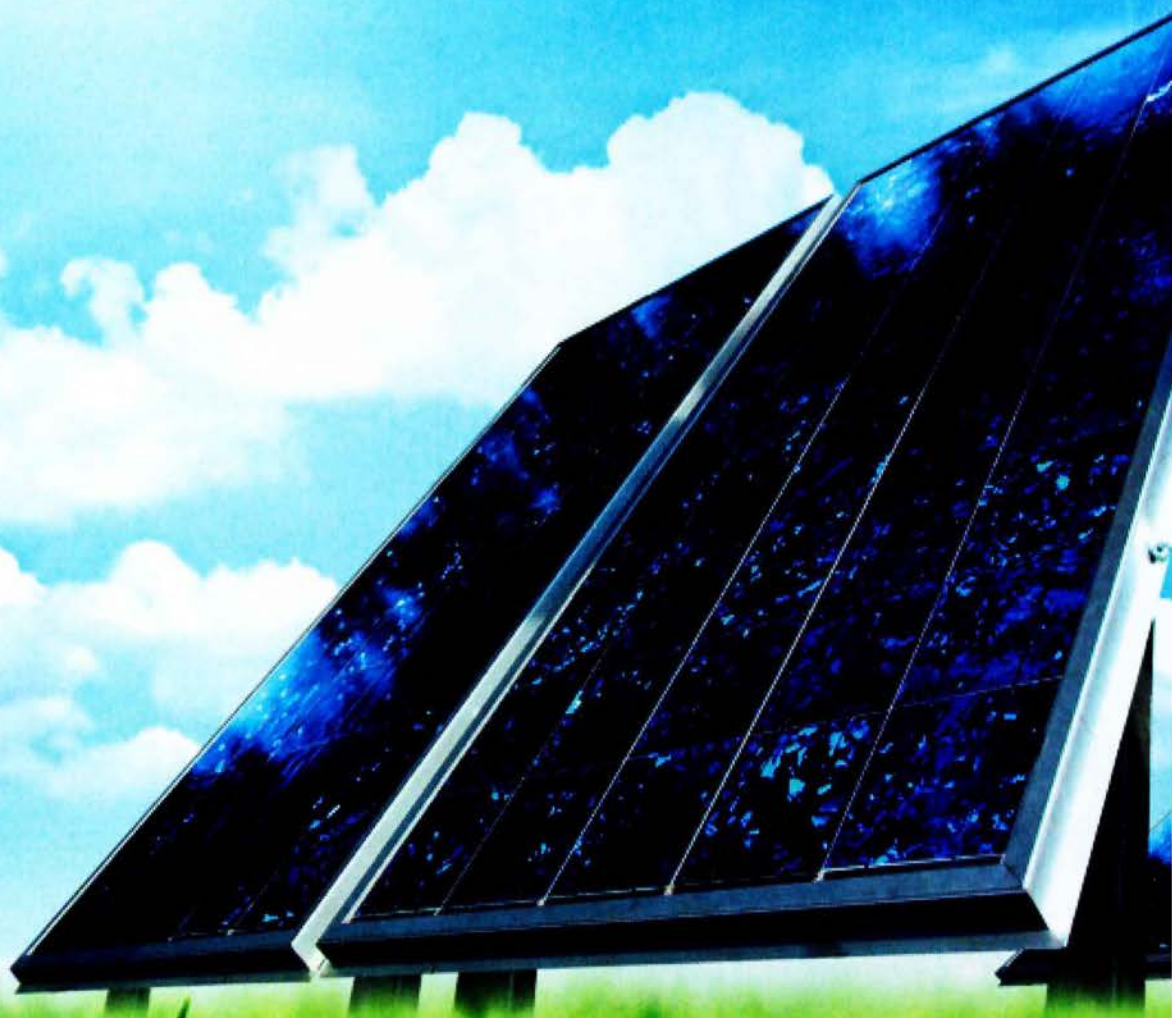


S60  
A4T

**Προσομοίωση ολοκληρωμένου φωτοβολταϊκού συστήματος  
με έλεγχο απόδοσης σε πραγματικό χρόνο.**



ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ  
ΤΕΙ ΠΕΙΡΑΙΑ

**Επ. Καθηγητής:  
Παπουτσιδάκης Μιχάλης**

**Ρούσσος Γουλιέλμος  
Παπαθεοδοσίου Παναγιώτης**

**Α.Τ.Ε.Ι Πειραιά Τμήμα Αυτοματισμού  
Αιγάλεο Φεβρουάριος 2013**

1.12.1 Θερμοκρασία .....	33
1.12.2 Ηλιακή ακτινοβολία.....	33
1.12.3 Ταχύτητα και κατεύθυνση ανέμου.....	34
1.12.4 Ρύπανση .....	34
1.12.5 Σκίαση.....	34
1.12.6 Γήρανση .....	36
1.12.7 Απώλειες του φωτοβολταϊκού συστήματος.....	36
1.12.8 Οπτικές απώλειες.....	36
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 .....</b>	<b>38</b>
2.1 Μοντελοποίηση φ/β κυττάρου .....	38
2.2 Μοντελοποίηση φ/β πάνελ και συστοιχίας .....	43
2.3 Εισαγωγή στο MPPT.....	45
2.4 Συντελεστής Πλήρωσης (Fill Factor, FF) και Βαθμός Απόδοσης .....	47
2.5 Συντελεστής Απόδοσης (Performance Ratio, PR) .....	48
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3.....</b>	<b>49</b>
3.1 ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΕΣ MPPT .....	49
3.1.1 Perturb & Observe (Διαταραχή και Παρατήρηση)(P&O) .....	50
3.1.2 Incremental Conductance (Στοιχειώδης Αγωγιμότητα).....	53
3.1.3 Προσδιορισμός του MPP ως ποσοστό του Voc (Open Voltage, OV).....	56
3.1.5 Προσδιορισμός του MPP ως ποσοστό του Isc (Short Current, SC) .....	57
3.1.6 Νευρωνικά Δίκτυα .....	57
3.1.8 Σάρωση ρεύματος (Current Sweep).....	61
3.1.9 DC Link Capacitor Droop Control (DC LCDC).....	62
3.1.10 Μεγιστοποίηση ρεύματος ή τάσης φορτίου.....	63
3.1.11 dP/dV ή dP/dI Feedback control .....	64
3.1.12 Έλεγχος με Ασαφή Λογική (Fuzzy Logic) .....	64
3.1.13 Άλλες τεχνικές MPPT.....	67



Α.Τ.Ε.Ι Πειραιά

Τμήμα Αυτοματισμού

Φεβρουάριος 2013

## Πτυχιακή Εργασία

Προσομοίωση ολοκληρωμένου φωτοβολταϊκού συστήματος με έλεγχο απόδοσης σε πραγματικό χρόνο.

Simulation of Photovoltaic system with real time performance testing.

### Περίληψη

Θέμα αυτής της πτυχιακής εργασίας είναι η προσομοίωση ενός φωτοβολταϊκού συστήματος (Φ/Β) με τη χρήση του Matlab – Simulink, για την εύρεση του σημείου μέγιστης ισχύος (MPPT) για μεταβαλλόμενη ένταση ηλιακής ακτινοβολίας και θερμοκρασίας. Θα αναφερθεί η θεωρητική ανάλυση των στοιχείων που χρησιμοποιούνται για την υλοποίηση του φωτοβολταϊκού συστήματος. Επίσης γίνεται ανάλυση των κυκλωμάτων που χρησιμοποιούνται, όπως και του Μετατροπέα Υποβιβασμού (Buck Converter). Τέλος, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του ολοκληρωμένου φωτοβολταϊκού συστήματος για τις αντίστοιχες μεταβολές της θερμοκρασίας και της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας ( Irradiance).

Παπαθεοδοσίου Παναγιώτης

Ρούσσος Γουλιέλμος

Επ. Καθηγητής: Παπουτσιδάκης Μιχάλης MEng, MPhil, PhD



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

### 1.1 Ιστορικό φωτοβολταϊκών και τρέχουσες εξελίξεις

Ζούμε μια περίοδο όπου η διόγκωση των περιβαλλοντικών προβλημάτων σε συνδυασμό με την εξάντληση των ορυκτών ενεργειακών πόρων και τα τεράστια βήματα στην τεχνολογία των Φωτοβολταϊκών Συστημάτων κάνουν πλέον εφικτή την χρήση τους. Πώς φτάσαμε όμως ως εδώ και ποιά είναι η ιστορία των φωτοβολταϊκών;

Η πρώτη γνωριμία του ανθρώπου με το φωτοβολταϊκό φαινόμενο έγινε το 1839 όταν ο Γάλλος φυσικός **Edmond Becquerel** (1820 - 1891) ανακάλυψε το φωτοβολταϊκό φαινόμενο κατά την διάρκεια πειραμάτων του με μια ηλεκτρολυτική επαφή φτιαγμένη από δύο μεταλλικά ηλεκτρόδια. Το επόμενο σημαντικό βήμα έγινε το 1876 όταν οι **Adams** (1836 - 1915) και ο φοιτητής του **Day** παρατήρησαν ότι μια ποσότητα ηλεκτρικού ρεύματος παραγόταν από το στερεοποιημένο σελήνιο (**Se**) όταν αυτό ήταν εκτεθειμένο στο φως. Το 1918 ο Πολωνός **Czochralski** (1885 - 1953) πρόσθεσε την μέθοδο παραγωγής ημιαγωγού μονοκρυσταλλικού πυριτίου (**Si**) με την σχετική έρευνα του και η οποία μάλιστα χρησιμοποιείται βελτιστοποιημένη ακόμα και σήμερα. Μια σημαντική ανακάλυψη έγινε επίσης το 1949 όταν οι **Mott** και **Schottky** ανέπτυξαν την θεωρία της διόδου σταθερής κατάστασης. Στο μεταξύ η κβαντική θεωρία είχε ξεδιπλωθεί από τον **Albert Einstein** το 1905, όπου εξήγησε το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, οπότε ο δρόμος για τις πρώτες πρακτικές εφαρμογές είχε ανοίξει.

Το πρώτο ηλιακό κελί ήταν γεγονός. Κατασκευάστηκε στα εργαστήρια της Bell το 1954 από τους **Chapin**, **Fuller** και **Pearson**. Η απόδοση του ήταν στο 6% εκμετάλλευση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας. Αργότερα έγιναν πολλές προσπάθειες από εταιρίες, όπως η Hoffman Electronics, για να βελτιωθεί η απόδοση φτάνοντας, το 1960, σε ποσοστά του 14%. Η σημερινή μέγιστη απόδοση του 41% εκμετάλλευση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας από την National Renewable Energy Laboratory (NREL). (βλ. [19][20][21])

### 1.2 Τα πρώτα σημαντικά φωτοβολταϊκά συστήματα

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα αμέσως χρησιμοποιήθηκαν σε πολλές εφαρμογές και σε διάφορους επιστημονικούς χώρους. Πιο συγκεκριμένα, το 1958 η τεχνολογία των φωτοβολταϊκών συστημάτων προσαρτάται στον χώρο των διαστημικών εφαρμογών όταν τοποθετήθηκε ένα αυτόνομο φωτοβολταϊκό σύστημα στον δορυφόρο Vanguard I . Το σύστημα αυτό λειτούργησε επιτυχώς για 8 ολόκληρα χρόνια και ήταν ένα από τα πρώτα φωτοβολταϊκά συστήματα.

## Ευχαριστίες

Θα θέλαμε να εκφράσουμε τις θερμότερες ευχαριστίες μας στον επιβλέποντα καθηγητή κ. Μιχάλη Παπουτσιδάκη για τις καίριες υποδείξεις του κατά τη διάρκεια εκπόνησης της συγκεκριμένης εργασίας αλλά και για την εμπιστοσύνη που μας έδειξε στο χειρισμό του θέματος.

Τέλος, θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τις οικογένειες μας για τη στήριξη αλλά και για την υπομονή τους, όλα αυτά τα χρόνια, στις σπουδές μας.

## ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1</b> .....	<b>4</b>
1.1 Ιστορικό φωτοβολταϊκών και τρέχουσες εξελίξεις .....	4
1.2 Τα πρώτα σημαντικά φωτοβολταϊκά συστήματα.....	4
1.3 Τα φωτοβολταϊκά στην Ελλάδα.....	6
1.4 Η Ηλιακή Ενέργεια .....	6
1.5 Εφαρμογές Ηλιακής Ενέργειας.....	7
1.6 Φωτοβολταϊκά Ηλιακά Συστήματα.....	8
1.6.1 Διασυνδεδεμένα συστήματα .....	9
1.6.2 Αυτόνομα συστήματα .....	10
1.8 Ημιαγωγοί .....	12
1.8.1 Το Πυρίτιο .....	12
1.8.2 Η ένωση p-n.....	15
1.9 Φωτοβολταϊκό φαινόμενο .....	17
1.9.1 Μονοκρυσταλλικά Κελιά Πυριτίου .....	19
1.9.2 Πολυκρυσταλλικά Κελιά Πυριτίου.....	20
1.9.3 Λεπού Υμενίου ή Λεπτής Μεμβράνης (Thin film).....	21
1.9.4 Άμορφο πυρίτιο .....	22
1.9.5 Υβριδικά Κελιά.....	23
1.10 Δομή Ηλιακών Κελιών.....	25
1.10.1 Δομή φωτοβολταϊκών πλαισίων .....	25
1.11 Απορρόφηση Ηλιακής Ακτινοβολίας – Προσανατολισμός Πλαισίων .....	27
1.11.1 Συνιστώσες Ηλιακής Ακτινοβολίας.....	27
1.11.2 Προσανατολισμός φωτοβολταϊκού πλαισίου .....	29
1.12 Παράγοντες που επηρεάζουν την Απόδοση και Λειτουργία των Φ/β Συστημάτων .....	32

3.1.14 Συμπεράσματα .....	68
3.2 Μετατροπείς DC/DC Διακοπτικού Τρόπου Λειτουργίας Για MPPT .....	70
3.2.1 Αρχή λειτουργίας .....	70
3.2.2 Μετατροπείς Υποβιβασμού .....	71
3.2.3 Προσαρμογή φορτίου .....	79
3.2.4 Έλεγχος MPPT και PWM .....	80
3.2.5 Ιδανικοί και πραγματικοί διακόπτες .....	82
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 .....</b>	<b>86</b>
4.1 Μοντελοποίηση του Συστήματος MPPT .....	86
4.2 Μοντελοποίηση του φ/β πάνελ .....	86
4.3 Υπολογισμός και μοντελοποίηση του μετατροπέα DC .....	94
4.4 Μοντελοποίηση του αλγορίθμου MPPT .....	99
4.5 Μοντελοποίηση του συστήματος PWM .....	102
4.6 Μοντελοποίηση του φορτίου (Load) .....	103
4.6 Το block “Signal from Workspace” .....	103
4.8 Προσομοίωση του συστήματος .....	104
4.9 Συμπεράσματα .....	107
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 .....</b>	<b>108</b>
5.1 Προοπτικές βελτίωσης ή επεκτάσεις .....	108
<b>Βιβλιογραφία .....</b>	<b>109</b>
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α .....</b>	<b>111</b>
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β .....</b>	<b>115</b>

Από το χρονικό αυτό σημείο και μετά, τα φωτοβολταϊκά συστήματα άρχισαν να ενσωματώνονται σταδιακά σε διάφορες εφαρμογές και η τεχνολογία να βελτιώνεται συνεχώς. Το 1962 η μεγαλύτερη ΦΒ εγκατάσταση στον κόσμο γίνεται στην Ιαπωνία από την Sharp, σε έναν φάρο. Η εγκατεστημένη ισχύς του συστήματος είναι 242Wp.

Τα φωτοβολταϊκά ξεκίνησαν λοιπόν να κάνουν την εμφάνιση τους αλλά λόγω του υψηλού κόστους παραγωγής η εφαρμογή τους ήταν δυνατή μόνο σε ειδικές περιπτώσεις αυτόνομων συστημάτων. Η έρευνα όμως προχωρούσε και η απόδοση των ΦΒ συνεχώς βελτιωνόταν. Κυριότερος «πελάτης» των φωτοβολταϊκών τις δεκαετίες που ακολούθησαν είναι η NASA.

Οι υψηλές τιμές στα φωτοβολταϊκά ήταν ο σημαντικότερος λόγος που δεν υπήρχε περισσότερο ενθουσιώδης αποδοχή από την αγορά. Ενδεικτικά η τιμή των φωτοβολταϊκών ξεκινάει από τα 500\$ ανά εγκατεστημένο Watt το 1956, ενώ μετά από 14 χρόνια, το 1970 αγγίζει τα 100\$/Watt. Το 1973 οι βελτιώσεις στις μεθόδους παραγωγής φέρνουν το κόστος των φωτοβολταϊκών στα 50\$/Watt.

Η πρώτη εγκατάσταση PV που φτάνει στα επίπεδα του 1MW γίνεται στην Καλιφόρνια το 1980 από την ARCO Solar χρησιμοποιώντας ταυτόχρονα και σύστημα παρακολούθησης της τροχιάς του ηλίου 2 αξόνων (dual-axis trackers). Η εξέλιξη αρχίζει πλέον να γίνεται με ταχύτερους ρυθμούς. Το 1983 η παγκόσμια παραγωγή Φ/Β φτάνει τα 22MW και ο συνολικός τζίρος τα 250.000.000\$. Το 1999 η εταιρία Spectrolab σε συνεργασία με το NREL αναπτύσσουν ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο με απόδοση 32,3%. Το στοιχείο αυτό είναι συνδυασμός τριών υλικών (στρώσεων) και ειδικό για εφαρμογές σε συγκεντρωτικά συστήματα CPV. Την ίδια χρονιά το ρεκόρ στην απόδοση των Thin Films φτάνει στο 18,8%. Η παραγωγή όλων των τεχνολογιών των φωτοβολταϊκών πάνελ φτάνει συνολικά τα 200 MW. Το 2004 η μαζική είσοδος μεγάλων εταιρειών στον χώρο των Φ/Β φέρνει την μαζική παραγωγή και αυτή με την σειρά της την τιμή των διασυνδεδεμένων συστημάτων στα 6,5 ευρώ/W. Η Γερμανία και Ιαπωνία κυριαρχούν στην κατασκευή Φ/Β πάνελ και πλέον σε όλες τις αναπτυγμένες χώρες αρχίζουν, με τον έναν (παραγωγή εξοπλισμού) ή τον άλλον τρόπο (κατασκευή Φ/Β εγκαταστάσεων), να υιοθετούν τις τεχνολογίες των φωτοβολταϊκών και να τις παγιώνουν στην συνείδηση των επενδυτών αλλά και των καταναλωτών ενέργειας. Η συνολική παραγωγή το 2004 έφτασε τα 1.200 MW ΦΒ στοιχείων ενώ ο τζίρος της ίδιας χρονιάς άγγιξε τα 6.500.000.000\$. Σήμερα με οικονομίες μεγάλης κλίμακας έχουν επιτευχθεί μεγάλες αποδόσεις στα κρυσταλλικά κυρίως υλικά και αρκετές χώρες με πρωτοπόρες την Γερμανία και την Ιαπωνία έχουν ήδη επενδύσει τεράστια κονδύλια με σκοπό την ευρύτερη εκμετάλλευση της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας. (βλ. [20])



### 1.3 Τα φωτοβολταϊκά στην Ελλάδα

Πάντως τίποτα από αυτά δεν θα γινόταν πραγματικότητα εάν δεν είχε επικυρωθεί το πρωτόκολλο του Κιότο και άλλες διεθνείς συμφωνίες που ακολούθησαν κάτω από την πίεση των περιβαλλοντικών προβλημάτων.

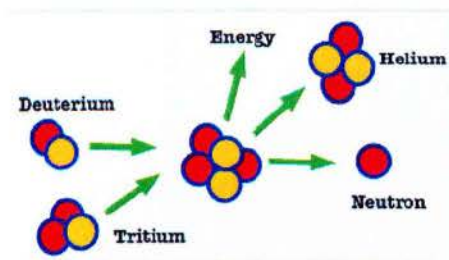
Η ουσιαστική ώθηση για τα φωτοβολταϊκά όπως και για τις υπόλοιπες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, δόθηκε μέσα από κυβερνητικά προγράμματα με την μορφή επιδοτήσεων των δραστηριοτήτων παραγωγής ενέργειας (κυρίως ηλεκτρικής) με την χρήση "πράσινων" τεχνολογιών (ΑΠΕ). Η περισσότερο γνωστή από αυτές είναι η ευνοϊκή τιμολόγηση της ενέργειας που παράγεται από Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, γνωστή και ως «feed-in-tariff».

Η Ελλάδα έχει υιοθετήσει και αυτή με την σειρά της κίνητρα για την προώθηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, τα οποία μάλιστα ήταν (και είναι?) ΙΔΙΑΙΤΕΡΑ ελκυστικά για τους υπονήφιους επενδυτές. Όμως η παρομιώδης τσαπατσουλιά, ανικανότητα και διαφθορά που μαστίζει τους κρατικούς φορείς, κατάφερε την πιο ελπιδοφόρα τεχνολογία της εποχής μας να την κάνει να χαρακτηριστεί ως "φούσκα". Εκατοντάδες αιτήσεις για άδειες παραγωγής ενέργειας στην ΡΑΕ και άλλες τόσες αιτήσεις αδειών - εξαιρέσεων προς επιδότηση από τον επενδυτικό νόμο, περιμένουν καρτερικά σε κάποια συρτάρια την ώρα (ή .... την χρονιά) της κρίσης τους. Παρόλα αυτά, ευτυχώς δεν φαίνεται να "κατόρθωσε" ο κρατικός μηχανισμός να αναχαιτίσει στην χώρα μας την παγκόσμια δυναμική των φωτοβολταϊκών, αφού η εφευρετικότητα του έλληνα κατασκευαστή αλλά και η "προνοητικότητα" κάποιων επενδυτών έχουν ήδη "στείλει" κάποιες μεγαβατώρες στο δίκτυο της ΔΕΗ. Επίσης, πέρα από τις επενδύσεις σε διασυνδεδεμένα συστήματα μια άλλη αγορά ΦΒ που αναπτύσσεται είναι αυτή των αυτόνομων συστημάτων , αφού η τιμή της φωτοβολταϊκής κιλοβατώρας πλέον ανταγωνίζεται με αξιώσεις αυτήν του πετρελαίου και μάλιστα παρουσιάζει και αρκετά πλεονεκτήματα έναντι αυτής. Τα περισσότερα αυτόνομα συστήματα προς το παρόν βρίσκονται στο Άγιο Όρος, αλλά πλέον υπάρχουν πολλές ΦΒ εγκαταστάσεις σε εξοχικές κατοικίες , απομακρυσμένους τηλεπικοινωνιακούς σταθμούς, φάρους, κτηνοτροφικές μονάδες κλπ. (βλ. [20])

### 1.4 Η Ηλιακή Ενέργεια

Ο Ήλιος είναι ο αστέρας του ηλιακού μας συστήματος και το λαμπρότερο ουράνιο σώμα. Η συμβολή του στην εξέλιξη και διατήρηση της ζωής στην Γη είναι καταλυτική. Με την θεμελιώδη διαδικασία της φωτοσύνθεσης, προσφέρει την απαραίτητη ενέργεια για την ανάπτυξη των ζωντανών οργανισμών και διατηρεί θερμοκρασία την επιφανειακή της Γης σε ανεκτά για τη ζωή επίπεδα. Χωρίς των

Ήλιο δεν μπορεί να υπάρξει ζωή. Η Ηλιακή Ενέργεια παράγεται μέσω της διαδικασίας της πυρηνικής σύντηξης (fusion) (Εικόνα 1.1).



Εικόνα 1.1: Η πυρηνική σύντηξη

Κατά την διαδικασία αυτή πραγματοποιείται συνένωση (σύντηξη) πυρήνων υδρογόνου, συγκεκριμένα των ισοτόπων δευτέριο και τρίτιο, με αποτέλεσμα την δημιουργία ατόμων ηλίου (He) και την απελευθέρωση ενέργειας. Ο Ήλιος μπορεί να παρουσιαστεί ως ένας γιγάντιος θερμοπυρηνικός αντιδραστήρας που τροφοδοτεί ολόκληρη τη Γη με **2.800 KWh** ενέργειας κάθε χρόνο. Αυτό αντιστοιχεί σε ενέργεια ικανή για την λειτουργία 100 κοινών λαμπτήρων φωτός για περίπου 5 εκατομμύρια έτη (περισσότερο από την ύπαρξη των ανθρώπων) ή ισοδύναμα, η ενέργεια που παρέχεται από τον Ήλιο στη Γη αντιστοιχεί στην ενέργεια που θα παρήγαγαν περισσότεροι από 150 εκατομμύρια μεγάλοι σταθμοί παραγωγής. Δεδομένου βέβαια ότι ο ήλιος θα εισέλθει σε « φάση θανάτου » σε περίπου πέντε δισεκατομμύρια χρόνια από σήμερα είναι προφανές ότι η πηγή του καυσίμου είναι ουσιαστικά άπειρη.

Ως ηλιακή ενέργεια χαρακτηρίζεται το σύνολο των διαφόρων μορφών ενέργειας που προέρχονται από τον Ήλιο. Αυτές είναι το φως, ή φωτεινή ενέργεια, η θερμότητα ή θερμική ενέργεια και οι διάφορες ακτινοβολίες ή ενέργεια ακτινοβολίας. Η ενέργεια μέσω της ηλιακής ακτινοβολίας μεταδίδεται με την μορφή αυτοτελών ποσοτήτων ή «πακέτων ενέργειας» που καλούνται φωτόνια. Κάθε φωτόνιο αντιστοιχεί σε μία ποσότητα ενέργειας που είναι ανάλογη προς τη συχνότητα του εκπεμπόμενου φωτός. (βλ. [30])

### 1.5 Εφαρμογές Ηλιακής Ενέργειας

Η εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας διαιρείται σε τρεις βασικές κατηγορίες εφαρμογών : τα **παθητικά ηλιακά συστήματα** , τα **ενεργητικά ηλιακά συστήματα** και τέλος τα **φωτοβολταϊκά συστήματα (φ/β συστήματα)** (Εικόνα 1.2). Τα παθητικά και τα ενεργητικά ηλιακά συστήματα εκμεταλλεύονται τη θερμότητα που

εκπέμπεται μέσω της ηλιακής ακτινοβολίας, με σκοπό τη θέρμανση νερού, τη θέρμανση χώρων και πολλές άλλες χρήσεις (οικιακές, βιομηχανικές κλπ). Τα φωτοβολταϊκά συστήματα στηρίζονται στη μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρικό ρεύμα μέσω του φωτοβολταϊκού φαινομένου, με την κατασκευή φ/β γεννητριών.



Εικόνα 1.1: Βασικές κατηγορίες εφαρμογών Ηλιακής ενέργειας

### Παραδείγματα:

Παθητικών ηλιακών συστημάτων: Ηλιακοί τοίχοι, Θερμοκήπια, Ηλιακά αίθρια

Ενεργητικών ηλιακών συστημάτων: Ηλιακοί Θερμοσίφωνες, Ηλιακοί Συλλέκτες Κενού, Ηλιακά Υψηλής Ενθαλπίας

## 1.6 Φωτοβολταϊκά Ηλιακά Συστήματα

Με τον γενικό όρο **φωτοβολταϊκά** χαρακτηρίζονται οι βιομηχανικές διατάξεις μετατροπής της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική, DC ή AC, ανάλογα με τις ενεργειακές απαιτήσεις που κάθε φορά πρέπει να πληρούνται. Στην ουσία πρόκειται για ηλεκτρογεννήτριες που συγκροτούνται από πολλά φωτοβολταϊκά στοιχεία σε επίπεδη διάταξη που έχουν ως βάση λειτουργίας το φωτοβολταϊκό φαινόμενο. Τα φωτοβολταϊκά ανήκουν στη κατηγορία των **Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ)**. (βλ. [26])

Μία τυπική Φ/Β συστοιχία αποτελείται από ένα ή περισσότερα Φ/Β πλαίσια ηλεκτρικά συνδεδεμένα μεταξύ τους. Όταν τα Φ/Β πλαίσια εκτεθούν στην ηλιακή ακτινοβολία, μετατρέπουν ποσοστό 14% περίπου της προσπίπτουσας ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική. Η μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική γίνεται αθόρυβα, αξιόπιστα και χωρίς περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα διακρίνονται σε αυτόνομα (stand-alone ή odd-grid) και σε διασυνδεδεμένα (grid-connected ή on-grid) συστήματα. Η ουσιαστική διαφορά τους είναι στο ότι τα μεν πρώτα αποθηκεύουν την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια σε συσσωρευτές, ενώ τα διασυνδεδεμένα τη διοχετεύουν απευθείας στο δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Βάσει αυτής της διάκρισης γίνονται φανερές και οι ενεργειακές απαιτήσεις που καλύπτει το κάθε σύστημα. (βλ. [31])



Εικόνα 1.3: Κατάταξη των φ/β συστημάτων

### 1.6.1 Διασυνδεδεμένα συστήματα

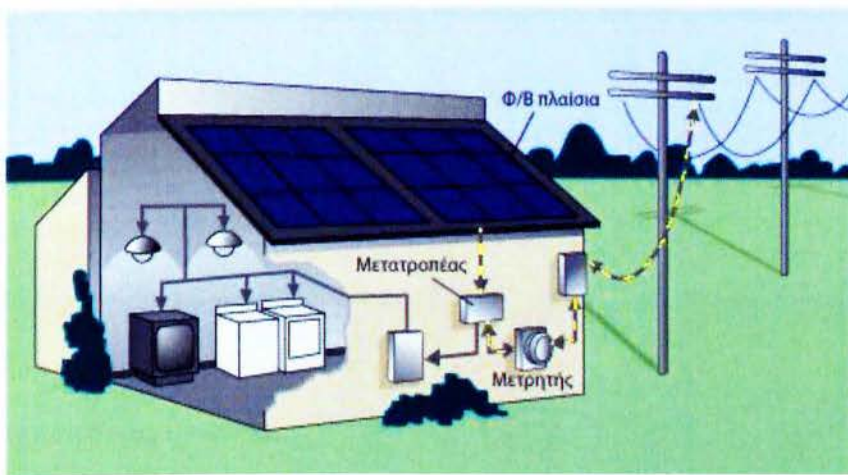
Όπως αναφέρθηκε, στα διασυνδεδεμένα φωτοβολταϊκά συστήματα το δημόσιο δίκτυο διανομής είναι ο τελικός αποδέκτης της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας. Στις περισσότερες περιπτώσεις δεν υπάρχει η δυνατότητα αποθήκευσης κάποιου μέρους της ενέργειας.

Η ονομαστική εγκατεστημένη ισχύς τέτοιων συστημάτων συνήθως ξεκινά από 10KWp και μπορεί να φτάσει τα 50MWp. Βασικός περιοριστικός παράγοντας είναι η έκταση που χρειάζεται για να στηθεί μια τέτοια εγκατάσταση. Συνήθως δεσμεύονται μεγάλες εκτάσεις γης, κυρίως σε πεδινές περιοχές ώστε να μην υπάρχει περιμετρική σκίαση από βουνά ή λόφους.

Ένα διασυνδεδεμένο φ/β σύστημα συνήθως αποτελείται από τα εξής στοιχεία:

Προσομοίωση ολοκληρωμένου φωτοβολταϊκού συστήματος με έλεγχο απόδοσης σε πραγματικό χρόνο.

- Φ/β πλαίσια (modules) κατάλληλα διασυνδεδεμένα σε σειρά ή/και παράλληλα
- Αντιστροφέας (inverter)
- Πίνακες διανομής AC και DC
- Σύστημα αντικεραυνικής προστασίας (ΣΑΠ)
- Καλωδιώσεις
- Μετρητής παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας
- Σύστημα Τηλεπικοινωνίας



Εικόνα 1.4: Διασυνδεδεμένα φωτοβολταϊκά συστήματα

### 1.6.2 Αυτόνομα συστήματα

Οι πρώτες ουσιαστικές εφαρμογές των αυτόνομων φωτοβολταϊκών συστημάτων αφορούσαν στην τροφοδοσία με ρεύμα κυρίως σε απομακρυσμένες και δυσπρόσιτες τοποθεσίες κρίσιμων εγκαταστάσεων, όπως αντλίες νερού στη μέση μιας ερήμου. Οι εξελίξεις στην τεχνολογία των φ/β πάνελ, καθώς και των συσσωρευτών, συνετέλεσαν στην ευρεία αποδοχή αυτού του τρόπου ηλεκτροδότησης κυρίως στις αναπτυσσόμενες χώρες για περιοχές όπου η επέκταση του δημοσίου δικτύου θα ήταν δαπανηρή και χρονοβόρα.

Ένα αυτόνομο σύστημα απαιτεί ένα μέσο αποθήκευσης μέρους της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτό συμβαίνει για δύο λόγους: ο πρώτος είναι η διασφάλιση παροχής ηλεκτρικού ρεύματος για την τροφοδοσία των φορτίων κατά τη διάρκεια της νύχτας και ο δεύτερος είναι ότι η στιγμιαία απαιτούμενη ενεργειακή

ζήτηση σπάνια ή ποτέ δεν ισοδυναμεί με την στιγμιαία παραγωγή. Γιατί επομένως, να σπαταληθεί αυτό το πολύτιμο αγαθό; Για τους λόγους αυτούς χρησιμοποιούνται συσσωρευτές ειδικών προδιαγραφών σε συνδυασμό πάντα με ένα σύστημα φόρτισης και ελέγχου. Στα αυτόνομα φ/β συστήματα το πιο σημαντικό δομικό στοιχείο είναι ο ρυθμιστής φόρτισης που βρίσκεται είτε ενσωματωμένος στον inverter ή ως αυτόνομη δομική μονάδα. Όπως παρουσιάζεται και στην Εικόνα 1.5, η έξοδος ενός αυτόνομου φ/β συστήματος δεν είναι πάντα ac 230 Vrms (για Ευρώπη), αλλά μπορεί να κυμανθεί ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του φορτίου.

Επομένως, σε ένα τυπικό αυτόνομο φ/β σύστημα χρησιμοποιούνται οι παρακάτω διατάξεις:

- Φ/β πλαίσια
- Συσσωρευτές ειδικής κατασκευής και προδιαγραφών
- Σύστημα φόρτισης και διαχείρισης των συσσωρευτών
- Μετατροπείς DC/DC
- Σύστημα αντικεραυνικής προστασίας (ΣΑΠ)
- Πίνακες διανομής, καλωδιώσεις
- Αντιστροφέας (inverter)
- Σύστημα Τηλεπικοινωνίας



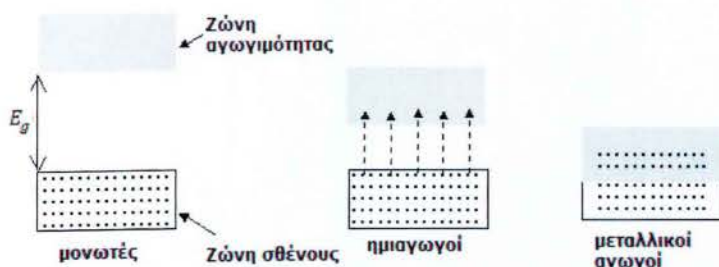
Εικόνα 1.5: Αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα

## 1.8 Ημιαγωγοί

### 1.8.1 Το Πυρίτιο

Το χαρακτηριστικό στοιχείο ενός ημιαγωγού που το διαφοροποιεί από τα υπόλοιπα υλικά είναι ο **αριθμός των ηλεκτρονίων σθένους** που διαθέτει σε ατομικό επίπεδο, δηλαδή ο αριθμός των ηλεκτρονίων που καταλαμβάνουν την εξωτερική στοιβάδα του ατόμου. Οι **ημιαγωγοί** αποτελούν μια κατηγορία φυσικών στοιχείων τα οποία χαρακτηρίζονται από μικρό αριθμό ελεύθερων ηλεκτρονίων σε σχέση με τους αγωγούς (μέταλλα), οι οποίοι διαθέτουν μεγάλο πλήθος ελεύθερων ηλεκτρονίων αλλά μεγαλύτερο αριθμό ηλεκτρονίων σθένους συγκριτικά με τους μονωτές που διαθέτουν ελάχιστα ελεύθερα ηλεκτρόνια. Έτσι λοιπόν από την άποψη της ηλεκτρικής αγωγιμότητάς τους κατατάσσονται μεταξύ των αγωγών (μέταλλα) και των μονωτών, επιτρέποντας τη διόδο του ηλεκτρισμού μόνο κάτω από ορισμένες συνθήκες. Η ειδική αντίσταση των ημιαγωγών κυμαίνεται μεταξύ αυτής των αγωγών και των μονωτών. Πιο συγκεκριμένα οι ημιαγωγοί έχουν τιμές ειδικής αντίστασης που κυμαίνονται στην περιοχή  $10^{-4}$ – $10^{-7} \Omega \cdot m$ , ενώ τα μέταλλα τιμές της τάξης των  $10^{-8} \Omega \cdot m$  και οι μονωτές μεγαλύτερες των  $10^{12} \Omega \cdot m$ . Μια άλλη σημαντική διαφορά που εμφανίζουν οι τρεις αυτές κατηγορίες στερεών είναι αυτή που σχετίζεται με τις τιμές που εμφανίζει το ενεργειακό χάσμα  $E_g$  (energy gap) μεταξύ των ζωνών αγωγιμότητας και σθένους (Εικόνα 5). Όταν ένα άτομο είναι μονωμένο τα ηλεκτρόνιά του κατέχουν μόνο ορισμένες διακριτές ενεργειακές στάθμες. (βλ. [2])

Όταν όμως βρεθούν κοντά πολλά άτομα, σχηματίζοντας κρυσταλλικό πλέγμα δημιουργούνται διαπλατυσμένες ενεργειακές ζώνες. Οι δημιουργούμενες ενεργειακές ζώνες είναι, η ζώνη αγωγιμότητας, η οποία είναι κενή και η ζώνη σθένους που είναι πλήρως κατειλημμένη. Ανάμεσα στις δύο παραπάνω ζώνες υπάρχει η απαγορευμένη ζώνη. Το εύρος της απαγορευμένης ζώνης  $E_g$  εξαρτάται από τη φύση του υλικού. Στην Εικόνα 1.6, φαίνεται η σχετική θέση των ζωνών σθένους και αγωγιμότητας για τις τρεις κατηγορίες στερεών.



Εικόνα 1.6: Το ενεργειακό χάσμα  $E_g$  για αγωγούς, ημιαγωγούς και μονωτές

Στους αγωγούς (μηδενικό ενεργειακό χάσμα) είναι εύκολη η μεταπήδηση των από ηλεκτρονίων από τη ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας. Στους μονωτές είναι σχεδόν αδύνατη η μεταπήδηση ενός από τα ηλεκτρόνια σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας, λόγω υψηλών τιμών του  $E_g$ .

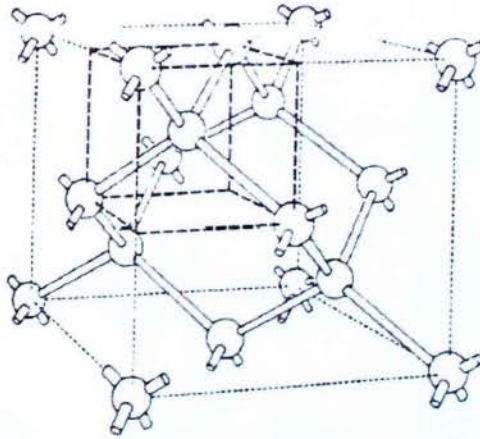
Ο κυριότερος εκπρόσωπος των ημιαγωγών που αποτελεί και το συνηθέστερο υλικό κατασκευής των ηλιακών κελιών είναι το **πυρίτιο (Si)**. Το πυρίτιο έχει ατομικό αριθμό 14 και διαθέτει 4 ηλεκτρόνια στην εξωτερική του στοιβάδα (Εικόνα 1.8). Όλα τα άτομα που έχουν λιγότερα ή περισσότερα ηλεκτρόνια στην εξωτερική τους στοιβάδα (η οποία είναι "γενικά" συμπληρωμένη με 8 ηλεκτρόνια) αναζητούν άλλα άτομα με τα οποία μπορούν να ανταλλάξουν ή να μοιραστούν ηλεκτρόνια προκειμένου να συμπληρώσουν τη στοιβάδα σθένους τους.



Εικόνα 1.8: Άτομο Πυριτίου (Si)

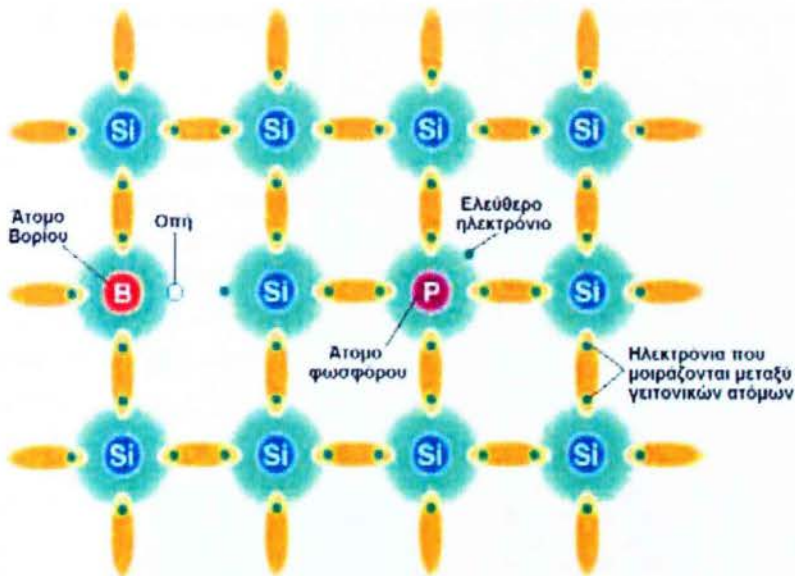
Το πυρίτιο μοιράζεται ηλεκτρόνια με τα γειτονικά του άτομα. Σε αυτήν την τάση του οφείλεται και η **κρυσταλλική δομή** του, στοιχείο καθοριστικής σημασίας για τα ηλιακά κελιά. Η αμοιβαία συνεισφορά ηλεκτρονίων, προς συμπλήρωση εξωτερικής στοιβάδας, οδηγεί ένα μεγάλο αριθμό ατόμων σε αλληλοσύνδεση με δεσμούς και σχηματισμό κρυσταλλικού πλέγματος (Εικόνα 1.9). Αυτή είναι και η καθοριστική ιδιότητα που έχουν τα κρυσταλλικά υλικά.





Εικόνα 1.9: Κρυσταλλική δομή του πλέγματος του πυριτίου

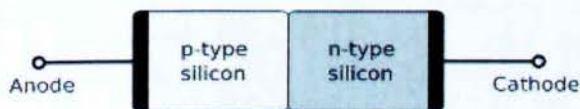
Στην καθαρή κρυσταλλική του μορφή το πυρίτιο είναι **απολύτως σταθερό**, δηλαδή δεν «προσθέτει» ούτε «διώχνει» ηλεκτρόνια, κάτι που ουσιαστικά του δίνει ηλεκτρικά χαρακτηριστικά πολύ κοντά σε αυτά ενός μονωτή, εφόσον δεν υπάρχουν ελεύθερα μετακινούμενα ηλεκτρόνια για την δημιουργία ηλεκτρικού ρεύματος στο εσωτερικό του. Ωστόσο, όταν έστω και ένα άτομο μέσα σε εκατομμύρια αντικατασταθεί από μία ελεγχόμενη πρόσμιξη που δεν καταστρέφει την κρυσταλλική δομή, με στοιχεία όπως ο **φωσφόρος (P)** ή το αρσενικό (As) τα οποία διαθέτουν 5 ηλεκτρόνια σθένους, ο κρύσταλλος πυριτίου φορτίζεται αρνητικά και η αγωγιμότητά του αυξάνεται θεαματικά. Αυτό συμβαίνει γιατί, ενώ το άτομο του φωσφόρου συνδέεται με τα γειτονικά άτομα πυριτίου το επιπλέον ηλεκτρόνιο σθένους του δεν μπορεί να συνδεθεί πουθενά και να σχηματίσει δεσμό, με αποτέλεσμα τη δημιουργία περίσσειας φορτίου. Το ίδιο συμβαίνει αν η πρόσμιξη γίνει με άτομο στοιχείου που διαθέτει ένα ηλεκτρόνιο λιγότερο στην εξωτερική του στοιβάδα όπως το **βόριο (B)** ή το γάλλιο (Ga), αφαιρώντας στην ουσία ηλεκτρόνιο από τον κρύσταλλο, φορτίζοντάς τον θετικά. Στην πρώτη περίπτωση, προκύπτει **ημιαγωγός τύπου n** ή **n-type** (n : negative, εφόσον υπάρχει περίσσεια ηλεκτρονίων) και στη δεύτερη **τύπου p** ή **p-type** (p : positive, καθώς υπάρχουν **οπές (holes)**, δηλαδή κενές θέσεις στη ζώνη σθένους-ύπαρξη θετικού φορτίου). Αυτός ο τρόπος πρόσμιξης ονομάζεται **«doping» (νόθευση)** (Εικόνα 1.10).



Εικόνα 1.10: Δημιουργία ημιαγωγών με προσθήκες στοιχείων σε κρυσταλλικό πυρίτιο (doping)

### 1.8.2 Η ένωση p-n

Εάν φέρουμε σε επαφή δύο στρώματα πυριτίου **n-type** και **p-type** το ένα απέναντι από το άλλο δημιουργείται μια **δίοδος** ή αλλιώς ένα ηλεκτρικό πεδίο. Το ηλεκτρικό πεδίο λειτουργεί σαν ηλεκτρόδιο, επιτρέποντας τη ροή ηλεκτρικού ρεύματος προς τη **μια κατεύθυνση μόνο**, αυτής **από την άνοδο (p-type) προς την κάθοδο (n-type)** λόγω της έλξης των επιπλέον ηλεκτρονίων του στρώματος n-type από τις «οπές» του p-type στρώματος. Η επιφάνεια επαφής των δύο υλικών, καλείται **ένωση p-n (p-n junction)** (Εικόνα 1.11). Οι ιδιότητές της όπως θα δούμε είναι καθοριστικής σημασίας για τη λειτουργία των ηλιακών φ/β στοιχείων.

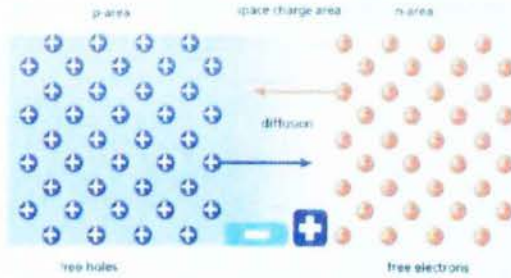


Εικόνα 1.11: Επαφή p-n junction χωρίς εφαρμογή τάσης

Αυτό το ζευγάρι των δύο υλικών είναι το **δομικό στοιχείο** του φωτοβολταϊκού κελιού και η βάση της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας. Στην κλασικότερη περίπτωση φ/β στοιχείων, κάθε ηλιακό κελί αποτελείται από ένα πολύ λεπτό στρώμα ημιαγωγού n-type (πυρίτιο με πρόσμιξη φωσφόρου), σε επαφή με ένα παχύτερο στρώμα ημιαγωγού p-type (πυρίτιο με πρόσμιξη βορίου). **Η δημιουργούμενη στην ένωση p-n δίοδος δίδει το ελάχιστο απαιτούμενο**

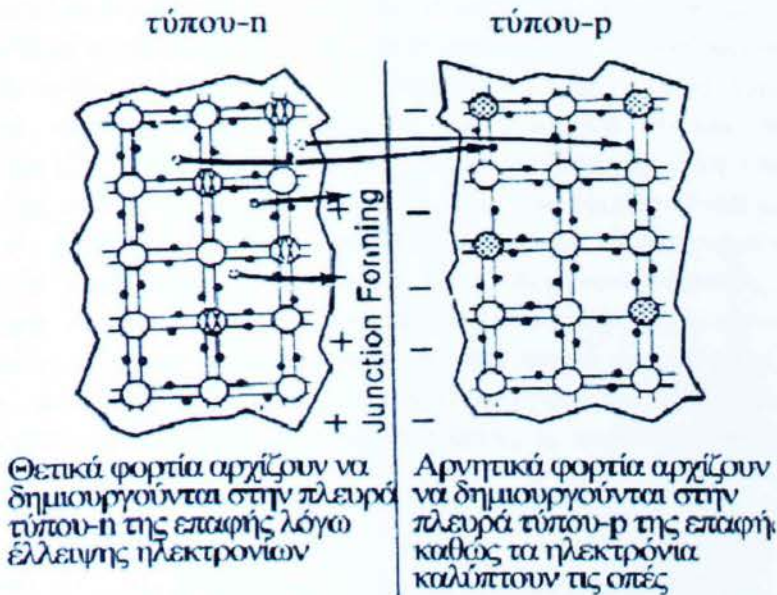
**ηλεκτρικό πεδίο για τη λειτουργία του κελιού, χωρίς το οποίο δεν θα ήταν δυνατό να δουλέψει.**

Στη διαχωριστική γραμμή της επαφής p-n, έχουμε μια «περιοχή κατάρρευσης» λόγω της απουσίας αντίθετα φορτισμένων σωματιδίων (ηλεκτρόνια και οπές). Η p-n junction αποτελεί την εστία δημιουργίας της ουσιαστικότερης προϋπόθεσης λειτουργίας του ηλιακού κυττάρου, δηλαδή του φράγματος δυναμικού. Όταν λοιπόν οι δύο ημιαγωγοί έρθουν σε επαφή, ελεύθερα ηλεκτρόνια μεταπηδούν από το n-type στρώμα με τη διαδικασία της διάχυσης (Εικόνα 1.12) μέσω της p-n junction προς το p-type στρώμα (θετικά φορτισμένο) και συνδέονται με τις αντίστοιχες οπές.



**Εικόνα 1.12: Το φαινόμενο της διάχυσης**

Κατά παρόμοιο τρόπο, οπές μετακινούνται από το p-type στρώμα στο n-type στρώμα. Στην ουσία, η μετακίνηση αυτή των οπών, μεταφράζεται στις κενές θέσεις που αφήνουν τα ηλεκτρόνια του n-type στρώματος κατά τη μεταφορά τους στο p-type στρώμα (Εικόνα 1.13).

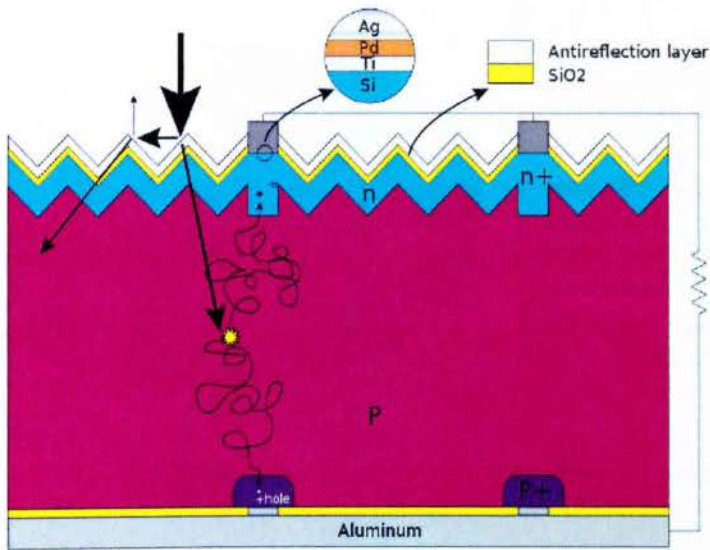


**Εικόνα 1.13: Δημιουργία θετικών φορτίων στο n-type στρώμα και αρνητικών στο p-type**

Εφόσον τα άτομα του πυριτίου παραμένουν στις θέσεις τους, όσες οπές παραμένουν αδέσμευτες στο n-type στρώμα το καθιστούν θετικά φορτισμένο ενώ κατά παρόμοιο τρόπο, όσα ηλεκτρόνια μένουν αδέσμευτα στο p-type στρώμα το καθιστούν αρνητικά φορτισμένο, δημιουργώντας μια ανισορροπία φορτίων στις δύο πλευρές τις επαφής. Η διαδικασία αυτή δεν συνεχίζεται απεριόριστα. Οι φορτισμένοι φορείς που μεταφέρθηκαν στις δυο πλευρές της επαφής δημιουργούν ένα ηλεκτρικό πεδίο/ ηλεκτρικό δυναμικό γύρω από την περιοχή ένωσης των δύο στρωμάτων της τάξης των 0,6-0,7 Volt. Το φράγμα δυναμικού ανάμεσα στο p-type και στο n-type στρώμα αντιτίθεται στην παραπέρα ροή των φορέων, εμποδίζοντας περισσότερα ηλεκτρόνια να διαπεράσουν την επαφή μέχρι τη στιγμή που το φως θα φτάσει στο φ/β στοιχείο μεταφέροντας ενέργεια την οποία πλέον τα ηλεκτρόνια θα μπορέσουν να αξιοποιήσουν ώστε να κινηθούν προς το αντίθετα φορτισμένο στρώμα.

## **1.9 Φωτοβολταϊκό φαινόμενο**

Ορίζεται ως η άμεση μετατροπή του φωτός (ηλιακή ενέργεια) σε ηλεκτρική ενέργεια σε ατομικό επίπεδο. Το Φ/Β φαινόμενο ανακαλύφθηκε το 1839 από τον Alexandre-Edmond Becquerel. Το φαινόμενο αυτό εκδηλώνεται σε ημιαγωγό τύπου pn, συνήθως ισχυρά εμπλουτισμένο. Όταν φωτόνια της ηλιακής ακτινοβολίας με ενέργεια μεγαλύτερη του ενεργειακού χάσματος του ημιαγωγού προσπίπτουν στην αρνητικά εμπλουτισμένη επιφάνειά του, τα ηλεκτρόνια σθένους του υλικού λαμβάνουν όλη την απαραίτητη ενέργεια ώστε να μεταβούν στη ζώνη αγωγιμότητας, αφήνοντας πίσω τους ίσο αριθμό οπών. Τα πεδία που δημιουργούνται με αυτό τον τρόπο στο εσωτερικό της επαφής πολώνουν κατάλληλα το συγκεκριμένο κομμάτι υλικού με αποτέλεσμα τη δημιουργία ροής ηλεκτρικού ρεύματος, το οποίο ονομάζεται «φωτορεύμα» διότι η ένταση του είναι ευθέως ανάλογη της ηλιακής ακτινοβολίας. Περιληπτικά πρόκειται για την απορρόφηση της ενέργειας του φωτός από τα ηλεκτρόνια των ατόμων του Φ/Β στοιχείου και την απόδραση των ηλεκτρονίων αυτών από τις κανονικές τους θέσεις με αποτέλεσμα την δημιουργία ρεύματος. (βλ. [22][25])



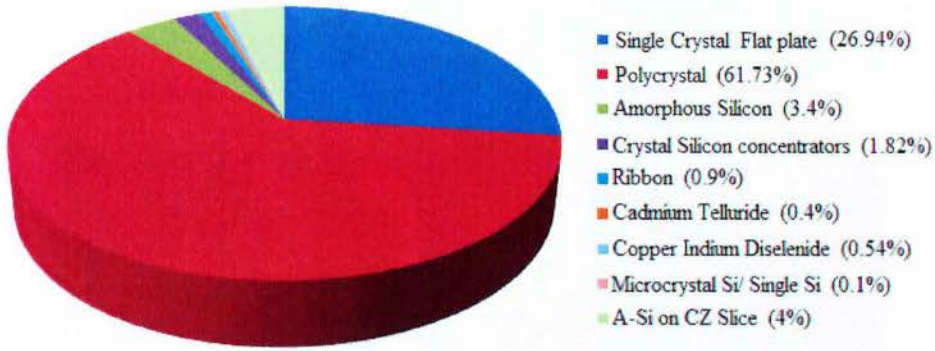
Εικόνα 1.14: Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο

Πρέπει να επισημανθεί ότι η υπέρυθη (IR) περιοχή του ηλιακού φάσματος (που αντιστοιχεί στο 42% του συνόλου) επειδή δεν δύναται να εξαναγκάσει τα ηλεκτρόνια σθένους σε αγωγή, επιβαρύνει με επιπλέον θερμότητα το φ/β κύτταρο, με αποτέλεσμα να αυξάνεται η συνολική θερμοκρασία λειτουργίας του. Άρα, για φ/β κύτταρο που λειτουργεί παράγοντας φωτορεύμα για συγκεκριμένη ένταση προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας και θερμοκρασίας λειτουργίας, μία επιπλέον αύξηση στην ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας δεν θα αυξήσει μόνο το φωτορεύμα αλλά και τη θερμοκρασία του φ/β κυττάρου.

Τα υλικά με τις παραπάνω ιδιότητες αποκαλούνται ηλιακά ή φ/β κύτταρα (solar cells) και είναι ο δομικός λίθος των φ/β πάνελς. Τα είδη ηλιακών κελιών, που χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο στην αγορά είναι τα εξής:

- Μονοκρυσταλλικού πυριτίου
- Πολυκρυσταλλικού πυριτίου
- Λεπτής μεμβράνης (Thin- film)
- Υβριδικά

Εκτός από του παραπάνω τύπους ηλιακών κελιών που βασίζονται στις διαφορετικές κρυσταλλικές δομές του πυριτίου, πραγματοποιούνται έρευνες και προσπάθειες για τη χρησιμοποίηση και άλλων ημιαγωγικών υλικών για τέτοιου είδους παρασκευές – είτε μεμονωμένα είτε σε συνδιασμό, όπως το **αρσενικούχο γάλλιο (GaAs)**, το **θειούχο κάδμιο (CdS)**, το **φωσφορούχο ίνδιο (InP)** και το **τελλουρίδιο του καδμίου (CdTe)**. Στην Εικόνα 1.15 που ακολουθεί, παρουσιάζονται τα ποσοστά παραγωγής ηλιακών στοιχείων σε παγκόσμια κλίμακα, ανάλογα με τα χρησιμοποιούμενα υλικά :



Εικόνα 1.15: Υλικά κατασκευής φ/β κυττάρων σε παγκόσμια κλίμακα

### 1.9.1 Μονοκρυσταλλικά Κελιά Πυριτίου

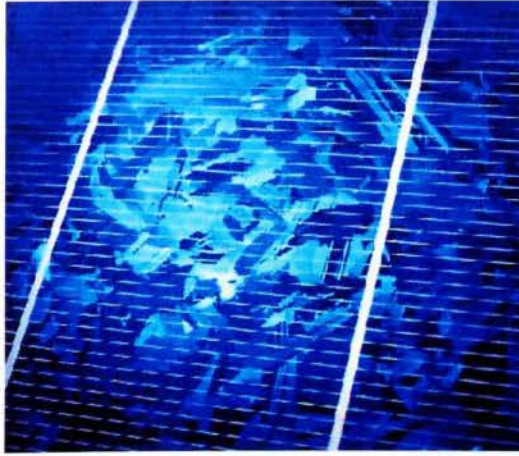
Τα στοιχεία μονοκρυσταλλικού πυριτίου παρασκευάζονται από κυλινδρικούς κρυστάλλους πυριτίου με τέλεια δομή και εξαιρετικά υψηλή καθαρότητα. Πυρίτιο και οξυγόνο – δύο εκ των πλέον αφθονότερων στοιχείων της γης – σχηματίζουν το **διοξείδιο του πυριτίου (Silicon dioxide -  $SiO_2$ )** που αποτελεί το πρωταρχικό υλικό, το οποίο με κατάλληλες διεργασίες όπως : τήξη, αργή στερεοποίηση, πρόσθεση προσμίξεων, καθαρισμό, κοπή και στίλβωση καταλήγει σε πολύ λεπτές πλάκες (Εικόνα 1.16). Βασικά μειονεκτήματα της πολύπλοκης αυτής διαδικασίας, είναι το αρκετά υψηλό κόστος παρασκευής Si ιδιαίτερης καθαρότητας και η χρήση εξειδικευμένων μεθόδων τήξης και κοπής για την επίτευξη του μονοκρυσταλλικού πλέγματος. Παρά το αυξημένο κόστος παραγωγής, αυτού του είδους τα ηλιακά στοιχεία έχουν τη μεγαλύτερη εμπορική αποδοτικότητα, η οποία κυμαίνεται σε ποσοστά της τάξης του 15% με 18 %, και συνεπώς τον καλύτερο βαθμό απόδοσης από όλες τις τεχνολογίες κατασκευής κελιών.



Εικόνα 1.16: Πλαίσια μονοκρυσταλλικού πυριτίου

### 1.9.2 Πολυκρυσταλλικά Κελιά Πυριτίου

Σε αντίθεση με τα κελιά μονοκρυσταλλικού πυριτίου, τα ηλιακά στοιχεία πολυκρυσταλλικού πυριτίου κατασκευάζονται από ράβδους λιωμένου και επανακρυσταλλομένου πυριτίου. Η διαδικασία παρασκευής τους περιλαμβάνει τήξη και μαζική (οπότε και λιγότερο ελεγχόμενη) στερεοποίηση του Si, με αποτέλεσμα να είναι απλούστερη από αυτή των μονοκρυσταλλικών ηλιακών κελιών ενώ συνοδεύεται και από χαμηλότερο κόστος παραγωγής. Όπως και στην προηγούμενη τεχνολογία, μετά την ψύξη, το πολυκρυσταλλικό πλέγμα πριονίζεται στα λεπτά φ/β στοιχεία (Εικόνα 1.17) από τα οποία κατασκευάζεται η κυψέλη του φωτοβολταϊκού πλαισίου με την διαδικασία χύτευσης. Η συγκεκριμένη διαδικασία, δημιουργεί ατέλειες στη δομή των κρυστάλλων και έτσι στο πλέγμα τους, περιλαμβάνονται μικροκρύσταλλοι ποικίλων προσανατολισμών. Η ύπαρξη διαφόρων κρυστάλλων μέσα στο πλέγμα αυξάνει την εσωτερική αντίσταση στα σημεία σύνδεσής τους, γεγονός που οδηγεί σε μικρότερη απόδοση από αυτή των κελιών μονοκρυσταλλικού πυριτίου, Ο βαθμός απόδοσής τους κυμαίνεται περίπου στο 14 %.



Εικόνα 1.17: Φωτοβολταϊκά στοιχεία πολυκρυσταλλικού πυριτίου

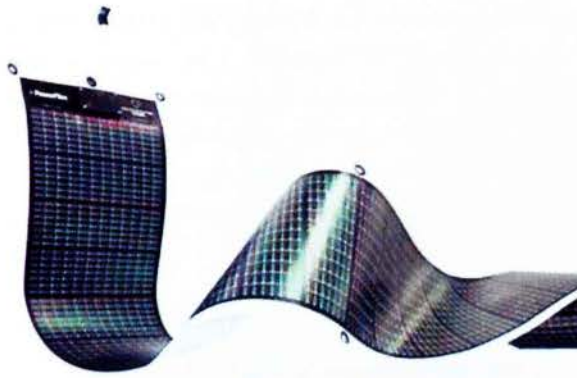
### 1.9.3 Λεπτού Υμενίου ή Λεπτής Μεμβράνης (Thin film)

Η τεχνολογία των λεπτών μεμβρανών χρησιμοποιεί πολύ λεπτά στρώματα (πάχους λίγων μικρών ( $\mu\text{m}$ )) του ημιαγωγού, μειώνοντας με τον τρόπο αυτό το κόστος παραγωγής (Εικόνα 1.18). Τα γνωστότερα υλικά που χρησιμοποιούνται στα στοιχεία αυτά είναι :

- Άμορφο πυρίτιο (a-Si).
- Copper Indium Diselenide (CIS).
- Cadmium Telluride (CdTe).
- Gallium Arsenide (GaAs)

με τα δυο πρώτα να είναι τα σημαντικότερα.





Εικόνα 1.18: Στοιχεία λεπτής μεμβράνης

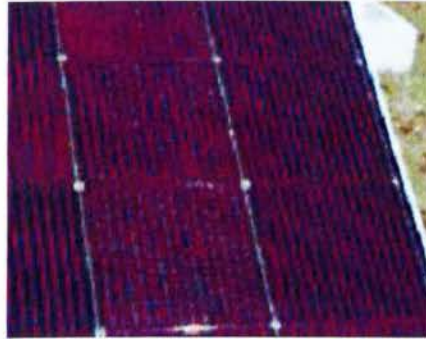


Εικόνα 1.19: Φωτοβολταϊκά πάνελ thin film

#### 1.9.4 Άμορφο πυρίτιο

Το άμορφο πυρίτιο διαφέρει από το κρυσταλλικό στο ότι τα άτομα δεν είναι τοποθετημένα σε ακριβείς αποστάσεις μεταξύ τους και οι γωνίες των δεσμών τους δεν είναι συγκεκριμένες. Τα ηλιακά κελιά αυτής της κατηγορίας αποτελούνται από ένα λεπτό στρώμα πυριτίου το οποίο έχει εναποτεθεί ομοιόμορφα σε κατάλληλη βάση. Ως βάση μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα αρκετά μεγάλο φάσμα υλικών (από δύσκαμπτα έως και ελαστικά) με αποτέλεσμα μεγαλύτερο εύρος εφαρμογών, ιδιαίτερα σε καμπύλες ή εύκαμπτες επιφάνειες. Μία ενδεικτική διαδικασία παρασκευής κελιών άμορφου πυριτίου (Εικόνα 1.20) περιλαμβάνει την τοποθέτηση λεπτού στρώματος άμορφου πυριτίου σε φύλλο γυαλιού, το οποίο έχει καλυφθεί από διάφανο οξειδίο του κασσιτέρου. Στην πίσω επιφάνεια τοποθετείται μεταλλικός αγωγός και στη συνέχεια η όλη διάταξη κόβεται με laser για την παραγωγή μιας σειράς ηλεκτρικά συνδεδεμένων άλλα ξεχωριστών στοιχείων. Τέλος, πραγματοποιείται η ενσωμάτωση τους σε φ/β μονάδα.

Ενώ το άμορφο πυρίτιο παρουσιάζει μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα στην απορρόφηση του φωτός, εντούτοις η φ/β απόδοσή του είναι η μικρότερη από αυτή των κρυσταλλικών. Σήμερα ένα εμπορικό φ/β πλαίσιο με κελιά άμορφου πυριτίου έχει απόδοση 6-8%, ενώ τα κύτταρα μονοκρυσταλλικού ή πολυκρυσταλλικού πυριτίου έχουν αποδόσεις που κυμαίνονται στο 11-14%, το φθινό όμως κόστος κατασκευής των πρώτων, τα καθιστά ιδανικά για εφαρμογές όπου δεν απαιτείται πολύ υψηλή απόδοση.



Εικόνα 1.20: Φωτοβολταϊκό πλαίσιο άμορφου πυριτίου

### 1.9.5 Υβριδικά Κελιά

Τόσο οι υπάρχουσες όσο και οι αναπτυσσόμενες τεχνολογίες κατασκευής φ/β στοιχείων, προσπαθούν να επιτύχουν την κατά το μέγιστο δυνατό ουσιώδη βελτίωση της απόδοσης των ηλιακών κελιών. Στην προσπάθεια επίτευξης αυτού του στόχου, πραγματοποιήθηκαν μελέτες πάνω στη χρήση υβριδικών δομών, δηλαδή δομών στις οποίες στοιχεία με διαφορετικά χαρακτηριστικά απορρόφησης φωτός συνδέονται μαζί. Το γεγονός αυτό επιτρέπει τη δημιουργία στοιχείων με καλύτερα χαρακτηριστικά με χρήση των ήδη υπαρχόντων υλικών και διαδικασιών.

Τα πλεονεκτήματα της χρήσης μιας δομής με πολλά στρώματα είναι τα εξής :

- Επιτρέπεται η απορρόφηση του φωτός σε πιο πλατιά φασματική περιοχή, δηλαδή πραγματοποιείται αποτελεσματικότερα.
- Επιτυγχάνονται υψηλότερες τάσεις ανοιχτού κυκλώματος
- Υποχωρεί έως ένα βαθμό ο ρυθμός μείωσης της απόδοσης των κελιών, που οφείλεται σε φαινόμενα οπτικής υποβάθμισης τα οποία παρατηρούνται όταν χρησιμοποιούνται υλικά άμορφου πυριτίου.



Εικόνα 1.21: Υβριδικά Κελιά

Στο Πίνακα 1 γίνεται μια συγκριτική παρουσίαση όλων των τεχνολογιών που περιγράφηκαν παραπάνω :

Πίνακας 1 : Σύγκριση της απόδοσης και της επιφάνειας των διαφόρων τεχνολογιών φ/β κελιών

Συγκριτικός Πίνακας Τεχνολογιών Φωτοβολταϊκών Κυττάρων				
Τύπος	Λεπτής μεμβράνης	Πολυκρυσταλλικά	Μονοκρυσταλλικά	Υβριδικά
Απόδοση	Άμορφα : 5-7% CIS : 7-10%	11-14%	13-16%	16-17%
Επιφάνεια ανά KWp	10-20 m <sup>2</sup>	8-10 m <sup>2</sup>	7-8 m <sup>2</sup>	6-7 m <sup>2</sup>

## 1.10 Δομή Ηλιακών Κελιών

Για λόγους μηχανικής αντοχής και ευχρηστίας, τα ηλιακά κελιά έχουν ενσωματωμένα στο περίγραμμα τους μεταλλικά ελάσματα αλουμινίου και για λόγους προστασίας είναι αεροστεγώς και υδατοστεγώς κλεισμένα μέσα σε ειδικό γυαλί και ειδικό μονωτικό πλαστικό. (βλ. [22])

Τα ηλιακά στοιχεία αποτελούνται από (Εικόνα 1.22):

- Μεταλλική βάση
- Πυρίτιο P-type
- Πυρίτιο N-type
- Μη-ανακλαστικό στρώμα επικάλυψης
- Μεταλλικά αγωγή ελάσματα



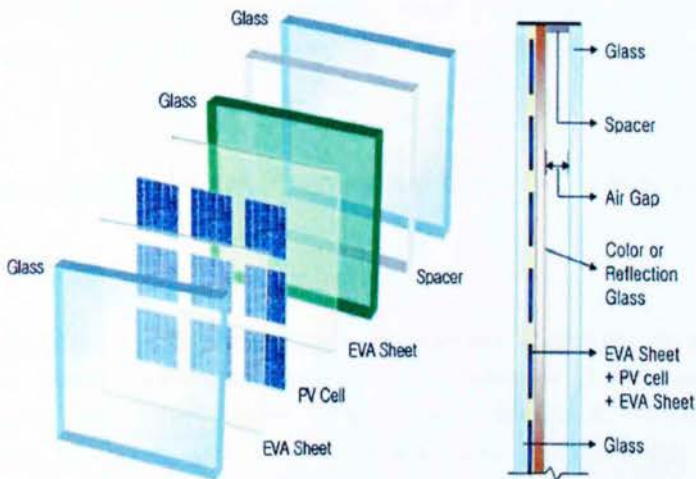
Εικόνα 1.22: Δομή ηλιακού κελιού

### 1.10.1 Δομή φωτοβολταϊκών πλαισίων

Ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο αποτελείται από ένα σύνολο ηλιακών κελιών. Συνιστά το βασικό δομικό στοιχείο φ/β εφαρμογών που κυκλοφορεί στο εμπόριο. Υπάρχουν πολλοί διαφορετικοί τύποι φωτοβολταϊκών πλαισίων και η δομή τους συχνά είναι διαφορετική για τα διάφορα είδη κελιών ή για τις ποικίλες εφαρμογές τους. Στην τυπικότερη περίπτωση ενός φ/β πλαισίου από πυρίτιο, αυτό συνίσταται από 36 ηλιακά κελιά σε σειρά ενώ έχει έξοδο με συνεχές ρεύμα και συνεχή τάση. Συνήθως τροφοδοτεί συσσωρευτή τάσης 12V. Το μέγεθος ενός φ/β πλαισίου καθορίζεται βάσει της μέγιστης ισχύος που μπορεί να αποδώσει υπό καθορισμένες συνθήκες- ονομαστικές συνθήκες.

Για να εξασφαλιστεί η ορθή λειτουργία του πλαισίου, είναι σημαντικό τα ηλιακά κελιά, να προστατεύονται από τις περιβαλλοντικές συνθήκες καθώς είναι εξαιρετικά λεπτά και άρα επιρρεπή σε μηχανικές βλάβες. Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 1.23 που ακολουθεί, τα διάφορα στρώματα υλικών από τα οποία αποτελείται ένα φ/β πλαίσιο είναι:

- Ειδικό γυαλί
- Συμπυκνωμένο υλικό (Ethylene Vinyl Acetate (EVA) Sheet) για την ενθυλάκωση των κυψελών
- Ηλιακές κυψέλες
- Συμπυκνωμένο υλικό (EVA)
- Ειδικό γυαλί
- Κενό αέρος
- Ειδικό γυαλί



Εικόνα 1.23: Δομή φωτοβολταϊκού πλαισίου

Τα ηλιακά κελιά περικλείονται συνήθως από δυο κομμάτια γυαλιού ή ένα φύλλο γυαλιού και ένα πλαστικό ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις εξ ολοκλήρου από πλαστικό. Τα είδη των γυάλινων καλυμμάτων που χρησιμοποιούνται είναι διαφανή, ανθεκτικά στις καιρικές συνθήκες και στην υπεριώδη ακτινοβολία και χρωματισμένα ώστε να αντανακλούν την θερμότητα. Το κάλυμμα προφυλάσσει τα κελιά και τις ηλεκτρικές επαφές από την βροχή, το χαλάζι και το χιόνι που μπορούν να προκαλέσουν διάβρωση. Κάτω από το γυάλινο κάλυμμα της επιφάνειας που είναι στραμμένη προς τον ήλιο υπάρχει αντί-ανακλαστική μεμβράνη, η οποία βοηθά στη μείωση του ποσοστού της ανακλώμενης ηλιακής ακτινοβολίας. Πάνω και κάτω από τα στρώματα του πυριτίου υπάρχουν ηλεκτρικές επαφές κατασκευασμένες από υλικό μικρής θερμικής αντίστασης που συνδέουν το πλαίσιο με εξωτερικό ηλεκτρικό

κύκλωμα. Το συμπυκνωμένο αυτό υλικό είναι συνήθως EVA, το οποίο εμφανίζει πολύ καλή ηλεκτρική μόνωση και μεγάλη διαπερατότητα στο φως. Τα ηλιακά κελιά συνδέονται σε σειρά, παράλληλα ή και συνδυασμένα προκειμένου να καλυφθούν οι ανάγκες σε τάση και σε ρεύμα. Επίσης, τα κελιά οφείλουν να είναι όμοια, ώστε να εμφανίζουν και όμοια ηλεκτρικά χαρακτηριστικά και να επιτυγχάνεται έτσι η ομαλή λειτουργία του φ/β πλαισίου. (βλ. [2])

Προκειμένου τα φ/β πλαίσια να έχουν την μέγιστη απόδοση, θα πρέπει να δέχονται συνεχώς την μέγιστη ηλιακή ακτινοβολία. Οι ηλιακές ακτίνες θα πρέπει να προσπίπτουν πάντα κάθετα στην επιφάνεια ώστε να έχουν την μεγαλύτερη δυνατή πυκνότητα ανά μονάδα επιφανείας και να μην ανακλώνται στην γυάλινη επικάλυψη του πλαισίου. Εφόσον, ο ήλιος κινείται κατά την διάρκεια της ημέρας για να επιτευχθεί η μέγιστη απόδοση, το φ/β πλαίσιο θα πρέπει να παρακολουθεί συνεχώς τη θέση του ήλιου. Αυτό για πρακτικούς λόγους δεν είναι πάντα εφικτό, καθώς απαιτείται εξειδικευμένος μηχανισμός κίνησης του πλαισίου που αυξάνει κατά πολύ το κόστος εγκατάστασης και έχει μεγάλες απαιτήσεις σε συντήρηση και επίβλεψη. Ωστόσο, επιλέγοντας τον καταλληλότερο σταθερό προσανατολισμό για το πλαίσιο, μπορούν να υπάρξουν ικανοποιητικότερα αποτελέσματα. Η επιλογή του καταλληλότερου προσανατολισμού συνεπώς, είναι καταλυτικής σημασίας τόσο για την ορθή λειτουργία του πλαισίου όσο και του φ/β συστήματος συνολικά.

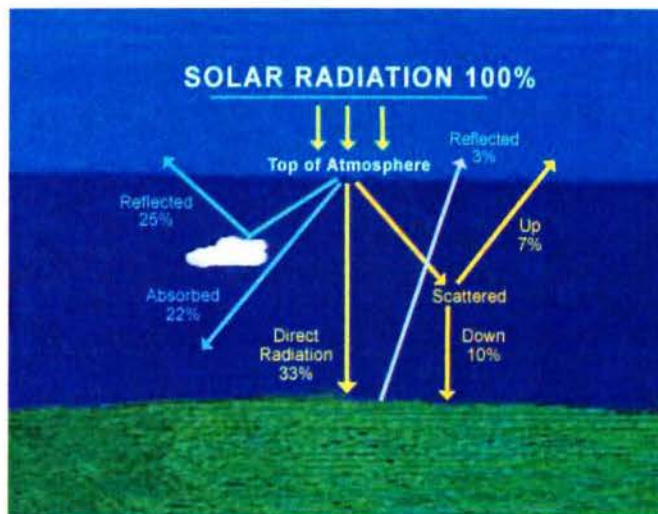
## ***1.11 Απορρόφηση Ηλιακής Ακτινοβολίας – Προσανατολισμός Πλαισίων***

**Η αποδοτική λειτουργία των φ/β συστημάτων εξαρτάται σε πολύ μεγάλο βαθμό από τη σωστή τοποθέτηση και διάταξη των πλαισίων.** Η θέση του ήλιου και η τροχιά κίνησής του στον ουρανό επηρεάζουν καθοριστικά, το ποσοστό της αξιοποιούμενης από το πλαίσιο ηλιακής ακτινοβολίας. Η εκλογή του κατάλληλου προσανατολισμού του πλαισίου έτσι ώστε να επιτυγχάνεται η μέγιστη δυνατή απόδοση – ιδίως σε συστήματα που δεν διαθέτουν μηχανισμό κίνησης ώστε να ακολουθούν την κίνηση του ήλιου, συνιστά βασικό και αναπόσπαστο κομμάτι της μελέτης και εγκατάστασης των φ/β συστημάτων.

### **1.11.1 Συνιστώσες Ηλιακής Ακτινοβολίας**

Πριν από τον ορισμό των γωνιών που βοηθούν στον προσδιορισμό του κατάλληλου προσανατολισμού του ηλιακού πλαισίου, είναι απαραίτητο να γίνει αναφορά στον τρόπο μεταφοράς της ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια της Γης. Όταν η ηλιακή ακτινοβολία εισέλθει στην γήινη ατμόσφαιρα, ένα μέρος της σκεδάζεται (από μόρια αέρα, νερού και σκόνης) και ένα μέρος της απορροφάται (από  $O_3$ ,  $H_2O$ ,

CO<sub>2</sub>). Έτσι λοιπόν, μόνο ένα τμήμα της ηλιακής ακτινοβολίας προσπίπτει στο έδαφος χωρίς να έχει υποστεί κάποια επίδραση. Αυτή η συνιστώσα ακτινοβολία ονομάζεται **ακτινική ή άμεση ακτινοβολία (direct)**. Ένα μέρος της **σκεδασμένης (scattered)** ηλιακής ακτινοβολίας επιστρέφει στο διάστημα, ενώ το υπόλοιπο τμήμα της φθάνει στο έδαφος. Η ηλιακή αυτή ακτινοβολία, της οποίας η κατεύθυνση έχει αλλάξει λόγω της σκέδασης στην ατμόσφαιρα, ονομάζεται **διάχυτη ακτινοβολία (diffuse)**. (βλ. [25])



Εικόνα 1.24: Οι συνιστώσες της ηλιακής ακτινοβολίας

Η **ολική ακτινοβολία** που προσπίπτει σε ένα οριζόντιο επίπεδο είναι το **άθροισμα της άμεσης και της διάχυτης ακτινοβολίας**:  $I=I_b+I_d$  όπου,

- $I$  : η ολική ηλιακή ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο στην επιφάνεια της Γης
- $I_b$  : η άμεση συνιστώσα της ηλιακής ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο
- $I_d$  : η διάχυτη συνιστώσα της ηλιακής ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο.

Για την **ολική ακτινοβολία** που προσπίπτει σε επιφάνεια με κλίση, πρέπει να προστεθεί η ηλιακή ακτινοβολία που ανακλάται από το έδαφος, δηλαδή η **ανακλώμενη ηλιακή ακτινοβολία (reflected)** :  $I_T=I_{b,T}+I_{d,T}+I_{refl,T}$  όπου,

- $I_T$  : η ολική ηλιακή ακτινοβολία σε κεκλιμένο επίπεδο στην επιφάνεια της Γης
- $I_{b,T}$  : η ακτινική συνιστώσα της ηλιακής ακτινοβολίας σε κεκλιμένο επίπεδο
- $I_{d,T}$  : η διάχυτη συνιστώσα της ηλιακής ακτινοβολίας σε κεκλιμένο επίπεδο
- $I_{refl,T}$  : η ανακλώμενη συνιστώσα της ηλιακής ακτινοβολίας σε κεκλιμένο επίπεδο

### 1.11.2 Προσανατολισμός φωτοβολταϊκού πλαισίου

Η αποδοτική εκμετάλλευση της ηλιακής ακτινοβολίας εξαρτάται άμεσα από τον προσανατολισμό του πλαισίου σε σχέση με την κατεύθυνση της ακτινοβολίας. Η θέση του ήλιου στον ουρανό, αλλά και ο προσανατολισμός ενός επίπεδου στην επιφάνεια της γης περιγράφονται από ορισμένες γωνίες. Οι γωνίες αυτές, είναι:

a) Η γωνία πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας  $\omega$ :

Ορίζεται ως η γωνία μεταξύ της ακτινικής συνιστώσας της ακτινοβολίας που προσπίπτει σε μια επιφάνεια και της καθέτου στην επιφάνεια αυτή

b) Ο προσανατολισμός του πλαισίου  $\beta$ :

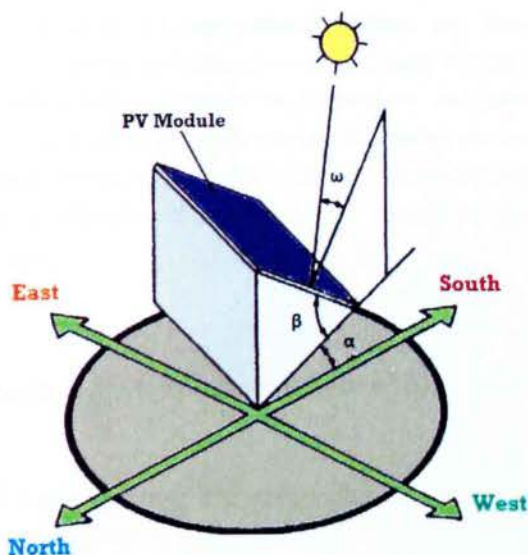
Η κλίση του πλαισίου  $\beta$  είναι η διέδρη γωνία που σχηματίζεται ανάμεσα στο επίπεδο του πλαισίου και στον ορίζοντα και μπορεί να πάρει τιμές από  $0^\circ$ -  $180^\circ$

c) Η αζιμούθια γωνία επιφάνειας του πλαισίου  $\alpha$  :

Η γωνία που σχηματίζεται πάνω στο οριζόντιο επίπεδο ανάμεσα στην προβολή της κατακόρυφου του πλαισίου και στον τοπικό μεσημβρινό βορρά-νότου. Παίρνει τιμές από  $-180^\circ$  έως  $+180^\circ$  (Εικόνα 1.25).

Στο σημείο αυτό πρέπει να αναφερθεί ότι έχουν κατασκευαστεί μηχανικές διατάξεις, οι οποίες επαναπροσανατολίζουν συνεχώς το πλαίσιο (π.χ. με τη βοήθεια ηλεκτρονικού υπολογιστή ή φωτοκύτταρων), ώστε η επιφάνεια του να «αντικρίξει» πάντα κάθετα τον ήλιο. Οι διατάξεις όμως αυτές είναι πολύπλοκες και σημαντικά δαπανηρές και η χρήση τους δικαιολογείται μόνον σε περιπτώσεις ειδικευμένων εφαρμογών (π.χ. σε μεγάλες εμπορικές/παραγωγικές εγκαταστάσεις όπως το φ/β πάρκο στην έρημο Νεβάδα των Η.Π.Α). (βλ. [25])





Εικόνα 1.25: Προσανατολισμός φωτοβολταϊκού πλαισίου

Όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, ανάλογα με το είδος των εφαρμογών τους στα συστήματα, τα φ/β πλαίσια διακρίνονται σε δύο βασικές κατηγορίες : **α) στα κλασσικά επίπεδα συστήματα** και **β) στα συστήματα συγκεντρωτικών συλλεκτών**.

### 1.11.2.1 Συστήματα Επίπεδων Φωτοβολταϊκών Πλαισίων

Πρόκειται για τον πιο κοινό τύπο φωτοβολταϊκών πλαισίων. Τα πλαίσια μπορούν είτε να βρίσκονται μόνιμα υπό μια σταθερή γωνία κλίσης ή να κινούνται ακολουθώντας την τροχιά κίνησης του ήλιου. Ακόμη, είναι σε θέση να απορροφούν τόσο την άμεση όσο και την διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία, γεγονός εξαιρετικά σημαντικό καθώς η διάχυτη ακτινοβολία αποτελεί το 10% με 20% της συνολικής σε επίπεδη επιφάνεια, ακόμα και σε πλήρη καθαρότητα ουρανού. Σε μερικώς συννεφιασμένες ημέρες το ποσοστό αυτό αγγίζει το 50% ενώ σε πλήρως συννεφιασμένες φτάνει το 100%. Τα απλούστερα επίπεδα πλαίσια βρίσκονται σε σταθερή θέση. Βασικό πλεονέκτημα των σταθερών πλαισίων είναι η έλλειψη κινητών τμημάτων, οπότε πρακτικά δεν υπάρχει ανάγκη επιπλέον εξοπλισμού και άρα είναι σχετικά ελαφριά. Αυτά τους τα χαρακτηριστικά, τα καθιστούν κατάλληλα για χρήση σε σειρά εφαρμογών, όπως π.χ. εγκατάσταση σε στέγες κτιρίων. Ο βέλτιστος προσανατολισμός των πλαισίων αυτών ώστε να παρέχουν ικανοποιητική απόδοση πρέπει να είναι προς το Νότο, ενώ η κλίση τους πρέπει να βρίσκεται στις

$(\varphi+15^\circ) \pm 5^\circ$ , όπου  $\varphi$  είναι το γεωγραφικό πλάτος της περιοχής. Τα επίπεδα πλαίσια με μηχανισμό κίνησης επιτυγχάνουν μεγαλύτερη απορρόφηση ακτινοβολίας ανά μονάδα επιφάνειας εφόσον μπορούν να βρίσκονται υπό βέλτιστη γωνία κλίσης και προσανατολισμού ανά πάσα χρονική στιγμή. Μειονεκτούν όμως σε σχέση με τα πρώτα διότι είναι επιφορτισμένα με επιπλέον κόστος και βάρος λόγω του μηχανισμού κίνησης. Βρίσκοντας μια ισορροπία μεταξύ των δύο μπορεί να γίνει η σωστή επιλογή για την κάθε περίπτωση.

### 1.11.2.2 Συστήματα Συγκεντρωτικών Φωτοβολταϊκών Πλαισίων

Η ειδοποιός διαφορά αυτής της κατηγορίας συστημάτων σε σχέση με την προηγούμενη, είναι η ικανότητά τους να παράγουν την ίδια ισχύ αξιοποιώντας λιγότερα ηλιακά κελιά από τα επίπεδα.

Τα κελιά αποτελούν το ακριβότερο τμήμα ενός τέτοιου συστήματος, μετρώντας το κόστος ανά μονάδα επιφάνειας. Για το σύστημα συγκέντρωσης της ακτινοβολίας χρησιμοποιούνται φθηνά υλικά, όπως πλαστικά κάτοπτρα και μεταλλικές θήκες, τα οποία συλλέγουν την ηλιακή ακτινοβολία από μια συγκριτικά μεγάλη επιφάνεια και την εστιάζουν σε μια μικρότερη, αυτή στην οποία βρίσκεται το κελί.

Τα πλεονεκτήματα των συγκεντρωτικών συστημάτων έναντι των επίπεδων είναι αρκετά :

Χαρακτηρίζονται από αυξημένη ισχύ εξόδου ενώ η απόδοση αυτών των συστημάτων είναι μεγαλύτερη για μικρότερο μέγεθος ή αριθμό κελιών. Η αύξηση της απόδοσης εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό απ' το σχήμα του ηλιακού κελιού και από το υλικό από το οποίο είναι κατασκευασμένο. Επίσης, η δυνατότητα χρήσης μικρότερων κελιών είναι μεγάλης σημασίας, εφόσον είναι πολύ πιο δύσκολο να παραχθούν κελιά με μεγάλη επιφάνεια και μεγάλη απόδοση.

Απ' την άλλη πλευρά, υπάρχουν και αρκετά μειονεκτήματα όπως για παράδειγμα, τα απαιτούμενα οπτικά στοιχεία αυτών των συστημάτων είναι πολύ πιο ακριβά από τα καλύμματα των επίπεδων. Επιπλέον, δεν μπορούν να εκμεταλλευτούν και να αξιοποιήσουν τη διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία, και εξαιτίας αυτού ακόμη και σε συνθήκες καθαρής ηλιοφάνειας, χάνεται το 20% της ολικής ακτινοβολίας. Συνεπώς χρειάζεται να ακολουθούν την κίνηση του ήλιου καθ' όλη την διάρκεια της μέρας και κατ' επέκταση του έτους. Άρα, για την επίτευξη μεγαλύτερης απόδοσης πρέπει ο μηχανισμός κίνησής τους να είναι μεγαλύτερης ακρίβειας από αυτούς που χρησιμοποιούνται στα επίπεδα συστήματα. Για την συγκέντρωση του φωτός χρησιμοποιούνται ανακλαστήρες και φακοί - με πιο διαδεδομένο τον φακό FRESNEL, με διατομή αντίστοιχη με δόντι πριονιού. Δυστυχώς όμως, δεν υπάρχει φακός που να μπορεί να αξιοποιήσει το 100% του προσπίπτοντος φωτός. Συνήθως μεταφέρεται το 90-95% ή και λιγότερο (λόγω απορρόφησης και ανάκλασης).

Ένα άλλο σημαντικό πρόβλημα είναι αυτό της υπερθέρμανσης των κελιών που προκαλείται από την υψηλή συγκέντρωση ακτινοβολίας – η οποία γενικότερα είναι επιθυμητή. Η θερμοκρασία των κελιών πρέπει να διατηρείται σε χαμηλά επίπεδα διότι η αύξησή της μειώνει την απόδοσή τους ενώ μακροπρόθεσμα μπορεί να διαταράξει την σταθερότητα λειτουργίας τους ή να οδηγήσει σε πρόωρη καταστροφή τους. Μια από τις πιο ουσιαστικές προσπάθειες που πραγματοποιούνται με στόχο την διατήρηση χαμηλής θερμοκρασίας είναι η ελαχιστοποίηση της ηλεκτρικής αντίστασης των επαφών που μεταφέρουν το ρεύμα στο εξωτερικό κύκλωμα. Αυτό επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας επαφές μεγαλύτερης επιφάνειας, το οποίο έχει όμως σαν αποτέλεσμα την πρόκληση σκίασης στο κελί.

Γι' αυτό υπάρχουν δύο λύσεις : αφενός, η τοποθέτηση πρισματικού καλύμματος πάνω από την επαφή ώστε το φως που θα προσέπιπτε στην επαφή, τώρα να προσπίπτει στο πρίσμα, απ' όπου και θα εκτρέπεται για να διοχετευτεί στο κελί. Αφετέρου, μπορεί να γίνει τοποθέτηση και των δύο επαφών πίσω από το κελί, πράγμα το οποίο όμως απαιτεί πολύ καλής ποιότητας πυρίτιο.

### 1.11.2.3 Μηχανισμός Κίνησης

Ο μηχανισμός κίνησης του φ/β πλαισίου μπορεί να επιτρέπει την κίνηση σε έναν ή δύο άξονες. Τα συστήματα ενός άξονα είναι σχεδιασμένα να ακολουθούν την πορεία του ήλιου από την ανατολή στη δύση. Χρησιμοποιούνται κυρίως σε συστήματα επίπεδων φωτοβολταϊκών πλαισίων αλλά σε ορισμένες περιπτώσεις και σε συστήματα συγκεντρωτικών πλαισίων. Τα **συστήματα** δύο αξόνων εκτελούν την ίδια λειτουργία με αυτά του ενός άξονα σε συνδυασμό όμως με την ταυτόχρονη παρακολούθηση της μεταβολής της απόκλισης του ήλιου κατά την διάρκεια του έτους. Χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο με συγκεντρωτικά πλαίσια. Τα **συστήματα δύο αξόνων** είναι πολυπλοκότερα και ακριβότερα σε σχέση με τα συστήματα ενός άξονα, ενώ έχουν και μεγαλύτερες απαιτήσεις συντήρησης.

## 1.12 Παράγοντες που επηρεάζουν την Απόδοση και Λειτουργία των Φ/β Συστημάτων

Σύμφωνα με τους κατασκευαστές τους, τα φ/β συστήματα παρουσιάζουν συνήθως αναμενόμενη διάρκεια ζωής περί τα 30 έτη. Ωστόσο, όπως αποδεικνύεται στην πράξη η λειτουργία των πλαισίων για αυτό το χρονικό διάστημα, δεν είναι συνήθως εφικτή. Το γεγονός αυτό οφείλεται σε διάφορα σφάλματα που παρατηρούνται κατά την λειτουργία των πλαισίων, τα οποία σχετίζονται με κατασκευαστικές αστοχίες ή/και διάφορους κλιματικούς και περιβαλλοντικούς παράγοντες. Αποτέλεσμα της μη ορθής λειτουργίας των πλαισίων, εκτός από τη μείωση του προσδοκώμενου χρόνου ζωής είναι σαφώς και η ελάττωση της

αναμενόμενης απόδοσης των πλαισίων. Κατασκευαστικά σφάλματα εντοπίζονται τόσο στο περίβλημα που πλαισιώνει το ηλιακό κελί όσο και στο ίδιο το κελί. Τα σφάλματα που σχετίζονται με το περίβλημα, μπορεί να οφείλονται στην αστοχία κάποιου υλικού (π.χ. υλικά κακής ποιότητας) εκ των δομικών στοιχείων του πλαισίου ή σε ελλιπή ακεραιότητα της δομής του πλαισίου, που μπορεί να προκαλέσει μείωση της αντοχής του σε φορτία ανέμου και εύκολη στρέβλωση. Αποτέλεσμα αυτού, είναι η εισχώρηση ρυπασμένων αερίων ή υγρασίας στο εσωτερικό του πλαισίου, προκαλώντας μείωση της απόδοσης του πλαισίου σε ποσοστό μεγαλύτερο του 1% ανά χρόνο χρήσης. Ειδικότερα, η υγρασία μπορεί να προκαλέσει διάβρωση των κελιών και των συνδέσεων τους. Τέλος, η κακή ποιότητα ή καταστροφή της μόνωσης του φ/β πλαισίου μπορεί να προκαλέσει διαρροή ρεύματος, οδηγώντας σε βραχυκύκλωμα. Σε ότι αφορά τα κελιά, είναι δυνατόν να υπάρχουν ρωγμές στην επιφάνεια τους, εξαιτίας της μηχανικής τους κοπής κατά την δημιουργία τους. Επιπλέον, μια ενδεχόμενη κακή σύνδεση των στοιχείων μπορεί να επιφέρει σημαντικότερη μείωση της απόδοσης του φ/β πλαισίου.

Εκτός από τις αστοχίες κατά την κατασκευή, την μη ορθή λειτουργία και η ελάττωση της απόδοσης κελιών και πλαισίων επηρεάζει ένα σύνολο εξωτερικών παραγόντων :

### 1.12.1 Θερμοκρασία

Η απόδοση των φ/β συστημάτων επηρεάζεται σημαντικά από τη θερμοκρασία. Τα φωτοβολταϊκά συστήματα λειτουργούν ιδανικά συνήθως σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, 25°C. Στην πράξη όμως, η θερμοκρασία του συστήματος υπό πραγματικές συνθήκες λειτουργίας διαφέρει σημαντικά από την ιδανική, ιδίως κατά την διάρκεια των θερινών μηνών. Η αύξηση της θερμοκρασίας των κελιών επιδρά αρνητικά στο ποσό της ηλιακής ενέργειας που μετατρέπεται σε ηλεκτρική και προκαλεί σημαντική μείωση στη διαφορά δυναμικού που αναπτύσσεται στο εσωτερικό τους. Συστήματα που λειτουργούν σε θερμοκρασίες πάνω από την ενδεικτική τιμή που προβλέπεται από τον κατασκευαστή, εμφανίζουν μείωση στην εν δυνάμει παραγωγή τους σε ποσοστό μεγαλύτερο από 14%. Συνολικά μπορούμε να πούμε ότι **η αποτελεσματικότητα όσον αφορά την λειτουργία των πλαισίων είναι αντιστρόφως ανάλογη με την αύξηση της θερμοκρασίας.**

### 1.12.2 Ηλιακή ακτινοβολία

Η συνολική ενέργεια που παράγεται από ένα φ/β σύστημα σε ετήσια βάση, είναι άμεσα εξαρτώμενη από τη **διαθέσιμη προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία** και

επηρεάζεται σημαντικά από τη γεωγραφική θέση εγκατάστασης του συστήματος. Γενικότερα η αύξηση της ηλιακής ακτινοβολίας έχει ως αποτέλεσμα μεγαλύτερη παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος που οφείλεται στην αυξανόμενη παραγωγή ηλεκτρονίων (λόγω της αυξανόμενης ροής των φωτονίων) και ως εκ τούτου, μεγαλύτερη παραγόμενη ισχύ. (βλ. [33])

Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι πολύ σπουδαίο ρόλο στην απόδοση του συστήματος, παίζει η «σύσταση» της ηλιακής ακτινοβολίας καθώς δυο δέσμες ακτινοβολίας ίδιας ισχύος αλλά διαφορετικού μήκους κύματος μπορούν να προκαλέσουν διαφορετική ηλεκτροπαραγωγή και επομένως να διαμορφώσουν διαφορετικό βαθμό απόδοσης.

### 1.12.3 Ταχύτητα και κατεύθυνση ανέμου

Η ταχύτητα του ανέμου, μπορεί να παίζει σημαντικό ρόλο στον καθορισμό της θερμοκρασίας του πλαισίου. Ψυχροί ανιμισμοί, προκαλούν λειτουργία πλαισίων σε θερμοκρασίες χαμηλότερες σε σχέση με τις αντίστοιχες υπό συνθήκες άπνοιας με ίδια ποσοστά προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας.

### 1.12.4 Ρύπανση

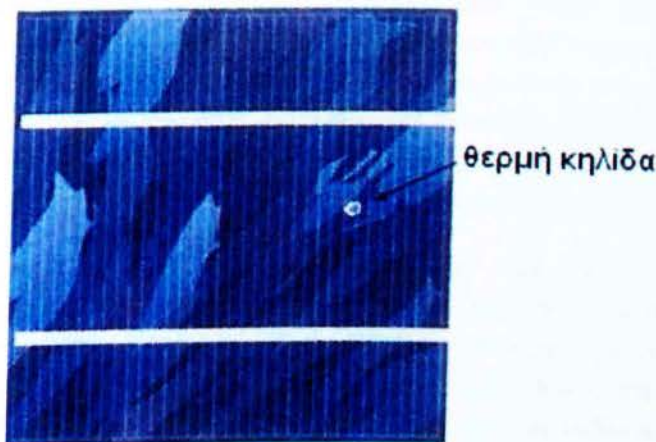
Η ηλεκτροπαραγωγή των φ/β πλαισίων ενδέχεται να μειωθεί από την επικάλυψη σκόνης, φύλλων, χιονιού, εντόμων και άλλων ακαθαρσιών στην επιφάνειά τους. Η μείωση είναι σημαντικότερη σε αστικές και βιομηχανικές περιοχές λόγω της αιωρούμενης στην ατμόσφαιρα αιθάλης η οποία προσκολλάται ισχυρά στην επιφάνεια των πλαισίων και δεν απομακρύνεται εύκολα. Σε περιοχές με συχνές χιονοπτώσεις ή ανεμοθύελλες, τα πλαίσια τοποθετούνται συνήθως υπό κλίση  $90^\circ$ , για την αποφυγή συσσώρευσης χιονιού, ή τουλάχιστον  $45^\circ$  για την αποφυγή συγκράτησης σκόνης. Όταν εκτιμάτε σημαντικό βαθμό ρύπανσης, είναι σκόπιμο να προβλέπεται στους υπολογισμούς η αντίστοιχη μείωση στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

### 1.12.5 Σκίαση

Ένας άλλος παράγοντας επίδρασης της DC ενεργειακής απόδοσης των φωτοβολταϊκών πλαισίων είναι η σκίαση. Το φαινόμενο της σκίασης εμφανίζεται είτε σε περιπτώσεις που συναντώνται εμπόδια στον περιβάλλοντα ορίζοντα των πλαισίων όπως παρακείμενα κτήρια, βλάστηση κλπ, είτε σε περιπτώσεις με περιορισμένη έκταση εγκατάστασης όπως για παράδειγμα στις στέγες κτηρίων, όπου προκαλείται

σκίαση από τη μία σειρά στην επόμενη. Ιδιαίτερα στη δεύτερη περίπτωση, οι επιπτώσεις της σκίασης μπορεί να είναι ιδιαίτερα σημαντικές. Ένα τυπικό πλαίσιο αποτελείται από στοιχεία όμοιων ηλεκτρικών χαρακτηριστικών σε σειρά. Οι τάσεις στα άκρα τους αθροίζονται και συνολικά, λειτουργούν ως ενιαία πηγή. Ένα σκιαζόμενο κελί, συμπεριφέρεται κατά βάση ως διάοδος, η οποία όταν το κύκλωμα είναι κλειστό, δέχεται από τα υπόλοιπα στοιχεία μία υψηλή ανάστροφη τάση. Εξαιτίας της δημιουργίας ανάστροφης τάσης, εμποδίζεται η ορθή ροή του ηλεκτρικού ρεύματος και δημιουργείται ρεύμα ανάστροφης φοράς που αυξάνει τη θερμοκρασία του στοιχείου. Αν ο αριθμός των υπολοίπων κελιών του πλαισίου είναι μεγάλος, αυτή η τάση μπορεί προκαλέσει την κατάρρευση της σκιασμένης διάοδου, προκαλώντας την καταστροφή της η οποία εκδηλώνεται με τη μορφή κηλίδας στην επιφάνεια του στοιχείου. Το φαινόμενο αυτό αναφέρεται ως «**θερμή κηλίδα**» (**hot spot**) (Εικόνα 1.26). Ουσιαστικά, το σκιαζόμενο στοιχείο λειτουργεί σαν πολύ μεγάλη αντίσταση, στην οποία αποδίδεται η ενέργεια που προσφέρουν όλα τα υπόλοιπα. Παρατεταμένος σκιασμός ενός στοιχείου σε συνδυασμό με έντονο φωτισμό των υπολοίπων μπορεί να οδηγήσει σε αχρήστευση όλου του πλαισίου, εφόσον δεν υπάρχει δυνατότητα αντικατάστασης ενός κατεστραμμένου στοιχείου. Για να αποτραπεί μία τέτοια εξέλιξη, το φωτοβολταϊκό πλαίσιο εφοδιάζεται με διάόδους (διάοδοι παράκαμψης), οι οποίες συνδέονται παράλληλα σε τμήματα εν σειρά συνδεδεμένων κελιών εξασφαλίζοντας τη δυνατότητα χρήσης του πλαισίου, ακόμα και όταν κάποιο στοιχείο του υστερεί ή έχει καταστραφεί.

Εκτός από τις παρακαμπτικές διάόδους, για την εξάλειψη των θερμών κηλίδων είναι απαραίτητο το πλαίσιο να τοποθετείται με τρόπο τέτοιο, ώστε να αποφεύγεται η συγκράτηση σκόνης ή χιονιού καθώς και η σκίαση από αντικείμενα του περιβάλλοντος χώρου.



Εικόνα 1.26: Απεικόνιση θερμής κηλίδας

### 1.12.6 Γήρανση

Λόγω της φθοράς των φωτοβολταϊκών πλαισίων (και των υπολοίπων στοιχείων ενός φ/β συστήματος), αναμένεται ότι με την πάροδο του χρόνου θα παρουσιάζεται μία μικρή βαθμιαία πτώση στην ποσότητα παραγωγής της ηλεκτρικής ισχύος, που συνήθως υπολογίζεται στο 1% με 2% ετησίως.

### 1.12.7 Απώλειες του φωτοβολταϊκού συστήματος

Περιλαμβάνουν τις ηλεκτρικές απώλειες στους αγωγούς που συνδέουν τα πλαίσια στις συστοιχίες, καθώς και τις συνδέσεις τους με άλλα μέρη του συστήματος, όπως διατάξεις ρύθμισης, προστασίας και ελέγχου, συσσωρευτές, μετατροπείς κλπ. Κατά τον υπολογισμό της απαιτούμενης επιφάνειας των φ/β ενός συστήματος, πρέπει να γίνεται πρόβλεψη, κατά περίπτωση και για την κάλυψη όλων αυτών των απωλειών, που μπορεί να αποτελούν περισσότερο από το 30% της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας.

### 1.12.8 Οπτικές απώλειες

Οι οπτικές απώλειες αφορούν σε αυξημένη ανακλαστικότητα του φ/β πλαισίου (υαλοπίνακας, αντανακλαστικό επίστρωμα, υλικό φ/β κελιών) λόγω αύξησης της γωνίας πρόσπτωσης των ηλιακών ακτινών στην επιφάνεια του, ιδιαίτερα σε γωνίες μεγαλύτερες των 60°. Στην ίδια κατηγορία ανήκουν και οι απώλειες λόγω χαμηλών τιμών της πυκνότητας της ηλιακής ακτινοβολίας. Για πλαίσια καλής ποιότητας, οι απώλειες αυτές αγνοούνται, σε αντίθετες όμως περιπτώσεις αποδεικνύονται σημαντικές και υπολογίζονται σε 3%, κατά μέσο όρο στο έτος.

Για την ανίχνευση και τον έλεγχο των διαφόρων σφαλμάτων που εμφανίζονται στα φ/β πλαίσια έχουν αναπτυχθεί διάφορες τεχνικές όπως : Υπέρυθρη απεικόνιση, ανάλυση καμπύλης τάσης-ρεύματος, P-Spice προσομοίωση, AMPS προσομοίωση, οπτική απεικόνιση, με τις δυο πρώτες να είναι οι σημαντικότερες. Η μέθοδος της υπέρυθρης απεικόνισης, χρησιμοποιεί την ακτινοβολία της υπέρυθρης περιοχής του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος (0.9–14 μm) για να παράγει εικόνες ενός συγκεκριμένου θερμοκρασιακού σχεδίου. Μέσω της υπέρυθρης ακτινοβολίας προσδιορίζεται η επιφανειακή θερμοκρασία των αντικειμένων και αποδίδονται, οποιεσδήποτε ανωμαλίες στο θερμοκρασιακό τους σχέδιο. Διακρίνεται σε δυο διαφορετικές κατηγορίες την παθητική και την ενεργητική. Στην πρώτη, τα προς εξέταση αντικείμενα είναι σε διαφορετική θερμοκρασία από το περιβάλλον και

ασυνήθιστα θερμοκρασιακά προφίλ υποδεικνύουν ένα πιθανό πρόβλημα. Στη δεύτερη, δίνεται ενέργεια στο αντικείμενο ώστε να παρατηρηθούν θερμοκρασιακές διαφορές που αποδεικνύουν ύπαρξη υποεπιφανειακών αστοχιών.



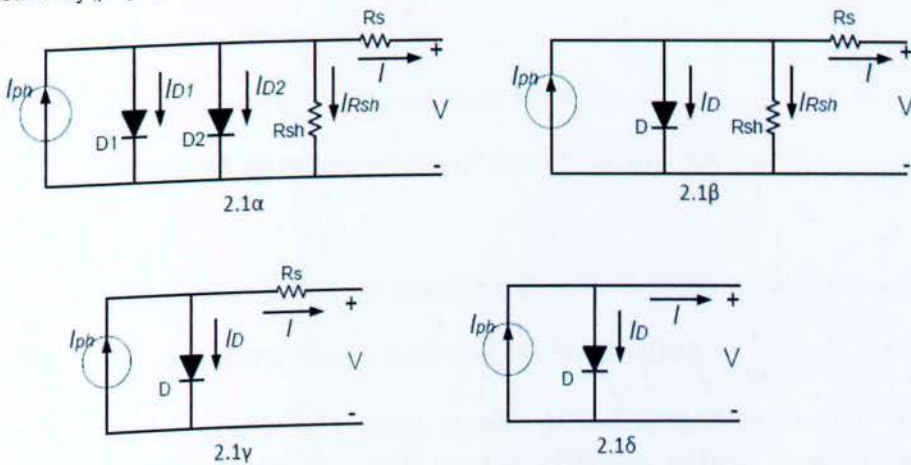
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Η λειτουργία ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου χαρακτηρίζεται ικανοποιητική σε σχέση με την απόδοσή του. Οπότε, ο βαθμός απόδοσης του κάθε φ/β πλαισίου αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους δείκτες σωστής λειτουργίας των φ/β συστημάτων. Ο αναμενόμενος βαθμός απόδοσης του φ/β πλαισίου δίνεται από τις δημοσιευμένες καμπύλες του κατασκευαστή και έχοντας δεδομένο τον αναφορικό βαθμό απόδοσης μπορεί να παρατηρηθεί ενδεχόμενο σφάλμα στην λειτουργία του. Ωστόσο για να οριστεί ο βαθμός απόδοσης, είναι απαραίτητο πρώτα να δοθεί μια λεπτομερής περιγραφή του ηλεκτρικού κυκλώματος του ηλιακού κελιού προκειμένου να κατανοηθεί περαιτέρω ο τρόπος λειτουργίας του.

Για να κατανοηθεί η ηλεκτρική συμπεριφορά των ηλιακών στοιχείων, είναι χρήσιμο να δημιουργηθεί ένα πρότυπο το οποίο είναι ηλεκτρικά ισοδύναμο, και βασίζεται σε διακριτά ηλεκτρικά στοιχεία των οποίων η συμπεριφορά είναι γνωστή.

### 2.1 Μοντελοποίηση φ/β κυττάρου

Το απλούστερο ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα ενός ιδανικού φ/β κυττάρου είναι μια μεγάλη φυσικών διαστάσεων δίοδο pn, η οποία είναι κατασκευασμένη με τέτοιο τρόπο ώστε η n επιφάνειά της, που είναι στραμμένη προς τον ήλιο, να έχει πολύ μεγάλη έκταση. Η ένταση την προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας ( $W/m^2$ ) μέσω του φωτοβολταϊκού φαινομένου δημιουργεί ροή ηλεκτρικού ρεύματος (φωτορεύμα). Η ποσοτική μελέτη ενός φ/β κυττάρου μπορεί να γίνει μέσω του ισοδύναμου ηλεκτρικού κυκλώματος. Οι δυνατές τοπολογίες απεικονίζονται στις παρακάτω εικόνες. (βλ.[13])



Εικόνα 2.1.1: Ισοδύναμα ηλεκτρικά κυκλώματα φ/β κυττάρου

Η γενική δομή του ισοδύναμου κυκλώματος ενσωματώνει μια πηγή φωτορεύματος  $I_{ph}$ , μία ή δύο διόδους  $D$ , μία παράλληλη αντίστασης  $R_{sh}$  (κατά κανόνα πολύ μεγάλης τιμής) που εκφράζει το ρεύμα διαρροής ως προς τη γη και μία αντίσταση σε σειρά  $R_s$  (της τάξης μερικών  $m\Omega$ ) που εκφράζει την εσωτερική αντίσταση του κυττάρου. Η τοπολογία 2.1α παρέχει τη μεγαλύτερη ακρίβεια από τις υπόλοιπες διότι έχει 8 παραμέτρους. Ωστόσο, όπως θα αναφερθεί στη συνέχεια, μεγαλύτερης αποδοχής για μελέτες MPPT απολαμβάνει η τοπολογία 2.1γ, καθώς οι 5 παράμετροι της διασφαλίζουν ικανοποιητική ακρίβεια και μεγάλη ευελιξία στη μοντελοποίηση των  $\phi/\beta$  κυττάρων και, κατ'επέκταση, των  $\phi/\beta$  πάνελς.

Εφαρμόζοντας τον νόμο του Kirchoff στην τοπολογία 2.1β, το ρεύμα  $I$  θα δίνεται από την εξίσωση  $I = I_{ph} - I_D - I_{Rsh}$ , όπου αντικαθιστώντας το ρεύμα της διόδου με την εξίσωση του Shockley  $I_D = I_s \left[ e^{\frac{q(V+I R_s)}{k T_c A}} - 1 \right]$  προκύπτει η παρακάτω σχέση που αποτελεί τη σχέση ρεύματος-τάσεως του  $\phi/\beta$  κυττάρου:

$$I = I_{ph} - I_s \left[ e^{\frac{q(V+I R_s)}{k T_c A}} - 1 \right] - \frac{(V + I R_s)}{R_{sh}}$$

Όπου:

$I_{ph}$ : το φωτορεύμα

$I_s$ : το ανάστροφο ρεύμα κόρου της διόδου

$q = 1,6 \cdot 10^{-19}$  C το φορτίο του ηλεκτρονίου

$k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  J/K η σταθερά Boltzmann

$T_c$ : η θερμοκρασία λειτουργίας του κυττάρου σε Kelvin

$A$ : ο συντελεστής ποιότητας της διόδου (1,2 για Si-mono, 1,3 για Si-poly)

Το φωτορεύμα μπορεί να θεωρηθεί με μεγάλη ασφάλεια ότι είναι ευθέως ανάλογο της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας, δηλαδή  $I_{ph}|_G = \left( \frac{G}{G_0} \right) I_{ph}|_{G_0}$ , όπου  $G_0$  είναι η τιμή αναφοράς της έντασης ηλιακής ακτινοβολίας, η οποία είναι ίση με  $1 \text{ KW/m}^2$ , και  $G$  η δοθείσα ένταση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας σε  $\text{KW/m}^2$ . Ωστόσο, έχει επικρατήσει το φωτορεύμα να υπολογίζεται από την πιο γενικευμένη σχέση που λαμβάνει υπόψη τόσο την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας όσο και τη θερμοκρασία λειτουργίας του  $\phi/\beta$  κυττάρου:

$$I_{ph}|_G = \left[ I_{sc} + K_i (T_c - T_{ref}) \right] G$$

Όπου:

$I_{sc}$ : το ρεύμα βραχυκύκλωσης του κυττάρου σε συνθήκες STC ( δηλαδή σε θερμοκρασία λειτουργίας 298° K ή 25° C, A.M. 1.5 και ένταση ηλιακής ακτινοβολίας 1KW/m<sup>2</sup>)

$K_i$ : ο επί τοις 100 θερμοκρασιακός συντελεστής ρεύματος βραχυκύκλωσης του κυττάρου

$T_{ref}$ : η θερμοκρασία αναφοράς λειτουργίας του κυττάρου σε βαθμούς Kelvin.

Να σημειωθεί ότι ως ένταση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας ορίζεται το άθροισμα της άμεσα προσπίπτουσας στο φ/β κύτταρο και της έμμεσα προσπίπτουσας, π.χ. μέσω ανακλάσεων.

Το ανάστροφο ρεύμα κόρου εξαρτάται από τη θερμοκρασία λειτουργίας του κυττάρου σύμφωνα με τη σχέση:

$$I_S = I_{RS} \left( \frac{T_c}{T_{ref}} \right)^{3/4} \cdot e^{- \left[ \frac{q E_g \left( \frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T_c} \right)}{k t} \right]}$$

Όπου

$I_{RS}$ : το ανάστροφο ρεύμα κόρου του κυττάρου σε σταθερή θερμοκρασία αναφοράς και καθορισμένης έντασης ηλιακή ακτινοβολία.

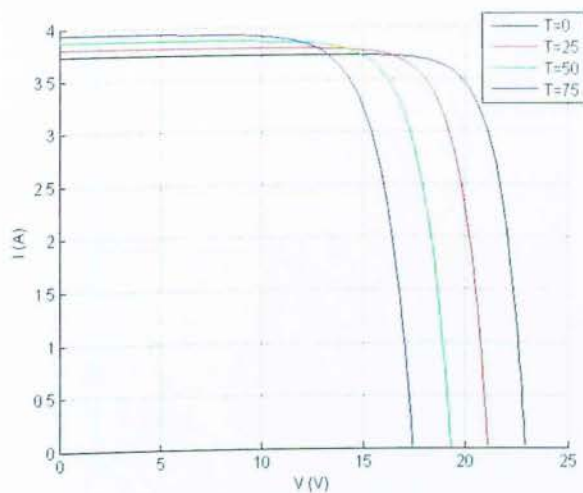
$E_g$ : το ενεργειακό χάσμα του ντοπαρισμένου ημιαγωγού από τον οποίο είναι κατασκευασμένο το κύτταρο.

Το  $I_{RS}$  δίνεται από τη σχέση:

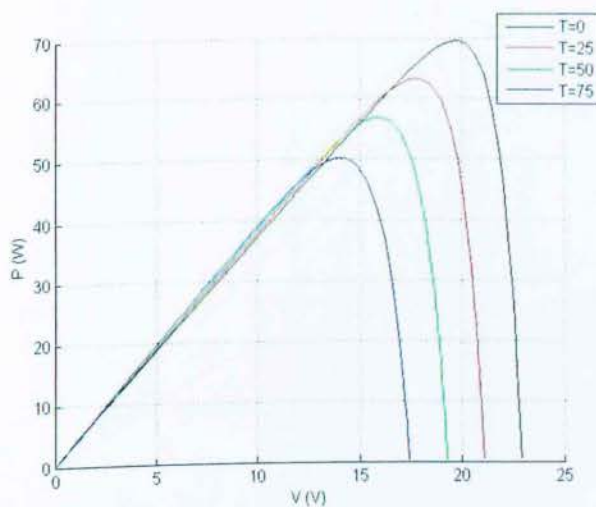
$$I_{RS} = \frac{I_{sc}}{\left[ e^{\left( \frac{q V_{oc}}{k T_c} \right)} - 1 \right]} \quad \text{Σχέση 2.1.1}$$

Όπου  $V_{oc}$  η τάση ανοιχτού κυκλώματος του κυττάρου.

Προσομοίωση ολοκληρωμένου φωτοβολταϊκού συστήματος με έλεγχο απόδοσης σε πραγματικό χρόνο.

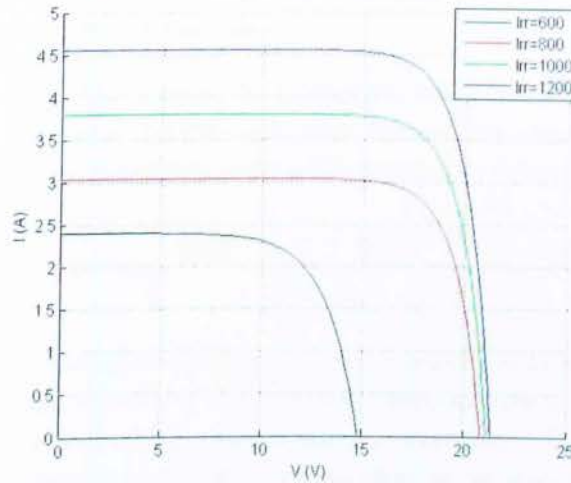


Εικόνα 2.1.2 Καμπύλη I-V με σταθερή ένταση ηλιακής ακτινοβολίας  $1,0\text{KW/m}^2$  και θερμοκρασία λειτουργίας μεταβαλλόμενη

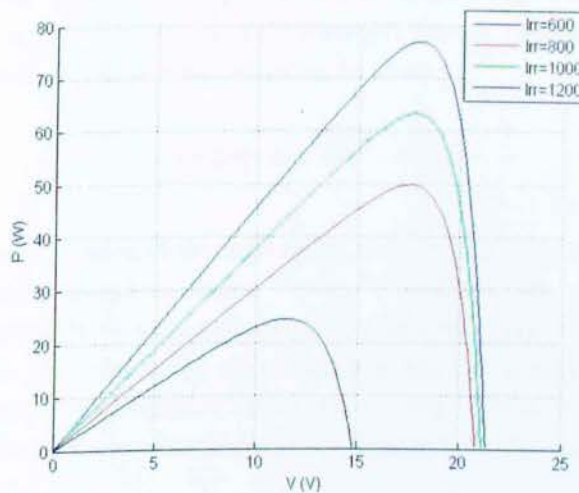


Εικόνα 2.1.3 Καμπύλη P-V με σταθερή ένταση ηλιακής ακτινοβολίας  $1,0\text{KW/m}^2$  και θερμοκρασία λειτουργίας μεταβαλλόμενη

Προσομοίωση ολοκληρωμένου φωτοβολταϊκού συστήματος με έλεγχο απόδοσης σε πραγματικό χρόνο.



Εικόνα 2.1.4 Καμπύλη I-V με σταθερή θερμοκρασία λειτουργίας 25°C και ένταση ηλιακής ακτινοβολίας μεταβαλλόμενη



Εικόνα 2.1.5 Καμπύλη P-V με σταθερή θερμοκρασία λειτουργίας 25°C και ένταση ηλιακής ακτινοβολίας μεταβαλλόμενη

Στη Σχέση 2.1.1 έχει αγνοηθεί η αντίσταση διαρροής, το οποίο όμως δεν βλάπτει το αποτέλεσμα διότι η τιμή της είναι πάρα πολύ μικρή. Στα σχήματα παραπάνω σχήματα παρουσιάζονται οι μορφές που έχουν οι καμπύλες I-V και P-V για ένα φ/β κύτταρο, το ισοδύναμο του οποίου είναι αυτό της Εικόνας 2.1β υπό συνθήκες σταθερής θερμοκρασίας λειτουργίας 25°C και μεταβαλλόμενης έντασης ηλιακής ακτινοβολίας Εικόνα 2.1.4, Εικόνα 2.1.5 και θερμοκρασία λειτουργίας μεταβαλλόμενη Εικόνα 2.1.2, Εικόνα 2.1.3.

Από τις προηγούμενες καμπύλες παρατηρείται ότι όσο αυξάνει η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας τόσο αυξάνει το ρεύμα του φ/β κυττάρου, άρα και η ισχύς του.

Επίσης, η αύξηση της θερμοκρασίας λειτουργίας μειώνει τη δυνατότητα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στο φ/β κύτταρο.

Η τοπολογία της Εικόνας 2.1α παρέχει, όπως αναφέρθηκε, μεγαλύτερη ακρίβεια γιατί βασίζεται περισσότερο στην πραγματική συμπεριφορά του φ/β κυττάρου. Σε αυτή την περίπτωση, το ρεύμα δίνεται από τη σχέση:

$$I = I_{ph} - I_s \left[ e^{\frac{q(V-IR_s)}{kTc_1A_1}} - 1 \right] - I_s \left[ e^{\frac{q(V+IR_s)}{kTc_2A_2}} - 1 \right] - \frac{(V + IR_s)}{R_{sh}}$$

Η διπλοεκθετική εξίσωση που προκύπτει ενσωματώνει τα χαρακτηριστικά της κάθε διόδου ομότιμα, ωστόσο η εξάγωγη των χαρακτηριστικών γίνεται μόνο μετά από επίπονη μαθηματική επεξεργασία της παρακάτω έκφρασης. Για το λόγο αυτό, σε περιπτώσεις που χρειάζεται ικανοποιητική ακρίβεια με το μικρότερο υπολογιστικό κόστος προτιμάται η τοπολογία 2.1.β.

Στην Εικόνα 2.1.γ παρουσιάζεται μια περισσότερο απλοποιημένη τοπολογία του φ/β κυττάρου. Σε αυτή την περίπτωση, η αντίσταση  $R_{sh}$ , η οποία εκφράζει τη διαρροή ρεύματος ως προς τη γη, έχει θεωρηθεί άπειρη (δηλαδή κύτταρο χωρίς διαρροή ρεύματος). Η έκφραση του ρεύματος θα είναι:

$$I = I_{ph} - I_s \left[ e^{\frac{q(V-IR_s)}{kTc_1}} - 1 \right]$$

Σε ένα πραγματικό κύτταρο πολύ καλής κατασκευής, η παραπάνω προσέγγιση μπορεί να θεωρηθεί οριακά αποδεκτή. Γενικά, η απόδοση ενός φ/β κυττάρου και, κατ'επέκταση, ενός φ/β πάνελ εξαρτάται αμυδρά από τις μεταβολές στην αντίσταση διαρροή  $R_{sh}$ . Από την άλλη, όμως, ακόμα και η παραμικρή μεταβολή στην τιμή της αντίστασης  $R_s$  μπορεί να επηρεάσει σημαντικά την ισχύ εξόδου του κάθε κυττάρου, προκαλώντας αλλοίωση των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών ολόκληρου του φ/β πάνελ.

## 2.2 Μοντελοποίηση φ/β πάνελ και συστοιχίας

Με βάση τις σημερινές δυνατότητες της βιομηχανίας ημιαγωγών, τα τυπικά ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των φ/β κυττάρων πυριτίου (mono-Si ή poly-Si) είναι 2W στα 0,6V (δηλαδή ρεύμα στο όριο των 3,3 A σε συνθήκες STC). Προκειμένου να κατασκευαστούν διατάξεις με πολλαπλάσιες ηλεκτρικές δυνατότητες, ένας αριθμός κυττάρων πρέπει να συνδεθεί σε σειρά ή/και παράλληλα. Επομένως, ένα φ/β πάνελ αποτελείται από πολλά κύτταρα, με όσο το δυνατόν όμοια ηλεκτρικά χαρακτηριστικά, ενωμένα μεταξύ τους σε σειρά. Μία φ/β συστοιχία ενσωματώνει μια ομάδα φ/β πάνελς συνδεδεμένα σε σειρά ή/και παράλληλα, ανάλογα και τις απαιτήσεις και τις δυνατότητες του inverter ή του ρυθμιστή φόρτισης. Τα περισσότερα φ/β πάνελς που κυκλοφορούν στην αγορά και εστιάζουν στις εφαρμογές

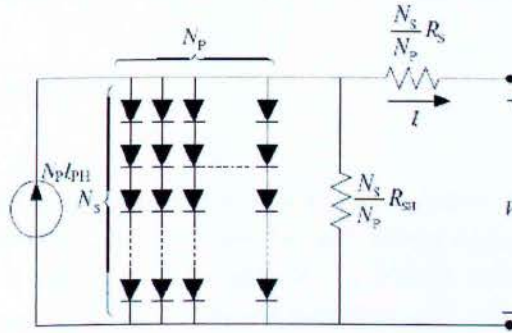
αυτόνομων φ/β συστημάτων ενσωματώνουν 36 ή 72 κύτταρα, λόγω των τεχνολογικών ιδιαιτεροτήτων που ενσωματώνουν οι grid inverters.

Όταν τα φ/β κύτταρα συνδεθούν σε σειρά, το συνολικό ρεύμα εξόδου θα είναι ίσο με το ρεύμα του ενός κυττάρου, ενώ η συνολική τάση θα είναι το άθροισμα των τάσεων του κάθε κυττάρου ξεχωριστά. Το ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα για ένα φ/β πάνελ αποτελούμενο από  $N_p$  κύτταρα εν παραλλήλω και  $N_s$  κύτταρα σε σειρά παρουσιάζεται στη παρακάτω εικόνα. (βλ. [13])

Η εξίσωση του ρεύματος για το φ/β πάνελ θα είναι:

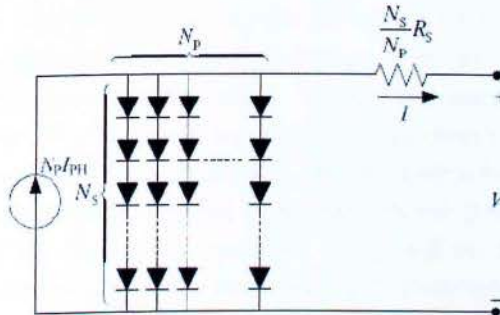
$$I = N_p I_{ph} - N_p I_s \left[ e^{\frac{q[(V/N_s) + (I R_s/N_p)]}{kTc-1}} - 1 \right] - \frac{(N_p V / N_s + I R_s)}{R_{sh}}$$

Το παραπάνω ηλεκτρικό ισοδύναμο του φ/β πάνελ προήλθε από γενίκευση του ισοδυνάμου κυττάρου του Σχήματος 2.1β.



Εικόνα 2.2.1: Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα φ/β πάνελ/συστοιχίας που βασίζεται στο κύκλωμα 2.1β

Αν γενικευτεί η απλοποιημένη προσέγγιση του Σχήματος 2.1γ, προκύπτει το απλοποιημένο μοντέλο για το φ/β πάνελ της παρακάτω Εικόνας:

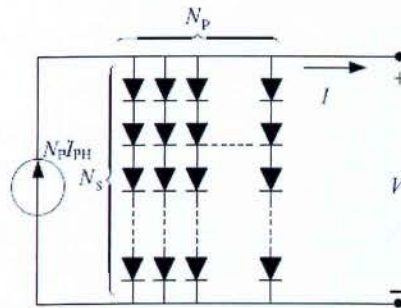


Εικόνα 2.2.2 : Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα φ/β πάνελ/συστοιχίας που βασίζεται στο κύκλωμα 2.1γ

Στη περίπτωση αυτή, το ρεύμα θα είναι:

$$I = N_p I_{ph} - N_p I_s \left[ e^{\frac{q[(V/N_s)+(R_s \cdot N_p)]}{kTcA}} - 1 \right]$$

Απλοποιώντας ακόμα περισσότερο την προσέγγιση, γενικεύοντας το κύκλωμα του Σχήματος 2.1δ προκύπτει το ισοδύναμο της παρακάτω Εικόνας:

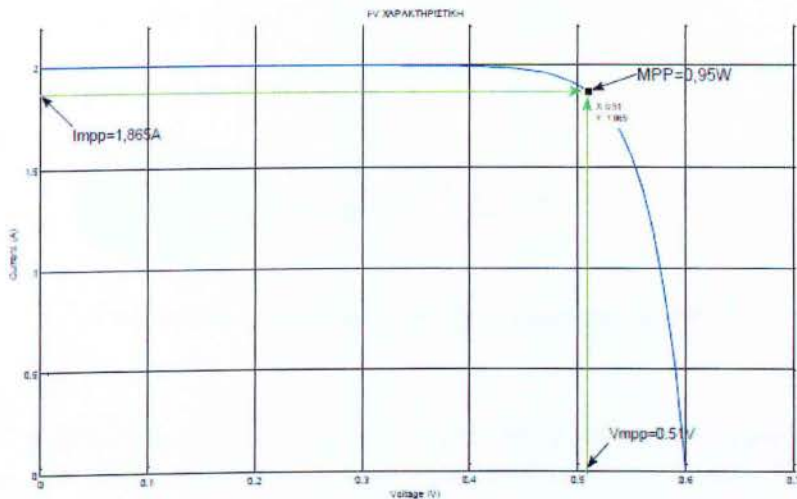


Εικόνα 2.2.3 : Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα φ/β πάνελ/συστοιχίας που βασίζεται στο κύκλωμα 2.1δ

### 2.3 Εισαγωγή στο MPPT

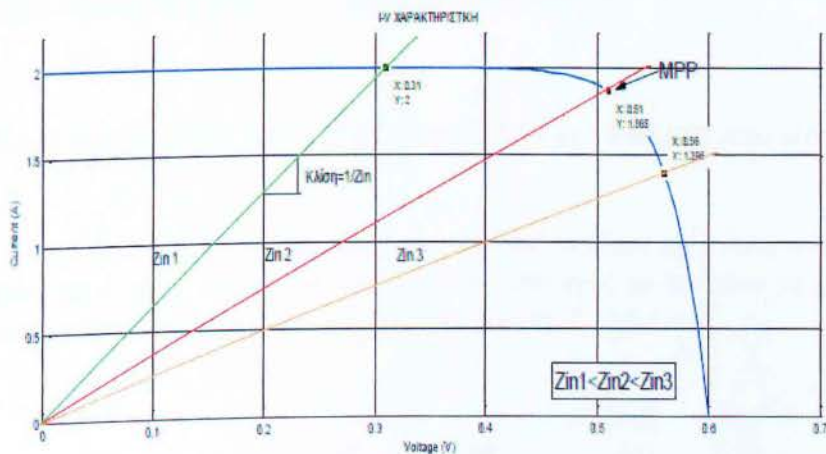
Από τις P-V χαρακτηριστικές των Εικόνα 2.1.3, Εικόνα 2.1.5 γίνεται εμφανές ότι ένα φ/β κύτταρο (και κατ' επέκταση ένα φ/β πάνελ) έχει μόνο ένα σημείο στο οποίο η εξαγόμενη ισχύς του είναι μέγιστη. Το σημείο αυτό αντιστοιχεί σε μια συγκεκριμένη τιμή ρεύματος και τάσης και εξαρτάται κάθε φορά από την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας και τη θερμοκρασία. **Γιατί όμως είναι σημαντική η γνώση του σημείου αυτού και τί παραπάνω προσφέρει σε ένα φ/β σύστημα;** Ένα φ/β κύτταρο μπορεί να λειτουργεί σε οποιοδήποτε σημείο της χαρακτηριστικής του καθώς ο καθοριστικός παράγοντας είναι η αντίσταση εισόδου της επόμενης βαθμίδας. Πρέπει να αναλογιστούμε, όμως, ότι η απόδοση ενός φ/β κυττάρου δεν υπερβαίνει το **17%** (mono-Si) στην καλύτερη των περιπτώσεων. Επομένως θα πρέπει να διασφαλιστεί με κάθε τρόπο ότι η εξαγόμενη ισχύς από το φ/β κύτταρο θα είναι πάντα η μέγιστη δυνατή ακόμα και στην περίπτωση που η θερμοκρασία περιβάλλοντος ή/και η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας μεταβάλλονται. Υπάρχει ένα μοναδικό σημείο στην I-V χαρακτηριστική, το οποίο βρίσκεται στο «γόνατο» που κάνει η καμπύλη, στο οποίο η εξαγόμενη ισχύς προς την επόμενη βαθμίδα είναι η μέγιστη δυνατή. Το σημείο αυτό αποκαλείται **Σημείο Μέγιστης Ισχύος (Maximum Power Point, MPP)** και η γνώση του ανά πάσα στιγμή είναι πολύ σημαντική για τα φ/β συστήματα. Τα παραπάνω μπορούν να γενικευτούν για φ/β πάνελ και φ/β συστοιχία. Στην Εικόνα 2.2.4 απεικονίζεται το σημείο αυτό πάνω στην καμπύλη του φ/β κυττάρου τα χαρακτηριστικά του οποίου παρουσιάζονται στις Εικόνες 2.1.2 , 2.1.3 , 2.1.4 , 2.1.5 και το ισοδύναμο κύκλωμα του οποίου είναι αυτό του Σχήματος 2.1β. (βλ. [4])





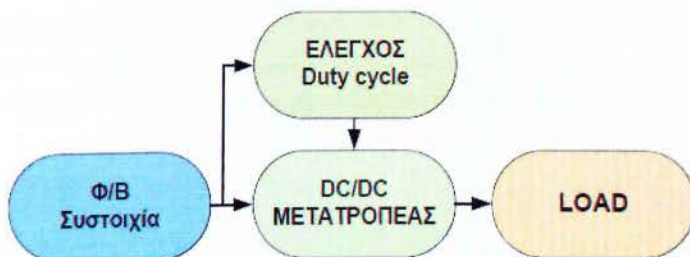
Εικόνα 2.2.4 Το σημείο MPP του φ/β κυττάρου

Όπως αναφέρθηκε, όταν ένα φ/β κύτταρο, πάνελ ή συστοιχία συνδεθεί απευθείας πάνω σε ένα φορτίο, τότε το σημείο λειτουργίας θα καθοριστεί από την αντίσταση εισόδου  $Z_{in}$  του φορτίου. Το σημείο αυτό πάνω στην χαρακτηριστική I-V θα είναι η τομή της ευθείας φορτίου (που έχει κλίση  $1/Z_{in}$ ) με τη χαρακτηριστική I-V της φ/β διάταξης. Στην Εικόνα 2.2.5 παρουσιάζεται ο τρόπος που προσδιορίζεται το σημείο λειτουργίας του φ/β κυττάρου που εξετάζουμε μέχρι τώρα για τρεις διαφορετικές τιμές φορτίου.



Εικόνα 2.2.5 Το σημείο λειτουργίας του φ/β κυττάρου για τρία διαφορετικά φορτία

Η μέθοδος συνεχούς ιχνηλάτησης του MPP μιας φ/β διάταξης απαιτεί την παρεμβολή μεταξύ της διάταξης και του φορτίου ενός μετατροπέα DC μαζί με το κύκλωμα ελέγχου του, όπως παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 2.2.6: Ο τρόπος υλοποίησης της ιχνηλάτησης του MPP

Ο ρόλος του μετατροπέα είναι να εξάγει από τη φ/β διάταξη τη μέγιστη ισχύ και να την μεταβιβάζει στο φορτίο, δρώντας ουσιαστικά σαν διεπαφή (interface) μεταξύ φ/β διάταξης και φορτίου. Αυτό επιτυγχάνεται χάρη στους ειδικούς αλγόριθμους που ελέγχουν το duty cycle του μετατροπέα γιατί με αυτό τον τρόπο μεταβάλλεται η συνολική αντίσταση που «βλέπει» η φ/β συστοιχία (προσαρμογή φορτίου). Οι αλγόριθμοι αυτοί διασφαλίζουν τη λειτουργία της φ/β συστοιχίας στο MPP για μεταβολές στις συνθήκες περιβάλλοντος αλλά και φορτίου του φ/β συστήματος. Σε αυτό το σημείο πρέπει να τονιστεί ότι η αξία του MPPT είναι πολύ σημαντική σε μια φ/β εφαρμογή διότι με την προσάρτηση μιας ηλεκτρονικής συσκευής (κατά κανόνα όχι πολύ μεγάλου κόστους και με συντελεστή απόδοσης συνήθως κοντά στο 90%) αποφεύγεται η υπερδιαστασιολόγηση της φ/β συστοιχίας, κάτι που κοστίζει σαφώς περισσότερο. Γι' αυτό, ο ιχνηλάτης MPP ενσωματώνεται σε διατάξεις φόρτισης συσσωρευτών για εφαρμογές αυτόνομων φ/β εγκαταστάσεων αλλά και σε διασυνδεδεμένες με το δίκτυο διανομής διατάξεις.

## 2.4 Συντελεστής Πλήρωσης (Fill Factor, FF) και Βαθμός Απόδοσης

Ο **συντελεστής πλήρωσης** περιγράφει την ποιότητα των φ/β κυττάρων/πάνελ. Ορίζεται ως ο λόγος της ισχύος του σημείου MPP προς το γινόμενο της τάσης ανοιχτού κυκλώματος  $V_{oc}$  με το ρεύμα βραχυκύκλωσης  $I_{sc}$ , δηλαδή:

$$FF = \frac{V_{MPP} \cdot I_{MPP}}{V_{oc} \cdot I_{oc}}$$

Για φ/β πάνελς κατασκευασμένα από μονοκρυσταλικά ή πολυκρυσταλικά κύτταρα, ο συντελεστής αυτός κυμαίνεται μεταξύ 0,75 και 0,85, ενώ για τα άμορφα μεταξύ 0,5 και 0,7. (βλ. [22])

Ο **βαθμός απόδοσης** ενός φ/β κυττάρου (και κατ' επέκταση ενός φ/β πάνελ) ισούται με την εξερχόμενη από το φ/β κύτταρο ηλεκτρική ισχύ προς την εισερχόμενη ισχύ της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στην επιφάνεια του φ/β κυττάρου, δηλαδή:

$$n = \frac{P}{G \cdot S} = \frac{E}{E_r \cdot S}$$

όπου:

$P$ : η εξερχόμενη ισχύς (W)

$G$ : η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας ( $W/m^2$ )

$E$ : η αποδιδόμενη ηλεκτρική ενέργεια (KWh)

$E_r$ : η πυκνότητα της ηλιακής ενέργειας ( $KWh/m^2$ )

## 2.5 Συντελεστής Απόδοσης (*Performance Ratio, PR*)

Ένας πολύ σημαντικός συντελεστής που επιτρέπει τη σύγκριση μεταξύ διαφορετικών φ/β συστημάτων είναι ο συντελεστής απόδοσης, που ορίζεται ως:

$$PR = \frac{Y_f}{Y_r} \cdot 100\%$$

όπου:

$Y_f$ : ο λόγος της τελικής ενέργειας που παράγεται από το φ/β σύστημα προς την ονομαστική ισχύ του συστήματος, δηλαδή:  $Y_f = E / P_o$  ( $KWh / KW$ ). Με το δείκτη αυτό κανονικοποιείται η παραγόμενη ενέργεια ως προς ως προς την εγκατεστημένη ισχύ κάνοντας, έτσι, δυνατή τη σύγκριση συστημάτων διαφορετικών μεγεθών.

$Y_r$ : ο λόγος της συνολικής λαμβανόμενης ηλιακής ενέργειας προς την ακτινοβολία αναφοράς, δηλαδή:  $Y_r = H / G$  ( $KWh / m^2 / KW / m^2$ ). Ο δείκτης αυτός εκφράζει τη διαθέσιμη στο σύστημα ηλιακή ακτινοβολία. Κατά συνέπεια, εξαρτάται από τη θέση εγκατάστασης και τον προσανατολισμό και διαφοροποιείται σημαντικά από μήνα σε μήνα και από έτος σε έτος. (βλ. [22])

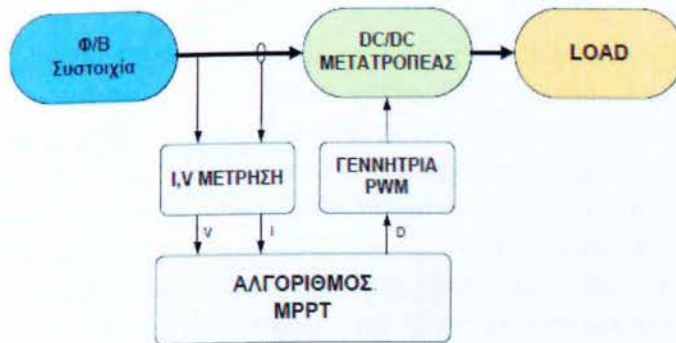
Ο συντελεστής απόδοσης (PR) ποσοτικοποιεί τη συνολική επίδραση των απωλειών στην τελική ενέργεια που λαμβάνεται από ένα φ/β σύστημα. Οι απώλειες αυτές περιλαμβάνουν χαμηλή απόδοση inverter, καλωδίωση, διαφοροποιήσεις φ/β πάνελς, θερμοκρασία λειτουργίας, απώλειες λόγω ανάκλασης στην επιφάνεια των φ/β πάνελς, ρύπανση κ.α. Η τιμή του δίνεται σε μηνιαία ή ετήσια βάση.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

### 3.1 ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΕΣ MPPT

Όπως εκτενώς αναλύθηκε στο προηγούμενο εισαγωγικό κεφάλαιο, στη μη γραμμική χαρακτηριστική I-V των φ/β πάνελς υπάρχει το σημείο μέγιστης ισχύος MPP (Maximum Power Point) όπου η εξαγόμενη ισχύς από τη φ/β γεννήτρια γίνεται μέγιστη. Το σημείο αυτό, το οποίο δεν είναι σταθερό, εξαρτάται από τις φυσικές ιδιότητες του υλικού που είναι κατασκευασμένο το φ/β πάνελ σε συνδυασμό με τη θερμοκρασία και την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας του περιβάλλοντος χώρου. Δεδομένου ότι οι συνθήκες περιβάλλοντος δεν είναι ελεγχόμενες ή προβλέψιμες, έχουν αναπτυχθεί αλγόριθμοι που ενσωματώνονται σε τεχνικές οι οποίες εστιάζουν στην αδιάλειπτη λειτουργία της φ/β γεννήτριας στο σημείο μέγιστης ισχύος. (βλ. [3][4])

Στην Εικόνα 3.1 παρουσιάζεται η συνήθης διάταξη ενός ελεγκτή MPPT. Όταν συνδεθεί μια φ/β συστοιχία απευθείας σε ένα φορτίο είναι μάλλον απίθανη η λειτουργία της συστοιχία στο σημείο MPP. Εισάγοντας ένα μετατροπέα DC με το κατάλληλο σχήμα ελέγχου που να ρυθμίζει το ρεύμα ή/και την τάση ανάμεσα στη φ/β συστοιχία και το φορτίο, τότε είναι σαν να υπάρχει ένα νέο ισοδύναμο «έξυπνο» φορτίο όπου λειτουργεί την συστοιχία μονίμως στο MPP.



Εικόνα 3.1 : Τυπική δομή ενός ελεγκτή MPPT

Οι περισσότεροι αλγόριθμοι που έχουν αναπτυχθεί για την ιχνηλάτηση του σημείου MPP βασίζονται στη μέτρηση της τάσης και του ρεύματος εξόδου της φ/β συστοιχίας βάση των οποίων προσδιορίζεται το τρέχον σημείο λειτουργίας πάνω στην P-V χαρακτηριστική. Στις περισσότερες περιπτώσεις αλγορίθμων γίνεται έλεγχος αν το τρέχον σημείο λειτουργίας αντιστοιχεί στο MPP (ολικό μέγιστο της PV χαρακτηριστικής) και ανάλογα με τον αλγόριθμο, προσαρμόζεται το Duty Cycle του μετατροπέα ώστε να συγκλίνει το σημείο λειτουργίας στο MPP. Πρέπει να σημειωθεί και η δυνατότητα που έχουν αρκετές MPPT τεχνικές ώστε σε περίπτωση σκίασης της

συνολικής επιφάνειας της φ/β συστοιχίας και, κατ' επέκταση, της δημιουργίας πολλών τοπικών μεγίστων στη P-V χαρακτηριστική, να προσδιορίζεται πάντα το ολικό μέγιστο. Αυτό συμβαίνει σε περιπτώσεις φ/β εγκαταστάσεων μεγάλης ισχύος όπου η έκταση της φ/β εγκατάστασης είναι σημαντική.

Η ιχνηλάτηση του σημείου μέγιστης ισχύος σε συστοιχία φ/β γεννητριών είναι πολύ σημαντική για τη συνολική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας της φ/β εγκατάστασης. Για το λόγο αυτό τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί ευφυείς αλγόριθμοι MPPT, οι οποίοι ενσωματώθηκαν σε πολλές τεχνικές. Οι τεχνικές αυτές διαφέρουν μεταξύ τους ως προς την πολυπλοκότητα, τον αριθμό των αισθητήρων που χρειάζονται, τους αλγόριθμους που χρησιμοποιούν, την ταχύτητα ιχνηλάτησης του MPP σημείου, το κόστος του υλικού, το hardware που χρειάζεται για την υλοποίησή τους κ.α.

Στη συνέχεια του κεφαλαίου της πτυχιακής εργασίας θα επιχειρηθεί μια παρουσίαση των κυριότερων τεχνικών MPPT με σκοπό την ανάδειξη των πιο σημαντικών χαρακτηριστικών τους. Πρέπει να σημειωθεί ότι θα αναλυθεί η βασική ιδέα της κάθε τεχνικής και όχι και των βελτιώσεων που έχουν γίνει, για τις οποίες θα γίνει επιγραμματική αναφορά.

### 3.1.1 Perturb & Observe (Διαταραχή και Παρατήρηση)(P&O)

Η Διαταραχή και Παρατήρηση είναι μια από τις πιο διαδεδομένες μεθόδους MPPT, στην οποία χρησιμοποιείται αλγόριθμος τύπου Hill climbing. Εν συντομία, ένας Hill climbing αλγόριθμος είναι μια μαθηματική τεχνική βελτιστοποίησης μέσω της οποίας μπορούν να λυθούν προβλήματα που έχουν πολλές λύσεις, με κάποιες από αυτές να είναι καλύτερες από τις άλλες. Ο αλγόριθμος ξεκινά με μια τυχαία (πιθανή) λύση, για την οποία πραγματοποιούνται πολύ μικρές αλλαγές-δοκιμές επαναληπτικά πάνω σε αυτή, επιχειρώντας τη βελτιστοποίησή της. Όταν ο αλγόριθμος αδυνατεί να τη βελτιστοποιήσει περαιτέρω, τότε προβάλλει την τελευταία λύση που προέκυψε ως τη βέλτιστη. Ωστόσο, όπως θα φανεί και παρακάτω, δεν είναι απόλυτα σίγουρο ότι η συγκεκριμένη λύση είναι όντως η βέλτιστη δυνατή.

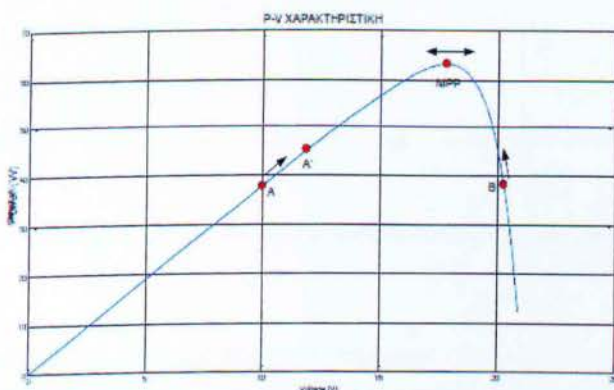
Σε ένα φ/β σύστημα όπως της Εικόνας 3.1, στο οποίο το φ/β πλαίσιο παρουσιάζει την P-V χαρακτηριστική του Εικόνα 3.1.1, η βασική εκδοχή της P&O μεθόδου λειτουργεί ως εξής: Αρχικά λαμβάνεται σαν αφετηρία ένα τυχαίο σημείο A μέσω της μέτρησης του I και V από την έξοδο του πλαισίου. Αυξάνοντας (διαταράσσοντας) τεχνητά την τάση λειτουργίας του φ/β πλαισίου με μεταβολή του duty ratio του μετατροπέα κατά  $\Delta V$ , λαμβάνεται ένα νέο ρεύμα I' και, κατά συνέπεια, η φ/β συστοιχία λειτουργεί σε νέο σημείο A' στη χαρακτηριστική P-V. Αν  $\Delta P/\Delta V > 0$  τότε η συστοιχία λειτουργεί αριστερά του MPP (Εικόνα 3.1.1) και θα πρέπει να αυξηθεί η τάση λειτουργίας του φ/β πλαισίου περαιτέρω κατά  $\Delta V$  προκειμένου να

κινηθεί το σημείο λειτουργίας προς το MPP. Στον επόμενο κύκλο επαναλαμβάνεται η σύγκριση και αν  $\Delta P/\Delta V < 0$ , δηλαδή το σημείο λειτουργίας βρεθεί δεξιά του MPP, τότε θα πρέπει να μειωθεί η τάση λειτουργίας του φ/β πλαισίου. Η συγκεκριμένη διαδικασία επαναλαμβάνεται διαρκώς με απώτερο σκοπό την προσέγγιση του MPP. Στον παρακάτω Πίνακα συνοψίζεται ο τρόπος λειτουργίας του αλγόριθμου και στην Εικόνα 3.1.2 το διάγραμμα ροής.

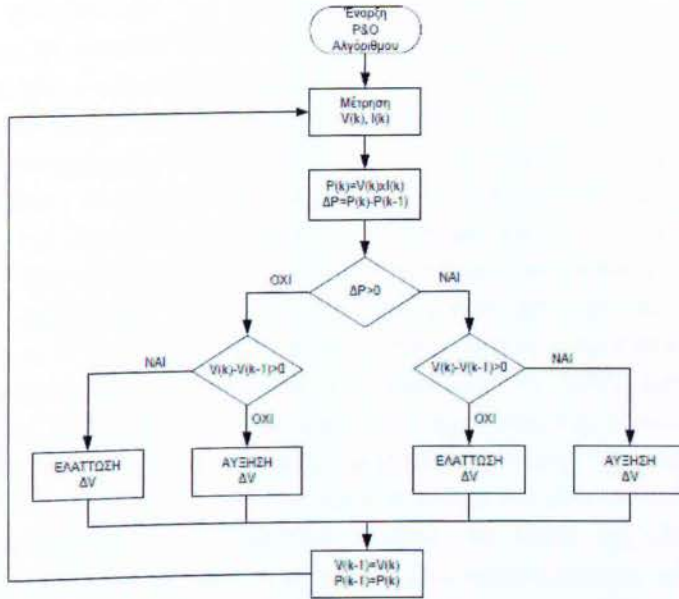
Πίνακας 3.1.1

Διαταραχή $\Delta V$	Αλλαγή στο $\Delta P$	Επόμενη Διαταραχή $\Delta V$
Θετική	Θετική	Θετική
Θετική	Αρνητική	Αρνητική
Αρνητική	Θετική	Αρνητική
Αρνητική	Αρνητική	Θετική

Ένα πολύ σημαντικό πρόβλημα του συγκεκριμένου αλγόριθμου, που ταυτόχρονα υποβαθμίζει την απόδοση του όλου συστήματος ιχνηλάτησης του MPP, είναι η αδυναμία τερματισμού του όταν προσεγγιστεί η περιοχή του MPP, με αποτέλεσμα τη διαρκή ταλάντωση γύρω από αυτό. Το εύρος της ταλάντωσης έχει να κάνει με το βήμα όπου είναι προγραμματισμένη να μεταβάλλεται η τάση  $\Delta V$ , σε συνδυασμό πάντα με την ταχύτητα μεταβολής των ατμοσφαιρικών συνθηκών. Μια πρόταση για τη μείωση της ταλάντωσης θα μπορούσε να είναι η μείωση του βήματος της μεταβολής στην τάση  $\Delta V$ . Κάτι τέτοιο, όμως, θα καθιστούσε τη συγκεκριμένη τεχνική αργή στην εύρεση του MPP. Τελικά προκύπτει ότι η καλύτερη λύση για το πρόβλημα της ταλάντωσης γύρω από το MPP είναι το βήμα μεταβολής της τάσης  $\Delta V$  να είναι μεταβλητό και να μειώνεται σταδιακά όσο προσεγγίζεται το MPP.

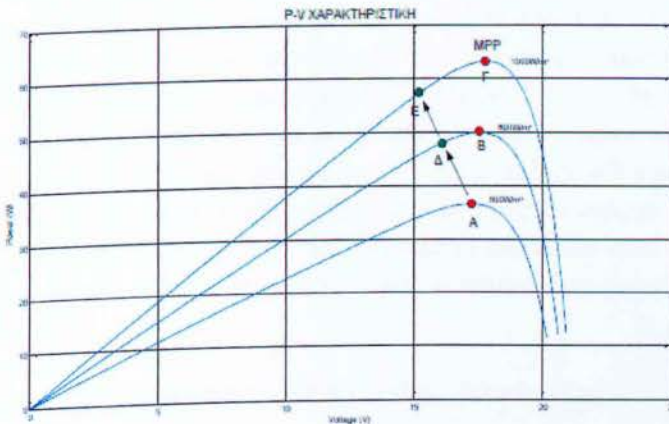


Εικόνα 3.1.1 Μετακίνηση του σημείου λειτουργίας πάνω στη P-V χαρακτηριστική



Εικόνα 3.1.2 : Διάγραμμα ροής βασικού P&O

Ένα ακόμα πρόβλημα της P&O τεχνικής είναι η πιθανότητα λανθασμένης μετακίνησης του σημείου λειτουργίας της φ/β συστοιχίας σε αντίθετη κατεύθυνση από το MPP, κάτω από ραγδαίες αλλαγές των ατμοσφαιρικών συνθηκών. Αυτό φαίνεται με τη βοήθεια της παρακάτω εικόνας.



Εικόνα 3.1.3 : Η λανθασμένη λειτουργία του αλγορίθμου P&O σε ξαφνικές αλλαγές της ηλιακής

Ας υποθεθεί ότι ένα φ/β σύστημα, στο οποίο εφαρμόζεται η κλασική P&O τεχνική, κάποια χρονική στιγμή λειτουργεί ταλαντευόμενο στη στενή περιοχή του σημείου A όπου βρίσκεται το MPP για τις παρούσες συνθήκες. Αν η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας αυξηθεί ξαφνικά, τότε ο αλγόριθμος P&O θα υπολογίσει  $\Delta P > 0$ .

Αυτό έχει σαν συνέπεια, για την περίπτωση που το  $\Delta V$  είναι αρνητικό (δηλαδή κίνηση προς τα αριστερά του MPP), το σημείο λειτουργίας της φ/β συστοιχίας να μετακινηθεί στο  $\Delta$  αντί στο  $B$ . Αυτό συμβαίνει διότι η συγκεκριμένη τεχνική MPPT δεν μπορεί να αποφανθεί αν το θετικό  $\Delta P$  προκύπτει λόγω αύξησης της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας και το ερμηνεύει ως κίνηση του σημείου λειτουργίας εγγύτερα στο MPP. Όμως, επειδή η κίνηση του σημείου λειτουργίας τη στιγμή της ξαφνικής μεταβολής της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας ήταν προς τα αριστερά, ο αλγόριθμος αντιλαμβάνεται ότι το MPP θα βρίσκεται πιο αριστερά του  $\Delta$  και θα προχωρήσει με αρνητικό  $\Delta V$ . Αν η αύξηση της ηλιακής ακτινοβολίας συνεχιστεί με ταχύ ρυθμό, το σημείο λειτουργίας θα μεταφέρεται περαιτέρω προς τα αριστερά (π.χ. στο  $E$ ), απομακρύνοντας το ακόμα πιο πολύ από το MPP. Κατά συνέπεια, συμπεραίνεται ότι ο αλγόριθμος P&O δεν είναι αξιόπιστος στις περιπτώσεις που οι μεταβολές στην ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας (αλλά και των συνθηκών περιβάλλοντος γενικότερα) λαμβάνουν χώρα με ρυθμό που είναι συγκρίσιμος με την ταχύτητα επεξεργασίας των δεδομένων ρεύματος και τάσης της φ/β συστοιχίας. Ωστόσο, το πρόβλημα αυτό λύνεται σε κάποιες βελτιωμένες εκδοχές του αλγορίθμου με σύγκριση του τρέχοντος σημείου λειτουργίας με τουλάχιστον δύο προηγούμενα. Έτσι, η απόφαση που θα ληφθεί για το πρόσημο του  $\Delta V$  θα είναι περισσότερο ασφαλής.

Γενικά, ο συγκεκριμένος MPPT αλγόριθμος είναι εξαιρετικά δημοφιλής λόγω της ευκολίας στην υλοποίησή του. Εντούτοις, όπως αναφέρθηκε, για ταχέως μεταβαλλόμενες ατμοσφαιρικές συνθήκες η συγκεκριμένη τεχνική δεν είναι η καλύτερη δυνατή. Ωστόσο, έχουν αναπτυχθεί πάρα πολλές τεχνικές που έχουν βελτιώσει τα μειονεκτήματα του βασικού P&O, με τις περισσότερες να εστιάζουν σε τρόπους βελτιστοποίησης της δειγματοληψίας, κι άλλες να χρησιμοποιούν adaptive Hill Climbing αλγόριθμους. Τέλος, πρέπει να επισημανθεί ότι για την ολοκλήρωση της υλοποίησης της τεχνικής P&O χρειάζονται και δύο αισθητήρες για τη μέτρηση της τάσης λειτουργίας και του ρεύματος που εξάγεται από τη φ/β συστοιχία. Έτσι, υπολογίζεται το τρέχον σημείο  $P$  και, κατόπιν, το πλάτος (όπου υπάρχει η δυνατότητα μεταβλητού πλάτους) και το πρόσημο του  $\Delta V$ . Από τα παραπάνω είναι φανερό πως η συγκεκριμένη τεχνική υλοποιείται κυρίως με  $\mu Y$ , δεδομένου του τρόπου λειτουργίας του αλγορίθμου.

### 3.1.2 Incremental Conductance (Στοιχειώδης Αγωγιμότητα)

Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος (IncCond εν συντομία) βασίζεται στο γεγονός ότι η κλίση της  $P$ - $V$  χαρακτηριστικής στο MPP είναι μηδέν, αριστερά του MPP θετική και δεξιά του MPP αρνητική. Δηλαδή:



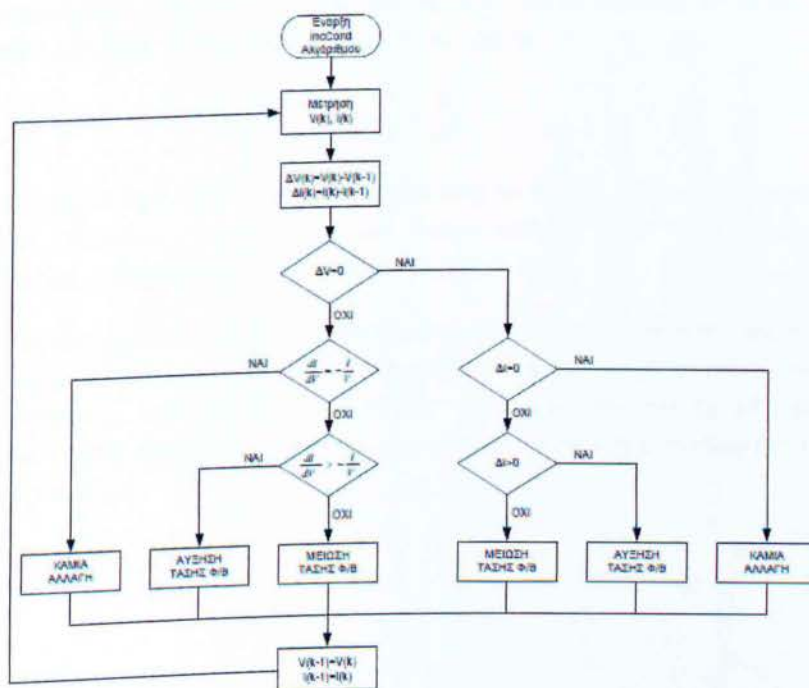
Προσομοίωση ολοκληρωμένου φωτοβολταϊκού συστήματος με έλεγχο απόδοσης σε πραγματικό χρόνο.

$$\begin{cases} \frac{dP}{dV} = 0, \text{στο\_MPP} \\ \frac{dP}{dV} > 0, \text{αριστερα\_του\_MPP} \\ \frac{dP}{dV} < 0, \text{δεξια\_του\_MPP} \end{cases}$$

Επειδή  $\frac{dP}{dV} = \frac{d(IV)}{dV} = I + V \frac{dI}{dV} \cong I + V \frac{\Delta I}{\Delta V}$ , η παραπάνω σχέση γράφεται ως εξής:

$$\begin{cases} \frac{\Delta I}{\Delta V} = -\frac{I}{V}, \text{στο\_MPP} \\ \frac{\Delta I}{\Delta V} > -\frac{I}{V}, \text{αριστερα\_του\_MPP} \\ \frac{\Delta I}{\Delta V} < -\frac{I}{V}, \text{δεξια\_του\_MPP} \end{cases}$$

Επομένως, το σημείο MPP προσεγγίζεται συγκρίνοντας διαδοχικά τη στιγμιαία αγωγιμότητα ( $I/V$ ) με τη στοιχειώδη ( $\Delta I/\Delta V$ ). Στη παρακάτω Εικόνα παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής του αλγόριθμου.



Εικόνα 3.2.1.1 : Διάγραμμα ροής του αλγόριθμου IncCond

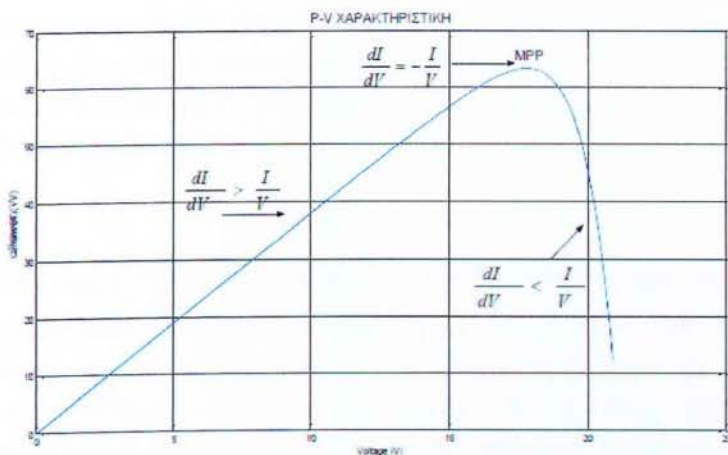
Όπως και στην περίπτωση του P&O, ο αλγόριθμος IncCond ξεκινά μετρώντας την τρέχουσα τιμή του ρεύματος και της τάσης της φ/β συστοιχίας. Κατόπιν, υπολογίζονται οι στοιχειώδης μεταβολές  $dI$  και  $dV$  (χρησιμοποιώντας τις αμέσως προηγούμενες τιμές ρεύματος και τάσης της φ/β συστοιχίας) προκειμένου να γίνουν οι έλεγχοι της σχέσης 2.2. Βάσει αυτών των ελέγχων θα ληφθεί η απόφαση για το πρόσημο και το πλάτος του βήματος μεταβολής της τάσης της φ/β συστοιχίας. Το μεγάλο πλεονέκτημα που υπεισέρχεται σε αυτόν τον αλγόριθμο είναι ότι όταν προσεγγιστεί το MPP, τότε το σημείο λειτουργίας της φ/β συστοιχίας παραμένει αμετάβλητο δίχως να ταλαντώνεται. Οι μηχανισμοί μεταβολής του σημείου λειτουργίας θα ενεργοποιηθούν ξανά μόλις η διαφορά στιγμιαίας και στοιχειώδους αγωγιμότητας γίνει διάφορη του μηδέν, κάτι που θα συμβεί όταν μεταβληθούν οι συνθήκες του περιβάλλοντος που λειτουργεί η φ/β συστοιχία.

Το βήμα της στοιχειώδους μεταβολής της τάσης καθορίζει και το πόσο γρήγορα ο αλγόριθμος προσδιορίζει το MPP. Ωστόσο, υπερβολική αύξηση του βήματος ενέχει τον κίνδυνο το σημείο MPP να μην μπορεί να προσεγγιστεί επακριβώς, με αποτέλεσμα την ύπαρξη ταλαντώσεων γύρω από αυτό (ότι δηλαδή συμβαίνει και στην περίπτωση του P&O). Όπως και στην περίπτωση του P&O, έτσι και στον IncCond έχουν βρεθεί τρόποι ώστε να αποφεύγεται η ταλάντωση, είτε έχοντας μεταβλητό βήμα ή βελτιώνοντας συγκεκριμένα σημεία του αλγορίθμου ή εντάσσοντας στο βρόχο ελέγχου του συστήματος ένα PI ελεγκτή. Αυτό γίνεται αν θεωρηθεί σαν σήμα σφάλματος η παρακάτω ποσότητα:

$$e = \frac{I}{V} + \frac{dI}{dV}$$

Η παραπάνω σχέση τείνει στο μηδέν όσο το σημείο λειτουργίας προσεγγίζει το MPP. Επομένως, εντάσσοντας στο βρόχο ελέγχου έναν PI ελεγκτή, το  $e$  προοδευτικά μηδενίζεται και, έτσι, προσεγγίζεται το MPP.

Πρέπει να σημειωθεί ότι η τεχνική IncCond έχει πολύ καλή συμπεριφορά σε γρήγορες μεταβολές των καιρικών συνθηκών. Για να λειτουργήσει χρειάζεται μόνο δύο αισθητήρες, έναν για τη μέτρηση της τάσης και έναν για τη μέτρηση του ρεύματος της φ/β συστοιχίας. Λόγω του αλγορίθμου ελέγχου, η συγκεκριμένη τεχνική υλοποιείται με  $\mu Y$ .



Εικόνα 3.1.2 : Ο τρόπος λειτουργίας του αλγόριθμου IncCond

### 3.1.3 Προσδιορισμός του MPP ως ποσοστό του Voc (Open Voltage, OV)

Η συγκεκριμένη τεχνική αφορά σε έναν απλό τρόπο ιχνηλάτησης του MPP, ο οποίος στηρίζεται στην προσέγγιση ότι το MPP αντιστοιχεί περίπου στο 70-80% της τάσης ανοιχτού κυκλώματος  $V_{oc}$  της φ/β συστοιχίας. Ακόμα και στην περίπτωση που μεταβάλλεται η θερμοκρασία περιβάλλοντος και η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας, η παραπάνω προσέγγιση δεν παύει να ισχύει. Ποσοτικά, η συγκεκριμένη τεχνική περιγράφεται ως:

$$V_{MPP} \approx k_1 V_{oc}$$

Όπου  $k_1$  είναι ο συντελεστής ποσόστωσης, κυμαίνεται μεταξύ 0,7-0,8 και προσδιορίζεται εξ' αρχής, συνήθως για μεταβαλλόμενη θερμοκρασία περιβάλλοντος, καθώς αποτελεί ίδιον της εκάστοτε φ/β συστοιχίας που χρησιμοποιείται. Η τεχνική αυτή λειτουργεί ως εξής: από τη στιγμή που έχει προσδιοριστεί το  $k_1$ , διακόπτοντας τη φ/β συστοιχία περιοδικά (συνήθως κάθε 30 sec) για μερικά ms μετράται το  $V_{oc}$ . Έτσι, το MPP υπολογίζεται από την παραπάνω προσεγγιστική σχέση και αμέσως δίνεται εντολή στο κύκλωμα ελέγχου του μετατροπέα DC να οδηγήσει το σημείο λειτουργίας της φ/β γεννήτριας στο νέο αυτό σημείο.

Είναι φανερό ότι αυτή η τεχνική έχει ως σοβαρότερο μειονέκτημα την περιοδικά στιγμιαία διακοπή της λειτουργίας της φ/β συστοιχίας για τη μέτρηση του  $V_{oc}$ . Όπως και σε όλες τις τεχνικές προσδιορισμού του MPP, έτσι και σ' αυτή έχουν γίνει προσπάθειες βελτίωσης. Κάποιες από αυτές χρησιμοποιούν ένα κύτταρο της φ/β συστοιχίας (κύτταρο πιλότος) για την μέτρηση του  $V_{oc}$ , ενώ σε κάποιες άλλες προσδιορίζεται το  $V_{oc}$  (και κατ' επέκταση το MPP) με έμμεσο τρόπο, καθιστώντας αυτές ακόμα περισσότερο επισφαλείς.

Γενικά, η συγκεκριμένη τεχνική δεν εγγυάται την ιχνηλάτηση του MPP με απόλυτη ακρίβεια. Ωστόσο, πρόκειται για μια απλή και αρκετά φτηνή τεχνική (δεν χρειάζεται απαραίτητα  $\mu Y$  για να υλοποιηθεί), η οποία απευθύνεται σε περιπτώσεις όπου οι συνθήκες περιβάλλοντος είναι σχετικά σταθερές.

### 3.1.5 Προσδιορισμός του MPP ως ποσοστό του $I_{SC}$ (Short Current, SC)

Η τεχνική αυτή είναι ανάλογη με την OV. Σε αυτή την περίπτωση προσδιορίζεται το  $I_{MPP}$  ως ποσοστό του  $I_{SC}$  σύμφωνα με τη θεώρηση ότι κάτω από μεταβαλλόμενες συνθήκες περιβάλλοντος (κυρίως της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας), τα  $I_{SC}$  και  $I_{MPP}$  μεταβάλλονται σχεδόν γραμμικά. Ποσοτικά, η τεχνική αυτή περιγράφεται ως εξής:

$$I_{MPP} \approx k_2 I_{SC}$$

Όπως και στην OV τεχνική, υπάρχει ένας συντελεστής ποσόστωσης  $k_2$ , η τιμή του οποίου προσδιορίζεται πειραματικά και κυμαίνεται μεταξύ 0,78 και 0,92.

Η μέτρηση του  $I_{SC}$  κατά τη λειτουργία της  $\phi/\beta$  συστοιχίας είναι μια σχετικά δύσκολη διαδικασία. Συνήθως, πραγματοποιείται με την τοποθέτηση ενός κυκλώματος βραχυκύκλωσης, με στατικό διακόπτη στην έξοδο της  $\phi/\beta$  συστοιχίας που έχει και αισθητήρα μέτρησης ρεύματος. Περιοδικά βραχυκυκλώνεται η  $\phi/\beta$  συστοιχία και μετράται έτσι το  $I_{SC}$ . Κατόπιν, μέσω της παραπάνω σχέσης προσδιορίζεται το MPP, στο οποίο μεταβαίνει η  $\phi/\beta$  συστοιχία μέσω του μετατροπέα DC. Εδώ φαίνεται και μια σοβαρή διαφοροποίηση σε σχέση με την OV τεχνική, για την οποία απαιτείται μεγαλύτερος αριθμός κυκλωμάτων, αυξάνοντας, έτσι, το κόστος. Ωστόσο, η πολυπλοκότητά τους δεν είναι σημαντική, με αποτέλεσμα ο αλγόριθμος να υλοποιείται και με αναλογικά κυκλώματα.

Οι προσπάθειες βελτίωσης της συγκεκριμένης τεχνικής εστίασαν περισσότερο στο να ενσωματώσουν στον μετατροπέα DC τη δυνατότητα βραχυκύκλωσης ώστε να μην διακόπτεται η λειτουργία της  $\phi/\beta$  συστοιχίας. Επίσης, άλλες προσπάθειες εστίασαν στη συνεχή βελτιστοποίηση του  $k_2$ , λόγω του ότι το ρεύμα βραχυκύκλωσης μεταβάλλεται με ταχύτερο ρυθμό όταν αλλάζει η ένταση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας (συγκρινόμενο με την τάση ανοιχτού κυκλώματος που προκαλείται από τις μεταβολές της θερμοκρασίας). Αν το  $k_2$  παραμένει σταθερό, τότε το μεγάλο σφάλμα είναι αναπόφευκτο. Τέλος, υπήρξαν και προσπάθειες όπου το σύστημα ιχνηλάτησης του MPP χρησιμοποιούσε ταυτόχρονα στοιχεία των OV και SC.

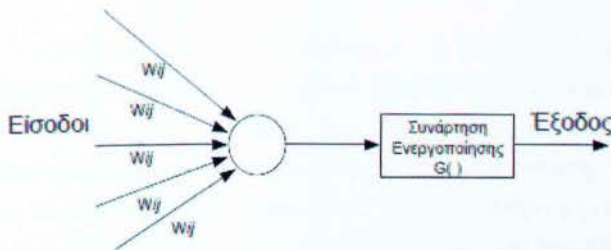
### 3.1.6 Νευρωνικά Δίκτυα

Η ιχνηλάτηση του MPP με διατάξεις τεχνητών νευρωνικών δικτύων (ή απλά νευρωνικών δικτύων) φαίνεται τα τελευταία χρόνια να κερδίζει συνεχώς έδαφος (μαζί

με τη fuzzy logic) ανάμεσα στις τεχνικές που συναγωνίζονται τις κλασικές «ώριμες» μεθόδους (P&O, IncCond). Σε αυτό συνετέλεσε η ευρεία διάδοση ικανών μΥ. Γενικά, ως «νευρωνικό δίκτυο» χαρακτηρίζεται ένα μαθηματικό μοντέλο για την επεξεργασία πληροφορίας, το οποίο προσεγγίζει την υπολογιστική και αναπαραστατική δυνατότητα μέσω συνάψεων. Το μοντέλο είναι εμπνευσμένο από τα βιοηλεκτρικά δίκτυα που δημιουργούνται στον εγκέφαλο ανάμεσα στους νευρώνες και τα σημεία επαφής των νευρικών απολήξεων. Σε αυτό υπάρχουν κομβικά σημεία (nodes), στα οποία καταλήγουν συνδέσεις από άλλους κόμβους του δικτύου και στις οποίες συνήθως αποδίδεται κάποιο βάρος  $w$ . Δομικός λίθος ενός νευρωνικού δικτύου είναι το «τεχνητό νευρώνιο» (ή απλά «νευρώνιο»), το οποίο εικονίζεται στην Εικόνα 3.1.6.1. Υπάρχουν δύο είδη νευρώνων: τα νευρώνια εισόδου και τα υπολογιστικά νευρώνια. Τα νευρώνια εισόδου δεν πραγματοποιούν υπολογισμούς, αλλά απλά μεσολαβούν ανάμεσα στις εισόδους του δικτύου και τα υπολογιστικά νευρώνια. Τα υπολογιστικά νευρώνια πολλαπλασιάζουν τις εισόδους τους με τα συναπτικά βάρη και υπολογίζουν το άθροισμα του γινομένου. Το άθροισμα που προκύπτει είναι το όρισμα της συνάρτησης ενεργοποίησης. Εάν  $x_{kj}$  είναι η  $j$ -οστή είσοδος του  $k$  νευρωνίου,  $w_{kj}$  το  $j$ -οστό συναπτικό βάρος του  $k$  νευρωνίου και  $\Phi(\cdot)$  η συνάρτηση ενεργοποίησης του νευρωνικού δικτύου, τότε η έξοδος  $y_k$  του  $k$  νευρωνίου θα δίνεται από την εξίσωση:

$$y_k = \Phi \left( \sum_{j=0}^N x_{kj} w_{kj} \right)$$

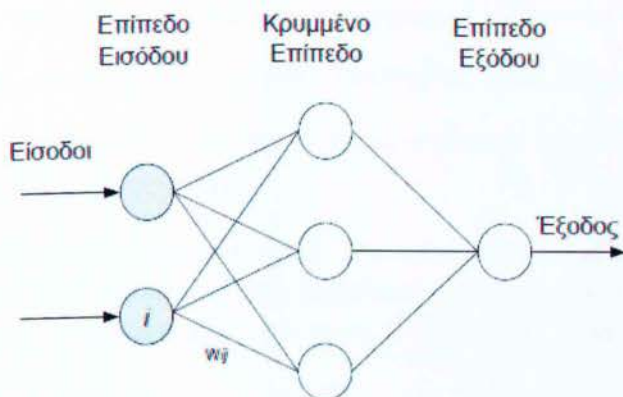
Η συνάρτηση ενεργοποίησης μπορεί να είναι βηματική, γραμμική, μη-γραμμική ή στοχαστική.



Εικόνα 3.1.6.1 : Το τεχνητό νευρώνιο

Μια τυπική διάταξη νευρωνικού δικτύου ευθείας τροφοδότησης αποτελείται από τρία επίπεδα: το επίπεδο εισόδου, το κρυμμένο επίπεδο και το επίπεδο εξόδου (βλ Εικόνα 3.1.6.2). Ο αριθμός των κόμβων (δηλαδή των νευρωνίων) του κάθε επιπέδου εξαρτάται κάθε φορά από την εφαρμογή. Στην περίπτωση ελέγχου φ/β συστοιχίας, οι εισοδοί του δικτύου θα είναι κάποιος συνδυασμός των παραμέτρων της συστοιχίας, δηλαδή της τάσης ανοιχτού κυκλώματος, του ρεύματος βραχυκύκλωσης, των συνθηκών θερμοκρασίας και της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας. Η έξοδος θα είναι το duty cycle του μετατροπέα έτσι ώστε να επιτευχθεί η ιχνηλάτηση του MPP.

Το κατά πόσο επιτυχώς θα ιχνηλατηθεί το MPP εξαρτάται από τους αλγόριθμους που υλοποιούνται στο κρυμμένο επίπεδο του νευρωνικού δικτύου, καθώς και το κατά πόσο καλά έχει «εκπαιδευτεί». Ο όρος «εκπαίδευση» ενός νευρωνικού δικτύου σημαίνει ότι σε αυτό υφίσταται μια εσωτερική διαδικασία διάρκειας αρκετών μηνών, το τέλος της οποίας «μαθαίνει» να παράγει τις επιθυμητές εξόδους για συγκεκριμένες εισόδους. Αυτό γίνεται μέσω διαρκούς αναπροσαρμογής των βαρών του δικτύου (με βάση πάντα μια προκαθορισμένη διαδικασία/αλγόριθμο) ώστε οι τελικές τιμές τους να επιφέρουν το επιθυμητό αποτέλεσμα, δηλαδή την επιτυχή ιχνηλάτηση του MPP.



Εικόνα 3.1.6.2 : Παράδειγμα νευρωνικού δικτύου

Από τα παραπάνω γίνεται αντιληπτό το βασικό μειονέκτημα της συγκεκριμένης τεχνικής, δηλαδή η χρονοβόρα διαδικασία της σωστής εκπαίδευσης του νευρωνικού δικτύου. Επίσης, λόγω του ότι τα φ/β πάνελς έχουν συνήθως διαφορετικά χαρακτηριστικά μεταξύ τους, πρέπει η εκπαίδευση του νευρωνικού δικτύου να γίνεται για το κάθε πάνελ ξεχωριστά. Τέλος, σοβαρό μειονέκτημα είναι το ότι λόγω της μεταβολής των χαρακτηριστικών των πάνελς με το χρόνο, θα πρέπει το νευρωνικό δίκτυο να εκπαιδεύεται περιοδικά εκ νέου ώστε να είναι αξιόπιστη η ιχνηλάτηση του MPP.

### 3.1.7 Έλεγχος με συσχέτιση της κυμάτωσης (Ripple Correlation Control, RCC)

Όταν μια φ/β συστοιχία συνδέεται με ένα μετατροπέα DC-DC, ο διακοπτικός τρόπος λειτουργίας του έχει σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία κυμάτωσης στη DC τάση εξόδου της συστοιχίας και, κατά συνέπεια, της ισχύος. Ο έλεγχος με συσχέτιση της κυμάτωσης (RCC) στηρίζεται στην πληροφορία της διαφοράς φάσης της κυμάτωσης προκειμένου να ιχνηλατηθεί το MPP. Πιο συγκεκριμένα, συσχετίζεται η χρονική

παράγωγος της (χρονικά μεταβαλλόμενης) ισχύος εξόδου της φ/β συστοιχίας  $\dot{p}$  με τη χρονική παράγωγο του (χρονικά μεταβαλλόμενου) ρεύματος εξόδου της φ/β συστοιχίας  $\dot{i}$  ή της τάσης  $\dot{v}$ , προκειμένου η κλίση της καμπύλης P-V να γίνει μηδέν, δηλαδή να προσεγγιστεί το MPP.

Στην Εικόνα 3.1.1 εικονίζεται η τυπική μορφή της καμπύλης P-V. Παρατηρούμε ότι αν η τάση  $\dot{v}$  ή το ρεύμα  $\dot{i}$  αυξάνονται, δηλαδή  $\dot{v} > 0$  ή  $\dot{i} > 0$ , και η ισχύς  $p$  επίσης αυξάνεται ( $\dot{p} > 0$ ), τότε το σημείο λειτουργίας της φ/β γεννήτριας είναι αριστερά του MPP. Αντίθετα, αν η τάση  $v$  ή το ρεύμα  $i$  αυξάνονται αλλά η ισχύς μειώνεται, δηλαδή  $\dot{p} < 0$ , τότε το σημείο λειτουργίας είναι δεξιά του MPP. Επομένως, το γινόμενο  $\dot{p}\dot{v}$  ή  $\dot{p}\dot{i}$  είναι θετικό στα αριστερά του MPP, αρνητικό στα δεξιά του MPP και μηδέν πάνω στο MPP.

Όταν χρησιμοποιείται μετατροπέας DC-DC ανύψωσης, η αύξηση του duty ratio αυξάνει και το ρεύμα του πηνίου (στην περίπτωση μας του ρεύματος εξόδου της φ/β συστοιχίας) μειώνοντας ταυτόχρονα την τάση. Επομένως, το σήμα ελέγχου του duty ratio θα είναι:

$$d(t) = -k \int \dot{p}\dot{v} dt$$

ή 
$$d(t) = k \int \dot{p}\dot{i} dt$$

όπου  $k$  είναι μια θετική σταθερά. Άρα, ελέγχοντας το duty ratio μέσω των παραπάνω σχέσεων, το MPP θα ιχνηλατείται συνεχώς. Μάλιστα, το μέγεθος της σταθεράς  $k$  φέρεται να είναι καθοριστικός παράγοντας για την ταχύτητα ιχνηλάτησης του MPP.

Απλοποιώντας περεταίρω τον τρόπο ελέγχου του duty ratio, έτσι όπως περιγράφεται από τις παραπάνω σχέσεις, εξάγεται η πληροφορία της φάσης, είτε εισάγοντας τα μεγέθη της τάσης ή ρεύματος και της ισχύος μέσω ac σύζευξης ή χρησιμοποιώντας υψηλερατό φίλτρο. Στο υψηλερατό φίλτρο θα πρέπει να επιλεγθεί η συχνότητα αποκοπής υψηλότερα από τη συχνότητα της κυμάτωσης προκειμένου να εξαχθεί σωστά η πληροφορία της φάσης.

Η παραπάνω μέθοδος ιχνηλάτησης του MPP υλοποιείται σχετικά απλά με αναλογικά κυκλώματα χαμηλού κόστους (πχ φίλτρα). Πρόκειται για τεχνική που συμπεριφέρεται πολύ καλά κάτω από γρήγορα μεταβαλλόμενες συνθήκες περιβάλλοντος, αρκεί η διακοπτική συχνότητα του μετατροπέα DC και το κέρδος  $k$  να είναι προσεκτικά επιλεγμένα. Επίσης, είναι τεχνική “plug n’ play”, δηλαδή δεν χρειάζεται εκμάθηση της καμπύλης της φ/β συστοιχίας.

Όπως σε όλες τις τεχνικές MPPT υπάρχουν παραλλαγές, έτσι και στην RCC έχουν εμφανιστεί προτάσεις που εστιάζουν στην εύρεση της πληροφορίας της φάσης ρεύματος ή τάσης και ισχύος, επηρεάζοντας έτσι τις ποσότητες που ολοκληρώνονται στις παραπάνω σχέσεις. Απώτερος σκοπός είναι η επίτευξη μεγαλύτερης ταχύτητας στην ιχνηλάτηση του MPP.

### 3.1.8 Σάρωση ρεύματος (Current Sweep)

Η λογική της συγκεκριμένης τεχνικής είναι η παραγωγή τεχνητά της I-V χαρακτηριστικής μιας φ/β συστοιχίας σε καθορισμένες χρονικές στιγμές. Από τη χαρακτηριστική αυτή υπολογίζεται εύκολα το MPP, το οποίο και προσεγγίζεται μεταβάλλοντας κατάλληλα το duty ratio του μετατροπέα. Ο τεχνητός προσδιορισμός της I-V χαρακτηριστικής γίνεται «σαρώνοντας» από τη φ/β συστοιχία ρεύμα συγκεκριμένης κυματομορφής που χαρακτηρίζεται ως «κυματομορφή σάρωσης». Η συνάρτηση που επιλέγεται για την κυματομορφή σάρωσης πρέπει να είναι απευθείας ανάλογη της χρονικής παραγώγου της, δηλαδή:

$$f(t) = k \frac{df(t)}{dt} \quad \text{Σχέση 3.1.8.1}$$

όπου  $k$  είναι μια σταθερά. Η ισχύς της φ/β συστοιχίας θα είναι:

$$p(t) = v(t)i(t) = v(t)f(t) \quad \text{Σχέση 3.1.8.2}$$

Στο MPP θα ισχύει:

$$\frac{dp(t)}{dt} = v(t) \frac{df(t)}{dt} + f(t) \frac{dv(t)}{dt} = 0 \quad \text{Σχέση 3.1.8.3}$$

Αντικαθιστώντας την 3.1.8.1 στη 3.1.8.3, προκύπτει:

$$\frac{dp(t)}{dt} = \left[ v(t) + k \frac{dv(t)}{dt} \right] \frac{df(t)}{dt} = 0 \quad \text{Σχέση 3.1.8.4}$$

Η γενική μορφή της λύσης της διαφορικής εξίσωσης 3.1.8.4 είναι:

$$f(t) = Ce^{t/k} \quad \text{Σχέση 3.1.8.5}$$

Το  $C$  επιλέγεται να είναι ίσο με το μέγιστο ρεύμα που μπορεί να δώσει η φ/β συστοιχία  $I_{max}$  και το  $k$ , που έχει διαστάσεις σταθεράς χρόνου, επιλέγεται να είναι αρνητικό ώστε η 3.1.8.5 να φθίνει με το χρόνο, δηλαδή:

$$f(t) = I_{max} e^{-t/T} \quad \text{Σχέση 3.1.8.6}$$



Δεδομένου ότι η παράγωγος της εξίσωσης 3.1.8.6 είναι διάφορη του μηδενός, διαιρώνοντας και τα δύο μέρη της 3.1.8.4 με  $df(t) / dt$  και θέτοντας  $f(t) = i(t)$  (το ρεύμα, δηλαδή, που σαρώνεται από τη φ/β συστοιχία), προκύπτει:

$$\frac{dp(t)}{di(t)} = v(t) + k \frac{dv(t)}{dt} = 0$$

Σχέση 3.1.8.7

Από τη στιγμή που μέσω της κυματομορφής σάρωσης έχει προσδιοριστεί το MPP (άρα και το  $V_{MPP}$ ), η σχέση 3.1.8.7 χρησιμεύει στο να επιβεβαιωθεί αν πράγματι το υπολογισμένο σημείο είναι σωστό και, αν όχι, να γίνουν οι απαραίτητες διορθώσεις.

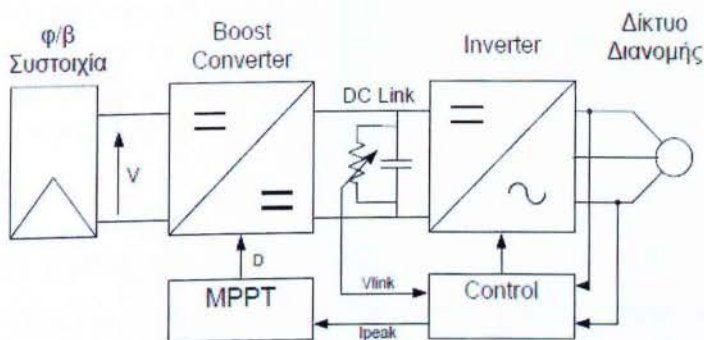
Ο έλεγχος με σάρωση ρεύματος είναι μια τεχνική που υλοποιείται εύκολα με αναλογικά κυκλώματα. Το βασικότερο μειονέκτημά της είναι η απώλεια ισχύος από τη φ/β συστοιχία για όσο χρόνο διαρκεί η σάρωση ρεύματος και ο υπολογισμός του MPP. Γενικά, η καθυστέρηση στον υπολογισμό του MPP είναι μια πολύ σημαντική παράμετρος που καθιστά τη συγκεκριμένη τεχνική όχι ιδιαίτερα ελκυστική για περιπτώσεις γρήγορων μεταβολών στις συνθήκες περιβάλλοντος.

### 3.1.9 DC Link Capacitor Droop Control (DC LCDC)

Η συγκεκριμένη τεχνική MPPT βρίσκει εφαρμογή σε φ/β συστήματα που λειτουργούν εγχέοντας την παραγόμενη ενέργειά του σε ac δίκτυο (on-grid), όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.9. Το duty ratio ενός ιδανικού μετατροπέα ανύψωσης είναι:

$$D = 1 - \frac{V}{V_{link}}$$

όπου  $V$  είναι η τάση της φ/β συστοιχίας και  $V_{link}$  η τάση στην έξοδο του μετατροπέα DC (βλ Σχήμα 2.9). Αν, διατηρώντας τη  $V_{link}$  σταθερή, αυξηθεί το ρεύμα που εισρέει στον inverter, θα αυξηθεί το ρεύμα που εξέρχεται από τον μετατροπέα DC (ανύψωσης στο συγκεκριμένο παράδειγμα) και, κατά συνέπεια, θα αυξηθεί η ισχύς εξόδου της φ/β συστοιχίας. Ενώ το ρεύμα αυξάνει, η  $V_{link}$  μπορεί να παραμείνει σταθερή όσο η απαιτούμενη από τον inverter ισχύς δεν χρειαστεί να υπερβεί τη μέγιστη ισχύ που μπορεί να δώσει η φ/β συστοιχία. Αν οι απαιτήσεις του inverter αυξηθούν η  $V_{link}$  θα αρχίσει να μειώνεται. Ακριβώς πριν η  $V_{link}$  ρίξει την τιμή της, η εντολή ελέγχου ρεύματος  $I_{peak}$  του inverter αντιστοιχεί στη μέγιστη τιμή της εισερχόμενης σε αυτόν ισχύος, με συνέπεια η φ/β συστοιχία να λειτουργεί στο MPP. Η ανατροφοδότηση από το βρόχο ελέγχου της εξόδου του inverter προλαβαίνει τη  $V_{link}$  από το να μειώσει την τιμή της, μεταβάλλοντας το duty ratio του μετατροπέα DC. Έτσι, με αυτόν τον τρόπο το  $I_{peak}$  ανακάμει τη μέγιστη τιμή του και διατηρείται το σημείο λειτουργίας της φ/β συστοιχίας στο MPP.



Εικόνα 3.1.9.1 : Τοπολογία DC LCDC

Όπως είναι προφανές, η τεχνική DC LCDC δεν χρειάζεται να «χαρτογραφήσει» τη χαρακτηριστική I-V ή P-V, όπως η τεχνική σάρωσης ρεύματος, προκειμένου να ληφθούν οι αποφάσεις για το σημείο λειτουργίας της φ/β συστοιχίας. Λειτουργεί προσπαθώντας συνεχώς να ικανοποιεί τις απαιτήσεις εξόδου του inverter, άρα του φορτίου. Η συγκεκριμένη τεχνική υλοποιείται σχετικά εύκολα με αναλογικά κυκλώματα τελεστικών ενισχυτών και λογικά κυκλώματα για τη λήψη αποφάσεων.

### 3.1.10 Μεγιστοποίηση ρεύματος ή τάσης φορτίου

Ο σκοπός αυτής της τεχνικής είναι η μεγιστοποίηση της ισχύος εξόδου μιας φ/β συστοιχίας. Όταν μια φ/β συστοιχία είναι συνδεδεμένη σε ένα μετατροπέα ισχύος, η μεγιστοποίηση της ισχύος εξόδου της επίσης μεγιστοποιεί την ισχύ εξόδου του μετατροπέα που διοχετεύεται στο φορτίο του. Με την ίδια λογική, μεγιστοποιώντας την ισχύ εξόδου του μετατροπέα θα πρέπει να μεγιστοποιείται και η ισχύς εξόδου της φ/β συστοιχίας (με την προϋπόθεση ότι ο μετατροπέας είναι ιδανικός).

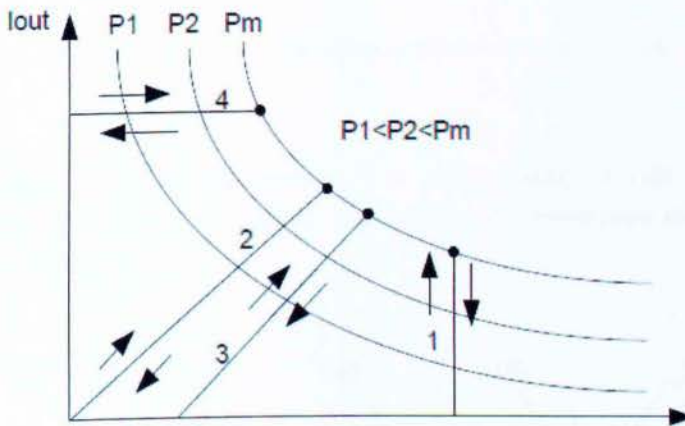
Για να αποδοθούν κυκλωματικές ιδιότητες στα φορτία, είναι δυνατόν να γίνει η παραδοχή ότι τα περισσότερα είναι τύπου πηγής τάσης, πηγής ρεύματος, αντίστασης ή συνδυασμός των παραπάνω. Από το σχήμα αυτό γίνεται φανερό ότι για φορτίο τύπου πηγής τάσης, το ρεύμα φορτίου  $i_{out}$  θα πρέπει να μεγιστοποιηθεί προκειμένου να επιτευχθεί μέγιστη ισχύς στην έξοδο,  $P_M$ . Για φορτίο τύπου πηγής ρεύματος, η τάση φορτίου θα πρέπει να μεγιστοποιηθεί. Για τους άλλους τύπους φορτίων, η μεταβολή μπορεί να συμπεριλάβει είτε το  $v_{out}$  ή το  $i_{out}$ . Τα παραπάνω ισχύουν και για μη γραμμικά φορτία, αρκεί να μην επιδεικνύουν χαρακτηριστικά αρνητικής (σύνθετης) αντίστασης.

Επομένως, για σχεδόν όλα τα φορτία ενδιαφέροντος, είναι αρκετό να επιχειρείται επαύξηση είτε του ρεύματος φορτίου ή της τάσης προκειμένου να αυξηθεί η ισχύς του φορτίου. Για παράδειγμα, στα αυτόνομα φ/β συστήματα γίνεται χρήση συσσωρευτών, στους οποίους το στάδιο της φόρτισης ο συσσωρευτής έχει το ρόλο του φορτίου. Σύμφωνα με τα παραπάνω, ο συσσωρευτής μπορεί να θεωρηθεί ως φορτίο τύπου πηγής τάσης. Στην περίπτωση αυτή, το ρεύμα φορτίου μπορεί να χρησιμεύσει ως μεταβλητή ελέγχου. Με τη χρήση κατάλληλου κυκλώματος ελέγχου κλειστού βρόχου είναι δυνατόν το ρεύμα φορτίου να μεγιστοποιηθεί και, έτσι, το

σημείο λειτουργίας της φ/β συστοιχίας να οδηγηθεί κοντά στο MPP. Πρέπει να σημειωθεί ότι με την συγκεκριμένη τεχνική, το MPP είναι σχεδόν αδύνατο να ιχνηλατηθεί με ακρίβεια διότι η τεχνική θεωρεί μετατροπέα χωρίς απώλειες, κάτι όμως που δεν ισχύει πραγματικά.

### 3.1.11 $dP/dV$ ή $dP/dI$ Feedback control

Η λογική της συγκεκριμένης τεχνικής είναι η ευρεία χρήση  $\mu Y$ , ώστε να γίνεται απευθείας ο υπολογισμός της κλίσης  $dP/dV$  ή  $dP/dI$  της καμπύλης της Εικόνας 3.1.1 και η ανατροφοδότηση αυτής της πληροφορίας απευθείας στο duty cycle του μετατροπέα DC. Σκοπός είναι η κλίση να γίνει μηδέν ώστε να οδηγηθεί η φ/β συστοιχία στο MPP.



Εικόνα 3.1.11.1 : Διαφορετικοί τύποι φορτίου: 1: πηγή τάσης, 2: αντίσταση, 3: αντίσταση και πηγή τάσης, 4: πηγή ρεύματος

Ουσιαστικά, πρόκειται για μια τεχνική αμιγώς ψηφιακή που εκμεταλλεύεται την ικανότητα των  $\mu Y$  για γρήγορο υπολογισμό πράξεων. Επομένως, ιδιαίτερα σημαντικά είναι η ταχύτητα δειγματοληψίας, η πολυπλοκότητα και η ταχύτητα του αλγορίθμου που χρησιμοποιείται κάθε φορά για τον υπολογισμό. Επίσης, το κύκλωμα ελέγχου του μετατροπέα DC δεν είναι δεδομένο και εξαρτάται από απαιτήσεις, όπως duty ratio σταθερού ή μεταβλητού βήματος κλπ. Γενικά, λόγω της χρήσης αποκλειστικά  $\mu Y$ , η συγκεκριμένη τεχνική εγγυάται ταχύτητα και ακρίβεια ιχνηλάτησης του MPP.

### 3.1.12 Έλεγχος με Ασαφή Λογική (Fuzzy Logic)

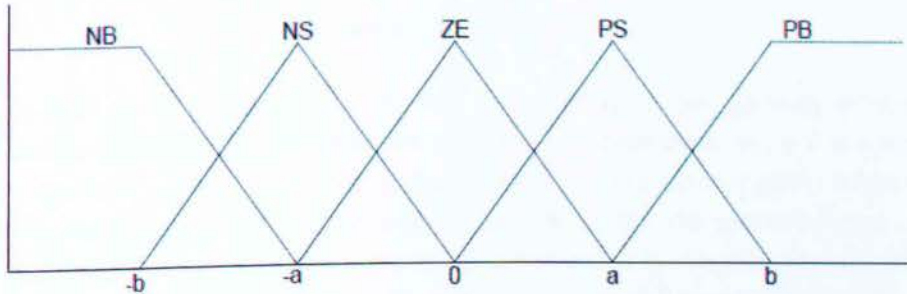
Την τελευταία δεκαετία, λόγω της ευρείας διάδοσης ικανότατων  $\mu Y$  και των ενσωματωμένων συστημάτων, αναπτύχθηκαν διατάξεις ελεγκτών για MPPT βασισμένες στην ασαφή λογική. Τα σημαντικά πλεονεκτήματα που παρουσιάζει η ασαφής λογική (λειτουργία σε ασαφείς εισόδους, μη απαίτηση για ακριβές

μαθηματικό μοντέλο και εύκολος χειρισμός της μη γραμμικότητας), είναι κεφαλαιώδους σημασίας για το MPPT λόγω ακριβώς της μη προβλέψιμης συμπεριφοράς των συνθηκών περιβάλλοντος και, σαν συνέπεια, της φ/β συστοιχίας.

Ως ασαφή λογική εννοείται εκείνο το υπερσύνολο της συμβατικής λογικής που επεκτάθηκε για να διαχειριστεί την έννοια της «μερικής αλήθειας», δηλαδή τις τιμές μεταξύ του «εντελώς αλήθεια» και του «εντελώς ψέμα», επιτρέποντας τη μερική συμμετοχή σε ένα σύνολο αντί της ολοκληρωτικής ή καθόλου συμμετοχής σ' αυτό. Ο έλεγχος με ασαφή λογική, γενικά, αποτελείται από τα εξής επίπεδα:

- Καθορισμός μεταβλητών
- Ασαφοποίηση (fuzzification) των δεδομένων εισόδου
- Ανάπτυξη πίνακα κανόνων
- Αποσαφοποίηση (de-fuzzification) των αποτελεσμάτων

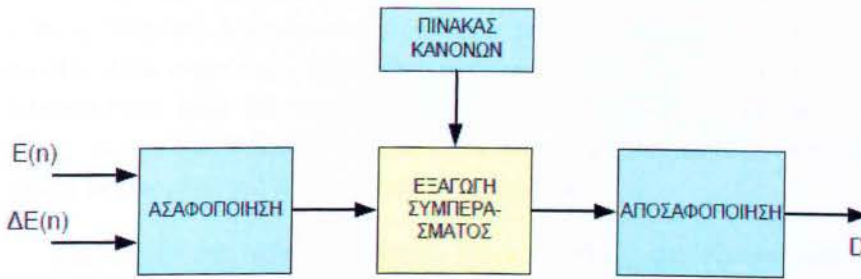
Κατά το στάδιο της ασαφοποίησης, οι αριθμητικές μεταβλητές εισόδου μετατρέπονται σε linguistic μεταβλητές σύμφωνα με μια *συνάρτηση ιδιοτήτων* όπως της παρακάτω Εικόνας:



Εικόνα 3.1.12.1: Συνάρτηση ιδιοτήτων για τις μεταβλητές εισόδου-εξόδου)

Στην περίπτωση αυτή χρησιμοποιούνται πέντε επίπεδα ασαφούς λογικής: NB (Negative Big), NS (Negative Small), ZE (Zero), PS (Positive Small) και PB (PositiveBig). Πρέπει να σημειωθεί ότι όσο περισσότερα επίπεδα χρησιμοποιούνται, τόσο μεγαλύτερη ακρίβεια επιτυγχάνεται στα αποτελέσματα. Στη συνάρτηση της Εικόνας 3.1.11.1, τα  $a$ ,  $b$  και  $0$  φαίνονται να είναι τοποθετημένα συμμετρικά, ωστόσο η συμμετρία αυτή μπορεί να διαταραχθεί προκειμένου να δοθεί ιδιαίτερη σημασία σε συγκεκριμένα επίπεδα ασαφούς λογικής.

Η γενική δομή ενός ελεγκτή ασαφούς λογικής για MRPT παρουσιάζεται στην παρακάτω Εικόνα:



Εικόνα 3.1.12.2 : Γενική δομή ελεγκτή ασαφούς λογικής για MRPT

Οι είσοδοι είναι συνήθως το *error*  $E$  και η *μεταβολή του error*  $\Delta E$ . Στο MPP, ως γνωστόν, το  $dP/dV$  μηδενίζεται, επομένως οι σχέσεις υπολογισμού για τα  $E$  και  $\Delta E$  είναι:

$$E(n) = \frac{P(n) - P(n-1)}{V(n) - V(n-1)}$$

και

$$\Delta E(n) = E(n) - E(n-1)$$

όπου  $P(n)$  είναι η στιγμιαία ισχύς της φ/β συστοιχίας την χρονική στιγμή  $n$ . Επομένως, η είσοδος  $E(n)$  υποδηλώνει αν το σημείο λειτουργίας της φ/β συστοιχίας είναι αριστερά ή δεξιά του MPP τη χρονική στιγμή  $n$ , ενώ η είσοδος  $\Delta E(n)$  δείχνει την κατεύθυνση που κινείται το τρέχον σημείο λειτουργίας την ίδια χρονική στιγμή. Από τη στιγμή που τα  $E$  και  $\Delta E$  υπολογιστούν και μετατραπούν σε linguistic μεταβλητές, η έξοδος του ελεγκτή ασαφούς λογικής (που είναι η μεταβολή στο duty ratio  $D$  του μετατροπέα DC) θα αναζητείται σε ένα πίνακα κανόνων σαν αυτόν του παρακάτω Πίνακα:

Πίνακας 3.1.12.1

$\Delta E \backslash E$	NB	NS	ZE	PS	PB
NB	ZE	ZE	NB	NB	NB
NS	ZE	ZE	NS	NS	NS
ZE	NS	ZE	ZE	ZE	PS
PS	PS	PS	PS	ZE	ZE
PB	PB	PB	PB	ZE	ZE

Οι linguistic μεταβλητές που επιδρούν στη μεταβολή του duty ratio για τους διάφορους συνδυασμούς των  $E$  και  $\Delta E$  είναι άμεσα συνδεδεμένες με τον τύπου του μετατροπέα DC που χρησιμοποιείται. Ο Πίνακας 3.1.12.1 αναφέρεται σε μετατροπέα ανύψωσης. Ο τρόπος λειτουργίας έχει ως εξής: αν για παράδειγμα το σημείο της  $\phi/\beta$  συστοιχίας είναι μακριά από το MPP και προς τα αριστερά του, τότε το  $E$  είναι PB, το  $\Delta E$  αναγκαστικά είναι ZE (αφού τώρα ξεκινάει η ιχνηλάτηση) και θα πρέπει να αυξηθεί το duty ratio D. Δεδομένου ότι το MPP είναι μακριά, το D σε αυτό το στάδιο θα πρέπει να είναι όσο πιο μεγάλο γίνεται, δηλαδή PB.

Στη φάση της απόσαφοποίησης, οι μεταβλητές της εξόδου του ελεγκτή ασαφούς λογικής μετατρέπονται από linguistic σε αριθμητικές, μέσω της συνάρτησης ιδιοτήτων. Αυτή η πληροφορία μετατρέπεται σε αναλογικό σήμα που ελέγχει το duty ratio του μετατροπέα DC.

Οι MPPT ελεγκτές που στηρίζονται στην ασαφή λογική παρουσιάζουν πολύ καλή συμπεριφορά/απόκριση σε γρήγορα μεταβαλλόμενες συνθήκες περιβάλλοντος. Ωστόσο, η αποτελεσματικότητα ενός τέτοιου ελεγκτή στηρίζεται πάντα στη σωστή επιλογή της συνάρτησης ιδιοτήτων των μεταβλητών εισόδου-εξόδου και στη σχέση υπολογισμού των  $E$  και  $\Delta E$  που θα χρησιμοποιηθεί. Οι προτάσεις βελτίωσης πάνω στη συγκεκριμένη τεχνική MPPT εστιάζουν στη διαρκή ρύθμιση της συνάρτησης ιδιοτήτων και του πίνακα κανόνων την ώρα ακριβώς που το  $\phi/\beta$  σύστημα βρίσκεται σε λειτουργία. Υπάρχουν επίσης αναφορές για χρήση περισσότερων των δύο συναρτήσεων ιδιοτήτων έτσι ώστε, ανάλογα με τις μεταβολές των συνθηκών περιβάλλοντος, να χρησιμοποιείται πάντα η βέλτιστη δυνατή. (βλ. [1])

### 3.1.13 Άλλες τεχνικές MPPT

Οι αλγόριθμοι και τεχνικές MPPT που παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες ενότητες είναι οι πιο γνωστές, με τους αλγόριθμους P&O και IncCond να χρησιμοποιούνται ευρέως κυρίως σε διασυνδεδεμένα  $\phi/\beta$  συστήματα. Πέρα από αυτές, αναπτύχθηκαν και άλλες, για τις πιο σημαντικές εκ των οποίων, αν και δεν μπήκαν ποτέ στο στάδιο της μαζικής παραγωγής, αναφέρονται τα βασικά χαρακτηριστικά.

Μια από αυτές τις μεθόδους MPPT εκμεταλλεύεται τη γραμμικότητα που υπάρχει σε μια  $\phi/\beta$  συστοιχία μεταξύ του φωτορεύματος (άρα και του  $I_{MPP}$ ) και της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας. Το σύστημα ελέγχου παίρνει δεδομένα για την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας από κάποιο αισθητήρα (π.χ. πυρανόμετρο), κατόπιν γίνεται ο υπολογισμός του  $I_{MPP}$  και μέσω ενός ελεγκτή PI εξάγεται ρεύμα από τη  $\phi/\beta$  συστοιχία ίσο με το  $I_{MPP}$ .

Μια άλλη μέθοδος υπολογίζει σε τακτά χρονικά διαστήματα απευθείας τα  $I_{MPP}$  και  $V_{MPP}$  βάσει κατάλληλων εξισώσεων, οι οποίες έχουν ως μεταβλητές εισόδου την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας και τη θερμοκρασία λειτουργίας της  $\phi/\beta$

συστοιχίας. Όταν γίνει ο υπολογισμός των  $I_{MPP}$  και  $V_{MPP}$ , τροποποιείται ανάλογα το duty ratio του μετατροπέα DC προκειμένου να μεταβεί η  $\phi/\beta$  συστοιχία στο σημείο αυτό.

Τέλος, μια ακόμα μέθοδος MPPT που αξίζει να αναφερθεί, κάνει χρήση ενός μετατροπέα DC υποβιβασμού του οποίου η διακοπτική συνάρτηση  $u$  ορίζεται σύμφωνα με τη παρακάτω σχέση:

$$\begin{cases} u = 0, & S \geq 0 \\ u = 1, & S < 0 \end{cases}$$

όπου για  $u=0$ , ο διακόπτης του μετατροπέα είναι ανοικτός και για  $u=1$ , ο διακόπτης είναι κλειστός, ενώ το  $S$  δίνεται από τη σχέση:

$$S = dP/dV = I + dI/dV$$

Επομένως, ο ελεγκτής που πραγματοποιεί αυτή τη μέθοδο MPPT χρησιμοποιεί ένα  $\mu Y$  που τρέχει τον παραπάνω αλγόριθμο, λαμβάνοντας τις τιμές του ρεύματος και της τάσης της  $\phi/\beta$  συστοιχίας από αισθητήρες.

### 3.1.14 Συμπεράσματα

Σε αυτό το κεφάλαιο της διπλωματικής εργασίας παρουσιάστηκαν οι σημαντικότεροι αλγόριθμοι και τεχνικές που χρησιμοποιούνται για την ιχνηλάτηση του MPP. Από την αναδρομή στη βιβλιογραφία, βρέθηκαν 19 διαφορετικοί βασικοί τρόποι ιχνηλάτησης, με μεγάλο αριθμό από αυτούς να έχουν υποστεί τροποποιήσεις βελτιστοποίησης. Στις προηγούμενες ενότητες παρουσιάστηκε η βασική εκδοχή συνολικά 14 διαφορετικών μεθόδων MPPT, με τη μεγαλύτερη έμφαση να δίνεται στους P&O και IncCond καθώς είναι οι κύριοι αλγόριθμοι που ενσωματώνονται στην πλειοψηφία των συστημάτων MPPT. Γενικά, τα κριτήρια επιλογής της κατάλληλης τεχνικής MPPT έχουν να κάνουν με παράγοντες όπως η πολυπλοκότητα υλοποίησης, ο αριθμός των αισθητήρων που χρησιμοποιούν, οι συνθήκες περιβάλλοντος που θα λειτουργήσουν, το κόστος υλοποίησης και η εφαρμογή τους.

Πιο συγκεκριμένα, ο παράγοντας της ευκολίας υλοποίησης μιας τεχνικής MPPT συνδέεται στενά με την τεχνική κατάρτιση των μηχανικών που καλούνται να την υλοποιήσουν. Έτσι, υπάρχουν τεχνικές που υλοποιούνται αποκλειστικά με αναλογικά κυκλώματα όπως π.χ. οι OV, SC και RCC, τεχνικές που υλοποιούνται μόνο με  $\mu Y$  όπως π.χ. οι P&O, IncCond, fuzzy logic και τεχνικές που μπορούν να υλοποιηθούν με συνδυασμό των δύο τεχνολογιών. Επίσης, ο αριθμός και το είδος των αισθητήρων που χρησιμοποιούνται είναι επίσης καθοριστικός παράγοντας λόγω του ότι τις περισσότερες φορές είναι πιο εύκολο και αξιόπιστο να γίνεται μέτρηση της τάσης της  $\phi/\beta$  συστοιχίας παρά του ρεύματος. Να σημειωθεί ότι οι συνήθεις αισθητήρες ρεύματος (Hall effect, Shunt) είναι αρκετά ακριβοί. Αν συνυπολογιστεί και το γεγονός ότι για τη διάταξη MPPT απαιτείται αισθητήρας μέτρησης της

έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας (πυρανόμετρο), τότε το κόστος ανεβαίνει ακόμα περισσότερο. Στα περισσότερα συστήματα που ενσωματώνουν διάταξη ΜΡΡΤ, προκειμένου το κόστος να κυμαίνεται σε λογικά επίπεδα, επιλέγεται η χρήση ενός μόνο αισθητήρα τάσης ή ρεύματος της φ/β συστοιχίας με την πρόβλεψη ότι η δεύτερη παράμετρος εισόδου, που χρειάζεται η τεχνική ΜΡΡΤ, θα υπολογιστεί με έμμεσο τρόπο.

Σημαντικός παράγοντας επιλογής της τεχνικής ΜΡΡΤ είναι και η δυνατότητα διάκρισης του ΜΡΡ από ενδεχόμενα τοπικά μέγιστα που δημιουργούνται στη χαρακτηριστική P-V μιας φ/β συστοιχίας όταν στην περιοχή υπάρχουν σκιάσεις από γειτονικά κτίρια ή δέντρα ή στον ουρανό υπάρχουν σημεία με νέφη. Δεδομένου ότι αυτή η δυνατότητα ενσωματώνεται μόνο σε μικρό αριθμό ΜΡΡΤ τεχνικών, συνήθως υπάρχει μεγάλη ελαστικότητα σε αυτή την παράμετρο. Τέλος, καθοριστικός παράγοντας επιλογής τεχνικής ΜΡΡΤ είναι η εφαρμογή για την οποία θα αναπτυχθεί το σύστημα ΜΡΡΤ σε συνδυασμό, πάντα, με το διαθέσιμο κόστος υλοποίησης. Για παράδειγμα, στους δορυφόρους ή τους διαστημικούς σταθμούς όπου χρειάζεται ένα σύστημα ΜΡΡΤ εξαιρετικά αξιόπιστο και αποδοτικό, το κόστος επιλογής της τεχνικής ΜΡΡΤ δεν είναι καθοριστικός παράγοντας. Στον αντίποδα, ένα φ/β σύστημα δημοτικού φωτισμού, το οποίο φορτίζει συσσωρευτές κατά τη διάρκεια της ημέρας, δεν είναι ανάγκη να ενσωματώνει κάποια ευφυή και ταυτόχρονα ακριβή τεχνική ΜΡΡΤ. Στον παρακάτω Πίνακα συνοψίζονται όλα τα βασικά χαρακτηριστικά των τεχνικών ΜΡΡΤ που παρουσιάστηκαν στο παρόν το κεφάλαιο.

Πίνακας 3.1.14.1

ΤΕΧΝΙΚΗ ΜΡΡΤ	ΕΞΑΡΤΗΣΗ ΑΠΟ Φ/Β ΣΥΣΤΟΙΧΙΑ	ΑΝΑΛΟΓΙΚΗ/ ΨΗΦΙΑΚΗ	ΠΕΡΙΟΔΙΚΗ ΡΥΘΜΙΣΗ	ΤΕΧΥΤΗΤΑ ΣΥΓΚΛΙΣΗΣ ΣΤΟ ΜΡΡΤ	ΠΟΛΥΠΛΟΚΟΤΗΤΑ	ΔΙΕΘΗΤΗΡΕΣ
P&O	ΟΧΙ	ΑΝΑΛΟΓ. Η ΨΗΦΙΑΚΗ	ΟΧΙ	ΟΧΙ ΣΤΑΘΕΡΗ	ΧΑΜΗΛΗ	ΤΑΣΗΣ, ΡΕΥΜΑΤΟΣ
IncCond	ΟΧΙ	ΨΗΦΙΑΚΗ	ΟΧΙ	ΟΧΙ ΣΤΑΘΕΡΗ	ΜΕΤΡΙΑ	ΤΑΣΗΣ, ΡΕΥΜΑΤΟΣ
OV	ΝΑΙ	ΑΝΑΛΟΓ. Η ΨΗΦΙΑΚΗ	ΝΑΙ	ΜΕΤΡΙΑ	ΧΑΜΗΛΗ	ΤΑΣΗΣ
SC	ΝΑΙ	ΑΝΑΛΟΓ. Η ΨΗΦΙΑΚΗ	ΝΑΙ	ΜΕΤΡΙΑ	ΜΕΤΡΙΑ	ΡΕΥΜΑΤΟΣ
ΝΕΥΡΩΝΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ	ΝΑΙ	ΨΗΦΙΑΚΗ	ΝΑΙ	ΓΡΗΓΟΡΗ	ΥΨΗΛΗ	ΤΑΣΗΣ Η ΡΕΥΜΑΤΟΣ
RCC	ΟΧΙ	ΑΝΑΛΟΓΙΚΗ	ΟΧΙ	ΓΡΗΓΟΡΗ	ΧΑΜΗΛΗ	ΤΑΣΗΣ, ΡΕΥΜΑΤΟΣ
ΣΑΡΩΣΗ ΡΕΥΜΑΤΟΣ	ΝΑΙ	ΨΗΦΙΑΚΗ	ΝΑΙ	ΑΡΓΗ	ΥΨΗΛΗ	ΤΑΣΗΣ, ΡΕΥΜΑΤΟΣ
DC LCDC	ΟΧΙ	ΑΝΑΛΟΓ. Η ΨΗΦΙΑΚΗ	ΟΧΙ	ΜΕΤΡΙΑ	ΧΑΜΗΛΗ	ΤΑΣΗΣ
ΜΕΓΙΣΤΟΠ. ΡΕΥΜΑΤΟΣ Η ΤΑΣΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ	ΟΧΙ	ΑΝΑΛΟΓΙΚΗ	ΟΧΙ	ΓΡΗΓΟΡΗ	ΧΑΜΗΛΗ	ΤΑΣΗΣ, ΡΕΥΜΑΤΟΣ
dP/dV Η dP/dI	ΟΧΙ	ΨΗΦΙΑΚΗ	ΟΧΙ	ΓΡΗΓΟΡΗ	ΜΕΤΡΙΑ	ΤΑΣΗΣ, ΡΕΥΜΑΤΟΣ
ΑΣΑΦΗΣ ΛΟΓΙΚΗ	ΝΑΙ	ΨΗΦΙΑΚΗ	ΝΑΙ	ΓΡΗΓΟΡΗ	ΥΨΗΛΗ	ΤΑΣΗΣ Η ΡΕΥΜΑΤΟΣ



### **3.2 Μετατροπείς DC/DC Διακοπτικού Τρόπου Λειτουργίας Για MPPT**

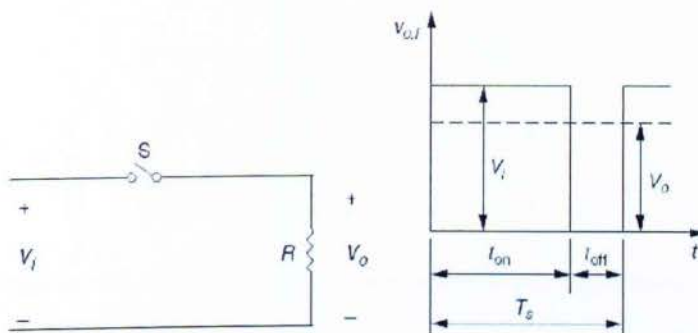
Στη προηγούμενη ενότητα αναδείχθηκε η σημασία του μετατροπέα DC/DC στη λειτουργία του μηχανισμού της ιχνηλάτησης του MPP, δηλαδή του σημείου λειτουργίας της φ/β συστοιχίας που πραγματοποιείται η μέγιστη μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας. Σε αυτή την ενότητα θα παρουσιαστούν οι DC μετατροπείς διακοπτικού τρόπου λειτουργίας (switch mode) που χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές MPPT, θα γίνει η κατηγοριοποίησή τους, θα δοθεί η αρχή λειτουργίας τους, θα παρουσιαστούν οι σημαντικότερες τοπολογίες και, τέλος, θα εξαχθούν οι σχέσεις μεταξύ duty ratio και τάσης ή ρεύματος. Επίσης, θα παρουσιαστεί η τεχνική της προσαρμογής φορτίου με μετατροπέα DC και θα αναλυθεί η δομή των ελεγκτών MPPT και PWM. Έχει δοθεί ιδιαίτερη έμφαση στον μετατροπέα υποβιβασμού, καθώς σε αυτόν επενεργεί ο αλγόριθμος MPPT στο προσομοιωμένο σύστημα (βλ. επόμενο κεφάλαιο).

Γενικά, ο ρόλος ενός μετατροπέα DC είναι η παροχή μιας σταθεροποιημένης DC τάσης και ρεύματος εξόδου (συγκεκριμένης τιμής και πολικότητας) σε ένα φορτίο πολλές φορές μεταβαλλόμενο, έχοντας σαν είσοδο μια επίσης DC τάση, η οποία δεν είναι πάντα σταθερή. Η τάση εξόδου μπορεί να είναι μικρότερης ή μεγαλύτερης τιμής από την τάση εισόδου, να έχει αντίστροφη πολικότητα ή να είναι γαλβανικά απομονωμένη. Τα κυκλώματά των μετατροπέων διακοπτικού τρόπου λειτουργίας αποτελούνται κυρίως από πυκνωτές, πηνία και διακόπτες. Όλα αυτά τα στοιχεία, ιδανικά, δεν καταναλώνουν ενέργεια, στην πραγματικότητα όμως καταναλώνουν ένα πολύ μικρό ποσοστό, γεγονός που συμβάλει στην υψηλή τους απόδοση.

Οι μετατροπείς DC διακοπτικού τρόπου λειτουργίας παρουσιάζουν σημαντικά πλεονεκτήματα σε σχέση με τους γραμμικούς, με κυριότερα (πέραν της υψηλότερης απόδοσης) τον μικρότερο όγκο και τη δυνατότητα ανύψωσης της τάσης εισόδου. Η ευρεία χρήση τους με τεχνικές έλεγχου PWM, οι οποίες υλοποιούνται με προγραμματιζόμενους μικροελεγκτές, τους κάνουν ιδιαίτερα αξιόπιστους για την ενσωμάτωσή τους σε κρίσιμες εφαρμογές. (βλ. [11])

#### **3.2.1 Αρχή λειτουργίας**

Η αρχή λειτουργίας του μετατροπέα DC διακοπτικού τρόπου λειτουργίας μπορεί να εξηγηθεί με βάση το απλό κύκλωμα που εικονίζεται στην Εικόνα 3.2.1.1.1. Η τάση εξόδου ελέγχεται προσαρμόζοντας το χρόνο που είναι κλειστός ο διακόπτης (ton), ρυθμίζοντας με αυτό τον τρόπο το εύρος του παλμού εξόδου και κατ' επέκταση τη μέση τιμή της τάσης εξόδου. Δηλαδή, η ρύθμιση της (μέσης) τιμής της τάσης εξόδου είναι συνάρτηση του χρόνου που ο διακόπτης παραμένει κλειστός (on time), του εύρους του παλμού ανά περίοδο (PWM) και της περιόδου Ts (Εικόνα 3.2.1.1.1).



Εικόνα 3.2.1.1.1 Αρχή λειτουργίας μετατροπέα DC υποβιβασμού

Τις περισσότερες φορές ο χρόνος  $T_s$  ή, αλλιώς, η διακοπτική συχνότητα  $f_s$  ( $f_s = 1/T_s$ ), είναι αμετάβλητη παράμετρος του συστήματος. Επομένως, ρυθμιστικός παράγοντας της τάσης εξόδου θα είναι τότε ο χρόνος αγωγής του διακόπτη  $t_{on}$ .

Ορίζουμε ως Duty Ratio τη σχέση:

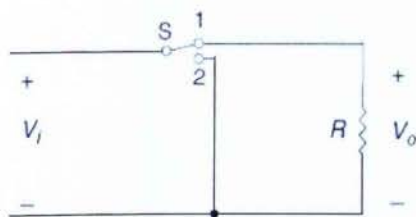
$$D = \frac{t_{on}}{T_s} = \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}}$$

Η σχέση του Duty Ratio με την τάση και το ρεύμα εξόδου θα φανεί ποσοτικά κατά την παρουσίαση της κάθε τοπολογίας.

Στις πραγματικές εφαρμογές, ο διακόπτης είναι ελεγχόμενος ημιαγωγός ισχύος, όπως SCR, MOSFET, IGBT κ.λ.π., ανάλογα με τις απαιτήσεις ισχύος και διακοπτικής συχνότητας για τις οποίες έχει διαστασιολογηθεί ο μετατροπέας DC. Η διακοπτική συχνότητα συνήθως επιλέγεται να είναι μεγαλύτερη των 20KHz έτσι ώστε ο διακοπτικός θόρυβος να είναι εκτός του ακουστικού φάσματος. Οι χρονικές στιγμές που ο διακόπτης θα άγει, ρυθμίζονται από κύκλωμα ελέγχου, το οποίο, με δεδομένη την περίοδο  $T_s$ , επανακαθορίζει συνεχώς το  $D$  ώστε η έξοδος να παραμένει σταθερή, ανεξαρτήτως των διακυμάνσεων της εισόδου.

### 3.2.2 Μετατροπείς Υποβιβασμού

Με τους μετατροπείς υποβιβασμού ρυθμίζεται η μέση τιμή της τάσης εξόδου σε επίπεδο μικρότερο ή ίσο από αυτό της εισόδου. Το κύκλωμα του ιδανικού μετατροπέα υποβιβασμού, που αποτελείται από έναν ιδανικό διακόπτη και ωμικό φορτίο στην έξοδο, εικονίζεται στη παρακάτω εικόνα:



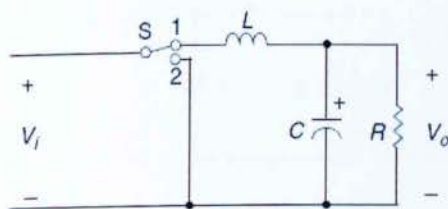
Εικόνα 3.2.1.2.1 : Το κύκλωμα του ιδανικού μετατροπέα υποβιβασμού

Όταν ο διακόπτης S βρίσκεται στη θέση 1, η τάση εξόδου ισούται με την τάση εισόδου, ενώ όταν βρίσκεται στη θέση 2, η τάση εξόδου είναι μηδέν. Ανάλογα με το πόσο χρόνο μέσα σε μια περίοδο  $T_s$  παραμένει σε κάθε θέση ο διακόπτης, η τάση εξόδου θα έχει τη μορφή τετραγωνικής κυματομορφής, με τη μέση τιμή της να εξαρτάται από τον χρόνο  $t_{on}$ , δηλαδή το χρόνο που ο διακόπτης βρίσκεται στη θέση 1. Επομένως, η μέση τιμή της τάσης εξόδου σαν σχέση του Duty Ratio και της τάσης εισόδου θα είναι:

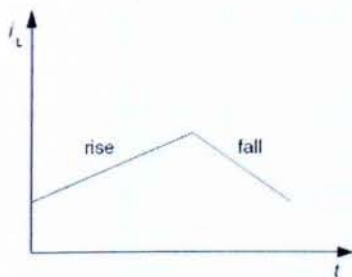
$$\overline{V_o} = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} V_o(t) dt = \frac{1}{T_s} \left( \int_0^{t_{on}} V_m dt + \int_{t_{on}}^{T_s} 0 dt \right) = \frac{t_{on}}{T_s} V_m = D \cdot V_m \quad \text{Σχέση 3.2.1.2.1}$$

Από την προηγούμενη σχέση γίνεται φανερός ο τρόπος ελέγχου της μέσης τιμής της τάσης εξόδου μέσω του duty ratio του διακόπτη. (βλ. [10])

Το κύκλωμα της Εικόνας 3.2.1.2.1 δεν δύναται να παρουσιάζει πρακτικό ενδιαφέρον. Γι' αυτό το λόγο, προστίθεται σε σειρά μια αυτεπαγωγή  $L$ , ώστε να επιτευχθεί μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας από την είσοδο προς την έξοδο του μετατροπέα, καθώς και παράλληλα μια χωρητικότητα  $C$  ώστε να μειωθεί η κυμάτωση (βλ Εικόνα 3.2.1.2.2). Το αποτέλεσμα της εισαγωγής αυτού του LC φίλτρου εικονίζεται στην Εικόνα 3.2.1.2.3.



Εικόνα 3.2.1.2.2 : Το κύκλωμα του μετατροπέα υποβιβασμού με φίλτρο LC



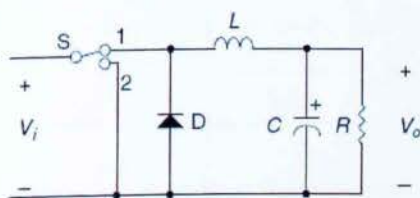
**Εικόνα 3.2.1.2.3 :** Η εξομαλυσμένη μορφή του ρεύματος του πηνίου μετά την εισαγωγή του LC φίλτρου

Για όσο χρόνο ο διακόπτης S βρίσκεται στη θέση 1, το ρεύμα που ρέει προς την αντίσταση φορτίου (μέσω της αυτεπαγωγής) αυξάνει προοδευτικά και όχι απότομα, αυξάνοντας και την αποθηκευμένη ενέργεια ( $E = \frac{1}{2} Li_L^2$ ) στο πηνίο. Ο ρυθμός

αύξησης του ρεύματος εξαρτάται από την τιμή της αυτεπαγωγής και είναι  $\frac{di_L}{dt} = \frac{V_L}{L}$ .

Όταν ο διακόπτης μεταβεί στη θέση 2, η αποθηκευμένη στην αυτεπαγωγή ενέργεια μειώνεται, επίσης προοδευτικά, μειώνοντας και το ρεύμα στο φορτίο. Η αύξηση και η μείωση του ρεύματος στο φορτίο είναι γραμμική αν η σταθερά χρόνου που ορίζεται από το μέγεθος των στοιχείων LR είναι σχετικά μεγάλη συγκρινόμενη με τους χρόνους  $t_{on}$  και  $t_{off}$  του διακόπτη S (βλ. Εικόνα 3.2.1.2.3). Ο ηλεκτρολυτικός πυκνωτής που τοποθετείται παράλληλα στο φορτίο συμβάλλει στην περαιτέρω μείωση της κυμάτωσης της τάσης εξόδου. Άρα, το LC φίλτρο εξομαλύνει δραστικά την κυματομορφή της τάση και του ρεύματος εξόδου.

Στην Εικόνα 3.2.1.2.4 απεικονίζεται μια πιο ρεαλιστική προσέγγιση του μετατροπέα υποβιβασμού, στην οποία υπάρχει τοποθετημένη και μια δίοδος ελεύθερης διέλευσης.



**Εικόνα 3.2.1.2.4 :** Κύκλωμα μετατροπέα υποβιβασμού με δίοδο ελεύθερης διέλευσης

Στο κύκλωμα αυτό η φόρτιση και εκφόρτιση του πηνίου ελέγχεται πλήρως από δύο διακόπτες (S και δίοδο ελεύθερης διέλευσης D). Ο ρόλος της διόδου ελεύθερης διέλευσης είναι, όταν ο διακόπτης βρίσκεται στη θέση 2, να δημιουργείται βρόχος ρεύματος προκειμένου να εκφορτιστεί η αποθηκευμένη ενέργεια του πηνίου στο φορτίο (μέρος fall, Εικόνα 3.2.1.2.3). Όταν ο διακόπτης μεταβεί ξανά στη θέση 1,

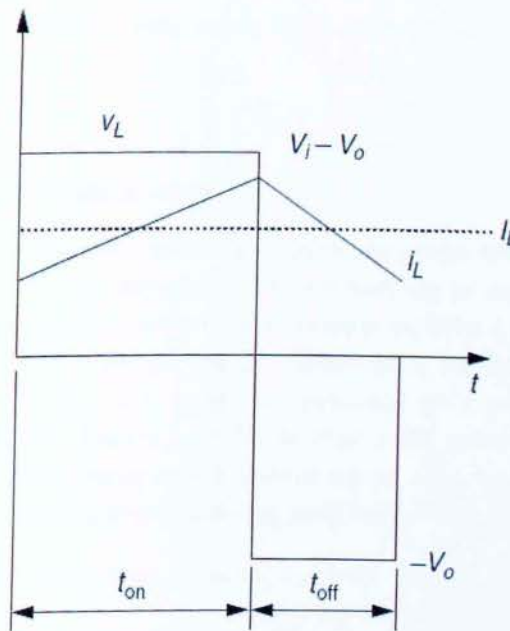
τότε η δίοδος είναι ανάστροφα πολωμένη και το ρεύμα περνάει μέσα από το πηνίο, φορτίζοντάς το.

Ανάλογα με το αν μέσα σε μια περίοδο  $T_s$  η κυματομορφή του ρεύματος του πηνίου είναι συνεχής ή όχι (δηλαδή αν βρεθεί στο μηδέν), διακρίνεται ο συνεχούς αγωγής και ο ασυνεχούς αγωγής τρόπος λειτουργίας των μετατροπέων υποβιβασμού.

Παρακάτω αναλύονται αυτοί οι δύο τρόποι λειτουργίας:

### Τρόπος λειτουργίας συνεχούς αγωγής

Σύμφωνα με το συγκεκριμένο τρόπο λειτουργίας, το ρεύμα του πηνίου είναι συνεχές, δηλαδή δεν θα βρεθεί ποτέ στο μηδέν κατά τη διάρκεια μιας περιόδου  $T_s$ . Η μέση τιμή της τάση εξόδου θα είναι αυτή που προκύπτει από τη Σχέση 3.2.1.2.1. Στη παρακάτω Εικόνα παρουσιάζεται η μορφή που λαμβάνει το ρεύμα και η τάση στο πηνίο.



Εικόνα 3.2.1.2.5 : Η τάση και το ρεύμα του πηνίου στο συνεχή τρόπο λειτουργίας

Κατά το χρονικό διάστημα που ο διακόπτης  $S$  είναι κλειστός, η τάση του πηνίου  $V_L$  θα ισούται με  $V_i - V_o$ , ενώ όταν είναι ανοικτός θα ισούται με  $-V_o$ . Επομένως, η αύξηση του ρεύματος για το χρόνο  $t_{on}$  θα είναι:

$$\Delta I_{L(on)} = \int_0^{t_{on}} \frac{V_L}{L} dt = \frac{(V_i - V_o)}{L} t_{on}$$

ενώ η μείωση του ρεύματος για το χρόνο  $t_{off}$  θα είναι:

$$\Delta I_{L(OFF)} = \int_0^{t_{off}} \frac{V_L}{L} dt = \frac{-V_o}{L} t_{OFF}$$

Η DC συνάρτηση μεταφοράς του μετατροπέα θα προκύψει σύμφωνα με την παραδοχή ότι στη μόνιμη κατάσταση η ενέργεια που αποθηκεύεται στο πηνίο στο τέλος της περιόδου  $T_s$  θα ισούται με την ενέργεια στην αρχή του επόμενου κύκλου διάρκειας  $T_s$ . Αυτή η ενέργεια για ένα κύκλο είναι όμως μηδέν, κάτι που σημαίνει ότι το ολοκλήρωμα (άρα το συνολικό εμβαδό) της κυματομορφής της τάσης του πηνίου σε μια περίοδο είναι μηδέν.

$$V_L \cdot t_{on} - V_o \cdot t_{off} = 0 \Rightarrow (V_i - V_o)DT_s - V_o(T_s - t_{on}) = 0 \Rightarrow \dots \dots \dots \Rightarrow$$

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{I_i}{I_o} = D$$

Από την παραπάνω σχέση γίνεται εμφανές ότι η είσοδος με την έξοδο του μετατροπέα έχουν γραμμική σχέση, καθώς και το ότι η έξοδος δεν μπορεί να υπερβεί την είσοδο ( $0 \leq D \leq 1$ ).

### Τρόπος λειτουργίας ασυνεχούς αγωγής

Κατά τον συγκεκριμένο τρόπο λειτουργίας, το ρεύμα που διαρρέει το πηνίο μετά από κάποιο σημείο της περιόδου  $T_s$  παίρνει τιμή ίση με μηδέν. Πιθανές αιτίες που μπορεί να οδηγήσουν σε αυτό τον τρόπο λειτουργίας είναι η χαμηλή διακοπτική συχνότητα  $f_s$ , σε συνάρτηση με χαμηλές ενεργειακές απαιτήσεις του φορτίου. Υποθέτοντας ότι η άνοδος και η πτώση του ρεύματος του πηνίου είναι γραμμική, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.2.1.2.6, το σημείο που καθορίζει το όριο μεταξύ συνεχούς και ασυνεχούς αγωγής είναι η χρονική στιγμή κατά την οποία η μέση τιμή του ρεύματος του πηνίου  $I_{LB}$  γίνει το μισό της **peak** τιμής του  $i_L$ .

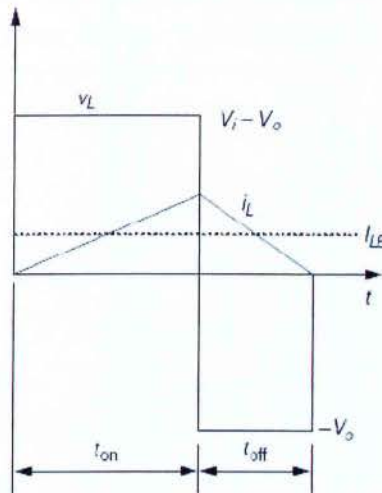
Η οριακή τιμή της μέσης τιμής του ρεύματος  $I_{LB}$  είναι:

$$I_{LB} = \frac{1}{2} i_{L(peak)} = \frac{DT_s}{2L} (V_i - V_o)$$

Ανάλογα με την εφαρμογή, θα λαμβάνεται σταθερή η τάση εισόδου ή εξόδου. Αν ληφθεί σταθερή η τιμή της τάσης εισόδου, τότε η μέση τιμή του ρεύματος  $I_{LB}$  υπολογίζεται αντικαθιστώντας την τιμή της τάσης εξόδου στην παραπάνω εξίσωση με την

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{I_i}{I_o} = D$$

οπότε προκύπτει:



Εικόνα 3.2.1.2.5 : Το ρεύμα του πηνίου στο όριο μεταξύ συνεχούς και ασυνεχούς αγωγής

$$I_{LB} = \frac{DI_i}{2L} (V_i)(1-D)$$

Ο λόγος των τάσεων εξόδου προς την τάση εισόδου θα είναι τότε:

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{D^2}{D^2 + \frac{1}{4} \left( \frac{I_o}{I_{LB(\max)}} \right)}$$

όπου  $I_{LB}$  είναι max όταν  $D=1/2$ . Αν η τιμή της τάσης εξόδου ληφθεί σταθερή (κάτι που είναι και το πιο σύνηθες), η μέση τιμή του ρεύματος  $I_{LB}$  υπολογίζεται αντικαθιστώντας, όπως και στην προηγούμενη περίπτωση, την τιμή της τάσης εισόδου, οπότε προκύπτει:

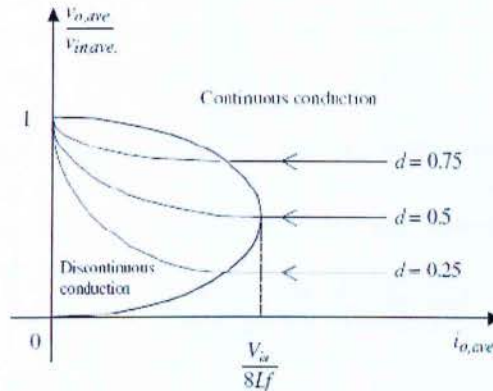
$$I_{LB} = \frac{I_i}{2L} (V_o)(1-D)$$

Το duty ratio του μετατροπέα για τον ασυνεχή τρόπο λειτουργίας θα προσδιοριστεί από την εξίσωση:

$$D = \frac{V_o}{V_i} \left( \frac{I_o/I_{LB(\max)}}{1 - \left( \frac{V_o}{V_i} \right)} \right)^{1/2}$$

Από τις παραπάνω σχέσεις διαπιστώνεται ότι ο υπολογισμός της τάσης εξόδου ενός μετατροπέα υποβιβασμού κατά τον ασυνεχούς αγωγής τρόπο λειτουργίας είναι πολύ πιο περίπλοκος σε σχέση με τον συνεχούς αγωγής διότι αποτελεί μη γραμμική

συνάρτηση της αυτεπαγωγής  $L$ , της περιόδου  $T_s$ , του ρεύματος εξόδου  $I_o$  και, φυσικά, των  $D$  και  $V_i$ . Στο παρακάτω σχήμα εικονίζεται το διάγραμμα της κανονικοποιημένης τάσης  $V_o/V_{in}$  και του ρεύματος  $I_o$ , στο οποίο φαίνεται η μη γραμμικότητα στην οριοθετημένη περιοχή της ασυνεχούς αγωγής.



Εικόνα 3.2.1.2.6 : Διάγραμμα  $V_o/V_i$  προς  $I_o$

### Κυμάτωση τάσης εξόδου

Όπως προκύπτει από την προηγούμενη ανάλυση, οι δύο διαφορετικοί τρόποι λειτουργίας εξυπηρετούν διαφορετικούς σκοπούς, οι οποίοι συνδέονται με τη φύση και τις ενεργειακές ανάγκες του φορτίου, το ποσοστό χρησιμοποίησης των ημιαγωγών κλπ. Η τιμή της αυτεπαγωγής που ορίζει το όριο μεταξύ συνεχούς και ασυνεχούς αγωγής τρόπου λειτουργίας είναι:

$$L_b = \frac{(1-D)R}{2f}$$

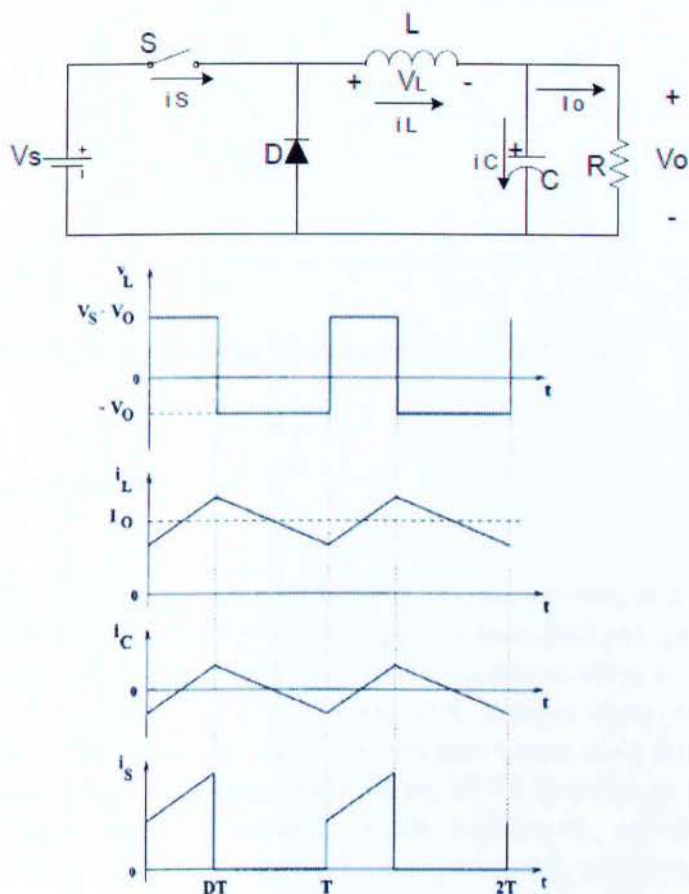
Για τιμή αυτεπαγωγής  $L > L_b$ , ο μετατροπέας λειτουργεί σε συνεχούς αγωγής τρόπο λειτουργίας. Το ρεύμα του πηνίου  $i_L$  κατά τον τρόπο λειτουργίας συνεχούς αγωγής συνίσταται από μια dc συνιστώσα  $I_o$  και από μια ac συνιστώσα  $i_c$  τριγωνικής μορφής, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Ο σκοπός του μετατροπέα είναι η dc συνιστώσα του ρεύματος που διαρρέει το φορτίο να είναι όσο γίνεται περισσότερο σταθεροποιημένη. Για να γίνει αυτό πρέπει όλη η τριγωνική ac συνιστώσα να απορροφηθεί από τον κλάδο του πυκνωτή C. Επομένως, η επιλογή της σωστής χωρητικότητας του πυκνωτή είναι ιδιαίτερης σημασίας για την εφαρμογή. Προκειμένου η peak-to-peak τιμή της τάσης κυμάτωσης να μπορεί να περιοριστεί κάτω από μια οριακή τιμή  $\Delta V_o$ , η ελάχιστη τιμή της χωρητικότητας του πυκνωτή θα πρέπει να είναι:

$$C_{\min} = \frac{(1-D)V_o}{8\Delta V_o L f^2}$$



Στους μετατροπείς DC, η κυμάτωση της τάσης εξόδου αποτελεί μια σχεδιαστική παράμετρο που πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη σημασία. Η react-to-peak κυμάτωση της τάσης του μετατροπέα υποβιβασμού της παρακάτω Εικόνας, για συνεχούς αγωγής τρόπο λειτουργίας και για συγκεκριμένη τιμή του πυκνωτή εξομάλυνσης, υπολογίζεται βάσει του πρόσθετου φορτίου που αποθηκεύει στον πυκνωτή το θετικό μέρος της κυμάτωσης. Βάσει της συγκεκριμένης προσέγγισης, όλο το «κυματικό» ρεύμα ρέει διαμέσου του πυκνωτή εξομάλυνσης, ενώ το ρεύμα που έχει να κάνει με τη μέση τιμή του (δηλαδή το ρεύμα του πηνίου) ρέει στην αντίσταση φορτίου. Η τιμή της react-to-peak κυμάτωσης της τάσης υπολογίζεται λαμβάνοντας την περιοχή μεταξύ του  $I_o$  και του κυματικού μέρους του  $i_L$  που βρίσκεται πάνω από το  $I_o$  (το μέρος, δηλαδή, που συσσωρεύεται φορτίο στον πυκνωτή). Έτσι προκύπτει:

$$\Delta V_o = \frac{\Delta Q}{C} = \frac{1}{C} \frac{1}{2} \frac{\Delta I_L T_s}{2} = \frac{T_s^2 V_o}{8 C L} (1 - D)$$



Εικόνα 3.2.1.2.7 : Κύκλωμα και κυματομορφές μετατροπέα υποβιβασμού λειτουργίας συνεχούς αγωγής

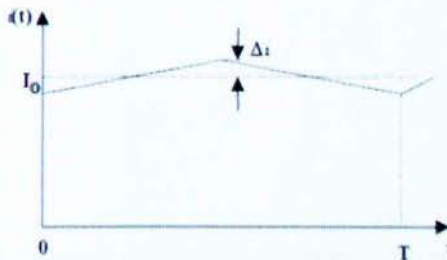
Συνήθως, η κυμάτωση αναφέρεται ως ποσοστό της μέσης τιμής της τάσης εξόδου,

δηλαδή:

$$\frac{\Delta V_o}{V_o} = \frac{1}{8} \frac{T_s^2 (1-D)}{LC} = \frac{\pi^2}{2} (1-D) \left( \frac{f_c}{f_s} \right)^2$$

Όπου  $f_s$  είναι η διακοπτική συχνότητα και  $f_c$  είναι η συχνότητα αποκοπής του βαθυπερατού LC φίλτρου εξόδου. Από την παραπάνω σχέση συνάγεται ότι **ο κυματισμός της τάσης εξόδου μειώνεται όσο μικρότερη είναι η συχνότητα αποκοπής του LC φίλτρου σε σχέση με τη διακοπτική συχνότητα.**

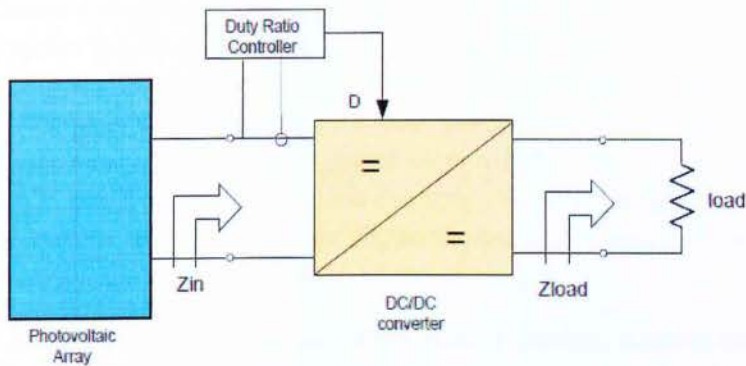
Στη παρακάτω Εικόνα εμφανίζεται η τελική μορφή που έχει το ρεύμα  $i_o$  στο φορτίο. Όπως αναφέρθηκε, όσο προσεκτικά και αν επιλεγθεί η χωρητικότητα του πυκνωτή εξομάλυνσης, θα υφίσταται πάντα ένα ποσοστό κυμάτωσης.



Εικόνα 3.2.1.2.8 : Το ρεύμα εξόδου του μετατροπέα υποβιβασμού

### 3.2.3 Προσαρμογή φορτίου

Όπως αναφέρθηκε στην εισαγωγή, ο ρόλος ενός μετατροπέας dc σε ένα φ/β σύστημα είναι να αποτελεί μια έξυπνη διάταξη που παρεμβάλλεται μεταξύ φ/β συστοιχίας και φορτίου έτσι ώστε η φ/β συστοιχία να λειτουργεί πάντα στο MPP. Η τεχνική αυτή, που χαρακτηρίζεται ως προσαρμογή φορτίου (load matching), πραγματοποιείται μεταβάλλοντας το duty ratio του μετατροπέα μέσω κατάλληλου κυκλώματος ελεγκτή, στον οποίο τρέχει ο αλγόριθμος MPPT. Ο τρόπος με τον οποίο το duty ratio συμβάλλει στην προσαρμογή του φορτίου της φωτοβολταϊκής συστοιχίας παρουσιάζεται στη συνέχεια με βάση έναν μετατροπέα υποβιβασμού.



Εικόνα 3.2.3.1 Προσαρμογή φορτίου μέσω μετατροπέα DC

Σύμφωνα με το παραπάνω κύκλωμα, η σύνθετη αντίσταση του φορτίου

θα είναι:

$$Z_{load} = \frac{V_o}{I_o}$$

όπου  $V_o$  και  $I_o$  είναι η τάση εξόδου και ρεύμα εξόδου αντίστοιχα. Όταν η φωτοβολταϊκή συστοιχία λειτουργεί στο MPP, η σύνθετη αντίσταση του φορτίου θα είναι:

$$Z_{opt} = \frac{V_{MPP}}{I_{MPP}}$$

όπου  $V_{mpp}$  και  $I_{mpp}$  είναι αντίστοιχα η τάση και το ρεύμα στο σημείο μέγιστης ισχύος της φωτοβολταϊκής συστοιχίας. Ο απώτερος σκοπός είναι οι τιμές της σύνθετης αντίστασης φορτίου, όπως περιγράφονται από τις παραπάνω σχέσεις, να ταυτιστούν. Αυτό διασφαλίζεται μέσω της παρεμβολής του μετατροπέα dc μεταξύ του φορτίου και της φ/β συστοιχίας. Για τον μετατροπέα υποβιβασμού είναι

$$Z_{in} = Z_{load} / D^2$$

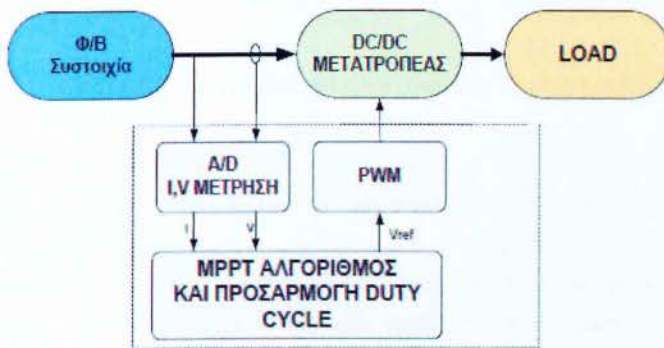
Με αυτή την σχέση βλέπουμε την εξάρτηση που έχει η σύνθετη αντίσταση εισόδου του μετατροπέα υποβιβασμού με τη σύνθετη αντίσταση φορτίου και το duty ratio. Επομένως, με κατάλληλη κάθε φορά επιλογή του duty ratio (με γνωστή τη  $Z_{load}$ ) είναι δυνατή η προσαρμογή της αντίστασης  $Z_{in}$  στην τιμή της  $Z_{opt}$  και, άρα, τη λειτουργία της φωτοβολταϊκής συστοιχίας στο MPP.

### 3.2.4 Έλεγχος MPPT και PWM

Το κλειδί για την επιτυχή ιχνηλάτηση του MPP είναι η εφαρμογή του κατάλληλου αλγόριθμου στο κατάλληλο σχήμα ελέγχου, προκειμένου να αναπροσαρμόζεται το Duty ratio του μετατροπέα DC. Όπως αναφέρθηκε οι

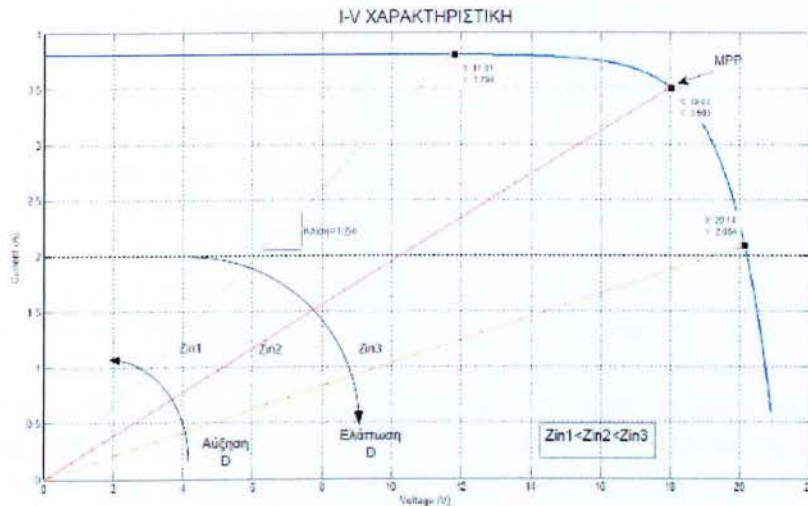
περισσότεροι αλγόριθμοι είναι προτιμότερο να υλοποιούνται με  $\mu Y$  λόγω των πολλών πλεονεκτημάτων που παρουσιάζουν έναντι των αναλογικών μεθόδων υλοποίησης. Άλλωστε, πολλές σύγχρονες τεχνικές MPPT ενσωματώνουν αλγόριθμους, των οποίων η υλοποίηση αποκλειστικά με  $\mu Y$  είναι μονόδρομος. Στην παρούσα ενότητα γίνεται αναφορά στα επικρατέστερα σχήματα ελέγχου MPPT και τις πιο διαδεδομένες τεχνικές PWM που ενσωματώνονται μέσα στα σχήματα αυτά. Τα σχήματα αυτά είναι γενικά και μπορούν να υλοποιηθούν με  $\mu Y$ , καθώς και με αναλογικά κυκλώματα, αν παραληφθεί η μονάδα A/D. (βλ. [2][10])

Η φιλοσοφία ενός αλγόριθμου MPPT είναι η συνεχής παρακολούθηση του σημείου λειτουργίας μιας  $\phi/\beta$  συστοιχίας και η μετακίνησή του στο επιθυμητό, κάθε φορά, σημείο. Αυτό μπορεί να γίνει με τον παρακάτω τρόπο:



Εικόνα 3.2.4.1 : Διάγραμμα ελεγκτή MPPT με απευθείας έλεγχο

Στην εικόνα παρουσιάζεται ένας ελεγκτής, ο οποίος χρησιμοποιεί μόνο ένα βρόχο ελέγχου. Όπως παρουσιάστηκε στην προηγούμενη ενότητα, η ρύθμιση του duty ratio βασίζεται πάνω στη θεωρία της προσαρμογής φορτίου. Έτσι, η  $\phi/\beta$  συστοιχία στην έξοδο της θα βλέπει την αντίσταση εισόδου του μετατροπέα, που είναι εξαρτώμενη από το duty ratio  $D$ . Όπως φαίνεται στη παρακάτω Εικόνα, η αύξηση του  $D$  θα επιφέρει μείωση στην αντίσταση εισόδου  $Z_{in}$ , άρα μετακίνηση του σημείου λειτουργίας της  $\phi/\beta$  συστοιχίας προς τα αριστερά, ενώ μείωση του  $D$  επιφέρει τα αντίθετα αποτελέσματα. Η απόφαση για τη μετακίνηση του σημείου λειτουργίας λαμβάνεται από τον αλγόριθμο MPPT που χρησιμοποιείται.



Εικόνα 3.2.4.2 : Η σχέση μεταξύ αντίστασης εισόδου και D

Ένας μετατροπέας DC πρέπει να παρέχει πάντα μια τάση εξόδου πλήρως καθορισμένη και σταθεροποιημένη, ανεξάρτητα από ενδεχόμενες αλλαγές στο φορτίο και την τάση εισόδου. Επίσης, ο μετατροπέας θα πρέπει να είναι αναισθητός και στις όποιες αλλαγές των τιμών των στοιχείων από τα οποία αποτελείται, κάτι που συμβαίνει συχνά λόγω της γήρανσης, της ποιότητας των υλικών, της θερμοκρασίας λειτουργίας, της θερμοκρασίας περιβάλλοντος κ.λ.π. (βλ. [11])

### 3.2.5 Ιδανικοί και πραγματικοί διακόπτες

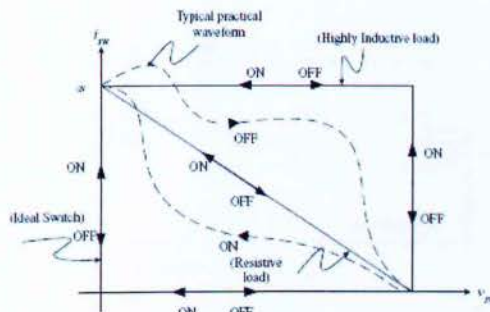
Κατά την ανάλυση των κυκλωμάτων των μετατροπέων στις προηγούμενες ενότητες του παρόντος κεφαλαίου, ως διακόπτης θεωρήθηκε ο ιδανικός διακόπτης ισχύος. Οι παραδοχές που συνοδεύουν σιωπηρά ένα τέτοιο διακόπτη, του προσδίδουν τις παρακάτω δυνατότητες:

1. Ροή άπειρου ρεύματος (ευθύ ή ανάστροφο) διαμέσου αυτού όταν είναι κλειστός (κατάσταση on).
2. Εφαρμογή άπειρης τάσης (ευθεία ή ανάστροφη) στα άκρα του όταν είναι ανοικτός (κατάσταση off).
3. Μηδενική πτώση τάσης κατά μήκος του στην κατάσταση on.
4. Άπειρη τιμή αντίστασης (μηδενική τιμή ρεύματος διαρροής) στην κατάσταση off.
5. Μηδενικό χρόνο ανόδου και καθόδου (rise time, fall time).

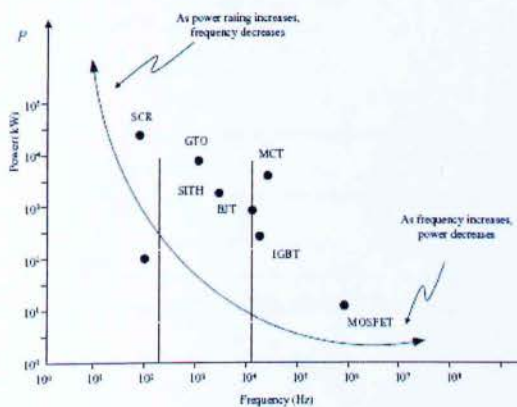
Ένας ιδανικός διακόπτης είναι ικανός να διαχειριστεί άπειρη τιμή ρεύματος και τάσης σε άπειρη διακοπτική συχνότητα. Είναι, βέβαια, προφανές ότι οι παραπάνω δυνατότητες είναι αδύνατο να επιτευχθούν στην πράξη. Ωστόσο, οι ημιαγωγικοί διακόπτες (SCR, MOSFET, IGBT κ.α.) είναι δυνατό να παρουσιάσουν τα παραπάνω

χαρακτηριστικά με κάποιους περιορισμούς, εν αντιθέσει με τους ηλεκτρομηχανικούς διακόπτες (ρελέ ισχύος) γι' αυτό και χρησιμοποιούνται ευρέως στις τοπολογίες των μετατροπέων DC και όχι μόνο (ο πιο ευρέως χρησιμοποιούμενος διακόπτης για μετατροπείς DC είναι το MOSFET ισχύος). Οι περιορισμοί που παρουσιάζουν, γενικά, αφορούν στην τιμή του ρεύματος διέλευσης (κατάσταση on), στην τιμή της εφαρμοζόμενης τάσης στα άκρα του διακόπτη (κατάσταση off), στους χρόνους ανόδου και καθόδου και, κατά συνέπεια, στη διακοπτική συχνότητα. Επίσης, η αντίσταση του διακόπτη δεν είναι άπειρη στην κατάσταση off (είναι της τάξης των MΩ) κάτι που σημαίνει την ύπαρξη μικρού ρεύματος διαρροής, αλλά ούτε μηδέν στην κατάσταση on (είναι μερικά mΩ) κάτι που σημαίνει μια μικρή πτώση τάσης. Συνέπεια όλων αυτών των περιορισμών είναι η εμφάνιση απωλειών κατά τη λειτουργία στις καταστάσεις on και off, καθώς και κατά τη διάρκεια της μετάβασης από τη μια κατάσταση στην άλλη. (βλ. [11])

Το **MOSFET** ισχύος είναι ο πιο διαδεδομένος διακόπτης σε μετατροπείς DC λόγω του ότι μπορεί να λειτουργήσει σε πολύ μεγάλες διακοπτικές συχνότητες. Στη παρακάτω Εικόνα παρουσιάζονται οι διακοπτικές ικανότητες ως προς την ισχύ των σημαντικότερων ημιαγωγικών διακοπών, με το MOSFET να είναι το μόνο που μπορεί να λειτουργήσει σε διακοπτικές συχνότητες μέχρι 1 MHz.

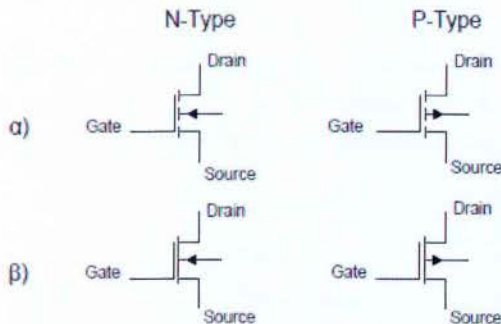


Εικόνα 3.2.5.1 : Η διακοπτική τροχιά των ιδανικών και των πραγματικών διακοπών



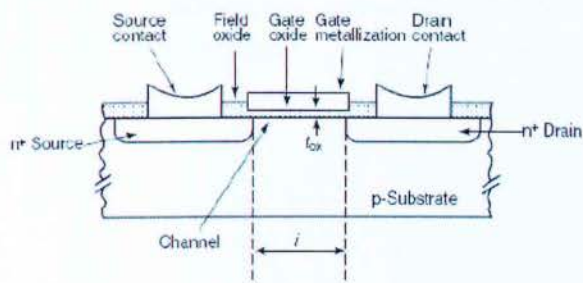
Εικόνα 3.2.5.2 : Κατηγοριοποίηση των κυριότερων ημιαγωγικών διακοπών

Το MOSFET είναι μια διάταξη με τρεις ακροδέκτες: την Πύλη (Gate, G), την Πηγή (Source, S) και την Υποδοχή (Drain, D). Ο πιο διαδεδομένος τύπος MOSFET είναι ο τύπος πύκνωσης. Το κυκλωματικό του σύμβολο παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα. Η φιλοσοφία λειτουργίας του βασίζεται στη δυνατότητα ελέγχου του διερχόμενου ρεύματος μεταξύ Πηγής και Υποδοχής, μέσω της εφαρμοζόμενης τάσης στην Πύλη.

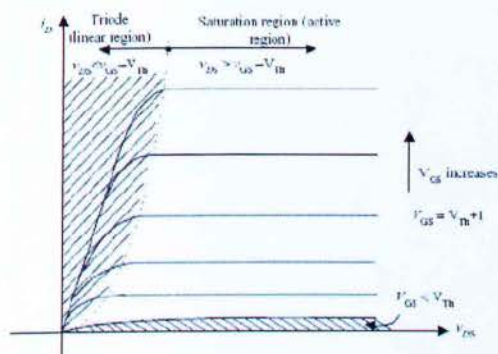


Εικόνα 3.2.5.3 : Το MOSFET ισχύος τύπου: α) πύκνωσης, β) απογύμνωσης

Η φυσική δομή ενός MOSFET N-τύπου (ή N καναλιού) σε τομή παρουσιάζεται στη παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 3.2.5.4 : Η φυσική δομή του MOSFET N καναλιού σε τομή



Εικόνα 3.2.5.5 Η χαρακτηριστική  $I_D$ - $V_{DS}$  του MOSFET N καναλιού για μεταβαλλόμενη τάση Πύλης

Από την παραπάνω εικόνα γίνεται εμφανές ότι για να λειτουργεί το MOSFET στην κατάσταση αγωγής (διακόπτης κλειστός), η τάση της Πύλης πρέπει να υπερβαίνει μια οριακή τιμή  $V_{Th}$ , ενώ για να λειτουργήσει στην κατάσταση αποκοπής (διακόπτης ανοιχτός) η τάση της Πύλης θα πρέπει να είναι μικρότερη της  $V_{Th}$ , δηλαδή:

$$\begin{array}{ll} V_{GS} > V_{Th} \text{ και } v_{DS} > V_{GS} - V_{Th} & \text{κατάσταση on} \\ V_{GS} < V_{Th} & \text{κατάσταση off} \end{array}$$

Όταν το MOSFET βρίσκεται στην κατάσταση on, το κανάλι που έχει σχηματιστεί (το οποίο εξαρτάται από την τιμή της  $V_{GS}$ ) συμπεριφέρεται σαν να υπάρχει μια σταθερή αντίσταση  $R_{DS(on)}$ , γραμμικά εξαρτώμενη από τις μεταβολές του  $v_{DS}$  και  $i_{DS}$  σύμφωνα με τη σχέση:

$$R_{DS(on)} = \left. \frac{\partial v_{DS}}{\partial i_{DS}} \right|_{V_{GS} = \text{σταθερή}}$$

Επομένως, οι διακοπτικές απώλειες θα είναι:

$$P_{diss(on)} = I_D^2 R_{DS(on)}$$

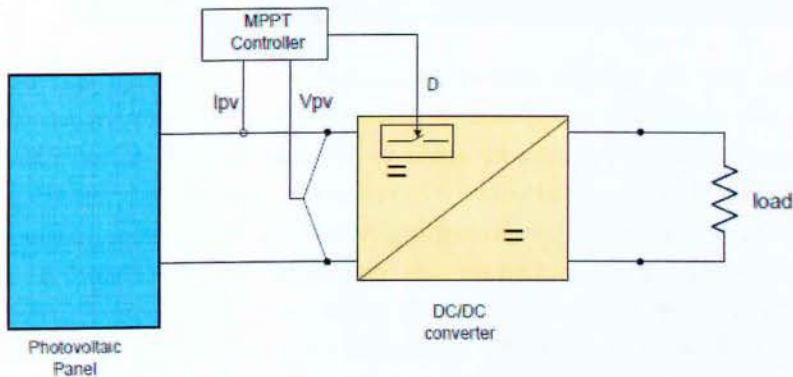
Η τιμή της  $R_{DS(on)}$  κυμαίνεται μεταξύ μερικών mΩ και λίγων Ω για MOSFET χαμηλής και υψηλής τάσης λειτουργίας, αντίστοιχα.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

### 4.1 Μοντελοποίηση του Συστήματος MPPT

Εκτός από την παρουσίαση της φιλοσοφίας και των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών του κάθε αλγόριθμου MPPT, που αναφέρθηκαν στο δεύτερο κεφάλαιο, σκοπός της παρούσας διπλωματικής είναι και η προσομοίωση της λειτουργίας τους σε σενάρια που προσεγγίζουν τις πραγματικές συνθήκες λειτουργίας ενός φ/β συστήματος, όπως η αλλαγή στην ένταση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας ή/και η μεταβολή της θερμοκρασίας περιβάλλοντος. Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται αναλυτικά η μοντελοποίηση και προσομοίωση του απλού φ/β συστήματος που παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα: (βλ. [13][14])



Εικόνα 4.1 : Το προς μοντελοποίηση σύστημα

Για μοντελοποίηση των διατάξεων του φ/β συστήματος βασιστήκαμε στη θεωρία που παρατέθηκε στα προηγούμενα κεφάλαια. Το λογισμικό που χρησιμοποιείται είναι το MATLAB/SIMULINK (έκδοση R2011a). Τα toolboxes του Simulink με τα οποία πραγματοποιήθηκε το μεγαλύτερο τμήμα της μοντελοποίησης των βαθμίδων είναι τα Simscape και SimPowerSystems.

Πιο συγκεκριμένα, οι διατάξεις που θα μοντελοποιηθούν είναι ένα φ/β πάνελ ισχύος 60Wr, ο μετατροπέας DC υποβιβασμού και το σύστημα ελέγχου MPPT που επενεργεί στο duty ratio του μετατροπέα. Για το σύστημα ελέγχου θα μοντελοποιηθεί και κλασική εκδοχή του πιο δημοφιλούς αλγόριθμου MPPT, του **Perturb & Observe**.

### 4.2 Μοντελοποίηση του φ/β πάνελ

Για το προς προσομοίωση σύστημα επιλέγεται να μοντελοποιηθεί το φ/β πάνελ MSX60 της εταιρείας Solarex. Το συγκεκριμένο πάνελ αποτελείται από 36

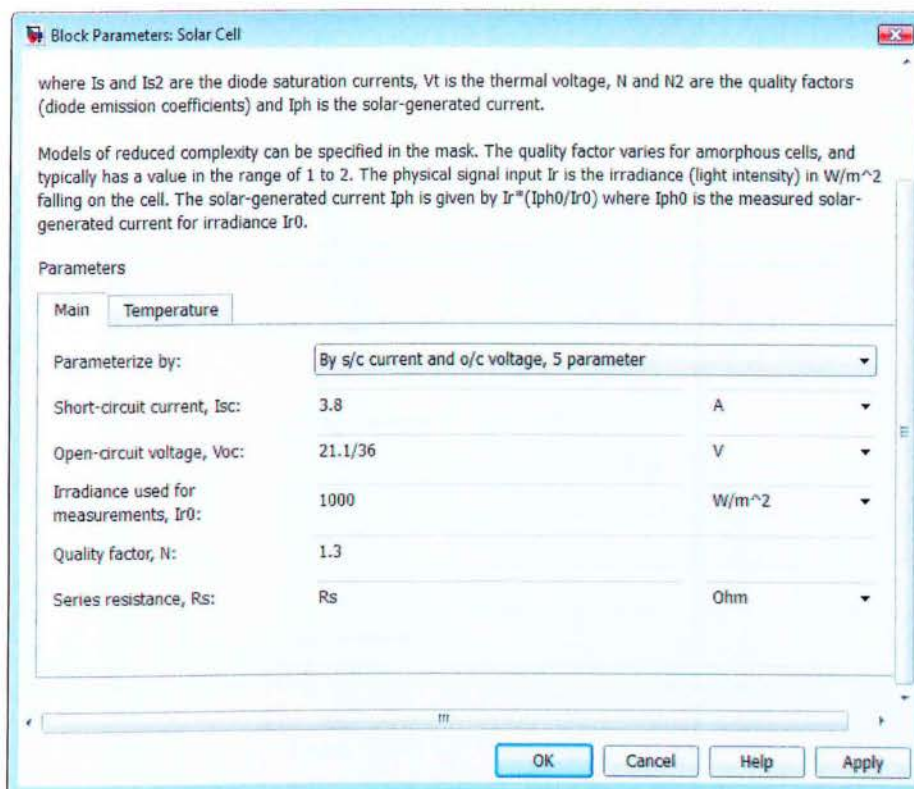
πολυκρυσταλλικά κύτταρα πυριτίου και τα βασικότερα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

**Πίνακας 4.2 : Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά Solarex MSX60**

Μέγιστη Ισχύς (P <sub>max</sub> )	60W
Τάση στο P <sub>max</sub> (V <sub>mp</sub> )	17,1V
Ένταση στο P <sub>max</sub> (I <sub>mp</sub> )	3,5A
Ρεύμα βραχυκύκλωσης (I <sub>sc</sub> )	3,8A
Τάση ανοιχτού κυκλώματος (V <sub>oc</sub> )	21,1V
Ονομαστική τάση	12V
Συντελεστής θερμότητας I <sub>sc</sub>	(0,065±0,015)% / °C
Συντελεστής θερμότητας V <sub>oc</sub>	-(80±10)mV / °C
Συντελεστής θερμότητας P <sub>max</sub>	-(0,5±0,05)% / °C
NOCT	47±2 °C

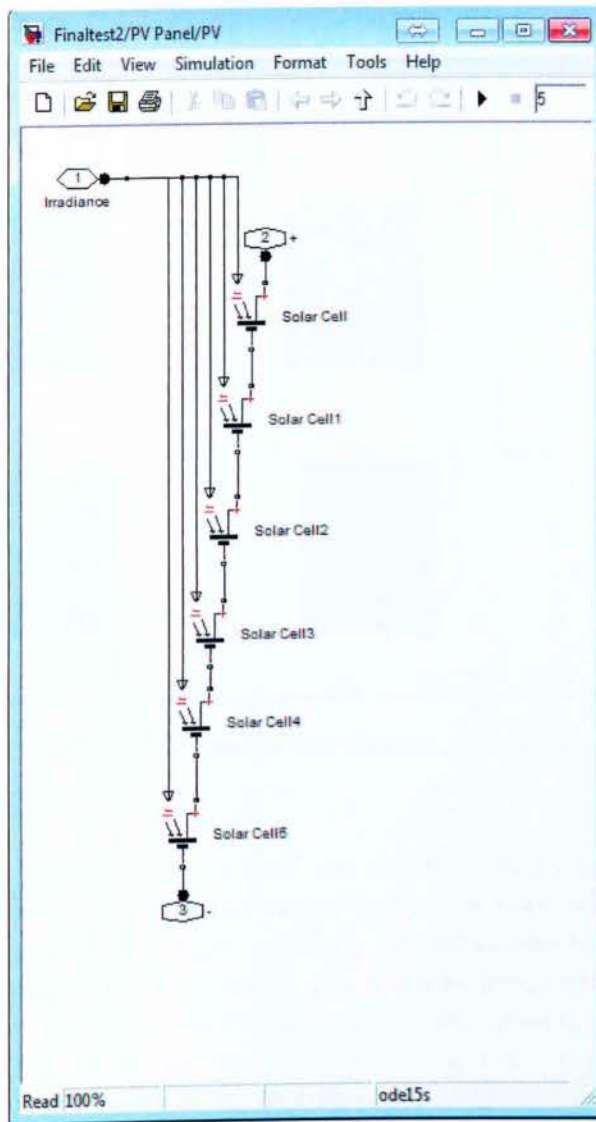
Το φ/β κύτταρο είναι η θεμελιώδης δομική μονάδα για την κατασκευή μεγαλύτερων φ/β διατάξεων. Ως γνωστόν, η ένταση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας και η θερμοκρασία του κυττάρου επηρεάζουν έντονα τη μορφή των χαρακτηριστικών I-V και P-V αντίστοιχα. Τα ισοδύναμα μοντέλα της Εικόνας 2.1 περιγράφουν με επιτυχία (και με κλιμακούμενη ακρίβεια) τις χαρακτηριστικές I-V και P-V του φ/β κυττάρου ως συνάρτηση της έντασης ηλιακής ακτινοβολίας, της θερμοκρασίας λειτουργίας και της τάσης εξόδου. Η μοντελοποίηση του MSX60 θα γίνει βάσει των χαρακτηριστικών του Πίνακα 4.2. Στις πηγές του SimElectronics (που ανήκει στο toolbox Simscape) στην έκδοση R2011a υπάρχει το μπλοκ του φ/β κυττάρου. Χρησιμοποιώντας το ως δομική μονάδα, κατασκευάζεται το φ/β πάνελ για την προσομοίωση.

Το πρώτο βήμα για τη μοντελοποίηση του φ/β πάνελ είναι ο καθορισμός των παραμέτρων του μπλοκ του φ/β κυττάρου. Το συγκεκριμένο μπλοκ μπορεί να παραμετροποιηθεί με βάση τα ισοδύναμα των Εικόνων 2.1α (8 παράμετροι) και 2.1γ (5 παράμετροι). Για λόγους απλότητας και χωρίς να χαθεί σημαντική πληροφορία, θα επιλεγεί η παραμετροποίηση με βάση το ισοδύναμο της Εικόνας 2.1γ.



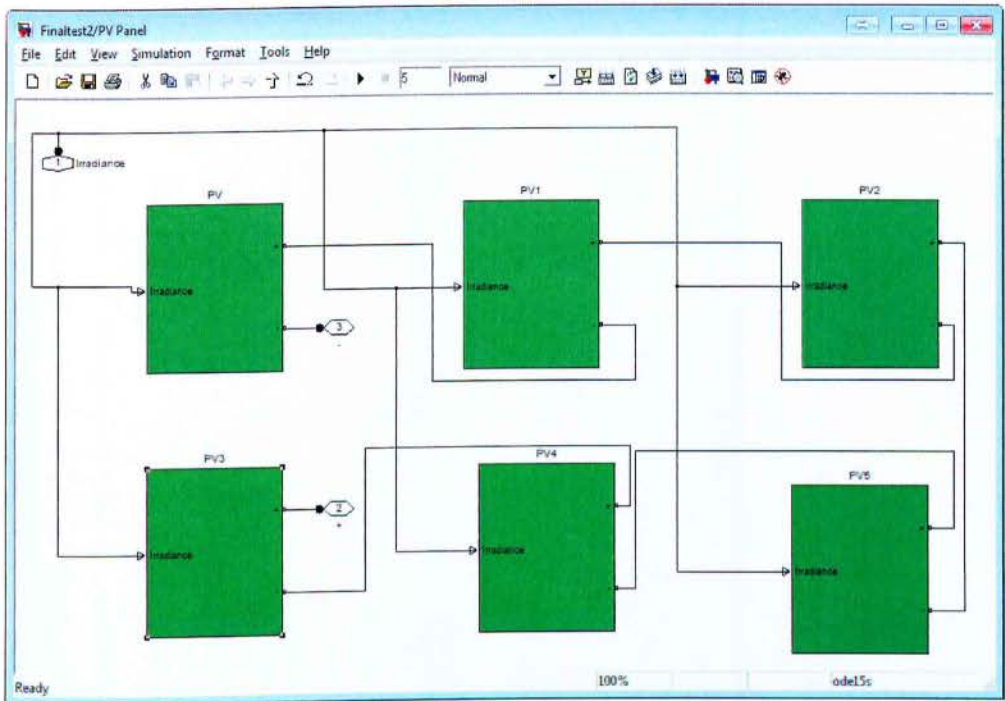
Εικόνα 4.2: Συμπλήρωση των πεδίων των παραμέτρων του Solar Cell #1

Το πεδίο της αντίστασης σειράς  $R_s$  και της θερμοκρασίας λειτουργίας  $T$  ( $T_{fix}$ ) θα καθορίζονται κάθε φορά από το workspace του MATLAB. Με βάση το «δομικό» μπλοκ, σχηματίζεται η πιο γενικευμένη διάταξη που αποτελείται από 6 όμοια blocks συνδεδεμένα σε σειρά. Η συγκεκριμένη διάταξη μετασχηματίζεται σε υποσύστημα (subsystem). Τελικά, το ισοδύναμο πάνελ MSX60 θα σχηματιστεί με τη σειριακή σύνδεση 6 τέτοιων υποσυστημάτων, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.3, ώστε να σχηματιστεί ισοδύναμη διάταξη φ/β πάνελ με 36 κύτταρα. (βλ. [18])



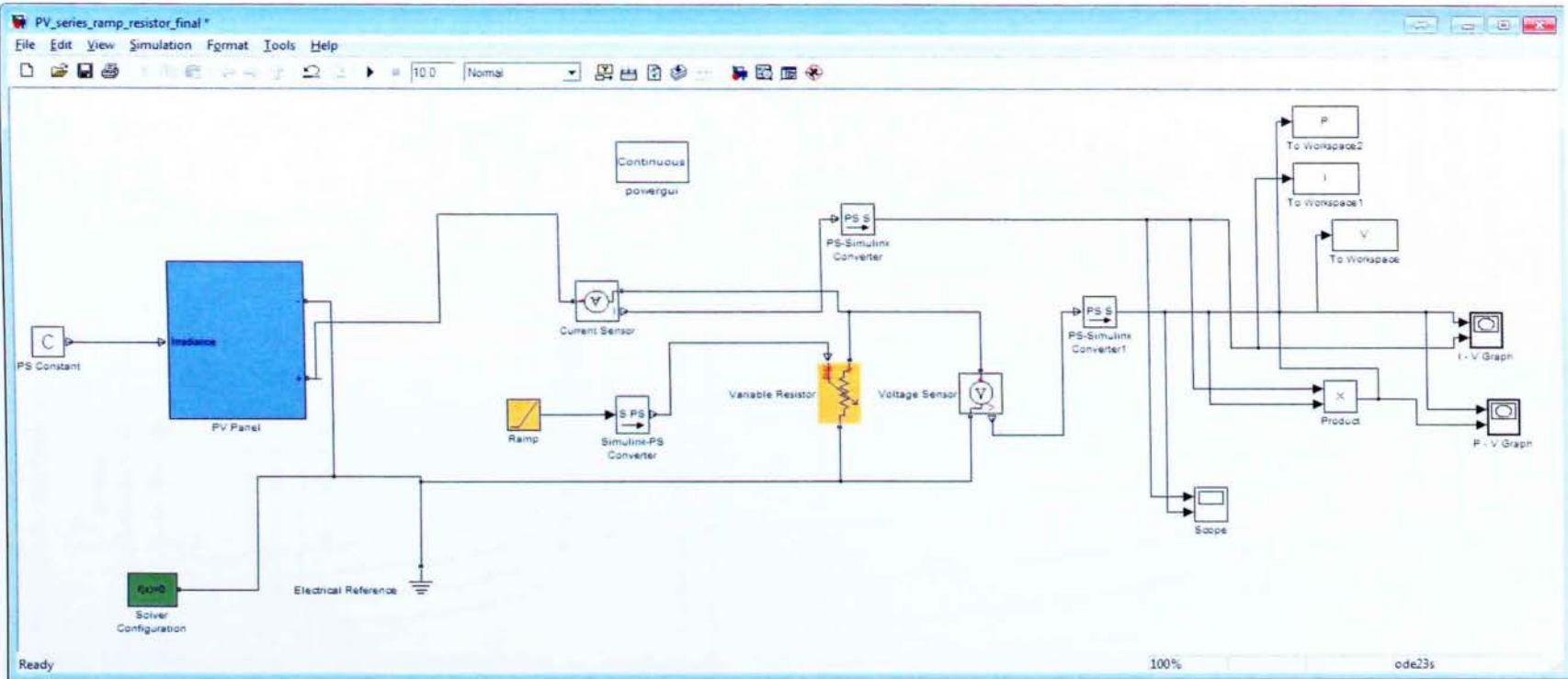
Εικόνα 4.3: Σχηματισμός διάταξης αποτελούμενη από 6 παραμετροποιημένα φ/β κύτταρα

Για να ελεγχθεί η ορθότητα του μοντέλου του MSX60 που σχηματίστηκε, θα πρέπει να ληφθεί η I-V χαρακτηριστική του μοντέλου με μεταβαλλόμενη τη θερμοκρασία λειτουργίας, η οποία θα συγκριθεί με τη χαρακτηριστική που εικονίζεται στο datasheet. Το κύκλωμα με το οποίο θα ληφθεί η I-V χαρακτηριστική εικονίζεται στην Εικόνα 4.4.



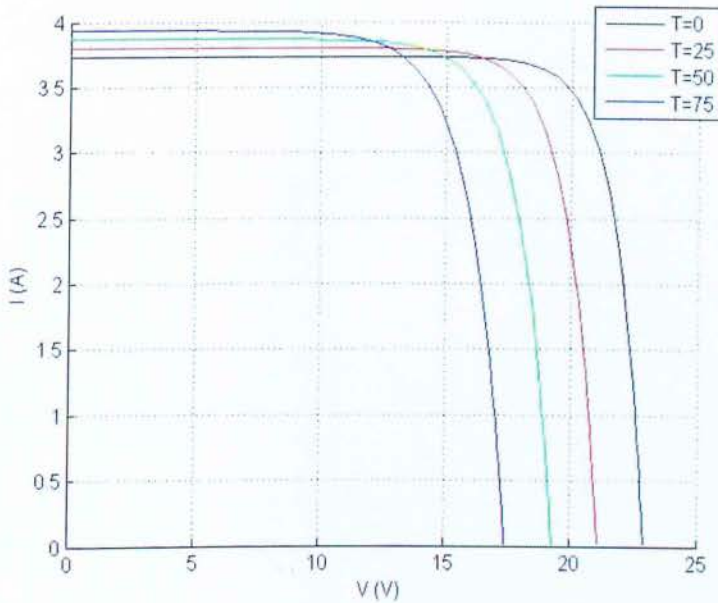
Εικόνα 4.4: Ισοδύναμη διάταξη φ/β πάνελ με 36 κύτταρα

Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στον solver που θα χρησιμοποιηθεί, καθώς στο περιβάλλον του SimElectronics πρέπει να είναι κάποιος stiff. Σε αυτή την περίπτωση, και έπειτα από δοκιμές, επιλέξαμε τον solver ode15s. Η βασική ιδέα είναι η χρήση στο φ/β πάνελ ως φορτίο μιας γραμμικά μεταβλητής αντίστασης με μηδενική αρχική τιμή. Έτσι, για σταθερή τιμή έντασης ηλιακής ακτινοβολίας και θερμοκρασίας, το ρεύμα εξόδου του φ/β πάνελ θα λάβει όλο το εύρος τιμών, από μηδέν μέχρι  $I_{sc}$ . Καταγράφοντας τις παραπάνω σαρώσεις για μεταβαλλόμενη τιμή θερμοκρασίας λειτουργίας, χαράσσονται οι χαρακτηριστικές της Εικόνας 4.5. Η προσομοίωση πραγματοποιείται για σταθερή ένταση ηλιακής ακτινοβολίας  $1KW/m^2$  και με τη θερμοκρασία να μεταβάλλεται διαδοχικά από  $0^{\circ}C$  ως  $75^{\circ}C$ , ανά  $25^{\circ}C$ .

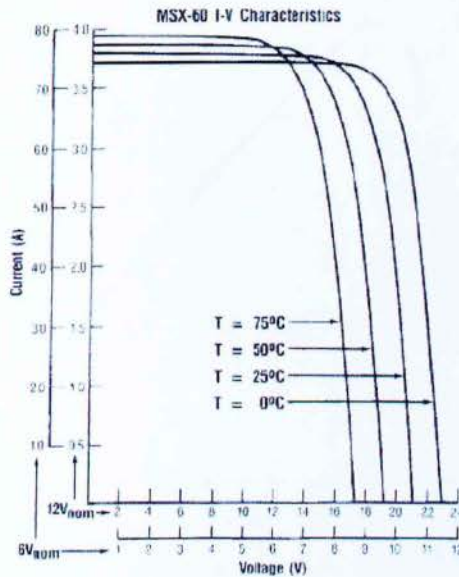


Εικόνα 4.5: Το κύκλωμα με το οποίο θα ληφθεί η I-V χαρακτηριστική

Από τη σύγκριση των χαρακτηριστικών των Εικόνων 4.6 και 4.7 για  $12V_{nom}$  προκύπτει ότι το ισοδύναμο μοντέλο του MSX60 που κατασκευάστηκε είναι ορθό. Ενδιαφέρον παρουσιάζει η επιρροή της μεταβολής της αντίστασης σειράς  $R_s$  στη χαρακτηριστική του φ/β πλαισίου.

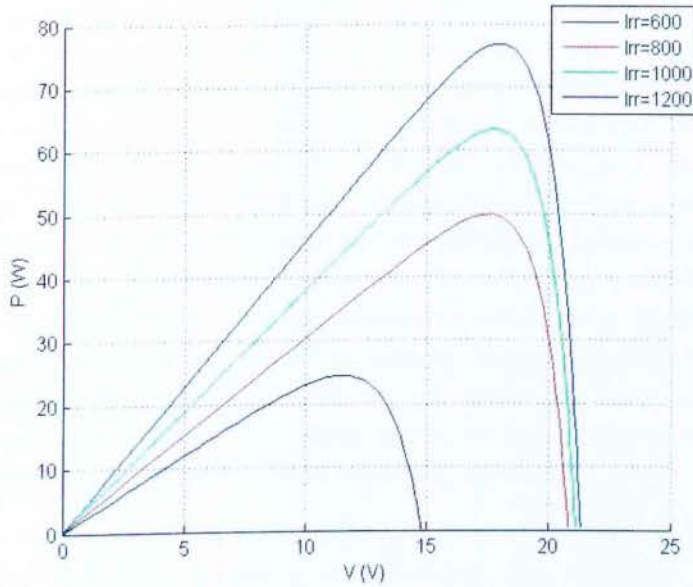


Εικόνα 4.6: Καμπύλη I-V με σταθερή ένταση ηλιακής ακτινοβολίας  $1,0KW/m^2$  και θερμοκρασία λειτουργίας μεταβαλλόμενη

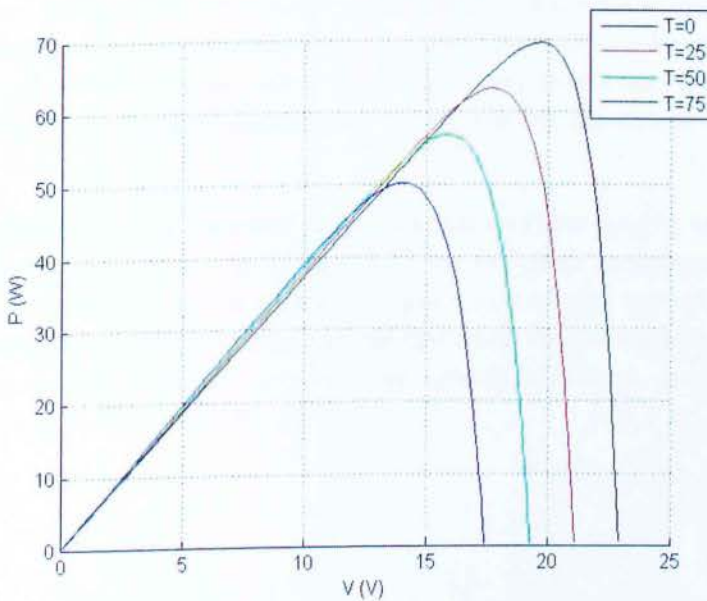


Εικόνα 4.7: Οι χαρακτηριστικές I-V του MSX60 έτσι όπως υπάρχουν στο datasheet

Στις Εικόνες 4.8 και 4.9 παρουσιάζεται η μετακίνηση του σημείου MPP ως προς τη μεταβολή της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας, αντίστοιχα. Γενικά, η τάση  $V_{mpp}$  του πάνελ MSX60 μεταβάλλεται μεταξύ 15V και 20V, ενώ η τάση ανοιχτού κυκλώματος  $V_{oc}$  μεταξύ 18V και 23V. Τα δεδομένα αυτά θα χρησιμεύσουν στη συνέχεια κατά τον υπολογισμό του μετατροπέα DC.



Εικόνα 4.8: Καμπύλη P-V με σταθερή θερμοκρασία λειτουργίας 25°C και ένταση ηλιακής ακτινοβολίας μεταβαλλόμενη



Εικόνα 4.8: Καμπύλη P-V με σταθερή ένταση ηλιακής ακτινοβολίας 1,0KW/m<sup>2</sup> και θερμοκρασία λειτουργίας μεταβαλλόμενη



### 4.3 Υπολογισμός και μοντελοποίηση του μετατροπέα DC

Όπως αναφέρθηκε, η βαθμίδα που είναι επιφορτισμένη με την επιβολή του σημείου MPP στη φ/β συστοιχία είναι ο μετατροπέας DC διακοπτικού τρόπου λειτουργίας. Οι μετατροπείς υποβιβασμού, χρησιμοποιούνται συνήθως σε εφαρμογές αυτόνομου χαρακτήρα, όπως η φόρτιση συσσωρευτών ή η οδήγηση dc κινητήρων διατάξεων άντλησης νερού, λόγω του ότι η υποβίβαση της τάσης διασφαλίζει μεγαλύτερο εύρος ρεύματος στο φορτίο. Οι μετατροπείς ανύψωσης χρησιμοποιούνται ως βαθμίδα ρύθμισης τάσης ή/και ρεύματος σε inverters, προκειμένου να ανυψώσουν τη dc τάση της φ/β συστοιχίας στο επιθυμητό επίπεδο που χρειάζονται οι συγκεκριμένοι inverters στην είσοδό τους. Οι μετατροπείς ανύψωσης-υποβιβασμού, λόγω των σημαντικών πλεονεκτημάτων που παρουσιάζουν, βρίσκουν εφαρμογή σε ειδικές περιπτώσεις όπου επιβάλλεται δυνατότητα ανύψωσης ή/και υποβιβασμού. Μια τέτοια περίπτωση είναι όταν χρησιμοποιείται μετατροπέας υποβιβασμού για φόρτιση συσσωρευτών και η μεταβολή της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας ή της θερμοκρασίας οδηγήσει το σημείο MPP της φ/β συστοιχίας κάτω από την τάση φόρτισης των συσσωρευτών. Τότε, προκειμένου να μην μείνουν αφόρτιστοι οι συσσωρευτές, επιβάλλεται η δυνατότητα ανύψωσης της τάσης.

Για την επίδειξη και την αξιολόγηση των αλγορίθμων MRPT στη συγκεκριμένη εργασία, επιλέγεται η προσθήκη στο σύστημα μετατροπέα υποβιβασμού. Η απλούστερη διάταξη που μπορεί να χρησιμοποιηθεί είναι αυτή της Εικόνας Εικόνα 3.2.1.2.7. Η συγκεκριμένη τοπολογία παρουσιάζει σοβαρά μειονεκτήματα τα οποία, στις πραγματικές εφαρμογές, ενδεχομένως να έχουν συνέπειες στη λειτουργία του συνολικού συστήματος. Το πιο σοβαρό από αυτά είναι η διακοπτόμενη μορφή του ρεύματος εισόδου  $I_s$  λόγω της θέσης του διακόπτη  $S$  στην είσοδο του μετατροπέα, κάτι που κάνει επιβεβλημένη την τοποθέτηση μιας διάταξης σταθεροποίησης του ρεύματος εισόδου. Για το λόγο αυτό τοποθετήθηκε ο πυκνωτής  $C_{in}$ .

Ο υπολογισμός των στοιχείων του μετατροπέα υποβιβασμού γίνεται βάσει της θεωρίας που παρουσιάστηκε στην ενότητα 3.2.2 για τον τρόπο λειτουργίας συνεχούς αγωγής. Οι προδιαγραφές που θα πρέπει να πληροί ο μετατροπέας συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα. Ως φορτίο του μετατροπέα επιλέγεται ένα σταθερό ωμικό φορτίο της τάξης των  $10\Omega$ , καθώς στη συγκεκριμένη εργασία εξετάζεται αποκλειστικά ο μηχανισμός ιχνηλάτησης του MPP. (βλ. [11])

Πίνακας 4.3: Προδιαγραφές μετατροπέα υποβιβασμού

Εύρος τάσης εισόδου (Vs)	0-25V DC
Εύρος ρεύματος εισόδου (Is)	0-4A (<5% κυμάτωση)
Κυμάτωση τάσης εξόδου (ΔVo)	<400mVp-p
Κυμάτωση ρεύματος πηνίου (ΔIo)	ΧΩΡΙΣ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟ
Μέγιστη ισχύς εξόδου (Pmax)	60W
Διακοπτική συχνότητα	100KHz

Ο υπολογισμός της αυτεπαγωγής L είναι, ίσως, ο πιο κρίσιμος υπολογισμός στο κύκλωμα του μετατροπέα. Από τη σχέση, η ελάχιστη τιμή για την αυτεπαγωγή L για D=0,5 είναι:

$$L_b = \frac{(1-D)R}{2f}$$

$$L \geq \frac{(1-D)R}{2f} = \frac{(1-0,5)10}{2 \cdot 100000} = 25 \mu H$$

Η τιμή των 25μH είναι η ελάχιστη επιτρεπτή προκειμένου ο μετατροπέας να βρίσκεται σε συνεχή τρόπο λειτουργίας. Ωστόσο, δεδομένου ότι η παραπάνω τιμή είναι οριακή και τα στοιχεία του κυκλώματος δεν είναι ιδανικά, για την προσομοίωση η τιμή της αυτεπαγωγής θα επιλεγεί στα 30μH.

Καθοριστικό ρόλο παίζει η μέγιστη επιτρεπτή κυμάτωση της τάσης εξόδου. Εδώ πρέπει να επισημανθεί και η γραμμική σχέση που υπάρχει μεταξύ της μέγιστης επιτρεπτής κυμάτωσης και του χρόνου απόκρισης της τάσης εξόδου (για ωμικό φορτίο). Πιο συγκεκριμένα: *όσο μεγαλύτερο είναι το επιτρεπτό ποσοστό κυμάτωσης στην έξοδο του μετατροπέα, τόσο μεγαλύτερη θα είναι η κυμάτωση του ρεύματος στο πηνίο και τόσο μικρότερη θα είναι η τιμή του πυκνωτή εξόδου, αντίστοιχα. Άρα τόσο ταχύτερη θα γίνεται η απόκριση του μετατροπέα.* Η ελάχιστη τιμή της χωρητικότητας του πυκνωτή καταστολής της κυμάτωσης C υπολογίζεται με βάση τη παρακάτω σχέση για D=0,5 και Vo ίση με το MPP του φ/β πάνελ MSX60 για STC (βλ. Εικόνα 4.6 και 4.7):

$$C_{\min} = \frac{(1-D)V_o}{8\Delta V_o L f^2}$$

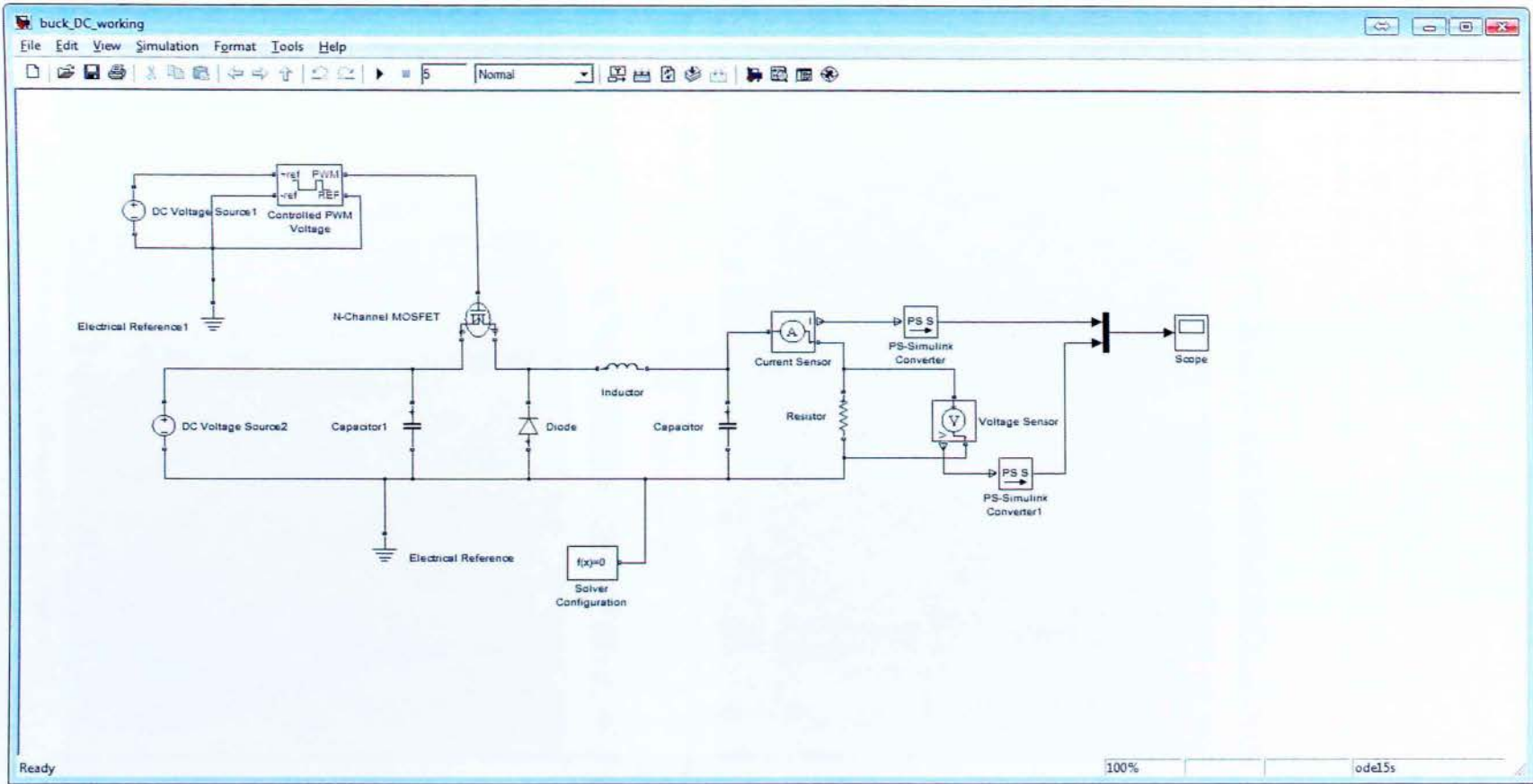
$$C_{min} = \frac{(1-D)V_0}{8\Delta V_0 L f^2} = \frac{(1-0.5)18}{8 \cdot 0.4 \cdot 25 \cdot 10^{-6} \cdot (100000)^2} = 11.25 \mu F$$

Η επιλογή της τιμής του πυκνωτή εισόδου  $C_{in}$ , σύμφωνα με την [10], γίνεται με γνώμονα το μέγιστο ρεύμα που μπορεί να αποδώσει η βαθμίδα που είναι συνδεδεμένη στην είσοδο του μετατροπέα. Πιο συγκεκριμένα, **για κάθε Ampere αρκούν 10  $\mu F$  ως 22  $\mu F$** . Επομένως, λόγω του ότι το μέγιστο ρεύμα που μπορεί να αποδώσει το φ/β πάνελ MSX60 είναι 3,8 A (το ρεύμα βραχυκύκλωσης σε STC), η χωρητικότητα του  $C_{in}$  προκύπτει:

$$C_{in} = 3,8 \cdot 22 \mu F = 83,6 \mu F$$

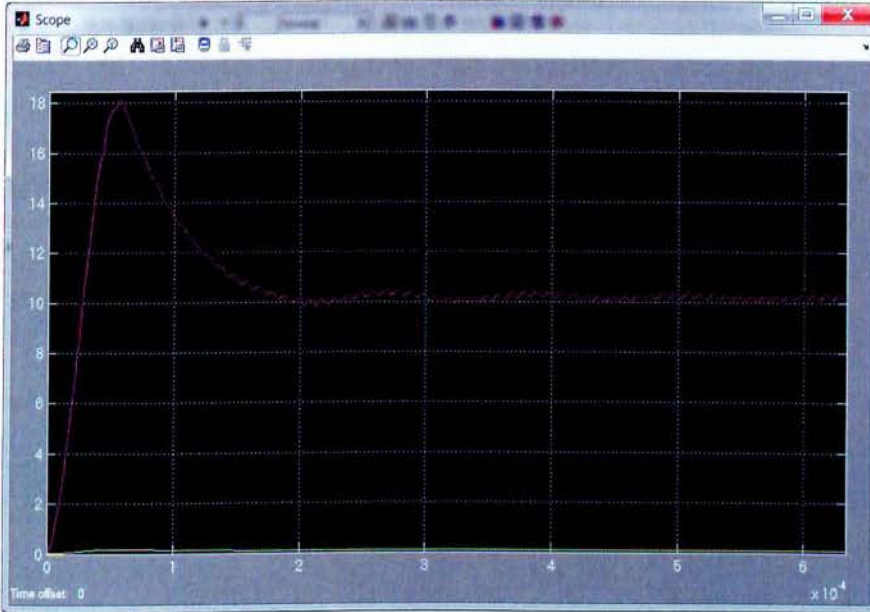
Ως διακόπτης θα χρησιμοποιηθεί το μπλοκ του MOSFET πύκνωσης N-καναλιού από τη βιβλιοθήκη semiconductor devices του toolbox simscape. Σε αυτό το στάδιο δεν θα κατασκευαστεί κάποιο ειδικό κύκλωμα ελέγχου της Πύλης του MOSFET, αλλά θα χρησιμοποιηθεί μια γεννήτρια συνεχόμενων παλμών ρυθμιζόμενου πλάτους, duty ratio και περιόδου. Μεγάλη σημασία πρέπει να αποδοθεί στην τιμή της αντίστασης.

Με βάση όλα τα στοιχεία που προέκυψαν από την παραπάνω ανάλυση, σχηματίστηκε στο MATLAB/SIMULINK το κύκλωμα της Εικόνας 4.9 :

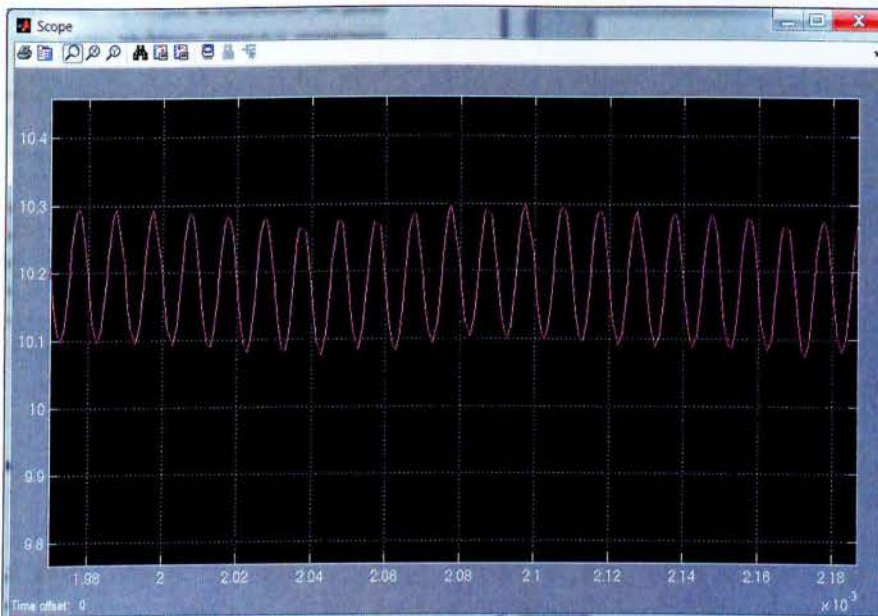


Εικόνα 4.9: Το κύκλωμα του μετατροπέα υποβιβασμού

Για να επιβεβαιωθεί η ορθή λειτουργία του μετατροπέα, συνδέθηκε στην είσοδο μια πηγή τάσης 20 V DC και ρυθμίστηκε η γεννήτρια ώστε να παρέχει παλμούς πλάτους 12 V, συχνότητας 100 KHz και duty ratio 50% στο κύκλωμα οδήγησης της Πύλης του MOSFET. Βάσει της παρακάτω σχέσης, η τάση στο φορτίο θα πρέπει να είναι 10V DC. Το αποτέλεσμα της προσομοίωσης παρουσιάζεται στην εικόνα 4.10, ενώ στο Σχήμα 4.11 παρουσιάζεται η κυμάτωση της τάσης εξόδου μεγεθυμένη.



**Εικόνα 4.10:** Η απόκριση του μετατροπέα υποβιβασμού για παλμούς στο διακόπτη πλάτους 12V, συχνότητας 100KHz και duty ratio 50%

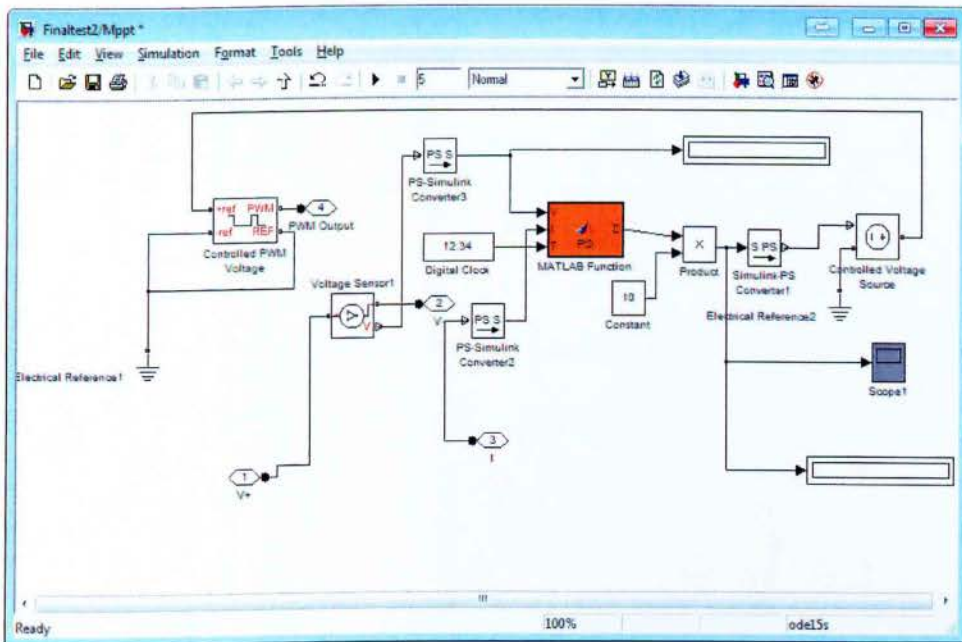


**Εικόνα 4.11:** Η κυμάτωση της τάσης εξόδου μεγεθυμένη

#### 4.4 Μοντελοποίηση του αλγορίθμου MPPT

Όπως αναφέρθηκε στα προηγούμενα κεφάλαια, ο P&O είναι ο αλγόριθμος MPPT που χρησιμοποιείται ευρέως καθώς, ακόμα και στη βασική εκδοχή του, δίνει πολύ καλά αποτελέσματα και υλοποιείται σχετικά εύκολα. Στην ενότητα 3.1.1 υπάρχει εκτενής ανάλυση της λειτουργίας του συγκεκριμένου αλγορίθμου. Στην παρούσα ενότητα θα μοντελοποιηθεί το σχήμα ελέγχου MPPT με βάση το διάγραμμα ροής που παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.1.2. Πιο αναλυτικά, το σχήμα ελέγχου, αρχικά, θα διαβάσει την τρέχουσα τιμή του ρεύματος και της τάσης της φ/β συστοιχίας και θα υπολογίσει την τρέχουσα τιμή της ισχύος. Τις τιμές αυτές θα τις αποθηκεύσει σαν τις  $k$ -οστές τιμές. Με τον ίδιο τρόπο, στον επόμενο κύκλο θα πάρει τις  $(k+1)$ -οστές τιμές τάσης και ισχύος, τις οποίες θα αφαιρέσει από τις αντίστοιχες αποθηκευμένες  $k$ -οστές τιμές. Κατόπιν, ανάλογα με το πρόσημο που προκύπτει από τις αφαιρέσεις και με βάση τον Πίνακα 3.1.1, θα μεταβληθεί ανάλογα η τιμή της τάση αναφοράς  $V_{ref}$ , η οποία συνδέεται με κύκλωμα PWM. (βλ. [3])

Ο παραπάνω αλγόριθμος υλοποιείται στο MATLAB/SIMULINK με το κύκλωμα της Εικόνας 4.12.

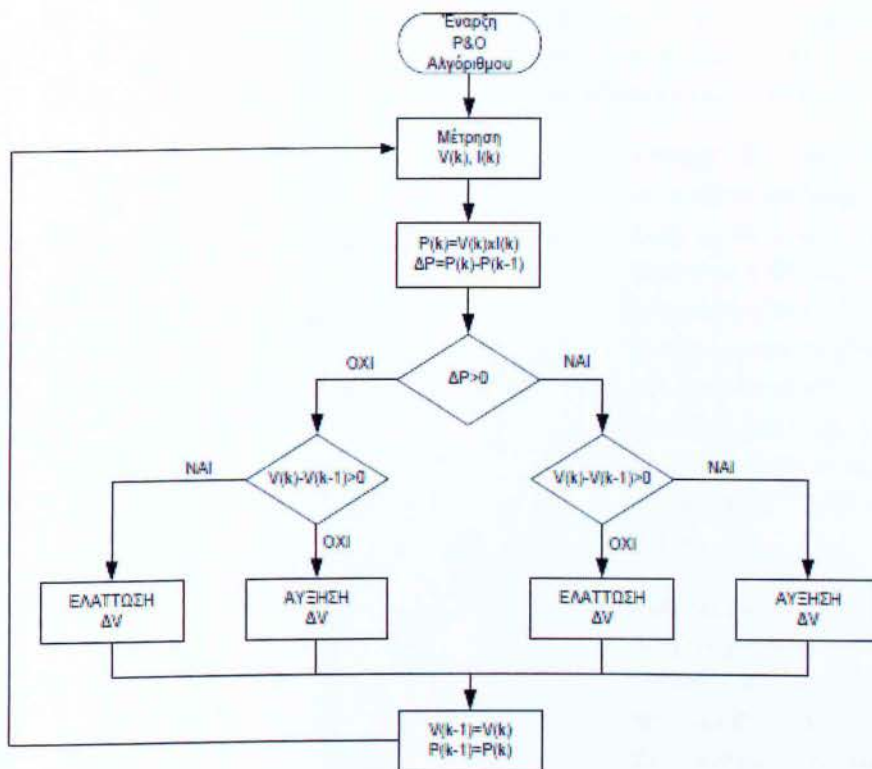


Εικόνα 4.12: Υλοποίηση του αλγορίθμου P&O.

Στο παραπάνω κύκλωμα, με πορτοκαλί χρώμα είναι το μπλοκ που περιέχει τον κώδικα που υλοποιεί το διάγραμμα ροής όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.1.2. Η έξοδος αυτού του μπλοκ είναι μια τιμή της μορφής 0.5, 0.52, 0.612 κτλ. Η τιμή αυτή πολλαπλασιάζεται με την σταθερή τιμή 10 και στη συνέχεια τροφοδοτεί την γεννήτρια παλμών PWM ώστε ανάλογα με την τιμή αυτή να ρυθμιστεί η διάρκεια του

παλμού που δημιουργείται από την PWM generator. Ο παλμός αυτός είναι που ρυθμίζει την διακοπτική λειτουργία το N- Mosfet.

Το μπλοκ MATLAB Function δέχεται ως είσοδο: Τάση V από την έξοδο του φ/β πάνελ, Ρεύμα I από την έξοδο του φ/β πάνελ και τον χρόνο από το μπλοκ Digital Clock. Όπως αναφέραμε, το μπλοκ αυτό υλοποιεί το παρακάτω διάγραμμα ροής.



Εικόνα 4.13: Διάγραμμα Ροής P&O.

```

1 function D = PO(V,I,T)
2 persistent P2 P1 dP d dd n;
3 if isempty(V)%trexwn tasi
4     V=0;
5 end
6 if isempty(I)%trexwn reuma
7     I=0;
8 end
9 if isempty(P2)%trexousa isxus
10    P2=0;
11 end
12 if isempty(P1)%proigoumeni isxus
13    P1=0;
14 end
15 if isempty(dP)%metaboli P
16    dP=0;
17 end
18 if isempty(d)%duty Cycle
19    d=1;
20 end
21 if isempty(dd)%difference from duty cycle
22    dd=0;
23 end
24 if isempty(n)%zigas periodous
25    n=1;
26 end
27 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
28 if (T > n*0.000002)
29    n = n + 1;
30    P1=P2;
31    P2=V*I;
32    dP=P2-P1;
33    if (dd==0)
34        if dP>1
35            dd=0.02;
36            d=d+dd;
37        else
38            if dP<-1
39                dd=-0.02;
40                d=d+dd;
41            else
42                dd=0;
43            end
44        end
45    else
46        if ((dP<1)&&(dP>-1))
47            dd=0;
48            d=d+dd;
49        else
50            if ((dP/dd)>0)
51                dd=0.02;
52                d=d+dd;
53            else
54                dd=-0.02;
55                d=d+dd;
56            end
57        end
58    end
59 end
60 D=d/(d+1);
61 if D<0.1
62    D=0.1;
63    d=D/(1-D);
64 else
65    if D>0.9
66        D=0.9;
67        d=D/(1-D);
68    else
69        end
70 end
71 end

```

**Γραμμές 1 - 26:** Αρχικοποίηση μεταβλητών.

**Γραμμές 28 - 58:** Αρχικά ελέγχει τον χρόνο ώστε ανά ίσες περιόδους να παίρνει μετρήσεις ώστε να συγκρίνει και να βγάλει ως έξοδο το Duty Cycle (d).

**Γραμμές 33 - 44:** Ελέγχει αν η τρέχουσα διαφορά Duty Cycle είναι 0, και έπειτα αν η dP είναι μεγαλύτερη του 1 ή μικρότερη από -1 (δηλαδή εάν υπάρχει μεγάλη διαφορά), και ανάλογα μειώνει ή αυξάνει το duty cycle (dd=0.02 ή dd=-0.02)

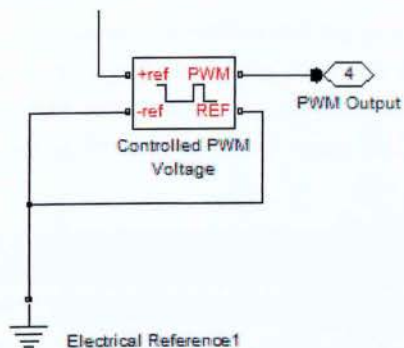
**Γραμμές 46 - 57:** Ελέγχει αν η τρέχουσα ισχύς είναι  $-1 < dP < 1$ , και εάν ισχύει, θέτει dd=0 και d=d+dd. Στη συνέχεια ανάλογα μειώνει ή αυξάνει το duty cycle (dd=0.02 ή dd=-0.02).

**Γραμμές 60 - 70:** Υπολογίζει την τιμή που τελικά θα έχει σαν έξοδο το μπλοκ ώστε να είναι σε μορφή που να πολλαπλασιάζεται με την τιμή 10, για να είναι είσοδος στην PWM generator.

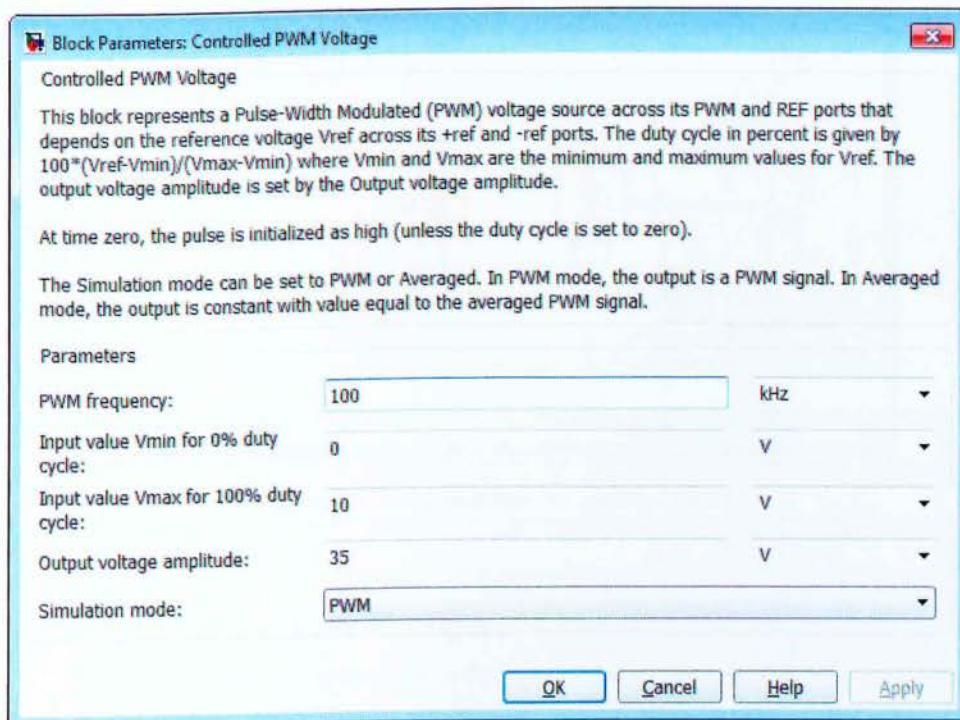


#### 4.5 Μοντελοποίηση του συστήματος PWM

Η έξοδος του μπλοκ που υλοποιεί τον αλγόριθμο MPPT είναι η τάση αναφοράς  $V_{ref}$ , βάσει της οποίας θα προσαρμόζεται το duty ratio  $D$  του συστήματος PWM. Στην Εικόνα 4.14 παρουσιάζεται η υλοποίηση ενός συστήματος PWM που λειτουργεί με την παραπάνω λογική στο MATLAB/SIMULINK. (βλ. [11])



Εικόνα 4.14: Υλοποίηση του PWM όπως χρησιμοποιήθηκε στο MPPT.

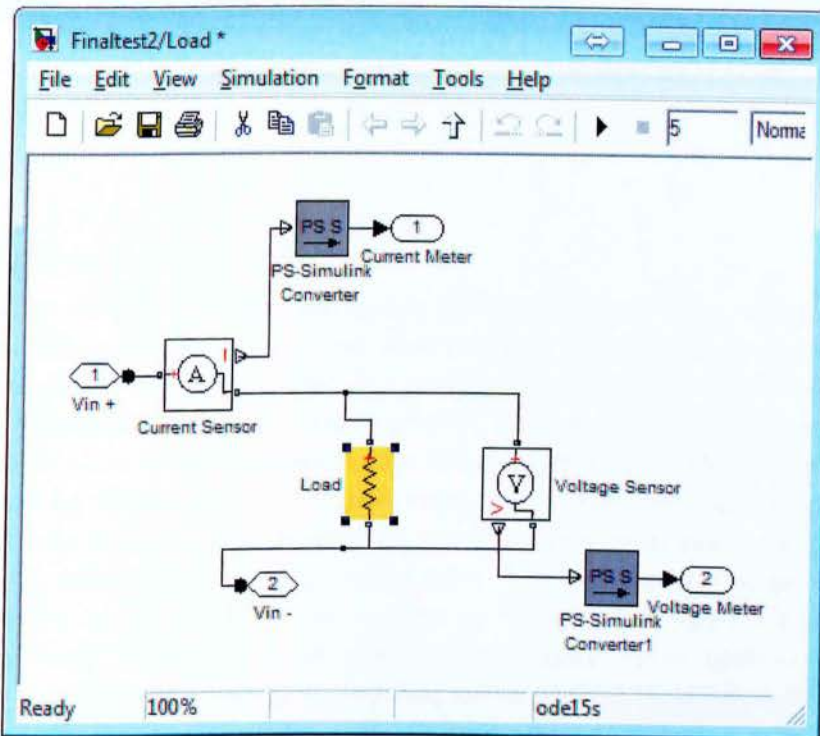


Εικόνα 4.15: Οι ρυθμίσεις του μπλοκ Controlled PWM Voltage

Βασικό στοιχείο του παραπάνω κυκλώματος είναι το μπλοκ του ελεγχόμενου από τάση PWM, το οποίο βρίσκεται στο toolbox simscape. Χρησιμοποιώντας αυτό το μπλοκ, καθορίζεται η συχνότητα και το πλάτος των παλμών PWM, καθώς και το εύρος της τάσης  $V_{ref}$  όπου θα μεταβάλλεται το duty ratio του PWM.

#### 4.6 Μοντελοποίηση του φορτίου (Load)

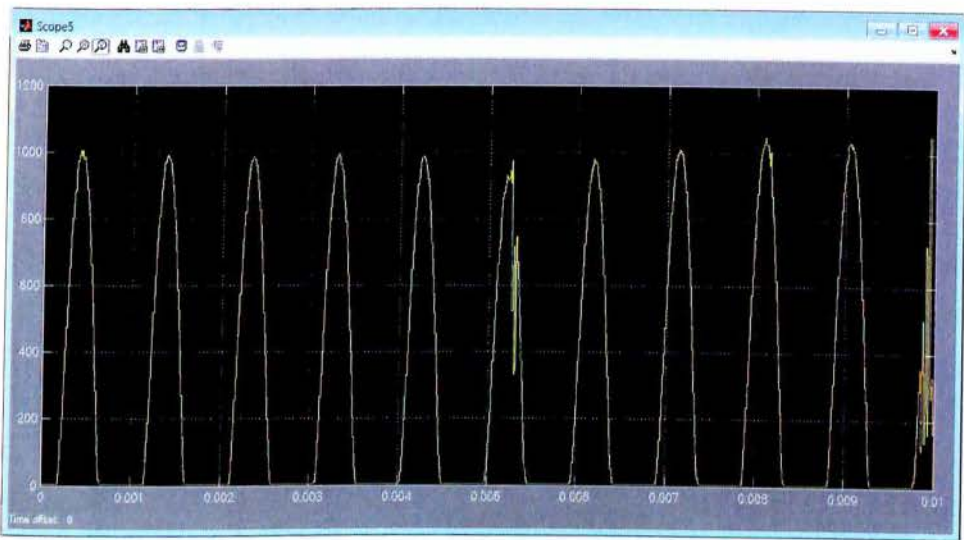
Στην παρούσα εργασία, για λόγους διευκόλυνσης της μοντελοποίησης αλλά και για τον λόγο ότι τα στοιχεία στην πραγματικότητα δεν είναι ιδανικά, ως φορτίο έχει χρησιμοποιηθεί μια αντίσταση  $10\Omega$ , έτσι ώστε η γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων να είναι πιο εμφανής. Στην Εικόνα 4.16 παρουσιάζεται το Subsystem Load.



Εικόνα 4.16: Το υποσύστημα του φορτίου (Load)

#### 4.6 To block “Signal from Workspace”

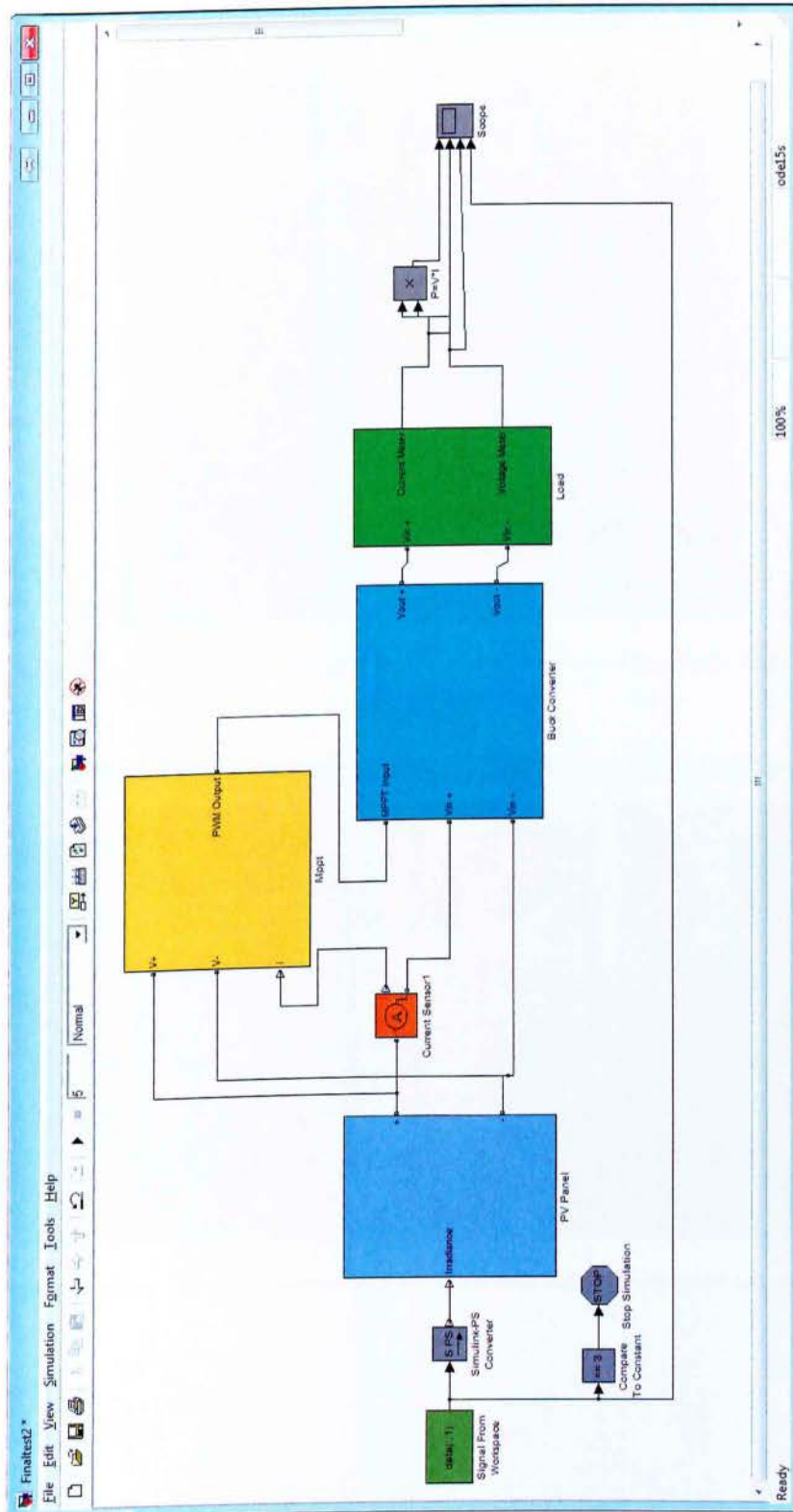
Με τη χρήση αυτή του μπλοκ, επιτυγχάνεται η εισαγωγή των δεδομένων της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας (Irradiance) για ένα συγκεκριμένο φ/β πάρκο. Τα δεδομένα εισάγονται από έναν πίνακα data που έχει εισαχθεί στο workspace, μεγέθους  $1002 \times 1$ . Στην Εικόνα 4.17 φαίνεται η γραφική παράσταση της εντάσεως ηλιακής ακτινοβολίας για χρονικό διάστημα δέκα ημερών.



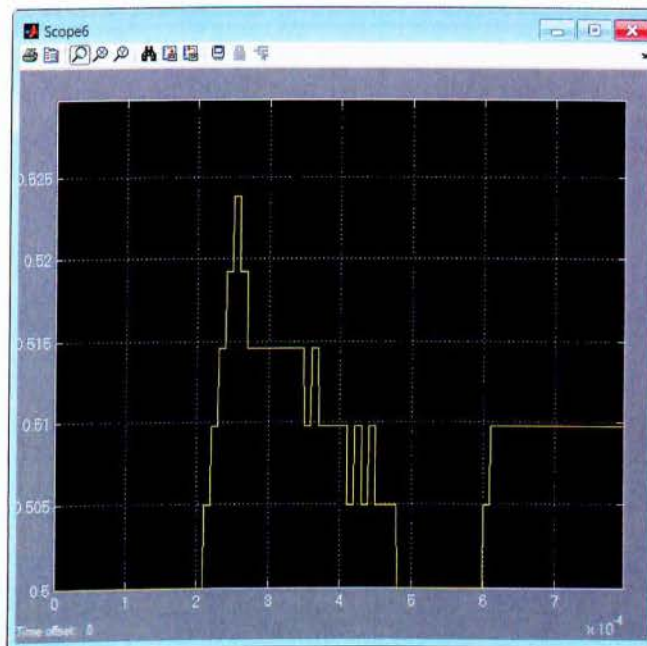
Εικόνα 4.17: Ένταση ηλιακής ακτινοβολίας για χρονικό διάστημα 10 ημερών

#### 4.8 Προσομοίωση του συστήματος

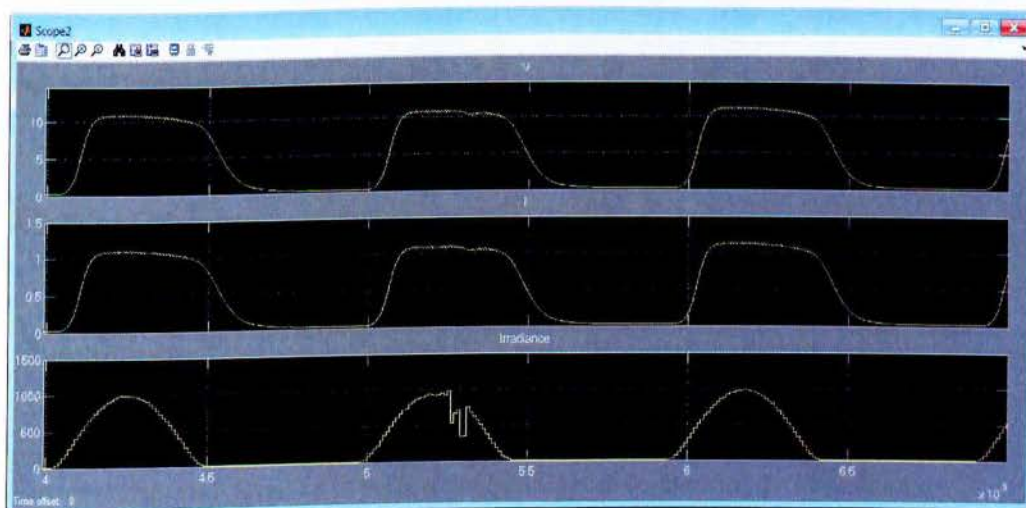
Με βάση τα υποσυστήματα που μοντελοποιήθηκαν στις προηγούμενες ενότητες, σχηματίζεται το συνολικό σύστημα MPPT που θα προσομοιωθεί για μεταβαλλόμενη τιμή της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας. Στην Εικόνα 4.18 παρουσιάζεται το συνολικό σύστημα του MPPT που ενσωματώνει αλγόριθμο P&O. Επίσης στην Εικόνα 4.19 απεικονίζονται οι αλλαγές στην τιμή του Duty Cycle καθώς υπολογίζεται τακτικά νέο MPP. Ενώ στην Εικόνα 4.20 φαίνεται οι γραφικές παραστάσεις τάσης, έντασης ρεύματος και έντασης ηλιακής ακτινοβολίας για χρονικό διάστημα τριών ημερών. Τέλος, στην Εικόνα 4.21 φαίνεται η διαφορά ισχύος συστήματος με χρήση MPPT και συστήματος χωρίς χρήση MPPT (δηλαδή με σταθερό Duty Cycle). Αυτές οι γραφικές παραστάσεις έχουν υπολογισθεί για μεταβαλλόμενη ένταση ηλιακής ακτινοβολίας και για σταθερή θερμοκρασία 25° C.



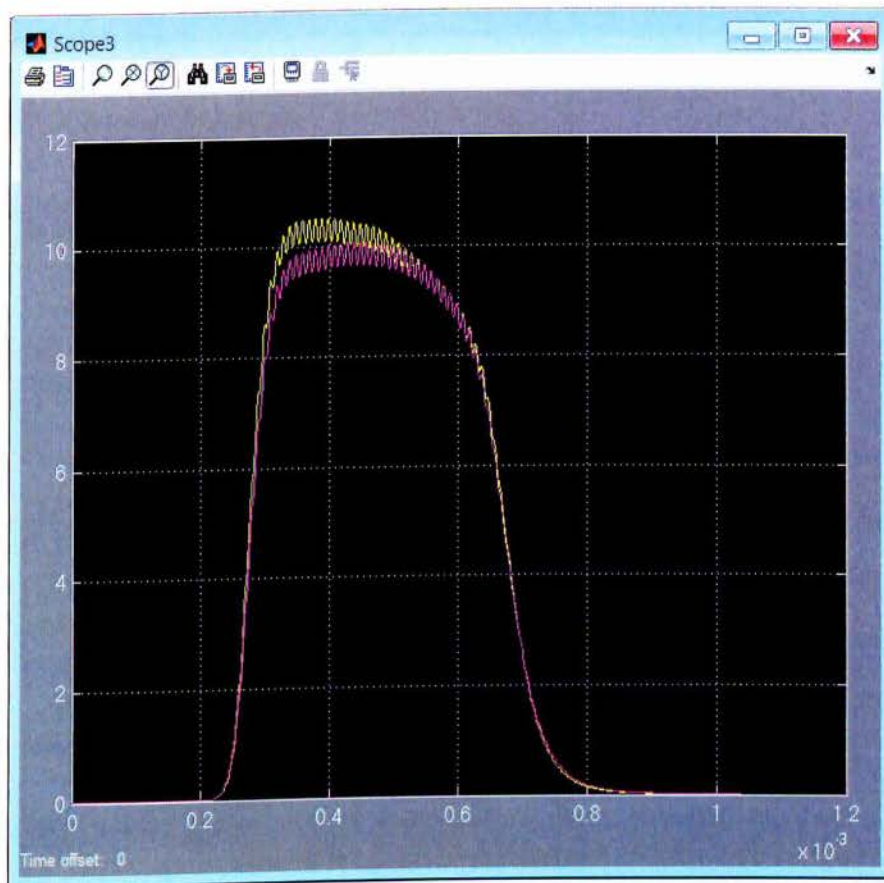
Εικόνα 4.18: Το συνολικό σύστημα MPPT



Εικόνα 4.19: Οι αλλαγές στο duty cycle όπως υπολογίζεται από τον αλγόριθμο P&O



Εικόνα 4.20: Τάση , Ένταση ρεύματος και Ένταση ηλιακής ακτινοβολίας τριών ημερών



Εικόνα 4.21: Η διαφορά ισχύος μεταξύ συστήματος με MPPT (κίτρινο χρώμα) και συστήματος χωρίς MPPT(μωβ χρώμα).

#### 4.9 Συμπεράσματα

Από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του συστήματος MPPT, για μεταβαλλόμενη ένταση προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας, έγινε σαφής ο τρόπος λειτουργίας του μηχανισμού ιχνηλάτησης P&O. Στα ίδια αποτελέσματα καταλήγουμε και στην περίπτωση που η παράμετρος που μεταβάλλεται είναι η θερμοκρασία λειτουργίας του φ/β πλαισίου ή το φορτίο εξόδου ή συνδυασμός όλων των παραπάνω. Δηλαδή, η φιλοσοφία του αλγορίθμου P&O, όπως και των περισσότερων τεχνικών MPPT, εστιάζει στην απορρόφηση του συνόλου της διαθέσιμης ισχύος από τη φ/β συστοιχία, κάτι που επιτυγχάνεται με τη μεταβολή της αντίστασης εισόδου της συνολικής βαθμίδας που συνδέεται στην έξοδο της φ/β συστοιχίας. Η αντίσταση αυτή, εξαρτάται άμεσα από το duty ratio του μετατροπέα DC.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

### 5.1 Προοπτικές βελτίωσης ή επεκτάσεις

Επιπλέον, το μοντέλο που αναπτύξαμε μπορεί να βελτιωθεί με διάφορους τρόπους:

1. Εισαγωγή της θερμοκρασίας ως μεταβαλλόμενης παραμέτρου που επηρεάζει την ισχύ που παράγεται από την εγκατάσταση, ώστε να έχουμε μεγαλύτερη ακρίβεια.
2. Γενίκευση του μοντέλου και για άλλους τύπους φωτοβολταϊκών πάνελ που χρησιμοποιούνται στις φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις.
3. Χρήση boost μετατροπέα ή buck-boost μετατροπέα για επέκταση της εργασίας με χρήση Inverter και σύνδεση στο δίκτυο.
4. Χρήση περισσότερων από ένα φ/β πάνελ, έως μοντελοποίηση ενός ολόκληρου φ/β πάρκου.
5. Αξιοποίηση δεδομένων από πυρανόμετρα (Μέτρηση Irradiance) και άλλους μετρητές για μέτρηση τάσης, έντασης ρεύματος ανά πάνελ , σε πραγματικό χρόνο για πιο ακριβή αποτελέσματα.
6. Αλλαγή του φορτίου (Load) που χρησιμοποιείται, σε φορτίο μεγαλύτερης πολυπλοκότητας για περαιτέρω διερεύνηση της απόκρισης του P&O αλγορίθμου.
7. Χρήση διαφορετικών αλγορίθμων ιχνηλάτησης του σημείου μέγιστης ισχύος (MPP) , όπως πχ χρήση της μεθόδου Incremental Conductance (Στοιχειώδης Αγωγιμότητα) κτλ.
8. Προσθήκη Solar tracker , ώστε να επιτευχθεί η απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας όσον το δυνατόν σε μεγαλύτερο βαθμό.

## Βιβλιογραφία

- [1]Ait Cheikh, M.S., Larbes, C., Tchoketch Kebir G.F. and Zerguerras, A. 2007. Maximum power point tracking using a fuzzy logic control scheme *Revue des Energies Renouvelables*, 10 (3), 387-395.
- [2]Δέρβος, Κ.Θ. 2007. Εισαγωγή στα ημιαγώγιμα υλικά και φωτοβολταϊκές διατάξεις. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών.
- [3]Esram, T. and Chapman. P.L. 2007. Comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques, *IEEE Trans. Energy Conversion* 22 (2), 439.
- [4]Faranda, R., Leva, S. 2008. Energy comparison of MPPT techniques for PV Systems. *WSEAS TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS*, 3(6), 446-455
- [5]International Solar Energy, German section. 2008. Planning and Installing Photovoltaic Systems: A Guide for Installers, Architects and Engineers. Earthscan Publications Ltd, ISBN-10: 1844074420
- [6]Μάνιας, Σ. 2007. Ηλεκτρονικά Ισχύος. Εκδόσεις Συμείων. [7]Οι Α.. 2005. Design and simulation of photovoltaic water pumping system, Thesis, Faculty of California Polytechnic State University Dan Luis Obispo.
- [8]Pires, V.F.; Silva, J.F.A. 2002. Teaching nonlinear modeling, simulation, and control of electronic power converters using MATLAB/SIMULINK. *IEEE Transactions on Education*, 45 (3), 253 – 261.
- [9]Rashid, M. 2007. *Power Electronics Handbook* (Academic Press Series in Engineering). Elsevier
- [10]Schelle, D. and Castorena, J. 2006. *Buck-Converter Design Demystified*. Power Electronic Technology.
- [11]Skvarenina, T. L. 2002. *The Power Electronics Handbook* (Industrial Electronics). CRC Press LLC.
- [12]Tsai, H.L. 2010. Insolation-oriented model of photovoltaic module using Matlab/Simulink, *Solar Energy*, 4 (7), 1318-1326, ISSN 0038-092X, DOI: 10.1016/j.solener.2010.04.012.
- [13]Development of Generalized Photovoltaic Model Using MATLAB/SIMULINK, Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science 2008 WCECS 2008, October 22 - 24, 2008, San Francisco, USA



- [14]Design and Modeling of Standalone Solar Photovoltaic Charging System  
International Journal of Computer Applications (0975 – 8887) Volume 18– No.2,  
March 2011
- [15]A High Efficient Micro-controlled Buck Converter with Maximum Power Point  
Tracking for Photovoltaic Systems- International Conference on Renewable Energies  
and Power Quality (ICREPQ'09)
- [16]MSX-60 and MSX-64 Photovoltaic Modules datasheet
- [17]<http://artemis.cslab.ntua.gr/>
- [18][www.mathworks.com](http://www.mathworks.com)
- [19][http://en.wikipedia.org/wiki/A.\\_E.\\_Becquerel](http://en.wikipedia.org/wiki/A._E._Becquerel)
- [20]<http://helioenergy.gr/en/15/>
- [21]<http://inventors.about.com/od/timelines/a/Photovoltaics.htm>
- [22][http://en.wikipedia.org/wiki/Solar\\_cell#cite\\_note-3](http://en.wikipedia.org/wiki/Solar_cell#cite_note-3)
- [23][http://www.cres.gr/kape/energeia\\_politis/energeia\\_politis\\_photovol.htm](http://www.cres.gr/kape/energeia_politis/energeia_politis_photovol.htm)
- [24][www.cie.org.cy](http://www.cie.org.cy)
- [25]<http://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A6%CF%89%CF%84%CE%BF%CE%B2%CE%BF%CE%BB%CF%84%CE%B1%CF%8A%CE%BA%CE%AC>
- [26][http://www.solarwind.gr/?p=p\\_72](http://www.solarwind.gr/?p=p_72)
- [27][http://www.1-solar.gr/product\\_1.htm](http://www.1-solar.gr/product_1.htm)
- [28]<http://inhabitat.com/british-team-develop-thin-solar-photovoltaics/>
- [29]<http://assets.inhabitat.com/wp-content/blogs.dir/1/files/2012/05/nevada-hybrid-solar-geothermal-power-plant-stillwatera-537x357.jpg>
- [30][http://el.wikipedia.org/wiki/%CE%95%CE%BD%CE%AD%CF%81%CE%B3%CE%B5%CE%B9%CE%B1\\_%CE%B1%CE%BA%CF%84%CE%B9%CE%BD%CE%BF%CE%B2%CE%BF%CE%BB%CE%AF%CE%B1%CF%82](http://el.wikipedia.org/wiki/%CE%95%CE%BD%CE%AD%CF%81%CE%B3%CE%B5%CE%B9%CE%B1_%CE%B1%CE%BA%CF%84%CE%B9%CE%BD%CE%BF%CE%B2%CE%BF%CE%BB%CE%AF%CE%B1%CF%82)
- [31][http://el.wikipedia.org/wiki/%CE%97%CE%BB%CE%B9%CE%B1%CE%BA%CE%AE\\_%CE%B5%CE%BD%CE%AD%CF%81%CE%B3%CE%B5%CE%B9%CE%B1](http://el.wikipedia.org/wiki/%CE%97%CE%BB%CE%B9%CE%B1%CE%BA%CE%AE_%CE%B5%CE%BD%CE%AD%CF%81%CE%B3%CE%B5%CE%B9%CE%B1)
- [32]<http://el.wikipedia.org/wiki/%CE%89%CE%BB%CE%B9%CE%BF%CF%82>
- [33]<http://www.enerdomi.gr/fotovoltaika.php>

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

# MSX-60 and MSX-64 Photovoltaic Modules



The MSX-64 and -60 are among the most powerful of Solarex's Megamodule™ series, a product line which is the culmination of nearly three decades of extensive research in polycrystalline silicon photovoltaics. With over 3 amperes of current at peak power, these modules offer the most cost-effective package in the industry, and charge batteries efficiently in virtually any climate.

These modules may be used in single-module arrays or deployed in multiple-module arrays wired in series/parallel combinations as required to meet current and voltage requirements. They are engineered under Solarex's Integratesystem™ system integration concept, which ensures full compatibility with other Solarex subsystems and components (support hardware, regulators, etc.) and easy system assembly. As single-module arrays, they may be mounted on a variety of surfaces using optional kits or by means of user-fabricated support hardware. Solarex also offers hardware for supporting multiple-module arrays.

These modules are well-suited for virtually all applications where photovoltaics are a feasible energy source, including telecommunications systems, pumping and irrigation, cathodic protection, remote villages and clinics, and aids to navigation.

### Individually Tested, Labeled and Warranted

As part of the final inspection procedure, every MSX module is tested in a solar simulator and labeled with its actual output—voltage, current, and power at maximum power point ( $P_{max}$ )—at Standard Test Conditions and standard Operating Conditions. Furthermore, the MSX-64 and -60 are covered by our industry-leading limited warranty, which guarantees:

- that no module will generate less than its guaranteed minimum  $P_{max}$  when purchased;
- at least 80% of the guaranteed minimum  $P_{max}$  for twenty years.

Contact Solarex's Marketing Department for full terms and limitations of this unparalleled warranty.

### Reliable and Versatile

The Megamodule series has proved its reliability at thousands of installations in every climate on Earth. Among the features that contribute to its versatility:

#### Dual Voltage Capability

These modules consist of 36 polycrystalline silicon solar cells electrically configured as two series strings of 18 cells each. The strings terminate in the junction box on the module back. Shipped in 12V configuration, modules may easily be switched to 6V configuration in the field by moving leads in the junction box. This design also allows instal-

lation of bypass diodes on 18-cell strings, which can improve reliability and performance in systems with nominal voltage 24V and above.

### High-Capacity Multifunction Junction Box

The size of the junction box (25 cubic inches, 411cc) and its six-terminal connection block allow most system array connections to be made right in the J-box. The box also can accommodate bypass or blocking diodes or a small regulator, which can save the expense and labor of additional boxes. The box is raintight (IP54 rated) and accepts 1/2" nominal or PG13.5 conduit or cable fittings. The standard terminals accept wire as large as AWG #10 (6mm<sup>2</sup>), an optional terminal block accepts wire up to AWG #4 (25mm<sup>2</sup>).

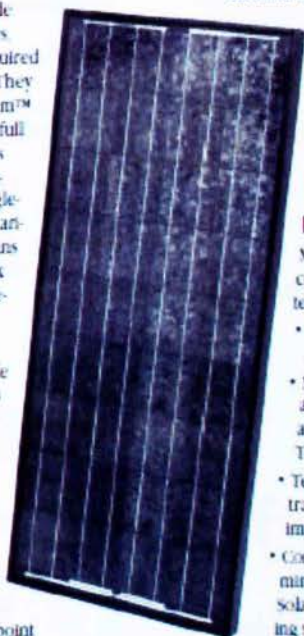
### Proven Materials and Construction

Megamodule materials reflect Solarex's quarter-century of experience with solar modules and systems installed in virtually every climate on Earth.

- Polycrystalline silicon solar cells: efficient, attractive, stable.
- Modules are rugged and weatherproof; cell strings are laminated between sheets of ethylene vinyl acetate (EVA) and tempered glass with a durable Tedlar backsheet.
- Tempered glass superstrate is highly light-transmissive (low iron content), stable, and impact-resistant.
- Corrosion-resistant, bronze-anodized extruded aluminum frame is strong, attractive, compatible with Solarex mounting hardware and most other mounting structures.

### Options

- Blocking and bypass diodes
- Solarstate™ charge regulator
- Protective aluminum backplate



*More than 20 years ago, Solarex made the first polycrystalline silicon solar cell, advancing photovoltaics beyond the first-generation monocrystalline technology developed for*



*electronics. Developed specifically for photovoltaics, polycrystalline silicon is used in Solarex's Mega™ series to provide a wide range of attractive, efficient modules. They require substantially less energy to manufacture and generate substantially more energy per rated watt than other crystalline silicon modules.*

**Safety Approved**

MSX-60 and -64 modules are listed by Underwriter's Laboratories for electrical and fire safety (Class C fire rating), certified by TÜV Rheinland as Class II equipment, and approved by Factory Mutual Research for application in NEC Class I, Division 2, Group C & D hazardous locations.



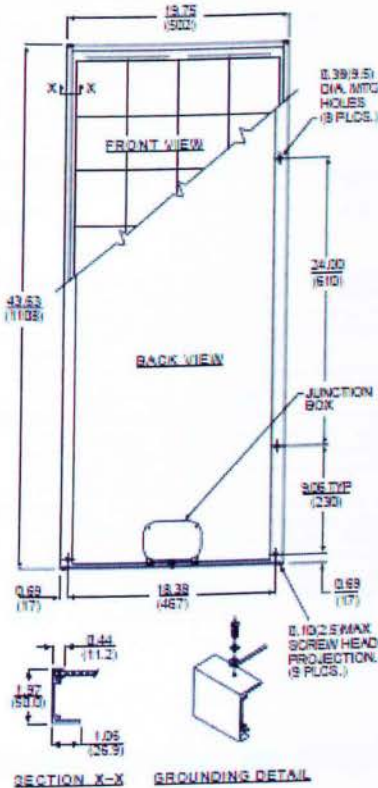
**Quality Certified**

These modules are manufactured in our ISO 9001-certified factories to demanding specifications, and comply with IEC 1215, IEEE 1262 and CEC 503 test requirements, including:

- repetitive cycling between -40°C and 85°C at 85% relative humidity;
- simulated impact of one-inch (25mm) ball at terminal velocity;
- 2700 VDC frame/cell string isolation test;
- a "damp heat" test, consisting of 1000 hours of exposure to 85°C and 85% relative humidity;
- a "hot-spot" test, which determines a module's ability to tolerate localized shadowing (which can cause reverse-biased operation and localized heating);
- simulated wind loading of 125 mph (200 kph).

**Mechanical Characteristics**

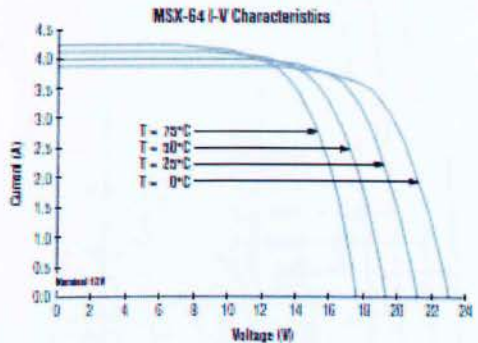
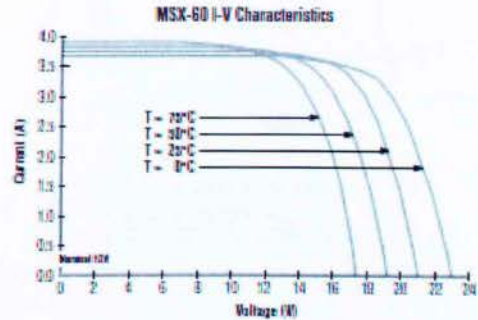
**Weight:** 15.9 pounds (7.2 kg)  
**Dimensions:** Dimensions in brackets are in millimeters  
 Unbracketed dimensions are in inches  
 Overall tolerances ±.18" (3mm)



**Typical Electrical Characteristics<sup>1</sup>**

	<b>MSX-64</b>	<b>MSX-60</b>
Maximum power (P <sub>max</sub> )	64W	60W
Voltage @ P <sub>max</sub> (V <sub>mp</sub> )	17.5V	17.1V
Current @ P <sub>max</sub> (I <sub>mp</sub> )	3.66A	3.5A
Guaranteed minimum P <sub>max</sub>	62W	58W
Short-circuit current (I <sub>sc</sub> )	4.0A	3.8A
Open-circuit voltage (V <sub>oc</sub> )	21.3V	21.1V
Temperature coefficient of open-circuit voltage	..... -180±10(mV/°C) .....	
Temperature coefficient of short-circuit current	..... (0.065±0.015)%/°C .....	
Temperature coefficient of power	..... -0.5±0.05)%/°C .....	
NOCT <sup>2</sup>	..... 47±2°C .....	

**NOTES:**  
 (1) These modules are tested, labeled and shipped in 12V configuration. These data represent the performance of typical 12V modules as measured at their output terminals, and do not include the effect of such additional equipment as diodes and cabling. The data are based on measurements made in a solar simulator at Standard Test Conditions (STC), which are:  
 • Illumination of 1 kW/m<sup>2</sup> (1 sun) at spectral distribution of AM 1.5;  
 • cell temperature of 25°C or as otherwise specified (on curves).  
 Operating characteristics in sunlight may differ slightly. To determine the characteristics of modules in 6V configuration, divide the 12V voltage characteristics by 2 and multiply current characteristics by 2. Power values are unchanged.  
 (2) Under most climatic conditions, the cells in a module operate hotter than the ambient temperature. NOCT (Nominal Operating Cell Temperature) is an indicator of this temperature differential, and is the cell temperature under Standard Operating Conditions: ambient temperature of 20°C, solar irradiation of 0.8 kW/m<sup>2</sup>, and wind speed of 1 m/s.



## VARIABLES AFFECTING PERFORMANCE

The performance of typical MEGA SX-64 and -60 modules is described by the I-V curves and electrical characteristics table on the next page. Each module's actual, tested output characteristics are printed on its label.

The current and power output of photovoltaic modules are approximately proportional to illumination intensity. At a given intensity, a module's output current and operating voltage are determined by the characteristics of the load. If that load is a battery, the battery's internal impedance will dictate the module's operating voltage. An I-V curve is simply all of a module's possible operating points (voltage/current combinations) at a given cell temperature and light intensity. Increases in cell temperature increase current but decrease voltage.

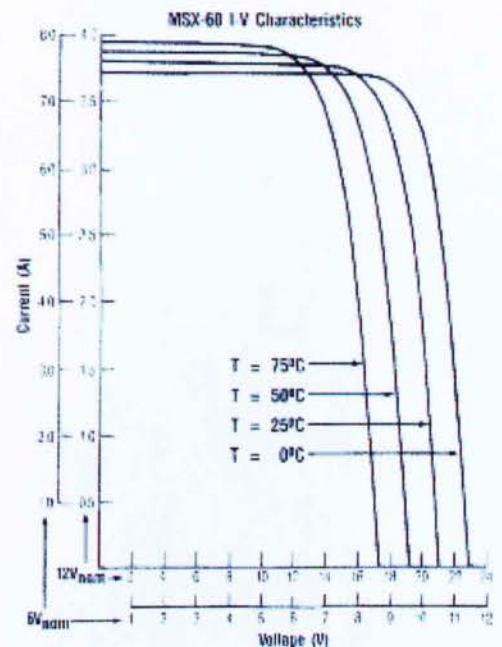
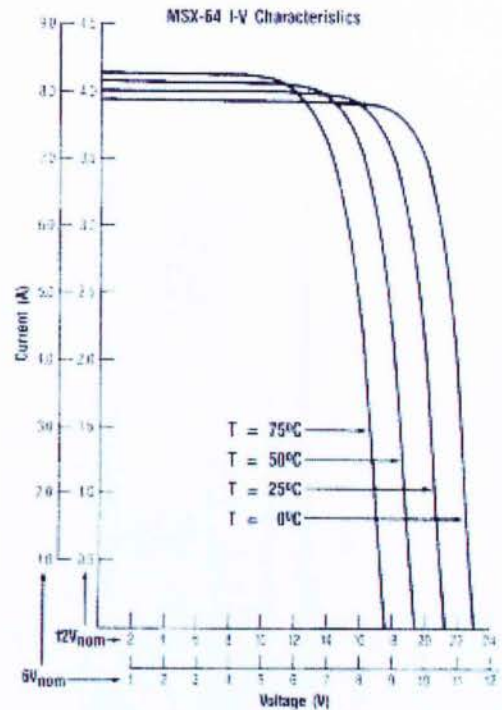
## TYPICAL ELECTRICAL CHARACTERISTICS<sup>(1)</sup>

	12 VOLT CONFIGURATION <sup>(2)</sup>	
	MSX-64	MSX-60
Typical peak power (P <sub>mp</sub> )	64W	60W
Voltage @ peak power (V <sub>mp</sub> )	17.5V	17.1V
Current @ peak power (I <sub>mp</sub> )	3.66A	3.5A
Guaranteed minimum peak power	62W	58W
Short-circuit current (I <sub>sc</sub> )	4.0A	3.8A
Open-circuit voltage (V <sub>oc</sub> )	21.3V	21.1V
Temperature coefficient of open-circuit voltage	.....-(80±10)mV/°C.....	
Temperature coefficient of short-circuit current	.....(0.065±0.015)%/°C.....	
Approximate effect of temperature on power	.....-(0.5±0.05)%/°C.....	
NOCT <sup>(3)</sup>	.....49°C.....	

### Notes:

- (1) These data represent the performance of typical modules as measured at their output terminals, and do not include the effect of such additional equipment as diodes and cabling. The data are based on measurements made at Standard Test Conditions (STC) which are:
  - Illumination of 1 kW/m<sup>2</sup> (1 sun) at spectral distribution of AM 1.5
  - Cell temperature of 25°C or as otherwise specified (on curves).
- (2) Electrical characteristics of modules wired in the nominal 6V configuration may be found by using the 6V scales on the I-V curves. For more exact values, divide the 12V voltage characteristics in the table by 2 and multiply the 12V current characteristics by 2. Power values are unchanged.
- (3) Under nearly all climatic conditions, the solar cells in an operating module are hotter than the ambient temperature, a fact which must be considered when reading module data. NOCT (Nominal Operating Cell Temperature) is an indication of this temperature rise, and is the cell temperature under Standard Operating Conditions: ambient temperature of 20°C, solar irradiation of 0.8 kW/m<sup>2</sup> and average wind speed of 1 m/s.

## I-V CHARACTERISTICS



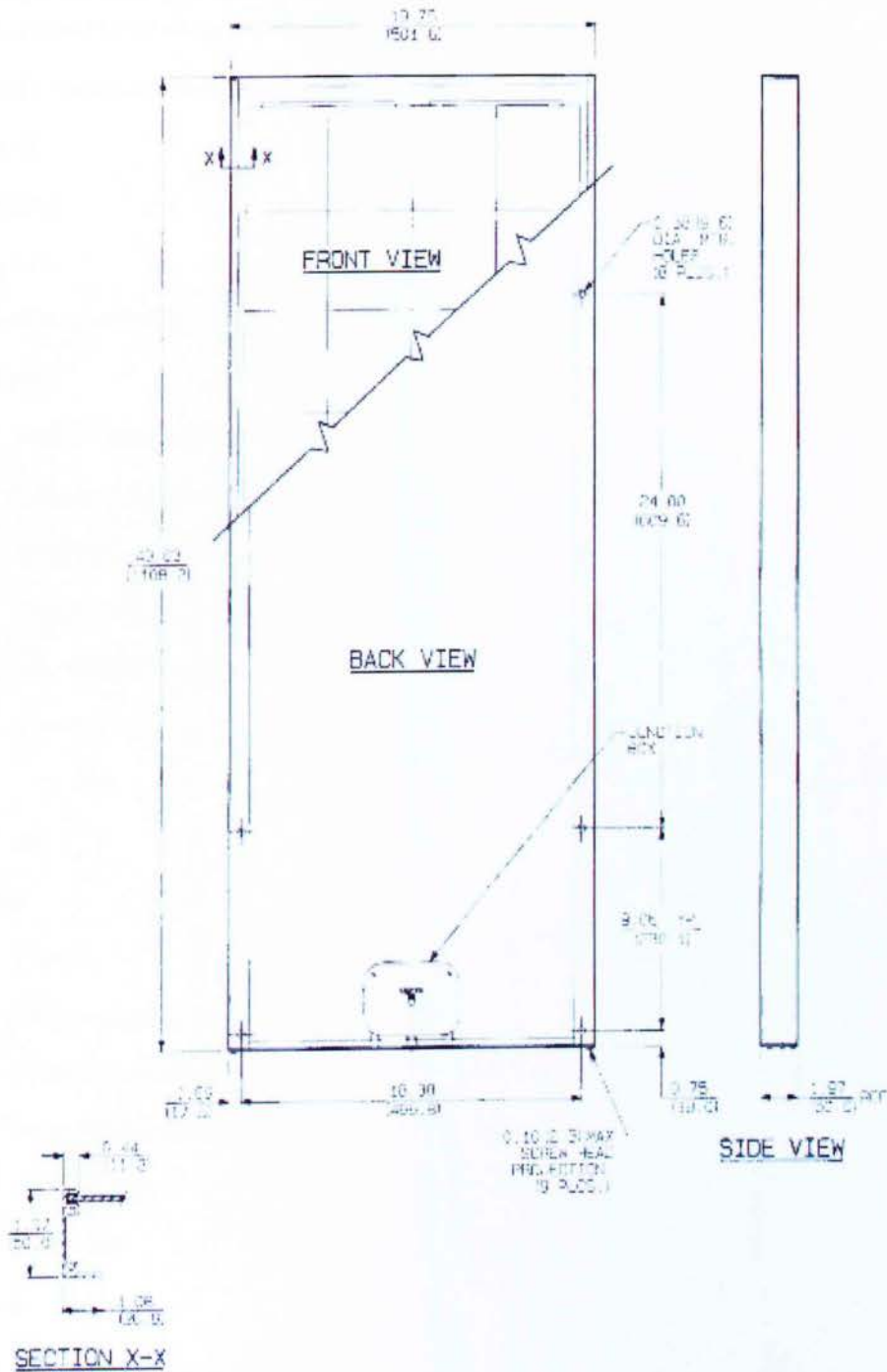
Προσομοίωση ολοκληρωμένου φωτοβολταϊκού συστήματος με έλεγχο απόδοσης σε πραγματικό χρόνο.

### MECHANICAL CHARACTERISTICS

MEGA SX-64 and -60 are mechanically identical, differing only in electrical output.

Weight: 15.9 pounds (7.2 kg)

Dimensions: Dimensions in brackets are in millimeters  
Unbracketed dimensions are in inches



## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

Με τον παρακάτω κώδικα εξάγονται οι Εικόνες 4.6 και 4.8 ( δηλαδή οι αποκρίσεις του φ/β πάνελ για διαφορετικές θερμοκρασίες αλλά και διαφορετικές τιμές έντασης ηλιακής ακτινοβολίας).

```
model = 'Destination Folder\filename.m'
```

```
Tfix=0;
```

```
Irr=1000;
```

```
for y=1:8
```

```
    simOut=sim(model);
```

```
    if y<=4
```

```
        Iall{y}=I.signals.values;
```

```
        Vall{y}=V.signals.values;
```

```
        Pall{y}=P.signals.values;
```

```
        Tall{y}=Tfix;
```

```
        Tfix=Tfix+25;
```

```
    if y==4
```

```
        Irr=600;
```

```
    end
```

```
else
```

```
    Tfix=25;
```

```
    Iall{y}=I.signals.values;
```

```
    Vall{y}=V.signals.values;
```

```
    Pall{y}=P.signals.values;
```

```
    Irrall{y-4}=Irr;
```

```
    Irr=Irr+200;
```

```
end
```

```
end
```

```
figure('name','V-I');
```

```
xlabel('V (V)')
```

```
ylabel('I (A)')
```

```
grid on  
hold on  
plot(Vall{1},Iall{1},'Color','k');  
plot(Vall{2},Iall{2},'Color','r');  
plot(Vall{3},Iall{3},'Color','g');  
plot(Vall{4},Iall{4},'Color','b');  
hold off  
legend(strcat("T= ",num2str(Tall{1})),strcat("T= ",num2str(Tall{2})),strcat("T=  
' ,num2str(Tall{3})),strcat("T= ",num2str(Tall{4})));
```

```
figure('name','P-V');  
xlabel('V (V)')  
ylabel('P (W)')  
grid on  
hold on  
set(0,'DefaultAxesColorOrder',[1,0.4,0.6])  
plot(Vall{1},Pall{1},'Color','k');  
plot(Vall{2},Pall{2},'Color','r');  
plot(Vall{3},Pall{3},'Color','g');  
plot(Vall{4},Pall{4},'Color','b');  
hold off  
legend(strcat("T= ",num2str(Tall{1})),strcat("T= ",num2str(Tall{2})),strcat("T=  
' ,num2str(Tall{3})),strcat("T= ",num2str(Tall{4})));
```

```
figure('name','V-I');  
xlabel('V (V)')  
ylabel('I (A)')  
grid on  
hold on  
plot(Vall{5},Iall{5},'Color','k');  
plot(Vall{6},Iall{6},'Color','r');
```