



ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΚΡΗΤΗΣ  
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε.



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΚΡΗΤΗΣ  
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ  
ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΧΗΜΕΙΑΣ

# «Σύστημα εσωτερικής διανομής Φ/Β εγκατάστασης»

Ιωάννης Κατσιγιαννης

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΕΠΙΚΑΙΡΟΠΟΙΗΣΗΣ ΓΝΩΣΕΩΝ ΑΠΟΦΟΙΤΩΝ

## «ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ»

Το πρόγραμμα συνδιοργανώνεται από:

Το Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών του Τ.Ε.Ι. Κρήτης

Το Τμήμα Χημείας του Πανεπιστημίου Κρήτης



Ευρωπαϊκή Ένωση  
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ  
ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗ ΚΑΙ ΔΙΑ ΒΙΟΥ ΜΑΘΗΣΗ  
*επένδυση στην κοινωνία της γνώσης*

ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ ΚΑΙ ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ  
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



ΕΣΠΑ  
2007-2013  
Πρόγραμμα για την ανάπτυξη  
ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ

Η ΠΡΑΞΗ ΥΛΟΠΟΙΕΙΤΑΙ ΣΤΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΤΟΥ ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» ΚΑΙ ΣΥΓΧΡΗΜΑΤΟΔΟΤΕΙΤΑΙ ΑΠΟ ΤΗΝ ΕΥΡΩΠΑΪΚΗ ΕΝΩΣΗ (ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ – ΕΚΤ) ΚΑΙ ΑΠΟ ΕΘΝΙΚΟΥΣ ΠΟΡΟΥΣ ΕΣΠΑ 2007-2013

**Στοιχεία επικοινωνίας**

*Εισηγητής:* Ιωάννης Κατσίγιαννης

*Εργαστήριο*

*Ίδρυμα:* Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Κρήτης

*Τηλ:* 2821023046

*Fax:*

*Email:* [katsigiannis@chania.teicrete.gr](mailto:katsigiannis@chania.teicrete.gr)

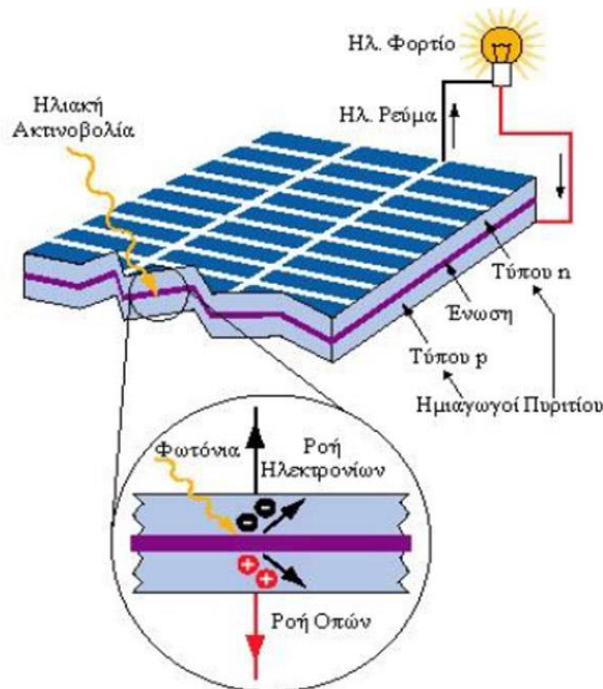
## Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1. Ηλεκτρική συμπεριφορά των Φ/Β πλαισίων .....	2
1.1 Εισαγωγή .....	2
1.2 Συνδεσμολογίες Φ/Β .....	6
1.3 Ισοδύναμο κύκλωμα Φ/Β στοιχείου .....	7
1.4 Επίδραση της σκίασης στη λειτουργία των Φ/Β.....	10
1.5 Καμπύλες I-V φορτίων συνδεδεμένων σε Φ/Β .....	15
1.5.1 Καμπύλη I-V ωμικού φορτίου .....	15
1.5.2 Καμπύλη I-V κινητήρα DC.....	16
1.5.3 Καμπύλη I-V μπαταρίας .....	18
Κεφάλαιο 2. Καλώδια σύνδεσης Φ/Β εγκατάστασης .....	20
2.1 Εισαγωγή .....	20
2.2 Βήματα πριν από τη σύνδεση Φ/Β στον αντιστροφέα .....	21
2.2.1 Σύνδεση και πολικότητα Φ/Β.....	21
2.2.2 Σφάλμα γείωσης.....	23
2.3 Μονωτικά υλικά καλωδίων .....	24
2.4 Διαστασιολόγηση καλωδίων.....	24
Κεφάλαιο 3. Κυκλώματα DC Φ/Β εγκαταστάσεων .....	29
3.1 Δομή και εξαρτήματα DC κυκλώματος .....	29
3.2 Το πρότυπο IEC / TS 62548.....	31

## Κεφάλαιο 1. Ηλεκτρική συμπεριφορά των Φ/Β πλαισίων

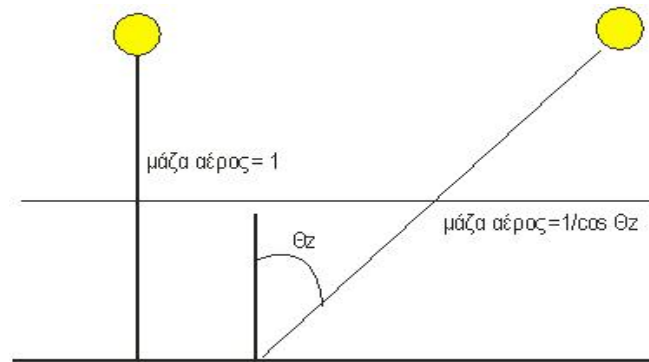
### 1.1 Εισαγωγή

Τα φωτοβολταϊκά (Φ/Β) συστήματα μετατρέπουν την ηλιακή ενέργεια σε ηλεκτρική ενέργεια. Αποτελούνται από διόδους ημιαγωγών (συνήθως πυριτίου), οι οποίες καθώς δέχονται στην επιφάνειά τους την ηλιακή ακτινοβολία, εκδηλώνουν διαφορά δυναμικού ανάμεσα στην εμπρός και την πίσω όψη τους. Η διαδικασία αυτή βασίζεται στο Φ/Β φαινόμενο, και το ρεύμα που παράγεται είναι συνεχές (Σχήμα 1.1).

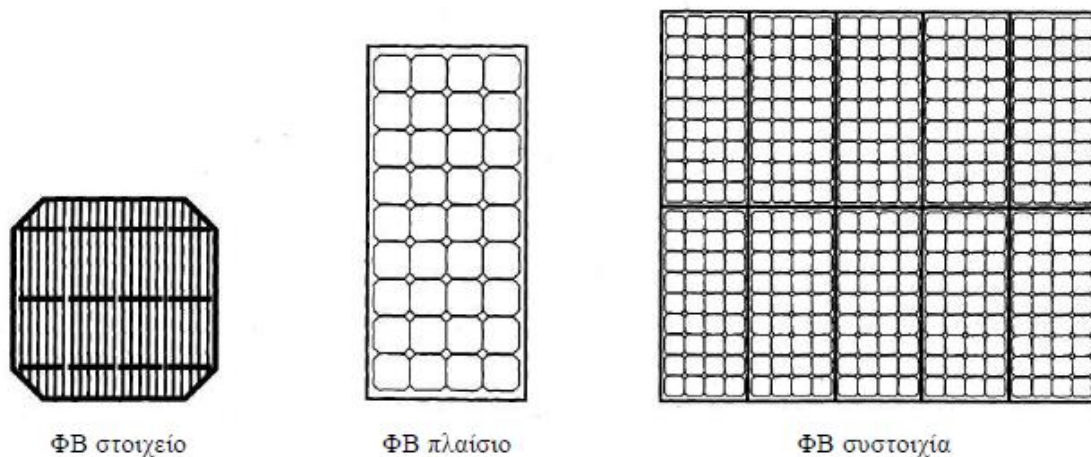


Σχήμα 1.1: Το Φ/Β φαινόμενο

Σε ένα Φ/Β σύστημα, η θεμελιώδης μονάδα μετατροπής της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική ονομάζεται Φ/Β στοιχείο. Η μέγιστη αναπτυσσόμενη τάση ενός Φ/Β στοιχείου βρίσκεται στην περιοχή μεταξύ 0.5 V και 0.6 V. Λόγω του ότι υπάρχουν πολύ λίγες συσκευές που μπορούν να λειτουργήσουν σε τόσο χαμηλές τάσεις, τα Φ/Β στοιχεία συνδέονται σε σειρά και σχηματίζουν το Φ/Β πλαίσιο. Τα Φ/Β πλαίσια αποτελούν τις βασικές δομικές μονάδες ενός Φ/Β συστήματος. Η ταξινόμηση των Φ/Β πλαισίων γίνεται ανάλογα με την ισχύ που αυτά αποδίδουν κάτω από τις πρότυπες συνθήκες δοκιμής (Standard Test Conditions – STC), που αναφέρονται σε πυκνότητα ισχύος ηλιακής ακτινοβολίας  $1 \text{ kW/m}^2$ , θερμοκρασία πλαισίου  $25^\circ\text{C}$ , και τιμή μάζας αέρα AM1.5, που σχετίζεται με το μήκος διαδρομής της ηλιακής ακτινοβολίας μέσα στη γήινη ατμόσφαιρα (Σχήμα 1.2). Η ισχύς εξόδου που μετράται υπό STC εκφράζεται σε “Watt αιχμής” ή  $W_p$ . Ο συνδυασμός πολλών Φ/Β πλαισίων, σε σειρά ή παράλληλα, συνήθως σε μια επίπεδη επιφάνεια, αποτελεί τη Φ/Β συστοιχία. Στο Σχήμα 1.3 απεικονίζεται η ιεραρχία των Φ/Β συστημάτων κρυσταλλικού πυριτίου, που αποτελούν και την πλειονότητα των εγκατεστημένων συστημάτων.



Σχήμα 1.2: Ορισμός μάζας αέρα (AM)

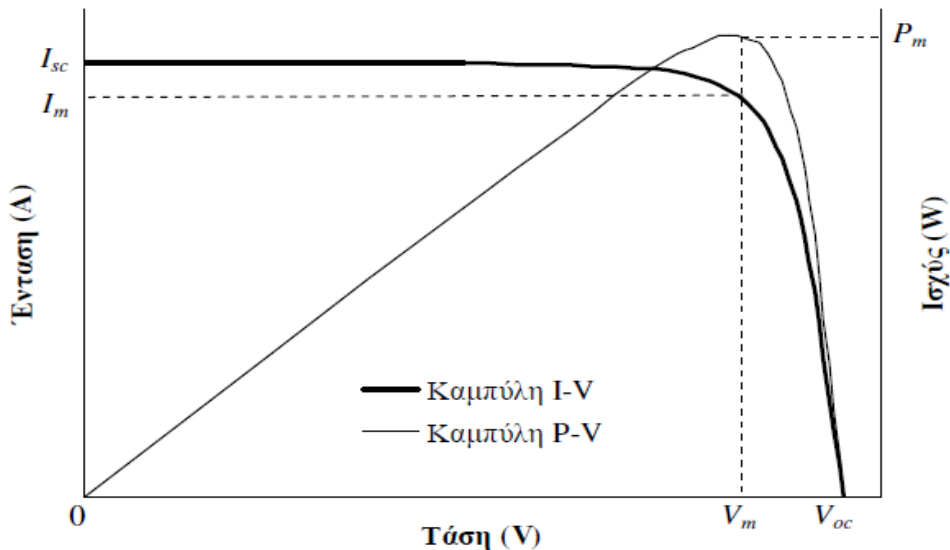


Σχήμα 1.3: Ιεραρχία Φ/Β συστημάτων κρυσταλλικού πυριτίου

Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι η θερμοκρασία ενός Φ/Β στοιχείου είναι συνήθως κατά 25-30°C υψηλότερη από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Για το λόγο αυτό, συνήθως οι κατασκευαστές παρέχουν τα δεδομένα ισχύος των Φ/Β πλαισίων και στις *συνθήκες ονομαστικής θερμοκρασίας λειτουργίας του Φ/Β στοιχείου* (Normal Operating Cell Temperature – NOCT), οι οποίες αντιστοιχούν σε θερμοκρασία Φ/Β στοιχείου περί τους 43-48°C, θερμοκρασία περιβάλλοντος 20°C, ένταση ηλιακής ακτινοβολίας 800W/m<sup>2</sup>, τιμή μάζας αέρα AM=1.5 και ταχύτητα ανέμου ίση με 1m/sec. Τα δεδομένα αυτά παρέχουν μία περισσότερο ρεαλιστική εικόνα της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από τα Φ/Β στοιχεία, αναφορικά με τις επικρατούσες περιβαλλοντικές συνθήκες.

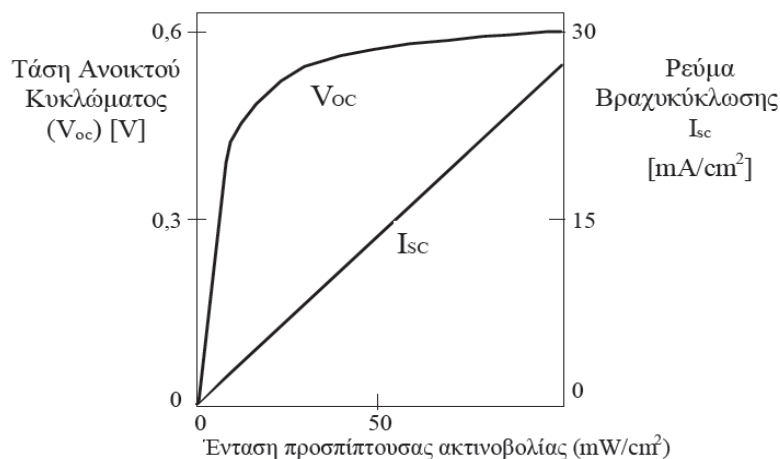
Το Φ/Β στοιχείο έχει μια αρκετά ασυνήθιστη συμπεριφορά ως πηγή παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Σε αντίθεση με τις περισσότερες ηλεκτρικές πηγές, οι οποίες διατηρούν σταθερή περίπου τάση στην περιοχή της κανονικής τους λειτουργίας, η τάση των Φ/Β στοιχείων μεταβάλλεται ριζικά (και μη γραμμικά) σε συνάρτηση με την ένταση του ρεύματος που δίνουν στο κύκλωμα, ακόμα και εάν η ακτινοβολία που δέχονται παραμένει σταθερή. Η μεταβολή της τάσης  $V$  σε συνάρτηση με την ένταση  $I$  ενός Φ/Β στοιχείου ορίζει την καμπύλη  $I-V$ . Στο Σχήμα 1.4 απεικονίζεται μια τυπική καμπύλη  $I-V$  για ένα Φ/Β στοιχείο πυριτίου, καθώς και η αντίστοιχη καμπύλη  $P-V$  του Φ/Β στοιχείου που προκύπτει, όπου  $P$  είναι η ισχύς που αποδίδεται. Σε κατάσταση βραχυκύκλωσης του Φ/Β στοιχείου, η ένταση του ρεύματος παίρνει τη μέγιστή της τιμή  $I_{sc}$ , ενώ η τάση μηδενίζεται. Σε κατάσταση ανοιχτοκύκλωσης του Φ/Β στοιχείου, η ένταση του ρεύματος μηδενίζεται, αλλά η τάση παίρνει τη μέγιστή της τιμή  $V_{oc}$ . Επομένως, στη βραχυκυκλωμένη και στην ανοιχτοκυκλωμένη κατάσταση η ισχύς  $P$  του Φ/Β στοιχείου μηδενίζεται. Στο υπόλοιπο τμήμα της

καμπύλης  $I-V$ , η ισχύς είναι μεγαλύτερη του μηδενός (αφού  $I > 0$  και  $V > 0$ ), επομένως υπάρχει ένα σημείο στη λειτουργία ενός Φ/Β στοιχείου στο οποίο η αποδιδόμενη ισχύς  $P$  μεγιστοποιείται. Η μέγιστη παραγόμενη ισχύς συμβολίζεται με  $P_m$  και αντιστοιχεί σε ένα ορισμένο ζεύγος τιμών τάσης  $V_m$  και έντασης  $I_m$  (Σχήμα 1.4). Είναι πολύ σημαντικό η λειτουργία ενός Φ/Β συστήματος να βρίσκεται όσο το δυνατόν πλησιέστερα στο σημείο μέγιστης ισχύος  $P_m$ , έτσι ώστε να μεγιστοποιείται η απόδοσή του.

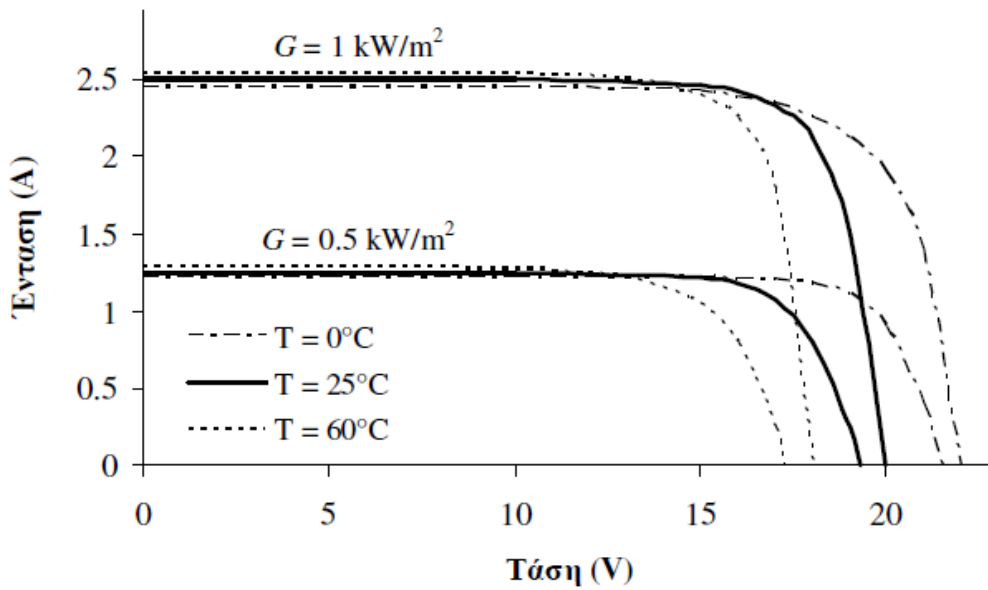


Σχήμα 1.4: Καμπύλες  $I-V$  και  $P-V$  ενός Φ/Β στοιχείου πυριτίου

Οι καμπύλες  $I-V$  και  $P-V$  ενός Φ/Β πλαισίου έχουν αντίστοιχη μορφή με αυτές που παρουσιάστηκαν στο Σχήμα 1.4 και αφορούν τα Φ/Β στοιχεία. Κάτω από μεταβαλλόμενες συνθήκες ηλιακής ακτινοβολίας και θερμοκρασίας, η μορφή των καμπυλών αυτών επηρεάζεται. Η εξάρτηση της τάσης ανοιχτοκύκλωσης  $V_{oc}$  και της έντασης βραχυκύκλωσης  $I_{sc}$  από την ηλιακή ακτινοβολία δείχνεται στο Σχήμα 1.5, από όπου φαίνεται ότι η συσχέτιση είναι γραμμική για την  $I_{sc}$  και έντονα μη γραμμική για την  $V_{oc}$ . Στο Σχήμα 1.6 απεικονίζεται η εξάρτηση της καμπύλης  $I-V$  ενός Φ/Β πλαισίου από την πυκνότητα ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας  $G$  και τη θερμοκρασία  $T$ . Από την μελέτη του Σχήματος 1.6 προκύπτει ότι η αύξηση της θερμοκρασίας  $T$  μειώνει την τάση ανοιχτοκύκλωσης  $V_{oc}$ , ενώ η αύξηση της έντασης βραχυκύκλωσης  $I_{sc}$  που παρατηρείται με την αύξηση της θερμοκρασίας  $T$  είναι πολύ μικρότερης τάξης μεγέθους.

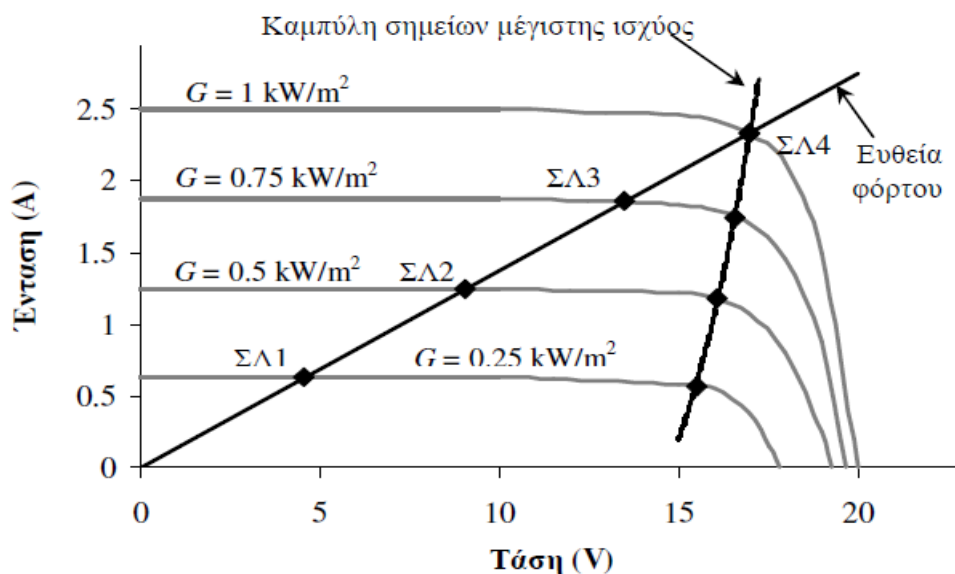


Σχήμα 1.5: Εξάρτηση  $V_{oc}$  και  $I_{sc}$  από την ηλιακή ακτινοβολία



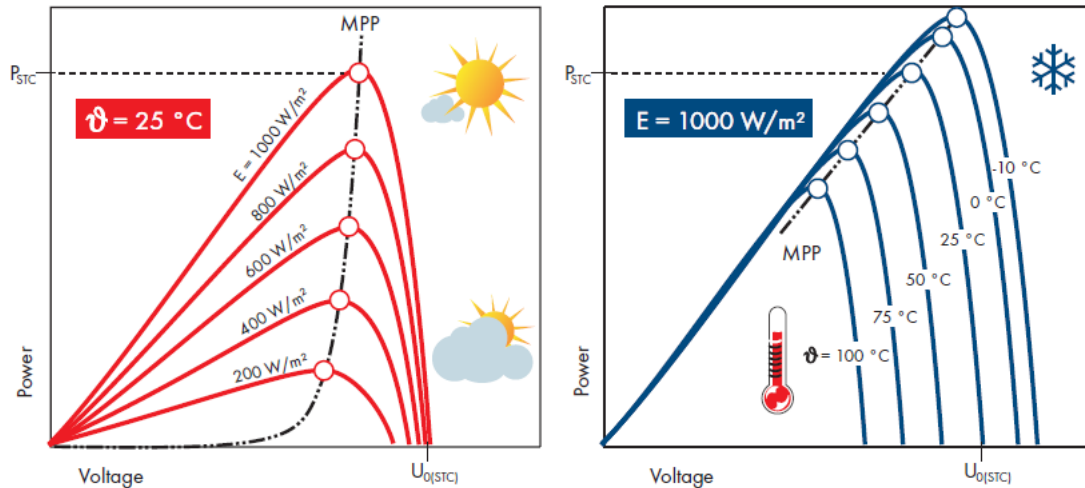
Σχήμα 1.6: Εξάρτηση καμπύλης I-V από ηλιακή ακτινοβολία και θερμοκρασία

Στο Σχήμα 1.7 απεικονίζονται οι καμπύλες I-V ενός Φ/Β πλαισίου για διαφορετικές πυκνότητες ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας  $G$ , καθώς επίσης και τα διαφορετικά σημεία λειτουργίας (ΣΛ) του Φ/Β πλαισίου, που τροφοδοτεί μια σταθερή ωμική αντίσταση. Όπως μπορεί να παρατηρηθεί, η τάση  $V_m$  που αντιστοιχεί στα σημεία μέγιστης ισχύος δεν επηρεάζεται σημαντικά από την πυκνότητα ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας  $G$ . Αντίθετα, για δεδομένο ωμικό φόρτιο και για διαφορετικές τιμές της πυκνότητας ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας  $G$ , η τιμή της τάσης  $V$  συνήθως αποκλίνει σημαντικά σε σχέση με την αντίστοιχη τιμή της  $V_m$ . Για να αντιμετωπιστεί αυτό το πρόβλημα, τα Φ/Β συστήματα συνεργάζονται με μια διάταξη που ονομάζεται *ανιχνευτής σημείου μέγιστης ισχύος* (Maximum Power Point Tracker – MPPT), η οποία διατηρεί το σημείο λειτουργίας του Φ/Β συστήματος στο σημείο μέγιστης ισχύος υπό οποιεσδήποτε συνθήκες.



Σχήμα 1.7: ΣΛ Φ/Β πλαισίου για διαφορετική ακτινοβολία

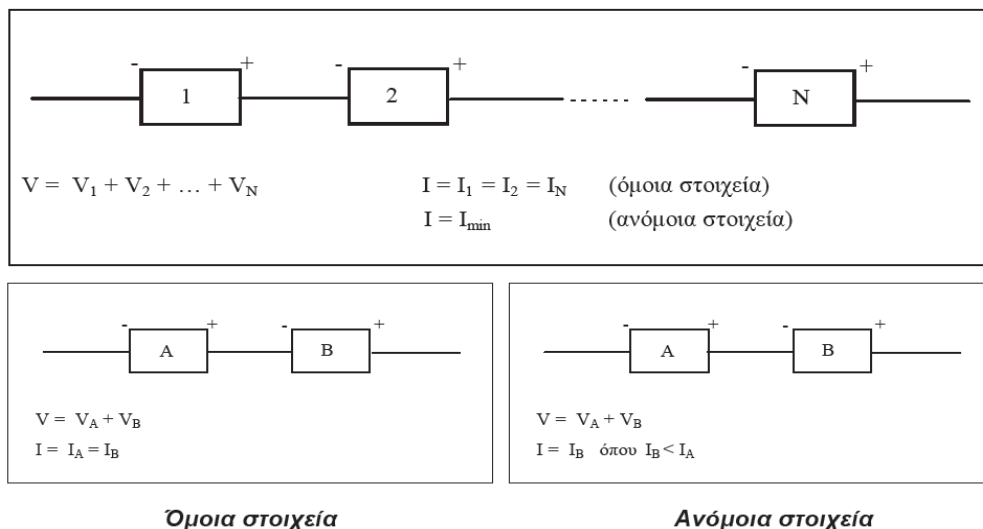
Ένα ενδιαφέρον χαρακτηριστικό της ηλεκτρικής συμπεριφοράς ενός Φ/Β πλαισίου είναι η μεταβολή της τάσης  $V_m$  που αντιστοιχεί στο σημείο μέγιστης ισχύος σε σχέση με την ηλιακή ακτινοβολία και τη θερμοκρασία. Όπως μπορεί να φανεί και από το σχήμα 1.8, η μεταβολή της ηλιακής ακτινοβολίας δεν μεταβάλλει σημαντικά την τιμή της  $V_m$ , όταν όλες οι άλλες παράμετροι παραμένουν σταθερές. Αντίθετα, η μεταβολή της θερμοκρασίας προκαλεί σημαντική διαφοροποίηση της τιμής της  $V_m$  (θεωρώντας πάλι σταθερές τις υπόλοιπες παραμέτρους).



Σχήμα 1.8: Εξάρτηση καμπύλης P-V από ηλιακή ακτινοβολία και θερμοκρασία

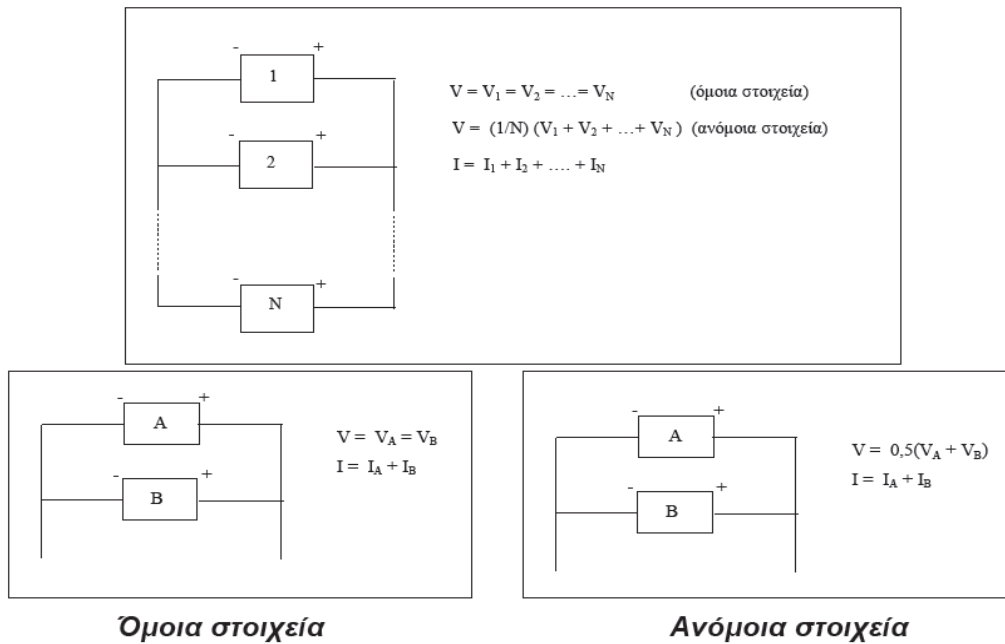
### 1.2 Συνδεσμολογίες Φ/Β

Τα Φ/Β στοιχεία, όπως και τα Φ/Β πλαίσια, μπορούν να συνδεθούν σε σειρά ή παράλληλα. Στη συνδεσμολογία σε σειρά (Σχήμα 1.9), οι τάσεις προστίθενται και το ρεύμα παραμένει το ίδιο για όμοια στοιχεία, ενώ για συνδεσμολογία ανόμοιων στοιχείων το ρεύμα είναι ίσο με το ελάχιστο ρεύμα των Φ/Β της στοιχειοσειράς. Στην παράλληλη σύνδεση (Σχήμα 1.10), η τάση παραμένει κοινή ενώ το συνολικό ρεύμα είναι ίσο με το άθροισμα των επιμέρους ρευμάτων.



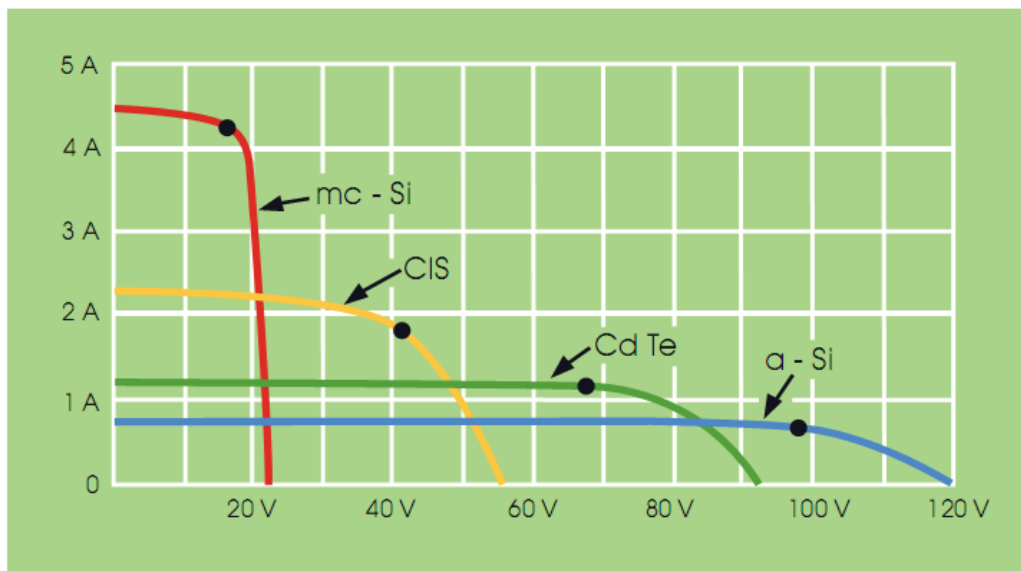
Σχήμα 1.9: Συνδεσμολογία Φ/Β σε σειρά





Σχήμα 1.10: Συνδεσμολογία Φ/Β παράλληλα

Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι δεν πρέπει να συνδέονται σε σειρά ή παράλληλα Φ/Β πλαίσια διαφορετικής τεχνολογίας. Στο Σχήμα 1.11 παρουσιάζονται οι καμπύλες I-V τεσσάρων Φ/Β πλαισίων διαφορετικών τεχνολογιών, που έχουν όλα την ίδια ισχύ αιχμής (75 W<sub>p</sub>). Από τη μελέτη του Σχήματος 1.11 προκύπτει ότι η κάθε Φ/Β τεχνολογία παρουσιάζει εντελώς διαφορετικά χαρακτηριστικά τάσης και ρεύματος.



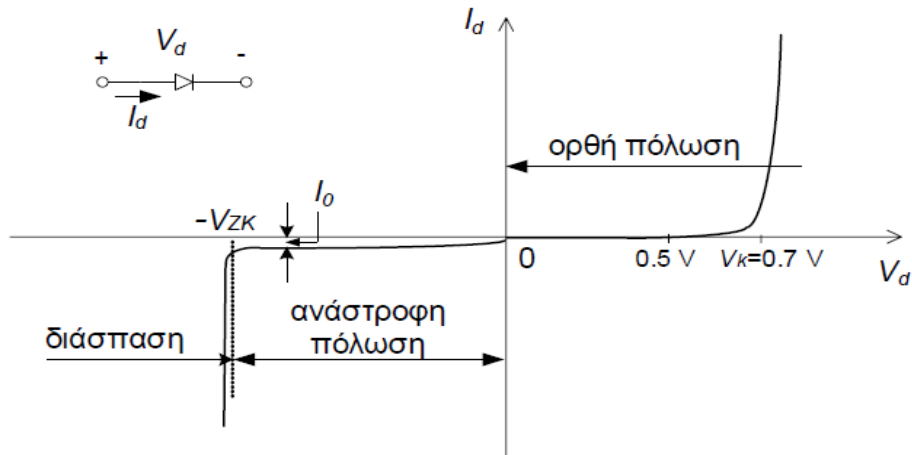
Σχήμα 1.11: Καμπύλες I-V για διαφορετικές τεχνολογίες Φ/Β ισχύος 75 W<sub>p</sub>

### 1.3 Ισοδύναμο κύκλωμα Φ/Β στοιχείου

Ένα απλό ισοδύναμο κυκλωματικό μοντέλο του Φ/Β στοιχείου αποτελείται από μία πραγματική δίοδο παράλληλα με μία ιδανική πηγή ρεύματος. Πριν γίνει η περιγραφή του ισοδύναμου κυκλώματος, θα αναφερθούν κάποια βασικά στοιχεία σε σχέση με τη συμπεριφορά της διόδου. Στο

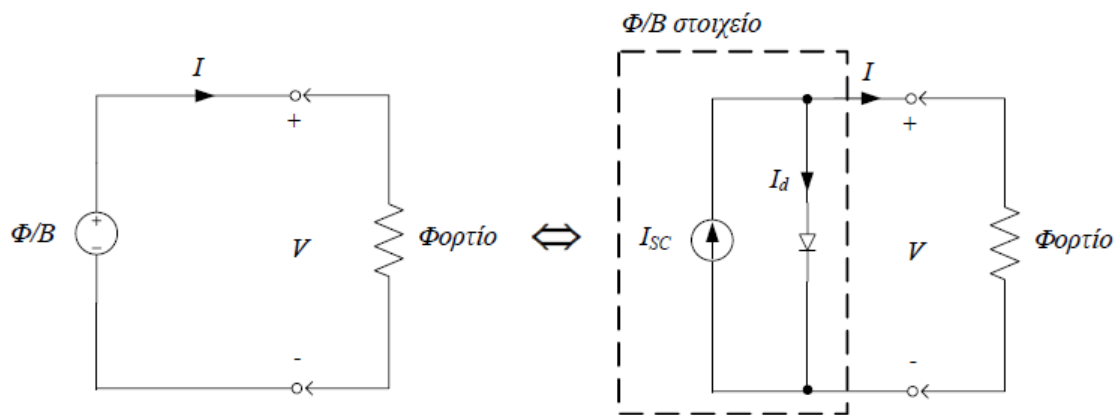
Σχήμα 1.12 φαίνεται η μορφή της χαρακτηριστικής ρεύματος-τάσης  $I_d-V_d$  της διόδου πυριτίου. Οι άξονες στο Σχήμα 1.12 δεν είναι υπό κλίμακα, προκειμένου να φανούν καλύτερα οι λεπτομέρειες της χαρακτηριστικής  $I_d-V_d$ . Στο Σχήμα 1.12 φαίνεται επίσης το κυκλωματικό σύμβολο της διόδου. Όπως μπορεί να παρατηρηθεί από τη χαρακτηριστική της διόδου, υπάρχουν τρεις περιοχές, στις οποίες μπορεί να λειτουργήσει η διάσπαση:

1. Η περιοχή ορθής πόλωσης, όταν  $V_d > 0$
2. Η περιοχή ανάστροφης πόλωσης, όταν  $-V_{zk} < V_d < 0$
3. Η περιοχή διάσπασης, όταν  $V_d < -V_{zk}$ , όπου  $V_{zk}$  είναι η τάση διάσπασης της διόδου



Σχήμα 1.12: Χαρακτηριστική  $I_d-V_d$  διόδου

Το απλό ισοδύναμο κύκλωμα ενός Φ/Β στοιχείου απεικονίζεται στο Σχήμα 1.13. Η ιδανική πηγή ρεύματος δίνει ρεύμα ανάλογο της ηλιακής έντασης στην οποία εκτίθεται το Φ/Β στοιχείο.



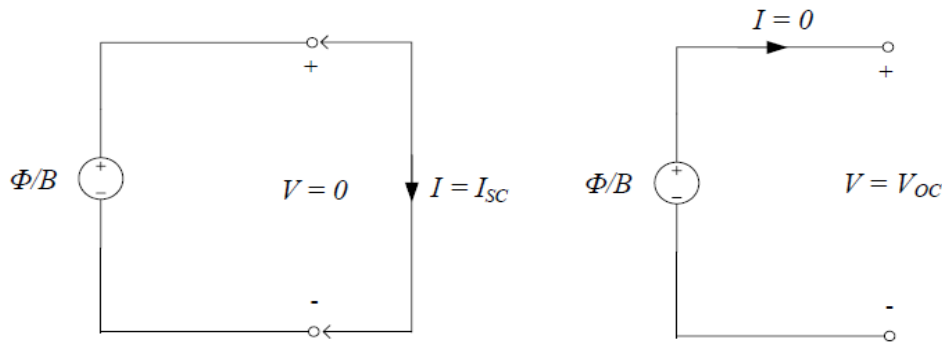
Σχήμα 1.13: Απλό ισοδύναμο κύκλωμα Φ/Β στοιχείου

Υπάρχουν δύο συνθήκες με ιδιαίτερο ενδιαφέρον για το πραγματικό Φ/Β στοιχείο. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.14, οι συνθήκες αυτές είναι:

1. Το ρεύμα βραχυκύκλωσης  $I_{sc}$  που ρέει όταν οι ακροδέκτες είναι βραχυκυκλωμένοι
2. Η τάση ανοικτοκύκλωσης  $V_{oc}$  μεταξύ των ακροδεκτών όταν τα άκρα μένουν ανοικτά

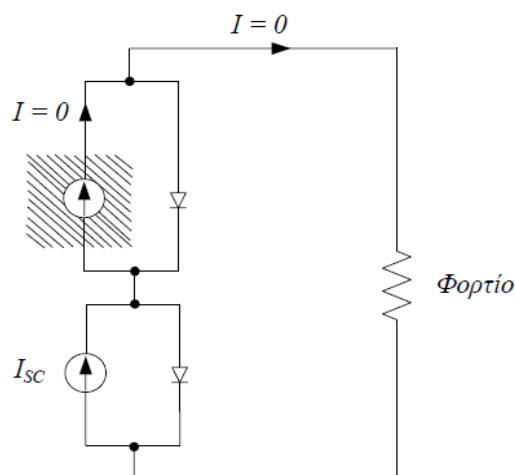
Όταν βραχυκυκλωθούν οι ακροδέκτες του ισοδύναμου κυκλώματος του Φ/Β στοιχείου, η πραγματική διάσπαση δε διαρρέεται από ρεύμα αφού  $V = 0$ , οπότε όλο το ρεύμα της ιδανικής πηγής ρεύματος ρέει μέσα από τους βραχυκυκλωμένους ακροδέκτες. Επειδή αυτό το ρεύμα

βραχυκύκλωσης θα πρέπει να είναι ίσο με  $I_{sc}$ , προκύπτει το μέτρο του ρεύματος της ιδανικής πηγής ρεύματος θα πρέπει να είναι επίσης ίσο με  $I_{sc}$ .



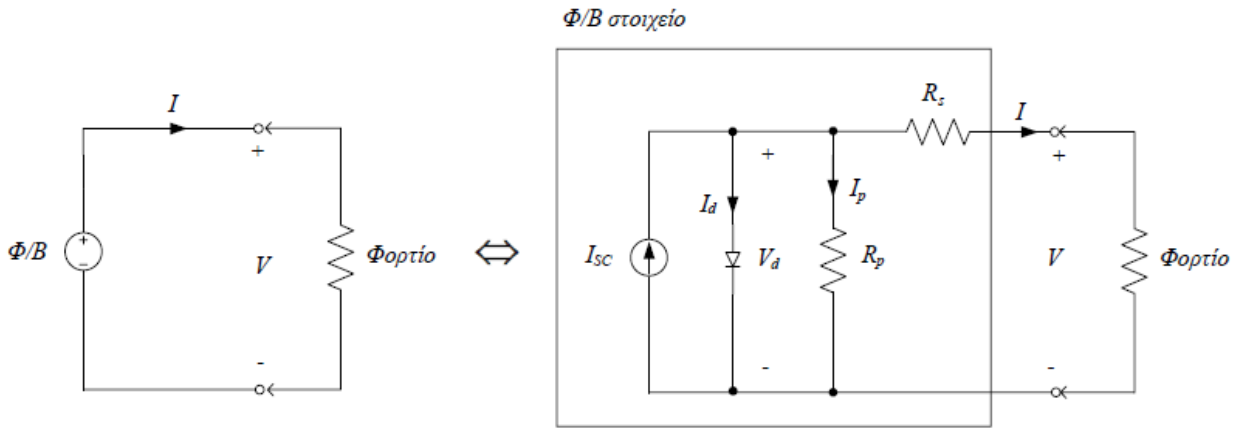
Σχήμα 1.14: Απλό ισοδύναμο κύκλωμα Φ/Β στοιχείου –  $I_{sc}$  και  $V_{oc}$

Υπάρχουν φορές που χρειάζεται ένα ακριβέστερο κυκλωματικό μοντέλο για το Φ/Β στοιχείο, σε σχέση με το απλό κυκλωματικό μοντέλο του Σχήματος 1.13. Για παράδειγμα, ας θεωρηθεί η επίδραση της σκίασης σε μία σειρά Φ/Β στοιχείων που συνδέονται σε σειρά (Σχήμα 1.15), τότε το Φ/Β αυτό στοιχείο δεν παράγει ρεύμα. Στο απλό ισοδύναμο κύκλωμα για το Φ/Β στοιχείο (Σχήμα 1.13), το ρεύμα μέσα από την πηγή ρεύματος αυτού του Φ/Β στοιχείου είναι μηδέν και η διόδός του είναι ανάστροφα πολωμένη οπότε δε διαρρέεται από ρεύμα (εκτός από ένα μικρό ρεύμα κόρου). Αυτό σημαίνει ότι το απλό ισοδύναμο κύκλωμα δείχνει ότι δεν θα παραδοθεί ισχύς στο φορτίο αν ένα οποιοδήποτε από τα Φ/Β στοιχεία είναι υπό σκιά. Παρόλο που αληθεύει ότι τα Φ/Β στοιχεία είναι πολύ ευαίσθητα στη σκίαση, στην πραγματικότητα η κατάσταση δεν είναι τόσο άσχημη. Έτσι, υπάρχει ανάγκη για ένα ακριβέστερο κυκλωματικό μοντέλο Φ/Β στοιχείου προκειμένου να μπορούμε να μοντελοποιούμε ρεαλιστικά προβλήματα όπως αυτό της σκίασης του Φ/Β στοιχείου.



Σχήμα 1.15: Σκίαση εν σειρά Φ/Β στοιχείων στο απλό ισοδύναμο κύκλωμα Φ/Β

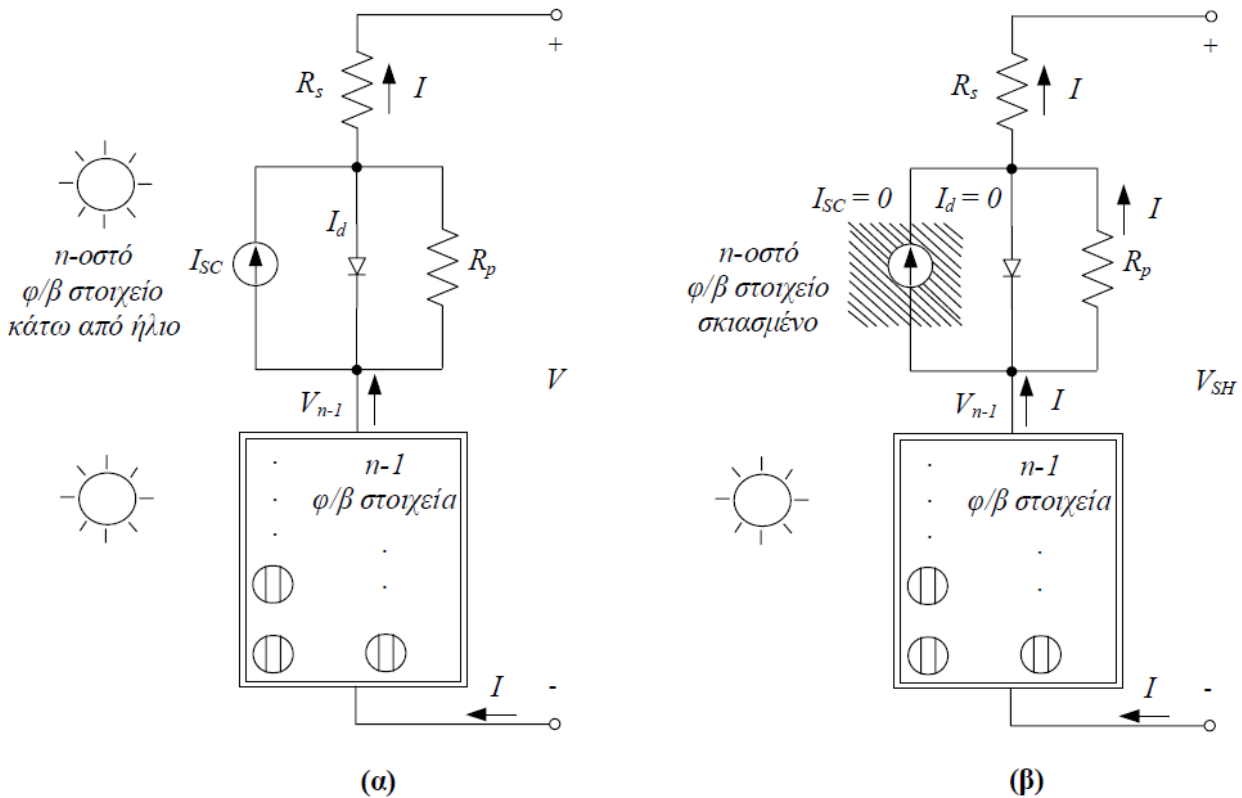
Το Σχήμα 1.16 δείχνει ένα ακριβέστερο κυκλωματικό μοντέλο του Φ/Β στοιχείου, το οποίο μοντέλο περιέχει μία παράλληλη αντίσταση διαρροής  $R_p$ , καθώς και μια αντίσταση σειράς  $R_s$ . Οι τιμές των δυο αυτών αντιστάσεων είναι τέτοιες ώστε  $R_p > 100 \cdot V_{oc}/I_{sc}$  και  $R_s < 0.01 \cdot V_{oc}/I_{sc}$ . Η ιδανική πηγή ρεύματος  $I_{sc}$  στην περίπτωση αυτή δίνει ρεύμα στη διόδο, την παράλληλη αντίσταση, και το φορτίο που βρίσκεται σε σειρά με την  $R_s$ .



Σχήμα 1.16: Ακριβέστερο ισοδύναμο κύκλωμα Φ/Β στοιχείου

### 1.4 Επίδραση της σκίασης στη λειτουργία των Φ/Β

Η έξοδος ενός Φ/Β πλαισίου μπορεί να μειωθεί δραματικά όταν ακόμα και ένα μικρό τμήμα του είναι υπό σκιά. Εκτός και αν καταβάλλονται ειδικές προσπάθειες για να αντισταθμιστεί το πρόβλημα της σκίασης, ακόμα και αν ένα μόνο Φ/Β στοιχείο είναι σκιασμένο σε μια μεγάλη σειρά Φ/Β στοιχείων, μπορεί εύκολα να μειωθεί η ισχύς εξόδου περισσότερο από το μισό. Για τη διατήρηση της απόδοσης των Φ/Β πλαισίων, προστίθενται εξωτερικές δίοδοι από τον κατασκευαστή των Φ/Β ή από το σχεδιαστή του συστήματος. Οι δίοδοι αυτές έχουν ως στόχο να μετριάσουν την επίδραση της σκίασης στις χαρακτηριστικές  $I-V$ . Τέτοιες δίοδοι συνήθως προστίθενται παράλληλα στα Φ/Β πλαίσια ή στις ομάδες Φ/Β στοιχείων εντός ενός Φ/Β πλαισίου.

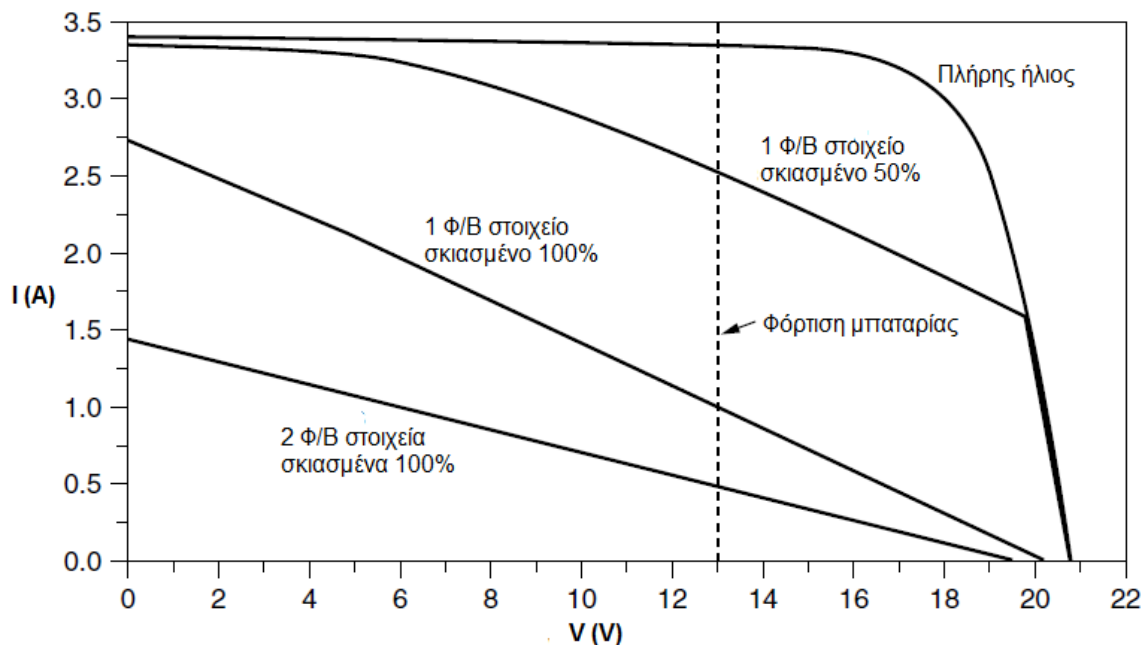


Σχήμα 1.17: Σκίαση Φ/Β στοιχείου σε ένα Φ/Β πλαίσιο

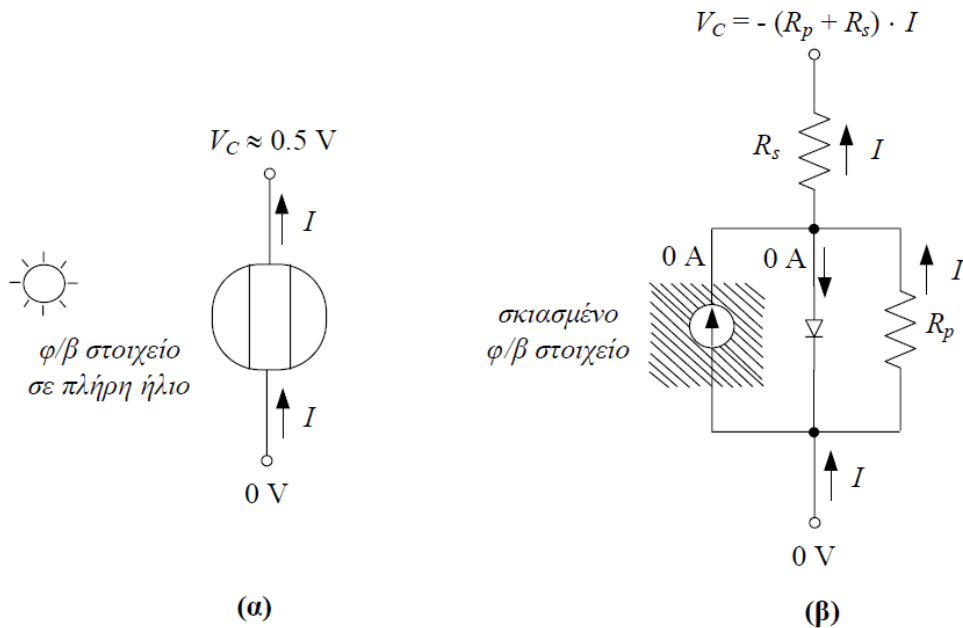
Για την κατανόηση του φαινομένου της σκίασης θεωρούμε το Σχήμα 1.17 όπου το  $n$ -οστό Φ/Β στοιχείο του Φ/Β πλαισίου είναι διαχωρισμένο από τα υπόλοιπα  $n-1$  Φ/Β στοιχεία. Το Φ/Β πλαίσιο έχει τάση  $V$  και ρεύμα  $I$ . Το  $n$ -οστό Φ/Β στοιχείο είναι σχεδιασμένο στην κορυφή του Φ/Β στοιχείου, παρόλο που θα μπορούσε να ήταν οποιοδήποτε Φ/Β στοιχείο. Τα υπόλοιπα  $n-1$  Φ/Β στοιχεία εικονίζονται ως ένα Φ/Β πλαίσιο με τάση  $V_{n-1}$  και ρεύμα  $I$ .

Στο Σχήμα 1.17(α) όλα τα Φ/Β στοιχεία είναι κάτω από ήλιο και καθώς συνδέονται στη σειρά, το ίδιο ρεύμα  $I$  ρέει μέσα από κάθε ένα από αυτά. Στο Σχήμα 1.17(β), όμως, το Φ/Β στοιχείο στην κορυφή είναι σκιασμένο και η πηγή ρεύματός του  $I_{sc}$  δεν διαρρέεται από ρεύμα. Η πτώση τάσης κατά μήκος της  $R_p$ , καθώς το ρεύμα  $I$  ρέει μέσα από αυτή, πολώνει ανάστροφα τη δίοδο, οπότε το ρεύμα της διόδου είναι επίσης μηδενικό. Αυτό σημαίνει ότι όλο το ρεύμα που ρέει μέσα από το Φ/Β πλαίσιο πρέπει να περάσει μέσα από τις  $R_p$  και  $R_s$  του σκιασμένου Φ/Β στοιχείου. Αυτό σημαίνει ότι η τάση του  $n$ -οστού Φ/Β στοιχείου αφαιρείται, αντί να προστίθεται στην τάση του Φ/Β πλαισίου.

Η μεταβολή της καμπύλης  $I-V$  ενός Φ/Β πλαισίου λόγω σκίασης μόλις ενός ή δύο Φ/Β στοιχείων μπορεί να είναι σημαντική και δείχνεται στο Σχήμα 1.18. Πέραν της επίδρασης στα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά ενός Φ/Β πλαισίου, μπορούν επίσης να δημιουργηθούν τοπικά, πιθανότατα καταστροφικά, θερμά σημεία στα σκιασμένα Φ/Β πλαίσια. Το Σχήμα 1.19 δείχνει μια τυπική περίπτωση. Συγκεκριμένα, στο Σχήμα 1.19(α) ένα Φ/Β στοιχείο σε πλήρη ήλιο λειτουργώντας στα κανονικά του όρια συνεισφέρει περίπου 0.5 V στην τάση εξόδου του Φ/Β πλαισίου. Αντίθετα, στο Σχήμα 1.19(β) ένα σκιασμένο Φ/Β προκαλεί πτώση τάσης  $V_C$ , δηλαδή μειώνει την τάση εξόδου του Φ/Β πλαισίου. Αυτή η πτώση τάσης μπορεί να είναι σημαντική (σε αρκετές περιπτώσεις μπορεί να ξεπερνάει τα 10 V).

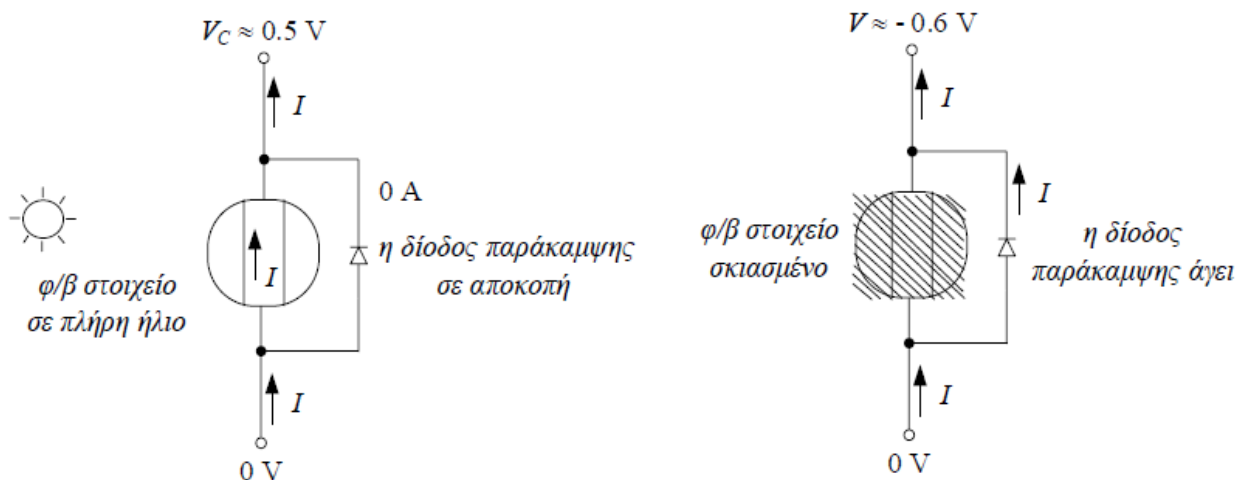


Σχήμα 1.18: Επίδραση σκίασης Φ/Β στοιχείων στην καμπύλη  $I-V$

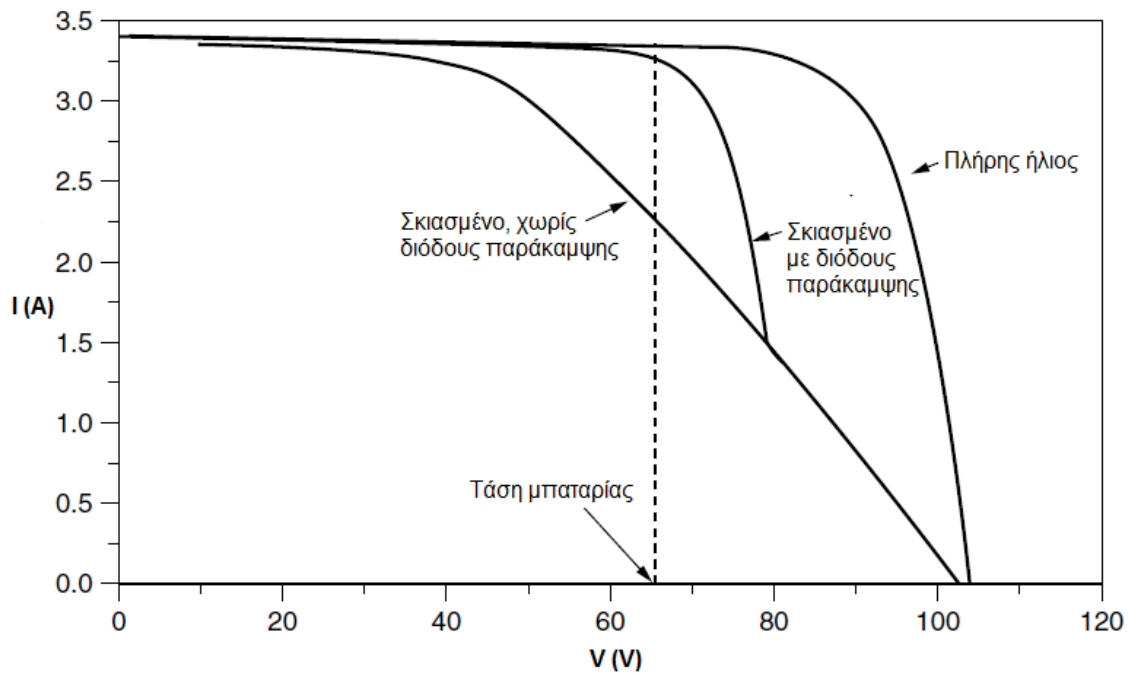


Σχήμα 1.19: Πτώση τάσης Φ/Β στοιχείου λόγω σκίασης

Το πρόβλημα της πτώσης τάσης στα σκιασμένα φ/β στοιχεία μπορεί να διορθωθεί προσθέτοντας μία *δίοδος παράκαμψης* κατά μήκος κάθε φ/β στοιχείου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.20. Όταν ένα φ/β στοιχείο είναι σε πλήρη ήλιο, υπάρχει μία ανύψωση τάσης κατά μήκος του φ/β στοιχείου οπότε η δίοδος παράκαμψης είναι σε αποκοπή (ανάστροφα πολωμένη) και δεν περνάει ρεύμα μέσα από αυτήν. Όταν όμως το φ/β στοιχείο είναι σκιασμένο, η πτώση τάσης (που θα συμβεί αν το φ/β στοιχείο άγει οποιοδήποτε ρεύμα) πολώνει ορθά τη δίοδο παράκαμψης, εκτρέποντας το ρεύμα μέσα από τη δίοδο παράκαμψης. Όταν η δίοδος παράκαμψης άγει, έχει πτώση τάσης περίπου 0.6 V στα άκρα της. Έτσι, η δίοδος παράκαμψης ελέγχει την πτώση τάσης κατά μήκος του σκιασμένου φ/β στοιχείου, περιορίζοντας την στη σχετικά μικρή τιμή των 0.6 V αντί για τη μάλλον μεγάλη πτώση τάσης που θα λάμβανε χώρα αν δεν υπήρχε η δίοδος παράκαμψης. Η επίδραση της δόδου παράκαμψης στην καμπύλη *I-V* ενός Φ/Β πλαισίου δείχνεται στο Σχήμα 1.21. Όπως μπορεί να παρατηρηθεί σε σύγκριση με το Σχήμα 1.18, η προσθήκη της δόδου παράκαμψης προσφέρει σημαντικά βελτιωμένα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του Φ/Β πλαισίου υπό συνθήκες σκίασης.

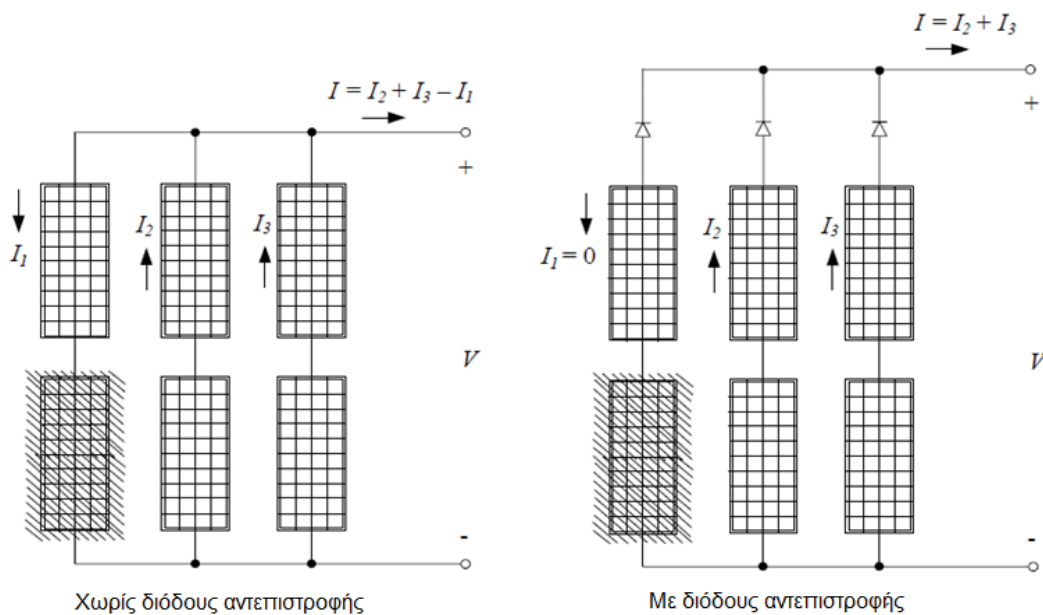


Σχήμα 1.20: Άμβλυνση του προβλήματος της σκίασης Φ/Β με προσθήκη δόδου παράκαμψης



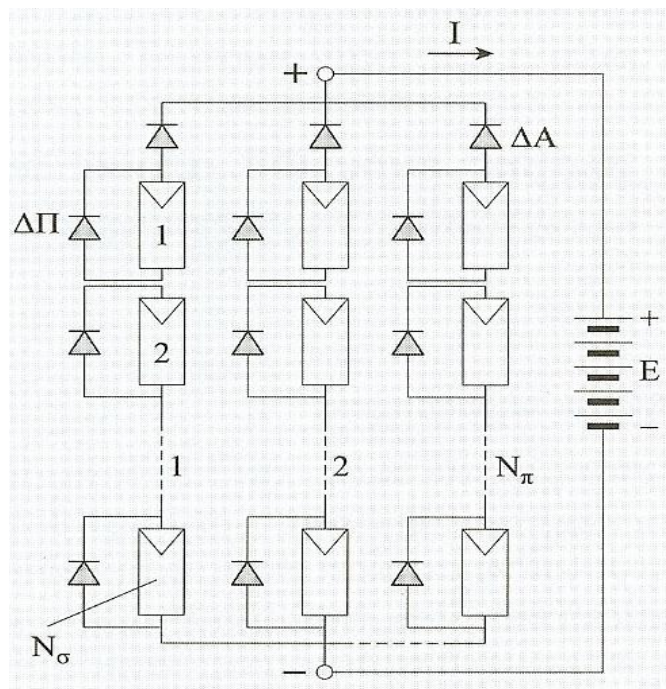
Σχήμα 1.21: Επίδραση της διόδου παράκαμψης στην καμπύλη I-V ενός Φ/Β πλαισίου

Σε πραγματικά Φ/Β πλαίσια, είναι μη πρακτική η προσθήκη διόδων παράκαμψης κατά μήκος κάθε Φ/Β στοιχείου. Όμως οι κατασκευαστές συχνά παρέχουν τουλάχιστον μία δίοδο παράκαμψης γύρω από κάθε Φ/Β πλαίσιο για να βοηθήσουν στην προστασία των Φ/Β πλαισίων, και μερικές φορές παρέχουν πολλές τέτοιες διόδους γύρω από ομάδες Φ/Β στοιχείων μέσα σε ένα Φ/Β πλαίσιο. Οι διόδους αυτές δεν έχουν μεγάλη επίδραση στα προβλήματα σκίασης ενός απλού Φ/Β πλαισίου, όμως μπορεί να έχουν πολύ σημαντική επίδραση όταν ένα πλήθος Φ/Β πλαισίων συνδέονται σε σειρά. Όπως τα Φ/Β στοιχεία συνδέονται σε σειρά για να αυξηθεί η τάση του Φ/Β πλαισίου, έτσι και τα Φ/Β πλαίσια μπορούν να συνδεθούν σε σειρά για να αυξηθεί η τάση του Φ/Β συλλέκτη. Το πλεονέκτημα της διόδου παράκαμψης για ένα Φ/Β στοιχείο εφαρμόζεται επίσης και σε μία δίοδο παράκαμψης κατά μήκος ενός πλήρους Φ/Β πλαισίου.



Σχήμα 1.22: Άμβλυση του προβλήματος της σκίασης Φ/Β πλαισίων με δίοδο αντεπιστροφής

Οι δίοδοι παράκαμψης βοηθούν το ρεύμα να πάει γύρω από ένα σκιασμένο ή ένα ελαττωματικό Φ/Β πλαίσιο, σε μία ομάδα Φ/Β πλαισίων σε σειρά. Αυτό όχι μόνο βελτιώνει την απόδοση της σειράς των Φ/Β πλαισίων, αλλά επίσης εμποδίζει τη δημιουργία θερμών σημείων σε ατομικά σκιασμένα Φ/Β στοιχεία. Όταν σειρές Φ/Β πλαισίων συνδέονται παράλληλα, προκύπτει παρόμοιο πρόβλημα όταν μία από τις σε σειρά ομάδες Φ/Β πλαισίων δεν λειτουργεί κανονικά. Αντί την παροχή ρεύματος στο συλλέκτη, μία ελαττωματική ή σκιασμένη ομάδα Φ/Β πλαισίων μπορεί να απορροφήσει ρεύμα από τον υπόλοιπο συλλέκτη. Τοποθετώντας *διόδους αντεπιστροφής* στην κορυφή κάθε ομάδας Φ/Β πλαισίων, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.22, εμποδίζεται η απορρόφηση ανάστροφου ρεύματος από μία σκιασμένη ομάδα Φ/Β πλαισίων. Ο συνδυασμός διόδων παράκαμψης και διόδων αντεπιστροφής σε μια Φ/Β συστοιχία δείχνεται στο Σχήμα 1.23.



Σχήμα 1.23: Συνδυασμός διόδων παράκαμψης και διόδων αντεπιστροφής σε μια Φ/Β συστοιχία



$x > 2h$ : ελάχιστη απόσταση μεταξύ συστοιχιών για αποφυγή σκιάσεων

Σχήμα 1.24: Ελάχιστη απόσταση Φ/Β πλαισίων λόγω σκίασης



Σε πρακτικό επίπεδο, ένας εμπειρικός κανόνας για να βεβαιωθούμε ότι το Φ/Β σύστημα δεν θα αποδίδει λιγότερο λόγω σκιάσεων, είναι να θεωρούμε απόσταση από το τυχόν εμπόδιο (κτίριο, δέντρο, Φ/Β πλαίσιο, κλπ) τουλάχιστον διπλάσια του ύψους του εμποδίου (Σχήμα 1.24).

### 1.5 Καμπύλες I-V φορτίων συνδεδεμένων σε Φ/Β

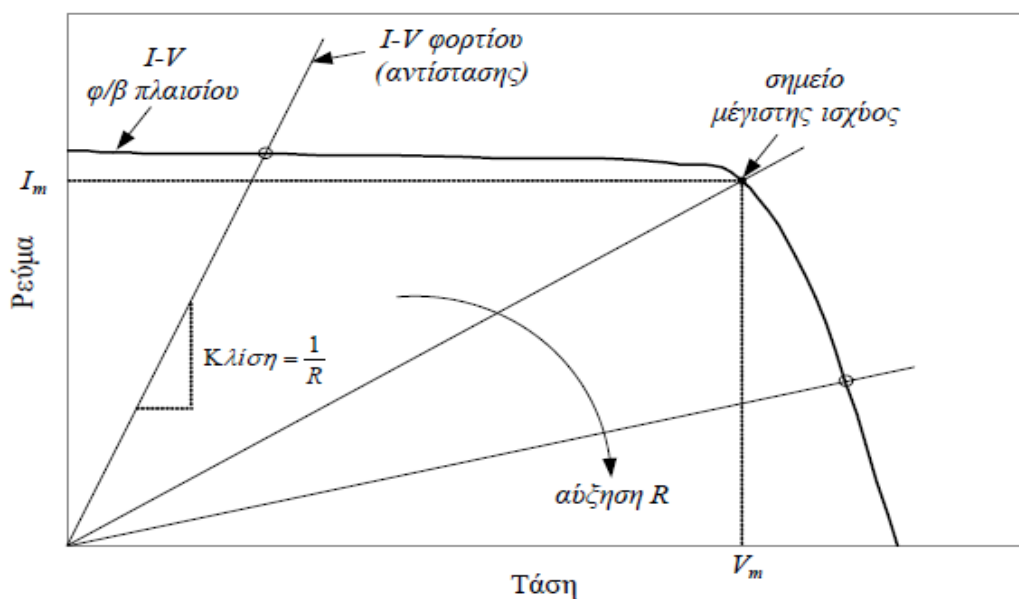
Ενώ η χαρακτηριστική I-V ενός Φ/Β στοιχείου, πλαισίου, ή συλλέκτη προσδιορίζει τους συνδυασμούς τάσης και ρεύματος που είναι επιτρεπτοί κάτω από τις ισχύουσες συνθήκες περιβάλλοντος, από μόνη της η χαρακτηριστική αυτή δεν μας λέει τίποτα για το σημείο της καμπύλης πάνω στο οποίο θα λειτουργεί το Φ/Β 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.

#### 1.5.1 Καμπύλη I-V ωμικού φορτίου

Για να φανεί η σπουδαιότητα και η ανάγκη για τις καμπύλες φορτίου, ας θεωρηθεί το καθαρά ωμικό φορτίο του Σχήματος 1.25. Για το φορτίο αυτό:

$$V = I \cdot R \Rightarrow I = \left(\frac{1}{R}\right) \cdot V$$

το οποίο, όταν σχεδιάζεται σε γράφημα ρεύματος ως συνάρτηση της τάσης, είναι μία ευθεία γραμμή με κλίση  $1/R$ . Όπως φαίνεται από το Σχήμα 1.25, καθώς αυξάνει η αντίσταση  $R$ , το σημείο λειτουργίας στο οποίο τέμνονται οι χαρακτηριστικές I-V του Φ/Β και του φορτίου μετακινείται κατά μήκος της χαρακτηριστικής I-V του Φ/Β από αριστερά προς τα δεξιά.



Σχήμα 1.25: Φ/Β πλαίσιο που παρέχει ισχύ σε ωμικό φορτίο

Επειδή η ισχύς που παραδίδεται στο φορτίο είναι το γινόμενο τάσης και ρεύματος, θα υπάρχει μία συγκεκριμένη τιμή αντίστασης η οποία θα οδηγεί σε μέγιστη ισχύ:

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

όπου  $V_m$  και  $I_m$  είναι η τάση και το ρεύμα στο σημείο μέγιστης ισχύος. 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  $1 \text{ kW/m}^2$ , θερμοκρασία  $25^\circ\text{C}$ , και λόγο μάζας αέρα AM 1.5.

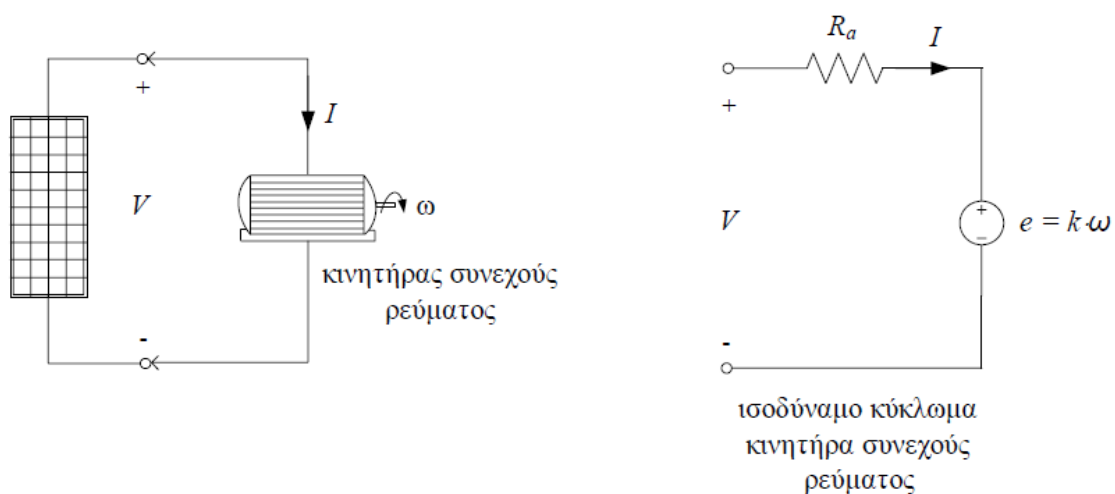
Επιπλέον, στο Σχήμα 1.7 δείχνεται ότι με σταθερό ωμικό φορτίο, το σημείο λειτουργίας απομακρύνεται από το σημείο μέγιστης ισχύος καθώς μειώνεται η ηλιακή ένταση, οπότε το Φ/Β πλαίσιο γίνεται ολοένα και λιγότερο αποδοτικό.

### 1.5.2 Καμπύλη I-V κινητήρα DC

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 1.26. Ας σημειωθεί ότι καθώς ο κινητήρας περιστρέφεται, αναπτύσσει μία αντιηλεκτρεγερτική δύναμη  $e$ , η οποία είναι μία τάση ανάλογη με την ταχύτητα περιστροφής  $\omega$  του κινητήρα που αντιτίθεται στην τάση που παρέχεται από το Φ/Β πλαίσιο. Από το ισοδύναμο κύκλωμα του Σχήματος 1.26, η σχέση ρεύματος-τάσης για τον κινητήρα συνεχούς ρεύματος είναι:

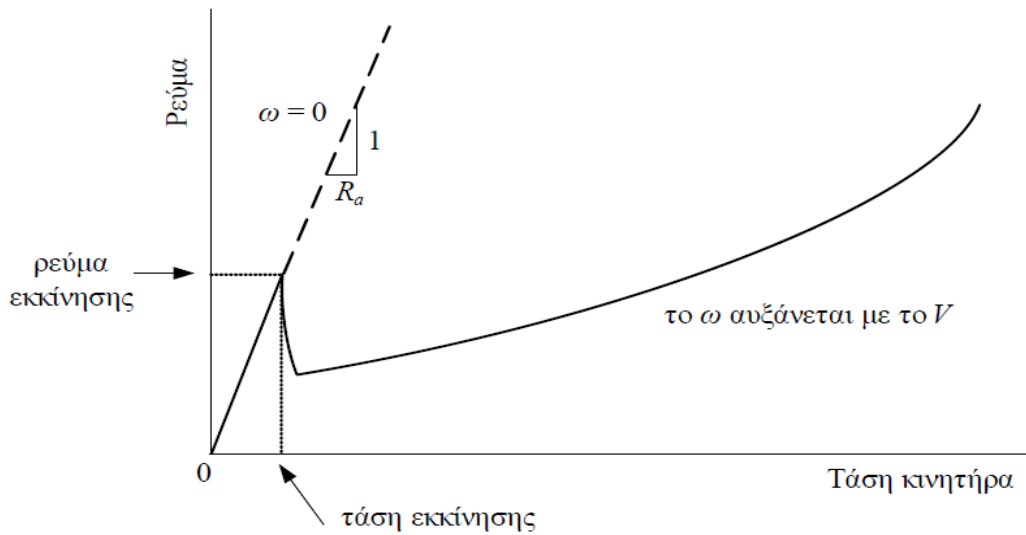
$$V = I \cdot R_a + k \cdot \omega$$

όπου η αντιηλεκτρεγερτική δύναμη είναι  $e = k \cdot \omega$  και  $R_a$  είναι η αντίσταση του κινητήρα. Ένας κινητήρας συνεχούς ρεύματος περιστρέφεται με σχεδόν σταθερή ταχύτητα για κάθε δοσμένη εφαρμοζόμενη τάση, αν και οι απαιτήσεις ροπής του φορτίου ίσως να αλλάζουν.



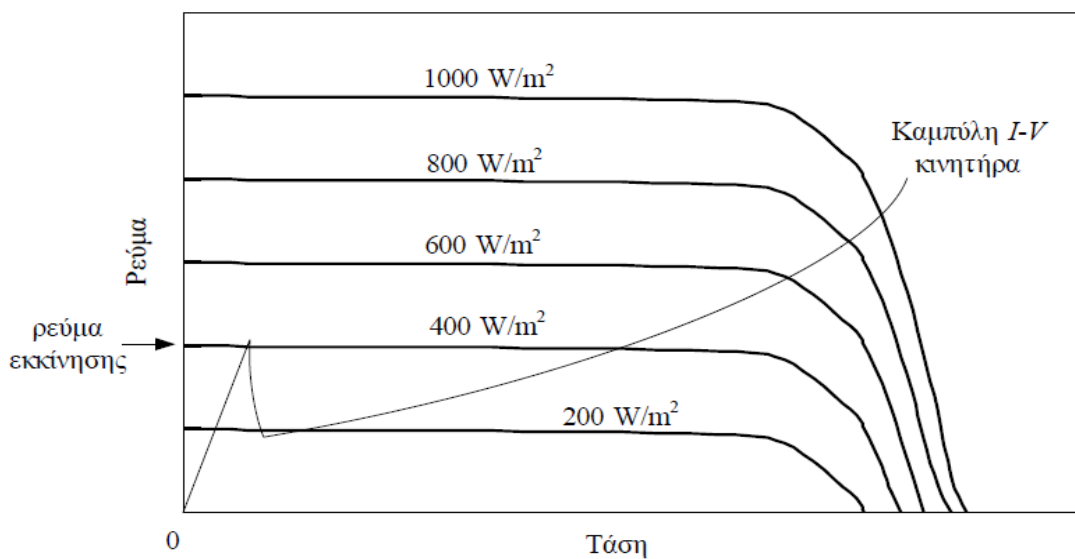
Σχήμα 1.26: Ηλεκτρικό μοντέλο κινητήρα DC με μόνιμους μαγνήτες

Σύμφωνα με τα όσα αναφέρθηκαν παραπάνω, η χαρακτηριστική ρεύματος-τάσης του κινητήρα συνεχούς ρεύματος θα έχει τη μορφή του Σχήματος 1.27. Αξίζει να σημειωθεί ότι στην εκκίνηση, ενώ  $\omega = 0$ , το ρεύμα αυξάνει ραγδαία με την αύξηση της τάσης μέχρι το ρεύμα να είναι αρκετό να δημιουργήσει ικανή ροπή εκκίνησης για να ξεκινήσει η περιστροφή του κινητήρα. Μόλις ο κινητήρας ξεκινήσει να περιστρέφεται, η αντιηλεκτρεγερτική δύναμη μειώνει το ρεύμα και έτσι το ρεύμα αυξάνει πιο αργά σε σχέση με την αύξηση της τάσης.



Σχήμα 1.27: Καμπύλη I-V κινητήρα DC με μόνιμους μαγνήτες

Στο Σχήμα 1.28, η χαρακτηριστική I-V του κινητήρα συνεχούς ρεύματος συνδυάζεται με τις χαρακτηριστικές I-V του Φ/Β πλαισίου προκειμένου να προσδιοριστούν τα σημεία λειτουργίας. Στο παράδειγμα αυτό ο κινητήρας θα εκκινήσει όταν η ηλιακή ένταση φτάσει τουλάχιστον την τιμή 400 W/m<sup>2</sup>. Μόλις ο κινητήρας εκκινήσει, στη συνέχεια χρειάζεται μόνο 200 W/m<sup>2</sup> ηλιακή ένταση για να συνεχίσει να κινείται.

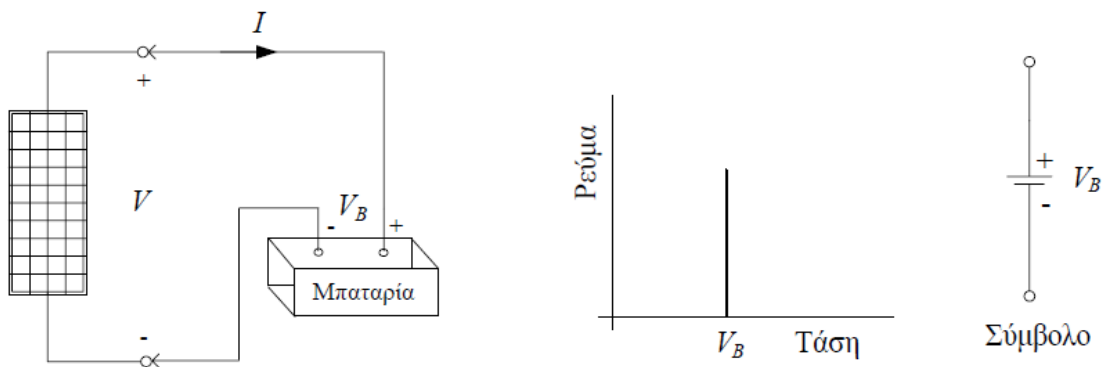


Σχήμα 1.28: Ιεραρχία Φ/Β συστημάτων κρυσταλλικού πυριτίου

## 1.5.3 Καμπύλη I-V 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 είναι αποθηκεύεται μέσα σε μια 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 1.29.



Σχήμα 1.29: Σύνδεση Φ/Β πλαισίου με ιδανική μπαταρία

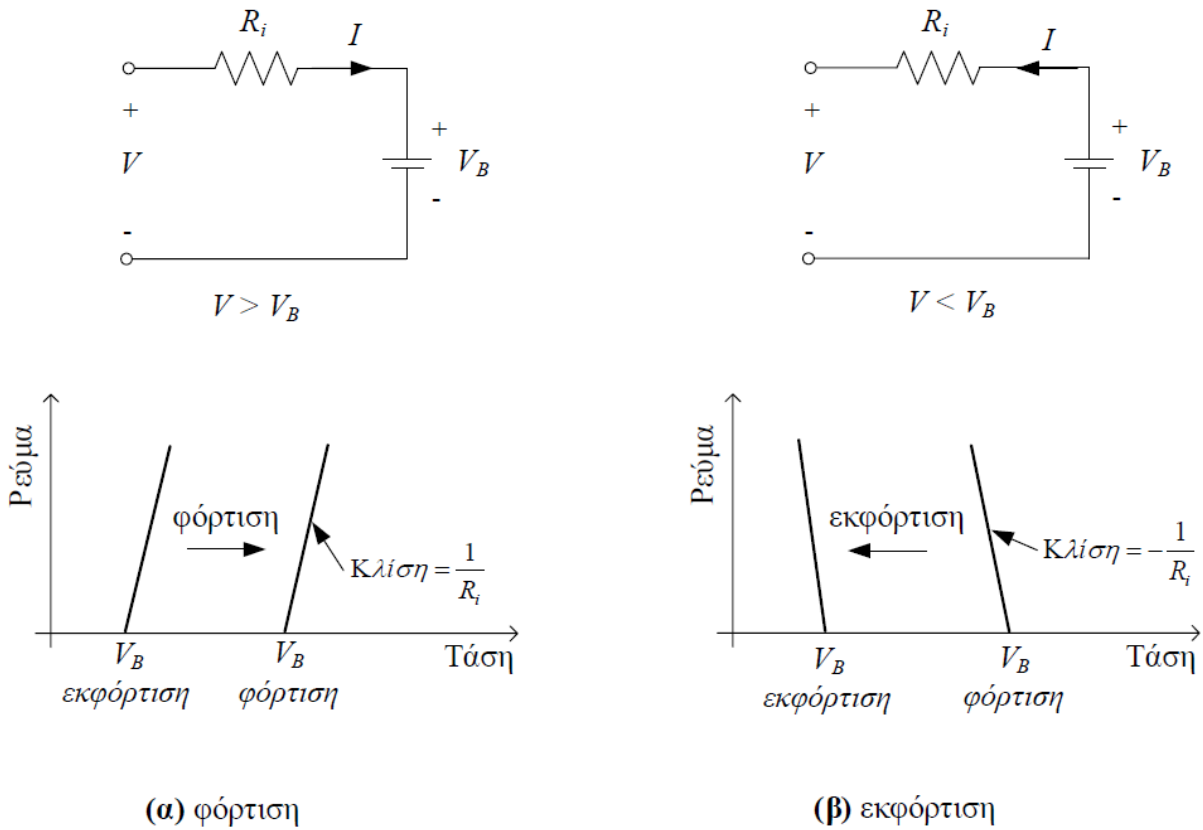
Μια πραγματική μπαταρία, έχει κάποια εσωτερική αντίσταση και συχνά μοντελοποιείται με ένα ισοδύναμο κύκλωμα που αποτελείται από μία ιδανική μπαταρία τάσης  $V_B$  σε σειρά με μία εσωτερική αντίσταση  $R_i$ , όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.30. Κατά τη διάρκεια του κύκλου φόρτισης, με θετική ροή ρεύματος στη μπαταρία, έχουμε:

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

οπότε η χαρακτηριστική  $I$ - $V$  της πραγματικής μπαταρίας είναι μία ευθεία γραμμή με μια 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 1.30(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 1.30(β).

Το απλό ισοδύναμο κύκλωμα του Σχήματος 1.30 περιπλέκεται από μια σειρά παραμέτρων, που περιλαμβάνουν το γεγονός ότι η τάση ανοικτοκύκλωσης  $V_B$  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 μόλυβδου 12 V, 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.



(α) φόρτιση

(β) εκφόρτιση

Σχήμα 1.30: Φόρτιση και εκφόρτιση πραγματικής μπαταρίας από Φ/Β

## Κεφάλαιο 2. Καλώδια σύνδεσης Φ/Β εγκατάστασης

### 2.1 Εισαγωγή

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

Τα καλώδια που χρησιμοποιούνται για τη σύνδεση εν σειρά των Φ/Β πλαισίων είναι συνήθως κατασκευασμένα για χρήση σε εξωτερικούς χώρους. Το υλικό του αγώγιμου τμήματος είναι συνήθως από χαλκό, ενώ χρησιμοποιείται και το αλουμίνιο. Τα καλώδια αυτά είναι συνήθως μονοπολικά και με διπλή ή ενισχυμένη μόνωση, ώστε να αποφεύγονται σφάλματα μεταξύ του θετικού και του αρνητικού πόλου των Φ/Β πλαισίων ή σφάλματα γης. Σε περίπτωση που η μόνωση των καλωδίων δεν ικανοποιεί τις παραπάνω απαιτήσεις, θα πρέπει να τοποθετούνται σε διαφορετικά κανάλια. Επίσης, κατασκευάζονται πολύκλινα ώστε να διαθέτουν την απαραίτητη ευελιξία για τη σύνδεση τους. Στο Σχήμα 2.1 φαίνεται η μορφή ενός τυπικού καλωδίου Φ/Β εγκατάστασης, σύμφωνα με τα όσα περιγράφηκαν παραπάνω



Σχήμα 2.1: Καλώδιο σύνδεσης Φ/Β πλαισίων

Η καλωδίωση περιλαμβάνει:

1. Τις συνδέσεις μεταξύ των Φ/Β πλαισίων
2. Τις συνδέσεις από τα άκρα κάθε εν σειρά κλάδου μέχρι το κουτί παραλληλισμού (αν χρησιμοποιείται)
3. Τις συνδέσεις από τα άκρα της Φ/Β συστοιχίας (π.χ., στο κουτί παραλληλισμού) μέχρι τον αντιστροφέα

Οι διατομές των καλωδίων DC που χρησιμοποιούνται για τη σύνδεση των Φ/Β πλαισίων με τους αντιστροφέες κυμαίνονται συνήθως από 4-16mm<sup>2</sup>. Για Φ/Β πλαίσια άμορφου πυριτίου, η διατομή τους μπορεί να είναι ακόμη μικρότερη (ακόμα και της τάξης του 1.5mm<sup>2</sup>), λόγω του σημαντικά μικρότερου ρεύματος τους (βλ. Σχήμα 1.11). Ο ακριβής προσδιορισμός της διατομής εξαρτάται κυρίως από τις απώλειες του καλωδίου και όχι ιδιαίτερα από τη θερμική φόρτιση η οποία είναι μικρή, λόγω του μικρού σχετικά ρεύματος λειτουργίας των Φ/Β πλαισίου. Έτσι, με δεδομένη την

γραμμική αύξηση των απωλειών με το μήκος των καλωδίων, είναι σκόπιμο ο κάθε μελετητής να προβαίνει σε υπολογισμούς απωλειών, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις αποστάσεων αρκετών δεκάδων μέτρων, λαμβάνοντας υπόψη και την αντίσταση των καλωδίων. Είναι επίσης σκόπιμο να χρησιμοποιούνται διαφορετικοί χρωματισμοί καλωδίων για το θετικό και αρνητικό, συνήθως κόκκινο (+) και μαύρο (-).

Είναι δυνατόν επίσης να χρησιμοποιηθούν και μεγαλύτερες διατομές DC καλωδίων της τάξης των 25-70mm<sup>2</sup>, σε περιπτώσεις που δεν επαρκεί ο αριθμός των εισόδων ενός αντιστροφέα για την απευθείας σύνδεση όλων των επιμέρους DC καλωδίων των κλάδων. Η περίπτωση αυτή είναι αρκετά συνηθισμένη κυρίως σε κεντρικούς αντιστροφείς (της τάξης ονομαστικής ισχύος των 100kW<sub>p</sub> και άνω). Στην περίπτωση αυτή χρησιμοποιούνται κατάλληλα κιβώτια (κιτία) τα οποία ομαδοποιούν πολλά ζεύγη καλωδίων κλάδων σε ένα ζεύγος. Τα κιβώτια αυτά είναι επίσης συνήθως εφοδιασμένα με απαγωγείς υπερτάσεων και DC διακόπτες φορτίου.

Στα κιβώτια διασύνδεσης πρέπει να χρησιμοποιούνται διαφορετικές περιοχές με μονωτικό διαχωριστικό για τη σύνδεση των αρνητικών και θετικών αγωγών. Εναλλακτικά μπορούν να χρησιμοποιούνται ξεχωριστά κουτιά σύνδεσης για τους θετικούς και τους αρνητικούς αγωγούς. Τα κιβώτια που θα χρησιμοποιηθούν θα πρέπει να είναι μονωτικά και να ανοίγουν με ειδικό κλειδί ή εργαλείο.

Σε κάποιες περιπτώσεις διαθέτουν και διατάξεις επιτήρησης κλάδων (string monitoring) ώστε να δίνεται πληροφορία στον αντιστροφέα και το σύστημα εποπτείας για τη δυσλειτουργία ενός κλάδου. Στις περιπτώσεις αυτές ο μελετητής μηχανικός θα πρέπει να λαμβάνει επίσης υπόψη του για τον υπολογισμό της διατομής, πέραν των απωλειών, και το θερμικό φορτίο, λόγω του παραλληλισμού σημαντικού αριθμού κλάδων. 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.

Είναι χρήσιμο να τονιστεί ότι τα καλώδια μιας Φ/Β εγκατάστασης μπορούν να είναι και εναέρια, αλλά πρέπει να παρέχεται κατάλληλη στήριξη, ώστε να μην καταπονούνται οι συνδέσεις. Η στήριξη γίνεται με υλικά ανθεκτικά στην υπεριώδη ακτινοβολία, την υγρασία, την υψηλή θερμοκρασία και τη διάβρωση.

## 2.2 Βήματα πριν από τη σύνδεση Φ/Β στον αντιστροφέα

Πριν συνδεθούν τα Φ/Β πλαίσια στον αντιστροφέα, είναι απαραίτητο να έχουν γίνει δύο βασικοί έλεγχοι:

1. Έλεγχος σύνδεσης και πολικότητας Φ/Β
2. Έλεγχος για σφάλμα γείωσης

### 2.2.1 Σύνδεση και πολικότητα Φ/Β

Ιδιαίτερη μέριμνα πρέπει να λαμβάνεται για τη σωστή διασύνδεση των καλωδίων τόσο μεταξύ των Φ/Β πλαισίων (δηλαδή από το (+) ενός Φ/Β πλαισίου στο (-) του επόμενου κτλ) όσο και μεταξύ των κλάδων των Φ/Β πλαισίων και των εισόδων του αντιστροφέα. Σε περίπτωση χαλαρής σύνδεσης

είναι πιθανόν να εμφανιστεί τόξο αυξάνοντας τον κίνδυνο πυρκαγιάς. Η ύπαρξη υψηλής σχετικά DC τάσης επιβάλλει ώστε η σύνδεση των καλωδίων να πραγματοποιείται από εξειδικευμένο προσωπικό με τη δέουσα προσοχή. Οι 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 5mΩ και μικρότερη). Τα προεγκατεστημένα καλώδια των Φ/Β πλαισίων δε θα πρέπει να αφαιρούνται και να αντικαθίστανται από καλώδια άλλης διατομής ή τύπου. Στα Σχήματα 2.2 και 2.3 δείχνονται διάφοροι τρόποι σύνδεσης καλωδίων Φ/Β εγκαταστάσεων.



Σχήμα 2.2: Συνδέσεις καλωδίων Φ/Β (1)

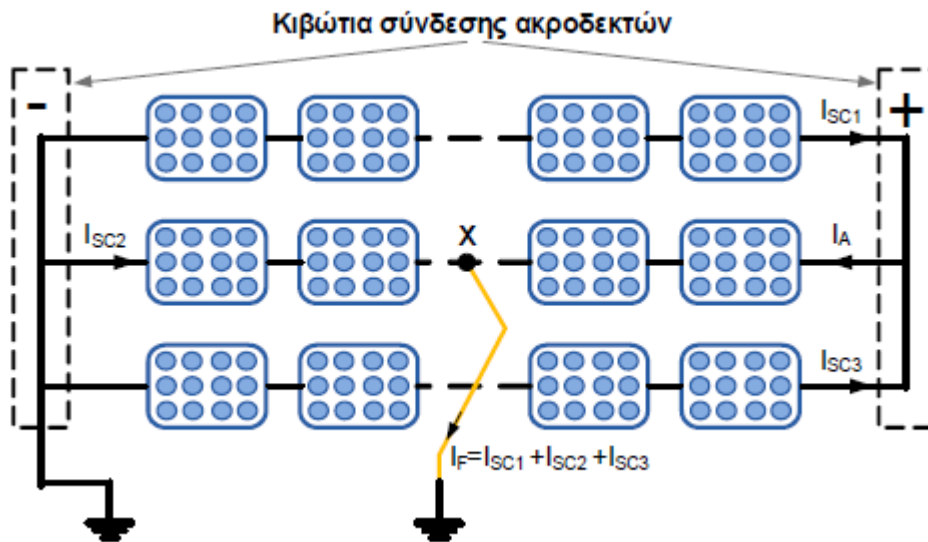


Σχήμα 2.3: Συνδέσεις καλωδίων Φ/Β (2)



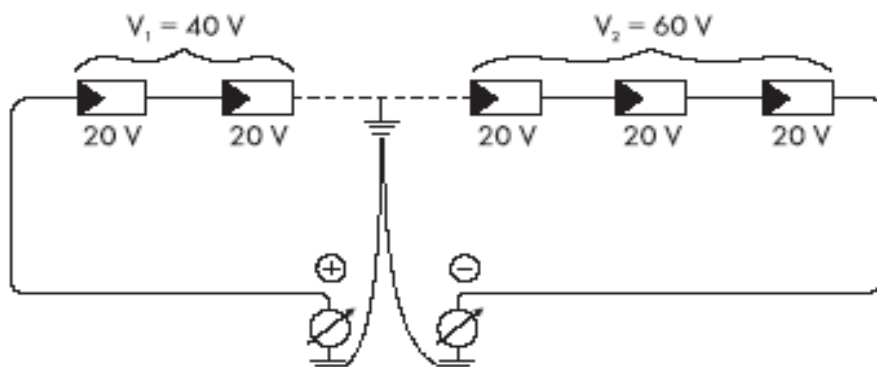
2.2.2 Σφάλμα γείωσης

Στο Σχήμα 2.4 φαίνεται ένα παράδειγμα εγκατάστασης με εκ σχεδιασμού γειωμένο τον αρνητικό πόλο των Φ/Β στοιχειοσειρών, για διερεύνηση πιθανής ανεπιθύμητης κατάστασης εξ αιτίας σφάλματος. Στην περίπτωση του Σχήματος 2.4, ο αρνητικός πόλος είναι πολωμένος. Αν συμβεί ένα σφάλμα ως προς γη σε έναν παράλληλο κλάδο, τότε το ρεύμα όλων των υπόλοιπων κλάδων θα τροφοδοτήσει το σφάλμα, δημιουργώντας ένα ανάστροφο ρεύμα σε πλαίσια του κλάδου με το σφάλμα.



Σχήμα 2.4: Σφάλμα γείωσης

Παρόμοια κατάσταση προκύπτει και όταν δημιουργηθεί σφάλμα βραχυκύκλωσης στον παράλληλο κλάδο, ή όταν ο αρνητικός πόλος γειώνεται ακούσια, από ένα πρώτο σφάλμα ως προς γη που έχει προκύψει, και ακολουθεί το δεύτερο σφάλμα ως προς γη. Το ρεύμα σφάλματος τροφοδοτείται από τα Φ/Β και μπορεί να παραμείνει ακόμα και αν η Φ/Β συστοιχία απομονωθεί από τον μετατροπέα, χωρίς αυτό να διακόψει τον βρόγχο του ρεύματος σφάλματος. Το ρεύμα αυτό μπορεί να καταστρέψει τα καλώδια και τα Φ/Β πλαίσια.



Σχήμα 2.5: Έλεγχος σφάλματος γείωσης

Για να βρεθεί το σημείο της Φ/Β εγκατάστασης στο οποίο υπάρχει σφάλμα γείωσης, αρχικά απομονώνεται η Φ/Β συστοιχία από το κύκλωμα (π.χ., από τη σύνδεσή της με τον αντιστροφέα), και στη συνέχεια μετρώνται οι τάσεις μεταξύ του θετικού και του αρνητικού πόλου μιας στοιχειοσειράς

σε σχέση με το δυναμικό γης. Αν παρουσιαστεί τάση μεγαλύτερη από ελάχιστα Volt, σημαίνει ότι υπάρχει βραχυκύκλωμα γείωσης στη στοιχειοσειρά. Το σημείο βραχυκύκλωσης προκύπτει προσεγγιστικά λαμβάνοντας την τάση ανοικτού κυκλώματος  $V_{oc}$  των Φ/Β της στοιχειοσειράς. Στο παράδειγμα του Σχήματος 2.5, όπου  $V_{oc} = 20\text{ V}$ , το βραχυκύκλωμα είναι μεταξύ του 2<sup>ου</sup> και 3<sup>ου</sup> Φ/Β της στοιχειοσειράς.

### 2.3 Μονωτικά υλικά καλωδίων

Για τα θέματα προστασίας, η μέθοδος της αυτόματης διακοπής της τροφοδότησης δεν είναι δυνατή λόγω των ιδιοτεροτήτων των Φ/Β. Δεδομένου ότι τα Φ/Β πλαίσια που χρησιμοποιούνται πρέπει να είναι κλάσης II όσον αφορά στη μόνωση κατά το πρότυπο EN 61730. Η κατηγορία αυτή περιλαμβάνει εφαρμογές με συνεχή τάση λειτουργίας του συστήματος πάνω από 120 V, στην οποία ανήκει και η πλειονότητα των Φ/Β συστημάτων.

Το συχνά χρησιμοποιούμενο καλώδιο με μόνωση λάστιχο και μανδύα από νεοπρένιο τύπου H07 RN-F, στην τυπική (standard) έκδοση του επιτρέπεται σε θερμοκρασίες έως 60°C και έτσι είναι κατάλληλο για χρήση σε Φ/Β συστήματα σε περιορισμένο εύρος. Για το σκοπό αυτό οι κατασκευαστές προχώρησαν στη δημιουργία ειδικών καλωδίων για Φ/Β εφαρμογές (solar cables). Τα κυριότερα χαρακτηριστικά τους είναι ότι είναι ανθεκτικά στις καιρικές συνθήκες και σε υπεριώδη (UV) ακτινοβολία με μεγαλύτερο εύρος θερμοκρασιών (της τάξης από -55°C έως 125°C). Επιπλέον κάποιοι κατασκευαστές προσφέρουν καλώδια με μεταλλικό πλέγμα για μεγαλύτερη προστασία από τα τρωκτικά και καλύτερη προστασία από υπερτάσεις.

Τα μονωτικά υλικά που χρησιμοποιούνται στους αγωγούς και τα καλώδια καθώς και η μέγιστη συνεχώς επιτρεπόμενη θερμοκρασία είναι :

- Το πολυβινυλοχλωρίδιο (PVC) για θερμοκρασίες έως 70°C
- Το αιθυλενιούχο προπυλαινιούχο ελαστικό (EPR, B2, 3G) για θερμοκρασίες έως 90°C
- Το δικτυωμένο πολυαιθυλένιο (XLPE, 2X) για θερμοκρασίες έως 90°C

Στην πλευρά της Φ/Β συστοιχίας ο σχεδιασμός και η υλοποίηση της εγκατάστασης καλωδίωσης θα πρέπει να εξασφαλίζει προστασία ισοδύναμη με μόνωση κλάσης II. Όλα τα καλώδια τα οποία είναι εκτεθειμένα στην ηλιακή ακτινοβολία θα πρέπει να είναι ανθεκτικά στην υπεριώδη ακτινοβολία (αποκλείοντας έτσι τα κοινά καλώδια με μόνωση από PVC).

### 2.4 Διαστασιολόγηση καλωδίων

Ο υπολογισμός της διατομής των αγωγών μια ηλεκτρικής γραμμής πραγματοποιείται λαμβάνοντας υπόψη τα ακόλουθα:

- Την επιτρεπτή πτώση τάσης στη γραμμή
- Το μέγιστο ρεύμα
- Το μήκος της γραμμής
- Το φορτίο της γραμμής

Η επιλογή διατομής των αγωγών γίνεται από πίνακες με βάση τον τρόπο εγκατάστασης της γραμμής, την ένταση φόρτισης και το είδος της μόνωσης των αγωγών.

Για την επιλογή της διατομής των αγωγών μιας γραμμής μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας πρέπει να ικανοποιούνται τα ακόλουθα κριτήρια:

1. Οι αγωγοί να διαρρέονται συνεχώς από ένταση ρεύματος η οποία δεν θα ξεπερνά τη μέγιστη επιτρεπτή ένταση ρεύματος που «αντέχει» ο αγωγός, ώστε η αναπτυσσόμενη θερμότητα να μην προκαλέσει καταστροφή της μόνωσης των αγωγών (κριτήριο ασφαλούς λειτουργίας γραμμής)
2. Η επιλεγείσα διατομή των αγωγών της γραμμής να μην προκαλεί πτώση τάσης μεγαλύτερης της επιτρεπτής (εξασφάλιση σωστής λειτουργίας γραμμών)
3. Η διατομή του αγωγού υπολογίζεται και σε σχέση με την μέγιστη ένταση ρεύματος που τον διαρρέει

Η ωμική αντίσταση ενός αγωγού υπολογίζεται από τη σχέση:

$$R = \rho \cdot \frac{\ell}{A}$$

όπου  $R$  είναι η ωμική αντίσταση αγωγού ( $\Omega$ ),  $\rho$  είναι η ειδική αντίσταση του αγωγού ( $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ ),  $\ell$  είναι το μήκος αγωγού (m), και  $A$  είναι η διατομή αγωγού ( $\text{mm}^2$ ). Για το χαλκό η ειδική αντίσταση είναι  $\rho=0.0172 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ , ενώ για το αλουμίνιο είναι  $\rho=0.0278 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ .

Η αύξηση της θερμοκρασίας επιδρά αυξητικά στην τιμή της ωμικής αντίστασης ενός αγωγού σύμφωνα με τη σχέση:

$$R_{\theta} = R_{20^{\circ}\text{C}} \cdot [1 + a \cdot (\theta - 20)]$$

όπου  $R_{\theta}$  είναι η τιμή της ωμικής αντίστασης σε θερμοκρασία  $\theta^{\circ}\text{C}$ ,  $R_{20^{\circ}\text{C}}$  είναι η τιμή της ωμικής αντίστασης σε θερμοκρασία  $20^{\circ}\text{C}$ , και  $a$  είναι ο θερμοκρασιακός συντελεστής μεταβολής της αντίστασης ( $/^{\circ}\text{C}$ ), που είναι ίσος με  $0.00393/^{\circ}\text{C}$  για το χαλκό και  $0.00403/^{\circ}\text{C}$  για το αλουμίνιο.

Πίνακας 2.1: Τυπικές τιμές χαρακτηριστικών καλωδίων Φ/Β

ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΗ ΔΙΑΤΟΜΗ ΚΑΛΩΔΙΟΥ	ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ ΚΑΛΩΔΙΟΥ (ΠΕΡΙΠΟΥ)	ΒΑΡΟΣ ΚΑΛΩΔΙΟΥ (ΠΕΡΙΠΟΥ)	ΜΕΓΙΣΤΗ ΩΜΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΣΕ DC ΣΕ $20^{\circ}\text{C}$	ΕΠΙΤΡΕΠΟΜΕΝΗ ΣΥΝΕΧΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗ		ΠΤΩΣΗ ΤΑΣΗΣ	
				ΣΤΟ ΕΔΑΦΟΣ	ΣΤΟΝ ΑΕΡΑ	1 ΦΑΣΗ AC ή DC	3 ΦΑΣΕΙΣ AC
$\text{mm}^2$	mm	Kg/Km	$\Omega/\text{Km}$	A	A	mV/A/m	mV/A/m
1x1,5	5,5	46	12,1	18	25	29	25
1x2,5	5,9	60	7,41	24	34	18	15
1x4	6,7	80	4,61	32	43	11	9,5
1x6	7,2	100	3,08	41	55	7,3	6,4
1x10	8,3	150	1,83	56	75	4,4	3,8
1x16	9,3	210	1,15	73	100	2,8	2,4
1x25	10,9	315	0,727	99	135	1,75	1,5
1x35	12,0	410	0,524	121	170	1,25	1,1
1x50	13,7	550	0,387	147	205	0,94	0,81
1x70	15,3	755	0,268	185	260	0,65	0,57
1x95	17,5	1030	0,193	230	320	0,49	0,42
1x120	19,0	1255	0,153	267	375	0,4	0,35
1x150	21,0	1545	0,124	306	430	0,34	0,29
1x185	23,3	1925	0,0991	353	490	0,29	0,25
1x240	26,3	2520	0,0754	420	590	0,24	0,21
1x300	28,8	3110	0,0601	485	680	0,21	0,18
1x400	32,4	3970	0,0470	562	780	0,19	0,17
1x500	35,9	5030	0,0366	650	880	0,18	0,16
1x630	39,6	6410	0,0283	746	965	0,17	0,15

Στον Πίνακα 2.1 δίνονται ορισμένες τυπικές τιμές χαρακτηριστικών μονοπολικών καλωδίων Φ/Β εγκαταστάσεων, που περιλαμβάνουν τη διατομή, τη διάμετρο και το βάρος του καλωδίου, καθώς και τη μέγιστη ωμική αντίσταση, τη μέγιστη επιτρεπόμενη φόρτιση και την πτώση τάσης. Οι τιμές της πτώσης τάσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για έναν γρήγορο υπολογισμό της αναμενόμενης πτώσης τάσης ενός καλωδίου.

Σχετικά με την ένταση ρεύματος που διέρχεται από ένα καλώδιο, η μέγιστη αναμενόμενη τιμή της προκύπτει από το ρεύμα βραχυκύκλωσης  $I_{sc}$  του ενός πλαισίου πολλαπλασιασμένο επί τον συντελεστή 1.25. Για παράλληλους κλάδους η μέγιστη αναμενόμενη τιμή του συνολικού ρεύματος, προκύπτει από την αντίστοιχη τιμή του ενός κλάδου πολλαπλασιασμένη επί τον αριθμό των παράλληλων κλάδων. Ο συντελεστής ασφαλείας 1.25 καλύπτει ειδικές συνθήκες ατμόσφαιρας και ανακλάσεων οι οποίες μπορούν να παρουσιαστούν σε καθαρό ουρανό μετά από βροχή (ένταση ακτινοβολίας μεγαλύτερη από 1 kW/m<sup>2</sup>). Η τιμή του ρεύματος που υπολογίζεται με αυτό τον τρόπο θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στη διαστασιολόγηση των καλωδίων και των προστασιών.

Οι απώλειες τάσης για έναν αγωγό DC, καθώς και για ένα μονοφασικό AC σύστημα υπολογίζονται από τη σχέση:

$$\frac{\Delta V}{V} = 2 \cdot \left( \frac{\ell \cdot I}{V \cdot K \cdot A} \right)$$

όπου  $\Delta V$  είναι η πτώση τάσης (V),  $V$  είναι η τάση του Φ/Β συστήματος (V),  $\ell$  είναι το μήκος του αγωγού (m),  $I$  είναι η ένταση ρεύματος (A),  $K$  είναι η ειδική αγωγιμότητα (m/Ω·mm<sup>2</sup>) και  $A$  είναι η διατομή του αγωγού (mm<sup>2</sup>). Στον τύπο αυτόν ως  $I$  εισάγεται το μέγιστο ρεύμα του καλωδίου ( $1.25 \cdot I_{sc}$ ) και ως  $V$  η τάση σημείου μέγιστης ισχύος  $V_m$  των Φ/Β. Η ειδική αγωγιμότητα για το χαλκό είναι ίση με  $K = 58$  m/Ω·mm<sup>2</sup>, ενώ για το αλουμίνιο είναι ίση με  $K = 36$  m/Ω·mm<sup>2</sup>. Τέλος, ο πολλαπλασιαστής 2 στην παραπάνω σχέση εισέρχεται για να ληφθεί υπόψη και το καλώδιο μήκους  $\ell$  που απαιτείται για να κλείσει το κύκλωμα.

Στην περίπτωση τριφασικών AC συστημάτων, η παραπάνω σχέση μετασχηματίζεται στην:

$$\frac{\Delta V}{V} = \sqrt{3} \cdot \left( \frac{\ell \cdot I}{V \cdot K \cdot A} \right)$$

Οι τυπικές μέγιστες τιμές απωλειών τάσης για διαφορετικά τμήματα μιας Φ/Β εγκατάστασης (διασυνδεδεμένης ή αυτόνομης) δίνονται στον Πίνακα 2.2.

Πίνακας 2.2: Τυπικές μέγιστες τιμές απωλειών τάσης

Τμήμα Φ/Β εγκατάστασης	Μέγιστη πτώση τάσης
Φ/Β πλαίσια – αντιστροφείας	1%
Φ/Β πλαίσια – ρυθμιστής τάσης	3%
Ρυθμιστής τάσης – μπαταρία	1%
Αντιστροφείας - φορτία	1%

Η μέγιστη αναμενόμενη θερμοκρασία λειτουργίας των Φ/Β πλαισίων, όπως και των κιβωτίων σύνδεσης αυτών, μπορεί να φθάσει τους 70°C, σε κατασκευές που επιτρέπουν την ελεύθερη κυκλοφορία του αέρα στην πίσω πλευρά των Φ/Β πλαισίων. Στις περιπτώσεις που εμποδίζεται η ελεύθερη κυκλοφορία του αέρα αναμένονται μεγαλύτερες θερμοκρασίες, έως και 80-90°C. Στην περίπτωση που οι αγωγοί διασύνδεσης των Φ/Β πλαισίων γειτνιάζουν με τα πλαίσια, η θερμοκρασία των τελευταίων θα πρέπει να ληφθεί σοβαρά υπόψη τόσο για την ορθή επιλογή της

μόνωσης των αγωγών, όσο και για την κατάλληλη επιλογή της διατομής τους (επιλογή σωστού διορθωτικού συντελεστή αύξησης διατομής).

Θα πρέπει να ληφθεί υπόψη τουλάχιστον η διόρθωση λόγω θερμοκρασίας, η οποία για τα καλώδια πλησίον των Φ/Β πλαισίων μπορεί να φθάσει τους 70°C. Όπως φαίνεται από τα στοιχεία του Πίνακα 2.3, στους 70°C ο διορθωτικός συντελεστής για καλώδια με μόνωση ανθεκτική ως τους 90°C (τυπική περίπτωση) είναι 0.58 (περιοχή θερμοκρασιών περιβάλλοντος 61-70°C). Επομένως, στην περίπτωση αυτή η διατομή του καλωδίου θα πρέπει να διαστασιολογηθεί με βάση τη τιμή του μέγιστου αναμενόμενου ρεύματος πολλαπλασιασμένη επί 1.72 (=1/0.58), για να μην υπερβούν τα όρια αντοχής της μόνωσης.

Πίνακας 2.3: Επίδραση θερμοκρασίας στο μέγιστο ρεύμα των καλωδίων

Θερμοκρασία περιβάλλοντος (°C)	Καλώδια με μόνωση ανθεκτική έως τους 90°C	Καλώδια με μόνωση ανθεκτική έως τους 105°C
30	<b>1.00</b>	1.00
31-35	<b>0.96</b>	0.97
36-40	<b>0.91</b>	0.93
41-45	<b>0.87</b>	0.89
56-50	<b>0.82</b>	0.86
51-55	<b>0.76</b>	0.82
56-60	<b>0.71</b>	0.77
61-70	<b>0.58</b>	0.68
71-80	<b>0.41</b>	0.58

### Παράδειγμα

Έστω 10 Φ/Β πλαίσια συνδεδεμένα σε σειρά, τα οποία έχουν τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

$$P_m = 200 \text{ W}, V_m = 28.10 \text{ V}, I_m = 7.20 \text{ A}, I_{sc} = 7.78 \text{ A}, V_{oc} = 36.00 \text{ V}.$$

Η στοιχειοσειρά των Φ/Β συνδέεται με έναν αντιστροφέα με τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

$$P_{DC} = 2.10 \text{ kW}, P_{AC} = 2.00 \text{ kW}.$$

Να επιλεγεί η κατάλληλη διατομή καλωδίων. Χρησιμοποιούνται χάλκινα καλώδια μήκους  $\ell = 40 \text{ m}$  τα οποία βρίσκονται στο έδαφος. Τα καλώδια έχουν μόνωση ανθεκτική ως τους 90°C και η μέγιστη θερμοκρασία τους μπορεί να φθάσει τους 70°C.

Από τον Πίνακα 2.2, η μέγιστη πτώση τάσης για το τμήμα Φ/Β πλαίσια – αντιστροφέας είναι  $\Delta V/V=1\%$ . Αφού τα καλώδια είναι χάλκινα ισχύει  $K=58 \text{ m}/\Omega \cdot \text{mm}^2$ . Το μέγιστο ρεύμα σύμφωνα με τα όσα αναφέρθηκαν παραπάνω είναι:

$$I_{\max} = 1.25 \cdot I_{sc} = 9.725 \text{ A}$$

Η συνολική τάση των 10 εν σειρά συνδεδεμένων Φ/Β πλαισίων είναι:

$$\Sigma V_m = 10 \cdot 28.10 \text{ V} = 281 \text{ V}$$

Αντικαθιστώντας τα παραπάνω στον τύπο της πτώσης τάσης υπολογίζουμε την ελάχιστη διατομή του καλωδίου:

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{2 \cdot \ell \cdot I_{\max}}{\Sigma V \cdot K \cdot A} \Rightarrow A_{\min} = \frac{2 \cdot \ell \cdot I_{\max}}{\Sigma V \cdot K \cdot \left(\frac{\Delta V}{V}\right)_{\max}} \Rightarrow A_{\min} = 4.77 \text{ mm}^2$$

Από τις διαθέσιμες τιμές διατομών του Πίνακα 2.1 προκύπτει ότι  $A = 6 \text{ mm}^2$ .

Στη συνέχεια ελέγχουμε αν η θερμοκρασία των καλωδίων δημιουργεί προβλήματα υπερφόρτισης. Από τα στοιχεία του Πίνακα 2.3, στους 70°C ο διορθωτικός συντελεστής για καλώδια με μόνωση ανθεκτική ως τους 90°C είναι 0.58. Από τον Πίνακα 2.1, η μέγιστη ένταση για καλώδιο 6 mm<sup>2</sup> στο έδαφος είναι 41 A, η οποία στους 70°C γίνεται ίση με  $0.58 \cdot 41 \text{ A} = 23.78 \text{ A}$ .

Επειδή  $I_{\max} = 9.725 \text{ A} < 23.78 \text{ A}$ , διαπιστώνουμε πως δεν υπάρχει πρόβλημα υπερφόρτισης των καλωδίων.

Ένα άλλο κριτήριο που εξετάζεται για τη διαστασιολόγηση των καλωδίων είναι αυτό της απώλειας ισχύος. Συνήθως θεωρείται ότι η απώλεια ισχύος στο συνολικό μήκος των καλωδίων DC υπό ονομαστικές τιμές λειτουργίας δεν πρέπει να υπερβαίνει το 1% της ονομαστικής ισχύος του Φ/Β συστήματος. Για τα δεδομένα του παραπάνω παραδείγματος έχουμε:

Η συνολική ωμική αντίσταση του καλωδίου είναι  $R = \rho \cdot \frac{(2 \cdot \ell)}{A} \Rightarrow R = 0.23 \Omega$

όπου  $\rho = 0.0172 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$  (χάλκινα καλώδια),  $\ell = 40 \text{ m}$  και  $A = 6 \text{ mm}^2$ .

Η συνολική απώλεια ισχύος είναι  $P_{\text{loss}} = I_m^2 \cdot R \Rightarrow P_{\text{loss}} = 11.92 \text{ W}$

όπου  $I_m = 7.20 \text{ A}$ .

Η σχετική απώλεια ισχύος σε σχέση με την ονομαστική ισχύ (DC πλευρά) είναι:

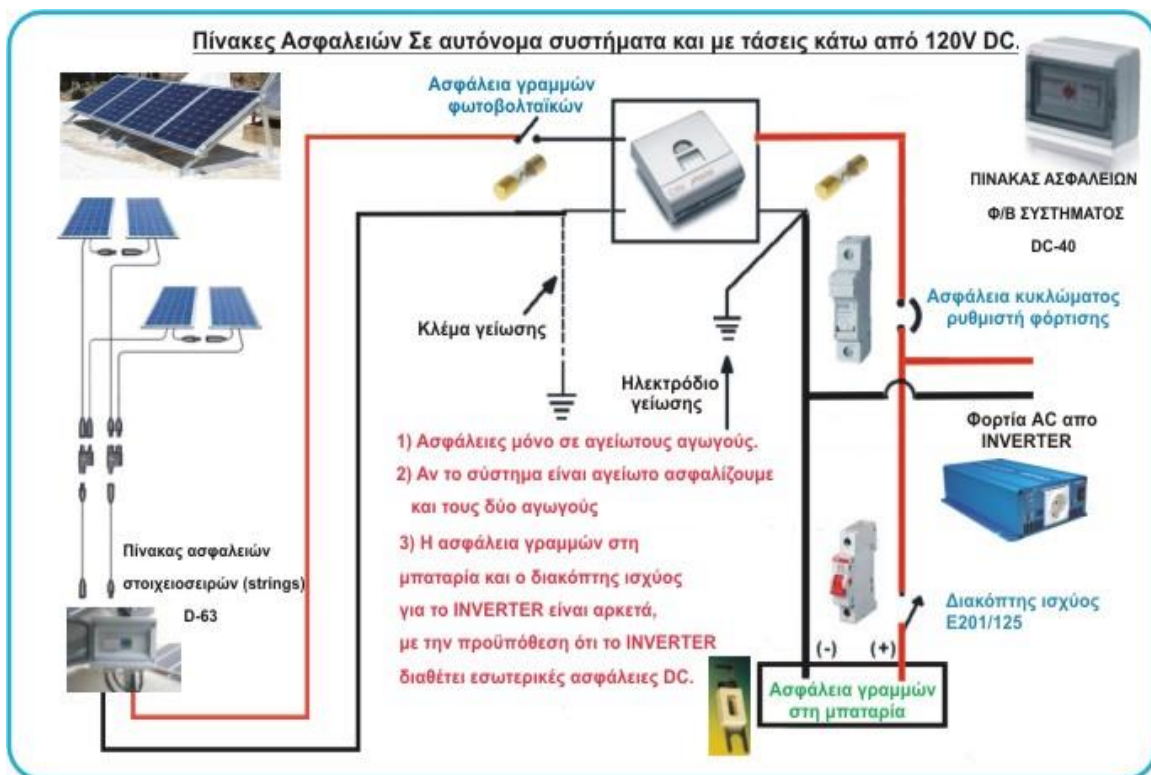
$$\frac{P_{\text{loss}}}{P_{\text{DC}}} = \frac{11.92 \text{ W}}{2100 \text{ W}} = 0.57\% < 1\%$$

από όπου διαπιστώνεται πως δεν υπάρχει πρόβλημα απώλειας ισχύος.

## Κεφάλαιο 3. Κυκλώματα DC Φ/Β εγκαταστάσεων

### 3.1 Δομή και εξαρτήματα DC κυκλώματος

Στο Σχήμα 3.1 δείχνεται ένα κύκλωμα αυτόνομης Φ/Β εγκατάστασης, με τάσεις μικρότερες των 120V DC. Δεδομένου ότι οι στοιχειοσειρές Φ/Β έχουν εγγενείς περιορισμούς ως προς τα υψηλά ρεύματα βραχυκυκλώματος, δεν παρουσιάζεται συνήθως ιδιαίτερο πρόβλημα στις ασφάλειες τήξεως για προστασία από υπερφόρτωση και βραχυκύκλωμα, καθώς και στους διακόπτες Φ/Β. Εκεί που χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή είναι στα αυτόνομα συστήματα με μπαταρίες αποθήκευσης, όπου μπορούν να παραχθούν πολύ υψηλά ρεύματα βραχυκύκλωσης (έως 8000 A για ένα ms και έως 6000 A για μερικά δευτερόλεπτα). Τέτοια υψηλά ρεύματα μπορούν να παραγάγουν υπερβολικές θερμικές και μαγνητικές καταπονήσεις, οι οποίες μπορούν να αναγκάσουν μια υποδιαστασιοποιημένη ασφάλεια τήξεως να διαλυθεί. Επιπλέον, οι αγωγοί μεταξύ του αντιστροφέα και της μπαταρίας πρέπει να έχουν την κατάλληλη ασφάλεια υπερφόρτωσης για την προστασία του αντιστροφέα, καθώς οι αναστροφείς αυτοί έχουν συχνά την ικανότητα μεγάλων στιγμιαίων ρευμάτων που είναι τέσσερις έως έξι φορές το κανονικό φορτίο (π.χ., στην εκκίνηση ενός κινητήρα).



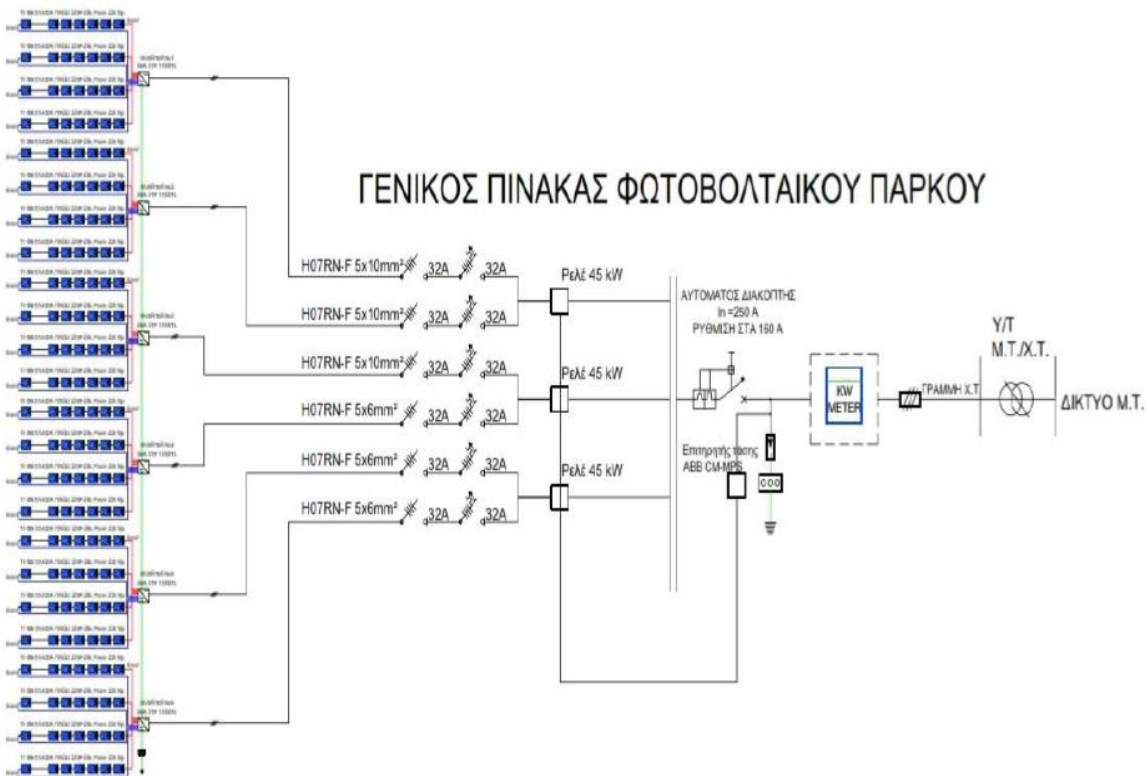
Σχήμα 3.1: Κύκλωμα αυτόνομης Φ/Β εγκατάστασης ( $V < 120\text{ V}$ )

Στο Σχήμα 3.2 απεικονίζεται το κύκλωμα μιας Φ/Β εγκατάστασης 100 kW<sub>p</sub>, ενώ το Σχήμα 3.3 απεικονίζει το κύκλωμα DC τάσης μιας Φ/Β εγκατάστασης μεσαίου μεγέθους. Το κύκλωμα αυτό μπορεί να περιλαμβάνει τα ακόλουθα εξαρτήματα:

1. Μίνι τηλεχειριζόμενοι διακόπτες αέρος για έλεγχο trackers
2. Μικροαυτόματοι διακόπτες για προστασία από υπερφόρτιση ή βραχυκύκλωμα (τάση λειτουργίας έως 1200 V)

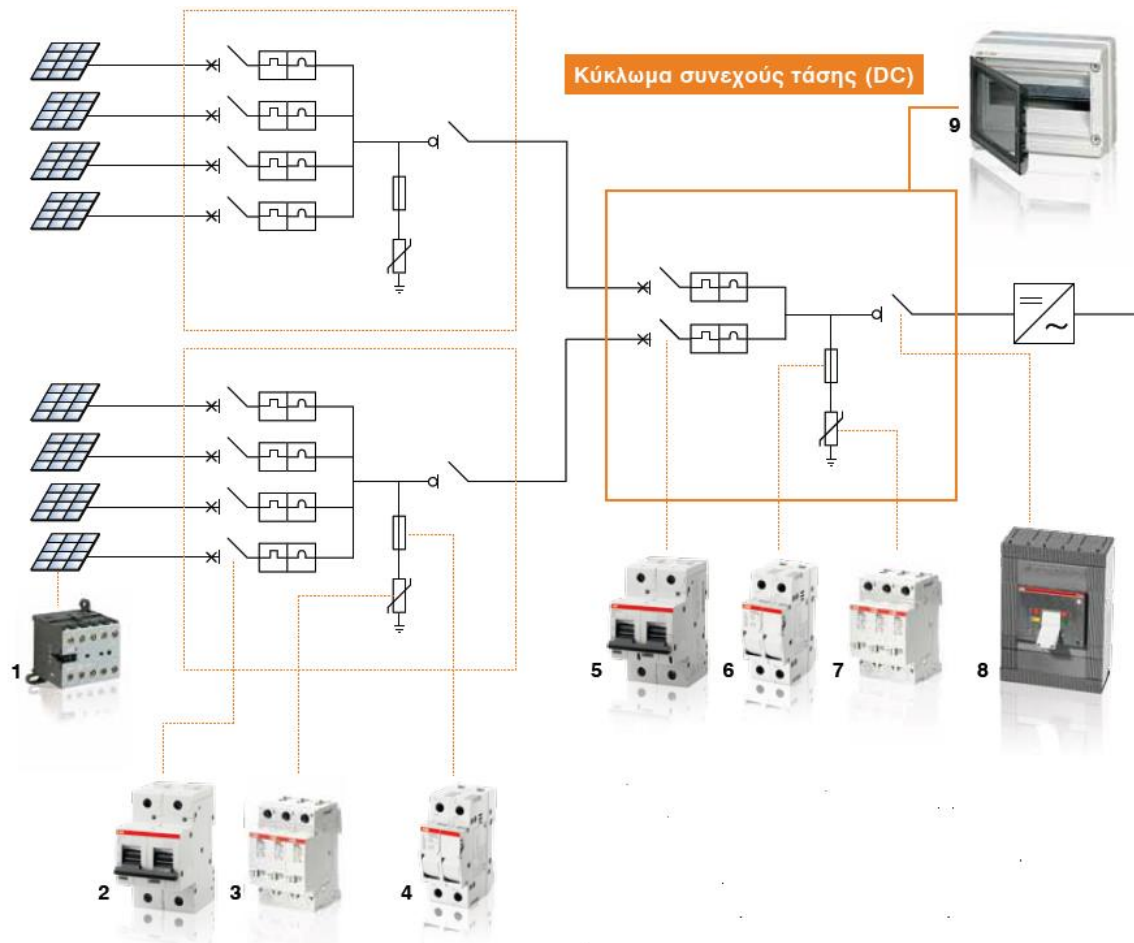
3. Απαγωγείς υπερτάσεων για προστασία από ατμοσφαιρικές ή βιομηχανικές μεταβατικές υπερτάσεις (τάση λειτουργίας έως 1000 V)
4. Ασφαλειοαποζεύκτες και κυλινδρικές ασφάλειες για προστασία από υπερφόρτιση ή βραχυκύκλωμα (τάση λειτουργίας έως 1000 V)
5. Μικροαυτόματοι διακόπτες
6. Ασφαλειοαποζεύκτες και κυλινδρικές ασφάλειες
7. Απαγωγείς υπερτάσεων
8. Διακόπτες φορτίου για ζεύξη-απόζευξη υπό πλήρες φορτίο (τάση λειτουργίας έως 1100 V)
9. Επίτοιχοι στεγανοί πλαστικοί πίνακες

Οι μικροαυτόματοι διακόπτες προστατεύουν μια ηλεκτρική εγκατάσταση από υπερφόρτιση ή βραχυκύκλωμα. Στην DC πλευρά του Φ/Β συστήματος οι μικροαυτόματοι προστατεύουν κάθε στοιχειοσειρά Φ/Β πλαισίων από ρεύματα ανάστροφης φοράς καθώς επίσης και από την έγχυση εναλλασσόμενου ρεύματος (AC) στο κύκλωμα DC σε πιθανή βλάβη του αντιστροφέα. Κάθε στοιχειοσειρά Φ/Β πλαισίων πρέπει να προστατεύεται ξεχωριστά ώστε να εξασφαλίζεται ο περιορισμός του σφάλματος μόνο σε εκείνη τη στοιχειοσειρά που αντιμετωπίζει το πρόβλημα, επιτρέποντας την κανονική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από την υπόλοιπη εγκατάσταση. Η επαναλειτουργία της στοιχειοσειράς μπορεί να γίνεται χειροκίνητα ή και με τηλεχειρισμό. Ένα επιπλέον πλεονέκτημά των μικροαυτόματων διακοπών είναι η ευκολία με την οποία μπορεί να απομονωθεί ηλεκτρικά, για λόγους συντήρησης ή επέκτασης, κάποιο μέρος του συστήματος. Επιπλέον, τα Φ/Β πλαίσια και οι αντιστροφεείς είναι πολύ ευαίσθητα σε μεταβατικές υπερτάσεις και κρουστικά ρεύματα που προκαλούνται από κεραυνούς ή χειρισμούς μεγάλων διακοπών. Οι απαγωγείς υπερτάσεων (αντικεραυνικά) για κυκλώματα DC περιορίζουν αυτές τις υπερτάσεις, προστατεύοντας τον εξοπλισμό και αποτρέποντας περαιτέρω ζημιές στην Φ/Β εγκατάσταση.



Σχήμα 3.2: Κύκλωμα Φ/Β εγκατάστασης 100 kW<sub>p</sub>





Σχήμα 3.3: Κύκλωμα DC τάσης Φ/Β εγκατάστασης μεσαίου μεγέθους

### 3.2 Το πρότυπο IEC / TS 62548

Το πρότυπο IEC / TS 62548: 2013 (E) καθορίζει τις απαιτήσεις σχεδιασμού για τις Φ/Β συστοιχίες, συμπεριλαμβάνοντας την DC καλωδίωση της συστοιχίας, ηλεκτρικές συσκευές προστασίας, τους διακόπτες και τις διατάξεις γείωσης. Το πεδίο εφαρμογής περιλαμβάνει όλα τα τμήματα της Φ/Β συστοιχίας έως (αλλά μη συμπεριλαμβανομένων) των συσκευών αποθήκευσης ενέργειας, του εξοπλισμού μετατροπής ισχύος (π.χ., αντιστροφείς) και των φορτίων. Το αντικείμενο της παρούσας τεχνικής προδιαγραφής είναι να αντιμετωπίσει τις απαιτήσεις ασφαλείας του σχεδιασμού που προκύπτουν από τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των Φ/Β συστημάτων.

## Κεφάλαιο 4. Βιβλιογραφία.

1. Ι.Ε. Φραγκιαδάκης, “Φωτοβολταϊκά συστήματα”, Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη, 2006
2. Κ. Καγκιράκης, “Φωτοβολταϊκή τεχνολογία”, Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα, 1992
3. T. Markvart, L. Castañer, “Practical handbook of photovoltaics: fundamentals and applications”, Elsevier, UK, 2003
4. G.M. Masters, “Renewable and efficient electric power systems”, John Wiley & Sons, New Jersey, 2004
5. German Solar Energy Society, “Planning and Installing Photovoltaic Systems – 2<sup>nd</sup> edition”, Earthscan, London, 2007
6. John Wiles, “Photovoltaic Power Systems and The National Electrical Code: Suggested Practices”, SANDIA report (SAND96–2797, UC–1290), 1996
7. Ι. Κατσιγιάννης, “Βελτιστοποίηση Δομής και Οικονομική Αξιολόγηση Απομονωμένου Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας που Βασίζεται σε Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας”, Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά, 2008
8. ΚΑΠΕ, “Οδηγίες για την εγκατάσταση Φ/Β συστημάτων σε κτηριακές εγκαταστάσεις”, 2009
9. Μ. Δαμανιδής, Γ. Κατσαρός, Μ. Τόλης, Φ. Στεργιόπουλος, “Οδηγός Μελέτης και Υλοποίησης Φωτοβολταϊκών Έργων”, Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας – Τμήμα Κεντρικής Μακεδονίας, 2011
10. ABB, “Λύσεις για Φωτοβολταϊκά – Έλεγχος και προστασία”
11. Γ. Τσακαλούδης, “Μελέτη και εγκατάσταση αυτόνομου υβριδικού συστήματος”, Πτυχιακή Εργασία, Τμήμα Μηχανικών Φυσικών Πόρων και εριβάλλοντος, Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Κρήτης, 2014
12. Α.Ι. Ζερίτης, “Μελέτη εγκατάστασης φωτοβολταϊκού σταθμού μικρής και μεγάλης κλίμακας”, Πτυχιακή Εργασία, Τμήμα Ηλεκτρολογίας, Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Κρήτης, 2012
13. Α. Παγγέλα, Σ. Τσακνάκη, “Σχεδίαση αυτόνομου υβριδικού φωτοβολταϊκού συστήματος για τροφοδότηση κατοικίας”, Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Πολυτεχνική Σχολή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 2012
14. Π.Κ. Νικήτας, “Επιθεώρηση διασύνδεσμένου φωτοβολταϊκού συστήματος – Υπολογισμός διατομής καλωδίων συνεχούς και εναλλασσόμενου ρεύματος”, Διπλωματική Εργασία, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2013
15. Η.Ε. Κουτελιδάκης, “Καθορισμός παραγόντων που επηρεάζουν την παραγόμενη ισχύ σε Φ/Β πάρκο 80kW<sub>p</sub>”, Διπλωματική Εργασία, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2012