

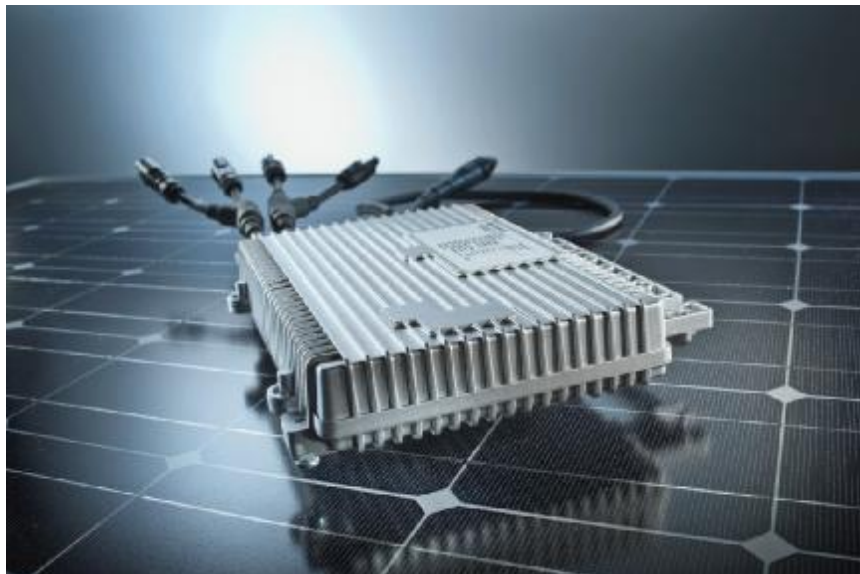
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ

ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε.

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ  
ΑΡΙΘΜΟΣ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ: 1519

# ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΑ (INVERTER) ΓΙΑ ΧΑΜΗΛΗΣ ΙΣΧΥΟΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ



**ΣΠΟΥΔΑΣΤΕΣ:**  
**ΚΟΛΛΙΑΣ ΧΡΗΣΤΟΣ**  
**ΑΓΓΕΛΟΠΟΥΛΟΣ ΔΗΜΗΤΡΗΣ**

**ΕΠΟΠΤΕΥΟΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ :**  
**ΣΤΑΘΑΤΟΣ ΗΛΙΑΣ**

ΠΑΤΡΑ 2015

Copyright © Κόλλιας Χρήστος, Αγγελόπουλος Δημήτρης. 2015

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ' ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τους συγγραφείς.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τους συγγραφείς και δεν πρέπει να ερμηνευτεί ότι εκφράζουν τις επίσημες θέσεις του ΤΕΙ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία παρουσιάζει την μελέτη υλοποίησης αντιστροφέα (inverter) που προτείνεται για την διασύνδεσή του στα χαμηλής ισχύος φωτοβολταϊκά στοιχεία. Κύρια λειτουργία των αντιστοφένων είναι η μετατροπή της συνεχούς (DC) ισχύος την οποία παράγει το φωτοβολταϊκό στοιχείο (γεννήτρια) σε εναλλασσόμενη (AC). Συγκεκριμένα υλοποιείται μια ηλεκτρονική διάταξη αντιστροφέα ρεύματος τοπολογίας Flyback με μετασχηματιστή κατάλληλη για χαμηλής ισχύος φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις έως 300Watt καθώς και η διασύνδεση με το ηλεκτρικό δίκτυο. Η εργασία αυτή διαρθρώνεται σε τέσσερα κεφάλαια.

Στο ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Αναφερόμαστε στα φωτοβολταϊκά συστήματα αναδεικνύοντας την τεχνολογία που είναι κατασκευασμένα καθώς τα ισοδύναμα κυκλώματα με γραφικές παραστάσεις και το σημείο μέγιστης παραγόμενης ισχύος.

Στο ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Γίνεται μια εισαγωγή στον κόσμο των ηλεκτρονικών ισχύος για ημιαγωγικά στοιχεία που λαμβάνουν τόπο στις περισσότερες διατάξεις μετατροπών, κάνουμε ανάλυση και σύγκριση των ελεγχόμενων διακοπών IGBT, MOSFET που θα συναντήσει κάποιος σε αντιστροφείς.

Στο ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Επικεντρώνεται το ενδιαφέρον στους μονοφασικούς αντιστροφείς, γίνεται ανάλυση στις τοπολογίες αλλά και την αρχή λειτουργίας τους. Επίσης οι ηλεκτρονικές διατάξεις μετατροπών των φωτοβολταϊκών πλαισίων θα καταταχθούν σε κατηγορίες βάση του αριθμού βαθμίδων, ανάλογα με το αν περιέχουν μετασχηματιστή απομόνωσης ή όχι, καθώς θα προκύψουν συμπεράσματα για την βέλτιστη επιλογή της ηλεκτρονικής διάταξης.

Τέλος, προχωρώντας στο ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Παρουσιάζεται η υλοποίηση του μονοφασικού αντιστροφέα διασυνδεδεμένος με χαμηλής ισχύος φωτοβολταϊκό στοιχείο που επιλέξαμε στην μελέτη αυτή όπως ο σχεδιασμός τοπολογίας Flyback, οι αρχές και οι τρόποι λειτουργίας του, κάνοντας σύγκριση και επιλογή μεταξύ αυτών.

# Περιεχόμενα

<b>ΠΕΡΙΛΗΨΗ</b> .....	3
<b>Περιεχόμενα</b> .....	4
<b>ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b> .....	6
E.1 Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (Α.Π.Ε).....	6
E.2 Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τον ήλιο.....	7
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ</b> .....	8
1.1 Εισαγωγή στην τεχνολογία Φωτοβολταϊκών συστημάτων .....	8
1.1.1. Ιστορική αναδρομή.....	8
1.1.2. Τεχνολογία Φωτοβολταϊκών Συστημάτων .....	9
1.2 Τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των φωτοβολταϊκών στοιχείων.....	13
1.3 Ισοδύναμο κύκλωμα φωτοβολταϊκών στοιχείων.....	14
1.4 Χαρακτηριστική Καμπύλη I-V και P-V .....	16
1.5 Ανίχνευση του σημείου μέγιστης παραγόμενης ισχύος του φωτοβολταϊκού στοιχείου -M.P.P.T .....	18
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΗΜΙΑΓΩΓΟΙ ΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΙΣΧΥΟΣ</b> .....	19
2.1 Εισαγωγή στα ηλεκτρονικά ισχύος.....	19
2.2 Εξέλιξη των ημιαγωγών ισχύος.....	19
2.3 Ταξινόμηση των ημιαγωγικών στοιχείων.....	21
2.4 Ελεγχόμενα διακοπτικά στοιχεία .....	22
2.5 Απώλειες στα ελεγχόμενα διακοπτικά στοιχεία .....	22
2.6 MOSFET και IGBT .....	24
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΙΣ (Inverters)</b> .....	26
3.1 Εισαγωγή στους Αντιστροφείς.....	26
3.2 Οι ηλεκτρονικοί μετατροπείς .....	28
3.3 Ταξινόμηση των μετατροπέων ανάλογα με το αν περιέχουν μετασχηματιστή απομόνωσης .....	32
3.4 Ταξινόμηση των μετατροπέων με κριτήριο τον αριθμό βαθμίδων .....	33
3.5 Μονοφασικοί αντιστροφείς.....	34
3.6 Στόχοι και Αρχές Λειτουργίας Αντιστροφέων .....	36
3.7 Ο βαθμός απόδοσης του Αντιστροφέα .....	38
3.8 Νησιδοποίηση .....	39
3.9 Αρμονική παραμόρφωση του ρεύματος και συντελεστής Ισχύος.....	40

3.10 Διαμόρφωση εύρους παλμού και λειτουργία αντιστροφέα.....	41
3.10.1 Αντιστροφέας τετραγωνικής κυματομορφής .....	41
3.10.2 Αντιστροφέας τροποποιημένου ημιτόνου .....	41
3.10.3 PWM – Διαμόρφωση Εύρους Παλμού .....	42
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΑ ΓΙΑ ΧΑΜΗΛΗΣ</b>	
<b>ΙΣΧΥΟΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟ ΣΤΟΙΧΕΙΟ.....</b>	<b>44</b>
4.1 Εισαγωγή.....	44
4.2 Τοπολογίες που συνδυάζονται στον αντιστροφέα .....	44
4.3 Αρχές λειτουργίας και κύκλωμα του αντιστροφέα .....	46
4.4 Λειτουργία αντιστροφέα στην περιοχή της ασυνεχούς αγωγής (DCM).....	48
4.5 Μέγιστη πυκνότητα μεταφερόμενης ισχύος (DCM).....	50
4.6 Λειτουργία του αντιστροφέα στο όριο της συνεχούς και ασυνεχούς αγωγής (BCM) .....	58
4.7 Μέγιστη πυκνότητα μεταφερόμενης ισχύος (BCM).....	60
4.8 Συνδυασμός εφαρμογής των δύο καταστάσεων λειτουργίας για την διασύνδεση του αντιστροφέα με χαμηλής ισχύος φωτοβολταϊκό στοιχείο .....	69
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....</b>	<b>70</b>

# ΕΙΣΑΓΩΓΗ

## Ε.1 Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (Α.Π.Ε)

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ) είναι πηγές με χαρακτηριστικό την εκμετάλλευση της ενέργειας που προέρχεται από την φύση, όπως η αιολική ενέργεια, η ηλιακή ενέργεια, η γεωθερμική ενέργεια, η ενέργεια των κυμάτων, η παλιρροϊκή ενέργεια, η υδραυλική ενέργεια και η ενέργεια από την βιομάζα. Η χρήση των ορυκτών καυσίμων έχει προκαλέσει αρνητικές επιπτώσεις στο περιβάλλον και κατ' επέκταση στους ζωτικούς οργανισμούς προκαλώντας φαινόμενα όπως του θερμοκηπίου με καταστροφικές συνέπειες και κλιματικές αλλαγές. Η ανάγκη για χρησιμοποίηση των ΑΠΕ έχει γίνει επιτακτική και ολοένα και περισσότερο, οι αναπτυγμένες χώρες προσπαθούν να τις εκμεταλλευτούν και να μειώσουν την αποκλειστική χρήση των ορυκτών καυσίμων για την κάλυψη των ενεργειακών τους αναγκών. Η χρήση των ΑΠΕ είναι πλέον αναγκαία, διότι παρουσιάζουν πλεονεκτήματα όπως:

- Συμβάλουν στην οικολογία με μηδενικά κατάλοιπα και απόβλητα.
- Δεν έχουν όριο εξάντλησης των αποθεμάτων ενέργειας.
- Είναι εφαρμογές όπου η ορθολογική χρήση τους δημιουργεί οικονομία στην χώρα και στους πολίτες.
- Έχουν χαμηλά έξοδα λειτουργίας.

Ωστόσο πέρα από τα πλεονεκτήματα που έχουν αυτές οι μορφές ενέργειας έχουν και μειονεκτήματα όπως:

- Ο χαμηλός σχετικά συντελεστής απόδοσης.
- Καταλαμβάνουν σχετικά μεγάλο όγκο εγκατάστασης και μεγάλο κόστος εφαρμογής.
- Η ενεργειακή απόδοση τους εξαρτάται από την εποχή του έτους, από το γεωγραφικό πλάτος και από τις κλιματικές συνθήκες που επικρατούν στον τόπο.

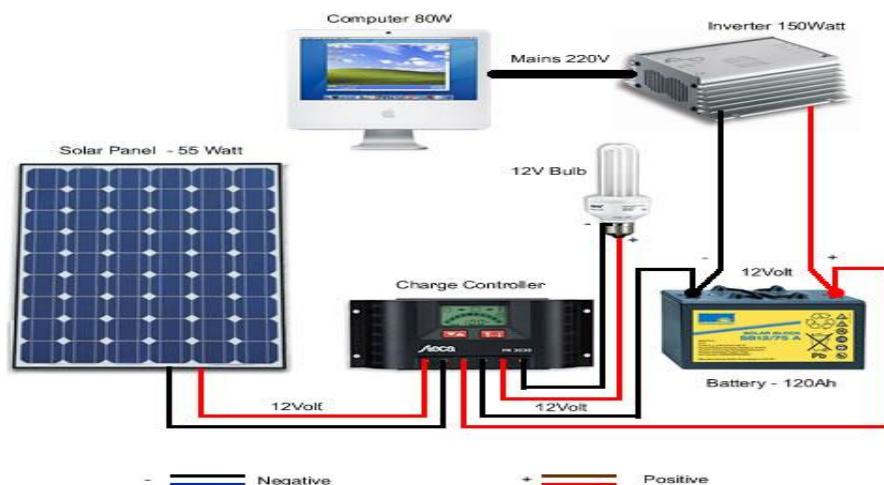
Πέραν από τα μειονεκτήματα αυτά όσο η τεχνολογία εξελίσσεται οι μορφές των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας γίνονται ολοένα και πιο δελεαστικές και φιλικές προς τον άνθρωπο και το περιβάλλον.

## Ε.2 Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τον ήλιο

Ο ήλιος είναι η μεγαλύτερη φυσική πηγή ενέργειας, από όλες τις άλλες ΑΠΕ του πλανήτη. Από τον ήλιο μπορούμε να αντλήσουμε ενέργεια αν εκμεταλλευτούμε τη θερμότητα ή το φως του. Η ηλιακή ενέργεια διαδίδεται μέσω της ηλιακής ακτινοβολίας. Ο ήλιος ενεργεί ως μια τέλεια πηγή ακτινοβολίας (σε μια θερμοκρασία κοντά στους 5.800 K). Το ετήσιο συνολικό ποσό που ακτινοβολείται από τον ήλιο στην επιφάνεια της γης είναι περίπου όσο 10.000 φορές η ετήσια παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας. Η ηλιακή ενέργεια όσο αφορά την εκμετάλλευσή της θα μπορούσαμε να πούμε ότι χωρίζεται σε τρεις κατηγορίες εφαρμογών:

- τα παθητικά ηλιακά συστήματα
- τα ενεργητικά ηλιακά συστήματα
- και τα φωτοβολταϊκά συστήματα

Τα παθητικά και τα ενεργειακά ηλιακά συστήματα στηρίζονται στη μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας σε θερμότητα, ενώ τα φωτοβολταϊκά συστήματα στη μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω του φωτοβολταϊκού φαινομένου. Η φωτοβολταϊκή μορφή θεωρείται το μέλλον της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Επίσης το κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις έχει πλέον κάνει αισθητή την μείωση του. Από το 2000 η παραγωγή φωτοβολταϊκών στοιχείων σχεδόν διπλασιάζεται κάθε δύο χρόνια, μετατρέποντας την στην πιο γρήγορα αναπτυσσόμενη ενεργειακή τεχνολογία. Τα φωτοβολταϊκά πάνελ μετατρέπουν την ενέργεια από την ανεξάντλητη πηγή (τον ήλιο), σε χρήσιμη ηλεκτρική ενέργεια. Λόγω της απεριόριστης φύσης της πηγής είναι επιθυμητό να παίρνουμε την μέγιστη δυνατή ισχύ από τα φωτοβολταϊκά πάνελ. Γι' αυτό το λόγο έχουν αναπτυχθεί συστήματα όπου επεμβαίνουν, όπως φαίνεται στην (Εικόνα 1), ανάμεσα στα φωτοβολταϊκά πάνελ και στην σύνδεση τους με το φορτίο όπου γίνεται η εγκατάσταση.



Εικόνα 1: Αυτόνομο Φ/Β σύστημα

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

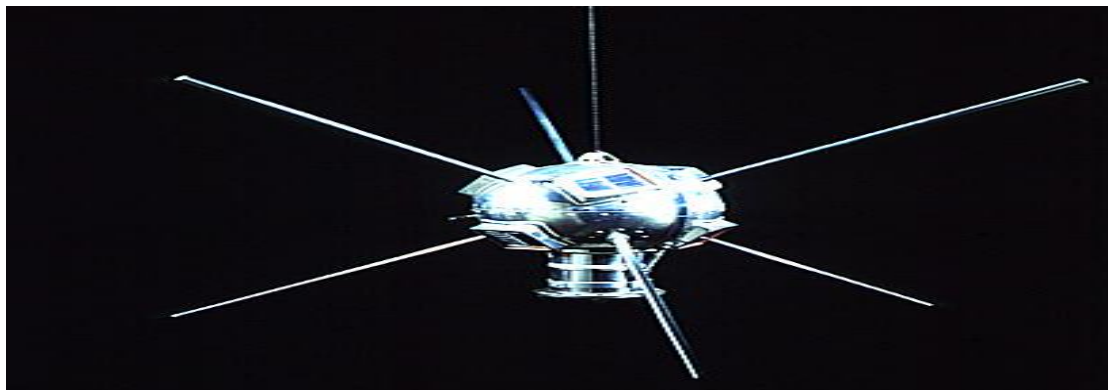
---

## 1.1 Εισαγωγή στην τεχνολογία Φωτοβολταϊκών συστημάτων

### 1.1.1. Ιστορική αναδρομή

Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο άρχισε να πρωτοεμφανίζεται το 1839 όταν ο Γάλλος φυσικός Edmond Becquerel (1820-1891) ανακάλυψε κατά τη διάρκεια πειραμάτων του με μια ηλεκτρολυτική επαφή φτιαγμένη από δύο μεταλλικά ηλεκτρόδια ότι ορισμένα υλικά μπορούσαν να παράγουν σπινθήρες ηλεκτρισμού όταν υποβάλλονταν σε ηλιακή ακτινοβολία. Το επόμενο σημαντικό βήμα έγινε το 1876 όταν ο Adams (1836-1915) και ο φοιτητής του Day, παρατήρησαν ότι μια ποσότητα ηλεκτρικού ρεύματος παραγόταν από το σελήνιο (Se), όταν αυτό ήταν εκτεθειμένο στο φως. Το 1918 ο Πολωνός Czochralski (1885-1953) πρόσθεσε τη μέθοδο παραγωγής ημιαγωγού μονοκρυσταλλικού πυριτίου (Si) με τη σχετική έρευνα του, η οποία μάλιστα χρησιμοποιείται βελτιστοποιημένη ακόμη και σήμερα. Σημαντική ανακάλυψη έγινε επίσης το 1949, όταν οι Mott και Schottky ανέπτυξαν τη θεωρία της διόδου σταθερής κατάστασης. Το πρώτο ηλιακό κελί λαμβάνει τόπο στα εργαστήρια της Bell το 1954 από τους Chapin, Fuller και Pearson. Η αποδοτικότητά του είχε την τιμή 6% της εκμεταλλεύσιμης ηλιακής προσπίπτουσας ακτινοβολίας.

Το 1958 η Hoffman Electronics κατάφερε να πετύχει αύξηση στο βαθμό απόδοσης κυψέλης στο 9%, ενώ στις 17 Μαρτίου προγραμματίστηκε εκτόξευση του Vanguard I (Εικόνα 1), ο πρώτος δορυφόρος του οποίου η ηλεκτρική ισχύς παραγόταν από ηλιακές κυψέλες. Στην εποχή μας, με την εξέλιξη της τεχνολογίας και της τεχνικής προόδου παρατηρούνται όλο και περισσότερες καινοτομίες στον κλάδο κατασκευής των φωτοβολταϊκών στοιχείων που αγγίζουν αποδόσεις έως και 46%.

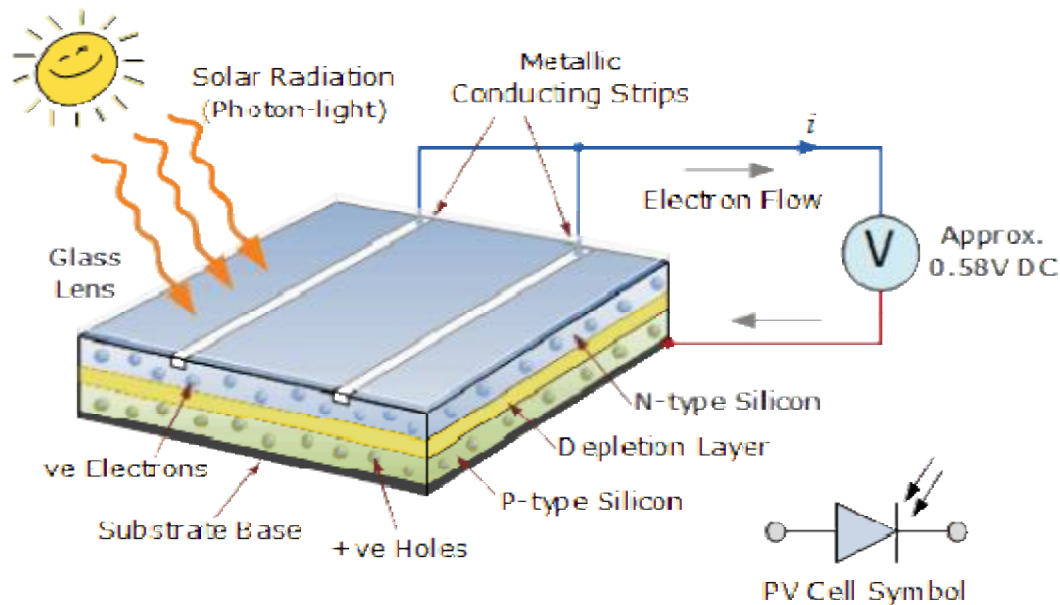


Εικόνα 1: Δορυφόρος Vanguard I



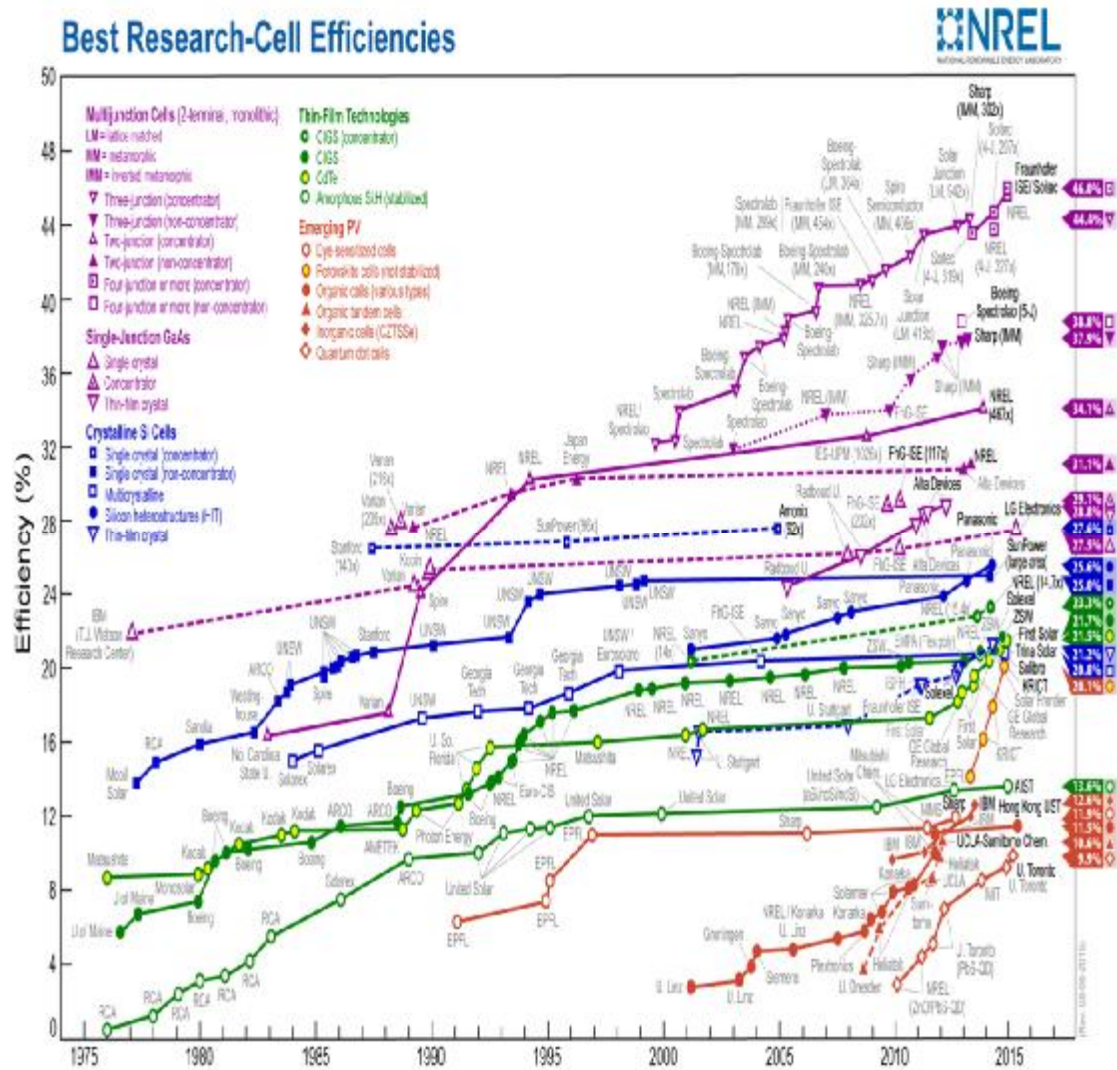
### 1.1.2. Τεχνολογία Φωτοβολταϊκών Συστημάτων

Τα σημαντικότερα στοιχεία ενός ηλιακού κελιού είναι δύο στρώματα ημιαγωγικού υλικού τα οποία αποτελούνται από κρυστάλλους πυριτίου. Για να δημιουργηθεί η προϋπόθεση για την παραγωγή ηλεκτρισμού, στο κρυσταλλικό πυρίτιο προστίθενται προσμίξεις και άλλων στοιχείων. Στο κάτω στρώμα του ηλιακού κελιού προστίθεται συνήθως βόριο, το οποίο δημιουργεί δεσμούς με το πυρίτιο οδηγώντας στην ανάπτυξη θετικού φορτίου (p). Στο πάνω μέρος του ηλιακού κελιού προστίθεται συνήθως φώσφορος, το οποίο δημιουργεί δεσμούς με το πυρίτιο οδηγώντας στην ανάπτυξη αρνητικού φορτίου (n). Η επιφάνεια μεταξύ των ημιαγωγών τύπου p και τύπου n που δημιουργούνται ονομάζεται p-n επαφή (P-N junction).



Σχήμα 1.1.1: Solar cell

Όταν το ηλιακό φως εισέρχεται στο κελί (Σχήμα 1.1.1), τότε στα δύο στρώματα ελευθερώνεται η ενέργεια των ηλεκτρονίων. Τα ηλεκτρόνια αυτά, γνωστά και ως ελεύθερα ηλεκτρόνια προσπαθούν, λόγω των διαφορετικών φορτίσεων των δύο στρωμάτων, να μετακινηθούν από το στρώμα τύπου-n στο στρώμα τύπου-p, αλλά εμποδίζονται από το ηλεκτρικό πεδίο που δημιουργείται στην επαφή p-n. Ωστόσο, η παρουσία ενός εξωτερικού κυκλώματος δημιουργεί την απαραίτητη διαδρομή για τη μεταφορά ηλεκτρονίων από το στρώμα τύπου-n στο στρώμα τύπου-p. Εξαιρετικά λεπτά καλώδια κατά μήκος του στρώματος τύπου-n επιτρέπουν τη διέλευση ηλεκτρονίων και η κίνηση αυτή των ηλεκτρονίων προκαλεί τη δημιουργία ρεύματος. Τα ηλιακά κελιά έχουν συνήθως τετράγωνο σχήμα, πλευράς περίπου 10 εκατοστών. Ένα ηλιακό κελί παράγει πολύ μικρή ισχύ και έτσι ενώνονται ηλεκτρικά σε σειρά ή παράλληλα, για να δημιουργηθούν τα φωτοβολταϊκά πάνελ. Η απόδοση των ηλιακών κελιών, εκφραζόμενη ως το ποσοστό της ηλιακής ενέργειας που μετατρέπεται σε ηλεκτρική, εξαρτάται από την τεχνολογία των υλικών που χρησιμοποιούνται. Από έρευνες που πραγματοποιήθηκαν έχουν αναφερθεί (Σχήμα 1.1.2) αποδόσεις έως και 46%. Ωστόσο η πλειοψηφία των ηλιακών κελιών και των δημιουργημένων φωτοβολταϊκών πάνελ που είναι σε διαθεσιμότητα στο εμπόριο έχουν μέγιστη απόδοση της τάξης του 20-25%.



Σχήμα 1.1.2: Μέγιστες αποδόσεις τύπων ηλιακών κελιών

Οι κυριότεροι τύποι ηλιακών κελιών είναι οι εξής:

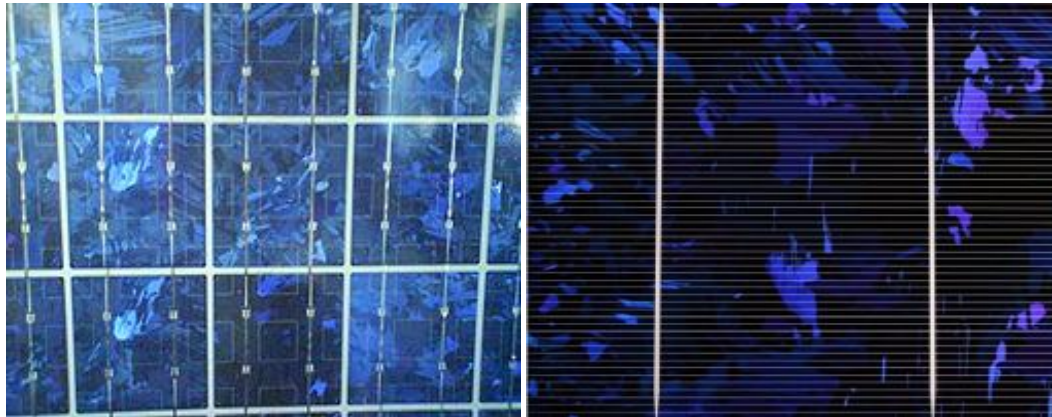
**1. Μονοκρυσταλλικό πυρίτιο (Mono-Si)**



Εικόνα 2: κελιά μονοκρυσταλλικού πυριτίου

Τα κελιά μονοκρυσταλλικού πυριτίου (Εικόνα 2) κατασκευάζονται από έναν μεγάλο κρυσταλλικό δίσκο (wafer) πυριτίου. Το χρώμα τους είναι συνήθως βαθύ μπλε έως μαύρο όταν διαθέτουν αντί-ανακλαστική (AR) επίστρωση ή γκρι (χωρίς αντί-ανακλαστική επίστρωση). Η απόδοση τους στην βιομηχανία κυμαίνεται από 15 - 18% για το πλαίσιο. Είναι μάλιστα το μοναδικό που έχει τις μεταλλικές επαφές στο πίσω μέρος του πάνελ αποκομίζοντας έτσι μεγαλύτερη επιφάνεια αλληλεπίδρασης με την ηλιακή ακτινοβολία. Ένα όμως σημαντικό μειονέκτημα είναι το υψηλό κόστος κατασκευής σε σχέση με τα πολυκρυσταλλικά.

## 2. Πολυκρυσταλλικό πυρίτιο (poly-Si)



**Εικόνα 3:** κελιά πολυκρυσταλλικού πυριτίου

Η μέθοδος παραγωγής τους είναι φθηνότερη από αυτήν των μονοκρυσταλλικών, γι' αυτό η τιμή τους είναι συνήθως χαμηλότερη όπως και η απόδοσή τους. Η απόδοσή τους κυμαίνεται από 13% έως 16%. Το χρώμα τους είναι συνήθως μπλε (με αντί-ανακλαστική επίστρωση)(AR) ή γκρι-ασημί (χωρίς αντί-ανακλαστική επίστρωση). Οπτικά μπορεί κανείς να παρατηρήσει τις επιμέρους μονοκρυσταλλικές περιοχές. Όσο μεγαλύτερες είναι σε έκταση οι μονοκρυσταλλικές περιοχές τόσο μεγαλύτερη είναι και η απόδοση για τα πολυκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά κελιά (Εικόνα 3).

## 3. Τεχνολογίες λεπτού υμενίου (thin-film)

Η τεχνολογία λεπτού υμενίου έχει ως σκοπό την τελειοποίηση μεθόδων κατασκευής ηλιακών κελιών με ημιαγωγούς πάχους μόλις μερικών μικρομέτρων, συνδυάζοντας την όσο καλύτερη δυνατή απόδοση με την χρήση μικρής ποσότητας πυριτίου. Τα κελιά αυτά έχουν μικρότερη απόδοση από τα κελιά κρυσταλλικού πυριτίου (της τάξης του 5-7%) αλλά έχουν αρκετά χαμηλότερο κόστος, ώστε να τα καθιστά ανταγωνιστικά. Συνήθως χαρακτηρίζονται από το έντονο σκούρο χρώμα τους. Κυριότεροι παράγοντες της κατηγορίας αυτής αποτελούν οι εξής:

### 3.α. Κελιά άμορφου πυριτίου (amorphous-Si)



**Εικόνα 4:** Φωτοβολταϊκά πάνελ από άμορφο πυρίτιο

Το άμορφο πυρίτιο είναι η μη-κρυσταλλική μορφή του πυριτίου που μπορεί να τοποθετηθεί σε ένα αγώγιμο υπόστρωμα σε στρώμα πάχους μερικών μικρομέτρων δημιουργώντας ένα κελί τεχνολογίας λεπτού υμενίου. Η διαδικασία τοποθέτησης επιτρέπει στο άμορφο πυρίτιο να έχει λιγότερο από το 1% του πάχους ενός κρυσταλλικού κελιού.

### 3.β Κελιά καδμίου-τελλουρίου (CdTe)

Η κρυσταλλική ένωση καδμίου-τελλουρίου (CdTe) είναι ένα αποτελεσματικό υλικό κατασκευής φωτοβολταϊκών κελιών. Λόγω της αποτελεσματικότητας ένα κελί CdTe χρησιμοποιεί περίπου το 1% του ημιαγώγιμου υλικού σε σχέση με ένα κρυσταλλικό κελί. Μειονέκτημα τους αποτελεί η χρήση του σπάνιου μετάλλου τελλουρίου. Επιπλέον, η χρήση του καδμίου επιβάλλει την αναγκαστική ανακύκλωσή τους όταν δοθεί τέλος στην λειτουργία τους.

### 3.γ. Κελιά χαλκού-Ινδίου / Γαλλίου – Δισεληνιούχου

Σε αυτήν την τεχνολογία, όπου τα κελιά λεπτού υμενίου κατασκευάζονται από έναν συνδυασμό χαλκού-ινδίου-δισεληνιούχου και χαλκού-γαλλίου-δισεληνιούχου (κελιά CIGS) έχουν αναφερθεί αποδόσεις της τάξης του 19,9%, που αποτελεί την υψηλότερη απόδοση για τα κελιά λεπτού υμενίου.

- 4. Κελιά Γαλλίου-Αρσενικούχου (GaAs):** Αποτελούν κελιά υψηλής απόδοσης (έως και 36%), ωστόσο έχουν ιδιαίτερα υψηλό κόστος.

## 1.2 Τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των φωτοβολταϊκών στοιχείων

Το φωτοβολταϊκό στοιχείο όπως αναφερθήκαμε στην παράγραφο 1.1.2 είναι μια ειδικά σχεδιασμένη ένωση pn. Ένα μη φωτιζόμενο φωτοβολταϊκό στοιχείο περιγράφεται με ακρίβεια από τη χαρακτηριστική εξίσωση της διόδου. Το (Σχήμα 1.2.1) δείχνει την χαρακτηριστική τάσης-ρεύματος (καμπύλη I-V) ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου. Εδώ αξιοσημείωτο είναι ότι το ρεύμα και η τάση του στοιχείου εξαρτώνται από το επίπεδο της ακτινοβολίας. Για ιδανική περίπτωση, η εξίσωση που συνδέει την τάση με το ρεύμα είναι η εξής:

$$I = I_i - I_o \left( e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right) \quad (1.1)$$

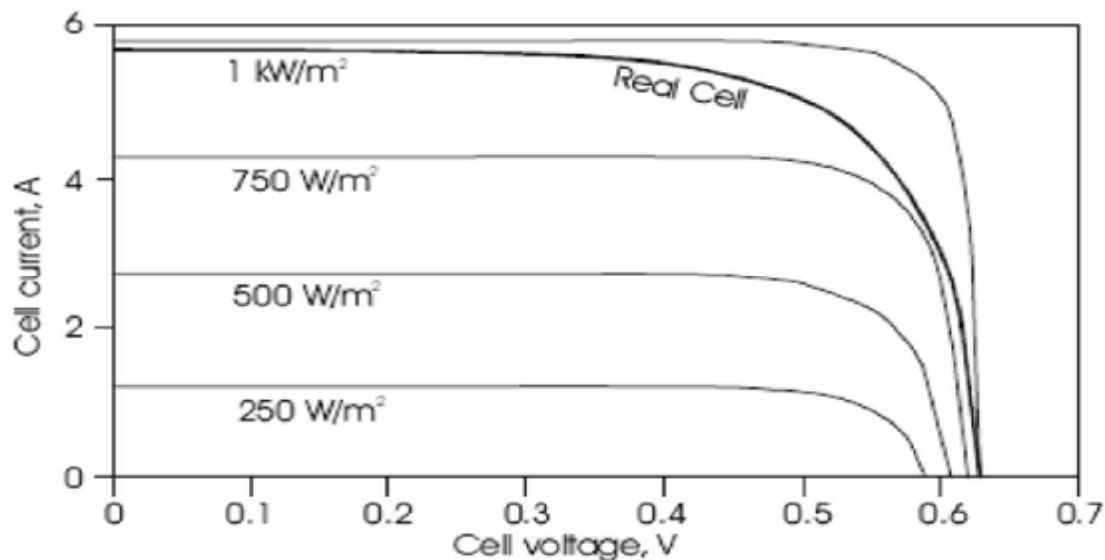
Όπου  $I_i$  είναι η συνιστώσα του ρεύματος στο στοιχείο λόγω των φωτονίων,

$$q = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$$

$$k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$$

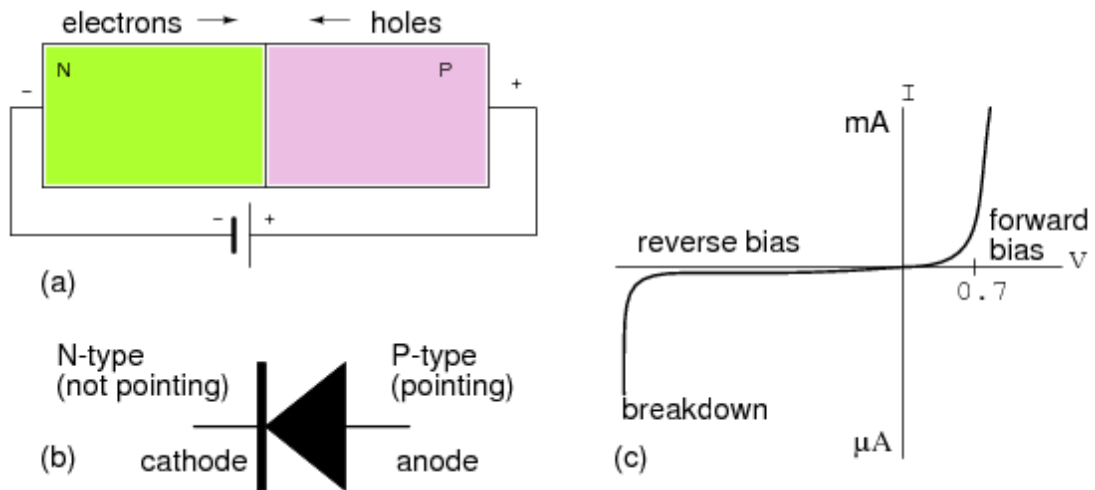
και  $T$  είναι η θερμοκρασία του στοιχείου σε βαθμούς K.

Η εξίσωση (1.1) μας δείχνει τη συμπεριφορά ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου.



Σχήμα 1.2.1: Καμπύλες I-V για διάφορες τιμές της ακτινοβολίας (W/m<sup>2</sup>)

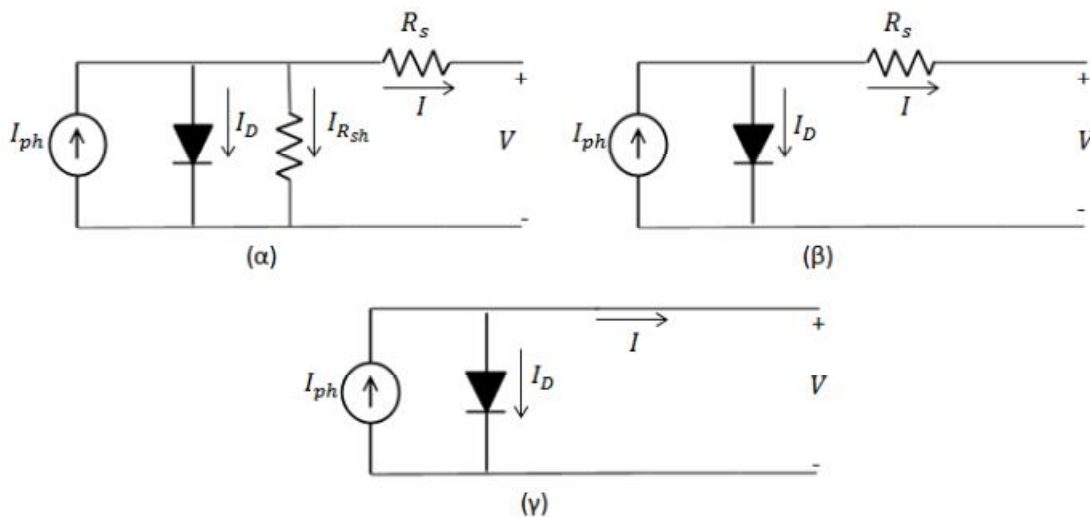
Στο (Σχήμα 1.2.2) φαίνεται η χαρακτηριστική καμπύλη μιας διόδου πυριτίου όπου έχει ίδιες ηλεκτρικές ιδιότητες με το φωτοβολταϊκό στοιχείο. Όταν η διόδος συνδέεται σε ένα κύκλωμα, όπου το δυναμικό είναι θετικό στην άνοδο και αρνητικό στην κάθοδο της διόδου, τότε αυτή είναι ορθά πολωμένη και η χαρακτηριστική της βρίσκεται στο πρώτο τεταρτημόριο. Αν η διόδος είναι ανάστροφα πολωμένη δεν μπορεί να περάσει ρεύμα. Η χαρακτηριστική καμπύλη της τότε βρίσκεται στο τρίτο τεταρτημόριο.



**Σχήμα 1.2.2:** Χαρακτηριστική καμπύλη τάσης-ρεύματος διόδου πυριτίου

### 1.3 Ισοδύναμο κύκλωμα φωτοβολταϊκών στοιχείων

Η μελέτη ενός φ/β στοιχείου μπορεί να γίνει μέσω του ισοδύναμου ηλεκτρικού κυκλώματος. Οι δυνατές τοπολογίες φαίνονται στα παρακάτω (Σχήματα 1.3.1 (α), 1.3.1 (β), 1.3.1 (γ)).



**Σχήμα 1.3.1** Ηλεκτρικά ισοδύναμα φωτοβολταϊκού στοιχείου

Στην περίπτωση που το στοιχείο δεχτεί ηλιακή ακτινοβολία, η ενέργεια από τα φωτόνια δημιουργεί φορείς φορτίου. Επομένως το κύκλωμα αποτελείται, από την δίοδο και μια πηγή ισχύος. Η πηγή ισχύος παράγει ένα ρεύμα, το φωτόρευμα  $I_{ph}$ . Αυτό το ρεύμα εξαρτάται από την ακτινοβολία,  $G$  ( $W/m^2$ ) και τη θερμοκρασία στα φωτοβολταϊκά στοιχεία.

Η δομή του ισοδύναμου κυκλώματος γενικά ενσωματώνει:

- μια πηγή φωτορεύματος  $I_{ph}$
- μία δίοδο  $D$
- μία παράλληλη αντίσταση  $R_{sh}$  (κατά κανόνα πολύ μεγάλης τιμής  $>10\Omega$ ) που εκφράζει το ρεύμα διαρροής ως προς τη γη.
- μία αντίσταση σε σειρά  $R_s$  (της τάξης μερικών  $m\Omega$ ) που εκφράζει την εσωτερική αντίσταση του φωτοβολταϊκού στοιχείου.

Η τοπολογία του (Σχήματος 1.3.1 (α) ) παρέχει τη μεγαλύτερη ακρίβεια από τις υπόλοιπες. Μεγαλύτερης αποδοχής για μελέτες MPPT (Maximum Power Point Tracking) λαμβάνει η τοπολογία του (Σχήματος 1.3.1 (β) ), καθώς οι παράμετροί της διασφαλίζουν ικανοποιητική ακρίβεια και μεγάλη ευελιξία στη μοντελοποίηση των φ/β κυττάρων και κατ' επέκταση των φ/β πλαισίων.

Εφαρμόζοντας τον νόμο Kirchhoff στην τοπολογία του (Σχήματος 1.3.1 (α) ), το ρεύμα  $I$  στην έξοδο του κυκλώματος θα δίνεται από την εξίσωση:  $I=I_{ph} - I_D - I_{R_{sh}}$ , όπου αντικαθιστώντας το ρεύμα της διόδου με την εξίσωση του Shockley :

$$I_D = I_s \left( e^{\frac{q(V+IR_s)}{kTA}} \right) \quad (1.2)$$

προκύπτει η σχέση που αποτελεί τη σχέση ρεύματος-τάσεως του φ/β στοιχείου:

$$I = I_{ph} - I_s \left( e^{\frac{q(V+IR_s)}{kTA}} - 1 \right) - \frac{(V+IR_s)}{R_{sh}} \quad (1.3)$$

Όπου:

- $I$  : το ρεύμα στην έξοδο του κυκλώματος
- $I_{ph}$  : το φωτόρευμα
- $I_s$  : το ανάστροφο ρεύμα κόρου της διόδου
- $V$ : η τάση στην έξοδο του κυττάρου
- $q$ :  $1.6 \times 10^{19}$  °C το φορτίο του ηλεκτρονίου
- $k$  :  $1.38 \times 10^{-23}$  j/k η σταθερά του Boltzmann
- $V+IR_s$ : η τάση της διόδου επαφής μέσα στο κύκλωμα
- $T$ : η θερμοκρασία λειτουργίας του κυκλώματος σε Kelvin
- $A$ : ο συντελεστής ποιότητας της διόδου με τιμές μεταξύ 1 και 2 (1,2 για m-Si, 1,3 για p-Si). Οφείλεται σε φαινόμενα επανασύνδεσης που συμβαίνουν στην περιοχή της επαφής. Για φ/β στοιχεία από άμορφο πυρίτιο ο συντελεστής παίρνει τιμές μέχρι και το 5.
- $R_s$ : η σε σειρά αντίσταση του κυττάρου. Παριστάνει σε συγκεντρωμένη μορφή όλα τα κατανεμημένα στοιχεία αντίστασης κατά την ροή των φορέων στον κυρίως ημιαγωγό,

την επιφανειακή ροή στον ημιαγωγό που βρίσκεται στην πλευρά που προσπίπτει το φως και αποτελείται από πολύ λεπτό στρώμα, την ενδοεπιφάνεια μεταξύ ημιαγωγού-ωμικής επαφής και την ωμική επαφή.

- Rsh: η παράλληλη αντίσταση του κυκλώματος. Οφείλεται σε διαρροές των φορέων που συμβαίνουν είτε στην επαφή pn, είτε στην εξωτερική παράπλευρη επιφάνεια του στοιχείου.

Στο (Σχήμα 1.3.1 (β) ): παρουσιάζεται μια περισσότερο απλοποιημένη τοπολογία του φ/β στοιχείου. Σε αυτήν την περίπτωση η αντίσταση Rsh έχει θεωρηθεί άπειρη και επομένως η έκφραση του ρεύματος θα είναι:

$$I = I_{ph} - I_s \left( e^{\frac{q(V+IR_s)}{kTA}} - 1 \right) \quad (1.4)$$

Στο (Σχήμα 1.3.1 (γ) ): παρουσιάζεται η τοπολογία του ιδανικού στοιχείου, δηλαδή ενός στοιχείου που δεν παρουσιάζει διαρροή ως προς τη γη Rsh άπειρη και αντίσταση σειράς  $R_s = 0$  και επομένως η έκφραση του ρεύματος θα είναι:

$$I = I_{ph} - I_s \left( e^{\frac{qV}{kTA}} - 1 \right) \quad (1.5)$$

Το φωτόρευμα μπορεί να θεωρηθεί με μεγάλη ασφάλεια ότι είναι ανάλογο της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας  $I_{ph|G} = \frac{G}{G_0} I_{ph|G_0}$  όπου  $G_0$  είναι η τιμή αναφοράς της έντασης ηλιακής ακτινοβολίας, η οποία είναι ίση με  $1000 \text{ W/m}^2$  και  $G$  η δοθείσα ένταση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας σε  $\text{W/m}^2$ . Ωστόσο, έχει επικρατήσει το φωτόρευμα να υπολογίζεται από την πιο γενικευμένη σχέση που λαμβάνει υπόψη τόσο την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας όσο και τη θερμοκρασία λειτουργίας του φ/β στοιχείου:

$$I_{ph|G} = [I_{sc} + K_i (T - T_{ref})] G \quad (1.6)$$

Όπου:

- $I_{sc}$  : το ρεύμα βραχυκύκλωσης του στοιχείου σε πρότυπες συνθήκες STC
- $K_i$ : ο επί τις εκατό (%) θερμοκρασιακός συντελεστής ρεύματος
- $T_{ref}$  : η θερμοκρασία αναφοράς λειτουργίας του στοιχείου σε βαθμούς Kelvin

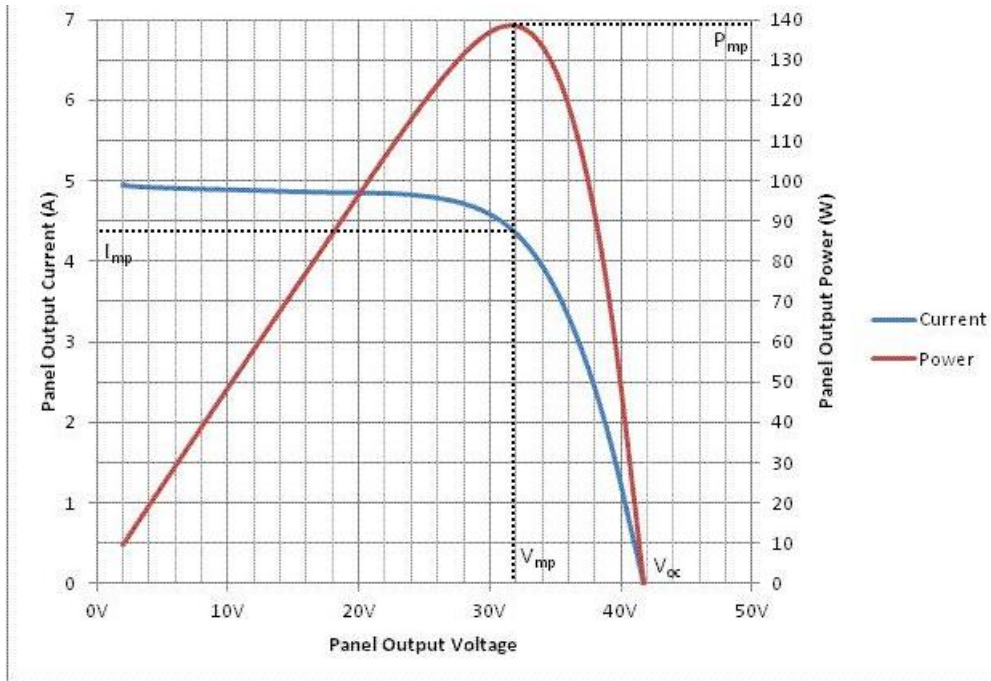
Όλοι οι κατασκευαστές φωτοβολταϊκών μονάδων κάνουν δοκιμές στα προϊόντα τους υπό πρότυπες συνθήκες δοκιμής (STC). Οι τρεις κύριοι παράγοντες που ελέγχονται σε πρότυπες συνθήκες STC είναι η θερμοκρασία των κελιών  $25^\circ\text{C}$  ή  $75^\circ\text{C}$  σε πλήρη ήλιο, η ηλιακή ακτινοβολία  $1000 \text{ W/m}^2$  και η μάζα του αέρα  $AM=1,5$ .

#### 1.4 Χαρακτηριστική Καμπύλη I-V και P-V

Η εξίσωση  $I = I_{ph} - I_s \left( e^{\frac{q(V+IR_s)}{kTA}} - 1 \right) - \frac{(V+IR_s)}{R_{sh}}$  αποτελεί το μοντέλο του φ/β στοιχείου της τοπολογίας του (Σχήματος 1.3.1 (α) ).



Η γραφική παράσταση μεταξύ ρεύματος-τάσεως στην έξοδο ενός φ/β στοιχείου καλείται **I-V χαρακτηριστική**, ενώ αυτή μεταξύ τάσης και ισχύος καλείται **P-V χαρακτηριστική**. Στο (Σχήμα 1.4.1) φαίνονται στο ίδιο διάγραμμα, κάτω από σταθερή θερμοκρασία και ηλιακή ακτινοβολία για ένα φ/β στοιχείο χαμηλής ισχύος, μία αντιπροσωπευτική καμπύλη I-V και μία P-V η οποία ουσιαστικά προκύπτει από την πρώτη, αφού για ένα φ/β στοιχείο ισχύει  $P=VI$



**Σχήμα 1.4.1** Καμπύλη I-V,P-V για χαμηλής ισχύος φ/β στοιχείο

Η τάση και το ρεύμα μέγιστης ισχύος,  $V_{mp}$ ,  $I_{mp}$  αντιστοιχούν στη μέγιστη παραγόμενη ισχύ  $P_{mp}$  από τα φωτοβολταϊκά στοιχεία. Το σημείο που ορίζεται από αυτά τα μεγέθη ονομάζεται Σημείο Μέγιστης Ισχύος ΣΜΙ-MPP. Για την αποδοτικότερη εκμετάλλευση των δυνατοτήτων του φωτοβολταϊκού στοιχείου θα πρέπει να προσαρμόσουμε την τιμή του φορτίου που επιθυμούμε να συνδέσουμε στα άκρα του φωτοβολταϊκού στοιχείου ώστε η τάση και το ρεύμα σε αυτό να αντιστοιχούν στο ΣΜΙ. Το παραλληλόγραμμο που δημιουργείται στην καμπύλη I-V με πλευρές  $I_{mp}$  και  $V_{mp}$  έχει εμβαδό ίσο με την μέγιστη παραγόμενη ισχύ από το φωτοβολταϊκό στοιχείο. Το πηλίκο του εμβαδού αυτού προς το εμβαδόν ενός άλλου παραλληλογράμμου, με πλευρές  $I_{sc}$  που βρίσκεται στην αρχή της μπλε γραμμής του ρεύματος και  $V_{oc}$  περιγράφει την ιδανική συμπεριφορά του φωτοβολταϊκού στοιχείου ως πηγή σταθερού ρεύματος και λέγεται παράγοντας πλήρωσης FF (Fill Factor):

$$FF = \frac{I_m \times V_m}{I_{sc} \times V_{oc}} \quad (1.7)$$

Ο παράγοντας πλήρωσης λαμβάνει τιμές ανάμεσα στο 0 και το 1. Οι τιμές του παράγοντα αυτού όσο πιο κοντά είναι στην μονάδα τόσο περισσότερο η λειτουργία του φωτοβολταϊκού στοιχείου πλησιάζει στην ιδανική συμπεριφορά της πηγής σταθερού ρεύματος. Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία στην περιοχή τάσεων 0- $V_{oc}$  τιμές από 0,7 έως 0,9 μπορούν να χαρακτηριστούν ότι έχουν τυπικά αποδεκτή ενεργειακή απόδοση.

## 1.5 Ανίχνευση του σημείου μέγιστης παραγόμενης ισχύος του φωτοβολταϊκού στοιχείου -M.P.P.T

Από την P-V καμπύλη διαπιστώνεται ότι ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο και κατ' επέκταση μια φωτοβολταϊκή συστοιχία έχει μόνο ένα σημείο στο οποίο η ισχύς που εξάγεται στο κύκλωμα είναι μέγιστη. Το σημείο αυτό της I-V χαρακτηριστικής, ονομάζεται **Σημείο Μέγιστης Ισχύος (Maximum Power Point, MPP)** και βρίσκεται στην γωνία που σχηματίζεται από μια συγκεκριμένη τιμή ρεύματος  $I_{mp}$  και τάσης  $V_{mp}$  και εξαρτάται από:

- την προσπίπτουσα ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας
- τη θερμοκρασία λειτουργίας του φ/β στοιχείου
- το πόσο καθαρή είναι η γυάλινη επικάλυψη των φ/β πλαισίων, τις μεταβολές στα χαρακτηριστικά λειτουργίας λόγω γήρανσης και τις ελαττωματικές κατασκευαστικά δραστηριότητες στα φ/β πλαίσια.

Για την ανίχνευση του σημείου μέγιστης ισχύος (MPP) καθώς και για την προσαρμογή του σημείου λειτουργίας σε αυτό, απαιτείται η χρήση μετατροπέων ισχύος (DC/DC μετατροπέας ή DC/AC αντιστροφέας) μαζί με το κύκλωμα ελέγχου τους στο οποίο περιλαμβάνεται, εκτός των πιθανών άλλων ελεγκτών, και ένας **MPPT ελεγκτής** ο οποίος αναλαμβάνει τον έλεγχο ανίχνευσης του σημείου μέγιστης ισχύος (**Maximum Power Point Tracking**).

Σε περίπτωση που το φορτίο είναι dc τότε χρειάζεται η παρεμβολή ενός DC/DC μετατροπέα. Σε περιπτώσεις διασύνδεσης στο δίκτυο, για την εξαγωγή της μέγιστης ισχύος από τη φ/β γεννήτρια ελέγχεται ο DC/DC μετατροπέας, ενώ για τον ίδιο λόγο ελέγχεται ο DC/AC αντιστροφέας σε περιπτώσεις που δεν υπάρχει ο DC/DC μετατροπέας. Στον MPPT ελεγκτή πραγματοποιείται αλγόριθμος που εντοπίζει το σημείο μέγιστης ισχύος του φ/β στοιχείου και πιο συγκεκριμένα την τάση που αντιστοιχεί σε αυτό.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΗΜΙΑΓΩΓΟΙ ΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΙΣΧΥΟΣ

---

## 2.1 Εισαγωγή στα ηλεκτρονικά ισχύος

Τα ηλεκτρονικά ισχύος περιλαμβάνονται σε τεράστια γκάμα εφαρμογών τις οποίες κάποιος θα συναντήσει σε ηλεκτρονικά κυκλώματα και κυρίως σε ηλεκτρονικές διατάξεις ισχύος. Τα ηλεκτρονικά ισχύος διαχειρίζονται, ελέγχουν και επεξεργάζονται την ισχύ από μια πηγή σε ένα φορτίο. Αποτελούνται κυρίως από ελεγχόμενα ημιαγωγικά στοιχεία τα οποία μπορούν να διαχειριστούν μεγάλα ποσά ενέργειας και κατ' επέκταση μεγάλες τάσεις και ρεύματα. Με την γρήγορη εξέλιξη της τεχνολογίας τα ημιαγωγικά στοιχεία καταλαμβάνουν ολοένα και περισσότερο τόπο σε εφαρμογές και αυξάνουν την αξιοπιστία και την αποτελεσματικότητα τους, επίσης μειώνονται οι απώλειες ισχύος όπου αυτό συνεπάγεται με την αύξηση της αποδοτικότητας τους. Οι απώλειες ισχύος είναι ένας σημαντικός παράγοντας καθώς η παραγωγή ενέργειας είναι ακόμα δύσκολη και η χαμένη ενέργεια μετατρέπεται σε θερμότητα κάτι που επηρεάζει σημαντικά τα ευαίσθητα στοιχεία του κυκλώματος. Ο όγκος και το βάρος των συστημάτων με ηλεκτρονικά ισχύος είναι σημαντικά μειωμένος σε σχέση με την παλαιότερη τεχνολογία. Οι εφαρμογές που χρησιμοποιούν ηλεκτρονικά ισχύος είναι κυρίως στην βιομηχανία με τα συστήματα ελέγχου των κινητήρων, καθώς και στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, επίσης την συναντάμε και σε τροφοδοτικά υπολογιστών και σε συσκευές όπου τις χρησιμοποιούμε καθημερινά. Όμως για να γίνει εφικτή η κατασκευή και η χρήση των εφαρμογών αυτών έπρεπε να υπάρξουν σημαντικά εξελικτικά βήματα στα ηλεκτρονικά ισχύος και κατ' επέκτασιν στα ημιαγωγικά στοιχεία.

## 2.2 Εξέλιξη των ημιαγωγών ισχύος

Το 1882 έγιναν μελέτες με αντικείμενο το φωτεινό τόξο υδράργυρου Hg και την ιδέα να χρησιμοποιηθεί σε ανορθωτικές διατάξεις. Το 1902 κατασκευάστηκε ο πρώτος ανορθωτής Hg για τεχνικές εφαρμογές (Cooper-Hewitt Electric Co). Το 1948, κατασκευάστηκε το πρώτο τρανζίστορ από τους Bardeen, Brattain και Shockley στο ερευνητικό κέντρο "Bell Laboratories" στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής. Με την εφεύρεση του τρανζίστορ ακολούθησε αυτή του θυρίστορ, κατά το 1958 από την εταιρεία General Electric Company στις Η.Π.Α. Η εφεύρεση αυτή αφορά την ενεργειακή τεχνολογία. Δημιουργήθηκαν ημιαγωγικά στοιχεία για μεγάλα ρεύματα και μεγάλες τάσεις, σε αντίθεση με το τρανζίστορ που λειτουργεί κατά κανόνα υπό μικρές τάσεις και ρεύματα και βρήκε εφαρμογές στην επεξεργασία της πληροφορίας.

Το θυρίστορ είναι ελεγχόμενο στοιχείο όπως και το τρανζίστορ με μειονέκτημα ότι μεταβαίνει σε κατάσταση αγωγής με παλμό «ένανσης» όταν μεταξύ ανόδου και καθόδου επικρατεί θετική τάση, αλλά δεν «σβήνει», δηλ. δεν διακόπτεται η ροή του ρεύματος διακόπτοντας την παλμοδότηση της πύλης (Gate), παρά μόνον όταν αντιστραφεί η τάση

μεταξύ ανόδου και καθόδου ή όταν το ρεύμα μειωθεί κάτω από μία χαρακτηριστική τιμή. Το ρεύμα αυτό ονομάζεται ρεύμα συγκράτησης.

Επόμενο βήμα ήταν η εύρεση ενός στοιχείου με παρόμοια χαρακτηριστικά, με την δυνατότητα όμως σβέσης μέσω κατάλληλου παλμού. Αυτή λοιπόν η ανάγκη οδήγησε στην εφεύρεση του στοιχείου GTO (Gate Turn Off), το οποίο με έναν κατάλληλο παλμό σβέσεως μπορεί να τεθεί σε μη αγώγιμη κατάσταση. Μειονέκτημα του GTO είναι ότι ο παλμός σβέσης πρέπει να είναι πολύ μεγαλύτερος από τον παλμό έναυσης. Αυτή η διαφορά στον τρόπο σβέσεως προσδίδει σημαντικές δυνατότητες σε ό,τι αφορά τον έλεγχο της διακοπτικής λειτουργίας και συνεπώς της ροής ισχύος διαμέσου του ηλεκτρονικού μετατροπέα ισχύος. Το 1970 κατασκευάστηκε το διπολικό τρανζίστορ ισχύος (Bipolar Transistor), αρχικά για τάσεις και ρεύματα της τάξεως των 500V και 20A. Την ίδια χρονική περίοδο δημιουργήθηκε το τρανζίστορ ισχύος MOSFET, το οποίο διακρίνεται για την υψηλή διακοπτική συχνότητα λειτουργίας (100kHz).

Το 1980 δημιουργήθηκε το τρανζίστορ IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor), ένα ημιαγωγικό στοιχείο που συνδυάζει τη βασική ιδιότητα του τρανζίστορ και τα βασικά χαρακτηριστικά του θυρίστορ. Δηλαδή με την εφαρμογή μιας μικρής συνεχούς τάσεως στην πύλη το στοιχείο καθίσταται αγώγιμο, αλλά μόλις μηδενισθεί αυτή η τάση διακόπτεται η ροή του κύριου ρεύματος. Αυτή η διακοπτική διαδικασία μπορεί να επαναληφθεί με συχνότητα της τάξεως 30kHz έως 50kHz (ανάλογα με τον τύπο του στοιχείου), χωρίς να αποκλείονται υψηλότερες συχνότητες λαμβάνοντας όμως, υπόψη την αύξηση των διακοπτικών απωλειών. Τα IGBT μπορούν να άγουν πολύ υψηλές τάσεις και ρεύματα όπως και τα θυρίστορ. Επίσης την ίδια περίοδο δημιουργήθηκε το ημιαγωγικό στοιχείο ισχύος MOS- Controlled Thyristor (MCT).

Το 1990 δημιουργήθηκε το ημιαγωγικό στοιχείο IGCT (Insulated Gate Commutated Thyristor), το οποίο μπορεί να θεωρηθεί ως μία βελτιωμένη έκδοση του θυρίστορ GTO, με καλύτερη διακοπτική συμπεριφορά. Το στοιχείο αυτό χρησιμοποιείται σε ηλεκτρονικούς μετατροπείς ισχύος πολύ μεγάλης ισχύος, της τάξεως των [ MW]. Λόγω των υψηλών τιμών ρεύματος και τάσεως και παρουσιάζει καλύτερα δυναμικά χαρακτηριστικά σε σχέση με το θυρίστορ GTO (πολύ μικρότερο χρόνο διακοπής του ρεύματος). Το 1998 προέκυψε ένα νέο ημιαγωγικό στοιχείο ισχύος με την επωνυμία ETO (Emitter Turn-Off Thyristor). Ο οίκος ABB, το 1999, εισήγαγε στην αγορά το ημιαγωγικό στοιχείο ισχύος BCT (BiDirectional Control Thyristor), το οποίο είναι ένα εξελιγμένο θυρίστορ ελέγχου φάσης και αποτελείται από δύο αντιπαράλληλα θυρίστορ ενσωματωμένα στην ίδια πλάκα πυριτίου και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τάσεις μέχρι 6,5kV και για ρεύματα μέχρι 3kA.

Στην κατηγορία των ημιαγωγικών στοιχείων ισχύος POWER MOSFET ο Γερμανικός κατασκευαστικός οίκος INFINEON κατασκεύασε το 1998 το βελτιωμένο στοιχείο COOLMOS, το οποίο έχει μειωμένη αντίσταση αγωγής και έτσι προκύπτει η μείωση των απωλειών.

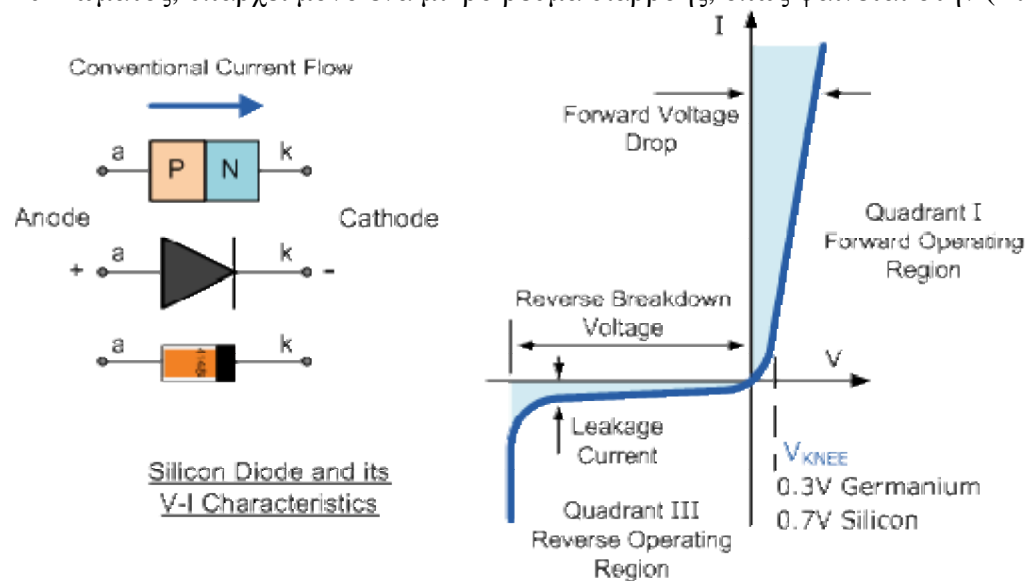
### 2.3 Ταξινόμηση των ημιαγωγικών στοιχείων

Η συνεχής ανάπτυξη των ημιαγωγικών στοιχείων και διατάξεων ισχύος οδηγεί στην δημιουργία βελτιωμένων μετατροπών ισχύος. Η βελτίωση αυτή αφορά την αύξηση του βαθμού απόδοσης και του συντελεστή ισχύος, τη μείωση του μεγέθους και της αποτελεσματικότερης ψύξης. Ο συντελεστής ισχύος βελτιώνεται εάν αυξηθεί η διακοπτική συχνότητα λειτουργίας των στοιχείων του μετατροπέα, διότι μειώνεται το περιεχόμενο των ανώτερων αρμονικών. Έτσι προκύπτει ποιοτικό όφελος για το συνολικό ενεργειακό σύστημα, που έχει ενσωματωμένους τους ηλεκτρονικούς μετατροπείς ισχύος.

Τα ημιαγωγικά στοιχεία λοιπόν είναι τα ηλεκτρονικά στοιχεία τα οποία χρησιμοποιούνται σαν διακόπτες στην ιδανική τους μορφή.

Με βάση τον έλεγχο που μπορούμε να πραγματοποιήσουμε πάνω τους, τα ημιαγωγικά στοιχεία μπορούν να ταξινομηθούν ως εξής:

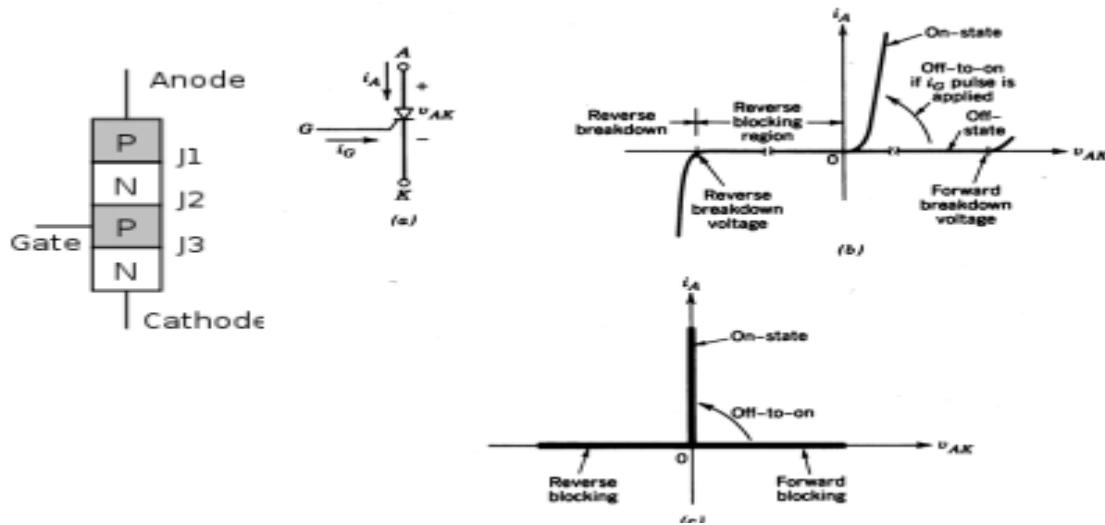
**Δίοδος:** Οι δυο καταστάσεις που προκύπτουν είναι ανοιχτή και κλειστή και αυτό ελέγχεται από το κύκλωμα ισχύος. Όταν η δίοδος είναι ορθά πολωμένη άγει, έχοντας μια μικρή πτώση τάσης στα άκρα της (0.7 [V]). Όταν είναι ανάστροφα πολωμένη και μέχρι η τάση στα άκρα της να γίνει ίση με την ανάστροφη τάση διάσπασης είναι σε κατάσταση ανοιχτού κυκλώματος, υπάρχει μόνο ένα μικρό ρεύμα διαρροής, όπως φαίνεται στην (Εικόνα 2.1.)



**Εικόνα 5:** Η δίοδος και η πραγματική χαρακτηριστική i-v

**Thyristors:** Κλείνουν όταν εφαρμόσουμε ένα μικρό θετικό παλμό ρεύματος στην πύλη του Thyristor εφόσον είναι ορθά πολωμένο, αλλά το άνοιγμα τους ελέγχεται από το κύριο ρεύμα που ρέει από την Άνοδο προς την Κάθοδο. Έπειτα παραμένει κλειστό χωρίς να μπορούμε να έχουμε τον έλεγχο και μπορούμε να σταματήσουμε να δίνουμε ρεύμα στην πύλη του. Μπορεί να ανοίξει μόνο όταν το ρεύμα στην άνοδο του τείνει να γίνει αρνητικό κάτι το οποίο επηρεάζεται μόνο από το υπόλοιπο κύκλωμα. Όταν ανοίξει, μπορούμε πάλι να έχουμε τον

έλεγχο για το πότε να το κλείσουμε εφόσον πάντα έρθει σε κατάσταση ορθής πόλωσης (Εικόνα 6).



Εικόνα 6: Thyristor: σύμβολο, χαρακτηριστικές  $i-v$ , ιδανικές χαρακτηριστικές

**Ελεγχόμενοι διακόπτες:** Κλείνουν και ανοίγουν από σήματα ελέγχου. Ο έλεγχος του διακόπτη εξαρτάται από εμάς και όχι από το κύκλωμα.

## 2.4 Ελεγχόμενα διακοπτικά στοιχεία

Αρκετά ημιαγωγικά στοιχεία όπως τα τρανζίστορ, διπολικά τρανζίστορ επαφής (BJT), τα τρανζίστορ MOSFET, τα τρανζίστορ με έλεγχο σβέσης από την πύλη (GTO Thyristor), και τα διπολικά τρανζίστορ με μονωμένη πύλη (IGBT) συμπεριλαμβάνονται στην κατηγορία αυτή.

Τα διακοπτικά στοιχεία αυτά, σε αντίθεση με τις διόδους και τα θυρίστορ, μπορούμε να ελέγχουμε εμείς μέσω της πύλης ποτέ θα ανοίγουν και πότε θα κλείνουν. Τα στοιχεία αυτά μπορούν όταν είναι ανοιχτά να αποκόπτουν αυθαίρετα ορθές και ανάστροφες τάσεις, να μην διαρρέονται από ρεύμα και όταν είναι κλειστά να άγουν υψηλά ρεύματα με μηδενική πτώση τάσης. Επίσης η απόκριση τους πρέπει να είναι γρήγορη, δηλαδή να μεταβαίνει ακαριαία από την κατάσταση αγωγιμότητας στην κατάσταση αποκοπής και ο έλεγχος μέσω της πύλης να απαιτεί την ελάχιστη ενέργεια.

## 2.5 Απώλειες στα ελεγχόμενα διακοπτικά στοιχεία

Οι απώλειες στα ελεγχόμενα διακοπτικά στοιχεία δεν μπορούν να τεθούν προς αποφυγήν. Σε έναν ελεγχόμενο διακόπτη με DC διέγερση παρουσιάζονται δυο ειδών απώλειες:

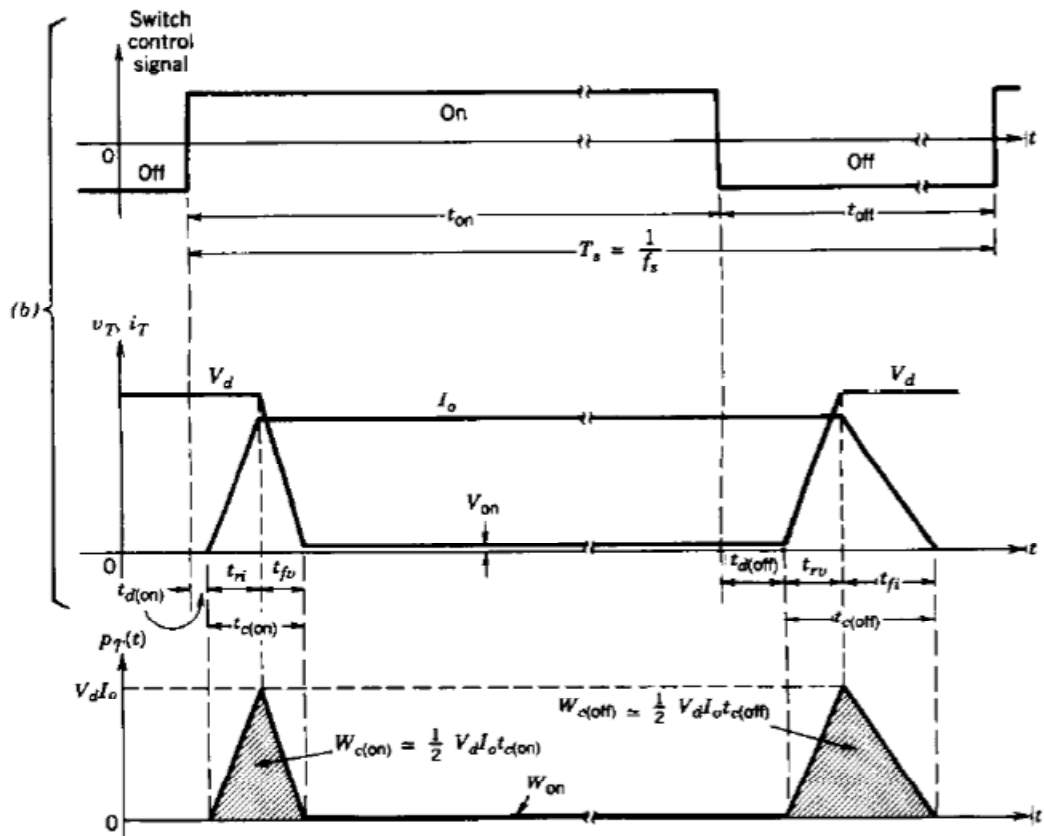
- Απώλειες μετάβασης (Switching losses)
- Απώλειες αγωγής (Conducting losses)

Στον γενικό τύπο συμπεριλαμβάνονται τα δυο είδη απωλειών στο πεδίο του χρόνου:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T v(t) \times i(t) dt \quad (1.8)$$

όπου:

- P: είναι οι απώλειες του διακόπτη.
- T: είναι η περίοδος παλμοδότησης.
- v(t): είναι η τάση στα άκρα του διακόπτη.
- i(t): είναι το ρεύμα που διαρρέει τον διακόπτη.



Σχήμα 2.5.1: Οι απώλειες των διακοπών με DC παλμούς

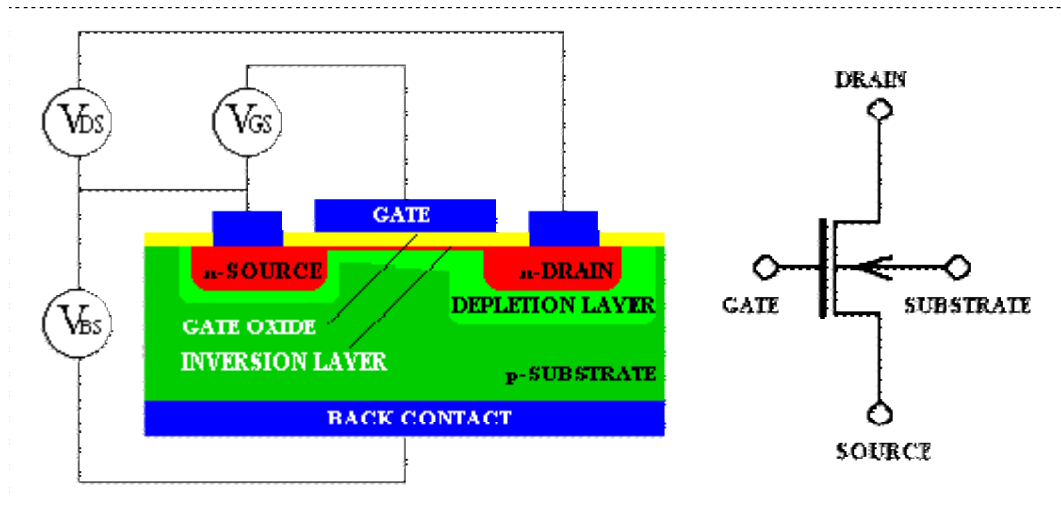
Στο (Σχήμα 2.5.1) ο διακόπτης μεταβαίνει από την ανοιχτή κατάσταση στην κλειστή κατάσταση και απαιτείται κάποιο χρονικό διάστημα  $t_{on}$  που είναι το διάστημα όπου ο ελεγχόμενος διακόπτης αρχίζει να άγει ρεύμα σταδιακά μέχρι να φτάσει στο τελικό ρεύμα. Επίσης παρατηρούμε και την πτώση τάσης στα άκρα του στοιχείου όταν το κύκλωμα μας διαρρέεται από ρεύμα. Το αντίστοιχο συμβαίνει και όταν ο διακόπτης μεταβαίνει από την κλειστή κατάσταση στην ανοιχτή, όπου απαιτείται και εκεί κάποιος χρόνος  $t_{off}$ . Κατά την διάρκεια της κλειστής κατάστασης, όπου διαρρέεται από ρεύμα, υπάρχει και μια μικρή εσωτερική αντίσταση όπου και αυτή καταναλώνει κάποια ενέργεια.

Οι απώλειες σε εγκαταστάσεις όπου απαιτούν μεγάλα ποσά ενέργειας είναι πρόβλημα διότι η απόδοση μειώνεται και η ενέργεια που χάνεται μετατρέπεται σε θερμότητα και θα πρέπει να διαφύγει προς στο περιβάλλον το συντομότερο δυνατόν διότι υπάρχει κίνδυνος να καταστραφούν οι διακόπτες και το υπόλοιπο σύστημα.

## 2.6 MOSFET και IGBT

Τα MOSFET και τα IGBT λειτουργούν κυρίως σε μεγάλες συχνότητες. Μπορούν και ανοιγοκλείνουν πολύ γρήγορα και οι απώλειες μετάβασης (switching losses) είναι μικρότερες από τα υπόλοιπα ελεγχόμενα διακοπτικά στοιχεία. Όμως μειονέκτημα τους αποτελεί ότι δεν μπορούν να διαχειριστούν μεγάλα ποσά ενέργειας, μπορεί όμως να διορθωθεί τοποθετώντας παράλληλα όσους διακόπτες χρειάζεται η υλοποίηση ενός συστήματος.

Τα Metal-Oxide-Semiconductor-Field-Effect-Transistor (MOSFET) είναι διατάξεις που ελέγχονται από την τάση, δεν απαιτούν μεγάλα ρεύματα οδήγησης και έχουν μικρό χρόνο έναυσης και σβέσης. Στο (Εικόνα 7) παρουσιάζεται η δομή ενός MOSFET.



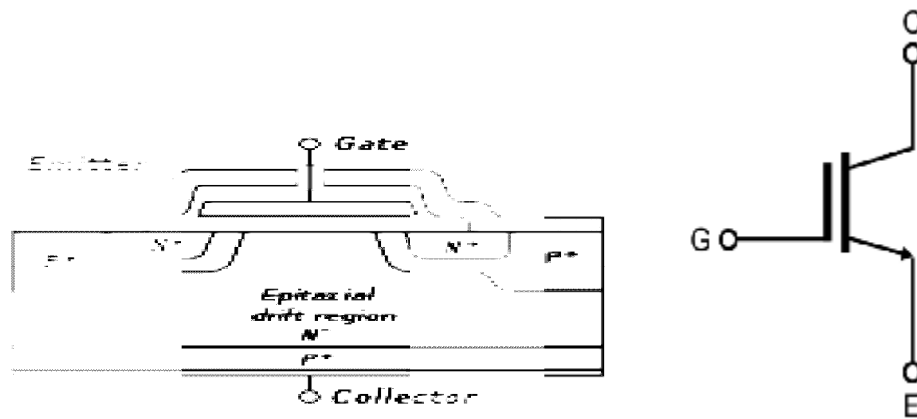
Εικόνα 7: Η δομή ενός MOSFET

Τα MOSFET απαιτούν τη συνεχή εφαρμογή μιας τάσης κατάλληλου μεγέθους μεταξύ της πύλης (gate) και της πηγής (source) για να άγουν. Από την πύλη δεν περνά ρεύμα, παρά μόνο κατά τις μεταβάσεις σβέσης και έναυσης, όταν η χωρητικότητα της πύλης φορτίζεται ή εκφορτίζεται. Οι χρόνοι μετάβασης είναι πολύ μικροί, από μερικές δεκάδες έως μερικές εκατοντάδες nsec, ανάλογα με το είδος του στοιχείου.

Χαρακτηριστικά γνωρίσματα του MOSFET είναι: α) οι πολύ μικρές φυσικές διαστάσεις του. Χρειάζεται περίπου το 20-30% της επιφάνειας, που απαιτείται για ένα BJT. β) η χαμηλή κατανάλωση ισχύος. γ) η μεγάλη αντίσταση εισόδου της τάξης των  $10^{14} \Omega$ . δ) η δυνατότητα κατασκευής με διεργασία επίπεδης διαστρωμάτωσης υλικών (planar process).

Τα Insulated-Gate-Bipolar-Transistor (IGBT) είναι ένας συνδυασμός χαρακτηριστικών από τα διπολικά τρανζίστορ και τα MOSFET. Η λειτουργία του είναι ότι όταν εφαρμοστεί θετική τάση στην Πύλη άγει, ενώ όταν αφαιρεθεί παρατηρείται σβέση. Το IGBT βρίσκει ίδιες εφαρμογές με το BJT αλλά με καλύτερα χαρακτηριστικά. Στην (Εικόνα 8) παρουσιάζεται η δομή ενός IGBT.





**Εικόνα 8:** Η δομή ενός IGBT

Παρόμοια με το MOSFET, το IGBT έχει μεγάλη σύνθετη αντίσταση πύλης και όπως το BJT έχει μικρή τάση αγωγιμότητας, ακόμη και σε στοιχεία με μεγάλες ονομαστικές τάσεις αποκοπής (για παράδειγμα,  $V_{on} = 2-3$  (V) σε ένα στοιχείο των 1000 (V)). Τα IGBT έχουν χρόνους έναυσης και σβέσης της τάξης του 1  $\mu\text{sec}$  και διατίθενται με μεγάλες ονομαστικές τιμές τάσης και ρεύματος, όπως 1700(V) και 1200(A), ενώ μελετούνται και με ονομαστικές τάσεις μέχρι 2-3(kV).

### 2.7 MOSFET vs IGBT

Το IGBT σε σύγκριση με ένα MOSFET μπορεί να διαχειριστεί μεγαλύτερα ρεύματα και τάσεις και κατ' επέκτασιν περισσότερα [kW] ενώ το MOSFET αποδίδει καλύτερα σε χαμηλότερα. Το MOSFET έχει μεγαλύτερη διακοπτική συχνότητα και η μέγιστη ισχύ που μπορεί να διαχειριστεί είναι λίγα [kW]. Το MOSFET λόγω της υψηλής ταχύτητας λαμβάνει τόπο σε εφαρμογές διαμόρφωσης εύρους παλμού (PWM), διακοπτικά τροφοδοτικά, ηλεκτροσυγκόλληση και φωτισμό φθορισμού με υψηλή συχνότητα και είναι κατάλληλα για φορητές συσκευές. IGBT βρίσκει εφαρμογές σε μετατροπείς DC-DC και αντιστροφείς. Στο (Πίνακα 1) φαίνονται τα κριτήρια επιλογής μεταξύ των MOSFET και IGBT.

Characteristics	MOSFET	IGBT
Frequency	High (greater than 200[kHz])	Low (less than 20[kHz])
Voltage	Low (less than 250[V])	High (greater than 1000[V])
Cycles	Long-duty	Low-duty

**Πίνακας 1:** MOSFET vs IGBT

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΙΣ (Inverters)

---

## 3.1 Εισαγωγή στους Αντιστροφείς

Ο στόχος της εγκατάστασης ενός αντιστροφέα στα φωτοβολταϊκά συστήματα είναι η μετατροπή της συνεχούς (DC) ισχύς που παράγεται από τα φωτοβολταϊκά σε εναλλασσόμενη (AC) ισχύ. Ο όρος του αντιστροφέα σημαίνει ότι είναι ένας ηλεκτρονικός μετατροπέας όπου παρέχει την δυνατότητα μεταβολής τόσο του πλάτους όσο και της συχνότητας της κυματομορφής εξόδου είτε αυτή είναι τάση είτε ρεύμα.

Ανάλογα με το είδος της πηγής εισόδου οι αντιστροφείς μπορούν να διαιρεθούν σε δύο κυρίως κατηγορίες:

- Αντιστροφείς οι οποίοι τροφοδοτούνται από πηγή συνεχούς τάσης (Voltage Source Inverters)
- Αντιστροφείς οι οποίοι τροφοδοτούνται από πηγή συνεχούς ρεύματος (Current Source Inverters)

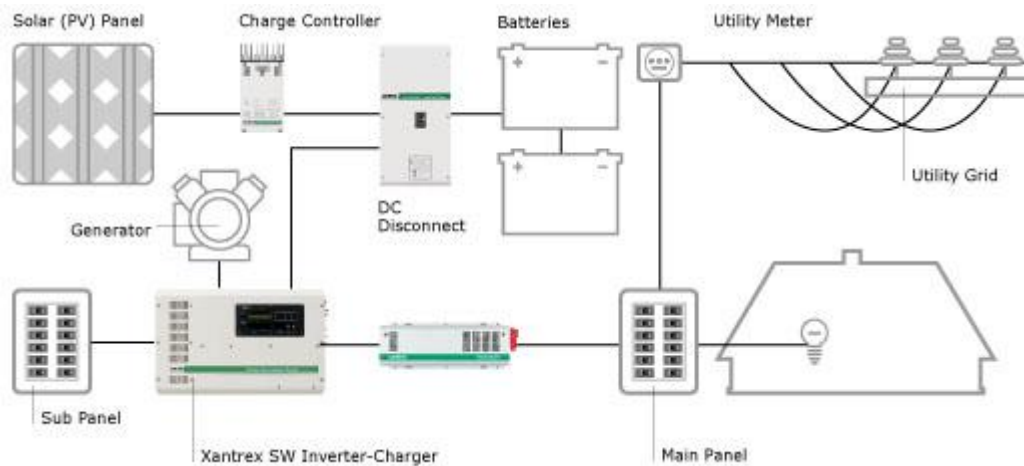
Κάθε μια από τις δύο παραπάνω κατηγορίες μπορεί να υποδιαιρεθεί σε δύο κατηγορίες:

- Στους μονοφασικούς αντιστροφείς (συνδεσμολογία ημιγέφυρας με δύο ελεγχόμενα ημιαγωγικά διακοπτικά στοιχεία ή συνδεσμολογία πλήρους γέφυρας με τέσσερα ελεγχόμενα ημιαγωγικά διακοπτικά στοιχεία)
- Στους τριφασικούς αντιστροφείς με έξι ελεγχόμενα ημιαγωγικά διακοπτικά στοιχεία

Το εσωτερικό κύκλωμα του αντιστροφέα αποτελείται από ελεγχόμενα ημιαγωγικά διακοπτικά στοιχεία ισχύος όπου με τη βοήθεια του κυκλώματος ελέγχου του, είτε ελέγχεται μόνο η έναυση (για παράδειγμα θυρίστορς), είτε τόσο η έναυση όσο και η σβέση (BJT, IGBT, MOSFET). Το κύκλωμα ελέγχου του αντιστροφέα περιλαμβάνει όλους τους ελέγχους που χρειάζονται, ανάλογα με το είδος της εφαρμογής για το οποίο επιλέγεται ο αντιστροφέας. Οι έξοδοι του κυκλώματος ελέγχου είναι τα σήματα παλμοδότησης (ηλεκτρικά σήματα) του αντιστροφέα τα οποία ελέγχουν τα διακοπτικά του στοιχεία.

Η τάση στην έξοδο του αντιστροφέα περιέχει ανώτερες αρμονικές λόγω της διακοπτικής του λειτουργίας και γι' αυτό στην έξοδο του υπάρχει ένα φίλτρο που χρησιμεύει στον περιορισμό αυτών.

Η πλειοψηφία των αντιστροφέων λαμβάνει τόπο σε εγκαταστάσεις συνδεδεμένες με το ηλεκτρικό δίκτυο, εφαρμόζεται ο σχεδιασμός τους ώστε να λειτουργούν είτε έχοντας συνδεδεμένους τους συσσωρευτές ώστε ο καταναλωτής να έχει ασφάλεια σε περίπτωση βλάβης του δικτύου να μην διακοπεί η τροφοδότηση (Εικόνα 3.1),

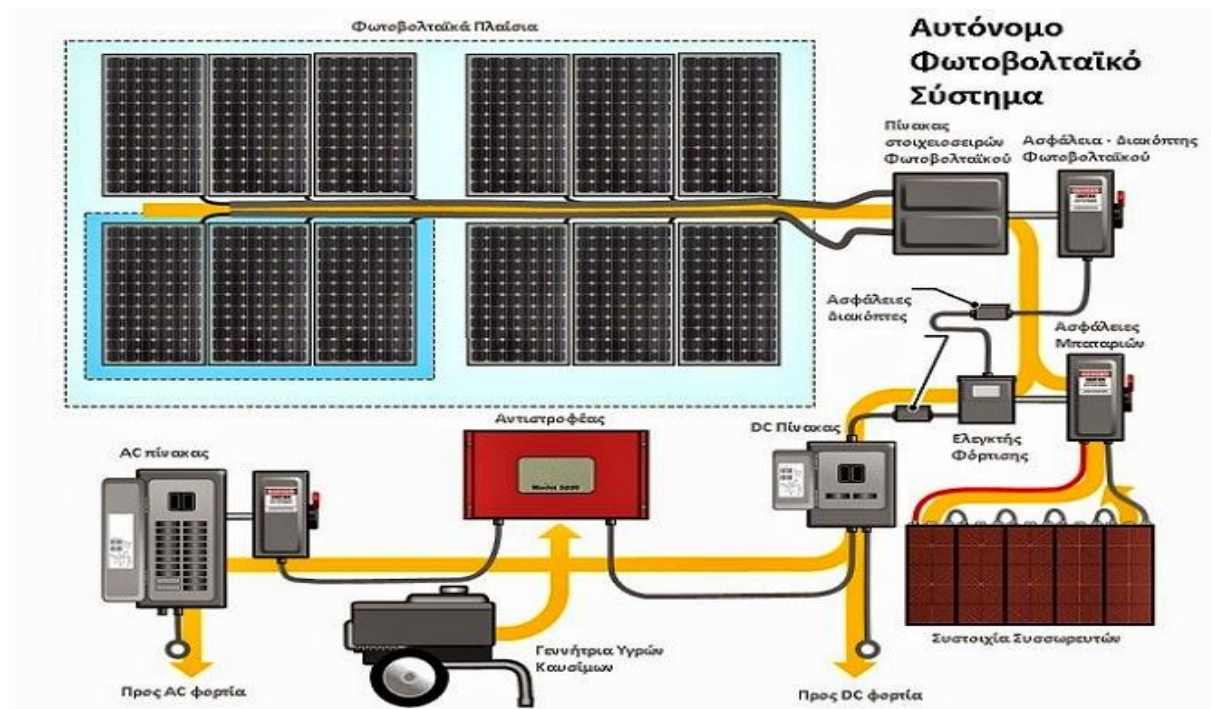


**Εικόνα 3.1** Inverter συνδεδεμένος με το ηλεκτρικό δίκτυο και συσσωρευτές

είτε μπορεί να εφαρμοστεί η λειτουργία με το ηλεκτρικό δίκτυο και χωρίς συσσωρευτές (Εικόνα 3.2) είτε να λειτουργούν αυτόνομα (Εικόνα 3.3).



**Εικόνα 3.2** Inverter συνδεδεμένος με το ηλεκτρικό δίκτυο χωρίς συσσωρευτές



Εικόνα 3.3 Αυτόνομο Φωτοβολταϊκό σύστημα

Οι αντιστροφείς που είναι συνδεδεμένοι με τους συσσωρευτές περιλαμβάνουν και έναν φορτιστή, ο οποίος σκοπός του είναι να φορτίζει μια συστοιχία συσσωρευτών από το ηλεκτρικό δίκτυο ή μέσω μιας γεννήτριας, άνεμο-γεννήτριας όταν η ηλιακή ακτινοβολία είναι περιορισμένη είτε αντιμετωπίζουμε προβλήματα σκίασης των φωτοβολταϊκών γεννητριών είτε κατά την διάρκεια της νυκτός.

### 3.2 Οι ηλεκτρονικοί μετατροπείς

Στους ηλεκτρονικούς μετατροπείς κατατάσσονται και οι αντιστροφείς με τους οποίους θα ασχοληθούμε. Παρακάτω γίνεται η περιγραφή των ειδών από τους ηλεκτρονικούς μετατροπείς. Τα ημιαγωγικά στοιχεία που αναφέρθηκαν στο κεφάλαιο 2 είναι τα βασικά δομικά στοιχεία ενός μετατροπέα ισχύος. Οι ηλεκτρονικοί μετατροπείς μπορούν να ταξινομηθούν σε τέσσερις κατηγορίες ανάλογα με την είσοδο και την έξοδο τους:

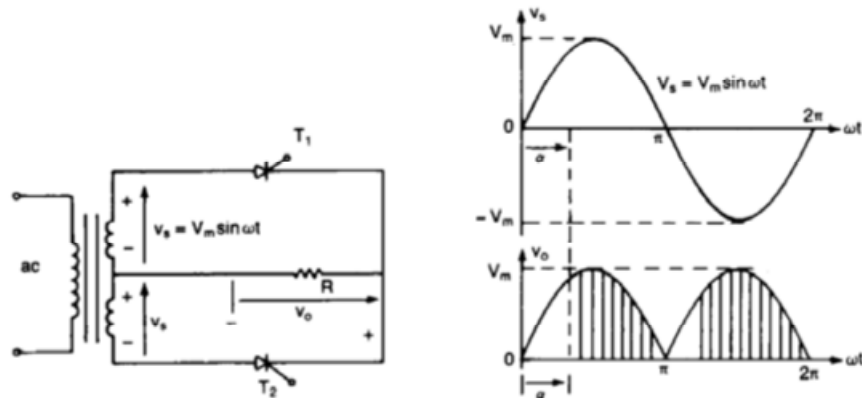
#### A) Μετατροπείς AC-DC:

Αναφέρονται ως ανορθωτές και είναι διατάξεις που μετατρέπουν το εναλλασσόμενο ρεύμα σε συνεχές. Μπορούν να διακριθούν σε:

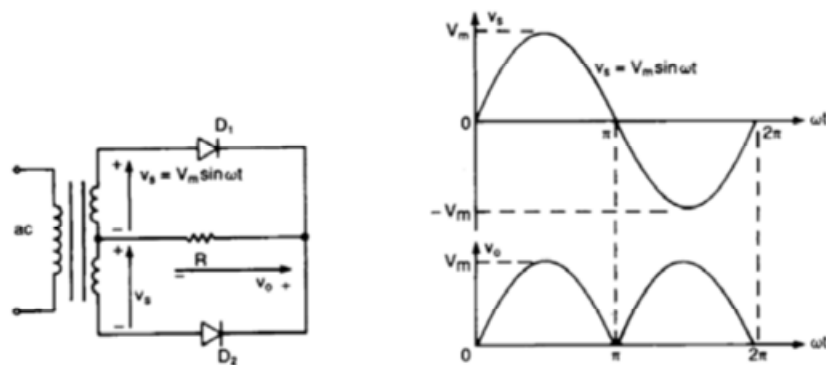
- Μονοφασικούς
- Πολυφασικούς
- Ελεγχόμενους (Σχήμα 1)
- μη Ελεγχόμενους (Σχήμα 2)

κάτι το οποίο εξαρτάται από το αν η τάση εξόδου είναι μεταβαλλόμενη ή μη. Οι μη-ελεγχόμενοι ανορθωτές έχουν και μη-ελεγχόμενα δομικά στοιχεία δηλαδή διόδους, άρα η

τάση εξόδου τους δεν είναι ελεγχόμενη. Αν υπάρχουν ελεγχόμενα διακοπτικά στοιχεία τότε η τάση εξόδου τους μπορεί να ελέγχεται μεταβάλλοντας τον χρόνο αγωγής κάθε στοιχείου.



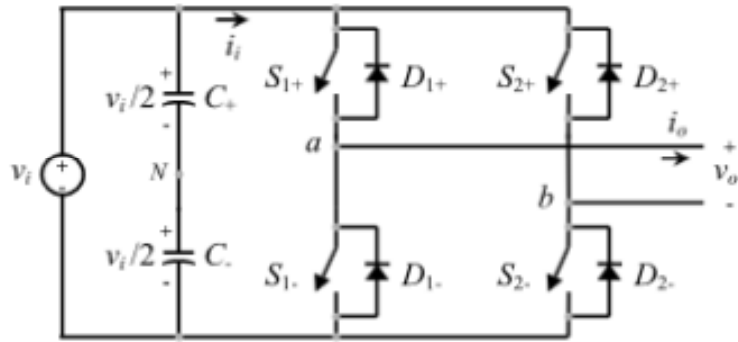
Σχήμα 1: Ελεγχόμενος ανορθωτής



Σχήμα 2: Μη-ελεγχόμενος ανορθωτής με διόδους

## B) Μετατροπείς DC-AC:

Στην παρούσα εργασία γίνεται μελέτη για αυτούς τους ηλεκτρονικούς μετατροπείς, σημαντικά στοιχεία αυτών αναφέρθηκαν στην εισαγωγή του 3<sup>ου</sup> κεφαλαίου και στα παρακάτω περιεχόμενα γίνεται η ανάλυσή τους. Οι ηλεκτρονικοί μετατροπείς DC-AC αναφέρονται ως αντιστροφείς και η λειτουργία τους είναι να μετατρέπουν την συνεχή μορφή σε εναλλασσόμενη. Η τάση εξόδου μπορεί να είναι είτε μονοφασική είτε πολυφασική (συνήθως τριφασική). Οι μετατροπείς αυτοί είναι ελεγχόμενοι τόσο για το πλάτος της τάσης εξόδου όσο και για τη συχνότητα της. Ο έλεγχος επιτυγχάνεται μέσω ρύθμισης του χρόνου αγωγής των ημιαγωγικών στοιχείων. Στο (Σχήμα 3) δίνεται μια τοπολογία ενός μονοφασικού αντιστροφέα.

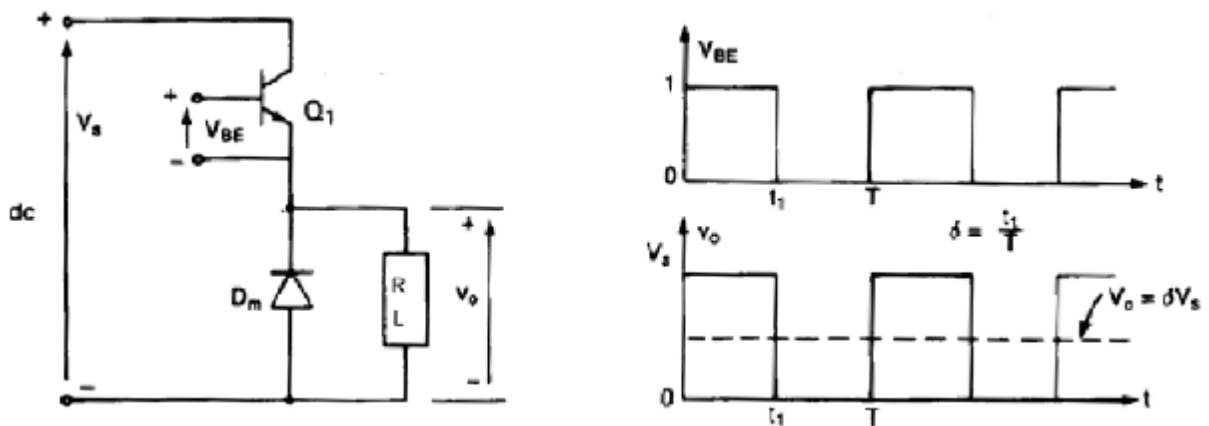


Σχήμα 3: Μονοφασικός Αντιστροφέας

### Γ) Μετατροπέας DC-DC:

Η λειτουργία του μετατροπέα DC-DC (Σχήμα 4) είναι να μετατρέψει τη συνεχή τάση ορισμένου πλάτους και πολικότητας σε συνεχή τάση με διαφορετικό πλάτος ή/και διαφορετική πολικότητα. Οι μετατροπείς αυτοί μπορούν να ταξινομηθούν:

- σε μετατροπείς υποβιβασμού, δηλαδή η τάση εξόδου είναι μικρότερη από την τάση εισόδου
- σε μετατροπείς ανύψωσης, όταν η τάση εξόδου είναι μεγαλύτερη της τάσης εισόδου.



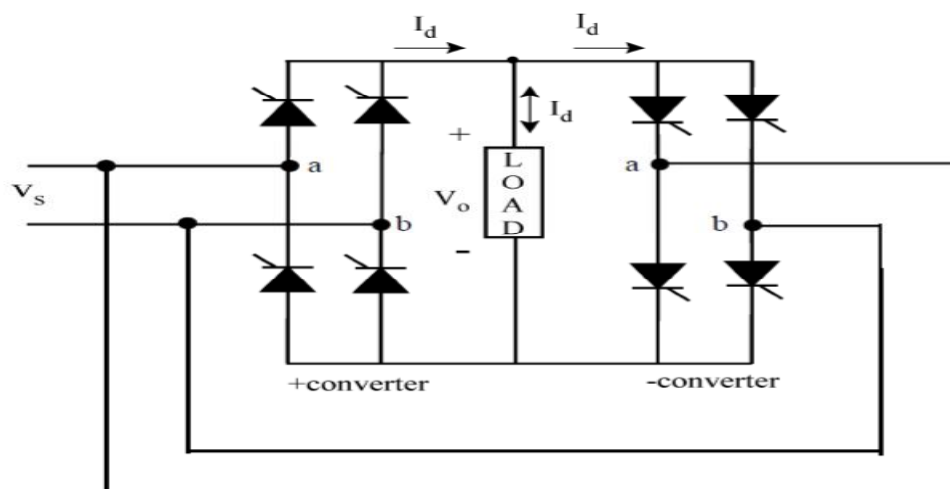
Σχήμα 4: Μετατροπέας DC-DC

### Δ) Μετατροπέας AC-AC:

Η λειτουργία του μετατροπέα AC-AC (Σχήμα 5) είναι να μετατρέψει την εναλλασσόμενη τάση σταθερού πλάτους και συχνότητας σε εναλλασσόμενη τάση με ρυθμιζόμενο πλάτος και συχνότητα. Τα μεγέθη αυτά ελέγχονται ρυθμίζοντας το χρόνο αγωγής των διακοπτικών στοιχείων. Οι μετατροπείς αυτοί μπορούν να ταξινομηθούν:

- σε μετατροπείς ανύψωσης συχνότητας
- σε μετατροπείς υποβιβασμού συχνότητας

ανάλογα με το αν η συχνότητα εξόδου είναι μεγαλύτερη ή μικρότερη της συχνότητας εισόδου. Υπάρχει και μια ειδική κατηγορία αυτών των μετατροπέων, οι ρυθμιστές εναλλασσόμενης τάσης, στους οποίους η συχνότητα εξόδου είναι σταθερή και ίση με τη συχνότητα εισόδου.



Σχήμα 5: Μετατροπέας AC-AC

### 3.3 Ταξινόμηση των μετατροπέων ανάλογα με το αν περιέχουν μετασχηματιστή απομόνωσης

Ανάλογα με το αν περιέχουν μετασχηματιστή σε κάποια από τις βαθμίδες τους οι ηλεκτρονικοί μετατροπείς μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο κατηγορίες. Μετατροπείς με μετασχηματιστή απομόνωσης που αυτός μπορεί να είναι υψίσυχνος ή χαμηλόσυχνος.

Η χρησιμοποίηση μετασχηματιστή προσφέρει ορισμένα βασικά πλεονεκτήματα, όπως η γαλβανική απομόνωση της φωτοβολταϊκής εγκατάστασης από το δίκτυο και η δυνατότητα αποδοτικής ανύψωσης της χαμηλής τάσης εξόδου των φωτοβολταϊκών στοιχείων χωρίς δύσκολες κυκλωματικές τοπολογίες. Αν ο μετασχηματιστής είναι χαμηλόσυχνος, συνδέεται στην έξοδο του αντιστροφέα μετά το σημείο εφαρμογής των κατωδιαβατών φίλτρων, ενώ ο υψίσυχνος μετασχηματιστής συναντάται στην βαθμίδα ανύψωσης της συνεχούς τάσης των φωτοβολταϊκών στοιχείων.

Επίσης η χρησιμοποίηση των μετασχηματιστών έχει σαν μειονέκτημα την αύξηση του όγκου και του βάρους της συνολικής κατασκευής, όμως η παρουσία τους εγγυάται τη μηδενική έγχυση συνεχούς ρεύματος στο ηλεκτρικό δίκτυο.

Στις τοπολογίες που δεν περιέχονται μετασχηματιστές οι ενδεχόμενες ασυμμετρίες του κυκλώματος ισχύος ή του κυκλώματος ελέγχου, προκαλούν την εμφάνιση μιας μικρής συνιστώσας συνεχούς ρεύματος στην έξοδο των αντιστροφών. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι εξής ιδιότητες των μετατροπέων:

	<b>Αντιστροφείς με μετασχηματιστή (with transformer)</b>	<b>Αντιστροφείς χωρίς μετασχηματιστή (without transformer)</b>
<b>Χαρακτηριστικά</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Οι τάσεις εισόδου και εξόδου είναι γαλβανικά απομονωμένες</li> <li>- Ευρεία χρήση</li> <li>- χρήση σε όλα τα επίπεδα ισχύος</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Η τάση των Φ/Β πάνελ πρέπει είτε να είναι σημαντικά υψηλότερη από το πλάτης της τάσης δικτύου, ή να χρησιμοποιηθούν DC/DC μετατροπείς ανύψωσης</li> </ul>
<b>Πλεονεκτήματα</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ασφάλεια</li> <li>- Πολλά χρόνια λειτουργίας</li> <li>- Μείωση ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Μεγαλύτερη απόδοση (σε συσκευές χωρίς DC/DC μετατροπείς)</li> <li>- Μικρότερος όγκος και βάρος</li> </ul>
<b>Μειονεκτήματα</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Απώλειες μετασχηματιστή (μαγνητικές και ωμικές)</li> <li>- Αυξημένος όγκος και βάρος</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Μεγαλύτερες απαιτήσεις ασφάλειας</li> <li>- Μεγαλύτερη ευαισθησία σε ασυμμετρίες</li> <li>- Μεταβολές του σημείου λειτουργίας</li> </ul>

**Πίνακας 1:** Σύγκριση αντιστροφών με μετασχηματιστή και χωρίς μετασχηματιστή



### 3.4 Ταξινόμηση των μετατροπέων με κριτήριο τον αριθμό βαθμίδων

Ανάλογα με τον αριθμό των βαθμίδων από τις οποίες αποτελείται ο μετατροπέας, τα φωτοβολταϊκά συστήματα που συνδέονται στο δίκτυο μπορούν να ταξινομηθούν στις παρακάτω κατηγορίες:

- Μετατροπέας μιας βαθμίδας

Σε αυτήν την περίπτωση ο μετατροπέας είναι ένας αντιστροφέας είτε μισής (half-bridge), είτε πλήρους (full-bridge) γέφυρας, του οποίου η τάση φιλτράρεται και ανυψώνεται με μετασχηματιστή και συνδέεται με το ηλεκτρικό δίκτυο. Στην κατηγορία αυτή ανήκει και ο αντιστροφέας τύπου Flyback με δύο ανεξάρτητα δευτερεύοντα τυλίγματα, η λειτουργία του οποίου θα αναλυθεί στο 4<sup>ο</sup> Κεφάλαιο. Ο σχεδιασμός και ο έλεγχος των μετατροπέων αυτής της κατηγορίας είναι απλός και τα ημιαγωγικά στοιχεία που χρησιμοποιούνται είναι ελάχιστα που σημαίνει ότι καταλαμβάνουν και κατ' επέκτασιν ο μετατροπέας, μικρό όγκο και μεγαλύτερη αξιοπιστία.

- Μετατροπέα δύο βαθμίδων

Σε αυτήν την περίπτωση ο μετατροπέας αποτελείται από δύο τμήματα. Το πρώτο είναι ένας μετατροπέας συνεχούς τάσης σε συνεχή (DC-DC) (boost, buck-boost, forward, push-pull), όπου η τάση ανυψώνεται σε σταθερή τιμή, ώστε στην επόμενη βαθμίδα, δηλαδή στον αντιστροφέα, να επιτευχθεί, με την βοήθεια ενός κατωδιαβατού φίλτρου, η ημιτονοειδής μορφή του ρεύματος ώστε να υλοποιηθεί η σύνδεση με το δίκτυο. Αυτό υλοποιείται ελέγχοντας τον αντιστροφέα με παλμούς PWM. Επιπλέον υπάρχει η δυνατότητα ο μετατροπέας (DC-DC) να δίνει στην έξοδό του, ανορθωμένο ημιτονικό ρεύμα και έπειτα ο αντιστροφέας, που οδηγείται από τετραγωνικούς παλμούς, να χρησιμοποιείται προκειμένου να δημιουργηθεί η εναλλασσόμενη συνιστώσα. Στην κατηγορία αυτή παρατηρείται η χρήση υψίσυχνου πηνίου ή μετασχηματιστή με άμεσο αποτέλεσμα τη μείωση του όγκου και του βάρους της διάταξης. Ωστόσο η ανάγκη για δύο βαθμίδες μετατροπής αυξάνει το κόστος κατασκευής αυτών των διατάξεων, ενώ η ύπαρξη επιπλέον ηλεκτρικών στοιχείων αυξάνει τόσο τις διακοπτικές όσο και τις απώλειες αγωγής με άμεσο αποτέλεσμα τη μείωση του βαθμού απόδοσης. Επίσης η παλμοδότηση και ο έλεγχος των ημιαγωγικών στοιχείων του μετατροπέα είναι πιο δύσκολος και πιο απαιτητικός.

- Μετατροπέας πολλαπλών βαθμίδων

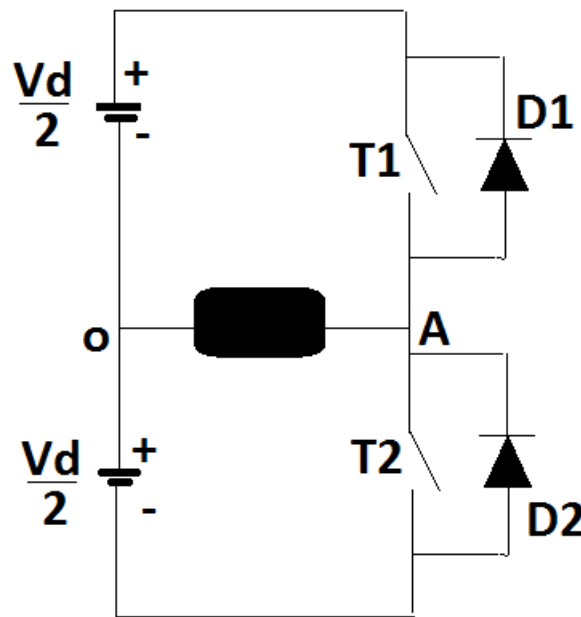
Σε αυτήν την περίπτωση βρίσκονται τα φωτοβολταϊκά συστήματα με εν σειρά συνδεδεμένους μετατροπείς συνεχούς τάσης σε συνεχή και ένα αντιστροφέα για την σύνδεση στο ηλεκτρικό δίκτυο. Πλεονεκτήματα των μετατροπέων αυτών είναι η εξάλειψη της ταλάντωσης του ρεύματος χαμηλής συχνότητας από το φωτοβολταϊκό σύστημα με αποτέλεσμα την επίτευξη βέλτιστης ανίχνευσης του σημείου μέγιστης ισχύος. Η χρήση πολλών βαθμίδων μετατροπής έχει μειονεκτήματα όπως το μεγάλο κόστος κατασκευής, το μικρό βαθμό απόδοσης λόγω των απωλειών στις ενδιάμεσες βαθμίδες και η απόκριση του όλου συστήματος έχει μεταβατικές καταστάσεις λόγω των ανεξάρτητων βρόχων ελέγχου του κάθε μετατροπέα.

### 3.5 Μονοφασικοί αντιστροφείς

Οι μονοφασικοί αντιστροφείς όπως αναφέρθηκε και στην εισαγωγή χωρίζονται σε δύο κατηγορίες που είναι οι εξής :

- Ημιγέφυρας (half-bridge)
- Πλήρους γέφυρας (full-bridge)

Η τοπολογία του μονοφασικού αντιστροφέα ημιγέφυρας φαίνεται στο Σχήμα 6.



Σχήμα 6: Μονοφασικός αντιστροφέας ημιγέφυρας

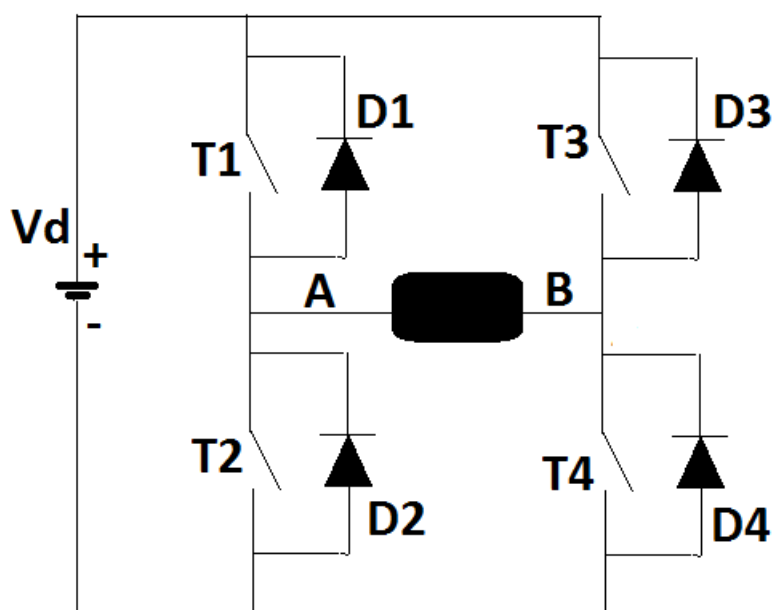
Ανάβοντας και σβήνοντας εναλλάξ τους διακόπτες T1 και T2 παράγεται μια τετραγωνική εναλλασσόμενη κυματομορφή τάσης πάνω στους ακροδέκτες του φορτίου. Η μέγιστη τιμή τάσης που εφαρμόζεται πάνω στο φορτίο είναι  $V_d/2$  και η ελάχιστη  $-V_d/2$ . Κάθε ημιαγωγικό στοιχείο επιτρέπει την ροή ρεύματος κατά την μια φορά όταν αυτό άγει ενώ η αντιπαράλληλη διόδος επιτρέπει στο ρεύμα να ρέει κατά την αντίθετη κατεύθυνση. Η παρουσία των αντιπαράλληλων διόδων είναι αναγκαία όταν το φορτίο είναι επαγωγικής φύσης διότι δίνουν έναν δρόμο επιστροφής του ρεύματος άρα και της ενέργειας από τον φορτίο στην συνεχή τάση τροφοδοσίας στην είσοδο του αντιστροφέα.

Τα βασικά μειονεκτήματα του μονοφασικού αντιστροφέα ημιγέφυρας είναι τα εξής:

- Απαιτούνται δύο πυκνωτές μέσης λήψης
- Το πλάτος της τάσης εξόδου έχει την μισή τιμή της τάσης εισόδου
- Δεν είναι δυνατό να σχηματιστούν διαστήματα μηδενικής τάσης στην κυματομορφή της τάσης εξόδου για μη ωμικά φορτία

Η τοπολογία του μονοφασικού αντιστροφέα πλήρους γέφυρας φαίνεται στο Σχήμα 7. Αποτελείται από δύο ημιγέφυρες. Οι ελεγχόμενοι ημιαγωγικοί διακόπτες αναβοσβήνουν σε διαγώνια ζευγάρια δηλαδή όταν τα T1 και T4 άγουν τα T3 και T2 είναι σε αποκοπή και το αντίθετο. Συνεπώς στο φορτίο εμφανίζεται από  $V_d$  έως  $-V_d$ . Οι αντιπαράλληλες διόδους έχουν ενεργό ρόλο μόνο όταν το φορτίο είναι επαγωγικής φύσης. Συγκεκριμένα για της διόδους ισχύουν τα εξής:

- Αν το φορτίο είναι ωμικής φύσης το ρεύμα έχει παρόμοια μορφή με την τάση και οι αντιπαράλληλες διόδους δεν έχουν ενεργό ρόλο στην λειτουργία του κυκλώματος.
- Αν το φορτίο είναι επαγωγικής φύσης και θεωρηθεί ότι τα ημιαγωγικά στοιχεία T1 και T4 άγουν, όταν αυτά σβήσουν θα άγουν τα T3 και T2. Έτσι η πολική τάση του φορτίου θα αλλάξει. Το ρεύμα της θα συνεχίσει να ρέει με την ίδια φορά λόγω της καθυστέρησης που εισάγει το επαγωγικό φορτίο. Μέχρι να μηδενιστεί το ρεύμα αυτό θα ρέει μέσω των διόδων D2 και D3 επιστρέφοντας ενέργεια στην πηγή τροφοδοσίας.



**Σχήμα 7:** Μονοφασικός αντιστροφέας πλήρους γέφυρας

### 3.6 Στόχοι και Αρχές Λειτουργίας Αντιστροφών

Η σύνδεση των αντιστροφών στο ηλεκτρικό δίκτυο μπορούν να λειτουργούν σύμφωνα με διάφορες αρχές:

- Η έξοδος του αντιστροφέα λαμβάνεται σαν μια ρυθμιζόμενη πηγή ρεύματος. Η αλλαγή με το χρόνο της παρεχόμενης ηλεκτρικής ενέργειας ρυθμίζεται έτσι ώστε να αντιστοιχεί στις αλλαγές της προβλεπόμενης τάσης του δικτύου. Εάν η τάση του δικτύου αποκλίνει σημαντικά από την ημιτονοειδή κυματομορφή, αυτή θα ακολουθηθεί από τον αντιστροφέα και θα λειτουργήσει με βάση αυτή.
- Ο αντιστροφέας παρέχει εσωτερικώς ρυθμιζόμενο, ημιτονοειδώς διαμορφωμένο ρεύμα στο δίκτυο, το οποίο ρέει ταυτόχρονα με τη τάση του δικτύου.
- Ο αντιστροφέας λαμβάνει υπόψιν την κυματομορφή της τάσης του δικτύου και κάνει τις κατάλληλες διορθώσεις ώστε να εξάγει την κατάλληλη κυματομορφή για τροφοδοσία.

Οι αντιστροφείς που συνδέονται στο ηλεκτρικό δίκτυο έχουν ορισμένους στόχους που καλούνται να εκπληρώσουν και πρέπει να ικανοποιούν διάφορες ρυθμίσεις. Κατά την επιλογή ενός αντιστροφέα για το σύστημα το οποίο θα εγκατασταθεί λαμβάνονται υπόψιν οι εξής στόχοι:

- Αυτόματη έναρξη λειτουργίας το πρωί.

Μετά την ανατολή, ο αντιστροφέας πρέπει να αναγνωρίζει πότε η ισχύ της φωτοβολταϊκής γεννήτριας είναι αρκετά υψηλή ώστε να εξασφαλίζει σύνδεση και ηλεκτρική παροχή στο δίκτυο.

- Υψηλή απόδοση υπό φορτίο μικρότερο του ονομαστικού.

Η ηλεκτρική ενέργεια πρέπει να μετατρέπεται σε εναλλασσόμενο ρεύμα από τον αντιστροφέα με τις ελάχιστες απώλειες. Επειδή δεν επικρατεί πάντα ηλιοφάνεια το σύστημα συχνά λειτουργεί με μερικό φορτίο. Άρα η εσωτερική κατανάλωση του αντιστροφέα έχει σημαντική επίδραση στην καμπύλη απόδοσης.

- Λειτουργία ορισμένης υπερφόρτισης.

Όταν η ισχύς ξεπεράσει το όριο της στη πλευρά του συνεχούς ρεύματος, πρέπει να ληφθούν μέτρα που να εξασφαλίζουν ότι ο αντιστροφέας δεν θα απενεργοποιείται. Ο αντιστροφέας πρέπει να διατηρεί τη λειτουργία του έχοντας πάντα ένα όριο ισχύος. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί μετακινώντας το σημείο λειτουργίας μακριά από το σημείο μέγιστης ισχύος προς τις υψηλότερες τιμές τάσης. Όμως πιο σωστός τρόπος είναι η κατάλληλη επιλογή του αντιστροφέα με μεγαλύτερη ισχύ από την φωτοβολταϊκή γεννήτρια ώστε να αποφεύγεται τέτοιου είδους υπερφορτίσεις.

- Λειτουργία στο σημείο μέγιστης ισχύος.

Αναφερθήκαμε σχετικά στο Κεφάλαιο 1.5 και με αυτήν την λειτουργία του αντιστροφέα ο οποίος μπορεί να περιέχει εσωτερικά και ενσωματωμένο ελεγκτή MPPT, παρέχει την μέγιστη ισχύ.

- Διακοπή παροχής ηλεκτρικού ρεύματος στον αντιστροφέα μέσω των ηλεκτρονικών εσωτερικού ελέγχου.

Κατά τη διάρκεια της νύχτας, ο αντιστροφέας δεν πρέπει να καταναλώνει οποιοδήποτε ποσό ισχύος από το δίκτυο. Τα ηλεκτρονικά ισχύος ελέγχου δεν πρέπει να θέτονται σε λειτουργία έως ότου η τάση της ηλιακής γεννήτριας να ξεπεράσει ένα συγκεκριμένο όριο το πρωί.

- Αντοχή του αντιστροφέα σε συνθήκες βραχυκύκλωσης και ανοιχτοκύκλωσης.

Αν το δίκτυο αποσυνδεθεί ενώ υφίσταται τάση της φωτοβολταϊκής γεννήτριας ο αντιστροφέας δεν πρέπει να καταστραφεί. Όταν το δίκτυο ξαφνικά αποσυνδεθεί, η αποθηκευμένη ενέργεια στα πηνία και τους πυκνωτές δεν μπορεί πλέον να διαχυθεί στο δίκτυο αλλά να διασκορπιστεί εσωτερικώς. Για το λόγο αυτό οι αντιστροφείς πρέπει να περιέχουν ειδικό κύκλωμα προστασίας που σκοπός του είναι η επιτήρηση της τάσης των στοιχείων και η πρόληψη υπερφόρτισης ή υπερεκφόρτισης με ανοιχτοκύκλωση του στοιχείου το οποίο βρίσκεται εκτός των επιτρεπτών ορίων τάσης λειτουργίας. Παρέχει επίσης προστασία από υπερεντάσεις και βραχυκυκλώματα, επιτηρώντας το ρεύμα εκφόρτισης και διακόπτοντας το αντίστοιχο κύκλωμα όταν ξεπεραστεί μία προκαθορισμένη τιμή κατωφλίου.

- Διηλεκτρική δύναμη.

Η είσοδος και η έξοδος του αντιστροφέα πρέπει να είναι αρκετά ανθεκτικές στην υπέρταση.

- Ακουστικός θόρυβος.

Ο ακουστικός θόρυβος πρέπει να είναι ελάχιστος.

- Αυτόματη αποσύνδεση από το δίκτυο σε απόκλιση τάσης ή συχνότητας.

Τα ηλεκτρονικά στοιχεία του αντιστροφέα πρέπει να αναγνωρίζουν τα σφάλματα του δικτύου. Εάν υπάρχουν αποκλίσεις από τη συχνότητα ή την τάση του δικτύου, ή διακοπή της μιας φάσης, ο αντιστροφέας πρέπει να αποκόπτεται από το δίκτυο εντός ενός δεδομένου χρονικού διαστήματος. Ο χρόνος αυτός εξαρτάται από τον τύπο του εναλλασσόμενου δικτύου.

- Συντελεστής ισχύος  $\cos\phi > 0.9$

Ο συντελεστής ισχύος του συστήματος του καταναλωτή πρέπει να είναι κοντά στη μονάδα. Αυτό εμποδίζει να απορροφάτε από το δίκτυο μεγάλη ποσότητα άεργου ισχύος. Αντιστροφείς με αυτόματη διαμόρφωση πλάτους έχουν συντελεστή ισχύος,  $\cos\phi = 1$ .

- Χαμηλό αρμονικό περιεχόμενο στην παροχή εναλλασσόμενου ηλεκτρικού ρεύματος στο δίκτυο.

Οι αντιστροφείς που συνδέονται στο δίκτυο χαμηλής τάσης πρέπει να συμμορφώνονται με τους γενικούς κανονισμούς για τις αρμονικές.

- Σήματα συγχρονισμού

Οι αντιστροφείς δεν πρέπει να επηρεάζονται από χαμηλής συχνότητας σήματα συγχρονισμού. Τα σήματα συγχρονισμού επιβάλλονται από την τάση του δικτύου των 50Hz και δεν πρέπει να προκαλέσουν την διακοπή του αντιστροφέα.

- Επίβλεψη συστήματος από τον χειριστή

Ο χειριστής του διασυνδεδεμένου φωτοβολταϊκού συστήματος πρέπει να μπορεί ελέγχει εάν το σύστημα λειτουργεί σωστά με σύντομο τρόπο. Ο έλεγχος των παρακάτω τιμών ικανοποιεί το στόχο αυτό.

- τάση της ηλιακής γεννήτριας
- ένταση της ηλιακής γεννήτριας
- ένταση του δικτύου
- κατάσταση μόνωσης της ηλιακής γεννήτριας

### 3.7 Ο βαθμός απόδοσης του Αντιστροφέα

Ο βαθμός απόδοσης είναι το πιο σημαντικό χαρακτηριστικό ενός αντιστροφέα και κάθε μηχανικός θα πρέπει να εξετάζει το σημείο αυτό. Ο λόγος γίνεται στο ότι οι απώλειες ισχύος μετατρέπονται σε απώλειες εισοδήματος σε διασυνδεδεμένα συστήματα.

Ο συνολικός βαθμός απόδοσης του αντιστροφέα, σε συγκεκριμένες συνθήκες φόρτισης ορίζεται ως το πηλίκο της (AC) ισχύος εξόδου προς την (DC) ισχύ εισόδου, δηλαδή:

$$n(\%) = \frac{P_{ac}}{P_{dc}} \quad (1)$$

Ο βαθμός απόδοσης αντανακλά το ποσό της ισχύος που χάνεται ως απώλειες στον αντιστροφέα. Οι κυριότερες απώλειες εμφανίζονται στα ημιαγωγά στοιχεία ισχύος, ανάλογα με αν περιέχει μετασχηματιστή ή όχι, ενώ άλλες πηγές απωλειών αποτελούν οι αντιστάσεις των ηλεκτρονικών εξαρτημάτων.

Σύμφωνα με το αν υπάρχει μετασχηματιστής συνδεδεμένος με τον αντιστροφέα, έχουν αναπτυχθεί τεχνολογίες οι οποίες ένας αντιστροφέας που περιέχει Μ/Σ και ένας που δεν περιέχει, αγγίζουν σχεδόν τις ίδιες αποδόσεις της τάξεως 94%-98%.

Ο Ευρωπαϊκός βαθμός απόδοσης (euro efficiency) είναι μια καλύτερη προσέγγιση για τον βαθμό αυτό, ο οποίος αποτελεί έναν μεσοσταθμισμένο βαθμό απόδοσης, βάσει αποδόσεων σε μερικά φορτία, εκφρασμένα σε ποσοστά της ονομαστικής ισχύος εξόδου. Ο βαθμός αυτός ορίζεται ως:

$$n_E = 0.03n_{5\%} + 0.06n_{10\%} + 0.13n_{20\%} + 0.1n_{30\%} + 0.48n_{50\%} + 0.2n_{100\%} \quad (2)$$

Όπου λαμβάνονται οι βαθμοί απόδοσης στο 5%, 10%, 20%, 30%, 50% και 100% της ονομαστικής ισχύος εξόδου με συντελεστές βαρών 3%, 6%, 13%, 10%, 48% και 20% αντίστοιχα. Ο Ευρωπαϊκός βαθμός απόδοσης διαφέρει συνήθως από το μέγιστο βαθμό απόδοσης κατά 1-2% και δίνεται επίσης από τους κατασκευαστές.

### 3.8 Νησιδοποίηση

Το φαινόμενο της νησιδοποίησης (islanding) αναφέρεται σε ένα τμήμα του δικτύου με φωτοβολταϊκά συστήματα που έχει αποκοπεί από το κεντρικό Ηλεκτρικό δίκτυο. Αιτίες εμφάνισης του φαινομένου αυτού είναι η απρόσκοπη αποσύνδεση ενός μέρους του δικτύου από τα μέσα προστασίας. Οι λόγοι μπορεί να είναι οι εξής: ανίχνευση κάποιου σφάλματος, η προγραμματισμένη διακοπή του δικτύου για την συντήρηση του, η διακοπή της ηλεκτροδότησης λόγω εξωγενών περιβαλλοντικών αιτιών, η πιθανή αστοχία ενός μέρους του εξοπλισμού του συστήματος.

Συνήθως για τον προσδιορισμό της κατάστασης νησιδοποίησης χρησιμοποιείται το πρότυπο VDE 0126-1-1 (Automatic disconnection device between a generator and the public low voltage grid) η συμμόρφωση προς το οποίο είναι υποχρεωτική.

Η ανίχνευση της κατάστασης νησιδοποίησης γίνεται συνήθως με παρακολούθηση της κατάστασης του δικτύου μέσω μετρήσεων τάσης, συχνότητας και αν προσδιοριστεί τότε ο αντιστροφέας αποσυνδέεται αυτόματα από το δίκτυο. Μετά την επαναφορά του δικτύου, ο αντιστροφέας για λόγους προστασίας δε θα πρέπει να επανασυνδέεται αυτόματα αλλά να αφήνει την πάροδο χρόνου τουλάχιστον 5 λεπτών. Επίσης, αν οι προστασίες ενός δικτύου ανοίξουν τους διακόπτες προστασίας μιας γραμμής (λόγω ανίχνευσης τυχαίων σφαλμάτων, πιθανής βλάβης του εξοπλισμού, εξωγενών περιβαλλοντικών αιτιών, ανθρώπινων λαθών χειρισμού κλπ.), και δεν καταστεί εφικτό από τις διεσπαρμένες πηγές να εντοπίσουν τη διακοπή της ηλεκτροδότησης, θα συνεχίσουν να τροφοδοτούν τα φορτία που είναι συνδεδεμένα στην ίδια γραμμή με αυτές.

Η ΔΕΗ απαιτεί από τους διασυνδεδεμένους παραγωγούς να χρησιμοποιούν αντιστροφείς που είναι εφοδιασμένοι με τα κατάλληλα συστήματα «αντινησιδοποίησης».

Οι μονοφασικοί φωτοβολταϊκοί αντιστροφείς μπορεί και να μην παρουσιάσουν κάποιο πρόβλημα σχετικά με τη νησιδοποίηση αν αυτή προκλήθηκε από ανοικτοκύκλωμα του δικτύου λόγω ενός σφάλματος της γραμμής. Αντίθετα, οι τριφασικοί αντιστροφείς παρουσιάζουν πάντα μια διαταραχή της τάσης που συνδέεται με το σφάλμα. Η πλειοψηφία των οικιακών φωτοβολταϊκών συστημάτων συνδέεται σε μια φάση του δικτύου. Ενώ η πλειοψηφία των συσκευών που χρησιμοποιούν τα δίκτυα για εκκαθάριση σφαλμάτων είναι τριφασικές. Ο συνδυασμός μονοφασικών αντιστροφέων και τριφασικών διακοπών σφάλματος οδηγεί στην πιθανή κατάσταση όπου ένα σφάλμα μπορεί να υπάρχει σε μια γραμμή που προέρχεται από το άνοιγμα ενός διακόπτη, αλλά χωρίς να υπάρχει διαταραχή της τάσης ώστε να υπάρχει επίπτωση στο μονοφασικό αντιστροφέα.

Το φαινόμενο της νησιδοποίησης είναι αρκετά σοβαρό και η ΔΕΗ ζητά την προσκόμιση πιστοποιητικών συμμόρφωσης προς το πρότυπο VDE 0126-1-1 από τις εταιρείες κατασκευής των αντιστροφέων. Επιπλέον, αποτελεί έναν από τους κυριότερους ελέγχους της ΔΕΗ κατά τη δοκιμή ηλεκτροδότησης του σταθμού και την παραλαβή του.

### 3.9 Αρμονική παραμόρφωση του ρεύματος και συντελεστής Ισχύος

Η ποιότητα της παρεχόμενης ισχύος προς το ηλεκτρικό δίκτυο συνδέεται με την αρμονική παραμόρφωση του παραγόμενου ρεύματος και τον συντελεστή ισχύος. Η ισχύς θα πρέπει να μεταφέρεται με συντελεστή ισχύος όσο το δυνατόν κοντά στην μονάδα, ώστε η άεργος ισχύς του σταθμού να είναι μηδενική και επιπλέον οι κυματομορφές τάσης και ρεύματος θα πρέπει να είναι σχεδόν ημιτονοειδούς μορφής, ώστε να μην υπάρχουν ανεπιθύμητες αρμονικές στο ηλεκτρικό δίκτυο της ΔΕΗ.

Ως μέτρο της ποιότητας του ρεύματος αναφορικά με τις αρμονικές του, χρησιμοποιείται ο διαδεδομένος δείκτης της ολικής αρμονικής παραμόρφωσης γνωστός ως THD (Total Harmonic Distortion). Ο δείκτης αυτός δίνεται απ' την σχέση:

$$THDi = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + I_5^2 + \dots}}{I_1} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1} \quad (3)$$

Όπου  $I_h$ ,  $h=2,3,4,\dots$  είναι η ενεργός τιμή (rms) ή πλάτος της αρμονικής τάξης  $h$  (δηλαδή συχνότητας  $50 \times h$ ) και  $I_1$ , είναι η ενεργός τιμή (rms) ή πλάτος της αρμονικής τάξης 1, δηλαδή της θεμελιώδους των 50Hz.

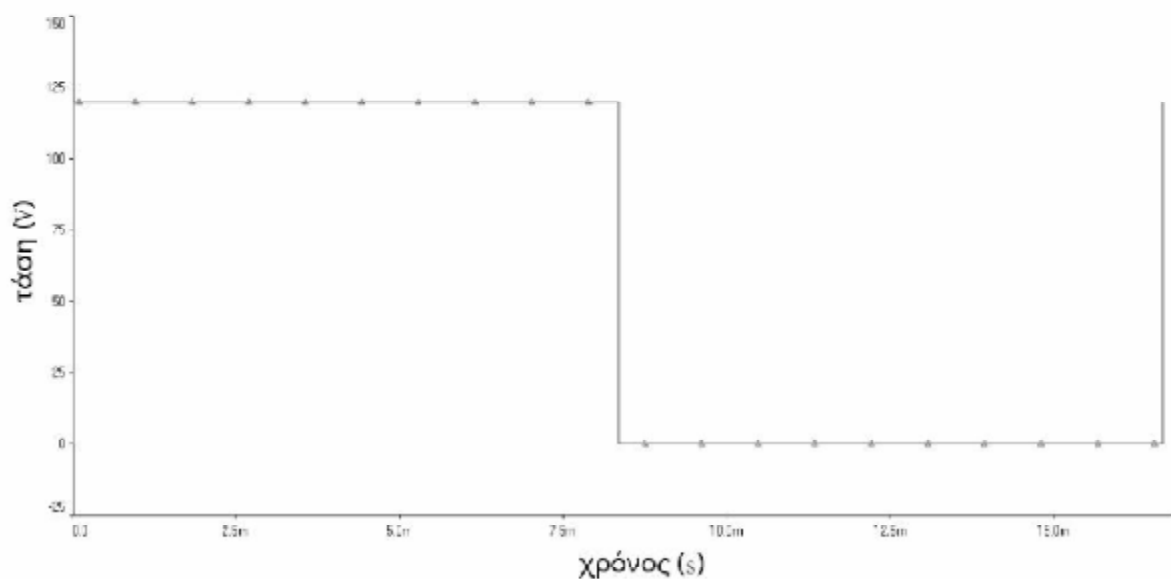
Από τον παραπάνω τύπο προκύπτει ότι για μία ημιτονοειδή κυματομορφή ο συντελεστής THD είναι ίσος με το μηδέν ενώ όσο μεγαλύτερα είναι τα πλάτη των αρμονικών τόσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του συντελεστή. Ο παραπάνω ορισμός έχει το μειονέκτημα ότι δεν ποσοτικοποιεί την επίδραση της συχνότητας της κάθε αρμονικής, παραμένει ωστόσο ένας διεθνώς αναγνωρισμένος δείκτης για την παρουσία αρμονικών. Ο συντελεστής THD του ρεύματος που παράγεται από έναν αντιστροφέα φωτοβολταϊκών συστημάτων προσδιορίζεται στο πρότυπο IEC 61000-3-2. Ο συντελεστής THD του ρεύματος θα πρέπει να είναι μικρότερος από 5%. Η ολική αρμονική παραμόρφωση του ρεύματος αυξάνεται σημαντικά σε φορτία πολύ μικρότερα του ονομαστικού.



## 3.10 Διαμόρφωση εύρους παλμού και λειτουργία αντιστροφέα

### 3.10.1 Αντιστροφέας τετραγωνικής κυματομορφής

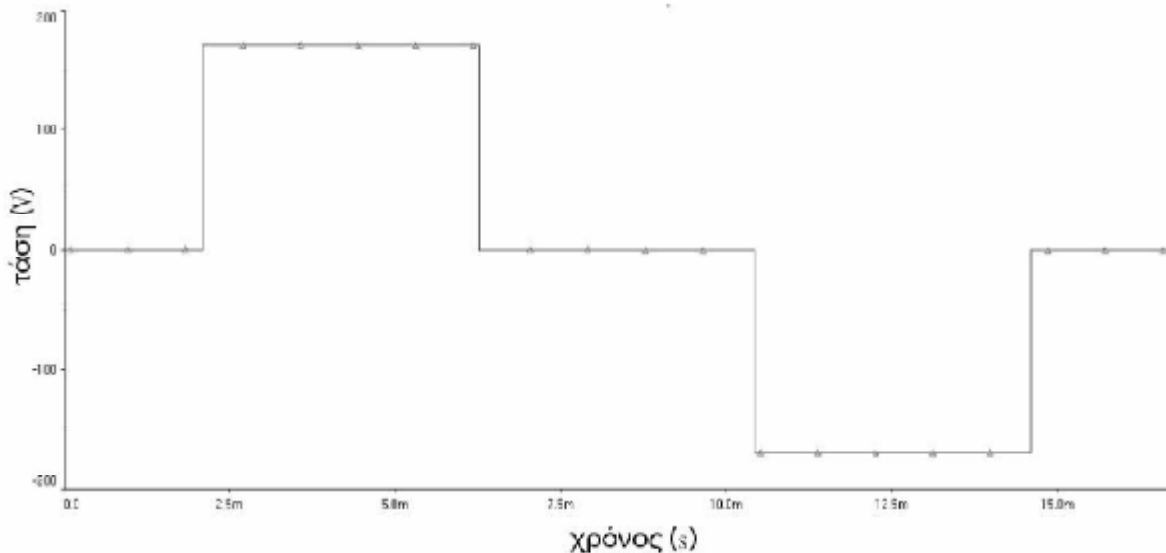
Η μετατροπή του DC ρεύματος σε AC γίνεται με διακοπτικά στοιχεία (ηλεκτρονικά ισχύος), τις περισσότερες φορές με χρήση MOSFET, τα οποία με βάση την τοπολογία τους στο κύκλωμα έχουν την δυνατότητα να μεταβάλλουν την τάση στο φορτίο έτσι ώστε το σήμα μας να μιμείται το AC ρεύμα. Για την παραγωγή ενός τετραγωνικού παλμού το ρεύμα στο φορτίο μεταβάλλεται μεταξύ  $V_{\max}$  και  $V_{\min}$  όπως φαίνεται στο (Σχήμα 8). Για να μεταφέρουμε την ίδια ισχύ με το ημιτονοειδές σήμα πρέπει το πλάτος του τετραγωνικού μας σήματος να ισούται με την RMS τιμή του ημιτονοειδούς σήματος. Οι αντιστροφείς που παράγουν τετράγωνο στην έξοδο δεν χρησιμοποιούνται πλέον λόγω της φύσης και του σχεδιασμού των φορτίων, αλλά αποτελούν την βάση στην οποία στηρίχθηκαν οι μελλοντικοί αντιστροφέες.



Σχήμα 8: Τετραγωνική κυματομορφή παραγόμενη από αντιστροφέα

### 3.10.2 Αντιστροφέας τροποποιημένου ημιτόνου

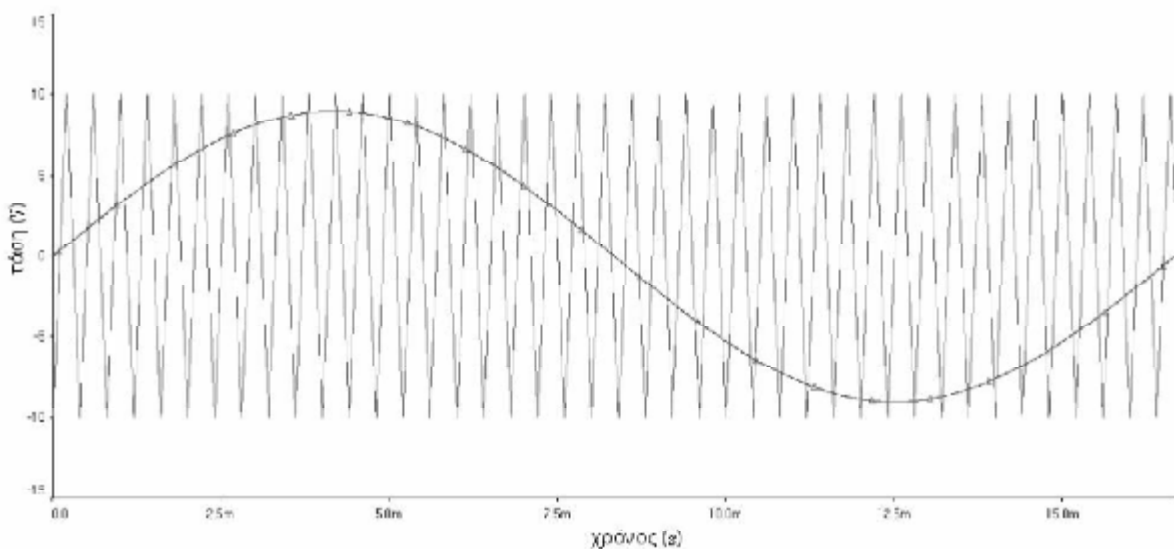
Οι αντιστροφείς τροποποιημένου ημιτόνου είναι η εξέλιξη των αντιστροφέων τετραγώνου. Στην έξοδο αυτού του είδους των αντιστροφέων παίρνουμε μια τάση η οποία έχει τρεις τιμές τάσης, θετική, αρνητική και μηδενική. Όπως βλέπουμε στο (Σχήμα 9) υπάρχει μια νεκρή ζώνη μεταξύ των μεταβάσεων από θετικές σε αρνητικές τιμές. Σαφώς αυτή η κυματομορφή θυμίζει περισσότερο την ημιτονοειδή καμπύλη και οι αντιστροφείς αυτοί είναι αρκετά δημοφιλείς καθώς έχουν μικρό κόστος αγοράς και είναι συμβατοί με τις περισσότερες οικιακές καταναλώσεις.



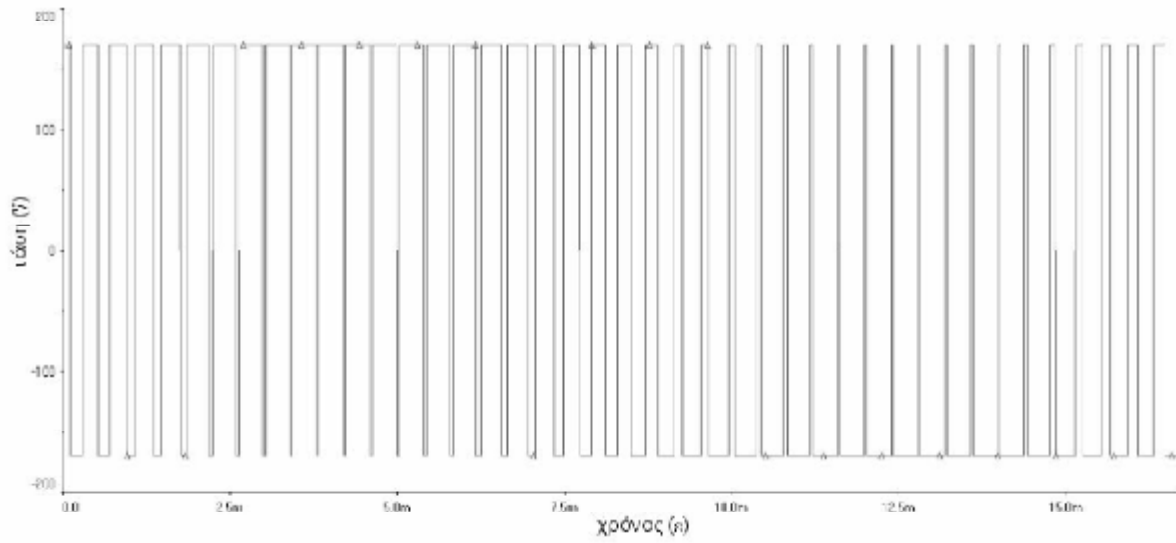
**Σχήμα 9:** Κυματομορφή τροποποιημένου ημίτονου

### 3.10.3 PWM – Διαμόρφωση Εύρους Παλμού

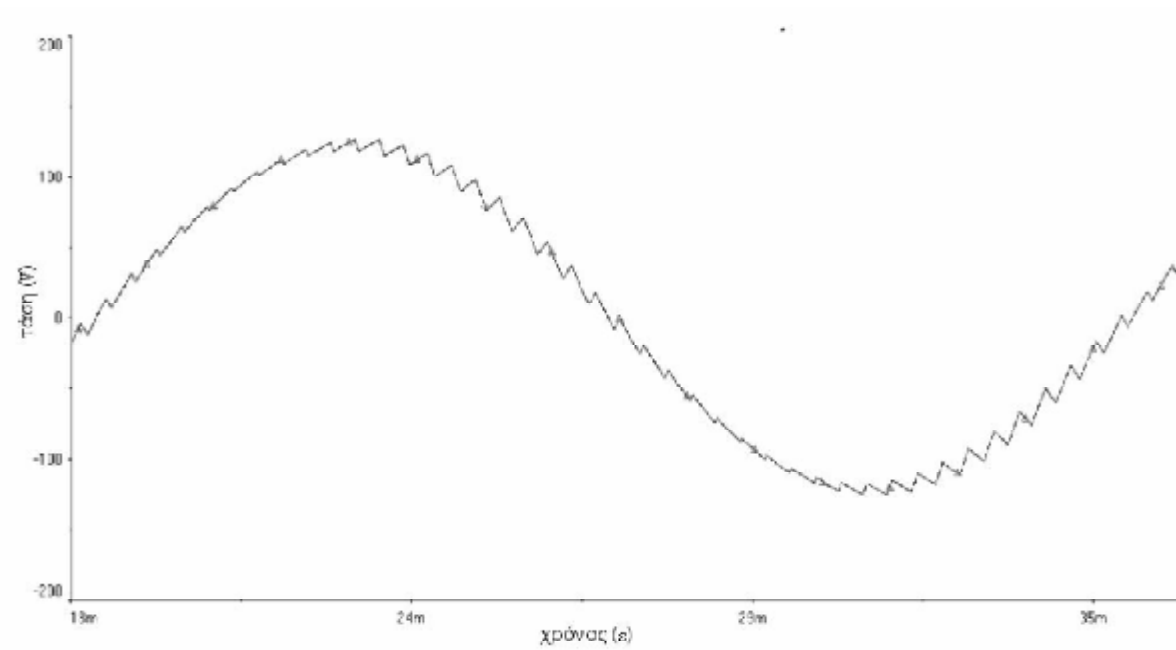
Η πιο κοινή και αποτελεσματική τεχνική για την παραγωγή ψηφιακών ημιτονοειδών σημάτων είναι η διαμόρφωση εύρους παλμού ή PWM στα διεθνή. Η τεχνική PWM περιλαμβάνει την παραγωγή ψηφιακής κυματομορφής για την οποία ο βαθμός εργασίας (Duty Cycle) μεταβάλλεται ώστε το τελικό αποτέλεσμα να είναι ένα σήμα που προσδιορίζει το ημίτονο. Ο απλούστερος τρόπος παραγωγής ημιτονοειδούς σήματος είναι μέσω σύγκρισης μίας μικρής ισχύος ημιτονοειδούς σήματος αναφοράς, με μια τριγωνικής κυματομορφής τάση, όπως φαίνεται στο (Σχήμα 10). Προωθώντας τα 2 αυτά σήματα σε έναν συγκριτή, η έξοδος του, θα είναι η PWM όπως φαίνεται στο (Σχήμα 11). Αυτό το σήμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να ελέγχει τα διακοπτικά στοιχεία, τα οποία συνδέονται σε διαύλους μεγαλύτερης τάσης, ώστε τελικά να έχουμε πλήρη αντιγραφή του σήματος με το πλάτος που επιθυμούμε. Εάν περάσουμε το σήμα μας από ένα LC φίλτρο όπως στο (Σχήμα 12), το PWM σήμα θα μοιάζει περισσότερο με την ημιτονοειδή καμπύλη.



**Σχήμα 10:** Τριγωνική και ημιτονοειδής τάση



**Σχήμα 11:** PWM έξοδος συγκριτή



**Σχήμα 12:** Τελικό σήμα PWM με εξομάλυνση

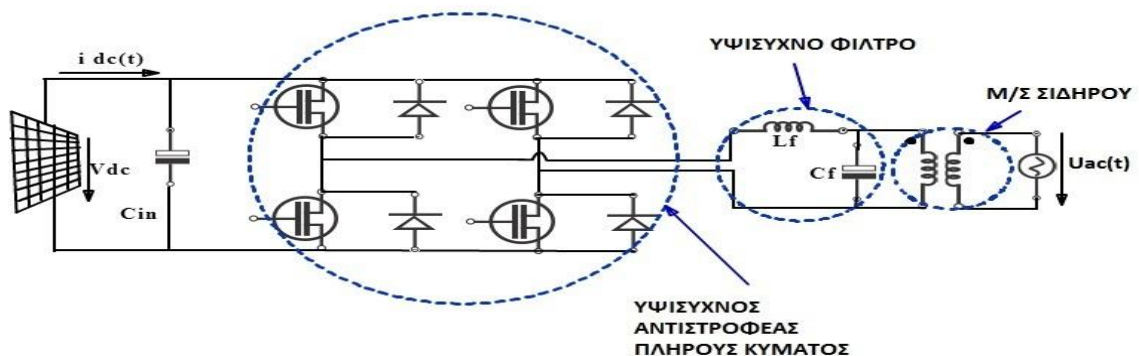
# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΑ ΓΙΑ ΧΑΜΗΛΗΣ ΙΣΧΥΟΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟ ΣΤΟΙΧΕΙΟ

## 4.1 Εισαγωγή

Στο προηγούμενο κεφάλαιο αναλύθηκαν τα βασικά κριτήρια που διέπουν τους αντιστροφείς. Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται η υλοποίηση του αντιστροφέα οποίος προτείνεται για χρήση στα χαμηλής ισχύος φωτοβολταϊκά στοιχεία. Πρόκειται για θεωρητική ανάλυση ενός μονοφασικού υψίσυχνου αντιστροφέα μιας βαθμίδας με μετασχηματιστή απομόνωσης έχοντας χαρακτηριστικά όπως ο υψηλός βαθμός απόδοσης, ο συντελεστής ισχύος και η πυκνότητα ισχύος, όπου λειτουργεί και σε αυτόνομο φωτοβολταϊκό σύστημα αλλά ειδικεύεται η χρήση του για την εγκατάσταση χαμηλής ισχύος φωτοβολταϊκών στοιχείων έως 300W στο δίκτυο χαμηλής τάσης. Η τοπολογία που προτείνεται είναι τύπου Flyback με δύο ανεξάρτητα δευτερεύοντα τυλίγματα όπου αναλύονται οι τεχνικές ελέγχου για να γίνει ορθά η χρήση του αντιστροφέα. Για την επίλυση των μαθηματικών σχέσεων και των γραφικών παραστάσεων που προέκυψαν για την λειτουργία του αντιστροφέα χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα OCTAVE 3.6.4 όπου έγινε εξαγωγή των αποτελεσμάτων.

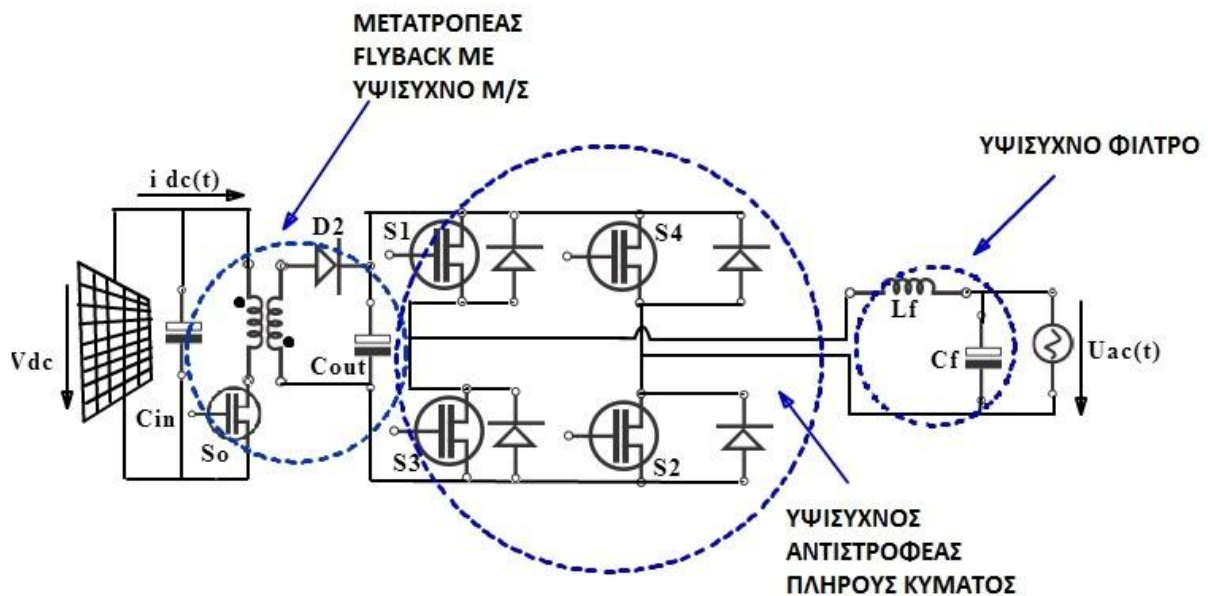
## 4.2 Τοπολογίες που συνδυάζονται στον αντιστροφέα

Αμέσως παρακάτω εμφανίζονται δύο τοπολογίες όπου σε συνδυασμό έγινε ο σχεδιασμός και η υλοποίηση του αντιστροφέα για χαμηλής ισχύος φωτοβολταϊκό στοιχείο. Στο (Σχήμα 1) παρουσιάζεται ένας PWM υψίσυχνος αντιστροφέας πλήρους γέφυρας με LC φίλτρο και μετασχηματιστή σιδήρου. Ο μετατροπέας αυτός είναι μιας βαθμίδας όπου ο σχεδιασμός και ο έλεγχός είναι απλός και τα ημιαγωγικά στοιχεία που χρησιμοποιούνται είναι ελάχιστα που σημαίνει ότι καταλαμβάνουν μικρό όγκο και μεγαλύτερη αξιοπιστία.



Σχήμα 1: PWM υψίσυχνος αντιστροφέας πλήρους γέφυρας με LC φίλτρο και μετασχηματιστή σιδήρου

Η τοπολογία του (Σχήματος 2) είναι ένας μετατροπέας δύο βαθμίδων. Στην πρώτη βαθμίδα υπάρχει ένας υψίσυχνος μετατροπέας forward Flyback ανύψωσης τάσης DC-DC με βασικό χαρακτηριστικό τον υψίσυχο μετασχηματιστή. Στην δεύτερη βαθμίδα βρίσκεται ο PWM αντιστροφέας πλήρους γέφυρας με υψίσυχο φίλτρο. Η τάση ανυψώνεται σε σταθερή τιμή, ώστε στην δεύτερη βαθμίδα, δηλαδή στον αντιστροφέα, να επιτευχθεί, με την βοήθεια του φίλτρου, η ημιτονοειδής μορφή του ρεύματος ώστε να υλοποιηθεί η σύνδεση με το δίκτυο. Αυτό υλοποιείται ελέγχοντας τον αντιστροφέα με παλμούς PWM.



**Σχήμα 2:** Μετατροπέας δύο βαθμίδων(forward Flyback, PWM αντιστροφέας)

Με τον έλεγχο M.P.P.T(έλεγχος ανίχνευσης του σημείου λειτουργίας μέγιστης αποδιδόμενης ισχύος) τα φωτοβολταϊκά στοιχεία παράγουν την μέγιστη ηλεκτρική ισχύ ενώ με κατάλληλες τεχνικές ελέγχου επιτυγχάνεται υψηλός συντελεστής ισχύος.

Οι παραπάνω τοπολογίες που παρουσιάστηκαν πέραν απ' το σκοπό λειτουργίας και τα πλεονεκτήματά τους περιέχουν και κάποια βασικά μειονεκτήματα με αποτέλεσμα τον περιορισμό της αποδοτικότητας των μετατροπέων και τον περιορισμό της πυκνότητας ισχύος. Στο (Σχήμα 1) η ύπαρξη του μετασχηματιστή σιδήρου προσθέτει όγκο και βάρος στην εγκατάσταση. Σε συνθήκες μειωμένης ηλιακής ακτινοβολίας ο βαθμός απόδοσης μειώνεται λόγω των απωλειών σιδήρου του μετασχηματιστή οι οποίες εξαρτώνται αποκλειστικά από την τιμή της τάσης που εφαρμόζεται η οποία είναι σταθερή και ίση με την τάση του ηλεκτρικού δικτύου. Στο (Σχήμα 2) υπάρχει αύξηση των ελεγχόμενων διακοπτικών στοιχείων και η παραγόμενη ενέργεια απ' το φωτοβολταϊκό στοιχείο μετασχηματίζεται δύο φορές, στην πρώτη βαθμίδα με την ανύψωση της τάσης και στην δεύτερη στον μετατροπέα πλήρους γέφυρας με αποτέλεσμα την μείωση του βαθμού απόδοσης του μετατροπέα και κατ' επέκταση την αξιοπιστία του. Έχοντας εξετάσει τις δύο αυτές τοπολογίες βάση των χαρακτηριστικών τους, υλοποιείται ο αντιστροφέας ο οποίος συνδυάζει τα πλεονεκτήματα τους και βάση συνδυασμού των λειτουργιών που αναλύονται γίνεται η ορθή χρήση για την διασύνδεσή του με χαμηλής ισχύος φωτοβολταϊκό στοιχείο.

### 4.3 Αρχές λειτουργίας και κύκλωμα του αντιστροφέα

Ο ηλεκτρονικός μετατροπέας συμπεριφέρεται ως πηγή ρεύματος όπου η τιμή της εξαρτάται από την τάση του δικτύου. Το φωτοβολταϊκό στοιχείο παράγει ηλεκτρική ενέργεια όπου με τον κατάλληλο έλεγχο του μετατροπέα γίνεται η μεταφορά της ενέργειας στο ηλεκτρικό δίκτυο. Θεωρητικά από την εξίσωση (1) η ηλεκτρική ενέργεια μεταφέρεται στο δίκτυο μέσω του μετατροπέα με συντελεστή ισχύος ίσο με την μονάδα.

$$i_s(t) = g_s u_{ac}(t) \quad (1)$$

$$u_{ac}(t) = V_{ac,p} \sin \omega t \quad (2)$$

Όπου

$I_s(t)$ : η χρονική συνάρτηση της πηγής ρεύματος

$u_{ac}(t)$ : η χρονική συνάρτηση της τάσης του δικτύου

$V_{ac,p}$ : η μέγιστη τιμή της τάσης του δικτύου

$g_s$ : η αγωγιμότητα της πηγής ρεύματος (εξαρτάται από το επίπεδο της μεταφερόμενης ισχύος)

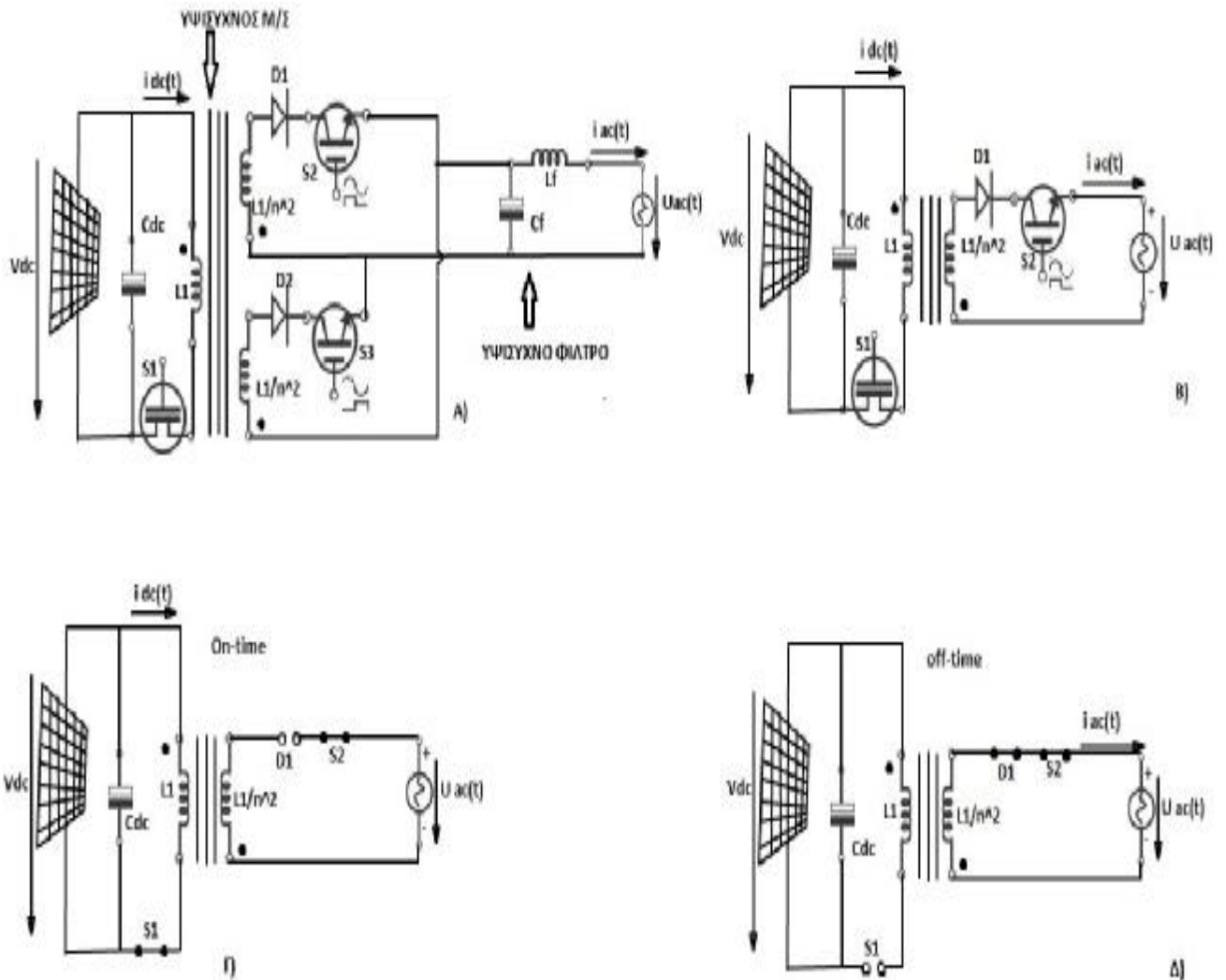
Χαρακτηριστικό του μετατροπέα είναι η μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο από την πλευρά της συνεχούς τάσης. Η επιλογή του μετατροπέα Flyback προτείνεται από τις υπόλοιπες υπάρχουσες διατάξεις διότι έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

- Ο σχεδιασμός του μετατροπέα περιέχει λιγότερα διακοπτικά στοιχεία απ' τις υπόλοιπες διατάξεις.
- Η κατασκευή του είναι απλή με λιγότερο κόστος απ' τις άλλες διατάξεις.
- Λόγω της ύπαρξης του υψίσυχνου μετασχηματιστή επιτυγχάνεται η υψηλή τιμή του συντελεστή ισχύος.

Για να γίνει ορθά η μεταφορά πραγματικής ισχύος από το φωτοβολταϊκό στοιχείο στο ηλεκτρικό δίκτυο, ο αντιστροφέας θα πρέπει:

- να εξασφαλίζει στην έξοδο του φίλτρου, ρεύμα ημιτονοειδούς μορφής.
- συχνότητας 50 Hz.
- συμφασικό με την τάση του δικτύου.

Η μεταφορά τη ενέργειας από την πλευρά της συνεχούς τάσης σε αυτή της εναλλασσόμενης πραγματοποιείται μέσω δύο όμοιων δευτερευόντων τυλιγμάτων. Κάθε ένα από αυτά άγει για διάστημα μισής περιόδου του εναλλασσόμενου ηλεκτρικού δικτύου ελέγχοντας κατάλληλα τα διακοπτικά στοιχεία S2 και S3. Ο σχεδιασμός της προτεινόμενης διάταξης παρουσιάζεται στο παρακάτω (Σχήμα 3.A) και για κάθε ημιπερίοδο του δικτύου, το ισοδύναμο κύκλωμα του μετατροπέα βρίσκεται στο (Σχήμα 3.B), με αποτέλεσμα η διάταξη να συμπεριφέρεται σαν ένας κλασικός dc/dc Flyback μετατροπέας.



**Σχήμα 3:** Κύκλωμα της προτεινόμενης διάταξης για κάθε ημιπερίοδο του ηλεκτρικού δικτύου.

Ο μετατροπέας πρέπει να συμπεριφέρεται ως πηγή ρεύματος, η τιμή της οποίας εξαρτάται από την τιμή της τάσης του δικτύου όπου καθορίζει τις περιοχές λειτουργίας του μετατροπέα. Για να ικανοποιείται η συνθήκη αυτή ο αντιστροφέας είναι δυνατόν να λειτουργεί είτε στην περιοχή της ασυνεχούς κατάστασης αγωγής (DCM) είτε στο όριο μεταξύ της συνεχούς και ασυνεχούς αγωγής (BCM). Στις δύο αυτές περιπτώσεις ο μετασχηματιστής εκφορτίζεται πλήρως στη διάρκεια μιας διακοπτικής περιόδου.

Σχετικά με τον εφαρμοζόμενο έλεγχο στις δύο μεθόδους λειτουργίας. Στην περίπτωση της ασυνεχούς κατάστασης αγωγής εφαρμόζεται μέθοδος ελέγχου Σταθερής Διακοπτικής Συχνότητας. Ενώ στο όριο μεταξύ συνεχούς και ασυνεχούς αγωγής η εφαρμοζόμενη μέθοδος είναι της Μεταβλητής Διακοπτικής Συχνότητας. Επίσης κατάλληλοι Μ.Ρ.Τ. έλεγχοι μπορούν να εφαρμοστούν και στην περίπτωση του προτεινόμενου αντιστροφέα και έχουν ήδη παρουσιαστεί στη διεθνή βιβλιογραφία.

#### 4.4 Λειτουργία αντιστροφέα στην περιοχή της ασυνεχούς αγωγής (DCM)

Η λειτουργία της τεχνικής ελέγχου του αντιστροφέα στην περίπτωση της ασυνεχούς αγωγής, κατά την οποία η διακοπτική συχνότητα διατηρείται σταθερή, είναι να διαμορφωθούν οι μέγιστες τιμές του διακοπτικού ρεύματος εισόδου σε κάθε διακοπτικό κύκλο σύμφωνα με την ημιτονοειδή τάση του δικτύου. Οι εξισώσεις που διέπουν τη λειτουργία στην ασυνεχή αγωγής είναι :

Η μέγιστη τιμή του ρεύματος που διαρρέει τον μετασχηματιστή

$$i_{DC,p}(t) = \frac{V_{DC}}{L_1 f_s} d_p \sin \omega t, \omega t \in [0, \pi] \quad (3)$$

Όπου:

$d_p$ : η τιμή του λόγου κατάτμησης  $d = t_{on}/t_s$  για την χρονική στιγμή  $\omega t = \pi/2$

$V_{dc}$ : η τάση εξόδου της φωτοβολταϊκής γεννήτριας

$f_s$ : η διακοπτική συχνότητα λειτουργίας

$L_1$ : η αυτεπαγωγήμότητα του πρωτεύοντος τυλίγματος του Μ/Σ

Για να εξασφαλίζουμε τη λειτουργία του μετατροπέα στην κατάσταση της ασυνεχούς αγωγής πρέπει:

$$d_p \leq \frac{1}{1+\frac{\lambda}{n}} \quad (4)$$

Όπου:

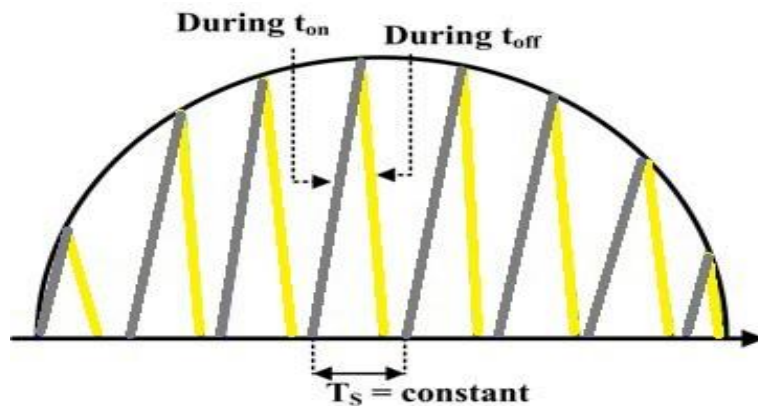
$n = N_{DC}/N_{AC}$  η τιμή του λόγου μετασχηματισμού και  $\lambda = V_{DC}/V_{AC,p}$

$N_{DC}$ : ο αριθμός των σπειρών του τυλίγματος του μετασχηματιστή που συνδέεται με την φωτοβολταϊκή γεννήτρια

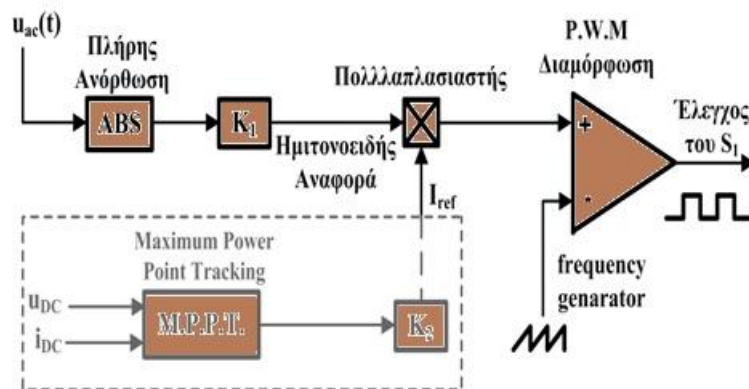
$N_{ac}$ : ο αριθμός των σπειρών του τυλίγματος του μετασχηματιστή που συνδέεται με το εναλλασσόμενο ηλεκτρικό δίκτυο

Στο (Σχήμα 4) παρουσιάζεται το ρεύμα του μετασχηματιστή ανηγμένο στην πλευρά του φωτοβολταϊκού στοιχείου. Όταν ο διακόπτης S1 βρίσκεται σε κατάσταση αγωγής (διάστημα  $t_{on}$ ) το ρεύμα του μετασχηματιστή ρέει μέσω του πρωτεύοντος τυλίγματος όπως φαίνεται στο (Σχήμα 3.Γ), ενώ κατά τη διάρκεια του χρονικού διαστήματος  $t_{off}$  ρέει μέσω του ενεργού δευτερεύοντος τυλίγματος (Σχήμα 3.Δ). Το ενεργό δευτερεύον τυλίγμα καθορίζεται κάθε φορά από την πολικότητα της τάσης του δικτύου, άρα από τον έλεγχο των S2 και S3. Τέλος στο χρονικό διάστημα που μεσολαβεί από την πλήρη εκφόρτιση του Μ/Σ μέχρι το ξεκίνημα του νέου διακοπτικού κύκλου, ο Μ/Σ δε διαρρέεται από ρεύμα. Η διάρκεια του διαστήματος αγωγής του S1 καθορίζεται βάσει της ισχύος εξόδου του Φ/Β πλαισίου. Στο διάγραμμα ελέγχου για τη περίπτωση της κατάστασης ασυνεχούς αγωγής με σταθερή διακοπτική συχνότητα, είναι ένας απλός PWM βρόχος, όπως φαίνεται στο (Σχήμα 5).





Σχήμα 4: Απεικόνιση ρεύματος που διαρρέει τον μετασχηματιστή στη DCM.



Σχήμα 5: Δημιουργία του σήματος ελέγχου του ημιαγωγικού διακόπτη S1 για την περίπτωση της ασυνεχούς αγωγής.

Σημειώνεται πως ο σχεδιασμός και η κατασκευή του κυκλώματος ελέγχου είναι εύκολο στο να υλοποιηθεί που σημαίνει μείωση του συνολικού κόστους. Το γεγονός ότι δεν μετράτε το ρεύμα μαγνήτισης του μετασχηματιστή μπορεί να οδηγήσει τον αντιστροφέα – κάτω υπό ακραίες συνθήκες φορτίου – στην συνεχή αγωγή με αποτέλεσμα τη δημιουργία βραχυκυκλώματος όπου για τον λόγο αυτό είναι απαραίτητος ο ακριβής σχεδιασμός του αντιστροφέα.

## 4.5 Μέγιστη πυκνότητα μεταφερόμενης ισχύος (DCM)

Έπειτα από τη θεωρητική ανάλυση της DCM, είναι απαραίτητος ο καθορισμός της μέγιστης πυκνότητας ισχύος που μπορεί να μεταφέρει ο αντιστροφέας, σε σχέση με τις σχεδιαστικές του παραμέτρους. Για δεδομένο επίπεδο ισχύος η κατάλληλη επιλογή των σχεδιαστικών παραμέτρων καθορίζει και την πυκνότητα ισχύος του μετατροπέα.

Θεωρητικά ο μετατροπέας παρέχει ενέργεια στο ηλεκτρικό δίκτυο με βαθμό απόδοσης ίσο με την μονάδα. Η πραγματική ισχύς που μεταφέρεται στο δίκτυο  $P_{ac}$  θα ισούται με την ισχύ εξόδου της φωτοβολταϊκής γεννήτριας  $P_{dc}$ :

$$P_{ac} = P_{dc} = P \quad (5)$$

Η μεταφερόμενη ισχύς στην μόνιμη κατάσταση λειτουργίας του μετατροπέα εκφράζεται:

$$P = V_{DC} I_{DC,avg} \quad (6)$$

Όπου

$I_{DC,avg}$ : η μέση τιμή του ρεύματος που διαρρέει το πρωτεύον του Μ/Σ

Η μεταφερόμενη ισχύς πλέον είναι η εξής:

$$P = \frac{1}{4} \frac{d_p^2}{f_s L_1} V_{DC}^2 = \frac{1}{2} \frac{\lambda^2 d_p^2}{2 f_s L_1} V_{ac,rms}^2 \quad (7)$$

Όπου:

$V_{ac,rms}$ : η ενεργός τιμή της τάσης του ηλεκτρικού δικτύου

Από την εξίσωση (1) η βασική αρμονική του ρεύματος που ρέει από τον μετατροπέα στο ηλεκτρικό δίκτυο (μετά το φίλτρο) είναι συμφασική με αυτή της τάσης του δικτύου. Η μεταφερόμενη ισχύς πλέον εκφράζεται σύμφωνα με την ακόλουθη εξίσωση:

$$P = g_s V_{ac,rms}^2 \quad (8)$$

Συνδυάζοντας τις (7) και (8) προκύπτει ότι:

$$\frac{g_s}{g_L} = \frac{1}{2} \lambda^2 d_p^2 \quad (9)$$

Όπου:

$$g_L = \frac{1}{f_s L_1} \quad (10)$$

Λαμβάνοντας υπόψη την εξίσωση (4), η μέγιστη μεταφερόμενη ισχύς σημειώνεται όταν:

$$\left( \frac{g_s}{g_L} \right)_{\max} = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{\lambda} + \frac{1}{n} \right)^{-2} \quad (11)$$

Παρακάτω παρουσιάζεται το πρόγραμμα με τα αποτελέσματα για το Σχήμα 6 που δείχνει το λόγο  $(g_S/g_L)_{\max}$  συναρτήσει του  $n$  και με παράμετρο το  $\lambda$ .

Πρόγραμμα με εξαγωγή αποτελεσμάτων:

```
octave-3.6.4.exe:2> l=0.05;
octave-3.6.4.exe:3> n=0:0.5:5.5;
octave-3.6.4.exe:4> y=(1/2).*(((1./l).+(1./n))^-2.)
y =
```

Columns 1 through 6:

```
0.0000000 0.0010331 0.0011338 0.0011707 0.0011898 0.0012015
```

Columns 7 through 12:

```
0.0012094 0.0012150 0.0012193 0.0012227 0.0012254 0.0012276
```

```
octave-3.6.4.exe:5> l=0.1;
octave-3.6.4.exe:6> u=(1/2).*(((1./l).+(1./n))^-2.)
u =
```

Columns 1 through 6:

```
0.0000000 0.0034722 0.0041322 0.0043945 0.0045351 0.0046228
```

Columns 7 through 12:

```
0.0046826 0.0047261 0.0047591 0.0047850 0.0048058 0.0048230
```

```
octave-3.6.4.exe:7> l=0.2;
octave-3.6.4.exe:8> o=(1/2).*(((1./l).+(1./n))^-2.)
o =
```

Columns 1 through 7:

```
0.000000 0.010204 0.013889 0.015571 0.016529 0.017147 0.017578
```

Columns 8 through 12:

```
0.017896 0.018141 0.018334 0.018491 0.018621
```

```
octave-3.6.4.exe:9> l=0.3;
octave-3.6.4.exe:10> t=(1/2).*(((1./l).+(1./n))^-2.)
t =
```

Columns 1 through 7:

0.000000 0.017578 0.026627 0.031250 0.034026 0.035874 0.037190

Columns 8 through 12:

0.038175 0.038940 0.039551 0.040050 0.040465

```
octave-3.6.4.exe:11> l=0.4;
octave-3.6.4.exe:12> r=(1/2).*(((1./l).+(1./n))^-2.)
r =
```

Columns 1 through 7:

0.000000 0.024691 0.040816 0.049861 0.055556 0.059453 0.062284

Columns 8 through 12:

0.064431 0.066116 0.067472 0.068587 0.069520

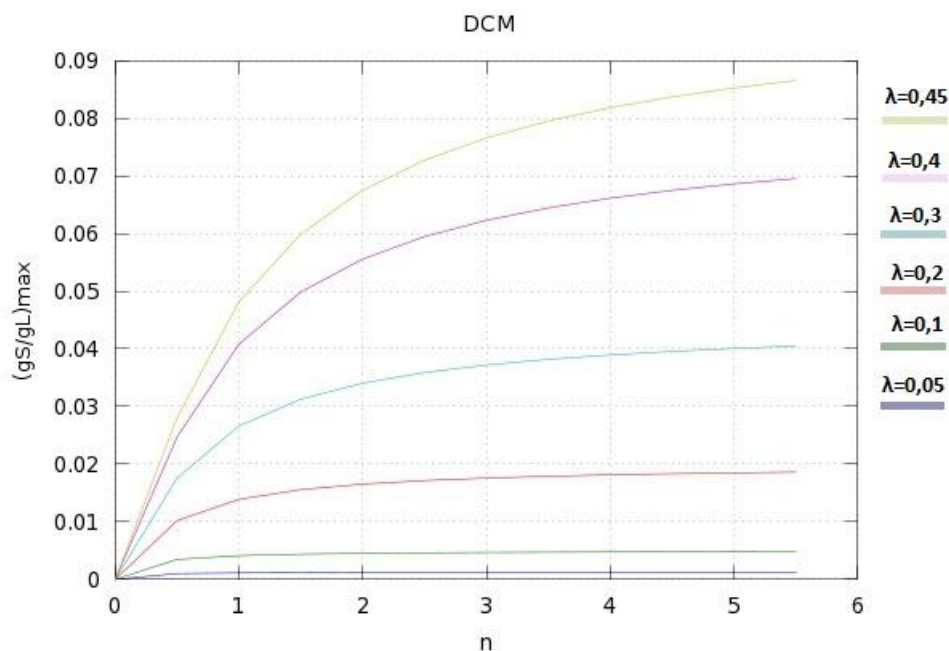
```
octave-3.6.4.exe:13> l=0.45;
octave-3.6.4.exe:14> d=(1/2).*(((1./l).+(1./n))^-2.)
d =
```

Columns 1 through 7:

0.000000 0.028047 0.048157 0.059911 0.067472 0.072716 0.076560

Columns 8 through 12:

0.079494 0.081808 0.083678 0.085220 0.086514



**Σχήμα 6:** Λόγος  $(g_s/g_L)_{\max}$  συναρτήσει του  $n$  και με παράμετρο το  $\lambda$  στη DCM

Για τον προσδιορισμό του εύρους τιμών που μπορεί να λάβει η παράμετρος  $\lambda$  λαμβάνονται υπόψη οι τιμές τάσης του Ευρωπαϊκού δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας και οι τιμές τάσης του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας των Η.Π.Α., καθώς επίσης και οι τιμές της τάσης εξόδου των φωτοβολταϊκών στοιχείων χαμηλής ισχύος στο σημείο μέγιστης αποδιδόμενης ισχύος. Οπότε για τις περιοχές της Ευρώπης η τιμή της παραμέτρου  $\lambda$  είναι μεταξύ των τιμών 0.044 και 0.214, ενώ για την περίπτωση των Η.Π.Α. μεταξύ 0.088 και 0.428. Το σχήμα 6 αποδεικνύει πως για δεδομένες τιμές των  $\lambda$  και  $g_L$  η μέγιστη μεταφερόμενη ισχύς καθορίζεται από την τιμή του λόγου  $g_S/g_L$ . Έτσι η συνεχής αύξηση της τιμής του  $n$  δεν συνοδεύεται από αντίστοιχη αύξηση της ισχύος, αναδεικνύοντας έτσι ότι υπάρχει ένα ανώτατο όριο της μεταφερόμενης ισχύος για κάθε τιμή της παραμέτρου  $\lambda$ .

Ανώτατο όριο της μεταφερόμενης ισχύος υπολογίζεται για κάθε τιμή του  $\lambda$  όταν το  $n$  τείνει στο άπειρο:

$$\left(\frac{g_S}{g_L}\right)_{\max} = \frac{\lambda^2}{2}, \text{ όταν } n \rightarrow \infty \quad (12)$$

Για δεδομένη τιμή της παραμέτρου  $\lambda$ , οποιοδήποτε σημείο λειτουργίας κάτω από την καμπύλη  $(g_S/g_L)_{\max}$  αποτελεί αποδεκτή λύση ώστε ο μετατροπέας να μεταφέρει δεδομένη ισχύ παραμένοντας στην περιοχή της ασυνεχούς αγωγής. Σύμφωνα όμως με την εξίσωση (4), η βέλτιστη επιλογή του σημείου λειτουργίας προκύπτει για την περίπτωση που ικανοποιείται η ισότητα. Το γεγονός αυτό σημαίνει ότι τα σημεία της καμπύλης  $(g_S/g_L)_{\max}$  αποτελούν τα βέλτιστα σημεία λειτουργίας ώστε να επιτυγχάνεται μέγιστη πυκνότητα ισχύος.

Κάθε σημείο της καμπύλης αποτελεί και βέλτιστο σημείο λειτουργίας, η επιλογή του κατάλληλου σημείου εξαρτάται από αρκετές κατασκευαστικές παραμέτρους του μετατροπέα, όπως αυτή του λόγου μετασχηματισμού. Ο τρόπος με τον οποίο η επιλογή της τιμής του  $n$  επιδρά στην ορθή λειτουργία του μετατροπέα θα αναλυθεί στις αμέσως παρακάτω παραγράφους. Χρησιμοποιώντας το ισοδύναμο κύκλωμα (Σχήματος 3.Δ) η μέγιστη τάση στα άκρα του διακόπτη που βρίσκεται στην μεριά του φωτοβολταϊκού στοιχείου υπολογίζεται ως εξής:

$$\frac{V_{S1,p}}{V_{AC,p}} = \lambda + n \quad (13)$$

Παρακάτω παρουσιάζεται το πρόγραμμα με τα αποτελέσματα για το (Σχήμα 7) και (Σχήμα 8) που δείχνουν το λόγο  $V_{S1,p}/V_{AC,p}$  και  $V_{S2,p}/V_{AC,p}$  συναρτήσει του  $n$  και με παράμετρο το  $\lambda$  αντίστοιχα.

Πρόγραμμα με εξαγωγή αποτελεσμάτων:

```
octave-3.6.4.exe:2> l=0.05;
octave-3.6.4.exe:3> n=0:0.5:5.5;
octave-3.6.4.exe:4> y=l.+n
y =
```

Columns 1 through 6:

0.050000 0.550000 1.050000 1.550000 2.050000 2.550000

Columns 7 through 12:

3.050000 3.550000 4.050000 4.550000 5.050000 5.550000

```
octave-3.6.4.exe:5> l=0.1;
octave-3.6.4.exe:6> u=l.+n
u =
```

Columns 1 through 7:

```
0.10000 0.60000 1.10000 1.60000 2.10000 2.60000 3.10000
```

Columns 8 through 12:

```
3.60000 4.10000 4.60000 5.10000 5.60000
```

```
octave-3.6.4.exe:7> l=0.2;
octave-3.6.4.exe:8> o=l.+n
o =
```

Columns 1 through 7:

```
0.20000 0.70000 1.20000 1.70000 2.20000 2.70000 3.20000
```

Columns 8 through 12:

```
3.70000 4.20000 4.70000 5.20000 5.70000
```

```
octave-3.6.4.exe:9> l=0.3;
octave-3.6.4.exe:10> t=l.+n
t =
```

Columns 1 through 7:

```
0.30000 0.80000 1.30000 1.80000 2.30000 2.80000 3.30000
```

Columns 8 through 12:

```
3.80000 4.30000 4.80000 5.30000 5.80000
```

```
octave-3.6.4.exe:11> l=0.4;
octave-3.6.4.exe:12> r=l.+n
r =
```

Columns 1 through 7:

```
0.40000 0.90000 1.40000 1.90000 2.40000 2.90000 3.40000
```

Columns 8 through 12:

```
3.90000 4.40000 4.90000 5.40000 5.90000
```

```
octave-3.6.4.exe:13> l=0.45;
```

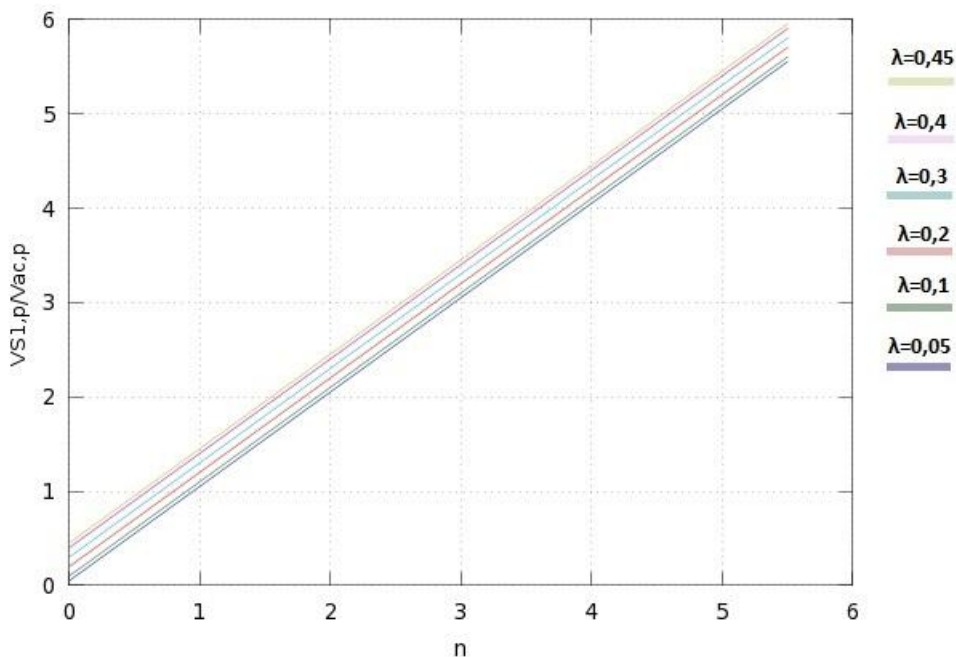
```
octave-3.6.4.exe:14> d=l.+n
d =
```

Columns 1 through 7:

```
0.45000  0.95000  1.45000  1.95000  2.45000  2.95000  3.45000
```

Columns 8 through 12:

```
3.95000  4.45000  4.95000  5.45000  5.95000
```



**Σχήμα 7:** Λόγος  $V_{S1,p}/V_{AC,p}$  συναρτήσει του  $n$  και με παράμετρο το  $\lambda$ .

Πρόγραμμα με εξαγωγή αποτελεσμάτων:

```
octave-3.6.4.exe:2> l=0.05;
octave-3.6.4.exe:3> n=0:0.5:5.5;
octave-3.6.4.exe:4> y=(l./n).+2
y =
```

Columns 1 through 8:

```
Inf  2.1000  2.0500  2.0333  2.0250  2.0200  2.0167  2.0143
```

Columns 9 through 12:

```
2.0125  2.0111  2.0100  2.0091
```

```
octave-3.6.4.exe:5> l=0.1;
octave-3.6.4.exe:6> u=(l./n).+2
u =
```

Columns 1 through 8:

Inf 2.2000 2.1000 2.0667 2.0500 2.0400 2.0333 2.0286

Columns 9 through 12:

2.0250 2.0222 2.0200 2.0182

```
octave-3.6.4.exe:7> l=0.2;
octave-3.6.4.exe:8> o=(l./n).+2
o =
```

Columns 1 through 8:

Inf 2.4000 2.2000 2.1333 2.1000 2.0800 2.0667 2.0571

Columns 9 through 12:

2.0500 2.0444 2.0400 2.0364

```
octave-3.6.4.exe:9> l=0.3;
octave-3.6.4.exe:10> t=(l./n).+2
t =
```

Columns 1 through 8:

Inf 2.6000 2.3000 2.2000 2.1500 2.1200 2.1000 2.0857

Columns 9 through 12:

2.0750 2.0667 2.0600 2.0545

```
octave-3.6.4.exe:11> l=0.4;
octave-3.6.4.exe:12> r=(l./n).+2
r =
```

Columns 1 through 8:

Inf 2.8000 2.4000 2.2667 2.2000 2.1600 2.1333 2.1143

Columns 9 through 12:

2.1000 2.0889 2.0800 2.0727

```
octave-3.6.4.exe:13> l=0.45;
octave-3.6.4.exe:14> d=(l./n).+2
d =
```

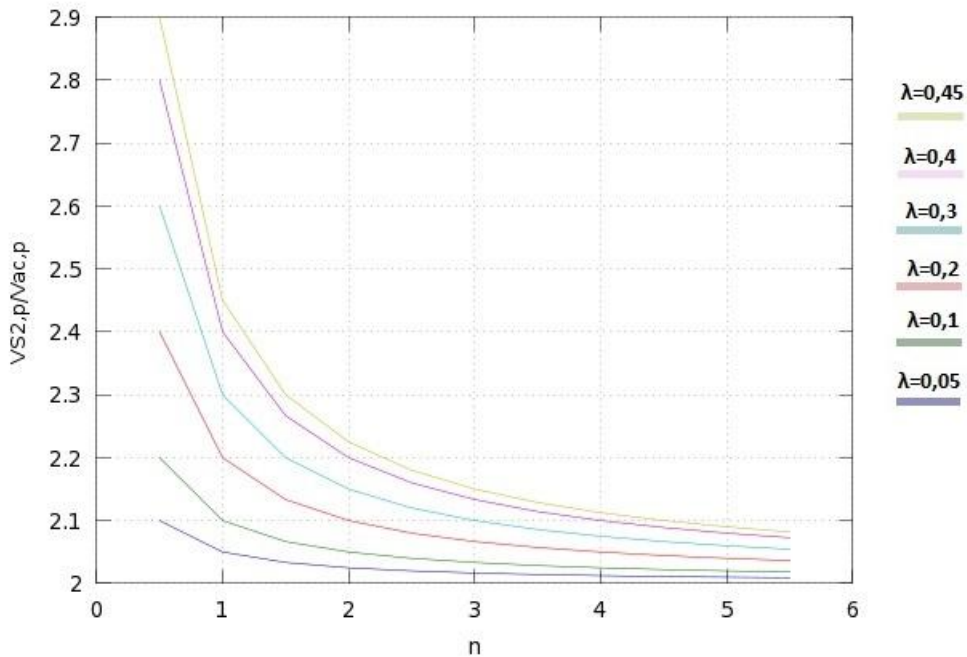
Columns 1 through 8:

Inf 2.9000 2.4500 2.3000 2.2250 2.1800 2.1500 2.1286



Columns 9 through 12:

2.1125 2.1000 2.0900 2.0818



**Σχήμα 8:** Λόγος  $V_{S2,p}/V_{AC,p}$  συναρτήσει του  $n$  και με παράμετρο το  $\lambda$ .

Μελετώντας το (Σχήμα 7) και (Σχήμα 8) προκύπτει το συμπέρασμα ότι υπάρχει σημαντικός περιορισμός ως προς την επιλογή του λόγου μετασχηματισμού. Σύμφωνα με το (Σχήμα 6) για δεδομένη τιμή της παραμέτρου  $\lambda$  η καλύτερη επιλογή της τιμής του  $n$  είναι η πλησιέστερη στο σημείο κορεσμού της καμπύλης, όμως η τιμή αυτή μπορεί να οδηγήσει σε επικίνδυνα υψηλές τιμές τάσεων στα άκρα του  $S1$ . Από την άλλη πλευρά σύμφωνα με το ισοδύναμο κύκλωμα (Σχήμα 3.Γ) η μέγιστη τάση στους διακόπτες που βρίσκονται στην μεριά του ηλεκτρικού δικτύου, υπολογίζεται ως εξής:

$$\frac{V_{S2,p}}{V_{AC,p}} = \frac{\lambda}{n} + 2 \quad (14)$$

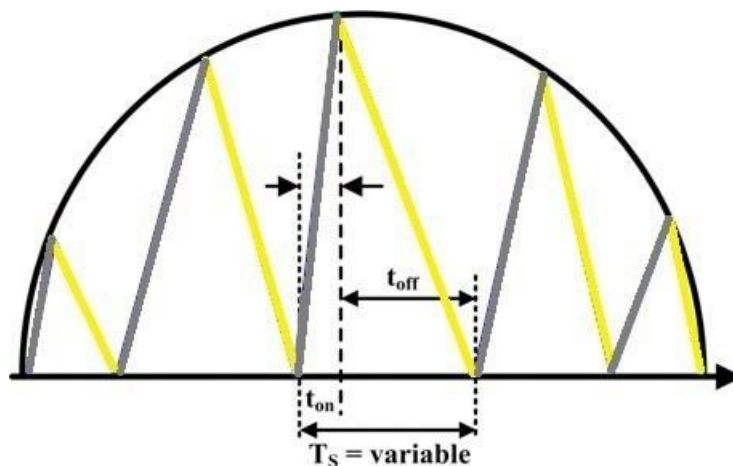
Η μέγιστη τάση στα άκρα των ημιαγωγικών διακοπών  $S2$ ,  $S3$  είναι 2.0 με 2.5 φορές υψηλότερη από τη μέγιστη τιμή τάσης του μονοφασικού ηλεκτρικού δικτύου για πρακτικές τιμές του λόγου μετασχηματισμού. Για αυτό το λόγο οι μέγιστες τάσεις στα άκρα των  $S2$ ,  $S3$  δεν επιδρούν ιδιαίτερα στην επιλογή της τιμής του  $n$ . Η μέγιστη τιμή του ρεύματος που διαρρέει τον διακόπτη  $S1$  είναι συνάρτηση του λόγου μετασχηματισμού και έχει ως εξής:

$$\frac{I_{DC,p}}{I_{DC,avg}} = 4 \left[ 1 + \frac{\lambda}{n} \right] \quad (15)$$

Από την εξίσωση αυτή μια αρκετά μεγάλη τιμή του λόγου μετασχηματισμού μπορεί να οδηγήσει σε επικίνδυνα μεγάλες μέγιστες τιμές ρεύματος διαμέσου του S1. Σαν στόχος λαμβάνεται ο περιορισμός της μέγιστης τάσης στα άκρα των ημιαγωγικών διακοπών καθώς επίσης και της συγκράτησης της μέγιστης τιμής του ρεύματος που διαρρέει τον S1, το πολύ μέχρι δέκα φορές πάνω από την τιμή του μέσου ρεύματος αυτού, έτσι η τιμή του λόγου μετασχηματισμού θα πρέπει να κυμαίνεται μεταξύ 0.2 και 2.8 για την περιοχή της Ευρώπης και μεταξύ 0.3 και 5.5 για την περιοχή των Η.Π.Α.

#### 4.6 Λειτουργία του αντιστροφέα στο όριο της συνεχούς και ασυνεχούς αγωγής (BCM)

Συγκρίνοντας τις δύο λειτουργίες του αντιστροφέα, η διαφορά μεταξύ της ασυνεχούς κατάστασης αγωγής και της λειτουργίας στο όριο συνεχούς και ασυνεχούς, είναι ότι κάθε φορά που το ρεύμα που διαρρέει τον μετασχηματιστή πλησιάζει το μηδέν ξεκινάει ένας νέος διακοπτικός κύκλος με αποτέλεσμα η διακοπτική συχνότητα να μην παραμένει σταθερή αλλά να μεταβάλλεται σε όλη τη διάρκεια μιας ημιπεριόδου του ηλεκτρικού δικτύου, έτσι επιτυγχάνεται πλήρης εκφόρτιση του μετασχηματιστή. Οπότε δεν υπάρχουν χρονικά διαστήματα στα οποία ο μετασχηματιστής να μη διαρρέεται από ρεύμα. Κρίνεται αναγκαίο λοιπόν η εφαρμογή μιας μεθόδου ελέγχου Μεταβλητής Διακοπτικής Συχνότητας. Στο (Σχήμα 9) σχεδιάζεται το ρεύμα που διαρρέει τον μετασχηματιστή, ανηγμένο στην πλευρά του φωτοβολταϊκού στοιχείου χαμηλής ισχύος.



Σχήμα 9: Ρεύμα που διαρρέει τον μετασχηματιστή στη BCM.

Οι σημαντικότερες εξισώσεις που διέπουν τη λειτουργία του μετατροπέα στο όριο της κατάστασης συνεχούς και ασυνεχούς αγωγής είναι:

$$T_s(t) = t_{on}(t) + t_{off} = \left( \frac{\lambda}{n} + \sin \omega t \right) t_{on,p} \quad (16)$$

Όπου

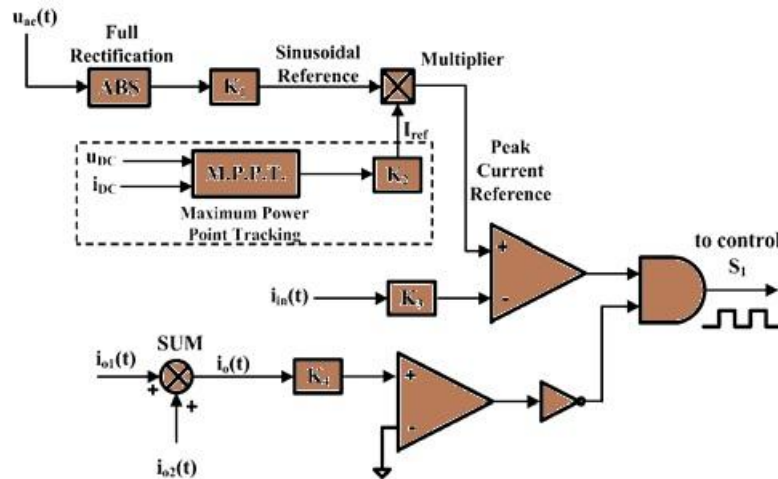
$t_{on,p}$ : είναι η τιμή του χρονικού διαστήματος  $t_{on}$  η οποία αντιστοιχεί στην διακοπτική περίοδο γύρω από την χρονική στιγμή  $\omega t = \pi/2$

Η μέγιστη και ελάχιστη διακοπτική συχνότητα κατά την διάρκεια μιας ημιπεριόδου του ηλεκτρικού δικτύου περιγράφονται από τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$f_{s,\max} = \frac{1}{T_{s,\min}} = \frac{1}{T_s} = \frac{n}{\lambda t_{on,p}}, \text{ όταν } \omega t = 0 \quad (17)$$

$$f_{s,\min} = \frac{1}{T_{s,\max}} = \frac{1}{T_s} = \frac{1}{\left(\frac{\lambda}{n}+1\right)t_{on,p}}, \text{ όταν } \omega t = \frac{\pi}{2} \quad (18)$$

Στο (Σχήμα 10) υλοποιείται η δημιουργία του σήματος ελέγχου του ημιαγωγικού διακόπτη S1 για την περίπτωση λειτουργίας στο όριο συνεχούς και ασυνεχούς αγωγής.



**Σχήμα 10:** Διάγραμμα ελέγχου για τη περίπτωση της λειτουργίας στο όριο συνεχούς και ασυνεχούς αγωγής.

Στην περίπτωση της BCM, το διάγραμμα ελέγχου είναι περισσότερο πολύπλοκο από την DCM, διότι πρέπει να ληφθεί μέτρηση τόσο του ρεύματος που διαρρέει το πρωτεύον τυλίγματα όσο και του ρεύματος των δευτερευόντων τυλιγμάτων του μετασχηματιστή. Όμως αυτό το κύκλωμα ελέγχου εξασφαλίζει ότι ο μετατροπέας δε θα εισέλθει στην περιοχή της συνεχούς αγωγής, διότι το ξεκίνημα κάθε διακοπτικής περιόδου προϋποθέτει την πλήρη εκφόρτιση του μετασχηματιστή.

## 4.7 Μέγιστη πυκνότητα μεταφερόμενης ισχύος (BCM)

Η μεταφερόμενη ισχύς, στην μόνιμη κατάσταση λειτουργίας του μετατροπέα, μπορεί να εκφραστεί σύμφωνα με την εξίσωση:

$$\mathbf{P} = \mathbf{g}_s \mathbf{V}_{ac,rms}^2 = \mathbf{g}_{L,avg} \frac{\lambda^2}{\left(\frac{\lambda}{n} + \frac{2}{\pi}\right)} \left[ \frac{2}{\pi} - \frac{\lambda}{n} + \left(\frac{\lambda}{n}\right)^2 \mathbf{S}\left(\frac{\lambda}{n}\right) \right] \mathbf{V}_{ac,rms}^2 \quad (19)$$

Όπου:

$$\mathbf{S}\left(\frac{\lambda}{n}\right) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} \frac{d\theta}{\frac{\lambda}{n} + \sin\theta} = \begin{cases} \frac{2}{\pi \sqrt{\left(\frac{\lambda}{n}\right)^2 - 1}} \tan^{-1} \sqrt{\left(\frac{\lambda}{n}\right)^2 - 1}, & \text{για } \frac{\lambda}{n} > 1 \\ \frac{2}{\pi}, & \text{για } \frac{\lambda}{n} = 1 \\ \frac{2}{\pi \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{n}\right)^2}} \tan^{-1} \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{n}\right)^2}, & \text{για } \frac{\lambda}{n} < 1 \end{cases} \quad (20)$$

$$\mathbf{g}_{L,avg} = \frac{1}{f_{s,avg} L_1} \quad (21)$$

$$f_{s,avg} = \frac{1}{T_{s,avg}} = \frac{1}{t_{on,p}} \frac{1}{\left(\frac{\lambda}{n} + \frac{2}{\pi}\right)} \quad (22)$$

Από την εξίσωση (19) προκύπτει ότι:

$$\frac{\mathbf{g}_s}{\mathbf{g}_{L,avg}} = \frac{\lambda^2}{\left(\frac{\lambda}{n} + \frac{2}{\pi}\right)} \left[ \frac{2}{\pi} - \frac{\lambda}{n} + \left(\frac{\lambda}{n}\right)^2 \mathbf{S}\left(\frac{\lambda}{n}\right) \right] \quad (23)$$

Παρακάτω παρουσιάζεται το πρόγραμμα με τα αποτελέσματα για το (Σχήμα 11) που δείχνουν το λόγο ( $\mathbf{g}_s/\mathbf{g}_{L,avg}$ ) συναρτήσει του  $n$  και παράμετρο το  $\lambda$ .

Πρόγραμμα με εξαγωγή αποτελεσμάτων:

```
Octave-3.6.4.exe:2> l=0.05;
Octave-3.6.4.exe:3> n=0:0.5:5.5;
Octave-3.6.4.exe:4> t=1./n;
Octave-3.6.4.exe:5> for tyke=t
> If taka>1
> g=(2./(pi.*sqrt(((1./n).^2).-1))).*atan((sqrt(((1./n).^2).-1)));
> else if t=1
> g=2/pi;
> else
> g=(2./(pi*sqrt(1.-((1./n)^2)))).*atanh((sqrt(1.-((1./n)^2))));
> end
> end
> y=((l^2)./(1./n).+(2./pi)).*((2./pi).-1./n).+((1./n)^2).*(g)
> end
```

y =

Columns 1 through 3:

NaN + NaNi 0.00189 + 0.00000i 0.00216 + 0.00000i

Columns 4 through 6:

0.00226 + 0.00000i 0.00232 + 0.00000i 0.00235 + 0.00000i

Columns 7 through 9:

0.00238 + 0.00000i 0.00239 + 0.00000i 0.00241 + 0.00000i

Columns 10 through 12:

0.00242 + 0.00000i 0.00242 + 0.00000i 0.00243 + 0.00000i

y =

Columns 1 through 6:

NaN 0.0018428 0.0021417 0.0022539 0.0023126 0.0023487

Columns 7 through 12:

0.0023731 0.0023908 0.0024041 0.0024145 0.0024229 0.0024298

```
octave-3.6.4.exe:6> l=0.1;
octave-3.6.4.exe:7> for tk=t
> if tk>1
> g=(2./(pi.*sqrt(((1./n)^2).-1))).*atan((sqrt(((1./n)^2).-1)));
> else if t=1
> g=2/pi;
> else
> g=(2./(pi*sqrt(1.-((1./n)^2))).)*atanh((sqrt(1.-((1./n)^2))));
> end
> end
> u=((l^2)./(1./n).+(2./pi)).*((2./pi).-(1./n).+((1./n)^2).*(g))
> end
u =
```

Columns 1 through 6:

NaN 0.0055232 0.0073713 0.0081444 0.0085668 0.0088327

Columns 7 through 12:

0.0090155 0.0091488 0.0092503 0.0093302 0.0093947 0.0094479

```

octave-3.6.4.exe:8> l=0.2;
octave-3.6.4.exe:9> for tk=t
> if tk>1
> g=(2./(pi.*sqrt(((1./n)^2).-1))).*atan((sqrt(((1./n)^2).-1)));
> else if t=1
> g=2/pi;
> else
> g=(2./(pi*sqrt(1.-((1./n)^2)))).*atanh((sqrt(1.-((1./n)^2))));
> end
> end
> o=((l^2)./(1./n).+(2./pi)).*((2./pi).-(1./n).+((1./n)^2).*(g))
> end
o =

```

Columns 1 through 7:

NaN 0.013061 0.022093 0.026734 0.029485 0.031297 0.032577

Columns 8 through 12:

0.033531 0.034267 0.034853 0.035331 0.035727

```

octave-3.6.4.exe:10> l=0.3;
octave-3.6.4.exe:11> for tk=t
> if tk>1
> g=(2./(pi.*sqrt(((1./n)^2).-1))).*atan((sqrt(((1./n)^2).-1)));
> else if t=1
> g=2/pi;
> else
> g=(2./(pi*sqrt(1.-((1./n)^2)))).*atanh((sqrt(1.-((1./n)^2))));
> end
> end
> t=((l^2)./(1./n).+(2./pi)).*((2./pi).-(1./n).+((1./n)^2).*(g))
> end
t =

```

Columns 1 through 7:

NaN 0.019345 0.037851 0.049709 0.057315 0.062542 0.066342

Columns 8 through 12:

0.069223 0.071482 0.073299 0.074793 0.076041

```

octave-3.6.4.exe:12> l=0.4;
octave-3.6.4.exe:13> for tk=t
> if tk>1
> g=(2./(pi.*sqrt(((1./n)^2).-1))).*atan((sqrt(((1./n)^2).-1)));
> else if t=1

```

```

> g=2/pi;
> else
> g=(2./(pi*sqrt(1.-((1./n)^2)))).*atanh(sqrt(1.-((1./n)^2)));
> end
> end
> r=((l^2)./(1./n).+(2./pi)).*((2./pi).-(1./n).+(1./n)^2).*(g)
> end
r =

```

Columns 1 through 7:

NaN 0.027181 0.052243 0.073549 0.088372 0.099002 0.106937

Columns 8 through 12:

0.113069 0.117941 0.121903 0.125186 0.127951

```

octave-3.6.4.exe:14> l=0.45;
octave-3.6.4.exe:15> for tk=t
> if tk>1
> g=(2./(pi.*sqrt(((1./n).^2).-1))).*atan(sqrt(((1./n).^2).-1));
> else if t=1
> g=2/pi;
> else
> g=(2./(pi*sqrt(1.-((1./n)^2)))).*atanh(sqrt(1.-((1./n)^2)));
> end
> end
> d=((l^2)./(1./n).+(2./pi)).*((2./pi).-(1./n).+(1./n)^2).*(g)
> end
d =

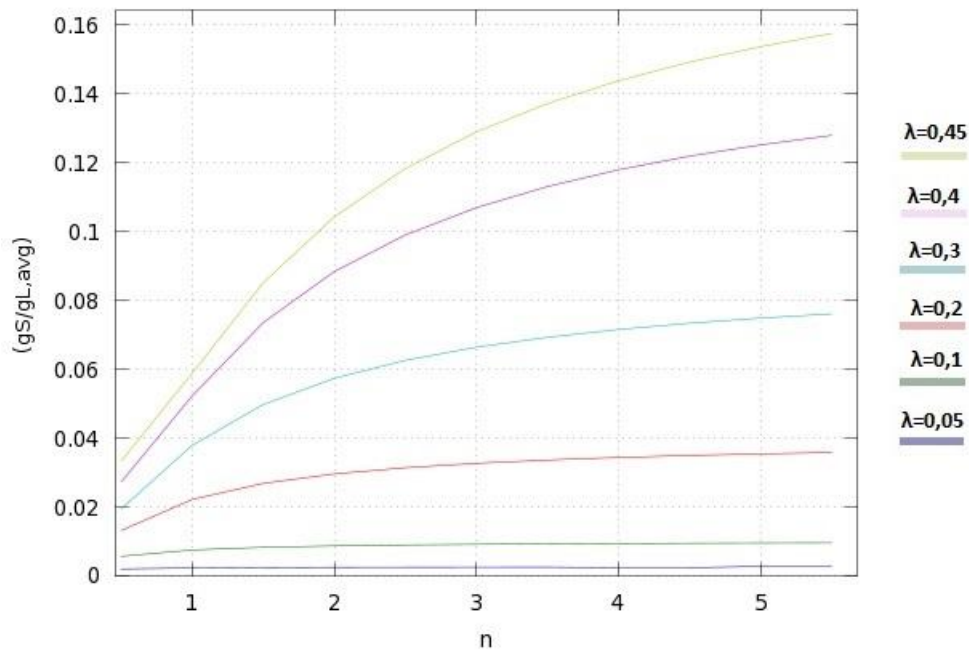
```

Columns 1 through 7:

NaN 0.033246 0.058802 0.085166 0.104314 0.118344 0.128958

Columns 8 through 12:

0.137235 0.143857 0.149269 0.153773 0.157578



**Σχήμα 11:** Λόγος ( $g_S/g_{L,avg}$ ) συναρτήσει του  $n$  και παράμετρο το  $\lambda$ .

Το (Σχήμα 11) σε σύγκριση με το (Σχήμα 6), δίνει το συμπέρασμα ότι η μεταφερόμενη ισχύς είναι πολύ μεγαλύτερη από εκείνη της ασυνεχούς κατάστασης αγωγής για τις ίδιες τιμές των παραμέτρων  $\lambda$  και  $n$ . Το όριο της μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος στην κατάσταση συνεχούς και ασυνεχούς αγωγής για τις ίδιες τιμές των παραμέτρων  $\lambda$  και  $n$  είναι:

$$\frac{g_S}{g_{L,avg}} = \lambda^2, \text{ όταν } n \rightarrow \infty \quad (24)$$

Από την θεωρητική υπόθεση ότι οι ποσότητες  $g_L$  και  $g_{L,avg}$  παίρνουν παραπλήσιες τιμές, βάσει των εξισώσεων (12) και (24) αποδεικνύεται ότι ή μέγιστη μεταφερόμενη ισχύς στην περίπτωση της λειτουργίας στο όριο συνεχούς και ασυνεχούς κατάστασης αγωγής είναι διπλάσια εκείνης που επιτυγχάνεται στην ασυνεχή κατάσταση αγωγής. Με βάση την παραπάνω υπόθεση ισχύει πως για δεδομένο επίπεδο ισχύος η λειτουργία στο όριο συνεχούς και ασυνεχούς αγωγής οδηγεί σε μείωση του όγκου του μαγνητικού πυρήνα σχεδόν σε ποσοστό 50%. Με βάση το αποτέλεσμα αυτό η BCM θεωρείται ως κατάλληλη κατάσταση λειτουργίας για την ανάπτυξη ενός μετατροπέα με ελάχιστο μέγεθος και όγκο και κατ' επέκταση κόστος.

Παρακάτω παρουσιάζεται το πρόγραμμα με τα αποτελέσματα για το (Σχήμα 12) που δείχνουν το λόγο εύρους της διακοπτικής συχνότητας προς τη μέση διακοπτική συχνότητα συναρτήσει του  $n$  και με παράμετρο το  $\lambda$ , οι οποίοι επιδρούν σε αυτήν την κατάσταση λειτουργίας.

Προγραμμα με εξαγωγή αποτελεσμάτων:

```
octave-3.6.4.exe:2> l=0.05;
octave-3.6.4.exe:3> n=0:0.5:5.5;
octave-3.6.4.exe:4> y=(n./(l.+n)).*(1.+(2./pi).*(n./l))
y =
```

Columns 1 through 7:

```
0.00000  6.69654  13.07847  19.45025  25.81931  32.18724  38.55461
```



Columns 8 through 12:

44.92165 51.28848 57.65517 64.02176 70.38828

```
octave-3.6.4.exe:5> l=0.1;
octave-3.6.4.exe:6> u=(n./(1.+n)).*(1.+(2./pi).*(n./l))
u =
```

Columns 1 through 7:

0.00000 3.48592 6.69654 9.88997 13.07847 16.26490 19.45025

Columns 8 through 12:

22.63498 25.81931 29.00337 32.18724 35.37098

```
octave-3.6.4.exe:7> l=0.2;
octave-3.6.4.exe:8> o=(n./(1.+n)).*(1.+(2./pi).*(n./l))
o =
```

Columns 1 through 7:

0.00000 1.85111 3.48592 5.09528 6.69654 8.29421 9.88997

Columns 8 through 12:

11.48458 13.07847 14.67186 16.26490 17.85767

```
octave-3.6.4.exe:9> l=0.3;
octave-3.6.4.exe:10> t=(n./(1.+n)).*(1.+(2./pi).*(n./l))
t =
```

Columns 1 through 7:

0.00000 1.28815 2.40159 3.48592 4.56011 5.62961 6.69654

Columns 8 through 12:

7.76192 8.82629 9.88997 10.95314 12.01595

```
octave-3.6.4.exe:11> l=0.4;
octave-3.6.4.exe:12> r=(n./(1.+n)).*(1.+(2./pi).*(n./l))
r =
```

Columns 1 through 7:

0.00000 0.99765 1.85111 2.67420 3.48592 4.29213 5.09528

Columns 8 through 12:

5.89653 6.69654 7.49569 8.29421 9.09227

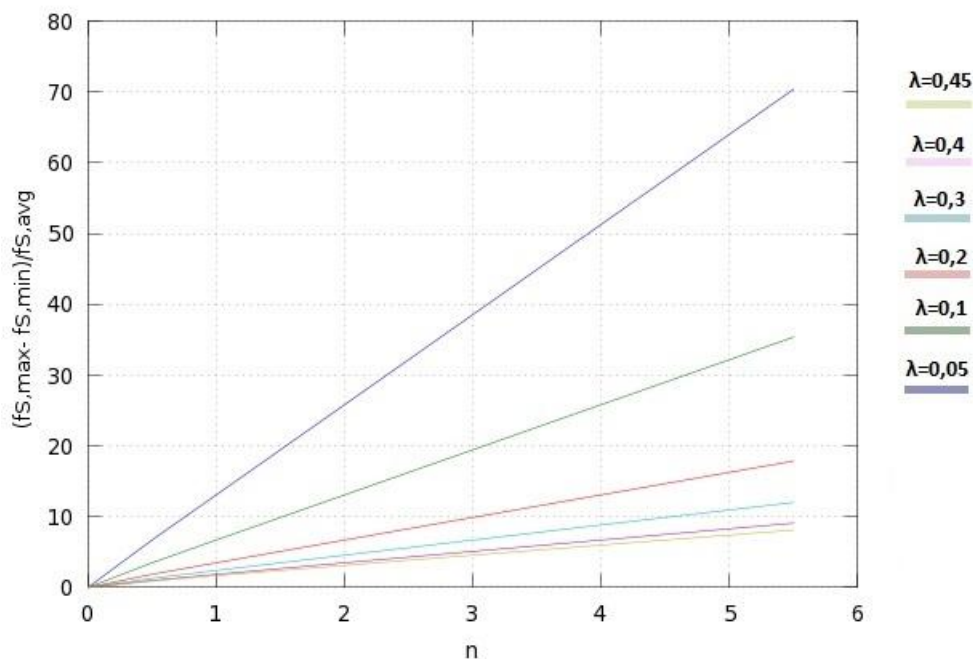
```
octave-3.6.4.exe:13> l=0.45;  
octave-3.6.4.exe:14> d=(n./(1.+n)).*(1.+(2./pi)).*(n./l))  
d =
```

Columns 1 through 7:

0.00000 0.89861 1.66532 2.40159 3.12606 3.84473 4.56011

Columns 8 through 12:

5.27347 5.98548 6.69654 7.40693 8.11681



**Σχήμα 12:** Λόγος του εύρους της διακοπτικής συχνότητας προς τη μέση διακοπτική συχνότητα  $f_{s,avg}$  συναρτήσει του  $n$

Για δεδομένη τιμή της παραμέτρου  $\lambda$ , η αύξηση της τιμής του  $n$  προκαλεί αντίστοιχη αύξηση στο εύρος της διακοπτικής συχνότητας όπου η  $f_{s,max}$  γίνεται σημαντικά μεγαλύτερη από την  $f_{s,min}$  ιδιαίτερα για τιμές του  $\lambda$  που εφαρμόζονται σε φωτοβολταϊκές εφαρμογές. Η τιμή του  $n$  επηρεάζει το εύρος της διακοπτικής συχνότητας καθώς επιδρά τόσο στη μέγιστη όσο και στην ελάχιστη διακοπτική συχνότητα. Συμπεραίνεται λοιπόν ότι η επιλογή της τιμής του  $n$  καταλαμβάνει σημαντικό ρόλο στη σωστή λειτουργία του μετατροπέα αλλά και στον ορθό υπολογισμό του φίλτρου εξόδου.

Παρακάτω παρουσιάζεται το πρόγραμμα με τα αποτελέσματα για το (Σχήμα 13) που δείχνουν το λόγο εύρους της διακοπτικής συχνότητας προς τη μέση διακοπτική συχνότητα συναρτήσει του  $\lambda$  και με παράμετρο το  $n$ .

Προγραμμα με εξαγωγή αποτελεσμάτων:

```
octave-3.6.4.exe:2> n=0.1;  
octave-3.6.4.exe:3> l=0:0.05:0.5;  
octave-3.6.4.exe:4> y=(n./(n.+1)).*(1.+(2./pi)).*(n./l))  
y =
```

Columns 1 through 7:

Inf 1.51549 0.81831 0.56977 0.43944 0.35847 0.30305

Columns 8 through 11:

0.26264 0.23183 0.20754 0.18789

```
octave-3.6.4.exe:5> n=0.5;
octave-3.6.4.exe:6> u=(n./(n.+1)).*(1.+(2./pi).*(n./l))
u =
```

Columns 1 through 7:

Inf 6.69654 3.48592 2.40159 1.85111 1.51549 1.28815

Columns 8 through 11:

1.12321 0.99765 0.89861 0.81831

```
octave-3.6.4.exe:7> n=1;
octave-3.6.4.exe:8> o=(n./(n.+1)).*(1.+(2./pi).*(n./l))
o =
```

Columns 1 through 7:

Inf 13.0785 6.6965 4.5601 3.4859 2.8372 2.4016

Columns 8 through 11:

2.0881 1.8511 1.6653 1.5155

```
octave-3.6.4.exe:9> n=3;
octave-3.6.4.exe:10> t=(n./(n.+1)).*(1.+(2./pi).*(n./l))
t =
```

Columns 1 through 7:

Inf 38.5546 19.4503 13.0785 9.8900 7.9749 6.6965

Columns 8 through 11:

5.7822 5.0953 4.5601 4.1312

```
octave-3.6.4.exe:11> n=4;
octave-3.6.4.exe:12> r=(n./(n.+1)).*(1.+(2./pi).*(n./l))
r =
```

Columns 1 through 7:

Inf 51.2885 25.8193 17.3268 13.0785 10.5279 8.8263

Columns 8 through 11:

7.6098 6.6965 5.9855 5.4160

octave-3.6.4.exe:13> n=5;

octave-3.6.4.exe:14> d=(n./(n.+1)).\*(1.+(2./pi)).\*(n./l)

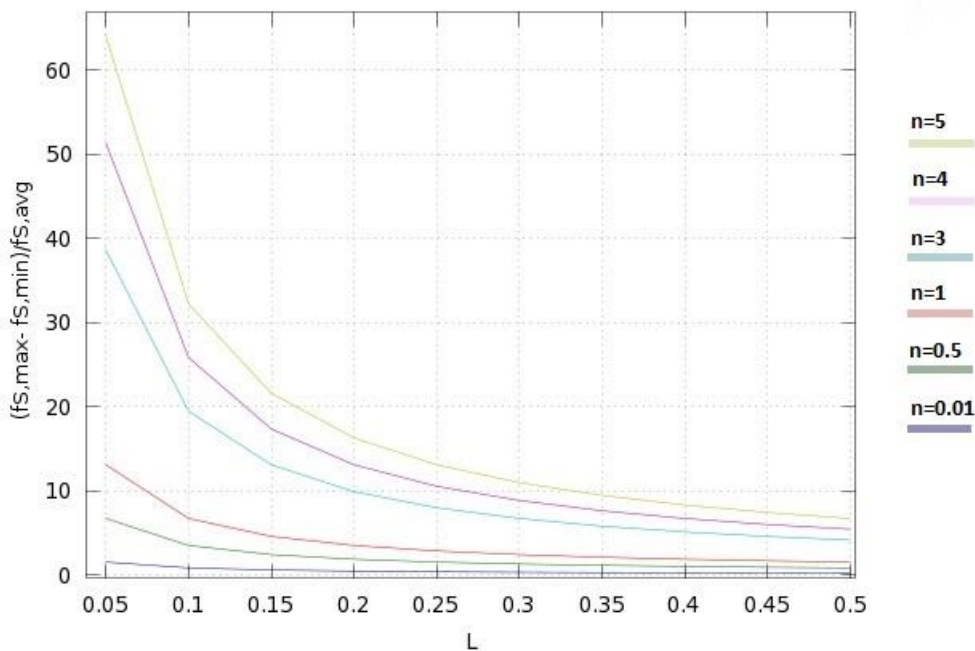
d =

Columns 1 through 7:

Inf 64.0218 32.1872 21.5735 16.2649 13.0785 10.9531

Columns 8 through 11:

9.4342 8.2942 7.4069 6.6965



**Σχήμα 13:** Λόγος του εύρους της διακοπτικής συχνότητας προς τη μέση διακοπτική συχνότητα  $f_{s,avg}$  συναρτήσει του  $\lambda$

Γίνεται λόγος ότι σε ένα πραγματικό φωτοβολταϊκό σύστημα η τιμή της τάσης εξόδου του φωτοβολταϊκού στοιχείου εξαρτάται τόσο από τις μεταβολές της ηλιακής ακτινοβολίας όσο και από την περιβάλλουσα θερμοκρασία, άρα η τιμή του  $\lambda$  δεν παραμένει σταθερή. Θεωρητικά για δεδομένο λόγο μετασχηματισμού, η μείωση της τάσης εξόδου του φωτοβολταϊκού στοιχείου οδηγεί σε αύξηση του εύρους της διακοπτικής συχνότητας για ιδιαίτερα για μεγάλες τιμές του  $n$  όπως φαίνεται από το (Σχήμα 13). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το εύρος χρήσης της BCM να δέχεται περιορισμούς. Η επίδραση των παραμέτρων  $\lambda$  και  $n$  στις μέγιστες τάσεις στα άκρα των ημιαγωγικών στοιχείων της BCM δεν επιδρούν ιδιαίτερα στην επιλογή της τιμής του  $n$ .

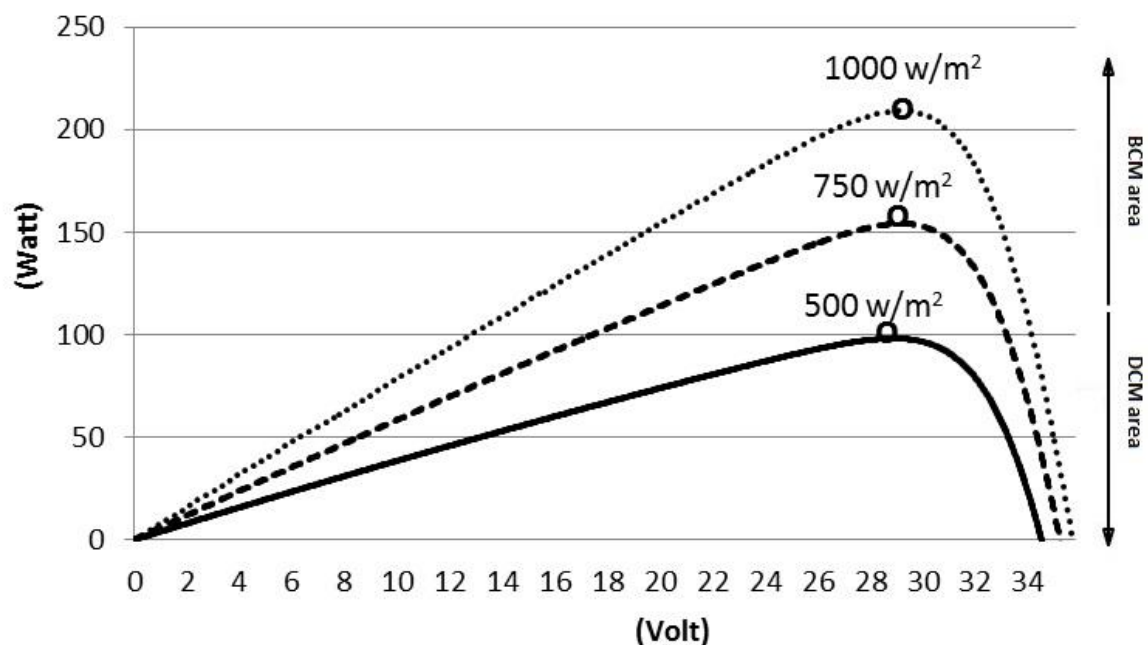
#### 4.8 Συνδυασμός εφαρμογής των δύο καταστάσεων λειτουργίας για την διασύνδεση του αντιστροφέα με χαμηλής ισχύος φωτοβολταϊκό στοιχείο

Ο συνδυασμός των δύο καταστάσεων λειτουργίας του αντιστροφέα που έγινε βάση θεωρητικής μελέτης παραπάνω, έχει ως σκοπό επίτευξη του υψηλού βαθμού απόδοσης, του συντελεστή ισχύος και τον σχεδιασμό ενός αντιστροφέα με απλό κύκλωμα και κατ' επέκταση μικρό όγκο και βάρος όπου χρησιμοποιείται για την διασύνδεση με χαμηλής ισχύος φωτοβολταϊκό στοιχείο.

Με βάση τους περιορισμούς της λειτουργίας του αντιστροφέα αλλά και τα όρια μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος για τις δύο καταστάσεις λειτουργίας, γίνεται η διαπίστωση ότι:

- Η BCM είναι η κατάσταση λειτουργίας κατά την οποία ο αντιστροφέας οδηγείται στα μέγιστα ανιχνεύσιμα από τον M.P.P.T επίπεδα ισχύος όπου είναι σχεδιασμένος, καθώς ικανοποιεί την προϋπόθεση να καταλαμβάνει μικρό όγκο και βάρος.
- Η DCM είναι η κατάσταση λειτουργίας κατά την οποία ο αντιστροφέας οδηγείται στα χαμηλά ανιχνεύσιμα από τον M.P.P.T επίπεδα ισχύος.

Στο (Σχήμα 14) παρουσιάζονται οι χαρακτηριστικές ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου χαμηλής ισχύος για διαφορετικές συνθήκες ακτινοβολίας. Από υπόθεση ότι ο αντιστροφέας λειτουργεί στο όριο συνεχούς και ασυνεχούς κατάστασης αγωγής BCM, οποιαδήποτε μείωση της ισχύος εξόδου του φωτοβολταϊκού στοιχείου εξαιτίας της ελάττωσης της ηλιακής ακτινοβολίας προκαλεί την αύξηση τόσο της μέγιστης όσο και της ελάχιστης διακοπτικής συχνότητας, με αποτέλεσμα να μειώνεται η απόδοση του αντιστροφέα και ο συντελεστής ισχύος για ιδιαίτερα χαμηλές συνθήκες ηλιοφάνειας. Για τον λόγο αυτό η BCM είναι κατάλληλη για επίπεδα ισχύος πάνω από κάποιο όριο όπως φαίνεται στο (Σχήμα 14), ενώ για να γίνει πλήρης εκμετάλλευση του υπόλοιπου μέρους της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιείται η DCM.



Σχήμα 14: Τυπικές χαρακτηριστικές ενός Φ/Β πλαισίου και προτεινόμενη στρατηγική ελέγχου

# ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[https://el.wikipedia.org/wiki/Ανανεώσιμες\\_πηγές\\_ενέργειας](https://el.wikipedia.org/wiki/Ανανεώσιμες_πηγές_ενέργειας)

<https://el.wikipedia.org/wiki/Φωτοβολταϊκά>

<http://hlektrologia.gr/φωτοβολταϊκά-φθηνότερη-ηλιακή-ενέργ/>

[http://www.helapco.gr/ims/file/oikiaka/pv\\_guide\\_jan11.pdf](http://www.helapco.gr/ims/file/oikiaka/pv_guide_jan11.pdf)

<http://www.electricaltechnology.org/2013/05/a-complete-note-on-solar-panel.html>

[http://www.nrel.gov/learning/re\\_photovoltaics.html](http://www.nrel.gov/learning/re_photovoltaics.html)

<http://phys.org/news/2014-12-nrel-efficiency-solar-cell.html>

<http://library.tee.gr/digital/m1800/mitro.pdf>

<http://www.ceidnotes.net/view/%CE%A8%CE%B7%CF%86%CE%B9%CE%B1%CE%BA%CE%AC+%CE%97%CE%BB%CE%B5%CE%BA%CF%84%CF%81%CE%BF%CE%BD%CE%B9%CE%BA%CE%AC/Digital%20Electronics%20book.pdf>

[http://www.electronics-tutorials.ws/transistor/tran\\_8.html](http://www.electronics-tutorials.ws/transistor/tran_8.html)

<http://www.irf.com/technical-info/whitepaper/choosewisely.pdf>

[http://www.electronicproducts.com/Analog\\_Mixed\\_Signal\\_ICs/Discrete\\_Power\\_Transistors/MOSFET\\_vs\\_IGBT.aspx](http://www.electronicproducts.com/Analog_Mixed_Signal_ICs/Discrete_Power_Transistors/MOSFET_vs_IGBT.aspx)

[https://en.wikipedia.org/wiki/Solar\\_inverter](https://en.wikipedia.org/wiki/Solar_inverter)

[http://library.tee.gr/digital/m2547/m2547\\_tatakis.pdf](http://library.tee.gr/digital/m2547/m2547_tatakis.pdf)

<http://www.cocoon.gr/inverter-faq.html>

[https://www.wpi.edu/Pubs/E-project/Available/E-project-080111-173652/unrestricted/Final\\_Report.pdf](https://www.wpi.edu/Pubs/E-project/Available/E-project-080111-173652/unrestricted/Final_Report.pdf)

<http://datasheet.octopart.com/LT3573EMSE%23TRPBF-Linear-Technology-datasheet-10315683.pdf>

<http://drivetechgr.blogspot.gr/2010/02/inverters.html>

<http://pveducator.blogspot.gr/2014/10/dcm-or-bcm-which-one-is-better-choice.html>

[http://schmidt-walter-schaltnetzteile.de/snt/snt\\_eng/snteng3b.pdf](http://schmidt-walter-schaltnetzteile.de/snt/snt_eng/snteng3b.pdf)

[http://library.tee.gr/digital/m2107/m2107\\_kobougias1.pdf](http://library.tee.gr/digital/m2107/m2107_kobougias1.pdf)

[http://aledan.ece.illinois.edu/publications\\_files/Dominguez-Garcia,%20June%202010b.pdf](http://aledan.ece.illinois.edu/publications_files/Dominguez-Garcia,%20June%202010b.pdf)

<https://www.quantumbalancing.com/worldelectricity/electricityif.htm>

<http://www.datasheetarchive.com/flyback%20smmps%20300w%20e%20cores%20transformer-datasheet.html>

<http://www.vergina.eng.auth.gr/IHT/Proc8th/042.doc>

<http://pveducator.blogspot.gr/2014/11/why-flyback-inverter-is-voltage.html>

<http://www.vishay.com/docs/71180/71180.pdf>

<https://www.fairchildsemi.com/datasheets/FA/FAN501A.pdf>