



ΤΕΙ ΠΕΙΡΑΙΑ

Σ.Τ.Ε.Φ

ΤΜΗΜΑ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥ

Πτυχιακή εργασία

Του σπουδαστή του τμήματος Αυτοματισμού

του ΤΕΙ Πειραιά

ΑΓΓΕΛΗ ΚΩΝ/ΝΟΥ ΤΟΥ ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΥ

Αριθμός μητρώου : 29597

ΘΕΜΑ:

«ΕΞΟΜΟΙΩΣΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΗΣ ΣΥΣΤΟΙΧΙΑΣ»

ΑΘΗΝΑ, ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2013

Επιβλέποντες:

Αλαφοδήμος Κωνσταντίνος – Καθηγητής

Κοφινάς Παναγιώτης – Εργαστηριακός συνεργάτης

Φετφατζής Πρόδρομος – Εργαστηριακός συνεργάτης

Περίληψη:

Σκοπός την παρούσας πτυχιακής εργασίας είναι η εισαγωγή του αναγνώστη στα φωτοβολταϊκά συστήματα παρουσιάζοντας σε συνοπτικά κεφάλαια τον τρόπο λειτουργίας των επιμέρους μονάδων που απαρτίζουν ένα ολοκληρωμένο φωτοβολταϊκό σύστημα. Στο δεύτερο και τρίτο μέρος της εργασίας περιγράφεται η λειτουργία ενός εξομοιωτή φωτοβολταϊκής συστοιχίας ο οποίος είναι απαραίτητο εργαλείο για την λήψη πληροφοριών σε εργαστηριακό περιβάλλον.

Εισαγωγή:

Ο τομέας των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είναι ένας τομέας ραγδαία εξελισσόμενος τα τελευταία χρόνια. Οι παρεχόμενες πληροφορίες από βιβλιογραφία και στο διαδίκτυο είναι ανεξάντλητες. Προσπαθώντας να δώσουμε μια γενική ιδέα ώστε να καταλάβει κάποιος την βασική δομή ενός Φ/Β συστήματος περιγράφηκαν σε ενότητες τα 3 κυριότερα μέρη που το απαρτίζουν. Το φωτοβολταϊκό πλαίσιο, ο μετατροπέας και οι συσσωρευτές. Μέσα από γραφήματα και φωτογραφίες έγινε προσπάθεια να γίνει κατανοητή η βασική αρχή λειτουργίας τους.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά όλους τους καθηγητές του τμήματος Αυτοματισμού για το έργο και την γνώση που προσέφεραν τόσα χρόνια σε εμένα και τους συμφοιτητές μου.

Ιδιαίτερα μέσα από την παρούσα εργασία θα ήθελα να ευχαριστήσω τους κυρίους Αλαφοδήμο Κων/νο , Φετφατζή Πρόδρομο και Κοφινά Παναγιώτη για την ευκαιρία που μου έδωσαν να ασχοληθώ με το συγκεκριμένο θέμα. Η βοήθεια και ή καθοδήγηση τους ήταν εξαιρετικά πολύτιμη.

Περιεχόμενα

Ευρετήριο τύπων:	7
Ευρετήριο εικόνων – διαγραμμάτων:	9
Μέρος Α΄	11
1. Τα φωτοβολταϊκά συστήματα.....	11
1.1 Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο:	11
1.2 Γενικά για το Φ/Β σύστημα	13
1.2 Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά Φ/Β πλαισίου	15
1.3 Επιπλέον λειτουργικά χαρακτηριστικά	16
1.4 Φυσικά χαρακτηριστικά:.....	17
2. Μοντέλα Φ/Β κυψελών.....	18
2.1 Το μοντέλο της μίας διόδου	19
2.2 Το μοντέλο των δύο διόδων:.....	22
3. Η καμπύλη I-V.....	24
3.1 Ο συντελεστής πληρώσεως (fill factor / FF)	24
3.2 Οι εσωτερική παράλληλη (Rsh) και εν σειρά αντίσταση (Rs)	26
4. Ο μετατροπέας (Inverter).....	27
4.1 Η δομή του μονοφασικού μετατροπέα:	28
4.2 Η διαμόρφωση PWM	31
4.3 Τεχνικές ελέγχου αντιστροφής:	33
4.4 Το φίλτρο εξόδου:	34
4.5 χαρακτηριστικά μετατροπέων (inverters).....	37
Ο αλγόριθμος MPPT.....	40
4.1 Η μέθοδος Perturb and observe (P&O).....	41
5.2 Η μέθοδος Incremental conductance (INC).....	42

5.3 Η μέθοδος Constant Voltage.....	43
5. Τα στοιχεία αποθήκευσης ενέργειας.....	44
6.1 Γενικά:.....	44
6.2 Ο κύκλος φορτίσεων/εκφορτίσεων:	44
6.3 Τα είδη των συσσωρευτών:	45
Μέρος Β'	47
6. Εξομοίωση Φ/Β.....	47
7.1 Γενικά για τον εξομοιωτή Φ/Β συστοιχίας.....	47
7.2 Δομή εξομοιωτή Φ/Β συστοιχίας.....	49
7.2.1 Το τροφοδοτικό:.....	52
7.2.2 Ο ψηφιακός ελεγκτής:.....	53
7. Περιγραφή ενός δοκιμαστικού μοντέλου εξομοιωτή φωτοβολταϊκής συστοιχίας: ..	54
8.1 Γενικά :.....	54
8.2 Προσεγγίζοντας την καμπύλη I-V ενός panel.....	55
8.3 Η μαθηματική προσέγγιση.....	56
8. Η κατασκευή του ηλεκτρονικού κυκλώματος:.....	57
9.1 Ο ελεγκτής TMS320F2808	59
9.2 Το σήμα ελέγχου	59
9.3 Βαθμίδα ισχύος – εξόδου.....	60
9.4 Το φίλτρο εξόδου	60
9.5 Η δοκιμή του συστήματος:.....	61
Μέρος Γ (πειραματικό μέρος).....	64
9. Κατασκευή του μοντέλου της μιας διόδου.....	64
10.1 Περιγραφή :.....	65
10.2 Οι μετρήσεις:.....	66
10.3 Γενικές παρατηρήσεις / συμπεράσματα.....	72
10.4 Επαλήθευση πειραματικών αποτελεσμάτων	72

10. Τροποποιημένο σχηματικό διάγραμμα κυκλώματος ισχύος που προσεγγίζει την λειτουργία Φ/B panel του εμπορίου με ισχύ 230W	76
11.1 Λίστα υλικών:	76
11.2 σχηματικό διάγραμμα εξομοιωτή 230W	77
12. Αναφορές:	78
Παράρτημα :	79
Φύλλα πληροφοριών κατασκευαστών	79
DATASHEETS	79

Ευρετήριο τύπων:

$$n = \frac{P_{\max}}{Et * A} \cdot 100\% \quad (1.2.1)$$

$$I = I_{pv} - I_d - I(R_p) \quad (2.1.1)$$

$$I = I_{PV} - I_{D1} * \left(e^{\frac{V+I*R_s}{a_1 * V_{T1}}} - 1 \right) - \frac{V + I * R_s}{R_p} \quad (2.1.2)$$

$$I = I_{PV} - I_D * \left(e^{\frac{V+I*R_s}{a_1 * V_{T1}}} - 1 \right) \quad (2.1.3)$$

$$I = I_{PV} - I_{D1} * \left(e^{\frac{V+I*R_s}{a_1 * V_{T1}}} - 1 \right) - I_{D2} * \left(e^{\frac{V+I*R_s}{a_2 * V_{T2}}} - 1 \right) - \left(\frac{V + I * R_s}{R_p} \right) \quad (2.2.1)$$

$$FF = \frac{P_{mp}}{V_{oc} * I_{sc}} = \frac{V_{mp} * I_{mp}}{V_{oc} * I_{oc}} \quad (3.1.1)$$

$$FF = \frac{u_{oc} - \ln(u_{oc} + 0.72)}{V_{oc} + 1} \quad (3.1.2)$$

$$u_{oc} = \frac{V_{oc}}{\Lambda} \quad (3.1.3)$$

$$\Lambda = \frac{q}{n * k * T} \quad (3.1.4)$$

$$duty\ cycle (\%) = \frac{T_{on}}{Time\ Period} * 100 \quad (4.2.1)$$

$$V_L = V_I - V_G \quad (4.4.1)$$

$$V_L = L \frac{\Delta I_L}{\delta \Gamma_s} \Rightarrow V_L = L \frac{\Delta I_L}{\delta} f_s \quad (4.4.2)$$

$$\left| \frac{Z_c * f_s}{Z_c * f_s + Z_T * f_s} \right| < \frac{p * I_{NOM}}{|\Delta I_L * f_s|} \quad (4.4.3)$$

$$Z_c = \frac{1}{2 * \pi * f_h * C_f} \quad (4.4.4)$$

$$I = \frac{I_{mpp}}{V_{mpp} - V_{oc}} * V - V_{oc} \frac{I_{mpp}}{V_{mpp} - V_{oc}} \quad (8.3.1)$$

$$I = \frac{I_{mpp} - I_{sc}}{V_{mpp}} * V + I_{sc} \quad (8.3.2)$$

$$I_{pv} = np * I_{sc} - np * I_o * \left(e^{\frac{V_{pv} + I_{pv} - R_s}{k * T * ns}} - 1 \right) \quad (10.4.1)$$

$$I_{pv} = \frac{I_o * np * q * R_s + I_{scr} * np * q * R_s - A * k * ns * Trr * \text{Pr oductLog} \left[e^{\frac{I_o * np * q * R_s + I_{scr} * np * q * R_s - a * I_{pv}}{A * k * ns * Trr}} + \frac{a * I_{pv}}{A * k * ns * Trr} \right] * I_o * np * q * R_s}{q * R_s} \quad (10.4.2)$$

Ευρετήριο εικόνων – διαγραμμάτων:

Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο	Σχ. 1.1.1
Δομή διασυνδεδεμένου Φ/Β συστήματος	Σχ. 1.2.1
Επίδραση θερμοκρασίας στην καμπύλη I-V	Σχ. 1.4.1
Ηλεκτρικό ισοδύναμο μοντέλου μιας διόδου	Σχ. 2.1.1
Γραφική απεικόνιση I-V και P-V του μοντέλου μιας διόδου	Σχ. 2.1.2
Ηλεκτρικό διάγραμμα του μοντέλου των δύο διόδων	Σχ. 2.2.1
Γραφική απεικόνιση καμπύλης I-V για υπολογισμό Fill Factor	Σχ. 3.1.1
Γραφική αναπαράσταση επίδρασης R_s και R_{sh} στην καμπύλη I-V	Σχ. 3.2.1
Ηλεκτρικό διάγραμμα πλήρους γέφυρας με διακόπτες	Σχ. 4.1.1
Πλήρης γέφυρα με IGBT	Σχ. 4.1.2
Πλήρης γέφυρα με transistors και φίλτρο εξόδου	Σχ. 4.1.3
Σήμα εισόδου διαμορφωμένο κατά PWM και σήμα εξόδου μετά το φίλτρο	Σχ. 4.1.4
Σήμα διαμορφωμένο κατά PWM με duty-cycle 50%	Σχ. 4.2.1
Σήμα διαμορφωμένο κατά PWM με duty-cycle 12.5%	Σχ. 4.2.2
Σήμα διαμορφωμένο κατά PWM με duty-cycle 75%	Σχ. 4.2.3
Φίλτρο LC	Σχ. 4.4.1
Ο αλγόριθμος P&O	Σχ. 5.1.1
Ο αλγόριθμος INC	Σχ. 5.2.1
Block διάγραμμα του εξομοιωτή	Σχ. 7.2.1
Διάγραμμα συστήματος εξομοιωτή	Σχ. 7.2.2

Απλοποιημένο block διάγραμμα αναλογικού ελέγχου.	Σχ. 7.2.3
Καμπύλη I-V	Σχ. 8.2.1
Γραφική απεικόνιση πειραματικών μετρήσεων και σύγκριση με τις 2 γραμμικές εξισώσεις	Σχ. 9.5.1
Ηλεκτρικό κύκλωμα πειραματικού μοντέλου	Σχ. 10.1
Γραφική παράσταση I-V για $I_{sc}=200mA$ & $I_{sc}=150mA$	Σχ. 10.2.1
Γραφική παράσταση P-V για $I_{sc}=200mA$ & $I_{sc}=150mA$	Σχ. 10.2.2
Γραφική παράσταση I-V για $I_{sc}=200mA$ & $I_{sc}=150mA$	Σχ. 10.2.3
Γραφική παράσταση P-V για $I_{sc}=200mA$ & $I_{sc}=150mA$	Σχ. 10.2.4
Γραφική απεικόνιση της συνάρτησης [10.4.2] στο mathematica	Σχ. 10.4.1
Απεικόνιση σημείων πειράματος 1	Σχ. 10.4.2
Σύγκριση γραφικών [10.4.1] και [10.4.2]	Σχ. 10.4.3
σχηματικό διάγραμμα εξομοιωτή 230W	Σχ. 11.2

Μέρος Α'

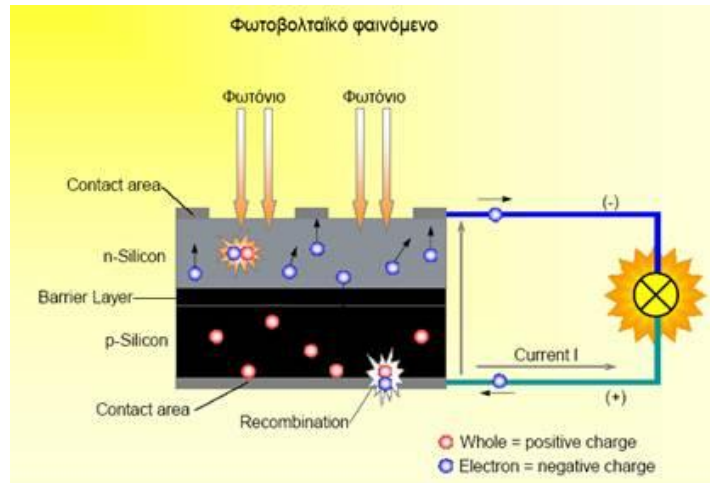
1. Τα φωτοβολταϊκά συστήματα

1.1 Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο:

Ο Ήλιος αποτελεί μία τεράστια και ανεξάντλητη πηγή ενέργειας που η εκμετάλλευση μόνο του 0,05% αυτής θα ήταν αρκετή να καλύψει κάθε ενεργειακή ανάγκη της ανθρωπότητας. Η εκμετάλλευση της ηλιακής ακτινοβολίας και η μετατροπή του σε ηλεκτρικό ρεύμα είναι σήμερα δυνατή μέσω του φωτοβολταϊκού φαινομένου.

Το ηλιακό φως αποτελείται από φωτόνια, τα οποία περιέχουν ποικίλα ποσά ενέργειας που αντιστοιχούν σε διαφορετικά μήκη κύματος. Όταν αυτά προσπίπτουν σε μία επιφάνεια, ένα μέρος την διαπερνά, ένα μέρος ανακλάται και ένα μέρος απορροφάται από την επιφάνεια αυτή. Όταν το φωτόνιο απορροφηθεί από μια επιφάνεια με υψηλή φωτοαγωγιμότητα (ημιαγωγός), η ενέργεια του μεταφέρεται στους φορείς του υλικού. Με την βοήθεια του ηλεκτρικού πεδίου που δημιουργείται στις επαφές των διαφορετικών υλικών, το ηλεκτρόνιο αποδρά από την κανονική του θέση και τίθεται σε κίνηση, αφήνοντας πίσω του μία οπή.

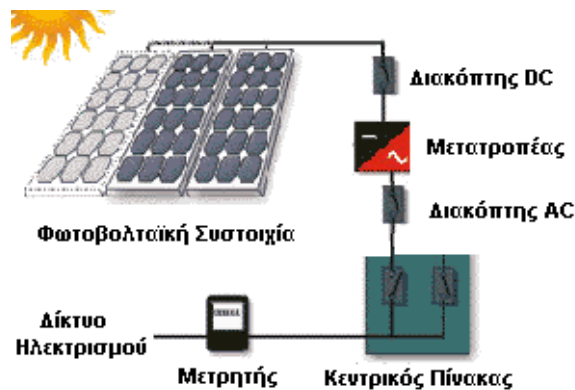
Αυτός ο ημιαγωγός ονομάζεται πλέον φωτοβολταϊκό στοιχείο. Εάν συνδέσουμε στις πλευρές του δύο ακροδέκτες και κλείσουμε το κύκλωμα, θα έχουμε την διέλευση ηλεκτρικού ρεύματος.



Σχ 1.1.1 Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο

1.2 Γενικά για το Φ/Β σύστημα

Κάθε μέρος του συνόλου που απαρτίζει ένα ολοκληρωμένο Φ/Β σύστημα έχει τον δικό του σημαντικό ρόλο. Το Φ/Β πάνελ είναι ίσως τα κυριότερο στοιχείο του συνόλου διότι στην λειτουργία του στηρίζεται όλη η φιλοσοφία ενός συστήματος το οποίο μετατρέπει την ηλιακή ακτινοβολία σε ηλεκτρική ενέργεια.



Σχ. 1.2.1 Δομή διασυνδεδεμένου Φ/Β συστήματος

Ένα Φ/Β πάνελ απαρτίζεται από κυψέλες οι οποίες είναι κατασκευασμένες από ημιαγωγά υλικά και παρουσιάζουν παρόμοια συμπεριφορά με τους γνωστούς ημιαγωγούς πυριτίου με επιπρόσθετο ένα επιπλέον χαρακτηριστικό. Έχουν την δυνατότητα να μετατρέπουν την προσπίπτουσα, στην επιφάνια τους, ηλιακή ακτινοβολία σε ροή ηλεκτρονίων, δηλαδή σε ηλεκτρική ενέργεια όπως περιγράφηκε στην προηγούμενη ενότητα.

Το παραγόμενο ρεύμα είναι συνεχές και άμεσα συσχετιζόμενο ποσοτικά με την ισχύ της ηλιακής ακτινοβολίας, την θερμοκρασία της κυψέλης αλλά και το φορτίο. Η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία στην επιφάνεια της γης σε πλήρως ευνοϊκές συνθήκες ξεπερνά τα 1000W/m² οπότε η λαμβανόμενη ισχύς ανά μονάδα επιφανείας σε μια φωτοβολταϊκή συστοιχία αναμένετε να είναι μικρότερη. Καθοριστικός παράγοντας για την μέγιστη απολαβή της ηλιακής ακτινοβολίας παίζει ο προσανατολισμός των panels. Μια λανθασμένη μελέτη πριν από την εγκατάσταση μπορεί να δώσει ένα σύστημα με πολύ χαμηλό βαθμό απόδοσης.

Εκτός όμως από το προσανατολισμό είναι φυσικό τον βαθμό απόδοσης να τον καθορίζουν τα υλικά και η μέθοδος κατασκευής του panel. Το βαθμό απόδοσης τον μετράμε σε ποσοστό επί τις εκατό (%) και υπολογίζετε βάση του τύπου:

$$\eta = \frac{P_{\max}}{E_t \cdot A} \cdot 100\% \quad (1.2.1) \quad \text{όπου:}$$

P_{\max} η μέγιστη ισχύς εξόδου

E_t η ολική προσπίπτουσα πυκνότητα ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας

A το εμβαδό επιφάνειας του πλαισίου ή τις κυψέλης

Με την σημερινή τεχνολογία κατασκευάζονται κυψέλες με βαθμό απόδοσης από 4% - 20%. Καθώς όμως η επιστημονική έρευνα στον τομέα προχωρά τα δεδομένα αυτά αλλάζουν με αυξανόμενους ρυθμούς.

1.2 Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά Φ/B πλαισίου

Τάση ανοικτού κυκλώματος , των εν σειρά συνδεδεμένων κυψελών. Η τιμή αυτή μειώνετε όσο η θερμοκρασία λειτουργίας του πλαισίου αυξάνετε. Έτσι δίνεται για την χαμηλότερη αναμενόμενη θερμοκρασία λειτουργίας του πλαισίου

Μέγιστη ένταση, είναι το ρεύμα βραχυκυκλώσεως του πλαισίου. Για την διαστασιολόγηση όμως των αγωγών και των λοιπών συνεργαζόμενων υλικών υπολογίζουμε την μέγιστη ένταση πολλαπλασιαζόμενη με τον συντελεστή 1.25 ώστε να καλύψουμε ειδικές συνθήκες όπου η ηλιακή ακτινοβολία ξεπερνά τα $1000\text{W}/\text{m}^2$

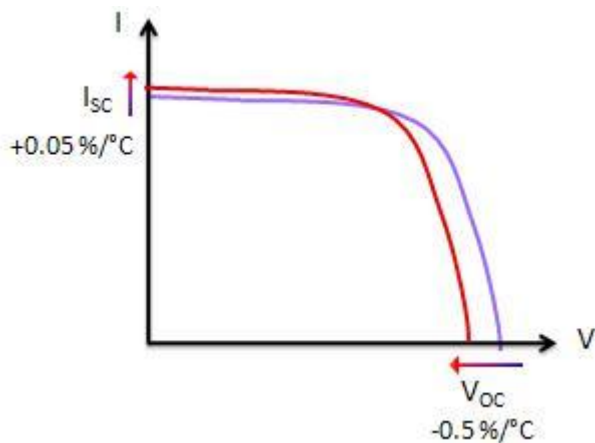
Ονομαστική ισχύς , ή ισχύς αιχμής ενός πλαισίου είναι η μέγιστη παραγόμενη ισχύς κάτω από πρότυπες συνθήκες ελέγχου. Δηλαδή σε θερμοκρασία λειτουργίας 25°C και πυκνότητα ηλιακής ακτινοβολίας $1000\text{W}/\text{m}^2$ φάσματος AM1.5 . Σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας τα πλαίσια αποδίδουν συνήθως λιγότερη ισχύ από την ονομαστική τους.

1.3 Επιπλέον λειτουργικά χαρακτηριστικά

Η Θερμοκρασία λειτουργίας ενός πλαισίου χωρίς ελεύθερη ροή αέρα ώστε να αποβάλετε η θερμότητα στο περιβάλλον μπορεί να φτάσει και τους 90°C . Πρέπει λοιπόν να ληφθεί και αυτό υπ' όψιν κατά την διασύνδεση του.

Συντελεστής μεταβολής της τάσης εξόδου σε συνάρτηση της θερμοκρασίας του πλαισίου. Μετριέται σε mV/ °C και λαμβάνει αρνητικές τιμές.

Συντελεστής μεταβολής του ρεύματος σε συνάρτηση της θερμοκρασίας του πλαισίου. Μετριέται σε mA / cm²/ °C και λαμβάνει θετικές τιμές.



Σχ. 1.4.1 Επίδραση θερμοκρασίας στην καμπύλη I-V

Απόδοση του πλαισίου σε ιδανικές συνθήκες . Είναι ποσοστό επί τις εκατό (%)

Απόκλιση των τιμών του κατασκευαστή από τις πραγματικές . Δίνεται σε ποσοστό ±% αν και τα τελευταία χρόνια οι περισσότεροι κατασκευαστές δίνουν μόνο θετικά ποσοστά απόκλισης.

1.4 Φυσικά χαρακτηριστικά:

Βάρος , αφορά το φυσικό βάρος της κυψέλης όπου μετριέται σε gr/cm^2 ή αν περιγράψουμε το βάρος ολόκληρου του πλαισίου τότε μετριέται σαν συνολική κατασκευή σε Kgr.

Διαστάσεις του πλαισίου σε cm

Μηχανικές αντοχές από δυνάμεις που μπορούν να προκαλέσουν παραμορφώσεις ή θραύση. Αναγράφονται σε N/cm^2

1.5 Φύλλα χαρακτηριστικών DATASHEETS

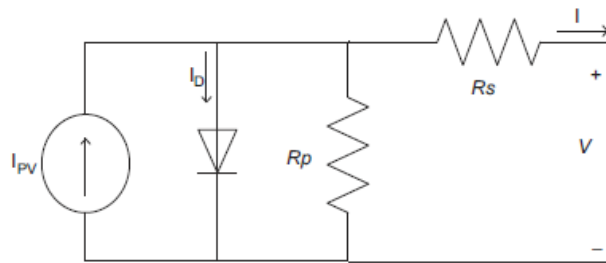
Στο παράρτημα της εργασίας δίδονται κάποια φύλλα χαρακτηριστικών, πλαισίων όπου μπορούμε να λάβουμε όλες τις πληροφορίες σχετικά με τα ηλεκτρικά , μηχανικά και φυσικά χαρακτηριστικά του υλικού. Η επιλογή τους έγινε τυχαία με σκοπό να παρουσιάσουμε την μορφή και τις παρεχόμενες πληροφορίες των κατασκευαστών.

2. Μοντέλα Φ/Β κυψελών

Για την δημιουργία ενός συστήματος εξομοίωσης Φ/Β συστοιχίας είναι απαραίτητη η μοντελοποίηση του πραγματικού συστήματος. Η μοντελοποίηση ενός συστήματος είναι η διαδικασία κατά την οποία λαμβάνονται υπόψη όλοι ή μερικοί παράμετροι του φυσικού συστήματος και ο τρόπος που επηρεάζουν την έξοδό του, έτσι δημιουργούμε ένα μαθηματικό μοντέλο , δηλαδή μία η περισσότερες συναρτήσεις που προσεγγίζουν κατά πολύ το πραγματικό σύστημα. Όσο περισσότεροι παράγοντες ληφθούν υπ' όψιν, τόσο καλύτερη είναι και η προσέγγιση του μοντέλου μας.

2.1 Το μοντέλο της μίας διόδου

Για τα Φ/Β συστήματα υπάρχουν διάφορα μοντέλα που δίνουν μια αρκετά καλή προσέγγιση. Το απλούστερο είναι το μοντέλο της μίας διόδου. Στο μοντέλο αυτό, το ιδανικό Φ/Β κύτταρο είναι ισοδύναμο μια δίοδο συνδεδεμένη παράλληλα με μία πηγή ρεύματος. Επίσης διαθέτει παράλληλη αντίσταση και εν σειρά. Το ηλεκτρικό ισοδύναμο του μοντέλου είναι το ακόλουθο:

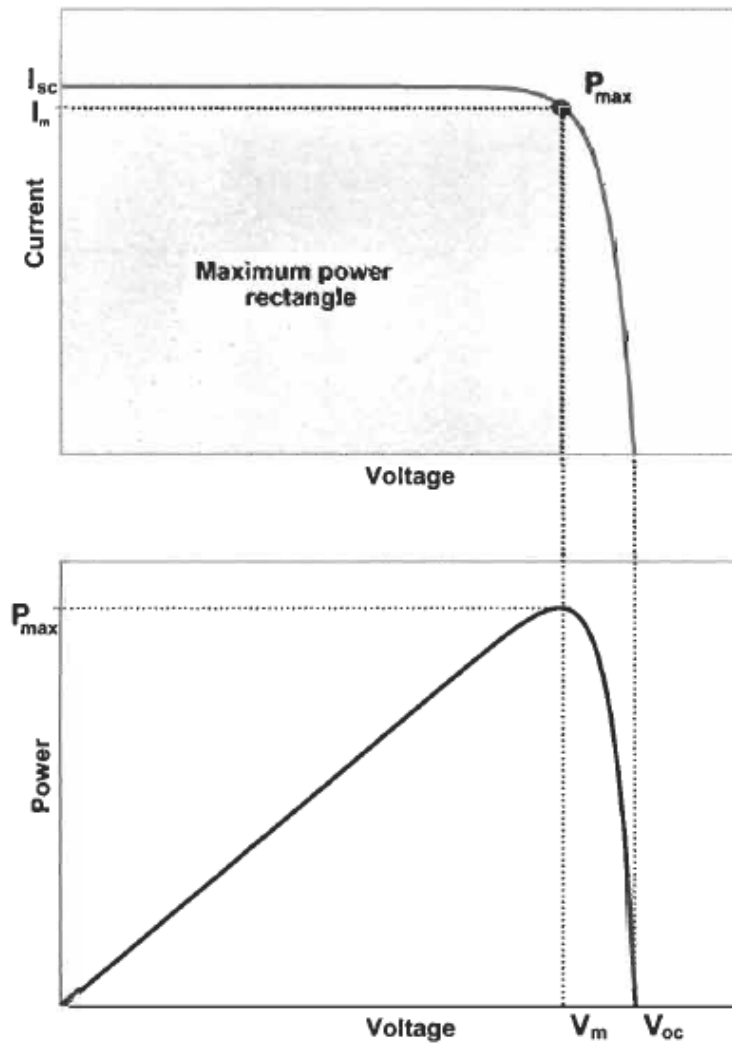


Σχ. 2.1.1 Ηλεκτρικό ισοδύναμο μοντέλου μιας διόδου

Παρατηρούμε ότι το ρεύμα που παράγεται από το Φ/Β κύτταρο ισούται με το ρεύμα που παράγεται από την πηγή σταθερού ρεύματος μείων το ρεύμα κόρου της διόδου μείων το ρεύμα που διαρρέει την αντίσταση R_p . Δηλαδή

$$I = I_{pv} - I_d - I(R_p) \quad (2.1.1)$$

Η καμπύλη I-V μιας κυψέλης για σταθερή ηλιακή ακτινοβολία έχει την μορφή του ακόλουθου σχήματος. Παρόμοια καμπύλη δίνει και το ηλεκτρικό ανάλογο που παρουσιάστηκε προηγουμένως. Άρα μπορούμε να το χρησιμοποιήσουμε για την δημιουργία του μαθηματικού μοντέλου.



Σχ. 2.1.2 Γραφική απεικόνιση I-V και P-V του μοντέλου μιας διόδου

Η συμπεριφορά του ηλεκτρικού ανάλογου δίδετε από την εξίσωση :

$$I = I_{PV} - I_{D1} * \left(e^{\frac{V+I*R_s}{a_1*V_{T1}}} - 1 \right) - \frac{V + I * R_s}{R_p} \quad (2.1.2)$$

Όπου:

I_{PV} το ισοδύναμο φωτόρευμα

I_D το αντίστροφο ρεύμα κόρου της διόδου της κυψέλης

I το συνολικό ρεύμα στην έξοδο της κυψέλης

R_p η ισοδύναμη παράλληλη αντίσταση της κυψέλης

R_s η ισοδύναμη σε σειρά αντίσταση της κυψέλης

V , η τάση στην έξοδο του πλαισίου

V_t η σταθερά της θερμικής τάσης της διόδου.

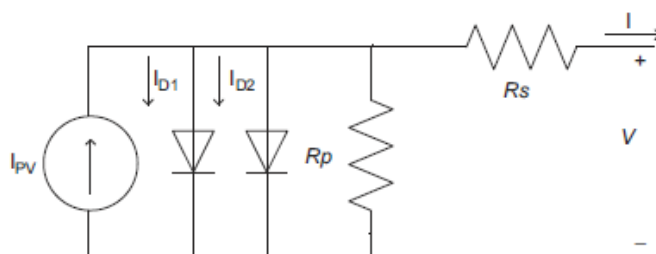
Στην περίπτωση που η παράλληλη αντίσταση θεωρηθεί ότι έχει άπειρη αντίσταση η εξίσωση παίρνει την μορφή :

$$I = I_{PV} - I_D * \left(e^{\frac{V+I*R_s}{a_1*V_{T1}}} - 1 \right) \quad (2.1.3)$$

2.2 Το μοντέλο των δύο διόδων:

Μια διαφορετική λίγο διαφορετική προσέγγισή δίνει το μοντέλο των δύο διόδων. Μας παρέχει μια πολύ καλή προσέγγιση του πραγματικού συστήματος ώστε να μπορέσουμε να πραγματοποιήσουμε την μελέτη των Φ/Β κυψελών.

Το ηλεκτρικό διάγραμμα του μοντέλου είναι το ακόλουθο:



Σχ. 2.2.1 Ηλεκτρικό διάγραμμα του μοντέλου των δύο διόδων

με μαθηματική εξίσωση την ακόλουθη.

$$I = I_{PV} - I_{D1} * \left(e^{\frac{V+I*R_s}{a_1*V_{T1}}} - 1 \right) - I_{D2} * \left(e^{\frac{V+I*R_s}{a_2*V_{T2}}} - 1 \right) - \left(\frac{V + I * R_s}{R_p} \right) \quad (2.2.1)$$

Όπου:

I_{PV} το ισοδύναμο φωτόρευμα

I_{D1} το αντίστροφο ρεύμα κόρου της διόδου D1

I_{D2} το αντίστροφο ρεύμα κόρου της διόδου D2

I το συνολικό ρεύμα στην έξοδο της κυψέλης

R_p η ισοδύναμη παράλληλη αντίσταση της κυψέλης

R_S η ισοδύναμη σε σειρά αντίσταση της κυψέλης

V , η τάση στην έξοδο του πλαισίου

α_1 και α_2 είναι σταθερές τις ιδανικής διόδου

V_{T1} και V_{T2} η θερμική τάση των διόδων D1 και D2 αντίστοιχα.

Η μορφή της καμπύλης τάσης-ρεύματος δεν φαίνεται να έχει διαφορά με το μοντέλο της μιας διόδου. Στην πραγματικότητα όμως αν εισαχθούν τα κατάλληλα δεδομένα και συντελεστές δίνει μια πολύ καλύτερη προσέγγιση του πραγματικού συστήματος.

3. Η καμπύλη I-V

3.1 Ο συντελεστής πληρώσεως (fill factor / FF)

Ο συντελεστής πληρώσεως είναι ένας παράγοντας ο οποίος επηρεάζει την μορφή της καμπύλης I-V του κυττάρου. Μας δείχνει πόσο «τετράγωνη» είναι η χαρακτηριστική I-V και συνήθως στην πράξη λαμβάνει τιμές από 0,7 – 0,85. Είναι ο λόγος της μέγιστης ισχύος προς το γινόμενο της τάσης ανοιχτού κυκλώματος επί το ρεύμα βραχυκυκλώσεως.

$$FF = \frac{P_{mp}}{V_{oc} * I_{sc}} = \frac{V_{mp} * I_{mp}}{V_{oc} * I_{oc}} \quad (3.1.1)$$

Μία άλλη μορφή που συναντάμε τον συντελεστή πληρώσεως είναι :

$$FF = \frac{u_{oc} - \ln(u_{oc} + 0.72)}{V_{oc} + 1} \quad (3.1.2)$$

$$\text{Όπου } u_{oc} = \frac{V_{oc}}{\Lambda} \quad (3.1.3)$$

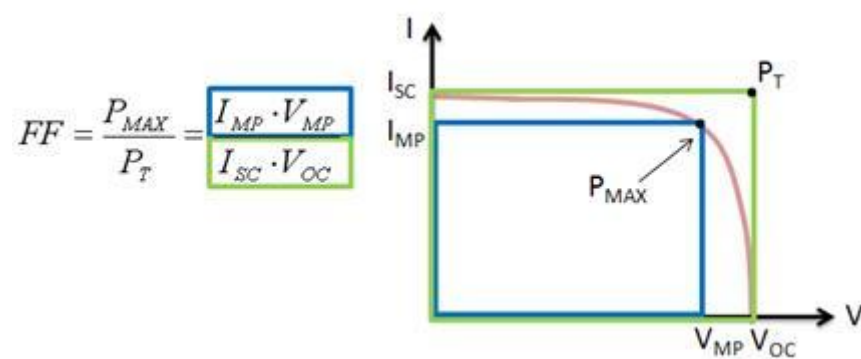
$$\text{Και } \Lambda = \frac{q}{n * k * T} \quad (3.1.4)$$

Όπου:

q = φορτίο ηλεκτρονίου

k = η σταθερά του boltzman ($k=1.38 \cdot 10^{-23}$ J/K)

T = η απόλυτη θερμοκρασία



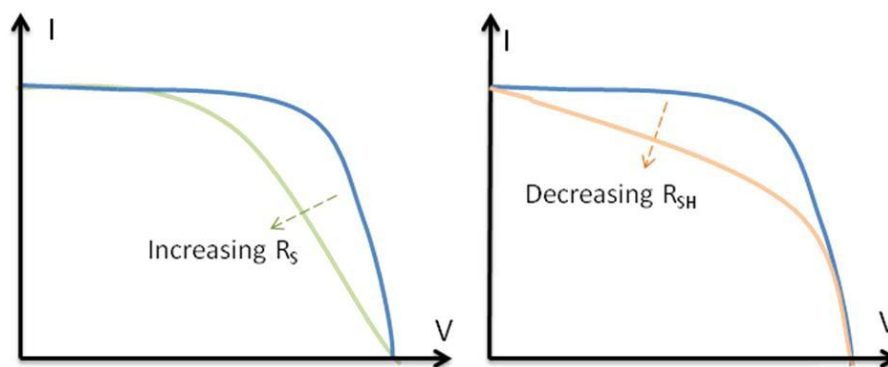
Σχ. 3.1.1 Γραφική απεικόνιση καμπύλης I-V για υπολογισμό Fill Factor

3.2 Οι εσωτερική παράλληλη (R_{sh}) και εν σειρά αντίσταση (R_s)

Κατά την λειτουργία τους, η απόδοση των Φ/Β κυψελών μειώνεται λόγω της ύπαρξης των εσωτερικών αντιστάσεων, οι οποίες φαίνονται και στο μοντέλο της μίας και των δύο διόδων που αναφερθήκαμε προηγουμένως.

Στο ιδανικό μοντέλο η παράλληλη αντίσταση θα λάμβανε τιμή που τείνει στο άπειρο ενώ η εν σειρά αντίστασης θα λάμβανε τιμή ίση με το μηδέν με αποτέλεσμα να μην υπάρχει επιπλέον πτώση τάση και κατ' επέκταση απώλεια ισχύος στο φορτίο.

Οι μεταβολή των δύο αντιστάσεων έχουν επιπτώσεις στον συντελεστή Fill Factor και φυσικά στην μέγιστη αποδιδόμενη ισχύ. Η επιπτώσεις φαίνονται στο ακόλουθο διάγραμμα.



Σχ. 3.2.1 Γραφική αναπαράσταση επίδρασης R_s και R_{sh} στην καμπύλη I-V

4. Ο μετατροπέας (Inverter)

Ο φωτοβολταϊκός μετατροπέας είναι η συσκευή η οποία μετατρέπει το συνεχές (DC) ρεύμα που παράγεται από τις Φ/Β συστοιχίες σε εναλλασσόμενο ημιτονικό ρεύμα, κατάλληλο για την ηλεκτροδότηση των οικιακών συσκευών. Σε πολλές περιπτώσεις ο ίδιος ο μετατροπέας παίζει και τον ρόλο του ρυθμιστή φόρτισης των μπαταριών του Φ/Β συστήματος.

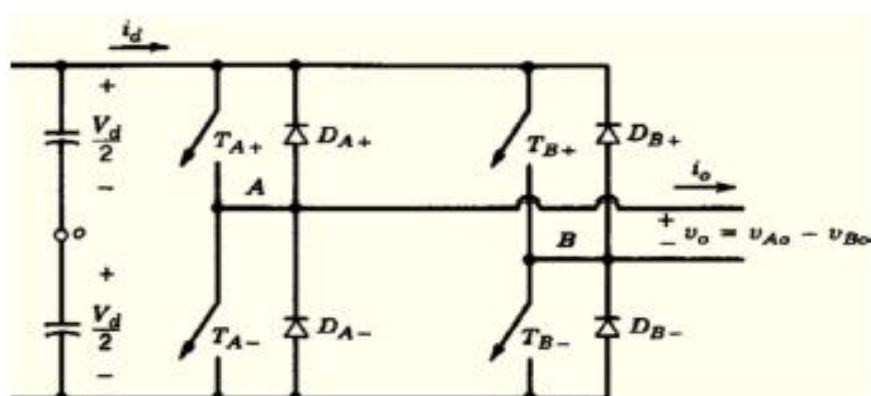
Σε τοπολογίες διασυνδεδεμένου Φ/Β συστήματος, ο μετατροπέας φροντίζει ώστε τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά της εξόδου του να ταιριάζουν απόλυτα με αυτά του δικτύου. Επίσης διαθέτουν κυκλώματα διακοπής και επαναφοράς της λειτουργίας σε καταστάσεις μη ευσταθούς λειτουργίας του δικτύου βάση προδιαγραφών που ορίζονται από το νόμο.

Για την αξιοποίηση και εξασφάλιση του μέγιστου βαθμού απόδοσης από το σύστημα ο μετατροπέας εφαρμόζει την μέθοδο εύρεσης του μέγιστου σημείου ισχύος λειτουργίας MPPT (maximum power point tracking). Ο αλγόριθμος διαφέρει ως προς τον τρόπο που εφαρμόζετε, αλλά ο στόχος είναι κοινός.

Ειδικό σύστημα προστασίας ενσωματώνεται στον μετατροπέα και φροντίζει την διακοπή της λειτουργίας του όταν αυτό κριθεί απαραίτητο. Συνθήκες όπου αναγνωριστούν ανωμαλίες στην λειτουργία του δικτύου ή των πλαισίων δηλαδή.

4.1 Η δομή του μονοφασικού μετατροπέα:

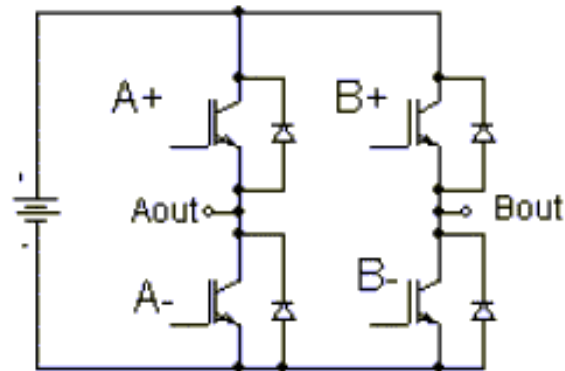
Ο μετατροπέας τροφοδοτείται από μια πηγή συνεχούς τάσης (δηλαδή από την τάση που παράγουν τα Φ/Β στοιχεία) ή οποία σε ιδανικές συνθήκες έχει μηδενική εσωτερική αντίσταση. Η βασική διάταξη του είναι μια πλήρης γέφυρα ελεγχόμενη από διακόπτες.



Σχ. 4.1.1 Ηλεκτρικό διάγραμμα πλήρους γέφυρας με διακόπτες

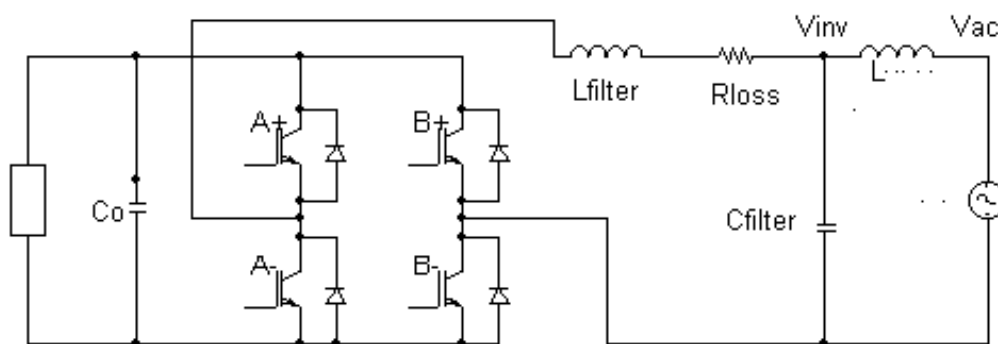
Η λειτουργία έχει ως εξής: όταν οι διακόπτες T_{A+} , T_{B-} είναι κλειστοί και αντίστοιχα οι T_{A-} και T_{B+} ανοικτοί η τάση εξόδου είναι ίση με V_d και το ρεύμα έχει φορά από το σημείο A προς το B . Όταν οι καταστάσεις των διακοπών αντιστραφούν τότε έχουμε και αλλαγή πολικότητας.

Έτσι εάν στο κύκλωμα αντί για μηχανικούς διακόπτες χρησιμοποιούσαμε ενεργά ηλεκτρονικά στοιχεία όπως πχ transistor ή mosfet



Σχ. 4.1.2 Πληρης γέφυρα με IGBT

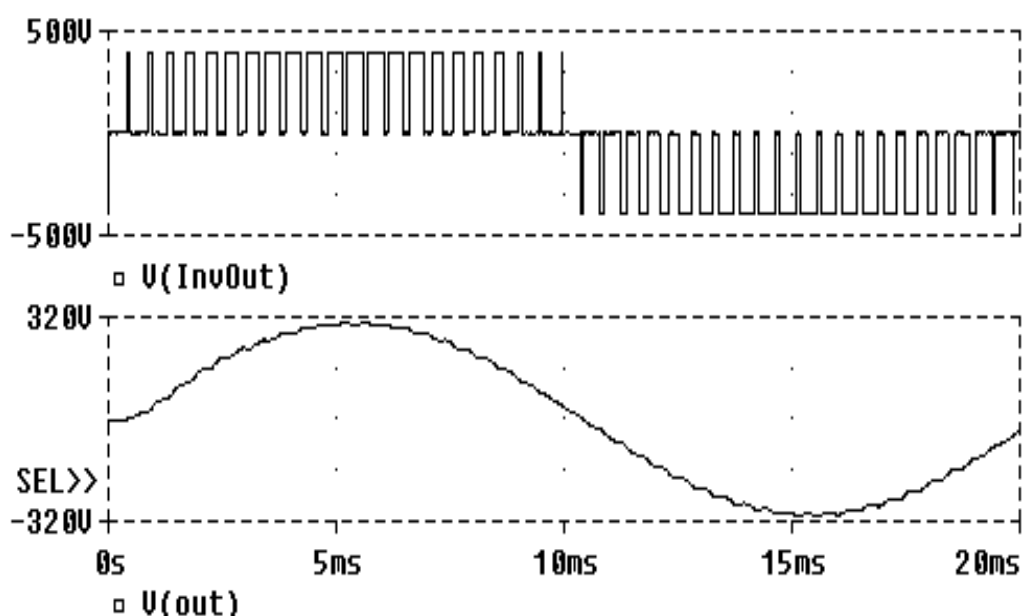
Και οδηγούσαμε την είσοδο τους (βάση ή πύλη αντίστοιχα) με κατάλληλο εναλλασσόμενο σήμα παραγόμενο από έναν ταλαντωτή θα είχαμε πετυχαίναμε μετατροπή του συνεχούς σήματος εισόδου σε εναλλασσόμενο. Η μορφή του σήματος από το παραπάνω κύκλωμα είναι τετραγωνικός εναλλασσόμενος παλμός. Περνώντας το από ένα φίλτρο η έξοδος μπορεί να μετατραπεί σε ένα τέλειο ημιτονικό σήμα. Έτσι το κύκλωμα θα έπαιρνε την μορφή :



Σχ. 4.1.3 Πλήρης γέφυρα με transistors και φίλτρο εξόδου

Για την οδήγηση των στοιχείων ισχύος στην πράξη για λόγους μείωσης του κόστους αλλά και του όγκου δεν χρησιμοποιείται ημιτονικό σήμα ελέγχου αλλά παλμοί διαμορφωμένοι κατά πλάτος με τη μεθοδο PWM. Παλμοί πολλαπλάσιας συχνότητας της κεντρικής συχνότητας του σήματος εξόδου οδηγούν τα τρανζίστορ και συνήθως φτάνουν τα 10-20KHz. Με την χρήση τέτοιων συχνοτήτων η χρήση πολύ μεγάλων αυτεπαγωγών και χωριτηκοτήτων δεν είναι απαραίτητη στην κατασκευή του φίλτρου εξόδου.

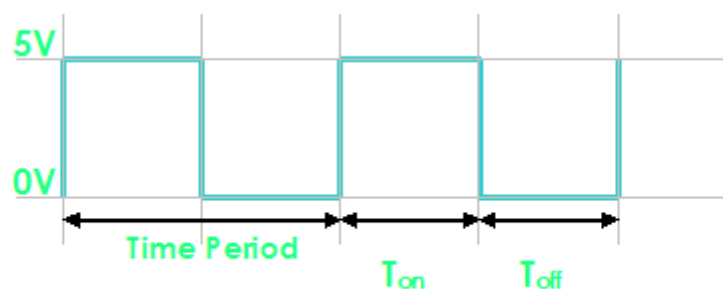
Τα παραγόμενο σήμα μοιάζει με το ακόλουθο και κατόπιν παρουσιάζετε το καθαρό ημιτονικό σήμα ύστερα από την επάλληψη των αρμονικών συχνοτήτων μέσα από την διέλευση από το βαθυπερατό φίλτρο εξόδου.



Σχ. 4.1.4 Σήμα εισόδου διαμορφωμένο κατά PWM και σήμα εξόδου μετά το φίλτρο

4.2 Η διαμόρφωση PWM

Η μέθοδος διαμόρφωσης εύρους παλμού (pulse width modulation – PWM) είναι μια πολύ διαδεδομένη μέθοδος ελέγχου σε συστήματα ισχύος. Η αρχή της μεθόδου βασίζεται στην διακοπτική λειτουργία των στοιχείων ισχύος. Το παραγόμενο σήμα που οδηγεί τα στοιχεία ελέγχου τα θέτει ή όχι σε αγωγιμότητα για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Όσο μεγαλύτερος είναι ο χρόνος που το στοιχείο παραμένει σε αγωγιμότητα τόσο μεγαλύτερη είναι η μέση ισχύς που παρέχεται στο φορτίο. Συνήθως το παραγόμενο σήμα ελέγχου προέρχεται από κάποιο ψηφιακό επεξεργαστή ή κάποιο ολοκληρωμένο ψηφιακό κύκλωμα κατασκευασμένο για την συγκεκριμένη εφαρμογή. Το πλάτος του σήματος ελέγχου λαμβάνει 2 τιμές, μια για την κατάσταση αγωγιμότητας (ON) και μία για την κατάσταση διακοπής (OFF). Η απόλυτη τιμή του καθορίζεται από της ανάγκες της εφαρμογής.



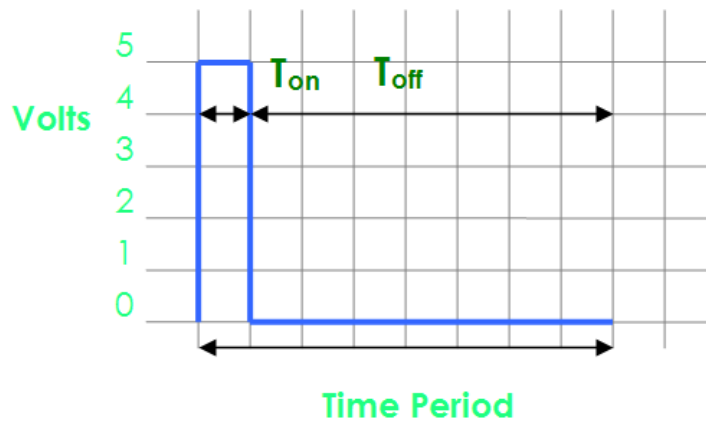
Copyright 2007-2009 eXtremeElectronics.co.in

Σχ. 4.2.1 Σήμα διαμορφωμένο κατά PWM με duty-cycle 50%

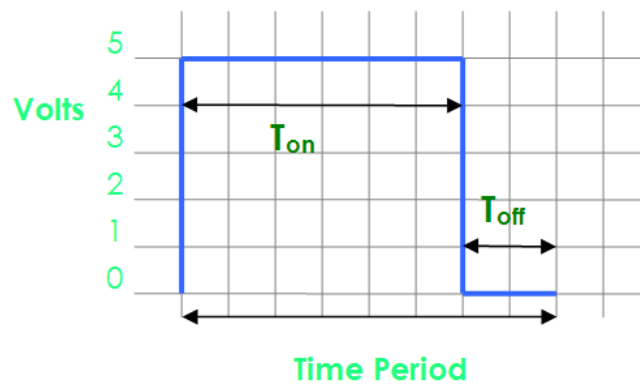
Το εύρος παλμού (**duty-cycle**) ορίζεται από τον τύπο

$$duty\ cycle (\%) = \frac{T_{on}}{TimePeriod} * 100 \quad (4.2.1)$$

Ακολουθούν μερικά παραδείγματα διαμόρφωσης εύρους παλμού:



Σχ.4.2.2 Σήμα διαμορφωμένο κατά PWM με duty-cycle 12.5%



Σχ. 4.2.3 Σήμα διαμορφωμένο κατά PWM με duty-cycle 75%

4.3 Τεχνικές ελέγχου αντιστροφέα:

Αναφορικά μερικές από τις τεχνικές ελέγχου των αντιστροφέων αλλά και γενικά των εφαρμογών ισχύος είναι οι ακόλουθες:

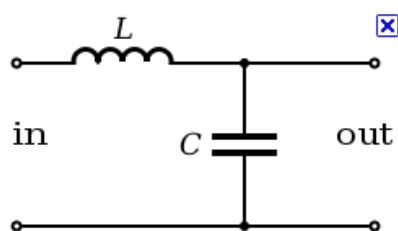
- Ημιτονοειδής τεχνική PWM με διπολική τάση εξόδου:
- Ημιτονοειδής τεχνική PWM με μονοπολική τάση εξόδου:
- Extra harmonic elimination – HEPWM:

Με σκοπό να μειωθούν όσο το δυνατό περισσότερο οι διακοπτικές απώλειες στα συστήματα αντιστροφέων μεγάλης ισχύος, χρησιμοποιούνται όσο το δυνατό χαμηλότερες συχνότητες για το σήμα ελέγχου. Για το σκοπό αυτό δημιουργήθηκε η τεχνική HEPWM όπου επιλέγονται N αυθαίρετες γωνίες εναλλαγής κατάστασης των διακοπών στο πρώτο τέταρτο της περιόδου μιας συμμετρικής κυματομορφής PWM και ύστερα βελτιώνεται η θέση αυτών των γωνιών με σκοπό την εξάλειψη των αρμονικών.

- Extra harmonic minimization – HMPWM

4.4 Το φίλτρο εξόδου:

Το φίλτρο LC στην έξοδο του μετατροπέα χρειάζεται για την αποκοπή των ανεπιθύμητων αρμονικών συχνοτήτων από το φάσμα του ρεύματος εξόδου. Αυξάνοντας την συχνότητα των παλμών ελέγχου των στοιχείων του μετατροπέα απαιτούνται μικρότερα σε όγκο φίλτρα αλλά παράλληλα αυξάνονται και οι διακοπτικές απώλειες στα στοιχεία με αποτέλεσμα την μετατροπή της ωφέλιμης ενέργειας σε θερμότητα. Έτσι θέτονται κάποια όρια στην συχνότητα του σήματος ελέγχου.



Σχ. 4.4.1 Φίλτρο LC 4.4.1

Για τον προσδιορισμό της επαγωγής L έχουμε:

$$V_L = V_I - V_G \quad (4.4.1)$$

Όπου V_I η τάση εξόδου του μετατροπέα και V_G η τάση του δικτύου. Επίσης ισχύει:

$$V_L = L \frac{\Delta I_L}{\delta T_s} \Rightarrow V_L = L \frac{\Delta I_L}{\delta} f_s \quad (4.4.2)$$

Όπου ΔI_L η μέγιστη κυμάτωση του ρεύματος εξόδου του μετατροπέα, δ ο κύκλος λειτουργίας του (duty cycle) και f_s η διακοπτική συχνότητα του μετατροπέα.

Σε περίπτωση σύνδεσης του συστήματος στο δίκτυο θα πρέπει οι αρμονικές συνιστώσες υψηλής συχνότητας να απομακρυνθούν από την κυματομορφή του ρεύματος εξόδου. Αυτό επιτυγχάνεται με την χρήση ενός πυκνωτή σε παράλληλη σύνδεση. Ο υπολογισμός της χωρητικότητας του γίνεται ως εξής. Θα πρέπει να ισχύει η ανισότητα:

$$\left| \frac{Z_c * f_s}{Z_c * f_s + Z_T * f_s} \right| < \frac{P * I_{NOM}}{|\Delta I_L * f_s|} \quad (4.4.3)$$

Όπου

$$Z_c = \frac{1}{2 * \pi * f_h * C_f} \quad (4.4.4)$$

I_{NOM} η ονομαστική τιμή του ρεύματος που εκχέεται στο δίκτυο στα 50Hz

ΔI_L η μέγιστη κυμάτωση του ρεύματος εξόδου του μετατροπέα

P η επιθυμητή εξάλειψη του αρμονικού περιεχομένου σε σύγκριση με το ονομαστικό ρεύμα σε dB

f_h η συχνότητα της αρμονικής που επιθυμούμε να εξαλειφθεί.

Συνήθως $f_s = f_h$

Η οδηγία IEEE 1547

Το 2003 ορίστηκε ως διεθνές πρότυπο για την διασύνδεση μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής ενέργειας το standard IEEE1547. Δίνει όλες τις απαραίτητες πληροφορίες και προδιαγραφές για την δημιουργία και διασύνδεση κέντρων παραγωγής Α.Π.Ε . Είναι διαθέσιμη από το IEEE προς κάποιο χρηματικό αντίτιμο.

4.5 χαρακτηριστικά μετατροπέων (inverters)

Υπάρχουν μετρούμενα μεγέθη τα οποία μας δίνουν σημαντικές πληροφορίες για την ποιότητα των μετατροπέων. Βάση πειραματικών μετρήσεων μπορούμε να προσδιορίσουμε αν ο υπό έλεγχο μετατροπέας πληρεί της απαραίτητες προδιαγραφές για την ορθή του λειτουργία αλλά και την σωστή συνεργασία του με τα υπόλοιπα μέρη του συνόλου που απαρτίζουν ένα Φ/Β σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

Πριν την έναρξη των μετρήσεων είναι απαραίτητο να γνωρίζουμε από τον κατασκευαστή την μέγιστη τάση εισόδου και την μέγιστη ισχύ που λειτουργεί ο μετατροπέας. Άμεσα μετρήσιμα είναι η τάση εξόδου του και η συχνότητα του παραγόμενου ημιτονικού σήματος.

Για τον προσδιορισμό όμως των προδιαγραφών πρέπει να υπολογίσουμε τον βαθμό απόδοσης του συστήματος, το ποσοστό διακύμανσης της τάσης εξόδου αλλά και της συχνότητας της. Επίσης η έκχυση συνεχούς ρεύματος, οι αρμονικές συχνότητες και ο παραγόμενος θόρυβος είναι και αυτά μερικά από τα μετρήσιμα μεγέθη. Ο αλγόριθμος και η ο τρόπος εύρεσης του MPP είναι και αυτό προς έλεγχο.

Για να λάβουμε όλες αυτές της μετρήσεις θα πρέπει στην είσοδο του μετατροπέα να συνδεθεί κατάλληλη Φ/Β συστοιχία με γνωστές και σταθερές παραμέτρους. Κάτι τέτοιο όμως είναι πρακτικά αδύνατο, λόγω της διαφοράς στην ηλιακή ακτινοβολία κατά την διάρκεια του χρόνου αλλά ακόμα και της ίδιας της ημέρας. Η παραγόμενη ισχύς από τα Φ/Β πάνελ είναι άμεσα επιρεάσιμη από το ποσοστό της λαμβανόμενης ηλιακής ακτινοβολίας αλλά και απ την θερμοκρασία λειτουργίας τους. Λογικό είναι λοιπόν να μην μπορούμε να βασίσουμε τον έλεγχο του μετατροπέα μας εισάγοντας σε αυτό μη σταθερά δεδομένα. Κάτι τέτοιο δημιούργησε την ανάγκη δημιουργίας των

εξομοιωτών Φ/Β συστοιχίας. Συστήματα δηλαδή με συμπεριφορά όμοια αυτής των γνωστών Φ/Β panels με την διαφορά όμως ότι είναι για εργαστηριακό σκοπό και μετρήσεις χωρίς την χρήση της ηλιακής ακτινοβολίας.

Αναλυτικότερα τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά ενός μετατροπέα χωρίζονται σε δύο κατηγορίες. Αυτά που αφορούν την πλευρά εισόδου του και αυτά που αφορούν την πλευρά εξόδου του μετατροπέα.

Για την πλευρά εισόδου:

Ελάχιστη και μέγιστη MPP τάση , είναι δύο τιμές που καθορίζουν το άνω και κάτω όριο ή αλλιώς κατώφλι τάσης μέσα στο οποίο ο μετατροπέας μπορεί να αναζητήσει το μέγιστο σημείο λειτουργίας.

Η μέγιστη τάση εισόδου είναι η επιτρεπόμενη τάση για την οποία ο μετατροπέας μπορεί να εργαστεί χωρίς να προκληθεί βλάβη.

Ελάχιστη ισχύς λειτουργίας , είναι η ελάχιστη ισχύς με την οποία μπορεί να τροφοδοτηθεί ο μετατροπέας και είναι συνήθως η ισχύς που καταναλώνει ο ίδιος ο μετατροπέας σε κατάσταση αδράνειας.

Μέγιστο ρεύμα λειτουργίας, είναι το μέγιστο επιτρεπτό παρεχόμενο ρεύμα στην είσοδο του μετατροπέα. Σε κάθε περίπτωση το μέγιστο παρεχόμενο ρεύμα της συστοιχίας με την οποία θα συνδεθεί ο μετατροπέας πρέπει να είναι μικρότερο από αυτό που ορίζει ο κατασκευαστής ως μέγιστο για τον μετατροπέα

Για την πλευρά εξόδου :

AC τάση λειτουργίας, είναι η ονομαστική τάση εξόδου του μετατροπέα στην οποία αποδίδει την ονομαστική του ισχύ. Για αυτόνομα συστήματα οικιακής χρήσης η τάση αυτή είναι στα 220-240V ενώ σε εφαρμογές όπου ο μετατροπέας συνδέεται στο δίκτυο ηλεκτροδότησης είναι από 400-20000V

AC ρεύμα λειτουργίας, είναι το μέγιστο παρεχόμενο ρεύμα στην έξοδο του μετατροπέα

Μέγιστη AC ισχύς, είναι η μέγιστη παρεχόμενη ισχύς στην έξοδο του μετατροπέα. Μετά την υπέρβαση της ο μετατροπέας ξεφεύγει από τα όρια λειτουργίας του και μπορεί να προκληθεί βλάβη λόγω υπερθέρμανσης. Αξίζει να αναφερθεί ότι για εφαρμογές έως 3kw μπορούν να χρησιμοποιηθούν μονοφασικοί μετατροπείς ενώ για εφαρμογές μεγαλύτερης ισχύος χρησιμοποιούνται τριφασικοί μετατροπείς.

Συχνότητα λειτουργίας, είναι η συχνότητα του ρεύματος ημιτονικής συνήθως μορφής στην έξοδο του μετατροπέα. Μπορεί να είναι 50Hz ή 60Hz ανάλογα με την χώρα όπου προορίζετε να χρησιμοποιηθεί ο μετατροπέας.

Τέλος κάποια επιπλέον χαρακτηριστικά των μετατροπέων είναι:

Ο βαθμός απόδοσης, που είναι ο λόγος την αποδιδόμενη ενέργειας προς την παρεχόμενη ενέργεια.

Ο τύπος του μετατροπέα, δηλαδή αν μετατρέπει το συνεχές ρεύμα της εισόδου του σε μονοφασικό ή τριφασικό ημιτονοειδές ρεύμα.

Ο αλγόριθμος MPPT

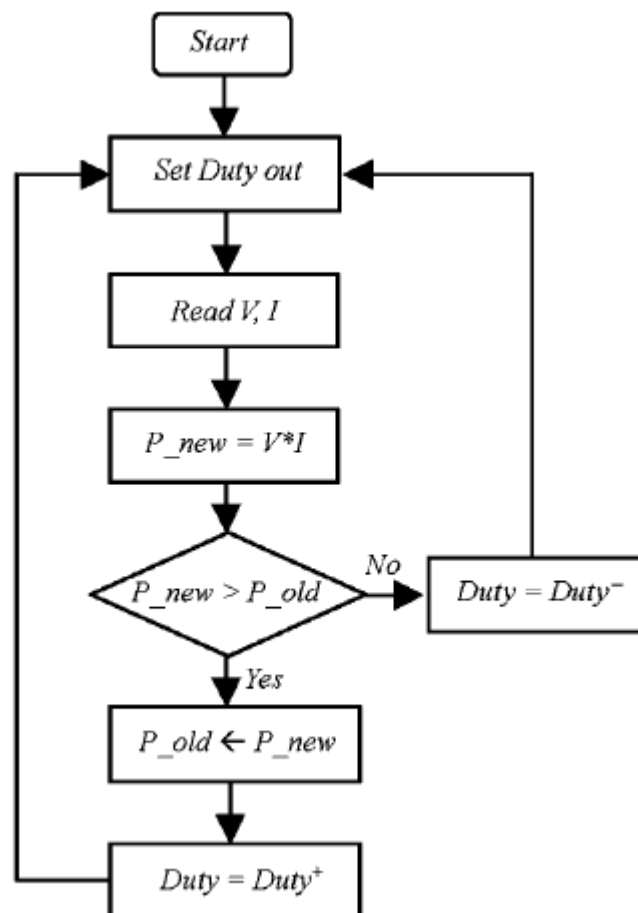
Ο μετατροπέας πρέπει να προσαρμόζεται στις διαφορετικές τιμές τάσης και ρεύματος που του παρέχονται από τις συνδεδεμένες Φ/Β διατάξεις αλλά αυτό δεν αρκεί. Πρέπει να προσαρμόζεται έτσι ώστε το σημείο λειτουργίας του να βρίσκεται σε σημείο όπου η απορροφούμενη ενέργεια να είναι η μέγιστη δυνατή . Δηλαδή το σημείο λειτουργίας του να κινείται , να εντοπίζει και να σταθεροποιείται στο σημείο εκείνο όπου το γινόμενο τάσης/ρεύματος είναι το μέγιστο. Η απαιτούμενη ενέργεια τροφοδοτεί το φορτίο ενώ η περίσσια διοχετεύεται για την φόρτιση των συσσωρευτών. Για να επιτευχθεί αυτό υλοποιούνται διατάξεις με την χρήση του αλγορίθμου εύρεσης του σημείου μέγιστης ισχύος ή αλλιώς MPPT (maximum power point tracking) .

Ανάλογα με τον τρόπο που επιτυγχάνεται οι αλγόριθμοι χωρίζονται σε 3 βασικούς τύπους:

4.1 Η μέθοδος Perturb and observe (P&O)

Η πιο διαδεδομένη μέθοδος είναι αυτή. Με την μέθοδο αυτή δημιουργείται μια διαταραχή στην τάση λειτουργίας θετική ή αρνητική και καταγράφεται ο λόγος dP/dV . Εάν δώσει θετικό αριθμό τότε ο αλγόριθμος γνωρίζει ότι η ρύθμιση έγινε προς την σωστή κατεύθυνση. Εάν δοθεί αρνητικός αριθμός τότε αντιστρέφεται η κατεύθυνση της διαταραχής.

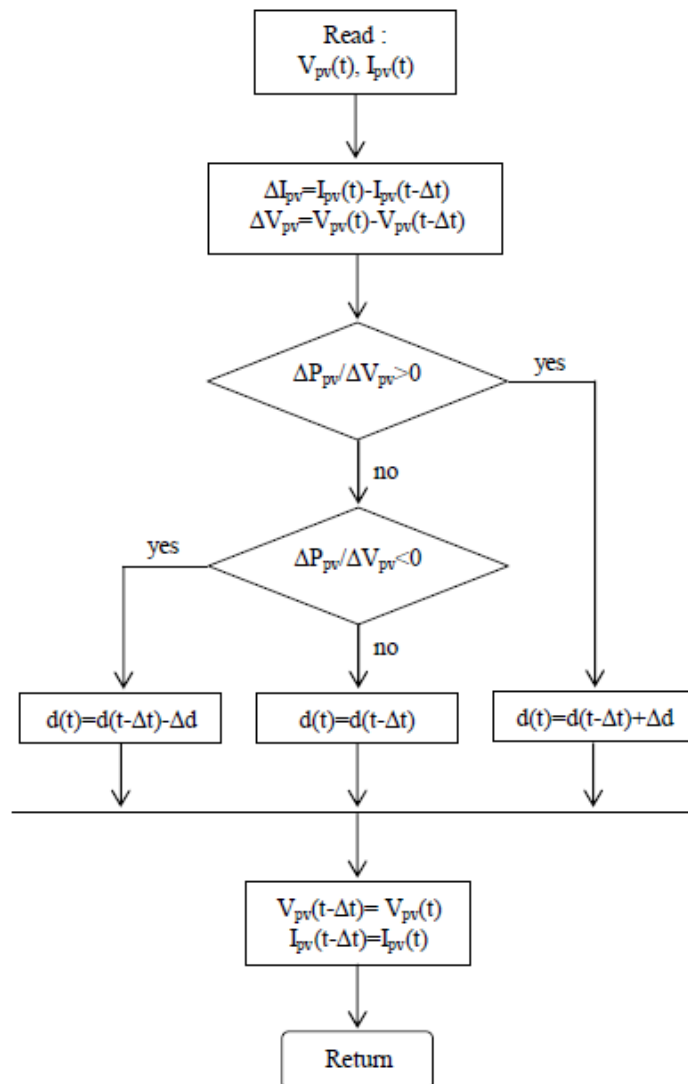
Κατασκευαστικά είναι πολύ εύκολο να υλοποιηθούν διατάξεις που να επιτυγχάνουν αυτό τον αλγόριθμο όμως ο αργός χρόνος απόκρισης και οι ταλαντώσεις που δημιουργούνται γύρω από το μέγιστο σημείο λειτουργίας είναι τα αδύνατα σημεία του.



Σχ. 5.1.1 Ο αλγόριθμος P&O

5.2 Η μέθοδος Incremental conductance (INC)

Με την μέθοδο αυτή χρησιμοποιείται η αγωγιμότητα $G=dI/dV$ ώστε να υπολογιστεί το πρόσημο του λόγου dP/dV . Ο αλγόριθμος INC αντιλαμβάνεται τις πιθανές γρήγορες μεταβολές στην ηλιακή ακτινοβολία και δίνει πιο ακριβή αποτελέσματα από την προηγούμενη μέθοδο. Παρόλα αυτά και αυτή η μέθοδος δημιουργεί ταλαντώσεις στο μέγιστο σημείο λειτουργίας του συστήματος κυρίως σε καταστάσεις όπου υπάρχουν απότομες μεταβολές στην προσπίπτουσα ακτινοβολία στο πλαίσιο.



Σχ.5.2.1 Ο αλγόριθμος INC

5.3 Η μέθοδος Constant Voltage

Η μέθοδος αυτή είναι η απλούστερη αλλά και φυσικά η λιγότερο αποδοτική. Χρησιμοποιεί ως δεδομένο το ότι η τάση στο μέγιστο σημείο λειτουργίας είναι ίση με το $0.76 * V_{oc}$. Έτσι σε τακτά διαστήματα θέτει το φορτίο εκτός του συστήματος με σκοπό να μηδενιστεί το ρεύμα και να μετρηθεί η V_{oc} (τάση ανοιχτού κυκλώματος), κατόπιν ρυθμίζει την τάση λειτουργίας στο 76% της μετρούμενης τάσης ανοιχτού κυκλώματος.

5. Τα στοιχεία αποθήκευσης ενέργειας

6.1 Γενικά:

Είναι φυσικό ένα σύστημα παραγωγής ενέργειας με χρήση της ηλιακής ενέργειας να μπορεί να λειτουργήσει και σε συνθήκες σκότους ή προσωρινής σκίασης. Έτσι ειδικού τύπου συσσωρευτές συνδέονται στο σύστημα με την χρήση ειδικών κυκλωμάτων.

Οι ηλεκτρικοί συσσωρευτές (μπαταρίες) αποθηκεύουν την περίσσια παραγόμενη ενέργεια με σκοπό να την αποδώσουν όταν υπάρξει μεγαλύτερη ζήτηση από την παροχή. Η χωρητικότητα των συσσωρευτών μετράτε σε ampere ανά ώρα (Ah) και η τιμή ισχύει για την ενδεικτική τιμή τάσης λειτουργίας του συσσωρευτή που ορίζει ο κατασκευαστής. Παρόλα αυτά η τιμή χωρητικότητας δεν είναι απόλυτη και καθορίζεται από εξωτερικούς παράγοντες όπως η θερμοκρασία, ο αριθμός φορτίσεων εκφορτίσεων που έχει υποστεί ως την μετρούμενη στιγμή καθώς επίσης και από την ηλικία του συσσωρευτή.

6.2 Ο κύκλος φορτίσεων/εκφορτίσεων:

Ένας συσσωρευτής μπορεί να διαχειριστεί φορτίσεις και εκφορτίσεις ανάλογα με τον τρόπο που έχει κατασκευαστεί. Μπορούμε να έχουμε ανάλογα με την εφαρμογή έναν συσσωρευτή που μπορεί να διαχειρίζεται «βαθείς» εκφορτίσεις πάνω από το 50-80% της αποθηκευμένης ενέργειας αλλά αυτό έχει ως επακόλουθο τον μικρό χρόνο ζωής του, ή να έχουμε συσσωρευτές που διαχειρίζονται μικρές εκφορτίσεις 10-15% με πολύ μεγαλύτερο κύκλο φορτίσεων.

6.3 Τα είδη των συσσωρευτών:

Συσσωρευτές εκκίνησης:

Χρησιμοποιούνται όπως λέει και το όνομά τους για εκκίνηση κινητήρων (βενζινοκινητήρων /πετρελαίου κτλ) . Δεν επιτρέπεται η βαθιά εκφόρτιση τους και όπως είναι φυσικό δεν είναι κατάλληλοι για χρήση σε φωτοβολταϊκά συστήματα.

Συσσωρευτές βαθιάς εκφόρτισης για πλοία/τροχόσπιτα κτλ:

Μπορούν να χρησιμοποιηθούν για κύκλους εκφόρτισης πάνω από το 80% της αποθηκευμένης ενέργειας τους αλλά ο χρόνος ζωής τους περιορίζεται συνήθως στα 2-3 χρόνια. Είναι κατάλληλοι για χρήση σε φωτοβολταϊκά συστήματα.

Συμπαγείς ή μονωμένοι συσσωρευτές:

Χρησιμοποιούνται σε ειδικές εφαρμογές όπου απαιτείται χρήση μπαταρίας σε διάφορες θέσης ώστε να μην υπάρχει διαρροή χημικών. Επίσης σε εφαρμογές όπου απαγορεύεται ή διαρροή υδρογόνου στο περιβάλλον. Ο χρόνος ζωής τους είναι 2-5 χρόνια εκτός από ορισμένους τύπους που σε ειδικές περιπτώσεις φτάνουν ως και τα 10 χρόνια.

Συσσωρευτές πραγματικά βαθιάς εκφόρτισης :

Είναι συσσωρευτές που έχουν την δυνατότητα να εκφορτίζονται βαθιά χωρίς να καταστρέφονται και μπορούν να διαχειριστούν μεγάλο αριθμό φορτίσεων και εκφορτίσεων. Οι κατασκευαστές τους προτείνουν να εκφορτίζονται έως το 50% παρόλα αυτά δίνουν επιπλέον ανοχή 30% για εκφόρτιση σε περίπτωση ανάγκης. Εάν δεν εκφορτιστούν περισσότερο από το 80% η διάρκεια ζωής τους παραμένει πολύ μεγάλη. Είναι οι πλέον κατάλληλες για χρήση σε φωτοβολταϊκά συστήματα.

Μέρος Β'

6. Εξομοίωση Φ/Β

7.1 Γενικά για τον εξομοιωτή Φ/Β συστοιχίας

Η ανάγκη ανάπτυξης, ελέγχου ,πιστοποίησης αλλά και για πειραματικούς λόγους σε ελεγχόμενες συνθήκες εργαστηρίου συντέλεσε στην ανάπτυξη διατάξεων που έχουν συμπεριφορά όμοια με αυτή μιας Φ/Β συστοιχίας. Η διάταξη αυτή ονομάζεται εξομοιωτής Φ/Β συστοιχίας γιατί παρουσιάζει σχεδόν ίδια χαρακτηριστικά με την συστοιχία χωρίς όμως την ανάγκη έκθεσης του στην ηλιακή ακτινοβολία. Έτσι τα χαρακτηριστικά εξόδου παραμένουν σταθερά και ελεγχόμενα δίνοντας την δυνατότητα ελέγχου των υπόλοιπων μονάδων που απαρτίζουν ένα Φ/Β σύστημα.

Η φιλοσοφία είναι απλή με πολλές παραλλαγές όμως στον τρόπο εφαρμογής. Ένα τροφοδοτικό ελεγχόμενο από μια κεντρική μονάδα παράγει μια καμπύλη I-V όμοια με αυτή της Φ/Β συστοιχίας η οποία οδηγεί την είσοδο του μετατροπέα.

Στις διατάξεις όπου ο έλεγχος γίνεται με τη μέθοδο διαμόρφωσης εύρους παλμού (PWM) ο παραγόμενος θόρυβος EMI στην έξοδο είναι έντονος και παρατηρήσιμος. Με την προσθήκη φίλτρων και κατά συνέπεια χωρητικότητας στην έξοδο ως προς την γη το πρόβλημα του θορύβου εξαλείφεται αλλά δημιουργείται πρόβλημα αστάθειας στην έξοδο το οποίο βέβαια μπορεί να επηρεάσει την ποιότητα των μετρήσεων.

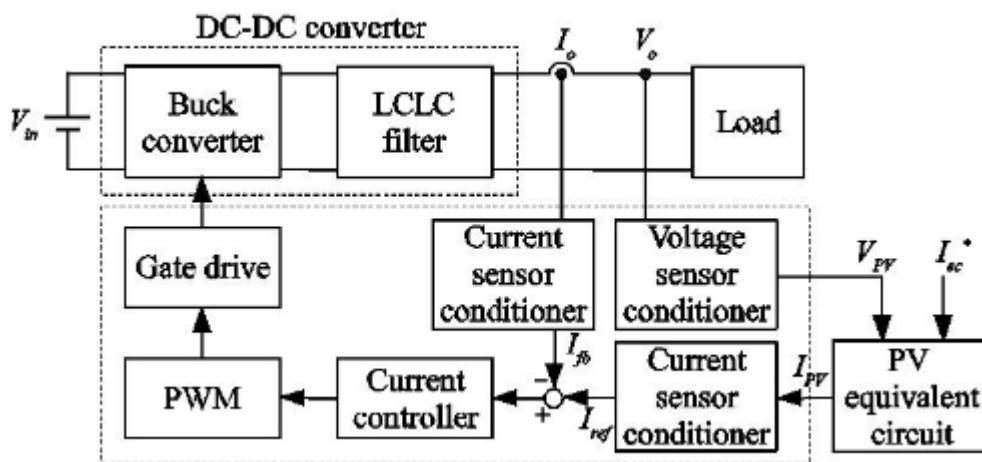
Η χρήση γραμμικών στοιχείων ελέγχου δίνει πάρα πολύ καλά αποτελέσματα με πολύ χαμηλή στάθμη θορύβου EMI και εξαιρετική σταθερότητα στην εύρεση του μεγίστου σημείου ισχύος (MPP) . Το κόστος όμως είναι πολλές φορές ένα περιοριστικός παράγοντας στην κατασκευή εξομοιωτών με γραμμικά στοιχεία .

7.2 Δομή εξομοιωτή Φ/Β συστοιχίας

Ένας εξομοιωτής Φ/Β συστοιχίας μπορεί να αναλυθεί σε επιμέρους βαθμίδες. Έτσι ονομαστικά μπορούμε να ξεχωρίσουμε τις ακόλουθες κατά σειρά:

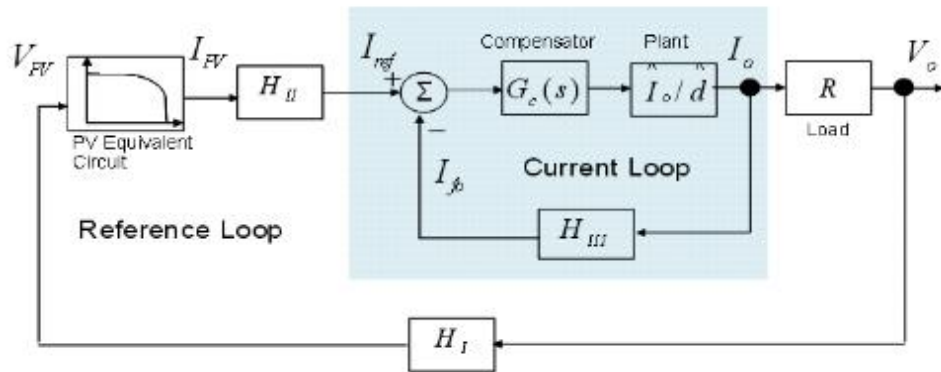
- Το τροφοδοτικό
- Τον ψηφιακό ελεγκτή
- Το φίλτρο εξόδου
- Τα αισθητήρια σε συνδυασμό με τους ελεγκτές τους.

Ακολουθεί ένα block διάγραμμα όπου φαίνεται πως ο ψηφιακός ελεγκτής λαμβάνοντας ως δεδομένα την τάση και το ρεύμα εξόδου του συστήματος επεμβαίνει στο τροφοδοτικό που στην συγκεκριμένη περίπτωση είναι ένας DC/DC μετατροπέας, επαναρυθμίζοντας την τάση/ρεύμα εξόδου που οδηγούν το φορτίο.



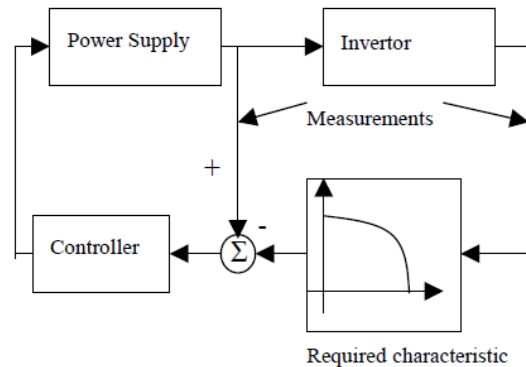
Σχ. 7.2.1 Block διάγραμμα του εξομοιωτή

Το ιδανικό σύστημα με αναλογικό ελεγκτή θα είχε την ακόλουθη μορφή .
 Όπου βλέπουμε ένα κλειστό σύστημα με διπλό βρόγχο ανάδρασης το οποίο
 τείνει να δώσει στην έξοδο την καμπύλι I-V ενός πραγματικού Φ/Β πάνελ ή
 κυψέλης.



Σχ. 7.2.2 Διάγραμμα συστήματος εξομοιωτή

Έτσι σε ιδανικές συνθήκες το αναλογικό σήμα ελέγχου θα οδηγούσε απευθείας τα στοιχεία εξόδου ισχύος με τον τρόπο που φαίνεται στο ακόλουθο διάγραμμα κατοπιν θα ακολουθηθούν αναλυτικότερα λίγα λόγια για την κάθε βαθμίδα



Σχ 7.2.3 Απλοποιημένο block διάγραμμα αναλογικού ελέγχου.

-

Η συγκεκριμένη σχεδίαση παρουσιάζει ένα σημαντικό μειονέκτημα. Κατά την λειτουργία του συστήματος ο ζητούμενος όρος $I_{r\nu}$ προσπαθεί να υπολογιστεί με συνεχείς προσεγγίσεις, κάτι το οποίο δημιουργεί μια συνεχόμενη μεταβολή του τελικού αποτελέσματος (πιθανές ταλαντώσεις , γύρω από το σημείο λειτουργίας) . Θα ήταν λοιπόν καλύτερο να είχε χρησιμοποιηθεί κάποια άλλη συνάρτηση η οποία να υπολόγιζε το μέγεθος πριν ώστε να γινόταν άμεση προσέγγιση του σωστού σημείου λειτουργίας.

7.2.1 Το τροφοδοτικό:

Ένα ή περισσότερα τροφοδοτικά συνεχούς ρεύματος με δυνατότητα ελέγχου από τον ελεγκτή του συστήματος, συνδέονται σε σειρά ή παράλληλα, ανάλογα με τις απαιτήσεις της εφαρμογής ώστε να αποδώσουν την απαιτούμενη τάση και ρεύμα. Ο έλεγχος τους γίνεται από μια είσοδο αναλογικού σήματος που διαθέτουν και την χρήση ενός πρωτοκόλλου επικοινωνίας με την μονάδα ελέγχου όπως το RS232 ή το GPIB. Το σήμα ελέγχου επεμβαίνει και μπορεί να ρυθμίσει την τάση εξόδου αλλά και το ρεύμα εξόδου του τροφοδοτικού. Είναι επιθυμητό ο χρόνος απόκρισής τους, στο σήμα ελέγχου να είναι όσο το δυνατό χαμηλότερος (συνήθως κάτω από 1mS)

7.2.2 Ο ψηφιακός ελεγκτής:

Η χρήση ψηφιακών μονάδων ελέγχου DSP εξασφαλίζει τον εύκολο έλεγχο του εξομοιωτή, δίνοντας μας την δυνατότητα προγραμματισμού του με χρήση αλγορίθμου από το Matlab/Simulink. Κάτι τέτοιο επιτρέπει την δημιουργία κατάλληλου λογισμικού ελέγχου δημιουργώντας ένα εύχρηστο περιβάλλον χειρισμού και παραμετροποίησης για τον τελικό χρήστη.

Ο ψηφιακός ελεγκτής είναι αυτός που θα οδηγήσει το τροφοδοτικό με κατάλληλο σήμα ελέγχου ώστε να αποδοθεί με ακρίβεια η απαιτούμενη καμπύλη ρεύματος/τάσης (I-V). Η αρχική ιδέα είναι να ελέγξουμε την τάση εξόδου του τροφοδοτικού έχοντας ως σήμα ανάδρασης το ρεύμα εξόδου.

Η επικοινωνία του ελεγκτή με το τροφοδοτικό γίνεται διαμέσου ενός διαύλου DAC, όπου η ψηφιακή έξοδος του επεξεργαστή μετατρέπεται σε αναλογικό σήμα και οδηγεί την είσοδο του τροφοδοτικού. Απαραίτητη είναι η προσθήκη ενδιάμεσης βαθμίδας απομόνωσης (buffer) για τον γαλβανικό διαχωρισμό του ψηφιακού ελεγκτή με το τροφοδοτικό.

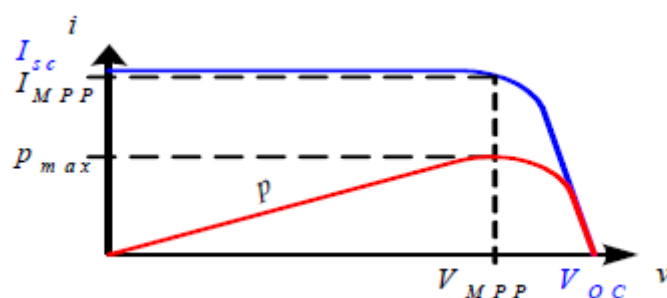
7. Περιγραφή ενός δοκιμαστικού μοντέλου εξομοιωτή φωτοβολταϊκής συστοιχίας:

8.1 Γενικά :

Η ανάγκη μελέτης της συμπεριφοράς και των χαρακτηριστικών των μετατροπέων που προορίζονται για χρήση σε φωτοβολταϊκά ή υβριδικά συστήματα Α.Π.Ε, σε εργαστηριακές συνθήκες οδήγησε στην κατασκευή εξομοιωτών φ/β συστοιχίας. Πρόκειται για τροφοδοτικά ελεγχόμενα από κάποιο μικροεπεξεργαστή ή Η/Υ με συμπεριφορά ίδια με αυτή ενός φωτοβολταϊκού panel. Μάλιστα επειδή στο εμπόριο τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των μετατροπέων διαφέρουν ανάλογα με τον κατασκευαστή συνήθως υπάρχει δυνατότητα για τροποποίηση της συμπεριφοράς του εξομοιωτή από τον τελικό χρήστη.

8.2 Προσεγγίζοντας την καμπύλη I-V ενός panel

Είναι γνωστό ότι οι παράμετροι που καθορίζουν την ακριβή μορφή της καμπύλης I-V είναι πολλοί (θερμοκρασία, ηλιακή ακτινοβολία, υλικό κατασκευής των κυψελών κ.α.) . Παρόλα αυτά η ακόλουθη καμπύλη δίνει μια γενική μορφή της με αρκετά καλή προσέγγιση στις περισσότερες περιπτώσεις:



Σχ. 8.2.1 Καμπύλη I-V

Παρόλο που τα μεγέθη αλλάζουν η μορφή της αλλάζει ελάχιστα αν προστεθούν περισσότερες κυψέλες παράλληλα ή σε σειρά.

8.3 Η μαθηματική προσέγγιση

Τα μαθηματικά μοντέλα που προσεγγίζουν την καμπύλη είναι πάρα πολλά και ανάλογα τον μελετητή μπορεί να είναι από πολύ απλά με ελάχιστους όρους έως πολύ σύνθετα που λαμβάνουν υπόψη όλες τις παραμέτρους. Εμείς προς χάρη ευκολίας για την μελέτη του εξομοιωτή, το μαθηματικό μοντέλο που θα πάρουμε είναι οι ακόλουθες δύο γραμμικές εξισώσεις όπου λαμβάνονται υπόψη οι όροι V_{oc} , V_{mpp} , I_{sc} και I_{mpp} . Η πρώτη προσεγγίζει τα σημεία του I για $V > V_{mpp}$ ενώ η δεύτερη δίνει προσέγγιση του I για $V < V_{mpp}$.

$$I = \frac{I_{mpp}}{V_{mpp} - V_{oc}} * V - V_{oc} \frac{I_{mpp}}{V_{mpp} - V_{oc}} \quad (8.3.1)$$

$$I = \frac{I_{mpp} - I_{sc}}{V_{mpp}} * V + I_{sc} \quad (8.3.2)$$

Το σημείο όπου οι δύο ευθείες τέμνονται προσεγγίζει το σημείο μέγιστης ισχύος λειτουργίας (V_{mpp} , I_{mpp})

8. Η κατασκευή του ηλεκτρονικού κυκλώματος:

Μελετώντας την κατασκευή ενός εξομοιωτή που παρουσιάστηκε στο 9 διεθνές συνέδριο στην Βαρκελώνη παρουσιάζει τα εξής βασικά ηλεκτρικά χαρακτηριστικά:

Output voltage = 0 – 650Vdc

Output current = 0 – 7 A

Nominal power = 4.4 kw

Το βασικό σχέδιο πάνω στο οποίο έγινε η κατασκευή είναι ένα τροφοδοτικό με παροχή από τριφασικό δίκτυο . Περιλαμβάνει μια γέφυρα **H** , δομημένη από 4 τρανζίστορ ισχύος IGBT , δυο μετασχηματιστές ,μια γέφυρα πλήρους ανόρθωσης και φίλτρα εξομάλυνσης για την έξοδο.

Το παρεχόμενο τριφασικό ρεύμα εισόδου ανορθώνεται πλήρως από μία γέφυρα κατασκευασμένη από διόδους. Στην συνέχεια τροφοδοτεί τα τρανζίστορ ισχύος τα που απαρτίζουν την γέφυρα H . Με το κατάλληλο σήμα στην είσοδο τους μετατρέπουν εκ νέου το ρεύμα σε υψηλής συχνότητας εναλλασσόμενο. Η συχνότητα του σήματος είναι στα 18Khz για να μειωθούν όσο γίνεται οι απώλειες ισχύος . Γι' αυτό το λόγο τα transistors καθώς και οι διόδοι ανόρθωσης στο δευτερεύον τύλιγμα των μετασχηματιστών πρέπει να επιλεγούν με κριτήριο να μπορούν να εργαστούν σε υψηλές συχνότητες αρκετά μεγαλύτερες από αυτή του σήματος ελέγχου . Για να επιτύχουν υψηλότερη τάση εξόδου τα τρανζίστορ οδηγούν το πρωτεύων τύλιγμα 2

μετασχηματιστών που συνδέεται παράλληλα και η τελική τάση εξόδου λαμβάνεται από τα δευτερεύοντα τους τυλίγματα τα οποία συνδέονται εν σειρά. Ο λόγος μετασχηματισμού που έχει επιλεγεί είναι 1:0.8 . Το υψηλό σήμα ανορθώνεται από διόδους ικανές να λειτουργήσουν συχνότητες >18KHz και οδηγείται σε βαθυπερατά φίλτρα με σκοπό να δώσουν στην έξοδο ένα σήμα με όσο το δυνατόν λιγότερες διακυμάνσεις.

Για την δημιουργία του κατάλληλου σήματος ελέγχου φροντίζει ο μικροελεγκτής TMS320F2808 και διοχετεύεται στο κύκλωμα ισχύος μέσω μιας βαθμίδας οδήγησης και απομόνωσης. Ο έλεγχος της βαθμίδας ισχύος γίνεται με την μέθοδο διαμόρφωσης εύρους πλάτους παλμού. Τα δεδομένα που λαμβάνονται προκειμένου ο αλγόριθμος να δημιουργήσει το σήμα αυτό είναι η τάση στα άκρα του φορτίου καθώς και το ρεύμα που το διαρρέει .

9.1 Ο ελεγκτής TMS320F2808

Κατασκευασμένος από την TEXAS INSTRUMENTS και μπορεί να λειτουργήσει σε ταχύτητες έως 100Mhz κάτι που τον κάνει αρκετά ισχυρό και γρήγορο για να μπορεί να διαχειρίζεται και να ανταποκρίνεται στις πληροφορίες που λαμβάνει στην συγκεκριμένη εφαρμογή. Περιλαμβάνει εσωτερική μνήμη ROM 128kbytes και RAM 36kbytes , 16 πόρτες εξόδου με δυνατότητα PWM καθώς και 16 πόρτες αναλογικής εισόδου με ενσωματωμένο 12bit A/D converter. Αυτά τα χαρακτηριστικά καθώς επίσης και το χαμηλό του κόστος τον κάνουν ιδανικό ελεγκτή για την εφαρμογή αυτή.

9.2 Το σήμα ελέγχου

Για την παραγωγή της κατάλληλης καμπύλης I-V στην έξοδο λαμβάνονται υπόψη οι γραμμικές εξισώσεις (1) και (2) που αναφέρθηκαν στην μαθηματική ανάλυση. Δύο αναλογικοί ελεγκτές PI οι οποίοι λειτουργούν ως εκτιμητές θέσης του σήματος φροντίζουν ώστε το σύστημα να λειτουργεί εντός ορίων τα οποία ορίζει ο κατασκευαστής (ως προς το ρεύμα και την τάση εξόδου). Τα αισθητήρια που χρησιμοποιεί το συγκεκριμένο σύστημα για την μέτρηση της τάσης και του ρεύματος είναι τα LV25-P και LV55-P μερικά χαρακτηριστικά των οποίων θα αναλυθούν σε άλλη παράγραφο. Η ανάλυση των σημάτων τους γίνεται από τον ψηφιακό ελεγκτή ο οποίος οδηγεί τα IGBT transistors εξόδου με κατάλληλο σήμα ώστε να έχουμε τα ζητούμενα σήματα ισχύος στην έξοδο του εξομοιωτή.

9.3 Βαθμίδα ισχύος – εξόδου.

Όπως φαίνεται και στο σχηματικό διάγραμμα 4 IGBT transistors με μέγιστη δυνατότητα λειτουργίας $V_{ce} = 1200V$ και $I_c=75A$ χρησιμοποιούνται για να ενισχύσουν το παραγόμενο σήμα του ελεγκτή το οποίο διοχετεύουν στο πρωτεύον τύλιγμα δύο μετασχηματιστών με αναλογία μετασχηματισμού 1:0.8 ισχύος 2.2KW. Στο δευτερεύον τύλιγμα των μετασχηματιστών μια διάταξη πλήρους ανόρθωσης με χρήση 8 διόδων DSEI30-12A με χαρακτηριστικά $V_{rrm} = 1200V$, $I_d = 26A$ $t_{rr} = 40ns$ φροντίζει για την μετατροπή του υψηλής συχνότητας σήματος σε συνεχές .

9.4 Το φίλτρο εξόδου

Τελευταία βαθμίδα πριν την τελική έξοδο του σήματος λαμβάνει η διάταξη του φίλτρου εξόδου. Έτσι στον συγκεκριμένο εξομοιωτή χρησιμοποιήθηκαν 2 πηνία με αυτεπαγωγή 3.3mH και 2 πυκνωτές χωρητικότητας 2200μF/ 450V με σκοπό την πλήρη εξομάλυνση του σήματος στην έξοδο και την απαλλαγή του από αρμονικές υψηλών συχνοτήτων.

9.5 Η δοκιμή του συστήματος:

Ο συγκεκριμένος εξομοιωτής κατασκευάστηκε ώστε να μπορεί να εξομοιώσει οποιοδήποτε panel ισχύος έως 4.4KW με μέγιστο $V_{oc} = 650V$ και $I_c = 7A$. Ο προγραμματισμός του ελεγκτή για το συγκεκριμένο πείραμα έγινε με σκοπό να εξομοιωθεί η λειτουργία **11** φωτοβολταϊκών panel της ISOFOTON με κωδικό IS-200/32 συνδεδεμένα σε σειρά τα οποία βάση των στοιχείων του κατασκευαστή παρουσιάζει το καθένα τα ακόλουθα χαρακτηριστικά :

$$V_{oc} = 57.6 \text{ Vdc}$$

$$I_{sc} = 4.7 \text{ A}$$

$$P_{max} = 200Wp$$

$$V_{mpp} = 46.08 \text{ V}$$

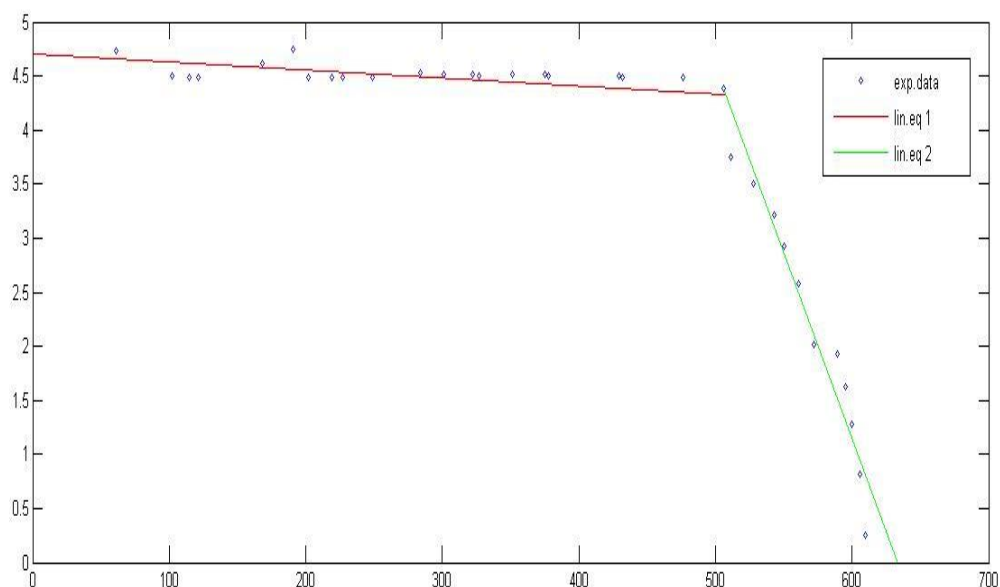
$$I_{mpp} = 4.35 \text{ A}$$

Έτσι οδηγήθηκε ένα μεταβαλλόμενο ωμικό φορτίο και λήφθηκαν 32 ενδιάμεσες τιμές με σκοπό να συγκριθούν με της θεωρητικές αναμενόμενες.

Οι τιμές ακολουθούν στον πίνακα:

α/α	Τάση (V)	Ένταση (A)	Αντίσταση φορτίου (Ω)
1	610	0.25	2440
2	606	0.81	478.14
3	600	1.28	468.75
4	595	1.62	367.28
5	589	1.93	305.18
6	572	2.01	284.57
7	561	2.58	217.44
8	550	2.92	188.35
9	543	3.21	169.15
10	528	3.51	150.42
11	511	3.75	136.26
12	506	4.38	115.52
13	476	4.48	106.25
14	432	4.49	96.21
15	429	4.50	95.33
16	378	4.50	84
17	375	4.51	83.14
18	351	4.52	77.65
19	327	4.50	72.66
20	322	4.52	71.23
21	301	4.52	66.59
22	284	4.53	62.69
23	249	4.48	55.58
24	227	4.48	50.66
25	219	4.48	48.88
26	202	4.49	44.98
27	191	4.74	40.29
28	168	4.61	36.44
29	121	4.49	26.94
30	115	4.49	25.61
31	102	4.50	22.66
32	61	4.73	12.89

Σημειώνοντας τα παραπάνω δεδομένα πάνω στην γραφική απεικόνιση των απλοποιημένων γραμμικών εξισώσεων (8.3.1) και (8.3.2) παρατηρούμε την πολύ καλή προσέγγιση του εξομοιωτή στα θεωρητικά και αναμενόμενα αποτελέσματα.



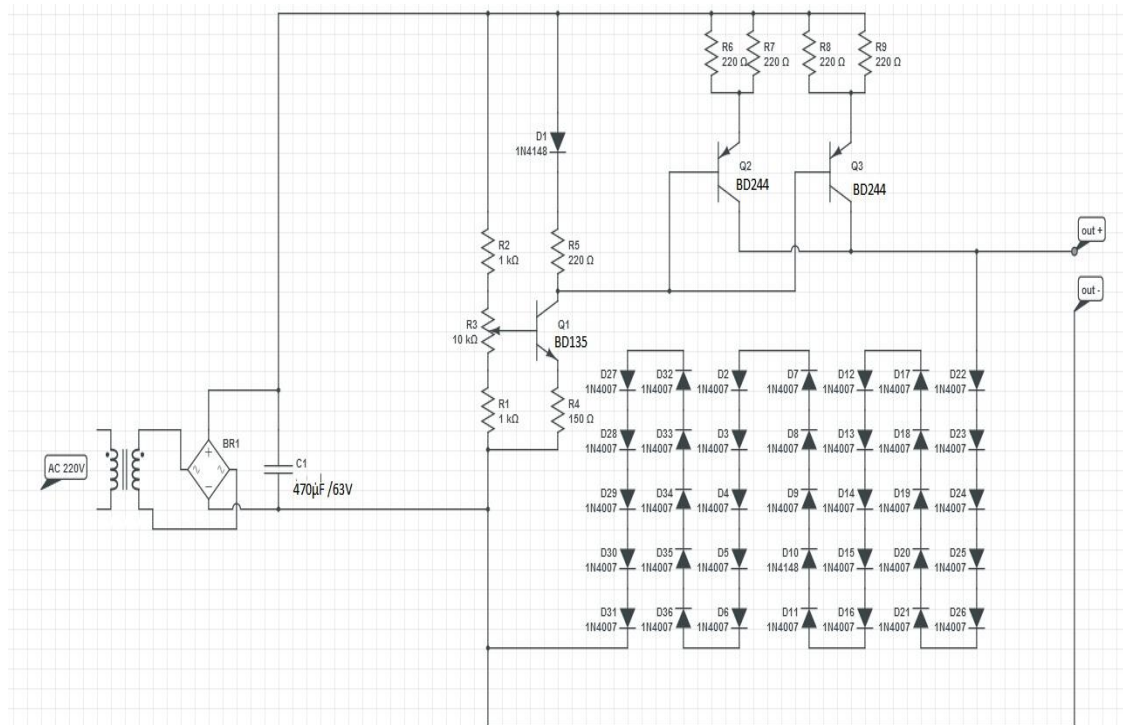
Σχ. 9.5.1 Γραφική απεικόνιση πειραματικών μετρήσεων και σύγκριση με τις 2 γραμμικές εξισώσεις.

Τα αποτελέσματα είναι πολύ κοντά στα αναμενόμενα βέβαια ή απόκλιση από τις πραγματικές τιμές είναι μεγάλη αν εστιάσουμε την προσοχή μας γύρο από το σημείο βέλτιστης λειτουργίας. Για την βελτίωση του συστήματος θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί ένα μαθηματικό μοντέλο με καλύτερη προσέγγιση του πραγματικού συστήματος. Κάτι τέτοιο θα έκανε όμως την κατασκευή του εξομοιωτή πολύ σύνθετη.

Μέρος Γ (πειραματικό μέρος)

9. Κατασκευή του μοντέλου της μιας διόδου.

Για την καλύτερη μελέτη του υλοποιήθηκε μια παραλλαγή του μοντέλου της μιας διόδου. Στο κύκλωμα χρησιμοποιούμε μια πηγή συνεχούς τάσης σαν είσοδος του συστήματος και ένα μεταβλητό φορτίο στην έξοδο. Μετρούμενα μεγέθη είναι η πτώση τάσης στα άκρα του φορτίου και το ρεύμα που το διαρρέει. Το διάγραμμα του κυκλώματος που χρησιμοποιήθηκε είναι το ακόλουθο.



Σχ. 10.1 Ηλεκτρικό κύκλωμα πειραματικού μοντέλου

10.1 Περιγραφή :

Τα δύο τρανζίστορ ισχύος Q2,Q3 πολώνονται έτσι ώστε να λειτουργούν στην γραμμική περιοχή τους και λειτουργούν ως μια πηγή συνεχούς ρεύματος. Η τιμή του ρεύματος βραχυκυκλώσεως του κυκλώματος μπορεί να ρυθμιστεί από την μεταβλητή αντίσταση R2 η οποία μεταβάλλει μέσω του τρανζίστορ Q1 το ρεύμα που διαρρέει την βάση των δύο τρανζίστορ ισχύος με αποτέλεσμα να αλλάζει το σημείο λειτουργίας τους και κατ' επέκταση την αγωγιμότητά τους. Οι διόδοι του κυκλώματος συνδέονται εν σειρά ώστε να αυξηθεί η συνολική πτώση τάσης στα άκρα τους . Παρακάμπτοντας μερικές από αυτές μπορούμε να λάβουμε διαφορετικά αποτελέσματα ως προς την τάση ανοιχτού κυκλώματος του συστήματος . Οι τιμές των αντιστάσεων R6 – R9 καθορίζουν το μέγιστο ρεύμα βραχυκυκλώσεως. Επιλέγοντας την τιμή των 220Ω το μέγιστο ρεύμα μπορεί να ρυθμιστεί στα 250mA , το οποίο είναι μικρό για μελέτη πραγματικού συστήματος αλλά αρκετό να αποδώσει μια καλή γραφική αναπαράσταση ενός μεγαλύτερου συστήματος.

Τα τρανζίστορ ισχύος που χρησιμοποιήθηκαν είναι τα BD244 , τα οποία είναι ικανά να λειτουργήσουν σε τάσεις έως 45V και να διαχειριστούν ρεύμα μεγέθους έως 6 A το καθένα και είναι τύπου PNP.

Το τρανζίστορ BD135 λειτουργεί με μέγιστη τάση 45V και αυτό αλλά με αρκετά μικρότερο ρεύμα της τάξης των 1.5 A . Είναι τύπου NPN.

Για περισσότερες πληροφορίες για τα υλικά ακλουθούν ενδεικτικά τα datasheets κάποιων κατασκευαστών αυτών των υλικών στις τελευταίες σελίδες της εργασίας.

10.2 Οι μετρήσεις:

Με χρήση μεταβλητού φορτίου λήφθηκαν οι ακόλουθες μετρήσεις που αφορούν το κύκλωμα με χρήση και των 35 διόδων. Επιλέχθηκαν 2 ρεύματα βραχυκυκλώσεως, στο πείραμα 1 επιλέξαμε $I_{sc} = 200\text{mA}$ ενώ στο πείραμα 2 επιλέξαμε $I_{sc} = 150\text{mA}$. Η απεικόνιση τους έγινε σε κοινούς άξονες για καλύτερη μελέτη.

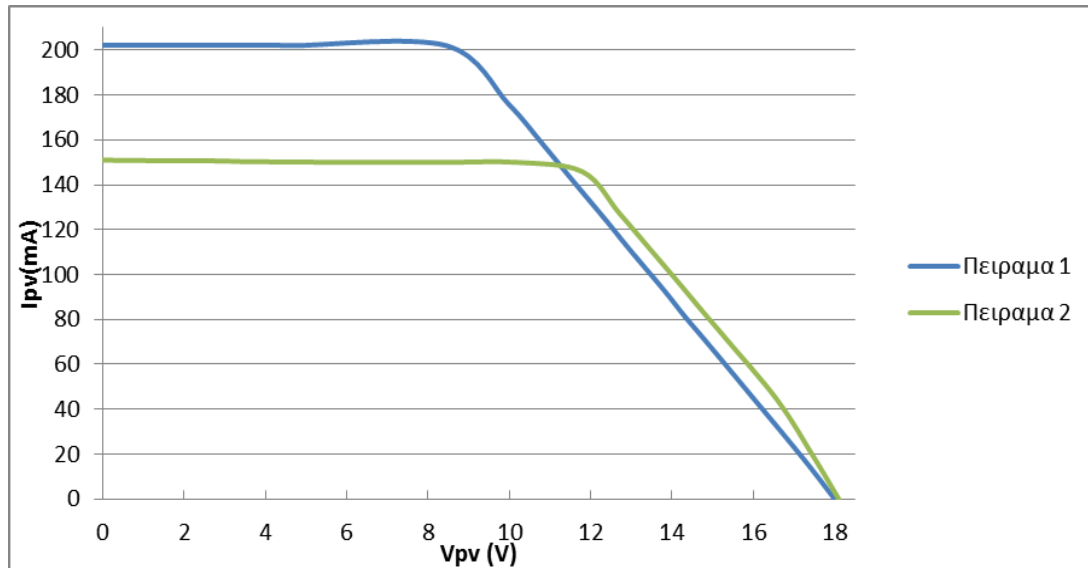
Μετρήσεις 1^{ου} πειράματος για $I_{sc} = 200\text{mA}$ $V_{oc} = 18\text{V}$ και χρήση 35 διόδων

R(ohm)	V(volt)	I(mA)	P(mW)
	18	0	0
1000	17,25	17,5	301,875
390	16,1	42,7	687,47
220	14,91	68,6	1022,826
180	14,32	81,2	1162,784
150	13,78	93,5	1288,43
120	12,94	111,5	1442,81
100	12,4	123,6	1532,64
82	11,55	142	1640,1
68	10,8	158,5	1711,8
56	9,98	175,9	1755,482
39	8,45	202	1706,9
22	4,82	202,1	974,122
18	4,66	202,1	941,786
10	2,48	202,2	501,456
4,7	1,44	202,2	291,168
1	0,73	202,2	147,606
0	0	202,2	0

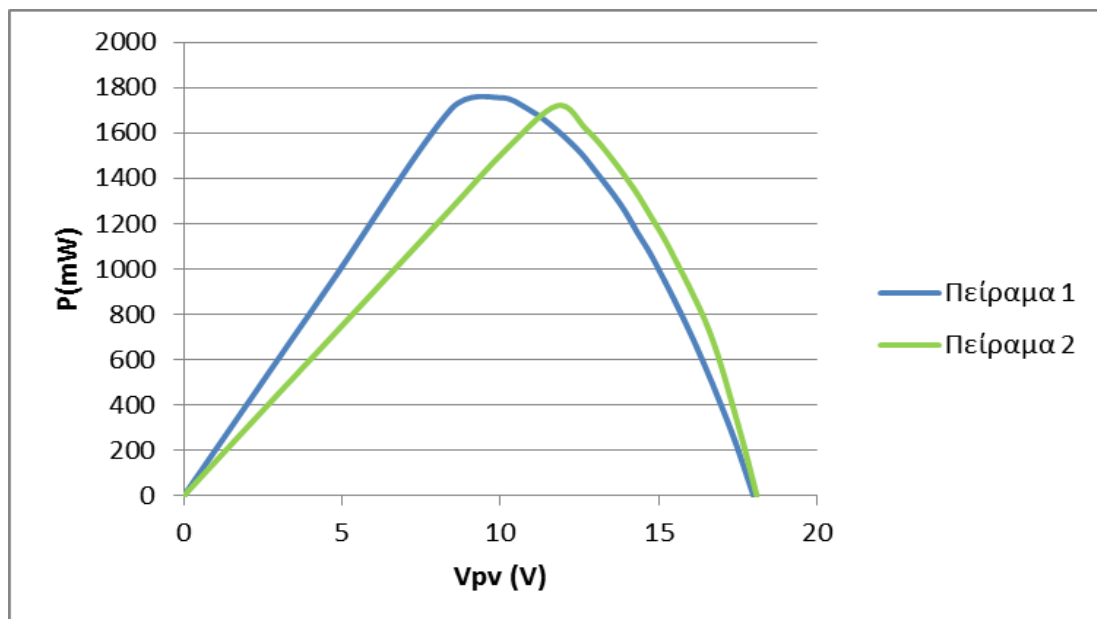
Μετρήσεις 2^{ου} πειράματος για $I_{sc}= 150\text{mA}$ $V_{oc}=18.1\text{V}$ και χρήση 35 διόδων

R(ohm)	V(volt)	I(mA)	P(mW)
	18,1	0	0
1000	17,5	18,2	318,5
390	16,6	43,8	727,08
220	15,36	70,7	1085,952
180	14,75	83,6	1233,1
150	14,18	96	1361,28
120	13,38	113	1511,94
100	12,7	127,4	1617,98
82	11,8	145,8	1720,44
68	10,2	150	1530
56	8,41	150	1261,5
39	6,25	150	937,5
22	3,55	150,3	533,565
18	3,01	150,6	453,306
10	1,82	150,7	274,274
4,7	1,05	150,8	158,34
1	0,5	150,9	75,45
0	0	151	0

Ακολουθεί η χάραξη των καμπυλών ρεύματος-τάσης (I-V) και ισχύος-τάσης (P-V)



Σχ. 10.2.1 Γραφική παράσταση I-V για $I_{sc}=200\text{mA}$ & $I_{sc}=150\text{mA}$



Σχ. 10.2.2 Γραφική παράσταση P-V για $I_{sc}=200\text{mA}$ & $I_{sc}=150\text{mA}$

Στη συνέχεια τροποποιώντας το κύκλωμα και παρακάμπτοντας 10 διόδους λάβαμε μετρήσεις για επιλεγμένο $I_{sc}=200$ & $I_{sc}=150$. Ακολουθούν οι μετρήσεις των πειραμάτων.

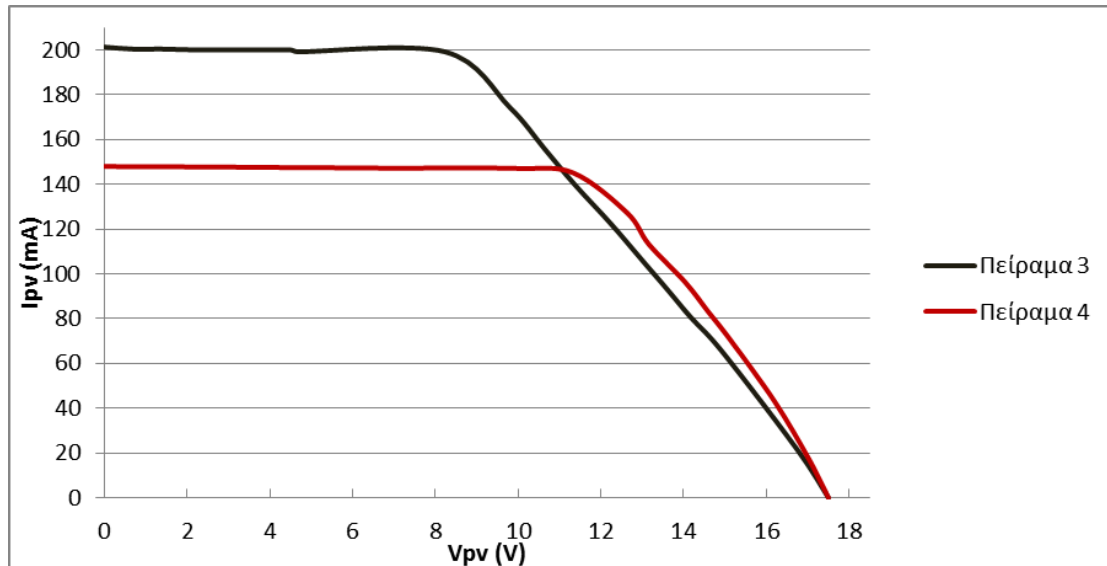
Μετρήσεις 3^{ου} πειράματος για $I_{sc}= 200\text{mA}$ $V_{oc}=17.5\text{V}$ και χρήση 25 διόδων

R(ohm)	V(volt)	I(mA)	P(mW)
	17,5	0	0
1000	16,91	17,2	290,852
390	15,91	42,1	669,811
220	14,8	68,2	1009,36
180	14,17	80,6	1142,102
150	13,62	92,7	1262,574
120	12,9	108,2	1395,78
100	12,25	122,2	1496,95
82	11,37	139,8	1589,526
68	10,63	156	1658,28
56	9,79	174,5	1708,355
39	8,23	199,2	1639,416
22	4,68	199,2	932,256
18	4,5	200	900
10	2,42	200	484
4,7	1,4	200,4	280,56
1	0,68	200,4	136,272
0	0	201,3	0

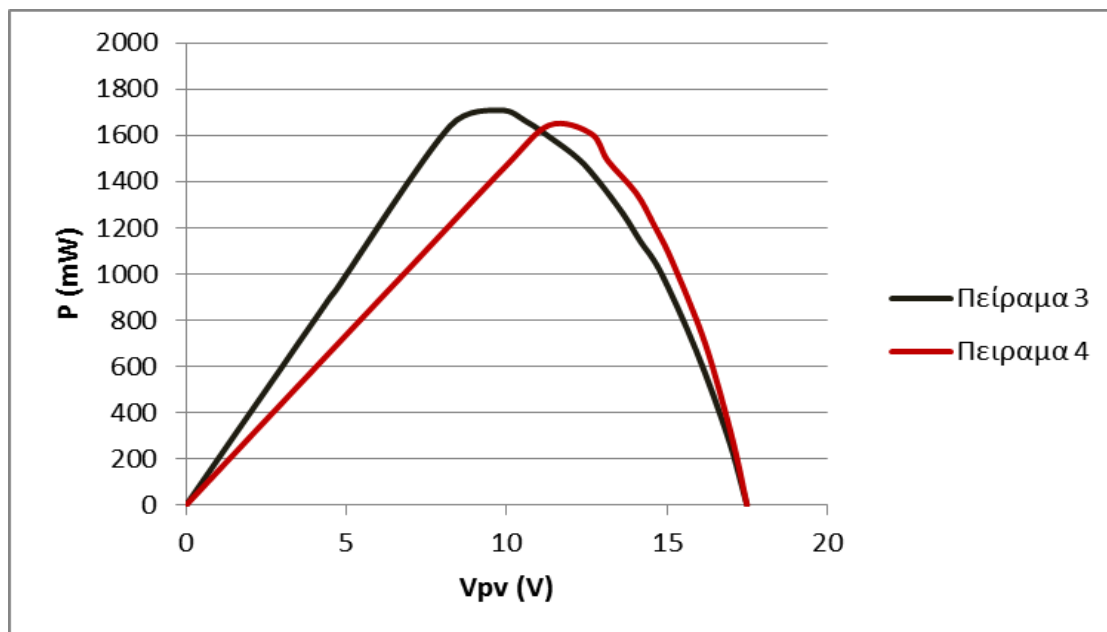
Μετρήσεις 4^{ου} πειράματος για $I_{sc} = 150\text{mA}$ $V_{oc} = 17.5\text{V}$ και χρήση 25 διόδων

R(ohm)	V(volt)	I(mA)	P(mW)
	17,5	0	0
1000	17,02	17,5	297,85
390	16,2	43	696,6
220	15,14	70,2	1062,828
180	14,59	83,2	1213,888
150	14,04	96,2	1350,648
120	13,16	113,2	1489,712
100	12,63	127,3	1607,799
82	11,33	145,1	1643,983
68	9,96	147,1	1465,116
56	7,1	147,2	1045,12
39	6,15	147,3	905,895
22	3,49	147,6	515,124
18	2,96	147,7	437,192
10	1,8	147,8	266,04
4,7	1,05	147,9	155,295
1	0,56	147,9	82,824
0	0	148	0

Ακολουθεί η χάραξη των καμπυλών ρεύματος-τάσης (I-V) και ισχύος-τάσης (P-V) για το τροποποιημένο κύκλωμα με τις 25 διόδους.



Σχ. 10.2.3 Γραφική παράσταση I-V για $I_{sc}=200\text{mA}$ & $I_{sc}=150\text{mA}$



Σχ. 10.2.4 Γραφική παράσταση P-V για $I_{sc}=200\text{mA}$ & $I_{sc}=150\text{mA}$

10.3 Γενικές παρατηρήσεις / συμπεράσματα.

Το απλό αυτό κύκλωμα έδωσε μια αρκετά καλή απόδοση της συμπεριφοράς ενός πραγματικού φωτοβολταϊκού συστήματος με κυψέλες. Θα μπορούσε να βρεί εφαρμογή για εργαστηριακή μελέτη μικρών μετατροπέων (inverters) ως προς τον τρόπο λειτουργίας τους καθώς επίσης και για την μελέτη και βελτίωση του αλγορίθμου MPPT . Αν η αγορά ηλεκτρονικών εξαρτημάτων μεγαλύτερης ισχύος δεν είναι πρόβλημα , εύκολα μπορεί να τροποποιηθεί και να διαχειριστεί ρευμα τάση δεκάδων ή και εκατονταδων Volt και amper αντίστοιχα.

10.4 Επαλήθευση πειραματικών αποτελεσμάτων

Θα ακολουθήσει μια σύγκριση των πειραματικών μετρήσεων και καμπυλών σε σχέση με τα αποτελέσματα που δίνει το ακολουθο θεωρητικό μοντέλο :

$$I_{PV} = n p * I_{sc} - n p * I_o * \left(e^{\frac{V_{pv} + I_{pv} R_s}{k * T * n s}} - 1 \right) \quad (10.4.1)$$

Λύνοντας την εξίσωση ως προς I_{pv} έχουμε:

$$I_{pv} = \frac{I_{or} * n_p * q * R_s + I_{scr} * n_p * q * R_s - A * k * n_s * T_{rr} * \text{ProductLog}\left[\frac{e^{\frac{I_{or} * n_p * q * R_s}{A * k * n_s * T_{rr}} + \frac{I_{scr} * n_p * q * R_s}{A * k * n_s * T_{rr}} + \frac{a * V_{pv}}{A * k * n_s * T_{rr}}}}{A * k * n_s * T_{rr}}\right]}{q * R_s}$$

(10.4.2)

(* Αξίζει να σημειωθεί πως το προσεγγιστικό αυτό μοντέλο κατασκευάστηκε από τους κυρίους Φετφατζή και Κοφινά ύστερα από συνδιασμό θεωρητικών και πρακτικών αποτελεσμάτων πάνω σε πειράματα στις φ/β κυψέλες. Η λύση της εξίσωσης βασίζεται στην διαδικασία Lambert (W function) η οποία βρίσκεται και με ονομασίες όπως Product Logarithm ή Omega Function)

Για τιμές των όρων :

$$n_p=1$$

$$n_s=43$$

$$I_{scr}=0.2$$

$$V_{ocr}=0.5$$

$$I_{or}=10^{-6}$$

$$T_{rr}=298$$

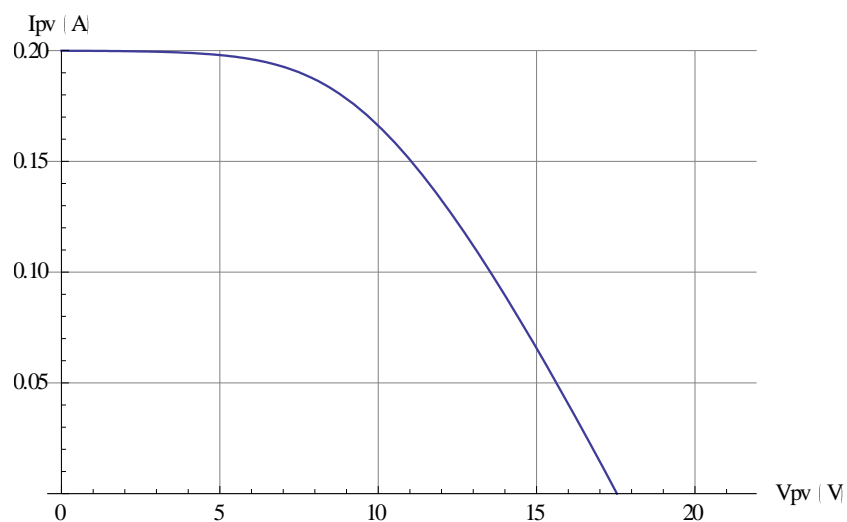
$$q=1.6 \cdot 10^{-19}$$

$$k=1.38 \cdot 10^{-23}$$

$$A=1.3$$

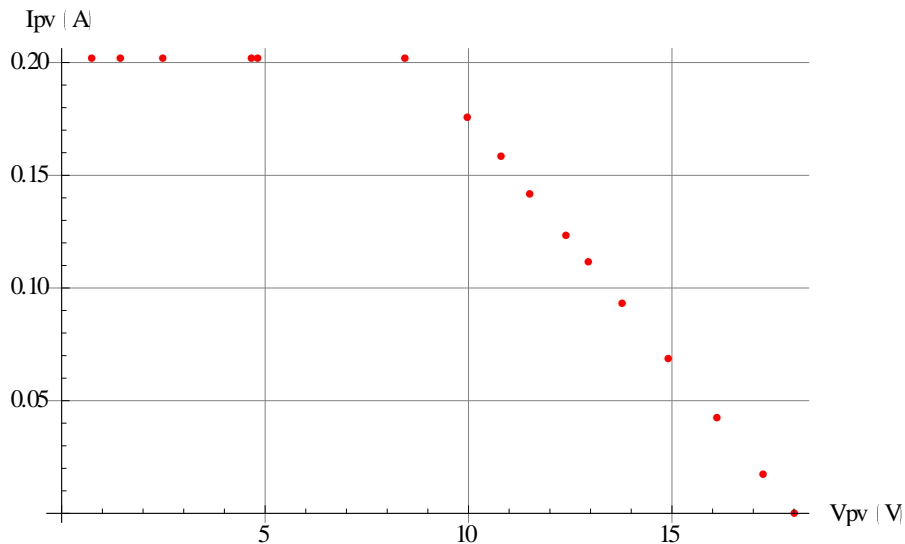
$$R_s=30$$

Τρέξαμε την συνάρτηση στο «mathematica» και αποτυπώσαμε την ακόλουθη γραφική παράσταση. .



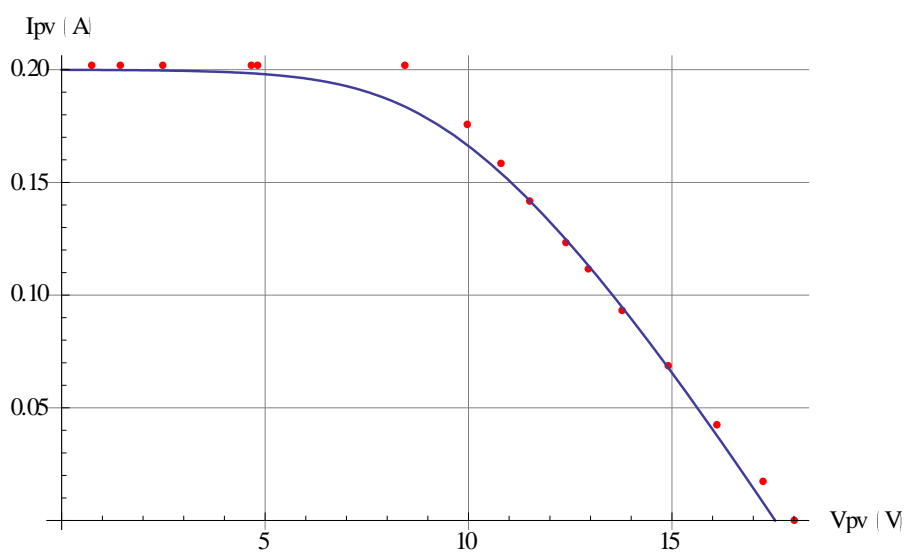
Σχ. 10.4.1 Γραφική απεικόνιση της συνάρτησης [10.4.2] στο mathematica

Στην συνέχεια καταχωρήθηκαν οι πειραματικές μετρήσεις που κάναμε στο κύκλωμα για $I_{sc}=200\text{mA}$ και $V_{oc}=18\text{V}$ τα οποία αποτυπώθηκαν και αυτά στους άξονες.



Σχ. 10.4.2 Απεικόνιση σημείων πειράματος 1

Αποτυπώνοντας τα αποτελέσματα του μαθηματικού μοντέλου με τα πειραματικά αποτελέσματα σε κοινό άξονα τιμών παρατηρούμε ότι υπάρχει μια αρκετά ικανοποιητική προσέγγιση των δύο.



Σχ. 10.4.3 Συγκριση γραφικών (σχ. 10.4.1) και (σχ. 10.4.2)

10. Τροποποιημένο σχηματικό διάγραμμα κυκλώματος ισχύος που προσεγγίζει την λειτουργία Φ/B panel του εμπορίου με ισχύ 230W

11.1 Λίστα υλικών:

Αντιστάσεις:

R1,R2,R3,R4 = 100Ω - 50W

R9= 220Ω - 5W

R10= 150Ω - 5W

R11 , R13 = 1KΩ - 1/2W

R12 = 10KΩ ΓΡΑΜΜΙΚΟ ΠΟΤΕΝΣΙΟΜΕΤΡΟ

Transistors

Q1,Q2,Q3,Q4 = MJ 15023

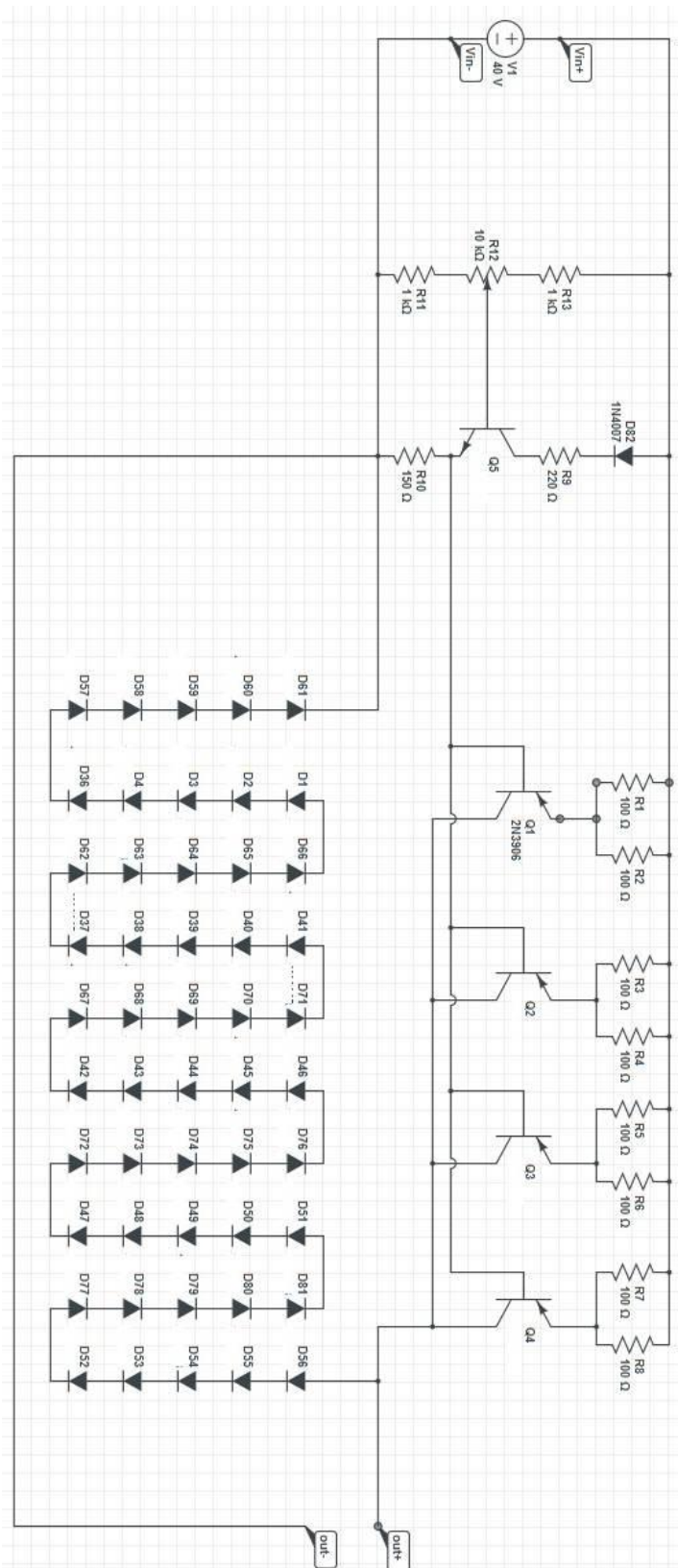
Q5 = BD139

Δίοδοι:

D37 – D87 = MUR 1520

Προσοχή πρέπει να δοθεί στην σωστή αποβολή θερμότητας το οποίο μπορεί να γίνει με την χρήση ψυκτρας για τα τρανζιστορ ισχύος καθώς επίσης και για τις διόδους.

11.2 σχηματικό διάγραμμα εξομοιωτή 230W



Σχ. 11.2

12. Αναφορές:

- [1] DEVELOPMENT OF A PHOTOVOLTAIC ARRAY EMULATOR SYSTEM BASED ON FULL-BRIDGE STRUCTURE
- [2] SOLAR ENERGY MATERIALS & SOLAR CELLS – ELSEVIER
- [3] ΟΔΗΓΟΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ Φ/Β ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΣΕ ΚΤΗΡΙΑΚΕΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ – ΚΑΠΕ
- [4] PRACTICAL HANDBOOK OF PHOTOVOLTAICS – TOM MARKVART & LUIS CASTANER
- [5] ΜΕΛΕΤΗ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ Φ/Β ΜΕΓΑΛΗΣ ΙΣΧΥΟΣ ΣΕ ΣΥΝΔΕΣΗ ΜΕ ΤΟ ΔΙΚΤΥΟ – ΔΑΛΛΑΪΝΑΣ ΔΗΜΗΤΡΗΣ
- [6] ΣΥΣΤΗΜΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ I-V ΚΑΜΠΥΛΩΝ Φ/Β ΚΥΨΕΛΩΝ ΒΑΣΙΣΜΕΝΟ ΣΤΟΝ ΜΙΚΡΟΕΛΕΓΚΤΗ MC68HC908GP32 – ΠΑΠΑΔΗΜΗΤΡΙΟΥ ΜΙΧΑΗΛ
- [7] ΙΣΤΟΤΟΠΟΣ WIKIPEDIA - <http://en.wikipedia.org/>
- [8] ENERGY COMPARISON OF MPPT TECHNIQUES FOR PV SYSTEMS – ROBERTO FARANDA, SONIA LEVA
- [9] DESIGN AND IMPLEMENTATION OF A DIGITALLY CONTROLLED STAND-ALONE PHOTOVOLTAIC POWER SUPPLY
- [10] COMPUTER SIMULATION BASED STUDY OF PHOTOVOLTAIC CELLS/MODULES AND THEIR EXPERIMENTAL VERIFICATION
- [11] A MPPT ALGORITHM FOR SINGLE- PHASE SINGLE-STAGE PV CONVERTERS – GABRIELE GRANDI , CLAUDIO ROSSI , DOMENICO CASADEI
- [12] Ο ΙΣΤΟΤΟΠΟΣ - <http://www.solardirect.com>
- [13] Ο ΙΣΤΟΤΟΠΟΣ - <http://extremeelectronics.co.in>
- [14] Ο ΙΣΤΟΤΟΠΟΣ <http://www.ni.com>
- [15] Ο ΙΣΤΟΤΟΠΟΣ <http://www.circuitlab.com>

Παράρτημα :

Φύλλα πληροφοριών κατασκευαστών

DATASHEETS