασης σύμφωνα με το πρότυπο IEC 62305-3 [28]. Οι οικίσκοι είναι μεταλλικοί και δεν απαιτείται κάποιο επιπλέον Σύστημα Αντικεραυνικής Προστασίας (συλλεκτήριο και αγωγοί καθόδου). Το σύστημα γείωσης που σχεδιάστηκε είναι σύστημα γείωσης τύπου B [28] και βρέθηκε ότι καλύπτει τις απαιτήσεις των Class III και IV συστημάτων αντικεραυνικής προστασίας [28]. Βασική προϋπόθεση είναι να συνδέεται με το σύστημα γείωσης κάθε μεταλλική επιφάνεια των οικίσκων, ώστε η ασφάλεια να επιτυγχάνεται μέσω ισοδυναμικών συνδέσεων. Για συστήματα Class I και II μπορούν να υπολογιστούν άνω όρια ειδικής αντίστασης πάνω από τα οποία απαιτούνται επιπλέον ηλεκτρόδια βάσει του IEC 62305-3 [28].

Τέλος, εφόσον ολοκληρώθηκαν όλοι οι απαραίτητοι έλεγχοι και ο σχεδιασμός του συστήματος, έγινε η υλοποίησή του στο λογισμικό CYMGrd [10]. Στα Σχήματα 40 και 41 φαίνεται η τρισδιάστατη αναπαράσταση των συστημάτων γείωσης των παραπάνω περιπτώσεων από το ίδιο λογισμικό.



Σχήμα 40: Πρώτη περίπτωση συστήματος γείωσης (Σχήμα 38) – 3D. Το σχήμα δεν είναι υπό κλίμακα.



Σχήμα 41: Δεύτερη περίπτωση συστήματος γείωσης (Σχήμα 39) – 3D. Το σχήμα δεν είναι υπό κλίμακα.

Ενότητα 4.3: Προσομοίωση αρχικού συστήματος γείωσης

Όπως αναφέρθηκε στην Ενότητα 4.1, προσομοιώθηκαν 4 περιπτώσεις για διαφορετικές αποστάσεις A και B (Σχήμα 33). Για κάθε μία από αυτές έγιναν 2 υποπεριπτώσεις για διασυνδεδεμένα και μη συστήματα γείωσης με γυμνούς αγωγούς στο έδαφος (Σχήματα 38-41). Επομένως, οι τοπολογίες που υλοποιήθηκαν στο CYMGrd [10] ήταν συνολικά 8 και περιγράφονται στον Πίνακα 7.

Πίνακας 7: Περιπτώσεις προς διερεύνηση – Πλήρης.

Τοπολογίες	A (m)	B (m)	Συνδεδεμένα Συστ.
1 ^η	60	30	ΝΑΙ
2 ^η	60	30	ΟΧΙ
3 ^η	60	60	ΝΑΙ
4 ^η	60	60	ΟΧΙ
5 ^η	30	60	ΝΑΙ
6 ^η	30	60	ΟΧΙ
7 ^η	10	10	ΝΑΙ
8 ^η	10	10	ΟΧΙ

Στην παρούσα εργασία υιοθετήθηκε ένα ομοιόμορφο μοντέλο εδάφους, που χαρακτηρίζεται από μία τιμή ειδικής αντίστασης, ώστε να αξιολογηθεί η ασφάλεια του συστήματος γείωσης με όσο το δυνατόν απλούστερο τρόπο. Το πραγματικό έδαφος μπορεί να αναπαρασταθεί πλήρως με ένα πολυστρωματικό μοντέλο. Ωστόσο σύμφωνα με τη διαθέσιμη βιβλιογραφία, αποτελεί συνήθης πρακτική η χρήση ομοιογενών ή διστρωματικών μοντέλων κατά την ανάλυση απλών συστημάτων γείωσης [6].

Αρχικά η ειδική αντίσταση του εδάφους θεωρήθηκε 100 Ωm σε κάθε μία από τις 8 περιπτώσεις. Σε επόμενη ενότητα γίνεται παραμετρική ανάλυση των αποτελεσμάτων ώστε να γίνουν υπολογισμοί για διάφορες τιμές της ειδικής αντίστασης. Να σημειωθεί εδώ ότι υλικό επιφανείας θεωρήθηκε μόνο στο σημείο στάθμευσης των οχημάτων. Το υλικό αυτό ήταν άσφαλτος με πάχος 5 cm και ειδική αντίσταση 10 kΩm.

Το CYMGrd [10] προκειμένου να υπολογίσει τα δυναμικά στην επιφάνεια του εδάφους και κατ' επέκταση τις βηματικές τάσεις και τις τάσεις επαφής, υπολογίζει το ρεύμα που διαχέεται στο έδαφος από κάθε στοιχειώδες στοιχείο του συστήματος γείωσης.

Στον Πίνακα 8 παρακάτω φαίνεται η ανύψωση δυναμικού του συστήματος γείωσης, GPR (Ground Potential Rise), για ρεύμα σφάλματος προς γη (μέγιστο ρεύμα πλέγματος, I_G) 1 kA και η αντίσταση του συστήματος γείωσης, R_g , για κάθε μία από τις περιπτώσεις.

Πίνακας 8: Αποτελέσματα από τις προσομοιώσεις – GPR (για $I_G=1$ kA) και R_g (για $\rho=100$ Ωm).

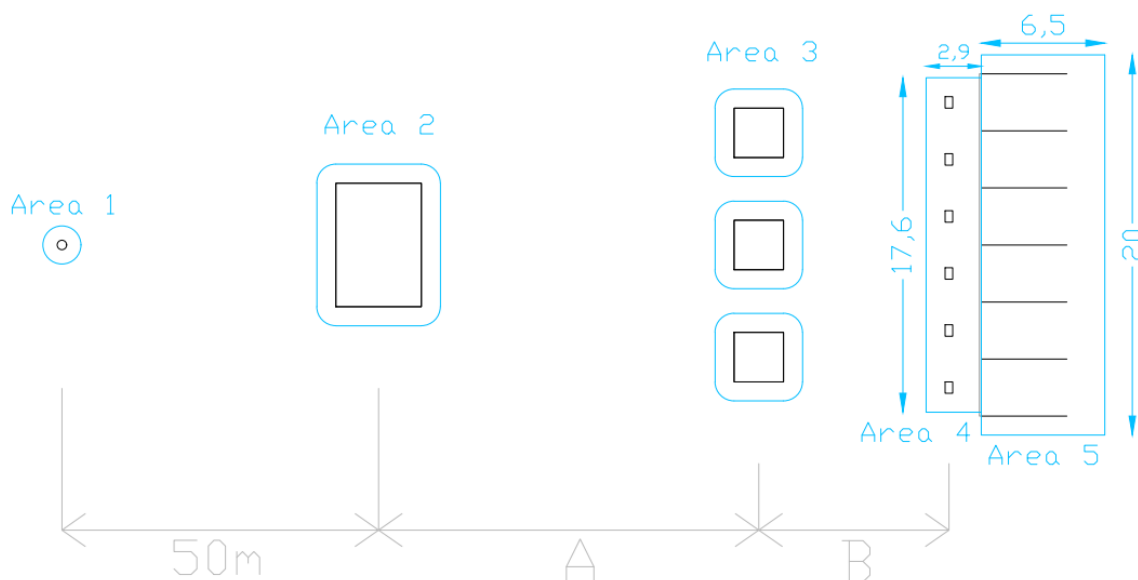
Τοπολογίες	GPR (V)	R_g (Ω)
1 ^η	1266.48	1.26648
2 ^η	1793.37	1.79337
3 ^η	1028.43	1.02843
4 ^η	1743.99	1.74399
5 ^η	1153.80	1.15380
6 ^η	1819.98	1.81998
7 ^η	2196.61	2.19661
8 ^η	2310.07	2.31006

Από τον παραπάνω πίνακα φαίνεται ότι η τοπολογία με τη σύνδεση των επιμέρους συστημάτων γείωσης με γυμνό αγωγό έχει πάντα μικρότερη αντίσταση γείωσης και GPR σε σχέση με τα επιμέρους συστήματα γείωσης που είναι συνδεδεμένα με τον PE (για τις ίδιες αποστάσεις). Το ίδιο μπορεί να παρατηρηθεί και για τα συστήματα γείωσης που καλύπτουν μεγάλες εκτάσεις, δηλαδή όταν οι αποστάσεις μεταξύ των επιμέρους συστημάτων αυξάνονται, μειώνεται η αντίσταση γείωσης και το GPR. Κατά συνέπεια, οι μικρότερες τιμές αντιστοιχούν στην τοπολογία 3 και οι μεγαλύτερες στην τοπολογία 8.

Στη συνέχεια, υπολογίστηκαν οι χειρότερες περιπτώσεις τάσεων επαφής. Η διαδικασία αυτή έγινε δημιουργώντας 5 γραφήματα (Contour Plots), ένα για κάθε περιοχή ενδιαφέροντος.

Για να έχουν νόημα οι τάσεις αυτές πρέπει να υπάρχουν γειωμένα μεταλλικά αντικείμενα σε απόσταση το πολύ 1 m (μήκος ανθρώπινου χεριού, χειρότερη περίπτωση) από τα όρια των μεταλλικών αντικειμένων που θα βρεθούν υπό τάση (GPR). Στο Σχήμα 42 φαίνονται ενδεικτικά οι περιοχές ενδιαφέροντος. Οι περιοχές αυτές είναι: ο τελευταίος στύλος του ΔΕΔΔΗΕ, ο οικίσκος του μετασχηματιστή, οι οικίσκοι των μετατροπέων, τα σημεία φόρτισης και η περιοχή στάθμευσης.

Στις Περιοχές 1-4 δεν υπάρχει υλικό επιφανείας στο έδαφος, ενώ η Περιοχή 5 είναι στρωμένη με άσφαλτο. Επομένως, υπολογίστηκαν 2 τιμές τάσεων επαφής ανά περίπτωση (με ή χωρίς υλικό επιφανείας). Το συνολικό γράφημα (Contour Plot) που απεικονίζει τις τάσεις επαφής φαίνεται στο Σχήμα 43α.



Σχήμα 42: Περιοχές ενδιαφέροντος για τάσεις επαφής.

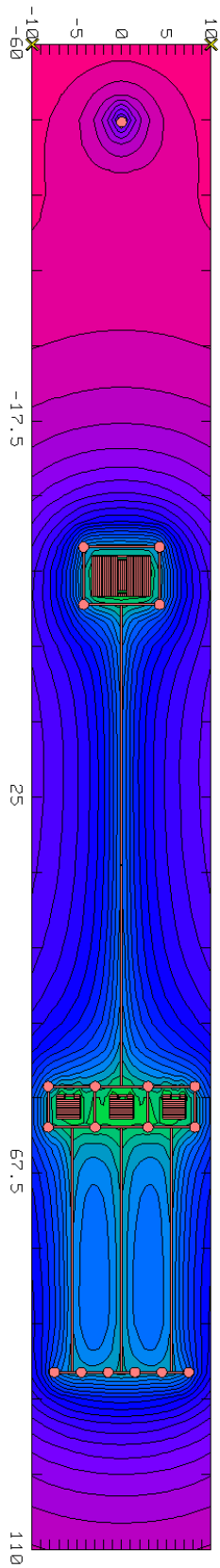
Όσον αφορά τις βηματικές τάσεις, αυτές υπολογίστηκαν για όλο το οικόπεδο, όπου υπάρχει ελεύθερος χώρος. Στην περίπτωση αυτή δημιουργήθηκε ένα συνολικό γράφημα (Contour Plot) το οποίο απεικονίζει τα δυναμικά επιφανείας (Σχήμα 43β).

Βάσει αυτού και όπου οι δυναμικές γραμμές γίνονται πιο πυκνές, υπολογίστηκαν οι χειρότερες βηματικές τάσεις. Πυκνότερες γραμμές αντιστοιχούν σε πιο απότομες μεταβολές, άρα και σε μεγαλύτερες βηματικές τάσης (διαφορά δυναμικών επιφανείας με απόσταση 1 m μεταξύ των σημείων).

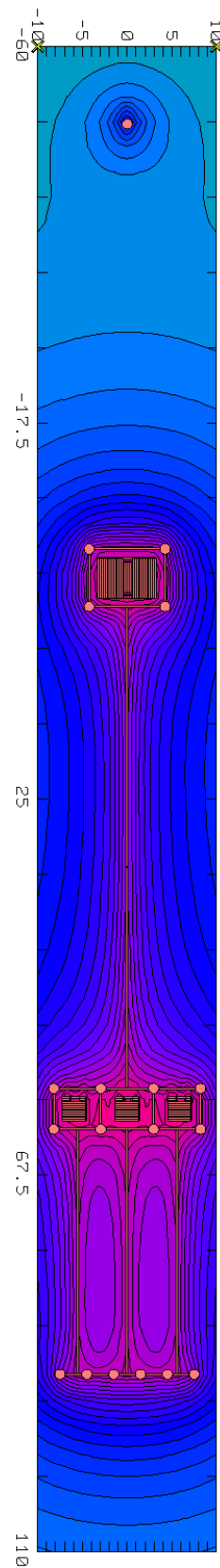
Και πάλι μόνο η Περιοχή 5 είναι στρωμένη με άσφαλο. Επομένως, υπολογίστηκαν 2 τιμές βηματικής τάσης ανά περίπτωση (με ή χωρίς υλικό επιφανείας).

Στους Πίνακες 9 και 10 παρακάτω φαίνονται οι χειρότερες βηματικές τάσεις και τάσεις επαφής ανά περίπτωση και ανά περιοχή ενδιαφέροντος. Οι τιμές αυτές θα συγκριθούν με τα αντίστοιχα επιτρεπτά όρια στη συνέχεια της εργασίας.

Στη συνέχεια παρατίθεται ένα ενδεικτικό σχέδιο (Σχήμα 44) για την καλύτερη επεξήγηση των παραπάνω. Το σχέδιο αφορά στην Περίπτωση 1. Με πράσινο χρώμα φαίνονται τα σημεία όπου υπολογίστηκαν τάσεις επαφής, ενώ με κόκκινο οι περιοχές όπου υπολογίστηκαν οι βηματικές τάσεις.



(α)

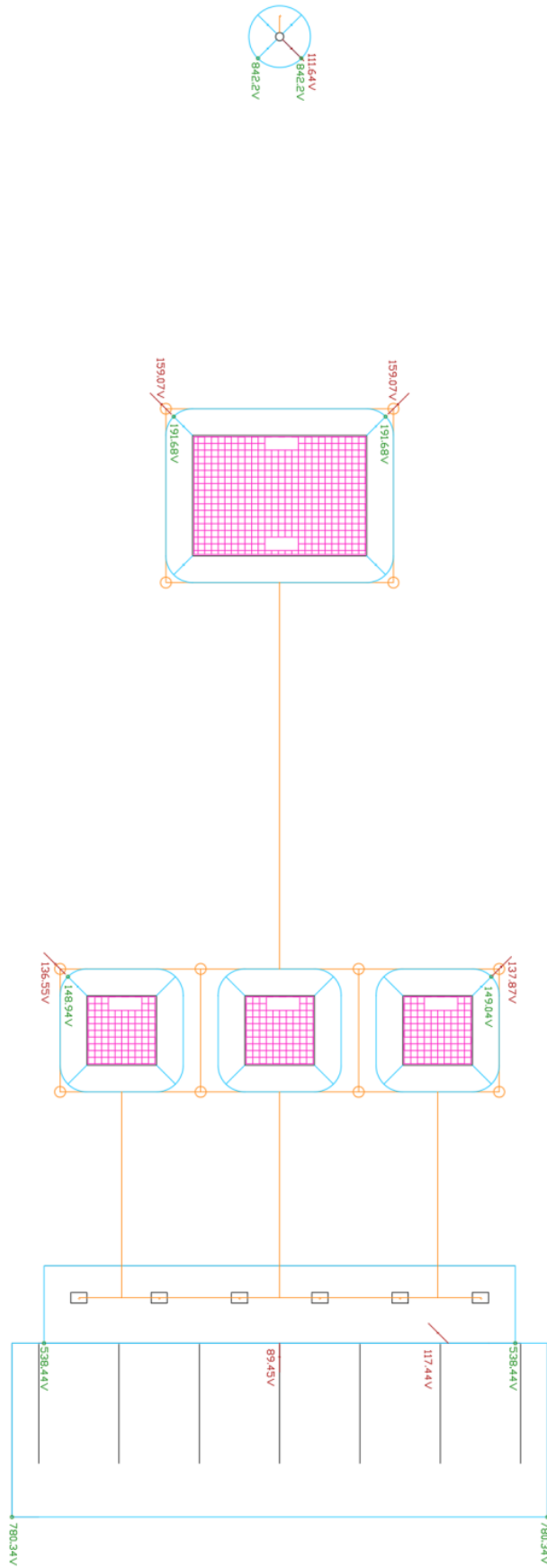


(β)

Σχήμα 43: Ενδεικτικά γραφήματα (Contour Plots) για την Περίπτωση 1.
 (α) Τάσεις Επαφής, (β) Δυναμικά Επιφανείας

Πίνακας 9: Αποτελέσματα αρχικής σχεδίασης.

			Vtouch (V)	Vstep (V)
1	60_30_C	Area 1	842.2	111.64
		Area 2	191.68	159.07
		Area 3	149.04	137.87
		Area 4	538.44	117.44
		Area 5	780.34	89.45
2	60_30_UC	Area 1	1243.41	165.32
		Area 2	304.69	249.32
		Area 3	280.65	233.16
		Area 4	1048.06	92.96
		Area 5	1312.99	85.65
3	60_60_C	Area 1	671.67	89.02
		Area 2	152.28	126.17
		Area 3	114.54	97.28
		Area 4	426.7	93.05
		Area 5	618.53	70.9
4	60_60_UC	Area 1	1209.68	160.85
		Area 2	296.86	242.89
		Area 3	278.98	232.44
		Area 4	1084.71	93.03
		Area 5	1335.92	84.79
5	30_60_C	Area 1	752.33	99.63
		Area 2	166.09	138.06
		Area 3	129.55	109.95
		Area 4	484.09	105.56
		Area 5	701.42	80.4
6	30_60_UC	Area 1	1249.32	165.91
		Area 2	294.95	242.6
		Area 3	281.39	232.96
		Area 4	1127.78	96.84
		Area 5	1389.92	88.3
7	10_10_C	Area 1	1504.22	199.47
		Area 2	318.22	269.03
		Area 3	264.44	242.82
		Area 4	953.65	210.63
		Area 5	1414.95	163.08
8	10_10_UC	Area 1	1590.4	210.99
		Area 2	340.8	287.43
		Area 3	304.15	268.54
		Area 4	1147.73	128.92
		Area 5	1561.32	121.06



Σχήμα 44: Ενδεικτικό σχέδιο εύρεσης χειρότερων περιπτώσεων τάσεων επαφής και βηματικών τάσεων – Περίπτωση 1.

Τα όρια βηματικής τάσης και τάσεις επαφής για την περίπτωση που εξετάζεται (100 Ωm, 1 kA) είναι $E_{\text{touch}70\text{kg}} = 303 \text{ V}$, $E_{\text{step}70\text{kg}} = 422 \text{ V}$ και $E_{\text{touch}50\text{kg}} = 224 \text{ V}$, $E_{\text{step}50\text{kg}} = 312 \text{ V}$ χωρίς υλικό επιφανείας. Με υλικό επιφανείας (άσφαλτος, πάχος 5 cm, 10 kΩm) είναι $E_{\text{touch}70\text{kg}} = 2363 \text{ V}$, $E_{\text{step}70\text{kg}} = 8660 \text{ V}$ και $E_{\text{touch}50\text{kg}} = 2218 \text{ V}$, $E_{\text{step}50\text{kg}} = 8287 \text{ V}$. Τα παραπάνω όρια αντιστοιχούν σε διάρκεια 0.355 s που αντιστοιχεί στη χειρότερη περίπτωση (σφάλμα (1β), Σχήμα 36).

Οι παραπάνω τιμές δείχνουν ξεκάθαρα ότι οι βηματικές τάσεις είναι εντός ορίων σε όλες τις περιοχές για άτομα 50 kg (ευρύ κοινό). Αυτό όμως δεν ισχύει στις περισσότερες περιπτώσεις όπου δεν υπάρχει υλικό επιφανείας για τις τάσεις επαφής. Επομένως, απαιτείται αναθεώρηση του συστήματος γείωσης, καθώς οι τιμές των τάσεων επαφής βρίσκονται κατά πολύ εκτός ορίων. Στην επόμενη ενότητα, περιγράφονται τα σημεία που προκαλούν προβληματισμό, καθώς και μία τουλάχιστον προτεινόμενη λύση.

Ενότητα 4.4: Αναθεώρηση σχεδίασης

Αρχικά, έντονο προβληματισμό προκαλούν οι πολύ υψηλές τάσεις επαφής στον στύλο του ΔΕΔΔΗΕ. Σύμφωνα με τη διαθέσιμη βιβλιογραφία, στην περίπτωση αυτή προτείνεται είτε η εγκατάσταση πλέγματος γείωσης ή ισοδυναμικού πλέγματος στην περιοχή ενδιαφέροντος, είτε η χρήση υλικού επιφανείας, με υψηλή ειδική αντίσταση, στην περιοχή αυτή.

Στην παρούσα εργασία, επιλέγεται η κατασκευή ισοδυναμικού πλέγματος από μονόκλωνους, χάλκινους αγωγούς, με διάμετρο 10 mm και μάτι 30x30 cm. Το βάθος εγκατάστασής του επιλέγεται στα 10 cm. Το πλέγμα αυτό θα εγκατασταθεί καλύπτοντας τα σημεία στα οποία μπορεί να βρεθεί άτομο που έρχεται σε επαφή με τα μεταλλικά γειωμένα μέρη του στύλου, όπως ο αγωγός γείωσής του. Εναλλακτικά, μπορεί να κατασκευαστεί περιμετρικό τοίχιο μικρού ύψους γύρω από τον στύλο και να πληρωθεί με υλικό επιφανείας ειδικής αντίστασης τουλάχιστον 6 kΩm και πάχους 20 cm. Το τοίχιο συγκρατεί το υλικό επιφανείας στη θέση του.

Τέλος, η αμέσως επόμενη τάση επαφής που καταλήγει εκτός ορίων σε αρκετές περιπτώσεις, είναι αυτή στην Περιοχή 4. Στην περίπτωση αυτή προτείνεται είτε η χρήση υλικού επιφανείας με ειδική αντίσταση μεγαλύτερη των 6 kΩm, είτε η προσθήκη επιπλέον ηλεκτροδίων γείωσης.

Στην παρούσα εργασία επιλέγεται η επέκταση της ασφάλτου και στην Περιοχή 4 για λόγους απλότητας. Σε πραγματικές συνθήκες ίσως να μπορεί να χρησιμοποιηθεί οικονομικότερο υλικό, αρκεί να τηρεί τον περιορισμό του κατώτερου ορίου ειδικής αντίστασης που ορίστηκε παραπάνω.

Αντίστοιχα μέτρα μπορούν να ληφθούν και στις υπόλοιπες περιοχές στις οποίες οι τάσεις επαφής υπερβαίνουν τα όρια. Με τις παραπάνω διορθώσεις, το σύστημα αναμένεται να προσφέρει υψηλά επίπεδα ασφαλείας στις περισσότερες περιπτώσεις. Θα εξεταστεί διεξοδικά στην επόμενη ενότητα μέσω της παραμετρικής ανάλυσης των αποτελεσμάτων.

Ενότητα 4.5: Αποτελέσματα και παραμετρική ανάλυσή τους

Το πρώτο βήμα στην παρούσα ενότητα είναι να προσδιοριστούν οι χειρότερες βηματικές τάσεις και τάσεις επαφής. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, τα όρια θα είναι διαφορετικά όπου υπάρχει υλικό επιφανείας, επομένως οι δυσμενέστερες τάσεις θα είναι δύο ανά περίπτωση. Στους Πίνακες 10 και 11 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα. Σημειώνεται ότι βάσει της Ενότητας 4.4 αγνοήθηκε ο τελευταίος στύλος του ΔΕΔΔΗΕ και στην Περιοχή 4 θεωρήθηκε ότι υπάρχει ασφαλτός. Τα σημεία των συντεταγμένων έχουν ορισθεί θεωρώντας σημείο αναφοράς (0,0) το κέντρο του οικίσκου του μετασχηματιστή.

Πίνακας 10: Αποτελέσματα προσομοιώσεων – Τάσεις Επαφής ($\rho=100 \Omega\text{m}$, $I_G=1 \text{ kA}$).

			Vtouch (V)	Area	Coordinates (m)
1	60_30_C	Soil (100Ωm)	191.68	2	(-2.96, 3.96)
		Asphalt (10kΩm)	780.34	5	(98.2, 10) and (98.2, -10)
2	60_30_UC	Soil (100Ωm)	304.69	2	(-2.96, 3.96)
		Asphalt (10kΩm)	1312.99	5	(98.2, 10) and (98.2, -10)
3	60_60_C	Soil (100Ωm)	152.28	2	(-2.96, 3.96)
		Asphalt (10kΩm)	618.53	5	(128.2, 10) and (128.2, -10)
4	60_60_UC	Soil (100Ωm)	296.86	2	(-2.96, 3.96)
		Asphalt (10kΩm)	1335.92	5	(128.2, 10) and (128.2, -10)
5	30_60_C	Soil (100Ωm)	166.09	2	(-2.96, 3.96)
		Asphalt (10kΩm)	701.42	5	(98.2, 10) and (98.2, -10)
6	30_60_UC	Soil (100Ωm)	294.95	2	(-2.96, 3.96)
		Asphalt (10kΩm)	1389.92	5	(98.2, 10) and (98.2, -10)
7	10_10_C	Soil (100Ωm)	318.22	2	(-2.96, 3.96)
		Asphalt (10kΩm)	1414.95	5	(28.2, 10)
8	10_10_UC	Soil (100Ωm)	340.8	2	(-2.96, 3.96)
		Asphalt (10kΩm)	1561.32	5	(28.2, 10)

Πίνακας 11: Αποτελέσματα προσομοιώσεων – Βηματικές Τάσεις ($\rho=100 \Omega\text{m}$, $I_G=1 \text{ kA}$).

			Vstep (V)	Area	Critical step coordinates (m)
1	60_30_C	Soil (100Ωm)	159.07	2	(-3.04 , 4.04) to (-3.83 , 4.83)
		Asphalt (10kΩm)	117.44	4	(90.95 , 5.55) to (91.7 , 6.3)
2	60_30_UC	Soil (100Ωm)	249.32	2	(-3.04 , -4.04) to (-3.83 , -4.83)
		Asphalt (10kΩm)	92.96	4	(90.2 , 4.8) to (90.95 , 5.55)
3	60_60_C	Soil (100Ωm)	126.17	2	(-3.04 , -4.04) to (-3.83 , -4.83)
		Asphalt (10kΩm)	93.05	4	(120.95 , 5.55) to (121.7 , 6.3)
4	60_60_UC	Soil (100Ωm)	242.89	2	(-3.04 , -4.04) to (-3.83 , -4.83)
		Asphalt (10kΩm)	93.03	4	(120.2 , 4.8) to (120.95 , 5.55)
5	30_60_C	Soil (100Ωm)	138.06	2	(-3.04 , -4.04) to (-3.83 , -4.83)
		Asphalt (10kΩm)	105.56	4	(90.95 , 5.55) to (91.7 , 6.3)
6	30_60_UC	Soil (100Ωm)	242.6	2	(-3.04 , -4.04) to (-3.83 , -4.83)
		Asphalt (10kΩm)	96.84	4	(90.2 , 4.8) to (90.95 , 5.55)
7	10_10_C	Soil (100Ωm)	269.03	2	(-3.04 , -4.04) to (-3.83 , -4.83)
		Asphalt (10kΩm)	210.63	4	(20.95 , 5.55) to (21.7 , 6.3)
8	10_10_UC	Soil (100Ωm)	287.43	2	(-3.04 , -4.04) to (-3.83 , -4.83)
		Asphalt (10kΩm)	128.92	4	(20.95 , 5.55) to (21.7 , 6.3)

Τα παραπάνω αποτελέσματα δείχνουν ότι οι περιπτώσεις διασυνδεδεμένων συστημάτων γείωσης αποτελούν ευμενέστερο σενάριο σε κάθε περίπτωση με σημαντικές μειώσεις στις τάσεις επαφής ιδίως για μεγάλες αποστάσεις μεταξύ των επιμέρους συστημάτων γείωσης. Προτείνεται επομένως η υιοθέτηση αυτής της σχεδίασης σε εγκαταστάσεις τέτοιου τύπου.

Όσον αφορά τα όρια επιτρεπτών βηματικών τάσεων και τάσεων επαφής, αυτά προκύπτουν από τις σχέσεις (7) και (9), σύμφωνα με το διεθνές πρότυπο IEEE-Std 80-2013 [6]. Επιλέχθηκαν οι σχέσεις οι οποίες αφορούν σε άτομα 50 κιλών, καθώς όλα τα μεταλλικά μέρη της εγκατάστασης είναι εκτεθειμένα στο ευρύ κοινό.

Στον Πίνακα 12 παρακάτω, φαίνονται οι υπολογισμένες τιμές για φυσικό έδαφος και για υλικό επιφανείας πάχους 5 cm με ειδική αντίσταση 10 kΩm. Ο χρόνος ηλεκτροπληξίας επιλέγεται σύμφωνα με το χειρότερο σφάλμα (1β), και ίσος με 0.355 s για ρεύμα σφάλματος 1 kA.

Πίνακας 12: Όρια βηματικών τάσεων και τάσεων επαφής (Σφάλμα 1β, $I_G=1 \text{ kA}$, $\Delta t=0.355 \text{ s}$).

ρ (Ωm)	Etouch - Soil Limit (V)	Estep - Soil Limit (V)	Etouch - Asph. Limit (V)	Estep - Asphalt Limit (V)
10	198	206	1733	6348
100	224	312	1746	6398
300	282	545	1773	6509
500	341	779	1801	6619
1000	487	1363	1870	6896
3000	1071	3699	2147	8003
5000	1655	6035	2423	9109
10000	3115	11876	3115	11876

Βάσει αυτών των ορίων, οι τοπολογίες που προσφέρουν ασφάλεια για ρεύμα σφάλματος 1 kA και ειδική αντίσταση εδάφους 100 Ωm, είναι η 1 (60_30_C), η 3 (60_60_C) και η 5 (30_60_C). Στις υπόλοιπες οι τάσεις επαφής και οι βηματικές τάσεις υπερβαίνουν τα αντίστοιχα όρια στις περιοχές όπου δεν υπάρχει υλικό επιφανείας.

Το επόμενο και τελευταίο βήμα της εργασίας, είναι η παραμετρική ανάλυση των αποτελεσμάτων. Με τον τρόπο αυτό, ελέγχεται η κάθε τοπολογία ξεχωριστά για διάφορες τιμές ειδικής αντίστασης και ρεύματος σφάλματος και επομένως και διάρκειας σφάλματος.

Η διαδικασία αυτή, προϋποθέτει τον προσδιορισμό τριών παραμέτρων για το κάθε σύστημα γείωσης που προσομοιώθηκε. Γενικά για τα συστήματα γείωσης ισχύουν οι παρακάτω σχέσεις, όταν το μοντέλο εδάφους είναι ομοιόμορφο (ομοιογενές) [33]:

$$k_g = \frac{GPR}{I_G * \rho} \quad (15)$$

Όπου:

- k_g (p.u.), ο γεωμετρικός συντελεστής του συστήματος γείωσης.
- GPR (V), η αύξηση του ηλεκτρικού δυναμικού μεταξύ γης και ενός σημείου αναφοράς, κατά τη διάρκεια ενός σφάλματος.
- I_G (A), η ενεργός τιμή του συμμετρικού ρεύματος πλέγματος.
- ρ (Ωm), η ειδική αντίσταση του εδάφους.

$$k_t = \frac{V_{touch}}{GPR} \quad (16)$$

Όπου:

- k_t (p.u.), ο συντελεστής αναλογίας για τάσεις επαφής.
- V_{touch} (V), η χειρότερη περίπτωση τάσης επαφής στην εγκατάσταση.

$$k_s = \frac{V_{step}}{GPR} \quad (17)$$

Όπου:

- k_s (p.u.), ο συντελεστής αναλογίας για βηματικές τάσεις.
- V_{step} (V), η χειρότερη περίπτωση βηματικής τάσης στην εγκατάσταση.

Από τις παραπάνω σχέσεις γίνεται φανερό ότι η παραμετρική ανάλυση για ομοιογενές έδαφος δεν απαιτεί την προσομοίωση του συστήματος γείωσης ξανά και ξανά. Αντίθετα μπορούν να πραγματοποιηθούν απλοί υπολογισμοί βάσει των συντελεστών αυτών.

Να σημειωθεί εδώ ότι όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη ενότητα, υπολογίζονται δύο χειρότερες τάσεις επαφής και δύο βηματικές, εξαιτίας της ύπαρξης ή μη υλικού επιφανείας. Για τον λόγο αυτό, θα υπολογιστούν αντίστοιχα και δύο συντελεστές k_t και k_s .

Στον Πίνακα 13 φαίνονται οι συντελεστές αναλογίας για κάθε μία από τις 8 τοπολογίες που εξετάστηκαν.

Πίνακας 13: Συντελεστές αναλογίας για την παραμετρική ανάλυση.

		kg	kt (Soil)	ks (Soil)	kt (Asphalt)	ks (Asphalt)
1	60_30_C	0.0126648	0.1513486	0.1256001	0.6161487	0.0927295
2	60_30_UC	0.0179337	0.169898	0.1390232	0.7321356	0.0518354
3	60_60_C	0.0102843	0.1480704	0.1226821	0.6014313	0.0904777
4	60_60_UC	0.0174399	0.1702189	0.1392726	0.7660136	0.0533432
5	30_60_C	0.011538	0.1439504	0.1196568	0.6079217	0.091489
6	30_60_UC	0.0181998	0.1620622	0.1332982	0.7637007	0.0532094
7	10_10_C	0.0219661	0.1448687	0.1224751	0.6441517	0.0958887
8	10_10_UC	0.0231007	0.147528	0.1244248	0.6758756	0.0558078

Από αυτούς τους συντελεστές δίνεται πλέον η δυνατότητα υπολογισμού των χειρότερων περιπτώσεων βηματικών τάσεων και τάσεων επαφής, για διάφορες τιμές ειδικής αντίστασης και ρεύματος σφάλματος. Οι υπολογισμοί γίνονται μέσω των σχέσεων 15-17 και συνοψίζονται ενδεικτικά στον Πίνακα 14 για την πρώτη τοπολογία.

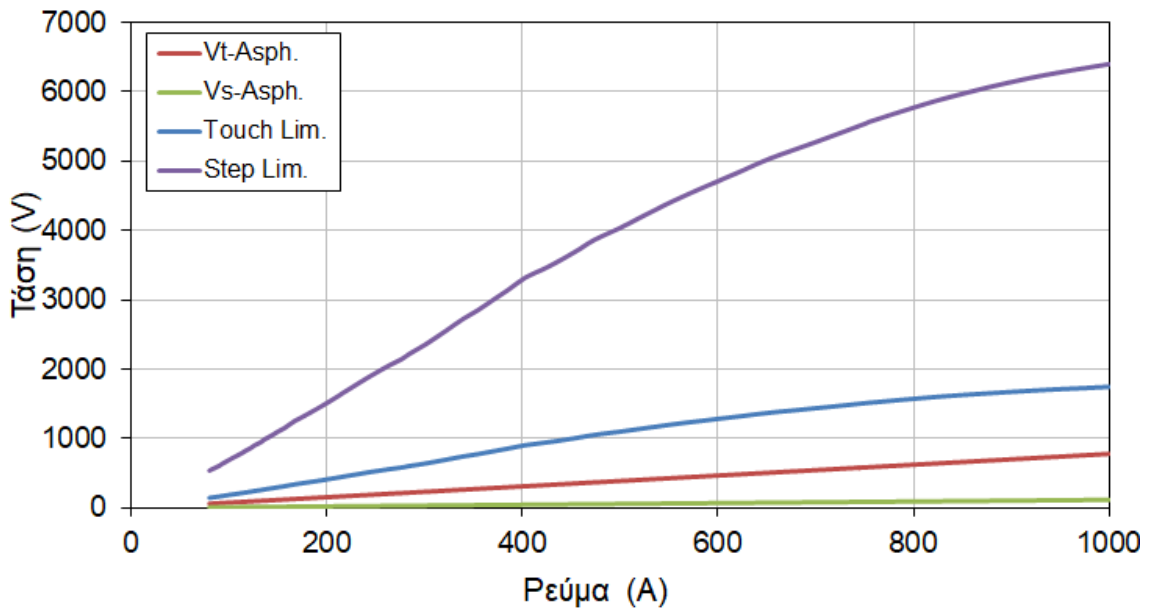
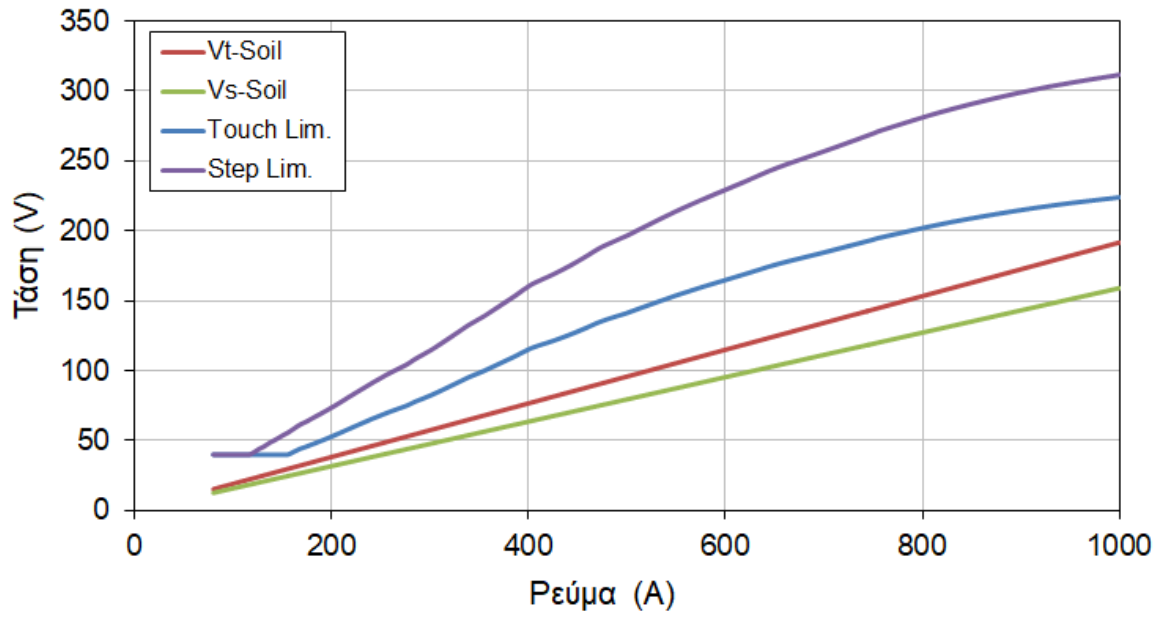
Να σημειωθεί εδώ ότι για κάθε τιμή ρεύματος, ο χρόνος σφάλματος είναι διαφορετικός, επομένως διαφορετικά είναι και τα επιτρεπτά όρια βηματικών τάσεων και τάσεων επαφής. Σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία, ασφαλές όριο για τον άνθρωπο για τάσεις επαφής βιομηχανικής συχνότητας είναι τα 50 V. Επομένως, στις περιπτώσεις όπου τα όρια προέκυπταν χαμηλότερα, υιοθετήθηκε η τιμή αυτή. Σημειώνεται ότι η ίδια τιμή των 50 V υιοθετήθηκε και για τις βηματικές τάσεις αν και εκεί το αντίστοιχο όριο θα είναι πολύ μεγαλύτερο λόγω της διαδρομής του ρεύματος στο ανθρώπινο σώμα.

Πίνακας 14: Αποτελέσματα παραμετρικής ανάλυσης – Τοπολογία 1.

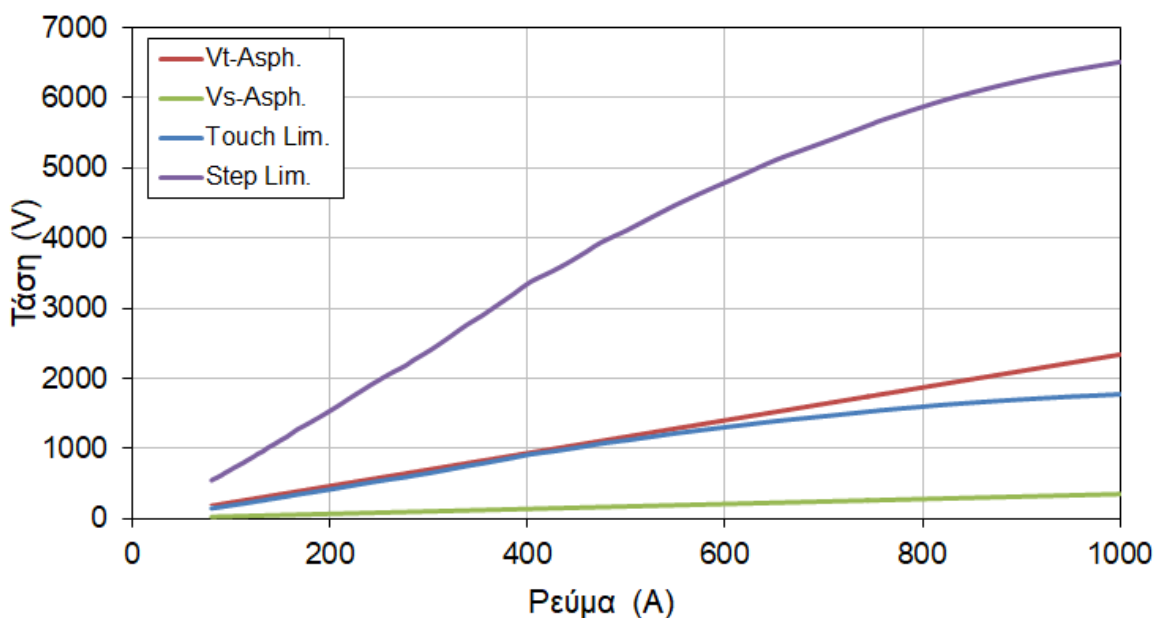
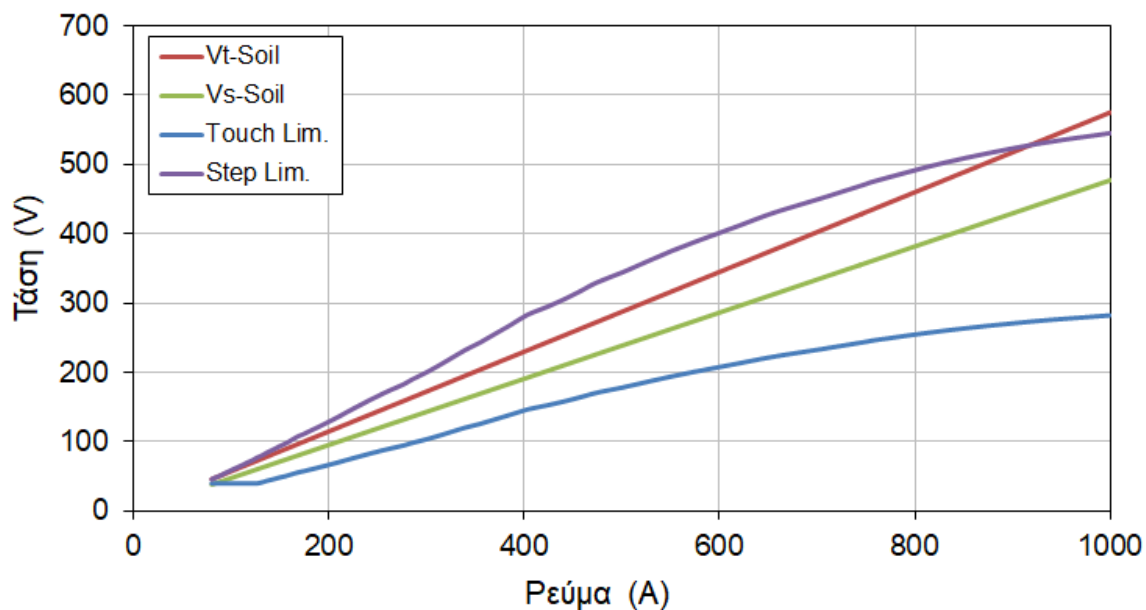
	ρ (Ωm)	IG (A)	Soil		Asphalt		Soil		Asphalt		
			Etouch50 (V)	Estep50 (V)	Etouch50 (V)	Estep50 (V)	Vtouch (V)	Vstep (V)	Vtouch (V)	Vstep (V)	
1	60_30_C	10	80	50	50	146	535	1.53	1.27	6.24	0.94
			250	60	63	527	1931	4.79	3.98	19.51	2.94
			500	125	130	1094	4007	9.58	7.95	39.02	5.87
			750	171	179	1500	5494	14.38	11.93	58.53	8.81
			1000	198	206	1733	6348	19.17	15.91	78.03	11.74
		100	80	50	50	147	539	15.33	12.73	62.43	9.40
			250	68	95	531	1946	47.92	39.77	195.09	29.36
			500	141	197	1102	4039	95.84	79.54	390.17	58.72
			750	194	270	1511	5537	143.76	119.30	585.26	88.08
			1000	224	312	1746	6398	191.68	159.07	780.34	117.44
		300	80	50	50	149	549	46.00	38.18	187.28	28.19
			250	86	166	539	1980	143.76	119.30	585.26	88.08
			500	178	344	1119	4108	287.52	238.61	1170.51	176.16
			750	244	472	1535	5633	431.28	357.91	1755.77	264.24
			1000	282	545	1773	6509	575.04	477.21	2341.02	352.32
		500	80	50	66	152	558	76.67	63.63	312.14	46.98
			250	104	237	548	2013	239.60	198.84	975.43	146.80
			500	215	492	1137	4178	479.20	397.68	1950.85	293.60
			750	295	674	1559	5729	718.80	596.51	2926.28	440.40
			1000	341	779	1801	6619	958.40	795.35	3901.70	587.20
	1000	80	50	115	158	581	153.34	127.26	624.27	93.95	
		250	148	414	569	2097	479.20	397.68	1950.85	293.60	
		500	307	860	1180	4353	958.40	795.35	3901.70	587.20	
		750	421	1179	1618	5968	1437.60	1193.03	5852.55	880.80	
		1000	487	1363	1870	6896	1916.80	1590.70	7803.40	1174.40	
	3000	80	90	312	181	675	460.03	381.77	1872.82	281.86	
		250	326	1125	653	2434	1437.60	1193.03	5852.55	880.80	
		500	676	2335	1355	5051	2875.20	2386.05	11705.10	1761.60	
		750	927	3201	1858	6926	4312.80	3579.08	17557.65	2642.40	
		1000	1071	3699	2147	8003	5750.40	4772.10	23410.20	3523.20	
	5000	80	139	509	204	768	766.72	636.28	3121.36	469.76	
		250	503	1836	737	2770	2396.00	1988.38	9754.25	1468.00	
		500	1045	3810	1530	5750	4792.00	3976.75	19508.50	2936.00	
		750	1432	5223	2097	7883	7188.00	5965.13	29262.75	4404.00	
		1000	1655	6035	2423	9109	9584.00	7953.50	39017.00	5872.00	
	10000	80	263	1001	263	1001	1533.44	1272.56	6242.72	939.52	
		250	947	3612	947	3612	4792.00	3976.75	19508.50	2936.00	
		500	1966	7496	1966	7496	9584.00	7953.50	39017.00	5872.00	
		750	2696	10278	2696	10278	14376.00	11930.25	58525.50	8808.00	
		1000	3115	11876	3115	11876	19168.00	15907.00	78034.00	11744.00	

Παρακάτω, στα Σχήματα 44 και 45 φαίνονται δύο ενδεικτικά γραφήματα για την πρώτη τοπολογία. Τα γραφήματα είναι τάσης-ρεύματος σφάλματος και στο καθένα φαίνονται τόσο οι τιμές όσο και τα όρια βηματικών τάσεων και τάσεων επαφής για δεδομένη ειδική αντίσταση εδάφους σε κάθε περίπτωση. Αντίστοιχα γραφήματα προκύπτουν για όλες τις περιπτώσεις. Είναι σημαντικό ότι το κάθε σύστημα γείωσης προσφέρει ασφάλεια για κάποια μέγιστη τιμή ειδικής αντίστασης του εδάφους και μέγιστο ρεύμα σφάλματος.

Σημειώνεται ότι τα επιτρεπτά όρια του προτύπου IEEE Std 80-2013 [6] ισχύουν για χρόνους ηλεκτροπληξίας από 0.03 s έως 3 s. Τα αντίστοιχα όρια από το EN 50522 ισχύουν από 0.01 έως 10 s. Χρόνοι εκτός των διαστημάτων αυτών πρέπει να αντιμετωπίζονται με προσοχή.



Σχήμα 45: Παραμετρική ανάλυση – Περίπτωση 1 – 100 Ωm.



Σχήμα 46: Παραμετρική ανάλυση – Περίπτωση 1 – 300 Ωm.

Στον Πίνακα 15 εξετάζονται όλες οι τοπολογίες, για ρεύμα σφάλματος 1 kA και για διάφορες τιμές ειδικής αντίστασης εδάφους, ενώ στον Πίνακα 16 για ρεύμα σφάλματος ίσο με 250 A.

Πίνακας 15: Αποτελέσματα παραμετρικής ανάλυσης – 1 κΑ.

		Soil		Asphalt		Soil		Asphalt		
		ρ (Ω m)	Etouch50 (V)	Estep50 (V)	Etouch50 (V)	Estep50 (V)	Vtouch (V)	Vstep (V)	Vtouch (V)	Vstep (V)
1	60_30_C	10	198	206	1733	6348	19.17	15.91	78.03	11.74
		100	224	312	1746	6398	191.68	159.07	780.34	117.44
		300	282	545	1773	6509	575.04	477.21	2341.02	352.32
		500	341	779	1801	6619	958.40	795.35	3901.70	587.20
		1000	487	1363	1870	6896	1916.80	1590.70	7803.40	1174.40
		3000	1071	3699	2147	8003	5750.40	4772.10	23410.20	3523.20
		5000	1655	6035	2423	9109	9584.00	7953.50	39017.00	5872.00
		10000	3115	11876	3115	11876	19168.00	15907.00	78034.00	11744.00
2	60_30_UC	10	198	206	1733	6348	30.47	24.93	131.30	9.30
		100	224	312	1746	6398	304.69	249.32	1312.99	92.96
		300	282	545	1773	6509	914.07	747.96	3938.97	278.88
		500	341	779	1801	6619	1523.45	1246.60	6564.95	464.80
		1000	487	1363	1870	6896	3046.90	2493.20	13129.90	929.60
		3000	1071	3699	2147	8003	9140.70	7479.60	39389.70	2788.80
		5000	1655	6035	2423	9109	15234.50	12466.00	65649.50	4648.00
		10000	3115	11876	3115	11876	30469.00	24932.00	131299.00	9296.00
3	60_60_C	10	198	206	1733	6348	15.23	12.62	61.85	9.31
		100	224	312	1746	6398	152.28	126.17	618.53	93.05
		300	282	545	1773	6509	456.84	378.51	1855.59	279.15
		500	341	779	1801	6619	761.40	630.85	3092.65	465.25
		1000	487	1363	1870	6896	1522.80	1261.70	6185.30	930.50
		3000	1071	3699	2147	8003	4568.40	3785.10	18555.90	2791.50
		5000	1655	6035	2423	9109	7614.00	6308.50	30926.50	4652.50
		10000	3115	11876	3115	11876	15228.00	12617.00	61853.00	9305.00
4	60_60_UC	10	198	206	1733	6348	29.69	24.29	133.59	9.30
		100	224	312	1746	6398	296.86	242.89	1335.92	93.03
		300	282	545	1773	6509	890.58	728.67	4007.76	279.09
		500	341	779	1801	6619	1484.3	1214.45	6679.6	465.15
		1000	487	1363	1870	6896	2968.6	2428.9	13359.2	930.3
		3000	1071	3699	2147	8003	8905.8	7286.7	40077.6	2790.9
		5000	1655	6035	2423	9109	14843	12144.5	66796	4651.5
		10000	3115	11876	3115	11876	29686	24289	133592	9303
5	30_60_C	10	198	206	1733	6348	16.61	13.81	70.14	10.56
		100	224	312	1746	6398	166.09	138.06	701.42	105.56
		300	282	545	1773	6509	498.27	414.18	2104.26	316.68
		500	341	779	1801	6619	830.45	690.3	3507.1	527.8
		1000	487	1363	1870	6896	1660.9	1380.6	7014.2	1055.6
		3000	1071	3699	2147	8003	4982.7	4141.8	21042.6	3166.8
		5000	1655	6035	2423	9109	8304.5	6903	35071	5278
		10000	3115	11876	3115	11876	16609	13806	70142	10556
6	30_60_UC	10	198	206	1733	6348	29.50	24.26	138.99	9.68
		100	224	312	1746	6398	294.95	242.60	1389.92	96.84
		300	282	545	1773	6509	884.85	727.8	4169.76	290.52
		500	341	779	1801	6619	1474.75	1213	6949.6	484.2
		1000	487	1363	1870	6896	2949.5	2426	13899.2	968.4
		3000	1071	3699	2147	8003	8848.5	7278	41697.6	2905.2
		5000	1655	6035	2423	9109	14747.5	12130	69496	4842
		10000	3115	11876	3115	11876	29495	24260	138992	9684
7	10_10_C	10	198	206	1733	6348	31.82	26.90	141.50	21.06
		100	224	312	1746	6398	318.22	269.03	1414.95	210.63
		300	282	545	1773	6509	954.66	807.09	4244.85	631.89
		500	341	779	1801	6619	1591.1	1345.15	7074.75	1053.15
		1000	487	1363	1870	6896	3182.2	2690.3	14149.5	2106.3
		3000	1071	3699	2147	8003	9546.6	8070.9	42448.5	6318.9
		5000	1655	6035	2423	9109	15911	13451.5	70747.5	10531.5
		10000	3115	11876	3115	11876	31822	26903	141495	21063
8	10_10_UC	10	198	206	1733	6348	34.08	28.74	156.13	12.89
		100	224	312	1746	6398	340.80	287.43	1561.32	128.92
		300	282	545	1773	6509	1022.4	862.29	4683.96	386.76
		500	341	779	1801	6619	1704	1437.15	7806.6	644.6
		1000	487	1363	1870	6896	3408	2874.3	15613.2	1289.2
		3000	1071	3699	2147	8003	10224	8622.9	46839.6	3867.6
		5000	1655	6035	2423	9109	17040	14371.5	78066	6446
		10000	3115	11876	3115	11876	34080	28743	156132	12892

Πίνακας 16: Αποτελέσματα παραμετρικής ανάλυσης – 250 A.

		Soil		Asphalt		Soil		Asphalt		
		ρ (Ω m)	Etouch50 (V)	Estep50 (V)	Etouch50 (V)	Estep50 (V)	Vtouch (V)	Vstep (V)	Vtouch (V)	Vstep (V)
1	60_30_C	10	60	63	527	1931	4.79	3.98	19.51	2.94
		100	68	95	531	1946	47.92	39.77	195.09	29.36
		300	86	166	539	1980	143.76	119.30	585.26	88.08
		500	104	237	548	2013	239.60	198.84	975.43	146.80
		1000	148	414	569	2097	479.20	397.68	1950.85	293.60
		3000	326	1125	653	2434	1437.60	1193.03	5852.55	880.80
		5000	503	1836	737	2770	2396.00	1988.38	9754.25	1468.00
		10000	947	3612	947	3612	4792.00	3976.75	19508.50	2936.00
2	60_30_UC	10	60	63	527	1931	7.62	6.23	32.82	2.32
		100	68	95	531	1946	76.17	62.33	328.25	23.24
		300	86	166	539	1980	228.52	186.99	984.74	69.72
		500	104	237	548	2013	380.86	311.65	1641.24	116.20
		1000	148	414	569	2097	761.73	623.30	3282.48	232.40
		3000	326	1125	653	2434	2285.18	1869.90	9847.43	697.20
		5000	503	1836	737	2770	3808.63	3116.50	16412.38	1162.00
		10000	947	3612	947	3612	7617.25	6233.00	32824.75	2324.00
3	60_60_C	10	60	63	527	1931	3.81	3.15	15.46	2.33
		100	68	95	531	1946	38.07	31.54	154.63	23.26
		300	86	166	539	1980	114.21	94.63	463.90	69.79
		500	104	237	548	2013	190.35	157.71	773.16	116.31
		1000	148	414	569	2097	380.70	315.43	1546.33	232.63
		3000	326	1125	653	2434	1142.10	946.28	4638.98	697.88
		5000	503	1836	737	2770	1903.50	1577.13	7731.63	1163.13
		10000	947	3612	947	3612	3807.00	3154.25	15463.25	2326.25
4	60_60_UC	10	60	63	527	1931	7.42	6.07	33.40	2.33
		100	68	95	531	1946	74.22	60.72	333.98	23.26
		300	86	166	539	1980	222.645	182.1675	1001.94	69.7725
		500	104	237	548	2013	371.075	303.6125	1669.9	116.2875
		1000	148	414	569	2097	742.15	607.225	3339.8	232.575
		3000	326	1125	653	2434	2226.45	1821.675	10019.4	697.725
		5000	503	1836	737	2770	3710.75	3036.125	16699	1162.875
		10000	947	3612	947	3612	7421.5	6072.25	33398	2325.75
5	30_60_C	10	60	63	527	1931	4.15	3.45	17.54	2.64
		100	68	95	531	1946	41.52	34.52	175.36	26.39
		300	86	166	539	1980	124.5675	103.545	526.065	79.17
		500	104	237	548	2013	207.6125	172.575	876.775	131.95
		1000	148	414	569	2097	415.225	345.15	1753.55	263.9
		3000	326	1125	653	2434	1245.675	1035.45	5260.65	791.7
		5000	503	1836	737	2770	2076.125	1725.75	8767.75	1319.5
		10000	947	3612	947	3612	4152.25	3451.5	17535.5	2639
6	30_60_UC	10	60	63	527	1931	7.37	6.07	34.75	2.42
		100	68	95	531	1946	73.74	60.65	347.48	24.21
		300	86	166	539	1980	221.2125	181.95	1042.44	72.63
		500	104	237	548	2013	368.6875	303.25	1737.4	121.05
		1000	148	414	569	2097	737.375	606.5	3474.8	242.1
		3000	326	1125	653	2434	2212.125	1819.5	10424.4	726.3
		5000	503	1836	737	2770	3686.875	3032.5	17374	1210.5
		10000	947	3612	947	3612	7373.75	6065	34748	2421
7	10_10_C	10	60	63	527	1931	7.96	6.73	35.37	5.27
		100	68	95	531	1946	79.56	67.26	353.74	52.66
		300	86	166	539	1980	238.665	201.7725	1061.2125	157.9725
		500	104	237	548	2013	397.775	336.2875	1768.6875	263.2875
		1000	148	414	569	2097	795.55	672.575	3537.375	526.575
		3000	326	1125	653	2434	2386.65	2017.725	10612.125	1579.725
		5000	503	1836	737	2770	3977.75	3362.875	17686.875	2632.875
		10000	947	3612	947	3612	7955.5	6725.75	35373.75	5265.75
8	10_10_UC	10	60	63	527	1931	8.52	7.19	39.03	3.22
		100	68	95	531	1946	85.20	71.86	390.33	32.23
		300	86	166	539	1980	255.6	215.5725	1170.99	96.69
		500	104	237	548	2013	426	359.2875	1951.65	161.15
		1000	148	414	569	2097	852	718.575	3903.3	322.3
		3000	326	1125	653	2434	2556	2155.725	11709.9	966.9
		5000	503	1836	737	2770	4260	3592.875	19516.5	1611.5
		10000	947	3612	947	3612	8520	7185.75	39033	3223

Από τους παραπάνω πίνακες, φαίνεται ότι γενικά οι τάσεις επαφής βρέθηκαν πιο επικίνδυνες από τις βηματικές τάσεις. Επίσης, φαίνεται ξεκάθαρα ότι η κάθε τοπολογία μπορεί να προσφέρει την απαιτούμενη ασφάλεια υπό προϋποθέσεις. Για τον λόγο αυτό, απαιτείται η εκπόνηση μελέτης γείωσης σε κάθε εγκατάσταση τέτοιου τύπου.

Για τις περιπτώσεις που δεν προσφέρεται ασφάλεια μπορούν να γίνουν στοχευμένες παρεμβάσεις για να αντιμετωπιστούν οι επικίνδυνες τάσεις που ενδέχεται να εμφανιστούν. Κοινές παρεμβάσεις είναι η εγκατάσταση επιπλέον ηλεκτροδίων γείωσης σε περιορισμένη έκταση της εγκατάστασης, η χρήση σχετικά επιφανειακών ισοδυναμικών πλεγμάτων ή υλικού επιφανείας σε επικίνδυνες θέσεις.

Γενικά από τα αποτελέσματα των παραπάνω πινάκων μπορεί να ειπωθεί ότι για να ενισχυθεί η προσφερόμενη ασφάλεια σε σταθμούς φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων που συνδέονται στη μέση τάση συνιστάται:

- να χρησιμοποιείται υλικό επιφανείας γύρω από τους οικίσκους για να αυξηθούν τα επιτρεπτά όρια
- να χρησιμοποιείται άσφαλτος πάχους 10 cm στον χώρο στάθμευσης και γύρω από τα σημεία φόρτισης
- εναλλακτικά να εγκαθίσταται πλέγμα γείωσης στην παραπάνω περιοχή.

Βέβαια η επάρκεια των παραπάνω εξαρτάται από την ειδική αντίσταση του εδάφους, το ρεύμα σφάλματος και τη διάρκεια της ηλεκτροπληξίας. Άρα απαιτείται μελέτη για κάθε περίπτωση ξεχωριστά.

Κεφάλαιο 5: Συμπεράσματα

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση της διαδικασίας σχεδίασης και μελέτης συστημάτων γείωσης τεχνικών εγκαταστάσεων που συνδέονται σε συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας μέσης και υψηλής τάσης. Συγκεκριμένα εξετάστηκε μία εγκατάσταση σταθμού φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων, συνδεδεμένη στο δίκτυο διανομής της Μέσης Τάσης. Η σχεδίαση έγινε με τέτοιο τρόπο, ώστε να εξασφαλίζεται η προστασία του εξοπλισμού σε περίπτωση σφάλματος γης αλλά και η προστασία των ανθρώπων που θα βρεθούν στον χώρο από πιθανή θανατηφόρο ηλεκτροπληξία. Ταυτόχρονα, το τελικό σύστημα που προκύπτει είναι τεχνικά εφικτό και όσο το δυνατόν οικονομικότερο.

Συνολικά εξετάστηκαν οκτώ διαφορετικές τοπολογίες συστημάτων γείωσης. Η σχεδίαση τους έγινε σύμφωνα με το πρότυπο IEEE Std 80-2013, ενώ η τελική προσομοίωση και ο έλεγχος της παρεχόμενης ασφάλειας από αυτά, έγινε με χρήση του λογισμικού CYMGrd της εταιρείας CYME. Τέλος τα αποτελέσματα εξετάστηκαν για ακόμα περισσότερες περιπτώσεις μέσω της παραμετρικής ανάλυσης. Με τον τρόπο αυτό, ελέγχθηκε η κάθε τοπολογία ξεχωριστά για διάφορες τιμές ειδικής αντίστασης και ρεύματος σφάλματος γης.

Ως πρώτο συμπέρασμα προκύπτει ότι τα διασυνδεδεμένα συστήματα γείωσης, για τους επιμέρους οικίσκους και τα σημεία φόρτισης, αποτελούν ευμενέστερο σενάριο σε κάθε περίπτωση με σημαντικές μειώσεις στις τάσεις επαφής ιδίως για μεγάλες αποστάσεις μεταξύ των επιμέρους συστημάτων γείωσης. Προτείνεται επομένως σε κάθε περίπτωση η υιοθέτηση αυτής της σχεδίασης σε εγκαταστάσεις τέτοιου τύπου και όχι η απλή διασύνδεση των συστημάτων μέσω του αγωγού PE που διανέμεται. Η χρήση πλέγματος γείωσης σε όλο τον χώρο της εγκατάστασης δεν είναι επιβεβλημένη, καθώς είναι εφικτό να επιτευχθεί ασφαλής σχεδίαση και χωρίς αυτό αλλά και να καλυφθούν και οι απαιτήσεις του συστήματος γείωσης από πλευράς αντικεραυνικής προστασίας.

Το υλικό επιφανείας, άσφαλτος, που χρησιμοποιείται έτσι κι αλλιώς στις θέσεις στάθμευσης των ηλεκτρικών οχημάτων, διευρύνει κατά πολύ τα επιτρεπτά όρια βηματικών τάσεων και τάσεων επαφής. Προτείνεται επομένως η ενδεχόμενη αξιοποίησή του και σε άλλα σημεία ενδιαφέροντος του σταθμού φόρτισης, ώστε το τελικό σύστημα γείωσης να είναι όσο το δυνατόν απλούστερο. Ένα περίπλοκο σύστημα κατασκευάζεται πιο δύσκολα, ενώ κατά πάσα πιθανότητα δεν θα είναι και η οικονομικότερη λύση. Επίσης, αν στις θέσεις στάθμευσης χρησιμοποιείται μπετόν τότε θα πρέπει να περιέχει ισοδυναμικό πλέγμα ώστε να υπάρχει ασφάλεια γιατί η ειδική αντίσταση του σκυροδέματος ενδέχεται να είναι

μικρότερη από αυτή του εδάφους συγκεντρώνοντας το ρεύμα σφάλματος και δημιουργώντας πιθανόν επικίνδυνες καταστάσεις.

Η παραμετρική ανάλυση που πραγματοποιήθηκε έδειξε ότι υπό προϋποθέσεις, κάθε μία από τις οκτώ τοπολογίες που εξετάστηκαν, μπορεί να προσφέρει επαρκή επίπεδα ασφαλείας. Παράγοντες όπως η ειδική αντίσταση του εδάφους και το ρεύμα σφάλματος από τη μελέτη βραχυκυκλωμάτων, καθορίζουν αν τελικά η σχεδίαση είναι ασφαλής ή όχι. Για τον λόγο αυτό, θα πρέπει το μέγιστο δυνατό ρεύμα σφάλματος να υπολογίζεται με ακρίβεια σε κάθε περίπτωση.

Επιπλέον, πρέπει να λαμβάνονται υπ' όψιν τα πραγματικά μέσα προστασίας. Συγκεκριμένα βρέθηκε ότι ακόμα και μικρά ρεύματα σφάλματος γης (μικρότερα από το μέγιστο) μπορούν να προκαλέσουν σημαντικά προβλήματα ασφαλείας. Αυτό συμβαίνει διότι συχνά όσο μικρότερη είναι η τιμή του ρεύματος σφάλματος γης, τόσο περισσότερο χρόνο χρειάζονται τα μέσα προστασίας για να διακόψουν το κύκλωμα. Επομένως, ένα σφάλμα χαμηλής έντασης ίσως τελικά να προκαλέσει σημαντικά προβλήματα. Δηλαδή, το χειρότερο σφάλμα γης από πλευρά επικινδυνότητας δεν είναι απαραίτητα αυτό που αντιστοιχεί στο μεγαλύτερο ρεύμα καθώς εξαρτάται από τη διάρκειά του. Επίσης, χρήση διαφορετικών μέσων προστασίας ή ρυθμίσεων τους μπορεί να εξασφαλίσει μεγαλύτερα επίπεδα ασφαλείας.

Είναι σημαντικό ότι ο γειωμένος αγωγός PE θα αποκτήσει το δυναμικό του συστήματος γείωσης GPR σε περίπτωση σφάλματος γης στη μέση τάση. Αυτό έχει ως συνέπεια όλα τα μεταλλικά μέρη που συνδέονται με αυτόν, μαζί και τα σασί των ηλεκτρικών οχημάτων, να βρεθούν υπό τάση και να υπάρχει κίνδυνος λόγω τάσης επαφής. Επομένως οι θέσεις που πρέπει να εξεταστούν για την ασφάλεια έναντι τάσεων επαφής πρέπει να περιλαμβάνουν και τις θέσεις στάθμευσης των οχημάτων.

Εν κατακλείδι, συνίσταται να γίνεται πάντα μελέτη πριν την κατασκευή του συστήματος γείωσης ενός σταθμού φόρτισης συνδεδεμένου στο σύστημα διανομής μέσης τάσης. Μια μελέτη η οποία θα πρέπει να ακολουθεί τα διεθνή πρότυπα, προκειμένου να διασφαλίζεται το μέγιστο δυνατό επίπεδο ασφαλείας. Πρέπει επίσης να λαμβάνονται υπ' όψιν οι ιδιαιτερότητες και τα χαρακτηριστικά των σταθμών φόρτισης.

Βιβλιογραφία

- [1] Γ. Διάφας, Γ. Δογραματζάκης, «Χρονική Μεταβολή Ηλεκτρικών Παραμέτρων Εδάφους», Διπλωματική Εργασία, Ε.Μ.Π., Αθήνα, 2018
- [2] Π. Ντοκόπουλος, «Ηλεκτρικές Εγκαταστάσεις Καταναλωτών», Εκδόσεις ΖΗΤΗ, 2^η έκδοση, Θεσσαλονίκη, 2005
- [3] Α. Αλεξοπούλου, «Συμβολή στη Μελέτη Συστημάτων Γείωσης», Διπλωματική Εργασία, Ε.Μ.Π., Αθήνα, 2016
- [4] Δ. Τόκας, «Μελέτη Διατάξεων Γείωσης με Χρήση της Μεθόδου Πεπερασμένων Στοιχείων», Διπλωματική Εργασία, Π.Δ.Μ., Κοζάνη, 2012
- [5] Ε. Μαυρομάτη, «Ασφαλής Σχεδίαση Συστήματος Γείωσης Φωτοβολταϊκού Πάρκου», Διπλωματική Εργασία, Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη, 2012
- [6] IEEE Std 80-2013, Guide for Safety in AC Substation Grounding, 2015
- [7] Δ. Βάρλα, «Υπολογιστική Μελέτη Συστημάτων Γείωσης», Διπλωματική Εργασία, Ε.Μ.Π., Αθήνα, 2004
- [8] Energy Networks Association, Power System Earthing Guide, Part 1: Management Principles, Version 1, 2010
- [9] EN 50522:2022, Earthing of Power Installations Exceeding 1 kV AC, CENELEC, 2022
- [10] CYMGrd 6.3 for Windows, User's Guide and Reference Manual, CYME Int. T&D Inc., 2006
- [11] W. Khan, A. Ahmad, F. Ahmad, and M. Alam, "A Comprehensive Review of Fast Charging Infrastructure for Electric Vehicles," Smart Science, vol. 6, no. 3, pp. 256-270, 2018
- [12] S. Arif, T. Lie, B. Seet, S. Ayyadi, and K. Jensen, "Review of Electric Vehicle Technologies, Charging Methods, Standards and Optimization Techniques," Electronics, vol. 10, no. 16, 1910, 2021

- [13] S. Habib, M. Khan, F. Abbas, and H. Tang, "Assessment of Electric Vehicles Concerning Impacts, Charging Infrastructure with Unidirectional and Bidirectional Chargers, and Power Flow Comparisons," *International Journal of Energy Research*, vol. 42, no. 11, 2018
- [14] V. Tran, D. Sutanto, and K. Muttaqi, "The State of the Art of Battery Charging Infrastructure for Electrical Vehicles: Topologies, Power Control Strategies, and Future Trend," *Australasian Universities Power Engineering Conference*, Melbourne, Australia, 2017
- [15] Χ. Αντριάς, Κ. Ζαγκουμίδης, «Μοντελοποίηση Σταθμών Φόρτισης Ηλεκτρικών Οχημάτων και Προσομοιώσεις Υπερτάσεων Λόγω Κεραυνικών Πληγμάτων», Διπλωματική Εργασία, Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη, 2022
- [16] IEC 61851-25:2020, *Electric Vehicle Conductive Charging System*, 2020
- [17] M. Ahmadi, N. Mithulanathan, and R. Sharma, "A Review on Topologies for Fast Charging Stations for Electric Vehicles," *IEEE International Conference on Power System Technology*, Wollongong, Australia, 2016
- [18] A. Arancibia and K. Strunz, "Modeling of an Electric Vehicle Charging Station for Fast DC Charging," *IEEE International Electric Vehicle Conference*, Greenville, USA, 2012
- [19] G. F. Reed, "Advancements in Medium Voltage DC Architecture Development with Applications for Powering Electric Vehicle Charging Stations," *IEEE Energytech*, Cleveland, USA, 2012
- [20] S. Rivera, B. Wu, S. Kouro, V. Yaramasu, and J. Wang, "Electric Vehicle Charging Station Using a Neutral Point Clamped Converter With Bipolar DC Bus," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 62, no. 4, pp. 1999-2009, 2015
- [21] T. P. Ezhil Reena Joy, K. Thirugnanam, and P. Kumar, "A Multi-Point Bidirectional Contactless Charging System in a Charging Station Suitable for EVs and PHEVs Applications," *Annual IEEE India Conference*, Mumbai, India, 2013
- [22] Wang, Shuo, R. Crosier, and Y. Chu, "Investigating the Power Architectures and Circuit Topologies for Megawatt Superfast Electric Vehicle

Charging Stations with Enhanced Grid Support Functionality," IEEE International Electric Vehicle Conference, 2012

[23] Crosier, Russell, S. Wang, and M. Jamshidi, "A 4800V Grid Connected Electric Vehicle Charging Station that Provides STACOM-APF Functions with a Bi-Directional, Multi-Level, Cascaded Converter," 27th Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, Orlando, USA, 2012

[24] R. Crosier, S. Wang, and Y. Chu, "Modeling of a Grid-Connected, Multifunctional Electric Vehicle Charging Station in Active Filter Mode with DQ Theory," IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, Raleigh, USA, 2012

[25] R. Crosier and S. Wang, "DQ-Frame Modeling of an Active Power Filter Integrated with a Grid-Connected, Multifunctional Electric Vehicle Charging Station," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 28, no. 12, pp. 5702-5716, 2013

[26] M. Vasiladiotis, A. Rufer, and A. Béguin, "Modular Converter Architecture for Medium Voltage Ultra-Fast EV Charging Stations: Global System Considerations," IEEE International Electric Vehicle Conference, Greenville, USA, 2012

[27] J. Zhao, H. Zhang, Q. Lu, C. Xu, G. Yang, "Lightning Protection of Electric Vehicle Charging Infrastructure", 33rd International Conference on Lightning Protection, Estoril, Portugal, 2016

[28] IEC 62305-3:2010, Protection Against Lightning - Part 3: Physical Damage to Structures and Life Hazard, 2010

[29] Z. Datsios, P. Mikropoulos, A. Teneketzoglou, and D. Tzikas, "Safety Performance Evaluation of Fence Grounding Configurations in High Voltage Installations", 49th International Universities Power Engineering Conference, Cluj-Napoca, Romania, 2014

[30] Uni Source Energy, Customer Provided and Installed Equipment Pad

[31] OLSUN Electrics, Project Applications, "Powering Up Electric Vehicle Charging Systems"

[32] Παροχαί Καταναλωτών Μ.Τ., Οδηγία Διανομής Νο 34, ΔΕΔ/ΤΤΕ Δ-18, ΔΕΗ, 1975

[33] Z. Datsios and P. Mikropoulos, "Safety performance evaluation of typical grounding configurations of MV/LV distribution substations," *Electric Power Systems Research*, vol. 150, pp. 36-44, 2017