



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΥ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ 1791

ΜΕΛΕΤΗ ΑΥΤΟΝΟΜΟΥ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ



ΜΠΑΝΤΙΛΕΣΚΑ ΙΩΑΝΝΑ, ΑΜ: 7174

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΣΧΟΙΝΑΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ

ΠΑΤΡΑ 2021

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την ολοκλήρωση της παρούσας πτυχιακής εργασίας , θα ήθελα να ευχαριστήσω τους ανθρώπους οι οποίοι με βοήθησαν στην περάτωση της.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον εισηγητή της πτυχιακής εργασίας κ. Νικόλαο Σχοινά για την καθοδήγησή του καθ' όλη την διάρκεια εκπόνησής της.

Επίσης , ιδιαίτερες ευχαριστίες θα ήθελα να εκφράσω στην οικογένειά μου για την στήριξη και συμπαράσταση κατά την διάρκεια των σπουδών μου.

Τέλος , θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Γεώργιο Κατσαϊδώνη για την παραχώρηση της επιχείρησής του για την διεξαγωγή της μελέτης.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα αυτόνομα φωτοβολταϊκά (off-grid) είναι συστήματα ηλεκτροδότησης, που μετατρέπουν την ηλιακή ενέργεια σε ηλεκτρική. Τα αυτόνομα, διαφοροποιούνται από τα διασυνδεδεμένα φωτοβολταϊκά (grid-tied ή on grid) συστήματα στο ότι δεν απαιτείται διασύνδεση με το δημόσιο δίκτυο (πχ ΔΕΗ) για να λειτουργήσουν. Συνήθως τα αυτόνομα συστήματα περιλαμβάνουν μπαταρίες (συσσωρευτές) και ονομάζονται αυτόνομα συστήματα με αποθήκευση. Σε αυτά τα συστήματα και κατά την διάρκεια ανυπαρξίας της ηλιοφάνειας, το φορτίο τροφοδοτείται από τους συσσωρευτές. Υπάρχουν και αυτόνομα συστήματα με απευθείας τροφοδότηση του φορτίου, χωρίς συσσωρευτές, τα οποία τροφοδοτούν μόνο όσο υπάρχει ηλιοφάνεια και ονομάζονται αυτόνομα συστήματα χωρίς αποθήκευση.

Στην παρούσα πτυχιακή εργασία πραγματοποιείται η μελέτη ενός αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος με αποθήκευση που θα τροφοδοτήσει ένα κατάστημα (κρεοπωλείο). Στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα είδη ηλιακών πλαισίων και ο τρόπος συνδεσμολογίας τους. Ακολούθως στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα είδη και τα χαρακτηριστικά των συσσωρευτών που χρησιμοποιούνται σε τέτοιου είδους εφαρμογές. Κατόπιν στο τρίτο κεφάλαιο αναλύονται οι αντιστροφείς και οι ρυθμιστές φόρτισης και τέλος στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η μελέτη που περιλαμβάνει ηλεκτρολογικό έλεγχο και διαστασιολόγηση της όλης εγκατάστασης

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	I
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	II
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	III
ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΙΚΟΝΩΝ.....	V
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΙΝΑΚΩΝ.....	VI
ΠΙΝΑΚΑΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ.....	VI
1 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1.....	1
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1 Χαρακτηριστικά Αυτόνομου Φωτοβολταϊκού	1
1.1.1 Εγκατεστημένη Ισχύς.....	1
1.1.2 Ημερήσια Παραγωγή	2
1.1.3 Η δυνατότητα αποθήκευσης των μπαταριών σε Ah και σε Wh	2
1.1.4 Η αυτονομία του συστήματος.....	3
1.1.5 Η ονομαστική τάση λειτουργίας (DC).....	3
1.1.6 Η μέγιστη ισχύς του μετατροπέα (W ή VA)	3
1.1.7 Η ισχύς εκκίνησης του μετατροπέα (W ή VA).....	3
2 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2.....	5
ΕΙΔΗ ΗΛΙΑΚΩΝ ΠΛΑΙΣΙΩΝ, ΤΡΟΠΟΙ ΔΙΑΣΥΝΔΕΣΗΣ	5
2.1 Είδη φωτοβολταϊκών πλαισίων.....	5
2.1.1 Μονοκρυσταλλικού πυριτίου (c-Si).....	5
2.1.2 Πολυκρυσταλλικού πυριτίου (m-Si).....	5
2.1.3 Άμορφου πυριτίου (a-Si).....	6
2.1.4 Υβριδικά – υψηλής απόδοσης.....	6
2.2 Απόδοση φωτοβολταϊκού συστήματος	6
2.2.1 Ηλιακή ακτινοβολία	7
2.2.2 Προσανατολισμός – Κλίση	7
2.2.3 Σκίαση.....	9
2.3 Ανάλυση της διάρκειας σκίασης στα πάνελ	12
2.3.1 Ένωση φωτοβολταϊκών πλαισίων με παρόμοια πρόσπτωση ηλιακής ακτινοβολίας σε στοιχειοσειρές.....	12

2.3.2	Σύνδεση των στοιχειοσειρών σε μετατροπέα που διαθέτει περισσότερους από έναν ανιχνευτές σημείου μέγιστης ισχύος (MPP Tracker) .	13
2.3.3	Κατάλληλος προσανατολισμός των φωτοβολταϊκών πλαισίων.....	13
2.3.4	Επιλογή ενός μετατροπέα κατάλληλου για συνθήκες σκίασης.....	15
2.3.5	Σωστός σχεδιασμός της τάσης της στοιχειοσειράς	16
2.4	Περιβαλλοντικά Οφέλη	16
2.5	Συνδεσμολογία φωτοβολταϊκών πάνελ	17
3	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3.....	19
	ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΕΣ.....	19
3.1	Χωρητικότητα	20
3.2	Βάθος Εκφόρτισης.....	21
3.3	Κατάσταση Φόρτισης.....	22
3.4	Κανόνες χρήσης μπαταρίας.....	23
4	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4.....	24
	ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΙΣ ΚΑΙ ΡΥΘΜΙΣΤΕΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ.....	24
4.1	Αντιστροφείς(INVERTER)	24
4.1.1	Οικογένειες αντιστροφένων	26
4.1.2	Σημαντικές παράμετροι λειτουργίας	29
4.1.3	Άλλα χαρακτηριστικά	36
4.2	Ρυθμιστές φόρτισης.....	37
4.2.1	MPPT ρυθμιστής φόρτισης	37
4.2.2	PWM ρυθμιστής φόρτισης	42
5	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5.....	44
	ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ.....	44
5.1	ΦΒ συστοιχία.....	44
5.2	Διαστασιολόγηση.....	46
5.3	Μπαταρία φωτοβολταϊκής συστοιχίας	49
5.4	Μετατροπέας συνεχούς ρεύματος εξόδου της συστοιχίας σε εναλλασσόμενο ρεύμα	50
5.4.1	Ηλεκτρολογικός έλεγχος διασύνδεσης της συστοιχίας στον αντιστροφέα	51
6	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	52

ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 2.2.1	Χάρτης ηλιακής ενέργειας στην Ελλάδα	7
Εικόνα 2.2.2	Παράδειγμα σκίασης σε στέγη	10
Εικόνα 2.2.3	Εικ. 1 Σύμφωνα με τον κανόνα Νο. 3, τα φωτοβολταϊκά πλαίσια θα πρέπει να χωρισθούν σε σκιασμένες και μη-σκιασμένες και να συνδεθούν σε ξεχωριστό ανιχνευτή σημείου μέγιστης ισχύος (MPP-Tracker). Εικ. 2 Σε συνθήκες πλευρικής σκίασης (α) συστήνεται κάθετος προσανατολισμός των πλαισίων σε συνθήκες οριζόντιας σκίασης (β) αντίστοιχα οριζόντιος προσανατολισμός. Εικ. 3 Στο παράδειγμα (γ) σε κάθε περίπτωση είναι ενεργές και οι τρεις δίοδοι παράκαμψης. Στον τύπο πλαισίου (δ) μόνο μια. Έτσι αξιοποιείται ένα σημαντικά μεγαλύτερο ποσοστό της ισχύος.	11
Εικόνα 2.3.1	OptiTrac (μπλε βέλος) και OptiTrac Global Peak (κόκκινο βέλος): Ο ειδικός για τη σκίαση ανιχνευτής σημείου μέγιστης ισχύος έχει ένα σημαντικά μεγαλύτερο πεδίο αναζήτησης και μπορεί να βρει το μέγιστο απόδοσης και σε μερικώς σκιασμένες στοιχειοσειρές.	14
Εικόνα 2.3.2	Σε συνθήκες σκίασης μειώνεται η τάση του σημείου μέγιστης ισχύος. Για να μπορεί να ρυθμιστεί το σημείο μέγιστης απόδοσης, η περιοχή τάσης εισόδου του μετατροπέα θα πρέπει να είναι αρκετά μεγάλη.	14
Εικόνα 2.5.1	Παράλληλη συνδεσμολογία φωτοβολταϊκών πάνελ	17
Εικόνα 2.5.2	Σε σειρά συνδεσμολογία φωτοβολταϊκών πάνελ.....	18
Εικόνα 4.1.1	Κεντρικός μετατροπέας	26
Εικόνα 4.1.2	Μετατροπείς κλάδων	27
Εικόνα 4.1.3	Αντιστροφέας πολλαπλών κλάδων	28
Εικόνα 4.1.4	Αντιστροφείς για ενσωμάτωση σε Φ/Β πάνελ	29
Εικόνα 4.1.5	Παραδείγματα διαγραμμάτων βαθμού απόδοσης αντιστροφέων	30
Εικόνα 4.1.6	Μεταβολή του συντελεστή ισχύος και της ολικής αρμονικής παραμόρφωσης ρεύματος με το φορτίου του αντιστροφέα	35
Εικόνα 4.2.1	Καμπύλη τάσης - ρεύματος	38
Εικόνα 4.2.2	Καμπύλη τάσης –ρεύματος - ισχύος	38
Εικόνα 4.2.3	Η τιμή της ισχύος αποδιδόμενη ως εμβαδό	39

Εικόνα 4.2.4	Μέγιστο εμβαδό, δηλ μέγιστη αποδιδόμενη ισχύς από το πάνελ	39
Εικόνα 4.2.5	Μέγιστη δυνατή ισχύς σε έναν MPPT ρυθμιστή φόρτισης	40
Εικόνα 4.2.6	Μείωση τάσης σε σχέση με τη θερμοκρασία	41
Εικόνα 4.2.7	μέγιστη δυνατή απορροφώμενη ισχύς σε διαφορετικές θερμοκρασίες	41
Εικόνα 4.2.8	Η ισχύς φόρτισης P_{bat} είναι ίση με τη μέγιστη απορροφώμενη MPPT ισχύ P_m :.....	42
Εικόνα 4.2.9	Η μέγιστη απορροφώμενη ισχύς από τον PWM φορτιστή είναι μικρότερη σε σχέση με αυτή που απορροφά MPPT φορτιστής στις ίδιες συνθήκες	43
Εικόνα 5.2.1	Οι διαστάσεις του ΦΒ πάνελ.....	46
Εικόνα 5.2.2	Η γωνία τοποθέτησης των πάνελ	47
Εικόνα 5.2.3	Προτεινόμενη διάταξη των ΦΒ στοιχείων	47

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2.2-1	Ηλιακή ενέργεια σε ποσοστά σε σχέση με τον προσανατολισμό και την κλίση του πάνελ	8
Πίνακας 2.2-2	ποσοστά ηλεκτρικής ενέργειας σε σχέση με την κλίση και τον προσανατολισμό (ακριβείς τιμές)	9
Πίνακας 3.3-1	Κατάσταση Φόρτισης Μπαταρίας (Θερμ. Περιβάλλοντος: 27°C)	22
Πίνακας 5.2-1	Τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του πάνελ	48
Πίνακας 5.3-1	Τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των συσσωρευτών	49

ΠΙΝΑΚΑΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Διάγραμμα 3.2-1	Διάρκεια ζωής συσσωρευτών σε σχέση με το βάθος εκφόρτισης ανά κύκλο	22
-----------------	---	----

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Χαρακτηριστικά Αυτόνομου Φωτοβολταϊκού

Τα κυριότερα χαρακτηριστικά ενός αυτόνομου ΦΒ συστήματος είναι τα ακόλουθα

- Η εγκατεστημένη ισχύς των φωτοβολταϊκών σε Wp
- Η αναμενόμενη ημερήσια παραγωγή του συστήματος kWh
- Η δυνατότητα αποθήκευσης των μπαταριών σε Ah και σε Wh
- Η αυτονομία του συστήματος
- Η ονομαστική τάση λειτουργίας (DC)
- Η μέγιστη ισχύς του μετατροπέα (W ή VA)
- Η ισχύς εκκίνησης του μετατροπέα (W ή VA)

1.1.1 Εγκατεστημένη Ισχύς

Για να υπολογίσουμε κατά προσέγγιση την απαραίτητη εγκατεστημένη ισχύ φωτοβολταϊκών διαιρούμε την ημερήσια κατανάλωση σε kWh με 6h εάν χρησιμοποιούμε το σύστημα μόνο το καλοκαίρι και με 2h εάν το χρησιμοποιούμε όλο το χρόνο. Εάν το σύστημα είναι "mission critical", δηλαδή πρέπει να δουλεύει κάθε μέρα του χρόνου ανεξαιρέτως και τυχόν αστοχία είναι δραματική, πολλαπλασιάζουμε με το 1.5 (ή και το 2, ανάλογα με το συντελεστή ασφαλείας που επιθυμούμε). Έτσι προκύπτει η ισχύς των φωτοβολταϊκών σε kW. Στην περίπτωση του A/C που απαιτεί 16kWh ημερησίως η ισχύς είναι περίπου 2.7kWp για λειτουργία μόνο το καλοκαίρι και 8kWp για λειτουργία όλο το χρόνο. Εάν η εγκατάσταση είναι "mission critical", η εγκαταστημένη ισχύς διαμορφώνεται αντίστοιχα σε 4 και 12kWp. Η εγκατεστημένη ισχύς επηρεάζεται επίσης από τα διαθέσιμα φωτοβολταϊκά. Εάν η απαιτούμενη ισχύς είναι 2.7kWp και τα διαθέσιμα πάνελ είναι των 200W θα επιλέξουμε $14 \times 200 = 2.8 \text{kWp}$. Εάν αυτό περιορίζεται από τη μέγιστη τάση ή ρεύμα εισόδου του ρυθμιστή φόρτισης ή του inverter δικτύου όπου θα τα συνδέσουμε, ίσως χρειαστεί να επανεξετάσουμε το σχεδιασμό μας ή να επιλέξουμε διαφορετικά υλικά. Όταν συγκρίνουμε δυο συστήματα,

μικροδιαφορές στην εγκατεστημένη ισχύ (έως και 5%) δεν έχουν και τόση σημασία.

1.1.2 Ημερήσια Παραγωγή

Η ημερήσια παραγωγή ενός φωτοβολταϊκού συστήματος δεν είναι σταθερή, και εξαρτάται (εκτός από την εγκατεστημένη ισχύ) από παράγοντες όπως:

- Η εποχή του έτους. Το χειμώνα η παραγωγή μπορεί να είναι μέχρι και 4 φορές μικρότερη απ'ότι το καλοκαίρι
- Η τοποθεσία εγκατάστασης. Στην Κρήτη και την Πελοπόννησο η παραγωγή μπορεί να είναι από 20 μέχρι και 35% παραπάνω απ'ότι στη Μακεδονία
- Οι καιρικές συνθήκες. Μια συννεφιασμένη ή βροχερή ημέρα, η παραγωγή μπορεί να είναι σχεδόν μηδενική
- Η κατάσταση των συλλεκτών. Εάν η επιφάνεια είναι λερωμένη, η παραγωγή μπορεί να είναι δραματικά μειωμένη
- Μόνιμες σκιάσεις. Εάν υπάρχουν στο σημείο εγκατάστασης η παραγωγή θα είναι μειωμένη
- Κλίση εγκατάστασης (γωνία σε σχέση με το οριζόντιο επίπεδο) Διαφορετικές γωνίες ευνοούν την παραγωγή σε διαφορετικές εποχές του χρόνου
- Κατεύθυνση εγκατάστασης (Γωνία σε σχέση με τη διεύθυνση του Βορρά)

1.1.3 Η δυνατότητα αποθήκευσης των μπαταριών σε Ah και σε Wh

Η χωρητικότητα των μπαταριών σε Ah συνήθως αναγράφεται. Προσοχή στο ρυθμό εκφόρτισης (C) στον οποίο έχει υπολογιστεί, καθώς μια μπαταρία 12V/100Ah(C10) έχει μεγαλύτερη χωρητικότητα από μια μπαταρία 12V/100Ah(C100). Όταν έχουμε συστοιχία μπαταριών συνδεδεμένων παράλληλα η συνολική χωρητικότητα προκύπτει από το άθροισμα όλων. Όταν είναι συνδεδεμένες σε σειρά η χωρητικότητα παραμένει ίδια ενώ αυξάνεται η τάση. Εάν δηλαδή υποθέσουμε ότι έχουμε δυο μπαταρίες 200Ah/12V, εάν τις συνδέσουμε παράλληλα η συνολική χωρητικότητα είναι 400Ah/12V, ενώ αν τις συνδέσουμε σε σειρά είναι 200Ah/24V. Και στις δυο περιπτώσεις, η χωρητικότητα σε Wh είναι η ίδια, δηλαδή 4800Wh ($400 \times 12 = 200 \times 24$)

1.1.4 Η αυτονομία του συστήματος

Αυτονομία του συστήματος είναι οι συνολικές ημέρες τις οποίες μπορεί να λειτουργήσει εάν δεν υπάρχει ηλιοφάνεια, και προκύπτει διαιρώντας τη συνολική χωρητικότητα των μπαταριών σε kWh με την ημερήσια κατανάλωση σε kWh. Εάν καταναλώνουμε 1kWh ημερησίως και οι μπαταρίες μας έχουν 4800Wh, ή 4.8kWh, τότε η αυτονομία μας είναι σχεδόν 5 ημέρες.

1.1.5 Η ονομαστική τάση λειτουργίας (DC)

Η ονομαστική τάση του συστήματος είναι η τάση των μπαταριών. Γενικά, όσο μεγαλύτερη τόσο καλύτερα καθώς ένα σύστημα 48V απαιτεί μικρότερα ρεύματα για την ίδια ισχύ.

1.1.6 Η μέγιστη ισχύς του μετατροπέα (W ή VA)

Η μέγιστη ισχύς του μετατροπέα μας πρέπει να υπερκαλύπτει τη μέγιστη ισχύ όλων των φορτίων που θέλουμε να λειτουργήσουμε παράλληλα. Εάν έχουμε για παράδειγμα μια τoστιέρα (1000W) και μία καφετιέρα (1000W), εάν θέλουμε να λειτουργούμε και τις δυο συσκευές παράλληλα χρειαζόμαστε έναν μετατροπέα μέγιστης ισχύος 2kVA. Εάν τις λειτουργούμε εκ περιτροπής, αρκεί ένας μετατροπέας ισχύος 1000W. Και οι δύο συσκευές είναι καθαρά ωμικά φορτία (αντιστάσεις), οπότε η φαινόμενη ισχύς τους (kVA) είναι ίση με την ενεργό ισχύ τους (kW). Σε περίπτωση που τα φορτία μας ήταν επαγωγικά φορτία (λάμπες φθορισμού, κινητήρες) θα έπρεπε να συνυπολογίσουμε και τον συντελεστή ισχύος. Εάν ο συντελεστής ισχύος ήταν 80%, τότε η απαραίτητη φαινόμενη ισχύς του μετατροπέα (kVA) θα έπρεπε να είναι μεγαλύτερη κατά 20%. Εάν δηλαδή το φορτίο μας ήταν κινητήρας με μέγιστη ισχύ 1000W, ο μετατροπέας θα έπρεπε να έχει ισχύ τουλάχιστον 1200VA. Στη συγκεκριμένη βέβαια περίπτωση, γενικά θα ήταν καλό να επιλέξουμε έτσι κι'αλλιώς αρκετά μεγαλύτερο μετατροπέα, καθώς οι περισσότεροι κινητήρες απαιτούν γενικά αρκετά μεγαλύτερη ισχύ εκκίνησης...

1.1.7 Η ισχύς εκκίνησης του μετατροπέα (W ή VA)

Πολλά φορτία έχουν αρκετά μεγαλύτερη ισχύ εκκίνησης, δηλαδή απαιτούν πολλαπλάσια ισχύ κατά την εκκίνησή τους. Το πιο αντιπροσωπευτικό

παράδειγμα είναι το μοτέρ των ψυγείων, το οποίο ενώ μπορεί να έχει ισχύ 100W, κατά τις εκκινήσεις μπορεί να απαιτεί στιγμιαία έως και 2000VA, ανάλογα με την παλαιότητα, την κατάσταση και την τεχνολογία.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΕΙΔΗ ΗΛΙΑΚΩΝ ΠΛΑΙΣΙΩΝ, ΤΡΟΠΟΙ ΔΙΑΣΥΝΔΕΣΗΣ

Η αρχή λειτουργίας ενός Φωτοβολταϊκού συστήματος στηρίζεται στο φωτοβολταϊκό φαινόμενο κατά το οποίο δύο υλικά με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά (ημιαγωγοί προσμίξεων διαφορετικής πολικότητας ιόντων) όταν βρεθούν σε επαφή και εν συνεχεία εκτεθούν σε ηλιακή ακτινοβολία παράγουν ηλεκτρικό ρεύμα. Οι επαφές αυτές σχηματίζουν τα φωτοβολταϊκά στοιχεία, τα οποία συνδέονται σε πλαίσια, πάνελ και τελικά συστοιχίες.

Το ρεύμα που παράγεται (συνεχές) για να χρησιμοποιηθεί (είτε από συσκευές για ιδιοκατανάλωση είτε για πώληση στην εταιρεία παροχής ηλεκτρικής ενέργειας) μετατρέπεται σε κατάλληλη μορφή (εναλλασσόμενο) με χρήση κατάλληλων διατάξεων (αντιστροφείς). Για την περίπτωση αυτόνομων συστημάτων (όπου το ρεύμα χρησιμοποιείται πλήρως για την εξυπηρέτηση των ηλεκτρικών φορτίων της εγκατάστασης) χρησιμοποιούνται επίσης μπαταρίες για την τροφοδότηση των αναγκών κατά τις νυκτερινές και συννεφιασμένες ώρες.

2.1 Είδη φωτοβολταϊκών πλαισίων

Το πυρίτιο (Si) είναι το υλικό που έχει κυριαρχήσει μέχρι σήμερα. Οι βασικοί τύποι φωτοβολταϊκών στοιχείων είναι:

2.1.1 Μονοκρυσταλλικού πυριτίου (c-Si)

Αποτελούνται από μεγάλους κρυστάλλους, το πάχος του υλικού είναι σχετικά μεγάλο (περίπου 300μm) και έχουν χρώμα σκούρο μπλε. Η απόδοσή του είναι 13-16% και η απαιτούμενη επιφάνεια για 1kWp είναι 7-8 m². Πλεονέκτημά τους η λίγο μεγαλύτερη απόδοση (στο ίδιο εμβαδό μπορούν να τοποθετηθούν σχετικά μεγαλύτερη ισχύς σε σύγκριση με τα πλαίσια πολυκρυσταλλικού πυριτίου) και συνήθως χρησιμοποιούνται όταν υπάρχει πρόβλημα χώρου. Αν δεν υπάρχει πρόβλημα χώρου δεν υπάρχει κανένα κέρδος από τη χρήση τους.

2.1.2 Πολυκρυσταλλικού πυριτίου (m-Si)

Έχουν χρώμα γαλάζιο και στην επιφάνεια του στοιχείου διακρίνονται μονοκρυσταλλικές περιοχές. Η απόδοση είναι περίπου 12.5-15.5% και απαιτούνται 8-9 m² για 1kWp (συνεπώς για την ίδια ισχύ απαιτείται λίγο

μεγαλύτερη επιφάνεια σε σύγκριση με τα μονοκρυσταλλικού). Κόβονται σε στοιχεία τετραγωνικής μορφής πάχους 10-50μm. Χρησιμοποιούνται κατά κόρον σε φωτοβολταϊκά σε στέγες και ταράτσες.

2.1.3 Άμορφου πυριτίου (a-Si)

Το μεγάλο πλεονέκτημα είναι ότι έχει πολύ μεγαλύτερο συντελεστή απορρόφησης της ηλιακής ακτινοβολίας με αποτέλεσμα να αρκεί ένα στρώμα πάχους λίγων μm για την κατασκευή των φωτοβολταϊκών στοιχείων. Η απόδοση κυμαίνεται μεταξύ 6-10%. (Δε χρησιμοποιείται σε στέγες ή ταράτσες καθώς υπάρχει πρόβλημα χώρου).

2.1.4 Υβριδικά – υψηλής απόδοσης

Τα πλαίσια με υβριδική τεχνολογία έχουν λάβει σημαντικό μερίδιο της αγοράς τα τελευταία χρόνια. Αποτελούνται από μονοκρυσταλλικό πυρίτιο καλυμμένο από μια λεπτή στρώση άμορφου πυριτίου.

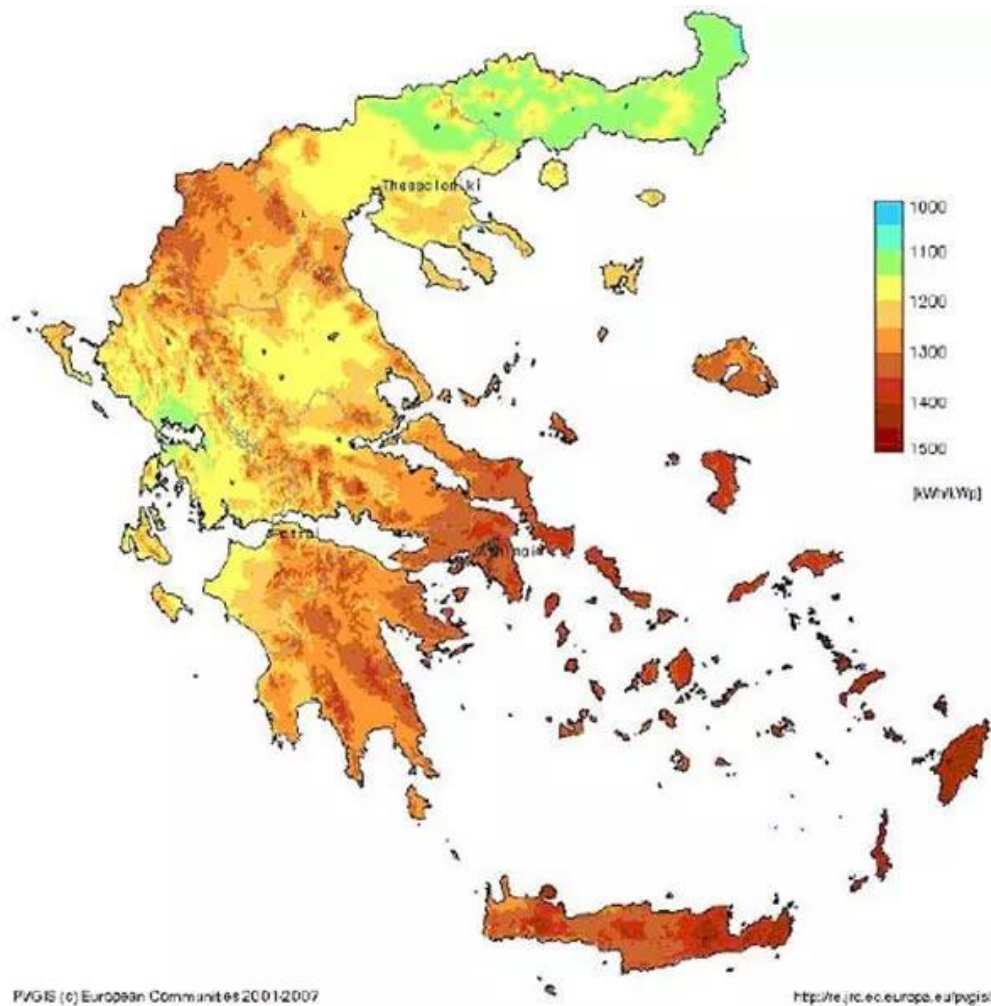
Πλεονέκτημα αποτελεί η ιδιαίτερος μεγάλη απόδοση (+18%), χαρακτηριστικό το οποίο δίνει τη δυνατότητα στο ίδιο εμβαδό να τοποθετείται μεγαλύτερη ισχύ. Το ισχυρότερο όμως θετικό χαρακτηριστικό αποτελεί ο χαμηλός θερμοκρασιακός συντελεστής σε σύγκριση με τα υπόλοιπα πλαίσια. Το χαρακτηριστικό αυτό έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή περισσότερης ενέργειας από ένα σύστημα ίδιας ισχύος με διαφορετικά πλαίσια. Μειονέκτημα αποτελεί η υψηλότερη τιμή η οποία όμως αποσβένει σε αντίστοιχο χρονικό διάστημα με την όλη επένδυση, προσφέροντας μεγαλύτερα έσοδα 25ετίας.

2.2 Απόδοση φωτοβολταϊκού συστήματος

Η απόδοση ενός φωτοβολταϊκού συστήματος είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με τα μετεωρολογικά-κλιματικά στοιχεία μιας περιοχής (όχι μόνο η ηλιακή ακτινοβολία αλλά και η θερμοκρασία της επηρεάζει την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας). Επίσης το γεωγραφικό μήκος, πλάτος και το υψόμετρο του συστήματος επηρεάζουν δραστικά την απόδοση του φωτοβολταϊκού.

2.2.1 Ηλιακή ακτινοβολία

Η χώρα μας αποτελεί την πιο ηλιόλουστη γωνιά της Ευρώπης. Όπως φαίνεται και από το χάρτη για κάθε kWh οι παραγόμενες kWh κατ' έτος κυμαίνονται από 1100kWh για τις βόρειες περιοχές έως 1500kWh για τις νότιες



Εικόνα 2.2.1 Χάρτης ηλιακής ενέργειας στην Ελλάδα

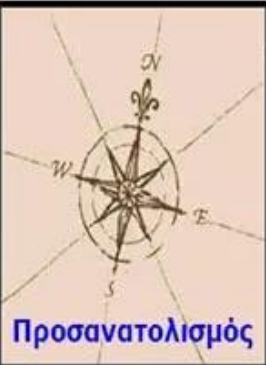
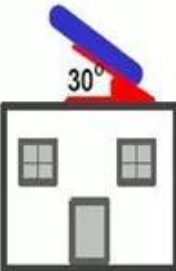

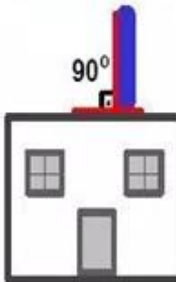
2.2.2 Προσανατολισμός – Κλίση

Για να είναι εφικτή η μεγιστοποίηση της ενεργειακής αποδοτικότητας των φωτοβολταϊκών πλαισίων θα πρέπει να επιτυγχάνεται βέλτιστη εκμετάλλευση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας. Επειδή η συνεχής παρακολούθηση του ήλιου (tracker) δεν είναι οικονομικά αποδοτική (για την περίπτωση στέγης ή ταράτσας) επιλέγεται μια βέλτιστη κλίση και προσανατολισμός.

Για το βόρειο ημισφαίριο η βέλτιστη κλίση του φωτοβολταϊκού είναι 10°-30° με κατεύθυνση προς το Νότο. Για την Ελλάδα η μεγιστοποίηση της συνολικής ετήσιας ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει σε επιφάνεια

σταθερής κλίσης επιτυγχάνεται για νότιο προσανατολισμό και κλίση περίπου 28°. Δεδομένου ότι στην περίπτωση των κτιριακών φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων οι βέλτιστες τιμές κλίσης και προσανατολισμού μπορεί να είναι ανέφικτες, προτείνονται επιφάνειες νότιου προσανατολισμού με αζιμουθιακή απόκλιση ως 70° από το Νότο και κλίση στο εύρος 10°-30°. Σημειώνεται ότι η χρήση γωνιών άνω των 10°-15° διευκολύνει τον αυτοκαθαρισμό (μέσω σταγονιδίων βροχής) των πλαισίων από σωματίδια σκόνης και άλλους ρύπους μέσω της βροχής.

Πίνακας 2.2-1 Ηλιακή ενέργεια σε ποσοστά σε σχέση με τον προσανατολισμό και την κλίση του πάνελ

 Προσανατολισμός	Κλίση ως προς το οριζόντιο επίπεδο		
	 30°	 0°	 90°
Ανατολικός - Δυτικός	85%kWh _(max)	90%kWh _(max)	50%kWh _(max)
ΝοτιοΑνατολικός - ΝοτιοΔυτικός	95%kWh _(max)	90%kWh _(max)	60%kWh _(max)
Νότιος	kWh _(max)	90%kWh _(max)	60%kWh _(max)
ΒορειοΑνατολικός - ΒορειοΔυτικός	67%kWh _(max)	90%kWh _(max)	30%kWh _(max)
Βόρειος	60%kWh _(max)	90%kWh _(max)	20%kWh _(max)

Για μεγαλύτερη ακρίβεια διαφωτιστικός είναι ο παρακάτω πίνακας. Φαίνεται ότι όσο απομακρυνόμαστε από το Νότο είναι καλύτερο η κλίση να μειώνεται από το βέλτιστο των 30 μοιρών.

Πίνακας 2.2-2 ποσοστά ηλεκτρικής ενέργειας σε σχέση με την κλίση και τον προσανατολισμό (ακριβείς τιμές)

		προσανατολισμός																		
		δύση						νότος						ανατολή						
τοποθέτηση πάνελ σε σχέση με το οριζόντιο επίπεδο		90°	80°	70°	60°	50°	40°	30°	20°	10°	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°
	0°	87	88	90	91	92	92	93	93	93	93	93	93	92	92	91	90	89	87	86
	10°	84	87	90	92	94	95	95	96	96	97	97	96	95	94	93	91	89	87	84
	20°	82	85	90	93	94	96	97	98	99	99	98	97	96	95	93	91	88	84	81
	30°	78	83	87	91	93	96	97	98	99	100	98	97	96	95	93	89	85	81	78
	40°	75	79	84	87	92	94	95	96	96	96	96	95	94	92	90	86	82	77	72
	50°	70	74	79	83	87	90	91	93	94	94	94	93	91	88	83	80	76	73	70
	60°	65	69	73	77	80	83	86	87	87	87	88	87	85	82	78	74	71	67	63
	70°	59	69	66	70	72	75	78	79	79	79	79	79	78	75	72	62	64	61	56
	80°	50	56	60	64	66	68	69	70	71	72	72	71	70	67	66	60	57	54	50
90°	41	49	54	58	59	60	61	61	63	65	65	63	62	59	59	52	50	47	44	

Όσον αφορά τα αυτόνομα φωτοβολταϊκά η επιλογή της κλίσης και του προσανατολισμού δεν έχουν να κάνουν τόσο με τη βέλτιστη επιλογή για τη μεγιστοποίηση της ετήσιας απόδοσης αλλά καθαρά με τη χρήση που απαιτείται. Έτσι αν μιλάμε για καλοκαιρινή χρήση και μόνο επιλέγεται κλίση κάτω των 15 μοιρών. Αν μιλάμε για χειμώνα και μόνο πάνω από 35 μοίρες. Αντίστοιχα αν η χρήση είναι πιο έντονη τα πρωινά ο ανατολικός προσανατολισμός είναι σημαντικός, ενώ για απογευματινή χρήση δυτικός. Δεν είναι λίγες οι φορές που σε ένα αυτόνομο φωτοβολταϊκό επιλέγεται η τοποθέτηση σε Ανατολή και Δύση ώστε να υπάρχει μία "καρδιοειδή" κατανομή ενέργειας για περισσότερες ώρες της μέρας με σκοπό η ενέργεια να καταναλώνεται όσο γίνεται απευθείας από τον ήλιο χωρίς φόρτιση-εκφόρτιση της συστοιχίας μπαταριών που συνεπάγεται γήρανσή τους. Επίσης προκρίνεται ο δυτικός προσανατολισμός πολλές φορές ώστε οι μπαταρίες να είναι όσο γίνεται περισσότερο φορτισμένες λίγο πριν απαιτηθεί η έντονη χρήση τους δηλαδή τις πρώτες ώρες της νύχτας.

2.2.3 Σκίαση

Πολύ κρίσιμος παράγοντας για την απόδοση ενός φωτοβολταϊκού συστήματος είναι η σκίαση. Όταν ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο σκιάζεται ακόμη και εν μέρει παράγει σημαντικά χαμηλότερο ρεύμα και κατά συνέπεια λιγότερη ενέργεια. Το πρόβλημα όμως δε σταματάει εδώ, καθώς το συγκεκριμένο πλαίσιο αποτελεί σημείο συμφόρησης (bottleneck) για όλη την ομάδα πλαισίων που είναι συνδεδεμένα επιβάλλοντας το χαμηλότερο ρεύμα του σε όλα τα υπόλοιπα μειώνοντας σημαντικά τη συνολική παραγωγή του συστήματος.

Πέραν της μειωμένης απόδοσης, επαναλαμβανόμενες τοπικές σκιάσεις σε ώρες υψηλής ακτινοβολίας καταπονούν το σκιασμένο φωτοβολταϊκό πλαίσιο προκαλώντας πρόωρη γήρανση, καθώς το ρεύμα των υπόλοιπων πλαισίων καταναλώνεται σε μορφή θερμότητας στο σκιασμένο.



Εικόνα 2.2.2 Παράδειγμα σκίασης σε στέγη

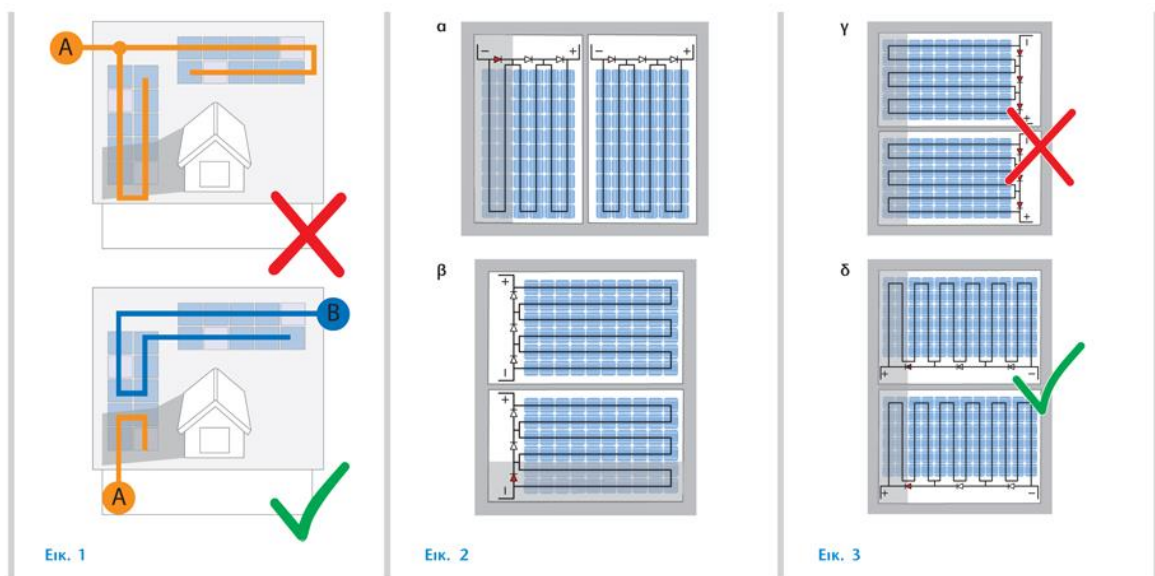
Το πρόβλημα της σκίασης είναι ιδιαίτερος έντονο στα φωτοβολταϊκά σε στέγες και ταράτσες για πολλούς λόγους. Καταρχάς λόγω του περιορισμένου χώρου δεν είναι εύκολο να απομακρυνθεί το σύστημα από παρακείμενα εμπόδια. Τα περισσότερα συστήματα εγκαθίστανται εντός πόλεων όπου τα διαφορετικά ύψη κτιρίων προκαλούν μόνιμες σκιάσεις. Τέλος, πολλά εμπόδια που βρίσκονται ήδη στη στέγη ή την ταράτσα, όπως η απόληξη του κλιμακостаσίου, προεξοχές σοφίτας, σπασίματα της στέγης, καμινάδες, ιστοί κεραιών, θερμοσίφωνες, λέβητες, σύρματα, το στηθαίο της ταράτσας κ.α. προκαλούν δυσεπίλυτα προβλήματα.

Από τα ανωτέρω είναι φανερό ότι σε κάθε περίπτωση πριν τη λήψη της απόφασης για την εγκατάσταση ενός φωτοβολταϊκού συστήματος σε στέγη ή ταράτσα θα πρέπει κάθε ιδιοκτήτης να συμβουλευτεί τη γνώμη ενός ειδικού και στην περίπτωση που υπάρχουν σκιάσεις θα πρέπει να εκπονηθεί μελέτη σκιάσεων η οποία θα δώσει στον ενδιαφερόμενο μια πολύ καλή εκτίμηση των

απωλειών λόγω σκιάσεων και θα προτείνει εναλλακτικές λύσεις του προβλήματος.

Ωστόσο, παραμένει ιδιαίτερα σημαντικός ο προσεκτικός σχεδιασμός που συνυπολογίζει εκ των προτέρων τις τεχνικές και ενεργειακές ιδιαιτερότητες. Πρέπει να σημειωθεί ότι οι υψηλές απώλειες λόγω συνθηκών σκίασης που αναφέρονται συνήθως αφορούν γενικά σε στιγμιαίες τιμές. Μία σκίαση δεν εξαρτάται μόνο από την τοποθεσία, το μέγεθος και την αιτία που την προκαλεί αλλά και από τις καιρικές συνθήκες, την ώρα και την εποχή.

Η χρονική διάρκεια των σκιάσεων τις περισσότερες φορές είναι περιορισμένη, οι σκιάσεις δηλαδή σε καμία περίπτωση δεν επηρεάζουν συνεχώς την ενεργειακή απόδοση. Είναι βέβαιο όμως ότι με το σωστό σχεδιασμό, η απόδοση μερικώς σκιασμένων εγκαταστάσεων μπορεί να βελτιωθεί αισθητά.



Εικόνα 2.2.3 *Εικ. 1* Σύμφωνα με τον κανόνα Νο. 3, τα φωτοβολταϊκά πλαίσια θα πρέπει να χωρισθούν σε σκιασμένες και μη-σκιασμένες και να συνδεθούν σε ξεχωριστό ανιχνευτή σημείου μέγιστης ισχύος (MPP-Tracker).

Εικ. 2 Σε συνθήκες πλευρικής σκίασης (α) συστήνεται κάθετος προσανατολισμός των πλαισίων σε συνθήκες οριζόντιας σκίασης (β) αντίστοιχα οριζόντιος προσανατολισμός.

Εικ. 3 Στο παράδειγμα (γ) σε κάθε περίπτωση είναι ενεργές και οι τρεις δίοδοι παράκαμψης. Στον τύπο πλαισίου (δ) μόνο μια. Έτσι αξιοποιείται ένα σημαντικά μεγαλύτερο ποσοστό της ισχύος.

2.2.3.1 Έξι βήματα για εξασφάλιση βέλτιστης απόδοσης

Γενικά, προκειμένου η λειτουργία μιας φωτοβολταϊκής εγκατάστασης να είναι αποδοτική, απαιτείται η μέγιστη αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας σε ώρες υψηλής ακτινοβολίας. Γι' αυτό δεν θα πρέπει να σχεδιάζονται εγκαταστάσεις σε συνθήκες μόνιμης σκίασης.

Επιπλέον θα πρέπει να αποφεύγεται κατά το δυνατόν η σκίαση κατά τις ώρες της έντονης ηλιοφάνειας (μεσημέρια, θερινοί μήνες).

Υπό αυτές τις προϋποθέσεις, η απόδοση της φωτοβολταϊκής εγκατάστασης μπορεί, ακολουθώντας τους επόμενους έξι κανόνες μελέτης και σχεδιασμού, να βελτιστοποιηθεί ώστε οι απώλειες λόγω σκίασης να ελαχιστοποιηθούν:

- Ένωση φωτοβολταϊκών πλαισίων με παρόμοια πρόσπτωση ηλιακής ακτινοβολίας σε στοιχειοσειρές.
- Σύνδεση των στοιχειοσειρών σε μετατροπέα που διαθέτει περισσότερους από έναν ανιχνευτές σημείου μέγιστης ισχύος (MPPT Tracker).
- Κατάλληλος προσανατολισμός των φωτοβολταϊκών πλαισίων.
- Επιλογή ενός μετατροπέα κατάλληλου για συνθήκες σκίασης.
- Σωστός σχεδιασμός της τάσης της γεννήτριας.

2.3 Ανάλυση της διάρκειας σκίασης στα πάνελ

Κατ' αρχήν πρέπει να εξακριβωθεί πότε, πού και με ποια ένταση εμφανίζονται οι σκιάσεις και πώς αυτές κατανέμονται κατά τη διάρκεια της ημέρας. Για να γίνει αυτό, θα πρέπει να συνυπολογιστεί μία σειρά από παραμέτρους ενώ υπάρχουν και διάφορες μέθοδοι και εργαλεία διαθέσιμα – από έναν απλό δείκτη πορείας της ηλιακής ακτινοβολίας μέχρι μια ηλεκτρονική συσκευή ανάλυσης με GPS, πυξίδα και ενσωματωμένη ψηφιακή κάμερα για λήψεις ορίζοντα.

2.3.1 Ένωση φωτοβολταϊκών πλαισίων με παρόμοια πρόσπτωση ηλιακής ακτινοβολίας σε στοιχειοσειρές

Όταν εξακριβωθεί ο επιθυμητός αριθμός και η κατάλληλη διάταξη των φωτοβολταϊκών πλαισίων, θα πρέπει να ενωθούν σε στοιχειοσειρές τα μέρη εκείνα που δέχονται αντίστοιχη ακτινοβολία (ή αντίστοιχη σκίαση). Διότι

όταν συνδέονται σε σειρά πλαίσια με διαφορετική πρόσπτωση ηλιακής ακτινοβολίας, σχηματίζονται στη χαρακτηριστική καμπύλη ισχύος της στοιχειοσειράς πολλά “τοπικά” σημεία μέγιστης ισχύος, ένα για κάθε κατάσταση ηλιακής ακτινοβολίας. Καθώς κάθε στοιχειοσειρά μπορεί να λειτουργήσει σε ένα μόνο σημείο μέγιστης ισχύος, ο βασικός στόχος είναι να δημιουργηθούν όσο το δυνατόν λιγότερες ανομοιογενείς στοιχειοσειρές. Στην πράξη βέβαια, θα πρέπει να προσδιοριστεί ο βαθμός σκίασης (ώρα, διάρκεια, ένταση) που κατηγοριοποιεί ένα πλαίσιο ως “σκιασμένο”. Εδώ κατά κανόνα υπάρχουν διάφορες διαβαθμίσεις. Επιπλέον καθοριστικό ρόλο παίζει και το μήκος των στοιχειοσειρών όσον αφορά στο βαθμό απόδοσης του μετατροπέα - που εξαρτάται από την τάση- αλλά και στην περιοχή του εύρους τάσης εισόδου, όπου ο ανιχνευτής MPP λειτουργεί.

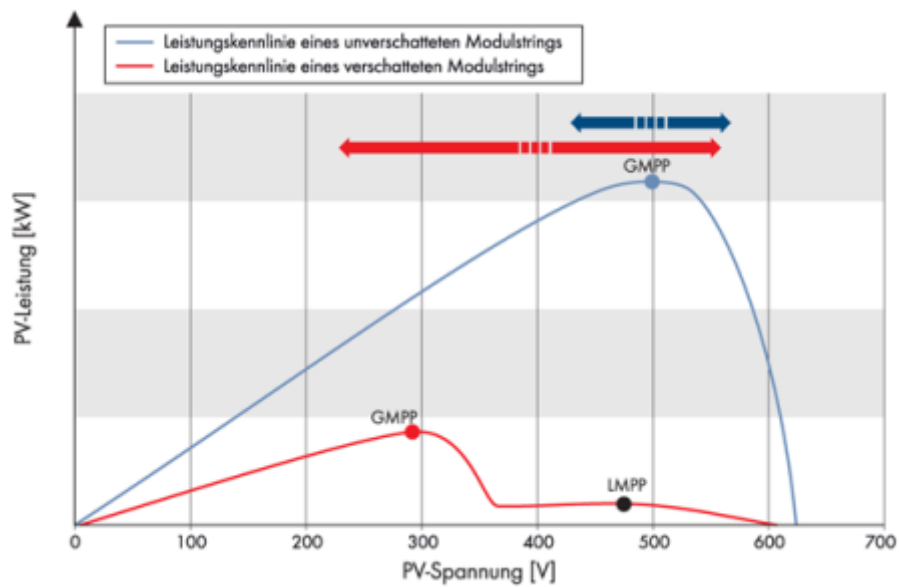
2.3.2 Σύνδεση των στοιχειοσειρών σε μετατροπέα που διαθέτει περισσότερους από έναν ανιχνευτές σημείου μέγιστης ισχύος (MPP Tracker)

Ο τρίτος κανόνας βασίζεται στο δεύτερο: Εδώ πρόκειται για τη σύνδεση στοιχειοσειρών ή τμημάτων συστοιχιών με διαφορετική πρόσπτωση ηλιακής ακτινοβολίας ακόμη και σε ξεχωριστές εισόδους μετατροπέων με περισσότερους από έναν ανιχνευτές σημείου μέγιστης ισχύος (MPP-Tracker). Η παράλληλη σύνδεση των στοιχειοσειρών με διαφορετική πρόσπτωση ηλιακής ακτινοβολίας σε έναν κοινό ανιχνευτή σημείου μέγιστης ισχύος μπορεί να προκαλέσει σημαντικές απώλειες καθώς ένα μέρος των πλαισίων βασικά δεν θα λειτουργεί στο βέλτιστο σημείο ισχύος. Εάν όμως οι στοιχειοσειρές πρέπει να συνδεθούν παράλληλα, επειδή για παράδειγμα δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί μετατροπέας με περισσότερους από έναν ανιχνευτές σημείου μέγιστης ισχύος, θα πρέπει όλες να παρουσιάζουν την ίδια πρόσπτωση ηλιακής ακτινοβολίας.

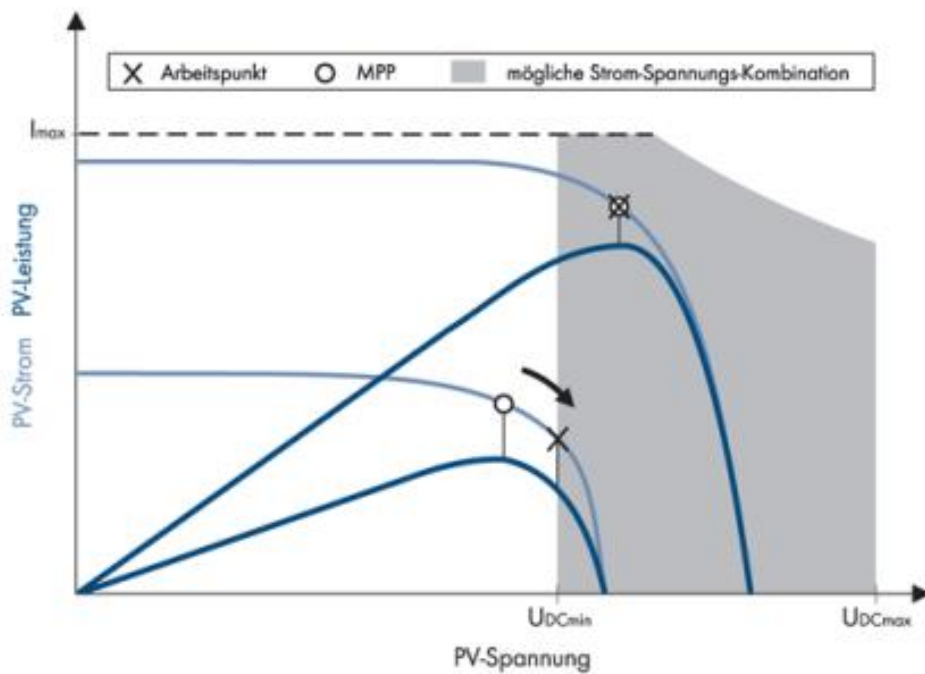
2.3.3 Κατάλληλος προσανατολισμός των φωτοβολταϊκών πλαισίων

Ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο αποτελείται από ξεχωριστές ηλιακές κυψέλες που σχηματίζουν μια μακρά σειρά κυψελών, η οποία χωρίζεται μέσω των παρακαμπτήριων διόδων, ανάλογα με τις ανάγκες, σε αρκετά μικρότερα τμήματα στοιχειοσειρών. Και εδώ προκύπτει το πρόβλημα του διαχωρισμού

των κυψελών με διαφορετική πρόσπτωση ηλιακής ακτινοβολίας από τα διαφορετικά ρεύματα του σημείου μέγιστης ισχύος.



Εικόνα 2.3.1 OptiTrac (μπλε βέλος) και OptiTrac Global Peak (κόκκινο βέλος): Ο ειδικός για τη σκίαση ανιχνευτής σημείου μέγιστης ισχύος έχει ένα σημαντικά μεγαλύτερο πεδίο αναζήτησης και μπορεί να βρει το μέγιστο απόδοσης και σε μερικώς σκιασμένες στοιχειοσειρές.



Εικόνα 2.3.2 Σε συνθήκες σκίασης μειώνεται η τάση του σημείου μέγιστης ισχύος. Για να μπορεί να ρυθμιστεί το σημείο μέγιστης απόδοσης, η περιοχή τάσης εισόδου του μετατροπέα θα πρέπει να είναι αρκετά μεγάλη.

Οι δίοδοι παράκαμψης διασφαλίζουν ότι σε περίπτωση που ένα τμήμα σκιάζεται, επηρεάζεται μόνο η δική του απόδοση και όχι ολόκληρου του πλαισίου. Στην περίπτωση λοιπόν που πέσει σκιά στο πλαίσιο, θα πρέπει να εξεταστεί αν αυτό το γεγονός επηρεάζει πολύ μόνο κάποια τμήματα ή λιγότερο μεν αλλά συνολικά όλα τα τμήματα του πλαισίου. Γιατί όσο μικρότερος ο αριθμός των μερικώς σκιασμένων τμημάτων της στοιχειοσειράς, τόσο λιγότερο παρακάμπτονται και τόσο υψηλότερη είναι η ενεργειακή απόδοση του πλαισίου. Ανάλογα με την ανάλυση της διάρκειας σκίασης, τα φωτοβολταϊκά πλαίσια θα πρέπει να σχεδιάζονται έτσι ώστε κάθε φορά να επηρεάζονται όσο το δυνατόν λιγότερα τμήματα των στοιχειοσειρών των πλαισίων.

- Πλευρική σκίαση: Κάθετος προσανατολισμός πλαισίων (α).
- Σκίαση από πάνω ή από κάτω: Οριζόντιος προσανατολισμός πλαισίων (b).

Εάν η κατεύθυνση της συναρμολόγησης των πλαισίων δε δέχεται επιλογές, θα πρέπει, εάν γίνεται, να χρησιμοποιηθούν πλαίσια με άλλη διάταξη κυψελών και δίοδων παράκαμψης (c) και (d).

2.3.4 Επιλογή ενός μετατροπέα κατάλληλου για συνθήκες σκίασης

Κάθε μετατροπέας με περισσότερους από ένα ανιχνευτές σημείου μέγιστης ισχύος (MPP Tracker), δεν είναι και ο κατάλληλος για μερικώς σκιασμένες φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις. Διότι ακόμη και εάν τα μη σκιασμένα και σκιασμένα πλαίσια, σύμφωνα με τον κανόνα 1, συνδεθούν σε διαφορετικούς ανιχνευτές σημείου μέγιστης ισχύος, ο ανιχνευτής στη δεύτερη περίπτωση θα πρέπει να μπορεί να διαχειριστεί διαφορετικά μέγιστα ισχύος. Αυτό συμβαίνει γιατί η σκίαση δεν εμφανίζεται σχεδόν ποτέ σε όλα τα πλαίσια ταυτόχρονα και με την ίδια ένταση.

Γι' αυτό το λόγο, στην καμπύλη απόδοσης των μερικώς σκιασμένων στοιχειοσειρών δεν δημιουργείται μόνο ένα, αλλά κατά κανόνα περισσότερα μέγιστα, τα οποία επιπλέον μπορεί να βρίσκονται σε σημαντικά διαφορετικές τάσεις. Ο ανιχνευτής σημείου μέγιστης ισχύος υπολογίζει το πραγματικό, δηλαδή το καθολικό σημείο μέγιστης ισχύος.

Οι συμβατικοί ανιχνευτές δεν είναι πάντα κατάλληλοι αφού, προκειμένου να μην προκαλέσουν άσκοπες απώλειες λόγω αναζήτησης στις μη σκιασμένες φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις, τις περισσότερες φορές έχουν περιορισμένο πεδίο αναζήτησης. Έτσι, μπορεί ο ανιχνευτής σημείου μέγιστης ισχύος να μη βρίσκει το βέλτιστο σημείο ισχύος της στοιχειοσειράς γιατί αυτό βρίσκεται εκτός του πραγματικού πεδίου αναζήτησής του. Σε ανιχνευτές ειδικούς για σκιάσεις, το πεδίο αναζήτησής τους μπορεί να επεκταθεί σημαντικά για να μη διατρέχουν τον κίνδυνο να “κολλήσουν” σε ένα τυχόν τοπικό μέγιστο.

Ένας τέτοιος ειδικός ανιχνευτής σημείου μέγιστης ισχύος είναι ο Opti-Trac-Global-Peak της SMA, ο οποίος διατίθεται σε όλους τους νέους μετατροπείς της SMA και μπορεί να ενεργοποιηθεί από το μενού. Μία επιπλέον ιδιαιτερότητα του OptiTrac-Global-Peak: Παρά το ευρύ πεδίο αναζήτησης προκύπτει μία ετήσια απώλεια απόδοσης που δεν ξεπερνάει τις 0.2 ποσοστιαίες μονάδες. Αντίθετα, το κέρδος απόδοσης από τη συνεχή λειτουργία σε καθολικό σημείο μέγιστης ισχύος μπορεί να ανέλθει σε περίπου 20% ανάλογα με τις συνθήκες σκίασης.

2.3.5 Σωστός σχεδιασμός της τάσης της στοιχειοσειράς

Τέλος, θα πρέπει να ληφθεί υπ’ όψιν η δυνητικά χαμηλότερη τάση των μερικώς σκιασμένων στοιχειοσειρών και κατά τον υπολογισμό της τάσης ολόκληρης της εγκατάστασης. Ο “κλασικός” υπολογισμός της τάσης της γεννήτριας στο κατώτατο όριο τάσης εισόδου του μετατροπέα (UMPP (70°C) μπορεί να μην είναι κατάλληλος και να οδηγήσει σε πτώση κάτω από την ελάχιστη τάση σημείου μέγιστης ισχύος του μετατροπέα. Ως αποτέλεσμα δεν θα μπορεί να ρυθμιστεί το σημείο μέγιστης ισχύος που θα βρίσκεται εκεί.

Συμπέρασμα: Η υλοποίηση μερικώς σκιασμένων φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων αποτελεί ένα έργο με αρκετές προκλήσεις. Η πρόκληση όμως μπορεί να αντιμετωπιστεί με επιτυχία με το σωστό σχεδιασμό, τις απαραίτητες τεχνικές γνώσεις και τους σωστούς μετατροπείς.

2.4 Περιβαλλοντικά Οφέλη

Αν θεωρήσουμε ότι ένα φωτοβολταϊκό σύστημα 10kWp αποδίδει περίπου 7.700€ ετησίως, το ποσό αυτό αποτελεί μόνο το 50% της απόσβεσης και

ονομάζεται άμεση καθώς το υπόλοιπο 50% είναι έμμεση και αποδίδεται στο περιβάλλον, στην κοινωνία, στα παιδιά μας.

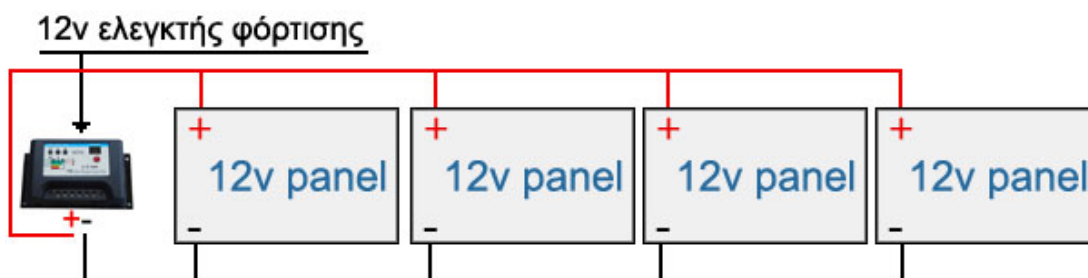
Ένα τυπικό φωτοβολταϊκό σύστημα 1kWp αποτρέπει κάθε χρόνο την έκλυση 1,3τόνων διοξειδίου του άνθρακα, όσο δηλαδή θα απορροφούσαν 2 στρέμματα δάσους (ή αντίστοιχα 100 δέντρα). Για να παραχθεί η ίδια ηλεκτρική ενέργεια με πετρέλαιο απαιτούνται 2,2 βαρέλια και ισοδυναμεί με την ετήσια μείωση 7.000χλμ. ενός μέσου αυτοκινήτου.

2.5 Συνδεσμολογία φωτοβολταϊκών πάνελ

Η συνδεσμολογία φωτοβολταϊκών πάνελ αλλά και μπαταριών πρέπει να γίνονται με προσοχή και φυσικά υπεύθυνα από αυτόν που κάνει την εγκατάσταση.

Όπως και στην περίπτωση των μπαταριών οι οποίες μπορούν να συνδεθούν σε σειρά αλλά και παράλληλα, έτσι και με τα φωτοβολταϊκά πάνελ μπορεί να γίνει κατάλληλη συνδεσμολογία ώστε να αυξηθεί η ένταση ή η τάση του παραγόμενου ρεύματος.

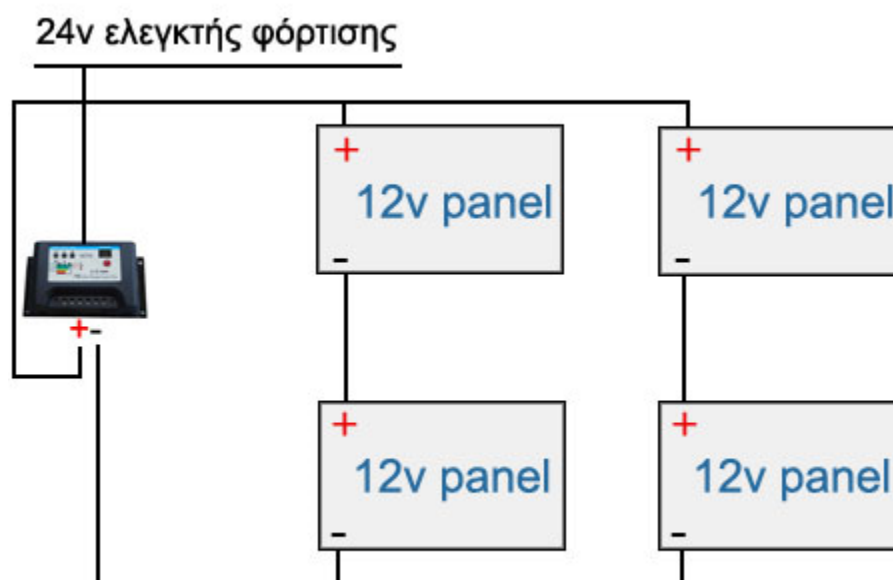
Η πιο συχνή περίπτωση είναι να έχουμε ήδη στήσει το σύστημά μας και απλά να θέλουμε να αυξήσουμε την παραγωγή ενέργειας στην τάση που ήδη λειτουργεί. Στα πιο πολλά μικρά φωτοβολταϊκά είναι τα 12V. Αν για παράδειγμα έχουμε ένα φωτοβολταϊκό πάνελ των 50W – 12V και αγοράσαμε άλλο ένα επίσης των 50W – 12V με σκοπό τον διπλασιασμό της παραγόμενης ενέργειας τότε θα πρέπει να συνδέσουμε τα πάνελ παράλληλα. Η τάση θα παραμείνει η ίδια, αλλά θα αυξηθεί η ένταση και συνεπώς η μπαταρίες του συστήματος θα φορτίζουν συντομότερα.



Εικόνα 2.5.1 Παράλληλη συνδεσμολογία φωτοβολταϊκών πάνελ

Η παράλληλη σύνδεση φωτοβολταϊκών πάνελ αυξάνει την ένταση του ρεύματος και συνεπώς μειώνει τον απαιτούμενο χρόνο φόρτισης των μπαταριών μας.

Αν όμως πρέπει να χρησιμοποιήσουμε πάνελ μιας τάσης ώστε να φορτίσουμε μπαταρίες μεγαλύτερης τάσης, θα πρέπει να είμαστε σε θέση να κάνουμε συνδυασμό συνδεσμολογιών. Δηλαδή να κάνουμε τις απαραίτητες συνδέσεις ώστε το τελικό παραγόμενο ρεύμα να έχει την τάση που μπορεί να δεχτεί και να αξιοποιήσει το ελεγκτής φόρτισης του συστήματός μας. Ένα απλό παράδειγμα απεικονίζεται γραφικά στην εικόνα όπου 4 φωτοβολταϊκά πάνελ των 12V συνδέονται με τέτοιο τρόπο ώστε καταλήγοντας σε έναν ελεγκτή φόρτισης των 24V να φορτίσουν μπαταρίες των 24V.



Εικόνα 2.5.2 Σε σειρά συνδεσμολογία φωτοβολταϊκών πάνελ

Η σύνδεση σε σειρά χρησιμοποιείται για να αυξηθεί η τάση ώστε να γίνει εφικτή η φόρτιση μπαταριών τάσης μεγαλύτερης των διαθέσιμων φωτοβολταϊκών πάνελ. Φυσικά μπορεί να γίνει συνδυασμός παράλληλης και σε σειρά σύνδεσης ταυτόχρονα για να επιτευχθούν περισσότεροι στόχοι.

Η αύξηση της παραγόμενης ενέργειας σε ένα ήδη υπάρχον φωτοβολταϊκό σύστημα είναι ίσως ο πιο συχνός λόγος για να συνδέσουμε παραπάνω του ενός φωτοβολταϊκά πάνελ. Πρακτικά σημαίνει πως η μπαταρίες μας θα φορτίζονται συντομότερα, με την ίδια έκθεση στον ήλιο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΕΣ

Οι μπαταρίες ή συσσωρευτές είναι το πιο ευπαθές και επικίνδυνο κομμάτι του συστήματος. Φθείρονται με τη χρήση, και η διάρκεια ζωής τους είναι μεν περιορισμένη (από 1 έως και 10 χρόνια), αλλά επεκτείνεται με την εφαρμογή κανόνων κατά τη χρήση. Οι κίνδυνοι που σχετίζονται με τις μπαταρίες είναι:

- Σοβαρός τραυματισμός λόγω κακού χειρισμού κατά τη μεταφορά, πτώσης ή κακής τοποθέτησης
- Ηλεκτροπληξία λόγω γυμνών επαφών, λανθασμένης συνδεσμολογίας, κακού χειρισμού ή άγνοιας. Πριν την πρώτη ηλεκτροπληξία από μπαταρία όλοι πιστεύουμε ότι το ρεύμα είναι χαμηλής τάσης και ακίνδυνο...
- Κίνδυνος έκρηξης από εκρηκτικά αέρια (Υδρογόνο)
- Κίνδυνος χημικού εγκαύματος από τον ηλεκτρολύτη (διάλυμα θειικού οξέος)

Λόγω των παραπάνω σοβαρών κινδύνων, συνιστάται η εγκατάσταση των μπαταριών από επαγγελματία, ειδικά εάν είναι ανοικτού τύπου ή η χωρητικότητά τους είναι μεγάλη.

Οι μπαταρίες φορτίζονται όταν η παραγωγή του Φ/Β υπερκαλύπτει τη ζήτηση και εκφορτίζονται κάθε άλλη στιγμή. Ακόμη και σε κατάσταση ηρεμίας, οι μπαταρίες εκφορτίζονται σε ποσοστό από 1-3% μηνιαίως. Το διάστημα από το τέλος μιας περιόδου φόρτισης, δηλαδή από τη στιγμή που θα σταματήσει η φόρτιση της μπαταρίας μέχρι τη στιγμή που θα αδειάσει ή θα αρχίσει και πάλι η φόρτιση ονομάζεται "κύκλος". Ιδανικά, σε κάθε κύκλο οι μπαταρίες πρέπει να φορτίζονται στο 100% της χωρητικότητάς τους πριν αρχίσουν να εκφορτίζονται, και δεν πρέπει ποτέ να εκφορτίζονται πλήρως. Η κάθε μπαταρία μπορεί να αντέξει ορισμένους κύκλους, ο αριθμός των οποίων κυμαίνεται από 5000 για τις μπαταρίες βαθιάς εκφόρτισης υψηλής ποιότητας έως και κάτω από δέκα για μπαταρίες αυτοκινήτου οι οποίες δεν πρέπει γενικά να χρησιμοποιούνται σε Φ/Β συστήματα. Κανένα άλλο στοιχείο του συστήματος δεν επηρεάζεται τόσο από το μέγεθος και τη χρήση του φορτίου

όσο οι μπαταρίες. Εάν το φορτίο είναι συνδεδεμένο απευθείας στη μπαταρία χωρίς έλεγχο, η ανεξέλεγκτη κατανάλωση μπορεί να αδειάσει τη μπαταρία σε βαθμό πρόκλησης μη αναστρέψιμης ζημιάς. Το ίδιο μπορεί να συμβεί αν στη μπαταρία συνδεθεί σε υπερβολικά μεγάλο φορτίο έστω και για σχετικά μικρό χρονικό διάστημα. Εάν η φόρτιση της μπαταρίας δεν είναι ελεγχόμενη και αντίστοιχη με τον τύπο και την ονομαστική τάση της, η μπαταρία και πάλι μπορεί να υποστεί ζημιά. Οι μπαταρίες πρέπει να επιλέγονται έτσι ώστε να μπορούν να εξυπηρετήσουν το φορτίο και να φορτίζονται σωστά με τα διαθέσιμα μέσα. Αφού γίνει αυτή η επιλογή το σύστημα φόρτισης θα πρέπει να μπορεί να φορτίσει πλήρως τη μπαταρία με τη σωστή τάση ανά στάδιο φόρτισης για το συγκεκριμένο τύπο μπαταρίας.



Εικόνα3.1 Συστοιχία συσσωρευτών φωτοβολταϊκού συστήματος

Οι μπαταρίες αυτόνομων φωτοβολταϊκών συστημάτων χαρακτηρίζονται από τη χωρητικότητά τους σε Αμπερώρια (Ah) σε συγκεκριμένο ρυθμό εκφόρτισης (C) και το βάθος εκφόρτισης για το οποίο είναι σχεδιασμένες.

2.6 Χωρητικότητα

Η χωρητικότητα είναι το ρεύμα που μπορεί να δώσει η μπαταρία σε Αμπέρ (A) επί τις ώρες (h) για τις οποίες μπορεί να το δώσει. Μια μπαταρία με χωρητικότητα 10Ah τι μπορεί να δώσει 1A για 10 ώρες. Εκ πρώτης όψεως, μία μπαταρία 200 αμπερωρίων (Ah) θα έπρεπε να μπορεί να δώσει 200A για

μία ώρα, 50A για 4 ώρες, 1A για 200 ώρες κ.ο.κ. Αυτό δεν ισχύει. Η χωρητικότητα της μπαταρίας δίδεται σε συνάρτηση και με το βαθμό εκφόρτισης (C). Γενικά όσο αυξάνεται ο βαθμός εκφόρτισης, τόσο μειώνεται η πραγματική χωρητικότητα. Για παράδειγμα, όταν μια μπαταρία αναφέρεται ως 200Ah (C10), αυτό σημαίνει ότι η χωρητικότητα ισχύει για εκφόρτιση εντός 10 ωρών, δηλαδή ρεύμα 20A για 10 ώρες. Εάν από την ίδια μπαταρία ζητήσουμε ρεύμα 30A, ίσως να μπορεί να το δώσει για 5-6 ώρες (χωρητικότητα 150-180Ah). Αυτό λειτουργεί και αντίστροφα, δηλαδή η ίδια μπαταρία θα να μπορεί να δώσει ρεύμα 5A για 45 ώρες, με ουσιαστική χωρητικότητα 225Ah.

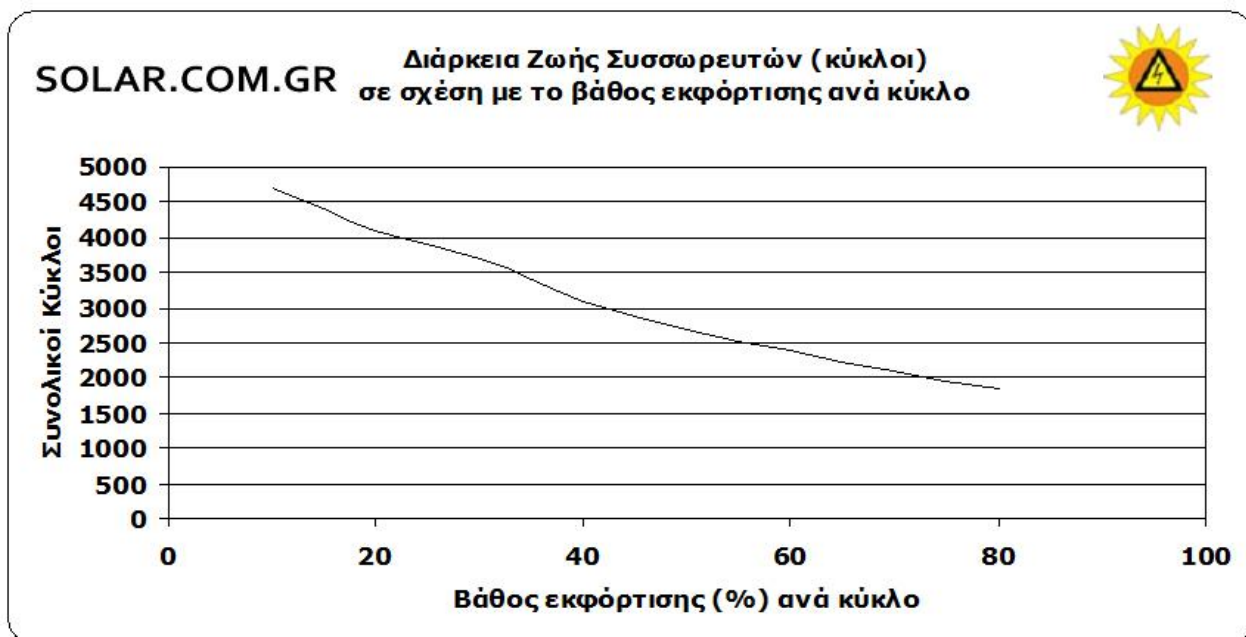
Η θερμοκρασία της μπαταρίας και του περιβάλλοντος χώρου επηρεάζει επίσης τη χωρητικότητα. Υψηλότερη θερμοκρασία έχει αποτέλεσμα ελαφρώς μεγαλύτερη χωρητικότητα αλλά μπορεί να αυξήσει την εξάτμιση νερού σε ανοικτές μπαταρίες και να μειώσει τον αριθμό των κύκλων που θα αντέξει η μπαταρία πριν χρειαστεί αντικατάσταση. Όταν συγκρίνουμε τη χωρητικότητα μπαταριών, θα πρέπει να λαμβάνουμε υπ'οψιν μας και την ονομαστική τάση του συστήματος. Μια μπαταρία 200Ah στα 12V μπορεί να αποθηκεύσει 2400Wh. Μια μπαταρία 200Ah στα 24V (η οποία συνήθως αποτελείται από μια συστοιχία 2 μπαταριών 200Ah στα 12V συνδεδεμένων σε σειρά) μπορεί να αποθηκεύσει 4800Wh.

2.7 Βάθος Εκφόρτισης

Βάθος εκφόρτισης είναι το ποσοστό της συνολικής χωρητικότητας της μπαταρίας το οποίο θα χρησιμοποιηθεί σε έναν κύκλο φόρτισης/εκφόρτισης. Οι μπαταρίες βαθειάς εκφόρτισης είναι σχεδιασμένες να εκφορτίζονται σε ποσοστό 60-80% ανά κύκλο. Μπαταρίες οι οποίες δεν είναι βαθειάς εκφόρτισης (εκκίνησης, έλξης κλπ) είναι σχεδιασμένες να εκφορτίζονται σε ποσοστό μόλις 15-30% ανά κύκλο. Αυτό σημαίνει ότι μια μπαταρία βαθειάς εκφόρτισης με χωρητικότητα 200Ah είναι σχεδιασμένη να παρέχει έως 120-160Ah ανά κύκλο χωρίς να πάθει ζημιά, ενώ μια αντίστοιχη μπαταρία εκκίνησης ή έλξης μόλις 30-60Ah ανά κύκλο.

Ακόμη και η διάρκεια ζωής των μπαταριών βαθειάς εκφόρτισης επηρεάζεται από το βάθος εκφόρτισης ανά κύκλο. Όσο βαθύτερος είναι ο κάθε κύκλος,

τόσο μικρότερη είναι η αναμενόμενη διάρκεια ζωής, όπως φαίνεται και στο διάγραμμα.



Διάγραμμα 2.7-1 Διάρκεια ζωής συσσωρευτών σε σχέση με το βάθος εκφόρτισης ανά κύκλο

2.8 Κατάσταση Φόρτισης

Κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας είναι η τρέχουσα διαθέσιμη χωρητικότητά της. Μπορεί να προσδιοριστεί με ακρίβεια με βάση την ειδική πυκνότητα του ηλεκτρολύτη με τη χρήση πυκνόμετρου. Η κατάσταση φόρτισης μπορεί επίσης να προκύψει με βάση την τάση της μπαταρίας, με την προϋπόθεση η μπαταρία να παραμείνει σε ηρεμία (χωρίς να φορτίζεται ή να εκφορτίζεται) για 30-60 λεπτά πριν τη μέτρηση. Σε περίπτωση που η μπαταρία έχει υψηλή τάση αλλά όταν συνδέουμε κάποιο φορτίο η τάση πέφτει κατακόρυφα, η μέτρηση τάσης δεν μας δίνει αξιόπιστη ένδειξη για την κατάστασή της. Ανάλογα με την κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας μεταβάλλεται και το σημείο πήξης του ηλεκτρολύτη, η θερμοκρασία δηλαδή στην οποία παγώνει και η μπαταρία κινδυνεύει να καταστραφεί.

Πίνακας 2.8-1 Κατάσταση Φόρτισης Μπαταρίας (Θερμ. Περιβάλλοντος: 27°C)

Κατάσταση	Ειδική Πυκνότητα	Τάση στοιχείου 2V	Τάση μπαταρίας	Σημείο Πήξης (°C)

			12V	
Πλήρως Φορτισμένη	1.265	2.12V	12.70V	-57°C
75%	1.225	2.10V	12.60V	-37°C
50%	1.190	2.08V	12.45V	-24°C
25%	1.155	2.03V	12.20V	-16°C
Πλήρως εκφορτισμένη	1.120	1.95V	11.70V	-8°C

2.9 Κανόνες χρήσης μπαταρίας

- Επιλέγουμε τη σωστή μπαταρία για την επιθυμητή χρήση
- Φροντίζουμε για τη σωστή φόρτιση της μπαταρίας
- Δεν εκφορτίζουμε τη μπαταρία εντελώς
- Δεν αφήνουμε τη μπαταρία αφόρτιστη
- Ελέγχουμε και συμπληρώνουμε απιονισμένο νερό
- Δεν "ξεχειλίζουμε" με νερό τη μπαταρία

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΙΣ ΚΑΙ ΡΥΘΜΙΣΤΕΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ

3.1 Αντιστροφείς (INVERTER)

Με τον όρο αντιστροφέα νοείται η διάταξη ηλεκτρονικών ισχύος η οποία μετατρέπει τη συνεχή τάση των Φ/Β πάνελ σε εναλλασσόμενη ονομαστικών τιμών 230V (ανά φάση) /50 Hz. Οι αντιστροφείς αποτελούν πάντα ένα κομβικό σημείο σε μία Φ/Β εγκατάσταση καθώς όλη η παραγόμενη ενέργεια διοχετεύεται μέσω αυτών στο δίκτυο ή στον καταναλωτή. Κατά συνέπεια έχει ιδιαίτερη σημασία να χαρακτηρίζονται από αξιοπιστία και υψηλή απόδοση.

Η εταιρεία παροχής ηλεκτρικής ενέργειας, αναγνωρίζοντας το σημαντικό ρόλο των αντιστροφέων σε ένα διασυνδεδεμένο σύστημα θέτει συγκεκριμένες προδιαγραφές για αυτούς απαιτώντας την ύπαρξη σχετικών πιστοποιητικών. Επιπλέον κατά τη φάση παραλαβής του έργου, οι αντιστροφείς υποβάλλονται σε έλεγχο για να διαπιστωθεί κατά πόσο τηρούνται αυτές οι προδιαγραφές. Οι προδιαγραφές αυτές αφορούν:

1. Την τάση και τη συχνότητα των αντιστροφέων: οι προεπιλεγμένες τιμές ρυθμίσεων προστασιών ορίων τάσης και συχνότητας είναι από -20% έως +15% και +/-0,5Hz αντίστοιχα για σταθμούς στο διασυνδεδεμένο σύστημα και από -20% έως +15% και από 47,5Hz έως 51Hz για σταθμούς σε μη διασυνδεδεμένα νησιά. Σε περίπτωση ενεργοποίησης των παραπάνω προστασιών ο χρόνος αποσύνδεσης θα πρέπει να είναι μικρότερος από 0,5 sec και ο χρόνος επανασύζευξης τουλάχιστον 3 λεπτά.
2. Η Ολική Αρμονική Παραμόρφωση (Total Harmonic Distortion-THD) του ρεύματος των αντιστροφέων δεν θα πρέπει να υπερβαίνει τα 5%. Ο συντελεστής THD ορίζεται ως:

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1}$$

Όπου

I_1 είναι η ενεργός τιμή του ρεύματος στη θεμελιώδη συχνότητα και

I_h η ενεργός τιμή της αρμονικής ρεύματος τάξης h και συχνότητας $50xh$ Hz.

3. Εφόσον οι αντιστροφείς δε διαθέτουν μετασχηματιστή απομόνωσης η έγχυση συνεχούς ρεύματος (dc injection current) δεν θα πρέπει να ξεπερνά το 0,5% του ονομαστικού ρεύματος.
4. Προστασία έναντι του φαινομένου νησιδοποίησης κατά το πρότυπο VDE 0126. Το σημείο αυτό πρόκειται να αναλυθεί περαιτέρω στις επόμενες παραγράφους.

Οι αντιστροφείς των διασυνδεδεμένων συστημάτων διαχωρίζονται ανάλογα με το είδος της τάσης που παράγουν σε:

- Μονοφασικούς αντιστροφείς, με τυπικά μεγέθη ισχύος έως 10-11kW.
- Τριφασικούς αντιστροφείς, με μεγέθη ισχύος από 6-7kW έως και 1MW.

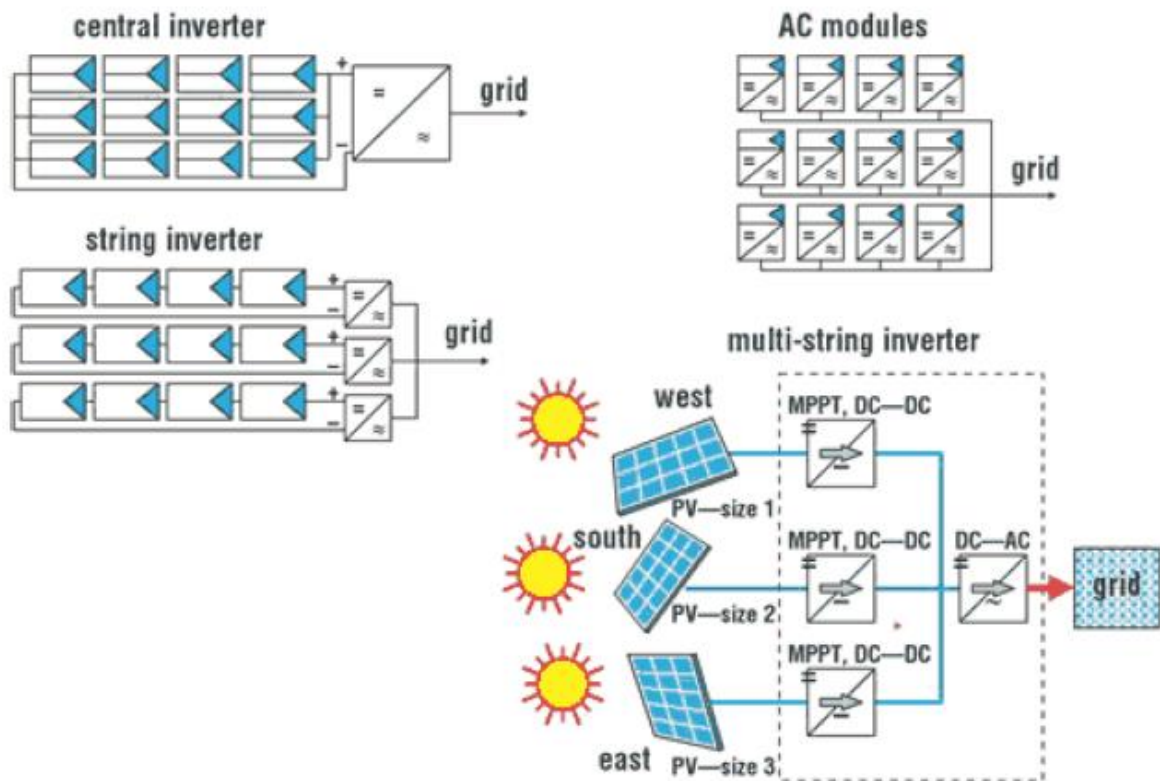
Τονίζεται ότι η εταιρεία παροχής ηλεκτρικής ενέργειας επιβάλλει τη σύνδεση των αντιστροφέων σε τριφασικό σύστημα για εγκαταστάσεις άνω των 5kW, ενώ εγκαταστάσεις άνω των 100kW συνδέονται υποχρεωτικά στο δίκτυο Μέσης Τάσης (MT) της εταιρείας παροχής ηλεκτρικής ενέργειας.

Οι αντιστροφείς ανάλογα με το αν χρησιμοποιούν μετασχηματιστή για γαλβανική απομόνωση (χαμηλής ή υψηλής συχνότητας) ανάμεσα στην DC είσοδο και την AC έξοδο χωρίζονται σε :

- Αντιστροφείς με μετασχηματιστή (inverters with transformer)
- Αντιστροφείς χωρίς μετασχηματιστή (transformerless (TL) inverters)

Επιπλέον, ανάλογα της τεχνολογίας διασύνδεσης των Φ/Β πάνελ που χρησιμοποιείται οι αντιστροφείς χωρίζονται στις παρακάτω κατηγορίες:

- Κεντρικοί αντιστροφείς (central inverters)
- Αντιστροφείς κλάδων (string inverters)
- Αντιστροφείς πολλαπλών κλάδων (multi-string inverters)
- Αντιστροφείς με ενσωμάτωση σε Φ/Β πάνελ (module integrated inverters).



Εικόνα 3.1.1 Κεντρικός μετατροπέας

3.1.1 Οικογένειες αντιστροφέων

3.1.1.1 Κεντρικοί αντιστροφείς (central inverters)

Οι κεντρικοί αντιστροφείς αποτελούν το είδος των αντιστροφέων που εμφανίζουν τα μεγαλύτερα επίπεδα ισχύος, της τάξης από 30-50kW έως και 1-2MW. Για το λόγο αυτό, η χρήση τους είναι περισσότερο διαδεδομένη σε σταθμούς μεγάλης ισχύος. Σε ορισμένες περιπτώσεις και σε επίπεδα ισχύος των εκατοντάδων kW οι αντιστροφείς αυτοί συνοδεύονται από μετασχηματιστή ανύψωσης 0,4/20kV, ώστε να επιτρέπουν την απευθείας σύνδεση τους στο δίκτυο MT της εταιρείας παροχής ηλεκτρικής ενέργειας.

3.1.1.2 Αντιστροφείς κλάδων ή στοιχειοσειρών (string inverters)

Αποτελούν αδιαμφισβήτητα την περισσότερο διαδεδομένη κατηγορία αντιστροφέων σε σταθμούς μικρής έως και μέσης ισχύος. Η βασική αρχή λειτουργίας τους βασίζεται στην παράλληλη σύνδεση ενός αριθμού κλάδων (strings) σε αντίστοιχες εισόδους του αντιστροφέα (της τάξης των 2-8).

Οι αντιστροφείς αυτού του τύπου κυκλοφορούν στο εμπόριο με μετασχηματιστή ή χωρίς μετασχηματιστή καθώς επίσης και σε μονοφασική ή τριφασική σύνδεση (συνήθως πάνω από 10kW). Διαθέτουν αρκετή ευελιξία αναφορικά με τον αριθμό των πάνελ που μπορεί να συνδεθεί στις εισόδους τους, αρκεί φυσικά να μην παραβιάζονται οι μέγιστες ρυθμίσεις ασφαλείας τους. Επιπλέον είναι σκόπιμο να συνδέονται στις εισόδους τους με τον ίδιο τύπο και αριθμό πάνελ.



Εικόνα 3.1.2 Μετατροπείς κλάδων

3.1.1.3 Αντιστροφείς πολλαπλών κλάδων ή στοιχειοσειρών (multistring inverters)

Οι αντιστροφείς πολλαπλών κλάδων χρησιμοποιούνται όταν σε έναν αντιστροφέα είναι απαραίτητο να συνδεθούν διαφορετικά πάνελ, όσον αφορά την ονομαστική ισχύ τους, τον αριθμό των πάνελ που αποτελούν τον κλάδο, τον κατασκευαστή κτλ. Στην περίπτωση αυτή στην ουσία κάθε είσοδος είναι ανεξάρτητη από τις άλλες και διαθέτει τους δικούς της ελεγκτές μέγιστης ισχύος και μετατροπείς.

Οι αντιστροφείς αυτοί χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις όπου η διαθεσιμότητα πάνελ επιβάλλει τη σύνδεση διαφορετικών πάνελ ή σε περιπτώσεις όπου μεταβάλλονται τα χαρακτηριστικά εγκατάστασης που επηρεάζουν την παραγωγή ενέργειας, όπως είναι η κλίση των πάνελ ή η ύπαρξη προβλημάτων σκίασης.

Λόγω του ειδικού χαρακτήρα της χρήσης τους, η διαθεσιμότητα μοντέλων multi-string είναι σαφώς πιο περιορισμένη απ' ότι σε συμβατικούς string inverters.



Εικόνα 3.1.3 Αντιστροφέας πολλαπλών κλάδων

3.1.1.4 Αντιστροφείς με ενσωμάτωση σε Φ/Β πάνελ (Module integrated inverters)

Οι αντιστροφείς αυτοί αποτελούν μία σχετικά νέα κατηγορία χαμηλής ισχύος (έως περίπου 300W). Οι αντιστροφείς αυτοί ενσωματώνονται, δηλαδή δέχονται στην είσοδο τους, με ένα Φ/Β πάνελ. Σκοπός της χρήσης τους αποτελεί η βέλτιστη λειτουργία της Φ/Β εγκατάστασης ανά κάθε πάνελ χωριστά. Οι αντιστροφείς αυτοί παρουσιάζουν ενδιαφέρον κυρίως για μικρές οικιακές εγκαταστάσεις με σημαντικά προβλήματα σκίασης.



Εικόνα 3.1.4 Αντιστροφείς για ενσωμάτωση σε Φ/Β πάνελ

3.1.2 Σημαντικές παράμετροι λειτουργίας

3.1.2.1 Ο βαθμός απόδοσης του αντιστροφέα

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

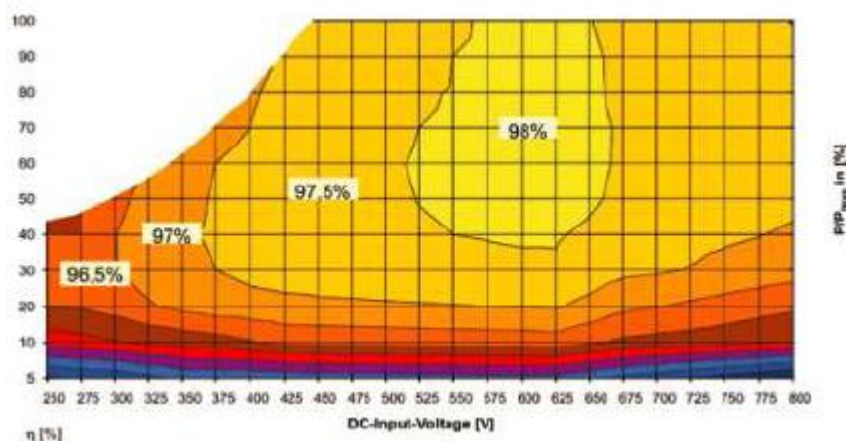
$$n(\%) = \frac{P_{AC}}{P_{DC}}$$

Ο βαθμός απόδοσης αντανακλά το ποσό της ισχύος που χάνεται ως απώλειες στον αντιστροφέα. Οι κυριότερες απώλειες εμφανίζονται στα ημιαγωγά στοιχεία ισχύος, ενώ άλλες πηγές απωλειών αποτελούν οι ωμικές αντιστάσεις των ηλεκτρονικών εξαρτημάτων, οι απώλειες αερισμού κτλ.

Ο βαθμός απόδοσης αποτελεί ίσως το σημαντικότερο χαρακτηριστικό ενός αντιστροφέα και κάθε μελετητής μηχανικός θα πρέπει να εξετάζει το σημείο αυτό. Ο λόγος είναι προφανής: απώλειες ισχύος μεταφράζονται σε απώλειες εισοδήματος σε διασυνδεδεμένα συστήματα. Για παράδειγμα αν υποθεθεί ότι η μέση παραγωγή σε μία τοποθεσία είναι 1.300kWh/kWp το έτος τότε η μεταβολή κατά 1% (επί της ονομαστικής ισχύος) των απωλειών σε ένα Φ/Β σταθμό 100kWp, θα σήμαινε απώλειες εισόδων της τάξης των 585€/έτος.

Ο σημαντικότερος παράγοντας που επηρεάζει το βαθμό απόδοσης, θεωρώντας ίδιο ποσό φόρτισης του αντιστροφέα, είναι η ύπαρξη ή μη μετασχηματιστή απομόνωσης. Όπως αναφέρθηκε στην αγορά υπάρχουν οι τεχνολογίες αντιστροφέων με μετασχηματιστή ή χωρίς. Τυπικές τιμές απόδοσης αντιστροφέων με μετασχηματιστή είναι της τάξης του 92-94% με μετασχηματιστή χαμηλής συχνότητας (LF) και 94-96% με μετασχηματιστή υψηλής συχνότητας (HF). Αντίθετα, σε αντιστροφείς χωρίς μετασχηματιστή ο βαθμός απόδοσης κυμαίνεται μεταξύ 96-98,5%.

Οι παραπάνω τιμές απόδοσης αναφέρονται στον καταγραφόμενο μέγιστο βαθμό απόδοσης (maximum efficiency). Η τιμή αυτή αναγράφεται πάντα στα τεχνικά φυλλάδια. Ωστόσο θα πρέπει να γνωρίζει κανείς ότι κάθε αντιστροφέας λειτουργεί λίγες φορές στον απολύτως μέγιστο βαθμό απόδοσης, καθώς αυτός εξαρτάται από το επίπεδο φόρτισης του αντιστροφέα και την DC τάση λειτουργίας. Ως βαθμός φόρτισης νοείται το ποσοστό της ισχύος εισόδου του αντιστροφέα, ως προς την ονομαστική ισχύ εισόδου ή η ισχύς εξόδου (ο ακριβής προσδιορισμός εξαρτάται από τον κατασκευαστή). Οι κατασκευαστές παρουσιάζουν τα στοιχεία αυτά με τη μορφή διαγραμμάτων, όπως για παράδειγμα στα παρακάτω σχήματα:



Εικόνα 3.1.5 Παραδείγματα διαγραμμάτων βαθμού απόδοσης αντιστροφέων

Όπως παρατηρείται στα παραπάνω διαγράμματα, ο βαθμός απόδοσης των αντιστροφέων εμφανίζει μέγιστο σε μία περιοχή τιμών ισχύος και DC τάσεων. Το γεγονός αυτό θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά την διαστασιολόγηση σε σχέση με την ονομαστική ισχύ των Φ/Β πάνελ, όπου ο μελετητής

μηχανικός θα πρέπει να εξετάζει, ανάλογα με την περίπτωση, αν η λειτουργία του αντιστροφέα αντιστοιχεί σε περιοχές με υψηλό βαθμό απόδοσης.

Έτσι για υπέρ-διαστασιολογημένους αντιστροφείς (αναφορικά με τη συνολική ισχύ των Φ/Β πάνελ που συνδέονται στην είσοδο τους), είναι πιθανό να λειτουργούν σε σχετικά χαμηλά φορτία για τα οποία δεν εμφανίζουν το βέλτιστο βαθμό απόδοσης και επιπλέον στοιχίζουν περισσότερο. Από την άλλη πλευρά, αντιστροφείς που εμφανίζονται υπό-διαστασιολογημένοι σε σχέση με την ισχύ των Φ/Β πάνελ, είναι δυνατόν να οδηγήσουν σε απώλειες ενέργειας λόγω υπερφόρτισης: κάθε αντιστροφέας χαρακτηρίζεται από μία μέγιστη ισχύ η οποία δεν μπορεί να ξεπεραστεί για λόγους ασφαλείας, οπότε είναι πιθανόν πλεονάσματα ενέργειας από τα Φ/Β πάνελ να χάνονται.

Συνήθως, ανάλογα και με τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της περιοχής εγκατάστασης, το είδος των πάνελ, της χρησιμοποιούμενης τεχνολογίας στήριξης (σταθερές βάσεις ή τράκερ) και της καμπύλης απόδοσης του κάθε αντιστροφέα, η σχέση μεταξύ της ονομαστικής ισχύος εξόδου του αντιστροφέα και της ισχύος των Φ/Β πάνελ κυμαίνεται μεταξύ 90% και 115%.

Από τα παραπάνω γίνεται φανερό ότι ο μέγιστος βαθμός απόδοσης δεν επαρκεί για να χαρακτηρίσει τη λειτουργία ενός αντιστροφέα αναφορικά με τις απώλειες του. Μία καλύτερη προσέγγιση παρέχει ο Ευρωπαϊκός βαθμός απόδοσης (euro efficiency), ο οποίος αποτελεί έναν μεσοσταθμισμένο βαθμό απόδοσης, βάσει αποδόσεων σε μερικά φορτία, εκφρασμένα σε ποσοστά της ονομαστικής ισχύος εξόδου. Ο βαθμός αυτός ορίζεται ως:

$$\eta_E = 0.03\eta_{5\%} + 0.06\eta_{10\%} + 0.13\eta_{20\%} + 0.1\eta_{30\%} + 0.48\eta_{50\%} + 0.2\eta_{100\%}$$

όπου λαμβάνονται οι βαθμοί απόδοσης στο 5%, 10%, 20%, 30%, 50% και 100% της ονομαστικής ισχύος εξόδου με συντελεστές βαρών 3%, 6%, 13%, 10%, 48% και 20% αντίστοιχα. Ο Ευρωπαϊκός βαθμός απόδοσης διαφέρει συνήθως από το μέγιστο βαθμό απόδοσης κατά 1-2% και δίνεται επίσης από τους κατασκευαστές.

3.1.2.2 Βέλτιστο σημείο λειτουργίας των Φ/Β πάνελ

Η παρακολούθηση του σημείου βέλτιστης λειτουργίας γνωστή και ως MPPT (Maximum Power Point Tracking) αναφέρεται στην τεχνική που χρησιμοποιείται ώστε να μεταβάλλεται το σημείο λειτουργίας (τάση-ρεύμα)

των Φ/Β πάνελ ώστε να ανταποκρίνεται κάθε φορά στο σημείο που αντιστοιχεί στη μέγιστη ισχύ.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η ισχύς ενός Φ/Β πάνελ, η οποία προκύπτει από το γινόμενο της τάσης με την ένταση ρεύματος, δεν είναι σταθερή αλλά μεταβάλλεται σε σχέση με την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας (irradiance, G) και της θερμοκρασίας. Οι κατασκευαστές των πάνελ δίνουν στα τεχνικά φυλλάδια τη μέγιστη ισχύ (Maximum Power Point, MPP) στις πρότυπες συνθήκες ελέγχου (STC) οι οποίες αντιστοιχούν σε ένταση ηλιακής ακτινοβολίας ίση προς $G=1000\text{W/m}^2$, και θερμοκρασία πάνελ ίση προς 25 βαθμούς Κελσίου. Σε οποιαδήποτε άλλες συνθήκες, η μέγιστη ισχύς μεταβάλλεται και μειώνεται με τη μείωση της ακτινοβολίας και την αύξηση της θερμοκρασίας. Κατά συνέπεια είναι απαραίτητο κάθε αντιστροφέας να διαθέτει διατάξεις οι οποίες παρακολουθούν συνεχώς το σημείο λειτουργίας των πάνελ και το μεταβάλλουν, ώστε να αντιστοιχεί κάθε φορά στο σημείο της μέγιστης ισχύος.

Στη διεθνή βιβλιογραφία αναφέρονται διάφοροι αλγόριθμοι MPPT. Ένας απλός και διαδομένος αλγόριθμος είναι αυτός της μεθόδου P&O (perturbation and observe, διαταραχή και παρατήρηση). Στον αλγόριθμο αυτό το σημείο λειτουργίας μεταβάλλεται ελαφρά και παρατηρείται η μεταβολή στην ισχύ: αν η μεταβολή οδηγεί σε αύξηση της ισχύος (θετική παράγωγος), τότε επιβάλλεται νέα μεταβολή, έως το σημείο που η μεταβολή της ισχύος οδηγήσει σε μείωση ισχύος (αρνητική παράγωγος).

Τότε το τελικό σημείο λειτουργίας ταλαντώνεται μεταξύ αυτών των δύο σημείων θετικής και αρνητικής παραγωγής, που αντιστοιχεί σε μέγιστο. Τα τεχνικά φυλλάδια των αντιστροφέων αναφέρονται στο εύρος της DC τάσης εισόδου στο οποίο μπορεί να επιτευχθεί έλεγχος της μέγιστης ισχύος. Είναι υποχρέωση του μελετητή να εξασφαλίζει ότι σε όλο το δυνατό εύρος λειτουργίας, η DC τάση των Φ/Β πάνελ κείται εντός των ορίων ελέγχου μέγιστης τάσης, ώστε να εξασφαλίζεται η αποδοτική λειτουργία του αντιστροφέα.

Επίσης, συχνά τα φυλλάδια των κατασκευαστών αναφέρονται στο βαθμό απόδοσης της παρακολούθησης του σημείου μέγιστης ισχύος (MPPT

efficiency). Ο βαθμός απόδοσης ορίζεται ως το ποσό της ενέργειας που λαμβάνει ο αντιστροφέας από τα Φ/Β πάνελ προς το (θεωρητικό) ποσό της μέγιστης ενέργειας που μπορεί να λάβει για μία προκαθορισμένη χρονική περίοδο. Δηλαδή ισχύει:

$$n_{MPPT} = \frac{\int_0^1 P_{DC}(t)dt}{\int_0^1 P_{MAX}(t)dt}$$

3.1.2.3 Αρμονική παραμόρφωση του ρεύματος και συντελεστής ισχύος

Η αρμονική παραμόρφωση του παραγόμενου ρεύματος και ο συντελεστής ισχύος συνδέονται άμεσα με την ποιότητα της παρεχόμενης προς το δίκτυο ισχύος. Ιδανικά, η ισχύς θα πρέπει να μεταφέρεται με συντελεστή ισχύος ίσο προς τη μονάδα, ώστε η άεργος ισχύς του σταθμού να είναι μηδενική και επιπλέον οι κυματομορφές τάσης και ρεύματος θα πρέπει να είναι σχεδόν ημιτονοειδούς μορφής, ώστε να μην εγχέονται ανεπιθύμητες αρμονικές στο δίκτυο της ΕΤΑΙΡΕΙΑ ΠΑΡΟΧΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ.

Ως μέτρο της ποιότητας του ρεύματος αναφορικά με τις αρμονικές του χρησιμοποιείται ο ευρέως διαδεδομένος δείκτης της «ολικής αρμονικής παραμόρφωσης» περισσότερο γνωστός ως THD, από τα αρχικά των λέξεων Total Harmonic Distortion. Ο δείκτης αυτός ορίζεται ως:

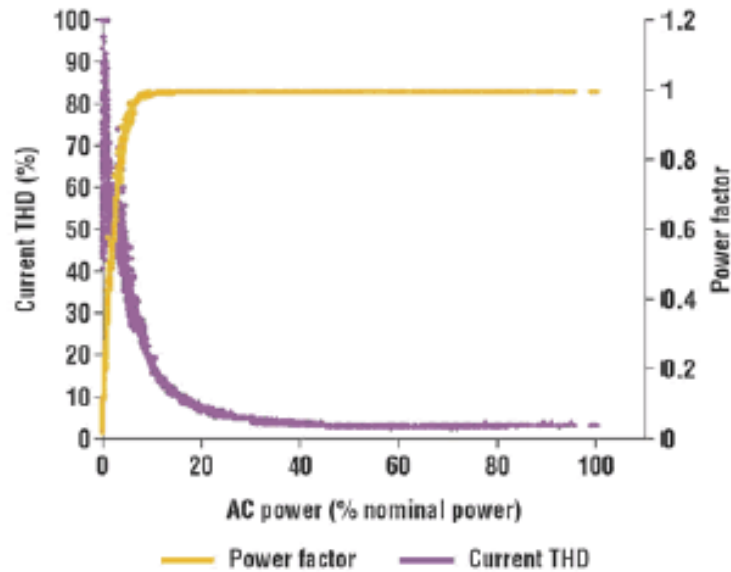
$$THD_i = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + \dots}}{I_1} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1}$$

Όπου I_h , $h=2,3,4,\dots$ είναι η ενεργός τιμή (rms) ή πλάτος της αρμονικής τάξης h (δηλαδή συχνότητας $50 \times h$) και I_1 , είναι η ενεργός τιμή (rms) ή πλάτος της αρμονικής τάξης 1, δηλαδή της θεμελιώδους των 50Hz.

Από τον παραπάνω τύπο προκύπτει ότι για μία αμιγώς ημιτονοειδή κυματομορφή ο συντελεστής THD είναι ίσος με το μηδέν ενώ όσο μεγαλύτερα είναι τα πλάτη των αρμονικών τόσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του συντελεστή. Ο παραπάνω ορισμός έχει το μειονέκτημα ότι δεν ποσοτικοποιεί την επίδραση της συχνότητας της κάθε αρμονικής, παραμένει ωστόσο ένα διεθνώς αναγνωρισμένος δείκτης για την παρουσία αρμονικών.

Ο συντελεστής THD του ρεύματος που παράγεται από έναν αντιστροφέα φωτοβολταϊκών συστημάτων προσδιορίζεται στο πρότυπο IEC 61000-3-2. Θεωρώντας το φάσμα αρμονικών έως την αρμονική τάξης 49, ο συντελεστής THD του ρεύματος θα πρέπει να είναι μικρότερος από 5%. Είναι ενδιαφέρον να σημειωθεί ότι λόγω της υψηλής συχνότητας μεταγωγής των διακοπών ηλεκτρονικών ισχύος (τεχνολογίας IGBT) που χρησιμοποιούνται στις γέφυρες του αντιστροφέα και της χρησιμοποίησης της τεχνικής διαμόρφωσης εύρους παλμών (PWM) οι κυριότερες αρμονικές εμφανίζονται σε πολλαπλάσια της συχνότητας αυτής, σε τάξεις συνήθως μεγαλύτερες από την τάξη 50. Η AC ισχύς για την οποία πρέπει να ισχύει η προδιαγραφή της αρμονικής παραμόρφωσης δεν αναφέρεται και έτσι συνήθως νοείται η ονομαστική ισχύς. Η ολική αρμονική παραμόρφωση του ρεύματος αυξάνεται σημαντικά σε φορτία πολύ μικρότερα του ονομαστικού. Το παρακάτω σχήμα παρουσιάζει ενδεικτικά τη μεταβολή του THD και του συντελεστή ισχύος με το φορτίο του αντιστροφέα, όπου φαίνεται ότι η συντελεστής THD είναι κάτω από 5% στο 50% του φορτίου και πάνω. Επιπλέον, παρατηρείται ότι ο συντελεστής ισχύος διατηρείται σχεδόν ίσος προς τη μονάδα ($>0,999$) για φορτία του αντιστροφέα από 20% και πάνω.

Αξίζει να σημειωθεί ότι στη Γερμανία ισχύει από 1η Ιουλίου 2010 ότι οι αντιστροφείς που τροφοδοτούν ενέργειας στο δίκτυο μέσης τάσης, θα πρέπει να έχουν τη δυνατότητα υποστήριξης του με την παραγωγή ή κατανάλωση αέργου ισχύος. Έτσι εμφανίζονται στην αγορά εκδόσεις αντιστροφέων που έχουν τη δυνατότητα μεταβολής της αέργου ισχύος και εμφανίζουν συντελεστή ισχύος μικρότερο της μονάδας.



Εικόνα 3.1.6 Μεταβολή του συντελεστή ισχύος και της ολικής αρμονικής παραμόρφωσης ρεύματος με το φορτίου του αντιστροφέα

3.1.2.4 Λειτουργία με περιορισμό ισχύος

Η διαφορά ανάμεσα στην ονομαστική ισχύ και την ισχύ λειτουργίας από τα Φ/Β πάνελ προϋποθέτει ότι οι αντιστροφείς θα πρέπει να προστατευτούν από τη λειτουργία υπερφόρτισης, για παράδειγμα όταν η ισχύς που παράγεται από τα Φ/Β πάνελ είναι μεγαλύτερη από τη μέγιστη DC εισόδου του αντιστροφέα. Στην περίπτωση αυτή οι εσωτερικοί αλγόριθμοι ελέγχου μετατοπίζουν το σημείο λειτουργίας από το μέγιστο (MPP) ώστε να προστατευτεί ο αντιστροφέας από υπερθέρμανση. Δυστυχώς, στην περίπτωση αυτή η επιπλέον αυτή ενέργεια των Φ/Β πάνελ δεν αξιοποιείται.

Υπάρχουν επίσης αντιστροφείς στους οποίους δεν εκτελείται η παραπάνω διαδικασία, αλλά απλά ο αντιστροφέας σταματά τη λειτουργία του και προσπαθεί να επανασυνδεθεί μετά από μικρό χρονικό διάστημα. Για το σκοπό αυτό είναι απαραίτητο να γίνεται σωστή διαστασιολόγηση των αντιστροφέων και να ληφθεί υπόψη μία μέση εκτίμηση της πραγματικά παραγόμενης ενέργειας από τα Φ/Β πάνελ. Το θέμα αυτό είναι σημαντικότερο σε Φ/Β πάρκα με τράκερ καθώς εμφανίζουν σημαντικά αυξημένη παραγωγή ενέργειας που επιφέρει τη λειτουργία αντιστροφέων σε υψηλότερα φορτία απ' ό τι για παράδειγμα σε συστήματα σταθερών βάσεων.

3.1.3 Άλλα χαρακτηριστικά

Ένα ακόμη χαρακτηριστικό που θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά την επιλογή και τοποθέτηση των αντιστροφεία είναι ο βαθμός προστασίας του (IP class). Αν και αντιστροφείς με υψηλό δείκτη προστασίας (π.χ. IP 65) μπορούν να τοποθετηθούν στον εξωτερικό χώρο, γενικά συνιστάται να αποφεύγεται η απευθείας έκθεση τους στον ήλιο και να τοποθετούνται στο πίσω μέρος των σταθερών βάσεων ή στη βάση των τράκερ.

Αντιστροφείς με μικρότερο δείκτη προστασίας IP (π.χ. IP44) μπορούν να τοποθετηθούν σε εξωτερικό χώρο με πρόβλεψη κάποιου καλύμματος προστασίας από καιρικές συνθήκες. Αντίθετα αντιστροφείς με ακόμη μικρότερο δείκτη (π.χ IP 21-23) θα πρέπει οπωσδήποτε να τοποθετούνται σε εσωτερικό χώρο. Στην περίπτωση αυτή μέριμνα πρέπει να ληφθεί για τον επαρκή αερισμό του χώρου ώστε να αποφεύγεται η υπερθέρμανση του αντιστροφεία κατά τους καλοκαιρινούς μήνες, σε ορισμένες περιπτώσεις αν θεωρείται σκόπιμο θα πρέπει να προβλεφθεί και η τοποθέτηση κλιματιστικού μηχανήματος.

Αναφορικά με την αξιοπιστία των αντιστροφείων, οι περισσότεροι κατασκευαστές εγγυώνται μία περίοδο της τάξης των 5 ετών. Είναι ωστόσο δυνατόν, με αντίστοιχη αύξηση του κόστους η περίοδος εγγύησης να επεκταθεί αρκετά, σε διάστημα ακόμη και 20 ετών. Το γεγονός ότι οι αντιστροφείς εμφανίζουν σημαντικά μειωμένους χρόνους εγγύησης σε σχέση με τα υπόλοιπα βασικά τμήματα της Φ/Β εγκατάστασης (π.χ. πάνελ, βάσεις, καλώδια κτλ), λόγω της ηλεκτρονικής φύσης τους, θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά τους χρηματοοικονομικούς υπολογισμούς καθώς είναι πολύ πιθανόν στο διάστημα της 20ετίας που προβλέπεται η αγορά της ηλεκτρικής ενέργειας από το ΔΕΣΜΗΕ να χρειαστεί να γίνει αντικατάσταση τους επί πληρωμή.

Τέλος θα πρέπει να αναφερθεί ότι όλοι οι αντιστροφείς της αγοράς είναι εξοπλισμένοι με συστήματα που επιτρέπουν την παρακολούθηση της λειτουργίας τους, την καταγραφή των δεδομένων και της δυνατότητα επικοινωνίας ώστε να καταστεί δυνατή η τοπική και απομακρυσμένη παρακολούθηση της πραγματικής παραγωγής του Φ/Β σταθμού. Ειδικά στην απομακρυσμένη παρακολούθηση, σχεδόν όλοι οι κατασκευαστές

αντιστροφών δίνουν τη δυνατότητα παρακολούθησης μέσω διαδικτύου, μέσω αντίστοιχων ιστοσελίδων, ώστε να είναι δυνατή η επισκόπηση της λειτουργίας από απόσταση και η αναφορά σφαλμάτων.

3.2 Ρυθμιστές φόρτισης

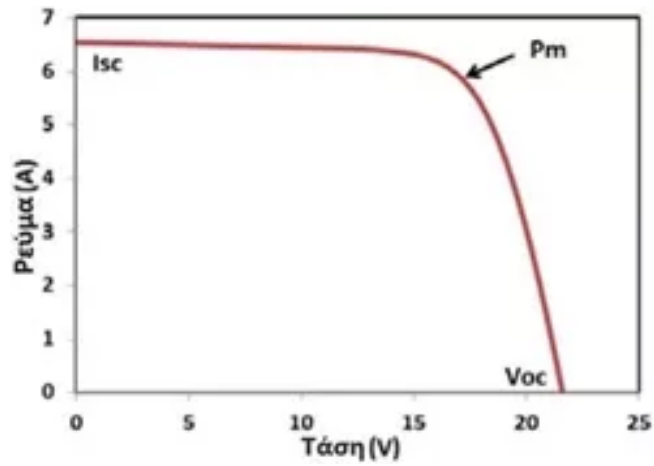
Ο ρυθμιστής φόρτισης, που επίσης λέγεται και αυτόματος/κόφτης/σταθεροποιητής, είναι απαραίτητο όργανο για να προστατεύει τους συσσωρευτές (μπαταρίες) από υπερβολική φόρτιση και πολλές φορές από υπερβολική εκφόρτιση. Παρεμβάλλεται μεταξύ του φωτοβολταϊκού συλλέκτη και του συσσωρευτή.

Όταν η μπαταρία δεν μπορεί και δεν πρέπει να δεχθεί περισσότερη ηλεκτρική φόρτιση, ο ρυθμιστής φόρτισης διακόπτει τη ροή του ρεύματος προς τον συσσωρευτή κι έτσι ο συσσωρευτής δεν παθαίνει κάποια ζημιά. Επίσης, αν ηλεκτρικές συσκευές είναι συνδεδεμένες με το ρεύμα από την έξοδο για φορτία του ρυθμιστή φόρτισης και η τάση της μπαταρίας δεν πρέπει να κατέβει σε χαμηλά επίπεδα τάσης για να μην υποστούν ζημιά τα στοιχεία της, ο ρυθμιστής φόρτισης διακόπτει το ρεύμα προς τις συσκευές και προστατεύει την μπαταρία.

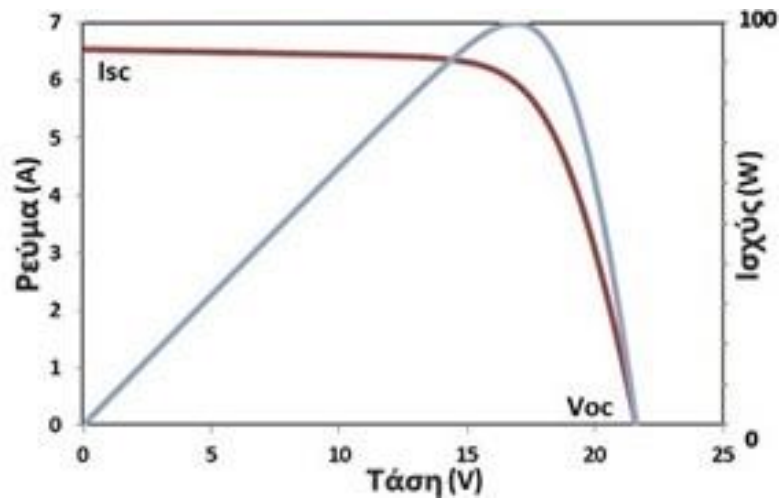
Γενικά υπάρχουν 2 ειδών Ρυθμιστές Φόρτισης. Ο απλός PWM και ο προηγμένος, MPPT

3.2.1 MPPT ρυθμιστής φόρτισης

Η σύγκριση θα βασιστεί στη χαρακτηριστική καμπύλη ρεύματος-τάσης του φωτοβολταϊκού πάνελ. Από το σύνολο των σημείων ρεύματος-τάσης προκύπτει το σύνολο των σημείων του γινομένου ρεύματος-τάσης, δηλαδή της ισχύος και η αντίστοιχη καμπύλη ως προς την τάση

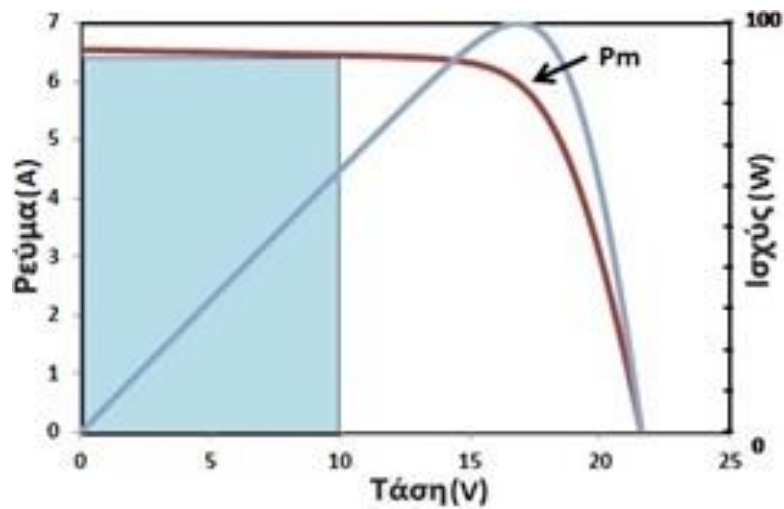


Εικόνα 3.2.1 Καμπύλη τάσης - ρεύματος



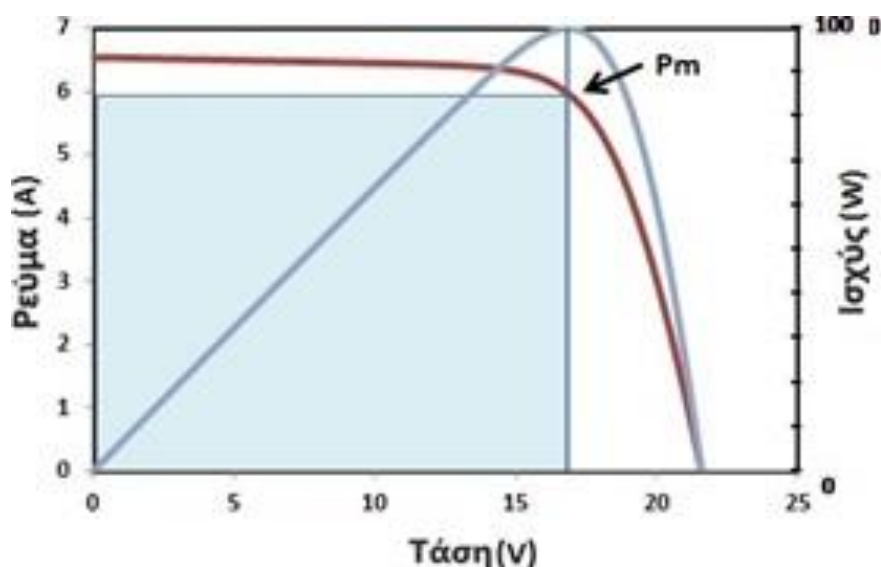
Εικόνα 3.2.2 Καμπύλη τάσης - ρεύματος - ισχύος

Τα γινόμενα ρεύματος-τάσης, οι τιμές της ισχύος που αποδίδει το πάνελ, απεικονίζονται και ως εμβαδά κάτω από την καμπύλη ρεύματος-τάσης και κάθε εμβαδό αντιστοιχεί σε ένα σημείο της καμπύλης ισχύος-τάσης:



Εικόνα 3.2.3 Η τιμή της ισχύος αποδιδόμενη ως εμβαδό

Για ένα μόνο ζεύγος τιμών ρεύματος-τάσης του πάνελ έχουμε το μέγιστο εμβαδό, δηλαδή τη μέγιστη αποδιδόμενη από το πάνελ ισχύ P_m :



Εικόνα 3.2.4 Μέγιστο εμβαδό, δηλ. μέγιστη αποδιδόμενη ισχύς από το πάνελ

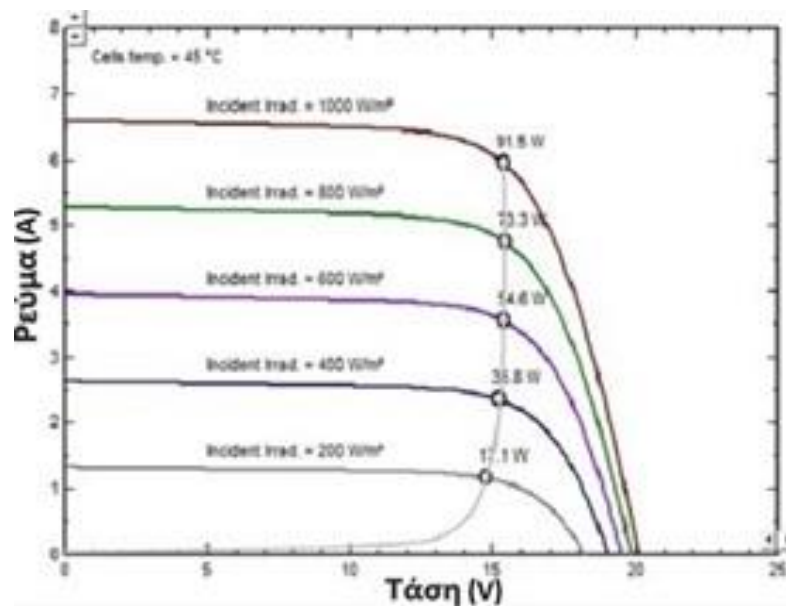
Ο MPPT ρυθμιστής φόρτισης για τις εκάστοτε συνθήκες θερμοκρασίας και ηλιακής ακτινοβολίας «ανιχνεύει» το βέλτιστο σημείο P_m και «τραβάει» τη μέγιστη ισχύ από το πάνελ.

Ο MPPT ρυθμιστής φόρτισης είναι ένας DC σε DC μετασχηματιστής. Η ισχύς, το γινόμενο τάσης-ρεύματος, στην είσοδο και την έξοδο του είναι η ίδια, συμπεριλαμβανομένων των μικρών απωλειών ιδιοκατανάλωσής του. Στην είσοδο έχουμε υψηλότερη τάση και χαμηλότερο ρεύμα και στην έξοδο χαμηλότερη τάση και υψηλότερο ρεύμα.

Ο MPPT ρυθμιστής φόρτισης βασίζεται σε έναν αλγόριθμο προσαρμογής της τάσης στην είσοδό του που πραγματοποιεί μικρά και γρήγορα βήματα. Προσαρμόζει την τάση του πάνελ στην τιμή V_m , λαμβάνει το αντίστοιχο ρεύμα του πάνελ I_m και προσεγγίζει το βέλτιστο σημείο P_m , απορροφώντας έτσι τη μέγιστη ισχύ. Αυτή η γρήγορη βηματική κίνηση προσαρμογής της τάσης λαμβάνει χώρα στις εκάστοτε συνθήκες ηλιακής ακτινοβολίας και θερμοκρασίας ώστε να απορροφάται αντίστοιχα η μέγιστη ισχύς που μπορεί να απορροφηθεί από αυτές τις συνθήκες. Στις παραπάνω καμπύλες στις STC συνθήκες θα προσαρμόσει την τάση του πάνελ στα 18V (V_m), θα τραβήξει

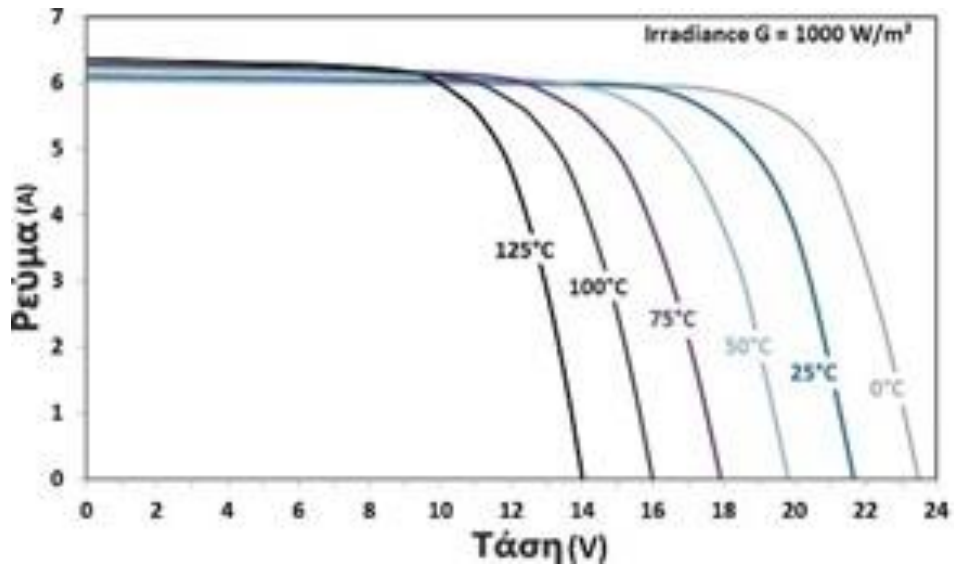
αντίστοιχο ρεύμα 5,56A (I_m) και θα απορροφήσει έτσι τη μέγιστη δυνατή ισχύ P_m , την ονομαστική τιμή των 100Wp.

Το φωτοβολταϊκό πάνελ συμπεριφέρεται ως πηγή ρεύματος και όχι ως πηγή τάσης. Με την μείωση της ακτινοβολίας μειώνεται το ρεύμα που δίνει το πάνελ. Η τάση μειώνεται λιγότερο. Ο MPPT ρυθμιστής φόρτισης προσαρμόζει την τάση του πάνελ, τραβάει το αντίστοιχο ρεύμα και απορροφά τη μέγιστη δυνατή ισχύ για τις εκάστοτε συνθήκες συννεφιάς και μειωμένης ακτινοβολίας:

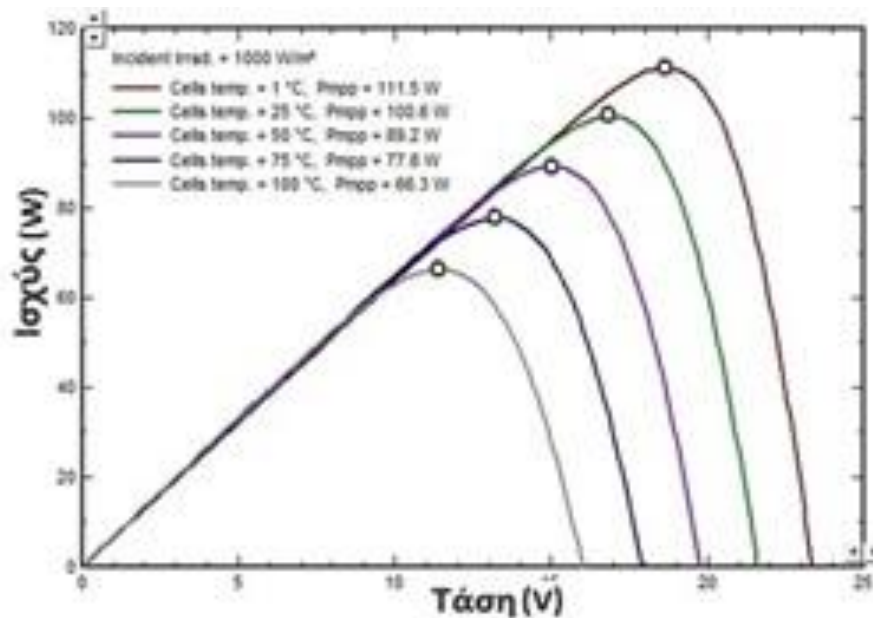


Εικόνα 3.2.5 Μέγιστη δυνατή ισχύς σε έναν MPPT ρυθμιστή φόρτισης

Με την αύξηση της θερμοκρασίας η τάση μειώνεται σύμφωνα με τον θερμοκρασιακό συντελεστή ενώ το ρεύμα παραμένει περίπου σταθερό. Πάλι ο MPPT ρυθμιστής θα προσαρμόσει την τάση του πάνελ, θα τραβήξει το αντίστοιχο ρεύμα και θα απορροφήσει τη μέγιστη δυνατή ισχύ από την κάθε θερμοκρασία λειτουργίας:

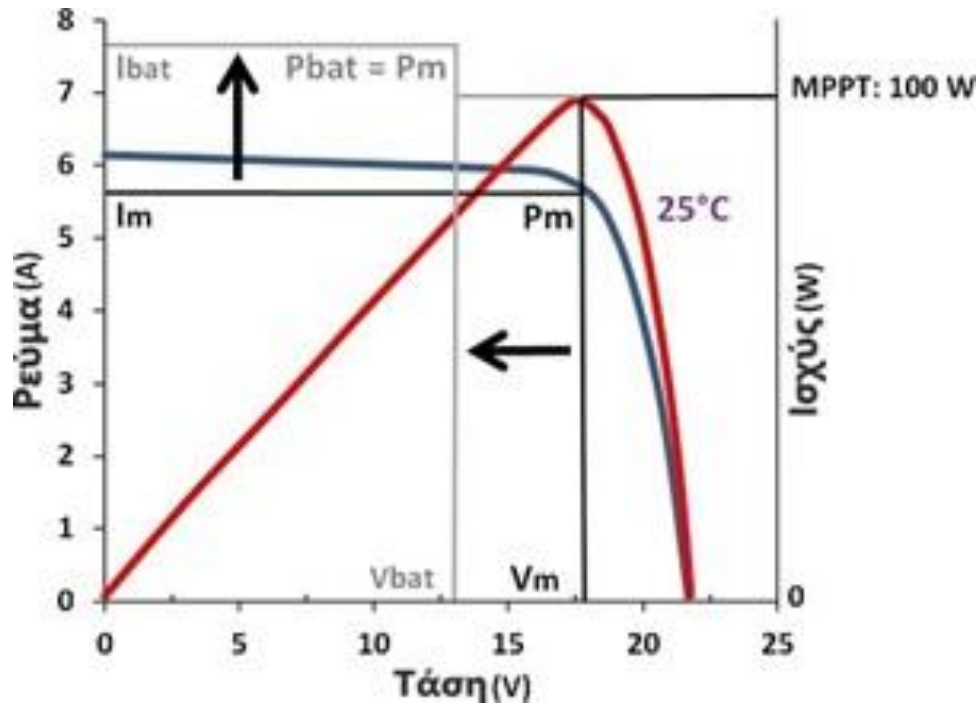


Εικόνα 3.2.6 Μείωση τάσης σε σχέση με τη θερμοκρασία



Εικόνα 3.2.7 μέγιστη δυνατή απορροφώμενη ισχύς σε διαφορετικές θερμοκρασίες

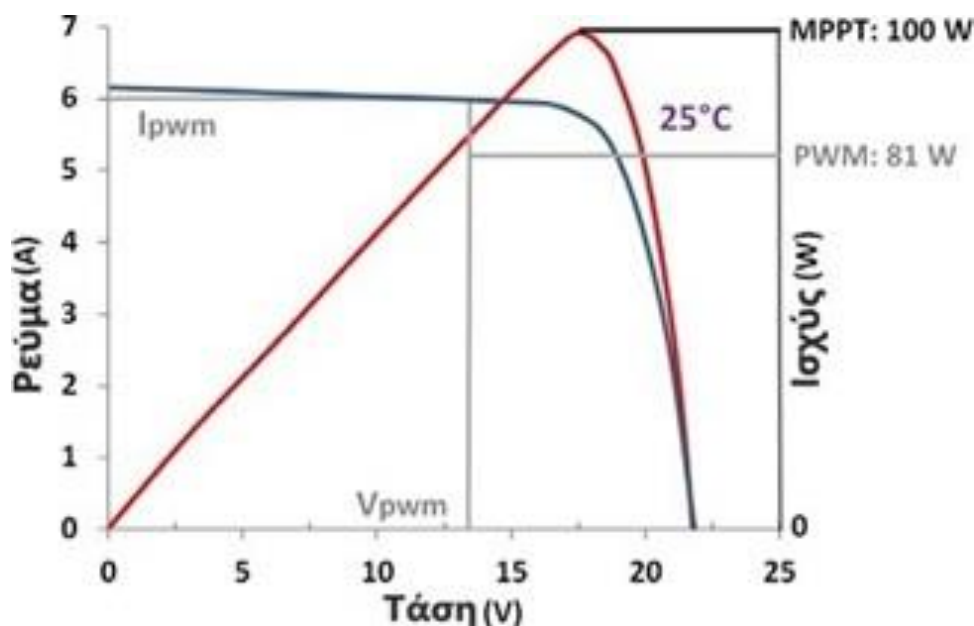
Όταν ο MPPT ρυθμιστής σε συνθήκες STC φορτίζει μία σχετικά εκφόρτιστη 12βολτη μπαταρία σε μία τάση $V_{bat}=13V$, το ρεύμα φόρτισης θα είναι $I_{bat}=100W/13V=7,7A$, ούτως ώστε η ισχύς φόρτισης P_{bat} να είναι ίση με τη μέγιστη απορροφώμενη MPPT ισχύ P_m :



Εικόνα 3.2.8 Η ισχύς φόρτισης P_{bat} είναι ίση με τη μέγιστη απορροφώμενη MPPT ισχύ P_m :

3.2.2 PWM ρυθμιστής φόρτισης

Ο PWM ρυθμιστής φόρτισης δεν είναι ένας DC σε DC μετασχηματιστής. Είναι ουσιαστικά ένας διακόπτης που απλά συνδέει το φωτοβολταϊκό πάνελ με τη μπαταρία και, όταν ο διακόπτης είναι κλειστός, η τάση του πάνελ εξισώνεται με αυτή της μπαταρίας. Ως εκ τούτου, θεωρώντας πάλι μία σχετικά εκφόρτιστη 12βολτη μπαταρία και φόρτιση στην τιμή τάσης $V_{bat}=13V$, η τάση του πάνελ στην περίπτωση του PWM ρυθμιστή, λαμβάνοντας υπόψη μία πτώση τάσης $0,5V$ στα καλώδια και την ιδιοκατανάλωση του ρυθμιστή, θα προσαρμόζεται στην τιμή $V_{pwm}=13,5V$ και τα ρεύματα I_{pwm} , I_{bat} θα είναι επίσης ίσα:



Εικόνα 3.2.9 Η μέγιστη απορροφώμενη ισχύς από τον PWM φορτιστή είναι μικρότερη σε σχέση με αυτή που απορροφά MPPT φορτιστής στις ίδιες συνθήκες

Αυτό σημαίνει ότι η ισχύς που απορροφά ο PWM ρυθμιστής από το πάνελ είναι $P_{pwm} = V_{pwm} \times I_{pwm} = 13,5V \times 6A = 81W$, στις ίδιες συνθήκες που ο MPPT ρυθμιστής απορροφά 100W.

Σε συνθήκες STC, θερμοκρασία 25°C και ακτινοβολία 1000W/m², ο MPPT ρυθμιστής φόρτισης απορροφά από το μονοκρυσταλλικό πάνελ των 100Wr 19% περισσότερη ισχύ σε σχέση με τον PWM ρυθμιστή.

Στη συνέχεια καθώς η φόρτιση προχωράει η τάση του πάνελ και της μπαταρίας αυξάνεται σιγά-σιγά προς την τιμή απορρόφησης (absorption). Όταν φτάσει σε αυτό το στάδιο ο PWM αρχίζει να συνδέει και να αποσυνδέει το πάνελ για να αποτρέψει την υπερφόρτιση εξ' ου και pulse-width, παλμικής μορφής on-off φόρτιση.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ

4.1 ΦΒ συστοιχία

Ετήσια κατανάλωση ισχύος με βάση τους εκκαθαριστικούς λογαριασμούς:
9670 kWhr

Ημερήσια κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας:

$$E_{\text{ηλεκτρική}} = \frac{9670}{365} = 26,5 \text{ kWhrs}$$

Θα υπολογιστεί η ηλεκτρική ενέργεια που χρειάζεται το μήνα του έτους με τη μικρότερη ηλιακή ακτινοβολία, δηλαδή το Δεκέμβριο.

Για το μήνα Δεκέμβριο λαμβάνουμε $E_{\text{ηλιακή}}=94 \text{ kWhrs/m}^2$ και μήνα και $t_a=13.4^\circ\text{C}$

Οπότε η ηλιακή ενέργεια ανά ημέρα είναι

$$E_{\text{ηλιακή/ημέρα}} = \frac{94}{31} = 3.032258 \text{ kWhrs/m}^2$$

Τα ΦΒ πλαίσια είναι καινούρια, οπότε ο συντελεστής γήρανσης είναι: $n_\gamma=1$

Επειδή η εγκατάσταση βρίσκεται σε πόλη, λαμβάνουμε συντελεστή ρύπανσης:
 $n_\rho=0,8$

Ο συντελεστής της διόδου είναι $n_\delta=0,99$

Ο συντελεστής θερμοκρασίας είναι: $n_\theta = 1 - (t_a + 5) \cdot 0.004 = 1 - (13.4 + 5) \cdot 0.004 \Rightarrow n_\theta = 0.9264$

Άρα ο συνολικός συντελεστής είναι : $n = n_\gamma \cdot n_\rho \cdot n_\delta \cdot n_\theta = 1 \cdot 0.8 \cdot 0.99 \cdot 0.9264 = 0.74$

Θα χρησιμοποιηθούν πάνελ της εταιρείας SHARP, τύπος NU-JD40 ισχύος 440Wp, οπότε η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από το κάθε πάνελ είναι

$$\frac{E_{\eta\lambda\epsilon\kappa\tau\rho\iota\kappa\acute{\eta}}}{E_{\eta\lambda\iota\alpha\kappa\acute{\eta}/\eta\mu\acute{\epsilon}\rho\alpha}} = n \cdot \frac{P_{\pi\acute{\alpha}\nu\epsilon\lambda}}{1000} \Rightarrow E_{\eta\lambda\epsilon\kappa\tau\rho\iota\kappa\acute{\eta}} = n \cdot \frac{P_{\pi\acute{\alpha}\nu\epsilon\lambda}}{1000} \cdot E_{\eta\lambda\iota\alpha\kappa\acute{\eta}/\eta\mu\acute{\epsilon}\rho\alpha}$$

$$= 0.74 \cdot \frac{440}{1000} \cdot \frac{94}{31} \Rightarrow$$

$$E_{\eta\lambda\epsilon\kappa\tau\rho\iota\kappa\acute{\eta}} = 0.9873 \text{ kWhrs}$$

1 πάνελ ισχύος 440Wr παράγει ηλεκτρική ενέργεια $E_{\eta\lambda\epsilon\kappa\tau\rho\iota\kappa\acute{\eta}} = 0.9873 \text{ kWhrs}$

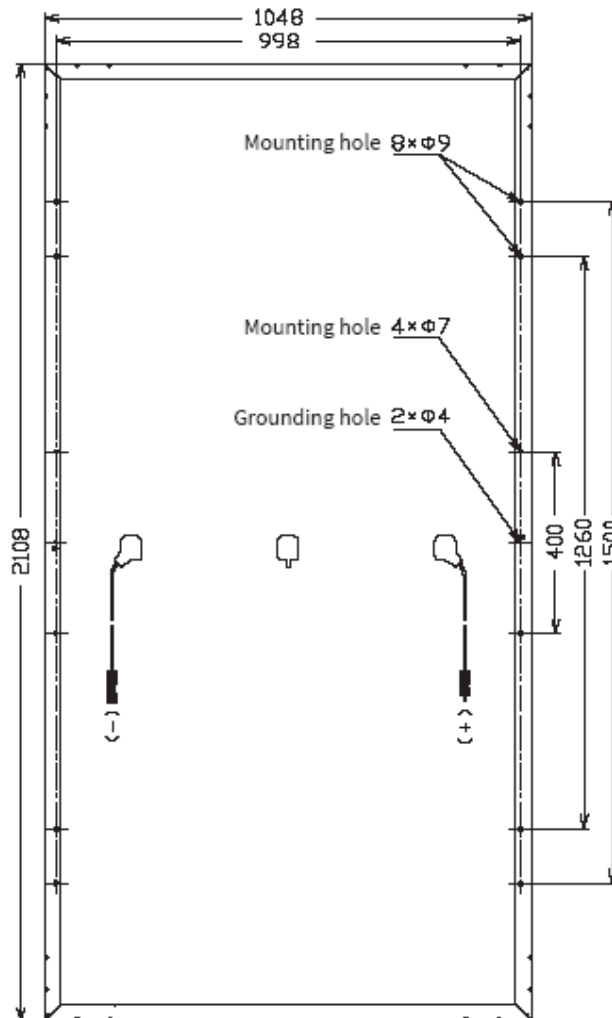
x πάνελ ισχύος 440Wr παράγουν ηλεκτρική ενέργεια $E_{\eta\lambda\epsilon\kappa\tau\rho\iota\kappa\acute{\eta}} = 26.5 \text{ kWhrs}$

$$x = 1 \cdot \frac{26.5}{0.9873} \Rightarrow x = 27 \text{ πανελ}$$

4.2 Διαστασιολόγηση

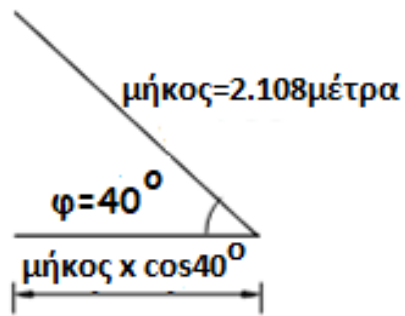
Θα υπολογιστούν τα απαιτούμενα τετραγωνικά για την εγκατάσταση των πλαισίων.

Οι διαστάσεις του πλαισίου φαίνονται στην παρακάτω εικόνα



Εικόνα 4.2.1 Οι διαστάσεις του ΦΒ πάνελ

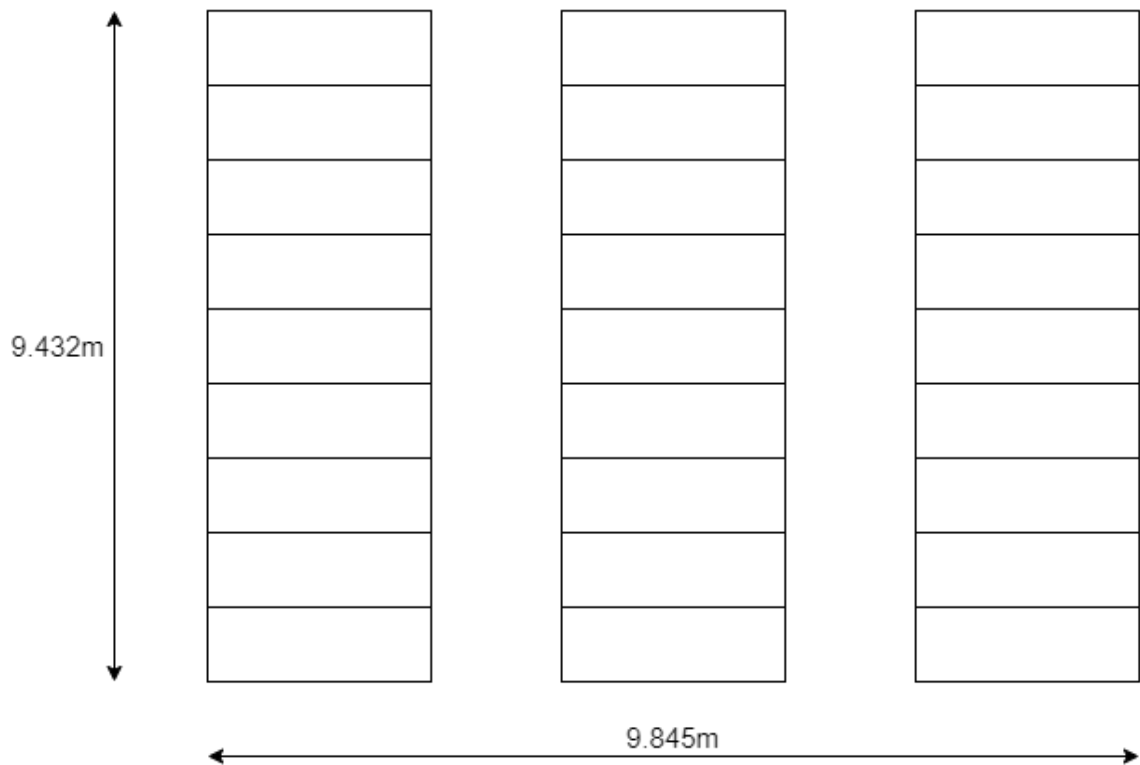
Η διάταξη αποτελείται από τρεις σειρές των εννέα πλαισίων έκαστη. Κάθε σειρά έχει μήκος $1.048 \times 9 = 9.432\text{m}$. Επειδή τα πάνελ τοποθετούνται με κλίση 40° από το έδαφος, το πραγματικό πλάτος της συστοιχίας σε σχέση με το έδαφος είναι $\text{μήκος} \cdot \cos\phi = 2.108 \cdot \cos 40 = 1.615\text{m}$.



Εικόνα 4.2.2 Η γωνία τοποθέτησης των πάνελ

Επίσης θεωρούμε ότι οι σειρές μεταξύ τους έχουν απόσταση 2.5 m.

Αρά το πλάτος της όλης συστοιχίας είναι $3 \cdot 1.615 + 2 \cdot 2.5 = 9.845$ m



Εικόνα 4.2.3 Προτεινόμενη διάταξη των ΦΒ στοιχείων

Οπότε η εγκατάσταση θα καταλαμβάνει εμβαδόν: $(9.432\text{m}) \cdot (9.845\text{m}) = 92.86\text{m}^2$

Και θα είναι ισχύος $440 \times 27 \text{ πάνελ} = 11880 \text{ W}$

Πίνακας 4.2-1 Τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του πάνελ

Electrical data (STC)		NU-JD440	
Maximum power	P _{max}	440	W _p
Open-circuit voltage	V _{oc}	49.77	V
Short-circuit current	I _{sc}	11.49	A
Voltage at point of maximum power	V _{mpp}	41.20	V
Current at point of maximum power	I _{mp}	10.68	A
Module efficiency	η _m	19.9	%

STC = Standard Test Conditions: irradiance 1,000 W/m², AM 1.5, cell temperature 25 °C.
 Rated electrical characteristics are within ±10% of the indicated values of I_{sc}, V_{oc} and 0 to +5% of P_{max} (power measurement tolerance ±3%).
 Reduction of efficiency from an irradiance change of 1,000 W/m² to 200 W/m² (T_{module} = 25 °C) is less than 3%.

$$\text{Πρέπει } V_{dc,pv} \geq 1.2 \cdot V_{load} \Rightarrow 9 \cdot 41.2 \geq 1.2 \cdot 230 = 276 \text{ ΙΣΧΥΕΙ}$$

4.3 Μπαταρία φωτοβολταϊκής συστοιχίας

2 ημέρες αυτονομίας, άρα οι συσσωρευτές θα έχουν βάθος εκφόρτισης $B_{εκ}=0.4$

Για αυτονομία 2 ημερών έχουμε: $E_{ηλεκτρική} = (2 + 1) \cdot 26.5 = 79.5 kWhrs$

$$Q_{ολ} = \frac{E_{ηλεκτρική}}{B_{εκ} \cdot \eta \cdot V} = \frac{79500}{0.4 \cdot 0.9 \cdot 12} = 18402.8 Ah \cdot$$

Άρα θα χρησιμοποιηθούν $N = \frac{18402.8}{230} = 800$ συσσωρευτές 12V/230Ah

4 σειρές, 20 συσσωρευτές ανά σειρά ούτως ώστε κάθε σειρά να αποδίδει $20 \times 12 = 240V$

Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των συσσωρευτών

Πίνακας 4.3-1 Τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των συσσωρευτών

Giant Power 12V 230AH AGM Deep Cycle Battery	
Nominal Voltage	12V
Nominal Capacity (20HR)	230.0 AH
Dimension	Length: 522 ±3mm (20.55 inches) Width: 240 ±2mm (9.45 inches) Container Height: 218 ±2mm (8.58 inches) Total Height (with Terminal): 224 ±2mm (8.81 inches)
Approx Weight	Approx 62.5 Kg
Terminal	T11
Container Material	ABS
Rated Capacity	230.0 AH/11.5A (20hr, 1.80V/cell, 25°C)
Max. Discharge Current	2000A (5s)

4.4 Μετατροπέας συνεχούς ρεύματος εξόδου της συστοιχίας σε εναλλασσόμενο ρεύμα

Επειδή η φωτοβολταϊκή συστοιχία αποδίδει 11880 W επιλέχθηκε ο μετατροπέας Sunny Tripower 8.0/10.0 της εταιρείας SMA ο οποίος καλύπτει τις ανάγκες μας όπως φαίνεται από τα τεχνικά χαρακτηριστικά του.



Ο μετατροπέας Sunny Boy

Πίνακας 3 Τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του αντιστροφέα

Technical data	Sunny Tripower 8.0	Sunny Tripower 10.0
Input (DC)		
Max. PV array power	15000 W _p	15000 W _p
Max. input voltage	1000 V	1000 V
MPP voltage range	260 V to 800 V	320 V to 800 V
Rated input voltage	580 V	
Min. input voltage / initial input voltage	125 V / 150 V	
Max. input current input A / input B	20 A / 12 A	
Max. DC short-circuit current input A / input B	30 A / 18 A	
Number of independent MPP inputs / strings per MPP input	2 / A:2; B:1	
Output (AC)		
Rated power (at 230 V, 50 Hz)	8000 W	10000 W
Max. apparent AC power	8000 VA	10000 VA
Nominal AC voltage	3 / N / PE; 220 V / 380 V 3 / N / PE; 230 V / 400 V 3 / N / PE; 240 V / 415 V	
AC voltage range	180 V to 280 V	
AC grid frequency / range	50 Hz / 45 Hz to 55 Hz 60 Hz / 55 Hz to 65 Hz	
Rated grid frequency / rated grid voltage	50 Hz / 230 V	
Max. output current	3 x 12.1 A	3 x 14.5 A
Power factor at rated power / displacement power factor adjustable	1 / 0.8 overexcited to 0.8 underexcited	
Feed-in phases / connection phases	3 / 3	

4.4.1 Ηλεκτρολογικός έλεγχος διασύνδεσης της συστοιχίας στον αντιστροφέα

Τα πλαίσια θα συνδεθούν σε 3 σειρές των 9 πλαισίων έκαστη

Με βάση τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των πλαισίων και του αντιστροφέα (πίνακες 1 και 3) διενεργείται ο έλεγχος της ηλεκτρολογικής διασύνδεσης

$$\text{Πρέπει } V_{DC,m}=41.2\times 9=370.8V, 260V<V_{mppt}<800V$$

$$V_{DC,oc}=49.77\times 9=447.93V<V_{DC,max}=600V$$

$$I_{DC}=11.49A<30A$$

Όλες οι τιμές είναι εντός των ορίων του αντιστροφέα οπότε είναι εφικτή η προτεινόμενη σύνδεση

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- <https://solar.com.gr/el/%CE%B1%CF%85%CF%84%CE%BF%CE%BD%CE%BF%CE%BC%CE%B1-%CF%86%CF%89%CF%84%CE%BF%CE%B2%CE%BF%CE%BB%CF%84%CE%B1%CE%B9%CE%BA%CE%B1.asp>
- <https://www.mp-energy.gr/%CF%86%CF%89%CF%84%CE%BF%CE%B2%CE%BF%CE%BB%CF%84%CE%B1%CE%B9%CE%BA%CE%B1/%CE%B2%CE%BF%CE%B7%CE%B8%CE%B5%CE%B9%CE%B1/%CF%86%CF%89%CF%84%CE%BF%CE%B2%CE%BF%CE%BB%CF%84%CE%B1%CE%B9%CE%BA%CE%B1-%CE%BC%CE%B5-%CE%B1%CF%80%CE%BB%CE%B1-%CE%BB%CE%BF%CE%B3%CE%B9%CE%B1.html>
- https://sunpower.maxeon.com/au/sites/default/files/2019-07/max2-360-350-340-au_0.pdf
- <http://karaferis.gr/%CF%83%CF%85%CE%BD%CE%B4%CE%B5%CF%83%CE%BC%CE%BF%CE%BB%CE%BF%CE%B3%CE%AF%CE%B1-%CF%86%CF%89%CF%84%CE%BF%CE%B2%CE%BF%CE%BB%CF%84%CE%B1%CF%8A%CE%BA%CF%8E%CE%BD-%CF%80%CE%AC%CE%BD%CE%B5%CE%BB/>