



ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΜΕΣΟΓΕΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Σχεδιασμός και Λειτουργία Συστημάτων ΑΠΕ

Δρ. Τριανταφυλλιά Νικολάου

ΕΝΟΤΗΤΑ 05: Φωτοβολταϊκά Συστήματα Ι

ΑΣΚΗΣΗ 1

Ένα φ/β στοιχείο 100 cm^2 έχει ρεύμα κόρου 10^{-12} A/cm^2 . Σε πλήρη ηλιοφάνεια, παράγει ρεύμα βραχυκύκλωσης 40 mA/cm^2 στους 25°C . Να βρεθεί η τάση ανοικτοκύκλωσης σε πλήρη ηλιοφάνεια καθώς και σε 50% ηλιοφάνεια. Να σχεδιαστεί η χαρακτηριστική τάσης-ρεύματος του φ/β στοιχείου σε πλήρη ηλιοφάνεια και σε 50% ηλιοφάνεια.

Λύση

Επειδή το φ/β στοιχείο έχει επιφάνεια 100 cm^2 , το ρεύμα κόρου είναι:

$$I_0 = \left(10^{-12} \frac{\text{A}}{\text{cm}^2} \right) \cdot (100 \text{ cm}^2) \Rightarrow I_0 = 10^{-10} \text{ A}$$

Σε πλήρη ηλιοφάνεια, το ρεύμα βραχυκύκλωσης είναι:

$$I_{SC,full} = \left(40 \frac{\text{mA}}{\text{cm}^2} \right) \cdot (100 \text{ cm}^2) \Rightarrow I_{SC,full} = 4 \text{ A}$$

Σε πλήρη ηλιοφάνεια, η τάση ανοικτοκύκλωσης υπολογίζεται από τη σχέση (3.59):

$$V_{OC,full} = \frac{k \cdot T}{q} \cdot \ln \left(\frac{I_{SC}}{I_0} + 1 \right) \Rightarrow V_{OC,full} = \frac{1.381 \cdot 10^{-23} \cdot (273 + 25)}{1.602 \cdot 10^{-19}} \cdot \ln \left(\frac{4}{10^{-10}} + 1 \right) \Rightarrow V_{OC,full} = 0.627 \text{ V}$$

Επειδή το ρεύμα βραχυκύκλωσης είναι ανάλογο της ηλιακής έντασης, σε 50% ηλιοφάνεια, το ρεύμα βραχυκύκλωσης θα είναι το μισό του ρεύματος βραχυκύκλωσης σε πλήρη ηλιοφάνεια, δηλαδή:

$$I_{SC,50\%} = 2 \text{ A}$$

Σε 50% ηλιοφάνεια, η τάση ανοικτοκύκλωσης υπολογίζεται από τη σχέση (3.59):

$$V_{OC,50\%} = \frac{k \cdot T}{q} \cdot \ln \left(\frac{I_{SC}}{I_0} + 1 \right) \Rightarrow V_{OC,50\%} = \frac{1.381 \cdot 10^{-23} \cdot (273 + 25)}{1.602 \cdot 10^{-19}} \cdot \ln \left(\frac{2}{10^{-10}} + 1 \right) \Rightarrow V_{OC,50\%} = 0.610 \text{ V}$$

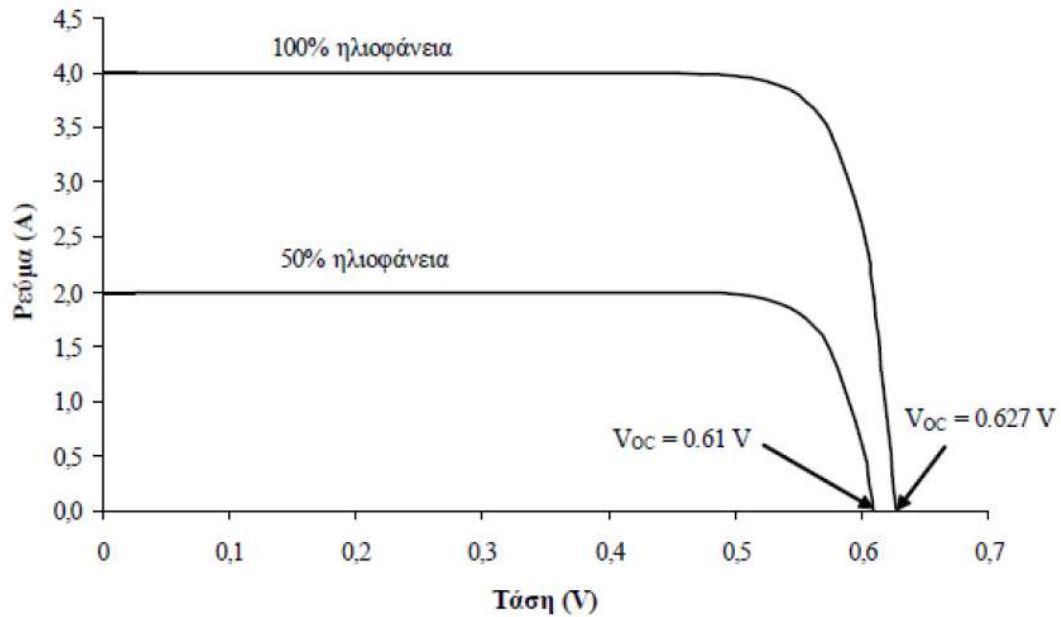
Η χαρακτηριστική τάσης-ρεύματος του φ/β στοιχείου σε πλήρη ηλιοφάνεια είναι:

$$I_{full} = I_{SC,full} - I_0 \cdot \left(e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right) \Rightarrow I_{full} = 4 - I_0 \cdot \left(e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right)$$

Η χαρακτηριστική τάσης-ρεύματος του φ/β στοιχείου σε 50% ηλιοφάνεια είναι:

$$I_{50\%} = I_{SC,50\%} - I_0 \cdot \left(e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right) \Rightarrow I_{50\%} = 2 - I_0 \cdot \left(e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right)$$

Η χαρακτηριστική τάσης-ρεύματος του φ/β στοιχείου σε πλήρη ηλιοφάνεια και σε 50% ηλιοφάνεια φαίνεται στο Σχήμα 3.27.



χαρακτηριστική ρεύματος – τάσης (I – V) του φ/β στοιχείου σε 100% και σε 50% ηλιοφάνεια

ΑΣΚΗΣΗ 2

Ένα φ/β πλαίσιο κατασκευάζεται από 36 ίδια φ/β στοιχεία συνδεδεμένα σε σειρά. Με ηλιακή ένταση ενός ήλιου (1 kW/m^2), κάθε φ/β στοιχείο έχει ρεύμα βραχυκύκλωσης $3,4 \text{ A}$ και στους 25°C το ρεύμα κόρου είναι $6 \cdot 10^{-10} \text{ A}$. Κάθε φ/β στοιχείο έχει παράλληλη αντίσταση $6,6 \Omega$ και σε σειρά αντίσταση $0,005 \Omega$ και τάση διόδου $0,55 \text{ V}$. Να βρεθεί η τάση, το ρεύμα και η ισχύς του φ/β πλαισίου.

Αντικαθιστώντας στη σχέση (3.66) τις τιμές $I_{SC} = 3.4 \text{ A}$, $I_0 = 6 \cdot 10^{-10} \text{ A}$, $V_d = 0.55 \text{ V}$, $R_p = 6.6 \Omega$, υπολογίζουμε το ρεύμα του φ/β πλαισίου:

$$I = I_{SC} - I_0 \cdot \left(e^{\frac{qV_d}{kT}} - 1 \right) \cdot \frac{V_d}{R_p} = 3.4 - (6 \cdot 10^{-10}) \cdot \left(e^{\frac{1.602 \cdot 10^{-19} \cdot 0.55}{1.381 \cdot 10^{-23} \cdot (273+25)}} - 1 \right) \cdot \frac{0.55}{6.6} \Rightarrow I = 2.14 \text{ A}$$

Η τάση του φ/β πλαισίου υπολογίζεται από τη σχέση (3.68):

$$V_{\text{module}} = n \cdot (V_d - I \cdot R_s) = 36 \cdot (0.55 - 2.14 \cdot 0.005) \Rightarrow V_{\text{module}} = 19.41 \text{ V}$$

Η ισχύς του φ/β πλαισίου είναι:

$$P = I \cdot V_{\text{module}} = 2.14 \cdot 19.41 \Rightarrow P = 41.5 \text{ W}$$

Λύση

Η μέγιστη ισχύς που παραδίδεται από το φ/β είναι:

$$P_m = V_m \cdot I_m = 17 \cdot 6 \Rightarrow P_m = 102 \text{ W}$$

Για να παραδοθεί όλη αυτή η ισχύς των 102 W στην αντίσταση των 10Ω , η αντίσταση αυτή χρειάζεται μία τάση:

$$P_m = \frac{V_R^2}{R} \Rightarrow V_R = \sqrt{P_m \cdot R} \Rightarrow V_R = \sqrt{102 \cdot 10} \Rightarrow V_R = 31.9 \text{ V}$$

Ο ανιχνευτής σημείου μέγιστης ισχύος θα πρέπει να αυξάνει την τάση $V_m = 17 \text{ V}$ στην επιθυμητή τιμή των 31.9 V στο φορτίο. Με τη βοήθεια της (3.86) υπολογίζουμε τον κύκλο καθήκοντος:

$$\frac{V_o}{V_i} = \left(\frac{D}{1-D} \right) \Rightarrow \frac{31.9}{17} = \left(\frac{D}{1-D} \right) \Rightarrow \frac{D}{1-D} = 1.88 \Rightarrow D = 0.65$$

ΑΣΚΗΣΗ 3

Να εκτιμηθεί η θερμοκρασία του φ/β στοιχείου, η τάση ανοικτούκυ κλώματος, και το σημείο μέγιστης ισχύος για το φ/β πλαίσιο BP2150S των 150 W κάτω από συνθήκες ηλιακής έντασης ενός ήλιου και θερμοκρασίας περιβάλλοντος 30°C. Το φ/β πλαίσιο έχει δείκτη NOCT ίσο με 47°C.

Λύση

Η θερμοκρασία του φ/β στοιχείου υπολογίζεται από τη σχέση 1, χρησιμοποιώντας τις τιμές $S = 1 \text{ kW/m}^2$, $T_{amb} = 30^\circ\text{C}$ και $\text{NOCT} = 47^\circ\text{C}$:

$$T_{cell} = T_{amb} + \left(\frac{\text{NOCT} - 20^\circ}{0.8} \right) \cdot S = 30 + \left(\frac{47 - 20}{0.8} \right) \cdot 1 \Rightarrow T_{cell} = 64^\circ\text{C}$$

Από τον Πίνακα 1, για το φ/β πλαίσιο BP2150S έχουμε $V_{oc} = 42,8 \text{ V}$. Επειδή η V_{oc} μειώνεται κατά $0.37\% / ^\circ\text{C}$, η νέα V_{oc} θα είναι περίπου:

$$V_{oc} = 42.8 \cdot [1 - 0.0037 \cdot (64 - 25)] \Rightarrow V_{oc} = 36.7 \text{ V}$$

Το σημείο της μέγιστης ισχύος μειώνεται κατά $0.5\% / ^\circ\text{C}$, οπότε αυτό το φ/β πλαίσιο των 150 W στο σημείο της μέγιστης ισχύος του θα παραδίδει ισχύ:

$$P_{max} = 150 \cdot [1 - 0.005 \cdot (64 - 25)] \Rightarrow P_{max} = 121 \text{ W}$$

Πίνακας 1: Παραδείγματα απόδοσης φ/β πλαισίων κάτω από πρότυπες συνθήκες δοκιμών (1 kW/m², AM 1,5 και 25°C θερμοκρασία φ/β στοιχείου).

Κατασκευαστής	Kyocera	Sharp	BP	Uni-Solar	Shell
Μοντέλο	KC-120-1	NE-Q5E2U	2150S	US-64	ST40
Αριθμός φ/β στοιχείων n	36	72	72		42
Ονομαστική ισχύς $P_{DC,STC}$ (W)	120	165	150	64	40
Τάση στη μέγιστη ισχύ (V)	16.9	34.6	34	16.5	16.6
Ρεύμα στη μέγιστη ισχύ (A)	7.1	4.77	4.45	3.88	2.41
Τάση ανοικτοκύκλωσης V_{oc} (V)	21.5	43.1	42.8	23.8	23.3
Ρεύμα βραχυκύκλωσης I_{sc} (A)	7.45	5.46	4.75	4.80	2.68
Μήκος (mm)	1425	1575	1587	1366	1293
Πλάτος (mm)	652	826	790	741	329
Βάθος (mm)	52	46	50	31.8	54
Βάρος (kg)	11.9	17	15.4	9.2	14.8
Απόδοση φ/β πλαισίου	12.9%	12.7	12.0%	6.3%	9.4%

ΑΣΚΗΣΗ 4

Συνεχίζοντας την άσκηση 2

Σε φ/β πλαίσιο 36 φ/β στοιχείων υπάρχει μία παράλληλη αντίσταση ανά φ/β στοιχείο $R_p = 6,6 \Omega$. Σε πλήρη ήλιο και σε ρεύμα $I = 2,14 \text{ A}$, η τάση εξόδου βρέθηκε ότι ήταν $V = 19,41 \text{ V}$. Αν ένα φ/β στοιχείο είναι υπό σκιά και αν αυτό το ρεύμα με κάποιο τρόπο παραμένει το ίδιο, να υπολογιστούν:

1. Η νέα τάση εξόδου και η ισχύς του φ/β πλαισίου.
2. Η πτώση τάσης κατά μήκος του σκιασμένου φ/β στοιχείου.
3. Η ισχύς που καταναλώνεται στο σκιασμένο φ/β στοιχείο.

Λύση

1. Η πτώση στην τάση του φ/β πλαισίου υπολογίζεται από τη σχέση (3.77):

$$\Delta V = \frac{V}{n} + I \cdot R_p \Rightarrow \Delta V = \frac{19,41}{36} + 2,14 \cdot 6,6 \Rightarrow \Delta V = 14,66 \text{ V}$$

Η νέα τάση εξόδου του φ/β πλαισίου θα είναι:

$$V_{\text{module}} = V - \Delta V = 19,41 - 14,66 \Rightarrow V_{\text{module}} = 4,75 \text{ V}$$

Η νέα ισχύς του φ/β πλαισίου θα είναι:

$$P_{\text{module}} = V_{\text{module}} \cdot I = 4,75 \cdot 2,14 \Rightarrow P_{\text{module}} = 10,1 \text{ W}$$

Για σύγκριση, σε πλήρη ήλιο το φ/β πλαίσιο παρήγαγε $41,5 \text{ W}$, όπως υπολογίστηκε στο Παράδειγμα 3.15.

2. Η πτώση τάσης κατά μήκος του σκιασμένου φ/β στοιχείου είναι:

$$V_c = I \cdot (R_p + R_s) = 2,14 \cdot (6,6 + 0,005) \Rightarrow V_c = 14,14 \text{ V}$$

Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί ότι κανονικά ένα φ/β στοιχείο προσθέτει περίπου $0,5 \text{ V}$ στο φ/β πλαίσιο. Εδώ βλέπουμε ότι το σκιασμένο φ/β στοιχείο αφαιρεί $14,14 \text{ V}$ από το φ/β πλαίσιο.

3. Η ισχύς που καταναλώνεται στο σκιασμένο φ/β στοιχείο είναι:

$$P_c = V_c \cdot I = 14,14 \cdot 2,14 \Rightarrow P_c = 30,2 \text{ W}$$

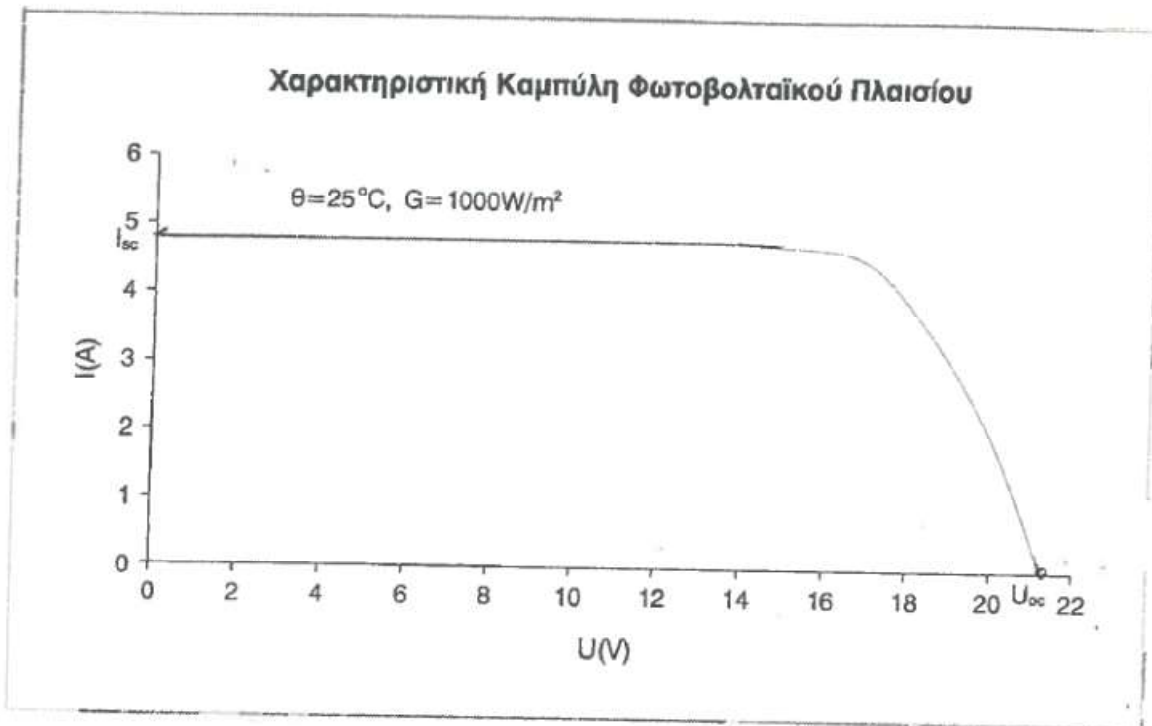
Όλη αυτή η ισχύς που απορροφάται από το σκιασμένο φ/β στοιχείο μετατρέπεται σε θερμότητα, η οποία μπορεί να προκαλέσει ένα τοπικό θερμό σημείο που μπορεί να οδηγήσει στη μόνιμη καταστροφή των φύλλων πλαστικού που περιβάλουν το φ/β στοιχείο.

ΑΣΚΗΣΗ 5

α) Παρουσιάστε τη συνολική τυπική καμπύλη λειτουργίας ($I-U$) μιας συστοιχίας οκτώ όμοιων φωτοβολταϊκών πλαισίων (βλέπε σχήμα 3.1.1) συνδεδεμένων ανά δύο εν παραλλήλω και στη συνέχεια εν σειρά.

β) Να εκτιμηθεί η τάση ανοικτοκυκλώσεως, το ρεύμα βραχυκυκλώσεως και η τάση μέγιστης ισχύος της τελικής συνδεσμολογίας.

γ) Τέλος, να προσδιορισθεί ο συντελεστής πλήρωσης της συνδεσμολογίας.



Σχήμα 3.1.1: Χαρακτηριστική καμπύλη έντασης-τάσης τυπικού φωτοβολταϊκού πλαισίου

Απάντηση

α) Στο σχήμα 3.1.2 παρουσιάζεται η συνδεσμολογία των φωτοβολταϊκών πλαισίων.

Για την ένταση " I " της συστοιχίας, λαμβάνοντας υπόψιν την προτεινόμενη συνδεσμολογία του σχήματος 3.1.2, ισχύει ότι:

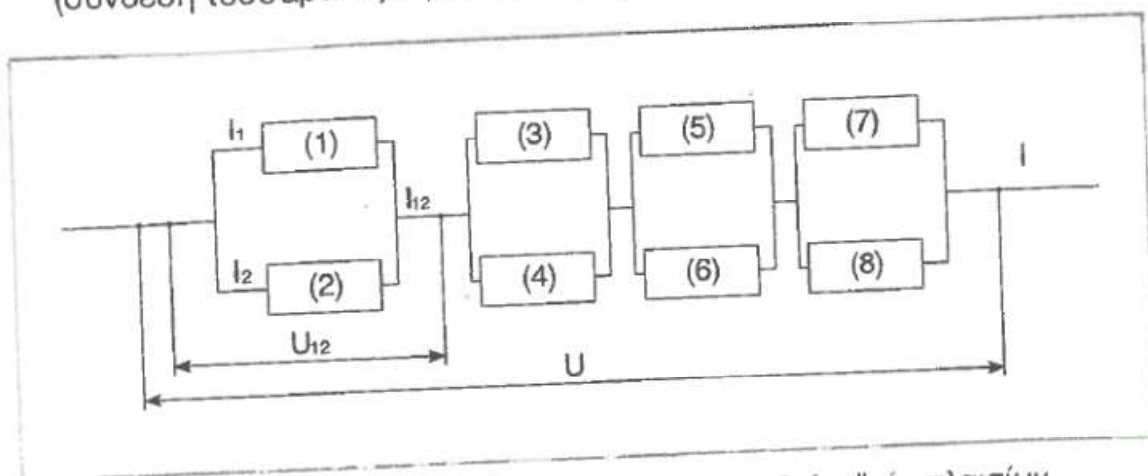
$$I_{12} = I_1 + I_2 = 2I_1 \quad (3.1.1)$$

(σύνδεση δύο όμοιων πλαισίων εν παραλλήλω) και

$$I = I_{12} = 2I_1$$

(3.1.2)

(σύνδεση τεσσάρων ζευγών εν σειρά)



Σχήμα 3.1.2: Συνδεσμολογία συστοιχίας φωτοβολταϊκών πλαισίων

Αντίστοιχα, για την τάση "U" της συστοιχίας ισχύει ότι:

$$U_{12} = U_1 = U_2 \quad (3.1.3)$$

(σύνδεση δύο όμοιων πλαισίων εν παραλλήλω) και

$$U = U_{12} + U_{34} + U_{56} + U_{78} = 4U_{12} = 4U_1 \quad (3.1.4)$$

(σύνδεση τεσσάρων ζευγών εν σειρά)

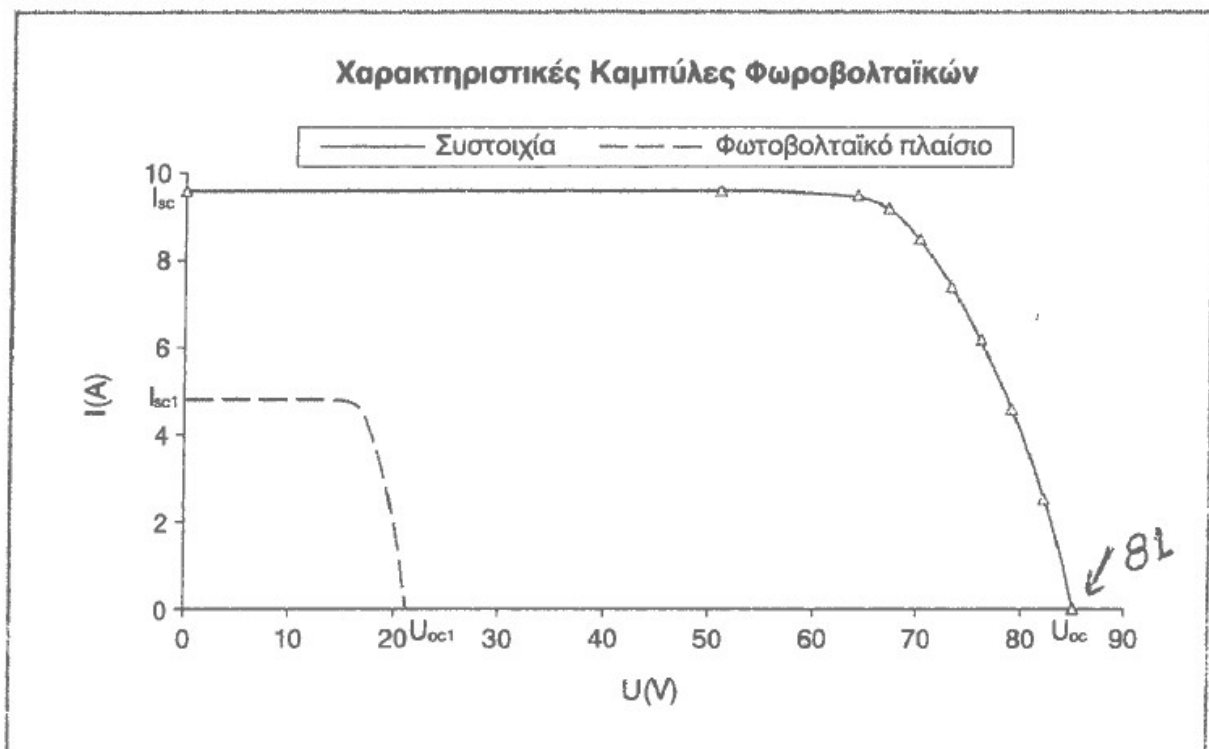
Συνεπώς, βάσει των εξισώσεων (3.1.2) και (3.1.4) κατασκευάζεται «σημείο προς σημείο» η χαρακτηριστική λειτουργίας (I-U) της υπό μελέτη συστοιχίας, σχήμα 3.1.3.

β) Βάσει των ανωτέρω, ισχύει για την τάση ανοικτοκυκλώσεως της συνδεσμολογίας ότι:

$$U_{oc} = 4U_{oc1} \quad (3.1.5)$$

και για το ρεύμα βραχυκυκλώσεως ότι:

$$I_{sc} = 2I_{sc1} \quad (3.1.6)$$



Σχήμα 3.1.3: Χαρακτηριστικές καμπύλες τυπικού φωτοβολταϊκού πλαισίου και υπό μελέτη συστοιχίας

Ακολούθως, η τάση μέγιστης ισχύος " U_{mp} " ενός φωτοβολταϊκού συστήματος καθορίζεται από το σημείο λειτουργίας του φωτοβολταϊκού για το οποίο ισχύει:

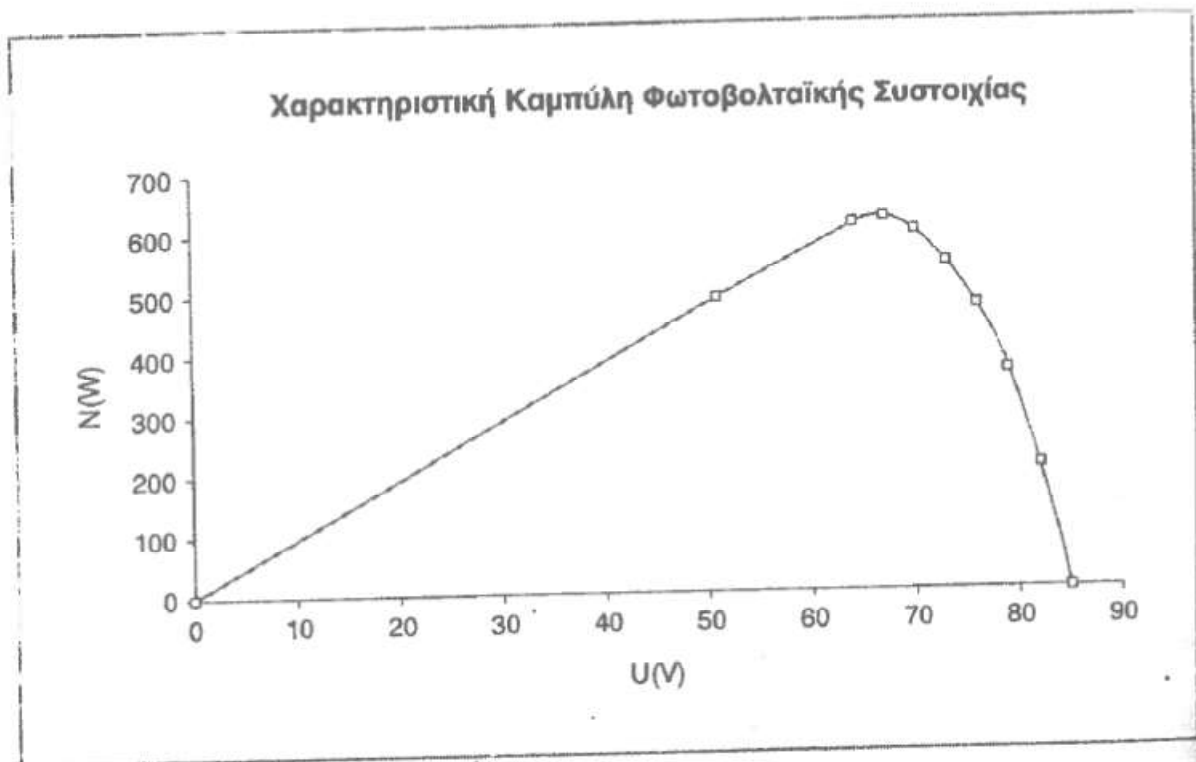
$$N(U_{mp}) = N_{max} = N_{peak} \quad (3.1.7)$$

Συνεπώς, βάσει του σχήματος 3.1.3 κατασκευάζεται «σημείο-σημείο» η χαρακτηριστική αποδιδόμενη ισχύος-τάσης λειτουργίας ($N-U$) της συνδεσμολογίας, βλέπε Πίνακα 3.1.1 και σχήμα 3.1.4.

Βάσει των αριθμητικών αποτελεσμάτων του Πίνακα 3.1.1, η τάση μέγιστης ισχύος ισούται με $U_{mp} = 67.0V$, ενώ η αντίστοιχη αποδιδόμενη ισχύς ισούται με $616.4Wp$.

Πίνακας 3.1.1: Στοιχεία φωτοβολταϊκής συστοιχίας

α/α	I(A)	U(V)	N(W)
1	0	85.0	0
2	2.5	82.0	205.00
3	4.6	79.0	363.40
4	6.2	76.0	471.20
5	7.4	73.0	540.20
6	8.5	70.0	595.00
7	9.2	67.0	616.40
8	9.5	64.0	608.00
9	9.6	50.8	487.68
10	9.6	0	0



Σχήμα 3.1.4: Χαρακτηριστική καμπύλη ισχύος φωτοβολταϊκής συστοιχίας

γ) Τέλος, ο συντελεστής πλήρωσης "Σ.Π." τής υπό μελέτη συστοιχίας ορίζεται σύμφωνα με την εξίσωση (3.1) ως:

$$\text{Σ.Π.} = \frac{E_{(P-U)}}{I_{sc} \cdot U_{oc}}$$

(3.1.8)

όπου το εμβαδόν της καμπύλης (I-U) “ $E_{(I-U)}$ ”, σχήμα 3.1.5, υπολογίζεται από τα εμβαδά των τμημάτων “Α”, “Β” και “Γ” σύμφωνα με την παρακάτω εξίσωση:

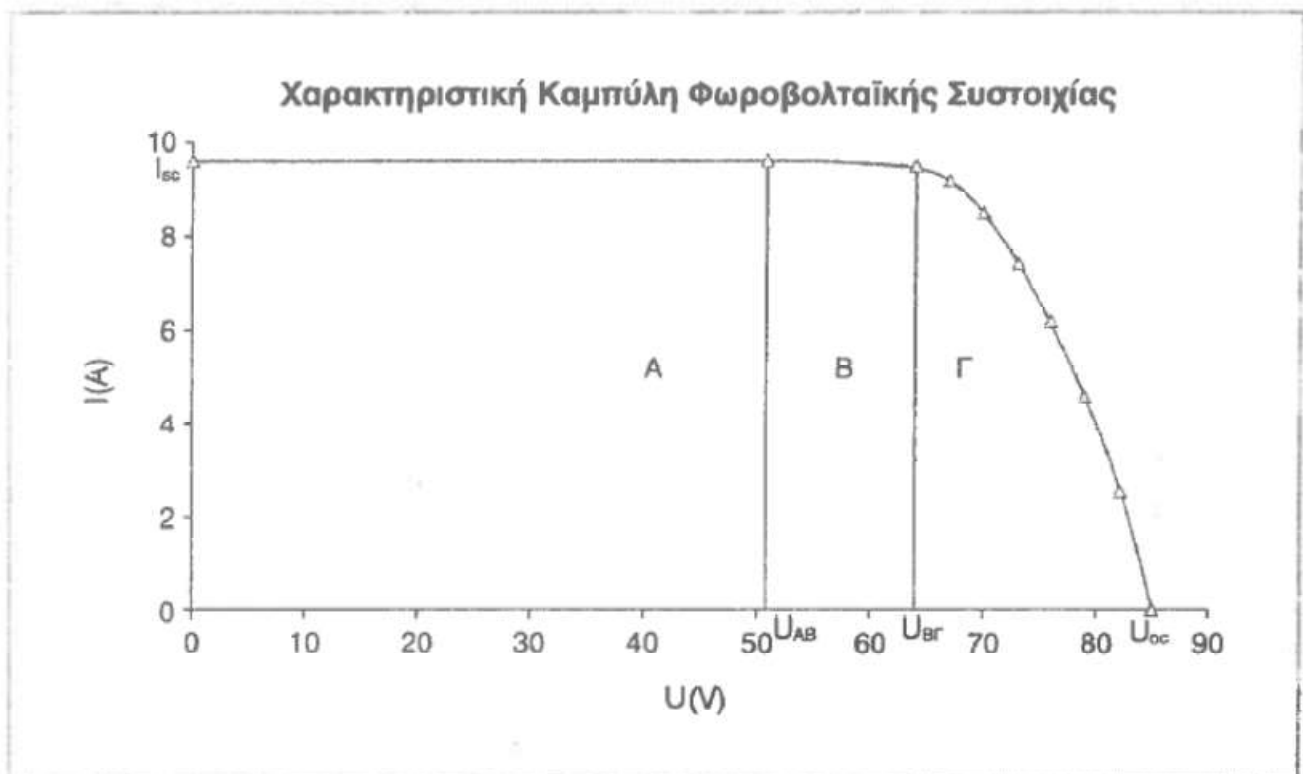
$$E_{(I-U)} = E_A + E_B + E_\Gamma \quad (3.1.9)$$

Συγκεκριμένα το τμήμα “Α” θεωρείται ως ορθογώνιο παραλληλόγραμμο και το αντίστοιχο εμβαδόν λαμβάνεται ως:

$$E_A = 50.8 \cdot 9.6 = 487.68 \quad (3.1.10)$$

Αντίστοιχα, το τμήμα “Β” λαμβάνεται κατά προσέγγιση ως ορθογώνιο τραπέζιο και το αντίστοιχο εμβαδόν υπολογίζεται ως:

$$E_B = \frac{(9.6 + 9.5) \cdot (64 - 50.8)}{2} = 126.06 \quad (3.1.11)$$



Σχήμα 3.1.5: Χαρακτηριστική καμπύλη ισχύος φωτοβολταϊκής συστοιχίας

Τέλος, το εμβαδόν του τμήματος “Γ” ορίζεται ως:

$$E_\Gamma = \int_0^{U_{oc}} I(U) dU \quad (3.1.12)$$

Με αριθμητική ολοκλήρωση κατά Simpson ακρίβειας τετάρτης τάξεως^[3.1], χρησιμοποιώντας τις τιμές του Πίνακα 3.1.11, προκύπτει:

Πίνακας 3.1.11: Στοιχεία ολοκλήρωσης κατά Simpson

i	I_i (A)	U (V)	ΔU
1	9.5	64.0	3
2	9.2	67.0	3
3	8.5	70.0	3
4	7.4	73.0	3
5	6.2	76.0	3
6	4.6	79.0	3
7	2.5	82.0	3
8 $\rightarrow I_{oc}$	0	85.0	-

$$E_r = \frac{\Delta U}{3} (I_1 + 4I_{i+1} + 2I_{i+2} + \dots + 4I_{oc-1} + I_{oc}) \Rightarrow$$

$$E_r = \frac{3}{3} (9.5 + 4 \cdot 9.2 + 2 \cdot 8.5 + 4 \cdot 7.4 + 2 \cdot 6.2 + 4 \cdot 4.6 + 4 \cdot 2.5 + 0) \Rightarrow$$

$$E_r = 133.7$$

(3.1.13)

Αντικαθιστώντας τις αριθμητικές τιμές των μεγεθών στις εξισώσεις (3.1.8) και (3.1.9), προκύπτει για το συντελεστή πλήρωσης ότι:

$$\Sigma.Π. = \frac{487.68 + 126.06 + 133.7}{9.6 \cdot 85} = 0.916 \text{ ή } 91.56\%$$

(3.1.14)

$$\int_{x_0}^{x_2} f(x) dx = \frac{\Delta U}{3}$$

$$I = \sum_{i=0}^{N-1} I_i = \frac{h}{3} (f_0 + 4f_2 + f_2 + \dots + 2f_{N-1} + f_N)$$

