ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ

ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

Μελέτη Διαμόρφωσης Διασυνδεδεμένου Φωτοβολταϊκού Σταθμού Ισχύος 2MW

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ
ΕΡΓΑΣΙΑ

Στέφανος Δημήτριος Κ. Κακαβούλης

Επιβλέπων: Σταύρος Αθ. Παπαθανασίου

Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα
Οκτώβριος 2009

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ

ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

Μελέτη Διαμόρφωσης Διασυνδεδεμένου Φωτοβολταϊκού Σταθμού Ισχύος 2MW

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Στέφανος Δημήτριος Κ. Κακαβούλης

Επιβλέπων: Σταύρος Αθ. Παπαθανασίου

Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την … /……./ 2009

……..	……..	……..
Σταύρος Αθ. Παπαθανασίου	Νικόλαος Χατζηαργυρίου	Γεώργιος Ν. Κορρές
Επίκουρος καθηγητής Ε.Μ.Π.	Καθηγητής Ε.Μ.Π.	Αναπληρωτής καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα

Οκτώβριος 2009

……..

Στέφανος Δημήτριος Κ. Κακαβούλης

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

Copyright © Στέφανος Δημήτριος Κ. Κακαβούλης, 2009
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved

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

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

Περίληψη

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη της διαμόρφωσης ενός διασυνδεδεμένου Φωτοβολταϊκού σταθμού εγκατεστημένης ισχύος 2MWp με το δημόσιο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Οι τοπολογίες που μελετήθηκαν είναι τόσο με αντιστροφείς των 11kW όσο και με κεντρικούς αντιστροφείς των 500kW. Βασικές παράμετροι όπως η ενεργειακή απολαβή, το συνολικό εμβαδό του σταθμού, οι απώλειες ενέργειας και η διαστασιολόγηση του ηλεκτρολογικού εξοπλισμού έχουν μελετηθεί με την ανάπτυξή τους σε υπολογιστικά φύλλα. Στα σχέδια που συνοδεύουν την εργασία αποτυπώνονται ο απαραίτητος ηλεκτρομηχανολογικός εξοπλισμός, ηλεκτρικά μονογραμμικά διαγράμματα καθώς και η όδευση των καλωδίων μέσα από ειδικά χαντάκια. Τέλος επιχειρείται ο αναλυτικός υπολογισμός του κόστους μιας τέτοιας εφαρμογής.

Λέξεις κλειδιά: αντιστροφέας, φωτοβολταϊκός σταθμός, εγκατεστημένη ισχύς, ενεργειακή απολαβή, απώλειες ενέργειας, ηλεκτρομηχανολογικός εξοπλισμός, ηλεκτρικό μονογραμμικό διάγραμμα

Abstract

The scope of the present thesis is the analysis of the parameters that should be taken into account for the construction of a 2MWp grid-connected Photovoltaic plant. Two different topologies have been studied: the first one with 11kW inverters and the second with central inverters of 500kW. Basic parameters like energy yield, estimation of the surface needed, energy losses and dimensioning of the electrical equipment have been studied by their development in spreadsheets. The drawings coming with this work show the position of the electromechanical equipment, the electrical diagrams and the cable routes through canals. Finally, the global cost of the above construction is estimated.

Keywords: inverter, grid-connected, photovoltaic plant, energy losses, electrical equipment, electrical diagrams, electromechanical equipment

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Επίκουρο Καθηγητή Ε.Μ.Π. Σταύρο Παπαθανασίου για τη δυνατότητα που μου έδωσε να ασχοληθώ με ένα τόσο πρακτικό θέμα πάνω στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Οι συμβουλές του και η καθοδήγησή του υπήρξαν καθοριστικές για την περάτωση της παρούσας εργασίας.

Επίσης, τους πολύτιμους συνεργάτες Γεώργιο Μάνο και Γεώργιο Δεικτά, δύο άτομα με πολύ μεγάλη εμπειρία στο χώρο που καθημερινά μου μεταδίδουν τη γνώση τους.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους έμμεσα ή άμεσα με υποστήριξαν στην προσπάθειά μου αυτή.

Στέφανος Δημήτριος Κ. Κακαβούλης

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

1.1 Γενικά..... σελ. 02
1.2 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα Φ/Β διατάξεων..... σελ. 03
1.3 Συνοπτική περιγραφή του αντικειμένου της εργασίας..... σελ. 03

Κεφάλαιο 2: Σχεδίαση Φωτοβολταϊκής Γεννήτριας

2.1 Εισαγωγή..... σελ. 06
2.2 Κύριες συσκευές Φ/Β γεννήτριας..... σελ. 06
2.2.1 Φ/Β πλαίσια..... σελ. 06
2.2.2 Συσκευή παραλληλισμού στοιχειοσειρών (combiner box)..... σελ. 09
2.2.3 Αντιστροφέας (Inverter)..... σελ. 10
2.2.4 Βάση στήριξης συστοιχίας..... σελ. 12
2.3 Μεταβολή των ηλεκτρικών παραμέτρων Φ/Β πλαισίων με τη θερμοκρασία και την ακτινοβολία..... σελ. 14
2.4 Διαδικασία σχεδίασης Φ/Β γεννήτριας..... σελ. 17
2.4.1 Φ/Β γεννήτρια με αντιστροφείς των 500kW..... σελ. 17
2.4.2 Ανάπτυξη Φ/Β γεννήτριας σε συστοιχίες..... σελ. 22
2.4.3 Καλωδίωση συστοιχιών..... σελ. 27
2.4.4 Φ/Β γεννήτρια με αντιστροφείς των 11kW..... σελ. 29
2.4.5 Ανάπτυξη της Φ/Β γεννήτριας σε συστοιχίες..... σελ. 32
2.4.6 Καλωδίωσης συστοιχιών..... σελ. 33
2.5 Συμπεράσματα..... σελ. 35

Κεφάλαιο 3: Ενεργειακή Απολαβή και Παράγοντες Μείωσης της Απολαβής Φ/Β Γεννήτριας

3.1 Εισαγωγή..... σελ. 36
3.2 Ενεργειακή απολαβή Φ/Β γεννήτριας σε συγκεκριμένο γεωγραφικό τόπο..... σελ. 36
3.3 Θερμική εξάρτηση της απόδοσης ενεργειακής μετατροπής n_c του Φ/Β πλαισίου..... σελ. 44
3.4 Οπτικές απώλειες ενέργειας σε Φ/Β πλαίσια..... σελ. 46
3.5 Παράγοντες γήρανσης του Φ/Β πλαισίου (n_γ)..... σελ. 48
3.6 Απώλειες λόγω ανομοιογένειας στα χαρακτηριστικά των Φ/Β πλαισίων (n_m)..... σελ. 48
3.7 Επίδραση της σκίασης στη λειτουργία της Φ/Β γεννήτριας, απώλειες και καθορισμός της οριζόντιας απόστασης μεταξύ των στοιχειοσειρών σελ. 50
3.7.1 Επίδραση της σκίασης σε Φ/Β στοιχείο..... σελ. 50
3.7.2 Επίδραση της σκίασης σε σχέση με τη συνδεσμολογία των Φ/Β πλαισίων και το σύστημα ανίχνευσης μέγιστης ισχύος του αντιστροφέα..... σελ. 52
3.7.3 Σύνδεση πλαισίων εν σειρά..... σελ. 53
3.7.4 Παράλληλη σύνδεση πλαισίων..... σελ. 54
3.7.5 Σύγκριση των παραπάνω τοπολογιών..... σελ. 55
3.7.6 Οριζόντια απόσταση μεταξύ συστοιχιών σε Φ/Β σταθμό..... σελ. 56
3.8 Απαιτούμενο εμβαδό για την εγκατάσταση του Φ/Β σταθμού..... σελ. 60
3.8.1 Τοπολογία Φ/Β σταθμού με μεγάλους αντιστροφείς..... σελ. 60

3.8.2 Τοπολογία Φ/Β σταθμού με μικρούς αντιστροφείς..... σελ. 62
3.8.3 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα..... σελ. 64
3.9 Ετήσια απολαβή Φ/Β γεννήτριας..... σελ. 64
3.10 Συμπεράσματα..... σελ. 66

Κεφάλαιο 4: Ηλεκτρολογική Μελέτη Φ/Β Σταθμού Τοπολογίας Μικρών Αντιστροφέων

4.1 Εισαγωγή..... σελ. 68
4.2 Γενική Περιγραφή της τοπολογίας..... σελ. 68
4.3 Καλωδίωση Φ/Β πλαισίων..... σελ. 70
4.3.1 Όδευση καλωδίων – απαιτούμενο μήκος καλωδίων DC..... σελ. 70
4.3.2 Τύπος καλωδίου..... σελ. 72
4.3.3 Πτώση τάσης και απώλειες ισχύος στο καλώδιο DC..... σελ. 73
4.3.4 Απώλειες ενέργειας στο καλώδιο DC..... σελ. 74
4.3.5 Μέγιστη επιτρεπόμενη διαρκής φόρτιση καλωδίου DC..... σελ. 76
4.4 Προστασία στη DC πλευρά του αντιστροφέα..... σελ. 78
4.5 Inverter: Θέματα ασφάλειας δικτύου και απόδοσης αντιστροφέα..... σελ. 79
4.5.1 Σύστημα επιτήρησης δικτύου..... σελ. 79
4.5.2 Συντελεστής απόδοσης του αντιστροφέα και εκτιμώμενη ετήσια απώλεια ενέργειας..... σελ. 80
4.6 Διασύνδεση αντιστροφέων σε πίνακα Χαμηλής Τάσης..... σελ. 82
4.7 Προστασίες στον πίνακα Χαμηλής Τάσης..... σελ. 84
4.8 Διασύνδεση των πινάκων Χαμηλής Τάσης με τους Υ/Σ ανύψωσης..... σελ. 86
4.9 Περιγραφή του Υ/Σ ανύψωσης 0,4/20kV..... σελ. 90
4.9.1 Γενικά στοιχεία..... σελ. 90
4.9.2 Διαμέρισμα Χαμηλής Τάσης..... σελ. 92
4.9.3 Διαμέρισμα Μετασχηματιστή..... σελ. 94
4.9.4 Διαμέρισμα Μέσης Τάσης..... σελ. 98
4.10 Περιγραφή του Υ/Σ ζεύξης και ελέγχου..... σελ. 101
4.10.1 Γενικά στοιχεία..... σελ. 101
4.10.2 Διαμέρισμα Μέσης Τάσης..... σελ. 101
4.11 Διασύνδεση των Υ/Σ ανύψωσης – Υπόγειο δίκτυο Μέσης Τάσης..... σελ. 104

Κεφάλαιο 5: Ηλεκτρολογική Μελέτη Φ/Β Σταθμού Τοπολογία Αντιστροφέων 500kW

5.1 Εισαγωγή..... σελ. 109
5.2 Γενική περιγραφή της τοπολογίας..... σελ. 109
5.3 Καλωδίωση Φ/Β πλαισίων..... σελ. 110
5.3.1 Όδευση καλωδίων – Απαιτούμενο μήκος καλωδίων DC..... σελ. 110
5.3.2 Τύπος καλωδίου..... σελ. 110
5.3.3 Πτώση τάσης και απώλειες ισχύος στο καλώδιο DC..... σελ. 110
5.3.4 Απώλειες ενέργειας στο καλώδιο DC..... σελ. 112
5.3.5 Μέγιστη επιτρεπόμενη διαρκής φόρτιση καλωδίου DC..... σελ. 113
5.4 Περιγραφή διάταξης παραλληλισμού (Sunny String Monitor SSM)..... σελ. 113
5.5 Διασύνδεση των συστοιχιών με τους πίνακες Χαμηλής Τάσης..... σελ. 115
5.6 Διασύνδεση Φ/Β συστοιχιών με τον αντιστροφέα..... σελ. 117

5.6.1 Περιγραφή διάταξης..... σελ. 117
5.6.2 Διάταξη προστασίας κυρίως καλωδίου DC..... σελ. 118
5.6.3 Διασύνδεση Φ/Β γεννήτριας με τον αντιστροφέα..... σελ. 119
5.7 Εκτιμώμενη ετήσια απώλεια ενέργειας στον αντιστροφέα..... σελ. 121
5.8 Διασύνδεση του αντιστροφέα με τον Υ/Σ ανύψωσης..... σελ. 122
5.9 Περιγραφή Υ/Σ Μέσης Τάσης..... σελ. 124
5.10 Υ/Σ ζεύξης και ελέγχου..... σελ. 125
5.11 Διασύνδεση των Υ/Σ ανύψωσης – Υπόγειο δίκτυο Μέσης Τάσης..... σελ. 125

Κεφάλαιο 6: Σύστημα γείωσης και αντικεραυνικής προστασίας Φ/Β σταθμού

6.1 Εισαγωγή..... σελ. 128
6.2 Προσδιορισμός ειδικής αντίστασης εδάφους..... σελ. 128
6.3 Βασικά πεδιακά μεγέθη..... σελ. 130
6.4 Είδη ηλεκτροδίων γείωσης και υλικά κατασκευής τους..... σελ. 133
6.5 Διάβρωση στους γειωτές..... σελ. 137
6.6 Αντικεραυνική προστασία..... σελ. 138
6.7 Εξωτερική προστασία..... σελ. 140

Κεφάλαιο 7: Σύστημα παρακολούθησης και διαχείρισης Φ/Β σταθμών

7.1 Εισαγωγή – Γενική περιγραφή..... σελ. 144
7.2 Προσφερόμενες υπηρεσίες από το σύστημα παρακολούθησης..... σελ. 145
7.3 Περιγραφή της εγκατάστασης για Φ/Β σταθμό με μικρούς αντιστροφείς..... σελ. 147
7.4 Περιγραφή της εγκατάστασης για Φ/Β σταθμό με αντιστροφείς των 500kW..... σελ. 151

Κεφάλαιο 8: Εκτίμηση κόστους Φ/Β σταθμών

8.1 Εισαγωγή..... σελ. 156
8.2 Αναλυτικός πίνακας κόστους κατασκευής Φ/Β σταθμού με αντιστροφείς των 11kW..... σελ. 156
8.3 Αναλυτικός πίνακας κόστους Φ/Β σταθμού με αντιστροφείς των 500kW..... σελ. 161
8.4 Συμπεράσματα..... σελ. 166

Κεφάλαιο 9: Συμπεράσματα και προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

9.1 Συμπεράσματα..... σελ. 169
9.2 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα..... σελ. 171

Βιβλιογραφία..... σελ. 172

Παράρτημα Α: Πίνακες Ενεργειακής Απολαβής Κεκλιμένου Πλαισίου για Διάφορες Γωνίες

Παράρτημα Β: Τεχνικά Χαρακτηριστικά Ηλεκτρολογικού Εξοπλισμού

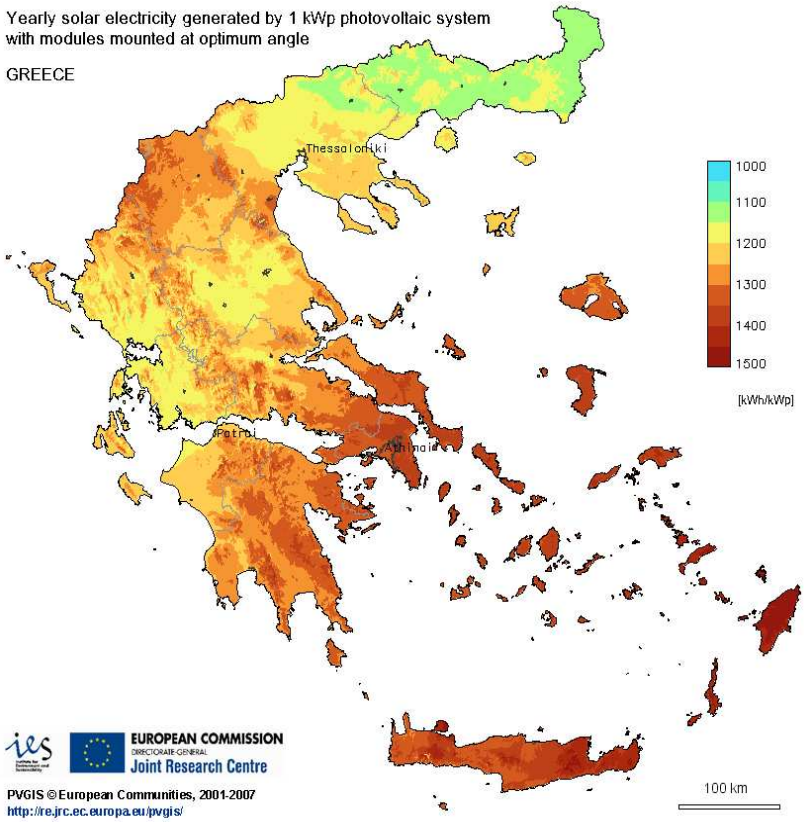
Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

1.1 Γενικά

Η αύξηση των αναγκών του ανθρώπου έχει ως άμεση συνέπεια την απαίτηση ολοένα και μεγαλύτερων ποσών ενέργειας. Τα τελευταία χρόνια οι αρνητικές επιπτώσεις που προκαλούν οι συμβατικές μορφές ενέργειας (πετρέλαιο, λιθάνθρακας) στο περιβάλλον, έχουν στρέψει το ενδιαφέρον τόσο των επιστημόνων όσο και των κυβερνήσεων στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Το συγκριτικό τους πλεονέκτημα έναντι των συμβατικών είναι προφανές μιας και οι πηγές αυτές είναι ανεξάντλητες και φιλικές προς το περιβάλλον.

Η ηλιακή ακτινοβολία είναι μια ήπια μορφή ενέργειας που μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο άμεσα όσο και έμμεσα για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Άμεσα, με τη μετατροπή απευθείας της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρικό ρεύμα με τη χρήση φωτοβολταϊκών (Φ/Β) πλαισίων και έμμεσα, για την παραγωγή ατμού και την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με ατμοστροβίλους. Η Ελλάδα είναι μια από τις ιδανικότερες χώρες για την εξάπλωση των φωτοβολταϊκών συστημάτων λόγω του πλούσιου ηλιακού δυναμικού της κατά τη διάρκεια όλου του έτους.



Σχήμα 1.1 Απεικόνιση ηλιακού δυναμικού της Ελλάδας

1.2 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα Φ/Β διατάξεων

Σε σχέση με τις υπόλοιπες μορφές ενέργειας, η μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική παρουσιάζει τα ακόλουθα πλεονεκτήματα:

- Παρουσιάζει μηδενική ρύπανση και επιβάρυνση του περιβάλλοντος
- Δεν χρησιμοποιούνται διατάξεις με περιστρεφόμενα μέρη κάτι που συνεπάγεται την αθόρυβη λειτουργία, την αξιοπιστία και ελάχιστες ανάγκες συντήρησης
- Η διάρκεια ζωής των Φ/Β στοιχείων είναι μεγάλη (20 με 25 χρόνια)
- Υπάρχει δυνατότητα τόσο για αυτόνομη όσο και για διασυνδεδεμένη λειτουργία των Φ/Β σταθμών
- Τα Φ/Β στοιχεία μπορούν να χρησιμοποιηθούν ανάλογα με τις ανάγκες σε μεγάλο εύρος εφαρμογών, από μερικά Watt έως και δεκάδες MW

Παρόλα αυτά παρουσιάζουν και μειονεκτήματα όπως:

- Χαμηλή απόδοση μετατροπής για κοινά Φ/Β πλαίσια κάτι που σημαίνει ότι απαιτούνται μεγάλες εκτάσεις για την τοποθέτησή τους
- Ακριβός εξοπλισμός με αποτέλεσμα υψηλό αρχικό κόστος εγκατάστασης
- Η αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται με μεγάλους συντελεστές απωλειών κάνοντάς την μη αποδοτική. Επιπλέον, οι συσσωρευτές αποθήκευσης έχουν μεγάλο κόστος.
- Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι άμεση συνδεδεμένη με τις παρούσες καιρικές συνθήκες, παράγοντας ο οποίος δεν μπορεί να προβλεφθεί με ακρίβεια.

1.3 Συνοπτική περιγραφή του αντικειμένου της εργασίας

Η παρούσα εργασία ασχολείται με την διαμόρφωση και την ανάπτυξη ενός Φ/Β σταθμού ισχύος περίπου 2MW. Η διάταξη τοποθέτησης των συστοιχιών, αν και στην πραγματικότητα εξαρτάται από τη μορφολογία και το σχήμα των διαθέσιμων εκτάσεων, είναι αρκετά ρεαλιστική. Αρχικά γίνεται μελέτη της αναμενόμενης ηλιακής απολαβής

θεωρώντας ότι ο σταθμός βρίσκεται στην περιοχή του Άργους και αναλύονται οι παράγοντες εκείνοι που συνεισφέρουν στη μείωση της απόδοσης των Φ/Β πλαισίων. Στη συνέχεια γίνεται ηλεκτρολογική μελέτη δύο τοπολογιών κατασκευής, με αντιστροφείς των 11kW και των 500kW. Με τη χρήση κατάλληλων σχεδίων αποτυπώνεται η θέση του εξοπλισμού σε σχέση με τις συστοιχίες και εκτιμώνται οι απαραίτητες ποσότητες του χρησιμοποιούμενου εξοπλισμού. Τέλος, γίνεται εκτίμηση του κόστους κατασκευής των δύο σταθμών.

Κεφάλαιο 2

Σχεδίαση Φωτοβολταϊκής Γεννήτριας

2.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται αναφορά στους παράγοντες εκείνους που πρέπει να ληφθούν υπ' όψιν για τη σωστή σχεδίαση και λειτουργία μιας φωτοβολταϊκής (Φ/Β) γεννήτριας. Παρουσιάζεται με μεθοδικό τρόπο η διαδικασία προσαρμογής του αντιστροφέα με τα Φ/Β πλαίσια, γίνεται αναφορά στο σύστημα στήριξης των συστοιχιών και τέλος εκτιμάται η βέλτιστη κατασκευή ανάλογα με το μήκος, το ύψος από το έδαφος, τη διάταξη των πλαισίων και το μήκος καλωδίωσής τους. Προς αποφυγή σύγχυσης, οι όροι Φ/Β συστοιχία, Φ/Β στοιχειοσειρά και Φ/Β γεννήτρια ορίζονται ως ακολούθως:

- **Φ/Β συστοιχία:** Είναι ο αριθμός των στοιχειοσειρών που συνδέονται παράλληλα σε ειδική διάταξη και στη συνέχεια καταλήγουν στον αντιστροφέα μέσω του κύριου καλωδίου DC.
- **Στοιχειοσειρά:** Είναι μια διάταξη n_c πλαισίων συνδεδεμένα σε σειρά.
- **Φ/Β γεννήτρια:** Το πλήθος όλων των συστοιχιών.

2.2 Κύριες συσκευές Φ/Β γεννήτριας

Οι βασικές συσκευές από τις οποίες αποτελείται μια Φ/Β γεννήτρια είναι:

- Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια.
- Η συσκευή παραλληλισμού των στοιχειοσειρών.
- Ο αντιστροφέας.
- Η βάση στήριξης της συστοιχίας.

2.2.1 Φ/Β πλαίσια

Τα Φ/Β πλαίσια είναι τα δομική στοιχεία που συλλέγουν την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία και τη μετασχηματίζουν σε συνεχές ρεύμα. Σαν βασικό κατασκευαστικό τους στοιχείο έχουν το πυρίτιο και διακρίνονται σε πλαίσια **μονοκρυσταλλικού**, **πολυκρυ-**

σταλλικού και **άμορφου** πυριτίου. Για έναν Φ/Β σταθμό των 2MW τα πλαίσια άμορφου πυριτίου δεν ενδείκνυνται διότι λόγω της χαμηλής τους απόδοσης (6% με 8%) απαιτείται μεγαλύτερος χώρος και άρα μεγαλύτερο κόστος εγκατάστασης. Το μονοκρυσταλλικό πυρίτιο έχει αρκετά καλύτερη απόδοση (15% με 18%) όμως το κόστος του είναι υψηλό και απαγορευτικό για μεγάλου μεγέθους Φ/Β συστήματα. Η πιο συνηθισμένη επιλογή είναι πλαίσια πολυκρυσταλλικού πυριτίου. Η απόδοσή τους είναι της τάξης του 13% με 15%.

(α) (β) (γ)

Σχήμα 1.1 Φωτοβολταϊκά κύτταρα (α) μονοκρυσταλλικού, (β) πολυκρυσταλλικού και (γ) άμορφου πυριτίου

Στον πίνακα που ακολουθεί γίνεται σύγκριση του εμβαδού που απαιτείται για διάφορα πλαίσια κρυσταλλικού και άμορφου πυριτίου:

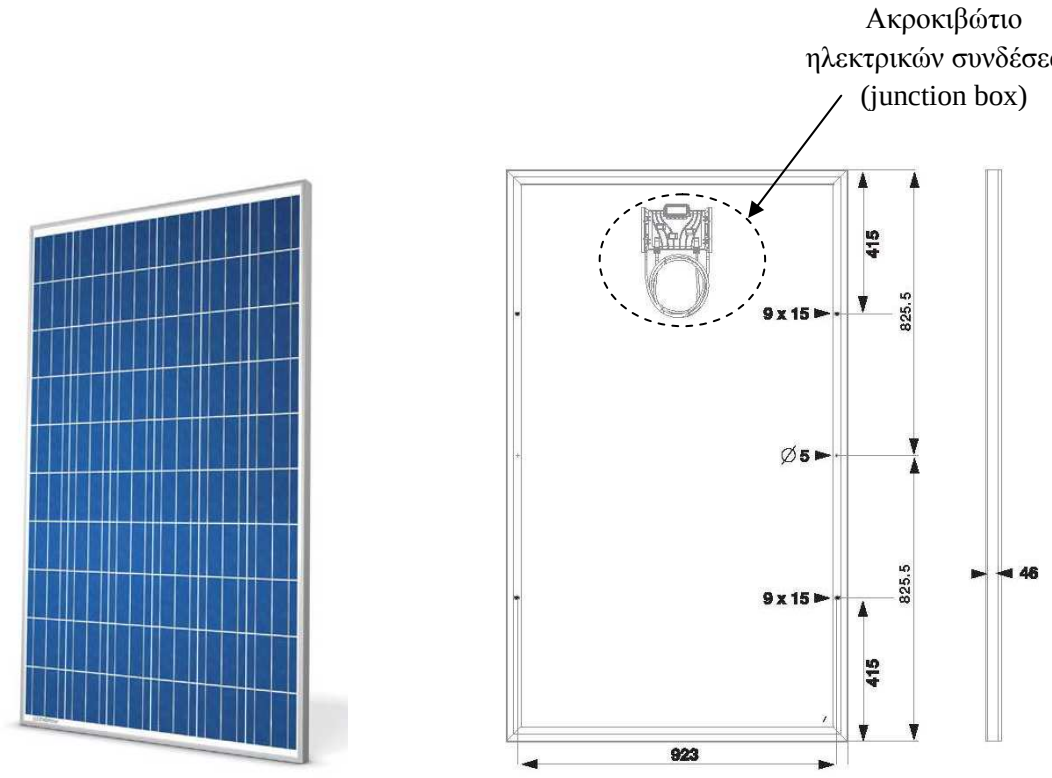
Άμορφο πυρίτιο				**Κρυσταλλικό πυρίτιο**			
Ισχύς (Wp)	**Επιφάνεια (τ.μ.)**	**Επιφάνεια 1 kW (τ.μ.)**	**Απόδοση (%)**	**Ισχύς (Wp)**	**Επιφάνεια (τ.μ.)**	**Επιφάνεια 1 kW (τ.μ.)**	**Απόδοση (%)**
40	0,42	10,6	9,4	**85**	0,66	7,7	12,9
60	0,95	15,8	6,3	**130**	0,97	7,5	13,3
64	1,01	15,8	6,3	**150**	1,17	7,8	12,8
68	0,72	10,7	9,4	**165**	1,23	7,4	13,5
80	0,86	10,8	9,3	**170**	1,23	7,2	13,9
100	1,57	15,7	6,4	**175**	1,28	7,3	13,7
140	1,95	13,9	7,2	**180**	1,32	7,3	13,7
-	-	-	-	**180**	1,15	6,4	15,6
-	-	-	-	**200**	1,25	6,3	16,0

Πίνακας 2.1 Σύγκριση διαφόρων πλαισίων άμορφου και κρυσταλλικού πυριτίου ως προς την επιφάνεια που απαιτούν.

Το εμβαδόν των πλαισίων και κατά συνέπεια η μέγιστη ισχύς τους παίζει αρκετά μεγάλο ρόλο στην κατασκευή ενός Φ/Β σταθμού. Τα πλεονεκτήματα που παρουσιάζονται στην επιλογή μεγάλων πλαισίων έχουν να κάνουν με:

- Ευκολία εγκατάστασης λόγω του μικρότερου αριθμού πλαισίων.
- Ευκολία ανίχνευσης σφαλμάτων και αντικατάστασης ελαττωματικών πλαισίων.
- Ελάττωση του συνολικού μήκους καλωδίωσης των συστοιχιών με άμεση συνέπεια τη μείωση των απωλειών ενέργειας και της πτώσης τάσης.

Στο Σχήμα 2.2 και που ακολουθεί βλέπουμε την εικόνα ενός πλαισίου πολυκρυσταλλικού πυριτίου καθώς επίσης και τα μηχανικά του χαρακτηριστικά. Το πλαίσιο αυτό κατασκευάζεται από την εταιρεία Conergy και είναι ισχύος 210Wp.



Σχήμα 2.2 Φωτοβολταϊκό πλαίσιο 210 Wp και μηχανολογικά του χαρακτηριστικά.

Ακολουθούν στον πίνακα 2.2 τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του παραπάνω πλαισίου **[45]**:

Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά Φ/Β πλαισίου	
Μέγιστη ισχύς σε κανονικές συνθήκες[1] (P_{mpp}):	210 Wp
Ανοχή απόδοσης:	±3 %
Απόδοση πλαισίου:	12,9 %
Τάση στο σημείο μέγιστης ισχύος V_{MPP}:	29,1 V
Ρεύμα στο σημείο μέγιστης ισχύος I_{MPP}:	7,24 A
Τάση ανοιχτού κυκλώματος V_{OC}:	36,4 V
Ρεύμα βραχυκυκλώσεως I_{SC}:	7,93 A
Θερμοκρασιακός συντελεστής σημείου μέγιστης ισχύος:	-0,45 %/^{o}C
Θερμοκρασιακός συντελεστής τάσης ανοιχτού κυκλώματος:	-0,127 V/^{o}C
Θερμοκρασιακός συντελεστής τάσης ανοιχτού κυκλώματος:	-0,35 %/^{o}C
Θερμοκρασιακός συντελεστής ρεύματος βραχυκύκλωσης:	2,1 mA/^{o}C
Θερμοκρασιακός συντελεστής ρεύματος βραχυκύκλωσης:	0,027 %/^{o}C
Μέγιστη τάση συστήματος:	1000 V

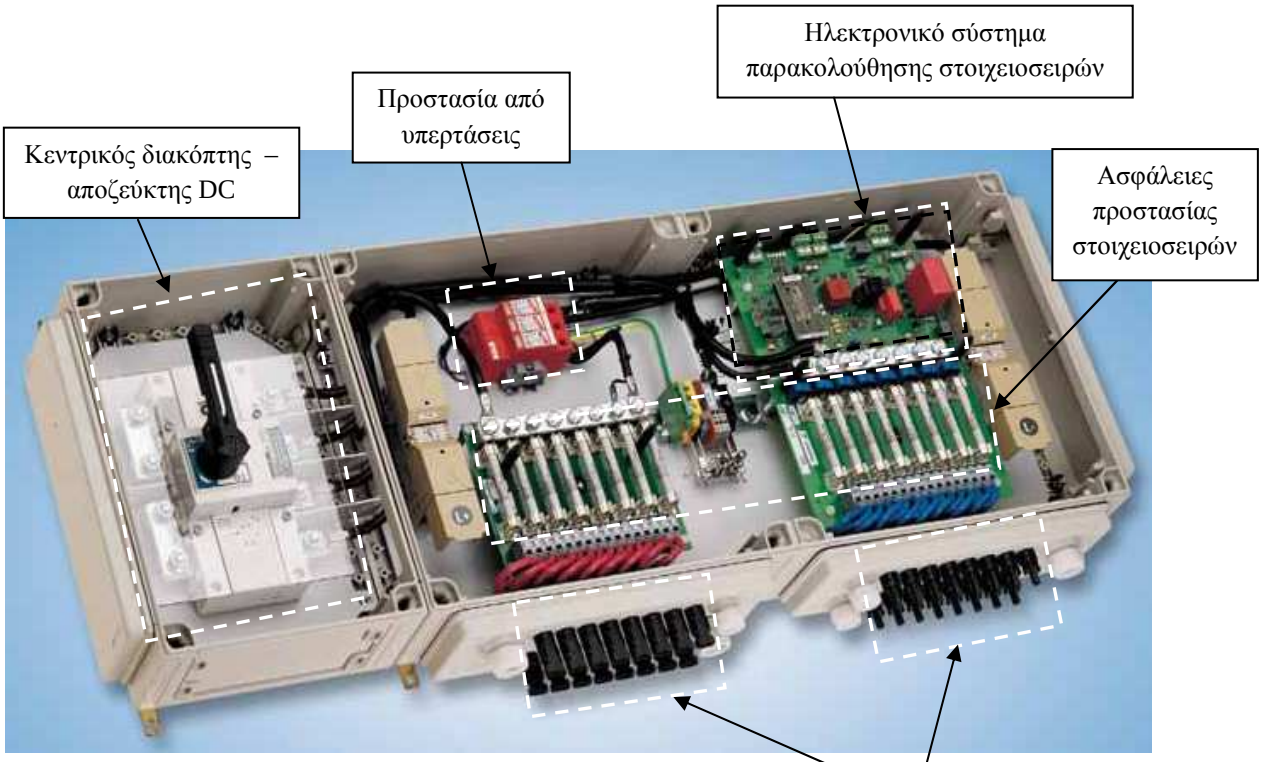
Πίνακας 2.2 Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά πλαισίου Conergy PowerPlus 210P

Ο συνδυασμός των παραπάνω πληροφοριών είναι απαραίτητος τόσο στη διαστασιολόγηση της Φ/Β γεννήτριας όσο και στην εκτίμηση της ενεργειακής της απολαβής. Η χρήση τους εξηγείται αναλυτικά σε επόμενες παραγράφους και κεφάλαια.

2.2.2 Συσκευή παραλληλισμού στοιχειοσειρών (combiner box)

Οι στοιχειοσειρές μιας συστοιχίας είναι απαραίτητο να παραλληλιστούν πριν οδηγηθούν στην είσοδο του αντιστροφέα. Η συσκευή παραλληλισμού είναι στην ουσία ένας πίνακας DC ο οποίος φέρει όλες τις απαραίτητες διατάξεις προστασίας και παρακολούθησης των ηλεκτρικών παραμέτρων τους. Επιπλέον υπάρχει η δυνατότητα σύνδεσής της σε τοπικό δίκτυο για παρακολούθηση των στοιχειοσειρών μέσω internet.

[1] Κανονικές Συνθήκες ή Πρότυπες Συνθήκες Δοκιμών (STC): Αναφέρεται στις εργαστηριακές συνθήκες κάτω από τις οποίες μετρήθηκαν τη ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του πλαισίου και είναι: Πυκνότητα ακτινοβολίας 1000 W/m^2, μάζα αέρα 1,5 AM και θερμοκρασία κυττάρου 25^{o}C.



Σχήμα 2.3 Συσκευή παραλληλισμού στοιχειοσειρών

2.2.3 Αντιστροφέας (inverter)

Η φωτοβολταϊκή γεννήτρια παράγει συνεχές ρεύμα και τάση. Απαιτείται επομένως ένα ενδιάμεσο στάδιο μετατροπής της τάσης και του ρεύματος σε εναλλασσόμενα μεγέθη προκειμένου η ενέργεια που παράγεται να διοχετευτεί στο δημόσιο δίκτυο ηλεκτρισμού. Η συσκευή που αναλαμβάνει τη μετατροπή αυτή ονομάζεται αντιστροφέας. Είναι μια διάταξη που αποτελείται από ημιαγωγούς ισχύος (IGBTs, MOSFETs) καθώς και ηλεκτρονικά κυκλώματα ελέγχου. Στις εικόνες που ακολουθούν βλέπουμε έναν μονοφασικό αντιστροφέα των 11 kW καθώς και έναν τριφασικό των 500 kW, και οι δύο της εταιρείας SMA.

Στην παρούσα εργασία θα αναπτυχθούν τοπολογίες ΦΒ σταθμών με χρήση τόσο τριφασικών αντιστροφέων των 500kW όσο και μικρότερων μονοφασικών των 11 kW. Ακολουθεί πίνακας με τα τεχνικά τους χαρακτηριστικά όπως αυτά αναφέρονται στα εγχειρίδια του κατασκευαστή.

(α)

(β)

Σχήμα 2.4 Αντιστροφείς (α) Sunny Mini Central 11000TL των 11 kW και (β) Sunny Central SC 500HE των 500 kW **[36],[38]**

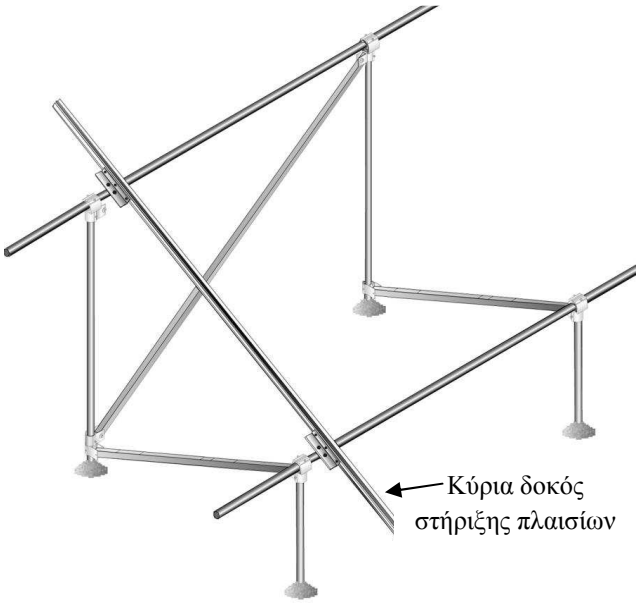
	Τεχνικά χαρακτηριστικά	***SMC 11000TL***	***Sunny Central SC 500 HE***
Τιμές εισόδου (DC)	Μέγιστη ΦΒ ισχύς (P_{PV}):	11400W	560kWp
	Περιοχή ΦΒ τάσης για ανίχνευση σημείου μέγιστης ισχύος (U_{DC}):	333V - 500V	450V – 820V
	Μέγιστη τάση DC ($V_{DC,max}$):	700V	1000V
	Μέγιστο ρεύμα εισόδου ($I_{DC,max}$):	34A	1200A
	Παραμόρφωση τάσης DC (U_{SS}):	-	<3%
	Αριθμός παράλληλων στοιχειοσειρών:	5	Χάλκινες μπάρες σύνδεσης
	Προστασία από υπέρταση DC:	Οχι	Ναι
	Προστασία από αντίστροφη πολικότητα:	Ναι	-
Τιμές εξόδου (AC)	Ονομαστική ισχύς AC ($P_{AC,nom}$):	11000W	500kW
	Ονομαστικό ρεύμα AC ($I_{AC,nom}$):	44A	1070A
	Συντελεστής παραμόρφωσης ρεύματος δικτύου:	-	<3%
	Περιοχή λειτουργίας τάσης δικτύου (U_{AC}):	220V-240V	3x270V±10%
	Συχνότητα δικτύου (F_{AC}):	50Hz/60Hz ±4,5Hz	50Hz/60Hz
	Συντελεστής ισχύος (cosφ):	1	±0,95
	Προστασία από βραχυκύκλωμα:	Ναι	-
	Προστασία από υπέρταση AC:	-	Ναι
Γενικά χαρακτηριστικ	Μέγιστος βαθμός απόδοσης (n/n_{euro}):	98,0% / 97,5%	98,6% / 98,4%
	Κλάση προστασίας:	IP65	IP20
	Πλάτος/Υψος/Βάθος (σε mm)	468/613/242	2400/2120/850
	Ιδία κατανάλωση κατά τη λειτουργία	<10W	<1% σε $P_{AC,nom}$
	Ιδία κατανάλωση κατά τη νυχτερινή λειτουργία:	0,25W	<50W
	Θερμοκρασία λειτουργίας:		-20^{o}C έως $+40^{o}$C

Πίνακας 2.3 Βασικά ηλεκτρικά και μηχανολογικά χαρακτηριστικά των αντιστροφέων SMC 11000TL και Sunny Central SC 500

2.2.4 Βάση στήριξης συστοιχίας

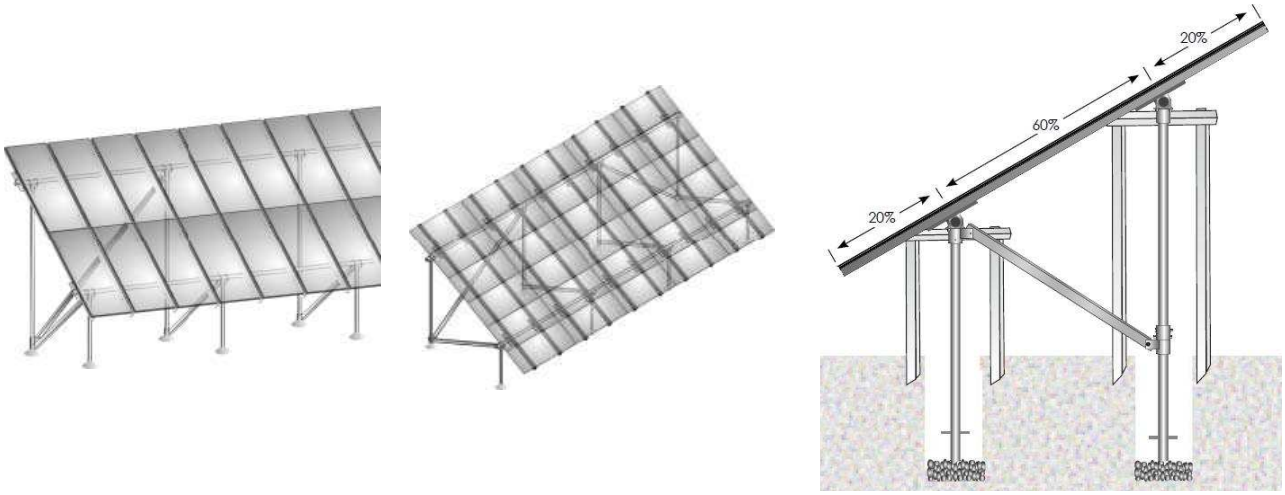
Οι βάσεις στήριξης συγκαταλέγονται στα έργα υποδομής ενός ΦΒ σταθμού και περιλαμβάνουν εργασίες εκσκαφής, θεμελίωσης και σκυροδέτησης. Η κατασκευή τους πρέπει να είναι ανθεκτική τόσο στο βάρος των πλαισίων, των καλωδίων διασύνδεσης και πολλές φορές και μικρών αντιστροφέων, όσο και στις αντίξοες καιρικές συνθήκες που μπορεί να επικρατούν στης περιοχή. Τα υλικά από τα οποία κατασκευάζονται είναι κυρίως γαλβανισμένο ατσάλι (για αποτροπή σκουριάς) ή αλουμίνιο. Το πλεονέκτημα του αλουμινίου, αν και πιο ακριβό, είναι ότι είναι πιο ελαφρύ και εύκολο στης επεξεργασία.

Όπως φαίνεται και στις εικόνες που ακολουθούν, μια βάση στήριξης διαστασιολογείται με τέτοιο τρόπο ώστε τα πλαίσια να μπορούν να τοποθετηθούν είτε σε οριζόντια (landscape) είτε σε κατακόρυφη (portrait) διάταξη.



(α)

(β)



(γ) (δ) (ε)

Σχήμα 2.5 (α) Τμήματα βάσης στήριξης, (β) τοποθέτηση Φ/Β πλαισίων στις κύριες δοκούς, (γ) κατακόρυφη τοποθέτηση πλαισίων, (δ) οριζόντια τοποθέτηση πλαισίων, (ε) πλήρως συναρμολογημένη και θεμελιωμένη συστοιχία.

Οι βάσεις στήριξης στις οποίες αναφερθήκαμε είναι σταθερής κλίσης και αζιμούθιου. Η έλλειψη ηλεκτρομηχανολογικών μερών προσδίδει στη διάταξη μηχανική αντοχή και αξιοπιστία κατά τη λειτουργία της. Παρόλα αυτά, με μικρές παρεμβάσεις μπορούμε να τη μετατρέψουμε σε βάση με δυνατότητα εποχικής ρύθμισης της κλίσης αυξάνοντας έτσι της απόδοση της Φ/Β γεννήτριας. Εκτενέστερη αναφορά στη γωνία κλίσης και στον προσανατολισμό της συστοιχίας γίνεται σε επόμενο κεφάλαιο.

Αξίζει να αναφερθεί ότι υπάρχει η δυνατότητα κατασκευής συστοιχιών οι οποίες παρακολουθούν την κίνηση του ήλιου όλη τη διάρκεια της ημέρας. Έχουν δυνατότητα περιστροφής γύρω από έναν ή δύο άξονες[2] με αποτέλεσμα η ακτινοβολία να προσπίπτει πάντα κάθετα πάνω στα πλαίσια. Για να επιτευχθεί αυτό απαιτείται η χρήση ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού και αισθητήρων (πυρανόμετρα). Αν και η απόδοση μιας κινητής διάταξης εκτιμάται ότι είναι 20% με 25% μεγαλύτερη, στην πράξη σπάνια επιλέγεται ως λύση. Τόσο η κατανάλωση ενέργειας από τον ηλεκτρονικό εξοπλισμό αλλά και οι αυξημένες βλάβες και κατά συνέπεια το κόστος συντήρησης της εγκατάστασης καθιστούν τη λύση αυτή πρακτικά ασύμφορη σε βάθος χρόνου.

[2] Μπορούν να μεταβάλλουν μόνο τη γωνία αζιμουθίου, μόνο τη γωνία κλίσης ή και τις δύο γωνίες ταυτόχρονα.

2.3 Μεταβολή των ηλεκτρικών παραμέτρων Φ/Β πλαισίων με τη θερμοκρασία και την ακτινοβολία [1],[3],[7][11]

Τα τρια πιο σημαντικά ηλεκτρικά χαρακτηριστικά ενός Φ/Β πλαισίου είναι το ρεύμα βραχυκύκλωσης I_{SC}, η τάση ανοιχτού κυκλώματος V_{OC} και το σημείο μέγιστης ισχύος MPP. Κυρίως μας ενδιαφέρει η μεταβολή των παραπάνω μεγεθών σε σχέση με τη θερμοκρασία και την προσπίπτουσα ακτινοβολία.

Η θερμοκρασία αποτελεί σημαντική παράμετρο στη λειτουργία ενός Φ/Β συστήματος. Για ένα ανεξάρτητο πολυκρυσταλλικό κύτταρο, ο θερμοκρασιακός συντελεστής της τάσης ανοιχτού κυκλώματος έχει τιμή περίπου ίση με -2,3 mV/^{o}C. Έτσι, για σύνδεση n_c κυττάρων σε σειρά ο συνολικός θερμοκρασιακός συντελεστής είναι:

$$\frac{dV_{OC}}{dT} = -2{,}3 \times n_c \quad mV/^o C \qquad (2.1)$$

Για τα Φ/Β πλαίσια της παρούσας εργασίας ο θερμοκρασιακός συντελεστής της V_{OC} δίνεται από τα φυλλάδια του κατασκευαστή και είναι **-0,127V/^{o}C**. Είναι σημαντικό εδώ να αναφέρουμε ότι η τάση ενός πλαισίου καθορίζεται από τη θερμοκρασία των Φ/Β κυττάρων κατά τη λειτουργία τους η οποία διαφέρει από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Για την εύρεση της παραμέτρου αυτής πρέπει να γνωρίζουμε την τυπικά θερμοκρασία λειτουργίας (NOCT[3]) του κυττάρου η οποία είτε δίνεται από τον κατασκευαστή είτε μετριέται στις ακόλουθες συνθήκες:

- Πυκνότητα ακτινοβολίας: 0,8kW/m^2
- Μάζα αέρα: 1,5 AM
- Θερμοκρασία περιβάλλοντος: 20^{o}C
- Μέση ταχύτητα αέρα: > 1m/sec

Η τιμή της είναι μεταξύ 42 ^{o}C και 46 ^{o}C.

[3] NOCT: Normal Operating Cell Temperature

Η θερμοκρασία λειτουργίας του Φ/Β κυττάρου (και κατά συνέπεια του πλαισίου) τότε δίνεται από τη σχέση:

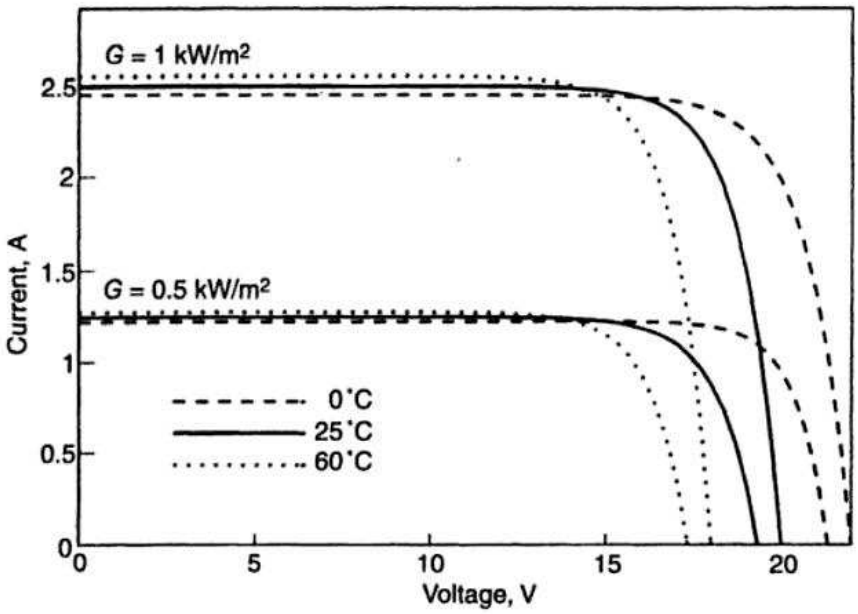
$$T_c - T_a = \frac{NOCT - 20}{0{,}8} \times G(kW/m^2) \qquad (2.2)$$

όπου T_c και T_a η θερμοκρασία κυττάρου και περιβάλλοντος αντίστοιχα σε ^oC και G η πυκνότητα ακτινοβολίας σε kW/m^2

Για το ρεύμα βραχυκύκλωσης ο θερμοκρασιακός συντελεστής έχει θετικό πρόσημο και είναι της τάξης των $+6\mu A/^oC$ ανά τετραγωνικό εκατοστό της επιφάνειας του πλαισίου. Το πλαίσιο της παρούσας εργασίας έχει θερμοκρασιακό συντελεστή I_{sc} περίπου **+2,1mA/^{o}C**.

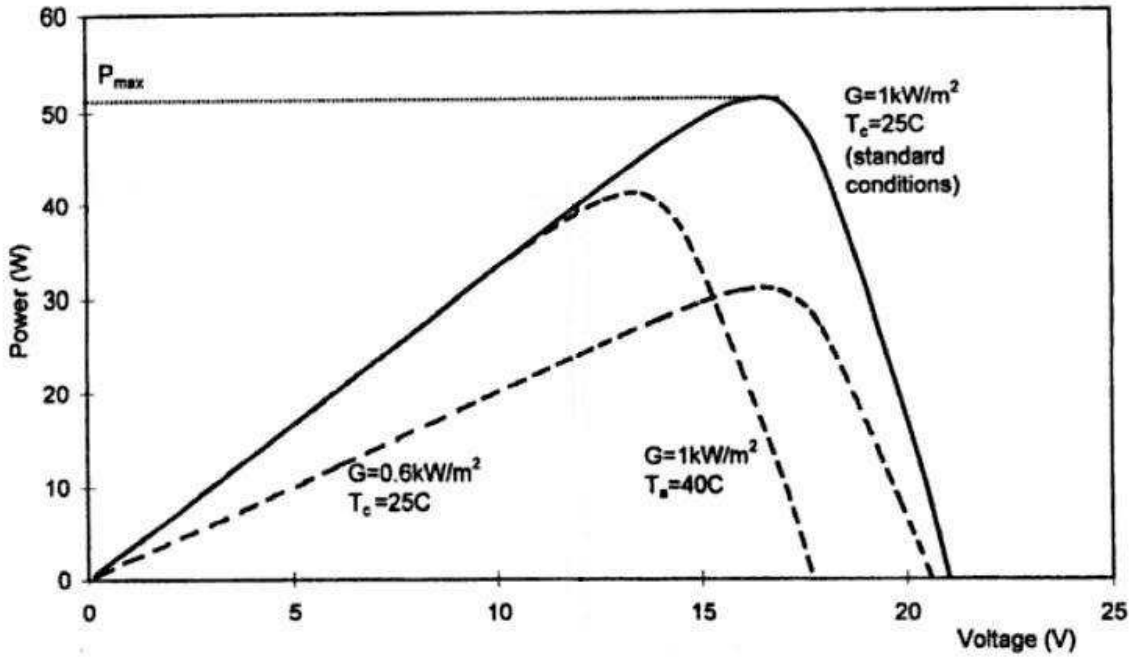
Η πυκνότητα ακτινοβολίας έχει σημαντική επίδραση στο ρεύμα βραχυκύκλωσης. Συγκεκριμένα, το I_{sc} είναι ευθέως ανάλογο με της πυκνότητα της ακτινοβολίας και κατά τη διάρκεια της ημέρας μεταβάλλεται όπως και αυτή. Δίνεται από τη σχέση:

$$I_{SC}(G) = I_{SC}(1kW/m^2) \times G(kW/m^2) \qquad (2.3)$$



Σχήμα 2.6 Εξάρτηση της καμπύλης I-V ενός Φ/Β πλαισίου από την θερμοκρασία και την ακτινοβολία.

Η λειτουργία ενός Φ/Β πλαισίου πρέπει να είναι όσο πιο κοντά γίνεται στο σημείο μέγιστης ισχύος. Όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.7, το σημείο αυτό μεταβάλλεται πολύ με τις διαφοροποιήσεις της θερμοκρασίας και της ακτινοβολίας.



Σχήμα 2.7 Εξάρτηση της παραγόμενης ισχύος ενός Φ/Β πλαισίου από την τάση σαν συνάρτηση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος και της ακτινοβολίας

Είναι σημαντικό να αναφέρουμε ότι η τάση μέγιστης ισχύος είναι σχεδόν ανεξάρτητη από την ακτινοβολία. Η μέση τιμή της κατά τη διάρκεια της ημέρας είναι περίπου 80% της V_{OC}, μια ιδιότητα πολύ καθοριστική για τον αριθμό των πλαισίων που θα σχηματίζουν μια στοιχειοσειρά. Η ισχύς P_{MPP} μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας και για τα πλαίσια που χρησιμοποιούμε στην εργασία ο θερμοκρασιακός συντελεστής είναι **-0,45%/^{o}C** ή **-0,945W/^{o}C.**

Συμπερασματικά λοιπόν μπορούμε να πούμε ότι οι μεταβολές της θερμοκρασίας επηρεάζουν κυρίως της τάση V_{OC} και V_{MPP} ενώ μεταβολές στην ακτινοβολία το I_{SC}. Αυτό φαίνεται ξεκάθαρα στο σχήμα 2.6 όπου βλέπουμε πως αλλάζουν οι παραπάνω παράμετροι. Σε πρακτικές εφαρμογές λαμβάνουμε υπ' όψιν μας μόνο τις παραπάνω εξαρτήσεις (αμελούμε δηλαδή την εξάρτηση της τάσης από την ακτινοβολία και του ρεύματος από τη θερμοκρασιά). Κατά τη διάρκεια μιας ημέρας, η ακτινοβολία μεταβάλλεται πολύ πιο έντονα από

την θερμοκρασία, συνεπώς περιμένουμε το ρεύμα να μεταβάλλεται πολύ πιο έντονα από την τάση. Τέλος, στο σχήμα 2.7 παρατηρούμε ότι για την ίδια θερμοκρασία περιβάλλοντος (T_a=25^{o}C) διαφοροποιήσεις στην ακτινοβολία αλλάζουν τη μέγιστη αποδιδόμενη ισχύ του πλαισίου. Όμως, η μέγιστη αυτή ισχύς αποδίδεται για την ίδια περίπου τάση V_{MPP} (17,5V περίπου). Επομένως είναι αναγκαία η ύπαρξη μιας ηλεκτρονικής διάταξης που να ελέγχει την τάση του πλαισίου ή της στοιχειοσειράς ώστε να έχουμε πάντα μέγιστη απόδοση.

2.4 Διαδικασία σχεδίασης Φ/Β γεννήτριας

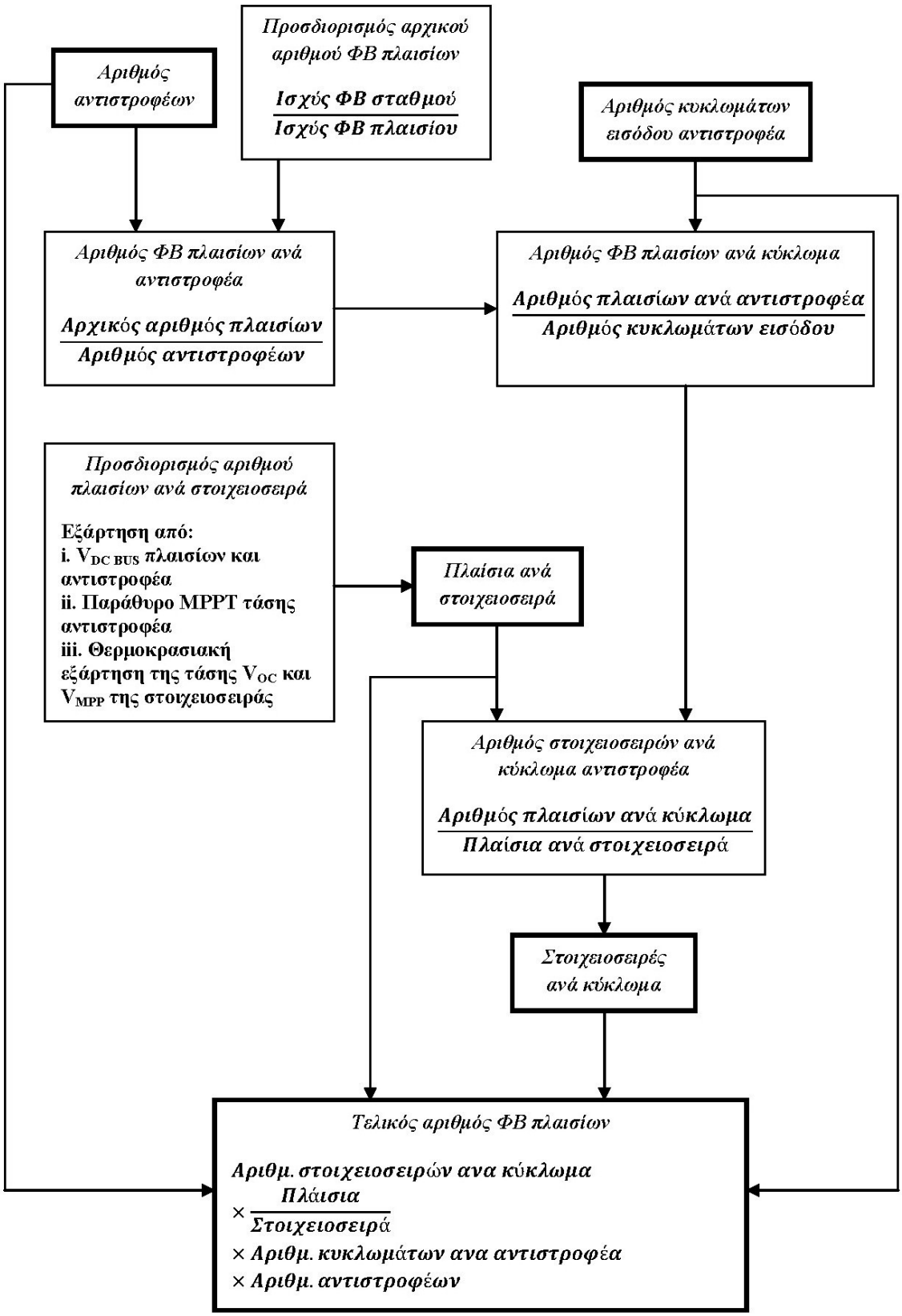
Ο σχεδιασμός ενός Φ/Β σταθμού απαιτεί την ομαδοποίηση των Φ/Β πλαισίων. Από ηλεκτρολογική μεριά αυτό είναι απαραίτητο για την προσαρμογή της γεννήτριας με τα DC χαρακτηριστικά εισόδου του αντιστροφέα. Η ομαδοποίηση των πλαισίων ακολουθεί την παρακάτω ιεραρχία:

- Καθορισμός αριθμού πλαισίων ανά στοιχειοσειρά
- Καθορισμός του πλήθους των στοιχειοσειρών ανά κύκλωμα του αντιστροφέα
- Καθορισμός του αριθμού των στοιχειοσειρών που θα φέρει κάθε συστοιχία
- Καθορισμός του αριθμού των συστοιχιών που θα αντιστοιχούν σε κάθε αντιστροφέα

Ταυτόχρονα θα πρέπει να λάβουμε υπ’ όψιν μας λειτουργικές παραμέτρους όπως η εύκολη εποπτεία του Φ/Β σταθμού, η ηλεκτρολογική και γεωμετρική συμμετρία των στοιχειοσειρών και τέλος η ευκολία διασύνδεσης και αποφυγής λαθών.

2.4.1 Φ/Β γεννήτρια με αντιστροφείς των 500kW

Τα βασικά βήματα σχεδιασμού και προσαρμογής της Φ/Β γεννήτριας με έναν αντιστροφέα των 500kW παρουσιάζονται συνοπτικά στο σχήμα 2.8 και αναλύονται στη συνέχεια της παραγράφου. Για την ευκολότερη εφαρμογή της διαδικασίας έχει ανατηχθεί υπολογιστικό φύλλο με το οποίο έχουμε άμεση εποπτεία των διαφόρων παραμέτρων.



Σχήμα 2.8 Βασικά βήματα σχεδιασμού Φ/Β γεννήτριας με μεγάλους αντιστροφείς

Σαν πρώτο βήμα κρίνεται η εκτίμηση του αριθμού των Φ/Β πλαισίων που θα χρειαστούμε και δίνεται από τη σχέση:

$$\text{Αριθμός πλαισίων} = \frac{\text{Ισχύς Φ/Β σταθμού (Wp)}}{\text{Ισχύς Φ/Β πλαισίου (Wp)}} = \frac{2000000}{210} \cong 9524 \text{ πλαίσια}$$

Τα **9524** που εκτιμάται ότι αρχικά θα χρησιμοποιηθούν θα ομαδοποιηθούν σε **4 αντιστροφείς** των 500kW τύπου Sunny Central της εταιρείας SMA, με τον κάθε ένα να φέρει **16 κυκλώματα εισόδου DC**. Έτσι, τα πλαίσια που αντιστοιχούν σε κάθε αντιστροφέα είναι:

$$\frac{\text{Πλαίσια}}{\text{Αντιστροφέα}} = \frac{\text{Αρχικός αριθμός πλαισίων}}{\text{Αριθμός αντιστροφέων}} = \frac{9524}{4} \cong 2381 \text{ πλαίσια}$$

ενώ ανά κύκλωμα θα έχουμε:

$$\frac{\text{Πλαίσια}}{\text{Κύκλωμα}} = \frac{\text{Πλαίσια ανά αντιστροφέα}}{\text{Αριθμός κυκλωμάτων ανά αντιστροφέα}} = \frac{2381}{16} \cong 148 \text{ πλαίσια}$$

Τα **148 πλαίσια ανά κύκλωμα** πρέπει να ομαδοποιηθούν σε στοιχειοσειρές και στη συνέχεια οι στοιχειοσειρές να παραλληλιστούν μέσω διάταξης παραλληλισμού.

Ο προσδιορισμός του αριθμού των πλαισίων ανά στοιχειοσειρά είναι μια πολυπαραμετρική διαδικασία για την οποία πρέπει να λάβουμε υπόψη:

i. **Τη μέγιστη DC τάση συστήματος:** Για τα πλαίσια καθορίζεται από τον κατασκευαστή και στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι **1000V**. Για τον αντιστροφέα, από τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά εισόδου βλέπουμε ότι είναι **880V**. Επομένως, η μέγιστη DC τάση συστήματος στη συγκεκριμένη τοπολογία είναι τα **880V**.

ii. **Παράθυρο MPPT τάσης αντιστροφέα:** Είναι τα όρια της τάσης μέσα στα οποία ο αντιστροφέας κάνει ανίχνευση του σημείου μέγιστης ισχύος της στοιχειοσειράς. Στην παρούσα περίπτωση είναι **450V – 820V**.

iii. **Θερμοκρασιακή εξάρτηση της V_{OC} και V_{MPP} της στοιχειοσειράς:** Είναι η τάση στα άκρα της στοιχειοσειράς καθώς η θερμοκρασία μεταβάλλεται. Για τις διάφορες περιοχές της Ελλάδας ένα εύρος θερμοκρασιών από -20^{o}C έως +70^{o}C (θερμοκρασία πλαισίου) είναι ικανοποιητικό για τη μελέτη μας. Θα μπορούσαμε να πούμε ότι οι

-20^{o}C είναι ένα κάπως υπερβολικό σενάριο μιας και η θερμοκρασία πλαισίου είναι περίπου 25 ^{o}C υψηλότερη από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Γνωρίζουμε τις τάσεις V_{OC} και V_{MPP} στους 25^{o}C και τον αντίστοιχο θερμοκρασιακό συντελεστή[4]. Με τη βοήθεια των σχέσεων 2.4 και 2.5 που ακολουθούν υπολογίζουμε τις τάσεις για όλο το εύρος θερμοκρασιών που μας ενδιαφέρει.

$$V_{OC}(T_{\mathrm{mod}}) = V_{OC}(25^{o}C) + (T_{\mathrm{mod}} - 25) \times V_{OC,T_{coeff}} \qquad (2.4)$$

$$V_{MPP}(T_{\mathrm{mod}}) = V_{MPP}(25^{o}C) + (T_{\mathrm{mod}} - 25) \times V_{MPP,T_{coeff}} \qquad (2.5)$$

Με τη βοήθεια του υπολογιστικού φύλλου, βρίσκουμε ότι ο κατάλληλος αριθμός πλαισίων ανά στοιχειοσειρά είναι 18 ή 19 πλαίσια. Συγκεκριμένα έχουμε:

	18 πλαίσια ανά στοιχειοσειρά		**19 πλαίσια ανά στοιχειοσειρά**	
	-20^{o}C	+70^{o}C	-20^{o}C	+70^{o}C
V_{OC}	758,39 V	552,01 V	800,53 V	582,67 V
V_{MPP}	606,30 V	441,30 V	639,98 V	465,82 V

Πίνακας 2.4 Μεταβολή της V_{OC} και V_{MPP} σε ακραίες τιμές θερμοκρασίας

Παρατηρούμε ότι για τα 18 πλαίσια ανά στοιχειοσειρά και για θερμοκρασία +70^{o}C η τάση V_{MPP} ξεφεύγει από το παράθυρο ανίχνευσης τάσης μέγιστης ισχύος του αντιστροφέα. Αυτό δεν αποτελεί ιδιαίτερο πρόβλημα αφού η θερμοκρασία αυτή είναι ακραία και θα παρατηρηθεί ελάχιστες φορές και μόνο τους καλοκαιρινούς μήνες. Περαιτέρω μείωση των πλαισίων ανά στοιχειοσειρά θα είχε ως αποτέλεσμα τη συχνότερη εμφάνιση του παραπάνω φαινομένου.

Στη συνέχεια πρέπει να προσδιορίσουμε τον αριθμό των στοιχειοσειρών που θα λειτουργούν παράλληλα σε ένα κύκλωμα. Προσδιορίζεται από τη σχέση:

[4] Αν ο θερμοκρασιακός συντελεστής για την τάση V_{MPP} δεν είναι γνωστός, για πρακτικούς λόγους δεν είναι λάθος να τον υποθέσουμε περίπου ίδιο με αυτόν της V_{OC}.

$$\frac{\Sigma τοιχειοσειρές}{\text{Κ}ύκλωμα} = \frac{\text{Α}ριθμός\ πλαισίων\ ανά\ κύκλωμα}{\Pi λαίσια\ ανά\ στοιχειοσειρά}$$

Για 18 πλαίσια ανά στοιχειοσειρά έχουμε 8,22 στοιχειοσειρές ενώ για 19 πλαίσια έχουμε 7,78. Καταλήγουμε λοιπόν στο συμπέρασμα ότι απαιτούνται συνολικά **8 παράλληλες στοιχειοσειρές**. Το συνολικό DC ρεύμα εισόδου θα είναι:

$$I_{DC} = I_{MPP,string} \cdot \text{Α}ριθμό\ στοιχειοσειρών \cdot \text{Α}ριθμό\ \text{κ}υκλωμάτων =$$
$$= 7,24 \cdot 8 \cdot 8 = 463,36\text{A}$$

το οποίο είναι εντός των ηλεκτρικών προδιαγραφών.

Για 18 πλαίσια ανά στοιχειοσειρά η τελική ισχύς του Φ/Β σταθμού είναι 1,935 MWp ενώ με 19 πλαίσια έχουμε **2,042MWp**. Επειδή η επιθυμητή ισχύς του σταθμού θέλουμε να είναι 2MWp, αυτό επιτυγχάνεται καλύτερα με **19 πλαίσια**. Στην παρούσα περίπτωση η διαφοροποίηση της ισχύος είναι αμελητέα. Αξίζει να σημειωθεί ότι ομαλή λειτουργία θα είχαμε και με 20, ακόμα και με 21 πλαίσια ανά στοιχειοσειρά. Τότε όμως η ισχύς του σταθμού θα ήταν 2,150MWp και 2,258MWp αντίστοιχα, σημαντικά μεγαλύτερη από την επιθυμητή.

Τέλος, αφού έχουν προηγηθεί οι παραπάνω υπολογισμοί, μπορούμε να προσδιορίσουμε τον ακριβή αριθμό πλαισίων που χρειάζονται που είναι **9728 πλαίσια**. Συγκεντρωτικά έχουμε τα εξής αποτελέσματα:

Ισχύς Φ/Β σταθμού:	2,042 MWp
Αριθμός αντιστροφέων:	4
Κυκλώματα ανά αντιστροφέα:	16
Στοιχειοσειρές ανά κύκλωμα:	8
Πλαίσια ανά στοιχειοσειρά:	19
Τελικός αριθμός Φ/Β πλαισίων:	9728
Λόγος ισχύος αντιστροφέα[5]:	86,56 %

Πίνακας 2.5 Τελική διαστασιολόγηση Φ/Β σταθμού με αντιστροφείς των 500kW.

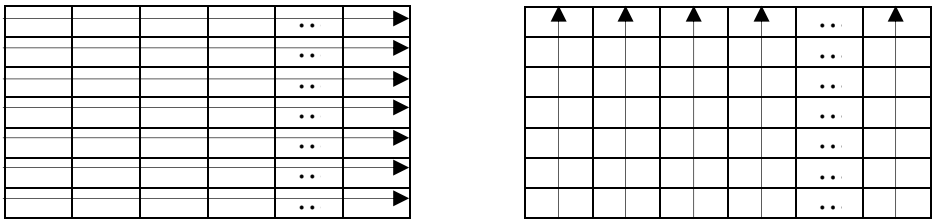
[5] Λόγος ισχύος: Είναι ο λόγος της μέγιστης ισχύος των Φ/Β πλαισίων στην είσοδο του αντιστροφέα προς την ισχύ που ο αντιστροφέας μπορεί να δεχτεί.

2.4.2 Ανάπτυξη Φ/Β γεννήτριας σε συστοιχίες

Γνωρίζοντας τις πληροφορίες του πιο πάνω πίνακα το επόμενο βήμα είναι η διαστασιολόγηση της Φ/Β συστοιχίας. Πάνω σε αυτήν, εκτός από τα Φ/Β πλαίσια θα στηρίζονται τόσο τα καλώδια των πλαισίων όσο και η συσκευή παραλληλισμού των στοιχειοσειρών. Για την σχεδίασή της πρέπει να λάβουμε υπ' όψιν παράγοντες όπως:

- Μήκος και μέγιστο ύψος συστοιχίας
- Προσανατολισμός πλαισίων σε οριζόντια και κατακόρυφη γεωμετρία
- Οριζόντια ή κατακόρυφη τοποθέτηση της στοιχειοσειράς
- Συνολικό μήκους καλωδίωσης
- Ευκολία κατασκευής, ελέγχου και επιδιόρθωσης της διάταξης

Ο προσανατολισμός της στοιχειοσειράς μπορεί να γίνει είτε οριζόντια είτε κατακόρυφα όπως φαίνεται και στο σχήμα που ακολουθεί:

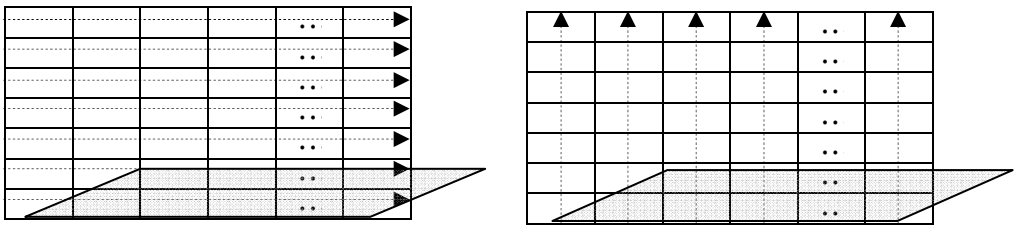


(α) (β)

Σχήμα 2.9 Οριζόντιος και κατακόρυφος προσανατολισμός στοιχειοσειρών

Η επιλογή όμως του προσανατολισμού ουσιαστικά περιορίζεται λόγω των φαινομένων σκίασης της συστοιχίας.

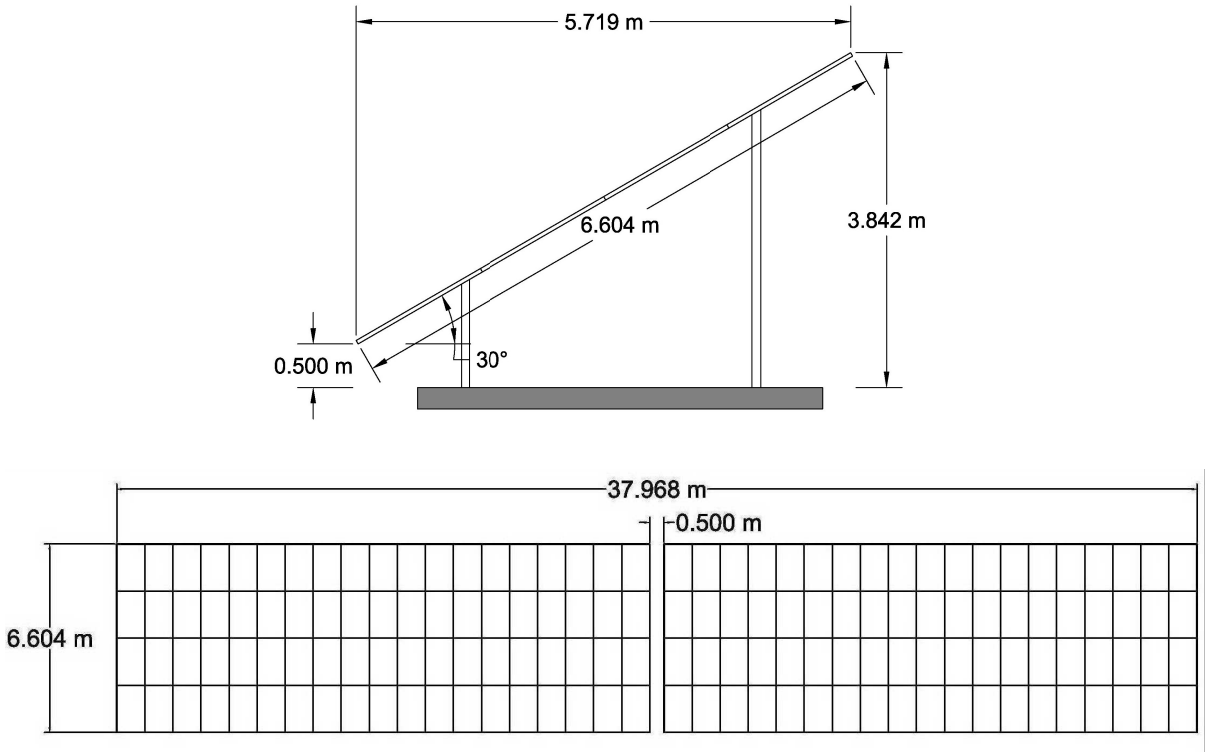
Κάθε συστοιχία σκιάζεται από την αμέσως νοτιότερή της. Η σκιά κινείται από την κορυφή της συστοιχίας προς το έδαφος τις πρωινές ώρες ενώ διαγράφει την αντίθετη πορεία τις απογευματινές. Στο σχήμα 2.10 που ακολουθεί βλέπουμε τις συστοιχίες υπό μερική σκίαση κάποια στιγμή της ημέρας. Όταν κάποιο πλαίσιο μιας στοιχειοσειράς σκιαστεί, αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της απόδοσης ολόκληρης της στοιχειοσειράς.



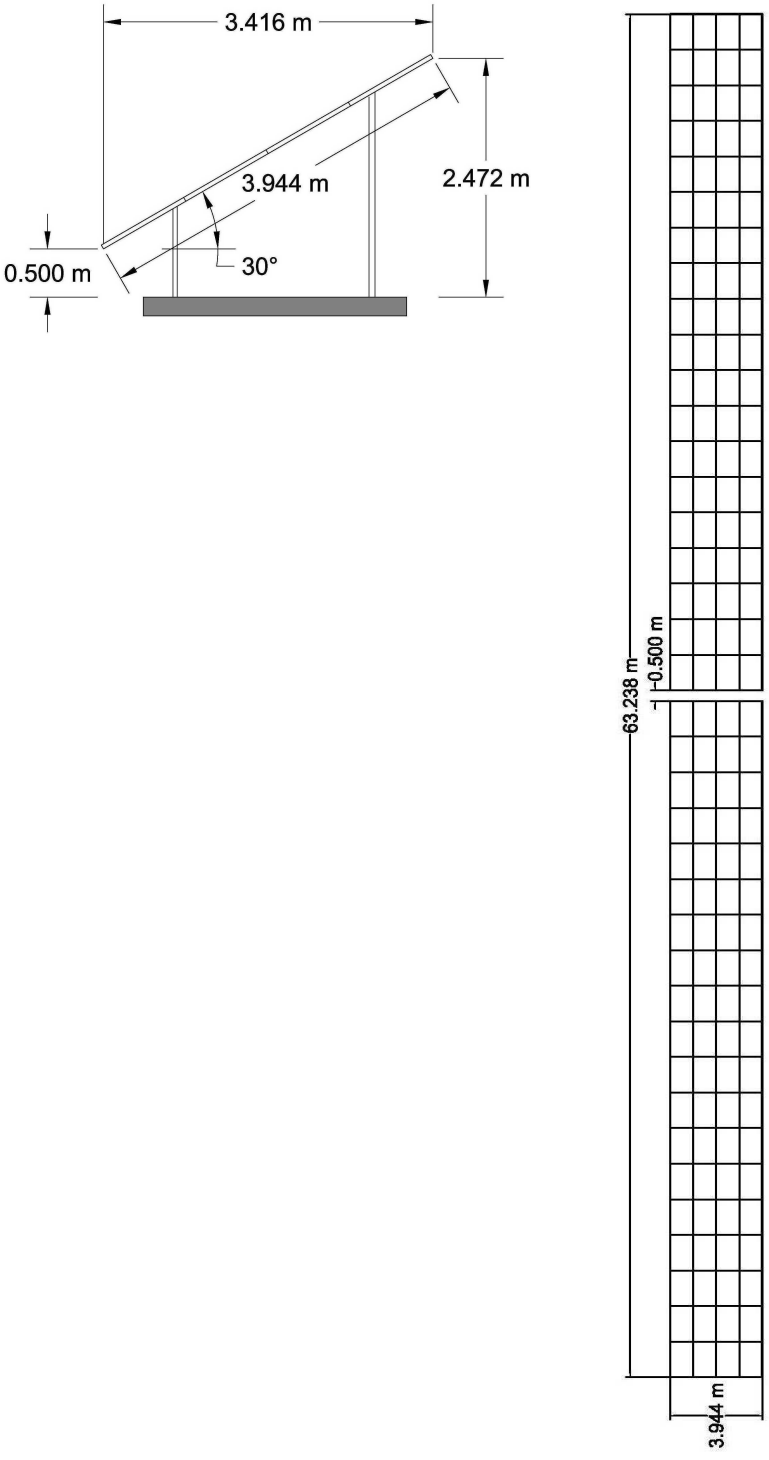
Σχήμα 2.10 Μερική σκίαση στοιχειοσειρών

Στα σχήματα, η σκιά έχει καλύψει τις δύο πρώτες σειρές των συστοιχιών. Όταν ο προσανατολισμός είναι οριζόντιος, αυτό έχει ως αποτέλεσμα να σκιάζονται τα πλαίσια μόνο 2 στοιχειοσειρών. Αντίστοιχα, έχουμε μείωση της απόδοσης μόνο στις στοιχειοσειρές αυτές. Όταν όμως προσανατολισμός είναι κατακόρυφος, σκιάζονται πλαίσια όλων των στοιχειοσειρών και μειώνεται η απόδοση όλης της συστοιχίας. Για τον λόγο αυτό στη σχεδίαση της παρούσας εργασίας θα ακολουθήσουμε οριζόντιο προσανατολισμό της στοιχειοσειράς.

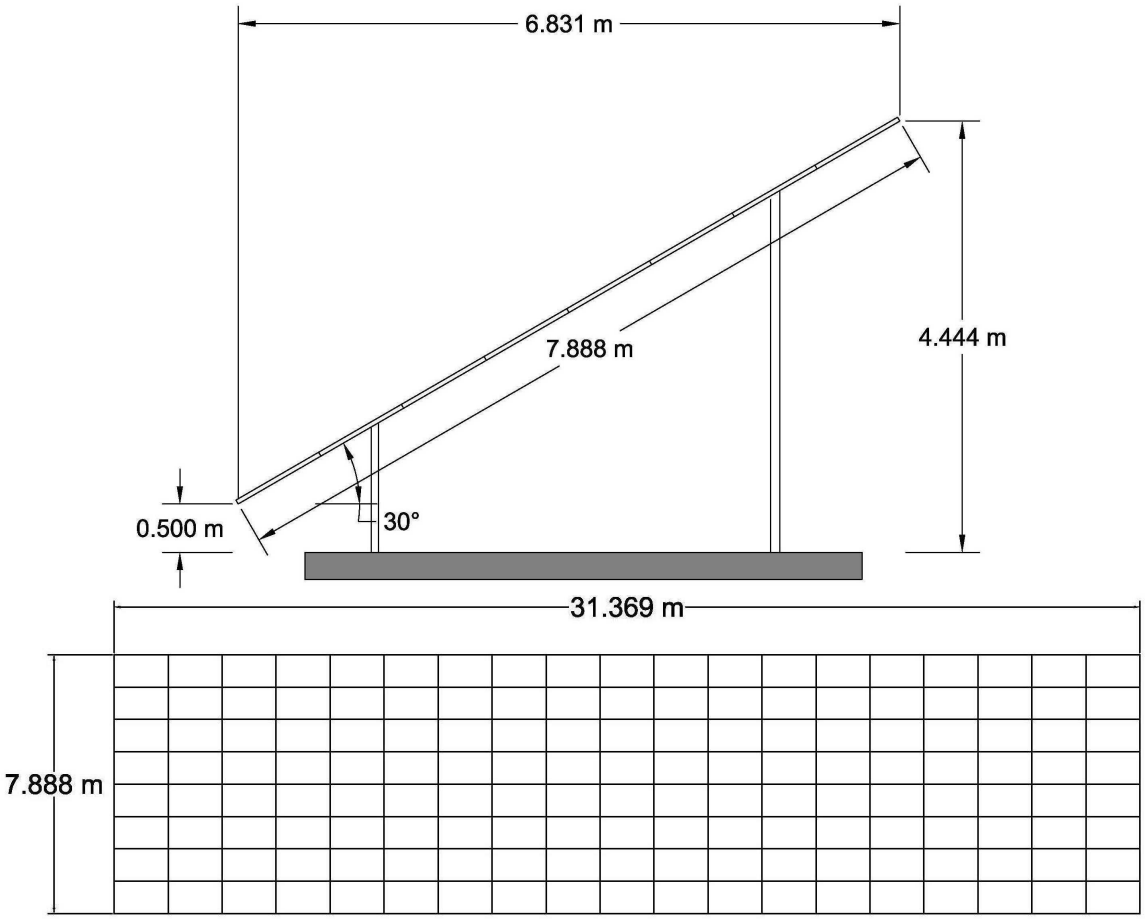
Στη συνέχεια φτιάχνουμε σχέδια από τρεις διαφορετικές διατάξεις συστοιχιών και συγκρίνουμε τα χαρακτηριστικά τους:



Συστοιχία 1: Πλάγια όψη και εμβαδό



Συστοιχία 2: Πλάγια όψη και εμβαδό



Συστοιχία 3: Πλάγια όψη και εμβαδό

Συγκεντρωτικά:

	Συστοιχία 1	**Συστοιχία 2**	**Συστοιχία 3**
Μήκος:	37,97 m	63,24 m	31,67 m
Πλάτος:	6,60 m	3,94 m	7,89 m
Ύψος από το έδαφος:	3,84 m	2,47 m	4,44 m

Πίνακας 2.6

Η γωνία των συστοιχιών είναι κοινή και ίση με 30 μοίρες. Η κλίση αυτή δεν ανταποκρίνεται στη γωνία μέγιστης απόδοσης της συστοιχίας (υπολογίζεται αναλυτικά στο κεφάλαιο 3). Είναι μια μέση τιμή που ανταποκρίνεται στο γεωγραφικό πλάτος περιοχών της Ελλάδας και την χρησιμοποιούμε για μια πρώτη εκτίμηση των διαφόρων μεγεθών της συστοιχίας. Η τοποθέτηση των Φ/Β πλαισίων έχει γίνει κατά τρεις διαφορετικούς τρόπους:

- Σε κατακόρυφη διάταξη (portrait) και 4 σειρές πλαισίων
- Σε οριζόντια διάταξη (landscape) και 4 σειρές πλαισίων
- Σε οριζόντια διάταξη και 8 σειρές πλαισίων

Και στις τρεις σχεδιάσεις, βασική ιδέα αποτελεί η διαστασιολόγηση της συστοιχίας ώστε να αποτελεί είσοδο σε κάθε ένα από τα κυκλώματα του αντιστροφέα. Στην παρούσα εργασία κάθε αντιστροφέας θα λειτουργεί με 16 συστοιχίες. Αυτό διευκολύνει κατά πολύ τη σχεδίαση αν για παράδειγμα αντί για 500 kW χρησιμοποιήσουμε αντιστροφείς των 250kW ή των 1000kW. Κάθε συστοιχία είναι ανεξάρτητη απο την άλλη τόσο ηλεκτρολογικά όσο και σχεδιαστικά ώστε να είναι εύκολη η κατασκευή, η επίβλεψη και η απομόνωσή τους σε περίπτωση βλάβης.

Ως προς τα μηχανικά τους χαρακτηριστικά, αρχικά παρατηρούμε ότι τόσο το εμβαδόν της απαιτούμενης έκτασης όσο και το εμβαδόν της συστοιχίας είναι ουσιαστικά το ίδιο και στις τρεις διατάξεις, κάτι που ήταν αναμενόμενο αφού χρησιμοποιείται ο ίδιος αριθμός πλαισίων. Σημαντικό κριτήριο αποτελεί το ύψος της συστοιχίας από το έδαφος. Είναι προφανές ότι μικρότερο ύψος συνεπάγεται ευκολία στην κατασκευή των βάσεων και στη συναρμολόγηση ενώ ταυτόχρονα δίνεται η δυνατότητα άμεσης επέμβασης σε περίπτωση βλάβης. Επιπλέον, η εργασία σε μικρότερο ύψος σημαίνει μεγαλύτερη ασφάλεια για το προσωπικό που εργάζεται στο σταθμό καθώς και ευκολία στη συντήρηση. Ως προς το οριζόντιο μήκος βλέπουμε ότι στη δεύτερη σχεδίαση είναι σχεδόν το διπλάσιο από ότι στις άλλες δύο. Αυτό έχει άμεση συνέπεια στο μήκος των βάσεων που πρέπει να κατασκευαστούν, κάτι που δεν αποτελεί ιδιαίτερο πρόβλημα. Γενικά ως προς το οριζόντιο μήκος, βασικός παράγοντας επιλογής είναι η διάταξη του διαθέσιμου χώρου στον οποίο θα εγκατασταθεί ο Φ/Β σταθμός. Η τρίτη διάταξη υστερεί σε σχέση με τις άλλες δύο τόσο στο θέμα του ύψους από το έδαφος όσο και στον τρόπο διάταξης των πλαισίων που εμποδίζει τον επαρκή δροσισμό τους και μειώνει την απόδοση του σταθμού. Τέλος, σημαντικό είναι να αναφέρουμε ότι συστοιχίες με μεγάλο ύψος απαιτούν ισχυρότερες βάσεις θεμελίωσης και γενικά πιο ανθεκτικά υλικά κατασκευής για να αντέχουν στις ανεμοπιέσεις.

2.4.3 Καλωδίωση συστοιχιών

Το συνολικό μήκος του καλωδίου που απαιτείται για κάθε μία από τις παραπάνω σχεδιάσεις αποτελεί σημαντικό κριτήριο για την επιλογή της κατάλληλης συστοιχίας. Συγκεκριμένα έχει επίδραση:

- Στο κόστος καλωδίωσης της συστοιχίας και στο συνολικό κόστος του σταθμού
- Στην πτώση τάσης που δημιουργείται στο καλώδιο και κατά συνέπεια στην επιλογή της διατομής του
- Στις απώλειες ενέργειας που θα έχουμε κατά τη λειτουργία της συστοιχίας

Ο τρόπος καλωδίωσης φαίνεται αναλυτικά στα σχήματα της επόμενης σελίδας. Για το μήκος του καλωδίου που απαιτείται έχουμε:

Συστοιχία 1	
A1	39,16 m
A2	42,74 m
A3	46,34 m
A4	49,94 m
B1	39,16 m
B2	42,74 m
B3	46,34 m
B4	49,94 m
Σύνολο	**356,4 m**

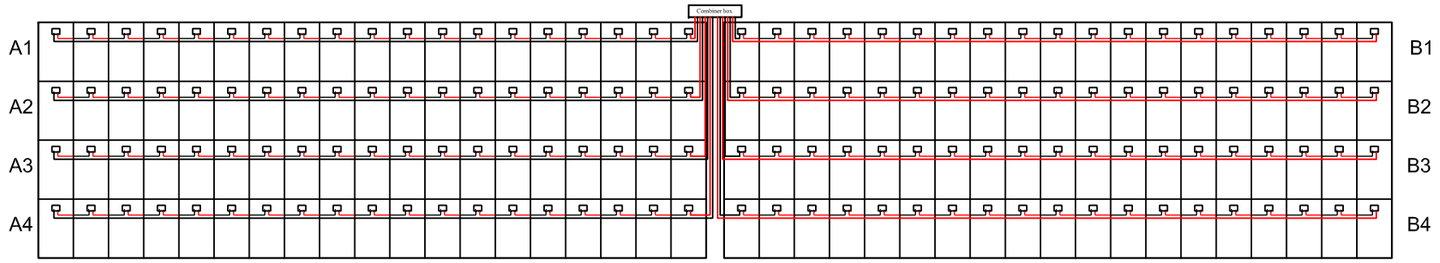
Συστοιχία 2	
A1	74,60 m
A2	76,85 m
A3	79,15 m
A4	81,40 m
B1	74,60 m
B2	76,85 m
B3	79,15 m
B4	81,40 m
Σύνολο	**624,0 m**

Συστοιχία 3	
A1	79,61 m
A2	77,97 m
A3	76,27 m
A4	74,59 m
A5	75,03 m
A6	76,72 m
A7	78,41 m
A8	80,10 m
Σύνολο	**618,7 m**

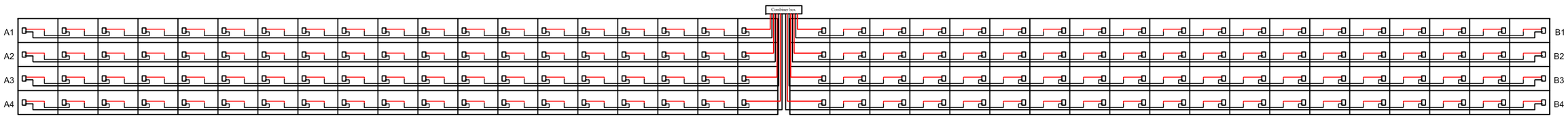
Πίνακας 2.7

Βλέπουμε ότι η τοποθέτηση των πλαισίων σε κατακόρυφη διάταξη (portrait) μειώνει σχεδόν στο μισό το μήκος του απαιτούμενου καλωδίου.

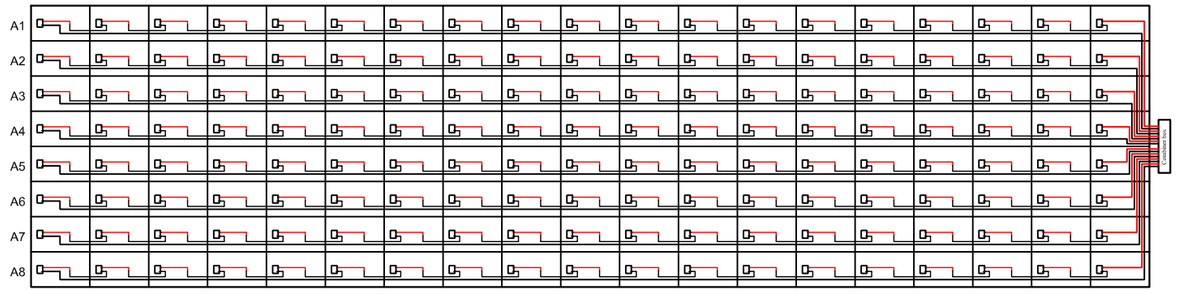
Καταλήγοντας, καθοριστικός παράγοντας επιλογής ανάμεσα στις τρεις σχεδιάσεις φαίνεται να είναι η καλωδίωση της συστοιχίας. Και αυτό γιατί μείωση του καλωδίου κατά 40% περίπου συνεπάγεται τόσο τη μείωση του αρχικού κόστους καλωδίωσης όσο και μείωση των συνολικών απωλειών ενέργειας του σταθμού. Σε επόμενο κεφάλαιο θα γίνει μελέτη του συνολικού εμβαδού του σταθμού λαμβάνοντας υπ' όψιν μας τη σχεδίαση της **συστοιχίας 1**.



Συστοιχία 1



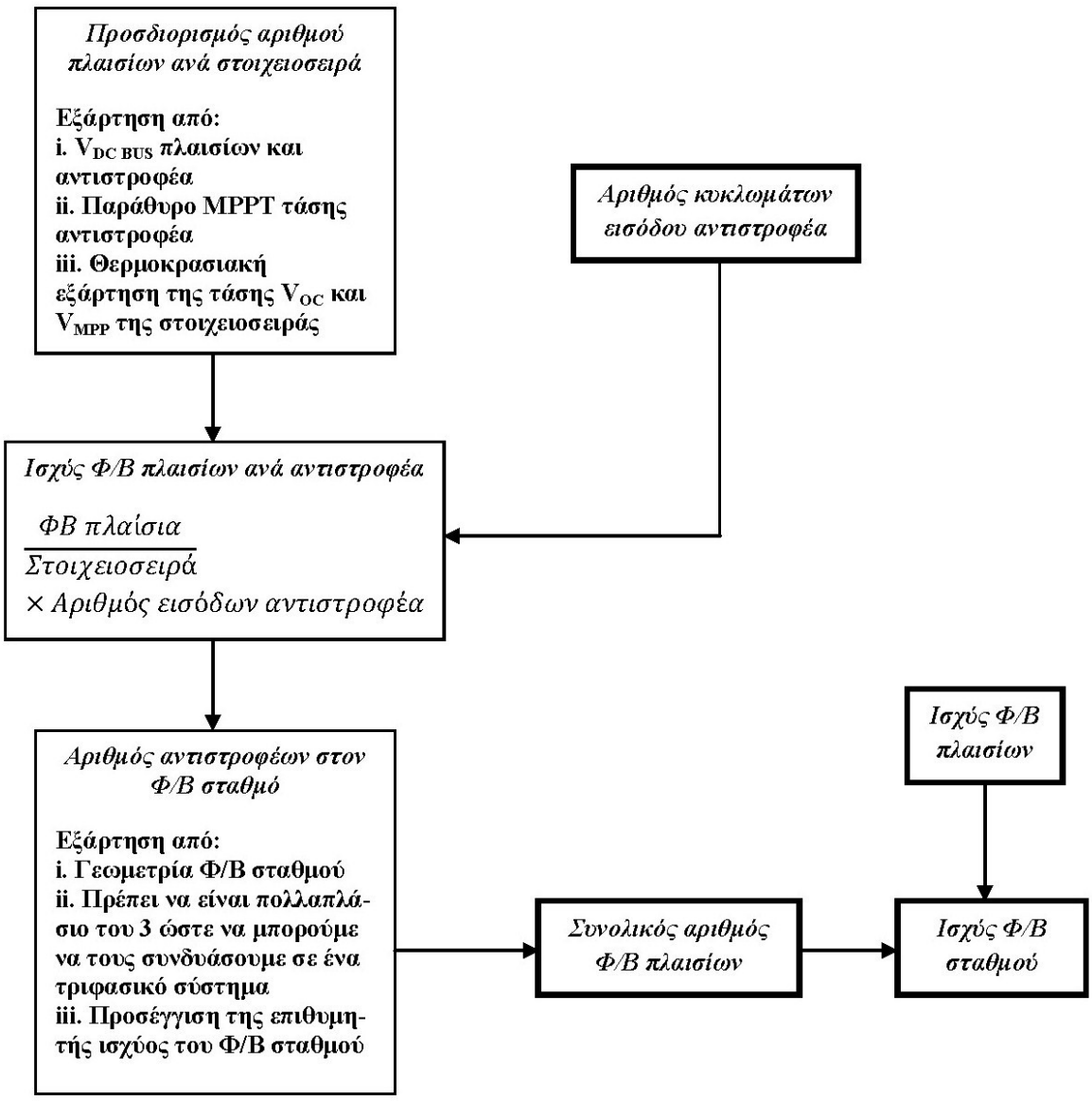
Συστοιχία 2



Συστοιχία 3

2.4.4 Φ/Β γεννήτρια με αντιστροφείς των 11kW

Στην περίπτωση που η σχεδίαση γίνει με μικρούς αντιστροφείς, εκτός από την προσαρμογή με τα Φ/Β πλαίσια πρέπει επίσης να καθοριστεί και ο αριθμός των αντιστροφέων που θα χρησιμοποιηθούν. Αναλυτικά η διαδικασία σχεδιασμού παρουσιάζεται στο σχήμα 2.11.



Σχήμα 2.11 Βασικά βήματα σχεδιασμού Φ/Β γεννήτριας με μικρούς αντιστροφείς

Εδώ θα χρησιμοποιήσουμε το μοντέλο SMC 11000TL της εταιρείας SMA με τα χαρακτηριστικά του πίνακα 2.3. Ο αντιστροφέας αυτός μας δίνει τη δυνατότητα σύνδεσης μέχρι και 5 παράλληλων στοιχειοσειρών στην είσοδό του με μέγιστο ρεύμα 34A. Από το ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των πλαισίων όμως βλέπουμε ότι 5 παράλληλες στοιχειοσειρές θα είχαν ως αποτέλεσμα ρεύμα I_{MPP}=5×7,24A=36,2A. Για το λόγο αυτό θα χρησιμοποιήσουμε μόνο τις 4 εισόδους προσθέτοντας επιπλέον πλαίσια σε σειρά για να αξιοποιήσουμε όσο το δυνατόν καλύτερα τις δυνατότητες της διάταξης.

Ο αριθμός των πλαισίων ανά στοιχειοσειρά καθορίζεται με τον ίδιο τρόπο όπως στην παράγραφο 2.4.1. Συγκεκριμένα ο βέλτιστος αριθμός πλαισίων είναι **15** και για τις ακραίες συνθήκες θερμοκρασίας έχουμε:

	15 πλαίσια ανά στοιχειοσειρά	
	-20°C	+70°C
V_{OC}	631,73 V	460,28 V
V_{MPP}	522,23 V	350,78 V

Πίνακας 2.8 Μεταβολές της V_{OC} και της V_{MPP} σε ακραίες θερμοκρασιακές συνθήκες

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του υπολογιστικού φύλλου, για θερμοκρασίες πλαισίου μικρότερες των -9°C η V_{MPP} θα είναι εκτός των ορίων ανίχνευσης τάσης μέγιστης ισχύος. Αυτό δεν αποτελεί πρόβλημα αφού η θερμοκρασία αυτή παρουσιάζεται ελάχιστες φορές και μόνο κατά τους χειμερινούς μήνες. Σημαντικό είναι ότι η τάση V_{OC} παραμένει σε κάθε περίπτωση εντός των επιτρεπτών ορίων.

Επιπλέον, κριτήριο είναι και ο λόγος της μέγιστης ισχύος των πλαισίων σε σχέση με τη μέγιστη ισχύ εισόδου του αντιστροφέα (Rs). Ο λόγος αυτός μπορεί να κυμαίνεται από 1,3-1,5 για χώρες της Βόρειας Ευρώπης, 1,1-1,3 για χώρες της Κεντρικής Ευρώπης και 1,0-1,2 για χώρες της Νότιας Ευρώπης[6]. Επομένως, σύμφωνα με τα δεδομένα μας θα έχουμε:

[6] Jayanta Deb Monto, Yigzaw G. Yohanis, Brian Norton: Optimal sizing of array and inverter for grid-connected photovoltaic systems, Solar Energy 80 (2006) pages 1517 - 1539

$$Rs = \frac{4 \cdot 15 \cdot 210}{11400} \cong 1{,}105$$

Υπερδιαστασιολόγηση της τάξης του 10,5% δεν αναμένεται να προκαλέσει πρόβλημα στη λειτουργία και στην απόδοση του σταθμού.

Για τον υπολογισμό του αριθμού των αντιστροφέων πρέπει να λάβουμε υπ' όψιν:

i. **Τη γεωμετρία του Φ/Β σταθμού:** δηλαδή τον τρόπο διάταξης των συστοιχιών στον διαθέσιμο χώρο

ii. **Αριθμός αντιστροφέων πολλαπλάσιο του 3:** έτσι ώστε να δημιουργήσουμε τριφασικά συστήματα χαμηλής τάσης μέσα στον σταθμό

iii. **Προσέγγιση της επιθυμητής ισχύος του Φ/Β σταθμού**

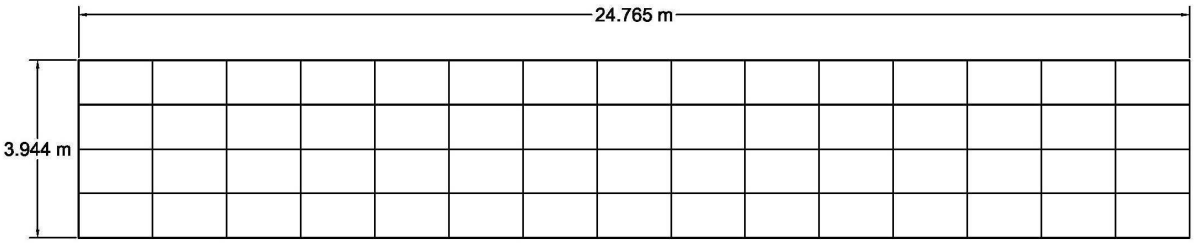
Στην είσοδο του αντιστροφέα η Φ/Β ισχύς θα είναι ίση με 12,6kW. Επομένως, μια πρώτη εκτίμηση είναι ότι θα χρειαστούμε περίπου 158 αντιστροφείς. Για τις ανάγκες δημιουργίας τριφασικών συστημάτων ο αριθμός αυτός πρέπει να είναι πολλαπλάσιος του 3 κάτι που σημαίνει ότι τελικά χρειαζόμαστε 156 ή 159 αντιστροφείς. Στην πράξη και οι δύο τιμές είναι επιθυμητές αφού η ισχύς των σταθμών που προκύπτει ελάχιστα αποκλίνει από το επιθυμητό και συγκεκριμένα είναι 1.9656 kWp και 2.0034 kWp. Στην πορεία της εργασίας θα αναπτύξουμε τον σταθμό με **156 αντιστροφείς**. Τέλος, εύκολα μπορούμε να υπολογίσουμε και τον τελικό αριθμό των πλαισίων που απαιτούνται. Συνοπτικά θα έχουμε:

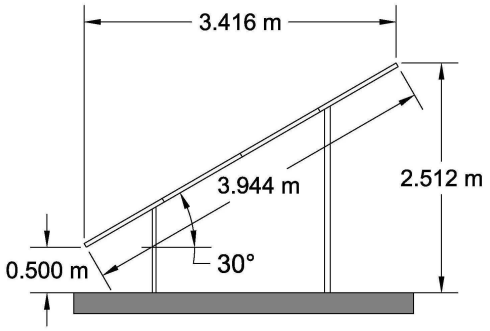
Ισχύς Φ/Β σταθμού:	1,965 MWp
Αριθμός αντιστροφέων:	156
Κυκλώματα ανά αντιστροφέα:	4
Αριθμός συστοιχιών:	156
Στοιχειοσειρές ανά κύκλωμα:	1
Πλαίσια ανά στοιχειοσειρά:	15
Τελικός αριθμός Φ/Β πλαισίων:	9360
Λόγος ισχύος αντιστροφέα:	110,5 %

Πίνακας 2.9 Τελική διαστασιολόγηση Φ/Β σταθμού με αντιστροφείς των 11kW

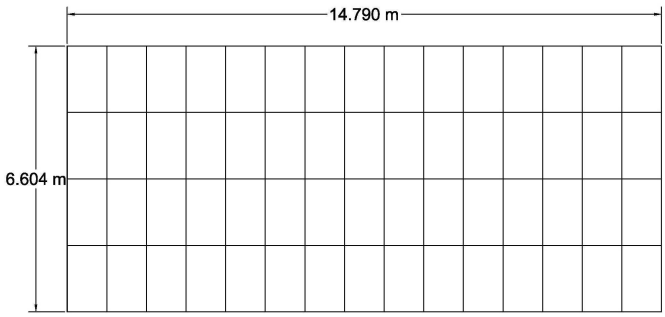
2.4.5 Ανάπτυξη της Φ/Β γεννήτριας σε συστοιχίες

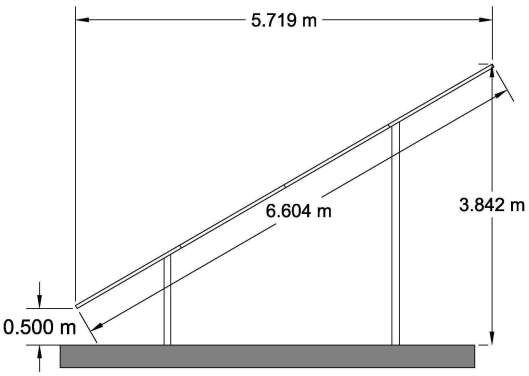
Είναι εμφανές ότι στη σχεδίαση με μικρούς αντιστροφείς κάθε συστοιχία θα αποτελεί και ένα αυτόνομο μονοφασικό σύστημα. Οι 4 στοιχειοσειρές θα τοποθετηθούν πάνω σε κοινή βάση στήριξης και θα αποδίδουν την ενέργειά τους σε έναν αντιστροφέα. Ακολουθούν σχέδια των προτεινόμενων συστοιχιών:



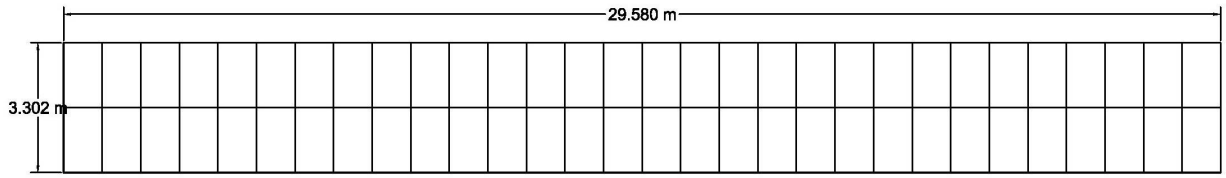


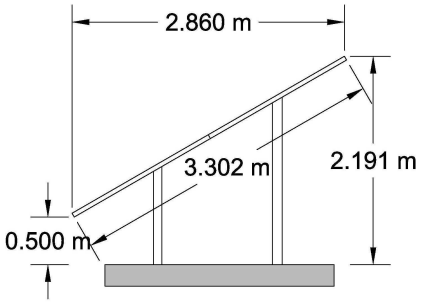
Συστοιχία 1: Πλάγια όψη





Συστοιχία 2: Πλάγια όψη και εμβαδό





Συστοιχία 3: Πλάγια όψη και εμβαδό

Συγκεντρωτικά:

	Συστοιχία 1	**Συστοιχία 2**	**Συστοιχία 3**
Μήκος:	24,77 m	14,8 m	29,6 m
Πλάτος:	3,95 m	6,60 m	3,30 m
Ύψος από το έδαφος:	2,51 m	3,85 m	2,19 m

Πίνακας 2.10

2.4.6 Καλωδίωση συστοιχιών

Ο τρόπος καλωδίωσης των συστοιχιών εξαρτάται από τους περιορισμούς που παρουσιάστηκαν στην παράγραφο 2.4.3 και φαίνεται αναλυτικά στο σχήμα της σελίδας 31. Για το μήκος του καλωδίου που απαιτείται για κάθε συστοιχία έχουμε:

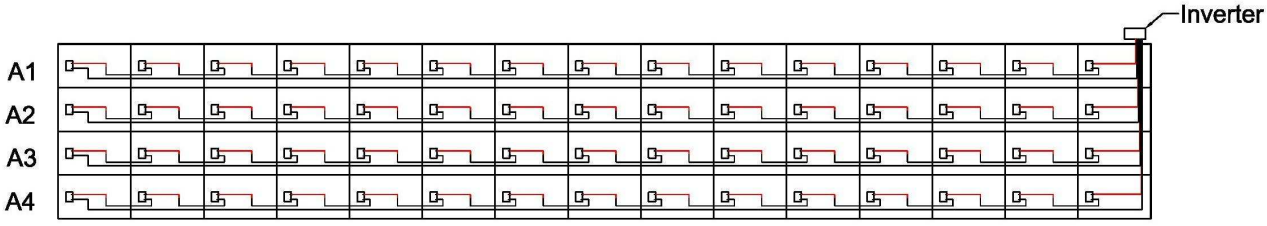
Συστοιχία 1	
A1	58,63 m
A2	60,70 m
A3	62,73 m
A4	64,83 m
Σύνολο	**246,9 m**

Συστοιχία 2	
A1	31,00 m
A2	34,31 m
A3	37,70 m
A4	41,00 m
Σύνολο	**144,0 m**

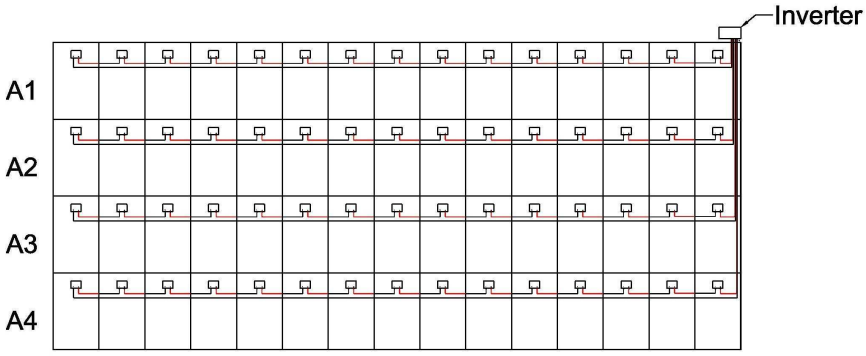
Συστοιχία 3	
A1	31,27 m
A2	34,66 m
A3	31,27 m
A4	34,66 m
Σύνολο	**131,9 m**

Πίνακας 2.11

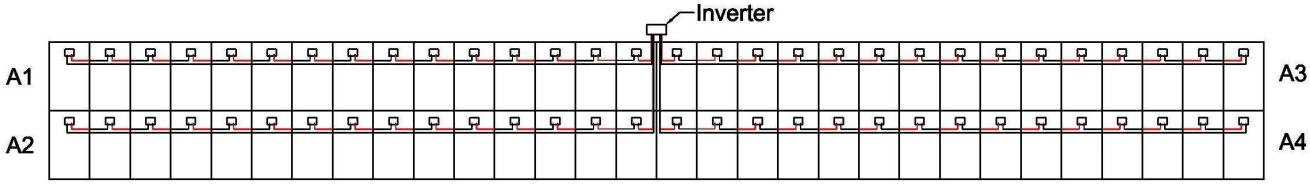
Και σε αυτή την περίπτωση βλέπουμε τη σημαντική μείωση του μήκους καλωδίου όταν τοποθετήσουμε τα πλαίσιο σε κατακόρυφη διάταξη. Η διαφορά αυτή (103m/συστοιχία) μεταφράζεται σε συνολική εξοικονόμηση 16 km καλωδίου περίπου σε επίπεδο Φ/Β σταθμού. Επιπλέον, από τις τρεις σχεδιάσεις που παρουσιάστηκαν, η συστοιχία 3 συνδυάζει τόσο την εξοικονόμηση καλωδίου όσο και το χαμηλό ύψος κατασκευής και επομένως κρίνεται ως η πιο κατάλληλη για υλοποίηση.



Συστοιχία 1



Συστοιχία 2



Συστοιχία 3

2.5 Συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό μελετήσαμε τα κύρια σημεία που καθορίζουν τη σχεδίαση μιας Φ/Β γεννήτριας. Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στον τρόπο προσαρμογής του αντιστροφέα με τα πλαίσια και στη συνέχεια την τοποθέτηση των πλαισίων σε συστοιχίες. Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας παρουσιάστηκαν τα εξής ενδιαφέροντα σημεία:

1. Στη σχεδίαση με μικρούς αντιστροφείς είδαμε την δυσκολία της προσαρμογής με πλαίσια των 210W. Η δυσκολία προέκυψε λόγω του υψηλού ρεύματος που παρέχουν οι 5 παράλληλοι κλάδοι πλαισίων και επιλύθηκε αφήνοντας μία από τις εισόδους του αντιστροφέα εκτός λειτουργίας. Η πρακτική αυτή είναι λειτουργική αφού χρησιμοποιούμε πλήρως τις δυνατότητες της ηλεκτρονικής διάταξης.

2. Στην επιλογή της κατάλληλης συστοιχίας έπαιξαν ιδιαίτερο ρόλο το ύψος της και το μήκος του απαιτούμενου καλωδίου. Με βάση τα όσα αναφέραμε, είναι πιο κρίσιμο να επιδιώξουμε όσο το δυνατόν μικρότερο μήκος καλωδίωσης και αυτό γιατί μας εξασφαλίζει άμεσα αλλά και μακροπρόθεσμα οφέλη ιδιαίτερα όταν οι διαφορές στο απαιτούμενο καλώδιο είναι της τάξης του 40% με 45%. Έχουμε κέρδος στο κόστος αρχικής επένδυσης του έργου αλλά και μακροπρόθεσμα εξοικονομούμε ενέργεια που μπορούμε να πουλήσουμε στο δίκτυο. Τέλος, η φθορά που υφίσταται η βάση στήριξης είναι ελάχιστη κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής ενός έργου σε αντίθεση με το καλώδιο που διαβρώνεται πιο εύκολα. Έτσι, μικρότερο μήκος καλωδίου σημαίνει και μικρότερο κόστος επισκευής και αντικατάστασης.

Κεφάλαιο 3

Ενεργειακή Απολαβή και Παράγοντες Μείωσης της Απόδοσης Φ/Β Γεννήτριας

3.1 Εισαγωγή

Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται μελέτη της ενεργειακής απόδοσης της Φ/Β γεννήτριας και αναφέρονται οι παράγοντες που συμβάλλουν στη μείωσή της. Πιο συγκεκριμένα, χρησι-μοποιείται η μέθοδος των B.Y.H. Liou και R.C. Jordan **[5]** με την οποία υπολογίζονται οι μέσες τιμές της ημερήσιας ενεργειακής απολαβής της ηλιακής ακτινοβολίας (kWh/m^2) σε κεκλι- μένο επίπεδο με νότιο προσανατολισμό. Σε σχέση με τους παράγοντες μείωσης, εκτε-νέστερη αναφορά γίνεται στο θέμα της σκίασης και της επίδρασής της τόσο σε επίπεδο Φ/Β πλαισίου όσο και σε επίπεδο Φ/Β σταθμού.

3.2 Ενεργειακή απολαβή Φ/Β γεννήτριας σε συγκεκριμένο γεωγραφικό τόπο [5]

Ο υπολογισμός της ηλιακής ενέργειας που προσπίπτει σε κεκλιμένη επιφάνεια απαιτεί την χρήση χρονοσειρών της ηλιακής ακτινοβολίας (W/m^2) και γενικότερα μετεωρολογικών δεδομένων που είναι δύσκολο να βρεθούν. Στη συνέχεια της παραγράφου αυτής γίνεται εκτίμηση της ημερήσιας ηλιακής ενέργειας σε κεκλιμένο επίπεδο με τη χρήση του αλγορίθμου των B.Y.H. Liou και R.C. Jordan. Η παραπάνω μέθοδος έχει αναπτυχθεί σε υπολογιστικό φύλλο και εφαρμόζεται για Φ/Β σταθμό εγκατεστημένο σε περιοχή του Άργους με γεωγραφικό πλάτος **λ=37,15^o**. Για την εφαρμογή της μεθόδου χρειάζεται επιπλέον να διαθέτουμε τις μηνιαίες μέσες τιμές ηλιακής απολαβής $\overline{H}$ (kWh/m^2) σε οριζόντια τοποθετημένο αισθητήρα, δεδομένα που για την περιοχή του Άργους είναι διαθέσιμα και παρουσιάζονται στον πίνακα 3.1.

Μήνας	$\overline{H}$ **(kWh/m^2)**	**Μήνας**	$\overline{H}$ **(kWh/m^2)**
Ιανουάριος	2,09	**Ιούλιος**	6,86
Φεβρουάριος	2,66	**Αύγουστος**	6,26
Μάρτιος	3,67	**Σεπτέμβριος**	4,87
Απρίλιος	4,41	**Οκτώβριος**	3,35
Μάιος	6,07	**Νοέμβριος**	2,45
Ιούνιος	6,83	**Δεκέμβριος**	1,74

Πίνακας 3.1 Τιμές της ημερήσιας ενέργειας ηλιακής ακτινοβολίας ανά μονάδα επιφάνειας για την περιοχή του Άργους

Για τον υπολογισμό των διαφόρων μεγεθών θα πρέπει επιπρόσθετα να γνωρίζουμε την αντιπροσωπευτική ημέρα κάθε μήνα και την γωνία κλίσης β του κεκλιμένου επιπέδου. Προκειμένου να βρούμε τη βέλτιστη γωνία όπου η απολαβή γίνεται μέγιστη, χρησιμοποιούμε το β σαν ελεύθερη παράμετρο που παίρνει τιμές από 0^o έως 90^o μοίρες.

Οι ημέρες του έτους που εμπλέκονται στους υπολογισμούς σχετίζονται άμεσα με την ηλιακή ακτινοβολία στα όρια της ατμόσφαιρας. Συγκεκριμένα, για κάθε μήνα, είναι εκείνη η ημέρα για την οποία η εξωγήινη ημερήσια ηλιακή ακτινοβολία προσεγγίζει τη μέση ημερήσια εξωγήινη ηλιακή ακτινοβολία του αντίστοιχου μήνα. Οι μέρες αυτές παρουσιάζονται στον πίνακα 3.2:

Μήνας	Ημέρα μήνα	Ημέρα έτους
Ιανουάριος	17	17
Φεβρουάριος	16	47
Μαρτιος	16	75
Απρίλιος	15	105
Μάιος	15	135
Ιούνιος	11	162
Ιούλιος	17	198
Αύγουστος	16	228
Σεπτέμβριος	15	258
Οκτώβριος	15	288
Νοέμβριος	14	318
Δεκέμβριος	10	344

Πίνακας 3.2 Αντιπροσωπευτικές ημέρες του έτους

Για την υλοποίηση των υπολογισμών ακολουθούνται τα ακόλουθα βήματα:

1. Υπολογισμός της απολαβής στα όρια της ατμόσφαιρας H_{ext} για γεωγραφικό πλάτος $\lambda=37,15^o$ και με δεδομένη της τιμή της ηλιακής σταθεράς $J_o=1,367 kW/m^2$. Ο υπολογισμός βασίζεται στην ολοκλήρωση μέσα στην ημέρα της πυκνότητας ισχύος της ακτινοβολίας στο οριζόντιο επίπεδο και στα όρια της ατμόσφαιρας. Έχουμε δηλαδή:

$$H_{ext} = \int_{0}^{24h} E \cdot dt = \int_{t_{ανατ}}^{t_{δύσης}} E \cdot dt = 2 \cdot \int_{t_{ανατ}}^{t_{\text{ΗΜ}}} E \cdot dt = \frac{1}{\Omega} \cdot 2 \cdot \int_{\omega_s}^{0} E \cdot d\omega =$$

$$= J_o \cdot \frac{24}{\pi} \cdot r(n) \cdot \left(\cos\lambda \cdot \cos\delta \cdot \sin\omega_s + \omega_s \cdot \sin\lambda \cdot \sin\delta \right)$$

όπου:

- $E = J_o \cdot r(n) \cdot \sin(EL)$
- $\sin(EL) = \sin\lambda \cdot \sin\delta + \cos\lambda \cdot \cos\delta \cdot \cos\omega$
- δ= η απόκλιση του ήλιου που δίνεται από τη σχέση $\delta = 23,45 \cdot \sin(360 \cdot \frac{284+n}{365})$
- ω= η ωριαία γωνία του ηλιακού μεσημβρινού ως προς τη μεσημβρινό του τόπου
- EL= το ύψος του ηλίου την ίδια χρονική στιγμή
- $\Omega = 2\pi / \text{T}, \text{T} = 24h$
- $\tau_{\text{ΗΜ}}$ η χρονική στιγμή του ηλιακού μεσημεριού
- ω_s είναι η ωριαία γωνία του ήλιου τη στιγμή της ανατολής με
  $\omega_s = \arccos(-\tan(\lambda) \cdot \tan(\delta))$ σε rad
- r(n) γεωμετρικός παράγοντας που καθορίζει την εξάρτηση της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας σε σχέση με την απόσταση από την ήλιο για την $\text{n}^{\text{στη}}$ ημέρα του έτους. Δίνεται από τη σχέση:

$$r(n) = 1,00011 + 0,034221 \cdot \cos(\Phi) + 0,00128 \cdot \sin(\Phi) + 0,000719 \cdot \cos(2\Phi) + 0,000077 \cdot \sin(2\Phi)$$

$$\text{με} \quad \Phi = 2\pi \cdot \frac{n-1}{365}$$

2. Έχοντας υπολογίσει το H_{ext} και γνωρίζοντας τις τιμές του Η, υπολογίζουμε τον μηνιαίο δείκτη αιθριότητας [1] K_T από τη σχέση:

$$K_T = \frac{H}{H_{ext}}$$

3. Ο υπολογισμός της μέσης ημερήσια ενέργειας διάχυτης ακτινοβολίας H_s προϋποθέτει τη γνώση του μηνιαίου δείκτη αιθριότητας για συγκεκριμένο μήνα και τόπο. Πειραματικά έχει προκύψει ότι δίνεται από τη σχέση:

$$H_S = f(K_T) \cdot H$$

όπου $f(K_T)$ είναι αναλυτική συνάρτηση του μηνιαίου δείκτη αιθριότητας και δίνεται από τη σχέση:

$$f(K_T) = 1{,}00 - 1{,}13 \cdot K_T$$

4. Η παραπάνω τιμή H_S αναφέρεται σε οριζόντιο επίπεδο. Η αναγωγή σε κεκλιμένο επίπεδο γωνίας κλίσης β δίνεται από τη σχέση:

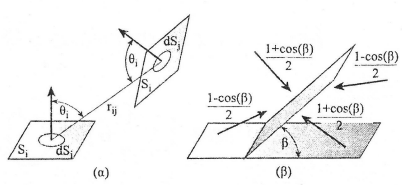
$$H_{S(tilt)} = H_S \cdot R_d = \frac{1+\cos(\beta)}{2}$$

όπου ο όρος $\frac{1+\cos(\beta)}{2}$ ονομάζεται **παράγοντας θέας**[2] και σχετίζεται με το ποσοστό του ουράνιου θόλου που είναι ορατό από την κεκλιμένη επιφάνεια καθώς επίσης και από την πηγή της ακτινοβολίας.

---

[1] Ο δείκτης αιθριότητας εκφράζεις την επίδραση της ατμόσφαιρας στη διέλευση της ηλιακής ακτινοβολίας και εξαρτάται από την κατάσταση της ατμόσφαιρας (υγρασία, νέφωση...), το γεωμετρικό πλάτος του τόπου που μελετάμε και την εποχή του έτους.

[2] Ο παράγων θέας ορίζεται από τη σχέση: $F_{ij} = \frac{1}{\pi \cdot S_i} \cdot \int_{S_i}\int_{S_j} \frac{\cos(\theta_i)\cdot\cos(\theta_j)}{r_{ij}^2} \cdot dS_i \cdot dS_j$



όπου το σύμβολο i προσδιορίζει την πηγή ακτινοβολίας και j τη συλλεκτική επιφάνεια (σχήμα α). Προσδιορίζει το κλάσμα της προσπίπτουσας ακτινοβολίας στη συλλεκτική επιφάνεια προς την ακτινοβολούμενη ισχύ από την συνολική επιφάνεια της πηγής. Στο σχήμα β που αφορά σε κεκλιμένο οριζόντιο συλλέκτη γωνίας β, αναγράφονται οι τιμές του παράγοντα θέας για την προσπίπτουσα στην εμπρός και πίσω επιφάνεια ακτινοβολία.

5. Στη συνέχεια υπολογίζεται ο παράγοντας R_b. Ο λόγος αυτός εκφράζει το πηλίκο των μέσων ημερήσιων ενεργειών της άμεσης ακτινοβολίας σε κεκλιμένο επίπεδο με νότιο προσανατολισμό προς την άμεση ακτινοβολία που προσπίπτει σε οριζόντιο επίπεδο. Δηλαδή:

$$R_b = \frac{H_{D(tilt)}}{H_D}$$

Ο λόγος αυτός προκύπτει θεωρητικά σαν συνάρτηση του γεωγραφικού πλάτους λ του τόπου, της απόκλισης δ του ηλίου κατά την αντιπροσωπευτική μέρα κάθε μήνα και της ωριαίας γωνίας του ήλιου ω_s. Η αναλυτική σχέση δίνεται από τον τύπο:

$$R_b = \frac{\cos(\lambda-\beta)\cdot\cos(\delta)\cdot\cos(\omega_o)+\omega_o\cdot\sin(\lambda-\beta)\cdot\sin(\delta)}{\cos(\lambda)\cdot\cos(\delta)\cdot\cos(\omega_S)+\omega_S\cdot\sin(\lambda)\cdot\sin(\delta)}$$

όπου $\omega_o=\min(\omega_s , \omega'_s)$ με ω'_S τη γωνία ανατολής του ηλίου σε σχέση με το επίπεδο του συλλέκτη.

6. Ο υπολογισμός της μηνιαίας μέσης ημερήσιας ακτινοβολίας H_D σε οριζόντιο επίπεδο δίνεται άμεσα από τη σχέση:

$$H_D = H - H_S$$

ενώ για κεκλιμένη επιφάνεια έχουμε:

$$H_{D(tilt)} = R_b \cdot H_D$$

7. Τέλος, υπολογίζουμε την μηνιαία μέση ημερήσια τιμή της διάχυτα ανακλώμενης στο έδαφος ηλιακής ακτινοβολίας, $H_{Gr\,(tilt)}$ που δίνεται από τη σχέση:

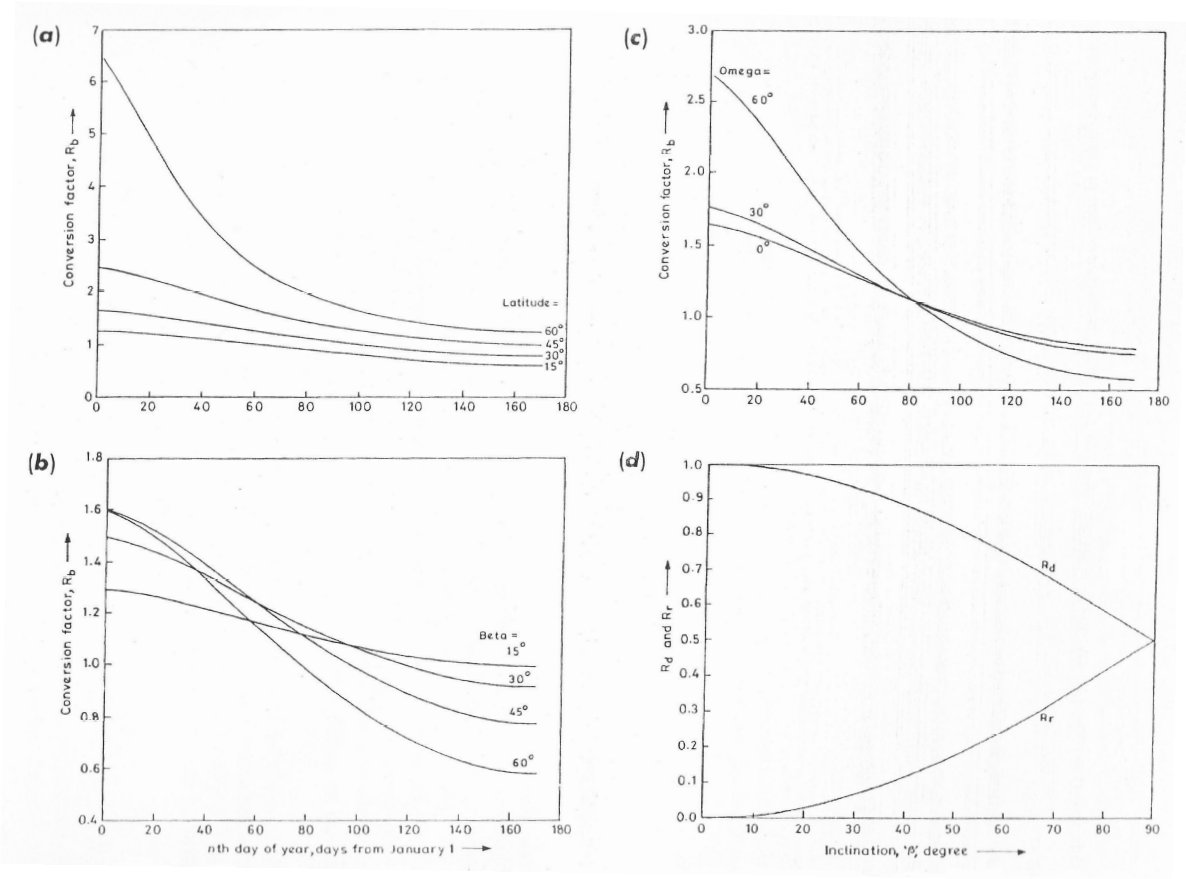
$$H_{Gr(tilt)} = H\cdot R_r = H\cdot\rho\cdot\frac{1-\cos(\beta)}{2}$$

όπου ρ είναι η διάχυτη ανακλαστικότητα του εδάφους (albedo). Ο συντελεστής ρ εξαρτάται από το είδος της επιφάνειας του εδάφους. Ενδεικτικές τιμές φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Είδος επιφάνειας	Συντελεστής ανάκλασης (albedo)
Επιφάνεια νερού, θάλασσα	0,05
Δάσος κωνοφόρων	0,05
Ασφαλτόστρωμα	0,08
Υγρή άμμος	0,09
Αγρός πράσινος	0,15
Ξηρή άμμος	0,18
Βραχώδης επιφάνεια	0,20
Επιφάνεια τσιμέντου	0,23 – 0,33
Χιόνι	0,60 – 0,87

Πίνακας 3.3 Συντελεστής ανάκλασης για διάφορες επιφάνειες

Η μεταβολή των συντελεστών R_b, R_d και R_r σε σχέση με τη γωνία β και την ημέρα του έτους φαίνεται στο σχήμα 3.1.



Σχήμα 3.1 (a) Μεταβολή του συντελεστή R_b με τη $n^{στή}$ ημέρα του χρόνου και για διάφορα γεωγραφικά πλάτη, **(b)** για διάφορες κλίσεις, **(c)** κατά τη διάρκεια μιας ημέρας και **(d)** μεταβολές του R_d και R_r με τη γωνία κλίσης β.

Η προσομοίωση του αλγορίθμου γίνεται για γωνίες κλίσης από 0^o έως 90^o με βήμα μιας μοίρας. Ο τελικός πίνακας με τα αποτελέσματα παρουσιάζεται στο Παράρτημα Α της εργασίας. Βάσει αυτού είναι φανερό ότι η βέλτιστη απολαβή επιτυγχάνεται για γωνίες κλίσης μεταξύ 26^o και 30^o. Συγκεκριμένα, για γωνία 30^o, η απολαβή ηλιακής ακτινοβολίας για ένα Φ/Β πλαίσιο ανά μήνα δίνεται στον ακόλουθο πίνακα:

Μήνας έτους	**Ημερήσια απολαβή ηλιακής ακτινοβολίας H_t (kWh/m^2)**	**Μηνιαία απολαβή ηλιακής ακτινοβολίας (MWh/m^2)**
Ιανουάριος	3,002	0,093062
Φεβρουάριος	3,329	0,093212
Μάρτιος	4,068	0,126108
Απρίλιος	4,359	0,130770
Μάιος	5,529	0,171399
Ιούνιος	5,939	0,177570
Ιούλιος	6,047	0,187457
Αύγουστος	5,987	0,185597
Σεπτέμβριος	5,256	0,157680
Οκτώβριος	4,126	0,127906
Νοέμβριος	3,494	0,104820
Δεκέμβριος	2,525	0,078275
Σύνολο		***1,634 MWh/m^2/ετος***

Πίνακας 3.4 Απολαβή ηλιακής ακτινοβολίας ανά μήνα για κλίση 30^o

Προφανώς δεν έχει ληφθεί υπ' όψιν η ηλεκτρική απόδοση του πλαισίου και οι υπόλοιποι παράγοντες μείωσης που θα αναπτυχθούν σε επόμενες παραγράφους. Στη συνέχεια της εργασίας θεωρούμε ότι ο Φ/Β σταθμός αποτελείται από συστοιχίες με σταθερή κλίση **30^o**.

Ενδιαφέρον έχει να δούμε τη μεταβολή στην απολαβή ενέργειας ενός πλαισίου του οποίου η κλίση μεταβάλλεται. Για τη θερινή περίοδο (Μάρτιος – Αύγουστος) η βέλτιστη κλίση του πλαισίου είναι περίπου 16^o ενώ για τη χειμερινή (Σεπτέμβριος – Φεβρουάριος) περίπου 48^o. Οι αντίστοιχες απολαβές είναι **1,005 MWh/m^2** και **0,681 MWh/m^2**. Επιτυγχάνεται αύξηση στην απόδοση κατά:

$$\frac{\left|1,634-(1,005+0,681)\right|}{1,634}\times 100\% \cong 3,18\%$$

Τέλος, αν υπήρχε δυνατότητα μεταβολής της κλίσης ανά μήνα του έτους τότε η απολαβή της ηλιακής ακτινοβολίας θα ήταν:

Μήνας έτους	***Βέλτιστη γωνία κλίσης(^{o})***	***Απολαβή ηλιακής ακτινοβολίας H_t (MWh/m^2)***
Ιανουάριος	60	0,103323
Φεβρουάριος	48	0,096712
Μάρτιος	34	0,126263
Απρίλιος	20	0,132270
Μάιος	11	0,178126
Ιούνιος	7	0,189120
Ιούλιος	9	0,197625
Αύγουστος	18	0,189069
Σεπτέμβριος	30	0,157680
Οκτώβριος	45	0,131006
Νοέμβριος	60	0,115470
Δεκέμβριος	60	0,087792
Σύνολο		***1,704460 MWh/m^2/έτος***

Πίνακας 3.5 Βέλτιστη κλίση και μέγιστη απολαβή ηλιακής ακτινοβολίας ανά μήνα

και η αύξηση στην απόδοση θα ήταν:

$$\frac{|1,634-1,705|}{1,634}\times 100\% \cong 4,34\%$$

3.3 Θερμική εξάρτηση της απόδοσης ενεργειακής μετατροπής n_c του Φ/Β πλαισίου

Η ικανότητα ενός πλαισίου να μετατρέπει την ηλιακή ενέργεια σε ηλεκτρική διαφοροποιείται σημαντικά με τη διακύμανση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος. Γνωρίζοντας τη μέση θερμοκρασία που επικρατεί στην περιοχή του Φ/Β σταθμού για κάθε μήνα θα είμαστε σε θέση να εκτιμήσουμε με μεγαλύτερη ακρίβεια το ποσοστό της ενέργειας που τελικά μετατρέπεται σε ηλεκτρική. Σε πρότυπες συνθήκες λειτουργίας ο βαθμός ηλεκτρικής απόδοσης είναι $\mathbf{n_{c,STC} \cong 0,1413}$. Σε συνθήκες διαφορετικές από αυτές η τιμή του προσδιορίζεται από τη διαφορά θ_c - θ_{STC}, δηλαδή της θερμοκρασίας του πλαισίου σε σχέση με τη θερμο-

κρασία αναφοράς, καθώς και από την πυκνότητα ισχύος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Σε κάθε περίπτωση ο βαθμός απόδοσης θα προσδιορίζεται από τη σχέση:

$$n_c = n_T \cdot n_{c,STC}$$

όπου n_T ονομάζεται παράγον θερμοκρασίας του Φ/Β στοιχείου και εκφράζει την επίδραση της διαφοροποίησης της θερμοκρασίας του πλαισίου σε σχέση με τη θερμοκρασία αναφοράς, στην απόδοσή του. Ο συντελεστής αυτός προσδιορίζεται από τη σχέση:

$$n_T = 1 + \gamma_{Pm} \cdot (\theta_c - \theta_{STC})$$

όπου θ_c η θερμοκρασία του Φ/Β στοιχείου και $\gamma_{Pm} = \frac{dP}{Pm \cdot dT}$ ο θερμικός συντελεστής μέγιστης ισχύος του Φ/Β στοιχείου που για το πυρίτιο είναι προσεγγιστικά ίσος με $\boldsymbol{\gamma_{Pm} \cong -0{,}0045/^oC}$.

Θεωρώντας ότι όλα το στοιχεία του πλαισίου βρίσκονται στην ίδια θερμοκρασία κατά τη λειτουργία τους, ο παράγοντας θ_c προσδιορίζεται από τη σχέση:

$$\theta_c = \theta_{a,D} + 1{,}5 \cdot \kappa \cdot \overline{G}_{t,D}$$

όπου $\theta_{\alpha,D}$ και $\overline{G}_{t,D}$ είναι οι μέσες τιμές της θερμοκρασίας περιβάλλοντος και της ολικής πυκνότητας ισχύος (kW/m^2) της ηλιακής ακτινοβολίας αντίστοιχα στο χρονικό διάστημα που αφορά στο ημερήσιο τόξο του ηλίου. Ο συντελεστής **κ** εξαρτάται από τις οριακές τιμές της θερμοκρασίας των κυψελίδων του πλαισίου σε χαμηλές και υψηλές ταχύτητες αέρα και έχει τιμή $\mathbf{0{,}025^oC/W/m^2}$. Η ποσότητα $\overline{G}_{t,D}$ κατά τη διάρκεια της ημέρας σχετίζεται με τη μέση πυκνότητα ισχύος μέσω της σχέσης:

$$\overline{G}_{t,D} = \frac{T}{t_{\alpha\delta}} \cdot \overline{G}_t \quad \text{(Watt)}$$

με T=24hrs και τον λόγο $T/t_{\alpha\delta}$ να σχετίζεται με τη διάρκεια της ημέρας για κάθε μήνα του έτους και να έχει τιμές από 1,7 για το καλοκαίρι μέχρι 2,3 για τον χειμώνα. Τέλος, γνωρίζοντας την απολαβή ενέργειας για κάθε ημέρα του μήνα (πίνακας 3.4) προσδιορίζουμε την ποσότητα $\overline{G}t$ μέσω της σχέσης:

$$\overline{G}_t = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T G_t \cdot dt = \frac{H_t}{T} \quad \text{(σε Watt)}$$

Συγκεντρώνοντας όλες τις παραπάνω σχέσεις σε ένα λογιστικό φύλλο είμαστε σε θέση να υπολογίσουμε τον βαθμό ηλεκτρικής απόδοσης του Φ/Β πλαισίου για κάθε μήνα του έτους. Στον πίνακα 3.6 φαίνονται τα αποτελέσματα:

Μήνας έτους	$\theta_{a,D}$ (°C)	$\theta_c - \theta_{STC}$ (°C)	κ	γ_{Pm}	H_t (kW/m²/day)	$T/t_{a\delta}$	$\overline{G}_t$ (W)	$\overline{G}_{t,D}$ (W)	n_T	n_C
Ιανουάριος	60	-4,20	0,025	-0,0045	3,002	2,26	125,1	282,6	1,019	**0,1440**
Φεβρουάριος	48	-3,22			3,329	2,15	138,7	298,2	1,014	**0,1433**
Μάρτιος	34	0,01			4,068	2,00	169,5	339,0	1,000	**0,1413**
Απρίλιος	20	2,80			4,359	1,85	181,6	336,0	0,987	**0,1405**
Μάιος	11	9,73			5,529	1,74	230,4	400,8	0,956	**0,1351**
Ιούνιος	7	14,82			5,919	1,70	246,6	419,3	0,933	**0,1329**
Ιούλιος	9	17,84			6,047	1,74	252,0	438,4	0,920	**0,1300**
Αύγουστος	18	18,61			5,987	1,85	249,5	461,5	0,916	**0,1295**
Σεπτέμβριος	30	14,62			5,256	2,00	219,0	438,0	0,934	**0,1320**
Οκτώβριος	45	7,76			4,126	2,15	171,9	369,6	0,965	**0,1364**
Νοέμβριος	60	2,14			3,494	2,26	145,6	329,0	0,990	**0,1409**
Δεκέμβριος	60	-4,22			2,525	2,30	105,2	242,0	1,019	**0,1440**

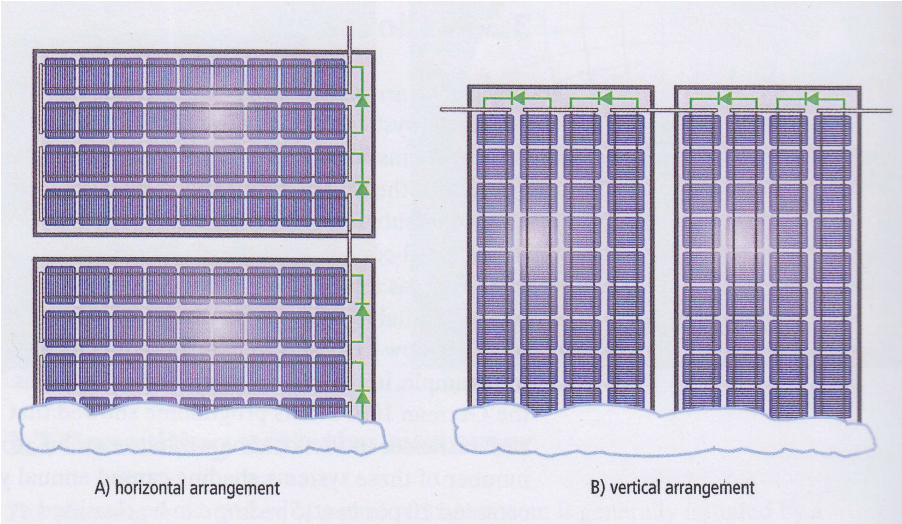
Πίνακας 3.6

3.4 Οπτικές απώλειες ενέργειας σε Φ/Β πλαίσια [5],[3],[6],[28],[30]

Στην παράγραφο αυτή αναφέρονται οι οπτικοί παράγοντες που ελαττώνουν την απόδοση ενός Φ/Β πλαισίου σε σχέση με τις πρότυπες συνθήκες λειτουργίας. Εκτιμάται επίσης το ποσοστό της μείωσης που προκαλούν.

1. **Συντελεστής απωλειών λόγω μη καθαρότητας του Φ/Β πλαίσιο ($n_{\kappa\alpha\theta}$):** Στην κατηγορία αυτή υπεισέρχονται παράγοντες όπως η ελαφρά ομοιογενής επικάθισα σκόνης, γύρης φυτών ή άλλων μικροσωματιδίων στην όψη του Φ/Β πλαισίου. Η επίδραση της επικάθισης σκόνης σε μικρό βαθμό αυξάνει επιπλέον και το ποσοστό απωλειών λόγω ανάκλασης κατά έναν παράγοντα 1,3 έως 1,5. Σημαντική αναφορά πρέπει να γίνει στην επικάθιση χιονιού, γεγονός που είναι πολύ συχνό σε περιοχές με μεγάλο υψόμετρο. Όπως βλέπουμε και στο σχήμα 3.2 η διάταξη των πλαισίων οριζόντια (Α) έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση του ποσοστού απωλειών στο μισό. Αυτό

συμβαίνει επειδή το χιόνι επιδρά μόνο στις 2 από τις 4 σειρές σε αντίθεση με τη διάταξη της εικόνας (Β). Γενικότερα, η μείωση αυτού του είδους των απωλειών γίνεται με προγραμματισμένο καθαρισμό των πλαισίων ή ακόμα και με το νερό της βροχής. Συνήθως γωνίες κλίσης 12^o ή και περισσότερο είναι αρκετές να επιτευχθεί καθαρισμός. Οι απώλειες μη καθαρότητας ανέρχονται σε ποσοστό περίπου **2% ετησίως ($n_{καθ}$=0,98)**.



Σχήμα 3.2 Επικάθιση χιονιού σε Φ/Β πλαίσια

2. **Διαφοροποίηση ανακλαστικότητας Φ/Β πλαισίου σε σχέση με αντίστοιχη σε STC (n_R):**

Σχετίζεται με την αυξημένη ανακλαστικότητα του οπτικού συστήματος όψεως του πλαισίου (υαλοπίνακας, αντιανακλαστικό επίστρωμα και υλικό Φ/Β κυψελίδων) σε σχέση με την αντίστοιχη τιμή της σε πρότυπες συνθήκες, καθώς αυξάνεται η γωνία πρόσπτωσης, κυρίως πάνω από τις 60^o. Για μικρές γωνίες πρόσπτωσης των ακτίνων οι απώλειες αυτές είναι ασήμαντες και ο συντελεστής n_R είναι ίσος με 1. Σε περιοχές με μέσα γεωγραφικά πλάτη, νότιο προσανατολισμό και κλίση πλαισίων περίπου ίση με το γεωγραφικό πλάτος, η ετήσια τιμή των απωλειών αυτών είναι περίπου **2% (n_R=0,98)**.

3. **Επίδραση διαφοροποίησης φάσματος ακτινοβολίας σε σχέση με το AM1,5 (n_S):** Σχετίζεται με την διαφοροποίηση του φάσματος της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια της ημέρας. Ο παράγοντας αυτός έχει μεγάλη επίδραση σε Φ/Β πλαίσια στενής περιοχής φασματικής απορρόφησης όπως το a-Si και CdTe. Για το κρυσταλλικό πυρίτιο (c-Si) οι ετήσιες απώλειες κυμαίνονται στο **1% (n_S=0,99)**.

4. **Απώλειες διαφοροποίησης πόλωσης (n_P):** Οφείλεται στη διαφοροποίηση της πόλωσης της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια τις ημέρας σε σχέση με την πόλωση της ακτινοβολίας σε πρότυπες συνθήκες. Η ετήσια επίδραση του παράγοντα αυτού είναι περίπου **1% (n_P=0,99)**.

5. **Απώλειες χαμηλών τιμών ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας (n_G):** Η απόδοση ενός Φ/Β πλαισίου μειώνεται για χαμηλές τιμές ισχύος ανά m^2. Ένα γενικά αποδεκτό ποσοστό απωλειών κατά μέσο όρο στο έτος είναι περίπου **2% (n_G=0,98)**.

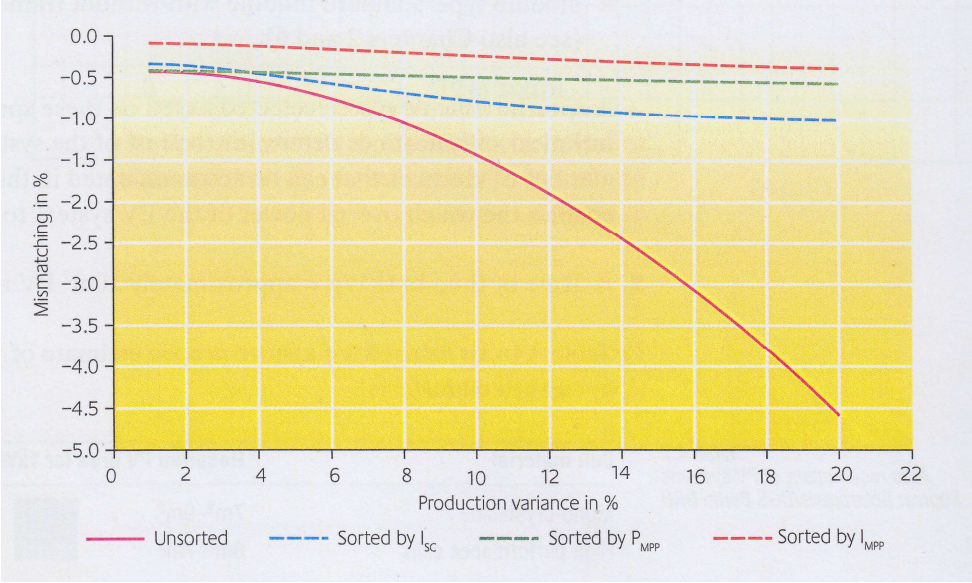
3.5 Παράγοντας γήρανσης του Φ/Β πλαισίου (n_γ)

Σχετίζεται με τη μείωση της απόδοσης του Φ/Β πλαισίου στο χρόνο ζωής του. Η αλλοίωση των Φ/Β κυψελίδων έχει άμεση συνέπεια στην ισχύ αιχμής και στην παραγωγή ενέργειας. Οφείλεται σε διάφορους παράγοντες αλλά κυρίως στο γεγονός ότι υπερθερμαίνονται εξαιτίας σκίασής τους και κάτω από ισχυρό ηλιακό φωτισμό. Τυπική τιμή μείωσης της αποδοτικότητας είναι περίπου **1%** ανά έτος λειτουργίας. Για ενεργειακούς υπολογισμούς μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε έναν τυπικό συντελεστή γήρανσης που λαμβάνει υπ' όψιν τη διαχρονική μείωση της αποδοτικότητας. Η τιμή του εκτιμάται στο **10% (n_γ=0,90)**.

3.6 Απώλειες λόγω ανομοιογένειας στα χαρακτηριστικά των Φ/Β πλαισίων (n_m)

Οι απώλειες αυτές σχετίζονται με την ανομοιογένεια των I-V χαρακτηριστικών των Φ/Β πλαισίων. Οι διαφορές αυτές μπορεί να υπάρχουν εκ κατασκευής ή να προκύπτουν εξαιτίας διαφορετικών συνθηκών στις θέσεις που αυτά έχουν τοποθετηθεί. Σημαντικό παράγοντα παίζει η ανομοιογένεια λόγω διαφορετικής θερμοκρασίας, κυρίως σε εγκα-

ταστάσεις κτιρίων, όπου η ψύξη δεν είναι ομοιόμορφη και η πυκνότητα ακτινοβολίας δεν είναι η ίδια για όλα τα πλαίσια. Επιπλέον, διαφοροποιήσεις στην ανοχή τους σχετίζονται άμεση με τις απώλειες ανομοιογένειας καθώς τα πλαίσια συνδέονται για να σχηματίσουν στοιχειοσειρές. Με μετρήσεις που έγιναν στο TÜV Rheinland PV Certification Laboratory της Γερμανίας εκτιμήθηκε η επίδραση της ανοχής τους στο συντελεστή n_m. Στο σχήμα που ακολουθεί βλέπουμε ότι διαφοροποίηση κατά ±5% στην παραγωγή, πλαισίων που έχουν συνδεθεί σε σειρά, έχει σαν συνέπεια απώλειες μικρότερες του 1%. Αν επιπρόσθετα αυτά έχουν ομαδοποιηθεί με βάση το ρεύμα I_{MPP} ή I_{SC} οι απώλειες βρίσκονται στην περιοχή του 0,2%. Για διαφοροποίηση στην παραγωγή μεγαλύτερη του 8% συνίσταται η ομαδοποίηση με βάση το ρεύμα.



Σχήμα 3.3 Απώλειες ανομοιογένειας, σε συστοιχία αποτελούμενη από 8 στοιχειοσειρές των 15 πλαισίων, σε σχέση με τη διαφοροποίηση στην παραγωγή

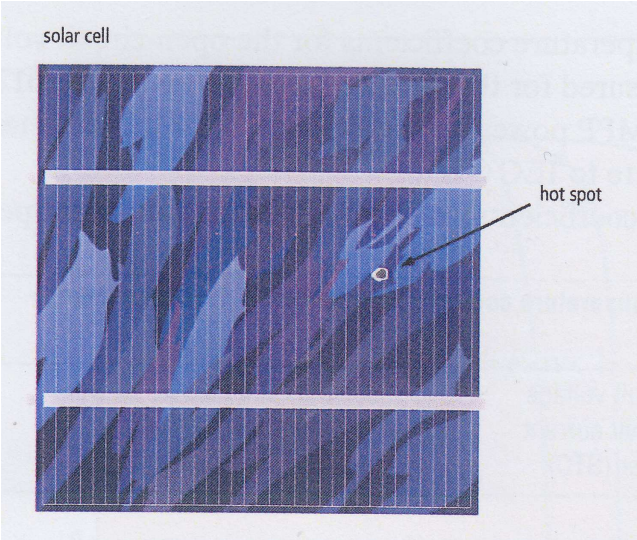
Τυπική τιμή του συντελεστή ανομοιογένειας για μια συστοιχία είναι **2% (n_m=0,98).**

3.7 Επίδραση της σκίασης στη λειτουργία της Φ/Β γεννήτριας, απώλειες και καθορισμός της οριζόντιας απόστασης μεταξύ συστοιχιών.

Τόσο σε επίπεδο Φ/Β πλαισίου όσο και σε επίπεδο ολόκληρου του σταθμού, ο παράγοντας της σκίασης είναι σημαντικός και συνήθως αναπόφευκτος. Τα θερμικά φαινόμενα που δημιουργούνται είναι ικανά να προκαλέσουν μόνιμες βλάβες στους ημιαγωγούς και να αυξήσουν σημαντικά τις απώλειες σε ολόκληρη τη διάταξη. Επιπλέον, ο σκίαση μιας συστοιχίας από την αμέσως νοτιότερή της είναι είναι βασικό κριτήριο καθορισμού της μεταξύ τους απόστασης.

3.7.1 Επίδραση της σκίασης σε Φ/Β στοιχείο [3],[7],[15]

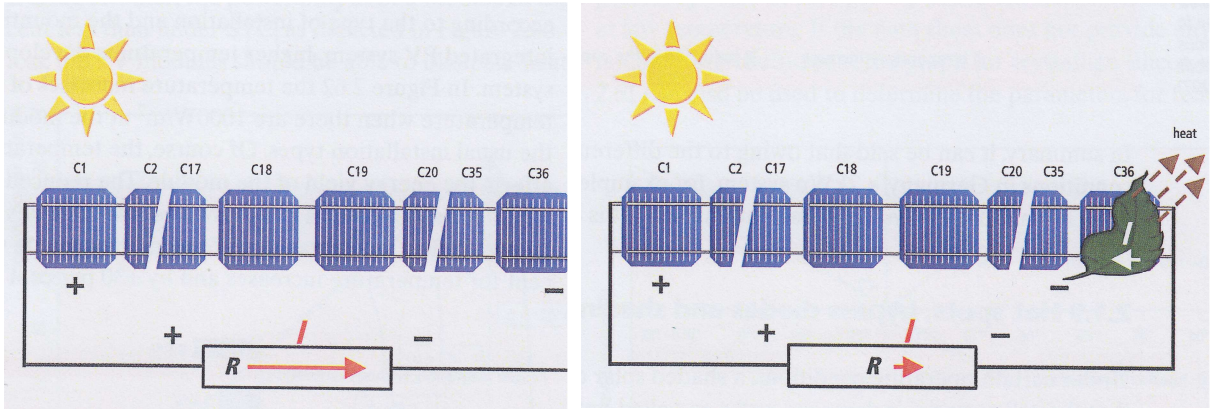
Υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας, σκίαση ενός Φ/Β στοιχείου είναι ικανή να προκαλέσει αύξηση της θερμότητας του σε τέτοιο βαθμό έτσι ώστε να προκληθούν μόνιμες βλάβες στον ίδιο τον ημιαγωγό. Το φαινόμενο αυτό είναι γνωστό ως **θερμή κηλίδα (hot spot)** και φαίνεται έντονα στο ακόλουθο σχήμα:



Σχήμα 3.4 Σχηματισμός θερμής κηλίδας

Η δημιουργία μιας θερμής κηλίδας μειώνει ελάχιστα την ισχύ αιχμής του Φ/Β στοιχείου, αυξάνει όμως την πιθανότητα καταστροφής του κάθε φορά που το στοιχείο σκιάζεται.

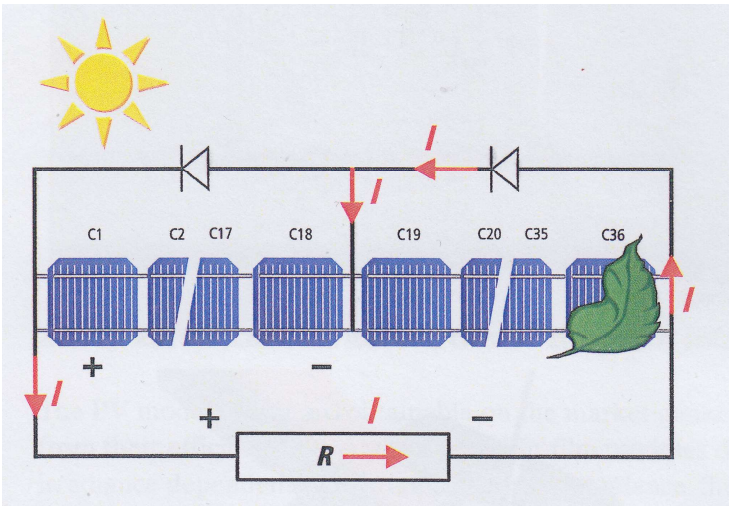
Στο σχήμα 3.5α βλέπουμε την ομαλή λειτουργία 36 Φ/Β στοιχείων συνδεδεμένα σε σειρά υπό φορτίο αντίστασης R.



(α) (β)

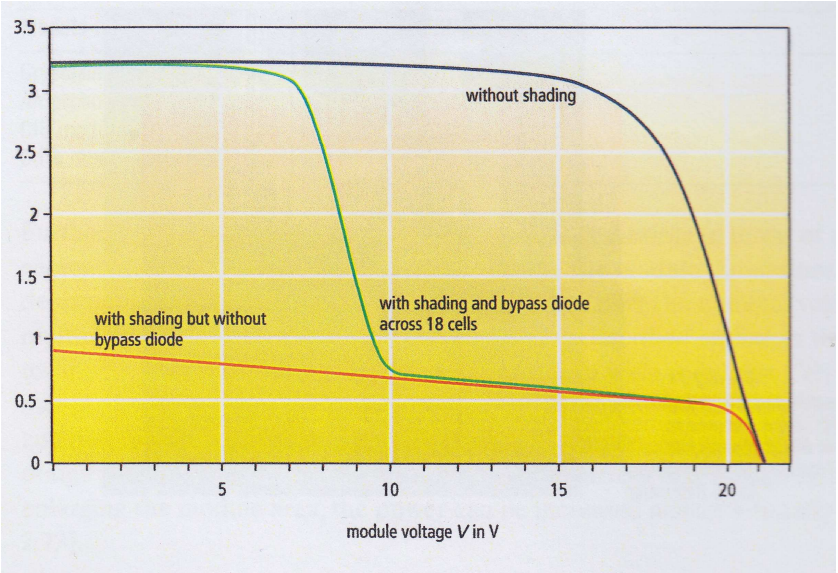
Σχήμα 3.5 (α) Ροή ρεύματος σε Φ/Β πλαίσιο 36 στοιχείων όταν (α) δεν υπάρχει σκίαση σε κάποιο στοιχείο και (β) ένα στοιχείο είναι σκιασμένο.

Αν για κάποιο λόγο σκιαστεί ένα στοιχείο, αυτόματα αυτό συμπεριφέρεται σαν ηλεκτρικό φορτίο πολύ μεγάλης αντίστασης και σταματά να παράγει ενέργεια. Το ρεύμα που ρέει μέσα από αυτό έχει ως συνέπεια την αντιστροφή της πολικότητάς της τάσης στα άκρα του. Η ροή αυτή μετατρέπεται σε θερμότητα και αν η ένταση του ρεύματος είναι αρκετά μεγάλη έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία θερμής κηλίδας. Η παρεμπόδιση του φαινομένου αυτού γίνεται με τη χρήση διόδου παράκαμψης.



Σχήμα 3.6 Χρήση διόδου παράκαμψης για αποφυγή δημιουργίας θερμής κηλίδας

Το σκιασμένο στοιχείο παρακάμπτεται και το ρεύμα ρέει μέσω της διόδου όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.6. Βλέπουμε ότι η δίοδος αυτή συνδέεται παράλληλα με τα στοιχεία C19 έως C36, επομένως, αν για κάποιο λόγο υπάρξει σκίαση, για παράδειγμα στο C36, παράκαμψη όλων αυτών των στοιχείων συνεπάγεται αυτόματα ότι η παραγωγή του πλαισίου θα μειωθεί στο μισό. Πιο κατανοητό γίνεται το φαινόμενο μέσω της μεταβολής της χαρακτηριστικής καμπύλης I-V.



Σχήμα 3.7 Μεταβολή της καμπύλης I-V του πλαισίου σε τρεις διαφορετικές περιπτώσεις λειτουργίας

Αξίζει να παρατηρήσουμε ότι κατά τη διάρκεια της σκίασης και με τη χρήση διόδου, αλλάζει το σημείο λειτουργίας μέγιστης ισχύος του πλαισίου. Η V_{mpp} γίνεται σχεδόν μισή κάτι που μπορεί να δημιουργήσει πρόβλημα στο σύστημα ανίχνευσης του σημείου μέγιστης ισχύος του αντιστροφέα.

3.7.2 Επίδραση της σκίασης σε σχέση με τη συνδεσμολογία των Φ/Β πλαισίων και το σύστημα ανιχνευσης μέγιστης ισχύος του αντιστροφέα

Όπως αναφέρθηκε πιο πριν, σκίαση ενός τμήματος του Φ/Β πλαισίου έχει ως συνέπεια τη μεταβολή της καμπύλης I-V. Παρόμοιο φαινόμενο συμβαίνει όταν τα πλαίσια είναι συνδεδεμένα σε σειρά και παράλληλα. Μεταβολή στην καμπύλη συνεπάγεται και μετατόπιση του σημείου μέγιστης λειτουργίας της συστοιχίας. Έτσι, το σημείο λειτουργίας

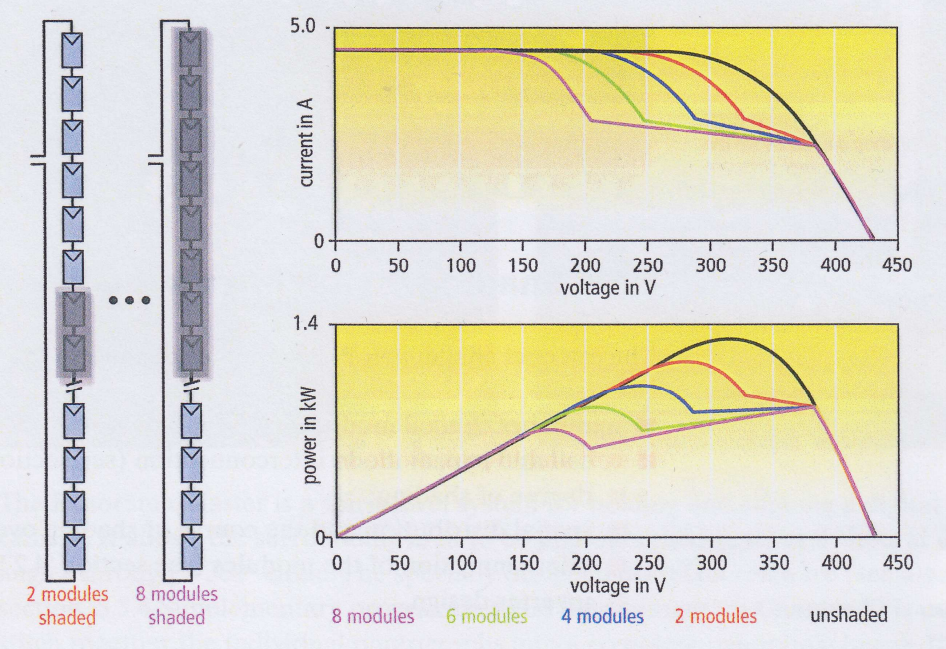
του αντιστροφέα μετατοπίζεται συνεχώς ώστε να ανιχνευτεί το νέο σημείο μέγιστης ισχύος (της σκιασμένης συστοιχίας). Η διαδικασία αυτή σχετίζεται άμεσα με τις απώλειες ισχύος και ενέργειας μιας σκιασμένης συστοιχίας σε σχέση με μια ασκίαστη.

Μια επιστημονική προσέγγιση του προβλήματος της σκίασης έχει διεξαχθεί στο Τεχνικό Πανεπιστήμιο του Βερολίνου για διάφορες τοπολογίες συστημάτων. Με προσομοίωση στο πρόγραμμα PSpice προσδιορίστηκαν οι καμπύλες I-V καθώς και οι απώλειες ενέργειας σε διαφορετικές περιπτώσεις σκίασης. Μια Φ/Β συστοιχία 20 πλαισίων συνδεδεμένα σε σειρά συγκρίνεται με μια άλλη που αποτελείται από 4 στοιχειοσειρές των 5 πλαισίων. Με πυκνότητα ακτινοβολίας 1000W/m^2, δύο, τέσσερα, έξι και οκτώ πλαίσιο σκιάζονται μειώνοντας την πυκνότητα ακτινοβολίας στα 500 W/m^2. Αν η συνδεσμολογία είναι εν σειρά, η μεταβολή της καμπύλης I-V δεν εξαρτάται από το ποιο πλαίσιο σκιάζεται σε αντίθεση με την παράλληλη συνδεσμολογία όπου διαφορετικές περιπτώσεις σκίασης επιδρούν και διαφορετικά στη μεταβολή της καμπύλης.

Στις παραγράφους που ακολουθούν αναλύονται με λεπτομέρεια οι δύο περιπτώσεις που περιγράψαμε. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι σε καμπύλες I-V με σκίαση εμφανίζονται δύο διαφορετικά μέγιστα. Ένα για μικρές και ένα για μεγάλες τάσεις. Το βασικό θέμα είναι κατά πόσο τα μέγιστα αυτά εμφανίζονται έντονα στις καμπύλες ή όχι αλλά και σε ποιο από τα δύο μέγιστα μετατοπίζεται το σημείο λειτουργίας του αντιστροφέα.

3.7.3 Σύνδεση πλαισίων εν σειρά

Η σκίαση και τα αποτελέσματά της στην καμπύλη I-V φαίνονται στο σχήμα 3.8. Στη συγκεκριμένη τοπολογία εμφανίζονται δύο μέγιστα τα οποία είναι πιθανά σημεία λειτουργίας του αντιστροφέα αν βρίσκονται μέσα στο παράθυρο ανίχνευσης MPP. Το ποιο από τα δύο τελικά θα επιλεγεί εξαρτάται από τη μεταβολή της σκιάς σε σχέση με τον χρόνο και από το ηλεκτρονικό σύστημα ανίχνευσης. Στην αρχή τα πλαίσια είναι ασκίαστα και ο αντιστροφέας λειτουργεί στο μοναδικό μέγιστο που παρουσιάζει η καμπύλη. Καθώς η σκιά εμφανίζεται και σταδιακά αυξάνει, το αριστερό μέγιστο, το οποίο αρχικά ήταν το σημείο λειτουργίας, ολισθαίνει προς χαμηλότερες τάσεις. Η λειτουργία του αντιστροφέα παραμένει στο αριστερό μέγιστο ακόμα και αν το σημείο μέγιστης ισχύος βρίσκεται στο δεξί.

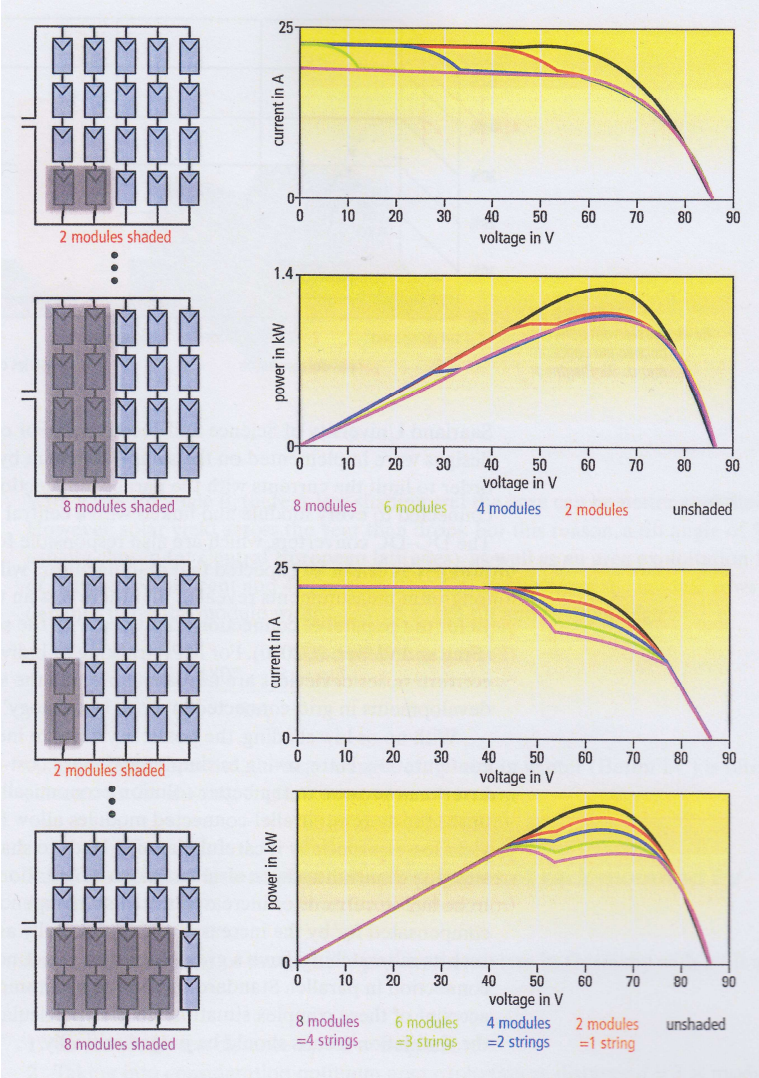


Σχήμα 3.8 Σύνδεση πλαισίων εν σειρά και επίδραση της σκίασης στην καμπύλη I-V

Κατά τη διάρκεια των πρωινών ωρών υπάρχει ήδη σκίαση στα πλαίσια. Καθώς ενεργοποιείται ο αντιστροφέας, το σύστημα MPPT αρχίζει την ανίχνευση από την τάση ανοιχτού κυκλώματος προς το δεξί μέγιστο της καμπύλης. Το σημείο λειτουργίας του θα παραμείνει σε αυτό το μέγιστο ανεξάρτητα αν αυτό είναι το σημείο MPP. Η τάση στο δεξί μέγιστο είναι ελαφρώς μεγαλύτερη σε σχέση με αυτή σε ασκίαστα πλαίσια.

3.7.4 Παράλληλη σύνδεση πλαισίων

Για παράλληλη συνδεσμολογία, διαφορετικός τρόπος σκίασης προκαλεί τελείως διαφορετικά αποτελέσματα στις καμπύλες. Τα πιο ευνοϊκά αποτελέσματα επιτυγχάνονται όταν τα σκιασμένα πλαίσιο βρίσκονται στην ίδια στοιχειοσειρά. Η τάση στην οποία βρίσκεται το αριστερό μέγιστο είναι συνήθως η μισή, ή και μικρότερη, της τάσης V_{OC} με αποτέλεσμα να βρίσκεται έξω από την περιοχή ανίχνευσης του αντιστροφέα. Επιπλέον είναι ελάχιστα διακριτό με αποτέλεσμα ο αντιστροφέας να λειτουργεί κατά κανόνα στο δεξί μέγιστο που συνήθως είναι και το MPP.



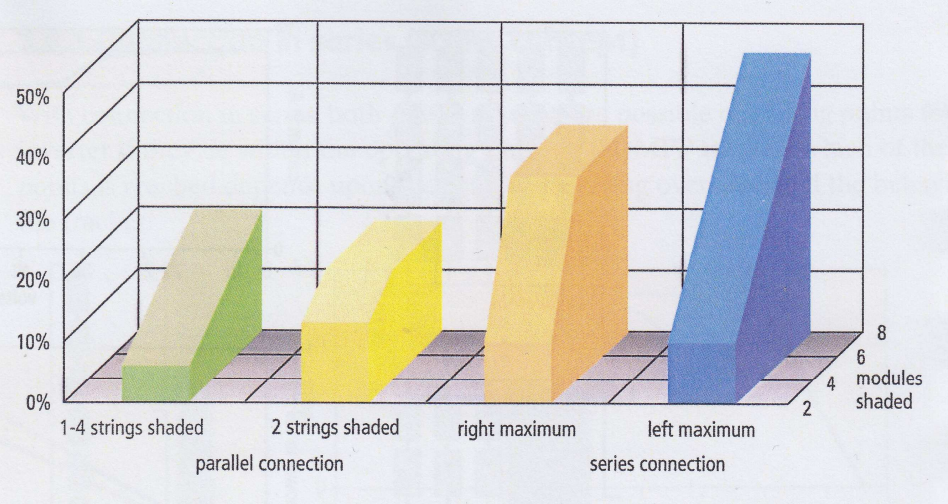
Σχήμα 3.9 Περιπτώσεις σκίασης και χαρακτηριστικές καμπύλες I-V για παράλληλη σύνδεση πλαισίων

Στην περίπτωση που η σκίαση εκτείνεται σε περισσότερες από μία στοιχειοσειρές, και καθώς γίνεται όλο και πιο έντονη, έχουμε έντονη την εμφάνιση πάλι δύο μεγίστων με το αριστερό να βρίσκεται συνήθως εκτός των ορίων ανίχνευσης του σημείου MPP.

3.7.5 Σύγκριση των παραπάνω τοπολογιών

Με σύνδεση εν σειρά, και τα δύο μέγιστα εμφανίζονται έντονα στην καμπύλη I-V. Όσο πιο λίγα πλαίσια είναι σκιασμένα, τόσο οι τάσεις των δύο μεγίστων βρίσκονται στην περιοχή ανίχνευσης του αντιστροφέα. Έτσι, και τα δύο σημεία λειτουργίας πρέπει να

ληφθούν υπ' όψιν. Στην παράλληλη σύνδεση, ο αντιστροφέας μπορεί αν ανιχνεύσει αποτελεσματικά μόνο το δεξί μέγιστο διότι το αριστερό εμφανίζεται αμυδρά και σε περιοχή χαμηλής τάσης. Για σκίαση δύο στοιχειοσειρών, ανεξάρτητα εάν έχουν σκιαστεί δύο, τέσσερα, έξι ή οκτώ πλαίσια, οι απώλειες ισχύος παραμένουν σχεδόν αμετάβλητες και σε χαμηλότερα επίπεδα από τις εν σειρά απώλειες. Τέλος, αν το σημείο λειτουργίας βρίσκεται στο αριστερό μέγιστο, οι απώλειες αυξάνουν έντονα με κάθε επιπλέον σκιασμένο πλαίσιο σε αντίθεση με το δεξί μέγιστο όπου οι απώλειες είναι σχεδόν σταθερές.



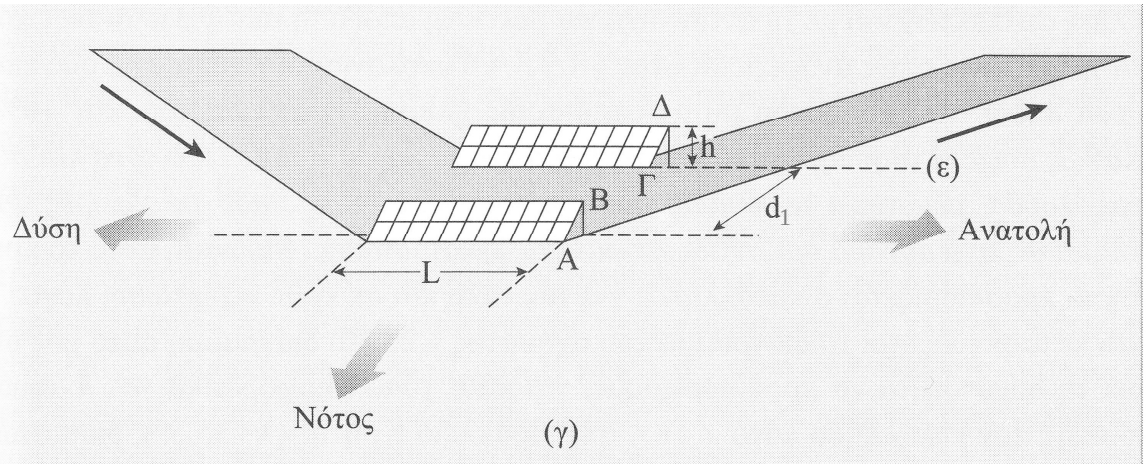
Σχήμα 3.10 Απώλειες ισχύος λόγω σκίασης στην εν σειρά και στην παράλληλη συνδεσμολογία

Με ελάχιστη ή και καθόλου σκίαση, η απολαβή είναι ανεξάρτητη από τη συνδεσμολογία των πλαισίων. Έτσι, πιο εύκολη και αποδοτική οικονομικά λύση αποτελούν οι αντιστροφείς τύπου string. Στις περισσότερες περιπτώσεις είναι σχεδόν αδύνατον να μην υπάρχει σκίαση. Εκεί η παράλληλη συνδεσμολογία είναι επιτακτική σε συνδυασμό με την προσεκτική σχεδίαση του Φ/Β σταθμού ώστε να έχουμε σκίαση μόνο σε λίγες στοιχειοσειρές.

3.7.6 Οριζόντια απόσταση μεταξύ συστοιχιών σε Φ/Β σταθμό [3],[5]

Η οριζόντια απόσταση μεταξύ των συστοιχιών γίνεται λαμβάνοντας υπ' όψιν, κατά κύριο λόγο, τη σκίαση που προκαλείται από τις αμέσως νοτιότερες συστοιχίες αλλά και λειτουργικούς παράγοντες όπως η διακίνηση οχημάτων για τη συντήρηση του σταθμού. Σε ό,τι

αφορά στο θέμα της σκίασης, στην παράγραφο αυτή μελετάται η απόσταση που πρέπει να υπάρχει μεταξύ των συστοιχιών ώστε το ποσοστό μείωσης να μην ξεπερνά κάποια προκαθορισμένα αποδεκτά όρια.

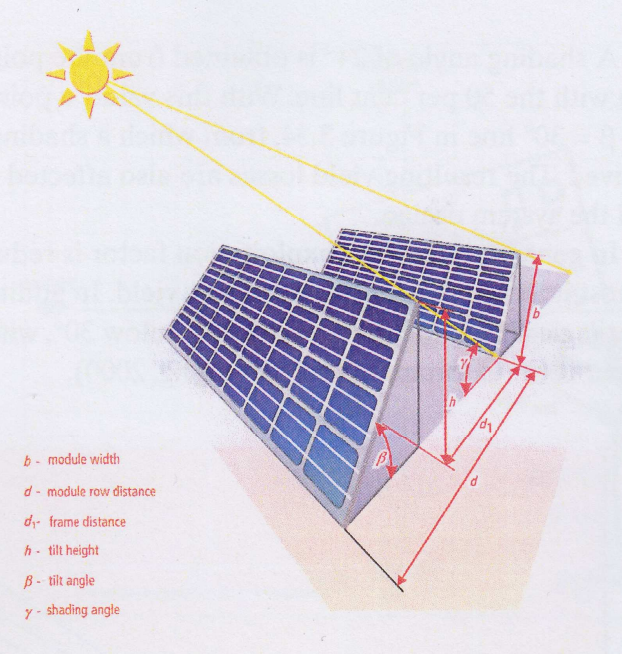


Σχήμα 3.11 Κίνηση της σκιάς και σκιαζόμενα σημεία του εδάφους από την ανατολή έως τη δύση του ηλίου

Στην παρούσα εργασία οι συστοιχίες τοποθετούνται σε οριζόντια επιφάνεια. Η αρχική σκέψη ώστε η απόσταση d_1 μεταξύ των συστοιχιών να ισούται όσο και το μήκος της μακρύτερης μεσημεριανής σκιάς μέσα στο έτος (21 Δεκεμβρίου) δεν είναι η ενδεδειγμένη. Η εκμεταλλεύσιμη ενέργεια τη μέρα αυτή παίρνει την ελάχιστη τιμή της και σταδιακά αυξάνει. Η λύση αυτή είναι ενεργειακά ασύμφορη αφού για πολλές ημέρες πριν και μετά τις 21 Δεκεμβρίου η σκιά καλύπτει μέρος της επόμενης συστοιχίας μειώνοντας σημαντικά την απόδοσή της.

Για τον καθορισμό της απόστασης μεταξύ των συστοιχιών ορίζεται αρχικά ο συντελεστής χρησιμοποίησης επιφάνειας (f) που περιγράφεται από τον λόγο του πλάτους της συστοιχίας b προς την απόσταση d όπως φαίνεται στο σχήμα 3.12

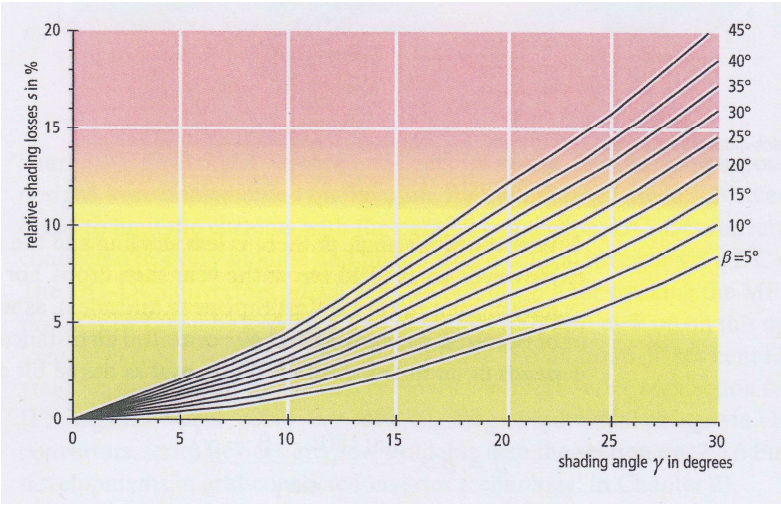
$$f = \frac{b}{d}$$



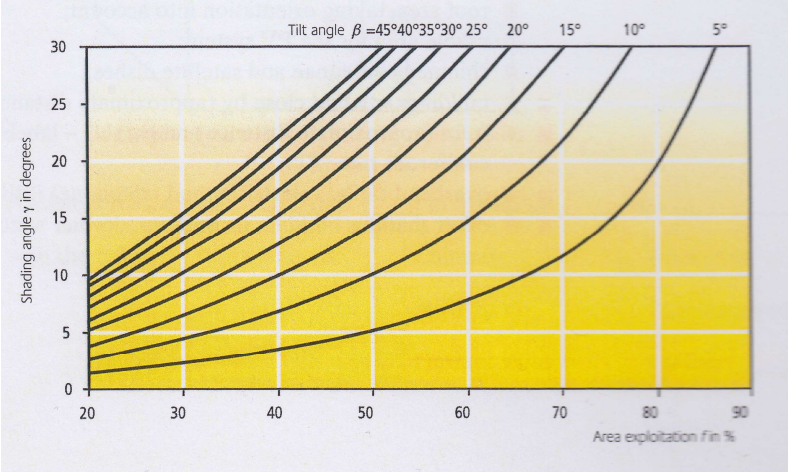
Σχήμα 3.12 Σκίαση πλαισίων τοποθετημένα σε βάσεις στηριξης

Ο συντελεστής αυτός παίρνει τιμές από 0 έως 1. Για f=1 (100%) η απόσταση μεταξύ των συστοιχιών γίνεται η ελάχιστη όμως η έντονη αμοιβαία σκίαση μειώνει δραστικά την παραγωγή. Τυπικές τιμές του f είναι από 0,3 έως 0,4.

Η εκτίμηση του ποσοστού των απωλειών γίνεται με τη χρήση των διαγραμμάτων που ακολουθούν γνωρίζοντας τη γωνία κλίσης των πλαισίων β.



Σχήμα 3.13 Προσδιορισμός των απωλειών σαν συνάρτηση της γωνίας σκίασης γ και της γωνίας κλίσης β



Σχήμα 3.14 Γωνία σκίασης σε συνάρτηση με τον συντελεστή f και τη γωνία κλίσης β

Αρχικά προσδιορίζουμε το ποσοστό των επιθυμητών απωλειών και στη συνέχεια από το διάγραμμά 3.13 βρίσκουμε τη γωνία σκίασης γ. Στη συνέχεια, από το διάγραμμά 3.14 προσδιορίζεται ο λόγος f και κατά συνέπεια η απόσταση d. Η απόσταση d_1 μεταξύ των συστοιχιών δίνεται από τη σχέση:

$$d_1 = d - b \cdot \cos(\beta)$$

Για ποσοστά απωλειών από 1% έως 10% έχουμε και για σχεδίαση συστοιχίας για **μεγάλους αντιστροφείς** (κεφάλαιο 2) έχουμε:

Ποσοστό απωλειών (%)	**Γωνία σκίασης γ (°)**	**Συντελεστής f**	**b (m)**	**h* (m)**	**d (m)**	**d_1 (m)**	**Λόγος d_1/h**
1 %	3,7	-	6,6	3,34	-	-	-
2 %	6,6	-			-	-	-
3 %	9,2	0,250			26,40	**20,68**	**6,19**
4 %	11,3	0,290			22,76	**17,04**	**5,10**
5 %	13,2	0,333			20,00	**14,28**	**4,27**
6 %	14,7	0,360			18,33	**12,61**	**3,77**
7 %	16,3	0,380			17,37	**11,65**	**3,49**
8 %	17,9	0,405			16,30	**10,58**	**3,17**
9 %	19,4	0,435			15,17	**9,45**	**2,83**
10 %	21,0	0,455			14,51	**8,79**	**2,63**

Πίνακας 3.7

* Για τον καθορισμό της οριζόντιας απόστασης d_1, το μέγεθος h δεν παριστάνει το ύψος της συστοιχίας από το έδαφος αλλά το μήκος (προβολή) μεταξύ του υψηλότερου και του χαμηλότερου σημείου της, ή αλλιώς το μέγεθος b·sin(β)

Αφού είναι γνωστός ο λόγος d_1/h, μπορούμε υπολογίσουμε την απόσταση d_1 μεταξύ των συστοιχιών για **τοπολογία με μικρούς αντιστροφείς**:

Ποσοστό απωλειών (%)	**Λόγος d_1/h**	**b (m)**	**h (m)**	**d_1 (m)**
1 %	-	3,30	1,69	-
2 %	-			-
3 %	**6,19**			**10,46**
4 %	**5,10**			**8,62**
5 %	**4,27**			**7,21**
6 %	**3,77**			**6,37**
7 %	**3,49**			**5,90**
8 %	**3,17**			**5,35**
9 %	**2,83**			**4,80**
10 %	**2,63**			**4,44**

Πίνακας 3.8

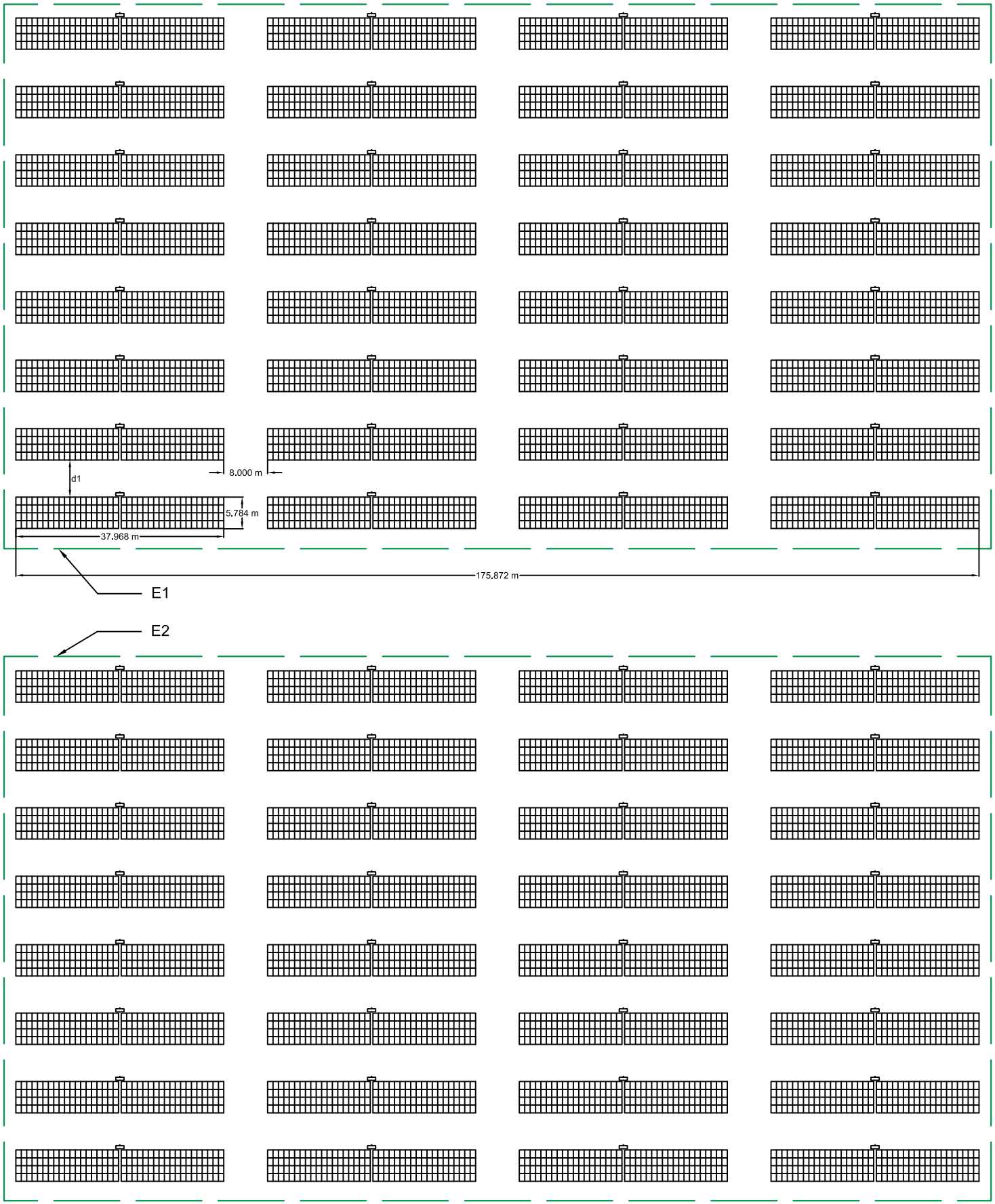
3.8 Απαιτούμενο εμβαδό για την εγκατάσταση του Φ/Β σταθμού

Η γνώση του λόγου d_1/h είναι καθοριστική στην εκτίμηση του τελικού εμβαδού του Φ/Β σταθμού σε σχέση και με το ποσοστό της επιτρεπτής, μη διαθέσιμης ακτινοβολίας. Στην επιλογή του πλάτους των δρόμων εμπλέκονται παράγοντες όπως η πρόβλεψη για τη διακίνηση των οχημάτων και η πρόβλεψη για τα χαντάκια των καλωδίων μέσης ή χαμηλής τάσης, που όμως τελικά δεν έχουν μεγάλη επίδραση. Στη συνέχεια της παραγράφου παρουσιάζονται τα σχέδια των Φ/Β σταθμών για τοπολογία τόσο για μικρούς όσο και για μεγάλους αντιστροφείς.

3.8.1 Τοπολογία Φ/Β σταθμού με μεγάλους αντιστροφείς

Τα σχέδια του σταθμού φαίνονται στην επόμενη σελίδα. Το μήκος d_1 είναι η ελεύθερη παράμετρος που καθορίζει το εμβαδό E_1 και E_2. Οι κάθετοι δρόμοι μεταξύ των συστοιχιών έχουν πλάτος 8m. Για τη διάταξη του σχήματος 3.15, το συνολικό εμβαδό του Φ/Β σταθμού δίνεται από τη σχέση:

$$E_{ολ} = 2 \times \left[175,872 \cdot \left(8 \cdot 5,784 + 7 \cdot d_1 \right) \right]$$



Σχήμα 3.15 Εμβαδό Φ/Β σταθμού για διάταξη με μεγάλους αντιστροφείς

Στην παρούσα εργασία οι συστοιχίες τοποθετούνται σε οριζόντιο έδαφος. Στον πίνακα 3.9 που ακολουθεί παρουσιάζονται τα τελικά αποτελέσματα της συνολικά απαιτούμενης έκτασης του σταθμού.

Ποσοστό απωλειών (%)	**Απόσταση d_1 (m)**	**$E_{ολ}$ (Στρέμματα)**
1 %	-	-
2 %	-	-
3 %	20,68	**67,20**
4 %	17,04	**58,23**
5 %	16,28	**51,44**
6 %	12,61	**47,32**
7 %	11,65	**44,96**
8 %	10,58	**42,32**
9 %	9,45	**39,54**
10 %	8,79	**37,92**

Πίνακας 3.9

3.8.2 Τοπολογία Φ/Β σταθμού με μικρούς αντιστροφείς

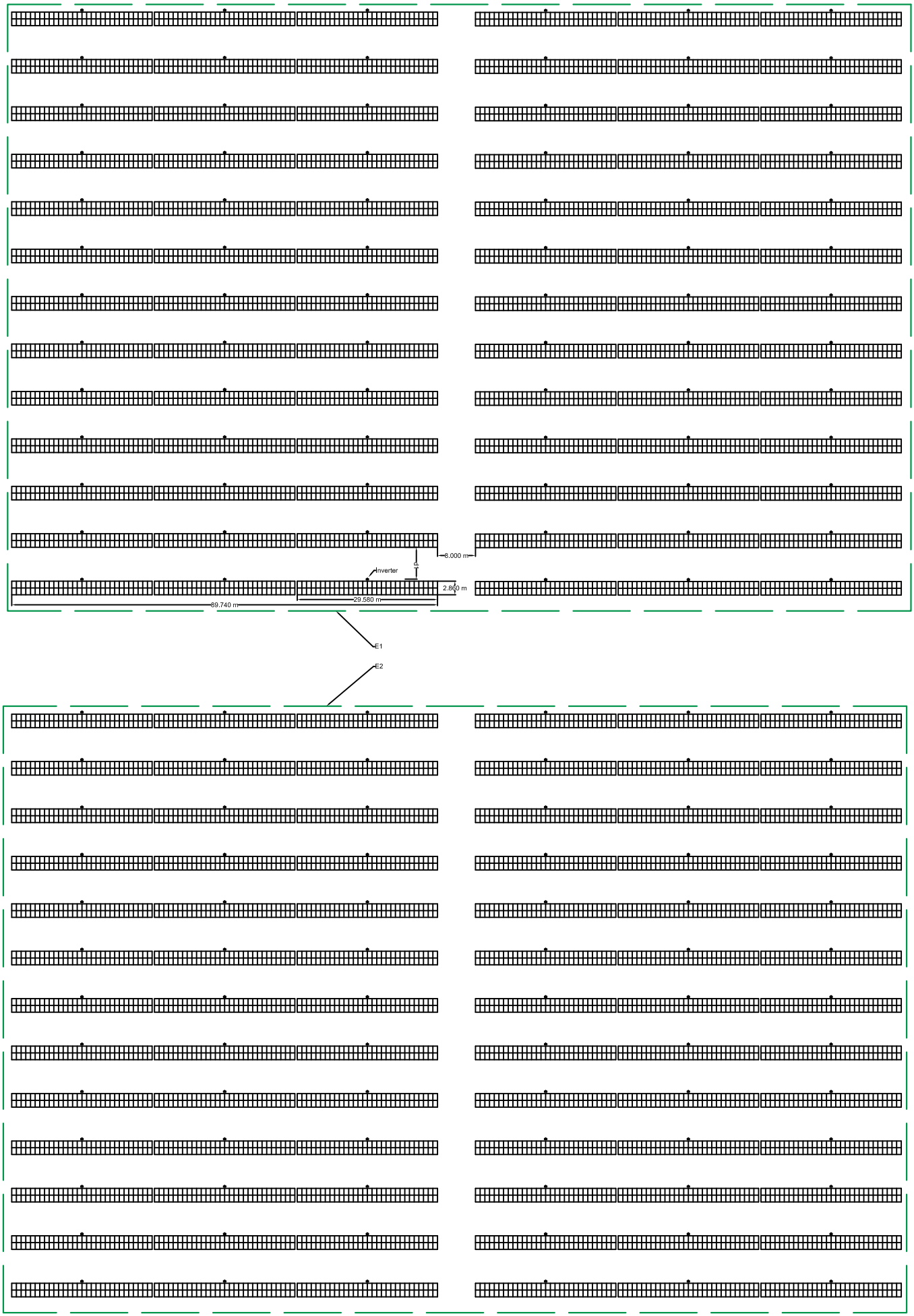
Ο τρόπος σκέψης είναι όμοιος με πριν. Οι συστοιχίες τοποθετούνται σε ομάδες των τριών ώστε να δημιουργήσουν ένα τριφασικό σύστημα. Τα σχέδια του Φ/Β σταθμού με μικρούς αντιστροφείς φαίνονται στο σχήμα 3.16 που ακολουθεί. Οι κάθετοι δρόμοι μεταξύ των συστοιχιών έχουν μήκος 8m ενώ έκταση που απαιτείται δίνεται, με ελεύθερη παράμετρο το μήκος d_1, από τη σχέση:

$$E_{ολ} = 2 \times \left[187,480 \cdot \left(13 \cdot 2,86 + 12 \cdot d_1 \right) \right]$$

Το απαιτούμενο εμβαδό παρουσιάζεται στον πίνακα 3.10

Ποσοστό απωλειών (%)	**Απόσταση d_1 (m)**	**$E_{ολ}$ (Στρέμματα)**	**Ποσοστό απωλειών (%)**	**Απόσταση d_1 (m)**	**$E_{ολ}$ (Στρέμματα)**
1 %	-	-	6 %	6,37	**42,60**
2 %	-	-	7 %	5,90	**40,49**
3 %	10,46	**61,00**	8 %	5,35	**38,01**
4 %	8,62	**52,73**	9 %	4,80	**35,54**
5 %	7,21	**46,38**	10 %	4,44	**33,92**

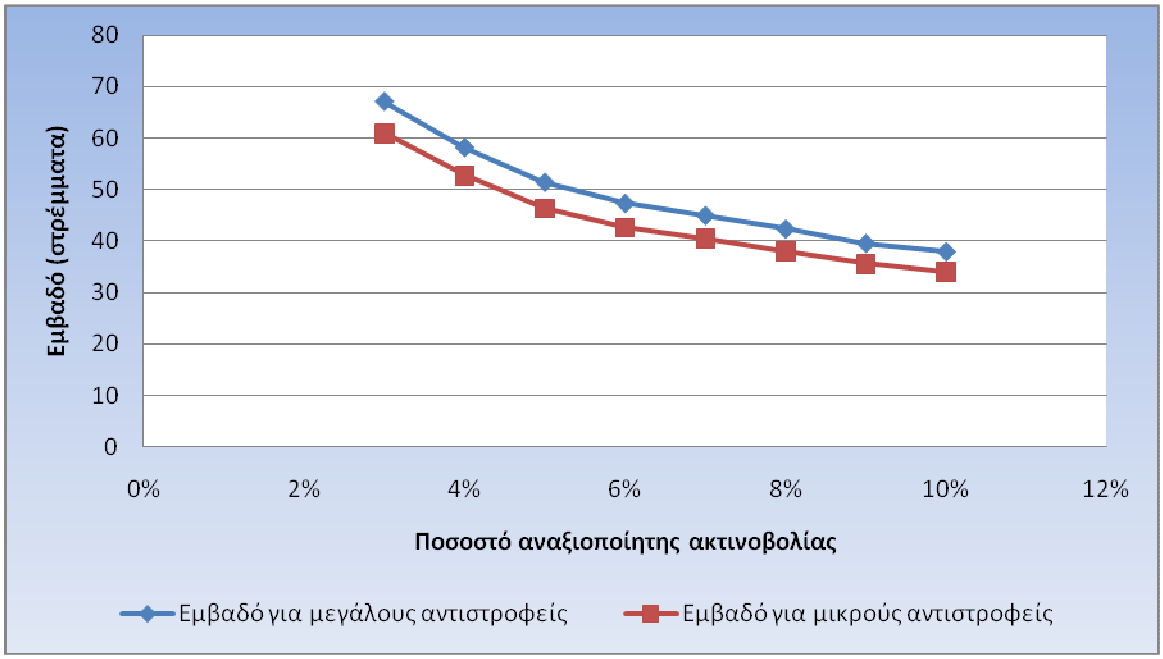
Πίνακας 3.10



Σχήμα 3.16

3.8.3 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα

Στο γράφημα που ακολουθεί φαίνονται συγκεντρωμένα τα αποτελέσματα των προηγούμενων πινάκων.



Σχήμα 3.15 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα

Παρατηρούμε ότι και για τις δύο τοπολογίες σταθμών, η απαιτούμενη έκταση παρουσιάζει σταθερή διαφορά της τάξης των 4 με 6 στρεμμάτων για αντίστοιχο ποσοστό απωλειών. Η διαφορά αυτή μας δίνει τη δυνατότητα να επιλέξουμε χαμηλότερο ποσοστό απωλειών σε σταθμούς στην τοπολογία με μικρούς αντιστροφείς. Στην παρούσα εργασία λαμβάνουμε σαν ποσοστό απωλειών **6%** και για τις δύο γεννήτριες.

3.9 Ετήσια απολαβή Φ/Β γεννήτριας

Σε προηγούμενες παραγράφους αναπτύχθηκαν οι αιτίες που προκαλούν μείωση στην απόδοση μιας Φ/Β γεννήτριας. Γνωρίζοντας το ποσοστό στο οποίο επιδρά κάθε αιτία, την απολαβή ηλιακής ακτινοβολίας και την επίδραση της θερμοκρασίας στην απόδοση των πλαισίων είμαστε σε θέση να υπολογίσουμε την ετήσια απολαβή του Φ/Β σταθμού.

Παράγοντες μείωσης:

i. Συνολικές οπτικές απώλειες: $\mathbf{n_{opt}=0,92}$

ii. Παράγοντας γήρανσης: $\mathbf{n_{\gamma}=0,90}$

iii. Απώλειες ανομοιογένειας: $\mathbf{n_{m}=0,98}$

iv. Απώλειες σκίασης $\mathbf{n_{\sigma\kappa}=0,94}$

Μήνας έτους	$\mathbf{n_{opt}}$	$\mathbf{n_{\gamma}}$	$\mathbf{n_{m}}$	$\mathbf{n_{\sigma\kappa}}$	$\mathbf{n_{C}}$	$\mathbf{n_{tot}}$	**Μηνιαία απολαβή Φ/Β γεννήτριας (kWh/m^2)**
Ιανουάριος	0,92	0,90	0,98	0,94	0,1440	**0,110**	**10,240**
Φεβρουάριος					0,1433	**0,110**	**10,250**
Μάρτιος					0,1413	**0,107**	**13,500**
Απρίλιος					0,1405	**0,107**	**13,990**
Μάιος					0,1351	**0,103**	**17,655**
Ιούνιος					0,1329	**0,101**	**17,940**
Ιούλιος					0,1300	**0,100**	**18,750**
Αύγουστος					0,1295	**0,100**	**18,560**
Σεπτέμβριος					0,1320	**0,100**	**15,770**
Οκτώβριος					0,1364	**0,104**	**13,300**
Νοέμβριος					0,1409	**0,108**	**11,320**
Δεκέμβριος					0,1440	**0,110**	**8,610**

Πίνακας 3.11 Μηνιαία απολαβή Φ/Β γεννήτριας ανά μονάδα επιφάνειας

Οι μηνιαίες τιμές που βρήκαμε, πολλαπλασιασμένες επί το συνολικό εμβαδό των πλαισίων μας δίνουν την ετησια παραγωγή του σταθμού.

Μήνας έτους	**Μηνιαία απολαβή Φ/Β γεννήτριας (kWh/m^2)**	**Εμβαδό γεννήτριας για μεγάλους αντιστροφείς (m^2)**	**Εμβαδό γεννήτριας για μικρούς αντιστροφείς (m^2)**
Ιανουάριος	**10,240**	**15836,07**	**15237,01**
Φεβρουάριος	**10,250**		
Μάρτιος	**13,500**		
Απρίλιος	**13,990**		
Μάιος	**17,655**		
Ιούνιος	**17,940**		
Ιούλιος	**18,750**		
Αύγουστος	**18,560**		
Σεπτέμβριος	**15,770**		
Οκτώβριος	**13,300**		
Νοέμβριος	**11,320**		
Δεκέμβριος	**8,610**		

Ετήσια παραγωγή σταθμών (kWh/έτος)	Σταθμός με μεγάλους αντιστροφείς	Σταθμός με μικρούς αντιστροφείς
	2.690,3 MWh	**2.588,5 MWh**

Πίνακας 3.13 Ετήσια παραγωγή σταθμών

Τέλος, κάνοντας αναγωγή στην ετήσια παραγωγή ανά kW εγκατεστημένης ισχύος (κεφάλαιο 2) έχουμε:

- Για μεγάλους αντιστροφείς: **1313,1 kWh/kW**
- Για μικρούς αντιστροφείς: **1316,9 kWh/kW**

3.10 Συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό μελετήθηκε η ενεργειακή απολαβή μιας Φ/Β γεννήτριας σε συγκεκριμένο τόπο εγκατάστασης. Έγινε αναφορά στους παράγοντες μείωσης της απολαβής αυτής με έμφαση στον παράγοντα σκίασης. Με τον υπολογισμό της οριζόντιας απόστασης μεταξύ των συστοιχιών εκτιμήσαμε το απαιτούμενο εμβαδό για την ανάπτυξη των δύο Φ/Β σταθμών. Στο σχήμα 3.15 φαίνεται ότι το εμβαδό αυτό είναι ανεξάρτητο του μεγέθους και του τρόπου διαρρύθμισης των συστοιχιών μέσα στο σταθμό. Τέλος, με χρήση όλων των συντελεστών μείωσης γίνεται εκτίμηση της ετήσιας ενεργειακής απολαβής της Φ/Β γεννήτριας.

Κεφάλαιο 4

Ηλεκτρολογική μελέτη Φ/Β σταθμού τοπολογίας μικρών αντιστροφέων

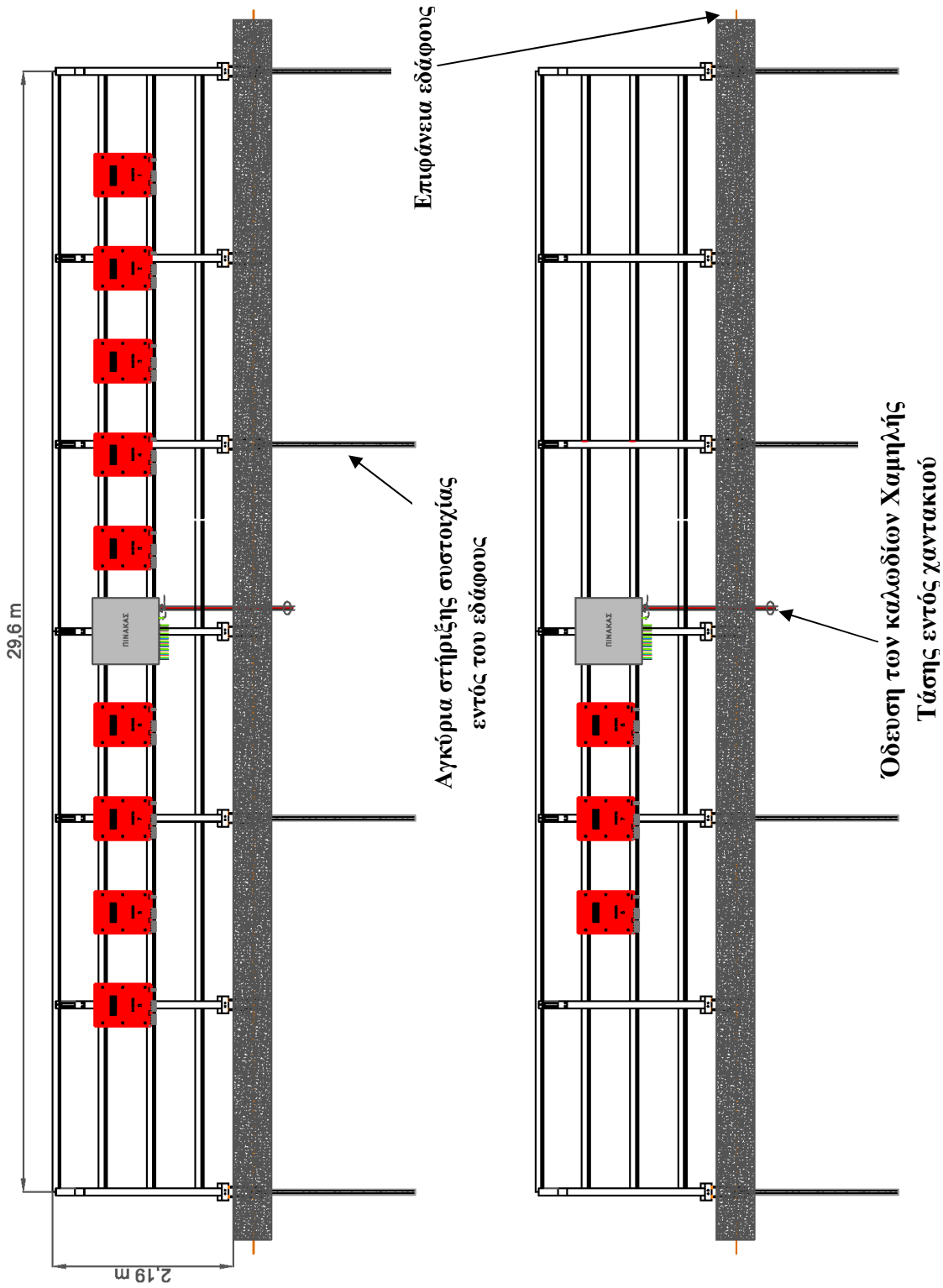
4.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται ειδικότερα η διασύνδεση των διαφόρων τμημάτων του Φ/Β σταθμού. Με τη βοήθεια τοπογραφικού διαγράμματος απεικονίζεται η χωροθέτηση του χρησιμοποιούμενου εξοπλισμού ενώ τη ηλεκτρολογικά διαγράμματα Μέσης και Χαμηλής τάσης δείχνουν τις ηλεκτρολογικές συνδέσεις. Ειδικότερη αναφορά γίνεται στα χρησιμοποιούμενα καλώδια, τον τύπο τους και τον τρόπο επιλογής της διατομής του. Τέλος γίνεται περιγραφή των οικίσκων – υποσταθμών και ελέγχου που θα χρησιμοποιηθούν, των Πεδίων Μέσης Τάσης καθώς και των διατάξεων προστασίας.

4.2 Γενική περιγραφή της τοπολογίας

Στην τοπολογία αυτή ο σταθμός αποτελείται από συνολικά 9360 πλαίσια της εταιρείας Conergy τύπου PowerPlus 210P ονομαστικής ισχύος 210Wp. Τα πλαίσια αυτά ομαδοποιούνται σε 156 συστοιχίες. Κάθε συστοιχία τροφοδοτεί από έναν αντιστροφέα των 11kW τύπου SMC 11000TL της εταιρείας SMA. Οι αντιστροφείς ομαδοποιούνται ανά 9 (σε 4 περιπτώσεις ανά 3) και συνδέονται ηλεκτρικά σε πίνακα Χαμηλής Τάσης ώστε να δημιουργηθεί ένα τριφασικό σύστημα. Τέλος η ισχύς κάθε τριφασικού πίνακα τροφοδοτεί μία από τις 5 εισόδους του Υ/Σ ανύψωσης 0,4/20kV

Χωροταξικά, όπως είναι εμφανές και στο διάγραμμα **"Τοπογραφικό διάγραμμα 1"**, οι ομάδες των 9 αντιστροφέων τοποθετούνται στη Βόρεια πλευρά της μεσαίας (κεντροβαρικά) συστοιχίας όπου βρίσκεται και ο αντίστοιχος πίνακας Χαμηλής Τάσης. Όμοια και για τις ομάδες των 3 αντιστροφέων. Η όδευση των καλωδίων DC γίνεται τόσο πάνω στα ικριώματα των συστοιχιών όσο και εντός χαντακιού τύπου Α (διάγραμμα **"Τομές Χαντακιών 1"**) μέχρι το σημείο των αντιστροφέων. Τα καλώδια διέρχονται από το έδαφος μέσω φρεατίων. Από τα ίδια φρεάτια διέρχονται και τα καλώδια AC Χ.Τ. από τους υποπίνακες προς τους Υ/Σ ανύψωσης. Στο κέντρο του σταθμού, στη Νότια πλευρά για λόγους αποφυγής της σκίασης, έχουν τοποθετηθεί οι 4 Υ/Σ και ο οικίσκος ζεύξης και ελέγχου. Οι υποσταθμοί, ανά δύο συνδέονται σε σειρά και εν συνεχεία στον οικίσκο ελέγχου μέσω των χαντακιών τύπου Β και C. Τέλος, το υπόγειο δίκτυο Μέσης Τάσης είναι τοπολογίας βρόχου εξασφαλίζοντας την αδιάλειπτη λειτουργία του σταθμού σε περίπτωση που συμβεί σφάλμα στο κύριο κύκλωμα του δικτύου.



Σχήμα 4.1 Τοποθέτηση αντιστροφέων στη Βόρεια όψη της συστοιχίας

4.3 Καλωδίωση Φ/Β πλαισίων

4.3.1 Όδευση καλωδίων – απαιτούμενο μήκος καλωδίων DC

Τα καλώδια που συνδέουν τα Φ/Β πλαίσια με τους αντιστροφείς οδεύουν εν μέρει πάνω στις συστοιχίες και στη συνέχεια σε σωλήνες μέσα στα χαντάκια τύπου Α. Στις ομάδες Α5, Β5, Γ5 και Δ5 τα καλώδια οδεύουν μόνο πάνω στις συστοιχίες οριζόντια μέχρι τους αντιστροφείς. Στις υπόλοιπες ομάδες τα καλώδια οδεύουν οριζόντια μέχρι το αντίστοιχο φρεάτιο και στη συνέχεια μέσω σωλήνων κατευθύνονται στη Βόρεια όψη της συστοιχίας της αντίστοιχης ομάδας που συγκεντρώνει τους αντιστροφείς. Εκεί, κάθε συστοιχία και στοιχειοσειρά συνδέεται με τον αντίστοιχο αντιστροφέα.

Σχήμα 4.2 Φρεάτια και σωλήνες όδευσης καλωδίων

Με τη βοήθεια του Τοπογραφικού διαγράμματος 1 μπορούμε να υπολογίσουμε το απαιτούμενο μήκος των καλωδίων DC. Τα αποτελέσματα των επιμετρήσεων[1] δίνονται στον ακόλουθο πίνακα:

Επιμέτρηση καλωδίων ομάδων Α4 και Α5					
Συστοιχία	**Στοιχειοσειρά**	**Μήκος**	**Συστοιχία**	**Στοιχειοσειρά**	**Μήκος**
A4-1	STR1	110m	A4-7	STR1	108m
	STR2	110m		STR2	108m
	STR3	80m		STR3	80m
	STR4	80m		STR4	80m
A4-2	STR1	50m	A4-8	STR1	50m
	STR2	50m		STR2	50m
	STR3	50m		STR3	50m
	STR4	50m		STR4	50m
A4-3	STR1	80m	A4-9	STR1	80m
	STR2	80m		STR2	80m
	STR3	110m		STR3	108m
	STR4	110m		STR4	108m
A4-4	STR1	85m	A5-1	STR1	85m
	STR2	85m		STR2	85m
	STR3	55m		STR3	55m
	STR4	55m		STR4	55m
A4-5	STR1	30m	A5-2	STR1	30m
	STR2	30m		STR2	30m
	STR3	30m		STR3	30m
	STR4	30m		STR4	30m
A4-6	STR1	55m	A5-3	STR1	55m
	STR2	55m		STR2	55m
	STR3	85m		STR3	85m
	STR4	85m		STR4	85m

Πίνακας 4.1

Για την ομάδα Α4 το συνολικό μήκος καλωδίου DC είναι περίπου **2.600m** ενώ για την ομάδα Α5 είναι **680m.**

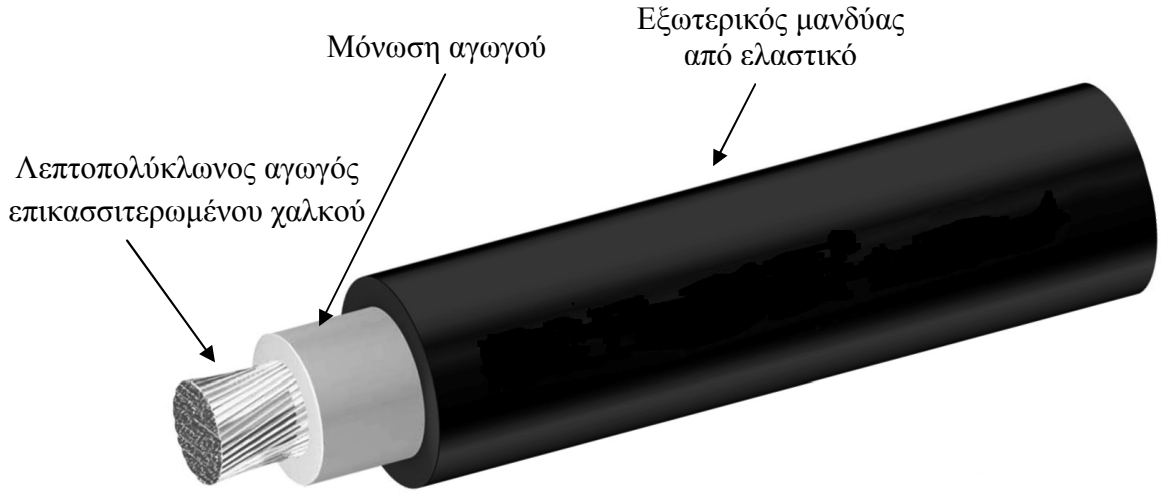
Βάσει των παραπάνω υπολογισμών, συνολικά για τον σταθμό χρειαζόμαστε **44.320m** καλώδιο DC.

[1] Οι επιμετρήσεις γίνονται για τις στοιχειοσειρες της ομάδας Α. Λόγω της συμμετρίας του σταθμού, για της υπόλοιπες ομάδες τα μήκη θα είναι τα ίδια.

4.3.2 Τύπος καλωδίου

Για την διασύνδεση των πλαισίων χρησιμοποιούνται ειδικά καλώδια εξωτερικού χώρου τα οποία πρέπει να είναι ανθεκτικά τόσο σε μηχανικές καταπονήσεις όσο και στην ηλιακή ακτινοβολία. Ο τύπος που επιλέγεται είναι συνήθως **H07RN-F** και έχει τις ακόλουθες προδιαγραφές **[43],[44]**:

- **H**: το καλώδιο ακολουθεί εναρμονισμένο πρότυπο
- **07**: για τάσεις 450/750 φασική/πολική. Για συνεχές ρεύμα το καλώδιο μπορεί να εγκατασταθεί σε σύστημα ονομαστικής τάσης **1,5·750=1125V** (κατά HD 516)
- **R**: η μόνωση του αγωγού είναι από φυσικό λάστιχο
- **N**: ο εξωτερικός μανδύας είναι από ελαστικό πολυχλωροπρένιο, υλικό ανθεκτικό στην ηλιακή ακτινοβολία που δεν αποικοδομείται.
- **F**: ο αγωγός είναι λεπτοπολύκλωνος και σε πολλές περιπτώσεις επικασσιτερωμένος.



Σχήμα 4.3 Τυπική τομή καλωδίου H07RN-F

Το καλώδιο αυτό είναι σύμφωνο με τις προδιαγραφές ΕΛΟΤ 623.4 και HD 22.4

4.3.3 Πτώση τάσης και απώλειες ισχύος στο καλώδιο DC

Η επιλογή της διατομής του αγωγού σχετίζεται με την ανάγκη όσο το δυνατόν μικρότερων απωλειών αλλά και πτώσης τάσης κατά μήκος του. Σύμφωνα με το γερμανικό προσχέδιο **VDE 0100 Part 1** προτείνεται η πτώση τάσης να μην είναι μεγαλύτερη του **1%** της ονομαστικής DC τάσης συστήματος σε πρότυπες συνθήκες. Αυτό έχει ως συνέπεια οι απώλειες ισχύος να διατηρούνται και αυτές στο **1%** σε πρότυπες συνθήκες. Πρακτικά, η καλωδίωση των πλαισίων γίνεται με καλώδια διατομών $4mm^2$ ή $6mm^2$. Στη συνέχεια, θα δούμε το ποσοστό της πτώσης τάσης που επιφέρει κάθε μία από τις παραπάνω διατομές.

Το ρεύμα που ρέει σε κάθε στοιχειοσειρά εξαρτάται κυρίως από την ακτινοβολία και είναι σχεδόν πάντα **μικρότερο του ρεύματος $I_{MPP,STC}$.** Στη συγκεκριμένη περίπτωση, το ρεύμα $I_{MPP,STC}$ **είναι 7,24A** και βάση αυτού θα γίνουν οι παραπάνω έλεγχοι.

- **Πτώση τάσης:** Μας ενδιαφέρει η πτώση τάσης που έχουμε πάνω στον μακρύτερο αγωγό ο οποίος είναι **110m**. Η ωμική αντίσταση του καλωδίου σε θερμοκρασία 20^oC δίνεται από το φυλλάδιο του κατασκευαστή και είναι **5,09 Ω/km** και **3,39 Ω/km** για αγωγούς $4mm^2$ και $6mm^2$ αντίστοιχα. Επειδή τα καλώδια εγκαθίστανται εν μέρει και στο εξωτερικό περιβάλλον, τους θερινούς μήνες η θερμοκρασία λειτουργίας τους **70^oC.** Για το λόγο αυτό είναι αναγκαίο να γίνει διόρθωση στις τιμές των ωμικών αντιστάσεων για τη θερμοκρασία λειτουργίας βάση του τύπου:

$$R_{70^oC} = R_{20^oC} \cdot \left[1 + a_{20^oC} \cdot (\theta_{λειτ} - 20)\right]$$

όπου **α_{20}=0,00393** για αγωγούς χαλκού και **0,00403** για αγωγούς αλουμινίου. Σύμφωνα με την παραπάνω σχέση έχουμε:

Αντίσταση καλωδίου R στους 70^oC (Ω/km)	
$4mm^2$	6,090
$6mm^2$	4,056

Πίνακας 4.2

Η πτώση τάσης κατά μήκος του καλωδίου δίνεται από τη παρακάτω σχέση και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον πίνακα 4.3. Η τάση συστήματος είναι **436,5V**.

$$V_{Drop} = I_{MPP,STC} \cdot R_{70^o C}(\Omega / km) \cdot L(km)$$

Διατομή	Πτώση τάσης (V)	% Πτώση τάσης
4mm^2	4,85	1,11%
6mm^2	3,23	0,74%

Πίνακας 4.3

Από τα πιο πάνω αποτελέσματα φαίνεται ότι τις συνθήκες ικανοποιεί το καλώδιο διατομής 6mm^2.

- Οι απώλειες ισχύος δίνονται από την παρακάτω σχέση και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον πίνακα 4.4. Η ισχύς μιας στοιχειοσειράς είναι 3150Wp σε πρότυπες συνθήκες.

$$P_{loss} = I^2_{MPP,STC} \cdot R_{70^o C}(\Omega / km) \cdot L(km)$$

$$P_{loss,\%} = \frac{P_{loss}}{P_{nom}} \cdot 100\%$$

Διατομή	Απώλειες (W)	% Απώλειες
4mm^2	35,12	1,11%
6mm^2	23,40	0,74%

Πίνακας 4.4

4.3.4 Απώλειες ενέργειας στο καλώδιο DC

Ο υπολογισμός των απωλειών ενέργειας στο καλώδιο DC υπολογίζεται με τη βοήθεια του **σταθμισμένου συντελεστή απόδοσης** του αντιστροφέα, μέγεθος που θα περιγραφεί αναλυτικότερα σε επόμενο κεφάλαιο. Ο συντελεστής αυτός, για τις χώρες της Κεντρικής Ευρώπης προσεγγίζεται από τη σχέση:

$$n_{Euro} = 0,03 \cdot n_{5\%} + 0,06 \cdot n_{10\%} + 0,13 \cdot n_{20\%} + 0,10 \cdot n_{30\%} + 0,48 \cdot n_{50\%} + 0,2 \cdot n_{100\%}$$

όπου οι συντελεστές n_i σχετίζονται με την απόδοση του αντιστροφέα όταν λειτουργεί σε ποσοστό i της ονομαστικής ισχύος του ενώ τα υπόλοιπα βάρη (t_i) σχετίζονται στο ποσοστό του χρόνου λειτουργίας του αντιστροφέα μέσα σε ένα έτος στο οποίο ο αυτός λειτούργησε σε ποσοστό i της ονομαστικής του ισχύος.

Με τη χρήση τυπικών διαγραμμάτων της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας μπορούμε να υπολογίσουμε για μια τυπική ημέρα κάθε μήνα τις ώρες ηλιοφάνειας και κατά συνέπεια τις ώρες λειτουργίας του αντιστροφέα. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον πίνακα 4.5:

Ώρες λειτουργίας αντιστροφέα ανά μήνα					
Μήνας	**Ώρες/ημέρα**	**Ώρες/μήνα**	**Μήνας**	**Ώρες/ημέρα**	**Ώρες/μήνα**
Ιανουάριος	10,16	315	**Ιούλιος**	13,06	405
Φεβρουάριος	12,14	340	**Αύγουστος**	12,42	385
Μάρτιος	12	372	**Σεπτέμβριος**	12	360
Απρίλιος	13	390	**Οκτώβριος**	10,96	340
Μάιος	13,06	405	**Νοέμβριος**	10,66	320
Ιούνιος	14	420	**Δεκέμβριος**	10	310
			Σύνολο ωρών λειτουργίας/έτος		
			4362 ώρες		

Πίνακας 4.5

Επιπλέον μπορούμε με ικανοποιητική ακρίβεια να υποθέσουμε ότι όταν ο αντιστροφέας λειτουργεί σε ποσοστό i της μέγιστης ισχύος του, το ρεύμα που παρέχουν τα Φ/Β πλαίσια είναι $i \cdot \mathrm{Im}\, pp$. Με τον τρόπο αυτό μπορούμε άμεσα να υπολογίσουμε τις απώλειες ενέργειας ανά έτος σε κάθε στοιχειοσειρά μέσω της σχέσης:

$$E_{string} = \sum_{i=1}^{6} [(\mathrm{I}_{\mathrm{m}\,pp} \cdot n_i)^2 \cdot R(\Omega / km, 70^o C) \cdot L(km) \cdot t_i \cdot 4362] \quad (Wh)$$

Για τις 2 διατομές καλωδίου που διαθέτουμε οι απώλειες ενέργειας ανά έτος για τον Φ/Β σταθμό είναι:

Διατομή	**Απώλειες ενέργειας (MWh/έτος)**
4mm^2	20,61
6mm^2	13,73

Πίνακας 4.6

Αν υποθέσουμε ότι με διατομή 4mm^2 ικανοποιούνταν η μέγιστη επιθυμητή απώλεια ισχύος και πτώση τάσης (1%), είναι ενδιαφέρον να δούμε αν θα άξιζε να εγκαταστήσουμε καλώδιο μεγαλύτερης διατομής ώστε να επωφεληθούμε από την εξοικονομούμενη ενέργεια. Από τα αποτελέσματα του παραπάνω πίνακα βλέπουμε ότι με καλώδια διατομής 6mm^2 εξοικονομείται ενέργεια $20,61-13,73=6,88\,MWh/έτος$. Το κόστος του απαιτούμενου μήκους καλωδίου H07RN-F είναι:

Διατομή	**Κόστος (€/m)**	**Απαιτούμενο μήκος (m)**	**Συνολικό κόστος (€)**
4mm^2	0,36	44.320	16000 €
6mm^2	0,52		23050 €
		Επιπλέον κόστος	**7050 €**

Πίνακας 4.7

Επιπλέον, με βάση τη νομοθεσία, η τιμή πώλησης της ενέργειας που παράγεται από διασυνδεδεμένο Φ/Β σταθμό μεγαλύτερο από 100kW είναι **407,14 €/MWh** (τιμή Ιουλίου 2009 από ΡΑΕ). Έτσι, η απόσβεση του καλωδίου των 6mm^2 θα γινόταν σε χρονικό διάστημα:

$$\mathrm{T}=\frac{\mathrm{E}\pi\iota\pi\lambda\acute{\varepsilon}o\nu\,\mathrm{K}\acute{o}\sigma\tau o\varsigma}{(\mathrm{E}\xi o\iota\kappa.\mathrm{E}\nu\acute{\varepsilon}\rho\gamma\varepsilon\iota\alpha/\acute{E}\tau o\varsigma)\cdot\mathrm{T}\iota\mu\acute{\eta}\,\mathrm{E}\nu\acute{\varepsilon}\rho\gamma\varepsilon\iota\alpha\varsigma}\cong 2,5\,\acute{\varepsilon}\tau\eta$$

Βλέπουμε δηλαδή ότι μέσα σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα γίνεται απόσβεση του επιπλέον κόστους.

4.3.5 Μέγιστη επιτρεπόμενη διαρκής φόρτιση καλωδίου DC [12],[21],[22],[24]

Ο προσδιορισμός του μέγιστου επιτρεπόμενου ρεύματος σε εγκαταστάσεις καλωδίων Χαμηλής Τάσης γίνεται με τη βοήθεια του προτύπου HD 384.5.523. Στη συγκεκριμένη εγκατάσταση τα καλώδια DC οδεύουν στο μεγαλύτερο μήκος τους εκτός εδάφους και στηρίζονται στο δομικό υλικό (αλουμίνιο) των συστοιχιών. Το μέγιστο επιτρεπόμενο ρεύμα δίνεται από τη σχέση:

$$I=I_o\cdot f_\theta\cdot f_n$$

όπου Io η επιτρεπόμενη συνεχής φόρτιση του καλωδίου στους 30°C, f_θ ο συντελεστής θερμοκρασίας περιβάλλοντος για θερμοκρασίες διάφορες των 30°C και f_n ο συντελεστής πλήθους κυκλωμάτων ή αγωγών.

Από τα στοιχεία του κατασκευαστή και για θερμοκρασία 30°C, η επιτρεπόμενη συνεχής φόρτιση του καλωδίου για διατομή 6mm^2 είναι **53A**. Επιπλέον, στο σημείο όπου αυτά συγκεντρώνονται για να οδεύσουν στο έδαφος έχουμε συνολικά 24 καλώδια με αντίστοιχο συντελεστή διόρθωσης που δίνεται από τον κατασκευαστή και είναι **0,40**. Τέλος, η θερμοκρασία που επικρατεί στο χώρο της Φ/Β εγκατάστασης τους θερινούς μήνες (δυσμενέστερη περίπτωση) είναι περίπου 40°C με αντίστοιχο συντελεστή μείωσης **0,91** για καλώδια με μόνωση από ελαστικό. Συγκεντρωτικά, το μέγιστο επιτρεπόμενο ρεύμα του καλωδίου είναι:

$$I = I_o \cdot f_\theta \cdot f_n = 53 \cdot 0,91 \cdot 0,40 \cong 19,3A$$

Το ρεύμα αυτό είναι μικρότερο του I_{mpp} (7,24A) και η διατομή αυτή είναι κατάλληλη.

Είναι σκόπιμο να γίνει ο αντίστοιχος έλεγχος και για την όδευσή τους στο έδαφος αφού τα καλώδια οδεύουν μέσα σε χαντάκι μέχρι το σημείο όπου βρίσκεται ο αντιστροφέας. Ο τύπου που δίνει το μέγιστο επιτρεπόμενο ρεύμα είναι:

$$I = I_o \cdot f_\theta \cdot f_c \cdot f_i$$

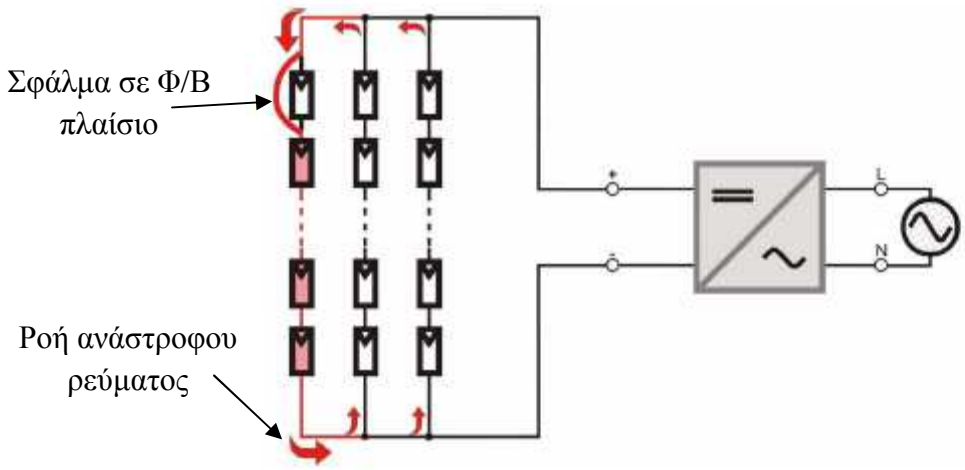
όπου f_c συντελεστής που εξαρτάται από την ειδική αγωγιμότητα του εδάφους, f_θ συντελεστής που εξαρτάται από τη θερμοκρασία του εδάφους και f_i συντελεστής που εξαρτάται από το πλήθος των καλωδίων. Υποθέτοντας ότι έχουμε κανονική βροχόπτωση στην περιοχή κατασκευής του έργου, το έδαφος θεωρείται υγρό (IEC 60287) και η ειδική θερμική του αντίσταση είναι ίση με 1 K*m/W. Από τους πίνακες του προτύπου HD384 ο συντελεστής διόρθωσης f_c ισούται με **1,18**. Επιπρόσθετα, υποθέτοντας ότι η θερμοκρασία εδάφους στο βάθος των καλωδίων είναι 25°C ο συντελεστής f_θ πάιρνει τιμή **0,96** για καλώδια με μόνωση από ελαστικό. Τέλος, για όδευση 24 καλωδίων μέση σε σωλήνα στο έδαφος ο συντελεστής f_i θεωρείται ίσος με πριν, δηλαδή **0,40**. Επομένως, το μέγιστο επιτρεπόμενο ρεύμα είναι:

$$I = I_o \cdot f_\theta \cdot f_c \cdot f_i = 53 \cdot 0,96 \cdot 1,18 \cdot 0,40 \cong 24,0A$$

Επομένως, το καλώδιο δεν διατρέχει κανένα κίνδυνο λόγω θερμικών περιορισμών.

4.4 Προστασία στη DC πλευρά του αντιστροφέα [3]

Μέριμνα πρέπει να ληφθεί στη DC πλευρά του αντιστροφέα για την προστασία τόσο του καλωδίου από βραχυκύκλωμα όσο και των Φ/Β πλαισίων από δημιουργία ανάστροφων ρευμάτων. Το μέγιστο ανάστροφο ρεύμα που μπορεί αν δεχτεί ένα πλαίσιο δίνεται από στοιχεία του κατασκευαστή και για το πολυκρυσταλλικό πυρίτιο είναι περίπου **2 φορές** το ρεύμα I_{sc}.



Σχήμα 4.4 Δημιουργία ανάστροφου ρεύματος στα Φ/Β πλαίσια

Όπως φαίνεται και στο σχήμα 4.4, ανάστροφο ρεύμα μπορεί να δημιουργηθεί λόγω βραχυκυκλώματος σε ένα ή περισσότερα πλαίσια ενός string της συστοιχίας. Είναι πιθανό, το σύνολο των ρευμάτων βραχυκύκλωσης όλων των strings που λειτουργούν κανονικά να ρέει στη στοιχειοσειρά που παρουσιάζει βλάβη αντί να ρέει προς τον αντιστροφέα. Η τιμή του ανάστροφου ρεύματος δίνεται από τη σχέση:

$$I_{max} = (n-1) \cdot I_{SC,string}$$

όπου n ο αριθμός των παράλληλων στοιχειοσειρών, και είναι και το ρεύμα του διαρρέει και τα καλώδια DC.

Στην παρούσα περίπτωση έχουμε:

$$I_{max} = (4-1) \cdot 7,93 \cong 23,8\,A$$

και μέγιστο επιτρεπτό ανάστροφο ρεύμα πλαισίων **2x7,93=15,9A**. Σε συνδυασμό με το μέγιστο επιτρεπόμενο ρεύμα διαρκούς φόρτισης του καλωδίου που υπολογίσαμε στην προηγούμενη παράγραφο (18,45 Α) καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι πρέπει να χρησιμοποιηθούν ασφάλειες τήξης σχεδιασμένες για DC ρεύμα που να διακόπτουν το κύκλωμα όταν το ρεύμα ξεπερνά τα **14A**.

Τέλος, για την απομόνωση των συστοιχιών προβλέπεται αποζεύκτης φορτίου ο οποίος είναι ενσωματωμένος στον αντιστροφέα. Έτσι, δεν χρειάζεται μέριμνα για επιπλέον εξοπλισμό.

4.5 Inverter: Θέματα ασφάλειας δικτύου και απόδοσης αντιστροφέα

4.5.1 Σύστημα επιτήρησης δικτύου

Για διασυνδεδεμένα συστήματα είναι αναγκαίο να υπάρχει δυνατότητα αυτόματης απομόνωσης των αντιστροφέων από το δίκτυο διανομής. Η απομόνωση αυτή γίνεται με χρήση αυτόματης διεπαφής απομόνωσης δικτύου όπως περιγράφεται από το πρότυπο **DIN VDE 0126 (ENS) του 1999**. Έτσι παρέχεται ασφάλεια ανάμεσα στην εγκατάσταση παραγωγής και στο δίκτυο διανομής. Επιπλέον, παρέχεται προστασία τόσο για το προσωπικό κατά τη διεξαγωγή εργασιών συντήρησης όσο και για τους καταναλωτές από απαγορευτικά επίπεδα τάσης και συχνότητας.

Η αυτόματη διεπαφή απομόνωσης αποτελείται από δύο ανεξάρτητα μεταξύ τους συστήματα συνδεδεμένα σε σειρά, κάθε ένα από τα οποία επιτηρεί σε συνεχή βάση την ποιότητα του συνδεδεμένου δικτύου, ελέγχοντας την τάση, τη συχνότητα και τη σύνθετη αντίστασή του. Το παραπάνω πρότυπο έχει αναθεωρηθεί και σήμερα ισχύει το **VDE 0126-1-1** το οποίο προβλέπει διεύρυνση των ορίων ενεργοποίησης της διεπαφής (δηλαδή διεύρυνση των ορίων σύνθετης αντίστασης, τάσης και συχνότητας δικτύου). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αυξημένη διαθεσιμότητα των αντιστροφέων και συνεπώς την αυξημένη απόδοση της συνολικής εγκατάστασης.

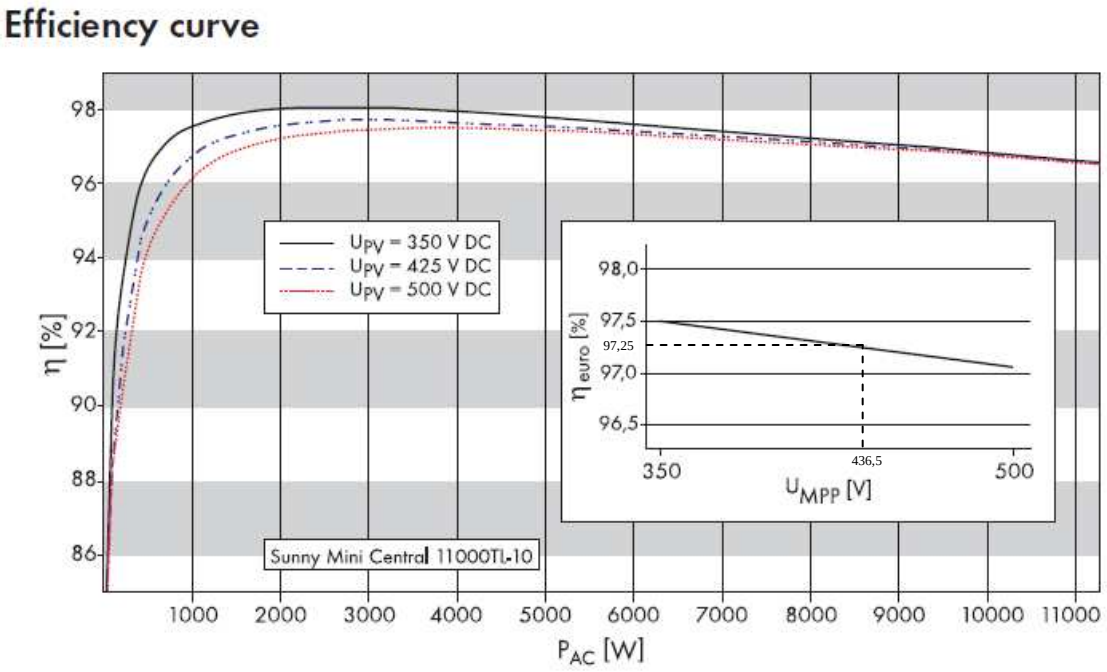
4.5.2 Συντελεστής απόδοσης αντιστροφέα και εκτιμώμενη ετήσια απώλεια ενέργειας [3], [29]

Η απόδοση του αντιστροφέα είναι άμεσα εξαρτημένη από την DC ισχύ στην είσοδό του αλλά και από την τάση λειτουργίας της συστοιχίας. Μείωση της ισχύος εισόδου συνεπάγεται και μείωση της απόδοσης. Λόγω της συχνής μεταβολής της ηλιακής ακτινοβολίας, ο αντιστροφέας λειτούργει διαρκώς υπό διαφορετικό φορτίο. Για το κλίμα της Κεντρικής Ευρώπης το μεγαλύτερο ποσοστό της ενέργειας παράγεται για μέσες τιμές ακτινοβολίας. Για το λόγο αυτό οι κατασκευαστές βελτιστοποιούν τους αντιστροφείς για μέγιστη απόδοση σε μερικό φορτίο.

Για την ποσοτικοποίηση του βαθμού απόδοσης του αντιστροφέα χρησιμοποιείται ο συντελεστής **Euro efficiency n_{Euro}**. Ο συντελεστής αυτός λαμβάνει υπ' όψιν τις διαφορετικές συνθήκες φορτίου και υπολογίζεται από τη σχέση:

$$n_{Euro} = 0,03 \cdot n_{5\%} + 0,06 \cdot n_{10\%} + 0,13 \cdot n_{20\%} + 0,10 \cdot n_{30\%} + 0,48 \cdot n_{50\%} + 0,2 \cdot n_{100\%}$$

Οι ποσότητες $n_{5\%}$, $n_{10\%}$, $n_{20\%}$, $n_{30\%}$, $n_{50\%}$ και $n_{100\%}$ αναφέρονται στη λειτουργία υπό φορτίο ίσο με 5%, 10%, 20%, 30%, 50% και 100% του ονομαστικού φορτίου αντίστοιχα και προσδιορίζονται από τη σχήμα 4.5. Παρόλα αυτά, από τη στιγμή που μας παρέχεται και το διάγραμμα n_{Euro} - V_{mpp} μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε αυτό για τον τελικό προσδιορισμό του συντελεστή απόδοσης.



Σχήμα 4.5 Καμπύλες απόδοσης αντιστροφές σε σχέση με την τάση V_{mpp} και της ισχύος εξόδου P_{AC}

Για στοιχειοσειρά 15 πλαισίων η τάση μέγιστης ισχύος είναι **Vmpp=436,5V** και ο συντελεστής απόδοσης $\mathbf{n_{Euro}}$**=97,25%.**

Στην παράγραφο 3.9 υπολογίσαμε ότι η ετήσια παραγωγή ενός σταθμού με μικρούς αντιστροφείς είναι **2.588,5MWh**. Επίσης πρέπει να αφαιρεθούν οι απώλειες των καλωδίων DC (διατομής $6mm^2$) που είναι **13,73MWh**. Επομένως, στους αντιστροφείς, κάθε χρόνο χάνεται ενέργεια ίση με:

$$(2.588,5-13,73)\cdot(1-0,9725)=70,8\,MWh/\acute{\varepsilon}\tau o\varsigma$$

Για κάθε αντιστροφέα δηλαδή θα έχουμε:

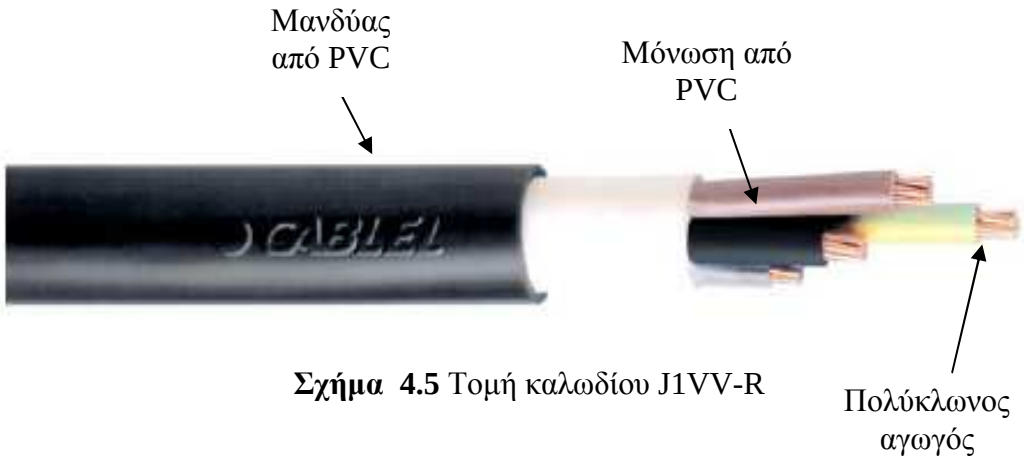
$$\frac{70,8}{156}\cong 0,454 MWh/\acute{\varepsilon}\tau o\varsigma$$

4.6 Διασύνδεση αντιστροφέων σε πίνακα Χαμηλής Τάσης [12]

Η κάθε ομάδα των αντιστροφέων συνδέεται ηλεκτρικά σε πίνακα Χαμηλής Τάσης δημιουργόντας ένα τριφασικό σύστημα. Το μονογραμμικό διάγραμμά των συνδέσεων φαίνεται στο σχέδιο **"Μονογραμμικό Διάγραμμα Χαμηλής Τάσης 1"**. Μέσα στον πίνακα προβλέπονται 3 ζυγοί για τη δημιουργία των φάσεων R,S και T αντίστοιχα, ένας ζυγός σύνδεσης όλων των ουδέτερων αγωγών και ένας ισοδυναμικός ζυγός σύνδεσης των γειώσεων. Ο τελευταίος θα συνδέεται με το κεντρικό σύστημα γείωσης του Φ/Β σταθμού.

Η σύνδεση του κάθε αντιστροφέα στον πίνακα γίνεται με καλώδιο Χαμηλής Τάσης τύπου **J1VV-R** και διατομής που θα προσδιοριστεί στη συνέχεια. Το καλώδιο αυτό έχει τις ακόλουθες προδιαγραφές:

- **J**: το καλώδιο χαρακτηρίζεται κατά IEC (IEC 502)
- **1**: το καλώδιο είναι κατασκευασμένο για τάσεις λειτουργίας 600/1000V
- **V**: η μόνωση του αγωγού είναι από PVC
- **V**: ο εξωτερικός μανδύας είναι από PVC
- **F**: ο αγωγός είναι πολύκλωνος



Σχήμα 4.5 Τομή καλωδίου J1VV-R

Το καλώδιο αυτό χαρακτηρίζεται από τα πρότυπα ΕΛΟΤ 843, ΕΛΟΤ 1099 και IEC 60502. Είναι βαρέως τύπου και κατασκευασμένα να αντέχουν σε ενταφιασμό, στο νερό και στον αέρα σε συνθήκες εξωτερικού χώρου όπως στην παρούσα εφαρμογή.

Η μέγιστη επιτρεπόμενη διαρκής φόρτιση του καλωδίου υπολογίζεται όπως και στην παράγραφο 4.3.5. Έτσι έχουμε:

- $\mathbf{f_\theta}$ ίσο με **0,87** για θερμοκρασία περιβάλλοντος 40^{o}C και μόνωση από PVC
- $\mathbf{f_n}$ ίσο με **0,78** διότι βρίσκονται πάνω σε σχάρες καλωδίων

Επιπλέον γνωρίζουμε το αναμενόμενο ρεύμα που θα διαρρέει το καλώδιο:

$$P_{AC} = V_\pi \cdot I \cdot \cos(\varphi) \Rightarrow \mathrm{I} = \frac{11000}{230 \cdot 1} \cong 47,83\,A$$

Επομένως χρειαζόμαστε καλώδιο που να αντέχει σε διαρκή φόρτιση ίση με:

$$\frac{47,83\,A}{0,87 \cdot 0,78} \cong 70,5\,A$$

Το καλώδιο που είναι κατάλληλο γι' αυτή την εφαρμογή θα έχει 3 αγωγούς (φάση, ουδέτερο και γείωση) ενώ οι ενεργοί του αγωγοί θα είναι μόνο η φάση και ο ουδέτερος. Σύμφωνα με τους πίνακες του προτύπου HD 384 η κατάλληλη διατομή καλωδίου είναι **16mm^2** με όριο φόρτισης στους 30^{o}C τα **94A**.

Λόγω της μικρής απόστασης των αντιστροφέων από τον πίνακα το καλώδιο αυτό θα έχει σχετικά μικρό μήκος (πίνακας 4.8).

Ομάδα 9 αντιστροφέων		**Ομάδα 3 αντιστροφέων**	
Inv 1	5,6 m	**Inv 1**	1,8 m
Inv 2	4,6 m	**Inv 2**	2,8 m
Inv 3	3,7 m	**Inv 3**	3,7 m
Inv 4	2,8 m	-	-
Inv 5	1,8 m	-	-
Inv 6	1,8 m	-	-
Inv 7	2,8 m	-	-
Inv 8	3,7 m	-	-
Inv 9	4,6 m	-	-
Σύνολο	**31,4 m**	**Σύνολο**	**8,3 m**

Πίνακας 4.8

Συνολικά, για όλο το σταθμό θα χρειαστούν 31,4m·16+8,3m·4=**536m**. Με παρόμοιο τρόπο όπως και στο καλώδιο DC μπορούμε να υπολογίσουμε τις ετήσιες απώλειες ενέργειας. Η αντίσταση του καλωδίου στους 70^{o}C δίνεται από τους αντίστοιχους πίνακες και είναι **1,38 Ω/km**. Οι συνολικές απώλειες ενέργειας είναι **4,94MWh/έτος**.

Για την πτώση τάσης πάνω στο καλώδιο εξετάζουμε το μεγαλύτερο απαιτούμενο μήκος που είναι 5,6m. Η συνολική διαδρομή του ρεύματος σε μονοφασικό κύκλωμα είναι η διπλάσια της απόστασης του καλωδίου και έτσι έχουμε:

$$V_{Drop} = I_{nom} \cdot R_{70^o C}(\Omega / km) \cdot L(km) = 47,83 \cdot 1,38 \cdot 0,0112 = 0,74V$$

$$\Delta V(\%) = (1 - \frac{V_{nom} - V_{Drop}}{V_{nom}}) \cdot 100\% = (1 - \frac{230 - 0,74}{230}) \cdot 100\% \cong 0,32\%$$

Όμοια για τις απώλειες ισχύος έχουμε:

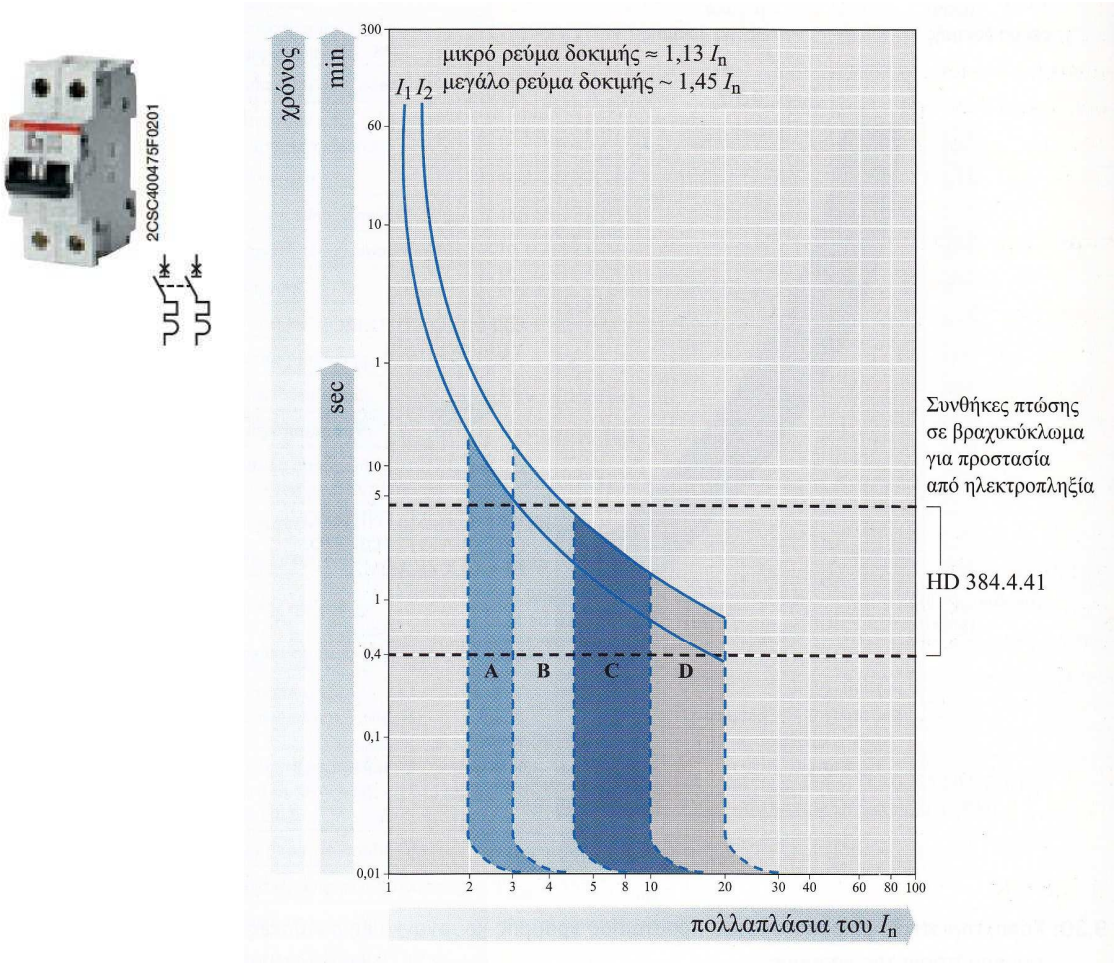
$$P_{loss} = I^2{}_{nom} \cdot R_{70^o C}(\Omega / km) \cdot L(km) = 47,83^2 \cdot 1,38 \cdot 0,0112 = 35,36W$$

$$P_{loss}(\%) = \frac{35,36}{11000} \cdot 100\% \cong 0,32\%$$

Επομένως, από τη στιγμή που δεν ξεπερνάμε τα όρια πτώσης τάσης και απωλειών ισχύος, η διατομή που επιλέξαμε είναι κατάλληλη.

4.7 Προστασίες στον πίνακα Χαμηλής Τάσης [42]

Η AC πλευρά κάθε αντιστροφέα μπορεί να απομονωθεί από το υπόλοιπο σύστημα με τη χρήση μικροαυτόματου διακόπτη ισχύος με απόζευξη. Ο διακόπτης αυτός θα είναι διπολικός (απόζευξη φάσης και ουδετέρου) με ονομαστικό ρεύμα λειτουργίας **In** μεγαλύτερο του ρεύματος του αντιστροφέα, δηλαδή **50 A** ή ακόμα καλύτερα **63A**. Ο διακόπτης αυτός τηρεί τις προδιαγραφές IEC/EN 60898. Επίσης, η θερμική επαφή που φέρει προστατεύει το καλώδιο από υπερφόρτιση ή βραχυκύκλωμα και μπορούμε να επιλέξουμε να ανταποκρίνεται βάσει της καμπύλης τύπου B, τυπική καμπύλη για εγκαταστάσεις τροφοδοσίας που δεν τροφοδοτούνται κινητήρες.



Σχήμα 4.6 Σχηματική απεικόνιση και καμπύλες μικροαυτόματου

Τέλος, με τη χρήση διακόπτη φορτίου απομονώνουμε τον πίνακα Χαμηλής Τάσης από το υπόλοιπο κύκλωμα. Το ονομαστικό ρεύμα λειτουργίας του πρέπει να είναι μεγαλύτερο των **143,5A** (3·ονομαστικό ρεύμα AC του κάθε αντιστροφέα). Τα χαρακτηριστικό του παρουσιάζονται στον πίνακα 4.9

Χαρακτηριστικά διακόπτη φορτίου/αποζεύκτη	
Πρότυπο περιγραφής	EN 60204, EN 60947-3
Ονομαστικό ρεύμα λειτουργίας In (A)	160A
Ονομαστική τάση λειτουργίας (V)	690V
Αριθμός πόλων	4
Κατηγορία χρήσης	AC-22: χειρισμοί μικτών φορτίων ωμικών - επαγωγικών συμπεριλαμβανομένης μικρής υπερφόρτισης

Πίνακας 4.9

Σχήμα 4.7 Διακόπτης φορτίου - αποζεύκτης της σειράς OT (OT160) της ABB

4.8 Διασύνδεση των πινάκων Χαμηλής Τάσης με τους Υ/Σ ανύψωσης [12],[21]

Οι υποπίνακες Χαμηλής Τάσης συνδέονται με τους Υ/Σ ανύψωσης μέσω καλωδίων τύπου **J1VV-R** που οδεύουν σε χαντάκι τύπου Α (σχέδιο **"Τομές χαντακιών 1"**). Στο τμήμα του χαντακιού κοντά στον Υ/Σ οδεύουν συνολικά 5 κυκλώματα καλωδίων προερχόμενα από τους αντίστοιχους πίνακες της κάθε ομάδας. Τα κυκλώματα είναι σε τοπολογία αστέρα, αποτελούνται δηλαδή από τρεις αγωγούς φάσεων (R,S,T) και έναν αγωγό ουδετέρου (N). Το μονογραμμικό διάγραμμα της διασύνδεσης των πινάκων Χ.Τ. με τον Υ/Σ ανύψωσης φαίνεται στο σχέδιο **"Μονογραμμικό διάγραμμα Χ.Τ./Μ.Τ. 1"**.

Αφού τα καλώδια οδεύουν στο έδαφος χρησιμοποιούμε τους αντίστοιχους συντελεστές μείωσης f_θ, f_c και f_i του προτύπου HD384 για τον υπολογισμό της κατάλληλης διατομής. Το μέγιστο ρεύμα που θα διαρρέει την κάθε φάση θα είναι 3 φορές το ονομαστικό ρεύμα AC του κάθε αντιστροφέα, δηλαδή **Io=143,5A**. Ο συντελεστής f_c, όπως και στην παράγραφο 4.3.5 έχει τιμή **1,18**. Ο συντελεστής f_θ, για θερμοκρασία εδάφους 25^{o}C και για καλώδιο με μόνωση από PVC, έχει τιμή **0,95**. Τέλος, ο συντελεστής f_i προσδιορίζεται για **5 κυκλώματα** του οδεύουν σε **οχετούς** μέσα στο έδαφος και σε απόσταση περίπου 15cm μεταξύ τους. Ο συντελεστής διόρθωσης είναι περίπου **0,72**. Άρα έχουμε:

$$\frac{143,5\,A}{1,18\cdot 0,95\cdot 0,72}\cong 177,8\,A$$

Σύμφωνα με τους πίνακες του προτύπου HD 384, για καλώδιο Χαμηλής Τάσης εγκατεστημένο στο έδαφος με μόνωση από PVC και 3 φορτιζόνενους αγωγούς, η κατάλληλη διατομή είναι **95mm^2**.

Για τον προσδιορισμό της διατομής A_N του ουδετέρου θεωρούμε ότι το τριφασικό σύστημα είναι γενικά συμμετρικό σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας κάτι που προσεγγίζει κατά πολύ την αλήθεια αφού όλοι οι αντιστροφείς θα λειτουργούν σχεδόν στην ίδια ισχύ για την ίδια χρονική στιγμή της ημέρας. Σύμφωνα με τον κανονισμό HD384.5.524 για διατομές φάσεων μικρότερες των 16mm^2 η διατομή του ουδετέρου πρέπει να είναι ίδια με τη διατομή της φάσης. Για διατομές μεγαλύτερες των 16mm^2 ισχύει:

- $A_N=A_R=A_S=A_T$ για φορτία μη ηλεκτρονικά ισχύος όπως γραφεία και βιομηχανία
- $A_N=0,5A_R=0,5A_S=0,5A_T$ για γραμμικά φορτία

Για τη συγκεκριμένη εφαρμογή η διατομή του αγωγού του ουδετέρου θα είναι μισή από αυτή των φάσεων δηλαδή **50mm^2**.

Το συνολικό μήκος του καλωδίου 3x95+50mm^2 υπολογίζεται με τη βοήθεια του σχεδίου **"Τοπογραφικό διάγραμμα 1"** με όπου και είναι εύκολο να μετρηθούν οι αποστάσεις. Για τις διάφορες ομάδες συστοιχιών θα έχουμε:

Ομάδα Α		**Ομάδα Β**		**Ομάδα Γ**		**Ομάδα Δ**	
Πίνακας Α1→Υ/Σ Α	68,1m	Πίνακας Β1→Υ/Σ Β	39,3m	Πίνακας Γ1→Υ/Σ Γ	68,1m	Πίνακας Δ1→Υ/Σ Δ	39,3m
Πίνακας Α2→Υ/Σ Α	96m	Πίνακας Β2→Υ/Σ Β	67m	Πίνακας Γ2→Υ/Σ Γ	96m	Πίνακας Δ2→Υ/Σ Δ	67m
Πίνακας Α3→Υ/Σ Α	123,4m	Πίνακας Β3→Υ/Σ Β	95m	Πίνακας Γ3→Υ/Σ Γ	123,4m	Πίνακας Δ3→Υ/Σ Δ	95m
Πίνακας. Α4→Υ/Σ Α	151,1m	Πίνακας Β4→Υ/Σ Β	122,3m	Πίνακας Γ4→Υ/Σ Γ	151,1m	Πίνακας Δ4→Υ/Σ Δ	122,3m
Πίνακας Α5→Υ/Σ Α	169,5m	Πίνακας Β5→Υ/Σ Β	141m	Πίνακας Γ5→Υ/Σ Γ	169,5m	Πίνακας Δ5→Υ/Σ Δ	141m
						Σύνολο	**2146m**

Πίνακας 4.10

Για τον υπολογισμό των ορίων τάσης και ισχύος γνωρίζουμε ότι η αντίσταση του καλωδίου στους 70°C είναι **0,232Ω/km** ενώ η αυτεπαγωγή λειτουργίας **0,253mH/km**. Δηλαδή **R=0,232Ω/km** και **X=ω·L=2π·f·L=0,0795Ω/km**. Οι απώλειες ισχύος και η πτώση τάσης για τα μήκη του πίνακα 4.10 δίνονται από τις σχέσεις:

$$P_{loss} = 3 \cdot I^2{}_{nom} \cdot R_{70^o C}(\Omega / km) \cdot L(km)$$

$$\frac{\Delta U}{U} = \frac{L(\Omega / km) \cdot (R + X \tan\varphi) \cdot P}{U^2}$$

όπου U η πολική τάση του συστήματος, P η τριφασική ισχύς και φ η γωνία του συντελεστή ισχύος. Επειδή οι αντιστροφείς λειτουργούν με συντελεστή ισχύος 1 η γωνία φ είναι μηδέν. Για τα μήκη του πίνακα 4.10 έχουμε:

Μήκος	Πτώση τάσης (V)	Πτώση τάσης (%)	Απώλειες ισχύος (W)	Απώλειες ισχύος (%)
68,1m	3,92	0,98	976	0,98
96m	5,48	1,37	1375,9	1,39
123,4m	7,08	1,77	1768,6	1,79
151,1m	8,68	2,17	2165,6	2,19
169,5m	3,24	0,81	269,9	0,82
39,3m	2,24	0,56	563,3	0,57
67m	3,84	0,96	960,3	0,97
95m	5,44	1,36	1361,6	1,37
122,3m	7,04	1,76	1752,8	1,77
141m	2,70	0,67	224,5	0,68

Κυκλώματα με 1 αντιστροφέα ανά φάση

Πίνακας 4.11

Όπως και στην παράγραφο 4.3.4 μπορούμε να υπολογίσουμε τις απώλειες ενέργειας του καλωδίου με χρήση της αναλυτικής περιγραφής του συντελεστή Euro-efficiency. Οι απώλειες ενέργειας είναι **33,36MWh/έτος**. Όπως φαίνεται από τα στοιχεία του πίνακα 4.11 στις περισσότερες περιπτώσεις δεν ικανοποιούνται οι περιορισμοί ισχύος και πτώσης τάσης (≤1%). Αυτό δεν είναι απαγορευτικό βάση του προτύπου HD 384.525.1 που συνιστά η πτώση τάσης να μην υπερβαίνει το 4%. Σε σχέση με τις απώλειες ισχύος χρειάζεται μια επιπλέον διερεύνηση για να αποφασίσουμε αν είναι συμφέρουσα η εγκατάσταση καλωδίου μεγαλύτερης διατομής.

Αν χρησιμοποιήσουμε καλώδιο J1VV-R διατομής 3x120+70mm^2 και αντίστασης **0,184 Ω/km** ο πίνακας 4.11 και οι απώλειες ενέργειας μεταβάλλονται ως εξής:

Μήκος	Πτώση τάσης (V)	Πτώση τάσης (%)	Απώλειες ισχύος (W)	Απώλειες ισχύος (%)
68,1m	3,10	0,78	774,1	0,78
96m	4,40	1,09	1091,2	1,10
123,4m	5,62	1,40	1402,7	1,42
151,1m	6,88	1,72	1717,5	1,73
169,5m	2,57	0,64	214	0,65
39,3m	1,79	0,45	446,7	0,45
67m	3,05	0,76	761,6	0,77
95m	4,33	1,08	1079,9	1,09
122,3m	5,57	1,39	1390,2	1,40
141m	2,14	0,54	178,1	0,54

Κυκλώματα με 1 αντιστροφέα ανά φάση

Πίνακας 4.12

Οι απώλειες ενέργεια είναι **26,46MWh/έτος**, δηλαδή επιτυγχάνεται εξοικονόμηση **6,9MWh/έτος**.

Διατομή	Κόστος (€/m)	Απαιτούμενο μήκος (m)	Συνολικό κόστος (€)
3x95+50mm^2	70,51	2.146	151.314 €
3x120+70mm^2	92,24		193.655€
		Επιπλέον κόστος	**42.341 €**

Πίνακας 4.13

Ο χρόνος που απαιτείται για την απόσβεση του επιπλέον κόστους του καλωδίου διατομής 3x120+70mm^2 είναι:

$$T = \frac{Επιπλέον\ Κόστος}{(Εξοικ.Ενέργεια/Έτος)\cdot Τιμή\ Ενέργειας} \cong 15,1 έτη$$

που είναι πολύ μεγάλος σε σχέση με τη διάρκεια ζωής του σταθμού (περίπου 25 έτη). Επομένως, καταλήγουμε στη χρήση του καλωδίου **J1VV-R διατομής 3x95+50mm^2**.

4.9 Περιγραφή του Υ/Σ ανύψωσης 0,4/20KV [40],[41]

4.9.1 Γενικά στοιχεία

Στον Φ/Β σταθμό θα εγκατασταθούν 4 Υ/Σ ανύψωσης 0,4/20kV, ένας για κάθε ομάδα συστοιχιών όπως φαίνεται και στο σχέδιο **"Τοπογραφικό διάγραμμα 1"**. Οι Υ/Σ είναι τύπου LR-73 και κατασκευάζονται από την εταιρείες Schneider-Electric. Αποτελούνται από:

- Περίβλημα κατασκευασμένο από γαλβανισμένη λαμαρίνα
- Το διαμέρισμα Μέσης Τάσης καθώς και τον πίνακα Μέσης Τάσης
- Το διαμέρισμα του Μ/Σ διανομής
- Το διαμέρισμα Χαμηλής Τάσης καθώς και τον πίνακα Χαμηλής Τάσης
- Τις απαραίτητες εσωτερικές συνδέσεις μεταξύ των διαμερισμάτων και των πεδίων

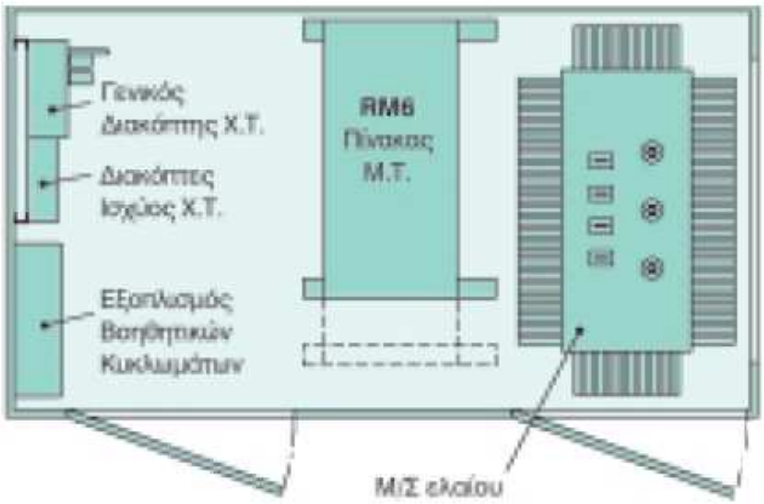
Τα πρότυπα και οι προδιαγραφές βάση των οποίων έχει σχεδιαστεί, κατασκευαστεί και δοκιμαστεί ο Υ/Σ παρουσιάζονται στον πίνακα 4.14

Πρότυπα κατασκευής, σχεδιασμού και δοκιμών Υ/Σ LR-73	
Κοινές προδιαγραφές για πίνακες Μέσης Τάσης	IEC 60694
Πίνακες Μέσης Τάσης με μεταλλικό περίβλημα (1εως 52kV)	IEC 60298
Αποζεύκτης και γειωτής	IEC 60129
Διακόπτης φορτίου Μέσης Τάσης AC	IEC 60265
Συνδυασμένοι διακόπτες με ασφάλειες	IEC 60420
Ασφάλειες Μέσης Τάσης	IEC 60282-1
Διαδικασίες δοκιμών Υψηλής Τάσης	IEC 60060
Μετασχηματιστές ισχύος	IEC 60076
Πίνακες Χαμηλής Τάσης	IEC 60439-1
Προκατασκευασμένοι Υ/Σ Μ.Τ./Χ.Τ.	IEC 1330
Δείκτης προστασίας περιβλημάτων	IEC 5329

Πίνακας 4.14

Στη συνέχεια ακολουθεί φωτογραφία του Υ/Σ καθώς και κάτοψη αυτού.

Σχήμα 4.8 Συνεπτυγμένος Υ/Σ LR 73 της εταιρείας Schneider-Electric



Σχήμα 4.9 Χωροθέτηση ηλεκτρολογικού εξοπλισμού του σταθμού

Συγκεντρωτικά, τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του Υ/Σ και των πεδίων Μέσης και Χαμηλής Τάσης, παρουσιάζονται στο παράρτημα τεχνικών προδιαγραφών του χρησιμοποιούμενου εξοπλισμού.

4.9.2 Διαμέρισμα Χαμηλής Τάσης

Εδώ βρίσκεται ο πίνακας Χαμηλής Τάσης πάνω στον οποίο παραλληλίζονται τα κυκλώματα των πινάκων των συστοιχιών. Για την προστασία από βραχυκυκλώματα ή υπερφόρτιση χρησιμοποιούνται 5 διακόπτες ισχύος. Οι διακόπτες ισχύος χρησιμοποιούνται σαν μέσο ζεύξης και έχουν την ικανότητα να διακόψουν ή να ζεύξουν ένα φορτίο τόσο σε συνθήκες ομαλής λειτουργίας όσο και σε συνθήκες βραχυκυκλώματος. Δεν χρησιμοποιούνται όμως για ζεύξεις και αποζεύξεις φορτίου αφού κατασκευάζονται για λίγους κύκλους λειτουργίας.

Ο διακόπτης που θα επιλέξουμε πρέπει να είναι ονομαστικού ρεύματος λειτουργίας πάνω από 143,5A, δηλαδή το ονομαστικό ρεύμα τριών αντιστροφέων που σχηματίζουν μια φάση. Επίσης, η τάση λειτουργίας πρέπει να είναι πάνω από 400V. Ενδεικτικά επιλέγεται ο διακόπτης Compact NS 160N της εταιρείας Merlin Gerin με βασικά χαρακτηριστικά:

Χαρακτηριστικά διακόπτη MG Compact NS 160N	
Πρότυπα κατασκευής	IEC 60947-2, EN 60947-2
Αριθμός πόλων	4P
Ονομαστικό ρεύμα In	160A
Τάση λειτουργίας Ue	690AC/500DC
Συστήματα ενεργοποίησης	Θερμικό & Ηλεκτρομαγνητικό
Ρεύμα βραχυκύκλωσης Icu	36kA/1sec

Πίνακας 4.15

Μετά τον παραλληλισμό των 5 κυκλωμάτων παρεμβάλλεται πολυόργανο για τον παρακολούθηση ηλεκτρικών μεγεθών. Το πολυόργανο συνοδεύεται από τους αντίστοιχους μετασχηματιστές τάσης και έντασης με τη βοήθεια των οποίων καταγράφονται οι μετρήσεις. Ενδεικτικά αναφέρεται το πολυόργανο Powerlogic PM710 της Merlin Gerin με χαρακτηριστικά που αναφέρονται στον πίνακα 4.16:

Χαρακτηριστικά πολυόργανου MG Powerlogic PM710
• Μέτρηση ρεύματος (I1, I2, I3, I_N)
• Μέτρηση ρεύματος μεγίστου
• Μέτρηση πολικής τάσης
• Μέτρηση συχνότητας
• Μέτρηση συνημιτόνου cosφ
• Μέτρηση ενεργού, αέργου και φαινομένης ισχύος και ενέργειας
• Μέτρηση αρμονικών ρεύματος
• Μέτρηση αρμονικών τάσης

Πίνακας 4.16

Τέλος, όλο το κύκλωμα ασφαλίζεται με έναν αυτόματο διακόπτη ισχύος και οδηγείται στο διαμέρισμα του μετασχηματιστή στη χαμηλή τάση όπως φαίνεται και στο σχέδιο **"Μονογραμμικό διάγραμμα Χ.Τ./Μ.Τ. 1"**. . Ο διακόπτης αυτός είναι επίσης της σειράς Compact της εταιρείας Merlin Gerin και τύπου NS 1000N και έχει χαρακτηριστικά:

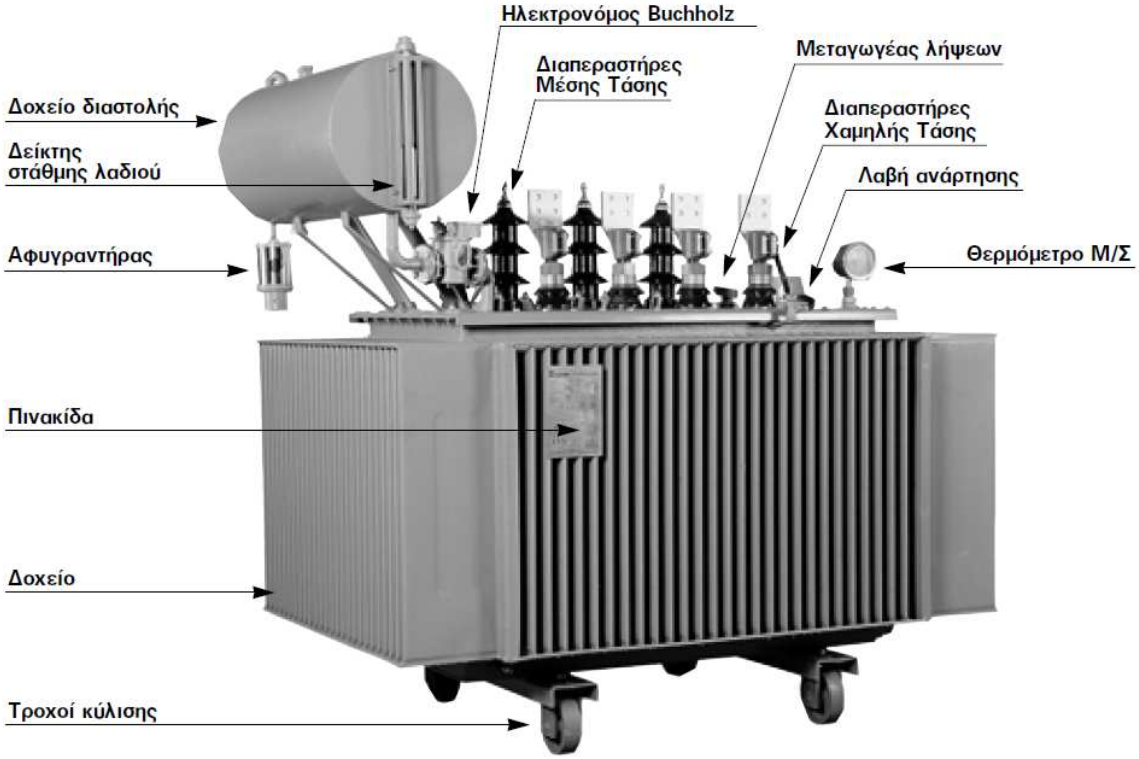
Χαρακτηριστικά διακόπτη MG Compact NS 1000N	
Πρότυπα κατασκευής	IEC 60947-2, EN 60947-2
Αριθμός πόλων	4P
Ονομαστικό ρεύμα In	1000A
Τάση λειτουργίας Ue	690AC
Ρεύμα βραχυκύκλωσης Icu	50kA/1sec
Μονάδα ελέγχου	Micrologic 5.0 από όπου ρυθμίζονται όλες οι παράμετροι προστασίας

Πίνακας 4.17

Το εγχειρίδιο του διακόπτη βρίσκεται στο τμήμα με τα εγχειρίδια των κατασκευαστών του ηλεκτρολογικού εξοπλισμού.

4.9.3 Διαμέρισμα Μετασχηματιστή [12],[40]

Για την ανύψωση της τάσης χρησιμοποιείται μετασχηματιστής ανύψωσης 0,4/20kV. Συνήθως οι μετασχηματιστές επιλέγονται ελαιόψυκτοι εκτός αν υπάρχουν ειδικές συνθήκες περιβάλλοντος όπως για παράδειγμα απαιτήσεις για αποφυγή μόλυνσης περιβάλλοντος ή εύφλεκτα υλικά και κίνδυνο πυρκαγιάς. Για το ελληνικό σύστημα η συνδεσμολογία τους συνίσταται να είναι Dyn11 ή Dyn5, συνδεσμολογίες αποδεκτές και από τη ΔΕΗ.



Σχήμα 4.9 Μετασχηματιστής διανομής λαδιού

Η τάση του εκλέγεται ώστε μελλοντικά να είναι συμβατή με όλα τα δίκτυα Μέσης Τάσης, δηλαδή στα 20kV. Συνίσταται επίσης μεταβλητός λόγος τάσεων ο οποίος επιτυγχάνεται με ειδικό μεταγωγό που αλλάζει τον αριθμό των σπειρών από την πλευρά της Μέσης Τάσης όπου το ρεύμα είναι και μικρότερο. Ο λόγος μετασχηματισμού είναι συνήθως ±2,5 και ±5%.

Τα πρότυπα από τα οποία περιγράφεται ένας μετασχηματιστής συγκεντρώνονται στον ακόλουθο πίνακα:

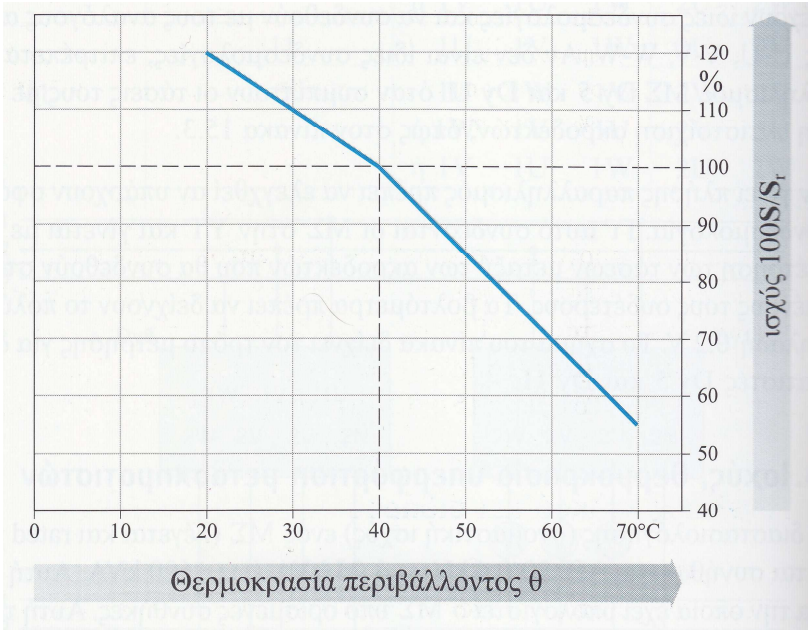
Προδιαγραφές κατασκευής Μετασχηματιστών	
Προδιαγραφή	**Περιγραφή**
IEC 76-1	Μ/Σ ισχύος: γενικά
IEC 76-2	Μ/Σ ισχύος: ανύψωση θερμοκρασίας
IEC 76-3	Μ/Σ ισχύος: επίπεδα μόνωσης και διηλεκτρικές δοκιμές
IEC 76-5	Μ/Σ ισχύος: δυνατότητα αντοχής σε βραχυκυκλώματα
IEC 137	Διαπεραστήρες για εναλλασσόμενες τάσεις πάνω από 1000V
IEC 354	Οδηγός φόρτισης Μ/Σ λαδιού
IEC 726	Μ/Σ ισχύος ξηρού τύπου
IEC 905	Οδηγός φόρτισης Μ/Σ ξηρού τύπου

Πίνακας 4.18

Για τη διαστασιολόγηση της ισχύος του Μ/Σ λαμβάνουμε υπ' όψιν τόσο το φορτίο που αυτός πρέπει να διαχειριστεί όσο και τις συνθήκες λειτουργίας του. Στη συγκεκριμένη εφαρμογή υποθέτουμε ότι δε θα γίνει επέκταση της ισχύος του σταθμού. Η ονομαστική ισχύς του Μ/Σ είναι και η ισχύς μέγιστης επιτρεπόμενης διαρκούς φόρτισής του (VDE0532) για τις ακόλουθες συνθήκες:

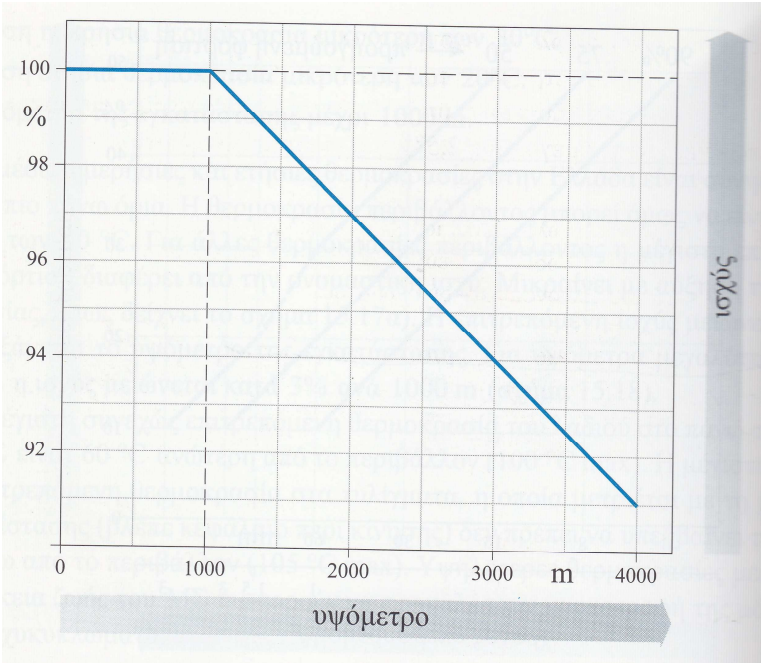
- Θερμοκρασία περιβάλλοντος μικρότερη των 40^{o}C
- Μέση ημερήσια θερμοκρασία μικρότερη των 30^{o}C
- Μέση ετήσια θερμοκρασία μικρότερη των 20^{o}C
- Υψόμετρο εγκατάστασης μέχρι 1000m.

Οι μέσες ημερήσιες και ετήσιες θερμοκρασίες στην Ελλάδα συνήθως βρίσκονται μέσα στα πιο πάνω όρια. Η θερμοκρασία περιβάλλοντος όμως μπορεί να διαφέρει από αυτή των 40^{o}C. Τότε η μέγιστη επιτρεπόμενη φόρτιση του Μ/Σ προσεγγίζεται από το διάγραμμα:



Σχήμα 4.10 Επί τοις εκατό φόρτισή του Μ/Σ σε σχέση με τη θερμοκρασία περιβάλλοντος

Η επιτρεπόμενη ισχύς μειώνεται επίσης καθώς αυξάνεται και το υψόμετρο της εγκατάστασης:



Σχήμα 4.11 Φόρτιση Μ/Σ σε σχέση με το υψόμετρο εγκατάστασης

Στην παρούσα εφαρμογή, κάθε Υ/Σ διαχειρίζεται ισχύ 500 kWp. Αυτό σημαίνει ότι η επιλογή ενός Μ/Σ των 500 KVA καλύπτει οριακά τις ανάγκες του σταθμού με επιπρόσθετο κίνδυνο τη δυσλειτουργία του ή και την καταστροφή του σε περίπτωση που οι συνθήκες θερμοκρασίας περιβάλλοντος και υψομέτρου δεν είναι οι κατάλληλες. Για το λόγο αυτό θα επιλεγεί Μ/Σ ονομαστικής ισχύος **630kVA**.

Σε σχέση με τις απώλειες, ο Μ/Σ έχει συνεχώς όσο είναι στο δίκτυο απώλειες λόγω μαγνητικής υστέρησης (απώλειες κενού ή σιδήρου). Επιπρόσθετα, ανάλογα με το φορτίο, έχουμε και ωμικές απώλειες που εξαρτώνται από το τετράγωνο του ρεύματος. Ισχύει η σχέση:

$$P_{\text{M}/\Sigma} = P_{Fe} + P_{Cu} \cdot \left(\frac{S}{S_{rated}} \right)^2$$

Για Μ/Σ ελαίου 630 kVA οι **απώλειες σιδήρου είναι 1300W ενώ οι απώλειες χαλκού 6500W**. Όπως και με τα καλώδια DC και AC, μπορούμε να υπολογίσουμε τις ετήσιες απώλειες ενέργειας στον Μ/Σ από τη σχέση:

$$E_{απωλ,\text{M}/\Sigma} = P_{Fe} \cdot 8760 + \sum_{i=1}^{6} P_{Cu} \cdot \left(\frac{n_i \cdot S}{S_r} \right)^2 \cdot t_i \cdot 4362 \ \ (Wh)$$

με τους συντελεστές n_i και t_i να ορίζονται όπως και στην παράγραφο 4.3.4. Επίσης, η τιμή της μεταβλητής S είναι 429kW, όση η μέγιστη ονομαστική ισχύς που μπορούν να αποδώσουν οι αντιστροφείς (39 αντιστροφείς) κάθε ομάδας. Η συνολικές απώλειες ενέργειας ανά μετασχηματιστή και ανά έτος υπολογίζονται ότι είναι **15,8MWh**. Συνολικά δηλαδή θα έχουμε απώλειες ενέργειας:

$$E_{απωλ,\ 4\text{M}/\Sigma} = 63,2\, MWh / έτος$$

4.9.4 Διαμέρισμα Μέσης Τάσης [40]

Στον κάθε Υ/Σ ανύψωσης, στο διαμέρισμα Μέσης Τάσης θα υπάρχουν 3 πεδία: Πεδίο εισόδου ή άφιξης από άλλον Υ/Σ, πεδίο διασύνδεσης και προστασίας του Μ/Σ και πεδίο αναχώρησης προς άλλον Υ/Σ ή τον οικίσκο ελέγχου. Για τις ανάγκες της εργασίας επιλέγεται να γίνει μελέτη με τον τύπο πεδίων RM6 της εταιρείας Schneider-Electric. Τα πεδία αυτά είναι εναρμονισμένα με τα ακόλουθα πρότυπα:

Προδιαγραφές κατασκευής πεδίων RM6	
Προδιαγραφή	**Περιγραφή**
IEC 60694	Κοινές προδιαγραφές για πίνακες Μέσης Τάσης
IEC 62271-200	Μεταλλοεπενδυμένοι πίνακες Μέσης Τάσης
IEC 60265-1	Διακόπτες φορτίου Μέσης Τάσης
IEC 62271-102	Αποζεύκτες και γειωτές AC
IEC 62271-100	Αυτόματοι διακόπτες Μέσης Τάσης
IEC 60529	Βαθμοί προστασίας μεταλλικού περιβλήματος (Κώδικας IP)

Πίνακας 4.19

Σχήμα 4.12 Πεδία διασύνδεσης RM6

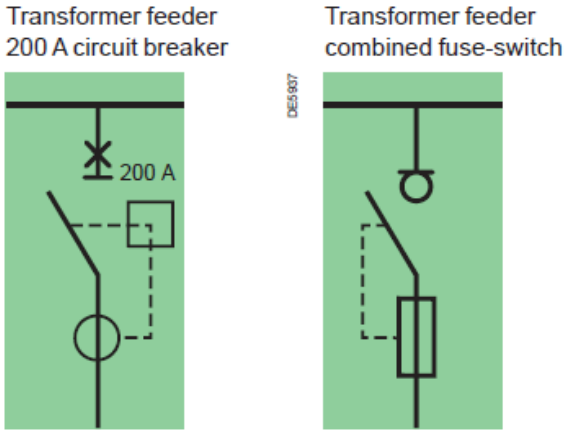
Πεδίο εισόδου (I): Στο πεδίο αυτό γίνεται άφιξη της γραμμής Μέσης Τάσης από άλλον Υ/Σ ανύψωσης. Στη συγκεκριμένη εφαρμογή έχουμε άφιξη του καλωδίου Μ.Τ. από τον Υ/Σ Β στον Α και από τον Υ/Σ Δ στον Γ. Αποτελείται από ένα διακόπτη φορτίου γραμμής με δυνατότητα απόζευξης (αποζεύκτης φορτίου) καθώς και από έναν γειωτή όπως φαίνεται και στο σχέδιο **"Μονογραμμικό διάγραμμα Χ.Τ./Μ.Τ. 1"**. Η διακοπή του κυκλώματος γίνεται μέσα σε θάλαμο σβέσης ο οποίος περιέχει αέριο SF6. Μετά το άνοιγμα του διακόπτη φορτίου, το καλώδιο γειώνεται μέσω της διάταξης του γειωτή. Ο χειρισμός της γείωσης του καλωδίου μπορεί να γίνει μόνο εφόσον έχει ανοίξει ο διακόπτης. Η τάση λειτουργίας του είναι 24kV και η αντοχή του σε βραχυκύκλωμα είναι 16kA για 1sec.

Ο τύπος πεδίου RM6 είναι σχεδιασμένος για δύο τιμές ονομαστικού ρεύματος λειτουργίας: 400A και 630A. Για τη συγκεκριμένη εφαρμογή έχουμε:

$$S = \sqrt{3} \cdot V_{\pi o \lambda} \cdot I_n \Rightarrow I_n = \frac{2.000.000}{\sqrt{3} \cdot 20.000} \cong 57,8A$$

επομένως γίνεται επιλογή του πεδίου ονομαστικού ρεύματος 400A.

Πεδίο διασύνδεσης Μ/Σ (Q): Στο πεδίο αυτό γίνεται η ζεύξη του Μ/Σ ισχύος καθώς και η προστασία του από τη μεριά της Μέσης Τάσης. Η προστασία του μετασχηματιστή μπορεί να γίνει με δύο τυποποιημένους τρόπους, με ασφάλειες Μέσης Τάσης ή με διακόπτες ισχύος, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 4.13 Τρόποι προστασίας Μ/Σ στη Μ.Τ.

Το πεδίο τύπου Q που επιλέγουμε προστατεύει το Μ/Σ με ασφάλειες σκόνης Μ.Τ. Το ονομαστικό ρεύμα συνεχούς λειτουργίας του είναι 200Α και είναι επαρκές αφού το μέγιστο ρεύμα που περιμένουμε από τον Μ/Σ είναι:

$$S = \sqrt{3} \cdot V_{\pi o \lambda} \cdot I_n \Rightarrow I_n = \frac{500.000}{\sqrt{3} \cdot 20.000} \cong 14,5A$$

Στο χώρο του ίδιου πεδίου περιλαμβάνεται ο αποζεύκτης φορτίου καθώς και δύο γειωτές, ένας σε κάθε πλευρά των ασφαλειών. Μεταξύ γειωτών και διακόπτη υπάρχει μηχανική μανδάλωση ώστε οι χειρισμοί να πραγματοποιούνται με συγκεκριμένη σειρά. Οι ασφάλειες μέσα στο θάλαμο τοποθετούνται σε σειρά με τον διακόπτη ώστε να επιτυγχάνεται η ακόλουθη λειτουργία: η τήξη μιας ασφάλειας απελευθερώνει ένα καψούλι (striker) που με τη σειρά του προκαλεί το τριφασικό άνοιγμα του διακόπτη και δεν επιτρέπει το επανα-κλείσιμό του. Το ονομαστικό ρεύμα των ασφαλειών προσδιορίζεται βάσει του ακόλουθου πίνακα για μετασχηματιστή 630kVA και τάση λειτουργίας 20kV.

Selection table

(Rating in A, no overload, – 25°C < θ < 40°C)

Fuse type	Operating voltage (kV)	Transformer rating (kVA) 50	75	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	Rated voltage (kV)
Fusarc CF and SIBA (1) (General case, IEC 60282-1 standard, IEC 62271-105 (to replace IEC 60420) and DIN 43625 standard)																		
	3	20	31.5	40	50	50	63	80	100	125 (2)	160 (1) (2)							12
	3.3	20	25	40	40	40	63	80	80	125 (2)	125 (2)	160 (1) (2)						
	4.2	20	25	25	40	50	50	63.5	80	80	100	125 (2)	160 (1) (2)					
	5.5	16	20	25	25	40	40	50	63	80	80	100	125 (2)	160 (1) (2)				
	6	16	20	25	25	31.5	40	50	50	63	80	100	125 (2)	160 (1) (2)				
	6.6	10	20	25	25	31.5	40	50	50	63	63	80	100	125 (2)	160 (1) (2)			
	10	10	10	16	20	25	25	31.5	40	50	50	63	80	100	125 (2)			
	11	10	10	16	20	20	25	25	40	40	50	50	63	80	100	125 (2)		
	13.8	10	10	10	16	16	20	25	31.5	40	40	50	50	63	100 (2)			24
	15	10	10	10	10	16	20	25	31.5	31.5	40	50	50	63	80	100 (2)		
	20	10	10	10	10	16	16	20	25	25	31.5	40	40	63	63	80	100 (2)	
	22	10	10	10	10	10	16	16	20	25	31.5	40	40	50	63	80	100 (2)	

Σχήμα 4.14 Πίνακας προσδιορισμού ονομαστικού ρεύματος ασφαλειών για το πεδίο του Μ/Σ

Προκύπτει ότι οι ασφάλειες που πρέπει να επιλεγούν είναι των **40Α**.

4.10 Περιγραφή του Υ/Σ ζεύξης και ελέγχου

4.10.1 Γενικά στοιχεία

Στον Φ/Β σταθμό θα εγκατασταθούν 1 Υ/Σ ζεύξης και ελέγχου όπως φαίνεται και στο σχέδιο **"Τοπογραφικό διάγραμμα 1"**. Ο Υ/Σ κατασκευάζεται από την εταιρεία Schneider-Electric και είναι κατάλληλος για να στεγάσει όλο τον απαραίτητο Η/Μ εξοπλισμό. Βασικά χαρακτηριστικά του είναι:

- Είναι κατασκευασμένος από γαλβανισμένη εν θερμώ λαμαρίνα και επενδυμένος ε-ξωτερικά με πλαστικοποιημένη λαμαρίνα η οποία αποτρέπει την οξείδωση και εξασφαλίζει ελάχιστες εργασίες συντήρησης.
- Διαμέρισμα Μέσης Τάσης με τα απαραίτητα πεδία
- Χώρος γραφείου με W.C και τον απαραίτητο ηλεκτρονικό εξοπλισμό (Η/Υ, fax κλπ)
- Σύστημα πυρανίχνευσης και στα δύο διαμερίσματα του οικίσκου καθώς και κεντρικό σύστημα συναγερμού.

4.10.2 Διαμέρισμα Μέσης Τάσης

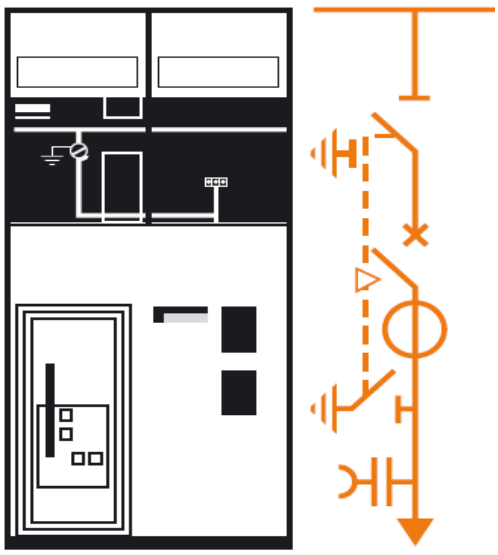
Το τμήμα του οικίσκου στο οποίο θα αναφερθούμε ιδιαίτερα είναι το διαμέρισμα Μέσης Τάσης. Στο διαμέρισμα αυτό έχουν τοποθετηθεί οι πίνακες Μέσης Τάσης οι οποίοι είναι τύπου SM6 της εταιρείας Schneider-Electric. Ο εξοπλισμός έχει σχεδιαστεί, κατασκευαστεί και ελεγχθεί σύμφωνα με τα πρότυπα:

Πρότυπα κατασκευής, σχεδιασμού και δοκιμών Πεδίων Μ.Τ. SM6	
Κοινές προδιαγραφές για πίνακες Μέσης Τάσης	IEC 60694
Πίνακες Μέσης Τάσης με μεταλλικό περίβλημα	IEC 60298
Αποζεύκτης και γειωτής	IEC 60129
Διακόπτης φορτίου Μέσης Τάσης AC	IEC 60265
Συνδυασμένοι διακόπτες με ασφάλειες	IEC 60420
Αυτόματος διακόπτης ισχύος Μέσης Τάσης AC	IEC 62271-100
Ρελέ Μέσης Τάσης AC	IEC 60470
Ασφάλειες Μέσης Τάσης	IEC 60282-1
Διαδικασίες δοκιμών Υψηλής Τάσης	IEC 60060
Μετασχηματιστές τάσης	IEC 60044-2
Μετασχηματιστές έντασης	IEC 60044-1
Συνδυασμένοι διακόπτες με ασφάλειες Μέσης Τάσης	IEC 60420

Ηλεκτρονόμοι προστασίας	IEC 60255
Δείκτης προστασίας περιβλημάτων	IEC 5329

Πίνακας 4.20

<u>Πεδία εισόδου από τους Υ/Σ (DM1-A)</u>: Θα χρησιμοποιηθούν δύο πεδία τύπου DM1-A για τη διασύνδεση των Υ/Σ ανύψωσης. Αποτελούνται από τον διακόπτη ισχύος, τον αποζεύκτη και τον γειωτή, εξαρτήματα αλληλομανδαλωμένα ώστε οι χειρισμοί σε αυτά να γίνονται πάντα με τη σωστή σειρά. Οι διακόπτες χρησιμοποιούν SF6 σαν μονωτικό και διακοπτικό μέσο και είναι κλειστού τύπου. Δεν χρειάζεται δηλαδή αναπλήρωση σε όλη τη διάρκεια της ζωής της μονάδας. Σαν μονάδα ελέγχου και προστασίας θα εγκατασταθεί στο πεδίο ηλεκτρονόμος τύπου SEPAM S40 της εταιρειας Merlin Gerin. Οι δυνατότητες που προσφέρει αυτή η μονάδα είναι:



- Προστασία του δικτύου και του φορτίου που τροφοδοτεί
- Έλεγχος του αυτόματου διακόπτη ισχύος
- Μέτρηση ηλεκτρικών μεγεθών (I,V,f,P,Q,cosφ)

Μέσω των κατάλληλων μετασχηματιστών τάσης και έντασης, ο ηλεκτρονόμος παρακολουθεί τη ηλεκτρικά μεγέθη του δικτύου και θέτει εκτός λειτουργίας το κύκλωμα όταν αυτά είναι εκτός προκαθορισμένων ορίων. Βασική λειτουργία είναι να θέσει σε λειτουργία τον Αυτόματο Διακόπτη Ισχύος όταν συμβεί βραχυκύκλωμα.

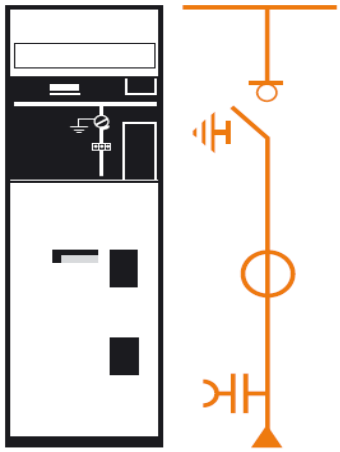
Το πεδίο τύπου DM1-A έχει τα ακόλουθα βασικά ηλεκτρικά χαρακτηριστικά:

- Ονομαστική τάση: 24kV
- Τάση λειτουργίας: 20kV
- Ονομαστικό ρεύμα μπαρών: 630A
- Ονομαστικό ρεύμα αποζεύκτη: 630A
- Αντοχή σε ρεύμα βραχυκύκλωσης: 16kA/1sec
- Ικανότητα διακοπής Αυτόματου Διακόπτη Ισχύος: 16kA

Πεδίο μετρήσεων τάσης (CM): Το πεδίο αυτό αποτελείται από έναν Μ/Σ τάσης ο οποίος μετασχηματίζει τη Μέση Τάση σε χαμηλή κατάλληλης τιμής ώστε να τροφοδοτηθούν τα μετρητικά όργανα. Το πεδίο μπορεί να απομονωθεί από το υπόλοιπο κύκλωμα με τη χρήση αποζεύκτη-γειωτή των 50A ενώ το πρωτεύον του Μ/Σ προστατεύεται με ασφάλειες των 6,3A. Τέλος, στο ίδιο πεδίο συνδέεται και το πολυόργανο PM850 με το οποίο γίνεται μέτρηση των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών της ισχύος που εγχέεται στο δίκτυο. Αυτό επιτυγχάνεται και με τη χρήση Μετασχηματιστή Ρεύματος στο πεδίο διασύνδεσης με το δίκτυο που περιγράφεται στη συνέχεια.

Σχήμα 4.15 Πολυόργανο μέτρησης PM 850

Πεδίο διασύνδεσης με το δίκτυο (IMC): Η διασύνδεση του Φ/Β σταθμού με το δίκτυο γίνεται με μέσω του πεδίου τύπου IMC το οποίο απεικονίζεται στο διπλανό σχήμα. Αποτελείται από έναν διακόπτη – αποζεύκτη φορτίου ονομαστικού ρεύματος 630A. Επιπλέον φέρει μετασχηματιστές ρεύματος 75-150/5-5A οι οποίοι τροφοδοτούν το πολυόργανο PM850 του πεδίου CM. Μερικά από τα κυριότερα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του πεδίου είναι:



- Ονομαστικό ρεύμα διακόπτη φορτίου: 630A
- Ονομαστική τάση: 24kV
- Τάση λειτουργίας: 20kV
- Αντοχή σε βραχυκύκλωμα: 16kA/1sec

4.11 Διασύνδεση των Υ/Σ ανύψωσης – Υπόγειο δίκτυο Μέσης Τάσης [43],[44]

Το δίκτυο Μέσης Τάσης του Φ/Β σταθμού αποτελείται από δύο ακτινικές υπόγειες γραμμές οι οποίες θα συνδέουν τους Υ/Σ ανύψωσης σειριακά ανά δύο και στη συνέχεια θα καταλήγουν στο κτίριο ζεύξης και ελέγχου.

Διασύνδεση των Υ/Σ ανύψωσης	
Γραμμή 1	Υ/Σ Β →Υ/Σ Α →Οικίσκος ζεύξης και ελέγχου
Γραμμή 2	Υ/Σ Δ →Υ/Σ Γ →Οικίσκος ζεύξης και ελέγχου

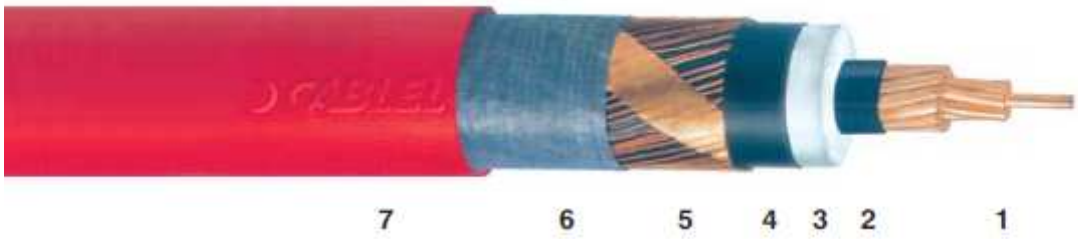
Πίνακας 4.21

Επιπλέον προβλέπεται εφεδρικός βρόχος ο οποίος αυξάνει τη διαθεσιμότητα του έργου σε περίπτωση που το κύριο καλώδιο Μ.Τ. υποστεί κάποια βλάβη. Ο βρόχος συνδέει τους Υ/Σ Β και Δ και τίθεται σε εφαρμογή με το κλείσιμο των διακοπτών φορτίου των αντίστοιχων πεδίων. Όταν δεν χρησιμοποιείται, το καλώδιο παραμένει γειωμένο μέσω διάταξης γειωτών. Στον πίνακα που ακολουθεί περιγράφεται η εναλλακτικά πορεία της ισχύος σε περίπτωση σφάλματος στο κύριο κύκλωμα Μ.Τ.

Σφάλμα στο κύριο κύκλωμα Μ.Τ.	
Σημείο σφάλματος	**Εναλλακτική πορεία ισχύος**
Μεταξύ Οικίσκου ελέγχου και Υ/Σ Α	Όλη η ισχύς διοχετεύεται στο δίκτυο μέσω της διαδρομής Υ/Σ Α → Υ/Σ Β → Εφεδρικός βρόχος → Υ/Σ Δ → Υ/Σ Γ → Οικίσκος ελέγχου
Μεταξύ Υ/Σ Α και Υ/Σ Β	Τα 500 kW διοχετεύονται στο δίκτυο απ' ευθείας από τον Υ/Σ Α ενώ τα υπόλοιπα 1500kW μέσω της διαδρομής Υ/Σ Β → Εφεδρικός βρόχος → Υ/Σ Δ → Υ/Σ Γ → Οικίσκος ελέγχου
Παρόμοιες διαδρομές ακολουθούνται σε περίπτωση σφάλματος μεταξύ Υ/Σ Δ και Υ/Σ Γ καθώς και μεταξύ Υ/Σ Γ και Οικίσκο ελέγχου	

Πίνακας 4.22

Ο ενταφιασμός του καλωδίου γίνεται μέσα σε σωλήνες για πρόσθετη μηχανική προστασία (**Σχέδιο "Τομές Χαντακιών 1"**) και σε τριγωνική διάταξη . Επιπλέον, με αυτόν τον τρόπο είναι δυνατή η αντικατάστασή του στο μέλλον σε περίπτωση προβλήματος. Ο τύπος του καλωδίου που χρησιμοποιείται είναι N2XSY, είναι συμβατό με το πρότυπο **IEC 60502-2** και τα χαρακτηριστικά του περιγράφονται στη συνέχεια.



Σχήμα 4.16 Τομή καλωδίου **N2XSY**: **1** πολύκλωνος στρογγυλός αγωγός χαλκού, **2** εσωτερικό ημιαγώγιμο στρώμα από XLPE (δικτυωμένο πολυαιθυλένιο), **3** μόνωση XLPE, **4** εξωτερικό ημιαγώγιμο στρώμα XLPE, **5** ηλεκτρική θωράκιση αποτελούμενη από σύρματα χαλκού τυλιγμένα ελικοειδώς, **6** πλαστική ταινία, **7** μανδύας PVC

Το μήκος του απαιτούμενου καλωδίου δίνεται στον πίνακα που ακολουθεί.

Μήκος καλωδίου N2XSY	
Οικίσκος ελέγχου → Υ/Σ Α	17,8m
Υ/Σ Α → Υ/Σ Β	13,8m
Εφεδρικός βρόχος	51,6m
Υ/Σ Δ → Υ/Σ Γ	16,2m
Υ/Σ Γ → Οικίσκος ελέγχου	17,9m
Συνολικό μήκος (3φ)	351,9m

Πίνακας 4.23

Για τον προσδιορισμό της διατομής του αγωγού, το μέγιστο ρεύμα που αναμένουμε στο καλώδιο είναι

$$I_n = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot V_\pi} = \frac{2.000.000}{\sqrt{3} \cdot 20.000} \cong 57{,}8\text{A}$$

και αυτό όταν συμβεί σφάλμα στο τμήμα του καλωδίου μεταξύ Οικίσκου ελέγχου και Υ/Σ Β ή Υ/Σ Γ. Επιπλέον, με βάση το πρότυπο VDE DIN 0298 πρέπει να γνωρίζουμε τα ακόλουθα στοιχεία:

- **Ειδική θερμική αντίσταση του εδάφους και θερμοκρασία**: Όπως και στις προηγούμενες παραγράφους **σ=1,0K·m/W** και **θ=25^{o}C**
- **Βάθος ενταφιασμού**: Είναι περίπου **0,7m**
- **Ημερήσιος συντελεστής φόρτισης m**: Στην παρούσα εφαρμογή θα υπολογιστεί ο **ετήσιος** συντελεστής φόρτισης m με χρήση των συντελεστών του Euro-Efficiency. Δεν έχει νόημα ο ημερήσιος συντελεστής αφού τα καλώδιο διαρρέεται από ρεύμα μόνο κατά τη διάρκεια ηλιοφάνειας, χρόνος που μεταβάλλεται από μήνα σε μήνα.

$$m = \frac{(0{,}03 \cdot 0{,}05 + 0{,}06 \cdot 0{,}1 + 0{,}13 \cdot 0{,}2 + 0{,}1 \cdot 0{,}3 + 0{,}48 \cdot 0{,}5 + 0{,}2 \cdot 1) \cdot I_{\max} \cdot 4362}{I_{\max} \cdot 8760} \cong 0{,}25$$

  Επειδή στους πίνακες του προτύπου ο μικρότερος συντελεστής φόρτισης είναι **0,5** χρησιμοποιούμε αυτόν για τους υπολογισμούς κάτι που σημαίνει ότι τα αποτελέσματα που θα βρούμε θα είναι από την ασφαλή μεριά.

- **Μέγιστη επιτρεπόμενη θερμοκρασία μόνωσης καλωδίου**: **90^{o}C**

Οι συντελεστές μείωσης είναι:

- **f_1**: για τα παραπάνω θ, m και σ από τους πίνακες προκύπτει **f_1=1,02**
- **f_2**: συντελεστής για περισσότερα του ενός συστήματος. Εδώ έχουμε πάντα ένα τριφασικό σύστημα να διαρρέεται από ρεύμα και επομένως **f_2=1**
- **f_3:** επειδή το καλώδιο βρίσκεται σε σωλήνα άνω των 6m **f_3=0,85**

- **f_4:** Επειδή δεν υπάρχουν προστατευτικά ή σκεπάσματα που να εγκλείουν αέρα, **f_4=1**
- **f_5:** Δεν υπάρχουν πολυπολικά καλώδια με περισσότερους των τριών αγωγών. **f_5=1**

Επομένως πρέπει να επιλεγεί καλώδιο διατομής που να επιτρέπει ρεύμα εντάσεως:

$$I = \frac{I_n}{f_1 \cdot f_2 \cdot f_3 \cdot f_4 \cdot f_5} \cong \frac{57,8}{0,867} \cong 66,7A$$

Επιλέγεται καλώδιο διατομής **35mm^2**. Η ωμική αντίσταση του καλωδίου είναι **R=0,659Ω/km** στους **90^{o}C**, η αυτεπαγωγή του είναι **0,484mH/km (X_L=0,1520Ω/km)** και η ικανότητα φόρτισής του είναι **189A για εγκατάσταση στο έδαφος**.

Στο καλώδιο Μέσης Τάσης, για τα μήκη της παρούσας εφαρμογής, οι απώλειες ισχύος και η πτώση τάσης μπορούν να θεωρηθούν αμελητέα.

Κεφάλαιο 5

Ηλεκτρολογική μελέτη Φ/Β σταθμού σε τοπολογία αντιστροφέων 500 kW

5.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται η διασύνδεση των διαφόρων τμημάτων του Φ/Β σταθμού, αυτή τη φορά όχι με χρήση πολλών αντιστροφέων αλλά με κεντρικούς αντιστροφείς των 500kW. Με τη βοήθεια τοπογραφικού διαγράμματος απεικονίζεται η χωροθέτηση του χρησιμοποιούμενου εξοπλισμού ενώ τα ηλεκτρολογικά διαγράμματα Μέσης και Χαμηλής τάσης δείχνουν τις ηλεκτρολογικές συνδέσεις. Όπως και στο κεφάλαιο 4 ειδικότερη αναφορά γίνεται στα χρησιμοποιούμενα καλώδια, τον τύπο τους και τον τρόπο επιλογής της διατομής τους. Τέλος, πρέπει εδώ να αναφερθεί ότι πολλά τμήματα του κεφαλαίου 4 εμφανίζονται και στο παρόν κεφάλαιο και έτσι δεν κρίνεται σκόπιμη η αναλυτική αναφορά σε αυτά.

5.2 Γενική περιγραφή της τοπολογίας

Στην τοπολογία αυτή ο σταθμός αποτελείται από συνολικά 9728 πλαίσια της εταιρείας Conergy τύπου PowerPlus 210P ονομαστικής ισχύος 210Wp. Τα πλαίσια αυτά ομαδοποιούνται σε 64 συστοιχίες. Κάθε ομάδα 16 συστοιχιών τροφοδοτεί έναν αντιστροφέα 500kW τύπου Sunny Central 500HE της εταιρείας SMA. Τέλος, η έξοδος κάθε αντιστροφέα οδηγείται σε έναν από τους 4 Υ/Σ ανύψωσης 0,4/20kV οι οποίοι ανά 2 συνδέονται σειριακά και καταλήγουν στον κεντρικό οικίσκο ελέγχου του σταθμού.

Στο σχέδιο **"Τοπογραφικό διάγραμμα 2"**, φαίνεται η χωροταξική τοποθέτηση του εξοπλισμού. Οι Υ/Σ ανύψωσης καθώς και οι αντιστροφείς με το κιόσκι προστασίας τους έχουν τοποθετηθεί στον κεντρικό διάδρομο του σταθμού ο οποίος έχει κατάλληλο πλάτος ώστε να επιτρέπει την ανεμπόδιστη διέλευση οχημάτων. Επιπλέον η θέση τοποθέτησης είναι τέτοια ώστε πρακτικά να είναι ασήμαντη η σκίαση που προκαλείται στις βορειότερες συστοιχίες. Η καλωδίωση των πλαισίων γίνεται με κατάλληλο καλώδιο DC το οποίο στηρίζεται πάνω στα ικριώματα των συστοιχιών ενώ το κεντρικό καλώδιο DC από τις συσκευές παραλληλισμού (combiner box) οδεύουν μέσω κατάλληλων χαντακιών μέχρι τον αντιστροφέα της αντίστοιχης ομάδας. Τα καλώδια εισέρχονται και εξέρχονται από το έδαφος μέσω φρεατίων. Στο σχέδιο **"Τομές Χαντακιών 2"** απεικονίζονται οι τομές όλων των χαντακιών που χρησιμοποιούνται στη συγκεκριμένη μελέτη. Τέλος, το υπόγειο δίκτυο Μέσης Τάσης

είναι τοπολογίας βρόχου εξασφαλίζοντας την αδιάλειπτη λειτουργία του σταθμού σε περίπτωση που συμβεί σφάλμα στο κύριο κύκλωμα του δικτύου.

5.3 Καλωδίωση Φ/Β πλαισίων [43],[44],[12],[21]

5.3.1 Όδευση καλωδίων – απαιτούμενο μήκος καλωδίων DC

Στην παρούσα τοπολογία το καλώδιο διασύνδεσης των Φ/Β πλαισίων οδεύει μόνο πάνω στη συστοιχία και καταλήγει στη συσκευή παραλληλισμού των στοιχειοσειρών. Για κάθε συστοιχία απαιτείται το ίδιο μήκος καλωδίου το οποίο υπολογίστηκε στο κεφάλαιο 2 ότι είναι **356,4m**. Συνολικά, για την καλωδίωση των πλαισίων θα χρειαστούν **22.810m** καλωδίου.

5.3.2 Τύπος καλωδίου

Ο τύπος του χρησιμοποιούμενου καλωδίου είναι **H07RN-F** προδιαγραφών όπως αναπτύχθηκαν στην παράγραφο 4.3.2.

5.3.3 Πτώση τάσης και απώλειες ισχύος στο καλώδιο DC

Για τον υπολογισμό της πτώσης τάσης στον αγωγό στηριζόμαστε πάλι στις απαιτήσεις του γερμανικού προσχεδίου **VDE 0100 Part 1** που προτείνεται να μην είναι μεγαλύτερη του **1%** της ονομαστικής DC τάσης συστήματος σε πρότυπες συνθήκες. Αυτό έχει ως συνέπεια οι απώλειες ισχύος να διατηρούνται και αυτές στο **1%** σε πρότυπες συνθήκες. Το ρεύμα $\mathbf{I_{MPP,STC}}$, και στην παρούσα εφαρμογή, είναι **7,24A**.

- **Πτώση τάσης:** Μας ενδιαφέρει η πτώση τάσης που έχουμε πάνω στον μακρύτερο αγωγό, περίπου **50m**. Η ωμική αντίσταση του καλωδίου σε θερμοκρασία 20^oC δίνεται από το φυλλάδιο του κατασκευαστή και είναι **5,09 Ω/km** και **3,39 Ω/km** για αγωγούς $4mm^2$ και $6mm^2$ αντίστοιχα. Τους θερινούς μήνες η θερμοκρασία λειτουργίας τους σε πλήρες φορτίο μπορεί να φτάσει τους **70^oC.** Οι ωμικές αντιστάσεις στη θερμοκρασία αυτή έχουν υπολογιστεί και είναι:

Αντίσταση καλωδίου R στους 70°C (Ω/km)	
4mm²	6,090
6mm²	4,056

Πίνακας 5.1

Η πτώση τάσης κατά μήκος του καλωδίου δίνεται από τη παρακάτω σχέση και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον πίνακα 5.2. Η τάση συστήματος είναι **552,9V**.

$$V_{Drop} = I_{MPP,STC} \cdot R_{70^o C}(\Omega / km) \cdot L(km)$$

Διατομή	**Πτώση τάσης (V)**	**% Πτώση τάσης**
4mm²	2,20	0,40%
6mm²	1,47	0,27%

Πίνακας 5.2

Από τα πιο πάνω αποτελέσματα φαίνεται ότι η πτώση τάσης είναι μέσα στα όρια και από τις δύο διατομές καλωδίων.

- **Απώλειες ισχύος:** Δίνονται από την παρακάτω σχέση και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον πίνακα 5.3. Η ισχύς μιας στοιχειοσειράς είναι **3990Wp** σε πρότυπες συνθήκες.

$$P_{loss} = I^2_{MPP,STC} \cdot R_{70^o C}(\Omega / km) \cdot L(km)$$

$$P_{loss,\%} = \frac{P_{loss}}{P_{nom}} \cdot 100\%$$

Διατομή	**Απώλειες (W)**	**% Απώλειες**
4mm²	15,96	0,40%
6mm²	10,63	0,27%

Πίνακας 5.3

5.3.4 Απώλειες ενέργειας στο καλώδιο DC

Όπως και στην παράγραφο 4.3.4, απώλειες ενέργειας στο καλώδιο DC υπολογίζεται με τη βοήθεια του **σταθμισμένου συντελεστή απόδοσης** του αντιστροφέα. Για τη συγκεκριμένη διάταξη υπολογίζονται ότι είναι:

Διατομή	**Απώλειες ενέργειας (MWh/έτος)**
4mm^2	10,63
6mm^2	7,08

Πίνακας 5.4

Από τη στιγμή που ικανοποιούνται οι περιορισμοί πτώσης τάσης και απωλειών ισχύος είναι ενδιαφέρον να δούμε αν θα άξιζε να εγκαταστήσουμε καλώδιο μεγαλύτερης διατομής ώστε να επωφεληθούμε από την εξοικονομούμενη ενέργεια. Από τα αποτελέσματα του παραπάνω πίνακα βλέπουμε ότι με καλώδια διατομής 6mm^2 εξοικονομείται ενέργεια $10,63-7,08=3,55\,MWh/έτος$. Το κόστος του απαιτούμενου μήκους καλωδίου H07RN-F είναι:

Διατομή	**Κόστος (€/m)**	**Απαιτούμενο μήκος (m)**	**Συνολικό κόστος (€)**
4mm^2	0,36	22.810	8212 €
6mm^2	0,52		11861 €
		Επιπλέον κόστος	**3649 €**

Πίνακας 5.5

Επιπλέον, με βάση τη νομοθεσία, η τιμή πώλησης της ενέργειας που παράγεται από διασυνδεδεμένο Φ/Β σταθμό μεγαλύτερο από 100kW είναι **407,14 €/MWh** (τιμή Ιουλίου 2009 από ΡΑΕ). Έτσι, η απόσβεση του καλωδίου των 6mm^2 θα γινόταν σε χρονικό διάστημα:

$$\text{Τ} = \frac{\text{Επιπλέον Κόστος}}{(\text{Εξοικ.Ενέργεια / Έτος})\cdot \text{Τιμή Ενέργειας}} \cong 2,5\,έτη$$

Βλέπουμε δηλαδή ότι μέσα σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα γίνεται απόσβεση του επιπλέον κόστους.

5.3.5 Μέγιστη επιτρεπόμενη διαρκής φόρτιση καλωδίου DC [12],[21]

Ο προσδιορισμός του μέγιστου επιτρεπόμενου ρεύματος γίνεται σύμφωνα με τις απαιτήσεις του προτύπου HD 384.5.523 για καλώδια εκτός εδάφους που στηρίζονται στο δομικό υλικό (αλουμίνιο) των συστοιχιών. Το μέγιστο επιτρεπόμενο ρεύμα δίνεται από τη σχέση:

$$I = I_o \cdot f_\theta \cdot f_n$$

όπου Io η επιτρεπόμενη συνεχής φόρτιση του καλωδίου στους 30^oC, f_θ ο συντελεστής θερμοκρασίας περιβάλλοντος για θερμοκρασίες διάφορες των 30^oC και f_n ο συντελεστής πλήθους κυκλωμάτων ή αγωγών.

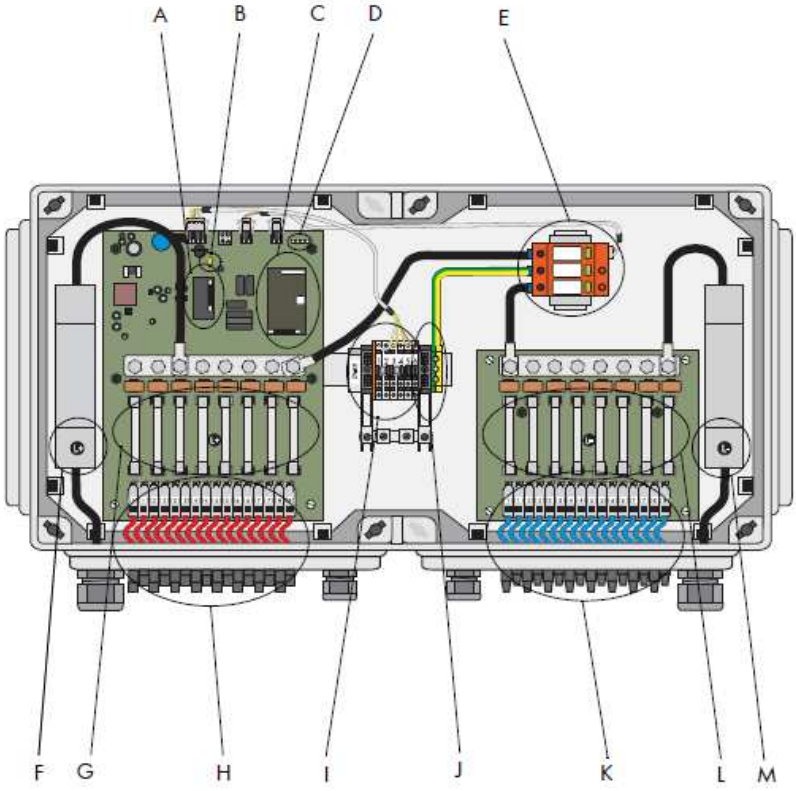
Από τα στοιχεία του κατασκευαστή και για θερμοκρασία 30^oC, η επιτρεπόμενη συνεχής φόρτιση του καλωδίου για διατομή $6mm^2$ είναι **53A**. Επιπλέον, στο σημείο όπου αυτά συγκεντρώνονται στη συσκευή παραλληλισμού έχουμε συνολικά 8 κυκλώματα με αντίστοιχο συντελεστή διόρθωσης που είναι **0,54**. Τέλος, η θερμοκρασία που επικρατεί στο χώρο της Φ/Β εγκατάστασης τους θερινούς μήνες (δυσμενέστερη περίπτωση) είναι περίπου 40^oC με αντίστοιχο συντελεστή μείωσης **0,91** για καλώδια με μόνωση από ελαστικό. Συγκεντρωτικά, το μέγιστο επιτρεπόμενο ρεύμα του καλωδίου είναι:

$$I = I_o \cdot f_\theta \cdot f_n = 53 \cdot 0,91 \cdot 0,40 \cong 26A$$

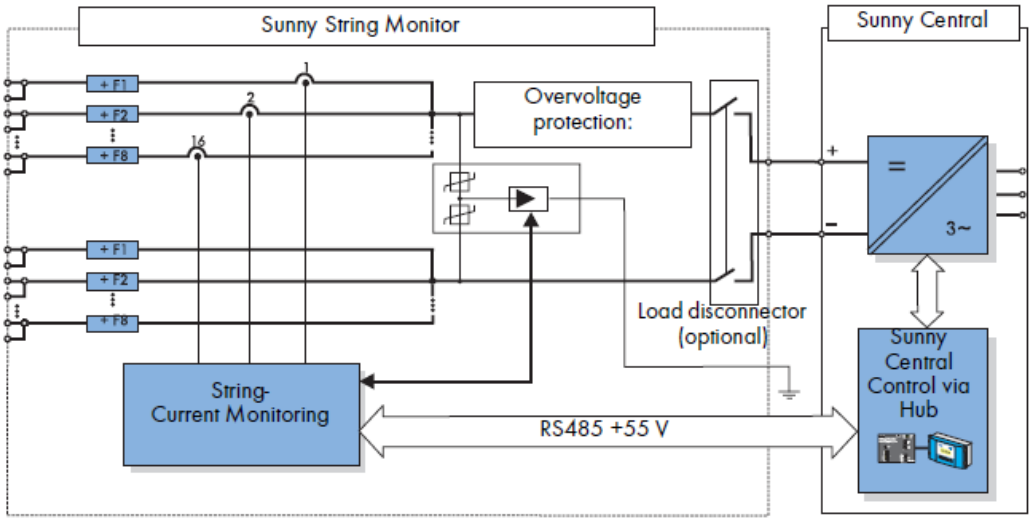
Το ρεύμα αυτό είναι μεγαλύτερο του I_{mpp} (7,24A) επομένως η διατομή αυτή είναι κατάλληλη.

5.4 Περιγραφή διάταξης παραλληλισμού (Sunny String Monitor SSM) [www.sma.de]

Η διάταξη παραλληλισμού είναι στην πραγματικότητα ένας πίνακας στον οποίο παραλληλίζονται οι 8 ομάδες των στοιχειοσειρών. Επιπλέον, ο πίνακας αυτός φέρει διατάξεις προστασίας των Φ/Β πλαισίων και καλωδίων, απόζευξης από τον αντιστροφέα και τα υπόλοιπα κυκλώματα καθώς και προστασίας από υπερτάσεις. Τέλος, γίνεται παρακολούθηση των ρευμάτων των στοιχειοσειρών μέσω ηλεκτρονικού κυκλώματος. Ένας τέτοιος πίνακας φαίνεται στο σχήμα 5.1 ενώ το λειτουργικό του διάγραμμα στο σχήμα 5.2.



Σχήμα 5.1 Πίνακας διασύνδεσης στοιχειοσειρών: A. κουτί επικοινωνιών, B. jumper επικοινωνιών, C. επεξεργαστής, D. ενδεικτικά LED λειτουργίας, E. απαγωγείς υπερτάσεων, F. κύρια γραμμή DC (θετικός πόλος), G. ασφάλειες DC, H. συνδετήρες στοιχειοσειρών (θετικός πόλος), I. συνδετήρας επικοινωνιών, J. σύνδεση με τη γη, K. συνδετήρες στοιχειοσειρών (αρνητικός πόλος), L. ασφάλειες DC, M. κύρια γραμμή DC (αρνητικός πόλος)



Σχήμα 5.2 Λειτουργικό διάγραμμα πίνακα παραλληλισμού

Η παρακολούθηση των στοιχειοσειρών είναι δυνατή και από απόσταση αφού προβλέπεται σύστημα μεταφοράς δεδομένων μέσω του προτύπου RS485 και καλωδίου που θα οδεύει στα χαντάκια μαζί με τα κεντρικά καλώδια DC. Με τον τρόπο, εκτός από άμεση εποπτεία, εξασφαλίζεται και γρήγορη ανίχνευση βλαβών σε περίπτωση που υπάρχει δυσλειτουργία σε κάποιο από τα Φ/Β πλαίσια.

Για τον εξοπλισμό που θα χρησιμοποιηθεί, επιλέγονται ασφάλειες όπως αναπτύχθηκε στην παράγραφο 4.4 ενώ ο αποζεύκτης φορτίου πρέπει να είναι ονομαστικής τάσης τουλάχιστον **600V** και ονομαστικού ρεύματος λειτουργίας τουλάχιστον **70A**.

5.5 Διασύνδεση των συστοιχιών με τους πίνακες Χαμηλής Τάσης

Από την έξοδο της διάταξης παραλληλισμού οδηγούμαστε, μέσω κατάλληλων καλωδίων DC, στον οικίσκο του αντιστροφέα και από εκεί στους αντίστοιχους πίνακες Χαμηλής Τάσης. Ο τρόπος σύνδεσης φαίνεται στο σχέδιο **"Μονογραμμικό Διάγραμμα Χαμηλής Τάσης 2"**. Τα καλώδια θα είναι τύπου **J1VV-R**, μονοπολικά και θα οδεύουν στα χαντάκια τύπου D, E και Z όπως φαίνεται στο σχέδιο **"Τομές Χαντακιών 2"**. Το συνολικό μήκος του καλωδίου που χρειάζεται φαίνεται στον ακόλουθο πίνακα:

Αποστάσεις καλωδίων μεταξύ των συστοιχιών της ομάδας Α και του αντιστροφέα Α			
Α1	182,2 m	**Α9**	164,6 m
Α2	90,6 m	**Α10**	72,8 m
Α3	90,6 m	**Α11**	72,8 m
Α4	182,2 m	**Α12**	164,6 m
Α5	145,6 m	**Α13**	202,6 m
Α6	64,6 m	**Α14**	110,8 m
Α7	64,6 m	**Α15**	110,8 m
Α8	145,6 m	**Α16**	202,6 m
Συνολικό μήκος ομάδας Α			**2068 m**
Συνολικό μήκος όλων των ομάδων			**8272 m**

Πίνακας 5.6

Για τον υπολογισμό της πτώσης τάσης και των απωλειών ισχύος χρησιμοποιούμε τη μεγαλύτερη απόσταση και προσδιορίζουμε την κατάλληλη διατομή του καλωδίου. Έχοντας 8 παράλληλες στοιχειοσειρών, το ρεύμα που αναμένουμε είναι $\mathbf{8 \cdot I_{mpp} \approx 58A}$. Επιπλέον, η τάση

στα άκρα της διάταξης παραλληλισμού είναι **552,9V** και η ισχύς **31920Wp**. Η πτώση τάσης και οι απώλειες ισχύος δίνονται από τις σχέσεις της παραγράφου 5.3.3. Για διάφορες διατομές καλωδίων έχουμε τα ακόλουθα αποτελέσματα:

Πτώση τάσης και απώλειες ισχύος στο κεντρικό καλώδιο DC					
Διατομή (mm^2)	**Αντίσταση στους 70°C (Ω/km)**	**V_{drop} (V)**	**V_{drop} (%)**	**P_{loss} (W)**	**P_{loss} (%)**
35	0,627	7,37	1,33	427,3	1,34
50	0,463	5,44	0,98	315,6	0,99
70	0,321	3,77	0,68	218,8	0,68
95	0,232	2,73	0,49	158,1	0,49

Πίνακας 5.7

Επομένως, καλώδιο διατομής 50mm^2 έχει ως αποτέλεσμα οι απώλειες ισχύος και η πτώση τάσης να είναι κάτω του 1%.

Για το μέγιστο επιτρεπόμενο ρεύμα, πρέπει να προσδιορίσουμε τους αντίστοιχους συντελεστές f_θ, f_c και f_i του προτύπου HD384 για καλώδια που οδεύουν στο έδαφος. Το μέγιστο ρεύμα που θα διαρρέει τον κάθε αγωγό θα είναι **Io=58A**. Ο συντελεστής f_c, όπως και στην παράγραφο 4.3.5 έχει τιμή **1,18**. Ο συντελεστής f_θ, για θερμοκρασία εδάφους 25°C και για καλώδιο με μόνωση από PVC, έχει τιμή **0,95**. Τέλος, ο συντελεστής f_i προσδιορίζεται για μέγιστο αριθμό **4 κυκλώματα** του οδεύουν σε **οχετούς** μέσα στο έδαφος και σε απόσταση περίπου 25cm μεταξύ τους. Ο συντελεστής διόρθωσης είναι περίπου **0,75**. Άρα έχουμε:

$$\frac{58A}{1,18 \cdot 0,95 \cdot 0,75} \cong 69\,A$$

Για το συγκεκριμένο τύπο καλωδίου και διατομή 50mm^2 η επιτρεπόμενη συνεχής φόρτιση στο έδαφος είναι 220A, πολύ μεγαλύτερη των 69A.

Για τον υπολογισμό των απωλειών ενέργειας ανά έτος χρησιμοποιούμε τους συντελεστές του **σταθμισμένου συντελεστή απόδοσης** του αντιστροφέα όπως και στην παράγραφο 4.3.4. Για τις παραπάνω διατομές έχουμε:

Απώλειες ενέργειας στο κύριο καλώδιο DC	
Διατομή (mm^2)	**Απώλειες ενέργειας (Wh/έτος)**
35	26
50	18,8
70	13,1
95	9,4

Πίνακας 5.8

Αν χρησιμοποιούσαμε καλώδιο 70mm^2 τότε θα εξοικονομούσαμε ενέργεια 5,7MWh/έτος. Το επιπλέον κόστος του καλωδίου θα ήταν:

Απώλειες ενέργειας στο κύριο καλώδιο DC			
Διατομή (mm^2)	**Απαιτούμενο μήκος καλωδίου (m)**	**Κόστος καλωδίου (€/m)**	**Κόστος καλωδίου (€)**
50	8272	11,40	94300,8
70		16,55	136901,6
		Επιπλέον κόστος	**42600,8**

Πίνακας 5.9

Το επιπλέον κόστος θα αποσβεστεί σε χρόνο που δίνεται από τη σχέση:

$$\text{Τ} = \frac{\text{Επιπλέον Κόστος}}{(\text{Ξοικ.Ενέργεια / Έτος}) \cdot \text{Τιμή Ενέργειας}} \cong 18,4 \text{έτη}$$

Ο χρόνος απόσβεσης είναι πολύ μεγάλος και για τον λόγο αυτό θα χρησιμοποιηθεί καλώδιο διατομής **50mm^2**.

5.6 Διασύνδεση Φ/Β συστοιχιών με τον αντιστροφέα

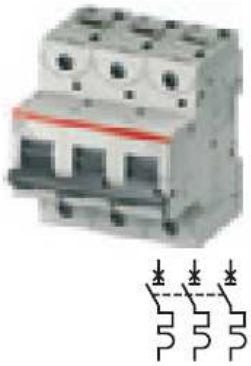
5.6.1 Περιγραφή διάταξης

Κάθε ομάδα 16 συστοιχιών χωρίζεται σε 2 επιμέρους ομάδες των 8. Η κάθε επιμέρους ομάδα οδηγείται σε έναν πίνακα Χαμηλής Τάσης μέσω κατάλληλης διάταξης προστασίας (διακόπτης ισχύος). Λεπτομέρειες των συνδέσεων φαίνονται στο σχέδιο **Μονογραμμικό**

Διάγραμμα Χαμηλής Τάσης 2″. Αφού τα 8 κυκλώματα παραλληλιστούν, οδεύουν προς τις μπάρες σύνδεσης DC κυκλωμάτων του αντιστροφέα (2 μπάρες χαλκού). Οι πίνακες Χαμηλής Τάσης θα βρίσκονται μέσα στο χώρο του οικίσκου προστασίας του αντιστροφέα ενώ τα καλώδια θα φτάνουν ως εκεί οδεύοντας στα χαντάκια.

5.6.2 Διάταξη προστασίας κυρίως καλωδίου DC [42]

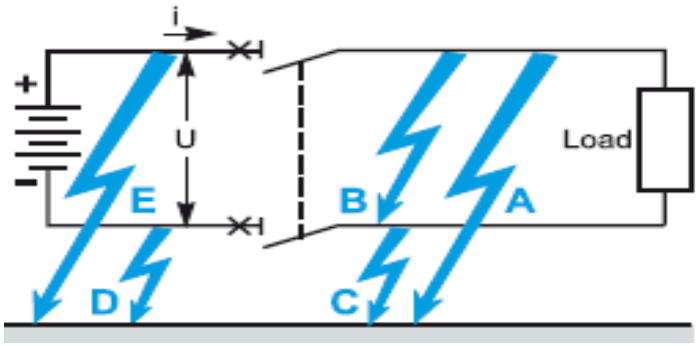
Το κυρίως καλώδιο DC (J1VV-R 50mm^2), με την άφιξή του στον πίνακα Χαμηλής Τάσης προστατεύεται με τη χρήση διακόπτη ισχύος κατάλληλο για DC κυκλώματα. Ο διακόπτης πρέπει να έχει χαρακτηριστικά τέτοια ώστε να αντέχει σε τάση μεγαλύτερη των **416V** και ονομαστικό ρεύμα μεγαλύτερο των **58A.** Ενδεικτικά προτείνεται ο διακόπτης S803PV-S80 της εταιρείας ABB:



Χαρακτηριστικά διακόπτη S803PV-S80	
Πρότυπα κατασκευής	IEC 60947-2
Αριθμός πόλων	3P
Ονομαστικό ρεύμα In	80A
Τάση λειτουργίας Ue	1200V DC
Συστήματα ενεργοποίησης	Θερμικό & Ηλεκτρομαγνητικό
Ρεύμα βραχυκύκλωσης I_{cu}	5kA

Πίνακας 5.10

Τα σφάλματα που μπορεί να εκκαθαρίσει ο διακόπτης φαίνονται στο σχήμα 5.3. Ένα σφάλμα μεταξύ των πόλων + και – (σφάλμα Β) ανιχνεύεται από τον διακόπτη σε αντίθεση με τα Α και C. Αυτό συμβαίνει γιατί το σύστημά μας δεν είναι γειωμένο και δεν υπάρχει αγώγιμος δρόμος ως προς γη. Για να ενεργοποιηθεί ο διακόπτης πρέπει να λάβει σήμα από μια ειδική διάταξη που ονομάζεται **επιτηρητής μόνωσης (IMD)**. Η διάταξη αυτή είναι εγκατεστημένη σε κάθε γραμμή έτσι ώστε να μπορεί εύκολα να ανιχνευτεί από που προέρχεται κάποιο σφάλμα αν αυτό συμβεί.



Σχήμα 5.3 Ενδεχόμενα σφάλματα στη γραμμή

5.6.3 Διασύνδεση Φ/Β γεννήτριας με τον αντιστροφέα

Μετά τον παραλληλισμό τους στον πίνακα Χαμηλής Τάσης, κάθε ομάδα 8 συστοιχιών οδεύει μέσω κατάλληλου διακόπτη ισχύος προς τις DC μπάρες σύνδεσης του αντιστροφέα. Ο διακόπτης αυτός πρέπει να είναι ονομαστικού ρεύματος τουλάχιστον **464A (58A·8 παράλληλες συστοιχίες)** και ονομαστικής τάσης τουλάχιστον **1000V**. Επιπλέον, για την ανίχνευση σφαλμάτων μεταξύ του θετικού ή του αρνητικού πόλου και της γης πρέπει να είναι εξοπλισμένος με διάταξη επιτήρησης μόνωσης. Ο διακόπτης διασύνδεσης, ενδεικτικά, μπορεί να είναι ο SACE EmaxDC της ABB με βασικά χαρακτηριστικά:

Χαρακτηριστικά διακόπτη SACE EmaxDC της ABB	
Πρότυπα κατασκευής	EN 60947-2, EN 60947-3
Αριθμός πόλων	4
Ονομαστικό ρεύμα In	800A
Ονομαστική τάση DC	1000V (με χρήση 4 πόλων)
Συστήματα ενεργοποίησης	Θερμικό & ηλεκτρομαγνητικό
Διαθέτει επιπλέον επαφές για ενεργοποίηση του διακόπτη από βοηθητική συσκευή όπως επιτηρητή μόνωσης	

Πίνακας 5.11

Σχήμα 5.2 Αντιστροφέας Sunny Central SC500HE. Διακρίνονται το τμήμα DC (δεξιά) και το τμήμα AC (αριστερά) **[39]**

Σχήμα 5.3 Διακρίνουμε τις 4 ράβδους σύνδεσης στο κύκλωμα DC του αντιστροφέα **[39]**

Στο σχήμα 5.3 φαίνονται οι συνδέσεις του τμήματος DC του αντιστροφέα με τα κεντρικά καλώδια DC της Φ/Β γεννήτριας. Ο τύπου SC500HE διαθέτει 4 ράβδους σύνδεσης, 2 για τον θετικό και 2 για τον αρνητικό πόλο της γεννήτριας. Σε κάθε ράβδο υπάρχουν 4 θέσεις για 4 παράλληλα κυκλώματα. Κάθε ζευγάρι ράβδων αποτελεί και μια είσοδο με μέγιστο επιτρεπόμενο ρεύμα τα **591A**. Στη συγκεκριμένη εφαρμογή, σε κάθε ένα από τα ζευγάρια ράβδων συνδέεται η έξοδος του αυτόματου διακόπτη SACE EmaxDC. Η σύνδεση γίνεται με καλώδιο **J1VV-R διατομής 300mm^2** το μήκος του οποίου είναι μερικά μέτρα μιας και οι πίνακες Χαμηλής Τάσης καθώς και ο αντιστροφέας βρίσκονται στον ίδιο οικίσκο. Εκτιμάται ότι θα χρειαστούν **10m** καλώδιο για τη σύνδεση του κάθε διακόπτη, συνολικά δηλαδή **80m** καλώδιο διατομής **300mm^2.** Λόγω του ελάχιστου μήκους τους οι απώλειες ενέργειας και η πτώση τάσης στο καλώδιο κρίνονται αμελητέες.

Εδώ είναι σημαντικό να αναφερθούν οι προστασίες που του αντιστροφέα στα κυκλώματα εισόδου. Συγκεκριμένα προβλέπονται:

- Απαγωγέας υπερτάσεων για κάθε ένα από τα ζευγάρια ράβδων εισόδου
- Επιτηρητής μόνωσης για κάθε ένα από τα ζευγάρια ράβδων εισόδου
- Κεντρικός διακόπτης φορτίου εφοδιασμένος με μοτέρ για αυτόματο κλείσιμο

5.7 Εκτιμώμενη ετήσια απώλεια ενέργειας στον αντιστροφέα

Σε σχέση με την απόδοση του αντιστροφέα, στα τεχνικά φυλλάδια του κατασκευαστή δεν υπάρχει καμπύλη απόδοσης σε σχέση με την DC τάση εισόδου **(n_{euro} - V_{mpp})**. Για το λόγο αυτό, η εκτίμηση της απωλεσθείσας ενέργειας γίνεται με συντελεστή **n_{Euro}=97,3%** σύμφωνα με τον κατασκευαστή.

Στο κεφάλαιο 3 υπολογίστηκε ότι η εκτιμώμενη ενέργεια που αποδίδεται από τον Φ/Β σταθμό είναι **2690,3 MWh/έτος.** Επιπλέον, υπολογίσαμε ότι οι συνολικές απώλειες στα καλώδια είναι **25,88MWh/έτος**. Επομένως, οι απώλειες που αναμένουμε στον αντιστροφέα θα είναι:

$$\left(2690,3-25,88\right)\cdot\left(1-0,973\right)\cong 71,94\,MWh/\,\acute{\varepsilon}\tau o\varsigma$$

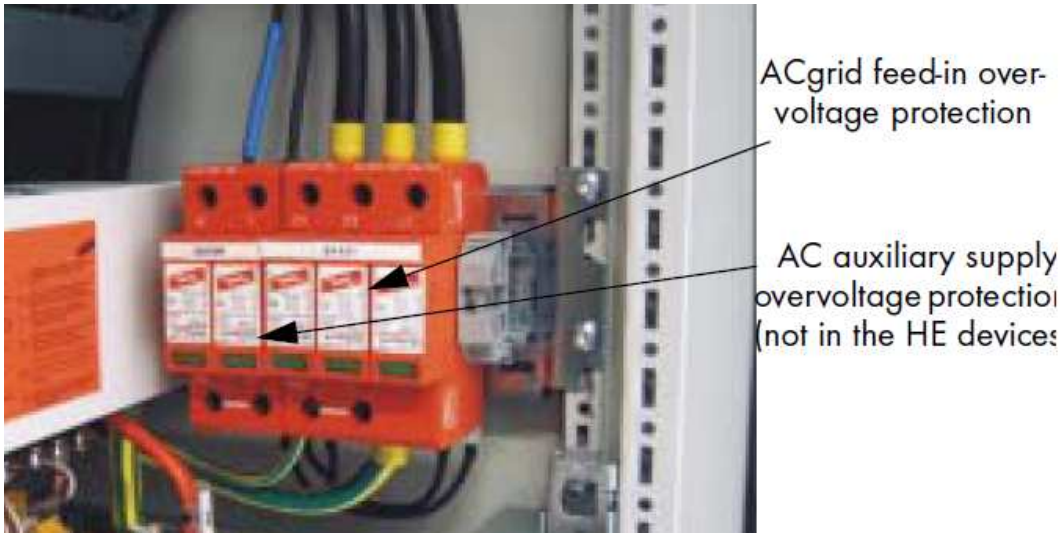
Δηλαδή, για τον κάθε αντιστροφές οι ετήσιες απώλειες ενέργειας θα είναι **≈18MWh**

5.8 Διασύνδεση του αντιστροφέα με τον Υ/Σ ανύψωσης [39],[41]

Η έξοδος του αντιστροφέα είναι τριφασική στα 270V. Για να ενταχτεί στο υπόγειο δίκτυο Μέσης Τάσης του σταθμού η τάση πρέπει να μετασχηματιστεί στα 20kV με τη βοήθεια Μ/Σ 0,27/20kV. Η σύνδεση του αντιστροφέα με τον Μ/Σ γίνεται με ειδικό καλώδιο το οποίο οδεύει μέσω των χαντακιών τύπου Η. Οι υποσταθμοί που χρησιμοποιούνται είναι τύπου κιόσκι και τα χαρακτηριστικά τους περιγράφονται με λεπτομέρεια στην παράγραφο 4.8.

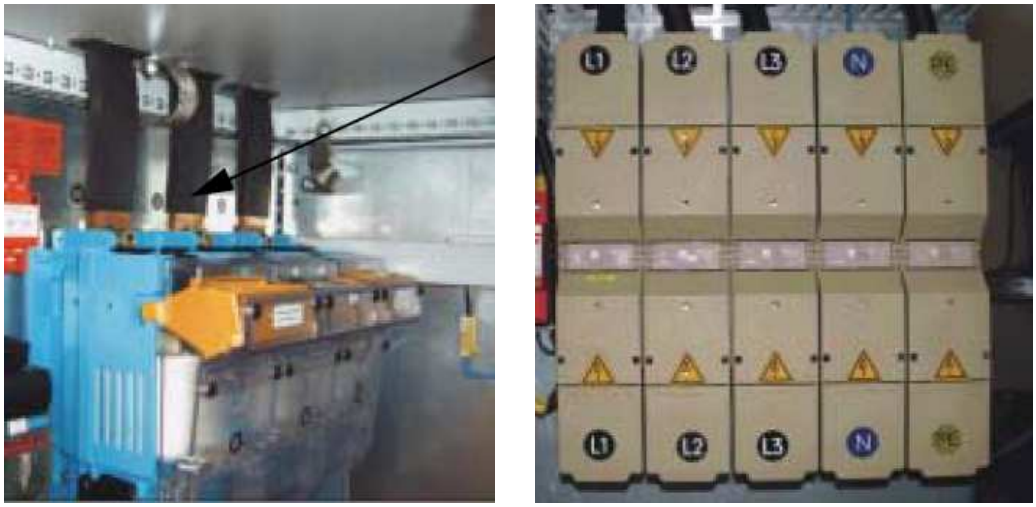
Σαν διάταξη, ο αντιστροφέας, από το τμήμα AC, φέρει τις ακόλουθες προστασίες:

- Απαγωγέας υπερτάσεων για την προστασία του τριφασικού κυκλώματος



Σχήμα 5.4 Απαγωγέας υπερτάσεων στην πλευρά AC για την κεντρική και τη βοηθητική παροχή AC ρεύματος

- Διακοπή της παροχής AC με χρήση ασφαλειοδιακόπτη φορτίου – αποζεύκτη με δυνατότητα γείωσης (σχήμα 5.5)



Σχήμα 5.5 Αριστερά: διάταξη ασφαλειοδιακόπτη φορτίου – αποζεύκτη
Δεξιά: συνδέσεις τροφοδοσίας AC

Η διασύνδεση με τον Μ/Σ γίνεται μέσω καλωδίου J1VV-R. Το ρεύμα κάθε φάσης, για συντελεστή ισχύος 0,99 είναι:

$$P = 3 \cdot I \cdot V_{\varphi} \cdot \cos\varphi \Rightarrow \mathrm{I} = \frac{500000}{3 \cdot 270 \cdot 0,99} \cong 624\mathrm{A}$$

Οι συντελεστές f_θ, f_c και f_i δίνονται από τους πίνακες του προτύπου HD384 για καλώδια που οδεύουν στο έδαφος. Το μέγιστο ρεύμα που θα διαρρέει τον κάθε αγωγό θα είναι **Io=624A**. Ο συντελεστής f_c, όπως και στην παράγραφο 4.3.5 έχει τιμή **1,18**. Ο συντελεστής f_θ, για θερμοκρασία εδάφους 25^{o}C και για καλώδιο με μόνωση από PVC, έχει τιμή **0,95**. Τέλος, ο συντελεστής f_i προσδιορίζεται για μέγιστο αριθμό **3 ενεργών καλωδίων** (ο ουδέτερος δεν διαρρέεται από ρεύμα σε κανονικές συνθήκες τροφοδοσίας) του οδεύουν σε **οχετούς** μέσα στο έδαφος και σε απόσταση περίπου 25cm μεταξύ τους. Ο συντελεστής διόρθωσης είναι περίπου **0,85**. Έτσι, χρειαζόμαστε καλώδιο τέτοιας διατομής που να επιτρέπει ρεύμα:

$$\frac{58A}{1,18 \cdot 0,95 \cdot 0,75} \cong 655\,A$$

Σύμφωνα με τον κατασκευαστή, το καλώδιο πρέπει να έχει διατομή **400mm^2**. Η διατομή του ουδετέρου προσδιορίζεται όπως και στην παράγραφο 4.7 και είναι 0,5 φορές τη διατομή

της φάσης. Η πλησιέστερη διατομή είναι **240mm^2**. Το μήκος του καλωδίου που θα χρειαστεί μπορεί να εκτιμηθεί από το σχέδιο **"Τοπογραφικό διάγραμμα 2"**.

Μήκος καλωδίου διασύνδεσης του αντιστροφέα Α με τον Μ/Σ ανύψωσης	
Για τις φάσεις (400mm^2)	3x8m=24m
Για τον ουδέτερο (240mm^2)	1x8m=5m
Συγκεντρωτικά για τις φάσεις	4x24m=**96m**
Συγκεντρωτικά για τον ουδέτερο	4x8m=**32m**

Πίνακας 5.12

Το μήκος του καλωδίου είναι μικρό και για το λόγο αυτό δεν γίνεται περαιτέρω διερεύνηση της πτώσης τάσης και των απωλειών ενέργειας στο καλώδιο. Θεωρούνται αμελητέα.

5.9 Περιγραφή Υ/Σ Μέσης Τάσης

Όλες οι διατάξεις που περιγράφουν τον εξοπλισμό Μέσης Τάσης περιγράφονται με λεπτομέρειες στις αντίστοιχες παραγράφους του κεφαλαίου 4. Πριν τους ακροδέκτες Χαμηλής Τάσης του Μ/Σ παρεμβάλλεται ένα όργανο μέτρησης ηλεκτρικών μεγεθών τύπου **MG Powerlogic PM710** καθώς και ο διακόπτης ισχύος **MG Compact NS 1000N** όπως φαίνεται και στο σχέδιο **"Μονογραμμικό διάγραμμα Χ.Τ. – Μ.Τ. 2".**

Ο Μ/Σ που επιλέγεται είναι ελαίου και τα τεχνικά του χαρακτηριστικά περιγράφονται με λεπτομέρειες στην παράγραφο 4.8.3. Επιπλέον, με τον ίδιο τρόπο υπολογίζουμε τις αναμενόμενες απώλειες ενέργειας ανά έτος οι οποίες θα είναι **17,4MWh**. Συνολικά, και για τους 4 Μ/Σ θα έχουμε:

$$E_{απωλ,\ 4Μ/Σ} = 69,6\,MWh/έτος$$

Κάθε οικίσκος ανύψωσης θα διαθέτει δύο πεδία εισόδου RM6 τύπου I καθώς και ένα πεδίο διασύνδεσης του Μ/Σ RM6 τύπου Q. Η προστασία του Μ/Σ θα γίνεται κατάλληλες ασφάλειες.

5.10 Υ/Σ ζεύξης και ελέγχου

Τα χαρακτηριστικά του Υ/Σ ζεύξης είναι ίδια με αυτά που περιγράφονται στην παράγραφο 4.10

5.11 Διασύνδεση των Υ/Σ ανύψωσης – Υπόγειο δίκτυο Μέσης Τάσης

Το δίκτυο Μέσης Τάσης του Φ/Β σταθμού αποτελείται από δύο ακτινικές υπόγειες γραμμές οι οποίες θα συνδέουν τους Υ/Σ ανύψωσης σειριακά ανά δύο και στη συνέχεια θα καταλήγουν στο κτίριο ζεύξης και ελέγχου.

Διασύνδεση των Υ/Σ ανύψωσης	
Γραμμή 1	Υ/Σ Α →Υ/Σ Β →Οικίσκος ζεύξης και ελέγχου
Γραμμή 2	Υ/Σ Δ →Υ/Σ Γ →Οικίσκος ζεύξης και ελέγχου

Πίνακας 5.13

Επιπλέον προβλέπεται εφεδρικός βρόχος ο οποίος αυξάνει τη διαθεσιμότητα του έργου σε περίπτωση που το κύριο καλώδιο Μ.Τ. υποστεί κάποια βλάβη. Ο βρόχος συνδέει τους Υ/Σ Α και Δ και τίθεται σε εφαρμογή με το κλείσιμο των διακοπτών φορτίου των αντίστοιχων πεδίων. Όταν δεν χρησιμοποιείται, το καλώδιο παραμένει γειωμένο μέσω διάταξης γειωτών. Στον πίνακα που ακολουθεί περιγράφεται η εναλλακτικά πορεία της ισχύος σε περίπτωση σφάλματος στο κύριο κύκλωμα Μ.Τ.

Σφάλμα στο κύριο κύκλωμα Μ.Τ.	
Σημείο σφάλματος	**Εναλλακτική πορεία ισχύος**
Μεταξύ Οικίσκου ελέγχου και Υ/Σ Β	Όλη η ισχύς διοχετεύεται στο δίκτυο μέσω της διαδρομής Υ/Σ Β → Υ/Σ Α → Εφεδρικός βρόχος → Υ/Σ Δ → Υ/Σ Γ → Οικίσκος ελέγχου
Μεταξύ Υ/Σ Β και Υ/Σ Α	Τα 500 kW διοχετεύονται στο δίκτυο απ' ευθείας από τον Υ/Σ Β ενώ τα υπόλοιπα 1500kW μέσω της διαδρομής Υ/Σ Α → Εφεδρικός βρόχος → Υ/Σ Δ → Υ/Σ Γ → Οικίσκος ελέγχου
Παρόμοιες διαδρομές ακολουθούνται σε περίπτωση σφάλματος μεταξύ Υ/Σ Δ και Υ/Σ Γ καθώς και μεταξύ Υ/Σ Γ και Οικίσκο ελέγχου	

Πίνακας 5.14

Ο ενταφιασμός του καλωδίου γίνεται μέσα σε σωλήνες για πρόσθετη μηχανική προστασία (**Σχέδιο "Τομές Χαντακιών 2"**) και σε τριγωνική διάταξη . Επιπλέον, με αυτόν τον τρόπο είναι δυνατή η αντικατάστασή του στο μέλλον σε περίπτωση προβλήματος. Ο τύπος του καλωδίου που χρησιμοποιείται είναι N2XSY, είναι συμβατό με το πρότυπο **IEC 60502-2** και τα χαρακτηριστικά του περιγράφονται στο σχήμα 4.16. Το καλώδιο θα έχει διατομή **35mm^2** και το συνολικό του μήκος μπορεί να εκτιμηθεί από το σχέδιο **"Τοπογραφικό διάγραμμα 2"**.

Μήκος καλωδίου N2XSY	
Οικίσκος ελέγχου → Υ/Σ Β	67m
Υ/Σ Β → Υ/Σ Α	79m
Εφεδρικός βρόχος	239m
Υ/Σ Γ → Υ/Σ Δ	79m
Υ/Σ Γ → Οικίσκος ελέγχου	52m
Συνολικό μήκος (3φ)	**1550m**

Πίνακας 5.15

Λόγω του μικρού ρεύματος από το οποίο διαρρέεται το καλώδιο καθώς και του μικρού μήκους του οι απώλειες ενέργειας και ισχύος καθώς και η πτώση τάσης θεωρούνται αμελητέα.

Κεφάλαιο 6

Σύστημα γείωσης και αντικεραυνικής προστασίας Φ/Β σταθμού

6.1 Εισαγωγή

Οι περιοχές στις οποίες εγκαθίσταται ένα Φ/Β σύστημα το καθιστά ευπαθές σε κεραυνικά πλήγματα με σοβαρό ενδεχόμενο ζημιών στην εγκατάσταση αλλά και κινδύνου της υγείας και της ζωής του προσωπικού. Στο κεφάλαιο αυτό, και λόγω έλλειψης πειραματικών μετρήσεων και προγραμμάτων προσομοίωσης, γίνεται μια γενική αναφορά στη δομή του συστήματος γείωσης και αντικεραυνική προστασίας ενός Φ/Β σταθμού. Τονίζονται ιδιαίτερα τα υλικά που χρησιμοποιούνται ώστε να αποφεύγονται διαβρώσεις και κακές συνδέσεις εντός του χώματος και του σκυροδέματος. Το κεφάλαιο αυτό βασίστηκε στη βιβλιογραφία **[12],[17],[32],[35]**

6.2 Προσδιορισμός ειδικής αντίστασης εδάφους

Αποτελεί αρχικό στάδιο μιας μελέτης γείωσης μιας και η γείωση εξαρτάται άμεσα από την ειδική αντίσταση του εδάφους. Επηρεάζεται από τα εξής:

1. **Είδος του εδάφους:** Για παράδειγμα ελώδες έδαφος έχει πολύ μικρότερη αντίσταση σε σχέση με τον ξηρό βράχο. Στον πίνακα 6.1 παρουσιάζονται ενδεικτικές τιμές των αντιστάσεων για διάφορα είδη εδαφών.

Έδαφος	Αντίσταση ρ (Ω·m)
Ελώδες υγρό	5-40
Άργιλος πηλός	20-200
Υγρή άμμος	-300
Υγρά χαλίκια	300-600
Ξηρή άμμος, χαλίκια	2000-
Βράχος	2000-

Πίνακας 6.1 Ενδεικτικές τιμές ειδικής αντίστασης διαφόρων εδαφών

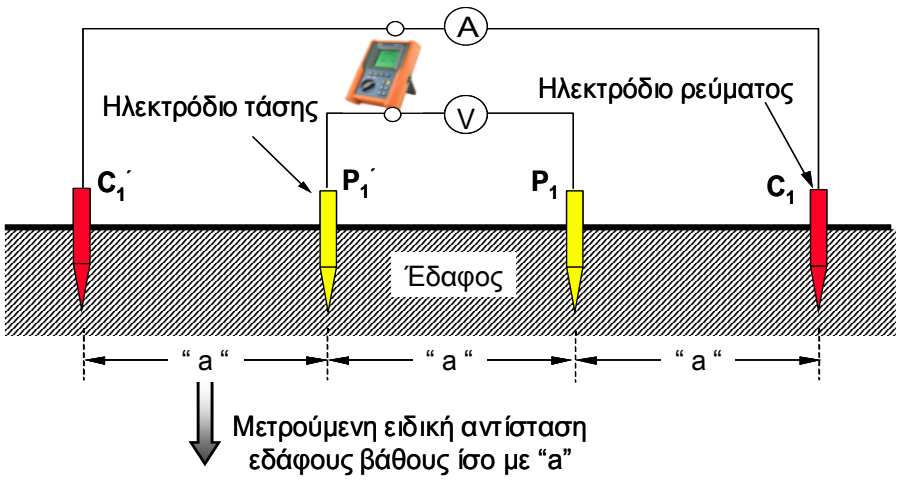
2. **Υγρασία:** Η αντίσταση μειώνεται με την αύξηση της υγρασίας του εδάφους. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι το έδαφος παραμένει υγρό σε όλες τις εποχές του έτους και για βάθος μεγαλύτερο των 0,5m. Για τον λόγο αυτό οι αγωγοί γείωσης εντός των χαντακιών τοποθετούνται σε βάθος μεγαλύτερο ή ίσο με αυτό.

3. **Θερμοκρασία:** Η μεταβολή της αντίστασης του εδάφους με τη θερμοκρασία φτάνει το 30% κατά τη διάρκεια του έτους. Η αντίσταση μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας. Αξίζει να αναφερθεί ότι από Ιανουάριο έως Φεβρουάριο έχουμε την υψηλότερη μεταβολή ενώ από Ιούλιο έως Αύγουστο τη χαμηλότερη.

4. Σε κρουστικές τάσεις και για γειωτές με μήκος μεγαλύτερο από 10m, έχει παρατηρηθεί άνοδος της αντίστασης κατά έναν παράγοντα 7. Σε αρνητικές κρουστικές τάσεις 0,3/30μsec η αντίσταση θεμελιακού γειωτή ανέρχεται από 3Ω στα 26Ω. Η άνοδος της αντίστασης γίνεται στο μέτωπο της τάσης. Η αντίσταση σε κρουστικές τάσεις ονομάζεται και **κρουστική αντίσταση.**

5. Παρουσιάζεται μεγαλύτερη σταθερότητα στην αντίσταση κατά τη διάρκεια του έτους λόγω της μικρής επίδρασης της υγρασίας και της θερμοκρασίας σε μεγάλα βάθη (0,5m~1,0m)

Για τη μέτρηση της ειδικής αντίστασης εδάφους χρησιμοποιείται γέφυρα ηλεκτροδίων όπως φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα:



Σχήμα 6.1 Διάταξη μέτρησης ειδικής αντίστασης εδάφους

Η πιο ακριβής μέθοδος μέτρησης είναι η μέθοδος Wenner (μέθοδος τεσσάρων σημείων). Η διαδικασία απαιτεί την εμφύτευση μικρών ηλεκτροδίων σε βάθος b σε τέσσερα σημεία του εδάφους που ανήκουν στην ίδια ευθεία. Τα ηλεκτρόδια απέχουν απόσταση α μεταξύ τους.

Στα ακριανά ηλεκτρόδια γίνεται έγχυση ρεύματος προς τη γη ενώ το δυναμικό μετριέται στα δύο εσωτερικά. Το πηλίκα V/I δίνει τη μέση αντίσταση R σε Ω. Το βάθος έμπηξης δεν πρέπει να είναι μικρότερο του 1/20 της απόστασης α και παράλληλα δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 30cm. Η ειδική αντίσταση του εδάφους δίνεται από τη γενική σχέση:

$$\rho = \frac{4 \cdot \pi \cdot \alpha \cdot R}{1 + \frac{2 \cdot a}{\sqrt{a^2 + 4 \cdot b^2}} - \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}}}$$

Μπορούμε να θεωρήσουμε b=0 από τη στιγμή που b<<a οπότε η παραπάνω σχέση γίνεται:

$$\rho = 2 \cdot \pi \cdot \alpha \cdot R$$

Οι μετρήσεις και τα αποτελέσματα που λαμβάνουμε ισχύουν μόνο για ομοιογενές υπέδαφος και για βάθος ίσο περίπου με α από το κέντρο της διάταξης των ηλεκτροδίων. Οι μετρήσεις συχνά επαναλαμβάνονται για αποστάσεις πολλαπλάσιες του α καθώς και για διαφορετικές διευθύνσεις στον χώρο του έργου έτσι ώστε να μπορέσει να κατασκευαστεί στη συνέχεια το μοντέλο της δομής του εδάφους πάνω στο οποίο θα τοποθετηθεί το ηλεκτρόδιο γείωσης.

6.3 Βασικά πεδιακά μεγέθη

Σε ένα σύστημα γείωσης, η ροή ρεύματος ως προς γη κατά τη διάρκεια ενός σφάλματος δημιουργεί στην επιφάνεια του εδάφους, μέσα και γύρω από αυτόν, κατανομές δυναμικού οι οποίες μπορεί να είναι επικίνδυνες για προσωπικό και εξοπλισμό αν δεν ληφθούν τα κατάλληλα μέτρα. Στο σχήμα 6.3 που ακολουθεί ορίζονται τα παρακάτω πεδιακά μεγέθη:

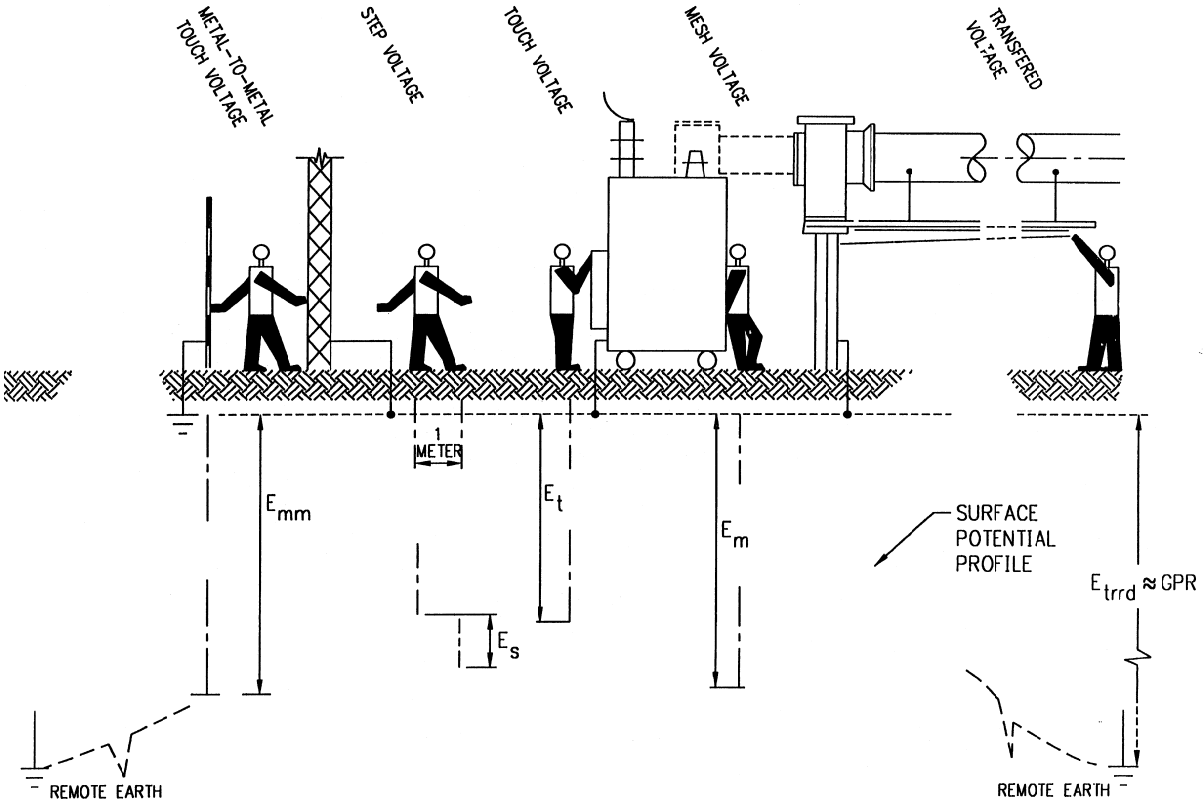
1. **Ανύψωση δυναμικού γης GPR (Ground Potential Rise):** είναι η μέγιστη τάση που μπορεί να φτάσει το δίκτυο γείωσης του υποσταθμού σε σχέση με απομακρυσμένο σημείο γείωσης που μπορεί να θεωρηθεί ότι έχει το δυναμικό της μακρινής γης (δυναμικό ίσο με μηδέν)

2. **Βηματική τάση E_s (Step Voltage):** είναι η διαφορά δυναμικού μεταξύ δύο σημείων του εδάφους σε απόσταση 1m και δηλώνει την καταπόνηση ατόμου, χωρίς να βρίσκεται σε επαφή με μεταλλικά αντικείμενα, λόγω ανοιχτού βηματισμού.

3. **Τάση επαφής E_t (Touch Voltage):** είναι η διαφορά δυναμικού μεταξύ μεταλλικής γειωμένης κατασκευής και σημείου σε απόσταση 1m, όπου στέκεται ο άνθρωπου και ακουμπά με τα χέρια του τη γειωμένη κατασκευή.

4. **Τάση επαφής βρόχου E_m (Mesh Voltage):** είναι η δυσμενέστερη τάση επαφής που παρουσιάζεται σε βρόχο του δικτύου γείωσης και συνήθως μεταξύ ενός σημείου της επιφάνειας του εδάφους στο μέσο μεταξύ δύο τελευταίων αγωγών γείωσης και του ίδιου του δικτύου.

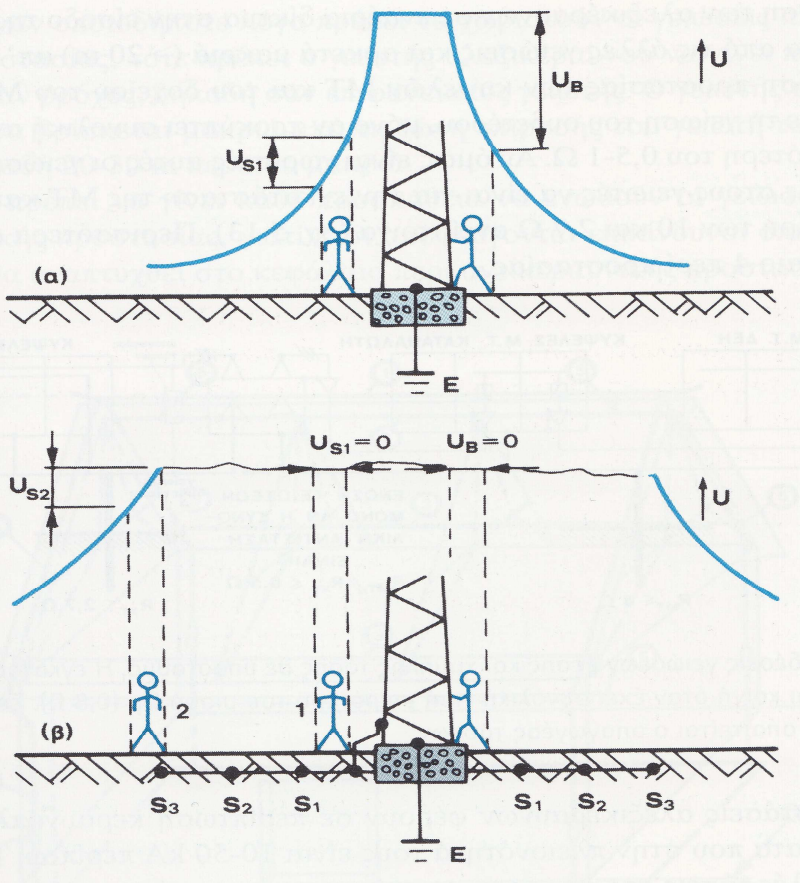
5. **Μεταφερόμενη τάση E_{trrd} (Transferred Voltage):** είναι η ειδική περίπτωση της τάσης επαφής όπου μια τάση μεταφέρεται μέσα στον ή έξω από τον υποσταθμό.



Σχήμα 6.2 Αναπαράσταση βασικών πεδιακών μεγεθών

Πρέπει να σημειωθεί ότι τα παραπάνω μεγέθη εμφανίζονται σε περίπτωση σφάλματος στο σταθμό, δηλαδή σε περίπτωση κεραυνόπτωσης ή βραχυκυκλώματος. Ο ρόλος του ηλεκτροδίου γείωσης είναι η εξίσωση του δυναμικού της γης κατά τη διάρκεια του σφάλματος

ώστε οι τάσεις που θα αναπτυχθούν στην επιφάνεια του εδάφους να μην υπερβαίνουν κάποια προκαθορισμένα όρια[1]. Αυτό γίνεται καλύτερα κατανοητό στο σχήμα 6.3 που ακολουθει:



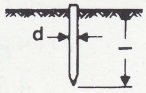
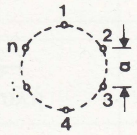
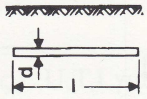
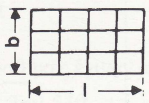
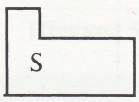
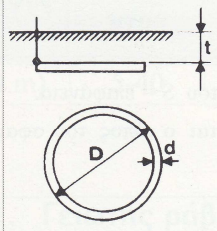
Σχήμα 6.3 Εξίσωση δυναμικού γης με τη χρήση ηλεκτροδίων

Έστω ότι στον στύλο γίνεται κάποιο σφάλμα (για παράδειγμα κεραυνός) και ρέει ρεύμα προς τη γη. Χωρίς την εξίσωση δυναμικού η τάση επαφής για έναν άνθρωπο που στέκεται 0,7m μακριά από τη βάση του στύλου και ακουμπάει το στύλο, είναι U_B. Με την τοποθέτηση πλέγματος γείωσης γύρω από το στύλο και σε βάθος 0,5 με 1m η τάση αυτή μπορεί να γίνει αμελητέα (σχήμα 6.3β).

[1] Τα όρια βηματικής τάσης και τάσης επαφής για το ανθρώπινο σώμα καθορίζονται από το πρότυπο IEEE Std 80-2000

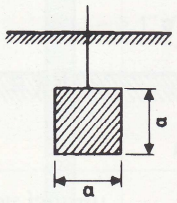
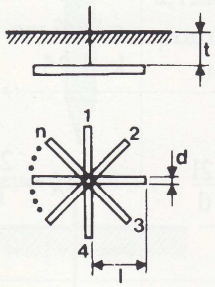
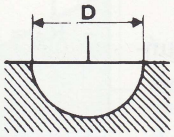
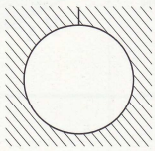
6.4 Είδη ηλεκτροδίων γείωσης και υλικά κατασκευής τους

Στα σχήματα που ακολουθούν παρουσιάζονται οι βασικότεροι τύποι ηλεκτροδίων γείωσης:

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

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

Σχήμα 6.4α Ηλεκτρόδια γείωσης – τύποι αντιστάσεων γειωτών

α/α		Γειωτής	Τύπος	Προσεγγιστικός τύπος
7		γειωτής πλάκας, πλάγια όψη S [m^2]	—	$R = \frac{\rho}{4{,}5\alpha}$ 2)
8		n = 5	$R = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{l^2}{0{,}27td}$	—
		n = 4	$R = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{l^2}{0{,}25td}$	—
		n = 3	$R = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{l^2}{0{,}22td}$	—
		n = 2	$R = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{l^2}{0{,}09td}$	—
9		ημισφαιρικός γειωτής	$R = \frac{\rho}{\pi D}$ 3)	—
10		σφαιρικός γειωτής	$R = \frac{\rho}{2\pi D}$	—

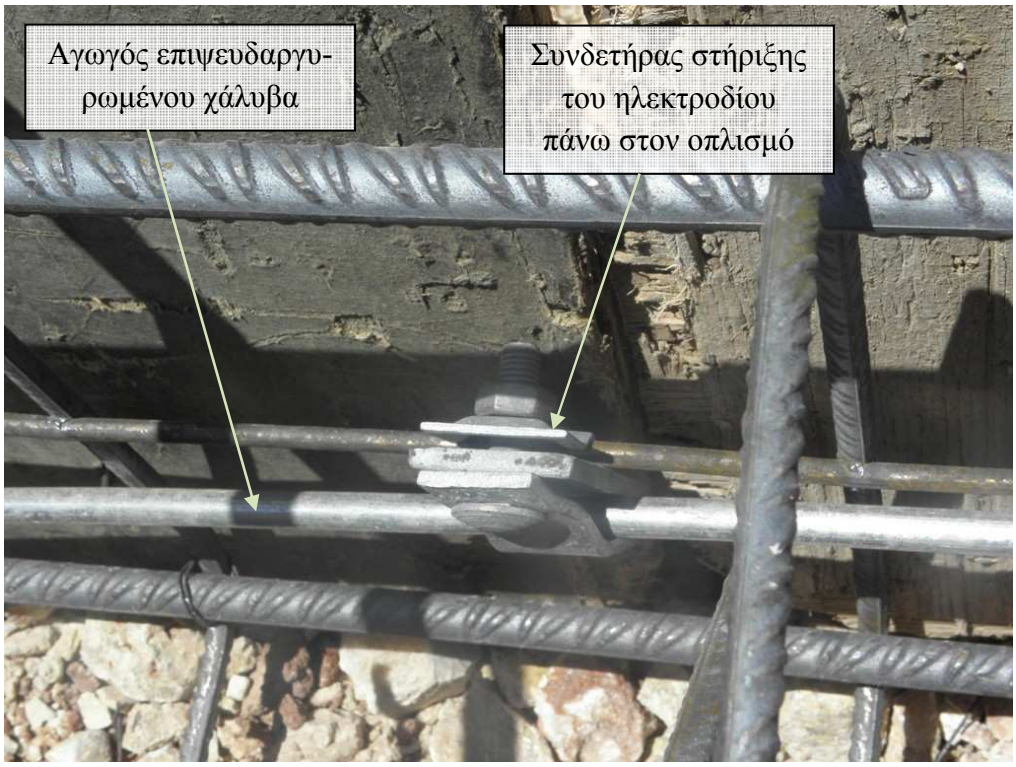
2) Για πλάκες που δεν είναι τετράγωνες θέτουμε: $\alpha = \sqrt{S}$, όπου S = επιφάνεια.

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

Σχήμα 6.4β Ηλεκτρόδια γείωσης – τύποι αντιστάσεων γειωτών

Στη συγκεκριμένη εφαρμογή ολόκληρο το γήπεδο του Φ/Β σταθμού αποτελεί το ηλεκτρόδιο γείωσης της διάταξης, μορφής πλέγματος. Να σημειωθεί εδώ ότι η γείωση προστασίας και η γείωση αντικεραυνικής προστασίας είναι ενιαία. Προβλέπονται επιπλέον χαντάκια τύπου GND που αποτυπώνονται στα σχέδια γείωσης και αντικεραυνικής προστασίας. Επιπλέον, στα Βόρεια δοκάρια στήριξης των πλαισίων τοποθετείται θεμελιακή γείωση εντός του οπλισμού του σκυροδέματος. Σε σημεία όπου η τιμή της τάσης επαφής μπορεί να ξεπεράσει

τα επιτρεπτά όρια (περίφραξη σταθμού), επιπρόσθετα μέτρα μπορούν να ληφθούν μη τη χρήση γειωτών ράβδου οι οποίες θα συνδέονται και με το πλέγμα.



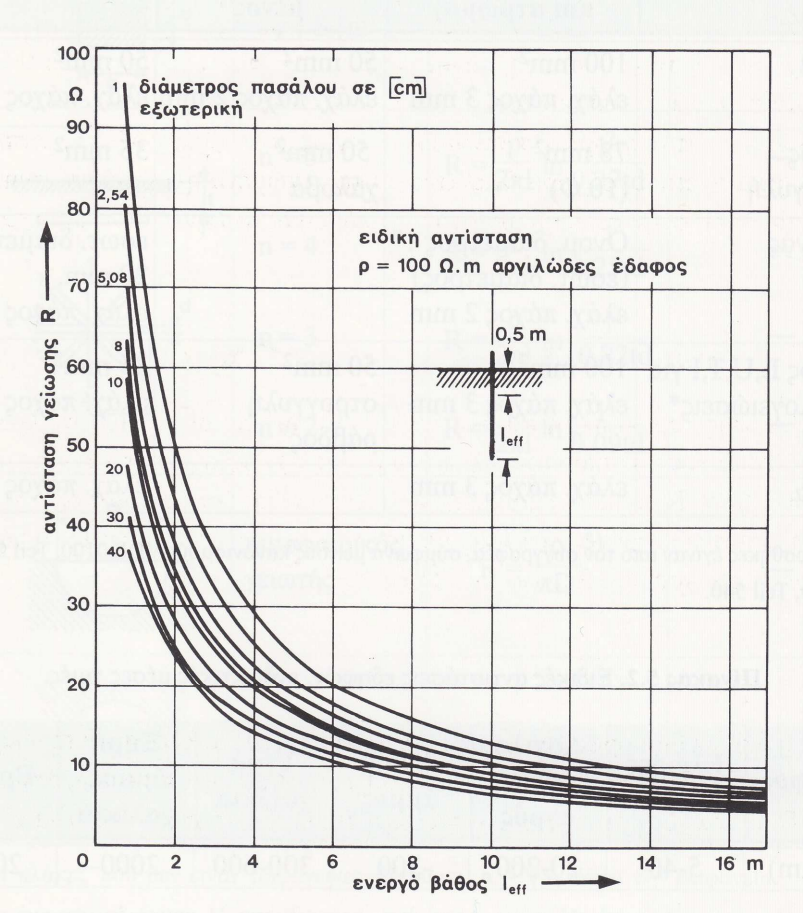
Σχήμα 6.5 Τοποθέτηση ηλεκτροδίου γείωσης εντός σκυροδέματος

- **Γειωτής ράβδου:** Μπορεί να είναι σωλήνας ονομαστικής διαμέτρου μεγαλύτερης της μιας ίντσας ή μια στρογγυλή ράβδος συμπαγής από γαλβανισμένο χάλυβα ή χαλκό, όπως αυτή που απεικονίζεται στο σχήμα 6.6.

Σχήμα 6.6 Ηλεκτρόδιο γείωσης τύπου ράβδου

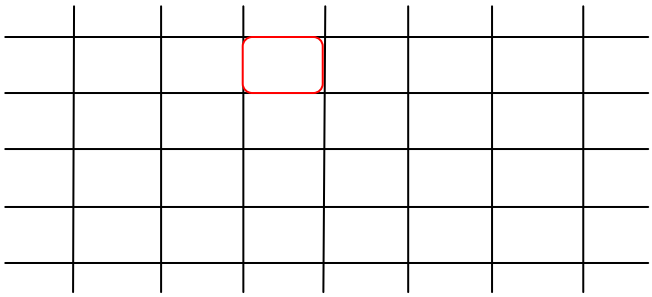
Η ράβδος καρφώνεται κατακόρυφα ή λοξά και σε βάθος μέσα στο έδαφος. Το κάτω μέρος διαμορφώνεται σαν ακίδα για να οδηγείται καλύτερα μέσα στο έδαφος. Η αντίσταση γείωσης είναι περίπου αντιστρόφως ανάλογη του βάθους έμπηξης. Η αντίσταση δεν εξαρτάται σημαντικά από τη πάχος ή τη διάμετρο της ράβδου. Τέλος,

ηλεκτρόδια κατασκευασμένα από χαλκό ή γαλβανισμένο χάλυβα παρουσιάζουν μεγάλη αντοχή στη διάβρωση.



Σχήμα 6.7 Αντίσταση γείωσης κατακόρυφων πασάλων στο έδαφος. Το ενεργό μήκος της ράβδου ισούται με το πραγματικό μήκος μείον μισό μέτρο, δηλαδή $l_{eff} = l-0,5m$

- **Γειωτής πλέγματος:** Πλέγμα από ηλεκτρόδια ταινίας ή αγωγούς κυκλικής ή άλλης διατομής που τοποθετείται οριζόντια στο έδαφος σε βάθος 0,5m με 1m. Το πλεονέκτημα των γειωτών πλέγματος είναι πως οι βηματικές τάσεις στο έδαφος, πάνω από το πλέγμα, είναι αμελητέες. Προφανώς όσο πιο αραιό είναι το πλέγμα τόσο οι βηματικές τάσεις αποκτούν σημαντική τιμή.



Σχήμα 6.8 Ηλεκτρόδιο πλέγματος (ή κάναβος γείωσης). Με κόκκινο χρώμα διακρίνεται το άνοιγμα του πλέγματος ή ″μάτι″ του κανάβου

6.5 Διάβρωση στους γειωτές

Όταν ένα ηλεκτρόδιο τοποθετείται στη γη μπορεί να υποστεί δύο ειδών διαβρώσεις: ιδιοδιάβρωση και διάβρωση επαφής ή ηλεκτροχημική διάβρωση.

- **Ιδιοδιάβρωση:** Παρατηρείται όταν ένα μέταλλο βρίσκεται μόνο του στο έδαφος. Το μέταλλο αντιδρά με το περιβάλλον και βαθμιαία προκαλείται χημική διάβρωση, για παράδειγμα οξείδωση, που εξαρτάται από τον αερισμό του χώματος, την υγρασία του και το βαθμό pH.

- **Διάβρωση επαφής:** Παρατηρείται όταν δύο μέταλλα είναι ενωμένα μεταξύ τους και ενταφιασμένα σε αγώγιμο περιβάλλον. Κάθε μέταλλο αναπτύσσει ηλεκτροχημικό δυναμικό ως προς την άπειρη γη το οποίο εξαρτάται από το μέταλλο και από το περιβάλλον του εδάφους. Από τη στιγμή που τα μέταλλα είναι σε επαφή υπάρχει ροή ρεύματος ιόντων από το αρνητικό προς το θετικό ηλεκτρόδιο. Με τον τρόπο αυτό αφαιρείται μέταλλο από τον ηλεκτραρνητικό γειωτή.

Στην παρούσα εφαρμογή, για τη θεμελιακή γείωση στα Βόρεια δοκάρια των συστοιχιών χρησιμοποιείται γαλβανισμένος (επιψευδαργυρωμένος) χάλυβας διαμέτρου 10mm (Ø10) οποίος είναι ανθεκτικός στη διάβρωση μέσα στο μπετόν. Εντός των χαντακιών οδεύει γαλβανισμένος (επιψευδαργυρωμένος) χαλκός διαμέτρου 8mm (Ø8). Στα σημεία όπου

υπάρχει συμβολή χάλυβα και χαλκού, αυτοί συνδέονται εντός του μπετόν με ειδικό σύνδεσμο όπως στο σχήμα 6.9.

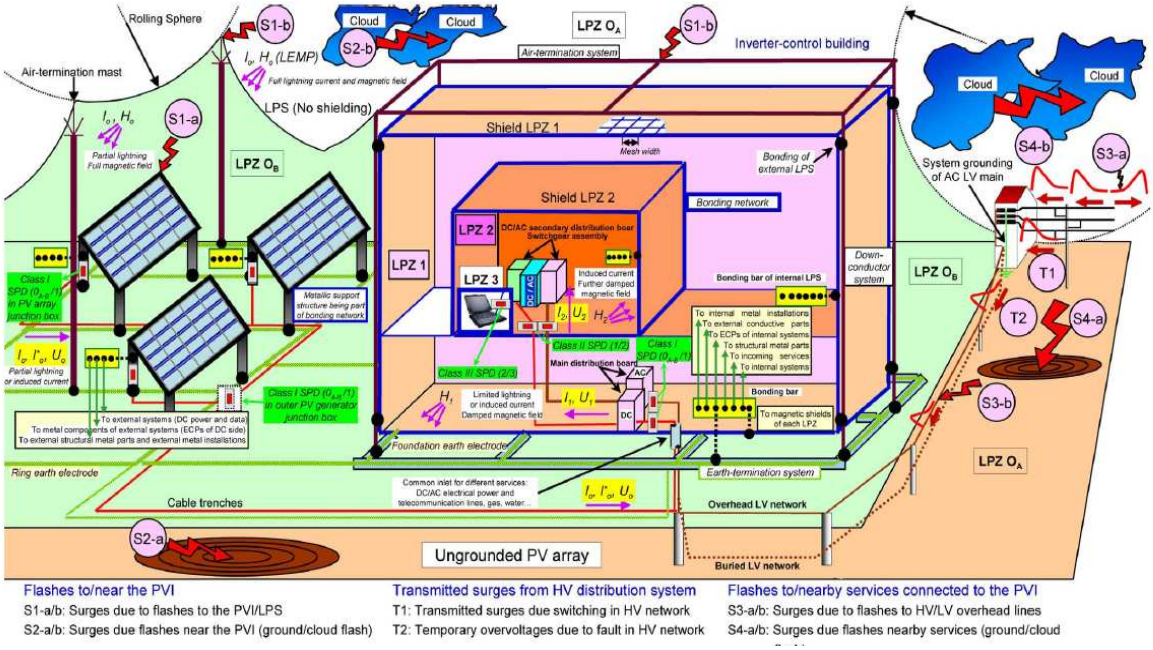
Σχήμα 6.9 Συμβολή χάλυβα και χαλκού εντός του σκυροδέματος

6.6 Αντικεραυνική προστασία

Αντικεραυνική προστασία είναι το σύνολο των μέτρων που λαμβάνονται για την προστασία σε περίπτωση πτώσης κεραυνού. Μια ηλεκτρική εκκένωση μπορεί να πλήξει μια εγκατάσταση από οποιαδήποτε κατεύθυνση και όχι κατ' ανάγκη μόνο κατακόρυφα. Η δράση της μπορεί να είναι άμεση, δηλαδή πλήγμα πάνω σε μια συσκευή, ή έμμεση, δηλαδη να δημιουργηθούν υπερτάσεις στα ηλεκτρικά κυκλώματα και να διασπαστούν τα μονωτικά υλικά τους.

Στο σχήμα 6.10 που ακολουθεί βλέπουμε τον εξοπλισμό μιας Φ/Β εγκατάστασης. Οι διάφορες περιοχές μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ανάλογα με το σημείο που θα συμβεί κεραυνικό πλήγμα. Έτσι έχουμε:

- **Περιοχή S1:** Πλήγματα μέσα στο Φ/Β γήπεδο
- **Περιοχή S2:** Πλήγματα πάνω από το Φ/Β σταθμό
- **Περιοχή S3:** Πλήγματα στο υπόγειο ή εναέριο δίκτυο μεταφοράς του σταθμού
- **Περιοχή S4:** Πλήγματα πλησίον του δικτύου μεταφοράς



Σχήμα 6.10 Χωρισμός του Φ/Β σταθμού σε ζώνες κεραυνικών πληγμάτων

Τα πρότυπα περιγραφής ενός Συστήματος Αντικεραυνικής Προστασίας χωρίζονται σε δύο κατηγορίες:

1. **Πρότυπα σχεδιασμού ΣΑΠ**
    - **ΕΛΟΤ ΕΝ 62305-1, 2006:** Protection against lightning-Part 1: General Principles

- **ΕΛΟΤ ΕΝ 62305-2, 2006:** Protection against lightning-Part 2: Risk Management
- **ΕΛΟΤ ΕΝ 62305-3, 2006:** Protection against lightning-Part 3: Physical damage to structures and life hazard
- **IEC 61643-12:** Low voltage surge protective devices-Part 12: Surge protective devices connected to low voltage power distribution systems – Selection and application principles

2. **Πρότυπα υλικών ΣΑΠ**
   - **ΕΛΟΤ ΕΝ50164-1, 2008:** Lightning protection components (LPC), Part1: Requirement for connection components
   - **ΕΛΟΤ ΕΝ 50164-2, 2008:** Lightning protection conponents (LPC), Part2: Requirements for conductors and earth electrodes

Επιπρόσθετα, υπάρχουν και οι γερμανικοί κανονισμοί VDE0185/78 καθώς και οι κανονισμοί DIN 48852 από τους οποίους διέπονται τα υλικά αντικεραυνικής προστασίας.

6.7 Εξωτερική προστασία

Για την προστασία του εξωτερικού χώρου της εγκατάστασης, ως συλλεκτήριο σύστημα προβλέπεται η τοποθέτηση αντικεραυνικών ακίδων σε κάθε συστοιχία. Οι ακίδες είναι κατασκευασμένες από επιψευδαργυρωμένο χάλυβα διατομής Ø8mm και προεξέχουν περίπου μισό μέτρο πάνω από τη συστοιχία. Στη Βόρεια δοκάρια στήριξης υπάρχει αντίστοιχη αναμονή από χάλυβα που συνδέει την ακίδα με τη θεμελιακή γείωση του συστήματος (σχήμα 6.11). Σαν αγωγοί καθόδου μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι αλουμινένιες βάσεις των πλαισίων

Σχήμα 6.11 Αναμονή ηλεκτροδίου για τη διασύνδεσή της αντικεραυνικής ακίδας με τη θεμελιακή γείωση

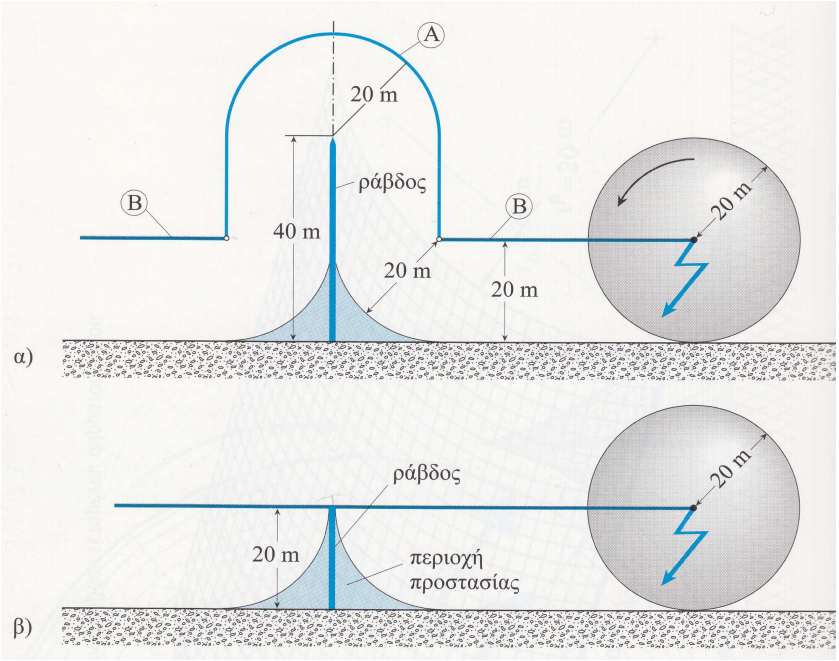
Η απόσταση τοποθέτησης των ακίδων έγινε σύμφωνα με τη μέθοδο της κεραυνικής (ή κυλιόμενης) σφαίρας βάσει του προτύπου IEC 1024. Όταν μια εκκένωση πλησιάσει γειωμένα αντικείμενα τότε ο κεραυνός θα χτυπήσει το αντικείμενο που βρίσκεται πιο καντά. Αυτή η απόσταση μεταξύ κεραυνού και αντικειμένου καλείται **ακτίνα** της κεραυνικής σφαίρας. Η ακτίνα μπορεί να επιλεγεί από 60m έως 20m ανάλογα με τη στάθμη προστασίας που εφαρμόζουμε.

Στάθμη προστασίας	**Ακτίνα Rb κεραυνικής σφαίρας**
I	20m
II	30m
III	45m
IV	60m

Πίνακας 6.2 Ακτίνα κεραυνικής σφαίρας ανάλογα με τη στάθμη προστασίας

Στα σχέδια **"Αγωγοί γείωσης – ακίδες αντικεραυνικής προστασίας"** και **"τοποθέτηση αντικεραυνικών ακίδων"** φαίνεται η εφαρμογή της παραπάνω μεθόδου.

Η περιγραφή της αρχής της κυλιόμενης σφαίρας γίνεται πιο κατανοητή με τη βοήθεια του πιο κάτω σχήματος.



Εικόνα 6.12 Περιοχές προστασίας ράβδων ύψους 40m και 20m

Στο σχήμα α, εκκενώσεις που πλησιάζουν από δεξιά ή αριστερά της ράβδου, σε οποιοδήποτε σημείο της γραμμής (Β) οδηγούνται κατευθείαν στη γη. Εκκενώσεις που πλησιάζουν κοντά σε σημείο της καμπύλης (Α) οδηγούνται στο αλεξικέραυνο ράβδου. Προστατευμένα θεωρούνται τα αντικείμενα που βρίσκονται μέσα στη σκιασμένη περιοχή. Στα δύο σχήματα παρατηρούμε ότι ανεξάρτητα του ύψους του αλεξικέραυνου, η προστατευμένη περιοχή παραμένει η ίδια.

Στη συγκεκριμένη εφαρμογή οι αποστάσεις των ακίδων έχουν υπολογιστεί για στάθμη προστασίας Ι. Στα αντίστοιχα σχέδια φαίνεται η αντικεραυνική σφαίρα και ποιες περιοχές κάτω από αυτή προστατεύονται. Τέλος, λόγω του ότι οι υποσταθμοί και ο οικίσκος ελέγχου είναι επενδυμένοι με μέταλλο, δεν χρειάζεται να ληφθούν επιπρόσθετα μέτρα για την προστασία τους. Το περίβλημά τους λειτουργεί σαν συλλεκτήριος αγωγός που οδηγεί τον κεραυνό άμεσα στο κύριο ηλεκτρόδιο γείωσης του σταθμού.

Σχήμα 6.13 Χάλκινοι πολύκλωνοι αγωγοί συνδεδεμένοι με τη θεμελιακή γείωση του Υ/Σ.

Κεφάλαιο 7

Σύστημα παρακολούθησης και διαχείρισης

Φ/Β σταθμών

7.1 Εισαγωγή – Γενική περιγραφή

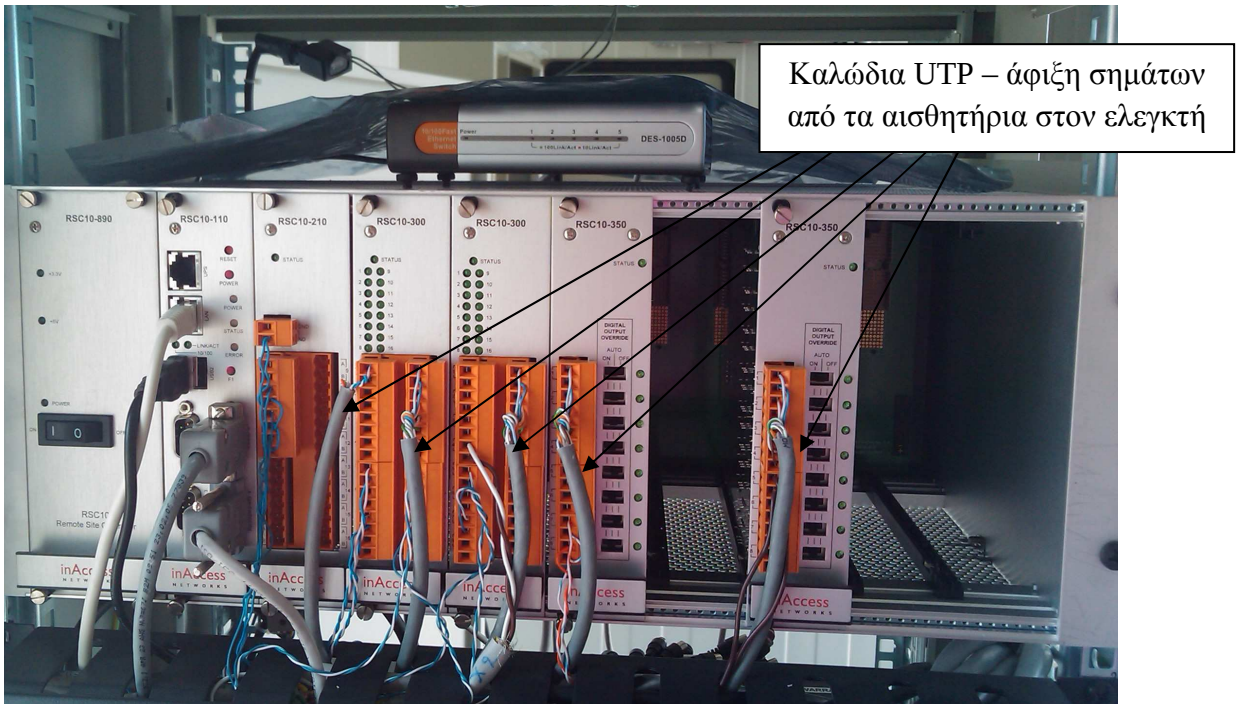
Λόγω των ελάχιστων απαιτήσεων σε τεχνικό προσωπικό, οι Φ/Β σταθμοί συνήθως έχουν τη δυνατότητα διαχείρισης και παρακολούθησης από απόσταση. Αυτό επιτυγχάνεται με ένα σύνολο αισθητήρων που τοποθετούνται στα επιμέρους συστήματα του σταθμού. Τα σήματα των αισθητηρίων οδεύουν μέσω καλωδίων και οπτικών ινών, συλλέγονται σε ένα κεντρικό σύστημα διαχείρισης σημάτων και στη συνέχεια αποστέλλονται μέσω διαδικτύου ή των δικτύων κινητής τηλεφωνίας στον χρήστη. Ένα τέτοιο σύστημα μπορεί να προσφέρει:

- Αυτονομία στη λειτουργία του σταθμού – ελάχιστη παρέμβαση από τον χρήστη
- Αναγνώριση των καταστάσεων συναγερμού και των πιθανών προβλημάτων λειτουργίας
- Περιοδική εκτέλεση διαδικασιών ελέγχου του εξοπλισμού της Φ/Β εγκατάστασης
- Παρακολούθηση, αποθήκευση και διαχείριση τεχνικών παραμέτρων και αυτόματη δημιουργία αναφορών για την εγκατάσταση
- Σύστημα ασφαλείας

Το σύστημα αποτελείται από δύο κύρια μέρη:

- **Υποσύστημα ελέγχου Φ/Β εγκατάστασης:** Περιλαμβάνει τους ελεγκτές και τους αισθητήρες για τη λήψη και τη διαχείριση σημάτων των εποπτευόμενων συσκευών.
- **Κέντρο ελέγχου:** Αποτελείται από κατάλληλο εξοπλισμό και λογισμικό για τη διαχείριση των ληφθέντων σημάτων.

Τέλος, οι απεικόνιση των παραμέτρων γίνεται μέσω λογισμικού portal. Οι υπεύθυνοι του σταθμού έχουν πρόσβαση σε αυτό μέσω του διαδικτύου.



Σχήμα 7.1 Ελεγκτές διαχείρισης σημάτων

7.2 Προσφερόμενες υπηρεσίες από το σύστημα παρακολούθησης

Στη συνέχεια περιγράφονται με λεπτομέρεια οι δυνατότητες και οι προσφερόμενες υπηρεσίες του συστήματος:

- **Παρακολούθηση των αντιστροφέων:** Ελέγχονται οι ηλεκτρικές παράμετροι τόσο στην DC όσο και στην AC μεριά. Επιπλέον είναι δυνατός ο έλεγχος όλων των καταστάσεων λειτουργίας και σφάλματος που δίνει ο αντιστροφέας.

- **Παρακολούθηση διαμερίσματος Μ/Σ:** Η παρακολούθηση γίνεται με ειδικούς αισθητήρες πυρανίχνευσης, καπνού και εσωτερικής θερμοκρασίας. Για τον έλεγχο εισόδου νερών απαιτείται η τοποθέτηση αισθητήρα πλημμύρας στο χαμηλότερο σημείο του πατώματος. Τέλος, παρακολουθούνται και οι παράμετροι του ίδιου του μετασχηματιστή, δηλαδή θερμοκρασία, στάθμη και πίεση λαδιού.

- **Παρακολούθηση των διαμερισμάτων Μ/Τ και Χ/Τ:** Απαιτούνται παρόμοιοι αισθητήρες όπως για την παρακολούθηση του διαμερίσματος των Μ/Σ. Επιπλέον,

είναι δυνατή η διασύνδεση των οργάνων μέτρησης καθώς και του ηλεκτρονόμου SEPAM για απομακρυσμένη διαχείριση των λειτουργιών τους.

- **Παρακολούθηση ηλεκτρικών παραμέτρων στο σημείο σύνδεσης με το δίκτυο:** Γίνεται μέτρηση τάσης, ρεύματος, συχνότητας, ενεργού και άεργου ισχύος και ενέργειας καθώς και του συντελεστή ισχύος. Είναι δυνατή η αποσύνδεση του έργου αν κάποια από τις παραμέτρους λάβει μη επιτρεπτή τιμή. Τέλος, οι τιμές των παραμέτρων αποθηκεύονται ανά τακτά χρονικά διαστήματα (περίοδος 10λέπτου ή μιας ώρας) για μελλοντική δημιουργία αναφορών.

- **Εγκατάσταση μετεωρολογικού σταθμού:** Είναι δυνατή η μέτρηση παραμέτρων όπως εξωτερική θερμοκρασία, θερμοκρασία πλαισίων, ταχύτητα ανέμου και έντασης ηλιακής ακτινοβολίας.

Σχήμα 7.2: Πυρανόμετρο μέτρησης ηλιακής ακτινοβολίας και θερμοκρασίας εξωτερικού χώρου

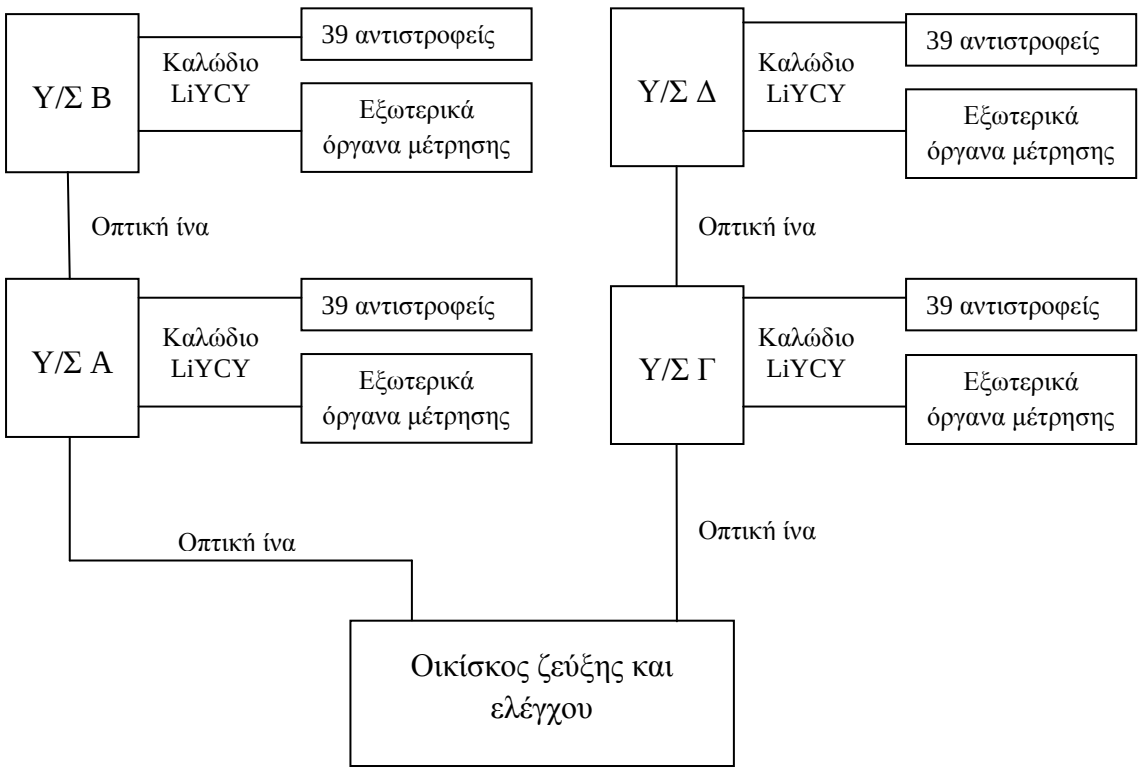
- **Παρακολούθηση και έλεγχος οικίσκων:** Είναι δυνατός ο έλεγχος πρόσβασης στα διαμερίσματα του οικίσκου μέσω μαγνητικών επαφών και συσκευών ανάγνωσης καρτών.

- **Έλεγχος πρόσβασης στο Φ/Β σταθμό:** Μέσω συστήματος ανάγνωσης καρτών και μαγνητικών επαφών.

- **Αναγνώριση καταστάσεων συναγερμού:** Όταν οι τιμές κάποιων παραμέτρων είναι εκτός των κανονικών ορίων. Επιπλέον διατηρείται αρχείο συναγερμών καθώς και αρχείο ενεργειών που έγιναν για την επίλυσή τους.
- **Περιοδικοί έλεγχοι του εξοπλισμού:** Ρουτίνες που τρέχουν ανά τακτά χρονικά διαστήματα και δίνουν πληροφορίες για την γήρανση και την απόδοση του εξοπλισμού.
- **Περιοδικές αναφορές και γραφικές παραστάσεις:** Στατιστικά στοιχεία και γραφήματα επιλεγμένων παραμέτρων που παράγονται ανά τακτικά χρονικά διαστήματα.

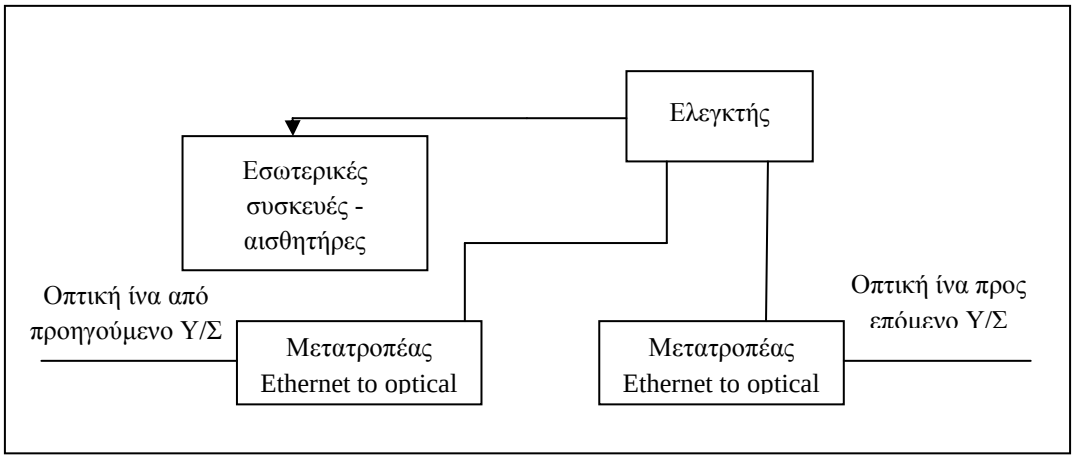
7.3 Περιγραφή της εγκατάστασης για Φ/Β σταθμό με μικρούς αντιστροφείς

Το διάγραμμα της εγκατάστασης φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί:



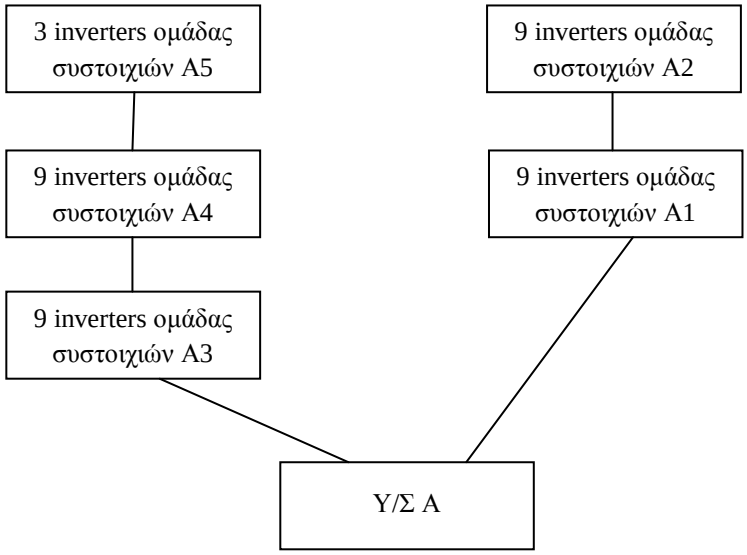
Σχήμα 7.3: Γενικό διάγραμμα εγκατάστασης για Φ/Β σταθμό με μικρούς αντιστροφείς

Σε κάθε οικίσκο τοποθετούνται ελεγκτές για τον έλεγχο των σημάτων. Όλοι οι ελεγκτές συνδέονται μεταξύ τους μέσω οπτικών ινών. Επιπλέον, η προσαρμογή των οπτικών ινών στο πρωτόκολλο Ethernet γίνεται μέσω μετατροπέων Ethernet to Optical.

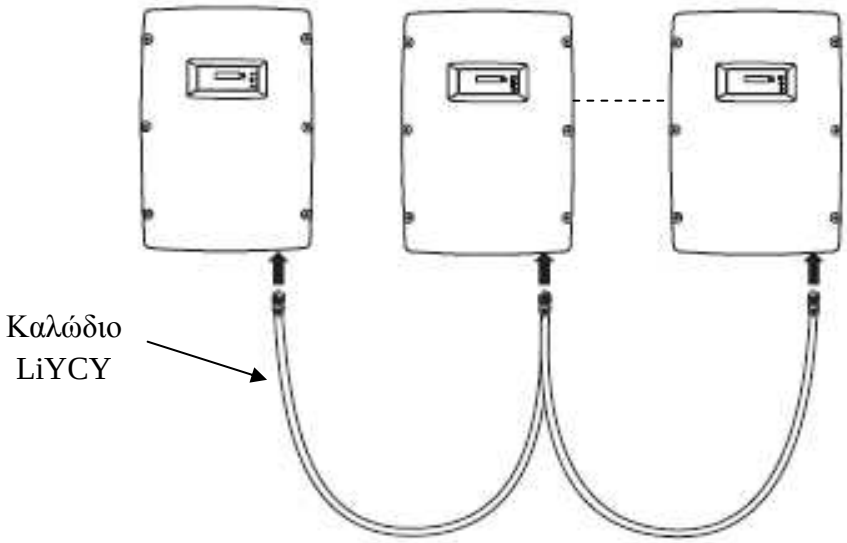


Σχήμα 7.4: Γενικό διάγραμμα εγκατάστασης Υ/Σ ανύψωσης

Το πρωτόκολλο διασύνδεσης των αντιστροφέων είναι RS485. Υποστηρίζει τη διασύνδεση μέχρι και 50 αντιστροφέων σε σειρά πριν το καλώδιο LiYCY καταλήξει στον ελεγκτή. Στην παρούσα εφαρμογή, για παράδειγμα στις συστοιχίες της ομάδας Α, υπάρχει η δυνατότητα να διασυνδεθούν όλοι οι αντιστροφείς με ένα καλώδιο. Παρόλα αυτά, και για να εξασφαλιστεί γρήγορη ταχύτητα μεταφοράς δεδομένων, οι αντιστροφείς χωρίζονται σε δύο ομάδες διασύνδεσης όπως στο σχήμα 7.5:

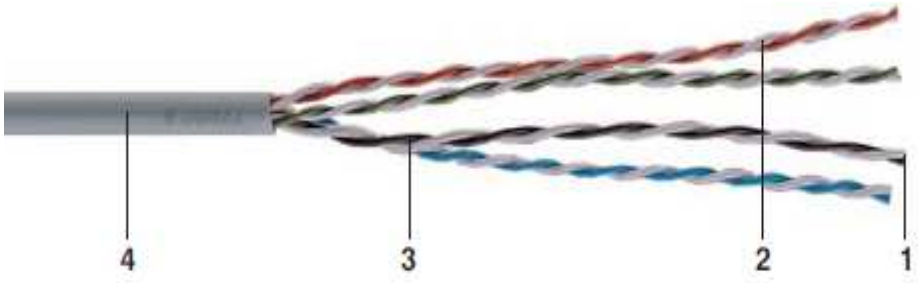


Σχήμα 7.5: Διασύνδεση αντιστροφέων της ομάδας συστοιχιών Α

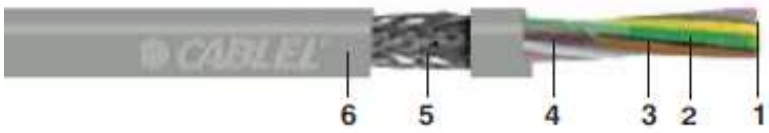


Σχήμα 7.6 Σειριακή σύνδεση των αντιστροφέων

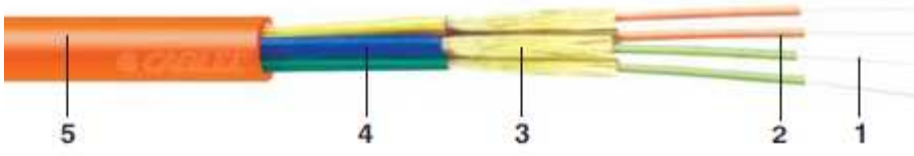
Το καλώδιο LiYCY αποτελείται από δύο ζεύγη συνεστραμμένων αγωγών, ένα για την αποστολή και ένα για τη λήψη δεδομένων. Στην είσοδο και την έξοδο κάθε ομάδας αντιστροφέων τοποθετείται αντικεραυνικό δύο κυκλωμάτων για προστασία από υπερτάσεις. Στις τερματικές ομάδες (εδώ Α5 και Α2) τοποθετείται μόνο ένα αντικεραυνικό. Τέλος, στις ομάδες Α5 και Α2 πρέπει να προσεχθεί ώστε να τερματιστεί ηλεκτρικά ο τελευταίος αντιστροφέας και έτσι και όλη η γραμμή τηλεπικοινωνιών.



Σχήμα 7.7 Καλώδιο UTP CAT5E: 1. Χάλκινος μονόκλωνος αγωγός, 2. Μόνωση πολυαιθυλενίου, 3. Καλωδιακός πυρήνας ζευγών, 4. Μανδύας PVC, προδιαγραφές ISO/IEC 11801, EN50173, EIA/TIA568B



Σχήμα 7.8 Εύκαμπτο καλώδια LiYCY: 1. Χάλκινος πολύκλωνος αγωγός, 2. Μόνωση PVC, 3. Καλωδιακός πυρήνας αγωγών ή ζευγών, 4. Συνθετική ταινία κάλυψης, 5. Θωράκιση πλέγματος επικασσιτερωμένων χάλκινων συρμάτων, 6. Μανδύας PVC, προδιαγραφές VDE 0812, VDE 0815



Σχήμα 7.9 Καλώδιο οπτικών ινών: 1. Οπτική ίνα, 2. Μόνωση πολυαμιδίου, 3. Ατομικές ενισχυτικές ίνες, 4. Ατομικός μανδύας FR LSZH σε κάθε ίνα, 5. Μανδύας FR LSZH, προδιαγραφές IEC 60974, EN18700, VDE0888

Το μήκος των απαιτούμενων καλωδίων αναγράφεται στον πίνακα που ακολουθεί:

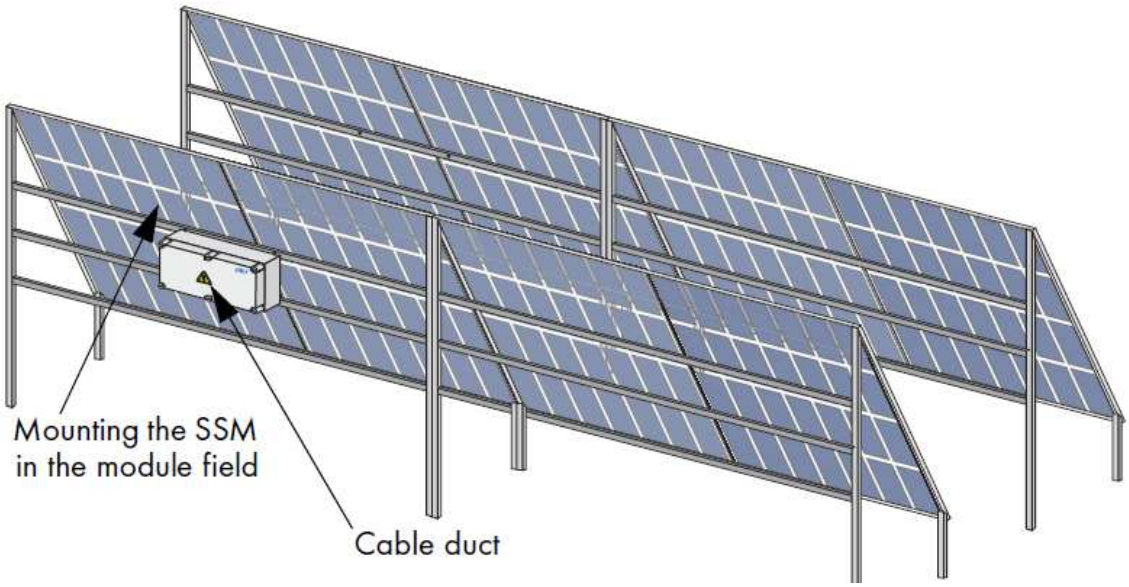
Οπτική ίνα		**Καλώδιο UTP**	**Καλώδιο LiYCY**	
Υ/Σ Β→Υ/Σ Α	18m	Για την καλωδίωση των αισθητήρων εκτιμάται ότι χρειάζονται **800m** καλώδιο UTP	Α5→Υ/Σ Α	170m
Υ/Σ Α→Κέντρο ελέγχου	20m		Α4→Υ/ΣΑ	150m
Υ/Σ Δ→Υ/Σ Γ	18m		Α3→Υ/ΣΑ	125m
Υ/Σ Γ→Κέντρο ελέγχου	20m		Α2→Υ/ΣΑ	100m
-	-		Α1→Υ/ΣΑ	70m
			Ομάδα των 9 inverters	10m
			Ομάδα των 3 inverters	4m
Συνολικά				
Οπτική ίνα	**76m**	**Καλώδιο UTP: 800m**	**Καλώδιο LiYCY**	**2600m**

Πίνακας 7.1

7.4 Περιγραφή της εγκατάστασης για Φ/Β σταθμό με αντιστροφείς των 500kW

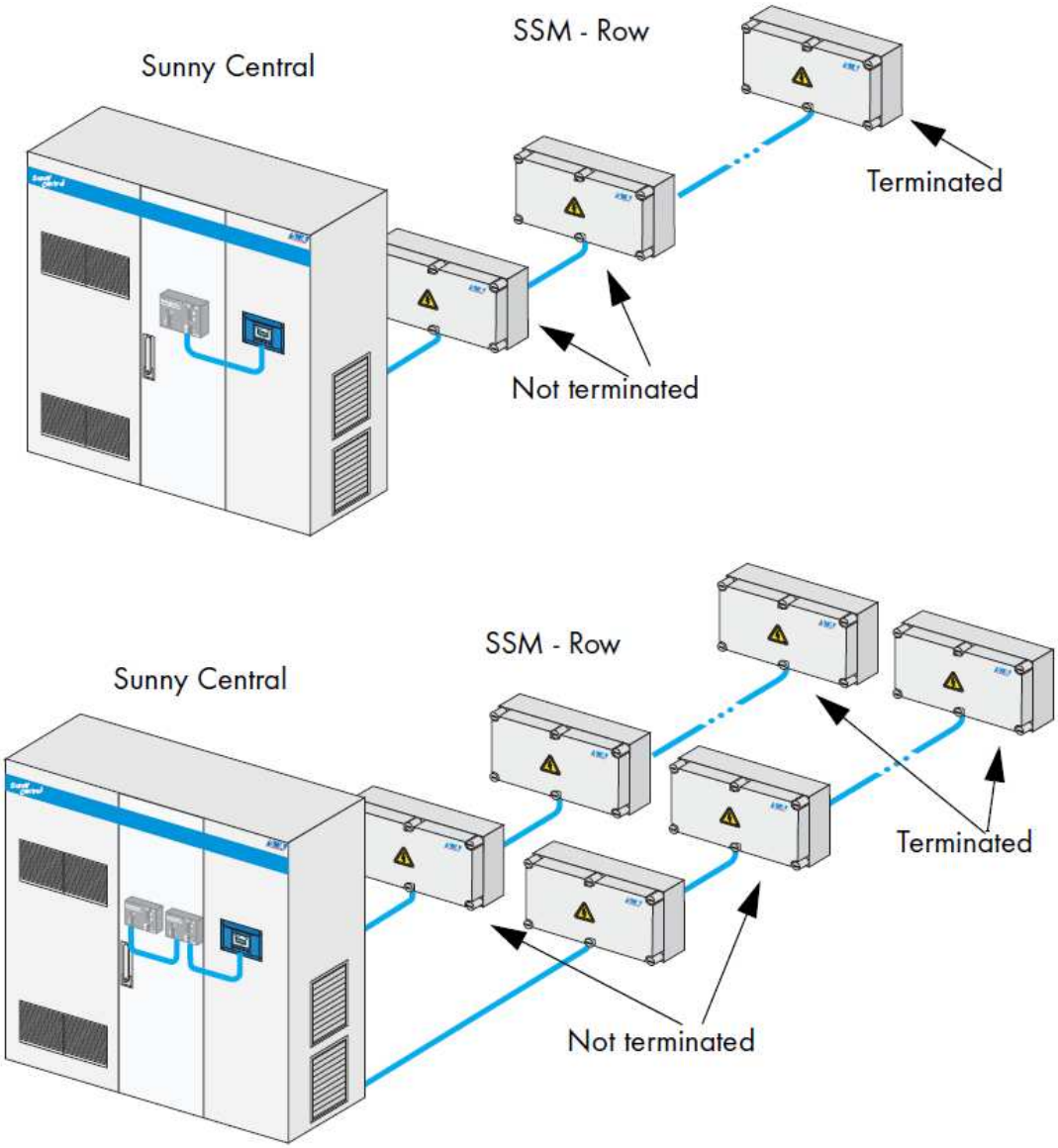
Στην τοπολογία με κεντρικούς αντιστροφείς ο τρόπος διασύνδεσης των οικίσκων μεταξύ τους παραμένει ο ίδιος. Οι χώροι προστατεύονται με τους κατάλληλους αισθητήρες οι οποίοι καταλήγουν στον ελεγκτή του αντίστοιχου οικίσκου.

Όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 5, οι στοιχειοσειρές παραλληλίζονται ανά 8 και καταλήγουν στον ηλεκτρικό πίνακα SSM (Sunny String Monitor) της SMA. Ο πίνακας αυτός είναι εφοδιασμένος με τις κατάλληλες διατάξεις για προστασία και παρακολούθηση του ρεύματος των strings. Επιπλέον, χρησιμοποιώντας το πρωτόκολλο RS485 είναι δυνατή η διασύνδεση πολλών πινάκων σε σειρά και η οδήγηση των σημάτων σε ειδική διάταξη εντός του αντιστροφέα.



Σχήμα 7.10 Σημείο τοποθήτησης του πίνακα SSM

Στο σχέδιο **"Τοπογραφικό διάγραμμα 2"** φαίνονται οι συστοιχίες που συνδέονται σε σειρά σε κάθε ομάδα συστοιχιών. Όπως και στην τοπολογία μικρών αντιστροφέων, ο τελευταίος πίνακας κάθε ομάδας πινάκων πρέπει να τερματιστεί για να λειτουργήσει το τηλεπικοινωνιακό κύκλωμα.

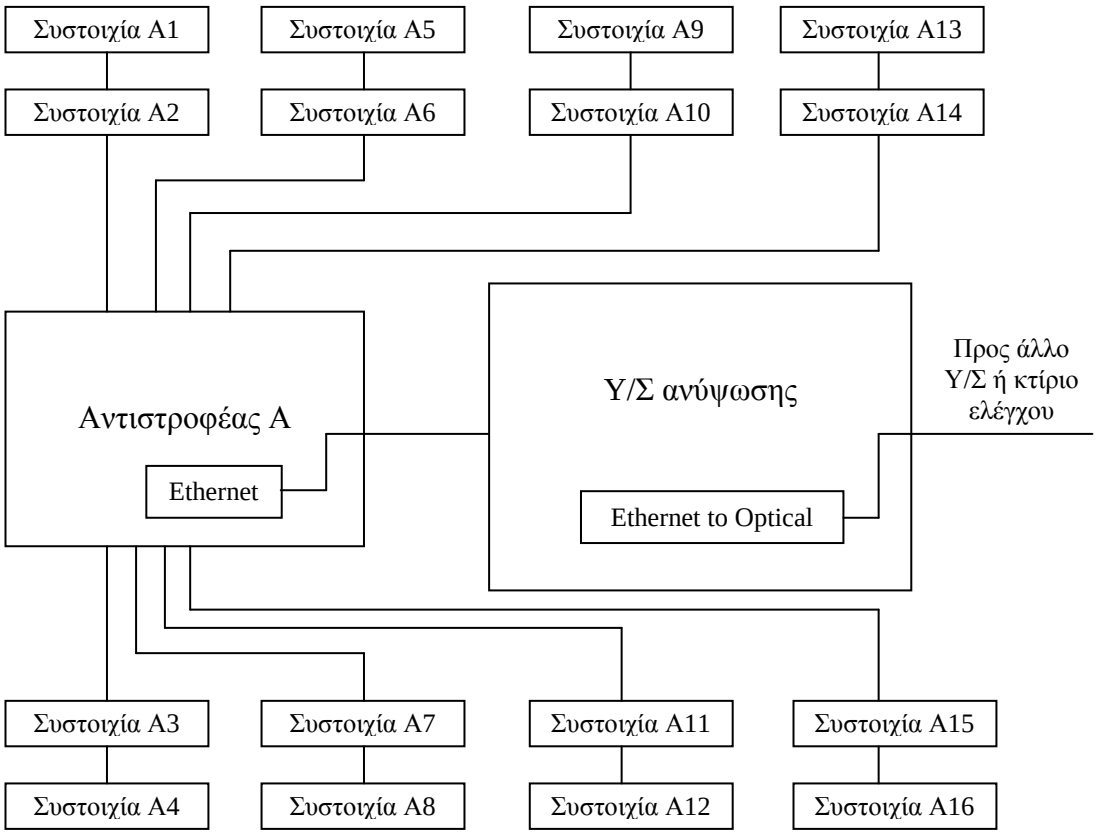


Σχήμα 7.11 Σχηματική αναπαράσταση διασύνδεσης πινάκων SSM

Στον αντιστροφέα υπάρχει ειδική διάταξη που συλλέγει τα δεδομένα από τους πίνακες (σχήμα 7.12). Εκτός από τους πίνακες, η διάταξη αυτή διαθέτει αναλογικές εισόδους για τη σύνδεση εξωτερικών αισθητήρων μέτρησης ακτινοβολίας ή θερμοκρασίας. Επιπλέον, μέσω της θύρας Ethernet που διαθέτει, ο χειριστής μπορεί να έχει απομακρυσμένη πρόσβαση και διαχείριση.

Σχήμα 7.12 Διάταξη συλλογής και διαχείρισης δεδομένων Sunny Central Control

Μέσω της θύρας Ethernet με τη χρήση ενισχυμένου καλωδίου UTP, γίνεται μεταφορά των δεδομένων στον αντίστοιχο Υ/Σ ανύψωσης όπου βρίσκεται και ο ελεγκτής σημάτων.



Σχήμα 7.13: Διασύνδεση συστοιχιών, αντιστροφές και Υ/Σ ανύψωσης ομάδας Α. Όμοια και για τις υπόλοιπες ομάδες

Το μήκος των απαιτούμενων καλωδίων φαίνεται στον πίνακα 7.2

Οπτική ίνα		**Καλώδιο UTP**	**Καλώδιο LiYCY**	
Υ/Σ Α→Υ/Σ Β	80m	Για την καλωδίωση των αισθητήρων και την επικοινωνία μεταξύ αντιστροφέων και Υ/Σ εκτιμάται ότι χρειάζονται **900m** καλώδιο UTP	Α1→Α2→Αντ/φέας Α	98m
Υ/Σ Α→Κέντρο ελέγχου	68m		Α5→Α6→Αντ/φέας Α	98m
Υ/Σ Δ→Υ/Σ Γ	80m		Α9→Α10→Αντ/φέας Α	90m
Υ/Σ Γ→Κέντρο ελέγχου	54m		Α13→Α14→Αντ/φέας Α	100m
			Α3→Α4→Αντ/φέας Α	98m
-	-		Α7→Α8→Αντ/φέας Α	98m
			Α11→Α12→Αντ/φέας Α	90m
			Α15→Α16→Αντ/φέας Α	100m
Συνολικά				
Οπτική ίνα	**282m**	**Καλώδιο UTP: 900m**	**Καλώδιο LiYCY**	**3100m**

Πίνακας 7.2

Κεφάλαιο 8

Εκτίμηση κόστους Φ/Β σταθμών

8.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό επιχειρείται μια ρεαλιστική προσέγγιση του κόστους κατασκευής των σταθμών που έχουν περιγραφεί. Το κόστος των διαφόρων υποδομών, αν και ρεαλιστικό, είναι σίγουρο ότι διαφέρει από έτος σε έτος. Είναι σημαντικό εδώ να αναφερθεί η μείωση της τιμής του πλαισίου πολυκρυσταλλικού πυριτίου το οποίο, τον Σεπτέμβριο του 2008 κόστιζε περίπου 3,40 €/W ενώ τον Σεπτέμβριο του 2009 2,2 €/W. Μιας και τα πλαίσια καθορίζουν πάνω από το 60% της δαπάνης ενός σταθμού, είναι εμφανής η διαφοροποίηση που προκαλείται στο κόστος κατασκευής του.

8.2 Αναλυτικός πίνακας κόστους κατασκευής Φ/Β σταθμού με αντιστροφείς των 11kW

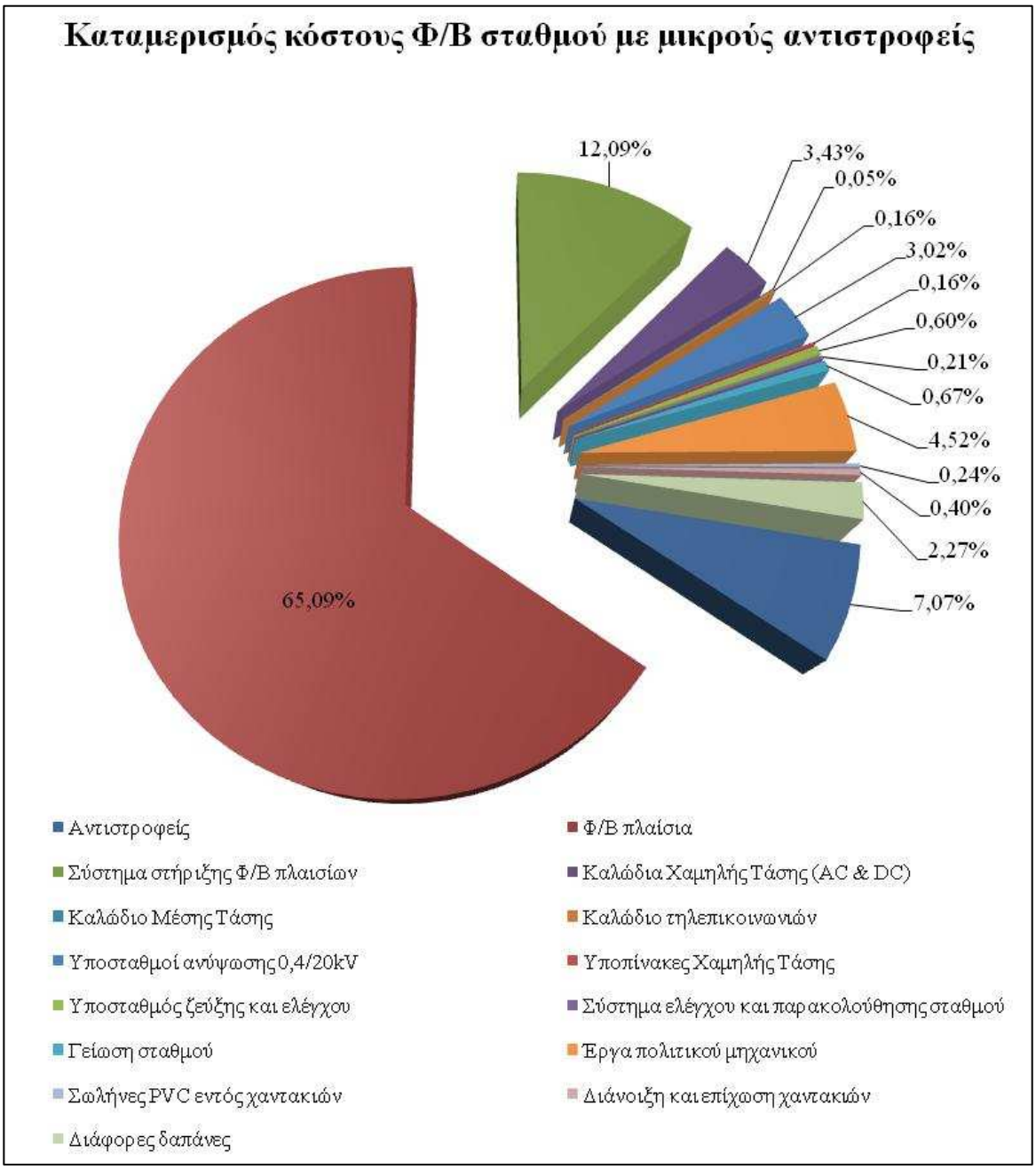
Στη συνέχεια παρουσιάζεται ο αναλυτικός πίνακας του κόστους ενός σταθμού τοπολογίας μικρών αντιστροφέων.

Α/Α	Περιγραφή εξοπλισμού	Ποσότητα	Μονάδες	Τιμή μονάδας	Συνολικό κόστος
1	**Αντιστροφείς**				**468.000,00 €**
1.1	SMC 11000TL της SMA	156	τεμ	3.000,00 €	468.000,00 €
2	**Φ/Β πλαίσια**				**4.305.600,00 €**
2.1	Conergy PowerPlus 210P	9.360	τεμ	460,00 €	4.305.600,00 €
3	**Σύστημα στήριξης Φ/Β πλαισίων**				**800.000,00 €**
3.1	Αλουμίνια στήριξης πλαισίων	-	-	-	800.000,00 €
4	**Καλώδια Χαμηλής Τάσης (AC & DC)**				**227.094,83 €**
4.1	Καλώδιο Φ/Β πλαισίων H07RN-F 6mm^2	44.320	m	0,52 €	23.046,40 €
4.2	Καλώδιο AC αντιστροφέων J1VV-R 3x16mm^2	536	m	10,7021 €	5.736,33 €
4.3	Καλώδιο J1VV-R διασύνδεσης των υποπινάκων με τον Υ/Σ ανύψωσης J1VV-R 3x95mm^2+50mm^2	2.146	m	70,5089 €	151.312,10 €
4.4	Κόστος εγκατάστασης καλωδίων	47.000	m	1,2000 €	47.000,00 €

5	**Καλώδιο Μέσης Τάσης**				**3.520,00 €**
5.1	N2XSY 35mm^2	352	m	7,00 €	2.464,00 €
5.2	Κόστος εγκατάστασης καλωδίου	352	m	3,00 €	1.056,00 €
6	**Καλώδια τηλεπικοινωνιών**				**10.441,32 €**
6.1	Καλώδιο UTP	800	m	0,5215 €	417,20 €
6.2	Καλώδιο LiYCY	2.600	m	1,7862 €	4.644,12 €
6.3	Οπτική ίνα	80	m	2,00 €	160,00 €
6.4	Κόστος εγκατάστασης καλωδίων	3.480	m	1,50 €	5.220,00 €
7	**Υποσταθμοί ανύψωσης 0,4/20kV**				**200.000,00 €**
7.1	Κέλυφος Υ/Σ	1			
7.2	3 Πεδία Μέσης Τάσης RM6 (I,Q,I)	1	τεμ		
7.3	Μετασχηματιστής ελαίου 630kVA	1	τεμ	Συνολικά 4 Υ/Σ ανύψωσης	
7.4	Πίνακας Χαμηλής Τάσης 5 αναχωρήσεων	1	τεμ		50.000,00 €
7.5	Διακόπτες MG Compact NS 160N	5	τεμ		
7.6	Πολυόργανο MG Powerligic PM710	1	τεμ		
7.7	Διακόπτης MG Compact NS 1000N	1	τεμ		
8	**Υποπίνακες Χαμηλής Τάσης**				**10.883,00 €**
8.1	Μικροαυτόματοι ABB S200B 63A, 230/400V	9	τεμ	9,35 €	84,15 €
8.2	Διακόπτης φορτίου - αποζεύκτης ABB OT160	1	τεμ	90,00 €	90,00 €
8.3	AC Αντικεραυνικό	3	τεμ	40,00 €	120,00 €
8.4	Κουτί πίνακα Χαμηλής Τάσης	1	τεμ	250,00 €	250,00 €
9	**Υποσταθμός ζεύξης και ελέγχου**				**39.750,00 €**
9.1	Κέλυφος Υ/Σ ζεύξης και ελέγχου	1	τεμ	9.000,00 €	9.000,00 €
9.2	Εξοπλισμός Χαμηλής Τάσης κτιρίου ελέγχου (Αγορά και εγκατάσταση)	1	σετ	2.000,00 €	2.000,00 €
9.2	Πεδία Μέσης Τάσης SM6 (Πεδίο διασύνδεσης με το δίκτυο, πεδίο μέτρησης, 2 πεδία με αυτόματο διακόπτη φορτίου)	1	τεμ	15.000,00 €	18.000,00 €
9.3	Μετρητικό όργανο PM850	1	τεμ	300,00 €	300,00 €
9.4	Ηλεκτρονόμος SEPAM	2	τεμ	1.300,00 €	2.600,00 €
9.5	Μετασχηματιστής 50kVA για τα φορτία ιδιοκαταναλώσεων του οικίσκου ελέγχου και των Υ/Σ ανύψωσης (αγορά και εγκατάσταση)	1	τεμ	5.000,00 €	5.000,00 €

9.6	Αγορά ηλεκτρονικού εξοπλισμού και εξοπλισμού γραφείου (Η/Υ, γραφείο, fax, εκτυπωτής, καλώδια…)	1	σετ	2.500,00 €	2.500,00 €
9.7	Κλιματιστικό για το χώρο του γραφείου	1	τεμ	350,00 €	350,00 €
10	**Έλεγχος και παρακολούθηση σταθμού (SCADA)**				**14.000,00 €**
10.1	Πλήρης εξοπλισμός ελέγχου και παρακολούθησης (ελεγκτές, αισθητήρες, κάμερες, ιστοί καμερών, καταγραφικά μηχανήματα)	1	σετ	14.000,00 €	14.000,00 €
11	**Γείωση του σταθμού**				**44.280,00 €**
11.1	Αγωγός επικασσιτερωμένου χαλκού Ø8mm για όδευση εντός χαντακιών (Αγορά και τοποθέτηση)	1730	m	11,00 €	19.030,00 €
11.2	Αγωγός επιψευδαργυρωμένου χάλυβα εντός του μπετόν (Αγορά και τοποθέτηση)	4750	m	5,00 €	23.750,00 €
11.3	Σύνδεσμοι αγωγών	800	τεμ	-	1.500,00 €
12	**Έργα πολιτικού μηχανικού**				**299.200,00 €**
12.1	Περίφραξη σταθμού	960	m	20,00 €	19.200,00 €
12.2	Διαμόρφωση σταθμού	-	-	-	100.000,00 €
12.3	Βάσεις αλουμινίων και σκυροδετήσεις				180.000,00 €
13	**Σωλήνες PVC εντός χαντακιών**				**15.840,00 €**
13.1	Σωλήνες διατομής Ø110mm	1200	m	4,70 €	5.640,00 €
13.2	Σωλήνες διατομής Ø70mm	3000	m	3,40 €	10.200,00 €
14	**Διάνοιξη και επίχωση χαντακιών**				**26.500,00 €**
14.1	Διάνοιξη και επίχωση χαντακιών	1060	m^3	25,00 €	26.500,00 €
15	**Διάφορες δαπάνες**				**150.000,00 €**
15.1	Δοκιμές	-	-	-	30.000,00 €
15.2	Επίβλεψη έργου	-	-	-	80.000,00 €
15.3	Μελέτες	-	-	-	40.000,00 €
	Συνολικό κόστος εγκατάστασης				**6.615.109,15 €**

Στο σχήμα που ακολουθεί φαίνεται το κόστος κάθε υποδομής σαν ποσοστό του συνολικού κόστους του σταθμού.



Σχήμα 8.1 Κόστος υποδομών σαν ποσοστό του συνολικού κόστους

Εκτός από το κόστος εγκατάστασης, τον σταθμό επιβαρύνουν ετήσια έξοδα λειτουργίας τα οποία παρουσιάζονται στον πίνακα 8.1

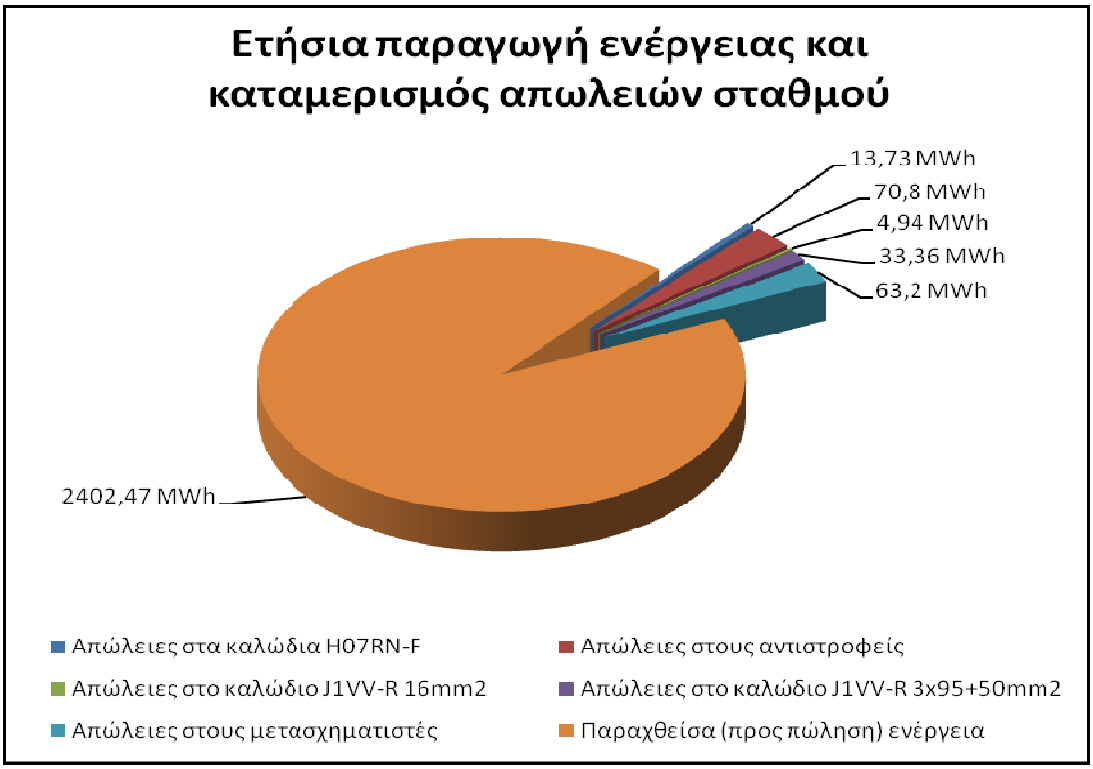
Ετήσια έξοδα λειτουργίας Φ/Β σταθμού	
Ασφάλιστρα	35.000 €
Αμοιβή προσωπικού	18.000 €
Λειτουργία και συντήρηση	25.000 €
Μίσθωση έκτασης	20.000 €
Συνολικά ετήσια έξοδα	**98.000 €**

Πίνακας 8.1

Τα έσοδα του σταθμού προέρχονται από την πώληση της ηλεκτρικής ενέργειας και είναι:

Ετήσια έσοδα Φ/Β σταθμού		
Εκτιμώμενη παραγωγή		2588,5 MWh
Ετήσιες απώλειες	Απώλειες στο καλώδιο H07RN-F	13,73 MWh
	Απώλειες στους αντιστροφείς	66,74 MWh
	Απώλειες στο καλώδιο J1VV-R 16mm^2	4,94 MWh
	Απώλειες στο καλώδιο J1VV-R 3x95+50mm^2	33,36 MWh
	Απώλειες στους μετασχηματιστές	63,20 MWh
Ετήσια παραγωγή ενέργειας		**2406,3 MWh**
Ετήσια έσοδα από την πώληση της ενέργειας		**979.700 €**

Πίνακας 8.2



Σχήμα 8.2 Απώλειες ενέργειας στον ηλεκτρολογικό εξοπλισμό – ετήσια παραγωγή ενέργειας από τον Φ/Β σταθμό

Με βάση τους παραπάνω ενεργειακούς υπολογισμούς ο συντελεστής χρησιμοποίησης του σταθμού είναι:

$$C.F.1 = \frac{2402,47}{8760 \cdot 1,965} \cdot 100\% \cong 13,96\%$$

8.3 Αναλυτικός πίνακας κόστους κατασκευής Φ/Β σταθμού με αντιστροφείς των 500kW

Στη συνέχεια παρουσιάζεται ο αναλυτικός πίνακας του κόστους ενός σταθμού με αντιστροφείς των 500kW.

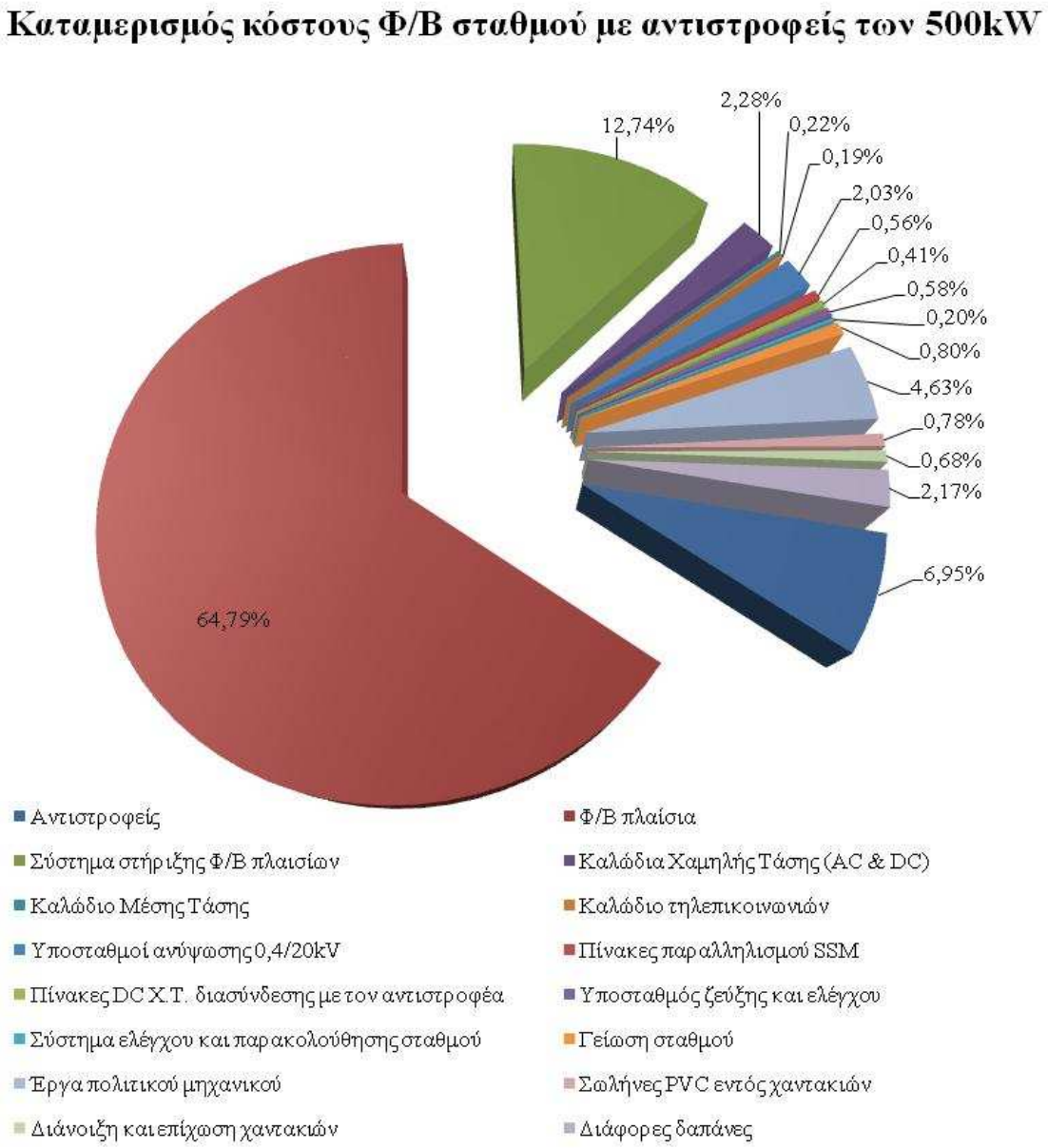
Α/Α	Περιγραφή εξοπλισμού	Ποσότητα	Μονάδες	Τιμή μονάδας	Συνολικό κόστος
1	**Αντιστροφείς**				**480.000,00 €**
1.1	SMA Sunny Central 500HE	4	τεμ	115.000,00 €	460.000,00 €
1.2	Οικίσκοι προστασίας αντιστροφέων	4	τεμ	5.000,00 €	20.000,00 €
2	**Φ/Β πλαίσια**				**4.474.880,00 €**
2.1	Conergy PowerPlus 210P	9.728	τεμ	460,00 €	4.474.880,00 €
3	**Σύστημα στήριξης Φ/Β πλαισίων**				**880.000,00 €**
3.1	Αλουμίνια στήριξης πλαισίων	-	-	-	880.000,00 €
4	**Καλώδια Χαμηλής Τάσης (AC & DC)**				**157.597,75 €**
4.1	Καλώδιο Φ/Β πλαισίων H07RN-F 6mm^2	22.810	m	0,52 €	11.861,20 €
4.2	Καλώδιο DC J1VV-R 50mm^2	8.272	m	11,40 €	94.300,80 €
4.3	Καλώδιο J1VV-R 300mm^2 διασύνδεσης της Φ/Β γεννήτριας με τους αντιστροφείς	80	m	63,32 €	5.065,45 €
4.4	Καλώδιο J1VV-R 400mm^2 διασύνδεσης των φάσεων του αντιστροφέα με τον Μ/Σ ανύψωσης	96	m	75,00 €	7.200,00 €
4.5	Καλώδιο J1VV-R 240mm^2 διασύνδεσης του ουδετέρου του αντιστροφέα με τον Μ/Σ ανύψωσης	32	m	50,6970 €	1.622,30 €

4.6	Κόστος εγκατάστασης καλωδίων	37.548	m	1,20 €	37.548,00 €
5	**Καλώδιο Μέσης Τάσης**				**15.500,00 €**
5.1	N2XSY 35mm^2	1.550	m	7,00 €	10.850,00 €
5.2	Κόστος εγκατάστασης καλωδίου	1.550	m	3,00 €	4.650,00 €
6	**Καλώδια τηλεπικοινωνιών**				**12.993,57 €**
6.1	Καλώδιο UTP	900	m	0,5215 €	469,35 €
6.2	Καλώδιο LiYCY	3.100	m	1,7862 €	5.537,22 €
6.3	Οπτική ίνα	282	m	2,00 €	564,00 €
6.4	Κόστος εγκατάστασης καλωδίων	4.282	m	1,50 €	6.423,00 €
7	**Υποσταθμοί ανύψωσης 0,4/20kV**				**140.000,00 €**
7.1	Κέλυφος Υ/Σ	1	τεμ	Συνολικά 4 Υ/Σ ανύψωσης	35.000,00 €
7.2	3 Πεδία Μέσης Τάσης RM6 (I,Q,I)	1	τεμ		
7.3	Μετασχηματιστής ελαίου 630kVA	1	τεμ		
7.4	Πίνακας Χαμηλής Τάσης	1	τεμ		
7.6	Πολυόργανο MG Powerligic PM710	1	τεμ		
7.7	Διακόπτης MG Compact NS 1000N	1	τεμ		
8	**Πίνακες παραλληλισμού Sunny String Monitoring**				**38.400,00 €**
8.1	Πίνακες Sunny String Monitoring με αντικεραυνική διάταξη και διακόπτη φορτίου συστοιχίας	64	τεμ	600,00 €	38.400,00 €
9	**Πίνακες Χ.Τ. για τη διασύνδεση των συστοιχιών με τις μπάρες DC των αντιστροφέων**				**28.000,00 €**
9.1	Πίνακες Χ.Τ. 8 αφίξεων	8	τεμ	Συνολικά 8 πίνακες	28.000,00 €
9.2	Διακόπτες φορτίου ABB S803PV-S80	64	τεμ		
9.3	Κεντρικοί διακόπτες DC ABB SACE EmaxDC	8	τεμ		
9.4	Επιτηρητές μόνωσης	8	τεμ		
10	**Υποσταθμός ζεύξης και ελέγχου**				**39.750,00 €**
10.1	Κέλυφος Υ/Σ ζεύξης και ελέγχου	1	τεμ	9.000,00 €	9.000,00 €
10.2	Εξοπλισμός Χαμηλής Τάσης κτιρίου ελέγχου (Αγορά και εγκατάσταση)	1	σετ	2.000,00 €	2.000,00 €

10.3	Πεδία Μέσης Τάσης SM6 (Πεδίο διασύνδεσης με το δίκτυο, πεδίο μέτρησης, 2 πεδία με αυτόματο διακόπτη φορτίου)	1	τεμ	15.000,00 €	18.000,00 €
10.4	Μετρητικό όργανο PM850	1	τεμ	300,00 €	300,00 €
10.5	Ηλεκτρονόμος SEPAM	2	τεμ	1.300,00 €	2.600,00 €
10.6	Μετασχηματιστής 50kVA για τα φορτία ιδιοκαταναλώσεων του οικίσκου ελέγχου και των Υ/Σ ανύψωσης (αγορά και εγκατάσταση)	1	τεμ	5.000,00 €	5.000,00 €
10.7	Αγορά ηλεκτρονικού εξοπλισμού και εξοπλισμού γραφείου (Η/Υ, γραφείο, fax, εκτυπωτής, καλώδια…)	1	σετ	2.500,00 €	2.500,00 €
10.8	Κλιματιστικό για το χώρο του γραφείου	1	τεμ	350,00 €	350,00 €
11	**Έλεγχος και παρακολούθηση σταθμού (SCADA)**				**14.000,00 €**
11.1	Πλήρης εξοπλισμός ελέγχου και παρακολούθησης (ελεγκτές, αισθητήρες, κάμερες, ιστοί καμερών, καταγραφικά μηχανήματα)	1	σετ	14.000,00 €	14.000,00 €
12	**Γείωση του σταθμού**				**55.100,00 €**
12.1	Αγωγός επικασσιτερωμένου χαλκού Ø8mm για όδευση εντός χαντακιών (Αγορά και τοποθέτηση)	3.700	m	11,00 €	40.700,00 €
12.2	Αγωγός επιψευδαργυρωμένου χάλυβα εντός του μπετόν (Αγορά και τοποθέτηση)	2.580	m	5,00 €	12.900,00 €
12.3	Σύνδεσμοι αγωγών	800	τεμ	-	1.500,00 €
13	**Έργα πολιτικού μηχανικού**				**320.000,00 €**
13.1	Περίφραξη σταθμού	1.000	m	20,00 €	20.000,00 €
13.2	Διαμόρφωση σταθμού	-	-	-	100.000,00 €
13.3	Βάσεις αλουμινίων και σκυροδετήσεις				200.000,00 €
14	**Σωλήνες PVC εντός χαντακιών**				**53.663,00 €**
14.1	Σωλήνες διατομής Ø70mm	2780	m	3,40 €	9.452,00 €
14.2	Σωλήνες διατομής Ø90mm	9.960	m	4,00 €	39.840,00 €
14.3	Σωλήνες διατομής Ø110mm	930	m	4,70 €	4.371,00 €
15	**Διάνοιξη και επίχωση χαντακιών**				**46.750,00 €**
15.1	Διάνοιξη και επίχωση χαντακιών	1.870	m^3	25,00 €	46.750,00 €
16	**Διάφορες δαπάνες**				**150.000,00 €**

16.1	Δοκιμές	-	-	-	30.000,00 €
16.2	Επίβλεψη έργου	-	-	-	80.000,00 €
16.3	Μελέτες	-	-	-	40.000,00 €
Συνολικό κόστος εγκατάστασης					**6.906.634,32 €**

Ακολουθεί διάγραμμα με το κόστος των υποδομών του σταθμού.



Σχήμα 8.3 Κόστος υποδομών σαν ποσοστό του συνολικού κόστους

Τα ετήσια λειτουργικά έξοδα του σταθμού εκτιμάται ότι θα είναι τα ακόλουθα:

Ετήσια έξοδα λειτουργίας Φ/Β σταθμού	
Ασφάλιστρα	35.000 €
Αμοιβή προσωπικού	18.000 €
Λειτουργία και συντήρηση	40.000 €
Μίσθωση έκτασης	20.000 €
Συνολικά ετήσια έξοδα	**113.000 €**

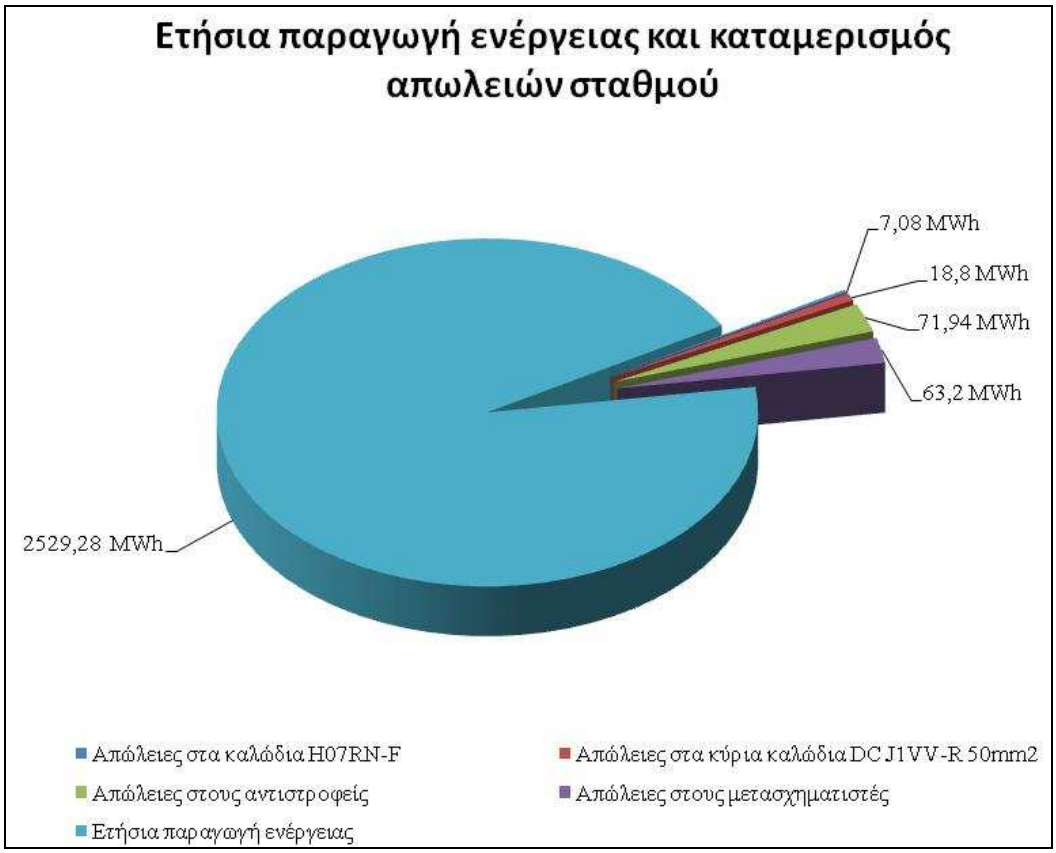
Πίνακας 8.3

Τέλος, από την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, τα έσοδα του σταθμού θα είναι:

Ετήσια έσοδα Φ/Β σταθμού		
Εκτιμώμενη παραγωγή		2690,30 MWh
Ετήσιες απώλειες	Απώλειες στο καλώδιο H07RN-F	7,08 MWh
	Απώλειες στους αντιστροφείς	71,94 MWh
	Απώλειες στο καλώδιο J1VV-R 50mm^2	18,80 MWh
	Απώλειες στους μετασχηματιστές	63,20 MWh
Ετήσια παραγωγή ενέργειας		**2529,3 MWh**
Ετήσια έσοδα από την πώληση της ενέργειας		**1.029.779,200 €**

Πίνακας 8.4

Στο σχήμα 8.4 που ακολουθεί φαίνεται ο καταμερισμός των ηλεκτρικών απωλειών του σταθμού καθώς και η συνολική προς πώληση ενέργεια.



Σχήμα 8.4

Με βάση τους παραπάνω ενεργειακούς υπολογισμούς ο συντελεστής χρησιμοποίησης του σταθμού είναι:

$$C.F.2 = \frac{2529,3}{8760 \cdot 2,042} \cdot 100\% \cong 14,13\%$$

8.4 Συμπεράσματα

Από τις παραπάνω εκτιμήσεις γίνεται φανερό ότι το κόστος κατασκευής των σταθμών είναι παραπλήσιο. Η αγορά των Φ/Β πλαισίων αντιστοιχεί σε ποσοστό τουλάχιστον 64% της συνολικής εγκατάστασης. Αυτό έχει ως συνέπεια η αυξομείωση του κόστους των πλαισίων να ρυθμίζει καθοριστικά το τελικό κόστος των σταθμών. Σημαντική διαφοροποίηση παρατηρείται στο κόστος κατασκευής των βάσεων στήριξης μιας και μεγαλύτερες συστοιχίες απαιτούν πιο ανθεκτικά θεμέλια και ισχυρότερα αλουμίνια. Οι υποσταθμοί ανύψωσης

κοστίζουν λιγότερο σε ένα έργο με κεντρικούς αντιστροφείς λόγω του απλούστερου ηλεκτρολογικού εξοπλισμού τους στο διαμέρισμα Χαμηλής Τάσης. Παρόλα αυτό, επιπλέον εξοπλισμός είναι απαραίτητος για τη διασύνδεση των 16 συστοιχιών με τις DC μπάρες εισόδου του αντιστροφέα. Σε σχέση με τις απώλειες ενέργειας, αυτές είναι μικρότερες σε σταθμό με αντιστροφείς των 500kW. Αυτό οφείλεται στη κυρίως σε μικρότερες απώλειες που παρουσιάζονται στην καλωδίωση Χαμηλής Τάσης και αποτυπώνεται και στη διαφοροποίηση των συντελεστών χρησιμοποίησης.

Κεφάλαιο 9

Συμπεράσματα και προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

9.1 Συμπεράσματα

Η σχεδίαση και κατασκευή ενός Φ/Β σταθμού είναι ένα σύνθετο πρόβλημα με πολλές παραμέτρους που σίγουρα δεν έχει μία μόνο λύση. Η αγορά παρέχει πληθώρα υλικών που επιτρέπει την ανάπτυξη σταθμών με πολλές παραλλαγές. Για τις τοπολογίες που μελετήθηκαν στην παρούσα εργασία μπορούμε να αναφέρουμε τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα που αναδείχτηκαν.

Τοπολογία αντιστροφέων των 11kW

- Κάθε συστοιχία αποτελεί και μια αυτόνομη διάταξη που μπορεί να απομονωθεί από τις υπόλοιπες σε περίπτωση σφάλματος. Συνήθως έχουμε τόσες συστοιχίες όσοι και οι αντιστροφείς. Αυξάνεται η αξιοπιστία και η διαθεσιμότητα του σταθμού με άμεση συνέπεια την αύξηση της τελικής παραγωγής

- Άμεση αντικατάσταση του αντιστροφέα σε περίπτωση βλάβης. Δεν χρειάζεται να τεθεί εκτός λειτουργίας μεγάλο τμήμα του σταθμού. Επιπλέον δεν είναι απαραίτητη η πληρωμή ετήσιων συμβολαίων συντήρησης με την εταιρεία κατασκευής των αντιστροφέων

- Ευκολότερος εντοπισμός και επίλυση βλαβών στα πλαίσια χωρίς την ανάγκη ύπαρξης ειδικών συσκευών κατάδειξης των σφαλμάτων

- Απαιτείται πιο πολύπλοκος ηλεκτρολογικός εξοπλισμός στο τμήμα Χαμηλής Τάσης των Υ/Σ ελέγχου. Χρησιμοποιούνται πίνακες με πολλές αναμονές εισόδου και καθώς και ο απαραίτητος διακοπτικός εξοπλισμός σε κάθε αναμονή.

- Σχετικά απλό δίκτυο χαντακιών όδευσης των καλωδίων

- Δύσκολη επιτήρηση του σταθμού σε περίπτωση χρήσης πολλών αντιστροφέων

- Μεγαλύτερες απώλειες στα καλώδια Χαμηλής Τάσης

Τοπολογία αντιστροφέων των 500kW

- Γίνεται έλεγχος των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών των στοιχειοσειρών κατά τη λειτουργία του έργου. Έτσι, αν υπάρχουν δυσλειτουργίες, αυτές καταδεικνύονται άμεσα
- Όπως φαίνεται και στα σχέδια, η όδευση των καλωδίων προς τους αντιστροφείς είναι αρκετά πολύπλοκη. Οφείλεται στο ότι ο αντιστροφέας τοποθετείται κεντρικά και οι συστοιχίες βρίσκονται γύρω από αυτόν με αποτέλεσμα να παρατηρούνται διασταυρώσεις πολλών τύπων χαντακιών
- Απαιτείται λιγότερος ηλεκτρολογικός εξοπλισμός στο τμήμα Χαμηλής Τάσης των Υ/Σ ανύψωσης. Χρησιμοποιείται πίνακας μίας μόνο αναχώρησης προς την Χαμηλή Τάση του αντιστροφέα με ένα διακόπτη ισχύος. Επιπρόσθετα, ο αντιστροφέας φέρει μεγάλο μέρος του διακοπτικού εξοπλισμού (διακόπτης – ασφαλειοαποζεύκτης φορτίου) καθώς και αντικεραυνικής προστασίας.
- Απαιτείται η εγκατάσταση χώρου στέγασης των αντιστροφέων (κιόσκι) και έτσι ανάγκη για καλύτερο χωροταξικό σχεδιασμό.
- Υπάρχει ανάγκη συντήρησης από εξειδικευμένο συνεργείο με αποτέλεσμα την αύξηση των ετήσιων εξόδων λειτουργίας του σταθμού. Επιπλέον, κατά τη διάρκεια συντήρησης ή βλάβης χάνεται μεγάλο μέρος της παραγωγής μέχρι την επαναλειτουργία της διάταξης.

Ο χωροταξικός και ηλεκτρολογικός σχεδιασμός που έγινε στην εργασία δεν είναι μοναδικός ούτε απαραίτητα ο βέλτιστος. Στην πραγματικότητα, οι διαθέσιμες προς εγκατάσταση εκτάσεις έχουν πιο ακαθόριστα σχήματα και η όδευση των καλωδίων δεν είναι τόσο συμμετρική.

9.2 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Στην εργασία αυτή γίνεται μια συνολική προσπάθεια παρουσίασης των βασικών βημάτων σχεδιασμού ενός Φ/Β σταθμού. Αν και ρεαλιστική, δεν είναι δυνατόν να περιγραφούν με μεγάλη λεπτομέρεια όλα τα στάδια σε μία μόνο εργασία. Κατά την άποψή μου, περαιτέρω μελέτη θα μπορούσε να γίνει στους εξής τομείς:

- Μελέτη ρευμάτων βραχυκύκλωσης με ειδικό λογισμικό για την κατάλληλη επιλογή του διακοπτικού εξοπλισμού σε σχέση με την αντοχή τους στο βραχυκύκλωμα
- Μελέτη της διάταξης γείωσης με ειδικό λογισμικό για τον προσδιορισμό της ύπαρξης ή μη βηματικών τάσεων και τάσεων επαφής. Επιπλέον μπορεί να προσδιοριστεί και η αποτελεσματικότητα των χρησιμοποιούμενων γειωτών.
- Μελέτη διαθεσιμότητας του Φ/Β σταθμού και του εξοπλισμού ειδικότερα βάση του προτύπου

Βιβλιογραφία

[1] **Solar Electricity: A Practical Guide to Designing and Installing Small Photovoltaic Systems** , Simon Roberts , New York : Prentice Hall

[2] **Solar Energy – Fundamentals, Design, Modelling and Applications** , G.N. Tiwari

[3] **Planning and Installing Photovoltaic Systems – A Guide for Installers, Architects and Engineers** , Second Edition , International Solar Energy Society, German Section.

[4] **Βέλτιστος Σχεδιασμός Αυτόνομων Φωτοβολταϊκών Συστημάτων** , Κωνσταντίνος Σώρος , Διδακτορική Διατριβή.

[5] **Φωτοβολταϊκά Συστήματα** , Ι.Ε. Φραγκιαδάκης , Εκδόσεις ΖΗΤΗ

[6] **Photovoltaic Engineering Handbook** , F. Lasnier and T.G. Ang , Εκδόσεις Adam Hilger

[7] **Solar Electricity** , Edited by Tomas Markvart , Second Edition , Unesco Energy Engineering Series

[8] **Solar Energy Handbook** , Dr. Jan F. Kreider & Dr. Frank Kreider , Mc Graw-Hill

[9] **Συμβολή στο Βέλτιστο Σχεδιασμό και στον Υπολογισμό της Αξιοπιστίας Συστημάτων με Αιολικές, Φωτοβολταϊκές και Θερμικές Πηγές** , Αναστάσιος Μπακουλτσής , Διδακτορική διατριβή

[10] **Practical Handbook of Photovoltaics – Fundamentals and Applications** , Tom Markvart & Luis Castãner.

[11] **Φωτοβολταϊκή Τεχνολογία** , Κ. Καγκαράκη , Καθηγητή Ε.Μ. Πολυτεχνείου

[12] **Ηλεκτρικές Εγκαταστάσεις Καταναλωτών** , Πέτρος Ντοκόπουλος , Εκδόσεις ΖΗΤΗ

[13] **Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας από Ανανεώσιμες Πηγές** , Μιχ. Π. Παπαδόπουλος , Καθηγητής Ε.Μ.Π. , Αθήνα 1997

[14] **Εισαγωγή στα Ημιαγώγιμα Υλικά και Φωτοβολταϊκές Διατάξεις** , Κ.Θ. Δέρβος , Καθηγητής Ε.Μ.Π. , Αθήνα 2007

[15] **Επίδραση Σκίασης και Ρύπανσης στην Ενεργειακή Απόδοση Φωτοβολταϊκού Σταθμού** , Ιάσων Α. Ρουτσολιάς , Διπλωματική Εργασία

[16] **Μοντέλο Ενεργειακής Απόδοσης Φωτοβολταϊκής Συστοιχίας** , Αλεξάνδρα Δ. Πέππα , Διπλωματική Εργασία

[17] **Σεμινάριο "Γειώσεις Δικτύων και Εγκαταστάσεων"** , Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας , 6-10 Οκτωβρίου 1997

[18] **Utility Aspects of Grid Connected Photovoltaic Power Systems** , International Energy Agency , Task V Report IEA PVPS T5-01:1998 December 1998

[19] **Photovoltaics in Buildings: Guide to the Installations of PV Systems** , DTI/Pub URN 02/788

[20] **A Guide to Photovoltaic System Design and Installation** , California Energy Commission , Consultant Report

[21] **Κανονισμός Εσωτερικών Ηλεκτρικών Εγκαταστάσεων - Πρότυπο ΕΛΟΤ HD 384**

[22] **National Electrical Code 2008**

[23] **Electric Power Substation Engineering** , Edited by John D. McDonald , CRC Press

[24] **Πρότυπο IEC 60364-7-712** Electrical Installations of buildings-Part 7-712: Requirements for Special Installations or Locations-Solar Photovoltaic (PV) Power Supply Systems

Δημοσιεύσεις

[25] **Optimal PV System Dimentioning with Obscured Solar Radiation** , K. Kalaitzakis, Renewable Energy Vol. 7 No1 pp. 51-56 1996

[26] **A Simple Monitoring Method for Estimation of Shading Loss of Photovoltaic Systems** , Kenji Otani, Koichi Sakuta and Kosuke Kurokawa , EuroSun98 The Second ISES-Europe Solar Congress, Slovenia September 14-17 1998

[27] **Calculating the Position of the Sun** , Robert Walraven , Solar Energy Vol. 20 pp. 393-397 Pergamon Press 1978

[28] **Energy Loss in Photovoltaic Systems** , Wagdy R. Anis and M. Abdulsadek Nour , Journal of Power Sources, 51 (1994) pp. 367-374

[29] **Euro Realo Inverter Efficiency: DC-Voltage Dependency** , F.P. Baumgartner , 20th European Photovoltaic Solar Energy Conference, 6-10 June 2005, Barcelona, Spain

[30] **Realistic Values of Various Parameters for PV System Design** , Kosuke Kurokawa, Renewable Energy 15 (1998) pp.157-164 Pergamon

[31] **Optimal Sizing of Array and Inverter for Grid-Connected Photovoltaic Systems** , Jayanta Deb Monto, Yigzaw G. Yohanis, Brian Norton , Solar Energy 80 (2006) pages 1517 – 1539

[32] **Lightning and Surge Protection in Photovoltaic Installations** , Jeús C. Hernández, Pedro G. Vidal and Francisco Jurado , IEEE Transactions on power delivery, Vol 23, No4, October 2008

Ιστοσελίδες

[33] http://www.solar.com.gr/documents/manual_web.htm (Εγχειρίδιο Εγκατάστασης Φ/Β Γεννήτριας)

[34] http://vergina.eng.auth.gr/IHT/A%20Tomos/A04%20-%20fotoboltaika/07-Gkouliaras_MELETH-KATASK%20FOTOBOLT.pdf (Μελέτη και κατασκευή Φωτο-βολταϊκού Πάρκου για κάλυψη ενεργειακών εφαρμογών σε παραγωγικές μονάδες. Συμπεράσματα και προοπτικές.)

[35] www.leutron.de (Lightning/Surge Protection for Photovoltaic Systems)

[36] http://download.sma.de/smaprosa/dateien/5710/SMC11000TL-DEL092415.pdf (Τεχνικά χαρακτηριστικά του αντιστροφέα Sunny Mini Central 11000TL)

[37] http://download.sma.de/smaprosa/dateien/1348/SB_SMC-BGR092840.pdf (Εγχειρίδιο χρήσης αντιστροφέων Sunny Mini Central)

[38] http://download.sma.de/smaprosa/dateien/7796/SC4-63HE-BGR093371.pdf (Εγχειρίδιο χειρισμού αντιστροφέα Sunny Central)

[39] http://download.sma.de/smaprosa/dateien/7796/SC400_500_630-IEN090830.pdf (Οδηγός εγκατάστασης αντιστροφέα Sunny Central)

[40] http://www.schneider-electric.gr/ (Ηλεκτρολογικός εξοπλισμός Χαμηλής και Μέσης Τάσης)

[41] http://www.electrical-installation.schneider-electric.com/ei-guide/electrical-installation.htm (Οδηγός Ηλεκτρικών Εγκαταστάσεων)

[42] www.abb.com (Ηλεκτρολογικό υλικό Χαμηλής και Μέσης Τάσης)

[43] www.fulgor.gr

[44] www.cablel.gr } Καλώδια Χαμηλής Τάσης, Μέσης Τάσης και Επικοινωνιών

[45] www.conergy.gr (Τεχνικά χαρακτηριστικά Φ/Β πλαισίων)

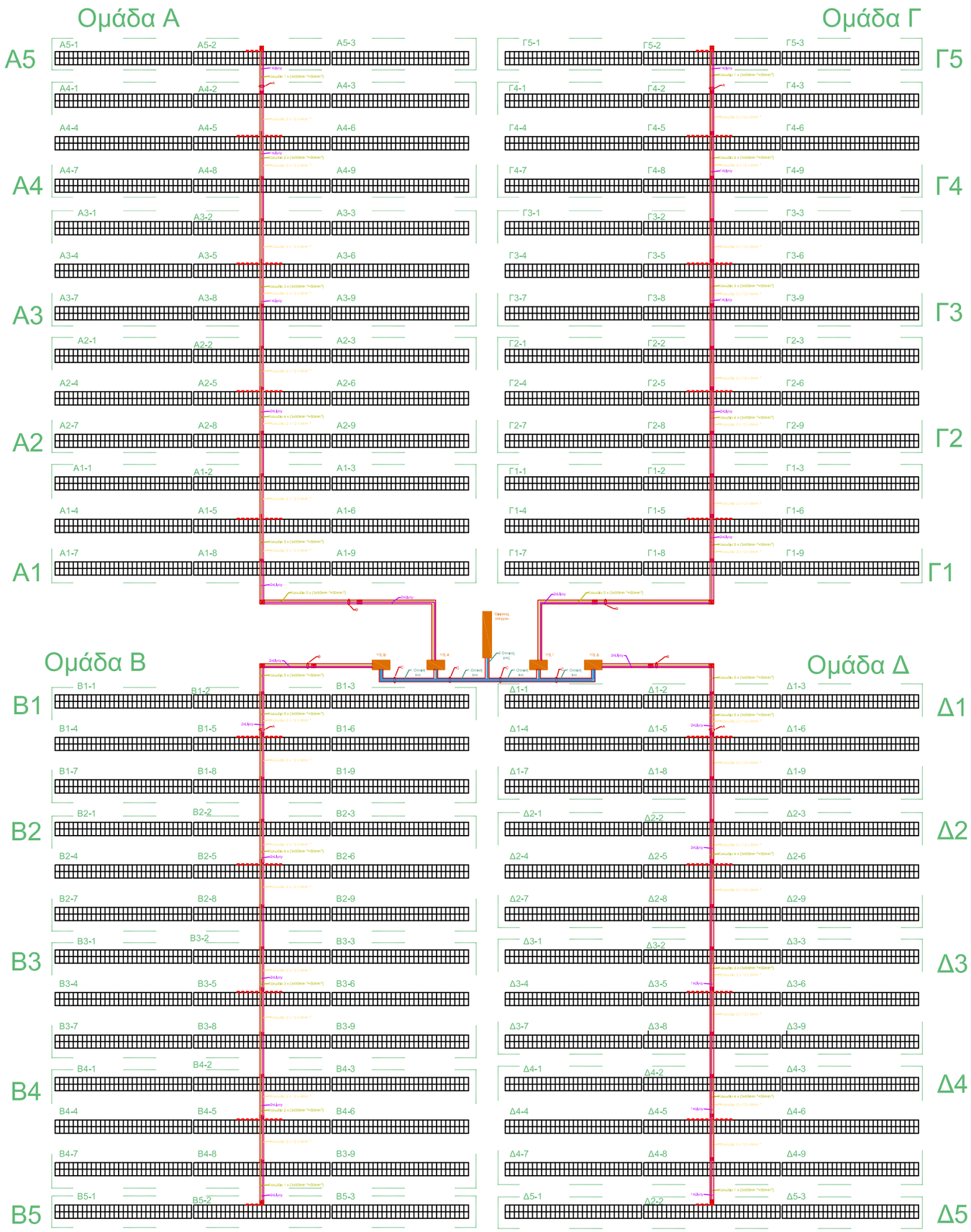
[46] http://elektrotechnica.gr

[47] www.affordable-solar.com

[48] http://www.itacanet.org/eng/elec/solar/pv.pdf

[49] www.positiveenergysolar.com

[50] www.solar.com.gr



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Η/Υ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

Μελέτη διαμορφωσης διασυνδεδεμένου Φωτοβολταϊκού Σταθμού 2MW

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Στέφανος Δημήτριος Κ. Κακαβούλης

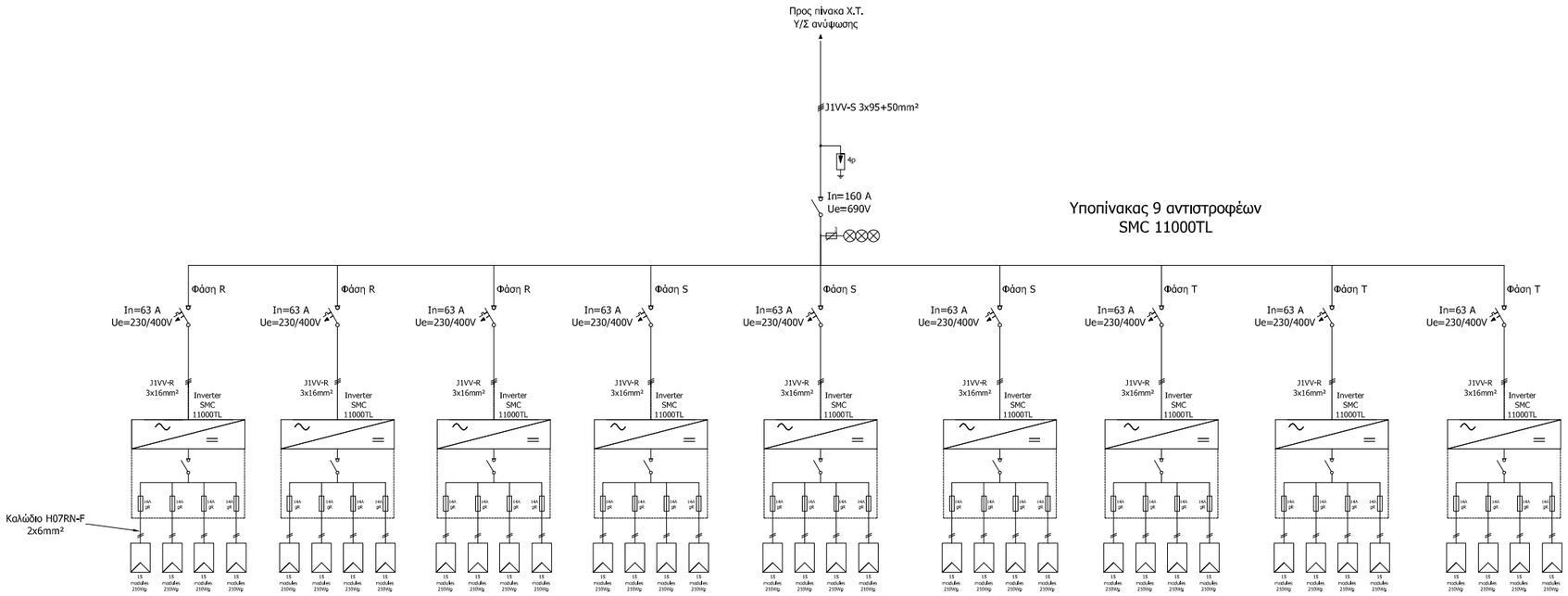
Επιβλέπων: Σταύρος Παπαθανασίου
Επίκουρος καθηγητής Ε.Μ.Π.

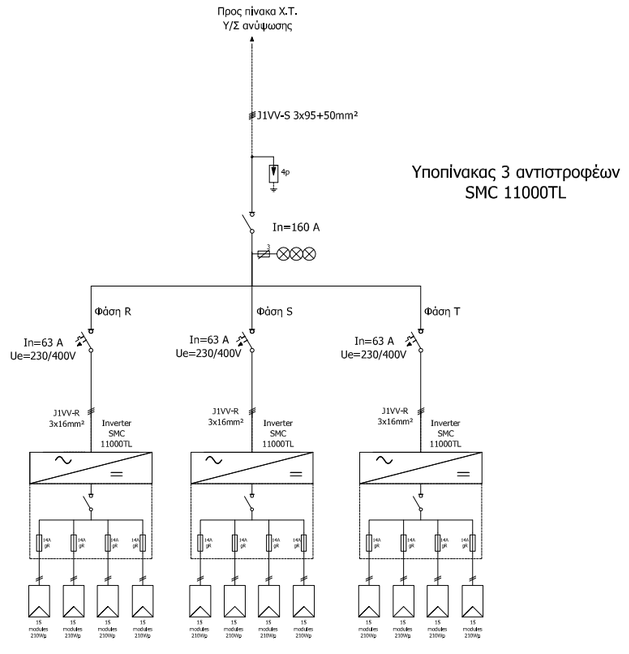
Αθήνα, Σεπτέμβριος 2009

Σχέδιο: Τοπογραφικό διάγραμμα 1

Κλίμακα: 1:350

Παρατηρήσεις: Σχέδιο της μελέτης Φ/Β σταθμού με μικρούς αντιστροφείς





ΥΠΟΜΝΗΜΑ ΜΟΝΟΓΡΑΜΜΙΚΟΥ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΟΣ	
	Διακόπτης Φορτίου
	Μικροαυτόματος
	Απαγωγέας Υπερτάσεων
	Μετατροπέας DC/AC SMC 11000TL
	Τηκτή ασφάλεια 14A τύπου gR
	Φωτοβολταϊκά Πλαίσια Conergy PowerPlus 210P

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Η/Υ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

Μελέτη διαμορφωσης διασυνδεδεμένου Φωτοβολταϊκού Σταθμού 2MW

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Στέφανος Δημήτριος Κ. Κακαβούλης

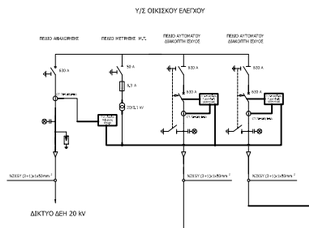
Επιβλέπων: Σταύρος Παπαθανασίου
Επίκουρος καθηγητής Ε.Μ.Π.

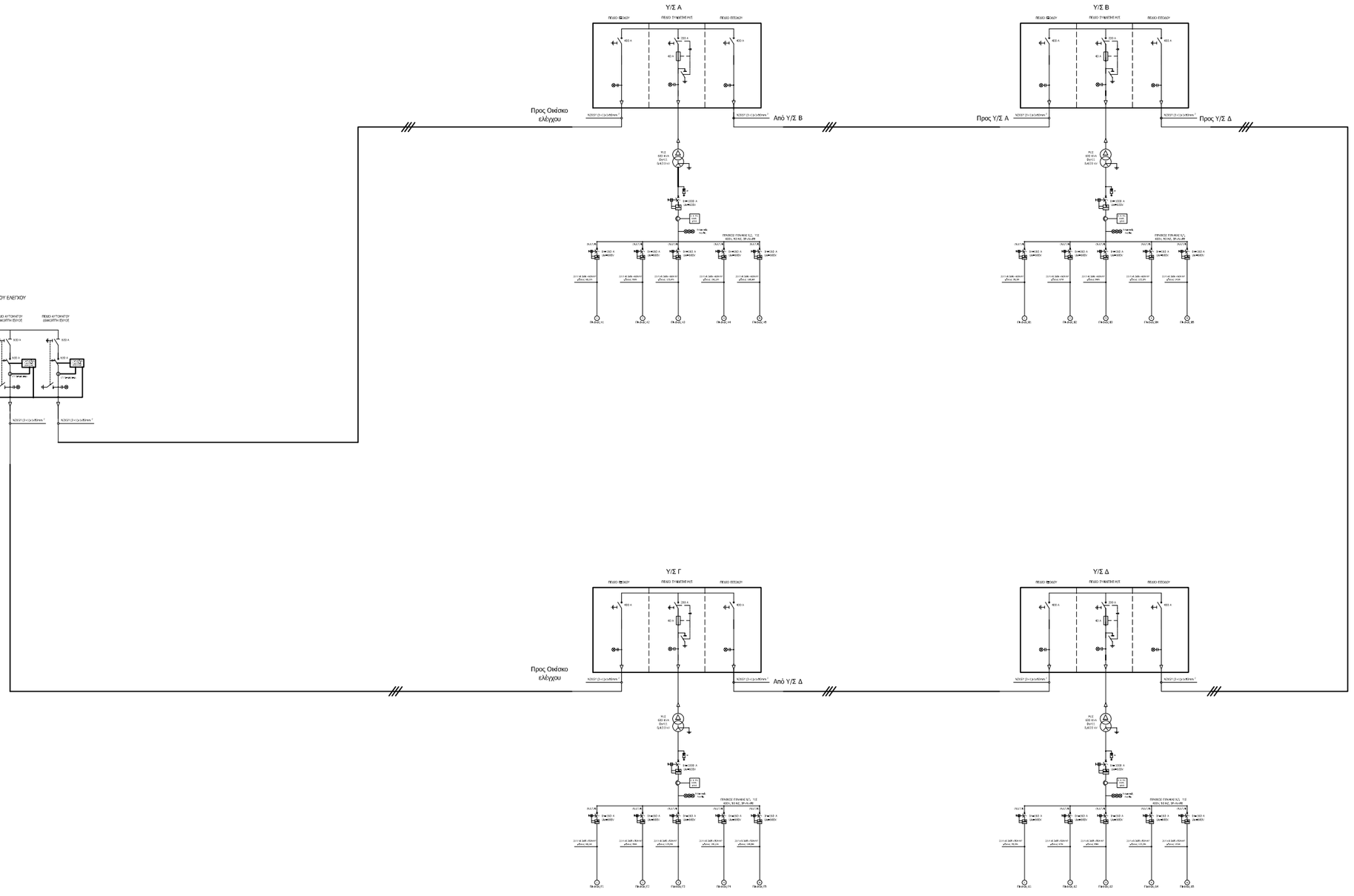
Αθήνα, Σεπτέμβριος 2009

Σχέδιο: Μονογραμμικό διάγραμμα Χαμηλής Τάσης 1

Κλίμακα: -

Παρατηρήσεις: Σχέδιο της μελέτης Φ/Β σταθμού με μικρούς αντιστροφείς





ΥΠΟΜΝΗΜΑ ΜΟΝΟΓΡΑΜΜΙΚΟΥ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΟΣ	
	Διακόπτης Φορτίου
	Διακόπτης Ισχύος
	Μ/Σ ανύψωσης 0.4/20kV 630kVA , Dyn11
	Πολυόργανο μέτρησης ηλεκτρικών παραμέτρων
	Απαγωγείς υπερτάσεων
	Ασφάλειες Μ.Τ.
	Διάταξη αποζεύκτη - γείωσή
	Χωρητικός καταμεριστής και ενδεικτικές λυχνίες

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Η/Υ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

Μελέτη διαμορφωσης διασυνδεδεμένου Φωτοβολταϊκού Σταθμού 2 MW

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Στέφανος Δημήτριος Κ. Κακαβούλης

Επιβλέπων: Σταύρος Παπαθανασίου
Επίκουρος καθηγητής Ε.Μ.Π.

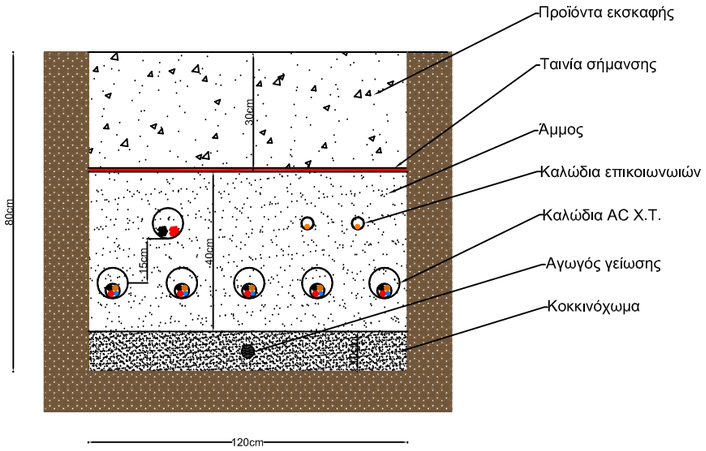
Αθήνα, Σεπτέμβριος 2009

Σχέδιο: Μονογραμμικό διάγραμμά Χ.Τ. - Μ.Τ. 1

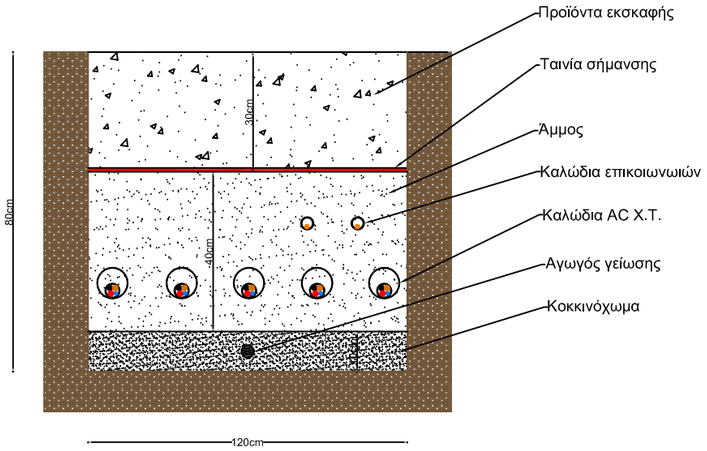
Κλίμακα: -

Παρατηρήσεις: Σχέδιο της μελέτης Φ/Β σταθμού με μικρούς αντιστροφείς

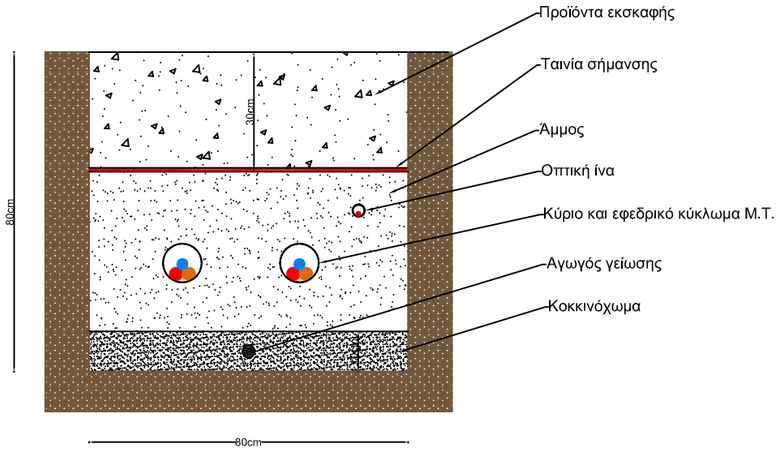
Χαντάκι τύπου A



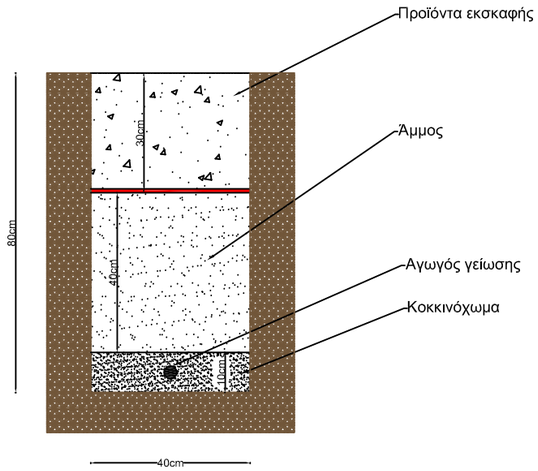
Χαντάκι τύπου B



Χαντάκι τύπου C



Χαντάκι τύπου GND



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Η/Υ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

Μελέτη Διαμορφωσης Διασυνδεδεμένου Φωτοβολταϊκού Σταθμού 2MW

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Στέφανος Δημήτριος Κ. Κακαβούλης

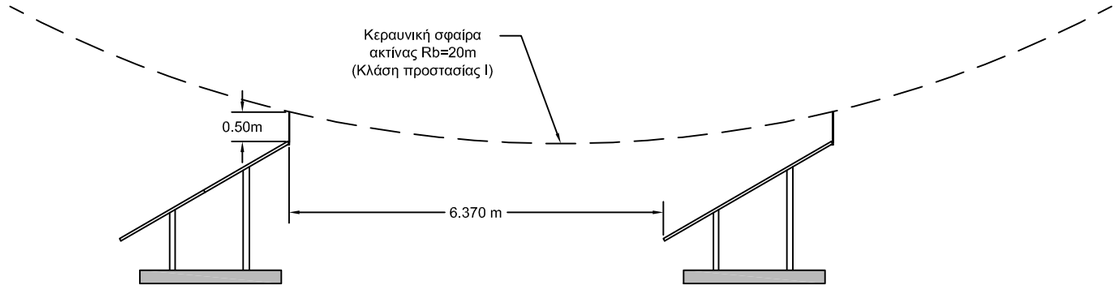
Επιβλέπων: Σταύρος Παπαθανασίου
Επίκουρος καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2009

Σχέδιο: Τομές χαντακιών 1

Κλίμακα: 1:8

Παρατηρήσεις: Σχέδιο της μελέτης Φ/Β σταθμού με μικρούς αντιστροφείς



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Η/Υ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

Μελέτη διαμορφωσης διασυνδεδεμένου Φωτοβολταϊκού Σταθμού 2MW

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Στέφανος Δημήτριος Κ. Κακαβούλης

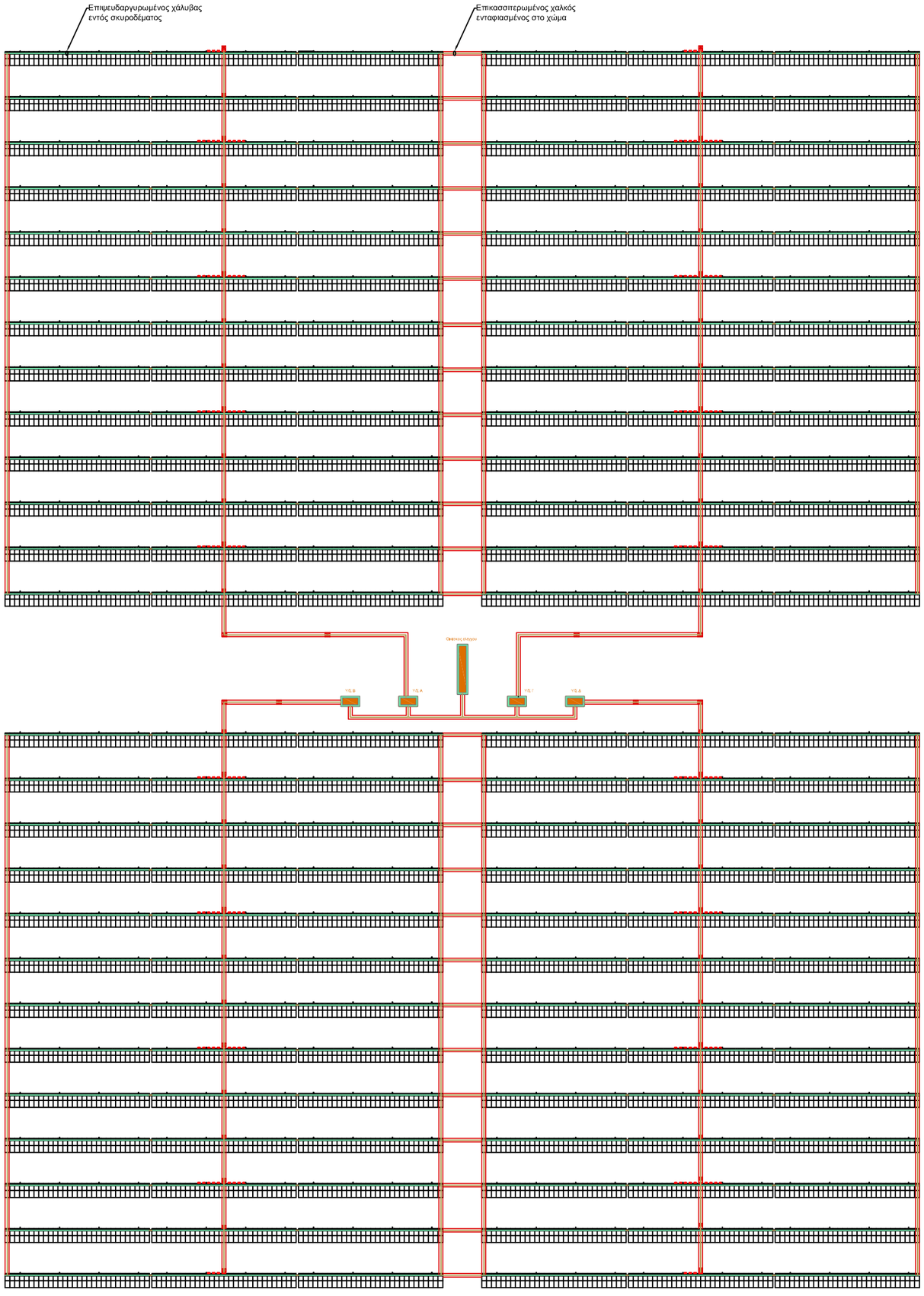
Επιβλέπων: Σταύρος Παπαθανασίου
Επίκουρος καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2009

Σχέδιο: Τοποθέτηση αντικεραυνικών ακίδων 1

Κλίμακα: 1:40

Παρατηρήσεις: Σχέδιο της μελέτης Φ/Β σταθμού με μικρούς αντιστροφείς



Υπόμνημα

- Αντιστροφέας SMA SMC 11000 TL
- Υποπίνακας Χ.Τ.
- Φρεάτιο καλωδίων
- Αγωγός επιψευδαργυρωμένου χάλυβα Φ10mm
- Αγωγός επικασσιτερωμένου χαλκού Φ8mm
- Ακίδες αντικεραυνικής προστασίας απο επιψευδαργυρωμένο χάλυβα Φ8mm
- Υποσταθμός ΧΤ/ΜΤ
- Οικίσκος ζεύξης και ελέγχου

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Η/Υ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

Μελέτη διαμορφωσης διασυνδεδεμένου Φωτοβολταϊκού Σταθμού 2MW

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Στέφανος Δημήτριος Κ. Κακαβούλης

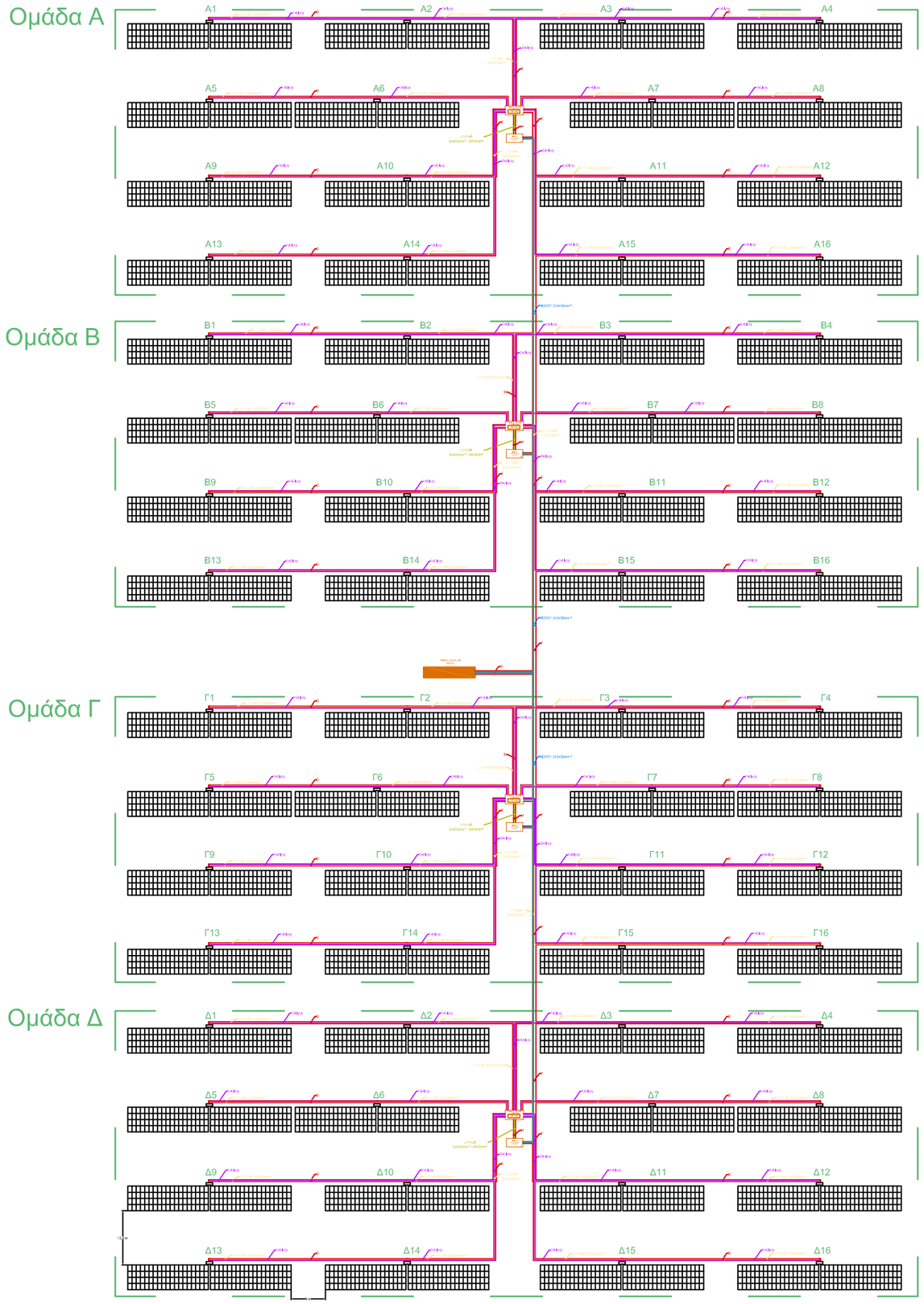
Επιβλέπων: Σταύρος Παπαθανασίου
Επίκουρος καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2009

Σχέδιο: Αγωγοί γείωσης - ακίδες αντικεραυνικής προστασίας 1

Κλίμακα: 1:350

Παρατηρήσεις: Σχέδιο της μελέτης Φ/Β σταθμού με μικρούς αντιστροφείς



Υπόμνημα

- Αντιστροφέας Sunny Central 500HE
- Οικίσκος ΥΣ ΧΤ/ΜΤ
- Οικίσκος ζεύξης και ελέγχου
- Combiner box
- Κεντρικό καλώδια DC ΧΤ
- Καλώδια AC ΧΤ
- Καλώδια ΜΤ
- Καλώδιο επικοινωνιών Lίycy
- Οπτική ίνα

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Η/Υ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

Μελέτη διαμορφωσης διασυνδεδεμένου Φωτοβολταϊκού Σταθμού 2MW

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Στέφανος Δημήτριος Κ. Κακαβούλης

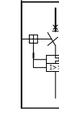
Επιβλέπων: Σταύρος Παπαθανασίου
Επίκουρος καθηγητής Ε.Μ.Π.

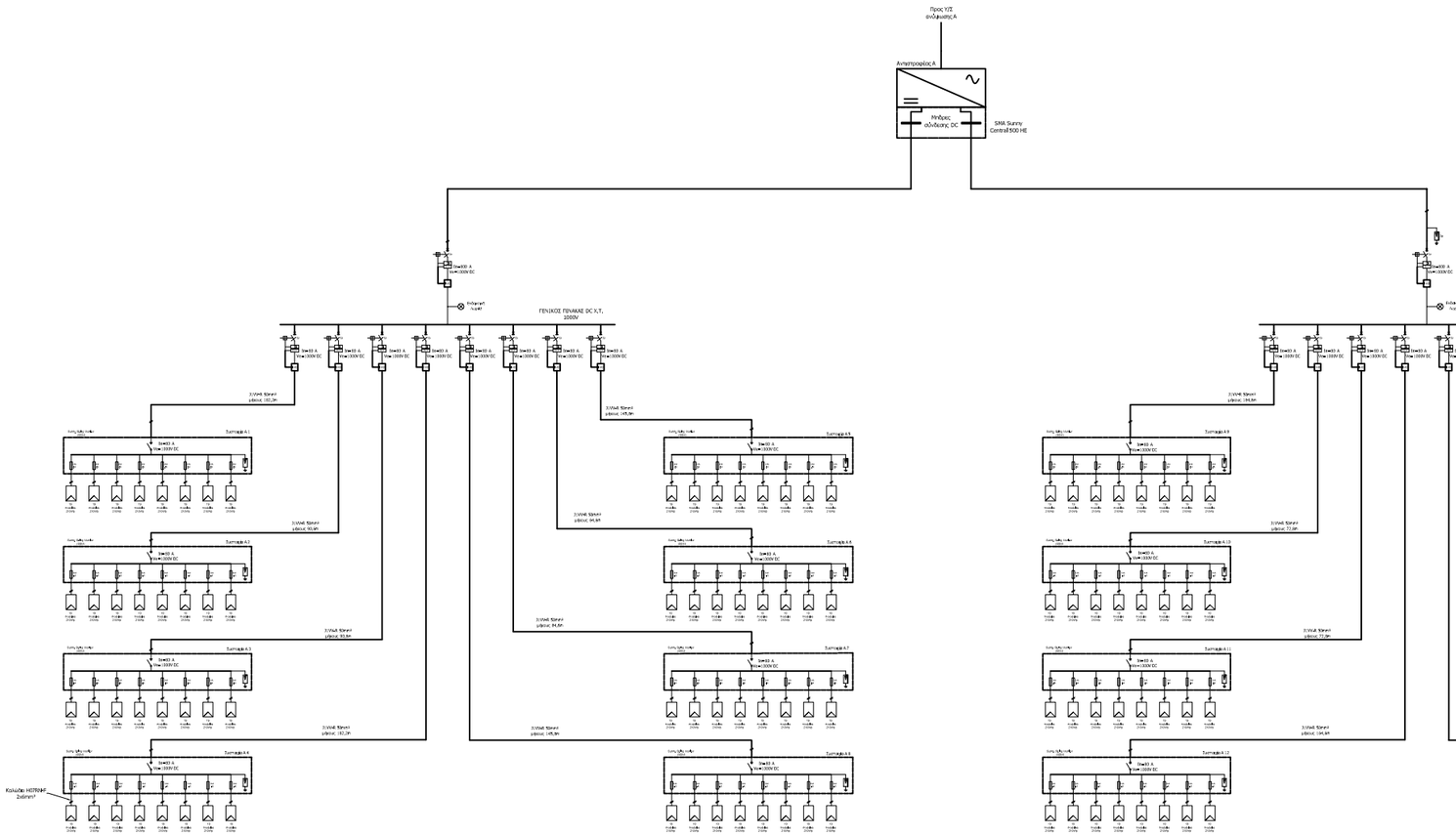
Αθήνα, Σεπτέμβριος 2009

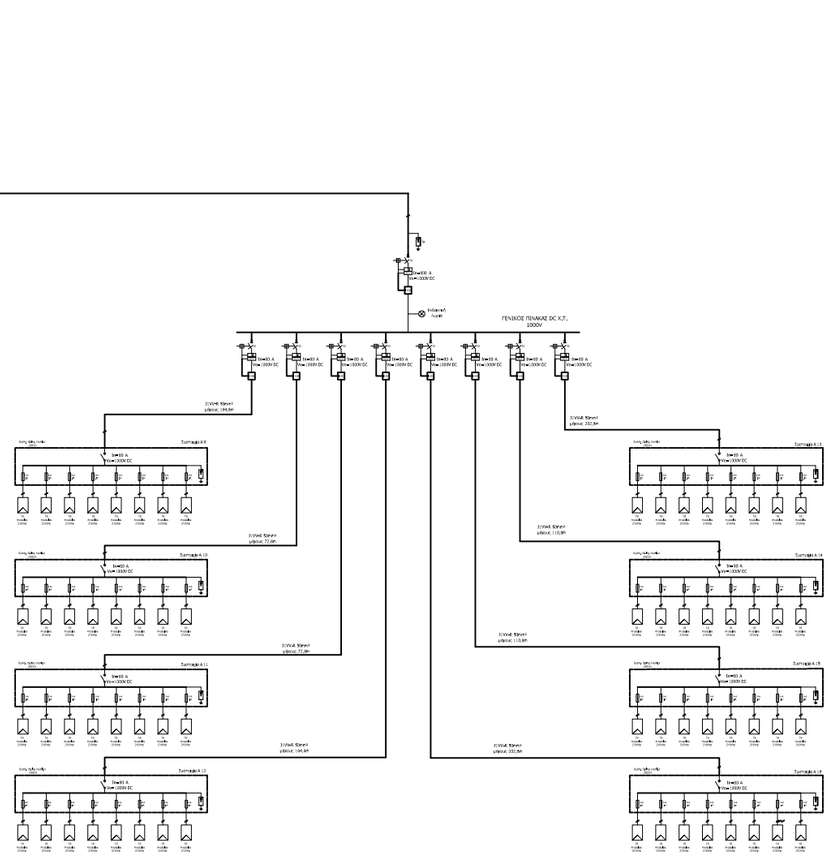
Σχέδιο: Τοπογραφικό διάγραμμα 2

Κλίμακα: 1:400

Παρατηρήσεις: Σχέδιο της μελέτης Φ/Β σταθμού με αντιστροφείς των 500kW

ΥΠΟΜΝΗΜΑ ΜΟΝΟΓΡΑΜΜΙΚΟΥ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΟΣ	
	Διακόπτης Φορτίου
	Μικροαυτόματος
	Απαγωγέας Υπερτάσεων
	Επιτηρητής μόνωσης
	Τηκτή ασφάλεια 14Α τύπου gR
	Φωτοβολταϊκά Πλαίσια Conergy PowerPlus 210P
	Διακόπτης ισχύος





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Η/Υ

Μελέτη διαμορφωσης διασυνδεδεμένου Φωτοβολταϊκού Σταθμού 2MW

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Στέφανος Δημήτριος Κ. Κακαβούλης

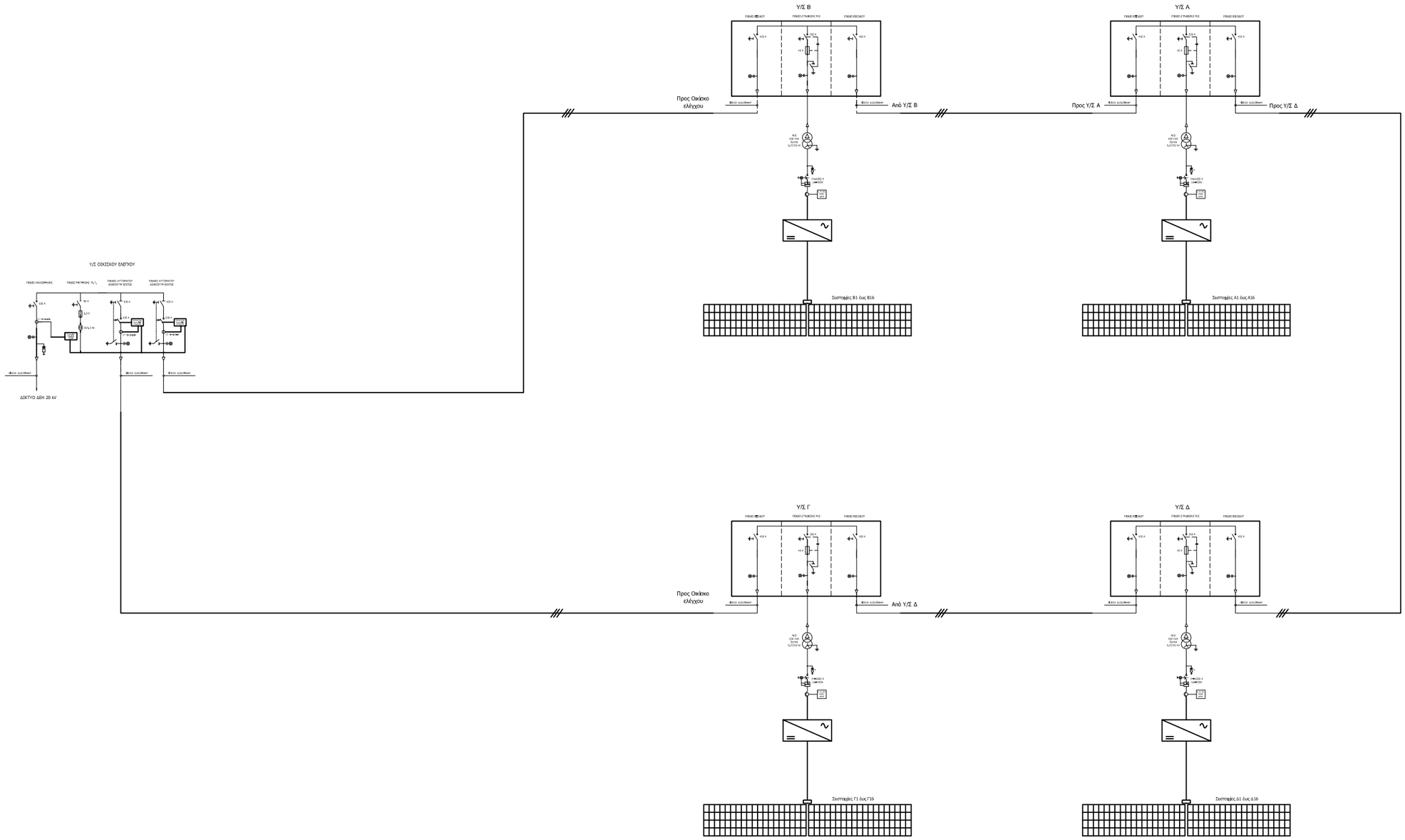
Επιβλέπων: Σταύρος Παπαθανασίου
Επίκουρος καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2009

Σχέδιο: Μονογραμμικό διάγραμμα Χαμηλής Τάσης 2

Κλίμακα: -

Παρατηρήσεις: Σχέδιο της μελέτης Φ/Β σταθμού με αντιστροφείς των 500 kW



ΥΠΟΜΝΗΜΑ ΜΟΝΟΓΡΑΜΜΙΚΟΥ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΟΣ	
	Διακόπτης Φορτίου
	Διακόπτης Ισχύος
	Μ/Σ ανύψωσης 0.4/20kV 630kVA , Dyn11
	Πολυόργανο μέτρησης ηλεκτρικών παραμέτρων
	Απαγωγέας υπερτάσεων
	Ασφάλειες Μ.Τ.
	Διπολική αποζεύκτη - γειωτή
	Χωρητικός καταμερισμός και ενδεικτικός λυχνίας

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Η/Υ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

Μελέτη διαμορφωσης διασυνδεδεμένου Φωτοβολταϊκού Σταθμού 2 MW

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Στέφανος Δημήτριος Κ. Κακαβούλης

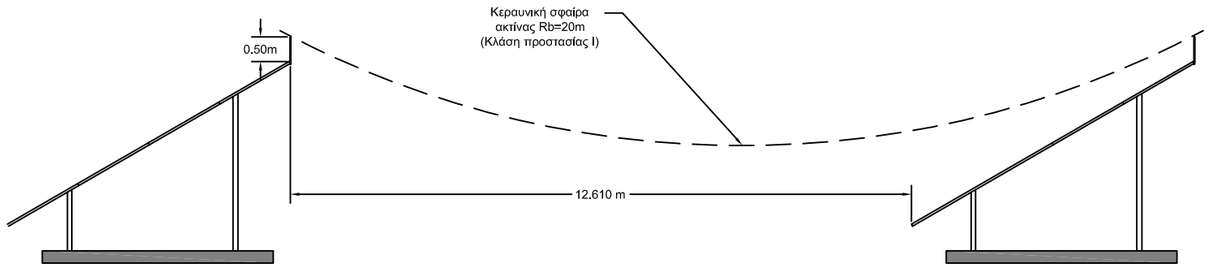
Επιβλέπων: Σταύρος Παπαθανασίου
Επίκουρος καθηγητής Ε.Μ.Π.

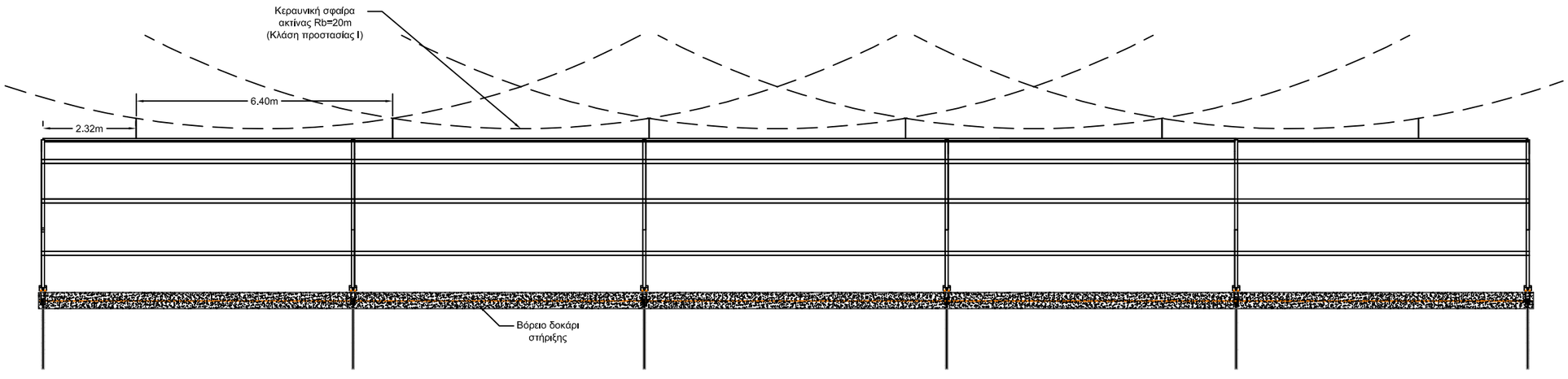
Αθήνα, Σεπτέμβριος 2009

Σχέδιο: Μονογραμμικό διάγραμμα Χ.Τ. - Μ.Τ. 2

Κλίμακα: -

Παρατηρήσεις: Σχέδιο της μελέτης Φ/Β σταθμού με αντιστροφείς των 500kW





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Η/Υ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

Μελέτη διαμορφωσης διασυνδεδεμένου Φωτοβολταϊκού Σταθμού 2MW

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Στέφανος Δημήτριος Κ. Κακαβούλης

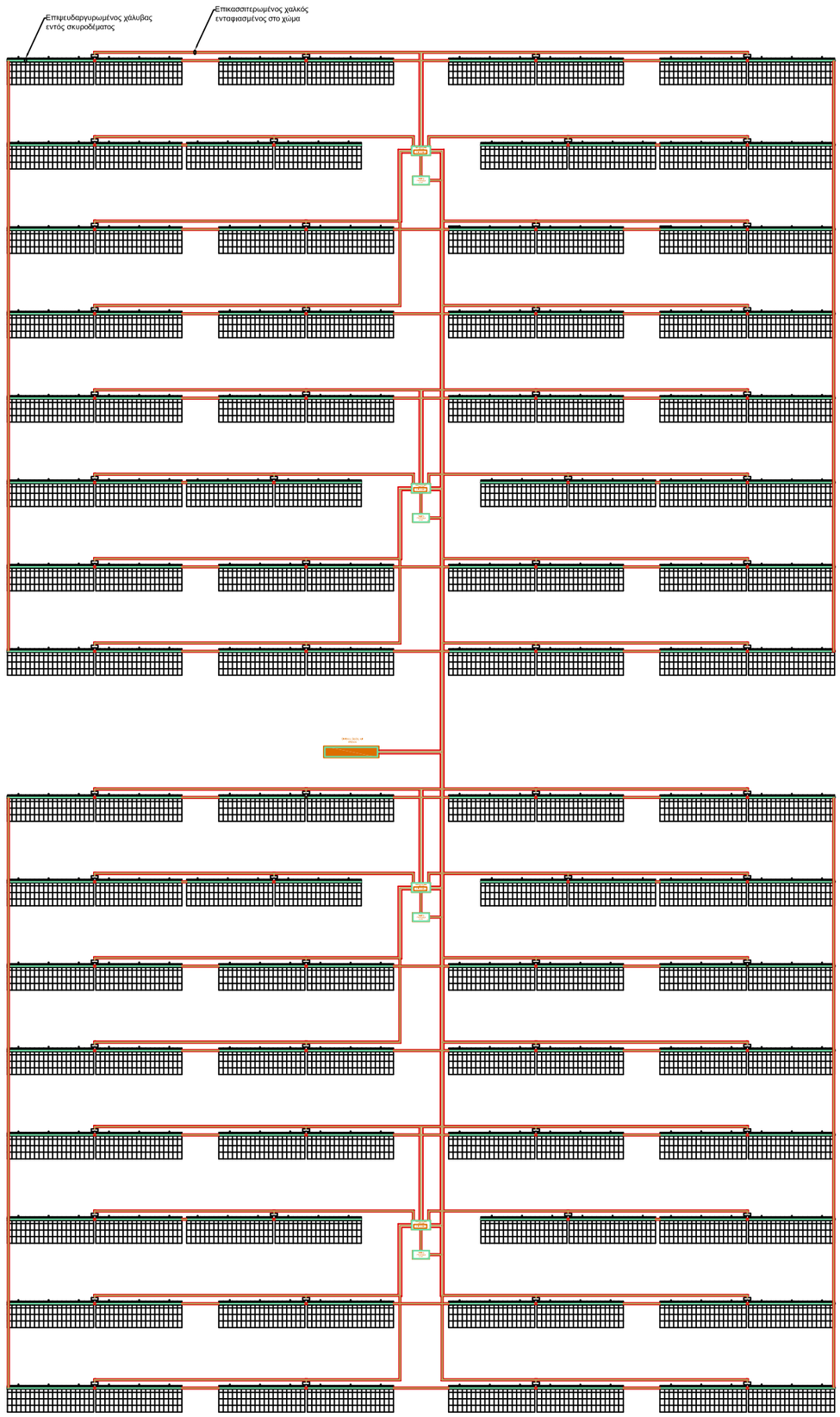
Επιβλέπων: Σταύρος Παπαθανασίου
Επίκουρος καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2009

Σχέδιο: Τοποθέτηση αντικεραυνικών ακίδων 2

Κλίμακα: 1:50

Παρατηρήσεις: Σχέδιο της μελέτης Φ/Β σταθμού με αντιστροφείς των 500kW



Υπόμνημα

- Αντιστροφέας Sunny Central 500HE
- Οικίσκος ΥΣ ΧΤ/ΜΤ
- Οικίσκος ζεύξης και ελέγχου
- Combiner box
- Αγωγός επικασσιτερωμένου χαλκού Φ8mm
- Αγωγός επιψευδαργυρωμένου χάλυβα Φ10mm
- Ακίδες αντικεραυνικής προστασίας απο επιψευδαργυρωμένο χάλυβα Φ8mm

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Η/Υ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

Μελέτη διαμορφωσης διασυνδεδεμένου Φωτοβολταϊκού Σταθμού 2MW

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Στέφανος Δημήτριος Κ. Κακαβούλης

Επιβλέπων: Σταύρος Παπαθανασίου
Επίκουρος καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2009

Σχέδιο: Γείωση και αντικεραυνική προστασία Φ/Β σταθμού 2

Κλίμακα: 1:400

Παρατηρήσεις: Σχέδιο της μελέτης Φ/Β σταθμού με αντιστροφείς των 500kW