



**ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΜΕΣΟΓΕΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

Σχεδιασμός και Λειτουργία Συστημάτων ΑΠΕ

Δρ. Τριανταφυλλιά Νικολάου

**ΕΝΟΤΗΤΑ 06:
Φωτοβολταϊκά Συστήματα II**

ΑΣΚΗΣΗ 1

Έστω ότι μία σχεδόν άδεια μπαταρία μόλυβδου 12 V έχει τάση ανοικτού κυκλώματος 11,7 V και εσωτερική αντίσταση 0,03 Ω.

1. Να υπολογιστεί σε ποια τάση θα λειτουργεί ένα φ/β πλαίσιο αν δίνει 6 A στη μπαταρία.
2. Αν αντλούνται 20 A από μία πλήρως φορτισμένη μπαταρία με τάση ανοικτού κυκλώματος 12,7 V, να υπολογιστεί σε ποια τάση θα λειτουργεί το φ/β πλαίσιο.

Λύση

1. Από την παρακάτω σχέση υπολογίζουμε την τάση λειτουργίας του φ/β πλαισίου

$$V = V_B + I \cdot R_i \rightarrow V = 11,7 + 6 \cdot 0,03 \rightarrow V = 11,88 \text{ V}$$

2. Τραβώντας 20A ενώ η VB έχει φτάσει τα 12,7 V άρα η τάση εξόδου της μπαταρίας θα είναι:

$$V_{load} = V_B - I \cdot R_i \rightarrow V_{load} = 12,7 - 20 \cdot 0,03 \rightarrow V_{load} = 12,1 \text{ V}$$

ΑΣΚΗΣΗ 2

Έστω ένας φ/β συλλέκτης με ονομαστική ισχύ 1 kW κάτω από πρότυπες συνθήκες δοκιμής. Η ονομαστική θερμοκρασία λειτουργίας του φ/β στοιχείου (δείκτης NOCT) είναι 47°C. Η ισχύς εξόδου συνεχούς ρεύματος στο σημείο μέγιστης ισχύος μειώνεται κατά 0,5%/°C πάνω από τη θερμοκρασία των 25°C των πρότυπων συνθηκών δοκιμής (STC). Να εκτιμηθεί η ισχύς εξόδου εναλλασσόμενου ρεύματος κάτω από συνθήκες PTC αν υπάρχει απώλεια ισχύος 3% λόγω κακού ταιριάσματος των φ/β πλαισίων, απώλεια ισχύος 4% λόγω ρύπανσης του συλλέκτη και αν ο αντιστροφέας έχει απόδοση 90%.

Λύση

Σε συνθήκες PTC, η θερμοκρασία του φ/β στοιχείου υπολογίζεται από τη σχέση (3.70), χρησιμοποιώντας τις τιμές $S = 1 \text{ kW/m}^2$ (ηλιακή ένταση συνθηκών PTC), $T_{amb} = 20^\circ\text{C}$ (θερμοκρασία συνθηκών PTC), και $NOCT = 47^\circ\text{C}$:

$$T_{cell} = T_{amb} + \left(\frac{NOCT - 20^\circ}{0.8} \right) \cdot S = 20 + \left(\frac{47 - 20}{0.8} \right) \cdot 1 \Rightarrow T_{cell} = 53.8^\circ\text{C}$$

Με απώλεια ισχύος 0.5%/°C πάνω από τη θερμοκρασία των 25°C, η ονομαστική ισχύς συνεχούς ρεύματος του συλλέκτη θα είναι:

$$P_{dc(PTC)} = (1 \text{ kW}) \cdot [1 - 0.005 \cdot (53.8 - 25)] \Rightarrow P_{dc(PTC)} = 0.856 \text{ kW}$$

Λαμβάνοντας υπόψη τις απώλειες λόγω κακού ταιριάσματος και εξαιτίας της ρύπανσης του συλλέκτη, και συνεκτιμώντας την απόδοση του αντιστροφέα, η εκτιμώμενη ισχύς εξόδου εναλλασσόμενου ρεύματος κάτω από συνθήκες PTC είναι:

$$P_{ac(PTC)} = (0.856 \text{ kW}) \cdot [1 - 0.03] \cdot [1 - 0.04] \cdot 0.90 \Rightarrow P_{ac(PTC)} = 0.72 \text{ kW}$$

ΑΣΚΗΣΗ 3

Στην οροφή μίας οικίας στο Fresno των ΗΠΑ πρόκειται να τοποθετηθεί φ/β συλλέκτης προκειμένου να εξυπηρετήσει όλη τη συνολική ετήσια ενέργεια των 3600 kWh/yr που η οικία χρειάζεται. Ο φ/β συλλέκτης είναι με νότιο προσανατολισμό και γωνία κλίσης ίση με το γεωγραφικό πλάτος μείον 15°, όπου η ηλιακή ένταση είναι 5,7 kWh/m²-day. Ο συντελεστής μετατροπής συνεχούς ρεύματος σε εναλλασσόμενο ρεύμα είναι 0,75. Η απόδοση του φ/β πλαισίου είναι 12,5%. Να υπολογιστεί πόσα kW (συνεχούς ρεύματος, STC) φ/β απαιτούνται και πόση επιφάνεια χρειάζεται.

Λύση

Επειδή η ηλιακή ένταση είναι 5,7 kWh/m²-day, προκύπτει ότι οι ώρες ανά μέρα ήλιου αιχμής είναι $h_{\text{peak-sun}} = 5,7$. Χρησιμοποιώντας την προσέγγιση των ωρών αιχμής, με τη βοήθεια της σχέσης $E = P_{ac} h_{\text{peak-sun}}$ προκύπτει η ακόλουθη σχέση υπολογισμού της ετήσιας ενέργεια E (kWh/year):

$$E = P_{ac} \cdot h_{\text{peak-sun}} \cdot 365 \Rightarrow P_{ac} = \frac{E}{h_{\text{peak-sun}} \cdot 365} = \frac{3600 \text{ kWh/yr}}{(5.7 \text{ h/day}) \cdot (365 \text{ days/yr})} \Rightarrow P_{ac} = 1.73 \text{ kW}$$

Ο συντελεστής μετατροπής είναι $CE = 0.75$, οπότε από τη σχέση (3.87) έχουμε:

$$P_{ac} = P_{dc(STC)} \cdot CE \Rightarrow P_{dc(STC)} = \frac{P_{ac}}{CE} = \frac{1.73}{0.75} \Rightarrow P_{dc(STC)} = 2.3 \text{ kW}$$

Η απόδοση του φ/β πλαισίου είναι $n = 0.125$, οπότε αν χρησιμοποιήσουμε αυτή την τιμή για την απόδοση, τότε η σχέση (3.89) θα δίνει την ισχύ $P_{dc(STC)}$ του φ/β:

$$P_{dc(STC)} = I_{1-sun} \cdot A \cdot n \Rightarrow A = \frac{P_{dc(STC)}}{I_{1-sun} \cdot n} = \frac{2.3 \text{ kW}}{(1 \text{ kW/m}^2) \cdot 0.125} \Rightarrow A = 18.4 \text{ m}^2$$

ΑΣΚΗΣΗ 4

Συνεχίζοντας την άσκηση 3

Συνεχίζοντας τη σχεδίαση που ξεκίνησε στο Παράδειγμα 1, να θεωρήσετε ότι θα χρησιμοποιηθεί φ/β πλαίσιο Kyocera KC158G και αντιστροφέας Xantrex STXR2500. Η τάση ανοικτού κυκλώματος του φ/β στοιχείου αυξάνει κατά $0,38\%/^{\circ}\text{C}$ για θερμοκρασίες κάτω από τη θερμοκρασία STC των 25°C . Να υπολογιστεί ο αριθμός των φ/β πλαισίων που θα πρέπει να έχει ο φ/β συλλέκτης καθώς και ο τρόπος που θα συνδέονται μεταξύ τους τα φ/β πλαίσια.

Λύση

Από τον Πίνακα 1 βλέπουμε ότι το φ/β πλαίσιο Kyocera KC158G έχει ονομαστική ισχύ $P_{dc(STC),module} = 158 \text{ W}$. Από το Παράδειγμα 1 βρήκαμε ότι για το φ/β συλλέκτη χρειαζόμαστε ισχύ $P_{dc(STC),collector} = 2300 \text{ W}$. Έτσι, ο απαιτούμενος αριθμός των φ/β πλαισίων N_{req} που θα πρέπει να έχει ο φ/β συλλέκτης είναι:

$$N_{req} = \frac{P_{dc(STC),collector}}{P_{dc(STC),module}} = \frac{2300 \text{ W}}{158 \text{ W}} \Rightarrow N_{req} = 14.6$$

Θα πρέπει να αποφασίσουμε αν θα χρησιμοποιήσουμε 14 ή 15 φ/β πλαίσια. Για να διευκολυνθούμε στην απόφαση αυτή, θα πρέπει να σκεφτούμε τον τρόπο με τον οποίο θα είναι συνδεδεμένα τα φ/β πλαίσια προκειμένου να προκύψει ο φ/β συλλέκτης. Αν έχουμε παράλληλη σύνδεση με δύο φ/β πλαίσια στην κάθε σειρά, τότε η ονομαστική τάση STC θα είναι $2 \cdot 23,2 = 46,4V$, η οποία μόλις και μετά βίας είναι μέσα στο εύρος τάσης 44-85 V για ανίχνευση του σημείου μέγιστης ισχύος για τον αντιστροφέα Xantrex STXR 2500, όπως φαίνεται από τον Πίνακα 2. Σε υψηλότερες θερμοκρασίες, η τάση του φ/β θα μπορούσε να πέσει κάτω από τα 44 V, το οποίο δεν είναι καλό. Αν έχουμε παράλληλη σύνδεση τριών φ/β πλαισίων στην κάθε σειρά, η ονομαστική τάση STC θα είναι $3 \cdot 23,2 = 69,6V$, η οποία είναι πολύ ικανοποιητικά μέσα στο εύρος τάσης 44-85 V για ανίχνευση του σημείου μέγιστης ισχύος για τον αντιστροφέα. Αυτόσημαινιότιοφ/βσυλλέκτηςθαέχει πέντε παράλληλες ομάδες και η κάθε ομάδα θα έχει τρία φ/β πλαίσια στη σειρά, δηλαδή ο φ/β συλλέκτης θα έχει συνολικά 15 φ/β πλαίσια. Είναι σημαντικό να εκτιμηθεί η μέγιστη τάση ανοικτού κυκλώματος του φ/β συλλέκτη για να είμαστε σίγουροι ότι δεν παραβιάζει τη μέγιστη τάση συνεχούς ρεύματος που μπορεί να δεχθεί ο αντιστροφέας, η οποία είναι 120 V, όπως φαίνεται από τον Πίνακα 2. Με τρία φ/β πλαίσια στη σειρά για κάθε μία από τις πέντε παράλληλες ομάδες του φ/β συλλέκτη, η τάση ανοικτού κυκλώματος της κάθε ομάδας θα φθάσει τα $3 \cdot 28,9 = 86,7V$. Η τάση αυτή είναι αρκετά κάτω από το όριο των 120 V. Όμως, επειδή η τάση ανοικτού κυκλώματος του φ/β στοιχείου αυξάνει κατά $0,38\%/^{\circ}C$ για θερμοκρασίες κάτω από τη θερμοκρασία STC των $25^{\circ}C$, η τάση ανοικτού κυκλώματος μπορεί να είναι αρκετά κάτω από την τιμή της στις πρότυπες συνθήκες δοκιμής (STC). Αν υποθέσουμε ότι το πιο ψυχρό πρωινό στο Fresno η θερμοκρασία περιβάλλοντος είναι $-5^{\circ}C$ και αν επίσης υποθέσουμε ότι η θερμοκρασία του φ/β στοιχείου είναι ίδια με τη θερμοκρασία περιβάλλοντος, τότε η τάση ανοικτού κυκλώματος της κάθε ομάδας θα είναι τώρα:

$$V_{OC,max} = (86.7 V) \cdot [1 + 0.0038 \cdot (25 + 5)] \Rightarrow V_{OC,max} = 97 V$$

η οποία είναι επίσης κάτω από το όριο των 120 V του αντιστροφέα. Έτσι λοιπόν, η επιλογή μας σύμφωνα με την οποία ο φ/β συλλέκτης θα έχει πέντε παράλληλες ομάδες και η κάθε ομάδα θα έχει στη σειρά από τρία φ/β πλαίσια (δηλαδή ο φ/β συλλέκτης θα έχει συνολικά 15 φ/β πλαίσια) είναι ορθή καθώς ικανοποιεί και τους δύο περιορισμούς, δηλαδή:

1. η ονομαστική τάση STC του φ/β συλλέκτη να είναι μέσα στο εύρος τάσης για ανίχνευση του σημείου μέγιστης ισχύος για τον αντιστροφέα.
2. η μέγιστη τάση ανοικτού κυκλώματος του φ/β συλλέκτη δεν παραβιάζει τη μέγιστη τάση συνεχούς ρεύματος που μπορεί να δεχθεί ο αντιστροφέας.

ΑΣΚΗΣΗ 5

Συνεχίζοντας την άσκηση 4

Να βρεθεί η επιφάνεια της οροφής που απαιτείται για σταθερή κλίση του συλλέκτη και να εκτιμηθεί η ετήσια παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια. Οι διαστάσεις του φ/β πλαισίου Kyocera KC158G δίνονται στον Πίνακα 1. Με 15 τέτοια φ/β πλαίσια, η επιφάνεια του συλλέκτη θα είναι:

$$A_{collector} = (15) \cdot (1.29 \text{ m}) \cdot (0.99 \text{ m}) \Rightarrow A_{collector} = 19.1 \text{ m}^2$$

η οποία είναι λίγο μεγαλύτερη από την αρχική εκτίμηση των 18,4 m² που κάναμε στο προηγούμενο παράδειγμα. Η ονομαστική ισχύς συνεχούς ρεύματος σε πρότυπες συνθήκες δοκιμής κάθε ενός από τα 15 φ/β πλαίσια είναι 158 W, οπότε η ονομαστική ισχύς συνεχούς ρεύματος σε πρότυπες συνθήκες δοκιμής του φ/β συλλέκτη θα είναι:

$$P_{dc(STC),collector} = 15 \cdot 158 \Rightarrow P_{dc(STC),collector} = 2370 \text{ W}$$

Ο συντελεστής μετατροπής του συνεχούς ρεύματος σε εναλλασσόμενο ρεύμα είναι 0,75 και οι ώρες ανά μέρα ήλιου αιχμής είναι 5,7 . Έτσι, η ετήσια παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια είναι:

$$E = (2.37 \text{ kW}) \cdot 0.75 \cdot (5.7 \text{ h/day}) \cdot (365 \text{ day/yr}) \Rightarrow E = 3698 \text{ kWh/yr}$$

Έτσι, ο στόχος μας για 3600 kWh/year έχει επιτευχθεί.

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 EP (W)	1500	2500	10000	2000	2500
Τάση EP	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 αντιστροφέων για φ/β συνδεδεμένα στο ηλεκτρικό δίκτυο.