



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΥ

**ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ**

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Μελέτη Φωτοβολταϊκού Πάρκου

**ΑΝΓΓΕΛΟ-ΙΩΑΝΝΗΣ ΛΑΜΑΪ Α.Μ. 7350
ΑΓΓΕΛΟΣ ΓΚΛΙΝΟΣ Α.Μ. 7355**

Επιβλέπων: Σχοινάς Νικόλαος



Περιεχόμενα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	6
Η ΦΥΣΙΚΗ ΤΩΝ ΗΜΙΑΓΩΓΩΝ	6
1.1 Δομές ηλεκτρονικών ζωνών στους ημιαγωγούς.....	6
1.1.1 Άμεσα και έμμεσα ενεργειακά διάκενα.....	7
1.1.2 Η ενέργεια Fermi	8
1.1.3 Μεταβολή των ηλεκτρονικών ζωνών με την ατομική απόσταση	9
1.2 Ενδογενείς ημιαγωγοί.....	10
1.2.1 Θερμική διέγερση και μετάβαση των ηλεκτρονίων στη ζώνη αγωγιμότητας.....	11
1.2.2 Αγωγιμότητα των ενδογενών αγωγών.....	13
1.3 Εξωγενείς ημιαγωγοί ή ημιαγωγοί προσμείξεων	14
1.3.1 Στοιχεία δότες	15
1.3.2 Στοιχεία αποδέκτες	15
1.3.3 Αγωγιμότητα εξωγενών, ημιαγωγών	15
1.4 Οπτικές ιδιότητες ημιαγωγών.....	17
1.5 Φωτοαγωγιμότητα	17
1.6 Το φαινόμενο Hall	18
1.7 Ορθή πόλωση της επαφής p-n.....	19
1.8 Ανάστροφη πόλωση	20
1.9 Αρσενικούχο γάλλιο	21
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	24
ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ ΙΣΧΥΟΣ	24
2.1 Ημιαγωγικά στοιχεία ισχύος	24
2.2 Διακοπτική λειτουργία	24
2.3 Δίοδοι ισχύος.....	25
2.4 Οικογένεια των τρανζίστορ (BJT, power MOSFET, IGBT)	26
2.5 Οικογένεια των θυρίστορ (SCR,GTO,IGCT).....	26

2.6 Βασικές κατηγορίες μετατροπών ισχύος	27
2.7 Τοπολογίες Μετατροπών AC-DC	28
2.8 Ανορθωτές με θυρίστορ	28
2.9 Ανορθωτής ενός παλμού με ωμικό φορτίο	28
2.10 Ανορθωτής ενός παλμού με ωμικό επαγωγικό φορτίο	29
2.11 Ανορθωτής δύο παλμών	30
2.12 Ανορθωτής τεσσάρων παλμών	31
2.13 Μετάβαση-Γωνία Μετάβασης	32
2.14 Τριφασικοί ελεγχόμενοι ανορθωτές	32
2.15 Βασικές Τοπολογίες Μετατροπών DC-DC	35
2.16 DC-DC μετατροπέας υποβιβασμού (buckconverter)	36
2.17 DC-DC μετατροπέας ανύψωσης (boostconverter)	37
2.18 Βασικές τοπολογίες μετατροπών DC-AC	38
2.19 Αντιστροφέας ημιγέφυρας (halfbridgeinverter)	40
2.20 Αντιστροφέας πλήρους γέφυρας (fullbridgeinverter)	40
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	42
ΑΓΩΓΟΙ ΚΑΙ ΚΑΛΩΔΙΑ	42
3.1 Τι είναι αγωγός ;	42
3.2 Διατομή αγωγών	43
3.3 Τι είναι καλώδιο ;	43
3.4 Τυποποίηση καλωδίων	44
3.5 Φόρτιση αγωγών	45
3.6 Καλωδιώσεις φωτοβολταϊκών	46
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4	50
ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΑ ΠΑΝΕΛ	50
4.1 Φωτοβολταϊκό Στοιχείο	50
4.2 Ακριβέστερο Ισοδύναμο Κύκλωμα	51
4.3 Απο Φωτοβολταϊκά Στοιχεία Σε Πλαίσια ΚΑΙ Συλλέκτες	54
4.4 Χαρακτηριστική I-V Φωτοβολταϊκού Πλαισίου	55
4.5 Επίδραση της Θερμοκρασίας και της Ηλιακής Έντασης στην Χαρακτηριστική I-V	57
4.6 Επίδραση της σκίασης στην χαρακτηριστική I-V	58
4.6.1 Φυσική της Σκίασης	59
4.6.2 Δίοδοι Παράκαμψης για Άμβλυση της Σκίασης	60
4.6.3 Δίοδοι Φραγής	61
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5	63
ΤΥΠΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ Φ/Β ΜΟΝΑΔΑΣ	63

5.1 Επισκόπηση Χώρου	63
5.2 Επιλογή Εξοπλισμού.....	63
5.3 Επιλογή Αντιστροφέα (INVERTER)	65
5.4 Τοποθέτηση στο Χώρο	69
5.5 Καλώδια στην DC πλευρά	70
5.6 Καλώδια στην AC πλευρά.....	71
5.7 Καλώδια Ισχύος-Σύνδεση με ΔΕΔΔΗΕ.....	72
5.8 Μέσα Προστασίας.....	73
5.9 Γείωση και Αντικεραυνική Προστασία.....	73

ΠΕΡΙΛΗΨΗ ΚΕΦΑΛΑΙΩΝ

Κεφάλαιο 1

Η Φυσική των ημιαγωγών.

Σε αυτό το κεφάλαιο θα αναπτυχθεί η θεωρία της αγωγιμότητας των υλικών. Θα παρουσιαστούν οι τρεις βασικές κατηγορίες των υλικών από άποψη αγωγιμότητας και θα γίνει εκτενέστερη ανάλυση σε μία κατηγορία αυτών, που ονομάζεται ημιαγωγοί.

Ξεκινώντας από την ατομική δομή αυτών των υλικών θα εξηγήσουμε πώς μπορούν να γίνουν αγώγιμα. Τέλος θα γίνει μια αναλυτική εξήγηση για το πώς μπορούν αυτά τα υλικά να παράγουν ηλεκτρική ενέργεια από την φωτεινή ενέργεια. Δηλαδή να μετατρέψουν το φως σε ηλεκτρική τάση άρα και σε ροή ρεύματος.

Κεφάλαιο 2

Ηλεκτρονικά ισχύος.

Εδώ θα παρουσιαστεί η θεωρία των ηλεκτρονικών ισχύος, λόγω του σημαντικού ρόλου εμπλοκής τους στην παραλαβή της ηλεκτρικής ισχύος από τα Φ/Β πάνελ και την οδήγηση και μεταφοράς της στο AC δίκτυο. Αρχικά θα παρουσιαστούν τα βασικά στοιχεία όπως δίοδοι, τρανζίστορ ισχύος, θυρίστορ, triac, κ.λπ. Θα ακολουθήσουν βασικά κυκλώματα τα οποία τα περιλαμβάνουν όπως ανορθωτές, αντιστροφές DC και AC, ρυθμιζόμενες διατάξεις (AC και DC chopper). Θα γίνει ιδιαίτερη αναφορά στον αντιστροφέα (inverter) μιας και αυτός συμμετέχει στην μετατροπή από DC σε AC.

Κεφάλαιο 3

Αγωγοί – Καλώδια

Οι αγωγοί και τα καλώδια αποτελούν και αυτά ένα μέρος της 'αλυσίδας' της φωτοβολταϊκής παραγωγής. Τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των αγωγών όπως η ωμική, επαγωγική και χωρητική αντίσταση που ορίζουν την μέγιστη ικανότητα κάθε αγωγού, θα αναλυθούν. Η επίδραση της θερμοκρασίας στην ικανότητα τους καθώς και σχετικοί πίνακες διαθέσιμων καλωδίων από διάφορες κατασκευάστριες εταιρίες. Τέλος θα παρουσιάσουμε ένα παράδειγμα επιλογής της διατομής του καλωδίου και τα σχετικά κριτήρια που πρέπει να υπακούουν.

Κεφάλαιο 4

Φωτοβολταϊκά πάνελ

Εδώ θα δούμε πως το στοιχειώδες φωτοβολταϊκό στοιχείο δομεί ένα φωτοβολταϊκό πάνελ. Ποια είναι τα είδη αυτών π.χ. μονοκρυσταλλικά, πολυκρυσταλλικά, άμορφα. Ποια είναι τα ηλεκτρικά τους χαρακτηριστικά, τα μεγέθη τάση V και ρεύμα I και τις σχετικές χαρακτηριστικές καμπύλες. Θα διερευνηθεί ο βαθμός απόδοσης, η επίδραση της θερμοκρασίας καθώς και άλλοι παράμετροι που επιδρούν στην απόδοση του φωτοβολταϊκού πάνελ.

Κεφάλαιο 5

Τυπική μελέτη Φ/Β μονάδας

Στο κεφάλαιο αυτό θα μελετήσουμε δύο περιπτώσεις φ/β. Η μια θα αναφέρεται στην μελέτη και εγκατάσταση φ/β μικρής ισχύος περίπου ίσο με 10 kW και η άλλη πολλαπλάσιας ισχύος περίπου ίσο με 100 kW. Σε κάθε περίπτωση θα ξεκινήσουμε από την επιλογή των φωτοβολταϊκών πάνελ, τον συνολικό αριθμό αυτών, τον μεταξύ τους τρόπο σύνδεσης (σε σειρά και παράλληλα) και τους αιτούμενες ομαδοποιήσεις. Στον υπολογισμό των καλωδίων, τύπος καλωδίων και διατομή καθώς και τους συνδέσεις σε αυτόν. Θα εκτιμηθεί το μέγεθος (ισχύς) των αντιστροφών καθώς και ο αριθμός τους. Όλα τα απαιτούμενα μέσα διακοπών και προστασίας και τέλος τον τρόπο σύνδεσης με το δίκτυο του ΔΕΔΔΗΕ.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

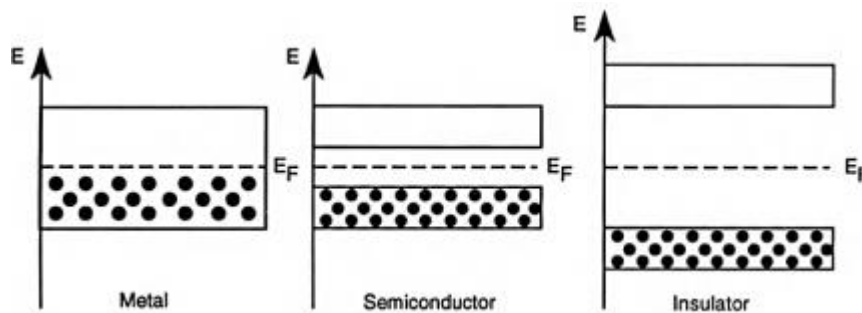
Η ΦΥΣΙΚΗ ΤΩΝ ΗΜΙΑΓΩΓΩΝ

Στο κεφάλαιο αυτό, θα συζητήσουμε την ηλεκτρονική δομή των ημιαγωγών και θα δούμε το πώς η κατάληψη των ενεργειακών σταθμών είναι διαφορετική απ' αυτήν των μετάλλων. Ο λόγος γι' αυτό είναι ότι στους ημιαγωγούς και μονωτές στην υψηλότερη ενεργειακή τους κατάσταση είναι είτε τελείως κατειλημμένη είτε τελείως άδεια. Αυτό σημαίνει ότι είναι πολύ δύσκολο για τα ηλεκτρόνια να κινηθούν κάτω από την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου, διότι αυτό θα οδηγούσε σε μια αύξηση ενέργειας, η οποία δεν είναι αμέσως επιτρεπτή, κάνοντας έτσι την ηλεκτρική τους αγωγιμότητα μικρή. Η μελέτη της ηλεκτρονικής δομής των ημιαγωγών είναι παρόμοια ή ίδια με τη μελέτη των μονωτών.

1.1 Δομές ηλεκτρονικών ζωνών στους ημιαγωγούς

Η δομή των ηλεκτρονικών ζωνών των ημιαγωγών και των μονωτών είναι όπως είπαμε ποιοτικά διαφορετική από αυτή των μετάλλων εξαιτίας του ενεργειακού διάκενου που ευρίσκεται μεταξύ της τελείως γεμάτης ζώνης σθένους και της άδειας ζώνης αγωγιμότητας. Η ηλεκτρονική θεωρία των ημιαγωγών αναλύθηκε πρώτα από τον Wilson χρησιμοποιώντας τη βασική άποψη ότι οι ημιαγωγοί και οι μονωτές διαθέτουν κατειλημμένες ενεργειακές καταστάσεις που είναι χωρικά εντοπισμένες στα ιοντικά δυναμικά. Ένας πολύ απλός τρόπος αναπαράστασης της δομής των ζωνών των μετάλλων, των ημιαγωγών και των μονωτών δίνεται στο Σχήμα 1.1, ενώ τυπικές τιμές ενεργειακών διάκενων σε διάφορους ημιαγωγούς και μονωτές δίνεται στον Πίνακα 1.1. Πολλές από τις ηλεκτρονικές ιδιότητες των ημιαγωγών μπορούν να εξηγηθούν με βάση αυτά τα απλοποιημένα διαγράμματα ενεργειακών ζωνών. Βέβαια, τα

πραγματικά διαγράμματα ενεργειακών δομών των ζωνών είναι πολύ πιο σύνθετα.



Σχήμα 1.1 Απλοποιημένο διάγραμμα δομής ζωνών των μετάλλων, ημιαγωγών και μονωτών. Τυπικές τιμές ενεργειακών διακενών είναι 0eV για τα μέταλλα, 0.5—5eV για τους ημιαγωγούς και πάνω από 5eV για μονωτές.

Υλικό	E_g (eV) στους 0 K	Άμεσο / έμμεσο χάσμα
Ge	0.75	Έμμεσο
Si	1.17	Έμμεσο
GaAs	1.5	Άμεσο
GaP	2.32	Έμμεσο
GaSb	0.81	Άμεσο
InSb	0.23	Άμεσο
SiC	3.0	Έμμεσο

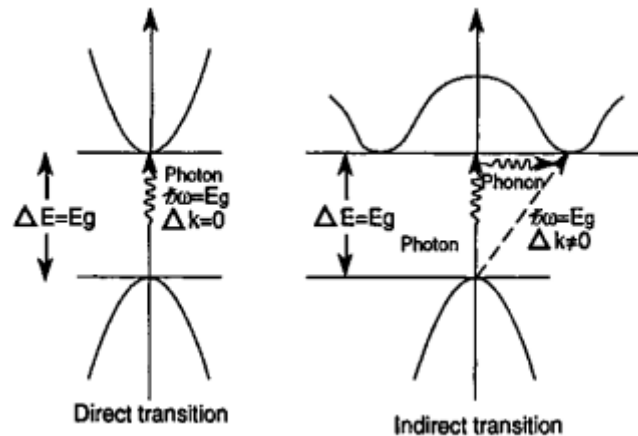
$1 \text{ eV} = 1.602 \times 10^{-19} \text{ joules}$. Περιοχή ορατού φωτός 2-3 eV

Πίνακας 1.1 Τυπικά ενεργειακά διάκενα ημιαγωγών

1.1.1 Άμεσα και έμμεσα ενεργειακά διάκενα

Σε μερικές περιπτώσεις η κορυφή της ζώνης σθένους και ο πυθμένας της ζώνης αγωγιμότητας ευρίσκονται σε διαφορετικά σημεία στον χώρο k . Αυτό ονομάζεται έμμεσο ενεργειακό διάκενο. Σε άλλες περιπτώσεις ευρίσκονται στο ίδιο σημείο στον χώρο k και ονομάζεται άμεσο ενεργειακό διάκενο. Αυτές οι δύο περιπτώσεις παρουσιάζονται στο Σχήμα 1.2. Τα άμεσα ενεργειακά διάκενα έχουν σημαντικές συνέπειες στις οπτικές εφαρμογές ημιαγωγών όπως θα δούμε στη συνέχεια, διότι η πιθανότητα της μετακίνησης ηλεκτρονίων διά μέσου του ενεργειακού διακενίου είναι μεγαλύτερη σε υλικά με άμεσο ενεργειακό διάκενο.

Θα δούμε τώρα τις αντίστοιχες δομές ζωνών στο γερμάνιο, το πυρίτιο και αρσενικούχο γάλλιο. Αυτά δίνονται στα Σχήματα 1.3, 1.4 και 1.5. Σ' αυτά τα διαγράμματα, τα ενεργειακά διάκενα δείχνονται καθαρά και έχουν τιμές 0.7eV για το γερμάνιο, 1.1eV για το πυρίτιο και 1.5eV για το αρσενικούχο γάλλιο. Επίσης μπορούμε να δούμε ότι ο γερμάνιο και το πυρίτιο έχουν έμμεσο ενεργειακό διάκενο, ενώ το αρσενικούχο γάλλιο έχει άμεσο.



Σχήμα 1.2 Άμεσα και έμμεσα ενεργειακά διάκενα σε έναν ημιαγωγό.

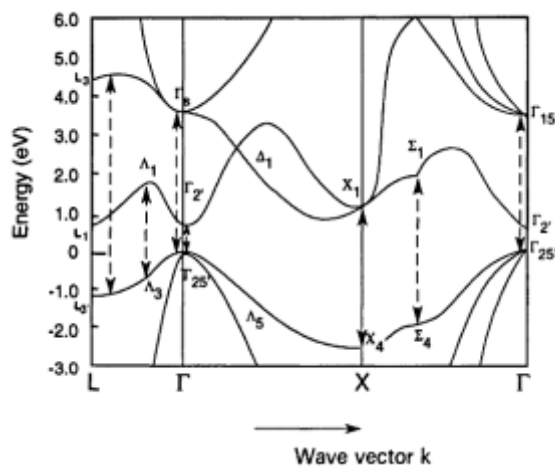
Μετασχηματίζοντας αυτόν τον τύπο διαγράμματος της δομής ζωνών σε απλοποιημένα διαγράμματα επιπέδων ζωνών οι ενωμένες ενεργειακές στάθμες πάνω και κάτω από το διάκενο αναπαριστώνται ως μια συνεχής ζώνη. Βέβαια, αυτή η απλοποίηση δεν μας δίνει πληροφορία για τη θέση των ζωνών στον χώρο k .

1.1.2 Η ενέργεια Fermi

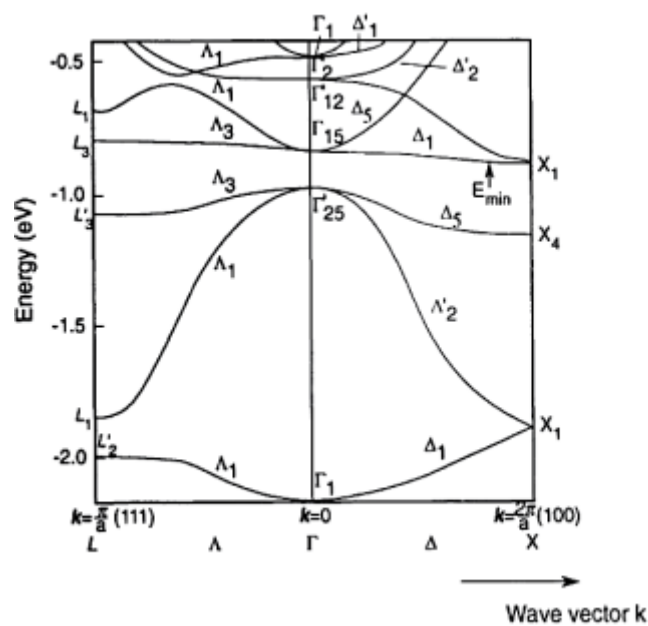
Σε έναν ημιαγωγό δεν υπάρχουν μερικώς πλήρεις ζώνες, αλλά μόνο πλήρως καλυμμένη ζώνη σθένους και πλήρως ακάλυπτη ζώνη αγωγιμότητας. Έτσι, η ενέργεια Fermi που διαχωρίζει τις πλήρεις από τις κενές καταστάσεις βρίσκεται μέσα στο ενεργειακό διάκενο. Έτσι, οι ημιαγωγοί δεν έχουν σαφώς ορισμένη επιφάνεια Fermi, η οποία δεν μας χρειάζεται κιόλας στην περίπτωση των ημιαγωγών.

1.1.3 Μεταβολή των ηλεκτρονικών ζωνών με την ατομική απόσταση

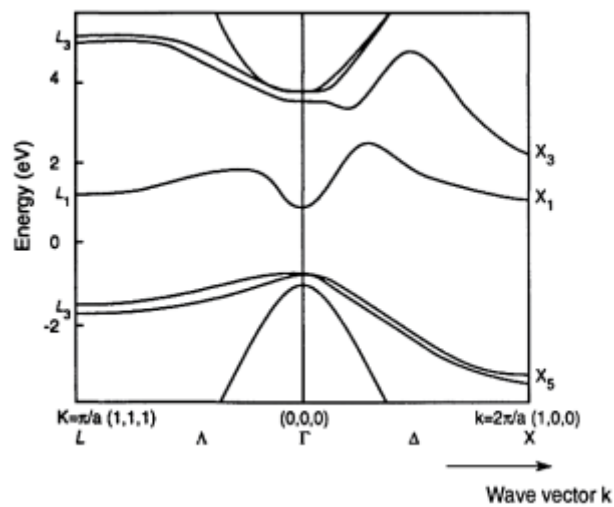
Όταν μειώνεται η ατομική απόσταση οι ηλεκτρονικές ενεργειακές ζώνες διευρύνονται. Αυτό σημαίνει ότι το ενεργειακό διάκενο σε έναν ημιαγωγό μειώνεται με την αύξηση της υδροστατικής πίεσης. Όντως, αυτό συμβαίνει στην πράξη. Για παράδειγμα, το γερμάνιο που είναι ημιαγωγός κάτω από κανονικές συνθήκες γίνεται μέταλλο κάτω από 12Gra (120kbar) υδροστατική πίεση.



Σχήμα 1.3 Διάγραμμα δομής ζωνών του γερμανίου



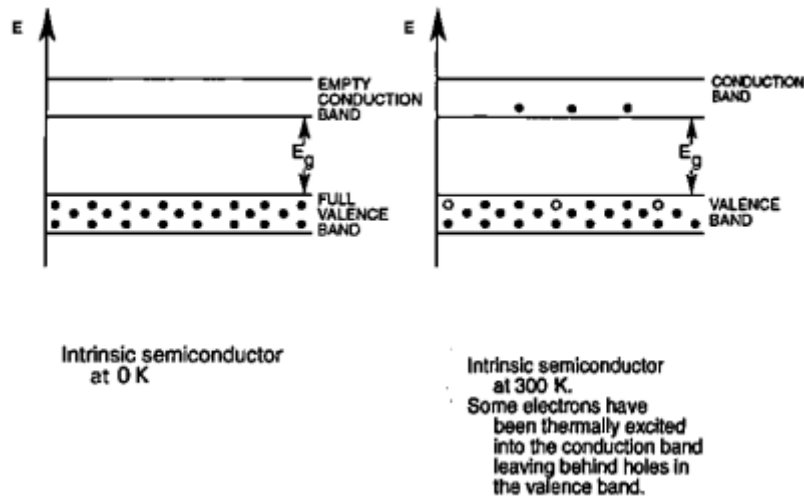
Σχήμα 1.4 Διάγραμμα δομής ζωνών του πυριτίου.



Σχήμα 1.5 Διάγραμμα δομής ζωνών του αρσενικούχου γάλλιου

1.2 Ενδογενείς ημιαγωγοί

Ενδογενείς ημιαγωγοί είναι εκείνα τα υλικά με σχετικά μικρά ενεργειακά διάκενα, τυπικά μικρότερα από 0.5eV . Στις περιπτώσεις αυτές, ένας αριθμός ηλεκτρονίων μπορεί να διεγερθεί θερμικά, και να μεταπηδήσει στη ζώνη αγωγιμότητας σε θερμοκρασία δωματίου (300K) όπως δείχνεται στο Σχήμα 1.6. Όταν αυτά τα ηλεκτρόνια βρεθούν στη ζώνη αγωγιμότητας, τότε συνεισφέρουν στην ηλεκτρική αγωγιμότητα, όπως επίσης και οι «τρύπες» ηλεκτρονίων που άφησαν πίσω τους στη ζώνη σθένους.



Σχήμα 1.6 Σχηματικό διάγραμμα δομής ζώνης ενδογενούς ημιαγωγού στο απόλυτο μηδέν (0K), όπου η ζώνη αγωγιμότητας είναι άδεια και το αντίστοιχο διάγραμμα στους 300K, όπου κάποια ηλεκτρόνια έχουν μεταφερθεί στη ζώνη αγωγιμότητας. Ο αριθμός των ηλεκτρονίων στη ζώνη αγωγιμότητας εξαρτάται από το μέγεθος του ενεργειακού διαύκενου και από τη θερμοκρασία.

1.2.1 Θερμική διέγερση και μετάβαση των ηλεκτρονίων στη ζώνη αγωγιμότητας

Οι ηλεκτρικές ιδιότητες των ενδογενών ημιαγωγών δεν επηρεάζονται σημαντικά από την παρουσία προσμείξεων τουλάχιστον στη θερμοκρασία δωματίου, διότι ο αριθμός των ηλεκτρονίων στη ζώνη αγωγιμότητας καθορίζεται κυρίως από την θερμική διέγερση και μετακίνηση των ηλεκτρονίων της ζώνης σθένους ως αποτέλεσμα σμίκρυνσης του ενεργειακού διαύκενου. Η κατανομή Fermi $f(E)$ δίνεται από τη σχέση:

$$f(E) = 1 / (1 + e^{(E - E_f) / k_B T}) \quad (1.1)$$

Αν θεωρήσουμε μια τυπική τιμή διαύκενου 1eV, την ενέργεια Fermi στο κέντρο του διαύκενου, μια θερμοκρασία χώρου 300K και $k_B = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$, με αποτέλεσμα $k_B T = 0.05 \text{ eV}$, μπορούμε να κάνουμε την προσέγγιση:

$$f(E) = e^{-E_g / 2k_B T} \quad (1.2)$$

Όπου $E - E_f \approx E_g / 2$. Αυτή η σχέση μάς δίνει την πιθανότητα μεταπήδησης ενός ηλεκτρονίου από τη ζώνη σθένους στη ζώνη

αγωγιμότητας εξαιτίας θερμικής διέγερσης. Οι τιμές αυτής της πιθανότητας δίνονται στον Πίνακα 1.2.

T(K)	$k_B T$ (eV)	$E_g/2k_B T$	$\exp(-E_g/2k_B T)$
0	0	∞	0
100	0.0086	58	0.06×10^{-24}
200	0.0172	29	0.25×10^{-12}
300	0.0258	19.3	4.0×10^{-9}
400	0.0344	14.5	0.5×10^{-6}

Πίνακας 1.2 Πιθανότητες διέγερσης ενός ηλεκτρονίου σε ενεργειακό διάκενο 1eV σε διάφορες θερμοκρασίες. Το υλικό έχει τυπικά 1028 - 1029 ηλεκτρόνια ανά μονάδα όγκου στη ζώνη σθένους.

Όταν η συνάρτηση $f(E)$ δίνει την πιθανότητα μιας κατάστασης να είναι κατειλημμένη, τότε ο αριθμός των ηλεκτρονίων σε κάθε ενεργειακή στάθμη $N(E)$ είναι το γινόμενο της πυκνότητας των εύκαιρων ενεργειακών καταστάσεων $D(E)$ και της συνάρτησης $f(E)$:

$$N(E) = 2D(E)f(E) \quad (1.3)$$

όπου ο συντελεστής 2 εισάγεται διότι τα ηλεκτρόνια μπορούν να έχουν spin - up και spin - down. Αυτό διπλασιάζει τον αριθμό των ηλεκτρονίων που μπορεί να καταλάβει μια οποιαδήποτε ενεργειακή στάθμη χωρίς να καταστρέφεται η απαγορευτική αρχή του Pauli. Η πυκνότητα καταστάσεων $D(E)$ για ελεύθερα ηλεκτρόνια όπως είδαμε στο κεφάλαιο 4, δίνεται από τη σχέση:

$$N_0(E) = (V/6\pi^2)(2m/\hbar)^{3/2} E^{3/2} \quad (1.4)$$

που είναι ο αριθμός των ενεργειακών σταθμών που υπάρχουν κάτω από την ενέργεια E . Αν η έκφραση αυτή παραγωγιστεί ως προς E δίνει τον αριθμό των ενεργειακών καταστάσεων μέσα στη μονάδα μεταβολής ενέργειας $D(E)$:

$$(dN_0(E)/dE) = D(E) = (V/64)(2m/\hbar)^{3/2} E^{1/2} \quad (1.5)$$

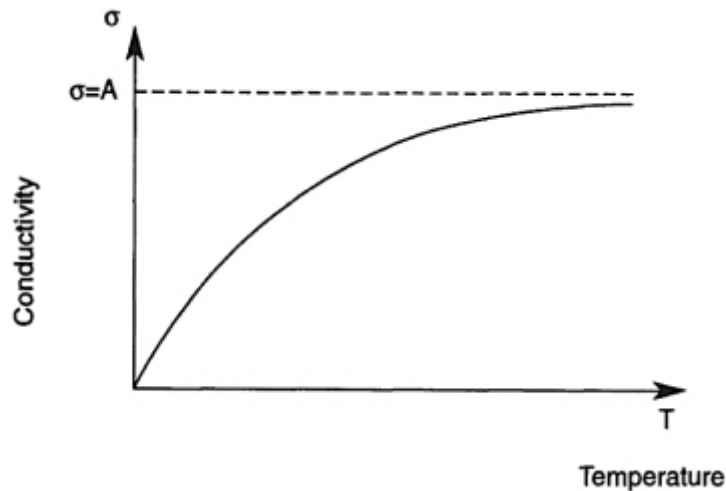
και η πυκνότητα των ηλεκτρονικών καταστάσεων είναι διπλάσιος αυτού του αριθμού. Η πυκνότητα των κατειλημμένων καταστάσεων δίνεται από:

$$N_0(E) = (V/2\pi^2)(2m/\hbar)^{3/2} E^{1/2} f(E) \quad (1.6)$$

Σε θερμοκρασία δωματίου ο ενδογενής ημιαγωγός έχει περίπου $10^{15} - 10^{20}$ ηλεκτρόνια αγωγιμότητας ανά m^3 που εξαρτάται από το ενεργειακό διάκενο και οφείλεται αποκλειστικά στη θερμική διέγερση. Αυτή η συνεισφορά στην ηλεκτρική αγωγιμότητα είναι γνωστή σαν «σκοτεινό ρεύμα» διότι απλά προκαλείται στην απουσία του προσπίπτοντος φωτός.

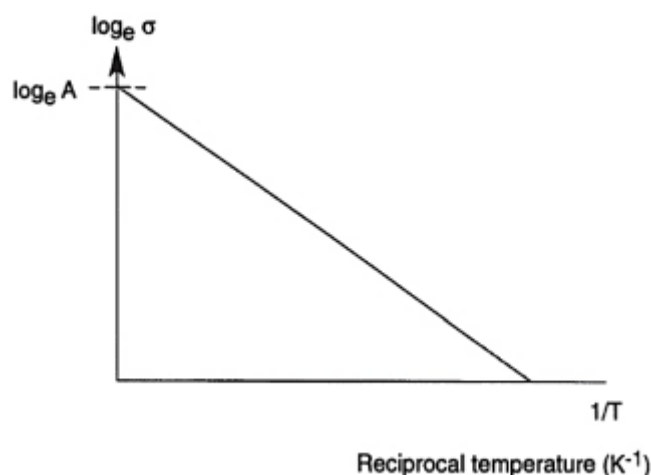
1.2.2 Αγωγιμότητα των ενδογενών αγωγών

Τα ηλεκτρόνια των ενδογενών ημιαγωγών διεγείρονται θερμικά και περνούν από τη ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας, όσο υψηλότερη είναι η θερμοκρασία τόσο περισσότερα ηλεκτρόνια ευρίσκονται στη ζώνη αγωγιμότητας. Κάθε ηλεκτρόνιο που υφίσταται αυτήν τη μετάβαση αφήνει πίσω του μια οπή στη ζώνη σθένους. Και το ηλεκτρόνιο και η οπή μπορούν να συνεισφέρουν στην ηλεκτρική αγωγιμότητα του υλικού. Η αγωγιμότητα, σ , δίνεται από το άθροισμα των συνεισφορών των ηλεκτρονίων και των οπών.



Σχήμα 1.7 Μεταβολή της αγωγιμότητας ενός ενδογενούς ημιαγωγού συναρτήσει της θερμοκρασίας

Με κατάλληλη μαθηματική επεξεργασία της εκθετικής (ασυμπτωτικής) γραφικής παράστασης του σχήματος 1.7 μπορούμε να καταλήξουμε στην γραφική παράσταση της αγωγιμότητας σ συναρτήσει του $1/T$ (λογαριθμοποίηση) και λαμβάνουμε την γραφική παράσταση του σχήματος 1.8



Σχήμα 1.8 Μεταβολή του λογάριθμου της αγωγιμότητας ως προς το αντίστροφο της θερμοκρασίας σε έναν ενδογενή ημιαγωγό.

1.3 Εξωγενείς ημιαγωγοί ή ημιαγωγοί προσμείξεων

Ένας εξωγενής ημιαγωγός είναι ένα υλικό με μεγάλο ενεργειακό διάκενο που θα μπορούσε να θεωρηθεί μονωτής, εκτός από συγκεκριμένα σημεία όπου έχουν εισαχθεί στοιχεία τα οποία ονομάζονται δότες ή αποδέκτες και μπορούν να δημιουργήσουν επί πλέον ηλεκτρόνια αγωγιμότητας ή οπές αγωγιμότητας στο ενεργειακό διάκενο. Τα ηλεκτρόνια των στοιχείων - δωτών μπορούν να ενεργοποιηθούν και να μεταπηδήσουν στη ζώνη αγωγιμότητας και να γίνουν ηλεκτρόνια αγωγιμότητας. Επιπλέον ηλεκτρόνια της ζώνης σθένους του ημιαγωγού μπορούν να ενεργοποιηθούν και να μεταπηδήσουν στη ζώνη των στοιχείων - αποδεκτών και να δημιουργήσουν οπές αγωγιμότητας στη ζώνη σθένους, όπως δείχνεται στο Σχήμα 1.9.

Οι ηλεκτρικές ιδιότητες των εξωγενών ημιαγωγών μπορούν να ελεγχθούν με ακρίβεια με την προσθήκη ατόμων δωτών και ατόμων αποδεκτών. Αυτό σημαίνει ότι τα υλικά αυτά μπορούν να σχεδιαστούν κατάλληλα για συγκεκριμένες τεχνολογικές εφαρμογές και κατά συνέπεια οι εξωγενείς ημιαγωγοί παραμένουν τα πιο σημαντικά υλικά για ηλεκτρονικές εφαρμογές.

Τα ενεργειακά επίπεδα των δωτών ευρίσκονται λίγο κάτω από το επίπεδο της ζώνης αγωγιμότητας, ενώ τα ενεργειακά επίπεδα των αποδεκτών ευρίσκονται λίγο πάνω από την ζώνη σθένους. Τα επίπεδα δωτών - ζώνης αγωγιμότητας και αποδεκτών - ζώνης σθένους είναι περίπου το 1% του ενεργειακού διακενου μεταξύ ζώνης σθένους και ζώνης αγωγιμότητας.

1.3.1 Στοιχεία δότες

Τυπικά στοιχεία - δότες τε ημιαγωγούς προσμείξεων είναι ο φώσφορος, το αρσενικό και το αντιμόνιο. Όταν αυτά τα πεντασθενή στοιχεία προστίθενται στον ημιαγωγό σε μικρές ποσότητες, της τάξης των ppm, συνεισφέρουν ένα ηλεκτρόνιο που πηγαίνει στη ζώνη αγωγιμότητας. Ο μηχανισμός αγωγιμότητας στην περίπτωση αυτή γίνεται διά μέσου ηλεκτρονίων και το υλικό ονομάζεται ημιαγωγός τύπου n.

1.3.2 Στοιχεία αποδέκτες

Τυπικά στοιχεία - αποδέκτες σε ημιαγωγούς προσμείξεων είναι το βόριο, το αλουμίνιο, το γάλλιο και το ίνδιο. Αυτά τα στοιχεία είναι τρισθενή και έχουν ένα ηλεκτρόνιο λιγότερο στη ζώνη σθένους από το πυρίτιο ή το γερμάνιο. Κατά συνέπεια μπορούν να πάρουν ένα στοιχείο από την ζώνη σθένους του ημιαγωγού αφήνοντας μια οπή στον ημιαγωγό. Η οπή αυτή επιτρέπει ηλεκτρική αγωγιμότητα στη ζώνη σθένους του ημιαγωγού. Σ' αυτές τις περιπτώσεις ο φορέας φορτίου φαίνεται να είναι θετικός και οι ημιαγωγοί αυτοί ονομάζονται ημιαγωγοί τύπου p.



Σχήμα 1.9 Σχηματικό διάγραμμα δομής ζωνών σε έναν ημιαγωγό προσμείξεων.

1.3.3 Αγωγιμότητα εξωγενών, ημιαγωγών

Σε έναν εξωγενή αγωγό έχουμε συνήθως την κυριαρχία προσμείξεων δοτών που οδηγούν σε ημιαγωγό τύπου n ή την κυριαρχία προσμείξεων αποδεκτών που οδηγούν σε ημιαγωγό τύπου p. Έτσι, στους ημιαγωγούς τύπου n έχουμε:

$$\sigma = eN_e\mu_e \quad (1.7)$$

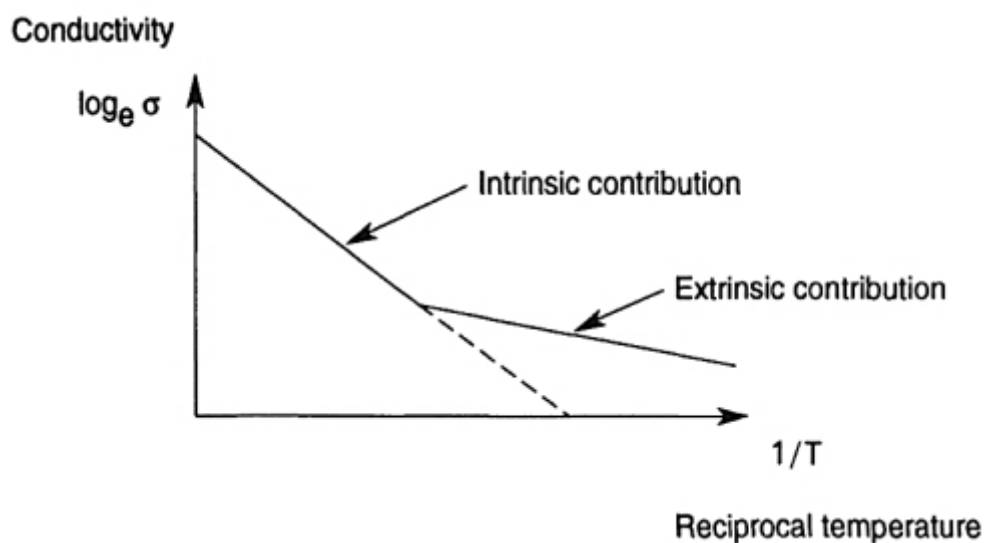
και στους ημιαγωγούς τύπου p, έχουμε:

$$\sigma = eN_h\mu_h \quad (1.8)$$

Ένας τυπικός αριθμός πυκνότητας φορέων φορτίου σε έναν εξωγενή ημιαγωγό είναι $N=10^{21}/\text{m}^3$ σε θερμοκρασία δωματίου.

Η συνεισφορά των προσμειξεων στους περισσότερους από αυτούς τους ημιαγωγούς είναι το πιο σημαντικό στοιχείο στον αριθμό φορέων, σε θερμοκρασία δωματίου. Σε μεγαλύτερες θερμοκρασίες η θερμική διέγερση των ηλεκτρονίων επιτρέπει βέβαια την απ' ευθείας μετανάστευση ηλεκτρονίων του ημιαγωγού από τη ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας. Είναι σαφές ότι υπάρχουν δύο παράμετροι συνεισφοράς στην αγωγιμότητα: η ενδογενής και η εξωγενής. Οι σχετικές συνεισφορές τους στην ολική αγωγιμότητα σε έναν δοσμένο ημιαγωγό με δοσμένες προσμειξεις εξαρτώνται από τη θερμοκρασία.

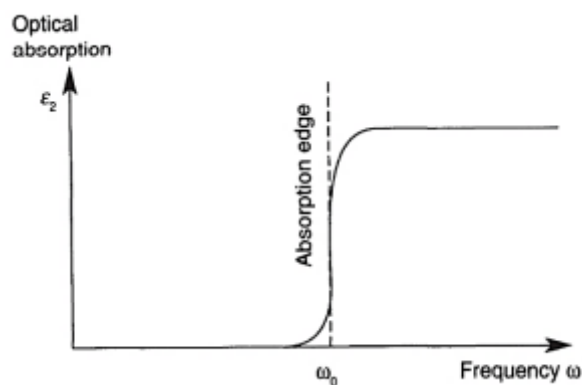
Θεωρώντας τη σχέση του λογάριθμου της αγωγιμότητας ως προς $1/T$ όπως κάναμε πριν σε έναν ενδογενή ημιαγωγό, θα έχουμε μια απόκριση που δείχνεται στο Σχήμα 1.11. Από το διάγραμμα αυτό βλέπουμε ότι η εξωγενής συνεισφορά είναι σημαντικότερη σε σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες και η ενδογενής συνεισφορά σε σχετικά μεγαλύτερες αντίστοιχα.



Σχήμα 1.11 Μεταβολή του λογάριθμου της αγωγιμότητας ως προς $1/T$ σε εξωγενή ημιαγωγό

1.4 Οπτικές ιδιότητες ημιαγωγών

Εξαιτίας του ενεργειακού διακένου E_g οι ημιαγωγοί δεν μπορούν να απορροφήσουν και να ανακλάσουν χαμηλές συχνότητες. Η απορροφητικότητα και η ανακλαστικότητα αρχίζουν να εμφανίζονται στη συχνότητα εκείνη που αντιστοιχεί στο ενεργειακό διάκενο, που ονομάζεται και κατώφλι απορροφητικότητας. Σε υψηλές συχνότητες, η απορροφητικότητα και η ανακλαστικότητα είναι σχετικά υψηλές και εξάρτησή τους από την συχνότητα ω , σχεδόν βηματική, όπως δείχνεται στο Σχήμα 1.12.

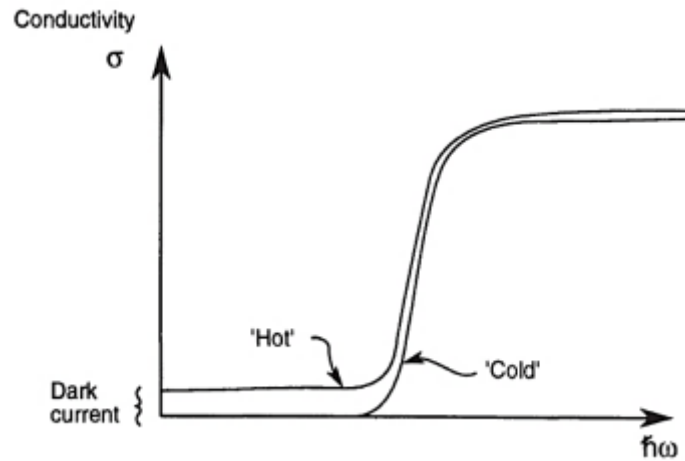


Σχήμα 1.12 Ιδεατή εξάρτηση της οπτικής ανακλαστικότητας ή απορροφητικότητας σε έναν ημιαγωγό συναρτήσει της συχνότητας του προσπίπτοντος φωτός.

1.5 Φωτοαγωγιμότητα

Εκτός της θερμικής διέγερσης των ηλεκτρονίων υπάρχουν και άλλες τεχνικές για να πετύχουμε το ίδιο αποτέλεσμα. Η έκθεση ενός ημιαγωγού στο φως μιας ικανοποιητικής συχνότητας, για παράδειγμα σε φωτονική ενέργεια, οδηγεί επίσης σε έναν αυξημένο αριθμό φορέων φορτίου στη ζώνη αγωγιμότητας και κατά συνέπεια σε αύξηση της αγωγιμότητας. Αυτό προκαλείται από την διέγερση των ηλεκτρονίων από τη ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας με την σύζευξη με φωτόνια. Η εξάρτηση της αγωγιμότητας από την απορρόφηση φωτός είναι γνωστή σαν φωτοαγωγιμότητα.

Η ελάχιστη συχνότητα του φωτός που είναι αναγκαία να αρχίσει να εμφανίζεται φωτοαγωγιμότητα καθορίζεται από το ενεργειακό διάκενο ζωνών σθένους και αγωγιμότητας. Σε έναν εξωγενή ημιαγωγό καθορίζεται από την ενεργειακή μετατόπιση εξαιτίας των δοτών και των αποδεκτών στις ζώνες αγωγιμότητας και σθένους αντίστοιχα. Η εξάρτηση της αγωγιμότητας από την συχνότητα του προσπίπτοντος φωτός δίνεται στο Σχήμα 1.13.



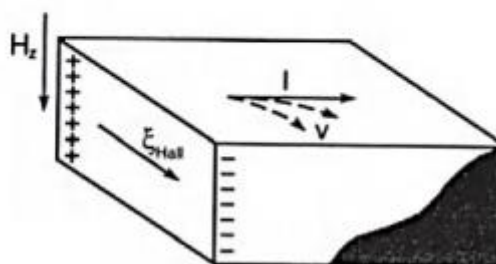
Σχήμα 1.13 Ιδεατή εξάρτηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας σε έναν ημιαγωγό συναρτήσει της συχνότητας του προσπίπτοντος φωτός σε διαφορετικές θερμοκρασίες

1.6 Το φαινόμενο Hall

Οι μετρήσεις αγωγιμότητας δεν είναι από μόνες τους αρκετές για να βρούμε τον ολικό αριθμό των φορέων φθορίου, των προσήμων τους και των ταχυτήτων τους. Η μέτρηση του φαινομένου Hall δίνει την απαραίτητη συμπληρωματική πληροφορία.

Όταν ένα ρεύμα ρέει σε έναν αγωγό ή ημιαγωγό και ένα μαγνητικό πεδίο εφαρμόζεται κάθετα στο ρεύμα, τότε εμφανίζεται μια τάση κατά μήκος του υλικού που είναι κάθετη και στο ρεύμα και στο μαγνητικό πεδίο, όπως δείχνεται στο Σχήμα 1.14. Η τάση αυτή είναι γνωστή σαν τάση Hall και το φαινόμενο σαν φαινόμενο Hall.

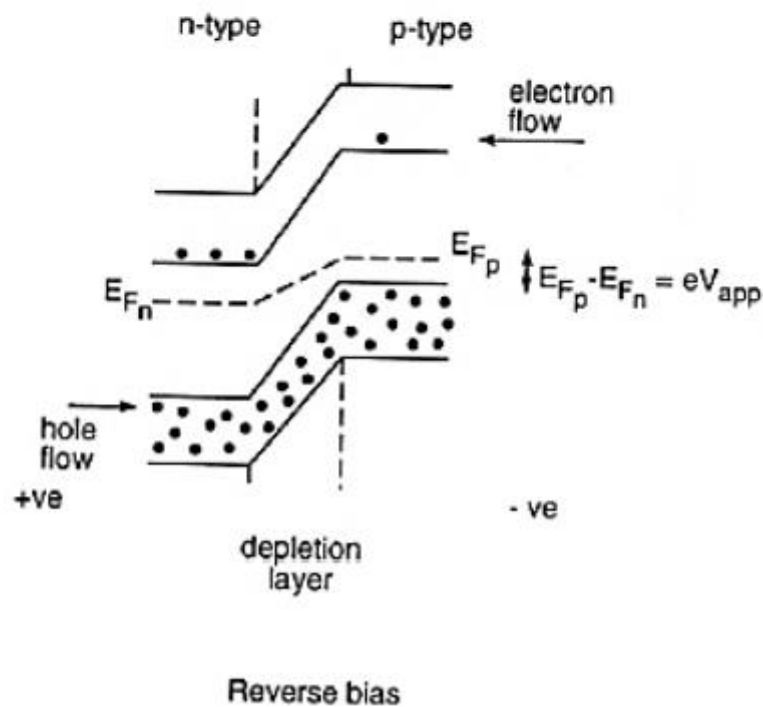
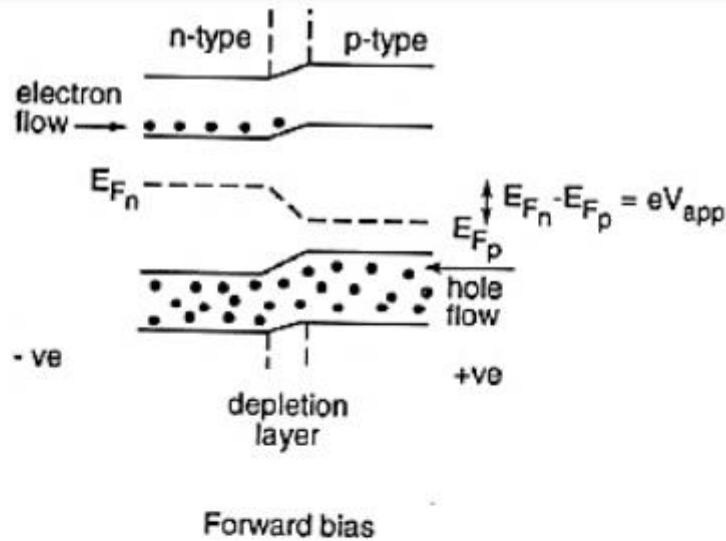
Η εξήγηση του φαινομένου είναι αρκετά απλή. Είναι το αποτέλεσμα της δύναμης Lorentz σε ένα φορτίο που κινείται μέσα σε μαγνητικό πεδίο.



Σχήμα 1.14 Τάση Hall εξαιτίας της επίδρασης εξωτερικού πεδίου στην κίνηση του φορτίου

1.7 Ορθή πόλωση της επαφής p-n

Αν τοποθετήσουμε ηλεκτρική τάση κατά μήκος της επαφής, συνδέοντας για παράδειγμα το θετικό άκρο της πηγής συνεχούς στο υλικό τύπου p και το αρνητικό άκρο της πηγής στο υλικό τύπου n, η διαφορά δυναμικού και κατά συνέπεια η διαφορά ενέργειας μεταξύ των δύο ζωνών μειώνεται. Αυτό καλείται θετική ή ορθή πόλωση. Σε μια πρώτη προσέγγιση το τείχος δυναμικού κατά μήκος της ζώνης αγωγιμότητας μειώνεται από E_g σε $\Delta E = E_g - eV$, όπου V είναι η τάση που εφαρμόζεται, όπως δείχνεται στο Σχήμα 1.18. Ως αποτέλεσμα αυτής της διαφοράς, περισσότερο μέρος της ζώνης αγωγιμότητας εκτίθεται στο υλικό τύπου p και κατά συνέπεια τα ηλεκτρόνια μπορούν να περνούν ευκολότερα από το υλικό τύπου n στο υλικό τύπου p. Αυτά τα ηλεκτρόνια μπορούν να συνδέονται με οπές, εκπέμποντας φως. Η ορθώς πολωμένη επαφή p-n, μπορεί κατά συνέπεια να χρησιμοποιηθεί σαν πηγή φωτός ή ακόμη και κάτω από ειδικές συνθήκες σαν πηγή laser.



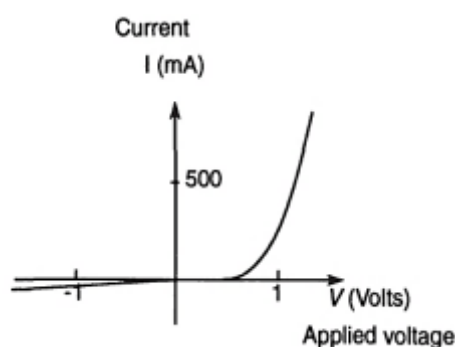
Σχήμα 1.18 Δομή ηλεκτρονικών ζωνών ορθής και ανάστροφης πόλωσης σε επαφές p-n.

1.8 Ανάστροφη πόλωση

Αντίθετα, αν το αρνητικό άκρο της πηγής συνεχούς τάσης είναι συνδεδεμένο με το υλικό τύπου p, η ενεργειακή διαφορά των ζωνών μεταξύ των δύο υλικών μεγαλώνει. Αυτή η διαδικασία ονομάζεται αρνητική ή ανάστροφη πόλωση. Στην περίπτωση αυτή, η διαφορά ενέργειας μεγαλώνει κατά $\Delta E = E_g + eV$, όπως δείχνεται στο Σχήμα

1.18, γίνεται πολύ δύσκολο να οδηγηθούν ηλεκτρόνια από το υλικό τύπου n στο υλικό τύπου p . Όμως, ηλεκτρόνια μπορούν να μετακινηθούν εύκολα από το υλικό τύπου p στο υλικό τύπου n εξαιτίας της μεταβολής δυναμικού στη ζώνη αγωγιμότητας στην περιοχή της διεπιφάνειας. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την δημιουργία ηλεκτρικού ρεύματος και μπορεί να προκληθεί για παράδειγμα αν τα ηλεκτρόνια διαπεράσουν το ενεργειακό διάκενο εξαιτίας της απορρόφησης φωτονίων στη διεπιφάνεια. Αυτό σημαίνει ότι η ανάστροφα πολωμένη επαφή μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν έναν ανιχνευτής φωτός, που λέγεται φωτοανιχνευτής ή φωτοκύτταρο.

Το ρεύμα σε μια επαφή p - n συμπεριφέρεται μη γραμμικά συναρτήσει της τάσης πόλωσης όπως δείχνεται στο Σχήμα 1.19. Θα δούμε επίσης ότι η απλή επαφή p - n που περιγράψαμε μπορεί να λειτουργήσει ως ανορθωτής ή δίοδος επιτρέποντας ρεύμα να ρέει μόνο ως προς τη μία κατεύθυνση.



Σχήμα 1.19 Χαρακτηριστική τάση ρεύματος σε μια επαφή p - n που παρουσιάζει αγωγή στην ορθή πόλωση, αλλά μη αγωγή στην ανάστροφη πόλωση (φυσικά μέχρις ότου προκληθεί ηλεκτρική διάσπαση λόγω υψηλής τάσης).

1.9 Αρσενικούχο γάλλιο

Η τεχνολογία έχει αναπτύξει έναν μεγάλο αριθμό ημιαγωγικών διατάξεων που βασίζονται σ' αυτές τις επαφές ημιαγωγών. Τέτοιες όπως διατάξεις μορφοποιούν κατάλληλα τις χαρακτηριστικές ρεύματος-τάσης για εφαρμογές σε διόδους και τρανζίστορες ή σε οπτοηλεκτρονικές διατάξεις όπως φωτοκύτταρα και πηγές φωτός.

Η σημερινή βιομηχανία ημιαγωγών βασίζεται στο πυρίτιο και κατά πολύ λιγότερο στο γερμάνιο. Εν τούτοις το ενδιαφέρον για το αρσενικούχο γάλλιο (GaAs) συνεχώς μεγαλώνει. Η μάχη μεταξύ πυριτίου και αρσενικούχου γαλλίου καλά κρατεί, λόγω μερικών πολύ σημαντικών ιδιοτήτων του αρσενικούχου γαλλίου, που είναι:

- μεγάλη κινητικότητα ηλεκτρονίων,

- μεγάλο ενεργειακό διάκενο,
- άμεσο ενεργειακό διάκενο.

Η μεγάλη κινητικότητα των φορέων φορτίου έχει σαν αποτέλεσμα μικρή φαινόμενη μάζα των ηλεκτρονίων του υλικού, που προκαλείται από τη σχετικά μεγάλη καμπυλότητα της ζώνης αγωγιμότητας στο σημείο Γ στη ζώνη Brillouin. Έτσι, μπορούν να κατασκευαστούν διατάξεις που να είναι πολύ γρήγορες. Αυτό το υλικό μπορεί να βρει εφαρμογές που ταχύτητα μετάδοσης φορτίων έχει ιδιαίτερα μεγάλη σημασία.

Το μεγάλο ενεργειακό διάκενο των 1.5eV κάνει το αρσενικούχο γάλλιο ευαίσθητο σε μήκη κύματος των 827nm και μικρότερων. Αυτό σημαίνει ότι τα ηλεκτρόνια που πέφτουν από τον πυθμένα της ζώνης αγωγιμότητας στην κορυφή της ζώνης σθένους θα εκπέμπουν ένα φωτόνιο στην ερυθρά περιοχή του ορατού φάσματος. Έτσι, το υλικό αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν δίοδος φωτο-εκπομπής (LED) που εκπέμπουν ερυθρό φως. Κάνοντας πρόσμειξη με άλλα υλικά όπως φωσφορικό γάλλιο, μπορούν να δημιουργηθούν και εκπομποί άλλων χρωμάτων, λόγω της μεταβολής του ενεργειακού διακενου.

Οι οπτικές ιδιότητες του αρσενικούχου γαλλίου και ειδικά η μεγάλη του ικανότητα στην ανίχνευση ή δημιουργία φωτός προκαλείται από το άμεσο ενεργειακό διάκενο. Αυτό σημαίνει ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή πηγών laser και διατάξεων οπτικής τηλεπικοινωνίας για υπολογιστές. Σε τέτοιες οπτοηλεκτρονικές εφαρμογές η πληροφορία μεταδίδεται με φωτόνια αντί με ηλεκτρόνια. Αυτοί οι οπτικοί υπολογιστές είναι πολύ πιο γρήγοροι από τους συμβατικούς. Οι πιο πρόσφατες εφαρμογές μεγάλων ηλεκτρονικών υπολογιστών βασίζονται σ' αυτήν την τεχνολογία.

Συνοψίζοντας τις τεχνολογικές ιδιότητες του αρσενικούχου γαλλίου μπορούμε να πούμε ότι:

- Τα κυκλώματα αρσενικούχου γαλλίου είναι γρήγορα και χρειάζονται ίση ή μικρότερη ισχύ για να λειτουργήσουν σε σχέση με τα κυκλώματα πυριτίου.
- Ο διαχωρισμός μεταξύ των ζωνών αγωγιμότητας και σθένους είναι πιο εύκολος στο αρσενικούχο γάλλιο απ' ότι στο πυρίτιο.
- Το αρσενικούχο γάλλιο εκπέμπει και ανιχνεύει υπέρυθρο και ορατή ακτινοβολία σαν συνάρτηση του ενεργειακού διακενου.

- Το αρσενικούχο γάλλιο μπορεί να υποστηρίξει οπτοηλεκτρονικές διατάξεις ενώ το πυρίτιο δεν μπορεί.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ ΙΣΧΥΟΣ

2.1 Ημιαγωγικά στοιχεία ισχύος

Με τον όρο «ηλεκτρονικά ισχύος» περιγράφεται μια ποικιλία εφαρμογών ημιαγωγικών στοιχείων για τον έλεγχο και την μετατροπή της ηλεκτρικής ισχύος (οι σχετικές διατάξεις δε, καλούνται και μετατροπείς ισχύος). Οι διατάξεις αυτές έχουν ιδιαίτερα πλεονεκτήματα σε σχέση με παλαιότερες ηλεκτρομηχανικής λογικής (π.χ. σύστημα Ward-Leonard) καθώς έχουν μικρότερο όγκο/βάρος/κόστος, υψηλότερη απόδοση, μεγαλύτερη ακρίβεια και ταχύτητα ελέγχου και μικρότερες απαιτήσεις συντήρησης. Από την άλλη παρουσιάζουν και συγκεκριμένα μειονεκτήματα με το κύριο να αφορά την εισαγωγή ανώτερων αρμονικών, γεγονός που έχει ποικίλα αρνητικά αποτελέσματα (αύξηση απωλειών, αύξηση άεργης ισχύος, ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές κ.α.). Όσον αφορά την ιστορική διαδρομή, η αφετηρία θα πρέπει να αναζητηθεί πίσω στην ανάπτυξη του ανορθωτή ατμών υδραργύρου (1900), με ειδική αναφορά στην εφεύρεση του τρανζίστορ (1947). Ουσιαστικά όμως η «επανάσταση» των ηλεκτρονικών ισχύος ξεκινά με την εφεύρεση του θυρίστορ (thyristor)(1956). Τα θυρίστορ ήταν ο αδιαμφισβήτητος κυρίαρχος της αγοράς για σημαντικό χρονικό διάστημα. Έπρεπε να περάσουν πάνω από δύο δεκαετίες μέχρι την ανάπτυξη νέων στοιχείων που μπορούσαν να αμφισβητήσουν την πρωτοκαθεδρία τους, αρχικά σε περιορισμένες εφαρμογές και σταδιακά σε όλο και περισσότερες. Μια βασική κατηγοριοποίηση μας δίνει τρεις διαφορετικές οικογένειες στοιχείων:

- (1) τις διόδους ισχύος
- (2) τα στοιχεία που ανήκουν στην οικογένεια των τρανζίστορ (BJT, MOSFET ισχύος, IGBT κ.α.)
- (3) τα στοιχεία που ανήκουν στην οικογένεια των θυρίστορ (SCR, GTO, IGCT κ.α.)

2.2 Διακοπτική λειτουργία

Θα πρέπει να γίνει μια βασική διευκρίνιση που αφορά την συμπεριφορά όλων των στοιχείων στα ηλεκτρονικά ισχύος. Σε αντίθεση με την συνήθη λογική στην μικροηλεκτρονική που αφορά κυρίως λειτουργία στην γραμμική περιοχή, στα ηλεκτρονικά ισχύος τα στοιχεία λειτουργούν ως ηλεκτρονικοί διακόπτες: βρίσκονται είτε σε κατάσταση αγωγής (ON) είτε σε κατάσταση αποκοπής (OFF). Για αυτό το λόγο χρησιμοποιούνται και οι όροι ηλεκτρονικοί διακόπτες ή

διακόπτες στερεάς κατάστασης (εφόσον εκτελούν διακοπτική λειτουργία αλλά δεν έχουν κινούμενα μέρη). Ένας βασικός διαχωρισμός βάσει του βαθμού ελέγχου δίνει επίσης τρεις βασικές κατηγορίες:

- (1) τα μη ελεγχόμενα στοιχεία (δίοδοι)
- (2) τα μερικώς ελεγχόμενα (SCR)
- (3) τα πλήρως ελεγχόμενα (GTO, MOSFET ισχύος, IGBT κ.α.).

Τα χαρακτηριστικά ενδιαφέροντος στους ηλεκτρονικούς διακόπτες ισχύος είναι τα γενικά χαρακτηριστικά που ενδιαφέρουν σε κάθε διακόπτη, δηλαδή η τάση που μπορεί να δεχθεί (ορθά ή ανάστροφα) χωρίς να καταρρεύσει, το μέγιστο ρεύμα αγωγής και αποκοπής, το ορθό και ανάστροφο ρεύμα διαρροής, οι χρόνοι απόκρισης, η μέγιστη δυνατή διακοπτική συχνότητα και η αντοχή σε απότομες μεταβολές τάσης και ρεύματος.

2.3 Δίοδοι ισχύος

Οι δίοδοι έχουν δύο ακροδέκτες: την άνοδο (A) και την κάθοδο (K). Η βασική αρχή λειτουργίας μιας διόδου είναι ότι αυτή άγει όταν η τάση στην άνοδο είναι μεγαλύτερη από την τάση στην κάθοδο (η διόδος τότε είναι ορθά πολωμένη).

Οι δίοδοι ισχύος χωρίζονται σε τρεις βασικές κατηγορίες:

- (1) τις διόδους γενικού σκοπού (ή διόδους δικτύου) κατάλληλες για μεγάλες τάσεις και ρεύματα αλλά όχι για μεγάλες συχνότητες (εξ ου και ο χαρακτηρισμός «δικτύου» καθώς συνίσταται η επιλογή τους για εφαρμογές που απαιτούν την λειτουργία των διόδων στην συχνότητα του δικτύου)
- (2) τις διόδους Schottky με κύριο χαρακτηριστικό την μικρότερη πτώση τάσης κατά την αγωγή και την υψηλή απόδοση σε μικρές στάθμες τάσης και ρεύματος
- (3) τις διόδους ταχείας αποκατάστασης με δυνατότητα λειτουργίας σε υψηλές διακοπτικές συχνότητες Στην γενικότερη οικογένεια των διόδων προφανώς συμπεριλαμβάνονται και άλλα είδη (δίοδοι Zener, φωτοδίοδοι κ.α.)

2.4 Οικογένεια των τρανζίστορ (BJT, power MOSFET, IGBT)

Τα διπολικά τρανζίστορ επαφής (Bipolar Junction Transistor ή BJT) έχουν τρεις ακροδέκτες: την βάση (B), τον εκπομπό (E) και τον συλλέκτη (C). Είναι διατάξεις ελεγχόμενες από ρεύμα (για να μείνουν σε αγωγή πρέπει το ρεύμα βάσης να είναι μεγαλύτερο από ένα όριο) και γνωρίζουν μικρή εφαρμογή σε διατάξεις ισχύος. Από την οικογένεια των τρανζίστορ μεγάλη εφαρμογή σε διατάξεις ισχύος γνωρίζουν τα IGBT και τα MOSFET ισχύος. Τα MOSFET ισχύος (τρανζίστορ μεταλλικών οξειδίων ημιαγωγών με επίδραση πεδίου ή Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) είναι διατάξεις ελεγχόμενες από τάση επίσης με τρεις ακροδέκτες που ονομάζονται πύλη (G), πηγή (S) και υποδοχή (D). Τα IGBT (διπολικά τρανζίστορ με μονωμένη πύλη (Insulated Gate Bipolar Transistor)) έχουν επίσης τρεις ακροδέκτες με παρόμοια ονομασία με αυτούς των BJT (πύλη-εκπομπός-συλλέκτης) αλλά ελέγχονται από τάση, όπως τα MOSFET. Αποτελούν ένα συνδυασμό των BJT και MOSFET ισχύος ώστε να παραχθεί ένα στοιχείο με ανώτερη απόδοση σε συγκεκριμένες εφαρμογές και έχουν σε μεγάλο ποσοστό αντικαταστήσει τα BJT στις διατάξεις ηλεκτρονικών ισχύος. Εδώ να σημειωθεί ότι και άλλα στοιχεία έχουν αναπτυχθεί που ανήκουν στην οικογένεια των τρανζίστορ (π.χ. SITs) τα οποία όμως ακόμα γνωρίζουν ελάχιστη εφαρμογή.

2.5 Οικογένεια των θυρίστορ (SCR, GTO, IGCT)

Τα θυρίστορ στην απλούστερη μορφή τους λέγονται και ελεγχόμενοι ανορθωτές πυριτίου (Silicon Controlled Rectifiers ή SCR) και έχουν τους δύο ακροδέκτες ανόδου (A) και καθόδου (K) όπως μια δίοδος με την προσθήκη όμως και ενός τρίτου ακροδέκτη που ονομάζεται πύλη (G). Για να μεταβεί ένα θυρίστορ σε κατάσταση αγωγής πρέπει να είναι ορθά πολωμένο (η τάση ανόδου να είναι μεγαλύτερη από την τάση καθόδου) και να δεχτεί κατάλληλο παλμό στην πύλη του. Η σβέση γίνεται αντίστοιχα με την δίοδο. Συνεπώς ένα SCR είναι ένα μερικώς ελεγχόμενο στοιχείο (ελέγχεται η έναυση αλλά όχι η σβέση του). Παρόλα αυτά, με προσθήκη ενός κατάλληλου κυκλώματος σβέσης είναι δυνατή η κατασκευή ενός πλήρως ελεγχόμενου διακόπτη με χρήση θυρίστορ (για παράδειγμα ένα δεύτερο θυρίστορ μπορεί να χρησιμοποιηθεί ώστε να παράσχει τάση στην κάθοδο του πρώτου, ελέγχοντας έτσι την σβέση του). Τέτοιες διατάξεις έχουν το μειονέκτημα του πρόσθετου κόστους για την κατασκευή τους αλλά και την επίτευξη χαμηλότερης διακοπτικής

συχνότητας σε σχέση με τα νεώτερα στοιχεία (MOSFET, IGBT). Έτσι παρόλο που χρησιμοποιούνταν ευρέως σε πληθώρα εφαρμογών μέχρι σχετικά πρόσφατα (π.χ. έλεγχο DC μηχανών [8,9]), η χρήση τους περιορίστηκε με την εισαγωγή και ευρεία χρήση των νεώτερων στοιχείων. Ειδική αναφορά πρέπει να γίνει στα αμφίδρομα τριαδικά θυρίστορ ή TRIAC που ισοδυναμούν με δύο αντιπαράλληλα συνδεδεμένα θυρίστορ (χρησιμοποιούνται για έλεγχο δύο κατευθύνσεων)

Τα θυρίστορ με σβέση από την πύλη (GateTurnOffThyristor ή GTO) αποτελούν μετεξέλιξη των απλών SCR με την διαφορά ότι η σβέση τους μπορεί να ελεγχθεί από τον ακροδέκτη-πύλη (με αρνητικό παλμό). Έχουν όμως μειονεκτήματα όπως την ανάγκη χρήσης κυκλωμάτων προστασίας (snubbers) και τον όχι τόσο στιβαρό έλεγχο. Βελτίωση του GTO μπορεί να θεωρηθεί το ολοκληρωμένο θυρίστορ με μεταγωγή από την πύλη (IntegratedGateCommutatedThyristor ή IGCT). Τα στοιχεία αυτά (IGCTs) μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην πλειοψηφία των εφαρμογών χωρίς να απαιτούν κυκλώματα προστασίας, επιτυγχάνουν μεγαλύτερη διακοπτική συχνότητα και γνωρίζουν αυξανόμενη χρήση σε διατάξεις ισχύος. Αξίζει να σημειωθεί ότι έχουν αναπτυχθεί και άλλα στοιχεία που ανήκουν στην ευρύτερη οικογένεια των θυρίστορ (π.χ. MCT και MTO) με την χρήση τους όμως να είναι ιδιαίτερα περιορισμένη, έως ανύπαρκτη, ακόμα.

2.6 Βασικές κατηγορίες μετατροπών ισχύος

Η βασική εφαρμογή των διατάξεων ηλεκτρονικών ισχύος είναι η διαχείριση της ηλεκτρικής ισχύος. Με την χρήση του όρου «διαχείριση» υπογραμμίζεται αρχικά το γεγονός ότι οι διατάξεις αυτές δεν παράγουν ισχύ αλλά την διαχειρίζονται, έχοντας και τις σχετικές απώλειες όπως κάθε τέτοια διάταξη. Η λειτουργία αυτών των διατάξεων μπορεί να διαχωριστεί σε τέσσερις βασικές κατηγορίες:

- (1) την μετατροπή AC τάσης σε DC τάση (ανόρθωση)
- (2) την μετατροπή DC τάσης σε AC τάση (αντιστροφή)
- (3) την μετατροπή AC τάσης σε AC τάση με διαφορετικά χαρακτηριστικά
- (4) την μετατροπή DC τάσης σε DC τάση με διαφορετικά χαρακτηριστικά

Οι αντίστοιχες διατάξεις περιγράφονται με τον γενικό όρο «μετατροπείς» συνοδευόμενο από την σχετική περιγραφή (AC-AC

μετατροπέας, AC-DC μετατροπέας κ.ο.κ.). Αντίστοιχα μπορεί να απαντηθούν οι όροι ανορθωτές (για AC-DC μετατροπείς), αντιστροφείς (για DC-AC μετατροπείς), ACελεγκτές ή AC ρυθμιστές ή κυκλομετατροπείς (για AC-AC μετατροπείς) και κατατμητές ή ψαλιδιστές (για DC-DC μετατροπείς).

2.7 Τοπολογίες Μετατροπών AC-DC

Οι AC-DC μετατροπείς ονομάζονται και ανορθωτές. Αν χρησιμοποιηθούν δίοδοι τότε ονομάζονται μη ελεγχόμενοι ανορθωτές ή ανορθωτές διόδων. Στην περίπτωση που χρησιμοποιηθούν θυρίστορ ονομάζονται ελεγχόμενοι ανορθωτές ή ανορθωτές με θυρίστορ. Παλαιότερα οι ανορθωτές με θυρίστορ ήταν ευρέως διαδεδομένοι για τον έλεγχο DC μηχανών. Πλέον στις εφαρμογές μικρής ισχύος χρησιμοποιούνται άλλα ημιαγωγικά στοιχεία ενώ η χρήση ανορθωτών με θυρίστορ παραμένει σε μεγάλες βιομηχανικές κινητήριες διατάξεις, ειδικές εφαρμογές όπως οι επιταχυντές σωματιδίων ενώ χρησιμοποιούνται σε μεγάλο βαθμό για τις απαραίτητες ανορθώσεις σε συστήματα HVDC.

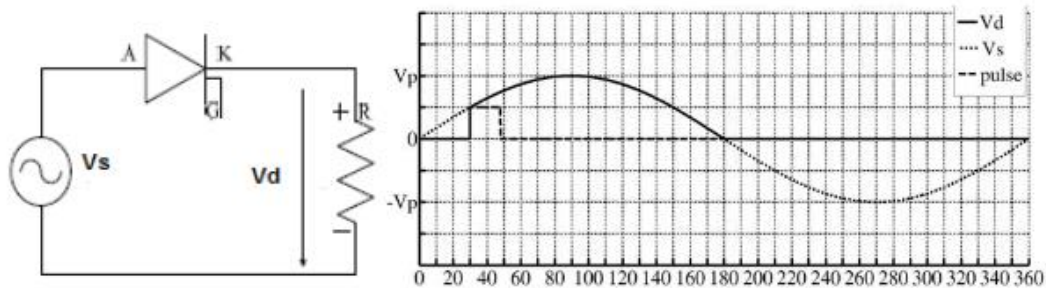
2.8 Ανορθωτές με θυρίστορ

Οι ανορθωτές που χρησιμοποιούν θυρίστορ συνήθως ονομάζονται με βάση των αριθμό των παλμών που απαιτούνται (και άρα των θυρίστορ). Έτσι όταν χρησιμοποιείται ένα θυρίστορ, ο μετατροπέας λέγεται και ενός παλμού, όταν χρησιμοποιούνται δύο θυρίστορ λέγεται και δύο παλμών κ.ο.κ. Η γωνία α που αντιστοιχεί στην έναυση του θυρίστορ μέσα σε μία περίοδο ονομάζεται γωνία έναυσης (ή πυροδότησης) και η γωνία β που αντιστοιχεί στην σβέση ονομάζεται γωνία σβέσης. Το διάστημα αγωγής αντιστοιχεί στην γωνία αγωγής που συνήθως συμβολίζεται με γ . Σημειώνεται ότι τα θυρίστορ στην συνέχεια θα εξεταστούν ως ιδανικά.

2.9 Ανορθωτής ενός παλμού με ωμικό φορτίο

Ονομάζεται και ανορθωτής μισού κύματος καθώς «αξιοποιεί» μόνο την μισή περίοδο. Το βασικό κύκλωμα φαίνεται στην Εικόνα 3.1. Για να μεταβεί το θυρίστορ σε κατάσταση αγωγής θα πρέπει να είναι ορθά πολωμένο και να δεχθεί κατάλληλο παλμό έναυσης στην πύλη. Συνεπώς η γωνία έναυσης θα πρέπει να είναι $0 < \alpha < 180^\circ$. Η γωνία σβέσης θα είναι ίση με 180° καθώς τότε το θυρίστορ πολώνεται ανάστροφα. Για όσο άγει θυρίστορ, η τάση στο φορτίο θα είναι ίση

με την τάση της πηγής. Ένα παράδειγμα για $\alpha=30^\circ$ φαίνεται στην Εικόνα 2.1.

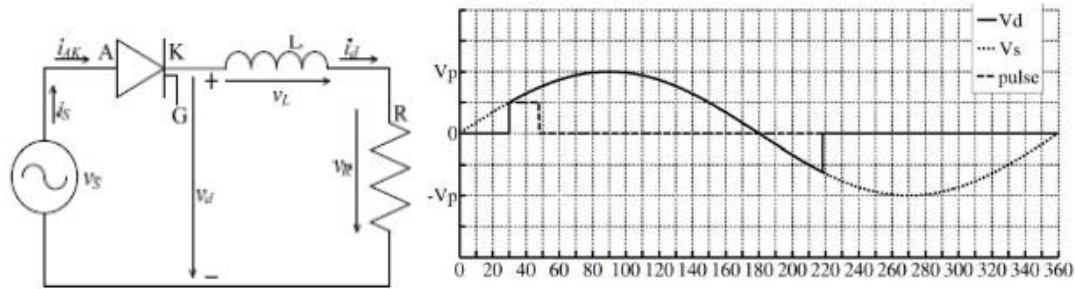


Εικόνα 2.1 Ανορθωτής ενός παλμού με ωμικό φορτίο, τάση εξόδου, εισόδου και παλμός για $\alpha=30^\circ$

Η κυματομορφή του ρεύματος θα είναι ίδιας μορφής με αυτής της τάσης αφού το φορτίο είναι ωμικό και συνεπώς για κάθε χρονική στιγμή ισχύει ο νόμος του Ohm.

2.10 Ανορθωτής ενός παλμού με ωμικό επαγωγικό φορτίο

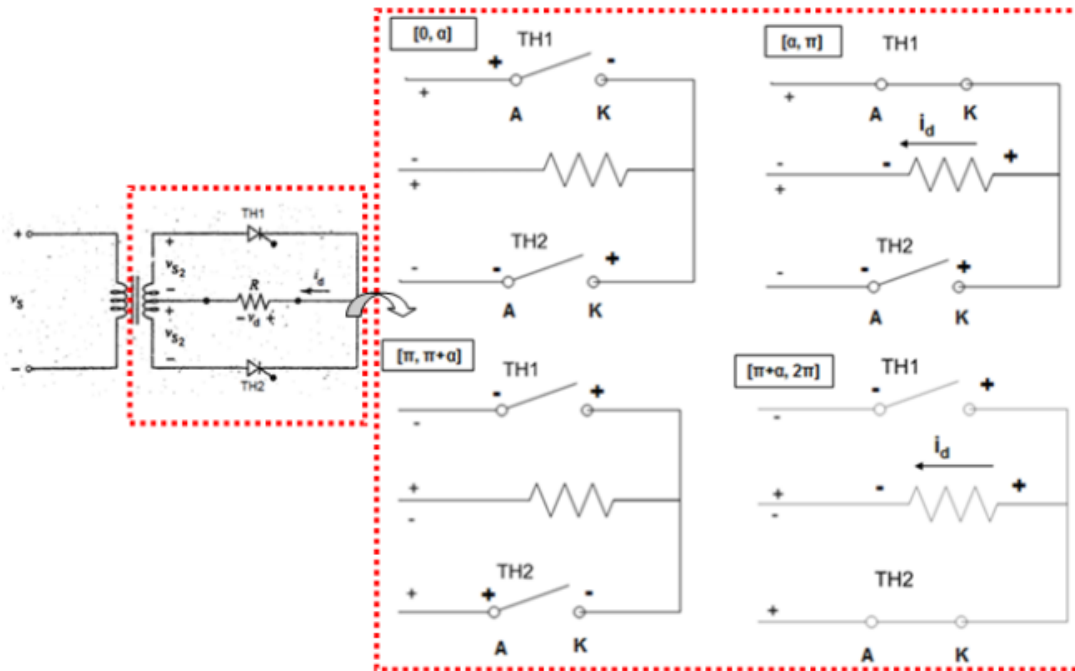
Στην περίπτωση που το φορτίο είναι ωμικό επαγωγικό τότε παρατηρείται η εξής συμπεριφορά [17]: το πηνίο αντιτάσσεται στην μεταβολή του ρεύματος που το διαρρέει. Στα άκρα λοιπόν της αυτεπαγωγής L αναπτύσσεται μια τάση $V_L=Ldi/dt$ η οποία όσο το ρεύμα αυξάνεται δρα αντίθετα στην πηγή V_s αποθηκεύοντας ενέργεια, ενώ όταν το ρεύμα αρχίσει να μειώνεται τότε η πολικότητά της αλλάζει και το πηνίο πλέον δρα ως ενεργητικό στοιχείο (πηγή). Η δράση του πηνίου έχει ως συνέπεια το ρεύμα να καθυστερήσει να μηδενιστεί, κρατώντας έτσι το θυρίστορ σε κατάσταση ON για ένα επιπλέον χρονικό διάστημα, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.2. Αυτός ο επιπλέον χρόνος εξαρτάται από την γωνία έναυσης (την παρεχόμενη ενέργεια προς αποθήκευση από το πηνίο) και την διαφορά φάσης (την τιμή της αυτεπαγωγής και άρα την δυνατότητα αποθήκευσης ενέργειας από το πηνίο). Η κυματομορφή του ρεύματος θα είναι γενικά θετική για όλο το διάστημα αγωγής, χωρίς απότομες μεταβολές («άλματα») καθώς τα απαγορεύει εν γένει η παρουσία του πηνίου και με καμπυλότητα που εξαρτάται από τις τιμές των R και L .



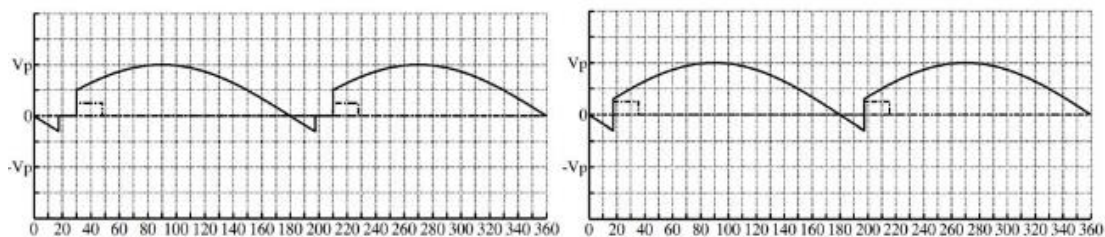
Εικόνα 2.2 Ανορθωτής ενός παλμού με ωμικό επαγωγικό φορτίο, τάση εξόδου, εισόδου και παλμός για $\alpha=30^\circ$

2.11 Ανορθωτής δύο παλμών

Για το κύκλωμα του ανορθωτή δύο παλμών απαιτείται η χρήση ενός μετασχηματιστή μεσαίας λήψης όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.3 ενώ η λειτουργία του κυκλώματος για διαφορετικές χρονικές περιόδους (και αντίστοιχες γωνίες) παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.3. Να σημειωθεί ότι αξιοποιείται ολόκληρη η περίοδος και τέτοιοι ανορθωτές λέγονται και ανορθωτές πλήρους κύματος. Πρέπει να σημειωθεί επίσης ότι το ρεύμα διέρχεται από το φορτίο με την ίδια φορά και στις δύο ημιπεριόδους. Στην περίπτωση που το φορτίο είναι ωμικό επαγωγικό τότε η συμπεριφορά που περιγράφηκε νωρίτερα, μπορεί να οδηγήσει και σε συνεχή αγωγή (το ρεύμα στο φορτίο να είναι συνεχώς μεγαλύτερο του μηδενός) όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.4. Η συνθήκη για να υπάρχει συνεχής αγωγή είναι $\alpha < \phi$. Το ρεύμα σε περίπτωση συνεχούς αγωγής θα προσεγγίζει την ευθείαγραμμή όσο μεγαλύτερη είναι η αυτεπαγωγή σε σχέση με την ωμική αντίσταση ενώ θα απαιτεί κάποιον χρόνο μετάβασης μέχρι να φτάσει στην μόνιμη κατάσταση. Στην περίπτωση πηνίου άπειρης αυτεπαγωγής, το ρεύμα στο φορτίο θα είναι σταθερό.



Εικόνα 2.3 Το κύκλωμα του ανορθωτή δύο παλμών και ανάλυση της λειτουργίας του

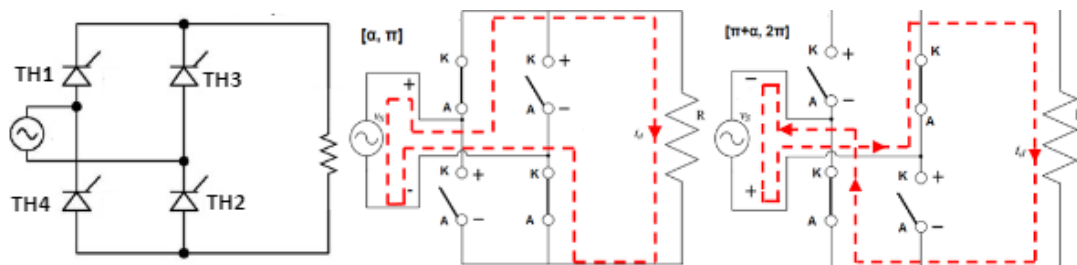


Εικόνα 2.4 Κυματομορφές τάσης εξόδου σε περίπτωση ασυνεχούς και συνεχούς αγωγής

2.12 Ανορθωτής τεσσάρων παλμών

Ο ανορθωτής τεσσάρων παλμών δεν είναι άλλος από τον γνωστό ανορθωτή γέφυρας, μόνο που τη θέση των διόδων έχουν πάρει θυρίστορ όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.5. Η συμπεριφορά του για τα διαστήματα αγωγής φαίνεται επίσης στην Εικόνα 2.5. Τα θυρίστορ αντιμετωπίζονται σαν δύο ζευγάρια με το πρώτο ζευγάρι (TH1 και TH2) να δέχεται παλμό σε χρόνο που αντιστοιχεί (σε κάθε περίοδο) σε γωνία α και το δεύτερο ζευγάρι (TH3 και TH4) να δέχεται παλμό σε γωνία $\pi + \alpha$ (η σειρά ενεργοποίησης δίνει και τα ονόματα των θυρίστορ). Όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.5 και στις δύο ημιπεριόδους το ρεύμα διέρχεται από το φορτίο με την ίδια φορά. Η μέγιστη ανάστροφη τάση που θα δεχθούν τα θυρίστορ είναι ίδια με

το μέγιστο της τάσης εξόδου. Για τις κυματομορφές τάσης και ρεύματος σε ωμικό και ωμικό-επαγωγικό φορτίο ισχύουν τα αντίστοιχα με τον ανορθωτή δύο παλμών.



Εικόνα 2.5 Ο ανορθωτής τεσσάρων παλμών και η λειτουργία του στα διαστήματα αγωγής

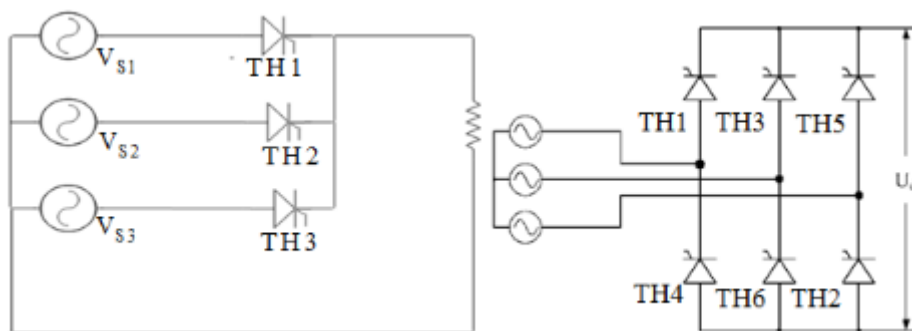
2.13 Μετάβαση-Γωνία Μετάβασης

Στις προηγούμενες παραγράφους θεωρήθηκε ότι η είσοδος (η τάση τροφοδοσίας) είναι μια ιδανική πηγή τάσης. Στην πραγματικότητα όμως η είσοδος (π.χ. το δίκτυο τροφοδοσίας) έχει μια εσωτερική αυτεπαγωγή. Όπως φαίνεται από τις Εικόνες 2.4 και 2.5 σε περίπτωση συνεχούς αγωγής τότε το ρεύμα που διέρχεται από την είσοδο θα πρέπει να αλλάξει ακαριαία φορά. Αυτό όμως δεν μπορεί να συμβεί παρουσία της εσωτερικής αυτεπαγωγής της εισόδου καθώς η αυτεπαγωγή δεν επιτρέπει απότομες μεταβάσεις («άλματα»). Συνεπώς απαιτείται κάποιος χρόνος για να μεταβεί το ρεύμα από την μία πολικότητα στην άλλη. Αυτό το φαινόμενο καλείται μετάβαση και η γωνία που αντιστοιχεί σε αυτό, καλείται γωνία μετάβασης. Κατά την διάρκεια της μετάβασης άγουν όλα τα θυρίστορ. Η τάση εξόδου θα είναι μηδέν για τα παραπάνω κυκλώματα κατά την διάρκεια της μετάβασης. Η γωνία μετάβασης εξαρτάται από την εσωτερική αυτεπαγωγή και το διερχόμενο ρεύμα.

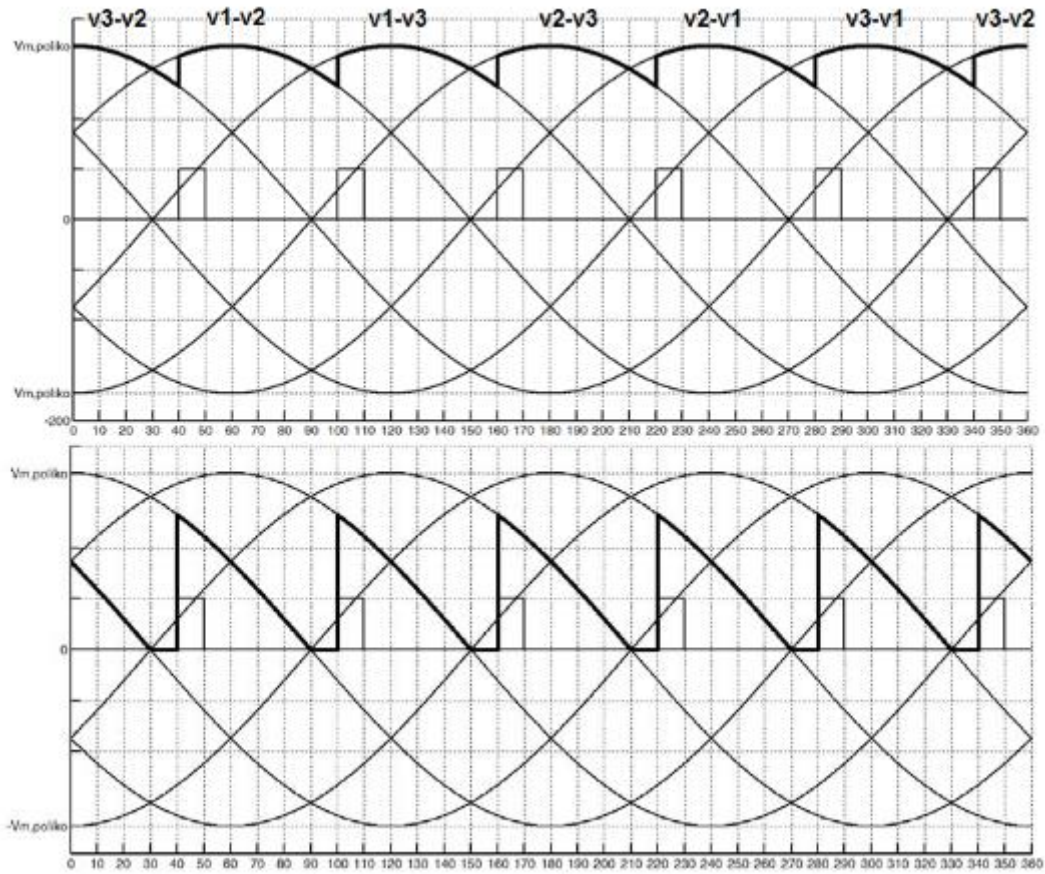
2.14 Τριφασικοί ελεγχόμενοι ανορθωτές

Αντίστοιχα κυκλώματα χρησιμοποιούνται για τους τριφασικούς ανορθωτές με την ονομασία τους και σε αυτήν την περίπτωση να αποδίδει τον αριθμό των θυρίστορ (παλμών). Η πρώτη προφανής περίπτωση είναι ο ανορθωτής τριών παλμών (Εικόνα 2.6) ο οποίος είναι το αντίστοιχο του μονοφασικού ανορθωτή ενός παλμού. Αυτός που χρησιμοποιείται κυρίως όμως είναι ο ανορθωτής έξι παλμών (Εικόνα 2.6) ο οποίος είναι το αντίστοιχο του ανορθωτή τεσσάρων παλμών. Στους τριφασικούς ανορθωτές η γωνία έναυσης μετριέται μετά τις 30° για λόγους που έχουν να κάνουν με την

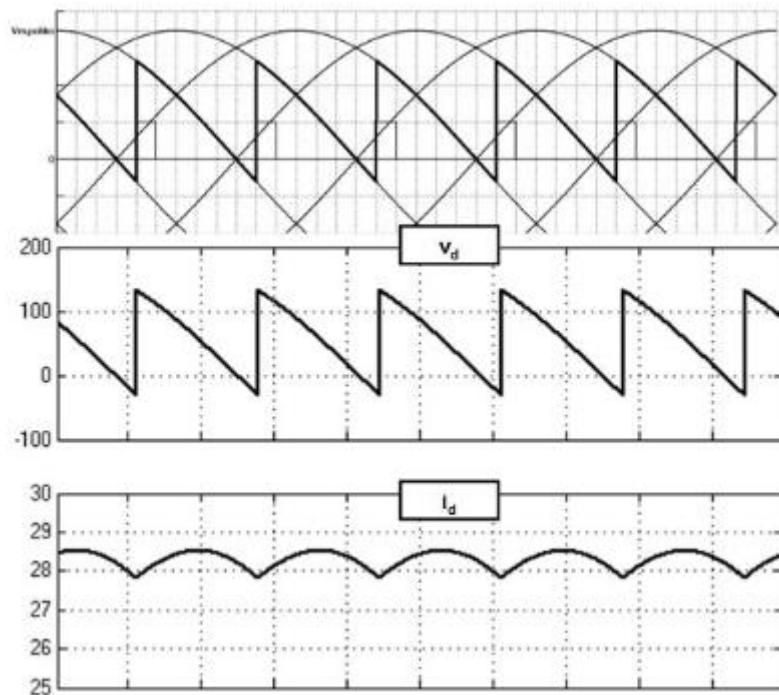
αλληλουχία των φάσεων. Η έναυση κάθε θυρίστορ πρέπει να γίνεται σε συγκεκριμένη γωνία ώστε να εξασφαλιστεί η ορθή λειτουργία. Για τον ανορθωτή έξι παλμών η άνω τριάδα θυρίστορ (TH1, TH3, TH5) θα λάβει παλμό με διαφορά 120° (α , $\alpha+120^\circ$, $\alpha+240^\circ$ αντίστοιχα) ενώ το κάθε θυρίστορ της κάτω τριάδας (TH4, TH6, TH2) θα λάβει παλμό 180° μετά το αντίστοιχο της άνω τριάδας (δηλαδή $\alpha+180^\circ$, $\alpha+300^\circ$, $\alpha+420^\circ = \alpha+60^\circ$). Από την σειρά ενεργοποίησης προκύπτει και η ονομασία των θυρίστορ. Ο ανορθωτής έξι παλμών χρησιμοποιείται ως δομικό στοιχείο για την κατασκευή ανορθωτών με περισσότερους παλμούς (π.χ.12). Τέτοιοι ανορθωτές χρησιμοποιούνται ευρέως στα HVDC συστήματα μεταφοράς αλλά και σε βιομηχανικές εφαρμογές (π.χ. τριφασικός διπλομετατροπέας). Η ανάλυση της λειτουργίας των κυκλωμάτων είναι αρκετά περίπλοκη και παραλείπεται εδώ. Ενδεικτικά παρουσιάζονται ορισμένες κυματομορφές στις Εικόνες 2.7 και 2.8 και ο πίνακας λειτουργίας των θυρίστορ για συνεχή αγωγή με ωμικό φορτίο στην Εικόνα 2.9



Εικόνα 2.6 Οι ελεγχόμενοι τριφασικοί ανορθωτές τριών και έξι παλμών



Εικόνα 2.7 Τάση εξόδου AC-DC μετατροπέα 6 παλμών με ωμικό φορτίο για $\alpha=10^\circ$ (συνεχή αγωγή) και $\alpha=70^\circ$ (ασυνεχή αγωγή). Απεικονίζονται επίσης οι πολικές τάσεις και οι παλμοί έναυσης



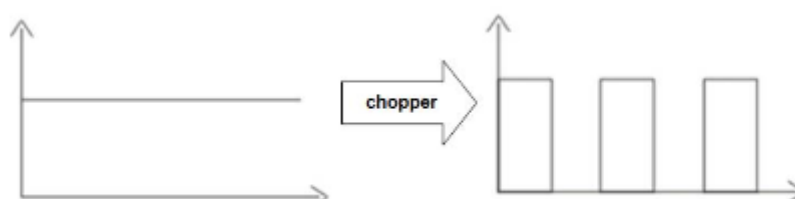
Εικόνα 2.8 Τάση και ρεύμα εξόδου AC-DC μετατροπέα 6 παλμών με ωμικό επαγωγικό φορτίο ($R=2 \Omega, L=0.1H$) και $\alpha=70^\circ$ (συνεχή αγωγή)

$30^\circ \rightarrow$	$\alpha \sim \alpha+60$	$\alpha+60 \sim \alpha+120$	$\alpha+120 \sim \alpha+180$	$\alpha+180 \sim \alpha+240$	$\alpha+240 \sim \alpha+300$	$\alpha+300 \sim \alpha+360$ $=\alpha+300 \sim 0+\alpha$
TH1	ON	ON	OFF	OFF	OFF	OFF
TH2	OFF	ON	ON	OFF	OFF	OFF
TH3	OFF	OFF	ON	ON	OFF	OFF
TH4	OFF	OFF	OFF	ON	ON	OFF
TH5	OFF	OFF	OFF	OFF	ON	ON
TH6	ON	OFF	OFF	OFF	OFF	ON
v_d	$v1-v2$	$v1-v3$	$v2-v3$	$v2-v1$	$v3-v1$	$v3-v2$

Εικόνα 2.9 Ενδεικτικός πίνακας λειτουργίας των θυρίστωρ και της τάσης εξόδου που προκύπτει για τον ελεγχόμενο ανορθωτή έξι παλμών για ωμικό φορτίο σε συνεχή αγωγή.

2.15 Βασικές Τοπολογίες Μετατροπών DC-DC

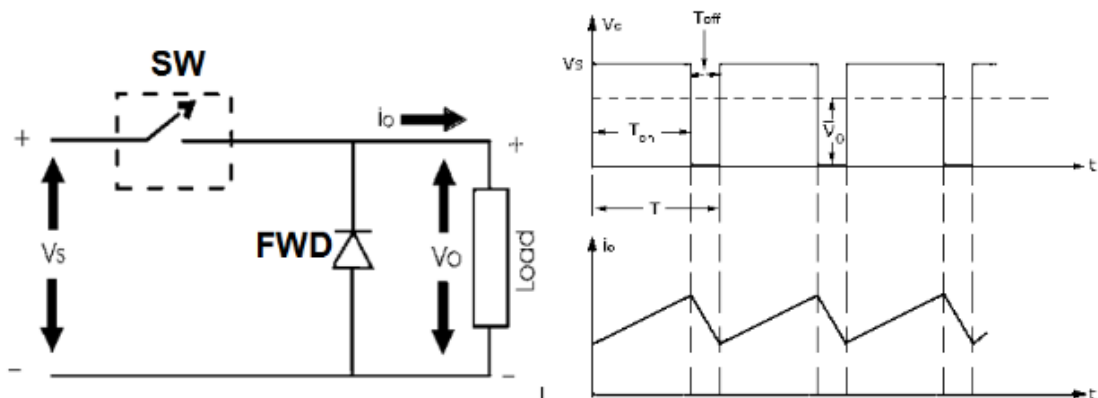
Οι DC-DC μετατροπές ονομάζονται και κατατμητές (ή ψαλιδιστές)(«choppers»). Πρόκειται κατά βάση για κυκλώματα που χρησιμοποιούν ηλεκτρονικούς διακόπτες μεγάλης διακοπτικής συχνότητας ώστε να αποκόπτον ή όχι μια DC τάση εισόδου από το φορτίο, παράγοντας έτσι μια DC τάση εξόδου με διαφορετική μέση τιμή. Η απλουστευμένη γενική αρχή λειτουργίας απεικονίζεται στο σχήμα 2.10. Με χρήση κατάλληλων στοιχείων και κυκλωματικών διατάξεων (αξιοποιώντας τις δυνατότητες αποθήκευσης ενέργειας παθητικών στοιχείων) είναι δυνατόν να παραχθούν και τάσης εξόδου με μεγαλύτερη μέση τιμή από αυτήν της εισόδου. Συνεπώς οι DC-DC μετατροπές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον υποβιβασμό και την ανύψωση μιας DC τάσης. Έτσι ανάλογα με την λειτουργία του μετατροπέα αυτός μπορεί να είναι υποβιβασμού (buck), ανύψωσης (boost) ή υποβιβασμού-ανύψωσης (buck-boost). Άλλες ονομασίες χρησιμοποιούνται για να δηλώσουν συγκεκριμένες τοπολογίες/ιδιότητες (Flyback, Forward, Push-pull, Halfbridge, Fullbridge, Cuk, SEPIC κλπ). Οι DC-DC μετατροπές έχουν ευρύ πεδίο εφαρμογών που περιλαμβάνει τα παλμοτροφοδοτικά, τα συστήματα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, τα συστήματα αντιστάθμισης, τα συστήματα ελέγχου ταχύτητας DC μηχανών κ.α.



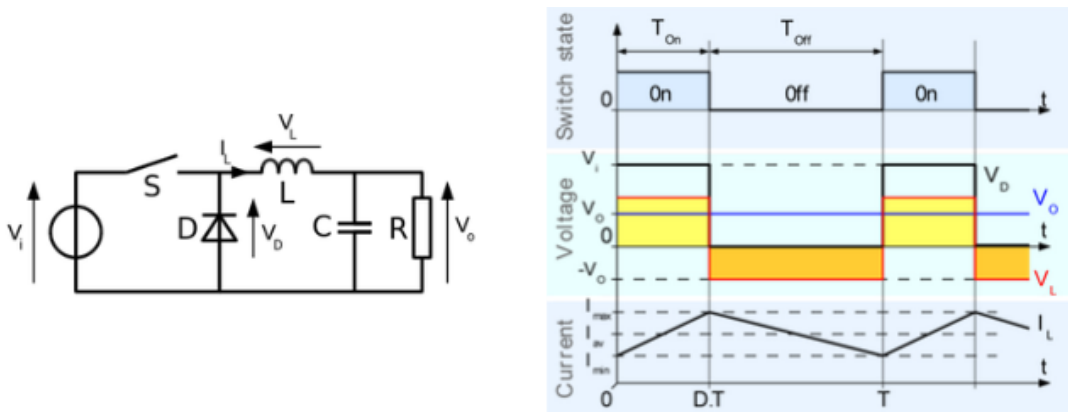
Εικόνα 2.10 Η απλουστευμένη γενική αρχή λειτουργίας των κατατμητών

2.16 DC-DC μετατροπέας υποβιβασμού (buckconverter)

Αν θεωρήσουμε ότι έχουμε το απλό κύκλωμα ενός διακόπτη που αποκόπτει ή όχι μια πηγή τάσης από ένα ωμικό φορτίο, τότε η λειτουργία θα είναι αυτή της Εικόνας 2.10. Στην περίπτωση όμως που το φορτίο έχει επαγωγικό χαρακτήρα, τότε το πηνίο θα αποθηκεύσει ενέργεια, ο διακόπτης θα δεχτεί υπέρταση κατά το άνοιγμά του. Για να αποφευχθεί η καταπόνηση ή και η καταστροφή του διακόπτη, προστίθεται μία δίοδος ελεύθερης διέλευσης όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.11. Αντί να συνδέεται παράλληλα στο φορτίο, σε άλλα κυκλώματα είναι δυνατόν να σχεδιασθεί συνδεδεμένη παράλληλα σε κάθε διακόπτη. Αν τώρα υποθέσουμε ότι έχουμε σταθερή λειτουργία τότε οι κυματομορφές της τάσεως και του ρεύματος εξόδου θα είναι αυτές που φαίνονται στην Εικόνα 2.11. Αν συνδεθεί κατάλληλο φίλτρο για την εξομάλυνση της εξόδου τότε είναι δυνατόν να προκύψει σταθερό ρεύμα στο φορτίο. Η Εικόνα 2.12 δείχνει ένα τέτοιο παράδειγμα. Σε μια τέτοια περίπτωση η ανάλυση επικεντρώνεται στο ρεύμα στο πηνίο όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.12. Το ρεύμα στο πηνίο μπορεί να είναι συνεχές ή όχι. Στην περίπτωση ασυνεχούς ρεύματος, η ανάλυση είναι γενικά πιο σύνθετη. Δεδομένου ότι συνήθως αυτή είναι μια μη επιθυμητή κατάσταση, η ανάλυση των κυκλωμάτων που θα ακολουθήσει θα επικεντρωθεί στην περίπτωση που το ρεύμα στο πηνίο είναι συνεχές. Επίσης δεν θα γίνει αναφορά στις προϋποθέσεις που πρέπει να ισχύουν κάθε φορά ώστε το ρεύμα στο πηνίο να είναι συνεχές. Στην περίπτωση που το ρεύμα στο πηνίο είναι συνεχές, τότε αποδεικνύεται ότι ισχύει: $V_o = D \cdot V_i$, με $D < 1$, και συνεπώς ο έλεγχος του χρόνου που ο διακόπτης άγει σε κάθε περίοδο (με άλλα λόγια, ο έλεγχος του εύρους του παλμού), προσφέρει και έλεγχο της τάσης εξόδου.



Εικόνα 2.11 Βασικό κύκλωμα του buck μετατροπέα και κυματομορφές



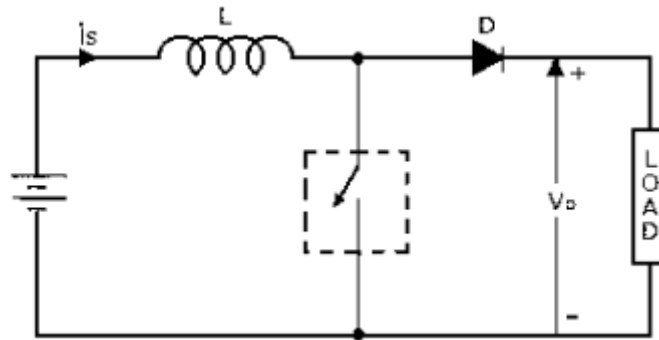
Εικόνα 2.12 Buck μετατροπέας με φίλτρο εξόδου και κυματομορφές

2.17 DC-DC μετατροπέας ανύψωσης (boostconverter)

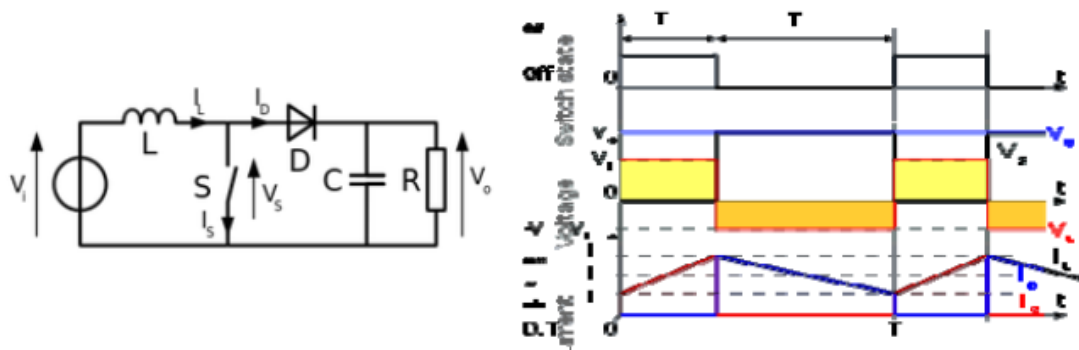
Για να γίνει πιο κατανοητή η λειτουργία του boost μετατροπέα θα εξεταστεί αρχικά το βασικό κύκλωμα που φαίνεται στην Εικόνα 2.13. Όταν ο διακόπτης είναι κλειστός, το ρεύμα τρέχει στον αριστερό βρόγχο και το πηνίο αποθηκεύει ενέργεια. Όταν ο διακόπτης ανοίξει, η ενέργεια που έχει αποθηκεύσει το πηνίο προστίθεται σε αυτήν της πηγής και διοχετεύεται μέσω της διόδου \$D\$ στο φορτίο. Συνεπώς, όταν ανοίξει ο διακόπτης το πηνίο γίνεται πηγή τάσης ίδιας πολικότητας με την πηγή εισόδου, οπότε η συνολική τάση εξόδου (στο φορτίο) προκύπτει μεγαλύτερη από αυτήν της εισόδου (πηγής). Αντίστοιχη λειτουργία με την προσθήκη φίλτρου προκύπτει και για την περίπτωση του μετατροπέα ανύψωσης, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.14. Για την περίπτωση που το ρεύμα στο πηνίο είναι συνεχές προκύπτει:

$$V_o = (1/1-D)V_i$$

και συνεπώς και σε αυτή την περίπτωση ελέγχοντας το εύρος του παλμού, είναι δυνατός ο έλεγχος της τάσης εξόδου η οποία θα προκύψει μεγαλύτερη από την εισόδου (εφόσον εξ' ορισμού \$D < 1\$)



Εικόνα 2.13 Βασικό κύκλωμα του boost μετατροπέα

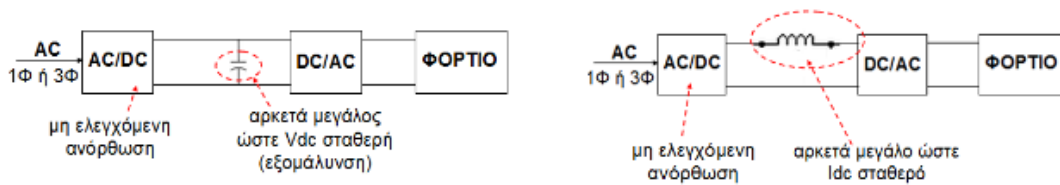


Εικόνα 2.14 Boost μετατροπέας φίλτρο εξόδου και κυματομορφές

2.18 Βασικές τοπολογίες μετατροπέων DC-AC

Για τους DC-DC μετατροπείς χρησιμοποιείται συνήθως ο όρος «αντιστροφείς» ή inverters. Ένας τέτοιος μετατροπέας μπορεί να τροφοδοτείται είτε από τάση (VoltageSourceInverter ή VSI) είτε από ρεύμα (CurrentSourceInverter ή CSI). Οι πρώτοι δέχονται μια DC τάση στην είσοδο ενώ οι δεύτεροι ένα DC ρεύμα. Αν υποθεθεί ότι η αφετηρία είναι μια μονοφασική ή τριφασική AC τάση η οποία ανορθώνεται μέσω της χρήσης μιας μη ελεγχόμενης διάταξης, τότε αν στην έξοδο της ανόρθωσης συνδεθεί (παράλληλα) πυκνωτής κατάλληλης χωρητικότητας μπορεί να προκύψει μια DC σταθερή τάση. Αντίθετα, αν στην έξοδο της ανόρθωσης συνδεθεί πηνίο κατάλληλης αυτεπαγωγής τότε μπορεί να προκύψει ένα DC σταθερό ρεύμα. Στην συνέχεια η DC σταθερή τάση ή το DC σταθερό ρεύμα μπορούν να τροφοδοτήσουν έναν αντιστροφέα ελεγχόμενο από τάση ή έναν αντιστροφέα ελεγχόμενο από ρεύμα αντίστοιχα, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.15, ώστε αυτός με την σειρά του να μεταφέρει την ισχύ στο φορτίο.

Οι αντιστροφείς ελεγχόμενοι από ρεύμα έχουν ακόμα περιορισμένη εφαρμογή (αν και κερδίζουν έδαφος έναντι των VSI) και για αυτό η ανάλυση στην συνέχεια θα επικεντρωθεί στους αντιστροφείς που ελέγχονται από τάση. Για λόγους συντομίας στην συνέχεια θα χρησιμοποιείται απλά ο όρος «αντιστροφέας» και θα εννοείται ο αντιστροφέας ελεγχόμενος από τάση (VSI).

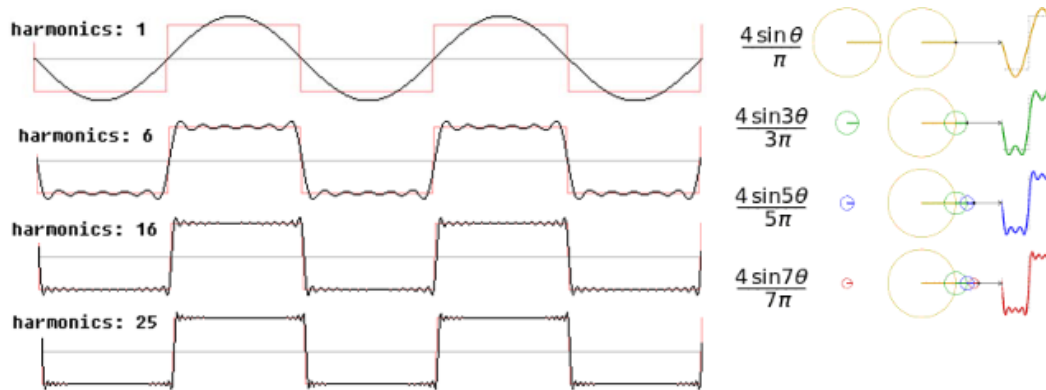


Εικόνα 2.15 Βασικά διαγράμματα λειτουργίας για αντιστροφείς ελεγχόμενους από τάση και αντιστροφείς ελεγχόμενους από ρεύμα.

Τα τρία βασικά είδη αντιστροφέων είναι οι αντιστροφείς ημιγέφυρας, πλήρους γέφυρας και οι push-pull αντιστροφείς, σε αντιστοιχία με τις τοπολογίες για τους DC-DC μετατροπείς. Επιπλέον κατηγοριοποίηση μπορεί να προκύψει σε σχέση με τα επιμέρους στοιχεία τους (κυρίως αριθμό επιπέδων, αριθμό φάσεων και το αν η έξοδος είναι μονοπολική (εναλλασσόμενη) ή διπολική).

Η ιδανική λειτουργία για έναν αντιστροφέα είναι η μετατροπή μιας σταθερής DC τάσης σε AC τάση αμιγώς ημιτονοειδούς μορφής. Πρακτικά, το ζητούμενο είναι η προσέγγιση της ημιτονοειδούς μορφής (καλύτερη προσέγγιση απαιτεί αύξηση κόστους και γενικά είναι περισσότερο αναγκαία όσο η ισχύς ανεβαίνει). Για χαμηλές ισχύς μπορεί να γίνει δεκτή ακόμα και τετραγωνική AC τάση εξόδου.

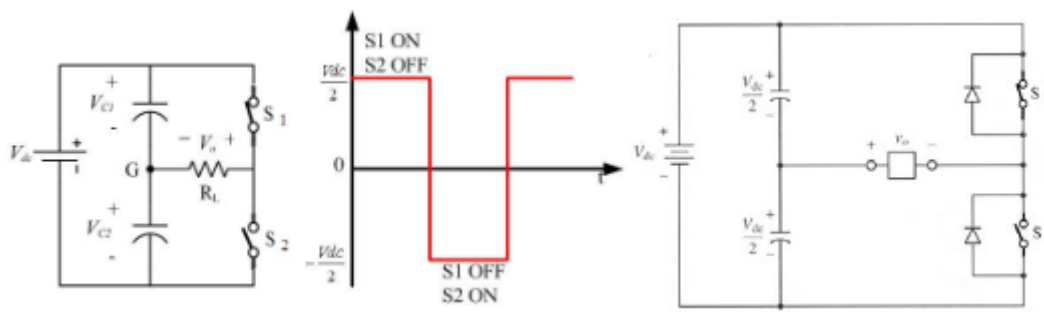
Ένα «καθαρό» ημίτονο δεν περιέχει ανώτερες αρμονικές παρά μόνο την θεμελιώδη. Αντίθετα, μια τετραγωνική μορφή έχει μεγάλο αρμονικό περιεχόμενο. Μια σχηματική αναπαράσταση της αναγκαίας αύξησης του αρμονικού περιεχομένου μπορεί να βρεθεί στα σχήματα της Εικόνας 2.16 τα οποία αποτελούν στιγμιότυπα ανοικτά διαθέσιμων κινούμενων εικόνων στα οποία παραπέμπεται ο αναγνώστης. Προφανώς το επιθυμητό είναι η ελάττωση της παρουσίας των αρμονικών η οποία επιτυγχάνεται με καλύτερη προσέγγιση της αμιγώς ημιτονοειδούς μορφής. Προς αυτόν τον σκοπό, πέρα από την χρήση φίλτρων, ελέγχεται η διαμόρφωση του εύρους των παλμών ώστε αυτοί να προσομοιάζουν στην ημιτονοειδή μορφή (δηλαδή, σε μια απλουστευμένη εξήγηση, να είναι μικρότερης διάρκειας προς τα άκρα των ημιπεριόδων και μεγαλύτερη διάρκειας προς το μέσο των ημιπεριόδων).



Εικόνα 2.16 Προοδευτική προσέγγιση της τετραγωνικής μορφής με αύξηση του αρμονικού περιεχομένου

2.19 Αντιστροφείας ημιγέφυρας (halfbridgeinverter)

Η βασική τοπολογία του αντιστροφέα ημιγέφυρας φαίνεται στην Εικόνα 2.17. Οι δύο πυκνωτές χρησιμοποιούνται ώστε να επιτευχθεί ισομοιρασμός της τάσης εισόδου. Συνεπώς η τάση εξόδου μπορεί να είναι ίση με το μισό της τάσης εισόδου (με πολικότητα που αλλάζει ανάλογα με το ποιος διακόπτης είναι ON) και με έλεγχο της σειράς και του χρόνου ενεργοποίησης των διακοπών η τάση εξόδου θα είναι ένας τετραγωνικός παλμός με συγκεκριμένη RMS τιμή (Εικόνα 2.17). Κατά τα γνωστά από τα προηγούμενα, αν το φορτίο είναι επαγωγικό τότε θα πρέπει να προστεθούν δίοδοι προστασίας παράλληλα στους διακόπτες (Εικόνα 2.17). Αυτή είναι και η γενική λογική σχεδιασμού των αντιστροφέων



Εικόνα 2.17 Το βασικό κύκλωμα του αντιστροφέα ημιγέφυρας, η τάση εξόδου και η συνηθισμένη προσέγγιση με σύνδεση δίοδων για την προστασία των διακοπών

2.20 Αντιστροφείας πλήρους γέφυρας (fullbridgeinverter)

Η βασική τοπολογία για έναν αντιστροφέα πλήρους γέφυρας φαίνεται στην Εικόνα 2.18. Ο αντιστροφέας πλήρους γέφυρας αποδίδει διπλάσια ισχύ σε σχέση με τον αντιστροφέα ημιγέφυρας για

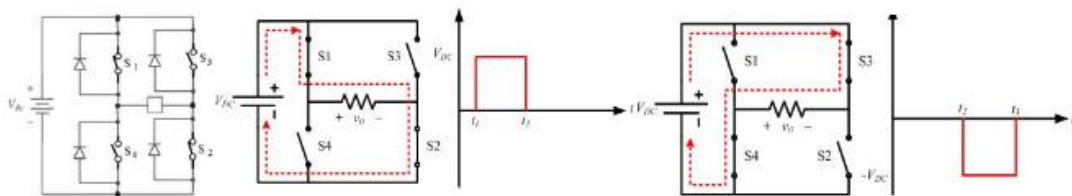
την ίδια τάση εισόδου. Αντίστροφα, στην περίπτωση που ένας αντιστροφέας πλήρους γέφυρας αποδίδει ίδια ισχύ με έναν αντιστροφέα ημιγέφυρας, τότε το ρεύμα εξόδου και το ρεύμα που διαρρέει τους διακόπτες θα είναι το μισό σε σχέση με τα αντίστοιχα στην περίπτωση του αντιστροφέα ημιγέφυρας.

Η βασική λειτουργία του αντιστροφέα γέφυρας έχει ως εξής:

- (1) S1-S2ON: $V_{out}=V_{dc}$
- (2) S3-S4ON: $V_{out}=-V_{dc}$
- (3) S1-S3 ή S2-S4ON: $V_{out}=0$

και δεν επιτρέπεται να είναι όλοι οι διακόπτες ON ταυτόχρονα.

Μια σχηματική επεξήγηση για τις φάσεις 1 και 2 δίνεται στην Εικόνα 2.18. Για την φάση 3, όταν το άνω ή το κάτω ζεύγος διακοπών είναι ON, το φορτίο είναι παράλληλα συνδεδεμένο σε βραχυκύκλωμα οπότε $V_{out}=0$. Το ίδιο αποτέλεσμα θα προκύψει αν S1-S2-S3-S4OFF. Συνεπώς ελέγχοντας την σειρά και τον χρόνο ενεργοποίησης των διακοπών, είναι δυνατό να παραχθεί μια AC τάση στην έξοδο με συγκεκριμένη RMS τιμή.



Εικόνα 2.18 Αντιστροφέας πλήρους γέφυρας και επεξήγηση λειτουργίας

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΑΓΩΓΟΙ ΚΑΙ ΚΑΛΩΔΙΑ

3.1 Τι είναι αγωγός ;

Αγωγός ονομάζεται το αγώγιμο σύρμα, γυμνό ή μονωμένο όταν έχει μονωτικό περίβλημα, που διοχετεύει ηλεκτρικό ρεύμα. Κατασκευάζεται από χαλκό ή αλουμίνιο και κράματά τους.

Αν ο αγωγός είναι από Al, τότε για την ίδια ηλεκτρική ισχύ χρειαζόμαστε μεγαλύτερη διατομή αγωγού (μικρότερη ηλεκτρική αγωγιμότητα του Al σε σχέση με το Cu).

$$S_{Al} = 1,8 S_{Cu} , B_{Al} = 0,558 B_{Cu} , d_{Al} = 1,34 d_{Cu}$$

ΧΑΛΚΟΣ οικιακές εγκαταστάσεις	ΑΛΟΥΜΙΝΙΟ δίκτυο ΔΕΗ
Ειδική αντίσταση $\rho_{Cu}=0,0178\Omega \cdot mm^2/m$	Ειδική αντίσταση $\rho_{Al}=0,028\Omega \cdot mm^2/m$
Πυκνότητα $\epsilon_{Cu}=8,92Kg/dm^3$	Πυκνότητα , $\epsilon_{Al}=2,7Kg/dm^3$
Θερμικός συντελεστής $3.92 \cdot 10^{-3} K^{-1}$	Θερμικός συντελεστής $4 \cdot 10^{-3} K^{-1}$
ΑΚΡΙΒΟΤΕΡΟ	ΦΘΗΝΟΤΕΡΟ

Συγκριτικά χαρακτηριστικά αγωγών χαλκού και αλουμινίου

Οι αγωγοί διακρίνονται ως:

- Μονόκλωνοι

Λιγότερο εύκαμπτοι και με διατομή μέχρι 16 mm².

- Πολύκλωνοι ή και Λεπτοπολύκλωνοι

Περισσότερο εύκαμπτοι.

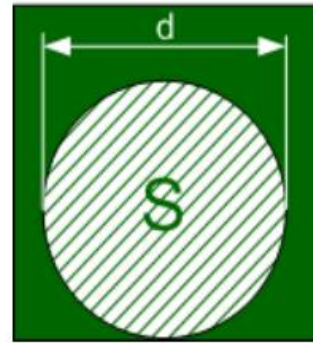
- και με διατομή από 16 mm² και πάνω.

3.2 Διατομή αγωγών

Μονόκλωνος αγωγός:

$$S = \pi \cdot d^2 / 4 = 0,785 \cdot d^2$$

όπου d: διάμετρος πυρήνα του αγωγού σε mm



$$S = \frac{\pi d^2}{4}$$

S: διατομή σε mm²

Πολύκλωνος αγωγός:

$$S = n \cdot \pi \cdot d^2 / 4 = 0,785 \cdot d^2 \cdot n$$

όπου d: διάμετρος κλώνου σε mm



$$S = \frac{\pi d^2}{4} n$$

n: αριθμός κλώνων n=1+6=7 (μια στρώση)

S: διατομή σε mm²

3.3 Τι είναι καλώδιο ;

Καλώδιο είναι κάθε απλός μονωμένος αγωγός ή σύστημα τέτοιων αγωγών με κοινή προστατευτική επένδυση (ελαστική, πλαστική, μεταλλική κ.α.), η οποία προστατεύει τους αγωγούς από μηχανικές καταπονήσεις και άλλες επιδράσεις π.χ. Υγρασία.

Τα καλώδια διακρίνονται σε:

- Μονοπολικά: Ένας μονωμένος αγωγός
- Πολυπολικά: Πολλοί μονωμένοι αγωγοί (διπολικό, τριπολικό, τετραπολικό,..., πολυπολικό).

3.4 Τυποποίηση καλωδίων

Οι αγωγοί και τα καλώδια που κυκλοφορούν στο εμπόριο είναι τυποποιημένα τόσο ως προς το μέγεθος της διατομής τους όσο και ως προς τα κατασκευαστικά τους χαρακτηριστικά και τη χρήση για την οποία προορίζονται.

Μέχρι πρόσφατα τα καλώδια που υπήρχαν στο εμπόριο ακολουθούσαν τα γερμανικά πρότυπα VDE. Τώρα υπάρχουν αγωγοί και καλώδια εναρμονισμένα κατά CENELEC.

Τυποποιημένες τιμές διατομής αγωγών και καλωδίων [mm ²]																			
0.75	1	1.5	2.5	4	6	10	16	25	35	50	70	95	120	150	185	240	300	400	500

Συμβολισμός Καλωδίων:

Οι κωδικοί τύποι δείχνουν την τυποποίηση που έχει χρησιμοποιηθεί, το είδος του μανδύα, τη μόνωση, το είδος και τον αριθμό των αγωγών και άλλες κατασκευαστικές ιδιομορφίες:

Π.χ.: H05V-U1.5

H= Τυποποίηση κατά CENELEC

05= Ονομαστική φασική τάση/ πολική τάση 300/500 V

V= Μόνωση μανδύα PVC

U= Ένας αγωγός

1.5= Διατομή 1.5 mm²

3.5 Φόρτιση αγωγών

Για κάθε μεμονωμένο αγωγό υπάρχει ένα ανώτατο όριο έντασης ρεύματος που επιτρέπεται να διαρρέει αυτόν συνεχώς. Αν το όριο αυτό ξεπεραστεί, φθείρονται οι μονώσεις των αγωγών, δημιουργούνται βραχυκυκλώματα και προκαλούνται πυρκαγιές.

Η μεγαλύτερη επιτρεπόμενη ένταση για έναν αγωγό εξαρτάται από τρεις παράγοντες:

- Τη διατομή
- Το είδος της μόνωσης
- Τις συνθήκες τοποθέτησης και λειτουργίας

Όπως περνάει το ρεύμα μέσα από τους αγωγούς, λόγω της ωμικής αντίστασης R , μέσω της ηλεκτρικής του ενέργειας μετατρέπεται σε θερμότητα (φαινόμενο Joule, $Q=I^2 Rt$). Όσο μεγαλύτερη είναι η ένταση του ρεύματος, τόσο μεγαλύτερη είναι η ελκυσμένη θερμότητα και συνεπώς υψηλότερη θερμοκρασία που αναπτύσσεται στον αγωγό

Η αντίσταση του αγωγού είναι αντιστρόφως ανάλογη προς τη διατομή του ($R=\kappa \rho l / S$, όπου κ = συντελεστής πλέξης καλωδίων, ρ = ειδική αντίσταση αγωγού, S = διατομή του αγωγού). Συνεπώς όσο μικρότερη είναι η διατομή του αγωγού τόσο υψηλότερη είναι η θερμοκρασία που αναπτύσσεται στον αγωγό και αντιστρόφως, όσο μεγαλύτερη είναι η διατομή τόσο χαμηλότερη είναι η θερμοκρασία.

Η αντοχή της μόνωσης των αγωγών σε υψηλές θερμοκρασίες εξαρτάται από το υλικό της μόνωσης με το οποίο είναι κατασκευασμένοι οι διάφοροι τύποι καλωδίων. Τα καλώδια εσωτερικών εγκαταστάσεων με τις συνηθισμένες μονώσεις των αγωγών από ελαστικό ή PVC αντέχουν σε θερμοκρασίες μέχρι τους 60 ή 70° C περίπου αντίστοιχα. Σε υψηλότερες θερμοκρασίες η μόνωση καταστρέφεται. Για αυτό επιδιώκουμε η ένταση του ρεύματος που περνάει μέσα από αυτούς τους αγωγούς να μην προκαλεί άνοδο θερμοκρασίας μεγαλύτερη από τα παραπάνω όρια. Για ειδικές χρήσεις υπάρχουν καλώδια με κατάλληλη μόνωση αγωγών που αντέχουν σε πολύ χαμηλές και πολύ υψηλές θερμοκρασίες (π.χ. η μόνωση από σιλικόνη αντέχει από -60 έως 180° C).

Η θερμοκρασία του χώρου στον οποίο βρίσκεται ή διέρχεται το καλώδιο επηρεάζει προφανώς την απαγωγή θερμότητας των αγωγών. Γι αυτό αποφεύγουμε την διέλευση των καλωδίων από ιδιαίτερα θερμά σημεία (π.χ. καμινάδες), ενώ σε περιπτώσεις που έχουμε καλώδια σε θερμαινόμενους χώρους με θερμοκρασία υψηλότερη των 25° C (π.χ. φούρνους) λαμβάνουμε υπόψη μας ορισμένους συντελεστές διόρθωσης για την μέγιστη επιτρεπόμενη ένταση.

3.6 Καλωδιώσεις φωτοβολταϊκών

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.

Τα καλώδια που χρησιμοποιούνται για τη σύνδεση εν σειρά των Φ/Β πάνελ είναι συνήθως κατασκευασμένα για χρήση στον εξωτερικό χώρο. Η διατομή τους είναι συνήθως 4mm² για πάνελ κρυσταλλικού πυριτίου και ακόμη μικρότερη (της τάξης του 1,5mm²) για πάνελ άμορφου πυριτίου, λόγω του σημαντικά μικρότερου ρεύματος τους. Τα καλώδια αυτά είναι συνήθως μονοπολικά και με διπλή μμόνωση, ώστε να αποφεύγονται σφάλματα μεταξύ του θετικού και του αρνητικού πόλου των Φ/Β πάνελ ή σφάλματα γης.

Κατασκευάζονται επίσης πολύκλινα ώστε να διαθέτουν την απαραίτητη ευελιξία για τη σύνδεση τους, ενώ το μήκος τους κυμαίνεται γύρω στο 1 μέτρο.



Σχήμα 3.1 Τυπικές μορφές καλωδίων φωτοβολταϊκών πλαισίων

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 φωτοβολταϊκά συστήματα σε περιορισμένο εύρος. Για το σκοπό αυτό οι κατασκευαστές προχώρησαν στη δημιουργία ειδικών καλωδίων για φωτοβολταϊκές 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.

Οι διατομές των DC καλωδίων που χρησιμοποιούνται για τη σύνδεση των Φ/Β πάνελ με τους αντιστροφείς κυμαίνονται συνήθως από 4-16mm². 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 πάνελ. 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 25-70mm², 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 και άνω. Στην περίπτωση αυτή χρησιμοποιούνται κατάλληλα κιτία τα οποία ομαδοποιούν πολλά ζεύγη καλωδίων κλάδων σε ένα ζεύγος. Στις περιπτώσεις αυτές τα κιτία αυτά είναι επίσης συνήθως εφοδιασμένα με απαγωγείς υπερτάσεων και DC διακόπτες φορτίου.

Επιπλέον, 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.

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. 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 5mΩ και μικρότερη). Το παρακάτω Σχήμα 3.2 παρουσιάζει παραδείγματα συνδέσεων καλωδίων:



Σχήμα 3.2 Σύνδεσμοι DC φωτοβολταϊκών καλωδίων

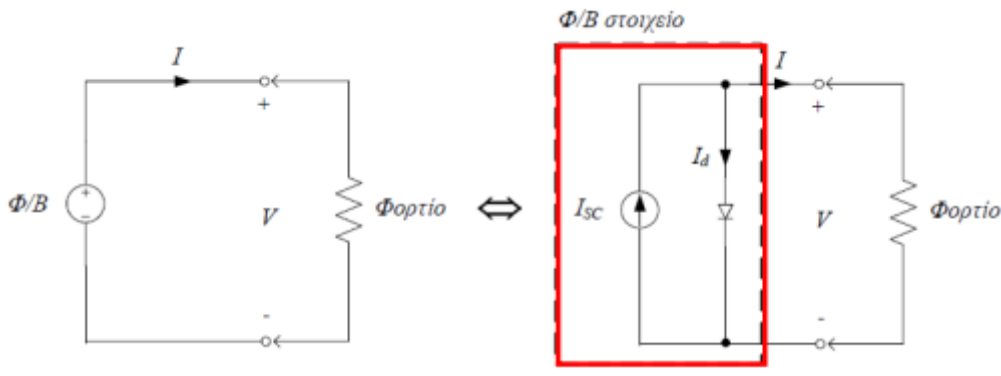
Αναφορικά με τα καλώδια του εναλλασσομένου ρεύματος (AC) χρησιμοποιούνται οι συμβατικοί τύπου καλωδίων (π.χ. ΝΥΥ, ΝΥΜ, ΝΥCWY) εφαρμόζοντας τις συνήθεις πρακτικές της ηλεκτροτεχνίας αναφορικά με τον υπολογισμό της διατομής τους, τον τρόπο τοποθέτησης και την προστασία τους.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

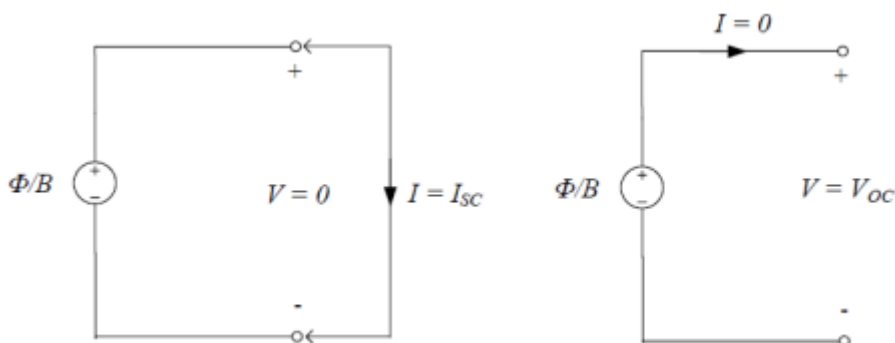
ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΑ ΠΑΝΕΛ

4.1 Φωτοβολταϊκό Στοιχείο

Ένα απλό ισοδύναμο μοντέλο κυκλώματος ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου αποτελείται από μία πραγματική δίοδο παράλληλα με μία ιδανική πηγή ρεύματος όπως φαίνεται στο Εικόνα(4.1),. Η ιδανική πηγή ρεύματος δίνει ρεύμα ανάλογο της ηλιακής έντασης στην οποία εκτίθεται το φωτοβολταϊκό (φ/β) στοιχείο. Υπάρχουν δύο συνθήκες με ιδιαίτερο ενδιαφέρον για το πραγματικό φωτοβολταϊκό στοιχείο. Όπως φαίνεται στο Εικόνα(4.1), οι συνθήκες αυτές είναι: (α) το ρεύμα βραχυκύκλωσης I_{sc} που ρέει όταν οι ακροδέκτες είναι βραχυκυκλωμένοι, και (β) η τάση ανοικτού κυκλώματος V_{oc} μεταξύ των ακροδεκτών όταν τα άκρα μένουν ανοικτά.



Εικόνα4.1 Φωτοβολταϊκό στοιχείο τροφοδοτεί φορτίο και απλό ισοδύναμο κύκλωμα φ/β στοιχείου που αποτελείται από πηγή ρεύματος παράλληλα με πραγματική δίοδο



Εικόνα 4.2 . Ρεύμα βραχυκύκλωσης I_{sc} και τάση ανοικτού κυκλώματος V_{oc} ενός φ/β στοιχείου.

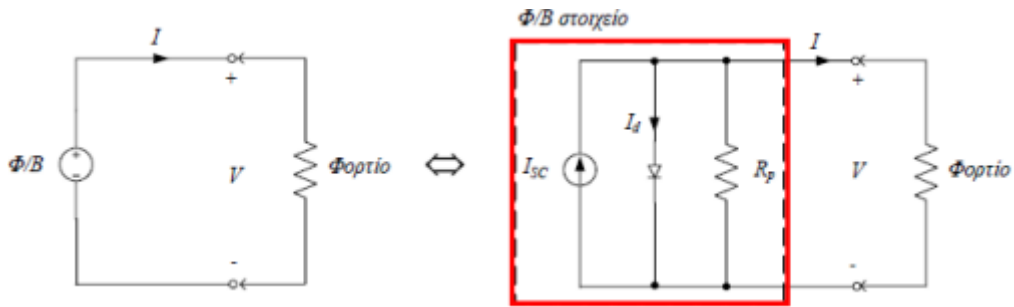
Όταν βραχυκυκλωθούν οι ακροδέκτες του ισοδύναμου κυκλώματος του φ/β στοιχείου, η πραγματική δίοδος δε διαρρέεται από ρεύμα αφού $V = 0$, οπότε όλο το ρεύμα της ιδανικής πηγής ρεύματος ρέει μέσα από τους βραχυκυκλωμένους ακροδέκτες I_{sc} . Επειδή αυτό το ρεύμα βραχυκύκλωσης θα πρέπει να είναι ίσο με I_{sc} , προκύπτει το μέτρο του ρεύματος της ιδανικής πηγής ρεύματος θα πρέπει να είναι ίσο με I_{sc} . Τώρα μπορούμε να διατυπώσουμε σχέσεις για τον υπολογισμό του ρεύματος και της τάσης του ισοδύναμου κυκλώματος του φ/β στοιχείου Εικόνα(4.2).

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι το ρεύμα I_{sc} βραχυκύκλωσης είναι ανάλογο της ηλιακής έντασης.

4.2 Ακριβέστερο Ισοδύναμο Κύκλωμα

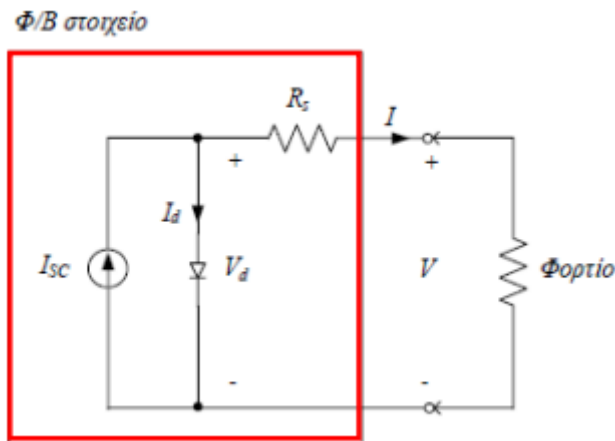
Υπάρχουν φορές που χρειάζεται ένα ακριβέστερο ισοδύναμο μοντέλο κυκλώματος για το φωτοβολταϊκό στοιχείο, σε σχέση με το απλό κύκλωμα του προηγούμενου Εικόνα(4.1). Για παράδειγμα, ας θεωρηθεί η επίδραση της σκίασης σε μία σειρά φ/β στοιχείων που συνδέονται στη σειρά, όπως στο παράδειγμα του παρακάτω σχήματος όπου συνδέονται στη σειρά δύο φ/β στοιχεία. Αν είναι υπό σκιά ένα οποιοδήποτε από τα φ/β στοιχεία που είναι συνδεδεμένα στη σειρά, τότε το φ/β αυτό στοιχείο δεν παράγει ρεύμα. Στο απλό ισοδύναμο κύκλωμα για το φ/β στοιχείο (Εικόνα4.1) το ρεύμα μέσα από την πηγή ρεύματος αυτού του φ/β στοιχείου είναι μηδέν και η δίοδος 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 κύκλωμα μοντέλο φ/β στοιχείου προκειμένου να μπορούμε να μοντελοποιούμε ρεαλιστικά προβλήματα όπως αυτό της σκίασης του φ/β στοιχείου.

Το παρακάτω Εικόνα(4.3) δείχνει ένα ακριβέστερο μοντέλο κυκλώματος του φ/β στοιχείου, το οποίο μοντέλο περιέχει μία παράλληλη αντίσταση διαρροής R_p . Η ιδανική πηγή ρεύματος I_{sc} στην περίπτωση αυτή δίνει ρεύμα στη δίοδο, την παράλληλη αντίσταση, και το φορτίο:



Εικόνα 4.3 απλό μοντέλο κυκλώματος του φ/β στοιχείου που έχει προστεθεί μία παράλληλη αντίσταση διαρροής R_p .

Ένα ακόμα καλύτερο ισοδύναμο μοντέλο θα περιέχει εκτός από την παράλληλη αντίσταση R_p και μία αντίσταση σειράς R_s . Η αντίσταση σειράς R_s οφείλεται στην αντίσταση μεταξύ του φ/β στοιχείου και των ακροδεκτών του καθώς και στην αντίσταση του ημιαγωγού (υλικού κατασκευής του φ/β στοιχείου).



Εικόνα 4.4 απλό κυκλωματικό μοντέλο του φ/β στοιχείου που έχει προστεθεί μία αντίσταση σειράς R_s .

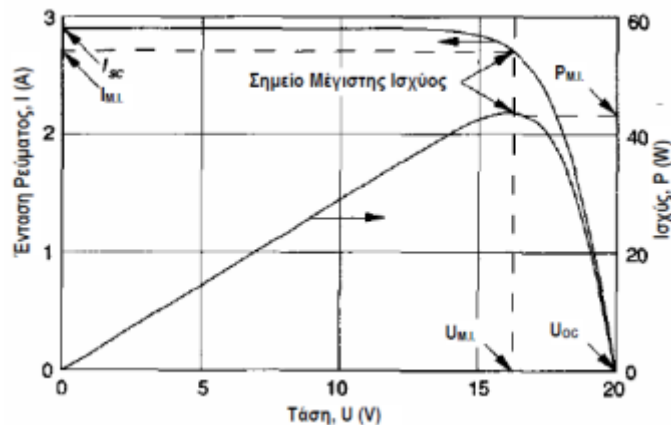
Η τάση (V) που αποδίδει το φ/β στο φορτίο θα μεταβάλλεται, ανάλογα με την τιμή της αντίστασης ($R_{\text{φορτίου}}$), από το μηδέν ως την τιμή της τάσης ανοικτού κυκλώματος (V_{oc}). Η σχέση έντασης ρεύματος και τάσης καθώς και η καμπύλη ισχύος $P=V \cdot I$ φαίνεται στο Εικόνα 4.5. Παρατηρείται στην Εικόνα 4.5 ότι η τιμή της έντασης φορτίου παραμένει σταθερή σε μεγάλο εύρος τιμών της τάσης και ότι για τιμές τάσης μεγαλύτερες από κάποιο όριο αρχίζει να μειώνεται μέχρι να μηδενιστεί για άπειρη αντίσταση φορτίου. Συνήθως η τιμή

της αντίστασης (R_s) είναι πολύ μεγάλη οπότε και τα ρεύματα I_D , I_s είναι μικρά αλλά για πολύ μεγάλη αντίσταση φορτίου αρχίζει να επηρεάζει σημαντικά. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο πυριτίου με επιφάνεια 1 cm^2 εκτεθειμένο σε ηλιακή ακτινοβολία 1000 W/m^2 έχει $V_{oc} \approx 0.6 \text{ V}$ και $I_{sc} \approx 20\text{-}30 \text{ mA}$. Στο Σχήμα 5 παρατηρείται ότι το σημείο μέγιστης ισχύος εμφανίζεται για τιμές τάσης και έντασης λίγο μικρότερες από τις V_{oc} (περίπου στο $0.9 V_{oc}$) και I_{sc} αντίστοιχα και αντιστοιχεί στο σημείο της καμπύλης V - I όπου το περικλειόμενο εμβαδόν της είναι μέγιστο.

Ο βαθμός απόδοσης ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου ορίζεται ως ο λόγος της ηλεκτρικής ισχύος που παράγεται προς τη διαθέσιμη ηλιακή ενέργεια:

$$\eta = [I \cdot V]_{\max} / E \cdot A$$

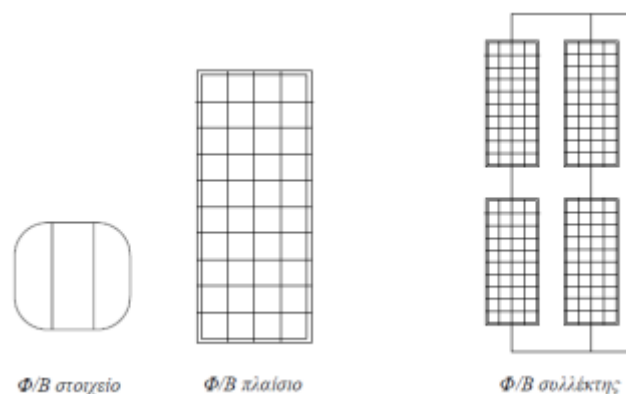
με (E) την ισχύ ανά m^2 της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας και (A) την επιφάνεια του φωτοβολταϊκού στοιχείου. Ο βαθμός απόδοσης του φωτοβολταϊκού δεν επηρεάζεται σημαντικά από την ένταση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας αφού, όπως θα φανεί παρακάτω, η μεταβολή της έντασης του παραγόμενου ρεύματος είναι περίπου ανάλογη με τη μεταβολή της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας.



Εικόνα 4.5 Χαρακτηριστική I - V όπου φαίνονται τα μέγιστα σημεία ισχύος

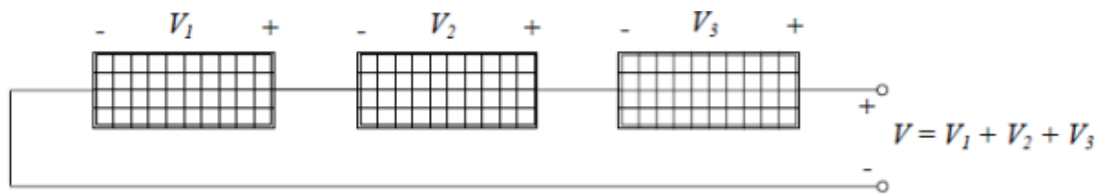
4.3 Απο Φωτοβολταϊκά Στοιχεία Σε Πλαίσια ΚΑΙ Συλλέκτες

Καθώς ένα ατομικό φ/β στοιχείο παράγει μόνο περίπου 0.5 V, το φ/β στοιχείο από μόνο του δεν έχει πρακτικές εφαρμογές. Αντίθετα, η βασική δομική μονάδα για φ/β εφαρμογές είναι το φ/β πλαίσιο που αποτελείται από προ-καλωδιωμένα φ/β στοιχεία σε σειρά. Ένα τυπικό φ/β πλαίσιο έχει 36 φ/β στοιχεία στη σειρά και συχνά ονομάζεται "φ/β πλαίσιο 12 V" αν και μπορεί να παράγει πολύ μεγαλύτερες τάσεις (από 12 V). Πολλά φ/β πλαίσια μπορούν να συνδεθούν σε σειρά για να αυξηθεί η τάση. Επίσης πολλά φ/β πλαίσια μπορούν να συνδεθούν παράλληλα για να αυξηθεί το ρεύμα. Μία σημαντική παράμετρος στη σχεδίαση των φ/β συστημάτων είναι η απόφαση για το πλήθος των φ/β πλαισίων που θα πρέπει να συνδεθούν σε σειρά καθώς και για το πλήθος των φ/β πλαισίων που θα πρέπει να συνδεθούν παράλληλα για να παράγεται η ζητούμενη ενέργεια. Ένας τέτοιος συνδυασμός φ/β πλαισίων ονομάζεται φ/β συλλέκτης. Στην Εικόνα 4.6 φαίνεται η διάκριση ανάμεσα στο φ/β στοιχείο, το φ/β πλαίσιο, και το φ/β συλλέκτη.

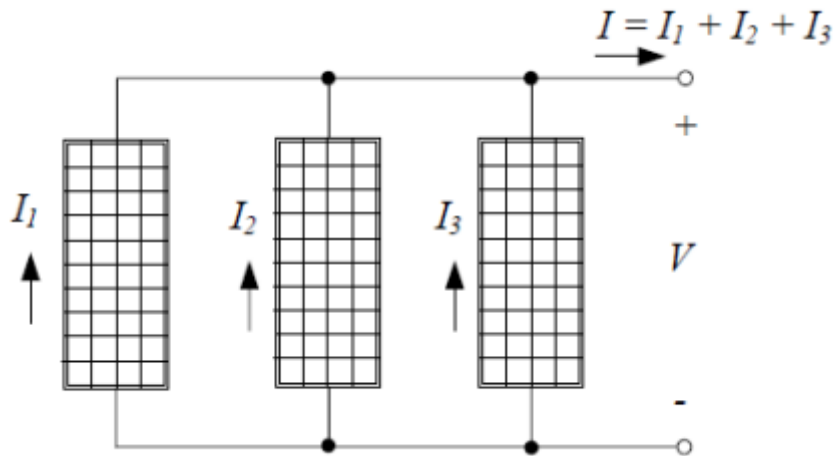


Εικόνα 4.6 Από τα Φ/Β Στοιχεία στα Φ/Β Πλαίσια

Τα φ/β πλαίσια συνδέονται στη σειρά για αύξηση της τάσης, και παράλληλα για αύξηση του ρεύματος. Οι φ/β συλλέκτες αποτελούνται από συνδυασμό φ/β πλαισίων συνδεδεμένων σε σειρά και παράλληλα για αύξηση της ισχύος. Στην Εικόνα 4.7 φαίνονται τρία φ/β πλαίσια συνδεδεμένα σε σειρά. Για κάθε ρεύμα, το οποίο ρέει μέσα από κάθε ένα από τα φ/β πλαίσια, η συνολική τάση είναι ίση με το άθροισμα των τάσεων των ατομικών φ/β πλαισίων.



Εικόνα 4.7 Η εν σειρά σύνδεση αυξάνει την συνολική τάση προσθετικά



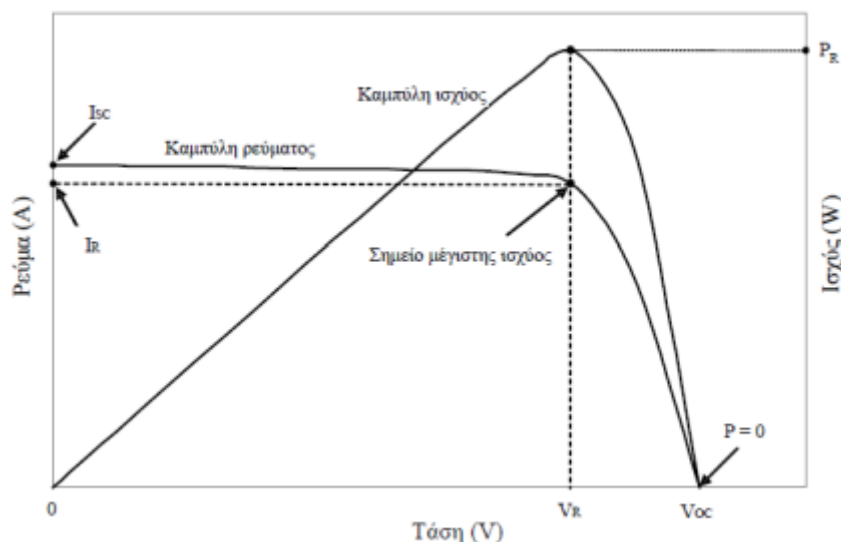
Εικόνα 4.8 Η παράλληλη σύνδεση αυξάνει το συνολικό ρεύμα προσθετικά

4.4 Χαρακτηριστική I-V Φωτοβολταϊκού Πλαισίου

Έστω ότι ένα φ/β πλαίσιο πρόκειται να συνδεθεί με κάποιο φορτίο. Το φορτίο μπορεί να είναι, για παράδειγμα, μία μπαταρία ή ένας κινητήρας συνεχούς ρεύματος που κινεί μία αντλία. Πριν τη σύνδεση του φορτίου, το φ/β πλαίσιο που είναι εκτεθειμένο στον ήλιο θα παράγει μία τάση ανοικτού κυκλώματος V_{oc} αλλά δε θα διαρρέεται από ρεύμα. Αν οι ακροδέκτες του φ/β στοιχείου βραχυκυκλωθούν, θα κυκλοφορήσει το ρεύμα βραχυκύκλωσης I_{sc} αλλά η τάση εξόδου θα είναι μηδέν. Και στις δύο περιπτώσεις, καθώς η ισχύς είναι το γινόμενο τάσης και ρεύματος, το φ/β στοιχείο δεν παράγει ισχύ και το φορτίο δεν παραλαμβάνει ισχύ. Όταν συνδεθεί το φορτίο, κάποιος συνδυασμός τάσης και ρεύματος θα προκύψει και θα παραχθεί ισχύς. Για να υπολογιστεί το ποσό της ισχύος, θα πρέπει να ληφθούν υπόψη οι χαρακτηριστικές I-V του φ/β πλαισίου και του φορτίου.

Στην Εικόνα 4.9 φαίνεται μία γενική χαρακτηριστική I-V ενός φ/β πλαισίου, όπου φαίνονται διάφορες σημαντικές παράμετροι όπως η τάση ανοικτού κυκλώματος V_{oc} και το ρεύμα βραχυκύκλωσης I_{sc} . Επίσης φαίνεται και η ισχύς που παράγει το φ/β πλαίσιο. Στα δύο άκρα της χαρακτηριστικής I-V, η ισχύς εξόδου είναι μηδέν επειδή

είτε το ρεύμα ή η τάση είναι μηδέν σε εκείνα τα σημεία. Το σημείο της μέγιστης ισχύος είναι στην αρχή πτώσης της καμπύλης ισχύος. Το σημείο της μέγιστης ισχύος P_R αντιστοιχεί σε ονομαστικό ρεύμα I_R και σε ονομαστική τάση V_R κάτω από τις ειδικές συνθήκες που αντιστοιχούν στις ιδανικές συνθήκες δοκιμών του φ/β πλαισίου.



Εικόνα 4.9 γενική χαρακτηριστική I-V ενός φ/β πλαισίου

Ένας άλλος τρόπος προσδιορισμού του σημείου μέγιστης ισχύος είναι με τη βοήθεια του συντελεστή πλήρωσης, FF (fill factor), ο οποίος υπολογίζεται από τη σχέση:

$$FF = (P_R / V_{oc} I_{oc}) = (V_R I_R / V_{oc} I_{oc})$$

Ο συντελεστής πλήρωσης είναι περίπου 70-75% για φ/β πλαίσια κρυσταλλικού πυριτίου, και 50-60% για φ/β πλαίσια άμορφου πυριτίου.

Η χαρακτηριστική I-V του φ/β πλαισίου εξαρτάται από την ηλιακή ένταση και τη θερμοκρασία. Για να μπορεί να γίνεται δίκαιη σύγκριση μεταξύ διαφορετικών φ/β πλαισίων έχουν καθιερωθεί πρότυπες συνθήκες δοκιμών, οι οποίες αφορούν ηλιακή ένταση 1 kW/m^2 (1 ήλιο) με κατανομή φάσματος που αντιστοιχεί σε λόγο μάζας αέρα 1.5 (AM 1.5). Η πρότυπη θερμοκρασία του φ/β στοιχείου είναι 25 C (η οποία είναι η θερμοκρασία του φ/β στοιχείου και όχι η θερμοκρασία του περιβάλλοντος). Οι κατασκευαστές πάντοτε παρέχουν δεδομένα απόδοσης κάτω από αυτές τις συνθήκες λειτουργίας, και μερικά παραδείγματα φαίνονται στον Πίνακα 1. Η παράμετρος κλειδί κάθε φ/β πλαισίου είναι η ονομαστική του ισχύς. Για να θυμόμαστε ότι η ονομαστική ισχύς είναι η ισχύς συνεχούς ρεύματος που μετρείται

κάτω από πρότυπες συνθήκες τη συμβολίζουμε με $P_{DC,STC}$ στον Πίνακα 1.

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 ανοικτού κύκλωσης 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%

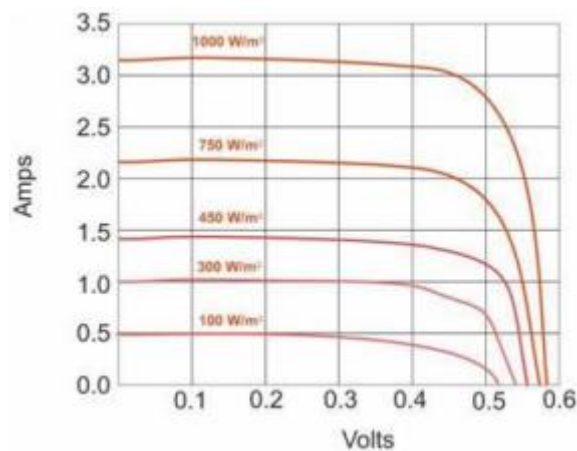
Πίνακας 1 απόδοση φ/β πλαισίων κάτω από πρότυπες συνθήκες δοκιμών (1 kW/m^2 , AM 1.5 25°C θερμοκρασία φ/β στοιχείου).

4.5 Επίδραση της Θερμοκρασίας και της Ηλιακής Έντασης στην Χαρακτηριστική I-V

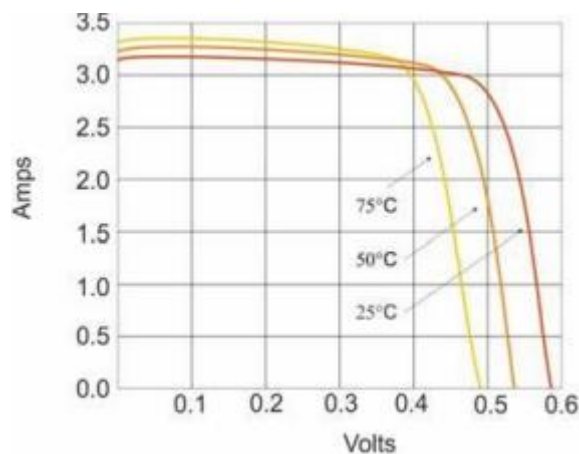
Οι κατασκευαστές συχνά δίνουν τις χαρακτηριστικές I-V του φ/β πλαισίου που δείχνουν πώς αλλάζουν οι καμπύλες όταν αλλάζει η ηλιακή ένταση και η θερμοκρασία. Η Εικόνα 4.10 δίνει παραδείγματα αυτών των καμπυλών για ένα φ/β πλαίσιο. Από την Εικόνα 4.10 μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι καθώς μειώνεται η ηλιακή ένταση, το ρεύμα βραχυκύκλωσης μειώνεται αναλογικά. Για παράδειγμα, η μείωση της ηλιακής έντασης στο μισό έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση του ρεύματος βραχυκύκλωσης I_{SC} στο μισό. Η μείωση της ηλιακής έντασης επίσης μειώνει την τάση ανοικτού κυκλώματος V_{OC} αλλά αυτή η μείωση ακολουθεί λογαριθμική σχέση που προκαλεί σχετικά μέτριες αλλαγές στην V_{OC} .

Όπως φαίνεται από την Εικόνα 4.11 καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία του φ/β στοιχείου, η τάση ανοικτού κυκλώματος μειώνεται σημαντικά ενώ το ρεύμα βραχυκύκλωσης αυξάνεται μόνο λίγο. Τα φωτοβολταϊκά, ίσως απρόσμενα, συμπεριφέρονται καλύτερα τις κρύες, ξάστερες μέρες, παρά τις ζεστές. Για τα φ/β στοιχεία από κρυσταλλικό πυρίτιο, η V_{OC} μειώνεται περίπου 0.37% για κάθε βαθμό Κελσίου αύξησης της θερμοκρασίας και το I_{SC} αυξάνεται περίπου κατά 0.05%. Έτσι, όταν τα φ/β στοιχεία θερμαίνονται, το σημείο μέγιστης ισχύος μειώνεται κατά περίπου 0.5%/ $^\circ\text{C}$. Με δεδομένη αυτή τη σημαντική αλλαγή στην απόδοση εξαιτίας της μεταβολής της θερμοκρασίας του φ/β στοιχείου, είναι προφανές γιατί

θα πρέπει να συνυπολογίζεται η θερμοκρασία σε κάθε εκτίμηση της απόδοσης του φ/β πλαισίου.



Εικόνα 4.10 Παραγωγή ρεύματος και τάσης μιας ηλιακής κυψελίδας σε διαφορετικές εντάσεις φωτός



Εικόνα 4.12 Επίδραση της θερμοκρασίας στις καμπύλες I-V μιας τυπικής κυψέλης κρυσταλλικού πυριτίου

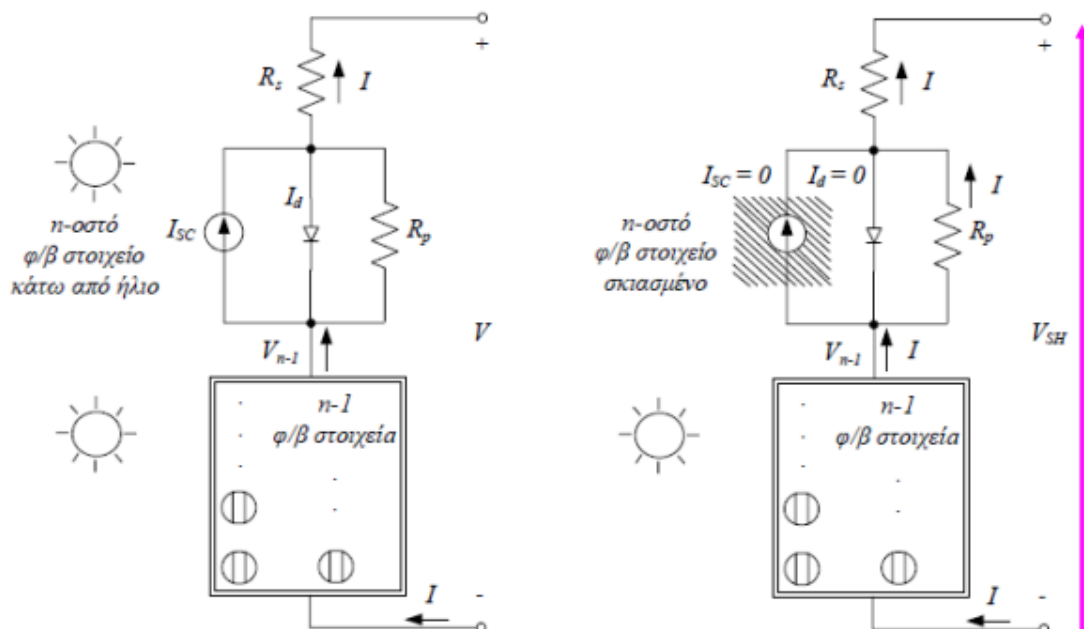
4.6 Επίδραση της σκίασης στην χαρακτηριστική I-V

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 μία 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 διόδους από τον κατασκευαστή των φ/β ή από το σχεδιαστή του συστήματος. Οι διόδους αυτές έχουν ως στόχο να μετριάσουν την επίδραση της

σκίασης στις χαρακτηριστικές I-V. Τέτοιες διόδους συνήθως προστίθενται παράλληλα στα φ/β πλαίσια ή στις ομάδες φ/β στοιχείων εντός ενός φ/β πλαισίου.

4.6.1 Φυσική της Σκίασης

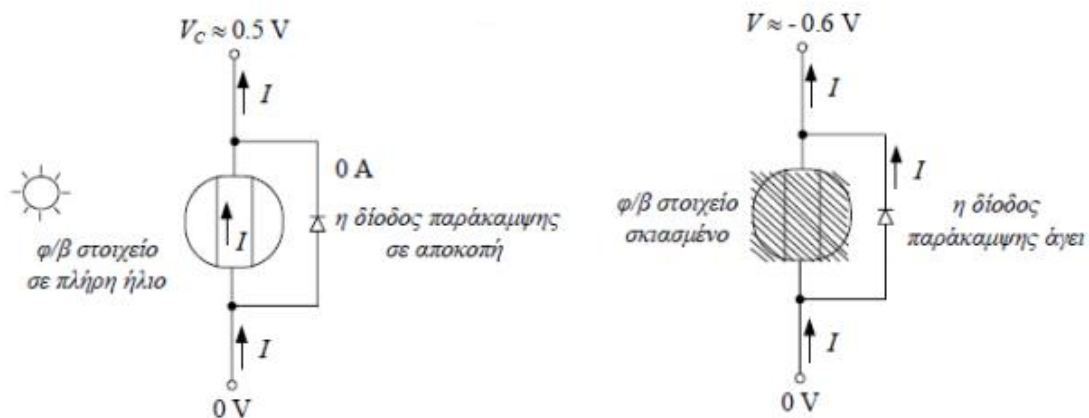
Για την κατανόηση του φαινομένου της σκίασης θεωρούμε η Εικόνα 4.12 όπου το n-οστό φ/β στοιχείο του φ/β πλαισίου είναι διαχωρισμένο από τα υπόλοιπα n-1 φ/β στοιχεία. Το φ/β πλαίσιο έχει τάση V και ρεύμα I. Το ποστό φ/β στοιχείο είναι σχεδιασμένο στην κορυφή του φ/β στοιχείου, παρόλο που θα μπορούσε να 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. Στην Εικόνα 4.12 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. Στην Εικόνα 4.12, 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.



Εικόνα 4.12 Η τάση του n-οστού φ/β στοιχείου (σκιασμένου) αφαιρείται από την συνολική τάση.

4.6.2 Δίοδοι Παράκαμψης για Άμβλυση της Σκίασης

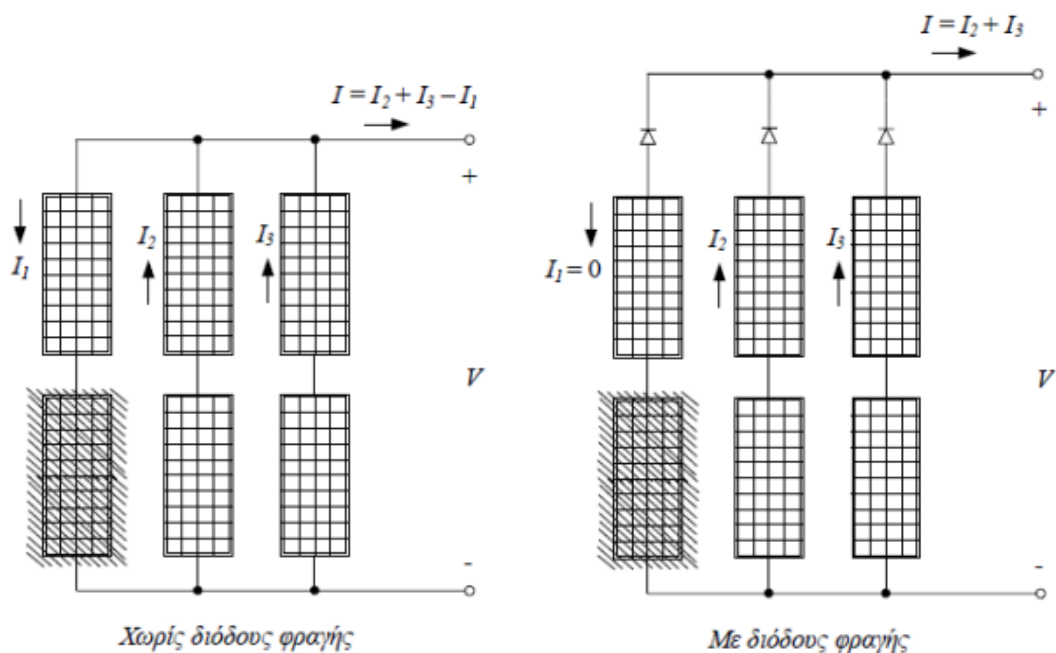
Το πρόβλημα της πτώσης τάσης στα σκιασμένα φ/β στοιχεία μπορεί να διορθωθεί προσθέτοντας μία δίοδο παράκαμψης κατά μήκος κάθε φ/β στοιχείου, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.14 . Όταν ένα φ/β στοιχείο είναι σε πλήρη ήλιο, υπάρχει μία ανύψωση τάσης κατά μήκος του φ/β στοιχείου οπότε η δίοδος παράκαμψης είναι 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.



Εικόνα 4.14 Άμβλυση του προβλήματος της σκίασης με δίοδο παράκαμψης. (αριστερά) σε πλήρη ήλιο, η δίοδος παράκαμψης είναι ανάστροφα πολωμένη και όλο το ρεύμα περνά μέσα από το φ/β στοιχείο. (δεξιά) σε σκίαση, η δίοδος παράκαμψης είναι ορθά πολωμένη οπότε άγει ρεύμα εξωτερικά του σκιασμένου φ/β στοιχείου επιτρέποντας έτσι να συμβεί μόνο η πτώση τάσης των 0.6 V στη δίοδο.

4.6.3 Δίοδοι Φραγής

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 δίοδους φραγής (επίσης ονομάζονται δίοδοι απομόνωσης) στην κορυφή κάθε ομάδας φ/β πλαισίων, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.15, εμποδίζεται η απορρόφηση ανάστροφου ρεύματος από μία σκιασμένη ομάδα φ/β πλαισίων.



Εικόνα 4.15 Οι δίοδοι φραγής εμποδίζουν την απορρόφηση ανάστροφου ρεύματος από μία σκιασμένη ομάδα φ/β πλαισίων.

Οι παράγοντες όπως η σκίαση ή η ρύπανση της επιφάνειας του πλαισίου που περιορίζουν την ηλιακή ακτινοβολία την οποία εκμεταλλεύεται τελικά το φωτοβολταϊκό στοιχείο μπορούν να ενσωματωθούν στον βαθμό απόδοσης του συστήματος:

$$\eta_{ολ} = (P/G * A * \sigma_T * \sigma_p)$$

με (G) την ισχύ ανά m^2 της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας και (A) την επιφάνεια του φωτοβολταϊκού στοιχείου, όταν είναι γνωστή η αποδιδόμενη ισχύς του (P). Εναλλακτικά, η επίδραση θερμοκρασίας μπορεί να συμπεριληφθεί στον υπολογισμό της αποδιδόμενης ισχύος (P) μέσω του παράγοντα (σ_T), ο οποίος μπορεί να δίνεται από τον κατασκευαστή ή, για φ/β πυριτίου, μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση:

$$\sigma_T = 1 - ((T_a + 10) / 200)$$

όπου T_a είναι η μέση θερμοκρασία αέρα. Στην ισχύ της πρώτης σχέσης συμπεριλαμβάνονται και οι απώλειες του συστήματος ενώ το (σ_p) εκφράζει την επίδραση της ρύπανσης ή του σκονισμού της επιφάνειας και είναι ($\sigma_p = 1$) για περιβάλλον χωρίς ρύπανση και ($\sigma_p = 0.8$) για υψηλό επίπεδο ρύπανσης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΤΥΠΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ Φ/Β ΜΟΝΑΔΑΣ

Στο κεφάλαιο αυτό θα μελετήσουμε την περίπτωση εγκατάστασης φωτοβολταϊκής μονάδας ισχύος 100KW. Θα ξεκινήσουμε με την επιλογή των φωτοβολταϊκών πάνελ, τον συνολικό αριθμό αυτών, των μεταξύ τους τρόπο σύνδεσης και τις απαιτούμενες ομαδοποιήσεις. Θα εκτιμηθεί το μέγεθος (ισχύς) των αντιστροφών καθώς και ο αριθμός τους. Θα υπολογιστούν οι απαιτούμενες καλωδιώσεις καθώς και ο τύπος των καλωδίων. Τέλος θα συζητηθεί ο τρόπος σύνδεσης με το δίκτυο του ΔΕΔΔΗΕ καθώς και τα απαιτούμενα μέσα προστασίας και διακοπής.

5.1 Επισκόπηση Χώρου

Η διαθέσιμη έκταση στη οποία θα πραγματοποιηθεί η φωτοβολταϊκή εγκατάσταση είναι ένα χωράφι 4400 m² στην περιοχή Ριόλος Αχαΐας. Το υψόμετρο της περιοχής είναι σχεδόν μηδενικό. Στο χωράφι δεν υπάρχουν κλίσεις του εδάφους. Το χωράφι έχει σχήμα ορθογωνίου παραλληλογράμμου με διαστάσεις 80x55 m και κατεύθυνση νοτιοανατολική. Στον περιβάλλοντα χώρο δεν υπάρχουν εμπόδια καθώς η περιοχή είναι γεωργική και τα γύρω χωράφια χρησιμοποιούνται για καλλιέργειες αμπελώνων οι οποίες έχουν ασημαντο ύψος το οποίο δεν πρόκειται να δημιουργεί σκιάσεις στην εγκατάσταση.

5.2 Επιλογή Εξοπλισμού

Τα πάνελ που θα χρησιμοποιηθούν είναι πολυκρυσταλλικά πάνελ LX-260P60 Eco Line της εταιρείας LUXOR SOLAR και έχουν μέγιστη ισχύ εξόδου 260 Wp. Ο στόχος της φωτοβολταϊκής εγκατάστασης είναι να πλησιάζει όσο το δυνατό περισσότερο στα 100 KWp, οπότε ο αριθμός πάνελ που θα χρησιμοποιηθούν προκύπτει από την διαίρεση της συνολικής εγκατεστημένης ισχύος με την μέγιστη ισχύ που μπορεί να προσφέρει κάθε πάνελ.

$$N = 100KW/260W = 384,61$$

Άρα ο αριθμός των πάνελ που θα χρησιμοποιηθούν θα είναι 384 και η εγκατεστημένη ισχύς της φωτοβολταϊκού πάρκου θα είναι:

$$384 * 260 = 99,84 KW_p$$

Τα χαρακτηριστικά της φωτοβολταϊκής μονάδας φαίνονται παρακάτω:



Εικόνα 5.1 πάνελ LX-260P60 Eco Line της εταιρείας LUXOR SOLAR

Ισχύς Pmax	260Wp
Τύπος	Πολυκρυσταλλικό
Τάση Vmp	31,28V
Ρεύμα Imp	8,32A
Τάση Voc	37,94V
Ρεύμα Isc	8,66A
Απόδοση	15,99 %
Αριθμός Κυψελών	60
Μήκος	1.640mm
Πλάτος	992mm
Πάχος	40mm
Βάρος	20kg

5.3 Επιλογή Αντιστροφέα (INVERTER)

Ο Inverter που θα χρησιμοποιηθεί είναι ο STP 15000TL-30 της εταιρείας SMA, με ισχύ εξόδου 15 KW.



Εικόνα 5.2 Inverter STP 15000TL-3

Ο αριθμός των inverters που θα απαιτηθούν θα είναι $100\text{kW}/15\text{kW}=6,6$ δηλαδή θα χρησιμοποιήσουμε 7 inverters.

Ακολουθεί πιο λεπτομερής πίνακας των τεχνικών χαρακτηριστικών όπως αυτά ελήφθησαν από τα σχετικά data sheet:

Technical Data	Sunny Tripower 15000TL
Input (DC)	
Max. DC power (at $\cos \varphi = 1$) / DC rated power	15330 W / 15330 W
Max. input voltage	1000 V
MPP voltage range / rated input voltage	240 V to 800 V / 600 V
Min. input voltage / start input voltage	150 V / 188 V
Max. input current input A / input B	33 A / 33 A
Number of independent MPP inputs / strings per MPP input	2 / A:3; B:3
Output (AC)	
Rated power (at 230 V, 50 Hz)	15000 W
Max. AC apparent power	15000 VA
AC nominal voltage	3 / N / PE; 220 V / 380 V 3 / N / PE; 230 V / 400 V 3 / N / PE; 240 V / 415 V
AC voltage range	180 V to 280 V
AC grid frequency / range	50 Hz / 44 Hz to 55 Hz 60 Hz / 54 Hz to 65 Hz
Rated power frequency / rated grid voltage	50 Hz / 230 V
Max. output current / Rated output current	29 A / 21.7 A
Power factor at rated power / Adjustable displacement power factor	1 / 0 overexcited to 0 underexcited
THD	≤ 3%
Feedin phases / connection phases	3 / 3
Efficiency	
Max. efficiency / European Efficiency	98.4% / 98.0%
Protective devices	
DC side disconnection device	•
Ground fault monitoring / grid monitoring	• / •
DC surge arrester (Type II) can be integrated	○
DC reverse polarity protection / AC short-circuit current capability / galvanically isolated	• / • / -
All-pole sensitive residual-current monitoring unit	•
Protection class (according to IEC 62109-1) / overvoltage category (according to IEC 62109-1)	I / AC: III; DC: II
General data	
Dimensions (W / H / D)	661 / 682 / 264 mm [26.0 / 26.9 / 10.4 inch]
Weight	61 kg [134.48 lb]
Operating temperature range	-25 °C to +60 °C [-13 °F to +140 °F]
Noise emission (typical)	51 dB(A)
Self-consumption (at night)	1 W
Topology / cooling concept	Transformerless / Opticool
Degree of protection (as per IEC 60529)	IP65
Climatic category (according to IEC 60721-3-4)	4K4H
Maximum permissible value for relative humidity (non-condensing)	100%
Features / function / Accessories	
DC connection / AC connection	SUNCLIX / spring-cage terminal
Display	○
Interface: RS485, Speedwire/Webconnect	○ / •
Data interface: SMA Modbus / SunSpec Modbus	• / •
Multifunction relay / Power Control Module	○ / ○
OptiTrack Global Peak / Integrated Plant Control / Q on Demand 24/7	• / • / •
Off-Grid capable / SMA Fuel Save Controller compatible	• / •
Guarantee: 5 / 10 / 15 / 20 years	• / ○ / ○ / ○
Planned certificates and permits	ANNE 30, AS 4777, BDEW 2008, C10/11:2012, CE, CEI 0-16, CEI 0-21, EN 50438:2013*, G59/3, IEC 60088-2, IEC 61727, IEC 62109-1/2, IEC 62116, NBR 16149, NEN EN 50438, NRS 097-3-1, PFC, RD 1699/413, RD 661/2007, Res. n°7/2013, SI4777, TCR D4, TR 3.2.2, UTE C15-712-1, VDE 0126-1-1, VDE-ARN 4105, VFR 2014
* Does not apply to all national appendices of EN 50438	

Εικόνα 5.3 datasheet inverter STP 15000TL-30 1,

Να σημειώσουμε εδώ ότι. Θα μπορούσαμε αντί για 7 αντιστροφείς που υπερκαλύπτουν την συνολική ισχύ των φωτοβολταϊκών να χρησιμοποιήσουμε 6 αντιστροφείς και έτσι να μειώναμε το συνολικό κόστος. Βέβαια οι 6 αντιστροφείς θα μετέφεραν μια ισχύ $6 \cdot 15 = 90 \text{kw}$ πράγμα που δεν θα δημιουργήσει πρόβλημα μιας και στην διάρκεια του χρόνου (π.χ. 1 έτος) σπάνια η παραγωγή θα έφτανε στα 100kw.

Στο επόμενο βήμα γίνεται ο υπολογισμός του τρόπου σύνδεσης των πάνελ στους inverters. Κάθε inverter έχει 2 εισόδους οι οποίες είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους. Κάθε αντιστροφέας πρέπει να συνδεθεί με 64 πάνελ. Η αρχική δοκιμή θα είναι να συνδέσουμε 32 πάνελ σε κάθε μία από τις εισόδους κάθε αντιστροφέα.

Τα πάνελ έχουν θερμοκρασιακό συντελεστή διόρθωσης 0,32% για το Voc. Άρα για την ελάχιστη θερμοκρασία της περιοχής που είναι 3°C και ηλιοφάνεια 1000 KWh/m², αν έχουμε 32 πάνελ σε κάθε στοιχειοσειρά τότε η μέγιστη τάση του συστήματος θα είναι :

$$V = [(25 - 3) * 0,32 \% + 1] * 37,94 * 32 = 1299 \text{ V}$$

,τα οποία ξεπερνούν κατά πολύ την μέγιστη DC τάση εισόδου των inverter που είναι 1000 V

Θα τροποποιήσουμε τον τρόπο σύνδεσης των πάνελ ώστε η μέγιστη τάση να είναι μικρότερη από 1000V. Δηλαδή θα συνδέουμε στην μία είσοδο κάθε inverter 22 πάνελ και στην δεύτερη είσοδο συνδέουμε 2 στοιχειοσειρές συνδεδεμένες παράλληλα οι οποίες έχουν 21 πάνελ η κάθε μία.

Οπότε η μέγιστη τάση σε αυτήν την περίπτωση είναι :

$$V = [(25 - 3) * 0,32 \% + 1] * 37,94 * 22 = 893 \text{ V} < 1000 \text{ V}$$

Από τις 2 παράλληλες στοιχειοσειρές υπολογίζουμε το μέγιστο ρεύμα εισόδου. Το μέγιστο ρεύμα εισόδου μίας στοιχειοσειράς ισούται με το ρεύμα βραχυκύκλωσης ενός πάνελ που είναι 8,66 A. Συνδέοντας δύο στοιχειοσειρές παράλληλα το μέγιστο ρεύμα που μπορεί να εμφανιστεί γίνεται:

$$8,66 * 2 = 17,32 \text{ A}$$

Έπειτα πρέπει να ελέγξουμε εάν η τάση Vmp της κάθε συστοιχίας βρίσκεται εντός των ορίων τάσης για τα οποία ο μετατροπέας μπορεί να ψάχνει το σημείο MPP. Με άλλα λόγια πρέπει να ελέγξουμε εάν η κατώτερη τιμή τάσης κάθε συστοιχίας αφενός επαρκεί για να λειτουργεί ο inverter στον οποίο συνδέεται και αφετέρου εάν βρίσκεται εντός του διαστήματος στο οποίο ο inverter μπορεί να ανιχνεύει το MPP(240 -800).

Για 21 πάνελ σε σειρά η συνολική Vmp τάση εξόδου θα είναι

$$V_{mp21} = 31.28 * 21 = 656.88 \text{ V}$$

Και για 22 πάνελ

$$V_{mp} = 31.28 * 22 = 688.16$$

5.4 Τοποθέτηση στο Χώρο

Τα πάνελ θα τοποθετηθούν στις βάσεις σε 3 στοιχειοσειρές, 2 των 21 πάνελ και μία των 22, έχοντας την μικρή τους διάσταση παράλληλη στο έδαφος. Ο τρόπος αυτός ονομάζεται 3 portrait. Λαμβάνοντας υπόψη τις διαστάσεις των πάνελ που είναι 1,64m X 0,992m και ότι ανάμεσα σε κάθε πάνελ θα πρέπει να αφήσουμε 0,024m για λόγους διαστολής και συστολής του μετάλλου, υπολογίζουμε το μήκος κάθε σειράς.

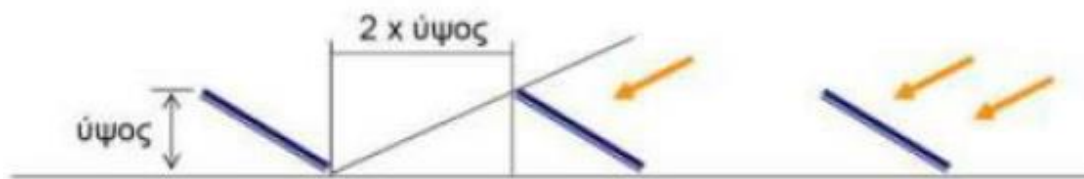
$$0,992 * 22 + 21 * 0,024 = 22,328 \text{ m μήκος (22,5m)}$$

$$1,64 * 3 + 2 * 0,024 = 4,968 \text{ m πλάτος(5 m)}$$



Εικόνα 5.4 παράδειγμα διάταξης 3 portrait

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 στην παρακάτω Εικόνα 5.5 .



Εικόνα 5.5 ο κανόνας του διπλάσιου ύψους

Το ύψος της εγκατάστασης είναι ίσο με το πλάτος που υπολογίσαμε πριν πολλαπλασιασμένο με το ημίτονο της γωνίας κλίσης, δηλαδή 27° . Άρα:

$$\text{Ύψος} = 5\text{m} * \sin 27^\circ = 2,27\text{m}$$

Άρα συμπεραίνουμε ότι η ελάχιστη απόσταση ανάμεσα σε 2 σειρές θα πρέπει να είναι:

$$2 * 2.27 = 4,5\text{m}$$

Οπότε τοποθετούμε τις στοιχειοσειρές σε απόσταση 5 m η μία από την άλλη για σιγουριά. Περιμετρικά του αγροκτήματος τοποθετούμε προστατευτικό φράχτη ύψους 1,75 m και αφήνουμε απόσταση τουλάχιστον 5 m για να ξεκινήσουμε την τοποθέτηση των φωτοβολταϊκών συστοιχιών.

5.5 Καλώδια στην DC πλευρά

Για τη σύνδεση κάθε σειράς φωτοβολταϊκών στοιχείων με τους αντιστροφείς θα χρησιμοποιηθεί καλώδιο τύπου DC Solar διατομής 6mm^2 . Πρόκειται για εύκαμπτα καλώδια με μόνωση και μανδύα από ελαστικό υψηλής αντοχής. Τα καλώδια ακολουθούν τις προδιαγραφές ΕΛΟΤ 623.4 και HD 22.4. Ενδείκνυνται για χρήση σε ξηρούς, υγρούς ή βρεγμένους χώρους στο υπαίθρο. Για την καλύτερη διάκριση των καλωδίων θα χρησιμοποιηθούν διαφορετικοί χρωματισμοί ανάλογα με την πολικότητα των ισχύων που μεταφέρουν. Συγκεκριμένα RED/BLACK για τον θετικό πόλο και BLACK/BLACK για τον αρνητικό.



Εικόνα 5.6 καλωδίωση DC

Η στήριξη των καλωδίων θα γίνει με δεματικά από πλαστικό υλικό για την αποφυγή επαγωγικών ρευμάτων. Οι προδιαγραφές του καλωδίου είναι οι εξής:

- Εύρος θερμοκρασίας από -40°C ως 120°C .
- Επιτρεπτή τάση λειτουργίας 2 KV DC.
- Αναμενόμενη διάρκεια ζωής >25 έτη.
- Ανθεκτικά στην υπεριώδη ακτινοβολία (UV protection).
- Δυνατότητα Εγκατάστασης τόσο σε εξωτερικούς χώρους όσο και εντός σωλήνων ή καναλιών.
- Μανδύας και μόνωση από μείγμα ελεύθερων αλογόνων με εξαιρετική αντοχή στη θερμοκρασία.

5.6 Καλώδια στην AC πλευρά

Για την μεταφορά της ισχύος από τους αντιστροφείς προς τον κεντρικό πίνακα, ο οποίος βρίσκεται μέσα στην αποθήκη, θα χρησιμοποιηθούν καλώδια τύπου H07RN-F διατομής 10mm^2 , διατηρώντας σε κάθε περίπτωση τις απώλειες από την μεταφορά της ενέργειας χαμηλότερα από το 2% της μεταφερόμενης ισχύος.



Εικόνα 5.7 Καλωδίωση AC

Τα καλώδια του συγκεκριμένου τύπου είναι ανθεκτικά σε όλες τις καιρικές συνθήκες και μπορούν να χρησιμοποιηθούν ακόμα και μέσα σε νερό (γλυκό ή θαλασσινό). Είναι ανθεκτικά σε όζον, βραδύκαυστα και μπορούν να αντέξουν σε υψηλές μηχανικές καταπονήσεις. Ο εξωτερικός μανδύας είναι από λάστιχο χλωροπρενίου, εσωτερικά

φέρουν μόνωση από λάστιχο ενώ ο αγωγός είναι λεπτό πολύκλωνος από χαλκό προσφέροντας έτσι υψηλή αγωγιμότητα και ελαστικότητα. Η τάση λειτουργίας είναι 450/750 V φασική και πολική αντίστοιχα, ενώ η περιοχή θερμοκρασίας από -30°C έως +60°C.

5.7 Καλώδια Ισχύος-Σύνδεση με ΔΕΔΔΗΕ

Η μέγιστη μεταφερόμενη ισχύς από το φωτοβολταϊκό πάρκο προς τον ΔΕΔΔΗΕ είναι 100kw ίση με την φαινόμενη ισχύ 100KVA αφού η εν λόγω μετατροπή γίνεται με συντελεστή ισχύος περίπου 1. Παραθέτουμε έναν πίνακα παροχών ΧΤ από τον ΔΕΔΔΗΕ κατάταξης παροχών ανάλογα με την ισχύ Πίνακας 5.1

ΠΑΡΟΧΗ		ΑΣΦΑΛΕΙΕΣ				ΜΕΤΡΗΤΗΣ	ΔΙΑΤΟΜΗ ΚΑΛΩΔΙΟΥ ΠΑΡΟΧΗΣ		ΕΛΑΧ. ΔΙΑΤΟΜΗ ΓΡΑΜΜΗΣ ΠΙΝΑΚΑ-ΜΕΤΡΗΤΗ ΠΟΥ ΠΡΟΣΤΑΤΕΥΕΤΑΙ ΑΠΟ ΥΠΕΡΦΟΡΤΙΣΗ	ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΙΣΧΥΣ Μ/Σ
		Γενική εσωτ. εγκατάστασης	Μετρητής		Ελάχ.Αναχ. δικτύου ΧΤ		Συγκεντρικά θ.Ν. (Cu)	X - LPE		
No	kVA		A	A		A			A	mm ²
ΜΟΝΟΦΑΣΙΚΕΣ ΠΑΡΟΧΕΣ										
03	8	35	35	40	63	10/40 15/60	2 x 6	-	3 x 10	50
05	12	50	63	63	80	15/60	2 x 16	-	3 x 16	50
ΤΡΙΦΑΣΙΚΕΣ ΠΑΡΟΧΕΣ										
1	15	25	25	25	63	3 x 10/40 3 x 10/60	4 x 6	-	5 x 6	50
2	25	35	35	40	63	3 x 10/40 3 x 10/60	4 x 6	-	5 x 10	50
3	35	50	63	63	100	3 x 20/60 3 x 10/60	4 x 16	-	5 x 16	100 (75)
4	55	80	100	-	160	3 x 50/100 3 x 20/100	4 x 25	-	3x25+16+16 ⁽⁵⁾	100
5	85	125	160	-	250	3 x 1.5/6 3x 1/6	4 x 50	3x95 Al + 35 Cu	3x50+25+25 ⁽⁵⁾	160
6	135	200	250	-	400	3 x 1.5/6 3x 1/6	Μονοπολ. 95 Cu	3x150 Al + 50 Cu	3x120+70+70 ⁽⁵⁾	250

Πίνακας 5.1 Στοιχεία παροχών ΧΤ

Από τον ανωτέρω πίνακα καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι θα συνδεθούμε με το δίκτυο ΧΤ με παροχή Νο6 για μέγιστη ισχύ 135KVA που είναι μεγαλύτερη από την μέγιστη ισχύ των 100KVA του φωτοβολταϊκού πάρκου.

Η ασφάλεια του μετρητή θα είναι 250A

Το καλώδιο παροχής από ΔΕΔΔΗΕ θα είναι 3X150AL+50cu ΧLPE.

Το καλώδιο παροχής από τον μετρητή μέχρι τον γενικό πίνακα θα είναι 3X120+70+70 mm².

Η ασφάλεια προστασίας του γενικού πίνακα θα είναι 200Α.

Η ελάχιστη ισχύς του μετασχηματιστή θα είναι 250KVA.

5.8 Μέσα Προστασίας

Στην AC πλευρά της εγκατάστασης θα χρησιμοποιηθούν μαχαιρωτές ασφάλειες τήξης μετά από κάθε inverter και άλλη μία στον κεντρικό Πίνακα, δηλαδή μεταξύ των καλωδίων των inverter που καταλήγουν στον Πίνακα και του καλωδίου που ξεκινά από τον Πίνακα και συνδέεται στο δίκτυο.

Διακόπτης διαφορικού ρεύματος- ΔΔΡ θα τοποθετηθεί στον κεντρικό πίνακα της εγκατάστασης μετά το γενικό διακόπτη. Ο ΔΔΡ παρακολουθεί το ρεύμα διαρροής ως προς τη γη και αν αυτό υπερβεί μία καθορισμένη τιμή, θα αποζεύξει το κύκλωμα σε όλους τους πόλους, δηλαδή στις φάσεις και στον ουδέτερο.

Εκτροπείς υπέρτασης θα τοποθετηθούν στα κιβώτια διασύνδεσης, κατά το δυνατόν πλησιέστερα στα πλαίσια. Οι εκτροπείς αυτοί προστατεύουν τοπικά τα Φ/Β στοιχεία και εμποδίζουν τις υπερπηδήσεις που οφείλονται στις ηλεκτρομαγνητικές επιδράσεις στα στοιχεία.

5.9 Γείωση και Αντικεραυνική Προστασία

Προκειμένου να πραγματοποιηθεί η θεμελιακή γείωση του πάρκου, τρέχουμε κατά μήκος του και σε βάθος 0,6m από την επιφάνεια της γης, γυμνό καλώδιο χαλκού 50mm² , το οποίο συνδέεται με όλες τις στοιχειοσειρές των πάνελ περιμετρικά δημιουργώντας έναν κλειστό βρόχο. Στην αποθήκη θα χρησιμοποιήσουμε θεμελιακή γείωση. Η θεμελιακή γείωση εξασφαλίζει χαμηλή τιμή αντίστασης γείωσης, δημιουργία ισοδυναμικής επιφάνειας, προστασία του ηλεκτροδίου από διάβρωση λόγω εγκιβωτισμού στο μπετό, καθώς και μείωση βηματικών τάσεων και τάσεων επαφής. Η θεμελιακή γείωση του κτιρίου θα συνδέεται με το πλέγμα γείωσης της Φ/Β εγκατάστασης, ώστε να μην είναι δυνατή η εμφάνιση διαφοράς δυναμικού μεταξύ κτιρίου και εγκατάστασης σε περίπτωση πλήγματος κεραυνού.

Για την άμεση αντικεραυνική προστασία θα κατασκευαστεί αλεξικέραυνο με ιστό ύψους 9 m στον οποίο θα τοποθετηθεί κεφαλή

τύπου pulsar με ακτίνα δράσης 90 m. Στην κεφαλή του - 91 - αλεξικέραυνου θα συνδεθεί αγωγός καθόδου διαμέτρου 12 mm, ο οποίος θα συνδεθεί με τρίγωνο γείωσης που θα κατασκευαστεί στη βάση του αλεξικέραυνου. Τα ηλεκτρόδια του τριγώνου θα είναι μήκους 2 m το καθένα και θα τοποθετηθούν σε απόσταση 2,5 m. Το σύστημα του αλεξικέραυνου θα συνδεθεί με το πλέγμα ισοδυναμικής γείωσης.

Βιβλιογραφία

1. Σωκράτης Ν. Καπλάνης, Μηχανική των φωτοβολταϊκών συστημάτων, Εκδόσεις Ιων, 2004
2. Ι. Ε. Φραγκιαδάκης, Φωτοβολταϊκά συστήματα, Εκδόσεις Ζήτη, 2006
3. Ηλεκτρικά Ι, Γιάννης Χαρητάντης, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις (Πάτρα)
4. Βιομηχανικά Ηλεκτρονικά Τόμος Α και Β, Σερβετάς Ε.Κ., Αθήνα 1990
5. Ηλεκτρικές Εγκαταστάσεις, Πέτρος Ντοκόπουλος, Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη
6. Βιομηχανικές ηλεκτρικές εγκαταστάσεις, Βασίλειος Δ. Μπιτζιώνης, εκδόσεις Τζιόλα

Ιστοσελίδες

1. <https://sites.google.com/site/photovoltaicssystems93/eide-photovoltaikon-systematon>
2. <https://www.oleng.eu/fotovoltaiko-parko-stin-kerkyra-100kw/>
3. http://tkm.tee.gr/wp-content/uploads/2018/02/fwtovoltaika_ergwn.pdf
4. <http://www.mechanicalsolutions.gr/en/products/fotovoltaika-21>
5. <http://portal.tee.gr>
6. https://repository.kallipos.gr/bitstream/11419/5786/3/02_chapter_07.pdf
7. <https://docplayer.gr/31592449-Eisagogi-sta-ilektronika-ishyos.html>
8. <https://core.ac.uk/download/pdf/81560778.pdf>