



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ
& ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ

**Μελέτη Κεραυνικών Πληγμάτων
σε Φωτοβολταϊκά Συστήματα**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΚΑΤΕΡΙΝΑ Δ. ΔΑΜΙΑΝΑΚΗ

Επιβλέπων : Ιωάννης Φ. Γκόνος
Επ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2015



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΚΑΙ
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ

Μελέτη Κεραυνικών Πληγμάτων σε Φωτοβολταϊκά Συστήματα

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΚΑΤΕΡΙΝΑ Δ. ΔΑΜΙΑΝΑΚΗ

Επιβλέπων : Ιωάννης Φ. Γκόνος
Επ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 20^η Ιουλίου 2015.

.....

Ιωάννης Φ. Γκόνος

Επ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....

Ιωάννης Αθ. Σταθόπουλος

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....

Βασιλική Θ. Κονταργύρη

Ε.ΔΙ.Π. Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2015

.....

Κατερίνα Δ. Δαμιανάκη

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

Copyright © Κατερίνα Δ. Δαμιανάκη, 2015

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 ασχολείται με τις επιπτώσεις που επιφέρουν τα κεραυνικά πλήγματα στις Φ/Β εγκαταστάσεις.

Στο κεφάλαιο 1 αναφέρεται η αρχή λειτουργίας των Φ/Β συστημάτων και το ισοδύναμο κύκλωμα του Φ/Β κυττάρου. Παρουσιάζονται τα υλικά που αποτελούν τα πλαίσια καθώς οι τύποι των Φ/Β συστημάτων. Επίσης, περιγράφονται τα βήματα των Φ/Β εγκαταστάσεων από τα κριτήρια επιλογής του χώρου έδρασης μέχρι τη σχεδίαση και την εγκατάσταση. Δίνεται έμφαση και στα προβλήματα που μπορεί να προκύψουν κατά τα βήματα αυτά όπως προβλήματα σκίασης και ανεπιθύμητες καταστάσεις κατά την εγκατάσταση τόσο της DC όσο και της AC μεριάς του συστήματος.

Στο κεφάλαιο 2 παρουσιάζονται οι πιθανές βλάβες που συμβαίνουν λόγω άμεσου κεραυνικού πλήγματος. Αναφέρονται οι περιπτώσεις υπερτάσεων στη DC και AC πλευρά της εγκατάστασης αλλά και τρόποι προστασίας της. Αναλύεται η επιλογή συστήματος αντικεραυνικής προστασίας και η στάθμη προστασίας του καθώς και η χρήση των απαγωγέων υπερτάσεων (SPDs).

Στο κεφάλαιο 3 ακολουθεί μια ανασκόπηση σε επιστημονικές εργασίες που ασχολούνται με την αντικεραυνική προστασία Φ/Β συστημάτων και τον υπολογισμό των επαγόμενων υπερτάσεων λόγω πτώσης κεραυνικού πλήγματος. Παρατίθενται τα σημαντικότερα αποτελέσματα των μελετών αυτών.

Στο κεφάλαιο 4 περιγράφονται οι τοπολογίες των Φ/Β συστημάτων που προσομοιώθηκαν, τα χαρακτηριστικά των πλαισίων της γείωσης και του εξωτερικού συστήματος αντικεραυνικής προστασίας που χρησιμοποιείται. Ακόμα, παρουσιάζονται οι τιμές των παραμέτρων που εξετάστηκαν.

Στο κεφάλαιο 5 γίνεται λεπτομερής περιγραφή και επεξήγηση των βασικών εφαρμογών του λογισμικού πακέτου SES-CDEGS και των βημάτων λειτουργίας που

χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση της εγκατάστασης αλλά και για τους υπολογισμούς που πραγματοποιήθηκαν.

Στο κεφάλαιο 6 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις προσομοιώσεις των τοπολογιών του τετάρτου κεφαλαίου. Συγκρίνεται το δυναμικό και οι επαγόμενες υπερτάσεις που υπολογίστηκαν για την διάφορες παραμέτρους που εξετάζονται με σκοπό την εκτίμηση της επίδρασής τους στην κεραυνική συμπεριφορά των Φ/Β συστημάτων.

Στο κεφάλαιο 7 συνοψίζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την σύγκριση των αποτελεσμάτων και προτείνονται λύσεις για την ασφαλέστερη λειτουργία των Φ/Β εγκαταστάσεων. Επίσης, διατυπώνονται προτάσεις για μελλοντική διερεύνηση του αντικειμένου.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά όλους όσους συνέδραμαν στην εκπόνηση αυτής της εργασίας και συγκεκριμένα:

Τον κ. Ιωάννη Φ. Γκόνο, Επίκουρο Καθηγητή του τομέα Ηλεκτρικών Βιομηχανικών Διατάξεων και Συστημάτων Αποφάσεων του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε με την ανάθεση της διπλωματικής εργασίας, την αμέριστη συμπαράστασή του και το άριστο κλίμα συνεργασίας που καλλιέργησε.

Την κα. Βασιλική Θ. Κονταργύρη, Διδάκτορα Ηλεκτρολόγο Μηχανικό του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου για την ουσιαστική βοήθεια που πρόθυμα και ακούραστα μου παρείχε κατά τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας.

Τον κ. Χρήστο Αθ. Χριστοδούλου, Διδάκτορα Ηλεκτρολόγο Μηχανικό του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου για τη καθοδήγηση, υποστήριξη και συμπαράστασή του.

Τον κ. Αναστάσιο Χ. Κυρίτση, Διδάκτορα Ηλεκτρολόγο μηχανικό και μέλος του ΚΑΠΕ για τις πολύτιμες γνώσεις που μου προσέφερε και την επικοινωνιακή συνεργασία.

Τέλος, ευχαριστώ το Θεό γιατί χωρίς Εκείνον δε θα μπορούσα να ολοκληρώσω τις σπουδές μου και την οικογένειά μου για την υποστήριξη που μου προσέφερε.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας ήταν η μελέτη της κεραυνικής συμπεριφοράς φωτοβολταϊκών συστημάτων. Με τη χρήση του λογισμικού CDEGS, έγινε σχεδιασμός και προσομοίωση φωτοβολταϊκής εγκατάστασης 100kWp ώστε να υπολογιστούν τα αναπτυσσόμενα δυναμικά στην επιφάνεια του εδάφους και στους αγωγούς της εγκατάστασης. Συγκεκριμένα υπολογίζεται το δυναμικό και οι επαγόμενες τάσεις λόγω κεραυνικών πληγμάτων για δύο περιπτώσεις γεωμετρίας των συστοιχιών. Επίσης, εξετάζεται η επίδραση καιρίων παραμέτρων (κλίση και πλάτος της κυματομορφής του κεραυνικού ρεύματος, ειδική αντίσταση του εδάφους, θέση έγχυσης του κεραυνού, περιμετρική γείωση) στα αποτελέσματα. Τέλος, τα αποτελέσματα αξιολογούνται με σκοπό να προταθεί κατάλληλη αντικεραυνική προστασία.

Λέξεις Κλειδιά: «Φωτοβολταϊκά συστήματα, κεραυνικό πλήγμα, επαγόμενες τάσεις, δυναμικό, CDEGS»

ABSTRACT

Subject of this thesis is lightning performance study of PV systems. Using CDEGS software, a 100kWp photovoltaic installation was designed and simulated in order to calculate potentials that develop on ground surface and wires of the system. More specifically, potential and induced overvoltages are calculated considering arrays of two different geometric structures. Furthermore, the effect of crucial parameters (lighting current waveform, soil resistivity, hit position and perimetric grounding) on the results is examined. Finally, results are evaluated for appropriate lightning protection to be suggested.

Keywords: “Photovoltaic systems, lightning surge, induced voltages, potential, CDEGS”

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ	5
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	7
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	9
ABSTRACT	11
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	13
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΔΟΜΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ	16
1.1 Αρχή λειτουργίας	16
1.2 Ισοδύναμο κύκλωμα Φ/Β κυττάρου	18
1.3 Υλικά και τρόποι σύνδεσης Φ/Β πλαισίων	19
1.4 Βασικοί τύποι φωτοβολταϊκών συστημάτων	22
1.4.1 Δομή των διασυνδεδεμένων κτηριακών Φ/Β συστημάτων	22
1.4.2 Διασυνδεδεμένα κτηριακά Φ/Β συστήματα υπό το καθεστώς Ανεξάρτητου Παραγωγού	25
1.4.3 Υβριδικά φωτοβολταϊκά συστήματα	26
1.5 Επιλογή τοποθεσίας εγκατάστασης του Φ/Β συστήματος.....	27
1.5.1 Προσανατολισμός των Φ/Β Πλαισίων.....	27
1.5.2 Προβλήματα σκιασμών.....	30
1.5.3 Στατική μελέτη & Υλικά στήριξης	32
1.5.4 Επιλογή του χώρου έδρασης των ηλεκτρονικών μετατροπέων	34
1.6 Σχεδίαση Φ/Β συστήματος	35
1.6.1 Χαρακτηριστικές ηλεκτρικές τιμές ενός Φ/Β συστήματος.....	35
1.6.2 Συνεργασία Φ/Β – Αντιστροφή.....	36
1.7 Εγκατάσταση συστήματος	37
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΚΕΡΑΥΝΙΚΑ ΠΛΗΓΜΑΤΑ ΣΕ Φ/Β ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ	40
2.1 Αξιολόγηση κινδύνου	40

2.2 Υπερτάσεις στην DC και AC πλευρά	43
2.3 Προστασία Φ/B εγκαταστάσεων έναντι υπερτάσεων	44
2.3.1 Σύστημα Αντικεραυνικής Πραστασίας (ΣΑΠ)	44
2.3.2 Απαγωγείς Υπερτάσεων (SPD)	49
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ	55
3.1 Μελέτες βάσει προτύπων	55
3.2 Μελέτες με χρήση λογισμικών πακέτων	61
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΤΟΠΟΛΟΓΙΕΣ.....	66
4.1 Εισαγωγή.....	66
4.2 Περιγραφή Φ/B Εγκατάστασης.....	66
4.2.1 Δομή Φ/B εγκατάστασης	66
4.2.2 Χαρακτηριστικά πλαισίων	67
4.2.3 Γείωση και Σύστημα αντικεραυνικής προστασίας.....	70
4.3 Εξεταζόμενες περιπτώσεις	71
4.3.1 Περίπτωση 1.....	71
4.3.2 Περίπτωση 2.....	71
4.4 Παράμετροι	74
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ.....	77
5.1 Εισαγωγή.....	77
5.2 Ευθύς Μετασχηματισμός Fourier του κεραυνικού ρεύματος	79
5.2.1 Εισαγωγή δεδομένων στον επιλύτη FFTSES.....	79
5.2.2 Προσομοίωση και εξαγωγή αποτελεσμάτων του FFTSES	84
5.3 Απόκριση συστήματος στο πεδίο της συχνότητας.....	87
5.3.1 Εισαγωγή δεδομένων στον επιλύτη HIFREQ.....	87
5.2.2 Προσομοίωση και εξαγωγή αποτελεσμάτων του HIFREQ	93
5.4 Απόκριση συστήματος στο πεδίο του χρόνου.....	97
5.4.1 Υπολογισμός αντίστροφου Fourier (IFFT).....	97

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	99
6.1 Επίδραση κυματομορφής κεραυνικού πλήγματος	99
6.2 Επίδραση εδάφους	102
6.3 Επίδραση της περιμετρικής γείωσης και της σύνδεσής της με τη βάση στήριξης	111
6.3.1 Έγχυση κεραυνικού πλήγματος στην ακίδα	111
6.6 Αντίστροφος Fourier για τις τάσεις επαφής.....	120
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	123
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	127

1

ΔΟΜΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

1.1 Αρχή λειτουργίας

Τα φωτοβολταϊκά (ή Φ/Β) συστήματα αποτελούν μια από τις πιο διαδεδομένες εφαρμογές των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, με τεράστιο ενδιαφέρον τόσο για την Ελλάδα όσο και για το εξωτερικό. Εκμεταλλευόμενο το φωτοβολταϊκό φαινόμενο, το φωτοβολταϊκό σύστημα παράγει ηλεκτρική ενέργεια από την ηλιακή.

Η απευθείας μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική επιτυγχάνεται με την βοήθεια των ηλιακών κυττάρων, των οποίων την αρχή λειτουργίας αποτελεί το φωτοβολταϊκό φαινόμενο. Η φωτοβολταϊκή μετατροπή στηρίζεται στις ιδιότητες των ημιαγωγικών υλικών όταν αυτά δεχτούν την ηλιακή ακτινοβολία. Αν η ενέργεια (E_{ph}) ενός φωτονίου που θα απορροφηθεί από τον ημιαγωγό είναι μεγαλύτερη από μία τιμή που καλείται ενεργειακό χάσμα (E_g), τότε δημιουργείται ένα ηλεκτρόνιο και μία οπή στον ημιαγωγό.

$$E_{ph} = hf = h \frac{c}{\lambda} \quad (1.1)$$

$$E_g = 1,1\text{eV για το Si}$$

όπου:

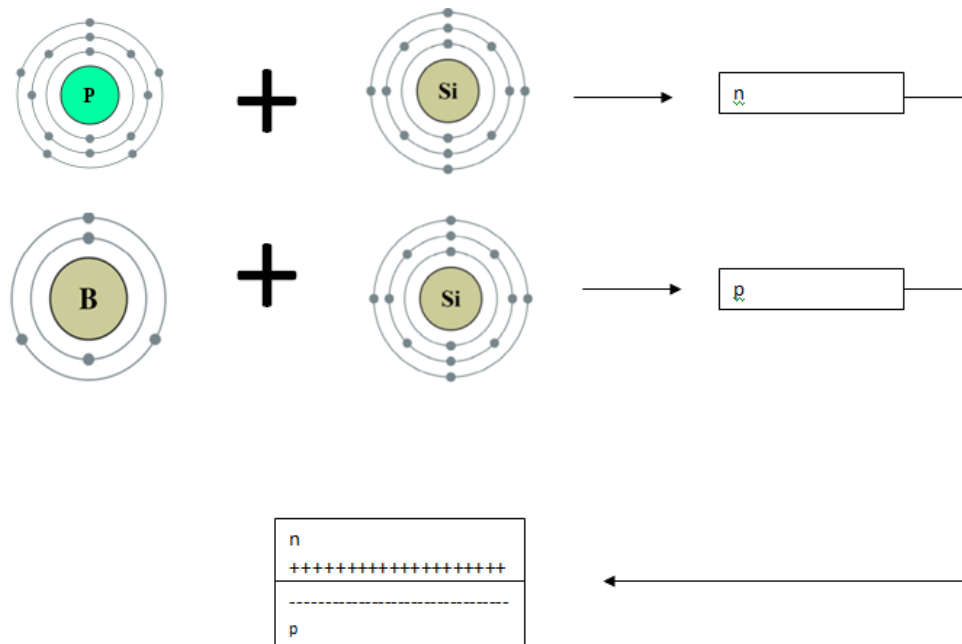
h = σταθερά του Plank

λ = μήκος κύματος

c = ταχύτητα του φωτός

Το άτομο του πυριτίου Si αποτελεί τον κυριότερο εκπρόσωπο των ημιαγωγών. Έχει 14 ηλεκτρόνια τοποθετημένα κατά τρόπο ώστε τα 4 εξωτερικά, που λέγονται και

ηλεκτρόνια σθένους, μπορούν να δοθούν, να γίνουν αποδεκτά ή να μοιραστούν με κάποιο άλλο άτομο. Αν προστεθεί σε κομμάτι πυριτίου φωσφόρος που έχει 5 ηλεκτρόνια στην εξωτερική του στοιβάδα, ενώνονται τα 4 με τα ηλεκτρόνια σθένους του πυριτίου και περισσεύει 1 ηλεκτρόνιο. Άρα έχω αγωγό τύπου n. Αν σε κομμάτι πυριτίου προστεθεί βόριο που έχει ηλεκτρόνια στην εξωτερική του στοιβάδα, ενώνονται με τα 3 ηλεκτρόνια σθένους του πυριτίου και περισσεύει 1 οπή και έχω αγωγό τύπου p. Αν ενωθούν τα δύο αυτά κομμάτια, αυτό που θα έχουμε στο σκοτάδι θα συμπεριφέρεται σαν δίοδος ενώ στο φως σαν φωτοβολταϊκό κύτταρο [1].



Σχήμα 1.1 Διάγραμμα σχηματισμού Φ/B κυττάρου [1]

Η διαχωριστική γραμμή που καλείται επαφή, αποτελεί την εστία δημιουργίας του φράγματος δυναμικού, βασικής προϋπόθεσης για την λειτουργία του ηλιακού κυττάρου. Σκοπός του φράγματος δυναμικού, είναι να κρατήσει την οπή στο τύπου p κομμάτι ενώ το ηλεκτρόνιο μπορεί, έχοντας την απαιτούμενη ενέργεια, να μεταβεί στο κομμάτι τύπου n με αποτέλεσμα τη δημιουργία διαφοράς δυναμικού, αφού πολλά φωτόνια δίνουν πολλά ηλεκτρόνια. Για να κινηθούν τα ηλεκτρόνια και να επιταχυνθούν προς την έξοδο, αρκεί να συνδεθεί μία αντίσταση και το αποτέλεσμα θα είναι η ροή ρεύματος [1].

1.2 Ισοδύναμο κύκλωμα Φ/Β κυττάρου

Όταν το κύτταρο δεν φωτίζεται τότε εφαρμόζεται η βασική εξίσωση μίας διόδου επαφής p-n:

$$I = I_0 \left(e^{qV/kT} - 1 \right) \quad (1.2)$$

Όπου:

I = το ρεύμα του κυττάρου

V = η τάση του κυττάρου

I_0 = το ρεύμα κόρου της διόδου

q = το φορτίο του ηλεκτρονίου, $1,6 \cdot 10^{-19}$ C

k = η σταθερά Boltzmann, $1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K

T = η απόλυτη θερμοκρασία [K]

Στην περίπτωση τώρα που το κύτταρο φωτίζεται, η εξίσωση ρεύματος είναι της μορφής:

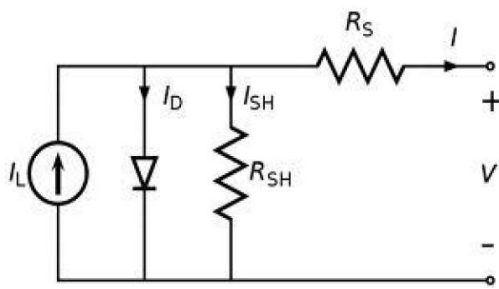
$$I = I_0 \left(e^{qV/kT} - 1 \right) - I_L \quad (1.3)$$

και I_L είναι το φωτόρευμα, το ρεύμα δηλαδή που παράγεται λόγω του προσπίπτοντος ηλιακού φωτός.

Η βασική εξίσωση, που προέκυψε θεωρητικά, δεν αντικατοπτρίζει με ικανοποιητική ακρίβεια τη I-V χαρακτηριστική ενός κυττάρου, η οποία στη συνέχεια βελτιώθηκε με τη βοήθεια πειραμάτων, ώστε να καταλήξει στην μορφή:

$$I = I_L - I_0 \left\{ \exp \left[\frac{q(V+IR_s)}{kT} \right] - 1 \right\} - \frac{V}{R_{SH}} \quad (1.4)$$

Το ισοδύναμο κύκλωμα φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί.



R_S : η αντίσταση όλων των καταναμημένων στοιχείων

A : οφείλεται σε φαινόμενα επανασύνδεσης, παίρνει τιμές 1-2

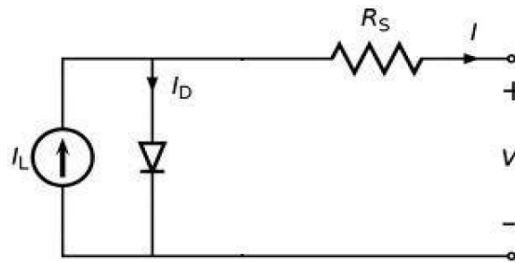
R_{SH} : οφείλεται σε διαρροές των φορέων

Σχήμα 1.2 Αρχικό ισοδύναμο κύκλωμα Φ/Β κυττάρου [1]

Λαμβάνοντας υπόψη ότι $R_{SH} \geq 1k\Omega$ άρα πρακτικά $R_{SH} = \infty$, η εξίσωση ρεύματος του κυττάρου παίρνει την τελική της μορφή, η οποία και χρησιμοποιείται στην πράξη [1]:

$$I = I_L - I_0 \left\{ \exp \left[\frac{q(V+IR_S)}{AkT} \right] - 1 \right\} \quad (1.5)$$

Επίσης, το ισοδύναμο κύκλωμα απλοποιείται όπως φαίνεται στο σχήμα 1.3.



Σχήμα 1.3 Τελικό ισοδύναμο κύκλωμα Φ/Β κυττάρου [1]

1.3 Υλικά και τρόποι σύνδεσης Φ/Β πλαισίων

Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια χωρίζονται σύμφωνα με τα υλικά κατασκευής τους σε δύο βασικές κατηγορίες:

α) Φωτοβολταϊκά Κρυσταλλικού πυριτίου

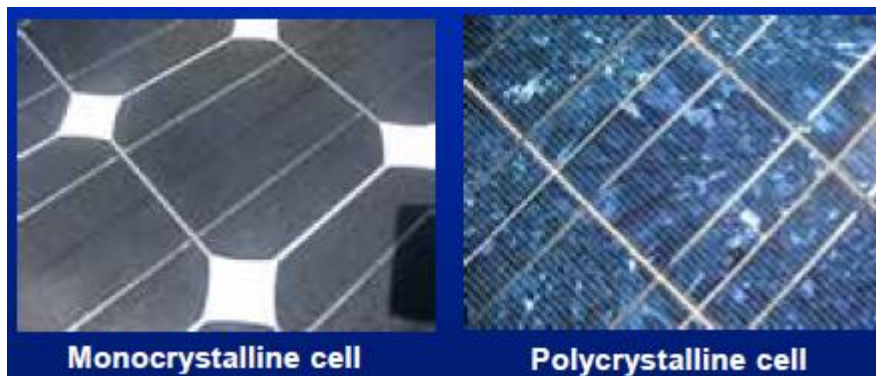
Μονοκρυσταλλικό πυρίτιο: Τα βασικά χαρακτηριστικά του είναι το υψηλό κόστος κατασκευής, η υψηλή απόδοση κυψέλης (16-18%) και συνεπώς υψηλός βαθμός απόδοσης πλαισίου (12-14%).

Πολυκρυσταλλικό πυρίτιο: Έχει χαμηλότερο κόστος κατασκευής σε σύγκριση με το μονοκρυσταλλικό, αλλά επίσης χαμηλότερος είναι και ο βαθμός απόδοσης του πλαισίου.

β) Φωτοβολταϊκά λεπτών μεμβρανών

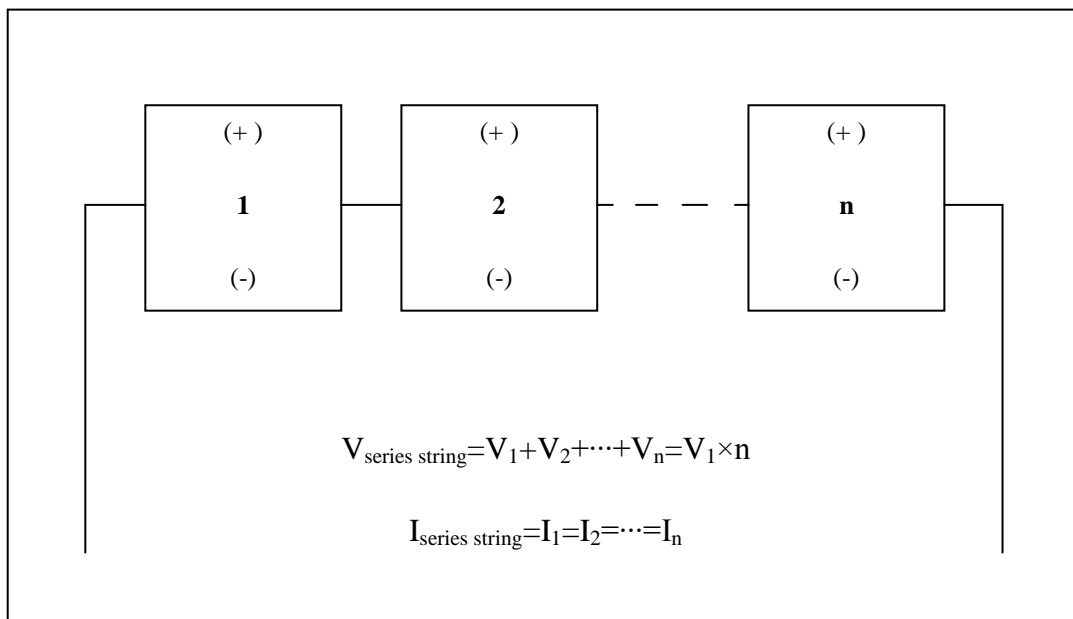
Άμορφο πυρίτιο: Έχει πολύ χαμηλότερο κόστος κατασκευής, και ανάλογα χαμηλότερη είναι και η απόδοση σε σχέση με το κρυσταλλικό. Ο βαθμός απόδοσής του είναι περίπου ο μισός σε σχέση με το κρυσταλλικό (8-9% ανά κυψέλη).

Χαλκοπυρίτιο: Η ονομαστική απόδοση του πλαισίου κυμαίνεται από 7% μέχρι 11% [3].

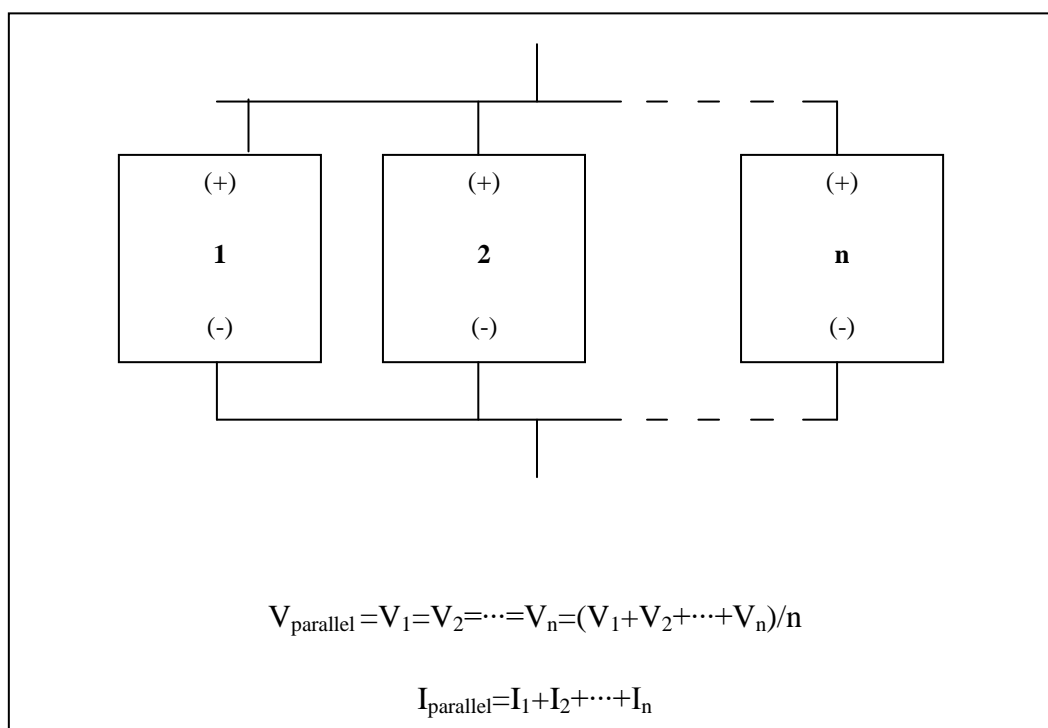


Σχήμα 1.4: Κυψέλες από μονοκρυσταλλικό (αριστερά) και πολυκρυσταλλικό (δεξιά) πυρίτιο [7].

Η μικρότερη δομική μονάδα μιας συστοιχίας είναι το πλαίσιο. Αυτό αποτελείται από περίπου 36 κύτταρα σε σειρά και αν συνδεθεί αλυσιδωτά με άλλα πλαίσια δημιουργεί ένα πάνελ. Η σύνδεση όλων των πάνελ μεταξύ τους αποτελεί την συστοιχία. Οι εν σειρά συνδέσεις κυττάρων διατηρούν το ρεύμα σταθερό, ενώ η τάση μεγαλώνει τόσες φορές όσο είναι το πλήθος των κυττάρων (σχήμα 1.3.2). Οι παράλληλες συνδέσεις διατηρούν την τάση σταθερή ενώ πολλαπλασιάζουν το ρεύμα με το πλήθος των κυττάρων (σχήμα 1.3.3) [1].



Σχήμα 1.5: Τα Φ/Β κύτταρα ή πλαίσια συνδέονται σε σειρά όταν οι αρνητικοί πόλοι συνδέονται με τους θετικούς των επομένων.



Σχήμα 1.6: Τα Φ/Β κύτταρα ή πλαίσια συνδέονται παράλληλα όταν γίνεται σύνδεση όλων των θετικών πόλων και όλων των αρνητικών.

1.4 Βασικοί τύποι φωτοβολταϊκών συστημάτων

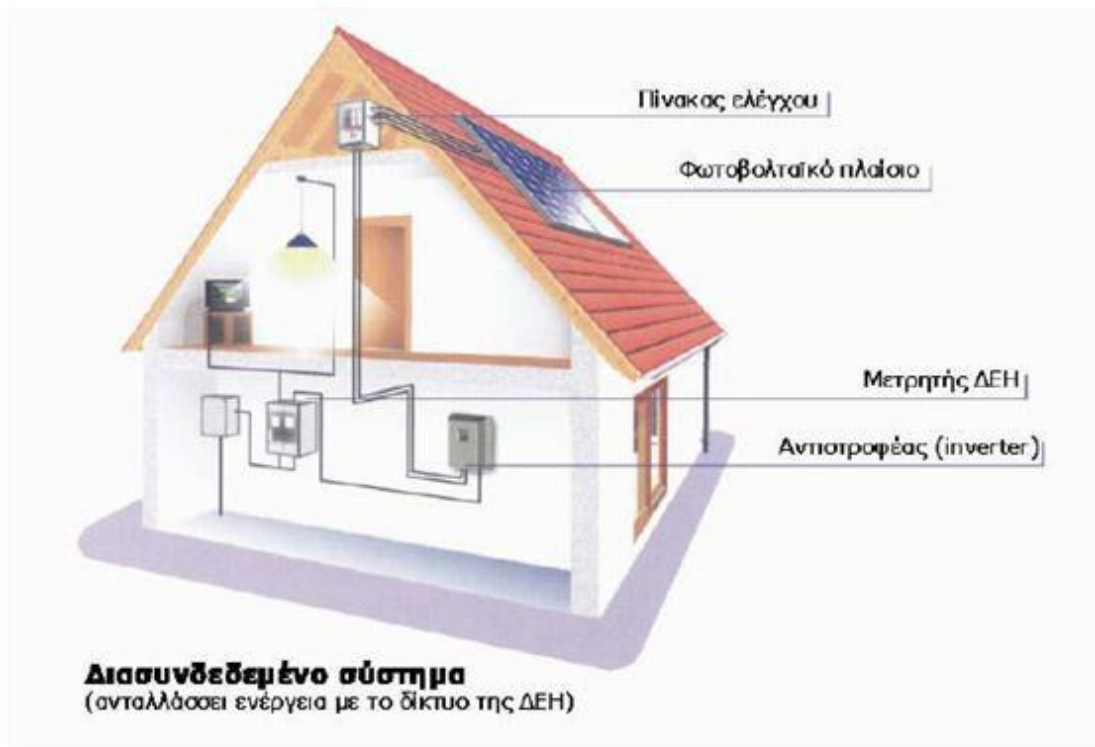
Υπάρχουν τρεις βασικοί τύποι φωτοβολταϊκών συστημάτων

- Διασυνδεδεμένα φωτοβολταϊκά συστήματα
- Αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα
- Υβριδικά φωτοβολταϊκά συστήματα

1.4.1 Δομή των διασυνδεδεμένων κτηριακών Φ/Β συστημάτων

Στα διασυνδεδεμένα με το δίκτυο φωτοβολταϊκά συστήματα, η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια από τα φωτοβολταϊκά, τροφοδοτεί τα ηλεκτρικά φορτία και η περίσσεια ηλεκτρικής ενέργειας, εφ' όσον υπάρχει, διαβιβάζεται και πωλείται στο δίκτυο. Στις περιπτώσεις, όμως, που η ενέργεια από τα φωτοβολταϊκά δεν επαρκεί για να καλύψει τα φορτία τότε το δίκτυο παρέχει τη συμπληρωματική ενέργεια. Έτσι στα διασυνδεδεμένα συστήματα υπάρχουν δύο μετρητές ηλεκτρικής ενέργειας. Ο ένας μετράει την ενέργεια που δίνεται στο δίκτυο και ο άλλος την ενέργεια που παρέχει το δίκτυο. Επίσης, στη περίπτωση των διασυνδεδεμένων συστημάτων δεν απαιτείται χρήση συσσωρευτών, γεγονός που ελαττώνει το αρχικό κόστος της εγκατάστασης, καθώς και το κόστος συντήρησης [2].

Κάθε Διασυνδεδεμένο Κτηριακό Φωτοβολταϊκό Σύστημα (BAPV/BIPV – Building Applied/Integrated Photovoltaics) μπορεί να αναλυθεί σε δύο επιμέρους δομικές μονάδες: τα φωτοβολταϊκά πλαίσια, τα οποία μετατρέπουν την ηλιακή ενέργεια σε ηλεκτρική και τον ηλεκτρονικό μετατροπέα, που αναλαμβάνει την προσαρμογή της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας στις προδιαγραφές του δικτύου χαμηλής τάσης. Ο αριθμός των χρησιμοποιούμενων Φ/Β πλαισίων καθορίζει τη μέγιστη παραγόμενη ισχύ, ενώ η εν σειρά και παράλληλη σύνδεση αυτών προσδιορίζει τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά (τιμές τάσης και ρεύματος) των μετατροπέων που θα χρησιμοποιηθούν. Επιπρόσθετα, η απρόσκοπτη λειτουργία της όλης εγκατάστασης απαιτεί τη χρήση ορισμένων βοηθητικών συστημάτων (Balance of System, B.O.S.), τα οποία εγγυώνται τόσο την ασφαλή διασύνδεση του μετατροπέα με τις Φ/Β γεννήτριες και το ηλεκτρικό δίκτυο όσο και τη στιβαρότητα της όλης εγκατάστασης σε μηχανικές καταπονήσεις.



Σχήμα 1.7 Διασυνδεδεμένο φωτοβολταϊκό σύστημα [3].

Κάθε Διασυνδεδεμένο Κτηριακό Φωτοβολταϊκό Σύστημα (BAPV/BIPV – Building Applied/Integrated Photovoltaics) μπορεί να αναλυθεί σε δύο επιμέρους δομικές μονάδες: τα φωτοβολταϊκά πλαίσια, τα οποία μετατρέπουν την ηλιακή ενέργεια σε ηλεκτρική και τον ηλεκτρονικό μετατροπέα, που αναλαμβάνει την προσαρμογή της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας στις προδιαγραφές του δικτύου χαμηλής τάσης. Ο αριθμός των χρησιμοποιούμενων Φ/Β πλαισίων καθορίζει τη μέγιστη παραγόμενη ισχύ, ενώ η εν σειρά και παράλληλη σύνδεση αυτών προσδιορίζει τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά (τιμές τάσης και ρεύματος) των μετατροπέων που θα χρησιμοποιηθούν. Επιπρόσθετα, η απρόσκοπτη λειτουργία της όλης εγκατάστασης απαιτεί τη χρήση ορισμένων βοηθητικών συστημάτων (Balance of System, B.O.S.), τα οποία εγγυώνται τόσο την ασφαλή διασύνδεση του μετατροπέα με τις Φ/Β γεννήτριες και το ηλεκτρικό δίκτυο όσο και τη στιβαρότητα της όλης εγκατάστασης σε μηχανικές καταπονήσεις.

Η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από τα φωτοβολταϊκά πλαίσια παρέχεται υπό τη μορφή συνεχούς τάσης και ρεύματος. Για να καταστεί εφικτή η τροφοδότηση του ηλεκτρικού δικτύου Ε.Ρ. με την ενέργεια που παράγεται από τα φωτοβολταϊκά, απαιτείται η διαμεσολάβηση κατάλληλων ηλεκτρονικών διατάξεων, των

αντιστροφών. Έχει επικρατήσει αυτές οι ηλεκτρονικές διατάξεις να ονομάζονται στο σύνολό τους ηλεκτρονικοί μετατροπείς ενώ το τμήμα τους που αναλαμβάνει τη διασύνδεση με το ηλεκτρικό δίκτυο και μετατρέπει τη συνεχή τάση σε εναλλασσόμενη ονομάζεται αντιστροφέας.

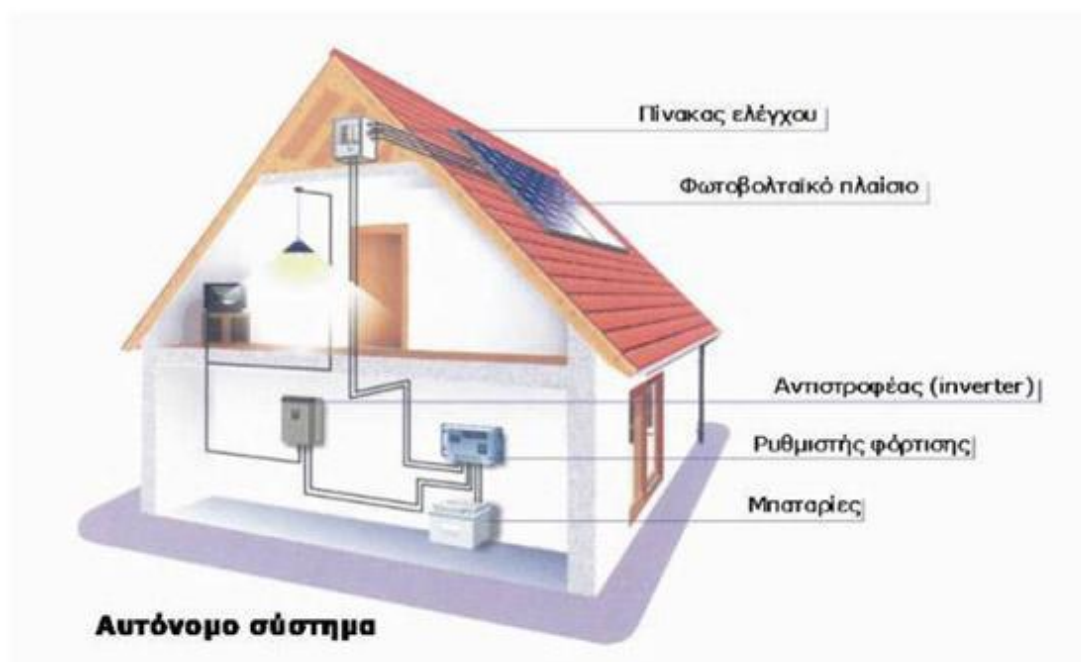
Όπως όλες οι ηλεκτρικές εγκαταστάσεις παραγωγής ή κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας που συνδέονται στο δίκτυο Ε.Ρ, έτσι και οι ηλεκτρονικοί μετατροπείς των διασυνδεδεμένων με το ηλεκτρικό δίκτυο Φ/Β συστημάτων, οφείλουν να υπόκεινται στις προδιαγραφές που ορίζονται από τους κανονισμούς και τα πρότυπα που έχουν θεσπιστεί ή υιοθετηθεί από τους Διαχειριστές των Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας και Δικτύων. Συγκεκριμένα, η σύνδεση μικρών διεσπαρμένων μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο Χαμηλής Τάσης (Χ.Τ.), θεωρείται αποδεκτή όταν η ενέργεια που παρέχεται στο ηλεκτρικό δίκτυο μέσω των ηλεκτρονικών μετατροπέων δεν επηρεάζει αρνητικά την ποιότητα ισχύος που παρέχεται στους άλλους συνδεδεμένους χρήστες (καταναλωτές ή παραγωγούς), δεν διαταράσσει την ορθή λειτουργία των μέσων ρύθμισης και προστασίας του δικτύου και δεν θέτει σε κίνδυνο πρόσωπα και εγκαταστάσεις.

Αξίζει να σημειωθεί ότι οι ηλεκτρονικοί μετατροπείς που διατίθενται στο εμπόριο είναι συνήθως εναρμονισμένοι με τους εν λόγω κανονισμούς και πρότυπα, ενώ παράλληλα διαθέτουν και τις απαιτούμενες προστασίες προκειμένου να επιτυγχάνεται η απρόσκοπτη παράλληλη λειτουργία τους με το ηλεκτρικό δίκτυο.

Ένας σημαντικός διαχωρισμός μεταξύ των ηλεκτρονικών μετατροπέων των διασυνδεδεμένων Φ/Β συστημάτων μπορεί να γίνει ανάλογα με το αν εμπεριέχουν μετασχηματιστή (Μ/Σ) σε κάποια από τις βαθμίδες τους. Στην περίπτωση που χρησιμοποιείται Μ/Σ, αυτός μπορεί να είναι υψίσυχνος (Μ/Σ φερρίτη) ή χαμηλόσυχνος (Μ/Σ σιδήρου). Η ύπαρξη Μ/Σ προσφέρει το πλεονέκτημα της γαλβανικής απομόνωσης του Φ/Β εξοπλισμού από το δίκτυο Ε.Ρ. Παρόλο που οι χαμηλόσυχνοι Μ/Σ επιφέρουν την αύξηση του όγκου και του βάρους της συνολικής κατασκευής, η παρουσία τους εγγυάται τη μηδενική έγχυση συνεχούς ρεύματος στο ηλεκτρικό δίκτυο. Αντίθετα στις υπόλοιπες τοπολογίες, ενδεχόμενες ασυμμετρίες του κυκλώματος ισχύος ή του κυκλώματος ελέγχου μπορούν να προκαλέσουν την εμφάνιση μιας μικρής συνιστώσας συνεχούς ρεύματος στην έξοδο των αντιστροφών[4].

1.4.2 Διασυνδεδεμένα κτηριακά Φ/Β συστήματα υπό το καθεστώς Ανεξάρτητου Παραγωγού

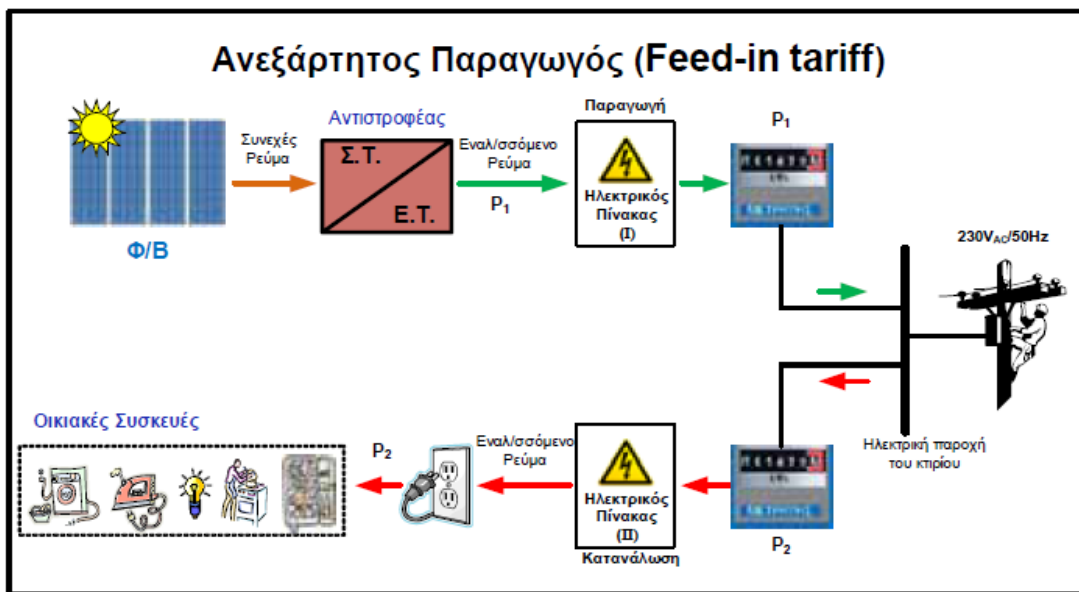
Σήμερα υπάρχει πληθώρα μικρών φωτοβολταϊκών συστημάτων σε κεραιές τηλεπικοινωνιακών σταθμών, εξοχικά σπίτια, αντλίες άντλησης νερού, χιονοδρομικά κέντρα, τροχόσπιτα, φάρους, μετεωρολογικούς σταθμούς, υπαίθρια φωτιστικά σώματα, σκάφη και άλλα τα οποία καθίστανται ενεργειακά αυτόνομα. Βέβαια υπάρχουν συστοιχίες συσσωρευτών, οι οποίες αποθηκεύουν την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια, ενώ σε περίπτωση που έχουμε φορτία εναλλασσομένου ρεύματος θα πρέπει να υπάρχει ένας αντιστροφέας στο σύστημα, ο οποίος θα μετατρέπει τη συνεχή σε εναλλασσόμενη τάση [3].



Σχήμα 1.8 Αυτόνομο φωτοβολταϊκό σύστημα [3].

Τα διασυνδεδεμένα κτηριακά Φ/Β συστήματα που εμπίπτουν στο πεδίο εφαρμογής της ΚΥΑ (ΦΕΚ Β' 1079, 4/6/2009) εντάσσονται στο καθεστώς του ανεξάρτητου παραγωγού (Feed in tariff). Δηλαδή, το σύνολο της ενέργειας που παράγεται από την ηλεκτροπαραγωγική μονάδα πωλείται στη ΔΕΗ και δεν χρησιμοποιείται για τη μερική ή ολική τροφοδότηση των φορτίων της κτηριακής εγκατάστασης (ιδιοκαταναλώσεις του κτηρίου).

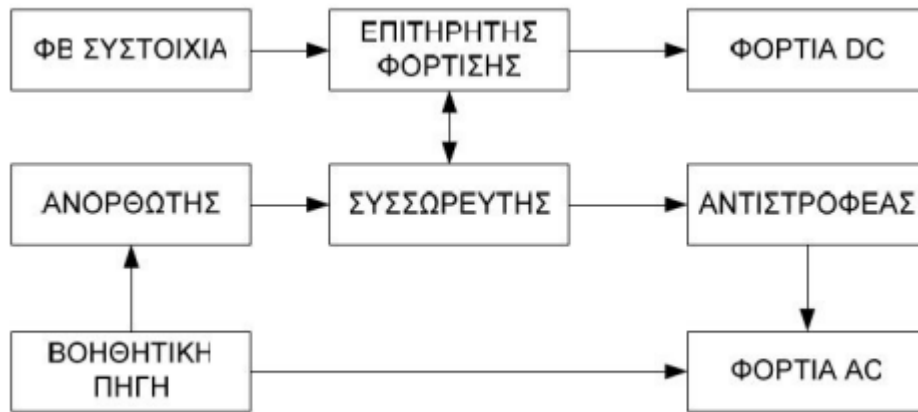
Η υλοποίηση της ηλεκτρικής εγκατάστασης (σχήμα 1.9) απαιτεί την εγκατάσταση δύο ξεχωριστών ηλεκτρικών πινάκων (ενός για τις ιδιοκαταναλώσεις του κτηρίου και ενός δεύτερου για τη σύνδεση της ηλεκτροπαραγωγικής μονάδας), οι οποίοι εν συνεχεία, συνδέονται στους μετρητές καταναλισκόμενης και αποδιδόμενης ενέργειας αντίστοιχα. Τόσο η ενέργεια που αποδίδει ο παραγωγός στο ηλεκτρικό δίκτυο όσο και αυτή που απορροφά από αυτό για τις ιδιοκαταναλώσεις του κτηρίου, μεταφέρονται πάντοτε μέσω της ίδιας ηλεκτρικής παροχής [4].



Σχήμα 1.9 Δομή ενός διασυνδεδεμένου κτηριακού Φ/Β συστήματος στην περίπτωση του ανεξάρτητου παραγωγού [4].

1.4.3 Υβριδικά φωτοβολταϊκά συστήματα

Όταν η απαιτούμενη ηλεκτρική ενέργεια δεν καλύπτεται από τη Φ/Β συστοιχία σε αυτόνομα Φ/Β συστήματα, τότε χρησιμοποιείται ο συνδυασμός της με κάποια άλλη πηγή ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτές οι πηγές μπορεί να είναι συμβατικών καυσίμων ή από Α.Π.Ε. Κυρίως χρησιμοποιούνται ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος ή ανεμογεννήτριες αντίστοιχα. Συχνά στα συστήματα αυτά προβλέπεται αποθήκευση της παραγόμενης ενέργειας.



Σχήμα 1.10: Υβριδικό Φ/Β σύστημα [8]

1.5 Επιλογή τοποθεσίας εγκατάστασης του Φ/Β συστήματος

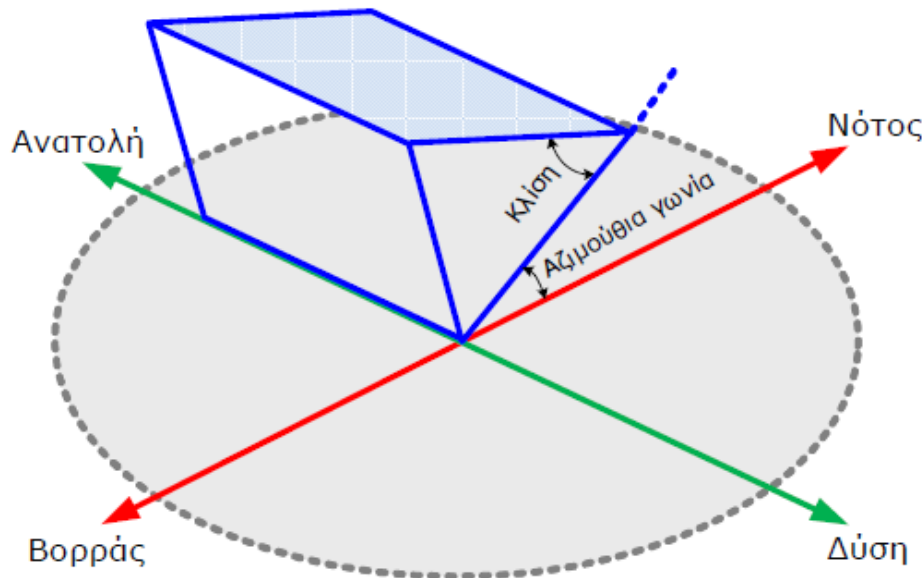
Στην περίπτωση των κτηριακών Φ/Β συστημάτων, η Φ/Β συστοιχία εγκαθίσταται στο δώμα ή τη στέγη του κτηρίου, σύμφωνα με την ΚΥΑ, ΦΕΚ Β' 1079, 4/6/2009. Επίσης, ως δυνατές επιφάνειες εγκατάστασης ορίζονται και τα στέγαστρα των βεραντών.

1.5.1 Προσανατολισμός των Φ/Β Πλαισίων

Για να είναι εφικτή η μεγιστοποίηση της ενεργειακής παραγωγικότητας των Φ/Β πλαισίων, θα πρέπει να επιτυγχάνεται βέλτιστη εκμετάλλευση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας. Συγκεκριμένα, εφόσον η πορεία του ήλιου αλλάζει τόσο με την ώρα της ημέρας, όσο και με τη μέρα του έτους, τεκμαίρεται πως για να παράγει ένα πλαίσιο τη μέγιστη ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας θα πρέπει να είναι σε θέση να περιστρέφεται ώστε να μπορεί να ακολουθεί την τροχιά του ήλιου και να είναι συνεχώς κάθετο στην κατεύθυνση της ακτινοβολίας.

Πρακτικά, η μηχανική πολυπλοκότητα και το κόστος ενός μηχανισμού που θα επέτρεπε την κίνηση των πλαισίων σύμφωνα με τον παραπάνω τρόπο, καθιστά εξαιρετικά δύσκολη και δαπανηρή την εφαρμογή του σε κτηριακά Φ/Β συστήματα. Έτσι στη πλειονότητα των κτηριακών Φ/Β συστημάτων επιλέγεται σταθερός προσανατολισμός των πλαισίων, ώστε να επιτυγχάνεται μέση ετήσια γωνία πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας όσο το δυνατό πιο κοντά στις 90°. Η

επίτευξη αυτού του στόχου έγκειται στην σωστή επιλογή της κλίσης και της αζιμούθιας γωνίας του πλαισίου. Η κλίση του πλαισίου εκφράζεται με τη γωνία που σχηματίζεται ανάμεσα στο επίπεδο της επιφάνειας του Φ/Β πλαισίου και το οριζόντιο επίπεδο, ενώ η αζιμούθια γωνία σχηματίζεται πάνω στο οριζόντιο επίπεδο ανάμεσα στην προβολή της κεκλιμένης πλευράς του πλαισίου και τον τοπικό μεσημβρινό βορρά-νότου, όπως φαίνεται στο σχήμα 1.11.



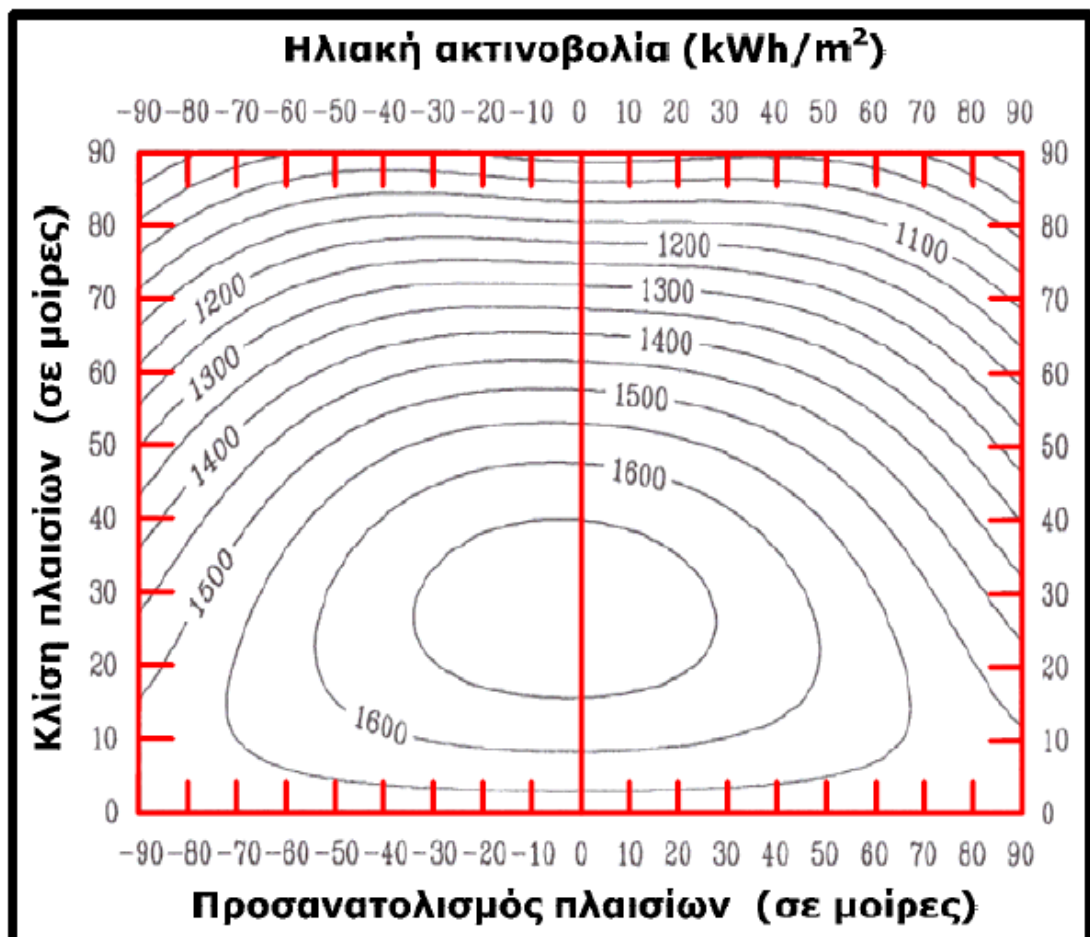
Σχήμα 1.11 Γραφική απεικόνιση της κλίσης και της αζιμούθιας γωνίας ενός Φ/Β πλαισίου που βρίσκεται στο Βόρειο ημισφαίριο [4].

Για το βόρειο ημισφαίριο η βέλτιστη κλίση του Φ/Β πλαισίου για τη μέγιστη παραγωγή καθ' όλη τη διάρκεια του έτους είναι ίση με τη γεωγραφική παράλληλο του τόπου και η αζιμούθια γωνία είναι περίπου 0° (κατεύθυνση προς νότο). Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί ότι στην Ελλάδα η μεγιστοποίηση της συνολικής ετήσιας ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει σε επιφάνεια σταθερής κλίσης, επιτυγχάνεται για Νότιο προσανατολισμό και κλίση περί των 30° .


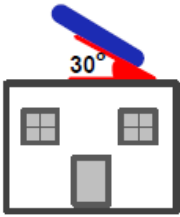
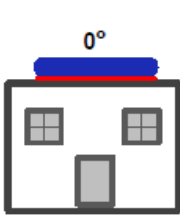
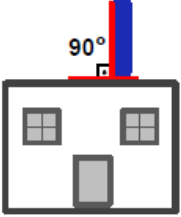
Δεδομένου ότι στην περίπτωση των κτηριακών Φ/Β εγκαταστάσεων οι βέλτιστες τιμές κλίσης και προσανατολισμού της Φ/Β συστοιχίας μπορεί να είναι ανέφικτες (λόγω των περιορισμών που προκύπτουν από τις δεδομένες διαθέσιμες επιφάνειες του κτηρίου), θα πρέπει να γίνει εκτίμηση της ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια στην οποία πρόκειται να εγκατασταθεί η Φ/Β συστοιχία. Η μείωση της ετήσιας ηλιακής ακτινοβολίας (στην επιφάνεια της Φ/Β συστοιχίας) συγκριτικά με τη

μέγιστη θεωρητική της τιμή (βέλτιστες τιμές κλίσης και προσανατολισμού) συνιστάται να μην υπερβαίνει το 10% προκειμένου να μεγιστοποιούνται τα οικονομικά οφέλη του ανεξάρτητου παραγωγού. Λαμβάνοντας υπόψη τους περιορισμούς που προκύπτουν από τις διαθέσιμες επιφάνειες των κτηρίων, προτιμώνται γενικά επιφάνειες νότιου προσανατολισμού με απόκλιση έως 70° από την κατεύθυνση του Νότου, και κλίσης στο εύρος 0° - 50° . Σημειώνεται ότι η χρήση γωνιών κλίσης άνω των 10° - 15° διευκολύνει τον αυτοκαθαρισμό των πλαισίων από σωματίδια σκόνης και άλλους ρύπους μέσω της βροχής.

Στα σχήματα 1.12 και 1.13 παρατίθενται ενδεικτικά η επίδραση της τιμής της κλίσης και του προσανατολισμού στην ηλεκτροπαραγωγική ικανότητα ενός κτηριακού Φ/Β συστήματος σε απόλυτες τιμές και σε επί τοις εκατό ποσοστά αντίστοιχα. Σε όλες τις περιπτώσεις υποθέτεται ότι δεν υπάρχουν σκιασμοί.



Σχήμα 1.12 Επίδραση της τιμής της κλίσης και του προσανατολισμού στην διαθέσιμη ηλιακή ακτινοβολία (kWh/m²/έτος) στο επίπεδο των ηλιακών πλαισίων ενός κτηριακού Φ/Β συστήματος στην Αττική [4].

 Προσανατολισμός	Κλίση ως προς το οριζόντιο επίπεδο		
	 30°	 0°	 90°
Ανατολικός - Δυτικός	85% kWh _(max)	90% kWh _(max)	50% kWh _(max)
Νότιοανατολικός - Δυτικός	95% kWh _(max)	90% kWh _(max)	60% kWh _(max)
Νότιος	kWh _(max)	90% kWh _(max)	60% kWh _(max)
Βόρειοανατολικός - Δυτικός	95% kWh _(max)	90% kWh _(max)	30% kWh _(max)
Βόρειος	60% kWh _(max)	90% kWh _(max)	20% kWh _(max)

Σχήμα 1.13 Επίδραση της τιμής της κλίσης και του προσανατολισμού στην ηλεκτροπαραγωγική ικανότητα ενός κτηριακού Φ/Β συστήματος (σε επί τοις εκατό ποσοστά) [4].

1.5.2 Προβλήματα σκιασμών

Ένας άλλος σημαντικός παράγοντας, ο οποίος επιδρά καθοριστικά στην ενεργειακή αποδοτικότητα ενός κτηριακού Φ/Β συστήματος, είναι η ύπαρξη σκιασμών. Λαμβάνοντας υπόψη ότι σε ένα Φ/Β πλαίσιο τόσο τα Φ/Β στοιχεία (ή μέρος αυτών) όσο και τα Φ/Β πλαίσια μιας στοιχειοσειράς συνδέονται μεταξύ τους εν σειρά, γίνεται κατανοητό ότι ακόμα κι ο σκιασμός ενός μέρους της Φ/Β συστοιχίας μπορεί να προκαλέσει σημαντική μείωση της παραγόμενης ισχύος συγκριτικά με την αναμενόμενη τιμή αυτής. Αναλυτικότερα, το συνολικό ρεύμα μιας στοιχειοσειράς Φ/Β πλαισίων καθορίζεται από το μειωμένο ρεύμα του σκιασμένου τμήματος της Φ/Β συστοιχίας. Βέβαια στην περίπτωση που ο σκιασμός περιορίσει την τάση του (των) σκιασμένου(ων) πλαισίου(ων) αρκετά χαμηλά ώστε να εισέλθει σε αγωγή η δίοδος παράκαμψης, το πλαίσιο αυτό εξαιρείται της ηλεκτροπαραγωγής.

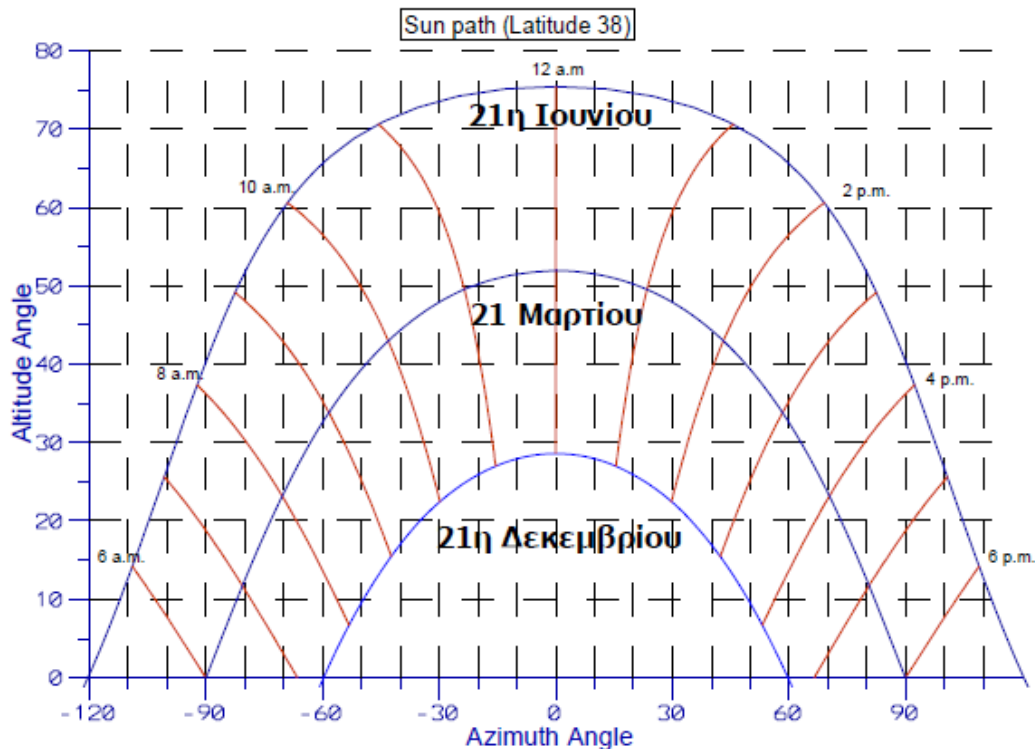
Από μια άλλη οπτική γωνία, μόνιμοι και επαναλαμβανόμενοι τοπικοί σκιασμοί σε ώρες υψηλής ακτινοβολίας δύναται να καταπονήσουν το σκιαζόμενο Φ/Β πλαίσιο, προκαλώντας την πρόωρη γήρανση αυτού. Συνεπώς είναι σημαντικό να αποφεύγονται σκιασμοί, έστω και από αντικείμενα μικρού όγκου όπως κολώνες, κεραίες ή ηλεκτρικά καλώδια ή, ακόμη περισσότερο, από δένδρα, παρακείμενα κτήρια κλπ.

Η επιλογή της θέσης έδρασης της Φ/Β συστοιχίας θα πρέπει να γίνεται κατά τέτοιο τρόπο ώστε να εξασφαλίζεται ότι δεν θα υπάρξουν σκιασμοί καθ' όλο το έτος και ειδικά τις ώρες υψηλής ηλιακής ακτινοβολίας. Εάν στην τοποθεσία έδρασης του Φ/Β εξοπλισμού υπάρχουν μόνιμοι ή επαναλαμβανόμενοι σκιασμοί (π.χ. σκίαση από παρακείμενα κτήρια, κολώνες, στηθαίο, κ.λπ.) για μεγάλο χρονικό διάστημα γύρω από το ηλιακό μεσημέρι (από 09:00 έως 15:00), τότε η θέση εγκατάστασης θεωρείται ακατάλληλη. Τέλος, για τη διασφάλιση της μακροχρόνιας απρόσκοπτης λειτουργίας του Φ/Β συστήματος θα πρέπει να εξετάζεται το ενδεχόμενο εμφάνισης μελλοντικών σκιασμών λόγω ανοικοδόμησης παρακείμενων κτηρίων. Εν κατακλείδι μπορούμε να πούμε ότι ο γενικός κανόνας ορθής τοποθεσίας έδρασης του Φ/Β εξοπλισμού είναι ο ορίζοντας προς Νότο να είναι ελεύθερος και χωρίς εμπόδια.

Για τον έλεγχο πιθανών σκιασμών καθ' όλο το έτος καλό είναι να χρησιμοποιηθεί ένα διάγραμμα τροχιάς του ήλιου, όπως αυτό που παρατίθεται στο σχήμα 1.5.4. Στο εν λόγω διάγραμμα σχεδιάζεται η θέση του ήλιου σε γωνιακές συντεταγμένες, για γεωγραφικό πλάτος 38° . Για διαφορετικό γεωγραφικό πλάτος στην Ελλάδα προκύπτει ελαφρά διαφορετικό διάγραμμα. Ο οριζόντιος άξονας στο σχήματος 1.14 αντιστοιχεί στην αζιμούθια γωνία του ήλιου, ήτοι την γωνία που σχηματίζεται πάνω στο οριζόντιο επίπεδο ανάμεσα στην προβολή της κατεύθυνσης του ήλιου και στον τοπικό μεσημβρινό βορρά-νότου (γωνιακή απόσταση του ήλιου από τη διεύθυνση του Νότου), ενώ ο κατακόρυφος άξονας αντιστοιχεί στη γωνία του ύψους του ήλιου, δηλαδή ανάμεσα στην κατεύθυνση του ήλιου και της προβολής της στο οριζόντιο επίπεδο [4].

Επί του διαγράμματος έχουν σχεδιασθεί ενδεικτικά η 21η Δεκεμβρίου, η 21 Μαρτίου και η 21η Ιουνίου, ενώ, επίσης, σημειώνονται επί των τροχιών και οι θέσεις του ήλιου για κάθε ώρα της ημέρας (σε τοπική ηλιακή ώρα). Με βάση το διάγραμμα του σχήματος 1.5.4 θα πρέπει να συγκριθούν τα περιγράμματα των εμποδίων (σε γωνιακές συντεταγμένες στο ίδιο σύστημα αξόνων) όπως φαίνονται από το δυσμενέστερο σημείο της Φ/Β συστοιχίας. Με τον τρόπο αυτό μπορούμε να

ελέγξουμε αν τα εμπόδια σκιάζουν την Φ/Β συστοιχία, δηλαδή αν η γωνία ύψους των εμποδίων είναι μεγαλύτερη από τη γωνία ύψους του ήλιου για την αντίστοιχη αζιμούθια γωνία [4].



Σχήμα 1.14 Διάγραμμα τροχιάς ήλιου σε Βόρειο γεωγραφικό πλάτος 38° μοιρών[4].

1.5.3 Στατική μελέτη & Υλικά στήριξης

Η έδραση των Φ/Β πλαισίων επί του κτηρίου μπορεί να υλοποιηθεί είτε πάνω σε πρόσθετη μεταλλική κατασκευή, είτε επί της επιφάνειας του δώματος, ή ακόμα και με την ενσωμάτωση των πλαισίων στο δομικό κέλυφος του κτηρίου. Αν και το βάρος της ίδιας της Φ/Β συστοιχίας και της βάσης στήριξης δεν αναμένεται να επηρεάσει την στατική αντοχή του κτηρίου, καλό είναι όταν η τοποθέτηση των πλαισίων γίνεται σε στέγαστρα ή σκεπές να διενεργείται στατικός έλεγχος (ή ακόμα και ειδική μελέτη όπου απαιτείται) ώστε να διερευνάται η μηχανική καταπόνηση και η ανεμοπίεση της επιφάνειας έδρασης των πλαισίων.

Τα Φ/Β πλαίσια τοποθετούνται σε ένα σύστημα στήριξης, εξασφαλίζοντας την απρόσκοπτη λειτουργία και την ασφάλεια της εγκατάστασης σε ακραίες συνθήκες ανέμου, χιονόπτωσης, σεισμού και θερμοκρασιακών μεταβολών. Οι ακραίες αυτές συνθήκες καθώς, ο συνδυασμός τους καθώς και οι αντίστοιχοι συντελεστές

ασφάλειας, προδιαγράφονται στους Ευροκώδικες (Eurocodes), παράλληλα με επιπρόσθετους ελέγχους, όπως για το σύνολο των δομικών κατασκευών. Για τη στατική επάρκεια του συστήματος στήριξης, μπορεί να ζητείται αντίστοιχο πιστοποιητικό από τον προμηθευτή.

Το σύστημα στήριξης μπορεί να είναι μέρος υαλοπετάσματος, να αποτελεί σύνδεσμο με τους φορείς μίας στέγης ή να αποτελεί ένα αυτοτελές σύστημα τοποθετημένο στο δώμα ή με τρόπο που να δημιουργεί σκίαστρο. Το σύστημα στήριξης μπορεί να είναι είτε μεταλλικό, από αλουμίνιο ή εν θερμώ γαλβανισμένο χάλυβα, είτε από πλαστικό (κυρίως όσο αφορά στην περίπτωση λεκανών στήριξης). Στο εμπόριο διατίθεται πληθώρα συστημάτων στήριξης. Σε κάθε περίπτωση θα πρέπει να δίνεται προσοχή στη συμβατότητά τους με τα λοιπά στοιχεία του εξοπλισμού και κατ' επέκταση στην εγκυρότητα των πιστοποιητικών στατικής επάρκειας επί του συνόλου της εγκατάστασης. Θα πρέπει ο τρόπος σύσφιξης των Φ/Β πλαισίων να είναι σύμφωνος με τις προδιαγραφές του συγκεκριμένου Φ/Β πλαισίου και επιπλέον οι διαστάσεις του πλαισίου να είναι αντίστοιχες (ή μικρότερες) με αυτές που έχουν θεωρηθεί στην στατική μελέτη για την έκδοση του πιστοποιητικού στατικής επάρκειας.

Όσον αφορά στη σύνδεση του συστήματος στήριξης με το κτήριο, και ειδικότερα αναφορικά με σύστημα στήριξης σε δώμα, θα πρέπει να εφαρμόζεται κατάλληλη αγκύρωση. Αυτή γίνεται κυρίως με την προσθήκη φορτίου, ή με τη χρήση κοχλιών. Στην πρώτη περίπτωση θα πρέπει το βάρος που θα τοποθετηθεί να είναι σύμφωνο με τη στατική μελέτη του κτηρίου. Στην περίπτωση χρήσεως κοχλιών, θα πρέπει να μην τραυματίζεται η υφιστάμενη μόνωση. Και στις δύο περιπτώσεις, όπως και στην περίπτωση άλλου συστήματος, παρέχονται οι προδιαγραφές για την αγκύρωση από τον προμηθευτή του συστήματος στήριξης. Ωστόσο η συμβατότητα με το κτήριο θα πρέπει να ελέγχεται από έναν μηχανικό.

Τέλος, ο εγκαταστάτης θα πρέπει να έχει υπόψη του την διαφοροποίηση των συστημάτων στήριξης και τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα που το διέπουν, συμπεριλαμβανομένων της ευκολίας εγκατάστασης, της αξιοπιστίας και των λειτουργικών στοιχείων (όπως η δυνατότητα ή όχι φυσικού αερισμού του πλαισίου)[4].

1.5.4 Επιλογή του χώρου έδρασης των ηλεκτρονικών μετατροπέων

Ένα από τα ζητήματα που χρήζουν προσοχής κατά το σχεδιασμό ενός κτηριακού Φ/Β συστήματος, είναι η επιλογή του χώρου έδρασης των ηλεκτρονικών μετατροπέων. Συνήθως, οι μετατροπείς των εν λόγω ηλεκτροπαραγωγικών μονάδων τοποθετούνται είτε στο εσωτερικό των κτηρίων που εγκαθίστανται, είτε σε ειδικά διαμορφωμένο κλειστό χώρο, ο οποίος μπορεί να βρίσκεται πλησίον του Φ/Β εξοπλισμού. Μάλιστα, στη δεύτερη περίπτωση μειώνεται σημαντικά το μήκος των ηλεκτρικών αγωγών Σ.Ρ. με άμεσο αποτέλεσμα τον περιορισμό των ηλεκτρικών απωλειών, της πτώσης τάσης, αλλά και του κόστους καλωδίωσης.

Βέβαια υπάρχουν και ηλεκτρονικοί μετατροπείς οι οποίοι σύμφωνα με τα τεχνικά φυλλάδια του κατασκευαστή μπορούν να εγκατασταθούν είτε κάτω από τα Φ/Β πλαίσια, είτε στο μηχανισμό στήριξης αυτών, εφόσον υπάρχει αρκετός χώρος. Λαμβάνοντας υπόψη ότι ο συγκεκριμένος τύπος έδρασης έχει ως αποτέλεσμα την άμεση έκθεση του μετατροπέα σε υψηλές θερμοκρασίες κατά τη διάρκεια των καλοκαιρινών μηνών, αλλά, σε ορισμένες περιοχές της Ελλάδας, και σε αρκετά χαμηλές κατά τη διάρκεια του χειμώνα, προτείνεται να εφαρμόζεται μόνο στις περιπτώσεις που το προβλέπει ο κατασκευαστής. Συγκεκριμένα, στο φυλλάδιο του κατασκευαστή θα πρέπει να αναζητηθεί ο δείκτης προστασίας (IP) του μετατροπέα από σωματίδια σκόνης και νερού, καθώς και τα όρια της θερμοκρασίας μέσα στα οποία δεν επηρεάζεται η ασφαλής και απρόσκοπτη λειτουργία του. Σε αντίθετη περίπτωση η υιοθέτηση του προαναφερθέντος τρόπου έδρασης μπορεί να επιφέρει μείωση του προσδόκιμου της διάρκειας ζωής του μετατροπέα. Επίσης, λαμβάνοντας υπόψη ότι η ψύξη του ηλεκτρονικού μετατροπέα επηρεάζεται σημαντικά από τις κλιματολογικές συνθήκες της περιοχής στην οποία είναι εγκατεστημένο το Φ/Β σύστημα (θερμοκρασία περιβάλλοντος, συνθήκες ηλιοφάνειας, υγρασία και άνεμος), γίνεται κατανοητό ότι στις περιπτώσεις που ο μετατροπέας τοποθετείται σε κλειστό χώρο πλησίον του Φ/Β εξοπλισμού ίσως είναι απαραίτητη η τοποθέτηση μηχανισμού εξαναγκασμένης ψύξης (ανεμιστήρες) [4].

1.6 Σχεδίαση Φ/Β συστήματος

Η σωστή σχεδίαση ενός Φ/Β συστήματος και η άρτια εγκατάστασή του επιβάλλονται ώστε να διασφαλίζεται η απρόσκοπτη λειτουργία της ηλεκτροπαραγωγικής μονάδας, τόσο από άποψη ασφάλειας, όσο και από άποψη ενεργειακής αποδοτικότητας.

1.6.1 Χαρακτηριστικές ηλεκτρικές τιμές ενός Φ/Β συστήματος

Τάση

Η μέγιστη αναμενόμενη τάση μιας στοιχειοσειράς είναι η συνολική τάση ανοικτού κυκλώματος των εν σειρά συνδεδεμένων πλαισίων για τη μικρότερη αναμενόμενη θερμοκρασία λειτουργίας.

Ένταση

Η μέγιστη αναμενόμενη τιμή του ρεύματος μιας στοιχειοσειράς, προκύπτει από το ρεύμα βραχυκύκλωσης του ενός πλαισίου πολλαπλασιασμένο επί τον συντελεστή 1.25. Για παράλληλους κλάδους η μέγιστη αναμενόμενη τιμή του συνολικού ρεύματος, προκύπτει από την αντίστοιχη τιμή του ενός κλάδου πολλαπλασιασμένη επί τον αριθμό των παράλληλων κλάδων. Ο συντελεστής ασφαλείας 1.25 καλύπτει ειδικές συνθήκες ατμόσφαιρας και ανακλάσεων οι οποίες μπορούν να παρουσιαστούν σε καθαρό ουρανό μετά από βροχή (ένταση ακτινοβολίας μεγαλύτερη από 1000W/m^2). Η τιμή του ρεύματος που υπολογίζεται με αυτό τον τρόπο θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στη διαστασιολόγηση των καλωδίων και των προστασιών.

Θερμοκρασία

Η μέγιστη αναμενόμενη θερμοκρασία λειτουργίας των Φ/Β πλαισίων, όπως και των κιβωτίων σύνδεσης αυτών, μπορεί να φθάσει τους 70°C , σε κατασκευές που επιτρέπουν την ελεύθερη κυκλοφορία του αέρα στην πίσω πλευρά των Φ/Β πλαισίων. Στις περιπτώσεις που εμποδίζεται η ελεύθερη κυκλοφορία του αέρα αναμένονται μεγαλύτερες θερμοκρασίες, έως και $80\text{-}90^\circ\text{C}$. Στην περίπτωση που οι αγωγοί διασύνδεσης των Φ/Β πλαισίων γειτνιάζουν με τα πλαίσια, η θερμοκρασία των τελευταίων θα πρέπει να ληφθεί σοβαρά υπόψη τόσο για την ορθή επιλογή της

μόνωσης των αγωγών, όσο και για την κατάλληλη επιλογή της διατομής τους (επιλογή σωστού διορθωτικού συντελεστή αύξησης διατομής) [4].

1.6.2 Συνεργασία Φ/B – Αντιστροφέα

Κατά τη σχεδίαση του συστήματος απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή στη συνεργασία μεταξύ της Φ/B συστοιχίας και του ηλεκτρονικού αντιστροφέα. Ο αντιστροφέας απαιτεί στην είσοδό του ένα συγκεκριμένο εύρος για την τάση λειτουργίας, έχοντας ένα ανώτατο όριο τάσης εισόδου. Το ανώτατο όριο δεν πρέπει να υπερβαίνεται, ώστε να μην υπάρξει κίνδυνος καταστροφής του αντιστροφέα. Συνεπώς, ο αριθμός των Φ/B πλαισίων που μπορούν να συνδεθούν εν σειρά (στοιχειοσειρά) υπολογίζεται έτσι ώστε να μην υπερβαίνονται τα όρια αυτά, σε όλες τις συνθήκες λειτουργίας.

Η τάση ενός Φ/B πλαισίου εξαρτάται σε σημαντικό βαθμό από τη θερμοκρασία λειτουργίας του. Οι τιμές τάσης, ρεύματος και ισχύος που δίνονται από τον κατασκευαστή, αναφέρονται στις πρότυπες συνθήκες δοκιμών (S.T.C). Σημειώνεται ότι η θερμοκρασία στην οποία διενεργήθηκαν οι μετρήσεις (του κατασκευαστή) είναι 25°C. Κατά συνέπεια τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των Φ/B πλαισίων πρέπει να διορθωθούν (αναχθούν) στις ακραίες θερμοκρασιακές συνθήκες λειτουργίας του Φ/B συστήματος. Αναλυτικότερα, από την ελάχιστη θερμοκρασία λειτουργίας των πλαισίων υπολογίζεται η μέγιστη τιμή της τάσης των αλυσίδων και από τη μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας των πλαισίων καθορίζεται η μέγιστη τιμή του ρεύματος των παράλληλων αλυσίδων (κλάδων).

Ο μέγιστος αριθμός Φ/B πλαισίων εν σειρά υπολογίζεται έτσι ώστε η συνολική τάση ανοικτού κυκλώματος της συστοιχίας στη μικρότερη αναμενόμενη θερμοκρασία λειτουργίας, να μην υπερβαίνει το ανώτατο όριο τάσης εισόδου του αντιστροφέα. Για τις πεδινές περιοχές της Ελλάδος ως ελάχιστη θερμοκρασία μπορεί να ληφθεί η τιμή -5°C η -10°C (θερμοκρασία λειτουργίας ενεργού υλικού του Φ/B πλαισίου). Συγχρόνως πρέπει να ελεγχθεί και η μέγιστη επιτρεπόμενη τάση λειτουργίας του Φ/B πλαισίου, η οποία ομοίως πρέπει να είναι μεγαλύτερη από την τάση ανοικτού κυκλώματος της στοιχειοσειράς στην μικρότερη αναμενόμενη θερμοκρασία λειτουργίας, ώστε να μην προκύψει πρόβλημα στη μόνωση του Φ/B πλαισίου.

Ο ελάχιστος αριθμός Φ/B πλαισίων εν σειρά ορίζεται έτσι ώστε η συνολική τάση βέλτιστης λειτουργίας της συστοιχίας στη μέγιστη αναμενόμενη θερμοκρασία

λειτουργίας να υπερβαίνει την ελάχιστη τάση του εύρους εισόδου του αντιστροφέα ώστε αυτός να ενεργοποιείται.

Αν ο κατασκευαστής παρέχει μόνο την τιμή του θερμοκρασιακού συντελεστή για την τάση ανοικτού κυκλώματος ($V/^\circ C$), τότε η ίδια τιμή μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για την τάση στο σημείο μέγιστης αποδιδόμενης ισχύος του Φ/Β πλαισίου, χωρίς σημαντικό σφάλμα.

Αν από την εν σειρά σύνδεση των Φ/Β πλαισίων δεν προκύπτει ισχύς κοντά στην ονομαστική ισχύ του αντιστροφέα, θα πρέπει να συνδεθούν περισσότεροι παράλληλοι κλάδοι (αποδεκτού αριθμού εν σειρά πλαισίων) ώστε η ισχύς της Φ/Β συστοιχίας να είναι κοντά στην ονομαστική ισχύ του αντιστροφέα.

Το ρεύμα λειτουργίας των παράλληλων κλάδων θα πρέπει να είναι χαμηλότερο από το μέγιστο όριο ρεύματος εισόδου του αντιστροφέα. Η συνολική ισχύς της Φ/Β συστοιχίας μπορεί και να υπερβαίνει την ονομαστική ισχύ του μετατροπέα. Για τις συνθήκες της Ελλάδας συνιστάται η ονομαστική ισχύς της Φ/Β συστοιχίας να μην υπερβαίνει το 110% της ονομαστικής ισχύος του αντιστροφέα.

Τέλος, ένα σημαντικό θέμα που πρέπει να λαμβάνεται υπ' όψιν είναι η συμβατότητα μεταξύ των τύπων των Φ/Β και του αντιστροφέα που σχετίζεται με την απαίτηση ή όχι για γείωση της συστοιχίας στην πλευρά Σ.Ρ. Πιο συγκεκριμένα, ορισμένοι τύποι Φ/Β πλαισίων απαιτούν σύμφωνα με τις κατασκευαστικές προδιαγραφές γείωση είτε του αρνητικού (Thin-film) είτε του θετικού (Back contact) πόλου. Η γείωση μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε απευθείας, είτε μέσω μεγάλης αντίστασης και αποσκοπεί στην αποφυγή λειτουργικών προβλημάτων που εμφανίζουν οι παραπάνω τύποι πλαισίων όταν παραμένουν αγείωτα (προβλήματα διάβρωσης και υποβάθμισης της απόδοσης). Κατά συνέπεια σε τέτοιες περιπτώσεις θα πρέπει να αποφεύγεται χρήση αντιστροφέων χωρίς γαλβανική απομόνωση, λόγω εμφάνισης ρευμάτων διαρροής, εκτός αν πιστοποιείται από τον κατασκευαστή του αντιστροφέα ότι ο επιλεγμένος τύπος αντιστροφέα είναι κατάλληλος για χρήση με τα πλαίσια που έχουμε επιλέξει [4].

1.7 Εγκατάσταση συστήματος

Για την άρτια υλοποίηση της ηλεκτροπαραγωγικής μονάδας θα πρέπει να ακολουθηθούν οι κανόνες της διεθνούς εμπειρίας και οι ισχύοντες κανονισμοί, έτσι

ώστε να αποφευχθούν καταστάσεις που θα μπορούσαν να θέσουν σε κίνδυνο ανθρώπινες ζωές ή να προκαλέσουν υλικές καταστροφές.

Αναλυτικότερα, για την υλοποίηση της εγκατάστασης στην πλευρά του Ε.Ρ, θα πρέπει να ακολουθηθούν οι κανονισμοί που απορρέουν από τον κανονισμό HD384. Αντίθετα, η υλοποίηση της εγκατάστασης στην πλευρά του Σ.Ρ. δεν καλύπτεται με την εφαρμογή του HD384. Ο λόγος είναι ότι τα φωτοβολταϊκά έχουν διαφορετικές ιδιότητες από τις συμβατικές πηγές. Οι ιδιαιτερότητες αυτές πηγάζουν από τη φύση των υλικών κατασκευής των Φ/Β στοιχείων και πρέπει να ληφθούν σοβαρά υπόψη προκειμένου για να σχεδιασθεί και να υλοποιηθεί σωστά ένα Φ/Β σύστημα.

Αναλυτικότερα:

Α) Λαμβάνοντας υπόψη τη φύση των Φ/Β στοιχείων, τεκμαίρεται πως τα Φ/Β πλαίσια συμπεριφέρονται σαν πηγές ρεύματος ελεγχόμενες από τάση. Μάλιστα η μέγιστη τιμή του ρεύματος ενός Φ/Β πλαισίου είναι ελάχιστα μεγαλύτερη από την τιμή του ονομαστικού ρεύματος του πλαισίου. Συνεπώς η χρήση ασφαλειών δεν εγγυάται τη διακοπή του συστήματος σε περίπτωση σφάλματος (βραχυκύκλωμα πλαισίου). Δηλαδή, ένα σφάλμα βραχυκύκλωσης στην πλευρά του Σ.Ρ. μπορεί να εξακολουθεί να υφίσταται, ανεξαρτήτως της χρήσης ασφαλειών εκτός από την περίπτωση που το Φ/Β σύστημα απαρτίζεται από περισσότερες από τρεις παράλληλες στοιχειοσειρές. Σε μια τέτοια δομή Φ/Β συστήματος οι ασφάλειες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την προστασία κάθε μιας ξεχωριστής στοιχειοσειράς.

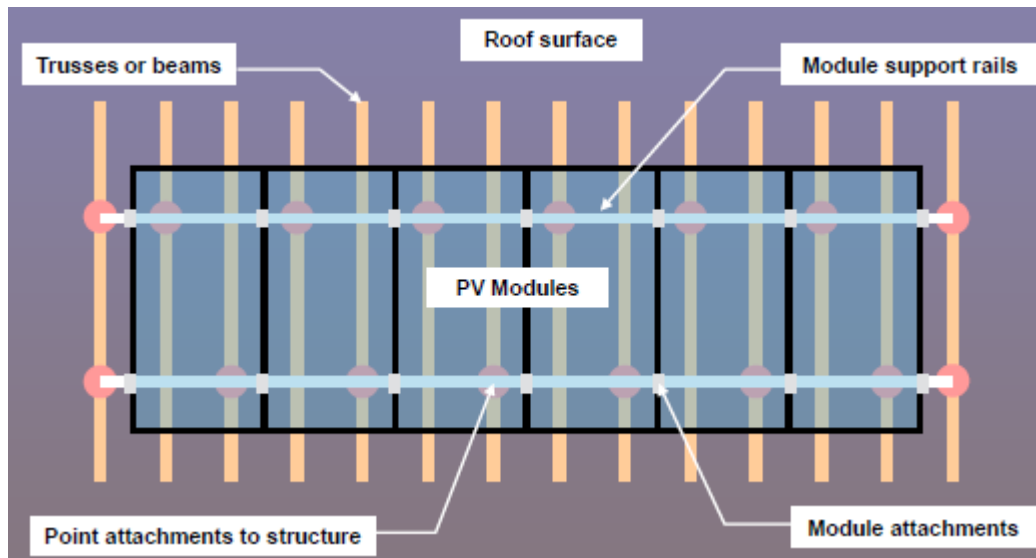
Β) Σε αντίθεση με τις περισσότερες ηλεκτροπαραγωγικές μονάδες όπου η παραγωγή ηλεκτρισμού μπορεί να διακοπεί με τη βοήθεια ενός γενικού μέσου απόζευξης, τα Φ/Β πλαίσια παράγουν τάση στους ακροδέκτες τους μόλις εκτεθούν στο ηλιακό φως. Συνεπώς, η εγκατάσταση ενός Φ/Β συστήματος πραγματοποιείται υπό συνθήκες τάσεως προς την πλευρά των πλαισίων.

Κατά την υλοποίηση της ηλεκτρικής εγκατάστασης στην μεριά του Σ.Ρ. μπορούν να προκύψουν ανεπιθύμητες καταστάσεις όταν:

Α) Υπάρχουν κακές ή χαλαρές συνδέσεις (δημιουργία ηλεκτρικού τόξου)

Β) Σφάλμα ως προς τη γη (καταστροφή μόνωσης και επαφή ενεργού αγωγού με γειωμένο μεταλλικό πλαίσιο ή εξοπλισμό στήριξης αυτού)

Γ) Σφάλμα βραχυκυκλώματος (σφάλμα μόνωσης και επαφή ενεργών αγωγών) [4]



Σχήμα 1.15: Δομική μελέτη Φ/Β συστημάτων συμπεριλαμβανομένων των συνδέσεων στήριξης [7].



Σχήμα 1.16: Τα Φ/Β πλαίσια συνδέονται συνήθως με βίδες ή σφυχτήρες σε ράβδους ή δοκούς στην κάτω επιφάνειά τους [7].



ΚΕΡΑΥΝΙΚΑ ΠΛΗΓΜΑΤΑ ΣΕ Φ/Β ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ

Οι Φ/Β εγκαταστάσεις, τόσο λόγω της θέσης τους (στις στέγες των σπιτιών, στις προσόψεις των κτιρίων ή σαν ανεξάρτητες μονάδες) καθώς επίσης και εξαιτίας της μεγάλης έκτασης που καταλαμβάνουν, είναι περισσότερο ευάλωτες στα άμεσα κεραυνικά πλήγματα και στις εισερχόμενες υπερτάσεις από τις συμβατικές μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Οι βλάβες που παρατηρούνται τόσο στην DC, όσο και στην AC πλευρά του συστήματος σε περίπτωση άμεσου κεραυνικού πλήγματος ποικίλουν. Για το λόγο αυτό, η μελέτη της αντικεραυνικής προστασίας στις εγκαταστάσεις αυτές είναι ιδιαίτερα σημαντική [1,5].

2.1 Αξιολόγηση κινδύνου

Οι πιθανές βλάβες από μια υπέρταση χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες [6]:

- D1: Τραυματισμός ζωντανών οργανισμών
- D2: Πρόκληση φυσικής βλάβης
- D3: Βλάβη σε ηλεκτρικά ή ηλεκτρονικά συστήματα

Οι βλάβες αυτές δύναται να προκαλέσουν τις εξής απώλειες [6]:

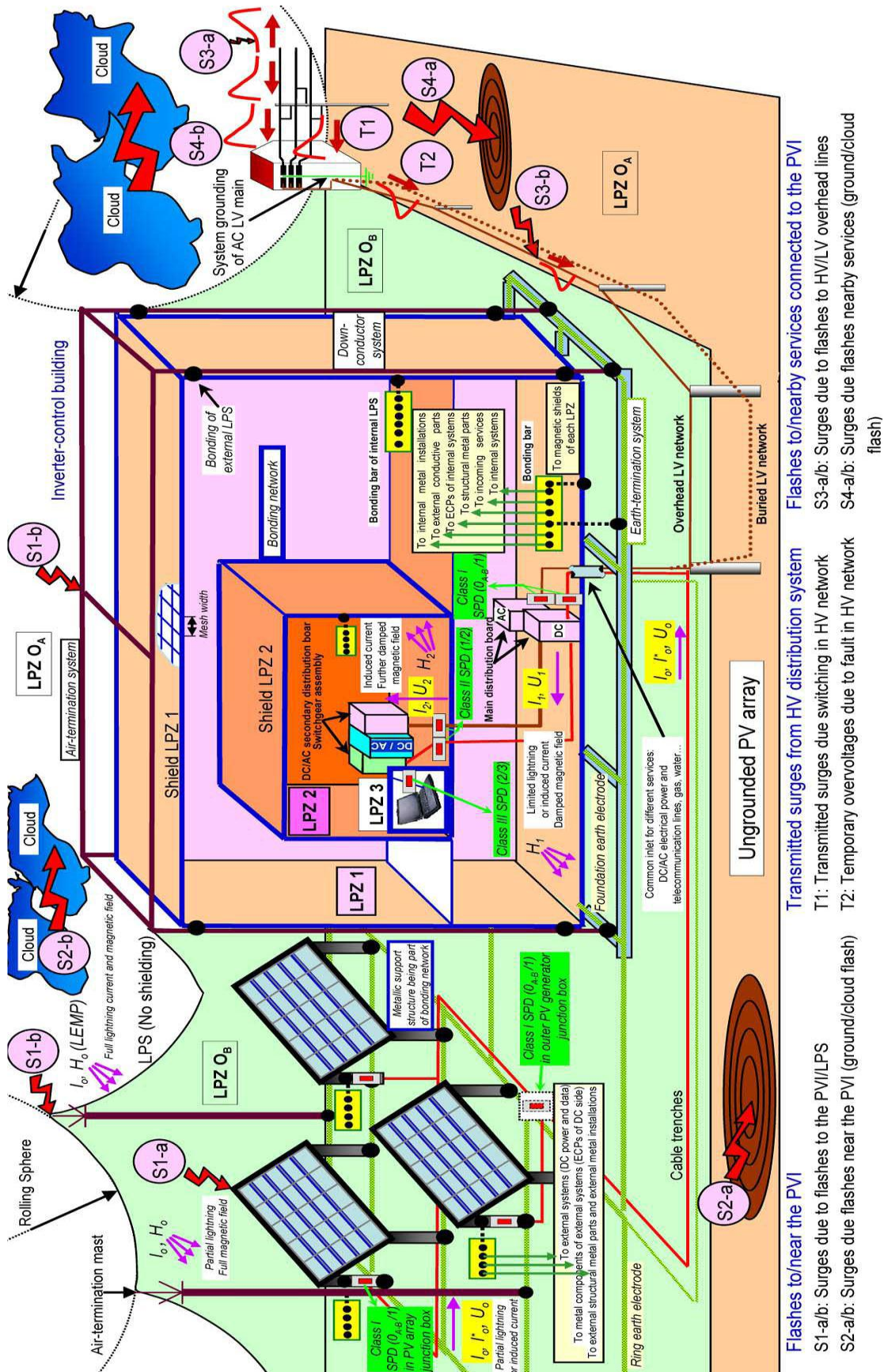
- L1: Απώλεια ανθρώπινης ζωής
- L2: Απώλεια σε δημόσιες παροχές
- L3: Απώλεια πολιτισμικής κληρονομιάς

- L4: Οικονομικές απώλειες

Όσον αφορά την πηγή τους, οι υπερτάσεις από κεραυνούς σε Φ/Β συστήματα χωρίζονται σε 4 ζώνες (ΖΑΠ: ζώνες αντικεραυνικής προστασίας) όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.1 [6]:

- S1: Λόγω πλήγματος κεραυνού στην Φ/Β γεννήτρια
- S2: Λόγω πλήγματος κεραυνού κοντά στη Φ/Β γεννήτρια
- S3: Λόγω πλήγματος κεραυνού σε γραμμές συνδεδεμένες με τη Φ/Β γεννήτρια
- S4: Λόγω πλήγματος κεραυνού κοντά σε γραμμές συνδεδεμένες με τη Φ/Β γεννήτρια

Για κάθε ζώνη ορίζεται ένα ελάχιστο και ένα μέγιστο επιτρεπτό ρεύμα κεραυνού. Η ελάχιστη τιμή του ρεύματος ορίζει την αποτελεσματικότητα σύλληψης της ζώνης, ενώ η μέγιστη τιμή ορίζει το επικίνδυνο ρεύμα του κεραυνού και της έντασης του μαγνητικού πεδίου που προκαλεί. Οι μηχανικές επιδράσεις του κεραυνού εξαρτώνται από την ειδική του ενέργεια (W/R) και το ρεύμα κορυφής του κεραυνού, οι θερμικές από την ειδική ενέργεια και το φορτίο και οι επαγόμενες από την μεταβολή του ρεύματος ως προς το χρόνο (di/dt). Η γνώση αυτών των παραμέτρων τόσο για το σύστημα αντικεραυνικής προστασίας, όσο και για όλα τα δίκτυα (ΜΤ, ΧΤ, νερού, αερίου κλπ.) είναι πολύ σημαντική για την επιτυχή επιλογή και διαστασιολόγηση των αγωγών γείωσης και των απαγωγέων υπερτάσεων [6].



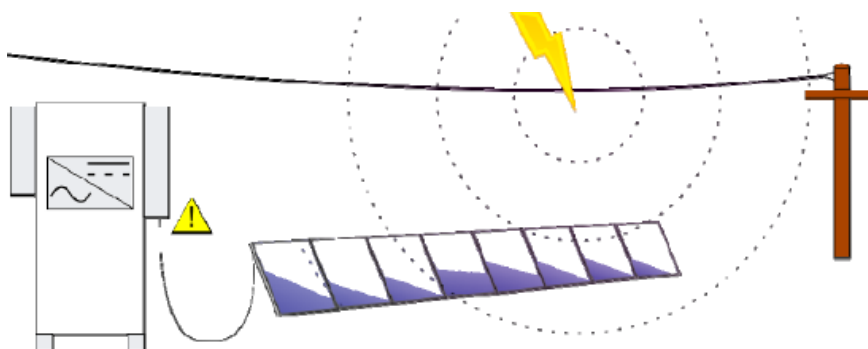
Σχήμα 2.1 Ζώνες αντικεραυνικής προστασίας και πηγές υπερτάσεων από κεραυνούς

[5].

2.2 Υπερτάσεις στην DC και AC πλευρά

Προσωρινές υπερτάσεις λόγω σφαλμάτων στο σύστημα είναι αμελητέες σε σχέση με αυτές που προκαλούνται από κεραυνούς. Όλα τα σφάλματα στην DC πλευρά της Φ/Β γεννήτριας πρέπει να αποζευκτούν σύντομα για την προστασία του προσωπικού και της εγκατάστασης σε δίκτυα TT και TN. Τέτοιες υπερτάσεις μπορούν να προκληθούν σε IT δίκτυα μόνο από σφάλματα γης, αλλά και πάλι κυμαίνονται σε αποδεκτά πλαίσια. Τα βασικά μοντέλα σύζευξης, όταν αναφερόμαστε σε υπερτάσεις από κεραυνό είναι τα εξής:

- **Γαλβανική ζεύξη:** Απευθείας πλήγμα κεραυνού σε γειωμένα, εκτεθειμένα, αγωγίμα μέρη της εγκατάστασης που μπορούν να προκαλέσουν καταστροφή της μόνωσης του Φ/Β εξοπλισμού. (Σχ. 2.1, S1-a)
- **Ωμική σύζευξη:** Απευθείας πλήγμα κεραυνού στην εξωτερική αντικεραυνική προστασία (Σχ. 2.1, S1-b), ή στο άμεσο περιβάλλον της Φ/Β γεννήτριας (Σχ. 2.1, S2-a)
- **Επαγωγική σύζευξη:** Η εκκένωση δημιουργεί μαγνητικό πεδίο γύρω από το κανάλι της εκκένωσης και του εξωτερικού συστήματος αντικεραυνικής προστασίας, το οποίο επάγει υπερτάσεις στους βρόχους της Φ/Β γεννήτριας. Αντίστοιχες υπερτάσεις μπορούν επίσης να επαχθούν και από έμμεσα κεραυνικά πλήγματα.



Σχήμα 2.2: Επίδραση επαγόμενου κεραυνικού ρεύματος στο μαγνητικό πεδίο

- **Χωρητική σύζευξη:** Το ηλεκτρικό πεδίο από τα σύννεφα μιας καταιγίδας δημιουργεί ένα διαχωρισμό φορτίου στα εκτεθειμένα αγωγίμα μέρη και τους ημιαγωγούς μιας Φ/Β εγκατάστασης. Ακριβώς τη στιγμή της εκκένωσης το ηλεκτρικό πεδίο καταρρέει και στη θέση του μεταφέρεται φορτίο, εν είδη μεταβατικής υπέρτασης, διαμέσου όλων των αγωγών γείωσης [6].

Στα φωτοβολταϊκά συστήματα, εγκαταστάσεις που συνδέονται με το δίκτυο (παροχές MT και YT, γραμμές τηλεπικοινωνιών) μπορούν πιθανά να αποτελέσουν δίοδο για υπερτάσεις που προέρχονται από εξωτερικούς παράγοντες. (Σχ. 2.1 T1, T2, S3-a/b, S4-a/b) [6].

2.3 Προστασία Φ/Β εγκαταστάσεων έναντι υπερτάσεων

2.3.1 Σύστημα Αντικεραυνικής Προστασίας (ΣΑΠ)

Σκοπός κάθε συστήματος αντικεραυνικής προστασίας (ΣΑΠ) είναι η ελαχιστοποίηση των πιθανών επιπτώσεων σε κτήρια και ζωντανούς οργανισμούς από άμεσο ή έμμεσο πλήγμα κεραυνού. Φυσικά, απόλυτη προστασία δεν είναι πότε εφικτή, οπότε υπάρχει πάντα ένας συμβιβασμός ανάμεσα στην επιθυμητή προστασία και στο κόστος της κατασκευής [6].

Στάθμη προστασίας

Η στάθμη προστασίας ενός ΣΑΠ σχετίζεται με την πιθανότητα με την οποία αυτό απαιτείται να προστατεύει ένα χώρο από τις επιπτώσεις του κεραυνού και κατατάσσει το ΣΑΠ σύμφωνα με την αποτελεσματικότητά του. Η σχέση μεταξύ στάθμης προστασίας και αποτελεσματικότητας, καθώς, επίσης, και οι τιμές των παραμέτρων του κεραυνού φαίνονται στους πίνακες 2.1 και 2.2.

Βασικοί παράγοντες που λαμβάνονται υπόψη για την επιλογή του κατάλληλου ΣΑΠ είναι η συχνότητα άμεσων κεραυνικών πληγμάτων (N_d) και η αποδεκτή συχνότητα κεραυνικών πληγμάτων (N_c) μιας κατασκευής. Η συχνότητα άμεσων κεραυνικών πληγμάτων υπολογίζεται από τον τύπο:

$$N_d = N_g \cdot A_e \cdot 10^{-6} \quad (2.1)$$

όπου N_g είναι η μέση ετήσια πυκνότητα πληγμάτων κεραυνού στο έδαφος και βρίσκεται από ειδικούς χάρτες και A_e είναι η συλλεκτήρια επιφάνεια, η οποία υπολογίζεται από κατάλληλα λογισμικά. Η αποδεκτή συχνότητα κεραυνικών πληγμάτων εκτιμάται με μεθόδους που ορίζει η IEC και εξαρτάται από παράγοντες όπως ο τύπος των υλικών και της δόμησης, η ύπαρξη εύφλεκτων ή εκρηκτικών

υλικών, το πλήθος των ανθρώπων που χρησιμοποιούν την κατασκευή, η σπουδαιότητα των υπηρεσιών που παρέχονται κ.λπ [6].

Στάθμες προστασίας	Αποτελεσματικότητα
P	E
I	0,98
II	0,95
III	0,90
IV	0,80

Πίνακας 2.1: Αποτελεσματικότητα σε σχέση με τη στάθμη προστασίας [1].

Παράμετροι κεραυνού	Σύμβολο	Μονάδα Μέτρησης	Στάθμη προστασίας		
			I	II	III-IV
Μέγιστη τιμή ρεύματος	I	kA	200	150	100
Ολικό φορτίο	Q_{total}	C	300	225	150
Κρουστικό φορτίο	$Q_{impulse}$	C	100	75	50
Ειδική ενέργεια	SE	kJ/Ω	10000	5600	2500
Μέση κλίση	di/dt	$\text{kA}/\mu\text{s}$	200	150	100

Πίνακας 2.2: Παράμετροι κεραυνικού ρεύματος σε σχέση με τη στάθμη προστασίας [1].

Επιλογή ΣΑΠ

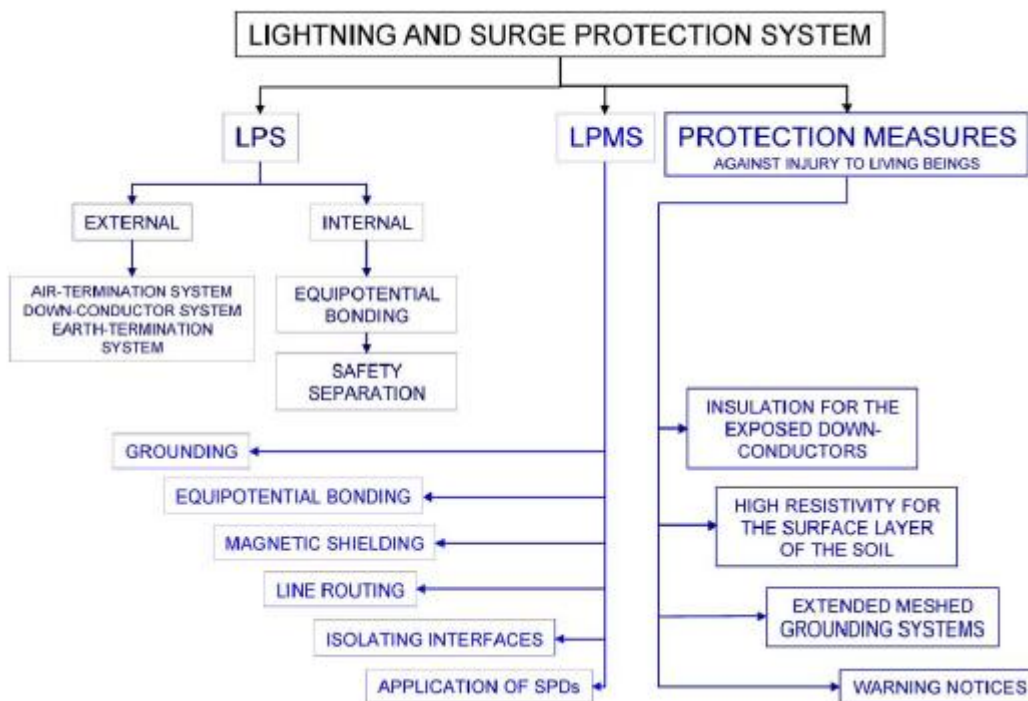
Πρώτος στόχος του ΣΑΠ είναι η προστασία του προσωπικού και της ανθρώπινης ζωής και από εκεί και πέρα η προστασία της εγκατάστασης και των εξαρτημάτων. Ένα ΣΑΠ αποτελείται από τρία μέρη: την εγκατάσταση αντικεραυνικής προστασίας, τα μέσα προστασίας απέναντι στις ηλεκτρομαγνητικές επιδράσεις του ρεύματος του κεραυνού και μέσα προστασίας έναντι ηλεκτροπληξίας. Ένα σχηματικό διάγραμμα των μέσων προστασίας δίνεται στο σχήμα 2.3.

Η επιλογή του κατάλληλου ΣΑΠ συνίσταται στον ορθό υπολογισμό του συνολικού κινδύνου R. Αυτός μπορεί να υπολογιστεί είτε με μεθόδους που περιγράφει η IEC, είτε με τη βοήθεια κατάλληλου λογισμικού. Ο κίνδυνος αυτός ορίζεται ως η πιθανότητα μιας ετήσιας βλάβης στο υπό προστασία κτήριο ή σε κάποιο εξάρτημα εντός του. Ο κίνδυνος εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως κίνδυνος

τραυματισμού από τάση επαφής ή βηματική τάση, κίνδυνος βλάβης από σπινθήρες, ή θερμικά φαινόμενα, αποτυχία των μέσων προστασίας κλπ. Κάθε συνιστώσα του κινδύνου υπολογίζεται από τη σχέση

$$R_x = N_x \cdot P_x \cdot L_x \quad (2.2)$$

όπου N_x είναι ο ετήσιος αριθμός επικίνδυνων γεγονότων, P_x είναι η πιθανότητα βλάβης στο κτήριο και L_x είναι η συνεπακόλουθη ετήσια απώλεια από χτύπημα ενός κεραυνού.



Σχήμα 2.3: Σύστημα προστασίας από κεραυνούς και υπερτάσεις [5].

Εξωτερική εγκατάσταση αντικεραυνικής προστασίας

Σκοπός της εξωτερικής εγκατάστασης αντικεραυνικής προστασίας είναι να ελαχιστοποιεί τις επιδράσεις από ένα πιθανό χτύπημα κεραυνού. Η εξωτερική εγκατάσταση αποτελείται από το συλλεκτήριο σύστημα (ράβδος ή πλέγμα αγωγών), τους αγωγούς καθόδου και τη γείωση (θαμμένο ηλεκτρόδιο, θεμελιακή γείωση κλπ.) και σκοπός της είναι να μεταφέρει ασφαλώς το ρεύμα του κεραυνού στη γη. Η IEC, στην οδηγία 62305-3, δίνει λεπτομερείς οδηγίες για το σχεδιασμό της εξωτερικής ΕΑΠ. Λαμβάνονται υπόψη η στάθμη της ΕΑΠ, η θέση της εγκατάστασης, η πιθανή χρήση άλλων δικτύων (πχ. νερού) τα υλικά κλπ και χρησιμοποιείται η μέθοδος της

γωνίας προστασίας, ή της κυλιόμενης σφαίρας, ή του πλέγματος αγωγών, με πιο συνηθισμένη τη δεύτερη. Στις Φ/Β εγκαταστάσεις η εξωτερική ΕΑΠ σχεδιάζεται έτσι ώστε όλα της τα τμήματα να βρίσκονται εντός της ΖΑΠ. Η Φ/Β γεννήτρια βρίσκεται μέσα στη ΖΑΠ 0β. Είναι σημαντικό η εξωτερική ΕΑΠ να σχεδιάζεται έτσι ώστε να μην σκιάζει τα γειτονικά Φ/Β πλαίσια και να αυξάνει την απόσταση ανάμεσα στη οδό διαφυγής του ρεύματος και στους πιθανούς βρόχους που σχηματίζουν τα πλαίσια έτσι ώστε να αποφευχθούν υπερτάσεις εξ επαγωγής [6].

Προστασία έναντι ηλεκτροπληξίας

Παρά την εξωτερική ΕΑΠ ο κίνδυνος για ηλεκτροπληξία είτε λόγω απευθείας επαφής, είτε λόγω βηματικής τάσης παραμένει υπαρκτός. Έτσι, συνίσταται η χρήση εκτεταμένου συστήματος γείωσης, η χρήση επαρκούς μόνωσης για τους αγωγούς καθόδου, υψηλή αντίσταση για το επιφανειακό στρώμα του εδάφους και προειδοποιητικών πινακίδων.

Εσωτερική εγκατάσταση αντικεραυνικής προστασίας

Στόχος της εσωτερικής ΕΑΠ είναι ο περιορισμός των ανεπιθύμητων ηλεκτρομαγνητικών επιδράσεων του ρεύματος του κεραυνού στο εσωτερικό της Φ/Β εγκατάστασης.

- **Σύστημα γείωσης:** Στόχος του συστήματος γείωσης είναι να διαχέει το ρεύμα του κεραυνού στη γη έτσι ώστε να μη δημιουργούνται επικίνδυνες υπερτάσεις, να συνδέει ισοδυναμικά τους αγωγούς καθόδου, να περιορίζει την ανύψωση του δυναμικού στο έδαφος στην περιοχή του και να αναχαιτίζει τον κεραυνό στην περίπτωση επιφανειακής διάσπασης του εδάφους. Είναι σαφώς προτιμότερο να εγκαθίσταται ένα ενιαίο σύστημα γείωσης τόσο για τη DC πλευρά της Φ/Β γεννήτριας, όσο και για το κτήριο ελέγχου. Σε διαφορετική περίπτωση, αν δηλαδή χρησιμοποιηθεί ξεχωριστό ηλεκτρόδιο γείωσης στη DC πλευρά, πρέπει αυτό να είναι συνδεδεμένο με τη θεμελιακή γείωση του κτηρίου προκειμένου να αποφευχθεί η εμφάνιση διαφοράς δυναμικού ανάμεσα στα δύο αυτά συστήματα.
- **Μαγνητική θωράκιση:** Σκοπός της μαγνητικής θωράκισης είναι να μειώσει το μαγνητικό πεδίο που προέρχεται από κεραυνικά πλήγματα μέσα ή κοντά στην Φ/Β εγκατάσταση, ώστε το αρχικό μαγνητικό πεδίο H_0 να εξασθενήσει

στα H1 και H2, που έχουν σαφώς χαμηλότερη τιμή. (σχ. 2.1). Στο ίδιο σχήμα φαίνεται πως αρχικά όλο το κτήριο αποτελεί το πρώτο επίπεδο θωράκισης και μέσα σε αυτό δημιουργείται ένα δεύτερο επίπεδο, σε ένα ξεχωριστό δωμάτιο, το οποίο περικλείει τον ευαίσθητο Φ/Β εξοπλισμό. Τέλος, μια περιορισμένη με ειδική κατασκευή ή κάλυμμα περιοχή του δωματίου περιέχει τη συσκευή ελέγχου και παρακολούθησης. Χαλύβδινη ενίσχυση και μεταλλικές προσόψεις περιβάλλουν τα κτήρια και τα δωμάτια. Όταν η Φ/Β γεννήτρια περιέχει πάνελ συνδεδεμένα με το εξωτερικό ΣΑΠ, τότε είναι απαραίτητη η θωράκιση των καλωδίων της. Σε εξωτερικές ζώνες όμως συνίσταται πάντα η θωράκιση των καλωδίων για μήκη μεγαλύτερα από 15-20m. Κάτι τέτοιο δεν είναι απαραίτητο στις εσωτερικές ζώνες, εκτός και αν τα καλώδια προστατεύουν ευαίσθητο εξοπλισμό. Στην περίπτωση που τα καλώδια των εισερχόμενων παροχών είναι θωρακισμένα και η θωράκιση είναι γειωμένη και στα δύο άκρα τους, το ρεύμα από κεραυνικό πλήγμα διαρρέει τη θωράκιση τους και έτσι υπάρχει ο κίνδυνος εμφάνισης υπέρτασης μεταξύ του ενεργού αγωγού και του καλωδίου. Σε αυτήν την περίπτωση πρέπει να χρησιμοποιείται καλώδιο κατάλληλης διατομής, προκειμένου να αποφευχθεί η χρήση απαγουέα υπέρτασης.

- **Δρομολόγηση καλωδίων:** Η σωστή δρομολόγηση των καλωδίων αποτελεί ένα από τα σπουδαιότερα σημεία για μια εγκατάσταση. Μια σωστά μελετημένη όδευση ελαχιστοποιεί τις περιοχές επαγόμενων τάσεων που δημιουργούνται από τους βρόχους που σχηματίζουν τα καλώδια, περιορίζοντας έτσι τις πιθανές εσωτερικά επαγόμενες υπερτάσεις. Ελαχιστοποίηση των περιοχών των βρόχων μπορεί να επιτευχθεί οδηγώντας τους αγωγούς όσο το δυνατόν πιο κοντά στους προστατευτικούς αγωγούς συνδέσεων ή οδηγώντας τις ηλεκτρικές και τις γραμμές σήματος μαζί. Τα καλώδια σε μια Φ/Β εγκατάσταση πρέπει να εγκαθίστανται με τέτοιο τρόπο, ώστε να ακολουθούν τις μικρότερες δυνατές διαδρομές, τα καλώδια στη DC πλευρά πρέπει να οδεύουν μαζί και τέλος, πρέπει να περιορίζονται κατά το δυνατόν κλειστές περιοχές καλωδίων [6].

2.3.2 Απαγωγείς Υπερτάσεων (SPD)

Οι απαγωγείς υπερτάσεων εγκαθίστανται με σκοπό την προστασία της Φ/Β εγκατάστασης από ανεπιθύμητες υπερτάσεις και η λειτουργία τους βασίζεται είτε στην αποκοπή της υπέρτασης, είτε στον περιορισμό της σε αποδεκτή τιμή. Φυσικά ένας και μόνο απαγωγέας δεν επαρκεί για την πλήρη και αποτελεσματική προστασία της εγκατάστασης, καθώς σε διάφορα σημεία της απαιτείται και διαφορετικός βαθμός προστασίας. Έτσι για τη σωστή και αποτελεσματική εφαρμογή τους απαιτείται η μελέτη συντονισμού της μόνωσης.

Κλάσεις απαγωγών υπέρτασης

Οι απαγωγείς υπέρτασης ανάλογα με το επίπεδο προστασίας που παρέχουν και τα τεχνικά χαρακτηριστικά τους διακρίνονται από την IEC [12] σε τρεις κλάσεις.

- **Κλάση I:** 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 ΧΤ, ή οι είσοδοι εγκαταστάσεων κοινής ωφέλειας. Οι διατάξεις αυτής της κλάσης καλούνται συνήθως «αλεξικέραυνα».
- **Κλάση II:** Συμπεριλαμβάνει 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 ΧΤ.
- **Κλάση III:** Σε αυτήν την κλάση υπάγονται διατάξεις στις οποίες απαιτείται μειωμένη προστασία έναντι υπερτάσεων λόγω χειρισμών, όπως οι συσκευές εντός της κατασκευής.

Διάφοροι κατασκευαστές προτείνουν και έναν τύπο απαγωγέα κλάσης I+II ο οποίος συνδυάζει τα χαρακτηριστικά των δύο πρώτων κλάσεων και μπορεί να χρησιμοποιηθεί αντί αυτών. Οι απαγωγείς κλάσης I+II ελέγχονται με κυματομορφή 10/350. Ακόμα, ελέγχονται και με κυματομορφή 8/20, όπως και οι απαγωγείς κλάσης I, προκειμένου να προστατεύουν από υπερτάσεις χαμηλής ενέργειας, προερχόμενες από κεραυνικό πλήγμα, ή διακοπτικές λειτουργίες. Οι απαγωγείς κλάσης I+II διαθέτουν υψηλότερο επίπεδο προστασίας (V_p) από τους απαγωγείς κλάσης I, πράγμα που τους καθιστά κατάλληλους για την προστασία οποιουδήποτε

ηλεκτρικού ή ηλεκτρονικού εξοπλισμού που βρίσκεται μέσα στην απόσταση προστασίας τους.

Περιοχές Προστασίας

Το πρότυπο IEC 62305 εισήγαγε την έννοια των περιοχών προστασίας από κεραυνικά πλήγματα (LPZ) με σκοπό να βοηθήσει την επιλογή της κατάλληλης προστασίας από τις υπερτάσεις (σχήμα 2.4). Η έννοια αυτή διασφαλίζει την προοδευτική μείωση ανά στάδια των ενεργειών και της υπέρτασης που προκαλούνται από την κεραυνική δραστηριότητα. Αυτή η συντονισμένη προστασία των ξεχωριστών περιοχών ενός κτιρίου ονομάζεται “προοδευτική προστασία”.

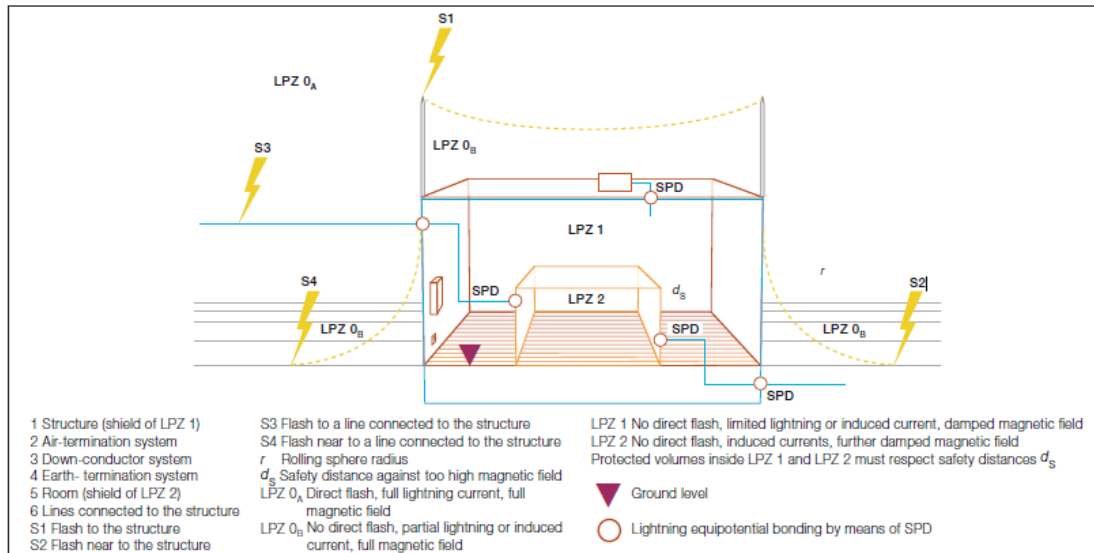
Εξωτερικές περιοχές:

- LPZ 0A Απροστάτευτη περιοχή εκτός κτιρίου υποκείμενη σε κεραυνικά πλήγματα που αναμένεται να αντιμετωπίσει το πλήρες ρεύμα και το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο του κεραυνού.
- LPZ 0B Περιοχή προστατευμένη κατά των άμεσων κεραυνικών πληγμάτων από εξωτερικό ΣΑΠ. Οι υπερτάσεις προέρχονται από το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο του ρεύματος παροχέτευσης προς τη γη.

Εσωτερικές περιοχές:

Περιοχές εντός του κτιρίου οι οποίες προστατεύονται κατά των άμεσων κεραυνικών πληγμάτων.

- LPZ 1 Περιοχή υποκείμενη σε μερική κεραυνοπληξία ή ρεύματα υπέρτασης. Οι απαγωγείς υπερτάσεων κλάσης 1 θα πρέπει να τοποθετούνται στο όριο μεταξύ LPZ 0A και LPZ 1 για να μειώνουν την είσοδο ρευμάτων κεραυνού μέσω γραμμών ηλεκτρικού ρεύματος.
- LPZ 2...n Περιοχή όπου το ρεύμα υπέρτασης περιορίζεται με καταμερισμό ρεύματος και όπου η ενέργεια υπέρτασης μειώνεται με τη χρήση επιπλέον απαγωγών υπερτάσεων κλάσης 2. Οι απαγωγείς κλάσης 2 τοποθετούνται στα όρια κάθε περιοχής, μεταξύ LPZ 1 και LPZ 2, LPZ 2 και LPZ 3 κ.λπ [13].



Σχήμα 2.4: Περιοχές προστασίας[13]

Λειτουργία των Απαγωγέων Υπέρτασης

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 [6] .

Κατηγορίες απαγωγέων υπέρτασης

Στην πράξη συναντώνται τέσσερις βασικές κατηγορίες απαγωγέων υπέρτασης:

- Σπινθηριστές αερίων (spark gap, GDT)

Πρόκειται για ένα ή περισσότερα διάκενα σε σειρά, τοποθετημένα μέσα σε κάποιον σωλήνα με κάποιο ευγενές αέριο υπό πίεση σαν διηλεκτρικό μέσο. Κατά το μέτωπο της υπέρτασης ο σπινθηριστής δεν άγει, τη στιγμή όμως που θα ξεπεραστεί η τάση έναυσής του θα εμφανιστεί μια εκκένωση αίγλης και η τάση στα άκρα του περιορίζεται στα 75-150V και ακολουθεί η δημιουργία ηλεκτρικού τόξου. Μετά το πέρας της κορυφής της υπέρτασης το ρεύμα του σπινθηριστή περιορίζεται (10-100mA) και μετά το τέλος της υπέρτασης το ηλεκτρικό τόξο μεταπίπτει σε εκκένωση αίγλης και τελικά επέρχεται σβέση του σπινθηριστή. Όμως, για να

εξασφαλιστεί η σβέση του τόξου η τάση λειτουργίας δεν επιτρέπεται να έχει μεγάλη τιμή, καθώς το τόξο δημιουργεί στιγμιαίο βραχυκύκλωμα και άρα δεν πρέπει να τροφοδοτείται από το ρεύμα της εγκατάστασης. Κατά συνέπεια οι σπινθηριστές οφείλουν να χρησιμοποιούνται πάντα σειρά με έναν βαρύστορα, ο οποίος προηγείται αυτών, στην μεριά του εξοπλισμού.

Η κύρια χρήση των σπινθηριστών αερίου είναι σε κυκλώματα ασθενών ρευμάτων (πχ. τηλεπικοινωνιακά). Ο χρόνος απόκρισης τους είναι σχετικά μεγάλος και η τάση έναυσής τους παρουσιάζει διακύμανση, καθώς εξαρτάται από το ρυθμό ανόδου της υπέρτασης, μπορούν όμως να φέρουν μεγάλα ρεύματα, μέχρι και 20KA.

- **Διατάξεις με βαρύστορες (MOV)**

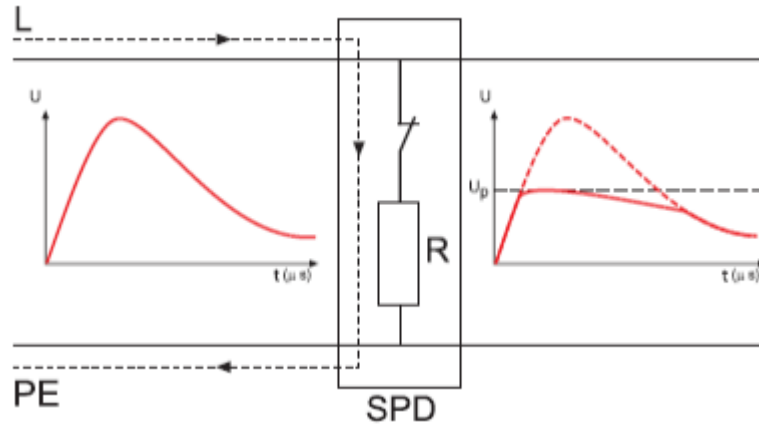
Πρόκειται για μη γραμμικές αντιστάσεις από βαρύστορες μεταλλικών οξειδίων (συνήθως ZnO) που χαρακτηρίζονται από την ταχύτατη απόκρισή τους και την ευρύτατη εφαρμογή τους.

Χαρακτηριστικές παράμετροι των απαγωγέων υπέρτασης με MOV είναι οι εξής:

i. *Τάση συνεχούς λειτουργίας V_c .* Αποτελεί τη μέγιστη επιτρεπόμενη, εναλλασσόμενη (rms) ή συνεχής, τάση που μπορεί να υφίσταται συνεχώς στα άκρα του απαγωγέα. Πρέπει να είναι μεγαλύτερη ή ίση με την μέγιστη επιτρεπόμενη τάση λειτουργίας της εγκατάστασης, V_{cs}

ii. *Τάση αντοχής σε προσωρινές υπερτάσεις, V_t .* Στην περίπτωση εμφάνισης σφάλματος στο δίκτυο MT, τότε ενδέχεται να εμφανιστούν υπερτάσεις και στο δίκτυο XT εύρους μέχρι και 1200 V, ανάλογα με το σύστημα γείωσης. Σε αυτήν την περίπτωση πρέπει η V_t να είναι μεγαλύτερη από τη μέγιστη τιμή της υπέρτασης που μπορεί να εμφανιστεί.

iii. *Επίπεδο προστασίας V_p .* Πρόκειται για την τιμή κορυφή της τάσης που χαρακτηρίζει την ικανότητα περιορισμού της υπέρτασης στα άκρα του απαγωγέα. Πολύ συχνά δίνεται ο λόγος V_p/V_c , με τυπικές τιμές 3-5 στον οποίο το επίπεδο προστασίας αναφέρεται σε ονομαστικό ρεύμα. Το V_p πρέπει να είναι μικρότερο από τη διαβαθμισμένη τάση αντοχής του εξοπλισμού, με ένα περιθώριο 20% σε σχέση με την μέγιστη πιθανή υπέρταση που ενδέχεται να εμφανιστεί. Μπορούμε να φανταστούμε τη V_p και τον τρόπο που προκύπτει με τη βοήθεια του σχήματος 2.5, αν θεωρήσουμε πως ο απαγωγέας είναι στην πραγματικότητα ένας διακόπτης με χαμηλή αντίσταση [6].



Σχήμα 2.5: Περιορισμός της υπέρτασης [6]

iv. *Παραμένουσα τάση U_{res} .* Η μέγιστη τιμή της τάσης που εμφανίζεται στα άκρα της διάταξης κατά τη διάρκεια της υπέρτασης. Αυτή είναι και η τάση που εν τέλει καταπονεί τον εξοπλισμό.

v. *Ονομαστικό ρεύμα I_n .* Η μέγιστη τιμή ρεύματος κυματομορφής 8/20 μs vi. *Κρουστικό ρεύμα I_{imp} (κλάση I) ή μέγιστο ρεύμα εκκένωσης I_{max} (κλάση II).* Η μέγιστη τιμή του ρεύματος κυματομορφής 10/350 ή 8/20 μs αντίστοιχα που μπορεί να διαρρεύσει τον απαγωγέα χωρίς να προκαλέσει καταστροφή του.

vii. *Ικανότητα απορρόφησης ενέργειας.* Αυτή η παράμετρος, σε kJ/kV, αντιστοιχεί στην τιμή της ενέργειας καταπόνησης της διάταξης σε δοκιμές συνεχούς λειτουργίας. Καθορίζεται από το I_n και το I_{imp} (ή I_{max}). Η μέγιστη τιμή της πρέπει να είναι μικρότερη από τη ικανότητα απορρόφησης ενέργειας της διάταξης, ιδίως όταν προστατεύονται μέσα που αποθηκεύουν, όπως πυκνωτές.

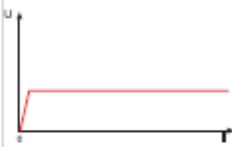

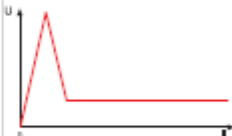

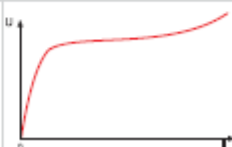
Οι σπινθηριστές αερίων και οι διατάξεις με βαρύστορες αποτελούν τους δυο πιο συνηθισμένους τύπους απαγωγέων. Στο σχήμα 2.6 δίνεται μια σύγκριση των χαρακτηριστικών μεγεθών τους (ρεύμα διαρροής, διάχυση ενέργειας ,ταχύτητα απόκρισης, χαρακτηριστική τάσης ρεύματος) με την ιδεατή λειτουργία.

- **Δίοδοι περιορισμού υπέρτασης (ABD)**

Πρόκειται για διόδους, αντίστοιχες με τις Zener, με πολύ γρήγορη απόκριση, αλλά πολύ μικρής ισχύος. Μόνες τους ή σε συστοιχίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την προστασία κυκλωμάτων XT.

- **Θυρίστορ περιορισμού υπέρτασης (TSS)**

Αντίθετα με τις διόδους, διατάξεις με θυρίστορες έχουν αργή απόκριση, αλλά μεγάλη ισχύ. Χρησιμοποιούνται σε διατάξεις προστασίας έναντι υπερτάσεων XT που συνδυάζουν την αντοχή και τον περιορισμό της υπέρτασης [6].

Component	Symbol	Leakage current	Energy dissipated	Response time	Voltage/Current characteristic
Ideal		0	High	Fast	
Spark gap		0	High	Medium	
Varistor		Very Low	Medium	Fast	

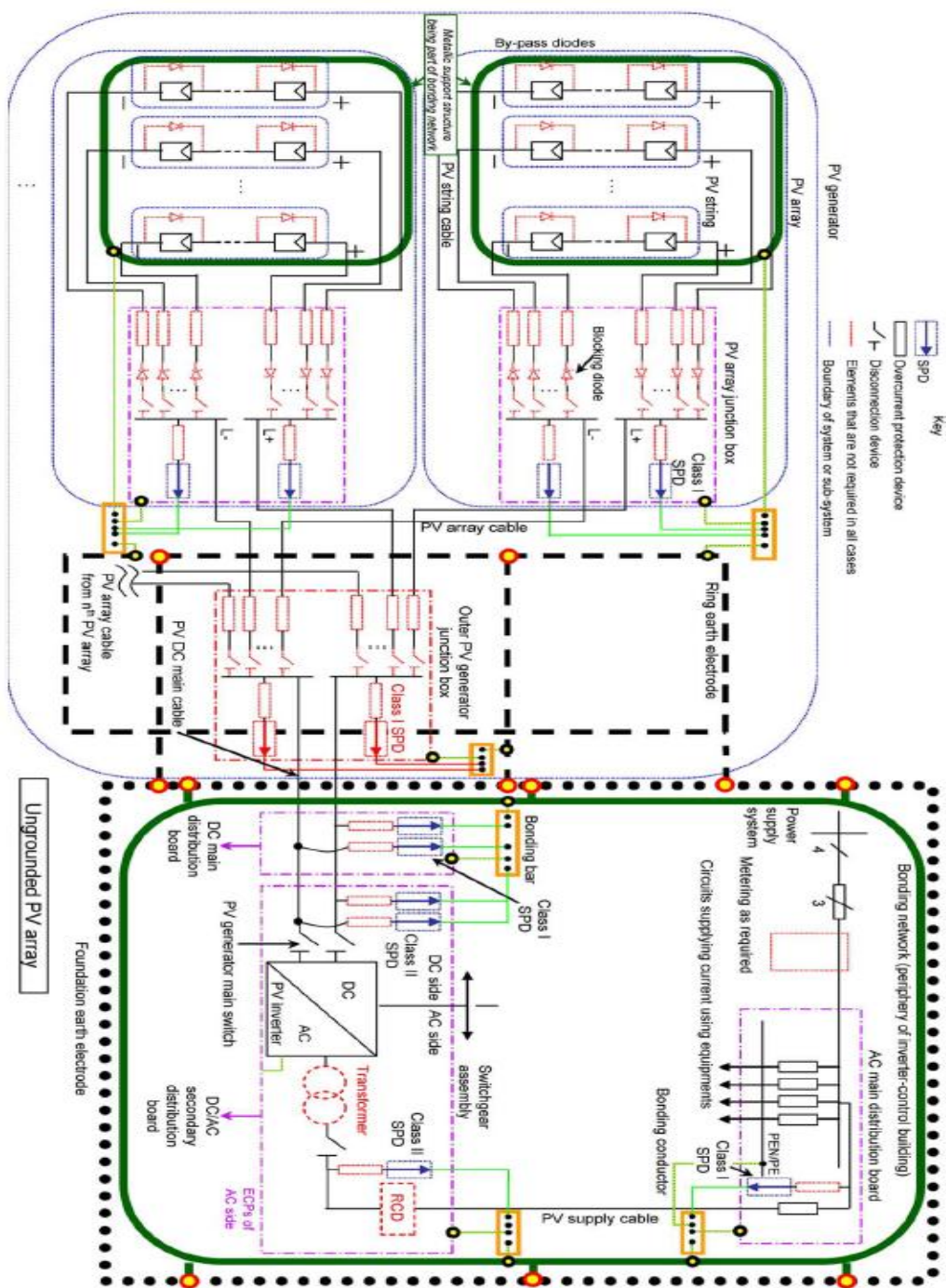
Σχήμα 2.6: Σύγκριση χαρακτηριστικών απαγωγέων υπέρτασης[6]

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

Καθώς τα τελευταία χρόνια παρατηρείται αυξανόμενη χρήση φωτοβολταϊκών συστημάτων για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και δεδομένου ότι τα συστήματα αυτά βρίσκονται συνήθως σε απομονωμένες περιοχές εκτεθειμένες άμεσα σε κεραυνικά πλήγματα, έχει προκύψει η ανάγκη για μελέτη των επιπτώσεών τους με σκοπό τη σχεδίαση αντικεραυνικής προστασίας. Συνεπώς, στο σημείο αυτό κρίνεται απαραίτητη η αναφορά σε σημαντικά ερευνητικά αποτελέσματα.

3.1 Μελέτες βάσει προτύπων

Το 2008 οι Jesús C. Hernández, Pedro G. Vidal και Francisco Jurado [5] θέτουν το επιστημονικό υπόβαθρο και τις ουσιαστικές παραδοχές που πρέπει να εισαχθούν στο σχεδιασμό αντικεραυνικής προστασίας σε φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις (PVI). Για το σκοπό αυτό, τα μέτρα προστασίας που αναφέρονται στα πρότυπα για τα συμβατικά συστήματα διανομής χαμηλής τάσης (CLVPDS) πρέπει να τροποποιηθούν κατάλληλα. Η αναθεώρηση αυτή είναι απαραίτητη, διότι τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των Φ/Β εγκαταστάσεων είναι διαφορετικά από εκείνα των CLVPDS. Στη συγκεκριμένη εργασία η μέθοδος προστασίας που προκύπτει με βάση τα μέτρα που προβλέπουν τα πρότυπα και τη διαχείριση κινδύνου (risk management) εφαρμόστηκε σε πραγματικό διασυνδεδεμένο Φ/Β σύστημα.

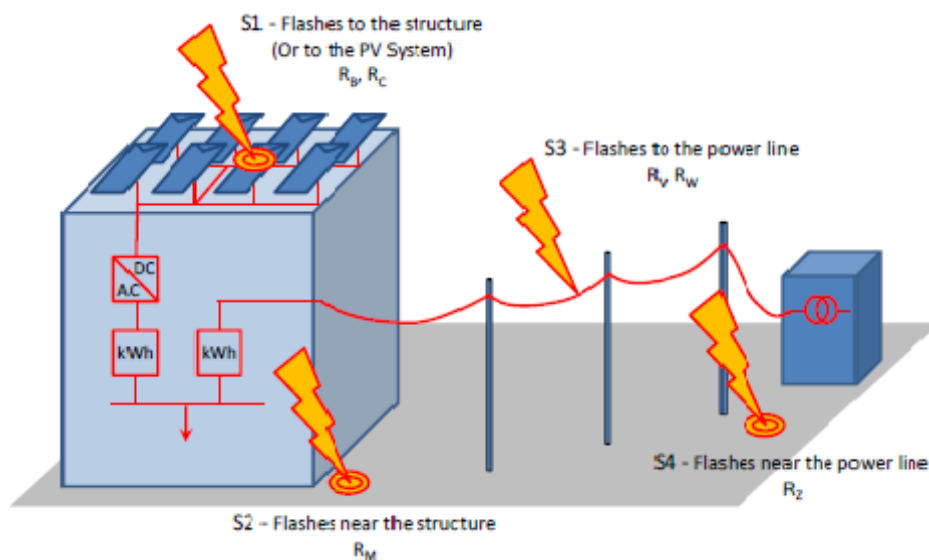


Σχήμα 3.1: Φ/B εγκατάσταση με αντικεραυνική προστασία [5]

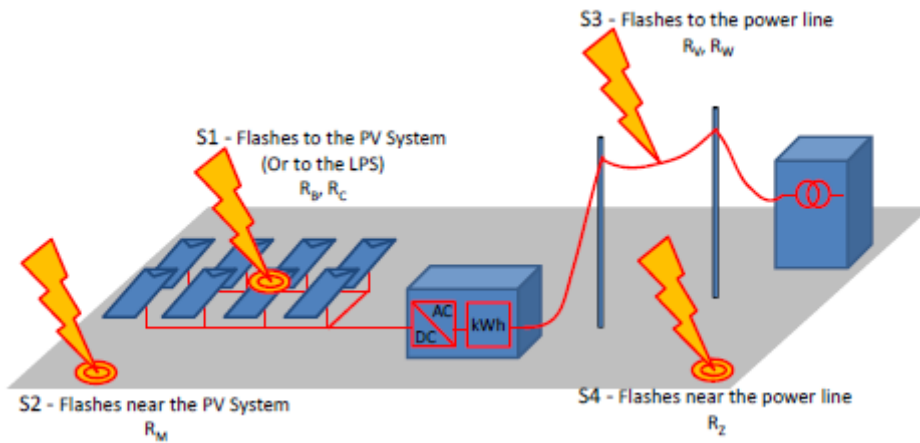
Τα βήματα που ακολουθήθηκαν για την επιλογή και την εγκατάσταση του απαγωγέα κρουστικών υπερτάσεων (SPD) παρουσιάζονται αναλυτικά. Επίσης, ερευνήθηκε η αντοχή των Φ/Β πλαισίων στις υπερτάσεις για την ορθότερη προσέγγιση του προβλήματος. Στο σχήμα 3.1 φαίνεται η προτεινόμενη αντικεραυνική προστασία για

Φ/Β εγκαταστάσεις που περιλαμβάνει εσωτερικό/εξωτερικό ΣΑΠ και απαγωγείς υπερτάσεων.

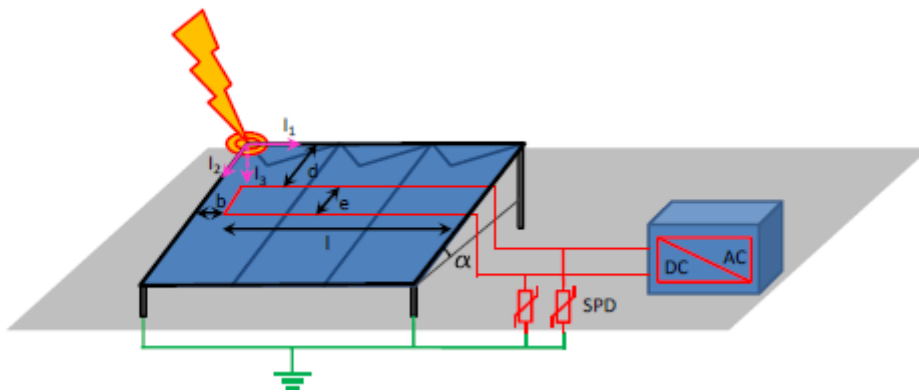
Αργότερα, οι Roberto Pomponi, Riccardo Tommasini και Enrico Pons [2] υπολόγισαν τους κινδύνους με βάση το πρότυπο IEC 62305, ώστε να επιλεγεί κατάλληλο σύστημα αντικεραυνικής προστασίας (ΣΑΠ). Επιπλέον, εκτιμώνται οι αναμενόμενες επαγόμενες τάσεις τόσο στην AC, όσο και στη DC πλευρά των Φ/Β εγκαταστάσεων συναρτήσει της κλάσης προστασίας του ΣΑΠ (LPL: Lightning Protection Level). Στα σχήματα 3.2 και 3.3 φαίνονται οι διάφορες περιοχές κεραυνικών πληγμάτων, ενώ στον πίνακα 3.1 τα αντίστοιχα αποτελέσματα για την AC πλευρά. Η περίπτωση του άμεσου πλήγματος φαίνεται στο σχήμα 3.4 και τα αποτελέσματα των επαγόμενων τάσεων και ρευμάτων βραχυκύκλωσης στον πίνακα 3.2.



Σχήμα 3.2: Φ/Β εγκατάσταση σε κτίριο [2]



Σχήμα 3.3: Ηλιακή μονάδα παραγωγής ενέργειας [2]



Σχήμα 3.4: Άμεσο κεραυνικό πλήγμα

Κλάση ΣΑΠ	Άμεσα και έμμεσα κεραυνικά πλήγματα		Κεραυνικά πλήγματα κοντά στην εγκατάσταση
	Περιοχή S3 (άμεσο πλήγμα) Κυματομορφή 10/350 μ s [kA]	Περιοχή S4 (έμμεσο πλήγμα) Κυματομορφή 8/20 μ s [kA]	Περιοχή S2 (επαγόμενο ρεύμα) Κυματομορφή 8/20 μ s [kA]
I	10	5	0.2
II	7.5	3.75	0.15
III - IV	5	2.5	0.1

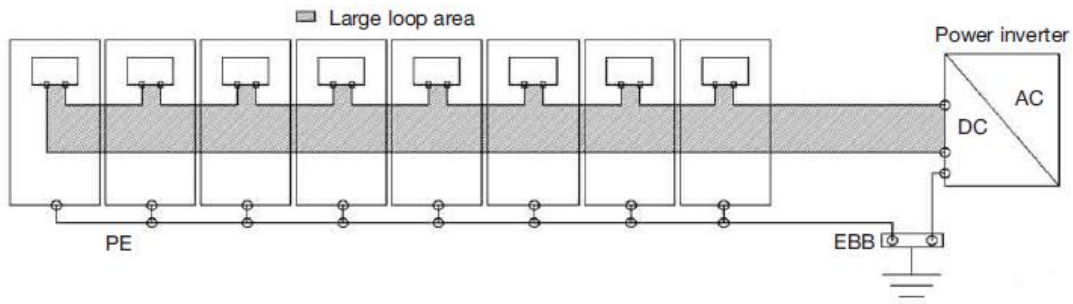
Πίνακας 3.1: Αναμενόμενες εντάσεις ρεύματος λόγω κεραυνικών πληγμάτων [2]

Κλάση ΣΑΠ	Επαγόμενη τάση ανά μονάδα μήκους [kV/m]	Ρεύμα Βραχυκύκλωσης (10/350 μs) [kA]
I	4	5
II	3	3.75
III-IV	2	2.5

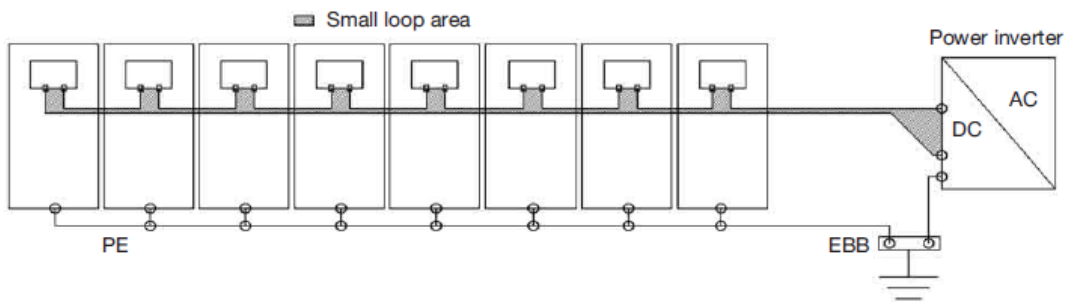
Πίνακας 3.2: Επαγόμενες τάσεις και ρεύμα βραχυκύκλωσης [2]

Οι Giovanni Luca Amicucci και Fabio Fiamingo [9] αναλύουν λεπτομερώς διάφορους τρόπους μείωσης των επαγόμενων υπερτάσεων στα Φ/Β συστήματα:

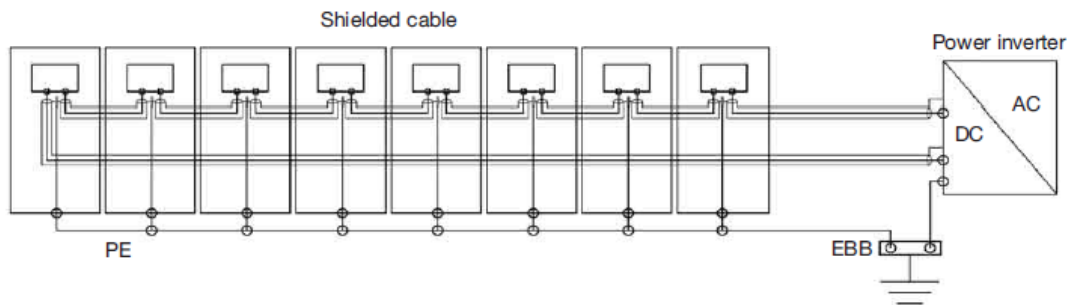
- **Μείωση μήκους αγωγών και επιφάνειας βρόχων:** στην AC πλευρά μειώνεται το μήκος των αγωγών, ενώ στη DC πλευρά είναι αδύνατο να μειωθεί το μήκος των αγωγών διασύνδεσης των πλαισίων γι' αυτό περιστρέφονται, ώστε να επιτευχθεί μικρότερος βρόχος (σχήματα 3.5 και 3.6). Η μέθοδος αυτή παρέχει σημαντική μείωση των επαγόμενων υπερτάσεων μόνο στη περίπτωση μικρών Φ/Β συστημάτων (ισχύς μικρότερη των 10 kWp).
- **Χρήση θωρακισμένων αγωγών:** για Φ/Β συστοιχίες με περισσότερα από 200 πλαίσια προτείνεται η λύση των θωρακισμένων αγωγών αν και δαπανηρή (σχήμα 3.7).
- **Απαγωγείς υπερτάσεων (SPDs):** στο σχήμα 3.8 φαίνεται πως ο απαγωγέας πρέπει να εγκατασταθεί κοντά στον αντιστροφέα. Σε αυτή τη περίπτωση, αν δεν έχουν ελαχιστοποιηθεί οι σχηματιζόμενοι βρόχοι, τότε μπορεί να υπάρξουν υπερτάσεις στα πλαίσια που δεν θα ενεργοποιήσουν τον απαγωγέα, αλλά θα βραχυκυκλώσουν τις διόδους παράκαμψης. Ως λύση του προβλήματος αυτού πρέπει οι διόδοι να παρακαμφθούν με αντίστροφη τάση μεγαλύτερη του 1 kV.



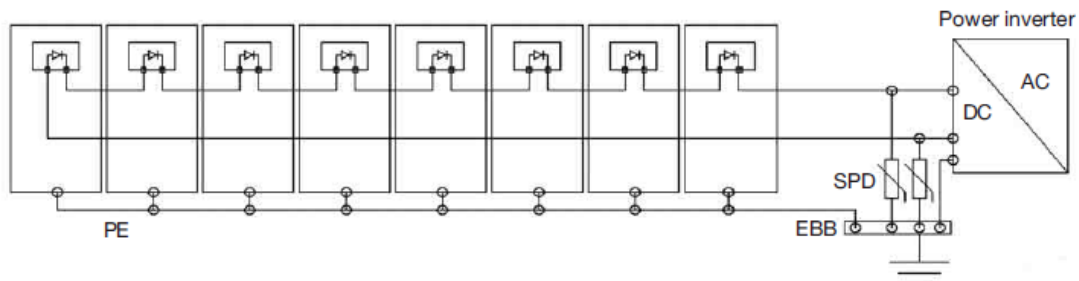
Σχήμα 3.5: Σχηματιζόμενος βρόχος λόγω αγωγών διασύνδεσης [9]



Σχήμα 3.6: Ελαχιστοποίηση σχηματιζόμενου βρόχου



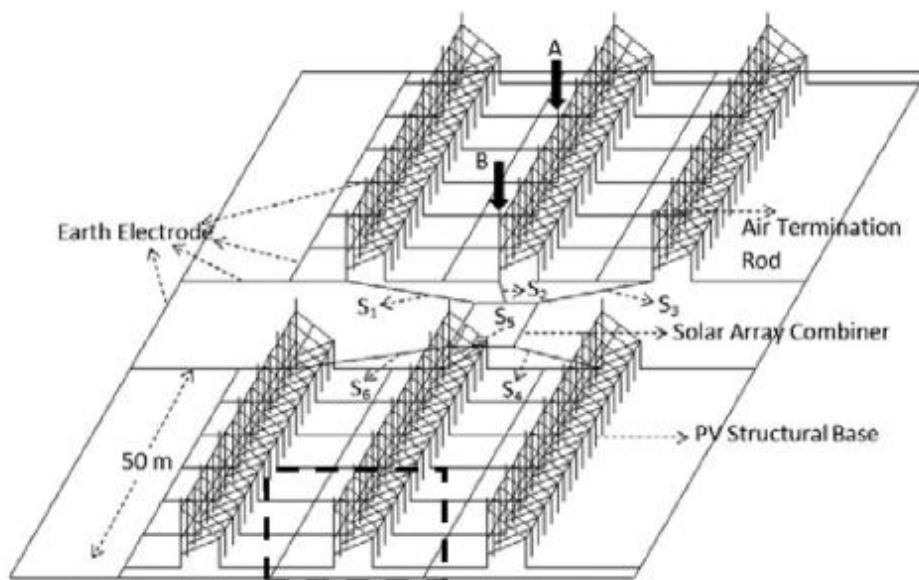
Σχήμα 3.7: Χρήση θωρακισμένων αγωγών



Σχήμα 3.8: Χρήση απαγωγέα υπερτάσεων

3.2 Μελέτες με χρήση λογισμικών πακέτων

Οι Χαράλαμπος Χαραλάμπους, Νικόλαος Κόκκινος και Νικόλαος Χριστοφορίδης [10] συγκρίνουν το απομονωμένο σύστημα αντικεραυνικής προστασίας σε σχέση με το μη απομονωμένο σε εκτεταμένα Φ/Β συστήματα. Το σχήμα 3.9 απεικονίζει το πάρκο που προσομοιώνεται, ενώ στα σχήματα 3.10 και 3.11 φαίνονται τα αποτελέσματα για μη απομονωμένο και απομονωμένο ΣΑΠ αντίστοιχα (τα σημεία A και B είναι οι θέσεις των κεραυνικών πληγμάτων και τα αποτελέσματα λαμβάνονται στους αγωγούς S1 έως S6). Παρατηρούμε πως στην περίπτωση του απομονωμένου συστήματος υπάρχει μείωση της έντασης του ρεύματος κατά 23% περίπου.

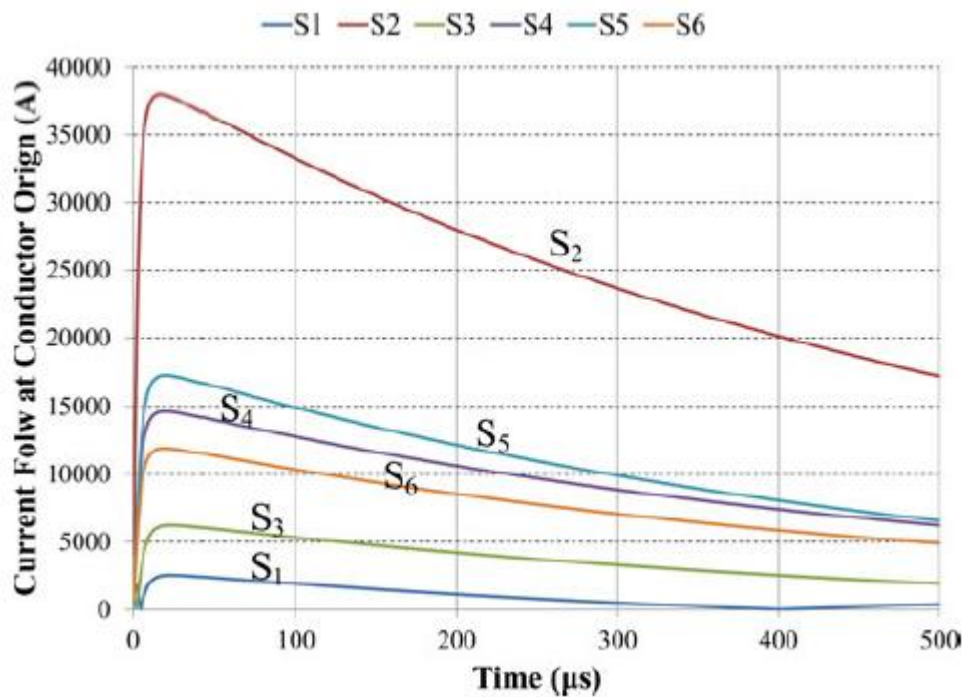


Σχήμα 3.9: Μοντέλο προσομοίωσης για Φ/Β πάρκο 150 kW [10]

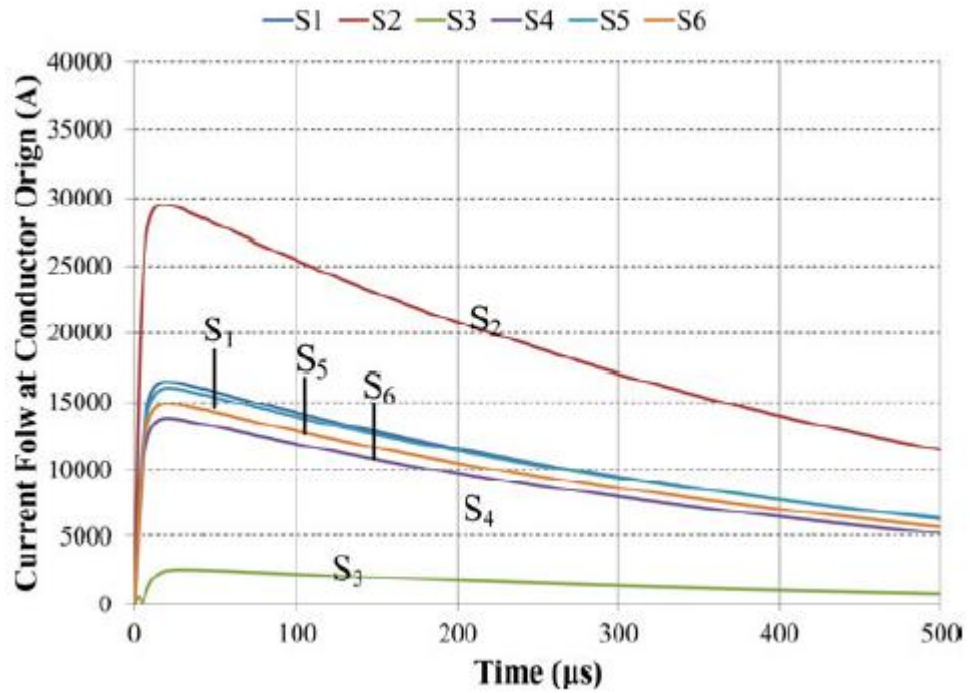
Επιπλέον, όσον αφορά τη γείωση ενός εκτεταμένου Φ/Β πάρκου προτείνεται η χρήση γείωσης τύπου A και B. Ως τύπου A λειτουργούν οι χαλύβδινοι δοκοί στήριξης των συστοιχιών που φθάνουν σε 1,5 m βάθος τουλάχιστον. Η παραμετρική γείωση (τύπου B) συνήθως βρίσκεται σε 0,5 m βάθος και εξασφαλίζει ισοδυναμική σύνδεση των μεταλλικών στοιχείων των πλαισίων. Αποδεικνύεται πως ενισχύοντας τη γείωση μειώνεται η ενέργεια που διαχέεται, με συνέπεια να αποφεύγεται η χρήση υπερμεγέθους αντικεραυνικής προστασίας.

Οι Z. Benesova, R. Haller και J. Birkl, P. Zahlmann [11] προσομοιώνουν ένα απλοποιημένο Φ/Β σύστημα για διάφορες κυματομορφές κεραυνικού ρεύματος και

σημεία πτώσης του. Διαπιστώθηκε, ότι εκτός από το πλάτος και τη κυματομορφή του κεραυνού, το σημείο πτώσης έχει σημαντική επίδραση στη τιμή των επαγόμενων τάσεων στα σημεία σύνδεσης των Φ/Β πάνελ. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης επιβεβαιώθηκαν με μετρήσεις χρησιμοποιώντας κρουστική γεννήτρια. Τα αποτελέσματα δείχνουν την επικινδυνότητα των κεραυνικών ρευμάτων με πολύ μικρό χρόνο ανόδου καθώς επίσης και τη μείωση των επαγόμενων υπερτάσεων με κατάλληλη γείωση.

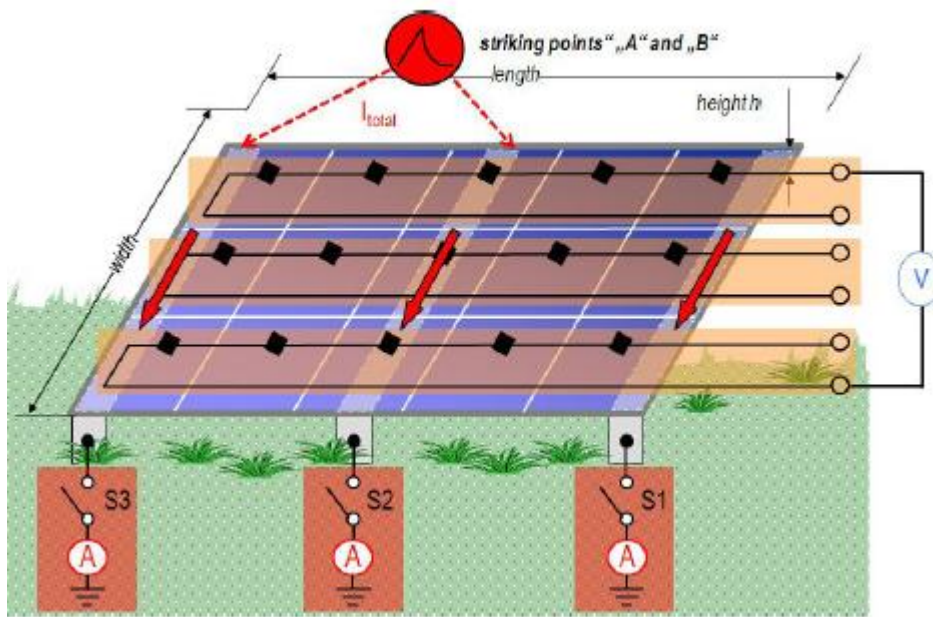


Σχήμα 3.10: Ένταση ρεύματος για κεραυνικό πλήγμα 150 kA 10/350 μs στην περίπτωση του μη απομονωμένου ΣΑΠ [10]

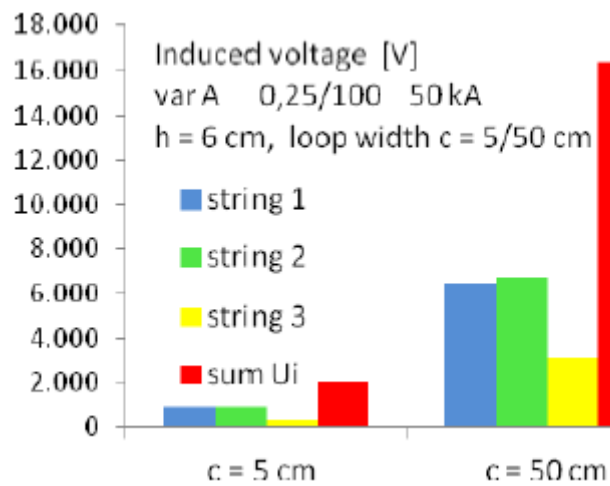


Σχήμα 3.11: Ένταση ρεύματος για κεραυνικό πλήγμα 150 kA 10/350 μs στην περίπτωση του απομονωμένου αντικεραυνικού συστήματος [10].

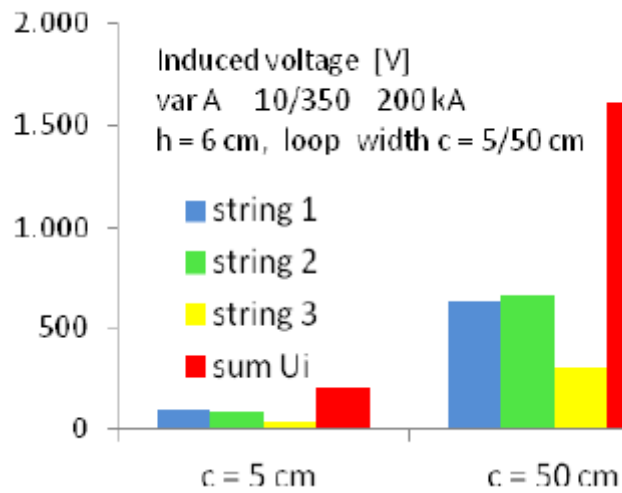
Παρακάτω φαίνεται το βασικό μοντέλο προσομοίωσης καθώς και τα αποτελέσματα των επαγόμενων υπερτάσεων για τα δύο σημεία πτώσης του κεραυνού (σχήματα 3.12 – 3.15).



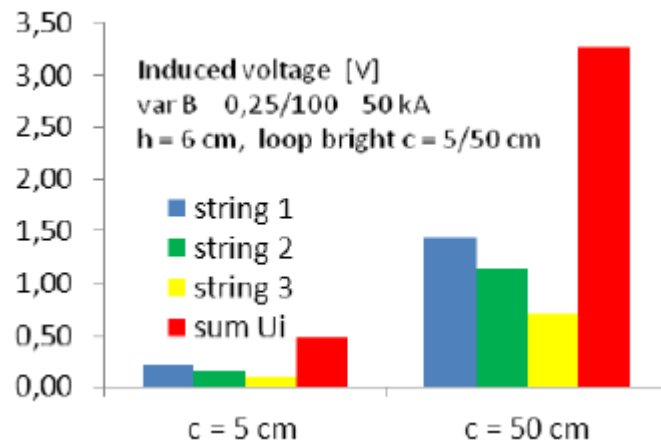
Σχήμα 3.12: Βασικό μοντέλο προσομοίωσης [11]



Σχήμα 3.13: Επαγόμενες υπερτάσεις για ρεύμα 0,25/100μs (σημείο πτώσης A) [11].



Σχήμα 3.14: Επαγόμενες υπερτάσεις για ρεύμα 10/350μs (σημείο πτώσης A) [11].



Σχήμα 3.15: Επαγόμενες υπερτάσεις για το σημείο πτώσης B [11].



ΤΟΠΟΛΟΓΙΕΣ

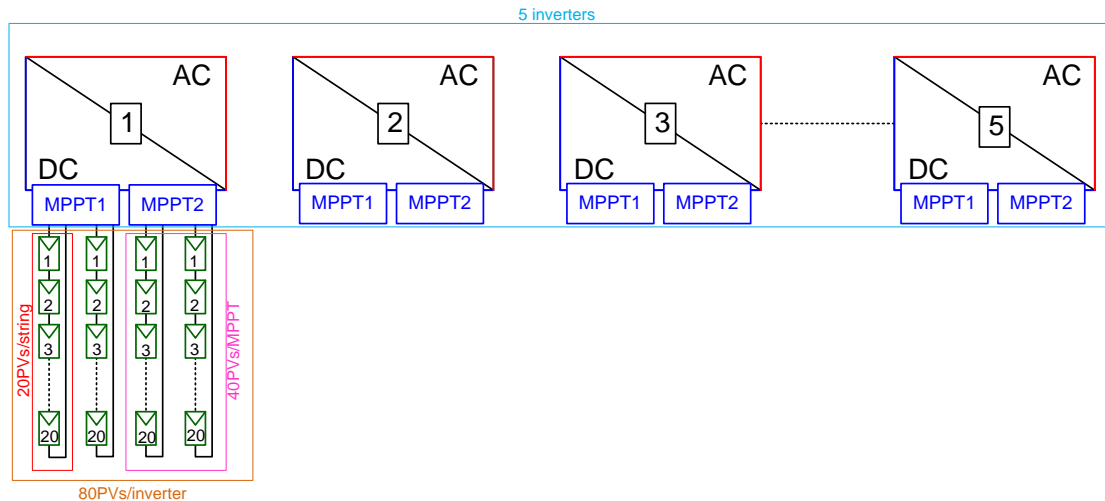
4.1 Εισαγωγή

Η παρούσα εργασία αποσκοπεί στον υπολογισμό των επαγόμενων τάσεων, των τάσεων επαφής και του δυναμικού που αναπτύσσεται λόγω κεραυνικών πληγμάτων σε δύο διαφορετικές περιπτώσεις συστοιχιών των πλαισίων για συνθήκες μη ηλιοφάνειας. Στις δύο περιπτώσεις συνδέονται ισάριθμα πλαίσια όπως επίσης και οι τιμές της τάσης, του ρεύματος και της ισχύος είναι ίδιες ανά συστοιχία υπό κανονικές συνθήκες. Έτσι, οι δύο εξεταζόμενες περιπτώσεις διαφέρουν μόνο ως προς την έκταση του βρόχου που σχηματίζουν τα DC καλώδια.

4.2 Περιγραφή Φ/Β Εγκατάστασης

4.2.1 Δομή Φ/Β εγκατάστασης

Πρόκειται για Φ/Β εγκατάσταση ισχύος 100kWp που δομείται από πλαίσια κρυσταλλικού πυριτίου ισχύος 250Wp και πέντε αντιστροφείς των 20kW. Σε κάθε αντιστροφή συνδέονται 80 πλαίσια δηλαδή τέσσερις συστοιχίες που αποτελούνται από 20 πλαίσια. Οι συστοιχίες ανά δύο συνδέονται παράλληλα σ'έναν ελεγκτή MPPT (Maximum Power Point Tracking). Τα παραπάνω παρουσιάζονται συνοπτικά στο σχήμα 4.1.



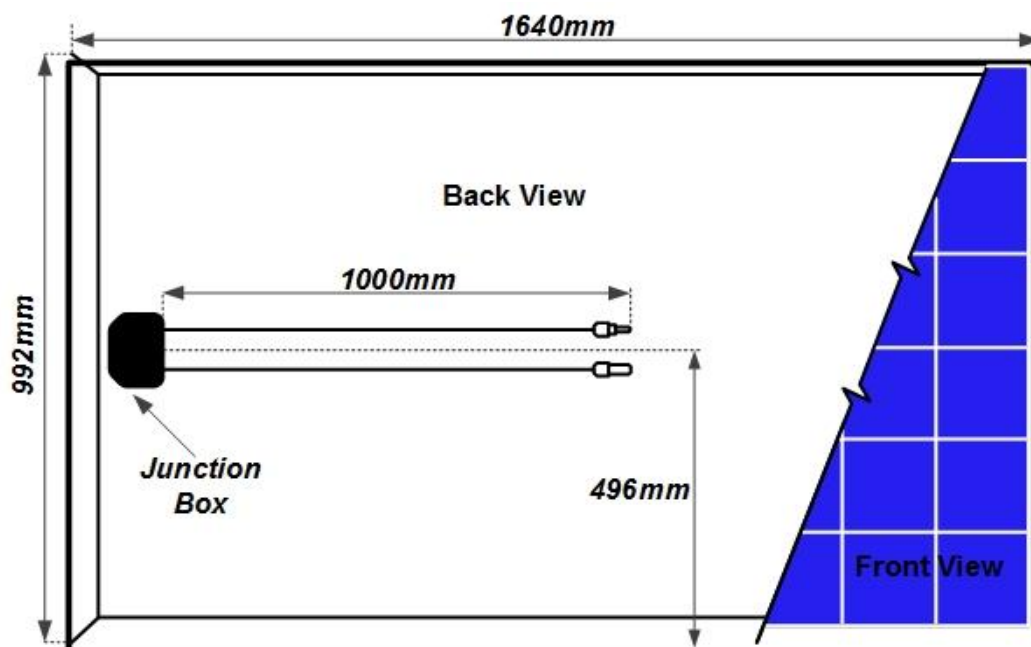
Σχήμα 4.1: Φ/Β εγκατάσταση

4.2.2 Χαρακτηριστικά πλαισίων

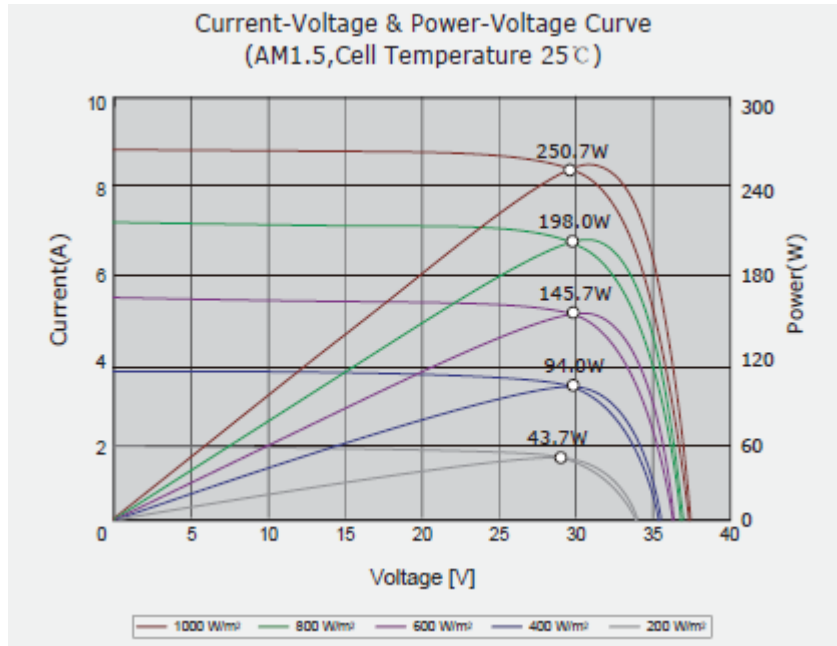
Τα φωτοβολταϊκά πάνελ που χρησιμοποιήθηκαν διαθέτουν πλαίσιο ανοδιωμένου αλουμινίου. Στο σχήμα 4.2 φαίνονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του κάθε πλαισίου. Σύμφωνα με τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά ενός τυπικού πολυκρυσταλλικού πλαισίου, η ονομαστική τάση λειτουργίας κάθε συστοιχίας είναι 620V σε STC ενώ η μέγιστη τάση δεν θα πρέπει να ξεπερνά τα 850V (για κρύα πρωινά με θερμοκρασία περιβάλλοντος -10°C). Η ακριβής μέγιστη τάση συστοιχίας εξαρτάται από τις περιβαλλοντολογικές συνθήκες και συμβαίνει σε κατάσταση ανοιχτού κυκλώματος (όταν τα Φ/Β δεν παράγουν ισχύ). Επίσης, το ονομαστικό ρεύμα λειτουργίας είναι 8,25A ενώ το μέγιστο ρεύμα βραχυκύκλωσης 8,9A. Στον πίνακα 4.1 καθώς και στα σχήματα 4.3 έως 4.5 φαίνονται τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του κάθε πλαισίου.

P_{max} (μέγιστη ισχύς πλαισίου)	250W
Απόδοση πλαισίου	15.36%
V_{mp} (τάση που αντιστοιχεί στην P_{max})	30.3V
I_{mp} (ένταση ρεύματος που αντιστοιχεί στην P_{max})	8.25A
V_{oc} (τάση ανοιχτού κυκλώματος)	37.47V
I_{sc} (ένταση ρεύματος βραχυκυκλώματος)	8.9A
Μέγιστη τάση συστήματος	1000V
Ονομαστική θερμοκρασία λειτουργίας	$45.3 \pm 2^{\circ}\text{C}$

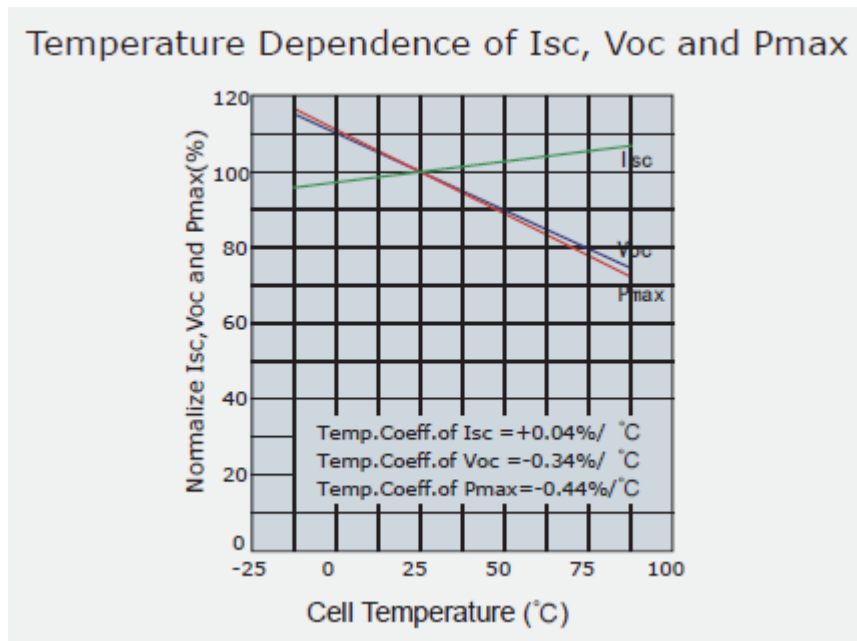
Πίνακας 4.1: Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά πλαισίου



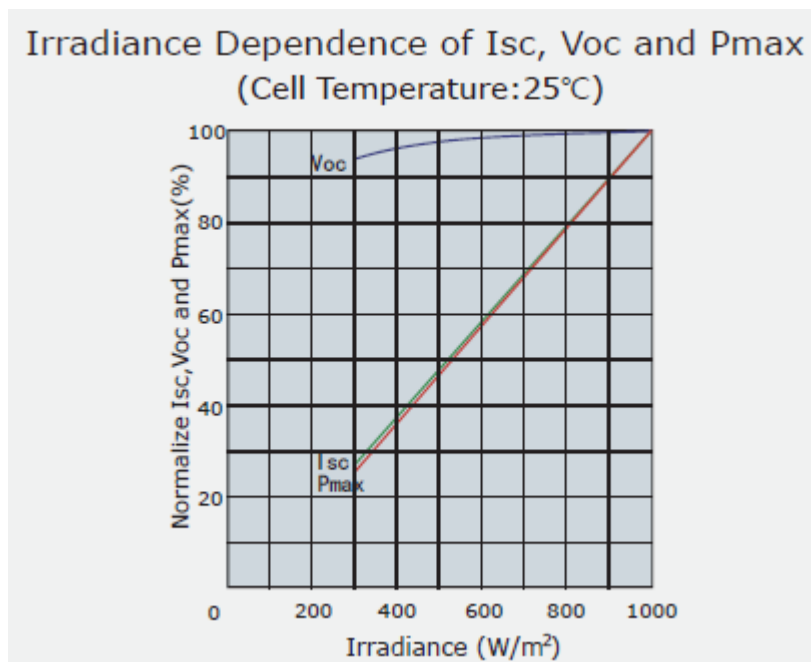
Σχήμα 4.2: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά του Φ/Β πλαισίου που χρησιμοποιήθηκε



Σχήμα 4.3: Καμπύλες λειτουργίας



Σχήμα 4.4: I_{sc} , V_{oc} και P_{max} συναρτήσει της θερμοκρασίας



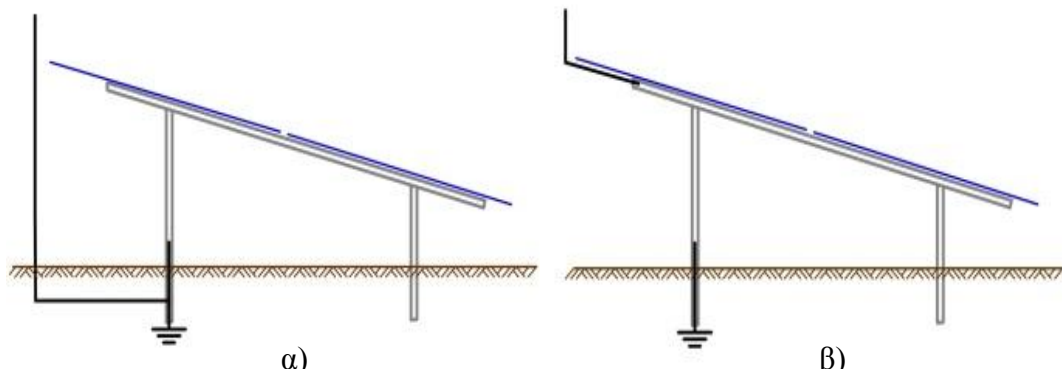
Σχήμα 4.5: I_{sc} , V_{oc} και P_{max} συναρτήσει της ακτινοβολίας

4.2.3 Γείωση και Σύστημα αντικεραυνικής προστασίας

Τα μεταλλικά πλαίσια των συλλεκτών γειώνονται μέσω της βάσης στήριξης της εγκατάστασης καθώς συνδέονται με βίδες ή σφυχτήρες με αυτήν. Η βάση στήριξης αποτελείται από χαλύβδινες δοκούς που φθάνουν σε 1,5m κάτω από το έδαφος. Επίσης, έχει τοποθετηθεί περιμετρική γείωση από χαλκό σε βάθος 0,5m και σε απόσταση 0,7m από τη βάση και 0,5m από τα καλώδια ισχύος περίπου.

Το εξωτερικό ΣΑΠ (σύστημα αντικεραυνικής προστασίας) σε μια Φ/Β εγκατάσταση μπορεί να συνδέεται με το σύστημα γείωσης απευθείας ή μέσω της βάσης στήριξης όπως φαίνεται στην πλάγια όψη του συστήματος (σχήμα 4.6). Στην πρώτη περίπτωση το κεραυνικό πλήγμα οδηγείται στο σύστημα γείωσης μέσω ξεχωριστού και κατάλληλα διαστασιοποιημένου ηλεκτρικού αγωγού ενώ στη δεύτερη οδεύει στη γη μέσω της βάσης του πλαισίου. Στην παρούσα μελέτη χρησιμοποιείται εξωτερικό ΣΑΠ συνδεδεμένο με τη βάση στήριξης όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 4.6β. Έτσι, ανάλογα με τις παραμέτρους που αναφέρονται παρακάτω, δημιουργείται διαφορά δυναμικού μεταξύ των πλαισίων και των καλωδίων που μπορεί να ξεπεράσει την αντοχή της μόνωσης του εξοπλισμού. Επιπλέον, το εσωτερικό ΣΑΠ περιλαμβάνει τη

γείωση, ισοδυναμική σύνδεση, μαγνητική θωράκιση, δρομολόγηση γραμμών, απομόνωση διεπαφών και χρήση απαγωγέων υπερτάσεων.



Σχήμα 4.6: Πλάγια όψη συστοιχίας Φ/Β συστήματος. Το ΣΑΠ συνδέεται στο σύστημα γείωσης α) απευθείας και β) μέσω της βάσης στήριξης

4.3 Εξεταζόμενες περιπτώσεις

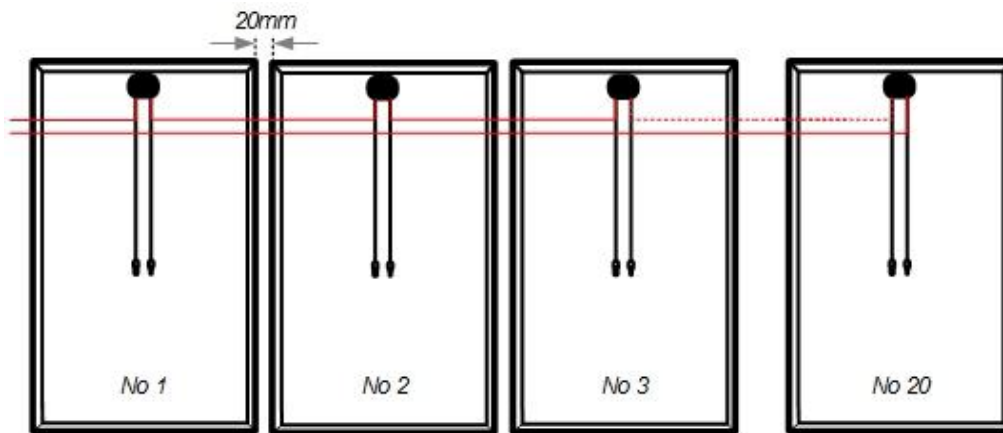
4.3.1 Περίπτωση 1

Στην περίπτωση 1 τα 20 πλαίσια της κάθε συστοιχίας βρίσκονται στην ίδια ευθεία όπως φαίνεται στο σχήμα 4.7. Πλεονέκτημά της είναι ο σχηματισμός αμελητέων βρόχων (περίπου 2m^2) όμως, απαιτείται μεγάλο μήκος επιπλέον DC καλωδίου με αποτέλεσμα να αυξάνεται το κόστος εγκατάστασης. Συγκεκριμένα, κάθε αντιστροφείας χρειάζεται 76m (4x19m) και μάλιστα διατομής 6mm^2 (τα καλώδια διασύνδεσης είναι διατομής 4mm^2) για τον περιορισμό της πτώσης τάσης και των απωλειών.

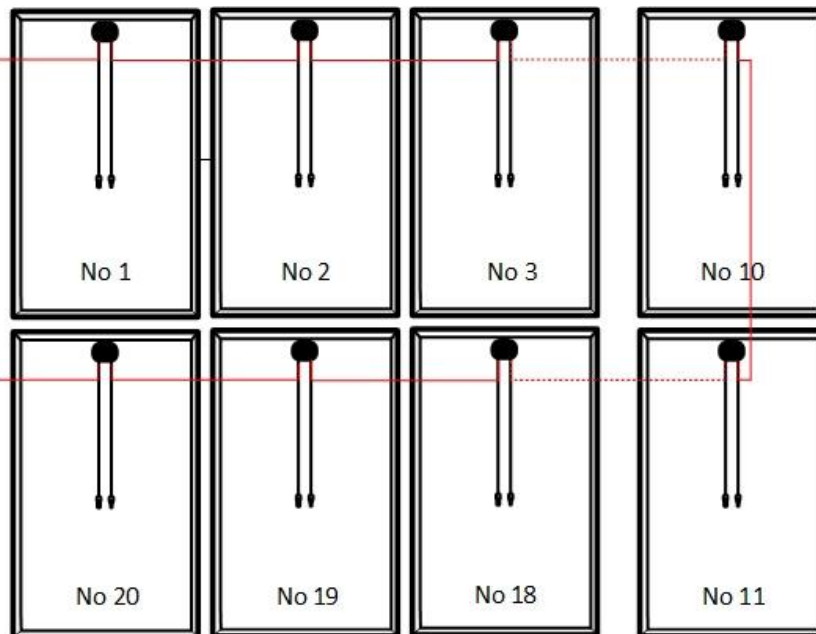
4.3.2 Περίπτωση 2

Η γεωμετρική δομή της περίπτωσης 2 φαίνεται στο σχήμα 4.8. Εδώ, τα καλώδια διασύνδεσης των πλαισίων αρκούν και δεν χρειάζεται επιπλέον DC καλώδιο 6mm^2 γεγονός που ελαττώνει τις απώλειες αλλά και το κόστος εγκατάστασης. Το μειονέκτημα στην περίπτωση αυτή είναι ο σχηματισμός βρόχων μεγέθους $16,3\text{m}^2$ περίπου ανά συστοιχία που αναμένεται να οδηγήσει σε μεγαλύτερες επαγόμενες

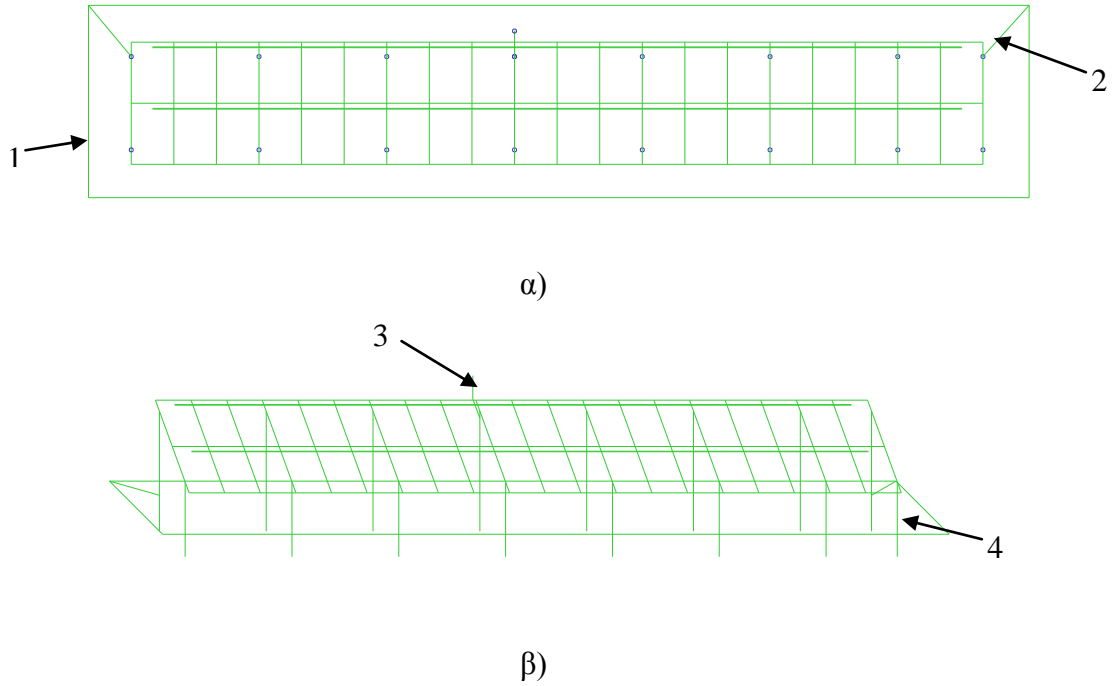
υπερτάσεις κατά την πτώση κεραυνών. Στα σχήματα 4.9 και 4.10 παρουσιάζονται τα σχέδια που προσομοιώθηκαν για τις περιπτώσεις 1 και 2 αντίστοιχα.



Σχήμα 4.7: Συστοιχία περίπτωσης 1

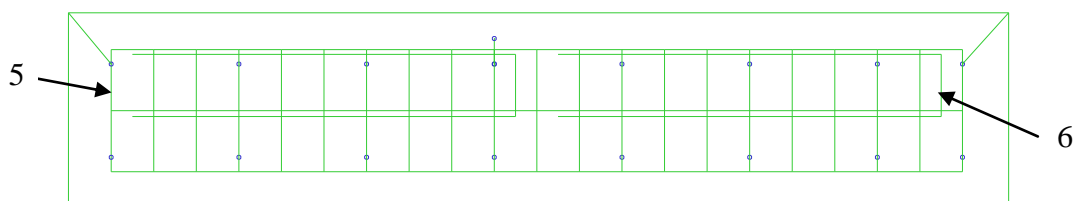


Σχήμα 4.8: Συστοιχία περίπτωσης 2



Σχήμα 4.9: Σχέδιο προσομοίωσης για την Περίπτωση 1 α) κάτοψη β) τρισδιάστατο

- 1.Περιμετρική γείωση
- 2.Ένωση περιμετρικής γείωσης με βάση στήριξης
- 3.Εξωτερικό ΣΑΠ
- 4.Βάση στήριξης



Σχήμα 4.10: Σχέδιο προσομοίωσης για την Περίπτωση 2 (κάτοψη)

- 5.Μεταλλικά πλαίσια Φ/Β στοιχείων
- 6.Καλώδια ισχύος

4.4 Παράμετροι

Στην εργασία αυτή συγκρίνονται οι δύο περιπτώσεις της εγκατάστασης σύμφωνα με τις εξής παραμέτρους:

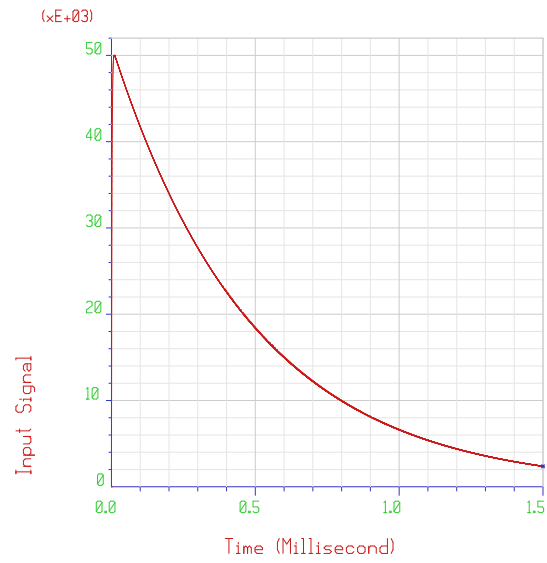
- Κλίση, πλάτος και θέση κεραυνικού πλήγματος
- Ειδική αντίσταση εδάφους
- Ύπαρξη ή όχι σύνδεσης παραμετρικής γείωσης με βάση στήριξης

Στον πίνακα 4.2 φαίνονται οι τιμές των παραπάνω παραμέτρων που εξετάστηκαν.

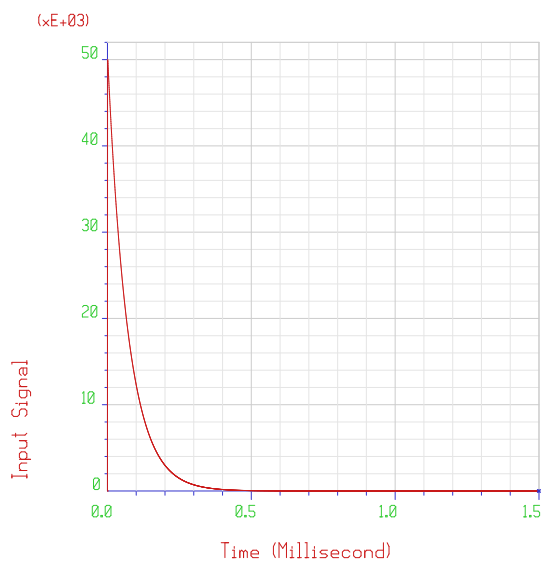
Κλίση κεραυνικού πλήγματος	Πλάτος κεραυνικού πλήγματος	Σημείο πτώσης κεραυνικού πλήγματος	Ειδική αντίσταση εδάφους	Σύνδεση παραμετρικής γείωσης με βάση στήριξης
10/350μs	50kA	Ακίδα	$\rho_1=100\Omega\text{m}$ (h=2m) $\rho_2=1000\Omega\text{m}$	Ναι
1/50μs	30kA	Σημείο 1	$\rho_1=1000\Omega\text{m}$ (h=2m) $\rho_2=100\Omega\text{m}$	Όχι

Πίνακας 4.2: Τιμές παραμέτρων

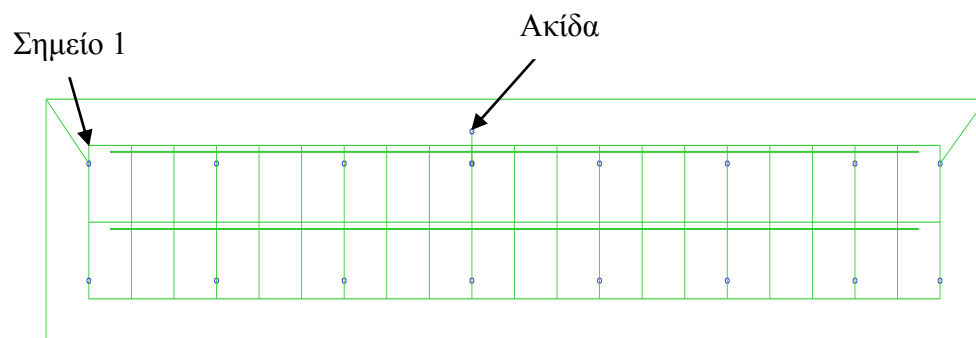
Οι κλίσεις των κεραυνικών πληγμάτων φαίνονται στα σχήματα 4.11 και 4.12 και τα σημεία πτώσης διευκρινίζονται στο σχήμα 4.13.



Σχήμα 4.11: Κυματομορφή 10/350 μ s 50kA



Σχήμα 4.12: Κυματομορφή 1/50 μ s 50kA



Σχήμα 4.13: Σημεία πτώσης του κεραμικού πλήγματος

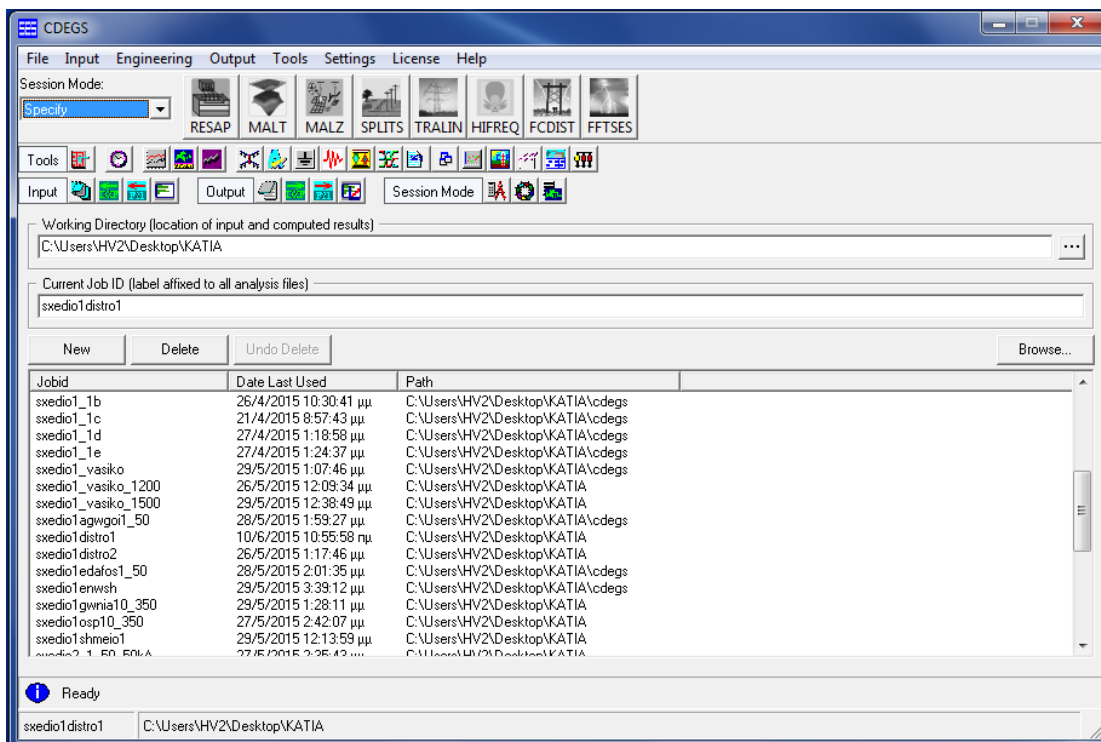
5

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ

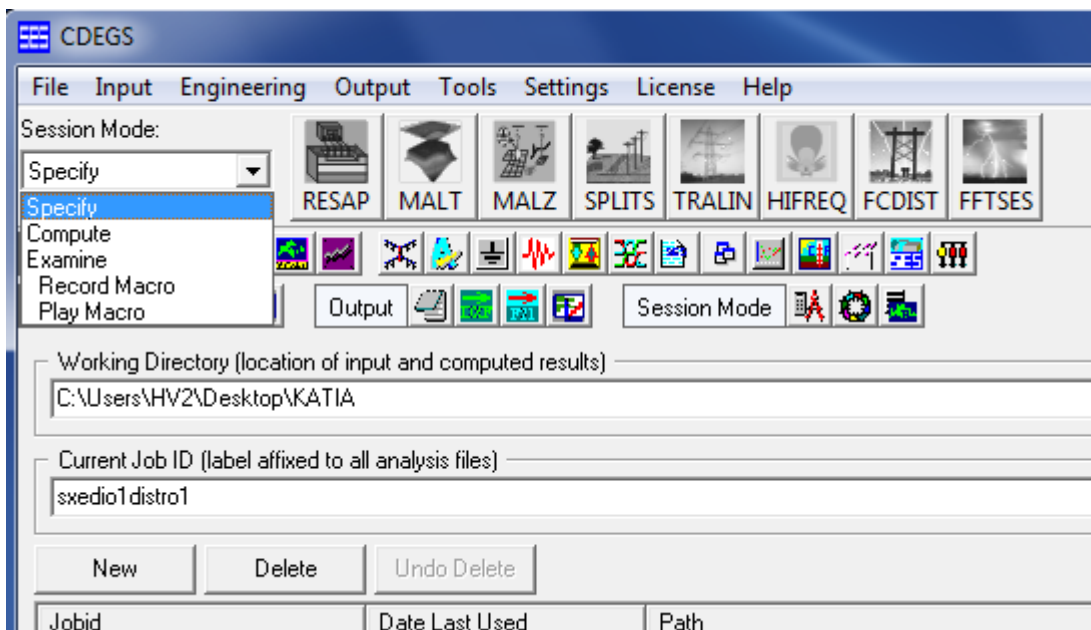
Το πακέτο λογισμικού CDEGS (Current Distribution Electromagnetic Interference Grounding and Soil Structure Analysis, Version 15.1.4080) της εταιρείας SES χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση κεραυνικού πλήγματος σε Φ/Β συστήματα. Η διαδικασία που ακολουθείται διακρίνεται σε τρία μέρη, την καταχώρηση δεδομένων, όπου γίνεται ο σχεδιασμός του Φ/Β 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 Εισαγωγή

Αφού εκτελέσουμε το πρόγραμμα CDEGS.exe (εμφανίζεται στην οθόνη το σχήμα 5.1), θα πρέπει να επιλέξουμε 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 σε Specify, Compute, Examine πατώντας το πλαίσιο πάνω αριστερά (σχήμα 5.2) και τον επιλύτη που μας ενδιαφέρει. Οι επιλύτες που χρησιμοποιούνται στη συγκεκριμένη εργασία είναι οι HIFREQ και FFTSES.



Σχήμα 5.1: Αρχική οθόνη προγράμματος



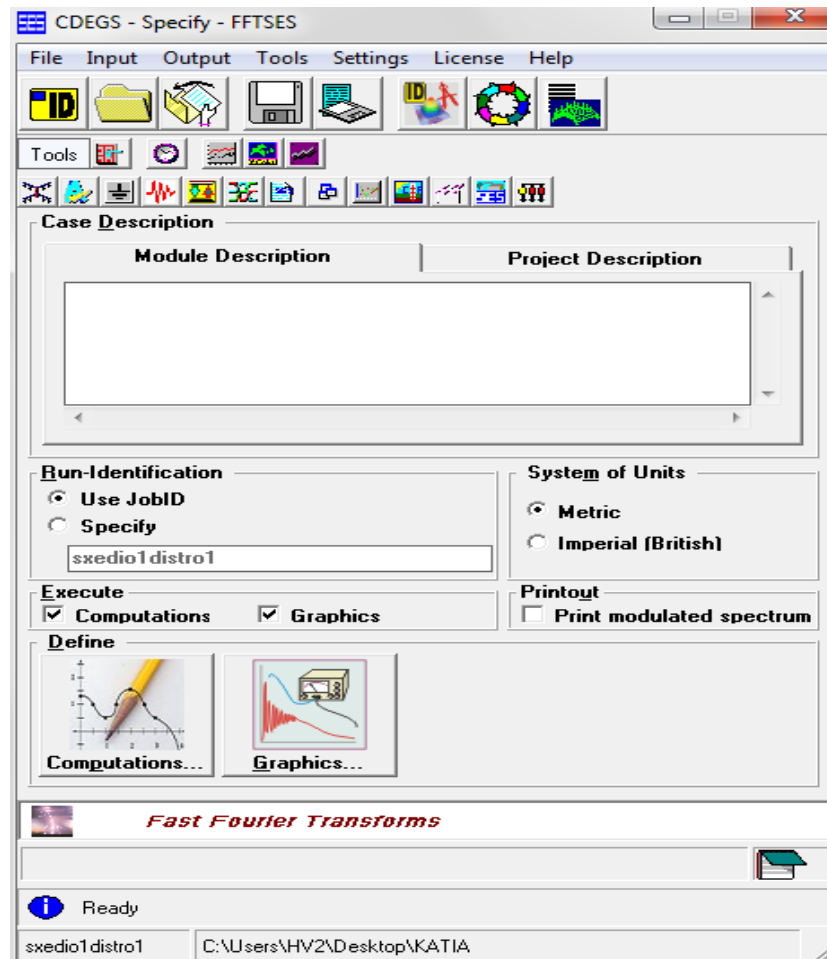
Σχήμα 5.2: Επιλογή λειτουργίας

5.2 Ευθύς Μετασχηματισμός Fourier του κεραυνικού ρεύματος

5.2.1 Εισαγωγή δεδομένων στον επιλύτη FFTSES

Επιλέγοντας την εφαρμογή FFTSES μπορούμε να πραγματοποιήσουμε ευθύ μετασχηματισμό Fourier, από το πεδίο του χρόνου στο πεδίο συχνοτήτων, καθώς και αντίστροφο.

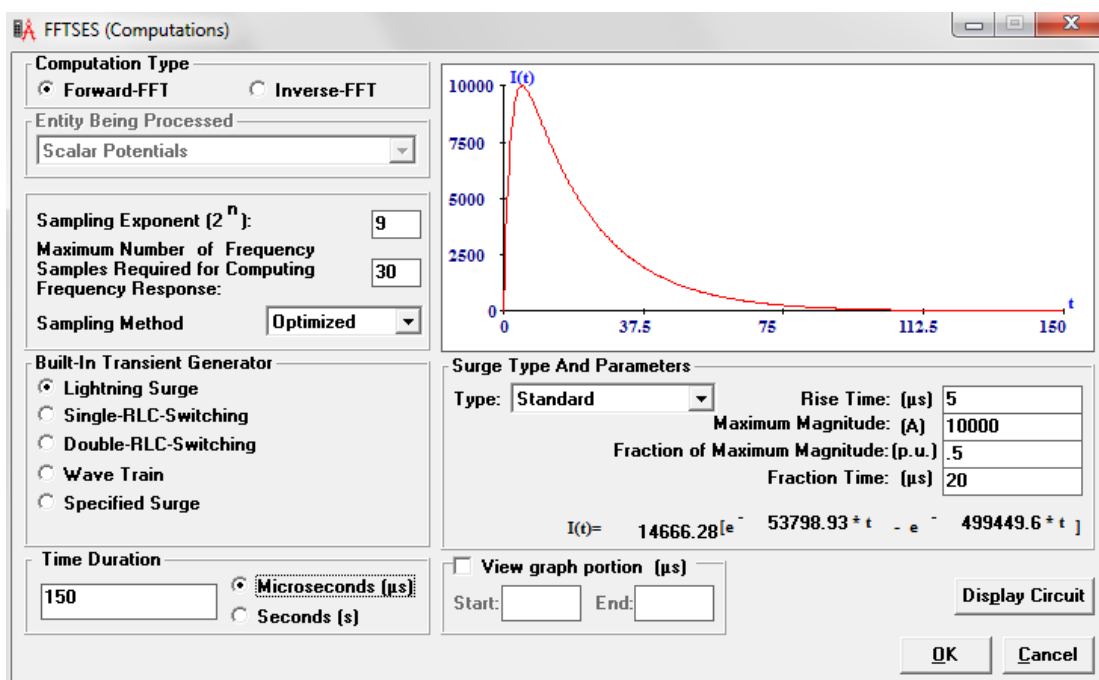
Στην αρχική οθόνη της εφαρμογής υπάρχει η δυνατότητα εισαγωγής σχολίων για την δοκιμή που θα πραγματοποιήσουμε, με την επιλογή Module Description. Επίσης, μπορούμε όπως και στο HIFREQ να επιλέξουμε σύστημα μονάδων, μεταξύ μετρικού και βρετανικού, για την ανάλυσή μας (σχήμα 5.3).



Σχήμα 5.3: Αρχική οθόνη FFTSES

Στην επιλογή Computations, επιλέγουμε τι είδος μετασχηματισμού Fourier θέλουμε να πραγματοποιήσουμε και ποιες φυσικές ποσότητες θα μετέχουν σε αυτόν. Επιλέγοντας ευθύ μετασχηματισμό, το κουμπί Lightning Surge είναι προεπιλεγμένο, ενεργοποιώντας μια εσωτερική συνάρτηση του προγράμματος (σχήμα 5.4).

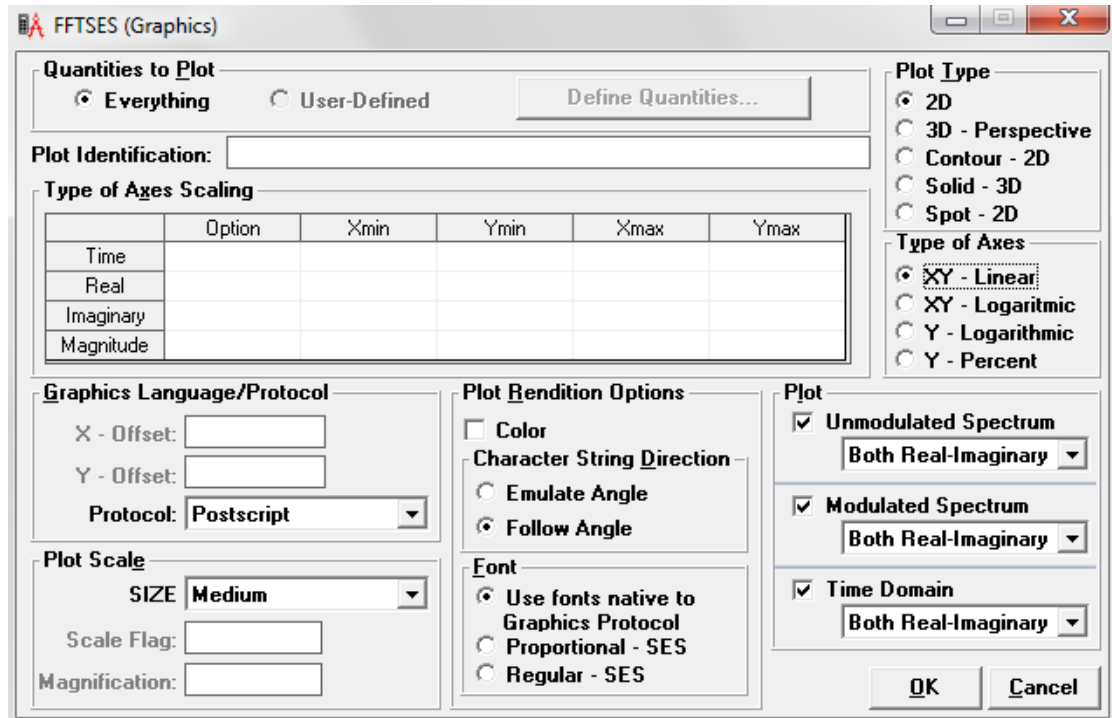
Στο πεδίο Sampling Exponent καθορίζουμε τον αριθμό των σημείων (N) που ενεργοποιούνται για τον υπολογισμό και την ψηφιοποίηση του χρονικού σήματος ($N=2^n$). Το χρονικό παράθυρο T του σήματος που εισάγουμε στην επιλογή Time-Duration καθορίζουν το βήμα συχνότητας Δf και τον εκθέτη n. Βασικό κριτήριο στην 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: Ευθύς μετασχηματισμός Fourier

Στην αρχική οθόνη της εφαρμογής υπάρχει και η επιλογή Graphics, στην οποία 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, 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 (σχήμα 5.5).

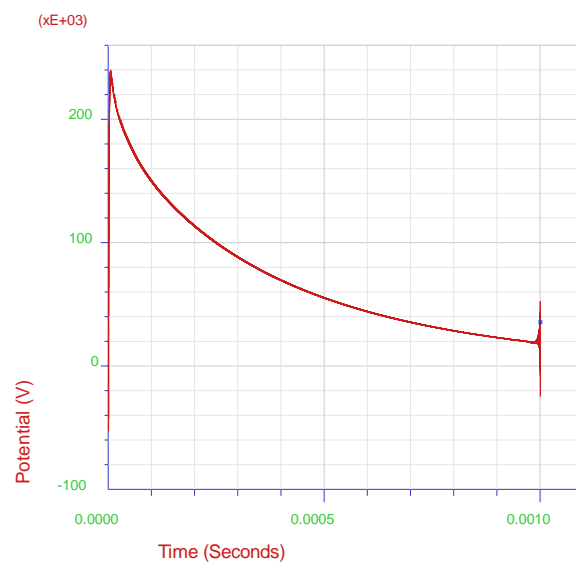


Σχήμα 5.5: Επιλογές γραφημάτων του επιλύτη FFTSES

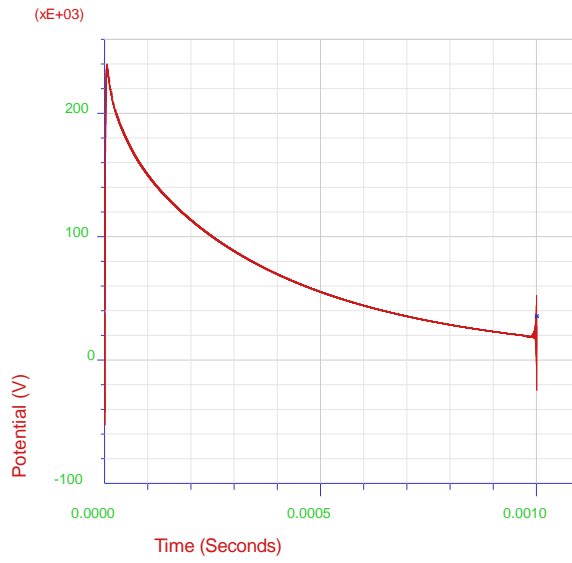
Αφού εισαχθούν τα χαρακτηριστικά του κεραυνικού ρεύματος στον επιλύτη FFTSES (πλάτος, χρόνος μετώπου και ουράς, παράθυρο χρόνου), υπολογίζεται το φάσμα συχνότητάς του και επιλέγεται πλήθος κρίσιμων συχνοτήτων από το πρόγραμμα. Αλλάζοντας κάποιο από τα χαρακτηριστικά του σήματος αλλάζουν και οι κρίσιμες 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 εξετάστηκαν οι κλίσεις 1/50μs 10/350μs σε δύο διαφορετικά πλάτη (30kA και 50kA). Για την κλίση 1/50 είναι αρκετό ένα παράθυρο χρόνου 300μs το οποίο και χρησιμοποιήθηκε. Αντιθέτως για τη κλίση 10/350μs χρειάζεται

αρκετά μεγαλύτερο παράθυρο χρόνου. Όμως αυξάνοντας τη χρονική διάρκεια του σήματος αυξάνεται και ο αριθμός των κρίσιμων συχνοτήτων που επιλέγει ο FFTSES που σημαίνει αυξάνεται ο χρόνος ‘τρεξίματος’ του επιλύτη Hifreq.

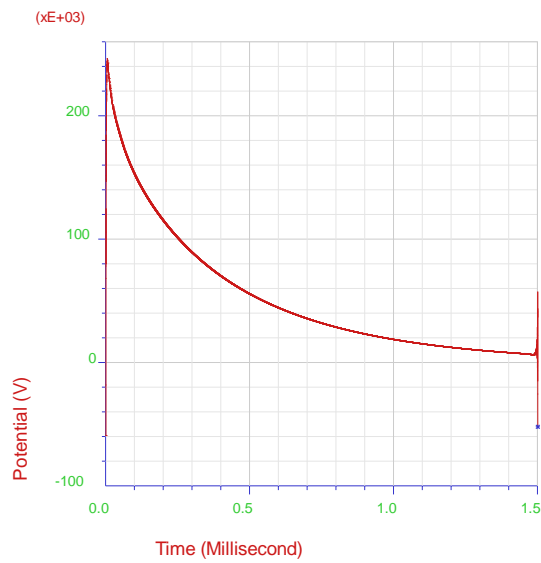
Για το λόγο αυτό, έγινε διερεύνηση για την εύρεση κατάλληλης χρονικής διάρκειας. Δοκιμάστηκαν τα χρονικά παράθυρα: 1000μs, 1200μs, 1500μs. Στις τρεις αυτές περιπτώσεις προκύπτουν διαφορετικές κρίσιμες συχνότητες οπότε τα αποτελέσματα των δυναμικού και βηματικών τάσεων που προκύπτουν από τον επιλύτη Hifreq δεν είναι συγκρίσιμα. Όμως ο αντίστροφος Fourier υπολογισμένος στο ίδιο σημείο και στις 3 περιπτώσεις προκύπτει πρακτικά ίδιος αφού τα αποτελέσματα έχουν διάφορα μικρότερη του 3% (σχήματα 5.6 έως 5.8). Για ρεύματα κλίσης 10/350μs, λοιπόν, επιλέχθηκε το χρονικό παράθυρο 1200μs συνδυάζοντας καλύτερη ανάλυση στο πεδίο της συχνότητας και λογικό χρόνο προσομοίωσης.



Σχήμα 5.6: Αντίστροφος Fourier κεραυνικού ρεύματος 10/350μs, 50kA για παράθυρο χρόνου 1000μs.




Σχήμα 5.7: Αντίστροφος Fourier κεραυνικού ρεύματος 10/350μs, 50kA για παράθυρο χρόνου 1200μs.

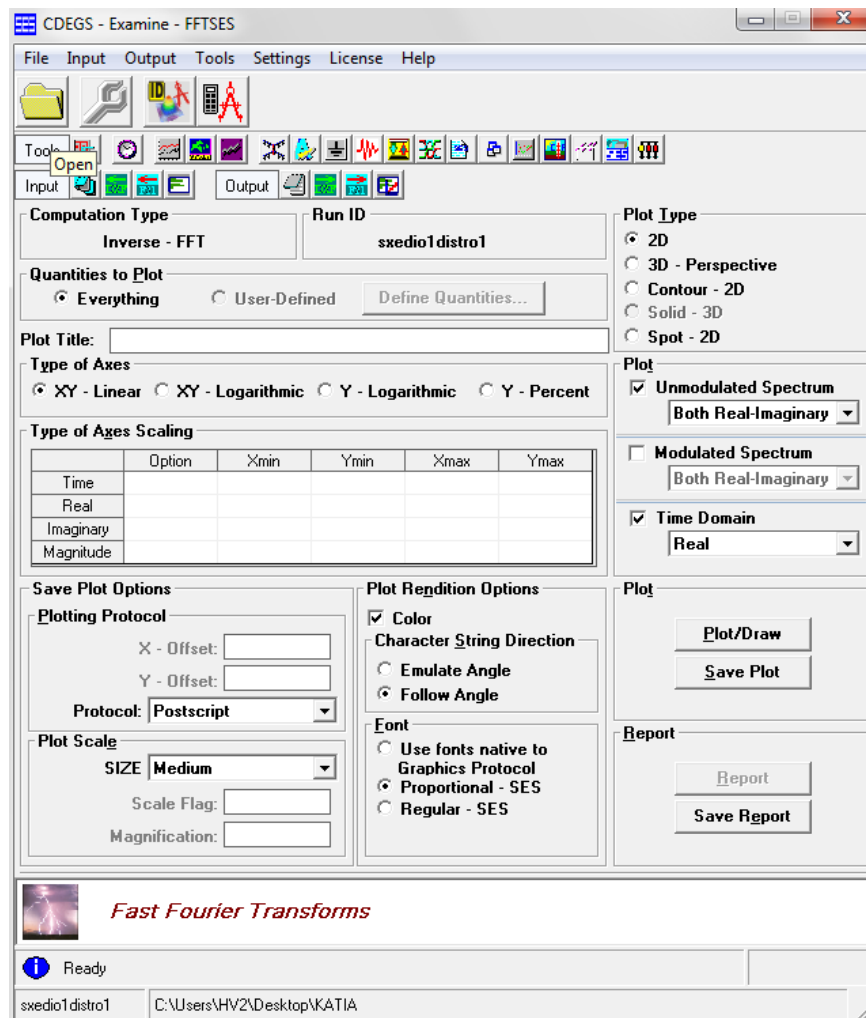


Σχήμα 5.8: Αντίστροφος Fourier κεραυνικού ρεύματος 10/350μs, 50kA για παράθυρο χρόνου 1500μs.

5.2.2 Προσομοίωση και εξαγωγή αποτελεσμάτων του FFTSES

Μετά την ολοκλήρωση της καταχώρησης δεδομένων και καθώς βρισκόμαστε στην αρχική οθόνη του επιλύτη, η προσομοίωση ξεκινάει πατώντας το κουμπί

Compute/Submit . Μόλις τελειώσει η προσομοίωση, αυτόματα εμφανίζεται η οθόνη παρουσίασης αποτελεσμάτων (σχήμα 5.9).



Σχήμα 5.9: Επιλογή γραφημάτων του επιλύτη FFTSES

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.

Οι συχνότητες που προκύπτουν από το μετασχηματισμό Fourier των τεσσάρων κεραυνικών ρευμάτων που εξετάστηκαν φαίνονται στον πίνακα 5.1.

	1/50μs 30kA 300μs	1/50μs 50kA 300μs	10/350μs 30kA 1200μs	10/350μs 50kA 1200μs
1η	0	0	0	0
2η	3333,334	3333,334	833,33337	833,33337
3η	6666,667	6666,667	1666,6667	1666,6667
4η	10000	10000	2500,0002	2500,0002
5η	13333,33	13333,33	3333,3335	3333,3335
6η	16666,67	16666,67	4166,667	4166,667
7η	20000	20000	5000,0005	5000,0005
8η	23333,33	23333,33	5833,3335	5833,3335
9η	216666,7	30000	6666,667	6666,667
10η	973333,4	216666,7	9166,667	7500,0005
11η	1946667	973333,4	11666,667	8333,334
12η	2920000	1946667	15000,001	10833,334
13η	3893334	2920000	22500,002	15833,334
14η	4866667	3893334	520833,34	22500,002
15η	5840001	4866667	975000,06	188333,34
16η	6813334	5840001	1950000,1	519166,69
17η	6826667	6813334	2561666,8	975000,06
18η		6826667	2800000,2	1950000,1
19η			2925000,2	2133333,5
20η			3094166,8	2925000,2
21η			3417500,2	3093333,5
22η			3900000,2	3900000,2
23η			4320833,5	4875000
24η			4875000	5850000,5
25η			5850000,5	6825000,5
26η			6825000,5	6826667
27η			6826667	

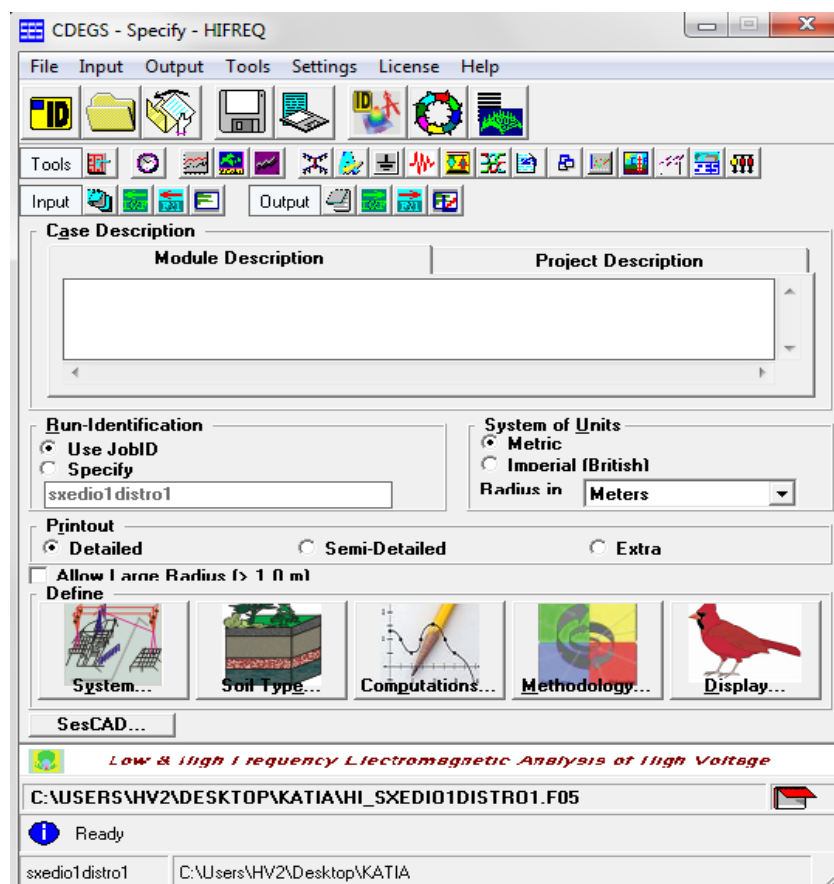
Πίνακας 5.1: Κρίσιμες συχνότητες που επιλέχθηκαν από τον επιλύτη FFTSES για τα κεραυνικά ρεύματα που χρησιμοποιήθηκαν.

5.3 Απόκριση συστήματος στο πεδίο της συχνότητας

5.3.1 Εισαγωγή δεδομένων στον επιλύτη HIFREQ

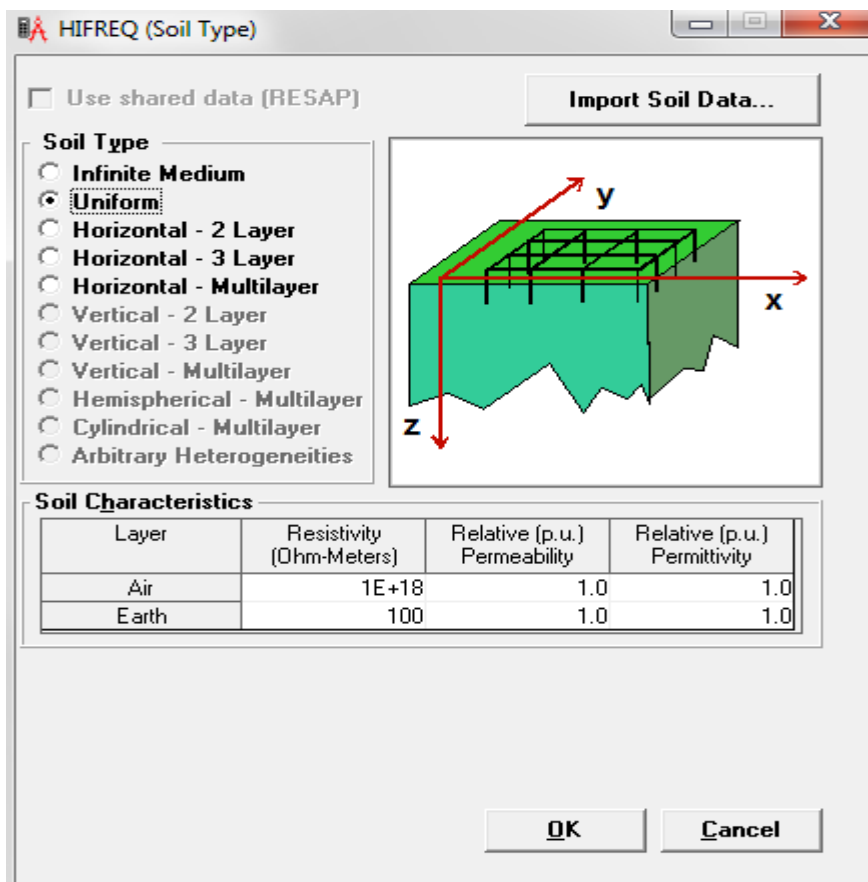
Η εφαρμογή HIFREQ μας επιτρέπει τον υπολογισμό της κατανομής των ρευμάτων σε δίκτυα υπόγειων ή εναέριων αγωγών. Στη συνέχεια, μπορούν να υπολογιστούν και άλλες ηλεκτρομαγνητικές ποσότητες που ενεργοποιούνται εξαιτίας της παραπάνω κατανομής, όπως το ηλεκτρικό και το μαγνητικό πεδίο και τάσεις (είτε σαν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

Στην αρχική οθόνη, στην επιλογή Module Description μπορούμε να εισάγουμε σχόλια για να περιγράψουμε την περίπτωση που θα αναλυθεί στην εφαρμογή. Μπορούμε να επιλέξουμε το σύστημα μονάδων (μετρικό ή βρετανικό) που θα χρησιμοποιήσουμε στην εφαρμογή μας, ενώ με την ένδειξη Run-Identification καθορίζουμε το JobID στο οποίο θα γίνει η αποθήκευση (σχήμα 5.10).



Σχήμα 5.10: Αρχική οθόνη του επιλύτη HIGREQ

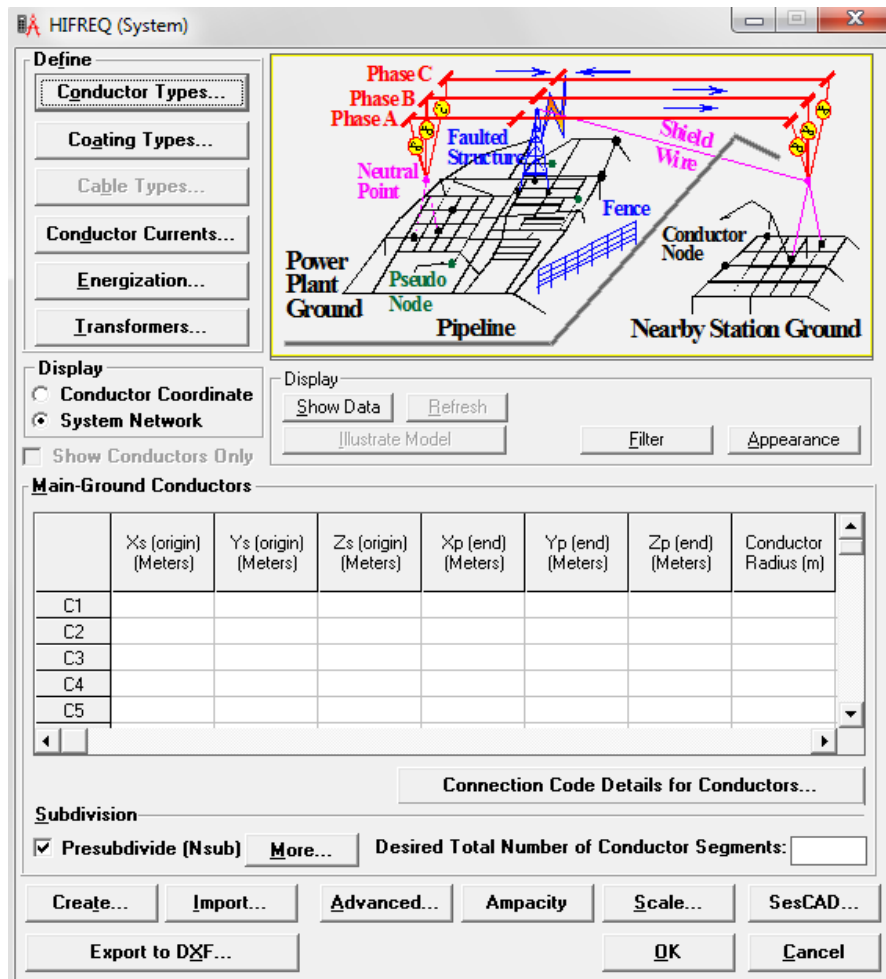
Στην επιλογή Soil Type προσδιορίζουμε το μοντέλο που πιστεύουμε ότι προσεγγίζει το εν λόγω έδαφος, π.χ. οριζόντια πολυστρωματικό (σχήμα 5.11)



Σχήμα 5.11: Επιλογή εδάφους στον επιλύτη HIFREQ

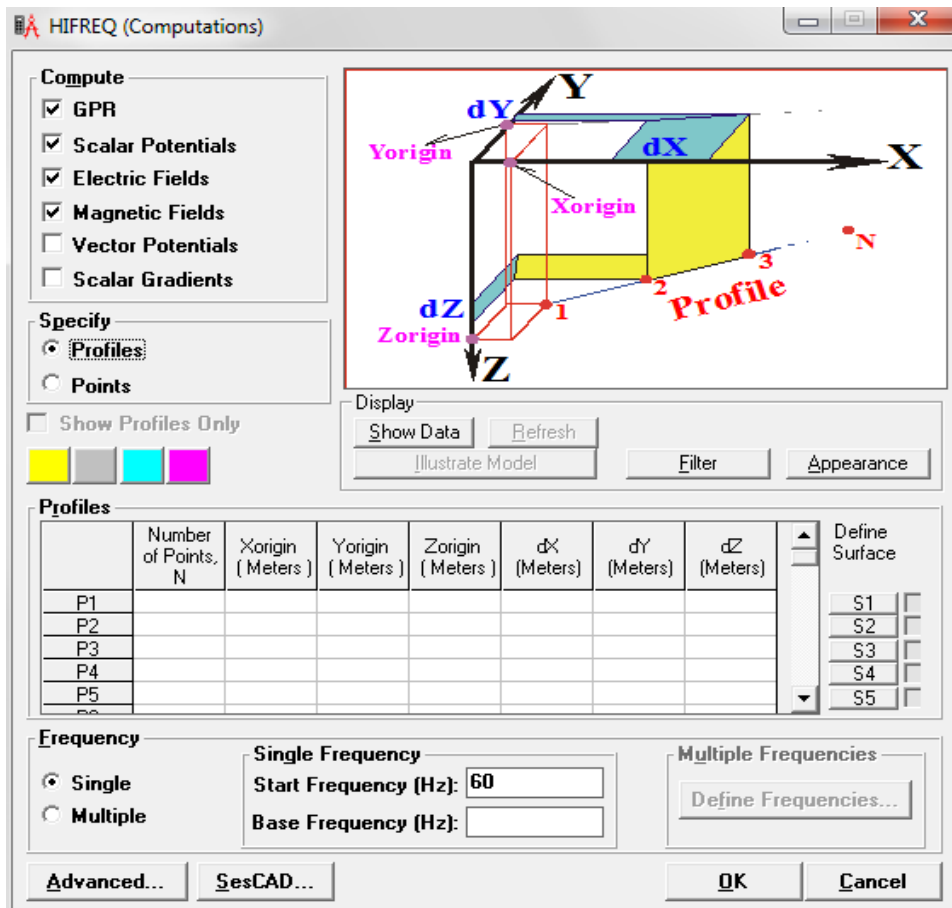
Στην επιλογή System, έχουμε τη δυνατότητα, στις επιλογές Characteristics, Conductor Currents και Energization της υποενότητας Define, να εισάγουμε τα χαρακτηριστικά των αγωγών, όπως ο τύπος και το εξωτερικό τους κάλυμμα, καθώς και τα απαιτούμενα ρεύματα ή τάσεις για την ενεργοποίησή τους. Στη συνέχεια εισάγουμε το δίκτυο των αγωγών και το ενεργοποιούμε στην υποενότητα Main-Ground Conductors (σχήμα 5.12).

Για να δούμε το δίκτυο των αγωγών, μπορούμε στην οθόνη HIFREQ (System) να πατήσουμε την επιλογή Show Data.



Σχήμα 5.12: Επιλογή δικτύου και χαρακτηριστικών του

Με την επιλογή Computations, στην αρχική οθόνη, 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 (σχήμα 5.13).



Σχήμα 5.13: Εισαγωγή Profiles και συχνοτήτων

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.

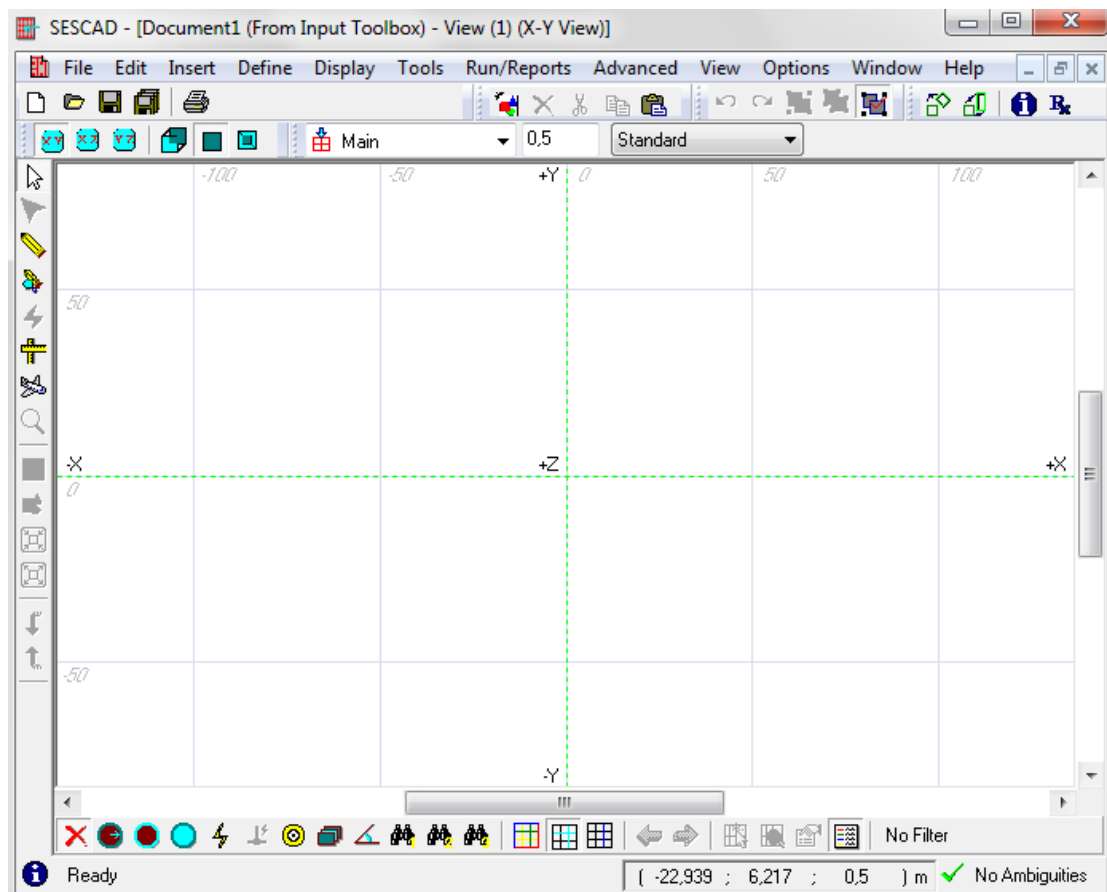
Πατώντας OK επιστρέφουμε στην αρχική οθόνη του HIFREQ.

- **SESCAD**

Η εφαρμογή SesCAD είναι ένα γραφιστικό εργαλείο για τον εύκολο σχεδιασμό συστημάτων και δικτύων αγωγών. 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 (σχήμα 5.14)



Σχήμα 5.14: Γραφικό περιβάλλον SESCAD

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. Στον πίνακα 5.2 φαίνονται τα χαρακτηριστικά των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν στη

παρούσα εργασία. 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.

υλικό	Σχετική ειδική αντίσταση (Ω/km)	Σχετική επιτρεπτότητα (Ω/km)
Χάλυβας	17	300
Αλουμίνιο	1,64	1,0

Πίνακας 5.2: Σχετική ειδική αντίσταση και τη σχετική επιτρεπτότητα χάλυβα και αλουμινίου.

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 :

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

$$\lambda = 3160 \sqrt{\rho / f} \text{ στο έδαφος} \quad (5.2)$$

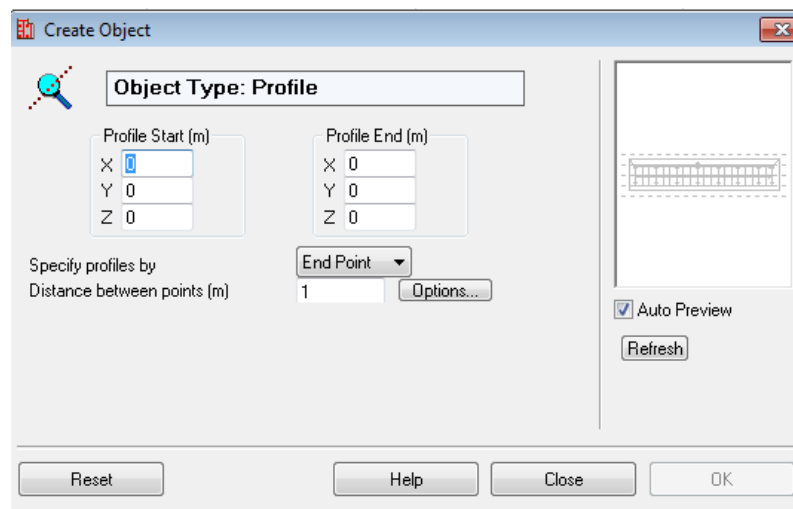
όπου f η συχνότητα και ρ η ειδική αντίσταση του εδάφους. Πρακτικά θέτουμε το λ αρκετά μικρότερο για μεγαλύτερη ακρίβεια αυξάνοντας βέβαια τον χρόνο προσομοίωσης. Στις προσομοιώσεις επιλέχθηκε $\lambda = 0,2\text{m}$ για τους υπολογισμούς.

Τελειώνοντας με τη σχεδίαση στο SESCAD κλείνουμε το παράθυρο του SESCAD και επιστρέφουμε στο παράθυρο του σχήματος 5.10.

Επιλέγοντας Define Frequencies 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.


Στα σχέδια που προσομοιώθηκαν, ορίστηκαν πέντε profiles στο έδαφος κατά μήκος της εγκατάστασης με απόσταση 1,5M μεταξύ τους, όπου υπολογίζεται το δυναμικό και οι βηματικές τάσεις. Επίσης, σχεδιάστηκαν profiles κατά μήκος των αγωγών ισχύος για τον υπολογισμό των επαγόμενων τάσεων. Σε κάθε profile η απόσταση των observation points είναι 0,2m.

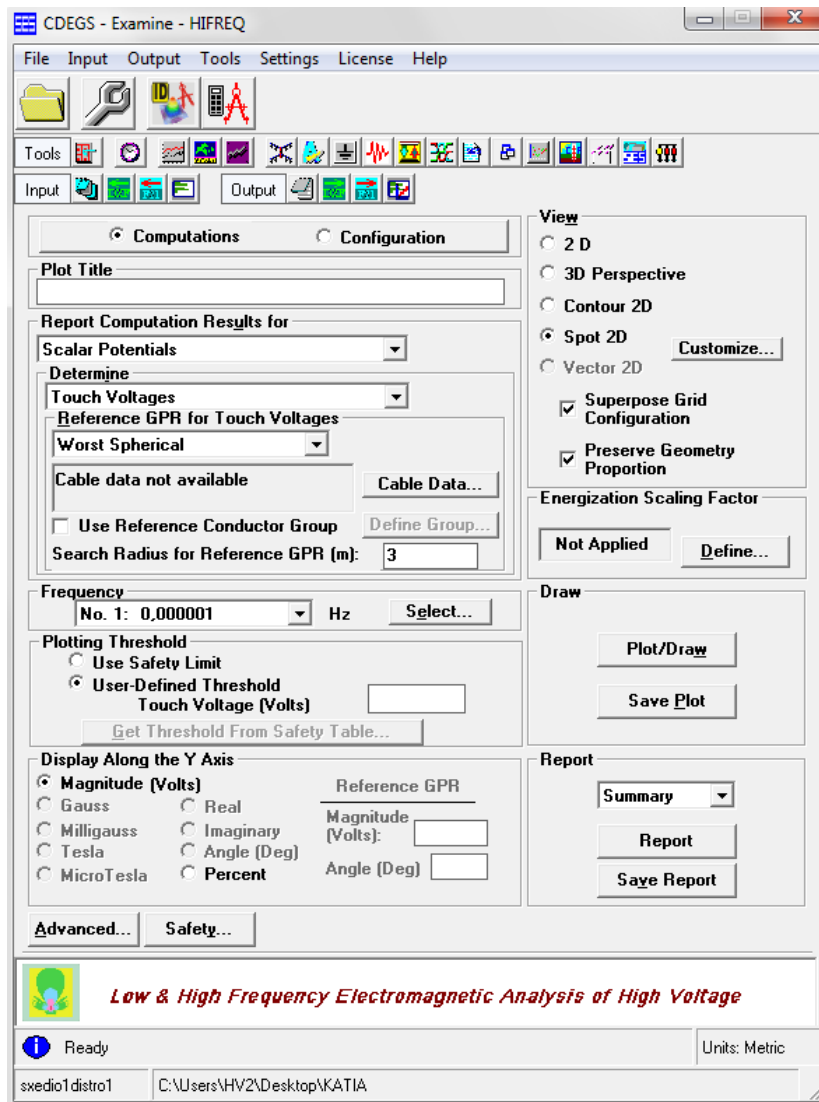
Τα observation profiles είναι ευθύγραμμα τμήματα που αποτελούνται από observation points όπου και γίνονται οι υπολογισμοί. Όπως φαίνεται στο **σχήμα 5.15**, ορίζουμε το σημείο που ξεκινάει και τελειώνει το profile ενώ στο πεδίο Distance between points εισάγουμε την απόσταση των points.



Σχήμα 5.15: Σχεδιασμός observation profile

5.2.2 Προσομοίωση και εξαγωγή αποτελεσμάτων του HIFREQ

Ομοίως, η προσομοίωση ξεκινάει πατώντας το κουμπί Compute/Submit  και αφού τελειώσει, αυτόματα εμφανίζεται η οθόνη παρουσίασης αποτελεσμάτων (σχήμα 5.16).

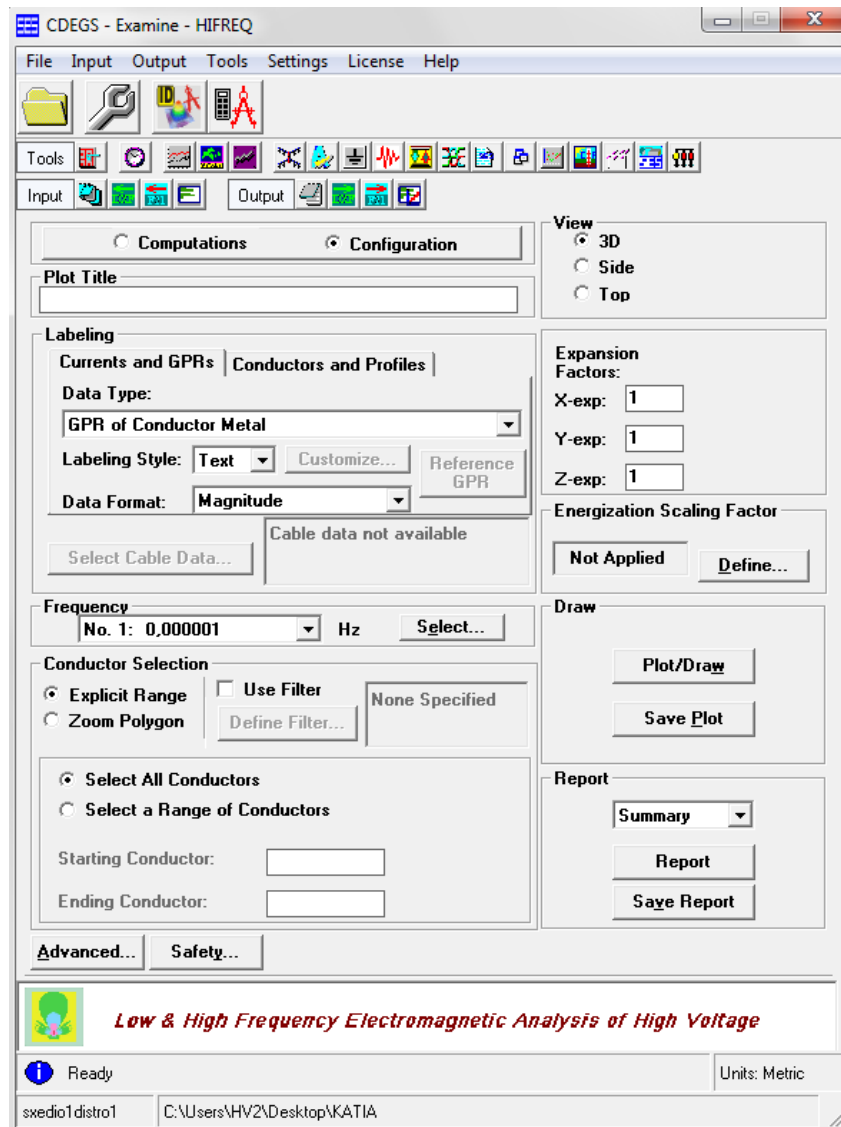


Σχήμα 5.16: Επιλογή γραφημάτων αποτελεσμάτων του επιλύτη HIFREQ

Πατάμε την επιλογή 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 Configuration στην αρχική οθόνη εμφανίζεται το σχήμα 5.17.



Σχήμα 5.17: Επιλογή γραφημάτων συστήματος του επιλύτη HIFREQ

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.

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.

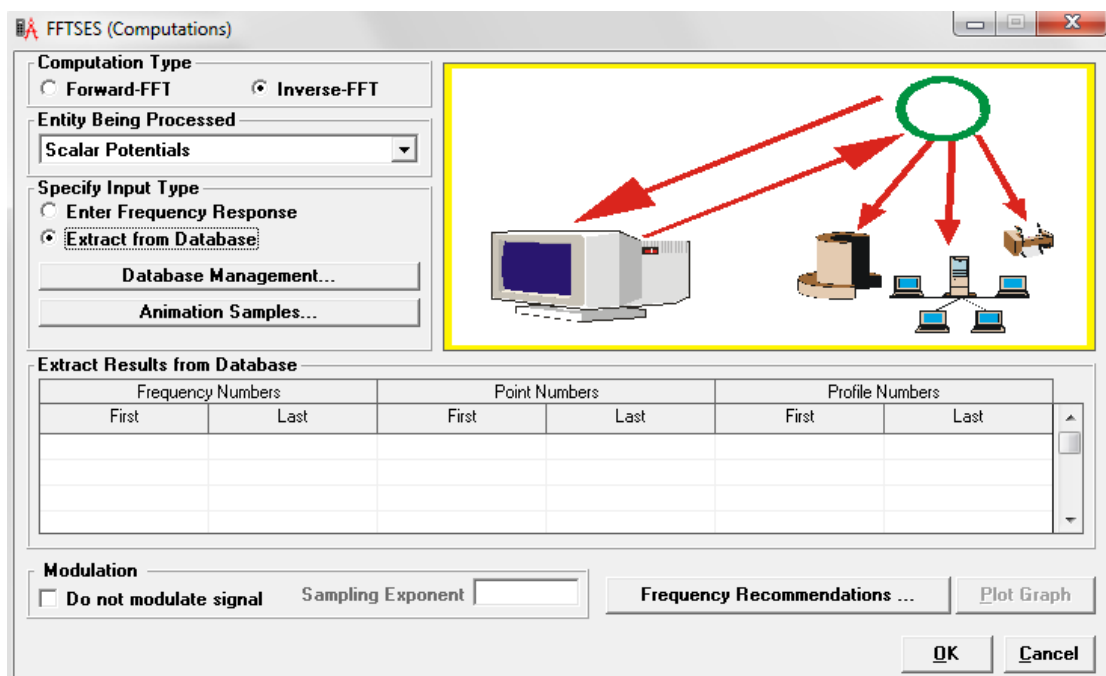
Για τα αποτελέσματα των δυναμικού επιλέγουμε Report Computation Results for → Scalar Potentials, Determine → Touch Voltages, Reference GPR for Touch Voltages → Worst Spherical και Search Radius for Reference GPR: 1m. Η επιλογή Worst Spherical υπολογίζει την τάση επαφής σε κάθε observation point σε σχέση 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.

5.4 Απόκριση συστήματος στο πεδίο του χρόνου

5.4.1 Υπολογισμός αντίστροφου Fourier (IFFT)


Επιλέγοντας Inverse FFT στο σχήμα 5.4 εμφανίζεται στην οθόνη το σχήμα 5.18. 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. Στα πεδία Point Numbers εισάγουμε τα σημεία παρατήρησης και στα πεδία Profile Numbers τα Profiles στα οποία θέλουμε να υπολογιστεί ο IFFT.



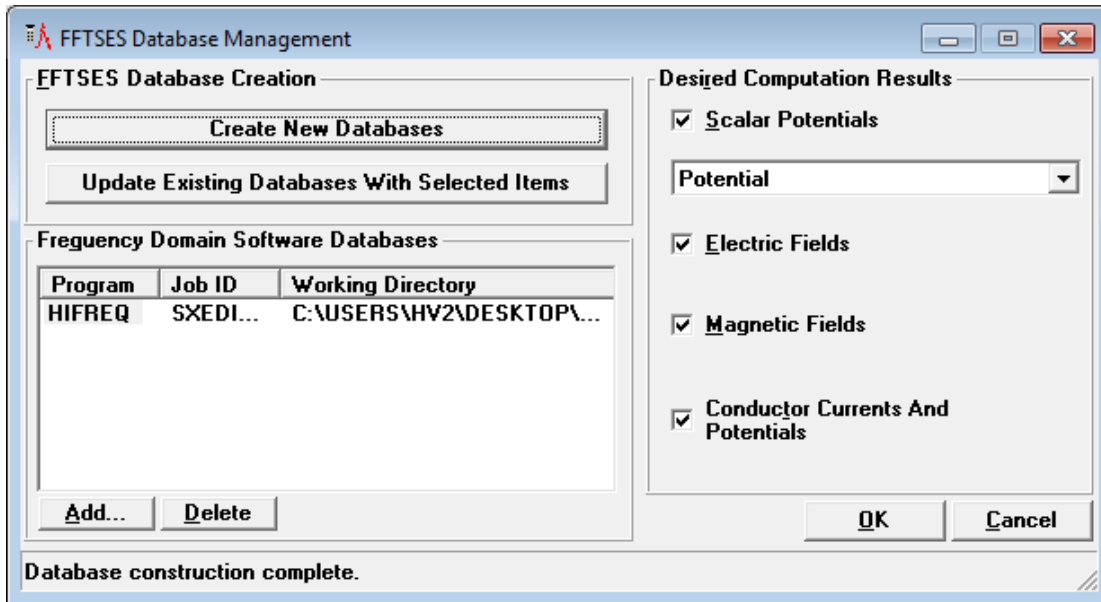
Σχήμα 5.18: Αντίστροφος μετασχηματισμός Fourier

Μετά επιλέγουμε Database Management και εμφανίζεται το σχήμα 5.19. 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 5.18 και επιλέγουμε ξανά OK. Στην οθόνη

εμφανίζεται το σχήμα 5.3. Η προσομοίωση ξεκινάει πατώντας το κουμπί

Compute/Submit .

Εξάγουμε τα αποτελέσματα από το σχήμα 5.9 όπως και στον ευθύ μετασχηματισμό Fourier.



Σχήμα 5.19: Δημιουργία βάσης δεδομένων για τον υπολογισμό του IFFT

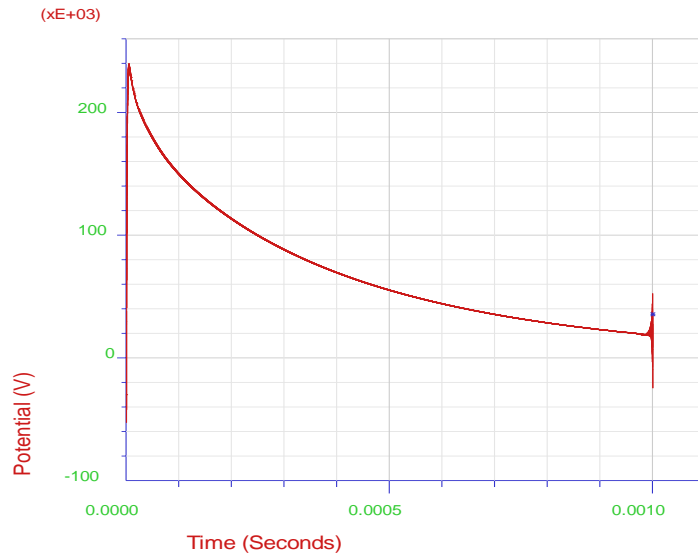
6

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

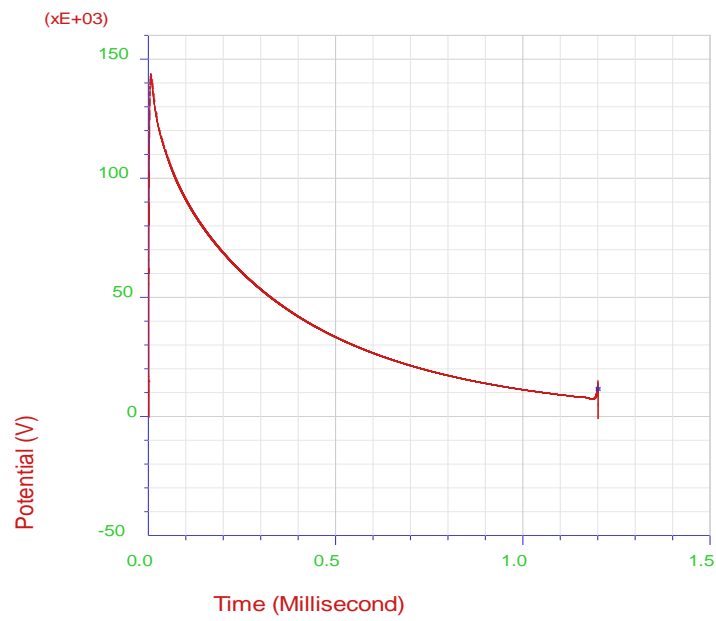
6.1 Επίδραση κυματομορφής κεραυνικού πλήγματος

Για να συγκρίνουμε την απόκριση του συστήματος ως προς την κλίση και το πλάτος του κεραυνικού ρεύματος προσομοιώνουμε τέσσερις διαφορετικές κυματομορφές ρεύματος στις δύο περιπτώσεις που εξετάζουμε. Θεωρούμε σε κάθε προσομοίωση πως η έγχυση ρεύματος γίνεται στην ακίδα (εξωτερικό ΣΑΠ) και το έδαφος έχει ειδική αντίσταση $100\Omega\text{m}$. Επειδή τα διαφορετικά χαρακτηριστικά κυματομορφής συνεπάγονται διαφορετικές κρίσιμες συχνότητες δεν μπορούμε να συγκρίνουμε τα αποτελέσματα που προκύπτουν στις διάφορες συχνότητες, αλλά τα αποτελέσματα του αντίστροφου Fourier.

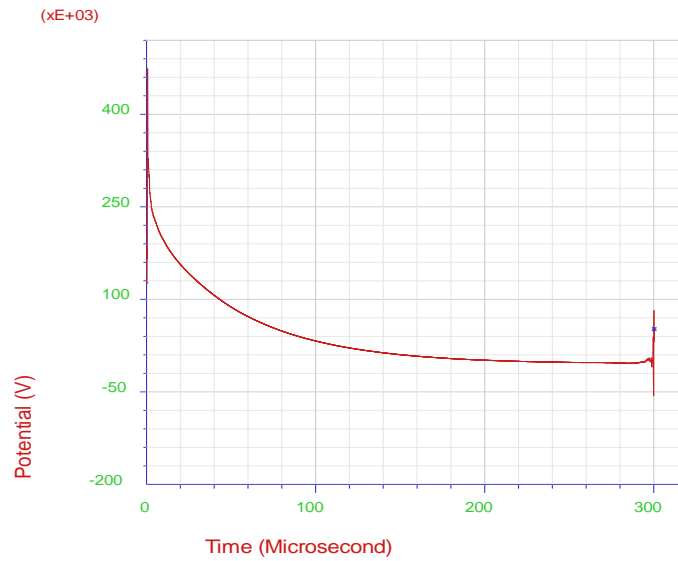
Στα σχήματα 6.1 έως 6.4 φαίνονται τα αποτελέσματα του IFFT για το αναπτυσσόμενο δυναμικό στο έδαφος για τις τέσσερις κυματομορφές ($10/350\mu\text{s}$ με μέγιστη τιμή 30kA ή 50kA και $1/50\mu\text{s}$ με μέγιστη τιμή 30kA ή 50kA) στο σημείο παρατήρησης που παρουσιάζονται μεγαλύτερες τιμές. Το σημείο αυτό βρίσκεται στο profile 2 (Σχήμα 6.5 και 6.6) και είναι το κοντινότερο στο σημείο έγχυσης του κεραυνού. Τα ίδια αποτελέσματα προκύπτουν και στις δύο περιπτώσεις αφού ο σχηματιζόμενος βρόχος (το μόνο στοιχείο που διαφέρει στις περιπτώσεις 1 και 2) δεν επηρεάζει τα αποτελέσματα που λαμβάνουμε στην επιφάνεια του εδάφους.



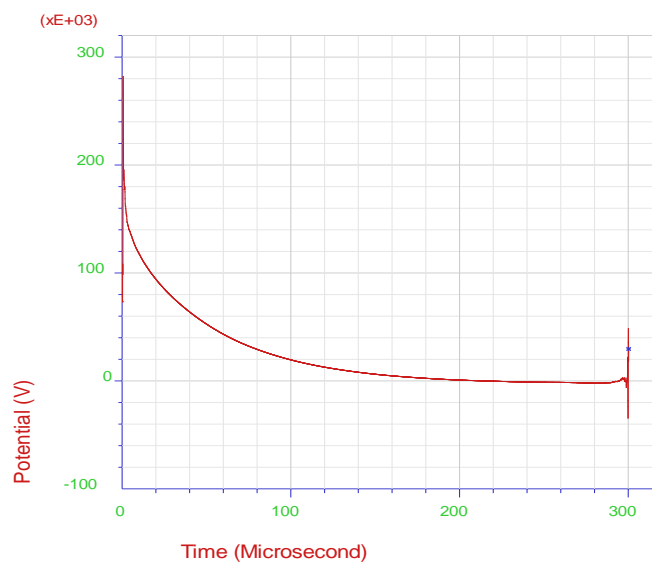
Σχήμα 6.1: Αντίστροφος Fourier για το δυναμικό για κεραυνικό πλήγμα 10/350 μ s,
50kA



Σχήμα 6.2: Αντίστροφος Fourier για το δυναμικό για κεραυνικό πλήγμα 10/350 μ s,
30kA



Σχήμα 6.3: Αντίστροφος Fourier για το δυναμικό για κεραυνικό πλήγμα 1/50μs, 50kA



Σχήμα 6.4: Αντίστροφος Fourier για το δυναμικό για κεραυνικό πλήγμα 1/50μs, 30kA

Οι μέγιστες τιμές των παραπάνω γραφικών παραστάσεων φαίνονται στον πίνακα 6.1.

	1/50μs 30kA	1/50μs 50kA	10/350μs 30kA	10/350μs 50kA
Μέγιστη τιμή αντίστροφου Fourier	286kV	475kV	144kV	240kV

Πίνακας 6.1: Μέγιστη τιμή του δυναμικού όπως προκύπτει από τον αντίστροφο Fourier για τις κυματομορφές που προσομοιώθηκαν.

Βλέπουμε πως και στις δύο κλίσεις η αλλαγή του πλάτους της κυματομορφής προκαλεί στα αποτελέσματα του αντίστροφου Fourier αλλαγή ανάλογη του λόγου των πλατών (3/5). Επίσης, διατηρώντας το ίδιο πλάτος και αλλάζοντας την κλίση παρατηρούμε πως η μεγαλύτερη κλίση δίνει αυξημένα αποτελέσματα αλλά φθίνει γρηγορότερα που σημαίνει πως το σύστημα καταπονείται λιγότερο χρόνο.

6.2 Επίδραση εδάφους

Για να αποφανθούμε για την επίδραση του εδάφους διατηρούμε σταθερή έγχυση κεραυνικού ρεύματος 10/350μs, 50kA στην ακίδα και στις δύο περιπτώσεις συνδεσμολογίας αλλάζοντας την παράμετρο του εδάφους.

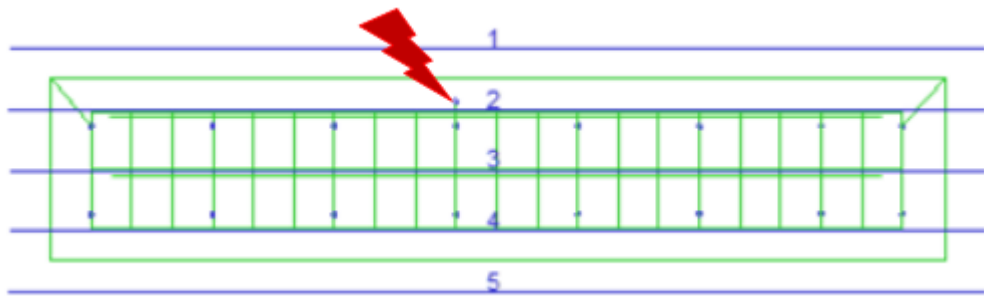
Τα εδάφη που εξετάζονται είναι:

- Μονοστρωματικό με αντίσταση εδάφους 100Ωm
- Διστρωματικό με $\rho_1=100\Omega\text{m}$ για ύψος $h=2\text{m}$ και $\rho_2=1000\Omega\text{m}$ (διστρωματικό 1)
- Διστρωματικό με $\rho_1=1000\Omega\text{m}$ για ύψος $h=2\text{m}$ και $\rho_2=100\Omega\text{m}$ (διστρωματικό 2)

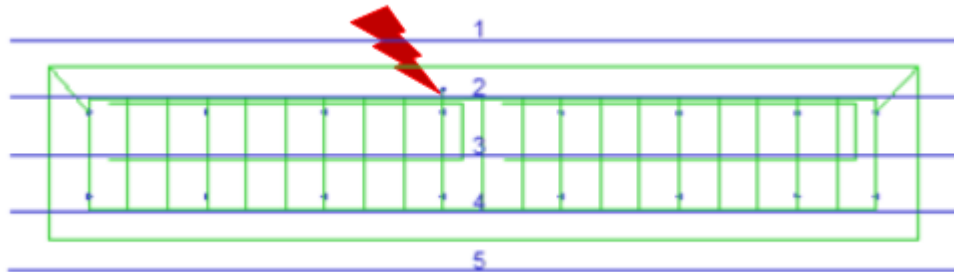
A) Τάσεις επαφής (touch voltages)

Οι τάσεις επαφής υπολογίζονται στα profiles 1 έως 5 που βρίσκονται στο έδαφος για την περίπτωση 1 (σχήμα 6.5) και την περίπτωση 2 (σχήμα 6.6).

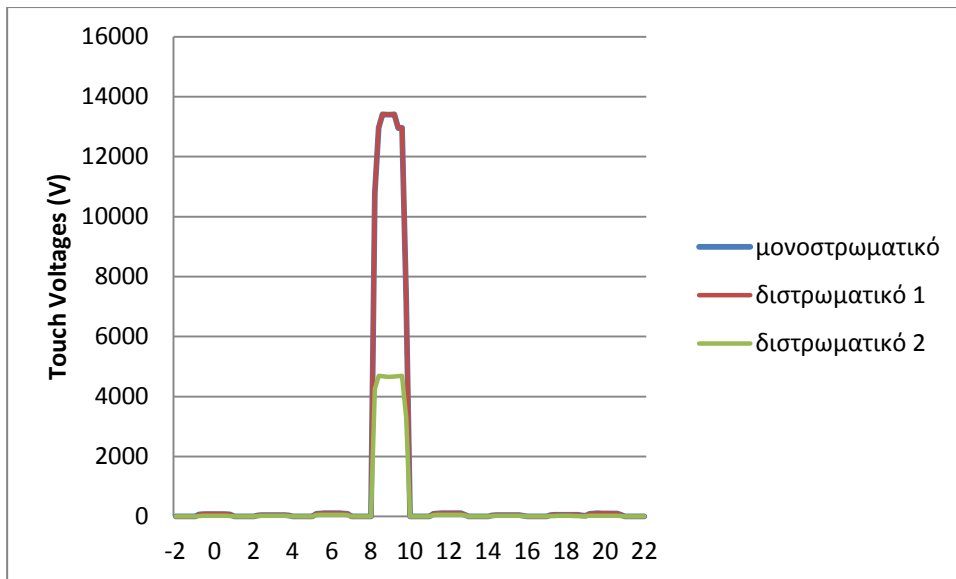
Στα σχήματα 6.7 έως 6.9 συγκρίνονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν κατά μήκος του profile 2 που είναι το κοντινότερο στο σημείο πτώσης του κεραυνού. Ο οριζόντιος άξονας σε κάθε σχήμα αντιπροσωπεύει τη θέση του profile σε σχέση με τον άξονα x του σχεδιαστικού εργαλείου SESCAD. Οι υψηλότερες τιμές παρατηρούνται κοντά στην ακίδα. Οι τάσεις επαφής για τις τρεις περιπτώσεις εδάφους που εξετάστηκαν δεν παρουσιάζουν μέγιστο στις ίδιες συχνότητες οπότε γίνεται σύγκριση των εδαφών σε όλες τις συχνότητες που παρουσιάζουν μέγιστο.



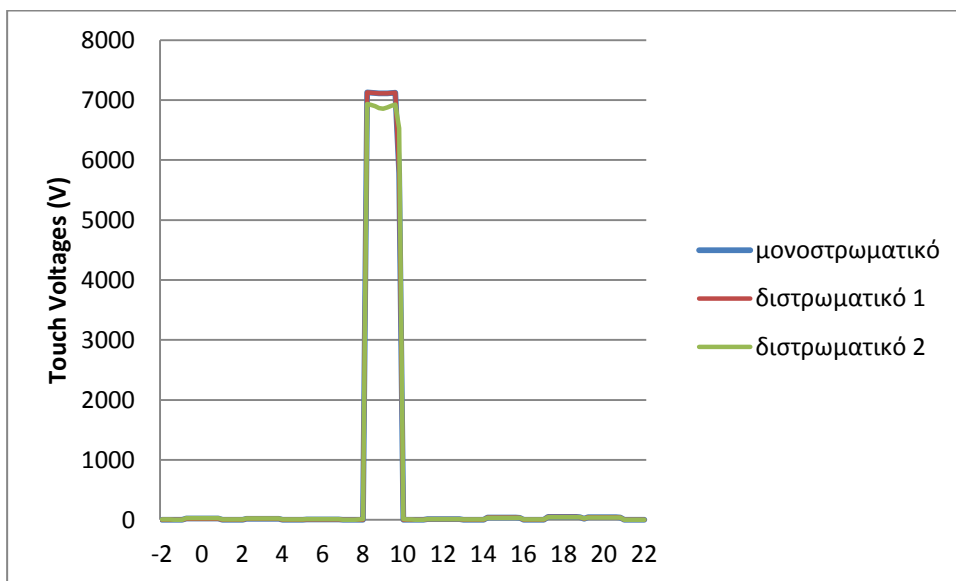
Σχήμα 6.5: Profiles στο έδαφος (περίπτωση 1)



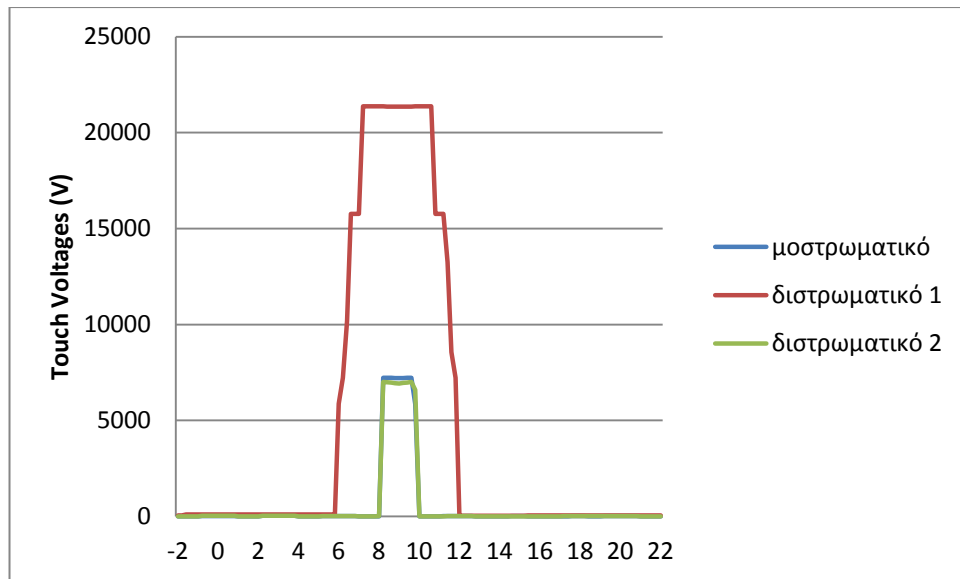
Σχήμα 6.6: Profiles στο έδαφος (περίπτωση 2)



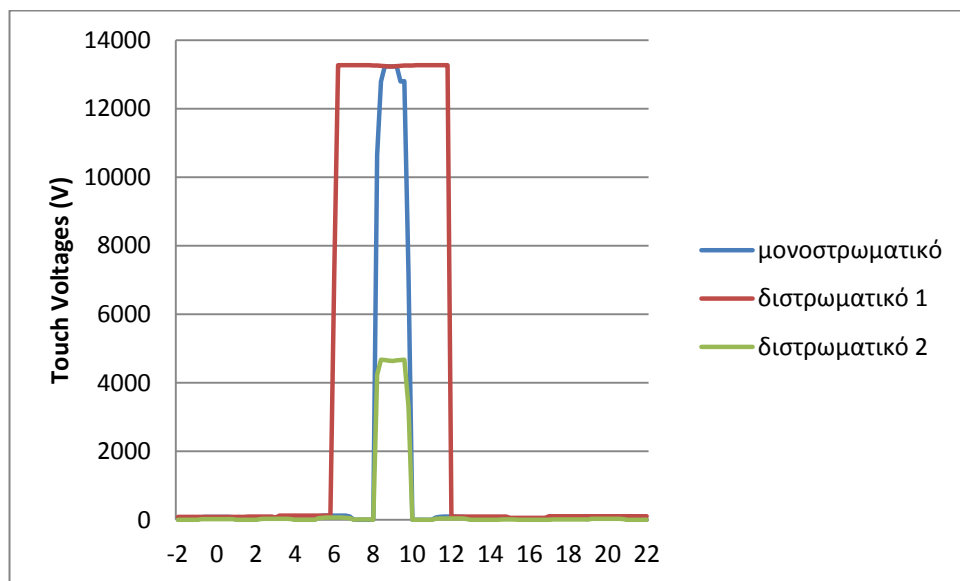
Σχήμα 6.7: Τάσεις επαφής μονοστρωματικού, διστρωματικού 1 και διστρωματικού εδάφους 2 για την 20^η συχνότητα (περίπτωση 1).



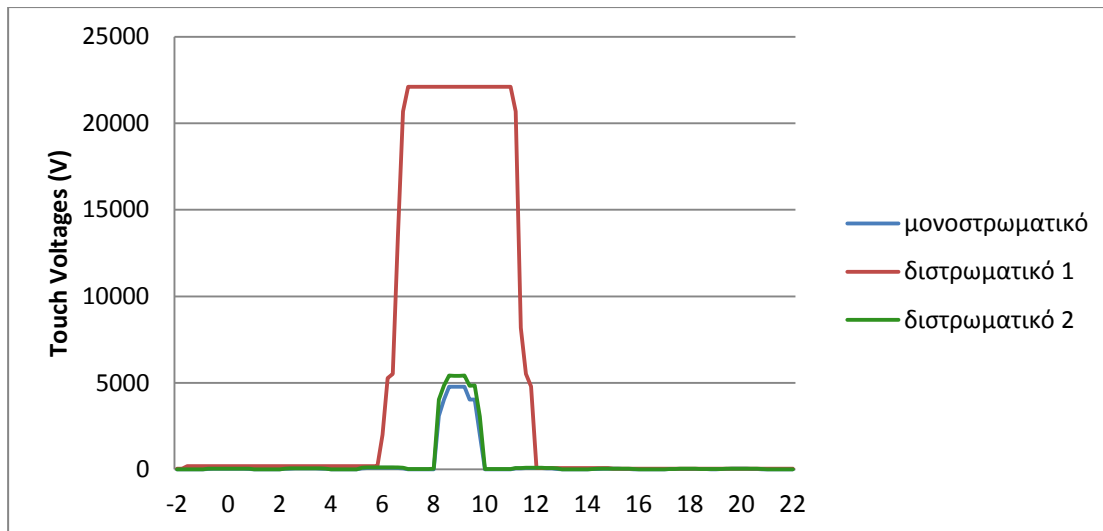
Σχήμα 6.8: Τάσεις επαφής μονοστρωματικού, διστρωματικού 1 και διστρωματικού εδάφους 2 για την 23^η συχνότητα (περίπτωση 1).



Σχήμα 6.9: Τάσεις επαφής μονοστρωματικού, διστρωματικού 1 και διστρωματικού εδάφους 2 για την 23^η συχνότητα (περίπτωση 2).



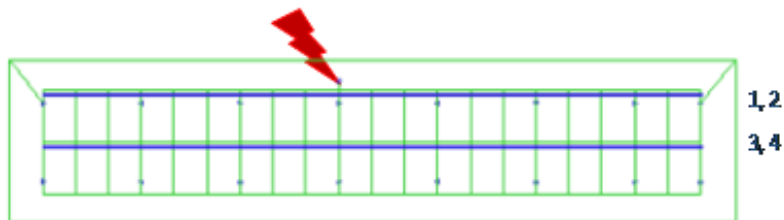
Σχήμα 6.10: Τάσεις επαφής μονοστρωματικού, διστρωματικού 1 και διστρωματικού εδάφους 2 για την 20^η συχνότητα (περίπτωση 2).



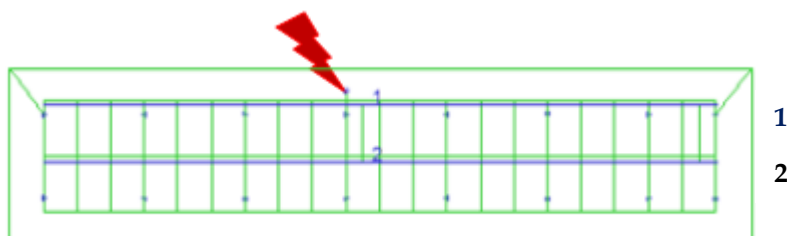
Σχήμα 6.11: Τάσεις επαφής μονοστρωματικού, διστρωματικού 1 και διστρωματικού εδάφους 2 για την 18^η συχνότητα (περίπτωση 2).

B) Επαγόμενες τάσεις (induced voltages)

Οι επαγόμενες τάσεις υπολογίζονται στα profiles 1 έως 4 που βρίσκονται στους αγωγούς ισχύος για την περίπτωση 1 (σχήμα 6.12) και στα profiles 1 και 2 για την περίπτωση 2 (σχήμα 6.13).

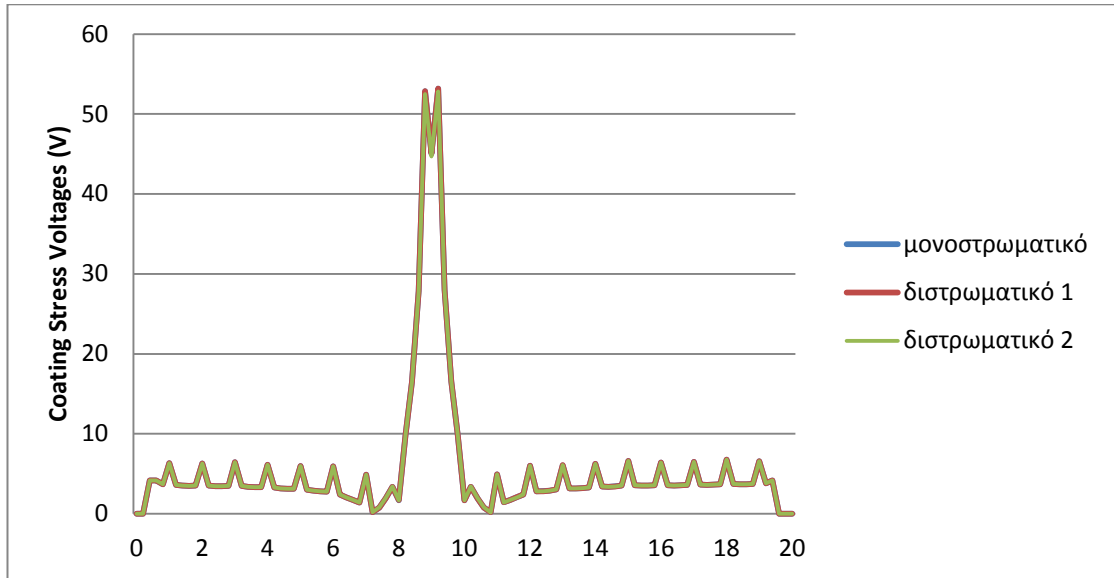


Σχήμα 6.12: Profiles στους αγωγούς (περίπτωση 1)

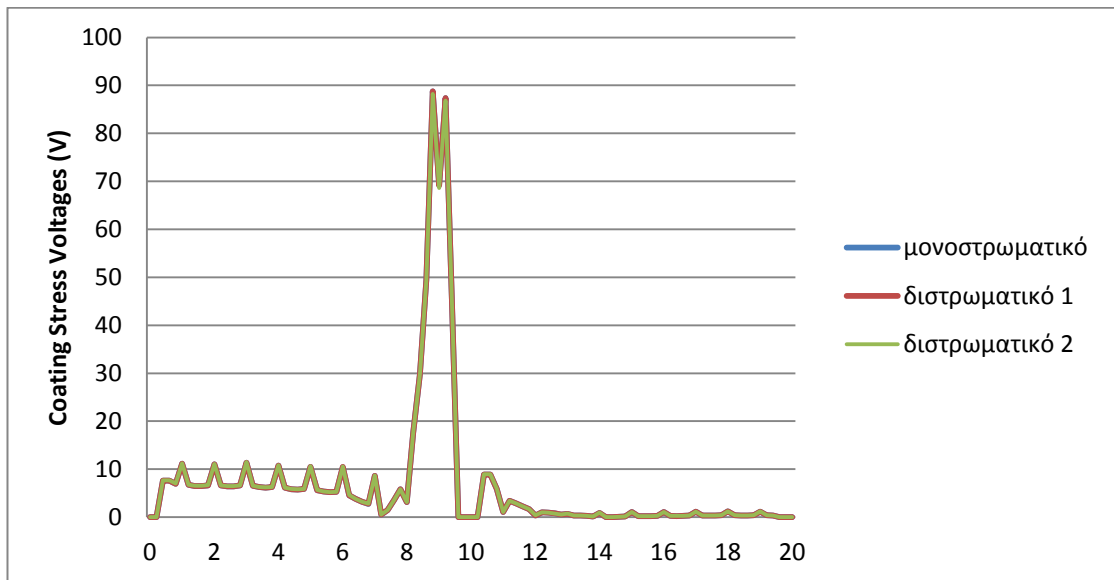


Σχήμα 6.13: Profiles στους αγωγούς (περίπτωση 2)

Στα σχήματα 6.14 έως 6.15 φαίνονται οι υπολογισμοί των επαγόμενων τάσεων κατά μήκος του profile 1 και στις δύο περιπτώσεις καθώς είναι το κοντινότερο στο σημείο πτώσης του κεραυνού (10/350μs 50kA).



Σχήμα 6.14: Επαγόμενες τάσεις μονοστρωματικού, διστρωματικού 1 και διστρωματικού εδάφους 2 για την 18^η συχνότητα (περίπτωση 1).



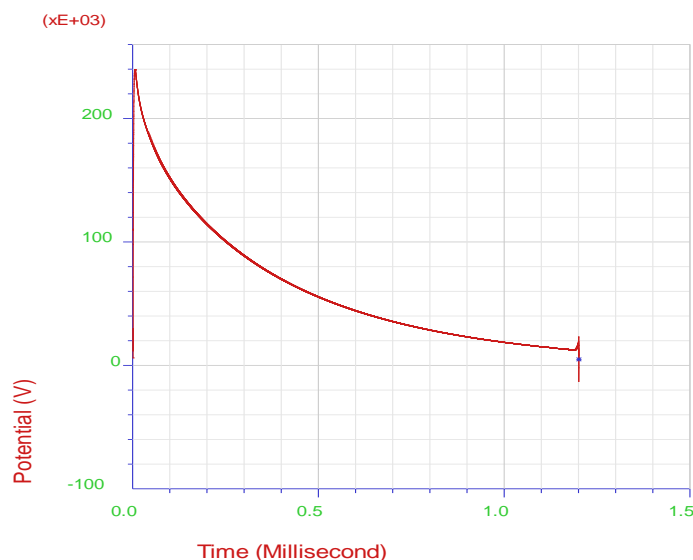
Σχήμα 6.15: Επαγόμενες τάσεις μονοστρωματικού, διστρωματικού 1 και διστρωματικού εδάφους 2 για την 18^η συχνότητα (περίπτωση 2).

Παρατηρούμε πως και στις δύο περιπτώσεις συνδεσμολογίας των πλαισίων τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για τα τρία εδάφη που εξετάζονται συμπίπτουν. Άρα, συμπεραίνουμε ότι η ειδική αντίσταση του εδάφους δεν επηρεάζει τις επαγόμενες τάσεις στους αγωγούς ισχύος.

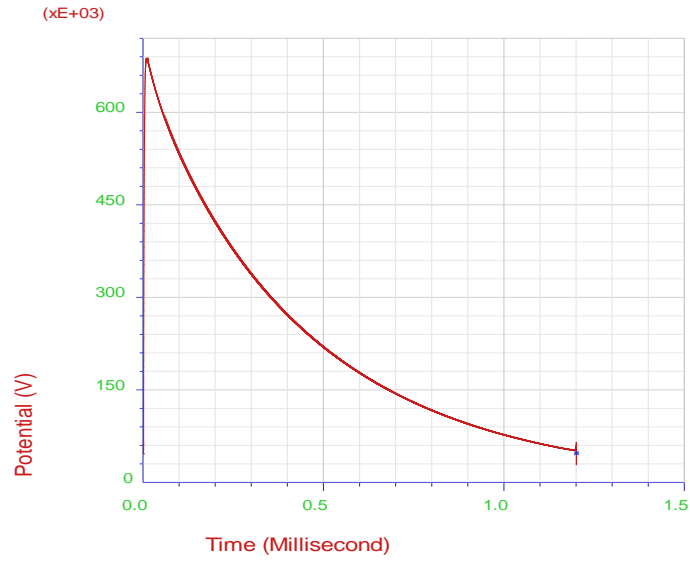
Γ) Αντίστροφος Fourier

Ο αντίστροφος Fourier υπολογίζεται μεμονωμένα για σημεία των profile. Στα σχήματα 6.16 έως 6.21 φαίνονται τα αποτελέσματα του αντίστροφου Fourier για τις περιπτώσεις 1 και 2 στο σημείο του profile 2 του εδάφους που παρουσιάζει τη μέγιστη τιμή. Στο πίνακα 6.2 συνοψίζονται οι μέγιστες τιμές του IFFT για τα εξεταζόμενα εδάφη και τις περιπτώσεις σχηματιζόμενου βρόχου.

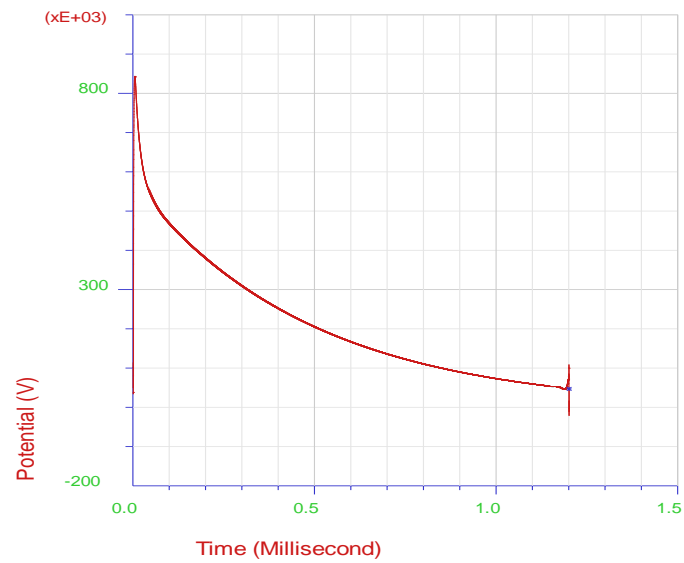
Βλέπουμε πως η επιφάνεια του σχηματιζόμενου βρόχου δεν επηρεάζει τα αποτελέσματα στο έδαφος ανεξαρτήτως ειδικής αντίστασης. Επίσης, γίνεται αντιληπτό πως η αύξηση ειδικής αντίστασης προκαλεί αύξηση του δυναμικού όπως φαίνεται από τα αποτελέσματα του αντίστροφου Fourier. Ακόμα, παρατηρούμε πως το πρώτο στρώμα του διστρωματικού εδάφους επηρεάζει περισσότερο το αποτέλεσμα.



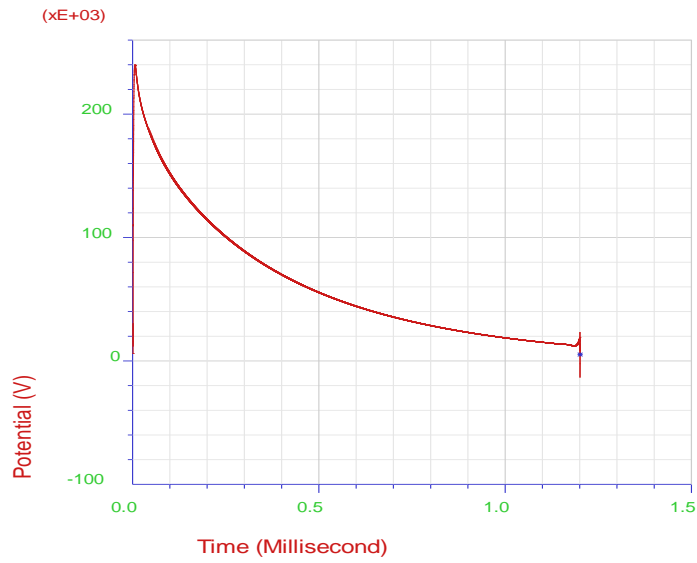
Σχήμα 6.16: Αντίστροφος Fourier για το δυναμικό μονοστρωματικού εδάφους (περίπτωση 1)



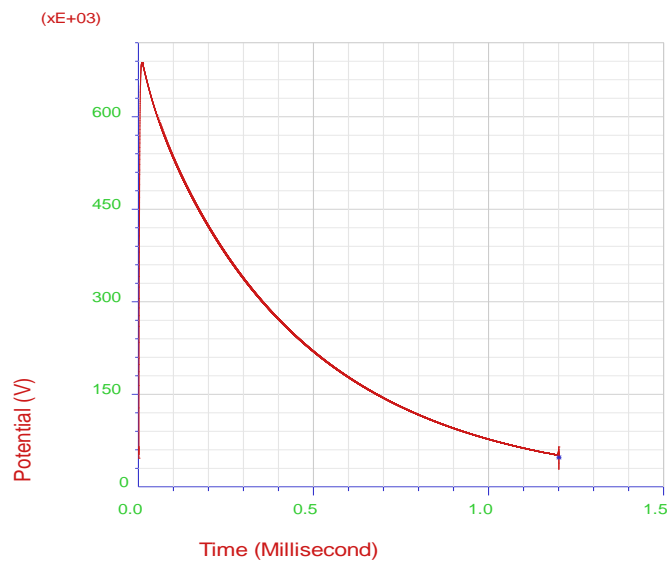
Σχήμα 6.17: Αντίστροφος Fourier για το δυναμικό διστρωματικού εδάφους 1 (περίπτωση 1)



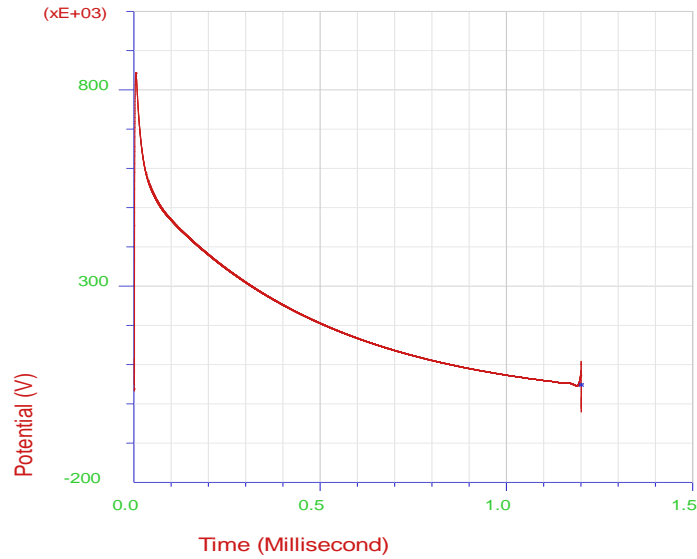
Σχήμα 6.18: Αντίστροφος Fourier για το δυναμικό διστρωματικού εδάφους 2 (περίπτωση 1)



Σχήμα 6.19: Αντίστροφος Fourier για το δυναμικό μονοστρωματικού εδάφους (περίπτωση 2)



Σχήμα 6.20: Αντίστροφος Fourier για το δυναμικό διστρωματικού εδάφους 1 (περίπτωση 2)



Σχήμα 6.21: Αντίστροφος Fourier για το δυναμικό διστρωματικού εδάφους 2 (περίπτωση 2)

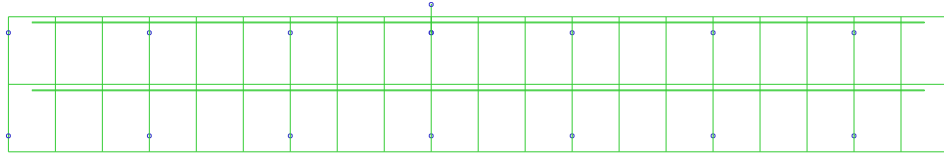
	Μέγιστη τιμή αντίστροφου Fourier (kV)		
	Μονοστρωματικό	Διστρωματικό 1	Διστρωματικό 2
Περίπτωση 1	240	714	845
Περίπτωση 2	240	720	850

Πίνακας 6.2: Μέγιστη τιμή του δυναμικού όπως προκύπτει από τον αντίστροφο Fourier για τα εδάφη που προσομοιώθηκαν.

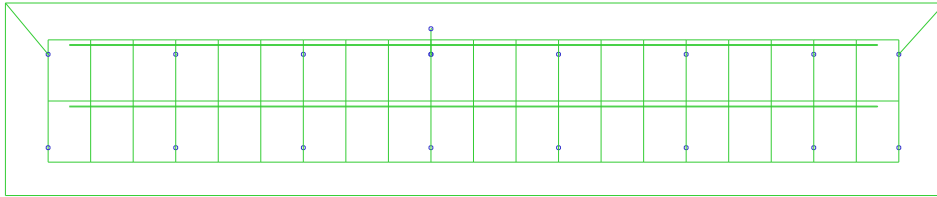
6.3 Επίδραση της περιμετρικής γείωσης και της σύνδεσής της με τη βάση στήριξης

6.3.1 Έγγυση κεραυνικού πλήγματος στην ακίδα

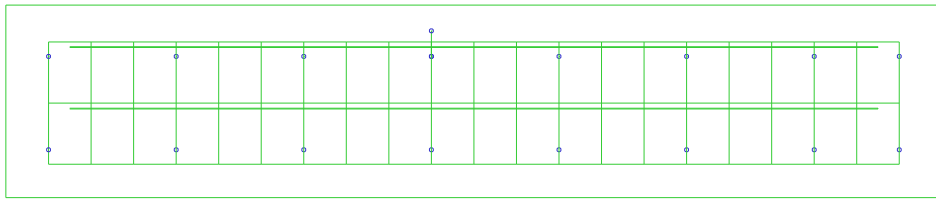
Για να εξεταστεί η επίδραση της περιμετρικής γείωσης προσομοιώθηκε το σύστημα υπό συνθήκες κεραυνοπληξίας στην ακίδα (κεραυνικό ρεύμα 10/350μς με μέγιστη τιμή 50kA) για τις περιπτώσεις που φαίνονται στο σχήμα 6.22.



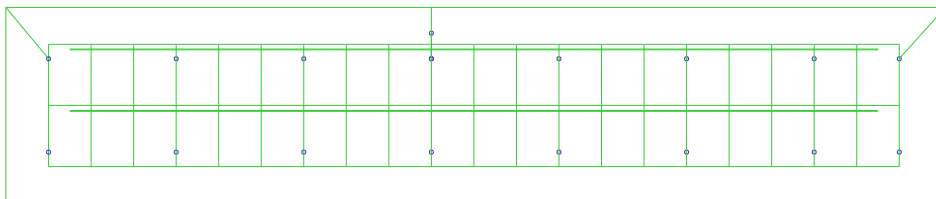
α)



β)



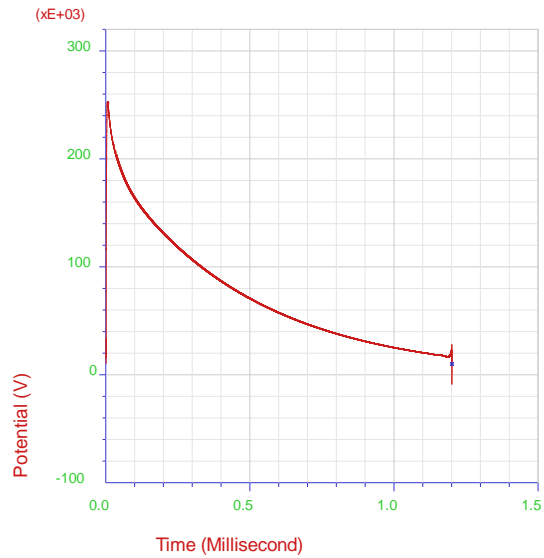
γ)



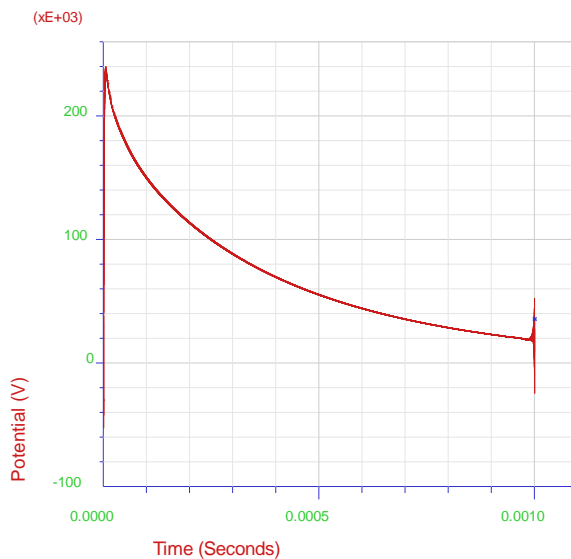
δ)

Σχήμα 6.22: Σύστημα: α) χωρίς περιμετρική γείωση β) με περιμετρική γείωση που συνδέεται με τη βάση στήριξης στις ακραίες δοκούς γ) με περιμετρική γείωση που δεν συνδέεται με τη βάση στήριξης δ) με περιμετρική γείωση που συνδέεται με τη βάση στήριξης επιπλέον στη δοκό που φέρει την ακίδα.

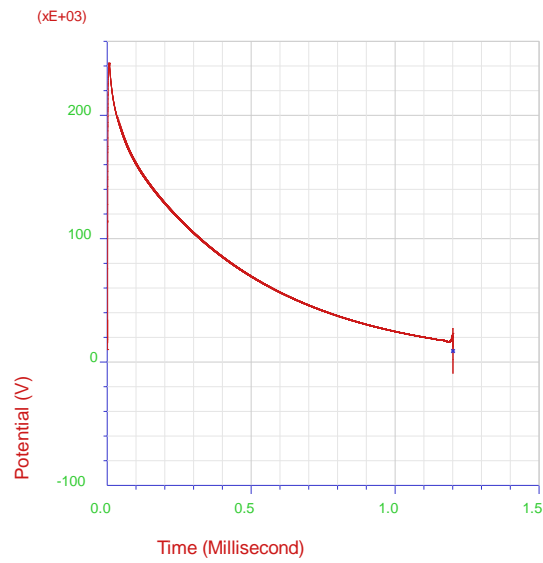
Στα σχήματα 6.23 έως 6.26 φαίνεται ο αντίστροφος Fourier των παραπάνω σχεδίων για το δυναμικό υπολογισμένος στο σημείο του 2⁰⁰ profile που βρίσκεται πιο κοντά στην έγχυση του κεραυνικού ρεύματος.



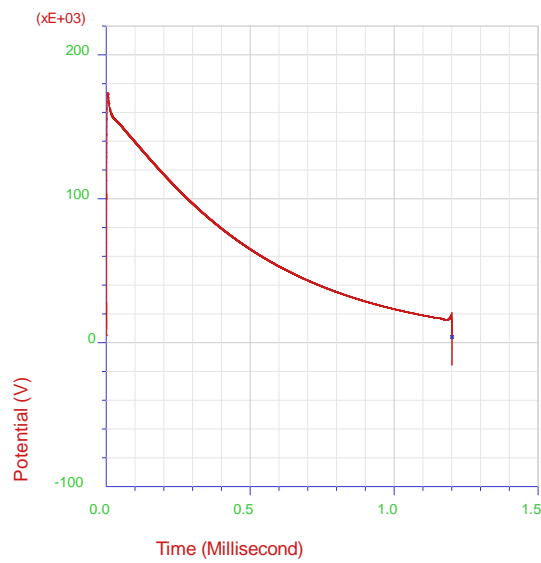
Σχήμα 6.23: Αντίστροφος Fourier για το δυναμικό του σχήματος 6.22α



Σχήμα 6.24: Αντίστροφος Fourier για το δυναμικό του σχήματος 6.22β



Σχήμα 6.25: Αντίστροφος Fourier για το δυναμικό του σχήματος 6.22γ



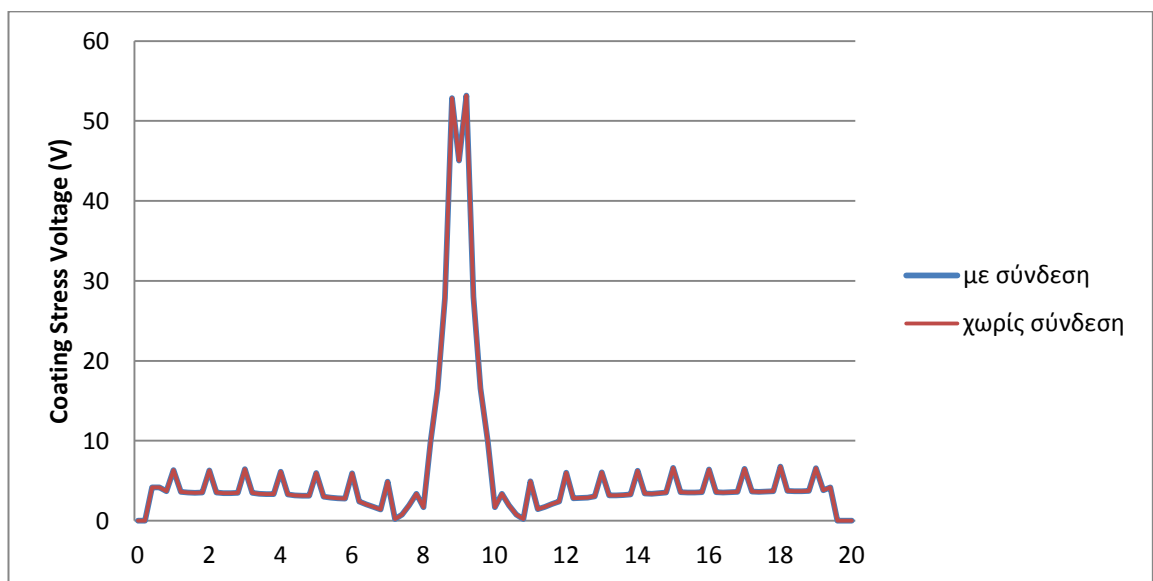
Σχήμα 6.26: Αντίστροφος Fourier για το δυναμικό του σχήματος 6.22δ

Μέγιστη τιμή αντίστροφου Fourier (kV)			
Σχήμα 6.22α	Σχήμα 6.22β	Σχήμα 6.22γ	Σχήμα 6.δ
247	240	244	175

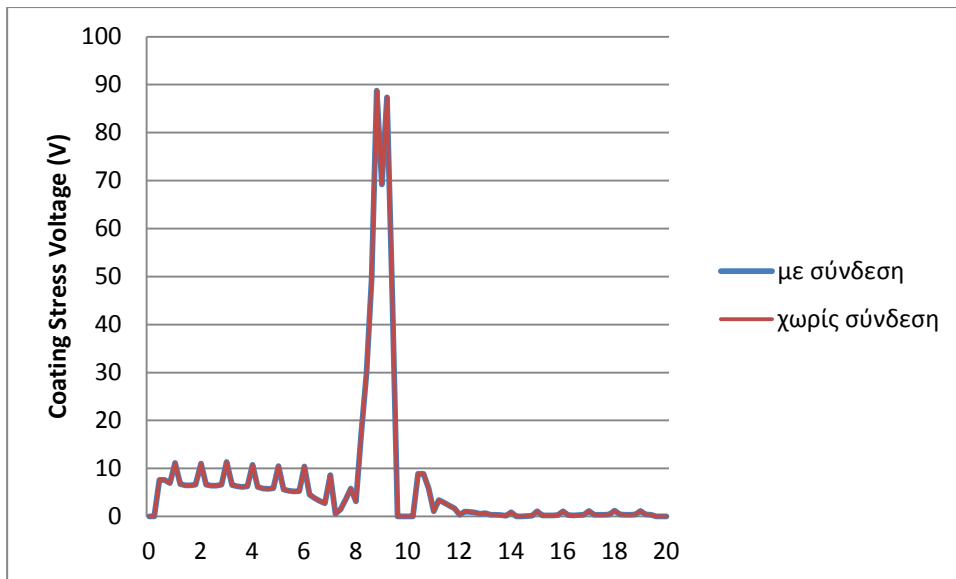
Πίνακας 6.3: Μέγιστη τιμή αποτελεσμάτων του δυναμικού για τα σχέδια του σχήματος 6.22.

Συγκρίνοντας τα σχήματα 6.22α και 6.22β βλέπουμε πως η περιμετρική γείωση προκαλεί μικρή μείωση των αποτελεσμάτων. Επίσης, εισάγοντας συνδέσεις της περιμετρικής γείωσης με τη βάση σε σημεία μακριά της έγχυσης του ρεύματος δεν επηρεάζεται καθόλου το αποτέλεσμα. Αντιθέτως, η ένωση της περιμετρικής γείωσης με τη βάση κοντά στο σημείο έγχυσης του κερανού επιφέρει σημαντική μείωση του δυναμικού.

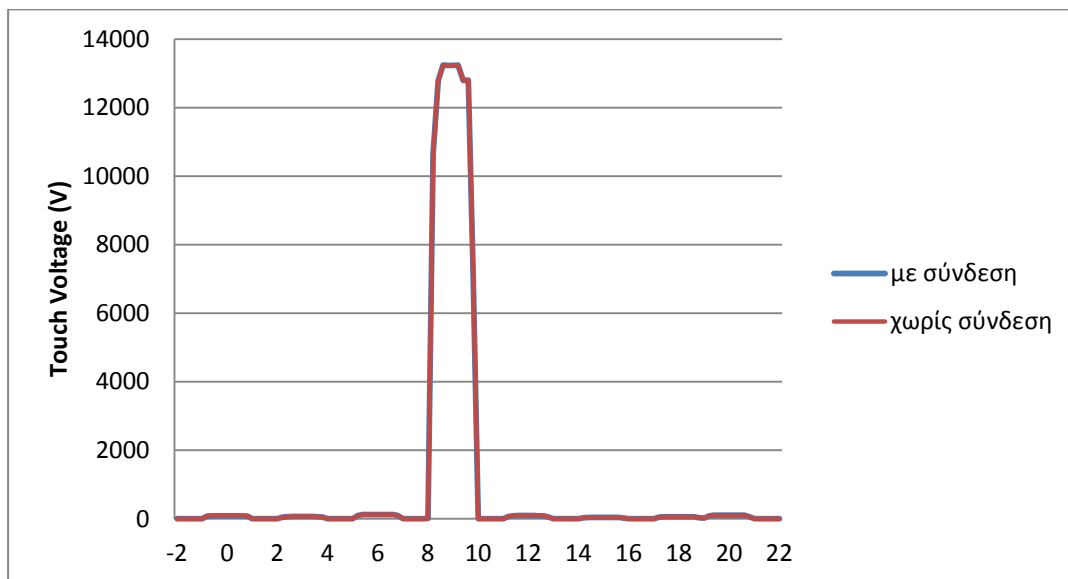
Στα σχήματα 6.27 έως 6.29 φαίνεται πως η σύνδεση της περιμετρικής γείωσης με τη βάση στήριξης δεν επηρεάζει τις επαγόμενες τάσεις και στις δύο περιπτώσεις σχηματιζόμενων βρόχων αλλά ούτε και τη τάση επαφής.



Σχήμα 6.27: Σύγκριση επαγόμενων τάσεων μεταξύ σύνδεσης και μη, περιμετρικής γείωσης και βάσης στήριξης (περίπτωση 1)



Σχήμα 6.28: Σύγκριση επαγόμενων τάσεων μεταξύ σύνδεσης και μη, περιμετρικής γείωσης και βάσης στήριξης (περίπτωση 2)

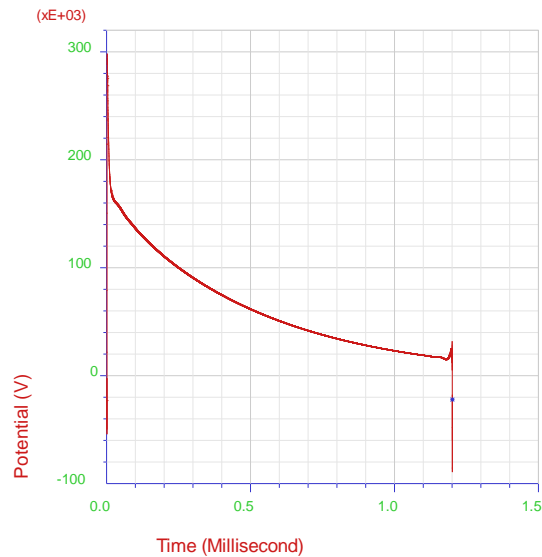


Σχήμα 6.29: Σύγκριση τάσεων επαφής μεταξύ σύνδεσης και μη, περιμετρικής γείωσης και βάσης στήριξης για την 20^η συχνότητα.

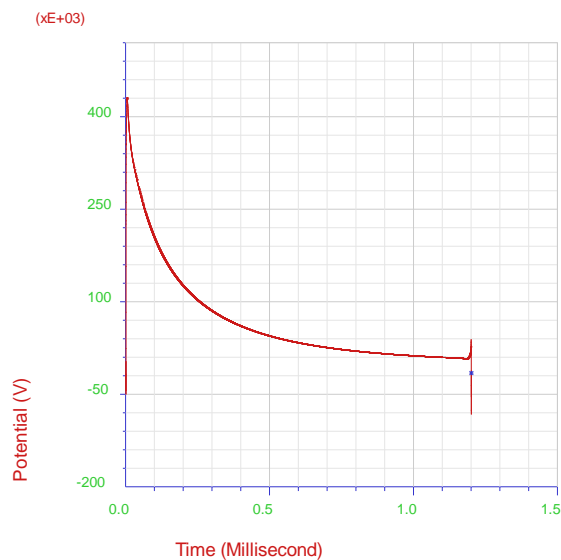
6.3.2 Έγχυση κεραμικού πλήγματος στο σημείο 1

Στην περίπτωση της έγχυσης του κεραμικού στο σημείο 1 συγκρίνουμε τα αποτελέσματα μόνο του σχήματος 6.22β και 6.22γ καθώς οι ενώσεις της

περιμετρικής γείωσης με τη βάση στήριξης του σχήματος 6.22β είναι ήδη κοντά στο σημείο έγχυσης. Στα σχήματα 6.30 και 6.31 φαίνεται ο αντίστροφος Fourier των προσομοιώσεων αυτών.



Σχήμα 6.30: Αντίστροφος Fourier του σχήματος 6.22β



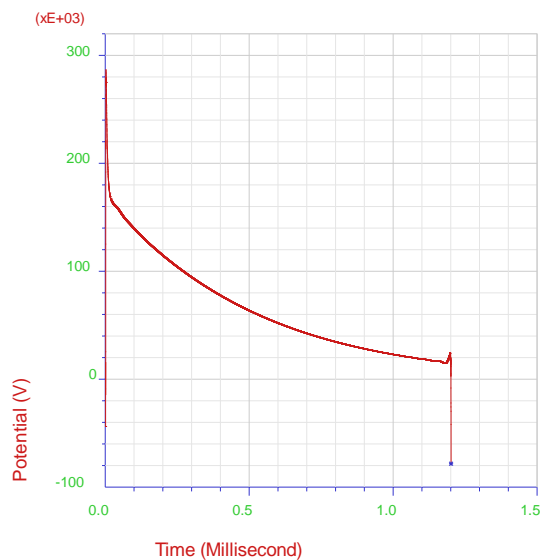
Σχήμα 6.31: Αντίστροφος Fourier του σχήματος 6.22γ

Βλέπουμε πως η σύνδεση της περιμετρικής γείωσης με τη βάση στήριξης προκαλεί μείωση των αποτελεσμάτων. Συγκεκριμένα η μέγιστη τιμή ελαττώνεται από τα 433kV στα 300kV. Οπότε καταλήγουμε και πάλι στο συμπέρασμα πως η

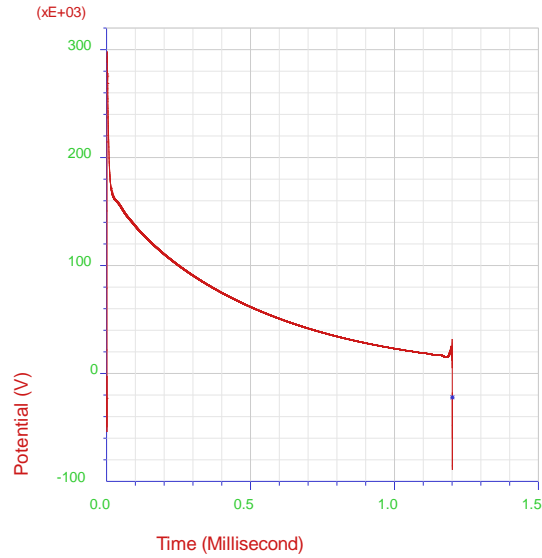
περιμετρική γείωση οδηγεί σε χαμηλότερες τιμές δυναμικού όταν συνδέεται με τη βάση κοντά στο σημείο του κεραυνού.

6.4 Επίδραση της θέσης έγχυσης του κεραυνικού πλήγματος

Εξετάστηκαν δύο θέσεις έγχυσης του κεραυνικού πλήγματος: η ακίδα και το σημείο 1 (άνω αριστερή γωνία του πρώτου πλαισίου του συστήματος). Για να υπάρχει ίδια ευκολία διάχυσης του κεραυνού και στις δύο περιπτώσεις θεωρούμε το σχήμα 6.22δ. Βλέπουμε πως όταν ο κεραυνός πέφτει στο σημείο 1 επιφέρει υψηλότερες τιμές δυναμικού χωρίς όμως να έχουμε σημαντική διαφοροποίηση.



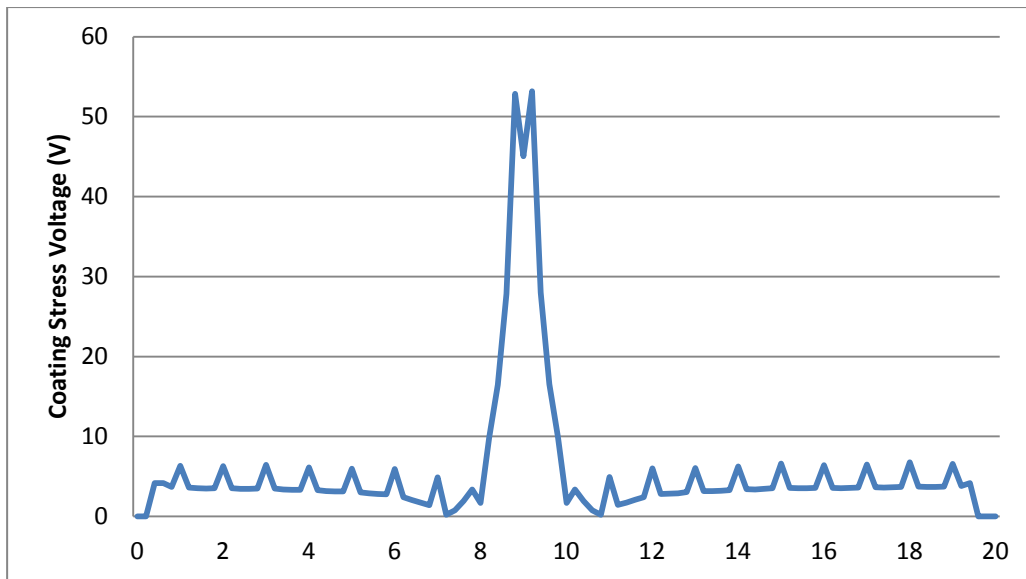
Σχήμα 6.32: Αντίστροφος Fourier για την έγχυση κεραυνού στην ακίδα.



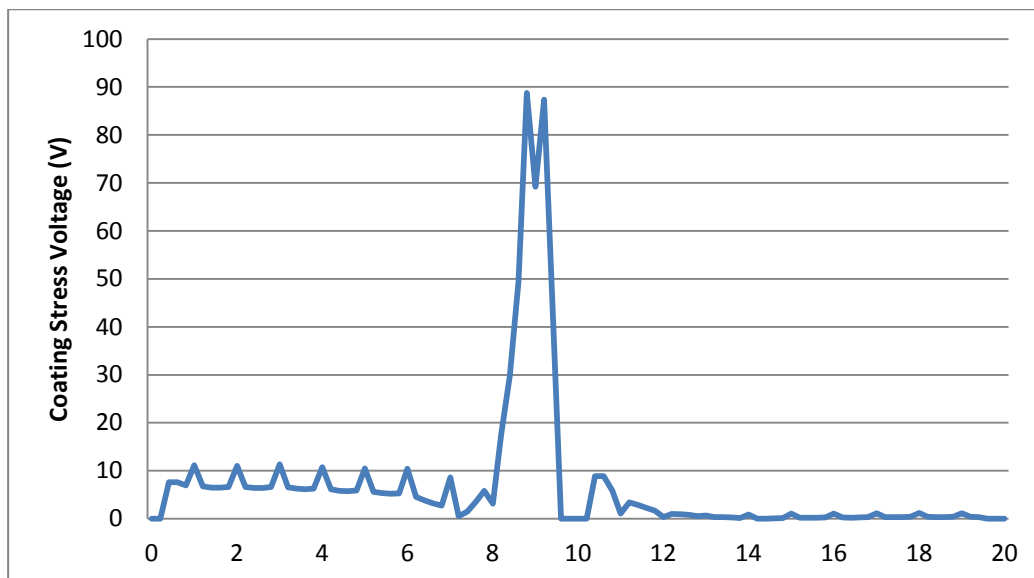
Σχήμα 6.33: Αντίστροφος Fourier για την έγχυση κεραυνού στο σημείο 1.

6.5 Επίδραση του σχηματιζόμενου βρόχου στις επαγόμενες τάσεις

Παρατηρήθηκε από τα αποτελέσματα πως ο μόνος παράγοντας που επηρεάζει τις επαγόμενες τάσεις μεταξύ των αγωγών και του πλαισίου είναι ο βρόχος που σχηματίζεται από τα καλώδια διασύνδεσης και τα DC καλώδια (αν χρειάζονται). Για κάθε αλλαγή των υπολοίπων παραμέτρων τα αποτελέσματα των επαγόμενων τάσεων είναι σταθερά. Παρακάτω φαίνονται οι τιμές που υπολογίστηκαν κατά μήκος του profile 1 (στους αγωγούς) για τις περιπτώσεις 1 και 2 (σχήματα 6.27 και 6.28).



Σχήμα 6.34: Επαγόμενες τάσεις στην περίπτωση 1



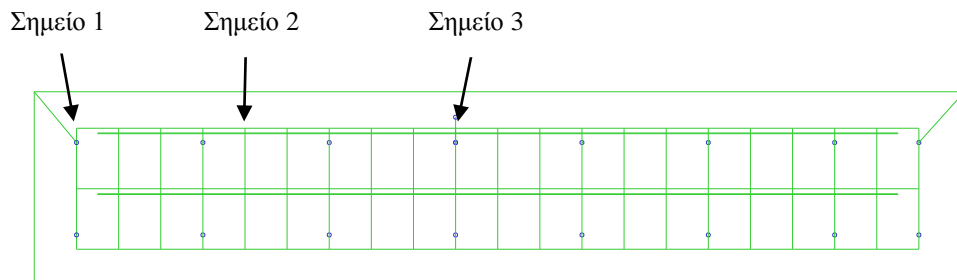
Σχήμα 6.35: Επαγόμενες τάσεις στην περίπτωση 2

6.6 Αντίστροφος Fourier για τις τάσεις επαφής

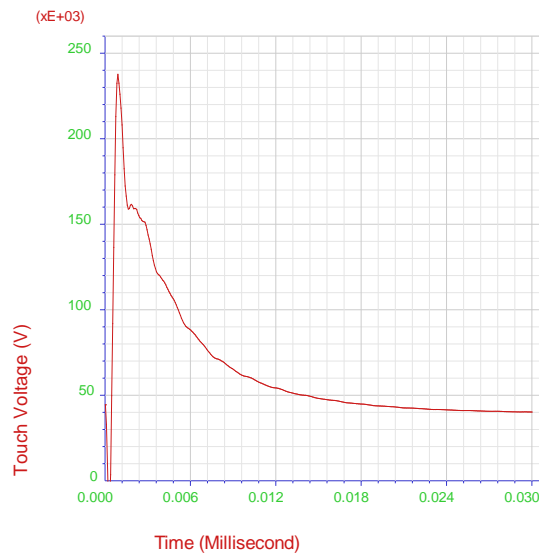
Για τον υπολογισμό του αντίστροφου Fourier των τάσεων επαφής προσομοιώθηκε το σχέδιο που φαίνεται στο σχήμα 6.36 με κεραυνικό ρεύμα 10/350μs και πλάτος 50kA ενώ η πτώση του κεραυνού γίνεται στην ακίδα. Επίσης, τα αποτελέσματα του

αντίστροφου Fourier για τα σημεία 1, 2 και 3 (του σχήματος 6.36) φαίνονται στα σχήματα 6.37 έως 6.39.

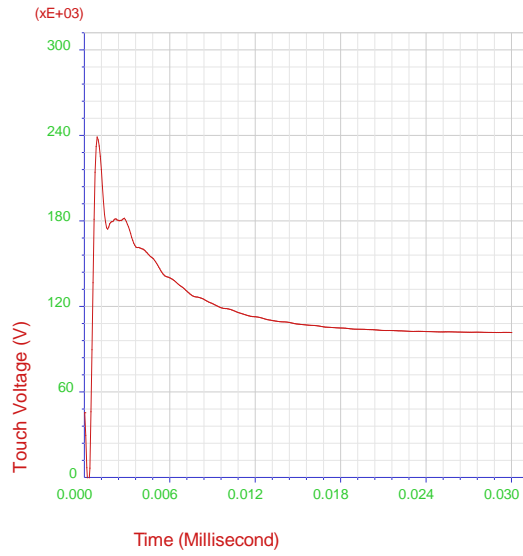
Βλέπουμε ότι καθώς απομακρυνόμαστε από το σημείο έγκυσης του κεραυνού μειώνονται οι τιμές τόσο των μεταβατικών φαινομένων, όσο και της μόνιμης κατάστασης.



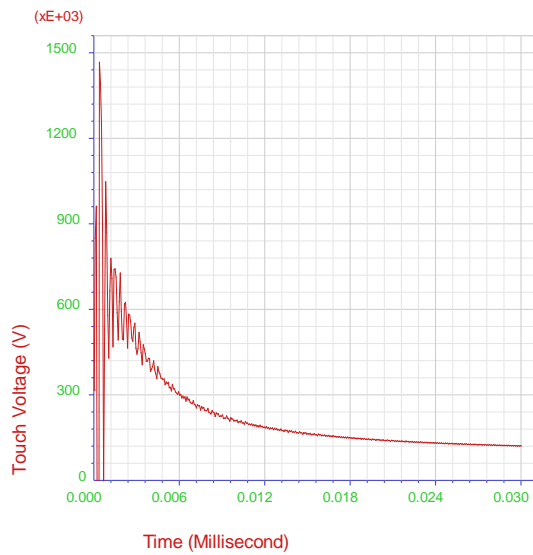
Σχήμα 6.36: Κάτοψη σχεδίου όπου φαίνονται τα σημεία υπολογισμού του IFFT για τις τάσεις επαφής.



Σχήμα 6.37: Αντίστροφος Fourier για τη τάση επαφής στο σημείο 1.



Σχήμα 6.38: Αντίστροφος Fourier για τη τάση επαφής στο σημείο 2.



Σχήμα 6.39: Αντίστροφος Fourier για τη τάση επαφής στο σημείο 3.



ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, εξετάστηκε η κεραυνική συμπεριφορά φωτοβολταϊκών συστημάτων. Με τη βοήθεια του λογισμικού πακέτου SES-CDEGS σχεδιάστηκαν δύο συνήθεις συνδεσμολογίες των πλαισίων ενός φωτοβολταϊκού πάρκου και εκτιμήθηκε η επίδραση διαφόρων παραμέτρων στο δυναμικό και τις αναπτυσσόμενες επαγόμενες υπερτάσεις. Οι εξεταζόμενες παράμετροι ήταν:

- η κλίση, το πλάτος και η θέση έγχυσης του κεραυνικού πλήγματος
- η πολύστρωματική δομή του
- η σύνδεση της περιμετρικής γείωσης με τη βάση στήριξης
- η επιφάνεια του βρόχου που σχηματίζεται από τα καλώδια διασύνδεσης.

Κλίση και πλάτος κυματομορφής κεραυνικού ρεύματος

Διαπιστώθηκε πως η κλίση και το πλάτος της κυματομορφής του κεραυνικού ρεύματος επηρεάζουν σημαντικά το δυναμικό. Οι κλίσεις κεραυνικών ρευμάτων που εξετάστηκαν ήταν οι 10/350 και 1/50 μ s με τα αποτελέσματα της δεύτερης (γρήγορης κυματομορφής) να είναι αυξημένα κατά 50% περίπου σε σχέση με την πρώτη (αργή κυματομορφή). Δηλαδή όταν μειώνεται ο χρόνος μετώπου το δυναμικό έχει μεγαλύτερη μέγιστη τιμή, με αποτέλεσμα τα ρεύματα με γρηγορότερη κλίση να είναι πιο επικίνδυνα. Επίσης, το πλάτος της κυματομορφής του κεραυνού επηρεάζει τα αποτελέσματα. Συγκεκριμένα, για τα πλάτη (30kA και 50kA) που προσομοιώθηκαν (και στις δύο κλίσεις) προέκυψε γραμμική μεταβολή των μεγίστων τιμών των δυναμικού ανάλογη με τον λόγο των πλατών σε κάθε κλίση και περίπτωση.

Θέση έγχυσης του κεραυνικού πλήγματος

Εξετάστηκαν δύο θέσεις έγχυσης του κεραυνικού πλήγματος:

- στην ακίδα, που αποτελεί το εξωτερικό αντικεραυνικό σύστημα που χρησιμοποιήθηκε και βρίσκεται στερεωμένη στη βάση στήριξης 9m δεξιά από την αρχή των συστοιχιών και
- στην πάνω αριστερά γωνία του ορθογωνίου που σχηματίζεται από τις δύο συστοιχίες των πλαισίων.

Συγκρίσιμα είναι τα αποτελέσματα μεταξύ της πτώσης κεραυνικού ρεύματος στη γωνία της συστοιχίας και στην ακίδα όταν υπάρχει ένωση περιμετρικής γείωσης και βάσης στήριξης στα άκρα αλλά και κοντά στην ακίδα. Δηλαδή, η διάχυση του κεραυνικού ρεύματος στο έδαφος μέσω της περιμετρικής γείωσης διευκολύνεται και στις δύο περιπτώσεις. Παρατηρούμε πως όταν ο κεραυνός πέφτει στην ακίδα οι τιμές του δυναμικού προκύπτουν μικρότερες αλλά όχι σημαντικά.

Περιμετρική γείωση

Η ύπαρξη περιμετρικής γείωσης αλλά και η κατάλληλη σύνδεση της με τη βάση στήριξης διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στη προστασία του συστήματος. Για το συμπέρασμα αυτό αρχικά συγκρίνουμε την ύπαρξη και μη της περιμετρικής γείωσης. Προσομοιώνοντας το ίδιο κεραυνικό ρεύμα στην ακίδα με και χωρίς περιμετρική γείωση παρατηρούμε ότι το δυναμικό στη περίπτωση χωρίς περιμετρική γείωση είναι ελάχιστα αυξημένο. Εδώ χρειάζεται να τονιστεί πως η σύνδεση της περιμετρικής γείωσης με τη βάση στήριξης βρίσκεται στα άκρα δηλαδή μακριά από το σημείο πτώσης του κεραυνού γι' αυτό και το ρεύμα δεν εγγέεται άμεσα στην περιμετρική γείωση. Αντιθέτως, προσθέτοντας αγωγή ένωση μεταξύ της βάσης στήριξης και της περιμετρικής γείωσης κοντά στην ακίδα προκύπτει μείωση του μεγίστου του δυναμικού (από τα 240kV στα 175kV). Στην περίπτωση που το κεραυνικό πλήγμα πέφτει στη γωνία του ακραίου πλαισίου, η ήδη υπάρχουσα ένωση της βάσης με τη περιμετρική γείωση βοηθά στην έγχυση του ρεύματος οπότε συγκρίθηκαν τα αποτελέσματα με και χωρίς την ένωση αυτή. Οι τιμές του δυναμικού είναι αυξημένες όταν έχει αφαιρεθεί η ένωση μεταξύ περιμετρικής γείωσης και της βάσης. Όλα τα παραπάνω μας οδηγούν στο συμπέρασμα πως το δυναμικό υφίστανται σημαντική μείωση όταν υπάρχει ένωση της περιμετρικής

γείωσης με τη βάση σε σημείο κοντά στην πτώση του κεραυνικού πλήγματος. Συνεπώς, σε Φ/Β εγκαταστάσεις προτείνεται η επιπλέον ένωση της περιμετρικής γείωσης με τη βάση στήριξης κοντά στις ακίδες.

Πολυστρωματική δομή εδάφους

Εξετάστηκαν δύο περιπτώσεις διστρωματικού εδάφους. Στην πρώτη περίπτωση επιλέχθηκε πρώτο στρώμα ειδικής αντίστασης 100Ωm βάθους 2m και δεύτερο άπειρο στρώμα ειδικής αντίστασης 1000Ωm. Στη δεύτερη περίπτωση το πρώτο στρώμα είναι πάλι βάθους 2m και έχει ειδική αντίσταση 1000Ωm ενώ το δεύτερο στρώμα άπειρου ύψους έχει ειδική αντίσταση 100Ωm. Βλέπουμε ότι η μέγιστη τιμή της τάσης επαφής κοντά στην έγχυση του κεραυνικού ρεύματος σε σχέση με την άπειρη γη είναι 720kV για το πρώτο διστρωματικό έδαφος και 850kV για το δεύτερο, ενώ στην περίπτωση του ομοιογενούς εδάφους ειδικής αντίστασης 100Ωm το αντίστοιχο αποτέλεσμα ήταν 240kV. Συμπεραίνουμε λοιπόν, πως α) η αύξηση της ειδικής αντίστασης του εδάφους οδηγεί σε σημαντική αύξηση των δυναμικού καθώς και ότι β) το πρώτο στρώμα επηρεάζει περισσότερο το αποτέλεσμα. Συνεπώς, είναι αναγκαία η μέτρηση της ειδικής αντίστασης του εδάφους και ο υπολογισμός (εκτίμηση) της δομής του εδάφους πριν την εγκατάσταση του Φ/Β πάρκου ώστε να γίνει κατάλληλη αντικεραυνική μελέτη.

Επιφάνεια σχηματιζόμενου βρόχου

Οι δύο περιπτώσεις γεωμετρίας των συστοιχιών που εξετάστηκαν διαφοροποιούνται ως προς το μέγεθος της επιφάνειας του σχηματιζόμενου βρόχου λόγω των καλωδίων διασύνδεσης. Συγκρίνοντας αυτές τις δύο περιπτώσεις, παρατηρήθηκε πως μεταβάλλοντας τις εξεταζόμενες παραμέτρους, τα αποτελέσματα του δυναμικού προκύπτουν ίδια. Δηλαδή το μέγεθος της επιφάνειας του σχηματιζόμενου βρόχου δεν επηρεάζει τις τιμές του δυναμικού που λαμβάνονται στο έδαφος. Επιπροσθέτως, η μέγιστη τιμή της επαγόμενης τάσης στους αγωγούς ήταν περίπου 53V στην περίπτωση του αμελητέου βρόχου και 90V στην περίπτωση του μεγαλύτερου βρόχου. Έτσι, γίνεται αντιληπτό πως οι επαγόμενες τάσεις αυξάνονται όταν μεγαλώσει η επιφάνεια του σχηματιζόμενου βρόχου. Το γεγονός ότι τα αποτελέσματα αυτά ήταν ίδια για κάθε προσομοίωση που πραγματοποιήθηκε δείχνει πως οι επαγόμενες τάσεις δεν εξαρτώνται από τις υπόλοιπες παραμέτρους που εξετάστηκαν. Συνεπώς, για τις τιμές των παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν,

προτιμητέα κρίνεται η περίπτωση του μεγαλύτερου σχηματιζόμενου βρόχου. Παρόλο που προκαλεί αύξηση των επαγόμενων τάσεων δεν προκύπτουν τάσεις επιβλαβείς για το σύστημα και το κόστος εγκατάστασης είναι μικρότερο αφού δεν χρειάζεται επιπλέον DC καλώδιο όπως στην περίπτωση του αμελητέου βρόχου.

ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Αρχικά, μπορεί να προσομοιωθεί κεραυνικό ρεύμα και σε άλλες θέσεις της εγκατάστασης ώστε να βρεθεί η βέλτιστη απόσταση των ακίδων. Ενδιαφέρουσα προέκταση της παρούσας εργασίας θα μπορούσε να είναι η προσομοίωση μεγαλύτερης Φ/Β εγκατάστασης, κάτι που θα ήταν εφικτό μόνο αν ο υπολογιστικός χρόνος του λογισμικού πακέτου SES-CDEGS περιοριζόταν αρκετά. Αυτό θα μπορούσε να επιτευχθεί και με αγορά άλλου κατάλληλου επιλύτη. Επίσης, θα μπορούσε να μελετηθεί η κεραυνική συμπεριφορά του συστήματος υπό συνθήκες ηλιοφάνειας. Ενδιαφέρουσα πρόταση για περαιτέρω μελέτη είναι η προσομοίωση και άλλων περιπτώσεων γεωμετρίας συστοιχιών των πλαισίων. Επίσης, προτείνονται μετρήσεις των επαγόμενων τάσεων και δυναμικού Φ/Β σε συνθήκες κεραυνοπληξίας και σύγκριση των αποτελεσμάτων με αυτών που προέκυψαν από τη χρήση του SES-CDEGS.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Παύλος Ν. Νικολαΐδης, ‘Αντικεραυνική προστασία φωτοβολταϊκών συστημάτων’, Διπλωματική Εργασία, Πάτρα, 2012
- [2] Enrico Pons, Riccardo Tommasini, ‘Lightning Protection of PV Systems’, 2013 4th International Youth Conference on Energy (IYCE), 06 Jun - 08 Jun 2013, Siófok, Hungary
- [3] Τιτσινίδου Μαρία, ‘Σχεδιασμός και μελέτη Φ/Β συστημάτων’, Διπλωματική Εργασία, ΑΠΘ, 2010
- [4] Οδηγίες για την εγκατάσταση Φ/Β συστημάτων σε κτιριακές εγκαταστάσεις, ΚΑΠΕ, 2009
- [5] Jesús C. Hernández, Pedro G. Vidal, Francisco Jurado, Senior Member, ‘Lightning and Surge Protection in Photovoltaic Installations’, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 23, no. 4, 2008
- [6] Παναγιώτης Παπαπανάγου, ‘Προστασία φωτοβολταϊκών γεννητριών έναντι υπερτάσεων’, Διπλωματική Εργασία, ΑΠΘ, 2012
- [7] William Brooks, James Dunlop, ‘PV installation professional resource guide’ NABCEP, 2013
- [8] Μαρία Β. Μαρκάτου, ‘Σχεδίαση αυτόνομου υβριδικού Φ/Β συστήματος’, Διπλωματική Εργασία, Πάτρα, 2011
- [9] Giovanni Luca Amicucci, Fabio Fiamingo, ‘Lightning Risk to Photovoltaic Power Generating Systems’, Prevention Today, Vol. 5, no. 1/2, 51-65, 2009
- [10] Charalambos A. Charalambous, Nikolaos D. Kokkinos, Nikolas Christofides, ‘External Lightning Protection and Grounding in Large-Scale Photovoltaic Applications’, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol. 56, no. 2, 2014
- [11] Z. Benesova, R. Haller, J. Birkl, P. Zahlmann, ‘Overvoltages in Photovoltaic Systems Induced by Lightning Strikes’, International Conference on Lightning Protection (ICLP), Vienna, Austria, 2012
- [12] Michael Zuercher-Martinson, Robert Schlesinger, ‘Protecting Electrical PV Systems from the Effects of Lightning’, Solectria Renewables

[13] OVR Practical guide for the protection against surges, ABB,
1TXH000309C0201 - Edition march 2014