



**ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΜΕΣΟΓΕΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

Σχεδιασμός και Λειτουργία Συστημάτων ΑΠΕ

ΔΙΑΛΕΞΗ 06: Φωτοβολταϊκά (Φ/Β) Συστήματα ΙΙ

Δρ. Τριανταφυλλιά Νικολάου

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΔΙΑΛΕΞΗΣ 06

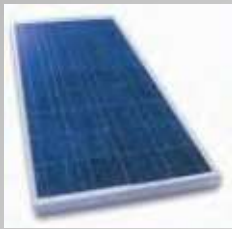
- Ορολογία
- A' Μέρος
- Κανόνες χωροθέτησης φ/β
- Τρόποι στήριξης φ/β πάνελ
- Βασικός εξοπλισμός για την εγκατάσταση και λειτουργία Φ/Β
- B' Μέρος
- Καμπύλες ρεύματος – τάσης φορτίων
- Ανιχνευτές σημείου μέγιστης ισχύος
- Ωριαίες χαρακτηριστικές I-V
- Φ/Β συστήματα διασυνδεδεμένα στο Δίκτυο

Εξοικείωση με την ορολογία

- **Φωτοβολταϊκό φαινόμενο:** ονομάζεται η άμεση μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρική τάση.
- **Φωτοβολταϊκό στοιχείο (PV cell):** Η ηλεκτρονική διάταξη που παράγει ηλεκτρική ενέργεια όταν δέχεται ακτινοβολία . Λέγεται ακόμα φωτοβολταϊκό κύτταρο ή φωτοβολταϊκή κυψέλη.



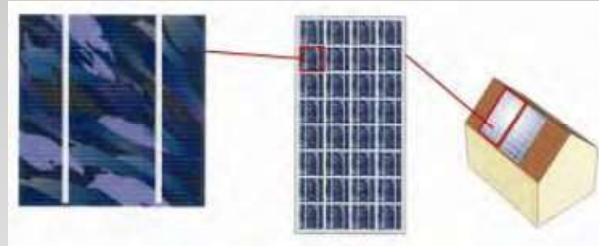
- **Φωτοβολταϊκό πλαίσιο (PV module):** Ένα σύνολο φωτοβολταϊκών στοιχείων που είναι ηλεκτρονικά συνδεδεμένα. Αποτελεί τη βασική δομική μονάδα της φωτοβολταϊκής γεννήτριας.



- **Φωτοβολταϊκό πανέλο (PV panel):** Ένα ή περισσότερα φωτοβολταϊκά πλαίσια, που έχουν προκατασκευαστεί και συναρμολογηθεί σε ενιαία κατασκευή, έτοιμη για να εγκατασταθεί σε φωτοβολταϊκή εγκατάσταση.



- **Φωτοβολταϊκή συστοιχία (PV array):** Μια ομάδα από φωτοβολταϊκά πλαίσια ή πανέλα με ηλεκτρική αλληλοσύνδεση, τοποθετημένα συνήθως σε κοινή κατασκευή στήριξης.



kW (κιλοβάτ): μονάδα ισχύος [1 kW = 1.000 Watt, 1 MW (μεγαβάτ) = 1.000 kW]

kWp (κιλοβάτ πικ-peak): μονάδα ονομαστικής ισχύος του φωτοβολταϊκού (ίδιο με το kW)

kWh (κιλοβατώρα): μονάδα ενέργειας

• Α' ΜΕΡΟΣ

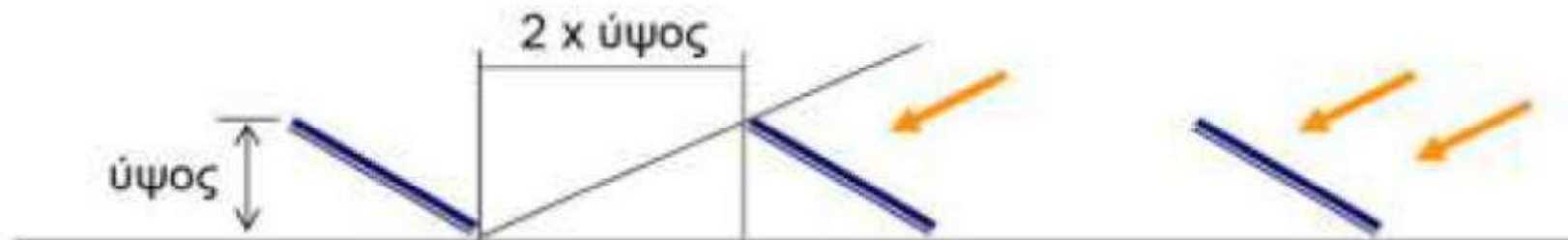


Πρακτικοί κανόνες χωροθέτησης πάνελ







- Για την μέγιστη απολαβή ενέργειας, τα πάνελ είναι απαραίτητο να τοποθετούνται με νότιο προσανατολισμό με κλίση η οποία εξαρτάται από το γεωγραφικό πλάτος της περιοχής.
- Για τα ελληνικά δεδομένα, μία τυπική μέση χαρακτηριστική κλίση είναι αυτή των **30 μοιρών.**
- Ωστόσο όπως θα αναλυθεί περαιτέρω, είναι δυνατόν να αυξηθεί η ενεργειακή απολαβή αναγκάζοντας τα φωτοβολταϊκά πάνελ να ακολουθούν καθημερινώς την πορεία του ήλιου από ανατολή προς δύση με μεταβλητή κλίση.
- Πρακτικός κανόνας τοποθέτησης των πάνελ:
 - τοποθέτηση σε νότιο προσανατολισμό
 - με περίπου 30 μοίρες κλίση ως προς την οριζόντιο.

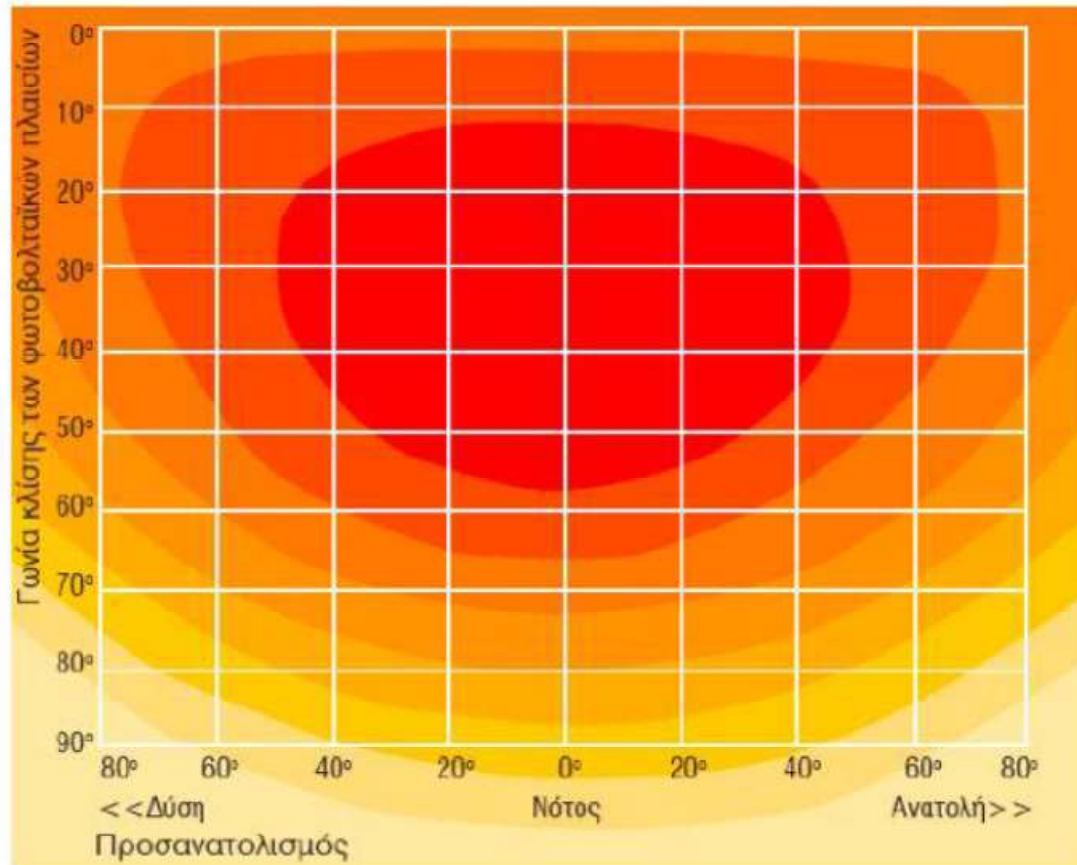
Σκίαση

Αναφορικά με τη σκίαση, θα πρέπει να λαμβάνεται μέριμνα ώστε η εγκατάσταση να βρίσκεται σε χώρο στον οποίο απουσιάζουν εμπόδια. Επιπλέον, για την αποφυγή σκιάσεων σειρών φωτοβολταϊκών πάνελ μεταξύ τους, ένας πρακτικός κανόνας τοποθέτησης είναι ότι η απόσταση μεταξύ διαδοχικών σειρών θα πρέπει να είναι τουλάχιστον διπλάσια του ύψους της εγκατάστασης, όπως φαίνεται στο παρακάτω Σχήμα:

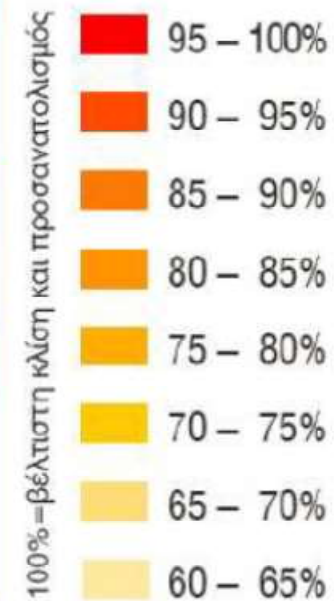


Ο παρακάτω πίνακας μας δείχνει τις απώλειες από σκιάσεις

Απώλειες από σκίαση			
			
Τρόπος σκίασης	Σκίαση (%)	Ενδεικτική απώλεια ισχύος (1 string x 9 modules)	Ενδεικτική απώλεια ισχύος (3 string x 3 modules)
	0,15%	-3,7%	-1,7%
	2,6%	-16,7%	-7%
	13,9%	-22,2%	-36,8%
	11,1%	-36,5%	-30,5%
	12,5%	-18,3%	-17%



Απόδοση ανάλογα με την κλίση και τον προσανατολισμό



2. Τα φωτοβολταϊκά έχουν τη μέγιστη απόδοση όταν έχουν νότιο προσανατολισμό. Αποκλίσεις από το Νότο είναι επιτρεπτές, μειώνουν όμως την απόδοση.

3. Η σωστή κλίση του φωτοβολταϊκού σε σχέση με το οριζόντιο επίπεδο. Συνήθως επιλέγεται μια κλίση που να δίνει τα καλύτερα αποτελέσματα καθ' όλη τη διάρκεια του έτους. Στην Ελλάδα, η βέλτιστη κλίση είναι γύρω στις 25°-30°. Τη σωστή κλίση θα τη βρεί ο τεχνικός που θα κάνει την εγκατάσταση.

Ενδεικτική απόδοση ανάλογα με τον προσανατολισμό και την κλίση



Κλίση ως προς το οριζόντιο επίπεδο	Προσανατολισμός		
	Νότιος	Νοτιοανατολικός Νοτιοδυτικός	Ανατολικός Δυτικός
0° 	90%	90%	90%
15° 	98%	95%	88%
30° 	100%	95%	85%
90° 	60%	60%	50%

Τρόποι στήριξης Φ/Β πάνελ

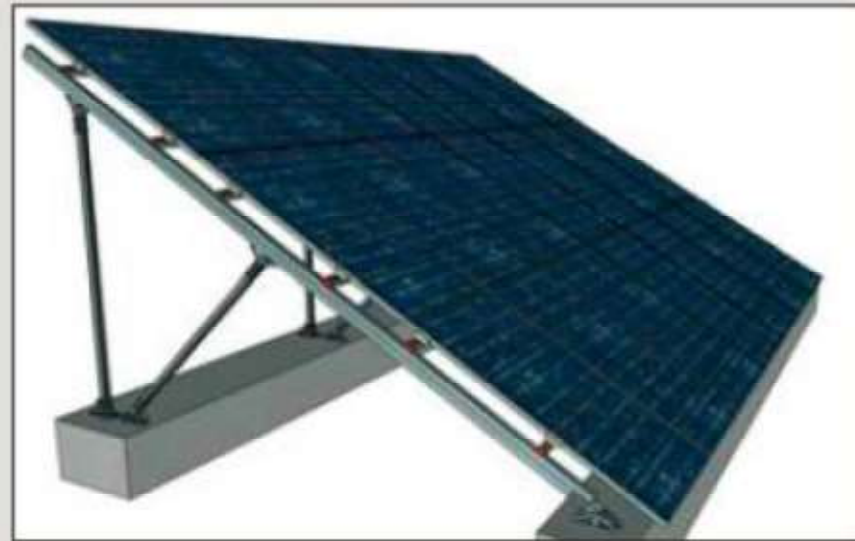
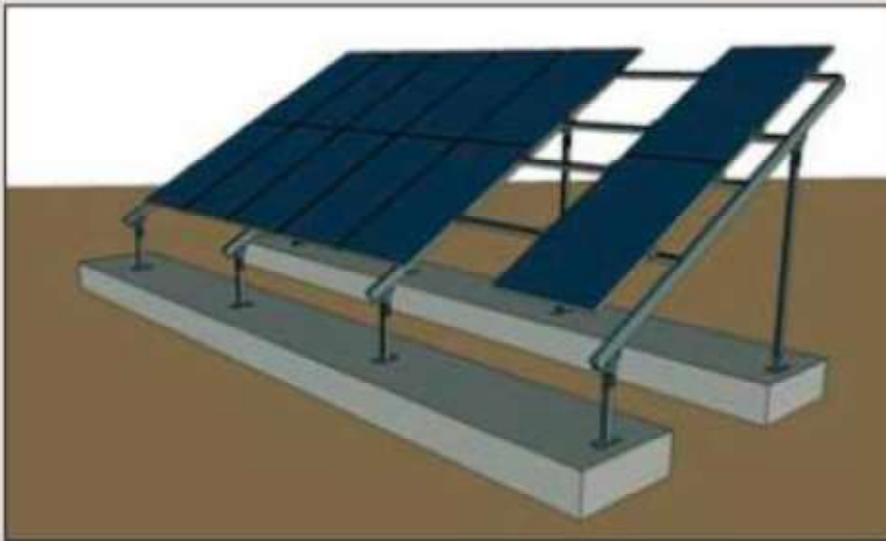
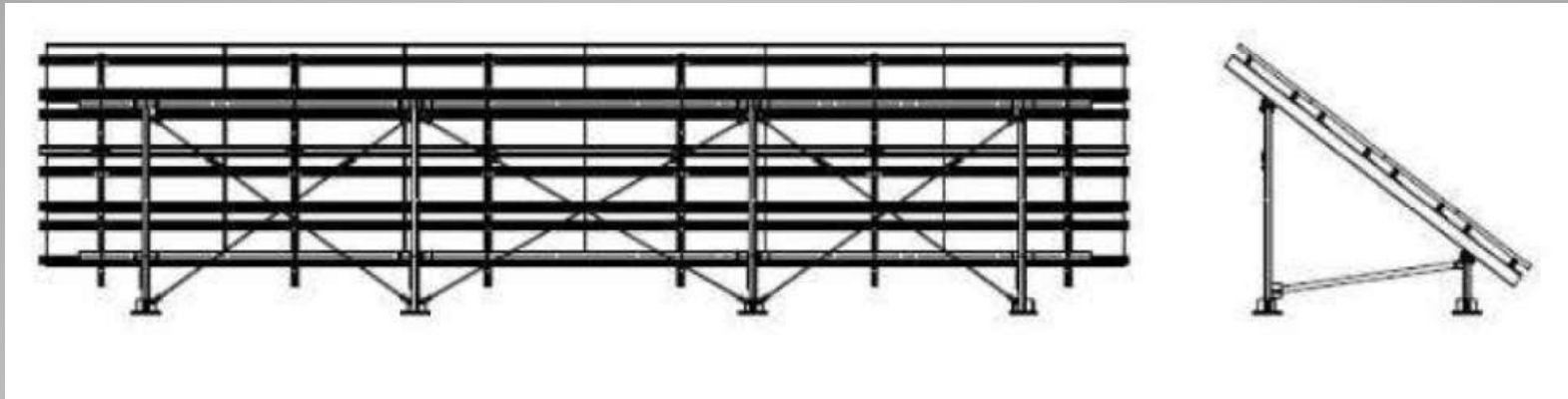
Τα φωτοβολταϊκά (Φ/Β) πάνελ συνήθως εδράζονται επί εδάφους με δύο τρόπους:

1. Σε βάσεις σταθερής κλίσης ως προς την οριζόντιο, συνήθως αναφερόμενες ως «σταθερές βάσεις»
2. Σε βάσεις επί διατάξεων παρακολούθησης της πορείας του ήλιου, αναφερόμενες συνήθως ως συστήματα ιχνηλάτησης της πορείας του ήλιου, ή ηλιοπαρακολουθητές ή τράκερς (trackers).

Σταθερές βάσεις

- Οι σταθερές βάσεις αποτελούν τον απλούστερο και οικονομικότερο τρόπο έδρασης Φ/Β πάνελ.
- Η αρχή σχεδιασμού τους είναι απλή: οι ακτίνες του ήλιου θα πρέπει να προσπίπτουν κάθετα στην επιφάνεια των πάνελ κατά το μεσημέρι. Έτσι οι βάσεις κατασκευάζονται ώστε να επιτρέπουν την τοποθέτηση των πάνελ σε σταθερή κλίση, περί τις 30 μοίρες. Η κλίση αυτή θεωρείται ως μία ικανοποιητική μέση τιμή για τα Ελληνικά δεδομένα. Χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι η ιδανική κλίση είναι αρκετά μικρότερη κατά τους καλοκαιρινούς μήνες και αρκετά μεγαλύτερη κατά τους χειμερινούς μήνες.
- Οι σταθερές βάσεις κατασκευάζονται συνήθως από **αλουμίνιο ή ανοξείδωτο χάλυβα** (χάλυβα γαλβανισμένο εν θερμώ). Συνήθως κατασκευάζονται μετά από **τεχνική μελέτη ώστε να διαπιστωθεί η στατική τους επάρκεια** και η αντοχή τους σε ανεμοπιέσεις ή φορτία χιονιού.

Τυπική βάση στήριξης



Σκυροδέτηση σταθερών βάσεων σε δοκάρια από μπετόν

Σκυροδέτηση σταθερών βάσεων σε πέλμα από μπετόν



Παράδειγμα εδαφόμνηξη βάσεων



Σταθερές βάσεις σε οροφή κτιρίου





Σταθερές βάσεις για σκεπές



Συστήματα ιχνηλάτησης της πορείας του ήλιου

- Η ιχνηλάτηση της πορείας του ήλιου αποτελεί μία τεχνική η οποία στοχεύει στην μεγιστοποίηση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας μέσω της προσπάθειας κίνησης των βάσεων των πάνελ κατά τη διάρκεια της ημέρας ώστε να επιτυγχάνεται συνεχώς η κάθετη πρόσπτωση της ηλιακής ακτινοβολίας.
- Τα συστήματα ιχνηλάτησης της πορείας του ήλιου, ή ηλιοπαρακολουθητές ή τράκερ (tracker) χαρακτηρίζονται από μεγαλύτερη πολυπλοκότητα σε σχέση με τα συστήματα βάσεων, παρέχοντας ωστόσο αυξημένες αποδόσεις, κατά μέσο όρο της τάξης του 30%. Χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες:

1. Συστήματα μονού άξονα (single axis): πρόκειται για συστήματα στα οποία λαμβάνει χώρα κίνηση των πάνελ σε έναν άξονα, αυτόν της Ανατολής-Δύσης κατά τη διάρκεια μίας μέρας. Τυπικά, τα συστήματα αυτά επιτυγχάνουν αύξηση της παραγωγής κατά 20-25% σε σχέση με τα συστήματα σταθερών βάσεων.

2. Συστήματα διπλού άξονα (dual axis): πρόκειται για συστήματα στα οποία είναι επιπλέον δυνατή η ρύθμιση της κλίσης των πάνελ ως προς τον οριζόντα. Η επιπλέον αυτή δυνατότητα παρέχει αυξημένη απόδοση κατά τυπικά 25-40% σε σχέση με τα συστήματα σταθερών βάσεων.

Η κίνηση στα συστήματα αυτά επιτυγχάνεται με συνήθως **με ηλεκτρο-μηχανικά ή ηλεκτρο-υδραυλικά μέσα**. Κατά συνέπεια, όλα τα συστήματα ιχνηλάτησης χαρακτηρίζονται από ιδιοκαταναλώσεις, οι οποίες είναι μικρές καθώς η κίνηση δεν είναι συνεχής αλλά περιοδική, τυπικά μία κίνηση ανά 10 λεπτά. Ωστόσο, είναι σκόπιμο η ενέργεια αυτή να προέρχεται από το δίκτυο της ΔΕΗ και όχι από τα Φ/Β πάνελ λόγω της διαφοράς τιμής.

Η ανίχνευση της πορείας του ήλιου γίνεται συνήθως με δύο τρόπους:

- 1) **με ηλιακούς αισθητήρες**, οι οποίοι αντιλαμβάνονται τη θέση του ήλιου.
- 2) **μέσω λογισμικού**, από αστρονομικά δεδομένα, βάσει των οποίων υπολογίζεται η θέση και πορεία του ήλιου για κάθε μέρα του έτους, ανάλογα με τις γεωγραφικές συντεταγμένες της περιοχής.

Λόγω της ανάγκης κίνησης σημαντικού αριθμού πάνελ, τα συστήματα ιχνηλάτησης χαρακτηρίζονται από επίπεδες επιφάνειες τοποθετημένες σε μία κάθετη ως προς το έδαφος βάση στήριξης. Στη βάση στήριξης τοποθετείται συνήθως και ο αντιστροφέας (inverter) ή αν αυτό δεν είναι δυνατόν, γίνεται η αναχώρηση καλωδίων προς ένα κεντρικό σημείο συλλογής όπου βρίσκονται και οι αντιστροφείς.

Το γεγονός αυτό οδηγεί σε κατασκευές σημαντικού ύψους το οποίο κυμαίνεται από 2,5 έως 10-12 μέτρα, αναλόγως της κατασκευής. Το ύψος της κατασκευής συνήθως αυξάνει με την αύξηση της επιφάνειας των πάνελ. Σήμερα συστήματα ιχνηλάτησης κατασκευάζονται για να φέρουν ισχύ πάνελ που κυμαίνεται **από 2-3kWp έως περίπου 33kWp**.

Το σημαντικό μέγεθος της κατασκευής καθιστά πολυπλοκότερη και την έδραση. Συνήθως οι βάσεις στήριξης εδράζονται σε οπλισμένο σκυρόδεμα.

Το σημαντικό μέγεθος των συστημάτων αυτών (και κυρίως το ύψος τους) **αυξάνει τις απαιτήσεις χώρου σε σχέση με ένα σύστημα σταθερών βάσεων, συνήθως κατά 1,5-2 φορές,** λόγω των μεγαλύτερων αποστάσεων μεταξύ τους για την αποφυγή σκιάσεων. Επιπλέον, το μέγεθος των τράκερ τους καθιστά περισσότερο ευάλωτους (σε σχέση με συστήματα σταθερών βάσεων) σε ανεμοπιέσεις. Η συνηθέστερη τεχνική που χρησιμοποιείται είναι να χρησιμοποιείται ένα ανεμόμετρο και όταν η ταχύτητα του ανέμου ξεπεράσει ένα όριο για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, το σύστημα κίνησης να λαμβάνει εντολή να θέτει την επιφάνεια των πάνελ σχεδόν παράλληλα με το έδαφος, μία διαδικασία γνωστή ως «οριζοντίωση», για λόγους προστασίας. Η ταχύτητα αυτή κυμαίνεται ανάλογα με τον κατασκευαστή, αλλά μπορεί να είναι και χαμηλή και να αντιστοιχεί σε άνεμο έντασης 5-6 Bf. Κατά συνέπεια, κάθε μελετητής μηχανικός θα πρέπει να εκτιμά τα ανεμολογικά δεδομένα της περιοχής εγκατάστασης προτού προχωρήσει στην επιλογή ενός συγκεκριμένου τύπου τέτοιου συστήματος.

Πέραν των παραπάνω, κάθε μελετητής μηχανικός και εν δυνάμει ιδιοκτήτης ενός Φ/Β πάρκου θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη του τα εξής πρακτικά ζητήματα που αφορούν την τοποθέτηση των συστημάτων ιχνηλάτησης:

1. Όλα τα συστήματα ιχνηλάτησης χρήζουν **συντήρησης** λόγω της ύπαρξης ήλεκτρο-μηχανικών ή ήλεκτρο-υδραυλικών μέσων κίνησης. Σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να καταστεί απαραίτητος ο επαναπρογραμματισμός του λογισμικού του συστήματος κίνησης, λόγω απώλειας δεδομένων.

2. Λόγω του σημαντικού τους ύψους, **είναι απαραίτητη η έκδοση οικοδομικής άδειας και όχι έγκρισης εργασιών μικρής κλίμακας**, όπως ισχύει για τα συστήματα σταθερών βάσεων. Το γεγονός αυτό αυξάνει το κόστος εγκατάστασης και επηρεάζει τον χρόνο υλοποίησης της κατασκευής του σταθμού.

3. Επιπλέον λόγω του σημαντικού ύψους, η εκτέλεση διάφορων εργασιών γίνεται δυσκολότερη σε σχέση με τα συστήματα σταθερών βάσεων. Παραδείγματα τέτοιων εργασιών αποτελούν η αντικατάσταση ενός πάνελ που έχει υποστεί φθορά ή ο καθαρισμός πάνελ.

Παρακάτω παρουσιάζονται ενδεικτικά κάποιες διατάξεις ιχνηλάτησης της πορείας του ήλιου.



Διατάξεις ιχνηλάτησης της πορείας του ήλιου μονού άξονα



Διατάξεις ιχνηλάτησης της πορείας του ήλιου διπλού άξονα

Βασικός εξοπλισμός για την εγκατάσταση και λειτουργία Φ/Β

- **Φωτοβολταϊκή γεννήτρια (PV generator):**

Το τμήμα μιας φωτοβολταϊκής εγκατάστασης που περιέχει φωτοβολταϊκά στοιχεία και παράγει συνεχές ρεύμα.

- **Αντιστροφέας ή μετατροπέας (inverter):**

Ο inverter (αντιστροφέας ή μετατροπέας στα ελληνικά) είναι μία ηλεκτρονική συσκευή που μετατρέπει το συνεχές ρεύμα που παράγουν τα φωτοβολταϊκά σε εναλλασσόμενο αντίστοιχο με αυτό του δικτύου. Οι αντιστροφείς μπορεί να είναι μικροί (string inverters) ή κεντρικοί, ανάλογα με τις απαιτήσεις του συστήματος. Λειτουργεί αυτόνομα και η απόδοσή του εξαρτάται από το φορτίο, δίνοντας μία μέγιστη απόδοση της τάξης του 95,6%.



- **Ρυθμιστής φόρτισης (charge controller):**

Συσκευή που χρησιμοποιείται σε αυτόνομα συστήματα για να ρυθμίζει τη φόρτιση των συσσωρευτών.



- **Δίοδος**

Η δίοδος τοποθετείται στη σειριακή σύνδεση των τριών παράλληλα συνδεδεμένων πλαισίων με σκοπό την αποφυγή φαινομένων αναστροφής ρεύματος.



- **Σύστημα Ελέγχου**

Τα connection boxes συνδέονται με οπτική ίνα με το κεντρικό σύστημα ENERGRID, το οποίο φιλοξενείται στο κέντρο ελέγχου. Τα δεδομένα τα οποία μεταφέρονται είναι ισχύος, έντασης, τάσης και συχνότητας.

- **Διακόπτες ισχύος**

Χρησιμοποιείται ένα πεδίο μέσης τάσης, στο οποίο περιέχεται ένας αυτόματος διακόπτης ισχύος αερίου SF6, ο οποίος έχει την ικανότητα να προστατεύει το σύστημα από υπερένταση, υποένταση, υπέρταση και υπόταση καθώς επίσης και κάθε ανωμαλία της συχνότητας.



- **Μετρητές**

Χρησιμοποιούνται κατάλληλα πεδία μέσης τάσης, τα οποία περιέχουν μετασχηματιστές έντασης και τάσης κατάλληλα συνδεδεμένα. Οι ενδείξεις των παραπάνω μετασχηματιστών αποτελούν τις μετρήσεις και καταγράφονται σε ένα σύστημα ENERGRID. Το ENERGRID DATA επιτρέπει τη μέτρηση όλων των ενεργειακών ροών από την ηλιακή φωτοβολταϊκή γεννήτρια. Επίσης σημαντικός είναι ο ρόλος του στην εποπτεία, μέσω του συστήματος αποστολής ειδοποιήσεων εξ αποστάσεως (ειδοποιήσεις των αντιστροφών και ειδοποιήσεις επιδόσεων). Με τον πρακτικό σχεδιασμό του, το ENERGRID DATA παρέχει πρόσβαση σε όλες τις πληροφορίες από τη φορητή ψηφιακή οθόνη LCD, από οποιονδήποτε Η/Υ.



- **Καλώδια - συνδέσεις**

Τα καλώδια τα οποία οδεύουν μέσα στο Φ/Π είναι κατά κύριο λόγο καλώδια χαμηλής τάσης, κατάλληλα για υπόγεια όδευση. Οι διατομές τους διαφέρουν ανάλογα με την ένταση του ρεύματος από την οποία διαρρέονται.



Αντιστροφείς (inverters)

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

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

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

Τονίζεται ότι η ΔΕΗ επιβάλλει τη σύνδεση των αντιστροφέων σε τριφασικό σύστημα για εγκαταστάσεις άνω των 5kW, ενώ εγκαταστάσεις άνω των 100kW συνδέονται υποχρεωτικά στο δίκτυο Μέσης Τάσης (ΜΤ) της ΔΕΗ. 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 :

1. Αντιστροφείς με μετασχηματιστή (inverters with transformer)
2. Αντιστροφείς χωρίς μετασχηματιστή (transformerless (TL) inverters)

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

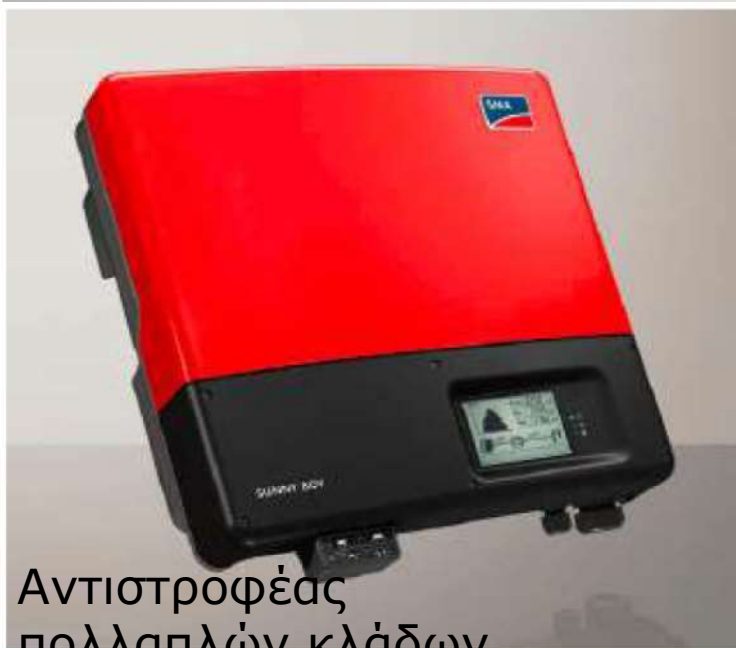
1. Κεντρικοί αντιστροφείς (central inverters)
2. Αντιστροφείς κλάδων (string inverters)
3. Αντιστροφείς πολλαπλών κλάδων (multi-string inverters)
4. Αντιστροφείς με ενσωμάτωση σε Φ/Β πάνελ (module integrated inverters).



Κεντρικός
αντιστροφέας



Αντιστροφέας κλάδων



Αντιστροφέας
πολλαπλών κλάδων



Αντιστροφέας με
ενσωμάτωση στο φ/β
πάνελ

Γείωση αντιστροφέα

Η γείωση (άμεση ή ουδέτερη, ανάλογο με την περιοχή) αποσκοπεί κυρίως στην προστασία **των εγκαταστάσεων παραγωγής και την ασφάλεια των προσώπων και θα πρέπει να γίνονται σύμφωνα με κάποιους κανονισμούς.** Τονίζεται ότι η γείωση φωτοβολταϊκού εξοπλισμού μπορεί να επιφέρει σοβαρά προβλήματα στην περίπτωση που η μόνωση των πλαισίων δεν είναι κατάλληλης τάξης. Από την άλλη πλευρά, μολονότι η χρήση αγείωτων φωτοβολταϊκών πλαισίων περιορίζει τον παραπάνω κίνδυνο, αυξάνει τον κίνδυνο καταστροφής των πλαισίων σε ένα ενδεχόμενο κεραυνικό πλήγμα. Σε ορισμένες περιπτώσεις η γείωση των πλαισίων είναι επιβεβλημένη από τον κατασκευαστή.

Καλωδιώσεις.

Η ηλεκτρολογική εγκατάσταση ενός φωτοβολταϊκού συστήματος απαιτεί τη χρήση καλωδίων DC και AC. DC καλώδια χρησιμοποιούνται για τη διασύνδεση των πάνελ μεταξύ τους και για τη σύνδεση των κλάδων/στοιχειοσειρών (string) με τις εισόδους του αντιστροφέα ενώ AC καλώδια ισχύος, συμβατικού τύπου, χρησιμοποιούνται για τη σύνδεση των αντιστροφέων σε τριφασικό σύστημα και την τελική σύνδεση με τη ΔΕΗ.

Επιπλέον, κατά τη φάση κατασκευής του έργου, θα πρέπει να λαμβάνεται μέριμνα για την προσεκτική όδευση των καλωδίων κατά τις συνήθεις πρακτικές της ηλεκτροτεχνίας, λαμβάνοντας υπόψη παράγοντες όπως η γειτνίαση των καλωδίων, η χρήση σωλήνων και η ανάγκη προστασίας από τα τρωκτικά. Η καλή σχεδίαση και η σωστή επιλογή των υλικών καλωδίωσης είναι απαραίτητη για την ασφάλεια έναντι ηλεκτροπληξίας όχι μόνο του εγκαταστάτη αλλά και όλων των προσώπων που έρχονται σε επαφή με το σύστημα.

Ιδιαίτερη μέριμνα πρέπει να λαμβάνεται για τη σωστή διασύνδεση των καλωδίων τόσο μεταξύ των πάνελ (δηλαδή από το (+) ενός πάνελ στο (-) του επόμενου κτλ) όσο και μεταξύ των κλάδων των πάνελ και των εισόδων του αντιστροφέα. Σε περίπτωση χαλαρής σύνδεσης είναι πιθανόν να εμφανιστεί τόξο αυξάνοντας τον κίνδυνο πυρκαγιάς. Επίσης, τέτοιος κίνδυνος μπορεί να εμφανιστεί λόγω υπερθέρμανσης των καλωδίων σε περίπτωση βραχυκυκλώματος.

Επιπλέον, η ύπαρξη υψηλής σχετικά DC τάσης επιβάλλει ώστε η σύνδεση των καλωδίων να πραγματοποιείται από εξειδικευμένο προσωπικό με τη δέουσα προσοχή.

Έτσι οι παραπάνω απαιτήσεις οδήγησαν στην επικράτηση στην αγορά λύσεων τύπου "plug and play" με συνδέσμους καλωδίων που εξασφαλίζουν την απουσία επαφής με γυμνό αγωγό και τη μικρή ωμική αντίσταση (της τάξης των $5\text{m}\Omega$ και μικρότερη).

Παρακάτω παρουσιάζονται παραδείγματα συνδέσμων καλωδίων:



Σύνδεσμος φωτοβολταϊκών καλωδίων 2,5-4mm², εύκολη συναρμολόγηση



Σετ συνδέσμων MC4 τύπου Y

Μέτρα περιορισμού του κινδύνου ηλεκτροπληξίας κατά την εγκατάσταση ενός φωτοβολταϊκού συστήματος

Κατά τη σύνδεση των φωτοβολταϊκών πλαισίων, ο εγκαταστάτης έρχεται σε επαφή με τους ακροδέκτες των πλαισίων στους οποίους εμφανίζεται συνεχής τάση.

Συνήθως η τιμή αυτή δεν υπερβαίνει τα όρια ασφαλείας συνεχούς επαφής που κυμαίνεται από 17-100V. Όμως συχνά έχουμε αύξηση των ορίων ασφαλείας λόγω των ηλεκτρονικών αντιστροφών που απαιτούν την εν σειρά σύνδεση περισσότερων των δύο πλαισίων.

Άρα η εγκατάσταση του συστήματος πρέπει να γίνεται από εξειδικευμένο προσωπικό και σύμφωνα με τα ακόλουθα μέτρα:

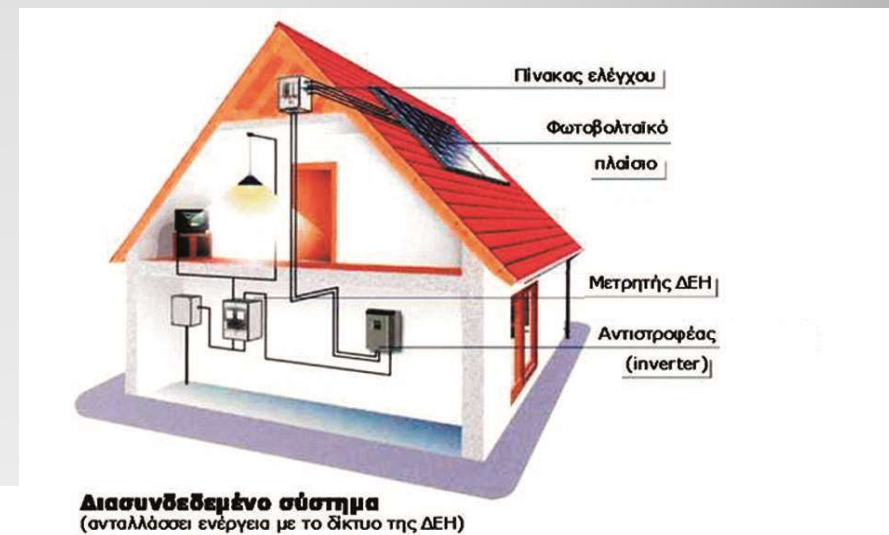
- **Σημαντικό μέρος της καλωδίωσης μπορεί να γίνει πριν την τοποθέτηση των φωτοβολταϊκών πλαισίων.**
- **Εγκατάσταση με μηδενική ηλιοφάνεια:** Για την αποφυγή εμφάνισης υψηλών τάσεων η εγκατάσταση του συστήματος μπορεί να γίνει είτε καλύπτοντας πλήρως τα πλαίσια είτε κατά τις νυχτερινές ώρες όπου αυτό είναι δυνατό. Επίσης συνιστάται χρήση ειδικών γαντιών και μονωμένων εργαλείων.
- **Ειδική σήμανση που να προειδοποιεί για τον κίνδυνο ηλεκτροπληξία.**
- **Η χρήση καλωδίων και κιβωτίων σύνδεσης διπλής μόνωσης ελαχιστοποιεί τον κίνδυνο ηλεκτροπληξίας.**
- **Επιλογή φωτοβολταϊκών πλαισίων για προεγκατεστημένο σύστημα σύνδεσης:** Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια που διαθέτουν μονωμένους ακροδέκτες σύνδεσης ελαχιστοποιούν την πιθανότητα έκθεσης του εγκαταστάτη σε επικίνδυνες τιμές τάσης.
- **Αποφυγή γείωσης της πλευράς Σ.Ρ κατά την εγκατάσταση:**
Ένα σύστημα στο οποίο κανένας από τους δύο πόλους δεν είναι γειωμένος εγκυμονεί λιγότερους κινδύνους(συγκριτικά με ένα γειωμένο σύστημα) επειδή ελαχιστοποιείται ο αριθμός πιθανών διαδρομών για το ρεύμα ηλεκτροπληξίας.

• Β' ΜΕΡΟΣ



Υπάρχουν δύο τρόποι να χρησιμοποιήσει κανείς τα φωτοβολταϊκά. Σε συνεργασία με το δίκτυο της ΔΕΗ ή ανεξάρτητα από αυτό.

1. Ένα σύστημα παραγωγής ηλεκτρισμού με φωτοβολταϊκά μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε συνδυασμό με το δίκτυο της ΔΕΗ (διασυνδεδεμένο σύστημα). Στην περίπτωση αυτή, πουλάει κανείς το ηλιακό ρεύμα στο δίκτυο έναντι μιας ορισμένης από το νόμο τιμής και συνεχίζει να αγοράζει ρεύμα από τη ΔΕΗ όπως και σήμερα για να καλύψει τυχόν ανάγκες του. Έχει δηλαδή ένα διπλό μετρητή για την καταμέτρηση της εισερχόμενης και εξερχόμενης ενέργειας.



2. Εναλλακτικά, μια φωτοβολταϊκή εγκατάσταση μπορεί να αποτελεί ένα **αυτόνομο σύστημα** που να καλύπτει το σύνολο των ενεργειακών αναγκών ενός κτιρίου ή μιας επαγγελματικής χρήσης. Για τη συνεχή εξυπηρέτηση του καταναλωτή, η εγκατάσταση θα πρέπει να περιλαμβάνει και μια μονάδα αποθήκευσης (μπαταρίες) και διαχείρισης της ενέργειας.



- Στο Μάθημα θα γίνει ανάλυση στη σχεδίαση των φ/β συστημάτων στις πιο συνηθισμένες τους διαμορφώσεις:
- 1. Συστήματα που παρέχουν ισχύ απευθείας στο ηλεκτρικό δίκτυο (Διάλεξη 06)
- 2. Αυτόνομα συστήματα με μπαταρίες, ίσως και με εφεδρική γεννήτρια (Διάλεξη 07)

Καμπύλες Ρεύματος - Τάσης των Φορτίων

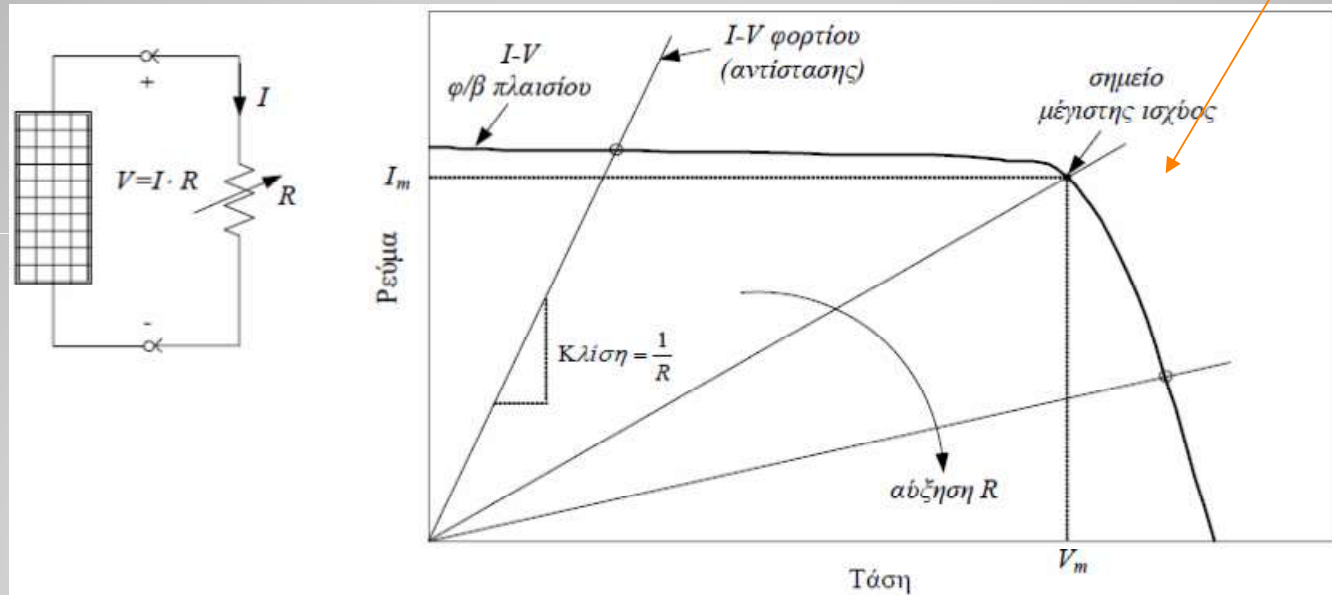
- Ενώ η χαρακτηριστική I-V ενός φ/β στοιχείου, πλαισίου, ή συλλέκτη προσδιορίζει τους συνδυασμούς τάσης και ρεύματος που είναι επιτρεπτοί κάτω από τις ισχύουσες συνθήκες περιβάλλοντος, από μόνη της η χαρακτηριστική αυτή δεν μας λέει τίποτα για το σημείο της καμπύλης πάνω στο οποίο θα λειτουργεί το φ/β σύστημα.
- Ο προσδιορισμός του σημείου λειτουργίας είναι συνάρτηση του φορτίου που τροφοδοτεί το φ/β σύστημα. Όπως τα φ/β έχουν χαρακτηριστική I-V, έτσι και τα φορτία έχουν και αυτά χαρακτηριστική I-V.
- Όταν η χαρακτηριστική I-V για το φορτίο σχεδιάζεται στο ίδιο γράφημα με τη χαρακτηριστική I-V για τα φ/β, τότε η τομή αυτών των δύο καμπυλών δίνει το σημείο λειτουργίας του φ/β συστήματος.

Ωμική Χαρακτηριστική Ρεύματος-Τάσης

- Ας θεωρηθεί το καθαρά ωμικό φορτίο του Σχήματος

$$V = I \cdot R \quad \text{ή} \quad I = \left(\frac{1}{R} \right) \cdot V$$

$$R_m = \frac{V_m}{I_m}$$



Κάτω από τις ειδικές συνθήκες στις οποίες δοκιμάζονται τα φ/β πλαίσια, το σημείο μέγιστης ισχύος αντιστοιχεί στην ονομαστική τάση V_R και στο ονομαστικό ρεύμα I_R του φ/β πλαισίου. Αυτό σημαίνει ότι η βέλτιστη τιμή αντίστασης, για μέγιστη μεταφορά ισχύος, θα είναι V_R/I_R κάτω από ηλιακή ένταση ενός ήλιου, θερμοκρασία 25°C και λόγο μάζας αέρα 1.5 (AM1.5).

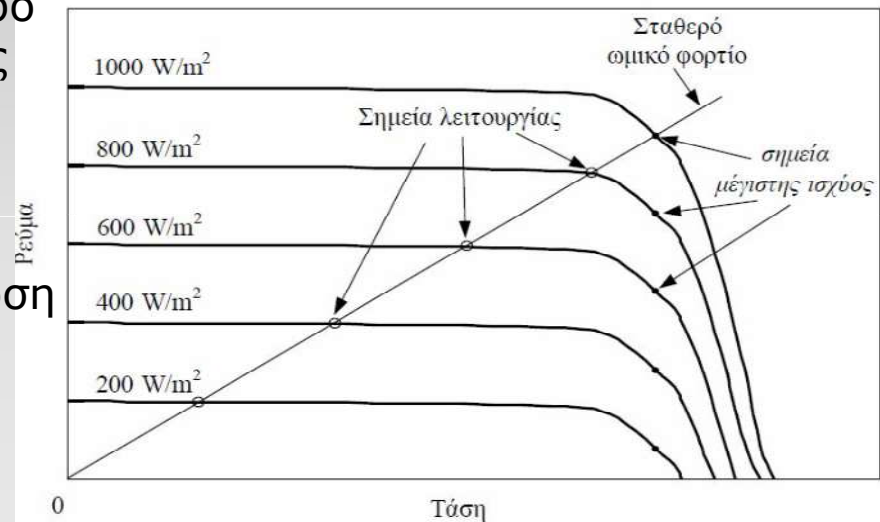
Ωμική Χαρακτηριστική Ρεύματος-Τάσης

- Ένα φ/β πλαίσιο παρέχει ισχύ σε ένα ωμικό φορτίο. Καθώς αλλάζει η αντίσταση του φορτίου, το σημείο λειτουργίας μετακινείται πάνω στην καμπύλη I-V του φ/β πλαισίου.

Η απόδοση ενός φ/β πλαισίου με σταθερό ωμικό φορτίο σχεδιασμένο για συνθήκες ενός ήλιου θα μειώνεται με μείωση της ηλιακής έντασης.

Τα σημεία μέγιστης ισχύος δείχνουν τα λειτουργικά σημεία με τη μέγιστη απόδοση του φ/β πλαισίου.

Το Σχήμα δείχνει ότι με σταθερό ωμικό φορτίο, το σημείο λειτουργίας απομακρύνεται από το σημείο μέγιστης ισχύος καθώς μειώνεται η ηλιακή ένταση, οπότε το φ/β πλαίσιο γίνεται ολοένα και λιγότερο αποδοτικό



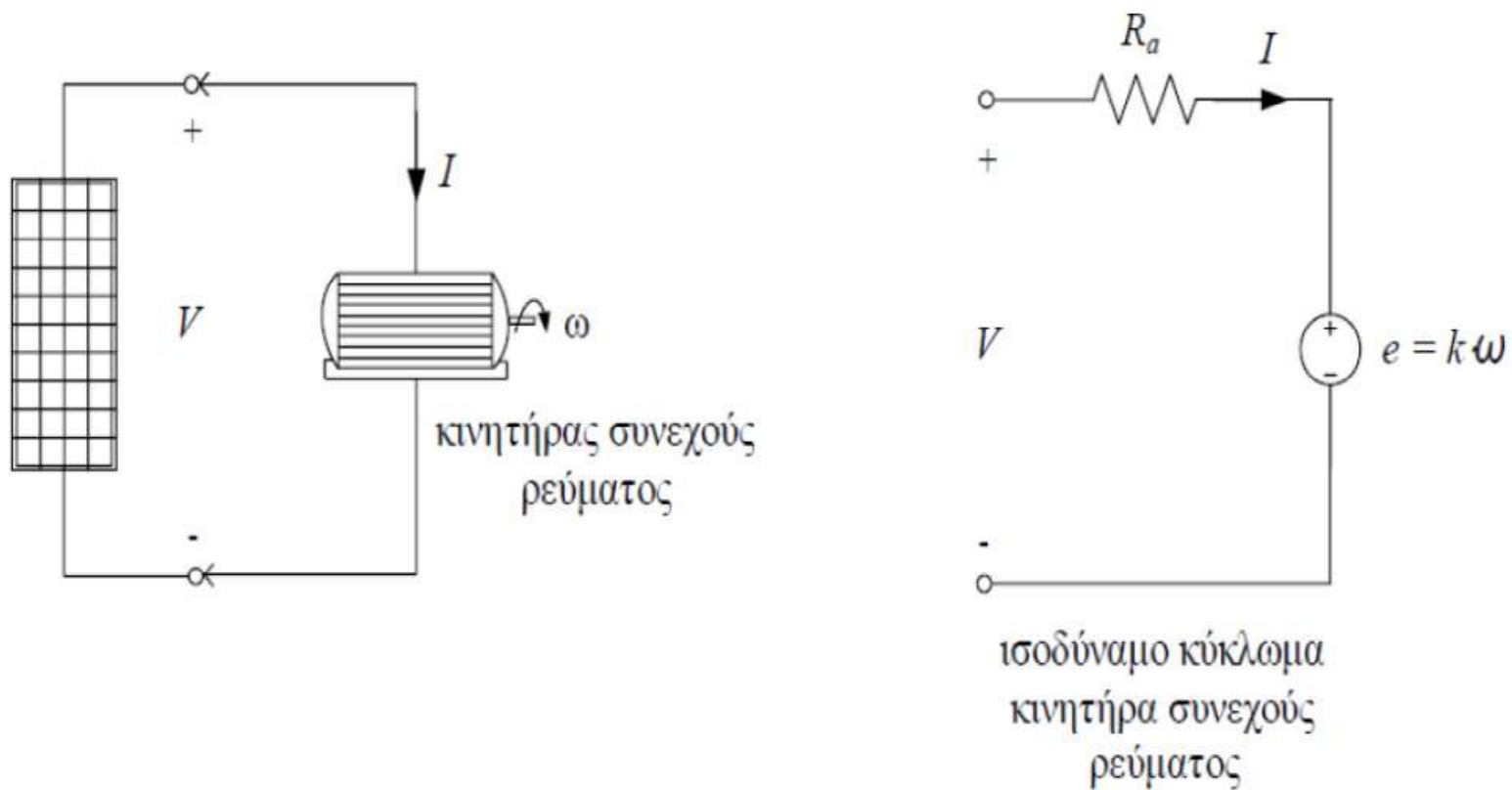
Χαρακτηριστική Ρεύματος-Τάσης Κινητήρα Συνεχούς Ρεύματος

- Ενώ δεν είναι συνηθισμένο ένα φορτίο να είναι καθαρά ωμικό, **οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος, όπως εκείνοι που χρησιμοποιούνται συχνά σε συστήματα άντλησης νερού με φ/β** , παρουσιάζουν μία σχέση ρεύματος-τάσης που μοιάζει με εκείνη της αντίστασης.
- Οι περισσότεροι είναι κινητήρες συνεχούς ρεύματος με μόνιμους μαγνήτες, οι οποίοι μοντελοποιούνται όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.
- Ας σημειωθεί ότι καθώς ο κινητήρας περιστρέφεται, αναπτύσσει μία **αντιηλεκτρεγερτική δύναμη e** , η οποία είναι **μία τάση ανάλογη με την ταχύτητα περιστροφής ω του κινητήρα που αντιτίθεται στην τάση που παρέχεται από το φ/β πλαίσιο.**

Από το ισοδύναμο κύκλωμα του Σχήματος 3, η σχέση ρεύματος-τάσης για τον κινητήρα συνεχούς ρεύματος είναι απλά:

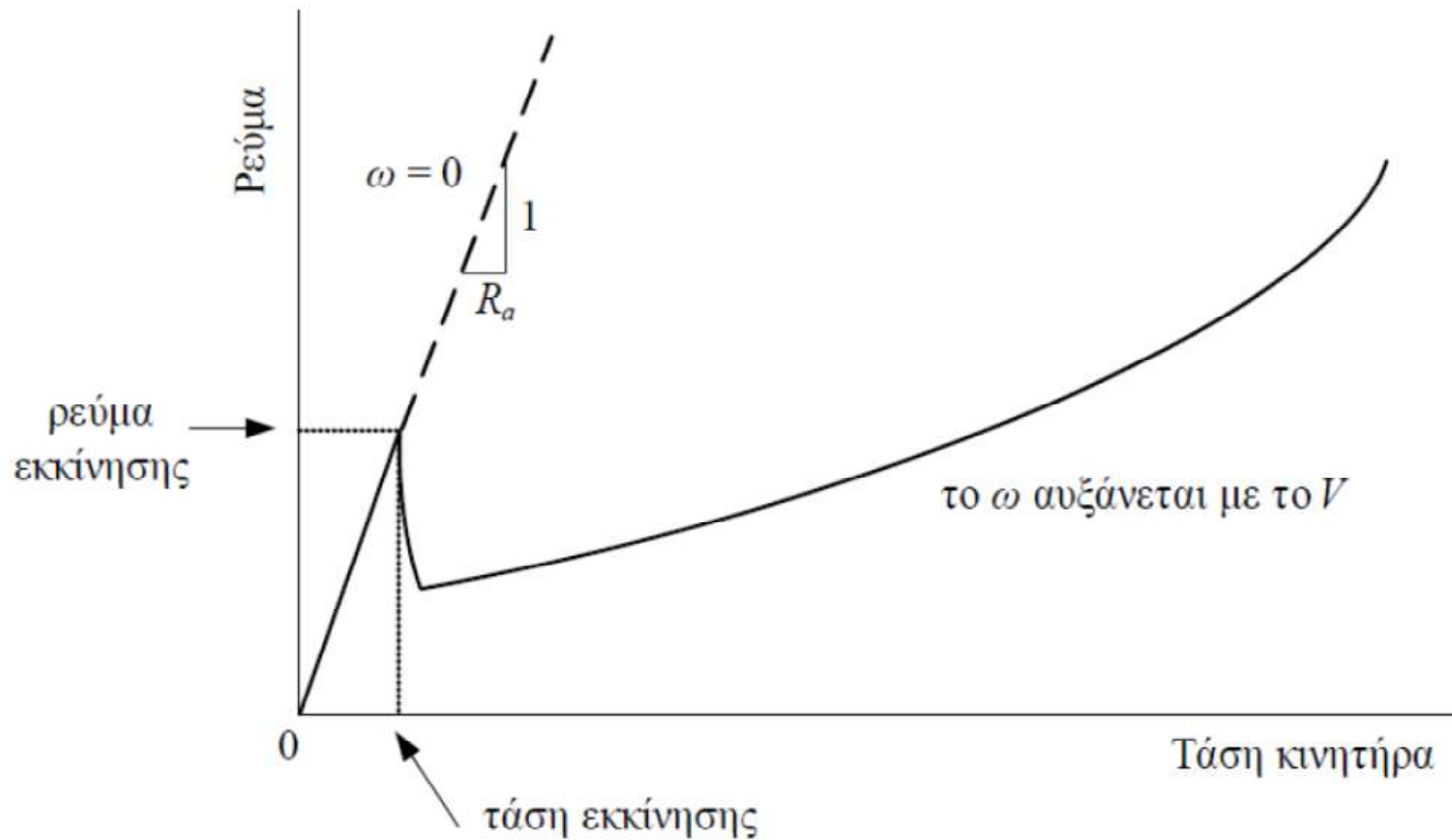
$$V = I \cdot R_a + k \cdot \omega$$

όπου η αντιηλεκτρεγερτική δύναμη είναι $e = k \cdot \omega$ και R_a είναι η αντίσταση του κινητήρα.



Σχήμα 3

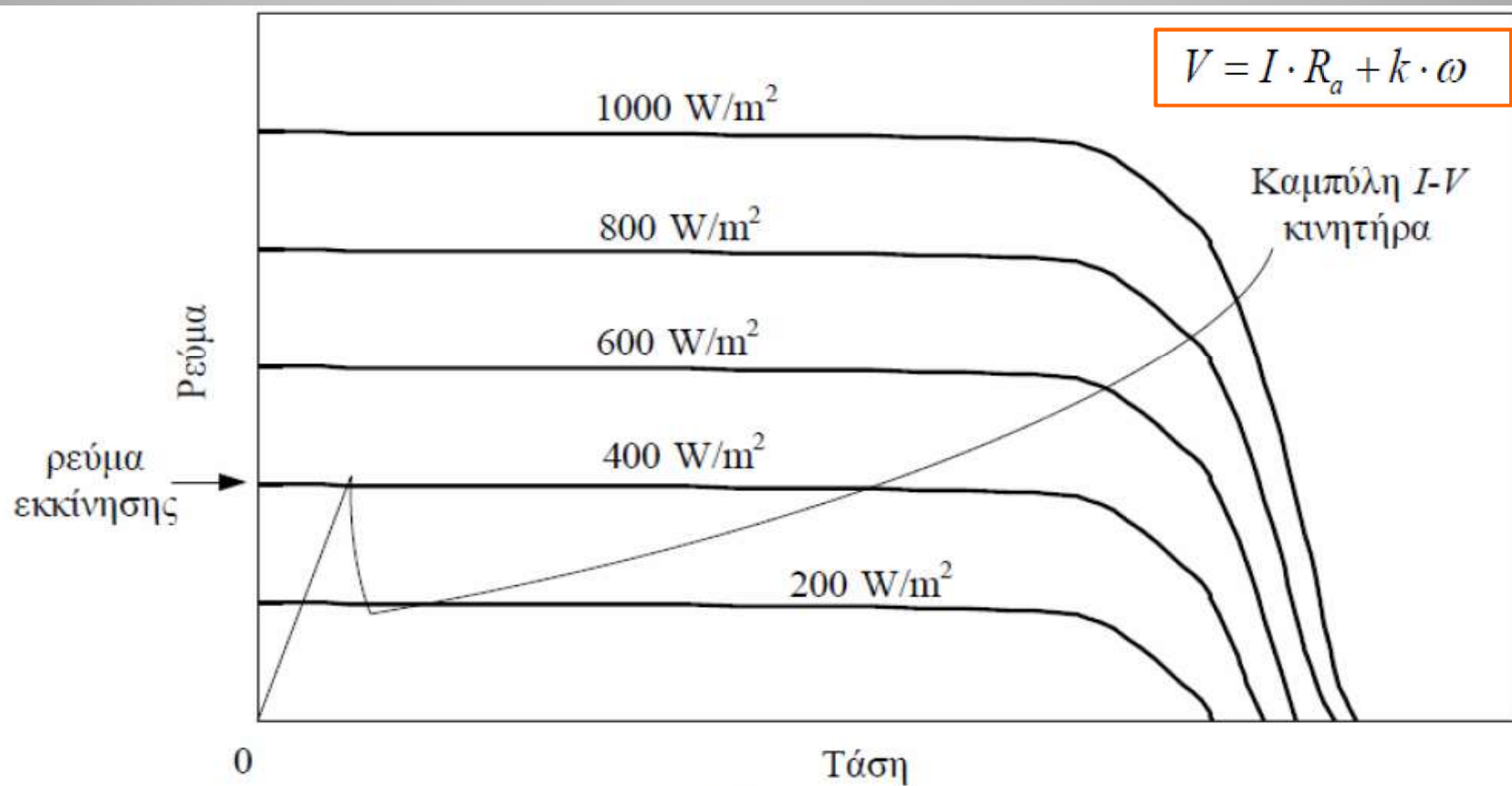
Ένας κινητήρας συνεχούς ρεύματος περιστρέφεται με σχεδόν σταθερή ταχύτητα για κάθε δοσμένη εφαρμοζόμενη τάση, αν και οι απαιτήσεις ροπής του φορτίου ίσως να αλλάζουν.



Σχήμα 4

Χαρακτηριστική I-V κινητήρα συνεχούς ρεύματος με μόνιμους μαγνήτες.

Συνδυασμός της χαρακτηριστικής I-V κινητήρα συνεχούς ρεύματος με τις χαρακτηριστικές I-V φ/β πλαισίου με μεταβαλλόμενη ηλιακή ένταση. Στο παράδειγμα αυτό ο κινητήρας εκκινεί όταν η ηλιακή ένταση φτάσει την τιμή των 400 W/m^2 , και στη συνέχεια χρειάζεται μόνο 200 W/m^2 για να συνεχίσει να κινείται.



Σχήμα 5

Το έργο συγχρηματοδοτήθηκε από τον ΧΜ ΕΟΧ 2009-2014 (Χρηματοδοτικός Μηχανισμός Ευρωπαϊκού Οικονομικού Χώρου) και από το Πρόγραμμα Δημοσίων Επενδύσεων της Ελληνικής Δημοκρατίας

3ο Έργο – Πρόσκληση Νο GR-03

ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ
& ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ
ΣΕ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΝΕΡΟΥ



«Εγκατάσταση φωτοβολταϊκών συστημάτων σε δεξαμενές νερού και αυτόνομηση αντλιών νερού»



Εμβληματικό έργο για τον ΟΑΚ ΑΕ με πρωτοποριακό χαρακτήρα τόσο σε εθνικό όσο και σε διεθνές επίπεδο συνταιριάζοντας αρμονικά την υψηλή τεχνολογία με τον επιδεικτικό χαρακτήρα

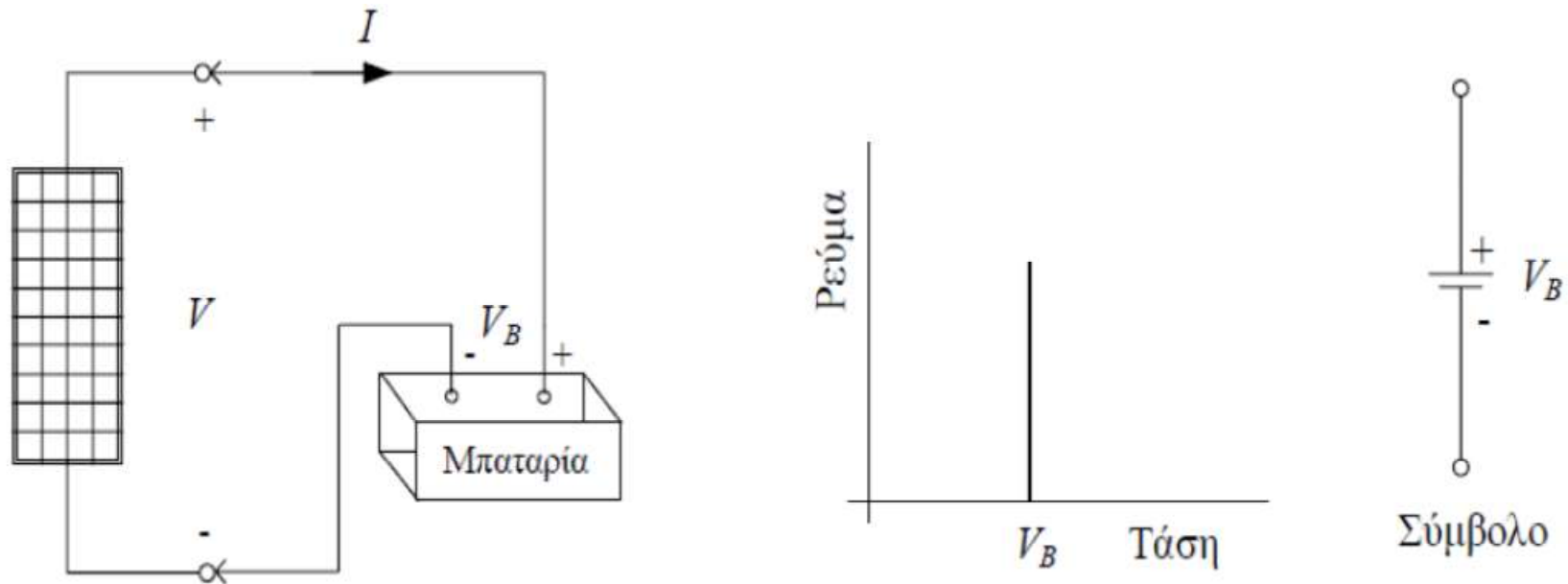
- **Στόχος:** μείωση της κατανάλωσης ηλεκτρ. ενέργειας από τις αντλίες
- **Έργο:** Εγκατάσταση Φ/Β στην οροφή δεξαμενής και αυτονόμηση αντλιών νερού
- **Τοποθεσία:** Τζιβαράς Αποκορώνου
- **Μέγεθος:** 136,68 kWp.
- **Εξοικ. Ενέργειας:** 190MWh/y
- **Προϋπ:** 558.906,05 €



Χαρακτηριστική Ρεύματος – Τάσης Μπαταρίας

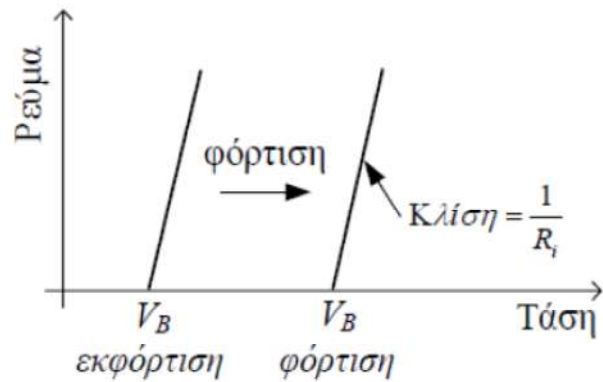
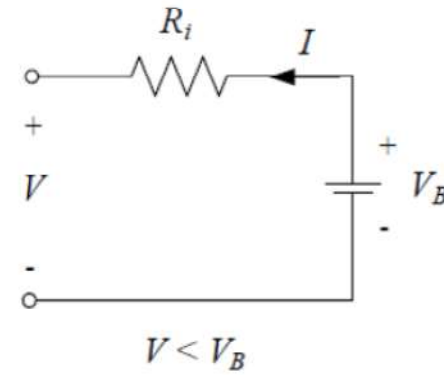
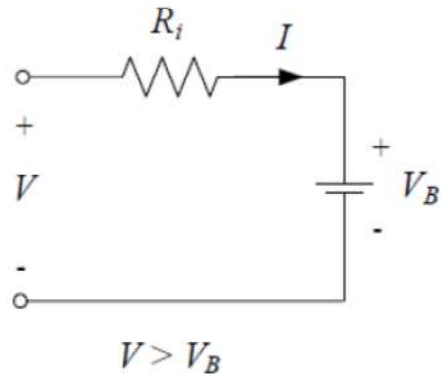
- Καθώς τα φ/β παρέχουν ισχύ μόνο κατά τη διάρκεια της ημέρας και πολλές εφαρμογές απαιτούν ενέργεια όταν **ο ήλιος δεν ακτινοβολεί, συχνά απαιτείται κάποια μέθοδος αποθήκευσης ενέργειας.**
- Για ένα σύστημα άντλησης νερού, η αποθήκευση ενέργειας μπορεί να αφορά την ενέργεια του νερού που αποθηκεύεται μέσα σε μία δεξαμενή.
- Για συστήματα συνδεδεμένα με το δίκτυο, οι γραμμές του δικτύου μπορούν να θεωρηθούν σαν ένα μέσο αποθήκευσης: η ενέργεια από τα φ/β διοχετεύεται στο δίκτυο τη διάρκεια της μέρας, ενώ ενέργεια αντλείται από το δίκτυο κατά τη διάρκεια της νύκτας.
- Για τα περισσότερα απομονωμένα συστήματα, όμως, η ενέργεια αποθηκεύεται σε μπαταρίες για να χρησιμοποιηθεί οποτεδήποτε χρειαστεί.

Μία ιδανική μπαταρία είναι εκείνη στην οποία η τάση παραμένει σταθερή ανεξάρτητα από το πόσο ρεύμα αντλείται. Αυτό σημαίνει ότι η ιδανική μπαταρία έχει μία χαρακτηριστική I-V η οποία είναι απλά μία ευθεία γραμμή κάθετη στον οριζόντιο άξονα (τάση της μπαταρίας) όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.

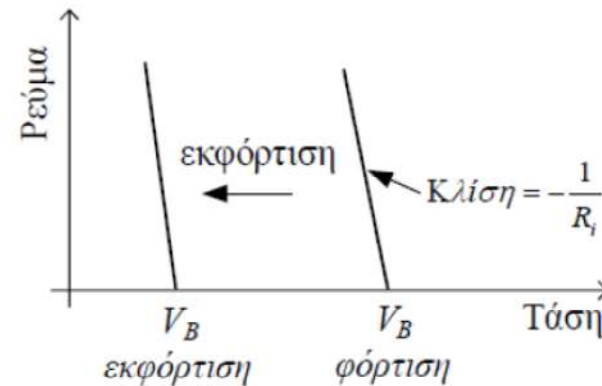


Σχήμα 6

Μία ιδανική μπαταρία έχει μία κατακόρυφη χαρακτηριστική I-V.



(α) φόρτιση



(β) εκφόρτιση

Σχήμα 7

Μία πραγματική μπαταρία μπορεί να μοντελοποιηθεί σαν μία ιδανική μπαταρία σε σειρά με την εσωτερική της αντίσταση, με το ρεύμα να ρέει σε αντίθετες κατευθύνσεις κατά τη διάρκεια (α) της φόρτισης και (β) της εκφόρτισης. Κατά τη διάρκεια της φόρτισης/εκφόρτισης, η ελαφρά κεκλιμένη χαρακτηριστική I-V μετατοπίζεται δεξιά ή αριστερά.

Μία πραγματική μπαταρία, έχει κάποια εσωτερική αντίσταση και συχνά μοντελοποιείται με ένα ισοδύναμο κύκλωμα που αποτελείται από μία ιδανική μπαταρία τάσης V_B σε σειρά με μία εσωτερική αντίσταση R_i όπως φαίνεται στο Σχήμα 7. Κατά τη διάρκεια του κύκλου φόρτισης, με θετική ροή ρεύματος στη μπαταρία, έχουμε:

$$V = V_B + I \cdot R_i$$

οπότε η χαρακτηριστική I-V της πραγματικής μπαταρίας είναι μία ευθεία γραμμή με μία μικρή κλίση, ίση με $1/R_i$. Κατά τη διάρκεια της φόρτισης, η εφαρμοζόμενη τάση πρέπει να είναι μεγαλύτερη της V_B . Καθώς η διαδικασία συνεχίζεται, η V_B αυξάνει, οπότε η χαρακτηριστική I-V μετακινείται προς τα δεξιά, όπως φαίνεται στο Σχήμα 7(α)

Κατά τη διάρκεια της εκφόρτισης, η τάση εξόδου της μπαταρίας είναι μικρότερη από V_B , η κλίση της γραμμής I-V αλλάζει, και η χαρακτηριστική I-V μετακινείται ξανά προς τα αριστερά, όπως φαίνεται στο Σχήμα 7(β). Το απλό ισοδύναμο κύκλωμα του Σχήματος 7 περιπλέκεται από μία σειρά παραμέτρων, που περιλαμβάνουν το γεγονός ότι η τάση ανοικτού κυκλώματος V_B εξαρτάται όχι μόνο από την κατάσταση φόρτισης αλλά επίσης και από τη θερμοκρασία της μπαταρίας καθώς και από τη διάρκεια που έχει μείνει η μπαταρία σε αδράνεια, χωρίς την κυκλοφορία κάποιου ρεύματος.

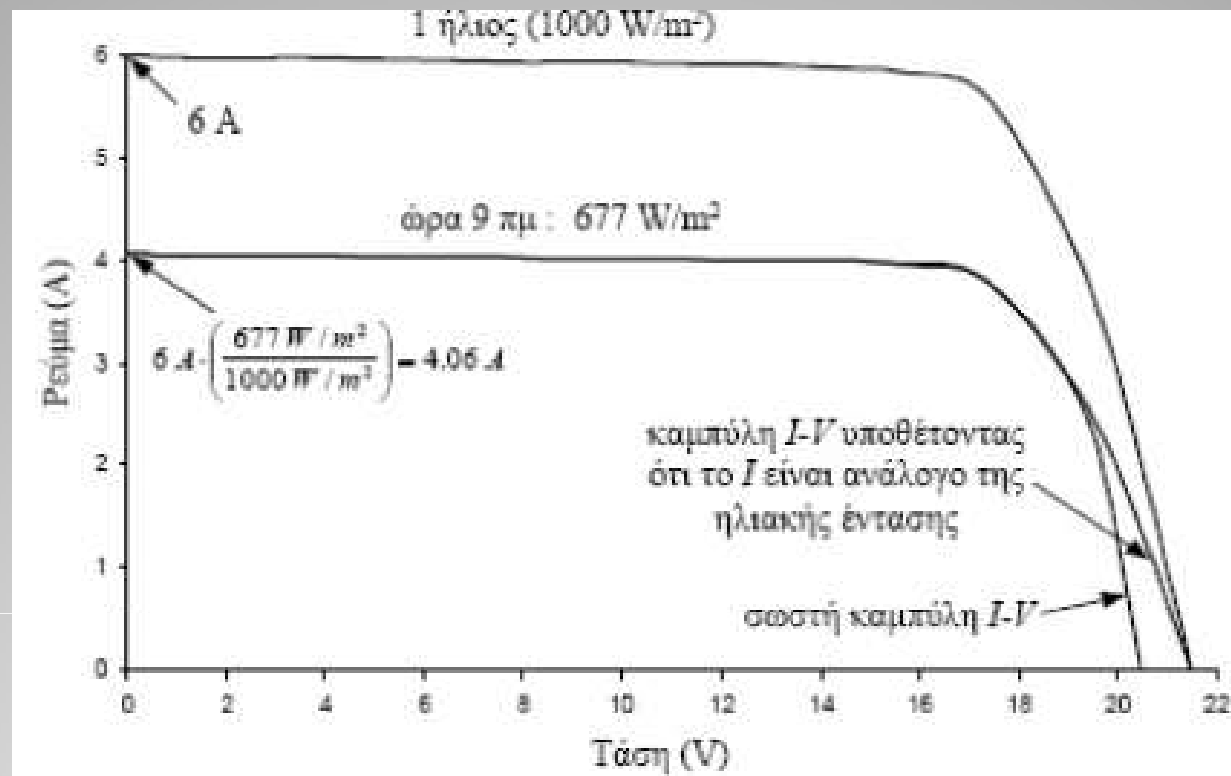
Για μία συμβατική μπαταρία μολυβδου 12 V στους 26°C, η οποία είναι σε αδράνεια για μερικές ώρες, η V_B κυμαίνεται από 12,7 V για μία πλήρως φορτισμένη μπαταρία έως περίπου 11,7 V όταν η μπαταρία είναι φορτισμένη κατά ένα μικρό ποσοστό.

Η εσωτερική αντίσταση της μπαταρίας είναι επίσης συνάρτηση της θερμοκρασίας και της κατάστασης φόρτισης, καθώς επίσης και της ηλικίας και της κατάστασης της μπαταρίας.

Ωριαίες Χαρακτηριστικές I-V

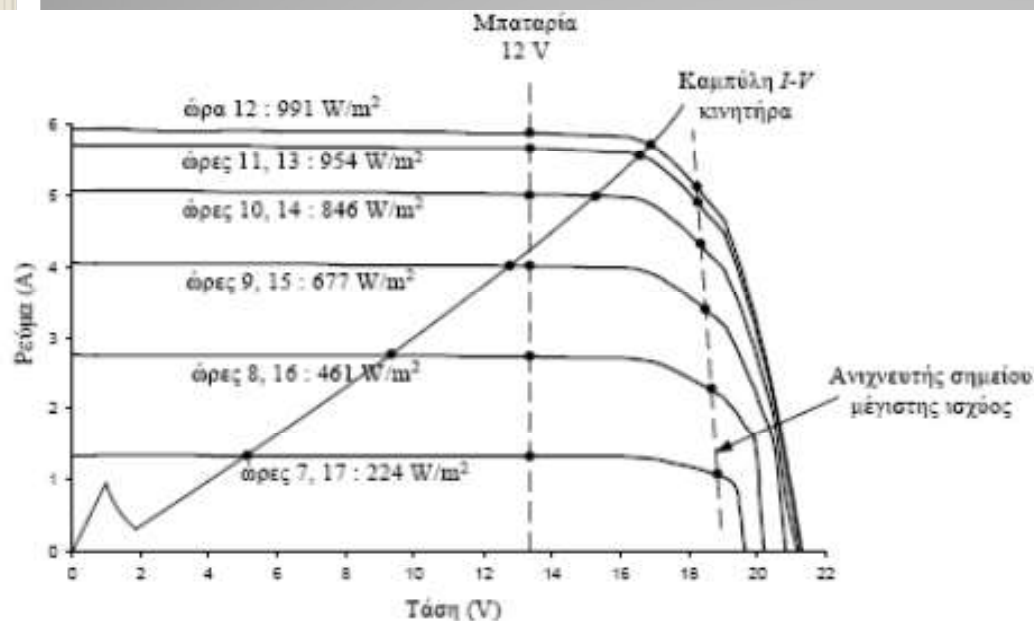
- Στη διάρκεια της μέρας μεταβάλλονται συνεχώς η θερμοκρασία του περιβάλλοντος και η διαθέσιμη ηλιακή ένταση.
- Αυτό σημαίνει ότι η χαρακτηριστική I-V ενός ηλιακού συλλέκτη μετατοπίζεται συνεχώς και το σημείο λειτουργίας για κάθε δεδομένο φορτίο επίσης μεταβάλλεται συνέχεια.
- Οι κατασκευαστές παρέχουν καμπύλες I-V για διάφορες θερμοκρασίες και ηλιακές εντάσεις, αλλά υπάρχουν περιπτώσεις που είναι χρήσιμες οι ωριαίες χαρακτηριστικές I-V. Στις περισσότερες από τις χαρακτηριστικές I-V, το ρεύμα σε κάθε τάση είναι απευθείας ανάλογο της ηλιακής έντασης.
- Αυτό σημαίνει ότι μπορούμε να διαβαθμίσουμε τη χαρακτηριστική I-V ενός ήλιου (1000 W/m^2) μετακινώντας την πάνω ή κάτω ανάλογα με την προβλεπόμενη ηλιακή ένταση.

- Αυτή η γενίκευση είναι απόλυτα σωστή για το ρεύμα βραχυκύκλωσης **Isc** (δηλαδή όταν $V = 0$).
- Στο σημείο αυτό υπενθυμίζουμε ότι η τάση ανοικτού κυκλώματος V_{oc} μειώνεται κάπως με τη μείωση της ηλιακής έντασης, οπότε η απλή υπόθεση ότι το ρεύμα είναι ανάλογο της ηλιακής έντασης δεν ισχύει κοντά στο σημείο V_{oc} .
- Στις περισσότερες περιπτώσεις όμως, η τάση λειτουργίας του φ/β συστήματος είναι γύρω από το γόνατο της χαρακτηριστικής $I-V$, ή ακόμα χαμηλότερα, όπου το ρεύμα είναι σχεδόν ανάλογο της ηλιακής έντασης.



Στο Σχήμα 11 φαίνεται αυτό το σημείο, όπου έχει σχεδιαστεί μία χαρακτηριστική I-V ενός ήλιου (1000 W/m²) που έχει I_{sc} = 6 A καθώς και δύο χαρακτηριστικές I-V όταν η ηλιακή ένταση είναι 677 W/m².

Όπως φαίνεται από το Σχήμα υπάρχει μικρή διαφορά μεταξύ των δύο καμπυλών για ηλιακή ένταση 677 W/m² όσο το φ/β πλαίσιο δε λειτουργεί κάτω από το γόνατο.



Στο Σχήμα φαίνονται οι ωριαίες καμπύλες I-V χρησιμοποιώντας ηλιακές εντάσεις που αντιστοιχούν σε ένα συλλέκτη με νότιο προσανατολισμό τον Απρίλιο σε γεωγραφικό πλάτος 40⁰ και γωνία κλίσης 40⁰ χρησιμοποιώντας ηλιακές εντάσεις ξάστερου ουρανού.

Στις καμπύλες I-V του Σχήματος γίνεται υπέρθεση τριών διαφορετικών τύπων φορτίου:

- 1) ενός κινητήρα συνεχούς ρεύματος,
- 2) μίας μπαταρίας 12 V με σταθερή τάση φόρτισης 13,5 V,
- και 3) ενός ανιχνευτή σημείου μέγιστης ισχύος (ΑΣΜΙ).

Όπως φαίνεται από το Σχήμα:

ο κινητήρας συνεχούς ρεύματος λειτουργεί ικανοποιητικά το μεσημέρι (αφού το σημείο λειτουργίας είναι κοντά στο σημείο λειτουργίας του ΑΣΜΙ), ενώ έχει χαμηλή απόδοση νωρίς το πρωί και αργά το απόγευμα (αφού το σημείο λειτουργίας είναι μακριά από το σημείο λειτουργίας του ΑΣΜΙ).

Η μπαταρία των 12 V είναι σταθερά κάτω από το σημείο λειτουργίας (μέγιστης ισχύος) του ΑΣΜΙ.

Φωτοβολταϊκά Συστήματα Συνδεδεμένα στο Δίκτυο

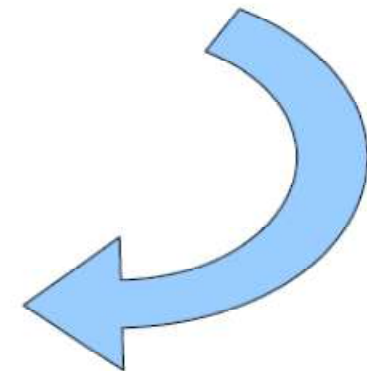
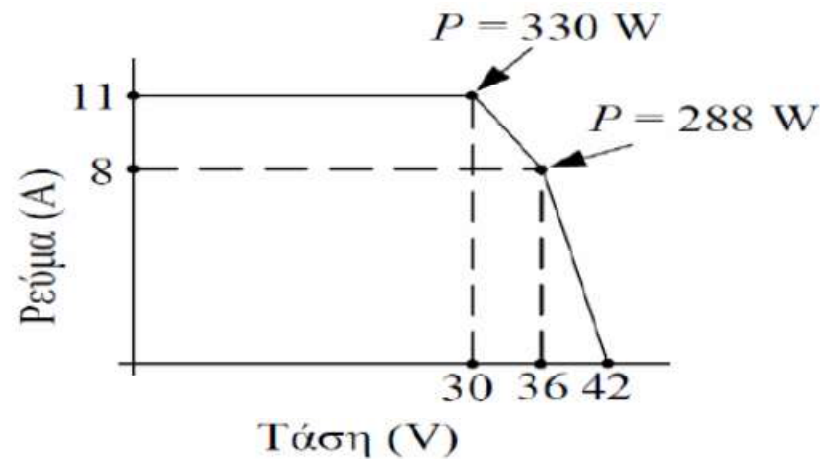
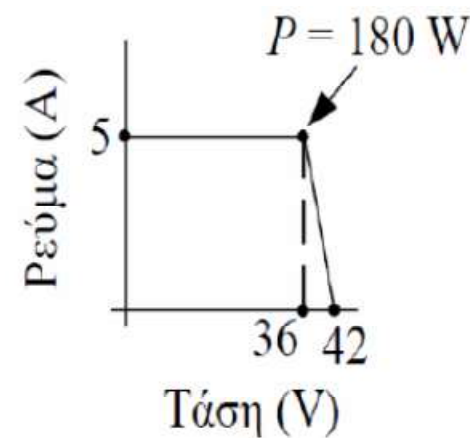
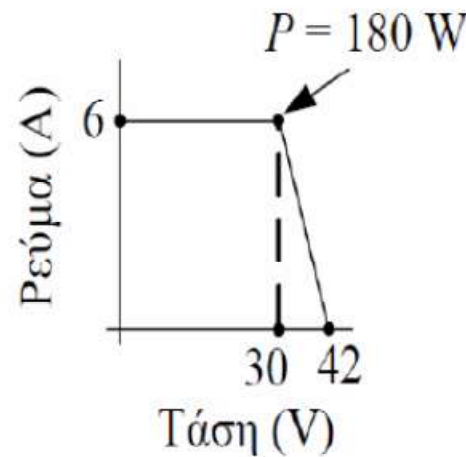
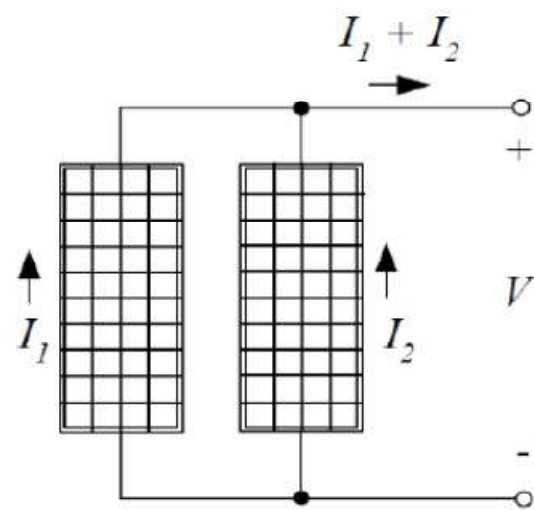
Ονομαστική Ισχύς Συνεχούς και Εναλλασσόμενου Ρεύματος

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα που είναι συνδεδεμένα στο ηλεκτρικό δίκτυο αποτελούνται από μία συστοιχία φ/β πλαισίων και ένα αντιστροφέα (inverter) που μετατρέπει το συνεχές ρεύμα (ΣΡ ή dc) των φ/β στο απαιτούμενο από το φορτίο εναλλασσόμενο ρεύμα (ΕΡ ή ac). Για να εκτιμηθεί η απόδοση του συστήματος, ένα καλό σημείο εκκίνησης είναι η ονομαστική ισχύς εξόδου συνεχούς ρεύματος του φ/β πλαισίου κάτω από πρότυπες συνθήκες δοκιμής, δηλαδή ηλιακή ένταση 1 kW/m² (1 ήλιο), με κατανομή φάσματος που αντιστοιχεί σε λόγο μάζας αέρα 1.5 (AM 1.5), και πρότυπη θερμοκρασία φ/β στοιχείου 25°C. Στη συνέχεια θα εκτιμηθεί η πραγματική ισχύς εξόδου εναλλασσόμενου ρεύματος κάτω από διαφορετικές συνθήκες. Όταν ένας φ/β συλλέκτης τίθεται σε λειτουργία, η πραγματική ισχύς εναλλασσόμενου ρεύματος που παραδίδεται από το φ/β συλλέκτη για ηλιακή ένταση ενός ήλιου συμβολίζεται με P_{ac} και υπολογίζεται ως ακολούθως:

$$P_{ac} = P_{dc(STC)} \cdot CE$$

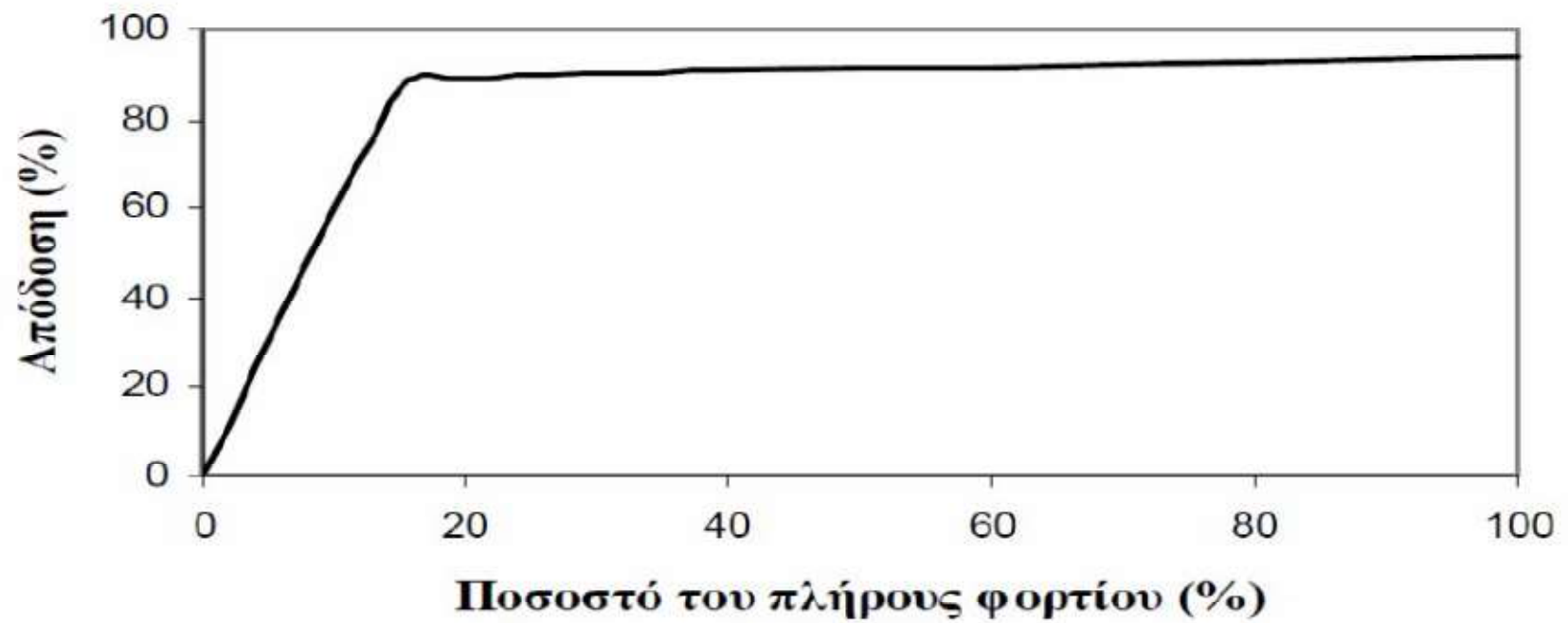
όπου $P_{dc(STC)}$ είναι η ισχύς εξόδου συνεχούς ρεύματος του φ/β συλλέκτη και CE είναι ο **συντελεστής μετατροπής**. Η ισχύς εξόδου συνεχούς ρεύματος του φ/β συλλέκτη υπολογίζεται απλά προσθέτοντας τις τιμές της ισχύος εξόδου συνεχούς ρεύματος κάθε φ/β πλαισίου κάτω από πρότυπες συνθήκες δοκιμής. Ο **συντελεστής μετατροπής οφείλεται στην απόδοση του αντιστροφέα, στη ρύπανση των συλλεκτών, στο κακό ταίριασμα των φ/β πλαισίων, και στις διαφορές στις συνθήκες του περιβάλλοντος**. Ακόμα και κάτω από πλήρη ήλιο, η επίδραση αυτών των απωλειών μπορεί εύκολα να υποβαθμίσει την ισχύ εξόδου από 20% έως 40%.

Σχήμα 1: Απώλειες ισχύος εξαιτίας του κακού ταιριάσματος δύο φ/β πλαισίων. Κάθε φ/β πλαίσιο έχει ονομαστική ισχύ 180 W, αλλά ο παράλληλος συνδυασμός τους έχει ισχύ μόνο 330 W στο σημείο μέγιστης ισχύος.



Θα θεωρήσουμε αρχικά την επίδραση των μικρών αποκλίσεων στις χαρακτηριστικές I-V των φ/β πλαισίων ενός φ/β συλλέκτη. Το Σχήμα 1 δείχνει ένα απλό παράδειγμα δύο κακώς ταιριασμένων φ/β πλαισίων 180 W συνδεδεμένων παράλληλα. Οι κατά κάποιο τρόπο ιδεατές χαρακτηριστικές τους I-V έχουν σχεδιαστεί έτσι ώστε το ένα φ/β πλαίσιο να παράγει 180 W στα 30 V και το άλλο φ/β πλαίσιο να παράγει 180 W στα 36 V. Όπως φαίνεται από το Σχήμα 1, το άθροισμα των χαρακτηριστικών τους I-V δείχνει ότι η μέγιστη ισχύς του συνδυασμού των δύο φ/β πλαισίων είναι μόνο 330 W αντί για 360 W που θα αναμενόταν εφόσον οι χαρακτηριστικές τους I-V ήταν ολόιδιες. Επιπρόσθετα, όλα τα φ/β πλαίσια που έχουν κατασκευαστεί από την ίδια γραμμή παραγωγής δεν θα έχουν ακριβώς την ίδια ονομαστική ισχύ εξόδου. Για παράδειγμα, μερικά φ/β πλαίσια των 100 W θα είναι στην πραγματικότητα 103 W και άλλα θα είναι 97 W. Με άλλα λόγια, οι ανοχές στην παραγωγή των φ/β πλαισίων μπορούν επίσης να μειώσουν την ισχύ εξόδου του φ/β συλλέκτη. Αυτοί οι δύο παράγοντες κακού ταιριάσματος μπορούν εύκολα να μειώσουν την ισχύ εξόδου του φ/β συλλέκτη μερικές ποσοστιαίες μονάδες. Ένας ακόμα σημαντικότερος παράγοντας, που μειώνει την ισχύ του φ/β πλαισίου κάτω από την ονομαστική τιμή, είναι η θερμοκρασία του φ/β στοιχείου.

Στην πραγματικότητα, τα φ/β στοιχεία είναι πιθανό να βρίσκονται σε θερμοκρασία πολύ υψηλότερη από τη θερμοκρασία των 250C που είναι βαθμονομημένη η ονομαστική τους ισχύς και γνωρίζουμε ότι καθώς η θερμοκρασία αυξάνει, η ισχύς μειώνεται. Για να διευκολυνθεί ο υπολογισμός της μεταβολής της ισχύος του φ/β πλαισίου που προκαλείται από την αύξηση της θερμοκρασίας του φ/β στοιχείου, έχει αναπτυχθεί ένα ακόμα σύστημα βαθμονόμησης που βασίζεται σε δοκιμές φ/β εγκαταστάσεων σε λειτουργία ως τμήμα ενός εντατικού προγράμματος επιτήρησης που ονομάζεται PVUSA. Οι συνθήκες δοκιμής PVUSA συμβολίζονται ως PTC και ορίζονται ως ηλιακή ένταση ενός ήλιου στην επιφάνεια ενός συλλέκτη, με θερμοκρασία περιβάλλοντος 20°C, και ταχύτητα ανέμου 1 m/s. Η ισχύς εξόδου εναλλασσόμενου ρεύματος ενός συλλέκτη κάτω από συνθήκες PTC συμβολίζεται ως $P_{ac(PTC)}$ και είναι ένας πολύ καλύτερος δείκτης της πραγματικής ισχύος που παραδίδεται σε ένα κτίριο σε πλήρη ήλιο, από ότι ο συνηθέστερα χρησιμοποιούμενος δείκτης $P_{dc(STC)}$. Τέλος υπάρχει η απόδοση του αντιστροφέα, η οποία μεταβάλλεται ανάλογα με το φορτίο, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2. Καλοί αντιστροφείς, που χρησιμοποιούνται για τη σύνδεση φ/β συλλεκτών με το ηλεκτρικό δίκτυο, έχουν απόδοση πάνω από 90% ακόμα και για χαμηλή φόρτιση, όπως για παράδειγμα για φόρτιση ίση με το 20% του πλήρους φορτίου.



Σχήμα 2

Η απόδοση ενός αντιστροφέα εξαρτάται από το ποσοστό της ονομαστικής ισχύος στο οποίο λειτουργεί ο αντιστροφέας.

Η Προσέγγιση των Ωρών Αιχμής για την Εκτίμηση της Απόδοσης του Φ/Β

Όταν οι μονάδες της μέσης ημερήσιας, μηνιαίας, ή ετήσιας ηλιακής έντασης είναι σε kWh/m²-day, τότε υπάρχει ένας πολύ βολικός τρόπος να ερμηνευθεί αυτός ο αριθμός. Επειδή η ηλιακή ένταση ενός ήλιου ορίζεται ως I kW/m², μπορούμε να θεωρήσουμε ότι μία ηλιακή ένταση για παράδειγμα 5,6 kWh/m²-day είναι ίδια με 5,6 h/day ηλιακή ένταση ενός ήλιου, ή 5,6 h/day ήλιου αιχμής. Έτσι, αγνοώντας την ισχύ εναλλασσόμενου ρεύματος που παραδίδεται από ένα συλλέκτη κάτω από ηλιακή ένταση ενός ήλιου, P_{ac} , τότε μπορούμε απλά να πολλαπλασιάσουμε αυτή την ονομαστική ισχύ με τον αριθμό των ωρών ήλιου αιχμής για να υπολογίσουμε την ημερήσια ηλεκτρική ενέργεια που παραδίδεται από το φ/β συλλέκτη. Για να δούμε αν αυτή η απλή προσέγγιση είναι λογική, θα θεωρήσουμε την ακόλουθη ανάλυση. Μπορούμε να υπολογίσουμε την ηλεκτρική ενέργεια E (kWh/day) που παραδίδεται από το φ/β συλλέκτη στη διάρκεια μίας μέρας ως ακολούθως:

$$E = I \cdot A \cdot n \quad (1)$$

όπου I (kWh/m²-day) είναι η μέση ημερήσια ηλιακή ένταση, A (m²) είναι η επιφάνεια του ηλιακού συλλέκτη και n είναι η μέση απόδοση του συστήματος στη διάρκεια της μέρας. Όταν γίνεται έκθεση σε ηλιακή ένταση ενός ήλιου, η ισχύς εναλλασσόμενου ρεύματος P_{ac} (kW) του ηλιακού συλλέκτη υπολογίζεται από τη σχέση:

$$P_{ac} = I_{1-sun} \cdot A \cdot n_{1-sun} \quad (2)$$

όπου $I_{1-sun} = 1$ kW/m² είναι η ηλιακή ένταση ενός ήλιου, και n_{1-sun} είναι η απόδοση του συστήματος για ηλιακή ένταση ενός ήλιου.

Από (1) και (2) έχουμε:

$$E = P_{ac} \cdot \frac{I}{I_{1-sun}} \cdot \frac{\bar{n}}{n_{1-sun}}$$

Αν υποθέσουμε ότι η μέση απόδοση του συστήματος στη διάρκεια της μέρας είναι ίδια με την απόδοση όταν το σύστημα εκτίθεται σε ηλιακή ένταση ενός ήλιου, τότε η ημερήσια ενέργεια E (kWh/day) που παραδίδεται από το φ/β συλλέκτη θα δίνεται από τη σχέση:

$$E = P_{ac} \cdot h_{peak-sun} \quad (3)$$

όπου $h_{peak-sun}$ είναι οι ώρες ανά μέρα ήλιου αιχμής.

Η κύρια υπόθεση στη σχέση (3) είναι ότι η απόδοση του συστήματος παραμένει σταθερή στη διάρκεια της μέρας. Η βασική εξήγηση για αυτό είναι ότι τα φ/β συστήματα που συνδέονται με το ηλεκτρικό δίκτυο έχουν ανιχνευτές σημείου μέγιστης ισχύος που διατηρούν το σημείο λειτουργίας κοντά στο γόνατο της χαρακτηριστικής I-V όλη τη διάρκεια της μέρας.

Καθώς η ισχύς στο σημείο μέγιστης ισχύος είναι σχεδόν απευθείας ανάλογη της ηλιακής έντασης, η απόδοση του συστήματος θα είναι λογικά σταθερή. Η θερμοκρασία του φ/β στοιχείου επίσης παίζει ρόλο, όμως λιγότερο σημαντικό. Η απόδοση ίσως να είναι λίγο μεγαλύτερη από το μέσο όρο το πρωί, όταν κάνει πιο κρύο και υπάρχει λιγότερη ηλιακή ένταση, αλλά αυτό που τελικά θα συμβεί είναι να γίνει κάπως συντηρητική η σχέση υπολογισμού (3).

- Η αξία του συστήματος βαθμονόμησης PTC είναι τώρα προφανής.
- Χρησιμοποιώντας το σύστημα αυτό για να δείξουμε ισχύ εναλλασσόμενου ρεύματος σε ένα ήλιο, σε συνδυασμό με την ερμηνεία των kWh/m²-day ως των ωρών ανά μέρα ήλιου αιχμής,
- **προκύπτει ένας εύκολος τρόπος για να εκτιμηθεί η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας του ηλιακού συλλέκτη.**

Συντελεστής Χρησιμοποίησης

Ένας απλός τρόπος για να παρασταθεί η ενέργεια που παραδίδεται από ένα σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας είναι με βάση την ονομαστική του ισχύ και το συντελεστή χρησιμοποίησής του (CF). Αν ένα σύστημα παραδίδει συνεχώς την ονομαστική του ισχύ, τότε ο CF θα ήταν μονάδα. Ένας CF ίσος με 0,4, για παράδειγμα, θα μπορούσε να σημαίνει ότι το σύστημα παραδίδει την ονομαστική του ισχύ το 40% του χρόνου και καθόλου ισχύ τον υπόλοιπο χρόνο, αλλά αυτή δεν είναι η μοναδική ερμηνεία. Θα μπορούσε επίσης να παραδίδει 40% της ονομαστικής του ισχύος όλο το χρόνο, οπότε επίσης θα ήταν $CF = 0,4$. Επίσης τιμή $CF = 0,4$ θα μπορούσε να επιτευχθεί και με πάρα πολλούς άλλους συνδυασμούς.

Η ετήσια ηλεκτρική ενέργεια ενός φ/β συστήματος υπολογίζεται από τη σχέση: $E = P \cdot CF \cdot 8760$

όπου E (kWh/year) η ετήσια ενέργεια, P_{ac} (kW) η ονομαστική ισχύς, CF ο ετήσιος συντελεστής χρησιμοποίησης και 8760 οι ώρες λειτουργίας ετησίως. Μηνιαίοι ή ημερήσιοι συντελεστές χρησιμοποίησης ορίζονται παρόμοια.

Συνδυάζοντας τις σχέσεις: $E = P \cdot CF \cdot 8760$ και $E = P_{ac} h_{peak-sun}$ θα έχουμε:

$$CF = \frac{h_{peak-sun-daily}}{24}$$

όπου $h_{peak-sun-daily}$ είναι οι ημερήσιες ώρες ήλιου αιχμής και 24 είναι οι ώρες της μέρας.

Αξίζει να σημειωθεί ότι η πολυπλοκότητα που συνδέεται με την επίδραση της θερμοκρασίας έχει συμπεριληφθεί στον ορισμό του P_{ac} , οπότε δεν έχει επίδραση στο συντελεστή χρησιμοποίησης.

Διαστασιολόγηση Φ/Β Συστημάτων Συνδεδεμένων στο Δίκτυο

Επειδή η ηλεκτρική εταιρία παρέχει αποθήκευση ενέργειας και εφεδρική ισχύ, η διαστασιολόγηση των φ/β συστημάτων που είναι συνδεδεμένα με το ηλεκτρικό δίκτυο δεν είναι τόσο κρίσιμη όπως στην περίπτωση των αυτόνομων φ/β συστημάτων. Επιπλέον, υπάρχουν κάποιες οικονομίες κλίμακας σε αυτά τα συστήματα, καθώς έχει περίπου διπλάσιο κόστος η εγκατάσταση ενός συστήματος που θα παραδίδει διπλάσια ενέργεια. Η διαστασιολόγηση των φ/β συστημάτων που είναι συνδεδεμένα με το ηλεκτρικό δίκτυο είναι περισσότερο θέμα του πόση επιφάνεια είναι διαθέσιμη σε ένα κτίριο, καθώς και του διαθέσιμου κεφαλαίου του επενδυτή, παρά η προσπάθεια εξυπηρέτησης της ζήτησης του φορτίου. Όμως είναι πολύ σημαντικό να μπορούμε να προβλέπουμε με τη μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια την ετήσια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από το φ/β σύστημα προκειμένου να μπορούμε να αποφασίσουμε αν είναι συμφέρουσα η επένδυση.

Σε θεωρητικό επίπεδο, η διαστασιολόγηση του φ/β συστήματος είναι άμεση. Πόσες kWh/year απαιτούνται; Πόσα Watt αιχμής φ/β ισχύος συνεχούς ρεύματος απαιτούνται για να παρέχουν την απαιτούμενη ετήσια ενέργεια; Πόση επιφάνεια απαιτεί το σύστημα; Όμως στην πράξη προκύπτουν περιορισμοί στη σχεδίαση, όπως για παράδειγμα είναι δύσκολη η εύρεση συλλέκτη με ονομαστική ισχύ 103,45 W. Επίσης υπάρχουν περιορισμοί στη διαθέσιμη επιφάνεια που θα καταλαμβάνει το φ/β σύστημα. Μερικές αποφάσεις απαιτούν όχι μόνο τεχνικά δεδομένα αλλά και οικονομικά δεδομένα, όπως για παράδειγμα αν ένα σύστημα ιχνηλασίας είναι οικονομικά αποδοτικότερο σε

σχέση με ένα σύστημα με σταθερό συλλέκτη.

Επίσης, οι περιορισμοί στο διαθέσιμο κεφάλαιο επένδυσης κυριαρχούν σε κάθε απόφαση. Οι πλέον παραδοσιακοί φ/β συλλέκτες στην αγορά έχουν 36 ή 72 φ/β στοιχεία στη σειρά προκειμένου να ικανοποιούν τις εφαρμογές φόρτισης μπαταριών 12 ή 24 V. Φωτοβολταϊκά πλαίσια με μεγαλύτερη τάση και μεγαλύτερη ισχύ είναι αρκετά δημοφιλή σήμερα σε εφαρμογές συνδεδεμένες με το ηλεκτρικό δίκτυο, για τις οποίες οι περιορισμοί στην τάση της μπαταρίας πλέον δεν υπάρχουν. Τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά για ένα σύνολο φ/β πλαισίων μεγάλης ισχύος προορισμένων για σύνδεση στο δίκτυο παρουσιάζονται στον παρακάτω Πίνακα 1. Παρόμοια, οι αντιστροφείς για φ/β συνδεδεμένα στο δίκτυο είναι επίσης διαφορετικοί από εκείνους που είναι σχεδιασμένοι για εφαρμογές σε αυτόνομα φ/β συστήματα. Οι αντιστροφείς για σύνδεση στο δίκτυο, για παράδειγμα, δέχονται πολύ μεγαλύτερη τάση εισόδου και, όπως θα δούμε, οι περιορισμοί τάσης επηρεάζουν πάρα πολύ τη διαμόρφωση του φ/β συλλέκτη. Οι πιο σημαντικές παράμετροι για ένα σύνολο αντιστροφέων που προορίζονται για σύνδεση στο δίκτυο φαίνονται στον Πίνακα 2.

Φ/Β πλαίσιο	Sharp NE-K125U2	Kyocera KC158G	Shell SP150	Uni-Solar SSR256
Ονομαστική ισχύς $P_{dc(STC)}$ (W)	125	158	150	256
Τάση στη μέγιστη ισχύ (V)	26.0	23.2	34	66.0
Ρεύμα στη μέγιστη ισχύ (A)	4.80	6.82	4.40	3.9
Τάση ανοικτοκύκλωσης V_{OC} (V)	32.3	28.9	43.4	95.2
Ρεύμα βραχυκύκλωσης I_{SC} (A)	5.46	7.58	4.8	4.8
Μήκος (m)	1.190	1.290	1.619	11.124
Πλάτος (m)	0.792	0.990	0.814	0.420
Απόδοση	13.3%	12.4%	11.4%	5.5%

Πίνακας 1: Σημαντικά χαρακτηριστικά διάφορων φ/β πλαισίων μεγάλης ισχύος.

Κατασκευαστής	Xantrex	Xantrex	Xantrex	Sunny Boy	Sunny Boy
Μοντέλο	STXR1500	STXR2500	PV 10	SB2000	SB2500
Ισχύς ΕΡ (W)	1500	2500	10000	2000	2500
Τάση ΕΡ	211-264 V	211-264 V	208 V, 3Φ	198-251 V	198-251 V
Εύρος τάσης για ανίχνευση ΣΜΠ	44-85 V	44-85 V	330-600 V	125-500 V	250-550 V
Μέγιστη τάση εισόδου (V)	120	120	600	500	600
Μέγιστο ρεύμα εισόδου (A)	-	-	31.9	10	11
Μέγιστη απόδοση	92%	94%	95%	96%	95%

Πίνακας 2: σημαντικά χαρακτηριστικά διάφορων αντιστροφών για φ/β συνδεδεμένα στο ηλεκτρικό δίκτυο.