

9. Διασυνδεδεμένα Φωτοβολταϊκά Συστήματα

H. Boileau, Savoie University, FR

Μαθησιακά αποτελέσματα

Μετά την ανάγνωση αυτού του κεφαλαίου, ο χρήστης θα έχει αποκτήσει γνώση για τα παρακάτω θέματα:

- Βασική περιγραφή των φωτοβολταϊκών συστημάτων που συνδέονται με το ηλεκτρικό δίκτυο
- Πρόσθετα εξαρτήματα από την πλευρά DC των φωτοβολταϊκών συστημάτων
- Φωτοβολταϊκοί αντιστροφείς (Inverters)
- Πρόσθετα εξαρτήματα από την πλευρά AC των φωτοβολταϊκών συστημάτων
- Σχεδίαση συστημάτων και πρόβλεψη της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας
- Οικονομική αποδοτικότητα των φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων (μέθοδος TCE από Bernard Chabot / ADEME)
- Αξιολόγηση της συμβατότητας μεταξύ του φωτοβολταϊκού πεδίου και του αντιστροφέα

Περιγραφή των φωτοβολταϊκών πλαισίων συνδεδεμένων με το ηλεκτρικό δίκτυο

Φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις που συνδέονται με το ηλεκτρικό δίκτυο αντιπροσωπεύουν την πλειονότητα των φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων αυτήν τη στιγμή στον κόσμο (το 2015). Πράγματι, αυτές οι φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις είναι οι απλούστερες δυνατές, ως εκ τούτου το κόστος είναι χαμηλότερο και το σύνολο της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας εγχέεται στο δίκτυο προς χρήση. Τα πλεονεκτήματα αυτά καθιστούν ικανά τα φωτοβολταϊκά συστήματα να παρέχουν χαμηλότερο κόστος ανά παραγόμενη kWh, γεγονός που εξηγεί την ισχυρή διεύρυνση στην αγορά και εμπορικό ενδιαφέρον.

Με την απουσία της ηλιακής ακτινοβολίας, βεβαίως δεν υπάρχει παραγωγή ενέργειας, αλλά το δίκτυο αντισταθμίζει. Από την άλλη πλευρά, πρέπει να είναι γνωστό ότι, σε περίπτωση απουσίας τάσης, η φωτοβολταϊκή εγκατάσταση παρακάμπτεται για λόγους ασφαλείας, ακόμη και αν υπάρχει έντονη φωτεινή ακτινοβολία.



Εικ. 1 - Απλοποιημένο διάγραμμα μιας φωτοβολταϊκής εγκατάστασης

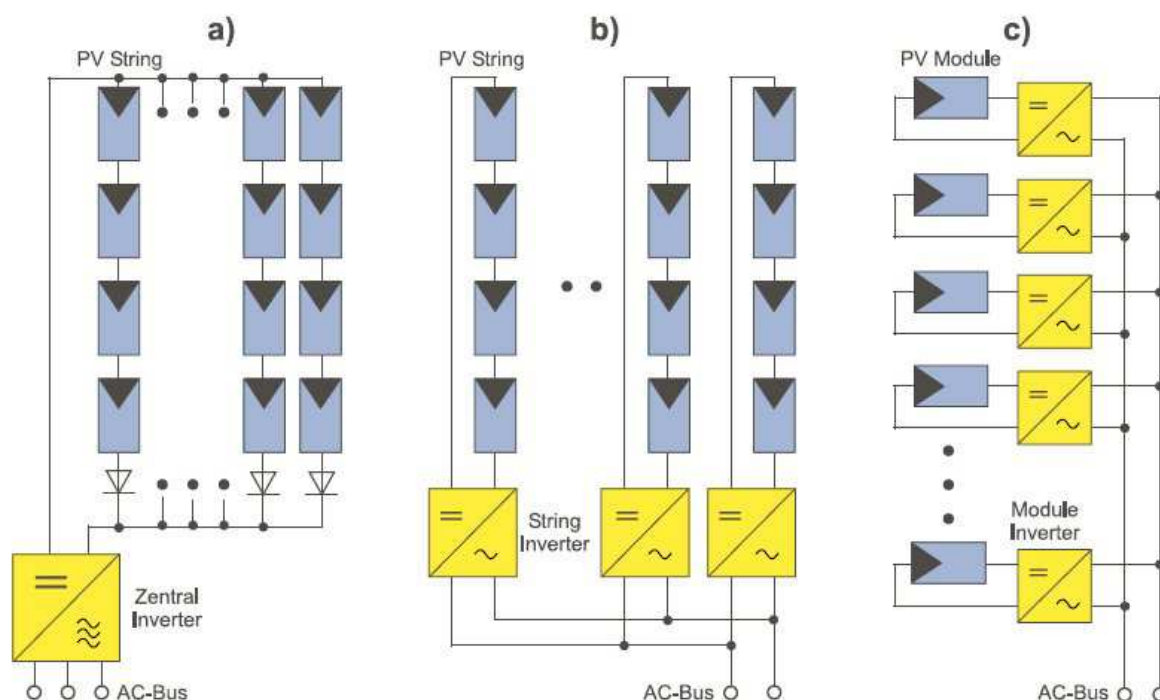
Η εικόνα 1 εμφανίζει ένα απλοποιημένο διάγραμμα μιάς φωτοβολταϊκής εγκατάστασης που συνδέεται με το δίκτυο με τα κυριότερα στοιχεία της.

Το φωτοβολταϊκό πεδίο υπό ηλιακή ακτινοβολία, παράγει ηλεκτρική ενέργεια με τη μορφή ρεύματος DC. Αυτό το ρεύμα DC μετασχηματίζεται από έναν αντιστροφέα σε εναλλασσόμενο προκειμένου να εγχυθεί στο δίκτυο, με το ίδιο πλάτος και φάση της τάσης AC του δικτύου (τυπικά με πλάτος 230 V και συχνότητα 50 Hz στην Ευρώπη). Μπορεί να υπάρχουν εγκαταστημένες διατάξεις προστασίας μεταξύ της φωτοβολταϊκής εγκατάστασης και του αντιστροφέα, αν είναι απαραίτητο ή υποχρεωτικό από τοπικούς κανονισμούς. Οι προστατευτικές διατάξεις μπορούν επίσης να παρεμβάλλονται μεταξύ του αντιστροφέα και του δικτύου (αναπόφευκτα απαραίτητες, αλλά δεν επιβάλλονται από τα πρότυπα ασφαλείας). Τέλος, υπάρχει συνήθως ένας μετρητής ενέργειας για την τιμολόγηση της παραγόμενης φωτοβολταϊκής kWh.

Μπορεί να είναι χρήσιμο να εισάγετε ένα σύστημα ανάδρασης για να ελέγξετε το πώς η εγκατάσταση λειτουργεί, επειδή, για ήσσοнос σημασίας θέματα ή ζημίες, τίποτα δεν δείχνει αν το σύστημα λειτουργεί σωστά ή όχι. Μια οθόνη μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη συνεχή παρακολούθηση των χρήσιμων πληροφοριών, όπως είναι η στιγμιαία ισχύς και η αθροιστική ενέργεια που παράγεται.

Το φωτοβολταϊκό πεδίο

Το φωτοβολταϊκό πεδίο είναι το σύνολο των φωτοβολταϊκών πλαισίων μίας φωτοβολταϊκής εγκατάστασης. Το σύνολο αυτών των φωτοβολταϊκών πλαισίων μπορεί να συνδεθεί με διάφορους τρόπους, σε έναν ή περισσότερους αντιστροφείς. Οι τρεις κύριες πιθανές διαμορφώσεις φαίνονται στην Εικόνα 2.



Εικόνα 2: Κύριες πιθανές διαμορφώσεις των φωτοβολταϊκών πεδίων.

Αμέσως παρακάτω ακολουθεί η εξήγηση του Σχήματος 2:

a) Το σύνολο των φωτοβολταϊκών πλαισίων συνδέεται σε ένα αντιστροφέα, που καλείται κεντρικός αντιστροφέας. Αυτή η διαμόρφωση είναι η λιγότερο ακριβή, αλλά το σύνολο των πλαισίων πρέπει να είναι του ίδιου τύπου, να έχουν την ίδια γωνιακή θέση και την κατεύθυνση, για τον απλό λόγο ότι το ρεύμα και η τάση που παράγεται από κάθε σειρά πλαισίων πρέπει να έχει ίδια τιμή. Αν όχι, υπάρχει μια απώλεια παραγωγής. Κάθε σειρά προφανώς πρέπει να έχει τον ίδιο αριθμό πλαισίων. Η επιρροή μίας σκιάς σε ένα ή περισσότερα φωτοβολταϊκά πλαίσια μπορεί να είναι σημαντική στην ηλεκτρική παραγωγή, επειδή τα πλαίσια της κάθε σειράς συνδέονται σε σειρά και θα αλλάξει το ρεύμα ή / και η τάση σε μια σειρά των πλαισίων που βρίσκεται σε παραλληλία με τις άλλες σειρές. Άλλα μειονεκτήματα είναι ότι η βλάβη του αντιστροφέα προκαλεί την πλήρη αδρανοποίηση του φωτοβολταϊκού πεδίου, η βλάβη ενός συγκεκριμένου φωτοβολταϊκού πλαισίου είναι δύσκολο να εντοπιστεί και η τάση της σειράς των πλαισίων είναι συχνά υψηλή, αρκετές εκατοντάδες Volt σε ρεύμα DC, το οποίο είναι επικίνδυνο για τους ζωντανούς οργανισμούς.

b) Το σύνολο του φωτοβολταϊκού πεδίου διαιρείται σε σειρές φωτοβολταϊκών πλαισίων, η καθεμία συνδέεται με έναν αντιστροφέα. Όλα τα φωτοβολταϊκά πλαίσια της ίδιας σειράς πρέπει να είναι του ίδιου τύπου, να έχουν την ίδια γωνιακή θέση και την κατεύθυνση. Από την άλλη πλευρά, από μία σειρά στην άλλη, ο τύπος και η θέση των πλαισίων μπορεί να είναι διαφορετικά. Για παράδειγμα, αυτό θα μπορούσε να είναι ένα σύστημα σε διαφορετικές στέγες συνδεδεμένο σε ένα μόνο κύριο ζυγό. Η επίδραση της σκίασης είναι λιγότερο σημαντική από ό,τι στη διαμόρφωση α, αφού σκιασμένα πλαίσια θα έχουν επιπτώσεις μόνο στην σειρά που έχουν εγκατασταθεί. Μεταξύ άλλων πλεονεκτημάτων, η βλάβη ενός αντιστροφέα προκαλεί την πλήρη διακοπή της σειράς (αλλά όχι του συνόλου του φωτοβολταϊκού πεδίου) και η βλάβη συγκεκριμένου φωτοβολταϊκού πλαισίου είναι πιο εύκολο να εντοπιστεί. Ωστόσο, η τάση μιας συγκεκριμένης σειράς των πλαισίων παραμένει συχνά υψηλή, αρκετές εκατοντάδες Volt σε ρεύμα DC, το οποίο είναι επικίνδυνο για τους ζωντανούς οργανισμούς.

c) Σε αυτή τη διαμόρφωση, σε κάθε φωτοβολταϊκό πλαίσιο είναι συνδεδεμένος ένας αντιστροφέας, ο οποίος συνήθως αναφέρεται μικρο-αντιστροφέας. Εδώ, όλα τα πλαίσια μπορούν να είναι διαφορετικού τύπου και να τοποθετηθούν διαφορετικά, δεδομένου ότι είναι ανεξάρτητα. Η βλάβη ενός αντιστροφέα προκαλεί τη στάση μόνο ενός φ/β πλαισίου και μικρή απώλεια παραγωγής. Η επίδραση της σκίασης είναι πολύ περιορισμένη, μόνο για τα εν λόγω πλαίσια. Το υψηλό κόστος είναι το κύριο μειονέκτημα αυτής της λύσης, αλλά προσφέρει τα περισσότερα πλεονεκτήματα.

Κανονιστικές παράμετροι σχετικά με τα χαρακτηριστικά των φωτοβολταϊκών πλαισίων και την ασφάλεια:

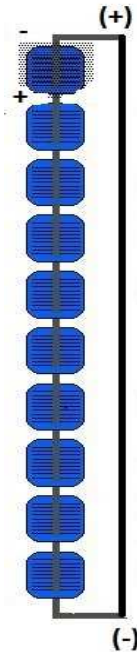
Για παράδειγμα, αναφέρουμε εν συντομία τα γαλλικά πρότυπα.

- NF 61215: δεξιότητα του σχεδιασμού και έγκρισης των κρυσταλλικών φωτοβολταϊκών πλαισίων.
- NF 61646: δεξιότητα του σχεδιασμού και έγκρισης των φωτοβολταϊκών πλαισίων λεπτού υμενίου
- NF 61730: Χαρακτηρισμός των επιδόσεων: δοκιμή ανάφλεξης, NOCT, συντελεστές κ.λπ.
- Μηχανικές δοκιμές: φορτίσεις, κλονισμός, κ.λπ.
- Κλιματικές δοκιμές: ζέστη-ψύχος, UV, κ.λπ.
- Ηλεκτρικές δοκιμές: διηλεκτρικό, ρεύμα διαρροής, κ.α.

Η τήρηση αυτών των κανόνων εγγυάται την ποιότητα των φωτοβολταϊκών πλαισίων και των όρων χρήσης τους όπως, για παράδειγμα, μια τάση μόνωσης των 1000 βολτ καθορίζει τον μέγιστο αριθμό των φωτοβολταϊκών πλαισίων σε μια ενιαία σειρά.

Το φαινόμενο του "θερμού σημείου (hot spot)"

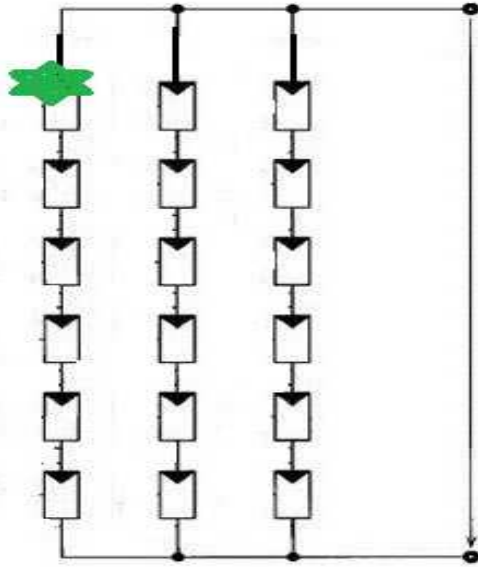
Για να εξηγήσουμε το φαινόμενο του θερμού σημείου, ας πάρουμε ένα παράδειγμα με ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο αποτελούμενο από 72 στοιχεία (χαρακτηριστικά $CP = 250 \text{ W}_c$, $V_{mpp} = 36 \text{ V}_{dc}$, $V_{oc} = 45 \text{ V}_{dc}$, $I_{mpp} = 7 \text{ A @ STC}$). Στην εικόνα 3, φαίνεται εάν ένα στοιχείο αυτού του πλαισίου είναι σκιασμένο ($I_{cell} = 0 \text{ A}$) ή αυτό το πλαίσιο βραχυκυκλώνεται.



Εικόνα 2: Φωτοβολταϊκό πλαίσιο με ένα σκιασμένο στοιχείο.

Το σκιασμένο στοιχείο ($I_{cell} = 0 \text{ A}$, έτσι συμπεριφέρεται ως ένα ανοικτό κύκλωμα) λαμβάνει το σύνολο της τάσης από την ανάποδη. Η αντίστροφη τάση διάσπαση ενός στοιχείου φωτοβολταϊκών είναι συνήθως 25 V_{DC} (τάση Zener), αλλά η τάση λειτουργίας του πλαισίου είναι $V_{mpp} = 36 \text{ V}_{dc}$. Ως εκ τούτου, το στοιχείο καταστρέφεται, επειδή λαμβάνει μια ισχυρή τάση και γίνεται αγώγιμο, με αποτέλεσμα την καταστροφή από υπερφόρτωση.

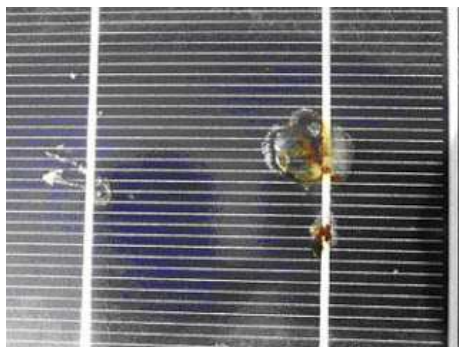
Ας πάρουμε μια πιο ρεαλιστική περίπτωση ενός φωτοβολταϊκού πεδίου με τρεις σειρές από έξι πλαίσια στη σειρά, όπου ένα φ/β στοιχείο από μία σειρά σκιάζεται όπως πριν (Εικόνα 4).



Εικόνα 3 : Τρεις σειρές με ένα σκιασμένο φ/β στοιχείο.

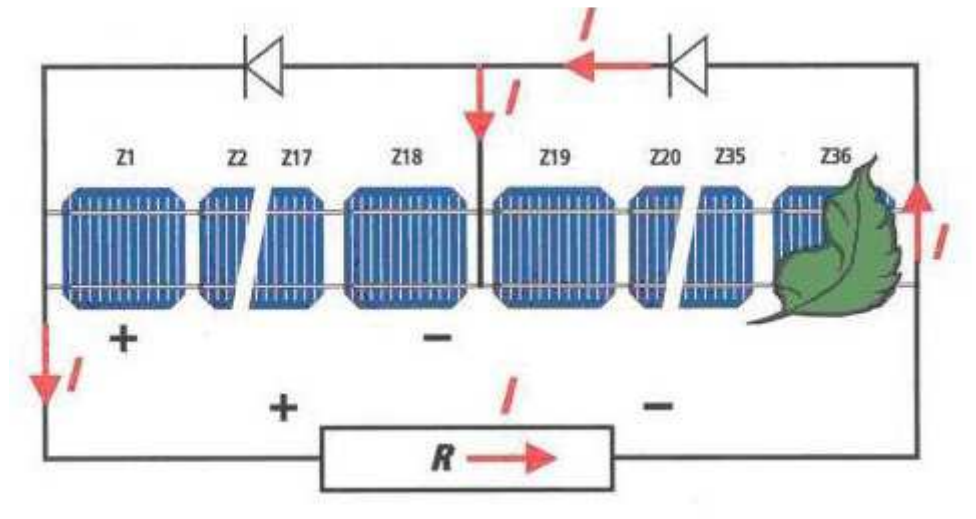
Η τάση λειτουργίας μιας τέτοιας στοιχειοσειράς είναι $36 V_{dc} \times 6 \text{ πλαίσια} = 216 V_{dc}$. Όπου το στοιχείο είναι σκιασμένο ($I_{cell} = 0A$), αυτή η σειρά είναι ένα ανοικτό κύκλωμα, με τάση ανοιχτοκύκλωσης $45V_{dc} \times 6 \text{ πλαίσια} = 270 V_{dc}$. Η αντίστροφη τάση του σκιασμένου στοιχείου είναι τότε $54 V_{dc}$. Το φαινόμενο Zener λαμβάνει χώρα σε αυτό το φωτοβολταϊκό στοιχείο και γίνεται αγώγιμο.

Η ισχύς που πρέπει να χειριστεί το σκιασμένο φωτοβολταϊκό στοιχείο είναι $25V \times 6A = 150W$, αλλά το φωτοβολταϊκό στοιχείο δεν είναι σχεδιασμένο για την απαγωγή αυτού του επίπεδου ισχύος (όχι περισσότερο από λίγα Watts). Η ισχύς αυτή θα μετατραπεί σε θερμική, όπου το φωτοβολταϊκό στοιχείο έχει τη μεγαλύτερη αντίσταση μέχρι απανθакώσεώς του (από όπου και το όνομα του hotspot προέρχεται). Η Εικόνα 5 εμφανίζει μια φωτογραφία ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου που καταστράφηκε από ένα τέτοιο αποτέλεσμα.



Εικόνα 4: Κατεστραμμένα φωτοβολταϊκά πλαίσια, θερμή κοιλίδα.

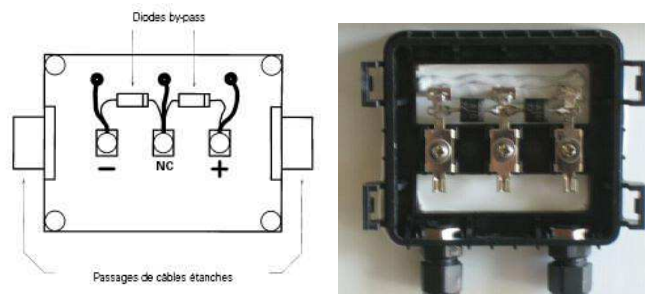
Η λύση για την αποτροπή του φαινομένου hot spot είναι η χρήση διόδων, που είναι γνωστές ως **δίοδοι παράκαμψης**, που συνδέονται αντίστροφα και ανά περίπου 20 φωτοβολταϊκά στοιχεία. Στο παράδειγμα ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου 12 Volts με 36 στοιχεία, μία δίοδος παράκαμψης συνδέεται ανά 18 φωτοβολταϊκά στοιχεία, όπως φαίνεται στην Εικόνα 6:



Εικόνα 5 : Λειτουργία μιας διόδου παράκαμψης.

Για το πλαίσιο αυτό των 12 Volt, το σκιασμένο στοιχείο έχει ως αποτέλεσμα την έλλειψη παραγωγής. Χωρίς μια δίοδο παράκαμψης, το φωτοβολταϊκό πλαίσιο παράγει χαμηλότερο ή καθόλου ρεύμα, με τον κίνδυνο εμφάνισης hot spot. Με τη δίοδο παράκαμψης, η ενέργεια που παράγεται από την ομάδα των 18 ασκίαστων στοιχείων μπορεί να περάσει μέσα από τη δίοδο παράκαμψης, αλλά, στην περίπτωση του παραδείγματος μας, η τάση εξόδου του πλαισίου θα είναι δύο φορές χαμηλότερη. Ωστόσο, η δίοδος αποτρέπει από το να έχουν μία υψηλή τάση αντίστροφα τα σκιασμένα στοιχεία.

Για φωτοβολταϊκά πλαίσια τεχνολογίας κρυσταλλικού πυριτίου, οι δίοδοι παράκαμψης βρίσκονται στο κουτί σύνδεσης (Εικόνα 7).

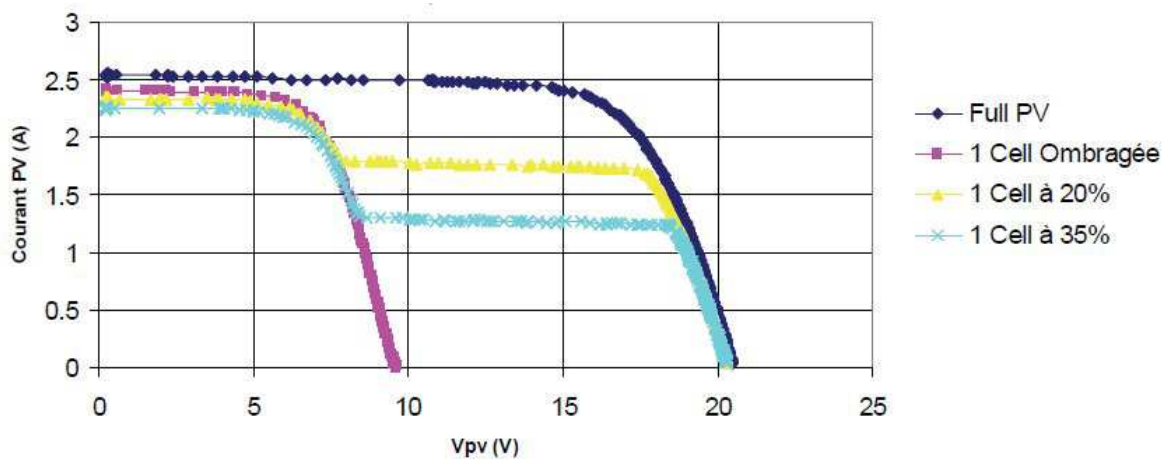


Εικόνα 6 : Σύνδεση διόδων παράκαμψης.

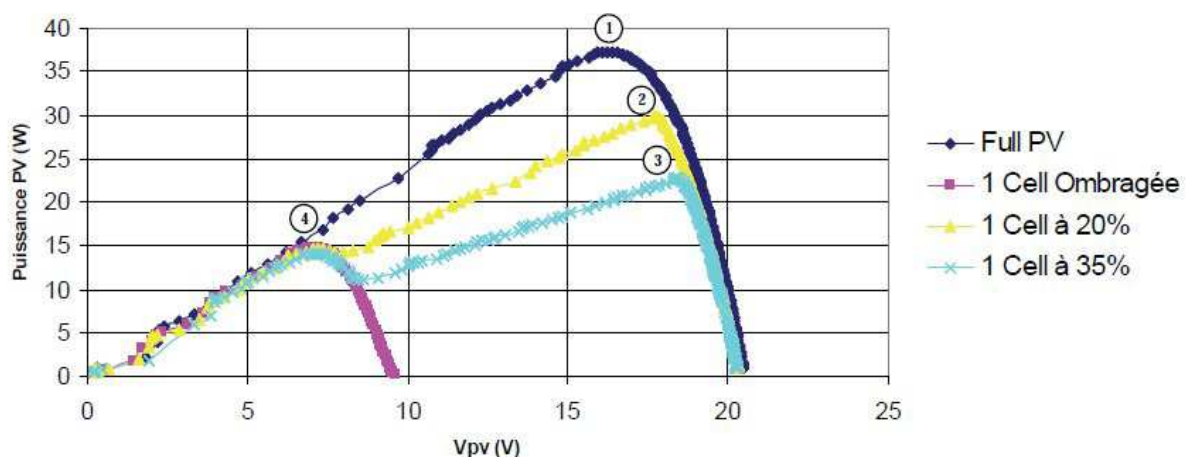
Ο αριθμός των διόδων παράκαμψης εξαρτάται από τον αριθμό των στοιχείων στο φωτοβολταϊκό πλαίσιο. Σε γενικές γραμμές, δύο δίοδοι παράκαμψης για ένα πλαίσιο με 36

στοιχεία, τρεις δίοδοι παράκαμψης για ένα πλαίσιο με 60 στοιχεία (πολύ κοινό είδος πλαισίου) και τέσσερις δίοδοι παράκαμψης για ένα πλαίσιο με 72 στοιχεία.

Η επιρροή της σκίασης σε ένα τυπικό λειτουργικό πλαίσιο 12 Volts, ανάλογα με το σημείο λειτουργίας, περιγράφεται από τα δύο ακόλουθα σχήματα:



Εικόνα 7 : Ρεύμα προς τάση για διαφορετικές σκιάσεις ενός στοιχείου



Εικόνα 8 : Ισχύς προς τάση για διαφορετικές σκιάσεις ενός στοιχείου

Αν ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο σε ένα πλαίσιο είναι σκιασμένο, το πλαίσιο θα παράγει ηλεκτρικό ρεύμα χαμηλότερο από το ονομαστικό ρεύμα. Αν το φορτίο απαιτεί ένα πολύ ασθενές ρεύμα, η τάση εξόδου θα είναι η ονομαστική τάση, αλλά αν οι τρέχουσες καταναλώσεις αυξηθούν πάνω από ό,τι μπορεί να παράγει το σκιασμένο στοιχείο, η τάση θα μειωθεί στο ήμισυ, λόγω της διόδου παράκαμψης. Η Εικόνα 9 δείχνει ότι αν σκιάζεται ένα στοιχείο, τότε δύο σημεία μέγιστης ισχύος παρουσιάζονται, μεταβλητά ανάλογα με την έκταση της σκίασης. Το φαινόμενο αυτό θα διαταράξει έτσι την λειτουργία του MPPT (Maximum Power Point Tracking) των αντιστροφέων.

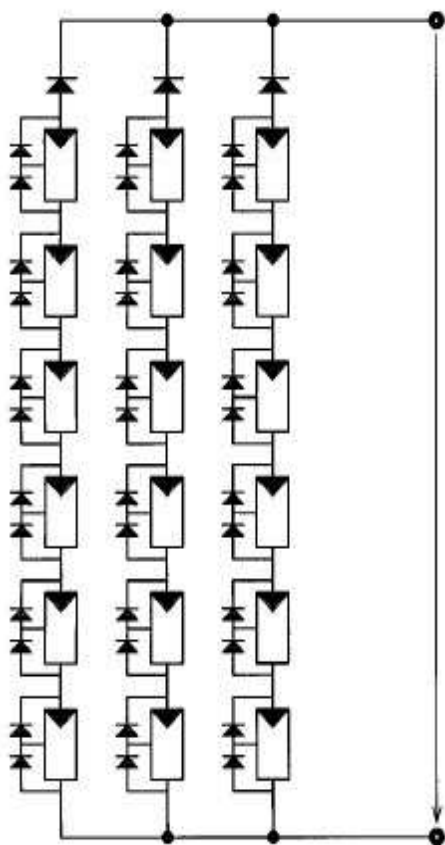
Σε ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο όπου ένα στοιχείο είναι ελαττωματικό (σκίαση ή παρόμοιο ελάττωμα), οι μετρήσεις της τάσης ανοιχτοκυκλώματος και του ρεύματος

βραχυκυκλώματος θα ναι καλές. Για την ανίχνευση ελαττώματος αυτού του είδους, είναι απαραίτητο να δημιουργήσει κανείς ένα γράφημα ρεύματος / τάσης.

Προστασία έναντι ανάστροφων ρευμάτων

Ανάστροφα ρεύματα είναι ένα άλλο φαινόμενο που μπορεί να φθείρει τα φωτοβολταϊκά πλαίσια, εκτός από το φαινόμενο hot spot. Το φαινόμενο συμβαίνει όταν το ρεύμα μιας σειράς αντιστρέφεται, στην περίπτωση που διάφορες σειρές συνδέονται παράλληλα. Σε αυτήν την περίπτωση, εάν μία από τις σειρές είναι σκιασμένη, τα στοιχεία δεν παράγουν κανένα ρεύμα. Το ρεύμα που παράγεται από τις παράλληλες σειρές τώρα μπορεί να περάσει μέσα από την σειρά με τα σκιασμένα πλαίσια, με αποτέλεσμα την καταστροφή τους.

Αναφορικά με τις νόρμες, ένα πλαίσιο πρέπει να αντέχει στην αναστροφή δύο φορές το ρεύμα που είναι σε θέση να παράγει υπό συνθήκες STC. Όταν υπάρχουν περισσότερες από τρεις σειρές, είναι επιτακτική ανάγκη να τοποθετηθεί προστατευτικό υλικό σε σειρά με κάθε σειρά, όπως μία δίοδος, για να αποφευχθεί αυτό το ανάστροφο ρεύμα.



Εικόνα 9: Παράδειγμα καλωδίωσης τριών σειρών από έξι φωτοβολταϊκά πλαίσια με τις διόδους παράκαμψης στις άκρες των φωτοβολταϊκών πλαισίων και των σειριακών διόδων στο τέλος των σειρών για την προστασία από ανάστροφα ρεύματα.

Η σειριακή δίοδος προστατεύει αποτελεσματικά, αλλά προκαλεί απώλεια ισχύος (απώλεια του 1 volt, αν συνδέεται σε σειρά). Στη Γαλλία, η κατευθυντήρια οδηγία UTE C15-712 συνιστά τη χρήση μιας ασφάλειας, η οποία προκαλεί μικρότερη απώλεια ισχύος, αλλά οι ασφάλειες είναι μη αναστρέψιμες όταν ενεργοποιούνται. Είναι σημαντικό να εκτιμηθεί με ακρίβεια η τιμή αυτής της ασφάλειας. Συχνά, οι κατασκευαστές των φωτοβολταϊκών πλαισίων παράσχουν τη συνιστάμενη τιμή αυτής της σειριακής ασφάλειας με τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του φωτοβολταϊκού πλαισίου.

Επιπρόσθετα εξαρτήματα από την πλευρά DC των φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων

Καλώδια και ηλεκτρικοί ακροδέκτες

Τα ηλεκτρικά καλώδια που χρησιμοποιούνται σε φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις πρέπει να πληρούν συγκεκριμένα κριτήρια (πρότυπο UTE C 32-500). Μερικά από αυτά τα κριτήρια είναι: διπλή μόνωση (class II), αντοχή σε 1000V, αντοχή στην υπεριώδη ακτινοβολία και αντοχή σε θερμοκρασία έως 90 °C. Η διατομή αυτών των καλωδίων είναι τυποποιημένη. Για παράδειγμα, εμπορικά καλώδια μπορούν να έχουν μια εγκάρσια διατομή 1,5 mm², 2,5

mm², 4 mm², 6 mm² κ.λπ. Η διατομή των συρμάτων επιλέγεται ανάλογα με την ένταση του ρεύματος και το μήκος των καλωδίων.



Εικόνα 10 : Καλώδια που χρησιμοποιούνται συνήθως σε φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις.

Οι ηλεκτρικοί ακροδέκτες είναι ασφαλείς (πρότυπα UL 1703, VDE 126-3, κλπ). Αυτό σημαίνει ότι προσφέρουν προστασία έναντι άμεσης επαφής, μπορούν να κλειδώνουν (τύπου MC4) ή όχι (MC3) ανάλογα με την προσβασιμότητά τους, με καλή συμπεριφορά απέναντι στην υπεριώδη ακτινοβολία και κακές καιρικές συνθήκες (IP54).



Εικόνα 11: Παραδείγματα των ακροδεκτών που χρησιμοποιούνται σε φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις.

Κάθε φωτοβολταϊκό στοιχείο έχει δύο ακροδέκτες, αρσενικό και θηλυκό, το οποίο διευκολύνει τη σύνδεση σε σειρά αυτών. Επιπρόσθετα καλώδια χρησιμοποιούνται για να γίνουν διασυνδέσεις ανάμεσα στις σειρές εν παραλλήλω και μεταξύ των φωτοβολταϊκών πεδίων και των μετατροπέων.

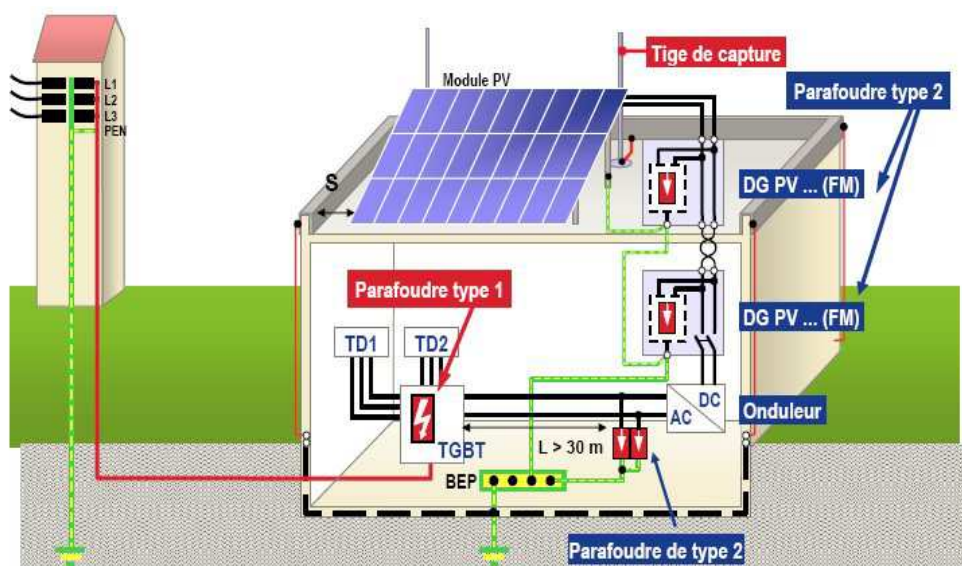
Να ληφθεί σοβαρά υπόψη, λόγω της συνεχούς ηλιακής ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια της ημέρας, η τάση στα όρια του φωτοβολταϊκού πεδίου έχει ένα μέγεθος μερικών εκατοντάδων βολτ. Αυτή η τάση μπορεί να είναι επικίνδυνη κατά τη διάρκεια της εφαρμογής ή συντήρησης μιας φωτοβολταϊκής εγκατάστασης και, στην περίπτωση βλάβης του κυκλώματος, ένα συντηρούμενο ηλεκτρικό τόξο δημιουργείται, επειδή δεν υπάρχει διέλευση μέσω μηδέν βολτ όπως και στην περίπτωση της τάσης AC. Για το λόγο αυτό, η χρήση των διακοπών κυκλώματος ειδικά για φωτοβολταϊκά είναι απαραίτητη (κατευθυντήρια γραμμή UTE C 15 712 στη Γαλλία).



Εικόνα 12 : Ηλεκτρικό τόξο σε ένα κύκλωμα PV.

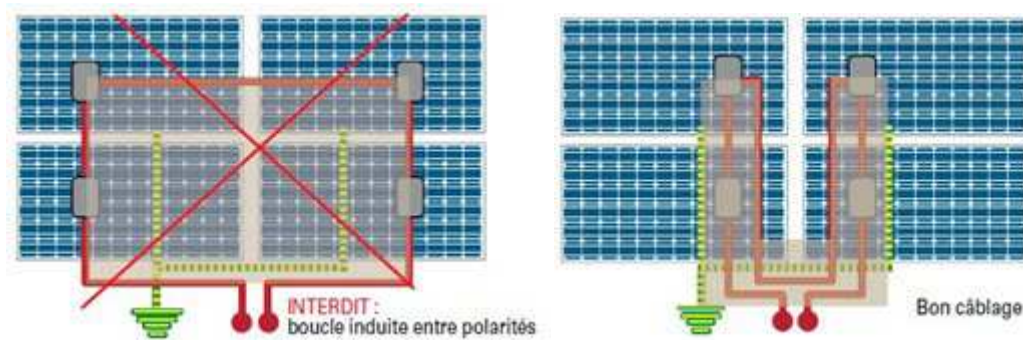
Αντικεραυνική προστασία των φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων

Τα φωτοβολταϊκά πεδία είναι εξ ορισμού εκτεθειμένα στον ήλιο και υπόκεινται σε όλες τις καιρικές συνθήκες, συμπεριλαμβανομένων των άμεσων και έμμεσων κεραυνικών χτυπημάτων. Γι' αυτό, τα πρότυπα ασφαλείας συστήνουν ή επιβάλλουν τη χρήση αλεξικέραυνου με κατάλληλη τοποθέτηση του καλωδίου γείωσης, με τις προδιαγραφές του ανάλογες με την περιοχή όπου είναι εγκατεστημένη η φωτοβολταϊκή εγκατάσταση (στη Γαλλία, κατευθυντήρια γραμμή UTE C15 712).



Εικόνα 13: Παράδειγμα γείωσης φωτοβολταϊκής εγκατάστασης (πηγή: Diagram Dehn, online: http://www.dehn.de/pdf/blitzplaner/BBP_2007_E_complete.pdf)

Για την προστασία από την απευθείας πρόσκρουση κεραυνού, δεν υπάρχει σχεδόν καμία άλλη λύση από ένα αλεξικέραυνο. Για τις έμμεσες επιπτώσεις κεραυνών, υπάρχουν διάφορες λύσεις ώστε να μειωθεί ο κίνδυνος καταστροφής των εξαρτημάτων της φωτοβολταϊκής εγκατάστασης. Για παράδειγμα, η καλωδίωση των φωτοβολταϊκών πλαισίων μπορεί να γίνει με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε να μειώνεται η επιφάνεια των βρόχων (Σχήμα 15), μειώνοντας το ηλεκτρικό πεδίο που επάγεται στο βρόχο από την ισχυρή μαγνητική μεταβολή που προκαλείται από την ένταση του ρεύματος του κεραυνού που προσκρούει στο έδαφος στην περιοχή.



Εικόνα 14: Παραδείγματα καλωδίωσης τεσσάρων φωτοβολταϊκών πλαισίων.

Κουτί διακλαδώσεων DC

Ένα φωτοβολταϊκό πεδίο γενικά αποτελείται από φωτοβολταϊκά πλαίσια καλωδιωμένα σε σειρά μεταξύ τους, δημιουργώντας σειρές. Αυτό γίνεται για να επιτευχθεί μια αρκετά υψηλή τάση. Όταν έχει επιτευχθεί η επιθυμητή τάση, πολλαπλές σειρές μπορούν να συνδεθούν παράλληλα (εφ' όσον η τάση τους παραμένει ίδια), διατηρώντας την τάση και αυξάνοντας την ένταση (βασική αρχή της ηλεκτρικής ενέργειας). Η διαστασιολόγηση απαιτεί την προσαρμογή μέσα από μια στοχαστική διάταξη των φωτοβολταϊκών πλαισίων σε σειρά και παράλληλα προς την διαθέσιμη επιφάνεια (σε μια στέγη, για παράδειγμα), αλλά κυρίως για τις προδιαγραφές τάσης και έντασης ρεύματος του μετατροπέα.

Μεταξύ του φωτοβολταϊκού πεδίου και του μετατροπέα(ων), ένα κουτί διακλάδωσης χρησιμοποιείται για να συνδέσει τις σειρές των πλαισίων παράλληλα μεταξύ τους. Το κουτί σύνδεσης περιλαμβάνει επίσης τα στοιχεία προστασίας, όπως τα αντικεραυνικά, τις ασφάλειες, DC διακόπτες, κ.λπ.

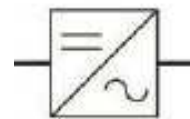


Εικόνα 15: Παράδειγμα ενός κουτιού διακλώσεων με τέσσερις σειρές εν παραλλήλω, δύο αντικεραυνικά και έναν διακόπτη DC.

Αντιστροφείς φωτοβολταϊκών

Αντιστροφείς DC σε AC που χρησιμοποιούνται από φωτοβολταϊκά πεδία μετατρέπουν την ηλεκτρική ενέργεια από DC που το φωτοβολταϊκό πεδίο παράγει σε AC, συμβατή με τους όρους της τάσης και της συχνότητας του δικτύου.

Το ηλεκτρικό σύμβολο του φωτοβολταϊκού αντιστροφέα είναι:



Διάφοροι τύποι αντιστροφών:



Εικόνα 16 : Αντιστροφείς για φωτοβολταϊκά πεδία (Πηγή: SMA)

Οι αντιστροφείς για φωτοβολταϊκά πεδία (Εικόνα 17) χρησιμοποιούνται συνήθως για μεγάλες φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις στο έδαφος ή σε αναρτήσεις, σχεδιασμένες για

αρκετές εκατοντάδες ή χιλιάδες kWp. Η AC παραγωγή τους είναι συνήθως τριφασική και η τάση εισόδου DC είναι μέχρι μερικές εκατοντάδες βολτ.



Εικόνα 17 : Αντιστροφείς για φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις (Πηγή: SMA)

Οι αντιστροφείς για φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις (Σχήμα 18) χρησιμοποιούνται σε μικρά ή μεσαίου μεγέθους έργα. Έχουν διαστασιολογηθεί από κάποια kWp έως λίγες εκατοντάδες kWp. Ο αντιστροφέας μπορεί να συνδέεται με μία ή περισσότερες σειρές φωτοβολταϊκών πλαισίων, ανάλογα με το μοντέλο και το μέγεθος της εγκατάστασης. Η είσοδος τάσης DC συνήθως έχει διαβαθμιστεί για μερικές εκατοντάδες βολτ, ενώ η έξοδος AC μπορεί να είναι μονοφασική ή τριφασική.



Εικόνα 18: Μικρο-αντιστροφέας.

Ο μικρο-αντιστροφέας (Εικόνα 19) είναι συνδεδεμένος με ένα μόνο ή μέχρι και λίγα φωτοβολταϊκά πλαίσια. Αυτοί οι αντιστροφείς δεν έχουν διαβαθμιστεί για περισσότερα από μερικές εκατοντάδες watts, ενώ η τάση εισόδου τους συνήθως δεν είναι υψηλότερη από μερικές δεκάδες volt. Η έξοδος AC είναι μονοφασική. Λόγω της εισόδου χαμηλής τάσης DC, οι αντιστροφείς αυτοί έχουν ενδιαφέρον λόγω της ασφάλειάς τους και μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε μικρά, μεσαία ή ακόμα και μεγάλα φωτοβολταϊκά πεδία.

Όλοι οι τύποι των αντιστροφέων διαθέτουν την αναζήτηση του σημείου λειτουργίας μέγιστης ισχύος (MPPT - Maximum Power Point Tracking), μια απόδοση μετατροπής από DC σε AC περίπου 95% και της αυτόματης απενεργοποίησης εάν δεν ανιχνευτεί τάση δικτύου AC (πρότυπο VDE0126-1-1), για να αποφευχθεί η ηλεκτροπληξία των εργαζομένων σε περιπτώσεις συντήρησης του δικτύου.

Αρχή λειτουργίας των φωτοβολταϊκών αντιστροφέων:

Ο σκοπός του φωτοβολταϊκού αντιστροφέα είναι η μετατροπή της ηλεκτρικής εξόδου που παράγεται από το φωτοβολταϊκό πεδίο σε έξοδο AC συμβατή με το δίκτυο. Για το σκοπό αυτό, το σύστημα MPPT επιδιώκει το σημείο λειτουργίας όπου η ισχύς είναι μέγιστη από όλα τα πιθανά σημεία λειτουργίας (τάσης DC) στην έξοδο του φωτοβολταϊκού πεδίου. Στη συνέχεια, ένα δεύτερο ηλεκτρονικό σύστημα, ο αντιστροφέας, μετατρέπει την τάση DC σε AC, συμβατή από άποψη μεγέθους και φάσης με εκείνη του δικτύου. Η απόδοση του αντιστροφέα εξαρτάται από το πόσο καλά μπορεί να ταιριάζει την τάση, τη συχνότητα και τη φάση του δικτύου, καθώς το ποσοστό του ρεύματος που εγχέεται στο δίκτυο προς το παραγόμενο ρεύμα του φωτοβολταϊκού πεδίου καθορίζει τις ηλεκτρικές απώλειες στον αντιστροφέα. Τα ηλεκτρονικά του φωτοβολταϊκού αντιστροφέα πρέπει επίσης να λαμβάνουν υπόψη τις προδιαγραφές ασφάλειας, όπως είναι η αποσύνδεση από το δίκτυο σε περίπτωση προσωρινής απουσίας τάσης AC, ή να αποφεύγουν την εισαγωγή αρμονικών στο δίκτυο που μπορεί να διαταράξουν τη λειτουργία των ευαίσθητων ηλεκτρικών συσκευών. Μέρος της ανατροφοδότησης των επιδόσεων μιας φωτοβολταϊκής εγκατάστασης μπορεί επίσης να εξασφαλιστεί από τον αντιστροφέα, με την καταγραφή ή τη διαβίβαση σε ένα διακομιστή των πληροφοριών λειτουργίας του.

Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά ενός φωτοβολταϊκού αντιστροφέα:

Οι φωτοβολταϊκοί αντιστροφέες έχουν ηλεκτρικά χαρακτηριστικά που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη για τη σωστή λειτουργία τους (Εικόνα 20). Τα κύρια χαρακτηριστικά είναι:

Από την πλευρά (είσοδο) DC:

- Μέγιστη ισχύς εισόδου: Μέγιστο P_{in} σε Watts
- Μέγιστη τάση εισόδου: Μέγιστο V_{in} σε Volts
- Φάσμα της τάσης εισόδου για λειτουργία MPPT: από $V_{mppt\ min}$ έως $V_{mppt\ max}$
- Μέγιστη ένταση εισόδου: Μέγιστο I_{in} σε Ampere

Από την πλευρά (έξοδο) AC:

- Μέγιστη ισχύς εξόδου: P_{out} σε Watts
- Τυπική τάση και εύρος λειτουργίας εξόδου: $V_{ac\ typ}$, από $V_{ac\ min}$ έως $V_{ac\ max}$
- Μέγιστη ένταση εξόδου: $I_{ac\ max}$
- Απόδοση μετατροπής στην ονομαστική έξοδο



Technical data	Sunny Boy 1200
Input (DC)	
Max. DC power (@ $\cos \varphi = 1$)	1320 W
Max. DC voltage	400 V
MPP voltage range	100 V – 320 V
DC nominal voltage	120 V
Min. DC voltage / start voltage	100 V / 120 V
Max. input current / per string	12.6 A / 12.6 A
Number of MPP trackers / strings per MPP tracker	1 / 2
Output (AC)	
AC nominal power (@ 230 V, 50 Hz)	1200 W
Max. AC apparent power	1200 VA
Nominal AC voltage; range	220, 230, 240 V; 180 V – 265 V
AC grid frequency; range	50, 60 Hz; ± 4.5 Hz
Max. output current	6.1 A
Power factor ($\cos \varphi$)	1
Phase conductors / connection phases	1 / 1
Efficiency	
Max. efficiency / Euro-eta	92.1 % / 90.9 %

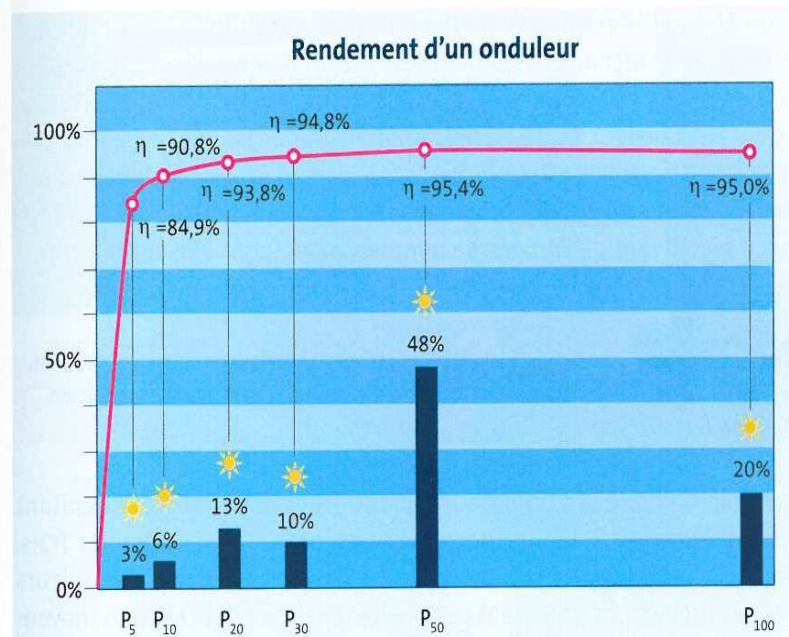
Εικόνα 19 : Παράδειγμα φωτοβολταϊκού αντιστροφέα και χαρακτηριστικά του (Πηγή: SMA)

Ευρωπαϊκή τυποποιημένη έξοδος ενός φωτοβολταϊκού αντιστροφέα:

Ο φωτοβολταϊκός αντιστροφέας καταναλώνει ένα μικρό μέρος της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από το φωτοβολταϊκό πεδίο (ή από το δίκτυο το βράδυ), προκαλώντας απώλειες. Η έξοδος ενός φωτοβολταϊκού αντιστροφέα ορίζεται γενικά στο 100% της ονομαστικής ισχύος του. Ωστόσο, όπως η ηλιακή ακτινοβολία κατά τη διάρκεια της ημέρας ποικίλλει σημαντικά, η ηλεκτρική παραγωγή του φωτοβολταϊκού πεδίου θα ποικίλει ανάλογα και, τελικά, η ισχύς εξόδου του φωτοβολταϊκού αντιστροφέα θα ποικίλει επίσης από το μηδέν (τη νύχτα) σε μια τιμή η οποία προσεγγίζει την ονομαστική του έξοδο υπό τις βέλτιστες συνθήκες ηλιακής ακτινοβολίας (αν είναι σωστά διαστασιοποιημένο). Για τον υπολογισμό της ηλεκτρικής παραγωγής μιας φωτοβολταϊκής εγκατάστασης με έναν πιο ρεαλιστικό τρόπο, μία ευρωπαϊκή μέση έξοδος ορίστηκε σύμφωνα με διάφορα σημεία λειτουργίας με συντελεστή για κάθε ένα από αυτά τα σημεία λειτουργίας.

Αυτή η ευρωπαϊκή έξοδος ορίστηκε σύμφωνα με τον τύπο που βρίσκεται στην Εικόνα 21.

$$\eta_{\text{EURO}} = 0,03 \cdot \eta_{5\%} + 0,06 \cdot \eta_{10\%} + 0,13 \cdot \eta_{20\%} + 0,10 \cdot \eta_{30\%} + 0,48 \cdot \eta_{50\%} + 0,20 \cdot \eta_{100\%}$$



Εικόνα 20 : Ευρωπαϊκή τυποποιημένη έξοδος ενός φωτοβολταϊκού αντιστροφέα.

Ασφάλεια και πρότυπα για τους φωτοβολταϊκούς αντιστροφεείς:

Οι φωτοβολταϊκοί αντιστροφεείς πρέπει να συμμορφώνονται με διάφορα πρότυπα, το πιο σημαντικό των οποίων είναι σίγουρα το πρότυπο VDE 0126 που υποχρεώνει την αποσύνδεση του φωτοβολταϊκού αντιστροφέα όταν δεν υπάρχει τάση δικτύου. Πράγματι, αν ένας εργαζόμενος αποσυνδέσει τοπικά τμήμα του δικτύου για παρεμβάσεις / επισκευές, είναι σημαντικό ότι ο φωτοβολταϊκός αντιστροφέας να σταματήσει την έγχυση ηλεκτρικής ενέργειας για την αποφυγή ηλεκτροπληξίας στους εργαζόμενους για την συντήρηση.

- Impédance du réseau < 1.5Ω. Et pas de saut > à 0.5 Ω. (uniquement après couplage)
- Résistance d'isolement entre panneaux et masse méca < 500kΩ. (uniquement avant couplage)
- 47.5Hz < Fréquence réseau < 50.2Hz.
- 184 V (80% Un) < Tension réseau < 264 V (115% Un)
- Courant de fuite < 300 mA.
- Composante continue du courant de sortie <1A

Εικόνα 21 : Οι όροι που επιβάλλονται από το πρότυπο VDE 0126 για τη Γαλλία. Αυτές οι συνθήκες μπορεί να διαφέρουν ελαφρώς από τη μία χώρα στην άλλη.

Πρόσθετα εξαρτήματα από την πλευρά AC των φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων

Κουτί πλευράς δικτύου με τα εξαρτήματα προστασίας:

(C15-100 πρότυπο για τη Γαλλία, πλευρά των καταναλωτών)



Εικόνα 22: Κουτί πλευράς δικτύου με τα εξαρτήματα προστασίας.

Σε αυτό το κουτί, θα βρούμε εξαρτήματα όπως διαφορικούς διακόπτες κυκλώματος (συνήθως με ονομαστικά 30 mA) αντικεραυνικούς διακόπτες, διακόπτες αποσύνδεσης (Εικόνα 24).



Εικόνα 23 : Διαφορικός διακόπτης (30 mA), αντικεραυνικός διακόπτης, διακόπτης αποσύνδεσης.

Είναι σημαντικό να τοποθετείται μια περιγραφική ετικέτα που δείχνει τη σύνδεση της φωτοβολταϊκής εγκατάστασης μέσα στο ηλεκτρικό κουτί, από την πλευρά του δικτύου, για να υποδείξει ένα ενδεχόμενο κίνδυνο σε έναν τεχνικό (Εικόνα 25).



Εικόνα 24 : Περιγραφική ετικέτα που δείχνει τη σύνδεση της φωτοβολταϊκής εγκατάστασης.

Ηλεκτρικοί μετρητές και ασφαλειοδιακόπτες πλευράς δικτύου:

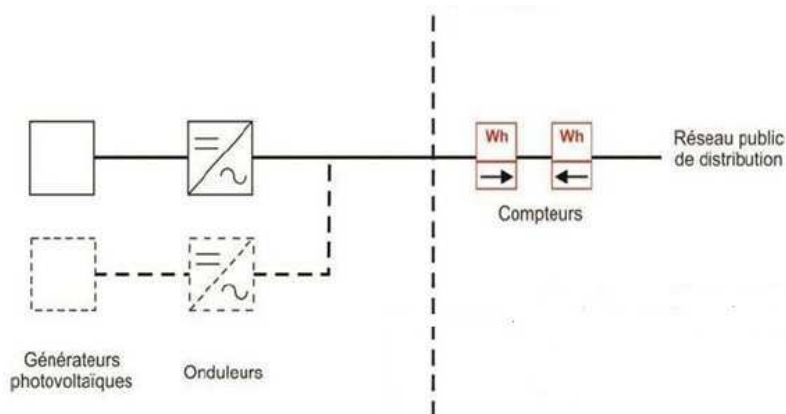
(Πρότυπο C14-100 στη Γαλλία, πλευρά δικτύου του διανομέα)

Η παραγωγή φωτοβολταϊκής ηλεκτρικής ενέργειας πρέπει να δρομολογείται μέσω ενός ηλεκτρικού μετρητή για να καταστεί δυνατή η τιμολόγηση της ηλεκτρικής ενέργειας που εγχέεται στο δίκτυο, όπως ακριβώς και η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας από έναν ιδιώτη. Αυτά τα όργανα μέτρησης, μαζί με τις συσκευές προστασίας, όπως τον διαφορικό διακόπτη, εγκαθίστανται γενικά εντός του ακινήτου, αλλά ανήκουν στην εταιρεία διανομής ηλεκτρικής ενέργειας.



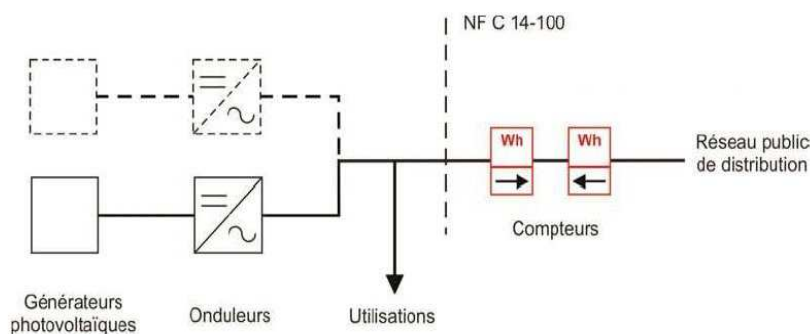
Εικόνα 25 : Παράδειγμα ενός ηλεκτρικού μετρητή και διαφορικού διακόπτη.

Ο μετρητής ηλεκτρικής κατανάλωσης επιτρέπει την καταμέτρηση των kWh που παράγονται από τις φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις και εγχέονται στο δίκτυο, όπως φαίνεται στην Εικόνα 27:



Εικόνα 26 : Ηλεκτρική σύνδεση αμφίδρομου μετρητή.

Συνήθως, ένας δεύτερος ηλεκτρικός μετρητής τίθεται σε σειρά, αλλά συνδέεται αντίθετα, να μέτρα ηλεκτρικές kWh που ενδέχεται να καταναλωθούν από το δίκτυο (από αντιστροφείς κατά τη διάρκεια της νύχτας, για παράδειγμα). Από την ανωτέρω ρύθμιση, ο καταναλωτής ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να συνδεθεί και να καταναλώνει ηλεκτρική ενέργεια τοπικά. Στην περίπτωση αυτή, μέρος της φωτοβολταϊκής παραγωγής θα αυτό-καταναλώνεται, ενώ το πλεόνασμα εγχέεται στο δίκτυο (Εικόνα 28).

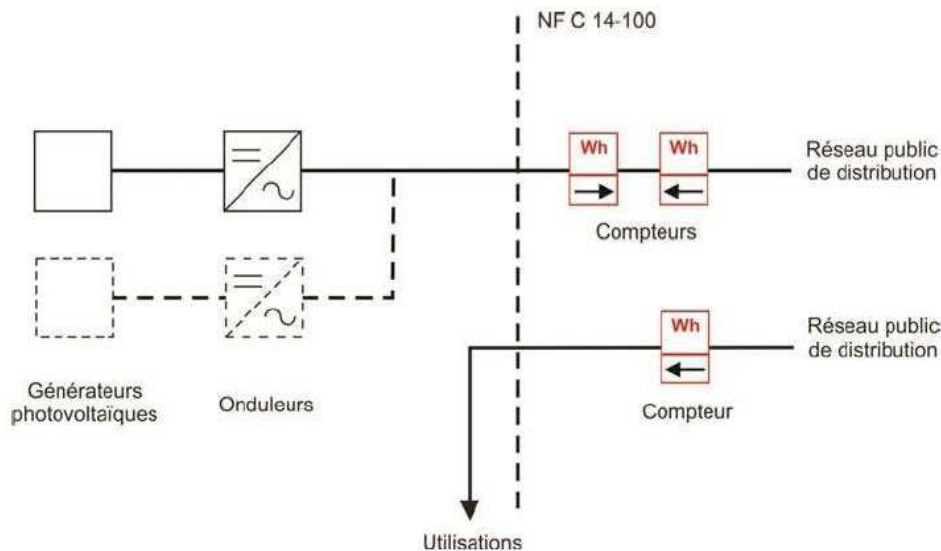


Εικόνα 27 : Ηλεκτρική σύνδεση αμφίδρομου μετρητή (εγκατάσταση αυτο-κατανάλωσης).

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι για να γνωρίζουμε την ποσότητα της φωτοβολταϊκής ενέργειας αυτο-κατανάλωσης, είναι απαραίτητο να προστεθεί άλλος ένα ηλεκτρικός μετρητής σε σειρά με την φωτοβολταϊκή εγκατάσταση. Αυτός ο μετρητής δεν είναι απαραίτητος για τον διανομέα ηλεκτρικής ενέργειας, επιτρέπει μόνο στο χρήστη να γνωρίζει την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας που παρέχει η φωτοβολταϊκή εγκατάσταση.

Στην περίπτωση που ο παραγωγός της φωτοβολταϊκής ηλεκτρικής ενέργειας επιθυμεί να εισάγει το σύνολο της παραγωγής στο ηλεκτρικό δίκτυο (στην περίπτωση πλεονεκτικής

τιμολογιακής συμφωνίας), είναι απαραίτητο να έχει μια δεύτερη σύνδεση στο ηλεκτρικό δίκτυο για κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας από το ηλεκτρικό δίκτυο (Εικόνα 29).

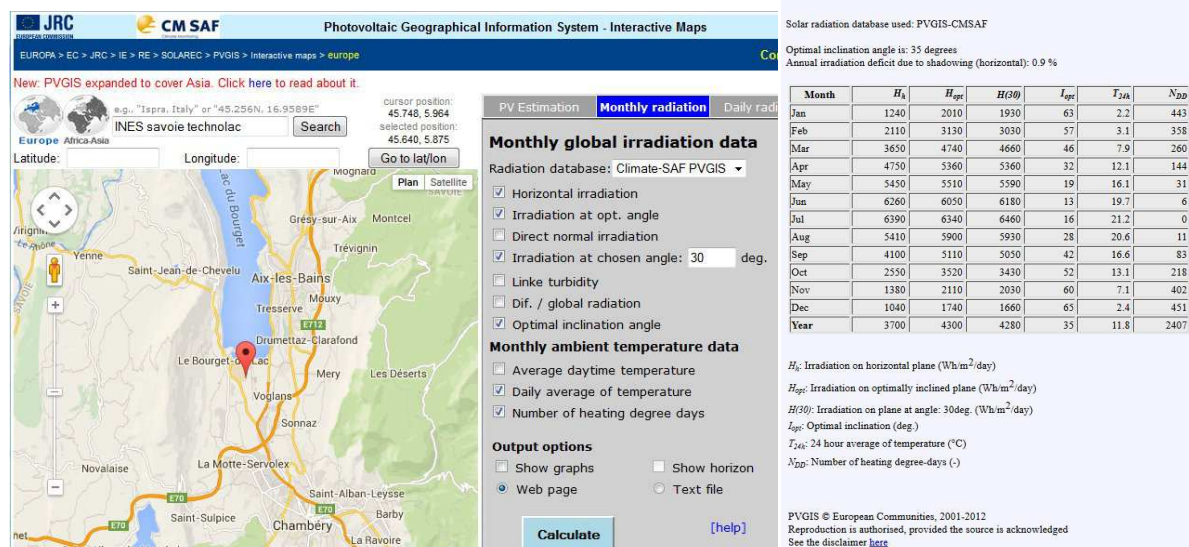


Εικόνα 29: Διαμόρφωση του δικτύου για έγχυση.

Διαστασιολόγηση και υπολογισμός της φωτοβολταϊκής απόδοσης

Ανάλογα με την περίπτωση και το σκοπό της φωτοβολταϊκής εγκατάστασης, ο σχεδιαστής μπορεί είτε να εκτιμήσει την ηλεκτρική παραγωγή του φωτοβολταϊκού συστήματος ή να διαστασιολογήσει την εγκατάσταση σύμφωνα με ορισμένες απαιτήσεις ισχύος. Πολύ συχνά, ειδικά με φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις που θα συνδέονται με το ηλεκτρικό δίκτυο, η μέγιστη ισχύς P_c της εγκατάστασης περιορίζεται από εξωτερικές συνθήκες, όπως, για παράδειγμα, η διαθέσιμη επιφάνεια εγκατάστασης. Σε αυτήν την περίπτωση, η μέγιστη ισχύς P_c της φωτοβολταϊκής εγκατάστασης είναι γνωστή και η ετήσια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι αυτό που πρέπει να αξιολογηθεί. Για το σκοπό αυτό, είναι απαραίτητο να διαθέτει στοιχεία σχετικά με την μέση ετήσια ακτινοβολία στην περιοχή των φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων, και να υπολογίσει την βέλτιστη κλίση και προσανατολισμό των φωτοβολταϊκών πάνελ.

Τα τυπικά δεδομένα που απαιτούνται για τη διαστασιολόγηση των φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων είναι η ετήσια συνολική ακτινοβολία (I_{GPan}) στο οριζόντιο επίπεδο. Λογισμικά, όπως το Meteoinform, μπορούν να προσδιορίσουν την τιμή αυτή για οποιαδήποτε τοποθεσία στον κόσμο, με σχετική ακρίβεια, για κάθε δεδομένη κλίση και προσανατολισμό εγκατάστασης. Υπάρχουν επίσης δωρεάν πηγές δεδομένων, όπως είναι το PVGIS (<http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/>), το οποίο υπολογίζει και παρέχει τα εν λόγω δεδομένα για σχεδόν οποιαδήποτε θέση στην Ευρώπη, την Αφρική και την Ασία με τη χρήση κλιματικών χαρτών (Εικόνα 30).



Εικόνα 30 : Παράδειγμα εξόδου του PVGIS για την περιοχή του INES στο Le Bourget du Lac στην Γαλλία.

Η τιμή για τη μέση ετήσια συνολική ακτινοβολία επί επιπέδου με κλίση 30° προς τα νότια είναι $3.98 \text{ kWh} / \text{m}^2$ ανά ημέρα (BDD classic PVGIS), η οποία είναι μια συνολική ακτινοβολία που προσπίπτει στα πλαίσια ίση με:

$$I_{GPan} = 365 \times 3.98 = 1452 \text{ kWh/m}^2 \text{ τον χρόνο.}$$

Ο τρίτος σημαντικός αριθμός δεδομένων είναι ο συντελεστής αποδοτικότητας (PR). Το PR αντιπροσωπεύει το σύνολο των ηλεκτρικών απωλειών, οι οποίες περιλαμβάνουν τις απώλειες Joule στην καλωδίωση ($\sim 1\%$), τις απώλειες του φωτοβολταϊκού αντιστροφέα ($\sim 5\%$) και, το σημαντικότερο, τις απώλειες από την αύξηση της θερμοκρασίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων υπό ηλιακή ακτινοβολία ($\sim 10\%$ έως $\sim 15\%$).

Διαφορετικοί τύποι εγκαταστάσεων επηρεάζουν τον αερισμό των φωτοβολταϊκών πλαισίων και, σε έκταση, τη θερμοκρασία λειτουργίας τους υπό ηλιακή ακτινοβολία. Για παράδειγμα, φωτοβολταϊκά πλαίσια οροφής μπορεί να έχουν υψηλότερες θερμοκρασίες λειτουργίας από εγκαταστάσεις εδάφους σε αναρτήσεις. Ανάλογα με τη θέση της εγκατάστασης και τον τύπο στερέωσης, εμπειρικά εκτιμάται ότι το PR είναι κοντά στις ακόλουθες τιμές:

Καλά αεριζόμενη εγκατάσταση (π.χ. PV εγκατάσταση στο έδαφος) PR = 0.8

Αρκετά κακώς αεριζόμενη (π.χ. αναρτημένη σε οροφή): PR = 0.75

Κακώς αεριζόμενη (π.χ. πλήρως ενσωματωμένη στην οροφή): PR = 0.70

Από αυτά τα τρία στοιχεία, P_c , I_{GPan} και PR , η ετήσια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας E_a μιας φωτοβολταϊκής εγκατάστασης μπορεί να εκτιμηθεί:

$$E_a \text{ (σε kWh ανά έτος)} = P_c (W_c) \times I_{GPan} \text{ (σε kWh/m}^2 \text{ ανά έτος)} \times PR \text{ (αδιάστατος)}$$

Ο τύπος αυτός εμφανίζεται ανομοιογενής αλλά θα πρέπει να σημειωθεί ότι η μέγιστη ισχύς P_c εκφράζει την ηλεκτρική έξοδο ενός ϕ/β πλαισίου υπό ακτινοβολία $1000W/m^2$ και δεν είναι μονάδα SI. Όπως το I_{GPan} εκφράζει την ετήσια ηλιακή ακτινοβολία σε kWh/m^2 , μπορεί να υποθεθεί ότι δείχνει τον αριθμό των ωρών που τα πλαίσια θα λειτουργούν υπό θεωρητική ακτινοβολία $1000W/m^2$. Με άλλα λόγια, η φωτοβολταϊκή εγκατάσταση θα λειτουργήσει με αυτό τον αριθμό των ωρών στη τιμή P_c της.

Παρατηρήσεις:

- 1) Ο συντελεστής αποδοτικότητας PR αντιπροσωπεύει την αναλογία της ηλεκτρικής εξόδου της εγκατάστασης, ή την ηλεκτρική ενέργεια που παρέχεται στο δίκτυο (E_a) διαιρούμενη με τη θεωρητική ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από τη φωτοβολταϊκή εγκατάσταση (που είναι $P_c \times I_{GPan}$)
- 2) Η έξοδος μετατροπής ενέργειας υπολογίζεται διαμέσου της ανώτατης ισχύος P_c , η οποία εξαρτάται από την επιφάνεια και την έξοδο του φωτοβολταϊκού πλαισίου υπό συνθήκες STC (STC για Standard Test Condition, δηλαδή μία ακτινοβολία $1000W/m^2$, μια θερμοκρασία $25^\circ C$ και ηλιακό φάσμα AM1.5)
- 3) Ο παραπάνω τύπος μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο εάν η ηλεκτρική ισχύς εξόδου της φωτοβολταϊκής εγκατάστασης είναι μια γραμμική συνάρτηση της ακτινοβολίας, το οποίο δεν είναι εντελώς αληθές σε πραγματικές συνθήκες, αλλά αρκεί για μια γρήγορη εκτίμηση. Για να αποκτήσετε καλύτερη ακρίβεια στην παραγωγή φωτοβολταϊκής ενέργειας, είναι απαραίτητο να χρησιμοποιήσετε ένα λογισμικό προσομοίωσης, όπως είναι τα PVsyst ή PVSOL που θα λάβει υπόψη αυτή την έλλειψη γραμμικότητας.

Παρομοίως, είναι δυνατόν να τροποποιηθεί αυτή η φόρμουλα για άλλα χρονικά διαστήματα, όπως ένα μήνα ή μια μέρα (σε ενέργεια):

$$E_M \text{ (σε kWh ανά μήνα)} = P_c (W_c) \times I_{Gpm} \text{ (σε kWh/m}^2 \text{ ανά μήνα)} \times PR \text{ (αδιάστατος)}$$

$$E_j \text{ (σε kWh ανά μέρα)} = P_c (W_c) \times I_{Gpd} \text{ (σε kWh/m}^2 \text{ ανά μέρα)} \times PR \text{ (αδιάστατος)}$$

Ομοίως, είναι δυνατόν να γράψουμε αυτόν το τύπο για μια στιγμή t , οπότε η ισχύς λειτουργίας P_e από την ακτινοβολία IGP (που είναι σε W/m^2):

$$P_e \text{ (σε kW)} = P_c (W_c) \times I_{GP} \text{ (σε kW/m}^2 \text{)} \times PR \text{ (αδιάστατος)}$$

$$\text{Ή } P_e \text{ (σε W)} = P_c (W_c) \times I_{GP} \text{ (σε W/m}^2 \text{)} \times PR \text{ (αδιάστατος)}$$

Παράδειγμα διαστασιολόγησης αξιολόγησης

Προηγουμένως, για την τοποθεσία του INES στο Le Bourget du Lac, υπολογίσαμε τη συνολική ακτινοβολία σε ένα επίπεδο κεκλιμένο 30° προς νότο. Έχουμε $I_{GPaN} = 1452 \text{ kWh/m}^2$ ανά έτος (ίσο με 1452 ώρες με ηλιακή ακτινοβολία 1 kW/m^2). Για μια φωτοβολταϊκή εγκατάσταση με μέγιστη ισχύ $P_c = 3 \text{ kW}_c$ (επιφάνεια 30 m^2 και 10% ενεργειακές απώλειες), με την εγκατάσταση ενσωματωμένη σε στέγη και συντελεστή αποδοτικότητας που θεωρείται ίσος με 0.7, η ετήσια παραγωγή των φωτοβολταϊκών E_a εκτιμάται ότι είναι:

$$E_a = 1452 \times 3 \times 0.70 = 3049 \text{ kWh}$$

Παρατηρήσεις:

1) Η μέση κατανάλωση συγκεκριμένης ηλεκτρικής ενέργειας (χωρίς ούτε θέρμανση ούτε ζεστό νερό) ενός νοικοκυριού στη Γαλλία είναι περίπου 3000 kWh ετησίως, περίπου ισοδύναμη με την ηλεκτρική παραγωγή μιας φωτοβολταϊκής εγκατάστασης των 3 kWp.

2) Ο συντελεστής φορτίου (αριθμός ωρών λειτουργίας στη ονομαστική ισχύ της εγκατάστασης, ως εκ τούτου, η μέγιστη ισχύς) είναι $3049 \text{ kWh} / 3 \text{ kW} = 1016$ ώρες. Αυτός ο παράγοντας φορτίου εξαρτάται από πολλές παραμέτρους, ο κύριος εκ των οποίων είναι η ηλιακή ακτινοβολία. Ποικίλλει από 800 ώρες στη βόρεια Ευρώπη έως 1500 ώρες στη νότια Ευρώπη. Ο συντελεστής φορτίου είναι μικρότερος σε σύγκριση με αυτόν του ανέμου, περίπου 2000 ώρες, και αυτού των σταθμών πυρηνικής ενέργειας, περίπου 7.000 ώρες. Όσο καλύτερος είναι ο συντελεστής φορτίου, τόσο πιο κοντά είναι η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με την μέγιστη εγκατεστημένη ισχύ. Οι παράγοντες φόρτωσης που αναφέρονται παραπάνω για φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις δεν ευνοούν την οικονομική τους αποδοτικότητα, η οποία δείχνει ότι η αρχική επένδυση ανά μονάδα ισχύος θα πρέπει να είναι χαμηλή για να παραμείνουν ανταγωνιστικές.

Μελέτη συμβατότητας μεταξύ του φωτοβολταϊκού πεδίου και του αντιστροφέα

Η διαστασιολόγηση της φωτοβολταϊκής εγκατάστασης συνήθως ξεκινά θέτοντας ένα συγκεκριμένο αριθμό φωτοβολταϊκών πλαισίων στις βάσεις στήριξης (οροφή κτιρίου ή χώρο στο έδαφος ή δομή) με μια ορισμένη κλίση και προσανατολισμό. Αυτή η διαδικασία θα καθορίσει τον αριθμό των φωτοβολταϊκών πλαισίων που πρέπει να χρησιμοποιούνται, σύμφωνα με το διαθέσιμο χώρο, αλλά και αποκαλύπτει τις διάφορες πιθανές διαμορφώσεις καλωδίωσης των πλαισίων (αριθμός πλαισίων ανά σειρά και τον αριθμό των σειρών). Ο αριθμός των φωτοβολταϊκών πλαισίων ανά σειρά και ο αριθμός των σειρών διέπει την ηλεκτρική έξοδο, αλλά και την τάση και το ρεύμα στην έξοδο της φωτοβολταϊκής εγκατάστασης. Εξωγενείς παράγοντες, όπως είναι η ηλιακή ακτινοβολία και η θερμοκρασία περιβάλλοντος, πρέπει επίσης να λαμβάνονται υπόψη. Ο αντιστροφέας που συνδέεται με το φωτοβολταϊκό πεδίο έχει εύρη λειτουργίας για είσοδο και έξοδο τάσης, ρεύματος και

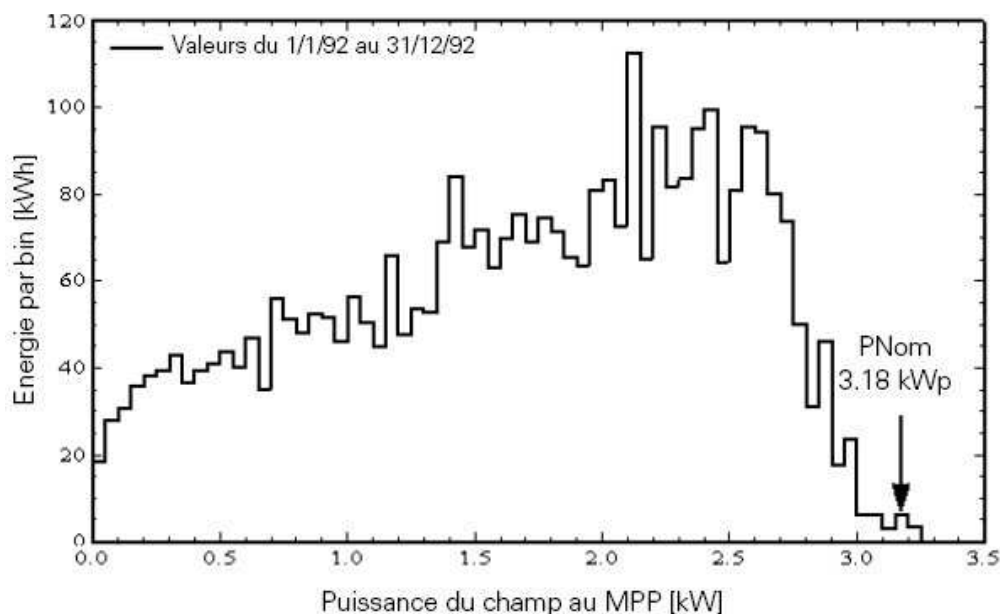
ισχύος, τα οποία θα πρέπει να είναι συμβατά με την ηλεκτρική παραγωγή του φωτοβολταϊκού πεδίου και τις προδιαγραφές του φορτίου / δικτύου.

Συμβατότητα της ισχύος:

Λόγω του γεγονότος ότι η ηλιακή ακτινοβολία στο πλαίσιο των ευρωπαϊκών γεωγραφικών πλατών ανεβαίνει σε περίπου 1000 W/m^2 και ότι ο συντελεστής αποδοτικότητας είναι γενικά περίπου 0.8, η ισχύς του αντιστροφέα επιλέγεται συνήθως να κυμαίνεται μεταξύ 80% και 100% της μέγιστης ισχύος του φωτοβολταϊκού πεδίου. Για την ιδανική εκτίμηση της ισχύος του αντιστροφέα σωστά, το γράφημα ράβδων ρεύματος στην έξοδο του φωτοβολταϊκού πεδίου είναι απαραίτητο. Αυτό το γράφημα ράβδων μπορεί να προσομοιωθεί με εξειδικευμένο λογισμικό, όπως το PVsyst.

Ας εξετάσουμε δύο παραδείγματα:

Παράδειγμα 1. Η Εικόνα 31 δείχνει το γράφημα ράβδων ισχύος ενός φωτοβολταϊκού πεδίου 3.18 kW, με νότιο προσανατολισμό και κλίση 30° , στη Γενεύη (Ελβετία).



Εικόνα 31. Γράφημα ράβδων ισχύος ενός φωτοβολταϊκού πεδίου 3.18 kW, με νότιο προσανατολισμό επί κλίση 30° , στη Γενεύη (Ελβετία).

Εάν η διαστασιολόγηση του αντιστροφέα είναι ίση με το 80% της μέγιστης ισχύος του πεδίου, η οποία είναι 2.55 kW, το γράφημα ράβδων δείχνει ότι η μονάδα είναι υποδιαστασιολογημένη, διότι η ισχύς του πεδίου μεταξύ 2.55 kW και 3 kW δεν χρησιμοποιείται πλήρως. Θα ήταν πιο συνετό να επιλέξετε ένα αντιστροφέα στα 3 kW ή 3.2 kW (κοντά στο 100% της μέγιστης ισχύος αυτού του πεδίου).

Παράδειγμα 2. Η εικόνα 32 δείχνει το γράφημα ράβδων ισχύος ενός φωτοβολταϊκού πεδίου 3.18 kW, με νότιο προσανατολισμό και κλίση 90°, στη Γενεύη (Ελβετία).

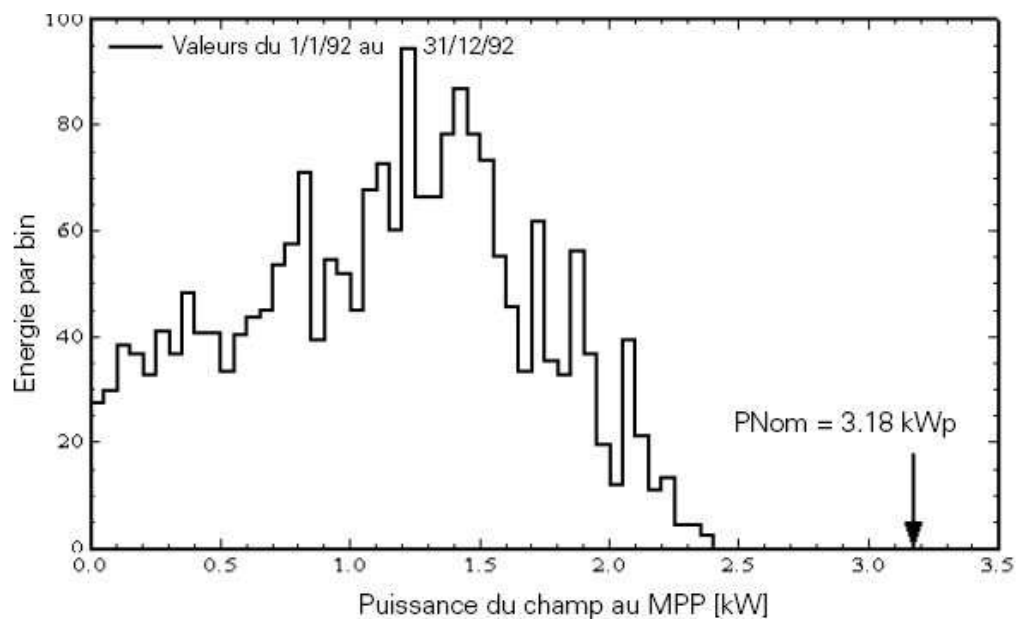


Figure 32 : Γράφημα ράβδων ισχύος ενός φωτοβολταϊκού πεδίου 3.18 kW, με νότιο προσανατολισμό και κλίση 90°, στη Γενεύη (Ελβετία).

Εάν η διαστασιολόγηση του αντιστροφέα είναι ίση με 100% της μέγιστης ισχύος του πεδίου, δηλαδή 3.2 kW, μπορεί να φανεί στην Εικόνα 32 ότι η μονάδα είναι υπερδιαστασιολογημένη επειδή το πεδίο δεν παρέχει καμία ηλεκτρική ενέργεια μεταξύ 2.5 kW και 3.2 kW. Θα ήταν πιο συνετό να επιλέξετε έναν αντιστροφέα από 2.4 έως 2.5 kW που είναι σε θέση να εκμεταλλευτεί πλήρως την έξοδο του πεδίου.

Έτσι, το ιδανικό είναι να γνωρίζουμε το γράφημα ράβδων ηλεκτρικής ενέργειας, αλλά αυτό δεν είναι πάντα εφικτό. Σε γενικές γραμμές, ένας αντιστροφέας ίσος με το 80% της μέγιστης ισχύος πεδίου χρησιμοποιείται όταν οι συνθήκες της κλίσης και προσανατολισμού είναι δυσμενείς (κατακόρυφος, ανατολικός ή δυτικός προσανατολισμός), οι μέσες θερμοκρασίες του περιβάλλοντος είναι αρκετά υψηλές και υπάρχουν συνθήκες ανεπαρκούς ηλιακής ακτινοβολίας, όπως στο κέντρο της πόλης (ρύπανση) ή την ακτογραμμή. Ομοίως, οι αντιστροφέες ονομαστικής ισχύος 100% της μέγιστης ισχύος του πεδίου επιλέγονται όταν οι συνθήκες της κλίσης και προσανατολισμού είναι ευνοϊκές, οι μέσες θερμοκρασίες περιβάλλοντος μάλλον χαμηλές και υπάρχουν καλές συνθήκες ηλιακής ακτινοβολίας, όπως στην ύπαιθρο. Θα είναι ίσως απαραίτητη η υπερ-διαστασιολόγηση ενός αντιστροφέα σε περιοχές όπου ο ουρανός είναι πολύ καθαρός, όπως ψηλά στα βουνά (χαμηλότερη πυκνότητα ατμόσφαιρας, λιγότερη ρύπανση, χαμηλή μέση θερμοκρασία και υψηλή ανακλαστικότητα).

Συμβατότητα με την ένταση του ρεύματος:

Η ηλιακή ακτινοβολία από έναν καθαρό ουρανό είναι περίπου 800 έως 900 W/m², αλλά υπό ορισμένες προϋποθέσεις, με μια ισχυρή άμεση ακτινοβολία και ένα συννεφιασμένο ουρανό με λευκά σύννεφα (σημαντική διάχυση), η ηλιακή ακτινοβολία μπορεί να φτάσει 1300 W/m² για λίγα λεπτά μερικές φορές ετησίως. Παρά το γεγονός ότι δεν είναι επιζήμια για το αντιστροφέα, εάν διαθέτει προστασία υπερέντασης, συνιστάται να υπάρχει ένα περιθώριο ασφαλείας σχετικά με την αποδεκτή μέγιστη ένταση ρεύματος του αντιστροφέα (προσοχή στις ασφάλειες προστασίας που πρέπει επίσης να έχουν τιμή πάνω από τέτοια όρια ώστε να μην χρειάζεται να αλλάζουν πολύ συχνά. Συνήθως, το ιδανικό είναι να έχουμε ένα περιθώριο 30% (σύμφωνα με τις νομοθετικές προτάσεις της χώρας) σε σύγκριση με τις συνθήκες λειτουργίας STC των φωτοβολταϊκών πλαισίων.

Συμβατότητα με τάση μηδενικού φορτίου:

Χωρίς καμία τάση δικτύου, ο αντιστροφέας αποσυνδέεται και επομένως η ένταση του ρεύματος είναι μηδέν. Ωστόσο, ο αντιστροφέας παραμένει συνδεδεμένος με το φωτοβολταϊκό πεδίο, όπου τώρα η τάση είναι η υψηλότερη δυνατή. Το χειρότερο σενάριο για τη μέγιστη τάση στην είσοδο του αντιστροφέα πρέπει να λάβει υπόψη το γεγονός ότι η ηλιακή ακτινοβολία μπορεί να φτάσει μέχρι και 1300 W/m². Αυτή η τάση πρέπει να παραμείνει χαμηλότερη από τη μέγιστη αποδεκτή τάση από τον φωτοβολταϊκό αντιστροφέα, διαφορετικά υπάρχει κίνδυνος να υποστεί ζημιά. Αυτή είναι μία από τις κύριες αιτίες των βλαβών αντιστροφέων, ειδικά όταν η υψηλή τάση άνευ φορτίου δεν έχει ελεγχθεί σε ορισμένες εγκαταστάσεις. Για το λόγο αυτό, συνιστάται να υπάρχει ένα περιθώριο ασφαλείας σχετικά με τη μέγιστη τάση άνευ φορτίου, ιδανικά 15% σε σύγκριση με τα φωτοβολταϊκά πλαίσια συνθήκες STC (ανάλογα με τις νομοθετικές συστάσεις της χώρας). Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια έχουν συνήθως μια μέγιστη τάση λειτουργίας, συχνά περίπου 1000 βολτ (ελέγξτε τα χαρακτηριστικά των φωτοβολταϊκών πλαισίων). Η τιμή αυτή επιτρέπει να υπολογίσετε τα πλαίσια αν είναι δυνατόν να τεθούν σε μία ενιαία σειρά.

Συμβατότητα στη τάση λειτουργίας:

Σε κατάσταση λειτουργίας ο αντιστροφέας ρυθμίζει το σημείο λειτουργίας στα όρια του φωτοβολταϊκού πεδίου αναζητώντας το σημείο όπου η ισχύς είναι μέγιστη (MPPT), επιλέγοντας το καλύτερο δυνατό ζεύγος τάσης και έντασης του ρεύματος. Το επιλεγμένο ζεύγος ποικίλλει ανάλογα με την ηλιακή ακτινοβολία και τη θερμοκρασία των στοιχείων των φωτοβολταϊκών πλαισίων. Η ένταση του ρεύματος υπό λειτουργία κυμαίνεται μεταξύ μηδέν και μέγιστου, ενώ η τάση λειτουργίας θα κυμαίνεται μεταξύ μιας τιμής U_{pvmin} (μόλις η ακτινοβολία φθάνει μερικές δεκάδες W/m²) και μια μέγιστη τιμή U_{pvmax} (για μια ισχυρή ακτινοβολία). Για καλή συμβατότητα μεταξύ του φωτοβολταϊκού πεδίου και του μετατροπέα, αυτές οι δύο τιμές τάσης πρέπει να είναι εντός των $V_{mppt-min}$ και $V_{mppt-max}$

τάσεων του φωτοβολταϊκού αντιστροφέα (βλέπε τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των φωτοβολταϊκών αντιστροφέων).

Λογισμικά όπως PVsyst ή PVSOL καθιστούν δυνατό να προσομοιωθεί το σύνολο των σημείων λειτουργίας της τάσης και έντασης του ρεύματος (και, κατά συνέπεια, της ισχύος) στην διάρκεια ενός έτους. Η έξοδος μπορεί να είναι ωριαία, χρησιμοποιώντας ένα αρχείο μέσων καιρικών συνθηκών, επιτρέποντας να ελέγξετε τη συμβατότητα μεταξύ του φωτοβολταϊκού πεδίου και του φωτοβολταϊκού αντιστροφέα.

Για μια περίληψη του ελέγχου, προσέχουμε τις ακόλουθες προϋποθέσεις:

$V_{mppt-min}$ αντιστροφέα < 80% της τυπικής τάσης STC του φωτοβολταϊκού πεδίου

$V_{mppt-max}$ αντιστροφέα > 115% της τυπικής τάσης STC του φωτοβολταϊκού πεδίου

Επεξήγηση: 80% της τυπικής τάσης STC του πεδίου φωτοβολταϊκών αντιπροσωπεύει την τάση του φωτοβολταϊκού πεδίου για μια ακτινοβολία 100 W/m² (για ένα πεδίο φωτοβολταϊκών κρυσταλλικού πυριτίου) και 130% της τυπικής τάσης STC του πεδίου φωτοβολταϊκών αντιπροσωπεύει την τάση του φωτοβολταϊκού πεδίου για μια ακτινοβολία των 1300 W/m² (για ένα πεδίο φωτοβολταϊκών κρυσταλλικού πυριτίου).

Παράδειγμα διαστασιολόγησης μιας μικρής φωτοβολταϊκής εγκατάστασης

Ας υποθέσουμε ότι έχουμε μια στέγη πάνω στην οποία επιθυμούν να εγκαταστήσουν φωτοβολταϊκά πλαίσια. Οκτώ πλαίσια Photowatt PW 2350-235 (Εικόνα 33) μπορούν να χωρέσουν στην οροφή.

A high-resolution image of a Photowatt PW2350 solar panel. The panel is rectangular with a dark, monocrystalline silicon surface. It features a grid of thin, silver-colored metal lines (busbars and finger lines) that divide the panel into a grid of smaller cells. The panel is shown at a slight angle, highlighting its thin profile and the texture of the silicon surface.

PW2350

CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES

Puissance typique	W	220	225	230	235				
Tolérance électrique	W	0/+5	0/+5	0/+5	0/+5				
Tension à la puissance typique	V	29,8	29,7	29,8	29,9				
Intensité à la puissance typique	A	7,50	7,69	7,75	7,86				
Tension en circuit ouvert	V	37,1	37,1	37,2	37,2				
Courant de court-circuit	A	8,25	8,28	8,33	8,38				
Tension maximum du circuit	V	1000 V DC							
Courant limite inverse (IRM)	A	15							
NOCT	°C	47,1 +/- 2							
Coefficient de température	α (Isc) = + 0,04 %/°C								
	β (Voc) = - 0,36 %/°C								
	δ (Pmax) = - 0,43 %/°C								

Sous les conditions d'essai standards (STC) : rayonnement de 1000 W/m², spectre AM 1.5 et température de cellule de 25°C

Εικόνα 33 : Χαρακτηριστικά πλαισίου Photowatt PW2350-235.

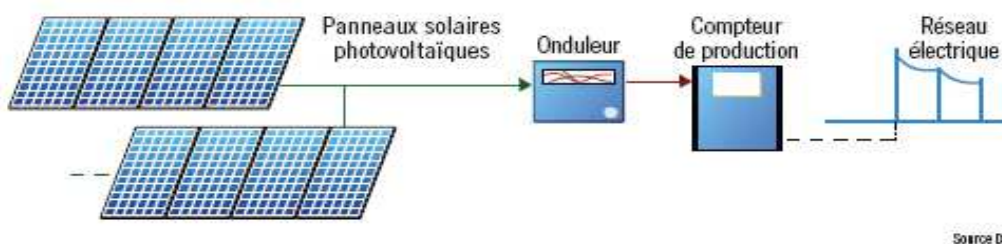
Αυτά τα οκτώ φωτοβολταϊκά πλαίσια συνδέονται με ένα SMA Sunny Boy 1700 αντιστροφέα (Εικόνα 34).



	Sunny Boy 1200	Sunny Boy 1700
Entrée (DC)		
Puissance DC max. (quand $\cos \varphi=1$)	1320 W	1850 W
Tension d'entrée max.	400 V	400 V
Plage de tension MPP / Tension d'entrée nominale	100 V – 320 V / 120 V	147 V – 320 V / 180 V
Tension d'entrée min. / Tension d'entrée au démarrage	100 V / 120 V	139 V / 180 V
Courant d'entrée max.	12,6 A	12,6 A
Courant d'entrée max. par string	12,6 A	12,6 A
Nombre des entrées MPP indépendantes / Strings par entrée MPP	1 / 2	1 / 2

Εικόνα 34 : Χαρακτηριστικά αντιστροφέα SMA Sunny Boy 1700

Επιλέγοντας μια καλωδίωση δύο παράλληλων σειρών με τέσσερα πλαίσια σε κάθε σειρά και συνδεδεμένα με τον αντιστροφέα (Εικόνα 35), ας δούμε αν αυτός ο συνδυασμός είναι συμβατός ή όχι.



Εικόνα 35 : Δύο παράλληλες σειρές με τέσσερα πλαίσια σε κάθε σειρά, συνδεδεμένα με τον αντιστροφέα

Ας ελέγξουμε τα διάφορα σημεία:

Έλεγχος ισχύος:

Η φωτοβολταϊκή εγκατάσταση περιλαμβάνει οκτώ πλαίσια Photowatt PW 2350 - 235Wc, οπότε η συνολική μέγιστη ισχύς είναι 1880 Wp. Ο αντιστροφέας της SMA Sunny Boy 1700 έχει μέγιστη ισχύ εισόδου 1850 Watts.

Ο λόγος ηλεκτρικής ενέργειας αντιστροφέα / πεδίου είναι ίσος με 0.98, είναι μεταξύ 0.8 και 1 (προσαρμοσμένος για ένα φωτοβολταϊκό πεδίο σε καλή κατάσταση, συνήθως κλίση έως 30 ° και νότιο προσανατολισμό). Έτσι, η επιλογή είναι OK από άποψη ισχύος.

Έλεγχος έντασης ρεύματος:

Η ένταση του ρεύματος της φωτοβολταϊκής εγκατάστασης στη χειρότερη περίπτωση είναι ίση με την χαρακτηριστική ένταση (συνθήκες STC) πολλαπλασιαζόμενη με δύο (επειδή υπάρχουν δύο σειρές παράλληλα) και πάλι πολλαπλασιάζεται με 1.3 (υποθέτοντας μια ακτινοβολία των 1300 W/m^2). Αυτό ισοδυναμεί με $7.86 \text{ A} \times 2 \times 1.3 = 20.43 \text{ A}$. Το μέγιστο ρεύμα εισόδου του αντιστροφέα είναι 12.6 A , το οποίο είναι χαμηλότερο από το ρεύμα που παράγεται από το φωτοβολταϊκό πεδίο. **Έτσι, υπάρχει πρόβλημα με την ένταση του ρεύματος.**

Έλεγχος τάσης άνευ φορτίου:

Η τάση άνευ φορτίου ενός πλαισίου είναι 37.2 V (συνθήκες STC). Με μια ακτινοβολία 1300 W/m^2 , αυτή η τάση άνευ φορτίου είναι $37.2 \text{ V} \times 1.15 = 42.78 \text{ V}$. Γνωρίζοντας ότι η μέγιστη τάση του κυκλώματος δεν μπορεί να υπερβαίνει τα 1000 VDC , έτσι $1000 \text{ V} / 42.78 \text{ V} = 23.37$, έτσι ώστε να μπορούμε να έχουμε ένα μέγιστο 23 φωτοβολταϊκά πλαίσια σε σειρά. Στην περίπτωση μας, έχουμε μόνο τέσσερα πλαίσια σε σειρά.

Με τέσσερα φωτοβολταϊκά πλαίσια σε σειρά, η μέγιστη τάση του φωτοβολταϊκού πεδίου είναι $37.2 \text{ V} \times 1.15 \times 4 = 171.12 \text{ V}$. Η τιμή αυτή είναι χαμηλότερη από τη μέγιστη τάση εισόδου του αντιστροφέα που είναι 400 V . **Έτσι, η μέγιστη τάση άνευ φορτίου είναι εντάξει.**

Έλεγχος τάσης τυπικής λειτουργίας (σημείο MPPT):

Η τυπική τάση (όχι MPPT) ενός πλαισίου είναι 29.9 V (συνθήκες STC). Με τέσσερα φωτοβολταϊκά πλαίσια σε σειρά και μια ακτινοβολία που κυμαίνεται από 100 W/m^2 έως 1300 W/m^2 , η τάση κατά τη λειτουργία του φωτοβολταϊκού πεδίου κυμαίνεται από $29.9 \text{ V} \times 4 \times 0.8 = 95.68 \text{ V}$ έως $29.9 \times 4 \times 1.15 = 137.54 \text{ V}$. Δεδομένου ότι η περιοχή λειτουργίας του αντιστροφέα κυμαίνεται μεταξύ 147 V με 320 V , η τάση εξόδου του φωτοβολταϊκού πεδίου είναι πολύ χαμηλή για το μετατροπέα. **Έτσι, υπάρχει ένα πρόβλημα με την τάση λειτουργίας MPPT.**

Για να ολοκληρώσουμε αυτό το παράδειγμα της καλωδίωσης δύο παράλληλων σειρών από τέσσερα πλαίσια η κάθε μία και τη σύνδεσή τους σε ένα συγκεκριμένο αντιστροφέα SMA, αυτός ο συνδυασμός δεν είναι συμβατός. Η τάση είναι πολύ χαμηλή και το ρεύμα είναι πολύ υψηλό. Μια λύση θα ήταν η χρήση άλλου αντιστροφέα ή άλλου τύπου φωτοβολταϊκών πλαισίων, αλλά μια προφανής λύση θα ήταν να αλλάξει η καλωδίωση των δύο σειρών των τεσσάρων πλαισίων σε μια ενιαία σειρά των οκτώ πλαισίων στη σειρά, αυξάνοντας την τάση και μειώνοντας το ρεύμα εξόδου του φωτοβολταϊκού πεδίου. Ας ελέγξουμε εάν ο συνδυασμός αυτός είναι συμβατός.

Έλεγχος ισχύος:

Η ίδια όπως πριν. **Έτσι, η επιλογή είναι OK από άποψη ισχύος.**

Έλεγχος έντασης ρεύματος:

Η ένταση του ρεύματος της φωτοβολταϊκής εγκατάστασης στη χειρότερη περίπτωση είναι ίση με τη χαρακτηριστική ένταση (συνθήκες STC και μόνο μία σειρά) πολλαπλασιαζόμενη με 1.3 (ακτινοβολία 1300 W/m^2), που είναι $7.86 \text{ A} \times 1.3 = 10.21 \text{ A}$. Η είσοδος ρεύματος του αντιστροφέα είναι 12.6 A , η οποία είναι υψηλότερη από την τρέχουσα που παράγεται από το φωτοβολταϊκό πεδίο. **Έτσι, η ένταση του ρεύματος είναι εντάξει.**

Έλεγχος τάσης άνευ φορτίου:

Η τάση άνευ φορτίου ενός πλαισίου είναι 37.2 V (συνθήκες STC). Με μια ακτινοβολία των 1300 W/m^2 , αυτή η τάση χωρίς φορτίο είναι $37.2 \text{ V} \times 1.15 = 42.78 \text{ V}$. Γνωρίζοντας ότι η μέγιστη τάση του κυκλώματος δεν μπορεί να υπερβαίνει τα 1000 V DC , έτσι $1000 \text{ V} / 42.78 \text{ V} = 23.37$, έτσι ώστε να μπορούμε να έχουμε ένα μέγιστο 23 φωτοβολταϊκών πλαισίων σε σειρά. Στην περίπτωση μας, έχουμε μόνο οκτώ πλαίσια σε σειρά.

Με οκτώ φωτοβολταϊκά πλαίσια σε σειρά, το μέγιστο φορτίο όταν δεν υπάρχει τάση του φωτοβολταϊκού πεδίου είναι $37.2 \text{ V} \times 1.15 \times 8 = 342.24 \text{ V}$. Η τιμή αυτή είναι χαμηλότερη από τη μέγιστη τάση εισόδου του αντιστροφέα που είναι 400 V . **Έτσι, η μέγιστη τάση άνευ φορτίου τάση είναι εντάξει.**

Έλεγχος τάσης τυπικής λειτουργίας (σημείο MPPT):

Η τυπική τάση (όχι MPPT) ενός πλαισίου είναι 29.9 V (συνθήκες STC). Με οκτώ φωτοβολταϊκά πλαίσια σε σειρά και μια ακτινοβολία που κυμαίνεται από 100 W/m^2 έως 1300 W/m^2 , η τάση υπό λειτουργία του φωτοβολταϊκού πεδίου κυμαίνεται από $29.9 \text{ V} \times 8 \times 0.8 = 191.36 \text{ V}$ έως $29.9 \times 8 \times 1.15 = 275.08 \text{ V}$. Δεδομένου ότι η περιοχή λειτουργίας του αντιστροφέα κυμαίνεται μεταξύ 147 V με 320 V , η τάση εξόδου του φωτοβολταϊκού πεδίου είναι συμβατή με τον αντιστροφέα. **Έτσι, δεν υπάρχει κανένα πρόβλημα με την τάση λειτουργίας MPPT.**

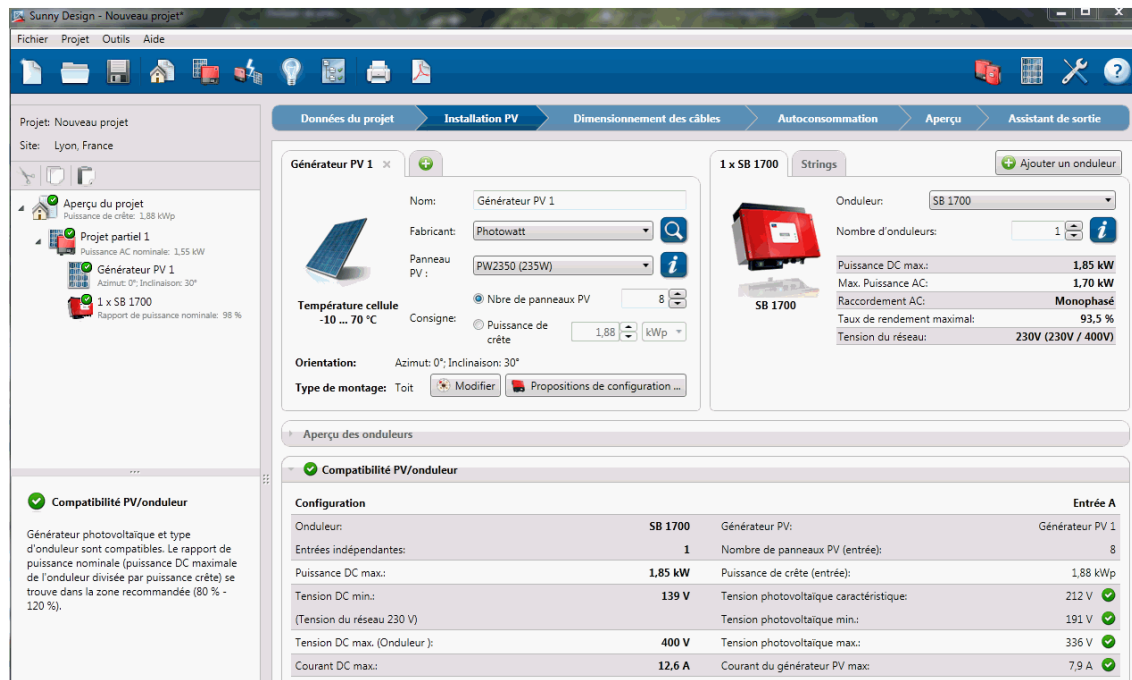
Ως εκ τούτου, με την καλωδίωση των οκτώ πλαισίων Photowatt 2350 - 235 σε σειρά στην είσοδο του αντιστροφέα SMA Sunny Boy 1700, η ρύθμιση είναι συμβατή.

Το πιο σημαντικό σημείο για έλεγχο είναι να μην υπερβεί το μέγιστο η τάση στην είσοδο του αντιστροφέα, επειδή αυτό μπορεί να είναι καταστροφικό για τον αντιστροφέα. Για τις άλλες περιπτώσεις, γενικά ο κίνδυνος είναι μόνο για να υπάρξει χαμηλότερη παραγωγή από την αναμενόμενη.

Σε αυτό το παράδειγμα, σε σύγκριση με το σημείο λειτουργίας υπό συνθήκες STC (ακτινοβολία 1000 W/m^2 , φάσμα AM1.5 και θερμοκρασία 25° C), η μέγιστη ένταση έχει ληφθεί με ένα συντελεστή 1.3, η μέγιστη τάση λαμβάνεται με ένα συντελεστή 1.15, και η ελάχιστη τάση με συντελεστή 0.8. Οι παράγοντες αυτοί είναι σχετικά αυθαίρετοι, αλλά απλοποιούν την μελέτη. Για διαφορετικές μελέτες, αυτές οι παραλλαγές υπολογίζονται με χρήση των συντελεστών θερμοκρασίας του φωτοβολταϊκού πλαισίου ενώ μεταβάλλεται η

θερμοκρασία (π.χ. από 0 ° C έως 70 ° C). Αυτή η μέθοδος δίνει αποτελέσματα μάλλον παρόμοια με τους παράγοντες που περιγράφονται προηγουμένως. Από την άλλη πλευρά, ένας έμπειρος μηχανικός θα πρέπει να είναι σε θέση να προσαρμόζει ρεαλιστικά αυτούς τους παράγοντες για διάφορες συνθήκες, όπως μια έρημο ή ορεινό τοπίο με ακραίες θερμοκρασίες και ακτινοβολίες.

Για τον έλεγχο της συμβατότητας μεταξύ του φωτοβολταϊκού πεδίου και του αντιστροφέα, οι κατασκευαστές αντιστροφέων συχνά παρέχουν δωρεάν λογισμικό.



Εικόνα 36 : Λογισμικό ελέγχου συμβατότητας φωτοβολταϊκού πεδίου και αντιστροφέα (Πηγή: SMA Sunny Design software)

Βιβλιογραφία

Weiss, Johnny. "Photovoltaics Design and Installation Manual." (2007): 52-54.

Balfour, John R., and Michael Shaw. *Advanced photovoltaic system design*. Jones & Bartlett Publishers, 2011.