



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

**ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ**

**ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ**

**Μελέτη Επαγόμενων Υπερτάσεων Λόγω Κεραυνικού
Πλήγματος σε Φωτοβολταϊκά Συστήματα**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ Σ. ΣΑΜΠΑΝΗΣ

Επ. Καθηγητής: Ιωάννης Φ. Γκόνος
Επιβλέπουσα: Κατερίνα Δ. Δαμιανάκη

Αθήνα, Οκτώβριος 2017



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

**ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ**

**ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ**

**Μελέτη Επαγόμενων Υπερτάσεων Λόγω Κεραυνικού
Πλήγματος Σε Φωτοβολταϊκά Συστήματα**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ Σ. ΣΑΜΠΑΝΗΣ

Επ. Καθηγητής: Ιωάννης Φ. Γκόνος

Επιβλέπουσα: Κατερίνα Δ. Δαμιανάκη

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την Οκτωβρίου 2017

.....

Ιωάννης Φ. Γκόνος

Επ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....

Ιωάννης Αθ. Σταθόπουλος

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....

Φραγκίσκος Β. Τοπαλής

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2017

.....
Κωνσταντίνος Σ. Σαμπάνης

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

Copyright © Κωνσταντίνος Σ. Σαμπάνης, 2017

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία αποτελεί μία μελέτη των επιπτώσεων που επιφέρει ένα κεραυνικό πλήγμα σε μία διάταξη φωτοβολταϊκών πλαισίων και πιο συγκεκριμένα των επαγόμενων υπερτάσεων στα καλώδια ισχύος.

Στο Κεφάλαιο 1 αναλύεται η ηλιακή ακτινοβολία με το φασματικό της περιεχόμενο και την πυκνότητα ισχύος που μεταφέρει. Στην συνέχεια περιγράφεται το φωτοβολταϊκό φαινόμενο, το οποίο συνίσταται στην μετατροπή την ηλιακής ακτινοβολίας απευθείας σε ηλεκτρική, επεξηγώντας τα δομικά στοιχεία που χρειάζονται για την πραγματοποίηση του φαινομένου, δηλαδή τους ημιαγωγούς με τις εσωτερικές διεργασίες τους, την δίοδο p-n με τον τρόπο λειτουργίας της ως απλό κυκλωματικό στοιχείο και τον τρόπο χρήσης της στη φωτοβολταϊκή μετατροπή όπως επίσης και το ισοδύναμο κύκλωμα μιας φωτιζόμενης διόδου. Στο κεφάλαιο περιγράφονται επιπλέον οι φωτοβολταϊκές διατάξεις, η χρήση των διόδων p-n για το σχηματισμό των φωτοβολταϊκών στοιχείων και εν συνεχεία των φωτοβολταϊκών πλαισίων με τον τρόπο που αυτά κατασκευάζονται. Το κεφάλαιο κλείνει προσθέτοντας στοιχεία για τα υπόλοιπα μέρη μιας φωτοβολταϊκής εγκατάστασης όπως οι βάσεις στήριξης των πλαισίων, τα καλώδια σύνδεσης και οι αναστροφείς.

Στο επόμενο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στα κεραυνικά πλήγματα και την αντικεραυνική προστασία. Στο Κεφάλαιο 2 περιγράφονται οι ατμοσφαιρικές εκκενώσεις αναλύοντας τα είδη τους, το τρόπο σχηματισμού και τις διάφορες φάσεις του κεραυνού καθώς και τις παραμέτρους που τις χαρακτηρίζουν. Ακόμη, περιγράφονται τα συστήματα αντικεραυνικής προστασίας (ΣΑΠ). Γίνεται αναφορά στους τρόπους αξιολόγησης των κινδύνων για τον προσδιορισμό της στάθμης προστασίας μιας εγκατάστασης και στην επιλογή κατάλληλου εσωτερικού και εξωτερικού συστήματος αντικεραυνικής προστασίας (ΣΑΠ) (απομονωμένο και μη απομονωμένο σύστημα, γωνία προστασίας και μέθοδος της κυλιόμενης σφαίρας, ισοδυναμικές συνδέσεις και συσκευές περιορισμού υπερτάσεων (SPDs)). Στο τέλος του κεφαλαίου παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά, τα είδη και οι τρόποι υπολογισμού της ειδικής αντίστασης του εδάφους.

Στο Κεφάλαιο 3 γίνεται μία βιβλιογραφική ανασκόπηση των επιστημονικών εργασιών και δημοσιευμένων άρθρων που αποτέλεσαν εναρκτήρια υποδομή του

θέματος της παρούσας εργασίας και παρουσιάζονται τα αποτελέσματά τους.

Το κύριο μέρος της εργασίας ξεκινά στο Κεφάλαιο 4. Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται η παρουσίαση του προβλήματος. Αναλύονται η βασική διάταξη, οι διατάξεις προσομοίωσης που χρησιμοποιήθηκαν για τους υπολογισμούς, τα χαρακτηριστικά, η μορφή και η θέση του κεραυνικού πλήγματος, τα υλικά των διατάξεων και το είδος του εδάφους που θεωρήθηκε.

Συνεχίζοντας, στο Κεφάλαιο 5 γίνεται αναλυτική περιγραφή και επεξήγηση των λειτουργιών και των εφαρμογών του λογισμικού πακέτου SES CDEGS που χρησιμοποιήθηκαν για την πραγματοποίηση των προσομοιώσεων.

Η παρουσίαση των αποτελεσμάτων βρίσκεται στο Κεφάλαιο 6. Περιγράφεται ο τρόπος εκλογής των σημείων που χρησιμοποιήθηκαν για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων στα καλώδια ισχύος και την μελέτη των περιπτώσεων. Παρατίθενται τα αποτελέσματα για κάθε περίπτωση και κάθε καλώδιο ξεχωριστά αλλά και συγκρίσεις μεταξύ των περιπτώσεων όσον αφορά τις μέγιστες εμφανιζόμενες υπερτάσεις αλλά και τη μεταβολή τους στο χρόνο.

Τέλος, στο Κεφάλαιο 7 συνοψίζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την μελέτη και την σύγκριση των αποτελεσμάτων και προτείνονται λύσεις για την ασφαλέστερη λειτουργία των φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων. Επίσης διατυπώνονται προτάσεις για μεταγενέστερη διερεύνηση του αντικειμένου.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά όλους όσους συνέβαλαν στην εκπόνηση της παρούσας εργασίας.

Τον κ. Ιωάννη Φ. Γκόνο, Επίκουρο Καθηγητή του τομέα Ηλεκτρονικών Βιομηχανικών Διατάξεων και Συστημάτων Αποφάσεων του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε με την ανάθεση της Διπλωματικής Εργασίας και την βοήθεια που μου παρείχε καθ' όλη την διάρκεια πραγματοποίησής της.

Την Κατερίνα Δ. Δαμιανάκη, Υποψήφια Διδάκτορα του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, για την συνεχή βοήθεια και καθοδήγηση στο διάστημα εκπόνησης της εργασίας καθώς και το άριστο κλίμα συνεργασίας που υπήρχε μεταξύ μας.

Όλο το προσωπικό του εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου για την εκτίμηση που μου έδειξαν όσο διάστημα βρισκόμουν μαζί τους.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου, τον πατέρα μου Στέφανο Ν. Σαμπάνη, την μητέρα μου Αικατερίνη Κ. Λιάκου καθώς και τον αδερφό μου Νικόλαο Σ Σαμπάνη, για την προσπάθεια και την στήριξη που μου παρείχαν όλα αυτά τα χρόνια σπουδών καθώς και τους φίλους μου για την συμπαράστασή τους.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία πραγματεύεται την μελέτη των επιπτώσεων που προέρχονται από κεραυνικά πλήγματα σε συστήματα φωτοβολταϊκής μετατροπής. Πιο συγκεκριμένα εξετάζονται οι επαγόμενες υπερτάσεις που αναπτύσσονται στα καλώδια ισχύος των συστοιχιών των φωτοβολταϊκών πλαισίων που καταλήγουν στον αναστροφέα. Μέσω του πακέτου λογισμικού SES CDEGS έγινε σχεδιασμός φωτοβολταϊκής εγκατάστασης $10kW_p$ και προσομοίωση πρόσπτωσης κεραυνικού πλήγματος σε έξι περιπτώσεις διασύνδεσης των φωτοβολταϊκών πλαισίων. Τα χαρακτηριστικά του κεραυνικού πλήγματος και των καλωδίων ισχύος, οι βάσεις στήριξης, τα πλαίσια και το σύστημα αντικεραυνικής προστασίας αποτέλεσαν τις σταθερές παραμέτρους των προσομοιώσεων. Η διαφοροποίηση των εξεταζόμενων περιπτώσεων έγκειται στην ειδική αντίσταση του εδάφους καθώς και στους σχηματιζόμενους βρόχους των καλωδίων που συνδέουν τα πλαίσια σε δύο συστοιχίες των είκοσι (20) πάνελ. Μελετούνται οι μέγιστες εμφανιζόμενες υπερτάσεις κατά μήκος των καλωδίων καθώς και η μεταβολή των υπερτάσεων με την πάροδο του χρόνου στα άκρα της διάταξης όπου βρίσκεται ο αναστροφέας. Επιπλέον πραγματοποιείται σύγκριση μεταξύ των διαφόρων διατάξεων όσον αφορά τις μέγιστες εμφανιζόμενες υπερτάσεις. Τέλος, τα αποτελέσματα αναμένεται να αποτελέσουν αρωγή στη σχεδίαση Φ/Β συστημάτων, αυξάνοντας την αξιοπιστία τους και συντελώντας στη βελτίωση της κεραυνικής συμπεριφοράς τους.

Λέξεις κλειδιά: Φωτοβολταϊκά συστήματα, κεραυνικό πλήγμα, επαγόμενες υπερτάσεις, αντικεραυνική προστασία, αναστροφείς, CDEGS

ABSTRACT

This Diploma Thesis deals with the study of the effects of lightning strikes on photovoltaic systems. More specifically, the induced overvoltages developed in the power cables of the PV arrays ending in the inverter are examined. Through the SES CDEGS software package, a 10kWp photovoltaic installation was designed and six alternative cases of photovoltaic modules interconnection hit by a lightning strike were simulated. The lightning strikes and power cables characteristics, the PV structural base, the module frames and the lightning protection system were the fixed parameters of the simulations. The differentiation of the cases under consideration lies in the soil resistivity as well as in the loops formed of the panel connecting cables in two arrays of the twenty (20). The maximum induced overvoltages developed along the wires are studied, as well as the change of overvoltages over time near the inverter. In addition, a comparison is made between the various provisions regarding the maximum occurring overvoltages. Finally, the results are expected to assist in the design of PV systems, increasing their reliability and helping to improve their lightning performance.

Keyword: Photovoltaic installations, lighting surge, induced overvoltages, lightning surge protection, CDEGS

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ	5
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	7
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	9
ABSTRACT	11
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ	13
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Φωτοβολταϊκά Συστήματα	15
1.1 Ηλιακή Ενέργεια.....	15
1.2 Φωτοβολταϊκό Φαινόμενο.....	18
Ημιαγωγοί προσμίξεων.....	18
Δίοδος p-n.....	20
Φωτοβολταϊκή μετατροπή.....	23
Ισοδύναμο κύκλωμα μιας φωτιζόμενης διόδου p-n.....	26
1.3 Φωτοβολταϊκές Διατάξεις.....	26
Φωτοβολταϊκό στοιχείο.....	27
Φωτοβολταϊκό πλαίσιο.....	30
1.4 Εγκατάσταση Φωτοβολταϊκών Συστημάτων.....	32
Βάσεις στήριξης.....	32
Καλωδιώσεις.....	35
Αναστροφείς.....	38
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Κεραυνικά Πλήγματα και Αντικεραυνική Προστασία	47
2.1 Ατμοσφαιρικές Εκκενώσεις.....	47
2.2 Συστήματα Αντικεραυνικής Προστασίας (ΣΑΠ).....	50
Αξιολόγηση κινδύνου και προσδιορισμός απαιτούμενου επιπέδου προστασίας ΣΑΠ.....	51
Εξωτερική εγκατάσταση αντικεραυνικής προστασίας.....	53
Εσωτερική εγκατάσταση αντικεραυνικής προστασίας.....	58
<i>Συσκευές Περιορισμού Υπερτάσεων (SurgeProtectiveDevices – SPDs)</i>	60
2.3 Ειδική Αντίσταση Εδάφους.....	62
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Βιβλιογραφική Ανασκόπηση	67
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Υπολογιστική Μελέτη	75
4.1 Η Βασική Διάταξη.....	75
4.2 Οι Διατάξεις Προσομοίωσης.....	77
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Λογισμικό CDEGS	87
5.1 Εκκίνηση Προγράμματος.....	87
5.2 Ευθύς μετασχηματισμός Fourier του κεραυνικού ρεύματος.....	89
Εισαγωγή δεδομένων στον επιλύτη FFTSES για ευθύ μετασχηματισμό Fourier.....	89
Προσομοίωση και εξαγωγή αποτελεσμάτων στον επιλύτη FFTSES για ευθύ μετασχηματισμό Fourier.....	91
5.3 Απόκριση συστήματος στο πεδίο της συχνότητας.....	93
Εισαγωγή δεδομένων στον επιλύτη HIFREQ.....	93
Προσομοίωση και εξαγωγή αποτελεσμάτων στον επιλύτη.....	98
5.4 Απόκριση στο πεδίο του χρόνου. Ανάστροφος μετασχηματισμός Fourier.....	100
Υπολογισμός ανάστροφου μετασχηματισμού Fourier στον επιλύτη FFTSES.....	100
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Αποτελέσματα Προσομοιώσεων	103
6.1 Επιλογή των Σημείων Εξέτασης.....	103
6.2 Εξέταση Περιπτώσεων Μεμονωμένα.....	110

6.3 Σύγκριση Περιπτώσεων.....	125
Σύγκριση περιπτώσεων ανά δύο.....	125
Σύγκριση όλων των περιπτώσεων.....	131
6.4 Ζεύγος A Στο Χρόνο.....	132
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: Συμπεράσματα.....	141
Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.....	142
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	145
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	149

Φωτοβολταϊκά Συστήματα

1.1 Ηλιακή Ενέργεια

Ο ήλιος είναι μια αστείρευτη πηγή ενέργειας η οποία είναι υπεύθυνη για την ύπαρξη ζωής πάνω στον πλανήτη καθώς είναι ο πρωτογενής ενεργειακός τροφοδότης όλων των φυσικών, χημικών και βιολογικών διεργασιών που λαμβάνουν χώρα στη Γη. Η ισχύς που λαμβάνει η Γη από τον ήλιο είναι της τάξης των 10^{11} MW, η οποία είναι χιλιάδες φορές μεγαλύτερη από τον τωρινό ρυθμό παραγωγής ενέργειας από συμβατικές μορφές όπως το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο. Έτσι, θεωρητικά, η ηλιακή ενέργεια θα μπορούσε να τροφοδοτήσει τις όποιες ενεργειακές ανάγκες του κόσμου σε συνεχή βάση [2, 3].

Πέραν του μεγέθους της και της αδιάκοπης παροχής της προς τη Γη, η ηλιακή ενέργεια είναι μια περιβαλλοντικά καθαρή μορφή ενέργειας που βρίσκει χρήση σε πολλές εφαρμογές από επίγειες, τόσο σε μικρή όσο και μεγάλη κλίμακα, έως διαστημικές. Οι εγκαταστάσεις που δεσμεύουν και αξιοποιούν την ηλιακή ενέργεια είναι αθόρυβες, με χαμηλά κόστη συντήρησης ενώ η εξέλιξη της τεχνολογίας μειώνει όλο και περισσότερο το κόστος κατασκευής τους κάνοντας την ηλιακή ενέργεια πιο προσιτή για οικιακές εφαρμογές [2, 3].

Στον αντίποδα, ο ανά μονάδα επιφάνειας ρυθμός ροής της ηλιακής ενέργειας, ή διαφορετικά η πυκνότητας ισχύος, ακόμα και στις πιο θερμές περιοχές του πλανήτη δεν ξεπερνά το 1 kW/m^2 . Κάτι τέτοιο έχει ως συνέπεια να απαιτούνται μεγάλες επιφάνειες συλλογής σε πολλές εφαρμογές αυξάνοντας το κόστος τους. Ένα δεύτερο πρόβλημα είναι πως η διαθεσιμότητα της ηλιακής ακτινοβολίας ποικίλει με το χρόνο. Αιτίες είναι ο κύκλος μέρας-νύχτας, η αλλαγή των εποχών καθώς και τοπικά καιρικά φαινόμενα στη περιοχή εγκατάστασης των συστημάτων. Τέτοιες διακυμάνσεις επιβάλλουν πολλές φορές την αποθήκευση της παραγόμενης ενέργειας για μελλοντική χρήση προσθέτοντας επιπλέον κόστος στην εκάστοτε εφαρμογή και κάνοντας τις πολλές φορές

να φτάνουν σε ασύμφορα μεγάλες τιμές [2, 3].

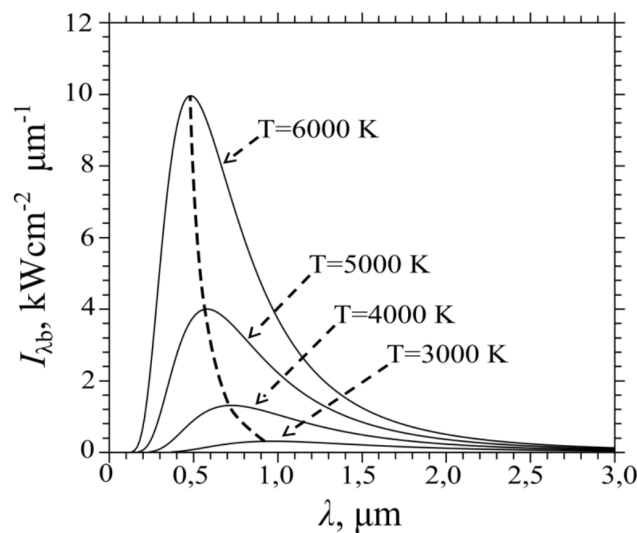
Η ενέργεια αυτή μεταφέρεται στη Γη μέσω του φωτός. Το φως είναι ηλεκτρομαγνητικά κύματα που διαδίδονται στο χώρο κατά στοιχειώδη ποσά, τα κβάντα, ή φωτόνια. Όντας κύματα, χαρακτηρίζονται από μια συγκεκριμένη συχνότητα και ένα αντίστοιχο μήκος κύματος. Το σύνολο των συχνοτήτων ή των μηκών κύματος που εμπεριέχονται στην ηλιακή ακτινοβολία αποκαλείται φάσμα. Η ενέργεια ενός φωτονίου έχει άμεση σχέση με τη συχνότητα και υπολογίζεται ως:

$$E = h \cdot f \quad (1.1)$$

όπου E η ενέργεια του φωτονίου, h η σταθερά του Planck ($6.63 \cdot 10^{-34} J \cdot s$) και f η συχνότητα. Η δε συχνότητα συνδέεται με το μήκος κύματος, λ , μέσω της εξίσωσης:

$$c = f \cdot \lambda \quad (1.2)$$

όπου c η ταχύτητα του φωτός [1].



Σχήμα 1.1: Η φασματική απόκριση της πυκνότητας ισχύος ενός μέλανος σώματος που βρίσκεται σε θερμοκρασία T [3]

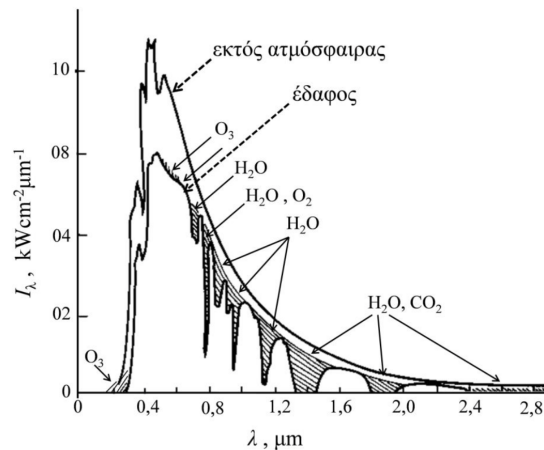
Κάθε σώμα ακτινοβολεί “φως” ανάλογα με τη θερμοκρασία στην οποία βρίσκεται. Η ποσότητα της εκπεμπόμενης ισχύος και η φασματική κατανομή του φωτός εξαρτώνται κύρια από τη θερμοκρασία του σώματος και, κατά δεύτερο λόγο, από τη δομή, το υλικό ή τις επιφανειακές ιδιότητές του. Η εξάρτηση της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας από τη

θερμοκρασία του σώματος φαίνεται στο Σχήμα 1.1 με τη φασματική απόκριση της πυκνότητας ισχύος να δίδεται μέσω του νόμου του Planck:

$$I(\lambda, T) = \frac{2\pi \cdot h \cdot c^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{h \cdot c / \lambda \cdot k \cdot T} - 1} \quad (1.3)$$

όπου I η πυκνότητα ισχύος σε W ανά m² και ανά m μήκους κύματος, T η θερμοκρασία σε Kelvin, h η σταθερά του Planck, c η ταχύτητα του φωτός, λ το μήκος κύματος της ακτινοβολίας και k η σταθερά Boltzmann ($1.38 \cdot 10^{-23} J/K$) [1].

Το φάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας εκτείνεται από την περιοχή των ακτίνων X ($\lambda < 0.01 \mu\text{m}$) μέχρι και πέραν του μακρινού υπερώθρου ($\lambda > 100 \mu\text{m}$). Ο ήλιος εκπέμπει κατά προσέγγιση ως μέλαν σώμα θερμοκρασίας ~6000K με το 39% της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας να εμπίπτει στην ορατή περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος που εκτείνεται από το βαθύ ιώδες (0.39μm) μέχρι το βαθύ υπεριώδες (0.76μm) ενώ το υπόλοιπο εκπέμπεται στο υπεριώδες (περίπου 8%) και το υπέρυθρο (περίπου 53%). Η ηλιακή ακτινοβολία που εισέρχεται στην ατμόσφαιρα εν μέρει απορροφάται μετατρέπόμενη σε θερμότητα κατά περίπου 70% από τα διάφορα στοιχεία όπως το νερό σε μορφή υδρατμών (H₂O), το όζον (O₃), το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂) και άλλα, ενώ ένα άλλο μέρος της σκεδάζεται ή ανακλάται πίσω στο διάστημα κατά περίπου 30% λόγω των διεπιφανειών διαφορετικής οπτικής πυκνότητας. Κατ' επέκταση το φασματικό περιεχόμενο της ηλιακής ακτινοβολίας ακριβώς έξω από την ατμόσφαιρα της γης και στην επιφάνεια του εδάφους παρουσιάζει διαφορές, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1.2 [3].



Σχήμα 1.2: Το ηλιακό φάσμα σε διαφορετικά ύψη και η φασματική απορρόφηση διαφόρων στοιχείων [3]

Η εκμετάλλευση και χρήση της ενέργειας του ήλιου πραγματοποιείται από συστήματα με παθητικό ή ενεργητικό χαρακτήρα. Τα παθητικά ηλιακά συστήματα βασίζονται αποκλειστικά σε φυσικές διεργασίες και σε αυτή την κατηγορία ανήκουν οι τεχνικές ή κατασκευές που προσαρμόζονται κατάλληλα στα κτίρια, ώστε να διευκολύνουν την καλύτερη εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας για την θέρμανση ή την ψύξη των εσωτερικών χώρων. Τέτοιες κατασκευές μπορούν να αξιοποιούν την θερμοχωρητικότητα των υλικών τους και η τυπική λειτουργία τους συνίσταται στο να απορροφούν και να αποθηκεύουν θερμότητα την ηλιόλουστη και ζεστή περίοδο της ημέρας και να την αποδίδουν στο χώρο κατά την ψυχρή. Στα ενεργητικά ηλιακά συστήματα ανήκουν κατασκευές που κάνουν χρήση ηλεκτρομηχανικών μέσων για την καλύτερη αξιοποίηση της θερμότητας του ήλιου. Κύρια εφαρμογή είναι η θέρμανση κάποιου υγρού, όπως το νερό, προκειμένου να χρησιμοποιηθεί είτε άμεσα είτε με έμμεσο τρόπο για την παραγωγή ηλεκτρισμού. Τόσο τα ενεργητικά όσο και τα παθητικά ηλιακά συστήματα εκμεταλλεύονται κυρίως την υπέρυθη περιοχή του φάσματος της ηλιακής ακτινοβολίας. Ένα επιπλέον σύστημα που θα μπορούσε να ταξινομηθεί στα ενεργητικά ηλιακά συστήματα είναι τα φωτοβολταϊκά πάνελ. Προς διαφοροποίησή των με τα υπόλοιπα ενεργητικά συστήματα, τα φωτοβολταϊκά πάνελ χρησιμοποιούν μέρος του ορατού φάσματος προς μετατροπή της ενέργειας σε ηλεκτρική μέσω του φωτοβολταϊκού φαινομένου [2, 4].

1.2 Φωτοβολταϊκό Φαινόμενο

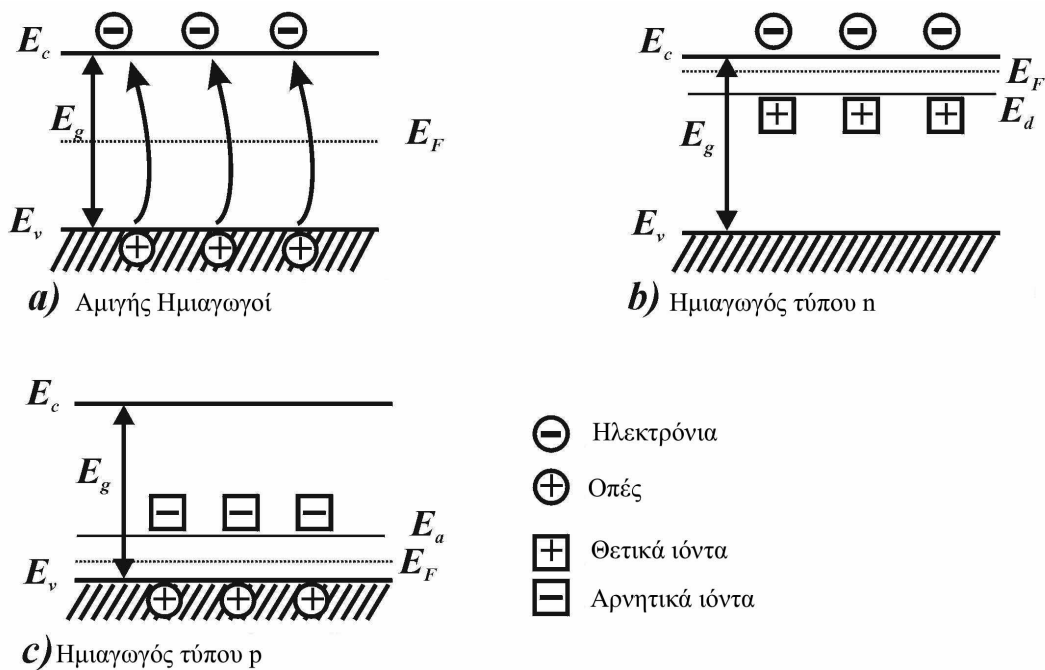
Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενη παράγραφο το φωτοβολταϊκό φαινόμενο συνίσταται στη μετατροπή μέρους του ορατού φάσματος της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρική ενέργεια. Η μετατροπή της φωτεινής ενέργειας σε ηλεκτρική γίνεται συνήθως με την απορρόφηση του φωτός από κατάλληλες διατάξεις, όπως η δίοδος p-n, και σε ειδικές περιπτώσεις χρησιμοποιείται η δίοδος Schottky (δεν θα αναλυθεί περαιτέρω στη παρούσα εργασία).

Ημιαγωγοί προσμίξεων

Ημιαγωγοί προσμίξεων είναι μία τάξη υλικών τα οποία έχουν την ιδιότητα μεταβολής της ηλεκτρικής τους αγωγιμότητας με την διάχυση προσμίξεων δοτών (D) ή αποδεκτών (A) εντός του υλικού. Οι δότες είναι στοιχεία τα οποία έχουν ένα επιπλέον

ηλεκτρόνιο από το υλικό στο οποίο εισχωρούν και μένει ελεύθερο να κινείται στη γύρω περιοχή, ενώ στους αποδέκτες λείπει ένα ηλεκτρόνιο το οποίο δεσμεύουν από το υλικό. Η απουσία αυτή του ηλεκτρονίου αποκαλείται “οπή” και θεωρείται πως έχει θετικό φορτίο. Κύριο συστατικό των διόδων p-n είναι το πυρίτιο (Si) από το οποίο κατασκευάζεται. Το πυρίτιο είναι χημικό στοιχείο με ατομικό αριθμό 14 και ανήκει στη 4η στήλη του περιοδικού πίνακα έχοντας τέσσερα ηλεκτρόνια στην εξωτερική στάθμη με τα οποία σχηματίζει τους χημικούς δεσμούς. Ημιαγωγοί με βάση το πυρίτιο δημιουργούνται με τη διάχυση προσμίξεων αποδεκτών από στοιχεία της 3ης στήλης του περιοδικού πίνακα, όπως το Βόριο (B), κατασκευάζοντας ημιαγωγούς τύπου p, ή προσμίξεων δοτών από στοιχεία της 5ης στήλης, όπως το Αρσενικό (As), κατασκευάζοντας ημιαγωγούς τύπου n [1, 5].

Σε κατάσταση ηρεμίας σε χαμηλή θερμοκρασία στο κρύσταλλο του πυριτίου όλα τα ηλεκτρόνια είναι δεσμευμένα στους χημικούς δεσμούς έχοντας χαμηλή ενέργεια και βρισκόμενα κάτω από τη ζώνη σθένους (E_v). Προκειμένου να καταστεί το υλικό αγώγιμο πρέπει να διασπαστεί ο ομοιοπολικός δεσμός και να δημιουργηθεί ένα ζεύγος οπής-ηλεκτρονίου με το ηλεκτρόνιο να δεσμεύει ενέργεια και να μεταβαίνει πάνω από τη ζώνη αγωγιμότητας (E_c) ξεπερνώντας το ενεργειακό διάκενο ($E_g = E_c - E_v$) (Σχ. 1.3) [1, 5].



Σχήμα 1.3: Διαγράμματα ενεργειακών καταστάσεων ημιαγωγών [23]

Όταν πραγματοποιηθεί η πρόσμιξη τα άτομα δοτών εισάγουν μια στάθμη κοντά στη ζώνη αγωγιμότητας, την στάθμη δοτών (E_d), και τα ηλεκτρόνια που βρίσκονται στη στάθμη αυτή μπορούν πολύ εύκολα να μεταβούν εντός της ζώνης σθένους λαμβάνοντας μικρή ενέργεια από το περιβάλλον και να κινούνται πλέον εντός όλου του υλικού και όχι μόνο γύρω από τη περιοχή του ατόμου δότη. Από την άλλη τα άτομα των αποδεκτών εισάγουν μία στάθμη κοντά στη ζώνη σθένους, την στάθμη αποδεκτών (E_a). Ηλεκτρόνια που βρίσκονται εντός της ζώνης σθένους δεσμεύονται από τα άτομα αποδέκτες αφήνοντας εντός της ζώνης σθένους μία οπή, η οποία κατ' αντιστοιχία με το ηλεκτρόνιο των δοτών, μπορεί πλέον να κινείται σε όλη την περιοχή του υλικού [1,5].

Δύο επιπλέον στάθμες που πρέπει να επισημανθούν είναι η στάθμη Fermi (E_F) που αντιπροσωπεύει την ενεργειακή στάθμη της οποίας η πιθανότητα να καταλαμβάνεται από ηλεκτρόνιο είναι ίση με $\frac{1}{2}$ καθώς και η στάθμη κενού (E_0) όπου ηλεκτρόνια πέραν της στάθμης αυτής μεταβαίνουν εκτός του υλικού, στον εξωτερικό χώρο. Η στάθμη Fermi μετατοπίζεται λόγω των προσμίξεων και στους μεν ημιαγωγούς τύπου p πλησιάζει την ζώνη σθένους ενώ στους δε ημιαγωγούς τύπου n προς τη ζώνη αγωγιμότητας. Ο υπολογισμός της στάθμης Fermi σε κάθε περίπτωση γίνεται ως εξής:

$$\begin{aligned} E_{Fi} &= \frac{E_G}{2} + \frac{k \cdot T}{2} \cdot \ln\left(\frac{N_V}{N_C}\right) && \text{για τους αμγείς ημιαγωγούς} \\ E_{Fn} &= E_C - k \cdot T \cdot \ln\left(\frac{N_C}{N_D}\right) && \text{για τους ημιαγωγούς τύπου n} \\ E_{Fp} &= E_V + k \cdot T \cdot \ln\left(\frac{N_V}{N_A}\right) && \text{για τους ημιαγωγούς τύπου p} \end{aligned} \quad (1.4)$$

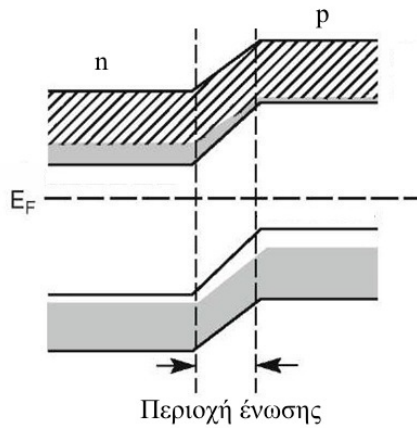
όπου E_G το ενεργειακό διάκενο, k η σταθερά Boltzmann, T η θερμοκρασία σε Kelvin, N_V η ενεργός πυκνότητα των ενεργειακών σταθμών στη ζώνη σθένους, N_C η ενεργός πυκνότητα των ενεργειακών σταθμών στη ζώνη αγωγιμότητας, N_D η συγκέντρωση των δοτών και N_A η συγκέντρωση των αποδεκτών [1, 5].

Δίοδος p-n

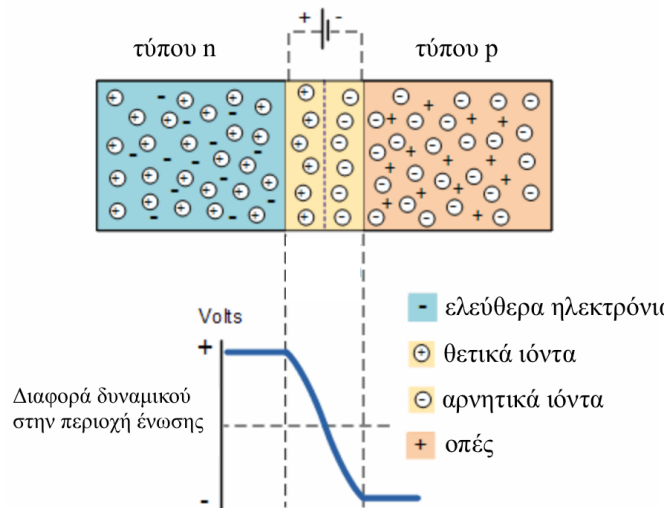
Μία δίοδος p-n σχηματίζεται από την ένωση ενός ημιαγωγού τύπου p με έναν ημιαγωγό τύπου n. Στην περιοχή της επαφής των υλικών πραγματοποιείται μεταφορά ηλεκτρονίων ούτως ώστε να επέλθει θερμοδυναμική ισορροπία. Η θερμοδυναμική ισορροπία προϋποθέτει ενιαία και οριζόντια στάθμη Fermi όπως φαίνεται και στο

Σχήμα 1.4. Έτσι, ηλεκτρόνια επανασυνδέονται με τις οπές στην περιοχή ένωσης αφήνοντας τα άτομα των δοτών και των αποδεκτών τα οποία δημιουργούν ένα ηλεκτροστατικό φράγμα δυναμικού, V_D (Σχ. 1.5). Το δυναμικό αυτό είναι χαρακτηριστική ποσότητα και σε μια μη πολωμένη επαφή είναι:

$$V_D = \frac{k \cdot T}{q} \cdot \ln \left(\frac{n_{no}}{n_{po}} \right) \quad (1.5)$$



Σχήμα 1.4: Θερμοδυναμική ισορροπία στην περιοχή ένωσης μιας δίodu p-n [24]



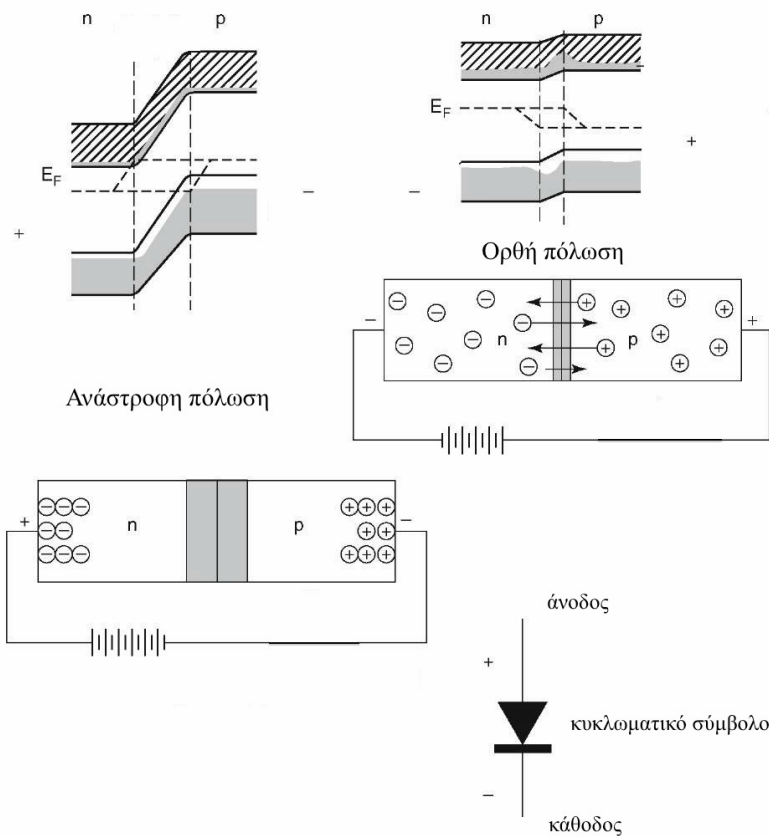
Σχήμα 1.5: Το ηλεκτροστατικό φράγμα δυναμικού σε μία δίοδο p-n [25]

όπου k η σταθερά Boltzmann, T η θερμοκρασία σε Kelvin, q το στοιχειώδες φορτίο ($1.6 \cdot 10^{-19} C$), n_{no} η συγκέντρωση των ηλεκτρονίων αγωγιμότητας στη κατάσταση

θερμοδυναμικής ισορροπίας στο υλικό τύπου n και n_{p0} η συγκέντρωση των ηλεκτρονίων αγωγιμότητας στη κατάσταση θερμοδυναμικής ισορροπίας στο υλικό τύπου p. Το εύρος, w , ή αλλιώς περιοχή απωθήσεως, και το ύψος, E_{max} , του εμφανιζόμενου ηλεκτροστατικού πεδίου εξαρτώνται από τις νοθεύσεις που έχουν υποστεί οι δύο κρύσταλλοι. Όταν στα άκρα μίας μη φωτιζόμενης διόδου εφαρμοστεί τάση τότε το συνολικό δυναμικό της διόδου προκύπτει ως:

$$V_{TOTAL} = V_D - V_{APP(f)} \quad \eta \quad = V_D + V_{APP(r)} \quad (1.6)$$

ανάλογα με το αν έχει εφαρμοστεί ορθή ($V_{APP(f)}$) ή ανάστροφη τάση ($V_{APP(r)}$) [1, 5].



Σχήμα 1.6: Ενεργειακά διαγράμματα στην περίπτωση εφαρμογής εξωτερικής πόλωσης σε δίοδο p-n [26]

Όπως φαίνεται και από την εξίσωση (1.6) όταν εφαρμόζεται ορθή πόλωση, δηλαδή μεγαλύτερο δυναμικό στην άνοδο από ότι στην κάθοδο, το ύψος του ηλεκτροστατικού φράγματος δυναμικού μειώνεται με αποτέλεσμα να υπάρχει διέλευση ηλεκτρικού ρεύματος ανάλογα με την εφαρμοζόμενη τάση. Η σχέση τάσεως-ρεύματος της διόδου στην περιοχή ορθής πόλωσης δίδεται με μεγάλη ακρίβεια από:

$$I_f = I_s \cdot (e^{\frac{q \cdot V}{k \cdot T}} - 1) \quad (1.7)$$

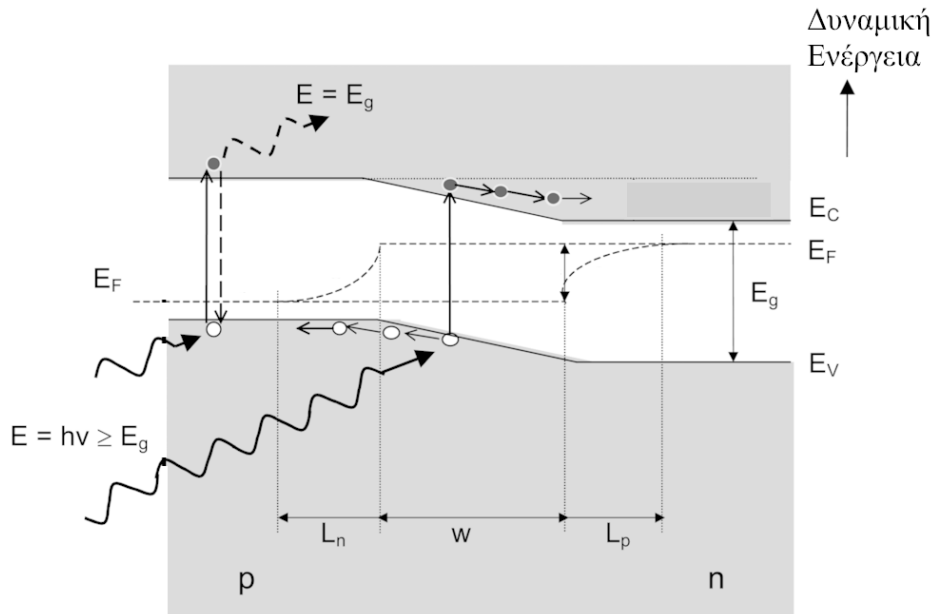
όπου I το ρεύμα ορθή πόλωσης, I_s το ρεύμα κορεσμού ή ρεύμα κλίμακας, V η εφαρμοζόμενη τάση στα άκρα της δίοδου, k η σταθερά Boltzmann, T η θερμοκρασία σε Kelvin και q το στοιχειώδες φορτίο. Αντίθετα όταν στην δίοδο εφαρμόζεται ανάστροφη τάση, δηλαδή όταν το δυναμικό της ανόδου είναι μικρότερο από της καθόδου, το ύψος του φράγματος δυναμικού μεγαλώνει και το ρεύμα ελαττώνεται στη σχεδόν μηδενική τιμή I_s . Σε κάθε περίπτωση στην περιοχή ένωσης παύει να ισχύει η θερμοδυναμική ισορροπία όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1.6 [1, 5].

Φωτοβολταϊκή μετατροπή

Σε αντιδιαστολή με την προηγούμενη ενότητα φωτοβολταϊκή μετατροπή παρατηρείται όταν η δίοδος φωτίζεται. Στο Σχήμα 1.7 φαίνεται η κατάσταση που επικρατεί σε μία δίοδο όταν εκτεθεί σε φωτεινή ακτινοβολία. Φωτόνια που εισέρχονται στη δίοδο έχοντας ενέργεια μεγαλύτερη από το φράγμα δυναμικού $E = h \cdot f \geq E_g$ απορροφώνται από τις περιοχές πέραν του εύρους του φράγματος δυναμικού, w , και των μηκών διάχυσης, L_n και L_p , στους ημιαγωγούς τύπου n και p αντίστοιχα, συνεπώς, δεν αναμένεται να συμβάλλουν στη φωτοβολταϊκή μετατροπή ενέργειας. Η απορρόφηση της φωτεινής ενέργειας γίνεται από ηλεκτρόνια της ζώνης σθένους τα οποία μεταβαίνουν πάνω από τη ζώνη αγωγιμότητας αφήνοντας μια οπή στη ζώνη σθένους. Αφού ζήσουν το χρόνο ζωής τους, τα φωτοπαραγόμενα ζεύγη επανασυνδέονται και χάνονται. Από την άλλη πλευρά όταν φωτόνια με τέτοια ενέργεια απορροφηθούν στην περιοχή του φράγματος δυναμικού ή/και στα εκατέρωθεν μήκη διάχυσης τα φωτοπαραγόμενα ζεύγη ηλεκτρικών φορέων (ελεύθερα ηλεκτρόνια και οπές) θα διαχωρίζονται χωροταξικά αυτόματα από το ηλεκτροστατικό πεδίο, προκειμένου να ελαχιστοποιήσουν την δυναμική τους ενέργεια. Η διαφορετική πορεία που ακολουθούν οι οπές στη ζώνη σθένους και τα ηλεκτρόνια στη ζώνη αγωγιμότητας σηματοδοτούνται από τα βέλη του Σχήματος 1.7 [1].

Όσο χρόνο διαρκεί η οπτική διέγερση τα ηλεκτρόνια που εισάγονται στην περιοχή του ηλεκτροστατικού φράγματος δυναμικού εκτρέπονται προς τον ημιαγωγό τύπου n , ενώ οι οπές εκτρέπονται προς τον αγωγό τύπου p . Συνεπώς ο ημιαγωγός τύπου n θα αποκτήσει περισσότερα αρνητικά φορτία, ενώ ο ημιαγωγός τύπου p περισσότερα θετικά φορτία το οποίο ισοδυναμεί με μία ορθά πολωμένη δίοδο. Η τάση ανοιχτοκύκλωσης

που εμφανίζεται στα άκρα της φωτιζόμενης διόδου δίδεται από τη σχέση:



- Ελεύθερα ηλεκτρόνια
- Οπές

Σχήμα 1.7: Η ενεργειακή κατάσταση μιας φωτιζόμενης διόδου [27]

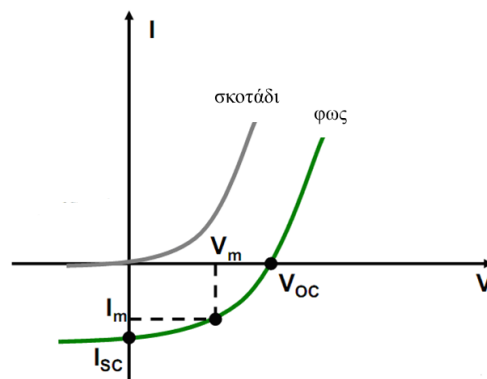
$$V_{OC} = \frac{k \cdot T}{q} \cdot \ln \left(\frac{L_n + L_p}{\frac{L_n}{\tau_n} \cdot n_p + \frac{L_p}{\tau_p} \cdot p_n} \cdot g_{opt} + 1 \right) \quad (1.8)$$

όπου V_{OC} η τάση ανοιχτοκύκλωσης, k η σταθερά Boltzmann, T η θερμοκρασία σε Kelvin, q το στοιχειώδες φορτίο, L_n το μήκος διάχυσης για τα ηλεκτρόνια στον ημιαγωγό τύπου p, L_p το μήκος διάχυσης για τις οπές στον ημιαγωγό τύπου n, τ_n ο χρόνος ζωής των ηλεκτρονίων, τ_p ο χρόνος ζωής των οπών, n_p η συγκέντρωση των ελεύθερων ηλεκτρονίων στον ημιαγωγό τύπου p, p_n η συγκέντρωση των οπών στον ημιαγωγό τύπου n και g_{opt} ο ρυθμός για τη δημιουργία ζευγών οπών- ηλεκτρονίων λόγω της οπτικής διέγερσης. Το ρεύμα που παρέχεται εξαρτάται από την απορροφούμενη φωτεινή ισχύ και σε ένα εξωτερικό κύκλωμα εξέρχεται από τον ημιαγωγό τύπου p και εισέρχεται στον ημιαγωγό τύπου n όπως το ρεύμα ανάστροφης πόλωσης της διόδου. Το φωτόρρευμα αυτό δίδεται από τη σχέση:

$$I_{opt} = q \cdot A \cdot (L_n + L_p) \cdot g_{opt} \quad (1.9)$$

όπου I_{opt} το φωτόρρευμα, q το στοιχειώδες φορτίο, A το εμβαδόν της επιφάνειας που δέχεται τον φωτισμό, L_n το μήκος διάχυσης για τα ηλεκτρόνια στον ημιαγωγό τύπου p , L_p το μήκος διάχυσης για τις οπές στον ημιαγωγό τύπου n και g_{opt} ο ρυθμός για τη δημιουργία ζευγών οπών- ηλεκτρονίων λόγω της οπτικής διέγερσης [1].

Στο Σχήμα 1.8 παρουσιάζεται η διαφορά μεταξύ μιας διόδου $p-n$ που βρίσκεται και λειτουργεί στο σκοτάδι (γκρι χρώμα) και μίας φωτιζόμενης διόδου (πράσινο χρώμα). Εν απουσία οπτικής διέγερσης η σχέση μεταξύ ρεύματος και τάσης ακολουθεί με μεγάλη ακρίβεια τον εκθετικό νόμο της σχέσεως (1.7) στο 1^ο τεταρτημόριο ενώ στο 3^ο τεταρτημόριο το ρεύμα είναι σχεδόν μηδενικό. Όταν η δίοδος βρεθεί κάτω από την επίδραση του φωτός η χαρακτηριστική μετατοπίζεται. Αυτό συμβαίνει γιατί το φωτόρρευμα που παράγεται αφαιρείται αλγεβρικά στο ρεύμα της διόδου. Κατ' αυτόν τον τρόπο η δίοδος εμπίπτει σε τρεις περιοχές λειτουργίας. Η πρώτη περιοχή βρίσκεται στο 1^ο τεταρτημόριο, δηλαδή για $I > 0$ και $V > 0$, όπου η δίοδος έχει τα χαρακτηριστικά μίας ορθά πολωμένης διόδου και καταναλώνει ενέργεια, $P > 0$. Η δεύτερη περιοχή βρίσκεται στο 3^ο τεταρτημόριο, δηλαδή για $I < 0$ και $V < 0$, στην οποία η δίοδος συμπεριφέρεται όπως μια ανάστροφα πολωμένη δίοδος με αυξημένο ρεύμα. Αυτή η περιοχή αξιοποιείται στους ανιχνευτές ακτινοβολίας, καθώς οποιαδήποτε ύπαρξη φωτός θα προκαλέσει αύξηση του ρεύματος στη διάταξη, ωστόσο και πάλι η δίοδος καταναλώνει ενέργεια καθώς $P > 0$ [1, 5].



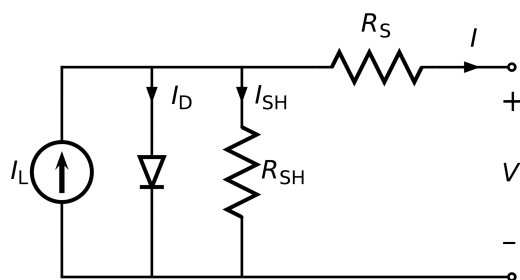
Σχήμα 1.8: Η χαρακτηριστική ρεύματος τάσης ($I-V$) μίας διόδου $p-n$ [28]

Όταν η δίοδος είναι ορθά πολωμένη και ταυτόχρονα υπάρχει αρκετή φωτεινή ισχύς μπορεί να λειτουργήσει ως ενεργητικό στοιχείο παρέχοντας ενέργειας στο κύκλωμα, $P < 0$. Σε αυτή τη περίπτωση η δίοδος λειτουργεί στον 4^ο τεταρτημόριο της

χαρακτηριστικής I-V με τη μέγιστη ισχύ να εμφανίζεται σε ένα σημείο λειτουργίας, όταν $I=I_m$ και $V=V_m$. Το I_{SC} είναι το ρεύμα βραχυκύκλωσης της διόδου και ισούται με το φωτόρρευμα που παράγει η διόδος [1, 5].

Ισοδύναμο κύκλωμα μιας φωτιζόμενης διόδου p-n

Το ισοδύναμο κύκλωμα μίας φωτιζόμενης διόδου η οποία χρησιμοποιείται είτε ως φωτοαγωγίμος οπτικός αισθητήρας είτε ως φωτοβολταϊκό στοιχείο δίδεται στο Σχήμα 1.9. Προκειμένου να λειτουργήσει ως αισθητήρας στο 3^ο τεταρτημόριο απαιτούνται ανάστροφη πόλωση και αντίσταση φορτίου στους ακροδέκτες εξόδου, ενώ για να λειτουργήσει στο 4^ο τεταρτημόριο ως φωτοβολταϊκός μετατροπέας απαιτείται αντίσταση φορτίου να καταναλώσει την παραγόμενη ισχύ. Όπως φαίνεται και στο σχήμα το ισοδύναμο κύκλωμα αποτελείται από: την πηγή που παράγει το φωτόρρευμα, I_L , παράλληλα με μία ιδανική διόδο και την αντίσταση R_{SH} και μία αντίσταση εξόδου R_S . Μέρος του φωτορρεύματος ρέει μέσω της διόδου (I_D) ώστε να διατηρείται το δυναμικό V_D που αναλογεί στο σημείο λειτουργίας ενώ το μη ιδανικό μέρος της διόδου προσομοιώνεται με την παράλληλη αντίσταση διαρροής R_{SH} . Αυτή η αντίσταση αποδίδει τους διάφορους μηχανισμούς μεταφοράς φορέων εκατέρωθεν του ηλεκτροστατικού φράγματος και καθίσταται σημαντική κυρίως στην ανάστροφη πόλωση. Τέλος η κατασκευαστική δομή και ωμικές επαφές εισάγουν την αντίσταση σειράς R_S , που καθίσταται σημαντική στην ορθή πόλωση. Τυπικές τιμές για την αντίσταση σειράς είναι $R_S=2-5 \Omega$, ενώ για την $R_{SH}= 10^8 \Omega$ [1].



Σχήμα 1.9: Ισοδύναμο κύκλωμα μίας φωτιζόμενης διόδου [29]

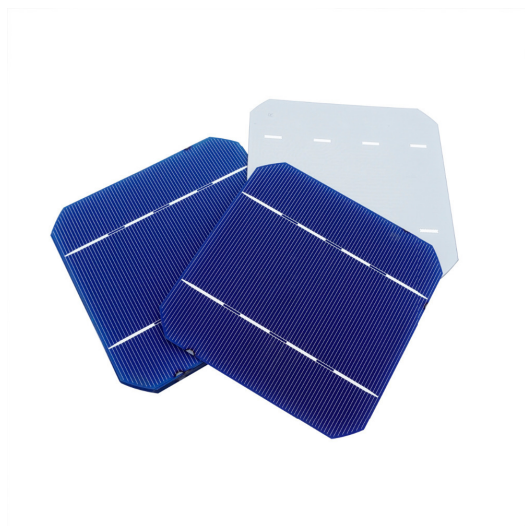
1.3 Φωτοβολταϊκές Διατάξεις

Η ιδιότητα μιας διόδου p-n να μετατρέπεται σε ένα ενεργητικό στοιχείο με την

εφαρμογή οπτικής διέγερσης έχει αξιοποιηθεί για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω των φωτοβολταϊκών διατάξεων. Οι διατάξεις αυτές αποτελούνται από μεγάλες επιφάνειες που δέχονται την ηλιακή ακτινοβολία, τα φωτοβολταϊκά πλαίσια, την μετατρέπουν σε συνεχή τάση που την αποδίδουν στο εκάστοτε δίκτυο μέσω μετατροπέων ή σε άλλες περιπτώσεις καταναλώνεται τοπικά. Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια με τη σειρά τους αποτελούνται από πολλά φωτοβολταϊκά στοιχεία ενωμένα ηλεκτρικά μεταξύ τους.

Φωτοβολταϊκό στοιχείο

Το φωτοβολταϊκό στοιχείο (λέγεται επίσης και φωτοβολταϊκή κυψέλη) αποτελεί την ελάχιστη δομική μονάδα για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τη φωτεινή ακτινοβολία. Τα συνήθη ΦΒ στοιχεία αποτελούνται από διόδους επαφής p-n που έχουν εμβαδόν φωτιζόμενης επιφάνειας που ποικίλλει από λίγα cm^2 μέχρι περίπου 180 cm^2 . Τα ΦΒ στοιχεία κατατάσσονται, ανάλογα με το υλικό της κατασκευής τους, σε στοιχεία μονοκρυσταλλικού πυριτίου (“mono”), πολυκρυσταλλικού πυριτίου (“poly”), λεπτών υμενίων (“ribbon”) και άμορφου πυριτίου (“a-Si”) [1].



Σχήμα 1.10: Μορφή μονοκρυσταλλικού φωτοβολταϊκού στοιχείου [30]

Συνήθως, τα μονοκρυσταλλικά στοιχεία έχουν κυκλικό σχήμα, διαμέτρου της τάξης των 6 ιντσών κατά μέγιστο, ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις έχουν αποκοπεί οι απολήξεις από τις τέσσερις αντιδιαμετρικές χορδές των τόξων, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.10, προκειμένου να επιτευχθεί μία πυκνότερη στοίβαση των στοιχείων σε δεδομένο

εμβαδόν φέροντος πλαισίου. Η διάμετρος του αρχικού μονοκρυστάλλου αναπτύχθηκε με τη μέθοδο Czochralski και ακολούθησε η κοπή του κρυστάλλου σε δίσκους (wafers) πάχους περίπου 300 μm , από όπου κατασκευάζεται το μοκρυσταλλικό ΦΒ στοιχείο πυριτίου [1].

Οι κρύσταλλοι του πολυκρυσταλλικού πυριτίου παράγονται σε μεγάλο βαθμό από πρώτη ύλη που προέρχεται από επαναχρησιμοποιημένο πυρίτιο ηλεκτρονικής καθαρότητας. Σε μία κατασκευαστική τεχνική παραγωγής πολυκρυσταλλικού πυριτίου, μονοκρύσταλλοι πυριτίου τοποθετούνται σε καλούπι ορθογώνιας γεωμετρίας, το οποίο θερμαίνεται στο σημείο τήξης, και παρέχεται πολυκρύσταλλος στον οποίον πολλά μικρά τμήματά του έχουν κρυσταλλωθεί αυτοτελώς σε μονοκρυσταλλική μορφή. Η γεωμετρία του είναι συνήθως ορθογωνίου παραλληλεπίπεδου με διαστάσεις στη βάση περίπου 50 cm x 50 cm όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.11. Στην συνέχεια ο πολυκρύσταλλος καθαρίζεται εξωτερικά και κόβεται σε μικρότερους κύβους με βάση περίπου 15 cm x 15 cm από τα οποία προκύπτουν λεπτά εγκάρσια φύλλα (wafers), πάχους περίπου 350 μm . Η ποιότητα των δίσκων πολυκρυσταλλικού πυριτίου προκαθορίζει τα μήκη διάχυσης των φορέων μειονότητας τα οποία ποικίλουν από 50 έως 280 μm . Επίσης, η ποιότητα καθορίζει το χρόνο ζωής των φορέων μειονότητας και κατ' επέκταση τον αναπτυσσόμενο ρυθμό επανασύνδεσης μεταξύ οπών – ηλεκτρονίων. Τα παραπάνω στοιχεία αποτελούν καθοριστικές παραμέτρους για το υλικό, οι οποίες μεγιστοποιούν την απόδοση των ΦΒ στοιχείων [1].



Σχήμα 1.11: Μορφή πολυκρυσταλλικού φωτοβολταϊκού στοιχείου [31]

Τα ΦΒ στοιχεία λεπτών υμενίων καταλαμβάνουν σημαντικό τμήμα της αγοράς και

βασίζουν την κατασκευή τους σε συμφέρουσες βιομηχανικές τεχνικές, που μπορούν να εφαρμοστούν σε παραγωγή μεγάλης κλίμακας. Τέτοιες τεχνικές είναι η επιταξία υγρής φάσης (“Liquid Phase Epitaxy” ή LPE) και η επιταξία αερίου φάσης (“Chemical Vapor Deposition” ή CVD). Μία εναλλακτική τεχνική, με αντίστοιχα παρασκευαστικά αποτελέσματα αποτελεί η μοριακή επιταξία δέσμης (“Molecular Beam Epitaxy” ή MBE) η οποία είναι πρωτίστως ερευνητική και αντενδείκνυται για βιομηχανική χρήση και εφαρμογή μεγάλης κλίμακας. Τα ΦΒ λεπτών υμενίων κατασκευάζονται από εναπόθεση τουλάχιστον δύο λεπτών ημιαγωγικών υμενίων, πάχους περίπου 1μm, πάνω σε κατάλληλο υπόστρωμα. Το υπόστρωμα ενδείκνυται να είναι υάλινη επιφάνεια, ή μεταλλική, ή κρύσταλλος διαφορετικού ημιαγωγού. Τα ημιαγωγικά υμένια, ο ημιαγωγός τύπου n και ο τύπου p, τοποθετούνται στην άνω όψη, η οποία δέχεται τον φωτισμό, και εγκαθίστανται το ηλεκτροστατικό φράγμα δυναμικού που απαιτείται για τη λειτουργία ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου. Όταν το κάθε υμένιο αποτελείται από διαφορετικό ημιαγωγικό υλικό που παρουσιάζει διαφορετική τιμή ενεργειακού διακένου, τότε η δημιουργούμενη επαφή p-n χαρακτηρίζεται ως ετεροεπαφή, ενώ σε αντίθετη περίπτωση ως ομοεπαφή [1].

Τέλος, στα ΦΒ στοιχεία άμορφου πυριτίου υπάρχει το κυριότερο πλεονέκτημα διατήρησης της απόδοσής τους σε υψηλότερες θερμοκρασίες λειτουργίας, γεγονός που τους παρέχει ένα συγκριτικό πλεονέκτημα έναντι όλων των υπόλοιπων ΦΒ στοιχείων. Για παράδειγμα, η μείωση της παρεχόμενης μέγιστης ισχύος ανά βαθμό Κελσίου αύξησης της θερμοκρασίας του ΦΒ στοιχείου είναι -0.2%, ενώ ο αντίστοιχος συντελεστής για τα υπόλοιπα ΦΒ στοιχεία είναι της τάξης του -0.4% έως -0.5%. Όμως οι λαμβανόμενες αποδόσεις των στοιχείων a-Si είναι μόλις 6%, πολύ χαμηλότερες από τα υπόλοιπα που κυμαίνονται από 12% έως 17%. Για αυτό σπάνια επιλέγονται σε συμβατικές εγκαταστάσεις εκτός αν υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας το απαιτούν. Το a-Si παρασκευάζεται από την συμπύκνωση των προϊόντων θερμικής διάσπασης αερίων πυριτιούχων ενώσεων. Πολλοί από τους χημικούς δεσμούς του είναι ατελείς ή στρεβλωμένοι, γεγονός που δημιουργεί διαφοροποιήσεις στις ηλεκτρικές του ιδιότητες. Χαρακτηρίζεται από μικρή κινητικότητα ηλεκτρικών φορέων και μικρά μήκη διάχυσης, τιμές οι οποίες μεταβάλλονται με τις συνθήκες παραγωγής. Επίσης, το ενεργειακό διάκενο δεν έχει σταθερή τιμή αλλά το εύρος του μεταβάλλεται από 1.2 έως 1.6 eV κάτι που κάνει το a-Si να συμπεριφέρεται καλύτερα στις υψηλότερες θερμοκρασίες και να ανταποκρίνεται καλύτερα στη φωτοβολταϊκή μετατροπή, δεδομένου ότι η ιδανική τιμή

του ενεργειακού διακένου που διασφαλίζει τη μέγιστη απορρόφηση στο φάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας είναι 1.45eV. Επιπλέον, ο συντελεστής απορρόφησης του a-Si είναι μεγαλύτερος του αντίστοιχου του κρυσταλλικού πυριτίου, με αποτέλεσμα να συμπεριφέρεται όπως τα υλικά με άμεσο ενεργειακό διάκενο, γεγονός το οποίο επιφέρει πλήρη απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας σε βάθος της τάξης του 1μm από την επιφάνεια [1].

Φωτοβολταϊκό πλαίσιο

Το κάθε φωτοβολταϊκό στοιχείο, όταν δέχεται την ηλιακή ακτινοβολία, παρέχει στην έξοδο του συνεχή τάση περίπου ίση με 0.5V. Η μέγιστη ένταση του ρεύματος που παράγει στην έξοδο του το ΦΒ στοιχείο είναι ανάλογη της επιφάνειάς του και προσδιορίζεται κυρίως από την τιμή της πυκνότητας ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας. Μία τυπική τιμή του ρεύματος μέγιστης ισχύος κυμαίνεται από 4 έως 7 A οπότε η παρεχόμενη μέγιστη ισχύς ανέρχεται περίπου στα 3W. Τα ΦΒ στοιχεία συνδέονται ηλεκτρικά μεταξύ τους για το σχηματισμό πλαισίων το οποίο αποτελεί τη βασική κατασκευαστική μονάδα που χρησιμοποιείται για τη δημιουργία κάθε φωτοβολταϊκής εγκατάστασης, ανεξαρτήτως μεγέθους εγκατεστημένης ισχύος. Άποψη ενός ΦΒ πλαισίου δίδεται στο Σχήμα 1.12. Το πλαίσιο συνιστά ενιαία στοιχειοσειρά τοποθετημένη επάνω σε κοινό υπόστρωμα. Περιλαμβάνει δηλαδή πολλά όμοια απολύτως ΦΒ στοιχεία συνδεδεμένα σε σειρά, με σκοπό την αύξηση της παρεχόμενης ηλεκτρικής ισχύος [1].



Σχήμα 1.12: Τυπική άποψη φωτοβολταϊκού πλαισίου[32]

Τα ΦΒ στοιχεία συνδέονται μεταξύ τους ενώνοντας ηλεκτρικά την πάνω όψη του ενός, που δέχεται την ηλιακή ακτινοβολία και είναι συνήθως ο ημιαγωγός τύπου n, με την πίσω όψη του στοιχείου που ακολουθεί. Οι συνδέσεις αυτές είναι αρκετά ευπαθείς και για αυτό το λόγο η στοιχειοσειρά βρίσκεται μέσα σε μια διαφανή ρητίνη, η οποία επιτρέπει στην ηλιακή ακτινοβολία να εισέλθει ενώ παράλληλα εμποδίζει την υγρασία και προσδίδει μηχανική σταθερότητα. Πάνω από τη ρητίνη τοποθετείται ενισχυμένο γυαλί ενώ περιμετρικά το πλαίσιο περιβάλλεται από μεταλλικό σκελετό κατασκευασμένο από ανωδιομένο αλουμίνιο το οποίο γειώνεται. Μόνη σύνδεση αυτής της δομής με το υπόλοιπο κύκλωμα ή/και με άλλα πλαίσια είναι τα δύο καλώδια στα άκρα της στοιχειοσειράς που εξέρχονται από το κιβώτιο συνδεσμολογίας στο πίσω μέρος του πλαισίου [1, 6].

Εφόσον όλα τα ΦΒ στοιχεία είναι όμοια μεταξύ τους, κάθε ένα, υπό τις ίδιες συνθήκες φωτισμού, εμφανίζει μία τάση ανοιχτοκύκλωσης V_{OC} και ένα ρεύμα βραχυκύκλωσης I_{SC} . Συνολικά, λοιπόν, στους ακροδέκτες του πλαισίου ανάλογα με το πόσα ΦΒ στοιχεία περιέχει, εμφανίζεται:

$$V_{OC}^{panel} = N \cdot V_{OC}$$

$$I_{SC}^{panel} = I_{SC}$$

όπου N είναι ο αριθμός των στοιχείων. Κατ' αυτό το τρόπο αυξάνεται η παρεχόμενη ισχύς από το πλαίσιο. Προσθέτοντας τώρα ΦΒ πλαίσια σε σειρά μεταξύ τους δημιουργείται μια συστοιχία η οποία, αναλογικά με την σύνδεση των στοιχείων εντός του πλαισίου, υπό ιδανικές συνθήκες, διαρρέεται από το ίδιο ρεύμα και σε συνθήκες βραχυκύκλωσης εμφανίζει $I_{SC}^{string} = I_{SC}^{panel} = I_{SC}$ ενώ οι τάσεις αθροίζονται και σε συνθήκες ανοιχτοκύκλωσης στα άκρα $V_{OC}^{string} = K \cdot V_{OC}^{panel} = K \cdot N \cdot V_{OC}$ όπου K ο αριθμός των πλαισίων που βρίσκονται εν σειρά. Πραγματοποιώντας σύνδεση πλαισίων σε σειρά αυξάνεται η εμφανιζόμενη τάση στην έξοδο το οποίο σημαίνει μεγαλύτερη ισχύς, όμως καθώς το ρεύμα παραμένει μικρό για την αποκόμιση ακόμα μεγαλύτερης ισχύος η τάση φτάνει σε απαγορευτικά επίπεδα και αυξάνει το κόστος της μόνωσης στη διάταξη. Προκειμένου λοιπόν να αυξηθεί ακόμα περισσότερο η αποδιδόμενη ισχύς που μπορεί να παραχθεί, συστοιχίες από φωτοβολταϊκά πλαίσια ενώνονται παράλληλα με σκοπό την αύξηση του ρεύματος [1, 6].

1.4 Εγκατάσταση Φωτοβολταϊκών Συστημάτων

Βάσεις στήριξης

Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια συνήθως εδράζονται επί εδάφους με δύο τρόπους: σε βάσεις σταθερής κλίσης ως προς την οριζόντιο, συνήθως αναφερόμενες ως «σταθερές βάσεις» και σε βάσεις επί διατάξεων παρακολούθησης της πορείας του ήλιου, αναφερόμενες συνήθως ως συστήματα ιχνηλάτησης της πορείας του ήλιου, ή ηλιοπαρακολουθητές ή τράκερς (trackers) [6].

Οι σταθερές βάσεις αποτελούν τον απλούστερο και οικονομικότερο τρόπο έδρασης ΦΒ πλαισίων. Η αρχή σχεδιασμού τους είναι απλή: οι ακτίνες του ήλιου θα πρέπει να προσπίπτουν κάθετα στην επιφάνεια των πλαισίων κατά το μεσημέρι. Έτσι οι βάσεις κατασκευάζονται ώστε να επιτρέπουν την τοποθέτηση των πλαισίων σε σταθερή κλίση, περί τις 30 μοίρες όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.13. Η κλίση αυτή θεωρείται ως μία ικανοποιητική μέση τιμή για τα Ελληνικά δεδομένα. Χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι η ιδανική κλίση είναι αρκετά μικρότερη κατά τους καλοκαιρινούς μήνες και αρκετά μεγαλύτερη κατά τους χειμερινούς μήνες. Οι σταθερές βάσεις κατασκευάζονται συνήθως από αλουμίνιο ή ανοξείδωτο χάλυβα (χάλυβα γαλβανισμένο εν θερμώ). Συνήθως κατασκευάζονται μετά από τεχνική μελέτη ώστε να διαπιστωθεί η στατική τους επάρκεια και η αντοχή τους σε ανεμοπιέσεις ή φορτία χιονιού. Οι βάσεις τοποθετούνται επί του εδάφους είτε με σκυροδέτηση είτε απευθείας με εδαφόμψη. Η σκυροδέτηση των βάσεων γίνεται συνήθως σε δοκάρια, δηλαδή σε όλη τη σειρά των βάσεων, από οπλισμένο σκυρόδεμα, είτε σε πέλματα από σκυρόδεμα, τοποθετημένα κατάλληλα ώστε να επιτρέπουν το βίδωμα των υποδοχών των βάσεων. Η εδαφόμψη γίνεται συνήθως σε βάθη τυπικά του 0.5-1.5 m, όπου τοποθετούνται πάσσαλοι, επί των οποίων στη συνέχεια εδράζεται η βάση. Η σκυροδέτηση των βάσεων αυξάνει το κόστος εγκατάστασης σε σχέση με την απλή εδαφόμψη. Ωστόσο, είναι σημαντική η διενέργεια αυτοψίας και γεωτεχνικής μελέτης για να διαπιστωθεί κατά πόσο ο τύπος του εδάφους επιτρέπει την εδαφόμψη χωρίς να δημιουργούνται θέματα στατικής επάρκειας των βάσεων [6].



Σχήμα 1.13: Σταθερές βάσεις στήριξης φωτοβολταϊκών πλαισίων υπό γωνία 30° [33]

Θα πρέπει επίσης να λαμβάνεται μέριμνα για τη δυνατότητα όδευσης καλωδίων καθώς και για τη στήριξη πινάκων ή αναστροφέων, σε περίπτωση που τεχνικά διαπιστωθεί ότι αυτή είναι η βέλτιστη λύση. Οι σταθερές βάσεις αποτελούνται συνήθως από τεμάχια τα οποία συναρμολογούνται επί το έργω. Κάθε τεμάχιο χαρακτηρίζεται από τη μέγιστη επιφάνεια τοποθέτησης, η οποία συνήθως υπολογίζεται λαμβάνοντας κάποιες μέσες τιμές διαστάσεων πλαισίων (τυπικά 1.6 x 1 m για κρυσταλλικά πλαίσια). Τα πλαίσια μπορούν να τοποθετηθούν ανά απλή (μονή) σειρά ή (συνηθέστερα) σε διπλή σειρά ή ακόμη και σε τριπλή ή τετραπλή σειρά. Επίσης είναι δυνατή η τοποθέτηση τους είτε κατά τη μικρή διάσταση (portrait) είτε κατά τη μεγάλη διάσταση (landscape). Η ακριβής χωροθέτηση εξαρτάται από τη μορφολογία του διαθέσιμου χώρου εγκατάστασης και τις διαστάσεις αυτού [6].

Στην δεύτερη κατηγορία, η ιχνηλάτηση της πορείας του ήλιου αποτελεί μία τεχνική η οποία στοχεύει στην μεγιστοποίηση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας μέσω της προσπάθειας κίνησης των βάσεων των πλαισίων κατά τη διάρκεια της ημέρας ώστε να επιτυγχάνεται συνεχώς η κάθετη πρόσπτωση της ηλιακής ακτινοβολίας. Ένα παράδειγμα συστήματος ιχνηλάτησης φαίνεται στο Σχήμα 1.14. Τα συστήματα ιχνηλάτησης της πορείας του ήλιου, ή ηλιοπαρακολουθητές ή τράκερ (tracker) χαρακτηρίζονται από μεγαλύτερη πολυπλοκότητα σε σχέση με τα συστήματα βάσεων, παρέχοντας ωστόσο αυξημένες αποδόσεις, κατά μέσο όρο της τάξης του 30%. Χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες. Συστήματα μονού άξονα (single axis) όπου πρόκειται για συστήματα στα οποία λαμβάνει χώρα κίνηση των πάνελ σε έναν άξονα,

αυτόν της Ανατολής-Δύσης, κατά τη διάρκεια μίας μέρας. Τυπικά, τα συστήματα αυτά επιτυγχάνουν αύξηση της παραγωγής κατά 20-25% σε σχέση με τα συστήματα σταθερών βάσεων. Συστήματα διπλού άξονα (dual axis) όπου πρόκειται για συστήματα στα οποία είναι επιπλέον δυνατή η ρύθμιση της κλίσης των πλαισίων ως προς την οριζόντιο. Η επιπλέον αυτή δυνατότητα παρέχει αυξημένη απόδοση κατά τυπικά 25-40% σε σχέση με τα συστήματα σταθερών βάσεων [6].



Σχήμα 1.14: Βάση φωτοβολταϊκών πλαισίων με σύστημα ιχνηλάτησης [34]

Η κίνηση στα συστήματα αυτά επιτυγχάνεται με συνήθως με ήλεκτρομηχανικά ή ήλεκτρο-υδραυλικά μέσα. Κατά συνέπεια, όλα τα συστήματα ιχνηλάτησης χαρακτηρίζονται από ιδιοκαταναλώσεις, οι οποίες είναι μικρές καθώς η κίνηση δεν είναι συνεχής αλλά περιοδική, τυπικά μία κίνηση ανά 10 λεπτά. Ωστόσο, είναι σκόπιμο η ενέργεια αυτή να προέρχεται από το τοπικό δίκτυο και όχι από τα ΦΒ πλαίσια. Η ανίχνευση της πορείας του ήλιου γίνεται συνήθως με δύο τρόπους. Ο πρώτος τρόπος είναι με ηλιακούς αισθητήρες, οι οποίοι αντιλαμβάνονται τη θέση του ήλιου. Ο δεύτερος τρόπος είναι μέσω λογισμικού, από αστρονομικά δεδομένα, βάσει των οποίων υπολογίζεται η θέση και πορεία του ήλιου για κάθε μέρα του έτους, ανάλογα με τις γεωγραφικές συντεταγμένες της περιοχής. Λόγω της ανάγκης κίνησης σημαντικού αριθμού πλαισίων, τα συστήματα ιχνηλάτησης χαρακτηρίζονται από επίπεδες επιφάνειες τοποθετημένες σε μία κάθετη ως προς το έδαφος βάση στήριξης. Στη βάση στήριξης τοποθετείται συνήθως και ο αναστροφέας (inverter) ή αν αυτό δεν είναι δυνατόν, γίνεται η αναχώρηση καλωδίων προς ένα κεντρικό σημείο συλλογής όπου

βρίσκονται και οι αναστροφείς. Το γεγονός αυτό οδηγεί σε κατασκευές σημαντικού ύψους το οποίο κυμαίνεται από 2.5 έως 10-12 μέτρα, αναλόγως της κατασκευής. Το ύψος της κατασκευής συνήθως αυξάνει με την αύξηση της επιφάνειας των πλαισίων. Σήμερα συστήματα ιχνηλάτησης κατασκευάζονται για να φέρουν ισχύ πλαισίων που κυμαίνεται από 2-3kWp έως περίπου 33kWp [6].

Το σημαντικό μέγεθος της κατασκευής καθιστά πολυπλοκότερη και την έδραση. Συνήθως οι βάσεις στήριξης εδράζονται σε οπλισμένο σκυρόδεμα σημαντικού όγκου (από 2-3 έως και περίπου 20-30 κυβ. μέτρα) ώστε να εξασφαλίζεται η στατική τους επάρκεια. Επιπλέον, αυξάνονται τα κόστη εγκατάστασης σε σχέση με τα συστήματα σταθερών βάσεων. Το σημαντικό μέγεθος των συστημάτων αυτών, κυρίως το ύψος τους, αυξάνει τις απαιτήσεις χώρου σε σχέση με ένα σύστημα σταθερών βάσεων, συνήθως κατά 1.5-2 φορές, λόγω των μεγαλύτερων αποστάσεων μεταξύ τους για την αποφυγή σκιάσεων. Επιπλέον, το μέγεθος των τράκερ τους καθιστά περισσότερο ευάλωτους (σε σχέση με συστήματα σταθερών βάσεων) σε ανεμοπιέσεις. Η συνηθέστερη τεχνική που χρησιμοποιείται είναι να τοποθετείται ένα ανεμόμετρο και όταν η ταχύτητα του ανέμου ξεπεράσει ένα όριο για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, το σύστημα κίνησης να λαμβάνει εντολή να θέτει την επιφάνεια των πάνελ σχεδόν παράλληλα με το έδαφος, μία διαδικασία γνωστή ως «οριζοντίωση», για λόγους προστασίας. Η ταχύτητα αυτή κυμαίνεται ανάλογα με τον κατασκευαστή, αλλά μπορεί να είναι και χαμηλή και να αντιστοιχεί σε άνεμο έντασης 5-6 Bf. Κατά συνέπεια, πρέπει να εκτιμούνται τα ανεμολογικά δεδομένα της περιοχής εγκατάστασης προτού γίνει η επιλογή ενός συγκεκριμένου τύπου τέτοιου συστήματος [6].

Καλωδιώσεις

Η ηλεκτρολογική εγκατάσταση ενός φωτοβολταϊκού συστήματος απαιτεί τη χρήση καλωδίων DC και AC. DC καλώδια χρησιμοποιούνται για τη διασύνδεση των πλαισίων μεταξύ τους και για τη σύνδεση των κλάδων/στοιχειοσειρών (string) με τις εισόδους του αναστροφέα ενώ AC καλώδια ισχύος, συμβατικού τύπου, χρησιμοποιούνται για τη σύνδεση των αναστροφέων σε τριφασικό σύστημα και την τελική σύνδεση με το τοπικό δίκτυο. Τα καλώδια που χρησιμοποιούνται για τη σύνδεση εν σειρά των ΦΒ πλαισίων είναι συνήθως κατασκευασμένα για χρήση στον εξωτερικό χώρο. Η διατομή τους είναι συνήθως 4mm² για πλαίσια κρυσταλλικού πυριτίου και ακόμη μικρότερη, της τάξης του 1.5mm², για πλαίσια άμορφου πυριτίου, λόγω του σημαντικά μικρότερου ρεύματός

τους. Τα καλώδια αυτά είναι συνήθως μονοπολικά και με διπλή μόνωση όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.15, ώστε να αποφεύγονται σφάλματα μεταξύ του θετικού και του αρνητικού πόλου των ΦΒ πλαισίων ή σφάλματα γης. Κατασκευάζονται επίσης πολύκλινα ώστε να διαθέτουν την απαραίτητη ευελιξία για τη σύνδεση τους, ενώ το μήκος τους κυμαίνεται γύρω στο 1m [6].



Σχήμα 1.15: Καλώδιο σύνδεσης φωτοβολταϊκών πλαισίων [35]

Το συχνά χρησιμοποιούμενο καλώδιο με μόνωση λάστιχο και μανδύα από νεοπρένιο τύπου H07 RN-F, στην τυπική (standard) έκδοσή του επιτρέπεται σε θερμοκρασίες έως 60°C και έτσι είναι κατάλληλο για χρήση σε φωτοβολταϊκά συστήματα σε περιορισμένο εύρος. Για το σκοπό αυτό οι κατασκευαστές προχώρησαν στη δημιουργία ειδικών καλωδίων για φωτοβολταϊκές εφαρμογές (solar cables). Το κυριότερο χαρακτηριστικό τους είναι η ανεκτικότητα τους στις καιρικές συνθήκες και σε υπεριώδη (UV) ακτινοβολία με μεγαλύτερο εύρος θερμοκρασιών (της τάξης από -55°C έως 125°C). Επιπλέον κάποιοι κατασκευαστές προσφέρουν καλώδια με μεταλλικό πλέγμα για μεγαλύτερη προστασία από τα τρωκτικά και καλύτερη προστασία από υπερτάσεις. Οι διατομές των DC καλωδίων που χρησιμοποιούνται για τη σύνδεση των ΦΒ πλαισίων με τους αναστροφείς κυμαίνονται συνήθως από 4 έως 16mm². Ο ακριβής προσδιορισμός της διατομής εξαρτάται κυρίως από τις απώλειες του καλωδίου και όχι ιδιαίτερα από τη θερμική φόρτιση η οποία είναι μικρή, λόγω του μικρού σχετικά ρεύματος λειτουργίας των ΦΒ πλαισίων. Είναι, επίσης, σκόπιμο να χρησιμοποιούνται διαφορετικοί

χρωματισμοί καλωδίων για το θετικό και αρνητικό, συνήθως κόκκινο και μαύρο. Ακόμα, είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν και μεγαλύτερες διατομές DC καλωδίων της τάξης των 25 έως 70mm², σε περιπτώσεις που δεν επαρκεί ο αριθμός των εισόδων ενός αναστροφέα για την απευθείας σύνδεση όλων των επιμέρους DC καλωδίων των κλάδων. Η περίπτωση αυτή είναι αρκετά συνηθισμένη κυρίως σε κεντρικούς αναστροφείς, ονομαστικής ισχύος της τάξης των 100kW και άνω. Στην περίπτωση αυτή χρησιμοποιούνται κατάλληλα κυτία τα οποία ομαδοποιούν πολλά ζεύγη καλωδίων κλάδων σε ένα ζεύγος και είναι συνήθως εφοδιασμένα με απαγωγείς υπερτάσεων και DC διακόπτες φορτίου. Επιπλέον, σε κάποιες περιπτώσεις διαθέτουν και διατάξεις επιτήρησης κλάδων (string monitoring) ώστε να δίνεται πληροφορία στον αναστροφέα και το σύστημα εποπτείας για τη δυσλειτουργία ενός κλάδου [6].

Κατά τη φάση κατασκευής του έργου, λαμβάνεται μέριμνα για την προσεκτική όδευση των καλωδίων κατά τις συνήθεις πρακτικές της ηλεκτροτεχνίας, λαμβάνοντας υπόψη παράγοντες όπως η γειτνίαση των καλωδίων, η χρήση σωλήνων και η ανάγκη προστασίας από τα τρωκτικά. Ιδιαίτερη λαμβάνεται για τη σωστή διασύνδεση των καλωδίων τόσο μεταξύ των πλαισίων, δηλαδή από το (+) ενός πλαισίου στο (-) του επόμενου, όσο και μεταξύ των κλάδων των πλαισίων και των εισόδων του αναστροφέα. Σε περίπτωση χαλαρής σύνδεσης είναι πιθανόν να εμφανιστεί τόξο αυξάνοντας τον κίνδυνο πυρκαγιάς. Έτσι οι παραπάνω απαιτήσεις οδήγησαν στην επικράτηση στην αγορά λύσεων τύπου “plug and play” με συνδέσμους καλωδίων που εξασφαλίζουν την απουσία επαφής με γυμνό αγωγό και τη μικρή ωμική αντίσταση, της τάξης των 5mΩ και μικρότερη. Αναφορικά με τα καλώδια του εναλλασσομένου ρεύματος (AC) χρησιμοποιούνται οι συμβατικοί τύπου καλωδίων (π.χ. NYΥ, NYM, NYCWY) εφαρμόζοντας τις συνήθεις πρακτικές της ηλεκτροτεχνίας λαμβάνοντας υπόψη τη διατομή, τον τρόπο τοποθέτησης και την προστασία τους [6].

Προκειμένου να υπολογιστούν οι ελάχιστες διατομές των καλωδιώσεων μιας φωτοβολταϊκής εγκατάστασης, πρέπει να συνεκτιμηθούν το είδος του ρεύματος που διαρρέει τον αγωγό, δηλαδή αν είναι DC ή AC, η τάση λειτουργίας της εγκατάστασης στο συγκεκριμένο σημείο και η μέγιστη αποδεκτή πτώση τάσης στα άκρα του αγωγού κατά τη λειτουργία λόγω απωλειών Joule. Εφόσον τα ανώτερο είναι σωστά, οι διατομές των αγωγών για τα καλώδια που θα επιλεγούν προκύπτουν από τα αποτελέσματα των τύπων που ακολουθούν:

$$\begin{aligned}
\text{για DC ρεύμα} \quad S &= \frac{2 \cdot L \cdot I}{\sigma \cdot \Delta V} \cdot 10^6 \\
\text{για AC μονοφασικό ρεύμα} \quad S &= \frac{2 \cdot L \cdot I \cdot \cos\varphi}{\sigma \cdot \Delta V} \cdot 10^6 \\
\text{για AC τριφασικό ρεύμα} \quad S &= \frac{\sqrt{3} \cdot L \cdot I \cdot \cos\varphi}{\sigma \cdot \Delta V} \cdot 10^6
\end{aligned} \tag{1.10}$$

όπου S η ελάχιστη δυνατή διατομή του αγωγού σε mm², L το μήκος του εξεταζόμενου κλάδου σε m, I το μέγιστο ρεύμα που διαρρέει τον αγωγό σε A, σ η ειδική αγωγιμότητα του υλικού του αγωγού σε Ω⁻¹m⁻¹, η μέγιστη δυνατή τιμή πτώσης τάσεως καθ' όλο το μήκος του αγωγού σε V και cosφ ο συντελεστής ισχύος για τον αναστροφέα [1].

Αναστροφείς

Με τον όρο αναστροφέα ή μετατροπέα ή αντιστροφέα νοείται η διάταξη ηλεκτρονικών ισχύος η οποία μετατρέπει τη συνεχή τάση των ΦΒ πλαισίων σε εναλλασσόμενη ονομαστικών τιμών 230V ανά φάση και συχνότητας 50Hz. Οι αναστροφείς αποτελούν πάντα ένα κομβικό σημείο σε μία ΦΒ εγκατάσταση καθώς όλη η παραγόμενη ενέργεια διοχετεύεται μέσω αυτών στο δίκτυο. Κατά συνέπεια έχει ιδιαίτερη σημασία να χαρακτηρίζονται από αξιοπιστία και υψηλή απόδοση. Οι αναστροφείς των διασυνδεδεμένων συστημάτων διαχωρίζονται ανάλογα με το είδος της τάσης που παράγουν σε μονοφασικούς αναστροφείς, με τυπικά μεγέθη ισχύος έως 10-11kW και τριφασικούς αναστροφείς, με μεγέθη ισχύος από 6-7kW έως και 1MW [6].

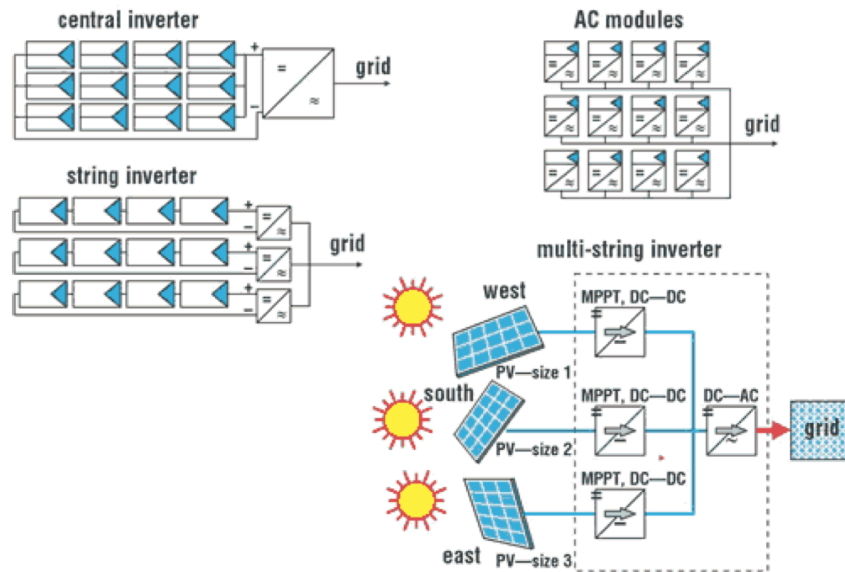
Οι αναστροφείς ανάλογα με το αν χρησιμοποιούν μετασχηματιστή για γαλβανική απομόνωση (χαμηλής ή υψηλής συχνότητας) ανάμεσα στην DC είσοδο και την AC έξοδο χωρίζονται σε αναστροφείς με μετασχηματιστή (inverters with transformer) και αναστροφείς χωρίς μετασχηματιστή (transformerless (TL) inverters). Ο κυριότερος λόγος της χρήσης μετασχηματιστή σε έναν αναστροφέα είναι αυτός της απομόνωσης της DC πλευράς η οποία συνδέεται με τα φωτοβολταϊκά πλαίσια με την AC πλευρά που συνδέεται στο δίκτυο. Οι μετασχηματιστές που χρησιμοποιούνται μπορεί να είναι κατασκευασμένοι για συχνότητα 50Hz, ή για υψηλότερη συχνότητα (της τάξης των 10-15kHz) για μικρότερη ισχύ. Οι μετασχηματιστές χαμηλής συχνότητας εμφανίζουν μεγαλύτερες απώλειες, καταλαμβάνουν μεγαλύτερο όγκο και έχουν μεγαλύτερο βάρος. Αντιθέτως οι μετασχηματιστές υψηλής συχνότητας χαρακτηρίζονται από πιο

εξειδικευμένη κατασκευή. Το μεγαλύτερο μειονέκτημα της χρήσης του μετασχηματιστή, πέραν του αυξημένου κόστους ανά μονάδα ισχύος, είναι αυτό της εισαγωγής επιπλέον απωλειών που κυμαίνονται μεταξύ 2-4%. Ωστόσο είναι πιθανόν και οι αναστροφείς χωρίς μετασχηματιστή να εμφανίζουν αυξημένες απώλειες αν χρησιμοποιούνται μετατροπείς ανύψωσης της DC τάσης των ΦΒ πλαισίων (DC/DC μετατροπείς ανύψωσης). Επιπλέον, η έλλειψη γαλβανικής απομόνωσης στους αναστροφείς χωρίς μετασχηματιστή, δημιουργεί αυξημένες απαιτήσεις αναφορικά με την ασφάλεια και την εμφάνιση διαρροών και ασυμμετριών. Σε ορισμένες περιπτώσεις δε, επιβάλλεται η χρήση αναστροφέων με μετασχηματιστή. Μία τέτοια περίπτωση είναι αυτή των πλαισίων άμορφου πυριτίου όπου υποχρεωτικά συνδέονται σε αντιστροφείς με μετασχηματιστή απομόνωσης [6].

Επιπλέον, ανάλογα της τεχνολογίας διασύνδεσης των Φ/Β πάνελ που χρησιμοποιείται οι αναστροφείς χωρίζονται στις παρακάτω κατηγορίες. Κεντρικοί αναστροφείς (central inverters), αναστροφείς κλάδων (string inverters), αναστροφείς πολλαπλών κλάδων (multi-string inverters) και αναστροφείς με ενσωμάτωση σε ΦΒ πλαίσια (module integrated inverters). Η διαφροποίηση τους δίδεται σχηματικά στο Σχήμα 1.16 [6].

Οι κεντρικοί αναστροφείς αποτελούν το είδος των αναστροφέων που εμφανίζουν τα μεγαλύτερα επίπεδα ισχύος, της τάξης από 30-50kW έως και 1-2MW. Για το λόγο αυτό, η χρήση τους είναι περισσότερο διαδεδομένη σε σταθμούς μεγάλης ισχύος. Σε ορισμένες περιπτώσεις και σε επίπεδα ισχύος των εκατοντάδων kW οι αναστροφείς αυτοί συνοδεύονται από μετασχηματιστή ανύψωσης 0,4/20kV, ώστε να επιτρέπουν την απευθείας σύνδεσή τους στο δίκτυο MT της ΔΕΗ. Αρχικά στους κεντρικούς μετατροπείς χρησιμοποιήθηκαν θυρίστορ με χαμηλές συχνότητες μεταγωγής και αυξημένες ανάγκες χρήσης φίλτρων. Ωστόσο με την εξέλιξη της τεχνολογίας τα θυρίστορ αντικαταστάθηκαν από τρανζίστορ IGBT με μεγαλύτερες συχνότητες μεταγωγής, τα οποία, σε συνδυασμό με την ανάπτυξη εξελιγμένων τεχνικών διαμόρφωσης εύρους παλμών (PWM) υλοποιούμενων ψηφιακά, οδήγησαν τους κεντρικούς μετατροπείς στην δημιουργία σχεδόν ημιτονοειδών ρευμάτων εξόδου με χαμηλές απαιτήσεις χρήσης φίλτρων. Οι κεντρικοί μετατροπείς χαρακτηρίζονται από το μικρό αριθμό εισόδων DC (συνήθως 1-2 εισόδους). Το γεγονός αυτό, σε συνδυασμό με τον μεγάλο αριθμό πλαισίων τα οποία πρέπει να συνδεθούν στην είσοδο τους, επιβάλλει την εκτεταμένη χρήση DC καλωδίων σε αντίθεση με τις άλλες ομάδες

αναστροφέων όπου η καλωδίωση μπορεί να γίνει με AC [6].



Σχήμα 1.16: Διαφοροποίηση στη τεχνολογία σύνδεσης των αναστροφέων [6]

Αναστροφείς κλάδων ή στοιχειωσειρών αποτελούν αδιαμφισβήτητητα την περισσότερο διαδεδομένη κατηγορία αναστροφέων σε σταθμούς μικρής έως και μέσης ισχύος. Η βασική αρχή λειτουργίας τους βασίζεται στην παράλληλη σύνδεση ενός αριθμού κλάδων (strings) σε αντίστοιχες εισόδους του αναστροφέα (της τάξης των 2-8). Οι αναστροφείς αυτού του τύπου κυκλοφορούν στο εμπόριο με μετασχηματιστή ή χωρίς μετασχηματιστή καθώς επίσης και σε μονοφασική ή τριφασική σύνδεση (συνήθως πάνω από 10kW). Διαθέτουν αρκετή ευελιξία αναφορικά με τον αριθμό των πλαισίων που μπορεί να συνδεθεί στις εισόδους τους, αρκεί φυσικά να μην παραβιάζονται οι μέγιστες ρυθμίσεις ασφαλείας τους. Επιπλέον είναι σκόπιμο να συνδέονται στις εισόδους τους με τον ίδιο τύπο και αριθμό πλαισίων [6].

Οι αναστροφείς πολλαπλών κλάδων χρησιμοποιούνται όταν σε έναν αναστροφέα είναι απαραίτητο να συνδεθούν διαφορετικά πλαίσια, όσον αφορά την ονομαστική ισχύ τους, τον αριθμό των πλαισίων που αποτελούν τον κλάδο, τον κατασκευαστή κτλ. Στην περίπτωση αυτή κάθε είσοδος είναι στην ουσία ανεξάρτητη από τις άλλες και διαθέτει τους δικούς της ελεγκτές μέγιστης ισχύος και μετατροπείς. Οι αναστροφείς αυτοί χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις όπου η διαθεσιμότητα πλαισίων επιβάλλει τη σύνδεση διαφορετικών πλαισίων ή σε περιπτώσεις όπου μεταβάλλονται τα

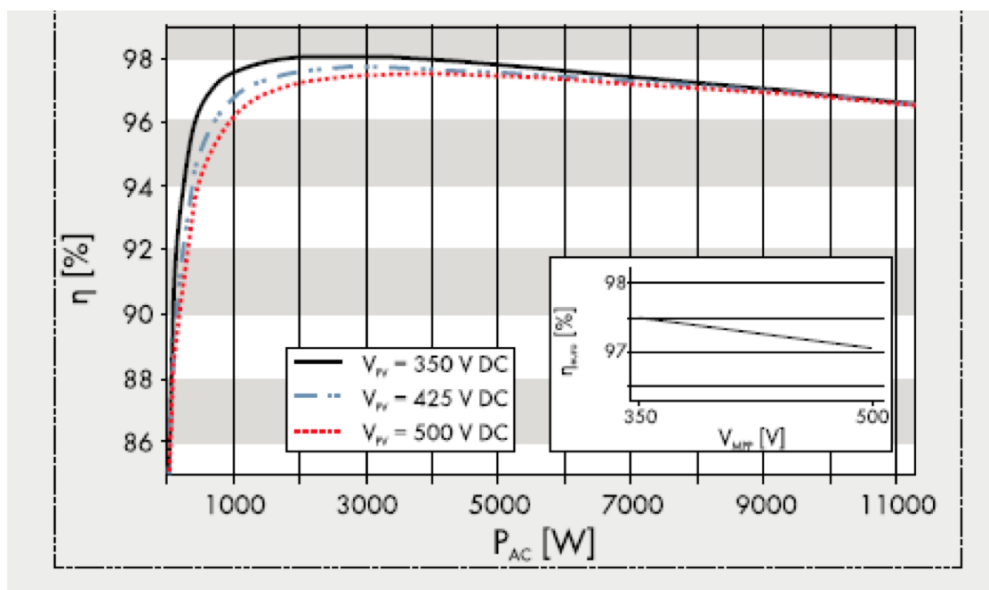
χαρακτηριστικά εγκατάστασης που επηρεάζουν την παραγωγή ενέργειας, όπως είναι η κλίση των πλαϊσίων ή η ύπαρξη προβλημάτων σκίασης [6].

Οι αναστροφείς με ενσωμάτωση σε ΦΒ πλαίσια αποτελούν μία σχετικά νέα κατηγορία χαμηλής ισχύος (έως περίπου 300W). Οι αναστροφείς αυτοί ενσωματώνονται, δηλαδή δέχονται στην είσοδο τους, με ένα ΦΒ πλαίσια. Σκοπός της χρήσης τους αποτελεί η βέλτιστη λειτουργία της ΦΒ εγκατάστασης ανά κάθε πλαίσιο χωριστά. Οι αναστροφείς αυτοί παρουσιάζουν ενδιαφέρον κυρίως για μικρές οικιακές εγκαταστάσεις με σημαντικά προβλήματα σκίασης [6].

Ο (συνολικός) βαθμός απόδοσης του αναστροφέα, σε συγκεκριμένες συνθήκες φόρτισης ορίζεται ως το πηλίκο της (AC) ισχύος εξόδου προς την (DC) ισχύ εισόδου, δηλαδή [6]:

$$\eta(\%) = \frac{P_{AC}}{P_{DC}} \quad (1.11)$$

Ο βαθμός απόδοσης αντανακλά το ποσό της ισχύος που χάνεται ως απώλειες στον αναστροφέα. Οι κυριότερες απώλειες εμφανίζονται στα ημιαγωγά στοιχεία ισχύος, ενώ άλλες πηγές απωλειών αποτελούν οι ωμικές αντιστάσεις των ηλεκτρονικών εξαρτημάτων, οι απώλειες αερισμού κτλ. Ο σημαντικότερος παράγοντας που επηρεάζει το βαθμό απόδοσης, θεωρώντας ίδιο ποσό φόρτισης του αναστροφέα, είναι η ύπαρξη ή μη μετασχηματιστή απομόνωσης. Όπως αναφέρθηκε στην αγορά υπάρχουν οι τεχνολογίες αναστροφέων με μετασχηματιστή ή χωρίς. Τυπικές τιμές απόδοσης αναστροφέων με μετασχηματιστή είναι της τάξης του 92-94% με μετασχηματιστή χαμηλής συχνότητας (LF) και 94-96% με μετασχηματιστή υψηλής συχνότητας (HF). Αντίθετα, σε αναστροφείς χωρίς μετασχηματιστή ο βαθμός απόδοσης κυμαίνεται μεταξύ 96-98,5%. Οι παραπάνω τιμές απόδοσης αναφέρονται στον καταγραφόμενο μέγιστο βαθμό απόδοσης (maximum efficiency), τιμή που αναγράφεται πάντα στα τεχνικά φυλλάδια. Ωστόσο θα πρέπει να γνωρίζει κανείς ότι κάθε αναστροφέας λειτουργεί λίγες φορές στον απολύτως μέγιστο βαθμό απόδοσης, καθώς αυτός εξαρτάται από το επίπεδο φόρτισης του αναστροφέα και την DC τάση λειτουργίας. Ο βαθμός φόρτισης νοείται το ποσοστό της ισχύος εισόδου του αναστροφέα, ως προς την ονομαστική ισχύ εισόδου ή η ισχύς εξόδου (ο ακριβής προσδιορισμός εξαρτάται από τον κατασκευαστή). Οι κατασκευαστές παρουσιάζουν τα προαναφερθέντα στοιχεία με τη μορφή διαγραμμάτων, όπως για παράδειγμα στο Σχήμα 1.17 [6].



Σχήμα 1.17: Διάγραμμα βαθμού απόδοσης αναστροφέων [6]

Όπως παρατηρείται στο Σχήμα 1.17, ο βαθμός απόδοσης των αναστροφέων εμφανίζει μέγιστο σε μία περιοχή τιμών ισχύος και DC τάσεων. Υπέρ-διαστασιοποιημένοι αναστροφείς (αναφορικά με τη συνολική ισχύ των ΦΒ πλαισίων που συνδέονται στην είσοδο τους) είναι πιθανό να λειτουργούν σε σχετικά χαμηλά φορτία για τα οποία δεν εμφανίζουν το βέλτιστο βαθμό απόδοσης και επιπλέον στοιχίζουν περισσότερο. Από την άλλη πλευρά, αναστροφείς που εμφανίζονται υπό-διαστασιοποιημένοι σε σχέση με την ισχύ των ΦΒ πλαισίων, είναι δυνατόν να οδηγήσουν σε απώλειες ενέργειας λόγω υπερφόρτισης. Κάθε αναστροφέας χαρακτηρίζεται από μία μέγιστη ισχύ η οποία δεν μπορεί να ξεπεραστεί για λόγους ασφαλείας, οπότε είναι πιθανόν πλεονάσματα ενέργειας από τα ΦΒ πλαισίων να χάνονται. Συνήθως, ανάλογα και με τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της περιοχής εγκατάστασης, το είδος των πλαισίων, της χρησιμοποιούμενης τεχνολογίας στήριξης (σταθερές βάσεις ή τράκερ) και της καμπύλης απόδοσης του κάθε αναστροφέα, η σχέση μεταξύ της ονομαστικής ισχύος εξόδου του αναστροφέα και της ισχύος των ΦΒ πλαισίων κυμαίνεται μεταξύ 90% και 115% [6].

Η παρακολούθηση του σημείου βέλτιστης λειτουργίας γνωστή και ως MPPT (Maximum Power Point Tracking) αναφέρεται στην τεχνική που χρησιμοποιείται ώστε να μεταβάλλεται το σημείο λειτουργίας (τάση-ρεύμα) των ΦΒ πλαισίων ώστε να αντιστοιχεί κάθε φορά στη μέγιστη ισχύ. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η ισχύς ενός ΦΒ

πλαίσιου, η οποία προκύπτει από το γινόμενο της τάσης με την ένταση ρεύματος, δεν είναι σταθερή αλλά μεταβάλλεται σε σχέση με την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας (irradiance, G) και της θερμοκρασίας. Οι κατασκευαστές των πλαισίων δίνουν στα τεχνικά φυλλάδια τη μέγιστη ισχύ (Maximum Power Point, MPP) στις πρότυπες συνθήκες ελέγχου (STC) οι οποίες αντιστοιχούν σε ένταση ηλιακής ακτινοβολίας ίση προς $G=1000\text{W/m}^2$, και θερμοκρασία πλαισίων ίση προς 25 βαθμούς Κελσίου. Σε οποιαδήποτε άλλες συνθήκες, η μέγιστη ισχύς μεταβάλλεται και μειώνεται με τη μείωση της ακτινοβολίας και την αύξηση της θερμοκρασίας. Κατά συνέπεια είναι απαραίτητο κάθε αναστροφέας να διαθέτει διατάξεις οι οποίες παρακολουθούν συνεχώς το σημείο λειτουργίας των πλαισίων και το μεταβάλλουν, ώστε να αντιστοιχεί κάθε φορά στο σημείο της μέγιστης ισχύος. Στη διεθνή βιβλιογραφία αναφέρονται διάφοροι αλγόριθμοι MPPT. Ένας απλός και διαδεδομένος αλγόριθμος είναι αυτός της μεθόδου P&O (perturbation and observe, διαταραχή και παρατήρηση). Στον αλγόριθμο αυτό το σημείο λειτουργίας μεταβάλλεται ελαφρά και παρατηρείται η μεταβολή στην ισχύ. Αν η μεταβολή οδηγεί σε αύξηση της ισχύος (θετική παράγωγος), τότε επιβάλλεται νέα μεταβολή, έως το σημείο που η μεταβολή της ισχύος οδηγήσει σε μείωση ισχύος (αρνητική παράγωγος). Τότε το τελικό σημείο λειτουργίας ταλαντώνεται μεταξύ αυτών των δύο σημείων θετικής και αρνητικής παραγωγού, που αντιστοιχεί σε μέγιστο. Τα τεχνικά φυλλάδια των αναστροφέων αναφέρονται στο εύρος της DC τάσης εισόδου στο οποίο μπορεί να επιτευχθεί έλεγχος της μέγιστης ισχύος. Επίσης, συχνά τα φυλλάδια των κατασκευαστών αναφέρονται στο βαθμό απόδοσης της παρακολούθησης του σημείου μέγιστης ισχύος (MPPT efficiency). Ο βαθμός απόδοσης ορίζεται ως το ποσό της ενέργειας που λαμβάνει ο αναστροφέας από τα ΦΒ πλαίσια προς το (θεωρητικό) ποσό της μέγιστης ενέργειας που μπορεί να λάβει για μία προκαθορισμένη χρονική περίοδο. Δηλαδή ισχύει [6]:

$$\eta_{MPPT} = \frac{\int_0^t P_{DC}(t) dt}{\int_0^t P_{MAX}(t) dt} \quad (1.12)$$

Η αρμονική παραμόρφωση του παραγόμενου ρεύματος και ο συντελεστής ισχύος συνδέονται άμεσα με την ποιότητα της παρεχόμενης προς το δίκτυο ισχύος. Ιδανικά, η

ισχύς θα πρέπει να μεταφέρεται με συντελεστή ισχύος ίσο προς τη μονάδα, ώστε η άεργος ισχύς του σταθμού να είναι μηδενική και επιπλέον οι κυματομορφές τάσης και ρεύματος θα πρέπει να είναι σχεδόν ημιτονοειδούς μορφής, ώστε να μην εγχέονται ανεπιθύμητες αρμονικές στο δίκτυο. Ως μέτρο της ποιότητας του ρεύματος αναφορικά με τις αρμονικές του χρησιμοποιείται ο ευρέως διαδεδομένος δείκτης της «ολικής αρμονικής παραμόρφωσης» περισσότερο γνωστός ως THD, από τα αρχικά των λέξεων Total Harmonic Distortion. Ο δείκτης αυτός ορίζεται ως [6]:

$$THD_i = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + \dots}}{I_1} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1} \quad (1.13)$$

όπου I_h , $h=2,3,4,\dots$ είναι η ενεργός τιμή (rms) ή πλάτος της αρμονικής τάξης h (δηλαδή συχνότητας $50 \times h$) και I_1 είναι η ενεργός τιμή (rms) ή πλάτος της αρμονικής 1^{ης} τάξης, δηλαδή της θεμελιώδους των 50Hz. Από τον παραπάνω τύπο προκύπτει ότι για μία αμιγώς ημιτονοειδή κυματομορφή ο συντελεστής THD είναι ίσος με το μηδέν ενώ όσο μεγαλύτερα είναι τα πλάτη των αρμονικών τόσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του συντελεστή. Ο παραπάνω ορισμός έχει το μειονέκτημα ότι δεν ποσοτικοποιεί την επίδραση της συχνότητας της κάθε αρμονικής, παραμένει ωστόσο ένα διεθνώς αναγνωρισμένος δείκτης για την παρουσία αρμονικών. Ο συντελεστής THD του ρεύματος που παράγεται από έναν αναστροφέα φωτοβολταϊκών συστημάτων προσδιορίζεται στο πρότυπο IEC 61000-3-2. Θεωρώντας το φάσμα αρμονικών έως την αρμονική 49^{ης} τάξης, ο συντελεστής THD του ρεύματος θα πρέπει να είναι μικρότερος από 5%. Είναι ενδιαφέρον να σημειωθεί ότι λόγω της υψηλής συχνότητας μεταγωγής των διακοπών ηλεκτρονικών ισχύος (τεχνολογίας IGBT) που χρησιμοποιούνται στις γέφυρες του αναστροφέα και της χρησιμοποίησης της τεχνικής διαμόρφωσης εύρους παλμών (PWM) οι κυριότερες αρμονικές εμφανίζονται σε πολλαπλάσια της συχνότητας αυτής, σε τάξεις συνήθως μεγαλύτερες από την 50^η τάξη. Η AC ισχύς για την οποία πρέπει να ισχύει η προδιαγραφή της αρμονικής παραμόρφωσης δεν αναφέρεται και έτσι συνήθως νοείται η ονομαστική ισχύς. Η ολική αρμονική παραμόρφωση του ρεύματος αυξάνεται σημαντικά σε φορτία πολύ μικρότερα του ονομαστικού [6].

Μία σημαντική προδιαγραφή που τίθεται για τους αναστροφείς που συνδέονται στο δίκτυο είναι αυτή της έγχυσης DC ρεύματος στο δίκτυο, γεγονός που σχετίζεται και με την ολική αρμονική παραμόρφωση του ρεύματος εξόδου. Το δυσμενές αποτέλεσμα της

έγχυσης DC ρεύματος στο δίκτυο είναι η μεταβολή του σημείου λειτουργίας των μετασχηματιστών του δικτύου προς τον κορεσμό, το οποίο οδηγεί σε υψηλό ρεύμα πρωτεύοντος με συνέπεια να ενεργοποιούνται μέσα προστασίας. Επιπλέον επηρεάζεται αρνητικά ο χρόνος ζωής και ο βαθμός απόδοσης των μετασχηματιστών, ενώ καταπονούνται επίσης και οι καλωδιώσεις. Το θέμα της έγχυσης DC ρεύματος αποκτά σημασία σε αναστροφείς χωρίς μετασχηματιστή. Οι αναστροφείς που διαθέτουν μετασχηματιστή χαμηλής συχνότητας (50Hz) πετυχαίνουν γαλβανική απομόνωση μεταξύ της DC και της AC πλευράς και έτσι αποφεύγεται η έγχυση DC ρεύματος. Αντίθετα, σε αναστροφείς χωρίς μετασχηματιστή, όπου το πρόβλημα μπορεί να εμφανιστεί, εφαρμόζονται εξελιγμένες τεχνικές για μέτρηση ρεύματος και ηλεκτρονικό έλεγχο. Οι αναστροφείς που διαθέτουν μετασχηματιστή απομόνωσης σε υψηλή συχνότητα, αποτελούν μία ενδιάμεση κατάσταση στο βαθμό που επηρεάζεται ο τύπος του μέσου προστασίας που χρησιμοποιείται για έμμεσες επαφές στην DC πλευρά. Σήμερα για τη σύνδεση ενός ΦΒ πάρκου τίθεται ως απαραίτητος όρος η έγχυση DC να είναι μικρότερη του 0.5% του ονομαστικού ρεύματος και πρέπει να προσκομιστούν τα ανάλογα πιστοποιητικά [6].

Η διαφορά ανάμεσα στην ονομαστική ισχύ και την ισχύ λειτουργίας από τα ΦΒ πλαίσια προϋποθέτει ότι οι αναστροφείς θα πρέπει να προστατευτούν από τη λειτουργία υπερφόρτισης, για παράδειγμα όταν η ισχύς που παράγεται από τα ΦΒ πλαίσια είναι μεγαλύτερη από τη μέγιστη DC εισόδου του αναστροφέα. Στην περίπτωση αυτή οι εσωτερικοί αλγόριθμοι ελέγχου μετατοπίζουν το σημείο λειτουργίας από το μέγιστο (MPP) ώστε να προστατευτεί ο αναστροφέας από υπερθέρμανση. Δυστυχώς, στην περίπτωση αυτή η επιπλέον αυτή ενέργεια των ΦΒ πλαισίων δεν αξιοποιείται. Υπάρχουν επίσης αναστροφείς στους οποίους δεν εκτελείται η παραπάνω διαδικασία, αλλά απλά ο αναστροφέας σταματά τη λειτουργία του και προσπαθεί να επανασυνδεθεί μετά από μικρό χρονικό διάστημα. Για το σκοπό αυτό είναι απαραίτητο να γίνεται σωστή διαστασιολόγηση των αναστροφέων και να ληφθεί υπόψη μία μέση εκτίμηση της πραγματικά παραγόμενης ενέργειας από τα ΦΒ πλαίσια. Το θέμα αυτό είναι σημαντικότερο σε ΦΒ πάρκα με τράκερ καθώς εμφανίζουν σημαντικά αυξημένη παραγωγή ενέργειας που επιφέρει τη λειτουργία αναστροφέων σε υψηλότερα φορτία απ' ότι για παράδειγμα σε συστήματα σταθερών βάσεων [6].

Ένα ακόμη χαρακτηριστικό που θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά την επιλογή και τοποθέτηση των αναστροφέων είναι ο βαθμός προστασίας του (IP class). Αν και

αναστροφείς με υψηλό δείκτη προστασίας (π.χ. IP 65) μπορούν να τοποθετηθούν στον εξωτερικό χώρο, γενικά συνιστάται να αποφεύγεται η απευθείας έκθεση τους στον ήλιο και να τοποθετούνται στο πίσω μέρος των σταθερών βάσεων ή στη βάση των τράκερ. Αναστροφείς με μικρότερο δείκτη προστασίας IP (π.χ. IP44) μπορούν να τοποθετηθούν σε εξωτερικό χώρο με πρόβλεψη κάποιου καλύμματος προστασίας από καιρικές συνθήκες. Αντίθετα αναστροφείς με ακόμη μικρότερο δείκτη (π.χ. IP 21-23) θα πρέπει οπωσδήποτε να τοποθετούνται σε εσωτερικό χώρο. Στην περίπτωση αυτή μέριμνα πρέπει να ληφθεί για τον επαρκή αερισμό του χώρου ώστε να αποφεύγεται η υπερθέρμανση του αναστροφέα κατά τους καλοκαιρινούς μήνες, σε ορισμένες περιπτώσεις αν θεωρείται σκόπιμο θα πρέπει να προβλεφθεί και η τοποθέτηση κλιματιστικού μηχανήματος. Αναφορικά με την αξιοπιστία των αναστροφέων, οι περισσότεροι κατασκευαστές εγγυώνται μία περίοδο της τάξης των 5 ετών. Είναι ωστόσο δυνατόν, με αντίστοιχη αύξηση του κόστους η περίοδος εγγύησης να επεκταθεί αρκετά, σε διάστημα ακόμη και 20 ετών. Το γεγονός ότι οι αναστροφείς εμφανίζουν σημαντικά μειωμένους χρόνους εγγύησης σε σχέση με τα υπόλοιπα βασικά τμήματα της ΦΒ εγκατάστασης (π.χ. πλαίσια, βάσεις, καλώδια κτλ), λόγω της ηλεκτρονικής φύσης τους, θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά τους χρηματοοικονομικούς υπολογισμούς καθώς είναι πολύ πιθανόν στο διάστημα της 20ετίας που προβλέπεται η αγορά της ηλεκτρικής ενέργειας από το ΔΕΣΜΗΕ να χρειαστεί να γίνει αντικατάσταση τους επί πληρωμή. Τέλος θα πρέπει να αναφερθεί ότι όλοι οι αναστροφείς της αγοράς είναι εξοπλισμένοι με συστήματα που επιτρέπουν την παρακολούθηση της λειτουργίας τους, την καταγραφή των δεδομένων και της δυνατότητα επικοινωνίας ώστε να καταστεί δυνατή η τοπική και απομακρυσμένη παρακολούθηση της πραγματικής παραγωγής του ΦΒ σταθμού. Ειδικά στην απομακρυσμένη παρακολούθηση, σχεδόν όλοι οι κατασκευαστές αναστροφέων δίνουν τη δυνατότητα παρακολούθησης μέσω διαδικτύου, μέσω αντίστοιχων ιστοσελίδων, ώστε να είναι δυνατή η επισκόπηση της λειτουργίας από απόσταση και η αναφορά σφαλμάτων [6].

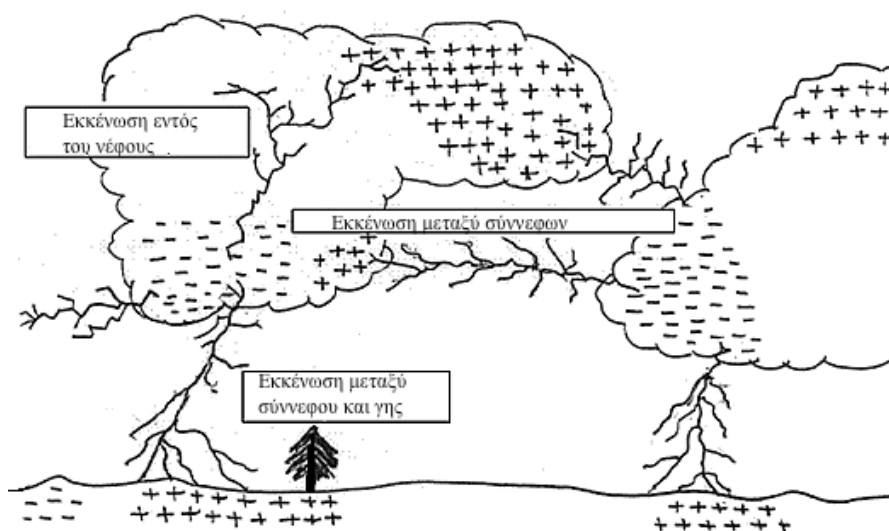
Κεραυνικά Πλήγματα και Αντικεραυνική Προστασία

2.1 Ατμοσφαιρικές Εκκενώσεις

Αναγκαία συνθήκη για την εμφάνιση ατμοσφαιρικών εκκενώσεων είναι η εμφάνιση κάποιας πυκνότητας φορτίου εντός ενός νέφους. Ο μηχανισμός διαχωρισμού των ηλεκτρικών φορτίων δεν έχει γίνει ακόμα γνωστός. Παρά ταύτα έχουν διατυπωθεί αρκετές θεωρίες όπως το φαινόμενο της διασποράς, όπου ο διαχωρισμός των φορτίων πραγματοποιείται από ανοδικά ρεύματα αέρα, εμφανίζοντας στο επάνω μέρος του νέφους αρνητικό φορτίο ενώ στο κάτω μέρος ένα θετικό φορτίο. Σε κάθε περίπτωση ένα ηλεκτρισμένο νέφος έχει κάποια πειραματικά επιβεβαιωμένα χαρακτηριστικά. Αρχικά ένα ηλεκτρισμένο σύννεφο περιέχει ηλεκτρικά φορτία και των δύο προσήμων σε ίσες ποσότητες με τα φορτία του κάθε πρόσημου να καταλαμβάνουν διακεκριμένες θέσεις εντός του σύννεφου. Τα σύννεφα παρουσιάζουν, κατά κανόνα, στο κάτω μέρος τους ένα σημαντικό φορτίο αρνητικής πολικότητας που κυμαίνεται από μερικές δεκάδες έως μερικές εκατοντάδες C και ένα φορτίο θετικής πολικότητας στο πάνω μέρος τους. Έτσι στο χώρο μεταξύ σύννεφου και γης αναπτύσσεται ένα ηλεκτρικό πεδίο του οποίου οι δυναμικές γραμμές καταλήγουν πάνω σε επαγόμενα φορτία αντίθετης πολικότητας από αυτή του νέφους. Η πυκνότητα και η διασπορά των φορτίων και των δύο προσήμων δημιουργούν μια συγκεκριμένη εικόνα μέσα στο νέφος, η οποία διαρκώς μεταβάλλεται, γεγονός που εμποδίζει την συστηματική ταξινόμηση των ηλεκτρικών καταστάσεων που μπορούν να επικρατούν μέσα στο νέφος. Ο διαχωρισμός, ωστόσο, των φορτίων συμβαίνει μέσα σε μικρό σχετικά χρονικό διάστημα, από μερικά λεπτά της ώρας έως μισή ώρα περίπου [7].

Οι ατμοσφαιρικές εκκενώσεις διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες όπως διακρίνεται και στο Σχήμα 2.1: μεταξύ σύννεφου και γης ή αντίστροφα, εντός του ίδιου του σύννεφου και μεταξύ σύννεφων. Οι κεραυνοί ανάμεσα σε σύννεφα και γη

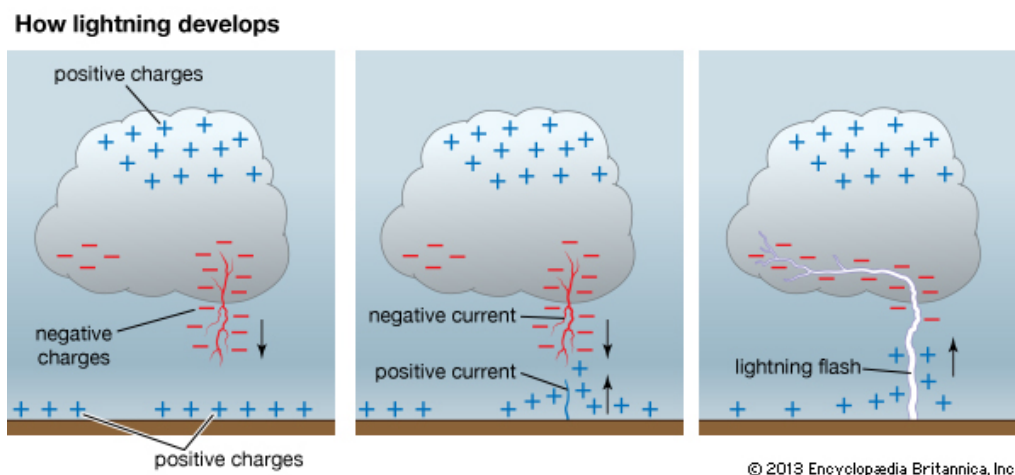
παρατηρούνται όταν το ηλεκτρικό πεδίο πάρει μια κρίσιμη τιμή πλησίον του νέφους, οπότε έχουμε εκκένωση κατερχόμενη, ή πλησίον του εδάφους, οπότε έχουμε εκκένωση ανερχόμενη. Σαν πολικότητα της εκκένωσης μεταξύ σύννεφου-γης, λαμβάνεται εκείνη του φορτίου του κάτω μέρους του σύννεφου που την προκάλεσε. Οι υπάρχουσες πληροφορίες για τους κεραυνούς ανάμεσα στα σύννεφα είναι λίγες και συχνά αντιφάσκουν μεταξύ τους. Γενικά στην περίπτωση αυτή, η εκκένωση λαμβάνει χώρα ανάμεσα στο ανώτερο θετικό και στο κατώτερο αρνητικό κέντρο του χωρικού φορτίου. Η διάρκεια της εκκένωσης είναι μεγάλη ενώ το ρεύμα της έχει τιμές μερικές εκατοντάδες A έως 1kA. Κερανοί ανάμεσα στα σύννεφα εμφανίζονται σε ύψος μεγαλύτερο του 1km και μικρότερο των 12km. Βασικό χαρακτηριστικό των κεραυνών αυτών είναι πως έχουν μεγάλο μήκος κεραυνικού τόξου που φτάνει μέχρι και 40km [7].



Σχήμα 2.1: Τρεις κατηγορίες ατμοσφαιρικών εκκενώσεων [36]

Οι φάσεις μια ατμοσφαιρικής εκκένωσης μεταξύ σύννεφου και γης, οι οποίες φαίνονται ενδεικτικά στο Σχήμα 2.2, είναι τρεις: η προεκκένωση, η εκκένωση αντίθετης φοράς και η κύρια εκκένωση. Στη φάση της προεκκένωσης το νέφος εμφανίζεται μακροσκοπικά ως ένα ηλεκτρικό δίπολο δημιουργώντας υψηλές εντάσεις ηλεκτρικού πεδίου στις παρυφές. Λόγω αυτού του ηλεκτρικού πεδίου δύναται να προκληθεί έναρξη ιονισμού των μορίων του αέρα το οποίο ακολουθείται από το σχηματισμό ενός οχετού ο οποίος ακολουθεί της δυναμικές γραμμές του ηλεκτρικού πεδίου και τροφοδοτείται συνεχώς από το σύννεφο με φορτία. Ο σχηματισμός αυτός του οχετού θυμίζει

μεταλλική προεξοχή με την πεδιακή ένταση στην άκρη προς στο έδαφος να ξεπερνά σε τιμή εκείνη για την έναρξη του ιονισμού του αέρα. Έπεται η φάση της εκκένωσης αντίθετης φοράς όπου λόγω της υψηλής έντασης του πεδίου στην άκρη του οχετού δημιουργεί μια ανερχόμενη εκκένωση από το έδαφος. Η απόσταση που θα πρέπει να φτάσει η κεφαλή του κατερχόμενου οχετού προκειμένου να ξεκινήσει από τη γη η εκκένωση αντίθετης φοράς χαρακτηρίζεται σαν απόσταση εναύσεως. Στη τελευταία φάση, που είναι η κύρια εκκένωση και εξελίσσεται με ιδιαίτερα μεγάλη ταχύτητα, έχουμε πλήρης γεφύρωση της απόστασης μεταξύ σύννεφου και γης. Τα κυκλοφορούντα ρεύματα δια μέσου του οχετού είναι της τάξης των δεκάδων kA με κλίσεις μετώπου της τάξης των δεκάδων kA/μs, ενώ η διάρκεια των ρευμάτων αυτών είναι της τάξης των δεκαδων μs [7].



Σχήμα 2.2: Οι τρεις φάσεις της κεραυνικής εκκένωσης [37]

Σαν πολικότητα της εκκένωσης λαμβάνεται η πολικότητα φορτίου του κάτω μέρους του σύννεφου που προκάλεσε την εκκένωση. Σύμφωνα με την συνθήκη αυτή, το 80% περίπου των κεραυνών είναι αρνητικής πολικότητας. Για την ένταση του ρεύματος του κεραυνού υπάρχουν πολλά πειραματικά δεδομένα από τα οποία συμπεραίνεται πως οι μέγιστες εντάσεις των κεραυνικών ρευμάτων φτάνουν πολλές δεκάδες kA, η μέση τιμή είναι μικρότερη των 2 kA και το εύρος της πρώτης μερικής εκκένωσης είναι μεγαλύτερο από τις τυχόν επόμενες εκκενώσεις [7].

Ο κεραυνός ως ηλεκτρικό φαινόμενο χαρακτηρίζεται από ορισμένες παραμέτρους: τη μέγιστη τιμή ρεύματος, τη μέγιστη κλίση μετώπου του ρεύματος, το μεταφερόμενο

φορτίο και το ολοκλήρωμα του τετραγώνου του ρεύματος, ποσότητα ανάλογη της εκλυόμενης ενέργειας από το κεραυνικό πλήγμα. Κάθε μία από τις παραμέτρους αυτές έχει ενοχλητικές μέχρι καταστροφικές συνέπειες για την ανθρώπινη ζωή και τις τεχνικές εγκαταστάσεις. Σαν συνέπεια της μέγιστης τιμής έχουμε την υπερπήδηση των μονωτήρων. Η μέγιστη κλίση μετώπου του κεραυνικού ρεύματος $\left. \frac{di}{dt} \right|_{max}$ καθορίζει τις επαγόμενες τάσεις σε βρόχους κυκλωμάτων, τάσεις, που αναπτυσσόμενες παραδείγματος χάριν σε λογικά κυκλώματα ή κυκλώματα που περιλαμβάνουν ευαίσθητα ηλεκτρονικά στοιχεία του συστήματος πλοήγησης ή τηλεπικοινωνίας αεροσκαφών, μπορούν να έχουν δραματικές συνέπειες. Το ολοκλήρωμα του ρεύματος $\int_0^{\infty} i(t) \cdot dt$, δηλαδή το μεταφερόμενο φορτίο, προκαλεί τοπική τήξη και διάτρηση μεταλλικών επιφανειών μικρού πάχους. Τέλος, το ολοκλήρωμα του τετραγώνου του ρεύματος $\int_0^{\infty} i^2(t) \cdot dt$ είναι ανάλογο της εκλυόμενης ενέργειας η οποία προκαλεί θερμικά φαινόμενα όπως τήξη μετάλλων, έναυση εύφλεκτων ατμών ή αερίων [7].

2.2 Συστήματα Αντικεραυνικής Προστασίας (ΣΑΠ)

Οι φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις υπαίθριου χώρου λόγω της μεγάλης έκτασης που καταλαμβάνουν, σε συνδυασμό με το πλήθος των ηλεκτρονικών στοιχείων που περιλαμβάνουν, είναι εξαιρετικά ευάλωτες σε κεραυνικά ρεύματα και κρουστικές υπερτάσεις. Ένα σύστημα αντικεραυνικής προστασίας ή ΣΑΠ έρχεται να επιλύσει αυτή την αδυναμία της ΦΒ εγκατάστασης. Θα πρέπει να αναφερθεί ότι το ΣΑΠ είναι παθητικό σύστημα και κατά συνέπεια δεν εμποδίζει, ούτε ελκύει τον κεραυνό να πλήξει την κατασκευή. Σε περίπτωση πτώσης κεραυνού, το ΣΑΠ μειώνει τους κινδύνους στον ελάχιστο δυνατό βαθμό, χωρίς όμως να εξασφαλίζει απόλυτη προστασία σε αντικείμενα, άτομα και συσκευές. Ως εκ τούτου, η διαδικασία σχεδιασμού για αντικεραυνική προστασία αποτελείται από ένα σύνολο βημάτων στα οποία γίνεται ανάλυση της ΦΒ εγκατάστασης, αξιολογείται το κατά πόσο είναι απαραίτητη η εγκατάσταση ενός ΣΑΠ και αν απαιτείται, τότε γίνεται η διαστασιολόγηση του [8].

Αξιολόγηση κινδύνου και προσδιορισμός απαιτούμενου επιπέδου προστασίας ΣΑΠ

Οι κίνδυνοι που πρέπει να περιοριστούν με ένα σύστημα αντικεραυνικής προστασίας, όπως ορίζονται στο IEC 62305-2, είναι κίνδυνος απώλειας ανθρώπινης ζωής, κίνδυνος απώλειας κοινωφελούς δικτύου (π.χ. Ενέργεια, Ύδρευση, Τηλεπικοινωνία κτλ), κίνδυνος απώλειας πολιτιστικής κληρονομιάς και κίνδυνος οικονομικών απωλειών. Η εκτίμηση του ολικού κινδύνου μιας κατασκευής από κεραυνικό πλήγμα ορίζεται τόσο με αντικειμενικά όσο και με υποκειμενικά κριτήρια επιλογής [8].

Στα βήματα που απαιτούνται για να κριθεί αν είναι απαραίτητη η εγκατάσταση ενός ΣΑΠ περιλαμβάνονται η ανάλυση των χαρακτηριστικών της ΦΒ εγκατάστασης, όπου επισημαίνονται βασικά χαρακτηριστικά της εγκατάστασης, όπως διαστάσεις, υλικά κατασκευής περιβάλλοντος χώρος, ηλεκτρολογικός εξοπλισμός και συνδεδεμένες παροχές (τηλεπικοινωνιακές, ηλεκτροδότησης) καθώς η ανάλυση συχνότητας κεραυνικών φαινομένων όπου γίνεται εκτίμηση της αναμενόμενης συχνότητας άμεσων και έμμεσων κεραυνικών πληγμάτων, που μπορούν να πλήξουν την κατασκευή (σημαντικές παράμετροι είναι ο ετήσιος αριθμός πτώσης κεραυνού, στην κατασκευή ή πλησίον αυτής και σε γραμμή τροφοδοσίας ή πλησίον αυτής). Επιπλέον γίνεται αποτίμηση ρίσκου απωλειών R και αποδεκτού ρίσκου R_t όπου με τη χρήση των δύο αυτών αναλύσεων γίνεται αποτίμηση του κινδύνου να πληγεί η κατασκευή. Το ρίσκο απώλειας ανθρώπινης ζωής, δημόσιας υπηρεσίας και πολιτιστικής κληρονομιάς είναι πρωτεύουσας σημασίας. Το αποδεκτό ρίσκο είναι μια συγκρίσιμη τιμή η οποία μπορεί να επιβάλλεται από τη νομοθεσία, την εταιρεία που κατασκευάζει το έργο ή μπορεί να αναζητηθεί σε πρότυπα. Έπειτα ακολουθεί η σύγκριση R με R_t . Εάν η τιμή του εκτιμώμενου ρίσκου R είναι μεγαλύτερη από R_t , τότε κρίνεται αναγκαία η εγκατάσταση ΣΑΠ, ενώ σε αντίθετη περίπτωση είναι προαιρετική. Επίσης ανάλογα με τη διαφορά αυτών των δύο τιμών, θα καθοριστεί στη συνέχεια σε ποια στάθμη προστασίας πρέπει να κατατάσσεται το ΣΑΠ. Η στάθμη προστασίας αντικατοπτρίζει την αποτελεσματικότητα του ΣΑΠ [8].

Σε επόμενο στάδιο υπολογίζεται το ρίσκο απώλειας οικονομικών αξιών που μπορεί να προκαλέσει το κεραυνικό πλήγμα, όπως καταστροφή ηλεκτρονικών, ηλεκτρολογικών στοιχείων ή διακοπή κάποιας δραστηριότητας που θα επιφέρει ζημιά. Γίνεται εκτίμηση του ετήσιου κόστους ζημιών, δηλαδή ανάλογα με το υπολογιζόμενο ρίσκο του προηγούμενου σταδίου εκτιμάται το ετήσιο κόστος ζημιών με ΣΑΠ (C_{RL}) και

χωρίς ΣΑΠ (C_L), ενώ τέλος εκτιμάται και το ετήσιο κόστος ΣΑΠ, ανάλογα με το αρχικό κόστος εγκατάσταση του ΣΑΠ καθώς και του επιπλέον κόστους συντήρησης κτλ. (C_{PM}). Εάν $C_{PM} + C_{RL} > C_L$ τότε η εγκατάσταση ΣΑΠ κρίνεται ασύμφορη ενώ στην αντίθετη περίπτωση συμφέρουσα [8].

Ανάλογα με την απαιτούμενη αποτελεσματικότητα που πρέπει να εξυπηρετεί ένα ΣΑΠ κατατάσσεται σε συγκεκριμένη στάθμη προστασίας. Υπάρχουν τέσσερις στάθμες προστασίας που αντικατοπτρίζουν την αποτελεσματικότητα ενός ΣΑΠ, με τη στάθμη I να είναι η πιο αυστηρή ή αποτελεσματική και τη στάθμη IV να είναι η λιγότερο αυστηρή ή αποτελεσματική. Όσο μεγαλύτερη είναι η αποτελεσματικότητα του συστήματος τόσο μεγαλύτερες αντοχές επιδεικνύει σε κεραυνικά πλήγματα. Όπως είναι αναμενόμενο, όσο μεγαλώνει η αποτελεσματικότητα του ΣΑΠ τόσο αυξάνεται το κόστος και η πολυπλοκότητα του. Για το λόγο αυτό κατά τη διαδικασία εκτίμησης της αναγκαιότητας του ΣΑΠ καθορίζεται και η αναγκαία στάθμη προστασίας στην οποία πρέπει να κατατάσσεται το ΣΑΠ, ώστε να διασφαλίζει την απαραίτητη προστασία [8].

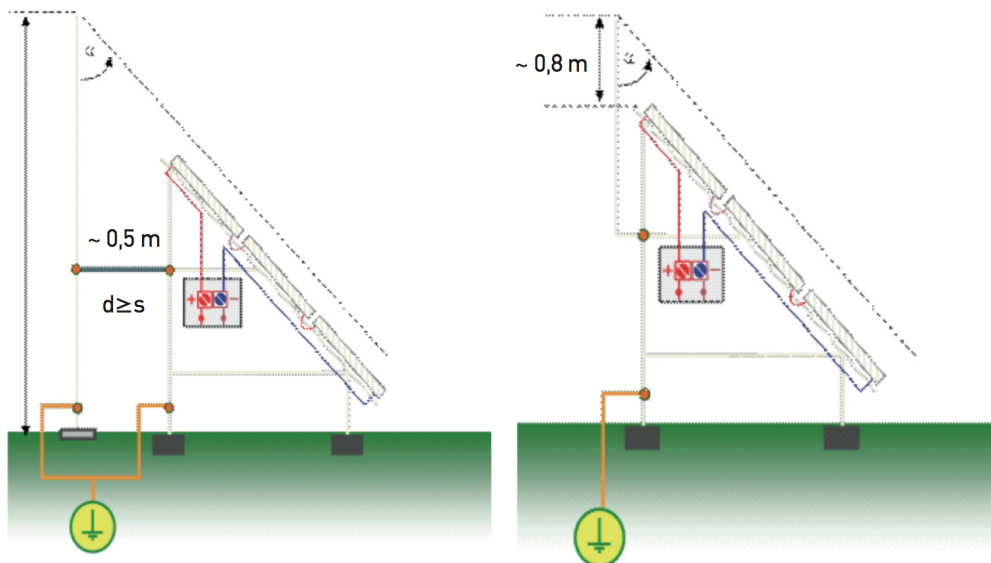
Στον Πίνακα 2.1 παρατίθενται οι μέγιστες τιμές που αφορούν τις παραμέτρους του κρουστικού ρεύματος για κάθε στάθμη προστασίας, οι οποίες χρησιμοποιούνται για την επιλογή των εξαρτημάτων προστασίας (διατομές αγωγών, τεχνικά χαρακτηριστικά SPDs, αποστάσεις προστασίας από επικίνδυνους σπινθήρες κτλ). Στον πίνακα φαίνεται επίσης και η αποτελεσματικότητα της κάθε στάθμης προστασίας, δηλαδή το ποσοστό των κεραυνικών πληγμάτων στο οποίο θα λειτουργήσει σωστά το σύστημα προστασίας [8].

Πίνακας 2.1: Παράμετροι κεραυνικού ρεύματος και αποτελεσματικότητα σε σχέση με τη στάθμη προστασίας [9]

Παράμετροι Κεραυνού	Σύμβολο	Μονάδα Μέτρησης	Στάθμες Προστασίας			
			I	II	III	IV
Μέγιστη τιμή ρεύματος	I	kA	200	150	100	100
Ολικό φορτίο	Q_{TOTAL}	C	300	225	150	150
Κρουστικό φορτίο	$Q_{IMPULSE}$	C	100	75	50	50
Ειδική ενέργεια	SE	KJ/Ω	10000	5600	2500	2500
Μέση κλιση	di/dt	KA/μs	200	150	100	100
Αποτελεσματικότητα			<i>0.98</i>	<i>0.95</i>	<i>0.90</i>	<i>0.80</i>

Εξωτερική εγκατάσταση αντικεραυνικής προστασίας

Εφόσον αποφασισθεί κατά πόσο η εγκατάσταση θα περιλαμβάνει ή όχι ΣΑΠ ακολουθεί ο σχεδιασμός του συστήματος. Για φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις υπαίθριου χώρου υπάρχουν τρεις περιπτώσεις: χωρίς εξωτερικό σύστημα αντικεραυνικής προστασίας, απομονωμένο σύστημα αντικεραυνικής προστασίας και μη απομονωμένο σύστημα αντικεραυνικής προστασίας. Στην πρώτη περίπτωση, η εγκατάσταση μπορεί να μην περιλαμβάνει εξωτερικό ΣΑΠ αλλά θα εφαρμοστούν ένα σύνολο από μέτρα προστασίας, που θα περιγραφούν στη συνέχεια και αφορούν στην προστασία της εσωτερικής ηλεκτρολογικής εγκατάστασης. Στην περίπτωση που θα εγκατασταθεί ΣΑΠ αυτό μπορεί να είναι απομονωμένο ή όχι όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.3. Το απομονωμένο ΣΑΠ χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις, όπου δεν είναι επιθυμητή η διέλευση κεραυνικού ρεύματος από τη μεταλλική κορνίζα υποστήριξης του φωτοβολταϊκού πλαισίου, για μείωση κινδύνων από θερμικά και ηλεκτρομαγνητικά φαινόμενα [8].

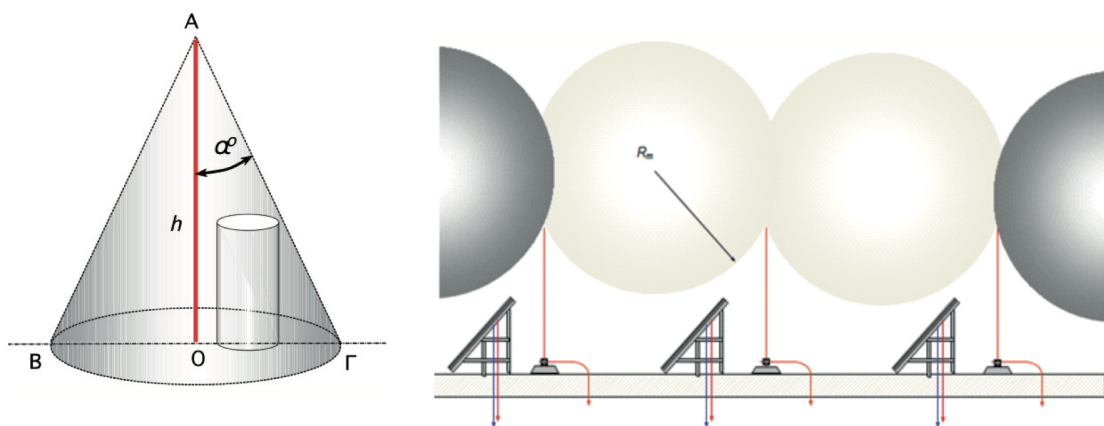


Σχήμα 2.3: Απομονωμένο (αριστερά) και μη απομονωμένο (δεξιά) σύστημα ΣΑΠ [8]

Στόχος της εξωτερικής εγκατάστασης ΣΑΠ είναι να λαμβάνει τα άμεσα κεραυνικά πλήγματα και να μεταφέρει το ρεύμα τους, από το σημείο κρούσης προς τη γη, χωρίς να προκαλούνται φυσικές ζημιές στην εγκατάσταση ή τραυματισμοί σε φυσικά πρόσωπα. Αποτελείται από τρία στοιχεία: το συλλεκτήριο σύστημα, το σύστημα αγωγών καθόδων

και το σύστημα γείωσης. Το συλλεκτήριο σύστημα που χρησιμοποιείται ως επί το πλείστον σε υπαίθριες φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις είναι η ακίδα προστασίας. Είναι ουσιαστικά μια μεταλλική ράβδος η οποία υποδέχεται τον κεραυνό όταν προσπέσει. Σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να χρησιμοποιηθούν και άλλου είδους συλλεκτήρια συστήματα, όπως τεταμένα συρματόσχοινα ή πλέγματα αγωγών τα οποία όμως δεν προτιμούνται γιατί μπορεί να προκαλέσουν σκίαση στα ΦΒ στοιχεία. Η ακίδα προστασίας στα απομονωμένα ΣΑΠ τοποθετείται σε συγκεκριμένη απόσταση “S” από το φωτοβολταϊκό πλαίσιο η οποία υπολογίζεται πιο κάτω. Στα μη απομονωμένα ΣΑΠ η ακίδα προστασίας μπορεί να συνδεθεί απευθείας στη μεταλλική κορνίζα υποστήριξης του φωτοβολταϊκού πλαισίου. Στην περίπτωση που η ακίδα τοποθετηθεί σε μικρότερη από την απόσταση “S” τότε πρέπει να γεφυρώνεται με αγωγό με τη μεταλλική κορνίζα του ΦΒ και το σύστημα θεωρείται μη απομονωμένο [8].

Προκειμένου να καθοριστεί το μήκος, η θέση και ο αριθμός των ακίδων προστασίας, χρησιμοποιούνται δύο βασικές μέθοδοι: η μέθοδος γωνίας προστασίας και η μέθοδος της κυλιόμενης σφαίρας. Χρησιμοποιώντας τη μέθοδο γωνίας προστασίας ο χώρος προστασίας ενός συλλεκτήριου συστήματος τύπου ακίδας έχει την μορφή κυκλικού κώνου. Λαμβάνοντας ως κορυφή το πάνω άκρο της ακίδας προστασίας, μια ευθεία γραμμή που σχηματίζει γωνία α με την κατακόρυφο και διερχόμενη από την κορυφή εκτελώντας μια πλήρη περιστροφή σχηματίζει τον κυκλικό κώνο όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.4.



Σχήμα 2.4: Η μέθοδος της γωνίας προστασίας (αριστερά) και η μέθοδος της κυλιόμενης σφαίρας (δεξιά) [8]

Χρησιμοποιώντας τη μέθοδο κυλιόμενης σφαίρας ο χώρος προστασίας ενός συλλεκτήριου συστήματος τύπου ακίδας, μπορεί να διαφανεί κυλώντας προς όλες τις διευθύνσεις μια νοητή σφαίρα ακτίνας R από την εξωτερική περίμετρο του πάρκου προς την εγκατάσταση των ΦΒ στοιχείων όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.4. Τα σημεία στα οποία η σφαίρα δεν μπορεί να έρθει σε επαφή θεωρούνται ότι είναι προστατευμένα. Η ακτίνα της σφαίρας εξαρτάται από τη στάθμη προστασίας. Αυτή η μέθοδος συνιστάται όταν η εγκατάσταση περιλαμβάνει πολύπλοκα και ακανόνιστα στοιχεία. Ανάλογα με την περιοχή που πρέπει να προστατευτεί υπολογίζεται ο αριθμός και το ύψος των ακίδων καθώς και τη θέση στην οποία πρέπει να εγκατασταθούν [8].

Επειδή τα ΦΒ στοιχεία είναι τοποθετημένα συνήθως σε σειρές, για καλύτερη αποτελεσματικότητα του συλλεκτήριου συστήματος οι ακίδες προστασίας τοποθετούνται σε παράλληλες σειρές κατά μήκος των ΦΒ στοιχείων. Οι μεταλλικές ράβδοι πρέπει να έχουν τις απαραίτητες ηλεκτρικές και μηχανικές ιδιότητες. Συνήθως τα υλικά που χρησιμοποιούνται είναι χαλκός, αλουμίνιο και ανοξείδωτος ή γαλβανισμένος χάλυβας. Η ελάχιστη διατομή ράβδου είναι 176mm^2 ανεξάρτητα από το υλικό και μπορεί να μειωθεί μέχρι τα 70mm^2 εάν δεν χρειάζεται ιδιαίτερη μηχανική αντοχή (συνήθως σε μικρού μήκους ακίδες μέχρι 1m). Η ακίδα προστασίας μπορεί να στηρίζεται με τη βοήθεια ενός τσιμεντένιου μπλοκ ή άλλων υποδομών ικανών να το στηρίξουν. Η ράβδος διέρχεται από διατομή που υπάρχει στο μπλοκ ενώ στην περίπτωση που χρειάζεται επιπλέον στήριξη, χρησιμοποιούνται μη αγωγίμα στηρίγματα που παρεμβάλλονται μεταξύ του φωτοβολταϊκού πλαισίου και της ακίδας. Για την απομόνωση του ΣΑΠ από το φωτοβολταϊκό πρέπει να τηρείται μια απόσταση απομόνωσης S η οποία δίνεται από τη σχέση:

$$S \geq \frac{K_i}{K_m} \cdot K_c \cdot l \quad (2.1)$$

όπου K_i συντελεστής που εξαρτάται από την επιλεγόμενη στάθμη προστασίας του ΣΑΠ, K_m συντελεστής που εξαρτάται από το υλικό απομόνωσης μεταξύ ΣΑΠ και μεταλλικών στοιχείων της εγκατάστασης, K_c συντελεστής που εξαρτάται από τη διέλευση του κρουστικού ρεύματος και l είναι το μήκος σε μέτρα από το σημείο υπολογισμού της απόστασης απομόνωσης, μέχρι το πλησιέστερο σημείο ισοδυναμικής σύνδεσης ή το σύστημα γείωσης σε περίπτωση που δεν υπάρχουν ισοδυναμικές συνδέσεις. Οι τιμές

των συντελεστών μπορούν να αναζητηθούν σε πίνακες. Στην περίπτωση του μη απομονωμένου ΣΑΠ η ακίδα προστασίας μπορεί να συνδέεται απευθείας στη μεταλλική κορνίζα υποστήριξης του φωτοβολταϊκού πλαισίου. Η σύνδεση πρέπει να παρέχει απαραίτητη στήριξη στη ράβδο και μπορεί να επιτευχτεί με την παρουσία σφικτήρων, βιδών ασφαλείας, συγκόλλησης κτλ [8].

Οι αγωγοί καθόδου πρέπει να παρέχουν τις απαραίτητες αγώγιμες διόδους για τη διέλευση του κεραυνικού ρεύματος από το σημείο κρούσης του κεραυνού. Παρεμβάλλονται μεταξύ συλλεκτήριου συστήματος και συστήματος γείωσης. Πρέπει να έχουν όσο το δυνατό μικρότερο μήκος για καλύτερη αποτελεσματικότητα. Σε ΦΒ πάρκα η ακίδα προστασίας μπορεί να επιτελεί επίσης και το ρόλο του αγωγού καθόδου νοουμένου ότι φτάνει στο έδαφος. Στην περίπτωση μη απομονωμένου ΣΑΠ όταν η ακίδα είναι συνδεδεμένη στη μεταλλική κορνίζα του φωτοβολταϊκού στοιχείου, η μεταλλική κορνίζα αναλαμβάνει το ρόλο του αγωγού καθόδου. Η σύνδεση με το σύστημα γείωσης μπορεί να γίνεται άμεσα αν είναι εφικτό ή με τη βοήθεια πολύκλωνου καλωδίου [8].

Το σύστημα γείωσης αποτελείται από ηλεκτρόδια ποικίλων σχημάτων και διαστάσεων. Σε ΦΒ πάρκα το σύστημα γείωσης σχεδιάζεται ειδικά για τη ΦΒ εγκατάσταση. Για τη διοχέτευση του κεραυνικού ρεύματος στη γη έχει ιδιαίτερη σημασία το σχήμα και οι διαστάσεις του συστήματος γείωσης. Επίσης σε ΦΒ πάρκα για μείωση του κόστους και αύξηση της αποτελεσματικότητας και του χρόνου ζωής του συστήματος γείωσης, σημαντικό ρόλο παίζει ο τύπος των θεμελίων στα οποία στηρίζεται ο μεταλλικός σκελετός των ΦΒ στοιχείων ο οποίος στη συνέχεια συνδέεται με τα ηλεκτρόδια και το σύστημα γείωσης. Υπάρχουν δύο βασικοί τύποι διατάξεων των ηλεκτροδίων γείωσης που ακολουθούνται σε συστήματα γείωσης αντικεραυνικής προστασίας, ανάλογα με το είδος ηλεκτροδίων που χρησιμοποιούν και τον τρόπο τοποθέτησής τους. Η πρώτη είναι η διάταξη τύπου Α. Αυτός ο τύπος διάταξης περιλαμβάνει κάθετα και οριζόντια ηλεκτρόδια σε σχήμα ράβδου (συνήθως ακολουθείται κάθετη διάταξη). Τουλάχιστον δύο ηλεκτρόδια πρέπει να συνδέονται με κάθε συλλεκτήριο σύστημα στην περίπτωση απομονωμένου ΣΑΠ ή με την κορνίζα του Φ/Β πλαισίου (που περιλαμβάνει ακίδα προστασίας) στην περίπτωση μη απομονωμένου ΣΑΠ με μήκος τουλάχιστον 2.5 m σε έδαφος που έχει ειδική αντίσταση μέχρι 500 Ωm. Εάν το ελάχιστο μήκος των οριζόντιων ηλεκτροδίων είναι l_1 για τα κάθετα ηλεκτρόδια είναι $0.5 \times l_1$. Στις περιπτώσεις όπου έχουμε βραχώδες έδαφος με

χαμηλή αγωγιμότητα μπορεί να χρησιμοποιηθούν ηλεκτρόδια σε σχήμα πλάκας συνήθως σε διαμόρφωση E. Η άλλη διάταξη είναι η τύπου B. Αυτός ο τύπος διάταξης δημιουργεί ένα είδος περιμετρικής γείωσης στα φωτοβολταϊκά πλαίσια της εγκατάστασης και συνιστάται σε ΦB πάρκα γιατί διευκολύνει τη γείωση συλλεκτήριου συστήματος και μεταλλικής κορνίζας. Επίσης δημιουργεί ισοδυναμική σύνδεση μεταξύ ανεξάρτητων μεταλλικών σκελετών-κορνιζών προς αποφυγή επικίνδυνων τάσεων επαφής. Η ακτίνα “r” του δακτυλίου που δημιουργεί ο αγωγός γείωσης δεν πρέπει να είναι μικρότερη από το μήκος του αγωγού l_1 . Συνήθως δημιουργούνται ορθογώνια πλέγματα διατάσεων 20m x 20m ή και μεγαλύτερα ειδικά εάν το σύστημα γείωσης ενισχύεται με ηλεκτρόδια Τύπου A κοντά στα ευάλωτα σημεία. Συνήθως τα ηλεκτρόδια είναι κατασκευασμένα από χαλκό ή χάλυβα [8].

Τα ηλεκτρόδια Τύπου A πρέπει να εγκαθίστανται κοντά στην περίμετρο των Φ/B σειρών σε μια απόσταση μεταξύ 1m-3m όσο το δυνατό καλύτερα κατανεμημένα στο έδαφος για ελαχιστοποίηση φαινομένων ηλεκτρικής σύζευξης. Πρέπει να τηρείται μια απόσταση μεταξύ ηλεκτροδίων τυπικά ίση με το διπλάσιο του μήκους τους. Ο τύπος και το βάθος έμπτυξης των ηλεκτροδίων πρέπει να γίνεται με τρόπο, ώστε να διασφαλίζεται όσο το καλύτερο δυνατό ακεραιότητα της τιμής της αντίστασης χωρίς να επηρεάζεται από φαινόμενα διάβρωσης/ξήρανσης και παγετού στο έδαφος. Συνήθως όταν τα ηλεκτρόδια βρίσκονται στο υψίπεδο του εδάφους τα πρώτα 20cm- 30cm δεν λαμβάνονται υπόψη στο ενεργό μήκος, λόγω των φαινομένων ξήρανσης και παγετού του εδάφους για αυτό και συνιστάται να εγκαθίστανται σε βάθος 50cm. Κάθε ηλεκτρόδιο πρέπει να τοποθετείται σε φρεάτιο με καπάκι για σκοπούς προστασίας και πρόσβασης σε περίπτωση επιθεώρησης. Επίσης πρέπει να διαθέτει σύνδεσμο απόζευξης, ώστε να απομονώνεται από το υπόλοιπο σύστημα για μέτρηση της αντίστασης του κατά τη συντήρηση [8].

Ο αγωγός σε σχήμα ορθογωνίου, για τα ηλεκτρόδια τύπου B, πρέπει να τοποθετείται μέσα σε τάφρο που ανοίγεται στο έδαφος με βάθος 0,5m και άνοιγμα 0,5m. Ο πιο συνηθισμένος τύπος ηλεκτροδίου που χρησιμοποιείται είναι σε σχήμα ταινίας. Η τοποθέτηση του αγωγού σε σχήμα ταινίας πρέπει να γίνεται με τέτοιο τρόπο, ώστε η μεγάλη επιφάνεια του αγωγού να τοποθετείται κάθετα στο χώμα. Είναι βασικό να επιτυγχάνεται όσο το δυνατό καλύτερη επαφή του αγωγού με το χώμα κάτι το οποίο δεν διασφαλίζεται εάν το ηλεκτρόδιο τοποθετηθεί με τη μεγάλη επιφάνεια οριζόντια στο έδαφος, αφού υπάρχει η πιθανότητα να δημιουργηθούν κενά μεταξύ ηλεκτροδίου και

εδάφους. Για να εξασφαλισθεί η καλύτερη δυνατή τοποθέτηση του ηλεκτροδίου σε κάθετη διάταξη, υπάρχουν ειδικά στηρίγματα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Η σύνδεση του μεταξύ συστήματος γείωσης και συλλεκτήριου συστήματος πρέπει να γίνεται σε όσο το δυνατό μικρότερη απόσταση. Για μια καλή απόδοση του συστήματος η απόστασή αυτή πρέπει να κυμαίνεται μεταξύ 1m-3m. Στην περίπτωση μη απομονωμένου ΣΑΠ όπου ο μεταλλικός σκελετός των Φ/Β-στοιχείων χρησιμοποιείται ως αγωγός καθόδου, δύο σειρές ΦΒ στοιχείων μπορούν να συνδέονται στην ίδια πλευρά του πλέγματος γείωσης. Στην περίπτωση απομονωμένου ΣΑΠ όπου το συλλεκτήριο σύστημα συνδέεται απευθείας με το σύστημα γείωσης κάθε σειρά ΦΒ στοιχείων συνδέεται σε ξεχωριστή πλευρά του πλέγματος γείωσης. Το μεταλλικό πλαίσιο των ΦΒ στοιχείων γειώνεται με ξεχωριστό αγωγό σύνδεσης [8].

Εσωτερική εγκατάσταση αντικεραυνικής προστασίας

Η εσωτερική εγκατάσταση αντικεραυνικής προστασίας χρησιμοποιείται για την πρόληψη επικίνδυνων σπινθήρων στην υπό προστασία κατασκευή, που πιθανό να προκαλέσει η ροή του κεραυνικού ρεύματος στο εξωτερικό ΣΑΠ ή στα αγωγίμα μέρη της εγκατάστασης. Σε ένα ΦΒ πάρκο η εσωτερική εγκατάσταση αντικεραυνικής προστασίας προστατεύει τον ηλεκτρολογικό εξοπλισμό, όπως inverters, πίνακες, υποπίνακες, όργανα μέτρησης, συσκευές προστασίας, ΦΒ στοιχεία, αισθητήρια όργανα και προλαμβάνει τον κίνδυνο ηλεκτροπληξίας και εκδήλωσης πυρκαγιάς. Δημιουργία ηλεκτρικού τόξου-σπινθήρων μπορεί να εμφανιστεί μεταξύ εξωτερικού συστήματος αντικεραυνικής προστασίας και των μεταλλικών εγκαταστάσεων, ηλεκτρικών, ηλεκτρονικών, τηλεπικοινωνιακών συστημάτων καθώς και εξωτερικών αγωγίμων τμημάτων και συνδεδεμένων γραμμών. Επίσης μπορεί να δημιουργηθεί σπινθήρας μεταξύ των πιο πάνω στοιχείων σε περίπτωση που διαρρέονται από μέρος του ρεύματος κεραυνού. Οι επικίνδυνοι σπινθήρες αποφεύγονται με μια σειρά μέτρων προστασίας που περιλαμβάνουν ισοδυναμικές συνδέσεις, δηλαδή η γεφύρωση δύο τμημάτων ή η εγκατάσταση συσκευών περιορισμού του ρεύματος καθώς και δημιουργία ηλεκτρικής μόνωσης μεταξύ δύο τμημάτων [8].

Οι ισοδυναμικές συνδέσεις επιβάλλεται να δημιουργηθούν μεταξύ τμημάτων της εγκατάστασης προς αποφυγή ανάπτυξης επικίνδυνου δυναμικού μεταξύ δύο τμημάτων. Μια ισοδυναμική σύνδεση προϋποθέτει τη δημιουργία αγωγίμης οδού μεταξύ του εξωτερικού συστήματος αντικεραυνικής προστασίας και μεταλλικών εγκαταστάσεων,

εσωτερικών συστημάτων καθώς και εξωτερικών αγωγίμων τμημάτων και συνδεδεμένων στο ΦΒ πάρκο γραμμών. Επίσης πρέπει δημιουργούνται ισοδυναμικές συνδέσεις μεταξύ των πιο πάνω στοιχείων εάν υπάρχει πιθανότητα ανάπτυξης επικίνδυνων σπινθήρων. Τα μέσα που χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία αγωγίμης οδού σε ισοδυναμικές συνδέσεις είναι συνδετικοί αγωγοί όπου η ηλεκτρική συνέχεια δεν παρέχεται από τον ουδέτερο, συσκευές περιορισμού υπερτάσεων (SPDs), όπου δεν είναι εφικτή η άμεση γεφύρωση και μονωμένα διάκενα σπινθηρισμού (isolating spark gaps ISGs), όπου δεν επιτρέπεται η άμεση γεφύρωση [8].

Τα μεταλλικά στοιχεία που κυριαρχούν σε ένα ΦΒ πάρκο είναι οι μεταλλικές βάσεις των ΦΒ στοιχείων και πιθανόν κάποια μεταλλικά κουτιά ηλεκτρολογικών πινάκων ή κουτιά διασύνδεσης. Το σύνολο αυτών των στοιχείων πρέπει να παρουσιάζει αγωγή σύνδεση με το σύστημα γείωσης. Οι ισοδυναμικές συνδέσεις εξωτερικών αγωγίμων τμημάτων αφορούν στη μεταλλική περίφραξη του ΦΒ πάρκου. Είναι πολύ σημαντικό να γειωθεί η περίφραξη του πάρκου γιατί είναι προσβάσιμη από ανθρώπους και ζώα. Γι' αυτό το λόγο, πρέπει να αποφευχθούν πιθανοί κίνδυνοι ηλεκτροπληξίας από ενδεχόμενες τάσεις επαφής, που μπορεί να αναπτυχθούν στην περίφραξη. Επίσης, εάν υπάρχουν μεταλλικές σωλήνες υδρορροών τότε πρέπει και για αυτές να λαμβάνονται μέτρα ισοδυναμικών συνδέσεων. Οι ισοδυναμικές συνδέσεις εσωτερικών συστημάτων αφορούν ηλεκτρικά και τηλεπικοινωνιακά συστήματα της Φ/Β εγκατάστασης (inverters, συστήματα ελέγχου, αισθητήρια όργανα). Εάν τα καλώδια των συστημάτων φέρουν μεταλλική θωράκιση ή είναι τοποθετημένα σε μεταλλικό περίβλημα, τότε η ισοδυναμική σύνδεση με το σύστημα γείωσης γίνεται στο περίβλημα ή στη θωράκιση. Στην περίπτωση που τα καλώδια δεν φέρουν μεταλλική θωράκιση, ούτε υπάρχει μεταλλικό περίβλημα, τότε πρέπει να συνδεθούν μέσω συσκευών περιορισμού υπέρτασης. Οι αγωγοί ηλεκτρικών και τηλεπικοινωνιακών γραμμών πρέπει να γεφυρώνονται απευθείας ή μέσω περιοριστών υπερτάσεων. Οι ενεργοί αγωγοί πρέπει να συνδέονται στους ζυγούς εξίσωσης δυναμικού αποκλειστικά μέσω συσκευών περιορισμού υπερτάσεων. Σε συστήματα TN ο αγωγός προστασίας PE ή ο ουδέτερος αγωγός προστασίας PEN μπορούν να συνδέονται απευθείας στο ΣΑΠ ή μέσω συσκευής περιορισμού υπέρτασης [8].

Για τη λήψη μέτρων προστασίας από υπερτάσεις σε ηλεκτρολογικές εγκαταστάσεις γίνεται διαχωρισμός του ηλεκτρολογικού εξοπλισμού σε κατηγορίες, οι οποίες αντικατοπτρίζουν την αντοχή του σε φαινόμενα υπερτάσεων. Βασικές παράμετροι για

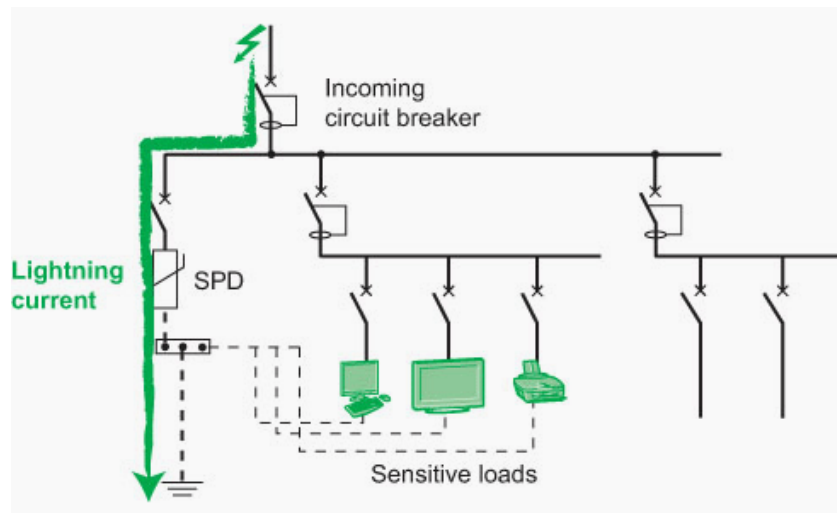
την κατηγοριοποίηση κάθε στοιχείου είναι η ονομαστική τάση λειτουργίας του στοιχείου, το σημείο εγκατάστασης του και η διηλεκτρική αντοχή του. Σε συστήματα χαμηλής τάσης (230/400 V_{AC}) διακρίνουμε τέσσερις κατηγορίες με τα αντίστοιχα χαρακτηριστικά. Η κατηγορία IV στην οποία ανήκουν συσκευές που χρησιμοποιούνται στην ηλεκτρολογική εγκατάσταση, όπως ηλεκτρολογικοί πίνακες, ασφάλειες, καλώδια όργανα μέτρησης κτλ. Η κατηγορία III στην οποία ανήκουν συσκευές μόνιμα συνδεδεμένες στον ηλεκτρολογικό εξοπλισμό για τη διανομή του ηλεκτρικού ρεύματος όπως υποπίνακες. Η κατηγορία II στην οποία ανήκουν συσκευές μόνιμα συνδεδεμένες στον ηλεκτρολογικό εξοπλισμό υψηλής ισχύος, όπως γεννήτριες, κινητήρες, αντλίες νερού κτλ. Και τέλος η κατηγορία I στην οποία ανήκουν ηλεκτρονικές συσκευές χαμηλής ισχύος που περιέχουν ευαίσθητα ηλεκτρονικά κυκλώματα και χρειάζονται ειδική προστασία. Όσον αφορά στα κυκλώματα συνεχούς ρεύματος της φωτοβολταϊκής εγκατάστασης, οι αποδεκτές τιμές των φωτοβολταϊκών στοιχείων υπολογίζονται βάσει της αντοχής σε ρεύμα ανάστροφης πόλωσης και αντιστοιχούν σε μερικές εκατοντάδες Volt. Η αντοχή που επιδεικνύουν οι αναστροφείς στην DC πλευρά εξαρτάται από τη μέγιστη τάση ανοιχτού κυκλώματος και συνήθως αυτή καθορίζεται από τον κατασκευαστή. Στην περίπτωση που δεν δίνονται πληροφορίες από τον κατασκευαστή για την αντοχή έναντι υπερτάσεων, η τιμή αυτή εκτιμάται περίπου στο πενταπλάσιο της μέγιστης τάσης ανοιχτού κυκλώματος της DC πλευράς του αναστροφέα [8].

Συσκευές Περιορισμού Υπερτάσεων (SurgeProtectiveDevices – SPDs)

Οι συσκευές περιορισμού υπερτάσεων χρησιμοποιούνται ευρέως σε συστήματα χαμηλής τάσης για προστασία του ηλεκτρολογικού εξοπλισμού και τη δημιουργία ισοδυναμικών συνδέσεων στους αγωγούς ηλεκτροδότησης. Στόχος τους είναι η προστασία των ηλεκτρικών συστημάτων και του εξοπλισμού από ανεπιθύμητες υπερτάσεις και κρουστικά ρεύματα, που πιθανόν να εμφανιστούν από κεραυνικά πλήγματα ή διακοπτικές υπερτάσεις (switching overvoltages). Περιλαμβάνουν τουλάχιστο ένα μη γραμμικό στοιχείο (βαρίστορ μεταλλικού οξειδίου ή σπινθηριστή διακένου) [8].

Στην ιδεατή κατάσταση λειτουργίας ο απαγωγέας μπορεί να θεωρηθεί σαν διακόπτης συνδεδεμένος παράλληλα με την γραμμή τη οποία προστατεύει. Στην κανονική κατάσταση λειτουργίας συμπεριφέρεται σαν ανοικτό κύκλωμα με άπειρη επαγωγική αντίδραση. Σε κατάσταση υπέρτασης όμως η αντίδραση του σχεδόν πέφτει στο μηδέν

και έτσι δημιουργείται ένα βραχυκύκλωμα που γειώνει απ' ευθείας το ρεύμα σφάλματος. Όταν η υπέρταση πάψει να υφίσταται η αντίδραση του απαγωγέα επανέρχεται ακαριαία στην αρχική της τιμή και έτσι το κύκλωμα συνεχίζει να λειτουργεί κανονικά. Στην πράξη συναντώνται τέσσερις βασικές κατηγορίες απαγωγέων υπέρτασης. Σπινθηριστές αερίων (spark gap, GDT), διατάξεις με βαρύστορες (MOV), δίοδοι περιορισμού υπέρτασης (ABD) και θυρίστορ περιορισμού υπέρτασης (TSS) [9].



Σχήμα 2.5: Λειτουργία των συσκευών περιορισμού υπερτάσεων [38]

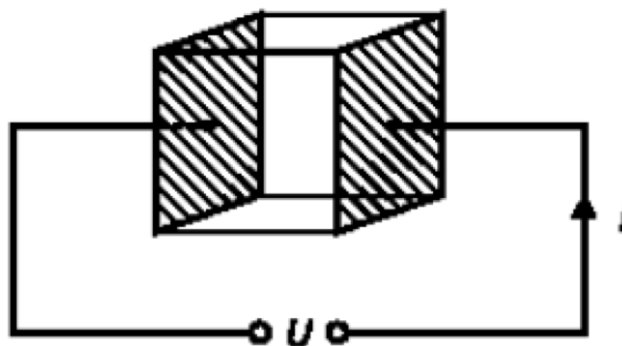
Οι απαγωγείς υπέρτασης ανάλογα με το επίπεδο προστασίας που παρέχουν και τα τεχνικά χαρακτηριστικά τους διακρίνονται σε τρεις κλάσεις. Η κλάση I που συμπεριλαμβάνει διατάξεις προστασίας που ενδέχεται να διαρρέοντα από το ρεύμα του κεραυνού ή τμήματά του. Εγκαθίστανται σε σημεία όπου αναμένεται άμεσο πλήγμα κεραυνού, όπως οι εναέριες γραμμές μεταφοράς XT, ή οι είσοδοι εγκαταστάσεων κοινής ωφέλειας. Οι διατάξεις αυτής της κλάσης καλούνται συνήθως «αλεξικέραυνα». Η κλάση II όπου υπεριλαμβάνει διατάξεις προστασίας έναντι υπερτάσεων λόγω έμμεσων πληγμάτων κεραυνού ή από χειρισμούς. Εγκαθίστανται σε σημεία με χαμηλότερες απαιτήσεις προστασίας σε σχέση με την προηγούμενη κλάση, όπως στον γενικό πίνακα XT. Τέλος στη κλάση III Σε αυτήν υπάγονται διατάξεις στις οποίες απαιτείται μειωμένη προστασία έναντι υπερτάσεων λόγω χειρισμών, όπως οι συσκευές εντός της κατασκευής [9].

Υπάρχουν δυο βασικοί τύποι συσκευών περιορισμού υπερτάσεων που

χρησιμοποιούνται σε φωτοβολταϊκά συστήματα αντικεραυνικής προστασίας, ανάλογα με την απόκριση τους σε ρεύμα υπερεντάσεως. Ο πρώτος που προσφέρει πρωτεύουσα προστασία από κεραυνικά πλήγματα και ανταποκρίνεται σε κυματομορφές ρεύματος 10/350μs. Αυτός ο τύπος τοποθετείται στα σημεία που ενδέχεται να έχουν τη μεγαλύτερη συμφόρηση από το κεραυνικό πλήγμα δηλαδή στα σημεία πτώσης του κεραυνού. Και ο δεύτερος τύπος που προσφέρει δευτερεύουσα προστασία από υπερεντάσεις και ανταποκρίνεται σε κυματομορφές ρεύματος 8/20μs. Αυτός ο τύπος τοποθετείται στα σημεία που δέχονται έμμεσα το κεραυνικό πλήγμα, σημεία όπου το κεραυνικό πλήγμα είναι πιο εξασθενημένο λόγω εκτόνωσης του από πολλαπλές διόδους [8].

2.3 Ειδική Αντίσταση Εδάφους

Η ειδική αντίσταση του εδάφους παίζει σημαντικό ρόλο στα κεραυνικά πλήγματα καθώς αποτελεί ένας δείκτης της δυνατότητας απορρόφησης του κεραυνικού φορτίου από τη γη και αποτελεί βασικό αίτιο της ανύψωσης του δυναμικού του εδάφους και της εμφάνισης βηματικών τάσεων. Ως ειδική αντίσταση του εδάφους, καθώς και κάθε υλικού, ρ , ορίζεται η αντίσταση που παρουσιάζει ένας μοναδιαίος κύβος (1m^3) κάποιου υλικού, όταν τοποθετηθούν επίπεδα ηλεκτρόδια σε δύο απέναντι πλευρές του, μεταξύ των οποίων εφαρμόζεται διαφορά δυναμικού U , όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.6. Η ειδική αντίσταση μετριέται συνήθως σε Ωm [12].



Σχήμα 2.6: Ορισμός ειδικής αντίστασης ενός υλικού [12]

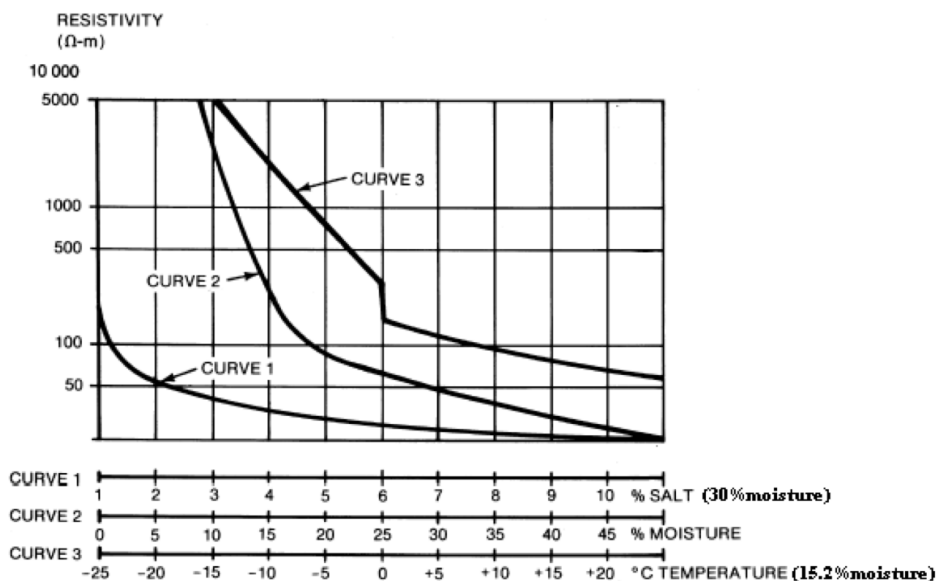
Η ειδική αντίσταση του εδάφους εξαρτάται από την πυκνότητα και την σύστασή του. Υπάρχει ποικιλία εδαφών και ειδικών αντιστάσεων. Εδάφη χωματώδη, αμμώδη, βραχώδη, υγρά, ξηρά, ανομοιογενή, κλπ. με αντίστοιχη ποικιλία τιμών ειδικών αντιστάσεων. Όσο ξηρότερο και πετρώδες το έδαφος, τόσο μεγαλύτερη η ειδική αντίστασή του, ρ . Ειδικότερα, η υγρασία του εδάφους έχει σημαντική επίδραση στην ειδική αντίστασή του. Αναφέρεται ενδεικτικά, ότι σε ένα αργιλώδες έδαφος με 10% περιεχόμενο υγρασίας (κατά βάρος) η ειδική αντίσταση ήταν 30 φορές μεγαλύτερη από το ίδιο έδαφος με περιεχόμενο υγρασίας 20%. Παρόλα αυτά, η υγρασία από μόνη της δεν παίζει πρωτεύοντα ρόλο στην ειδική αντίσταση. Μόνο εάν η υγρασία περιέχει αρκετά φυσικά συστατικά για να αποτελέσει έναν αγώγιμο ηλεκτρολύτη θα συμβάλει σε σημαντική μείωση της αντίστασης του εδάφους. Η τεχνητή προσθήκη διαλυτών ουσιών στο νερό, όπως χλωριούχο νάτριο (NaCl), χλωριούχο ασβέστιο (CaCl_2), θειικό χαλκό (CuSO_4), ή θειικό μαγνήσιο (MgSO_4) είναι ένας πρακτικός τρόπος μείωσης της ειδικής αντίστασης του εδάφους. Οι εποχιακές μεταβολές της θερμοκρασίας οδηγούν σε κάποια διακύμανση της αντίστασης του εδάφους, ειδικότερα σε περιοχές όπου σημειώνεται παγετός. Η επίδραση των διακυμάνσεων αυτών στην αποτελεσματικότητα της γείωσης μπορεί να ελαχιστοποιηθεί με τη χρήση ηλεκτροδίων γείωσης σε μεγάλο βάθος. Στον Πίνακα 2.2. φαίνονται ενδεικτικά οι ειδικές αντιστάσεις ορισμένων εδαφών. Δεν είναι δυνατό να ορισθούν καθαρά οι τύποι του εδάφους. Για παράδειγμα, με τη λέξη αργιλώδη, μπορεί να καλυφθεί ένα ευρύ φάσμα εδαφών. Επιπλέον, ακόμα και για τον ίδιο γενικό τύπο εδάφους η τιμή της ειδικής αντίστασης μπορεί να διαφέρει ανάλογα με την περιοχή. Ένας αριθμός ερευνητών έχει μετρήσει κατά καιρούς την ειδική αντίσταση διαφορετικών τύπων εδάφους, είτε [13, 14].

Στο Σχήμα 2.7 δίδεται ένα ενδεικτικό διάγραμμα με την επίδραση που έχουν στην ειδική αντίσταση του εδάφους η περιεκτικότητά σου σε χλωριούχο νάτριο, η υγρασία καθώς και η μεταβολή της θερμοκρασίας. Η υγρασία του εδάφους έχει σημαντική επίδραση στην ειδική αντίστασή του. Η αντίσταση μειώνεται αυξανόμενης της υγρασίας του εδάφους σύμφωνα με το Σχήμα 2.7. Η αγωγιμότητα του ρεύματος είναι σε μεγάλο βαθμό ηλεκτρολυτική, γεγονός που σημαίνει ότι η ποσότητα του νερού και οι ιδιότητές του, καθώς και το ποσό των διαλυμένων σε αυτό αλάτων, παίζουν μεγάλο ρόλο στον καθορισμό της ειδικής αντίστασης. Η περιεκτικότητα σε νερό μεταβάλλεται ανάλογα με τις καιρικές συνθήκες, την εποχή του χρόνου, τη φύση του υπεδάφους και το βάθος της υπόγειας στάθμης του νερού. Σπάνια το έδαφος είναι πολύ ξηρό, με

εξάριεση την άμμο της ερήμου όπου το έδαφος θεωρείται, προεγγιςτικά, ότι παρουνιάζει μεγάλο βαθμό ξηρότητας. Από την άλλη, δεν εμφανίζονται συχνά εδάφη με περιεκτικότητα υγρασίας μεγαλύτερη του 40%. Η μεταβολή της ειδικής αντίστασης του εδάφους λόγω της μεταβολής της θερμοκρασίας φθάνει περίπου τα 130% κατά τη διάρκεια του έτους. Από τον Ιανουάριο έως τον Φεβρουάριο είναι υψηλότερη και από τον Ιούλιο έως τον Αύγουστο χαμηλότερη. Η ειδική αντίσταση μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας. Παρατηρούμε ότι η επίδραση αυτή γίνεται αρκετά έντονη για θερμοκρασίες υπό του μηδενός [13, 14].

Πίνακας 2.2: Ειδική αντίσταση σε διάφορους τύπους εδαφών [14]

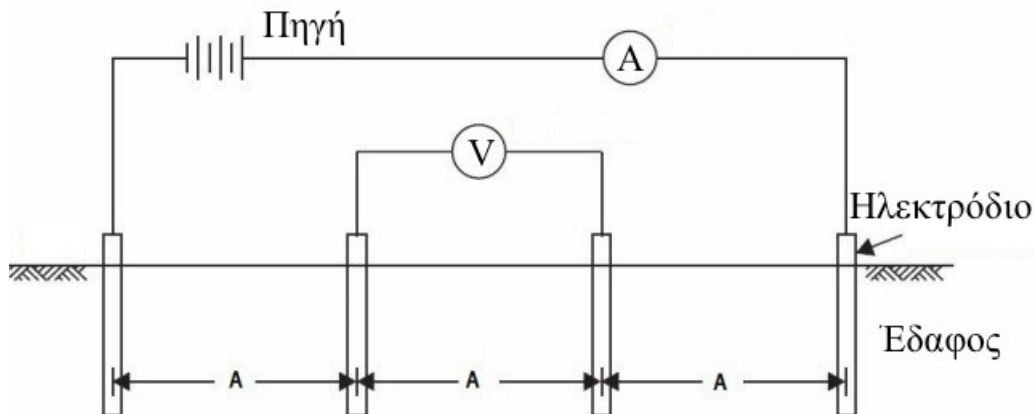
Τύπος εδάφους	Ειδική αντίσταση ρ (Ωm)
Ελώδες	30
Αγριλώδες, πηλώδες ή αγρού	100
Υγρή άμμος	200
Υγρά χαλίκια	500
Ξηρή άμμος	1000
Αμμόλιθος	2500
Πετρώδες και ξηρά χαλίκια	3000
Λιθώνας	>3000
Γρανίτης	>5000



Σχήμα 2.7: Επίδραση στην ειδική αντίσταση του εδάφους της περιεκτικότητας σε χλωριούχο νάτριο, της υγρασίας και της θερμοκρασίας [13]

Άλλοι παράγοντες που επιδρούν στην ειδική αντίσταση του εδάφους είναι η πίεση όπου έχει παρατηρηθεί ότι υψηλότερες πιέσεις, που οφείλονται σε συμπαγείς δομές στο έδαφος, οδηγούν σε χαμηλότερες τιμές ειδικής αντίστασης καθώς και το μέγεθος των κόκκων που υπάρχουν στο έδαφος και η διαφοροποίηση τους ως προς το μέγεθος, όπου παρατηρείται πως η ειδική αντίσταση αυξάνει με το μέγεθος [13, 14].

Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι για τον προσεγγιστικό υπολογισμό της ειδικής αντίστασης του εδάφους. Μία από αυτές είναι η μέθοδος Wenner η οποία χρησιμοποιείται και πιο συχνά. Σε αυτή τη μέθοδο χρησιμοποιούνται 4 ηλεκτρόδια τα οποία τοποθετούνται σε ίδιο βάθος μέσα στο έδαφος και σε ίσες αποστάσεις μεταξύ τους ενώ παράλληλα βρίσκονται στην ίδια ευθεία. Η μέθοδος φαίνεται σχηματικά στο Σχήμα 2.8. Μέσω μιας πηγής η διάταξη τροφοδοτείται με ρεύμα το οποίο ρέει μέσω του εδάφους και των δύο ακριανών ηλεκτροδίων το οποίο μετρείται μέσω ενός αμπερομέτρου. Στα δύο μεσαία ηλεκτρόδια τοποθετείται ένα βολτόμετρο το οποίο δείχνει την διαφορά δυναμικού που εμφανίζεται. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται για διαφορετικές αποστάσεις μεταξύ των ηλεκτροδίων όπου λαμβάνονται οι τιμές για το ρεύμα και την τάση που εμφανίζονται στα όργανα και υπολογίζοντας το πηλίκό τους [13, 14].



Σχήμα 2.8: Διάταξη Wenner προς μέτρηση της ειδικής αντίστασης του εδάφους [39]

Η ειδική αντίσταση του εδάφους προκύπτει έτσι από τη σχέση:

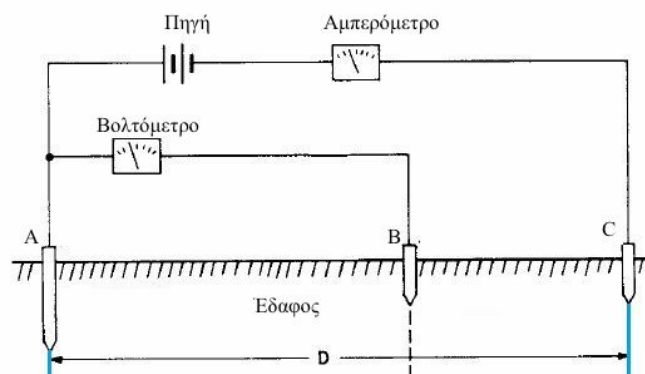
$$\rho = \frac{4 \pi A \cdot R}{1 + \frac{2A}{\sqrt{A^2 + 4h^2}} - \frac{A}{\sqrt{A^2 + h^2}}} \quad (2.2)$$

όπου ρ η ειδική αντίσταση σε Ωm , R η μετρούμενη αντίσταση σε Ω που προκύπτει από το πηλίκο V/I της μετρούμενης έντασης και τάσης από τα όργανα μέτρησης, A η απόσταση μεταξύ των διαδοχικών ηλεκτροδίων σε m και h το βάθος στο οποίο φτάνουν τα ηλεκτρόδια σε m [13, 14].

Μία ακόμη μέθοδος η οποία χρησιμοποιείται είναι αυτή των τριών ηλεκτροδίων ή πτώσης δυναμικού η οποία είναι χρήσιμη για τον υπολογισμό της ειδικής αντίστασης του εδάφους σε διάφορα βάθη όταν το έδαφος αποτελείται από διαφορετικά στρώματα. Σε αυτή την διάταξη υπάρχουν 3 ηλεκτρόδια A, B και C εκ των οποίων το ηλεκτρόδιο A είναι θαμμένο σε ένα βάθος L το οποίο και μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια των μετρήσεων. Τα ηλεκτρόδια B και C θάβονται σε μικρό βάθος και αποτελούν τα ηλεκτρόδια αναφοράς. Πάλι μέσω μιας πηγής η διάταξη τροφοδοτείται με ρεύμα το οποίο ρέει μέσω του εδάφους και των δύο ηλεκτροδίων A και C το οποίο μετρείται μέσω ενός αμπερομέτρου, ενώ μέσω ενός βολτομέτρου μετράται η εμφανιζόμενη διαφορά δυναμικού μεταξύ των ηλεκτροδίων A και B. Η ειδική αντίσταση δίδεται πλέον από τον τύπο:

$$\rho = \frac{2\pi \cdot L \cdot R}{\ln\left(\frac{8L}{d}\right) - 1} \quad (2.3)$$

όπου ρ η ειδική αντίσταση σε Ωm , L το βάθος του ηλεκτροδίου A σε m , R η μετρούμενη αντίσταση σε Ω που προκύπτει από το πηλίκο V/I της μετρούμενης έντασης και τάσης από τα όργανα μέτρησης και d η διάμετρος του ηλεκτροδίου A σε m . Η μέθοδος της πτώσης δυναμικού φαίνεται σχηματικά στο Σχήμα 2.9 [13, 14].

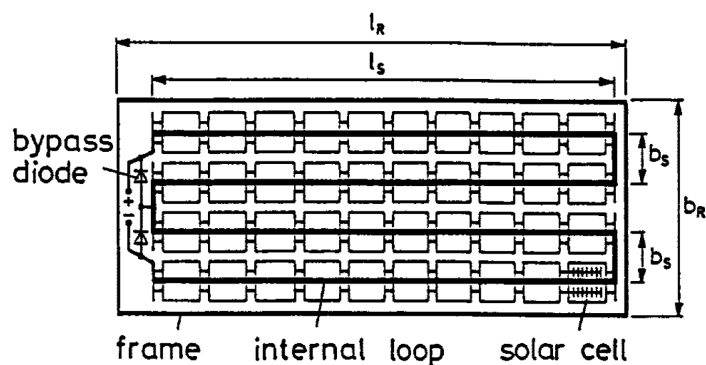


Σχήμα 2.9: Μέθοδος της πτώσης δυναμικού για τη μέτρηση της ειδικής αντίστασης του εδάφους [40]

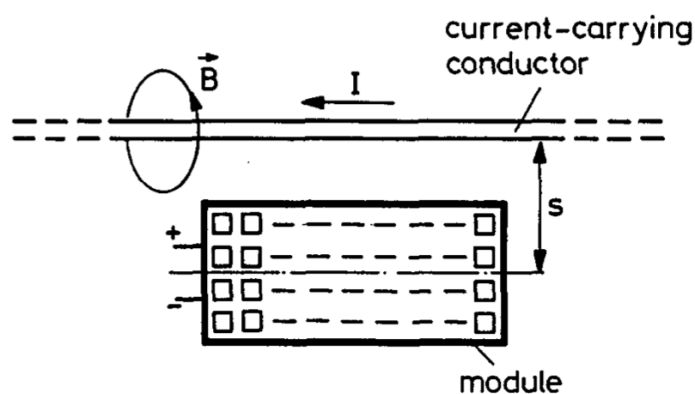
Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα, λόγω της εκτεθειμένης θέσης εγκατάστασής τους (οροφές κτιρίων ή υπαίθριοι χώροι), είναι ευάλωτα σε άμεσα κεραυνικά πλήγματα, καθώς και στην εμφάνιση επαγόμενων υπερτάσεων λόγω ατμοσφαιρικών εκκενώσεων κοντά στην εγκατάσταση που μπορούν να έχουν καταστροφικές συνέπειες για τα διάφορα μέρη της. Από τη δεκαετία του '90 έχουν γίνει αρκετές μελέτες όσον αφορά τις επαγόμενες τάσεις από κεραυνικά πλήγματα καθώς και τρόποι αντιμετώπισης τους ή μείωσης των αρνητικών επιπτώσεων.

Το 1993 οι Hans-Jürgen Stern και Hermann C. Kärner [15] μέτρησαν τις επαγόμενες τάσεις που εμφανίζονται στους ακροδέκτες ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου λόγω μαγνητικού πεδίου που δημιουργείται κοντά στο πλαίσιο. Το ΦΒ πλαίσιο αποτελούνταν από πολλά ΦΒ στοιχεία συνδεδεμένα σε σειρά σχηματίζοντας έναν εσωτερικό βρόχο, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.1. Σε απόσταση s από το πλαίσιο τοποθετήθηκε αγωγός τον οποίον διέρρεε ρεύμα που προσομοίωνε μία κεραυνική εκκένωση (Σχ. 3.2) ενώ στα άκρα του ΦΒ πλαισίου καταγράφηκαν οι επαγόμενες τάσεις. Τα αποτελέσματα έδειξαν πως όσο μεγαλώνει η απόσταση s μεταξύ αγωγού και πλαισίου οι επαγόμενες τάσεις στο πλαίσιο μειώνονται ενώ η ύπαρξη μεταλλικού περιβλήματος στα πλαίσια δίνει καλύτερα αποτελέσματα (μικρότερες τιμές επαγόμενων τάσεων). Παράλληλα πραγματοποιήθηκε θεωρητικός υπολογισμός ο οποίος έδειξε πως ο ρυθμός μεταβολής του ρεύματος στον αγωγό $\frac{di}{dt}$ έχει σημαντική επίδραση στο φαινόμενο καθώς μεγαλύτερες κλίσεις επιφέρουν μεγαλύτερες τιμές τάσης στα άκρα του ΦΒ πλαισίου [15].



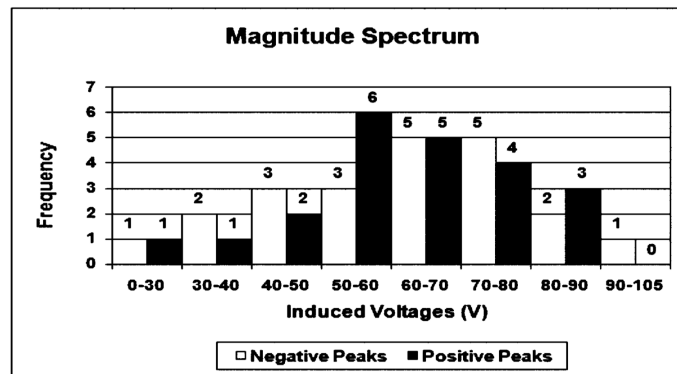
Σχήμα 3.1: Το ΦΒ πλαίσιο και ο βρόχος που δημιουργεί η εν σειρά σύνδεση των ΦΒ στοιχείων [15]



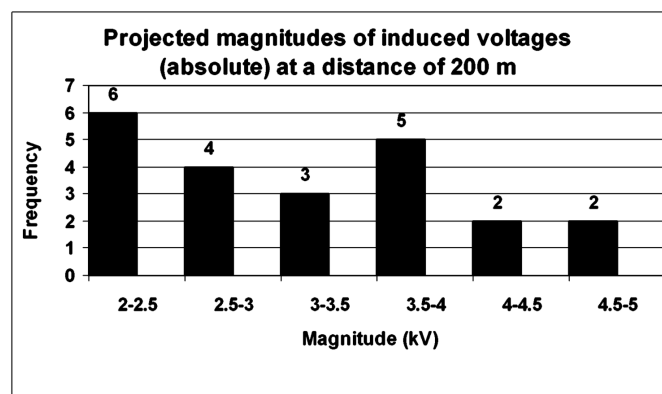
Σχήμα 3.2: Διάταξη της πειραματικής διαδικασίας με τον αγωγό και το ΦΒ πλαίσιο [15]

Το 2008 οι P. Vangala, M. Ropp, K. Haggerty, K. Lynn και W. Wilson [16] κατέγραψαν, υπό πραγματικές συνθήκες σε εξωτερικό περιβάλλον, μετρήσεις για τις επαγόμενες τάσεις που εμφανίζονται στα άκρα των καλωδίων φωτοβολταϊκής συστοιχίας λόγω ατμοσφαιρικών εκκενώσεων. Αντικείμενο της εργασίας ήταν η ανάδειξη της σημαντικότητας λήψης μέτρων προστασίας στην DC πλευρά για την αποφυγή σφαλμάτων λόγω επαγόμενων τάσεων σε ηλεκτρονικές συσκευές, όπως οι αναστροφείς και οι ρυθμιστές φόρτισης μπαταριών. Στο Σχήμα 3.3 φαίνονται οι μετρηθείσες τιμές των εμφανιζόμενων υπερτάσεων ύστερα από πτώση κάποιου κεραυνού σε κάποια απόσταση από τη ΦΒ συστοιχία και οι συχνότητες εμφάνισής τους. Με αυτές τις τιμές υπολογίστηκαν θεωρητικά οι επαγόμενες υπερτάσεις που θα εμφανιστούν σε περίπτωση που το κεραυνικό πλήγμα συμβεί σε απόσταση 200m από την διάταξη. Οι τιμές αυτές μαζί με την συχνότητα εμφάνισής τους δίδονται στο Σχήμα 3.4 [16].

Αν και μεγάλες τιμές υπέρτασης, που θα μπορούσαν να δημιουργήσουν πρόβλημα στα ηλεκτρονικά συστήματα της εγκατάστασης, δεν εντοπίστηκαν με την εργασία, μέσω της αναγωγής φαίνεται πως είναι σημαντική η χρήση απαγωγέων υπέρτασης στην DC πλευρά μιας εγκατάστασης [16].



Σχήμα 3.3: Επαγόμενες τάσεις σε ΦΒ συστοιχία και συχνότητες εμφάνισής τους [16].

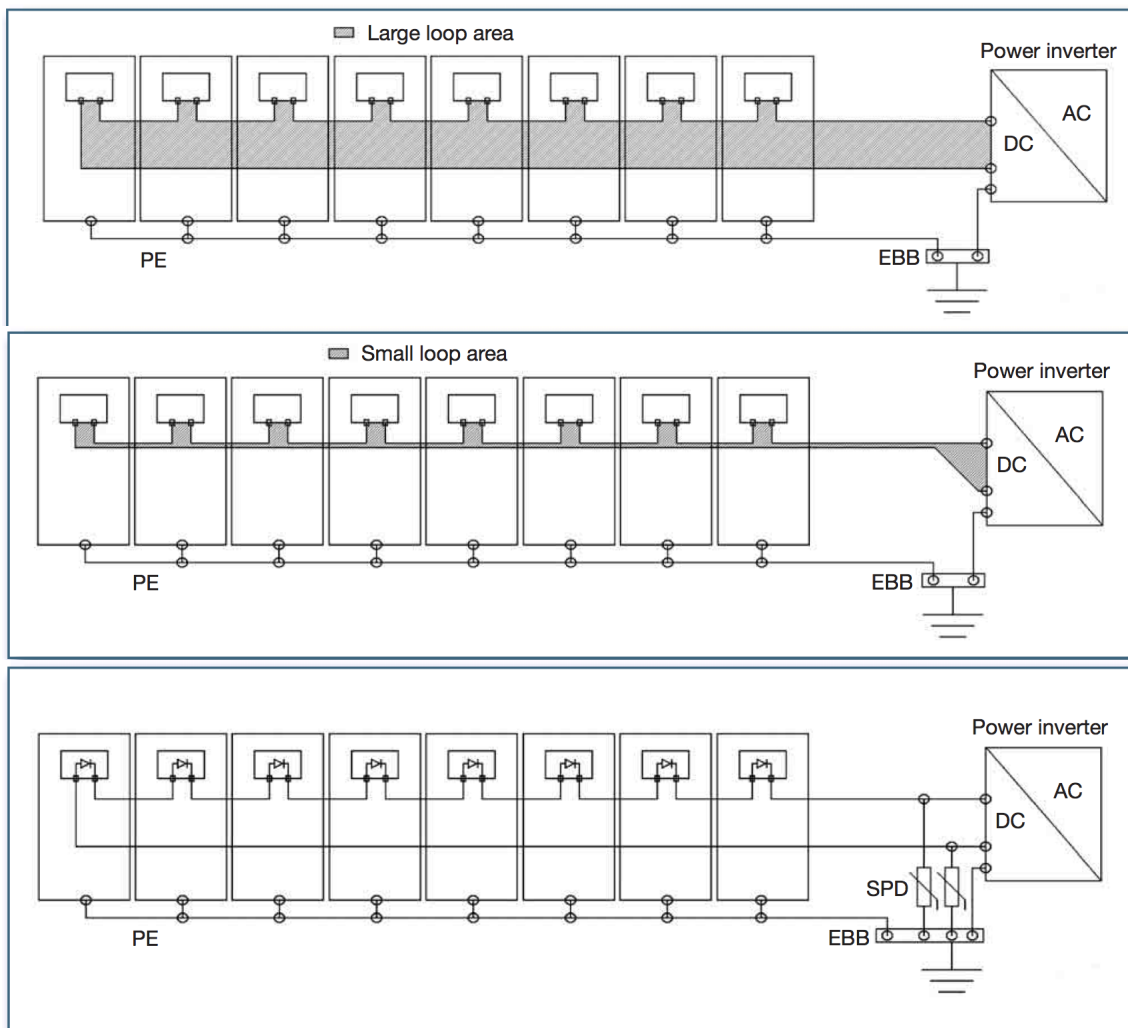


Σχήμα 3.4: Αναγωγή επαγόμενων τάσεων σε απόσταση κεραυνικού πλήγματος 200m [16].

Το 2009, βασισμένοι στο πρότυπο του IEC 62305 “Protection against lightning”, οι Giovanni Luca Amicucci και Fabio Fiamingo παρουσίασαν τους κινδύνους που εγκυμονεί η πτώση ενός κεραυνού σε μία φωτοβολταϊκή εγκατάσταση και πρότειναν ένα τρόπο επιλογής των μέτρων αντικεραυνικής προστασίας που μπορούν να ληφθούν. Στο [17] θεωρήθηκαν δύο περιπτώσεις φωτοβολταϊκής εγκατάστασης. Η πρώτη ήταν τοποθετημένη πάνω σε οροφή ενός κτιρίου ενώ η δεύτερη στο έδαφος σε μια αγροτική περιοχή. Και για τις δύο εγκαταστάσεις έγινε εκτίμηση των κινδύνων της απώλειας ανθρώπινης ζωής και των οικονομικών απωλειών λόγω κεραυνικών πληγμάτων [17].

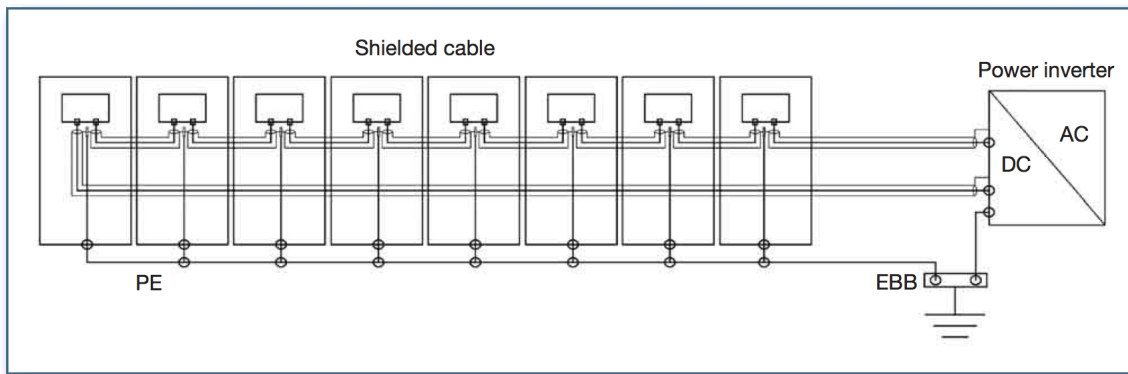
Το ρίσκο της απώλειας ανθρώπινης ζωής και στις δύο περιπτώσεις βρισκόταν κάτω

από τα όρια ανοχής. Οι οικονομικές απώλειες ωστόσο δεν μπορούν να αγνοηθούν. Προς αποφυγή των επαγόμενων υπερτάσεων από την πτώση ενός κεραυνού κοντά στην εγκατάσταση, αναφέρουν πως είναι σημαντική η σωστή τοποθέτηση των καλωδίων τόσο στην DC όσο και στην AC πλευρά για την μείωση του μήκους των καλωδίων και του εμβαδού των σχηματιζόμενων βρόχων όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.5 και την χρήση απαγωγέων υπερτάσης κοντά στον αναστροφέα [17].



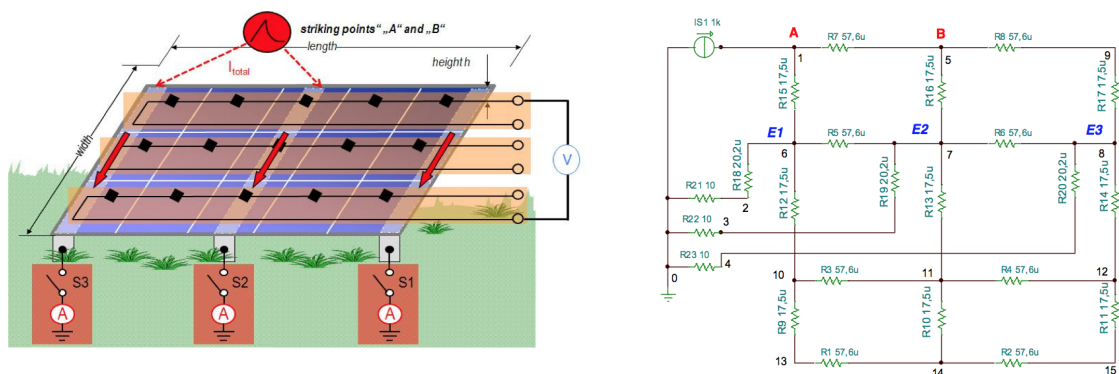
Σχήμα 3.5: Ελάττωση του εμβαδού του σχηματιζόμενου βρόχου και χρήση SPDs προς αποφυγή υπερτάσεων [17].

Καθώς μία τέτοια μέθοδος εφαρμόζεται δύσκολα σε μεγάλες εγκαταστάσεις, η ανάλυση έδειξε πως η χρήση καλωδίων με μεταλλική θωράκιση στην DC πλευρά, η οποία και για τα δύο καλώδια (θετικό και αρνητικό) συνδέεται στο ίδιο ισοδυναμικό σημείο, είναι η καλύτερη λύση (Σχ. 3.6) [17].



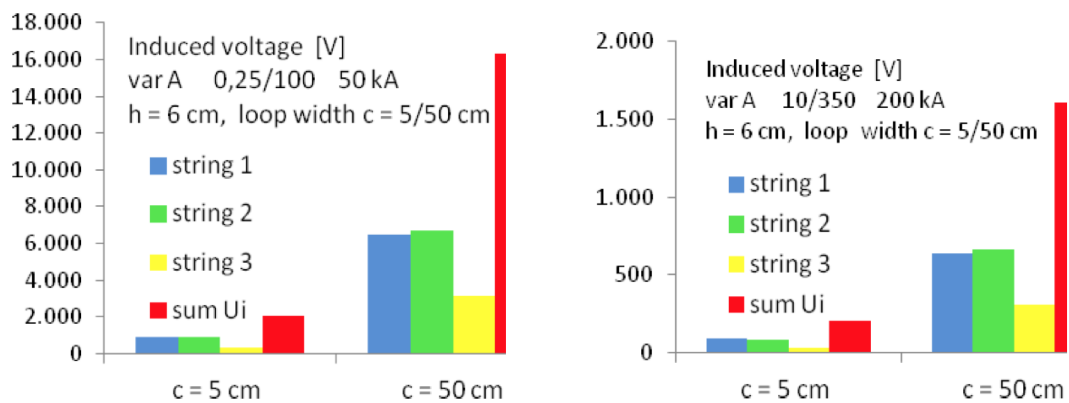
Σχήμα 3.6: Χρήση καλωδίων με μεταλλική θωράκιση [17].

Στα παραπάνω άρθρα η μελέτη επικεντρώθηκε στις επαγόμενες τάσεις στους ακροδέκτες μια φωτοβολταϊκής συστοιχίας ή ενός μεμονωμένου πλαισίου οι οποίες εμφανίζονται λόγω του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου που παράγει η πτώση ενώ κεραυνού σε μια απόσταση σε σχέδη με τους σχηματιζόμενους βρόχους καλωδίων. Το 2012 οι Z. Benesova, R. Haller, J. Birkl και P. Zahlmann εξέτασαν την περίπτωση του άμεσου κεραυνικού πλήγματος [18]. Η διάταξη περιελάμβανε τρεις σειρές των πέντε ΦΒ πλαισίων τοποθετημένες πάνω σε κοινή βάση η οποία βρισκόταν στο έδαφος, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.7. Χρησιμοποιήθηκαν δύο κυματομορφές που προσομοίωσαν την κεραυνική εκκένωση, μία 10/350μs και μία 0.25/100μs, σε δύο διαφορετικά σημεία της διάταξης A και B. Οι υπολογισμοί πραγματοποιήθηκαν με τη βοήθεια προγράμματος προσομοίωσης κυκλωμάτων όπου θεωρήθηκε η βάση στήριξης των ΦΒ πλαισίων (Σχ. 3.7). Με την χρήση αριθμητικών μεθόδων υπολογίστηκαν τα ρεύματα που διαρρέουν τους αγωγούς της βάσης και το παραγόμενο πεδίο τους το οποίο εμπλέκει τα καλώδια [18].



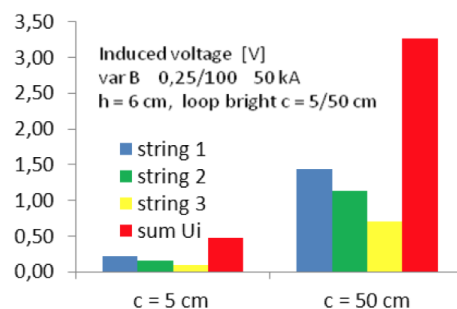
Σχήμα 3.7: Διάταξη ΦΒ πλαισίων (αριστερά) και κυκλωματική αναπαράσταση της βάσης στήριξης (δεξιά) [18].

Στο Σχήμα 3.8 φαίνονται οι επαγόμενες τάσεις στους τρεις βρόχους που σχηματίζουν τα καλώδια καθώς και το άθροισμά τους για το σημείο A. Η απόσταση των καλωδίων από τη βάση στήριξης h θεωρήθηκε 6cm, το μήκος των καλωδίων 6m και εξετάστηκε και το άνοιγμα του βρόχου c για 5 και 50cm. Από τα αποτελέσματα συνεπάγεται ότι το εμβαδόν του σχηματιζόμενου βρόχου έχει άμεση επίδραση στις εμφανιζόμενες τάσεις όπως και η κυματομορφή του ρεύματος. Ο μεγαλύτερος βρόχος των 50cm και η κυματομορφή 0.25/100μs με τους μεγαλύτερους ρυθμούς μεταβολής του ρεύματος επιφέρει μεγαλύτερες τιμές τάσεως. Παρατηρήθηκε επίσης πως η μέγιστη τιμή του ρεύματος δεν έχει άμεση επίπτωση στις επαγόμενες τάσεις [18].



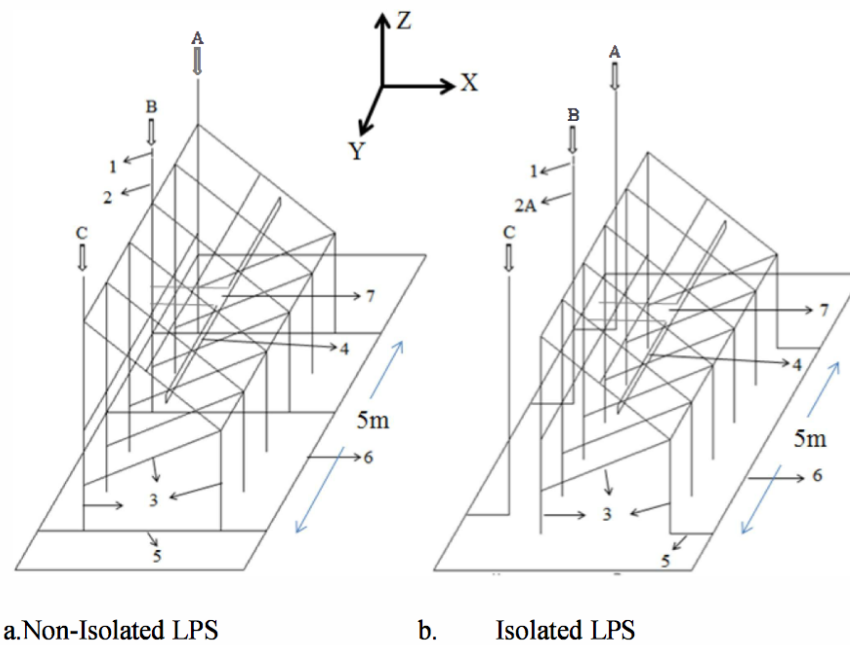
Σχήμα 3.8: Επαγόμενες τάσεις για το σημείο A [18].

Όσον αφορά τον σημείο του πλήγματος από το Σχήμα 3.9 φαίνεται πως λόγω συμμετρίας οι εμφανιζόμενες τάσεις είναι αρκετά μικρές και μπορούν να αγνοηθούν. Πέρα από την θεωρητική ανάλυση πραγματοποιήθηκαν πειραματικές δοκιμές τα αποτελέσματα των οποίων επιβεβαιώνουν τους υπολογισμούς [18].



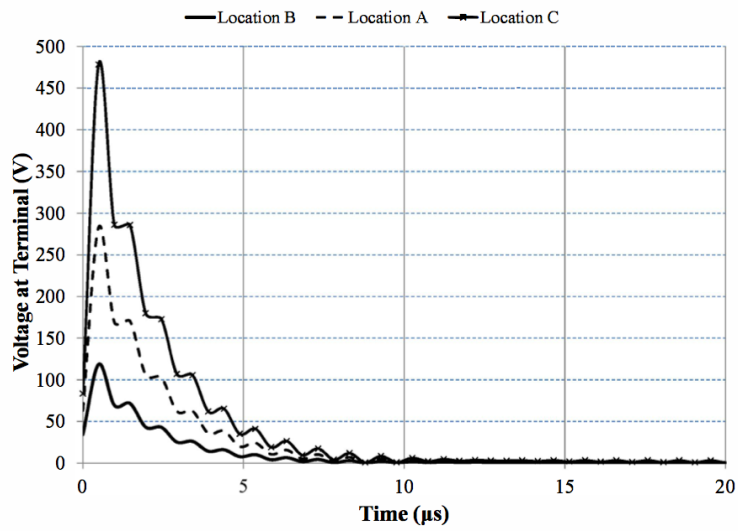
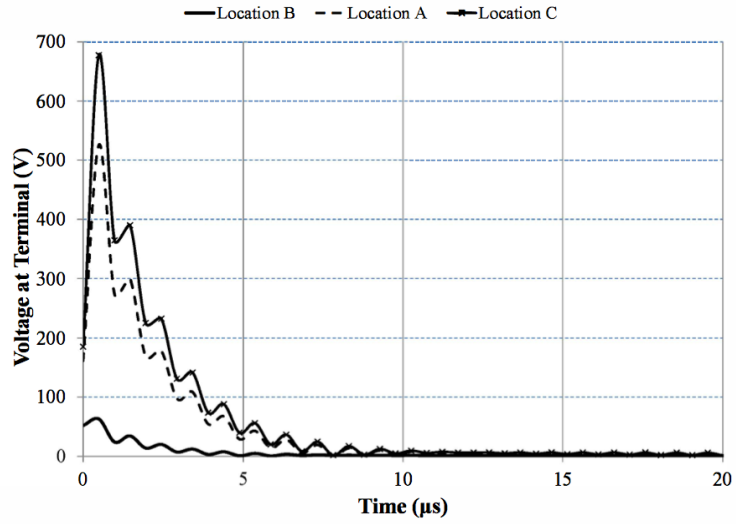
Σχήμα 3.9: Επαγόμενες τάσεις για το σημείο B [18].

Σε μία ακόμα δημοσίευση των Χαραλάμπους Χ., Κόκκινος Ν., Χρηστοφίδης Ν. και Mohd Zainal Abidin Ab Kadir το 2014 [19], βασισμένοι σε προηγούμενη πειραματική διαδικασία [20], εξέτασαν την περίπτωση του απομονωμένου και του μη απομονωμένου συστήματος αντικεραυνικής προστασίας. Μέσω προγράμματος πεδιακής ανάλυσης κατασκευάστηκαν δύο διατάξεις. Η πρώτη διαθέτει μη απομονωμένο σύστημα και δίδεται στο Σχήμα 3.10 a και η δεύτερη απομονωμένο σύστημα, Σχήμα 3.10 b. Και στις δύο διατάξεις μελετήθηκε για τρία σημεία του κεραυνικού πλήγματος Α, Β και C η διαφορά δυναμικού που εμφανίζεται στα άκρα των καλωδίων που φτάνουν στον αναστροφέα (ένδειξη 7 στο Σχ. 3.10) [19].



Σχήμα 3.10: Διατάξεις με μη απομονωμένο (a) και απομονωμένο (b) ΣΑΠ [19].

Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.11 δεν δίνουν μια σαφή εικόνα για πιο από τα δύο συστήματα είναι περισσότερο αποτελεσματικό. Για άμεσο κεραυνικό πλήγμα στο σημείο Β στο μη απομονωμένο η τάση στους ακροδέκτες είναι μικρότερη ενώ για τα σημεία Α και C η τάση είναι μικρότερη στο απομονωμένο. Γίνεται, ωστόσο, σαφές πως η τιμή της διαφοράς δυναμικού στους ακροδέκτες των καλωδίων συνεχούς ρεύματος εξαρτάται τόσο από το τύπο του συστήματος αντικεραυνικής προστασίας όσο και από το σημείο του πλήγματος σε σχέση με τη θέση των καλωδίων [19].



Σχήμα 3.11: Διαφορά δυναμικού στους ακροδέκτες της συστοιχίας για μη απομονωμένο (πάνω) και απομονωμένο (κάτω) ΣΑΠ [19].

Υπολογιστική Μελέτη

Στην παρούσα εργασία έγινε υπολογισμός της διαφοράς δυναμικού που εμφανίζεται στα άκρα του βρόχου ο οποίος σχηματίζεται από τα καλώδια διασύνδεσης των πλαισίων σε μία φωτοβολταϊκή διάταξη η οποία πλήττεται από κρουστικό ρεύμα. Το κρουστικό ρεύμα προσομοιώνει ένα κεραυνικό πλήγμα στη διάταξη στο σημείο όπου βρίσκεται το αλεξικέραυνο. Η μελέτη εστίασε στη διαφοροποίηση που υπάρχει στις επαγόμενες υπερτάσεις στα άκρα και κατά μήκος των καλωδίων καθώς αλλάζουν διάφορες παράμετροι του συστήματος. Η ειδική αντίσταση του εδάφους και ο σχηματιζόμενος βρόχος που δημιουργούν τα καλώδια της φωτοβολταϊκής διάταξης αποτελούν τις παραμέτρους του συστήματος.

4.1 Η Βασική Διάταξη

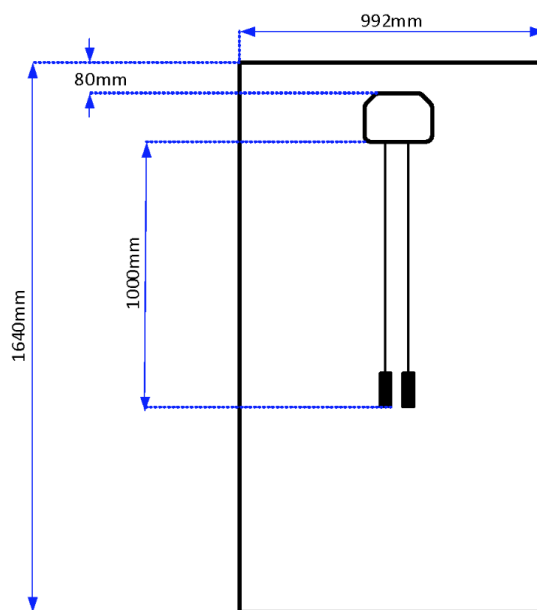
Θεωρούμε ένα πάρκο με γεννήτριες φωτοβολταϊκής μετατροπής συνολικής ισχύος 100kW αποτελούμενο από πλαίσια κρυσταλλικού πυριτίου το οποίο εδράζεται σε περιοχή με μηδενική κλίση εδάφους. Από το σύνολο των 400 φωτοβολταϊκών πλαισίων λαμβάνουμε μία βασική διάταξη μιας ομάδας που αποτελείται από 40 φωτοβολταϊκά πλαίσια με ίδια τεχνικά και ηλεκτρικά χαρακτηριστικά που δίδονται στον Πίνακα 4.1.

Τα παρακάτω χαρακτηριστικά αναφέρονται σε πρότυπες συνθήκες φωτισμού STC (Standard Test Conditions). Οι συνθήκες φωτισμού STC προδιαγράφονται από την πυκνότητα ισχύος της ακτινοβολίας $100\text{mW}/\text{cm}^2$, το φάσμα προσπίπτουσας δέσμης δέσμης (AM 1.5) λόγω της απορρόφησης που έχει υποστεί η ακτινοβολία σε συγκεκριμένα μήκη κύματος, τη θερμοκρασία του υλικού των ΦΒ στοιχείων (25°C) και τη διαδικασία ακτινοβολίας του πλαισίου σύμφωνα με το πρότυπο ASTM-E 892 [1].

Πίνακας 4.1: Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του εκάστοτε πλαισίου

Μέγιστη Ισχύς P_{MAX}	250 W
Απόδοση	15.36%
Τάση Μέγιστης Ισχύος V_{Pmax}	30.3 V
Ρεύμα Μέγιστης Ισχύος I_{Pmax}	8.25 A
Τάση Ανοιχτού Κυκλώματος V_{OC}	37.47 V
Ρεύμα Βραχυκυκλώσεως I_{SC}	8.9 A
Μέγιστη Τάση Συστήματος	1000 V
Ονομαστική Θερμοκρασία Λειτουργίας	45.3±2°C

Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια περιβάλλονται από μεταλλικό σκελετό κατασκευασμένο από ανοδιωμένο αλουμίνιο με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του να φαίνονται στο Σχήμα 4.1. Παρατηρούμε πως το κιβώτιο συνδεσμολογίας βρίσκεται στο μέσο του πλαισίου κατά τη μικρή διάσταση, απέχοντας 8cm από την πάνω πλευρά, και πως το πλαίσιο διαθέτει καλώδια για σύνδεση με τα υπόλοιπα στοιχεία της διάταξης μήκους 1m.



Σχήμα 4.1: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά φωτοβολταϊκών πλαισίων

Η τοποθέτησή τους έγινε με βάση το μήκος της μικρότερης διάστασης σε δύο στοιχειοσειρές των 20 πλαισίων υπό κλίση 30° και με απόσταση από το έδαφος που ξεκινά από τα 0.4m. Η βάση στην οποία έχουν τοποθετηθεί τα φωτοβολταϊκά πλαίσια

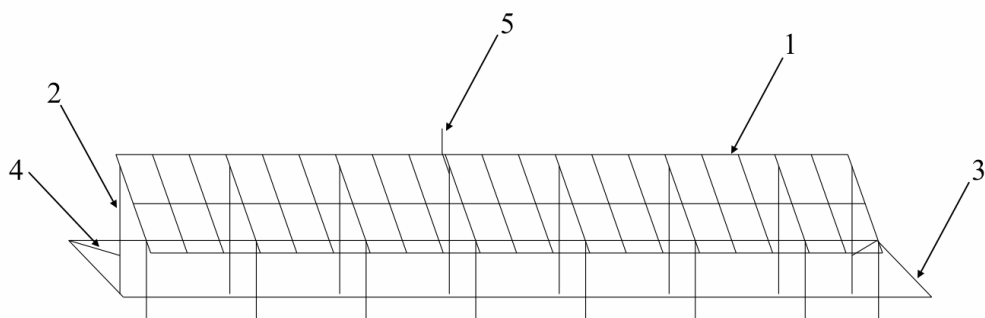
αποτελείται από δοκούς χάλυβα οι οποίες ξεκινούν από βάθος 1.5m και καταλήγουν στο μεταλλικό σκελετό των πλαισίων.

Η γείωση της διάταξης αποτελείται από τις δοκούς της βάσης στήριξης, οι οποίες εισέρχονται στο έδαφος, καθώς και από σύστημα περιμετρικής γείωσης σε βάθος 0.5m από την επιφάνεια του εδάφους και σε απόσταση περί το 1m από τη διάταξη αποτελούμενο από ράβδους χαλκού. Το σύστημα της περιμετρικής γείωσης συνδέεται με τη βάση στις δύο ακριανές δοκούς στο πίσω μέρος της διάταξης επίσης με ράβδους χαλκού.

Τέλος χρησιμοποιείται μη απομονωμένο σύστημα αντικεραυνικής προστασίας για την διάταξη. Το ΣΑΠ αποτελείται από μία χαλύβδινη ακίδα η οποία συνδέεται με την βάση και έχει τοποθετηθεί κοντά στο κέντρο της διάταξης. Μέσω της ακίδας και έπειτα της βάσης και του συστήματος περιμετρικής γείωσης διοχετεύεται το κεραυνικό ρεύμα στο έδαφος.

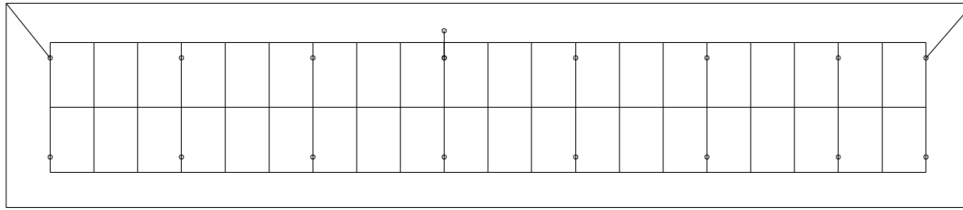
4.2 Οι Διατάξεις Προσομοίωσης

Τα παραπάνω χαρακτηριστικά προσομοιώθηκαν μέσω ειδικού λογισμικού όπου σχεδιάστηκε η βασική διάταξη περιλαμβάνοντας το μεταλλικό σκελετό των 40 πλαισίων, τη χαλύβδινη βάση μαζί με το σύστημα αντικεραυνικής προστασίας που συνδέεται επί αυτής και το σύστημα γείωσης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.2.



Σχήμα 4.2: Προσομοίωση φωτοβολταϊκής διάταξης που περιλαμβάνει:

1. Το μεταλλικό σκελετό των πλαισίων, 2. Τις βάσεις στήριξης, 3. Το σύστημα γείωσης
4. Σύνδεση της γείωσης στη βάση στήριξης, 5. Την αντικεραυνική προστασία



Σχήμα 4.3: Κάτοψη της διάταξης του Σχήματος 4.2

Οι παράμετροι των αγωγών που αποτελούν την διάταξη και χρησιμοποιήθηκαν για τους υπολογισμούς δίδονται στον Πίνακα 4.2.

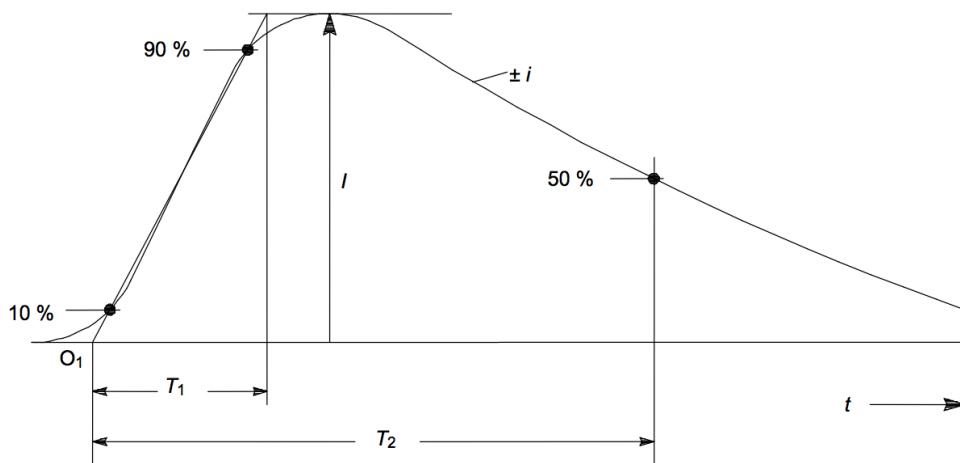
Πίνακας 4.2: Παράμετροι αγωγών

Αγωγός	Ειδική Αντίσταση ρ [Ωm]	Σχετική Διαπερατότητα μ/μ_0
Χαλκός	1.72×10^{-8}	1
Αλουμίνιο	2.82×10^{-8}	1
	Αντίσταση R [Ω/km]	Επαγωγική Αντίδραση X [Ω/km]
Χάλυβας	17	300

Το σημείο ενεργοποίησης της διάταξης, το σημείο δηλαδή που θεωρείται πως πλήττεται από το κεραυνό, είναι το υψηλότερο σημείο της χαλύβδινης ακίδας του συστήματος αντικεραυνικής προστασίας, αριθμός πέντε (5) Σχήμα 4.2. Η μορφή του ρεύματος που εισέρχεται στην άκρη της ακίδας δίνεται στο Σχήμα 4.4 ακολουθώντας το διεθνές πρότυπο για την προσομοίωση κεραυνικών πλήγμάτων σε κατασκευές IEC-62305 [10]. Σε αυτή την τυποποίηση τα χαρακτηριστικά του κεραυνού καθορίζονται από τη μέγιστη τιμή που εμφανίζει, I, το χρόνο μετώπου, T_1 , και το χρόνο ημίσεος εύρους, T_2 . Τα χαρακτηριστικά αυτά ορίζονται με την βοήθεια του σχήματος 4.4 ενώ για την παρούσα μελέτη οι τιμές που χρησιμοποιήθηκαν δίνονται στον Πίνακα 4.3.

Πίνακας 4.3: Χαρακτηριστικά κεραυνικού πλήγματος

Μέγιστη τιμή (I)	50 kA
Χρόνος μετώπου (T_1)	10 μs
Χρόνος ημίσεος εύρους (T_2)	350 μs



Σχήμα 4.4: Μορφή κεραυνικού πλήγματος βάσει του προτύπου IEC-62305 [10]

Σε αυτή τη διάταξη προστέθηκαν τα καλώδια ισχύος που ξεκινούν από τον αναστροφέα, ο οποίος θεωρείται πως βρίσκεται 5m αριστερά από την διάταξη, και ενώνουν τα ΦΒ πλαίσια σε δύο ομάδες των 20 πλαισίων. Ο τρόπος σύνδεσης των 20 πλαισίων διαφοροποιείται σε 6 περιπτώσεις οι οποίες παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.5.

Στην 1η περίπτωση το ένα καλώδιο ενώνει εν σειρά τα πλαίσια της πάνω (U) συστοιχίας από τον αριθμό 1 έως το 20 ενώ το άλλο καλώδιο ενώνει εν σειρά τα πλαίσια της κάτω (D) συστοιχίας από τον αριθμό 21 έως το 40. Η απόσταση του θετικού από το αρνητικό καλώδιο θεωρήθηκε στα 2cm. Στην 2η περίπτωση έχουμε τις αντίστοιχες συνδέσεις με αυτές της 1ης περίπτωσης μόνο που εδώ θεωρείται πως ο βρόχος έχει αυξηθεί με την απόσταση του θετικού από το αρνητικό καλώδιο να φτάνει στα 20cm.

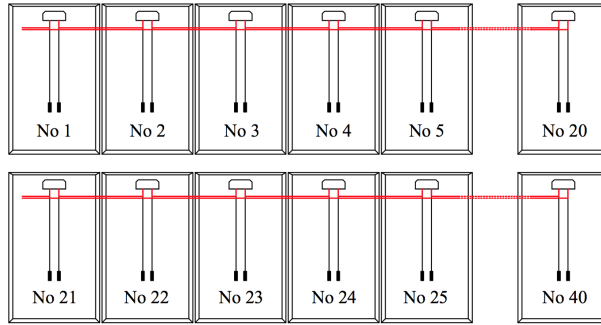
Στην 3η περίπτωση το ένα καλώδιο ενώνει εν σειρά τα πλαίσια από τον αριθμό 1 έως 10 που βρίσκονται στην πάνω πλευρά και στο αριστερό τμήμα της διάταξης και έπειτα συνεχίζει την εν σειρά σύνδεση με τα πλαίσια της κάτω πλευράς από τον αριθμό 11 έως 20. Το άλλο καλώδιο ενώνει εν σειρά τα πλαίσια από τον αριθμό 21 έως 30 που βρίσκονται στην πάνω πλευρά και στο δεξιό τμήμα της διάταξης και έπειτα συνεχίζει την εν σειρά σύνδεση με τα πλαίσια της κάτω πλευράς από τον αριθμό 31 έως 40. Δημιουργούνται έτσι δύο νέες συστοιχίες η αριστερή (L) και η δεξιάς (R) αντίστοιχα. Στην 4η περίπτωση έχουμε τις αντίστοιχες συνδέσεις με αυτές της 3ης περίπτωσης μόνο που εδώ θεωρείται πως ο βρόχος έχει μειωθεί. Η μείωση επιτυγχάνεται θεωρώντας πως τα πλαίσια που βρίσκονται πάνω έχουν περιστραφεί κατά 180° κατά την διεύθυνση που ορίζουν οι πλευρές με το μεγαλύτερο μήκος. Με την προϋπόθεση πως ο κατασκευαστής

δίδει αυτή τη δυνατότητα, μπορούν τα πλαίσια να περιστραφούν με τα κιβώτια συνδεσμολογίας να έχουν πλέον μικρότερη απόσταση μεταξύ τους ελαττώνοντας έτσι το βρόχο που σχηματίζουν τα καλώδια.

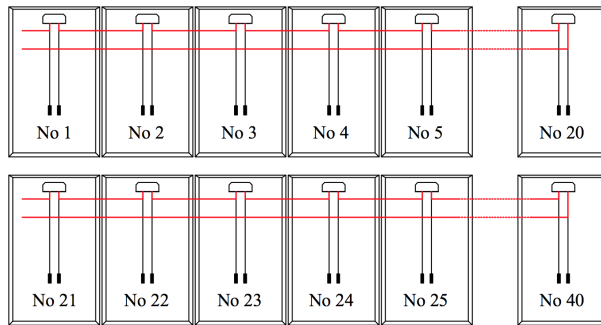
Στις περιπτώσεις 5 και 6 η ένωση των πλαισίων για τον σχηματισμό της αριστερής (L) και της δεξιάς (R) συστοιχίας γίνεται με τρόπο που τα καλώδια παρουσιάζουν μια συστροφή στο χώρο. Ξεκινώντας από πάνω και το πλαίσιο με αριθμό 1 το καλώδιο μεταβαίνει κάτω στο πλαίσιο με αριθμό 2 και συνεχίζει πάλι πάνω στο πλαίσιο με αριθμό 3. Το ίδιο επαναλαμβάνεται μέχρι να ενωθούν και τα 20 πλαίσια που βρίσκονται αριστερά καθώς και τα 20 πλαίσια που βρίσκονται δεξιά με το δεύτερο καλώδιο. Η διαφοροποίηση που υπάρχει μεταξύ των περιπτώσεων 5 και 6 είναι η περιστροφή των πλαισίων κατ' αντίστοιχο τρόπο με την περίπτωση 4 προκειμένου τα κιβώτια συνδεσμολογίας να έχουν μικρότερη απόσταση στην περίπτωση 6 και να μειωθεί ο βρόχος των καλωδίων.

Αν θεωρηθεί η επιφάνεια με το ελάχιστο εμβαδόν που ορίζεται από το βρόχο που σχηματίζει το εκάστοτε καλώδιο κάτω από το επίπεδο των ΦΒ πλαισίων στις έξι περιπτώσεις, παρατηρείται πως στις περιπτώσεις από 1 έως 4 οι επιφάνειες έχουν συγκεκριμένο προσανατολισμό, κάθετο στο επίπεδο των πλαισίων. Αντίθετα στις περιπτώσεις 5 και 6 λόγω της συστροφής των καλωδίων στο χώρο οι επιφάνειες αλλάζουν προσανατολισμό κατά 180°. Το κεραυνικό ρεύμα που θα προσπέσει στο υψηλότερο σημείο της χαλύβδινης ακίδας του ΣΑΠ θα ρεύσει στα αλουμινένια πλαίσια και τις χαλύβδινες δοκούς της βάσης στήριξης. Κατ' αυτό το τρόπο στο χώρο θα παραχθεί μαγνητικό πεδίο \mathbf{B} το οποίο δεν θα παρουσιάζει ομοιομορφία και οι επιφάνειες που θα εμπλέκει θα εμφανίζουν αλλαγές στην κατεύθυνση τόσο από διάταξη σε διάταξη όσο και μέσα στην ίδια την διάταξη. Το εμβαδόν των επιφανειών καθώς και ο προσανατολισμός τους αναμένεται να έχει επίδραση στις εμφανιζόμενες διαφορές δυναμικού στα άκρα των καλωδίων σύμφωνα με την εξίσωση Maxwell-Faraday:

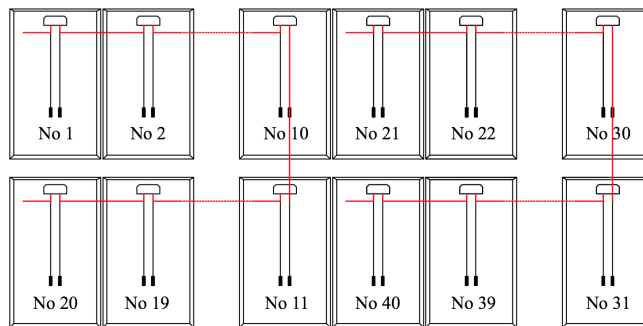
$$\oint_C \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = -\frac{d}{dt} \cdot \iint_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} \quad (4.1)$$



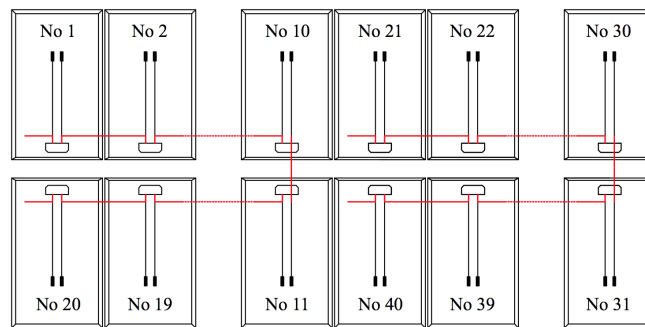
Περίπτωση 1



Περίπτωση 2

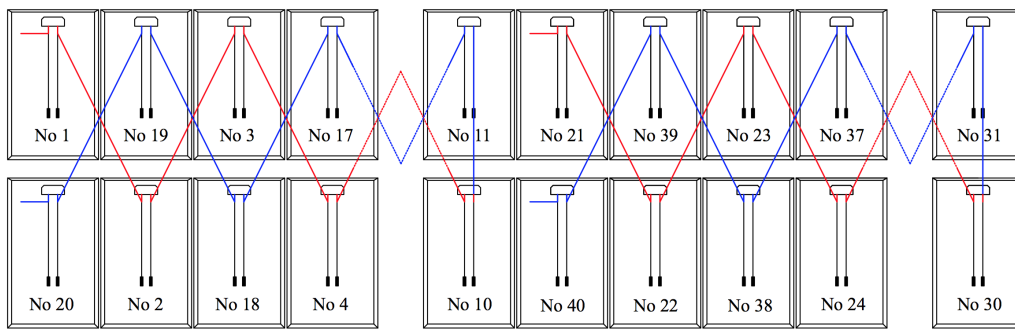


Περίπτωση 3

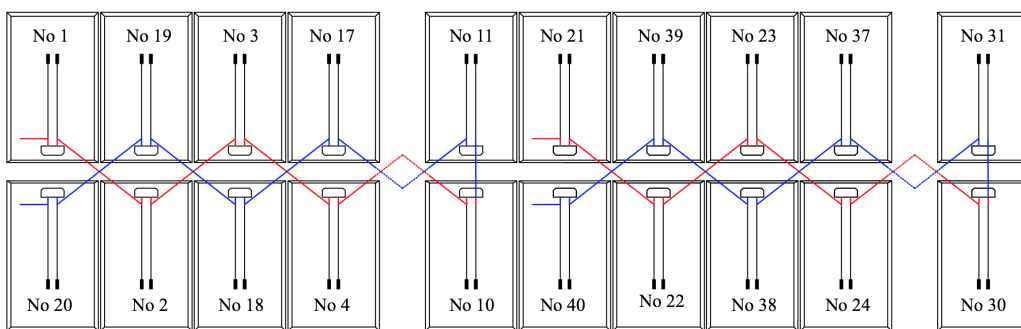


Περίπτωση 4

Σχήμα 4.5: Οι 6 περιπτώσεις σύνδεσης των ΦΒ πλαισίων. (συνεχίζεται)



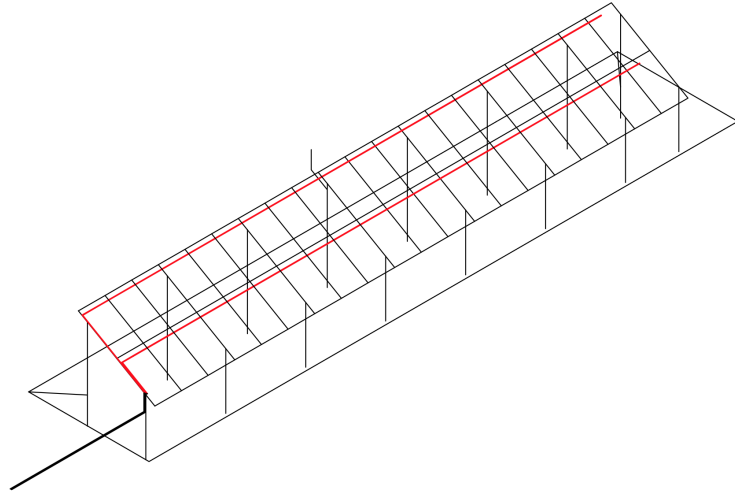
Περίπτωση 5



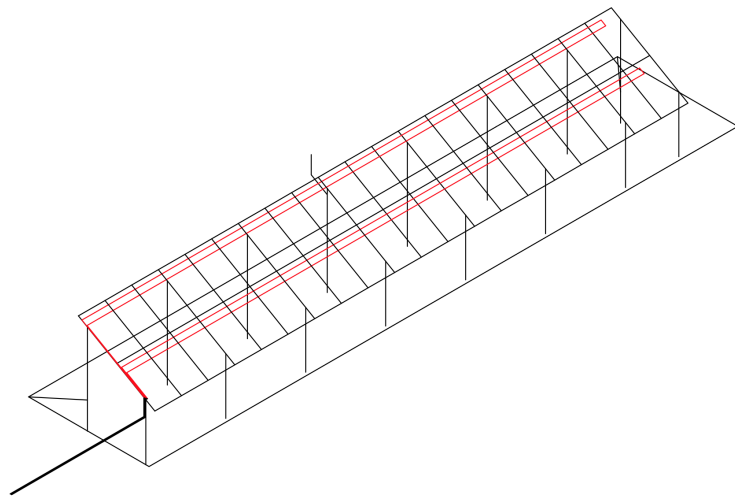
Περίπτωση 6

Σχήμα 4.5: Οι 6 περιπτώσεις σύνδεσης των ΦΒ πλαισίων.

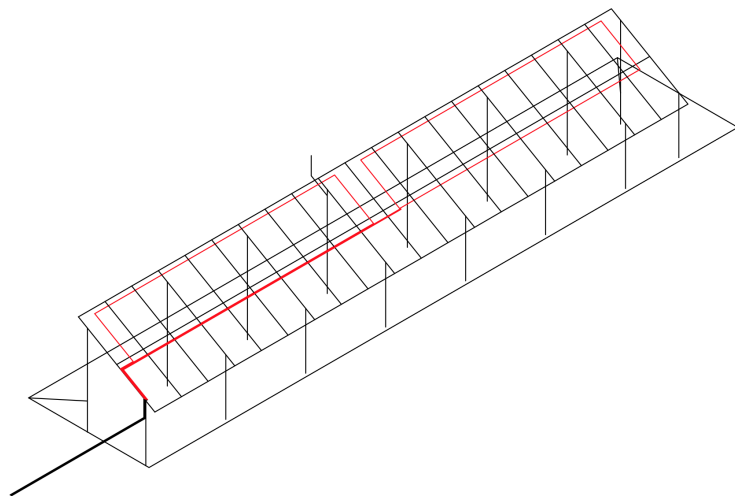
Στο Σχήμα 4.6 δίνονται οι διατάξεις που χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση της κάθε περίπτωσης. Στις διατάξεις αυτές ο βρόχος των καλωδίων απέχει 2cm από το επίπεδο που ορίζουν τα αλουμινένια πλαίσια των πάνελ. Τα καλώδια κατεβαίνουν δίπλα στην ακριανή δοκό της βάσης και συνεχίζουν επί του εδάφους για 5m όπου θεωρείται πως συνδέεται ο αναστροφέας στα άκρα. Προς απλοποίηση των υπολογισμών δεν έχουν ληφθεί υπόψιν η διάταξη των ΦΒ στοιχείων στο εσωτερικό των πλαισίων ούτε και οι δίοδοι προστασίας που αυτά διαθέτουν. Οι παράμετροι των καλωδίων δίνονται στον Πίνακα 4.4. Σύμφωνα με το διεθνές πρότυπο IEC 60228 σχετικά με τους αγωγούς μονωμένων καλωδίων και το ευρωπαϊκό πρότυπο EN 50618 τα καλώδια σύνδεσης των φωτοβολταϊκών συστημάτων της κατηγορίας $1 \times 4 \text{mm}^2$, που θεωρούνται στην παρούσα μελέτη, αποτελούνται από έναν πολύκλωνο αγωγίμο πυρήνα μέγιστης αντίστασης $5,09 \Omega/\text{km}$ σε θερμοκρασία 20°C , από μόνωση ελάχιστου πάχους $0,7\text{mm}$ και ελάχιστης ειδικής αντίστασης $5,8 \times 10^{11} \Omega\text{m}$ σε θερμοκρασία 20°C καθώς και από εξωτερική επένδυση ελάχιστου πάχους $0,8\text{mm}$ και όμοια ειδική αντίσταση [21, 22].



Περίπτωση 1

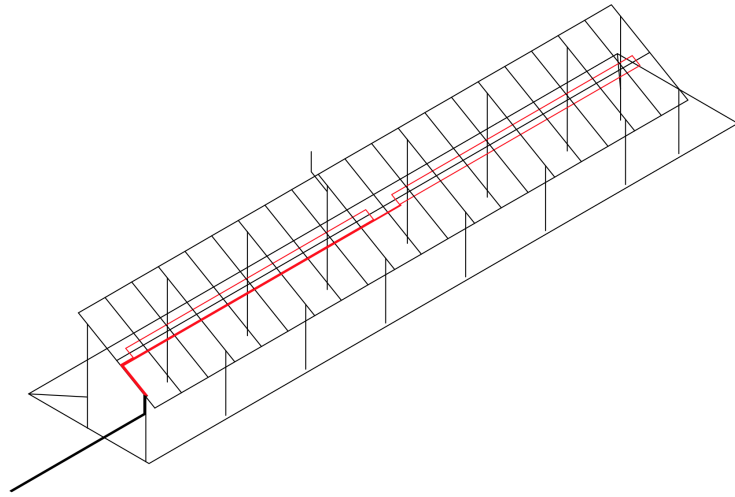


Περίπτωση 2

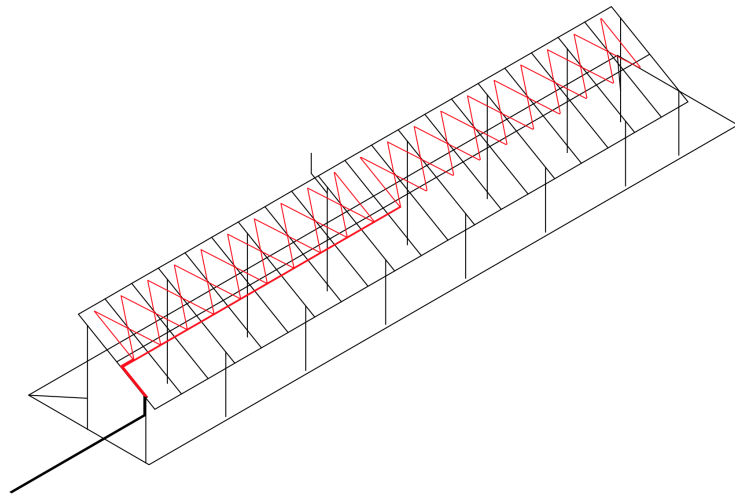


Περίπτωση 3

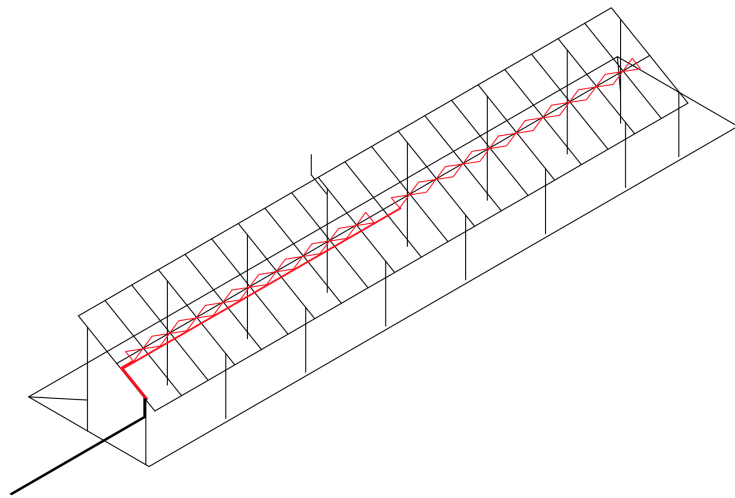
Σχήμα 4.6: Οι 6 διατάξεις προσομοίωσης. (συνεχίζεται)



Περίπτωση 4



Περίπτωση 5



Περίπτωση 6

Σχήμα 4.6: Οι 6 διατάξεις προσομοίωσης.

Πίνακας 4.4: Παράμετροι καλωδίων

	Εσ. Ακτίνα (mm)	Εξ.Ακτίνα (mm)	Ειδική Αντίσταση ρ [Ωm]	Σχετική Διαπερατότητα μ/μ_0
Πυρήνας	0	1,275	$2,03 \times 10^{-8}$	1
	Πάχος (mm)	Ειδική Αντίσταση ρ [Ωm]	Σχετική Επιτρεπτότητα ϵ/ϵ_0	Σχετική Διαπερατότητα μ/μ_0
Μόνωση	0,7	10^{14}	2,3	1
Επένδυση	0,8	10^{14}	2,3	1

Στον Πίνακα 4.5 δίνεται το εμβαδόν κατ' εκτίμηση που καταλαμβάνει κάθε βρόχος καλωδίου ξεκινώντας από τον αναστροφήα.

Πίνακας 4.5: Εμβαδά βρόχων καλωδίων

Περίπτωση	Εμβαδόν πάνω (U) ή αριστερής (L) συστοιχίας	Εμβαδόν κάτω (D) ή δεξιάς (R) συστοιχίας
1	0,538864 m ²	0,506455 m ²
2	4,027624 m ²	3,988015 m ²
3	15,190361 m ²	15,422815 m ²
4	3,175893 m ²	3,34272 m ²
5	8,621197 m ²	8,820051 m ²
6	2,530877 m ²	2,729731 m ²
Ποσοστό μείωσης του εμβαδού συγκρίνοντας την εναλλαγή των περιπτώσεων		
Από -> σε	Πάνω (U) ή αριστερής (L) συστοιχίας	Κάτω (D) ή δεξιάς (R) συστοιχίας
2 -> 1	86,6208 %	87,3006 %
3 -> 4	79,0927 %	78,3261 %
5 -> 6	70,6436 %	69,0508 %
3 -> 5	43,2456 %	42,8117 %
4 -> 6	20,3098 %	18,3380 %

Μία ακόμα παράμετρος που υπήρξε στη μελέτη είναι το έδαφος. Το έδαφος θεωρήθηκε μονοστρωματικό και στον Πίνακα 4.6 δίνονται οι διάφορες τιμές της ειδικής αντίστασης του για τις οποίες εξετάστηκαν και οι έξι παραπάνω περιπτώσεις.

Πίνακας 4.6: Τιμές ειδικής αντίστασης εδάφους

Ειδική Αντίσταση Εδάφους (Ωm)	100	1000
	200	2000
	300	3000
	500	5000
	700	7000
		10000

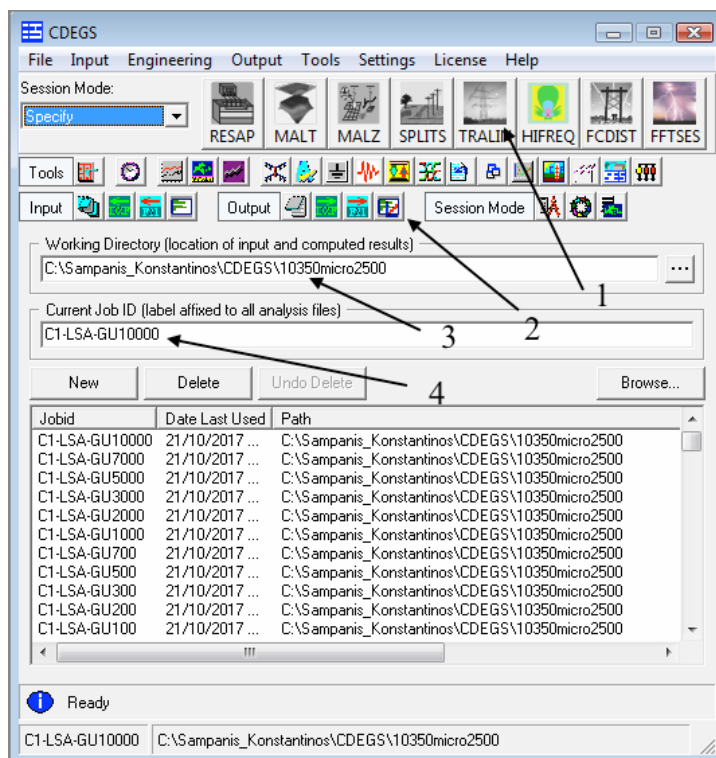
Η μελέτη των έξι παραπάνω περιπτώσεων για τις έντεκα τιμές της ειδικής αντίστασης του εδάφους εστίασε στην μεταβολή που υπάρχει στις μέγιστες επαγόμενες τάσεις στα άκρα και κατά μήκος των καλωδίων καθώς αλλάζει ο σχηματιζόμενος βρόχος και η τιμή της ειδικής αντίστασης. Επιπλέον εξετάστηκε η μεταβολή με τον χρόνο των επαγόμενων τάσεων στα άκρα των καλωδίων. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 6.

Λογισμικό CDEGS

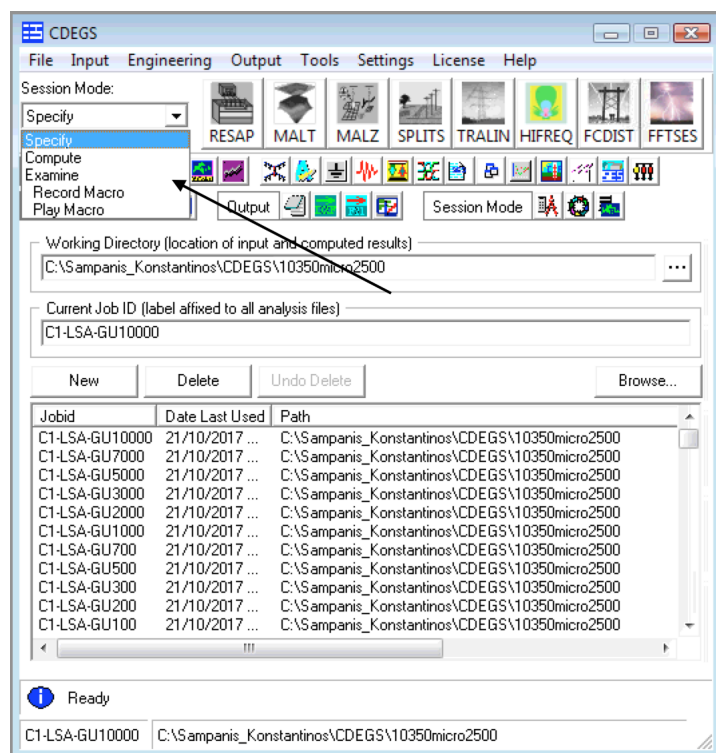
Το πακέτο λογισμικού CDEGS (Current Distribution Electromagnetic Interference Grounding and Soil Structure Analysis, Version 15.1.4080) της εταιρείας SES χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση κεραυνικού πλήγματος σε ΦΒ συστήματα. Η διαδικασία που ακολουθείται διακρίνεται σε τρία μέρη, την καταχώρηση δεδομένων, όπου γίνεται ο σχεδιασμός του ΦΒ συστήματος, ο ορισμός του κεραυνικού ρεύματος και των λοιπών παραμέτρων, την προσομοίωση της λειτουργίας του συστήματος υπό τις συνθήκες που ορίσαμε στο πρώτο μέρος και την παρουσίαση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης, αριθμητικά και με τη μορφή γραφημάτων.

5.1 Εκκίνηση Προγράμματος

Αφου εκτελέσουμε το πρόγραμμα CDEGS.exe εμφανίζεται στην οθόνη το αρχικό περιβάλλον εργασίας του προγράμματος όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.1. Σε αυτό το παραθυρο φαίνονται οι διάφοροι επιλύτες του πακέτου, εργαλεία προβολής καθώς και εισαγωγής και εξαγωγής δεδομένων, ο φάκελος εργασίας και το τρέχον όνομα του αρχείου προσομοίωσης. Επιλέγουμε ένα JobID το οποίο εισάγεται στο όνομα των αρχείων εισόδου και εξόδου, ώστε να αναγνωρίζονται εύκολα από το χρήστη, ανάλογα με την εκάστοτε προσομοίωση. Μετά την επιλογή του JobID μπορούμε να επιλέξουμε ανάμεσα στις κατηγορίες Specify, Compute, Examine πατώντας το πλαίσιο πάνω αριστερά όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.2 και τον επιλύτη που μας ενδιαφέρει. Οι επιλύτες που χρησιμοποιούνται στη συγκεκριμένη εργασία είναι οι HIFREQ και FFTSES [9].



Σχήμα 5.1: Περιβάλλον εκκίνησης προγράμματος CDEGS που περιλαμβάνει τους επιλύτες (1), εργαλεία του προγράμματος (2), το φάκελο εργασίας (3) και το όνομα αρχείου προσομοιώσεων (4)



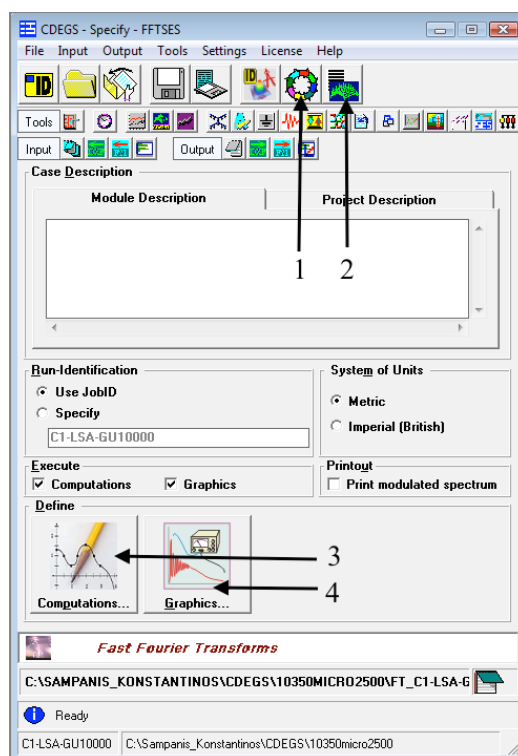
Σχήμα 5.2: Κατηγορίες λειτουργίας επιλυτών

5.2 Ευθύς μετασχηματισμός Fourier του κεραυνικού ρεύματος

Εισαγωγή δεδομένων στον επιλύτη FFTSES για ευθύ μετασχηματισμό Fourier

Επιλέγουμε τον επιλύτη FFTSES. Στην κατηγορία Specify μπορούμε να ορίσουμε τη μορφή του κεραυνικού ρεύματος στην οποία θέλουμε να γίνει ο ευθύς μετασχηματισμός Fourier από το πεδίο του χρόνου στο πεδίο της συχνότητας. Ο ίδιος επιλύτης πραγματοποιεί και την αντίστροφη διαδικασία, από το πεδίο των συχνοτήτων στο πεδίο του χρόνου, όπως παρουσιάζεται σε επόμενη ενότητα στο παρόν κεφάλαιο.

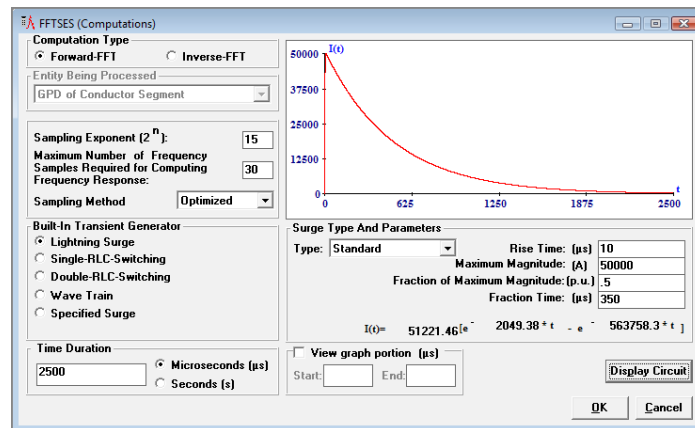
Το περιβάλλον της κατηγορίας Specify FFTSES δίνεται στο Σχήμα 5.3. Στο παράθυρο αυτό έχουμε τις επιλογές για την έναρξη των υπολογισμών καθώς και την εξέταση των αποτελεσμάτων (αριθμοί 1 και 2 αντίστοιχα στο σχήμα 5.3). Υπάρχει η δυνατότητα εισαγωγής σχολίων για την δοκιμή που θα πραγματοποιήσουμε, με την επιλογή Module Description και να επιλέξουμε σύστημα μονάδων, μεταξύ μετρητικού και βρετανικού, για την ανάλυσή μας.



Σχήμα 5.3: Περιβάλλον εργασίας Specify FFTSES. Διακρίνονται οι επιλογές για έναρξη υπολογισμών (1), εξέταση αποτελεσμάτων (2), ρύθμισης των δεδομένων (3) και ρύθμιση γραφικών παραστάσεων (4)

Στην επιλογή Computations (αριθμός 3 στο σχήμα 5.3) επιλέγουμε το είδος μετασχηματισμού Fourier θέλουμε να πραγματοποιήσουμε και ποιες φυσικές ποσότητες

θα μετέχουν σε αυτόν. Επιλέγοντας ευθύ μετασχηματισμό με την κατηγορία Forward-FFT, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.4, το κουμπί Lightning Surge είναι προεπιλεγμένο, ενεργοποιώντας μια εσωτερική συνάρτηση του προγράμματος. Στο πεδίο Sampling Exponent καθορίζουμε τον αριθμό των σημείων (N) που ενεργοποιούνται για τον υπολογισμό και την ψηφιοποίηση του χρονικού σήματος ($N=2^n$). Το χρονικό παράθυρο T του σήματος που εισάγουμε στην επιλογή Time Duration καθορίζουν το βήμα συχνότητας Δf και τον εκθέτη n. Βασικό κριτήριο στην επιλογή του T είναι ότι το σήμα πρέπει, για χρόνους μεγαλύτερους του T, να γίνεται αμελητέο. Έτσι, το βήμα συχνότητας $\Delta f=1/T$ γίνεται ικανό, ώστε να αναγνωριστεί οποιαδήποτε αιχμή λόγω αντήχησης και να εμφανιστεί στο πεδίο συχνοτήτων. Ισχύει $N=T/\Delta t$ όπου Δt το βήμα δειγματοληψίας οπότε αφού υπολογιστεί ο αριθμός N επιλέγεται ο ελάχιστος εκθέτης n που ικανοποιεί τη σχέση $2^n \geq N$. Τα πεδία Rise Time και Fraction Time καθορίζουν τη κλίση του σήματος ενώ το πεδίο Maximum Magnitude το πλάτος.

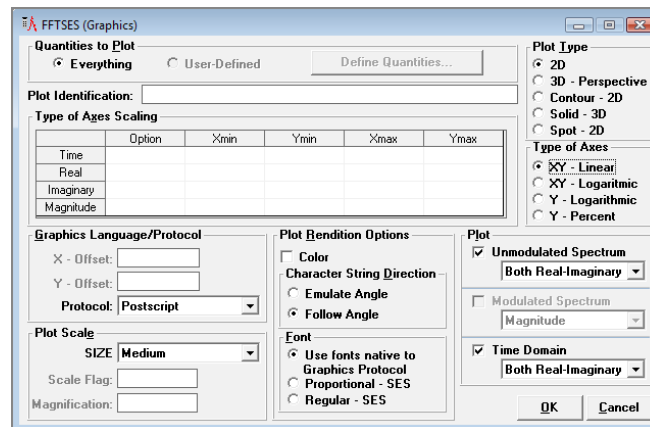


Σχήμα 5.4: Επιλογές για ευθύ μετασχηματισμό Fourier

Στην επιλογή Graphics (αριθμοί 4 στο σχήμα 5.3) μπορούμε να εισάγουμε τον τίτλο που θέλουμε να εμφανίζεται στις γραφικές μας παραστάσεις, το πρωτόκολλο που ακολουθείται, την κλίμακα, τον τύπο των αξόνων και τον τύπο της γραφικής παράστασης, π.χ. δισδιάστατη. Επίσης, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.5, μπορούμε στην επιλογή Unmodulated Spectrum και στην Time Domain, να διαλέξουμε αν θέλουμε να εμφανίζονται στην γραφική, τόσο τα πραγματικά όσο και τα φανταστικά μέρη του σήματος ρεύματος στα πεδία του χρόνου και της συχνότητας.

Αφού εισαχθούν τα χαρακτηριστικά του κεραυνικού ρεύματος στον επιλύτη FFTSES (πλάτος, χρόνος μετώπου και ουράς, παράθυρο χρόνου), υπολογίζεται το φάσμα συχνότητάς του και επιλέγεται πλήθος κρίσιμων συχνοτήτων από το πρόγραμμα. Αλλάζοντας κάποιο από τα χαρακτηριστικά του σήματος αλλάζουν και οι κρίσιμες συχνότητες που επιλέγονται. Όπως αναφέρεται και παραπάνω η χρονική διάρκεια T του σήματος πρέπει να είναι τέτοια ώστε να γίνεται αμελητέο για χρόνους μεγαλύτερους του T. Επίσης, η ανάλυση συχνότητας βελτιώνεται μεγαλώνοντας το παράθυρο χρόνου

ενός σήματος. Προφανώς, ένα σήμα με μεγαλύτερη κλίση φθίνει γρηγορότερα και χρειάζεται μικρότερη χρονική διάρκεια T . Στην εργασία αυτή εξετάστηκε η κυματομορφή 10/350 μs με ένα πατάθυρο χρόνου 2500 μs . Σε κάθε περίπτωση επιλογής του χρονικού παραθύρου T το πρόγραμμα επιλέγει τις κρίσιμες συχνότητες που είναι αρκετές για την αναπαράσταση του σήματος, καθώς ο συνολικός αριθμός των συχνοτήτων είναι αρκετά μεγάλος. Μεγαλύτερα ή μικρότερα χρονικά παράθυρα δεν συνεπάγεται άμεσα περισσότερες ή λιγότερες συχνότητες αντίστοιχα.



Σχήμα 5.5: Επιλογές γραφημάτων του επιλύτη FFTSES

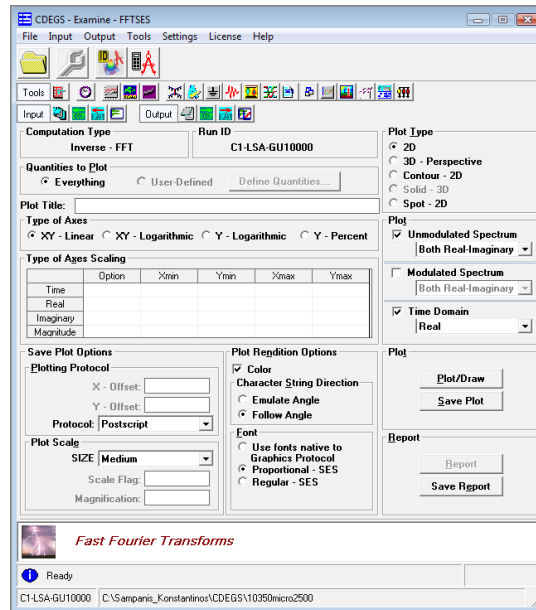
Προσομοίωση και εξαγωγή αποτελεσμάτων στον επιλύτη FFTSES για ευθύ μετασχηματισμό Fourier

Μετά την ολοκλήρωση της καταχώρησης δεδομένων και καθώς βρισκόμαστε στην αρχική οθόνη του επιλύτη, η προσομοίωση ξεκινάει πατώντας το κουμπί Compute/Submit (αριθμός 1 στο σχήμα 5.3). Μόλις τελειώσει η προσομοίωση, αυτόματα εμφανίζεται η οθόνη παρουσίασης αποτελεσμάτων όπως δίνεται στο Σχήμα 5.6.

Αφού επιλέξουμε τίτλο για την γραφική παράσταση, μπορούμε να καθορίσουμε ποια από τα μεγέθη που είχαμε επιλέξει να υπολογιστούν, θέλουμε να εμφανίσουμε στην γραφική παράσταση. Έχουμε τη δυνατότητα διαφορετικών τύπων γραφικών παραστάσεων, ενώ μπορούμε να καθορίσουμε και τον τύπο των αξόνων μας (π.χ. λογαριθμικοί).

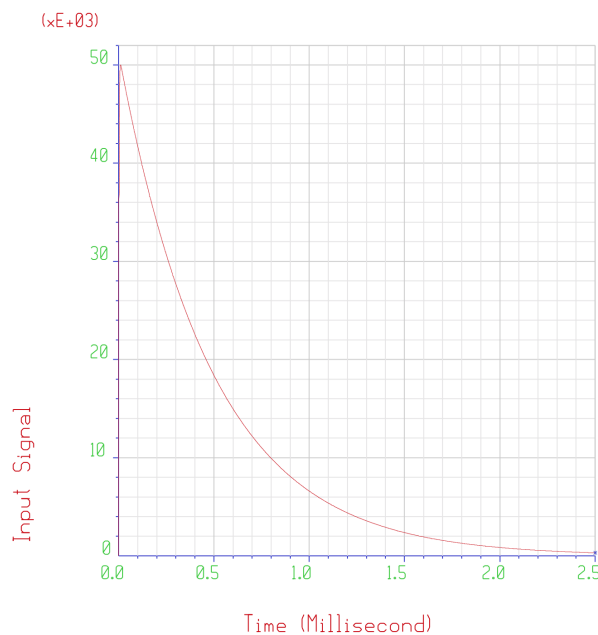
Υπάρχει η δυνατότητα επιλογής του τρόπου εμφάνισης των σχεδιαζόμενων διανυσματικών στοιχείων (σαν διάνυσμα, μόνο το μέτρο, μόνο η γωνία, πραγματικό, φανταστικό μέρος). Ακόμη μπορούμε να θέσουμε όρια στους άξονες, ώστε να περιορίσουμε το πεδίο ενδιαφέροντός μας με την επιλογή Types of Axes Scaling, ενώ με την επιλογή Plot Scale καθορίζουμε το μέγεθος που θέλουμε να έχουν οι γραφικές μας παραστάσεις. Στις επιλογές Unmodulated Spectrum, Modulated Spectrum και Time Domain επιλέγουμε αν θέλουμε στην γραφική για καθένα από αυτά, να εμφανιστούν

και τα πραγματικά και τα φανταστικά μέρη των ποσοτήτων που υπολογίζουμε. Τέλος, με την επιλογή Plot/Draw εμφανίζεται νέο παράθυρο με τις γραφικές παραστάσεις.



Σχήμα 5.6: Περιβάλλον εργασίας Examine FFTSES

Οι συχνότητες που προκύπτουν από το μετασχηματισμό Fourier φαίνονται στον Πίνακα 5.1. Στο Σχήμα 5.7 φαίνεται η κυματομορφή που προσομοιώνει το κεραυνικό πλήγμα με τις μονάδες του κάθετου άξονα να είναι Ampere (A) [9].



Σχήμα 5.7: Κυματομορφή κεραυνικού πλήγματος

Πίνακας 5.1: Συχνότητες για την αναπαράσταση του κεραυνικού ρεύματος

Αριθμός Συχνότητας	Συχνότητα (Hz)	Αριθμός Συχνότητας	Συχνότητα (Hz)
1	0	15	7600
2	400	16	10400
3	800	17	11200
4	1200	18	22800
5	1600	19	936000
6	2000	20	1228800
7	2400	21	1740800
8	2800	22	1872000
9	3200	23	2808000
10	3600	24	3744000
11	4000	25	4680000
12	4400	26	5616000
13	4800	27	6552000
14	6000	28	6553600

5.3 Απόκριση συστήματος στο πεδίο της συχνότητας

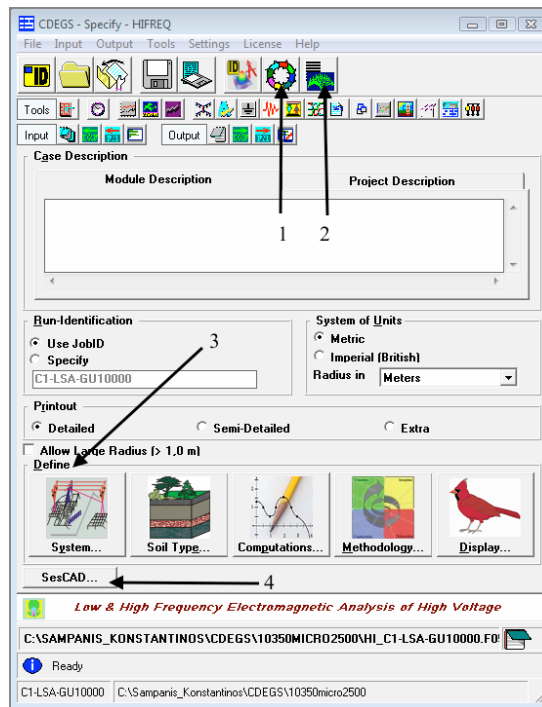
Εισαγωγή δεδομένων στον επιλύτη HIFREQ

Η εφαρμογή HIFREQ μας επιτρέπει τον υπολογισμό της κατανομής των ρευμάτων σε δίκτυα υπόγειων ή εναέριων αγωγών. Στη συνέχεια, μπορούν να υπολογιστούν και άλλες ηλεκτρομαγνητικές ποσότητες που ενεργοποιούνται εξαιτίας της παραπάνω κατανομής, όπως το ηλεκτρικό και το μαγνητικό πεδίο και τάσεις (είτε σαν διανυσματικές, είτε σαν αριθμητικές ποσότητες).

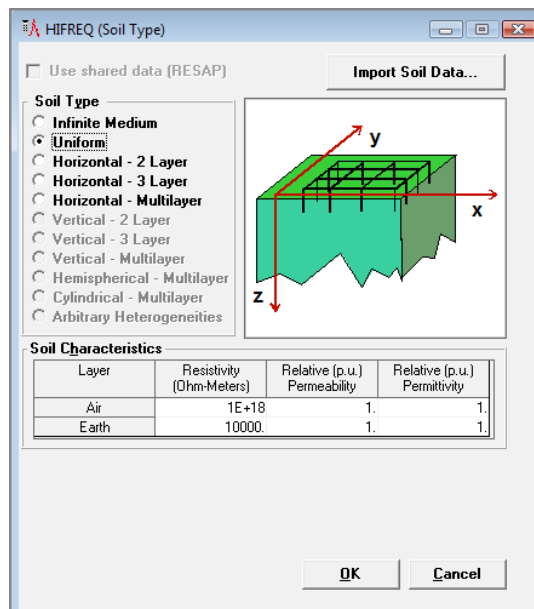
Επιλέγουμε τον επιλύτη HIFREQ από το περιβάλλον εκκίνησης του προγράμματος. Στην κατηγορία Specify μπορούμε να ορίσουμε την διάταξη στην οποία θέλουμε να πραγματοποιηθούν οι υπολογισμοί. Το περιβάλλον της κατηγορίας Specify HIFREQ δίνεται στο Σχήμα 5.8. Στο παράθυρο αυτό έχουμε τις επιλογές για την έναρξη των υπολογισμών καθώς και την εξέταση των αποτελεσμάτων (αριθμοί 1 και 2 αντίστοιχα στο σχήμα 5.8). Υπάρχει η δυνατότητα εισαγωγής σχολίων για την δοκιμή που θα πραγματοποιήσουμε, με την επιλογή Module Description και να επιλέξουμε σύστημα μονάδων, μεταξύ μετρητικού και βρετανικού, για την ανάλυσή μας. Ακόμη στο πεδίο Define (αριθμός 3 στο σχήμα 5.8) μπορούμε να ορίσουμε το σύστημα που θα πραγματοποιηθεί η μελέτη, του τύπο του εδάφους, το τύπο των υπολογισμών και άλλα.

Με την επιλογή Soil Type εμφανίζεται το παράθυρο του Σχήματος 5.9 και προσδιορίζουμε το μοντέλο που πιστεύουμε ότι προσεγγίζει το εν λόγω έδαφος, π.χ.

οριζόντια πολυστρωματικό.



Σχήμα 5.8: Περιβάλλον εργασίας Specify HIFREQ. Διακρίνονται οι επιλογές για έναρξη υπολογισμών (1), εξέταση αποτελεσμάτων (2), ρύθμισης των δεδομένων (3) και το γραφιστικό εργαλείο (4)

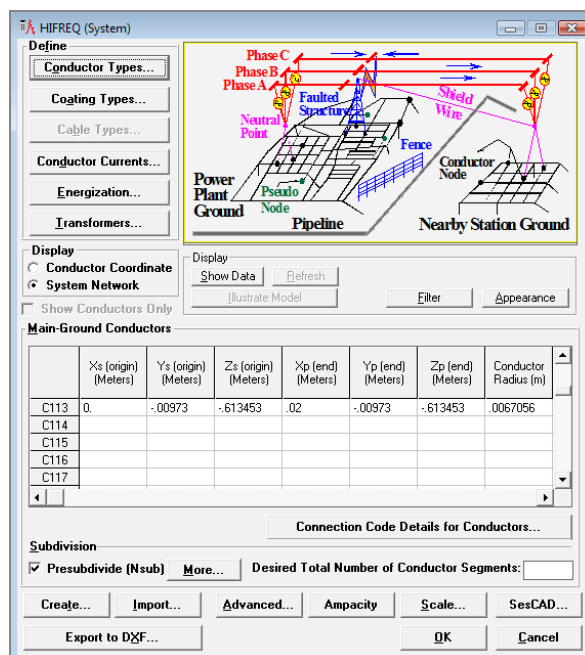


Σχήμα 5.9: Επιλογές για τον προσδιορισμό του μοντέλου του εδάφους

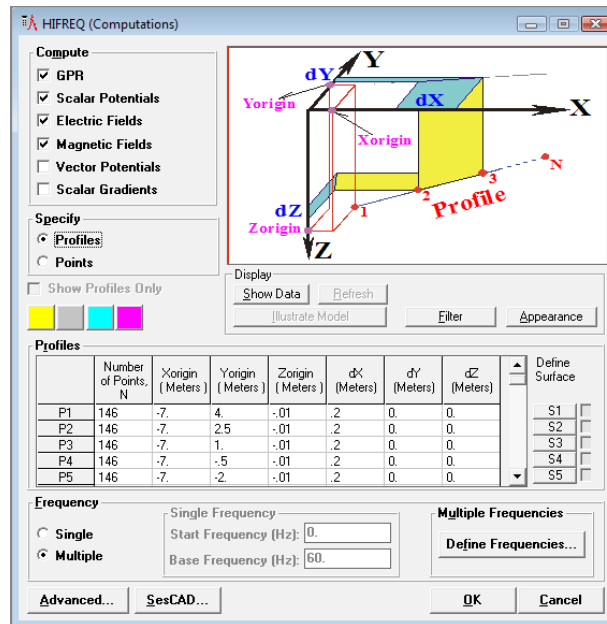
Με την επιλογή System εμφανίζεται το παράθυρο του σχήματος 5.10 και

έχουμε τη δυνατότητα, στις επιλογές Characteristics, Conductor Currents και Energization της υποενότητας Define, να εισάγουμε τα χαρακτηριστικά των αγωγών, όπως ο τύπος και το εξωτερικό τους κάλυμμα, καθώς και τα απαιτούμενα ρεύματα ή τάσεις για την ενεργοποίησή τους. Στη συνέχεια εισάγουμε το δίκτυο των αγωγών και το ενεργοποιούμε στην υποενότητα Main- Ground Conductors. Για να δούμε το δίκτυο των αγωγών, μπορούμε στην οθόνη HIFREQ (System) να πατήσουμε την επιλογή Show Data.

Με την επιλογή Computations εμφανίζεται το παράθυρο του σχήματος 5.11 και μπορούμε να προσδιορίσουμε τις φυσικές ποσότητες που θέλουμε να υπολογιστούν, την θέση των σημείων παρατήρησης και τις ζητούμενες συχνότητες για τις οποίες θα γίνουν οι μετρήσεις. Επίσης, μπορούμε να εξετάσουμε τη συμπεριφορά του συστήματός μας σε διάφορες συχνότητες, επιλέγοντας Multiple στο πεδίο Frequency και ορίζοντας τις συχνότητες που μας ενδιαφέρουν στο πεδίο Define Frequencies. Η επιλογή αυτή χρησιμοποιείται στην ανάλυση σφαλμάτων με ευρύ φάσμα συχνοτήτων, όπως είναι οι κεραυνοί. Τον αριθμό των σημείων παρατήρησης, καθώς και τη μορφή του πεδίου στο οποίο θέλουμε να γίνουν οι μετρήσεις, το καθορίζουμε εισάγοντας τα απαραίτητα δεδομένα στον πίνακα Profiles. Στα πεδία dX, dY, dZ καθορίζεται η απόσταση μεταξύ των Profiles στους τρεις άξονες.



Σχήμα 5.10: Επιλογές για τον προσδιορισμό της διάταξης



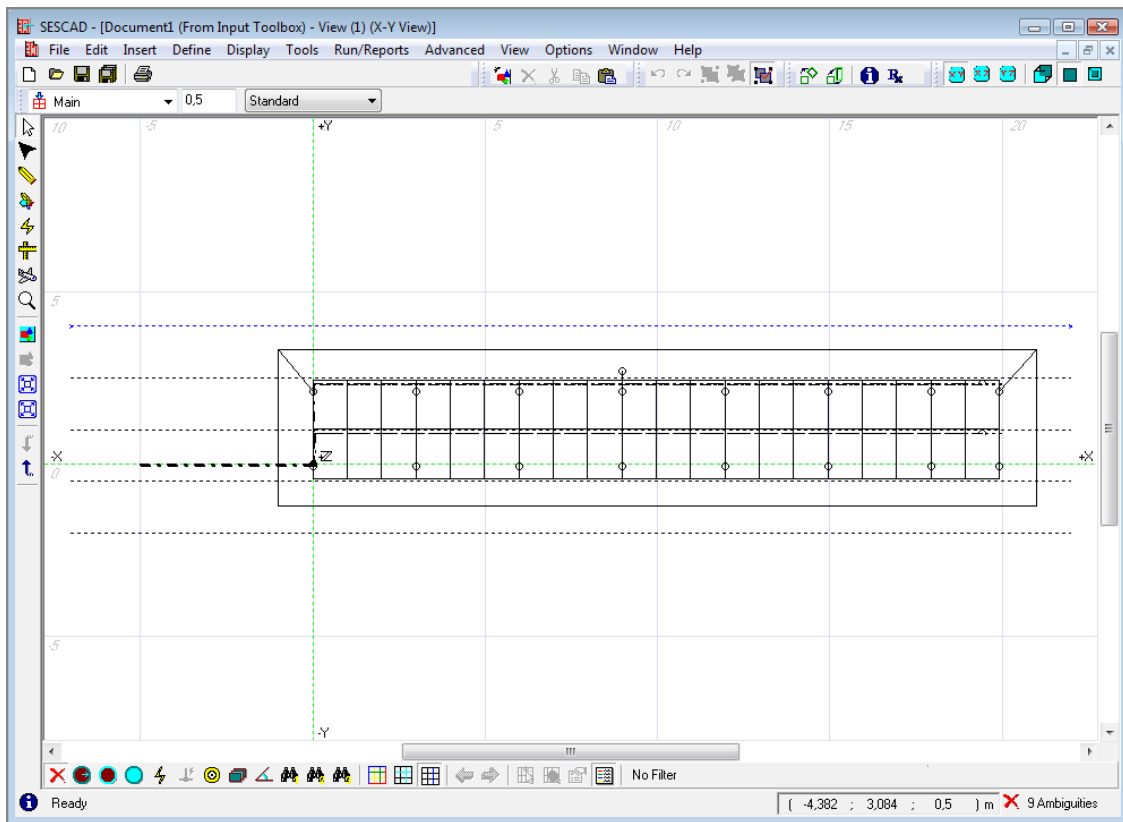
Σχήμα 5.11: Επιλογές για τον προσδιορισμό των υπολογισμών

Η εφαρμογή SESCAD (αριθμός 4 στο σχήμα 5.8) είναι ένα γραφιστικό εργαλείο για τον εύκολο σχεδιασμό συστημάτων και δικτύων αγωγών το παράθυρο του οποίου φαίνεται στο Σχήμα 5.12. Παρέχει πολλές ευκολίες για τον σχεδιασμό απλών και πολύπλοκων αντικειμένων, μέσω κατάλληλα σχεδιασμένων, ευκολόχρηστων δυναμικών εργαλείων. Επίσης, δίνεται η δυνατότητα παρακολούθησης του σχεδιαζόμενου τρισδιάστατου δικτύου από διαφορετικές οπτικές γωνίες, ενώ έχει και δυνατότητες εστίασης έως και 1 εκατομμύριο φορές. Με αυτή την εφαρμογή μπορούμε να σχεδιάσουμε μεγάλα ολοκληρωμένα δίκτυα πυλώνων υψηλής τάσης με τις βάσεις, τα πλέγματα γείωσης τους και περιφερειακά στοιχεία που μας ενδιαφέρουν, όπως μεταλλικούς φράχτες, ενώ μπορεί να γίνει και ο γραφικός καθορισμός του πεδίου στο οποίο θέλουμε να γίνουν οι μετρήσεις μας.

Στο γραφικό περιβάλλον SESCAD ο σχεδιασμός του πλέγματος και των αγωγών γίνεται επιλέγοντας Insert → Conductor Grid και Insert → Single Conductor αντίστοιχα όπως επίσης και η εισαγωγή Profile με την επιλογή Insert → Observation Profile. Ακόμα, γίνεται καθορισμός διαφόρων παραμέτρων (είδη αγωγών, είδη καλωδίων, ενεργοποίηση) μέσω του εργαλείου Define.

Επιλέγοντας Define → Conductor types εισάγουμε τη σχετική ειδική αντίσταση και τη σχετική επιτρεπτότητα των αγωγίμων υλικών που χρησιμοποιούμε. Ο χαλκός θεωρείται default conductor και υπάρχει ως επιλογή πριν εισάγουμε νέα υλικά. Με την επιλογή Define → Energization types ορίζουμε το είδος της ενεργοποίησης (ρεύμα ή τάση) και την τιμή του. Όταν το σήμα εισόδου έχει αναλυθεί μέσω του επιλυτή FFTSES, τότε εισάγουμε μοναδιαία τάση ή ρεύμα ώστε να μην επηρεάζεται το αποτέλεσμα των εξισώσεων Fourier. Στην προκειμένη περίπτωση χρησιμοποιείται

μοναδιαίο ρεύμα στο σημείο που θεωρούσε ότι εγχέεται ο κεραυνός.



Σχήμα 5.12: Γραφικό περιβάλλον SESCAD

Οι αγωγοί του συστήματος θα πρέπει να χωριστούν σε τμήματα μέσω της επιλογής Characteristics → Subdivision Options → Maximum Length και εισάγουμε μέγιστο μήκος των τμημάτων λ που επιλέγουμε. Η λειτουργία αυτή είναι σημαντική για τους υπολογισμούς ειδικά στις υψηλές συχνότητες. Το άνω επιτρεπτό όριο του λ υπολογίζεται από τους τύπους :

$$\lambda = \frac{3 \cdot 10^8}{f} \quad \text{στον αέρα} \quad (5.1)$$

$$\lambda = 3160 \cdot \sqrt{\frac{\rho}{f}} \quad \text{στο έδαφος}$$

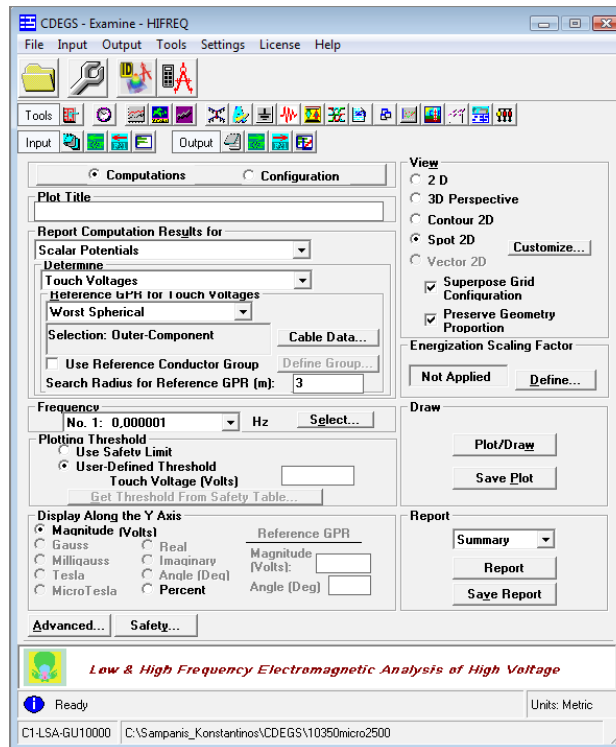
όπου f η συχνότητα και ρ η ειδική αντίσταση του εδάφους. Πρακτικά θέτουμε το λ αρκετά μικρότερο για μεγαλύτερη ακρίβεια αυξάνοντας βέβαια τον χρόνο

προσομοίωσης. Στις προσομοιώσεις επιλέχθηκε $\lambda=0.2\text{m}$ για τους υπολογισμούς.

Επιλέγοντας Define \rightarrow Computations settings και έπειτα στο πεδίο import το πρόγραμμα μας παραπέμπει στο φάκελο με τα αρχεία που περιέχουν τις κρίσιμες συχνότητες που έχουν προκύψει από τον επιλυτή FFTSES. Πρέπει να γίνει επιλογή του αρχείου με το όνομα που αντιστοιχεί στο JobID που δουλεύουμε.

Προσομοίωση και εξαγωγή αποτελεσμάτων στον επιλύτη

Μετά την ολοκλήρωση της καταχώρησης δεδομένων και καθώς βρισκόμαστε στην αρχική οθόνη του επιλύτη, η προσομοίωση ξεκινάει πατώντας το κουμπί Compute/Submit (αριθμός 1 στο σχήμα 5.8). Μόλις τελειώσει η προσομοίωση, αυτόματα εμφανίζεται η οθόνη παρουσίασης αποτελεσμάτων όπως δίνεται στο Σχήμα 5.13.

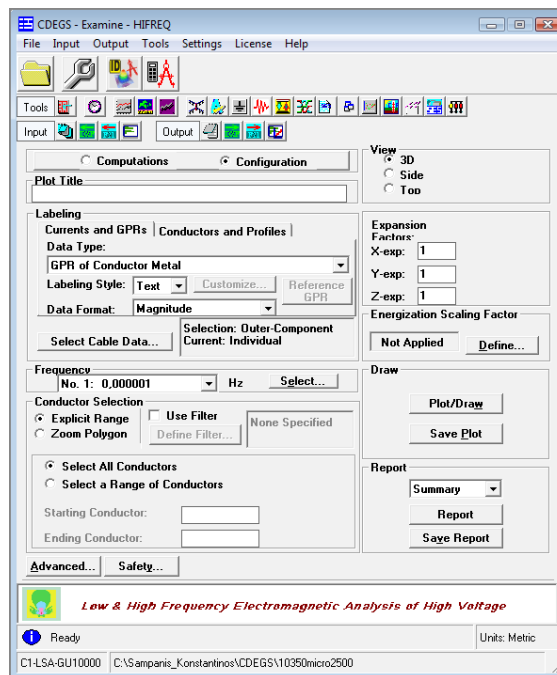


Σχήμα 5.13: Περιβάλλον εργασίας Examine HIFREQ με επιλεγμένη τη στήλη Computations

Επιλέγουμε την στήλη Computations. Μπορούμε να εισάγουμε το όνομα που θέλουμε να δώσουμε στην γραφική παράσταση στο πεδίο Plot Title. Μέσω των πεδίων Report Computation Results for και Determine καθορίζουμε τη παράμετρο της οποίας τα αποτελέσματα θέλουμε να εμφανιστούν. Επιλέγουμε την συχνότητα για την οποία θέλουμε να γίνει η γραφική (επιλογή Frequency), ενώ να βάλουμε όρια στις τιμές της

γραφικής με βάση κάποιους κανονισμούς, είτε με δική μας πρωτοβουλία αν έχουμε συγκεκριμένες προδιαγραφές (επιλογή Plotting Threshold). Επίσης, επιλέγουμε το είδος της γραφικής που επιθυμούμε (π.χ. τρισδιάστατη) και πατώντας Draw/Plot εμφανίζεται ένα νέο παράθυρο με τις γραφικές παραστάσεις επιλέχθηκαν.

Επιλέγοντας τη στήλη Configuration στην αρχική οθόνη εμφανίζεται το Σχήμα 5.14. Εδώ μπορούμε να εμφανίσουμε γραφήματα με το σχέδιο του συστήματος που προσομοιώνεται επιλέγοντας Conductors and Profiles ενώ με την επιλογή Currents and GPRs έχουμε κάποιες επιπλέον δυνατότητες αποτελεσμάτων. Στο πεδίο Select a Range of Conductor μπορούμε να επιλέξουμε συγκεκριμένους αγωγούς για τους οποίους θέλουμε να γίνουν οι υπολογισμοί. Αν επιλέξουμε το κουτάκι Zoom Polygon, μπορούμε με τα 4 πεδία P1 έως και P4 να καθορίσουμε μία ορθογωνική περιοχή στο επίπεδο X-Y και με το Depth να δημιουργήσουμε ένα τρισδιάστατο ορθογωνικό κουτί επιλογής αγωγών, σε αυτήν την περιοχή.



Σχήμα 5.14: Περιβάλλον εργασίας Examine HIFREQ με επιλεγμένη τη στήλη Configuration

Η επιλογή Energization Scaling Factor είναι ιδιαίτερα σημαντική για τη λήψη αποτελεσμάτων προσομοιώσεων. Το δυναμικό, οι τάσεις επαφής, οι βηματικές τάσεις, τα ρεύματα και όλα τα ηλεκτρομαγνητικά μεγέθη που υπολογίζουμε είναι ανάλογα του μεγέθους του ρεύματος ή της τάσης ενεργοποίησης του συστήματος. Για παράδειγμα,

αν διπλασιαστεί το ρεύμα σφάλματος που εγχέεται στο σύστημα και αυτή είναι η μόνη πηγή ενέργειας που υπάρχει τη δεδομένη στιγμή, τότε και όλες οι παραπάνω ποσότητες θα διπλασιαστούν. Επιλέγοντας, λοιπόν, κατάλληλο συντελεστή ενεργοποίησης προκύπτουν γραφικές ζητούμενων μεγεθών για διαφορετικά σενάρια ενεργοποίησης του δικτύου, χωρίς να χρειάζεται η επανάληψη της διαδικασίας για τον επιλύτη HIFREQ.

Εκτός από τις γραφικές παραστάσεις που σχεδιάζει το ίδιο το πρόγραμμα μπορούμε να εξάγουμε τα αποτελέσματα που υπολογίστηκαν για κάθε επιλεγμένη συχνότητα σε excel. Επιλέγουμε Advanced → Tab → Proceed και τα αποτελέσματα αποθηκεύονται σε text αρχείο απ' όπου μπορούμε να τα μεταφέρουμε σε αρχείο excel.

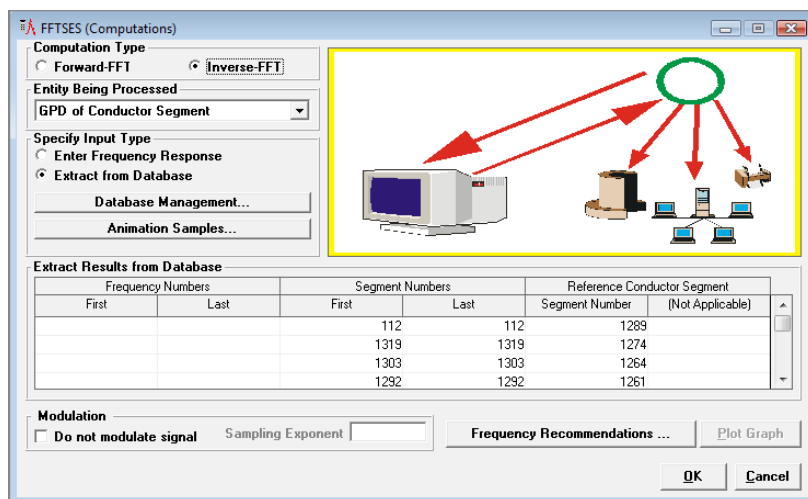
Για τα αποτελέσματα των δυναμικού επιλέγουμε Report Computation Results for → Scalar Potentials, Determine → Touch Voltages, Reference GPR for Touch Voltages Worst Spherical και Search Radius for Reference GPR: 1m. Η επιλογή Worst Spherical υπολογίζει την τάση επαφής σε κάθε observation point σε σχέση με τα τμήματα που βρίσκονται εντός της σφαίρας με ακτίνα που ορίζεται στο πεδίο και δίνει ως αποτέλεσμα την μεγαλύτερη τιμή. Η ακτίνα ορίζεται 1M σύμφωνα με το πρότυπο IEEE std 80-2000 για τις τάσεις επαφής.

Επίσης, για να υπολογίσουμε τις επαγόμενες τάσεις στους αγωγούς ισχύος σε σχέση με το σύστημα των πλαισίων επιλέγουμε Report Computation Results for → Conductor Data, Determine → Coating Stress Voltages και Reference Conductor → Nearest Conductor. Οι υπολογισμοί αυτοί έχουν νόημα στα profiles που βρίσκονται στους αγωγούς [9].

5.4 Απόκριση στο πεδίο του χρόνου. Ανάστροφος μετασχηματισμός Fourier

Υπολογισμός ανάστροφου μετασχηματισμού Fourier στον επιλύτη FFTSES

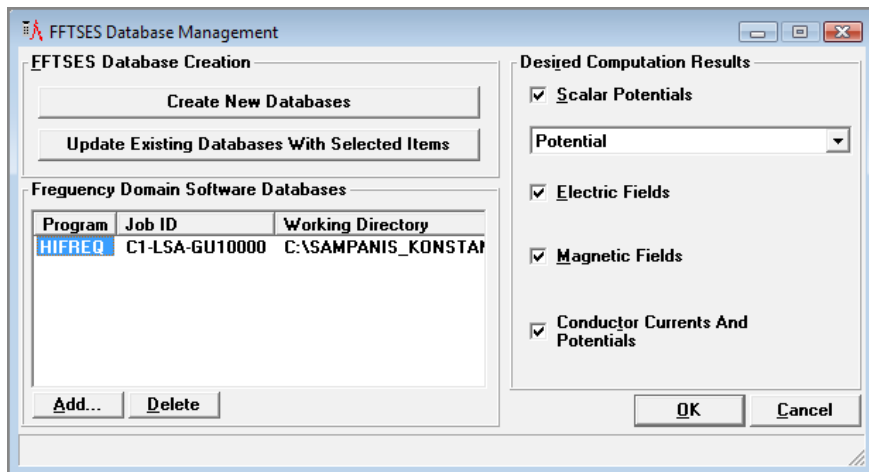
Επιλέγοντας Inverse FFT στο πεδίο Computations του Specify FFT (σχήμα 5.34) εμφανίζεται στην οθόνη το παράθυρο όπως στο Σχήμα 5.15. Στο κουτάκι Entity Being Processed επιλέγουμε την ποσότητα για την οποία θέλουμε να γίνει αντίστροφος Fourier. Επίσης μπορούμε στην ένδειξη Specify Input Type να επιλέξουμε αν η απόκριση του συστήματος στο πεδίο συχνοτήτων θα καθοριστεί από δεδομένα που θα εισάγει ο χρήστης ή από αρχεία στην βάση δεδομένων του προγράμματος.



Σχήμα 5.15: Επιλογές για ανάστροφο μετασχηματισμό Fourier

Στην παρούσα εργασία εξετάστηκε η διαφορά δυναμικού μεταξύ τμημάτων αγωγών (επιλογή GPD of Conductor Segment του πεδίου Entity Being Processed). Στην στήλη Segment Number εισάγεται η αρχή και το τέλος του τμήματος του αγωγού που θέλουμε να υπολογιστεί η διαφορά δυναμικού και στην στήλη Reference Conductor Segment το τμήμα του αγωγού που θέλουμε ως αναφορά. Όπως παρουσιάστηκε στην παραγραφο 5.3 όλοι οι αγωγοί διαιρούνται σε τμήματα μήκους 20cm προκειμένου να γίνουν οι υπολογισμοί. Έτσι κάθε τμήμα έχει έναν συγκεκριμένο αύξοντα αριθμό (A/A) ο οποίος χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του ανάστροφου Fourier και συγκεκριμένες συντεταγμένες για την αρχή και το τέλος του τμήματος.

Μετά επιλέγουμε Database Management και εμφανίζεται το Σχήμα 5.16. Αρχικά πατάμε Add και εισάγουμε το αντίστοιχο αρχείο που φέρει το όνομα του JobID στο οποίο δουλεύουμε. Επιλέγουμε από τα πεδία στα αριστερά τις ποσότητες που θέλουμε να υπολογίσουμε και με την επιλογή Create New Databases δημιουργούνται βάσεις δεδομένων όπου θα αποθηκευτούν τα αποτελέσματα του IFFT. Επιλέγουμε OK, επιστρέφουμε στο σχήμα 5.15 και επιλέγουμε ξανά OK. Στην οθόνη εμφανίζεται το σχήμα 5.3. Η προσομοίωση ξεκινάει πατώντας το κουμπί Compute/Submit (αριθμός 1 στο σχήμα 5.3).



Σχήμα 5.16: Διαχειριστής βάσεων δεδομένων του FFTSES

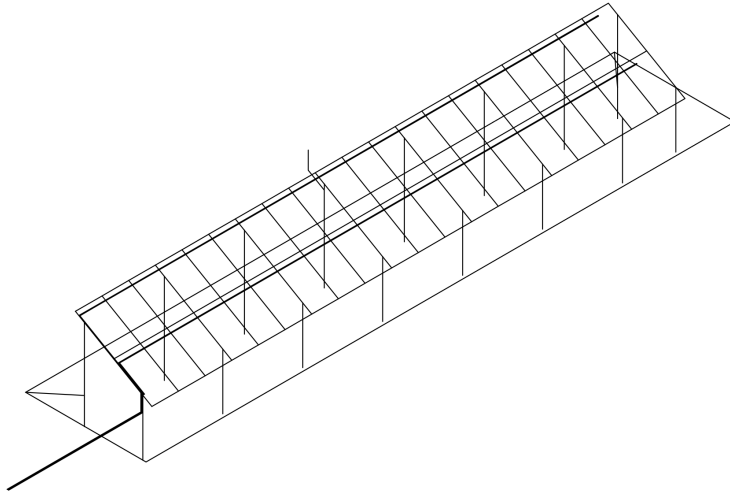
Εξάγουμε τα αποτελέσματα από το σχήμα 5.6 όπως και στον ευθύ μετασχηματισμό Fourier [9].

Αποτελέσματα Προσομοιώσεων

6.1 Επιλογή των Σημείων Εξέτασης

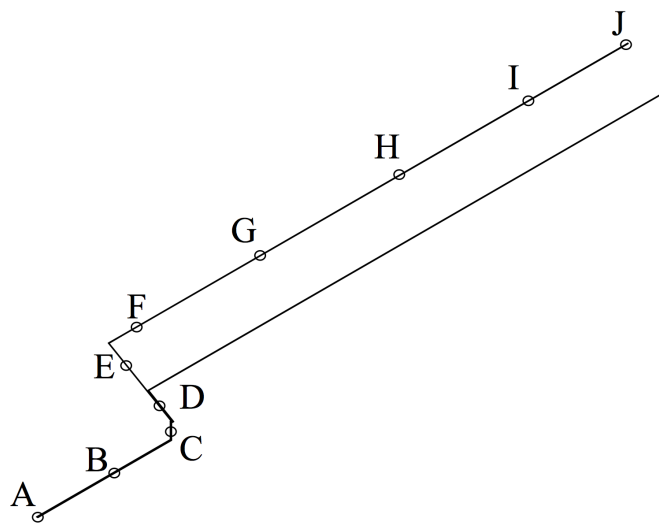
Προκειμένου να μελετηθούν οι επαγόμενες υπερτάσεις λόγω του κεραυνικού πλήγματος στις διατάξεις, πρέπει να οριστούν τα σημεία παρατήρησης τα οποία θα χρησιμοποιηθούν για την παρουσίαση των αποτελεσμάτων. Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενο κεφάλαιο, οι αγωγοί που χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση των διατάξεων χωρίζονται σε τμήματα μήκους περί τα 20cm. Κάθε τμήμα του αγωγού έχει ένα συγκεκριμένο αύξοντα αριθμό (A/A) ο οποίος συνοδεύεται από τα χαρακτηριστικά του τμήματος όπως οι συντεταγμένες της αρχής και του τέλους, η εσωτερική και εξωτερική ακτίνα του αγωγού και το συνολικό μήκος του. Σε κάθε διάταξη λοιπόν επιλέγονται τμήματα των καλωδίων τα οποία εξετάζονται ανά ζεύγη προκειμένου να υπολογιστεί η διαφορά δυναμικού που εμφανίζουν. Η επιλογή των ζευγών τμημάτων των καλωδίων έγινε με την προϋπόθεση κάθε τμήμα του επόμενου ζεύγους να απέχει την ίδια απόσταση από το προηγούμενο. Με αυτό τον τρόπο, μεταβαίνοντας από ζεύγος σε ζεύγος προστίθεται ή αφαιρείται σταθερό τμήμα βρόχου οπότε το εμβαδόν του σχηματιζόμενου βρόχου αυξομειώνεται γραμμικά.

Στο Σχήματα 6.1 έως 6.6 που ακολουθούν φαίνεται ο τρόπος επιλογής των ζευγών. Τα ζεύγη λαμβάνουν ονόματα από τους λατινικούς χαρακτήρες A έως L κάθε φορά. Τα πρώτα τέσσερα (A, B, C, D) είναι σε σταθερές θέσεις σε όλες τις περιπτώσεις έχοντας τις ίδιες συντεταγμένες για τα καλώδια που σχηματίζουν τις πάνω (U) και τις αριστερές (L) συστοιχίες και ομοίως ίδιες συντεταγμένες για τα καλώδια που σχηματίζουν τις κάτω (D) και δεξιές (R) συστοιχίες. Τα υπόλοιπα ζεύγη διαφοροποιούνται κάπως από διάταξη σε διάταξη.

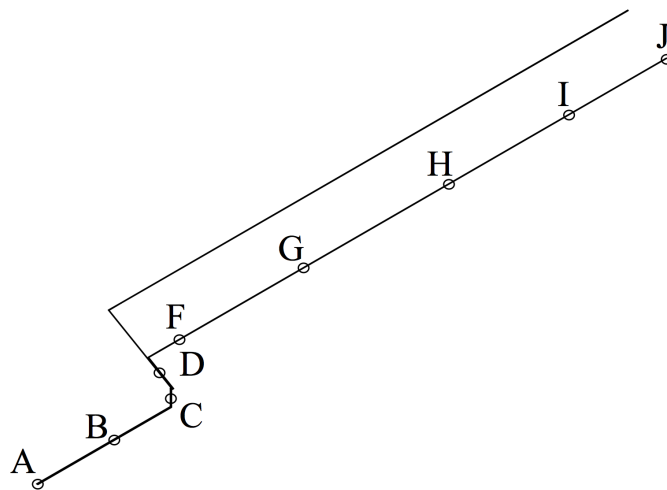


Περίπτωση 1

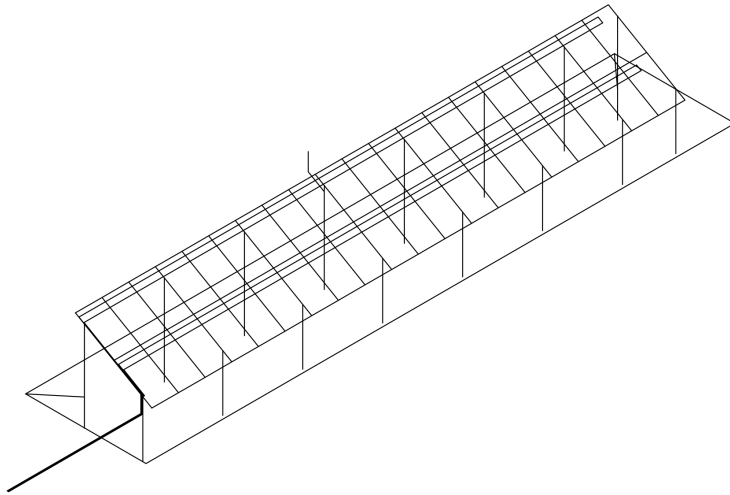
Καλώδιο Πάνω (U) Συστοιχίας



Καλώδιο Κάτω (D) Συστοιχίας

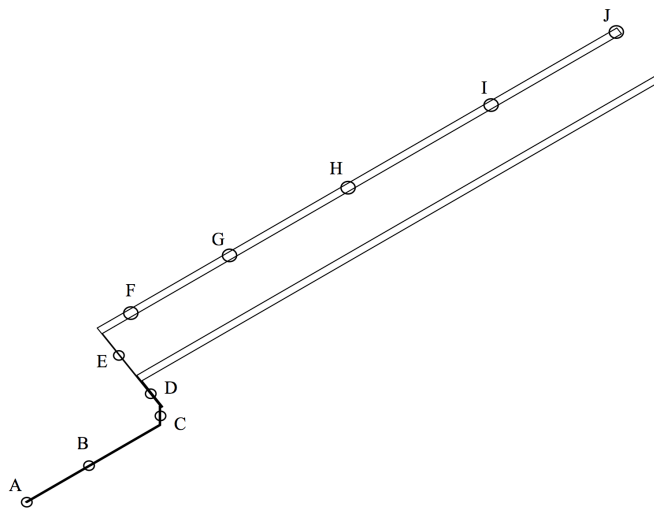


Σχήμα 6.1: Επιλογή ζευγών τμημάτων καλωδίων στην περίπτωση 1

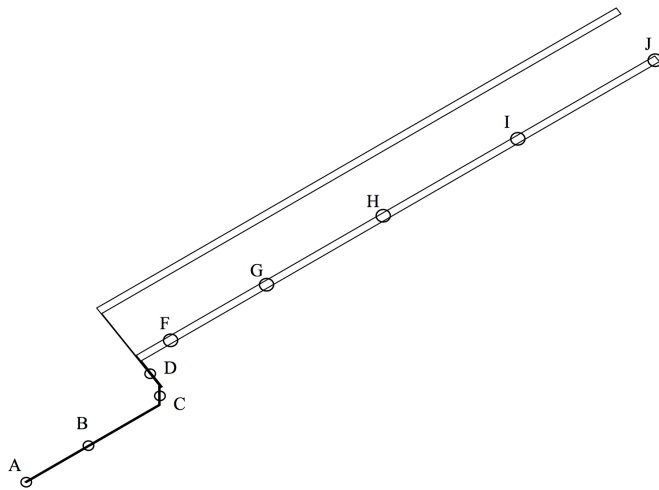


Περίπτωση 2

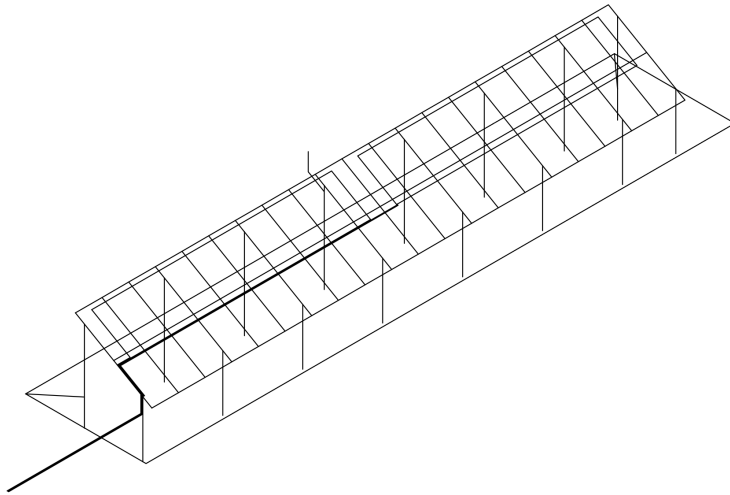
Καλώδιο Πάνω (U) Συστοιχίας



Καλώδιο Κάτω (D) Συστοιχίας

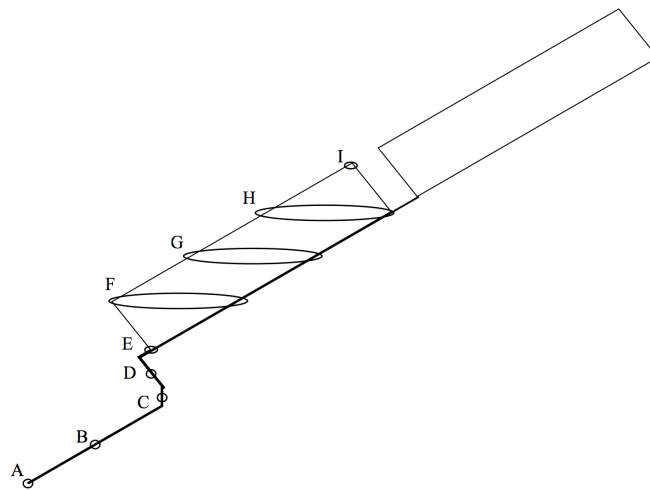


Σχήμα 6.2: Επιλογή ζευγών τμημάτων καλωδίων στην περίπτωση 2

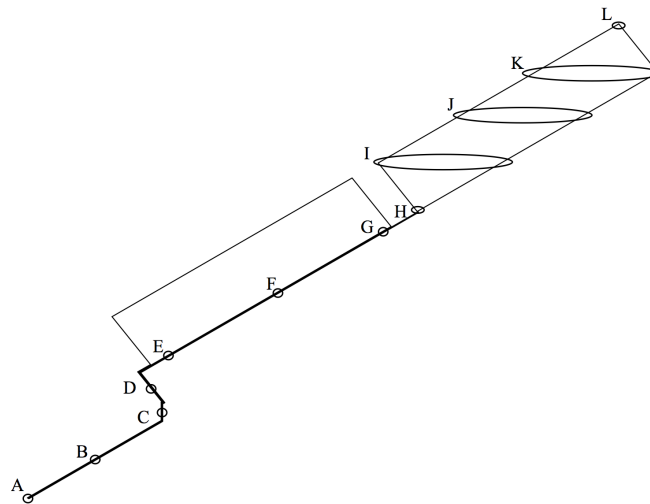


Περίπτωση 3

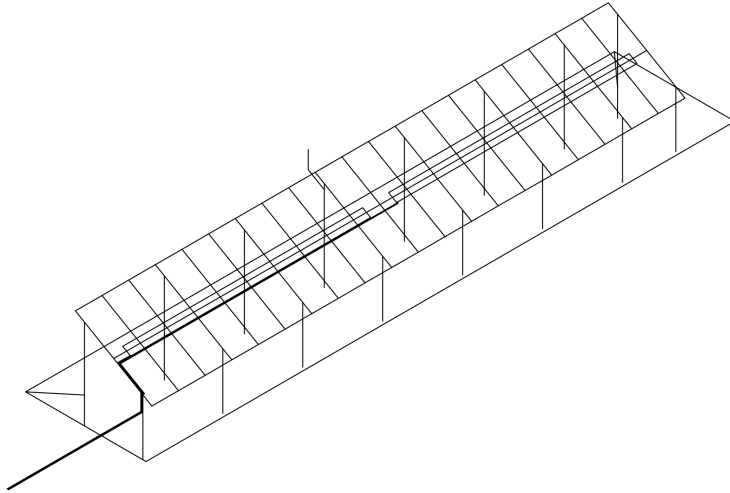
Καλώδιο Αριστερής (L)
Συστοιχίας



Καλώδιο Δεξιάς (R) Συστοιχίας

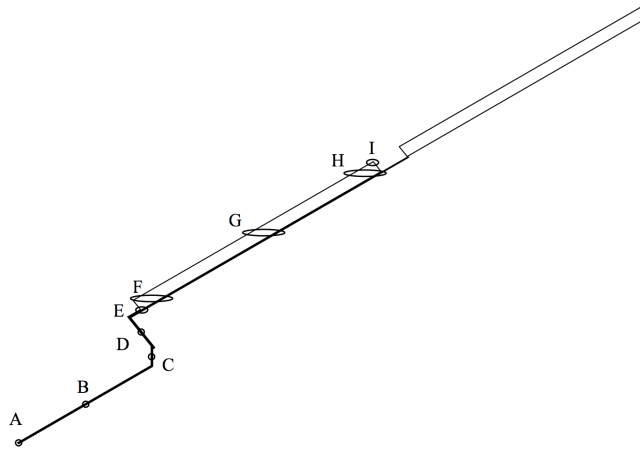


Σχήμα 6.3: Επιλογή ζευγών τμημάτων καλωδίων στην περίπτωση 3

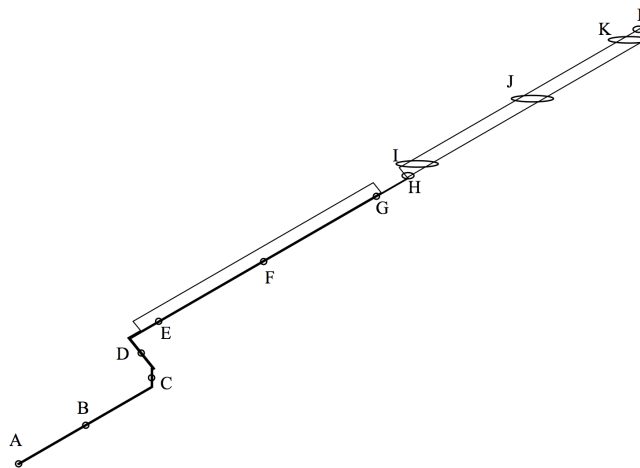


Περίπτωση 4

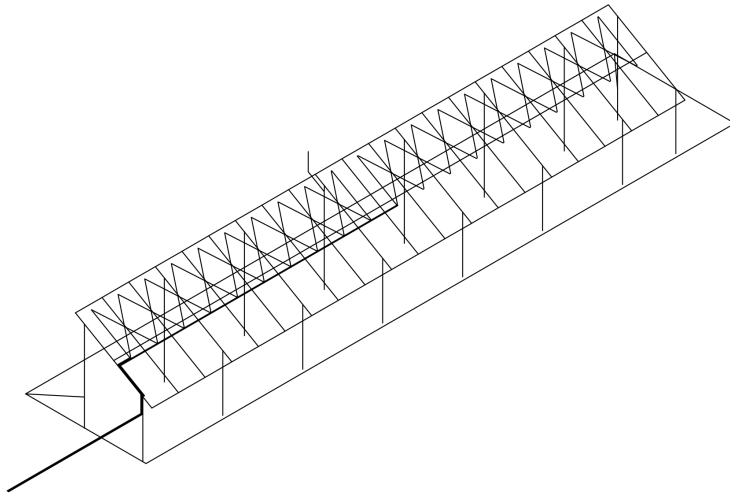
Καλώδιο Αριστερής (L)
Συστοιχίας



Καλώδιο Δεξιάς (R) Συστοιχίας

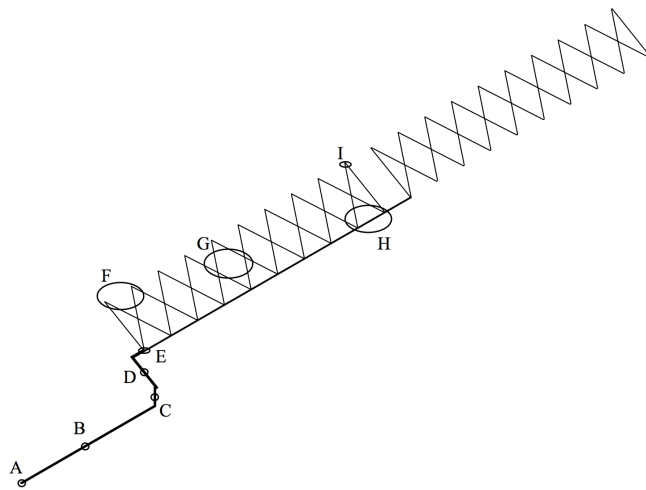


Σχήμα 6.4: Επιλογή ζευγών τμημάτων καλωδίων στην περίπτωση 4

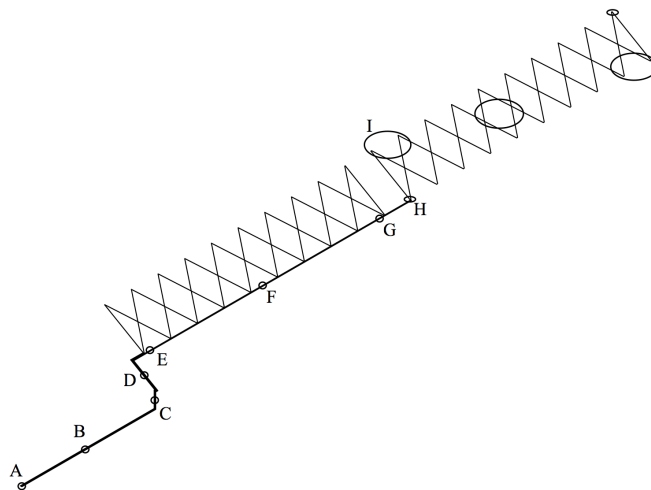


Περίπτωση 5

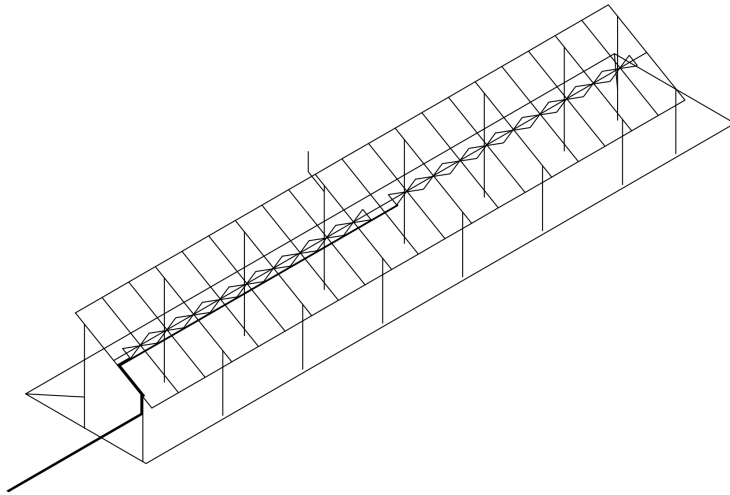
Καλώδιο Αριστεράς (L)
Συστοιχίας



Καλώδιο Δεξιάς (R) Συστοιχίας

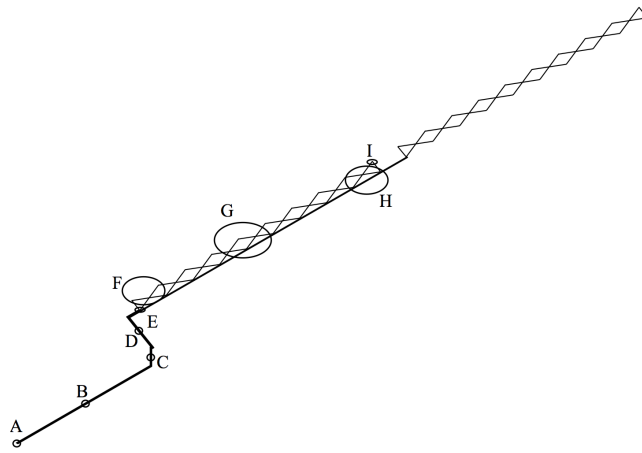


Σχήμα 6.5: Επιλογή ζευγών τμημάτων καλωδίων στην περίπτωση 5

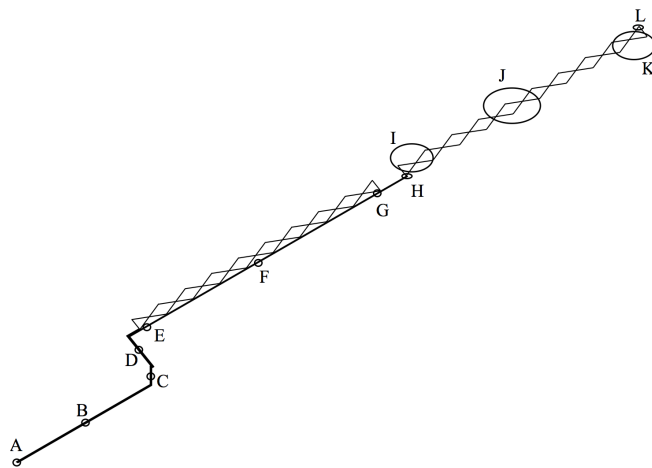


Περίπτωση 6

Καλώδιο Αριστερής (L)
Συστοιχίας



Καλώδιο Δεξιάς (R) Συστοιχίας



Σχήμα 6.6: Επιλογή ζευγών τμημάτων καλωδίων στην περίπτωση 6

6.2 Εξέταση Περιπτώσεων Μεμονωμένα

Στα Σχήματα 6.7 έως 6.18 που ακολουθούν δίνεται η μελέτη για το κάθε καλώδιο κάθε περίπτωσης. Στα παρακάτω σχήματα φαίνεται η διαφορά δυναμικού των ζευγών τμημάτων των καλωδίων συναρτήσει της ειδικής αντίστασης του εδάφους καθώς και η μεταβολή της διαφοράς δυναμικού κατά μήκος του βρόχου για τις διάφορες τιμές της ειδικής αντίστασης του εδάφους. Επισημαίνεται πως οι τιμές των τάσεων που αναφέρονται παρακάτω εμφανίζονται σε χρόνο μικρότερο του 1 μ s.

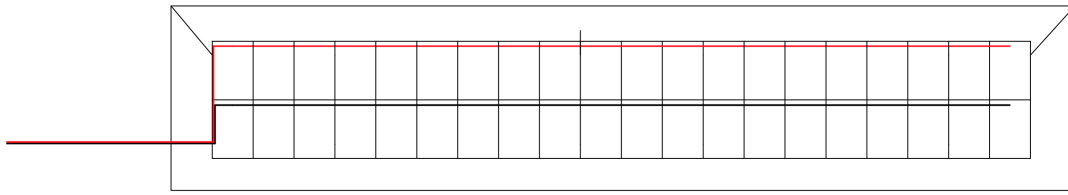
Στην περίπτωση 1 παρατηρείται πως οι μέγιστες επαγόμενες υπερτάσεις δεν ξεπερνούν τα 18 kV για το καλώδιο της πάνω (U) συστοιχίας και τα 19 kV για το καλώδιο της κάτω (D) συστοιχίας. Αυξανόμενης της τιμής της ειδικής αντίστασης του εδάφους και μέχρι τα 3000 Ω m υπάρχει μία πτώση της διαφοράς δυναμικού για το καλώδιο της πάνω (U) συστοιχίας που στο ζεύγος A πλησιάζει τα 4.8 kV ενώ έπειτα ανυψώνεται πάλι μέχρι τα 6.6 kV. Στο καλώδιο της κάτω (D) συστοιχίας υπάρχει επίσης μία πτώση με την αύξηση της τιμής της ειδικής αντίστασης του εδάφους μέχρι τα 3000 Ω m ενώ στην συνέχεια παρατηρείται μια σταθεροποίηση γύρω από τα 10 kV. Όσον αφορά την μεταβολή της διαφοράς δυναμικού κατά μήκος του βρόχου παρατηρείται πως μεταβαίνοντας από δεξιά προς αριστερά, από το ζεύγος J μέχρι και το ζεύγος A όπου βρίσκεται ο αναστροφέας, οι επαγόμενες υπερτάσεις αυξάνονται και για τα δύο καλώδια. Ενώ στο καλώδιο της πάνω (U) συστοιχίας υπάρχει μία αύξηση καθ' όλο το μήκος του βρόχου στο καλώδιο της κάτω (D) συστοιχίας η αύξηση παρατηρείται μέχρι και την αρχή της σύνδεσης των πλαισίων. Στην συνέχεια και μέχρι τον αναστροφέα υπάρχουν αμελητέες μεταβολές. Τέλος οι υπερτάσεις στο καλώδιο της πάνω (U) συστοιχίας είναι μικρότερες από την κάτω συστοιχία.

Στην περίπτωση 2 παρατηρείται πως οι μέγιστες επαγόμενες υπερτάσεις έχουν μεγαλύτερες τιμές από την περίπτωση 1 οι οποίες δεν ξεπερνούν τα 60 kV για το καλώδιο της πάνω (U) συστοιχίας και τα 45 kV για το καλώδιο της κάτω (D) συστοιχίας. Αυξανόμενης της τιμής της ειδικής αντίστασης του εδάφους και μέχρι τα 3000 Ω m υπάρχει μία πτώση της διαφοράς δυναμικού για το καλώδιο της πάνω (U) συστοιχίας που στο ζεύγος A πλησιάζει τα 30 kV ενώ έπειτα ανυψώνεται πάλι μέχρι τα 33.3 kV. Στο καλώδιο της κάτω (D) συστοιχίας υπάρχει επίσης μία πτώση με την αύξηση της τιμής της ειδικής αντίστασης του εδάφους μέχρι τα 3000 Ω m ενώ στην

συνέχεια παρατηρείται μια σταθεροποίηση γύρω από τα 28 kV. Όσον αφορά την μεταβολή της διαφοράς δυναμικού κατά μήκος τους βρόχου στην περίπτωση 2 παρατηρείται πως μεταβαίνοντας από δεξιά προς αριστερά, από το ζεύγος J μέχρι και το ζεύγος A όπου βρίσκεται ο αναστροφέας, οι επαγόμενες υπερτάσεις αυξάνονται και για τα δύο καλώδια. Ενώ στο καλώδιο της πάνω (U) συστοιχίας υπάρχει μία αύξηση καθ' όλο το μήκος του βρόχου στο καλώδιο της κάτω (D) συστοιχίας η αύξηση παρατηρείται μέχρι και την αρχή της σύνδεσης των πλαισίων. Στην συνέχεια και μέχρι τον αναστροφέα υπάρχουν μικρές μεταβολές. Τέλος οι υπερτάσεις στο καλώδιο της πάνω (U) συστοιχίας είναι μεγαλύτερες από την κάτω συστοιχία.

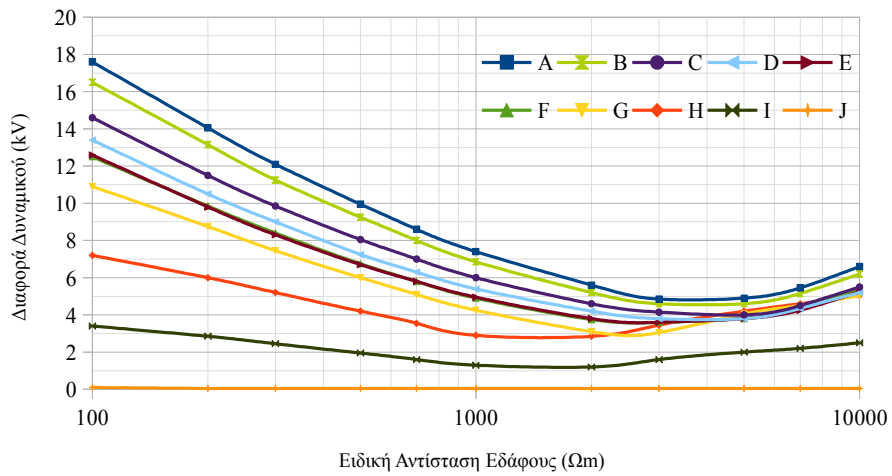
Στην περίπτωση 3 παρατηρείται πως οι μέγιστες επαγόμενες υπερτάσεις δεν ξεπερνούν τα 155 kV για το καλώδιο της αριστερής (L) συστοιχίας και τα 241 kV για το καλώδιο της δεξιάς (R) συστοιχίας. Αυξανόμενη της τιμής της ειδικής αντίστασης του εδάφους υπάρχει μία αισθητή πτώση της διαφοράς δυναμικού για το καλώδιο της αριστερής (L) συστοιχίας που στο ζεύγος A πλησιάζει τα 15 kV. Αντίθετα στο καλώδιο της δεξιάς (R) συστοιχίας υπάρχει σημαντική αύξηση των υπερτάσεων με την αύξηση της τιμής της ειδικής αντίστασης του εδάφους ξεκινώντας από τα 154 kV. Όσον αφορά την μεταβολή της διαφοράς δυναμικού κατά μήκος τους βρόχου παρατηρείται πως μεταβαίνοντας από δεξιά προς αριστερά, από το ζεύγος I και L, για την αριστερή και τη δεξιά συστοιχία αντίστοιχα, μέχρι και το ζεύγος A όπου βρίσκεται ο αναστροφέας, οι επαγόμενες υπερτάσεις αυξάνονται και για τα δύο καλώδια καθ' όλο το μήκος. Τέλος οι υπερτάσεις στο καλώδιο της αριστερής (L) συστοιχίας είναι μικρότερες από τη δεξιά συστοιχία.

Στην περίπτωση 4 παρατηρείται πως οι μέγιστες επαγόμενες υπερτάσεις έχουν μικρότερες τιμές σε σχέση με την περίπτωση 3 που δεν ξεπερνούν τα 22 kV για το καλώδιο της αριστερής (L) συστοιχίας και τα 11 kV για το καλώδιο της δεξιάς (R) συστοιχίας. Αυξανόμενη της τιμής της ειδικής αντίστασης του εδάφους υπάρχει μία πτώση της διαφοράς δυναμικού για το καλώδιο της αριστερής (L) συστοιχίας που στο ζεύγος A πλησιάζει τα 5.5 kV. Αντίθετα στο καλώδιο της δεξιάς (R) συστοιχίας υπάρχει αύξηση των υπερτάσεων με την αύξηση της τιμής της ειδικής αντίστασης του εδάφους ξεκινώντας από τα 7.45 kV. Όσον αφορά την μεταβολή της διαφοράς δυναμικού κατά μήκος τους βρόχου παρατηρείται πως μεταβαίνοντας από δεξιά προς αριστερά, από το ζεύγος I και L, για την αριστερή και τη δεξιά συστοιχία αντίστοιχα, μέχρι και το ζεύγος A όπου βρίσκεται ο αναστροφέας, οι επαγόμενες υπερτάσεις αυξάνονται και για τα δύο



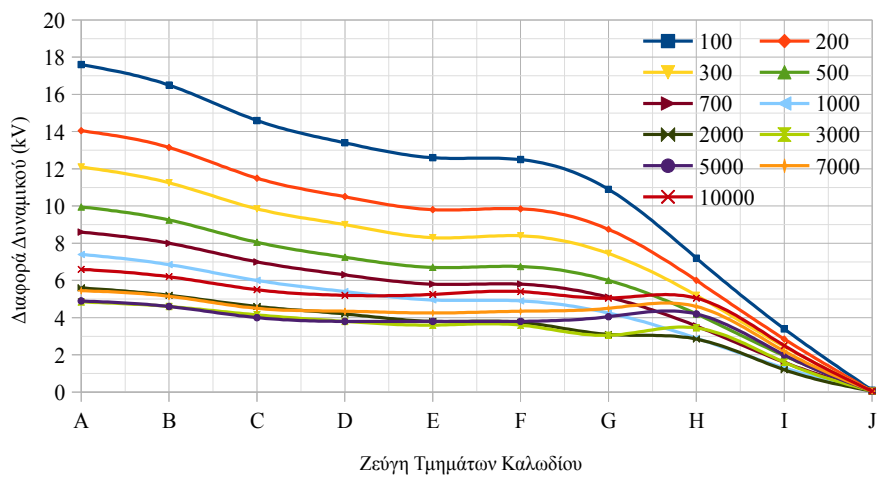
Διαφορά δυναμικού συναρτήσει της ειδικής αντίστασης του εδάφους

Περίπτωση 1. Καλώδιο πάνω (U) συστοιχίας

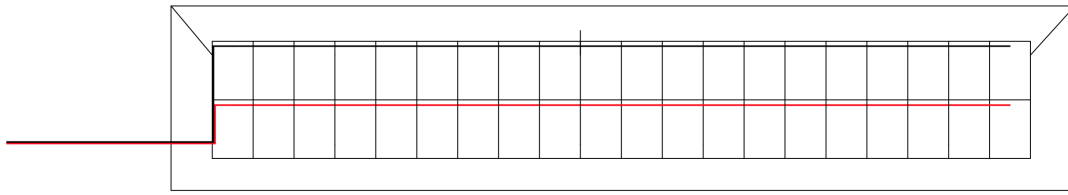


Μεταβολή της διαφοράς δυναμικού κατά μήκος του βρόχου

Περίπτωση 1. Καλώδιο πάνω (U) συστοιχίας

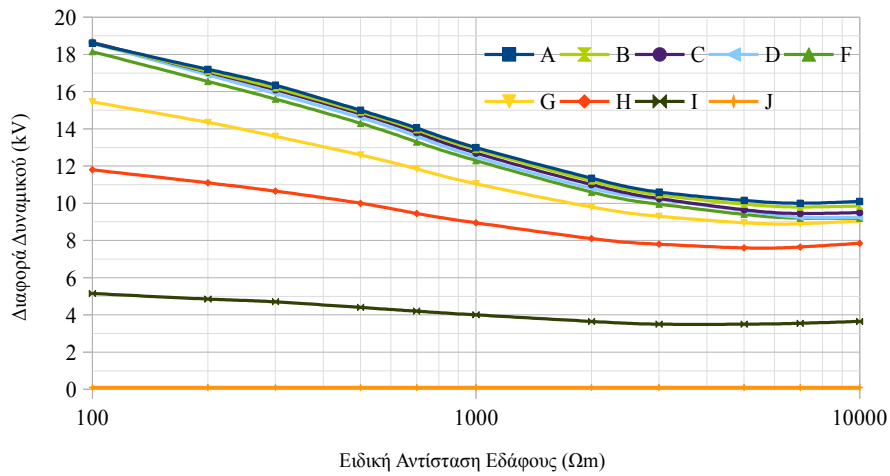


Σχήμα 6.7: Μελέτη καλωδίου. Περίπτωση 1. Καλώδιο πάνω (U) συστοιχίας



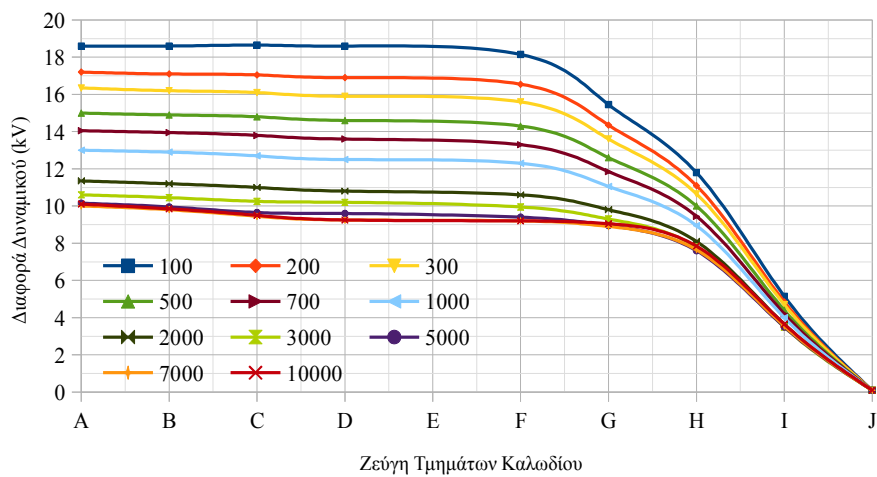
Διαφορά δυναμικού συναρτήσει της ειδικής αντίστασης του εδάφους

Περίπτωση 1. Καλώδιο κάτω (D) συστοιχίας

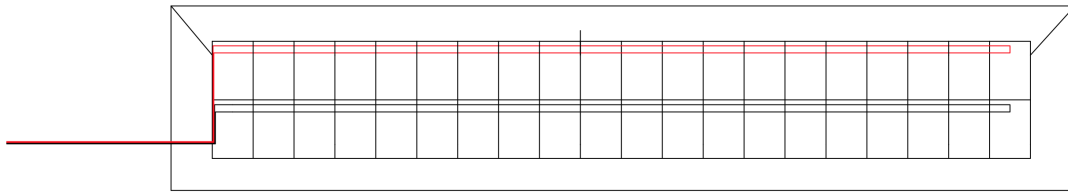


Μεταβολή της διαφοράς δυναμικού κατά μήκος του βρόχου

Περίπτωση 1. Καλώδιο κάτω (D) συστοιχίας

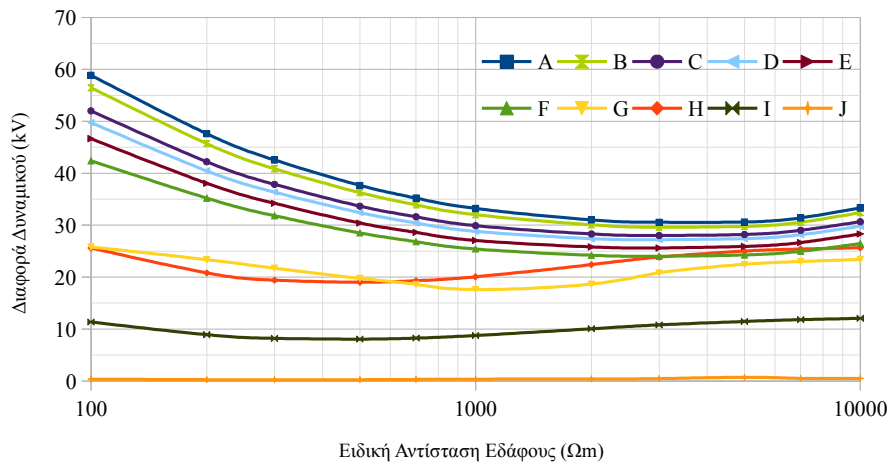


Σχήμα 6.8: Μελέτη καλωδίου. Περίπτωση 1. Καλώδιο κάτω (D) συστοιχίας



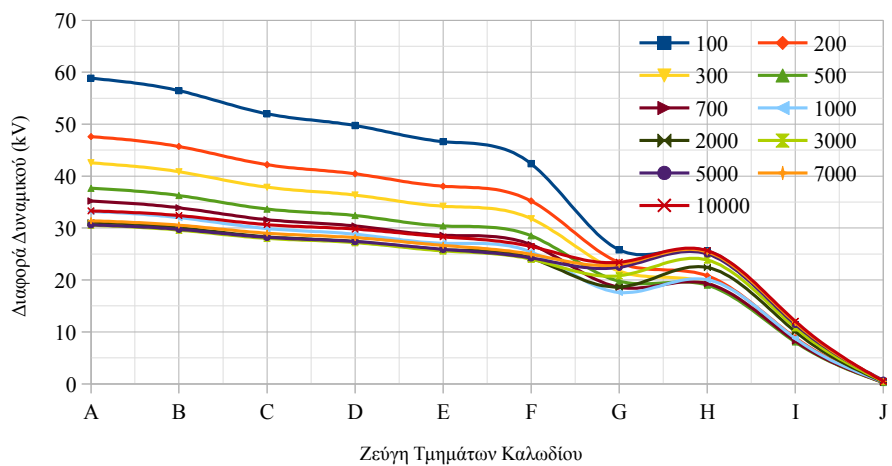
Διαφορά δυναμικού συναρτήσει της ειδικής αντίστασης του εδάφους

Περίπτωση 2. Καλώδιο πάνω (U) συστοιχίας

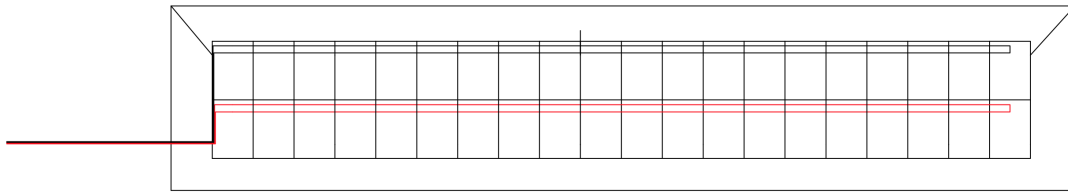


Μεταβολή της διαφοράς δυναμικού κατά μήκος του βρόχου

Περίπτωση 2. Καλώδιο πάνω (U) συστοιχίας

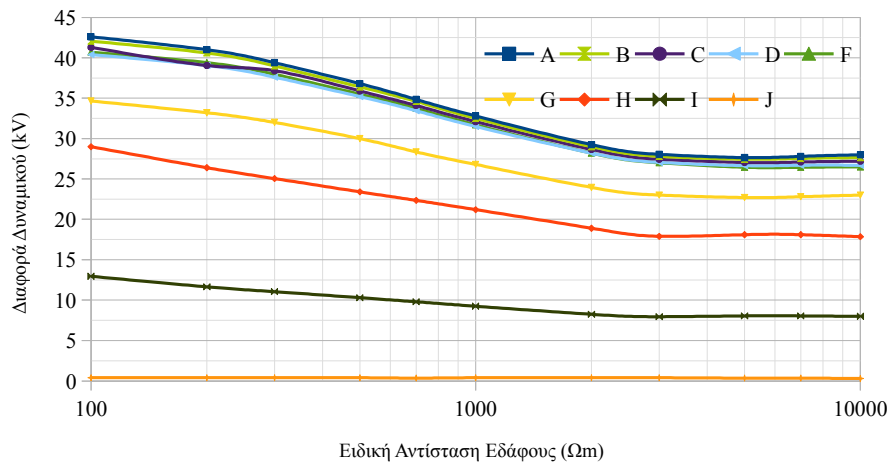


Σχήμα 6.9: Μελέτη καλωδίου. Περίπτωση 2. Καλώδιο πάνω (U) συστοιχίας



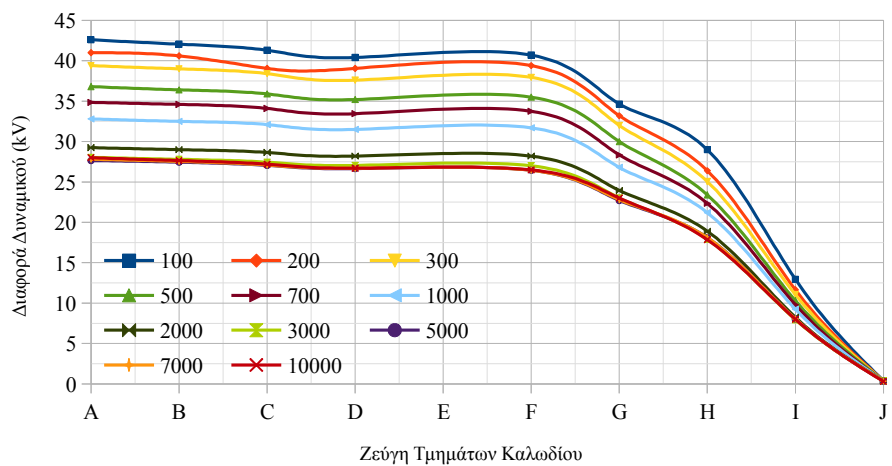
Διαφορά δυναμικού συναρτήσει της ειδικής αντίστασης του εδάφους

Περίπτωση 2. Καλώδιο κάτω (D) συστοιχίας

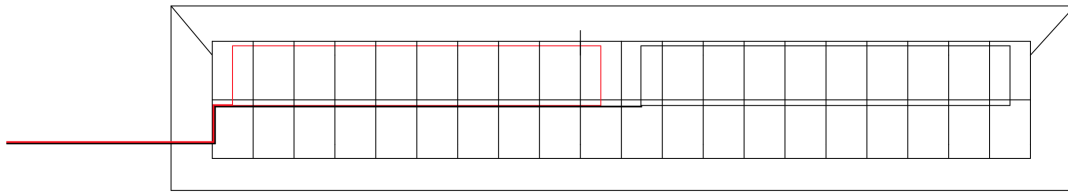


Μεταβολή της διαφοράς δυναμικού κατά μήκος του βρόχου

Περίπτωση 2. Καλώδιο κάτω (D) συστοιχίας

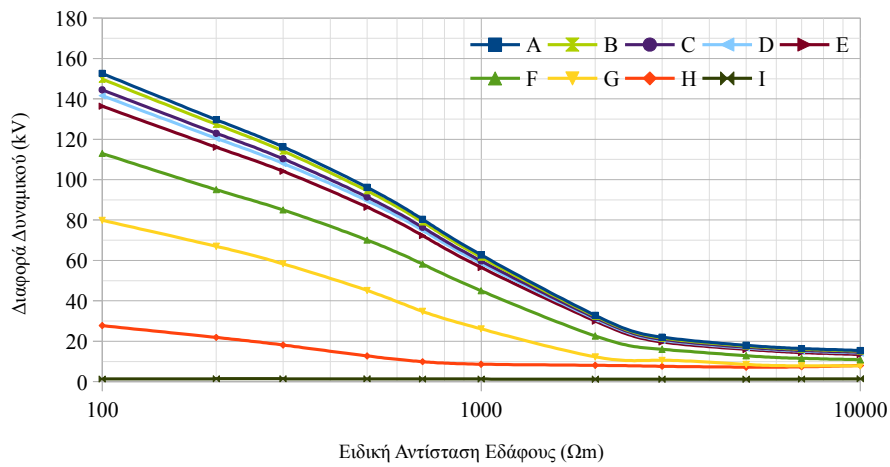


Σχήμα 6.10: Μελέτη καλωδίου. Περίπτωση 2. Καλώδιο κάτω (R) συστοιχίας



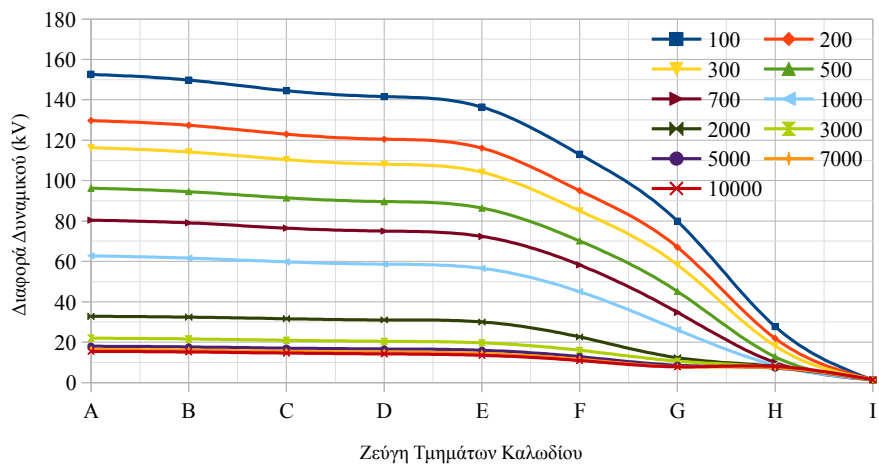
Διαφορά δυναμικού συναρτήσει της ειδικής αντίστασης του εδάφους

Περίπτωση 3. Καλώδιο αριστερής (L) συστοιχίας

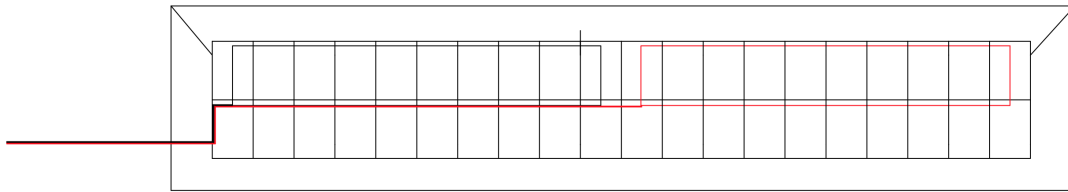


Μεταβολή της διαφοράς δυναμικού κατά μήκος του βρόχου

Περίπτωση 3. Καλώδιο αριστερής (L) συστοιχίας

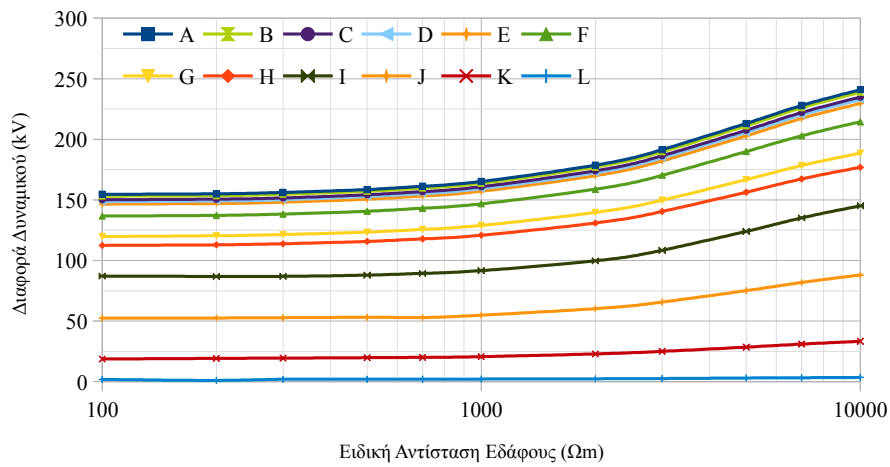


Σχήμα 6.11: Μελέτη καλωδίου. Περίπτωση 3. Καλώδιο αριστερής (L) συστοιχίας



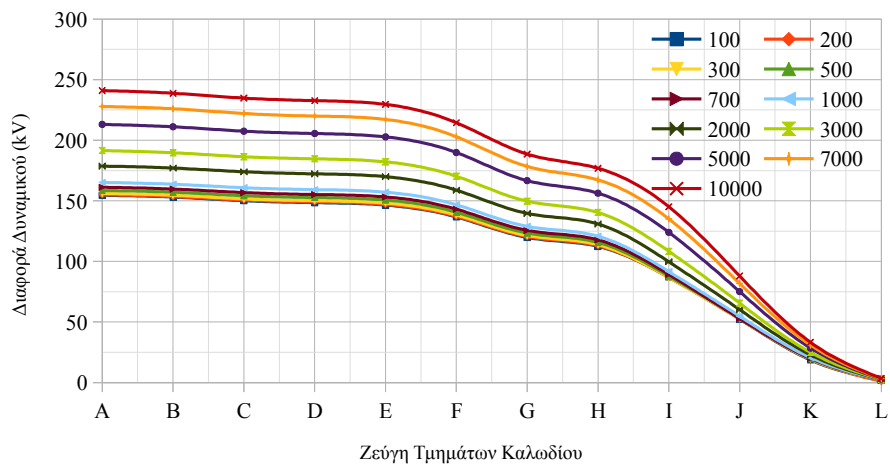
Διαφορά δυναμικού συναρτήσει της ειδικής αντίστασης του εδάφους

Περίπτωση 3. Καλώδιο δεξιάς (R) συστοιχίας

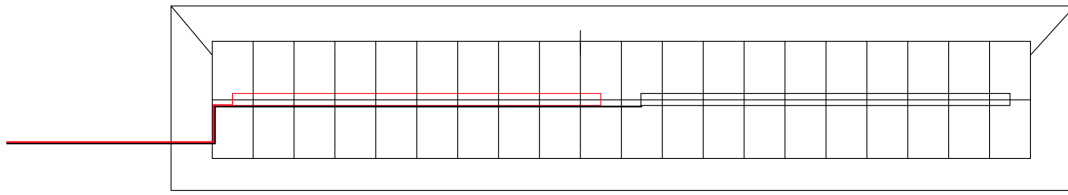


Μεταβολή της διαφοράς δυναμικού κατά μήκος του βρόχου

Περίπτωση 3. Καλώδιο δεξιάς (R) συστοιχίας

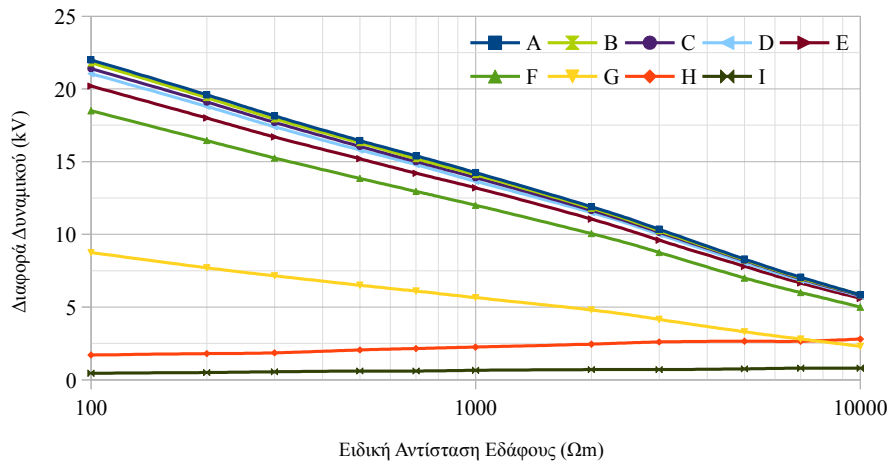


Σχήμα 6.12: Μελέτη καλωδίου. Περίπτωση 3. Καλώδιο δεξιάς (R) συστοιχίας



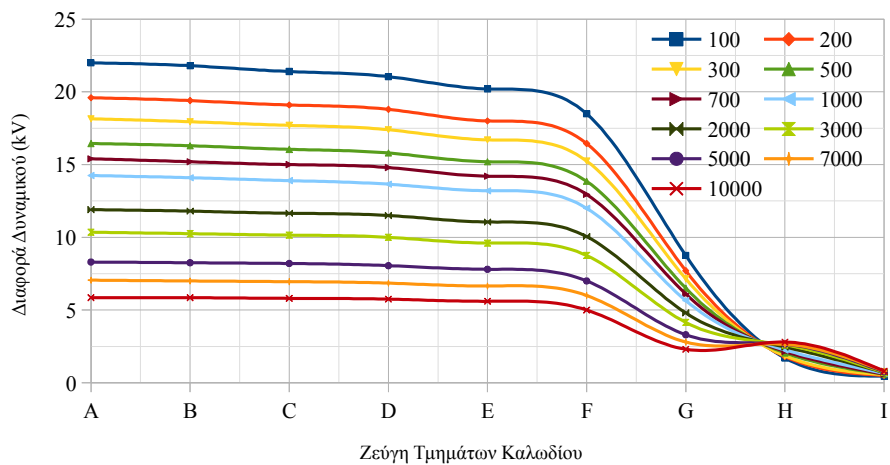
Διαφορά δυναμικού συναρτήσει της ειδικής αντίστασης του εδάφους

Περίπτωση 4. Καλώδιο αριστερής (L) συστοιχίας

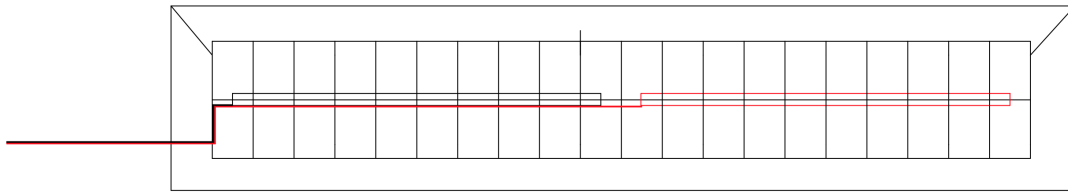


Μεταβολή της διαφοράς δυναμικού κατά μήκος του βρόχου

Περίπτωση 4. Καλώδιο αριστερής (L) συστοιχίας

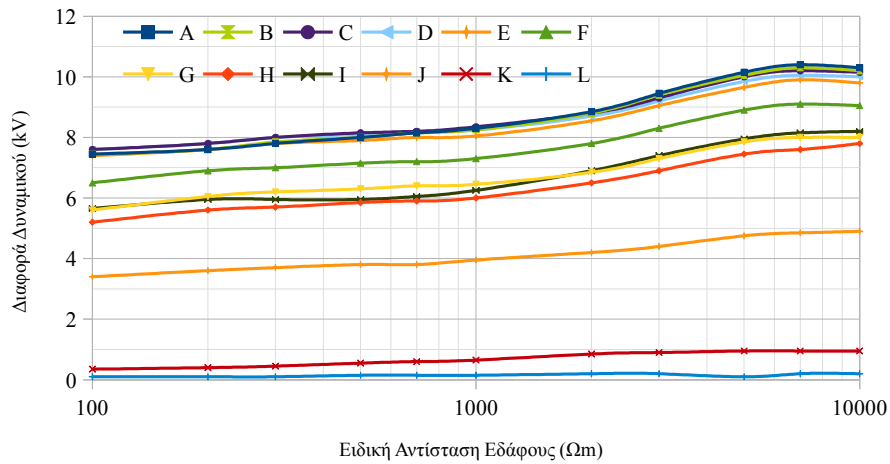


Σχήμα 6.13: Μελέτη καλωδίου. Περίπτωση 4. Καλώδιο αριστερής (L) συστοιχίας



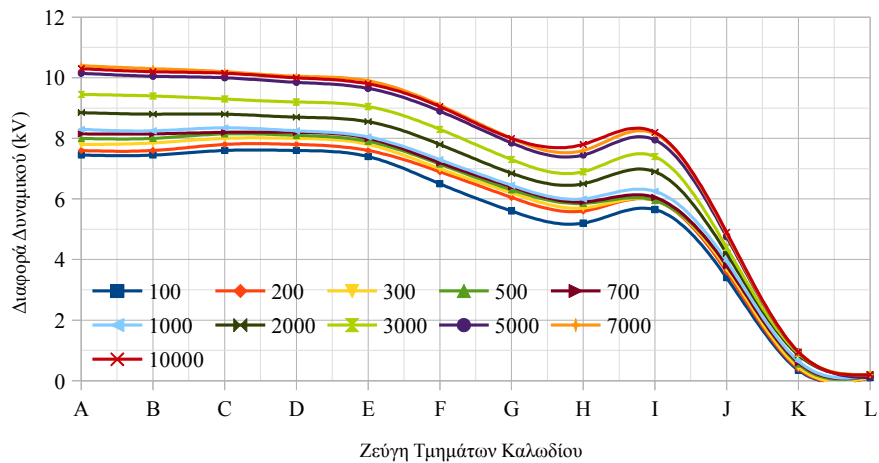
Διαφορά δυναμικού συναρτήσει της ειδικής αντίστασης του εδάφους

Περίπτωση 4. Καλώδιο δεξιάς (R) συστοιχίας

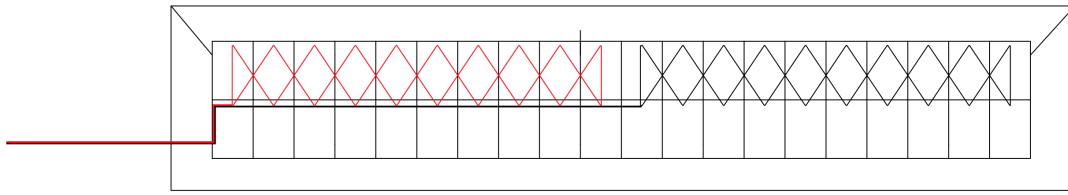


Μεταβολή της διαφοράς δυναμικού κατά μήκος του βρόχου

Περίπτωση 4. Καλώδιο δεξιάς (R) συστοιχίας

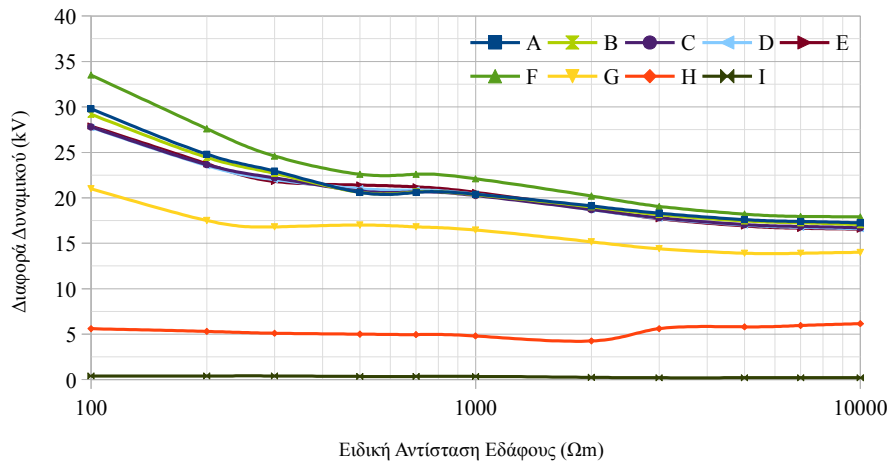


Σχήμα 6.14: Μελέτη καλωδίου. Περίπτωση 4. Καλώδιο δεξιάς (R) συστοιχίας



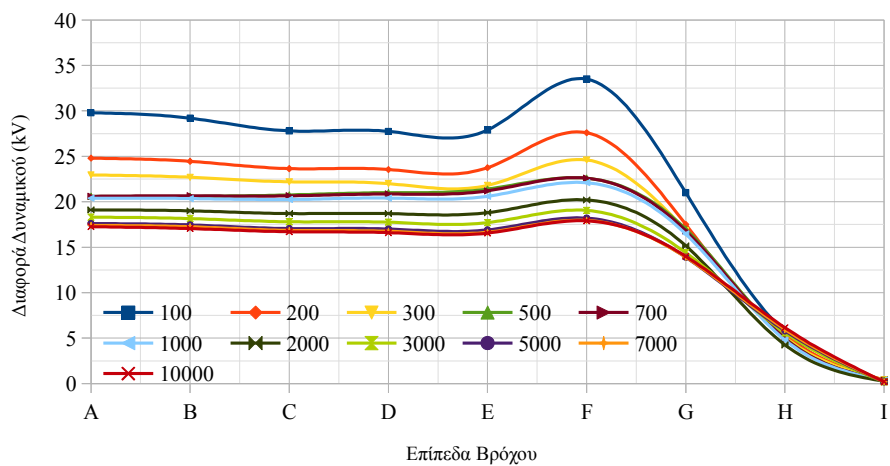
Διαφορά δυναμικού συναρτήσει της ειδικής αντίστασης του εδάφους

Περίπτωση 5. Καλώδιο αριστερής (L) συστοιχίας

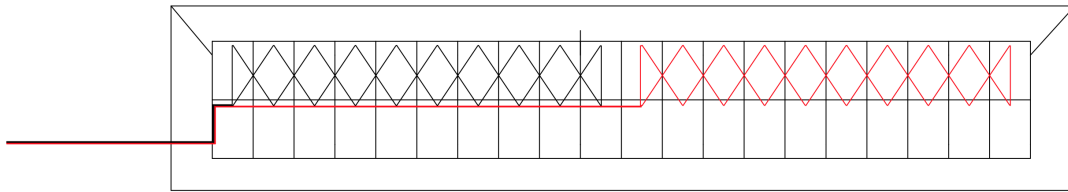


Μεταβολή της διαφοράς δυναμικού κατά μήκος του βρόχου

Περίπτωση 5. Καλώδιο αριστερής (L) συστοιχίας

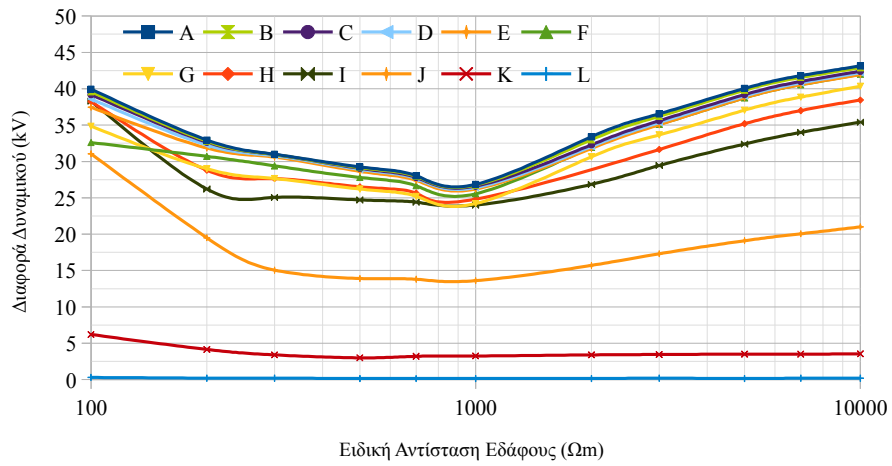


Σχήμα 6.15: Μελέτη καλωδίου. Περίπτωση 5. Καλώδιο αριστερής (L) συστοιχίας



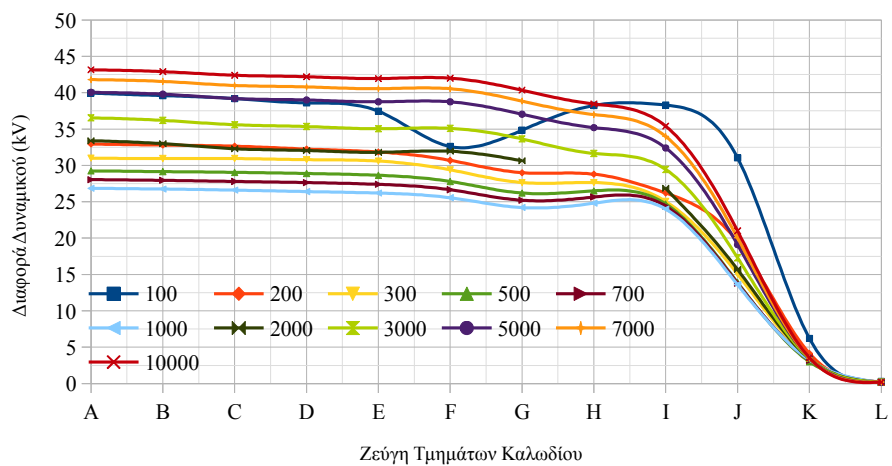
Διαφορά δυναμικού συναρτήσει της ειδικής αντίστασης του εδάφους

Περίπτωση 5. Καλώδιο δεξιάς (R) συστοιχίας

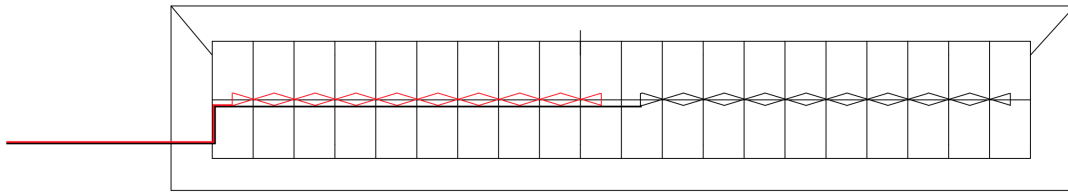


Μεταβολή της διαφοράς δυναμικού κατά μήκος του βρόχου

Περίπτωση 5. Καλώδιο δεξιάς (R) συστοιχίας

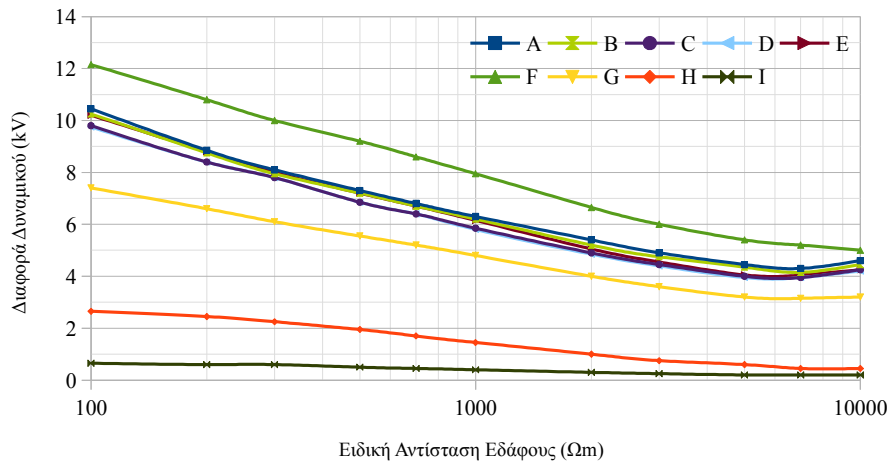


Σχήμα 6.16: Μελέτη καλωδίου. Περίπτωση 5. Καλώδιο δεξιάς (R) συστοιχίας



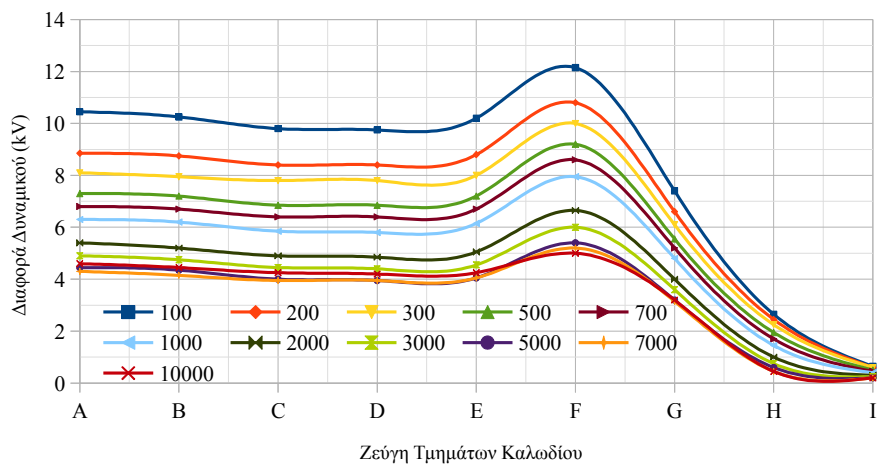
Διαφορά δυναμικού συναρτήσει της ειδικής αντίστασης του εδάφους

Περίπτωση 6. Καλώδιο αριστερής (L) συστοιχίας

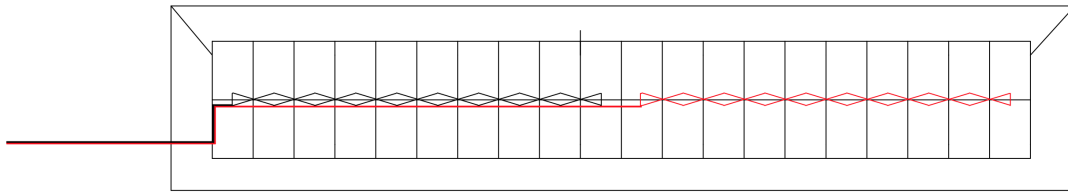


Μεταβολή της διαφοράς δυναμικού κατά μήκος του βρόχου

Περίπτωση 6. Καλώδιο αριστερής (L) συστοιχίας

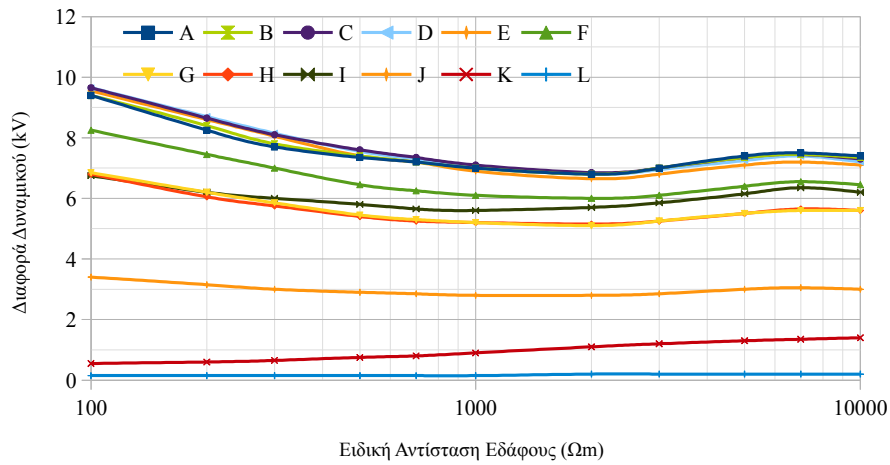


Σχήμα 6.17: Μελέτη καλωδίου. Περίπτωση 6. Καλώδιο αριστερής (L) συστοιχίας



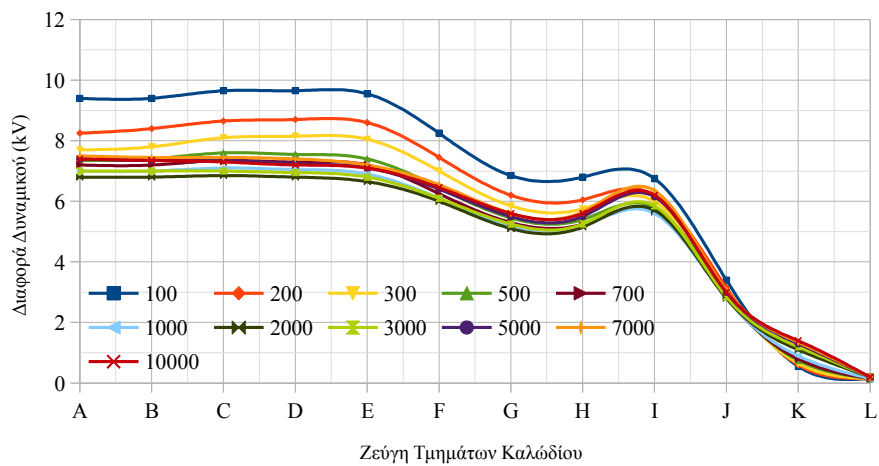
Διαφορά δυναμικού συναρτήσει της ειδικής αντίστασης του εδάφους

Περίπτωση 6. Καλώδιο δεξιάς (R) συστοιχίας



Μεταβολή της διαφοράς δυναμικού κατά μήκος του βρόχου

Περίπτωση 6. Καλώδιο δεξιάς (R) συστοιχίας



Σχήμα 6.18: Μελέτη καλωδίου. Περίπτωση 6. Καλώδιο δεξιάς (R) συστοιχίας

καλώδια. Επιπλέον και στα δύο καλώδια παρατηρείται πως μετά την αρχή της διάταξης των πλαισίων η μεταβολές των υπερτάσεων είναι μικρές. Τέλος οι υπερτάσεις στο καλώδιο της αριστερής (L) συστοιχίας είναι μεγαλύτερες από τη δεξιά συστοιχία.

Στην περίπτωση 5 παρατηρείται πως οι μέγιστες επαγόμενες υπερτάσεις δεν ξεπερνούν τα 30 kV για το καλώδιο της αριστερής (L) συστοιχίας και τα 45 kV για το καλώδιο της δεξιάς (R) συστοιχίας. Αυξανόμενης της τιμής της ειδικής αντίστασης του εδάφους υπάρχει πτώση της διαφοράς δυναμικού για το καλώδιο της αριστερής (L) συστοιχίας που στο ζεύγος A πλησιάζει τα 17 kV. Αντίθετα στο καλώδιο της δεξιάς (R) συστοιχίας υπάρχει πτώση των υπερτάσεων με την αύξηση της τιμής της ειδικής αντίστασης του εδάφους μέχρι τα 1000 Ωm και στην συνέχεια αυξάνονται πάλι. Όσον αφορά την μεταβολή της διαφοράς δυναμικού κατά μήκος τους βρόχου παρατηρείται πως μεταβαίνοντας από δεξιά προς αριστερά, από το ζεύγος I και L, για την αριστερή και τη δεξιά συστοιχία αντίστοιχα, μέχρι και το ζεύγος A όπου βρίσκεται ο αναστροφέας, οι επαγόμενες υπερτάσεις αυξάνονται. Τέλος οι υπερτάσεις στο καλώδιο της αριστερής (L) συστοιχίας είναι μικρότερες από τη δεξιά συστοιχία.

Στην περίπτωση 6 παρατηρείται πως οι μέγιστες επαγόμενες υπερτάσεις είναι μικρότερες σε σύγκριση με την περίπτωση 5 που δεν ξεπερνούν τα 11 kV για το καλώδιο της αριστερής (L) συστοιχίας και τα 10 kV για το καλώδιο της δεξιάς (R) συστοιχίας. Αυξανόμενης της τιμής της ειδικής αντίστασης του εδάφους υπάρχει πτώση της διαφοράς δυναμικού για το καλώδιο της αριστερής (L) συστοιχίας που στο ζεύγος A πλησιάζει τα 4 kV. Αντίθετα στο καλώδιο της δεξιάς (R) συστοιχίας υπάρχει πτώση των υπερτάσεων με την αύξηση της τιμής της ειδικής αντίστασης του εδάφους μέχρι τα 2000 Ωm και στην συνέχεια αυξάνονται πάλι. Όσον αφορά την μεταβολή της διαφοράς δυναμικού κατά μήκος τους βρόχου παρατηρείται πως μεταβαίνοντας από δεξιά προς αριστερά, από το ζεύγος I και L, για την αριστερή και τη δεξιά συστοιχία αντίστοιχα, μέχρι και το ζεύγος A όπου βρίσκεται ο αναστροφέας, οι επαγόμενες υπερτάσεις αυξάνονται. Τέλος οι υπερτάσεις στο καλώδιο της αριστερής (L) συστοιχίας είναι μικρότερες από τη δεξιά συστοιχία.

6.3 Σύγκριση Περιπτώσεων

Σύγκριση περιπτώσεων ανά δύο

Στα Σχήματα 6.19 έως 6.23 που ακολουθούν δίνεται η σύγκριση των περιπτώσεων εξετάζοντας την μεταβολή των υπερτάσεων καθώς μικραίνει το εμβαδόν του σχηματιζόμενου βρόχου. Στα διαγράμματα εμφανίζεται το ποσοστό μείωσης των επαγόμενων υπερτάσεων για κάποια ζεύγη τμημάτων των καλωδίων σε όλες της περιπτώσεις τιμής της ειδικής αντίστασης του εδάφους. Τα επιλεγμένα ζεύγη τμημάτων που φαίνονται στα διαγράμματα είναι τα ίδια, έχοντας τις ίδιες συντεταγμένες, και στις δύο περιπτώσεις που εξετάζονται.

Η πρώτη σύγκριση αφορά τις διατάξεις 2 και 1. Μεταβαίνοντας από τη διάταξη 2 στην 1 το εμβαδόν του βρόχου μικραίνει κατά περίπου 87% για τα δύο καλώδια. Τα ποσοστά μείωσης για το καλώδιο των πάνω (U) συστοιχιών ξεκινούν από 70% και φτάνουν μέχρι 83% ενώ για το καλώδιο των κάτω (D) συστοιχιών τα ποσοστά βρίσκονται ανάμεσα στο 54% και το 66%.

Η σύγκριση των διατάξεων 3 και 4 δίνει παρόμοια αποτελέσματα. Μεταβαίνοντας από τη διάταξη 3 στη 4 το εμβαδόν του βρόχου μικραίνει κατά περίπου 78.5% για τα δύο καλώδια. Τα ποσοστά μείωσης για το καλώδιο των αριστερών (L) συστοιχιών ξεκινούν από 50% και φτάνουν μέχρι 86% ενώ για το καλώδιο των δεξιών (L) συστοιχιών τα ποσοστά βρίσκονται ανάμεσα στο 94% και το 96%.

Όμοια και για την σύγκριση των διατάξεων 5 και 6 δίνει παρόμοια αποτελέσματα. Μεταβαίνοντας από τη διάταξη 5 στην 6 το εμβαδόν του βρόχου μικραίνει κατά περίπου 70% για τα δύο καλώδια. Τα ποσοστά μείωσης για το καλώδιο των αριστερών (L) συστοιχιών ξεκινούν από 62% και φτάνουν μέχρι 78% ενώ για το καλώδιο των δεξιών (L) συστοιχιών τα ποσοστά βρίσκονται ανάμεσα στο 72% και το 87%.

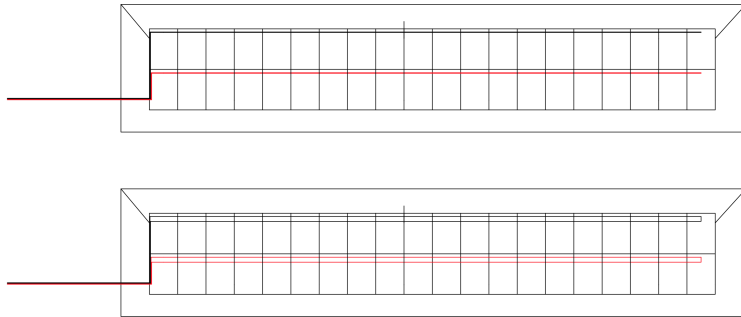
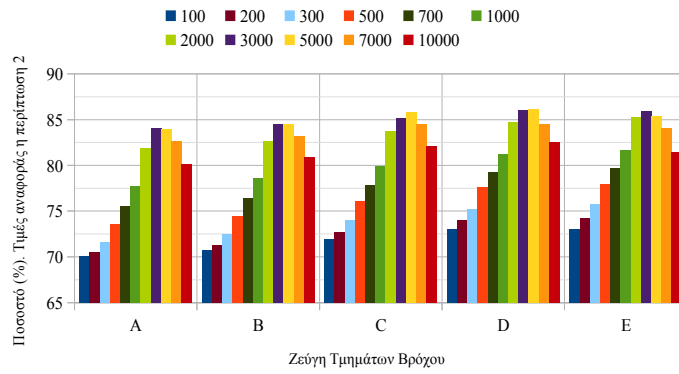
Δύο ακόμα συγκρίσεις που έγιναν εξετάζουν την επίδραση της συστροφής των καλωδίων και την μεταβολή της κατεύθυνσης του βρόχου για τις περιπτώσεις 3 και 5 καθώς και 4 και 6.

Μεταβαίνοντας από τη διάταξη 3 στην 5 το εμβαδόν του βρόχου μικραίνει κατά περίπου 43.5% για τα δύο καλώδια. Τα ποσοστά μείωσης για το καλώδιο των αριστερών (L) συστοιχιών ξεκινούν από -23%, δηλαδή μεγαλύτερες τιμές επαγόμενων



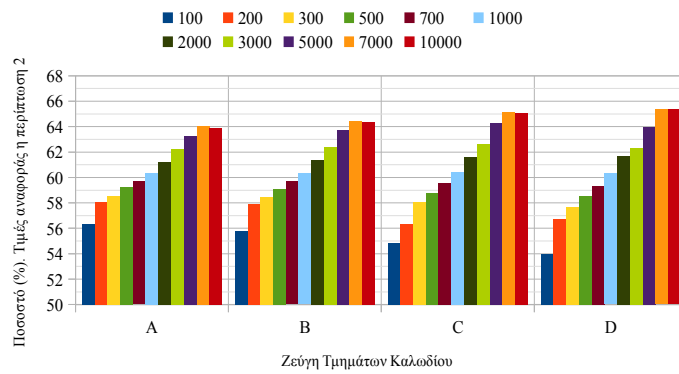
Μεταβολή της διαφοράς δυναμικού μειώνοντας το εμβαδόν του βρόχου

Από περίπτωση 2 σε 1. Καλώδιο πάνω (U) συστοιχίας

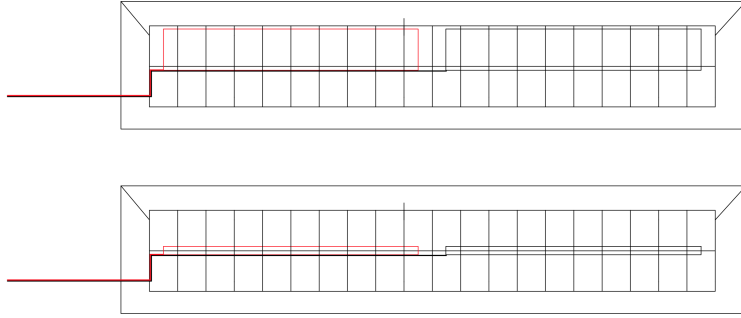


Μεταβολή της διαφοράς δυναμικού μειώνοντας το εμβαδόν του βρόχου

Από περίπτωση 2 σε 1. Καλώδιο κάτω (D) συστοιχίας

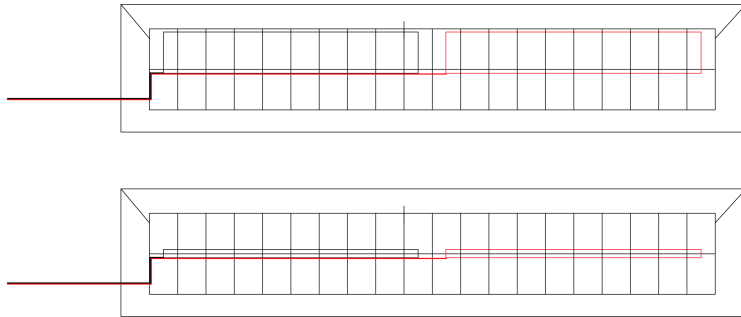
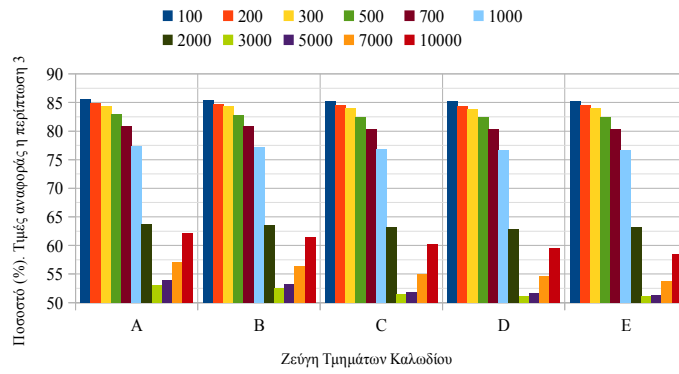


Σχήμα 6.19: Σύγκριση περιπτώσεων 2 και 1



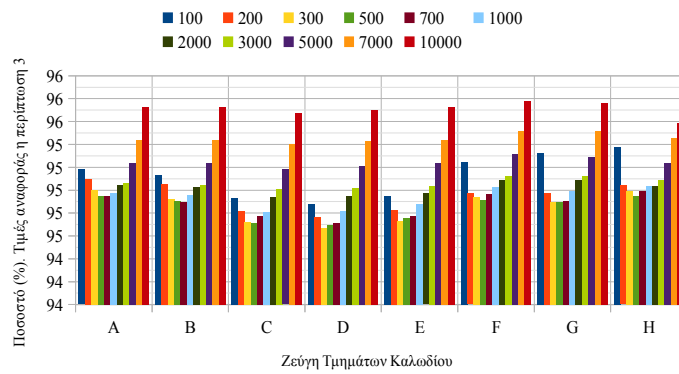
Μεταβολής της διαφοράς δυναμικού μειώνοντας το εμβαδόν του βρόχου

Από περίπτωση 3 σε 4. Καλώδιο αριστερής (L) συστοιχίας

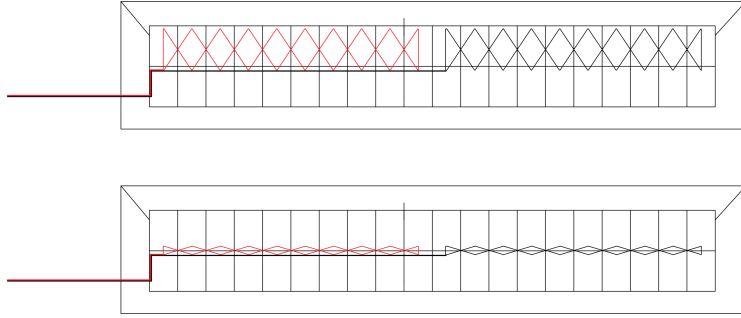


Μεταβολής της διαφοράς δυναμικού μειώνοντας το εμβαδόν του βρόχου

Από περίπτωση 3 σε 4. Καλώδιο δεξιάς (R) συστοιχίας

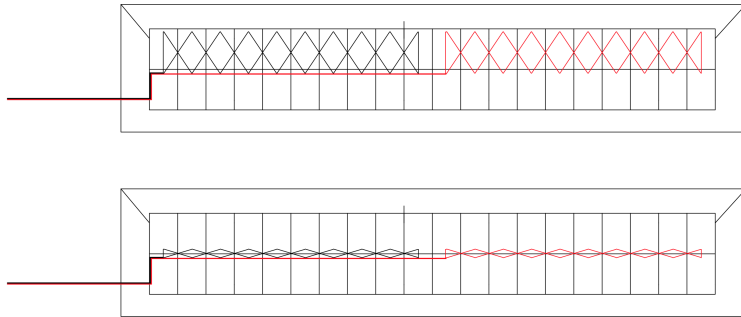
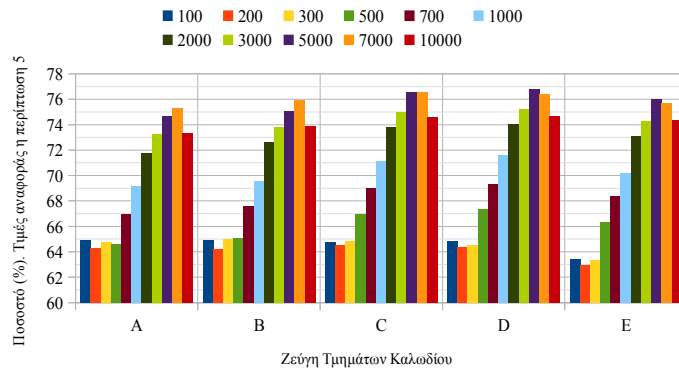


Σχήμα 6.20: Σύγκριση περιπτώσεων 3 και 4



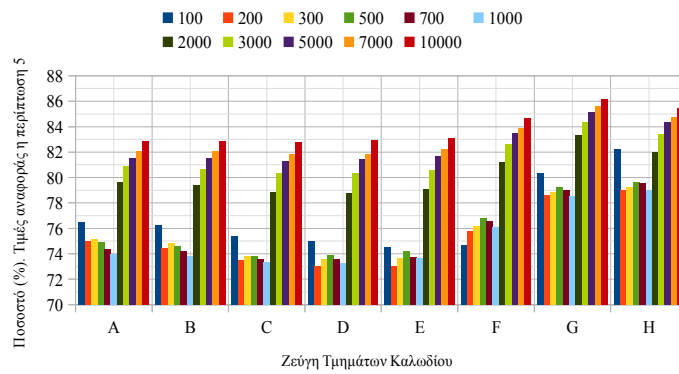
Μεταβολής της διαφοράς δυναμικού μειώνοντας το εμβαδόν του βρόχου

Από περίπτωση 5 σε 6. Καλώδιο αριστερής (L) συστοιχίας

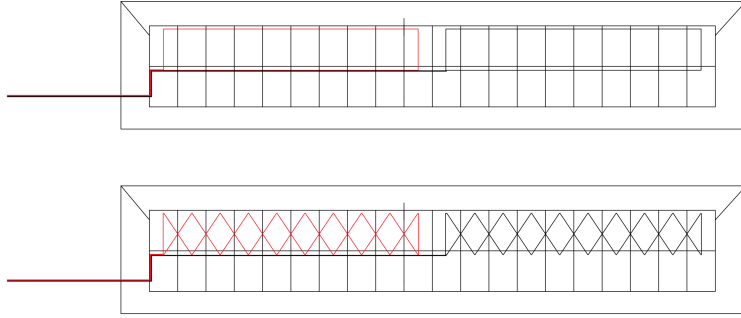


Μεταβολής της διαφοράς δυναμικού μειώνοντας το εμβαδόν του βρόχου

Από περίπτωση 5 σε 6. Καλώδιο δεξιάς (R) συστοιχίας

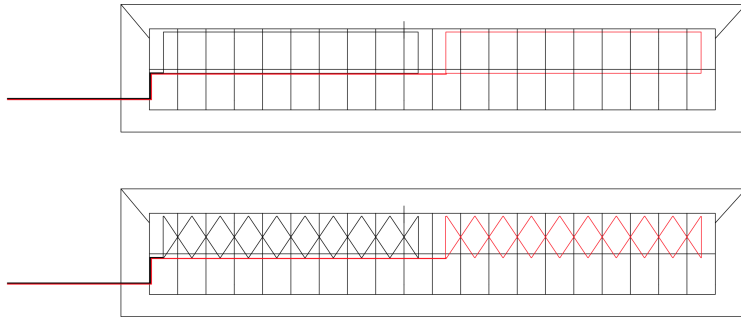
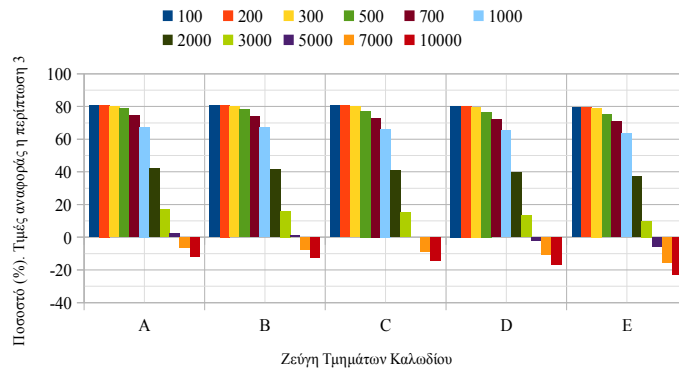


Σχήμα 6.21: Σύγκριση περιπτώσεων 5 και 6



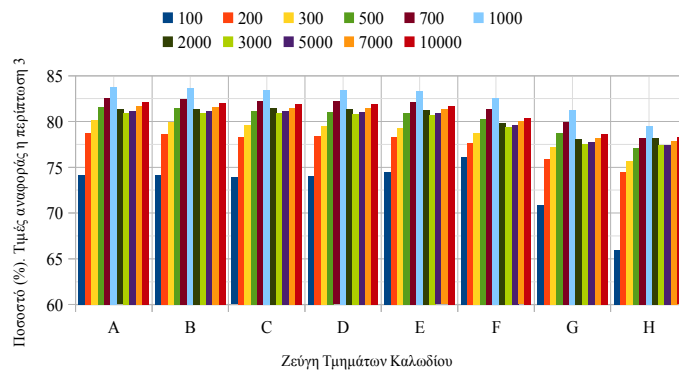
Μεταβολής της διαφοράς δυναμικού μειώνοντας το εμβαδόν του βρόχου

Από περίπτωση 3 σε 5. Καλώδιο αριστερής (L) συστοιχίας

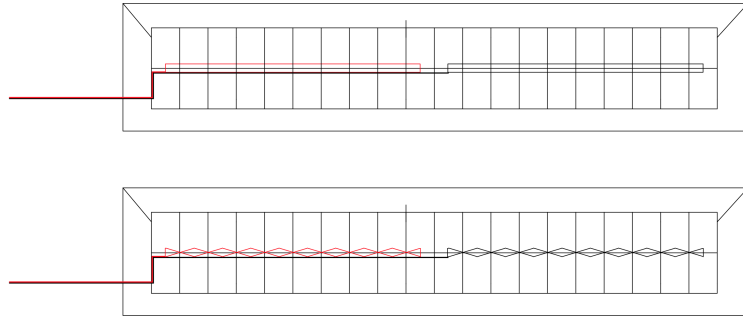


Μεταβολής της διαφοράς δυναμικού μειώνοντας το εμβαδόν του βρόχου

Από περίπτωση 3 σε 5. Καλώδιο δεξιάς (R) συστοιχίας

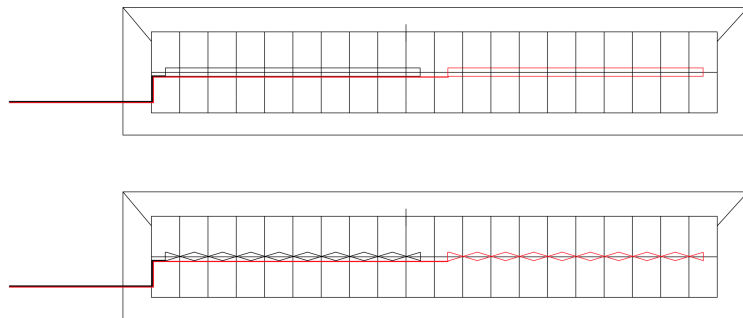
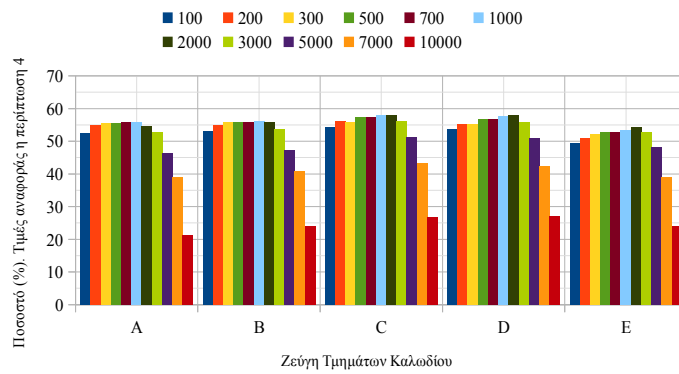


Σχήμα 6.22: Σύγκριση περιπτώσεων 3 και 5



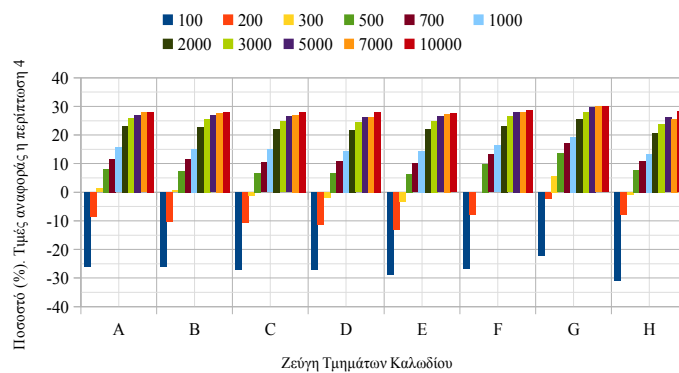
Μεταβολής της διαφοράς δυναμικού μειώνοντας το εμβαδόν του βρόχου

Από περίπτωση 4 σε 6. Καλώδιο αριστερής (L) συστοιχίας



Μεταβολής της διαφοράς δυναμικού μειώνοντας το εμβαδόν του βρόχου

Από περίπτωση 4 σε 6. Καλώδιο δεξιάς (R) συστοιχίας



Σχήμα 6.23: Σύγκριση περιπτώσεων 4 και 6

υπερτάσεων, για τα 10000 Ωm και φτάνουν μέχρι 82% καθώς πηγαίνουμε προς τα 100 Ωm. Για το καλώδιο των δεξιών (L) συστοιχιών τα ποσοστά βρίσκονται ανάμεσα στο 65% και το 85%.

Μεταβαίνοντας από τη διάταξη 4 στην 6 το εμβαδόν του βρόχου μικραίνει κατά περίπου 19% για τα δύο καλώδια. Τα ποσοστά μείωσης για το καλώδιο των δεξιών (L) συστοιχιών βρίσκονται ανάμεσα στο 20% και το 58%. Για το καλώδιο των δεξιών (L) συστοιχιών τα ποσοστά ξεκινούν από το -23%, δηλαδή μεγαλύτερες τιμές επαγόμενων υπερτάσεων, για τα 100 Ωm και φτάνουν μέχρι 30% καθώς πηγαίνουμε προς τα 10000 Ωm.

Σύγκριση όλων των περιπτώσεων

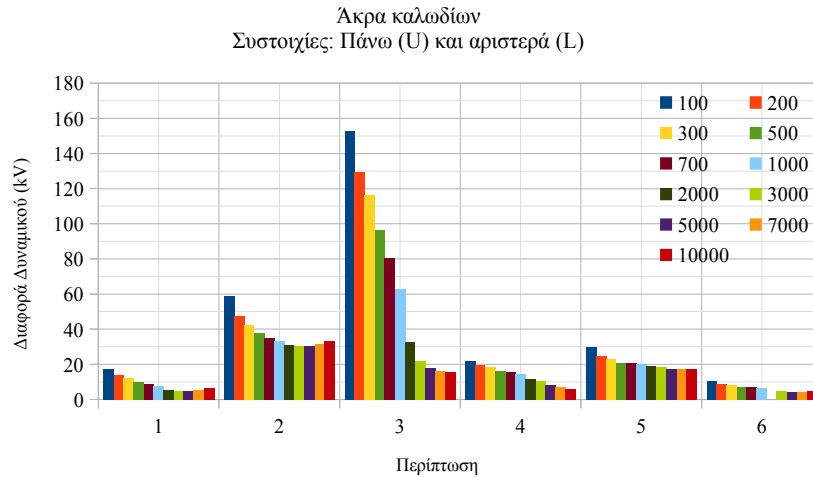
Η σύγκριση όλων των περιπτώσεων έγινε εξετάζοντας την άκρη των καλωδίων που καταλήγουν στον αναστροφέα, δηλαδή το ζεύγος τμημάτων A. Στο Σχήμα 6.24 δίνεται η σύγκριση για τα καλώδια των πάνω (U) και αριστερά (L) συστοιχιών καθώς και για τα καλώδια των κάτω (D) και δεξιά (R) συστοιχιών. Τα διαγράμματα δίνουν τις επαγόμενες υπερτάσεις ανά περίπτωση ενώ φαίνεται και η αλλαγές που υπάρχουν με την μεταβολή της ειδικής αντίστασης τους εδάφους.

Παρατηρείται πως για τις συστοιχίες πάνω και αριστερά που βρίσκονται κοντύτερα στο σημείο πτώσης του κεραυνού τις μεγαλύτερες υπερτάσεις εμφανίζει η περίπτωση 3 μέχρι και τα 2000 Ωm. Ακολουθούν οι περιπτώσεις 2, 5, 4, 1, και 6 με την 6 να παρουσιάζει τις μικρότερες τιμές σε όλο το εύρος των ειδικών αντιστάσεων του εδάφους. Μετά τα 2000 Ωm τις μεγαλύτερες υπερτάσεις εμφανίζει η περίπτωση 2. Καθώς αυξάνεται η ειδική αντίσταση του εδάφους η διαφορά της μεγαλύτερης από την μικρότερη τιμή ανάμεσα στις περιπτώσεις μειώνεται αισθητά. Στα 100 Ωm η διαφορά είναι 142 kV ενώ στα 10000 Ωm έχει πέσει στα 29 kV.

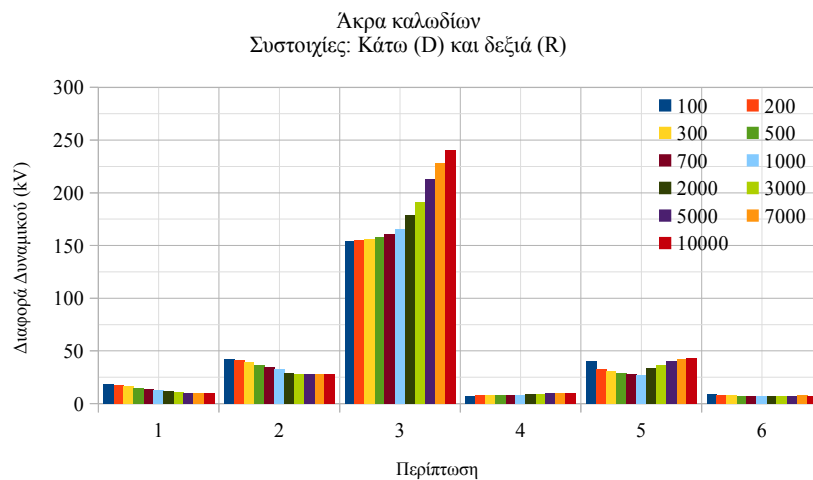
Για τις συστοιχίες κάτω και δεξιά που βρίσκονται εν γένει μακρύτερα στο σημείο πτώσης του κεραυνού τις μεγαλύτερες υπερτάσεις εμφανίζει η περίπτωση 3 σε όλο το εύρος των ειδικών αντιστάσεων του εδάφους. Τις μικρότερες τιμές για τις δύο πρώτες τιμές της ειδικής αντίστασης, 100 και 200 Ωm, δίνει η περίπτωση 4 ενώ στις υπόλοιπες τιμές η περίπτωση 6. Καθώς αυξάνεται η ειδική αντίσταση του εδάφους η διαφορά της μεγαλύτερης από την μικρότερη τιμή ανάμεσα στις περιπτώσεις αυξάνεται. Στα 100 Ωm η διαφορά είναι στα 147 kV ενώ στα 10000 Ωm έχει φτάσει στα 234 kV. Αν δεν

λάβουμε την περίπτωση 3 υπόψιν, οι υπόλοιπες, 2, 5, 1, 4, και 6, εμφανίζονται εντός ενός εύρους 30kV η μεγαλύτερη από την μικρότερη.

Συμπεριφορά άκρων καλωδίων ανάλογα με την περίπτωση του βρόχου



Συμπεριφορά άκρων καλωδίων ανάλογα με την περίπτωση του βρόχου



Σχήμα 6.24: Σύγκριση άκρων καλωδίων για όλες τις περιπτώσεις

6.4 Ζεύγος Α Στο Χρόνο

Η συμπεριφορά των άκρων των καλωδίων με τη πάροδο του χρόνου για τις 6 περιπτώσεις φαίνεται στα Σχήματα 6.25 έως 6.30 που ακολουθούν. Στα διαγράμματα ο ένας άξονας είναι βαθμονομημένος σε kV και σε λογαριθμική κλίμακα ενώ ο άλλος

άξονας αναπαριστά τον χρόνο σε μs και σε γραμμική κλίμακα. Εντός των διαγραμμάτων υπάρχουν σημεία για 5 τιμές της ειδικής αντίστασης του εδάφους, συγκεκριμένα για 100, 500, 1000, 5000 και 10000 Ωm , και έχουν προστεθεί πολυωνυμικές γραμμές που προσεγγίζουν την ροπή στον χρόνο, για καλύτερη εποπτεία.

Στην περίπτωση 1 για το καλώδιο της πάνω (U) συστοιχίας διακρίνεται πως οι επαγόμενες υπερτάσεις έχουν πέσει κάτω από τα 1000 V σε χρόνο 2 μs ενώ κάτω από τα 100 V σε χρόνο 10 μs . Αντίθετα, για το καλώδιο της κάτω (D) συστοιχίας οι επαγόμενες υπερτάσεις πέφτουν κάτω των 1000 V μετά την πάροδο των 5 μs και κάτω των 100 V, για όλες τις τιμές της ειδικής αντίστασης του εδάφους, μετά από 30 μs , εμφανίζοντας μια καθυστέρηση.

Στην περίπτωση 2 για το καλώδιο της πάνω (U) συστοιχίας προκειμένου οι επαγόμενες υπερτάσεις να μειωθούν στα 1000 V φαίνεται πως είναι αναγκαία η μεσολάβηση χρόνου 5 μs ενώ για να μειωθούν στα 100 V, σε όλες τις τιμές της ειδικής αντίστασης του εδάφους, χρόνος 30 μs . Για το καλώδιο της κάτω (D) συστοιχίας προκειμένου οι επαγόμενες υπερτάσεις να μειωθούν στα 1000 V, σε όλες τις τιμές της ειδικής αντίστασης του εδάφους, φαίνεται πως είναι αναγκαία η μεσολάβηση χρόνου 30 μs και στα 100 V χρόνος 90 μs εμφανίζοντας επίσης μια καθυστέρηση όπως η περίπτωση 1.

Στην περίπτωση 3 για το καλώδιο της αριστερής (L) συστοιχίας διακρίνεται πως οι επαγόμενες υπερτάσεις έχουν πέσει κάτω από τα 1000 V, σε όλες τις τιμές της ειδικής αντίστασης του εδάφους, σε χρόνο 20 μs ενώ κάτω από τα 100 V σε χρόνο 60 μs . Αντίθετα, για το καλώδιο της δεξιάς (R) συστοιχίας οι επαγόμενες υπερτάσεις πέφτουν κάτω των 1000 V μετά την πάροδο 30 μs και κάτω των 100 V μετά από 90 μs , εμφανίζοντας επίσης μια καθυστέρηση.

Στην περίπτωση 4 για το καλώδιο της αριστερής (L) συστοιχίας προκειμένου οι επαγόμενες υπερτάσεις να μειωθούν στα 1000 V, σε όλες τις τιμές της ειδικής αντίστασης του εδάφους, φαίνεται πως είναι αναγκαία η μεσολάβηση χρόνου 10 μs ενώ για να μειωθούν στα 100 V χρόνος 60 μs . Για το καλώδιο της δεξιάς (R) συστοιχίας προκειμένου οι επαγόμενες υπερτάσεις να μειωθούν στα 1000 V σε όλες τις τιμές της ειδικής αντίστασης του εδάφους φαίνεται πως είναι αναγκαία η μεσολάβηση χρόνου 5 μs και στα 100 V χρόνος 20 μs , χρόνοι μικρότερη σε σχέση με το καλώδιο της αριστερής συστοιχίας.

Στην περίπτωση 5 τόσο για το καλώδιο της αριστερής (L) συστοιχίας όσο και για το καλώδιο της δεξιάς (R) συστοιχίας διακρίνεται πως οι επαγόμενες υπερτάσεις έχουν πέσει κάτω από τα 1000 V σε χρόνο 10 μs ενώ κάτω από τα 100 V, σε όλες τις τιμές της ειδικής αντίστασης του εδάφους, σε χρόνο 60 μs. Όμοια, στην περίπτωση 6 τόσο για το καλώδιο της αριστερής (L) συστοιχίας όσο και για το καλώδιο της δεξιάς (R) συστοιχίας προκειμένου οι επαγόμενες υπερτάσεις να μειωθούν στα 1000 V, σε όλες τις τιμές της ειδικής αντίστασης του εδάφους, φαίνεται πως είναι αναγκαία η μεσολάβηση χρόνου 5 μs ενώ για να μειωθούν στα 100 V χρόνος 30 μs.

Τα παραπάνω αποτυπώνονται συνοπτικά στον Πίνακα 6.1 όπου δίνονται το εύρος των χρόνων που χρειάζονται για να μειωθούν οι τάσεις κάτω από μια συγκεκριμένη τιμή.

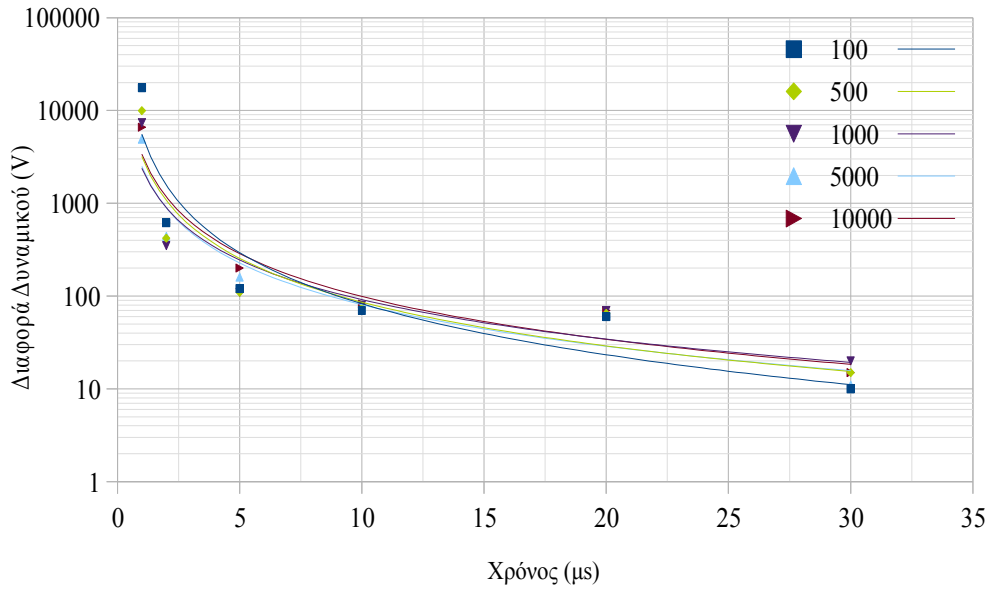
Σε ένα καλώδιο η διαφορά στην τιμή της ειδικής αντίστασης του εδάφους εμφανίζει και αλλαγές στους χρόνους. Όσον αφορά τις περιπτώσεις 1 και 2 και το καλώδιο των πάνω (U) συστοιχιών δεν παρουσιάζεται μεγάλη διαφοροποίηση στο χρόνο που χρειάζονται για να μειωθούν οι τάσεις. Για το καλώδιο των κάτω (D) συστοιχιών όσο αυξάνει η τιμή της ειδικής αντίστασης του εδάφους οι επαγόμενες υπερτάσεις μειώνονται γρηγορότερα. Στις περιπτώσεις 3, 4, 5 και 6 κοιτώντας τα καλώδια των αριστερών (L) συστοιχιών παρατηρείται πως καθώς αυξάνει η τιμή της ειδικής αντίστασης του εδάφους οι επαγόμενες υπερτάσεις μειώνονται γρηγορότερα. Τα καλώδια των δεξιών (R) συστοιχιών των περιπτώσεων 5 και 6 παρουσιάζουν επίσης παρόμοια συμπεριφορά, ενώ για στις περιπτώσεις 3 και 4 δεν διακρίνεται κάτι τέτοιο.

Πίνακας 6.1: Σύγκριση άκρων καλωδίων στην πάροδο του χρόνου

Περίπτωση	Καλώδιο	Χρόνος σε (μs) για τάσεις μικρότερες από	
		1000 V	100 V
1	U	2	10
	D	5	10..30
2	U	5	10..30
	D	10..30	30..90
3	L	5..20	30..60
	R	30	90
4	L	5..10	30..60
	R	2..5	10..20
5	L	10	30..60
	R	10	30..60
6	L	2..5	20..30
	R	2..5	20..30

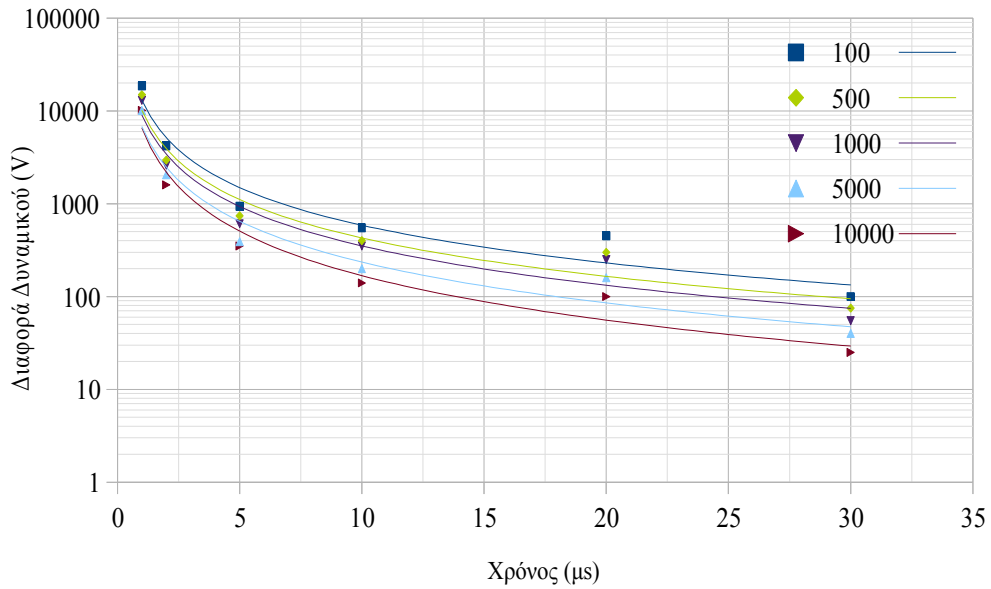
Μεταβολή διαφοράς δυναμικού στο χρόνο στα άκρα του καλωδίου

Περίπτωση 1. Καλώδιο πάνω (U) συστοιχίας



Μεταβολή διαφοράς δυναμικού στο χρόνο στα άκρα του καλωδίου

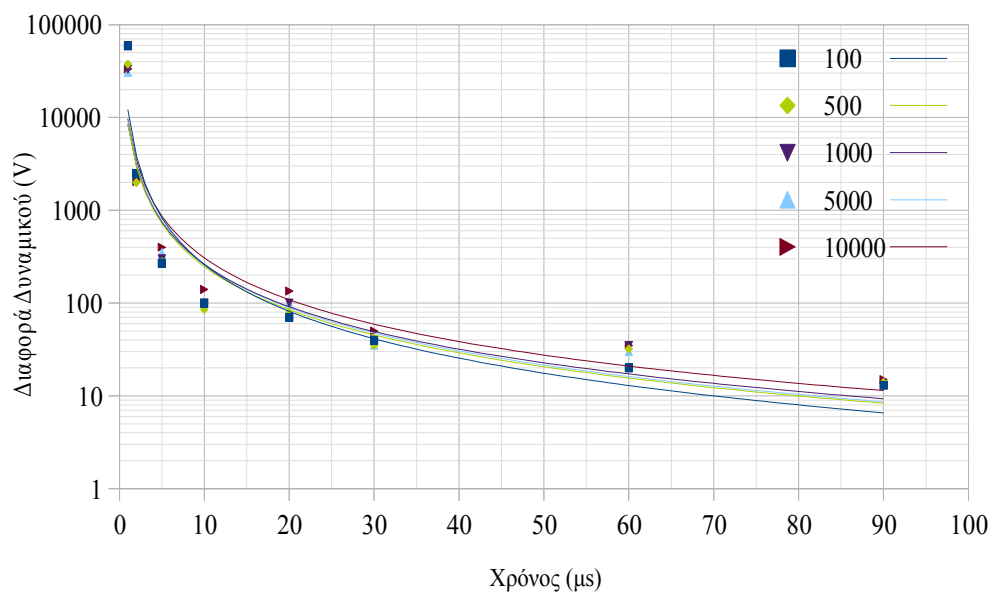
Περίπτωση 1. Καλώδιο κάτω (D) συστοιχίας



Σχήμα 6.25: Μελέτη άκρων καλωδίων στο χρόνο. Περίπτωση 1

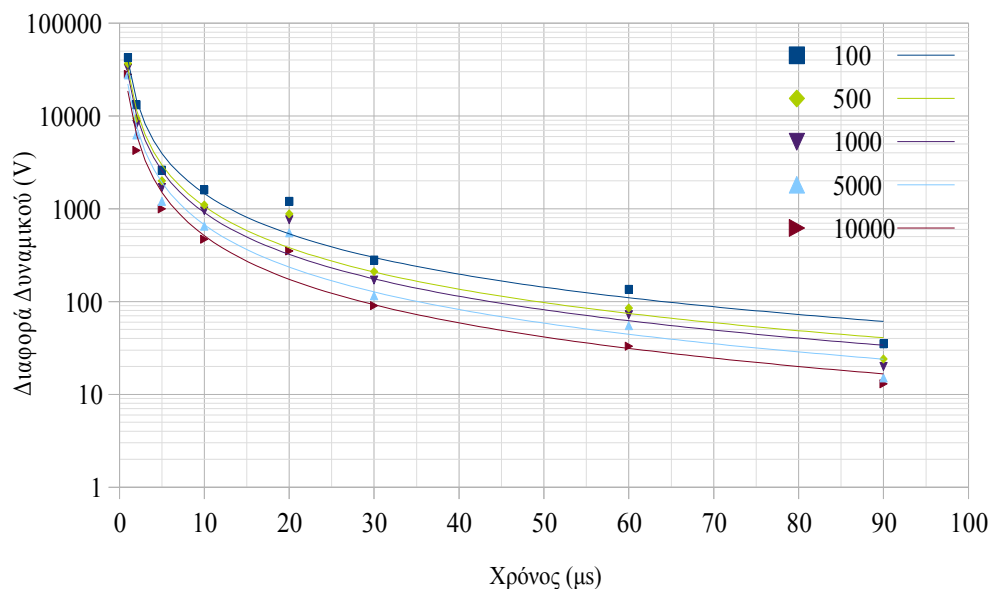
Μεταβολή διαφοράς δυναμικού στο χρόνο στα άκρα του καλωδίου

Περίπτωση 2. Καλώδιο πάνω (U) συστοιχίας



Μεταβολή διαφοράς δυναμικού στο χρόνο στα άκρα του καλωδίου

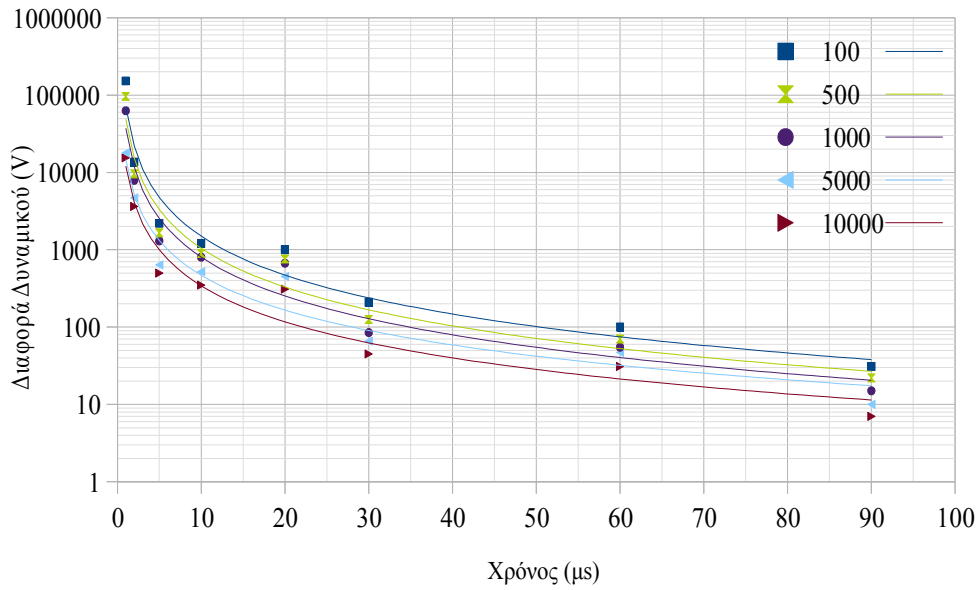
Περίπτωση 2. Καλώδιο κάτω (D) συστοιχίας



Σχήμα 6.26: Μελέτη άκρων καλωδίων στο χρόνο. Περίπτωση 2

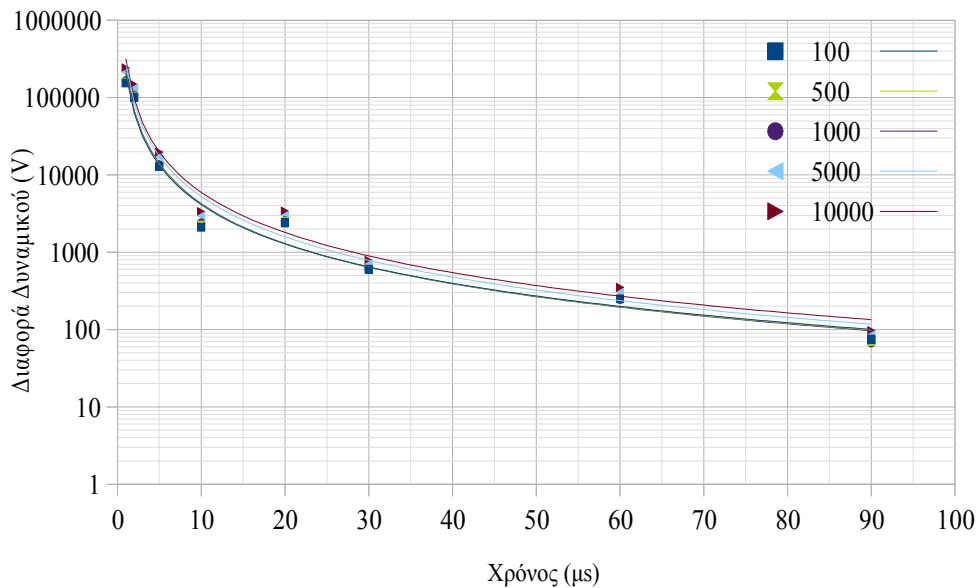
Μεταβολή της διαφοράς δυναμικού στο χρόνο στα άκρα του καλωδίου

Περίπτωση 3. Καλώδιο αριστερής (L) συστοιχίας



Μεταβολή της διαφοράς δυναμικού στο χρόνο στα άκρα του καλωδίου

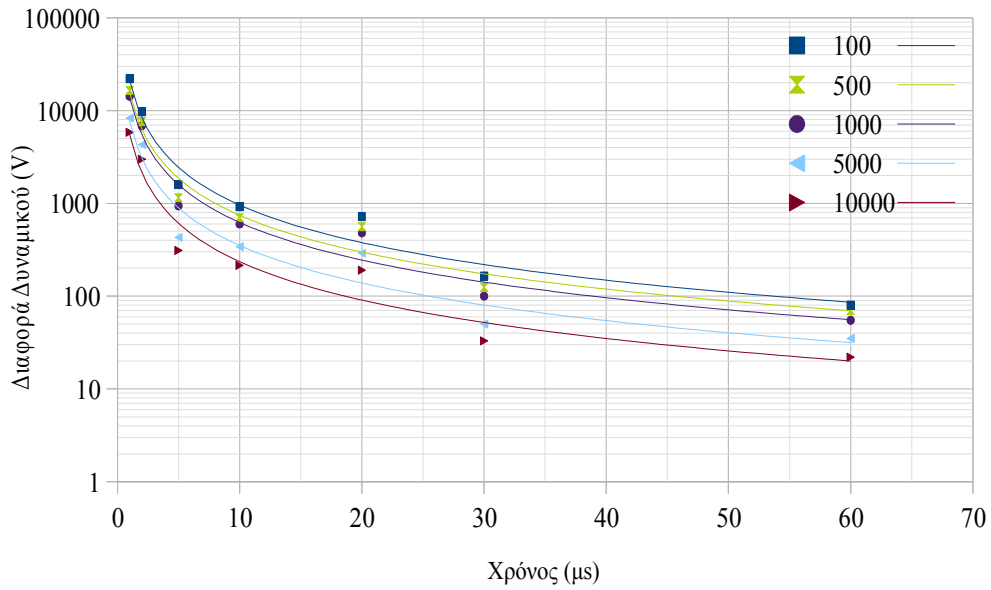
Περίπτωση 3. Καλώδιο δεξιάς (R) συστοιχίας



Σχήμα 6.27: Μελέτη άκρων καλωδίων στο χρόνο. Περίπτωση 3

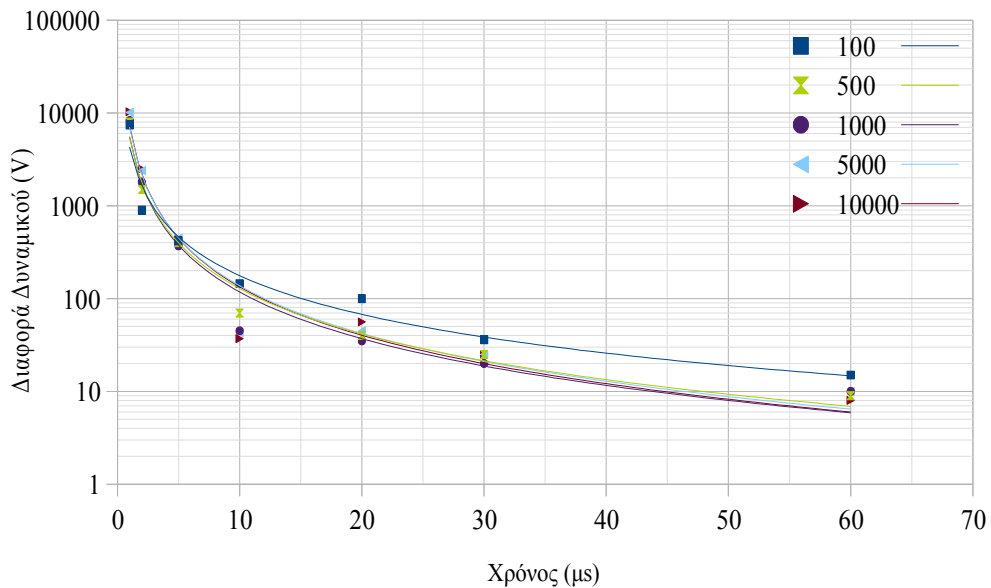
Μεταβολή της διαφοράς δυναμικού στο χρόνο στα άκρα του καλωδίου

Περίπτωση 4. Καλώδιο αριστερής (L) συστοιχίας



Μεταβολή της διαφοράς δυναμικού στο χρόνο στα άκρα του καλωδίου

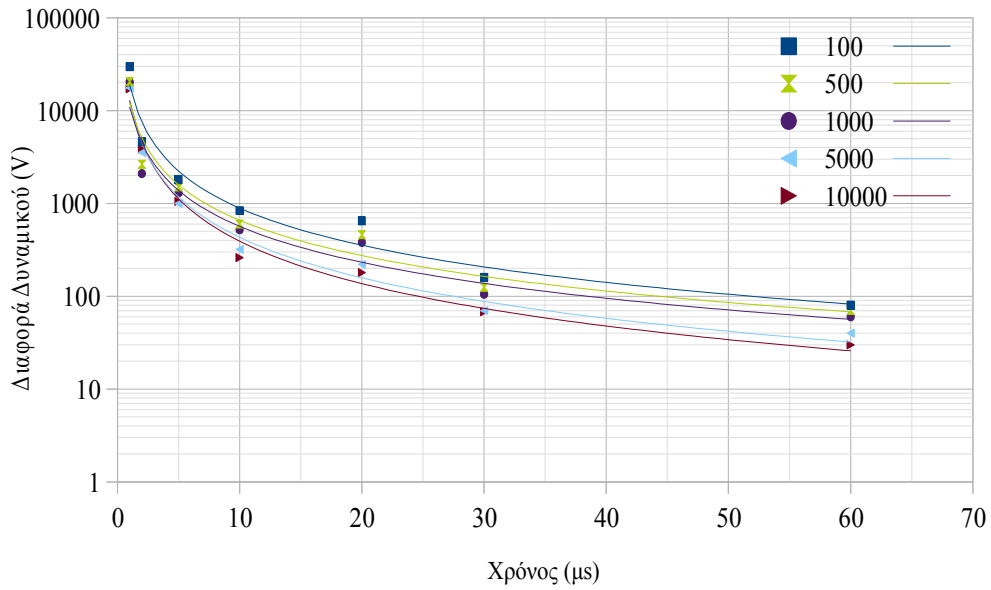
Περίπτωση 4. Καλώδιο δεξιάς (R) συστοιχίας



Σχήμα 6.28: Μελέτη άκρων καλωδίων στο χρόνο. Περίπτωση 4

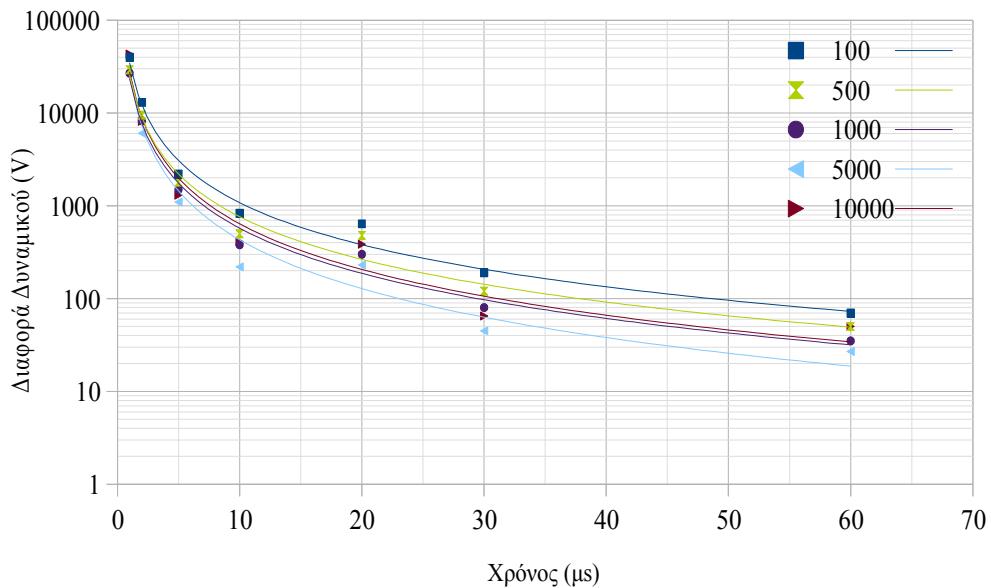
Μεταβολή της διαφοράς δυναμικού στο χρόνο στα άκρα του καλωδίου

Περίπτωση 5. Καλώδιο αριστερής (L) συστοιχίας



Μεταβολή της διαφοράς δυναμικού στο χρόνο στα άκρα του καλωδίου

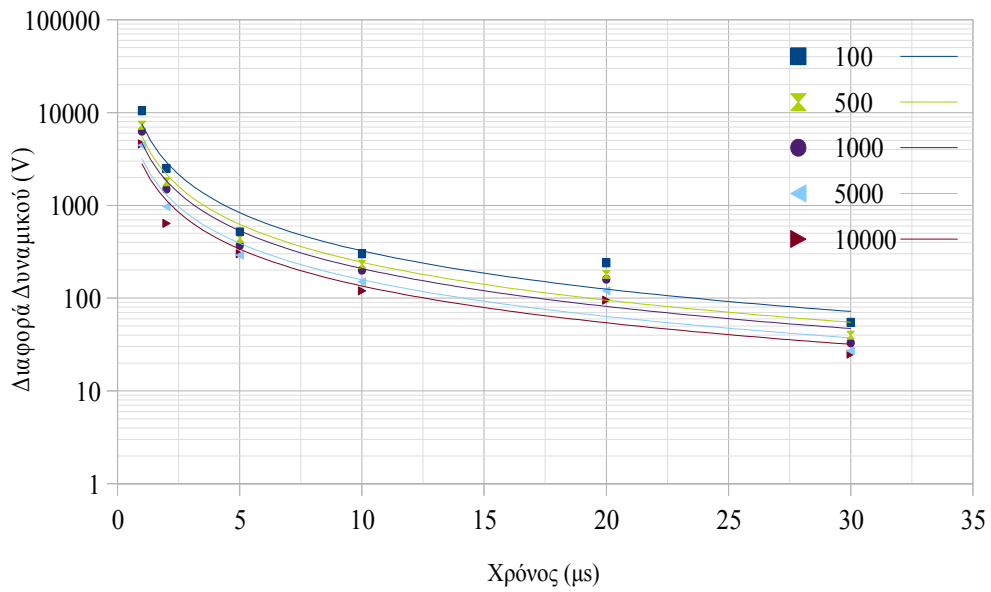
Περίπτωση 5. Καλώδιο δεξιάς (R) συστοιχίας



Σχήμα 6.29: Μελέτη άκρων καλωδίων στο χρόνο. Περίπτωση 5

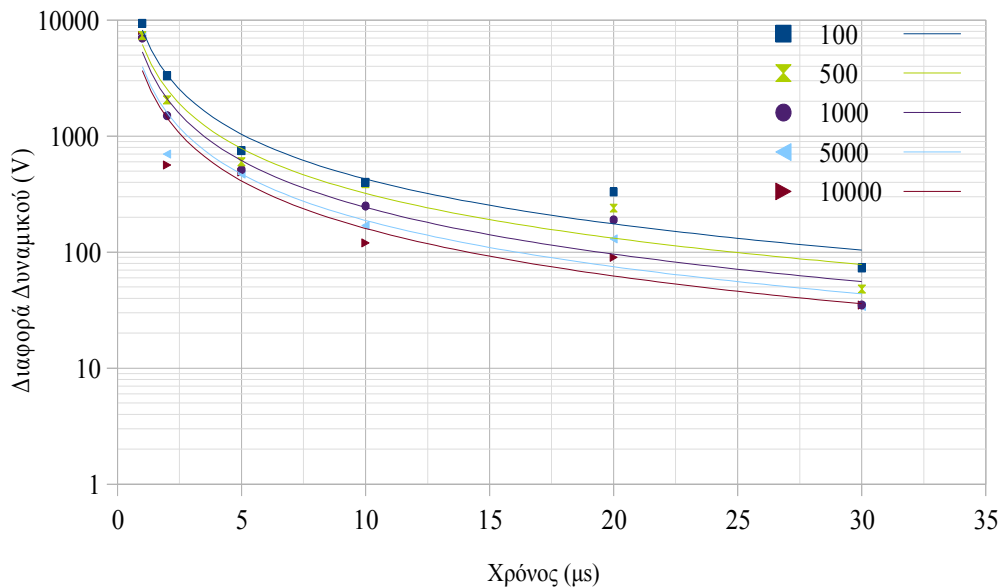
Μεταβολή της διαφοράς δυναμικού στο χρόνο στα άκρα του καλωδίου

Περίπτωση 6. Καλώδιο αριστερής (L) συστοιχίας



Μεταβολή της διαφοράς δυναμικού στο χρόνο στα άκρα του καλωδίου

Περίπτωση 6. Καλώδιο δεξιάς (R) συστοιχίας



Σχήμα 6.30: Μελέτη άκρων καλωδίων στο χρόνο. Περίπτωση 6

Συμπεράσματα

Η πτώση ενός κεραυνού σε μια διάταξη φωτοβολταϊκής μετατροπής έχει αρνητικές συνέπειες για τα ηλεκτρονικά συστήματά της. Στην παρούσα Διπλωματική Εργασία μελετήθηκαν οι συνέπειες αυτές προσομοιώνοντας τα μεταβατικά φαινόμενα μέσω ειδικού λογισμικού πακέτου. Η σύνδεση των διατάξεων με τα ηλεκτρονικά ισχύος, όπως ο αναστροφέας ή οι μετατροπείς DC/DC, γίνεται μέσω των καλωδίων ισχύος της διάταξης. Τα καλώδια αυτά συνδέουν σε σειρά τα φωτοβολταϊκά πλαίσια δημιουργώντας συστοιχίες. Ένα κεραυνικό πλήγμα στην διάταξη έχει σαν συνέπεια την εμφάνιση επαγόμενων υπερτάσεων στους σχηματιζόμενους βρόχους των καλωδίων καταπονώντας τα ίδια τα καλώδια και εν συνεχεία τα ηλεκτρονικά συστήματα υπερβαίνοντας τις περισσότερες φορές τα όρια αντοχής τους. Οι προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν για την μελέτη των φαινομένων εστίασαν στην διαφοροποίηση που υπάρχει ανάμεσα στον τρόπο σύνδεσης των πλαισίων και, συνεπώς, στους σχηματιζόμενους βρόχους καθώς και στην ειδική αντίσταση του εδάφους. Από την μελέτη που αναπτύχθηκε σε προηγούμενα κεφάλαια και τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων εξήχθησαν τα παρακάτω συμπεράσματα.

Το εμβαδόν των σχηματιζόμενων βρόχων έχει μεγάλη επίπτωση στις μέγιστες τιμές των εμφανιζόμενων υπερτάσεων κοντά στα άκρα των καλωδίων. Η μείωση του εμβαδού έχει σαν συνέπεια την μείωση στις τιμές των υπερτάσεων, ανάλογη πολλές φορές της μείωσης του εμβαδού, σε όλες σχεδόν τις περιπτώσεις μελέτης και τις τιμές της ειδικής αντίστασης του εδάφους. Επιπροσθέτως, το εμβαδόν παίζει σημαντικό ρόλο και στην μεταβολή των υπερτάσεων με την πάροδο του χρόνου. Συγκεκριμένα, μεγαλύτεροι σχηματιζόμενοι βρόχοι αυξάνουν τους χρόνους που χρειάζονται για την μείωση των τάσεων. Συνεπώς η επιλογή τρόπου σύνδεσης των πλαισίων που ελαχιστοποιεί το εμβαδόν των σχηματιζόμενων βρόχων από τα καλώδια είναι αναγκαία σε κάθε περίπτωση.

Η τιμή της ειδικής αντίστασης του εδάφους δεν έχει κάποια καθολική επίδραση στις μέγιστες τιμές των επαγόμενων υπερτάσεων. Σε ορισμένες περιπτώσεις η αύξηση της τιμής της ειδικής αντίστασης έχει ως συνέπεια την μείωση των τιμών των υπερτάσεων, ενώ σε άλλες την αύξησή τους. Συνεπώς, δεν μπορούμε να αποφανθούμε για τον τρόπο με τον οποίο η ειδική αντίσταση του εδάφους επηρεάζει τις διατάξεις και το ζήτημα αυτό χρήζει περαιτέρω διερεύνησης.

Εκ των περιπτώσεων 1, 2, 3 και 5, όπου τα φωτοβολταϊκά πλαίσια έχουν τοποθετηθεί με τον ίδιο τρόπο, οικονομικά συμφέρουσες είναι η 3 και η 5, καθώς απαιτείται λιγότερο επιπλέον υλικό για την σύνδεση των πλαισίων, αφού τα καλώδια που υπάρχουν στο πίσω μέρος των πλαισίων επαρκούν για τις συνδέσεις μεταξύ τους. Το κόστος των διατάξεων 4 και 6 είναι αντίστοιχο των περιπτώσεων 3 και 5 αν ο κατασκευαστής δίνει την δυνατότητα ανάποδης τοποθέτησης των πλαισίων όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 4.

Συνοψίζοντας, η εκλογή των φωτοβολταϊκών πλαισίων καθορίζει και τον τρόπο τοποθέτησης τους, το οποίο με την σειρά του καθορίζει και ποιες συνδεσμολογίες μπορούν να πραγματοποιηθούν. Συμφέρουσες περιπτώσεις φαίνονται οι 4 και 6 τόσο από οικονομικής πλευράς όσο και λόγω των χαμηλότερων τιμών υπερτάσεων που εμφανίζουν στα μεταβατικά φαινόμενα, σε σύγκριση με άλλες διατάξεις, και της γρήγορης απόσβεσής τους που συνεπάγεται εκλογή φθηνότερης προστασίας. Ο τρόπος συνδεσμολογίας των φωτοβολταϊκών της 1ης περίπτωσης παρουσιάζει αντίστοιχα χαμηλές τιμές υπερτάσεων συγκριτικά με τις περιπτώσεις 4 και 6 με σχετικά γρηγορότερους χρόνους για την μείωση τους. Όμως απαιτείται επιπλέον καλώδιο για την διασύνδεση των πάνελ γεγονός που αυξάνει το κόστος εγκατάστασης ανάλογα με το μέγεθος του πάρκου. Οι υπόλοιπες περιπτώσεις, δηλαδή οι 2, 3 και 5, δεν συνίστανται για την συνδεσμολογία μιας φωτοβολταϊκής εγκατάστασης λόγω των υψηλών υπερτάσεων και τους μεγάλους χρόνους απόσβεσής τους.

Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Ως επέκταση της παρούσας εργασίας για την μελέτη των επαγόμενων υπερτάσεων στα καλώδια ισχύος προτείνεται να εξεταστεί περαιτέρω η επίδραση της ειδικής αντίστασης του εδάφους καθώς και η επίδραση της μορφής του κεραυνικού πλήγματος, το σημείο τοποθέτησης του αλεξικέρανου, το απομονωμένο σύστημα αντικεραυνικής

προστασίας και η αλλαγή του επιπέδου μόνωσης των καλωδίων. Τέλος, προτείνεται η πειραματική διερεύνηση και μέτρηση των επαγόμενων υπερτάσεων σε φωτοβολταϊκές διατάξεις που πλήττονται από κεραυνό και η σύγκρισή τους με τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις προσομοιώσεις μέσω του λογισμικού CDEGS.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Δέρβος Κ. Θ. (2013), *Φωτοβολταϊκά Συστήματα: από τη Θεωρία στην Πράξη*. Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Ε.Μ.Π.
- [2] Sukhatme S. P., Nayak J. K. (2008), *Solar Energy: Principles of Thermal Collection and Storage 3rd Edition*. Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited
- [3] Χαλδούπης Χ. (2015), *Εισαγωγή στην Ατμοσφαιρική Φυσική*. ΣΕΑΒ, 2015
- [4] Παπαμανώλης, Ν. (2015), *Δομική Φυσική και Αρχές Περιβαλλοντικού Σχεδιασμού Κτιρίων*. ΣΕΑΒ
- [5] Smets A., Jäger K., Isabella O, Swaaij R.V., Zeman M., *Solar Energy: The Physics and Engineering of Photovoltaic Conversion, Technologies and Systems*. UIT Cambridge
- [6] Στεργιόπουλος Φ., Διαμιανίδης Μ., Τόλης Μ., Κατσαρός Γ. (2011), *Τεχνικό Εγχειρίδιο για τη Μελέτη και Υλοποίηση Φ/Β Συστημάτων*. Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας Τμήμα Κεντρικής Μακεδονίας
- [7] Σταθόπουλος Ι. Α. (1989), *Προστασία Τεχνικών Εγκαταστάσεων Έναντι Υπερτάσεων*. Εκδόσεις ΣΥΜΕΩΝ
- [8] Δημητρίου Α., Χαραλάμπους Χ. Α., *Τεχνικό Εγχειρίδιο Αντικεραυνικής Προστασίας και Προστασίας από Υπερτάσεις για Φωτοβολταϊκές Εγκαταστάσεις Υπαίθριου Χώρου*. Πανεπιστήμιο Κύπρου
- [9] Δαμιανάκη Κ. (2015), *Μελέτη Κεραυνικών Πληγμάτων σε Φωτοβολταϊκά Συστήματα*. Διπλωματική εργασία, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, ΕΜΠ
- [10] International Standard, IEC 62305, *Protection Against Lightning*, Ed. 2, 2010-2012
- [11] Ελληνικό Πρότυπο, ΕΛΟΤ 1197, *Προστασία κατασκευών από κεραυνούς - Μερός Ι: Γενικές αρχές*, 2002
- [12] Χαραμπόπουλος Α. (2011), *Μέτρηση και Έλεγχος Γειώσεων Συστημάτων Αντικεραυνικής Προστασίας στα Κτήρια του Πανεπιστημίου Πατρών*. Διπλωματική εργασία, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Πατρών

- [13] Βάρλα Δ. (2004), *Υπολογιστική Μελέτη Συστημάτων Γείωσης*. Διπλωματική εργασία, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, ΕΜΠ
- [14] Κοκάλης Χ. Χ. (2016), *Μελέτη Συμπεριφοράς Κεραυνικών Πληγμάτων σε Απομονωμένα Συστήματα Αντικεραυνικής Προστασίας Φωτοβολταϊκών Πάρκων*. Διπλωματική εργασία, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, ΕΜΠ
- [15] Stern H. J., Karner H. C., Lightning induced EMC phenomena in photovoltaic modules
- [16] Vangala P., Ropp M., Haggerty K., Lynn K., Wilson W., Field measurements of lightning-induced voltage transients in PV arrays
- [17] Amicucci G. L., Fiamingo F., Lightning risk to photovoltaic power generating systems (2009), *Prevention Today*, p. 51-65
- [18] Benesova Z., Haller R., Birkl J., Zahlmann P., Overvoltages in Photovoltaic Systems Induced by Lightning Strikes (2012), *International Conference on Lightning Protection (ICLP), Vienna, Austria*
- [19] Charalambous C. A., Christofides N., Kokkinos N., Mohd Zainal Abidin Ab Kadir Chandima Gomes, A Simulation Tool to Assess the Lightning Induced Over-Voltages on dc Cables of Photovoltaic Installations (2014), *International Conference on Lightning Protection (ICLP), Shanghai, China*
- [20] Charalambous C. A., Christofides N., Kokkinos N., Lightning Protection Practice for Large-Extended Photovoltaic Installations (2012), *International Conference on Lightning Protection (ICLP), Vienna, Austria*
- [21] British Standard, BS EN 50618, *Electric cables for photovoltaic systems*, 2014
- [22] International Standard, IEC 60228, *Conductors of insulated cables*, Ed. 3, 2004-2011
- [23] <http://www.porous-35.com/electrochemistry-semiconductors-3.html>
- [24] <http://what-when-how.com/electronic-properties-of-materials/semiconductors-electrical-properties-of-materials-part-3/>
- [25] http://www.electronics-tutorials.ws/diode/diode_2.html
- [26] <http://what-when-how.com/electronic-properties-of-materials/semiconductors->

[electrical-properties-of-materials-part-3/](#)

[27] <http://www.mdpi.com/1424-8220/4/5/58/htm>

[28] <https://www.intechopen.com/books/solar-cells-research-and-application-perspectives/silicon-solar-cells-with-nanoporous-silicon-layer>

[29] https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Solar_cell_equivalent_circuit.svg

[30] http://www.aliexpress.com/store/product/40-pcs-5x5-A-grade-Solar-cell-solar-cells-for-DIY-100w-solar-panel-free-shipping/520886_1748675959.html

[31] <http://www.jgtec.com.cn/home.php/en/product/details/id/125>

[32] <http://www.lgnewsroom.com/2015/06/lg-unveils-its-most-efficient-solar-panel-to-date-at-intersolar-europe/>

[33] <http://www.tsampco.gr/fwtovoltaika-giaparka-AGROS2.html>

[34] <http://www.tsampco.gr/fwtovoltaika-giaparka-AGROS2.html>

[35] <http://edeindia.com/products/solar/solar-cables/>

[36] <https://lightning.nsstc.nasa.gov/primer/primer2.html>

[37] <http://kids.britannica.com/kids/article/lightning/390250>

[38] <http://electrical-engineering-portal.com/9-recommended-practices-for-grounding>

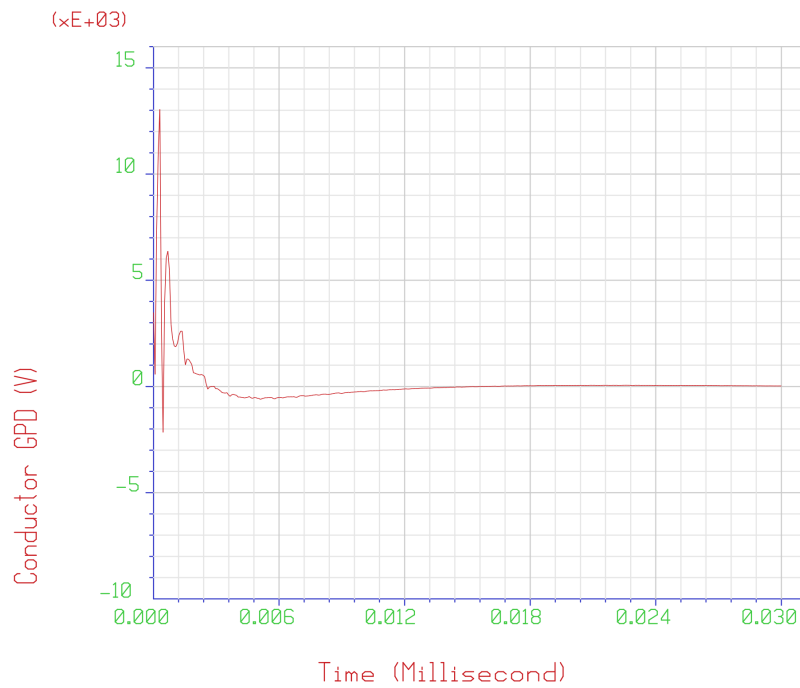
[39] <http://civilblog.org/2015/04/18/electrical-resistivity-test-of-soil-geophysical-method-of-soil-exploration/>

[40] <http://www.rfwireless-world.com/test-and-measurement/Earth-ground-tester-and-earth-resistance-testing.html>

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

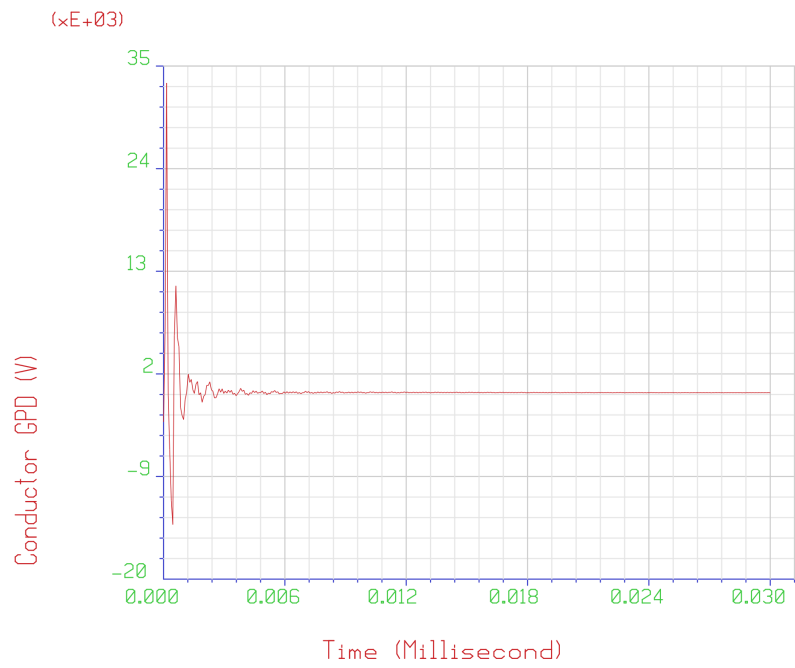


Καλώδιο πάνω (U) συστοιχίας

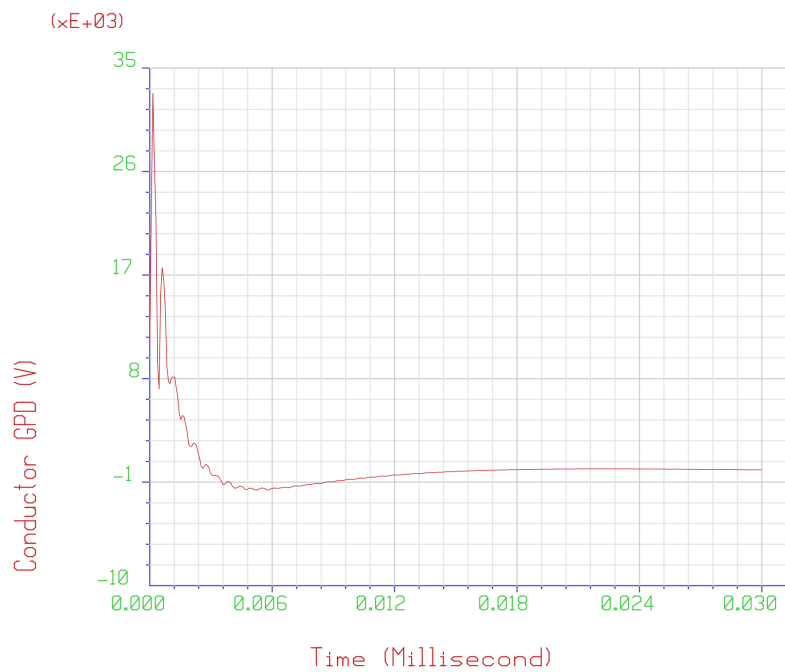


Καλώδιο κάτω (D) συστοιχίας

Σχήμα Π.1: Μεταβολή της διαφοράς δυναμικού στα άκρα των καλωδίων. Περίπτωση 1. $1000 \Omega m$

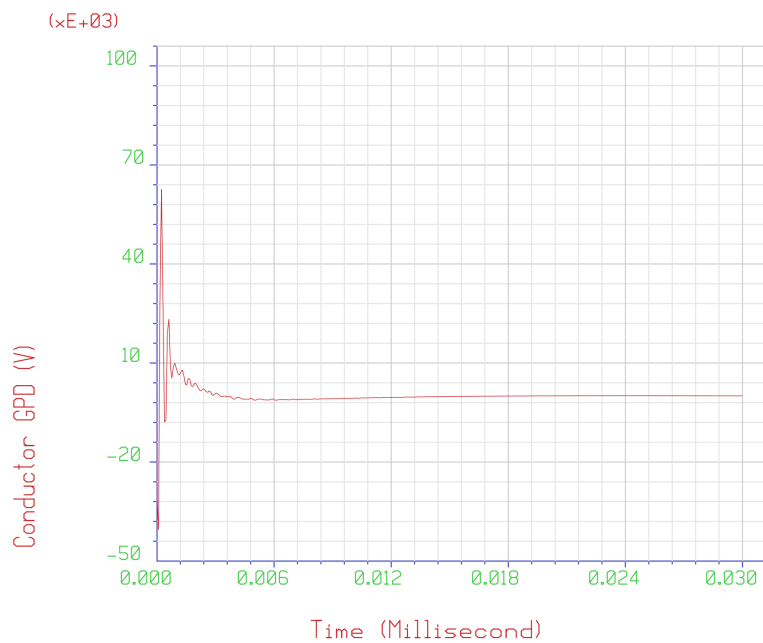


Καλώδιο πάνω (U) συστοιχίας

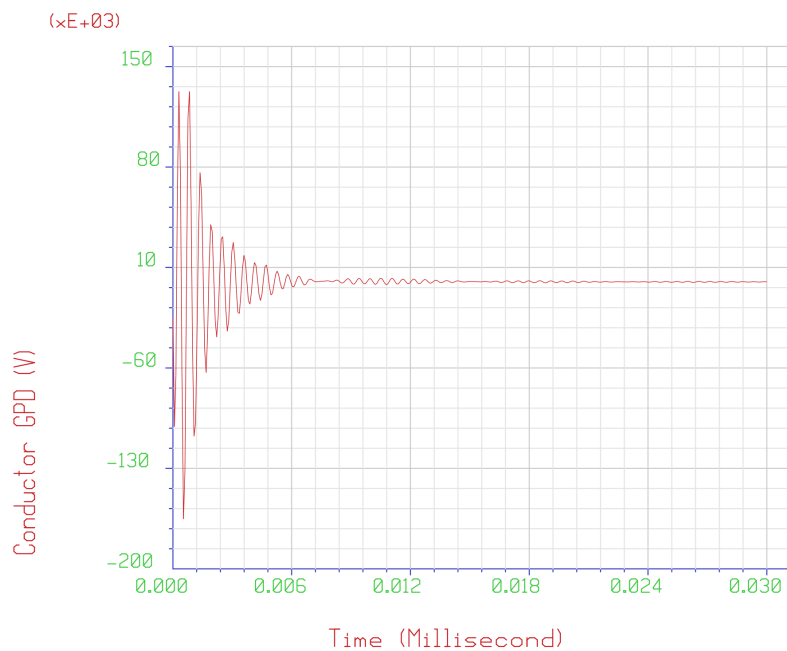


Καλώδιο κάτω (D) συστοιχίας

Σχήμα Π.2: Μεταβολή της διαφοράς δυναμικού στα άκρα των καλωδίων. Περίπτωση 2. $1000 \Omega m$

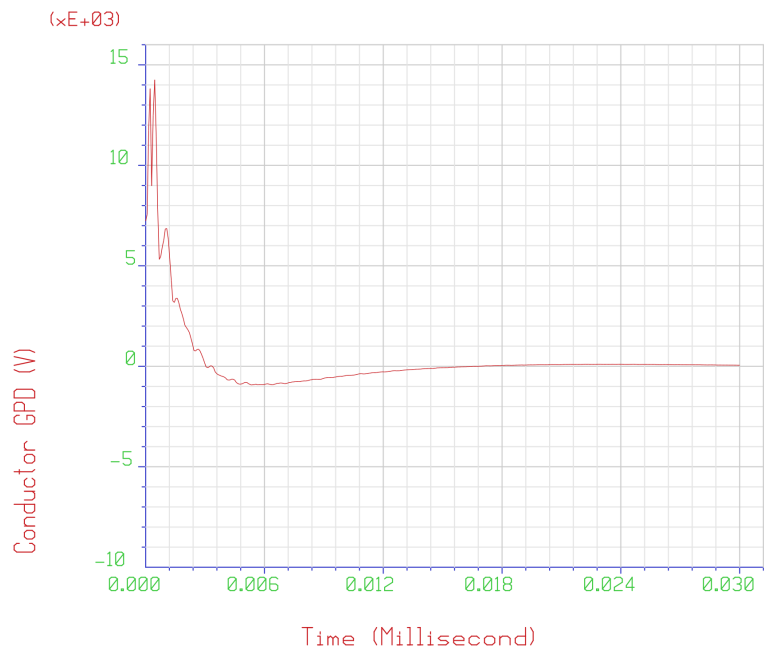


Καλώδιο αριστερής (L) συστοιχίας

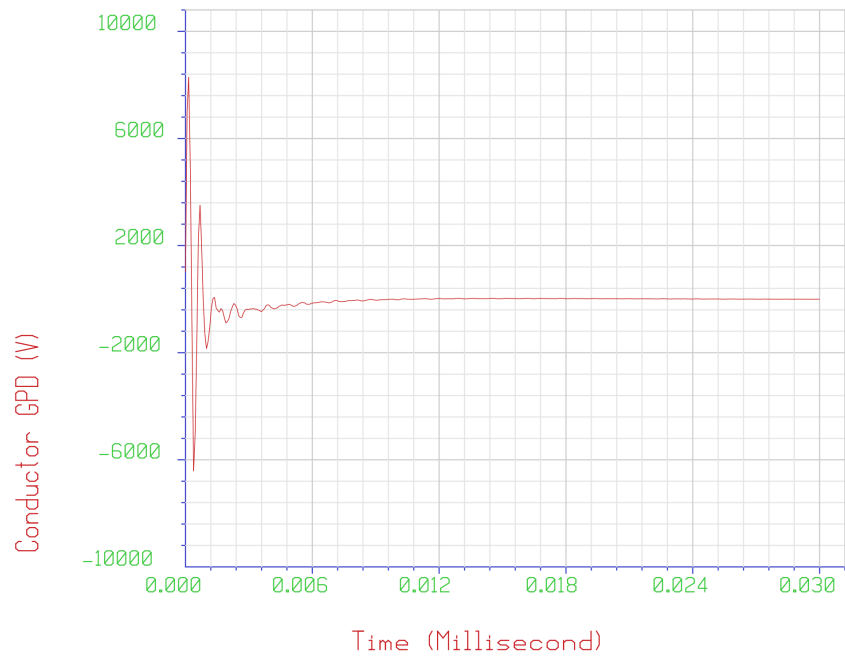


Καλώδιο δεξιάς (R) συστοιχίας

Σχήμα Π.3: Μεταβολή της διαφοράς δυναμικού στα άκρα των καλωδίων. Περίπτωση 3. $1000 \Omega m$

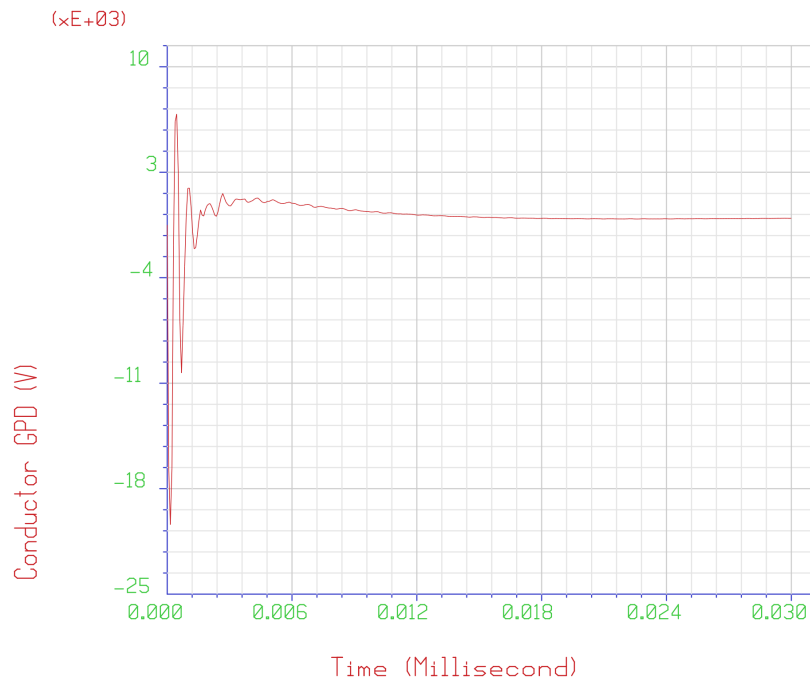


Καλώδιο αριστερής (L) συστοιχίας

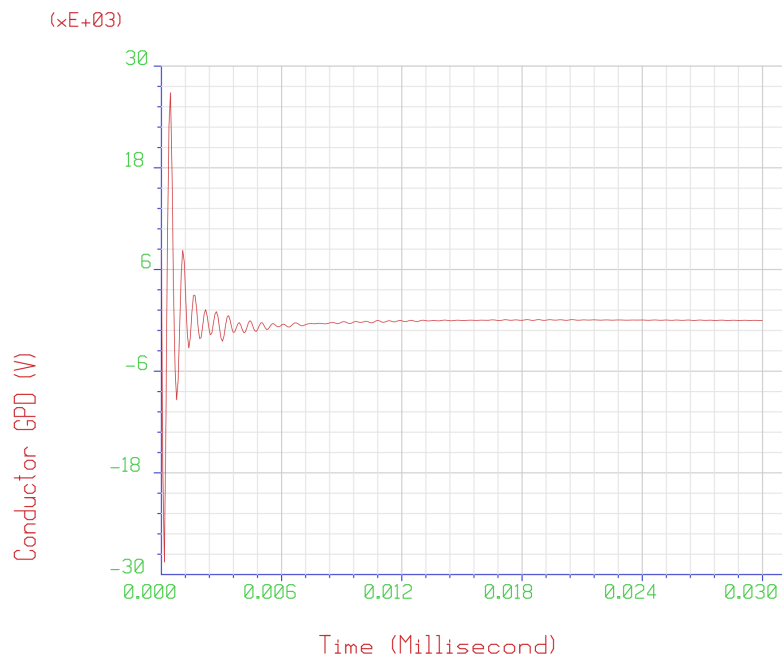


Καλώδιο δεξιάς (R) συστοιχίας

Σχήμα Π.4: Μεταβολή της διαφοράς δυναμικού στα άκρα των καλωδίων. Περίπτωση 4. $1000 \Omega m$

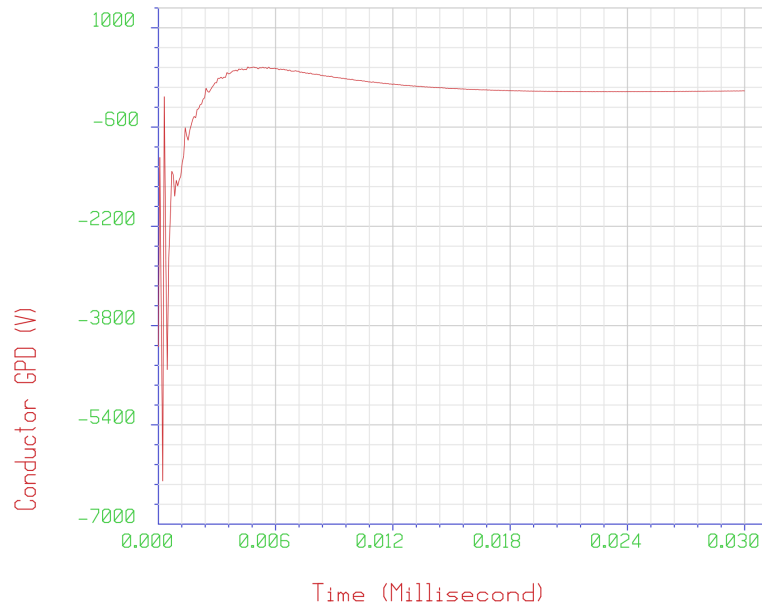


Καλώδιο αριστερής (L) συστοιχίας

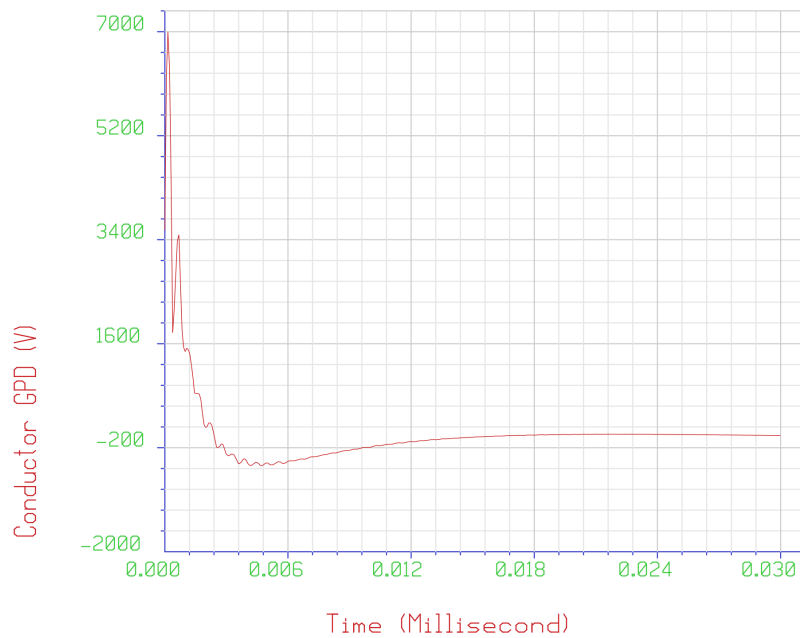


Καλώδιο δεξιάς (R) συστοιχίας

Σχήμα Π.5: Μεταβολή της διαφοράς δυναμικού στα άκρα των καλωδίων. Περίπτωση 5. $1000 \Omega m$



Καλώδιο αριστερής (L) συστοιχίας



Καλώδιο δεξιάς (R) συστοιχίας

Σχήμα Π.6: Μεταβολή της διαφοράς δυναμικού στα άκρα των καλωδίων. Περίπτωση 6. $1000 \Omega m$

