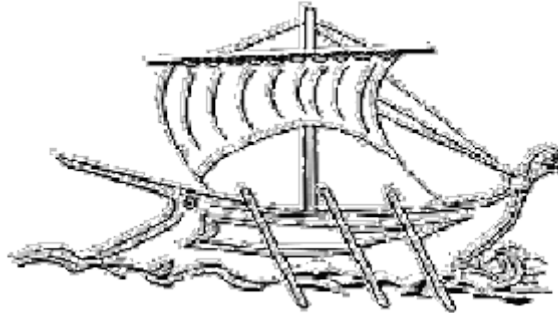


ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΠΕΙΡΑΙΑ



Τ.Ε.Ι ΠΕΙΡΑΙΑ

**ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΦΟΡΤΙΣΗ 12V ΜΠΑΤΑΡΙΑΣ ΜΕΣΩ
ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΟΥ ΦΟΡΤΙΣΤΗ**

ΚΑΤΣΙΑΝΟΣ Α. ΔΗΜΗΤΡΗΣ

ΚΑΡΠΟΥΖΟΣ ΑΓΓΕΛΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ

Δρ. ΑΛΑΤΣΑΘΙΑΝΟΣ ΣΤΑΜΑΤΙΟΣ

ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Τ.Ε.Ι ΠΕΙΡΑΙΑ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΠΕΙΡΑΙΑΣ 2016

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ
Π. Ράλλη & Θηβών 250, 12244 Αιγάλεω, Αθήνα – Ελλάδα

Ευχαριστίες

Θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τον Δρ. Σταμάτιο Αλατσαθιανό, καθηγητή του Ανώτατου Τεχνολογικού Ιδρύματος Πειραιά, του Τμήματος Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστικών Συστημάτων και επιβλέποντα καθηγητή αυτής της διπλωματικής εργασίας, που μου έδωσε την ευκαιρία να ασχοληθούμε με ένα πολύ ενδιαφέρον θέμα, όσο και για την εμπιστοσύνη που μας έδειξε όλων αυτών τον καιρό.

Επίσης, θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τις οικογένειές μας οι οποίες μας στήριξαν ηθικά και οικονομικά στις σπουδές μας όλα αυτά τα χρόνια.

Περιεχόμενα

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	2
ΠΡΟΛΟΓΟΣ	6
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 – ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ	8
1.1 ΙΣΤΟΡΙΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ.....	8
1.2 ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ (ΑΠΕ)	10
1.3 ΗΛΙΑΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ.....	12
1.4 ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ	14
1.5 ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ	15
1.6 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ Φ/Β.....	17
1.7 ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ.	20
1.8 ΕΙΔΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΠΑΝΕΛ	24
1.8.1 Μονοκρυσταλλικού Πυριτίου πλαίσια (στοιχεία)	24
1.8.2 Πολυκρυσταλλικού Πυριτίου πλαίσια (στοιχεία).....	25
1.8.3 Φωτοβολταϊκά στοιχεία ταινίας πυριτίου.....	25
1.8.4 Φωτοβολταϊκά υλικά λεπτών επιστρώσεων, thin film	25
1.8.5 Άμορφου Πυριτίου πλαίσια (στοιχεία)	25
1.8.6 Δισεληνοϊνδιούχος χαλκός (CuInSe ₂ ή CIS, με προσθήκη γαλλίου CIGS)	25
1.8.7 Τελουριούχο Κάδμιο (CdTe)	26
1.8.8 Αρσενικούχο Γάλλιο (GaAs)	26
1.8.9 Υβριδικά Φωτοβολταϊκά Στοιχεία.....	26
1.8.10 Άλλες τεχνολογίες	27
1.9 ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΕΠΙΔΟΣΗΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΠΑΝΕΛ	27
1.9.1 Η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας.....	27
1.9.2 Η θερμοκρασία λειτουργίας τους.....	28
1.9.3 Το σημείο λειτουργίας στην καμπύλη I-V	29
1.9.4 Η γωνία πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας	31
1.10 ΧΡΗΣΕΙΣ ΤΩΝ Φ/Β	31
1.10.1 Συστήματα με μπαταρίες.....	32
1.11 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ - ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ.....	33
1.11.1 Πλεονεκτήματα.....	33
1.11.2 Μειονεκτήματα	35
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΘΕΩΡΙΑ ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ MOSFET.....	37
2.1 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ MOSFET.....	37
2.1.1 Εισαγωγή	37
2.1.2 MOSFET τύπου αραιώσης.....	37
2.1.3 MOSFET τύπου πυκνώσης.....	39
2.2 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ	42
2.2.1 Γενικά για το τρανζίστορ.....	42
2.2.2 Το διπολικό τρανζίστορ επαφής BJT	43
2.2.3 Κατασκευή των τρανζίστορ	43
2.3 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ MOSFET	45
2.3.1 Κατασκευή MOSFET πυκνώσης και αραιώσης.....	46
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 - ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΜΕΓΙΣΤΟΥ ΣΗΜΕΙΟΥ ΙΣΧΥΟΣ MPP ΚΑΙ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΙΣ	49

3.1	ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΤΟΥ ΜΕΓΙΣΤΟΥ ΣΗΜΕΙΟΥ ΙΣΧΥΟΣ MPP	49
3.2	ΓΕΝΙΚΑ ΓΙΑ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΑΝΙΧΝΕΥΤΩΝ ΜΕΓΙΣΤΟΥ ΣΗΜΕΙΟΥ ΙΣΧΥΟΣ	51
3.3	ΔΙΑΚΟΠΤΙΚΟΙ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΙΣ DC/DC	54
3.4	ΈΛΕΓΧΟΣ ΤΩΝ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΩΝ DC/DC	55
3.4.1	MPPT με DC-DC Μετατροπείς.....	56
3.4.1.1	DC-DC μετατροπέας υποβιβασμού τάσης.....	58
3.4.1.2	DC - DC μετατροπέας ανύψωσης τάσης	62
3.4.2	Έλεγχος MPPT με τη χρήση DC - DC μετατροπέων	66
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 – ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ ΜΡΡΤ		69
4.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	69
4.2	Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΑΝΑΒΑΣΗΣ ΛΟΦΟΥ/ ΔΙΑΤΑΡΑΞΗΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗΣ (HILL CLIMBING /PERTURB & OBSERVE - P&O).....	71
4.3	ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΑΥΞΗΤΙΚΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ (INCREAMENTAL CONDUCTANCE -INC)	77
4.4	ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΠΑΡΑΣΙΤΙΚΗΣ ΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑΣ (PARASITIC CAPACITANCE - PC).....	80
4.5	ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΣΤΑΘΕΡΗΣ ΤΑΣΗΣ (CONSTANT VOLTAGE - CV)	84
4.6	ΜΕΘΟΔΟΣ ΔΙΑΦΟΡΟΠΟΙΗΣΗΣ (DIFFERENTIATION METHOD).....	87
4.7	ΜΕΘΟΔΟΣ ΜΟΝΟ ΡΕΥΜΑΤΟΣ (THE ONLY CURRENT METHOD)	87
4.8	ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΝΑΓΚΑΣΜΕΝΗΣ ΤΑΛΑΝΤΩΣΗΣ.....	91
4.9	Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗΣ ΚΑΜΠΥΛΩΝ (CURVE FITTING).....	91
4.10	Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΟΥ ΠΙΝΑΚΑ ΑΝΑΖΗΤΗΣΗΣ (LOOK – UP TABLE).....	92
4.11	Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΑΝΟΙΧΤΟΥ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΗΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ (OPEN-VOLTAGE PV GENERATOR)	93
4.12	Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΒΡΑΧΥΚΥΚΛΩΣΗΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΗΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ (SHORT – CIRCUIT PHOTONOLTAIC GENERATOR METHOD)	94
4.13	Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΑΝΟΙΧΤΟΥ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟΥ ΚΥΤΤΑΡΟΥ ΩΣ ΜΕΣΟΥ ΔΟΚΙΜΗΣ (OPEN-CIRCUIT VOLTAGE PHOTONOLTAIC TEST CELL METHOD)	95
4.14	Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΣΜΗΝΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ(PARTICLE SWARM OPTIMIZATION –PSO).	95
4.15	Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΑΣΑΦΟΥΣ ΛΟΓΙΚΗΣ (FUZZY LOGIC CONTROL)	96
4.16	Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΝΕΥΡΩΝΙΚΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ (NEURAL NETWORK).....	99
4.17	Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΣΥΣΧΕΤΙΣΜΟΥ ΚΥΜΑΤΩΣΗΣ (RIPPLE CORRELATION CONTROL)	100
4.18	Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΗΣ ΜΕΓΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΗΣ ΤΑΣΗΣ Η ΤΟΥ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΤΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ (LOAD CURRENT OR LOAD VOLTAGE MAXIMIZATION)	102
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 – ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΩΝ		104
5.1	ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ.....	104
5.1.1	Εισαγωγή	104
5.1.2	Η μπαταρία της Βαγδάτης ή μπαταρία της Παρθίας (Η πρώτη μορφή συσσωρευτών ενέργειας).	104
5.1.3	Αρχές 1800: Η Επινόηση και η εξέλιξη της μπαταρίας	105
5.1.4	Είδη και Χαρακτηριστικά μεγέθη Συσσωρευτών.....	112
5.1.4.1	Οι Μπαταρίες Ιόντων Λιθίου	112
5.1.4.2	Οι Αλκαλικές Μπαταρίες.....	113
5.1.4.3	Οι Μπαταρίες Μολύβδου	113
5.1.4.4	Οι Μπαταρίες Fuel Cell.....	116
5.1.4.5	Οι Μπαταρίες Καδμίου - Νικελίου NiCad	117
5.1.4.6	Οι Μπαταρίες NiMH	117
5.2	ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΗ (ΜΠΑΤΑΡΙΑΣ).....	118
5.2.1	Τερματισμός φόρτισης.....	119

5.2.2 Ασφαλής φόρτιση	119
5.2.3 Χρόνος φόρτισης.....	119
5.2.4 Μέθοδοι φόρτισης.....	120
5.2.5 Ρυθμός φόρτισης.....	121
5.2.6 Τύποι φορτιστών	121
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο ΜΕΛΕΤΗ – ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ 12VDC ΦΟΡΤΙΣΤΗ ΜΠΑΤΑΡΙΑΣ	
ΜΕΣΩ Φ/Β	123
6.1 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΩΝ ΤΜΗΜΑΤΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ	123
6.2 ΕΠΕΞΗΓΗΣΗ ΛΟΓΙΚΗΣ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ ΤΟΥ ΜΙΚΡΟΕΛΕΓΚΤΗ ΜΕ ΜΡΡΤ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟ (ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ)	127
6.3 ΣΥΓΓΡΑΦΗ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ	128
6.4 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΤΥΠΩΜΕΝΟΥ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ	131
6.4.1 Κύκλωμα τοποθέτησης των εξαρτημάτων	131
6.4.2 Τυπωμένο κύκλωμα	132
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 - ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	133
7.1 ΔΗΜΟΣΙΕΥΜΕΝΑ PAPERS	133
7.2 ΒΙΒΛΙΑ.....	134
7.3 LINKS.....	134

Πρόλογος

Ζούμε σε μια εποχή, που η ενέργεια παίζει σημαντικό ρόλο στην καθημερινή μας ζωή. Όλο και περισσότερο η ζήτηση φθηνής, καθαρής αλλά και ταυτόχρονα καλής ποιότητας ενέργειας αυξάνεται. Γι' αυτούς τους λόγους, η επιστήμη τις τελευταίες δεκαετίες έχει στραφεί σε νέες μεθόδους 'παρασκευής' ενέργειας. Μια από αυτές είναι και η Φωτοβολταϊκή.

Η παρούσα διπλωματική έχει ως σκοπό να διερευνήσει τους τρόπους με τους οποίους θα μπορέσουμε να λειτουργήσουμε τα φωτοβολταϊκά συστήματα στο βέλτιστο βαθμό τους, στο σημείο μέγιστης ισχύος, όπως και επίσης τον τρόπο κατά τον οποίο θα καταφέρουμε να έχουμε τη μέγιστη απόδοση. Επίσης, εξετάζουμε και κατασκευάζουμε ένα κύκλωμα φόρτισης 12v μπαταρίας, το οποίο μπορεί να τροφοδοτηθεί από φωτοβολταϊκό πάνελ 21 – 24v ισχύς 20 W -140 W. Το κύκλωμα αυτό υλοποιείται με τη βοήθεια ενός μικροελεγκτή (pic16f88) και ενός Pmosfet με σκοπό την υψηλότερη απόδοση του συστήματος. Αυτό επιτυγχάνεται, δημιουργώντας τους κατάλληλους παλμούς pwm μέσω του μικροελεγκτή, και οδηγώντας το pmosfet. Με αυτόν τον τρόπο, εξισορροπήσουμε την ισχύ του συστήματος, καταφέροντας να έχουμε λιγότερες απώλειες στο σύστημά μας και έτσι να χρησιμοποιούμε όσο το δυνατόν περισσότερη από την ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται.

Κεφάλαιο 1 – Φωτοβολταϊκή τεχνολογία

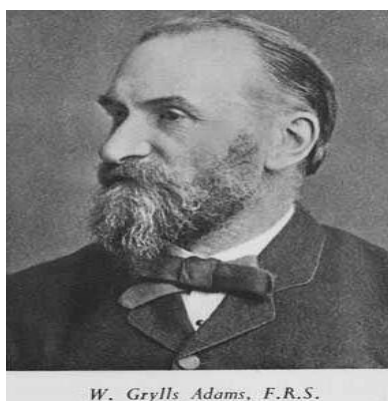
1.1 Ιστορία Φωτοβολταϊκής Τεχνολογίας

Το φωτοβολταϊκό (Φ/Β) φαινόμενο αφορά τη μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική. 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. Το ηλεκτρικό πεδίο που προϋπάρχει στο Φ/Β στοιχείο οδηγεί το ρεύμα στο φορτίο.



Edmond Becquerel (1820 – 1891)

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.



Adams (1836 - 1915)

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 σελήνιο (Se) όταν αυτό ήταν εκτεθειμένο στο φως.



Czochralski (1885 - 1953)

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. Ο δρόμος πλέον για τις πρώτες πρακτικές εφαρμογές είχε ανοίξει. Το πρώτο ηλιακό κελί ήταν γεγονός στα εργαστήρια της Bell το 1954 από τους **Chapin, Fuller και Pearson**. Η απόδοσή του ήταν 6% εκμετάλλευσης της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας.

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. Ο δρόμος πλέον για τις πρώτες πρακτικές εφαρμογές είχε ανοίξει. Το πρώτο ηλιακό κελί ήταν γεγονός στα εργαστήρια της Bell το 1954 από τους **Chapin, Fuller και Pearson**. Η απόδοση του ήταν 6% εκμετάλλευση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας.

Τέσσερα χρόνια μετά, το 1958 η τεχνολογία των φωτοβολταϊκών συστημάτων προσαρτάται στον χώρο των διαστημικών εφαρμογών όταν τοποθετήθηκε ένα αυτόνομο φωτοβολταϊκό σύστημα στον δορυφόρο Vanguard. Το σύστημα αυτό λειτούργησε επιτυχώς για 8 ολόκληρα χρόνια και ήταν ένα από τα πρώτα φωτοβολταϊκά συστήματα. 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 Φ/Β 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 Φ/Β συνεχώς βελτιωνόταν.



Δορυφόρος Vanguard

Στην πορεία του χρόνου όλο και αυξάνεται ο βαθμός απόδοσης: η αύξηση της απόδοσης, έστω και κατά μια ποσοστιαία μονάδα, θεωρείται επίτευγμα στην τεχνολογία των φωτοβολταϊκών. Στην σημερινή εποχή ο τυπικός βαθμός απόδοσης ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου βρίσκεται στο 13 – 19%, ο οποίος, συγκρινόμενος με την απόδοση άλλου συστήματος (συμβατικού, αιολικού, υδροηλεκτρικού κλπ.), παραμένει ακόμη αρκετά χαμηλός.

Με την προοδευτική αύξηση όμως του βαθμού απόδοσης, δημιουργήθηκαν ειδικές συσκευές – οι αναστροφείς (inverters) - που σκοπό έχουν να μετατρέψουν την έξοδο συνεχούς τάσης της Φ/Β συστοιχίας σε εναλλασσόμενη τάση. Με τον τρόπο αυτό, το Φ/Β σύστημα είναι σε θέση να τροφοδοτήσει μια σύγχρονη εγκατάσταση (κατοικία, θερμοκήπιο, μονάδα παραγωγής κλπ.) που χρησιμοποιεί κατά κανόνα συσκευές εναλλασσόμενου ρεύματος (AC).

1.2 Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ)

Οι **ανανεώσιμες μορφές ενέργειας (ΑΠΕ)** ή *ήπιες μορφές ενέργειας*, είναι μορφές εκμεταλλεύσιμης ενέργειας που προέρχονται από διάφορες φυσικές διαδικασίες, όπως ο άνεμος, η γεωθερμία, η κυκλοφορία του νερού και άλλες.

Ο όρος «ήπιες» αναφέρεται σε δυο βασικά χαρακτηριστικά τους. Καταρχάς, για την εκμετάλλευσή τους δεν απαιτείται κάποια ενεργητική παρέμβαση, όπως εξόρυξη, άντληση ή καύση, όπως με τις μέχρι τώρα χρησιμοποιούμενες πηγές ενέργειας, αλλά απλώς η εκμετάλλευση της ήδη υπάρχουσας ροής ενέργειας στη φύση. Δεύτερον, πρόκειται για «καθαρές» μορφές ενέργειας, πολύ «φιλικές» στο περιβάλλον, που δεν αποδεσμεύουν υδρογονάνθρακες, διοξείδιο του άνθρακα ή τοξικά και ραδιενεργά απόβλητα, όπως οι υπόλοιπες πηγές ενέργειας που χρησιμοποιούνται σε μεγάλη κλίμακα. Έτσι οι ΑΠΕ

θεωρούνται από πολλούς μία αφετηρία για την επίλυση των οικολογικών προβλημάτων που αντιμετωπίζει η Γη.

Ο χαρακτηρισμός «ανανεώσιμες» είναι κάπως καταχρηστικός, αφού ορισμένες από αυτές τις πηγές, όπως η γεωθερμική ενέργεια, δεν ανανεώνονται σε κλίμακα χιλιετιών. Σε κάθε περίπτωση οι ΑΠΕ έχουν μελετηθεί ως λύση στο πρόβλημα της αναμενόμενης εξάντλησης των (μη ανανεώσιμων) αποθεμάτων ορυκτών καυσίμων.



Το ενδιαφέρον για τις ήπιες μορφές ενέργειας και ιδιαίτερα την ηλιακή ενέργεια, εντάθηκε τη δεκαετία του 1970, ως αποτέλεσμα κυρίως των απαντών πετρελαϊκών κρίσεων της εποχής, αλλά και της αλλοίωσης του περιβάλλοντος και της ποιότητας ζωής από τη χρήση κλασικών πηγών ενέργειας. Χάρη στο φωτοβολταϊκό φαινόμενο, διαπιστώθηκε η δυνατότητα άμεσης και αποδοτικής μετατροπής της σε ηλεκτρική ενέργεια με την κατασκευή φωτοβολταϊκών γεννητριών. Η μέθοδος μετατροπής των (ΑΠΕ) σε ηλεκτρική ενέργεια έχει κυρίως πλεονεκτήματα. Τα κυριότερα είναι :

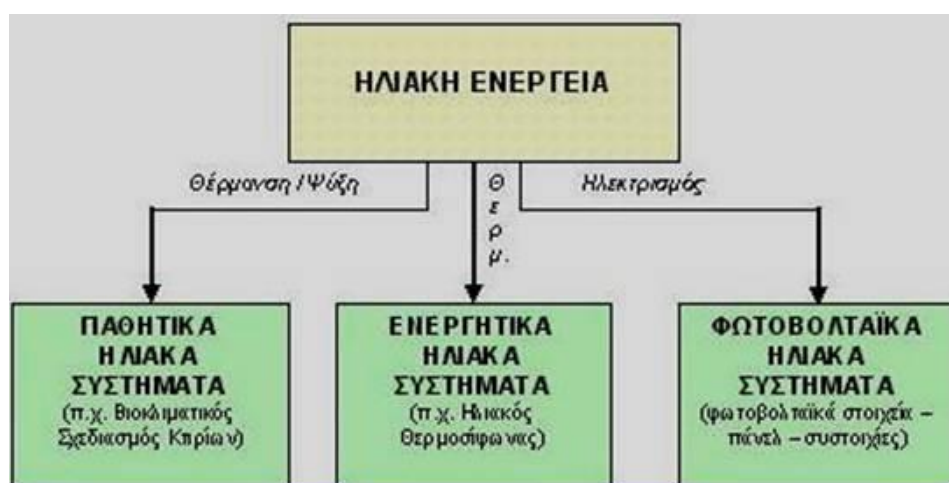
- Είναι πολύ φιλικές προς το περιβάλλον, έχοντας ουσιαστικά μηδενικά κατάλοιπα και απόβλητα.
- Ανανεώσιμη κ ελεύθερα διαθέσιμη ενέργεια.
- Μπορούν να βοηθήσουν την ενεργειακή αυτάρκεια μικρών και αναπτυσσόμενων χωρών, καθώς και να αποτελέσουν την εναλλακτική πρόταση σε σχέση με την οικονομία του πετρελαίου.
- Ο εξοπλισμός είναι απλός στην κατασκευή και τη συντήρηση και έχει πολύ μεγάλο χρόνο ζωής.
- Επιδοτούνται από τις περισσότερες κυβερνήσεις.

Φυσικά υπάρχουν κ μειονεκτήματα. Έχουν αρκετά μικρό συντελεστή απόδοσης, της τάξης του 30% ή και χαμηλότερο. Συνεπώς απαιτείται αρκετά μεγάλο αρχικό κόστος εφαρμογής σε μεγάλη επιφάνεια της γης. Γι' αυτό το

λόγο μέχρι τώρα χρησιμοποιούνται ως συμπληρωματικές πηγές ενέργειας και γι' αυτό τον λόγο δεν μπορούμε ακόμα να τις χρησιμοποιήσουμε για κάλυψη αναγκών μεγάλων αστικών κέντρων. Η παροχή και απόδοση της αιολικής, υδροηλεκτρικής και ηλιακής ενέργειας εξαρτάται από την εποχή του έτους, αλλά και από το γεωγραφικό πλάτος και το κλίμα της περιοχής στην οποία εγκαθίστανται.

1.3 Ηλιακή Ενέργεια

Ηλιακή ενέργεια ορίζεται ως το σύνολο των διαφόρων μορφών ενέργειας που προέρχονται από τον ήλιο, όπως είναι η φωτεινή ενέργεια, η θερμική ενέργεια, καθώς και ενέργεια ακτινοβολίας ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στην επιφάνεια της γης, σε ένα σημείο μια δεδομένη χρονική στιγμή χαρακτηρίζεται από την ένταση και την διεύθυνση πρόσπτωσης. Στη επιφάνεια της γης φτάνει μόνο ένα μέρος της ακτινοβολίας ενώ κάποιο μέρος της ανακλάτε. Η ακτινοβολία που μένει στην επιφάνεια της γης ύστερα από διαδοχικές ανακλάσεις λέγεται, διάχυτη ακτινοβολία. Η γη δέχεται ετήσια ηλιακή ενέργεια με ακτινοβολία της τάξης του $173 \times 10^{15} \text{W}$. Σε ένα 24ωρο κάθε τετραγωνικό μέτρο επιφάνειας της γης δέχεται κατά μέσο όρο 4-6 KWh ηλιακής ενέργειας με ακτινοβολία 800-2500 KWh/m³ ετησίως. Η ποσότητα αυτή είναι περίπου η διπλάσια από αυτή που θα μπορέσει ποτέ να ληφθεί από το σύνολο των μη ανανεώσιμων πηγών της Γης (φυσικό αέριο, άνθρακα κτλ) και περισσότερη από αυτή που καταναλώνει σήμερα ο άνθρωπος σε ένα χρόνο. Γι' αυτό κρίνεται σκόπιμη η πρακτική εκμετάλλευσης της ηλιακής ενέργειας. Η εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας χωρίζεται σε τρεις κατηγορίες εφαρμογών:



Πλεονεκτήματα χρήσης της ηλιακής ενέργειας:

- Αποτρέπεται η κατανάλωση ενέργειας από ορυκτά καύσιμα και κατά συνέπεια οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) που προκαλούν τις παγκόσμιες κλιματικές αλλαγές
- Το φως του ήλιου είναι δωρεάν και διαθέσιμο σε όλο τον πλανήτη. Είναι ανανεώσιμη πηγή και δεν πρόκειται να εξαντληθεί.
- Η ηλιακή θερμική ενέργεια μπορεί να αποθηκευτεί και να απελευθερώνεται αργά και σταδιακά.
- Η τοποθέτηση ενός ηλιακού συστήματος είναι απλή. Η δε συντήρηση που απαιτεί είναι ελάχιστη ενώ η ανθεκτικότητα τους φτάνει τα 25 και άνω έτη λειτουργίας.
- Πρόκειται για απλή και συμφέρουσα λύση καθώς με τη πάροδο του χρόνου τα ηλιακά συστήματα τείνουν να “πληρώνονται μόνα τους”(μέσος χρόνος αποπληρωμής 4 ετών).
- Μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο σε μηχανήματα μικρής κλίμακας όσο και μεγάλης.
- Είναι η εναλλακτική ενέργεια που φαίνεται ότι μπορεί να ανταποκριθεί καλύτερα στις ανάγκες του μέλλοντος.
- Τα συστήματα ηλιακής ενέργειας είναι γενικώς αθόρυβα.
- Τα black-out είναι σπάνια.
- Πλεονάζουσα ενέργεια μπορεί να ανατροφοδοτήσει το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας.
- Το κόστος δε μεταβάλλεται με τη πάροδο του χρόνου όπως συμβαίνει π.χ με τα ορυκτά καύσιμα.
- Η ηλιακή τεχνολογία είναι μια καθόλα ώριμη, δοκιμασμένη και αξιόπιστη τεχνολογία.
- Είναι ιδανική για απομονωμένες περιοχές, μακριά από γεννήτριες.
- Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη παραγωγή ηλεκτρισμού ακόμα κι όταν έχει συννεφιά.

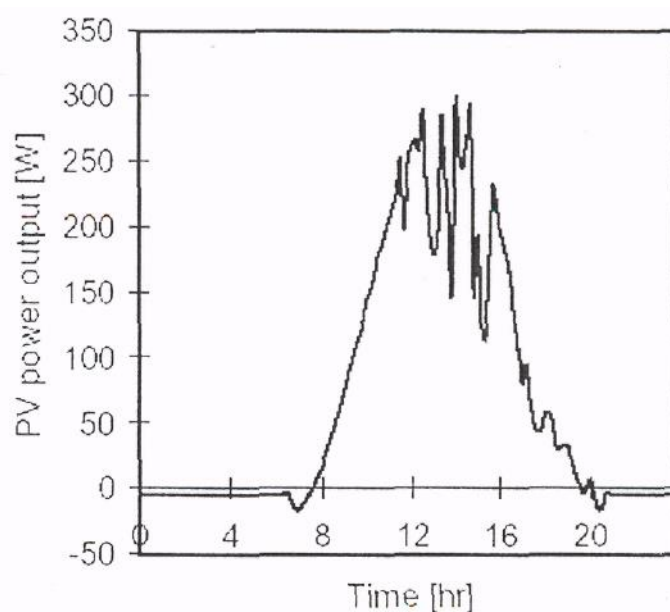
- Η ενέργεια δε χάνεται κατά τη μεταφορά από τα κεντρικά σημεία, όταν τα κατανεμημένα συστήματα βρίσκονται σε λειτουργία.
- Το πυρίτιο το οποίο χρησιμοποιείται για ημιαγωγούς είναι το δεύτερο σε αφθονία ορυκτό στο πλανήτη.

1.4 Φωτοβολταϊκή ενέργεια

Το φως του ήλιου μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια χρησιμοποιώντας τα φωτοβολταϊκά ή ηλιακά κύτταρα. Τα φωτοβολταϊκά κύτταρα (PV) είναι συσκευές ημιαγωγών, συνήθως φτιαγμένες από πυρίτιο, οι οποίες δεν περιέχουν κανένα υγρό, διαβρωτική χημική ουσία ή κινούμενο μέρος. Παράγουν ηλεκτρική ενέργεια με χρήση του φωτός, απαιτούν λίγη συντήρηση, δεν μολύνουν και λειτουργούν σιωπηλά, κάνοντας τη Φωτοβολταϊκή ενέργεια την καθαρότερη και ασφαλέστερη μέθοδο ηλεκτρικής παραγωγής. Τα ηλιακά ηλεκτρικά ή φωτοβολταϊκά συστήματα μετατρέπουν ένα ποσοστό της ηλιακής ενέργειας άμεσα σε ηλεκτρική. Το πυρίτιο, το δεύτερο αφθονότερο στοιχείο στον φλοιό της γης, είναι το ίδιο υλικό ημιαγωγών που χρησιμοποιείται στους υπολογιστές. Όταν το πυρίτιο συνδυάζεται με ένα ή περισσότερα υλικά, παρουσιάζει ηλεκτρικές ιδιότητες στο φως του ήλιου. Τα ηλεκτρόνια διεγείρονται από το φως και κινούνται μέσω του πυριτίου. Αυτό είναι γνωστό ως Φωτοβολταϊκή επίδραση και οδηγεί στην άμεση παραγωγή συνεχούς ηλεκτρικής ενέργειας (DC). Τα Φ/Β πλαίσια έχουν μια οικονομικά ενεργή ζωή 20 - 30 ετών. Η Φ/Β ενέργεια είναι μια από τις πιο ελπιδοφόρες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας στον κόσμο. Αντίθετα από τον άνθρακα, το φυσικό αέριο, το πετρέλαιο, κλπ.

Τα πλεονεκτήματα είναι σαφή: είναι συνολικά μη ρυπαντικό, δε χρειάζεται βοήθεια από μηχανές, και δεν απαιτεί πολλή συντήρηση. Ένα πολύ σημαντικό χαρακτηριστικό της Φωτοβολταϊκή ηλεκτρικής παραγωγής είναι ότι δεν απαιτεί μια εγκατάσταση μεγάλης κλίμακας για να λειτουργήσει, σε αντίθεση με τους κοινούς σταθμούς ηλεκτρικής παραγωγής. Οι ηλιογεννήτριες μπορούν να εγκατασταθούν σε κάθε σπίτι ή επιχείρηση ή σχολείο, και να παράγουν ισχύ ήσυχα και ακίνδυνα. Ένα βασικό μειονέκτημα ενός φωτοβολταϊκού συστήματος είναι ότι, σε αντίθεση με πολλά άλλα συστήματα μετατροπής, η τροφοδοσία του (ηλιακή ακτινοβολία) δεν είναι καθόλου σταθερή αλλά αυξομειώνεται μεταξύ μιας μέγιστης και της μηδενικής τιμής, ακολουθώντας συχνά απότομες και απρόβλεπτες διακυμάνσεις. Το ποσό της ενέργειας που περιέχεται στο φως του ήλιου, ονομάζεται ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας και με μία πιο αυστηρή ορολογία, ροή ακτινοβολίας που ορίζεται ως το ποσό της ενέργειας της ακτινοβολίας που περνά στη μονάδα του

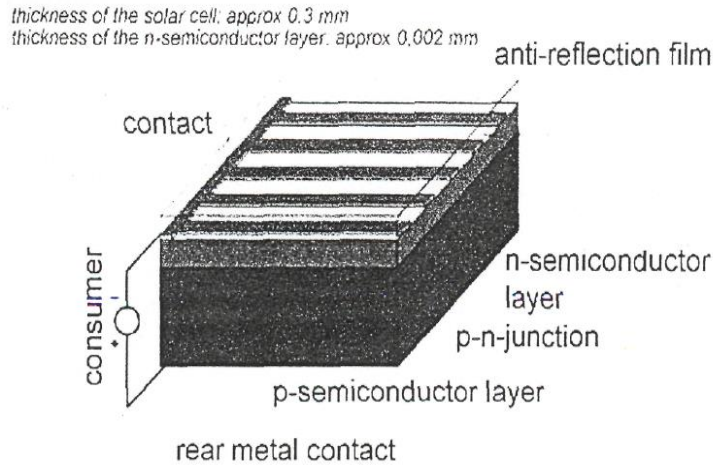
χρόνου από τη μονάδα εμβαδού μιας επιφάνειας τοποθετημένης κάθετα στην κατεύθυνση της ακτινοβολίας και εκφράζεται συνήθως σε kW/m^2 . Επίσης στα φωτοβολταϊκά στοιχεία δεν είναι δυνατή η μετατροπή σε ηλεκτρική ενέργεια του συνόλου της ηλιακής ακτινοβολίας που δέχονται στην επιφάνεια τους. Ένα μέρος από την προσπίπτουσα ακτινοβολία ανακλάται πάνω στην επιφάνεια του στοιχείου και διαχέεται πάλι προς το περιβάλλον, ενώ από τη ακτινοβολία που διεισδύει ένα μέρος πάλι συμβάλει στην εκδήλωση του φωτοβολταϊκού φαινομένου. Στο σχήμα 1.1 φαίνονται δύο παραδείγματα των μεταβολών της ισχύος που παράγει μία φωτοβολταϊκή γεννήτρια κατά τη διάρκεια της μέρας.



Σχήμα 1 Παράδειγμα μεταβάσεων της ισχύος φωτοβολταϊκής γεννήτριας

1.5 Φωτοβολταϊκό φαινόμενο

Ορίζεται ως η άμεση μετατροπή του φωτός σε ηλεκτρική ενέργεια σε ατομικό επίπεδο. Μερικά υλικά έχουν την ιδιότητα γνωστή ως φωτοηλεκτρική επίδραση με την οποία απορροφώντας φωτόνια από το φως απελευθερώνουν ηλεκτρόνια. Όταν αυτά τα ελεύθερα ηλεκτρόνια συλλαμβάνονται, δημιουργείται ηλεκτρικό ρεύμα και έτσι ηλεκτρική ενέργεια.



Σχήμα 2 Ηλιακό κύτταρο κρυσταλλικού πυριτίου.

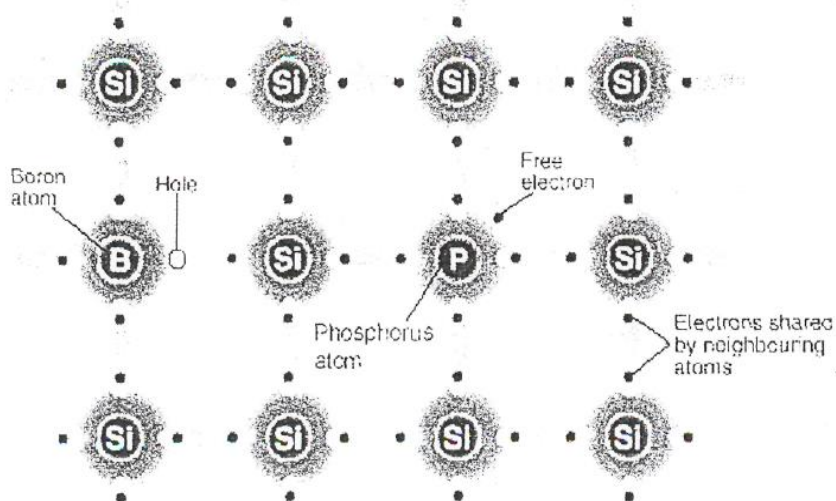
Τα ηλιακά στοιχεία είναι δίοδοι ημιαγωγού με τη μορφή ενός δίσκου που δέχεται την ηλιακή ακτινοβολία όπως απεικονίζεται στο σχήμα. Κάθε φωτόνιο της ακτινοβολίας με ενέργεια ίση ή μεγαλύτερη από το ενεργειακό διάκενο του ημιαγωγού, έχει τη δυνατότητα να απορροφηθεί σε ένα χημικό δεσμό και να ελευθερώσει ένα ηλεκτρόνιο. Δημιουργείται έτσι, όσο διαρκεί η ακτινοβολία, μια περίσσεια από ζεύγη φορέων πέρα από τις συγκεντρώσεις που αντιστοιχούν στις συνθήκες ισορροπίας. Οι φορείς αυτοί, καθώς κυκλοφορούν στο στερεό και εφόσον δεν επανασυνδεθούν με φορείς αντίθετου πρόσημου, μπορεί να βρεθούν στην περιοχή της ένωσης p-n, οπότε θα δεχθούν την επίδραση του ηλεκτροστατικού της πεδίου. Με τον τρόπο αυτό, τα ελεύθερα ηλεκτρόνια εκτρέπονται προς το τμήμα τύπου n και οι οπές εκτρέπονται προς το τμήμα τύπου p, με αποτέλεσμα να δημιουργηθεί μια διαφορά δυναμικού ανάμεσα στους ακροδέκτες των δύο τμημάτων της διόδου. Η εκδήλωση της τάσης αυτής ανάμεσα στις δύο όψεις του φωτιζόμενου δίσκου, η οποία αντιστοιχεί σε ορθή πόλωση της διόδου, ονομάζεται φωτοβολταϊκό φαινόμενο. Η διάταξη αποτελεί μια πηγή ρεύματος που διατηρείται όσο διαρκεί η πρόσπτωση του ηλιακού φωτός πάνω στην επιφάνεια του στοιχείου. Όταν ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο δέχεται κατάλληλη ακτινοβολία, διεγείρεται παράγοντας ηλεκτρικό ρεύμα, το φωτόρευμα I_{ϕ} , που η τιμή του θα είναι ανάλογη προς τα φωτόνια που απορροφά το στοιχείο. Η πυκνότητα του φωτορεύματος δίνεται από τη σχέση :

$$I_{\phi} = e \int_0^{\lambda_g} S(\lambda)[1 - R(\lambda)]\Phi(\lambda)d\lambda$$

όπου e , είναι το στοιχειώδες ηλεκτρικό φορτίο και λ_g , το μέγιστο χρησιμοποιούμενο μήκος κύματος ακτινοβολίας στον ημιαγωγό. $S(\lambda)$ είναι η φασματική απόκριση που ορίζεται ως το πλήθος των φορέων που συλλέγονται στα ηλεκτρόδια του φωτοβολταϊκού στοιχείου σε σχέση με τη φωτονική ροή $\Phi(\lambda)$, δηλαδή με το πλήθος των φωτονίων της ακτινοβολίας που δέχεται το στοιχείο ανά μονάδα επιφάνειας και χρόνου με ενέργεια που αντιστοιχεί σε μήκος κύματος από λ μέχρι $\lambda+d\lambda$. $R(\lambda)$ είναι ο δείκτης ανάκλασης της επιφάνειας του στοιχείου.

1.6 Λειτουργία Φ/Β

Το ηλιακό φως είναι ουσιαστικά μικρά πακέτα ενέργειας που λέγονται φωτόνια. Τα φωτόνια περιέχουν διαφορετικά ποσά ενέργειας ανάλογα με το μήκος κύματος του ηλιακού φάσματος. Το γαλάζιο χρώμα ή το υπεριώδες π.χ. έχουν περισσότερη ενέργεια από το κόκκινο ή το υπέρυθρο. Όταν λοιπόν τα φωτόνια προσκρούσουν σε ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο (που είναι ουσιαστικά ένας ημιαγωγός), άλλα ανακλώνται, άλλα διαπερνούν και άλλα απορροφώνται από το φωτοβολταϊκό. Αυτά τα τελευταία φωτόνια είναι που παράγουν ηλεκτρικό ρεύμα. Τα φωτόνια αυτά αναγκάζουν τα ηλεκτρόνια του φωτοβολταϊκού να μετακινηθούν σε άλλη θέση και ως γνωστόν ο ηλεκτρισμός δεν είναι τίποτε άλλο παρά κίνηση ηλεκτρονίων. Σ' αυτή την απλή αρχή της φυσικής λοιπόν βασίζεται μια από τις πιο εξελιγμένες τεχνολογίες παραγωγής ηλεκτρισμού στις μέρες μας. Από τα στοιχεία τα κυριότερα ημιαγωγιμα υλικά είναι το Γερμάνιο (Ge), το Πυρίτιο (Si) και το Σελήνιο (Se). Από αυτά το πιο σημαντικό είναι το πυρίτιο, γιατί βρίσκεται σε μεγαλύτερη αφθονία στη φύση. Από ηλεκτρικής απόψεως τα διάφορα σώματα χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες: τους αγωγούς, τους μονωτές και τους ημιαγωγούς. Οι ημιαγωγοί σε κατάλληλες συνθήκες εκδηλώνουν τις ιδιότητες των άλλων δύο κατηγοριών και μπορούν να λειτουργήσουν ως αγωγοί ή ως μονωτές. Όπως ξέρουμε, η ύλη αποτελείται από άτομα. Κάθε άτομο, με τη σειρά του, αποτελείται από τον πυρήνα και από τα ηλεκτρόνια που περιφέρονται γύρω από αυτόν, τοποθετημένα πάνω σε στοιβάδες. Από τα ηλεκτρόνια τα πιο απομακρυσμένα από τον πυρήνα, αυτά της εξωτερικής στοιβάδας, λέγονται *ηλεκτρόνια σθένους* και η αντίστοιχη στοιβάδα *σθένους*. Κάθε άτομο επιδιώκει να συμπληρώσει την εξωτερική του στοιβάδα με 8 ηλεκτρόνια.



Σχήμα 3 Κρυσταλλικό πλέγμα πυριτίου

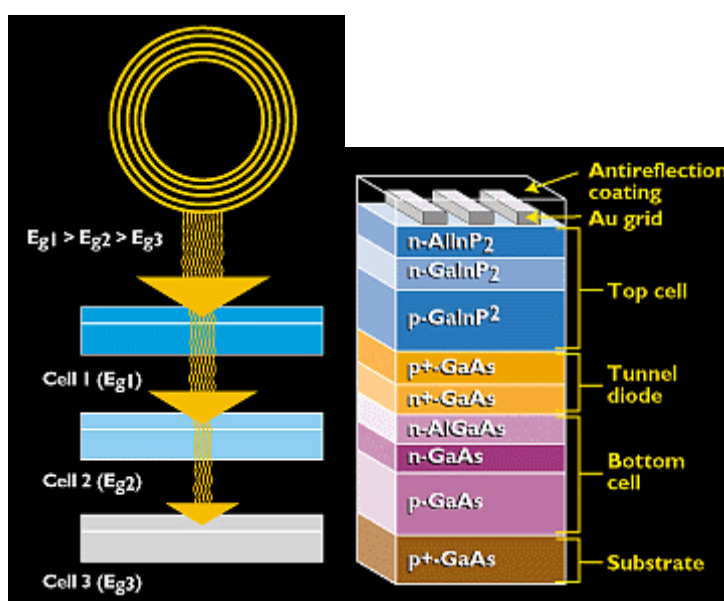
Το άτομο του πυριτίου στην στοιβάδα σθένους περιέχει 4 ηλεκτρόνια, που βρίσκονται στις κορυφές μιας κανονικής τριγωνικής πυραμίδας, στο κέντρο της οποίας βρίσκεται ο πυρήνας, όπως φαίνεται στο σχήμα. Για να συμπληρώσει τη στοιβάδα σθένους του με 8 ηλεκτρόνια, κάθε άτομο πυριτίου συνεργάζεται με άλλα 4 άτομα, που το περιβάλλουν στο χώρο και συνεισφέρουν ανά δύο από ένα ηλεκτρόνιο. Έτσι σχηματίζεται το κρυσταλλικό πλέγμα του πυριτίου.

Στους αγωγούς του ηλεκτρισμού τα ηλεκτρόνια σθένους είναι πολύ ευκίνητα και σε αυτήν την ευκινησία οφείλονται οι αγωγίμες ιδιότητες του υλικού. Αντίθετα στους μονωτές τα ηλεκτρόνια σθένους είναι πολύ ισχυρά συνδεδεμένα με τον πυρήνα και εδώ οφείλονται οι μονωτικές τους ιδιότητες.

Στους ημιαγωγούς τα ηλεκτρόνια σθένους συνδέονται σχετικά χαλαρά με τον πυρήνα, χωρίς να έχουν την ευκινησία των ηλεκτρονίων των αγωγών. Αν όμως, ένα ηλεκτρόνιο πάρει με κάποιον τρόπο πρόσθετη ενέργεια, τότε μπορεί να σπάσει τους δεσμούς του με τον πυρήνα και να φύγει από αυτόν. Η θέση από την οποία φεύγει το ηλεκτρόνιο είναι περιοχή με ηλεκτρονικό έλλειμμα, παρουσιάζει θετικό φορτίο ίσο με αυτό του ηλεκτρονίου και ονομάζεται *οπή*. Την πρόσθετη ενέργεια που πρέπει να πάρουν τα ηλεκτρόνια, για να φύγουν από το άτομο, μπορούμε να την προσφέρουμε με θερμότητα ή με φωτισμό. Το φως αποτελείται από μικρά σωματίδια, που λέγονται *φωτόνια* και τα οποία μεταφέρουν ενέργεια. Φωτίζοντας τον ημιαγωγό, κάποια από τα φωτόνια συγκρούονται με τα ηλεκτρόνια σθένους και μεταβιβάζουν σε αυτά όλη τους την ενέργεια. Αν, λοιπόν, φωτίσουμε έναν κρύσταλλο πυριτίου, στο εσωτερικό του θα “δούμε” κάποια ηλεκτρόνια να εγκαταλείπουν τα αντίστοιχα άτομα και να προσκολλώνται σε άλλα. Στον κρύσταλλο θα υπάρχουν άτομα με 9 ηλεκτρόνια στην εξωτερική στοιβάδα, που θα είναι αρνητικά φορτισμένα, και άτομα με 7 ηλεκτρόνια στην εξωτερική

στοιβάδα ή, ισοδύναμη πρόταση, με μια οπή στην εξωτερική στοιβάδα, που θα είναι θετικά φορτισμένα. Στο μεταξύ ελευθερώνονται κι άλλα ηλεκτρόνια που προσκολλώνται σε άτομα ή καταλαμβάνουν τη θέση μιας οπής που χάνεται. Αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας είναι μια άτακτη μετακίνηση ηλεκτρονίων και οπών, η οποία όμως δεν ισοδυναμεί με ηλεκτρικό ρεύμα. Το ηλεκτρικό ρεύμα είναι η κατευθυνόμενη και προς συγκεκριμένη φορά μετακίνηση ηλεκτρονίων ή οπών. Την κατευθυνόμενη κίνηση των ηλεκτρονίων και των οπών την πετυχαίνουμε με τους ημιαγωγούς πρόσμιξης.

Οι πιο κοινές συσκευές PV χρησιμοποιούν μια σύνδεση single- junction (επαφή p-n), για να δημιουργήσουν το ηλεκτρικό πεδίο στον ημιαγωγό. Σε ένα τέτοιο κύτταρο, μόνο τα φωτόνια των οποίων ενέργεια είναι ίση ή μεγαλύτερο από το ενεργειακό διάκενο του υλικού μπορούν να ελευθερώσουν ένα ηλεκτρόνιο. Με άλλα λόγια, η φωτοβολταϊκή ικανότητα αυτών των κυττάρων περιορίζεται στη μερίδα του φάσματος του ήλιου του οποίου η ενέργεια είναι πάνω από το ενεργειακό διάκενο του απορροφώντα υλικού, και τα χαμηλά ενεργειακά φωτόνια δεν χρησιμοποιούνται.



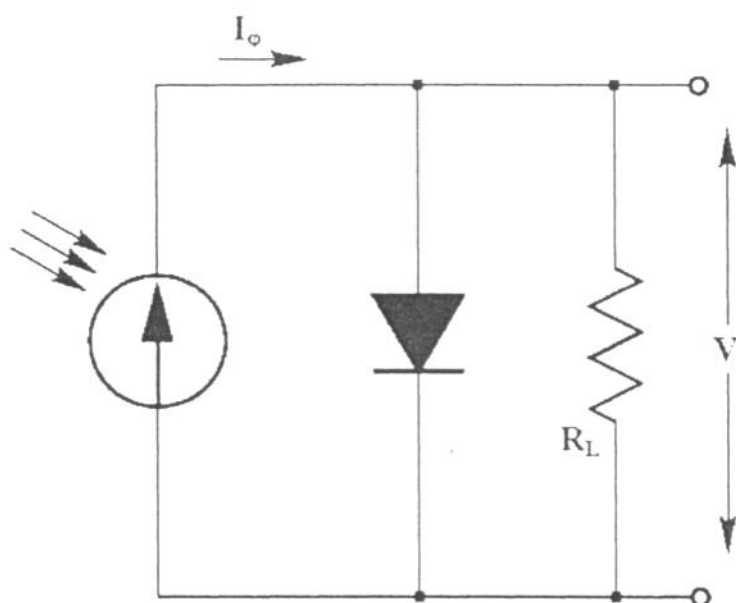
Σχήμα 4 Κύτταρα *multijunction*

Ένας τρόπος να αντιμετωπιστεί αυτός ο περιορισμός είναι να χρησιμοποιηθούν δύο (ή περισσότερα) διαφορετικά κύτταρα, με περισσότερα από ένα ενεργειακά διάκενα και περισσότερες από μια επαφές p-n (*multijunction*). Οι συσκευές *Multijunction* μπορούν να επιτύχουν μια υψηλότερη συνολική αποδοτικότητα μετατροπής επειδή μπορούν να εκμεταλλευτούν μεγαλύτερο φάσμα του φωτός και να το μετατρέψουν σε ηλεκτρική ενέργεια. Μια συσκευή *multijunction* είναι ένας σωρός μεμονωμένων κυττάρων όπου κατεβαίνοντας προς τα κάτω το διάκενο (E_g)

μικραίνει. Το κορυφαίο κύτταρο συλλαμβάνει τα υψηλής ενέργειας φωτόνια και περνά το υπόλοιπο των φωτονίων για να απορροφηθεί από τα κύτταρα χαμηλότερου διακένου. Τέτοια κύτταρα έχουν φθάσει σε αποδοτικότητες περίπου 35% κάτω από το συγκεντρωμένο φως του ήλιου. Άλλα υλικά που μελετώνται για τις συσκευές *multijunction* είναι το *amorphous silicon* και το *copper indium diselenide*.

1.7 Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των φωτοβολταϊκών στοιχείων.

Για να γίνει μια εκτίμηση των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών και της λειτουργίας ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου, μπορεί να θεωρηθεί ότι αποτελεί μια πηγή ρεύματος που ελέγχεται από μία δίοδο και ότι περιγράφεται από το πολύ απλοποιημένο διάγραμμα του σχήματος. Στο ισοδύναμο αυτό δεν συμπεριλαμβάνεται η αντίσταση λόγω της κίνησης των φορέων μέσα στον ημιαγωγό και στις επαφές με τα ηλεκτρόδια, όπως ακόμα και η μη άπειρη αντίσταση διαμέσου της διόδου και τα αναπόφευκτα ρεύματα διαρροής.



Σχήμα 5 Απλοποιημένο ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου.

Σε συνθήκες ανοιχτού κυκλώματος, θα αποκατασταθεί ισορροπία όταν η τάση που θα αναπτυχθεί ανάμεσα στις δύο όψεις του στοιχείου, θα προκαλεί ένα αντίθετο ρεύμα που θα αντισταθμίζει το φωτόρευμα, για το οποίο και θα ισχύει:

$$I_{\phi} = I_0 \left(e^{\frac{eV}{\gamma k T}} - 1 \right)$$

όπου I_0 , είναι το ανάστροφο ρεύμα κόρου, e το στοιχειώδες ηλεκτρικό φορτίο, k η σταθερά Boltzmann, T η απόλυτη θερμοκρασία και γ ένας συντελεστής που ανάλογα με την κατασκευή και την ποιότητα της διόδου παίρνει συνήθως τιμές μεταξύ 1 και 2. Από την παραπάνω σχέση, η τάση ανοιχτού κυκλώματος θα είναι:

$$V_{oc} = \frac{\gamma k T}{e} \ln \left(\frac{I_{\phi}}{I_0} + 1 \right), \quad I_0 \ll I_{\phi} \Rightarrow V_{oc} = \frac{\gamma k T}{e} \ln \left(\frac{I_{\phi}}{I_0} \right)$$

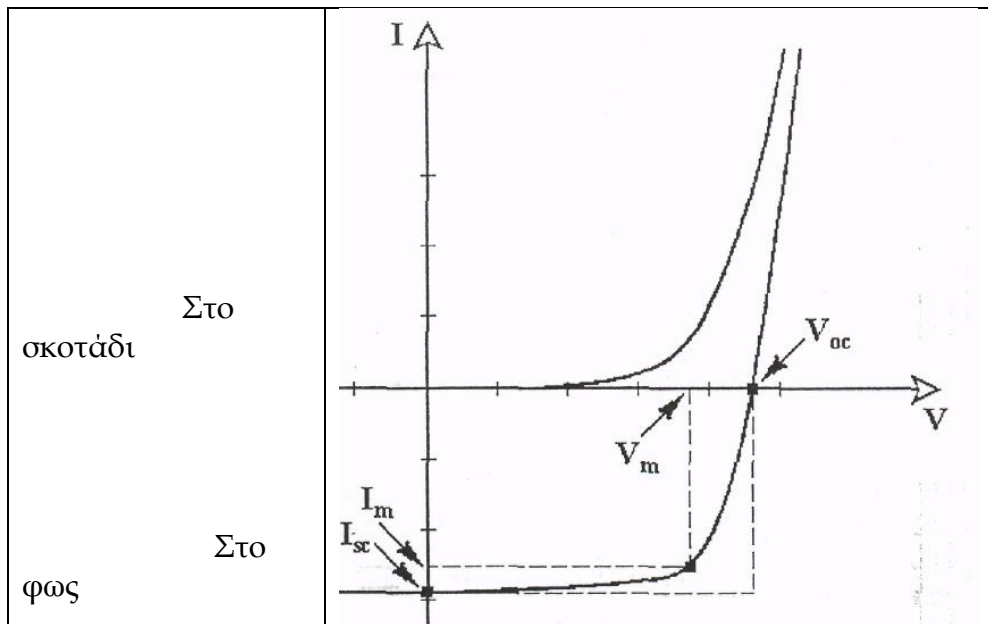
Η παραπάνω σχέση δείχνει τη λογαριθμική μεταβολή της V_{oc} σε συνάρτηση με το I_{ϕ} , δηλαδή με την ένταση της ακτινοβολίας που δέχεται το φωτοβολταϊκό στοιχείο και την εξάρτηση της από τις διάφορες ιδιότητες του ημιαγωγού. Στην άλλη ακραία περίπτωση, δηλαδή σε συνθήκες βραχυκύκλωσης ανάμεσα στις δύο όψεις του στοιχείου, το ρεύμα βραχυκύκλωσης θα ισούται με το παραγόμενο φωτόρρευμα, $I_{sc} = I_{\phi}$. Όταν το κύκλωμα του φωτοβολταϊκού στοιχείου κλείσει διαμέσου μιας εξωτερικής αντίστασης R_L , το ρεύμα θα πάρει μια μικρότερη τιμή I_L που βρίσκεται με τη λύση της εξίσωσης :

$$I_L = I_{\phi} - I_0 \cdot \left(e^{\frac{e \cdot I_L \cdot R_L}{\gamma \cdot k \cdot T}} - 1 \right)$$

Προφανώς θα υπάρχει κάποια τιμή της αντίστασης, δηλαδή του φορτίου του κυκλώματος, για την οποία η ισχύς που παράγει το φωτοβολταϊκό στοιχείο θα γίνεται μέγιστη ($P_m = I_m \cdot V_m$). Στις συνθήκες αυτές, θα αντιστοιχεί μια βέλτιστη τάση V_m , που δίνεται από τη λύση της εξίσωσης:

$$\frac{I_{\phi}}{I_0} + 1 = \left(1 + \frac{e \cdot V_m}{\gamma \cdot k \cdot T} \right) \cdot e^{\frac{e \cdot V_m}{\gamma \cdot k \cdot T}}$$

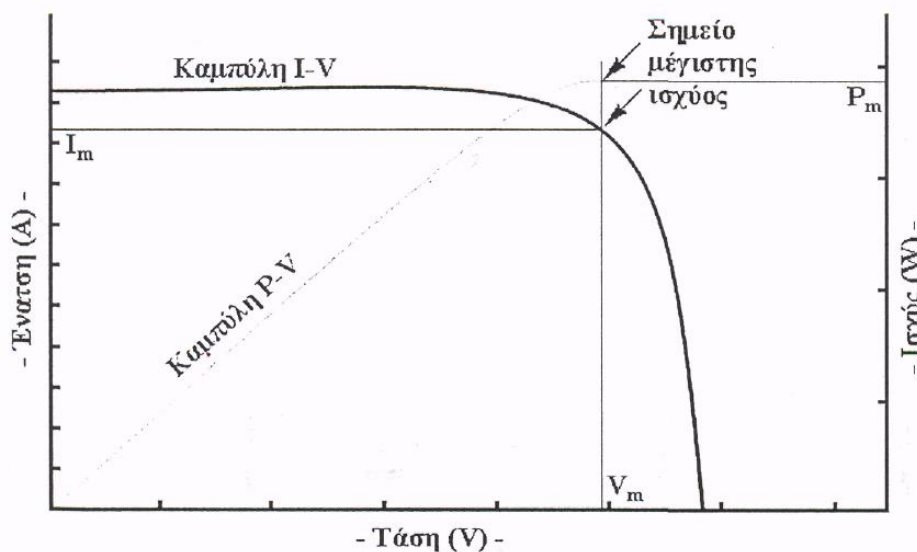
Στο διάγραμμα του κατωτέρω σχήματος, φαίνονται τα παραπάνω χαρακτηριστικά μεγέθη που χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση της συμπεριφοράς και λειτουργίας των φωτοβολταϊκών στοιχείων και καθορίζουν την απόδοσή τους.



Σχήμα 6 Χαρακτηριστική καμπύλη έντασης (I) - τάσης (V) ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου στο σκοτάδι και στο φως.

Ως πηγή παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, το φωτοβολταϊκό στοιχείο έχει μια αρκετά ασυνήθιστη συμπεριφορά. Δηλαδή, σε αντίθεση με τις περισσότερες κοινές ηλεκτρικές πηγές οι οποίες διατηρούν περίπου σταθερή τάση στην περιοχή κανονικής τους λειτουργίας, η τάση των φωτοβολταϊκών στοιχείων μεταβάλλεται ριζικά και μη γραμμικά σε συνάρτηση με την ένταση του ρεύματος που δίνουν στο κύκλωμα, έστω και αν η ακτινοβολία παραμένει σταθερή. Επίσης ένας παράγοντας που επιδρά αρνητικά στην απόδοση των φωτοβολταϊκών στοιχείων είναι η θερμοκρασία. Συγκεκριμένα, με την αύξηση της θερμοκρασίας προκαλείται αντίστοιχη αύξηση της ενδογενούς συγκέντρωσης των φορέων του ημιαγωγού, με αποτέλεσμα να πραγματοποιούνται περισσότερες επανασυνδέσεις φορέων. Έτσι, εκδηλώνεται ισχυρότερο ρεύμα διαρροής διαμέσου της διόδου, που συνεπάγεται μείωση της V_{oc} και αντίστοιχη μείωση της απόδοσης του στοιχείου.

Για σταθερές συνθήκες ακτινοβολίας (και θερμοκρασίας) και για μεταβαλλόμενες τιμές στην αντίσταση του κυκλώματος που τροφοδοτεί το ηλιακό κύτταρο, η τάση και η ένταση του ρεύματος του κυττάρου παίρνουν ενδιάμεσες τιμές ανάμεσα στις ακραίες που αντιστοιχούν σε μηδενική αντίσταση (βραχυκυκλωμένη κατάσταση με μέγιστη τιμή ρεύματος, I_{sc} και μηδενική τάση) και άπειρη αντίσταση (ανοιχτοκυκλωμένη κατάσταση με μηδενική τιμή ρεύματος και μέγιστη τιμή τάσης, V_{oc}), όπως παρουσιάζεται στο σχήμα .



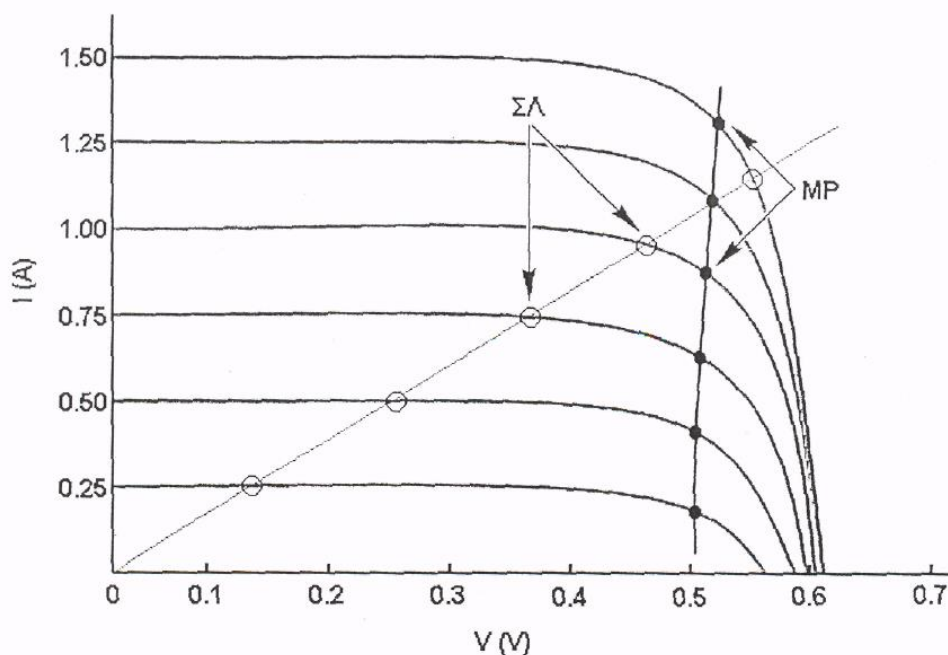
Σχήμα 7 Καμπύλες I-V και P-V φωτοβολταϊκού στοιχείου Si για σταθερές συνθήκες ακτινοβολίας και θερμοκρασίας.

Παράλληλα μεταβάλλεται ομαλά και η ισχύς που παράγει το στοιχείο, με μέγιστη τιμή P_m σε ένα ορισμένο ζεύγος τιμών τάσης V_m και έντασης I_m για το οποίο η καμπύλη της ισχύος ως προς την τάση (P-V) παρουσιάζει μέγιστο. Διαφορετικά μπορεί να ειπωθεί, ότι για τις τιμές αυτές των I_m και V_m , το εμβαδόν του ορθογώνιου που σχηματίζεται από την I-V καμπύλη και τους άξονες τάσης και έντασης ρεύματος, γίνεται μέγιστο. Η μαθηματική συνθήκη για το σημείο μέγιστης ισχύος είναι:

$$dP = \frac{\partial P}{\partial I} \cdot dI + \frac{\partial P}{\partial V} dV = 0 \Rightarrow \left(\frac{\partial P}{\partial I} = V, \frac{\partial P}{\partial V} = I \right) \quad \frac{dV}{dI} = -\frac{V_m}{I_m} = R_m$$

όπου R_m είναι η δυναμική αντίσταση του φωτοβολταϊκού στοιχείου. Αυτή η δυναμική αντίσταση είναι μια συνάρτηση της ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας των στοιχείων. Επομένως για τη μεταφορά μέγιστης ισχύος από τη φωτοβολταϊκή γεννήτρια στο φορτίο ενός φωτοβολταϊκού συστήματος, πρέπει να γίνεται ταίριασμα του φορτίου στη μονίμως μεταβαλλόμενη δυναμική αντίσταση της γεννήτριας. Η μεταβολή της πυκνότητας της ισχύος της ακτινοβολίας συνεπάγεται αντίστοιχη μεταβολή της V_{oc} και της I_{sc} από το μηδέν για το σκοτάδι, μέχρι τις μέγιστες τιμές τους για τη μέγιστη ένταση της ακτινοβολίας. Επίσης, με την αύξηση της θερμοκρασίας παρατηρείται αισθητή μείωση της ανοιχτοκυκλωμένης τάσης, V_{oc} των φωτοβολταϊκών στοιχείων. Παρατηρώντας το σχήμα που ακολουθεί, για την ακτινοβολία που δίνει $I_{sc}=1.25A$ έχουμε περίπου $I_m=1.1A$ και $V_m=0.5V$. Επομένως η κατάλληλη αντίσταση του κυκλώματος για να παράγεται η μέγιστη ηλεκτρική ισχύς από το φωτοβολταϊκό στοιχείο είναι $R_L=V_m/I_m=0.5/1.1 = 0.455\Omega$. Η αντίσταση αυτή όπως φαίνεται και στο σχήμα, είναι εντελώς ακατάλληλη για όλες τις

άλλες συνθήκες ακτινοβολίας, αφού η ευθεία με κλίση $1/0.455$ τέμνει τις αντίστοιχες καμπύλες I-V σε σημείο διαφορετικό από το σημείο μέγιστης ισχύος. Η τιμή της εσωτερικής αντίστασης του συσσωρευτή (και σε σχέση με το φορτίο κατανάλωσης) στο αυτόνομο φωτοβολταϊκό σύστημα καθορίζει κατά πόσο κοντά στο σημείο μέγιστης ισχύος θα λειτουργεί η φωτοβολταϊκή γεννήτρια στα μεταβαλλόμενα επίπεδα της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στα ηλιακά στοιχεία.



Η μετατόπιση των σημείων λειτουργίας ($\Sigma\Lambda$) ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου πυριτίου και η απομάκρυνση του από τα αντίστοιχα σημεία της μέγιστης ισχύος (MP) της I-V καμπύλης, για διαφορετικές συνθήκες ακτινοβολίας αλλά για σταθερή τιμή της αντίστασης του κυκλώματος που τροφοδοτεί το στοιχείο.

1.8 Είδη φωτοβολταϊκών πάνελ

1.8.1 Μονοκρυσταλλικού Πυριτίου πλαίσια (στοιχεία)

Κατασκευάζονται από κυψέλες που έχουν κοπεί από ένα κυλινδρικό κρύσταλλο πυριτίου. Αποτελούν τα πιο αποδοτικά φωτοβολταϊκά με αποδόσεις της τάξεως του 15%. Η κατασκευή τους όμως είναι πιο πολύπλοκη γιατί απαιτεί την κατασκευή του μονοκρυσταλλικού πυριτίου με αποτέλεσμα το υψηλότερο κόστος κατασκευής.

1.8.2 Πολυκρυσταλλικού Πυριτίου πλαίσια (στοιχεία)

Τα πολυκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά κατασκευάζονται από ράβδους λιωμένου και επανακρυσταλλομένου πυριτίου. Για την παραγωγή τους οι ράβδοι του πυριτίου κόβονται σε λεπτά τμήματα από τα οποία κατασκευάζεται η κυψέλη του φωτοβολταϊκού. Η διαδικασία κατασκευής τους είναι απλούστερη από εκείνη των μονοκρυσταλλικών φωτοβολταϊκών με αποτέλεσμα το φθηνότερο κόστος παραγωγής. Παρουσιάζουν όμως σε γενικές γραμμές μικρότερη απόδοση της τάξεως του 12%.

1.8.3 Φωτοβολταϊκά στοιχεία ταινίας πυριτίου

Πρόκειται για μια σχετικά νέα τεχνολογία φωτοβολταϊκών στοιχείων. Προσφέρει έως και 50% μείωση στην χρήση του πυριτίου σε σχέση με τις "παραδοσιακές τεχνικές" κατασκευής μονοκρυσταλλικών και πολυκρυσταλλικών φωτοβολταϊκών κυψελών πυριτίου. Η απόδοση για τα φωτοβολταϊκά στοιχεία του έχει φτάσει πλέον γύρω στο 12-13% ενώ το πάχος του είναι περίπου 0,3 χιλιοστά. Στο εργαστήριο έχουν επιτευχθεί αποδόσεις της τάξης του 18%.

1.8.4 Φωτοβολταϊκά υλικά λεπτών επιστρώσεων, thin film

Τα φωτοβολταϊκά αυτής της κατηγορίας αποτελούνται από ένα λεπτό στρώμα πυριτίου που έχει εναποτεθεί ομοιόμορφα σε κατάλληλο υπόβαθρο. Σαν υπόβαθρο μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια μεγάλη γκάμα υλικών από δύσκαμπτα μέχρι ελαστικά με αποτέλεσμα να βρίσκει μεγαλύτερο εύρος εφαρμογών, ιδιαίτερα σε καμπύλες ή εύκαμπτες επιφάνειες.

1.8.5 Άμορφου Πυριτίου πλαίσια (στοιχεία)

Το άμορφο πυρίτιο παρουσιάζει μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα στην απορρόφηση του φωτός, εντούτοις η φωτοβολταϊκή απόδοση του είναι του μικρότερη των κρυσταλλικών, περίπου 6%. Το φθινό όμως κόστος κατασκευής τους τα κάνει ιδανικά σε εφαρμογές όπου δεν απαιτείται υψηλή απόδοση.

1.8.6 Δισεληνοϊνδιούχος χαλκός (CuInSe₂ ή CIS, με προσθήκη γαλλίου CIGS)

Ο Δισεληνοϊνδιούχος Χαλκός έχει εξαιρετική απορροφητικότητα στο προσπίπτον φως αλλά παρόλα αυτά η απόδοση του με τις σύγχρονες τεχνικές κυμαίνεται στο 11% (πλαίσιο). Εργαστηριακά έγινε εφικτή απόδοση

στο επίπεδο του **18,8%** η οποία είναι και η μεγαλύτερη που έχει επιτευχθεί μεταξύ των φωτοβολταϊκών τεχνολογιών λεπτής επιστρώσεως. Με την πρόσμιξη γαλλίου η απόδοση του μπορεί να αυξηθεί ακόμα περισσότερο CIGS. Το πρόβλημα που υπάρχει είναι ότι το ίδιο υπάρχει σε περιορισμένες ποσότητες στην φύση. Στα επόμενα χρόνια πάντως αναμένεται το κόστος του να είναι αρκετά χαμηλότερο.

1.8.7 Τελουριούχο Κάδμιο (CdTe)

Το Τελουριούχο Κάδμιο έχει ενεργειακό διάκενο γύρω στο 1eV το οποίο είναι πολύ κοντά στο ηλιακό φάσμα κάτι που του δίνει σοβαρά πλεονεκτήματα όπως την δυνατότητα να απορροφά το 99% της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Οι σύγχρονες τεχνικές όμως μας προσφέρουν αποδόσεις πλαισίου γύρω στο 6-8%. Στο εργαστήριο η απόδοση στα φωτοβολταϊκά στοιχειά έχει φθάσει το 16%.

1.8.8 Αρσενικούχο Γάλλιο (GaAs)

Το Γάλλιο είναι ένα παραπροϊόν της ρευστοποίησης άλλων μετάλλων όπως το αλουμίνιο και ο ψευδάργυρος. Είναι πιο σπάνιο ακόμα και από τον χρυσό. Το Αρσενικό δεν είναι σπάνιο αλλά έχει το μειονέκτημα ότι είναι δηλητηριώδες. Το αρσενικούχο γάλλιο έχει ενεργειακό διάκενο 1,43eV που είναι ιδανικό για την απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας.

1.8.9 Υβριδικά Φωτοβολταϊκά Στοιχεία

Ένα υβριδικό φωτοβολταϊκό στοιχείο αποτελείται από στρώσεις υλικών διαφόρων τεχνολογιών. Τα πιο γνωστά εμπορικά υβριδικά φωτοβολταϊκά στοιχεία αποτελούνται από δύο στρώσεις άμορφου πυριτίου (πάνω και κάτω) ενώ ενδιάμεσα υπάρχει μια στρώση μονοκρυσταλλικού πυριτίου. Το μεγάλο πλεονέκτημα αυτής της τεχνολογίας είναι ο υψηλός βαθμός απόδοσης του πλαισίου που φτάνει σε εμπορικές εφαρμογές στο **17,2%** και το οποίο σημαίνει ότι χρειαζόμαστε μικρότερη επιφάνεια για να έχουμε την ίδια εγκατεστημένη ισχύ. Τα αντίστοιχα φωτοβολταϊκά στοιχεία έχουν απόδοση 19,7%. Άλλα πλεονεκτήματα για τα υβριδικά φωτοβολταϊκά στοιχεία είναι η **υψηλή τους απόδοση** σε υψηλές θερμοκρασίες αλλά και η μεγάλη τους απόδοση στην διαχεόμενη ακτινοβολία. Φυσικά, αφού προσφέρει τόσα πολλά, το υβριδικό φωτοβολταϊκό είναι και κάπως ακριβότερο σε σχέση με τα συμβατικά φωτοβολταϊκά πλαίσια.

1.8.10 Άλλες τεχνολογίες

Η τεχνολογία των φωτοβολταϊκών εξελίσσεται με ραγδαίους ρυθμούς και διάφορα εργαστήρια στον κόσμο παρουσιάζουν νέες πατέντες. Κάποιες από τις τεχνολογίες στα φωτοβολταϊκά στοιχεία που φαίνεται να ξεχωρίζουν και μελλοντικά πιθανώς να γίνει ευρεία η χρήση τους είναι:

- Νανοκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά στοιχεία πυριτίου (nc-Si).
- Οργανικά / Πολυμερή στοιχεία.

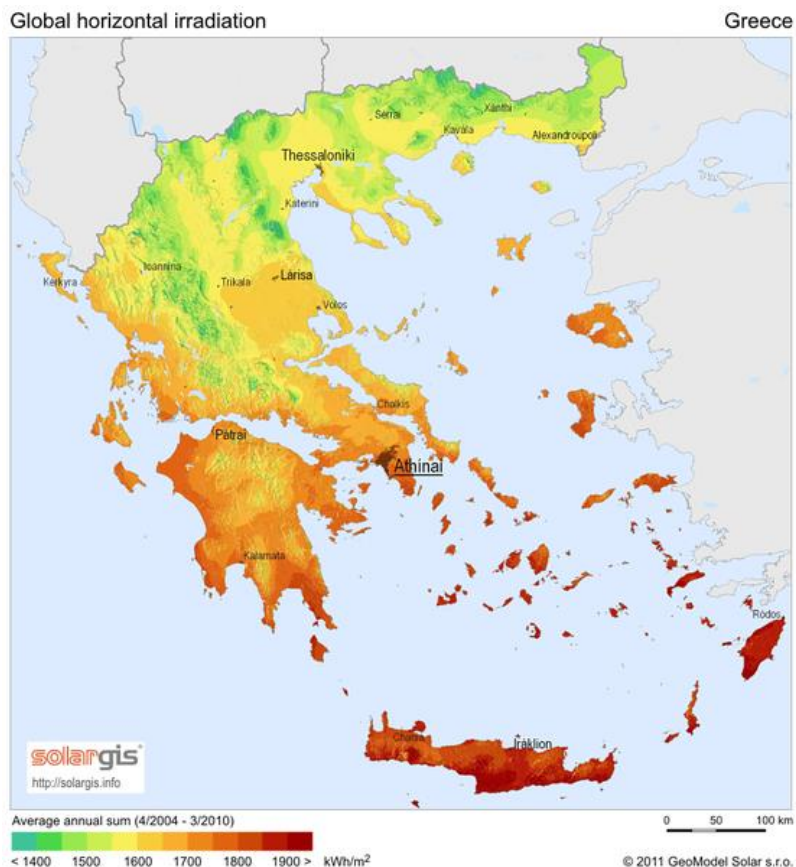
1.9 Παράγοντες επίδοσης φωτοβολταϊκών πάνελ

Τέσσερις παράγοντες επηρεάζουν την απόδοση των φωτοβολταϊκών συστημάτων:

- Η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας.
- Η θερμοκρασία λειτουργίας τους.
- Το σημείο λειτουργίας στην καμπύλη I-V.
- Η γωνία πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας.

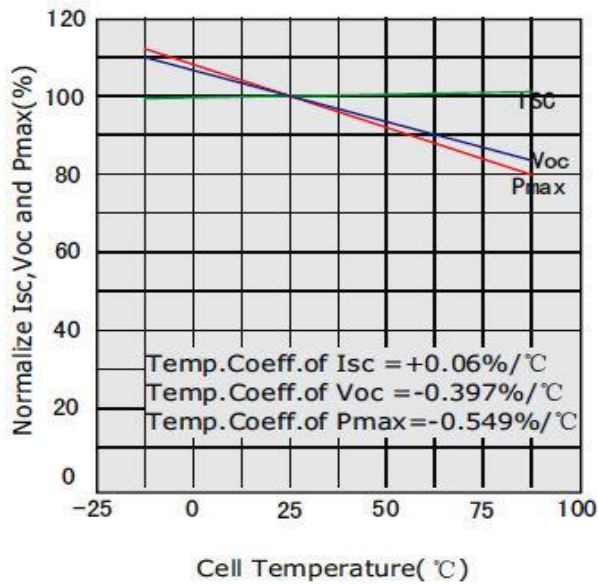
1.9.1 Η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας

Το φωτοβολταϊκό πάνελ παράγει ρεύμα ανάλογο με την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας, η οποία εξαρτάται από την γεωγραφική θέση της εγκατάστασης του συστήματος, τις καιρικές συνθήκες, την σκίαση της περιοχής και την ατμοσφαιρική ρύπανση. Ο παρακάτω χάρτης της Ελλάδας μας δείχνει την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας.



1.9.2 Η θερμοκρασία λειτουργίας τους

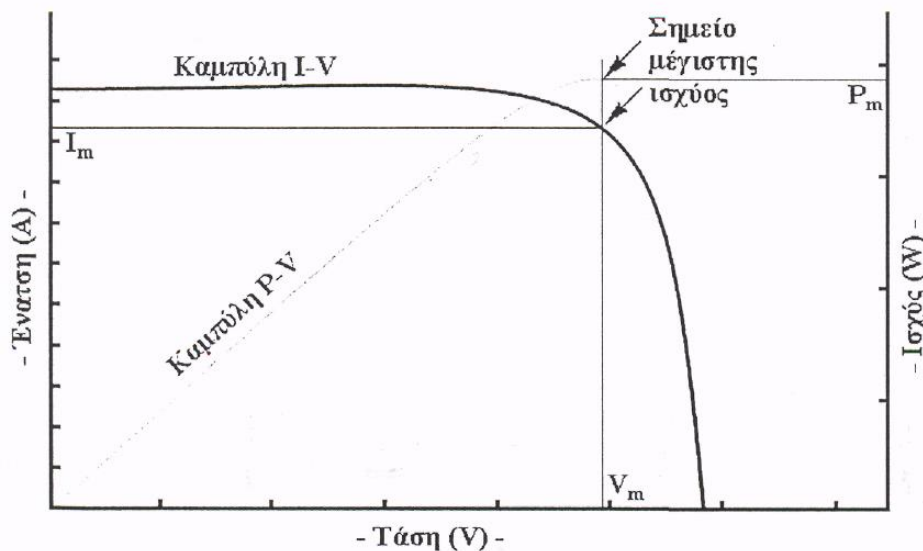
Όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω τα φωτοβολταϊκά συστήματα αποδίδουν περισσότερο σε περιοχές με αυξημένη ηλιοφάνεια λόγω έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας, η οποία όμως υπερθερμαίνει το πάνελ και μειώνει την απόδοσή του. Αυτό το φαινόμενο είναι κατασκευαστικό μειονέκτημα των φ/β πάνελ. Για το λόγο αυτό ιδανικές συνθήκες λειτουργίας είναι ψυχρές περιοχές με αυξημένη ηλιοφάνεια. Λύση στο πρόβλημα έχουν δώσει συστήματα ψύξης σχεδιασμένα για φωτοβολταϊκά συστήματα. Στο παρακάτω διάγραμμα βλέπουμε τις μεταβολές των διαφόρων μεγεθών (I_{sc} , V_{oc} , P_{max}) με την θερμοκρασιακή μεταβολή του φ/β πάνελ.



Σχήμα 8 Διάγραμμα: Επίδραση της θερμοκρασίας του φ/β κελιού στα I_{sc} , V_{oc} , P_{max} .

1.9.3 Το σημείο λειτουργίας στην καμπύλη I-V

Για να είναι μέγιστη η απόδοση ενός φ/β στοιχείου αυτό θα πρέπει να λειτουργεί σε ένα συγκεκριμένο σημείο της καμπύλης I-V.

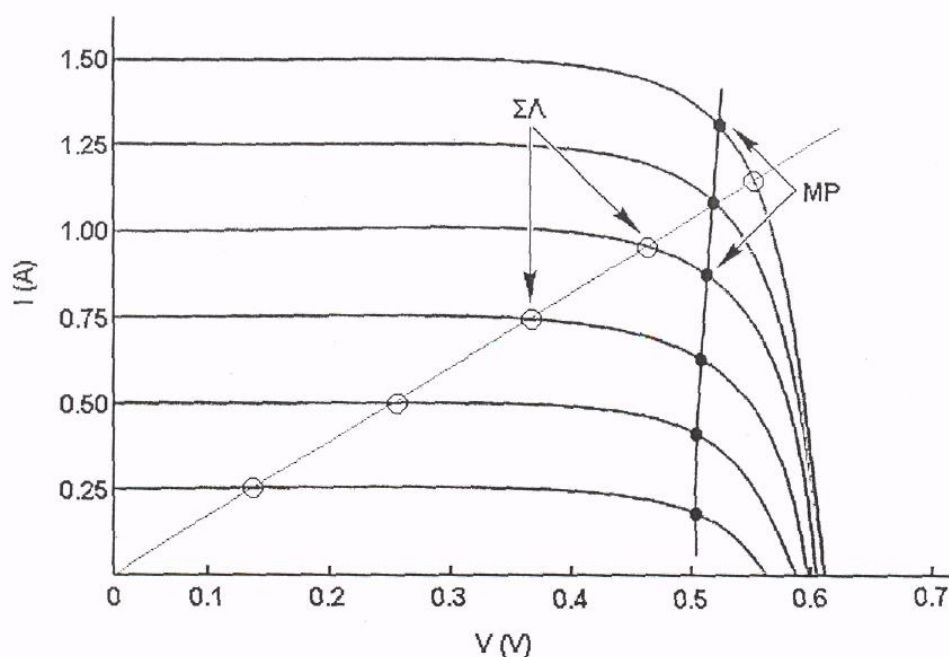


Σχήμα 9 Καμπύλες I-V και P-V φωτοβολταϊκού στοιχείου Si για σταθερές συνθήκες ακτινοβολίας και θερμοκρασίας

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ένα φ/β στοιχείο εν είναι τόσο σταθερή όπως οι κοινές πηγές ηλεκτρικής ενέργειας , αντιθέτως μεταβάλλεται μη γραμμικά.

Για σταθερές συνθήκες ακτινοβολίας και θερμοκρασίας και για μεταβαλλόμενες τιμές την αντίσταση του κυκλώματος που τροφοδοτεί το ηλιακό κύτταρο , η τάση και η ένταση του ρεύματος του κυττάρου παίρνουν ενδιάμεσες τιμές ανάμεσα στις ακραίες που αντιστοιχούν σε μηδενική αντίσταση (βραχυκυκλωμένη κατάσταση με μέγιστη τιμή ρεύματος , I_{sc} και μηδενική τάση) και άπειρη αντίσταση (κατάσταση ανοικτού κυκλώματος με μηδενική τιμή ρεύματος και μέγιστη τιμή τάσης V_{oc}). Παράλληλα μεταβάλλεται ομαλά αι η ισχύς που παράγει το φ/β στοιχείο , με μέγιστη τιμή P_m σε ενώ ορισμένο ζεύγος τιμών τάσης V_m και έντασης I_m .

Για την μεταφορά μέγιστης ισχύος στη φωτοβολταϊκή γεννήτρια το φορτίο ενός φ/β συστήματος , πρέπει να γίνεται ταίριασμα του φορτίου τη μονίμως μεταβαλλόμενη δυναμική αντίσταση της γεννήτριας. Η τιμή της εσωτερικής αντίστασης του συσσωρευτή καθορίζει κατά πόσο κοντά το σημείο μέγιστης ισχύος θα λειτουργεί η φ/β γεννήτρια.



Σχήμα 10 Διάγραμμα: Σημεία λειτουργίας και σημεία μέγιστης ισχύος στην καμπύλη I-V.

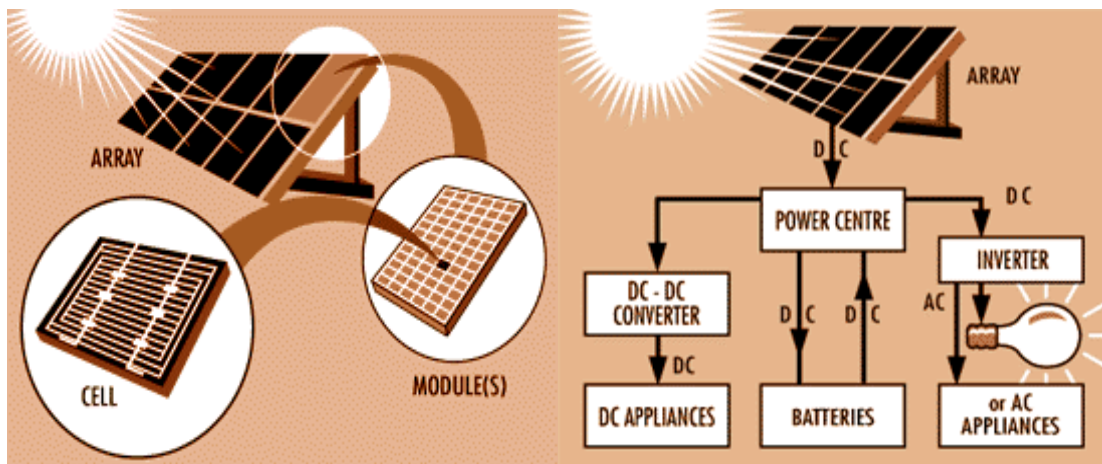
Στο παραπάνω διάγραμμα βλέπουμε την μετατόπιση των σημείων λειτουργίας (ΣΛ) ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου και την απομάκρυνση τους από τα αντίστοιχα σημεία της μέγιστης ισχύος (MP) της καμπύλης I-V , για διαφορετικές συνθήκες ακτινοβολίας άλλα για σταθερή τιμή της αντίστασης του κυκλώματος που τροφοδοτεί το στοιχείο.

1.9.4 Η γωνία πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας

Η γωνία με την οποία προσπίπτει η ηλιακή ακτινοβολία πάνω στο φ/β πάνελ είναι ανάλογη με το παραγόμενο ρεύμα. Για γωνίες από 85° και πάνω είναι οι ιδανικές για μέγιστη παραγωγή ρεύματος. Για να αντιμετωπιστεί αυτό το πρόβλημα υπάρχουν συστήματα παρακολούθησης της τροχιάς του ήλιου.

1.10 Χρήσεις των Φ/Β

Τα φωτοβολταϊκά κύτταρα έρχονται σε πολλά μεγέθη, αλλά συνήθως ένα κύτταρο $10\text{cm} \times 10\text{cm}$ παράγει μισό βολτ. Τα κύτταρα συνδέονται μαζί για να παράγουν υψηλότερες τάσεις και παρεχόμενη ισχύ. Μια ενότητα 12-βολτ, παραδείγματος χάριν θα μπορούσε να έχει 30 έως 40 κύτταρα PV. Μια ενότητα που παράγει 50 Watt έχει μέγεθος $40\text{cm} \times 100\text{cm}$. Τα Φ/β κύτταρα δεν είναι ιδιαίτερα αποδοτικά, μετατρέποντας μόνο 12 έως 15 τοις εκατό του φωτός σε ηλεκτρική ενέργεια, αλλά τα εργαστηριακά πρωτότυπα φθάνουν σε 30 τοις εκατό αποδοτικότητας.



Αν και τα Φ/β παράγουν συνεχές ρεύμα (DC), (το είδος ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από τις μπαταρίες) και οι λάμπες μπορούν να λειτουργήσουν με συνεχές ρεύμα, οι περισσότερες ηλεκτρικές συσκευές απαιτούν εναλλασσόμενο ρεύμα (AC) 220-βολτ. Μια συσκευή γνωστή ως αντιστροφέας (inverter) μετατρέπει το συνεχές ρεύμα σε εναλλασσόμενο.

Οι αντιστροφείς ποικίλλουν σε μέγεθος και σε ποιότητα ηλεκτρικής ενέργειας που παρέχουν. Οι λιγότερο ακριβοί αντιστροφείς είναι κατάλληλοι για απλά φορτία, όπως φώτα και υδραντλίες, αλλά οι περισσότερο ποιοτικοί που δίνουν καλής ποιότητας κυματομορφή απαιτούνται για να τροφοδοτήσουν ηλεκτρονικές συσκευές όπως τηλεοράσεις, στερεοφωνικά

συγκροτήματα, φούρνους μικροκυμάτων και υπολογιστές. Ένα σύνηθες Φ/β σύστημα αποτελείται από τα πλαίσια, το σύστημα διαχείρισης ενέργειας και τις μπαταρίες. Ο αριθμός των πλαισίων επιλέγεται αναλόγως του επιθυμητού ρεύματος απορρόφησης ανά ημέρα/εβδομάδα. Το σύστημα διαχείρισης ενέργειας αποτελείται από τις ηλεκτρονικές συσκευές που παίρνουν την τάση και ρεύμα που δίνουν τα πλαίσια και τη μεταβιβάζουν αναλόγως στα ac/dc φορτία ή και τις μπαταρίες για φόρτιση. Οι μπαταρίες επιλέγονται σε αριθμό και χωρητικότητα (Ah) βάση τις απαιτούμενης ισχύος σε Wh (Bat ανά ώρα). Οι εφαρμογές των φωτοβολταϊκών μπορούν να χωρισθούν στις παρακάτω κατηγορίες:

- Απλό ή ανεξάρτητο φωτοβολταϊκό σύστημα
- Φωτοβολταϊκό σύστημα με αποθήκευση σε μπαταρίες
- Φωτοβολταϊκό σύστημα συνδεδεμένο στον οργανισμό κοινής ωφελείας
- Φωτοβολταϊκό σύστημα σε επίπεδο εργοστασίου παραγωγής ενέργειας
- Μικτά / Υβριδικά συστήματα

Η ενέργεια παράγεται όπου και όταν χρειάζεται και το φωτοβολταϊκό σύστημα είναι απλό σε όλα του τα στάδια - από την καλωδίωση, την αποθήκευση του έως και τα κέντρα ελέγχου του. Τα μικρά συστήματα (έως 500W) έχουν χαμηλό βάρος και είναι πολύ εύκολα στην μεταφορά και στην εγκατάστασή τους. Στις περισσότερες περιπτώσεις η εγκατάσταση ενός συστήματος διαρκεί μερικές ώρες. Ένα παράδειγμα είναι οι αντλίες νερού που απαιτούν συχνή συντήρηση, ενώ το φωτοβολταϊκό σύστημα που τις τροφοδοτεί με ηλεκτρικό απαιτούν μόνο ένα περιοδικό έλεγχο της κατάστασής τους και καθάρισμα.

1.10.1 Συστήματα με μπαταρίες

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα με μπαταρίες είναι μία πολύ αξιόπιστη λύση για την ηλεκτροδότηση ενός χώρου ή μηχανήματος 24 ώρες το 24ωρο, με βροχή ή λιακάδα. Χρησιμοποιούνται σε όλο τον κόσμο για να μας δίνουν φως, να προμηθεύουν ηλεκτρικό τις οικιακές συσκευές, διακόπτες, τηλέφωνα, ακόμα και μηχανολογικό εξοπλισμό βαρέως τύπου. Κατά την διάρκεια της ημέρας τα στοιχεία συλλέγουν ηλιακό φως, το μετατρέπουν σε ηλεκτρικό ρεύμα και το αποθηκεύουν στις μπαταρίες. Αυτές με την σειρά τους μας προμηθεύουν με ηλεκτρισμό όταν ζητηθεί. Μεσολαβεί μία συσκευή που ονομάζεται "ρυθμιστής φόρτισης" η οποία φροντίζει να φορτίζονται σωστά οι μπαταρίες και επιμηκύνει την διάρκεια ζωής τους, προστατεύοντάς τις από υπερφόρτιση ή από την ολική τους αποφόρτιση.

Οι μπαταρίες είναι χρήσιμες στις περισσότερες περιπτώσεις αλλά απαιτούν μία περιοδική συντήρηση. Μοιάζουν με τις μπαταρίες των αυτοκινήτων, αλλά είναι σχεδιασμένες έτσι ώστε να μας δίνουν περισσότερο από το αποθηκευμένο ρεύμα τους κάθε ημέρα. Τα υγρά τους πρέπει να ελέγχονται περιοδικά και πρέπει να προστατεύονται από υπερβολικά χαμηλές θερμοκρασίες. Η ποσότητα του ηλεκτρικού ρεύματος που μπορούμε να απαιτήσουμε από αυτές μετά την δύση του ήλιου ή σε συννεφιασμένο καιρό καθορίζεται από την παραγωγή των φωτοβολταϊκών στοιχείων και το είδος/ποσότητα των μπαταριών. Η πρόσθεση επιπλέον μπαταριών και στοιχείων ανεβάζει το κόστος της επένδυσής , για αυτό τον λόγο πρέπει να γίνεται καλή μελέτη των ενεργειακών αναγκών πριν την εγκατάσταση του συστήματος για τον ορισμό του αποδοτικότερου μεγέθους του συστήματος. Εάν οι ανάγκες σε ενέργεια αλλάξουν η προσθήκη και άλλων μερών του συστήματος είναι εφικτή και απλή.

1.11 Πλεονεκτήματα - Μειονεκτήματα Φωτοβολταϊκών

1.11.1 Πλεονεκτήματα

Όταν τα φωτοβολταϊκά εκτεθούν στην ηλιακή ακτινοβολία, μετατρέπουν ένα 5-17% της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική. Το πόσο ακριβώς είναι αυτό το ποσοστό εξαρτάται από την τεχνολογία που χρησιμοποιούμε. Υπάρχουν π.χ. τα λεγόμενα μονοκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά, τα πολυκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά, και τα άμορφα. Τα τελευταία έχουν χαμηλότερη απόδοση είναι όμως σημαντικά φθηνότερα. Η επιλογή του είδους των φωτοβολταϊκών είναι συνάρτηση των αναγκών , του διαθέσιμου χώρου ή ακόμα και της διαθέσιμης οικονομικής ευχέρειας. Όλα τα φωτοβολταϊκά πάντως μοιράζονται τα παρακάτω πλεονεκτήματα:

- Μηδενική ρύπανση.
- Αθόρυβη λειτουργία.
- Αξιοπιστία και μεγάλη διάρκεια ζωής (που φθάνει τα 30 χρόνια).
- Απεξάρτηση από την τροφοδοσία καυσίμων για τις απομακρυσμένες περιοχές.
- Δυνατότητα επέκτασης ανάλογα με τις ανάγκες.
- Ελάχιστη συντήρηση.

Τα φωτοβολταϊκά συνεπάγονται σημαντικά οφέλη για το περιβάλλον και την κοινωνία. Οφέλη για τον καταναλωτή, για τις αγορές ενέργειας και για τη βιώσιμη ανάπτυξη. Τα φωτοβολταϊκά είναι μία από τις πολλά υποσχόμενες τεχνολογίες της νέας εποχής που ανατέλλει στο χώρο της ενέργειας. Μιας νέας εποχής που θα χαρακτηρίζεται ολοένα και περισσότερο από τις μικρές

αποκεντρωμένες εφαρμογές σε ένα περιβάλλον απελευθερωμένης αγοράς. Τα μικρά, ευέλικτα συστήματα που μπορούν να εφαρμοστούν σε επίπεδο κατοικίας, εμπορικού κτιρίου ή μικρού σταθμού ηλεκτροπαραγωγής (όπως π.χ. τα φωτοβολταϊκά, τα μικρά συστήματα συμπαραγωγής, οι μικροτουρμπίνες και οι κυψέλες καυσίμου) αναμένεται να κατακτήσουν ένα σημαντικό μερίδιο της ενεργειακής αγοράς στα χρόνια που έρχονται.

Ένα επιπλέον κοινό αυτών των νέων τεχνολογιών είναι η φιλικότητά τους προς το περιβάλλον. Η ηλιακή ενέργεια είναι μια καθαρή, ανεξάντλητη, ήπια και ανανεώσιμη ενεργειακή πηγή. Η ηλιακή ακτινοβολία δεν ελέγχεται από κανέναν και αποτελεί ένα ανεξάντλητο εγχώριο ενεργειακό πόρο, που παρέχει ανεξαρτησία, προβλεψιμότητα και ασφάλεια στην ενεργειακή τροφοδοσία. Τα φωτοβολταϊκά είναι λειτουργικά καθώς προσφέρουν επεκτασιμότητα της ισχύος τους και δυνατότητα αποθήκευσης της παραγόμενης ενέργειας (στο δίκτυο ή σε συσσωρευτές) αναιρώντας έτσι το μειονέκτημα της ασυνεχούς παραγωγής ενέργειας. Δίνοντας τον απόλυτο έλεγχο στον καταναλωτή, και άμεση πρόσβαση στα στοιχεία που αφορούν την παραγόμενη και καταναλισκόμενη ενέργεια, τον καθιστούν πιο προσεκτικό στον τρόπο που καταναλώνει την ενέργεια και συμβάλλουν έτσι στην ορθολογική χρήση και εξοικονόμηση της ενέργειας.

Για τις επιχειρήσεις παραγωγής ηλεκτρισμού, υπάρχουν ευδιάκριτα τεχνικά και εμπορικά πλεονεκτήματα από την εγκατάσταση μικρών συστημάτων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Όσο περισσότερα συστήματα παραγωγής ενέργειας εγκατασταθούν και συνδεθούν με το δίκτυο ηλεκτροδότησης, τόσο περισσότερα είναι τα οφέλη για τις επιχειρήσεις, όπως π.χ. η βελτίωση της ποιότητας της ηλεκτρικής ισχύος, η σταθερότητα της ηλεκτρικής τάσης και η μείωση των επενδύσεων για νέες γραμμές μεταφοράς. Η βαθμιαία αύξηση των μικρών ηλεκτροπαραγωγών μπορεί να καλύψει αποτελεσματικά τη διαρκή αύξηση της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία σε διαφορετική περίπτωση θα έπρεπε να καλυφθεί με μεγάλες επενδύσεις για σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής. Η παραγωγή ηλεκτρισμού από μικρούς παραγωγούς μπορεί να περιορίσει επίσης την ανάγκη επενδύσεων σε νέες γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Το κόστος μιας νέας γραμμής μεταφοράς είναι πολύ υψηλό, αν λάβουμε υπόψη μας πέρα από τον τεχνολογικό εξοπλισμό και θέματα που σχετίζονται με την εξάντληση των φυσικών πόρων και τις αλλαγές στις χρήσεις γης.

Οι διάφοροι μικροί παραγωγοί πράσινης ηλεκτρικής ενέργειας αποτελούν ιδανική λύση για τη μελλοντική παροχή ηλεκτρικής ενέργειας στις περιπτώσεις όπου αμφισβητείται η ασφάλεια της παροχής. Η τοπική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας δεν δοκιμάζεται από δαπανηρές ενεργειακές απώλειες που αντιμετωπίζει το ηλεκτρικό δίκτυο (απώλειες, οι οποίες στην Ελλάδα ανέρχονται σε 12% κατά μέσο όρο). Από την άλλη, η μέγιστη παραγωγή ηλιακού ηλεκτρισμού συμπίπτει χρονικά με τις ημερήσιες αιχμές της ζήτησης

(ιδίως τους καλοκαιρινούς μήνες), βοηθώντας έτσι στην εξομάλυνση των αιχμών φορτίου και στη μείωση του συνολικού κόστους της ηλεκτροπαραγωγής, δεδομένου ότι η κάλυψη αυτών των αιχμών είναι ιδιαίτερα δαπανηρή.

Τα φωτοβολταϊκά, εκτός από καθαρή ενέργεια, παρέχουν ακόμη προσέλκυση πελατών και αξιοπιστία σε ένα απελευθερωμένο περιβάλλον. Σε ένα υψηλά ανταγωνιστικό περιβάλλον, οι επιχειρήσεις παραγωγής ηλεκτρισμού χρειάζονται κίνητρα για να προσελκύσουν και να διατηρήσουν τους πελάτες τους. Τα προγράμματα καθαρής ενέργειας μπορούν να είναι ελκυστικά σε αρκετά μεγάλο αριθμό καταναλωτών που ενδιαφέρονται γενικά για το περιβάλλον και ειδικότερα για τις κλιματικές αλλαγές. Σήμερα οι καταναλωτές στις απελευθερωμένες ενεργειακές αγορές δεν αγοράζουν απλά τη φθηνότερη ηλεκτρική ενέργεια, καθώς υπάρχει πλέον θέμα τόσο ποιότητας όσο και υπηρεσιών. Όσον αφορά στην ποιότητα του ηλεκτρισμού, τα θέματα είναι ξεκάθαρα: η ενέργεια που χρησιμοποιείται προέρχεται από θερμοηλεκτρικό σταθμό που χρησιμοποιεί ορυκτά καύσιμα και καταστρέφει το περιβάλλον, ενώ μπορεί να προέλθει από μια μονάδα που δεν ρυπαίνει το περιβάλλον.

Αυτά αποτελούν θέματα που απασχολούν οπωσδήποτε τις έξυπνες επιχειρήσεις παραγωγής ενέργειας. Η επιχείρηση που αποδέχεται τα φωτοβολταϊκά συστήματα θα προσελκύσει πελάτες-παραγωγούς που θα χρησιμοποιούν φωτοβολταϊκά και θα πωλούν στη συνέχεια σε αυτή καθαρή ενέργεια. Σε ένα περιβάλλον απελευθερωμένης αγοράς, τέτοιοι πελάτες-παραγωγοί μπορεί να βρίσκονται οπουδήποτε. Τα φωτοβολταϊκά μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως δομικά υλικά παρέχοντας τη δυνατότητα για καινοτόμους αρχιτεκτονικούς σχεδιασμούς, καθώς διατίθενται σε ποικιλία χρωμάτων, μεγεθών, σχημάτων και μπορούν να παρέχουν ευελιξία και πλαστικότητα στη φόρμα, ενώ δίνουν και δυνατότητα διαφορικής διαπερατότητας του φωτός ανάλογα με τις ανάγκες του σχεδιασμού. Αντικαθιστώντας άλλα δομικά υλικά συμβάλλουν στη μείωση του συνολικού κόστους μιας κατασκευής (ιδιαίτερα σημαντικό στην περίπτωση των ηλιακών προσόψεων σε εμπορικά κτίρια).

1.11.2 Μειονεκτήματα

Το σχετικά υψηλό κόστος αγοράς και η έλλειψη επιδοτήσεων στον οικιακό καταναλωτή (κάτι που ισχύει σήμερα στην Ελλάδα, όχι όμως και σε άλλες χώρες). Τα φωτοβολταϊκά, όπως άλλωστε και όλες οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ), έχουν υψηλό αρχικό κόστος επένδυσης και ασήμαντο λειτουργικό κόστος, αντίθετα με τις συμβατικές ενεργειακές τεχνολογίες που συνήθως έχουν σχετικά μικρότερο αρχικό επενδυτικό κόστος και υψηλά λειτουργικά κόστη. Παρόλα αυτά, ήδη το κλίμα φαίνεται να αλλάζει. Πολλές

χώρες έχουν ξεκινήσει τα τελευταία χρόνια σημαντικά προγράμματα ενίσχυσης των φωτοβολταϊκών, με γενναίες επιδοτήσεις τόσο της αγοράς και εγκατάστασης φωτοβολταϊκών, όσο και της παραγόμενης ηλιακής κιλοβατώρας .

Κεφάλαιο 2 Θεωρία τρανζίστορ MOSFET

2.1 Τεχνολογία MOSFET

2.1.1 Εισαγωγή

Το MOSFET (Metal – Oxide Semiconductor FET) είναι και αυτή μια διάταξη η οποία έχει πηγή, πύλη και απαγωγό. Σε αντίθεση όμως με το JFET, η πύλη είναι ηλεκτρικά μονωμένη ως προς το κανάλι, με αποτέλεσμα το ρεύμα πύλης να είναι πάρα πού μικρό, ανεξάρτητα από τη φορά της τάσης που εφαρμόζεται μεταξύ πύλης και πηγής. Ως μονωτικό, χρησιμοποιείται ένα πολύ λεπτό στρώμα διοξειδίου του πυριτίου, το οποίο παρεμβάλλεται μεταξύ της μεταλλικής πύλης και του ημιαγωγού.

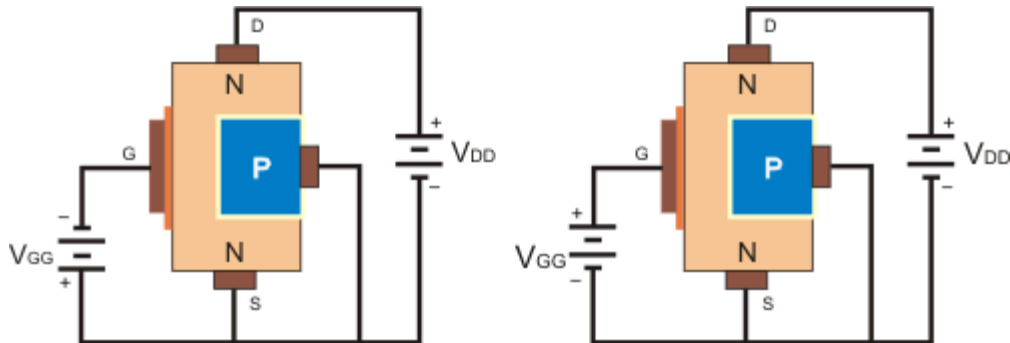
Το MOSFET καλείται και IGFET (Insulated Gate FET), επειδή η πύλη είναι μονωμένη. Σ' ένα MOSFET ο τύπος του καναλιού καθορίζεται από το είδος των φορτίων, ηλεκτρόνια ή οπές, τα οποία μεταφέρουν το ρεύμα από την πηγή στον απαγωγό. Επιπλέον τα MOSFET χωρίζονται σε δυο κατηγορίες: τα MOSFET τύπου αραίωσης και τα MOSFET τύπου πύκνωσης, ανάλογα με τον τρόπο λειτουργίας τους.

2.1.2 MOSFET τύπου αραίωσης

Το MOSFET αραίωσης αποτελείται από ένα τμήμα ημιαγωγού τύπου N. Στα άκρα αυτού του τμήματος συνδέονται οι ακροδέκτες πηγής και απαγωγού. Η εφαρμογή μιας τάσης μεταξύ πηγής και απαγωγού, όπου ο απαγωγός συνδέεται στο θετικό πόλο της πηγής, εξαναγκάζει τα ηλεκτρόνια σε ροή από την πηγή προς τον απαγωγό. Το MOSFET, αντίθετα με τα JFET, έχει μια μόνο περιοχή P, η οποία ονομάζεται υπόστρωμα. Η περιοχή αυτή περιορίζει τη διατομή του καναλιού με αποτέλεσμα να παραμείνει ένα πολύ λεπτό στρώμα το οποίο επιτρέπει στα ελεύθερα ηλεκτρόνια να κινούνται από την πηγή στον απαγωγό. Ένα πολύ λεπτό υμένιο διοξειδίου του πυριτίου αποτίθεται στην αντίθετη πλευρά του καναλιού και πάνω σε αυτό τοποθετείται η μεταλλική πύλη.

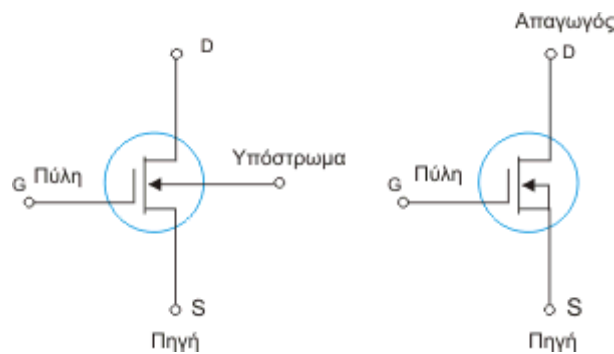
Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται ένα MOSFET τύπου αραίωσης στο οποίο έχει εφαρμοστεί μια αρνητική τάση στην πύλη. Η πηγή τάσης V_{DD} υποχρεώνει τα ηλεκτρόνια να μετακινούνται από την πηγή στον απαγωγό μέσα από το λεπτό κανάλι, το οποίο βρίσκεται μεταξύ της περιοχής P και της πύλης. Η αρνητική τάση που εφαρμόζεται στη πύλη απωθεί τα ηλεκτρόνια του καναλιού, με αποτέλεσμα την ελάττωση της πυκνότητας τους και συνεπώς την ελάττωση του ρεύματος απαγωγού. Αυτή η λειτουργία ονομάζεται λειτουργία

αραίωσης. Όταν η τάση της πύλης γίνεται περισσότερο αρνητική ελαττώνεται το ρεύμα του απαγωγού και όταν γίνει αρκετά αρνητική το ρεύμα αυτό αποκόπτεται. Επειδή η πύλη είναι ηλεκτρικά μονωμένη ως προς το κανάλι, είναι δυνατή η εφαρμογή θετικής τάσης.

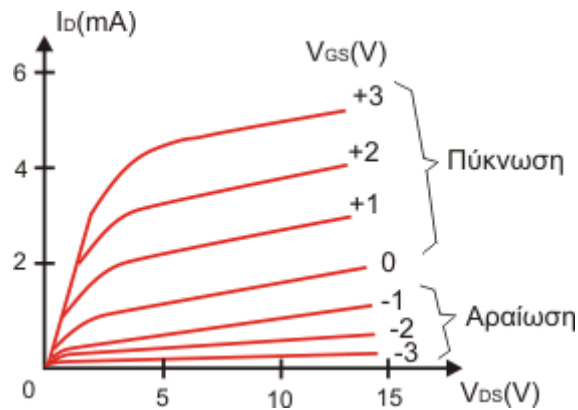


Μια θετική τάση στην πύλη έχει ως αποτέλεσμα να προσελκύνονται ηλεκτρόνια προς την πλευρά της πύλης και συνεπώς να αυξάνεται η πυκνότητα τους μέσα στο κανάλι. Αυτή η λειτουργία ονομάζεται λειτουργία πύκνωσης. Έτσι, το κανάλι, αν και πρακτικά δεν αλλάζει διαστάσεις, γίνεται περισσότερο αγώγιμο με αποτέλεσμα να αυξηθεί το ρεύμα απαγωγού.

Το ρεύμα της πύλης είναι αμελητέο και στους δυο τρόπους λειτουργίας. Έτσι, και στις δυο περιπτώσεις, η αντίσταση εισόδου της πύλης είναι πολύ μεγάλη, από 10^{10} μέχρι 10^{14} Ωμ. Συμπληρωματικό στοιχείο ενός MOSFET N-καναλιού είναι το MOSFET P-καναλιού.



Στο σχήμα δίδεται το κυκλωματικό σύμβολο ενός MOSFET τύπου αραίωσης. Η πύλη έχει τη μορφή σπλισμού ενός πυκνωτή. Δεξιά από την πύλη υπάρχει μια λεπτή γραμμή, η οποία παριστάνει το κανάλι. Το βέλος του υποστρώματος δείχνει προς το N-τύπου ημιαγωγό, οπότε η διάταξη αυτή είναι ένα MOSFET N-καναλιού. Στις περισσότερες περιπτώσεις ο κατασκευαστής συνδέει εσωτερικά το υπόστρωμα με την πηγή, οπότε έχουμε μια διάταξη τριών ακροδεκτών όπως στο σχήμα.

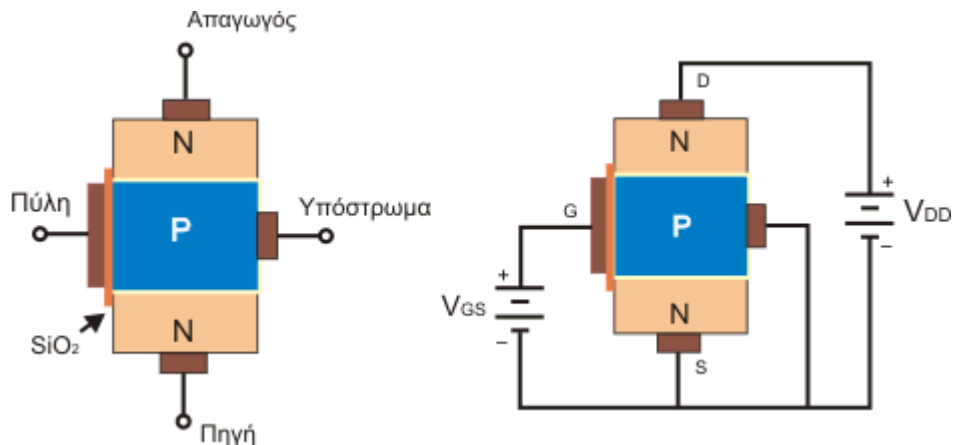


Οι χαρακτηριστικές απαγωγού ενός MOSFET N-καναλιού παρουσιάζονται στο σχήμα. Θα πρέπει να παρατηρήσει κανείς ότι οι καμπύλες που βρίσκονται στο άνω τμήμα των χαρακτηριστικών αντιστοιχούν σε θετικές τιμές τάσης πύλης, όπου έχουμε λειτουργία πύκνωσης ($V_{GS} > 0V$). Η χαμηλότερη καμπύλη για την οποία το ρεύμα απαγωγού είναι σχεδόν μηδέν αντιστοιχεί σε τάση πύλης ίση με την τάση αποκοπής ($V_{GS} = V_{GS(off)}$). Οι καμπύλες για τις οποίες η τάση πύλης βρίσκεται μεταξύ της $V_{GS(off)}$ και του μηδέν αντιστοιχούν σε λειτουργία αραιώσης ($V_{GS} < 0V$).

Έχοντας όλα αυτά υπόψη, μπορούμε να πούμε ότι κάθε MOSFET το οποίο μπορεί να λειτουργήσει είτε με αραιώση είτε με πύκνωση ονομάζεται MOSFET τύπου αραιώσης.

2.1.3 MOSFET τύπου πύκνωσης

Ένας άλλος τύπος MOSFET, ο οποίος εφαρμόζεται κατά κύριο λόγο στα ψηφιακά κυκλώματα, είναι το MOSFET τύπου πύκνωσης. Αυτό το MOSFET λειτουργεί αποκλειστικά με πύκνωση και επιτρέπει την ταυτόχρονη ολοκλήρωση στο ίδιο τσιπ διατάξεων N-καναλιού και P-καναλιού με αποτέλεσμα τη δημιουργία συστημάτων συμπληρωματικών στοιχείων και συνεπώς των κυκλωμάτων CMOS (Complementary MOS). Πρέπει να επισημανθεί ότι η ανάπτυξη της μικροηλεκτρονικής στον τομέα των ψηφιακών κυκλωμάτων και ειδικότερα των μικροεπεξεργαστών, οι οποίοι περιέχουν περισσότερο από ένα εκατομμύριο MOSFET σε κάθε ψηφίδα, οφείλεται στα MOSFET τύπου πύκνωσης. Επιπλέον, MOSFET τύπου πύκνωσης χρησιμοποιούνται και σε εφαρμογές ισχύος με διάφορες ονομασίες όπως V-MOSFET (Siliconix, Temic), T-MOSFET (Motorola), HEXFET (IRF) κλπ, ανάλογα με τη βελτιστοποιημένη δομή, την οποία έχουν επιτύχει διάφοροι κατασκευαστές τους.

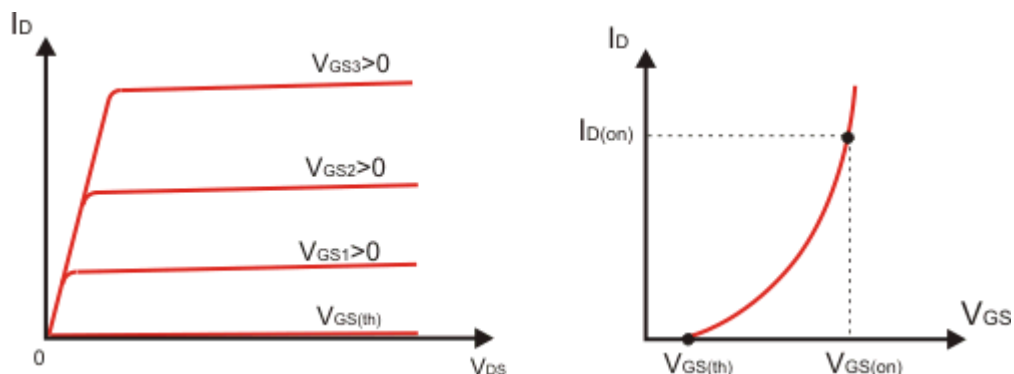


Η δομή των MOSFET τύπου πύκνωσης διαφέρει από αυτή των MOSFET τύπου αραίωσης. Σε αυτά το υπόστρωμα εκτείνεται μέχρι την επίστρωση του οξειδίου, με αποτέλεσμα να μην υπάρχει κανάλι μεταξύ πηγής και απαγωγού αλλά μόνο μια δομή η οποία μοιάζει με δυο διόδους συνδεδεμένες αντίθετα μεταξύ τους.

Για να γίνει κατανοητή η λειτουργία ενός MOSFET τύπου πύκνωσης θα πρέπει κατ' αρχήν να εφαρμοστούν οι κανονικές πολικότητες της πύλης και του απαγωγού. Αρχικά θεωρούμε ότι η τάση της πύλης είναι μηδέν, δηλαδή ότι έχουμε κατάσταση βραχυκυκλωμένης πύλης. Σ' αυτή την περίπτωση το ρεύμα δεν μπορεί να διέλθει από την πηγή στον απαγωγό διότι αφενός το P-τύπου υπόστρωμα έχει πάρα πολύ λίγα ελεύθερα ηλεκτρόνια και αφετέρου η διάδος υποστρώματος – απαγωγού είναι ανάστροφα πολωμένη. Έτσι στην κατάσταση βραχυκυκλωμένης πύλης το ρεύμα του απαγωγού είναι αμελητέο.

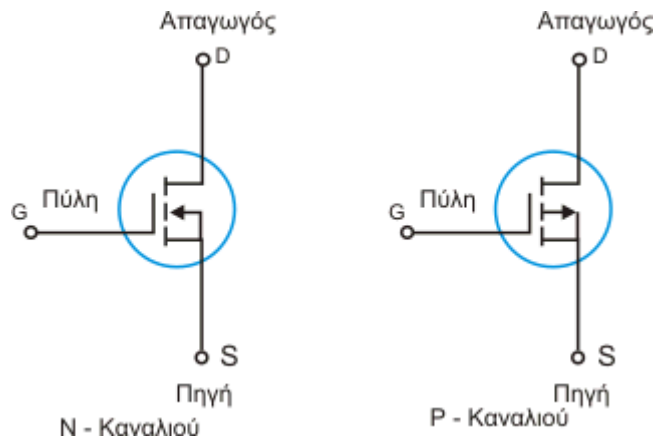
Για να υπάρξει ρεύμα απαγωγού πρέπει να υπάρξουν ηλεκτρόνια στο υπόστρωμα, δηλαδή το υπόστρωμα να μετατραπεί – έστω τοπικά – σε N – τύπου ώστε να μην υπάρχουν οι διόδοι υποστρώματος – απαγωγού. Αυτό επιτυγχάνεται χάρις στο γεγονός ότι η πύλη σχηματίζει ένα πυκνωτή με το υπόστρωμα. Έτσι, αν εφαρμοστεί μια αρκετά «υψηλή» θετική τάση στην πύλη τότε ο σπλισμός της πύλης του πυκνωτή πύλης-υποστρώματος, φορτίζεται θετικά. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να συσσωρευτεί αρνητικό φορτίο, δηλαδή ηλεκτρόνια στο υπόστρωμα. Το φορτίο αυτό συσσωρεύεται στην περιοχή του υποστρώματος, η οποία βρίσκεται ακριβώς κάτω από το λεπτό στρώμα του οξειδίου της πύλης καλύπτοντας όλη τη διαδρομή από την πηγή μέχρι τον απαγωγό. Έτσι δημιουργείται, τοπικά, ένα πολύ λεπτό στρώμα στο οποίο η συγκέντρωση των ηλεκτρονίων είναι μεγαλύτερη από εκείνη των οπών. Το στρώμα αυτό συμπεριφέρεται ως τύπου-N και η παρουσία του αποκαθιστά την αγωγιμότητα και συνεπώς το ηλεκτρικό ρεύμα, μεταξύ πηγής και απαγωγού. Αν, στη συνέχεια, αυξηθεί η θετική τάση της πύλης, θα αυξηθεί και η πυκνότητα των ηλεκτρονίων στο υπόστρωμα. Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του ρεύματος απαγωγού. Επειδή το κανάλι είναι N-τύπου, η διάταξη θα είναι MOSFET πύκνωσης N-καναλιού.

Το υπόστρωμα είναι P-τύπου και με την παρουσία του ισχυρού ηλεκτρικού πεδίου ένα λεπτό στρώμα αυτού, το οποίο εφάπτεται του στρώματος διοξειδίου του πυριτίου, μετατρέπεται σε N-τύπου. Αυτό το λεπτό στρώμα, το οποίο αλλάζει τύπο αγωγιμότητας, ονομάζεται στρώμα αναστροφής N-τύπου. Η ελάχιστη τάση πύλης-πηγής, η οποία προκαλεί την εμφάνιση του στρώματος αναστροφής N-τύπου ονομάζεται τάση κατωφλίου και σημειώνεται με $V_{GS(th)}$. Έτσι, όταν η τάση της πύλης είναι μικρότερη από την τάση κατωφλίου το MOSFET είναι ανοικτό. Αντίθετα, όταν η τάση της πύλης είναι μεγαλύτερη από την τάση κατωφλίου, το MOSFET άγει.



Στο σχήμα παρουσιάζονται οι χαρακτηριστικές ρεύματος απαγωγού συναρτήσει της τάσης απαγωγού-πηγής για διάφορες τιμές της τάσης πύλης. Η χαμηλότερα ευρισκόμενη καμπύλη αντιστοιχεί σε τάση πύλης ίση με την τάση κατωφλίου $V_{GS(th)}$. Έτσι όταν η τάση πύλης είναι μικρότερη της τάσης κατωφλίου το ρεύμα απαγωγού είναι σχεδόν μηδέν. Αντίθετα, όταν η τάση πύλης είναι μεγαλύτερη από την τάση κατωφλίου το MOSFET άγει και το ρεύμα απαγωγού καθορίζεται από την τάση πύλης. Στις χαρακτηριστικές του σχήματος παρατηρούμε μια συμπεριφορά αντίστοιχη με αυτή των MOSFET αραίωσης, δηλαδή μια περιοχή όπου το ρεύμα παραμένει σχεδόν σταθερό (ενεργός περιοχή ή περιοχή πηγής ρεύματος). Στο σχήμα παρουσιάζεται η χαρακτηριστική διαγωγιμότητας, η οποία και στην περίπτωση των MOSFET πύκνωσης αποτελεί μέρος μιας παραβολής. Η παραβολή αρχίζει, όπως αναμένεται από τα παραπάνω, από το σημείο $V_{GS(th)}$.

Στην κατάσταση βραχυκυκλωμένης πύλης το MOSFET τύπου πύκνωσης βρίσκεται σε κατάσταση off, επειδή δεν υπάρχει κανάλι μεταξύ πηγής και απαγωγού. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα στο κυκλωματικό σύμβολο το κανάλι να δηλώνεται με μια διακεκομμένη γραμμή και κατά αυτό τον τρόπο, να διαφέρει από εκείνο του MOSFET αραίωσης. Στο παρακάτω σχήμα δίδεται και το κυκλωματικό σύμβολο ενός MOSFET πύκνωσης.

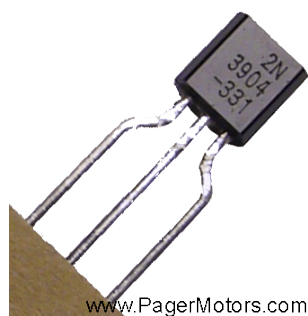


Σε κάθε τύπο MOSFET, αραιώσης ή πύκνωσης, παρεμβάλλεται μεταξύ της πύλης και του καναλιού ένα λεπτό στρώμα διοξειδίου του πυριτίου. Αυτό το πάχος του στρώματος του διοξειδίου του πυριτίου και η διηλεκτρική αντοχή του υλικού (10^7 V/cm) συνεπάγεται ότι η τάση που εφαρμόζεται στην πύλη μπορεί να κυμαίνεται σε κάποια όρια, τα οποία αν ξεπεραστούν το MOSFET καταστρέφεται. Τα όρια τάσης πύλης καθορίζονται με το $V_{GS(max)}$ και στην περίπτωση του VN10 είναι $V_{GS(max)} = \pm 40V$

Το μονωτικό στρώμα του διοξειδίου του πυριτίου της πύλης μπορεί να καταστραφεί και από άλλους λιγότερο προφανείς λόγους, εκτός από την επιβολή υψηλής τάσης. Η τοποθέτηση ή η απομάκρυνση του MOSFET από ένα κύκλωμα, το οποίο ήδη τροφοδοτείται, μπορεί να οδηγήσει στην ανάπτυξη μεταβατικών τάσεων υψηλότερων από τη $V_{GS(max)}$. Επίσης τα ηλεκτροστατικά φορτία που εναποτίθενται στην πύλη ενός MOSFET όταν το πιάνουμε, μπορούν να αναπτύξουν τάσεις που υπερβαίνουν τη $V_{GS(max)}$. Γι' αυτό το λόγο τα MOSFET προστατεύονται με αγώγιμο δακτυλίδι, το οποίο απομακρύνεται μετά την τοποθέτησή τους ή μεταφέρονται σε αγώγιμο σάκο και τοποθετούνται από τεχνικούς, οι οποίοι πατούν σε γειωμένο αγώγιμο δάπεδο ή φέρουν αγώγιμο βραχιόλι το οποίο είναι επίσης γειωμένο.[2book]

2.2 Τεχνολογία τρανζίστορ

2.2.1 Γενικά για το τρανζίστορ



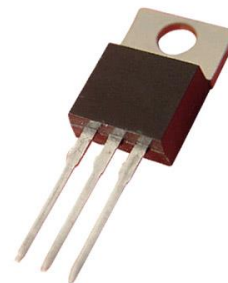
www.PagerMotors.com

Το τρανζίστορ ανακαλύφθηκε το 1948 από τους J. Bardeen και W. Brattain στα εργαστήρια της αμερικάνικης εταιρείας τηλεπικοινωνιών Bell. Το 1956 αυτοί μαζί με τον συνεργάτη τους W. Shockley που διατύπωσε την θεωρία του τρανζίστορ επαφής, τιμήθηκαν με το βραβείο Nobel. Πράγματι, το τρανζίστορ είναι μια επαναστατική εφεύρεση, που έχει αλλάξει τον τρόπο ζωής μας, αφού είναι το βασικό δομικό κομμάτι των ηλεκτρονικών συσκευών που κυκλοφορούν σήμερα,

από τους ηλεκτρονικούς υπολογιστές, τα κινητά έως τους ραδιοηλεκτρονικούς δέκτες.

2.2.2 Το διπολικό τρανζίστορ επαφής BJT

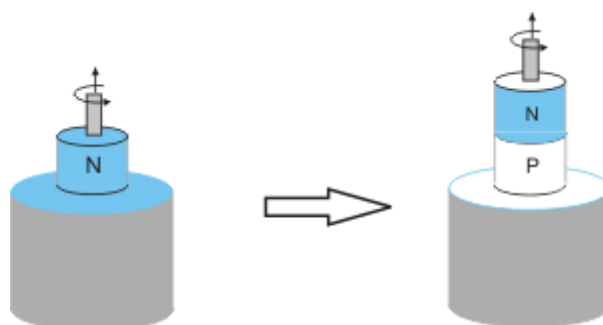
Το τρανζίστορ BJT αποτελείται από τρεις περιοχές ημιαγωγών τύπου N και τύπου P εναλλάξ. Προκύπτουν δυο συνδιασμοί το τρανζίστορ NPN και το PNP. Αυτός ο τύπος τρανζίστορ, αποτελείται από τον εκπομπό στο ένα άκρο του, που είναι ένας ημιαγωγός έντονα εμπλουτισμένος, που έχει την ιδιότητα να εκπέμπει φορείς προς τη βάση που αποτελεί το ενδιάμεσο τμήμα. Η βάση για το λόγο ότι είναι λεπτή και λιγότερο εμπλουτισμένη διαχέει τους φορείς που προέρχονται από τον εκπομπό προς το συλλέκτη, που αποτελεί το άλλο άκρο του τρανζίστορ. Στην κανονική λειτουργία του τρανζίστορ η επαφή του εκπομπού είναι ορθά πολωμένη ενώ η επαφή του συλλέκτη είναι ανάστροφα πολωμένη. Στη λειτουργία του τρανζίστορ, μια μικρή μεταβολή στο ρεύμα βάσης προκαλεί μια μεγάλη μεταβολή στο ρεύμα συλλέκτη και έτσι προκύπτει η ενισχυτική δράση του τρανζίστορ. Μια χαρακτηριστική παράμετρος του τρανζίστορ είναι το βήτα β για την οποία ισχύει $I_C = \beta I_B$, όπου I_C είναι το ρεύμα συλλέκτη και I_B το ρεύμα της βάσης. Το τρανζίστορ κατασκευάζεται σε διάφορους τύπους ανάλογα το υλικό κατασκευής π.χ. γερμάνιο παλαιότερα ή πυρίτιο, σαν τρανζίστορ γενικής χρήσης ή σαν τρανζίστορ ισχύος, επίσης ορισμένοι τύποι κατασκευάζονται για να λειτουργούν στις υψηλές συχνότητες. Το τρανζίστορ κατασκευάζεται με διάφορους μεθόδους π.χ. τρανζίστορ ανάπτυξης, κράματος, planar, epitaxial κ.τ.λ. και περικλείεται σε διάφορες συσκευασίες.



2.2.3 Κατασκευή των τρανζίστορ

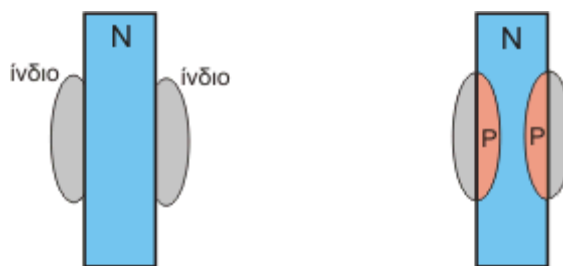
Μέθοδος ανάπτυξης

Ένα κομμάτι κρυστάλλου καθαρού ημιαγωγού πυριτίου, βυθίζεται σε τήγμα ημιαγωγού με προσμίξεις. Στη συνέχεια αυτό το κομμάτι περιστρέφεται ενώ ταυτόχρονα ανυψώνεται. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να ανυψώνει και υλικό του λιωμένου ημιαγωγού που στερεοποιείται καθώς ψύχεται. Στη συνέχεια αφού λειανθεί το κάτω μέρος ο κρύσταλλος βυθίζεται και πάλι σε τήγμα ημιαγωγού αντίθετου τύπου. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται συνεχώς ώσπου να δημιουργηθεί ένας κύλινδρος ημιαγωγού με διαδοχικές περιοχές P και N. Στο τέλος ο κρύσταλλος τεμαχίζεται σε κομμάτια NPN ή PNP. Έπειτα συγκολλούνται οι ακροδέκτες σε κάθε κομμάτι και τοποθετούνται σε θήκη όπου αναγράφονται τα στοιχεία του τρανζίστορ.



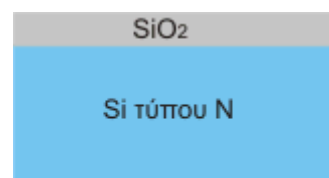
Μέθοδος κράματος

Πάνω στις δυο απέναντι πλευρές μιας λεπτής πλάκας ημιαγωγού τύπου N, τοποθετείται μικρή ποσότητα από κράμα τρισθενούς στοιχείου. Η διάταξη αυτή θερμαίνεται στους 600° C. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα το κράμα τρισθενούς στοιχείου να εισχωρήσει στη μάζα της λεπτής πλάκας σχηματίζοντας τμήμα ημιαγωγού τύπου P. Στη συνέχεια η διάταξη ψύχεται ενώ ταυτόχρονα στερεώνονται οι ακροδέκτες.

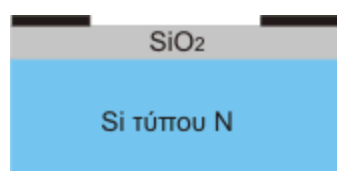


Μέθοδος Planar

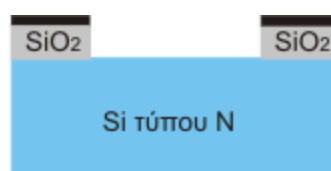
Η μέθοδος Planar είναι η επικρατούσα μέθοδος για την παραγωγή τρανζίστορ καθώς και των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων. Λεπτό στρώμα ημιαγωγού πυριτίου τύπου N τοποθετείται σε φούρνο θερμοκρασίας 1200° C ενώ ταυτόχρονα διαβιβάζεται οξυγόνο ή υδρατμοί. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να οξειδωθεί το πυρίτιο και να δημιουργηθεί στην επιφάνεια του διοξείδιο του πυριτίου SiO_2 που είναι άριστο μονωτικό (σχήμα 1).



ΣΧΗΜΑ 1

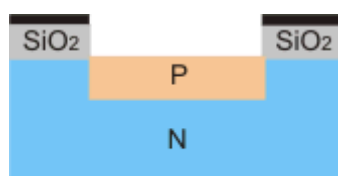


ΣΧΗΜΑ 2



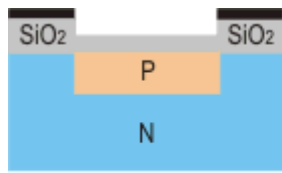
ΣΧΗΜΑ 3

Στη συνέχεια τοποθετείται με φωτοχημική μέθοδο μάσκα προστασίας πάνω στην επιφάνεια SiO_2 (σχήμα 2). Το τμήμα του οξειδίου SiO_2 που έχει μείνει ακάλυπτο από τη μάσκα αφαιρείται με ειδική χημική επεξεργασία με οξέα (σχήμα 3). Η αφαίρεση επιλεκτικών τμημάτων οξειδίου SiO_2 με τοποθέτηση μάσκας και χρήση οξέων ονομάζεται φωτολιθογραφική μέθοδος.

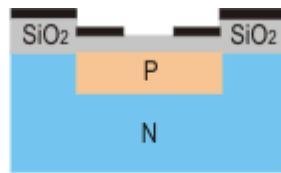


ΣΧΗΜΑ 4

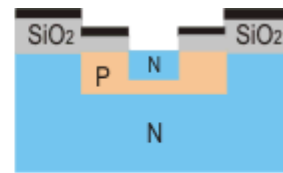
Στη συνέχεια, στο τμήμα που έχει αφαιρεθεί το SiO_2 διαχέονται προσμίξεις τρισθενών στοιχείων και έτσι δημιουργείται μια περιοχή τύπου P (σχήμα 4).



ΣΧΗΜΑ 5

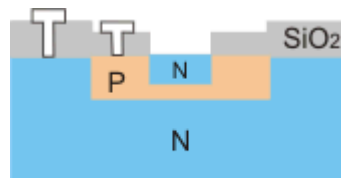


ΣΧΗΜΑ 6



ΣΧΗΜΑ 7

Έπειτα η διάταξη τοποθετείται σε φούρνο ενώ ταυτόχρονα διαβιβάζεται ταυτόχρονα οξυγόνο. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να καλυφθεί η περιοχή P με ένα λεπτό στρώμα οξειδίου SiO_2 (σχήμα 5). Αμέσως μετά αφαιρείται με τη βοήθεια καινούργια μάσκας τμήμα του οξειδίου SiO_2 και διαχέεται στο ακάλυπτο τμήμα πεντασθενείς προσμίξεις που σχηματίζουν μια περιοχή τύπου N (σχήμα 7).

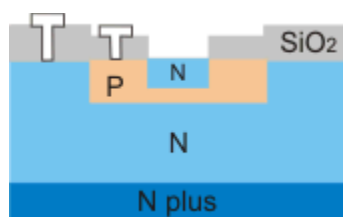


ΣΧΗΜΑ 8

Στην συνέχεια δημιουργούνται ανοίγματα στο οξείδιο SiO_2 που βρίσκονται πάνω από τα τμήματα του συλλέκτη, της βάσης και του εκπομπού και τοποθετούνται ακροδέκτες από αλουμίνιο (σχήμα 8).

Η μέθοδος Epitaxial

Η παραγωγή τρανζίστορ με τη μέθοδο epitaxial είναι όμοια με τη μέθοδο planar με τη διαφορά ότι τα τρανζίστορ κατασκευάζονται πάνω σε λεπτή πλάκα (υπόστρωμα) ημιαγωγού με μεγάλη πυκνότητα προσμίξεων τύπου N.



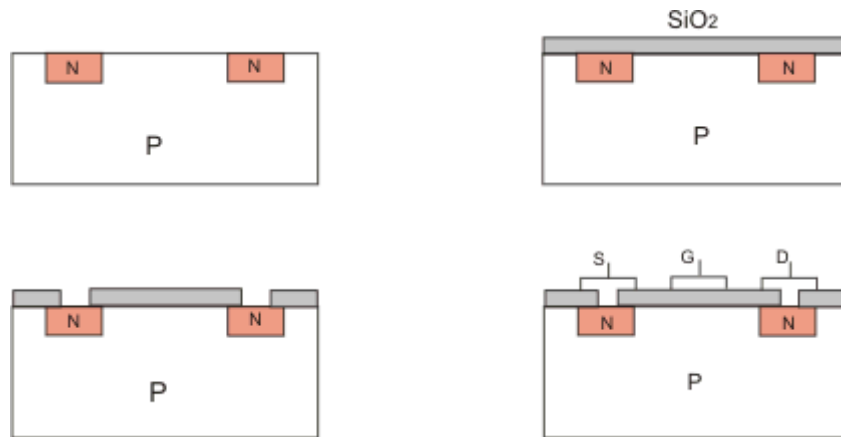
2.3 Τεχνολογία τρανζίστορ MOSFET

Η λειτουργία του τρανζίστορ MOSFET βασίζεται στη δημιουργία ενός καναλιού συνήθως N στα άκρα του οποίου είναι συνδεδεμένοι οι ακροδέκτες της πηγής και του απαγωγού. Ο ακροδέκτης της πύλης ακροδέκτης βρίσκεται πάνω στο κανάλι και μονωμένος από αυτό. Μια τάση V_{DD} εφαρμόζεται μεταξύ πηγής και απαγωγού, η οποία προκαλεί κίνηση φορέων μέσα στο κανάλι. Μια

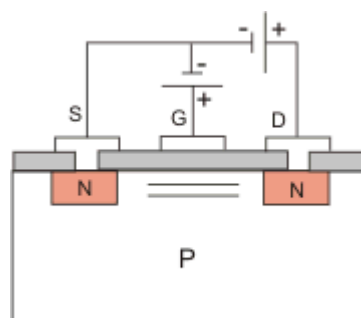
πηγή τάσης συνδέεται μεταξύ της πύλης και της πηγής. Η Μεταβολή αυτής της τάσης της πύλης έχει ως αποτέλεσμα τη πύκνωση ή την αραιώση των φορέων μέσα στο κανάλι και τελικά τη έχουμε τη ρύθμιση του ρεύματος του ρεύματος στο κανάλι μεταξύ πηγής και απαγωγού.

Διακρίνουμε δυο τύπους MOSFET ανάλογα με τον τρόπο κατασκευής και λειτουργίας τους α) Το MOSFET πύκνωσης και το β) MOSFET αραιώσης

2.3.1 Κατασκευή MOSFET πύκνωσης και αραιώσης



Για την κατασκευή του MOSFET πύκνωσης χρησιμοποιείται ένα υπόστρωμα τύπου P που δημιουργούνται με διάχυση δυο περιοχές τύπου N. Στη συνέχεια η διάταξη μπαίνει σε φούρνο με ατμόσφαιρα οξυγόνου οπότε καλύπτεται με ένα λεπτό στρώμα SiO_2 . Έπειτα με φωτοχημικές διεργασίες αφαιρείται τμήμα του SiO_2 που καλύπτει τα τμήματα N οπότε δημιουργούνται οι επαφές της πηγής και του απαγωγού με αλουμίνιο. Επίσης δημιουργείται και ο ακροδέκτης της πύλης μονωμένος πάνω από το κανάλι. Έτσι δημιουργείται το MOSFET πύκνωσης όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα.

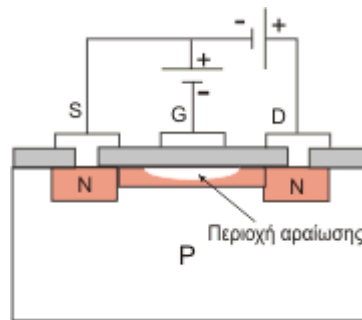


Στη λειτουργία του MOSFET πύκνωσης μια θετική τάση εφαρμόζεται μεταξύ απαγωγού και πηγής, όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα. Για να δημιουργηθεί ρεύμα πρέπει να εφαρμόσουμε μια θετική τάση στη πύλη. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την έλξη φορέων στο κανάλι και τη δημιουργία ρεύματος. Αύξηση της θετικής τάσης της πύλης έχει ως αποτέλεσμα την

πύκνωση των φορέων στο κανάλι και έτσι την αύξηση του ρεύματος στη διάταξη.



Για την κατασκευή του MOSFET αραίωσης πάνω σε ένα υπόστρωμα δημιουργούνται δυο περιοχές τύπου N που θα αποτελέσουν την πηγή και τον απαγωγό. Μεταξύ αυτών των δυο περιοχών δημιουργείται μια λεπτή περιοχή τύπου N με μικρότερο ποσοστό προσμίξεων που θα αποτελέσει το κανάλι του MOSFET. Στη συνέχεια καλύπτεται με στρώμα οξειδίου SiO_2 τμήματα του οποίου αφαιρούνται από τις περιοχές της πηγής και του απαγωγού και έπειτα δημιουργούνται οι επαφές από αλουμίνιο. Επίσης δημιουργείται και ο ακροδέκτης της πύλης μονωμένος πάνω από το κανάλι. Έτσι δημιουργείται το MOSFET αραίωσης όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα.



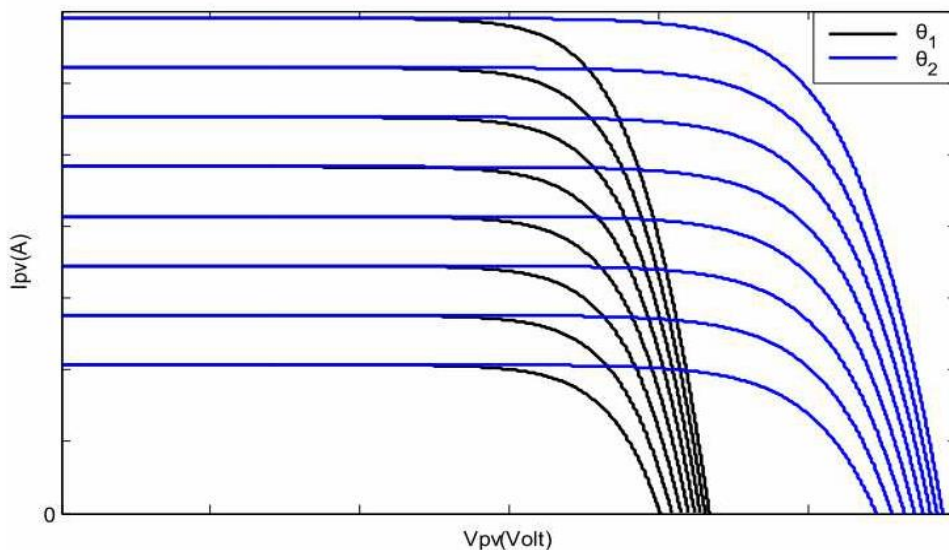
Στη λειτουργία του MOSFET αραίωσης μια θετική τάση εφαρμόζεται μεταξύ απαγωγού και πηγής και έτσι δημιουργείται ένα ρεύμα στη διάταξη από την πηγή προς τον απαγωγό μέσα από το κανάλι τύπου N, όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα. Στη συνέχεια πολώνουμε αρνητικά την πύλη ως προς την πηγή. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα το ηλεκτρόδιο της πύλης να ωθήσει τους φορείς του καναλιού (ηλεκτρόνια) κάτω στο υπόστρωμα και το κανάλι να αραιώσει από φορείς. Αυτό επιφέρει μείωση του ρεύματος απαγωγού. Με μεταβολή της τάσης πύλης έχουμε ρύθμιση του ρεύματος πηγής - απαγωγού. Έτσι μείωση της τάσης της πύλης έχουμε μείωση του ρεύματος της διάταξης ή με μεταβολή της τάσης πύλης προς θετικές τιμές έχουμε αύξηση των ηλεκτρονίων στο κανάλι με συνέπεια την αύξηση του ρεύματος μεταξύ πηγής και απαγωγού.[3-book]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 - Ανίχνευση Μέγιστου Σημείου Ισχύος MPP και Μετατροπείς

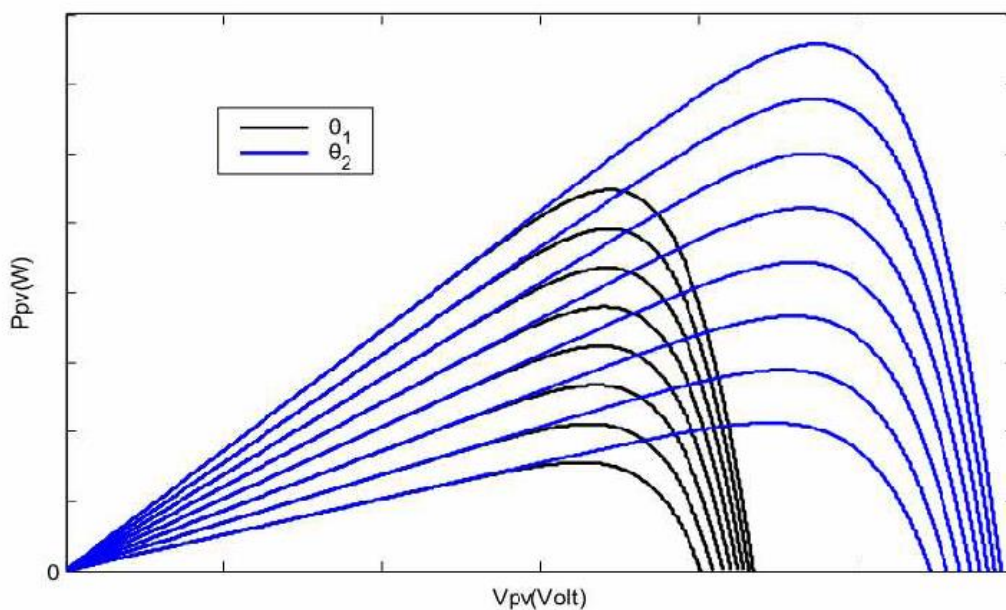
3.1 Ανίχνευση του Μέγιστου Σημείου ισχύος MPP

Η ηλιακή ενέργεια είναι άμεσα εκμεταλλεύσιμη, όπως είναι ήδη γνωστό, μέσω των φωτοβολταϊκών στοιχείων. Ωστόσο, δεν αρκούν μόνο τα φωτοβολταϊκά στοιχεία για την αξιοποίηση της ενέργειας. Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία παράγουν DC ρεύμα, το οποίο άλλοτε χρησιμοποιείται σε αυτή τη μορφή και άλλοτε μετατρέπεται σε εναλλασσόμενο μέσω διατάξεων **αντιστροφών**, κάποιες από τις οποίες θα παρουσιαστούν παρακάτω. Ωστόσο, η εξαγωγή της ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά στοιχεία δεν είναι απλή διαδικασία και παρουσιάζει αρκετές δυσκολίες. Μια από τις πιο σημαντικές δυσκολίες είναι η ανίχνευση του **Μέγιστου Σημείου Ισχύος** των φωτοβολταϊκών (σε διεθνή ορολογία **Maximum Power Point**).

Για να γίνει κατανοητό το τι ακριβώς είναι το Μέγιστο Σημείο Ισχύος, να αναφερθεί ότι μια συστοιχία φωτοβολταϊκών κάτω από σταθερή και ομοιόμορφη ακτινοβολία λειτουργεί σύμφωνα με μια χαρακτηριστική καμπύλη ρεύματος - τάσης. Σε αυτήν την καμπύλη υπάρχει ένα σημείο στο οποίο η συστοιχία φωτοβολταϊκών λειτουργεί με τη μέγιστη απόδοση και παράγει τη μέγιστη ισχύ. Αυτό είναι και το Μέγιστο Σημείο Ισχύος της φωτοβολταϊκής συστοιχίας. Να σημειωθεί ότι το σημείο αυτό δεν μπορεί να είναι γνωστό γιατί δεν είναι σταθερό, αφού η χαρακτηριστική καμπύλη λειτουργίας της φωτοβολταϊκής συστοιχίας αλλάζει με την αλλαγή της ηλιακής ακτινοβολίας. Έτσι το Σημείο Μέγιστης Ισχύος είναι διαφορετικό κατά τις πρωινές σε σχέση με τις απογευματινές ώρες, όπου και η ηλιακή ακτινοβολία είναι ασθενέστερη. Σύμφωνα με τα παραπάνω και δεδομένου ότι κατά την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι επιθυμητή η μέγιστη απόδοση των διατάξεων και η παραγωγή μέγιστης δυνατής ισχύος, γίνεται αντιληπτό ότι υπάρχει ανάγκη κατασκευής διατάξεων, οι οποίες θα ανιχνεύουν το Μέγιστο Σημείο Ισχύος και θα εξαναγκάζουν τη φωτοβολταϊκή συστοιχία να λειτουργεί σε αυτό το σημείο. Στο Σχήμα 1 παρουσιάζεται η καμπύλη $P - V$, για δύο διαφορετικές θερμοκρασίες και διαφορετικές τιμές ακτινοβολίας, όπου φαίνεται το MPP και το σημείο λειτουργίας μιας διάταξης MPPT και στο Σχήμα 2 παρουσιάζεται η καμπύλη $I-V$ για ανάλογες συνθήκες:



Σχήμα 3.1 Καμπύλες I-V φωτοβολταϊκού στοιχείου για διάφορες ακτινοβολίες και θερμοκρασίες

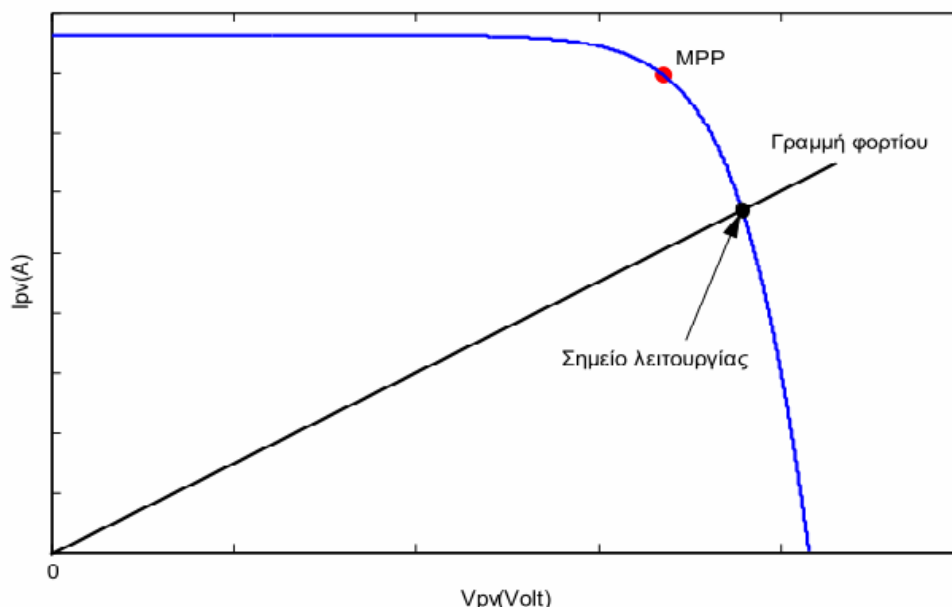


Σχήμα 3.2 Καμπύλες I-V φωτοβολταϊκού στοιχείου για διάφορες ακτινοβολίες και θερμοκρασίες

Διατάξεις ανίχνευσης του Μέγιστου Σημείου Ισχύος ονομάζονται *Ανιχνευτές Μέγιστου Σημείου Ισχύος* (σε διεθνή ορολογία **Maximum Power Point Trackers - MPPT**). Αυτές οι διατάξεις εντοπίζουν το Μέγιστο Σημείο Ισχύος και επιδρούν στη φωτοβολταϊκή συστοιχία, έτσι ώστε αυτή να λειτουργεί σε αυτό το σημείο.

Για παράδειγμα, όταν μια φωτοβολταϊκή συστοιχία είναι άμεσα συνδεδεμένη με ένα φορτίο, το σημείο

λειτουργίας του συστήματος, το οποίο καλείται και άμεσα συνδεδεμένο σύστημα, θα είναι στην τομή της καμπύλης ρεύματος - τάσης της φωτοβολταϊκής συστοιχίας και της γραμμής του φορτίου. Αυτό φαίνεται στο Σχήμα 3.3 που φαίνεται παρακάτω :



Σχήμα 3.3 Καμπύλη I-V και σημείο λειτουργίας για συγκεκριμένα φορτίο

Το σημείο λειτουργίας όμως αυτό είναι πρακτικά αδύνατο να συμπέσει με το Μέγιστο Σημείο Ισχύος χωρίς τη χρήση βοηθητικών διατάξεων. Σε αυτό το σημείο λοιπόν, γίνεται χρήση των διατάξεων Ανίχνευσης Μέγιστου Σημείου Ισχύος. Οι διατάξεις αυτές με διάφορους ελέγχους τάσης και ρεύματος και με τη βοήθεια αλγορίθμων αναζήτησης, εντοπίζουν το Μέγιστο Σημείο Ισχύος της φωτοβολταϊκής συστοιχίας και επιδρούν σε αυτή με σκοπό τη διατήρηση αυτού του σημείου λειτουργίας. Η κατασκευή τέτοιων διατάξεων και συστημάτων ελέγχου είναι σχετικά περίπλοκη, εφόσον πρέπει να ανταποκρίνονται γρήγορα και να εντοπίζουν το Μέγιστο Σημείο Ισχύος, το οποίο εξαρτάται από την ηλιακή ακτινοβολία και τη θερμοκρασία και μεταβάλλεται με την αλλαγή κάποιου από αυτούς τους δύο παράγοντες. Σε αυτό το Κεφάλαιο θα παρουσιαστούν και θα σχολιασθούν συνοπτικά διάφορες διατάξεις Ανιχνευτών Μέγιστου Σημείου Ισχύος.

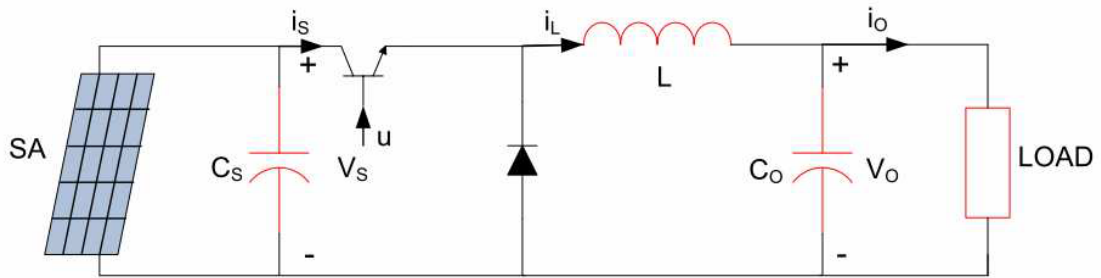
3.2 Γενικά για διατάξεις Ανιχνευτών Μέγιστου Σημείου Ισχύος

Οι βασικοί αλγόριθμοι ανίχνευσης του Μέγιστου Σημείου Ισχύος είναι οι διατάραξης και Παρατήρησης και Αυξητικής Αγωγιμότητας και να σχολιασθούν αναλυτικά σε επόμενο Κεφάλαιο. Δύο άλλες μέθοδοι για την Ανίχνευση MPP είναι η μέθοδος ρεύματος βραχυκύκλωσης και η μέθοδος

τάσης ανοιχτοκυκλώματος ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου. Η μέθοδος που χρησιμοποιεί το ρεύμα βραχυκύκλωσης ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου έγκειται στην υπόθεση ότι το ρεύμα λειτουργίας στο MPP του ηλιακού πίνακα είναι γραμμικά ανάλογο με το ρεύμα βραχυκύκλωσης. Για το λόγο αυτό κάτω από γρήγορα μεταβαλλόμενες καιρικές συνθήκες, αυτή η μέθοδος ανιχνεύει το ΜΣΙ σε σχετικά μικρό χρόνο. Ωστόσο, το κύκλωμα ελέγχου είναι αρκετά περίπλοκο και το κόστος του υψηλό. Επιπλέον, η υπόθεση ότι το ρεύμα λειτουργίας στο ΜΣΙ είναι γραμμικά ανάλογο με το ρεύμα βραχυκύκλωσης του φωτοβολταϊκού στοιχείου είναι μόνο μια προσέγγιση. Στην πράξη, η εφαρμογή αυτής της τεχνικής έχει πάντα ως αποτέλεσμα τη λειτουργία του φωτοβολταϊκού στοιχείου κάτω από το ΜΣΙ.

Η μέθοδος της τάσης ανοιχτού κυκλώματος φωτοβολταϊκού στοιχείου στηρίζεται και αυτή σε παρόμοια υπόθεση, ότι δηλαδή η τάση ανοιχτού κυκλώματος του ηλιακού πίνακα στο ΜΣΙ είναι γραμμικά ανάλογη με την τάση ανοιχτού κυκλώματος. Αυτή η τεχνική εμφανίζει τις ίδιες οριοθετήσεις και τα ίδια μειονεκτήματα με την παραπάνω. Αν και αυτή η μέθοδος είναι πιο οικονομική και μπορεί να υλοποιηθεί ευκολότερα, η εφαρμογή της οδηγεί σε σημαντικά σφάλματα στην ΑΜΣΙ και συνεπώς παρατηρούνται σημαντικές ενεργειακές απώλειες. Επιπλέον, τόσο η μέθοδος ρεύματος βραχυκύκλωσης όσο και η μέθοδος τάσης ανοιχτού κυκλώματος φωτοβολταϊκού στοιχείου αποτυγχάνουν να εντοπίσουν το ΜΣΙ αποτελεσματικά σε περιπτώσεις όπου στοιχεία του ηλιακού πίνακα είναι κατά ένα μέρος τους υπό σκιά ή κατεστραμμένα, αφού και στις δύο αυτές περιπτώσεις η καμπύλη ρεύματος - τάσης ($I - V$) μεταβάλλεται. Ωστόσο, σκιασμένα ή χαλασμένα στοιχεία δεν είναι κάτι το ασυνήθιστο στην πράξη και για το λόγο αυτό θα πρέπει οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται να ανταποκρίνονται και σε τέτοιες περιπτώσεις. Για τους παραπάνω λόγους και λόγω των ενεργειακών απωλειών που προκαλούνται από τις δύο αυτές μεθόδους, η εφαρμογή τους είναι περιορισμένη.

Σε αυτό το σημείο παρουσιάζεται συνοπτικά ένας ανιχνευτής ΜΣΙ για ένα μεμονωμένο φωτοβολταϊκό σύστημα παραγωγής ισχύος. Το σύστημα αποτελείται από έναν ηλιακό πίνακα με μη γραμμικά, χρονικά μεταβαλλόμενα χαρακτηριστικά, ένα μετατροπέα υποβιβασμού τάσης με τα κατάλληλα φίλτρα και ένα φορτίο το οποίο υποβάλλεται σε διαταραχές. Το κύκλωμα του συγκεκριμένου συστήματος φαίνεται στο Σχήμα 3.4.



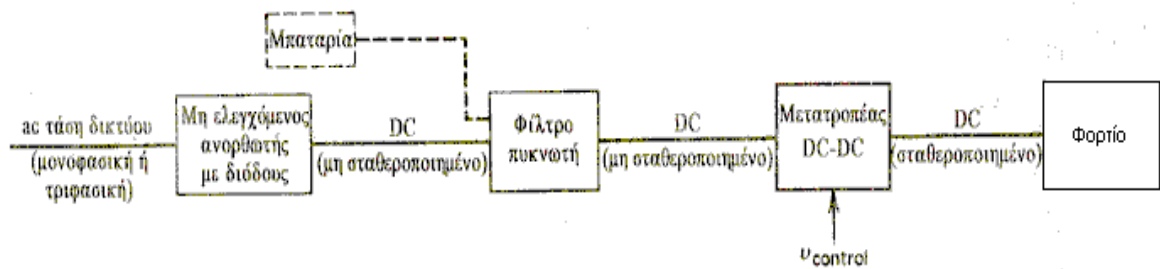
Σχήμα 3.4 Απλή Διάταξη με ελεγχόμενο διακόπτη για ανίχνευση του MPP

Το παραπάνω κύκλωμα είναι ένα σύστημα μετατροπής ηλιακής ενέργειας, όπου η πηγή, που είναι ο ηλιακός πίνακας SA σε συνδυασμό με φίλτρο τον πυκνωτή C_s , αποδίδει ισχύ μέσω ενός DC – DC μετατροπέα υποβιβασμού τάσης στο φορτίο. Το ενδιαμέσο κομμάτι του κυκλώματος μεταξύ του φωτοβολταϊκού πίνακα και του δικτύου μπορεί να αποτελείται και από άλλες διατάξεις εκτός από το μετατροπέα, όπως στοιχεία αποθήκευσης ενέργειας και επιπρόσθετους μετατροπείς ισχύος. Ο σκοπός των μετατροπένων ισχύος εξαρτάται από τις ιδιαιτερότητες κάθε εφαρμογής. Για παράδειγμα αν το σύστημα αποδίδει ενέργεια σε ένα δίκτυο διανομής εναλλασσόμενης ισχύος, τότε μπορούν να χρησιμοποιηθούν ανεξάρτητα ελεγχόμενοι αντιστροφείς. Ωστόσο, αν το σύστημα δίνει ενέργεια σε δίκτυο διανομής DC σταθερής ισχύος, τότε ενδιάμεσοι μετατροπείς ισχύος χρησιμοποιούνται για να αποδώσουν σταθεροποιημένη DC ισχύ στο δίκτυο. Να σημειωθεί ότι το συγκεκριμένο σύστημα είναι ένα απλό παράδειγμα και ότι ο DC - DC μετατροπέας υποβιβασμού τάσης που απεικονίζεται στο κύκλωμα θα μπορούσε να αντικατασταθεί με άλλο κύκλωμα ισχύος, όπως από ένα μικτό DC - DC μετατροπέα ή DC - DC μετατροπέα ανύψωσης τάσης ή από έναν αντιστροφέα, ανάλογα με τις ιδιαιτερότητες της εφαρμογής. Όπως φαίνεται από τις καμπύλες $P - V$ του Σχήματος 2.2, για δεδομένες συνθήκες ηλιοφάνειας και θερμοκρασίας, μπορεί να επιτευχθεί μια μέγιστη ισχύς εξόδου για μια συγκεκριμένη τιμή της τάσης του πίνακα. Η τάση αυτή μπορεί να προσεγγιστεί με την εφαρμογή της κατάλληλης διάρκειας αγωγής (duty cycle) στην είσοδο ελέγχου του μετατροπέα. Εξαιτίας όμως των συχνά μεταβαλλόμενων καιρικών συνθηκών, η διάρκεια αγωγής πρέπει να ρυθμίζεται συνεχώς έτσι ώστε σε κάθε χρονική στιγμή να μεταφέρεται η μέγιστη ισχύς στο φορτίο. Ο στόχος της σχεδίασης του συστήματος MPPT είναι να βρεθεί μια συνθήκη ελέγχου, ώστε:

1. Ο ελεγκτής να μπορεί να ανιχνεύσει με ακρίβεια το MPP υπό συνθήκες απρόβλεπτου καιρού και μεταβαλλόμενου φορτίου
2. το σύστημα να είναι γενικά και ασυμπτωτικά ευσταθές η διάσταση του διανύσματος κατάστασης του ελεγκτή να ελαχιστοποιηθεί, έτσι ώστε να μπορεί να γίνει μια εύκολη και οικονομική υλοποίηση.

3.3 Διακοπτικοί μετατροπείς DC/DC

Οι μετατροπείς DC/DC [25] χρησιμοποιούνται ευρέως σε σταθεροποιημένα DC τροφοδοτικά διακοπτικού τύπου και σε εφαρμογές DC κινητήριων συστημάτων. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.5.1 συχνά η είσοδος αυτών των μετατροπέων είναι μια μη σταθεροποιημένη DC τάση, η οποία λαμβάνεται με ανόρθωση της τάσης του δικτύου. Αυτή η DC τάση παρουσιάζει αυξομειώσεις εξαιτίας των μεταβολών της τάσης του δικτύου. Οι διακοπτικοί DC/DC μετατροπείς χρησιμοποιούνται για την μετατροπή της μη σταθεροποιημένης DC εισόδου σε μια ελεγχόμενη DC έξοδο.



Σχήμα 3.3.1 Το γενικό διάγραμμα του μετατροπέα DC/DC

Οι βασικοί τύποι των μετατροπέων DC/DC είναι οι παρακάτω:

1. Μετατροπέας υποβιβασμού τάσης.
2. Μετατροπέας ανύψωσης τάσης.
3. Μικτός (υποβιβασμού – ανύψωσης τάσης) μετατροπέας.
4. Μετατροπέας του Cuk .
5. Μετατροπέας με πλήρη γέφυρα.

Από τους παραπάνω πέντε τύπους μετατροπέων μόνο ο μετατροπέας υποβιβασμού τάσης και ο μετατροπέας ανύψωσης είναι οι βασικές τοπολογίες. Ο μετατροπέας του Cuk και ο μικτός μετατροπέας είναι συνδυασμοί των βασικών τοπολογιών. Ο μετατροπέας με πλήρη γέφυρα προκύπτει από το μετατροπέα υποβιβασμού τάσης.

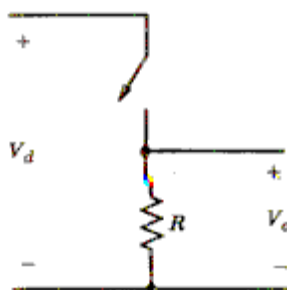
Ο τύπος μετατροπέα που χρησιμοποιήθηκε κατά την διάρκεια εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι ο τύπος του μετατροπέα υποβιβασμού τάσης και θα εξεταστεί παρακάτω. Θα εξεταστεί στην κατάσταση μόνιμης ισορροπίας όπου ο διακόπτης θα θεωρείται ιδανικός και οι απώλειες στα χωρητικά και επαγωγικά στοιχεία θα αγνοούνται.

Η DC πηγή τάσης στην είσοδο των μετατροπέων θεωρείται ότι έχει μηδενική εσωτερική αντίσταση. Μπορεί να είναι ένας συσσωρευτής ωστόσο στις περισσότερες περιπτώσεις, η είσοδος είναι μια AC τάση δικτύου

ανορθωμένη με διόδους και με ένα μεγάλο πυκνωτή εξομάλυνσης όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.5.1, ώστε να έχει χαμηλή εσωτερική σύνθετη αντίσταση και να λειτουργεί ως πηγή DC τάσης με μικρή κυμάτωση. Στη βαθμίδα εξόδου του μετατροπέα, αναπόσπαστο κομμάτι του είναι ένα μικρό φίλτρο. Η έξοδος θεωρείται ότι τροφοδοτεί ένα φορτίο που μπορεί να παρασταθεί με μια ισοδύναμη αντίσταση. Ένα φορτίο DC κινητήρα (η άλλη εφαρμογή αυτών των μετατροπέων) μπορεί να παρασταθεί με μια DC τάση σε σειρά με την αντίσταση και την αυτεπαγωγή του τυλίγματος του κινητήρα.

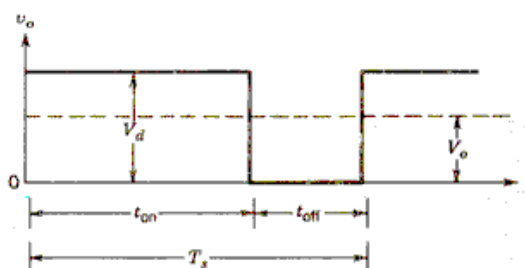
3.4 Έλεγχος των μετατροπέων DC/DC

Στους μετατροπείς αυτούς η DC τάση εξόδου πρέπει να ελέγχεται, ώστε να είναι σε ένα επιθυμητό επίπεδο, ανεξάρτητα από το γεγονός ότι η τάση εισόδου και το φορτίο μπορούν να αυξομειώνονται. Οι DC/DC μετατροπείς διακοπτικού τύπου χρησιμοποιούν έναν ή περισσότερους διακόπτες για το μετασχηματισμό της DC τάσης από ένα επίπεδο σε ένα άλλο. Σ' ένα DC/DC μετατροπέα με δεδομένη τάση εισόδου, η μέση τάση εξόδου ρυθμίζεται ελέγχοντας τους χρόνους έναυσης και σβέσης (t_{on} και t_{off}) των διακοπών. Για να καταστεί φανερή η αρχή της μετατροπής διακοπτικού τύπου ας θεωρηθεί ένας βασικός DC/DC μετατροπέας, όπως αυτός του Σχήματος 3.5.2



Σχήμα 3.4.2 Βασικός DC/DC μετατροπέας

Η μέση τιμή V_o της τάσης εξόδου v_o στο σχήμα 3.5.3 εξαρτάται από τους χρόνους t_{on} και t_{off} .



Σχήμα 3.4.3 Χρόνοι σβέσης και έναυσης του μετατροπέα

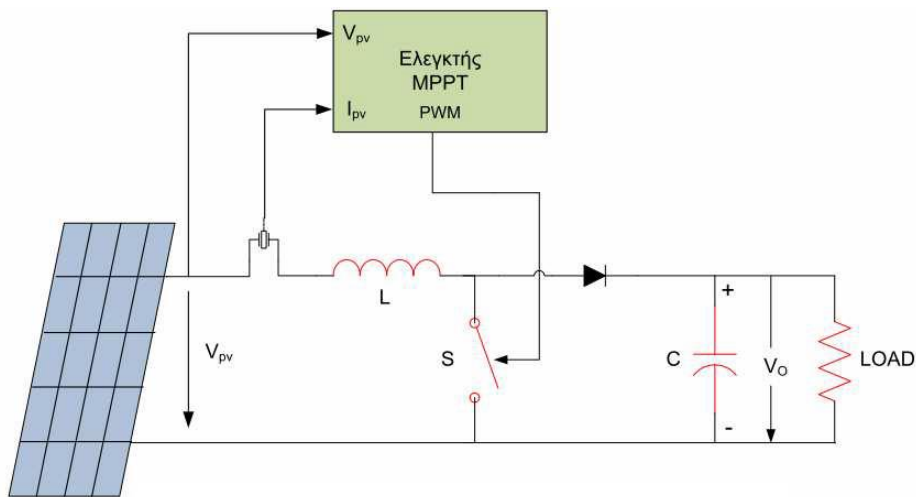
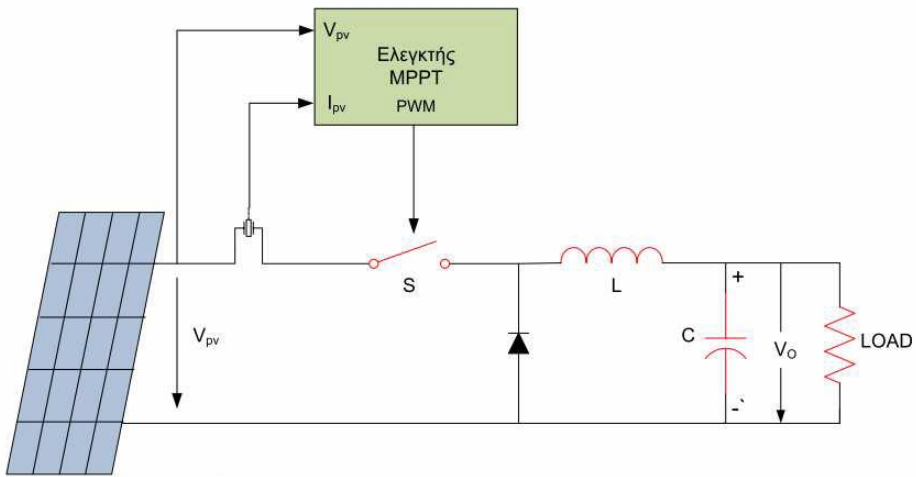
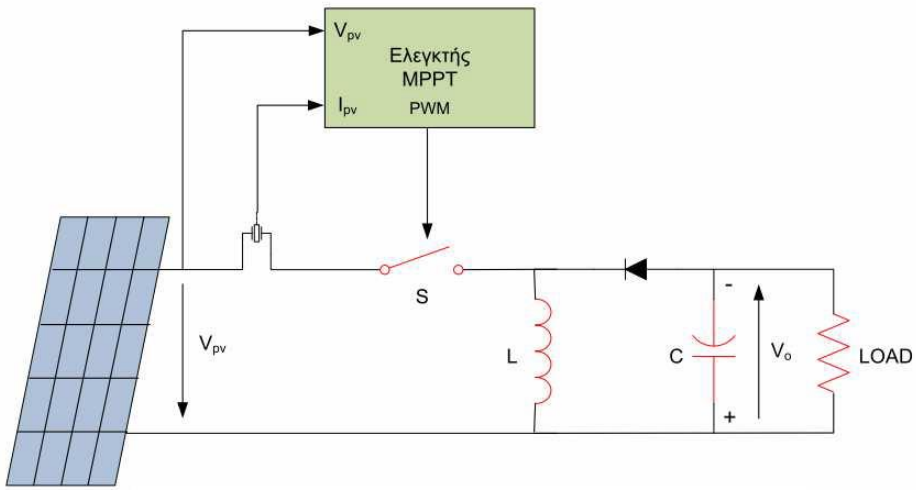
Μια από τις μεθόδους ελέγχου της μέσης τιμής της τάσης εξόδου χρησιμοποιεί σταθερή συχνότητα μετάβασης (και συνεπώς σταθερή περίοδο μετάβασης $T_s = t_{on} + t_{off}$) και ρύθμιση της διάρκειας κατά την οποία ο διακόπτης είναι κλειστός. Σ' αυτήν τη μέθοδο που ονομάζεται μετάβαση με διαμόρφωση εύρους παλμών (Pulse-Width Modulation, PWM) μεταβάλλεται η σχετική διάρκεια αγωγής (duty cycle) D που ορίζεται ως ο λόγος της διάρκειας κατά την οποία ο διακόπτης είναι κλειστός προς την περίοδο μετάβασης:

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

Η άλλη μέθοδος ελέγχου είναι γενικότερη. Σύμφωνα με αυτήν μεταβάλλονται, τόσο η συχνότητα μετάβασης, όσο και η διάρκεια κατά την οποία ο διακόπτης είναι κλειστός. Οι μεταβολές της συχνότητας μετάβασης καθιστούν δύσκολο το φιλτράρισμα της κυμάτωσης των κυματομορφών εισόδου και εξόδου.

3.4.1 MPPT με DC-DC Μετατροπείς

Από τις πιο συνηθισμένες εφαρμογές των φωτοβολταϊκών συστημάτων είναι αυτές στις οποίες χρησιμοποιούνται οι τρεις βασικές τοπολογίες DC - DC μετατροπέων. Οι μετατροπείς αυτοί είναι ο DC - DC μετατροπέας υποβιβασμού τάσης, ο DC - DC μετατροπέας ανύψωσης τάσης και ο μικτός DC - DC μετατροπέας. Τα συστήματα MPPT που λειτουργούν με αυτές τις διατάξεις είναι αρκετά απλά τόσο στην κατασκευή όσο και στον έλεγχο, καθώς οι συγκεκριμένες τοπολογίες περιλαμβάνουν ένα ελεγχόμενο στοιχείο. Στο επόμενο Σχήμα παρουσιάζεται η άποψη ενός φωτοβολταϊκού συστήματος με έλεγχο MPPT με τη χρήση των τριών DC - DC μετατροπέων που προαναφέρθηκαν:



Πριν όμως γίνει η συνοπτική περιγραφή της λειτουργίας του ελέγχου MPPT πρέπει να γίνει μια ανασκόπηση της λειτουργίας των DC - DC μετατροπέων υποβιβασμού και ανύψωσης τάσης. Η λειτουργία του μικτού DC - DC μετατροπέα θα αναλυθεί σε επόμενο Κεφάλαιο, καθώς σε αυτή τη διπλωματική εργασία μελετάται φωτοβολταϊκό σύστημα με τη χρήση του συγκεκριμένου μετατροπέα. Η λογική λειτουργίας των DC - DC μετατροπέων είναι κατά βάση η ίδια καθώς όλοι περιλαμβάνουν τα ίδια ενεργά και παθητικά στοιχεία. Η διαφορά τους έγκειται στη σχέση της τάσης εξόδου με τη σχέση εισόδου. Συγκεκριμένα, ο DC-DC μετατροπέας υποβιβασμού τάσης δημιουργεί τάση εξόδου μικρότερη από την τάση εισόδου, ο DC - DC μετατροπέας ανύψωσης τάσης δημιουργεί μεγαλύτερη τάση εξόδου, ενώ ο μικτός DC - DC μετατροπέας δημιουργεί και μεγαλύτερη αλλά και μικρότερη τάση εξόδου σε σχέση με την τάση εισόδου αλλά με διαφορετική πολικότητα. Το επίπεδο της τάσης εξόδου σε όλους τους DC - DC μετατροπέες ρυθμίζεται με τη μεταβολή της διάρκειας αγωγής (Duty Cycle) του ημιαγώγιμου διακόπτη των διατάξεων.

Επομένως, ανάλογα με την εφαρμογή των φωτοβολταϊκών στοιχείων, μπορεί να επιλεγεί κάποιος από αυτούς τους DC - DC μετατροπέες. δηλαδή, αν σε η τάση εξόδου των στοιχείων κυμαίνεται μεταξύ 30 έως 150V και απαιτείται σταθερή τάση εξόδου 20V, είναι προφανές ότι θα χρησιμοποιηθεί ένας DC - DC μετατροπέας υποβιβασμού τάσης. Σε περίπτωση που η επιθυμητή τάση εξόδου είναι 160V τότε θα χρησιμοποιηθεί DC - DC μετατροπέας ανύψωσης τάσης, ενώ αν η τάση εξόδου πρέπει να είναι 80V, μπορεί να εφαρμοστεί ο μικτός DC - DC μετατροπέας. Οι εφαρμογές αυτές αποτελούν απλά παραδείγματα εφαρμογής των τριών βασικών DC - DC μετατροπέων σε φωτοβολταϊκό συστήματα με έλεγχο MPPT και αναφέρθηκαν για την καλύτερη κατανόηση των συστημάτων αυτών.

3.4.1.1 DC-DC μετατροπέας υποβιβασμού τάσης

Η περιγραφή της λειτουργίας του συγκεκριμένου μετατροπέα ισχύει για τη λειτουργία με συνεχή αγωγή ρεύματος, δηλαδή για μη διακοπτόμενο ρεύμα πηνίου. Ο DC - DC μετατροπέας υποβιβασμού τάσης (**step down ή buck DC - DC converter**), όπως προαναφέρθηκε, παράγει μέση τάση εξόδου V_o μικρότερη από την DC τάση εισόδου του V_d . Η λειτουργία του μετατροπέα βασίζεται στον ημιαγώγιμο διακόπτη και στη σχετική διάρκεια αγωγής του D . Η τάση εισόδου V_d και η τάση εξόδου V_o συνδέονται με τη σχετική διάρκεια αγωγής D σύμφωνα με τη σχέση 3.1 :

$$\frac{V_o}{V_d} = D$$

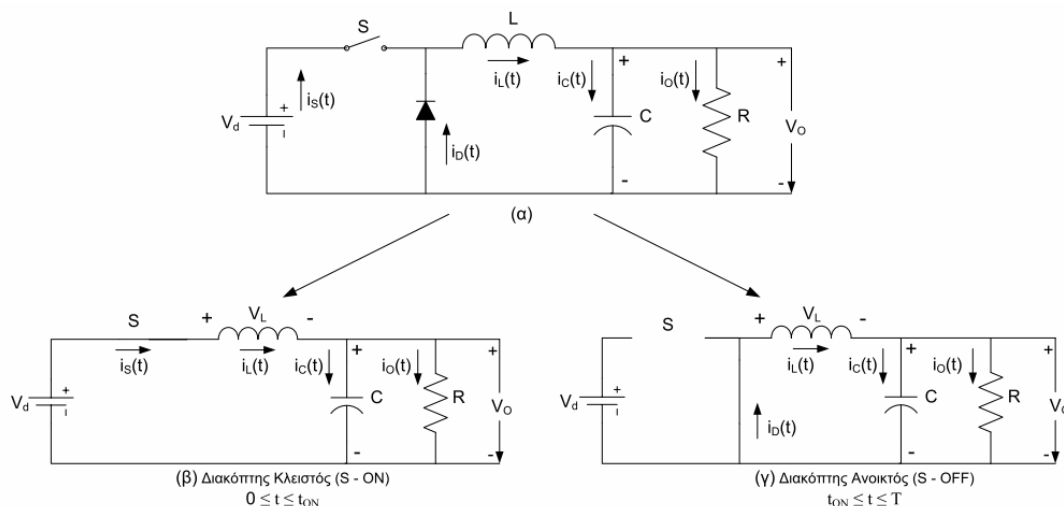
Και θεωρώντας ένα κύκλωμα χωρίς απώλειες, η ισχύς εξόδου P_o είναι ίση με την ισχύ εισόδου P_d , και άρα προκύπτει η ανάλογη Σχέση για το ρεύμα εισόδου I_d , το ρεύμα εξόδου I_o και τη σχετική διάρκεια αγωγής D σχέση 3.2:

$$P_d = P_o \Rightarrow V_d \cdot I_d = V_o \cdot I_o \Rightarrow \frac{I_o}{I_d} = \frac{V_d}{V_o} \Rightarrow \frac{I_o}{I_d} = \frac{1}{D}$$

Η σχετική διάρκεια αγωγής δίνεται από τη σχέση 3.3:

$$D = \frac{t_{ON}}{T}$$

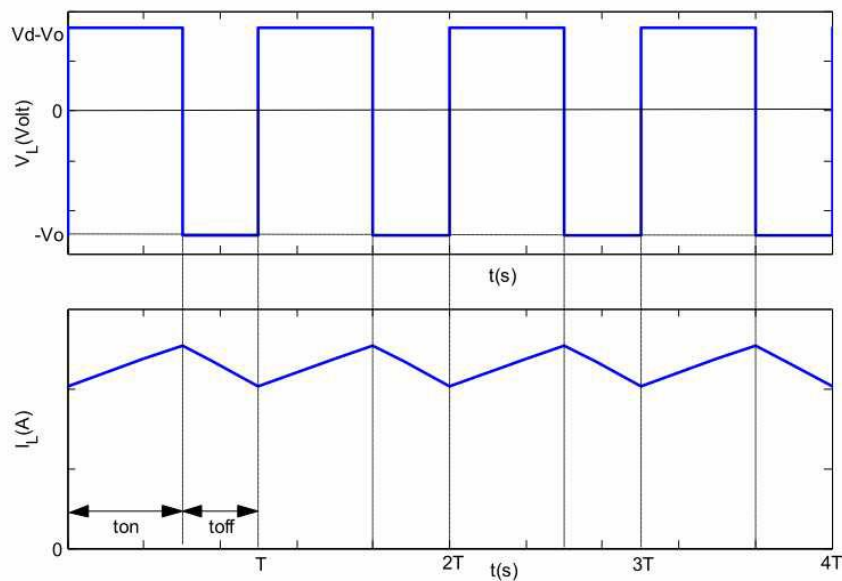
Όπου T είναι η περίοδος παλμοδότησης και t_{ON} είναι ο χρόνος κατά τον οποίο ο διακόπτης βρίσκεται σε κατάσταση αγωγής. Οι χρόνοι αγωγής t_{ON} και αποκοπής t_{OFF} του διακόπτη καθώς και η περίοδος παλμοδότησης T φαίνονται στο Σχήμα 2.9, όπου παρουσιάζονται οι κυματομορφές της τάσης και του ρεύματος του πηνίου του μετατροπέα υποβιβασμού κατά τη λειτουργία του με σχετική διάρκεια αγωγής $D = 0.6$. Επιπλέον, στο επόμενο Σχήμα παρουσιάζεται το κύκλωμα του DC - DC μετατροπέα υποβιβασμού τάσης, καθώς και τα ισοδύναμα κυκλώματα για τις δύο καταστάσεις του ημιαγωγισμού διακόπτη. Στα ισοδύναμα κυκλώματα παρουσιάζεται και η φορά ροής των ρευμάτων των στοιχείων.



Σχήμα 3.4.4

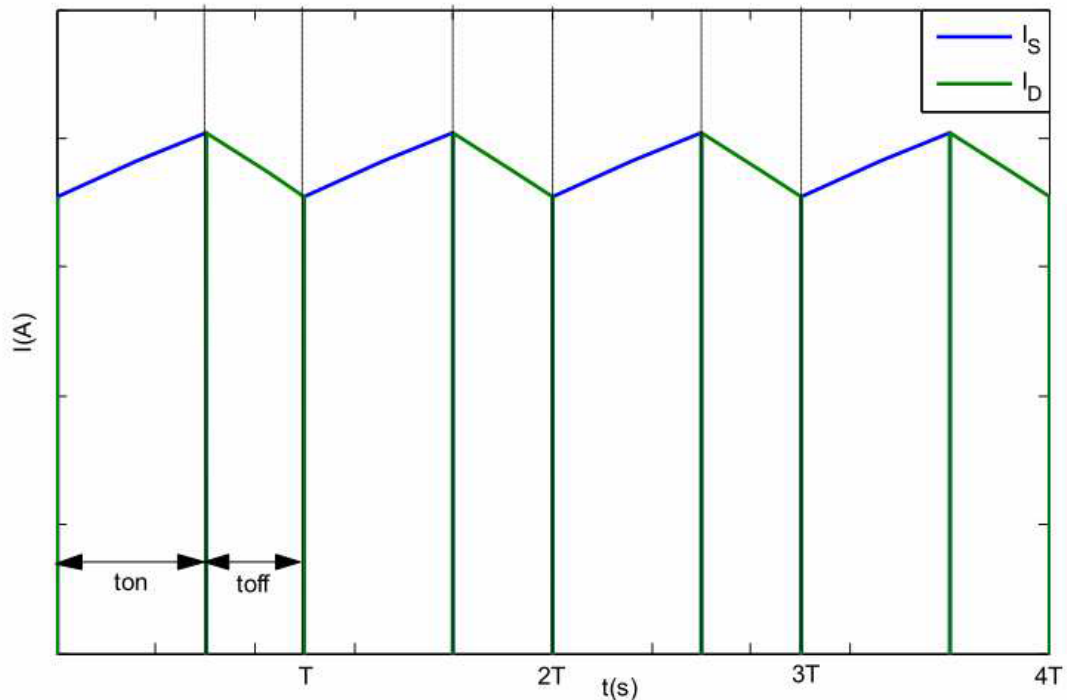
Όπως φαίνεται και από το Σχήμα 3.4,4(β), κατά τη διάρκεια που ο διακόπτης S είναι κλειστός το ρεύμα του πηνίου περνάει από αυτόν, ενώ η διόδος πολώνεται ανάστροφα και βρίσκεται σε κατάσταση αποκοπής. Σε αυτό το χρονικό διάστημα, στα άκρα του πηνίου εφαρμόζεται τάση $V_L = V_d - V_o$, η

οποία προκαλεί αύξηση του ρεύματος του. Επομένως, κατά το χρόνο $0 - t_{on}$ το πηνίο αποταμιεύει ενέργεια. Όταν ο διακόπτης S ανοίξει, λόγω της αποθηκευμένης στο πηνίο ενέργειας, το τελευταίο συνεχίζει να διαρρέεται από ρεύμα, το οποίο όμως διέρχεται από τη διάοδο. Λόγω αγωγής της διάοδο, το πηνίο συνδέεται παράλληλα με τον πυκνωτή εξόδου, όπως φαίνεται και από το Σχήμα 2.8(γ), και η τάση του γίνεται $V_L = -V_o$. Στο Σχήμα 2.9 φαίνεται η αύξηση του ρεύματος πηνίου κατά το χρονικό διάστημα $0 - t_{on}$ και έπειτα η μείωση του κατά το διάστημα $t_{on} - T$.



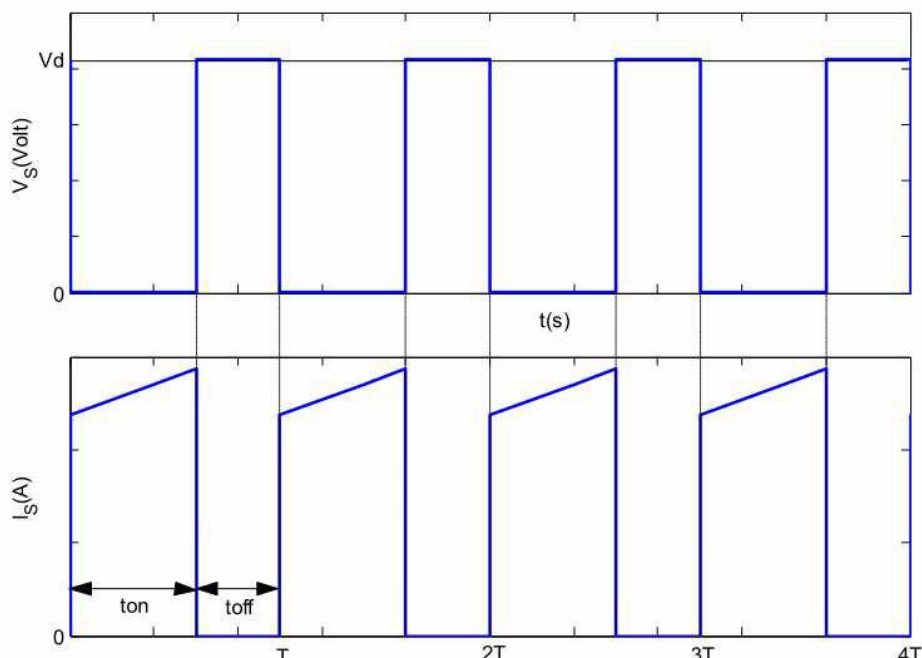
Σχήμα 3.4.5 Κυματομορφές τάσης (πάνω) και ρεύματος(κάτω) πηνίου DC-DC μετροπέα υποβιβισμού

Στο επόμενο Σχήμα 3.4.5 φαίνονται τα ρεύματα του διακόπτη I_s και της διάοδο I_D , όπου κατά το χρόνο $0 - t_{on}$ το ρεύμα πηνίου διέρχεται από το διακόπτη και το ρεύμα της διάοδο είναι μηδέν, ενώ κατά το χρόνο $t_{on} - T$ το ρεύμα του πηνίου διαρρέει τη διάοδο και το ρεύμα του διακόπτη είναι μηδέν :



Σχήμα 3.4.6 Ρεύμα διακόπτη I_s και διόδου I_D DC – DC μετατροπέα υποβιβασμού

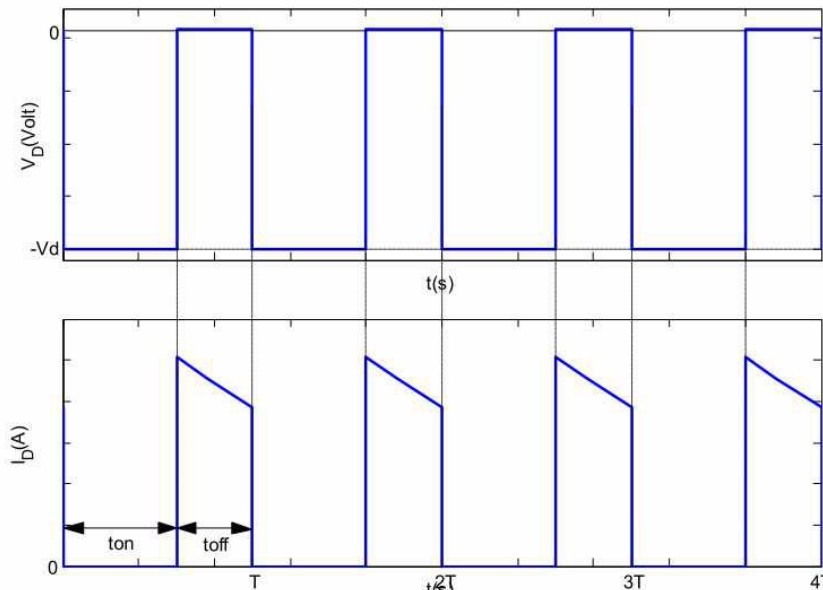
Όπως φαίνεται από το Σχήμα 3.4.6, τα ρεύματα του διακόπτη και της διόδου σχηματίζουν το συνολικό ρεύμα πηνίου. Τέλος, στα επόμενα Σχήματα παρουσιάζονται η τάση και το ρεύμα τόσο του διακόπτη του DC - DC μετατροπέα υποβιβασμού τάσης, όσο και της διόδου του.



Σχήμα 3.4.7 Κυματομορφές τάσης (πάνω) και ρεύματος(κάτω) πηνίου DC –DC μετροπέα υποβιβασμού

Από το παραπάνω Σχήμα, φαίνεται ότι όταν ο διακόπτης βρίσκεται σε κατάσταση αγωγής η τάση του είναι μηδέν, ενώ κατά την κατάσταση

αποκοπής, η τάση στα άκρα του είναι ίση με την τάση εισόδου V_d . Αυτό μπορεί να γίνει αντιληπτό από το ισοδύναμο κύκλωμα του Σχήματος 2.8(γ).



Σχήμα 3.4.8 Κυματομορφές τάσης (πάνω) και ρεύματος(κάτω) πηνίου DC –DC μετροπέα υποβιβασμού

Για τη δίοδο ισχύουν αυτά που ισχύουν και για το διακόπτη, καθώς και η δίοδος πρόκειται για ένα ημιαγώγιμο διακόπτη με τη διαφορά ότι δεν μπορεί να ελεγχθεί η αγωγή και αποκοπή της. Επομένως, όταν ο διακόπτης βρίσκεται σε κατάσταση αγωγής, η δίοδος δεν άγει και η τάση στα άκρα της είναι ίση με την τάση εισόδου $V^$. Αυτό είναι εμφανές από το ισοδύναμο κύκλωμα του Σχήματος 3.4.3(β). Αντίθετα, όταν ο διακόπτης δεν άγει, η δίοδος γίνεται αγωγίμη και η τάση στα άκρα της είναι μηδέν, όπως φαίνεται και στο παραπάνω Σχήμα.

3.4.1.2 DC - DC μετατροπέας ανύψωσης τάσης

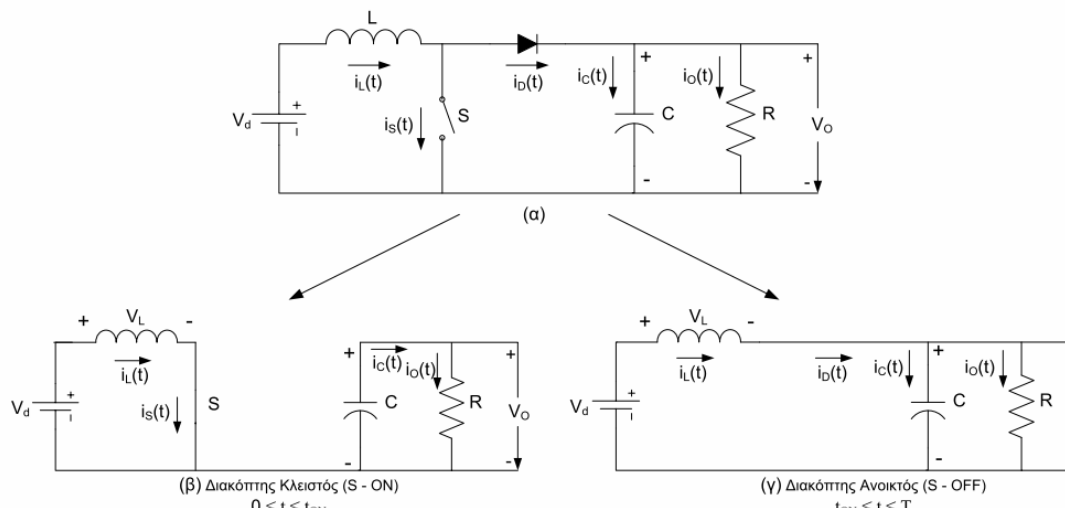
Στο σημείο αυτό θα γίνει μια σύντομη περιγραφή του DC - DC μετατροπέα ανύψωσης τάσης, ανάλογη με αυτή που έγινε προηγουμένως για τον DC - DC μετατροπέα υποβιβασμού τάσης. Η περιγραφή ισχύει και εδώ για μη διακοπτόμενο ρεύμα πηνίου. Ο DC - DC μετατροπέας ανύψωσης τάσης (step up ή boost DC - DC converter), παράγει μέση τάση εξόδου V_o μεγαλύτερη από την DC τάση εισόδου του V_d . Σε αυτή την περίπτωση, η τάση εισόδου V_d και η τάση εξόδου V_o συνδέονται με τη σχετική διάρκεια αγωγής D σύμφωνα με τη σχέση 3.4 :

$$\boxed{\frac{V_o}{V_d} = \frac{1}{1-D}}$$

Και θεωρώντας ένα κύκλωμα χωρίς απώλειες, η ισχύς εξόδου P_o είναι ίση με την ισχύ εισόδου P_d και άρα προκύπτει η ανάλογη Σχέση για το ρεύμα εισόδου I_d , το ρεύμα εξόδου I_o και τη σχετική διάρκεια αγωγής D σχέση 3.5:

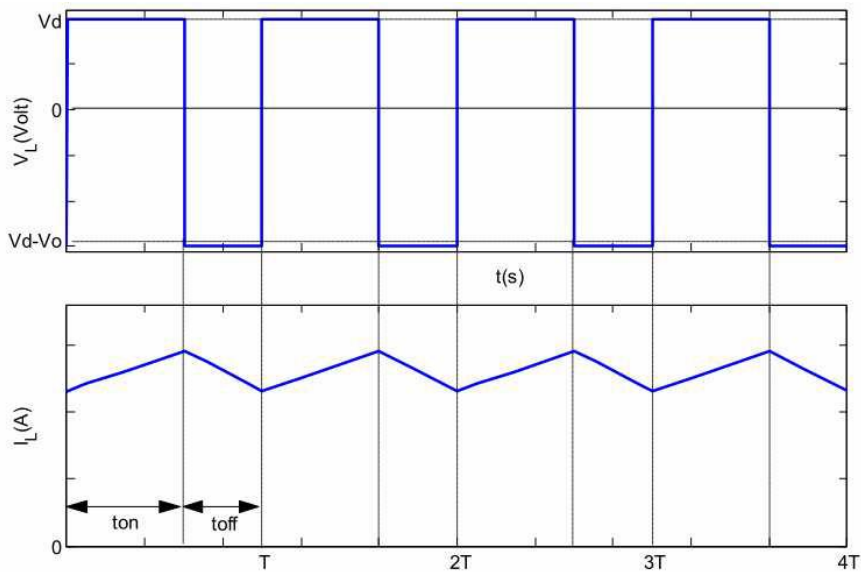
$$P_d = P_o \Rightarrow V_d \cdot I_d = V_o \cdot I_o \Rightarrow \frac{I_o}{I_d} = \frac{V_d}{V_o} \Rightarrow \frac{I_o}{I_d} = (1 - D)$$

Η σχετική διάρκεια αγωγής δίνεται και πάλι από τη Σχέση 3.5. Στο επόμενο Σχήμα φαίνεται το κύκλωμα του DC - DC μετατροπέα ανύψωσης τάσης, καθώς και τα ισοδύναμα κυκλώματα για τις δύο καταστάσεις του ημιαγωγίμου διακόπτη. Στα ισοδύναμα κυκλώματα παρουσιάζεται και η φορά ροής των ρευμάτων των στοιχείων.



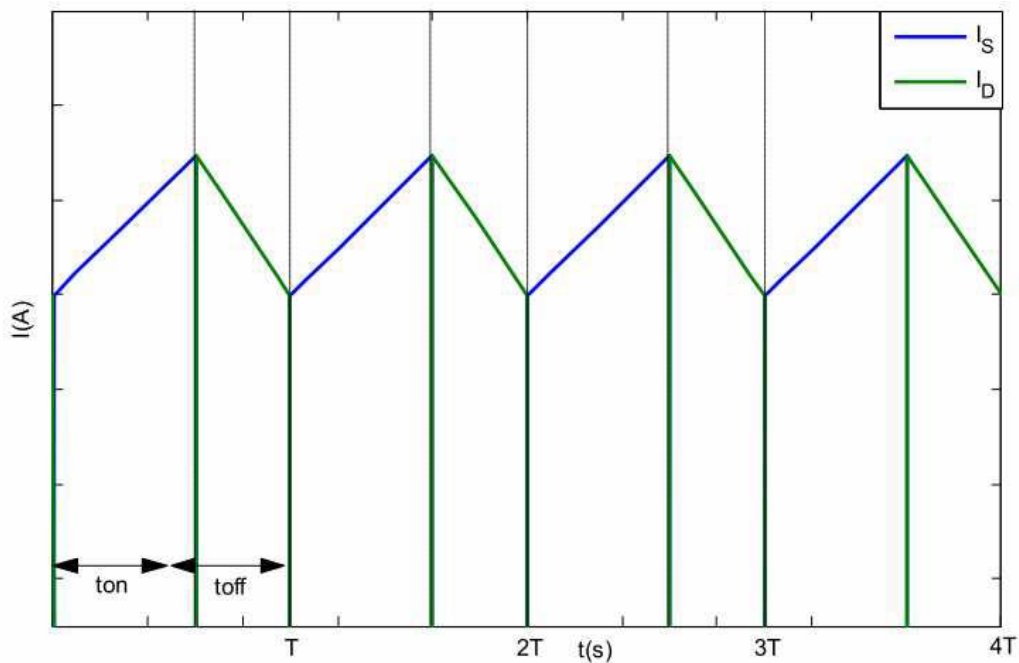
Σχήμα 3.4.9 Κυματομορφές τάσης (πάνω) και ρεύματος (κάτω) πηνίου DC –DC μετατροπέα υποβιβασμού

Όπως φαίνεται και από το Σχήμα 3.4.9 κατά τη διάρκεια που ο διακόπτης S είναι κλειστός το ρεύμα του πηνίου περνάει από αυτόν, ενώ η δίοδος βρίσκεται σε κατάσταση αποκοπής, απομονώνοντας τη βαθμίδα εξόδου από το υπόλοιπο κύκλωμα. Σε αυτό το χρονικό διάστημα, στα άκρα του πηνίου εφαρμόζεται η τάση εισόδου $V_L = V_d$ και το ρεύμα του αυξάνει. Επομένως, κατά το χρόνο $0 - t_{ON}$ το πηνίο αποταμιεύει ενέργεια. Όταν ο διακόπτης S βρεθεί σε κατάσταση αποκοπής, η αποθηκευμένη στο πηνίο ενέργεια αποδίδεται στη βαθμίδα μέσω της δίοδου. Όταν η δίοδος είναι αγωγίμη, το πηνίο συνδέεται παράλληλα με τον πυκνωτή εξόδου, όπως φαίνεται και από το Σχήμα 2.13(γ), και η τάση του γίνεται $V_L = V_d - V_o$. Στο Σχήμα 2.14, παρουσιάζονται οι κυματομορφές της τάσης και του ρεύματος του πηνίου του μετατροπέα ανύψωσης κατά τη λειτουργία του με σχετική διάρκεια αγωγής $D = 0.6$.



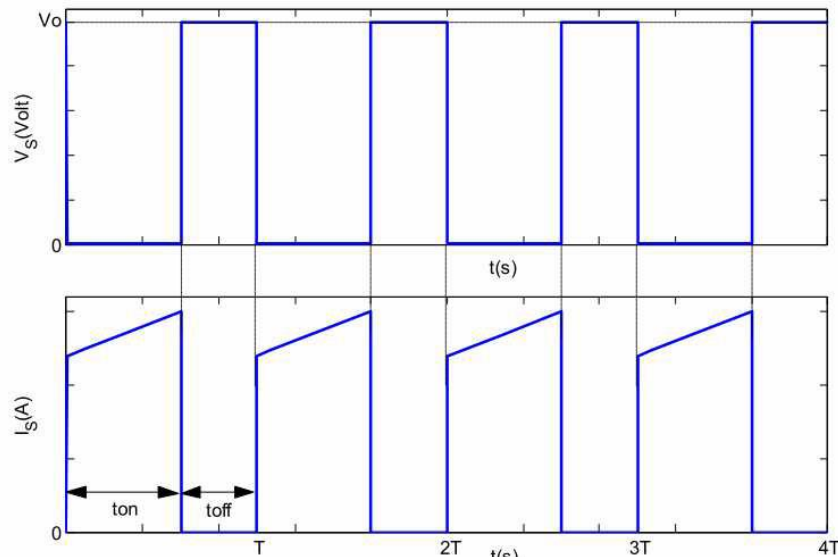
Σχήμα 3.4.10 Κυματομορφές τάσης (πάνω) και ρεύματος(κάτω) πηνίου DC –DC μετροπέα υποβιβισμού

Στο επόμενο Σχήμα φαίνονται τα ρεύματα του διακόπτη I_s και της διόδου I_D , όπου κατά το χρόνο $0 - t_{ON}$ το ρεύμα πηνίου διέρχεται από το διακόπτη και το ρεύμα της διόδου είναι μηδέν, ενώ κατά το χρόνο $t_{ON} - T$ το ρεύμα του πηνίου διαρρέει τη δίοδο και το ρεύμα του διακόπτη είναι μηδέν:



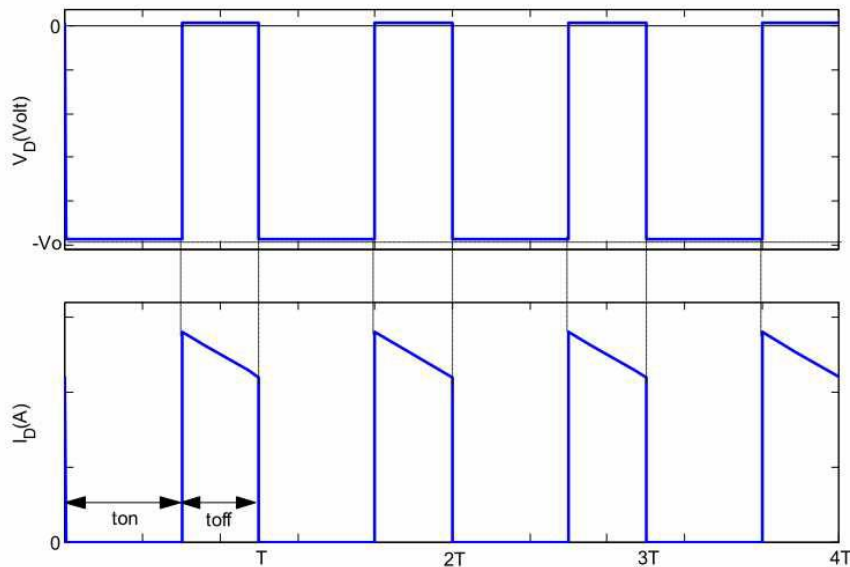
Σχήμα 3.4.11

Όπως φαίνεται από το Σχήμα 3.4.11, τα ρεύματα του διακόπτη και της διόδου σχηματίζουν το συνολικό ρεύμα πηνίου. Στα επόμενα Σχήματα παρουσιάζονται η τάση και το ρεύμα του διακόπτη και της διόδου του DC - DC μετατροπέα ανύψωσης τάσης.



Σχήμα 3.4.12 Κυματομορφές τάσης (πάνω) και ρεύματος(κάτω) πηνίου DC –DC μετροπέα υποβιβισμού

Από το παραπάνω Σχήμα, φαίνεται ότι όταν ο διακόπτης βρίσκεται σε κατάσταση αγωγής η τάση του είναι μηδέν, ενώ κατά την κατάσταση αποκοπής, η τάση στα άκρα του είναι ίση με την τάση εξόδου V_o . Αυτό μπορεί να γίνει αντιληπτό από το ισοδύναμο κύκλωμα του Σχήματος 2.13(γ).



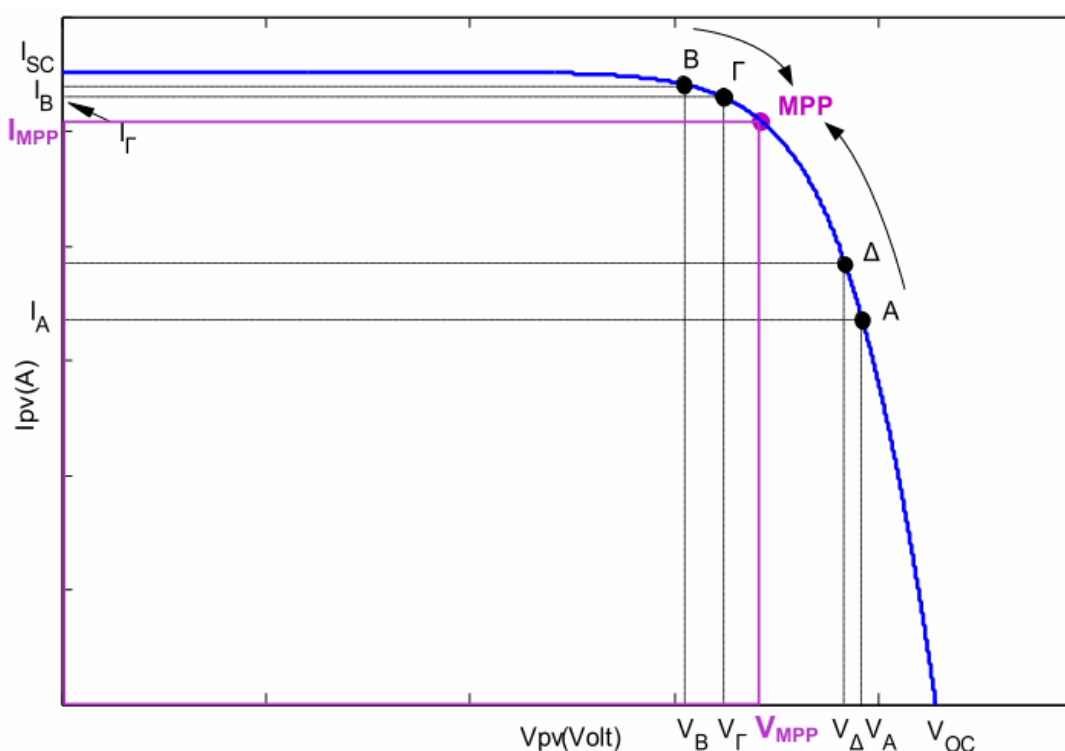
Σχήμα 3.4.13 Κυματομορφές τάσης (πάνω) και ρεύματος(κάτω) πηνίου DC –DC μετροπέα υποβιβισμού

Όταν ο διακόπτης βρίσκεται σε κατάσταση αγωγής, η διόδος δεν άγει και η τάση στα άκρα της είναι ίση με την τάση εξόδου V_o . Το αρνητικό πρόσημο προκύπτει γιατί οι κυματομορφές αναφέρονται στην τάση ανόδου καθόδου της διόδου, η οποία έχει αντίθετη πολικότητα από την τάση εξόδου. Αυτό είναι εμφανές από το ισοδύναμο κύκλωμα του Σχήματος 3.4.9. Τέλος, όταν ο

διακόπτης δεν άγει, η δίοδος γίνεται αγωγίμη και η τάση στα άκρα της είναι μηδέν.

3.4.2 Έλεγχος MPPT με τη χρήση DC - DC μετατροπών

Όπως φαίνεται και από τα παραπάνω Σχήματα 2.5, 2.6 και 2.7, ο ελεγκτής MPPT μετράει το ρεύμα και την τάση του φωτοβολταϊκού στοιχείου ή πίνακα. Αυτά τα δύο σημάια είναι τα σήματα ελέγχου και χρησιμοποιούνται για τον καθορισμό του σημείου λειτουργίας από τον ελεγκτή. Η προσέγγιση του μέγιστου σημείου ισχύος πραγματοποιείται με τη σταδιακή μεταβολή της διάρκειας αγωγής του ημιαγωγίμου διακόπτη S της διάταξης. Για να γίνει αυτό πιο κατανοητό, παρατίθεται μια χαρακτηριστική καμπύλη ρεύματος - τάσης στο επόμενο Σχήμα :



Σχήμα 3.4.14 Χαρακτηριστική καμπύλη $I - V$ και διάφορα σημεία λειτουργίας

Στο παραπάνω Σχήμα φαίνονται δύο διαφορετικά σημεία λειτουργίας A και B. Αν ο DC - DC μετατροπέας λειτουργεί με ρεύμα πηγής I_B , τότε το σημείο λειτουργίας των φωτοβολταϊκών στοιχείων είναι το B και η τάση εξόδου τους είναι V_B . Αν και το σημείο B βρίσκεται πάνω από το σημείο μέγιστης ισχύος, η ισχύς που αποδίδει το φωτοβολταϊκό στοιχείο είναι μικρότερη. Στις καμπύλες $I - V$ το σημείο μέγιστης ισχύος είναι αυτό στο οποίο αντιστοιχεί το τετράγωνο με το μεγαλύτερο εμβαδό. Το τετράγωνο αυτό ορίζεται από το σημείο λειτουργίας, την τιμή του ρεύματος στο σημείο λειτουργίας στον κατακόρυφο

άξονα, την τιμή της τάσης στο σημείο λειτουργίας στον οριζόντιο άξονα και από την αρχή των αξόνων. Το τετράγωνο που αντιστοιχεί στο MPP φαίνεται στο παραπάνω Σχήμα με μωβ χρώμα. Το σημείο μέγιστης ισχύος είναι πιο εμφανές στις καμπύλες ισχύος - τάσης, αλλά για την εξήγηση λειτουργίας της διάταξης οι καμπύλες ρεύματος τάσης είναι καταλληλότερες.

Ο ρόλος της λογικής ελέγχου του συστήματος είναι να εντοπίζει το σημείο λειτουργίας, από τη μέτρηση τάσης και ρεύματος του φωτοβολταϊκού στοιχείου, και να μεταβάλλει σταδιακά τη διάρκεια αγωγής του ημιαγωγίμου διακόπτη με ένα συγκεκριμένο βήμα. Με τη μεταβολή της διάρκειας αγωγής του διακόπτη, αλλάζει η μέση τιμή του ρεύματος που διαρρέει το διακόπτη. Όταν το φωτοβολταϊκό στοιχείο λειτουργεί στο σημείο B αποδίδει συγκεκριμένες τιμές ρεύματος και τάσης. Οπότε η λογική ελέγχου εντοπίζει ότι το σημείο λειτουργίας είναι το B, όπου το ρεύμα του φωτοβολταϊκού είναι μεγαλύτερο από το ρεύμα στο μέγιστο σημείο λειτουργίας I_{MPP} . Άρα η μεταβολή της διάρκειας του διακόπτη πρέπει να γίνει έτσι ώστε το ρεύμα του φωτοβολταϊκού στοιχείου να μειωθεί έτσι ώστε το νέο σημείο λειτουργίας να κινηθεί προς το MPP. Για να μειωθεί το ρεύμα πηγής, δηλαδή του φωτοβολταϊκού στοιχείου, πρέπει να μειωθεί η διάρκεια αγωγής του διακόπτη. Με τη μείωση της διάρκειας αγωγής του διακόπτη, η μέση τιμή του ρεύματος που διέρχεται από αυτόν μειώνεται καθώς μειώνεται ο χρόνος που αυτός βρίσκεται σε κατάσταση αγωγής. Άρα μόλις μειωθεί η διάρκεια αγωγής, μειώνεται το ρεύμα του φωτοβολταϊκού στοιχείου από I_B σε I_C , όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.18. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το νέο σημείο λειτουργίας του φωτοβολταϊκού στοιχείου να είναι το Γ. Η ίδια διαδικασία ακολουθείται και για το Γ και άρα το σημείο λειτουργίας κινείται προς το μέγιστο σημείο ισχύος.

Ωστόσο, το σημείο λειτουργίας του φωτοβολταϊκού στοιχείου μπορεί να είναι και κάτω από το MPP. Θα μπορούσε για παράδειγμα να είναι το A. Και πάλι η λογική ελέγχου εντοπίζει το σημείο λειτουργίας και καθορίζει τη φορά της μεταβολής του ρεύματος έτσι ώστε να προσεγγιστεί το MPP. Σε αυτή την περίπτωση, το ρεύμα του φωτοβολταϊκού στοιχείου I_A , σημείο A είναι μικρότερο από το ρεύμα I_{MPP} στο MPP. Επομένως, θα πρέπει να αυξηθεί το ρεύμα του φωτοβολταϊκού στοιχείου για να προσεγγιστεί το MPP. Αυτό μπορεί να γίνει με την αύξηση της διάρκειας αγωγής του ημιαγωγίμου διακόπτη, οπότε και το ρεύμα του φωτοβολταϊκού στοιχείου από I_A , αυξάνεται σε μία νέα τιμή και γίνεται για παράδειγμα ίσο με I_C . Με τη μεταβολή αυτή, το νέο σημείο λειτουργίας του συστήματος είναι το Γ. Με την περαιτέρω αύξηση της διάρκειας αγωγής, το σημείο λειτουργίας κινείται κατά τη φορά A,, προσεγγίζοντας το μέγιστο σημείο ισχύος. Αυτές οι διαδικασίες επιτελούνται στους DC - DC μετατροπείς έτσι ώστε να επιτευχθεί το μέγιστο σημείο ισχύος. Ωστόσο, ένας σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει την ταχύτητα αλλά και την απόδοση του συστήματος είναι το μέγεθος του βήματος μεταβολής της διάρκειας αγωγής. Για το λόγο αυτό, πρέπει να δίνεται μεγάλη προσοχή στην

επιλογή του καθώς ένα μεγάλο βήμα αυξάνει την ταχύτητα απόκρισης αλλά οδηγεί σε ταλαντώσεις γύρω από το MPP, ενώ ένα μικρό βήμα μειώνει τις ταλαντώσεις αλλά μειώνει σημαντικά την ταχύτητα απόκρισης. Να σημειωθεί ότι μπορεί να χρησιμοποιηθούν και μέθοδοι όπου το βήμα μεταβολής της διάρκειας αγωγής δεν είναι σταθερό αλλά μεταβάλλεται. Σε αυτές τις μεθόδους, όταν το σύστημα λειτουργεί σε κάποιο σημείο μακριά από το MPP, επιλέγεται από τη λογική ελέγχου μεγάλο βήμα, με αποτέλεσμα μείωση του χρόνου προσέγγισης, και καθώς προσεγγίζεται το MPP η λογική ελέγχου μειώνει το βήμα επιλογής, μειώνοντας έτσι τις ταλαντώσεις γύρω από το MPP. Έτσι συνδυάζεται ο μικρός χρόνος απόκρισης που επιτυγχάνεται με την επιλογή μεγάλου βήματος και οι μικρές ταλαντώσεις με την επιλογή μικρότερου βήματος, γεγονός που καθιστούν τις μεθόδους μεταβλητού βήματος πολύ πιο αποδοτικές από αυτές όπου το βήμα μεταβολής παραμένει σταθερό.

Κεφάλαιο 4 – Αλγόριθμοι MPPT

4.1 Εισαγωγή

Οι πρώτες μέθοδοι, που χρησιμοποιηθήκαν σε αεροδιαστημικές εφαρμογές, χρονολογούνται από τη δεκαετία του 70' σε εταιρίες ή ερευνητικά κέντρα όπως η εταιρία Honeywell Inc. ή η NASA. Οι μέθοδοι που έχουν αναπτυχθεί ως τώρα μπορούν να ομαδοποιηθούν σύμφωνα με τις διαφορετικές παραμέτρους τους. Αν ομαδοποιούνται με βάση τις μεταβλητές που παίρνουν μέρος στην διαδικασία της αναζήτησης, τότε χωρίζονται στη μέθοδο των δύο μεταβλητών και στη μέθοδο της μίας μεταβλητής. Η μέθοδος των δύο μεταβλητών χρησιμοποιεί τις μετρήσεις της τάσης V_{pv} , και ρεύματος I_{pv} της ισχύς εξόδου του φωτοβολταϊκού. Μεταξύ άλλων μπορούν να αναφερθούν οι μέθοδοι της διαφοροποίησης (Differentiation method), της διαταραχής και παρατήρησης (Perturbation and Observation, P&O method) και της σταδιακής αγωγιμότητας (Conductance Incremental, C.I method). Απ' την άλλη μπορούν να διακριθούν και οι μέθοδοι που χρησιμοποιούν μία μεταβλητή. Σχετικά με αυτή την ομάδα είναι οι μέθοδοι της τάσης ανατροφοδότησης (Feedback Voltage), ανοιχτού κυκλώματος φωτοβολταϊκής γεννήτριας, ανοιχτού κυκλώματος φωτοβολταϊκού κυττάρου και η μέθοδος του ρεύματος βραχυκύκλωσης.

Άλλες ταξινομήσεις μπορούν να βασιστούν στη λειτουργία της μεθόδου ή στη στρατηγική ελέγχου που χρησιμοποιείται. Έτσι, δύο κατηγορίες μπορούν να παρουσιαστούν: άμεσες και έμμεσες μέθοδοι.

Στις άμεσες μεθόδους περιλαμβάνονται οι μέθοδοι αυτοί που χρησιμοποιούν μετρήσεις της τάσης και του ρεύματος του φωτοβολταϊκού. Από αυτές, και λαμβάνοντας υπόψη τις διακυμάνσεις των σημείων λειτουργίας της γεννήτριας, βρίσκουμε το σημείο μέγιστης ισχύος (MPP). Αυτοί οι αλγόριθμοι έχουν το πλεονέκτημα ότι είναι ανεξάρτητοι της γνώσης εκ των προτέρων της φωτοβολταϊκής γεννήτριας. Έτσι, το σημείο λειτουργίας είναι ανεξάρτητο από την ηλιακή ακτινοβολία, τη θερμοκρασία ή τα επίπεδα της υποβάθμισης. Το πρόβλημα είναι τα ανεπιθύμητα σφάλματα τα οποία επηρεάζουν σημαντικά την ακρίβεια στην αναζήτηση. Οι μέθοδοι που ανήκουν σε αυτή την ομάδα είναι η μέθοδος της διαφοροποίησης, της τάσης ανάδρασης, P&O, C.I. , αυτό-ταλάντωσης όπως επίσης και της ασαφούς λογικής. Άλλοι τύποι ταξινομήσεων, οι οποίοι διακρίνουν μεταξύ των μεθόδων δειγμάτων και διαμόρφωσης μπορούν να περιληφθούν μέσα σε αυτή την ομάδα.

Οι έμμεσες μέθοδοι είναι βασισμένες στη χρήση μιας βάσης δεδομένων που περιλαμβάνει παραμέτρους και στοιχεία όπως, για παράδειγμα, χαρακτηριστικές καμπύλες της Φ/Β γεννήτριας για διαφορετικά επίπεδα ακτινοβολίας και θερμοκρασίας, ή στη χρήση των μαθηματικών λειτουργιών που λαμβάνονται από τα εμπειρικά στοιχεία για να υπολογίσει MPP. Στις περισσότερες περιπτώσεις απαιτείται μια προγενέστερη αξιολόγηση της Φ/Β γεννήτριας, ή αλλιώς είναι βασισμένο στη μαθηματική σχέση που λαμβάνεται από εμπειρικά στοιχεία, τα οποία δεν ικανοποιούν όλους τις κλιματολογικές συνθήκες. Οι παρακάτω μέθοδοι ανήκουν σε αυτήν την κατηγορία: προσαρμογή καμπύλων (curve fitting) πίνακας αναζήτησης (look – up table), ανοιχτού κυκλώματος φωτοβολταϊκής γεννήτριας (open-voltage PV generator), ανοιχτού κυκλώματος φωτοβολταϊκού κυττάρου (open circuit cell) και η μέθοδος του ρεύματος βραχυκύκλωσης φωτοβολταϊκής γεννήτριας (short circuit PV generator). Αυτές θα μελετηθούν στη συνέχεια με περισσότερες λεπτομέρειες.

Συνοπτικά:

- 1) *H Μέθοδος Ανάβασης Λόφου/ Διατάραξης και Παρατήρησης (Hill climbing /Perturb & Observe - P&O)*
- 2) *H Μέθοδος Αλγόριθμος Αυξητικής Αγωγιμότητας (Incremental Conductance - INC)*
- 3) *H Μέθοδος Αλγόριθμος Παρασιτικής Χωρητικότητας (Parasitic Capacitance - PC)*
- 4) *H Μέθοδος Αλγόριθμος Σταθερής Τάσης (Constant Voltage - CV)*
- 5) *H Μέθοδος Διαφοροποίησης (Differentiation method)*
- 6) *H Μέθοδος Μόνο ρεύματος (The only current method)*
- 7) *H Μέθοδος Αναγκασμένης ταλάντωσης*
- 8) *H Μέθοδος Προσαρμογής καμπύλων (curve fitting)*
- 9) *H Μέθοδος του πίνακα αναζήτησης (look – up table)*
- 10) *H Μέθοδος Ανοικτού κυκλώματος φωτοβολταϊκής γεννήτριας (open-voltage PV generator)*
- 11) *H Μέθοδος Βραχυκύκλωσης φωτοβολταϊκής γεννήτριας (short – circuit photovoltaic generator method)*
- 12) *H Μέθοδος Ανοικτού κυκλώματος φωτοβολταϊκού κυττάρου ως μέσου δοκιμής(Open-circuit voltage photovoltaic test cell method)*
- 13) *H Μέθοδος Βελτιστοποίησης Σμηγνών Σωματιδίων(Particle Swarm Optimization –PSO)*
- 14) *H Μέθοδος Ελέγχου Ασαφούς Λογικής (Fuzzy Logic Control)*
- 15) *H Μέθοδος Νευρωνικού Δικτύου (Neural Network)*
- 16) *H Μέθοδος Ελέγχου Συσχετισμού Κυμάτωσης (Ripple Correlation Control)*
- 17) *H Μέθοδος της Μεγιστοποίησης της Τάσης ή του Ρεύματος του Φορτίου (Load Current or Load Voltage Maximization)*

Οι τεχνικές αυτές διαφέρουν μεταξύ τους ως προς:

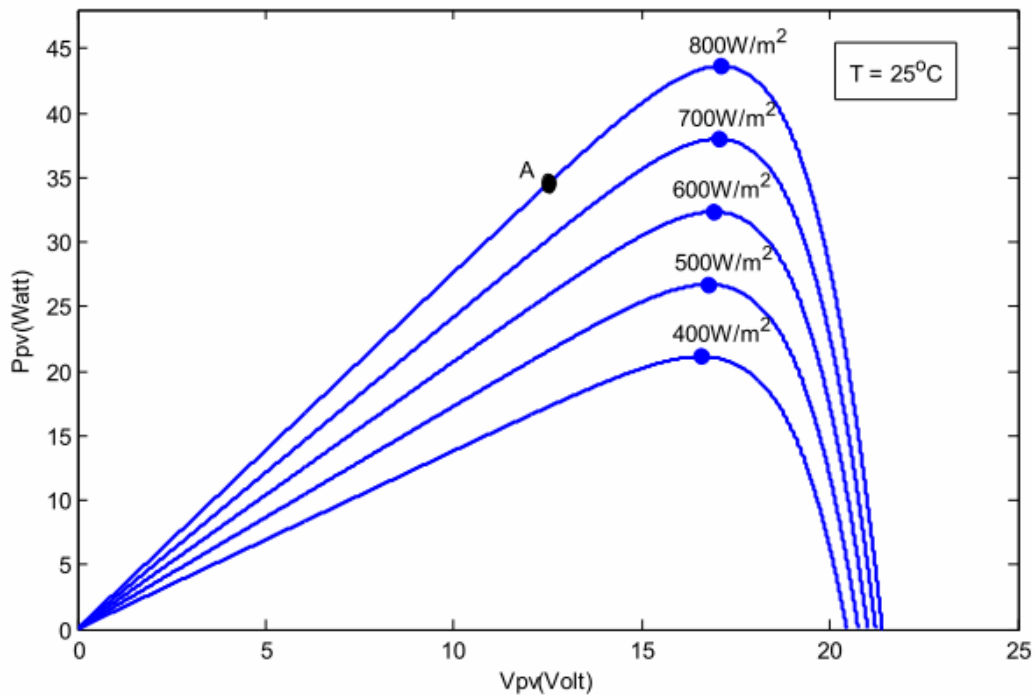
- *την πολυπλοκότητα*
- *τον αριθμό των αισθητήρων που χρειάζονται για τις απαιτούμενες μετρήσεις*
- *τους αλγόριθμους που χρησιμοποιούν*
- *την ταχύτητα ανίχνευσης του MPP σημείου*
- *το hardware που χρειάζεται για την υλοποίησή τους*

Οι περισσότεροι αλγόριθμοι MPPT λειτουργούν ως εξής: Παρακολουθώντας συνεχώς τις τιμές τάσης και ρεύματος εξόδου των φωτοβολταϊκών συστοιχιών, προκαλούν ανά τακτά χρονικά διαστήματα μια διαταραχή της τάσης εξόδου αυτών με σκοπό να εντοπίσουν την V_{mpp} και συνεπώς το σημείο μέγιστης ισχύος (MPP). **Να τονιστεί ότι η έξοδος του MPPT, ανεξάρτητα από την τεχνική που χρησιμοποιεί, είναι η $V_{dc,ref}$ η οποία είναι το σήμα αναφοράς για τον έλεγχο της τάσης V_{dc} .**

Η ανίχνευση του MPP σε μια φ/β συστοιχία είναι πολύ σημαντική για τη συνολική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μιας ολόκληρης φ/β εγκατάστασης. Για το λόγο αυτό τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί ευφυείς αλγόριθμοι MPPT, οι οποίοι ενσωματώθηκαν σε πολλές τεχνικές.

4.2 Η Μέθοδος Ανάβασης Λόφου/ Διατάραξης και Παρατήρησης (Hill climbing /Perturb & Observe - P&O)

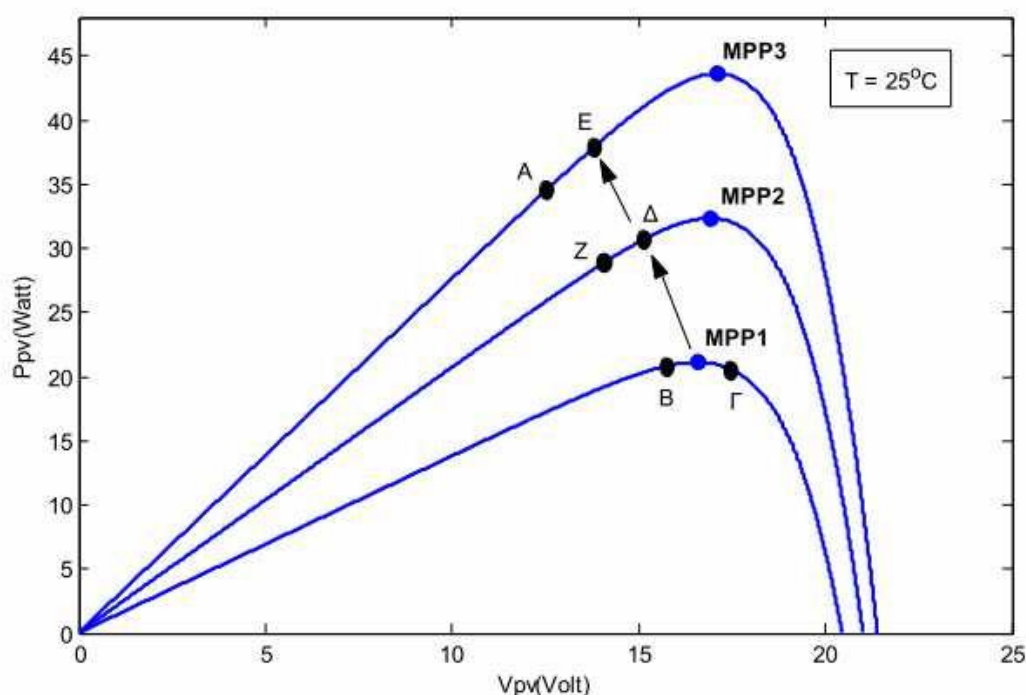
Ο αλγόριθμος , Ανάβασης Λόφου/Διατάραξης και Παρατήρησης είναι αυτός που εφαρμόζεται σε πολλές περιπτώσεις συστημάτων φωτοβολταϊκών στοιχείων, λόγω της ευκολίας εφαρμογής του. Η λειτουργία του αλγορίθμου μπορεί να περιγραφεί με μεγαλύτερη ευκολία αν λάβουμε υπόψη τη χαρακτηριστική καμπύλη P - V ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου, όπως αυτή που φαίνεται στο Σχήμα 4.1 παρακάτω.



Σχήμα 4.1 : Χαρακτηριστική P – V και σημείο λειτουργίας A

Αν εφαρμοστεί ο αλγόριθμος Ανάβασης Λόφου/Διατάραξης και Παρατήρησης, το ΜΣΙ θα ανιχνευθεί με μεταβολή της τάσης των φωτοβολταϊκών στοιχείων και έλεγχο της μεταβολής της ισχύος ,P. Πιο συγκεκριμένα, έστω ότι η φωτοβολταϊκή συστοιχία λειτουργεί στο σημείο A της καμπύλης, το οποίο βρίσκεται πιο αριστερά από το ΜΣΙ. Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία σε αυτό το σημείο λειτουργίας θα λειτουργούν με μία ορισμένη τάση και θα δίνουν μια συγκεκριμένη ισχύ μικρότερη της μέγιστης δυνατής. Ο Ανάβασης Λόφου/Διατάραξης και Παρατήρησης ακολουθεί μια απλή διαδικασία για να ανιχνεύσει το MPP. Προκαλεί μια διαταραχή στην τάση και ελέγχει τη μεταβολή της ισχύος. Εφόσον έχει υποθεθεί ότι το σημείο λειτουργίας είναι πιο αριστερά από το MPP, αν αυξηθεί η τάση το σημείο λειτουργίας θα μετατοπιστεί σε περιοχές της καμπύλης με μεγαλύτερη ισχύ και άρα η μεταβολή της ισχύος θα είναι θετική. Επομένως, το επόμενο βήμα του αλγορίθμου θα είναι να αυξήσει την τάση μέχρι η μεταβολή της ισχύος να γίνει αρνητική, κάτι που σημαίνει ότι το σημείο λειτουργίας μετατοπίζεται προς περιοχές χαμηλότερης ισχύος. Μόλις η μεταβολή της ισχύος γίνει αρνητική, ο αλγόριθμος αλλάζει φορά μεταβολής της τάσης και άρα μειώνει την τάση ενώ ελέγχει το ,P. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται αντίστροφα αυτή τη φορά. δηλαδή η τάση μειώνεται μέχρι η μεταβολή ισχύος να ξαναγίνει θετική. Ο αλγόριθμος όπως φαίνεται είναι απλούστατος και δε βασίζεται σε πολύπλοκες εξισώσεις και πράξεις αλλά σε μια απλή παρατήρηση. Αν γίνει όμως μια πιο καλή ανάλυση της διαδικασίας που ακολουθεί ο αλγόριθμος, θα γίνει

αντιληπτό ότι η μέθοδος είναι δύσκολο να εντοπίσει με ακρίβεια το ΜΣΙ και ακόμη και αν το εντοπίσει, δε θα μπορεί να διακρίνει ότι αυτό είναι το ΜΣΙ ώστε να σταματήσει τις διαταραχές της τάσης. Επομένως, με τη μέθοδο διατάραξης και παρατήρησης, δεν εντοπίζεται το ΜΣΙ αλλά γίνεται μια ταλάντωση του σημείου λειτουργίας των φωτοβολταϊκών στοιχείων σε μια περιοχή κοντά στο ΜΣΙ. Επιπλέον, στο Σχήμα 4.1 φαίνεται ότι όσο μικρότερη είναι η ηλιακή ακτινοβολία, τόσο πιο επίπεδη γίνεται η καμπύλη P - V. Το γεγονός αυτό εισάγει μια δυσκολία εντοπισμού του ΜΣΙ με το συγκεκριμένο αλγόριθμο, γιατί λόγω της μικρής κλίσης της καμπύλης, η μεταβολή της ισχύος είναι πολύ μικρή σε σχέση με τη μεταβολή της τάσης. Αυτό σημαίνει ότι για να παρατηρηθεί αξιοσημείωτη μεταβολή στην ισχύ, θα πρέπει να γίνει μια πολύ μεγάλη αλλαγή στην τάση. Πρόβλημα κατά την εκτέλεση του αλγορίθμου μπορεί να προκληθεί και από την απότομη αλλαγή των καιρικών συνθηκών. Για να γίνει πιο κατανοητό θα παρουσιαστεί ένα παράδειγμα μιας τέτοιας κατάστασης. Το παράδειγμα μπορεί να γίνει καλύτερα κατανοητό, λαμβάνοντας υπόψιν το Σχήμα που ακολουθεί:

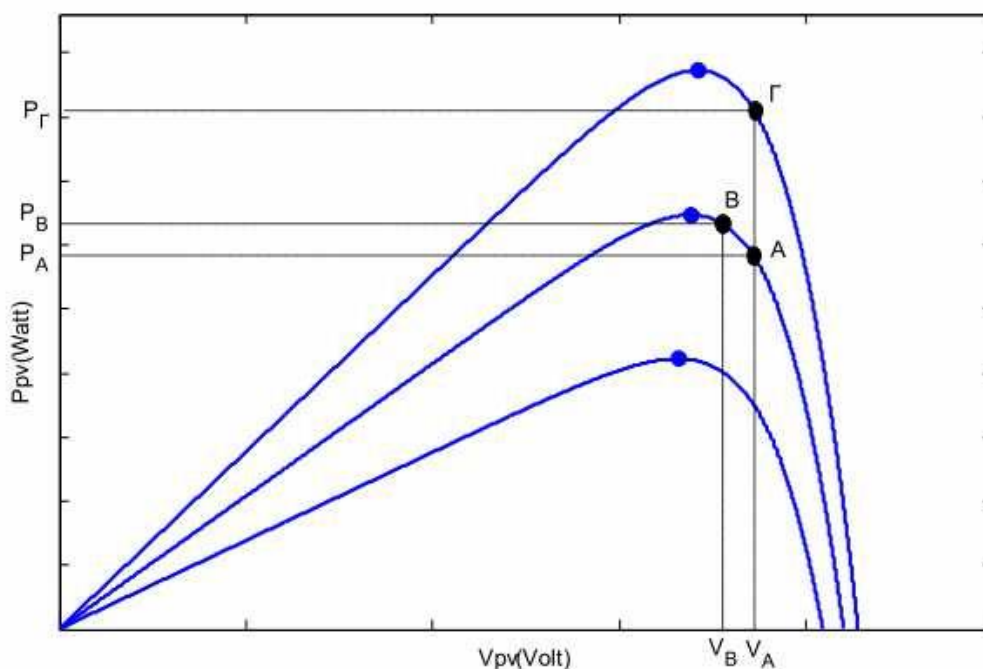


Σχήμα 4.2 : Παράδειγμα δυσλειτουργίας του αλγορίθμου διατάραξης και παρατήρησης

Έστω ότι ο Ανιχνευτής ΜΣΙ που χρησιμοποιεί τον αλγόριθμο διατάραξης και παρατήρησης ταλαντεύεται σε μια περιοχή πολύ κοντά στο ΜΣΙ, δηλαδή μεταξύ των σημείων Β και Γ. Αν για οποιοδήποτε λόγο, αυξηθεί η ηλιακή ακτινοβολία, αυτόματα τα φωτοβολταϊκά στοιχεία θα λειτουργούν με βάση κάποια άλλη καμπύλη που βρίσκεται πιο πάνω από την πρώτη. Άρα, οποιαδήποτε αλλαγή της τάσης οδηγεί σε θετική μεταβολή ισχύος. Αυτό συμβαίνει επειδή αλλάζει το σημείο λειτουργίας των φωτοβολταϊκών στοιχείων και βρίσκεται σε καμπύλη μεγαλύτερης ισχύος από την προηγούμενη.

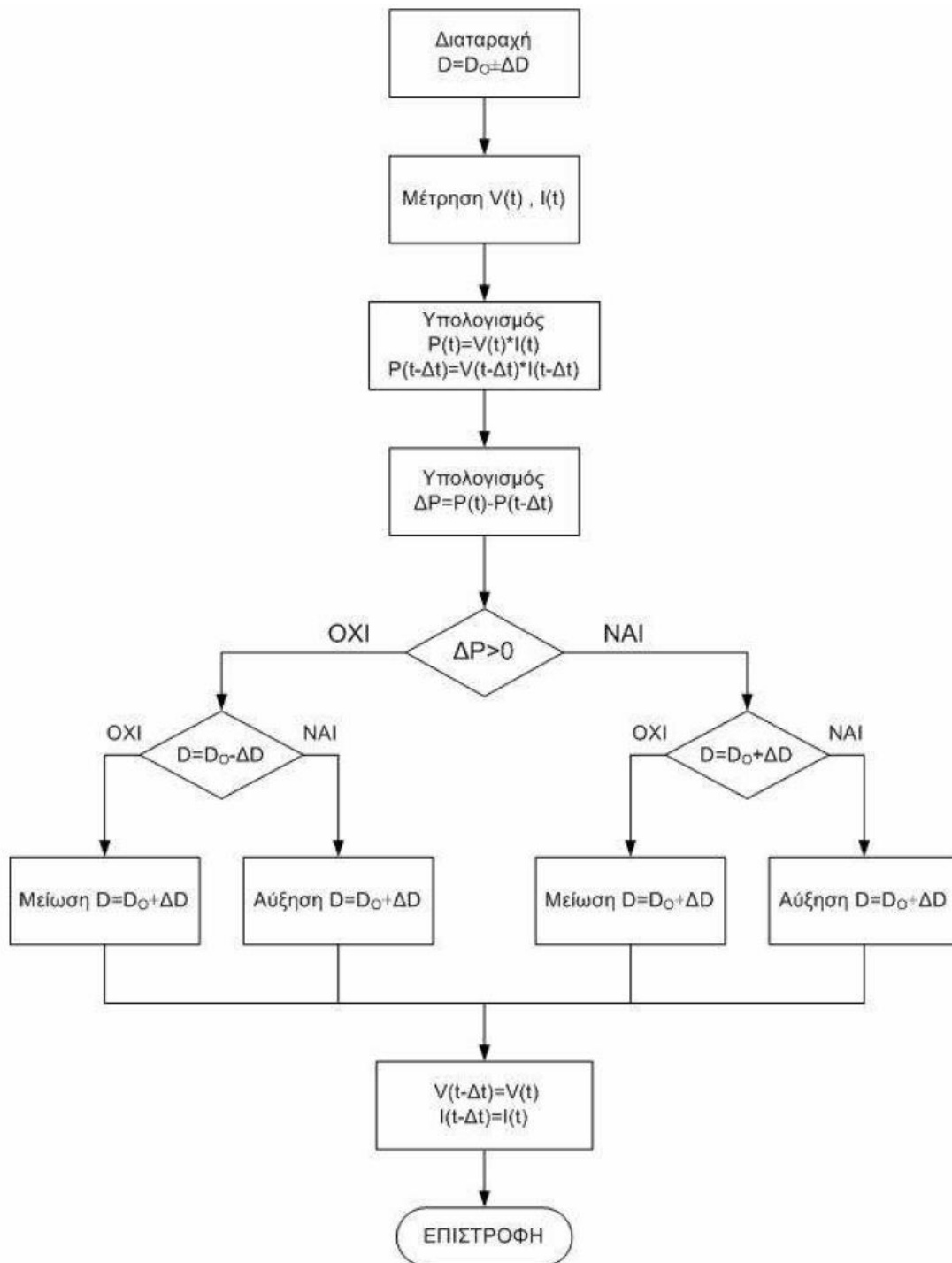
Συγκεκριμένα, έστω ότι το νέο σημείο λειτουργίας μετά τη μεταβολή της ηλιακής ακτινοβολίας είναι το Δ. Τότε όπως φαίνεται και από το Σχήμα 4.2, η λειτουργία μεταφέρεται από τα σημεία της πρώτης καμπύλης σε αυτά της δεύτερης. Επομένως, αν το προηγούμενο σημείο λειτουργίας ήταν το Γ, τότε ο αλγόριθμος θα έπρεπε να μειώσει την τάση μέχρι η μεταβολή ισχύος να γίνει αρνητική. Καθώς γίνεται η μείωση της τάσης, αλλάζει η ακτινοβολία και το νέο σημείο λειτουργίας είναι το Δ, στο οποίο τα φωτοβολταϊκά στοιχεία παράγουν μεγαλύτερη ισχύ σε σχέση με το Γ. Επομένως, η μεταβολή της ισχύος $\Delta P = P_{\Delta} - P_{\Gamma}$ είναι θετική και άρα ο αλγόριθμος θα συνεχίσει τη μείωση της τάσης. Αυτό οδηγεί σε νέο σημείο λειτουργίας Ζ, το οποίο όμως είναι πιο μακριά από το MPP2 από ότι το Δ. Δηλαδή, με την τελευταία μεταβολή τάσης που έγινε από τον αλγόριθμο, το σύστημα απομακρύνθηκε από το καινούργιο μέγιστο σημείο ισχύος MPP2. Αυτή η διαδικασία θα μπορούσε να συνεχίζεται και σε άλλες καμπύλες, αν αυξανόταν κι άλλο η ηλιακή ακτινοβολία και ο ΑΜΣΙ θα απομακρυνόταν ακόμη περισσότερο από το ΜΣΙ. Για παράδειγμα από το Δ θα μπορούσε το σημείο λειτουργίας να μετακινηθεί στο Ε και μετά στο Α. Επομένως, η προσέγγιση του μέγιστου σημείου ισχύος θα γινόταν μόνο αν οι καιρικές συνθήκες σταθεροποιούνταν. Το πρόβλημα αυτό μπορεί να προκύψει τις μέρες που έχει συννεφιά, λόγω της συχνής και απότομης αλλαγής του καιρού και να προκαλέσει σημαντικές απώλειες ισχύος. Για την αντιμετώπιση αυτών των προβλημάτων έχουν προταθεί κάποιοι τρόποι βελτίωσης του αλγορίθμου.

Μια απλή τροποποίηση είναι η εισαγωγή μιας συνάρτησης καθυστέρησης, η οποία θα διακόπτει τις αλλαγές της τάσης σε περίπτωση που το πρόσημο της μεταβολής ισχύος εναλλάσσεται διαδοχικά πολλές φορές. Όταν παρατηρείται δηλαδή μια έντονη ταλάντωση γύρω από ένα σημείο Δ σημαίνει ότι το σύστημα λειτουργεί κοντά στο μέγιστο σημείο ισχύος και οπότε η συνάρτηση καθυστέρησης θα επιτρέπει στο σύστημα ελέγχου αντιλαμβάνεται ότι εντόπισε το MPP ώστε να διακόπτει τις διαταραχές. Η τροποποίηση αυτή συμβάλλει στη μείωση των ταλαντώσεων και στην αύξηση της απόδοσης του αλγορίθμου κάτω από σταθερές καιρικές συνθήκες. Το μειονέκτημα της τροποποίησης είναι ότι επιβραδύνει την ανίχνευση του ΜΣΙ σε περίπτωση μεταβαλλόμενων συνθηκών. Μια άλλη μέθοδος βελτίωσης είναι η μέτρηση της ισχύος για μια τιμή της τάσης V_A έπειτα η διαταραχή της τάσης στην τιμή V_B και μέτρηση της ισχύος σε αυτή την τιμή και τέλος αλλαγή της τάσης για επιστροφή στην αρχική τιμή V_A και μέτρηση της ισχύος εκ νέου. Αυτό μπορεί να φανεί καλύτερα στο Σχήμα που ακολουθεί:



Σχήμα 4.3 : Παράδειγμα τροποποίησης του αλγορίθμου διατάραξης και παρατήρησης

Έστω ότι αρχικά το σύστημα λειτουργεί στο σημείο A με τάση V_A και ισχύ P_A , και γίνεται διαταραχή της τάσης οπότε και το σημείο λειτουργίας μετακινείται στο B όπου η τάση είναι V_B και η ισχύς P_B . Αν αντιστραφεί η μεταβολή της τάσης, δηλαδή αν η τάση ξαναγίνει V_A και μετρηθεί η ισχύς για την τιμή αυτή της τάσης, τότε το σύστημα μπορεί να ελέγξει αν το σημείο λειτουργίας είναι το A, οπότε η καμπύλη λειτουργίας P - V δεν έχει μεταβληθεί, ή αν το σημείο λειτουργίας είναι το Γ, οπότε η καμπύλη λειτουργίας P - V είναι διαφορετική από πριν. Με το τρόπο αυτό ο αλγόριθμος καθορίζει αν έχει μεταβληθεί η ηλιακή ακτινοβολία, καθώς σε μια τέτοια περίπτωση η επιστροφή στην τάση V_A οδηγεί σε ισχύ P_Γ μεγαλύτερη από την P_A που μετρήθηκε στην αρχή της διαδικασίας. Επομένως, μετά από τις μετρήσεις γίνεται σύγκριση της πρώτης και της δεύτερης τιμής της ισχύος στην τάση V_A , διαδικασία η οποία δίνει τη δυνατότητα στον αλγόριθμο να διακρίνει τις αλλαγές της ηλιακής ακτινοβολίας. Μια τέτοια διαδικασία όμως είναι φανερό ότι επιβραδύνει σημαντικά τον αλγόριθμο. Στο Σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζεται το λογικό διάγραμμα του αλγορίθμου Ανάβασης Λόφου/Διατάραξης και Παρατήρησης:



Σχήμα 4.4 : Λογικό διάγραμμα αλγορίθμου Διατάραξης και Παρατήρησης

4.3 Αλγόριθμος Αυξητικής Αγωγιμότητας (Incremental Conductance -INC)

Ο αλγόριθμος της Αυξητικής Αγωγιμότητας βασίζεται σε μια απλή μαθηματική ανάλυση. Η ισχύς μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι συνάρτηση της τάσης και του ρεύματος. Άρα για να βρούμε τη μέγιστη τιμή της ισχύος μπορούμε να παραγωγίσουμε την ισχύ ως προς κάποια από τις δύο μεταβλητές, δηλαδή ως προς την τάση ή ως προς το ρεύμα, και να θέσουμε την εξίσωση που θα προκύψει ίση με το μηδέν. Παραγωγίζουμε ως προς την τάση και προκύπτει ότι στο ΜΣΙ ισχύει:

$$\frac{dP}{dV} = 0 \Rightarrow \frac{d(V \cdot I)}{dV} = 0 \Rightarrow I + V \cdot \frac{dI}{dV} = 0$$

Από την παραπάνω εξίσωση προκύπτει η σχέση :

$$\frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V}$$

Στο σημείο αυτό να σημειωθεί ότι ο πρώτος όρος της παραπάνω σχέσης εκφράζει την αυξητική αγωγιμότητα της φωτοβολταϊκής συστοιχίας και ο δεύτερος είναι η αρνητική στιγμιαία αγωγιμότητα της φωτοβολταϊκής συστοιχίας, δηλαδή η στιγμιαία αγωγιμότητα με αρνητικό πρόσημο. Επομένως, προκύπτει η σχέση ελέγχου για την ανίχνευση του ΜΣΙ, όπου στο σημείο αυτό, σύμφωνα με την παραπάνω σχέση, πρέπει τα δύο μεγέθη που αναφέρθηκαν παραπάνω να είναι ίσα. Από την παραπάνω σχέση προκύπτουν επίσης κάποιες άνισες σχέσεις, οι οποίες δίνουν τη δυνατότητα στον αλγόριθμο να διακρίνει αν το σημείο λειτουργίας είναι αριστερά ή δεξιά του ΜΣΙ και επομένως να κάνει τις κατάλληλες ρυθμίσεις για να προσεγγιστεί το ΜΣΙ. Παρακάτω παρουσιάζονται όλες οι σχέσεις ελέγχου που χρησιμοποιούνται από τον αλγόριθμο αυξητικής αγωγιμότητας :

$$\frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V} \quad \left(\frac{dP}{dV} = 0 \right)$$

$$\frac{dI}{dV} > -\frac{I}{V} \quad \left(\frac{dP}{dV} > 0 \right)$$

$$\frac{dI}{dV} < -\frac{I}{V} \quad \left(\frac{dP}{dV} < 0 \right)$$

Οι δύο τελευταίες ανισώσεις χρησιμοποιούνται από τον ΑΜΣΙ για να διαπιστωθεί αν η τάση λειτουργίας είναι μικρότερη ή μεγαλύτερη από την τάση στο ΜΣΙ VMPP ενώ παράλληλα ελέγχεται και η τιμή του ρεύματος της φωτοβολταϊκής συστοιχίας. Επομένως, οι δύο αυτές ανισώσεις καθορίζουν τον τρόπο μεταβολής της τάσης, δηλαδή αν πρέπει να αυξηθεί ή να μειωθεί, έτσι ώστε να προσεγγιστεί το MPP. Η τάση μεταβάλλεται συνέχεια, έτσι όπως ορίζεται από την ανίσωση που ισχύει κάθε φορά για τη φωτοβολταϊκή συστοιχία, μέχρι να ικανοποιηθεί η πρώτη εξίσωση. Σε περίπτωση που ισχύει η πρώτη σχέση, έχει επιτευχθεί το ΜΣΙ και ο ΑΜΣΙ ρυθμίζει και κρατάει τη λειτουργία των φωτοβολταϊκών στοιχείων σε αυτό το σημείο μέχρι να παρατηρηθεί κάποια αλλαγή στο ρεύμα. Οποιαδήποτε αλλαγή στο ρεύμα, οδηγεί στο συμπέρασμα ότι υπάρχει αλλαγή της ηλιακής ακτινοβολίας. Με τον επιπλέον έλεγχο της τιμής του ρεύματος, ο αλγόριθμος έχει τη δυνατότητα να αντιλαμβάνεται την αλλαγή των καιρικών συνθηκών και επομένως να ανταποκρίνεται καλύτερα σε περιπτώσεις απότομης αλλαγής της ηλιακής ακτινοβολίας, γεγονός που τον καθιστά καλύτερο από τον αλγόριθμο διατάραξης και παρατήρησης. Επιπλέον, ο ΑΜΣΙ με αλγόριθμο αυξητικής αγωγιμότητας δεν οδηγεί σε ταλάντωση γύρω από το ΜΣΙ, αλλά σε σταθερή λειτουργία στο ΜΣΙ μέχρι να παρατηρηθεί αλλαγή του ρεύματος και συνεπώς της φωτεινότητας ή της θερμοκρασίας.

Μια σύντομη περιγραφή της διαδικασίας που ακολουθεί ο αλγόριθμος παρουσιάζεται παρακάτω. Ο αλγόριθμος χρησιμοποιεί δύο τιμές της τάσης και δύο τιμές του ρεύματος και ελέγχει τις μεταβολές των δύο μεγεθών. Συγκεκριμένα, αν $dV=0$ και $dI=0$, οι ατμοσφαιρικές συνθήκες δεν έχουν αλλάξει και το σύστημα λειτουργεί ακόμα στο MPP. Εάν $dV=0$ και $dI>0$, η ηλιακή ακτινοβολία έχει αυξηθεί, με αποτέλεσμα να αυξάνεται η τάση MPP. Επομένως ο ΑΜΣΙ αυξάνει τη τάση λειτουργίας της συστοιχίας φωτοβολταϊκών στοιχείων για να ακολουθήσει το νέο ΜΣΙ. Αντίθετα, αν $dV=0$ και $dI<0$, η ηλιακή ακτινοβολία έχει μειωθεί, μειώνοντας την τάση ΜΣΙ και ο ΑΜΣΙ μειώνει τη τάση λειτουργίας της φωτοβολταϊκής συστοιχίας για να εντοπίσει το νέο ΜΣΙ. Σε περίπτωση που οι μεταβολές στη τάση και το ρεύμα δεν είναι μηδέν, μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι ανισώσεις για να

καθορίσουν την κατεύθυνση κατά την οποία πρέπει να αλλάξει η τάση προκειμένου να επιτευχθεί το ΜΣΙ. Αν ισχύει:

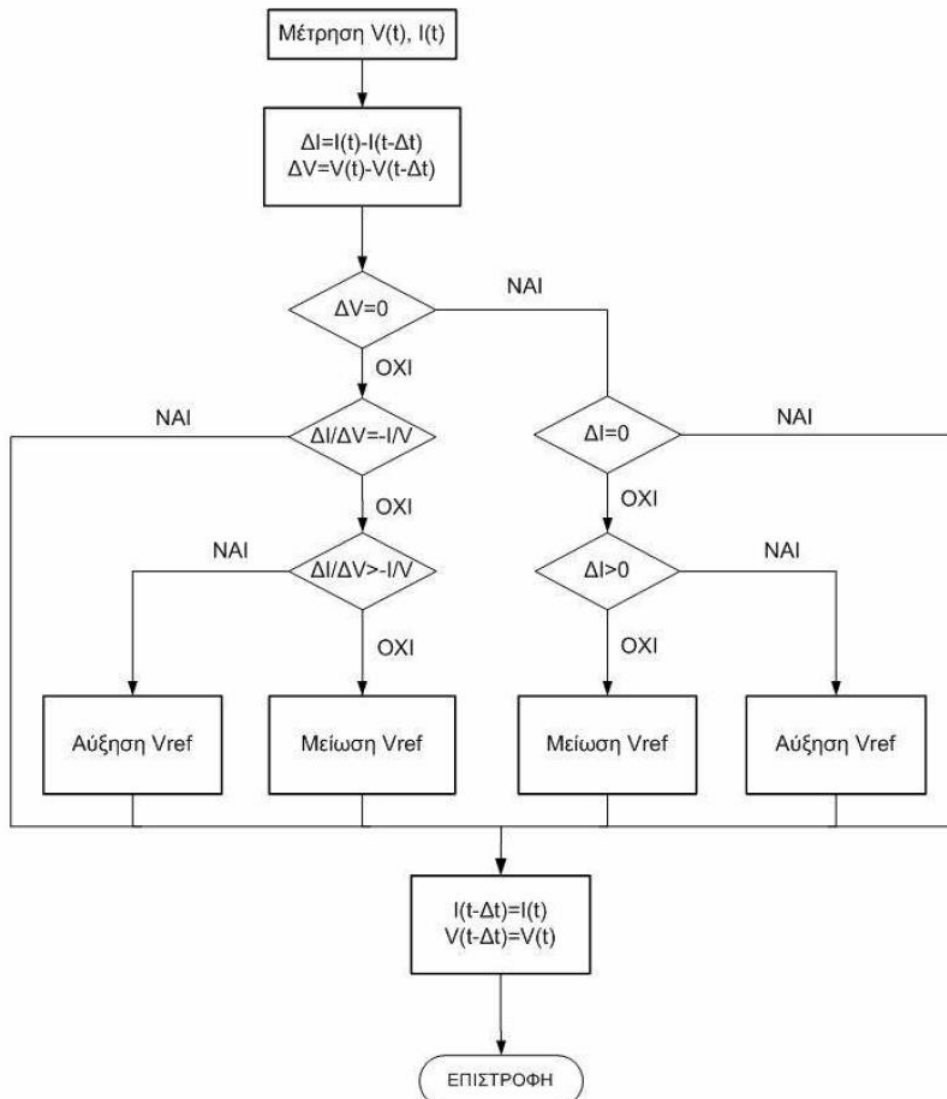
$$\boxed{\frac{dI}{dV} > -\frac{I}{V}} \quad \text{τότε} \quad \boxed{\frac{dP}{dV} > 0}$$

και το σημείο λειτουργίας της φωτοβολταϊκής συστοιχίας είναι αριστερά από το MPP στην καμπύλη P - V. Άρα η τάση της φωτοβολταϊκής πρέπει να αυξηθεί για να προσεγγιστεί το MPP. Αντίστοιχα, αν ισχύει:

$$\boxed{\frac{dI}{dV} < -\frac{I}{V}} \quad \text{τότε} \quad \boxed{\frac{dP}{dV} < 0}$$

και το σημείο λειτουργίας της φωτοβολταϊκής συστοιχίας βρίσκεται στα δεξιά του MPP στην καμπύλη P - V. Άρα η τάση πρέπει να μειωθεί για να ανιχνευθεί το ΜΣΙ.

Συμπερασματικά, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, ο αλγόριθμος αυξητικής αγωγιμότητας παρουσιάζει το βασικό πλεονέκτημα έναντι του αλγόριθμου διατάραξης και παρατήρησης, ότι έχει τη δυνατότητα να υπολογίσει και όχι να παρατηρήσει την κατεύθυνση στην οποία πρέπει να διαταράξει το σημείο λειτουργίας του φωτοβολταϊκού συστήματος για να προσεγγίσει το MPP. Κατά συνέπεια, κάτω από γρήγορα μεταβαλλόμενες καιρικές συνθήκες, αποφεύγεται η περίπτωση λανθασμένης μεταβολής της τάσης και απόκλισης από το ΜΣΙ, όπως συμβαίνει με τον αλγόριθμο διατάραξης και παρατήρησης. Επιπλέον μπορεί να προσδιορίσει πότε έχει προσεγγίσει το ΜΣΙ, με αποτέλεσμα να αποφεύγονται οι ταλαντώσεις γύρω από αυτό. Στο Σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζεται το λογικό διάγραμμα του αλγορίθμου Αυξητικής Αγωγιμότητας :

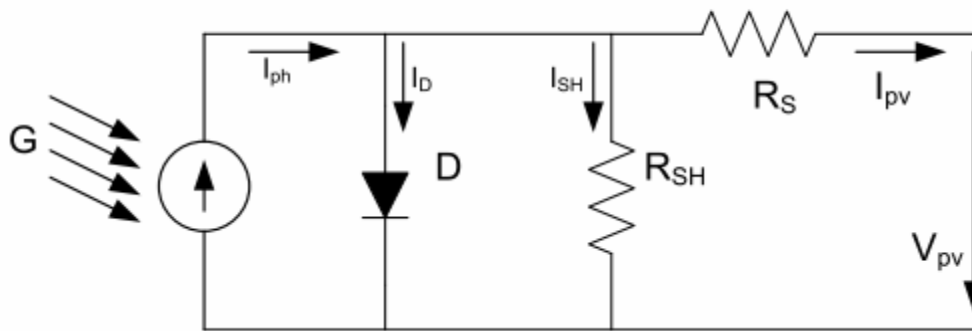


Σχήμα 4.5 : Λογικό διάγραμμα αλγορίθμου Αυξητικής Αγωγιμότητας

4.4 Αλγόριθμος Παρασιτικής Χωρητικότητας (Parasitic Capacitance - PC)

Ο αλγόριθμος παρασιτικής χωρητικότητας είναι παρόμοιος με αυτόν της αυξητικής αγωγιμότητας. Με αυτό τον αλγόριθμο λαμβάνεται υπόψιν η επίδραση της παρασιτικής χωρητικότητας των φωτοβολταϊκών στοιχείων C_p . Η παρασιτική χωρητικότητα αναφέρεται στα συσσωρευμένα φορτία που συγκεντρώνονται στην επαφή των υλικών που αποτελούν το στοιχείο. Η χωρητικότητα δίνεται από τη σχέση :

$$I(t) = C_p \cdot \frac{dV}{dt} \quad \text{Σχέση 4.4}$$



Σχήμα 4.6 : Ισοδύναμο κύκλωμα φωτοβολταϊκού στοιχείου

Για ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο ισχύει η Σχέση :

$$I = I_{ph} - I_{OS} \cdot \left[\exp \frac{q}{A \cdot k_B \cdot T} (V + I \cdot R) - 1 \right]$$

Όπου A ο συντελεστής ιδανικότητας της διόδου που φαίνεται στο Σχήμα 4.6, q το φορτίο του ηλεκτρονίου, R είναι η αντίσταση σειράς του ισοδύναμου κυκλώματος του φωτοβολταϊκού στοιχείου, I_{ph} το παραγόμενο φωτόρρευμα και I_{OS} το ρεύμα κορεσμού της διόδου. Η εξίσωση αυτή αποτελεί την εξίσωση του Shockley για μια φωτοευαίσθητη επαφή p - n. Προσθέτοντας τις Σχέσεις 4.5 και 4.6 προκύπτει:

$$I = I_{ph} - I_{OS} \cdot \left[\exp \frac{q}{A \cdot k_B \cdot T} (V + I \cdot R) - 1 \right] + C_p \cdot \frac{dV_P}{dt} \Rightarrow I = f(V_P) + C_p \cdot \frac{dV_P}{dt}$$

Επομένως, το ρεύμα I αποτελείται από δύο συνιστώσες, η μία από τις οποίες είναι συνάρτηση της τάσης $f(V_P)$ και η άλλη είναι συνάρτηση του ρεύματος της παρασιτικής χωρητικότητας. Σύμφωνα λοιπόν με όσα προαναφέρθηκαν, η αυξητική αγωγιμότητα της συστοιχίας gP ορίζεται ως :

$$g_P = \frac{df(V_P)}{dV_P}$$

ενώ η στιγμιαία αγωγιμότητα της συστοιχίας φωτοβολταϊκών, g_L ορίζεται ως :

$$g_L = -\frac{f(V_P)}{V_P} \quad \text{Σχέση 4.9}$$

Η ισχύς του φωτοβολταϊκού στοιχείου προκύπτει από τον πολλαπλασιασμό της Σχέσης 4.7 και της τάσης V_P . Από τον πολλαπλασιασμό προκύπτει:

$$P = V_P \cdot f(V_P) + V_P \cdot C_P \cdot \frac{dV_P}{dt} \quad \text{Σχέση 4.10}$$

Το σημείο μέγιστης ισχύος, όπως αναφέρθηκε και στην περιγραφή του αλγορίθμου αυξητικής

αγωγιμότητας, βρίσκεται στο σημείο των καμπυλών όπου η παράγωγος της ισχύς ως προς την τάση των φωτοβολταϊκών στοιχείων είναι μηδέν, Δηλαδή στο MPP ισχύει:

$$\frac{dP}{dV_P} = 0 \quad \text{Σχέση 4.11}$$

Επομένως, παραγωγίζοντας την ισχύ του φωτοβολταϊκού, που δίνεται από τη Σχέση 4.10, ως προς την τάση V_P και εξισώνοντας το αποτέλεσμα με μηδέν, σύμφωνα με τη Σχέση 4.11, προκύπτει :

$$\begin{aligned}
\frac{dP}{dV_P} = 0 &\Rightarrow \frac{d}{dV_P} [V_P \cdot f(V_P)] + C_P \cdot \frac{d}{dV_P} \left[V_P \cdot \frac{dV_P}{dt} \right] = 0 \Rightarrow \\
&\Rightarrow V_P \cdot \frac{df(V_P)}{dV_P} + f(V_P) + C_P \cdot \left(\frac{dV_P}{dt} + \frac{d}{dt} \cdot V_P \right) = 0 \Rightarrow \\
&\Rightarrow V_P \cdot \frac{df(V_P)}{dV_P} + f(V_P) + C_P \cdot \left(\frac{dV_P}{dt} + V_P \cdot \frac{d}{dV_P} \left(\frac{dV_P}{dt} \right) \right) = 0 \Rightarrow \\
&\Rightarrow V_P \cdot \frac{df(V_P)}{dV_P} + f(V_P) + C_P \cdot \left(\frac{dV_P}{dt} + V_P \cdot \frac{dt}{dV_P \cdot dt} \cdot \left(\frac{d^2 V_P}{dt^2} \right) \right) = 0 \Rightarrow \\
&\Rightarrow V_P \cdot \frac{df(V_P)}{dV_P} + f(V_P) + C_P \cdot \left(\frac{dV_P}{dt} + V_P \cdot \frac{1}{\left(\frac{dV_P}{dt} \right)} \cdot \left(\frac{d^2 V_P}{dt^2} \right) \right) = 0
\end{aligned}$$

Διαιρώντας την τελευταία εξίσωση με την τάση VP προκύπτει τελικά ότι :

$$\frac{df(V_P)}{dV_P} + \frac{f(V_P)}{V_P} + C_P \cdot \left(\frac{\left(\frac{dV_P}{dt} \right)}{V_P} + \frac{1}{\left(\frac{dV_P}{dt} \right)} \cdot \left(\frac{d^2 V_P}{dt^2} \right) \right) = 0 \quad \text{Σχέση 4.12}$$

Από τις Σχέσεις 4.8 και 4.9 φαίνεται ότι οι δύο πρώτοι όροι αντιπροσωπεύουν την αυξητική αγωγιμότητα και την αντίθετη στιγμιαία αγωγιμότητα του φωτοβολταϊκού στοιχείου. Ο τρίτος όρος αποτελεί την κυμάτωση ρεύματος που προκαλείται λόγω της παρασιτικής χωρητικότητας. Με την πρώτη και τη δεύτερη παράγωγο της τάσης της φωτοβολταϊκής συστοιχίας ως προς το χρόνο, λαμβάνονται υπόψιν οι εναλλασσόμενες συνιστώσες της κυμάτωσης ρεύματος, οι οποίες δημιουργούνται από το μετατροπέα. Τέλος, να σημειωθεί ότι η παρασιτική χωρητικότητα CP τεθεί ίση με μηδέν, η Σχέση 4.12 απλοποιείται και μετατρέπεται στη Σχέση 4.1 που χρησιμοποιείται για τον αλγόριθμο αυξητικής αγωγιμότητας.

Μια σημαντική διαφορά του αλγορίθμου παρασιτικής χωρητικότητας σε σχέση με τον αλγόριθμο αυξητικής αγωγιμότητας είναι ότι σε φωτοβολταϊκούς

πίνακες μεγάλης ισχύος με πολλά στοιχεία συνδεδεμένα παράλληλα, ο αλγόριθμος παρασιτικής χωρητικότητας μπορεί να αποδειχθεί πολύ πιο αποδοτικός από αυτόν της αυξητικής αγωγιμότητας. Αυτό συμβαίνει γιατί η παρασιτική χωρητικότητα βρίσκεται σε παράλληλη σύνδεση με το φωτοβολταϊκό στοιχείο. Επομένως, με την παράλληλη σύνδεση πολλών φωτοβολταϊκών στοιχείων, οι παρασιτικές χωρητικότητες τους προστίθενται και άρα η παρασιτική χωρητικότητα του συνολικού πίνακα είναι σημαντική. Λόγω της αύξησης της τιμής της παρασιτικής χωρητικότητας, αυξάνει και η ευαισθησία του αντίστοιχου αλγορίθμου, με αποτέλεσμα να την ανιχνεύει με μεγαλύτερη ακρίβεια.

4.5 Αλγόριθμος Σταθερής Τάσης (Constant Voltage - CV)

Ο αλγόριθμος Σταθερής τάσης (CV) βασίζεται σε μια απλή παρατήρηση που μπορεί να γίνει με τη

βοήθεια των καμπυλών $I - V$, όπως αυτές που φαίνονται στην Εικόνα 2. Συγκεκριμένα ισχύει εμπειρικά ότι η αναλογία της τάσης μέγιστης ισχύος V_{MPP} στο MPP και της τάσης ανοιχτού κυκλώματος V_{OC} των φωτοβολταϊκών στοιχείων είναι περίπου σταθερή για όλες τις καμπύλες. δηλαδή για τις δύο τάσεις ισχύει μια σχέση της μορφής :

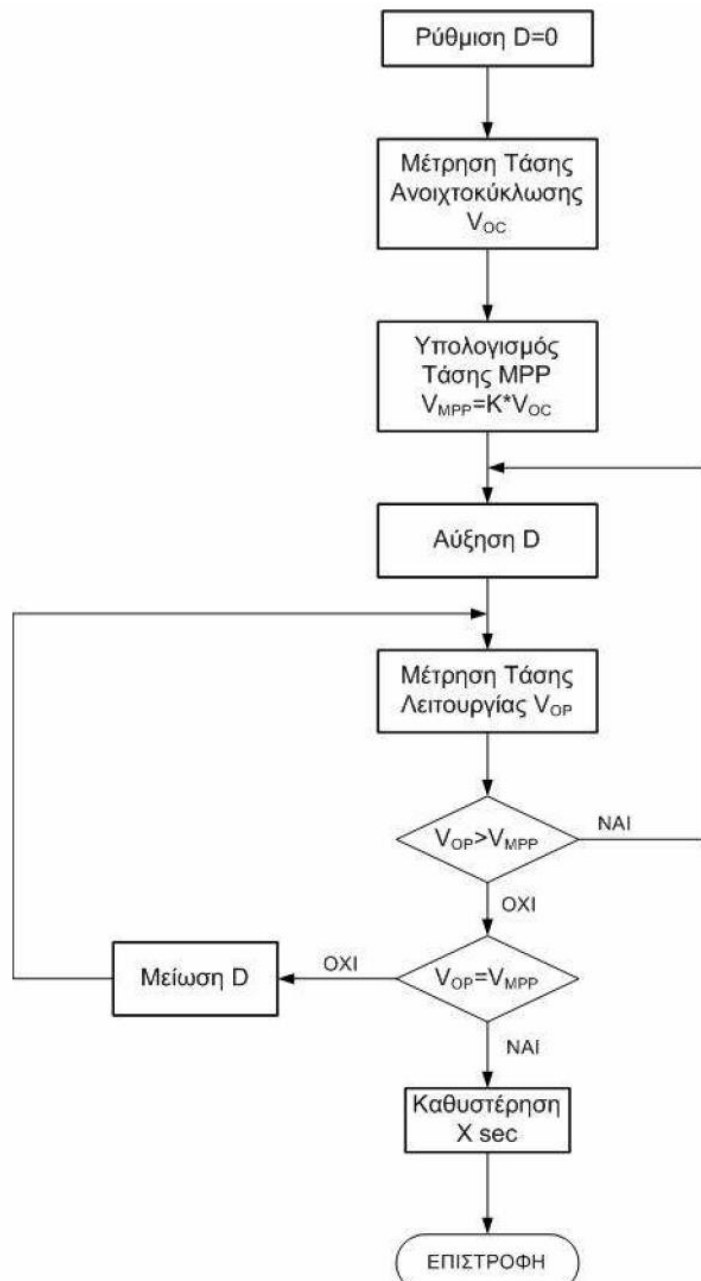
$$\frac{V_{MPP}}{V_{OC}} = K < 1 \quad \text{Σχέση 4.13}$$

Ο αλγόριθμος σταθερής τάσης ακολουθεί την εξής απλή διαδικασία : προσωρινά απομονώνεται η συστοιχία φωτοβολταϊκών από τον ΑΜΣΙ και γίνεται μέτρηση της τάσης ανοιχτού κυκλώματος V_{oc} . Έπειτα ο ΑΜΣΙ χρησιμοποιώντας την παραπάνω εξίσωση και μια προκαθορισμένη τιμή του K , υπολογίζει το σωστό σημείο λειτουργίας και ρυθμίζει την τάση των φωτοβολταϊκών στοιχείων μέχρι να επιτευχθεί η υπολογισμένη, από την εξίσωση, τιμή της τάσης V_{MPP} στο MPP . Η παραπάνω διαδικασία επαναλαμβάνεται περιοδικά με αποτέλεσμα ο αλγόριθμος να έχει τη δυνατότητα να ακολουθεί τη θέση του ΜΣΙ και να το εντοπίζει. Αν και αυτή η μέθοδος είναι εξαιρετικά απλή, η επιλογή της σταθεράς K δεν είναι απλά ζήτημα. Αυτό συμβαίνει γιατί η αναλογία K δεν είναι σταθερή, όπως θεωρήθηκε προσεγγιστικά, αλλά στην πραγματικότητα εξαρτάται από τη

θερμοκρασία και την ακτινοβολία. Επομένως, η επιλογή της σταθεράς K δεν μπορεί να γίνει ιδανικά αλλά ούτε και έχει βρεθεί τρόπος για την επιλογή της καλύτερης δυνατής τιμής. Για το λόγο αυτό η απόδοση των ΑΜΣΙ που χρησιμοποιούν τον αλγόριθμο σταθερής τάσης είναι μειωμένη σε σχέση με άλλους ΑΜΣΙ που χρησιμοποιούν άλλους αλγορίθμους. Στη μείωση της απόδοσης του αλγορίθμου συμβάλλει και το γεγονός ότι η μέτρηση της τάσης ανοικτού κυκλώματος προϋποθέτει τη στιγμιαία διακοπή της ισχύος των φωτοβολταϊκών στοιχείων. Να αναφερθεί ότι έχει προταθεί τροποποίηση του αλγορίθμου σύμφωνα με την οποία θα ρυθμίζεται η τιμή του K ανάλογα με τις συνθήκες θερμοκρασίας και ακτινοβολίας. Μια τέτοια λειτουργία όμως απαιτεί την επινόηση ενός βοηθητικού αλγορίθμου και ουσιαστικά ο αλγόριθμος σταθερής τάσης γίνεται παρόμοιος με τον αλγόριθμο διατάραξης και παρατήρησης.

Να αναφερθεί ότι υπάρχει και ο αλγόριθμος Σταθερού Ρεύματος, ο οποίος προσεγγίζει το ρεύμα στο ΜΣΙ ως σταθερό ποσοστό του ρεύματος βραχυκύκλωσης των φωτοβολταϊκών στοιχείων. Για την εφαρμογή του αλγορίθμου σταθερού ρεύματος, τοποθετείται ένας διακόπτης στους ακροδέκτες εισόδου του converter ο οποίος κλείνει στιγμιαία, έτσι ώστε να μετρηθεί το ρεύμα βραχυκύκλωσης. Έπειτα υπολογίζεται το ρεύμα στο ΜΣΙ από τη σχέση που συνδέει τα δύο ρεύματα και μεταβάλλεται το ρεύμα εξόδου της φωτοβολταϊκής συστοιχίας από τον ΑΜΣΙ μέχρι να επιτευχθεί το υπολογισμένο ρεύμα ΜΣΙ. Η ίδια διαδικασία επαναλαμβάνεται περιοδικά. Ωστόσο, ο αλγόριθμος σταθερής τάσης είναι προτιμότερος λόγω της ευκολίας μέτρησης των τάσεων και λόγω του ότι η ανοικτό κύκλωση της φωτοβολταϊκής συστοιχίας είναι απλή διαδικασία, ενώ η βραχυκύκλωση της είναι πρακτικά αδύνατη, εφόσον δε γίνεται να εφαρμοστεί μηδενική αντίσταση στα άκρα της φωτοβολταϊκής συστοιχίας.

Οι αλγόριθμοι σταθερής τάσης και σταθερού ρεύματος, ωστόσο, μπορούν να εφαρμοστούν με την τεχνική του στοιχείου πιλότου. Αυτό σημαίνει ότι για ένα μεγάλο φωτοβολταϊκό πίνακα, ένα στοιχείο θα χρησιμοποιείται για τις μετρήσεις. Δηλαδή η μέτρηση της τάσης ανοικτού κυκλώματος ή του ρεύματος βραχυκύκλωσης θα γίνεται πάνω σε αυτό το φωτοβολταϊκό στοιχείο και όχι σε όλο τον πίνακα. Επομένως, για τη μέτρηση των μεγεθών αυτών ανοικτό κυκλώνεται μόνο ένα στοιχείο του πίνακα, με αποτέλεσμα τα υπόλοιπα στοιχεία να παράγουν ισχύ ώστε να μη μειώνεται σημαντικά η απόδοση του συστήματος. Στο Σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζεται το λογικό διάγραμμα του αλγορίθμου Σταθερής Τάσης :



Σχήμα 4.7 : Λογικό διάγραμμα αλγορίθμου Σταθερής Τάσης

4.6 Μέθοδος διαφοροποίησης (Differentiation method)

Η τεχνική αυτή, για την εύρεση του MPP βασίζεται στην επίλυση της εξίσωσης:

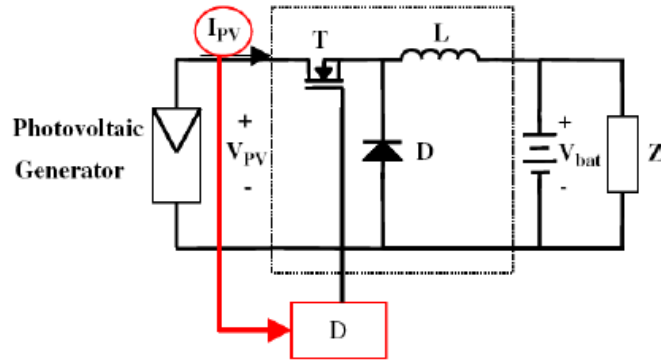
$$\frac{dP_{PV}}{dt} = V_{PV}, \quad \frac{dI_{PV}}{dt} + I_{PV} \frac{dV_{PV}}{dt} = 0$$

Ωστόσο, προκειμένου να παρέχουμε ρυθμίσεις στο σημείο λειτουργίας σε πραγματικό χρόνο, η παραπάνω εξίσωση θα πρέπει να επιλυθεί γρήγορα. Κάτι τέτοιο όμως είναι δύσκολο καθώς η επίλυση αυτής της εξίσωσης απαιτεί τουλάχιστον οχτώ υπολογισμούς και μετρήσεις: ο προσδιορισμός της τωρινής τάσης και ρεύματος της συστοιχίας V_{pv} και I_{pv} αντίστοιχα, ένα μέτρο της μεταβολής της τάσης dV_{pv} για την αντιμετώπιση μιας συγκεκριμένης διατάραξης στο σημείο λειτουργίας, ένα μέτρο της μεταβολής του ρεύματος dI_{pv} , υπολογισμός του γινομένου dI_{pv} επί V_{pv} , υπολογισμός του γινομένου I_{pv} επί dV_{pv} , υπολογισμός του ποσού που προκύπτει $V_{pv} \cdot dI_{pv} + I_{pv} \cdot dV_{pv}$, και σύγκριση της τιμής αυτής με μια ίδια διαταραχή στην απέναντι πλευρά του σημείου λειτουργίας. Επιπλέον, αν η τελική τιμή δεν είναι μηδέν, ένας ένατος υπολογισμός πρέπει να γίνει για το πρόσημο του dP_{pv} . Το πρόσημο αυτό υποδεικνύει την κατεύθυνση που θα πρέπει να κατευθυνθεί το σημείο λειτουργίας ώστε να φτάσει στο MPP.

4.7 Μέθοδος μόνο ρεύματος (The only current method)

Μέχρι στιγμής, στις άμεσες μεθόδους μετρούνται η τάση και το ρεύμα του φωτοβολταϊκού. Ωστόσο, είναι δυνατό να βρεθεί μια μέθοδος που να χρησιμοποιεί μόνο το ρεύμα του φωτοβολταϊκού, με βάση το σχήμα (4.8). Η μη γραμμική φωτοβολταϊκή συστοιχία μπορεί να μοντελοποιηθεί σύμφωνα με τη σχέση: $I_{PV} = f(V_{PV}, I_{PV})$ όπου I_{PV} το ρεύμα λειτουργίας, V_{PV} η τάση λειτουργίας, R_S η εν σειρά παρασιτική αντίσταση του φωτοβολταϊκού κυττάρου, R_P η παράλληλη παρασιτική αντίσταση του φωτοβολταϊκού κυττάρου, m η σταθερά διασύνδεσης, I_0 το ανάστροφο ρεύμα κορεσμού του φωτοβολταϊκού κυττάρου και I_L το φωτόρευμα. Στη συνέχεια, με αλλαγές μπορούμε να εκφράσουμε το I_{PV} μόνο ως προς V_{PV} , $I_{PV} = f(V_{PV})$, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί στις εκφράσεις της μετατροπής της ενέργειας. Στην περίπτωση μας, αυτή η πρώτη ανάλυση θα πρέπει να βασίζεται στον

μετασχηματιστή buck με τις γνωστές εξισώσεις (4.14) – (4.17), όπου V_{bat} η τάση της μπαταρίας (η οποία θεωρείται ότι έχει σταθερή τάση για κάθε ,t) και D η σχετική διάρκεια αγωγής.



Σχήμα 4.8 : Διάγραμμα αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος με τη μέθοδο μόνο ρεύματος

$$I_{PV}(V_{PV}, I_{PV}) = I_L - I_0(e^{(V_{PV} + I_{PV}R_s/mv_t)} - 1) - \frac{V_{PV} + I_{PV}R_s}{R_{sh}}, \quad (4.14)$$

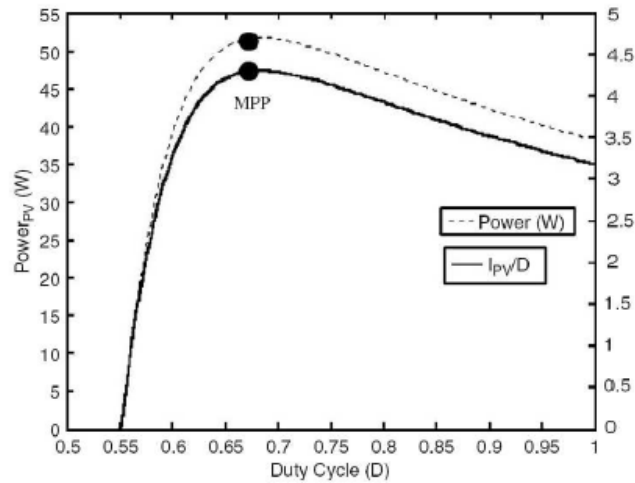
$$V_{bat} = \frac{t_{on}}{T} V_{PV}, \quad (4.15)$$

$$P_{in} = V_{PV}I_{PV} = V_{bat} \frac{I_{PV}}{D} = V_{bat}P^*, \quad (4.16)$$

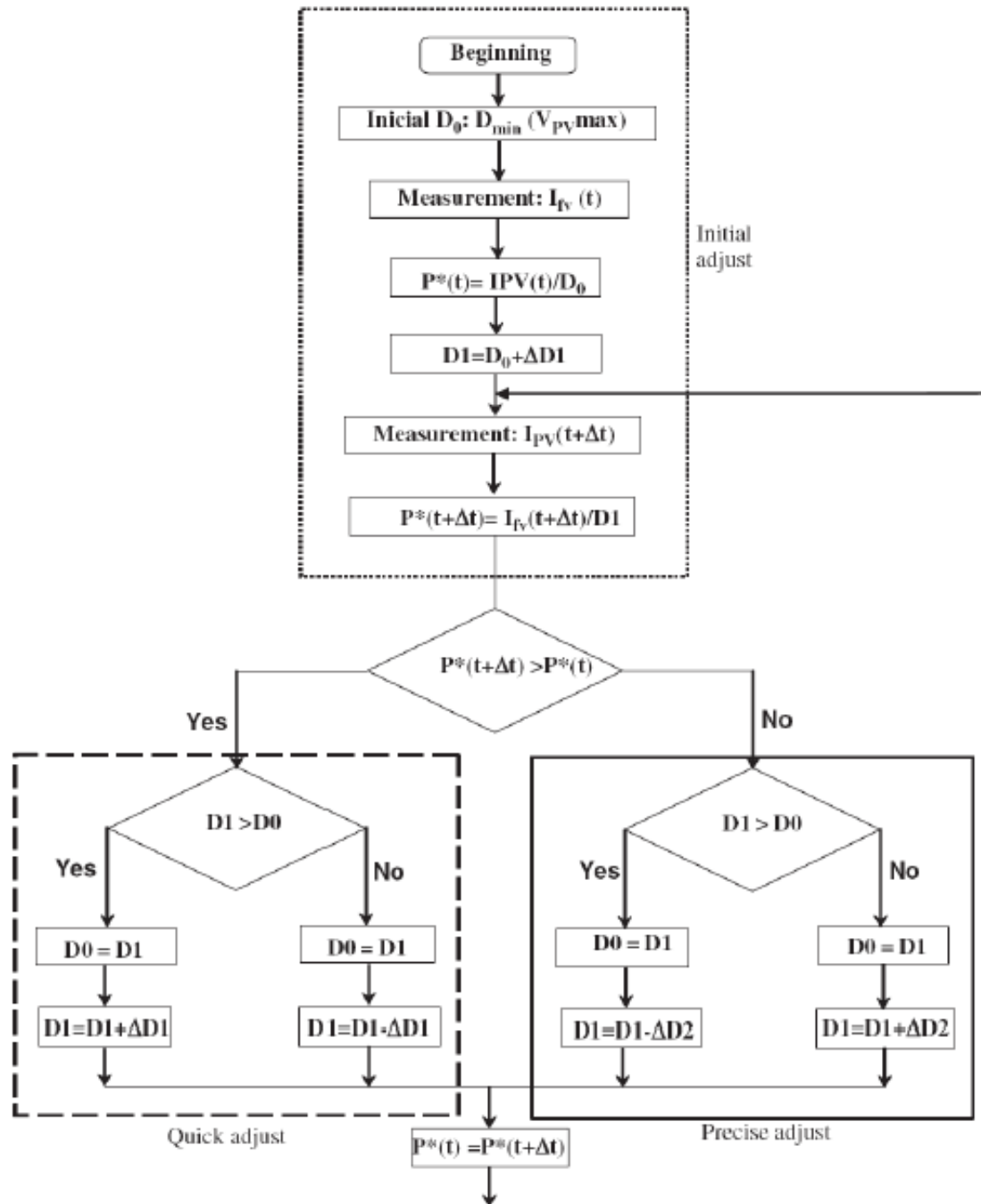
$$P_{Buck}^* = \frac{I_{PV}}{D}. \quad (4.17)$$

Μπορεί να αποδειχθεί ότι η ισχύς εισόδου του μετασχηματιστή, P_{in} προς τη σχετική διάρκεια αγωγής D , και P^*_{Buck} προς D , δίνουν τα ίδια σημεία μέγιστης ισχύος, για ίδια τιμή της σχετική διάρκεια αγωγής και σταθερή τιμή στην τάση μπαταρίας, σχήμα 4.9. Ο αλγόριθμος, για αυτή τη μέθοδο, μπορεί να εξηγηθεί ως εξής: η διαδικασία εύρεσης του μέγιστου σημείου ξεκινά με ένα αρχικό λόγο εργασίας. Αρχικά, μετράται το ρεύμα φωτοβολταϊκού $I_{PV}(t)$ και υπολογίζεται η $P^*(t)$. Στη συνέχεια, η σχετική διάρκεια αγωγής αυξάνεται, $D1$. Στο δεύτερο στάδιο, το ρεύμα $I_{PV}(t+1)$ μετράται και υπολογίζεται πάλι το $P^*(t+1)$. Αφού συλλέξουμε τις πληροφορίες για το παρελθόν και το παρόν του P^* , ο ελεγκτής αποφασίζει αν θα αυξήσει ή αν θα μειώσει τη σχετική διάρκεια αγωγής αναλόγως με τη θέση του σημείου λειτουργίας. Αυτή η διαδικασία αναζήτησης, επαναλαμβάνεται επ' αορίστων μέχρι να βρεθεί το σημείο μέγιστης ισχύος. Στο σχήμα 4.10 φαίνεται το διάγραμμα ροής του αλγόριθμου.

Η μέθοδος αυτή έχει ένα σημαντικό πλεονέκτημα σε σχέση με άλλες άμεσες μεθόδους, το γεγονός ότι χρησιμοποιεί τη μέτρηση μόνο του ρεύματος του φωτοβολταϊκού IPV. Επιπλέον ο αλγόριθμος αυτός λειτουργεί με επιτυχία ακόμη και σε περιπτώσεις που οι περιβαλλοντικές συνθήκες μεταβάλλονται απότομα. Τέλος, η μέθοδος αυτή είναι κατάλληλη για κάθε τοπολογία DC/DC μετασχηματιστή, και για step-up και για step-down.



Σχήμα 4.9 : Αποτελέσματα προσομοίωσης σύγκρισης μεταξύ της νέας μεθόδου με την ισχύ παροχής του φωτοβολταϊκού.



Σχήμα 4.10 : Διάγραμμα ροής για τη μέθοδο της μέτρησης του φωτοβολταϊκού ρεύματος I_{pv}

4.8 Μέθοδοι αναγκασμένης ταλάντωσης

Διάφορα άρθρα έχουν εξετάσει αυτό το θέμα. Σε ένα από αυτά εισάγεται μια μικρή τάση, 100 Hz, η οποία προστίθεται στην τάση λειτουργίας της φωτοβολταϊκής γεννήτριας. Αυτό οδηγεί σε μια ισχύς με κυματισμούς, της οποίας η φάση και το πλάτος εξαρτώνται από τη σχετική θέση του σημείου λειτουργίας στο σημείο μέγιστης ισχύος σχήμα 18. Αν η διαμόρφωση αυτή εμφανίζεται στη ζώνη «Α», στο αριστερό μέρος του MPP, ο κυματισμός της τάσης και της ισχύς θα έχουν ίδια φάση. Ωστόσο, αν η διαμόρφωση εμφανίζεται στη ζώνη «Β», στο δεξιό μέρος του MPP, ο κυματισμός της ισχύς θα έχει 180ο διαφορά φάσης με αυτόν της τάσης. Στην περίπτωση που το σημείο λειτουργίας βρίσκεται στο MPP, ο κυματισμός της ισχύς θα έχει διπλάσια συχνότητα από αυτόν της τάσης, με πολύ μικρό πλάτος.

Το πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι η ανάλυση του πλάτους και της φάσης παρέχουν πληροφορίες για την τοποθεσία του MPP. Επιπλέον, το σήμα εξόδου συγκλίνει αργά προς το μηδέν, όταν το σημείο λειτουργίας πλησιάζει στο MPP. Αυτό επιτρέπει την τάση λειτουργίας να προσαρμόζεται γύρω από το MPP. Έτσι δε θα υπάρχει συνεχής ταλάντωση γύρω από το MPP προερχόμενη από τον μετασχηματιστή MPPT. Η μόνη ταλάντωση που συμβαίνει με αυτή τη μέθοδο είναι τα 100Hz διαμόρφωσης της τάσης λειτουργίας.

Παρόλα αυτά, έχει σαν μειονέκτημα την μεγαλύτερη πολυπλοκότητα για την εφαρμογή της όπως επίσης και την εκτίμηση των σημάτων πολύ μικρού πλάτους.

4.9 Η μέθοδος προσαρμογής καμπύλων (curve fitting)

Η μη γραμμική χαρακτηριστική της Φ/Β γεννήτριας μπορεί να μοντελοποιηθεί από τα τυπικά μοντέλα της μιας διόδου, των δύο διόδων και του τροποποιημένου μοντέλου των δύο διόδων χρησιμοποιώντας μαθηματικές εξισώσεις ή αριθμητικές προσεγγίσεις. Ωστόσο, η επίλυσή τους είναι αδύνατη από αναλογικό έλεγχο και πολύ δύσκολο από τον τυπικό ψηφιακό έλεγχο. Ως εκ τούτου, η εφαρμογή τους δεν φαίνεται κατάλληλη για την εύρεση του MPP. Ωστόσο, άλλες προσεγγίσεις με βάση το μοντέλο μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Συνεπώς, για παράδειγμα η εξίσωση (1) είναι η χαρακτηριστική ισχύς – τάσης (P-V) όπου οι a, b, c και d είναι συντελεστές που καθορίζονται από την δειγματοληψία m τιμών της τάσης του Φ/Β V_{pv} , του

ρεύματος I_{pv} και ισχύς του $\Phi/B P_{pv}$ στο απαραίτητο διάστημα. Κατά συνέπεια, η τάση στην οποία η μέγιστη ισχύς γίνεται μέγιστη επιτυγχάνεται μέσω της εξίσωσης (2)

$$P_{pv} = aV_{pv}^3 + bV_{pv}^2 + cV_{pv} + d, \quad (4.18)$$

$$V_{MPP} = -b\sqrt{b^2 - 3ac}/3a. \quad (4.19)$$

Αυτή η διαδικασία θα πρέπει να επαναλαμβάνεται κάθε λίγα χιλιοστά του δευτερολέπτου προκειμένου να βρεθεί ένα καλώς προσδιορισμένο MPP. Η ακρίβεια θα εξαρτηθεί από τον αριθμό δειγμάτων.

Το μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι είτε απαιτεί την ακριβή γνώση των φυσικών παραμέτρων σχετικά με το υλικό των ηλιακών κυττάρων και τις προδιαγραφές κατασκευής, είτε οι μαθηματικές εκφράσεις που χρησιμοποιούνται δεν είναι έγκυρες για όλες τις κλιματολογικές συνθήκες. Επιπλέον, μπορεί να χρειαστούμε μεγάλη χωρητικότητα μνήμης για τον υπολογισμό των μαθηματικών σχέσεων.

4.10 Η μέθοδος του πίνακα αναζήτησης (look – up table)

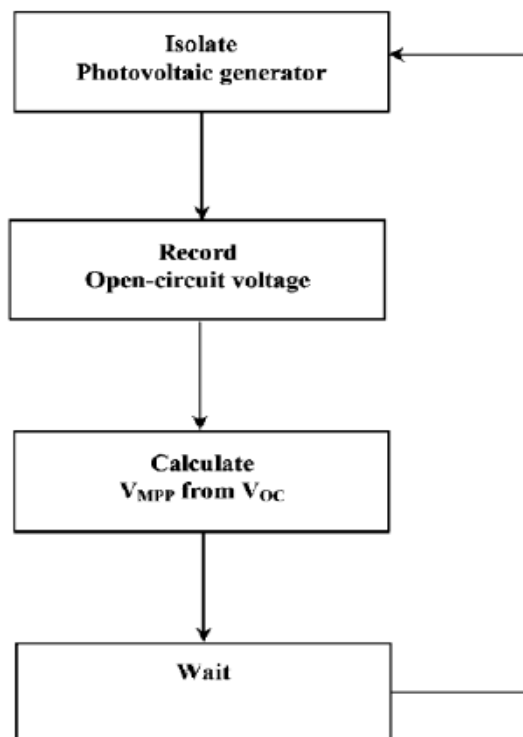
Σε αυτήν την περίπτωση, οι μετρημένες τιμές της τάσης και του ρεύματος της Φ/B γεννήτριας συγκρίνονται με εκείνες που έχουν αποθηκευτεί στο σύστημα ελέγχου, οι οποίες αντιστοιχούν στη λειτουργία στο μέγιστο σημείο, υπό συγκεκριμένες κλιματολογικές συνθήκες. Μειονέκτημα του αλγορίθμου αυτού είναι ότι απαιτείται μεγάλο μέγεθος μνήμης για την αποθήκευση των δεδομένων. Επιπλέον, η εφαρμογή πρέπει να προσαρμοστεί για ένα συγκεκριμένο Φ/B πάνελ καθώς είναι δύσκολο να καταγραφούν και να αποθηκευτούν όλες οι πιθανές καταστάσεις.

4.11 Η μέθοδος ανοιχτού κυκλώματος φωτοβολταϊκής γεννήτριας (open-voltage PV generator)

Ο αλγόριθμος αυτός βασίζεται στην τάση της Φ/Β πηγής στο MPP η οποία έχει περίπου γραμμική αναλογία (κατά ένα παράγοντα k_1) με την τάση ανοιχτού κυκλώματος, V_{oc} . Η σταθερά αναλογίας εξαρτάται κυρίως από την τεχνολογία επεξεργασίας των ηλιακών κυττάρων, τον συντελεστή πλήρωσης (fill factor) και τις μετεωρολογικές συνθήκες.

$$k_1 = \frac{V_{MPP}}{V_{OC}} \cong \text{Constant} < 1$$

Αυτό μπορεί να υλοποιηθεί από το διάγραμμα ροής του σχήματος. Έτσι, η τάση ανοιχτού κυκλώματος της Φ/Β πηγής μετριέται διακόπτοντας την κανονική λειτουργία του συστήματος, με μια ορισμένη περιοδικότητα, αποθηκεύοντας την μετρούμενη τιμή.



Σχήμα 4.11 : Διάγραμμα ροής της μεθόδου ανοιχτοκυκλώματος φωτοβολταϊκής γεννήτριας

Στη συνέχεια, υπολογίζεται το MPP σύμφωνα και η τάση λειτουργίας προσαρμόζεται στο σημείο μέγιστης τάσης. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται περιοδικά. Παρόλο που αυτή η μέθοδος είναι σχετικά απλή, είναι δύσκολο να επιλεγεί μια βέλτιστη τιμή της σταθεράς k_1 . Ωστόσο από διάφορες βιβλιογραφίες οι τιμές προκύπτουν να κυμαίνονται μεταξύ 0.73 και 0.8 για πολυκρυσταλλικά Φ/Β πλαίσια όπως επίσης και ένα τυπικός ρυθμός δειγματοληψίας περί των 15 ms.

Δεδομένου ότι η προσαρμογή της τάσης αναφοράς της V_{oc} παραμένει σταθερή για ένα μεγάλο φάσμα της θερμοκρασίας και της ηλιακής ακτινοβολίας και δεν αλλάζει σημαντικά με την πάροδο των χρόνων, αυτή η μέθοδος δεν μπορεί να ενσωματωθεί στην κατηγορία των άμεσων μεθόδων. Η ακρίβεια της ρύθμισης της τάσης λειτουργίας προς τη μέγιστη τάση, V_{mpp} , εξαρτάται από την επιλογή του συγκεκριμένου λόγου, σε σχέση με την πραγματική σχέση που υπάρχει μεταξύ V_{mpp} και V_{oc} .

Ως εκ τούτου αυτή η μέθοδος έχει ως πλεονέκτημα ότι είναι απλή και χαμηλής τιμής. Χρησιμοποιεί μόνο ένα βρόγχο ανατροφοδότησης. Εντούτοις, το μειονέκτημά του είναι ότι η διακεκομμένη λειτουργία του συστήματος έχει ως συνέπεια την απώλεια ισχύος κατά τη σάρωση ολόκληρου του φάσματος ελέγχου. Έτσι, η πραγματική ισχύς που εξάγεται δεν θεωρείται ότι είναι από το πλαίσιο. Έτσι, όπως γίνεται δεκτό, για δεδομένη τάση ανοικτού κυκλώματος, το μέγιστο σημείο προσδιορίζεται εάν το σημείο λειτουργίας είναι λανθασμένο, ή ελαφρώς ανακριβείς, η εξάγουσα ισχύς δεν θα είναι στα ανώτατα όρια.

4.12 Η μέθοδος βραχυκύκλωσης φωτοβολταϊκής γεννήτριας (short – circuit photovoltaic generator method)

Σε αυτή την περίπτωση η μέθοδος βασίζεται στο εμπειρικό γεγονός της γραμμικής εξάρτησης μεταξύ του ρεύματος MPP και αυτού του ρεύματος βραχυκύκλωσης που ικανοποιούν την σχέση:

$$k_2 = \frac{I_{PMP}}{I_{SC}} \cong \text{Constant} < 1$$

Όπως και η προηγούμενη μέθοδος η σταθερά αναλογίας εξαρτάται κυρίως από την τεχνολογία επεξεργασίας των ηλιακών κυττάρων, τον συντελεστή πλήρωσης (fill factor) και τις μετεωρολογικές συνθήκες. Ωστόσο, για τη μέθοδο αυτή, για πολυκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά πλαίσια, η σταθερά k_2 , μπορεί να

θεωρηθεί ότι είναι περίπου 0.85. Το διάγραμμα ροής είναι παρόμοιο με αυτό της μεθόδου του ανοιχτού κυκλώματος, έτσι η μέθοδος αυτή έχει τα ίδια πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα με την παραπάνω μέθοδο.

4.13 Η μέθοδος ανοιχτού κυκλώματος φωτοβολταϊκού κυττάρου ως μέσου δοκιμής (Open-circuit voltage photovoltaic test cell method)

Προκειμένου να αποφευχθούν πιθανά μειονεκτήματα που σχετίζονται με την συχνή διακοπή του συστήματος μπορούμε, ως εναλλακτική λύση, να χρησιμοποιήσουμε ένα φωτοβολταϊκό κύτταρο ως μέσω δοκιμής. Έτσι, η τάση ανοιχτού κυκλώματος υπολογίζεται από το κύτταρο το οποίο είναι ηλεκτρικά ανεξάρτητο από την υπόλοιπη φωτοβολταϊκή συστοιχία. Οι προκύπτουσες τιμές του k_3 θα εφαρμοστούν στην κύρια φωτοβολταϊκά γεννήτρια.

$$k_3 = \frac{V_{MPP}}{V_{OC, \text{ cell test}}} \cong \text{Const} < 1$$

Το πλεονέκτημα της μεθόδου είναι ότι είναι απλό και οικονομικό, χρησιμοποιεί μόνο ένα βρόγχο ανάδρασης για έλεγχο. Επιπλέον αποφεύγονται τα προβλήματα που προκαλούνται από τη διακοπτική λειτουργία όπως ορίστηκε στην προηγούμενη μέθοδο. 8ο μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι το ότι έχουμε υπόθεση ότι το κύτταρο δοκιμής έχει ιδιότητες πανομοιότυπες με αυτές της κυρίως γεννήτριας. Έτσι η τάση V_{oc} του κυττάρου δοκιμής θεωρείται ανάλογη της τάσης V_{oc} της φωτοβολταϊκής γεννήτριας που χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό του MPP. Αν αυτή η υπόθεση είναι λανθασμένη, δεν θα εξάγουμε την μέγιστη ισχύ. Τέλος, μπορεί να αποτελέσει ακατάλληλη μέθοδο για εφαρμογές με περιορισμούς επιφάνειας (π.χ. ηλιακά οχήματα).

4.14 Η Μέθοδος Βελτιστοποίησης Σμηνών Σωματιδίων (Particle Swarm Optimization –PSO).

Η Μέθοδος Βελτιστοποίησης Σμηνών Σωματιδίων (Particle Swarm Optimization –PSO) είναι μια απλή και αποτελεσματική μέθοδος που μπορεί

να εφαρμοστεί σε μια συνάρτηση με πολλές παραμέτρους και πολλά τοπικά μέγιστα για την βελτιστοποίηση της [22]. Για την υλοποίηση της , χρησιμοποιούνται διαφορετικοί συνεργαζόμενοι πράκτορες , οι οποίοι μοιράζονται και ανταλλάσσουν πληροφορίες που αποκτούν κατά την προσωπική εξέλιξη της έρευνά του. Κάθε πράκτορας κινείται με βηματισμό $v(i)$, όπου I είναι ο αριθμός επανάληψης της εκτέλεσης του αλγορίθμου, στο διάστημα τιμών και η κίνηση του εξαρτάται από δυο παράγοντες : 1) την καλύτερη θέση του και 2) την καλύτερη θέση που έχει ανακαλυφθεί γενικά από όλους τους πράκτορες. Οι νέες θέσεις στις οποίες καταφθάνουν οι πράκτορες , ελέγχονται κάθε φορά για την απόδοσή τους σε σύγκριση με τις προηγούμενες. Κάθε πράκτορας διατηρεί την θέση από την οποία είχε διέλθει και ήταν αποδοτικότερη. Ταυτόχρονα συνεχώς αποθηκεύεται και η καλύτερη θέση μεταξύ των καλύτερων θέσεων των πρακτόρων

Ο αλγόριθμος της «Μέθοδος Βελτιστοποίησης Σμηνών Σωματιδίων (Particle Swarm Optimization –PSO)» μπορεί να εφαρμοστεί για την εύρεση του σημείου παραγωγής της μέγιστης ισχύος μιας φωτοβολταϊκής συστοιχίας χρησιμοποιώντας ως διάστημα τιμών την τάση εξόδου της συστοιχίας ή την σχετική διάρκεια αγωγής του σήματος PWM που ελέγχει τον διακόπτη ενός μετατροπέα DC/DC, ώστε να βελτιστοποιήσει την συνάρτηση της ισχύος εξόδου της συστοιχίας. Η παραπάνω μέθοδος μπορεί να επιτύχει σύγκλιση του συστήματος στο ολικό μέγιστο της χαρακτηριστικής ισχύος-τάσης της εξόδου της συστοιχίας όταν εκείνη λειτουργεί σε συνθήκες μερικής σκίασης.

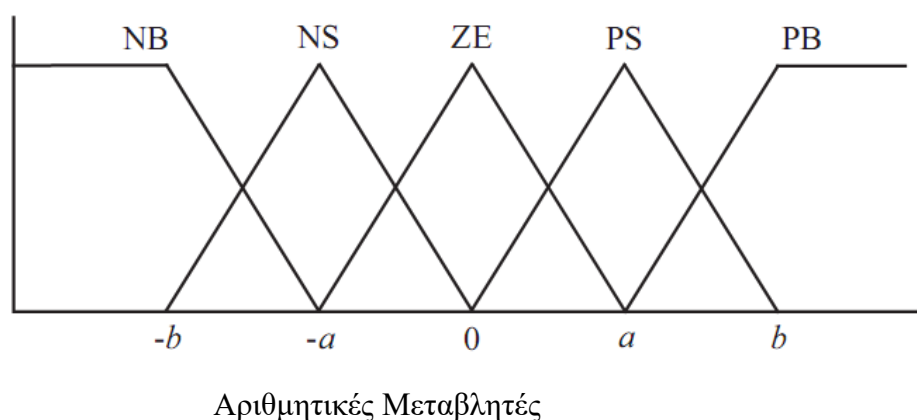
4.15 Η Μέθοδος Ελέγχου Ασαφούς Λογικής (Fuzzy Logic Control)

Την τελευταία δεκαετία έχουν κατασκευαστεί ελεγκτές χρησιμοποιώντας έλεγχο ασαφούς λογικής (Fuzzy Logic Control). Αυτοί οι ελεγκτές [4]έχουν ως πλεονέκτημα ότι λειτουργούν με ανακριβείς εισόδους, δηλαδή δεν χρειάζονται ένα ακριβές μαθηματικό μοντέλο και επίσης διαχειρίζονται αποδοτικότερα την μη γραμμικότητα του συστήματος.

Ο έλεγχος ασαφής λογικής (Fuzzy Logic Control), γενικά αποτελείται από τρία στάδια[1]:

1. Ασαφοποίηση(fuzzification)
2. Συμβούλευση πίνακα κανόνων (rule base table lookup)
3. Αποασαφοποίηση (defuzzification)

Κατά την διάρκεια της ασαφοποίησης, οι αριθμητικές μεταβλητές της εισόδου μετατρέπονται σε γλωσσικές μεταβλητές στηριζόμενες σε μια συνάρτηση ιδιότητας μέλους παρόμοια με εκείνη που φαίνεται στο σχήμα 4.12



Σχήμα 4.12 Συνάρτηση ιδιότητας μέλους για εισόδους και εξόδους ενός ελεγκτή ασαφούς λογικής .

Σε αυτή την περίπτωση χρησιμοποιούνται πέντε επίπεδα ασαφοποίησης (fuzzy levels):

- NB – αρνητικό μεγάλο (Negative Big)
- NS – αρνητικό μικρό (Negative Small)
- ZE – μηδέν (Zero)
- PS – θετικό μικρό (Positive Small)
- PB – θετικό μεγάλο (Positive Big)

Στο σχήμα 4.12 οι μεταβλητές a και b καθορίζονται από το εύρος των τιμών που λαμβάνει η αριθμητική μεταβλητή.

Οι είσοδοι του μικροελεγκτή ασαφούς λογικής για την εύρεση του MPPT είναι συνήθως ένα σφάλμα E και μια μεταβολή του σφάλματος ΔE . Επειδή ο λόγος DP/DV εξαφανίζεται στο MPP χρησιμοποιείται η προσέγγιση :

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

και

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

Όταν τα E και ΔE έχουν υπολογιστεί και μετατραπεί στις γλωσσικές μεταβλητές (linguistic variables) , η έξοδος του μικροελεγκτή ασαφούς λογικής, η οποία είναι στην ουσία μια αλλαγή στο ρυθμό μετάβασης (duty cycle) του PWM σήματος που στέλνεται στον μετατροπέα DC/DC, ορίζεται μέσα από ένα πίνακα κανόνων όπως στο σχήμα 4.13

$E \backslash \Delta E$	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

Σχήμα 4.13 Πίνακας κανόνων ασαφούς λογικής

Οι γλωσσικές μεταβλητές που καθορίζουν την σχετική διάρκεια αγωγής για τους διαφορετικούς συνδυασμούς του E και του ΔE εξαρτώνται από τον μετατροπέα DC/DC που χρησιμοποιείται, καθώς και από τη γνώμη του σχεδιαστή του συστήματος. Οι κανόνες που εφαρμόζονται στο σχήμα 4.13 στηρίζονται σε ένα μετατροπέα DC/DC ανύψωσης τάσης (DC/DC Boost Converter). Αν για παράδειγμα το τρέχον σημείο λειτουργίας είναι μακριά προς τα αριστερά από το MPP , σημαίνει ότι το E ισούται με PB, και το ΔE με ZE. Αν ζητούμενο είναι η αύξηση της σχετικής διάρκειας αγωγής, τότε η σχετική διάρκεια αγωγής πρέπει να γίνει PB για να επιτευχθεί η λειτουργία στο σημείο μέγιστης ισχύος MPP.

Τέλος στο στάδιο της αποασαφοποίησης (defuzzification), η έξοδος του μικροελεγκτή ασαφούς λογικής μετατρέπεται από μια γλωσσική μεταβλητή σε μια αριθμητική μεταβλητή χρησιμοποιώντας μια συνάρτηση σαν αυτή του παρακάτω σχήματος

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

Αυτή η διαδικασία παρέχει ένα αναλογικό σήμα που θα ελέγξει την λειτουργία του διακόπτη του μετατροπέα DC/DC.

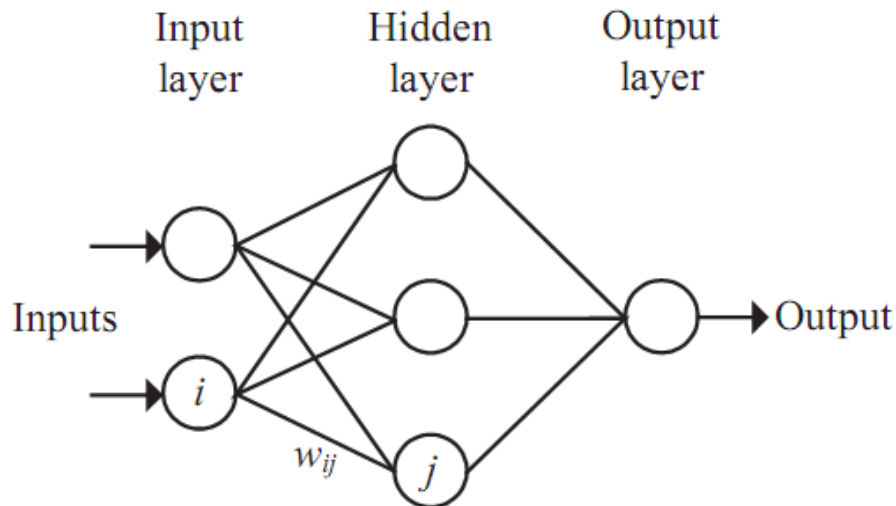
Οι μικροελεγκτές «ασαφούς Λογικής» λειτουργούν αρκετά καλά υπό εναλλασσόμενες ατμοσφαιρικές συνθήκες . Ωστόσο η αποτελεσματικότητα τους εξαρτάται πολύ από την γνώση του σχεδιαστή του συστήματος στην επιλογή της παραμέτρου εισόδου E (σφάλμα – error) του συστήματος και στην δημιουργία κανόνων ασαφούς λογικής.

4.16 Η Μέθοδος Νευρωνικού Δικτύου (Neural Network)

Παράλληλα με τους μικροελεγκτές ασαφούς λογικής, δημιουργήθηκε και μια άλλη μέθοδος για εύρεση του σημείου λειτουργίας φωτοβολταϊκής συστοιχίας για μέγιστη ενεργειακή απόδοση, αυτή της μεθόδου του «νευρωνικού δικτύου».

Τα νευρωτικά δίκτυα συνήθως έχουν τρία επίπεδα : είσοδο ,κρυφό και έξοδο όπως φαίνονται στο σχήμα 4.14 . Ο αριθμός των κόμβων σε κάθε επίπεδο διαφέρει και εξαρτάται από τον σχεδιαστή του συστήματος. Οι είσοδοι μπορούν να είναι ηλεκτρικοί παράμετροι της συστοιχίας των φωτοβολταϊκών όπως η V_{oc} και το I_{sc} ή και ατμοσφαιρικά δεδομένα όπως η ακτινοβολία και η θερμοκρασία. Η έξοδος είναι συνήθως ένα ή περισσότερα σήματα όπως η σχετική διάρκεια αγωγής (duty cycle) του PWM σήματος που ελέγχει τον μετατροπέα DC/DC.

Το πόσο καλή σύγκλιση επιτυγχάνει η μέθοδος στο MPP εξαρτάται από τον αλγόριθμο που χρησιμοποιείται, από το κρυφό επίπεδο και από το πόσος πειραματισμός και δοκιμές έχουν γίνει στο νευρωτικό δίκτυο. Για να αναγνωρισθεί με ακρίβεια το MPP πρέπει τα βάρη w_{ij} να καθοριστούν προσεκτικά μέσα από μια διαδικασία εκπαίδευσης.

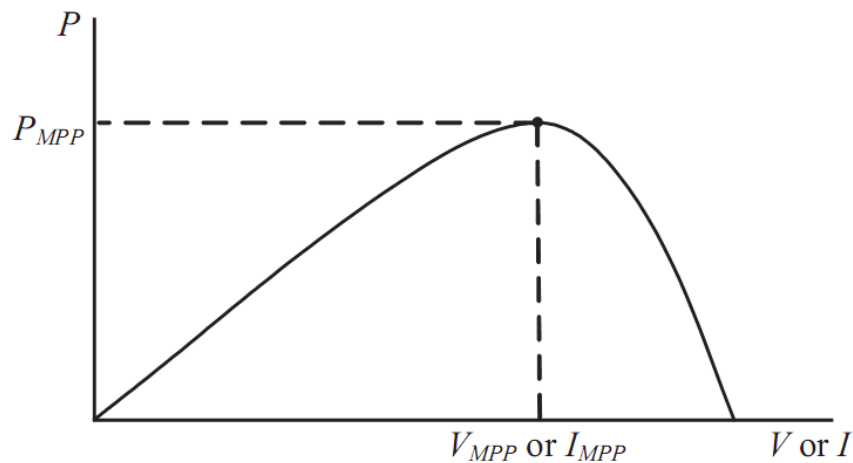


Σχήμα 4.14 Παράδειγμα ενός νευρωνικού δικτύου.

4.17 Η Μέθοδος Ελέγχου Συσχετισμού Κυμάτωσης (Ripple Correlation Control)

Όταν μια συστοιχία φωτοβολταϊκών είναι συνδεδεμένη [1] σε ένα μετατροπέα DC/DC, η λειτουργία του διακόπτη του μετατροπέα έχει σαν αποτέλεσμα να εμφανίζεται κυμάτωση στην τάση και στο ρεύμα της συστοιχίας. Σαν επακόλουθο, η παραγόμενη ισχύς παρουσιάζει επίσης κυμάτωση. Η μέθοδος «Ελέγχου Συσχετισμού Κυμάτωσης (Ripple Correlation Control)» χρησιμοποιεί αυτή την κυμάτωση για να οδηγηθεί και να συγκλίνει στο MPP. Συσχετίζει την παράγωγο ως προς τον χρόνο της ισχύος εξόδου της φωτοβολταϊκής συστοιχίας P , με την παράγωγο ως προς τον χρόνο του ρεύματος I ή της τάσης V της συστοιχίας των φωτοβολταϊκών στοιχείων, για να οδηγήσει την κλίση της ισχύος στο μηδέν. Έτσι επιτυγχάνεται η σύγκλιση στο MPP.

Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.15, αν η τάση V ή το ρεύμα αυξάνεται ($dV/dt > 0$ ή $dI/dt > 0$) και αυξάνεται και η ισχύς ($dP/dt > 0$), τότε το τρέχον σημείο λειτουργίας βρίσκεται κάτω από το MPP ($V < V_{MPP}$ ή $I < I_{MPP}$). Συνδυάζοντας τα παραπάνω, παρατηρείτε ότι οι dP/dt , dV/dt ή $dP/dt, dI/dt$ είναι θετικές στα αριστερά του MPP, αρνητικές στα δεξιά του MPP και μηδέν στο MPP.



Σχήμα 4.15 Χαρακτηριστική τάσης-ρεύματος της συστοιχίας των φωτοβολταϊκών

Όταν ο μετατροπέας DC/DC που χρησιμοποιείται στο σύστημα είναι μετατροπέας ανύψωσης τάσης, αυξάνοντας τη σχετική διάρκεια αγωγής (duty cycle) αυξάνεται το ρεύμα του πηνίου, το οποίο είναι το ίδιο με εκείνο της συστοιχίας των φωτοβολταϊκών στοιχείων. Ταυτόχρονα όμως μειώνεται η τάση της συστοιχίας των φωτοβολταϊκών. Επομένως η είσοδος του ελέγχου της σχετικής διάρκειας αγωγής δίνεται από την σχέση :

$$d(t) = -k_3 \int \frac{dP}{dt} \cdot \frac{dV}{dt} dt \quad (1)$$

ή

$$d(t) = -k_3 \int \frac{dP}{dt} \cdot \frac{dI}{dt} dt \quad (2)$$

όπου το k_3 είναι μια θετική σταθερά. Ελέγχοντας τη σχετική διάρκεια αγωγής με αυτόν τον τρόπο εξασφαλίζεται ότι θα υπάρχει μόνιμη σύγκλιση της μεθόδου στο MPP.

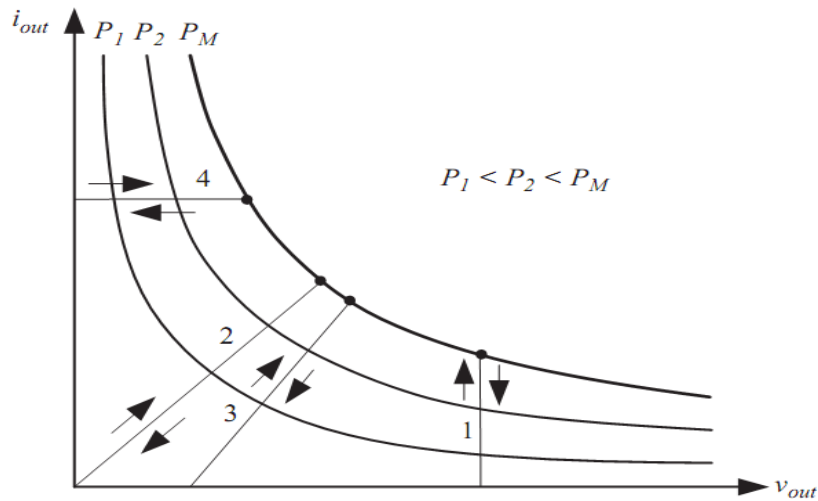
Ένας τρόπος εκτίμησης των παραγώγων των σχέσεων (1) και (2) είναι η χρήση υψιπερατών φίλτρων με συχνότητα αποκοπής μεγαλύτερη από την συχνότητα κυματισμού. Ένας άλλος εύκολος τρόπος για να υπολογιστεί η

παράγωγος του ρεύματος ως προς τον χρόνο στην εξίσωση (2) είναι να μετράται με ένα αισθητήρα η τάση του πηνίου του μετατροπέα DC/DC που είναι ανάλογη της παραγωγού του ρεύματος. Πειράματα έχουν δείξει ότι η μέθοδος «Ελέγχου Συσχετισμού Κυμάτων (Ripple Correlation Control)» συγκλίνει αρκετά γρήγορα και με μεγάλη ακρίβεια στο MPP κάτω από μεταβαλλόμενες ατμοσφαιρικές συνθήκες (ακτινοβολία ,θερμοκρασία). Επιπλέον είναι αρκετά απλή στην υλοποίηση της καθώς και οικονομική. Ίσως όμως το σπουδαιότερο χαρακτηριστικό της είναι ότι δεν χρειάζεται πληροφορίες για τα χαρακτηριστικά της συγκεκριμένης συστοιχίας που θα εφαρμοστεί. Αυτό την καθιστά ικανή να τοποθετηθεί σε οποιοδήποτε σύστημα φωτοβολταϊκών στοιχείων. Τέλος η μέθοδος «Ελέγχου Συσχετισμού Κυμάτων (Ripple Correlation Control)» δεν έχει ικανότητα εύρεσης του ολικού μεγίστου της χαρακτηριστικής ισχύος-τάσης της φωτοβολταϊκής συστοιχίας, όταν εκείνη λειτουργεί σε συνθήκες μερικής σκίασης.

4.18 Η Μέθοδος της Μεγιστοποίησης της Τάσης ή του Ρεύματος του Φορτίου (Load Current or Load Voltage Maximization)

Σε ένα σύστημα όπου η συστοιχία των φωτοβολταϊκών είναι συνδεδεμένη με ένα μετατροπέα DC/DC, αν μεγιστοποιηθεί η ισχύς που παράγεται από την συστοιχία, μεγιστοποιείται και η ισχύς στην έξοδο του μετατροπέα και στην είσοδο του φορτίου. Συνεπώς σε ένα μετατροπέα χωρίς απώλειες ενέργειας, μεγιστοποιώντας την ισχύ εξόδου του, μεγιστοποιείται και η ισχύς εισόδου του[1].

Το φορτίο που χρησιμοποιείται σε συστήματα φωτοβολταϊκών στοιχείων μπορεί να είναι τύπου πηγής-τάσης, πηγής-ρεύματος, ωμικά φορτία ή ένας συνδυασμός των προηγούμενων όπως φαίνεται στο σχήμα 4.16. Από αυτό το σχήμα παρατηρούμε ότι αν το φορτίο είναι τύπου πηγής-τάσης (voltage-source), το ρεύμα του φορτίου, I_{out} πρέπει να μεγιστοποιηθεί για να επιτευχθεί η μέγιστη ισχύς εξόδου της φωτοβολταϊκής συστοιχίας, P_M . Για φορτίο τύπου πηγής ρεύματος (current-source), αντίστοιχα, θα πρέπει να μεγιστοποιηθεί είτε η τάση V_{out} είτε το ρεύμα I_{out} . Συνεπώς, εφόσον αρκεί η μεγιστοποίηση μιας παραμέτρου για κάθε τύπο φορτίου, είναι αρκετός ένας αισθητήρας για την μέγιστη μέτρηση της τιμής της παραμέτρου αυτής.



Σχήμα 4.16 Διάφοροι τύποι Φορτίων : 1-πηγής-τάσης,2-ωμικό,3-ωμικό και πηγής-τάσης,4-πηγής-ρεύματος.

Στην πλειοψηφία των φωτοβολταϊκών συστημάτων, χρησιμοποιείται μια μπαταρία_[2-5] ως κύριο φορτίο ή σαν εφεδρικό. Η μπαταρία μπορεί να θεωρηθεί ως φορτίο πηγής-τάσης και συνεπώς μπορεί να χρησιμοποιηθεί το ρεύμα του φορτίου –τάσης ως παράμετρος ελέγχου του συστήματος. Η τιμή της μέτρησης του ρεύματος του φορτίου χρησιμοποιείται σαν παράμετρος από το σύστημα και η παραγόμενη ισχύς της φωτοβολταϊκής συστοιχίας μεγιστοποιείται όταν μεγιστοποιηθεί το ρεύμα του φορτίου. Η λειτουργία όμως στο πραγματικό MPP δεν επιτυγχάνεται σχεδόν ποτέ στην πράξη επειδή αυτή η μέθοδος στηρίζεται στην υπόθεση ότι δεν υπάρχουν απώλειες στον μετατροπέα DC/DC.

Κεφάλαιο 5 – Τεχνολογία Συσσωρευτών

5.1 Ιστορική Αναδρομή

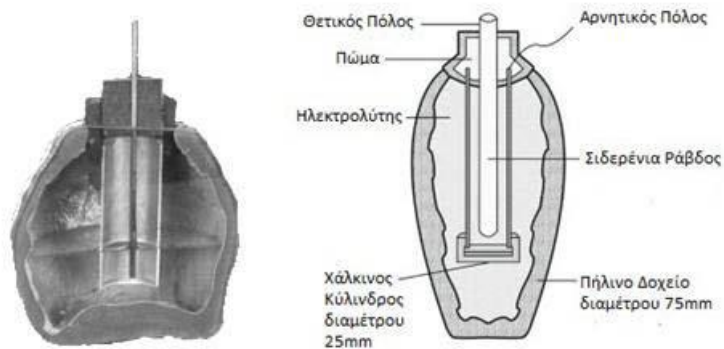
5.1.1 Εισαγωγή

Μία από τις πιο σημαντικές και καινοτόμες ανακαλύψεις, τουλάχιστον των τελευταίων 400 χρόνων, είναι αναμφισβήτητη η ανακάλυψη του ηλεκτρισμού, η οποία άλλαξε ολοκληρωτικά το ρου της ιστορίας της ανθρωπότητας. Ωστόσο, η πρώτη σημαντική χρήση της ηλεκτρικής ενέργειας, ήρθε πολύ αργότερα και σε περιορισμένη αρχικά έκταση, με την εφεύρεση της μπαταρίας στα μέσα με τέλη του 1800. Αρκετά πριν εφευρεθούν οι ηλεκτρικές γεννήτριες και αναπτυχθούν τα ηλεκτρικά δίκτυα, την κύρια πηγή ηλεκτρικής ενέργειας αποτελούσαν οι ηλεκτρικοί συσσωρευτές ή απλά μπαταρίες. Οι διαδοχικές βελτιώσεις της τεχνολογίας των συσσωρευτών οδήγησαν στην άνθηση πολλών σημαντικών ηλεκτρικών ανακαλύψεων, ξεκινώντας από τις πρώιμες επιστημονικές μελέτες, φθάνοντας στις απλές τεχνολογικές εφευρέσεις όπως αυτή του τηλεφώνου και του τηλεγράφου και καταλήγοντας σε φορητούς υπολογιστές, κινητά τηλέφωνα και ηλεκτρικά οχήματα.

5.1.2 Η μπαταρία της Βαγδάτης ή μπαταρία της Παρθίας (Η πρώτη μορφή συσσωρευτών ενέργειας).

Το 1936 κατά την κατασκευή ενός σιδηροδρόμου κοντά στη Βαγδάτη, εργάτες ανακάλυψαν μια «*προϊστορική μπαταρία*», γνωστή ως μπαταρία της Βαγδάτης ή μπαταρία της Παρθίας. Το εύρημα χρονολογείται από την Παρθία περίοδο και πιστεύεται ότι είναι 2000 ετών. Η αυτοκρατορία των Πάρθων, θεωρείται από τους μεγαλύτερους πολιτισμούς στην περιοχή της Μεσοποταμίας και από τους πιο ενδιαφέροντες αρχαιολογικά.[1]

Η μπαταρία της Βαγδάτης αποτελείται από ένα πήλινο δοχείο μέσα στο οποίο υπήρχε ένας χάλκινος κύλινδρος με μία σιδερένια ράβδο στο εσωτερικό του. Όταν το δοχείο αυτό γέμιζε με διάλυμα ξυδιού ή κάποιο άλλο ηλεκτρολύτη όπως χυμό λεμονιού ή κρασί, παρήγαγε 1 με 2 Volt τάση. Σύμφωνα με τον Γερμανό αρχαιολόγο Wilhelm König που ασχολήθηκε με το εύρημα, το πήλινο αυτό δοχείο είχε τα χαρακτηριστικά ενός γαλβανικού στοιχείου. Ωστόσο, η χρήση του συγκεκριμένου δοχείου ως πηγή ηλεκτρισμού δεν έχει γίνει δεκτή από όλους τους επιστήμονες, καθώς σύμφωνα με άλλες εκδοχές, το εύρημα είναι πιθανό να χρησιμοποιούταν στην επιμετάλλωση.[2]



Σχήμα 5.1 Η μπαταρία της Βαγδάτης ή μπαταρία της Παρθίας

5.1.3 Αρχές 1800: Η Επινόηση και η εξέλιξη της μπαταρίας



Το 1771 ένας Ιταλός ανατόμος, ο Λουίτζι Γκαλβάνι (Luigi Galvani), παρατήρησε τα εξής: Εκτελώντας ένα πείραμα με νεκρούς βατράχους, είδε ότι αν έφερνε σε επαφή τα νεύρα των μηρών με δύο διαφορετικά μέταλλα (π.χ. σίδηρο και χαλκό) ο μυς έκανε μία σύσπαση. Αυτή όμως είναι μία ιδιότητα μόνο των ζωντανών μυών. Ο Γκαλβάνι απέδωσε το φαινόμενο σε κάποιο είδος ηλεκτρισμού στο μυϊκό σύστημα, τον οποίο ονόμασε "ζωικό ηλεκτρισμό". Μάλιστα δεν ήταν λίγοι αυτοί που πίστεψαν πως είχε βρεθεί η λύση στο μεγάλο αίνιγμα της ζωής. Πολλοί επιστήμονες προσπαθούσαν να επαναφέρουν νεκρούς οργανισμούς στη ζωή, διοχετεύοντας τους ηλεκτρισμό. Από εδώ εμπνευσμένη, η συγγραφέας Μαίρη Σέλεϋ έγραψε το βιβλίο της "Φρανκενστάιν".

Ο **Αλεσάντρο Βόλτα** ήταν φυσικός ο οποίος έγινε κυρίως γνωστός για την

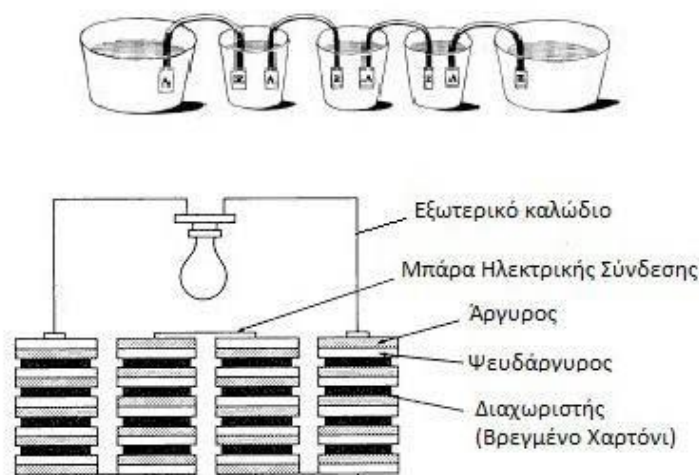
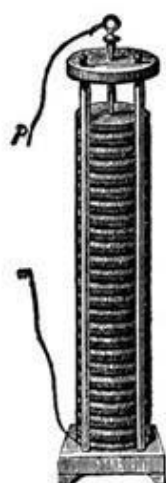


ανακάλυψη της ηλεκτρικής μπαταρίας το 1800. Γεννήθηκε και σπούδασε στο Κόμο της Ιταλίας. Δε μίλησε μέχρι την ηλικία των τεσσάρων ετών. Από την ηλικία των επτά ετών όμως, ήταν στο επίπεδο των άλλων παιδιών και άρχισε σύντομα να τα προσπερνά. Οι γονείς του, ο Φίλιππο Βόλτα (*Filippo Volta*) και η *Maria Maddalena Inzaghi*, τον έστειλαν σε χριστιανικό σχολείο με σκοπό να γίνει δικηγόρος. Το 1774, έγινε καθηγητής της φυσικής στο γυμνάσιο του

Κόμο. Ο Βόλτα με αφορμή τα πειράματα του Γκαλβάνι, πραγματοποίησε μια σειρά πειραμάτων, χρησιμοποιώντας ψευδάργυρο, μόλυβδο, κασσίτερο και σίδηρο για τη θετική πλάκα, και χαλκό, άργυρο, χρυσό ή γραφίτη για την αρνητική. Το 1800, ανακάλυψε ότι χρησιμοποιώντας συγκεκριμένα υγρά ως αγωγούς για την πρόκληση χημικής αντίδρασης μεταξύ των πλακών -ηλεκτροδίων, παραγόταν μία συνεχής ροή ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτό οδήγησε στην εφεύρεση της πρώτης μπαταρίας: τη «βολταϊκή στήλη»(Η μπαταρία αυτή φαίνεται στην διπλανή εικόνα 1798). Ο Volta συναρμολόγησε μια σειρά από δίσκους αργύρου και ψευδαργύρου εναλλάξ, μονώνοντας τα ζεύγη μεταξύ τους με φύλλο από χαρτόνι, βρεγμένο σε αγώγιμο υγρό (αλατόνερο). Όταν ο ακραίος δίσκος αργύρου συνδεόταν μέσω εξωτερικού καλωδίου με τον ακραίο δίσκο ψευδαργύρου, παραγόταν ρεύμα.



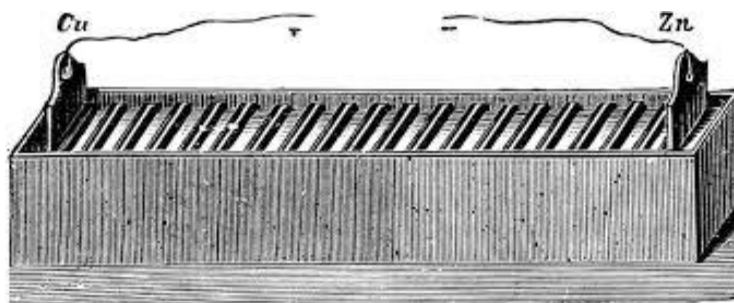
Ο Volta πίστευε ότι το ρεύμα προερχόταν από την επαφή των δύο μετάλλων, ενώ στην πραγματικότητα αναπτυσσόταν διαμέσου του βρεγμένου χαρτονιού, που ήταν ένας ηλεκτρολύτης. Κατασκεύασε στήλες με μέχρι 60 ζεύγη δίσκων, αλλά με τη χρήση, η στήλη στέγνωνε και ετίθετο έτσι εκτός λειτουργίας. Αυτό οδήγησε τον Volta στην επινόηση μιας τροποποίησης, την οποία ονόμασε «στέμμα κυπέλλων». Κάθε κύπελλο περιείχε ένα κομμάτι από άργυρο και ψευδάργυρο και ένα διάλυμα άλατος. Ο ψευδάργυρος κάθε κυπέλλου συνδεόταν ηλεκτρικώς με τον άργυρο του γειτονικού κυπέλλου, τα οποία ήταν διατεταγμένα κυκλικά. Ο Volta μετρούσε την ισχύ της μπαταρίας τοποθετώντας απλώς τα δάκτυλά του στα δύο άκρα.



. Σχήμα 5.2 Η βολταϊκή στήλη και η τροποποίησή της, το «στέμμα κυπέλλων»

Η Γαλλία ήταν μία από τις πρώτες χώρες που αναγνώρισε επίσημα τις ανακαλύψεις του Volta. Μετά από πρόσκληση του Ινστιτούτου της Γαλλίας, ο Volta πραγματοποίησε εκεί μια σειρά διαλέξεων τις οποίες παρακολούθησε και ο Ναπολέων Βοναπάρτης ως μέλος του Ινστιτούτου.

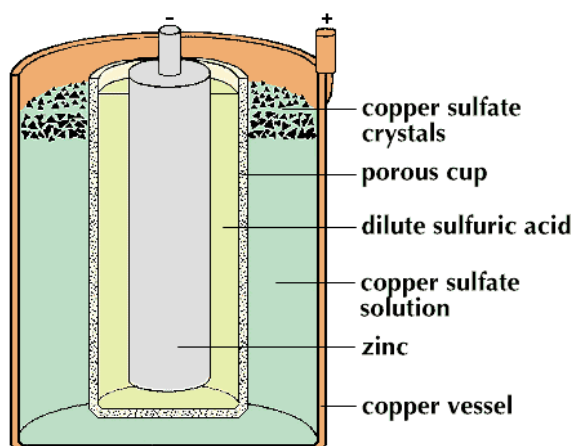
Το 1802, ο χημικός William Cruickshank σχεδίασε την πρώτη ηλεκτρική μπαταρία για μαζική παραγωγή. Τοποθέτησε τετράγωνα φύλλα χαλκού, τα οποία συγκόλλησε στα άκρα μεταξύ τους με φύλλα ψευδαργύρου ίσου μεγέθους. Αυτά τα φύλλα τοποθετήθηκαν μέσα σε ένα μακρύ ορθογώνιο ξύλινο κουτί το οποίο ήταν σφραγισμένο με τσιμέντο. Εσοχές μέσα στο κουτί κρατούσαν τις πλάκες χαλκού στη θέση τους. Το κουτί στη συνέχεια γέμιζε με έναν ηλεκτρολύτη άλμης ή με αραιωμένο οξύ. Ο συγκεκριμένος συσσωρευτής έλυne το πρόβλημα της στήλης του Volta, στην οποία λόγω του βάρους των πλακών παρατηρούταν διαρροή ηλεκτρολύτη. Όσο το ξύλινο κουτί παρέμενε ανέπαφο, δεν υπήρχε κίνδυνος διαρροής. Επίσης, η μπαταρία του Cruickshank (trough battery) παρήγαγε περισσότερη ηλεκτρική ενέργεια.[1Link].



Σχήμα 5.3 Η μπαταρία του Cruickshank(trough battery)

Το 1836, ένας άλλος χημικός, ο John F. Daniell, καθηγητής στο Βασιλικό Κολλέγιο του Λονδίνου, ανέπτυξε την κλασική μορφή του απλού, μη επαναφορτιζόμενου στοιχείου, δηλαδή ενός συσσωρευτή που δεν ήταν δυνατό να επαναφορτιστεί μετά την πρώτη της αποφόρτιση. Στο στοιχείο αυτό, γνωστό και ως στοιχείο Daniell, το αρνητικό ηλεκτρόδιο ή άνοδος, ήταν μια ράβδος από καθαρό ψευδάργυρο τοποθετημένη μέσα σε θειικό οξύ (ηλεκτρολύτης). Για προστασία του από προσβολή του οξέως, ο ψευδάργυρος καλυπτόταν με στρώμα υδραργύρου. Το θετικό ηλεκτρόδιο ή κάθοδος συνίστατο από ένα χάλκινο κάνιστρο (δοχείο) που περιείχε θειικό οξύ κορεσμένο με θειούχο χαλκό. Το στοιχείο Daniell παρήγαγε πιο σταθερό ρεύμα από τις προηγούμενες μπαταρίες που είχαν κατασκευασθεί.[4]

DANIELL CELL



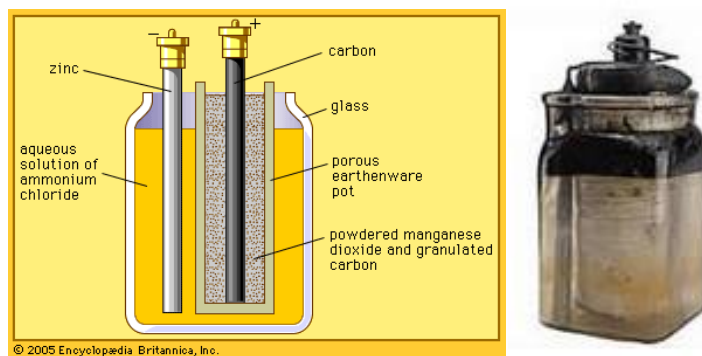
Σχήμα 5.4 Το στοιχείο του Daniell

Τρία χρόνια αργότερα, το 1839, ο Sir William Grove, Βρετανός δικαστής με σημαντική συνεισφορά στην επιστήμη, δημοσίευσε την περιγραφή μιας συστοιχίας με χρήση ηλεκτροδίων από λευκόχρυσο, τοποθετημένων σε σωλήνες ανεστραμμένους μέσα σε διάλυμα θειικού οξέος και ύδατος. Όταν ηλεκτρικό ρεύμα περνούσε μέσα από τη συσκευή, το νερό διασπώντα στα συστατικά του (υδρογόνο και οξυγόνο), τα οποία και συγκεντρώνονταν χωριστά στους δύο σωλήνες. Από αυτή τη «φορτισμένη» μπαταρία μπορούσε να παραληφθεί υπολογίσιμο ρεύμα και σχεδόν διπλάσια τάση από αυτή που παρήγαγε το στοιχείο Daniell. Επίσης, ήταν το πρώτο στοιχείο καυσίμου στο οποίο τα αντιδρώντα συστατικά, υδρογόνο και οξυγόνο, δεν περικλείονταν στα ηλεκτρόδια. Χάρη στα παραπάνω χαρακτηριστικά, το στοιχείο Grove έγινε για αρκετό καιρό ο «αγαπημένος» συσσωρευτής του αμερικανικού τηλεγραφικού δικτύου. Ωστόσο, όταν λειτουργούσε, εξέπεμπε δηλητηριώδεις αναθυμιάσεις μονοξειδίου του αζώτου, η τάση έπεφτε δραστικά με τη μείωση της φόρτισης του συσσωρευτή, ενώ είχε και υψηλό κόστος κατασκευής, λόγω του λευκόχρυσου. Έτσι, με την αύξηση της πολυπλοκότητας του τηλεγραφικού δικτύου, το στοιχείο Grove αντικαταστάθηκε.

Κατά τα τέλη του 19^{ου} αιώνα, επινοήθηκε από τον Gaston Planté, Γάλλο φυσικό (1859), το στοιχείο μολύβδου-οξέος, που είναι και η πρώτη πρακτικώς φορτισμένη και πιθανώς ευρύτατα χρησιμοποιούμενη μπαταρία σήμερα. Το στοιχείο του Planté αποτελούνταν από δύο φύλλα μολύβδου χωριζόμενα με λωρίδες από ελαστικό και τυλιγμένα σε σπείρα. Το στοιχείο όταν βυθιζόταν σε υδαρές διάλυμα 10% θειικού οξέος και φορτιζόταν, μπορούσε να αποθηκεύσει ηλεκτρική ενέργεια. Μολονότι το στοιχείο του Planté μπορούσε να αποδώσει την αποθηκευμένη ενέργεια πολύ γρήγορα, δηλαδή μπορούσε να παραγάγει

ισχυρό ρεύμα, παρέμεινε για είκοσι περίπου χρόνια απλώς μια εργαστηριακή επιινόηση.[5]

Το πρώτο «ξηρό» στοιχείο επινοήθηκε περί το 1865 από τον Γάλλο χημικό Georges Leclanché και παραμένει ένα από τα πλέον χρησιμοποιούμενα μη επαναφορτιζόμενα στοιχεία. Στην αρχική του μορφή αποτελούνταν από μια γυάλινη λάγνη (στάμνα) που περιείχε ως ηλεκτρολύτη διάλυμα χλωριούχο αμμωνίου. Η άνοδος ήταν ράβδος ψευδαργύρου προστατευόμενη από τη διάβρωση με στρώμα υδραργύρου. Με την πρόσδοση ηλεκτρικού ρεύματος παράγονταν ιόντα υδραργύρου, που κινούνταν προς το διάλυμα. Στο κέντρο της λάγνης ήταν τοποθετημένο ένα πορώδες πήλινο δοχείο, που περιείχε μίγμα κονιοποιημένου διοξειδίου του μαγγανίου και άνθρακα, και το οποίο λειτουργούσε ως αγωγίμο υλικό για να συνδέει τη σκόνη του διοξειδίου του μαγγανίου με την κάθοδο. Η κάθοδος ήταν ράβδος από άνθρακα και ήταν τοποθετημένη στο κέντρο του πήλινου δοχείου. Με τη ροή του ρεύματος, το διοξείδιο του μαγγανίου μετατρέπεται σε οξείδιο.[6].

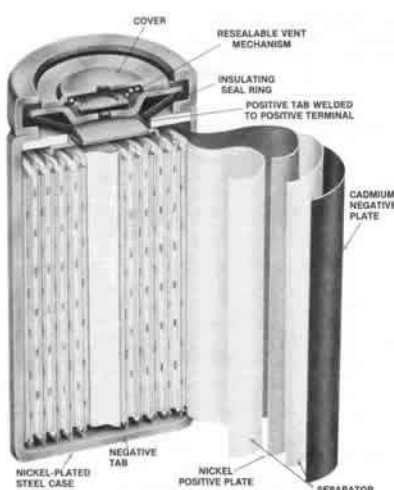


Σχήμα 5.5 Το στοιχείο του Leclanché

Το 1886, ο Carl Gassner έλαβε ένα γερμανικό δίπλωμα ευρεσιτεχνίας για μία παραλλαγή του στοιχείου του Leclanché, που έγινε γνωστή ως το ξηρό στοιχείο καθώς δεν περιείχε κάποιο ελεύθερο υγρό ηλεκτρολύτη. Αντίθετα, το χλωριούχο αμμώνιο αναμίχθηκε με γύψο δημιουργώντας μια μάζα, στην οποία προσθέτοντας μια μικρή ποσότητα χλωριούχου ψευδαργύρου παρατεινόταν η χρονική διάρκεια αποθήκευσης. Το διοξείδιο του μαγγανίου (κάθοδος) βυθιζόταν σε αυτή τη μάζα, και στη συνέχεια και τα δύο μαζί σφραγίζονταν σε ένα κέλυφος ψευδαργύρου, το οποίο λειτουργούσε ως άνοδος. Σε αντίθεση με τα προηγούμενα υγρά στοιχεία, το στοιχείο του Gassner ήταν περισσότερο ανθεκτικό, δεν απαιτούσε ιδιαίτερη συντήρηση, δεν χυνόταν και μπορούσε να χρησιμοποιηθεί με οποιονδήποτε προσανατολισμό. Παρήγαγε δυναμικό 1.5V. Η πρώτη μαζική παραγωγή του στοιχείου έγινε το 1896 από τη National Carbon Company, η οποία βελτίωσε το στοιχείο του Gassner, αντικαθιστώντας το γύψο με χαρτόνι τυλιγμένο σε σπείρα, μία καινοτομία που άφηνε περισσότερο χώρο για την κάθοδο και διευκόλυνε στην κατασκευή του. Ήταν η πρώτη εύχρηστη μπαταρία για το κοινό και έκανε τις φορητές ηλεκτρονικές συσκευές περισσότερο πρακτικές. Ο

συσσωρευτής ψευδαργύρου - άνθρακα, όπως ονομάζεται σήμερα, συνεχίζει να κατασκευάζεται.[7]

Το 1899, ο Σουηδός Waldemar Jungner επινόησε την επαναφορτιζόμενη μπαταρία νικελίου- καδμίου (NiCd), η οποία χρησιμοποιούσε ως ηλεκτρόδια νικέλιο για την άνοδο και κάδμιο για την κάθοδο, σε διάλυμα υδροξειδίου του καλίου. Ήταν η πρώτη μπαταρία με αλκαλικό ηλεκτρολύτη. Εμπορευματοποιήθηκε στη Σουηδία το 1910, ενώ στην Αμερική έφτασε πολύ αργότερα, το 1946. Τα πρώτα μοντέλα της μπαταρίας νικελίου-καδμίου ήταν ανθεκτικά και είχαν σημαντικά καλύτερη πυκνότητα ενέργειας από τις προηγούμενες μπαταρίες που είχαν κατασκευασθεί, όμως εξαιτίας του υψηλού κόστους των υλικών συγκριτικά με το ξηρό στοιχείο και το στοιχείο μολύβδου- οξέος περιορίσθηκε η χρήση τους.[8]



Σχήμα 5.6 Η μπαταρία NiCd του Waldemar Jungner

Δύο χρόνια αργότερα, το 1901, ο Edison κατασκεύασε μία διαφορετική εκδοχή της μπαταρίας νικελίου - καδμίου, αντικαθιστώντας το κάδμιο με σίδηρο. Ωστόσο, η χαμηλή ειδική ενέργεια, η μικρή απόδοση σε χαμηλές θερμοκρασίες και η γρήγορη αυτοεκφόρτιση της μπαταρίας, μετρίασαν την επιτυχία της. Νέες βελτιώσεις δεν παρουσιάστηκαν μέχρι το 1932, όταν ο Shlecht και ο Ackermann κατάφεραν να αυξήσουν το ρεύμα φορτίου και τη διάρκεια ζωής των μπαταριών νικελίου - καδμίου, επινοώντας την πορώδη πλάκα του πόλου της μπαταρίας.

Κατά τα μέσα του 20^{ου} αιώνα, και συγκεκριμένα το 1947 εμφανίστηκε η μπαταρία νικελίου - καδμίου όπως την ξέρουμε σήμερα, όταν ο George Neumann κατάφερε το αεροστεγές κλείσιμο του κελιού της μπαταρίας. Για πολλά χρόνια η μπαταρία νικελίου - καδμίου ήταν η μόνη επαναφορτιζόμενη μπαταρία για φορητές εφαρμογές.

Η μπαταρία ψευδαργύρου - άνθρακα συνέχισε μέχρι τα τέλη του 1950 να είναι η κύρια μη επαναφορτιζόμενη μπαταρία που χρησιμοποιούνταν, αν και η σχετικά μικρή διάρκεια ζωής της περιορίζε τις πωλήσεις της. Το 1955 ο μηχανικός Lewis Urry, εργαζόμενος στην Eveready, θυγατρική εταιρεία της National Carbon Company που αργότερα μετονομάστηκε σε Energizer, ασχολήθηκε με την εξεύρεση ενός τρόπου που θα αύξανε τη διάρκεια ζωής των συσσωρευτών ψευδαργύρου- άνθρακα. Αντί αυτού όμως, ο Urry αποφάσισε ότι οι αλκαλικοί συσσωρευτές ήταν πολλά υποσχόμενοι. Μέχρι τότε, οι μεγάλης διάρκειας αλκαλικοί συσσωρευτές ήταν ανυπέρβλητα ακριβοί. Οι μπαταρίες του Urry αποτελούνταν από διοξείδιο του μαγγανίου στην κάθοδο, σκόνη ψευδαργύρου στην άνοδο και αλκαλικό ηλεκτρολύτη. Η σκόνη ψευδαργύρου έδωσε στην κάθοδο μεγαλύτερη έκταση επιφάνειας. Οι συγκεκριμένες μπαταρίες βγήκαν στην αγορά το 1959.[9]

Η μπαταρία νικελίου - υδρογόνου εισήλθε στην αγορά ως ένα υποσύστημα αποθήκευσης ενέργειας για εμπορικούς δορυφόρους επικοινωνίας μέσα στη δεκαετία του 1970. Μία παραλλαγή της νικελίου - υδρογόνου, είναι οι μπαταρίες νικελίου -υδριδίου - μετάλλου (Ni-MH) που ήταν διαθέσιμες για χρήση το 1989 για μικρές εφαρμογές. Οι μπαταρίες Ni-MH τείνουν να έχουν μεγαλύτερη διάρκεια ζωής από τις νικελίου - υδρογόνου και η οποία συνεχίζει να αυξάνεται καθώς οι κατασκευαστές δοκιμάζουν νέα κράματα. Επιπλέον, τη δεκαετία του '90, περιβαλλοντολόγοι στην Ευρώπη άρχισαν να εκφράζουν ανησυχίες για τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις κατά την απόρριψη των συσσωρευτών νικελίου- καδμίου, καθώς το κάδμιο είναι τοξικό. Έτσι, ξεκίνησε μια εκστρατεία περιορισμού της χρήσης των συγκεκριμένων μπαταριών, ζητώντας από τους καταναλωτές να προτιμούν τις μπαταρίες Ni-MH ως πιο φιλικές προς το περιβάλλον.[10]

Πολλοί προέβλεπαν ότι οι μπαταρίες Ni - MH θα αποτελούσαν το σκαλοπάτι για τις μεγαλύτερης διάρκειας μπαταρίες λιθίου. Το λίθιο είναι το μέταλλο με τη μικρότερη πυκνότητα και το μεγαλύτερο ηλεκτροχημικό δυναμικό και αναλογία ενέργειας προς βάρος και επομένως θεωρητικά αποτελεί το ιδανικό υλικό για την κατασκευή συσσωρευτών. Τα πειράματα των μπαταριών λιθίου ξεκίνησαν το 1912 από τον G.N.Lewis και τη δεκαετία του '70 πουλήθηκαν οι πρώτες μπαταρίες λιθίου.[2]

Τρεις σημαντικές εξελίξεις σημάδεψαν τη δεκαετία του '80. Το 1980, ο Αμερικανός χημικός John B. Goodenough χρησιμοποίησε το οξειδίο λιθίου-κοβαλτίου για το ηλεκτρόδιο της καθόδου των μπαταριών λιθίου (θετικό άκρο) και ο ερευνητής Rachid Yazami το γραφίτη για την άνοδο (αρνητικό άκρο). Αυτά, οδήγησαν μία ομάδα ερευνητών υπό τον Akira Yoshino να κατασκευάσουν το πρώτο πρότυπο της μπαταρίας ιόντων λιθίου (Li-ion) το 1985, μία επαναφορτιζόμενη και περισσότερο σταθερή εκδοχή της μπαταρίας λιθίου. Η Sony εμπορευματοποίησε την πρώτη μπαταρία ιόντων λιθίου το

1991. Εκτός από την χρήση τους στα κινητά τηλέφωνα, στους φορητούς υπολογιστές, στις ψηφιακές φωτογραφικές μηχανές και σε ιατρικές συσκευές, οι μπαταρίες ιόντων λιθίου χρησιμοποιούνται και στα ηλεκτρικά οχήματα.

Οι περισσότερες ερευνητικές δραστηριότητες σήμερα σχετίζονται με τη βελτίωση των συσσωρευτών λιθίου. Το 1997 κυκλοφόρησαν οι συσσωρευτές ιόντων λιθίου με ηλεκτρολύτες από πολυμερή. Αυτές οι μπαταρίες έχουν τους ηλεκτρολύτες τους σε ένα στερεό σύνθετο πολυμερές αντί σε ένα υγρό διαλύτη και τα ηλεκτρόδια με τους διαχωριστές σε ελάσματα μεταξύ τους. Αυτές οι διαφορές επιτρέπουν τους συσσωρευτές να «εγκλωβίζονται» μέσα σε ένα σταθερό περιτύλιγμα αντί μέσα σε ένα άκαμπτο μεταλλικό περίβλημα, πράγμα που σημαίνει ότι οι εν λόγω συσσωρευτές μπορούν να είναι ειδικά διαμορφωμένοι για να τοποθετηθούν σε μια συγκεκριμένη συσκευή. Επίσης, έχουν υψηλότερη ενεργειακή πυκνότητα συγκριτικά με τις απλές μπαταρίες ιόντων λιθίου. Αυτά τα πλεονεκτήματα, τις καθιστούν τις ιδανικές μπαταρίες για φορητές ηλεκτρονικές συσκευές, καθώς επιτρέπουν μεγαλύτερη ευελιξία και συμπαγή σχεδιασμό.[12]

Από τις πρώτες ημέρες η εξέλιξη της ανθρωπότητας εξαρτάται απόλυτα από τον ηλεκτρισμό, ένα αγαθό, χωρίς το οποίο οι όποιες τεχνολογικές μας επιτεύξεις και εξελίξεις θα ήταν φτωχότερες. Οι αυξημένες ανάγκες για φορητότητα, ωθούν τους καταναλωτές σε φορητές συσκευές αποθήκευσης ενέργειας με εφαρμογές στη μετακίνηση, την επικοινωνία αλλά και τη διασκέδαση. Όσο αναξιόπιστες και παράξενες κι αν φαίνονται στο σημερινό αναγνώστη οι πρώτες προσπάθειες για κατασκευή συσσωρευτών ενέργειας, ο ρόλος που έπαιξαν ήταν καταλυτικός. Εξάλλου, είναι δεδομένο ότι κάποια μέρα, οι απόγονοί μας ενδέχεται να παρακολουθήσουν τις δικές μας τεχνολογικές εξελίξεις με ανάλογο τρόπο που αντιμετωπίζουμε εμείς σήμερα τα αδέξια πειράματα των προκατόχων μας[1- 5^{links}].

5.1.4 Είδη και Χαρακτηριστικά μεγέθη Συσσωρευτών

5.1.4.1 Οι Μπαταρίες Ιόντων Λιθίου

Οι μπαταρίες ιόντων λιθίου (LithiumLi-ion) έχουν σχετικά μεγάλη ενεργειακή χωρητικότητα και μικρό βάρος. Οι μπαταρίες αυτές έχουν την ίδια υψηλή ενεργειακή χωρητικότητα με τις μπαταρίες NiMH, δίδουν μεγάλο ρεύμα όπως οι μπαταρίες NiCad και είναι μέχρι 20%-35% πιο ελαφριές. Επίσης, έχουν μηδενικά προβλήματα επίδρασης μνήμης, πράγμα που σημαίνει ότι μπορούν να επαναφορτιστούν οποιαδήποτε στιγμή. Αν και οι μπαταρίες λιθίου είναι προηγμένης τεχνολογίας, είναι ακόμη σχετικά ακριβές για τη φορητή ενέργεια.



Οι μπαταρίες λιθίου κατασκευάζονται εξ ολοκλήρου από μη τοξικά υλικά. Έχουν όμως το μειονέκτημα, ότι το λίθιο αναφλέγεται πολύ εύκολα. Επίσης, το λίθιο παράγει μεγάλες ποσότητες υδρογόνου όταν έρχεται σε επαφή με το νερό, πράγμα που πρέπει να λαμβάνεται υπ' όψη στις πυρκαγιές μπαταριών λιθίου. Υπάρχουν επίσης πολυμερείς μπαταρίες λιθίου (lithium polymer). Αυτός ο τύπος μπαταριών έχει τη

δυνατότητα παροχής εξαιρετικά υψηλού ρεύματος (30A+), αλλά διαθέτει μικρότερη πυκνότητα ισχύος από τις κανονικές ιονικές μπαταρίες λιθίου.

5.1.4.2 Οι Αλκαλικές Μπαταρίες



Οι αλκαλικές μπαταρίες είναι οι πιο κοινές, οι πιο προσιτές και οι φτηνότερες. Εντούτοις, είναι σχεδόν άχρηστες, επειδή έχουν μικρή χωρητικότητα, είναι βαριές και ακριβές

5.1.4.3 Οι Μπαταρίες Μολύβδου

Οι μπαταρίες μολύβδου αναπτύχθηκαν προς το τέλος του 1800. Παραμένουν δημοφιλείς, επειδή η κατασκευή τους είναι εύκολη και φθηνή.



Οι επαναφορτιζόμενες μπαταρίες μολύβδου είναι διαθέσιμες από τη δεκαετία του 50 και έχουν γίνει σήμερα ο ευρύτερα χρησιμοποιημένος τύπος από όλες τις άλλες μπαταρίες. Έχουν το μεγάλο πλεονέκτημα, ότι είναι φτηνές και διαθέσιμες σε μεγάλη γκάμα επιλογών τάσης και χωρητικότητας. Χρησιμοποιούνται ευρέως στα οχήματα καθώς και σε εφαρμογές ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (π.χ. φωτοβολταϊκών) για αποθήκευση της πλεονάζουσας ενέργειας. Οι μπαταρίες μολύβδου έχουν το σοβαρό μειονέκτημα, ότι είναι ογκώδεις και βαριές και

πρέπει να διατηρούνται πάντοτε φορτισμένες.

Υπάρχουν στο εμπόριο σε τρεις μορφές:

Οι **συσσωρευτές εκκίνησης** (μερικές φορές ονομάζονται SLI, για την εκκίνηση, το φωτισμό, ανάφλεξη **S**tarting, **L**ighting, **I**gnition) χρησιμοποιούνται

συνήθως στα οχήματα, επειδή κατά την εκκίνηση των μηχανών απαιτείται ένα πολύ μεγάλο ρεύμα για ένα πολύ σύντομο χρονικό διάστημα. Οι συσσωρευτές αυτοί έχουν ένα μεγάλο αριθμό από λεπτές πλάκες για μέγιστη επιφάνεια. **Οι συσσωρευτές βαθιάς εκφόρτισης** έχουν σχεδιαστεί για να εκφορτίζονται έως και 80% και έχουν πολύ παχύτερες πλάκες. Παρά το γεγονός ότι μπορούν να εκφορτίζονται έως και 80%, η καλύτερη μέθοδος επιμήκυνσης της διάρκειας ζωής τους είναι να εκφορτίζονται έως 50%.

Οι συσσωρευτές θαλάσσης είναι συνήθως ένα "υβρίδιο", μεταξύ των συσσωρευτών εκκίνησης και των συσσωρευτών βαθιάς εκφόρτισης.

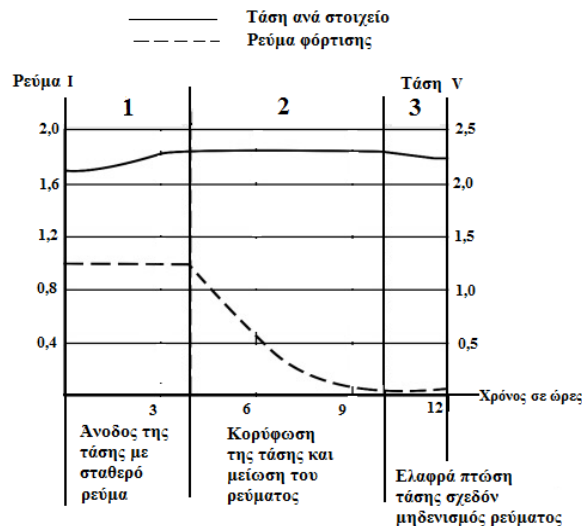
Η τάση των συσσωρευτών μολύβδου δεν επιτρέπεται να γίνει μικρότερη από 2,0V ανά στοιχείο, επειδή κινδυνεύει να πάθει "θει-ίκωση" με αποτέλεσμα να μην μπορεί να ξαναφορτιστεί. Θει-ίκωση είναι η περίπτωση όπου κρύσταλλοι θειικού μολύβδου επικάθονται στα ηλεκτρόδια, εμποδίζοντας την περαιτέρω επικοινωνία με το άμεσο περιβάλλον τους. Όταν η τάση 12βολτης μπαταρίας πέσει κάτω από 10,5V, τότε η μπαταρία έχει σοβαρή βλάβη και πρέπει να αντικατασταθεί. Οι συσσωρευτές μολύβδου φορτίζονται με σταθερή τάση.

Παρατηρούμε ότι οι μπαταρίες μολύβδου κατά τη φόρτισή τους εμφανίζουν τρία στάδια:

1. Με σταθερό ρεύμα
2. Υπό μέγιστη σταθερή τάση
3. Συντήρησης φορτίου

Περιοχή 1. Κατά τη διάρκεια της φόρτισης με σταθερό ρεύμα στην περιοχή αυτή, η μπαταρία λαμβάνει το 70% του φορτίου της σε 5-8 ώρες περίπου.

Περιοχή 2. Το υπόλοιπο 30% του φορτίου το λαμβάνει στην περιοχή 2, που είναι ζωτικής σημασίας για τη συντήρηση της μπαταρίας στο λίγο μεγαλύτερο χρονικό διάστημα των επόμενων 5-10 ωρών. Κατά τη διάρκεια αυτής της φάσης φόρτισης το ρεύμα μειώνεται σταδιακά, λόγω του αυξανόμενου κορεσμού των στοιχείων. Εάν παραληφθεί η φόρτιση της περιοχής 2, η μπαταρία θα χάσει την ικανότητα να δέχεται πλήρες φορτίο λόγω θει-ίκωσης.



Περιοχή 3. Η εφαρμογή τάσης στην περιοχή αυτή συντηρεί τη μπαταρία σε πλήρη φόρτιση με ένα σταθερό ελάχιστο ρεύμα. Συνεχίζοντας την φόρτιση με τη μέγιστη τάση για περισσότερο από τον απαιτούμενο χρόνο (περισσότερο από 48 ώρες) μετατρέπεται η περιττή ενέργεια σε θερμότητα και στο υγρό σχηματίζονται φυσαλίδες. Η συνιστώμενη τάση συντήρησης μπαταριών μολύβδου (float voltage) είναι 2,25 έως 2,3 V/στοιχείο στους 25°. Ο σκοπός της εφαρμογής της τάσεως συντήρησης είναι η αντιστάθμιση της αυτοεκφόρτισης και η διατήρηση της μπαταρίας σε ετοιμότητα σε μια πλήρως φορτισμένη κατάσταση.

Τάση της μπαταρίας χωρίς φορτίο	Κατάσταση φόρτισης %
12.65V	100%
12.45V	75%
12.24V	50%
12.06V	25%
11.89V ή λιγότερο	Εκφορτισμένη

Ο χρόνος φόρτισης των μπαταριών μολύβδου έχει μεγάλη διάρκεια συγκρινόμενος με τις άλλες μπαταρίες. Οι μπαταρίες μολύβδου πρέπει πάντα να αποθηκεύονται σε φορτισμένη κατάσταση. Μια σύντομη φόρτιση θα πρέπει να εφαρμόζεται κάθε έξι μήνες για να αποτραπεί η πτώση της τάσης της κάτω από 2V/στοιχείο.

Κανονικά, το μέγιστο ρεύμα φόρτισης περιορίζεται από τη συνιστώμενη τάση συντήρησης (από 2,1V/στοιχείο έως max2,3V/στοιχείο). Αν όμως χρησιμοποιούνται υψηλότερες τάσεις το μέγιστο ρεύμα φόρτισης πρέπει να περιορίζεται για την αποτροπή της φόρτισης με ένα υψηλότερο ρεύμα από ό, τι μπορεί να αποδεχθεί με αποτέλεσμα την υπερβολική θέρμανση την αεριοποίηση και τη συντόμευση της διάρκειας ζωής της. Συνιστάται το ρεύμα φόρτισης να μην ξεπερνά περίπου το 10% της ονομαστικής χωρητικότητας της μπαταρίας.

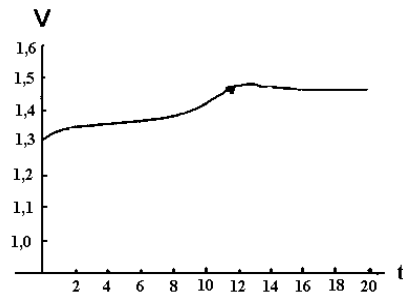
Συνοψίζοντας, η τυπική μέθοδος φόρτισης μπαταρίας μολύβδου απαιτεί σταθερή τάση και ρεύμα που δεν ξεπερνά κάποια όρια ανάλογα με τη χωρητικότητα της μπαταρίας. Έτσι, επιτρέπεται η φόρτιση στην αρχή με ένα μεγάλο ρεύμα, το οποίο βαθμιαία μειώνεται μέχρι το μηδενισμό του όταν η μπαταρία φορτισθεί πλήρως. Στη συνέχεια, για την αποφυγή της υπερφόρτισης και καταστροφής της μπαταρίας διακόπτεται η φόρτιση. Όταν ανερχόμενη η τάση της μπαταρίας φθάσει τα 2,3 Volt/κυψέλη (οι 12βολτες μπαταρίες περιέχουν 6 κυψέλες $2,3 \cdot 6 = 13,8$ Volts) ξεκινά η απελευθέρωση υδρογόνου από τον αρνητικό πόλο. Στο σημείο αυτό θεωρείται πλήρως φορτισμένη και η περαιτέρω προσπάθεια φόρτισης σπαταλά την προσφερόμενη ενέργεια για την απελευθέρωση υδρογόνου καταπονώντας την μπαταρία.

5.1.4.4 Οι Μπαταρίες Fuel Cell



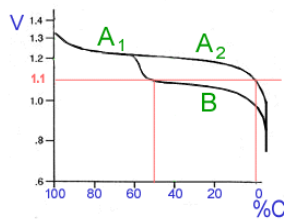
Οι μπαταρίες Fuel Cell είναι οι πιο κατάλληλες ιδιαίτερα για ρομποτικές εφαρμογές. Όμως, είναι ακόμη πολύ ακριβές (~\$400). Πιστεύεται, ότι με την ταχεία βελτίωση της τεχνολογίας σε μερικά έτη θα διατίθενται φτηνά. Μεγάλα χρηματικά ποσά επενδύονται στη βελτίωσή τους και έτσι αναμένεται να εμφανίσουν στα επόμενα χρόνια δύο έως τρεις φορές μεγαλύτερη ενεργειακή πυκνότητα από τις σημερινές μπαταρίες λιθίου. Εντούτοις έχει υπολογιστεί ότι οι μπαταρίες λιθίου που θα αναπτυχθούν πιθανώς θα έχουν τη διπλάσια ενεργειακή χωρητικότητα από αυτήν που έχουν σήμερα.

5.1.4.5 Οι Μπαταρίες Καδμίου - Νικελίου NiCad



Καμπύλη φόρτισης μπαταρίας Ni-Cd. Παρόμοια (ελαφρά μετατοπισμένη προς τα κάτω) είναι και η καμπύλη φόρτισης της μπαταρίας NiMH

Οι μπαταρίες καδμίου-νικελίου NiCad (Nickel Cadmium) είναι καλές για μικρές ρομποτικές εφαρμογές. Παρέχουν μεγάλο ρεύμα και μπορούν να επαναφορτιστούν μέσα σε μια ή δύο ώρες.



Ένα στοιχείο Ni-Cd που φορτίζεται και εκφορτίζεται στο ίδιο ποσοστό της χωρητικότητάς του, μπορεί να δώσει όλη την χωρητικότητά του. Εμφανίζει όμως στην πράξη ένα σκαλοπάτι στην καμπύλη εκφόρτισης, ή με άλλα λόγια μία υποχώρηση της τάσης του. Αυτή η μορφή μνήμης ονομάζεται "μνήμη μακράς διάρκειας".

Οι μπαταρίες Ni-Cd επαναφορτίζονται εύκολα και μπορούν να δώσουν μεγάλα ρεύματα εκφόρτισης, αποθηκεύονται εύκολα και αντέχουν την κακομεταχείριση περισσότερο από τους άλλους τύπους. Ταυτόχρονα, στην μικρή χρήσιμη ζωή τους μπορούν να αποδώσουν αρκετούς κύκλους φόρτισης- εκφόρτισης, που συγκριτικά με την τιμή αγοράς τους καθίστανται η φθηνότερη επιλογή. Εμφανίζουν το φαινόμενο επίδρασης μνήμης. Μπορούν δηλαδή να αποθηκεύουν όλο και λιγότερο την ενέργεια μετά από κάθε επαναφόρτιση. Για να αποτραπεί η επίδραση αυτή μνήμης στις μπαταρίες NiCad, κατά την επαναφόρτιση θα πρέπει πρώτα να εκφορτιστούν πλήρως. Υπενθυμίζεται, ότι οι μπαταρίες NiCd περιέχουν την τοξική ουσία καδμίου και για το λόγο αυτό θα πρέπει να ανακυκλώνονται. [6-15 [links](#)]

5.1.4.6 Οι Μπαταρίες NiMH

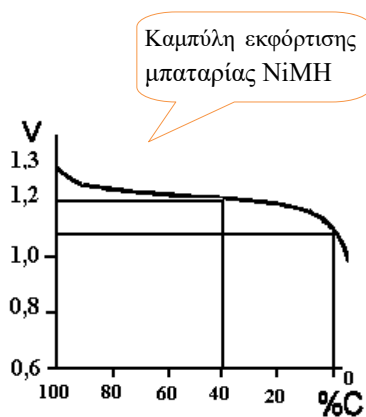
Οι μπαταρίες NiMH (Nickel Metal Hydride) μπορούν να παρέχουν σχετικά υψηλό ρεύμα, έχουν μεγαλύτερη χωρητικότητα ενέργειας και μπορούν να επαναφορτιστούν πολλές φορές. Προτείνονται για μηχανικές

κατασκευές μικρού μεγέθους. Τα στοιχεία Ni-MH Νικελίου-Υδριδίου - Μετάλλου (Nickel Metal Hydride), ήταν το αποτέλεσμα της ανάγκης αποφυγής του Καδμίου που θεωρείται πολύ τοξικό στο περιβάλλον.



Επειδή έχουν την ίδια ονομαστική τάση 1,2 V και τις ίδιες εξωτερικές διαστάσεις με τις μπαταρίες Ni-Cd, μπορούν να τις αντικαταστήσουν άμεσα στις πιο πολλές εφαρμογές. Αρχικά βρήκαν εφαρμογή σε κινητά τηλέφωνα και φορητούς ηλεκτρονικούς υπολογιστές. Ορισμένες μπαταρίες NiMH έχουν ένα υψηλό ρυθμό αυτο-εκφόρτισης. Με άλλα λόγια, χωρίς φορτίο μπορούν να εκφορτιστούν πλήρως μέσα σε μια εβδομάδα. Αλλά το πλεονέκτημα των μπαταριών NiMH είναι

ότι μπορούν να αντέξουν πολλούς περισσότερους κύκλους φόρτισης από τις μπαταρίες NiCad.



Στα μικρά μεγέθη συναντάμε μπαταρίες Ni-MH με χωρητικότητα έως και 180% μεγαλύτερη από ισομεγέθη Ni-Cd π.χ. 100mAh έναντι 50mAh, ή 280mAh έναντι 110mAh, ενώ στα μεγαλύτερα μεγέθη η διαφορά είναι γύρω στο 37% π.χ. 2400 mAh έναντι 3300mAh.

Ο αριθμός των κύκλων στη διάρκεια 'ζωής' τους είναι περίπου το **ένα τρίτο** αυτού των Ni-Cd. Η ζωή τους εξαρτάται άμεσα από την ένταση της φόρτισης και από το βάθος (ποσοστό) της εκφόρτισης. Αν φορτίζονται με μεγάλες εντάσεις η διάρκεια αυτή ελαττώνεται. Επίσης, αν όλες οι εκφορτίσεις είναι πλήρεις η 'ζωή' τους θα είναι μικρότερη απ' ό,τι αν όλες οι εκφορτίσεις ήταν ατελείς.[1_{book}]

5.2 Τεχνικές φόρτισης Συσσωρευτή (Μπαταρίας)

Ένας φορτιστής έχει τρεις βασικές λειτουργίες :

1. Να διοχετεύσει την ενέργεια από το μέσο στην μπαταρία (φόρτιση).
2. Να βελτιστοποιεί το ποσοστό φόρτισης (σταθεροποίηση).
3. Να ξέρει πότε για να σταματήσει (τερματισμός).

5.2.1 Τερματισμός φόρτισης

Μόλις φορτιστεί πλήρως μια μπαταρία, το ρεύμα φόρτισης πρέπει να αποκοπεί. Αν δεν γίνει αυτό το αποτέλεσμα είναι η παραγωγή θερμότητας και αερίων τα οποία καταστρέφουν τις μπαταρίες. Ένας καλός φορτιστής πρέπει να είναι σε θέση να ανιχνεύσει τότε η ανασύνθεση των ενεργών χημικών ουσιών είναι πλήρης και για να σταματήσει τη διαδικασία φόρτισης προτού να γίνει οποιαδήποτε ζημία ενώ διατηρεί τη θερμοκρασία κυττάρων μέσα σε ασφαλή όρια. Ανιχνεύοντας αυτό το σημείο και τερματίζοντας τη φόρτιση επιτυγχάνουμε αύξηση της ζωής της μπαταρίας. Στους περισσότερους φορτιστές το σημείο αυτό είναι ένα προκαθορισμένο ανώτατο όριο τάσης.

5.2.2 Ασφαλής φόρτιση

Εάν για οποιοδήποτε λόγο υπάρχει κίνδυνος υπερφόρτισης της μπαταρίας, όπως λάθος στον καθορισμό του ανώτατου όριο τάσης , αυτό θα συνοδευθεί από μια άνοδο στη θερμοκρασία. Ελαττώματα μέσα στην μπαταρία ή υψηλές θερμοκρασίες περιβάλλοντος μπορούν επίσης να οδηγήσουν μια μπαταρία πέρα από τα ασφαλή όρια θερμοκρασίας της. Οι υψηλές θερμοκρασίες καταστρέφουν τις μπαταρίες και ο έλεγχος της θερμοκρασίας κυττάρων είναι ένας καλός τρόπος ελέγχου της κατάστασης αυτών. Ο έλεγχος φόρτισης βάση της θερμοκρασίας της μπαταρίας, είναι ένας άλλος τρόπος ρύθμισης φόρτισης . Τέτοια προφύλαξη ασφάλειας είναι ιδιαίτερα σημαντική για μπαταρίες υψηλής ισχύος όπου οι συνέπειες αποτυχίας είναι σοβαρές και ακριβές.

5.2.3 Χρόνος φόρτισης

Φορτίζοντας γρήγορα μια μπαταρία, στέλνουμε ενέργεια στην μπαταρία με γρηγορότερο ρυθμό από το χρόνο που χρειάζεται για να γίνει η χημική διαδικασία σε αυτή , με καταστροφικά αποτελέσματα. Γι 'αυτό το λόγο είναι σημαντικός ο χρόνος φόρτισης της μπαταρίας. Ο χρόνος φόρτισης είναι ανάλογος της χωρητικότητας της μπαταρίας , του ρυθμού φόρτισης και των απωλειών φόρτισης Σε ιδανικές συνθήκες χωρίς απώλειες φόρτισης , ο χρόνος πλήρους φόρτισης μιας άδειας μπαταρίας είναι το πηλίκο της χωρητικότητας της (σε Αμπέρ) , προς το ρυθμό φόρτισης (ρεύμα φόρτισης σε Αμπέρ). Ο ιδανικός ρυθμός φόρτισης είναι το 10% της χωρητικότητας της μπαταρίας και ο μέγιστος το 20%. Έτσι αν πχ έχουμε μια μπαταρία

χωρητικότητας 10Ah και τη φορτίζουμε με ρυθμό 10% δηλ 1A ,χωρίς απώλειες ,θα χρειαστούν 10 ώρες για πλήρη φόρτιση της αν αυτή είναι άδεια.

5.2.4 Μέθοδοι φόρτισης

Σταθερής τάσης: είναι βασικά μια παροχή συνεχούς ρεύματος που δημιουργείται από ένα μετασχηματιστή υποβιβασμού και ένα ανορθωτή. Τέτοιους βρίσκουμε συχνά σε φορτιστές μπαταριών αυτοκινήτων (lead-acid), και φορτιστές μπαταριών lithium-ion όπου προστίθενται στοιχεία προστασίας για τις μπαταρίες και την ασφάλεια του χρήστη.

Σταθερού ρεύματος: οι φορτιστές αυτοί μεταβάλλουν την παρεχόμενη τάση για να διατηρήσουν σταθερό το ρεύμα που δίνουν, σβήνοντας όταν η τάση φτάσει στο επίπεδο μιας πλήρους φόρτισης. Αυτός ο τύπος χρησιμοποιείται συνήθως σε μπαταρίες νικελίου-καδμίου και νικελίου - μετάλλου.

Ελαττωμένου ρεύματος: η φόρτιση γίνεται από μια ανεξέλεγκτη σταθερή πηγή τάσης. Το ρεύμα μικραίνει καθώς η τάση κυττάρων αυξάνεται ,ενώ υπάρχει σοβαρός κίνδυνος υπερφόρτωσης .Αυτό αντιμετωπίζεται με περιορισμό του ρυθμού και του χρόνου φόρτισης. Τέτοιος φορτιστής είναι κατάλληλος μόνο για μπαταρίες τύπου SLA.

Παλμική φόρτιση: το ρεύμα παραδίδεται στη μπαταρία σε παλμούς. Ο ρυθμός φόρτισης (βασισμένο στο μέσο ρεύμα) μπορεί να ελεγχθεί καθορίζοντας το εύρος των παλμών. Κατά τη διάρκεια της φόρτισης, οι μικρές περίοδοι ανάπαυσης σταθεροποιούν τις χημικές ενέργειες στην μπαταρία αφού εξισώνεται η αντίδραση σε όλο τον όγκο του ηλεκτροδίου πριν ξαναρχίσει η φόρτιση. Αυτό επιτρέπει στη χημική αντίδραση να συμβαδίσει με το ποσοστό απορρόφησης ηλεκτρικής ενέργειας. Επίσης αυτή η μέθοδος μπορεί να μειώσει τις ανεπιθύμητες χημικές αντιδράσεις στην επιφάνεια των ηλεκτροδίων όπως δημιουργία αερίων και κρυστάλλου.

Φόρτιση Burp ή αρνητική παλμική φόρτιση : χρησιμοποιείται από κοινού με τη παλμική φόρτιση και εφαρμόζει έναν πολύ σύντομο παλμό εκφόρτισης 2 έως 3 φορές το ρεύμα φόρτισης για 5 χιλιοστά του δευτερολέπτου, κατά τη διάρκεια της περιόδου ανάπαυσης για να

αποπολώσει το κύτταρο. Αυτοί οι παλμοί αποσπούν οποιεσδήποτε φυσαλίδες αερίου που έχουν δημιουργηθεί στα ηλεκτρόδια κατά τη φόρτιση.

Φόρτιση IU1 : αρχικά η μπαταρία φορτίζεται με σταθερό ρυθμό έως ότου η τάση κυττάρων φτάσει σε μια προκαθορισμένη τιμή – συνήθως κοντά σε αυτή στην οποία δημιουργούνται αέρια. Τότε ο φορτιστής σταθεροποιεί τη τάση του και το ρεύμα που απορροφά η μπαταρία μειώνεται.. Χρησιμοποιείται για γρήγορη φόρτιση ειδικών τύπων μπαταριών μολύβδου.

Σε επαναφορτιζόμενες μπαταρίες οι λειτουργίες Trickle charge είναι ο ρυθμός απαιτούμενης φόρτισης που αντισταθμίζει το ρυθμό εκφόρτισης της μπαταρίας και Float charge η κατάσταση στην οποία το φορτίο και η μπαταρία είναι συνδεδεμένα παράλληλα με τον φορτιστή και διατηρούν τη τάση στα άκρα της μπαταρίας μικρότερη από το ανώτατο όριο της μπαταρίας.

5.2.5 Ρυθμός φόρτισης

Η φόρτιση των μπαταριών μπορεί να γίνει με ποικίλους ρυθμούς ανάλογα με την απαίτηση. Χαρακτηριστικά παρουσιάζονται κατωτέρω οι εξής ρυθμοί:

Αργή : 14-16 ώρες με ρυθμό 0.1c (10%)

Γρήγορη : 3 έως 6 ώρες με ρυθμό 0.3c (30%)

Ταχεία : λιγότερο από 1 ώρα με ρυθμό 1.0c (100%)

Όπου ρεύμα φόρτισης = ρυθμός % X Ah (μπαταρίας)

5.2.6 Τύποι φορτιστών

Οι φορτιστές συνήθως εκδηλώνουν μια μορφή διαχείρισης της τάσης για να ελεγχθεί η τάση φόρτισης που εφαρμόζεται στην μπαταρία. Η ποιότητα και απόδοση ενός φορτιστή είναι πάντοτε ανάλογη της τιμής του. Μερικά παραδείγματα ακολουθούν:

Διακοπτικός ρυθμιστής (switcher) : χρησιμοποιεί διαμόρφωση πλάτους παλμού για να ελέγξει την τάση. Έχει χαμηλή απαίτηση ισχύος και είναι αποδοτικότερος από τους γραμμικούς ρυθμιστές αλλά είναι πιο σύνθετος. Χρειάζεται ένα μεγάλο παθητικό φίλτρο για να εξομαλύνει τους παλμούς.

Ρυθμιστής σειράς (γραμμικός) : λιγότερο σύνθετος αλλά με περισσότερες απώλειες και παραγωγή θερμότητας. Όλο το ρεύμα περνά μέσω κάποιου ρυθμιστικού στοιχείου που πρέπει να είναι υψηλής ισχύος (mosfet, τρανζίστορ). Επειδή δεν υπάρχει καμία μετατροπή, παραδίδει συνεχές ρεύμα και δεν χρειάζεται φίλτρο εξόδου. Οι ρυθμιστές σειράς έχουν συνήθως καλύτερα χαρακτηριστικά ελέγχου και φόρτισης.

Ρυθμιστής εκτροπής : περισσότερο χρησιμοποιούνται σε φωτοβολταϊκά συστήματα δεδομένου ότι είναι σχετικά φτηνοί για να κατασκευαστούν και απλοί για να σχεδιαστούν. Το ρεύμα φόρτισης ελέγχεται από έναν διακόπτη ή τρανζίστορ που συνδέεται παράλληλα με το φωτοβολταϊκό πλαίσιο και την μπαταρία. Η υπερφόρτωση της μπαταρίας αποτρέπεται με την εκτροπή του Φ/β μέσω του τρανζίστορ όταν φθάσει η τάση σε ένα προκαθορισμένο όριο.

Ρυθμιστής Buck : λειτουργεί με ένα DC-DC μετατροπέα υποβιβασμού. Είναι υψηλής απόδοσης και έχει χαμηλές απώλειες θερμότητας. Δεν χρησιμοποιεί μετασχηματιστή, καταπονεί λίγο τα διακοπτικά του στοιχεία και έχει ένα μικρό φίλτρο εξόδου.

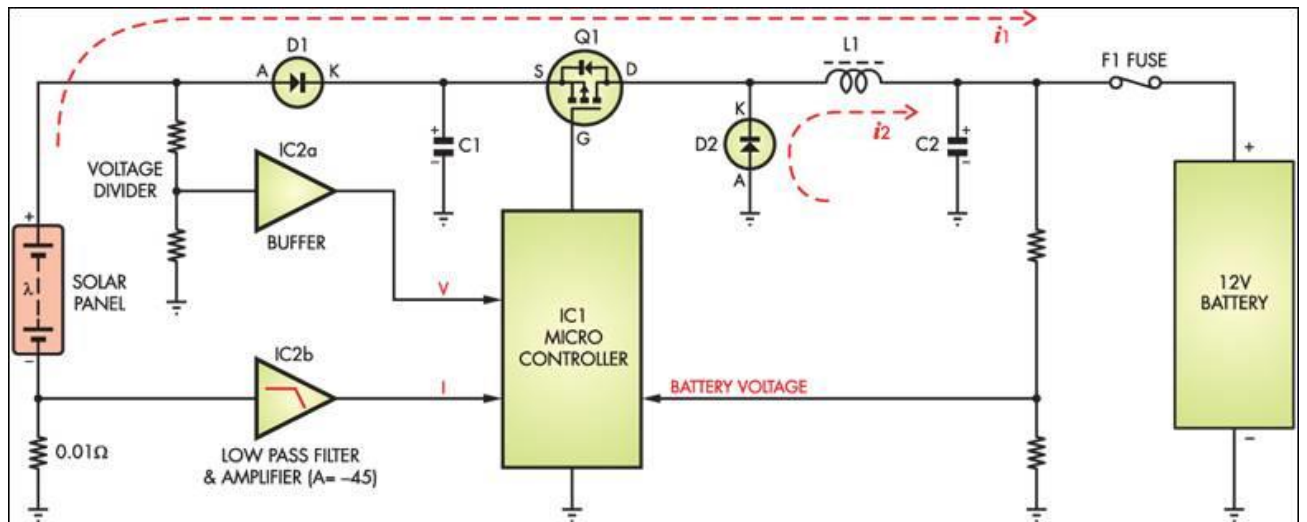
Φορτιστής παλμών : χρησιμοποιεί τρανζίστορ σειράς που μπορεί ανοιγοκλείσει. Όταν η τάση μπαταρίας είναι χαμηλή το τρανζίστορ μένει κλειστό και περνάει το ρεύμα της πηγής στη μπαταρία. Καθώς η τάση της μπαταρίας πλησιάζει την επιθυμητή τάση το τρανζίστορ ανοιγοκλείνει για να διατηρήσει την επιθυμητή τάση. Επειδή ενεργεί διακοπτικά παράγει λιγότερη θερμότητα και επειδή ενεργεί και γραμμικά το φίλτρο εξόδου μπορεί να είναι μικρότερο.

Επαγωγική φόρτιση : αναφέρεται στο σχέδιο του φορτιστή. Ουσιαστικά η πλευρά εισόδου του φορτιστή, το μέρος που συνδέεται με τη πηγή εναλλασσόμενου ρεύματος, κατασκευάζεται από έναν μετασχηματιστή που είναι χωρισμένος σε δύο μέρη. Το πρωτεύον τύλιγμα του μετασχηματιστή στεγάζεται σε μια μονάδα που συνδέεται με τη πηγή εναλλασσόμενου ρεύματος, ενώ το δευτερεύον τύλιγμα του μετασχηματιστή στεγάζεται στην συσκευή που περιέχει την μπαταρία, μαζί με τα υπόλοιπα ηλεκτρονικά στοιχεία. Αυτό επιτρέπει στην μπαταρία να φορτιστεί χωρίς κάποια σύνδεση με τη πηγή και χωρίς έκθεση οποιωνδήποτε επαφών που θα μπορούσαν να προκαλέσουν ηλεκτροπληξία στο χρήστη[13]

Κεφάλαιο 6^ο Μελέτη – Κατασκευή 12VDC Φορτιστή Μπαταρίας Μέσω Φ/Β

6.1 Παρουσίαση των τμημάτων κατασκευής

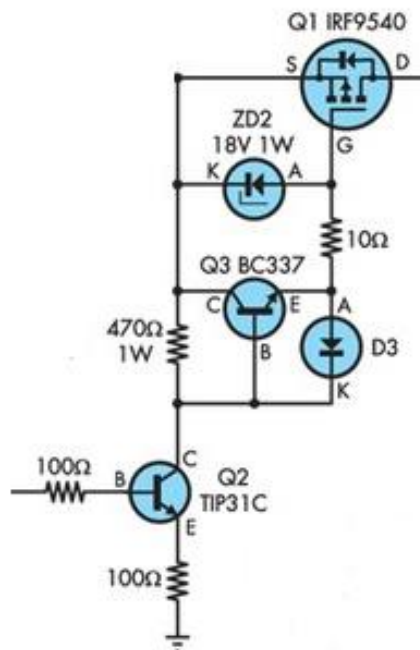
Αρχικά , στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζουμε την Αρχή Λειτουργίας του φωτοβολταϊκού φορτιστή που έχουμε κατασκευάσει στην παρούσα πτυχιακή.



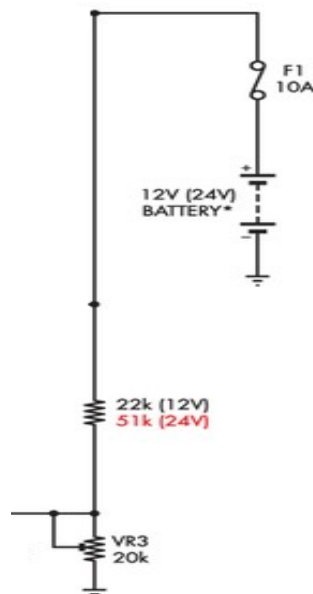
Όπως βλέπουμε και στο σχήμα , το κύκλωμα χωρίζεται σε τρία μέρη.

Το πρώτο μέρος του κυκλώματος είναι το κύκλωμα κατά το οποίο χρησιμοποιούμε το LM358 για να μπορέσουμε να μετρήσουμε την τάση και το ρεύμα του φωτοβολταϊκού πάνελ μας. Αυτό μας χρησιμεύει για να μπορούμε , με την βοήθεια του μικροελεγκτή , να βρίσκουμε την ισχύ του φωτοβολταϊκού πάνελ ανά τακτικά χρονικά διαστήματα. Αυτό μας βοηθάει γιατί έτσι με τους κατάλληλους παλμούς pwm του μικροελεγκτή θα οδηγούμε το P-Mosfet έτσι ώστε να τροφοδοτεί την μπαταρία με το κατάλληλο ρεύμα. Δηλαδή με άλλα λόγια , θα κρατάμε την ισχύ $P_{in} = P_{out}$.

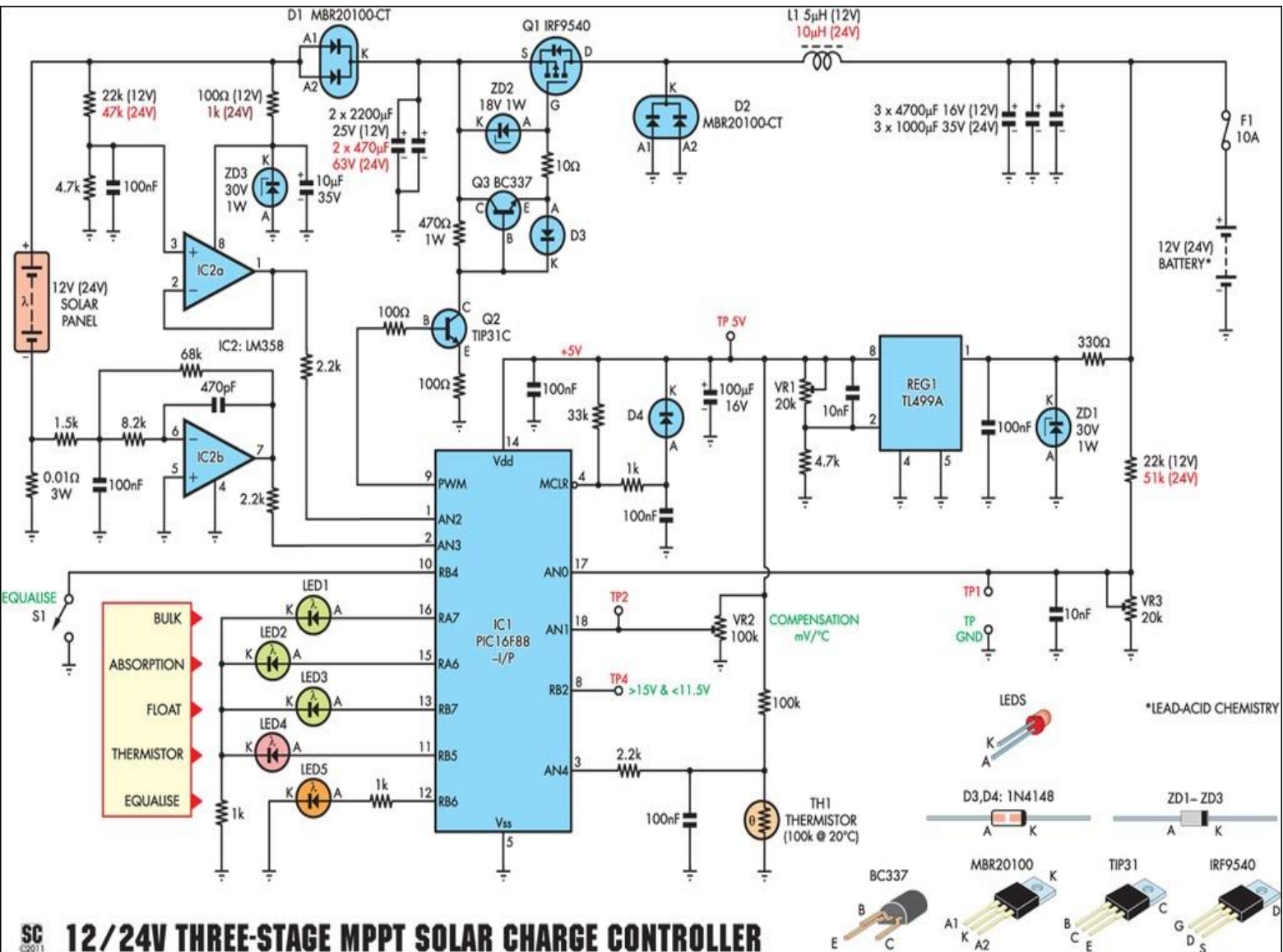
Επίσης στο δεύτερο μέρος του κυκλώματος , περιέχει και ένα κύκλωμα οδήγησης του Pmosfet από τον μικροελεγκτή pic16f88 .



Το τρίτο μέρος του κυκλώματος ,περιέχει απλά δυο αντιστάσεις με τις οποίες επιτυγχάνουμε να μετρήσουμε την τάση της μπαταρίας. Αυτό το χρειαζόμαστε ,διότι θέλουμε ο μικροελεγκτής να διαβάζει την τάση της μπαταρίας. Με αυτόν τον τρόπο και με το κατάλληλο προγραμματισμό του μικροελεγκτή θα μπορούμε να χειριζόμαστε τον τρόπο φόρτισης ή το πότε θα τερματίζουμε την φόρτιση της μπαταρίας.

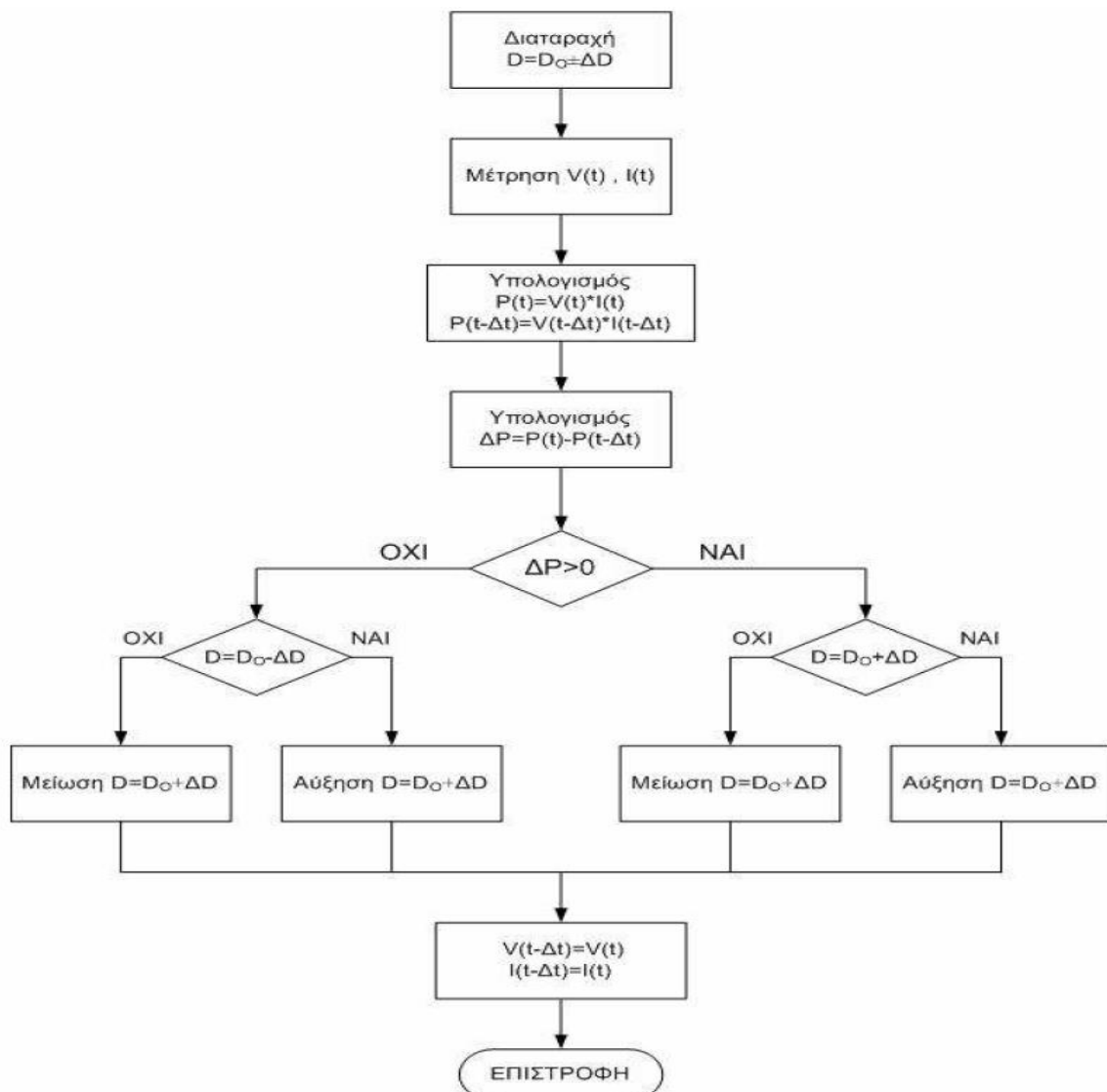


Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται το κύκλωμα που υλοποιήσαμε στην παρούσα πτυχιακή εργασία.



6.2 Επεξήγηση λογικής προγράμματος του μικροελεγκτή με MPPT αλγόριθμο (διαγράμματα)

Στο παρακάτω κύκλωμα θα υλοποιήσουμε την Μέθοδο Ανάβασης Λόφου/ Διατάραξης και Παρατήρησης (Hill climbing /Perturb & Observe - P&O). Σύμφωνα με την μέθοδο αυτή η τάση του φωτοβολταϊκού πάνελ μεταβάλλεται από τον μικροελεγκτή, ο οποίος υπολογίζει την ισχύ. Ανάλογα με την μέτρηση της ισχύς εισόδου, ο μικροελεγκτής αυξομειώνει την τάση στο τρανζίστορ έτσι ώστε να μπορεί η ισχύς της εξόδου να ακολουθεί την ισχύ της εισόδου. Η συγκεκριμένη μέθοδος είναι η συνηθέστερη, λόγω εύκολης υλοποίησης και της μεγάλης ταχύτητας και αποδοτικότητας στο να φτάσει στο σημείο MPP. Παρακάτω φαίνεται ο αλγόριθμος.



Σχήμα 4.4 : Λογικό διάγραμμα αλγορίθμου Διατάραξης και Παρατήρησης

6.3 Συγγραφή Προγράμματος

Όπως αναφέραμε και παραπάνω ,στην παρούσα πτυχιακή υλοποιήσαμε την Μέθοδο Ανάβασης Λόφου/ Διατάραξης και Παρατήρησης (Hill climbing /Perturb & Observe - P&O). Ο κώδικας για την πραγματοποίηση του αλγορίθμου, γράφτηκε σε γλώσσα MicroC. Με την βοήθεια του εργαλείου “MICROC” που διατίθεται δωρεάν από την MicroChip, το οποίο κάνει compile το πρόγραμμα που γράψαμε σε MicroC , σε αρχείο .hex , το οποίο είναι κατάλληλο για να διαβαστεί από τον Pic 16f88.

Παρακάτω ο κώδικας για την υλοποίηση του αλγορίθμου:

```
#define v5 5000

#define v13_8 13000

#define v13_7 12900

#define v13_65 12850

#define v10_8 11800

Unsigned in ch0,ch2, amp;
Unsigned long watt, oldwatt;
Unsigned short Du, Du2;

Unsigned int ADC_Avg(int Channel)
{
int sum =0 ;
short i;
for (i=0; i<8;i++)
{
Sum += ADC_GetSample(channel);
Delay_us(50);
}
```



```

Return (sum/8)
}
void main()
{
CMCON = 0x07
PORTA = 0;
TRISB=0
PORTB = 0;
TRISA = 0x07;
ADCON0= 0x81;
ADCON1= 0xC3;
ADC_Init();
PWM2_Init(5000);
PWM1_Init(5000);

Oldwatt = 0;
Du = 0;
Du2 =0;
While(1)
{
    PWM2_Start();
    PWM2_Set_Duty(Du);
    PWM1_Start();
    PWM1_Set_Duty(Du2);

ch0 = ADC_Avg(0)*15.62;
ch2 = ADC_Avg(2)*15.62;

```

```

if( ch0 > ch2)
{
    amp = (ch0 -ch2)*1.1;
}else{
    amp = (ch2 -ch0)*1.1;
}

If (amp <20)
{
    amp =0;
}

watt = ch0 * amp;
if ( ch0 < v13_8 && ch0 >= 13_65)
{
    Du=100;
}else if( ch0 <v13_65 && ch0>v5){
    If (watt > oldwatt)
    {
        Du++
    }
}else
{
    Du--;
}

    Oldwatt = watt ;
}else{
    Du = 0 ;
}

```

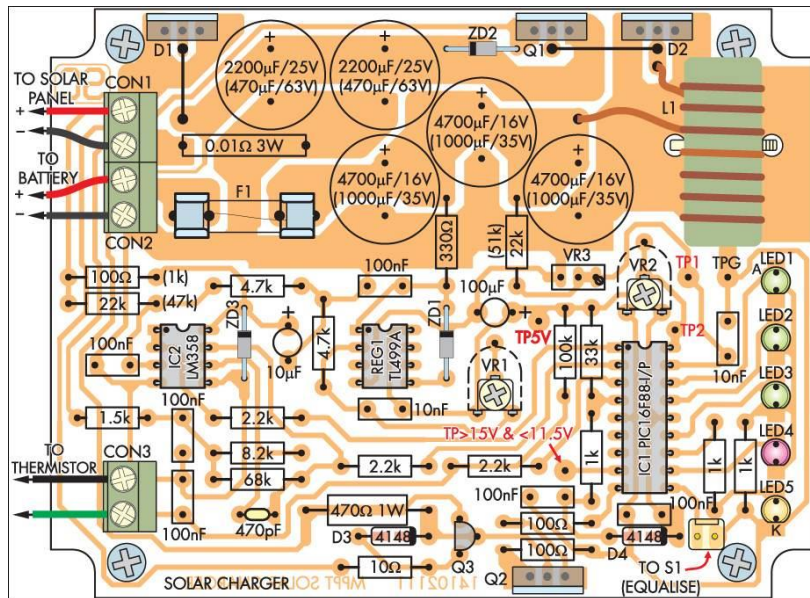
```

}
Delay_us(100);
    If(ch0 <v10_8)
{
Du2 = 0;
}else{
Du2 =245;
}
}
}

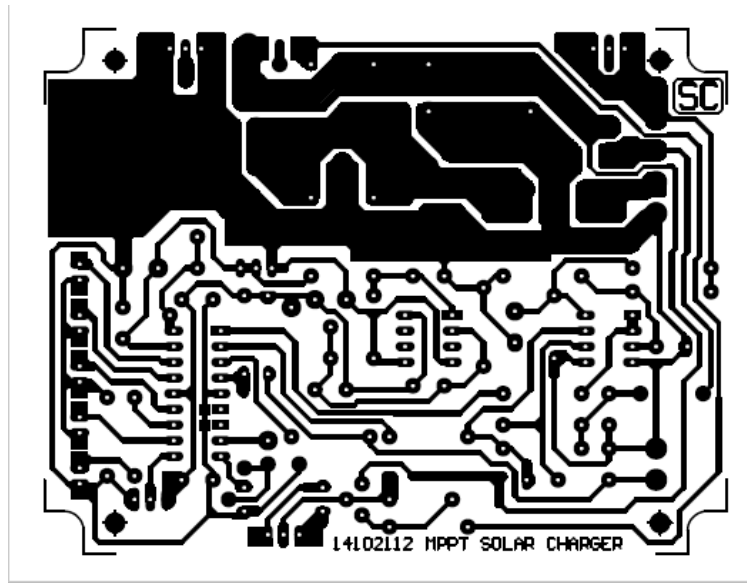
```

6.4 Κατασκευή Τυπωμένου κυκλώματος

6.4.1 Κύκλωμα τοποθέτησης των εξαρτημάτων



6.4.2 Τυπωμένο κύκλωμα



Κεφάλαιο 7 - Βιβλιογραφία

7.1 Δημοσιευμένα Papers

[1] Trishan Esham, Patrick L. Chapman, "Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 22, No. 2 pp. 439-449, June 2007

[2] H. J. Beukes and J. H. R. Enslin, "Analysis of a new compound converter as MPPT, battery regulator and bus regulator for satellite power systems", 24th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference, pp. 846-852, June 1993.

[3] C. R. Sullivan and M. J. Powers, "A high-efficiency maximum power point tracker for photovoltaic arrays in a solar-powered race vehicle" 24th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference., pp. 574-580, June 1993.

[4] A. S. Kislovski and R. Redl, "Maximum-power-tracking using positive feedback", 25th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference., pp. 1065-1068, Vol. 2, August 1994.

[5] J. Arias, F. F. Linera, J. Martin-Ramos, A. M. Pernia, and J. Cambroner, "A modular PV regulator based on microcontroller with maximum power point tracking", Conference Record of the 2004 IEEE Industry Applications Conference, Vol. 2, pp. 1178-1184, October 2004.

[6] M. Veerachary, T. Senjyu and K. Uezato, "Neural-network-based maximum-power-point tracking of coupled-inductor interleaved-boost-converter-

supplied PV system using fuzzy controller", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 50, No.4 pp. 749-758, August. 2003.

[7] Miyatake M., Veerachary M., Toriumi F., Fujii N., Ko H., "Maximum Power Point Tracking of Multiple Photovoltaic Arrays: A PSO Approach", IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol. 47, No.1 pp 367–380, January 2011.

[8] Ned Mohan, Tore A. Underland and William P. Robins."Ηλεκτρονικά Ισχύος", 1995, Β' έκδοση, Εκδόσεις Τζιόλα.

[9] J. H. R. Enslin and D. B. Snyman, "Simplified feed-forward control of the maximum power point in PV installations", Proc.1992 International Conference. on Industrial Electronics, Control., Instrumentation, and Automattion, Vol.1, pp. 548-553, November 1992.

7.2 Βιβλία

[1] Δρ. Αλατσαθανός Σταμάτης , 'Εισαγωγή στη Μηχατρονική και στα Ενσωματωμένα Συστήματα', Αθήνα 2010

[2] Richard C. Jaeger , 'Μικροηλεκτρονική Τόμος Α,Β', Θεσσαλονίκη 2003

[3] N.H Weste , K.Eshraghian 'Σχεδίαση Ολοκληρωμένων Κυκλωμάτων CMOS VLSI', Αθήνα 1996

[4] Κ.Καγκαράκη , Φωτοβολταϊκή τεχνολογία

[5] Χρήστος Χάλαρης και Πολυτίμη Κολοβού , Εργαστηριακό μικροδίκτυο με φωτοβολταϊκή γεννήτρια και συσσωρευτές

7.3 Links

[1] <http://www.aueb.gr/users/koundouri/resees/uploads/SOLAR%20ENERGY.pdf>

[2] http://en.wikipedia.org/wiki/History_of_the_battery

- [3] http://en.wikipedia.org/wiki/Baghdad_Battery
- [4] http://www.bbc.co.uk/history/historic_figures/davy_humphrey.shtml
- [5] http://en.wikipedia.org/wiki/Daniell_cell
- [6] <http://www.batteryfacts.co.uk/BatteryHistory/Plante.html>
- [7] <http://www.batteryfacts.co.uk/BatteryHistory/Leclanche.html>
- [8] <http://www.batteryfacts.co.uk/BatteryHistory/Gassner.html>
- [9] <http://www.batteryfacts.co.uk/BatteryHistory/Jungner.html>
- [10] http://en.wikipedia.org/wiki/Lewis_Urry
- [11] <http://www.mpoweruk.com/nimh.htm>
- [12] http://en.wikipedia.org/wiki/Lithium_battery
- [13] http://en.wikipedia.org/wiki/Lithium_ion_battery
- [14] <https://www.mpoweruk.com/>
- [15] http://www.selasenergy.gr/fv_systems.php#bookmark1