



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ & ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΣΠΟΥΔΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε.

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Σχεδίαση Συστήματος Γείωσης Φωτοβολταϊκού
Πάρκου

Ντίνγκο Νοβρούς

A.M.: 7545

Επιβλέπων: Δρ. Ζαχαρίας Γ. Δάτσιος, Έκτακτο Εκπαιδευτικό Προσωπικό

(Υπογραφή)

.....

ΝΤΙΝΓΚΟ ΝΟΒΡΟΥΣ

Ηλεκτρολόγος Μηχανικός Τ.Ε., ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ

© 2023 – All rights reserved

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η αναλυτική παρουσίαση της σχεδίασης ενός συστήματος γείωσης φωτοβολταϊκού πάρκου 500 kW συνδεδεμένου στη μέση τάση (20 kV). Αρχικά γίνεται αναφορά στη γενικότερη λειτουργία των συστημάτων γείωσης και πραγματοποιείται γενική αναφορά στη σχεδίαση ενός συστήματος γείωσης εγκατάστασης υψηλής τάσης. Στη συνέχεια περιγράφεται το σύστημα γείωσης ενός φωτοβολταϊκού πάρκου, κάνοντας αναφορά στις μορφές, στα τμήματα και στους τρόπους σύνδεσης των φωτοβολταϊκών πλαισίων, στις βάσεις και στα είδη θεμελίωσης των πάνελ, ενώ παρουσιάζονται τα δεδομένα του φωτοβολταϊκού πάρκου, του οποίου το σύστημα γείωσης πρόκειται να μελετηθεί. Κατόπιν αποτυπώνεται η σχεδίαση του συστήματος γείωσης του φωτοβολταϊκού πάρκου της παρούσας εργασίας, η προσομοίωση του οποίου πραγματοποιήθηκε στο λογισμικό πρόγραμμα CYMGrd. Στα συμπεράσματα, τα οποία αποτελούν το επιστέγασμα αυτής της εργασίας, αποτυπώνονται τα σημαντικότερα ευρήματά της.

Λέξεις – Κλειδιά: Φωτοβολταϊκό πάρκο, γείωση, σύστημα γείωσης, πάνελ, ηλεκτροπληξία

Η σελίδα αυτή είναι σκόπιμα λευκή

ABSTRACT

The objective of this thesis is the detailed presentation of the design of a photovoltaic (PV) park grounding system (500 kW, connected to the 20 kV overhead network). Initially, reference is made to the general function of grounding systems, as well as to the design of a high voltage installation grounding system. Then, the grounding system of a photovoltaic park is described, making reference to the forms, parts and connection methods of the PV panels, to the bases and types of foundation of the panels, while presenting the data of the PV park to be studied. Subsequently, the design of the grounding system of the PV park of this work is presented, the simulation of which was carried out in the CYMGrd software. In the conclusions, which are the culmination of this work, the most important findings of the present work are reflected.

Keywords: Photovoltaic (PV) park, grounding, grounding system, panels, electric shock

Η σελίδα αυτή είναι σκόπιμα λευκή

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Καθηγητή κ. Π.Ν. Μικρόπουλο, Διευθυντή του Εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης (Α.Π.Θ.) που παραχώρησε ευγενικά πρόσβαση στο λογισμικό σχεδίασης και ανάλυσης συστημάτων γείωσης CYMGtd. Χωρίς το λογισμικό αυτό η πτυχιακή εργασία δεν θα μπορούσε να διεκπεραιωθεί.

Η σελίδα αυτή είναι σκόπιμα λευκή

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΓΕΙΩΣΗΣ	3
<i>1.1 Ορισμός και χρησιμότητα συστημάτων γείωσης</i>	<i>3</i>
<i>1.2 Χρησιμότητα της γείωσης</i>	<i>4</i>
<i>1.3 Επικινδυνότητα γείωσης – Αντικεραυνική προστασία</i>	<i>5</i>
<i>1.4 Είδη – Κατηγορίες γείωσης</i>	<i>5</i>
<i>1.5 Μέθοδοι γείωσης</i>	<i>6</i>
<i>1.6 Ηλεκτρόδια γείωσης</i>	<i>6</i>
<i>1.6.1 Είδη ηλεκτροδίων γείωσης</i>	<i>7</i>
<i>1.6.2 Υλικό ηλεκτροδίων γείωσης.....</i>	<i>9</i>
<i>1.6.3 Επιλογή διατομής ηλεκτροδίων γείωσης</i>	<i>9</i>
<i>1.6.4 Βοηθητικά ηλεκτρόδια γείωσης</i>	<i>12</i>
<i>1.7 Αντίσταση γείωσης.....</i>	<i>12</i>
<i>1.8 Ροή ρεύματος από σύστημα γείωσης προς το έδαφος</i>	<i>14</i>
<i>1.9 Υλικό επιφάνειας</i>	<i>15</i>
<i>1.10 Περιπτώσεις κινδύνου ηλεκτροπληξίας</i>	<i>16</i>
<i>1.11 Τάση επαφής</i>	<i>18</i>
<i>1.12 Βηματική τάση</i>	<i>21</i>
<i>1.13 Επιτρεπτά όρια βηματικής τάσης και τάσης επαφής</i>	<i>22</i>
<i>1.14 Τάση πλέγματος.....</i>	<i>25</i>
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΓΕΙΩΣΗΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΥΨΗΛΗΣ ΤΑΣΗΣ.....	27
<i>2.1 Κριτήρια σχεδίασης και παράμετροι εισόδου για τη σχεδίαση</i>	<i>27</i>
<i>2.2 Σχεδίαση συστήματος γείωσης ΦΒ πάρκου</i>	<i>27</i>
<i>2.2.1 Διαδικασία σχεδίασης ΦΒ πάρκου</i>	<i>29</i>
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΤΟ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟ ΠΑΡΚΟ ΚΑΙ ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΓΕΙΩΣΗΣ ΤΟΥ	33
<i>3.1 Γενικά για τα φωτοβολταϊκά πάρκα</i>	<i>33</i>
<i>3.1.1 Το φωτοβολταϊκό πάρκο.....</i>	<i>33</i>
<i>3.1.2 Μορφές χρήσης του φωτοβολταϊκού πάρκου</i>	<i>33</i>
<i>3.1.3 Τμήματα ενός φωτοβολταϊκού συστήματος</i>	<i>34</i>
<i>3.1.4 Τρόποι σύνδεσης φωτοβολταϊκών πλαισίων</i>	<i>34</i>
<i>3.1.5 Τα φωτοβολταϊκά συστήματα στον διεθνή και στον ελληνικό χώρο</i>	<i>36</i>
<i>3.2 Βάσεις των πάνελ</i>	<i>36</i>
<i>3.2.1 Είδη θεμελίωσης σταθερών βάσεων</i>	<i>37</i>
<i>3.3 Περιγραφή φωτοβολταϊκού πάρκου που θα μελετηθεί</i>	<i>39</i>

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΓΕΙΩΣΗΣ ΤΟΥ ΥΠΟ ΜΕΛΕΤΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟΥ ΠΑΡΚΟΥ	43
<i>4.1 Η σχεδίαση του ΦΒ πάρκου</i>	43
<i>4.1.1 Διαδικασία σχεδίασης.....</i>	43
<i>4.1.2 Θέσεις εγκατάστασης συστοιχιών πάνελ ΦΒ πάρκου.....</i>	43
<i>4.1.3 Μοντέλα εδάφους για τις δύο συστοιχίες πάνελ και τον υποσταθμό.....</i>	43
<i>4.1.4 Υπολογισμός επιτρεπόμενων ορίων βηματικής τάσης και τάσης επαφής</i>	43
4.2 Προσομοίωση συστήματος γείωσης	45
<i>4.2.1 Ανάλυση Εδάφους (Soil Analysis Module)</i>	45
<i>4.2.2 Διαστασιολόγηση Ηλεκτροδίων (Electrode Sizing Module)</i>	45
<i>4.2.3 Ανάλυση Πλέγματος Γείωσης (Grid Analysis Module) – Αρχική Σχεδίαση</i>	46
<i>4.2.4 Προσομοίωση ΦΒ πάρκου με το CYMGrd – Αρχική Σχεδίαση</i>	48
<i>4.2.4 Ανάλυση Πλέγματος Γείωσης (Grid Analysis Module) και Προσομοίωση – Τελική Σχεδίαση</i>	50
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	53
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	55

ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΕΙΚΟΝΩΝ

Σχήμα 1: Μορφές ηλεκτροδίων γείωσης [4].....	7
Σχήμα 2: Βασικές περιπτώσεις έκθεσης σε κίνδυνο ηλεκτροπληξίας [2]	17
Σχήμα 3: Επαφή μετάλλου με μέταλλο σε υποσταθμό GIS [2].....	17
Σχήμα 4: Περίπτωση εκτεταμένου μεταφερόμενου δυναμικού [2]	18
Σχήμα 5: Έκθεση σε τάση επαφής [2].	19
Σχήμα 6: Αντιστάσεις στο κύκλωμα κατά την τάση επαφής [2]	19
Σχήμα 7: Ισοδύναμο Thevenin για την τάση επαφής [2].....	20
Σχήμα 8: Έκθεση σε βηματική τάση [2]	21
Σχήμα 9: Ισοδύναμο Thevenin για τη βηματική τάση [2].	21
Σχήμα 10: Σύνδεση τεσσάρων ΦΒ πλαισίων σε σειρά [10].	35
Σχήμα 11: Παράλληλη σύνδεση τεσσάρων ΦΒ πλαισίων [10]	35
Σχήμα 12: Μεικτή σύνδεση ΦΒ πλαισίων [10]	36
Σχήμα 13: Διαστάσεις του υπό μελέτη ΦΒ πάρκου.....	40
Σχήμα 14: Βάσεις πάνελ ΦΒ πάρκου.....	41
Σχήμα 15: Αναφορά διαστασιολόγησης ηλεκτροδίων από το λογισμικό CYMGrd (ελάχιστη επιφάνεια διατομής, επιλέγεται η αμέσως επόμενη εμπορικά διαθέσιμη διατομή).....	46
Σχήμα 16: Αρχική σχεδίαση συστήματος γείωσης του ΦΒ πάρκου με το λογισμικό CYMGrd (ελάχιστοι δυνατοί αγωγοί).....	47
Σχήμα 17: Αποτελέσματα αρχικής σχεδίασης (ελάχιστοι δυνατοί αγωγοί) συστήματος γείωσης του ΦΒ πάρκου με το λογισμικό CYMGrd.....	48
Σχήμα 18: Τάσεις επαφής για την αρχική σχεδίαση (ελάχιστοι δυνατοί αγωγοί) συστήματος γείωσης του ΦΒ πάρκου με το λογισμικό CYMGrd.....	49
Σχήμα 19: Τάσεις επαφής, βηματικές τάσεις και τα επιτρεπτά όρια για την αρχική σχεδίαση (ελάχιστοι δυνατοί αγωγοί) συστήματος γείωσης του ΦΒ πάρκου με το λογισμικό CYMGrd. Διαγώνιος του πάρκου από επάνω αριστερά προς κάτω δεξιά	49

Σχήμα 20: Τελική σχεδίαση συστήματος γείωσης του ΦΒ πάρκου με το λογισμικό CYMGrd.....	50
Σχήμα 21: Αποτελέσματα τελικής σχεδίασης συστήματος γείωσης του ΦΒ πάρκου με το λογισμικό CYMGrd	51
Σχήμα 22: Τάσεις επαφής για την τελική σχεδίαση συστήματος γείωσης του ΦΒ πάρκου με το λογισμικό CYMGrd	51
Σχήμα 23: Τάσεις επαφής, βηματικές τάσεις και τα επιτρεπτά όρια για την τελική σχεδίαση συστήματος γείωσης του ΦΒ πάρκου με το λογισμικό CYMGrd. Διαγώνιος του πάρκου από επάνω αριστερά προς κάτω δεξιά	52
Εικόνα 1: ΦΒ πάνελ σταθερής κλίσης [11].....	37
Εικόνα 2: Πασσαλόμπηξη ράβδων στήριξης ΦΒ πάνελ [12]	38
Εικόνα 3: Εγκατάσταση ΦΒ πάνελ με πασσαλόμπηξη [11].....	38
Εικόνα 4: Πάκτωση ράβδων στήριξης ΦΒ πάνελ σε μπετόν [13]	39
Εικόνα 5: Τυπική σταθερή βάση στήριξης [5], [14]	39

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1: Τύποι αντιστάσεων γειωτών [4]	8
Πίνακας 2: Τιμές παραμέτρων A_r , K_0 , T_m , ρ_r , $TCAP$ [2], [5].	11
Πίνακας 3: Επιτρεπτά όρια τάσης επαφής και βηματικής τάσης για πάχος υλικού επιφάνειας 0,15 m [8].	25
Πίνακας 4: Επιτρεπτά όρια βηματικής τάσης και τάσης επαφής για τις συστοιχίες πάνελ του ΦΒ πάρκου με πάχος υλικού επιφάνειας 0.15 m	44

Η σελίδα αυτή είναι σκόπιμα λευκή

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η σχεδίαση και η κατασκευή ενός Φωτοβολταϊκού (ΦΒ) πάρκου απαιτεί την αξιοποίηση όλων εκείνων των δυνατοτήτων που προσφέρει η σύγχρονη επιστήμη στην κατεύθυνση της βέλτιστης λειτουργικότητας και αποδοτικότητάς του. Περισσότερο, όμως, από αυτά τα δύο ζητούμενα, η προσοχή των μελετητών της σχεδίασης ενός ΦΒ πάρκου θα πρέπει να εστιάσει στην ασφαλή λειτουργία του. Στην κατεύθυνση αυτή, η σχεδίαση και η κατασκευή του συστήματος γείωσης ενός ΦΒ πάρκου συνδεδεμένου στη Μέση Τάση (ΜΤ) θα πρέπει να υλοποιηθεί, λαμβάνοντας υπόψη όλες εκείνες τις παραμέτρους που διασφαλίζουν ότι οι τιμές των δύο καίριων τάσεων, της τάσης επαφής και της βηματικής τάσης, θα βρίσκονται σε κάθε περίπτωση, κάτω από τα μέγιστα επιτρεπτά όρια ασφαλείας. Σε περίπτωση, δε, που κάτι τέτοιο δεν συμβαίνει, θα πρέπει η μελέτη γείωσης του ΦΒ πάρκου να επανασχεδιαστεί με τρόπο που να προσαρμόζει τις εκάστοτε παραμέτρους σε τιμές που οδηγούν τις δύο παραπάνω τάσεις εντός των επιτρεπτών ορίων. Στο πλαίσιο αυτής της μελέτης καταλυτικός είναι ο παράγοντας της γνώσης των τάσεων στο σύστημα γείωσης, καθώς και της ειδικής αντίστασης του εδάφους. Σε περίπτωση που απαιτηθούν βελτιωτικές παρεμβάσεις στην κατεύθυνση της μείωσης των μέγιστων τιμών των τάσεων επαφής και των βηματικών τάσεων, τότε είτε θα πρέπει να αυξηθεί ο αριθμός των ηλεκτροδίων γείωσης είτε να γίνει επαναδιάταξή τους είτε να τοποθετηθεί στο έδαφος κατάλληλο υλικό, το οποίο θα αυξήσει την μέγιστη ειδική αντίσταση της επιφάνειας του εδάφους άρα και τα επιτρεπτά όρια βηματικής τάσης και τάσης επαφής. Σε κάθε περίπτωση, η διασφάλιση των επιτρεπτών ορίων λειτουργίας του ΦΒ πάρκου θα πρέπει να αποτελεί πρώτη προτεραιότητα για κάθε μελετητή.

Η σελίδα αυτή είναι σκόπιμα λευκή

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΓΕΙΩΣΗΣ

1.1 Ορισμός και χρησιμότητα συστημάτων γείωσης

Ως «γείωση» ορίζεται η σκόπιμη ή τυχαία αγωγή συνδεση ενός ακροδέκτη κυκλώματος ηλεκτρικού ρεύματος με το έδαφος ή με κάποιο αντικείμενο το οποίο έχει μηδενικό δυναμικό σε σχέση με τη γη [1]. Ο συμβολισμός της γείωσης ενός σημείου γίνεται με τρεις παράλληλες γραμμές: η μία είναι μεγαλύτερη των δύο άλλων, που συνήθως σχεδιάζονται επίσης ως άνισες – και σπανιότερα ως ίσες – μεταξύ τους. Όποιο σημείο είναι συνδεδεμένο με τη γείωση, έχει μηδενικό δυναμικό: $V_{\text{γειωμένο}} = 0$.

Οι γειώσεις διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες:

- Στις γειώσεις λειτουργίας (γειώσεις συστήματος), που αποτελούν την σκόπιμη γείωση ενός σημείου κυκλώματος.
- Στις γειώσεις προστασίας, που αφορούν στην γείωση ενός αγωγίμου αντικειμένου (το οποίο σε κανονικές συνθήκες δεν φέρει τάση) και έχουν ως στόχο την προστασία τόσο της ανθρώπινης ζωής όσο και του εξοπλισμού από βραχυκύκλωμα λόγω απότομης αύξησης της τάσης.
- Στις γειώσεις συστημάτων αντικεραυνικής προστασίας, οι οποίες είναι αγωγίμες συνδέσεις των ηλεκτρικών αγωγών καθόδου του συστήματος αντικεραυνικής προστασίας με τη γη προκειμένου να διασφαλιστεί η ασφαλής διοχέτευση στη γη του ηλεκτρικού ρεύματος που προέρχεται από τους κεραυνούς.

Είναι εφικτή η ταυτόχρονη αξιοποίηση και των τριών παραπάνω κατηγοριών σε ένα σύστημα γείωσης κάτω από ορισμένες προϋποθέσεις. Η χρησιμότητα του ρόλου των γειώσεων, ανάλογα με την κατηγορία στην οποία ανήκουν, προσδιορίζεται από μια σειρά συγκεκριμένων λειτουργιών, οι οποίες έχουν ως αντικείμενό τους [1]:

- Την εξασφάλιση της ροής ρευμάτων κανονικής λειτουργίας, καθώς και της ροής προς το έδαφος τυχόν ρευμάτων που προέρχονται από σφάλματα ή από κεραυνούς
- Την εξασφάλιση της προστασίας της ανθρώπινης ζωής, καθώς και των άλλων έμβιων οργανισμών από κίνδυνο ηλεκτροπληξίας
- Την απρόσκοπτη λειτουργία των μέσων προστασίας ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας

-
- Τον περιορισμό της ανάπτυξης υπερτάσεων στον εξοπλισμό ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας
 - Τη μείωση της πιθανότητας ανάπτυξης ηλεκτρικών τάσεων μεταξύ σημείων ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας
 - Τη διασφάλιση της παροχής δυναμικού αναφοράς σε ηλεκτρικά και ηλεκτρονικά συστήματα
 - Τη βελτίωση της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας, καθώς και την προστασία από ηλεκτρομαγνητικούς θορύβους
 - Την προστασία από στατικό ηλεκτρισμό.

Ο όρος «σύστημα γείωσης» αναφέρεται στο σύνολο των στοιχείων που πρέπει να χρησιμοποιηθούν προκειμένου να επιτευχθεί η γείωση ενός αντικειμένου, ενός συστήματος ή μιας εγκατάστασης. Είναι η τυχαία ή σκόπιμη αγωγή σύνδεση, μέσω της οποίας πραγματοποιείται σύνδεση ενός ηλεκτρικού κυκλώματος ή μιας συσκευής είτε με την γη είτε με ένα άλλο αγωγίμο σώμα μεγάλης έκτασης [2].

Το σύστημα γείωσης έχει ως στόχους [3], [4]:

- Την παροχή κατάλληλων μέσων προκειμένου να διασφαλιστεί η διοχέτευση του ρεύματος στην γη, τόσο σε κανονικές συνθήκες όσο και σε συνθήκες σφάλματος, χωρίς να παρατηρείται υπέρβαση των ορίων λειτουργίας του εξοπλισμού. Απαραίτητη προϋπόθεση είναι η δυνατότητα του συστήματος γείωσης να επιτρέπει την διέλευση αρκετού ρεύματος σφάλματος, προκειμένου να καταστεί εφικτή η λειτουργία των συσκευών ασφαλείας της εγκατάστασης και η συνακόλουθη απομόνωση του σφάλματος.
- Τη διασφάλιση της διατήρησης της συνέχειας παροχής του ηλεκτρικού ρεύματος.
- Την εγγύηση της προστασίας από κίνδυνο ηλεκτροπληξίας για κάθε άτομο που βρίσκεται στην περιοχή γείωσης.

1.2 Χρησιμότητα της γείωσης

Προορισμός της γείωσης είναι η διασφάλιση από ηλεκτροπληξία, από βραχυκύκλωμα, καθώς και από άλλες επικίνδυνες καταστάσεις, οι οποίες είναι δυνατόν να προκύψουν από βλάβες που εμφανίζονται σε συσκευές που διαρρέονται από ηλεκτρικό ρεύμα. Αυτοί οι λόγοι ασφαλείας έχουν οδηγήσει στη θέσπιση σχετικού νομοθετικού πλαισίου, το οποίο επιβάλλει την

εγκατάσταση γείωσης σε κάθε κτήριο και, ειδικότερα, στις πρίζες. Σε συσκευές και εγκαταστάσεις με μεταλλικά μέρη και περιβλήματα εφαρμόζεται ως μέσο προστασίας από πιθανή διαρροή ηλεκτρικού ρεύματος η γείωση προστασίας. Για τις συσκευές που η απρόσκοπτη λειτουργία τους απαιτεί την σύνδεσή τους με γείωση, εφαρμόζεται η γείωση λειτουργίας, η οποία επισημαίνεται ότι διαρρέεται από ρεύμα. Στην περίπτωση που θα πρέπει αυτές οι συσκευές να προστατευτούν με τη γείωση προστασίας, γειώνονται διπλά, με τα δύο σημεία γείωσης (το ένα για τη γείωση προστασίας και το δεύτερο για τη γείωση λειτουργίας) να τοποθετούνται σε απόσταση αρκετών μέτρων μεταξύ τους.

1.3 Επικινδυνότητα γείωσης – Αντικεραυνική προστασία

Οι συσκευές που συνδέονται με γείωση προκειμένου να προστατευτούν από τυχόν διαρροή ηλεκτρικού ρεύματος τόσο όσοι βρίσκονται κοντά σε αυτές όσο και η λειτουργία αυτών των συσκευών, κινδυνεύουν να καταστραφούν από το ρεύμα μεγάλης έντασης που δημιουργείται καθώς ένας κεραυνός πέφτει στο έδαφος σε απόσταση έως και 500 μέτρα από αυτές. Στην περίπτωση αυτή, η πτώση του κεραυνού σε μια περιοχή δημιουργεί υπέρμετρη αύξηση ηλεκτρικού φορτίου, το οποίο έχει την τάση να διαφύγει με μεγάλη ταχύτητα προς εξομάλυνση της χωρικής κατανομής του φορτίου αυτού. Όταν στην περιοχή αυτή βρίσκεται κτήριο, το οποίο είναι συνδεδεμένο με το δίκτυο παροχής ηλεκτρικού ρεύματος και παράλληλα υφίστανται σε αυτό ηλεκτρικές συσκευές που είναι γειωμένες, αυτές, εξαιτίας του κεραυνού, διαρρέονται από ρεύμα πολύ μεγάλης έντασης, αφού τα φορτία από τον κεραυνό διαφεύγουν από την γη μέσω των συσκευών αυτών προς το δίκτυο παροχής ηλεκτρικής ενέργειας. Το αποτέλεσμα αυτής της αντίστροφης ροής του ηλεκτρικού ρεύματος από την γη μέσω των ηλεκτρικών συσκευών προς το ηλεκτρικό δίκτυο είναι η καταστροφή αυτών των συσκευών. Για την αποφυγή αυτής της δυσάρεστης εξέλιξης τοποθετείται αντικεραυνικό σύστημα προστασίας των κτηρίων από πτώσης κεραυνών.

1.4 Είδη – Κατηγορίες γείωσης

Ως προς το είδος, η γείωση διακρίνεται σε συνεχής ή σε διακοπτόμενη. Στην δεύτερη περίπτωση, παρεμβάλλεται ένα διάκενο σπινθηριστή, προκειμένου να δημιουργείται η ανοιχτή γείωση.

Ως προς τις κατηγορίες γείωσης, διακρίνονται οι παρακάτω:

➤ Η γείωση λειτουργίας, η οποία ουσιαστικά είναι η γείωση ενός σημείου ενεργού κυκλώματος, έχοντας ως προορισμό την αποφυγή δημιουργίας υπερτάσεων στο κύκλωμα. Η γείωση λειτουργίας διακρίνεται:

- Στην άμεση γείωση, κατά την οποία δεν παρεμβάλλεται κάποια αντίσταση πλην της αντίστασης γείωσης
- Στην έμμεση γείωση, κατά την οποία συνυπάρχουν η αντίσταση γείωσης με ωμικές, επαγωγικές και χωρητικές αντιδράσεις

➤ Η γείωση προστασίας, η οποία αφορά στην γείωση ενός μεταλλικού μέρους, το οποίο δεν ανήκει στο υφιστάμενο ηλεκτρικό κύκλωμα και έχει ως προορισμό την μείωση των τάσεων επαφής. Η γείωση προστασίας είναι πάντα συνεχής.

➤ Η γείωση του συστήματος αντικεραυνικής προστασίας, η οποία είτε είναι ανοιχτή είτε συνεχής, έχοντας ως προορισμό την διοχέτευση του ρεύματος που προέρχεται από τους κεραυνούς προς την γη, προστατεύοντας με τον τρόπο αυτό τα άτομα που παρευρίσκονται στον χώρο περιμετρικά της γείωσης αυτής.

1.5 Μέθοδοι γείωσης

Οι χρησιμοποιούμενες μέθοδοι γείωσης είναι:

- Η γείωση ουδετέρωσης, η οποία είναι μια αγώγιμη σύνδεση με τον ουδέτερο αγωγό ή με άλλον γειωμένο αγωγό δικτύου
- Η άμεση γείωση, η οποία πραγματοποιείται με την απευθείας αγώγιμη σύνδεση στο σύστημα γείωσης
- Η γείωση με διακόπτη διαφυγής, με τον οποίο επιτυγχάνεται η απομόνωση του τμήματος της εγκατάστασης που εμφανίζει πρόβλημα ηλεκτρικής διαρροής.

Στοιχεία που χρησιμοποιούνται για την επίτευξη γείωσης είναι τα ηλεκτρόδια γείωσης, οι συνδέσεις που θα πρέπει να πραγματοποιηθούν μεταξύ τους, καθώς και οι ισοδυναμικές συνδέσεις με τα σημεία ενός κυκλώματος που θα πρέπει να γειωθούν.

1.6 Ηλεκτρόδια γείωσης

Τα ηλεκτρόδια γείωσης (γειωτές) είναι αγώγιμα στοιχεία, τα οποία τοποθετούνται στο έδαφος προκειμένου είτε να διαχέουν ρεύμα προς αυτό (η συνηθέστερη περίπτωση) είτε να παραλαμβάνουν ρεύμα από το έδαφος (λιγότερο συνηθισμένη περίπτωση).

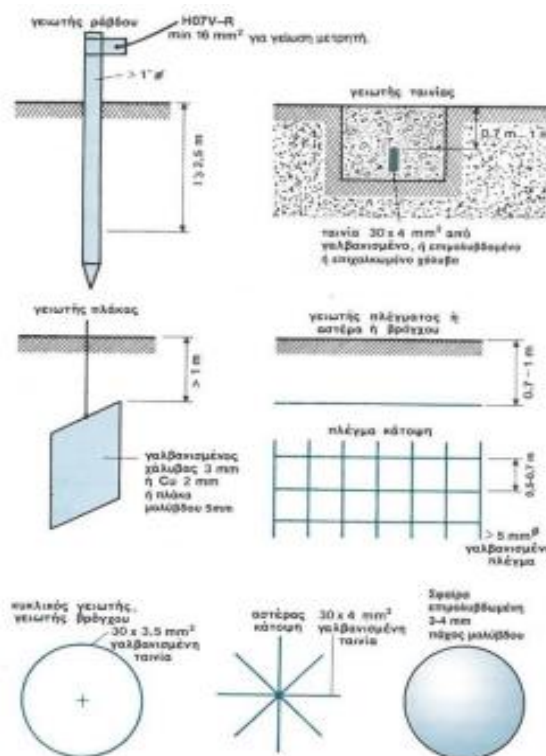
Τα ηλεκτρόδια γείωσης, ανάλογα με την μορφή τους, διακρίνονται στις παρακάτω κατηγορίες:

- Ηλεκτρόδια γείωσης ράβδου
- Ηλεκτρόδια γείωσης είτε κυκλικής διατομής (αγωγός γείωσης) είτε ορθογώνιας διατομής (ταινία γείωσης)
- Ηλεκτρόδια γείωσης πλάκας.

Ανάλογα με τις απαιτήσεις ενός συστήματος γείωσης είναι εφικτός ο συνδυασμός σε πολυπλοκότερες μορφές των παραπάνω μορφών ηλεκτροδίων, όπως η κατασκευή πλεγμάτων γείωσης τα οποία είτε περιλαμβάνουν ράβδους γείωσης είτε όχι, οι γειωτές βρόγχου (κυκλικοί γειωτές), οι γειωτές μορφής αστέρα, κλπ.

1.6.1 Είδη ηλεκτροδίων γείωσης

Το ηλεκτρόδιο γείωσης (γειωτής) είναι ένας αγωγός ηλεκτρικού ρεύματος, ο οποίος τοποθετείται στο έδαφος, ώστε, σε περίπτωση ηλεκτρικής διαρροής, να μεταφέρει το επιπλέον ρεύμα προς τη γη, προφυλάσσοντας με τον τρόπο αυτό ανθρώπους και συσκευές από την απότομη αύξησή του. Τα ηλεκτρόδια γείωσης διατίθεται σε διάφορες μορφές, όπως ράβδοι, επίπεδες πλάκες κλπ. (Σχήμα 1) [3], [4].



Σχήμα 1. Μορφές ηλεκτροδίων γείωσης [4].






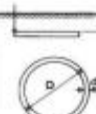
Στον παρακάτω πίνακα [3], [4] (Πίνακας 1) δίνονται οι τύποι αντιστάσεων γειωτών, καθώς και οι προσεγγιστικοί τύποι που χρησιμοποιούνται προς διευκόλυνση των σχετικών υπολογισμών.

Στους τύπους του παρακάτω πίνακα (Πίνακας 1) το πάχος d του ηλεκτρικού αγωγού λαμβάνεται ίσο με:


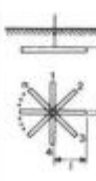


$$d = \sqrt{\frac{2A}{\pi}}$$

Όπου: A η διατομή των ηλεκτρικών αγωγών.

Πίνακας 1. Τύποι αντιστάσεων γειωτών [4].

α/α	Γειωτής	Τύπος	Προσεγγιστικός τύπος
1	 Πόταλος (πλάγια όψη)	$R_{A1} = \frac{\rho}{2\pi l \epsilon_{eff}} \cdot \ln \frac{4l_{eff}}{d}$ $l_{eff} = 1-0,5 \text{ m}$	$R_A = \frac{\rho}{k_{eff}}$
2	 Πολύγωνο πασάλων $a \geq 1$ (κάτοψη)	$R_A = k \frac{1}{n} R_{A1}$ $a/l=3; n=5; k=1,2$ R_{A1} = αντίσταση ενός πασάλου	μπορεί να τεθεί $k=(1...1,5)$, ειδικά για $n=10$: $k=1,25$
3	 Ταινία γείωσης ή επιφανειακός γειωτής, βάθος $h = 0,5... 1,0 \text{ m}$ (πλάγια όψη)	$R_A = \frac{\rho}{\pi l} \ln \frac{2l}{d}$	$R_A = \frac{2\rho}{l}$
4	 Πλέγμα σε βάθος $0,5-1,0 \text{ m}$ $D = \sqrt{\frac{4ab}{\pi}}$ (κάτοψη)	$R_A = \frac{\rho}{2D} + \frac{\rho}{lg}$ lg = συνολικό μήκος αγωγού	$R_A = \frac{\rho}{2D}$
5	 Ημισφαιρική γειωτή, $D = \sqrt{\frac{4}{\pi} S}$	—	$R_A = \frac{2}{\pi} \frac{\rho}{D}$
6	 κυκλικός γειωτής (κάτοψη)	$R_A = \frac{\rho}{2\pi^2 D} \cdot \ln \frac{8D}{d} \cdot \left(1 + \frac{\ln(2D)/l}{\ln(8D/d)}\right)$	$R_A = \frac{2\rho}{\pi D}$ 1)

1) Για ακανόνιστους βρόχους μπορεί να χρησιμοποιηθεί η ισοδύναμη διάμετρος $D=0,33 \cdot U$, όπου U = μήκος αγωγού.

7	 γειωτής πλάκας, πλάγια όψη $S [m^2]$	—	$R = \frac{\rho}{4,5a}$ 2)	
8		$n = 5$	$R = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{l^2}{0,271d}$	—
		$n = 4$	$R = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{l^2}{0,251d}$	—
		$n = 3$	$R = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{l^2}{0,221d}$	—
		$n = 2$	$R = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{l^2}{0,094d}$	—
9	 ημισφαιρικός γειωτής	$R = \frac{\rho}{\pi D}$ 3)	—	
10	 σφαιρικός γειωτής	$R = \frac{\rho}{2\pi D}$	—	

2) Για πλάκες που δεν είναι τετράγωνα: $a = \sqrt{S}$, όπου S = εμβαδόν.

3) Για ένα γειωτή όγκου V , ακανόνιστου σχήματος, εφαρμόζεται ο τύπος του σφαιρικού γειωτή με $D=1,57 \sqrt[3]{V}$.

1.6.2 Υλικό ηλεκτροδίων γείωσης

Ο επιθυμητός χρόνος ζωής της εγκατάστασης γείωσης ενός φωτοβολταϊκού πάρκου αποτελεί βασικό παράγοντα σχεδιασμού κάθε στοιχείου που την απαρτίζει (αγωγοί πλέγματος, συνδέσεις ηλεκτροδίων, κλπ.).

Τα ηλεκτρόδια γείωσης θα πρέπει να διαθέτουν τις παρακάτω απαιτήσεις:

- Επαρκή αγωγιμότητα, προκειμένου να αποφεύγεται η συνεισφορά της σε αυξομειώσεις της τάσης
- Απαιτούμενη αντοχή στην τήξη και σε μηχανικές καταπονήσεις για την περίπτωση της διαρροής σφάλματος μέγιστης αναμενόμενης τιμής και διάρκειας
- Αντοχή στις προβλεπόμενες μορφές μηχανικών καταπονήσεων
- Ικανότητα διατήρησης των ιδιοτήτων τους κατά την έκθεσή τους σε συνθήκες διάβρωσης, καθώς και σε δυσμενείς καιρικές συνθήκες.

Παρακάτω παρατίθενται τα υλικά που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή αγωγών γείωσης:

- Χαλκός, ο οποίος είναι ιδιαίτερα εύχρηστος χάρη στην μεγάλη ηλεκτρική του αγωγιμότητα και την υψηλή αντοχή του σε διάβρωση κατά την τοποθέτησή του στο έδαφος
- Χάλυβας, ο οποίος, αφού επιχαλκωθεί, χρησιμοποιείται περισσότερο για την κατασκευή ράβδων που βυθίζονται στο έδαφος και λιγότερο για την κατασκευή πλέγματος
- Αλουμίνιο, το οποίο σπάνια χρησιμοποιείται στην κατασκευή πλεγμάτων, για τον λόγο ότι παρουσιάζει διάβρωση κατά την τοποθέτησή του σε ορισμένα είδη εδάφους. Η αδυναμία του διαβρωθέντος αλουμινίου να άγει το ηλεκτρικό ρεύμα, αποτελεί ανασταλτικό παράγοντα ευρείας χρήσης του σε κατασκευές αγωγών γείωσης.

1.6.3 Επιλογή διατομής ηλεκτροδίων γείωσης

Η επιλογή της διατομής του αγωγού γείωσης απαιτεί τον έλεγχο της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στον αγωγό κατά την διαρροή της μέγιστης αναμενόμενης ποσότητας ρεύματος, την προσμέτρηση του είδους του ρεύματος που διαρρέει τον αγωγό, καθώς και των χαρακτηριστικών του υλικού από το οποίο είναι κατασκευασμένος.

Ειδικότερα για ρεύματα που δεν παρουσιάζουν συνιστώσα DC, δηλαδή για συμμετρικά ρεύματα, η διατομή του αγωγού γείωσης υπολογίζεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$A_{\text{mm}^2} = \frac{I}{\sqrt{\left(\frac{\text{TCAP} \cdot 10^{-4}}{t_c a_r \rho_r}\right) \ln\left(\frac{K_0 + T_0}{K_0 + T_a}\right)}}$$

Όπου:

A_{mm^2} : η διατομή του αγωγού σε mm^2

I: η rms τιμή του ρεύματος σφάλματος σε kA

T_m : η μέγιστη επιτρεπόμενη θερμοκρασία σε $^{\circ}\text{C}$

T_a : η θερμοκρασία περιβάλλοντος σε $^{\circ}\text{C}$

T_r : η θερμοκρασία αναφοράς για τον προσδιορισμό των σταθερών του υλικού σε $^{\circ}\text{C}$

α_0 : ο θερμικός συντελεστής ειδικής αντίστασης στους 0°C σε $(^{\circ}\text{C})^{-1}$

α_r : ο θερμικός συντελεστής ειδικής αντίστασης σε θερμοκρασία T_r σε $(^{\circ}\text{C})^{-1}$

ρ_r : η ειδική αντίσταση του αγωγού γείωσης σε θερμοκρασία T_r σε $\text{m}\Omega\cdot\text{cm}$

K_0 : ισούται με $1/\alpha_0$ ή $(1/\alpha_r) - T_r$ σε $^{\circ}\text{C}$

t_c : η διάρκεια του σφάλματος σε s

TCAP: η θερμοχωρητικότητα ανά μονάδα όγκου σε $\text{J}/(\text{cm}^3 \cdot ^{\circ}\text{C})$

Ο παρακάτω πίνακας περιέχει τις τιμές για τις παραμέτρους: A_r , K_0 , T_m , ρ_r , TCAP

Πίνακας 2. Τιμές παραμέτρων A_r , K_0 , T_m , ρ_r , TCAP [2], [5].

υλικό	Αγωγιμότητα (%)	α_r στους 20°C (°C) ⁻¹	K_0 στους 0°C	T_m °C	ρ_r 20°C μΩ·cm	TCAP θερμοχωρητικότητα J/(cm ³ ·°C)
Χαλκός μαλακής ανόπτησης (soft – drawn)	100	0.00393	234	1083	1.72	3.42
Χαλκός εμπορικός (hard – drawn)	97.0	0.00381	242	1084	1.78	3.42
Αγωγός από επιχαλωμένο χάλυβα	40.0	0.00378	245	1084	4.40	3.85
Αγωγός από επιχαλωμένο χάλυβα	30.0	0.00378	245	1084	5.86	3.85
Ράβδοι από επιχαλωμένο χάλυβα	20.0	0.00378	245	1084	8.62	3.85
Αλουμίνιο βαθμού EC	61.0	0.00403	228	657	2.86	2.56
Κράμα αλουμινίου 5005	53.5	0.00353	263	652	3.22	2.60
Κράμα αλουμινίου 6201	52.5	0.00347	268	654	3.28	2.60
Αγωγοί από χάλυβα με επικάλυμμα αλουμινίου	20.3	0.00360	258	657	8.48	3.58
Χάλυβας 1020	10.8	0.00160	605	1510	15.90	3.28
Ράβδοι από ανοξείδωτο χάλυβα	9.8	0.00160	605	1400	17.50	4.44
Χαλύβδινοι ράβδοι με επικάλυψη ψευδαργύρου	8.6	0.00320	293	419	20.10	3.93
Ανοξείδωτος χάλυβας 304	2.4	0.00130	749	1400	72.00	4.03

Στην περίπτωση που υπάρχουν ρεύματα που παρουσιάζουν συνιστώσα DC, δηλαδή για μη συμμετρικά ρεύματα, η θερμοκρασία του αγωγού, για τις ίδιες συνθήκες σφάλματος, θα είναι υψηλότερη σε σχέση με την αντίστοιχη του συμμετρικού ρεύματος, όπως μεγαλύτερη θα είναι και η μηχανική καταπόνηση, ενώ η ενέργεια που απορροφάται θα είναι μεγαλύτερη κατά τέσσερις φορές. Προκειμένου να υπολογιστεί στην περίπτωση αυτή η διατομή του αγωγού γείωσης, χρησιμοποιείται ο ίδιος τύπος, όπως και στο συμμετρικό ρεύμα, με τη διαφορά ότι στην θέση του I , που αφορά στην rms τιμή του ρεύματος σφάλματος (σε kA) τίθεται η rms τιμή του ασύμμετρου ρεύματος.

1.6.4 Βοηθητικά ηλεκτρόδια γείωσης

Κάτω από ορισμένες προϋποθέσεις, ως ηλεκτρόδια γείωσης είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν αγώγιμες υπόγειες κατασκευές, οι οποίες δεν έχουν ως βασική τους λειτουργία τη γείωση. Τέτοιες κατασκευές μπορεί να είναι ο μεταλλικός οπλισμός από οπλισμένο σκυρόδεμα των θεμελίων ενός κτηρίου, τα μεταλλικά θεμέλια, τα μεταλλικά στηρίγματα των πάνελ ενός ΦΒ συστήματος, καθώς και τα μεταλλικά δίκτυα σωληνώσεων ύδρευσης. Αυτό εξασφαλίζει καλύτερη γείωση και μείωση του κόστους εγκατάστασης του συστήματος γείωσης.

1.7 Αντίσταση γείωσης

Η αντίσταση γείωσης, η οποία ορίζεται ως προς την άπειρη γη (θεωρώντας ένα σημείο σε απόσταση άπειρη από σύστημα γείωσης που μας ενδιαφέρει και, επομένως, με μηδενικό δυναμικό), είναι η προσδιοριστική παράμετρος που χαρακτηρίζει έναν γειωτή ή ένα σύστημα γείωσης. Η αντίσταση αυτή αναφέρεται τόσο στο συνεχές όσο και στο εναλλασσόμενο ρεύμα χαμηλής έντασης και μικρής συχνότητας.

Όταν υφίστανται κανονικές συνθήκες λειτουργίας, τα στοιχεία που είναι γειωμένα βρίσκονται στο δυναμικό της γης, το οποίο είναι μηδενικό. Γενικά, το δυναμικό ενός ουδέτερου αγωγού είναι σχεδόν ίδιο με το δυναμικό της άπειρης γης. Όταν συμβεί ένα σφάλμα γείωσης, το μέρος του ρεύματος σφάλματος που διοχετεύεται μέσω του συστήματος γείωσης στη γη, προκαλεί την απότομη αύξηση του δυναμικού του συστήματος.

Κάθε σύστημα γείωσης χαρακτηρίζεται από το μέγιστο ηλεκτρικό δυναμικό που μπορεί να αποκτήσει, σε σχέση πάντα με το δυναμικό της άπειρης γης. Αυτό το μέγιστο ηλεκτρικό δυναμικό, χαρακτηριστικό του κάθε συστήματος γείωσης, ονομάζεται GPR (Ground Potential Rise – αύξηση δυναμικού εδάφους), με τιμή που προσδιορίζεται από τον τύπο [2]:

$$GPR = I_G \cdot R_g$$

Όπου:

I_G : το μέγιστο ρεύμα πλέγματος σε A

R_g : η αντίσταση γείωσης σε Ω

Είναι φανερή η σχέση εξάρτησης μεταξύ της τιμής της αντίστασης γείωσης ενός συστήματος και της αύξησης δυναμικού εδάφους. Έχοντας τη σχέση αυτή ως δεδομένη, λαμβάνεται μέριμνα για επίτευξη μικρής τιμής της αντίστασης (π.χ. $<1 \Omega$ για τους υποσταθμούς), προκειμένου, όταν παρουσιαστεί σφάλμα (βραχυκύκλωμα), να υπάρξει κατά το δυνατόν μικρότερη αύξηση δυναμικού εδάφους. Ωστόσο αυτό δεν εξασφαλίζει την ασφάλεια της εγκατάστασης και πρέπει να ελεγχθούν οι βηματικές τάσεις και τάσεις επαφής.

Η έννοια της αντίστασης γείωσης εμπεριέχει τα παρακάτω:

- Την αντίσταση του ίδιου του συστήματος γείωσης, η οποία περιλαμβάνει τόσο την αντίσταση των ηλεκτροδίων γείωσης όσο και των συνδέσεων αυτού του συστήματος
- Την αντίσταση επαφής που εμφανίζεται μεταξύ του συστήματος γείωσης και του εδάφους
- Την αντίσταση του εδάφους, όπως αυτή καταγράφεται μεταξύ του συστήματος γείωσης και της άπειρης γης.

Εφόσον διασφαλιστεί η καλή επαφή με του εδάφους ενός συστήματος γείωσης, καθώς και μηδενική τιμή της αντίστασης των απαραίτητων συνδέσεων, η αντίσταση του εδάφους, όπως αυτή προσδιορίζεται μεταξύ του συστήματος γείωσης και της άπειρης γης, είναι ο πλέον σημαντικός παράγοντας που λαμβάνεται υπόψη για τους υπολογισμούς που απαιτούνται στο πλαίσιο της κατασκευής ενός λειτουργικού συστήματος γείωσης. Αυτή η αντίσταση του εδάφους εξαρτάται τόσο από το τμήμα του εδάφους που βρίσκεται πολύ κοντά στο σύστημα γείωσης, όσο και από την γεωμετρία, αλλά και τις διαστάσεις του συστήματος γείωσης, καθώς και από την ειδική αντίσταση του εδάφους. Εφόσον το έδαφος θεωρεί ως ομοιογενές, η αντίσταση γείωσης $R_g (\Omega)$ ενός συστήματος γείωσης προσδιορίζεται από τον τύπο:

$$R_g = k_g \rho$$

Όπου:

ρ = ειδική αντίσταση εδάφους (Ωm)

k_g = γεωμετρικός συντελεστής αναλογίας (m^{-1}). Ο γεωμετρικός συντελεστής αναλογίας προσδιορίζεται από την επίδραση της γεωμετρίας και των διαστάσεων του συστήματος γείωσης. Για απλές γεωμετρίες ηλεκτροδίων, ο συντελεστής k_g υπολογίζεται με τη χρήση αναλυτικών σχέσεων, ενώ για πολύπλοκες γεωμετρίες ηλεκτροδίων εκτιμάται με την χρήση λογισμικού ανάλυσης συστημάτων γείωσης, όπως το CYMGrd που χρησιμοποιείται σε αυτή την εργασία.

Επισημαίνεται ότι το μέγεθος της τιμής της αντίστασης γείωσης R_g δεν είναι απόλυτα προσδιοριστική της καταλληλότητάς της για την διασφάλιση από τον κίνδυνο της ηλεκτροπληξίας ή τον αποτελεσματικό περιορισμό των αναπτυσσόμενων υπερτάσεων λόγω πτώσης κεραυνού.

1.8 Ροή ρεύματος από σύστημα γείωσης προς το έδαφος

Ένα σύστημα γείωσης δεν διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα όταν βρίσκεται υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας, δηλαδή υφίσταται απουσία λόγων διαρροής ηλεκτρικού ρεύματος προς το έδαφος. Στην περίπτωση αυτή το δυναμικό του ως προς τη γη είναι μηδέν, δηλαδή ίσο με το δυναμικό της άπειρης γης, η οποία αποτελεί το σημείο αναφοράς. Εξάιρεση στην περίπτωση της μη διαρροής ενός συστήματος γείωσης από το ηλεκτρικό ρεύμα αποτελούν τα συστήματα γείωσης που χρησιμοποιούνται σε συστήματα καθοδικής προστασίας επιβαλλόμενου ρεύματος, καθώς και σε συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας με επιστροφή του ρεύματος μέσω της γης, αν και αυτή η περίπτωση δεν επιτρέπεται σε πολλά κράτη, λόγω των προβλημάτων διάβρωσης ή ανάπτυξης επικίνδυνων δυναμικών που δημιουργούν αυτά τα ρεύματα σε γειτονικές γειωμένες μεταλλικές κατασκευές (σωληνώσεις, φράχτες, κλπ.) [1].

Ένα σύστημα γείωσης διαρρέεται προσωρινά από ηλεκτρικό ρεύμα είτε λόγω σφάλματος γης σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας είτε λόγω πλήγματος κεραυνού είτε κατά την λειτουργία των διατάξεων προστασίας έναντι των υπερτάσεων σε ένα σύστημα [1]. Στις περιπτώσεις αυτές το δυναμικό του συστήματος γείωσης ως προς την άπειρη γη αυξάνεται. Προκειμένου να προσδιοριστεί η συμπεριφορά του συστήματος γείωσης κατά την διαρροή του από ηλεκτρικό ρεύμα, χρησιμοποιείται το δυναμικό που αναπτύσσεται στο σημείο που παρατηρείται η διαρροή του ηλεκτρικού ρεύματος ως προς την άπειρη γη. Το δυναμικό αυτό ονομάζεται GPR (Ground Potential Rise), δηλαδή ανύψωση του δυναμικού συστήματος γείωσης.

Η κατάσταση ενός συστήματος γείωσης σε περιβάλλον αυξημένου δυναμικού, σε σχέση πάντα με την άπειρη γη, έχει ως αποτέλεσμα όλες οι μεταλλικές κατασκευές, τα στοιχεία εξοπλισμού, καθώς και τα λοιπά κυκλώματά του που είναι γειωμένα να παρουσιάζουν επίσης αυξημένο δυναμικό σε σχέση πάντα με την άπειρη γη. Επιπρόσθετα, δυναμικά αναπτύσσονται τόσο στην επιφάνεια του εδάφους, όσο και στο εσωτερικό του. Αυτή η ύπαρξη αναπτυσσόμενων διαφορών δυναμικού στην ευρύτερη περιοχή των συνδεδεμένων με το σύστημα γείωσης εγκαταστάσεων είναι πιθανό να εγκυμονεί κινδύνους τόσο για τα άτομα όσο και για τον εξοπλισμό που βρίσκεται στην εμβέλειά τους. Για τον λόγο αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικός ο

προσδιορισμός της αποτελεσματικής απόκρισης των συστημάτων γείωσης κατά την μελέτη του υπολογισμού των αναπτυσσόμενων υπερτάσεων στις τεχνικές εγκαταστάσεις προκειμένου να διασφαλιστεί η αξιόπιστη, καθώς και η οικονομική τους λειτουργία.

Χαρακτηριστικές περιπτώσεις εφαρμογών της εκτίμησης της αποτελεσματικής απόκρισης των συστημάτων γείωσης είναι οι παρακάτω [1]:

- Η ανάλυση και η σχεδίαση των συστημάτων γείωσης
- Ο συντονισμός των μονώσεων συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας
- Η προστασία ατόμων από κινδύνους ηλεκτροπληξίας
- Η προστασία των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας
- Η ανάλυση ηλεκτρομαγνητικών μεταβατικών φαινομένων
- Ο προσδιορισμός και η μελέτη της κεραυνικής συμπεριφοράς εναέριων γραμμών μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας
- Η μελέτη της κεραυνικής συμπεριφοράς των διασυνδεδεμένων ηλεκτρικών υποσταθμών.

1.9 Υλικό επιφάνειας

Στην επιφάνεια του εδάφους, πάνω από το πλέγμα γείωσης, συχνά τοποθετείται ένα υλικό επιφάνειας, το οποίο έχει μεγάλη ειδική αντίσταση, με σκοπό την αύξηση της αντίστασης επαφής μεταξύ του εδάφους και των ποδιών του ατόμου. Η αντίσταση αυτή περιορίζει το ρεύμα που θα διαρρέει έναν άνθρωπο αν βρεθεί σε τάση ως προς το έδαφος. Η σχέση μεταξύ της ειδικής αντίστασης του επιφανειακού στρώματος και της ειδικής αντίστασης του εδάφους είναι αυτή που καθορίζει το ρεύμα που διέρχεται από το ανθρώπινο σώμα, καθώς και την διαμόρφωση των δυναμικών που δημιουργούνται στην επιφάνεια της γης. Ακόμη μία σημαντική παράμετρος καθορισμού του βαθμού επηρεασμού του υλικού επιφάνειας είναι το πάχος αυτού του επιφανειακού στρώματος.

Όπως παραπάνω αναφέρθηκε, όταν το έδαφος είναι ομοιογενές, η αντίσταση του ποδιού ως προς την γη δίνεται από τον τύπο [2]:

$$R_f = \frac{\rho}{4b}$$

Όταν τοποθετείται υλικό επιφάνειας πάνω από το πλέγμα γείωσης, ο τύπος που προσδιορίζει την αντίσταση του ποδιού είναι [6]:

$$R_f = \frac{\rho_s}{4b}$$

Όπου:

ρ_s = Ειδική αντίσταση του υλικού επιφάνειας (Ωm)

ρ = Ειδική αντίσταση του εδάφους (Ωm)

b = Ακτίνα του μεταλλικού δίσκου, ο οποίος προσομοιώνει το πόδι του ατόμου

C_s = Συντελεστής μείωσης υλικού επιφάνειας

Ο συντελεστής μείωσης υλικού επιφάνειας (C_s) υπολογίζεται από τον παρακάτω εμπειρικό τύπο [7]:

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

Όπου:

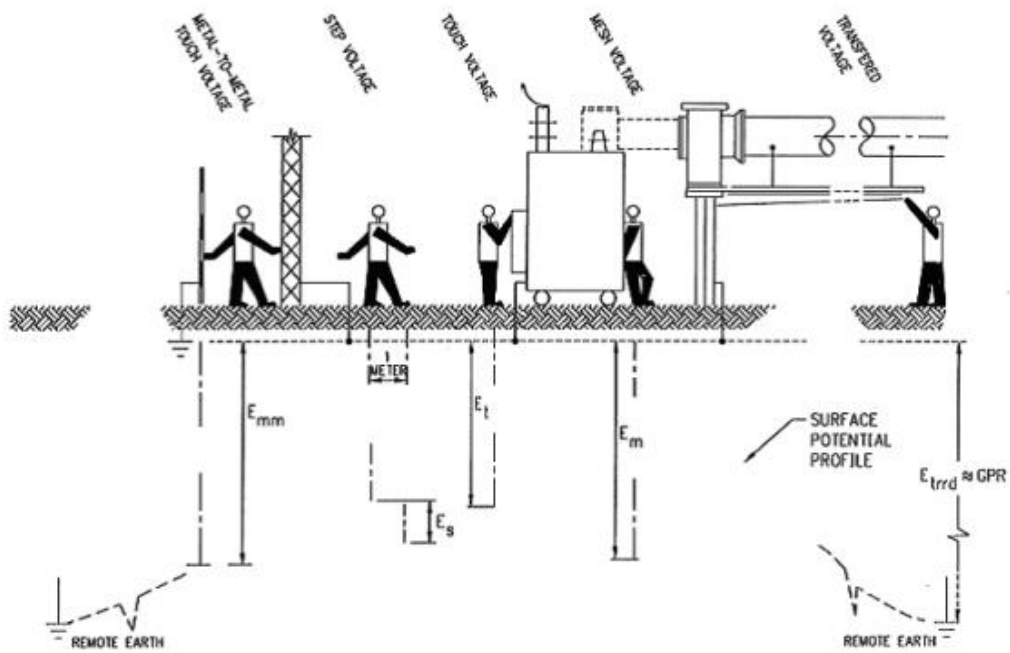
h_s = Πάχος του επιφανειακού στρώματος (m).

1.10 Περιπτώσεις κινδύνου ηλεκτροπληξίας

Πέντε είναι οι βασικές περιπτώσεις κινδύνου ηλεκτροπληξίας [2] (Σχήμα 2):

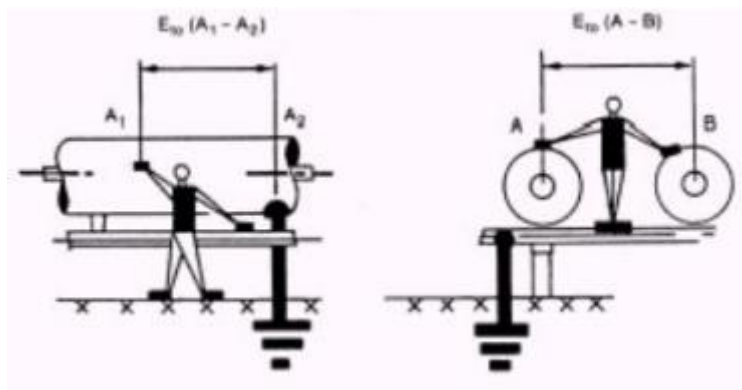
- Οι τάσεις επαφής (E_t)
- Οι βηματικές τάσεις (E_s)
- Οι τάσεις πλέγματος (βρόγχου) (E_m)
- Οι τάσεις επαφής μεταξύ μεταλλικών γειωμένων στοιχείων (E_{mm})
- Οι τάσεις από μεταφορά (E_{trd}).

Για την περίπτωση τάσης μεταξύ των ποδιών, η τάση ισούται με την βηματική (E_s), ενώ για τις περιπτώσεις της τάσης μεταξύ χεριού – ποδιών, όπως αυτές φαίνονται στο Σχήμα 2, η τάση U ισούται είτε με την τάση επαφής (E_t) είτε με την τάση βρόγχου (E_m) είτε με την τάση από μεταφορά (E_{trd}).



Σχήμα 2. Βασικές περιπτώσεις έκθεσης σε κίνδυνο ηλεκτροπληξίας [2].

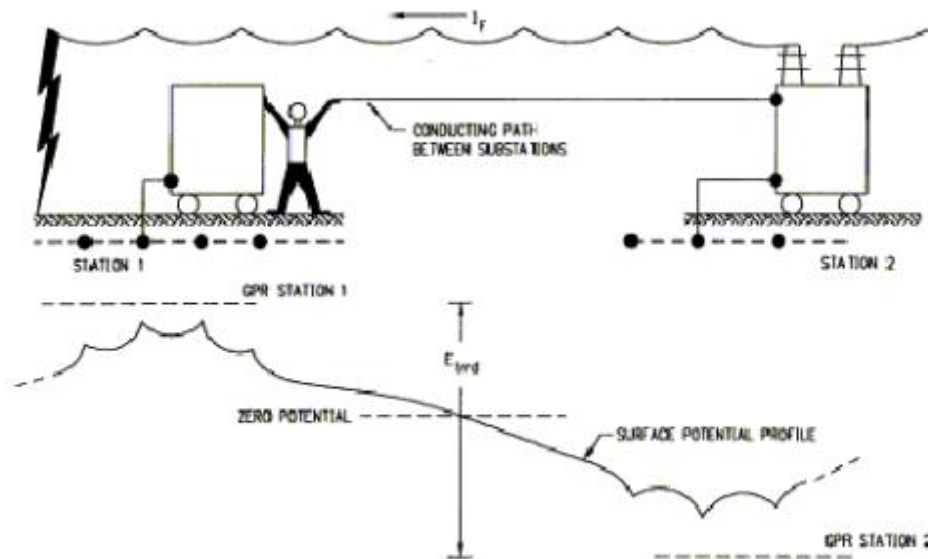
Όσον αφορά στο κύκλωμα που δημιουργείται από την επαφή μετάλλου με μέταλλο, καθώς και αυτήν μεταξύ χεριού με χέρι είτε χέρι με πόδι, η τάση U ισούται με την τάση επαφής μεταξύ μεταλλικών γειωμένων στοιχείων (E_{mm}). Σε περίπτωση ηλεκτρικού σφάλματος (βραχυκυκλώματος) τα ρεύματα άγονται προς την γη από το πλέγμα και τα άλλα μόνιμα ηλεκτρόδια γείωσης τα οποία είναι τοποθετημένα μέσα σε αυτήν (Σχήμα 3).



Σχήμα 3. Επαφή μετάλλου με μέταλλο σε υποσταθμό GIS [2].

Προκειμένου να αποφευχθούν κίνδυνοι από ηλεκτροπληξία που μπορεί να προκληθεί από μεταλλικά αντικείμενα τα οποία βρίσκονται εντός συμβατικού υποσταθμού, λαμβάνεται κατάλληλη μέριμνα ώστε αυτά γειωθούν, συνδεόμενα με το πλέγμα αυτού του υποσταθμού.

Η τάση μεταφοράς (μεταφερόμενη τάση) εμφανίζεται κατά την παρουσία ατόμου εντός της περιοχής του υποσταθμού είτε το άτομο αυτό ακουμπά σε αγωγό που έχει γειωθεί σε απομακρυσμένο σημείο είτε όταν στέκεται σε απομακρυσμένο σημείο του υποσταθμού και ακουμπά αγωγό που είναι συνδεδεμένος με το πλέγμα γείωσης.

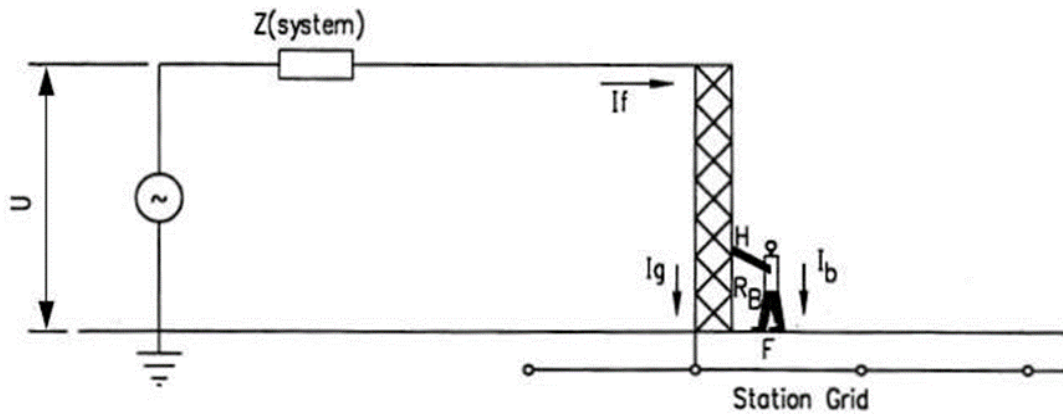


Σχήμα 4. Περίπτωση εκτεταμένου μεταφερόμενου δυναμικού [2].

Ο βαθμός πλήγματος σε περίπτωση που εμφανιστεί ηλεκτρικό σφάλμα εξαρτάται από την ενέργεια που απορροφά το σώμα του ατόμου για το χρονικό διάστημα μέχρι την εκκαθάριση αυτού του σφάλματος ή μέχρι την διακοπή της λειτουργίας του συστήματος.

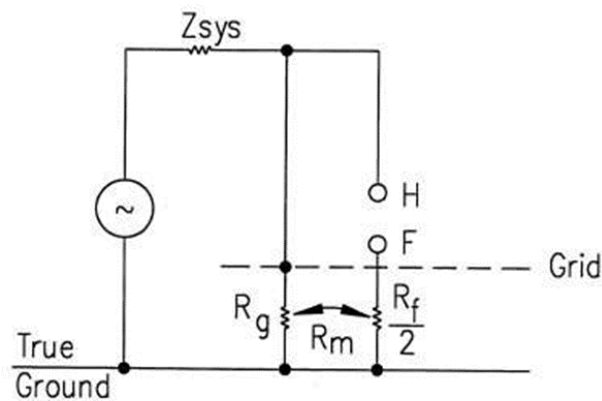
1.11 Τάση επαφής

Η τάση επαφής αναπτύσσεται από το ένα χέρι στα δύο πόδια του ανθρώπου. Αυτό συμβαίνει κατά τη διάρκεια σφάλματος γης σε περίπτωση επαφής με μεταλλική κατασκευή που συνδέεται στο σύστημα γείωσης. Άρα η τάση επαφής ισούται με τη διαφορά της ανύψωσης δυναμικού του συστήματος γείωσης (GPR, τάση στο χέρι) και του δυναμικού της επιφάνειας του εδάφους στο σημείο που στέκεται το άτομο (Σχήμα 5) [2].



Σχήμα 5. Έκθεση σε τάση επαφής [2].

Οι αντιστάσεις του ισοδύναμου κυκλώματος παρουσιάζονται στο παρακάτω σχήμα [2].



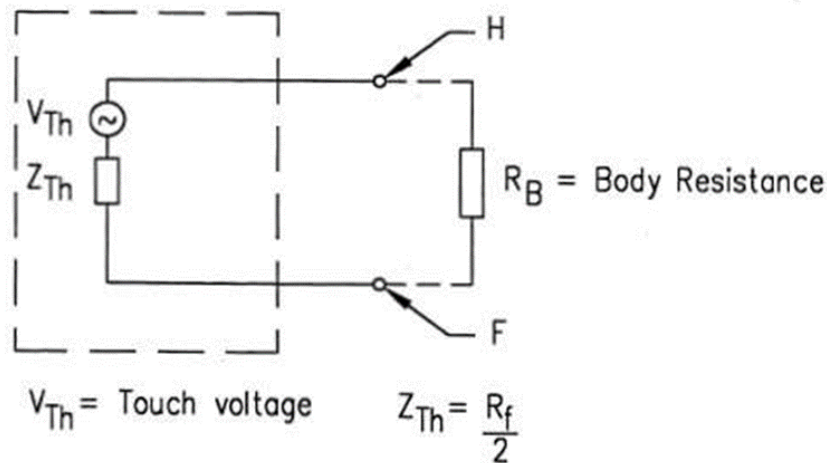
Σχήμα 6. Τάση επαφής: Ισοδύναμο κύκλωμα [2].

R_g : η αντίσταση γείωσης (Ω)

R_f : η αντίσταση του ανθρώπινου ποδιού προς γη (Ω) (χωρίς τη γείωση της εγκατάστασης)

Στο παραπάνω σχήμα (Σχήμα 6), H είναι ένα σημείο που βρίσκεται στο δυναμικό της γείωσης GPR, ενώ το F είναι η μικρή επιφάνεια της γης σε επαφή με τα πόδια του ανθρώπου.

Κάνοντας χρήση του θεωρήματος Thevenin, προκύπτει το ισοδύναμο κύκλωμα του παρακάτω σχήματος [2].



Σχήμα 7. Ισοδύναμο Theverin για την τάση επαφής [2].

Η τάση Thevenin (V_{th}) είναι η τάση ανοικτού κυκλώματος μεταξύ των σημείων H και F (χωρίς το άτομο), ενώ η Z_{th} είναι η αντίσταση που φαίνεται από τα σημεία H και F, θεωρώντας τις πηγές τάσης βραχυκυκλωμένες.

Το ρεύμα I_b που διαρρέει τον άνθρωπο που υπόκειται σε ηλεκτροπληξία είναι:

$$I_b = \frac{V_{th}}{Z_{th} + R_B}$$

Όπου:

R_B : η αντίσταση του σώματος (Ω)

Όσον αφορά στην αντίσταση Z_{th} , αυτή διαμορφώνεται από τον παράλληλο συνδυασμό των ποδιών του ατόμου και ισούται με:

$$Z_{th} = \frac{R_f}{2}.$$

Εφόσον η ακτίνα b του δίσκου (αφορά στον χώρο με τον οποίο έρχεται σε επαφή το άτομο με το έδαφος) προσεγγιστικά λαμβάνεται ίση με: 0,08 m, τότε η αντίσταση Theverin θα ισούται με:

$$Z_{th} = \frac{R_f}{2} = 1,5\rho$$

Όπου ρ η ειδική αντίσταση του εδάφους (Ωm).

Τελικά, η τάση επαφής για ρεύμα έντασης I_B ισούται με:

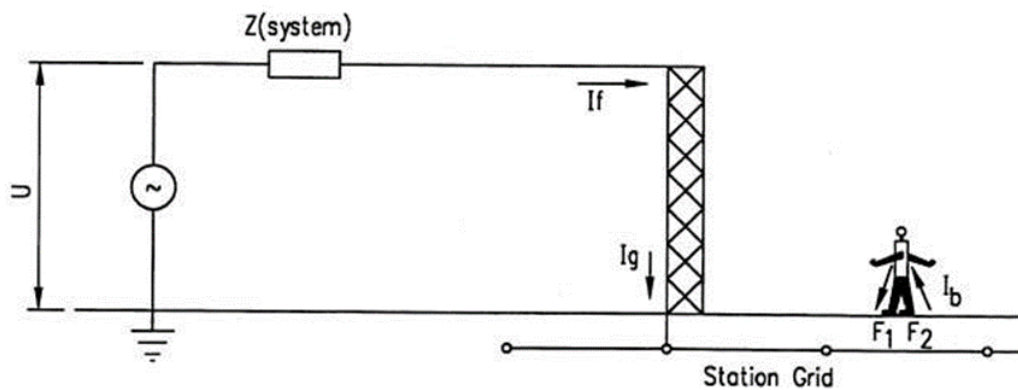
$$E_{touch} = I_B (R_B + 1,5\rho)$$

Υπενθυμίζεται ότι: R_B = αντίσταση του σώματος.

1.12 Βηματική τάση

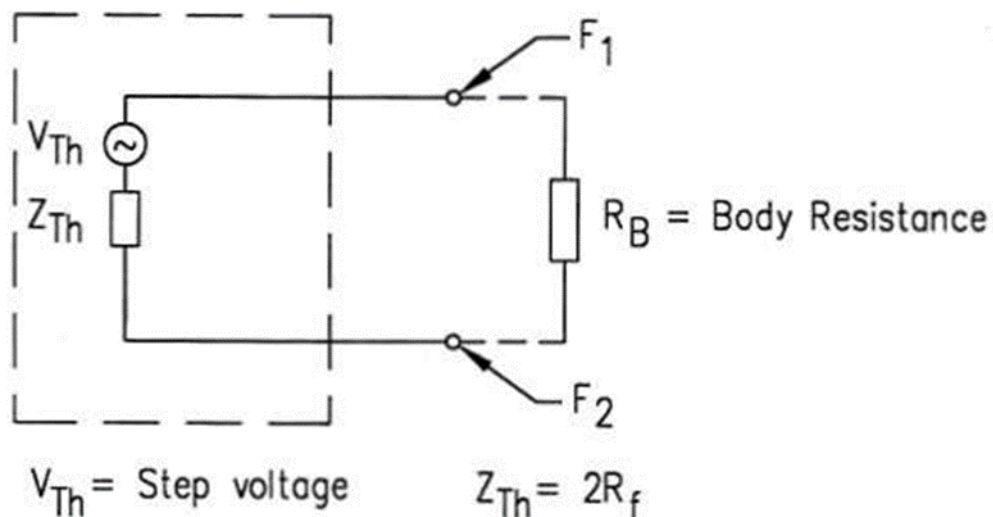
Ως «βηματική» ορίζεται η διαφορά δυναμικού μεταξύ των ποδιών ενός ανθρώπου, όταν αυτό στέκεται με τα πόδια του σε απόσταση 1 m, χωρίς παράλληλα να βρίσκεται σε επαφή με γειωμένα στοιχεία του περιβάλλοντός του.

Στο παρακάτω σχήμα [2] (Σχήμα 8), τα F_1 και F_2 είναι στην επιφάνεια της γης, με την οποία το άτομο βρίσκεται σε επαφή. Το ρεύμα I_b φαίνεται να διέρχεται από το ένα πόδι στο F_1 στο άλλο πόδι, δηλαδή στο F_2 .



Σχήμα 8. Έκθεση σε βηματική τάση [2].

Με το θεώρημα Thevenin, προκύπτει το ισοδύναμο κύκλωμα του παρακάτω σχήματος [2], στο οποίο η τάση Thevenin V_{Th} είναι μεταξύ των F_1 και F_2 χωρίς το άτομο, ενώ η Z_{th} είναι η αντίσταση που φαίνεται από τα F_1 και F_2 , θεωρώντας τις πηγές τάσης βραχυκυκλωμένες.



Σχήμα 9. Ισοδύναμο Thevenin για τη βηματική τάση [2].

Στην περίπτωση αυτή, το ρεύμα I_b που διαρρέει τον άνθρωπο που παθαίνει ηλεκτροπληξία είναι:

$$I_b = \frac{V_{th}}{Z_{th} + R_B}$$

Η αντίσταση Thevenin (Z_{th}) είναι ίση με τον συνδυασμό σε σειρά των ποδιών του ανθρώπου, ισοδυναμώντας με:

$$Z_{th} = 2R_f = 6\rho$$

και, τελικά, η βηματική τάση δίνεται από τον τύπο:

$$E_{step} = I_B (R_B + 6\rho)$$

1.13 Επιτρεπτά όρια βηματικής τάσης και τάσης επαφής

Προκειμένου να σχεδιαστεί ένα ασφαλές σύστημα γείωσης, θα πρέπει να προσδιοριστούν τα επιτρεπτά όρια τόσο της τάσης επαφής (E_{touch}), όσο και της βηματικής τάσης (E_{step}).

Ο προσδιορισμός των δύο αυτών παραμέτρων πραγματοποιείται με τους παρακάτω τύπους [2], [8]:

Προσδιορισμός ορίου της τάσης επαφής E_{touch} (V):

$$E_{touch} = (1000 + 1.5 C_s \cdot \rho_s) \left(\frac{k}{\sqrt{t_s}} \right)$$

Προσδιορισμός ορίου της βηματικής τάσης E_{step} (V):

$$E_{step} = (1000 + 6 C_s \cdot \rho_s) \left(\frac{k}{\sqrt{t_s}} \right)$$

Όπου:

t_s = ο χρόνος ροής του ρεύματος διαμέσου του ανθρώπινου σώματος. Πρόκειται για τον χρόνο που αντιστοιχεί στην χρονική διάρκεια εκκαθάρισης της κύριας ή της περισσότερο αργής εφεδρικής προστασίας

k = συντελεστής που ισούται με 0.116, όταν αναφερόμαστε σε ανθρώπους με βάρος 50 kg και 0.157, όταν αναφερόμαστε σε ανθρώπους με βάρος 70 kg

ρ_s = ειδική αντίσταση του υλικού επιφάνειας (Ωm)

h_s = πάχος του υλικού επιφάνειας (m)

C_s = παράγοντας που προσδιορίζεται από τον τύπο:

$$C_s = 1 - \frac{0.09 (1 - \frac{\rho}{\rho_s})}{2h_s + 0.09}$$

και αφορά στην τοποθέτηση στρώματος υλικού υψηλής ειδικής αντίστασης, το οποίο τοποθετείται επιφανειακά στην περιοχή εγκατάσταση, προκειμένου να αυξηθεί η αντίσταση ανάμεσα στο έδαφος και τα πόδια του ανθρώπου.

ρ = ειδική αντίσταση του εδάφους (Ωm).

Ειδικότερα:

Αποδεικνύεται ότι τα επιτρεπτά όρια της βηματικής τάσης δίνονται, σε συνάρτηση με το βάρος του ατόμου, από τις παρακάτω σχέσεις:

$$E_{\text{step}50} = (1000 + 6 C_s \rho_s) \frac{0,116}{\sqrt{t_s}} \text{ για βάρος ατόμου: 50 kg}$$

$$E_{\text{step}70} = (1000 + 6 C_s \rho_s) \frac{0,157}{\sqrt{t_s}} \text{ για βάρος ατόμου: 70 kg}$$

Όσον αφορά στα ανεκτά επίπεδα τάσης επαφής, για τον υπολογισμό τους χρησιμοποιείται ο τύπος:

$$E_{\text{touch}} = I_B \left(R_B + \frac{R_f}{2} \right)$$

Και, τελικά, τα ανεκτά επίπεδα τάσης επαφής προσδιορίζονται από τους παρακάτω τύπους, σε συνάρτηση πάντα με το βάρος του ατόμου:

$$E_{\text{touch}50} = (1000 + 1.5 C_s \rho_s) \frac{0,116}{\sqrt{t_s}} \text{ για βάρος ατόμου: 50 kg}$$

$$E_{\text{touch}70} = (1000 + 1.5 C_s \rho_s) \frac{0,157}{\sqrt{t_s}} \text{ για βάρος ατόμου: 70 kg}$$

Όταν δεν χρησιμοποιείται υλικό επαφής του ατόμου με το έδαφος, τότε είναι: $C_s = 1$ και $\rho_s = \rho$.

Για τον προσδιορισμό των ορίων τάσης επαφής που αφορά στο κύκλωμα που δημιουργείται από την επαφή μετάλλου με μέταλλο, καθώς και αυτήν μεταξύ χεριού με χέρι είτε χέρι με πόδι, χρησιμοποιούνται οι παραπάνω τύποι με την ιδιαιτερότητα ότι η ειδική αντίσταση του εδάφους λαμβάνεται με μηδενική τιμή ($\rho_s = 0$) και η ισοδύναμη αντίσταση του σώματος είναι η R_B . Με αυτές τις προϋποθέσεις, οι εν λόγω τύποι λαμβάνουν την μορφή:

$$E_{50} = \frac{116}{\sqrt{t_s}} \text{ για βάρος ατόμου: 50 kg}$$

και

$$E_{70} = \frac{157}{\sqrt{t_s}} \text{ για βάρος ατόμου: 70 kg}$$

και αφορά στην τοποθέτηση στρώματος υλικού υψηλής ειδικής αντίστασης, το οποίο τοποθετείται στην περιοχή εγκατάστασης, προκειμένου να αυξηθεί η αντίσταση ανάμεσα στο έδαφος και τα πόδια του ανθρώπου.

Ο παρακάτω πίνακας [8] (Πίνακας 3) δίνει τα επιτρεπτά όρια της τάσης επαφής και της βηματικής τάσης για έναν ΦΒ σταθμό, σε συνάρτηση της ειδικής αντίστασης του υλικού

επιφάνειας ρ_s , για τρεις διαφορετικές τιμές του χρόνου ροής t_s του ρεύματος. Οι παρακάτω τιμές έχουν προσδιοριστεί με την χρήση των παραπάνω τύπων και για ανθρώπινο βάρος 70 kg και 50 kg.

Πίνακας 3. Επιτρεπτά όρια τάσης επαφής και βηματικής τάσης για πάχος υλικού επιφάνειας 0,15 m [8].

ρ_s (Ωm)	t_s (s)					
	0.1		0.5		1	
	$E_{touch70}$ (V)	E_{step70} (V)	$E_{touch70}$ (V)	E_{step70} (V)	$E_{touch70}$ (V)	E_{step70} (V)
χωρίς	2579	8825	1153	3947	815	2791
4000	3268	11584	1462	5181	1034	3663
5000	3841	13876	1718	6205	1215	4388
6000	4414	16167	1974	7230	1396	5112
7000	4987	18459	2230	8255	1577	5837
8000	5560	20750	2486	9280	1758	6562
9000	6133	23041	2743	10304	1939	7286
10000	6706	25333	2999	11329	2120	8011
	$E_{touch50}$ (V)	E_{step50} (V)	$E_{touch50}$ (V)	E_{step50} (V)	$E_{touch50}$ (V)	E_{step50} (V)
χωρίς	1905	6521	852	2916	603	2062
4000	2415	8559	1080	3828	764	2707
5000	2838	10252	1269	4585	898	3242
6000	3261	11945	1459	5342	1031	3777
7000	3685	13638	1648	6099	1135	4313
8000	4108	15331	1837	6856	1299	4848
9000	4531	17024	2026	7613	1433	5384
10000	4954	18717	2216	8371	1567	5919

Με δεδομένο ότι οι ΦΒ σταθμοί είναι περιφραγμένοι, για την περιοχή εγκατάστασης εντός του περιφραγμένου χώρου χρησιμοποιείται το βάρος ατόμου 70 kg, ενώ για τον χώρο εκτός της περίφραξης χρησιμοποιείται το βάρος ατόμου 50 kg.

Επισημαίνεται ότι επειδή η χρήση υλικού επιφανείας δεν συνηθίζεται στα ΦΒ πάρκα, η τοποθέτησή του εντός της περιφραγμένης περιοχής της εγκατάστασης είναι δυνατόν να λειτουργήσει αποτελεσματικά στην κατεύθυνση της οικονομικής απόδοσης της μεθόδου, προκειμένου να επιτευχθούν οι απαιτούμενες προδιαγραφές ασφαλείας.

1.14 Τάση πλέγματος

Η τάση πλέγματος (ή τάση βρόγχου) (E_m) υπολογίζεται από τον παρακάτω τύπο:

$$E_m = \frac{\rho \cdot K_m \cdot K_i \cdot I_G}{L_m}$$

όπου:

ρ = ειδική αντίσταση του εδάφους (Ωm)

K_m = συντελεστής απόστασης για τάση πλέγματος

K_i = συντελεστής διόρθωσης για τα γεωμετρικά στοιχεία του πλέγματος

I_G = μέγιστο ρεύμα γείωσης (A)

L_m = πραγματικό μήκος για τάση πλέγματος (m)

$\frac{I_G}{L_m}$ = μέση τιμή ρεύματος γείωσης ανά μονάδα μήκους ενεργού (θαμμένου στη γη) αγωγού του συστήματος γείωσης

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΓΕΙΩΣΗΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΥΨΗΛΗΣ ΤΑΣΗΣ

2.1 Κριτήρια σχεδίασης και παράμετροι εισόδου για τη σχεδίαση

Η σχεδίαση ενός ασφαλούς συστήματος γείωσης θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη τις παρακάτω παραδοχές [2]:

- Να διαθέτει τα μέσα που προσφέρουν τη δυνατότητα ασφαλούς μεταφοράς ηλεκτρικών ρευμάτων προς την γη τόσο υπό κανονικές συνθήκες όσο και υπό συνθήκες σφάλματος, χωρίς να υφίσταται υπέρβαση των ορίων λειτουργίας του συστήματος ή του εξοπλισμού, καθώς και χωρίς να επηρεάζεται αρνητικά ή συνεχώς λειτουργία του
- Να διασφαλίζει ότι δεν θα κινδυνεύσει από ηλεκτροπληξία κανένα άτομο, σε περίπτωση που αυτό βρεθεί κοντά σε γειωμένες εγκαταστάσεις.

Η παρακάτω διαδικασία σχεδιασμού ενός συστήματος γείωσης θα χρησιμοποιήσει ως βάση υπολογισμού την τάση του πλέγματος γείωσης, η οποία, συνήθως, εμφανίζει και τις δυσμενέστερες τιμές.

Ενώ οι βηματικές τάσεις είναι λιγότερο επικίνδυνες από τις τάσεις πλέγματος, όταν η ασφάλεια εντός της γειωμένης περιοχής επιτυγχάνεται με την χρήση επιφανειακού στρώματος υψηλής ειδικής αντίστασης (υλικό επιφάνειας), τότε οι βηματικές τάσεις μπορεί να καταστούν επικίνδυνες. Για το λόγο αυτό είναι απαραίτητη η σύγκριση, σε κάθε στάδιο σχεδιασμού ενός συστήματος γείωσης, των βηματικών τάσεων με την επιτρεπόμενη βηματική τάση, προκειμένου να διασφαλιστεί η ασφαλής λειτουργία του συστήματος σε κάθε περίπτωση μεταφοράς ρεύματος προς το έδαφος.

Το βασικό κριτήριο για την για τον ασφαλή σχεδιασμό ενός συστήματος γείωσης ΦΒ πάρκου είναι η επίτευξη του περιορισμού της τάσης επαφή (E_{touch} , Κεφ. 1^ο) κάτω από την ανεκτή τάση ($E_{\text{touch}50}$, $E_{\text{touch}70}$, Κεφ. 1^ο).

2.2 Σχεδίαση συστήματος γείωσης ΦΒ πάρκου

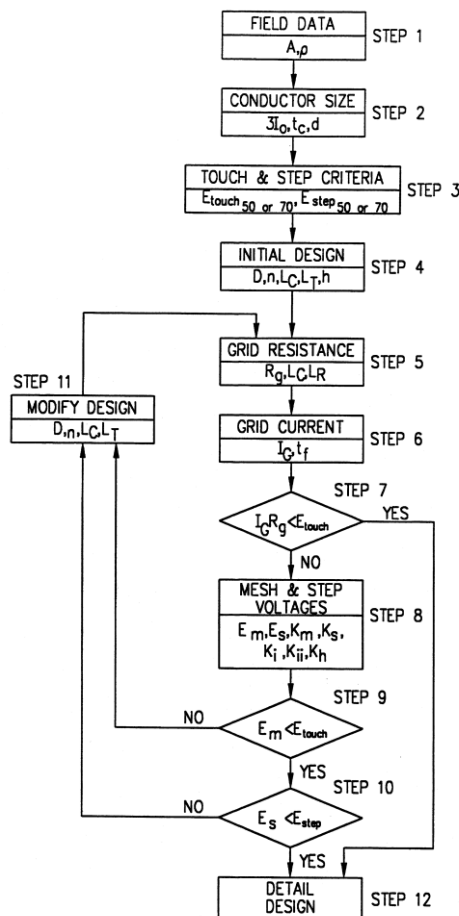
Για τη σχεδίαση ενός συστήματος γείωσης ΦΒ πάρκου συνδεδεμένου στη μέση τάση ακολουθείται συγκεκριμένη διαδικασία. Ειδικότερα [2], [9]:

-
- Καθορίζεται η μέγιστη τιμή ρεύματος σφάλματος του ΦΒ πάρκου.
 - Μετρίεται η ειδική αντίσταση του εδάφους με τη μέθοδο Wenner για τις θέσεις των φωτοβολταϊκών πάνελ και του κέντρου ελέγχου.
 - Υπολογίζεται το μοντέλο εδάφους, σύμφωνα με τις μετρήσεις της ειδικής αντίστασης για τις θέσεις στις οποίες έχουν πραγματοποιηθεί σχετικές μετρήσεις.
 - Σχεδιάζεται το τυπικό πλέγμα γείωσης για κάθε συστοιχία πάνελ και για τον υποσταθμό.
 - Υπολογίζεται η αντίσταση γείωσης.
 - Υπολογίζεται το εγχύμενο ρεύμα σφάλματος.
 - Υπολογίζεται η μέγιστη επιτρεπόμενη ασφαλής βηματική τάση και η μέγιστη επιτρεπόμενη ασφαλής τάση επαφής.
 - Υπολογίζεται η βηματική τάση και η τάση επαφής για κάθε σημείο στην επιφάνεια του εδάφους. Η τάση επαφής μόνο όπου υπάρχουν γειωμένα μεταλλικά αντικείμενα.
 - Πραγματοποιείται έλεγχος τιμών των παραπάνω μεγεθών. Στο πλαίσιο του ελέγχου αυτού θα πρέπει οι βηματικές τάσεις και οι τάσεις επαφής δεν θα πρέπει να ξεπερνούν τα επιτρεπτά όρια ασφάλειας, όπως αυτά καθορίζονται στο πρότυπο IEEE Std 80 [2].
 - Εφόσον ικανοποιούνται οι παραπάνω απαιτήσεις, η σχεδίαση προχωρά κανονικά. Σε διαφορετική περίπτωση θα πρέπει να πραγματοποιηθούν οι κατάλληλες παρεμβατικές βελτιώσεις, όπως παρακάτω:
 - Να αυξηθεί η επιφάνεια του συστήματος γείωσης.
 - Να πραγματοποιηθεί πύκνωση του πλέγματος γείωσης.
 - Να προστεθούν επιπλέον ράβδοι – ηλεκτρόδια γείωσης. Υπενθυμίζεται ότι οι ράβδοι στήριξης των φωτοβολταϊκών πάνελ λειτουργούν επίσης ως ηλεκτρόδια γείωσης.
 - Να προστεθεί χώμα με χαμηλή ειδική αντίσταση ή να προστεθεί βελτιωτικό εδάφους.
 - Να διασυνδεθεί το σύστημα γείωσης με άλλο γειτνιάζον σύστημα γείωσης.
 - Να τροποποιηθεί σε αυστηρότερες προδιαγραφές το κριτήριο για το χρόνο εκκαθάρισης σφάλματος. Στην περίπτωση που διασφαλίζεται από τα μέσα προστασίας της εγκατάστασης ότι ο χρόνος εκκαθάρισης σφάλματος γης είναι μικρότερος, τότε τα όρια τόσο για τη βηματική τάση όσο και για την τάση επαφής θα αυξηθούν σημαντικά.

- Να χρησιμοποιηθεί κατάλληλο υλικό επιφανείας, συνήθως χαλίκι, στην επιφάνεια του εδάφους, έστω σε περιορισμένες περιοχές, αν κάτι τέτοιο επιφέρει την επιθυμητή αλλαγή στα όρια ασφαλείας.
- Εφόσον οι προσομοιώσεις/ υπολογισμοί βρίσκονται κάτω από τα μέγιστα επιτρεπτά όρια, πραγματοποιείται η κατασκευή του συστήματος γείωσης
- Η παραπάνω διαδικασία επαναλαμβάνεται στην περίπτωση που οι μετρήσεις που πραγματοποιούνται σε ένα ΦΒ πάρκο μετά την κατασκευή είναι πάνω από τα μέγιστα επιτρεπτά όρια.

2.2.1 Διαδικασία σχεδίασης ΦΒ πάρκου

Έχοντας τα παραπάνω υπόψη, η διαδικασία σχεδίασης ενός ΦΒ πάρκου ακολουθεί, σε γενικές γραμμές, τα παρακάτω βήματα, κάτω από την δυναμική ενός διαγράμματος ροής, με την έννοια της διόρθωσης ή της τροποποίησης παραγόντων των προηγούμενων βημάτων, εφόσον κάτι τέτοιο απαιτεί η ασφάλεια και η λειτουργικότητα της εγκατάστασης.



Διάγραμμα 1. Διάγραμμα ροής σχεδίασης συστήματος γείωσης ΦΒ πάρκου [2]

Στο παραπάνω διάγραμμα απεικονίζονται τα βήματα για τον σχεδιασμό του πλέγματος γείωσης της ΦΒ πάρκου.

- **1^ο βήμα:** Αρχικά, προσδιορίζονται τα δεδομένα της περιοχής που πρόκειται να γειωθεί, λαμβάνοντας υπόψη το γενικό σχέδιο της θέσης του ΦΒ πάρκου. Προκειμένου να καθορισθεί τόσο η ειδική αντίσταση του εδάφους στο οποίο πρόκειται να εγκατασταθεί το πλέγμα γείωσης, όσο και το μοντέλο εδάφους που θα επιλεγεί (ομοιόμορφο μοντέλο ή μοντέλο δύο στρωμάτων).
- **2^ο βήμα:** Στο δεύτερο βήμα προσδιορίζεται το μέγεθος του αγωγού γείωσης, με χρήση κατάλληλων εξισώσεων. Το ρεύμα σφάλματος $3I_0$ θα πρέπει να έχει μέγιστη τιμή, η οποία θα είναι η μεγαλύτερη προσδιορισθείσα τιμή από τα ρεύματα που αναμένεται να διέλθουν από τους αγωγούς γείωσης, ενώ ο χρόνος t_c θα πρέπει να αντιπροσωπεύει τον μέγιστο δυνατό χρόνο που απαιτείται για την εξομάλυνση της λειτουργίας της εγκατάστασης μετά από διαρροή ρεύματος. Στον χρόνο αυτό συμπεριλαμβάνεται και ο εφεδρικός απαιτούμενος χρόνος (όχι μόνο ο κύριος).
- **3^ο βήμα:** Στο βήμα αυτό προσδιορίζονται τόσο η ανεκτή τάση επαφής όσο και η ανεκτή βηματική τάση, σύμφωνα με τις εξισώσεις που μνημονεύθηκαν στο 1^ο Κεφάλαιο.
- **4^ο βήμα:** Ο αρχικός σχεδιασμός θα πρέπει να περιλαμβάνει έναν βρόγχο αγωγού, ο οποίος θα περιβάλλει όλη την γειωμένη περιοχή, καθώς και ικανό αριθμό εγκάρσιων αγωγών προκειμένου να επιτευχθεί η πλήρης κάλυψη όλου του υφιστάμενου εξοπλισμού από πιθανότητα διαρροής ηλεκτρικού ρεύματος. Οι αρχικοί υπολογισμοί της απόστασης των αγωγών και των θέσεων των ράβδων θα πρέπει να έχουν ως βάση τους το μέγιστο ρεύμα γείωσης I_G του δικτύου, το οποίο διαρρέει το πλέγμα γείωσης και την γύρω περιοχή, καθώς και το μέγεθος της περιοχής που πρόκειται να γειωθεί.
- **5^ο βήμα:** Ο προσδιορισμός της συνολικής αντίστασης στην απομακρυσμένη γη αποτελεί ένα από τα πρώτα σημαντικά βήματα στην διαδικασία υπολογισμού του μεγέθους και της βασικής διάταξης ενός συστήματος γείωσης. Η αντίσταση γείωσης εξαρτάται από την περιοχή στην οποία θα εγκατασταθεί το σύστημα γείωσης, η οποία είναι γνωστή ήδη από το αρχικό στάδιο σχεδιασμού. Έτσι, ο προσδιορισμός της αντίστασης του συστήματος γείωσης πραγματοποιείται με τις κατάλληλες εξισώσεις (όπως αναφέρονται στο Κεφάλαιο 1) ή με προσομοιώσεις με κατάλληλο λογισμικό. Προκειμένου το σύστημα γείωσης να είναι αποτελεσματικό, θα πρέπει να διασφαλίζει χαμηλή αντίσταση στην απομακρυσμένη γείωση, προκειμένου το μέγιστο ηλεκτρικό δυναμικό GPR να ελαχιστοποιείται. Η συνήθης αποδεκτή αντίσταση γείωσης για τους περισσότερους υποσταθμούς μεταφοράς, καθώς και για μεγάλους υποσταθμούς είναι

περίπου 1Ω ή και μικρότερη, ενώ σε μικρότερους υποσταθμούς διανομής, το σύνηθες αποδεκτό εύρος της αντίστασης γείωσης κυμαίνεται από 1Ω έως 5Ω , ανάλογα με τις τοπικές συνθήκες [2]. Κατά τον τελικό σχεδιασμό, θα επιδιωχθεί ακριβέστερος προσδιορισμός της αντίστασης του συστήματος, κάτι που μπορεί να πραγματοποιηθεί με την χρήση κατάλληλου λογισμικού.

- **6° βήμα:** Προσδιορίζεται το μέγιστο ρεύμα γείωσης I_G με την χρήση κατάλληλων εξισώσεων. Προς αποφυγή σχεδιασμού του συστήματος γείωσης με περιττές διαστασιολογήσεις, οι οποίες θα επιβαρύνουν άσκοπα το συνολικό κόστος, θα πρέπει να ληφθεί υπόψη στους υπολογισμούς του πλέγματος γείωσης εκείνη η τιμή του συνολικού ρεύματος σφάλματος ($3I_0$), το οποίο έχει προσδιοριστεί ως το μέγιστο που θα μπορούσε να ρέει από το δίκτυο προς την γη. Επισημαίνεται ότι το ρεύμα γείωσης I_G θα πρέπει να αντικατοπτρίζει τόσο τον δυσμενέστερο τύπο και θέση του σφάλματος, τον συντελεστή μείωσης, καθώς και να καλύπτει οποιαδήποτε μελλοντική επέκταση του συστήματος γείωσης.
- **7° βήμα:** Εφόσον το μέγιστο ηλεκτρικό δυναμικό (GPR) έχει υπολογιστεί κατά την προκαταρκτική μελέτη μικρότερο της ανεκτής τάσης επαφής (δηλαδή, αν: $I_G \cdot R_g < E_{touch}$), τότε δεν απαιτείται περαιτέρω ανάλυση, παρά μόνο η τοποθέτηση επιπρόσθετων αγωγών, οι οποίοι θα εξυπηρετούν την αναγκαία γείωση του υπάρχοντος εξοπλισμού.
- **8° βήμα:** Αν δεν διασφαλίζεται η ανισότητα: $I_G \cdot R_g < E_{touch}$ τότε προχωρούμε στους υπολογισμούς τόσο της τάσης πλέγματος (E_m) όσο και της βηματικής τάσης (E_{step}), αξιοποιώντας τους κατάλληλους τύπους. Για ακριβέστερη προσέγγιση τιμών, χρησιμοποιούμε κατάλληλο λογισμικό, όπως και παραπάνω αναφέρθηκε.
- **9° βήμα:** Αν η τάση πλέγματος E_m είναι μικρότερη της τάσης επαφής E_{touch} ($E_m < E_{touch}$) προχωρούμε στο βήμα 10, προς ολοκλήρωση του υλοποιούμενου σχεδιασμού. Στην περίπτωση που η παραπάνω ανίσωση δεν ισχύει, τότε προχωρούμε σε τροποποίηση της σχεδίασης (βήμα 11).
- **10° βήμα:** Αν η τάση βήματος E_s είναι μικρότερη της ανεκτής τιμής της τάσης βήματος είτε για άτομο βάρους 50 kg (E_{step50}) είτε για άτομο βάρους 70 kg (E_{step70}), δηλαδή αν ισχύει: $E_s < E_{step50}$ ή $E_s < E_{step70}$ αντίστοιχα, τότε η σχεδίασή μας απαιτεί μόνο επιπρόσθετες βελτιώσεις πριν την ολοκλήρωσή της. Αν δεν ικανοποιούνται οι παραπάνω ανισότητες, τότε προχωρούμε σε τροποποίηση της σχεδίασης (βήμα 11).
- **11° βήμα:** Στο βήμα αυτό οδηγείται η σχεδίαση του συστήματος γείωσης ενός ΦΒ πάρκου όταν ξεπερνούνται τα ανεκτά όρια της βηματικής τάσης και της τάσης επαφής. Κατά την αναθεώρηση της σχεδίασης επιδιώκονται ενέργειες, όπως η ελάττωση των

αποστάσεων μεταξύ των αγωγών ή η τοποθέτηση πρόσθετων ράβδων γείωσης προκειμένου να επιτευχθούν οι επιθυμητές τιμές. Επιπρόσθετα, θα μπορούσε να εφαρμοστεί εκτροπή μεγαλύτερου μέρους του ρεύματος διαρροής σε άλλες διαδρομές, αν αυτό είναι εφικτό. Προκειμένου να επιτευχθεί αυτή η εκτροπή, εφαρμόζεται είτε σύνδεση εναερίων καλωδίων γείωσης γραμμών μεταφοράς ή μειώνονται οι αντιστάσεις του μεταλλικών πυλώνων κοντά στον υποσταθμό. Κάτω από πολύ συγκεκριμένες προϋποθέσεις θα μπορούσε να επιδιωχθεί ο περιορισμός του συνολικού ρεύματος σφάλματος, προκειμένου να επιτευχθεί η μείωση του μέγιστου ηλεκτρικού δυναμικού GPR, αν και κάτι τέτοιο, σύμφωνα με την διεθνή βιβλιογραφία, είναι εξαιρετικά δύσκολο [2].

- **12^ο βήμα:** Εφόσον έχουν ικανοποιηθεί οι απαιτήσεις των τιμών της βηματικής τάσης και της τάσης γείωσης, ενδέχεται να απαιτηθεί η τοποθέτηση επιπρόσθετων ράβδων δικτύου και γείωσης. Η τοποθέτηση επιπρόσθετων αγωγών γείωσης μπορεί να απαιτηθεί, σε περίπτωση που θα πρέπει να γειωθεί εξοπλισμός που βρίσκεται στον χώρο που θα πρέπει να ασφαλιστεί από ενδεχόμενο διαρροής ρεύματος. Επιπρόσθετες ράβδοι γείωσης θα μπορούσαν να απαιτηθούν για την τοποθέτησή τους στην βάση των εκτροπέων υπέρτασης, στους ουδέτερους μετασχηματιστών, κλπ. Ακόμη, κατά τον τελικό σχεδιασμό θα πρέπει να ληφθεί μέριμνα εξάλειψης των κινδύνων λόγω μεταφερόμενου δυναμικού, καθώς και των κινδύνων που σχετίζονται με ειδικούς τομείς ασφάλειας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΤΟ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟ ΠΑΡΚΟ ΚΑΙ ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΓΕΙΩΣΗΣ ΤΟΥ

3.1 Γενικά για τα φωτοβολταϊκά πάρκα

3.1.1 Το φωτοβολταϊκό πάρκο

Η αναγκαιότητα αναζήτησης φθηνής, ανανεώσιμης και οικολογικής ενέργειας οδήγησε στην αναζήτηση τρόπων εκμετάλλευσης της ηλιακής ακτινοβολίας. Η αναζήτηση αυτή έφερε την παρουσία των φωτοβολταϊκών πάρκων στο προσκήνιο των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Με δεδομένο ότι ένα τυπικό φωτοβολταϊκό σύστημα ισχύος 1 MW παράγει κατά μέσο όρο 1.500 kWh το χρόνο, αποτρέποντας με τον τρόπο αυτό την εκπομπή στην ατμόσφαιρα 1.600 κιλών διοξειδίου του άνθρακα (ποσότητα που απορροφάται ετησίως από δύο στρέμματα δάσους) γίνεται φανερή η οικολογική διάσταση της λειτουργίας των φωτοβολταϊκών συστημάτων.

Ένα φωτοβολταϊκό πάρκο ή φωτοβολταϊκός σταθμός είναι το αποτέλεσμα της συνύπαρξης πολλών φωτοβολταϊκών πάνελ, το καθένα από τα οποία δημιουργείται με την σύνδεση πολλών φωτοβολταϊκών πλαισίων, συνδεδεμένων μεταξύ τους. Το κάθε φωτοβολταϊκό πλαίσιο αποτελείται από πολλά φωτοβολταϊκά στοιχεία, συνδεδεμένα μεταξύ τους είτε σε σειρά είτε παράλληλα.

3.1.2 Μορφές χρήσης του φωτοβολταϊκού πάρκου

Ένα φωτοβολταϊκό πάρκο, ως καθαρή και αξιόπιστη πηγή ανανεώσιμης ενέργειας, καλύπτει μεγάλο εύρος ενεργειακών αναγκών: από τις ενεργειακές ανάγκες ενός κτηρίου, κατά την σύνδεσή του με το δίκτυο παροχής ηλεκτρικής ενέργειας, τις ενεργειακές ανάγκες μιας βιοτεχνικής ή μιας αγροτικής εγκατάστασης, μέχρι και σημαντικό μέρος των ενεργειακών αναγκών ενός εργοστασίου, ενός αεροδρομίου ή μιας μικρής πόλης ή, ακόμη, και ολόκληρων των ενεργειακών αναγκών των παραπάνω, όταν χρησιμοποιηθούν για τον σκοπό αυτό διασυνδεδεμένα φωτοβολταϊκά πάρκα, των οποίων η ενέργεια κυμαίνεται από μερικές δεκάδες kW μέχρι και αρκετά MW.

Η ενέργεια που θα αποδώσει ένα φωτοβολταϊκό πάρκο είναι αποτέλεσμα διάφορων παραγόντων: τις περιβαλλοντικές συνθήκες (κλίμα) της περιοχής εγκατάστασής του, από τις

οποίες συναρτάται ο μέσος όρος της ηλιακής ακτινοβολίας (ηλιακό δυναμικό της περιοχής εγκατάστασης του φωτοβολταϊκού πάρκου), όπως και από διαστάσεις του χώρου εγκατάστασής του, της χωροθέτησής του φωτοβολταϊκού πάρκου, της χρησιμοποιούμενης τεχνολογίας, κλπ.

3.1.3 Τμήματα ενός φωτοβολταϊκού συστήματος

Τα κυριότερα μέρη ενός φωτοβολταϊκού συστήματος είναι:

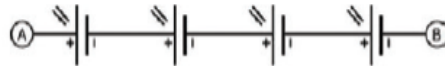
- Το φωτοβολταϊκό κελί, στο οποίο η ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει επάνω του δημιουργεί ηλεκτρική τάση, με αποτέλεσμα την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος.
- Το φωτοβολταϊκό πλαίσιο, το οποίο αποτελείται από σύνολο φωτοβολταϊκών στοιχείων, ηλεκτρικά συνδεδεμένων μεταξύ τους, αποτελώντας την βασική μονάδα ενός φωτοβολταϊκού συστήματος.
- Οι αντιστροφείς (inverters), που είναι η καρδιά του φωτοβολταϊκού συστήματος, μετατρέποντας την συνεχή τάση των φωτοβολταϊκών πάνελ σε εναλλασσόμενη τάση ονομαστικών τιμών 230 V / 50 Hz. Με δεδομένο το γεγονός πως όλη η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια του φωτοβολταϊκού συστήματος διοχετεύεται στο δίκτυο μέσω των αντιστροφέων, γίνεται φανερό πως αυτοί θα πρέπει να χαρακτηρίζονται από υψηλή απόδοση και από μεγάλη αξιοπιστία.
- Οι καλωδιώσεις (DC καλωδίωση, AC καλωδίωση, AC καλωδίωση ισχύος)
- Η αντικεραυνική προστασία
- Το σύστημα γείωσης προστασίας, σκοπός του οποίου είναι αποφυγή δημιουργίας ηλεκτρικού δυναμικού σε αγώγιμη επιφάνεια με την οποία είναι πιθανόν να έρθει σε επαφή ένα άτομο.

3.1.4 Τρόποι σύνδεσης φωτοβολταϊκών πλαισίων

Προκειμένου να δημιουργηθεί μια συστοιχία ΦΒ πλαισίων, αυτά μπορούν να συνδεθούν με τρεις τρόπους [10]:

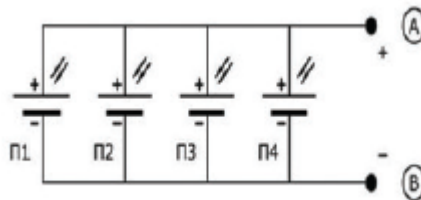
- Σε σειρά
- Παράλληλα
- Μεικτή σύνδεση

Η σύνδεση ΦΒ πλαισίων σε σειρά χρησιμοποιείται κυρίως για την επίτευξη τάσης μεγαλύτερης από αυτήν που παρέχεται από κάθε ΦΒ πλαίσιο χωριστά. Κατά την σύνδεση σε σειρά, ο θετικός πόλος ενός στοιχείου συνδέεται με τον αρνητικό πόλο του επόμενου στοιχείου. Με τον τρόπο αυτό δημιουργείται συστοιχία ΦΒ πλαισίων σε σειρά (Σχήμα 10). Προκειμένου να επιτευχθεί αυτή η σύνδεση σειράς, θα πρέπει όλα τα πλαίσια να έχουν το ίδιο ρεύμα βραχυκύκλωσης (I_{sk}), καθώς και το ίδιο ρεύμα μέγιστης ισχύος (I_m).



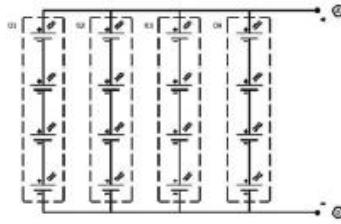
Σχήμα 10. Σύνδεση τεσσάρων ΦΒ πλαισίων σε σειρά [10].

Η παράλληλη σύνδεση ΦΒ πλαισίων χρησιμοποιείται όταν υπάρχει απαίτηση ρεύματος μεγαλύτερης έντασης από αυτήν που μπορεί να παράσχει κάθε πλαίσιο χωριστά. Κατά την παράλληλη σύνδεση ΦΒ πλαισίων, ο θετικός πόλος του ενός πλαισίου συνδέεται με τον θετικό πόλο του επόμενου πλαισίου, όπως και ο αρνητικός πόλος του ενός πλαισίου με τον ομώνυμο του επόμενου πλαισίου. Με τον τρόπο αυτό σχηματίζεται συστοιχία παράλληλα συνδεδεμένων ΦΒ πλαισίων (Σχήμα 11). Προκειμένου να επιτευχθεί η παράλληλη αυτή σύνδεση θα πρέπει τα ΦΒ πλαίσια να έχουν την ίδια τάση ανοικτού κυκλώματος (V_{oc}).



Σχήμα 11. Παράλληλη σύνδεση τεσσάρων ΦΒ πλαισίων [10].

Κατά την μεικτή σύνδεση ΦΒ πλαισίων επιτυγχάνεται μεγαλύτερη αύξηση του ρεύματος, όσο και μεγαλύτερη τάση συγκριτικά με το ρεύμα κάθε ΦΒ πλαισίου, με αποτέλεσμα η συνολική ισχύς που αποδίδει μια συστοιχία ΦΒ πλαισίων μεικτής σύνδεσης να ισούται με το άθροισμα της ισχύος όλων των ΦΒ πλαισίων που την απαρτίζουν. Προαπαιτούμενο μιας μεικτής σύνδεσης είναι τα ΦΒ πλαίσια να λειτουργούν κάτω από τις ίδιες συνθήκες (Σχήμα 12).



Σχήμα 12. Μεικτή σύνδεση ΦΒ πλαισίων [10].

3.1.5 Τα φωτοβολταϊκά συστήματα στον διεθνή και στον ελληνικό χώρο

Η αναζήτηση φθηνής ανανεώσιμης ενέργειας οδήγησε στην ραγδαία ανάπτυξη των φωτοβολταϊκών συστημάτων τα τελευταία χρόνια. Χώρες με ισχυρές οικονομίες, όπως οι ΗΠΑ, η Γερμανία, η Κίνα και η Ιαπωνία αποτελούν τους ηγέτες στην κούρσα ανάπτυξης φωτοβολταϊκών συστημάτων παγκοσμίως. Είναι ενδεικτικό ότι το 2004 η εγκατάσταση φωτοβολταϊκών συστημάτων στην Γερμανία παρουσίασε αύξηση 140%, καλύπτοντας ενέργεια ίση με 3.063 MW.

Στην Ελλάδα, η υφιστάμενη νομοθεσία (Ν. 3498/2006) επιχείρησε να δώσει ώθηση στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, επιχορηγώντας κάθε κιλοβατώρα που παράγεται με αυτές και τροφοδοτεί το δίκτυο της ΔΕΗ. Πλέον, και στην χώρα μας, όπως και σε διεθνές επίπεδο, τα διασυνδεδεμένα συστήματα επικρατούν στις επιλογές των επενδυτών. Ενώ το 2005 τα διασυνδεδεμένα συστήματα στην χώρα μας κατείχαν το 26% της εγχώριας αγοράς σε σχέση με το 74% που κάλυπταν τα αυτόνομα, το 2007 τα ποσοστά αντιστράφηκαν: 68% τα διασυνδεδεμένα φωτοβολταϊκά συστήματα έναντι 32% των αυτόνομων φωτοβολταϊκών συστημάτων [10].

3.2 Βάσεις των πάνελ

Τα ΦΒ πάνελ στηρίζονται με δύο μεθόδους:

1. με σταθερές βάσεις (βάσεις με συγκεκριμένη κλίση ως προς το έδαφος)
2. με βάσεις κινητές που παρακολουθούν την πορεία του ήλιου κατά τη διάρκεια της ημέρας (συστήματα ιχνηλάτησης ή ηλιοπαρακολουθητές ή στα αγγλικά trackers)

3.2.1 Είδη θεμελίωσης σταθερών βάσεων

τον Ο οικονομικότερος τρόπος στήριξης ΦΒ πάνελ είναι οι σταθερές βάσεις. Ο σχεδιασμός τους, καθορίζεται από την κάθετη πρόσπτωση στην επιφάνεια των πάνελ το μεσημέρι. Η σταθερή κλίση που επιλέγεται συνήθως είναι περίπου 30° (Εικόνα 1). Αυτή θεωρείται ικανοποιητική για την Ελλάδα. Το καλοκαίρι η ιδανική κλίση είναι αρκετά μικρότερη. Το χειμώνα αρκετά μεγαλύτερη. Επομένως η χρήση μίας τιμής είναι συμβιβασμός.



Εικόνα 1. ΦΒ πάνελ σταθερής κλίσης [11].

Οι ράβδοι στήριξης των ΦΒ πάνελ τοποθετούνται κάθετα στο έδαφος είτε με τη μέθοδο της πασσαλόμπηξης (Εικόνες 2 και 3) είτε με πάκτωσή τους (εγκιβωτισμό τους) σε μπετόν (Εικόνα 4)



Εικόνα 2. Πασσαλόμπτυξη ράβδων στήριξης ΦΒ πάνελ [12].

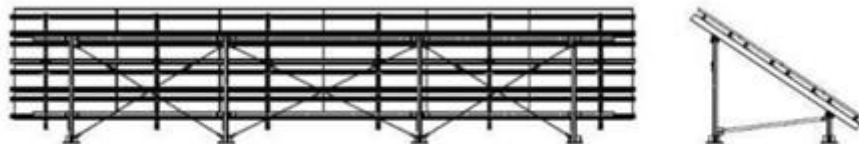


Εικόνα 3. Εγκατάσταση ΦΒ πάνελ με πασσαλόμπτυξη [11].



Εικόνα 4. Πάκτωση ράβδων στήριξης ΦΒ πάνελ σε μπετόν [13].

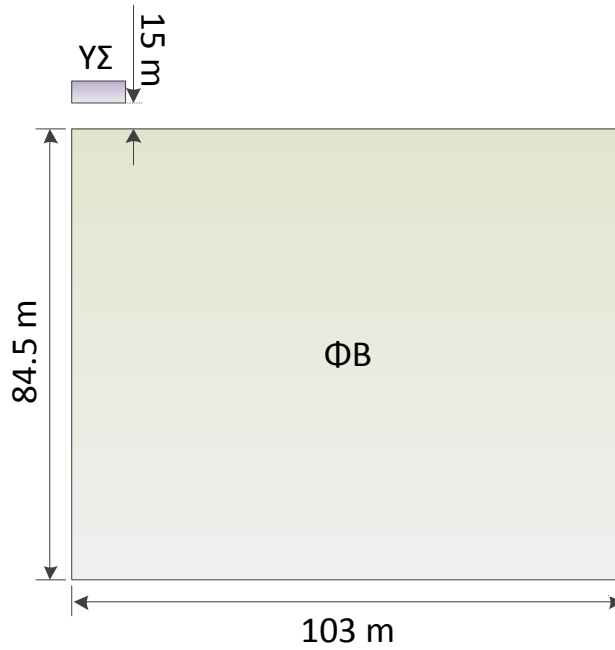
Η κατασκευή των βάσεων των πάνελ απαιτεί μελέτη για τη στατική επάρκεια. Εξετάζονται φορτία, όπως ο άνεμος και το χιόνι, αλλά και αντίξοες καταστάσεις όπως σεισμοί. Τα υλικά κατασκευής είναι συχνότερα ανοξείδωτος χάλυβας αλλά και αλουμίνιο.



Εικόνα 5. Τυπική σταθερή βάση στήριξης [5], [14].

3.3 Περιγραφή φωτοβολταϊκού πάρκου που θα μελετηθεί

Το ΦΒ πάρκο έχει συνολική ισχύ 500 kW και αποτελείται από δύο ομάδες συστοιχιών πάνελ (250 kW η κάθε μία). Οι διαστάσεις του πάρκου και των βάσεων των πάνελ απεικονίζονται στα παρακάτω σχήματα.

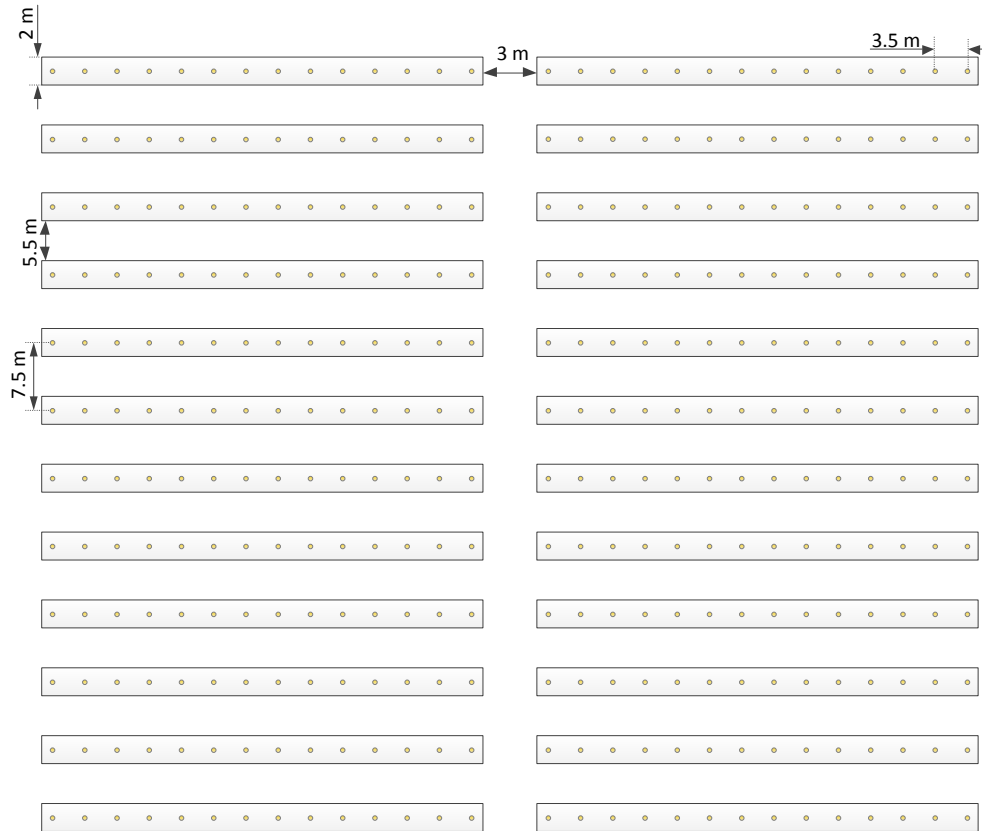


Σχήμα 13. Διαστάσεις του υπό μελέτη ΦB πάρκου.

Οι μεταλλικές βάσεις των ΦB πάνελ στηρίζονται μέσω γαλβανισμένων χαλύβδινων πασσάλων. Το μήκος τους μέσα στο έδαφος είναι 1.2 m. Το μήκος αυτό είναι εγκιβωτισμένο σε σκυρόδεμα διαμέτρου 0.25 m.

Το ΦB πάρκο είναι συνδεδεμένο με το εναέριο σύστημα διανομής Μέσης Τάσης (MT) μέσω προκατασκευασμένου υποσταθμού ($\Upsilon\Sigma$) με διαστάσεις 5 x 4 m.

Το πιο επικίνδυνο σφάλμα γης στο ΦB πάρκο είναι το μονοφασικό σφάλμα ως προς τη γη στους ζυγούς των 20 kV του γενικού πίνακα μέσης τάσης του $\Upsilon\Sigma$. Το πιο επικίνδυνο ρεύμα σφάλματος είναι 950 A και η διάρκειά του 1 s.



Σχήμα 14. Βάσεις πάνελ ΦΒ πάρκου.

Το μοντέλο εδάφους (δύο στρώματα) που προέκυψαν από μετρήσεις σε διάφορες θέσεις εντός του πάρκου είναι:

$$\rho_1=5579 \Omega\text{m}, \rho_2=2022 \Omega\text{m}, h=6.2 \text{ m}$$

Η σελίδα αυτή είναι σκόπιμα λευκή

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΓΕΙΩΣΗΣ ΤΟΥ ΥΠΟ ΜΕΛΕΤΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟΥ ΠΑΡΚΟΥ

4.1 Η σχεδίαση του ΦΒ πάρκου

Στο παρόν κεφάλαιο θα υλοποιηθεί η σχεδίαση του συστήματος γείωσης του ΦΒ πάρκου που περιγράφηκε παραπάνω (Σχήματα 13 και 14). Η σχεδίαση του ΦΒ πάρκου θα πραγματοποιηθεί σύμφωνα με το διεθνές πρότυπο IEEE Std 80 [2].

4.1.1 Διαδικασία σχεδίασης

Η μελέτη βραχυκυκλωμάτων του πάρκου έδειξε ότι η μέγιστη τιμή του ρεύματος σφάλματος είναι 950 A με τη διάρκειά του να είναι 1 s. Πρόκειται για ρεύμα σφάλματος, το οποίο είναι ενδεχομένως επικίνδυνο για τον άνθρωπο, όταν βρεθεί στην περιοχή του ΦΒ πάρκου.

4.1.2 Θέσεις εγκατάστασης συστοιχιών πάνελ ΦΒ πάρκου

Οι θέσεις εγκατάστασης των δύο ομάδων συστοιχιών πάνελ του ΦΒ πάρκου, όπως και του υποσταθμού βρίσκονται πλησίον μεταξύ τους, γεγονός που επιτρέπει αλλά και επιβάλλει την κοινή τους προσομοίωση.

4.1.3 Μοντέλα εδάφους για τις δύο συστοιχίες πάνελ και τον υποσταθμό

Τα μοντέλα εδάφους, τόσο για τις δύο συστοιχίες πάνελ όσο και για τον υποσταθμό, προέκυψαν από τις σχετικές μετρήσεις στο χώρο εγκατάστασής τους. Το μοντέλο εδάφους, όπως και παραπάνω αναφέρθηκε, είναι:

$$\rho_1=5579 \Omega\text{m}, \rho_2=2022 \Omega\text{m}, h=6.2 \text{ m}.$$

4.1.4 Υπολογισμός επιτρεπόμενων ορίων βηματικής τάσης και τάσης επαφής

Στους παρακάτω πίνακες αναφέρονται τα επιτρεπτά όρια της βηματικής τάσης και της τάσης επαφής, όρια, τα οποία, δεν θα πρέπει σε καμία περίπτωση να ξεπεραστούν λόγω ανεπιθύμητου

σφάλματος γης. Τα παρακάτω παρατιθέμενα όρια έχουν υπολογιστεί με τη χρήση των εξισώσεων της Ενότητας 1.13, με τους υπολογισμούς να αφορούν σε διάφορες τιμές ειδικής αντίστασης υλικού επιφανείας. Πρόκειται για υλικό, το οποίο τοποθετείται στην επιφάνεια του εδάφους, με σχετικά μικρό πάχος, προκειμένου να αυξήσει την αντίσταση του ανθρώπου με το έδαφος. Αυτό το πάχος ορίστηκε στην κοινά χρησιμοποιούμενη τιμή των 15 cm. Σύμφωνα με το πρότυπο IEEE Std 80, χρησιμοποιήθηκαν ως ανθρώπινα βάρη τα 50 kg και τα 70 kg.

Όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 4):

- Τα επιτρεπτά όρια βηματικής τάσης είναι μεγαλύτερα από τα όρια της τάσης επαφής
- Οι άνθρωποι με μεγαλύτερο βάρος (70 kg) εμφανίζουν μεγαλύτερη αντοχή σε μεγαλύτερη τάση από τους ανθρώπους με μικρότερο βάρος (50 kg), χωρίς να υπάρχει άμεσος κίνδυνος θανατηφόρου ηλεκτροπληξίας
- Η χρήση υλικού επιφανείας συμβάλλει στην αύξηση των επιτρεπτών ορίων, τόσο της τάσης επαφής όσο και της βηματικής τάσης

Οι παρακάτω υπολογισθείσες τιμές των ορίων, θα αξιοποιηθούν προκειμένου να σχεδιαστεί το σύστημα γείωσης του ΦΒ πάρκου, συμβάλλοντας σε, τυχόν, πιθανή αναθεώρησή του, μετά τις προσομοιώσεις.

Πίνακας 4. Επιτρεπτά όρια βηματικής τάσης και τάσης επαφής για τις συστοιχίες πάνελ του ΦΒ πάρκου με πάχος υλικού επιφανείας 0.15 m.

Ειδική αντίσταση υλικού επιφανείας ρ_s (Ωm)	$t_s = 1 s$			
	$E_{touch70}$	E_{step70}	$E_{touch50}$	E_{step50}
Χωρίς υλικό επιφάνειας	1470	5412	1086	3998
6000	1547	5717	1143	4224
7000	1728	6442	1276	4759
8000	1909	7166	1410	5295
9000	2090	7891	1544	5830
10000	2271	8615	1678	6365

4.2 Προσομοίωση συστήματος γείωσης

Η διαδικασία προσομοίωσης συστήματος γείωσης με το λογισμικό CYMGrd, όταν συμβαίνει σφάλμα γης, περιλαμβάνει τα εξής:

- Ανάλυση εδάφους (Soil analysis module)
- Διαστασιολόγηση ηλεκτροδίων (Electrode sizing module)
- Ανάλυση συστήματος γείωσης (Grid analysis module)
- Εξαγωγή αποτελεσμάτων (Plotting module).

4.2.1 Ανάλυση Εδάφους (Soil Analysis Module)

Στο λογισμικό CYMGrd εισάγονται οι μετρήσεις της ειδικής αντίστασης του εδάφους, επιλέγοντας ως επιθυμητό μοντέλο εδάφους το διστρωματικό, καθώς και διάφορες παράμετροι (π.χ. h_s , ρ_s , t_s) προκειμένου να καθοριστούν τα όρια ασφάλειας της βηματικής τάσης και της τάσης επαφής.

Όπως προαναφέρθηκε το μοντέλο εδάφους (δύο στρώματα) που προέκυψαν από μετρήσεις σε διάφορες θέσεις εντός του πάρκου είναι:

$$\rho_1=5579 \Omega\text{m}, \rho_2=2022 \Omega\text{m}, h=6.2 \text{ m}.$$

4.2.2 Διαστασιολόγηση Ηλεκτροδίων (Electrode Sizing Module)

Τον προσδιορισμό των ηλεκτρικών παραμέτρων του εδάφους ακολουθεί η διαστασιολόγηση των ηλεκτροδίων γείωσης. Ως υλικό, από το οποίο θα κατασκευαστούν οι μεταλλικές βάσεις των ΦΒ πάνελ, έχει επιλεγεί ο γαλβανισμένος χάλυβας, ο οποίος παρουσιάζει αρκετά υψηλή αγωγιμότητα και ιδιαίτερη αντοχή στη διάβρωση. Ο γαλβανισμένος χάλυβας βρίσκεται εντός σκυρόδεμα διαμέτρου 0.25 m εντός του εδάφους. Επομένως, το υλικό των ηλεκτροδίων γείωσης πρέπει να είναι χαλκός ή επιχαλκωμένος χάλυβας για την αποφυγή της διάβρωσής του.

Όπως προκύπτει από την ανάλυση του λογισμικού CYMGrd (Σχήμα 15), η ελάχιστη απαιτούμενη διαστασιολόγηση προκύπτει ίση με 3.5 mm². Η ελάχιστη εμπορικά διαθέσιμη διάμετρος είναι 8 mm (~50 mm²) και είναι αυτή που επιλέγεται.

Parameters

Bus ID	Unknown
LG Fault Current	950 amps
Fault Duration	1 secs
Ambient Temperature	40 °C

Output Results

Decrement Factor	1.01579
------------------	---------

Conductor Sizing (Minimum required)

Material	Conductivity (%)	Tm (°C)	Kf	Area (mm ²)	Nominal Size
Copper commercial hard-drawn	97	1084	7.06809	3.45537	2/0AWG

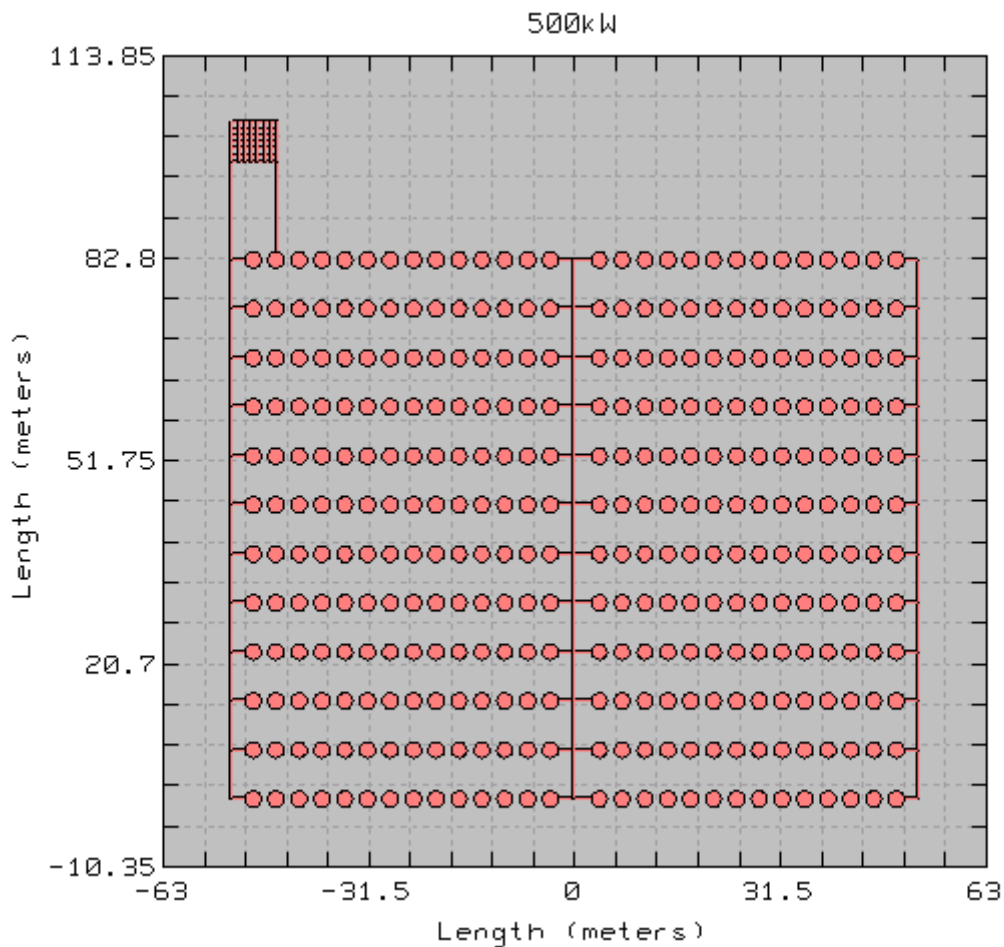
Σχήμα 15. Αναφορά διαστασιολόγησης ηλεκτροδίων από το λογισμικό CYMGrd (ελάχιστη επιφάνεια διατομής, επιλέγεται η αμέσως επόμενη εμπορικά διαθέσιμη διατομή).

4.2.3 Ανάλυση Πλέγματος Γείωσης (Grid Analysis Module) – Αρχική Σχεδίαση

Μετά τη διαστασιολόγηση των αγωγών γείωσης έπεται η σχεδίαση του συστήματος γείωσης. Προκειμένου να εισαχθούν οι πάσσαλοι των πάνελ, οι οποίοι συμπεριφέρονται ως βοηθητικά ηλεκτρόδια γείωσης, στο λογισμικό CYMGrd καταχωρούνται οι συντεταγμένες τους (καταχώρηση ως ράβδος γείωσης), για τις οποίες επιλέγεται το είδος των ηλεκτροδίων: κύρια, διακριτά (δευτερεύοντα) ή επιστροφής. Τα κύρια ηλεκτρόδια διαχέουν το ρεύμα σφάλματος γης στο έδαφος, ενώ τα δευτερεύοντα είναι αγωγή στοιχεία θαμμένα που βρίσκονται κοντά στο σύστημα γείωσης, χωρίς όμως να συνδέονται με αυτό. Τέλος, τα ηλεκτρόδια επιστροφής αφορούν περιπτώσεις δύο συστημάτων γείωσης, οι οποίες γειτνιάζουν. Το ρεύμα που διαχέεται στο έδαφος από το ένα ηλεκτρόδιο, επιστρέφει στο μέσω του άλλου ηλεκτροδίου, τότε αυτό λαμβάνει το ρόλο του ηλεκτροδίου επιστροφής. Στην περίπτωση του ΦΒ πάρκου της μελέτης μας, τα ηλεκτρόδια είναι κύρια. Θεωρούνται ηλεκτρικά συνδεδεμένα μεταξύ τους πάνω από το έδαφος μέσω των βάσεων των ΦΒ πάνελ. Οι ράβδοι γείωσης (πάσσαλοι των πάνελ) είναι εγκιβωτισμένες σε σκυροδέμα (material encased) διαμέτρου 0.25 m (material thickness 0.125 m καθώς αναφέρεται σε ακτίνα), με την ειδική αντίσταση του σκυροδέματος να θεωρείται 90 Ωm, δηλαδή ίση με τη μέγιστη τιμή που αναφέρεται στο πρότυπο IEEE Std 80 [2].

Αρχικά με κριτήριο τη διατήρηση του κόστους κατασκευής στο ελάχιστο δυνατό προσφέροντας όμως την απαιτούμενη ασφάλεια σε περίπτωση σφάλματος γης, αξιοποιήθηκαν οι πάσσαλοι των πάνελ με τους ελάχιστους δυνατούς αγωγούς γείωσης. Για την ηλεκτρική σύνδεση των διαφορετικών σειρών πάνελ μεταξύ τους τοποθετήθηκαν οριζόντιοι αγωγοί γείωσης σε βάθος 0.5 m αριστερά, δεξιά και στο μέσο ανάμεσα στα πάνελ, όπως φαίνεται στο

Σχήμα 16. Έτσι συνδέθηκαν ηλεκτρικά και όλοι οι πάσσαλοι μεταξύ τους διαμορφώνοντας το σύστημα γείωσης. Η απόσταση των αγωγών δεξιά και αριστερά των πάνελ είναι 1 m από τα πάνελ για να μειωθούν κατά το δυνατόν οι τάσεις επαφής. Ο υποσταθμός γειώνεται με πλέγμα (προσομοιώνει τη θεμελιακή γείωσή του και τον περιμετρικό αγωγό, καθώς η σχεδίαση θεμελιακής γείωσης δεν είναι εφικτή στο CYMGrd) που εξέχει 1 m από την κάθε πλευρά του και έχει άνοιγμα 1 m x 1 m. Το πλέγμα αυτό συνδέεται με τη γείωση των πάνελ με δύο αγωγούς (Σχήμα 16) θαμμένους στα 0.5 m. Η χρήση δύο αγωγών γίνεται για λόγους ασφαλείας.



Σχήμα 16. Αρχική σχεδίαση συστήματος γείωσης του ΦΒ πάρκου με το λογισμικό CYMGrd (ελάχιστοι δυνατοί αγωγοί).

4.2.4 Προσομοίωση ΦΒ πάρκου με το CYMGrd – Αρχική Σχεδίαση

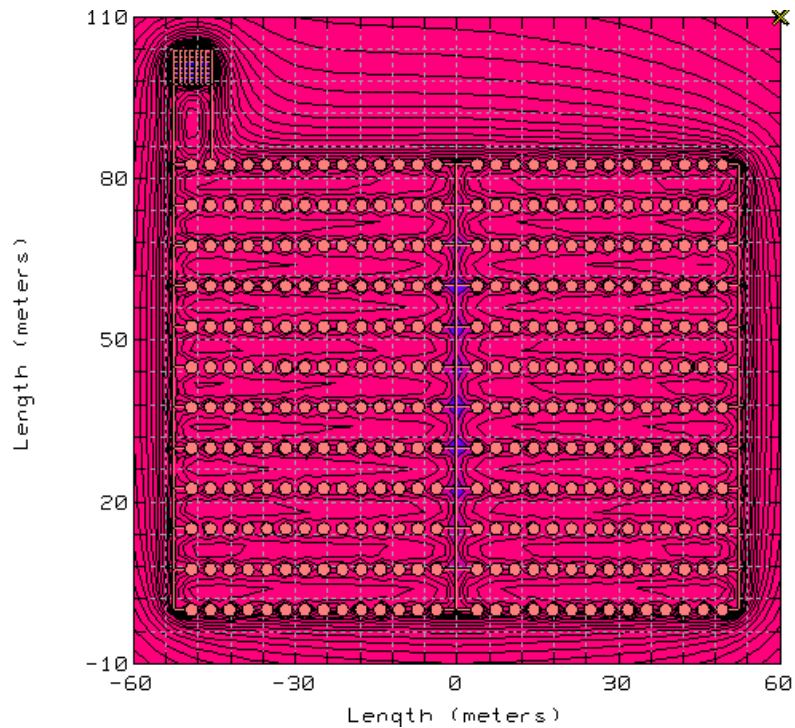
Έχοντας πραγματοποιήσει την καταχώριση όλων των δεδομένων στο λογισμικό CYMGrd για την αρχική σχεδίαση και ειδικότερα των ράβδων γείωσης (πάσσαλοι πάνελ), των οριζόντιων αγωγών γείωσης, του μοντέλου του εδάφους, του μέγιστου ρεύματος σφάλματος, στη συνέχεια πραγματοποιείται η ανάλυση του πλέγματος, τα αποτελέσματα της οποίας φαίνονται στην παρακάτω εικόνα (Σχήμα 17).

Parameters	
Equivalent Parallel Z Spec.	Infinite Z
Nominal Frequency	50 hz
Bus ID	20 kV
LG Fault Current	950 amps
Remote Contribution	100 %
Upper Layer Thickness	6.2 meters
Upper Layer Resistivity	5579 ohm-m
Lower Layer Resistivity	2022 ohm-m
Rod Encasement Resistivity	90 ohm-m
Output Results	
Ground Potential Rise	13748.1 volts
Calculated Ground Resistance	14.4696 ohms
Equivalent Impedance	14.4487 ohms

Σχήμα 17. Αποτελέσματα αρχικής σχεδίασης (ελάχιστοι δυνατοί αγωγοί) συστήματος γείωσης του ΦΒ πάρκου με το λογισμικό CYMGrd.

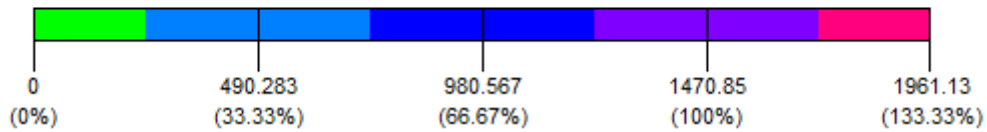
Σύμφωνα με την προσομοίωση, η αντίσταση γείωσης ανέρχεται σε 14.47 Ω, με την ανύψωση του δυναμικού GPR να είναι ίση με 13748.1 V.

Το Σχήμα 18 απεικονίζει τις τάσεις επαφής στο ΦΒ πάρκο που αναπτύσσονται σε περίπτωση σφάλματος γης. Είναι σημαντικό ότι οι τάσεις επαφής πρέπει να ελέγχονται κοντά σε γειωμένα μεταλλικά αντικείμενα και συγκεκριμένα σε απόσταση έως και 1 m μακριά από κάθε αντικείμενο (χειρότερη περίπτωση). Είναι φανερό ότι σε όλο το πάρκο το όριο των 1470 V χωρίς υλικό επιφανείας (Πίνακας 4) δεν ικανοποιείται. Μάλιστα ακόμα και με τη χρήση υλικού επιφανείας πολύ μεγάλης ειδικής αντίστασης (10000 Ωm, Πίνακας 4) δεν επιτυγχάνεται ασφάλεια. Αυτό φαίνεται και από το Σχήμα 19 που αναφέρεται στη διαγώνιο του ΦΒ πάρκου. Άρα θα γίνει τροποποίηση της αρχικής σχεδίασης και θα αυξηθούν τα ηλεκτρόδια γείωσης.

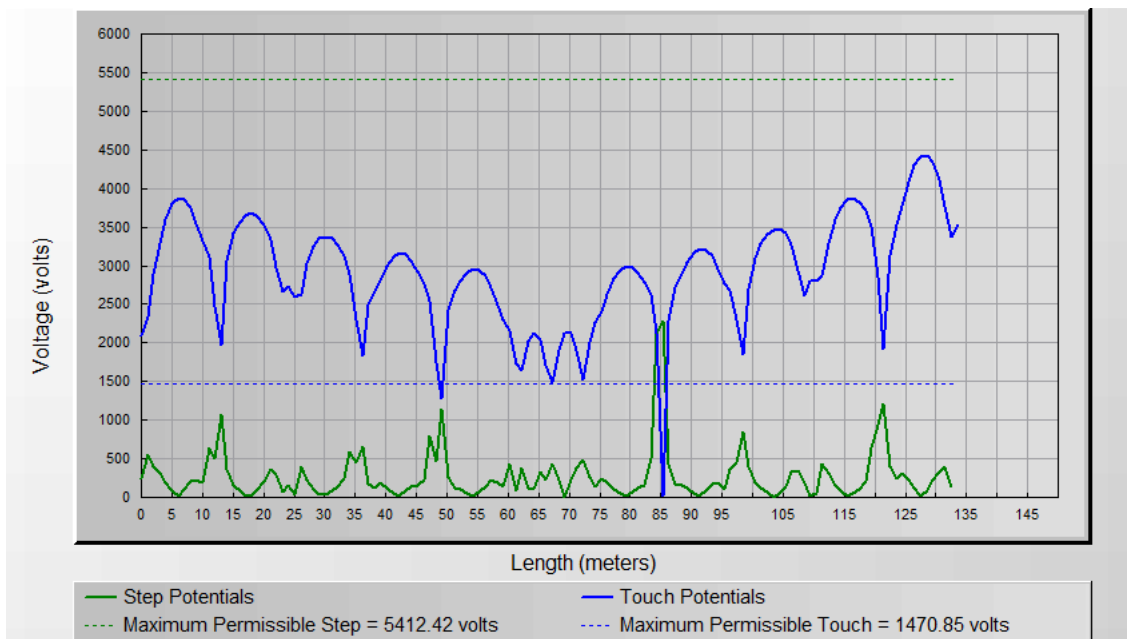


Potential Thresholds

Maximum Permissible Touch 1470.85 volts



Σχήμα 18. Τάσεις επαφής για την αρχική σχεδίαση (ελάχιστοι δυνατοί αγωγοί) συστήματος γείωσης του ΦΒ πάρκου με το λογισμικό CYMGrd.



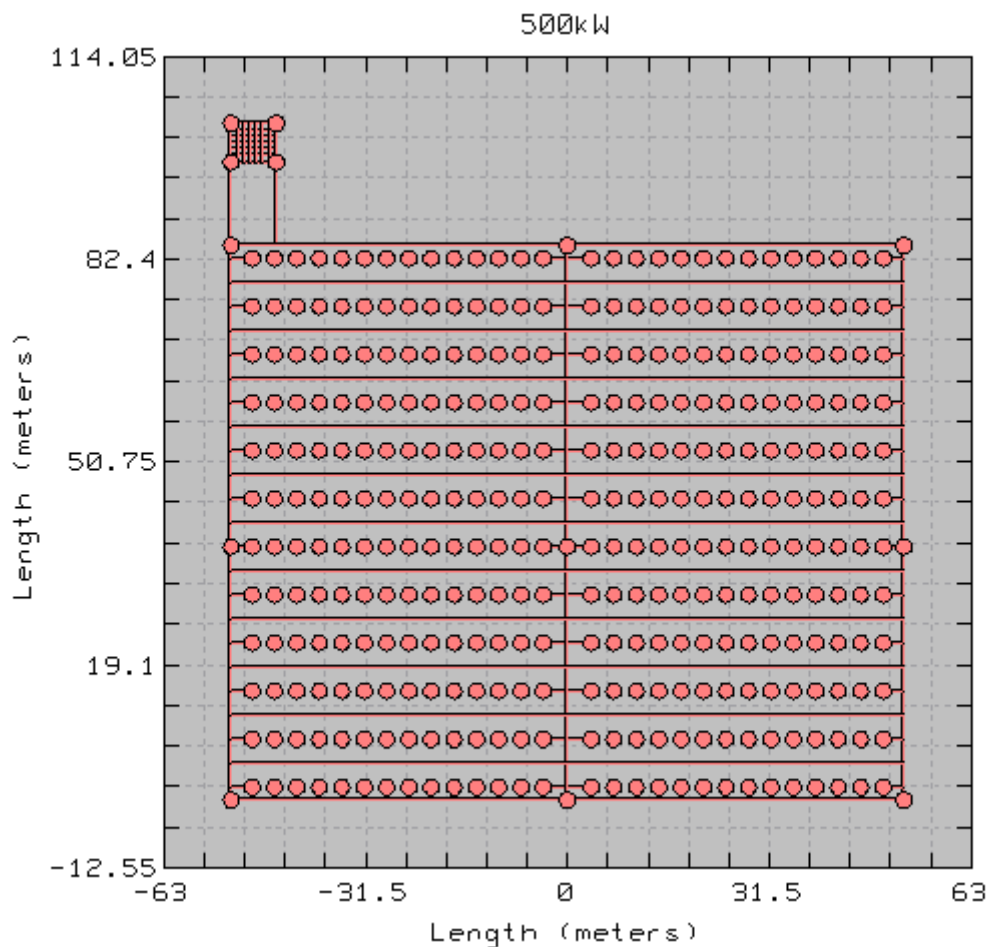
Σχήμα 19. Τάσεις επαφής, βηματικές τάσεις και τα επιτρεπτά όρια για την αρχική σχεδίαση (ελάχιστοι δυνατοί αγωγοί) συστήματος γείωσης του ΦΒ πάρκου με το λογισμικό CYMGrd. Διαγώνιος του πάρκου από επάνω αριστερά προς κάτω δεξιά.

4.2.4 Ανάλυση Πλέγματος Γείωσης (Grid Analysis Module) και Προσομοίωση – Τελική Σχεδίαση

Με βάση τα παραπάνω αποτελέσματα τροποποιήθηκε η σχεδίαση και μετά από δοκιμές βρέθηκε ότι για να ικανοποιούνται τα επιτρεπτά όρια των τάσεων επαφής και των βηματικών τάσεων πρέπει να:

- προστεθούν οριζόντιοι αγωγοί γείωσης ανάμεσα στις σειρές των πάνελ και επάνω και κάτω από τις τελευταίες σειρές,
- χρησιμοποιηθούν 13 βαθιές ράβδοι γείωσης (15 m μήκος) και αυτές να εγκατασταθούν μέσα σε βελτιωτικό υλικό πολύ χαμηλής ειδικής αντίστασης (όπως είναι ο μπετονίτης).

Τα παραπάνω φαίνονται στο Σχήμα 20. Από τα Σχήματα 21-23 που δείχνουν τα αποτελέσματα της προσομοίωσης της τελικής σχεδίασης, φαίνεται ότι η αντίσταση γείωσης μειώνεται σε 10.4 Ω και το GPR σε 9886.99 V. Οι τάσεις επαφής είναι πλέον εντός του επιτρεπτού ορίου. Επομένως η σχεδίαση αυτή ικανοποιεί το πρότυπο IEEE Std 80.



Σχήμα 20. Τελική σχεδίαση συστήματος γείωσης του ΦΒ πάρκου με το λογισμικό CYMGrd.

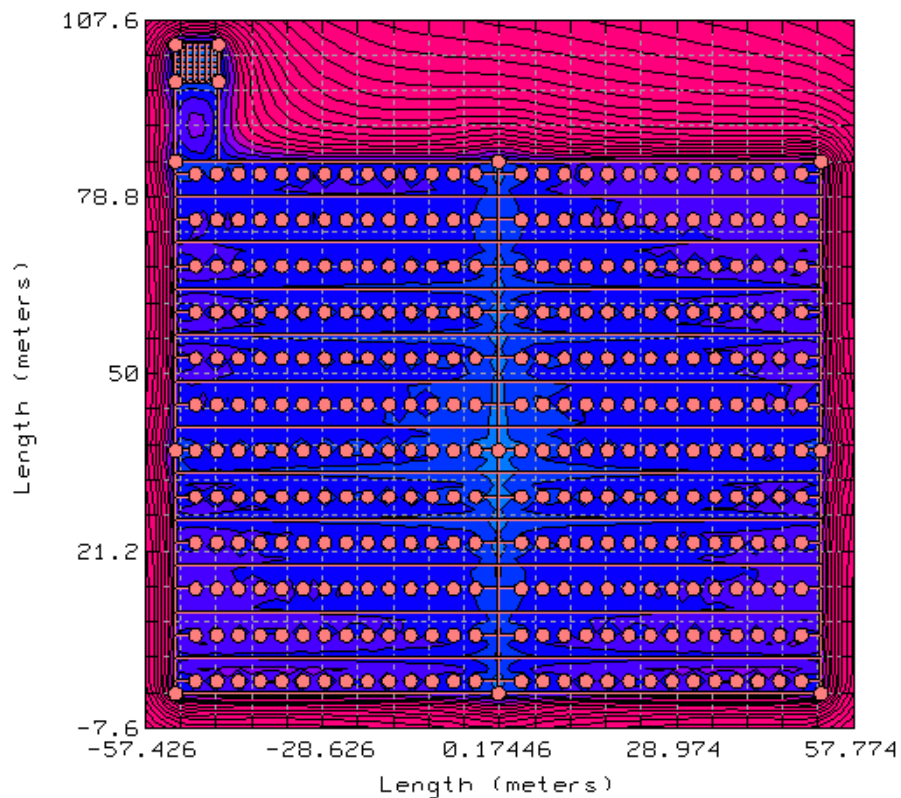
Parameters

Equivalent Parallel Z Spec.	Infinite Z
Nominal Frequency	50 hz
Bus ID	20 kV
LG Fault Current	950 amps
Remote Contribution	100 %
Upper Layer Thickness	6.2 meters
Upper Layer Resistivity	5579 ohm-m
Lower Layer Resistivity	2022 ohm-m
Rod Encasement Resistivity	90 ohm-m

Output Results

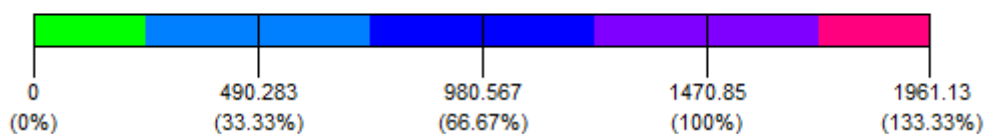
Ground Potential Rise	9886.99 volts
Calculated Ground Resistance	10.4016 ohms
Equivalent Impedance	10.3908 ohms

Σχήμα 21. Αποτελέσματα τελικής σχεδίασης συστήματος γείωσης του ΦΒ πάρκου με το λογισμικό CYMGrd.

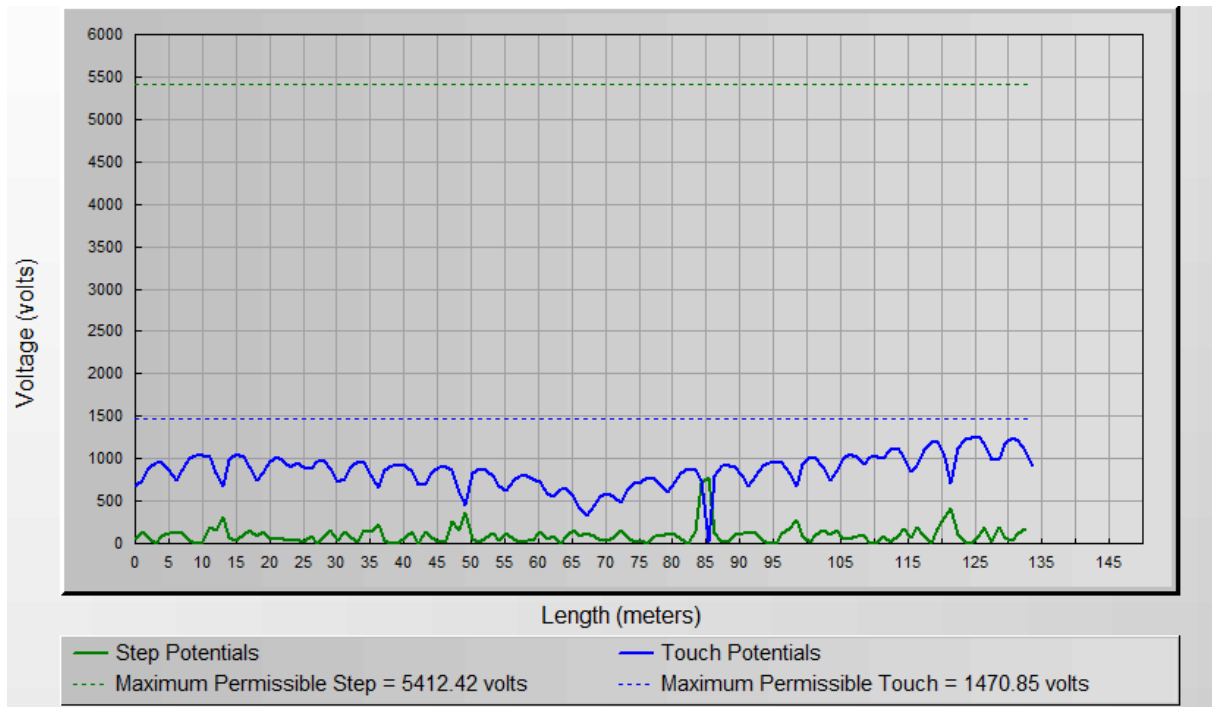


Potential Thresholds

Maximum Permissible Touch 1470.85 volts



Σχήμα 22. Τάσεις επαφής για την τελική σχεδίαση συστήματος γείωσης του ΦΒ πάρκου με το λογισμικό CYMGrd.



Σχήμα 23. Τάσεις επαφής, βηματικές τάσεις και τα επιτρεπτά όρια για την τελική σχεδίαση συστήματος γείωσης του ΦΒ πάρκου με το λογισμικό CYMGrd. Διαγώνιος του πάρκου από επάνω αριστερά προς κάτω δεξιά.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Το σύστημα γείωσης των φωτοβολταϊκών (ΦΒ) πάρκων είναι απαραίτητο στοιχείο για την ασφάλεια του προσωπικού και γενικά ατόμων μέσα και έξω από τον χώρο του ΦΒ πάρκου έναντι σφαλμάτων γης. Τα σφάλματα αυτά, αν δεν προσφέρεται η απαιτούμενη ασφάλεια από το σύστημα γείωσης, μπορεί να έχουν ως αποτέλεσμα την πρόκληση θανατηφόρου ηλεκτροπληξίας. Η πτυχιακή εργασία αυτή αφορά τη σχεδίαση του συστήματος γείωσης ενός ΦΒ πάρκου 500 kW που συνδέεται στο εναέριο δίκτυο της Μέσης Τάσης (20 kV). Η σχεδίαση αυτή πραγματοποιήθηκε μέσω του διεθνούς προτύπου IEEE Std 80.

Κατά την υλοποίηση της μελέτης γείωσης ενός ΦΒ πάρκου πρέπει να αξιοποιηθούν οι πάσσαλοι που στηρίζουν τα φωτοβολταϊκά πάνελ στο έδαφος και η θεμελίωσή τους ως ηλεκτρόδια γείωσης για λόγους μείωσης κόστους. Για την μελέτη του ΦΒ πάρκου της παρούσας εργασίας αξιοποιήθηκαν οι γαλβανισμένοι χαλύβδινοι πάσσαλοι, οι οποίοι εγκιβωτίστηκαν σε σκυρόδεμα, με το μήκος του μέσα στο έδαφος να είναι 1.2 m. Πρέπει να εξασφαλιστεί ότι όλοι οι πάσσαλοι είναι αγωγίμα συνδεδεμένοι μεταξύ τους. Αυτό γίνεται με τα ελάχιστα δυνατά οριζόντια ηλεκτρόδια γείωσης με τουλάχιστον δύο διαδρομές σύνδεσης σε κάθε περίπτωση. Αυτά τα ηλεκτρόδια τοποθετούνται στις πλευρές του πάρκου σε απόσταση 1 m από τα πάνελ για να μειωθούν οι τάσεις επαφής. Έτσι προκύπτει η αρχική σχεδίαση.

Για τα ΦΒ που συνδέονται στη Μέση Τάση, το πλέον επικίνδυνο σφάλμα γης είναι το μονοφασικό σφάλμα ως προς τη γη στους ζυγούς των 20 kV του γενικού πίνακα μέσης τάσης του ΥΣ. Στην περίπτωση του πάρκου αυτής της εργασίας το πλέον επικίνδυνο ρεύμα σφάλματος είναι 950 A με χρονική διάρκεια το 1 s.

Η προσομοίωση της αρχικής σχεδίασης έδειξε ότι δεν επαρκεί στην περίπτωση που εξετάζεται κυρίως λόγω της μεγάλης ειδικής αντίστασης της πρώτης στρώσης του εδάφους (5579 Ωm). Γι' αυτό σχεδιάστηκε νέο σύστημα με οριζόντιους αγωγούς γείωσης ανάμεσα και εκτός των σειρών των πάνελ και με βαθιές ράβδους γείωσης (13 ράβδοι των 15 m) σε διάφορα σημεία. Οι ράβδοι αυτές βρίσκονται μέσα σε βελτιωτικό υλικό μεγάλης αγωγιμότητας και φτάνουν στη δεύτερη στρώση του εδάφους που έχει μικρότερη ειδική αντίσταση (από τα 6.2 m και κάτω, 2022 Ωm). Έτσι μειώθηκε η αντίσταση γείωσης του ΦΒ πάρκου, η ανύψωση δυναμικού GPR και επομένως οι τάσεις επαφής και οι βηματικές τάσεις. Οι τάσεις επαφής μειώθηκαν επίσης γιατί αυξήθηκε το δυναμικό επιφανείας του εδάφους λόγω των οριζόντιων ηλεκτροδίων. Η σχεδίαση αυτή βρέθηκε σύμφωνη με το πρότυπο IEEE Std 80 και προσφέρει την απαιτούμενη ασφάλεια.

Γενικότερα, εφόσον οι τάσεις επαφής και οι βηματικές τάσεις ξεπερνούν τα μέγιστα επιτρεπτά όρια ασφαλείας θα πρέπει να αναληφθούν όλες εκείνες οι διορθωτικές ενέργειες στην κατεύθυνση της επανασχεδίασης του συστήματος γείωσης, προκειμένου να επιτευχθεί η μείωση των απαγορευτικών αυτών τιμών. Κάτι τέτοιο μπορεί να επιτευχθεί είτε με την αύξηση των ηλεκτροδίων γείωσης (ράβδοι και οριζόντιοι αγωγοί) είτε με κατάλληλη μετατόπισή τους είτε με τη χρησιμοποίηση υλικού επιφανείας μεγάλης ειδικής αντίστασης στις περιοχές εκείνες που φαίνεται πως αντιμετωπίζεται πρόβλημα υπέρβασης των ανώτατων επιτρεπτών ορίων ασφαλείας. Τέλος, από τα αποτελέσματα φαίνεται ότι η ασφάλεια μπορεί να επιτευχθεί και με σχετικά μεγάλη τιμή της αντίστασης γείωσης (για μεγάλης έκτασης ΦΒ πάρκα), δηλαδή δεν μπορεί να οριστεί κάποιο όριο αντίστασης γείωσης και να συσχετιστεί με την παρεχόμενη ασφάλεια έναντι θανατηφόρου ηλεκτροπληξίας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Ζ. Δάτσιος, *Διερεύνηση του φαινομένου ιονισμού του εδάφους γύρω από συγκεντρωμένα συστήματα γείωσης: Επίδραση στην κεραυνική συμπεριφορά εναέριων γραμμών μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας*. Διδακτορική Διατριβή, ΑΠΘ., 2017.
- [2] IEEE Std 80-2013 (Revision of IEEE Std 80-2000), *IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding*, May 2015.
- [3] Π. Ντοκόπουλος, *Ηλεκτρικές εγκαταστάσεις καταναλωτών μέσης και χαμηλής τάσης*, 2^η έκδοση, Εκδόσεις Ζήτη, 1992.
- [4] Π. Ντοκόπουλος, *Ηλεκτρικές Εγκαταστάσεις Καταναλωτών*, Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη, Ελλάδα, Ιανουάριος 2005.
- [5] Ε. Μαυρομάτη-Κακάνα, *Ασφαλής σχεδίαση συστήματος γείωσης φωτοβολταϊκού πάρκου*, Διπλωματική Εργασία, ΑΠΘ., 2012.
- [6] C. F. Dalziel, “Dangerous electric currents,” *AIEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. 65, pp. 579–585, pp. 1123–1124 1946.
- [7] B. Thapar, V. Gerez, and H. Kejriwal, “Reduction factor for the ground resistance of the foot in substation yards,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 9, no. 1, pp. 360–368, 1994.
- [8] Z. G. Datsios and P. N. Mikropoulos, “Safe grounding system design for a photovoltaic power station,” in *Proc. 8th Mediterranean Conference on Power Generation, Transmission, Distribution and Energy Conversion (MedPower)*, Cagliari, Italy, Oct. 2012, paper no. 62.
- [9] Ι. Φ. Γκόνοσ, Β. Θ. Κονταργύρη, Γ. Π. Φώτης, Ι. Α. Σταθόπουλος, και Γ. Α. Μάνος, «Σχεδίαση, ανάλυση και μέτρηση συστημάτων γείωσης σε αιολικά πάρκα», *Σύνοδος Ε.Ε CIGRE*, σελ. 201-208, 2005.
- [10] Π. Καραϊσάς, *Φωτοβολταϊκά συστήματα και ανανεώσιμες πηγές ενέργειας*, Ινστιτούτο Μικρών Επιχειρήσεων, Γενική Συνομοσπονδία Επαγγελματιών Βιοτεχνών Εμπόρων Ελλάδας, 2014.
- [11] Sunhunter.gr, Διπύσσαλη βάση στήριξης, [Σύνδεσμος](#), τελευταία πρόσβαση: Οκτώβριος 2022.
- [12] Eurodrill, Πασσαλόμπηξη για βάσεις Φωτοβολταϊκών, [Σύνδεσμος](#), τελευταία πρόσβαση: Οκτώβριος 2022.
- [13] Αφοί Μιχαλόπουλοι Α.Β.Ε.Ε., Βάσεις στήριξης φωτοβολταϊκών, [Σύνδεσμος](#), τελευταία πρόσβαση: Οκτώβριος 2022.
- [14] Οδηγός Μελέτης και Υλοποίησης Φωτοβολταϊκών Έργων, Μόνιμη Επιτροπή Ενέργειας, (Πόρισμα Ομάδας Εργασίας του ΤΕΕ/ΤΚΜ όπως εγκρίθηκε με την απόφαση Α159/Σ9/11.04.2011 της Διοικούσας Επιτροπής).