



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης

Τομέας Συστημάτων Παραγωγής

ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΜΕ PSPICE

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

ΣΤΑΜΟΥΛΗ ΜΙΛΤΙΑΔΗ

ΕΠΙΒΛΕΨΗ

ΓΕΩΡΓΙΑΚΗΣ ΠΑΥΛΟΣ, Επίκουρος Καθηγητής

ΧΑΝΙΑ

ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2008

Στους γονείς μου

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα εργασία αποτελεί τη Διπλωματική μου Εργασία στα πλαίσια των σπουδών μου στο Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης του Πολυτεχνείου Κρήτης. Η εκπόνησή της ξεκίνησε το Σεπτέμβριο του 2007 και ολοκληρώθηκε τον Νοέμβριο του 2008, υπό την επίβλεψη του Επίκουρου Καθηγητή κ. Γεωργιάκη Παύλου.

Με την ευκαιρία της παρουσίασης της εργασίας μου αυτής, θεωρώ χρέος μου να εκφράσω τις ευχαριστίες μου σε όσους συνέβαλαν αποφασιστικά στην όλη μου προσπάθεια. Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα Καθηγητή μου κ. Γεωργιάκη Παύλο, ο οποίος μου έδωσε τη δυνατότητα να ασχοληθώ με το αντικείμενο των φωτοβολταϊκών συστημάτων και με την καθοδήγηση και τις πολύτιμες συμβουλές που παρείχε, καλλιέργησε άρτιο κλίμα συνεργασίας σε όλη την πορεία της εργασίας, υπογράφοντας την επιτυχή της ολοκλήρωση.

Ένα πολύ μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένειά μου είναι το λιγότερο που θα μπορούσα να πω στους ανθρώπους εκείνους, η διαρκής υποστήριξη των οποίων στο διάστημα των χρόνων της φοίτησής μου στο Πολυτεχνείο επιβεβαίωσε για άλλη μία φορά ότι είναι πάντα δίπλα μου.

Τέλος, δε θα μπορούσα να παραλείψω να ευχαριστήσω τους φίλους μου, για τα ανεπανάληπτα φοιτητικά χρόνια που συνέθεσαν οι αξέχαστες στιγμές που περάσαμε μαζί.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η εργασία αυτή περιγράφει κάποια από τα στοιχεία Προστασίας και Ελέγχου και τα λειτουργικά χαρακτηριστικά ενός φωτοβολταϊκού συστήματος. Στόχος, είναι η μέγιστη αποδοτικότητα σε ένα σύστημα που τροφοδοτείται από αυτό. Με σκοπό να μελετηθεί η ροή της ενέργειας από την είσοδο του συστήματος προς την έξοδο και με τη βοήθεια του λογισμικού Pspice, γίνεται προσομοίωση κυκλώματος με ρυθμιστές φόρτισης μπαταρίας για σε σειρά σύνδεση, καθώς και για παράλληλη σύνδεση.

Επίσης, εκτελείται προσομοίωση φωτοβολταϊκού συστήματος με φωτοβολταϊκή γεννήτρια, DC/DC μετατροπέα, φορτίο και ανιχνευτή μέγιστου σημείου ισχύος, από την οποία συμπεραίνεται ότι ο DC/DC μετατροπέας εξασφαλίζει ορθή ανίχνευση του σημείου μέγιστης ισχύος στο σύστημα. Προτείνεται εναλλακτικό Σύστημα Προστασίας και Ελέγχου, το οποίο συντίθεται από έναν DC-DC επωθητικό μετατροπέα (boost converter) και έναν DC-AC μετατροπέα.

Για την μοντελοποίηση του εναλλάκτη ενός φωτοβολταϊκού συστήματος εξετάζονται τρία διαφορετικά μοντέλα: Το μοντέλο εναλλάκτη με RLC φορτίο, το μοντέλο εναλλάκτη για απευθείας σύνδεση φωτοβολταϊκής γεννήτριας-εναλλάκτη και τέλος το μοντέλο εναλλάκτη για σύνδεση μπαταρίας-εναλλάκτη.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ

Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, εξοπλισμός προστασίας και ελέγχου, μοντελοποίηση εναλλάκτη και ανιχνευτής βέλτιστου σημείου λειτουργίας

ABSTRACT

This Diploma Thesis analyses some of the Power Conditioning data as well as the operational characteristics of a photovoltaic system. The purpose is to identify the most efficient way of producing energy from solar power. The program Pspice was used to further study the circulation of energy from the input to the output point of the system. The simulation of the circuit is illustrated with battery charge regulators for parallel or cascade structures.

Moreover, a simulation was run on a system that incorporated a photovoltaic generator, a DC/DC converter, maximum power point tracking control (MPP) and the load. The conclusion is that the DC/DC converter ensures the correct tracking of the maximum power point in the system. It is suggested that an alternative Power Conditioning System comprised of a DC-DC boost converter and a DC/AC converter is used.

For the modeling of the inverter of a photovoltaic system three models are examined: The inverter model of RLC load, the photovoltaic generator-inverter direct connection model and finally the inverter model for battery-inverter direct connection.

KEY WORDS

Renewable Energy Sources, power conditioning, inverter modeling and maximum power point tracking.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1	Γενικά	1
1.2	Το ηλιακό φάσμα	1
1.3	Ηλεκτρονικές στοιβάδες	2
1.4	Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο	3
1.5	Φωτοβολταϊκά συστήματα	5
1.6	Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα χρήσης φωτοβολταϊκών συστημάτων	8
1.7	Στατιστικά αγοράς	10
1.8	Κεντροποιημένο, αποκεντρωμένο και κατακεντρωμένο σύστημα ενέργειας	12
1.9	Η παγκόσμια αγορά φωτοβολταϊκών συστημάτων	15
1.10	PSpice	15
1.10.1	Δομή του αρχείου εισόδου	17
1.10.2	Προσομοίωση κυκλωμάτων	17
1.11	Περιεχόμενα της εργασίας	23
1.12	Βιβλιογραφία	24

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΥ ΓΙΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ

2.1	Περίληψη	25
2.2	Εισαγωγή	25
2.3	Δίοδοι	26
2.3.1	Δίοδοι παράκαμψης για άμβλυνση της σκίασης	26
2.3.2	Δίοδοι φραγής	28
2.4	Μπαταρίες	30
2.4.1	Χρόνος ζωής συσσωρευτών	31
2.4.2	Προσδιορισμός της κατάστασης φόρτισης μπαταρίας (State Of Charge, SOC)	32
2.4.3	Εξάρτηση της χωρητικότητας συσσωρευτή από τους κύκλους λειτουργίας του με δεδομένο βάθος αποφόρτισης	32
2.4.4	Επίδραση θερμοκρασίας λειτουργίας στο χρόνο ζωής του συσσωρευτή	33
2.4.5	Αναγωγή της πυκνότητας του ηλεκτρολύτη σε θερμοκρασία αναφοράς	34
2.4.6	Ρεύμα φόρτισης συσσωρευτή	34
2.4.7	Αυτοαποφόρτιση του συσσωρευτή	35
2.4.8	Απόδοση ενέργειας και φορτίου	35
2.4.9	Συντελεστής γήρανσης συσσωρευτή	35
2.5	Τα ηλεκτρονικά των φωτοβολταϊκών	36
2.5.1	Ο ελεγκτής φόρτισης συσσωρευτή για φωτοβολταϊκά συστήματα	36

2.5.2	Μετατροπείς (converters) DC-DC, DC-AC και AC-DC	37
2.5.2.1	Μετατροπέας συνεχούς τάσεως σε συνεχή (DC-DC converter)	38
2.5.2.2	Ο μετατροπέας DC-AC (Inverter)	39
2.5.2.3	Μετατροπέας εναλλασσόμενου ρεύματος σε συνεχές (AC-DC)	43
2.6	Ρύθμιση φόρτισης της μπαταρίας	43
2.6.1	Παράλληλη ρύθμιση	43
2.6.2	Προσομοίωση κυκλώματος φωτοβολταϊκού συστήματος με παράλληλους ρυθμιστές στο Pspice	45
2.6.3	Ρύθμιση σε σειρά	49
2.6.4	Προσομοίωση κυκλώματος φωτοβολταϊκού συστήματος που περιλαμβάνει ρυθμιστή φορτίου σε σειρά.	51
2.7	Ανιχνευτής βέλτιστου σημείου λειτουργίας (Maximum power point trackers control algorithm (MPPT))	55
2.7.1	Ανιχνευτής βέλτιστου σημείου λειτουργίας, βασισμένος σε DC/DC μειωτή τάσεως (buck converter)	56
2.7.2	Ανιχνευτής βέλτιστου σημείου λειτουργίας, βασισμένος σε DC/DC επωθητικό μετατροπέα (boost converter).	58
2.8	Χαρακτηριστικά συμπεριφοράς μοντέλου ανιχνευτή βέλτιστου σημείου λειτουργίας (MPPT) στο Pspice	59
2.8.1	Προσομοίωση φωτοβολταϊκού συστήματος με φωτοβολταϊκή γεννήτρια, DC/DC μετατροπέα, φορτίο και ανιχνευτή μέγιστου σημείου ισχύος	64
2.9	Προτεινόμενος εξοπλισμός προστασίας και ελέγχου	69
2.9.1	Έλεγχος συστήματος και εκτίμηση (System Control and Estimation)	69
2.9.2	Ο MPPT αλγόριθμος	70
2.9.3	Εκτίμηση έντασης ρεύματος του φ/β	73
2.9.4	Ελεγκτής ρεύματος για ενιαίο παράγοντα ισχύος	74
2.9.5	Γρήγορη ανίχνευση της τάσης γραμμής	76
2.10	Βιβλιογραφία	79

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΕΝΑΛΛΑΚΤΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟΥ

3.1	Τεχνολογικό υπόβαθρο γνώσεων	81
3.2	Τοπολογικό μοντέλο εναλλάκτη στο Pspice	85
3.2.1	Προσομοίωση κυκλώματος εναλλάκτη με RLC φορτίο	86
3.3	Συμπεριφορά μοντέλου εναλλάκτη για απευθείας σύνδεση φωτοβολταϊκής γεννήτριας-εναλλάκτη.	93
3.3.1	Προσομοίωση κυκλώματος μοντέλου εναλλάκτη για απευθείας σύνδεση γεννήτριας-εναλλάκτη	97
3.4	Συμπεριφορά μοντέλου εναλλάκτη για σύνδεση μπαταρίας-εναλλάκτη.	103
3.4.1	Προσομοίωση κυκλώματος σύνδεσης μπαταρίας-εναλλάκτη.	103
3.5	Βιβλιογραφία	111

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	113
---------------------------------	------------

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ: ΑΡΧΕΙΑ ΤΟΥ PSPICE

Π.1	Το αρχείο module_1.lib	115
Π.2	Το αρχείο bat.cir	116
Π.3	Το αρχείο batstd.cir	120
Π.4	Το αρχείο generator_beh.lib	122
Π.5	Το αρχείο opamp.lib	124
Π.6	Βιβλιογραφία	125

1.1 ΓΕΝΙΚΑ

Η Ενέργεια δεν χρειάζεται απλά και μόνο για να διατηρεί τη ζωή. Παίζει μεγαλύτερο ρόλο στον αγώνα του ανθρώπου ενάντια στις εκκεντρικότητες της φύσης. Όσο περισσότερο την χρησιμοποιεί ο άνθρωπος για να ρυθμίζει και να θέτει σε χρήση άλλες μορφές της, τόσο περισσότερο έλεγχο αποκτά πάνω στο περιβάλλον του, επιτυγχάνοντας στόχους πολύ πέρα από την απλή επιβίωση του. Είναι όμως βασικό η μετατροπή στην απαιτούμενη μορφή να γίνεται με λογικό κόστος, χρηματικό αλλά και κοινωνικό.

1.2 ΤΟ ΗΛΙΑΚΟ ΦΑΣΜΑ

Πηγή της ηλιακής ακτινοβολίας είναι ο ήλιος, με διάμετρο 1.4 εκατομμύρια χιλιόμετρα, ο οποίος τήκει το υδρογόνο σε ήλιο. Η προκύπτουσα απώλεια μάζας μετατρέπεται σε περίπου 3.8×10^{20} MW ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας που ακτινοβολείται από την εξωτερική του επιφάνεια προς το διάστημα.

Κάθε αντικείμενο ακτινοβολεί ενέργεια σε ποσότητα, ανάλογα με την θερμοκρασία του. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι όσο μεγαλύτερη είναι η θερμοκρασία του σώματος τόσο μεγαλύτερη η ενέργεια που ακτινοβολεί. Ένας τρόπος περιγραφής της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας ενός σώματος είναι αναφορικά με το μέλαν σώμα. Μέλαν σώμα είναι ένας τέλειος εκπομπός, δηλαδή ακτινοβολεί περισσότερη ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας από οποιοδήποτε άλλο σώμα στην ίδια θερμοκρασία και τέλειος απορροφητής, απορροφά δηλαδή όλη την ακτινοβολία που προσπίπτει επάνω του. Ο νόμος του Planck περιγράφει πώς τα μήκη κύματος που εκπέμπονται από ένα μέλαν σώμα εξαρτώνται από την θερμοκρασία του. Ο νόμος εκφράζεται ως εξής:

$$E_{\lambda} = \frac{3.74 \times 10^8}{\lambda^5 \left[e^{\frac{14400}{\lambda T}} - 1 \right]} \quad (1.1)$$

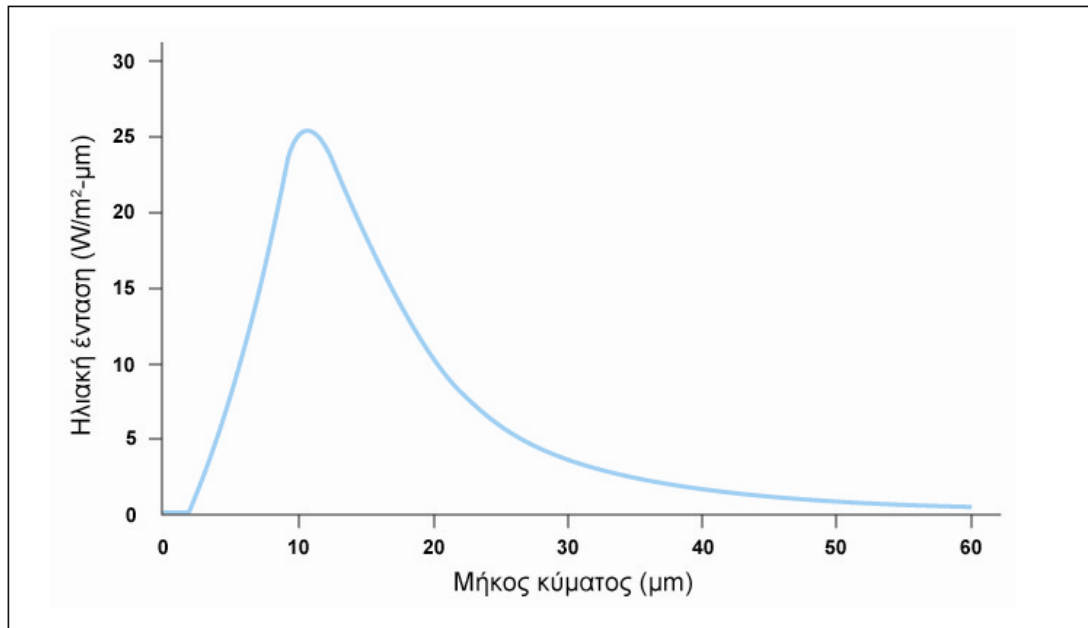
όπου:

E_{λ} : η εκπεμπόμενη ισχύς ανά μονάδα επιφάνειας του μέλαν σώματος ($\text{W/m}^2 \mu\text{m}$)

T: η απόλυτη θερμοκρασία του σώματος ($^{\circ}\text{K}$)

λ : το μήκος κύματος (μm)

Αν μοντελοποιηθεί η γη σαν μέλαν σώμα θερμοκρασίας 288°K (15°C), τότε με την βοήθεια της παραπάνω σχέσης προκύπτει το φάσμα εκπομπής του Σχήματος 1.1.



Σχήμα 1.1: Εκπεμπόμενη ισχύς φάσματος μέλανος σώματος 288 °K

Η συνολική επιφάνεια κάτω από την καμπύλη είναι ίση με την συνολική εκπεμπόμενη ισχύ φάσματος. Αυτή υπολογίζεται από τον νόμο ακτινοβολίας Stefan-Boltzmann: $E = A\sigma T^4$, όπου E ο συνολικός ρυθμός εκπομπής του μέλαν σώματος (W), σ η σταθερά Stefan-Boltzmann: $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{-K}^4$, T η απόλυτη θερμοκρασία του μέλανος σώματος (°K) και A είναι η επιφάνεια του μέλανος σώματος (m^2).

Ακόμα σύμφωνα με τον κανόνα της μετατόπισης του Wien, το μήκος κύματος στο οποίο το φάσμα εκπέμπει τη μέγιστη ακτινοβολία δίδεται από την σχέση: $\lambda_{\max} = 2898/T$, όπου το μήκος κύματος $\lambda_{\max}$ είναι σε μm και η θερμοκρασία σε °K [1.1].

1.3 ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΕΣ ΣΤΟΙΒΑΔΕΣ

Με την ανακάλυψη ορισμένων φαινομένων όπως της ραδιενέργειας, των ακτινών X κλπ, αποδείχτηκε ότι το άτομο δεν είναι άτμητο όπως πίστευαν παλιότερα, αλλά αποτελείται από άλλα απλούστερα σωματίδια. Αυτά τα θεμελιώδη σωματίδια είναι κοινά για όλα τα είδη των ατόμων και είναι τα εξής:

- Το ηλεκτρόνιο
- Το πρωτόνιο
- Το νετρόνιο

Μετά την ανακάλυψη των θεμελιωδών σωματιδίων δημιουργήθηκε το πρόβλημα του τρόπου με τον οποίο τα σωματίδια αυτά κατανέμονται μέσα στα άτομα, αν δηλαδή η μάζα και το φορτίο είναι ομοιόμορφα κατανεμημένα μέσα στο άτομο ή βρίσκονται συγκεντρωμένα σε ορισμένες περιοχές. Ο Νεοζηλανδός Ράδερφορντ (Βραβείο Νόμπελ Φυσικής 1908) έδωσε την απάντηση στο πρόβλημα αυτό. Αυτός απέδειξε πειραματικά ότι σχεδόν ολόκληρη η μάζα του ατόμου περιέχεται μέσα σε μια πολύ μικρή θετικά φορτισμένη περιοχή, τον πυρήνα του ατόμου. Γύρω από τον πυρήνα περιστρέφονται τα ηλεκτρόνια σε σταθερές τροχιές που ονομάζονται ηλεκτρονικές στοιβάδες.

Οι ηλεκτρονικές στοιβάδες ονομάζονται με τα γράμματα K, L, M, N, O, P, Q, ..., αρχίζοντας από τις πιο κοντινές στον πυρήνα και προχωρώντας προς τις πιο μακρινές. Η ενέργεια των στοιβάδων, που είναι πιο κοντά στον πυρήνα, είναι πιο μικρή από την ενέργεια των στοιβάδων που είναι πιο μακριά.

Κάθε μια ηλεκτρονική στοιβάδα μπορεί να περιέχει ορισμένο ανώτατο αριθμό ηλεκτρονίων. Όταν δηλαδή γίνει αυτό, η στοιβάδα αυτή θεωρείται συμπληρωμένη και αρχίζει να συμπληρώνεται άλλη στοιβάδα. Ο ανώτατος αριθμός των ηλεκτρονίων που μπορούν να περιληφθούν σε μια στοιβάδα δίνεται για τις τέσσερις πρώτες στοιβάδες, από τον τύπο $2n^2$, όπου ο "n" είναι ένας ακέραιος αριθμός που παίρνει τιμές από 1 έως 7. Τέλος, οποιαδήποτε στοιβάδα είναι η εξωτερική στο βόλτα του ατόμου δεν μπορεί να περιέχει περισσότερα από οκτώ ηλεκτρόνια. Εάν μια στοιβάδα είναι πιο κοντά προς την εξωτερική δεν μπορεί να περιέχει περισσότερα από δεκαοκτώ.

Εάν τώρα σε ένα ή περισσότερα ηλεκτρόνια δοθεί αρκετή ενέργεια, τότε αυτό μπορεί να εγκαταλείψει τη θεμελιώδη τροχιά και να αρχίσει να περιστρέφεται σε τροχιά που έχει μεγαλύτερη ακτίνα και συνεπώς μεγαλύτερη ενέργεια. Το φαινόμενο αυτό καλείται διέγερση του ατόμου. Η περιφορά του ηλεκτρονίου στη νέα αυτή τροχιά δεν είναι σταθερή και έτσι το ηλεκτρόνιο μέσα σε πάρα πολύ μικρό διάστημα επανέρχεται στην αρχική τροχιά. Κατά την πτώση αυτή του ηλεκτρονίου ελευθερώνεται ενέργεια που εκπέμπεται με την μορφή θερμότητας, με τη μορφή ενός φωτονίου. Η ενέργεια αυτή είναι ίση με τη διαφορά της ενέργειας της τελικής και της αρχικής τροχιάς. Η διέγερση των ατόμων μπορεί να γίνει με την επίδραση ενός εξωτερικού αίτιου όπως θερμότητα, τάση ή φως. Η πτώση του ηλεκτρονίου στη θεμελιώδη του τροχιά δεν είναι απαραίτητο να γίνει κατευθείαν με ένα μόνο άλμα, αλλά και με ενδιάμεσα άλματα από τροχιά σε τροχιά [1.2].

1.4 ΦΩΤΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ

Το 1839, ο Edmond Becquerel ανακάλυψε τη διαδικασία της δημιουργίας ηλεκτρικού ρεύματος σε ένα στερεό υλικό χρησιμοποιώντας ηλιακό φως. Οι επιστήμονες κατάφεραν τελικά να μάθουν ότι το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο αναγκάζει κάποια υλικά να μετατρέπουν την ενέργεια του φωτός σε ηλεκτρική, σε ατομικό επίπεδο.

Το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο είναι η θεμελιώδης φυσική διαδικασία με την οποία ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο μετατρέπει την ηλιακή ακτινοβολία σε ηλεκτρισμό. Όταν η ηλιακή ακτινοβολία προσπίπτει σε ένα φ/β στοιχείο, μπορεί να ανακλαστεί, να απορροφηθεί ή να διέλθει μέσω αυτού.

Η ηλιακή ακτινοβολία χρησιμοποιείται τόσο για την θέρμανση των κτιρίων με άμεσο ή έμμεσο τρόπο και με τη χρήση ενεργητικών ή και παθητικών συστημάτων, όσο και για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται με δύο τρόπους:

- με τη χρησιμοποίηση φωτοβολταϊκών συστημάτων τα οποία μετατρέπουν απευθείας την ηλιακή ενέργεια σε ηλεκτρική και
- με τα ηλιακά θερμικά συστήματα που χρησιμοποιούν την ηλιακή ενέργεια για να θερμάνουν ένα υγρό το οπού παράγει ατμό, ο οποίος τροφοδοτεί μία τουρμπίνα και μία γεννήτρια.

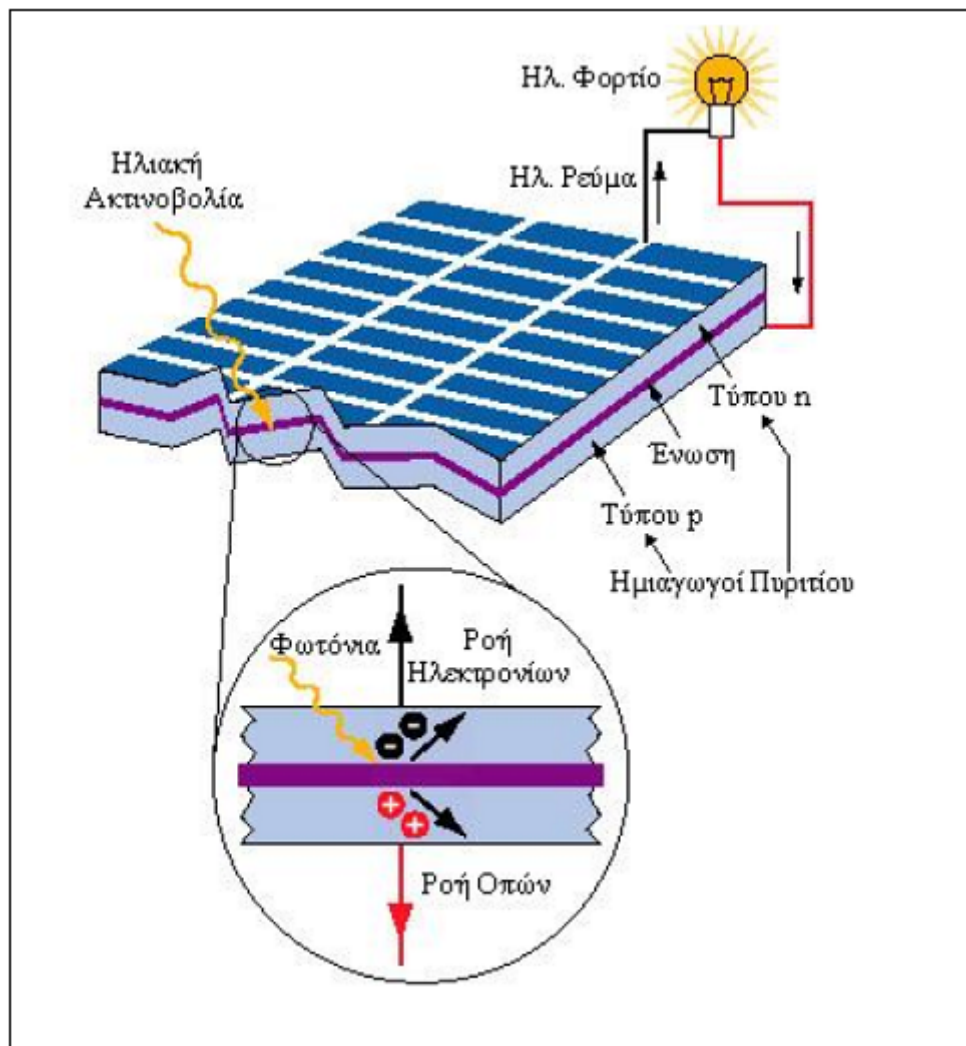
Μόνο όμως το μέρος της ακτινοβολίας που απορροφάται παράγει ηλεκτρισμό. Η ενέργεια του απορροφώμενου φωτός μεταφέρεται στα ηλεκτρόνια των ατόμων του φ/β στοιχείου. Χρησιμοποιώντας αυτή την ενέργεια, τα ηλεκτρόνια διαφεύγουν από τις κανονικές τους θέσεις στα άτομα του ημιαγωγού του φ/β στοιχείου και σχηματίζουν μια ροή ηλεκτρονίων ή αλλιώς ρεύμα σε ένα ηλεκτρικό κύκλωμα. Μια χαρακτηριστική ιδιότητα του φ/β στοιχείου, είναι αυτή που χαρακτηρίζεται σαν ενδογενές ηλεκτρικό πεδίο. Αυτό το πεδίο παρέχει τη δύναμη ή διαφορά δυναμικού που απαιτείται για να οδηγήσει το ρεύμα σε ένα εξωτερικό φορτίο.

Για την δημιουργία του ενδογενούς ηλεκτρικού πεδίου στο εσωτερικό του φ/β στοιχείου, δύο στρώματα διαφορετικών ημιαγωγικών υλικών έρχονται σε επαφή μεταξύ τους. Το ένα στρώμα είναι ένας ημιαγωγός τύπου-n με πλεόνασμα ηλεκτρονίων τα οποία έχουν αρνητικό

φορτίο. Το άλλο στρώμα είναι ένας ημιαγωγός τύπου-p με πλεόνασμα «οπών» οι οποίες έχουν θετικό φορτίο.

Παρόλο που τα δύο στρώματα, ο ημιαγωγός τύπου-n με πλεόνασμα ηλεκτρονίων και ο τύπου-p με πλεόνασμα οπών, είναι ηλεκτρικά ουδέτερα, φέρνοντας τα σε επαφή δημιουργείται μια επαφή p/n δημιουργώντας ηλεκτρικό πεδίο. Ηλεκτρόνια από τον ημιαγωγό τύπου-n μετακινούνται στην πλευρά του ημιαγωγού τύπου-p. Το αποτέλεσμα είναι η δημιουργία θετικού φορτίου στην πλευρά του ημιαγωγού τύπου-n και αρνητικού φορτίου στην πλευρά του τύπου-p.

Εξαιτίας της ροής ηλεκτρονίων και οπών, οι δύο ημιαγωγοί συμπεριφέρονται σαν μια μπαταρία, δημιουργώντας ηλεκτρικό πεδίο στην επιφάνεια επαφής η οποία καλείται επαφή p/n. Το ηλεκτρικό πεδίο αναγκάζει τα ηλεκτρόνια να κινούνται από τον ημιαγωγό προς την αρνητικά φορτισμένη επιφάνεια, όπου και γίνονται διαθέσιμα στο ηλεκτρικό κύκλωμα. Ταυτόχρονα, οι οπές κινούνται στην αντίθετη κατεύθυνση, προς τη θετική επιφάνεια όπου και «αναμένουν» εισερχόμενα ηλεκτρόνια. Η εκδήλωση της διαφοράς δυναμικού ανάμεσα στους δύο ακροδέκτες, ονομάζεται φωτοβολταϊκό φαινόμενο, ο μηχανισμός εκδήλωσης του οποίου παρουσιάζεται σχηματικά στο Σχήμα 1.2.



Σχήμα 1.2: Σχηματική παρουσίαση του φωτοβολταϊκού φαινομένου

1.5 ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

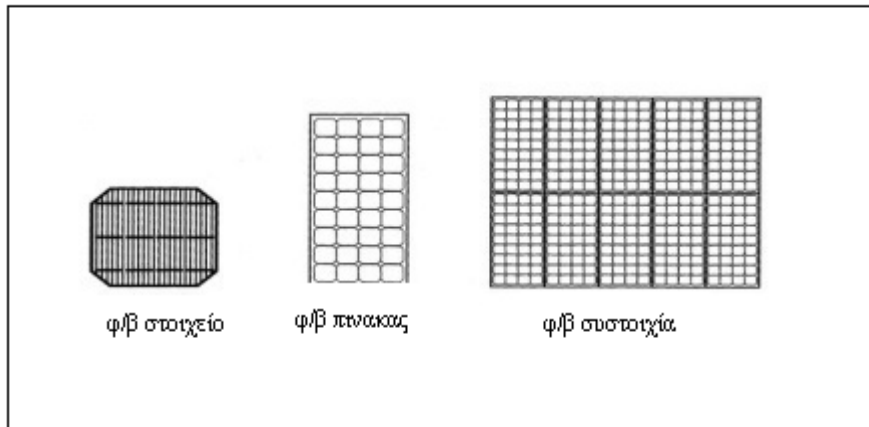
Ο όρος φωτοβολταϊκά αποτελεί μετάφραση του αγγλικού «photovoltaic». Ο όρος αυτός χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά το 1890 έχοντας σαν συνθετικά τις λέξεις photo από την ελληνική λέξη φως και volt η οποία συνδέεται με τον πρωτοπόρο στην ανάπτυξη του ηλεκτρισμού Alessandro Volta. Αναφέρεται δηλαδή στον ηλεκτρισμό από το φως. Αυτό ακριβώς κάνουν τα φωτοβολταϊκά υλικά, μετατρέπουν την ενέργεια του φωτός σε ηλεκτρική ενέργεια (φωτοηλεκτρικό φαινόμενο), όπως ανακάλυψε ο Edmond Becquerel το 1939.

Τα μεμονωμένα φωτοβολταϊκά στοιχεία (PV cells), κοινώς γνωστά σαν ηλιακά στοιχεία ή ηλιακές κυψέλες (solar cells) είναι συσκευές που παράγουν ηλεκτρισμό, κατασκευασμένες από ημιαγωγικά υλικά. Τα ημιαγωγικά υλικά δεν είναι ούτε πολύ καλό ούτε πολύ κακό αγωγοί του ηλεκτρικού ρεύματος. Η αγωγιμότητα των ημιαγωγών βρίσκεται μεταξύ των δύο άκρων, δηλαδή των αγωγών και των μονωτών. Οι πιο καλοί ημιαγωγοί έχουν τέσσερα ηλεκτρόνια σθένους. Ο πλέον χρησιμοποιούμενος αγωγός στην πράξη είναι το πυρίτιο. Άλλοι ημιαγωγοί είναι το γερμάνιο και το αρσενικούχο γάλλιο. Το ηλεκτρικό ρεύμα στους ημιαγωγούς οφείλεται τόσο στη ροή ελεύθερων ηλεκτρονίων (αρνητικών φορτίων), όσο και στη ροή θετικών φορτίων (οπών).

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία κατασκευάζονται σε διάφορα μεγέθη και σχήματα, από μικρότερα του ενός γραμματοσήμου μέχρι αρκετά εκατοστά. Καθώς ένα φ/β στοιχείο παράγει μόνο περίπου 0.5 V, το φ/β στοιχείο από μόνο του δεν έχει πρακτικές εφαρμογές. Αντίθετα, η βασική δομική μονάδα είναι το φ/β πλαίσιο ή φωτοβολταϊκός πίνακας που αποτελείται από προκαλωδιωμένα φ/β στοιχεία σε σειρά. Ένα τυπικό φ/β πλαίσιο έχει 36 φ/β στοιχεία σε σειρά και συχνά ονομάζεται “φ/β πλαίσιο 12V” αν και μπορεί να παράγει πολύ μεγαλύτερες τάσεις από 12 Volt.

Τα φ/β στοιχεία μετατρέπουν την ηλιακή ενέργεια σε ηλεκτρική, με τη βοήθεια του φωτοηλεκτρικού φαινομένου όπως αναφέρθηκε παραπάνω. Η απόδοση των φ/β στοιχείων εξαρτάται από το υλικό και τον τρόπο κατασκευής τους. Οι πιο συνηθισμένοι τύποι φ/β στοιχείων είναι τα μονοκρυσταλλικά στοιχεία πυριτίου και τα άμορφα πολυκρυσταλλικά στοιχεία. Τα στοιχεία αυτά διαφέρουν τόσο ως προς τον τρόπο κατασκευής τους, όσο και ως προς τα χαρακτηριστικά τους (χρώμα, εμφάνιση, ανακλαστικότητα, και ούτω καθεξής).

Πολλά φ/β πλαίσια μπορούν να συνδεθούν σε σειρά για να αυξηθεί η τάση, όπως επίσης πολλά φ/β πλαίσια μπορούν να συνδεθούν παράλληλα για να αυξηθεί το ρεύμα. Μία σημαντική παράμετρος στη σχεδίαση των φωτοβολταϊκών συστημάτων είναι η απόφαση για το πλήθος των φ/β πλαισίων που θα πρέπει να συνδεθούν σε σειρά ή παράλληλα για να παράγεται η ζητούμενη ενέργεια. Ένας τέτοιος συνδυασμός φ/β πλαισίων ονομάζεται φ/β συλλέκτης ή φ/β συστοιχία. Στο Σχήμα 1.3, απεικονίζονται αντίστοιχα ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο, ένας φωτοβολταϊκός πίνακας και μια φωτοβολταϊκή συστοιχία.



Σχήμα 1.3: Φωτοβολταϊκό στοιχείο, φωτοβολταϊκός πίνακας, φωτοβολταϊκή συστοιχία

Το απαιτούμενο μέγεθος μιας φωτοβολταϊκής συστοιχίας εξαρτάται από μια πληθώρα παραγόντων, όπως η ποσότητα του ηλιακού φωτός που είναι διαθέσιμη σε μια δεδομένη τοποθεσία και τις ενεργειακές απαιτήσεις του καταναλωτή. Οι φωτοβολταϊκοί πίνακες της συστοιχίας αποτελούν το κύριο μέρος ενός φωτοβολταϊκού συστήματος, το οποίο μπορεί να περιλαμβάνει ηλεκτρικές συνδέσεις, μηχανισμούς στήριξης, ρυθμιστές ενέργειας και μπαταρίες για τις περιπτώσεις όπου απαιτείται ενέργεια όταν ο ήλιος έχει δύσει.

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα είναι ήδη μέρος της καθημερινής ζωής. Απλά φ/β συστήματα παρέχουν ενέργεια για μικρές συσκευές όπως υπολογιστές τσέπης και ρολόγια χειρός. Πιο πολύπλοκα φ/β συστήματα χρησιμοποιούνται για να τροφοδοτήσουν με ενέργεια τηλεπικοινωνιακούς δορυφόρους, αντλίες νερού, συσκευές, μηχανές, καθώς και σπίτια και χώρους εργασίας αρκετών ανθρώπων. Πολλά επίσης φώτα δρόμων και τηλεφωνικοί θάλαμοι τροφοδοτούνται με ενέργεια από φ/β συστήματα. Σε πολλές περιπτώσεις η ενέργεια από τα φ/β συστήματα αποτελεί την φθηνότερη λύση για ηλεκτρική ενέργεια.

Οι βασικοί τύποι Φ/Β συστημάτων είναι οι εξής:

- **Αυτόνομο σύστημα.** Το σύστημα αυτό έχει τη δυνατότητα παροχής συνεχούς ή εναλλασσόμενου ρεύματος με τη χρήση μετατροπέα ισχύος (αντιστροφέα).
- **Σύστημα συνδεδεμένο με το δίκτυο.** Το σύστημα αυτό αποτελείται από μια συστοιχία φ/β στοιχείων, η οποία μέσω ενός αντιστροφέα είναι συνδεδεμένη με το ηλεκτρικό δίκτυο. Συνήθως, σε εφαρμογές μικρής εγκατεστημένης ισχύος, όπου τα φ/β πρέπει να καλύψουν συγκεκριμένο φορτίο, το δίκτυο χρησιμοποιείται ως μέσο για την προσωρινή αποθήκευση της παραγόμενης ενέργειας. Σε κεντρικά συστήματα μεγάλης εγκατεστημένης ισχύος, η παραγόμενη από τα φ/β στοιχεία ενέργεια παρέχεται απευθείας στο ηλεκτρικό δίκτυο.
- **Υβριδικό σύστημα.** Το σύστημα αυτό είναι αυτόνομο και απο ελείται από τη φωτοβολταϊκή συστοιχία που λειτουργεί σε συνδυασμό με άλλες πηγές ενέργειας (παραδείγματος χάριν, σε συνδυασμό με μια γεννήτρια πετρελαίου ή με άλλη ανανεώσιμη πηγή ενέργειας, όπως μια ανεμογεννήτρια).
- **Σύστημα μικρής ισχύος.** Το σύστημα αυτό εγκαθίσταται συνήθως σε κτίρια που διαθέτουν ενεργητικά ή παθητικά ηλιακά συστήματα. Χρησιμοποιείται συχνά για τη λειτουργία αντλιών ή ανεμιστήρων συνεχούς ρεύματος που χρησιμοποιούνται για την κυκλοφορία του αέρα ή του νερού στους ηλιακούς συλλέκτες. Έχει ενσωματωμένο ρυθμιστή ισχύος ο οποίος διακόπτει τη λειτουργία του φ/β συστήματος, όταν η ηλιακή ενέργεια δεν επαρκεί, και δεν απαιτεί τη χρήση συσσωρευτών για την

αποθήκευση της ενέργειας. Σε ορισμένες περιπτώσεις, αποτελείται από μόνο ένα φ/β πλαίσιο, το οποίο τροφοδοτεί έναν μικρό ανεμιστήρα που το χειμώνα χρησιμεύει για την κυκλοφορία του θερμού αέρα από ένα θερμοκήπιο στο υπόλοιπο κτίριο ή τον αερισμό των υπερθερμαινόμενων χώρων το καλοκαίρι.

Τα φωτοβολταϊκά μπορούν να τοποθετηθούν σε οικόπεδα, στέγες (επίπεδες και κεκλιμένες) ή και σε προσόψεις κτιρίων.

Υπάρχουν δύο τρόποι να τα χρησιμοποιήσει κανείς:

- ανεξάρτητα από το δίκτυο της ΔΕΗ
- σε συνεργασία με αυτό

Μια φωτοβολταϊκή εγκατάσταση μπορεί να αποτελεί λοιπόν ένα αυτόνομο σύστημα που να καλύπτει το σύνολο των ενεργειακών αναγκών ενός κτιρίου ή μιας επαγγελματικής χρήσης. Για τη συνεχή εξυπηρέτηση του καταναλωτή, η εγκατάσταση θα πρέπει να περιλαμβάνει και μια μονάδα αποθήκευσης και διαχείρισης της ενέργειας (μπαταρία).

Εναλλακτικά, ένα σύστημα παραγωγής ηλεκτρισμού με φωτοβολταϊκά μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε συνδυασμό με το δίκτυο της ΔΕΗ (διασυνδεδεμένο σύστημα). Στην περίπτωση αυτή, καταναλώνει κανείς ρεύμα από το δίκτυο όταν το φωτοβολταϊκό σύστημα δεν επαρκεί (π.χ. όταν έχει συννεφιά ή κατά τη διάρκεια της νύχτας), και δίνει ενέργεια στο δίκτυο όταν η παραγωγή υπερκαλύπτει τις ανάγκες του, π.χ. τις ηλιόλουστες ημέρες ή όταν λείπει κανείς.

Σε ορισμένες περιπτώσεις, τα φωτοβολταϊκά χρησιμοποιούνται για παροχή ηλεκτρικής ενέργειας εφεδρείας (δηλαδή ως συστήματα αδιάλειπτης παροχής – UPS). Στην περίπτωση αυτή, το σύστημα είναι μεν διασυνδεδεμένο με τη ΔΕΗ, αλλά διαθέτει και μπαταρίες (συν όλα τα απαραίτητα ηλεκτρονικά) για να αναλαμβάνει την κάλυψη των αναγκών σε περίπτωση διακοπής του ρεύματος και για όσο διαρκεί αυτή.

Ένα τυπικό φωτοβολταϊκό ισχύος 1 κιλοβάτ (kW) παράγει κατά μέσο όρο 1 200-1.500 κιλοβατώρες (KWh) το χρόνο (ανάλογα με την ηλιοφάνεια της περιοχής) και αποτρέπει κατά μέσο όρο κάθε χρόνο την έκλυση 1 45 0 κιλών διοξειδίου του άνθρακα, όσο δηλαδή θα απορροφούσαν δύο στρέμματα δάσους.

Τα φωτοβολταϊκά εγγυώνται:

- 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 μπορούν να χρησιμοποιηθούν και ως δομικά υλικά, υποκαθιστώντας άλλα παραδοσιακά υλικά (π.χ. κεραμοσκεπές ή υαλοστάσια σε προσόψεις). Κατά αυτό τον τρόπο εξοικονομούνται χρήματα και φυσικό CO_2 . Στην περίπτωση μάλιστα των υαλοστασίων σε προσόψεις εμπορικών κτιρίων, διατίθενται σήμερα διαφανή φωτοβολταϊκά με θερμομονωτικές ιδιότητες αντίστοιχες με αυτές των υαλοστασίων χαμηλής εκπνευσιμότητας (low-e), τα οποία επιτυγχάνουν (πέραν της ηλεκτροπαραγωγής) και εξοικονόμηση ενέργειας 15-30% σε σχέση με ένα κτίριο με συμβατικά υαλοστάσια[1.3].

1.6 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΧΡΗΣΗΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

Εκτός από τα παραπάνω πλεονεκτήματα που αναφέρθηκαν, τα φωτοβολταϊκά συνεπάγονται σημαντικά οφέλη για το περιβάλλον και την κοινωνία. Οφέλη για τον καταναλωτή, για την αγορά 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.

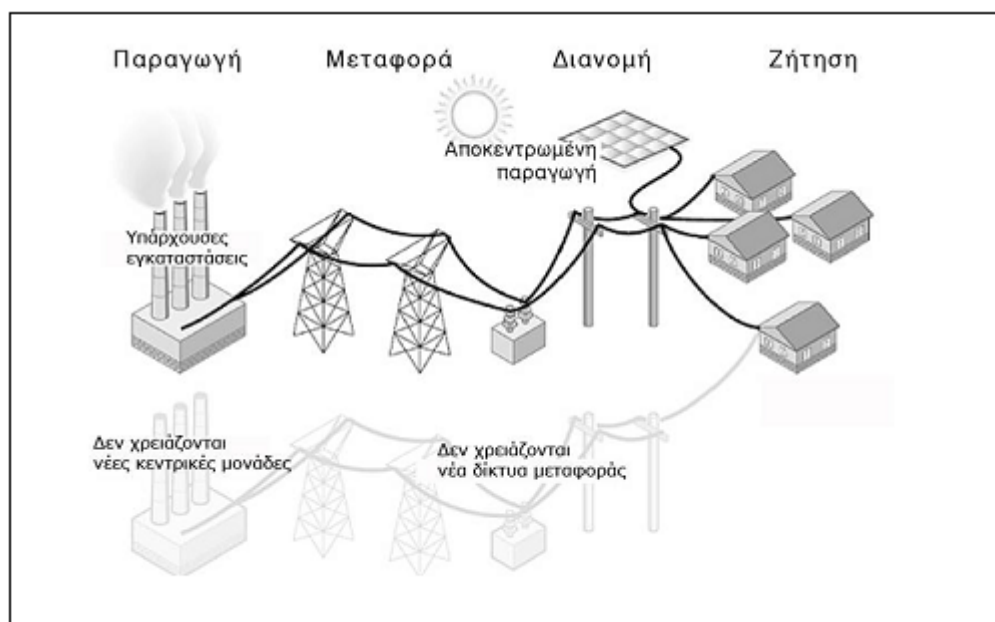
Η ηλιακή ενέργεια είναι μια καθαρή, ανεξάντλητη, ήπια και ανανεώσιμη ενεργειακή πηγή. Η ηλιακή ακτινοβολία δεν ελέγχεται από κανέναν και αποτελεί ένα ανεξάντλητο εγχώριο ενεργειακό πόρο, που παρέχει ανεξαρτησία, προβλεψιμότητα και ασφάλεια στην ενεργειακή τροφοδοσία.

Τα φωτοβολταϊκά, τα οποία μετατρέπουν την ηλιακή ακτινοβολία σε ηλεκτρικό ρεύμα, θεωρούνται τα ιδανικά συστήματα ενεργειακής μετατροπής καθώς χρησιμοποιούν την πλέον διαθέσιμη πηγή ενέργειας στον πλανήτη και παράγουν ηλεκτρισμό, που αποτελεί την πιο χρήσιμη μορφή ενέργειας.

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. Η εμπειρία της Δανίας π.χ. έδειξε μείωση της συνολικής κατανάλωσης ηλεκτρισμού από χρήστες φωτοβολταϊκών, της τάξης του 5-10%.

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. Επίσης όταν η παραγωγή λαμβάνει χώρα κοντά στην κατανάλωση αποφεύγονται οι μεγάλες κεντρικές μονάδες και τα ακριβά δίκτυα με τις μεγάλες απώλειες. Στο Σχήμα 1.4 απεικονίζεται ένα παράδειγμα αποκεντρωμένου συστήματος. Σε ένα αποκεντρωμένο σύστημα, η παραγωγή γίνεται με μικρές μονάδες κοντά στην κατανάλωση και αποφεύγονται έτσι οι μεγάλες κεντρικές μονάδες και τα ακριβά δίκτυα με τις μεγάλες απώλειες.



Σχήμα 1.4: Αποκεντρωμένο σύστημα

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. Η επιχείρηση που αποδέχεται τα φωτοβολταϊκά συστήματα θα προσελκύσει πελάτες-παραγωγούς που θα χρησιμοποιούν φωτοβολταϊκά, θα παράγουν ενέργεια και θα πουλούν στη συνέχεια σε αυτήν καθαρή ενέργεια. Σε ένα περιβάλλον απελευθερωμένης αγοράς, τέτοιοι πελάτες-παραγωγοί μπορεί να βρίσκονται οπουδήποτε.

Ακόμα, 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).

Τα περιβαλλοντικά πλεονεκτήματα των φωτοβολταϊκών είναι αδιαμφισβήτητα. Κάθε κιλοβατώρα (Kwh) που παράγεται από φωτοβολταϊκά και άρα όχι από συμβατικά καύσιμα,

συνεπάγεται την αποφυγή έκλυσης ενός περίπου κιλού διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα (με βάση το σημερινό ενεργειακό μείγμα στην Ελλάδα και τις μέσες απώλειες του δικτύου). Ένα τυπικό φωτοβολταϊκό σύστημα, συνεπάγεται λιγότερες εκπομπές άλλων επικίνδυνων ρύπων (όπως τα αιωρούμενα μικροσωματίδια, τα οξείδια του αζώτου, οι ενώσεις του θείου, κλπ). Οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα πυροδοτούν το φαινόμενο του θερμοκηπίου και αλλάζουν το κλίμα της Γης, ενώ η ατμοσφαιρική ρύπανση έχει σοβαρές επιπτώσεις στην υγεία και το περιβάλλον.

Ο παρακάτω πίνακας συνοψίζει την ποσότητα των ρύπων (σε γραμμάρια) η έκλυση των οποίων αποφεύγεται για κάθε ηλιακή κιλοβατώρα που παράγεται από ένα φωτοβολταϊκό σύστημα.

Πίνακας 1.1: Ποσότητα ρύπων που αποφεύγεται

Υποκατάσταση	Αποφυγή εκλυόμενων ρύπων (σε gr) ανά ηλιακή κιλοβατώρα			
	CO ₂	SO ₂	Nox	PM ₁₀
Λιγνίτη	1.482	1-1,8	1,17-1,23	1,1
Πετρελαίου (χαμηλού θείου)	830	3,50	1,5	0,34
Φυσικού αερίου	475	0,017	0,6	-

Τα μειονεκτήματα χρήσης φωτοβολταϊκών συστημάτων είναι, 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[1.4].

1.7 ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΑ ΑΓΟΡΑΣ

Η αγορά φωτοβολταϊκών οδηγείται σε τέλμα, αφού το πρωτόγνωρο επενδυτικό ενδιαφέρον που εκδηλώθηκε το 2007 δεν μεταφράστηκε σε πραγματικά έργα. Αιτία, οι γραφειοκρατικές αγκυλώσεις που εμποδίζουν την απρόσκοπτη ανάπτυξη της αγοράς και ακυρώνουν στην πράξη το θεσμικό πλαίσιο που ισχύει από το 2006.

Σύμφωνα με τα νεότερα, ως και τα τέλη Ιανουαρίου είχαν υποβληθεί για έγκριση πάνω από 7.800 αιτήσεις για εγκατάσταση φωτοβολταϊκών, συνολικής ισχύος 3.430 μεγαβάτ (MW). Σύμφωνα με τον προγραμματισμό του Υπουργείου Ανάπτυξης, μέχρι το 2010 θα πρέπει να έχουν αδειοδοτηθεί έργα συνολικής ισχύος 790 MW.

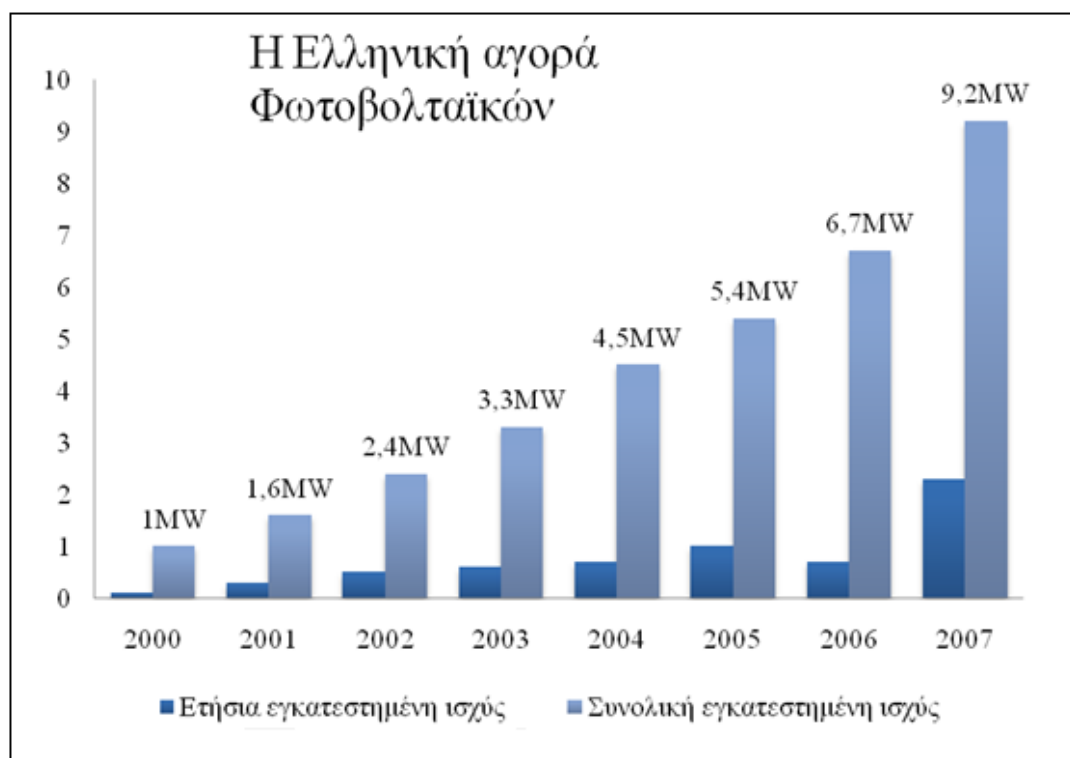
Παρόλο όμως το πέραν πάσης προσδοκίας επενδυτικό ενδιαφέρον, η αγορά κινείται ακόμη με εξαιρετικά αργούς ρυθμούς. Σύμφωνα με τα στατιστικά στοιχεία που συγκέντρωσε ο Σύνδεσμος Εταιριών Φωτοβολταϊκών (ΣΕΦ), το 2007 εγκαταστάθηκαν συνολικά 2,5 MW φωτοβολταϊκών. Αν και το νούμερο αυτό συνιστά αύξηση 100% σε σχέση με τα εγκατεστημένα συστήματα του 2006, είναι εξαιρετικά μικρό, όχι μόνο συγκρινόμενο με τις αιτήσεις που κατατέθηκαν, αλλά και με τις επιδόσεις άλλων χωρών. Εκτιμάται, για παράδειγμα, ότι μόνο δύο χώρες, η Γερμανία και η Ισπανία, εγκατέστησαν το 2007 περίπου 2.000 MW φωτοβολταϊκών.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα στατιστικά της αγοράς για το έτος 2007.

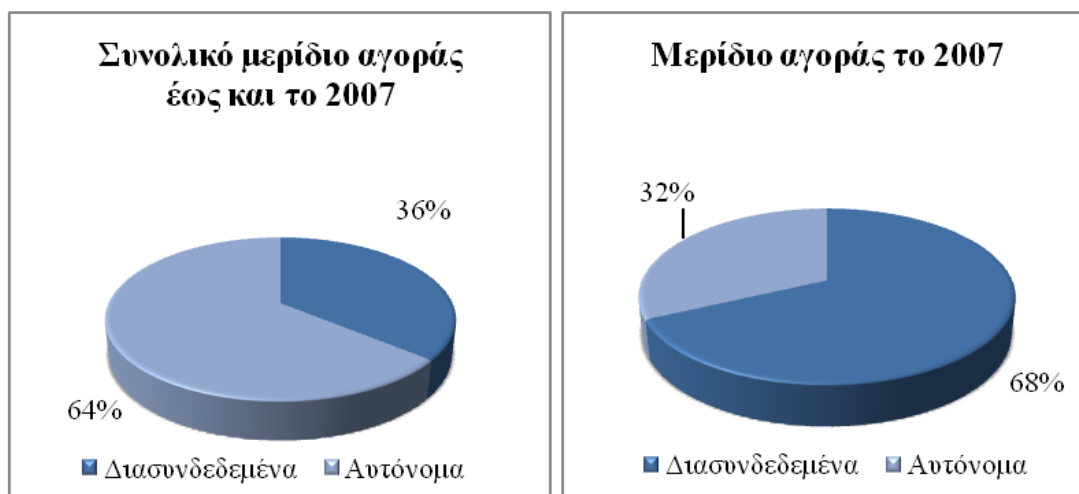
Πίνακας 1.2: Εγκαταστάσεις φωτοβολταϊκών συστημάτων το 2007

Εγκαταστάσεις φωτοβολταϊκών συστημάτων το 2007	Διασυνδεδεμένα	Αυτόνομα	Σύνολο
	1,69 MW (68%)	0,785 MW (32%)	2,475 MW

Από τα συστήματα που εγκαταστάθηκαν μέσα στο 2007 τα τέλη του χρόνου λειτουργούσαν 0,645 MW διασυνδεδεμένων και 0,785 MW αυτόνομων συστημάτων. Τα υπόλοιπα διασυνδεδεμένα συστήματα που εγκαταστάθηκαν, αναμένεται να αρχίσουν τη λειτουργία τους μέσα στο 2008. Στο Σχήμα 1.5 φαίνεται διαδοχικά ανά έτος η αύξηση της ετήσιας και της συνολικής εγκατεστημένης ισχύος αντίστοιχα.

**Σχήμα 1.5:** Η ελληνική αγορά φωτοβολταϊκών

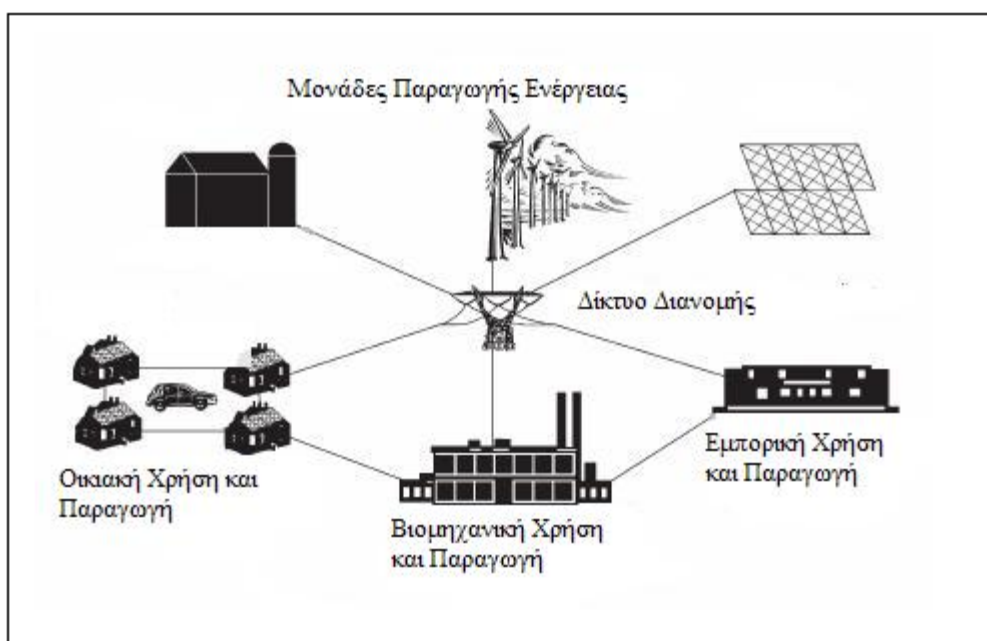
Όπως διαπιστώνεται και από τα παρακάτω γραφήματα, το 2007 ήταν η πρώτη χρονιά που τα διασυνδεδεμένα συστήματα υπερτερούν σαφώς των αυτόνομων[1.5].



Σχήμα 1.6: Συνολικό μερίδιο αγοράς έως το 2007, μερίδιο αγοράς το 2007

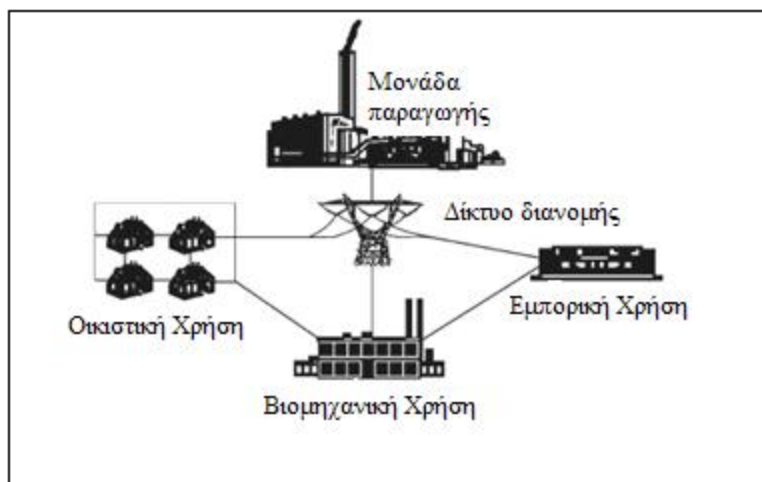
1.8 ΚΕΝΤΡΙΚΟΠΟΙΗΜΕΝΟ, ΑΠΟΚΕΝΤΡΙΚΟΠΟΙΗΜΕΝΟ ΚΑΙ ΚΑΤΑΝΕΜΗΜΕΝΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Τον προηγούμενο αιώνα, η ηλεκτρική ενέργεια παραγόταν σε μεγάλες μονάδες παραγωγής και μεταφερόταν στους καταναλωτές μέσω δικτύων διανομής.



Σχήμα 1.7: Σχεδιάγραμμα ενός κατανεμημένου συστήματος

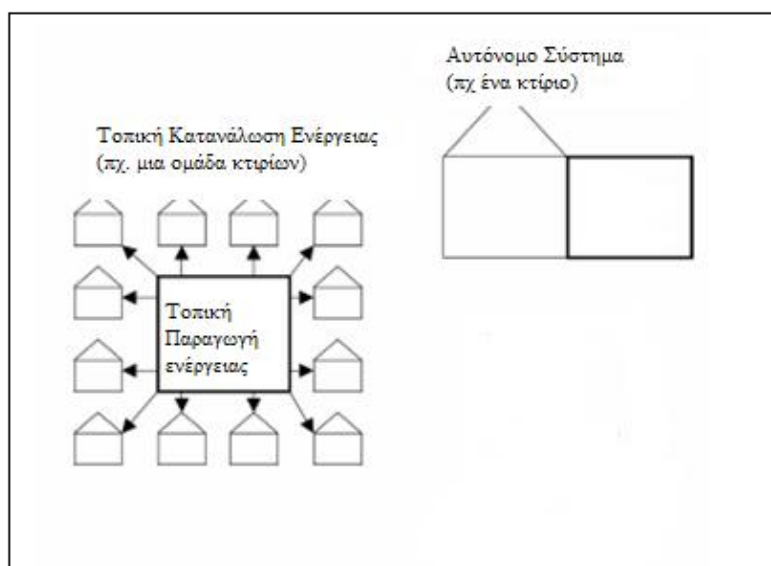
Ένα κατανεμημένο σύστημα ενέργειας (Σχήμα 1.7) μπορεί να θεωρηθεί το αντίθετο ενός κεντροποιημένου συστήματος ενέργειας (Σχήμα 1.8). Γενικά θεωρείται ότι αναφέρεται σε μικρής κλίμακας (μικρότερα των 200 kW) ενεργειακές μονάδες που έχουν τοποθετηθεί στην ίδια τοποθεσία με ένα σημείο ενεργειακής κατανάλωσης και χρησιμοποιούνται από έναν μικρό αριθμό ανθρώπων[1.6].



Σχήμα 1.8: Σχεδιάγραμμα ενός κεντροποιημένου συστήματος

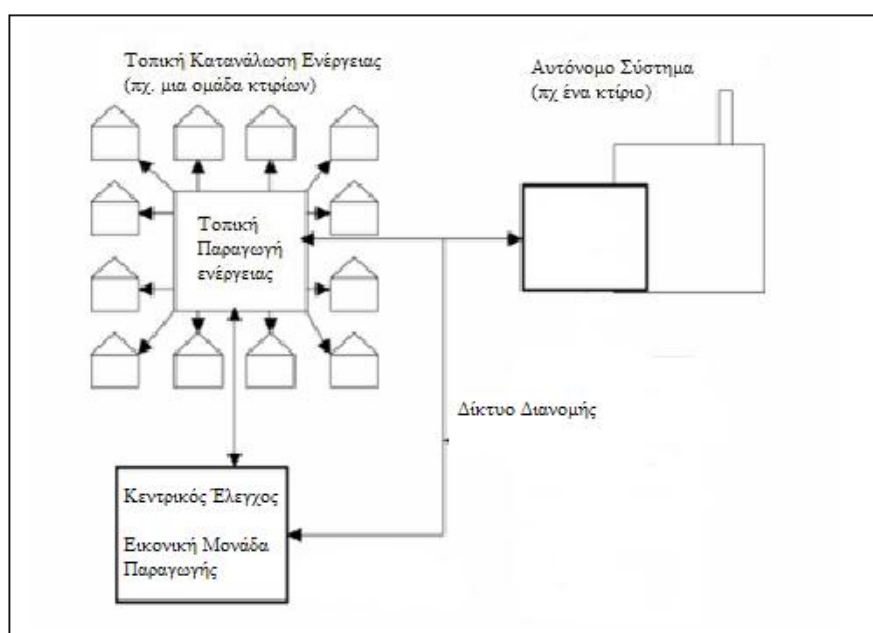
Οι όροι «αποκεντροποιημένο» και «κατανεμημένο» εξηγούν πώς οι μονάδες παραγωγής ενσωματώνονται στο ολικό σύστημα. Για την εξήγηση της διαφοράς των συστημάτων, θα χρησιμοποιηθεί η αναλογία των συστημάτων ενέργειας με τα πληροφοριακά συστήματα. Οι αποκεντροποιημένες μονάδες (στα πληροφοριακά συστήματα) είναι αυτόνομες και δεν έχουν καμία αλληλεπίδραση με τις άλλες μονάδες [1.7]. Γενικά ισχύει ότι όλα τα αποκεντροποιημένα συστήματα είναι κατανεμημένα, αλλά ένα κατανεμημένο δεν είναι απαραίτητα κεντροποιημένο. Έτσι είναι λογικό να χρησιμοποιείται ο πιο γενικός όρος «κατανεμημένα» στο πλαίσιο των ενεργειακών συστημάτων.

Η ενεργειακή κατανάλωση είναι αποκεντροποιημένη εκ φύσεως. Έτσι, το αν ένα ενεργειακό σύστημα είναι κεντροποιημένο, αποκεντροποιημένο ή κατανεμημένο έχει σχέση με την παραγωγή ενέργειας. Στο μέλλον ίσως ένα ολόκληρο ενεργειακό σύστημα μπορεί να ενσωματωθεί σε ένα κτίριο. [1.8] Πρακτικά αυτό αναφέρεται σε ένα κτίριο που βρίσκεται σε αγροτική περιοχή και δεν υπάρχει τρόπος σύνδεσης στο δημόσιο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Έτσι, αυτό το κτίριο, που είναι εξοπλισμένο με μονάδες παραγωγής ανανεώσιμης ενέργειας και μονάδες αποθήκευσης θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας, αποτελεί ένα από τα καλύτερα παραδείγματα αποκεντροποιημένης παραγωγής ενέργειας. Στο Σχήμα 1.9 παρουσιάζεται ένα παράδειγμα αποκεντροποιημένου συστήματος παραγωγής ενέργειας.



Σχήμα 1.9: Παράδειγμα αποκεντριοποιημένου συστήματος παραγωγής ενέργειας

Στην περίπτωση των κατανεμημένων συστημάτων παραγωγής ενέργειας μία «εικονική μονάδα παραγωγής» παρουσιάζεται ως λύση για την παροχή ενέργειας μίας μεγάλης περιοχής. Αυτό σημαίνει ότι το ενεργειακό σύστημα αποτελείται από μία κεντροποιημένη μονάδα ελέγχου και πολυάριθμες μονάδες παραγωγής και μετατροπής ηλεκτρικής ενέργειας[1.9]. Η μονάδα ελέγχου δέχεται πληροφορίες για τη λειτουργική κατάσταση του δικτύου και καθορίζει με ποιον τρόπο καλύπτονται οι ανάγκες του δικτύου κάθε στιγμή. Αφού κάθε μονάδα μετατροπής συνδέεται στο δημόσιο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας, η αμφίπλευρη εμπορική ανταλλαγή γίνεται δυνατή. Στο Σχήμα 1.10 παρουσιάζεται ένα παράδειγμα κατανεμημένου συστήματος παραγωγής ενέργειας.



Σχήμα 1.10 : Παράδειγμα κατανεμημένου συστήματος παραγωγής ενέργειας

1.9 Η ΠΑΓΚΟΣΜΙΑ ΑΓΟΡΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

Η παγκόσμια αγορά για τα φωτοβολταϊκά συστήματα ξεπέρασε τα 200MW το 1999 και μπορεί να φθάσει τα 1800MW το 2010 - δεδομένου ότι το κόστος εγκατάστασης για τα εντός δικτύου Φωτοβολταϊκά συστήματα αναμένεται να μειωθεί σε λιγότερο από \$3/W το 2010.

Κατά την διάρκεια του 1996, οι παράγοντες «Καταναλωτής» και «Επικοινωνία» κυριάρχησαν στην αγορά των Φωτοβολταϊκών Συστημάτων, σε μέγεθος και ανάπτυξη. Το 1997 με την εμφάνιση του Ιαπωνικού προγράμματος Φωτοβολταϊκών Στεγών και την ολοκλήρωση κτιρίων με PV (BIPV) στην Ευρώπη, ο εντός δικτύου οικιακός και εμπορικός τομέας που περιλαμβάνει το ιδιωτικό οικιακό τομέα, BIPV και άλλους εμπορικούς εντός δικτύου εξοπλισμούς, εξελίχθηκαν σε έναν τεράστιο και γρήγορα αναπτυσσόμενο κομμάτι της αγοράς. Για περισσότερο από 15 χρόνια, από το 1980, ο Δ.Μ.Τ.Δ. (Διασυνδεδεμένος Με Το Δίκτυο) τομέας έφθανε λιγότερο από 1MW ανά έτος παγκοσμίως, με τα περισσότερα σχέδια να ολοκληρώνονται με την κρατική υποστήριξη σε ποσοστό 80-100%.

Το 1995-1996, ξεκίνησε η εφαρμογή του ιαπωνικού προγράμματος κατασκευής στεγών με φωτοβολταϊκό σύστημα (με στόχο την ενίσχυσή του το Σεπτέμβριο του 1998, με 5GW σε 1,4 εκατομμύρια σπίτια), οι πωλήσεις παρουσίασαν ενδεικτική αύξηση.

Το Γερμανικό πρόγραμμα των «100.000 Στεγών», το 1998 και 1999 κυριολεκτικά καθυστέρησε τις εισαγωγές στη χώρα (Γερμανία) εξαιτίας της πολιτικής και διοικητικής αβεβαιότητας που επικρατούσε σχετικά με την εφαρμογή-υλοποίηση του προγράμματος. Το 1996 ο εντός δικτύου τομέας ανέβηκε στην έβδομη θέση από την έκτη που κατείχε, και μέσα σε περίοδο 3 χρόνων στην πρώτη θέση. Στην ουσία όλη αυτή η ανάπτυξη οφειλόταν στην εφαρμογή του επιχορηγούμενου ιαπωνικού προγράμματος κατασκευής οροφών με φωτοβολταϊκά συστήματα.

Τα Φωτοβολταϊκά συστήματα παραγωγής ενέργειας προσπάθησαν επίσης να προβλέψουν τις εξελίξεις στην παγκόσμια αγορά μέχρι το 2010. Σε αυτή την πρόβλεψη, η μέση ανάπτυξη είναι περίπου 25% ανά χρόνο. Ο πιο γρήγορα αναπτυσσόμενος τομέας είναι ο Δ.Μ.Τ.Δ. Ας σημειωθεί ότι προβλέπεται πως τα κόστη του σχεδιασμού και της εγκατάστασης των εντός δικτύου συστημάτων, θα μειωθούν. Αυτή η μείωση του κόστους εγκατάστασης είναι ζωτικής σημασίας για την ανάπτυξη της αγοράς αφού οι αλλαγές διαμορφώνονται ή υπαγορεύονται από πολιτικές τάσεις.

1.10 PSPICE

Διατίθενται πολλά προγράμματα γενικής χρήσης προσανατολισμένα προς το κύκλωμα. Κάποια από αυτά είναι το SPICE, το EMPT το SABER και το KREAN. Δύο από αυτά, το SPICE και το EMPT, είναι εύκολα διαθέσιμα και σε ευρεία χρήση. Και τα δύο έχουν τα δυνατά και τα αδύνατα σημεία τους. Το SPICE αναπτύχθηκε για την προσομοίωση ολοκληρωμένων κυκλωμάτων, ενώ το EMPT αναπτύχθηκε για τη μοντελοποίηση συστημάτων ισχύος.

Η συντομογραφία SPICE προέρχεται από τα αρχικά των λέξεων Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis, δηλαδή Πρόγραμμα με Έμφαση σε Ολοκληρωμένα Κυκλώματα. Αναπτύχθηκε στο πανεπιστήμιο Berkley της Καλιφόρνια. Το SPICE μπορεί να χειριστεί μη γραμμικότητες και παρέχει αυτόματο έλεγχο στο βήμα της ολοκλήρωσης. Υπάρχουν αρκετές εμπορικές παραλλαγές του SPICE για λειτουργία σε προσωπικούς Η/Υ κάτω από αρκετά κοινά λειτουργικά συστήματα. Μια εμπορική έκδοση του SPICE ονομάζεται PSpice.

Το Pspice είναι ένα πρόγραμμα το οποίο χρησιμοποιείται για να προσομοιώσει (simulate) τη λειτουργία ενός κυκλώματος. Η ιδέα του συλλήφθηκε στο πανεπιστήμιο Berkeley της Καλιφόρνια των ΗΠΑ περίπου το 1975. Αν και αρχικά γράφτηκε για λειτουργικά συστήματα

τύπου Unix®, εν τούτοις έχουν βγει πολλές εκδόσεις και για PC, όπως το PSPICE Student Edition που θα χρησιμοποιηθεί στην παρούσα εργασία.

Στο PSpice προστίθενται πολλά χαρακτηριστικά, ώστε να γίνει προσομοιωτής πολλών επιπέδων, όπου οι ελεγκτές μπορούν να παρασταθούν με τα μοντέλα συμπεριφοράς τους, δηλαδή με τη συμπεριφορά εισόδου-εξόδου τους, χωρίς να καταφεύγει κανείς σε προσομοίωση σε επίπεδο στοιχείων. Υπάρχει μια δυνατότητα επιλογής για την εισαγωγή των δεδομένων εισόδου με τη σχεδίαση της τοπολογίας του κυκλώματος. Παράλληλα με τη χρήση του στη βιομηχανία, το PSpice έχει γίνει επίσης πολύ δημοφιλές για τη διδασκαλία προπτυχιακών μαθημάτων κορμού για κυκλώματα και ηλεκτρονικά. Για το λόγο αυτό, πολλοί φοιτητές είναι εξοικειωμένοι με το PSpice. Ένας από τους λόγους της δημοτικότητας του PSpice είναι η διαθεσιμότητα και η δυνατότητα της δωρεάν παραχώρησης έκδοσής του για διδασκαλία (στην πράξη ενθαρρύνεται η αντιγραφή και η διάδοσή του) και είναι πολύ εύκολο να εγκατασταθεί τόσο σε έναν H/Y συμβατό με Windows όσο και σε έναν συμβατό με IBM ή Macintosh. Αυτή η έκδοση είναι πολύ ισχυρή για προσομοιώσεις ηλεκτρονικών ισχύος.

Προσομοίωση (simulation) ενός κυκλώματος είναι η χρήση ενός υπολογιστή με σκοπό να λειτουργήσει όπως το κύκλωμα. Δηλαδή να προγραμματιστεί ο υπολογιστής με κάποιο τρόπο ώστε αυτός να κάνει θεωρητικά ό,τι κάνει και το κύκλωμα προς μελέτη. Αν για παράδειγμα χρειαστεί να προσομοιωθεί το πώς λειτουργεί ένα φίλτρο, ο υπολογιστής θα προγραμματιστεί να κάνει όλες τις απαραίτητες μετατροπές σε μια δεδομένη είσοδο, ώστε στην έξοδο τα δεδομένα να έχουν την ίδια μορφή που θα είχαν αν περνούσαν μέσα από ένα πραγματικό φίλτρο. Στο τέλος της προσομοίωσης ο υπολογιστής δίνει κάποια αποτελέσματα, συνήθως υπό τη μορφή κυματομορφών.

Για να καταστεί δυνατό να προσομοιωθεί ένα κύκλωμα, θα πρέπει ο υπολογιστής να προγραμματιστεί να λειτουργήσει όπως αυτό. Ο προγραμματισμός μπορεί να γίνει με τρεις τρόπους :

- Σχεδιάζοντας το κύκλωμα με σχηματικό διάγραμμα (schematic), αλλά δεν θα μας απασχολήσει στην παρούσα εργασία αυτή η μέθοδος
- Είτε με μια γλώσσα προγραμματισμού υψηλού επιπέδου (πχ C), όπου φτιάχνεται ένα λειτουργικό ισοδύναμο του κυκλώματός.
- Είτε με μια γλώσσα περιγραφής (πχ VHDL) όπου κατασκευάζεται το δομικό ισοδύναμο του κυκλώματός.

Το λειτουργικό ισοδύναμο είναι ένα πρόγραμμα το οποίο δεν πληροί δομική αντιστοιχία με το κύκλωμα, αλλά για ίδια είσοδο παράγει ίδια έξοδο με το κύκλωμα (ή τουλάχιστον αυτό στοχεύουμε). Ο σκοπός της δημιουργίας του λειτουργικού ισοδυνάμου είναι η διεκπεραίωση της δεύτερης φάσης της σχεδίασης ενός κυκλώματος, που είναι η παραγωγή τιμών. Οι φάσεις δεν είναι σταθερές σε κάθε σχεδιασμό ενός προϊόντος, αλλά είναι γενικά οι εξής: διατύπωση προδιαγραφών, δημιουργία λειτουργικού ισοδυνάμου – παραγωγή αποτελεσμάτων αναφοράς, δημιουργία δομικού ισοδυνάμου, προσομοίωση δομικού ισοδυνάμου χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα αναφοράς, εξομοίωση στο υλικό (prototyping), παραγωγή προϊόντος.

Οι τιμές αυτές θα αποτελέσουν την αναφορά για τη σωστή λειτουργία του κυκλώματος σε επόμενη φάση. Επειδή δεν ενδιαφέρει το ισοδύναμο να πληροί την δομική αντιστοιχία αλλά την λειτουργική, φτιάχνεται με μια γλώσσα προγραμματισμού, ώστε η συγκεκριμένη φάση να ολοκληρωθεί αρκετά γρήγορα.

Στην επόμενη φάση χρησιμοποιείται μια γλώσσα περιγραφής υλικού για να περιγραφεί το κύκλωμα. Αν το κύκλωμα πρέπει να περιγραφεί σε επίπεδο πυλών ή καταχωρητών, τότε χρησιμοποιείται μια γλώσσα περιγραφής υλικού (πχ VHDL ή Verilog®). Αν το κύκλωμα πρέπει να το περιγράψουμε σε επίπεδο τρανζίστορ (transistor) τότε πρέπει να δημιουργηθεί ένας κατάλογος δικτύων (ή δικτυωμάτων (netlist)).

Δίκτυο ή δικτύωμα ονομάζεται οποιαδήποτε σύνδεση μεταξύ ηλεκτρονικών εξαρτημάτων σε ένα κύκλωμα, πχ μεταξύ ηλεκτρικών αντιστατών και πυκνωτών, πηνίων, τρανζίστορ κτλ.

Αφού περιγραφεί το κύκλωμα σε μορφή καταλόγου δικτυωμάτων, πρέπει ο υπολογιστής μέσω ενός ειδικού προγράμματος που καταλαβαίνει την παραπάνω μορφή (τον προσομοιωτή), να διαβάσει την περιγραφή του κυκλώματος και να προσομοιώσει τη

λειτουργία του. Ο προσομοιωτής που θα χρησιμοποιηθεί στην παρούσα εργασία είναι το PSPICE.

1.10.1 Δομή του αρχείου εισόδου

Η δημιουργία του αρχείου εισόδου, γίνεται μέσω του editor του προγράμματος PSPICE. Η σύνταξη του καταλόγου δικτυωμάτων είναι απλή και ακολουθεί τους εξής κανόνες:

- Η πρώτη γραμμή του αρχείου είναι πάντα ο τίτλος του κυκλώματος.
- Κάθε γραμμή που ξεκινάει με αστεράκι (*) είναι σχόλιο και αγνοείται από τον προσομοιωτή, π.χ.: R1 1 0 10K. Αν το εξάρτημα χρειάζεται πολλές παραμέτρους τότε δηλώνεται κάπου δίνοντάς του κάποιο όνομα και τις παραμέτρους και μετά το χρησιμοποιούμε με το όνομά του.
- Αν οι παράμετροι ενός εξαρτήματος δεν χωράνε σε μία γραμμή τότε ο κώδικας συνεχίζει στην επόμενη με ένα συν (+) στην αρχή της. Οι παράμετροι για ένα εξάρτημα είναι πάντα στην ίδια γραμμή και δεν μπορούν να χωριστούν.
- Για κάθε εξάρτημα που τοποθετείται, αριθμούνται οι ακροδέκτες του (με ορισμένη σειρά η οπού δίνεται στο εγχειρίδιο χρήσης του SPICE). Όταν δύο εξαρτήματα έχουν ίδιο αριθμό σε ακροδέκτες τους σημαίνει ότι τα εξαρτήματα συνδέονται στους αντίστοιχους ακροδέκτες.
- Πέρα από την τοποθέτηση των εξαρτημάτων, εισάγεται και η τροφοδοσία (Vin) καθώς και όποιες άλλες πηγές τάσης ή ρεύματος χρειάζονται. Για την γείωση του κυκλώματος πάντα χρησιμοποιείται ο αριθμός κόμβου μηδέν (0).
- Πρέπει να επεξηγηθεί στο πρόγραμμα τι είδους ανάλυση να κάνει στο κύκλωμά. Στην παρούσα εργασία σε όλα τα κυκλώματα γίνεται transient analysis. Η εντολή για transient analysis γράφεται ως εξής:

```
.tran 1ns 1000ns (για 1000ns με step 1ns)
```

- Επίσης, όταν χρειάζονται τα αποτελέσματα σε γραφική μορφή, δίνεται η παρακάτω εντολή:

```
.probe
```

Με αυτή την εντολή το πρόγραμμα δίνει πληροφορίες για όλα τα σήματα που περνάνε από όλα τα δικτυώματα.

- Τέλος κάθε περιγραφή πρέπει να τελειώνει με την παρακάτω εντολή:

```
.end
```

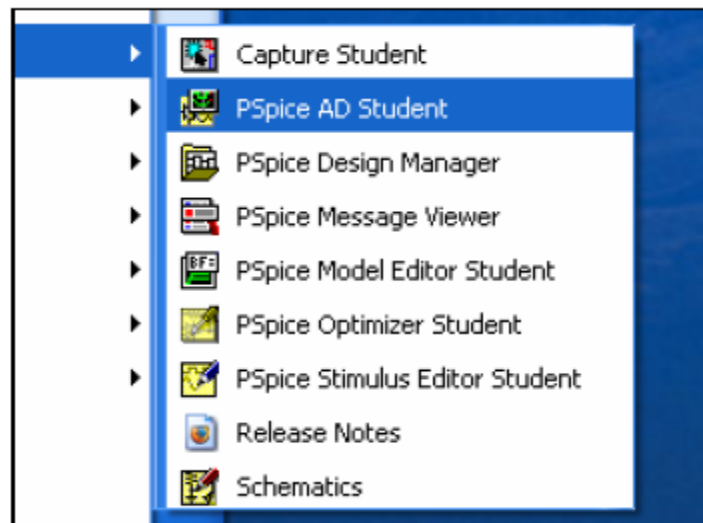
Όταν ο προσομοιωτής βρει την παραπάνω εντολή καταλαβαίνει ότι η περιγραφή του κυκλώματος τελείωσε.

- Το αρχείο αποθηκεύεται με κατάληξη .cir (πχ my_inv.cir).

1.10.2 Προσομοίωση κυκλωμάτων

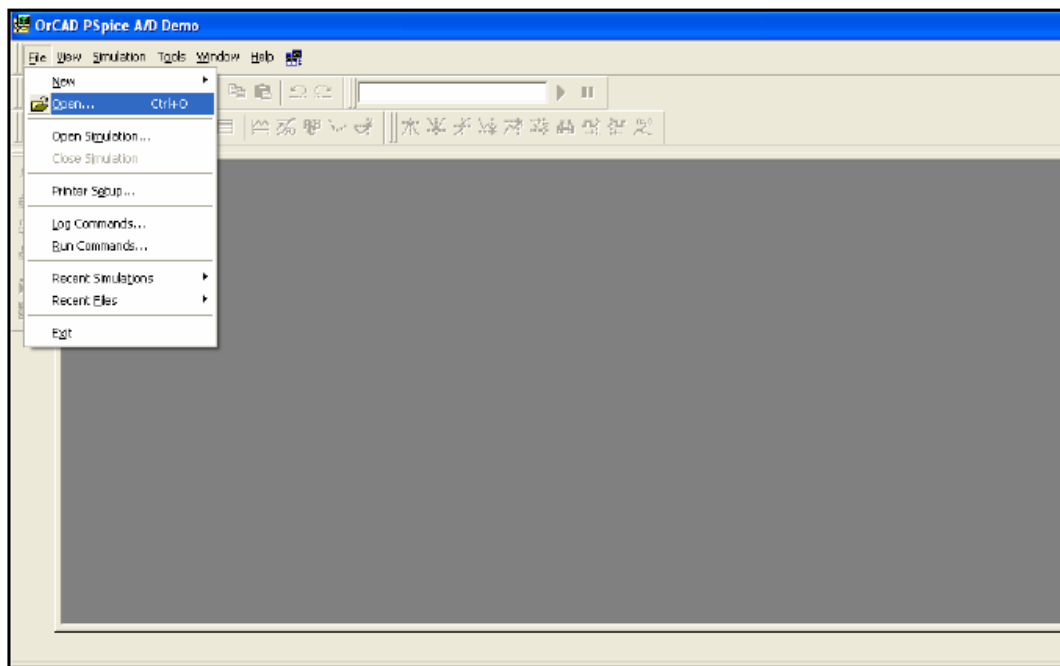
Αφού έχει περιγραφεί το κύκλωμα, τώρα πρέπει να προσομοιωθεί και να διαπιστωθεί αν λειτουργεί έτσι όπως αναμενόταν. Αυτό γίνεται ακολουθώντας τα παρακάτω βήματα:

- Ανοίγεται το PSPICE AD Student, και έτσι ανοίγει το παράθυρο του περιβάλλοντος της προσομοίωσης όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.11:



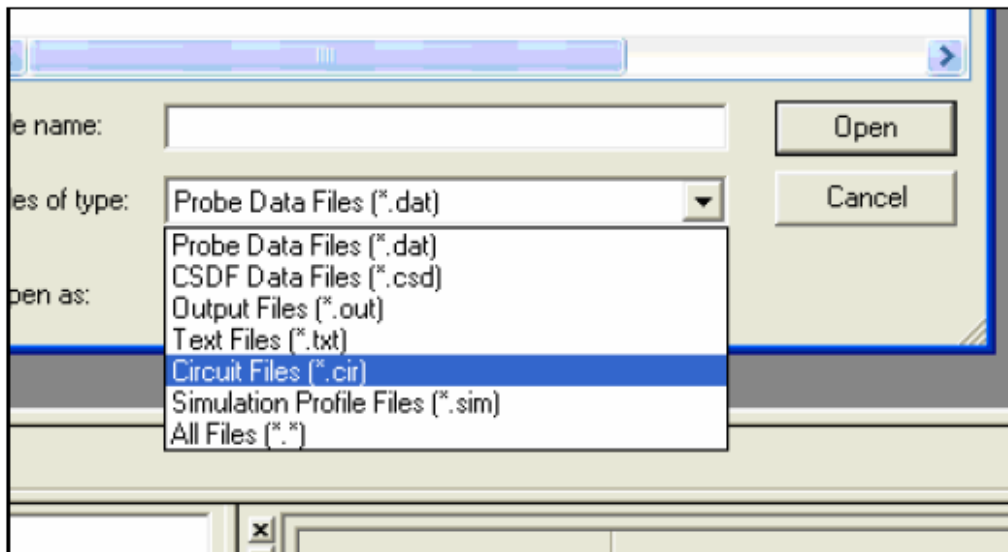
Σχήμα 1.11: Άνοιγμα του προγράμματος Pspice AD Student μέσα από το περιβάλλον των Windows

- Ανοίγεται το αρχείο που έχει αποθηκευτεί, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.12:



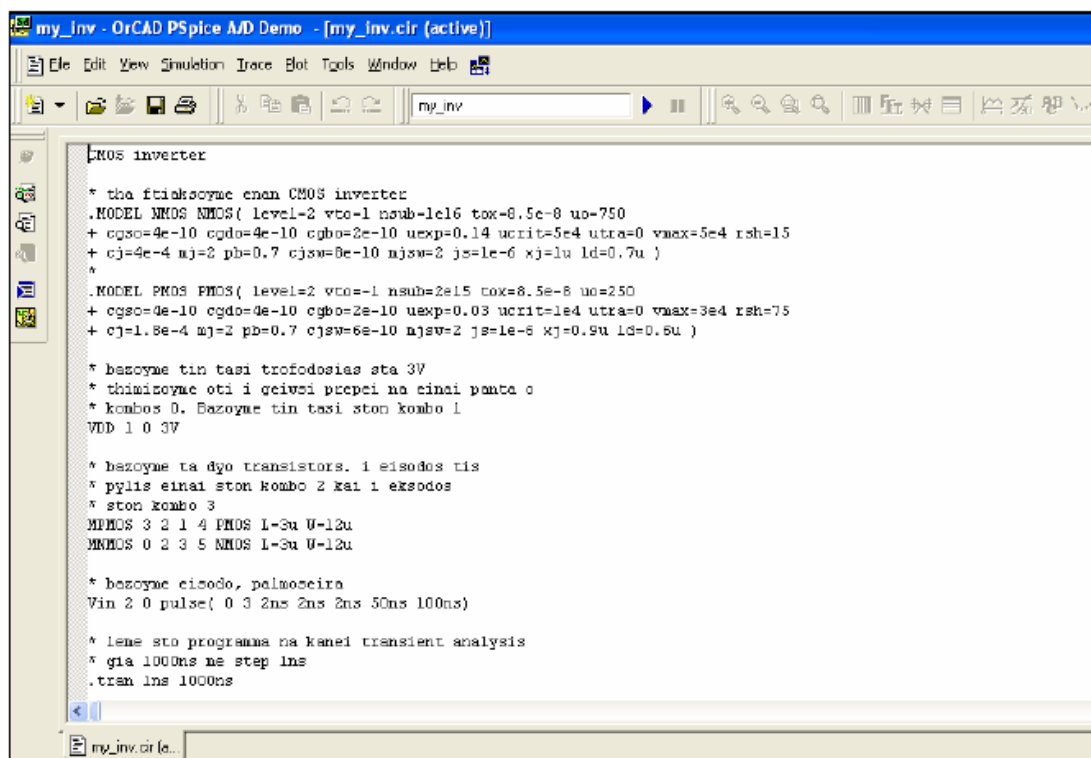
Σχήμα 1.12: Άνοιγμα του αρχείου από την τοποθεσία που έχει αποθηκευτεί

Το πρόγραμμα ψάχνει για αρχεία τύπου .dat. Το επιθυμητό αρχείο είναι αυτό, το οποίο έχει κατάληξη .cir (my_inv.cir). Οπότε διαλέγεται η αντίστοιχη επιλογή από το μενού, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1.13:



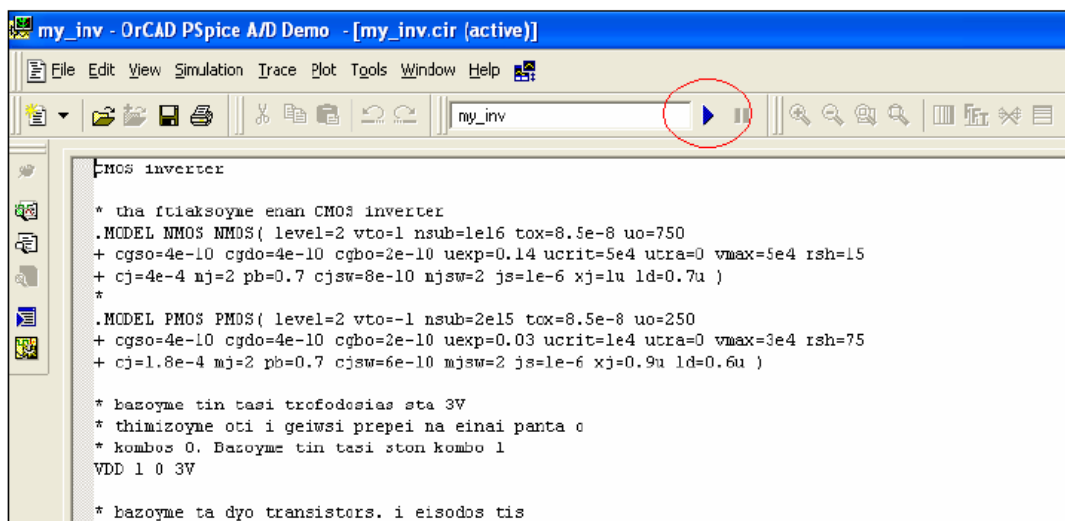
Σχήμα 1.13: Επιλογή τύπου αρχείου

Αφού επιλεγθεί το αρχείο, απεικονίζεται σε μορφή κώδικα στον προσομοιωτή, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1.14:



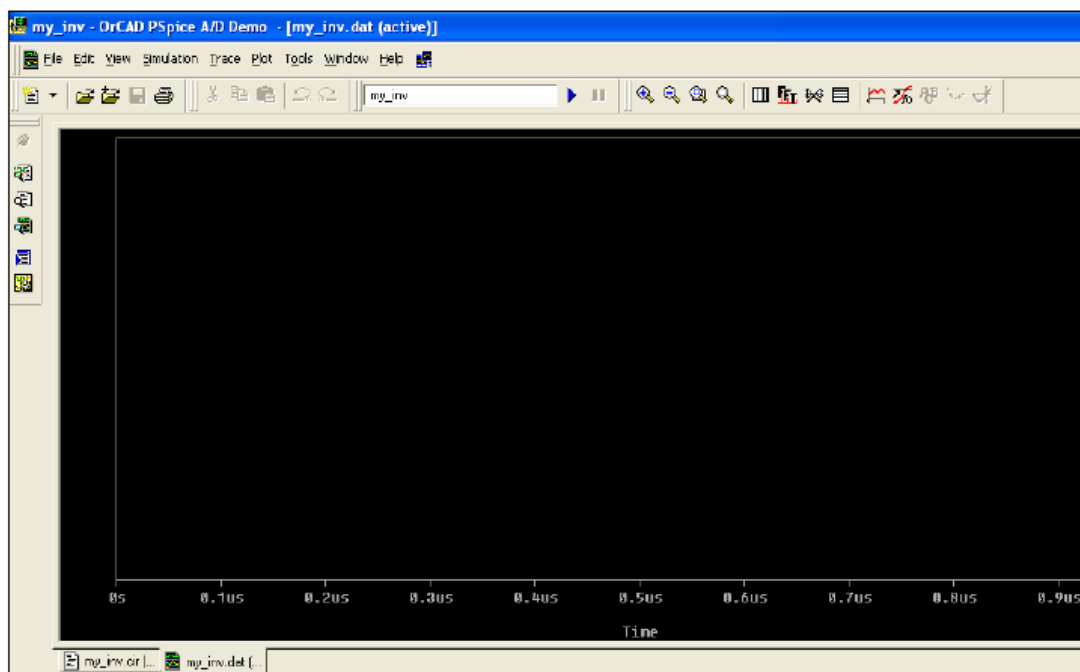
Σχήμα 1.14: Απεικόνιση του αρχείου σε μορφή κώδικα στον προσομοιωτή

Με το πάτημα του γαλανού κουμπιού που βρίσκεται κάτω από τη γραμμή μενού, στη μέση της γραμμής βασικών εργαλείων, εκτελείται η προσομοίωση του κυκλώματος, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.15.



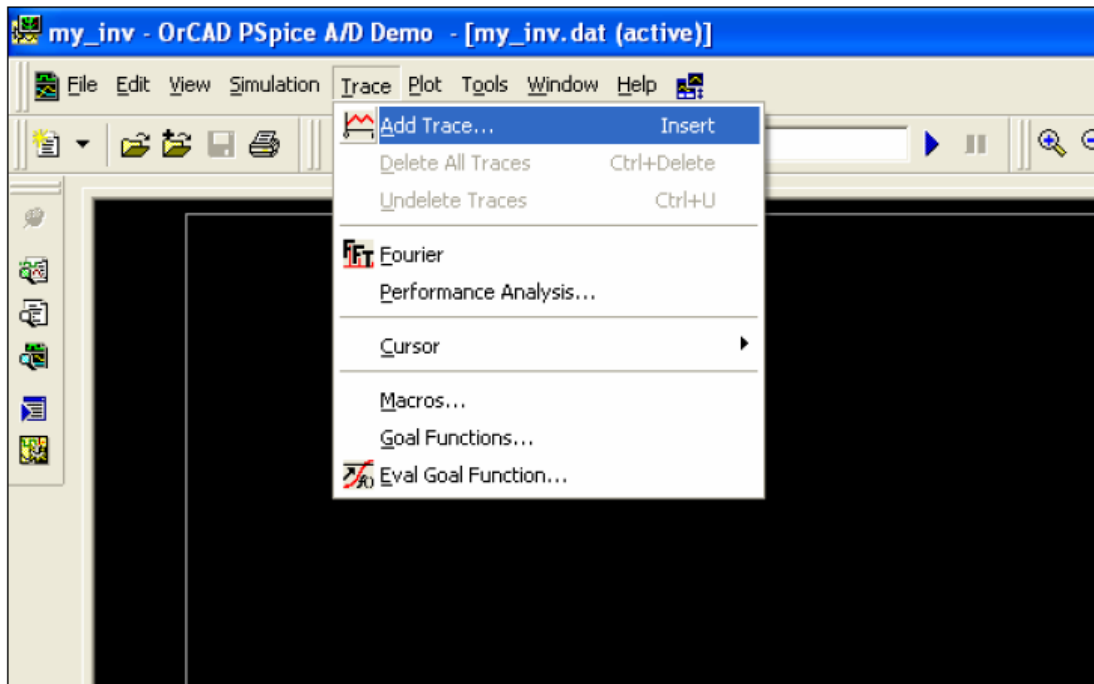
Σχήμα 1.15: Έναρξη της προσομοίωσης με το πάτημα του κουμπιού έναρξης

Μόλις η προσομοίωση ολοκληρωθεί, ανοίγει η κλίμακα χρόνου του προσομοιωτή, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.16. Αρχικά ο προσομοιωτής δεν δίνει κάποια έξοδο.



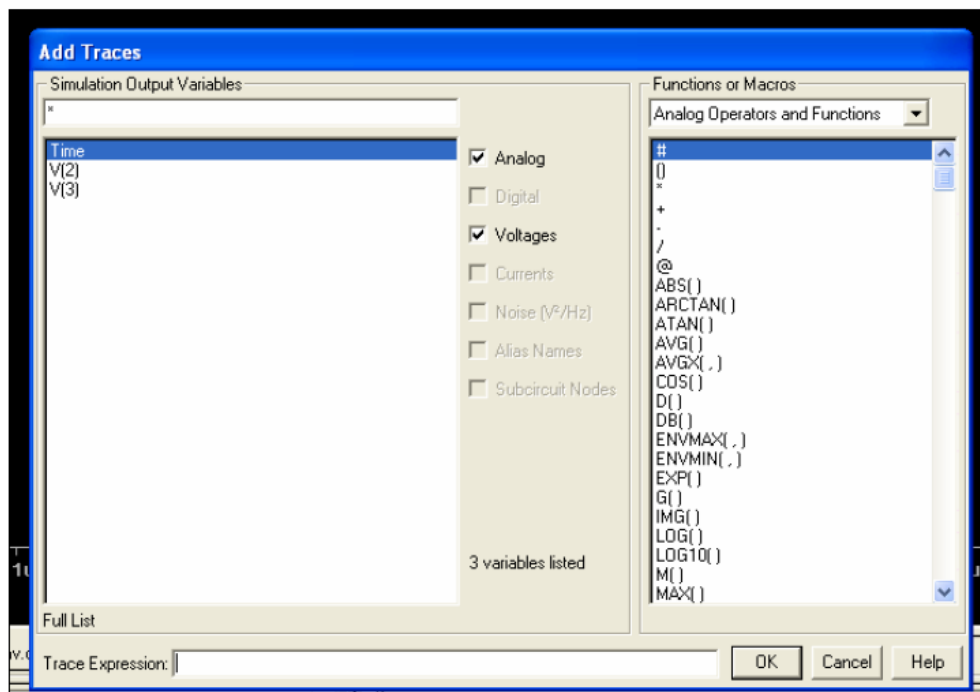
Σχήμα 1.16: Άνοιγμα της κλίμακας χρόνου του προσομοιωτή

Για να απεικονίσει κάποια έξοδο ο προσομοιωτής, πρέπει να προστεθεί στην κλίμακα (να ανιχνευτεί δηλαδή) το επιθυμητό σήμα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.17.



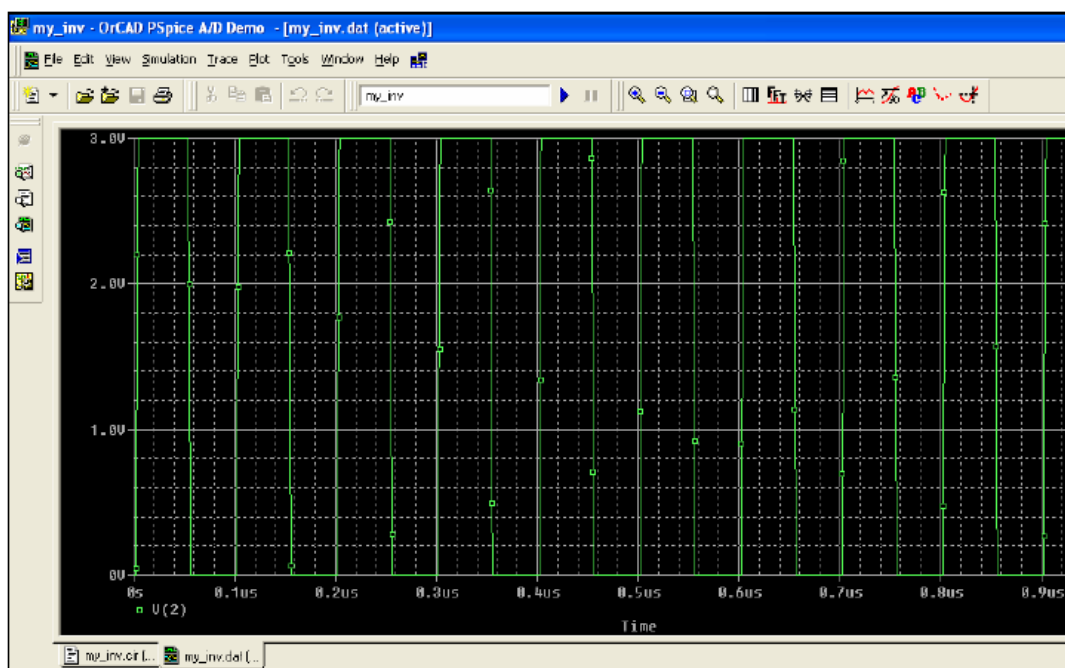
Σχήμα 1.17: Επιλογή ανίχνευσης σήματος

Μόλις επιλεγεί η ανίχνευση κάποιου σήματος, εμφανίζεται ένα παράθυρο στο οποίο δίνονται τα σήματα τα οποία μπορούν να ανιχνευτούν, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.18. Επιλέγονται τα κατάλληλα σήματα.



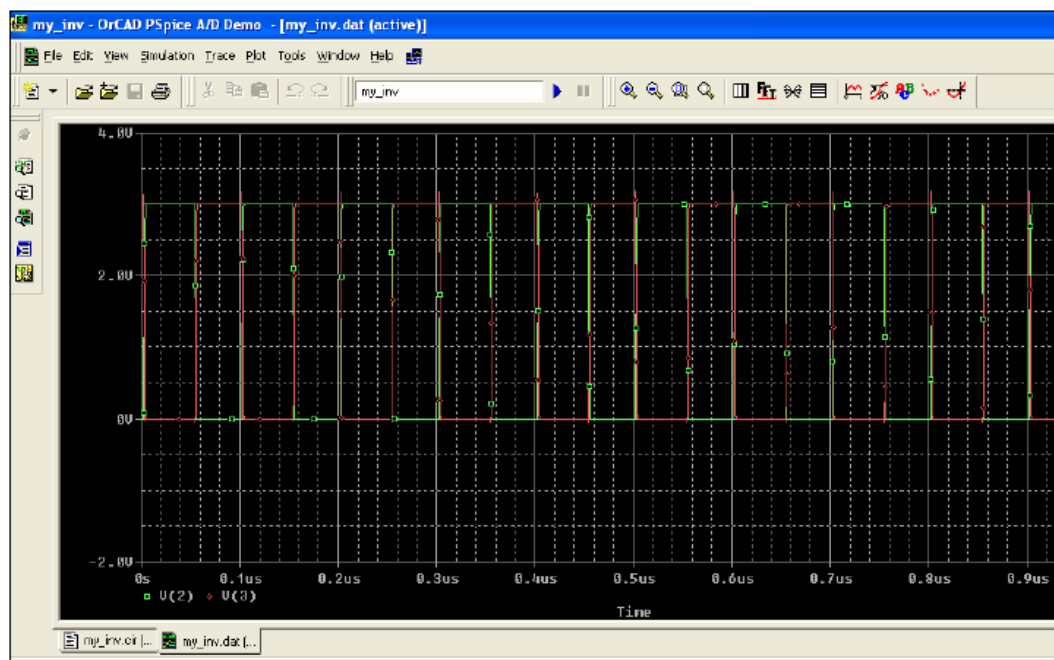
Σχήμα 1.18 : Επιλογή του επιθυμητού σήματος για απεικόνιση

Επιλέγονται διαδοχικά όσα σήματα επιθυμείται να εμφανιστούν στην έξοδο. Για κάθε σήμα που επιλέγεται, εμφανίζεται η κυματομορφή στην έξοδο του προσομοιωτή, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.19:



Σχήμα 1.19: Η έξοδος του προσομοιωτή

Επιλέγονται και τα υπόλοιπα σήματα. Για κάθε σήμα που επιλέγεται στην έξοδο, η κυματομορφή του εμφανίζεται με διαφορετικό χρώμα όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.20:



Σχήμα 1.20: Ταυτόχρονη απεικόνιση διαφορετικών σημάτων

1.11 ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Στο **Κεφάλαιο 1** ορίζονται κάποια βασικά μεγέθη της ηλιακής ακτινοβολίας, καθώς και βασικές έννοιες για τα φωτοβολταϊκά συστήματα όπως το ηλιακό φάσμα, οι ηλεκτρονικές στοιβάδες, το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο. Στην συνέχεια παρουσιάζονται τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα χρήσης των φωτοβολταϊκών συστημάτων καθώς και στατιστικά της επικρατούσας εγχώριας και παγκόσμιας αγοράς. Επίσης αναλύονται οι έννοιες του κεντροποιημένου, αποκεντροποιημένου και κατανεμημένου συστήματος ενέργειας. Παρουσιάζονται η δομή του αρχείου εισόδου και η μεθοδολογία για την προσομοίωση ηλεκτρικών κυκλωμάτων στο λογισμικό Pspice.

Στο **Κεφάλαιο 2** αναλύονται η δίοδος παράκαμψης για άμβλυνση της σκίασης και η δίοδος φραγής. Μελετώνται η σε σειρά και η παράλληλη ρύθμιση φόρτισης μπαταρίας και γίνονται οι αντίστοιχες προσομοιώσεις για κάθε κύκλωμα. Στην συνέχεια παρουσιάζεται η μεθοδολογία ανίχνευσης βέλτιστου σημείου λειτουργίας για DC/DC μειωτή τάσης (buck converter) και DC/DC επωθητικό μετατροπέα (boost converter) καθώς και κάποια χαρακτηριστικά συμπεριφοράς του μοντέλου (MPPT) στο Pspice. Γίνεται προσομοίωση φωτοβολταϊκού συστήματος με φωτοβολταϊκή γεννήτρια, DC/DC μετατροπέα, φορτίο και ανιχνευτή μέγιστου σημείου ισχύος. Ακόμη, προτείνεται εξοπλισμός προστασίας και ελέγχου. Παρουσιάζονται οι μεθοδολογίες της εκτίμησης έντασης ρεύματος του φ/β , του ελεγκτή ρεύματος για ενιαίο παράγοντα ισχύος και της γρήγορης ανίχνευσης της τάσης γραμμής για τον έλεγχο του συστήματος και εκτίμησή του.

Στο **Κεφάλαιο 3** μοντελοποιείται ο εναλλάκτης ενός φωτοβολταϊκού συστήματος, μελετάται στο λογισμικό Pspice το τοπολογικό του μοντέλο και στη συνέχεια προσομοιώνεται. Επιπλέον μοντελοποιείται και προσομοιώνεται το μοντέλο εναλλάκτη για απευθείας σύνδεση φωτοβολταϊκής γεννήτριας-εναλλάκτη και για σύνδεση μπαταρίας-εναλλάκτη.

1.12 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1.1] Π. Γεωργιλάκης «Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας» Χανιά, Σεπτέμβριος 2006, σελ.63.
- [1.2] Π. Γεωργιλάκης «Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας» Χανιά, Σεπτέμβριος 2006, σελ.98.
- [1.3] www.aenaon.net, www.buildings.gr.
- [1.4] Greenpeace (www.greenpeace.org).
- [1.5] Hellenic association of photovoltaic companies (www.helapco.gr).
- [1.6] “Connection of Distributed Energy Generation Units in the Distribution Network and Grid”. GODGUNet Final Report 2003.
- [1.7] Palensky P. Dissertation: “Distributed Reactive Energy Management”, Austria, Technische Universität Wien, Fakultät für Elektrotechnik, 2001.
- [1.8] Dunn S. Hydrogen futures: “toward a sustainable energy system”, International Journal of Hydrogen Energy 2002.
- [1.9] “From Fuel Cell to Virtual Power Plant”, Hexis News Issue, 4/2003.

ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΥ ΓΙΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ

2.1 ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ο εξοπλισμός προστασίας και ελέγχου, όπως οι DC/DC μετατροπείς ή οι DC/AC μετατροπείς και οι ρυθμιστές φόρτισης, είναι μέρος του φωτοβολταϊκού συστήματος στις περισσότερες εφαρμογές. Αυτό το κεφάλαιο επικεντρώνεται στην περιγραφή μοντέλων με αυτά τα στοιχεία. Σκοπός είναι να απλουστευθεί όσο γίνεται η προσομοίωση για ένα εύρος αρχιτεκτονικής φωτοβολταϊκών συστημάτων στο Pspice, ενσωματώνοντας εξοπλισμό προστασίας και ελέγχου. Τα μοντέλα που περιγράφονται σε αυτό το κεφάλαιο διαφέρουν ως προς την πολυπλοκότητα και την ποιότητα της προσομοίωσης.

2.2 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η φωτοβολταϊκή ενέργεια θεωρείται μια από τις πιο χρήσιμες φυσικές πηγές ενέργειας επειδή είναι δωρεάν, άφθονη, δεν μολύνει και κατανέμεται σε όλη την γη. Έρευνες με σκοπό την αναζήτηση πηγών ενέργειας στράφηκαν όχι μόνο σε διαστημικές αποστολές αλλά και σε επίγειες. Παρά όλα αυτά, η αποδοτικότητα της ενεργειακής μετατροπής του φωτοβολταϊκού συστήματος είναι ακόμα χαμηλή.

Το ηλεκτρικό ρεύμα που τροφοδοτεί έναν ηλεκτρονικό εξοπλισμό μεταφέρει μεταβατικά φαινόμενα, αιχμές τάσης και ηλεκτρονικό θόρυβο. Αυτά τα φαινόμενα είναι διαταραχές της ηλεκτρικής ενέργειας που μεταφέρονται μέσω της κεντρικής παροχής και εισβάλλουν στα συστήματα. Εάν αυτός ο θόρυβος περάσει στα ηλεκτρονικά μέρη του συστήματος, θα επηρεάσει τους μικροεπεξεργαστές και θα προκαλέσει αρχικά δυσλειτουργία και τελικά βλάβη. Ο ηλεκτρικός θόρυβος μπορεί να προκληθεί από έντονα καιρικά φαινόμενα όπως αστραπές, καταιγίδες, κ.α., αλλά η πιο συχνή αιτία είναι το φυσικό προϊόν της χρήσης του ηλεκτρισμού. Ένα αποτελεσματικό Σύστημα Προστασίας και Ελέγχου (Power Conditioning System) φιλτράρει τις επιβλαβείς ηλεκτρικές διαταραχές εμποδίζοντας έτσι τις δυσλειτουργίες και το σταδιακό "εκφυλισμό" του εξοπλισμού, διασφαλίζοντας τελικά την αξιοπιστία του και την σωστή του λειτουργία.

Έτσι, σε ένα φωτοβολταϊκό σύστημα είναι απαραίτητο να περιλαμβάνονται συσκευές, καθώς και κυκλώματα Προστασίας και Ελέγχου με σκοπό είτε να προστατεύσουν το σύστημα είτε στο να συμβάλουν στη μείωση απωλειών. Έτσι εξασφαλίζεται στη φωτοβολταϊκή γεννήτρια να λειτουργεί όσο πιο κοντά γίνεται στο σημείο μέγιστης ισχύος.

Μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν στο σύστημα στοιχεία ελέγχου φορτίου, ώστε να αποφευχθούν ανεπιθύμητες καταστάσεις λειτουργίας και επίσης για να προστατεύσουν την μπαταρία από υπερφόρτιση ή αποφόρτιση.

Αυτό το κεφάλαιο περιγράφει κάποια από τα στοιχεία Προστασίας και Ελέγχου, αυτοτελείς μονάδες ελέγχου φορτίου και τα λειτουργικά χαρακτηριστικά ενός φωτοβολταϊκού συστήματος.

Με σκοπό επίσης να εξασφαλιστεί η μέγιστη αποδοτικότητα, είναι απαραίτητη σε ένα σύστημα που τροφοδοτείται από φωτοβολταϊκό σύστημα, η χρήση της τεχνικής ανάχνευσης βέλτιστου σημείου λειτουργίας (MPPT: Maximum Power Point Tracking) η οποία εξάγει τη μέγιστη δυνατή ισχύ. Το φωτοβολταϊκό σύστημα παρουσιάζει μια εξαιρετικά μη γραμμική

χαρακτηριστική καμπύλη τάσης-έντασης ($V-I$) η οποία πο κίλει ανάλογα με τις θερμοκρασιακές συνθήκες και την έκθεση στον ήλιο σε όλη τη διάρκεια της μελέτης.

Συμπεραίνεται λοιπόν η πολυπλοκότητα εντοπισμού του σημείου μέγιστης ισχύος. Για να ξεπεραστεί αυτό το εμπόδιο έχουν αναπτυχθεί διάφορες μέθοδοι, μερικές από αυτές είναι η μέθοδος του «πίνακα αναζήτησης» (lookup table method)[2.1, 2.2], η μέθοδος του «διατάραξε και παρατήρησε» (perturb-and-observe method)[2.3-2.6] και η μέθοδος της «σταδιακής αγωγιμότητας» (incremental conductance method)[2.7, 2.8], οι οποίες προτείνονται για χρήση του MPPT αλγορίθμου μιας φωτοβολταϊκής συστοιχίας.

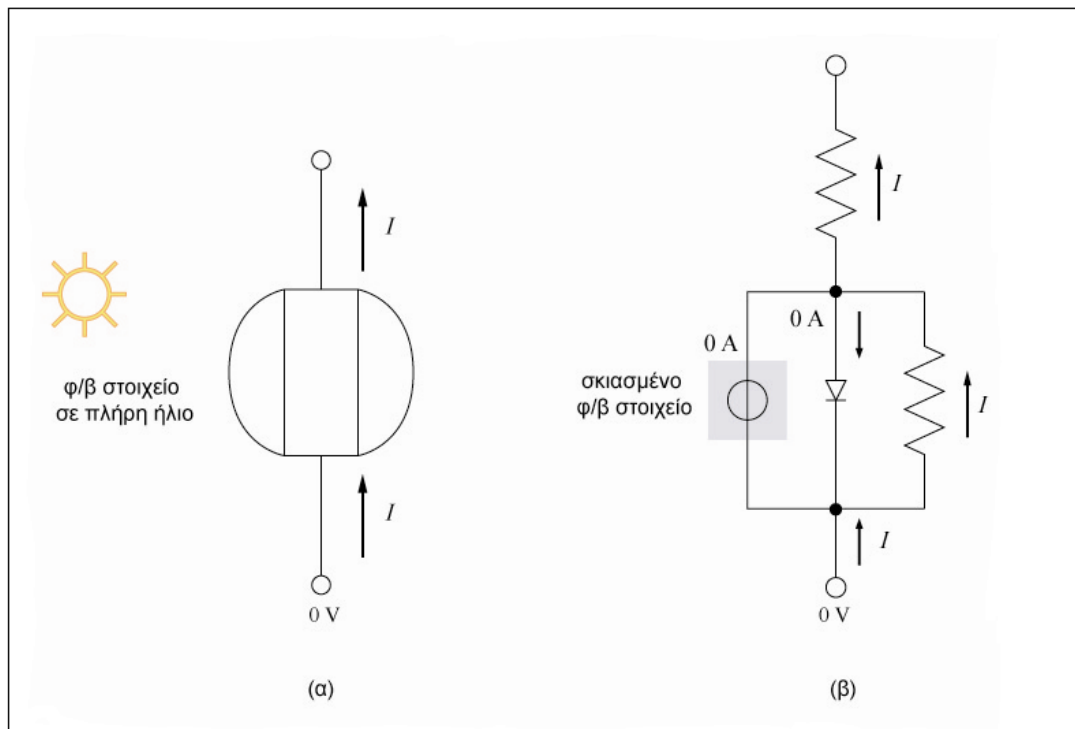
Η μέθοδος του «πίνακα αναζήτησης» απαιτεί προηγούμενη διερεύνηση των χαρακτηριστικών του φωτοβολταϊκού πίνακα. Τα χαρακτηριστικά αυτά εξαρτώνται από πολλούς πολυκριτήριους παράγοντες όπως θερμοκρασία, παλαιότητα ή ακόμα και πιθανότητα καταστροφής των ηλιακών κυψελών. Επομένως είναι δύσκολο να καταγράψει κανείς και να αποθηκεύσει όλες τις πιθανές καταστάσεις του συστήματος.

Στη μέθοδο του «διατάραξε και παρατήρησε», διαταράσσεται η τάση λειτουργίας της φωτοβολταϊκής συστοιχίας, μεταβάλλοντας τον παράγοντα δράσης (duty ratio) με σκοπό να βρούμε την αλλαγή διεύθυνσης (direction change) που μεγιστοποιεί την ισχύ. Όταν αυξηθεί η ισχύς, η τάση λειτουργίας αυξάνεται, αντίθετα όταν μειωθεί η ισχύς, η τάση λειτουργίας μειώνεται[2.3-2.6]. Αυτό έχει σαν πλεονέκτημα ότι δε χρειάζεται να είναι γνωστά τα χαρακτηριστικά του ηλιακού πίνακα. Πάντως, αυτή η μέθοδος είναι ακατάλληλη για χρήση σε συστήματα με διαρκώς μεταβαλλόμενες ατμοσφαιρικές συνθήκες. Το μειονέκτημα της μεθόδου «διατάραξε και παρατήρησε» μπορεί να βελτιωθεί συγκρίνοντας τις τιμές της αγωγιμότητας του φωτοβολταϊκού πίνακα[2.7, 2.8]. Αυτή η μέθοδος είναι η πιο ορθή από τις προαναφερθείσες και εξασφαλίζει καλή απόδοση με συνεχώς μεταβαλλόμενες συνθήκες, αλλά όλες οι προηγούμενες μέθοδοι δεν οδηγούν σε ομαλή μετάβαση έως το σημείο μέγιστης ισχύος.

2.3 ΔΙΟΔΟΙ

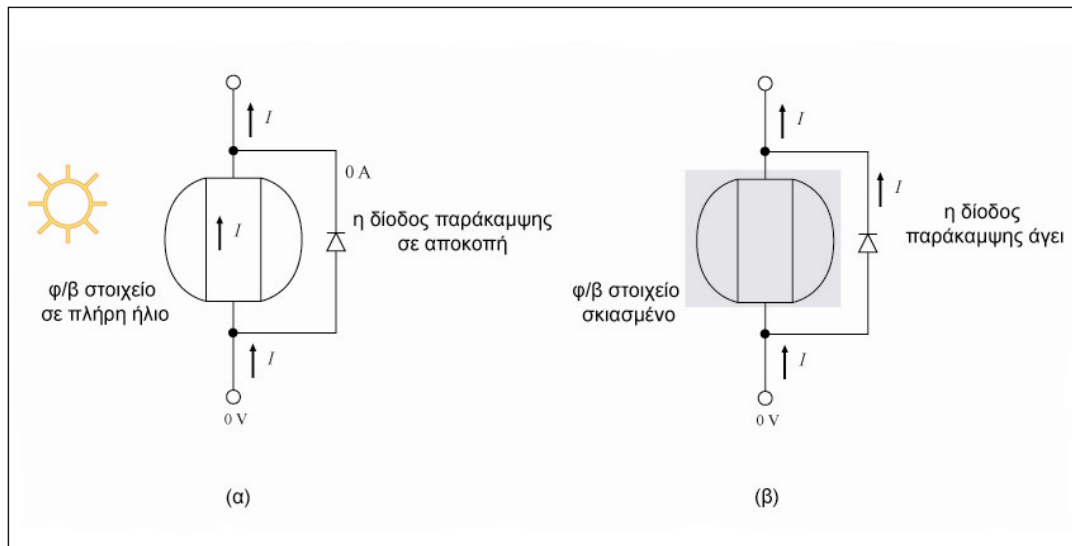
2.3.1 Δίοδοι παράκαμψης για άμβλυνση της σκίασης

Η σκίαση μπορεί να δημιουργήσει τοπικά, πιθανότατα καταστροφικά, θερμά σημεία στα σκιασμένα φωτοβολταϊκά πλαίσια. Το Σχήμα 2.1 δείχνει μια τυπική περίπτωση. Στο Σχήμα 2.1(α) ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο σε πλήρη ήλιο λειτουργώντας στα κανονικά του όρια συνεισφέρει περίπου 0,5 V στην τάση εξόδου του φωτοβολταϊκού πλαισίου. Αντίθετα, στο Σχήμα 2.1(β) ένα σκιασμένο φωτοβολταϊκό προκαλεί πτώση τάσης V_c , δηλαδή μειώνει την τάση εξόδου του φωτοβολταϊκού πλαισίου. Αυτή η πτώση τάσης μπορεί να είναι σημαντική.



Σχήμα 2.1: (α) Φωτοβολταϊκό στοιχείο σε πλήρη ήλιο, (β) φωτοβολταϊκό στοιχείο σκιασμένο.

Το πρόβλημα της πτώσης τάσης στα σκιασμένα φ/β στο χείμα μπορεί να διορθωθεί προσθέτοντας μια δίοδο παράκαμψης κατά μήκος κάθε φ/β στοιχείου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.2. Όταν ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο είναι σε πλήρη ήλιο, υπάρχει μια ανύψωση τάσης κατά μήκος του φ/β στοιχείου ο πότε η δίοδος παράκαμψης είναι σε αποκοπή (ανάστροφα πολωμένη) και δεν περνάει ρεύμα μέσα από αυτήν. Όταν όμως το φ/β στοιχείο είναι σκιασμένο, η πτώση τάσης (που θα συμβεί αν το φ/β στοιχείο άγει οποιοδήποτε ρεύμα) πολώνει ορθά την δίοδο παράκαμψης, εκτρέποντας το ρεύμα μέσα από την δίοδο παράκαμψης. Όταν η δίοδος παράκαμψης άγει, έχει πτώση τάσης περίπου $0,6\text{ V}$ στα άκρα της. Έτσι η δίοδος παράκαμψης ελέγχει την πτώση τάσης κατά μήκος του σκιασμένου φ/β στοιχείου περιορίζοντάς την στη σχετικά μικρή τιμή των $0,6\text{ V}$ αντί για την μάλλον μεγάλη πτώση τάσης που θα λάμβανε χώρα αν δεν υπήρχε η δίοδος παράκαμψης.

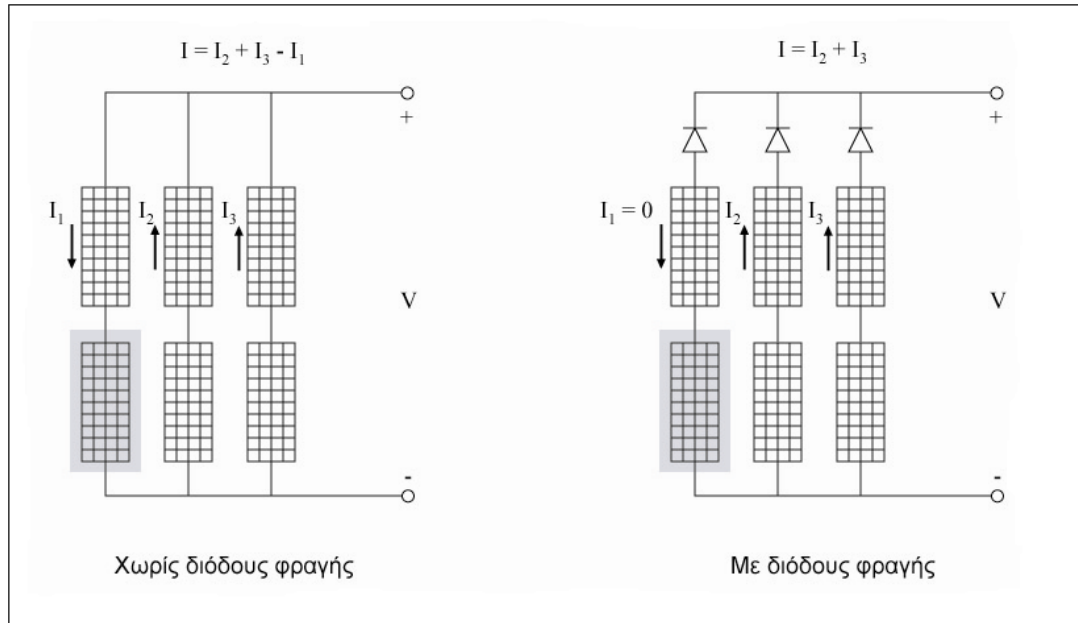


Σχήμα 2.2: Άμβλυνση του προβλήματος της σκίασης με διόδο παράκαμψης (α) σε πλήρη ήλιο η διόδος παράκαμψης είναι ανάστροφα πολωμένη και όλο το ρεύμα περνά μέσα από το φ/β στοιχείο, (β) σε σκίαση η διόδος παράκαμψης είναι ορθά πολωμένη οπότε άγει ρεύμα εξωτερικά του σκιασμένου φ/β στοιχείου επιτρέποντας έτσι να συμβεί μόνο η πτώση τάσης των 0,6 Volt στην είσοδο.

Σε πραγματικά φ/β πλαίσια, είναι μη πρακτική η προσθήκη διόδων παράκαμψης κατά μήκος κάθε φ/β στοιχείου. Όμως οι κατασκευαστές συχνά παρέχουν τουλάχιστον μια διόδο παράκαμψης γύρω από κάθε φωτοβολταϊκό πλαίσιο για να βοηθήσουν στην προστασία των φωτοβολταϊκών πλαισίων, και μερικές φορές παρέχουν πολλές τέτοιες διόδους γύρω από ομάδες φωτοβολταϊκών στοιχείων μέσα σε ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο. Οι διόδους αυτές δεν έχουν μεγάλη επίδραση στα προβλήματα σκίασης ενός απλού φωτοβολταϊκού πλαισίου, όμως μπορεί να έχουν πολύ σημαντική επίδραση, όταν ένα πλήθος φ/β πλαισίων συνδέονται σε σειρά. Όπως τα φ/β στοιχεία συνδέονται σε σειρά για να αυξηθεί η τάση του φ/β πλαισίου, έτσι και τα φ/β πλαίσια μπορούν να συνδεθούν σε σειρά για να αυξηθεί η τάση του φ/β συλλέκτη. Το πλεονέκτημα της διόδου παράκαμψης για ένα φ/β στοιχείο, εκφράζεται επίσης και σε μια διόδο παράκαμψης κατά μήκος ενός πλήρους φ/β πλαισίου.

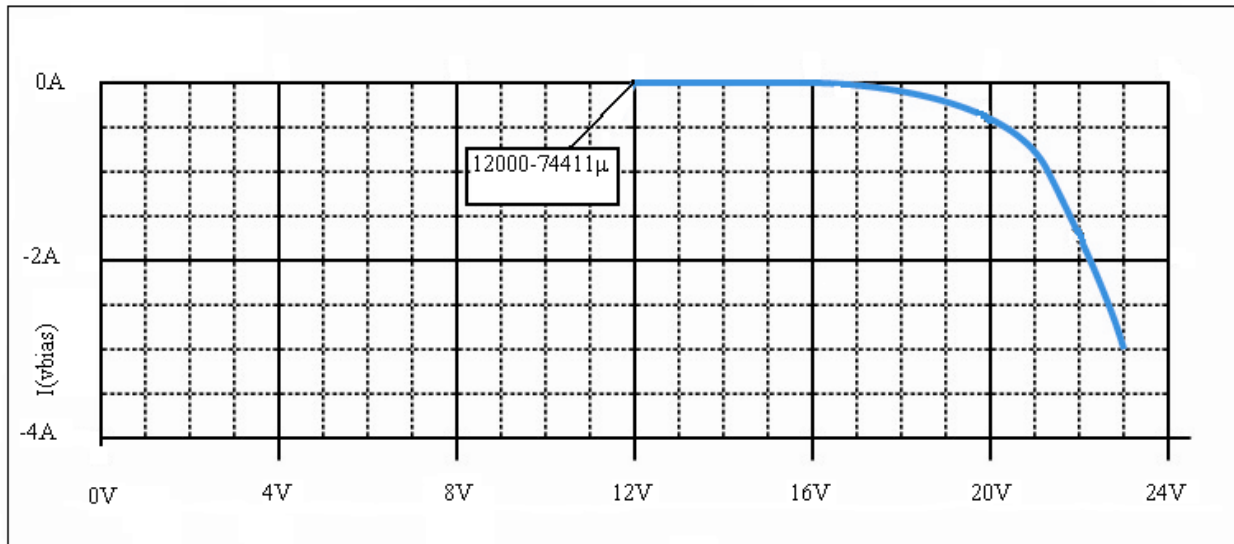
2.3.2 Δίοδοι φραγής

Οι διόδους παράκαμψης βοηθούν το ρεύμα να πάει γύρω από ένα σκιασμένο ή ένα ελαττωματικό φ/β πλαίσιο, σε μια ομάδα φ/β πλαισίων σε σειρά. Αυτό όχι μόνο βελτιώνει την απόδοση της σειράς των φ/β πλαισίων, αλλά επίσης εμποδίζει την δημιουργία θερμών σημείων σε ατομικά σκιασμένα φ/β στο χεία. Όταν σειρές φ/β πλαισίων συνδέονται παράλληλα προκύπτει παρόμοιο πρόβλημα όταν μια από τις σε σειρές ομάδα φ/β πλαισίων δεν λειτουργεί κανονικά. Αντί της παροχής ρεύματος στο συλλέκτη, μια ελαττωματική ή σκιασμένη ομάδα φ/β πλαισίων μπορεί να απορροφήσει ρεύμα από τον υπόλοιπο συλλέκτη. Τοποθετώντας διόδους φραγής (ονομάζονται επίσης και διόδους απομόνωσης) στην κορυφή κάθε ομάδας φ/β πλαισίων, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.3, εμποδίζεται η απορρόφηση ανάστροφου ρεύματος από μια σκιασμένη ομάδα φ/β πλαισίων[2.9].



Σχήμα 2.3: Οι διόδοι φραγής εμποδίζουν την απορρόφηση ανάστροφου ρεύματος από μια σκιασμένη ομάδα φ/β πλαισίων.

Χωρίς την ύπαρξη ακτινοβολίας το ρεύμα βραχυκύκλωσης I_{SC} , είναι 0 και η χαρακτηριστική ρεύματος-τάσης $I(V)$ μοιάζει με αυτήν της διόδου, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.1. Θεωρείται ιδανικό στοιχείο με άπειρη ισοδύναμη διακλαδισμένη αντίσταση.



Σχήμα 2.4: Χαρακτηριστικά φωτοβολταϊκής γεννήτριας στο σκοτάδι.

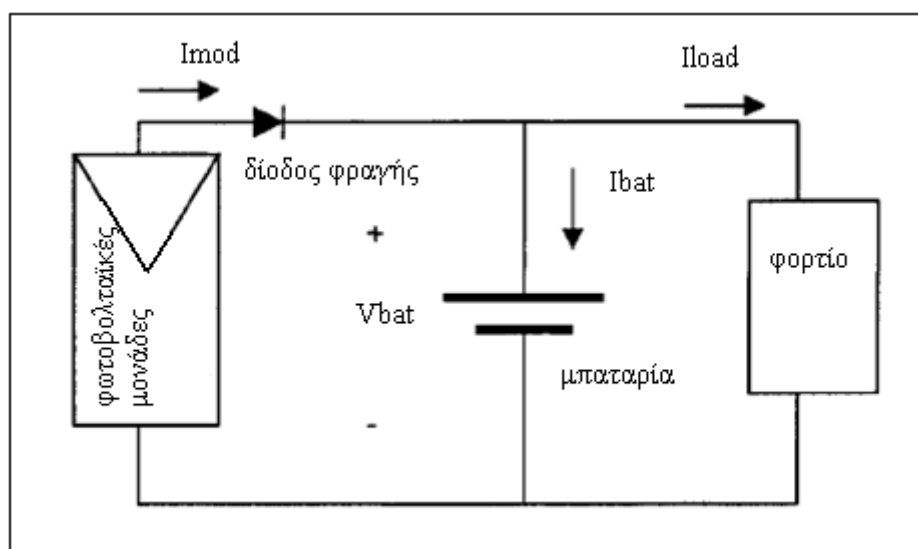
Κάτω από αυτές τις συνθήκες, η φωτοβολταϊκή γεννήτρια δρα ως επιπρόσθετο φορτίο στην μπαταρία. Έτσι, μέρος του ρεύματος που διαρρέει την μπαταρία, I_{bat} , μπορεί να προέρχεται από τα φωτοβολταϊκά στοιχεία. Αυτό φαίνεται στο Σχήμα 2.4. Μέρος του ρεύματος που διαρρέει την μπαταρία ορίζεται ως $I(vbias)$. Ο δείκτης επισημαίνει την τιμή του ρεύματος προερχόμενο από τα φωτοβολταϊκά στοιχεία. Θεωρείται αυτοτελής σύνδεση με μπαταρία 12 V, υπό την έλλειψη ακτινοβολίας. Αυτό το φαινόμενο μπορεί να αποφευχθεί,

προσθέτοντας στο σύστημά μας μία διόδο. Το Σχήμα 2.5 δείχνει ένα φωτοβολταϊκό σύστημα, όπου η διόδος έχει συνδεθεί σε σειρά με τον φωτοβολταϊκό συλλέκτη.

Είναι απαραίτητο να γίνουν κάποιες παραδοχές:

- Η παρουσία της διόδου σε σειρά συνεπάγεται πτώση τάσης στη διόδο, η οποία μπορεί να είναι της τάξεως του ενός βολτ. Αυτό εξαρτάται από τον τύπο της διόδου και την ενεργειακή της τάξη.
- Το μέτρο της απώλειας ρεύματος, I_{mod} , που φαίνεται στο Σχήμα 2.4 εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ισοδύναμη διακλαδισμένη αντίσταση. Παρά την εξάρτηση αυτή όμως, λαμβάνοντας υπόψιν τις τιμές διακλαδισμένων αντιστάσεων πραγματικών φωτοβολταϊκών στοιχείων, οι τιμές του I_{mod} που παρατηρούνται είναι πολύ μικρές.

Σύμφωνα λοιπόν με τα παραπάνω, η χρήση της διόδου σε ένα φωτοβολταϊκό σύστημα, θεωρείται μέσω προστασίας του. Όμως, μπορεί σε κάποιες περιπτώσεις να μην είναι απαραίτητη η χρήση διόδου, ειδικά όταν στο σύστημα περιλαμβάνονται στοιχεία ελέγχου φορτίου.



Σχήμα 2.5: Διάγραμμα φωτοβολταϊκού συστήματος με διόδο

2.4 ΜΠΑΤΑΡΙΕΣ

Τα αυτόνομα φ/β συστήματα χρειάζονται κάποια μέθοδο για να αποθηκεύουν ενέργεια που συλλέγεται κατά την διάρκεια των χρονικών περιόδων με ηλιοφάνεια, για να μπορούν να την καταναλώνουν όταν δεν υπάρχει ηλιοφάνεια. Σήμερα στις περισσότερες εφαρμογές χρησιμοποιούνται μπαταρίες, παρόλο που υπάρχουν διάφορες ασυνήθιστες τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας (όπως σφόνδυλοι, πεπιεσμένος αέρας, παραγωγή υδρογόνου). Η μπαταρία μολύβδου-οξέως συνεχίζει να είναι η κινητήρια δύναμη των φωτοβολταϊκών συστημάτων, ανάμεσα στις διαφορετικές τεχνολογίες μπαταριών. Εκτός από την αποθήκευση ενέργειας, οι μπαταρίες προσφέρουν και διάφορες άλλες υπηρεσίες ενέργειας, όπως παροχή υψηλών ρευμάτων (για σύντομα χρονικά διαστήματα) που είναι πολύ υψηλότερα από το στιγμιαίο ρεύμα του φωτοβολταϊκού συλλέκτη, καθώς και την έμφυτη και αυτόματη ιδιότητα του ελέγχου της τάσης εξόδου του συλλέκτη, έτσι ώστε τα φορτία να λαμβάνουν τάσεις που να είναι ανάμεσα στα δικά τους όρια αποδοχής.

Οι μπαταρίες νικελίου-καδμίου, νικελίου-μεταλλικού υδριδίου, λιθίου-ιόντος, λιθίου-πολυμερούς και νικελίου-ψευδαργύρου ανταγωνίζονται τις συμβατικές μπαταρίες μολύβδου-οξέως. Από αυτές, μόνο οι νικελίου-καδμίου είναι ελάχιστα ανταγωνιστικές με τις μπαταρίες μολύβδου-οξέως, αλλά αυτό ίσως να αλλάξει στο κοντινό μέλλον εξαιτίας του μεγάλου

ενδιαφέροντος και της ανάπτυξης των νέων τεχνολογιών μπαταριών για τα ηλεκτρικά και υβριδικά οχήματα. Στον Πίνακα 2.1 παρουσιάζονται οι τυπικές τιμές μερικών σημαντικών χαρακτηριστικών των διαφορετικών τεχνολογιών μπαταριών. Στον πίνακα αυτό, οι μπαταρίες μολύβδου οξέος παρουσιάζονται σε τρεις κατηγορίες:

- συμβατικές μπαταρίες αυτοκινήτου για εκκίνηση μηχανής, φωτισμός του οχήματος και ανάφλεξη του κινητήρα
- μπαταρίες με βαθύ κύκλο και χαμηλό κόστος που χρησιμοποιούνται στα καροτσάκια του γκολφ
- μπαταρίες με πραγματικά βαθύ κύκλο και μεγαλύτερη διάρκεια ζωής

Τα δύο άλλα είδη μπαταριών που φαίνονται στον Πίνακα 2.1, οι μπαταρίες νικελίου-καδμίου και νικελίου-μεταλλικού υδριδίου, έχουν ξεκινήσει να χρησιμοποιούνται σε μερικά υβριδικά-ηλεκτρικά αυτοκίνητα. Όπως φαίνεται επίσης στον Πίνακα 2.1, οι μπαταρίες μολύβδου-οξέος είναι μακράν οι πλέον οικονομικές και έχουν τις καλύτερες αποδόσεις. Οι μπαταρίες νικελίου καδμίου είναι πολύ πιο ακριβές, αλλά διαρκούν περισσότερο. Επίσης οι μπαταρίες νικελίου-καδμίου συμπεριφέρονται καλύτερα από τις άλλες μπαταρίες σε δύσκολες κλιματολογικές συνθήκες. Οι μπαταρίες νικελίου-καδμίου είναι μακράν οι πιο ανθεκτικές όταν χρησιμοποιούνται καταχρηστικά επειδή μπορούν να εκφορτίζονται σχεδόν στο 100% χωρίς ζημιά.

Πίνακας 2.1: Σύγκριση των χαρακτηριστικών των μπαταριών.

Μπαταρία	Μέγιστο βάθος εκφόρτισης	Πυκνότητα έντασης (Wh/Kg)	Κύκλος ζωής (κύκλοι)	Διάρκεια ζωής (έτη)	Κόστος (\$/kWh)
Μολύβδου-οξέος, SLI	20%	50	500	1-2	50
Μολύβδου-οξέος, γκολφ	80%	45	1000	3-5	60
Μολύβδου οξέος, με βαθύ κύκλο	80%	35	2000	7-10	100
Νικελίου-καδμίου	100%	20	1000-2000	10-15	1000
Νικελίου-μεταλλικού υδριδίου	100%	50	1000-2000	8-10	1200

2.4.1 Χρόνος ζωής συσσωρευτών

Οι συσσωρευτές δεν πρέπει να υφίστανται παρατεταμένη φόρτιση σε πολλή υψηλή τάση για αυτούς (overcharging), ούτε να εκφορτίζονται κάτω από ένα όριο (over discharging). Αυτός ο κανόνας είναι πολύ σημαντικός και καθορίζει το χρόνο ζωής τους. Η υπερφόρτωση έχει ως αποτέλεσμα την ηλεκτρόλυση καθώς και την παραγωγή υδρογόνου. Ταυτόχρονα υπάρχει έντονη ελάττωση της στάθμης του ηλεκτρολυτικού διαλύματος (απώλεια νερού). Ο χρόνος ζωής των συσσωρευτών εκφράζεται σε κύκλους λειτουργίας, καθένας από τους οποίους περιλαμβάνει τις διαδοχικές διαδικασίες φόρτισης και αποφόρτισης του.

Η χωρητικότητα C, του συσσωρευτή δεν παραμένει σταθερή, αλλά μειώνεται όσο αυξάνουν οι κύκλοι λειτουργίας. Ένας επίσης πρακτικός κανόνας που προσεγγίζει την

πραγματική συμπεριφορά των συσσωρευτών και ουσιαστικά περιγράφει τον χρόνο ζωής τους, είναι ο ακόλουθος:

Το γινόμενο βάθους αποφόρτισης επί τους κύκλους λειτουργίας είναι, με καλή προσέγγιση, σταθερό: $\beta_{εκφ} \cdot N_k = \text{σταθερό}$, όπου N_k το πλήθος των κύκλων λειτουργίας του συσσωρευτή και $\beta_{εκφ}$ το βάθος αποφόρτισης. Για τους συσσωρευτές βαθιάς αποφόρτισης ο εμπειρικός κανόνας λέει ότι το παραπάνω γινόμενο έχει την τιμή 1200 ενώ για κοινούς συσσωρευτές περιορίζεται στο 120.

2.4.2 Προσδιορισμός της κατάστασης φόρτισης μπαταρίας (State Of Charge, SOC)

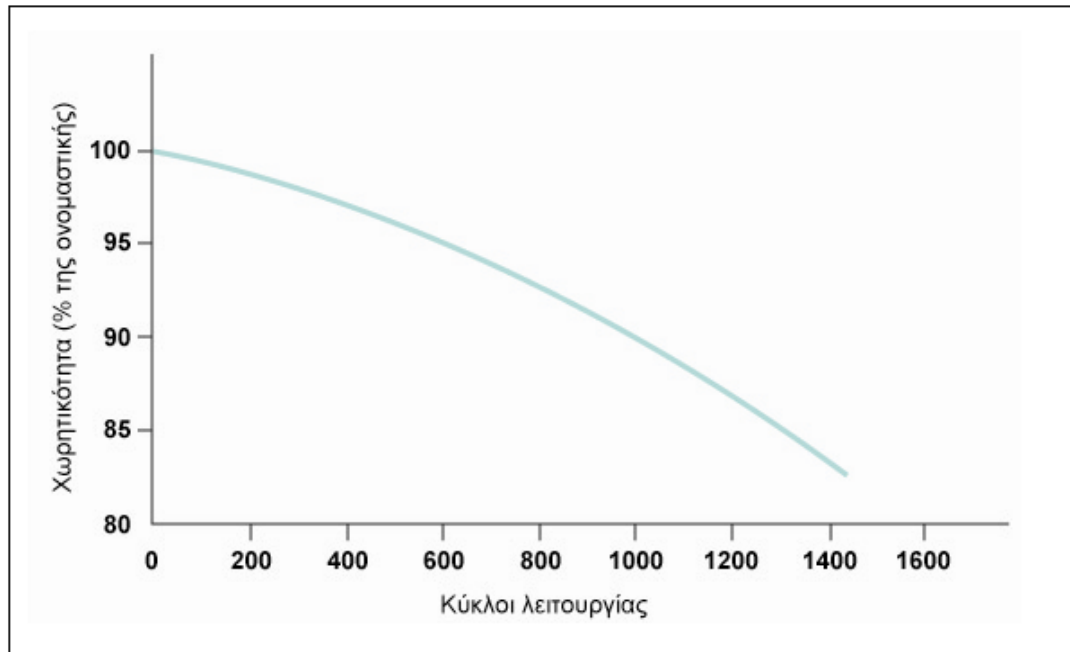
Η κατάσταση πλήρους φόρτισης ενός συγκεκριμένου συσσωρευτή εξαρτάται από:

- τη θερμοκρασία του
- τους κύκλους λειτουργίας, μέχρι τη στιγμή εξέτασης
- το βάθος αποφόρτισης
- το ρυθμό φόρτισης- αποφόρτισης.

Η κατάσταση φόρτισης εξαρτάται από τις τέσσερις παραπάνω παραμέτρους. Εξαιτίας της πολυπλοκότητας αυτής ακόμα δεν έχει εφαρμοστεί μια ρεαλιστική μέθοδος απόλυτου τρόπου καθορισμού της κατάστασης φόρτισης ενός συσσωρευτή, με παρακολούθηση μιας συγκεκριμένης παραμέτρου. Εξαιτίας των μεγάλων δυνατοτήτων που έχουν αναπτυχθεί στα συστήματα ηλεκτρονικής μνήμης, υπάρχει η δυνατότητα συνεχούς παρακολούθησης και ελέγχου της λειτουργίας των συσσωρευτών. Ενισχύεται έτσι η αύξηση του χρόνου ζωής τους.

2.4.3 Εξάρτηση της χωρητικότητας συσσωρευτή από τους κύκλους λειτουργίας του με δεδομένο βάθος αποφόρτισης

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η τυπική εξάρτηση της χωρητικότητας ενός συσσωρευτή όσο αυξάνει ο χρόνος ζωής του, μετρούμενος σε κύκλους λειτουργίας, με δεδομένο βάθος αποφόρτισης. Όπως παρατηρείται, η χωρητικότητά του ελαττώνεται και μάλιστα, όσο αυξάνονται οι κύκλοι λειτουργίας, ο ρυθμός ελάττωσης αυξάνει.

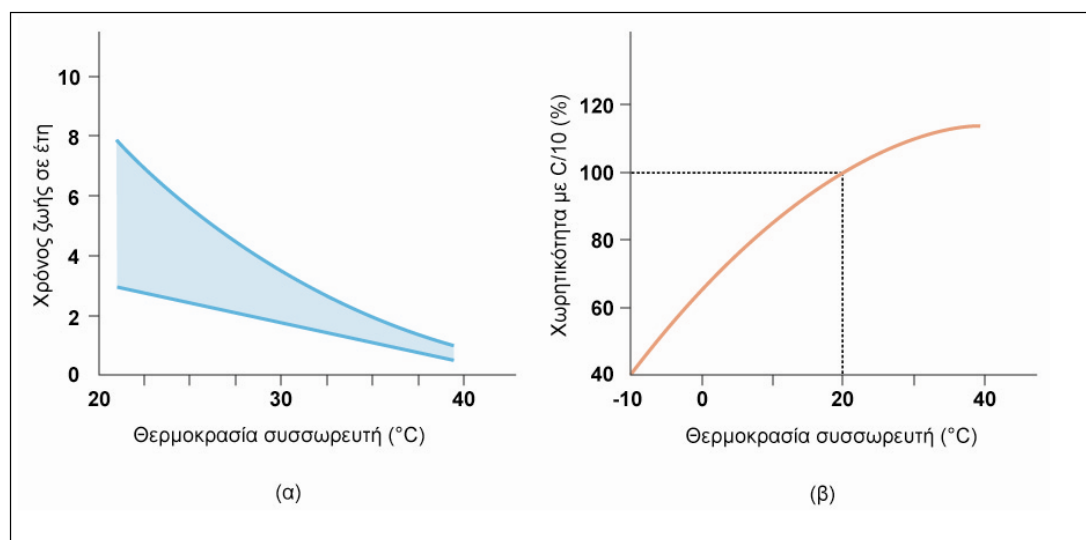


Σχήμα 2.6: Τυπική εξάρτηση της χωρητικότητας ενός συσσωρευτή μολύβδου-θεικού οξέως ($\text{Pb}/\text{H}_2\text{SO}_4$), ως ποσοστό της ονομαστικής τιμής της, από το χρόνο ζωής του, εκπεφρασμένο σε κύκλους λειτουργίας.

Η σταδιακή μείωση των ενεργών υλικών των ηλεκτροδίων έχει σαν αποτέλεσμα την ελάττωση της χωρητικότητας κατά την διάρκεια των κύκλων λειτουργίας του. Η ελάττωση της αρχικής χωρητικότητας προσδιορίζεται με ένα συντελεστή γήρανσης, $\eta_{\gamma,B}$, η τιμή του οποίου προκύπτει περίπου 0,8, για όλη τη ζωή του συσσωρευτή (μείωση της χωρητικότητας, στο τέλος της ζωής του συσσωρευτή, στο 80% της αρχικής τιμής).

2.4.4 Επίδραση θερμοκρασίας λειτουργίας στο χρόνο ζωής του συσσωρευτή

Ο χρόνος ζωής και η χωρητικότητα του συσσωρευτή επηρεάζονται σημαντικά από την θερμοκρασία λειτουργίας του συσσωρευτή. Οι υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας (πάνω από τους 20°C), μειώνουν το χρόνο ζωής του. Οι χαμηλές θερμοκρασίες περιορίζουν ισχυρά, τη δυνατότητα αποθήκευσης φορτίου. Σύμφωνα με το Σχήμα 2.7 α), αν η θερμοκρασία λειτουργίας του είναι 35°C , ο χρόνος ζωής του συσσωρευτή μειώνεται στο 25%-30% του χρόνου ζωής του, που αντιστοιχεί σε λειτουργία του στους 20°C , εξαιτίας της αύξησης της αυτοαποφόρτισης (αύξηση της ευκινησίας των ιόντων και καταστροφή των ενεργών συστατικών των πλακών, από θειικό οξύ).



Σχήμα 2.7: (α) Η γραμμοσκιασμένη περιοχή, αντιπροσωπεύει πλήθος δεδομένων, δείχνει γενικά την μείωση του χρόνου ζωής του συσσωρευτή, αν λειτουργεί σε υψηλές θερμοκρασίες. (β) Σε χαμηλές θερμοκρασίες λειτουργίας, η χωρητικότητα του συσσωρευτή, με δεδομένο ρυθμό φόρτισης είναι μειωμένη.

Αλλά και οι πολύ χαμηλές θερμοκρασίες προκαλούν έντονη μείωση στο φορτίο που μπορεί να αποθηκεύσει, υπό δεδομένο ρυθμό φόρτισης (ισχυρή μείωση της ευκινησίας των ιόντων). Όπως διαπιστώνεται από το Σχήμα 2.7 (β), αν ο συσσωρευτής λειτουργεί σε -10°C , η χωρητικότητά του, μετά από δέκα ώρες φόρτισης, μόλις που φτάνει το 40 % αυτής που εμφανίζει αν φορτίζεται, κατά τον ίδιο χρόνο, στους 20°C .

2.4.5 Αναγωγή της πυκνότητας του ηλεκτρολύτη σε θερμοκρασία αναφοράς

Προκειμένου να προσδιοριστεί η κατάσταση φόρτισης του συσσωρευτή, μέσω της πυκνότητας του ηλεκτρολύτη, αφού η πυκνότητα του ηλεκτρολυτικού διαλύματος εξαρτάται από την θερμοκρασία, απαιτείται αναγωγή της ένδειξης του πυκνόμετρου, ρ_{θ} , στην θερμοκρασία αναφοράς. Η θερμοκρασία των 20°C έχει καθιερωθεί ως η μέση θερμοκρασία εργαστηριακού χώρου. Υπάρχουν σχετικοί πίνακες των κατασκευαστών για την αναγωγή αυτή, η οποία μπορεί να γίνει επίσης με βάση την εμπειρική σχέση:

$$\rho_{20} = \rho_{\theta} + 0,0007(\theta - 20) \quad (2.1)$$

Στη σχέση αυτή, η πυκνότητα του ηλεκτρολυτικού υγρού εκφράζεται σε g/cm^3 .

2.4.6 Ρεύμα φόρτισης συσσωρευτή

Η ήπια φόρτιση του συσσωρευτή θεωρείται πο λ σημαντική παράμετρος για την διατήρησή του σε καλή κατάσταση. Όσο μακρύτερη είναι η περίοδος φόρτισης μέχρι το άνω όριο τάσης φόρτισης (2,35 Volt για 2-βολτο στοιχείο), τόσο υψηλότερη η τελική στάθμη χωρητικότητας. Για λειτουργία των συσσωρευτών σε κανονικά πλαίσια κατά την φόρτιση, προτείνεται ο εξής κανόνας:

- για κοινούς συσσωρευτές αυτοκινήτων και UPS: φόρτιση με κανονικό ρυθμό, δηλαδή με ηλεκτρικό ρεύμα το πολύ, $C/20$ (I σε A, C σε Ah)
- για φωτοβολταϊκούς συσσωρευτές, με ρυθμό το πολύ, $C/10$ (I σε A, C σε Ah)

όπου C η ονομαστική χωρητικότητα του συσσωρευτή.

2.4.7 Αυτοαποφόρτιση του συσσωρευτή

Ένας φορτισμένος συσσωρευτής εκφορτίζεται ακόμη και αν δεν είναι συνδεδεμένος σε εξωτερικό φορτίο-κατανάλωση (αυτοαποφόρτιση). Οφείλεται στη συνεχή δράση του H_2SO_4 στα ηλεκτρόδια, κατά την οποία, ο Pb και ο PbO_2 μετατρέπονται σε PSO_4 , με ταυτόχρονη έκλυση των αερίων H_2 και O_2 . Η αυτοαποφόρτιση αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας του συσσωρευτή. Τυπικοί ρυθμοί αυτοαποφόρτισης ενός συσσωρευτή, είναι:

- σε θερμοκρασία $5^\circ C$, η χωρητικότητα ελαττώνεται κατά 2% ανά μήνα
- σε θερμοκρασία $15^\circ C$, η χωρητικότητα ελαττώνεται κατά 4% ανά μήνα
- σε θερμοκρασία $25^\circ C$, η χωρητικότητα ελαττώνεται κατά 10% ανά μήνα

2.4.8 Απόδοση ενέργειας και φορτίου

Όταν φορτίζεται ένας συσσωρευτής, ένα ποσοστό της τάξεως του 1 00% της προσφερόμενης σε αυτόν ενέργειας χάνεται, θερμαίνοντας τον ηλεκτρολύτη ή προκαλώντας ηλεκτρόλυση. Έτσι, ένας συσσωρευτής χαρακτηρίζεται από συγκεκριμένο βαθμό απόδοσης ενέργειας, η_E . Ορίζεται ως ο λόγος του ηλεκτρικού έργου που αποδίδει ο συσσωρευτής κατά την αποφόρτιση ($W=VIt$), δια του έργου που του προσφέρθηκε κατά την προηγηθείσα φόρτισή του. Τυπική τιμή: 80-85%.

$$\eta_E = \frac{W_{\text{εκφόρτισης}}}{W_{\text{φόρτισης}}} \quad (2.2)$$

Χρησιμοποιείται επίσης ο αντίστοιχος βαθμός απόδοσης φορτίου η_q , εκτός από το βαθμό ενεργειακής απόδοσης, ο οποίος ορίζεται ως ο λόγος του φορτίου κατά την αποφόρτιση, προς το φορτίο κατά την φόρτιση:

$$\eta_q = \frac{Q_{\text{εκφόρτισης}}}{Q_{\text{φόρτισης}}} \quad (2.3)$$

Τυπική τιμή του βαθμού απόδοσης φορτίου είναι η τιμή $\eta_q=90\%$.

2.4.9 Συντελεστής γήρανσης συσσωρευτή

Με την αύξηση του αριθμού των κύκλων λειτουργίας του συσσωρευτή, δηλαδή με την πάροδο του χρόνου, μειώνεται η χωρητικότητά του. Πρέπει να ληφθεί υπόψη η μείωση αυτή (γήρανση) κατά τον υπολογισμό της αρχικής χωρητικότητας του συσσωρευτή, ώστε μέσα στο χρόνο ζωής του να διατηρεί τη δυνατότητα να καλύπτει ημερησίως την ενέργεια που απαιτούν οι καταναλώσεις της εφαρμογής, με συγκεκριμένο βάθος αποφόρτισης, β . Η εμπειρία έχει δείξει ότι η χωρητικότητα ενός συσσωρευτή, μειώνεται σταδιακά με την πάροδο του χρόνου και περίπου στο τέλος της ζωής του πέφτει στο 80 % της αρχικής ονομαστικής χωρητικότητάς του. Συνεπώς, ως τυπική τιμή του συντελεστή γήρανσης του συσσωρευτή λαμβάνεται η τιμή $\eta_{\gamma,B}=0,8$.

2.5 ΤΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ ΤΩΝ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ

Με σκοπό τη βελτιστοποίηση της μεταφοράς της ενέργειας κατά τον οικονομικότερο δυνατό τρόπο καθώς και την προστασία του συσσωρευτή από υπερφόρτιση ή από υπεραποφόρτιση, απαιτείται η παρεμβολή κατάλληλων ηλεκτρονικών συσκευών για την σωστή διαχείριση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από τη φ/β συστοιχία. Από λειτουργικής πλευράς, δυο είναι οι βασικές ηλεκτρονικές διατάξεις:

- ο ελεγκτής της διαδικασίας φόρτισης-αποφόρτισης (charge controller)
- οι μετατροπείς τάσεως.

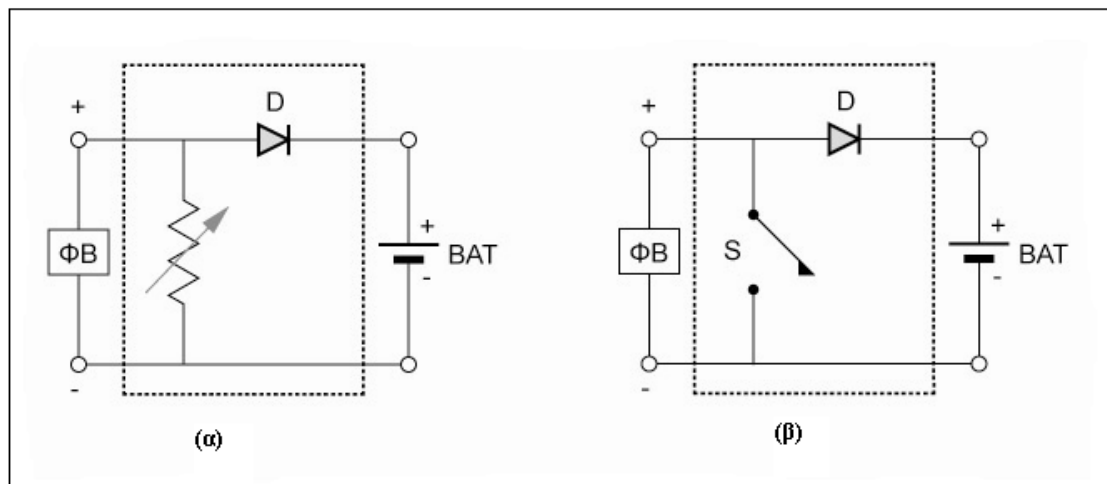
Ο ελεγκτής φόρτισης τοποθετείται συνήθως σε χωριστή μονάδα σε σχέση με τις υπόλοιπες διατάξεις, μπορεί όμως να βρίσκεται ενσωματωμένος με τον εναλλάκτη, σε μια ολοκληρωμένη μονάδα.

2.5.1 Ο ελεγκτής φόρτισης συσσωρευτή για φωτοβολταϊκά συστήματα

Η φόρτιση των ηλεκτρικών συσσωρευτών, μέσω μιας πηγής ηλεκτρικής ενέργειας π.χ φ/β συστοιχίας, ανεμογεννήτριας ή ηλεκτροπαραγωγικού ζεύγους, απαιτεί συνεχή έλεγχο της κατάστασης φόρτισής τους, ώστε όταν αυτοί φτάσουν στην κατάσταση μέγιστης φόρτισης, να διακόπτεται η διαδικασία. Έτσι αποφεύγεται η υπερφόρτιση του συσσωρευτή, η οποία θα είχε ως συνέπεια την έκλυση μεγάλων ποσοτήτων υδρογόνου, λόγω ηλεκτρόλυσης και συνακόλουθα μείωση της στάθμης του διαλύματος. Αντίστοιχα απαιτείται έλεγχος του συσσωρευτή όσο αυτός τροφοδοτεί την κατανάλωση, ώστε να προληφθεί η καταστροφική για τον συσσωρευτή, κατάσταση υπεραποφόρτισης (ελεγκτής αποφόρτισης).

Γενικά ο ελεγκτής φόρτισης-εκφόρτισης, στην πιο περιορισμένη του μορφή, εποπτεύει την διαδικασία φόρτισης και αποφόρτισης ώστε να απομονώνει το σύστημα αποθήκευσης, αφενός από το σύστημα παραγωγής της ενέργειας, στην περίπτωση της υπερφόρτισης, και αφετέρου από το σύστημα κατανάλωσης, στην περίπτωση της υπεραποφόρτισης. Και στις δυο περιπτώσεις, η διακοπή αυτή προκαλείται όταν η τάση στα άκρα του συσσωρευτή ξεπεράσει, προς τα άνω και αντίστοιχα προς τα κάτω, ορισμένα όρια τάσης (setpoints), όπου ενεργοποιούνται οι ηλεκτρικοί διακόπτες.

Μια μονάδα ελέγχου φόρτισης-αποφόρτισης, περιλαμβάνει ένα σύνολο ολοκληρωμένων συστημάτων είτε μικροελεγκτές (microcontrollers), που ελέγχουν ηλεκτρικούς διακόπτες, είτε ηλεκτρονόμους (relays), είτε ηλεκτρονικά ισχύος. Σε κάθε περίπτωση, στο κύκλωμα παρεμβάλλεται μια δίοδος για την προστασία του συστήματος αποθήκευσης από αποφόρτιση, μέσω των κυκλωμάτων της διάταξης ή του υπόλοιπου συστήματος (Σχήμα 2.8).



Σχήμα 2.8: Τυπικά διαγράμματα παράλληλου ρυθμιστή φόρτισης (α) με γραμμικό και (β) με διακοπτικό στοιχείο. Ο ρυθμιστής αυτός χρησιμοποιείται μόνο σε φωτοβολταϊκά στοιχεία.

Διακρίνονται δυο περιπτώσεις, όπου στην κάθε μια απαιτείται διαφορετικός ελεγκτής φόρτισης. Αυτήν που αφορά καθαρά σε φωτοβολταϊκά συστήματα και εκείνη που μπορεί να διαχειρίζεται ηλεκτρική ενέργεια που προέρχεται από οποιαδήποτε πηγή ηλεκτρικής ενέργειας (φωτοβολταϊκά, ανεμογεννήτριες ή ηλεκτροπαραγωγικά ζεύγη). Η παρούσα εργασία θα επικεντρωθεί σε αυτήν που αφορά καθαρά σε φωτοβολταϊκά συστήματα.

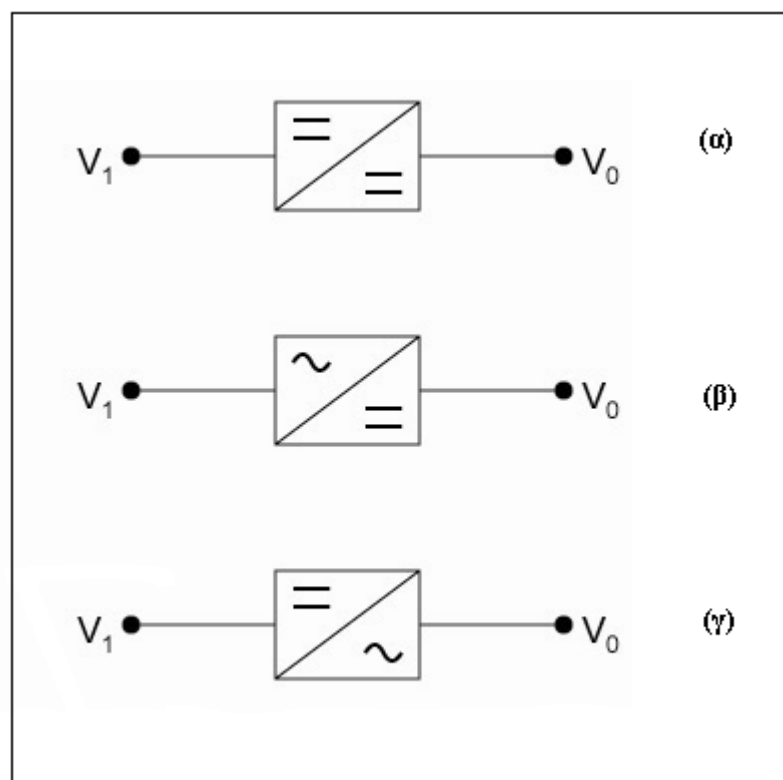
Στην ειδική περίπτωση λοιπόν ενός φωτοβολταϊκού συστήματος, το οποίο χαρακτηρίζεται ως πηγή σταθερού ρεύματος, χρησιμοποιούνται διατάξεις, των οποίων τα τυπικά διαγράμματα δείχνονται στο Σχήμα 2.8(α) και (β). Χαρακτηριστικό αυτού του ρυθμιστή είναι το ότι το ελεγχόμενο στοιχείο είναι συνδεδεμένο παράλληλα με το φωτοβολταϊκό σύστημα (shunt controller), με τη δυνατότητα να λειτουργεί, είτε μεταβαλλόμενο γραμμικά, ανάλογα με την μέγιστη φόρτιση (Σχήμα 2.8(α)), είτε ως διακόπτης ON/OFF (Σχήμα 2.8(β)). Στην περίπτωση του παράλληλου ρυθμιστή, όταν επιτευχθεί η μέγιστη φόρτιση (όριο τάσης, setpoint), το ελεγχόμενο στοιχείο βραχυκυκλώνει το φωτοβολταϊκό σύστημα, χωρίς να προκαλείται καμία απολύτως βλάβη σε αυτό. Έτσι απομονώνεται το σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από το σύστημα αποθήκευσής της.

2.5.2 Μετατροπείς (converters) DC-DC, DC-AC και AC-DC

Οι μετατροπείς είναι ηλεκτρονικές διατάξεις, μετατροπής:

- συνεχούς ρεύματος σε συνεχές (DC-DC converter), οποιασδήποτε τάσης
- συνεχούς ρεύματος σε εναλλασσόμενο (DC-AC converter), οποιουδήποτε πλάτους
- εναλλασσόμενης τάσης σε συνεχή (AC-DC converter)

Το Σχήμα 2 9 δείχνει τις συμβολικές ηλεκτρολογικές παραστάσεις των τριών τύπων μετατροπέων.



Σχήμα 2.9: Συμβολικές παραστάσεις των τριών τύπων μετατροπέων (α) συνεχούς τάσεως σε συνεχή, (β) εναλλασσόμενης σε συνεχή, (γ) συνεχούς σε εναλλασσόμενη.

Ένας DC-DC μετατροπέας, μόνος του ή σε συνδυασμό με τους άλλους τύπους (DC-AC, AC-DC), μπορεί να αποτελεί χωριστή μονάδα ή να αποτελεί τμήμα του ελεγκτή φόρτισης. Στην τελευταία περίπτωση, η λειτουργία του έγκειται στο να προσαρμόζει την τάση του συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, στην τάση του συστήματος αποθήκευσης, ώστε να εκμεταλλεύεται πλήρως η παραγόμενη φ/β ηλεκτρική ενέργεια.

Η όλη διαδικασία έχει ομοιότητα με την μετατροπή του εναλλασσόμενου σε εναλλασσόμενο διαφορετικού πλάτους, μέσω μετασχηματιστή (transformer), η οποία ως γνωστόν, βασίζεται αποκλειστικά και μόνο στο φαινόμενο της επαγωγής. Στην περίπτωση αυτή, το κύκλωμα εξόδου είναι ηλεκτρικά μονωμένο από το κύκλωμα εισόδου. Στην περίπτωση των μετατροπέων DC-DC, δεν είναι υποχρεωτική η χρησιμοποίηση μετασχηματιστή.

2.5.2.1 Μετατροπέας συνεχούς τάσεως σε συνεχή (DC-DC converter)

Η μετατροπή μιας συνεχούς τάσεως, V_I , σε συνεχή, V_O βασίζεται στη χρήση υψίσυχων διακοπτικών στοιχείων κυκλωμάτων, με τα οποία υπάρχει η δυνατότητα διαχείρισης μεγάλης ισχύος, με ελάχιστες απώλειες. Η μονάδα μετατρέπει συνεχή τάση σε συνεχή, μεγαλύτερης ή μικρότερης τιμής, ανάλογα με τις απαιτήσεις, συμβάλλοντας στη μείωση των καταναλώσεων στη γραμμή μεταφοράς από το χώρο παραγωγής στο χώρο αποθήκευσης. Στο χώρο του φωτοβολταϊκού πεδίου, τα φωτοβολταϊκά πλαίσια συνδέονται σε σειρά κι αν απαιτείται παράλληλα, ώστε η παραγόμενη σε αυτά ηλεκτρική ενέργεια να μεταφέρεται με όσο γίνεται υψηλότερη τάση, πάντα μέσα στα επιτρεπτά όρια, ώστε το ρεύμα (DC) στη γραμμή μεταφοράς να είναι χαμηλό και αντίστοιχα χαμηλές οι απώλειες μεταφοράς ενέργειας. Σε συστήματα μεγαλύτερα των μερικών kW_p, η τάση εξόδου συστοιχίας βρίσκεται συνήθως περί τα 3 0V, με όριο τα 6 0V. Στο χώρο των συσσωρευτών, ο μετατροπέας DC-DC, προσαρμόζει την τάση της συστοιχίας στην τάση του συσσωρευτή, ώστε να υπάρχει πλήρης

εκμετάλλευση της ενέργειας και επιπλέον να μη δημιουργηθούν συνθήκες υπέρτασης του συσσωρευτή. Τα συστήματα αυτά παρουσιάζουν απόδοση έως 94%.

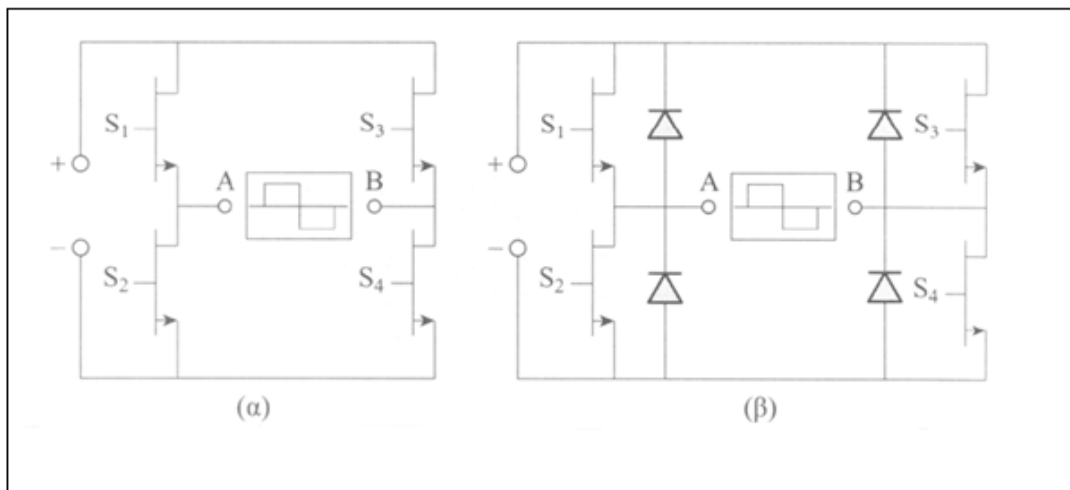
Στην διάταξη μπορεί να ενσωματωθεί μικροελεγκτής, ο οποίος συνεχώς ελέγχει και επιβάλλει την προσαρμογή του σημείου λειτουργίας του συστήματος παραγωγής ενέργειας, με το σημείο μέγιστης ισχύος που καθορίζουν οι επικρατούσες συνθήκες φωτισμού και θερμοκρασίας περιβάλλοντος. Η πρόσθετη αυτή διάταξη ονομάζεται όπως αναφέρθηκε ανιχνευτής βέλτιστου σημείου λειτουργίας (Maximum Power Point Tracking, MPPT).

2.5.2.2 Ο μετατροπέας DC-AC (Inverter)

Η χρησιμοποίηση του εναλλασσομένου ρεύματος σε φωτοβολταϊκές εφαρμογές επιβάλλεται, στις περισσότερες των περιπτώσεων, εξαιτίας της επικράτησής του, κατά γενικό τρόπο, σε κάθε είδους οικιακές χρήσεις και εφαρμογές καθώς και στη βιομηχανία. Εντελώς γενικά τρεις είναι οι κύριοι τρόποι με τους οποίους μετατρέπεται το συνεχές ρεύμα (DC) σε εναλλασσόμενο (AC):

- με συνδυασμό κινητήρα συνεχούς ρεύματος με γεννήτρια εναλλασσομένου
- με χρήση του κλασικού μηχανικού ή ηλεκτρονικού διακοπτικού συστήματος σε συνεργασία με μετασχηματιστή (πηνίο Ruhmkorff, διατάξεις τροφοδοσίας των αναφλεκτήρων των μηχανών εσωτερικής καύσης
- με τον καθαρά ηλεκτρονικό μετατροπέα DC-AC converter (inverter).

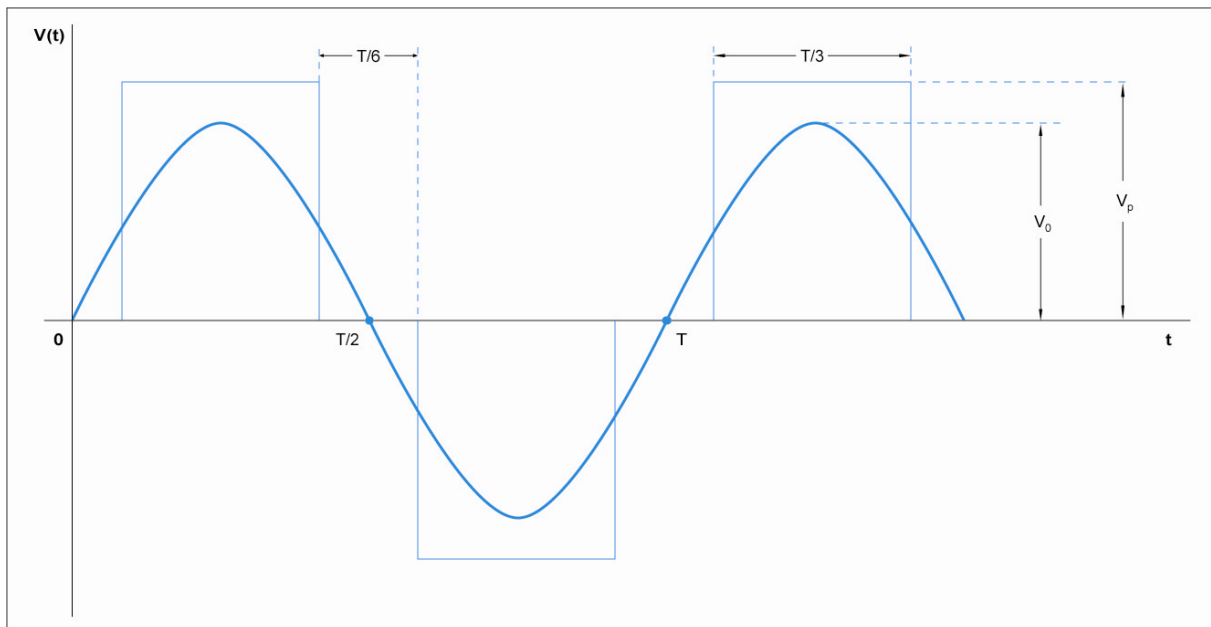
Ο εναλλάκτης είναι ένα ηλεκτρονικό σύστημα ισχύος που μετατρέπει συνεχή τάση σε εναλλασσόμενη (μονοφασική ή τριφασική). Η βασική αρχή λειτουργίας του περιγράφεται στο Σχήμα 2.10. Χρησιμοποιείται ευρύτατα σε περιπτώσεις που διατίθεται πηγή συνεχούς ηλεκτρικής τάσεως και καταναλωτές εναλλασσόμενης, όπως συμβαίνει π.χ στις φωτοβολταϊκές εφαρμογές οικιακής χρήσεως. Αποτελείται από ηλεκτρονικούς διακόπτες (π.χ διπολικά τρανζίστορ ισχύος, thyristors κ.λ.π.), η συνδυασμένη λειτουργία των οποίων έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία σειράς τετραγωνικών παλμών διαδοχικά ορθών και ανεστραμμένων (Inversion).



Σχήμα 2.10: (α) Βασική αρχή λειτουργίας του inverter. S_1, S_2, S_3, S_4 : διακοπτικά στοιχεία. Η μετατροπή του συνεχούς ρεύματος σε εναλλασσόμενο (DC-AC conversion), επιτυγχάνεται με κλείσιμο-άνοιγμα των διακοπτικών στοιχείων, ανά δύο, χιαστί (1,4 και 2,3). Όσο τα S_1, S_4 είναι αγωγή και τα S_2, S_3 σε αποκοπή, τα σημεία A και B έχουν πρόσημα + και - αντίστοιχα. Όταν συμβαίνει το αντίστροφο, τα A και B έχουν πρόσημα - και + αντίστοιχα. Με αυτόν τον τρόπο δημιουργείται η εναλλασσόμενη τετραγωνική τάση (κέντρο του διαγράμματος). (β) Στο προηγούμενο κύκλωμα προστίθεται, σε κάθε

διακοπτικό στοιχείο, από μία δίοδο, ώστε να αποκόπτεται η επιστρεφόμενη ισχύς από μη ωμικά φορτία κατανάλωσης.

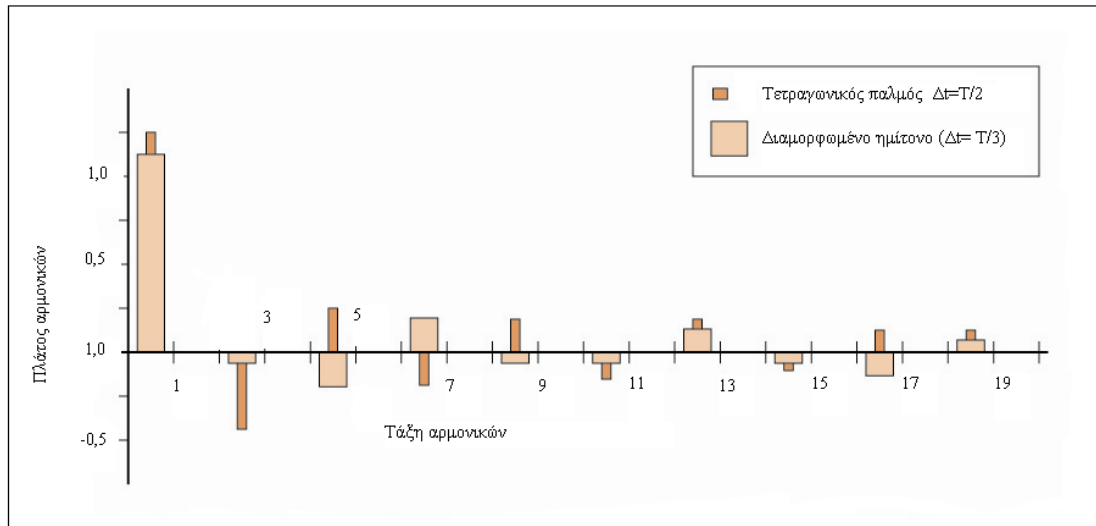
Μια βελτιωμένη έκδοση εναλλάκτη, αποτελεί εκείνος του οποίου η τάση εξόδου παρουσιάζεται με τη μορφή διαμορφωμένου ημιτόνου (modified sine inverter), όπως εμφανίζεται στο σχήμα 2.11.



Σχήμα 2.11: Η μορφή του τροποποιημένου ημιτόνου (modified sine), σε σύγκριση με το καθαρό ημίτονο. V_p : πλάτος τετραγωνικού παλμού, V_0 : πλάτος αντίστοιχου θεμελιώδους ημιτονικής κυματομορφής.

Με κατάλληλη ρύθμιση των χρόνων κλεισίματος-ανοίγματος των διακοπών, επιτυγχάνεται μικρή τροποποίηση της κυματομορφής εξόδου του, η οποία χαρακτηρίζεται από το ότι ο αρνητικός τετραγωνικός παλμός είναι μετατοπισμένος χρονικά, σε σχέση με τον θετικό, κατά $T/6$ της περιόδου της συνολικής κυματομορφής. Το χρονικό εύρος των τετραγωνικών τμημάτων είναι $T/3$.

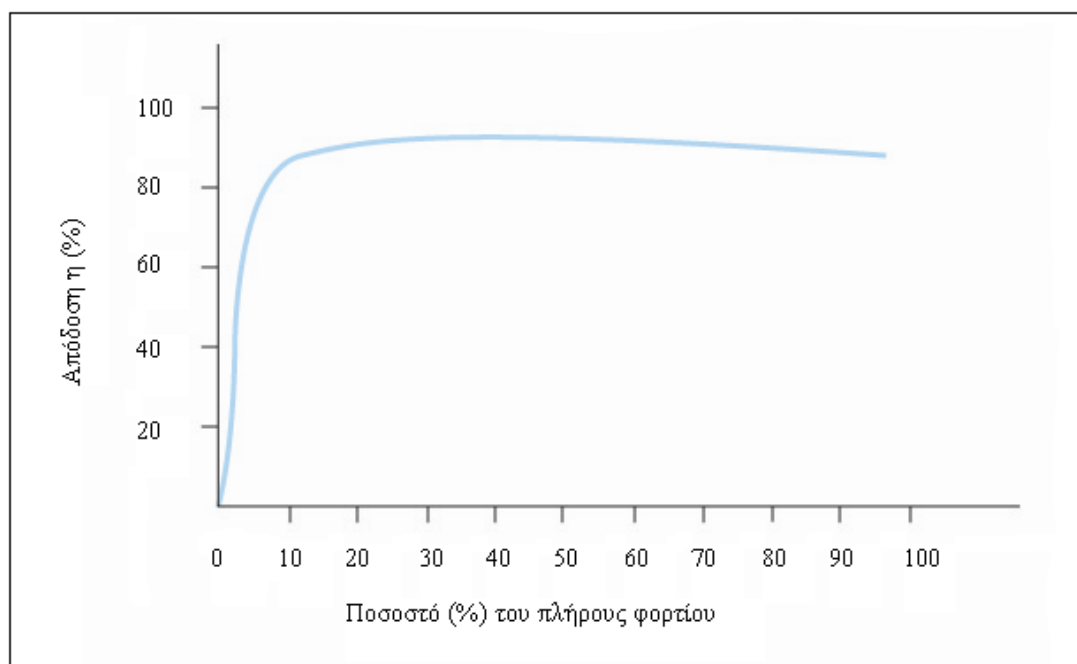
Τα πλεονεκτήματα αυτής της διαμορφωμένης τετραγωνικής κυματομορφής, είναι ότι περιορίζεται το μέγεθος των ανωτέρων αρμονικών και άρα περιορίζεται δραστικά η παραμόρφωση του σήματος. Πράγματι όπως παρατηρείται στο σχήμα 2.12, υπάρχει έντονη διαφορά μεταξύ των πλατών των ανωτέρων αρμονικών του διαμορφωμένου σήματος, σε σχέση με τον απλό τετραγωνικό παλμό.



Σχήμα 2.12: Φάσμα συχνοτήτων δυο περιοδικών σημάτων, του εναλλασσόμενου τετραγωνικού παλμού (μαύρα παραλληλόγραμμα) και του εναλλασσόμενου διαμορφωμένου τετραγωνικού παλμού. Το πλάτος της θεμελιώδους αρμονικής (Τάξη $n=1$) είναι περίπου 1,15 του πλάτους του τετραγωνικού παλμού ($V_0=1,15V_p$).

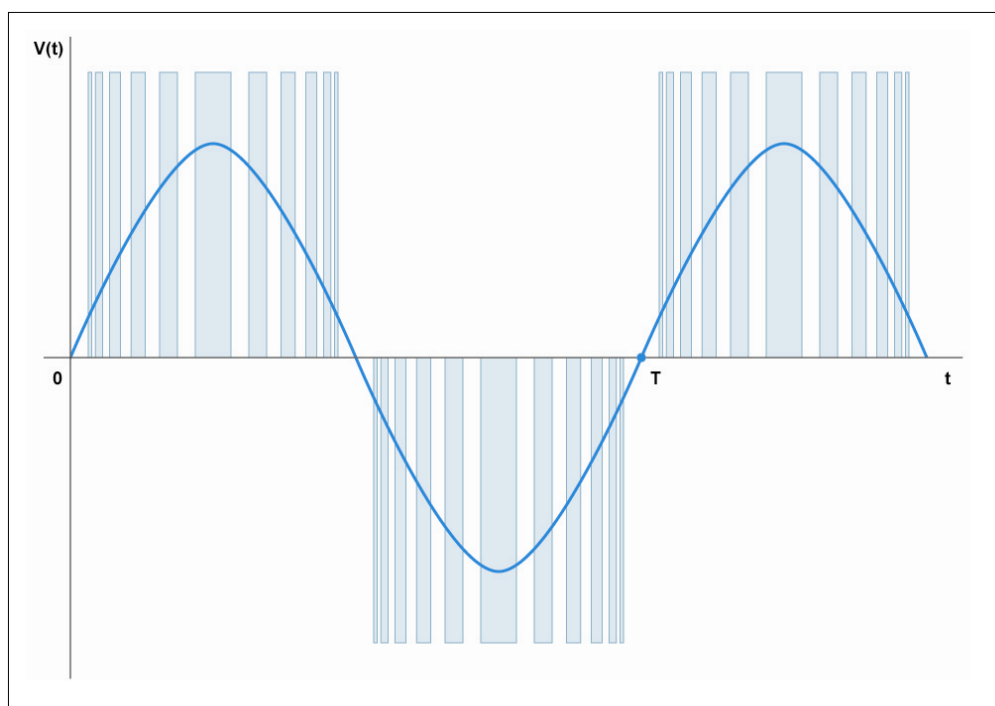
Η περίπτωση με μετατόπιση $\tau=T/6$ μεταξύ των αναστραμμένων παλμών χαρακτηρίζεται από μικρότερη παραμόρφωση, που επιβάλλουν οι ανώτερες αρμονικές στο σήμα της θεμελιώδους. Οι inverters αυτού του είδους χρησιμοποιούνται ευρέως, χωρίς ιδιαίτερα προβλήματα στις συσκευές που τροφοδοτούν και παρουσιάζουν αρκετά καλή απόδοση (μέχρι και 96%, σε πλήρες φορτίο).

Γενικά η απόδοση των inverters είναι αρκετά υψηλή (93-96%, Σχήμα 2.13), εξαρτώμενη από το ποσοστό του πλήρους φορτίου που τροφοδοτεί. Απαιτείται υψηλή απόδοση, όχι μόνο όταν τροφοδοτείται το πλήρες φορτίο (100%), αλλά και όταν αυτό είναι μειωμένο. Συγκεκριμένα, βασικό απαιτούμενο χαρακτηριστικό ενός inverter είναι η υψηλή απόδοση (>90%) ακόμα και όταν το φορτίο είναι μόνο 10% του πλήρους. Σημειώνεται επίσης, ότι η λειτουργία τους συνοδεύεται, κατά περίπτωση, από παραγωγή μεγάλου πλήθους αρμονικών υψηλών συχνοτήτων (κυρίως με τον απλό τετραγωνικό παλμό), που περιορίζεται με ειδικά ηλεκτρονικά φίλτρα.



Σχήμα 2.13: Μεταβολή της απόδοσης του inverter σε συνάρτηση με το ποσοστό του πλήρους φορτίου που τροφοδοτεί.

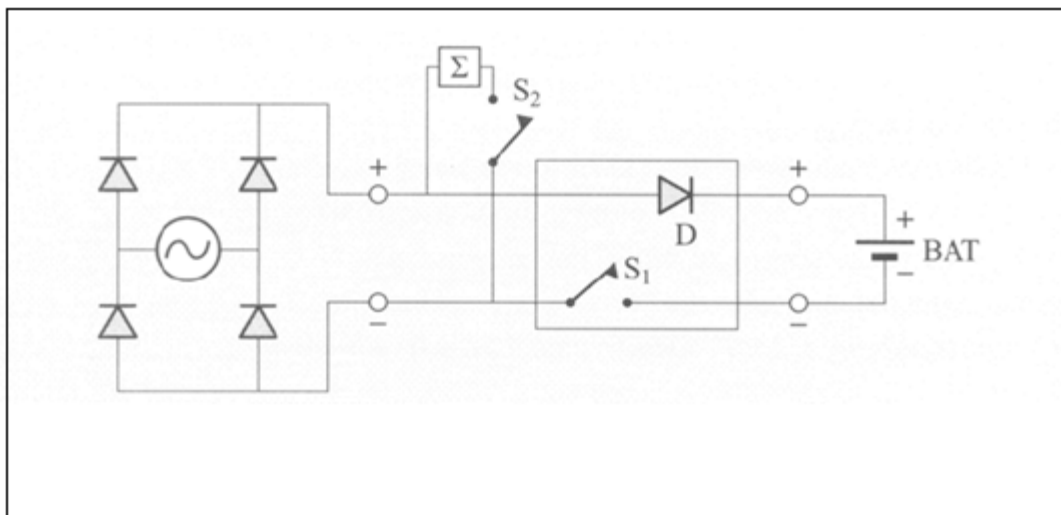
Επιβάλλοντας περισσότερα κλεισίματα των διακοπών 1,4 και στη συνέχεια των 2,3 και μάλιστα μεταβαλλόμενης διάρκειας, ανάλογα με τις τιμές ενός ημιτόνου, παράγεται ηλεκτρικό σήμα που πλησιάζει πολύ την ημιτονική μορφή. Οι διατάξεις αυτές ονομάζονται «inverters διαμόρφωσης του εύρους των παλμών της κυματομορφής εξόδου» (Modulated Pulse Width Waveform) (Σχήμα 2.14).



Σχήμα 2.14: Η κυματομορφή εξόδου ενός inverter διαμόρφωσης εύρους παλμών.

2.5.2.3 Μετατροπέας εναλλασσόμενου ρεύματος σε συνεχές (AC-DC)

Σε αυτή την διάταξη συνδυάζεται ένα σύστημα ανόρθωσης της παρεχόμενης, από την ενεργειακή πηγή (ΑΓ, Η/Ζ), εναλλασσόμενης ηλεκτρικής τάσης (μονοφασικής ή τριφασικής μορφής), χωρίς την παρεμβολή μετασχηματιστή, με μια διάταξη μετατροπής συνεχούς σε συνεχές (DC-DC). Μια τέτοια διάταξη περιλαμβάνει μια ανορθωτική μονάδα σε συνδυασμό με έναν μετατροπέα DC-DC (Σχήμα 2.15).



Σχήμα 2.15: Το αριστερό τμήμα του διαγράμματος είναι απλά ένας ανορθωτής με διόδους σε διάταξη γέφυρας, για τη μετατροπή του εναλλασσόμενου ρεύματος σε συνεχές. Το δεξιό τμήμα είναι ένας DC-DC εναλλάκτης για τη μετατροπή της συνεχούς τάσεως σε συνεχή, διαφορετικής τιμής. S1, S2 είναι διακοπτικά συστήματα, D: δίοδος αντεπιστροφής, Σ: ελεγχόμενο στοιχείο στο οποίο αποδίδεται η πλεονάζουσα ενέργεια[2.10].

2.6 ΡΥΘΜΙΣΗ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΤΗΣ ΜΠΑΤΑΡΙΑΣ

Το βασικό ζήτημα σε κάθε σύστημα ενεργειακής μετατροπής είναι η αποδοτικότητα. Η ροή ενέργειας από την είσοδο του συστήματος προς την έξοδο του συστήματος εξαρτάται όχι μόνο από την ακτινοβολία ή την θερμοκρασία, αλλά επίσης και από τις συνθήκες λειτουργίας όλων των υπόλοιπων στοιχείων του συστήματος. Με σκοπό να αποτραπεί η μπαταρία από καταστάσεις υπερφόρτισης ή αποφόρτισης, καθίσταται σημαντική η αποτελεσματική διαχείριση της ροής.

Δύο βασικοί τύποι ηλεκτρονικών ρυθμιστών χρησιμοποιούνται συνήθως, για την διαχείριση φόρτισης της μπαταρίας: Οι παράλληλοι ή σε σειρά ρυθμιστές.

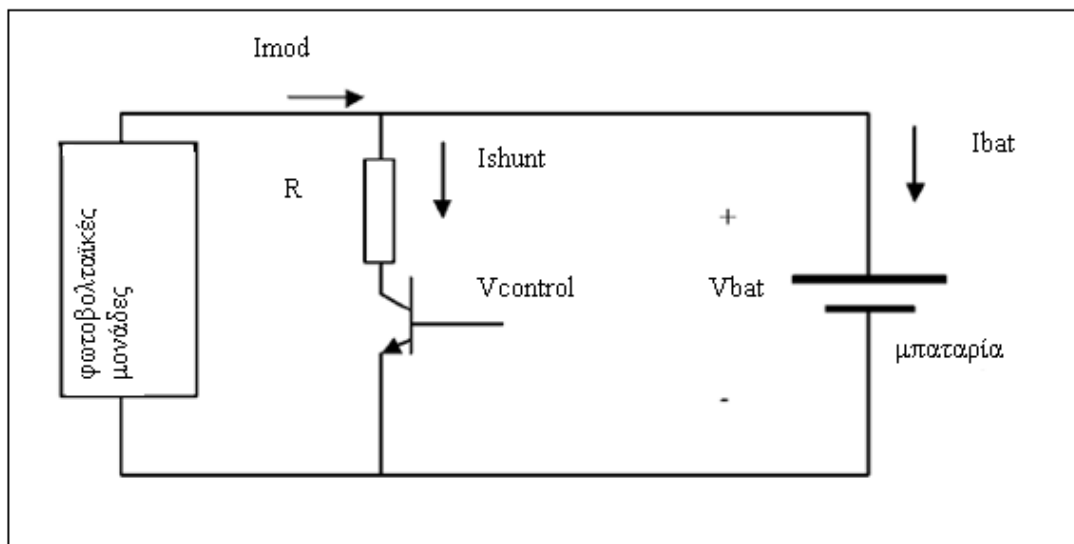
2.6.1 Παράλληλη ρύθμιση

Οι παράλληλοι ρυθμιστές συνδέονται παράλληλα με την φωτοβολταϊκή γεννήτρια, με σκοπό να εκτρέψουν την περίσσεια, άχρηστη ενέργεια που παράγεται, η οποία συντελεί στην υπερφόρτιση της μπαταρίας. Η ένδειξη εισόδου που ελέγχει τη δράση του ρυθμιστή είναι η τάση της μπαταρίας. Συγκεκριμένα, όταν οριακά φτάσει στο σημείο υπερφόρτωσης, ενεργοποιείται μία παράλληλη διακλάδωση μέσω της οποίας διοχετεύεται το περίσσιο ρεύμα.

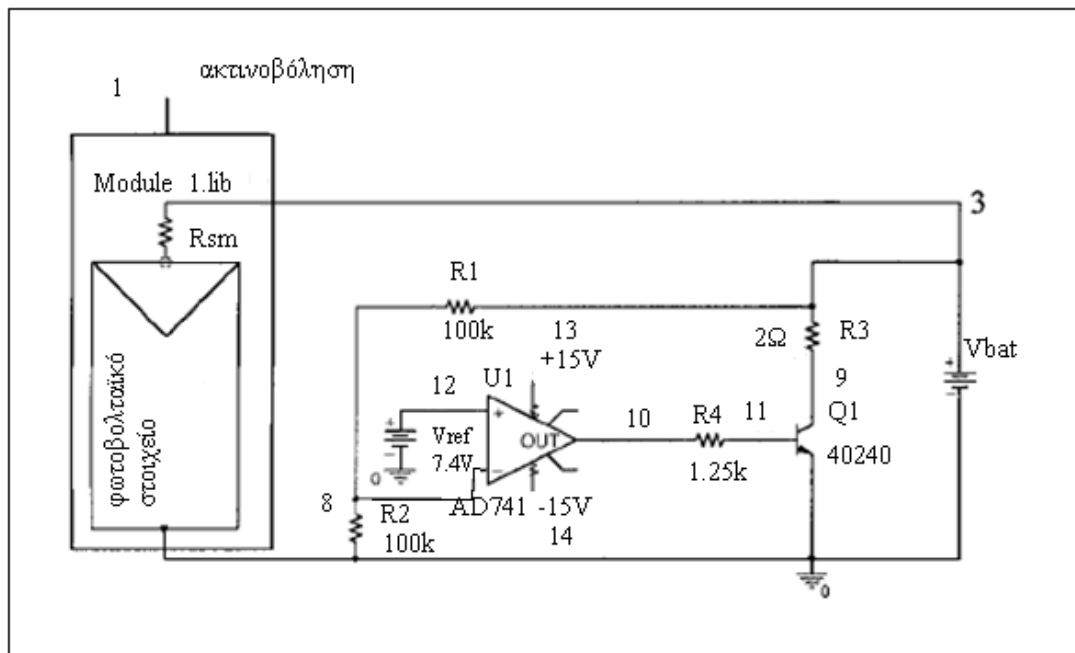
Στο Σχήμα 2.16 φαίνεται μια τυπική διευθέτηση αυτού του είδους του ρυθμιστή.

Το τρανζίστορ είναι στην κατάσταση OFF και το I_{shunt} ισούται με μηδέν, όσο η τάση $V_{control}$ παραμένει μικρότερη από την τάση υπερφόρτωσης της μπαταρίας, η οποία πρέπει να είναι γνωστή. Όταν η $V_{control}$ αγγίζει οριακά την τάση υπερφόρτωσης, τότε το τρανζίστορ περνάει στην κατάσταση ON και το I_{shunt} γίνεται θετικό. Με αυτόν τον τρόπο εκτρέπεται μέρος του I_{mod} , δια μέσου της διακλάδωσης του παράλληλου ρυθμιστή, περιορίζοντας έτσι το I_{bat} και συνεπώς και το V_{bat} .

Στο Σχήμα 2.17 το $V_{control}$ παράγεται από μία απλή συσκευή σύγκρισης, η οποία λαμβάνει σαν δεδομένα εισόδου την τάση V_{bat} και την αρχική τάση αναφοράς (onset reference value) στο σχήμα V_{ref} , και εξάγει αρνητικό σήμα όταν η τάση της μπαταρίας είναι μικρότερη από την τάση αναφοράς και θετικό όταν είναι μεγαλύτερη από την τάση αναφοράς αντίστοιχα. Ο κλάδος του παράλληλου ρυθμιστή που αποτελείται από ένα τρανζίστορ και μία αντίσταση, πρέπει να υπολογιστεί, με σκοπό να αφανίσει την παραπανίσια ενέργεια που παράγεται από τα φωτοβολταϊκά στοιχεία και να μην διανεμηθεί στην μπαταρία.



Σχήμα 2.16: Τυπική διάταξη παράλληλου ρυθμιστή



Σχήμα 2.17: Φωτοβολταϊκό σύστημα με παράλληλους ρυθμιστές.

Ας θεωρηθεί για παράδειγμα μιας προσομοίωσης παράλληλης ρύθμισης στο Pspice, το φωτοβολταϊκό σύστημα που φαίνεται στο Σχήμα 2.17.

Το σύστημα αυτό περιλαμβάνει φωτοβολταϊκά στοιχεία, μια μπαταρία και ένα κύκλωμα παράλληλης ρύθμισης. Το κύκλωμα αυτό αποτελείται από έναν συγκριτή τάσεως και ένα ηρη δίπολο τρανζίστορ ως κύρια στοιχεία και τέσσερις αντιστάσεις. Πιο ειδικά οι αντιστάσεις R_1 και R_2 είναι διαιρετές τάσεως, που παράγουν μια ανάλογη τάση στην τάση της μπαταρίας στην αρνητική είσοδο του συγκριτή τάσεως. Οι αντιστάσεις R_3 και R_4 λειτουργούν ως αντιστάσεις ισχύος σε σειρά με το κύκλωμα του συλλέκτη του τρανζίστορ και η αντίσταση R_3 είναι συνδεδεμένη σε σειρά με τη βάση του τρανζίστορ. Αυτές οι δύο αντιστάσεις περιορίζουν το ρεύμα που περνά από τα τερματικά τρανζίστορ.

Ακολουθεί η προσομοίωση του κυκλώματος αυτού στο Pspice.

2.6.2 Προσομοίωση κυκλώματος με παράλληλους ρυθμιστές στο Pspice.

Για το κύκλωμα του Σχήματος 2.17, θεωρείται ότι η φωτοβολταϊκή μονάδα αποτελείται από 36 ηλιακά κύτταρα συνδεδεμένα σε σειρά, με ρεύμα βραχυκυκλώσεως 5 A, τάση ανοικτού κυκλώματος 22.3 V και ολική ισχύ 85W, υπό σταθερή ένταση ακτινοβολίας AM1.5G 1KW/m² και σταθερή θερμοκρασία λειτουργίας 25°C

Η μπαταρία του κυκλώματος απαρτίζεται από συστοιχία 6 στοιχείων σε σειρά 2 V το καθένα και συνολική χωρητικότητα 1840Wh και αρχική τιμή SOCn=0.75 στην αρχή της προσομοίωσης..

Η μπαταρία του κυκλώματος έχει ονομαστική τάση $V_{bat}=12V$ και υπερφορτίζεται όταν φτάσει την τάση των 14,8 V. Τα δεδομένα εισόδου της προσομοίωσης παρέχονται από το αρχείο έντασης της ακτινοβολίας με όνομα 'irrad.stl'. Για απλοποίηση του προβλήματος θεωρείται σταθερή θερμοκρασία περιβάλλοντος 25° C. Το μοντέλο της φωτοβολταϊκής μονάδας περιγράφεται από το αρχείο με όνομα 'module_1.lib'.

Η netlist του προγράμματος φαίνεται στο Σχήμα 2.18.

**Συνδεση φωτοβολταϊκής μονάδας και μπαταρίας με παράλληλους ρυθμιστές

```
xmodule 0 3 1 module_1 params:ta = 25, iscmr =5, tr = 25, vocmr =22.3,ns = 36, np = 1, nd = 1,
+rmaxmr =85
```

**Καλείται το αρχείο module_1, ορίζονται οι ακροδέκτες του και οι παράμετροι του εξαρτήματος

```
.inc module_1.lib
```

**Με την εντολή αυτή το πρόγραμμα συμπεριλαμβάνει το αρχείο module_1.lib

```
xbat1 3 0 7 bat params: ns= 6, SOCm =1240, k = .8, D =1e-5, SOC1 = 0.75
```

**Καλείται το αρχείο bat ορίζονται ο ι κόμβο ι εισό δου και εξό δου καθώς και οι παράμετροι της μπαταρίας

```
.inc bat.cir
```

**Με την εντολή αυτή το πρόγραμμα συμπεριλαμβάνει το αρχείο bat.cir

```
R1 3 12 100000
```

**Η αντίσταση R1 βρίσκεται συνδεδεμένη μεταξύ των κόμβων 3 και 12 και η τιμή της αντίστασης είναι 100KΩ.

```
R2 12 0 100000
```

**Η αντίσταση R2 βρίσκεται συνδεδεμένη μεταξύ των κόμβων 12 και 0 και η τιμή της αντίστασης είναι 100KΩ.

```
R3 3 9 2
```

** Η αντίσταση R3 βρίσκεται συνδεδεμένη μεταξύ των κόμβων 3 και 9 και η τιμή της αντίστασης είναι 2Ω.

```
Q_Q1 9 11 0 Q40240
```

**Το τρανζίστορ Q1 με όνομα Q40240 έχει τοποθετημένο τον ακροδέκτη του συλλέκτη στον κόμβο 9, τον ακροδέκτη της βάσης στον κόμβο 11 και τον ακροδέκτη του εκπομπού στον κόμβο 0.

```
.model Q40240 npn
```

**Μοντελοποιείται το τρανζίστορ Q40240 και ορίζεται ο τύπος του (npn).

```
vref 8 0 dc 7.4
```

**Η ανεξάρτητη πηγή τάσης vref βρίσκεται συνδεδεμένη μεταξύ των κόμβων 8 και 0 με τιμή τάσης 7,4 V.

```
x741 12 8 13 14 10 ad741
```

**Καλείται το αρχείο του τελεστικού ενισχυτή 741 ορίζονται οι κόμβοι εισόδου και εξόδου καθώς και οι παράμετροι του

```
.inc opamp.lib
```

**Με την εντολή αυτή το πρόγραμμα συμπεριλαμβάνει το αρχείο opamp.lib

```
R4 10 11 1250
```

** Η αντίσταση R4 βρίσκεται συνδεδεμένη μεταξύ των κόμβων 10 και 11 και η τιμή της αντίστασης είναι 1,25KΩ.

```
vcc 13 0 dc 15
```

**Η ανεξάρτητη πηγή τάσης vcc βρίσκεται συνδεδεμένη μεταξύ των κόμβων 13 και 0 με τιμή τάσης 15 V.

```

vee 14 0 dc -15
**Η ανεξάρτητη πηγή τάσης vee βρίσκεται συνδεδεμένη μεταξύ των κόμβων 14 και 0 με τιμή τάσης
**-15V.

.inc irrاد.stl
** Με την εντολή αυτή το πρόγραμμα συμπεριλαμβάνει το αρχείο irrاد.stl

vmesur 1 0 stimulus Virrad
**Η ανεξάρτητη πηγή τάσης vmesur βρίσκεται συνδεδεμένη μεταξύ των κόμβων 1 και 0 με τιμή
**τάσης που προέρχεται από το αρχείο Virrad.

.tran 1s 130000s
**Το πρόγραμμα θα εκτελέσει transient analysis για 130000seconds με βήμα 1second

.probe
**Προβολή των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης σε γραφική μορφή
.
end
**Τέλος του προγράμματος

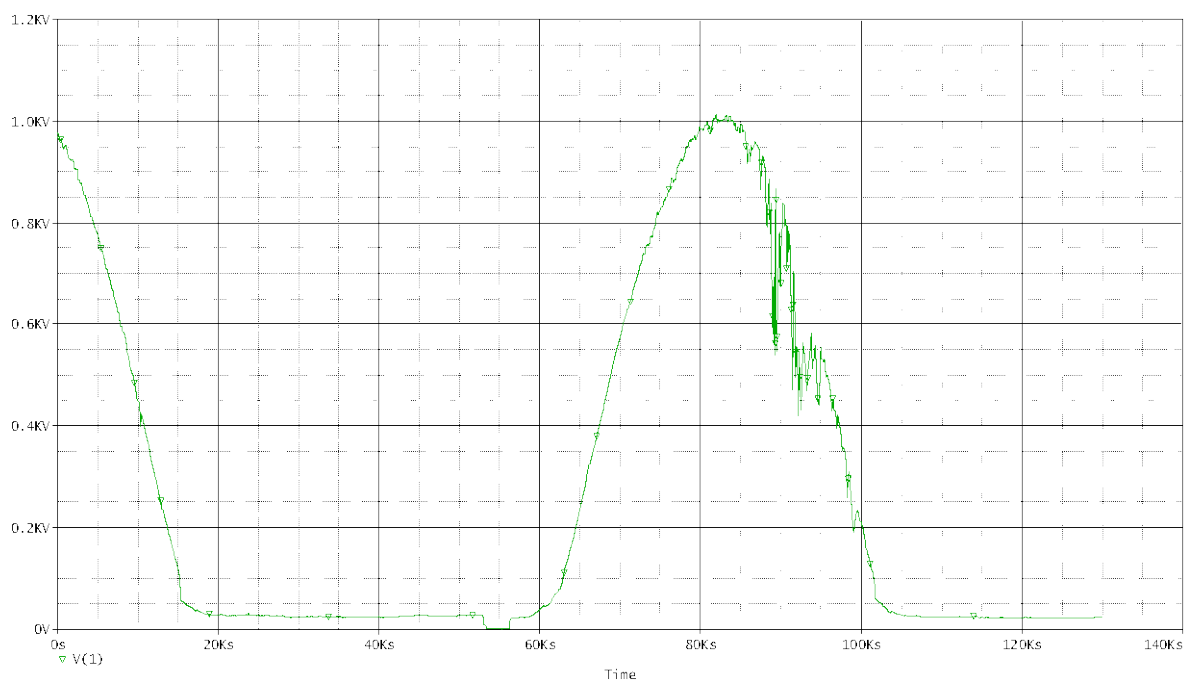
```

Σχήμα 2.18: Η netlist του κυκλώματος με παράλληλους ρυθμιστές στο Pspice

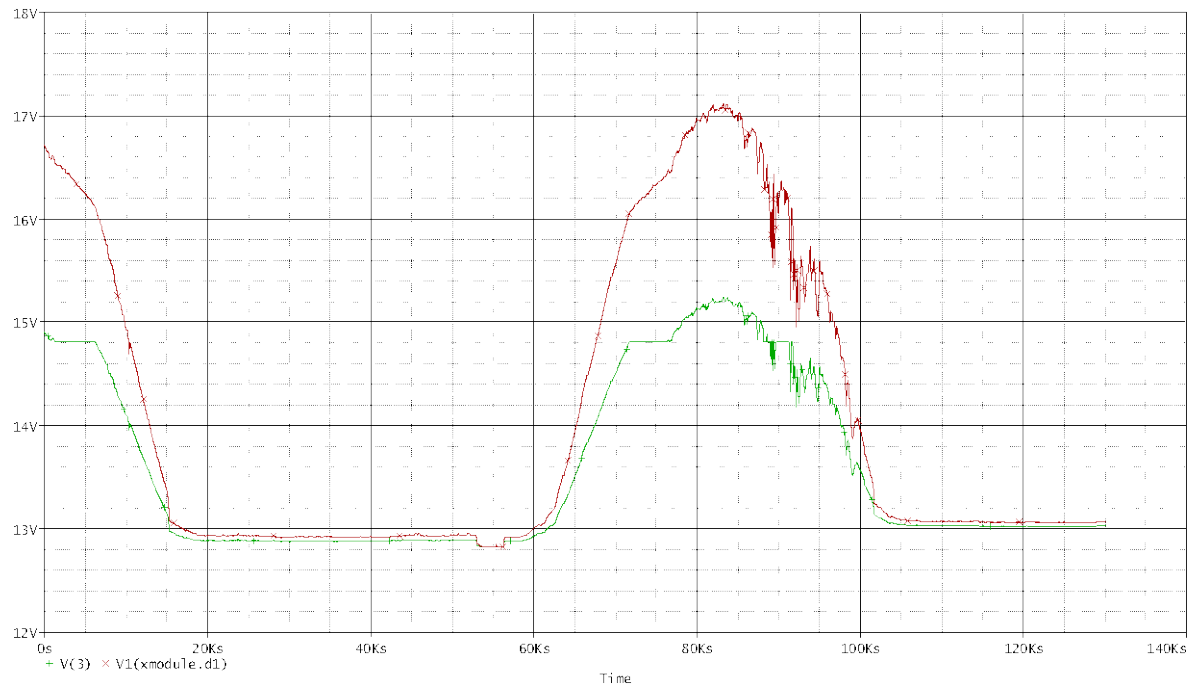
Το αρχείο module_1.lib περιγράφει το υποκύκλωμα της φωτοβολταϊκής μονάδας, το αρχείο bat.cir περιγράφει το μοντέλο μπαταρίας μολύβδου και το αρχείο irrاد.stl παρέχει το προφίλ της μετρούμενης ακτινοβολίας.

Η ένταση της ακτινοβολίας προέρχεται από πραγματικά καταγεγραμμένα στοιχεία και έχουν συμπεριληφθεί στα δεδομένα εισόδου της προσομοίωσης με την εντολή .inc irrاد.stl στη netlist του προγράμματος όπως το ίδιο έγινε και για τα αρχεία module_1.lib, bat.cir, oramp.lib

Στο Σχήμα 2.19 φαίνεται η ένταση της ακτινοβολίας για δύο ημέρες του Απριλίου στην Ισπανία.

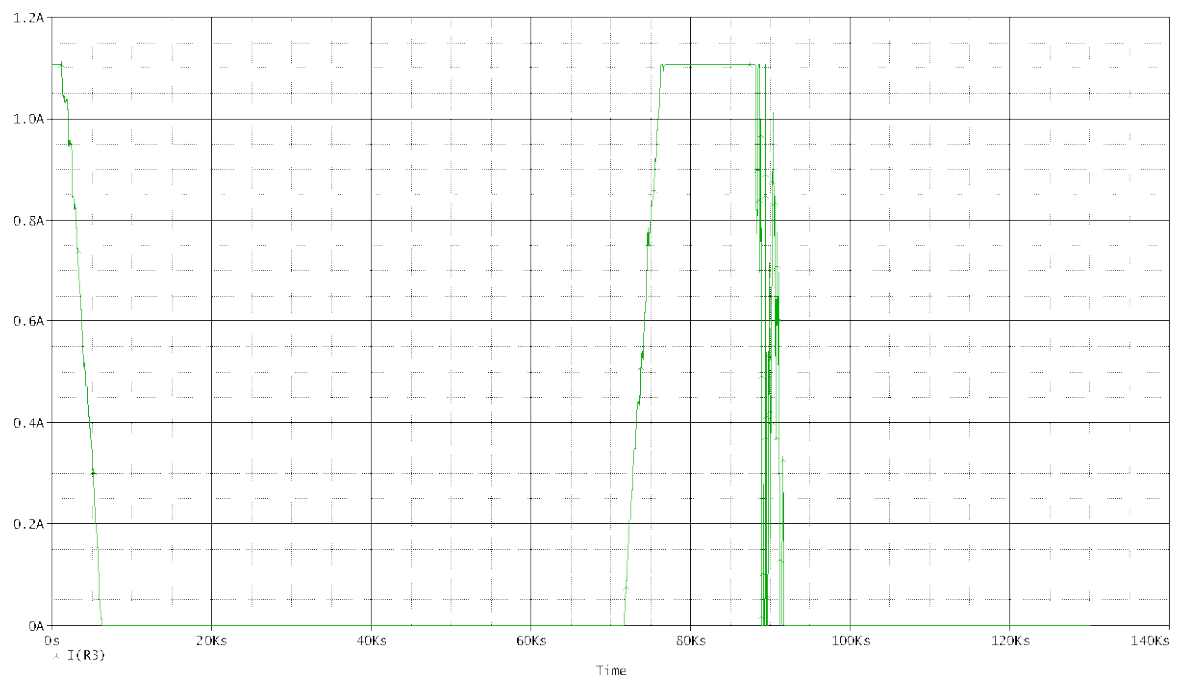


Σχήμα 2.19 : Ένταση ακτινοβολίας



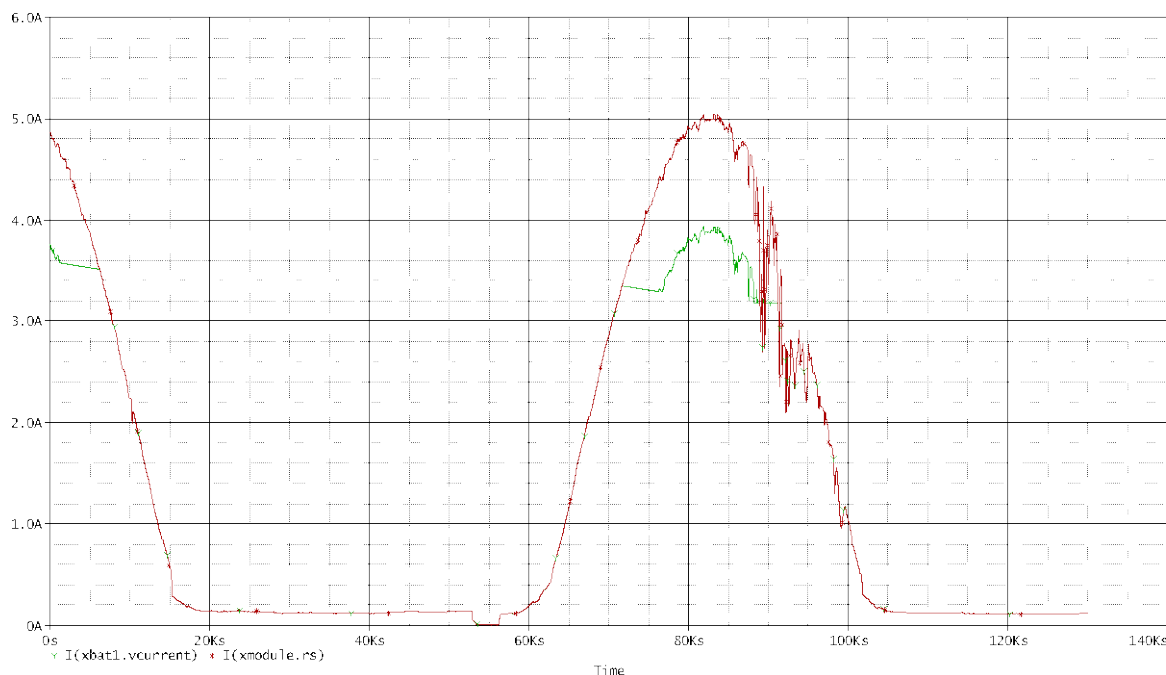
Σχήμα 2.20 : Η εξέλιξη της τάσης της μπαταρίας και της τάσης της φωτοβολταϊκής μονάδας

Όπως φαίνεται και απ το κύκλωμα στο Σχήμα 2.17 ο τελεστικός ενισχυτής συγκρίνει την τιμή $V_{bat}/2$ με μια σταθερή τάση αναφοράς $V_{ref}=7.4V$. Όταν η τάση της μπαταρίας V_{bat} φτάσει την τιμή των 14.8 V πλησιάζοντας την τάση υπερφόρτισης, η έξοδος του συγκριτή τάσεως γίνεται θετική ενεργοποιώντας έτσι το παράλληλο κύκλωμα που αποτελείται από ένα τρανζίστορ και την αντίσταση R_3 . Το Σχήμα 2.21 δείχνει την εξέλιξη του ρεύματος $I(R_3)$ κατά μήκος του παράλληλου κλάδου.



Σχήμα 2.21: Εξέλιξη του ρεύματος $I(R_3)$ κατά μήκος του παράλληλου κλάδου.

Το ρεύμα λοιπόν που εισέρχεται στην μπαταρία, περιορίζεται από την δράση του παράλληλου κλάδου. Στο Σχήμα 2.22 φαίνεται το ρεύμα της μπαταρίας $I(xbat1.vcurrent)$ και το ρεύμα στην έξοδο της φωτοβολταϊκής γεννήτριας $I(xmodule.rs)$.



Σχήμα 2.22: Το ρεύμα της μπαταρίας $I(xbat1.vcurrent)$ και το ρεύμα στην έξοδο της φωτοβολταϊκής γεννήτριας $I(xmodule.rs)$.

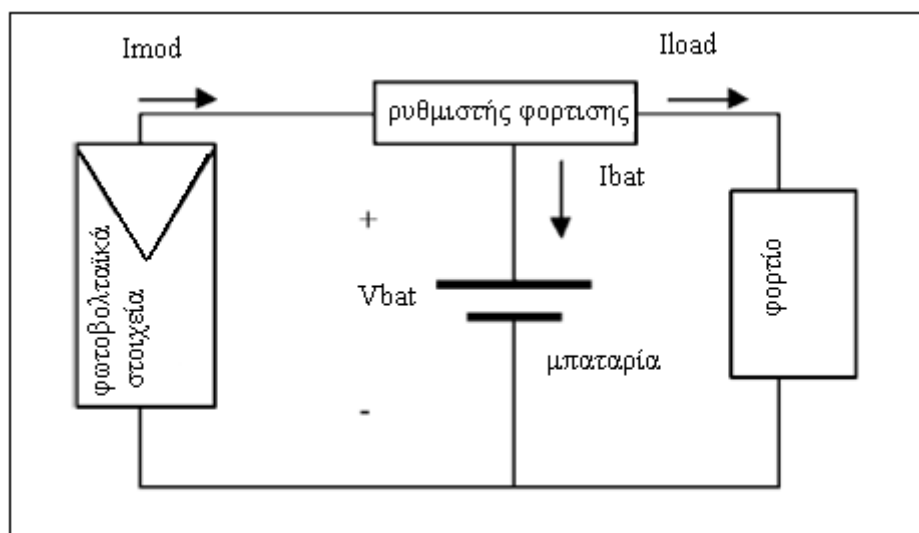
2.6.3 Ρύθμιση σε σειρά

Η δεύτερη προσέγγιση ρύθμισης είναι γνωστή ως ρύθμιση σε σειρά. Σήμερα οι περισσότεροι ρυθμιστές σε φωτοβολταϊκές εφαρμογές χρησιμοποιούν αυτού του είδους την ρύθμιση[2.11]. Το Σχήμα 2.23 δείχνει ένα διάγραμμα ενός αυτοδύναμου φωτοβολταϊκού συστήματος που περιλαμβάνει ένα ρυθμιστή φόρτισης μπαταρίας σε σειρά.

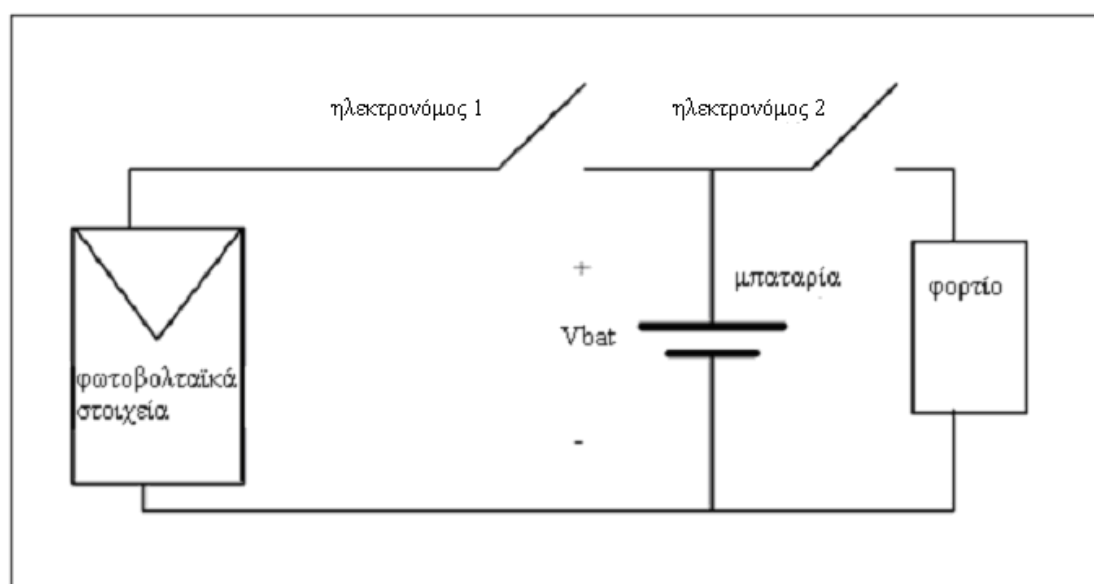
Όπως περιγράφηκε παραπάνω, η μπαταρία έχει ένα προτεινόμενο εύρος τάσεως λειτουργίας μεταξύ V_{min} και V_{max} , όπου λειτουργεί λαμβάνοντας υπόψη τη χωρητικότητα και την αποδοτικότητα του συστήματος. Αν η μπαταρία εξαναγκαστεί να λειτουργήσει έξω από αυτά τα όρια, υπάρχει περίπτωση να υποστεί ανεπανόρθωτη βλάβη ή να μην λειτουργεί σωστά. Οι σε σειρά ρυθμιστές φορτίου αποτρέπουν την μπαταρία από το να λειτουργεί εκτός αυτών των ορίων τάσεως.

Βασικά, ο τρόπος που λειτουργούν οι ρυθμιστές φορτίου σε σειρά, είναι απλός: Όταν η μπαταρία φτάνει το V_{min} , τότε οι ρυθμιστές αποσυνδέουν το κύκλωμα του φορτίου, ενώ το συνδέουν όταν η μπαταρία έχει φορτιστεί αρκετά ώστε να ανακτηθεί η τάση εξόδου. Από την άλλη μεριά ο ρυθμιστής φορτίου, αποσυνδέει την μπαταρία από τη φωτοβολταϊκή διάταξη όταν επιτευχθεί πλήρης φόρτιση. Αυτό σημαίνει πρακτικά ότι η τάση της μπαταρίας έχει φτάσει το μέγιστο όριο V_{max} . Η σύνδεση ανατάσσεται όταν η μπαταρία έχει αποφορτιστεί αρκετά.

Αυτός ο έλεγχος σε σειρά μπορεί εύκολα να εφαρμοστεί χρησιμοποιώντας ηλεκτρονόμους (relays) όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.24.



Σχήμα 2.23: Φωτοβολταϊκό σύστημα που περιλαμβάνει ρυθμιστή φορτίου σε σειρά



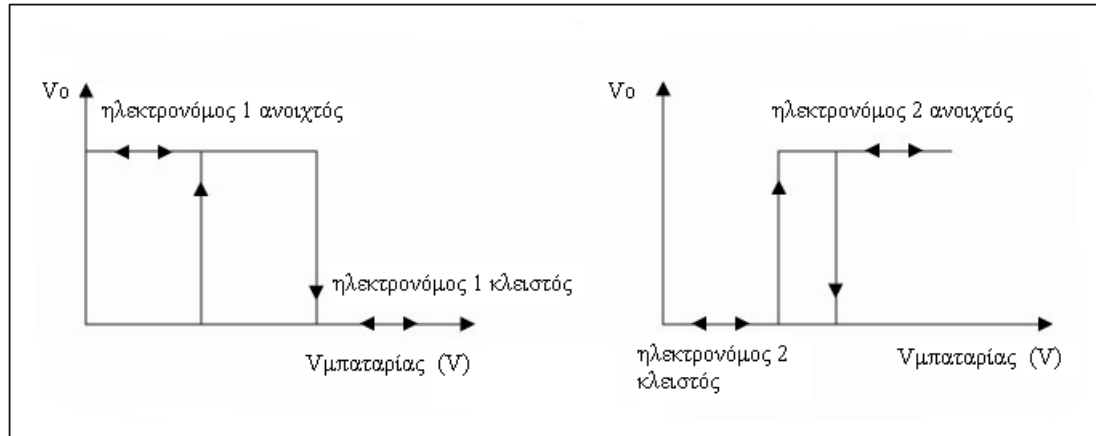
Σχήμα 2.24: Σχηματική απεικόνιση ρύθμισης φορτίου σε σειρά

Πίνακας 2.2: Θέση διακοπών

Ηλεκτρονόμος 1		Ηλεκτρονόμος 2	
Ανοιχτός	Κλειστός	Ανοιχτός	Κλειστός
(Φωτοβολταϊκά στοιχεία συνδεδεμένα)	(Φωτοβολταϊκά στοιχεία αποσυνδεδεμένα)	(Φορτίο αποσυνδεδεμένο)	(Φορτίο συνδεδεμένο)
$V_{bat} = 12.8V$	$V_{max} = 13.9V$	$V_{min} = 11V$	$V_{bat} = 12V$

Ο πίνακας 2.2 απεικονίζει ένα παράδειγμα για μια μπαταρία με ονομαστική τάση 12 V. Στον πίνακα αναγράφεται η επιθυμητή τάση της μπαταρίας για της διάφορες θέσεις των ηλεκτρονόμων 1 και 2 (relays 1 & 2). Σε αυτή την περίπτωση τα όρια τάσεως λειτουργίας της μπαταρίας περιορίζονται μεταξύ $V_{\max}=13.9\text{V}$ και $V_{\min}=11\text{V}$.

Το σήμα που ελέγχει το χειρισμό των ηλεκτρονόμων (relays) μπορεί εύκολα να παραχθεί χρησιμοποιώντας δύο συγκριτικά κυκλώματα με λούπες υστέρησης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.25.



Σχήμα 2.25: Βρόχοι υστέρησης για τους δύο συγκριτές

Η μόνη απώλεια ισχύος στο ρυθμιστικό κύκλωμα είναι οι απώλειες από τους ηλεκτρονόμους (relays), οι οποίες είναι πολύ μικρές σε σύγκριση με αυτές ενός αντιστάτη ή ενός τρανζίστορ που χρησιμοποιούνται στην παράλληλη ρύθμιση. Ακόμα, η ισορροπία της ενέργειας υποφέρει σε κάποιο βαθμό, αφού μέρος της ενέργειας που παράγεται από τα φωτοβολταϊκά στοιχεία χάνεται όταν η είσοδος στο διακόπτη της μπαταρίας είναι ανοικτή.

Το επόμενο παράδειγμα επεξηγεί αυτή ακριβώς την στρατηγική ρύθμισης φορτίου. Το σύστημα που προσομοιώνεται είναι το ίδιο με αυτό που φαίνεται στο Σχήμα 2.23, αλλά δίνεται έμφαση στην λειτουργία του ηλεκτρονόμου 1, ο οποίος ελέγχει την σύνδεση ή αποσύνδεση της μπαταρίας με τα φωτοβολταϊκά στοιχεία (PV modules).

2.6.4 Προσομοίωση κυκλώματος φωτοβολταϊκού συστήματος που περιλαμβάνει ρυθμιστή φορτίου σε σειρά.

Θεωρείται μπαταρία μολύβδου με τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- Αρχική κατάσταση φόρτισης $SOC_1 = 0.45$
- Μέγιστη κατάσταση φόρτισης: $SOC_m = 1000\text{Wh}$
- Αριθμός ηλιακών κυττάρων σε σειρά (της τάξεως των 2V): $n_s = 6$
- $K=0.8$ η αποδοτικότητα φόρτισης/αποφόρτισης της μπαταρίας
- $D=10^{-5}$, ρυθμός αποφόρτισης της μπαταρίας
- Η τάση της μπαταρίας όταν τα φωτοβολταϊκά στοιχεία αποσυνδέονται: 13.9V
- Η τάση της μπαταρίας όταν τα φωτοβολταϊκά στοιχεία επανασυνδέονται: 13.4 V

Η μπαταρία συνδέεται στην φωτοβολταϊκή μονάδα, η οποία απαρτίζεται από 36 ηλιακά στοιχεία. Τα χαρακτηριστικά της είναι:

- Ρεύμα βραχυκύκλωσης: $i_{scmr}=5\text{A}$
- Τάση ανοικτού κυκλώματος: $v_{ocmr} = 22.3\text{V}$
- Μέγιστη έξοδο ισχύος: $p_{maxr}=85\text{W}$

Τέλος, στην μπαταρία είναι μονίμως συνδεδεμένο ένα DC φορτίο με αντίσταση 800Ω.

Η netlist του προγράμματος φαίνεται στο Σχήμα 2.26.

```

** Σύνδεση φωτοβολταϊκής μονάδας ,ρυθμιστή φόρτισης και μπαταρίας

    xmodule 0 3 1 module_1 params: iscmr=5, tr=25,
    vocmr=22.3,ns=36,np=1,nd=1,pmaxmr=85, ta=25
**Καλείται το αρχείο xmodule ορίζονται οι κόμβοι εισόδου και εξόδου καθώς και οι
**παράμετροι του

    .inc module_1.lib
**Με την εντολή αυτή το πρόγραμμα συμπεριλαμβάνει το αρχείο module_1.lib

    .inc irradi.stl
**Με την εντολή αυτή το πρόγραμμα συμπεριλαμβάνει το αρχείο irradi.stl

    vmesur 1 0 stimulus Virrad
**Η ανεξάρτητη πηγή τάσης vmesur βρίσκεται συνδεδεμένη μεταξύ των κόμβων 1 και
**0 με τιμή τάσης που προέρχεται από το αρχείο Virrad.

    xbat1 4 0 7 batstd params: ns=6, SOCm=1000, k=.8, D=1e-5, SOC1=.45
**Καλείται το αρχείο bat και ορίζονται οι παράμετροι της μπαταρίας

    .inc batstd.cir
**Με την εντολή αυτή το πρόγραμμα συμπεριλαμβάνει το αρχείο batstd.cir

    Rbat 4 0 800
**Η αντίσταση Rbat έχει βρίσκεται συνδεδεμένη μεταξύ των κόμβων 4 και 0 και η
**τιμή της αντίστασης είναι 800Ω.

    R1 4 8 10000
**Η αντίσταση R1 βρίσκεται συνδεδεμένη μεταξύ των κόμβων 4 και 8 και η τιμή της
**αντίστασης είναι 10KΩ.

    R2 8 0 10000
**Η αντίσταση R2 βρίσκεται συνδεδεμένη μεταξύ των κόμβων 8 και 0 και η τιμή της
**αντίστασης είναι 10KΩ.

    x741 12 8 13 14 10 ad741
**Καλείται το αρχείο του τελεστικού ενισχυτή ορίζονται οι κόμβοι εισόδου και
**εξόδου καθώς και οι παράμετροί του.

    .inc opamp.lib
**Με την εντολή αυτή το πρόγραμμα συμπεριλαμβάνει το αρχείο opamp.lib

    Vcc 13 0 dc 15
**Η ανεξάρτητη πηγή τάσης vcc βρίσκεται συνδεδεμένη μεταξύ των κόμβων 13 και 0

```

```

**με τιμή τάσης 15 V.

Vee 14 0 dc -15
**Η ανεξάρτητη πηγή τάσης vee βρίσκεται συνδεδεμένη μεταξύ των κόμβων 14 και 0
**με τιμή τάσης -15 V.

vref 16 0 dc 6.8
**Η ανεξάρτητη πηγή τάσης vref βρίσκεται συνδεδεμένη μεταξύ των κόμβων 16 και 0
**με τιμή τάσης 6,8 V.

R6 12 16 4100
**Η αντίσταση R6 βρίσκεται συνδεδεμένη μεταξύ των κόμβων 12 και 16 και η τιμή
**της αντίστασης είναι 4,1KΩ.

R7 12 100 220000
**Η αντίσταση R7 βρίσκεται συνδεδεμένη μεταξύ των κόμβων 12 και 100 και η τιμή
**της αντίστασης είναι 220KΩ.

Wch 3 4 vcurrent sw1mod
**Ο διακόπτης Wch βρίσκεται συνδεδεμένος μεταξύ των κόμβων 3 και 4 με τιμή
**ρεύματος sw1mod
.model sw1mod iswitch (ioff=-10e-5, ion=10e-6, Roff=1.0e+8, Ron=0.01)

**Μοντελοποιείται ο διακόπτης sw1mod, ορίζεται ο τύπος του (iswitch) και οι
**παράμετροί του.

vcurent 10 100 dc 0
**Η ανεξάρτητη πηγή τάσης vcurent βρίσκεται συνδεδεμένη μεταξύ των κόμβων 10
**και 100.

tran 1s 140000s
**Το πρόγραμμα θα εκτελέσει transient analysis για 140000seconds με βήμα 1second

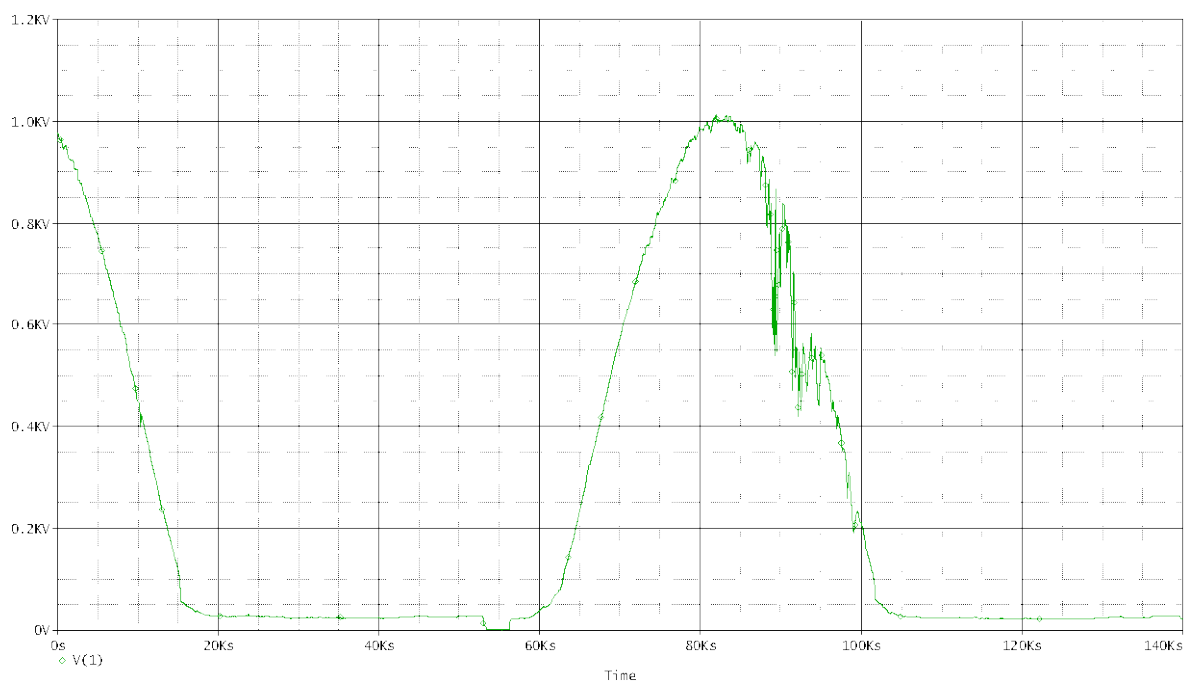
.probe
**Προβολή των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης σε γραφική μορφή

.end
**Τέλος του προγράμματος

```

Σχήμα 2.26: Η netlist κυκλώματος φωτοβολταϊκού συστήματος, με ρυθμιστή φορτίου σε σειρά

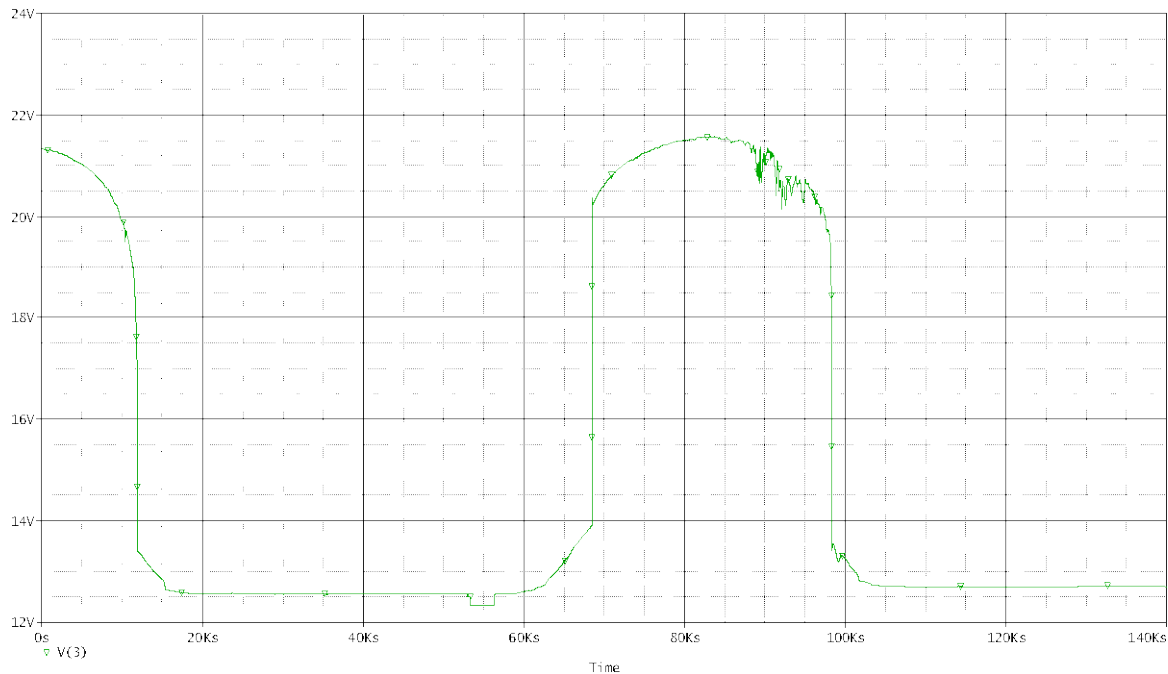
Το αρχείο module_1.lib περιγράφει το υποκύκλωμα της φωτοβολταϊκής μονάδας, το αρχείο batstd.cir περιγράφει ένα απλουστευμένο μοντέλο μπαταρίας μολύβδου και το αρχείο irradi.stl παρέχει το προφίλ της μετρούμενης ακτινοβολίας.



Σχήμα 2.27: Ένταση ακτινοβολίας

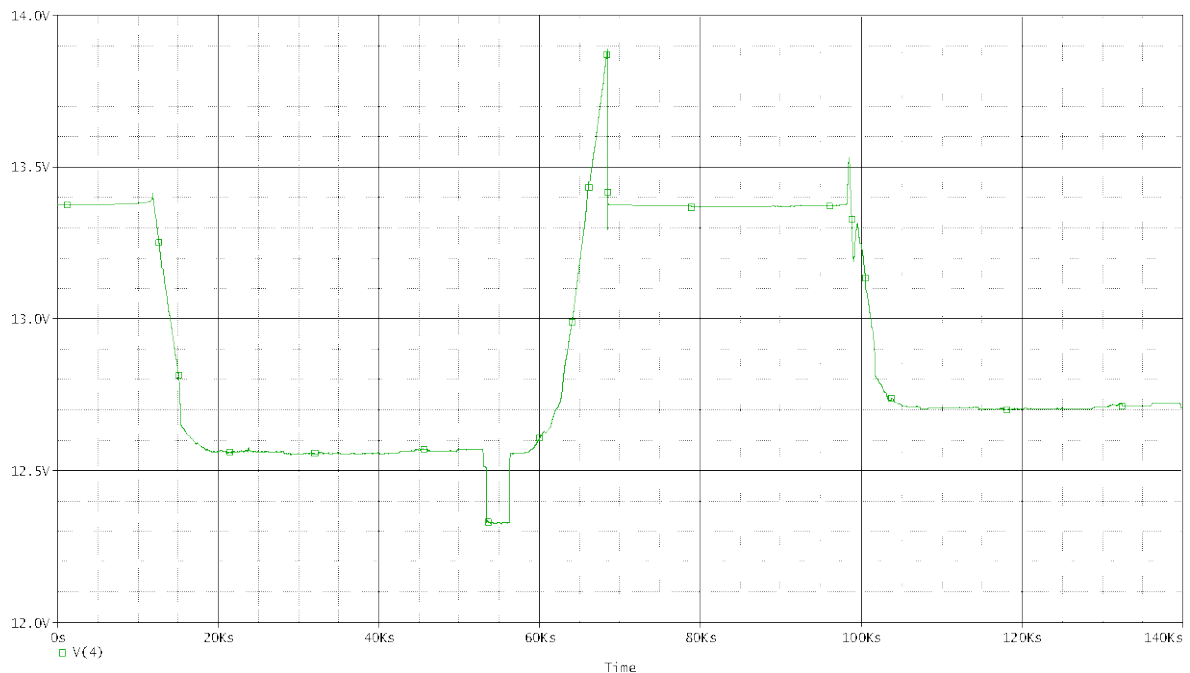
Η ένταση της ακτινοβολίας που φαίνεται στο Σχήμα 2.27 χρησιμοποιείται ως δεδομένο εισόδου για την εκτέλεση της προσομοίωσης.

Η εξέλιξη της τάσης της φωτοβολταϊκής μονάδας μπορεί να παρασταθεί μετά από προσομοίωση του κυκλώματος στο Pspice στο Σχήμα 2.28 (V_3 -time)



Σχήμα 2.28: Τάση εξόδου φωτοβολταϊκής γεννήτριας (Η ελάχιστη τάση αντιστοιχεί στην τάση της μπαταρίας το βράδυ).

Η εξέλιξη της τάσης της μπαταρίας παριστάνεται στο Σχήμα 2.29 (V_4 -time). Όπως φαίνεται στο σχήμα, η τάση μειώνεται όταν φτάσει την τιμή V_{max} και η φωτοβολταϊκή συστοιχία παραμένει αποσυνδεδεμένη από την μπαταρία, μέχρι την τάση επανασύνδεσης.



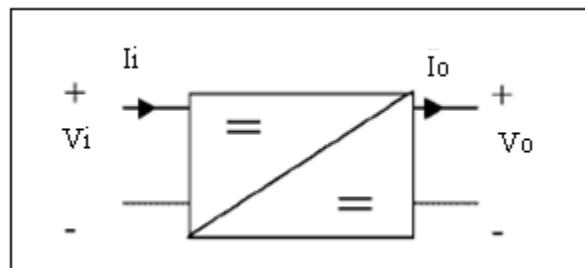
Σχήμα 2.29: Τάση μπαταρίας

2.7 ΑΝΙΧΝΕΥΤΗΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΥ ΣΗΜΕΙΟΥ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ (MPPT: MAXIMUM POWER POINT TRACKERS, CONTROL ALGORITHM)

Με σκοπό να επιτευχθεί η μέγιστη μεταφορά ισχύος από την ηλεκτρική γεννήτρια στο φορτίο, είναι απαραίτητο να διατηρηθεί και η φωτοβολταϊκή γεννήτρια αλλά και το φορτίο στις βέλτιστες συνθήκες λειτουργίας. Φυσικά ο στόχος είναι το σημείο λειτουργίας να συμπίπτει με το βέλτιστο σημείο λειτουργίας. Αυτός εξάλλου είναι και ο κύριος λόγος που χρησιμοποιούνται τα κυκλώματα ανίχνευσης βέλτιστου σημείου λειτουργίας (MPPT circuits).

Αυτά τα κυκλώματα είναι ιδιαίτερος χρήσιμα σε εφαρμογές, όπου οι αντιστάσεις είναι κινητήρες DC για λειτουργία κατά τη διάρκεια της ημέρας και επίσης σε εφαρμογές όπου η διάρκεια ζωής του αντιστάτη μπορεί να μειωθεί δραματικά όταν εξαναγκάζεται να δουλέψει κάτω από ανώμαλες ή ακραίες συνθήκες.

Οι ανιχνευτές βέλτιστου σημείου λειτουργίας είναι πρακτικά DC/DC μετατροπείς και μπορούν να αναπαρασταθούν όπως στο Σχήμα 2.30.



Σχήμα 2.30: Σχηματικό διάγραμμα ενός DC/DC μετατροπέα

Η εισερχόμενη ισχύς στον DC/DC μετατροπέα είναι:

$$P_i = V_i I_i \quad (2.4)$$

και η ισχύς που παρέχεται από τον μετατροπέα στην έξοδο είναι:

$$P_o = V_o I_o \quad (2.5)$$

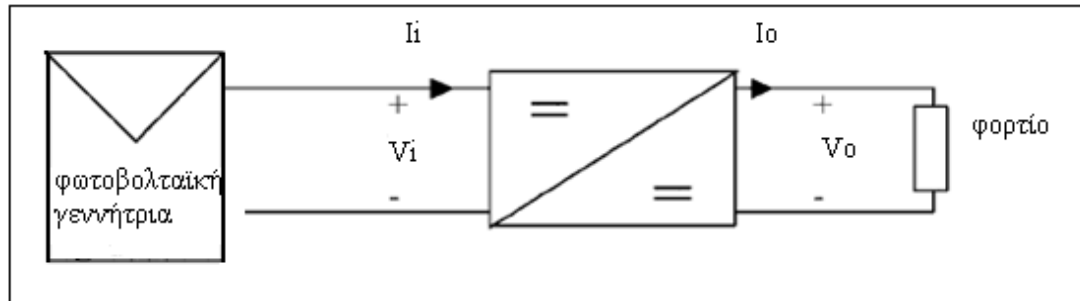
Η σχέση μεταξύ ισχύος εισόδου και εξόδου ορίζει την αποδοτικότητα του μετατροπέα, η:

$$\eta = P_o / P_i \quad (2.6)$$

Σε έναν DC/DC ανιχνευτή η ολική αντίσταση της εισόδου του DC/DC μετατροπέα πρέπει να προσαρμόστεί με σκοπό να αναγκάσει τη φωτοβολταϊκή γεννήτρια να λειτουργήσει στο σημείο μέγιστης ισχύος. Επίσης πρέπει και η έξοδος του DC/DC μετατροπέα να προσαρμόστεί στα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά του φορτίου. Ο DC/DC μετατροπέας μπορεί να αποδώσει ένα εύρος τιμών συνεχούς τάσης στην έξοδό του, από μια σταθερή συνεχής τάση στην είσοδό του. Ανάλογα με τις απαιτήσεις σε φορτίο η τάση εξόδου V_o , μπορεί να είναι μεγαλύτερη ή μικρότερη από την τάση εισόδου V_i . Για αυτό το λόγο οι DC/DC μετατροπείς μπορούν να κατανεμηθούν σε δύο βασικές κατηγορίες:

- Μειωτές τάσεως (Voltage reductrors, επίσης ονομαζόμενοι step down or buck converters)
- Επωθητικοί μετατροπείς (Voltage elevators, επίσης ονομαζόμενοι step up or boost converters)

Το Σχήμα 2.31 παριστάνει ένα φωτοβολταϊκό σύστημα με έναν DC/DC μετατροπέα μεταξύ της φωτοβολταϊκής γεννήτριας και του φορτίου



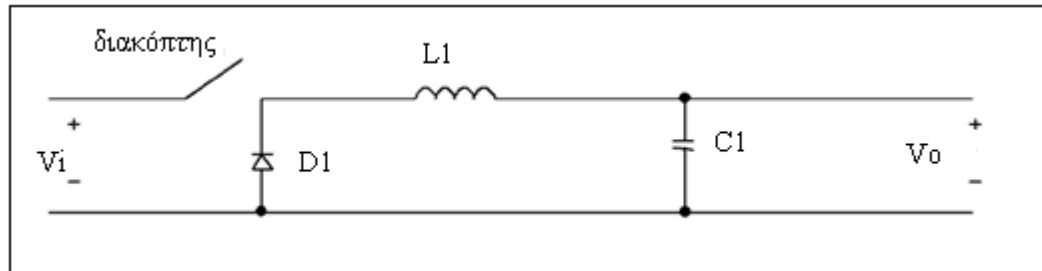
Σχήμα 2.31: Διάγραμμα φωτοβολταϊκού συστήματος που περιγράφει τη σύνδεση του DC/DC μετατροπέα

Άλλοι τύποι DC/DC μετατροπέων είναι οι μετατροπείς πλήρους γέφυρας (full-bridge converters), οι μειωτές τάσεως (buck converters) και οι επωθητικοί μετατροπείς. Οι τελευταίοι χρησιμοποιούνται συνήθως σε εφαρμογές με εξειδικευμένες απαιτήσεις, κυρίως σε περιπτώσεις όπου η επιθυμητή έξοδος είναι αρνητικής πολικότητας ή σε περιπτώσεις όπου η τάση εξόδου είναι μεγαλύτερη ή μικρότερη από αυτήν της εισόδου, ακόμα και σε DC κινήσεις [2.12-2.15].

2.7.1 Ανιχνευτής βέλτιστου σημείου λειτουργίας, βασισμένος σε DC/DC μειωτή τάσεως (buck converter).

Το βασικό κύκλωμα για έναν μειωτή τάσης (buck converter) φαίνεται στο Σχήμα 2.32. Ο διακόπτης ανοίγει και κλείνει το κύκλωμα εισόδου και τότε η τάση στην κάθοδο της διόδου D1 έχει ορθογωνική κυματομορφή. Η κυματομορφή αυτή στη συνέχεια φιλτράρεται από το

μεγάλης αποδοτικότητας φίλτρο LC, εξασφαλίζοντας έτσι ημισυνεχή τάση στον κόμβο εξόδου που ισούται με την μέση τιμή της ορθογωνικής κυματομορφής. Η διόδος D1 εξασφαλίζει για το ρεύμα πηνίου ένα δρόμο επιστροφής όταν ο διακόπτης είναι ανοικτός εξαναγκάζοντας χαμηλή θετική τάση στο τερματικό της καθόδου. Ανοίγοντας ή κλείνοντας τον διακόπτη, είναι δυνατόν να ρυθμιστεί η μέση τιμή της ορθογωνικής κυματομορφής, ώστε να ελεγχθεί το μήκος κύματος. Υπάρχουν δύο καταστάσεις για τον διακόπτη ανάλογα από το αν είναι ανοικτός ή κλειστός (t_{on} και t_{off} αντίστοιχα).



Σχήμα 2.32: Το βασικό κύκλωμα ενός μειωτή τάσεως (buck converter)

Το σήμα ελέγχου του διακόπτη έχει συνήθως σταθερή περίοδο T . Ο κύκλος καθήκοντος (duty cycle) D_c ορίζεται ως:

$$D_c = \frac{t_{on}}{T} \quad (2.7)$$

και είναι μεταβλητός. Όταν ο διακόπτης είναι ON, το ρεύμα ρέει μέσω του πηνίου και η διόδος είναι κατάσταση ανάστροφης πόλωσης (reverse bias state). Τότε το πηνίο αποθηκεύει ενέργεια. Όταν ο διακόπτης είναι OFF, το ρεύμα που ακόμα ρέει μέσα στο πηνίο αναγκάζει την διόδο να είναι σε κατάσταση ON κατά την διάρκεια του διαστήματος t_{off} .

Αν θεωρηθεί ένας ιδανικός διακόπτης, σταθερή στιγμιαία τάση εισόδου V_{in} και καθαρή ωμική αντίσταση στην έξοδο του μετατροπέα, η μέση τάση εξόδου V_o , δίδεται:

$$V_o = \frac{1}{T} \int_0^T u_o(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^{t_{on}} V_i(t) dt = D_c V_i \quad (2.8)$$

Αν ο παράγοντας δράσης (duty cycle) είναι μικρότερος της μονάδας το αποτέλεσμα της εξίσωσης (2.8) σημαίνει ότι $V_o < V_i$.

Η τάση εξόδου του μετατροπέα μπορεί να ρυθμιστεί σε συγκεκριμένη επιθυμητή τιμή, με κατάλληλη εκλογή της τιμής του παράγοντα δράσης (duty cycle). Αν θεωρηθεί ένας ιδανικός DC/DC μετατροπέας χωρίς απώλειες ισχύος, με αποδοτικότητα $\eta=1$, τότε η εισερχόμενη ισχύς θα πρέπει να είναι ίση με την εξερχόμενη και θα ισχύει:

$$P_i = P_o \quad (2.9)$$

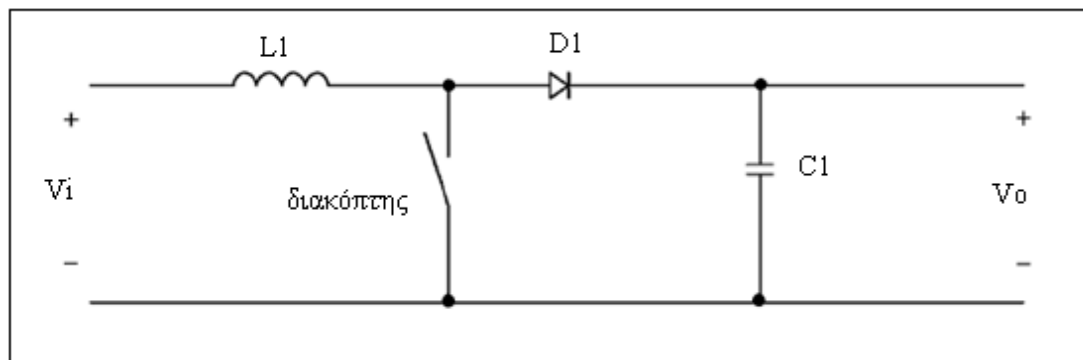
$$V_i I_i = V_o I_o \quad (2.10)$$

$$V_o/V_i = D_c = I_i/I_o \quad (2.11)$$

Σε φωτοβολταϊκές εφαρμογές οι DC/DC μειωτές τάσεως (buck converters) συνήθως χρησιμοποιούνται ως τροφοδοσία DC, όπου η τάση εισόδου V_i μεταβάλλεται και εξαρτάται από την θερμοκρασία και τις συνθήκες ακτινοβολίας. Η τάση εξόδου V_o παραμένει σταθερή. Ο παράγοντας δράσης μπορεί να μεταβάλλεται με τέτοιο τρόπο, ώστε η τάση εισόδου στον DC/DC μετατροπέα να είναι τέτοια που να οδηγεί στο σημείο μέγιστης ισχύος.

2.7.2 Ανιχνευτής βέλτιστου σημείου λειτουργίας, βασισμένος σε DC/DC επωθητικό μετατροπέα (boost converter).

Οι DC/DC επωθητικοί μετατροπείς χρησιμοποιούνται σε φωτοβολταϊκές εφαρμογές και ειδικά για φόρτιση μπαταριών. Το βασικό κύκλωμα ενός επωθητικού μετατροπέα φαίνεται στο Σχήμα 2.33



Σχήμα 2.33: Το βασικό κύκλωμα ενός επωθητικού μετατροπέα (boost converter)

Όπως φαίνεται και από το Σχήμα 2.33, το κύκλωμα έχει τα ίδια συστατικά με αυτά του buck converter, αλλά είναι τοποθετημένα σε διαφορετικές θέσεις. Η κατάσταση του διακόπτη και σε αυτή την περίπτωση ελέγχεται από το σήμα ελέγχου με σταθερή περίοδο T και μεταβλητό παράγοντα δράσης (duty cycle).

Σε αυτό τον μετατροπέα η τάση εξόδου V_o είναι πάντα μεγαλύτερη από την τάση εισόδου V_i . Όταν ο διακόπτης είναι ON η διόδος είναι ανάστροφα πολωμένη (reverse biased) και μόνο ο πυκνωτής είναι συνδεδεμένος στην έξοδο. Το πηνίο αποθηκεύει ενέργεια από την είσοδο. Τότε:

$$V_i = L \frac{di_L}{dt} \quad (2.12)$$

όπου: i_L είναι το ρεύμα του πηνίου. Συνήθως αυτοί οι μετατροπείς χρησιμοποιούν συχνότητα χρονιστή (clock frequency) πολύ μεγαλύτερη από την συχνότητα στην οποία η τάση εισόδου και εξόδου αλλάζουν. Έτσι ολοκληρώνοντας ως προς το χρόνο την παραπάνω εξίσωση, τότε:

$$i_L(t_{on}) - i_L(0) = t_{on} \frac{V_i}{L} \quad (2.13)$$

Όταν ο διακόπτης είναι ON τότε περνάει ρεύμα και από την διόδο και η ενέργεια μεταφέρεται στον πυκνωτή και στην έξοδο από το πηνίο και την πηγή V_i . Ισχύει:

$$V_i - V_o = L \frac{di_L}{dt} \quad (2.14)$$

και

$$i_L(T) - i_L(t_{on}) = t_{off} \frac{V_i - V_o}{L} \quad (2.15)$$

Απαιτώντας συνέχεια και περιοδικότητα στο ρεύμα του πηνίου, ισχύει:

$$\frac{V_i}{L} t_{on} = \frac{V_i - V_o}{L} t_{off} \quad (2.16)$$

Το αποτέλεσμα είναι η κατάληξη σε μία σχέση μεταξύ της τάσης εισόδου και εξόδου ως συνάρτηση του παράγοντα δράσης (duty cycle, Dc):

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{T}{t_{off}} = \frac{1}{1 - Dc} \quad (2.17)$$

Αν θεωρηθεί ένας ιδανικός DC/DC μετατροπέας χωρίς απώλειες ισχύος, δηλαδή με απόδοση $\eta=1$, η εισερχόμενη ισχύς θα πρέπει να ισούται με την εξερχόμενη:

$$P_i = P_o \quad (2.18)$$

$$V_i I_i = V_o I_o \quad (2.19)$$

$$\frac{I_o}{I_i} = (1 - Dc) \quad (2.20)$$

Όπως και στην προηγούμενη περίπτωση με μειωτές τάσεως (buck converters), έτσι κι εδώ είναι δυνατόν να μεταβάλλουμε τον παράγοντα δράσης (duty cycle) με τέτοιο τρόπο ώστε η τάση εισόδου V_i να οδηγεί στο σημείο μέγιστης ισχύος, ανάλογα πάντα με τις απαιτήσεις σε τάση στην έξοδο (V_o).

Όταν ένας DC/DC μετατροπέας χρησιμοποιείται ως ανιχνευτής βέλτιστου σημείου λειτουργίας, buck or boost είναι απαραίτητο να παράγεται ένα ικανοποιητικό σήμα ελέγχου ώστε να ελέγχεται η κατάσταση του διακόπτη. Συνήθως το σήμα αυτό παράγεται χρησιμοποιώντας τεχνικές διαμόρφωσης πλάτους παλμού (pulse width modulation: PWM). Προστίθεται ένα κύκλωμα ελέγχου στον μετατροπέα με σκοπό να παραχθεί το σήμα ελέγχου μεταγωγής (switch control signal)[2.15]. Αυτό το κύκλωμα ελέγχου πρέπει να ρυθμίζει τον παράγοντα δράσης (duty cycle) της κυματομορφής ελέγχου του διακόπτη για τον εντοπισμό του σημείου μέγιστης ισχύος, ως συνάρτηση της μετατροπής της εισερχόμενης ισχύος στον DC/DC μετατροπέα.

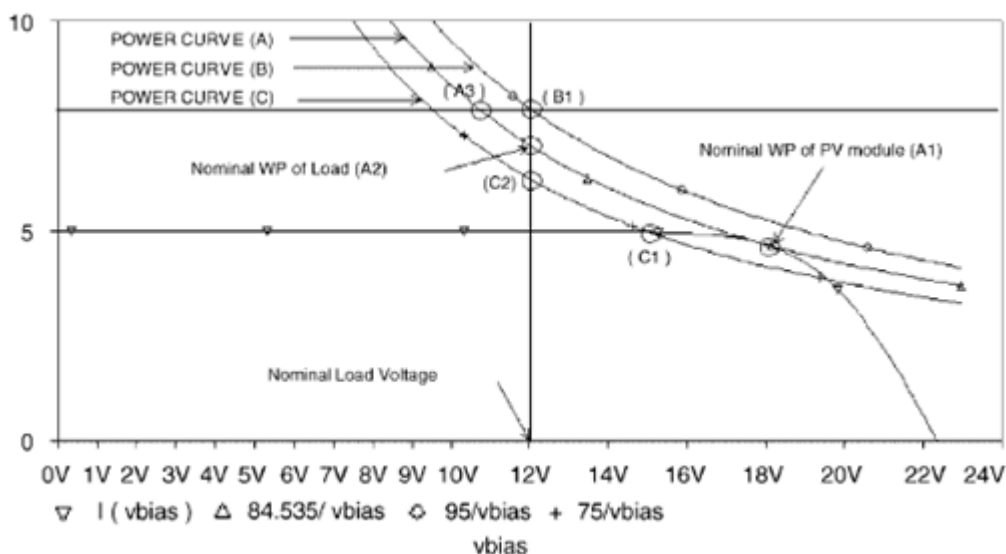
2.8 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΑΝΙΧΝΕΥΤΗ ΒΕΛΤΙΣΤΟΥ ΣΗΜΕΙΟΥ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ (MPPT) ΣΤΟ PSPICE

Η βασική λειτουργία των DC/DC μετατροπέων, μας δείχνει ότι μια συγκεκριμένη προσομοίωση μιας περιόδου μας παρέχει ένα ακριβές και με μικρές απώλειες σχέδιο των ηλεκτρονικών, αλλά έχει μικρή αξία στην περίπτωση λειτουργίας φωτοβολταϊκών συστημάτων, όπου ο μηχανικός ενδιαφέρεται για την μακροπρόθεσμη συμπεριφορά του συστήματος.

Αυτός είναι και ο λόγος που προτείνεται για προσομοίωση το απλό μοντέλο προσομοίωσης DC/DC μετατροπέα, είτε είναι μειωτής τάσης (buck converter) είτε επωθητικός μετατροπέας (boost converter). Το μοντέλο αυτό δεν βασίζεται στην τοπολογία

των ηλεκτρονικών συσκευών των μετατροπέων, αλλά εστιάζει στη σχέση εισόδου-εξόδου και στις αρχές λειτουργίας.

Στο Σχήμα 2.34 φαίνεται η γραφική παράσταση της χαρακτηριστικής καμπύλης $I(V)$ της φωτοβολταϊκής μονάδας καθώς επίσης και τρεις καμπύλες iso power.



Σχήμα 2.34: Σημεία λειτουργίας της φωτοβολταϊκής μονάδας και του φορτίου

- Η καμπύλη (B) είναι η καμπύλη iso-power για τιμή ισχύος μεγαλύτερη από P_{max} , και
- Η καμπύλη (C) είναι η καμπύλη iso-power για τιμή ισχύος μικρότερη από P_{max} .

Οι ονομαστικές συνθήκες λειτουργίας της φωτοβολταϊκής γεννήτριας, θεωρώντας ανιχνευτή βέλτιστου σημείου λειτουργίας με απόδοση 100%, είναι το σημείο λειτουργίας (A1), που είναι το σημείο μέγιστης ισχύος, και το σημείο (A2) για το φορτίο, με δεδομένη τιμή για την ονομαστική τάση του φορτίου.

Σε ένα σύστημα το οποίο αποτελείται από ένα μόνο φωτοβολταϊκό δομοστοιχείο, έναν DC/DC μετατροπέα και το φορτίο, η ενεργειακή ισορροπία σε ένα κύκλωμα με αποδοτικότητα του DC/DC εναλλάκτη 100% μας λέει ότι οι ονομαστικές συνθήκες διατηρούνται κατά μήκος της καμπύλης A για δεδομένη ακτινοβολία.

Εάν φανταστεί κανείς για τις ίδιες τιμές ακτινοβολίας και θερμοκρασίας, μια μεταβολή στην ισχύ του φορτίου, η οποία είναι μεγαλύτερη από την μέγιστη ισχύ του φωτοβολταϊκού στοιχείου, P_{max} , αυτό που συμβαίνει είναι ότι το σημείο λειτουργίας του φορτίου μετακινείται στο σημείο (A3). Ως αποτέλεσμα η τάση εξόδου δεν μπορεί να παραμείνει σταθερή και έτσι λαμβάνει μικρότερη τιμή από αυτήν της ονομαστικής.

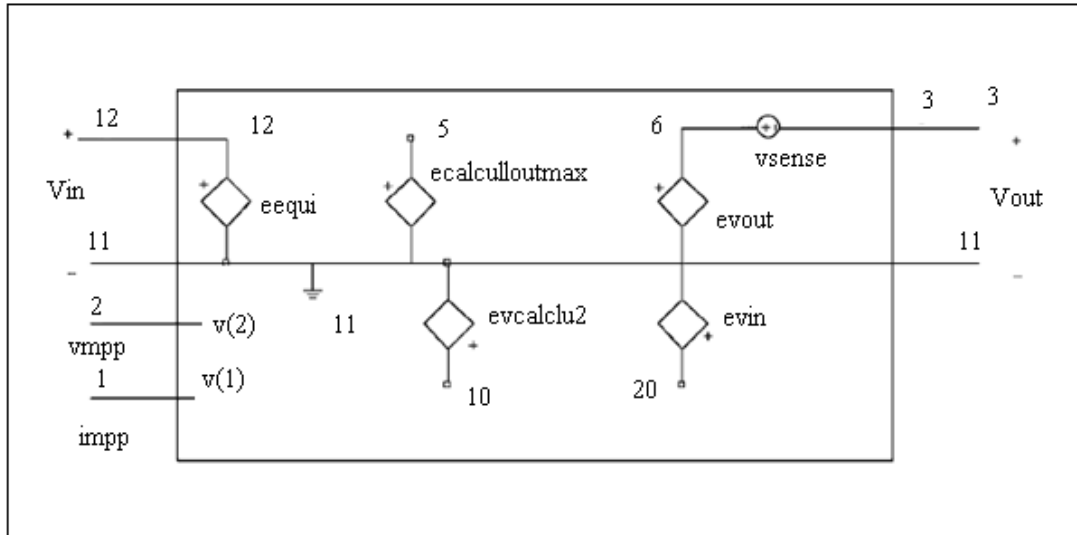
Αν αντίθετα, η απαιτούμενη από το φορτίο ισχύς λάβει μικρότερη τιμή από P_{max} (καμπύλη (C)), τότε η πόλωση του βέλτιστου σημείου λειτουργίας δεν μπορεί να συνεχιστεί και το σημείο λειτουργίας μετακινείται στο σημείο (C1). Το σημείο λειτουργίας του φορτίου εντοπίζεται στο σημείο (C2).

Στην πράξη, το μοντέλο θα συμπεριφερθεί όπως στο Σχήμα 2.34 μόνο για απ' ευθείας σύνδεση της φωτοβολταϊκής γεννήτριας με το φορτίο. Σε άλλα φωτοβολταϊκά συστήματα που διαθέτουν κάποιο μέσον αποθήκευσης της ενέργειας, όπως ένα αυτόνομο (με μπαταρία) σύστημα, το σημείο λειτουργίας του φορτίου και του φωτοβολταϊκού στοιχείου, θα μπορούσε να βρίσκεται:

- Περίπτωση B (αναφορικά με την καμπύλη (B)): στο σημείο (B1) για το φορτίο και στο σημείο (A1) για το φωτοβολταϊκό στοιχείο.
- Περίπτωση C (αναφορικά με την καμπύλη (C)): στο σημείο (C2) για το φορτίο και στο σημείο (A1) για το φωτοβολταϊκό στοιχείο.

Και στις δύο περιπτώσεις η αποδοτικότητα του DC/DC μετατροπέα είναι η ονομαστική και η επιπλέον ενέργεια που παράγεται από το φωτοβολταϊκό στοιχείο στην περίπτωση (C), θα διοχετευθεί στην μπαταρία και στο πλέγμα. Το έλλειμμα της ενέργειας στην περίπτωση (B) θα συμπληρωθεί από το μέσο αποθήκευσης της ενέργειας.

Με σκοπό να επεξηγηθεί η συμπεριφορά του μοντέλου που φαίνεται στο Σχήμα 2.34 κατασκευάζεται το μοντέλο στο Pspice, που φαίνεται στο Σχήμα 2.35.



Σχήμα 2.35: Σχηματική παρουσίαση μοντέλου DC/DC μετατροπέα στο Pspice

Η αντίστοιχη netlist φαίνεται στο Σχήμα 2.36.

```

** DC/CD converter
      .subckt dcdcf 11 12 1 2 3 params: n=1, vo1=1
**Ορίζεται το υποκύκλωμα dcdcf, οι κόμβοι εισόδου και εξόδου καθώς και οι
**παράμετροί του.
* *Ο κόμβος 11 είναι η γείωση
* *Ο κόμβος 12 είναι η είσοδος του μετατροπέα
* *Ο κόμβος 3 είναι η έξοδος του μετατροπέα
**Ο κόμβος 1 είναι είσοδος της τιμής του ρεύματος στο σημείο μέγιστης ισχύος
**της φωτοβολταϊκής γεννήτριας,  $i_{mpp}$ .
**Ο κόμβος 2 είναι είσοδος της τιμής της τάσης στο σημείο μέγιστης ισχύος.

      eequi 12 11 value={v(20)}
**Η πηγή τάσης ελεγχόμενη από τάση eequi βρίσκεται συνδεδεμένη μεταξύ των
**κόμβων 12 και 11 και η ενίσχυση τάσης είναι όση η τάση στον κόμβο 20

      evin 20 11 value={IF (v(10)-v(5)>0, v(2), vo1*v(10)/(n*v(1)))}
**Η ελεγχόμενη πηγή τάσης από τάση evin βρίσκεται συνδεδεμένη μεταξύ των
κόμβων 20 **και 11 και η ενίσχυση τάσης είναι όση στον κόμβο 2 αν  $v(10)-v(5)>0$  αλλιώς **παίρνει την τιμή  $vo1*v(10)/(n*v(1))$  V.

***** Έλεγχος ισχύος

      ecalculoutmax 5 11 value={n*v(1)*v(2)/vo1}
**Η συσκευή ecalculoutmax βρίσκεται συνδεδεμένη μεταξύ των κόμβων 5 και

```

```

**11 και υπολογίζει το μέγιστο διαθέσιμο ρεύμα στην έξοδο

vsense 6 3 dc 0
**Η πηγή τάσης vsense βρίσκεται συνδεδεμένη μεταξύ των κόμβων 6 και 3
**μετράει το ρεύμα που τροφοδοτείται στην έξοδο ('i(vsense)')

envalcul2 10 11 value = {i(vsense)}
**Η πηγή τάσης ελεγχόμενη από τάση envalcul2 βρίσκεται συνδεδεμένη μεταξύ
* των κόμβων 1 0 και 1 1 και η ενίσχυση τάσης είναι όση το ρεύμα που
**τροφοδοτείται στην έξοδο ('i(vsense)')

evout 6 11 value={IF (v(10)-v(5)>0, (n*v(1)*v(2)/v(10)), vo1)}
* Η πηγή τάσης ελεγχόμενη από τάση evout βρίσκεται συνδεδεμένη μεταξύ
* των κόμβων 6 και 1 1 και η ενίσχυση τάσης ορίζεται στην τιμή vo1 είτε στην
**τιμή που περιγράφει η παραπάνω εξίσωση ανάλογα με τις τιμές v(5) και v(10).

.ends dcdcf
**Τέλος του υποκυκλώματος.

```

Σχήμα 2.36: Η netlist του κυκλώματος ενός DC/DC μετατροπέα

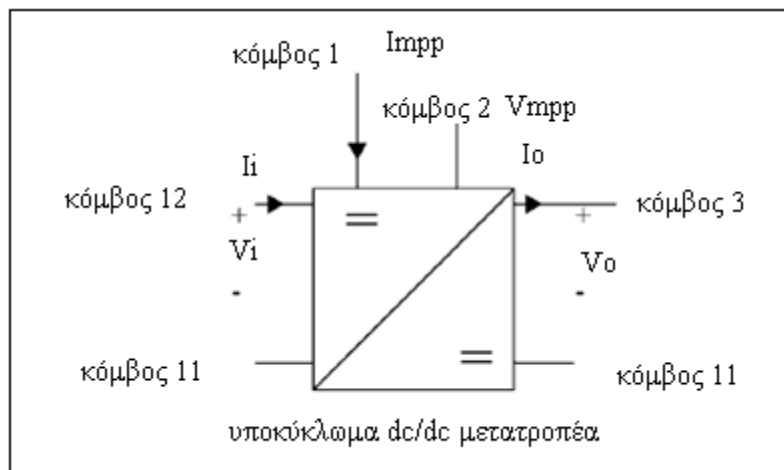
Το υποκύκλωμα dcdcf.cir περιγράφει το μοντέλο του DC/DC μετατροπέα.

Όπως φαίνεται ο μετατροπέας ορίζεται ως υποκύκλωμα με δύο παραμέτρους εισόδου: n και u_{01} , που ορίζονται ως εξής:

- n είναι η αποδοτικότητα του μετατροπέα, όπως ορίστηκε παραπάνω:

$$\eta = \frac{P_o}{P_i} \quad (2.21)$$

- u_{01} είναι η επιθυμητή τάση εξόδου του μετατροπέα.



Σχήμα 2.37: Κόμβοι σύνδεσης μοντέλου του DC/DC μετατροπέα στο Pspice

Το υποκύκλωμα έχει πέντε κόμβους σύνδεσης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.35 και στο Σχήμα 2.37 και αυτοί είναι:

- Κόμβος 11: γείωση
- Κόμβος 12: είσοδος μετατροπέα
- Κόμβος 1: είσοδος, τιμή του ρεύματος στο σημείο μέγιστης ισχύος της φωτοβολταϊκής γεννήτριας, i_{mmp} .
- Κόμβος 2: είσοδος, τιμή της τάσης στο σημείο μέγιστης ισχύος.
- Κόμβος 3: έξοδος μετατροπέα.

Οι κόμβοι 1 και 2 δίνουν πληροφορίες στον DC/DC μετατροπέα σχετικά με τις στιγμιαίες τιμές των συντεταγμένων (τάση, ένταση ρεύματος) στο σημείο μέγιστης ισχύος της φωτοβολταϊκής γεννήτριας. Από αυτά τα δεδομένα, το μοντέλο του DC/DC μετατροπέα, δρα ως ανιχνευτής βέλτιστου σημείου λειτουργίας, συνδέοντας στην έξοδο της γεννήτριας τον κόμβο 12 που είναι η είσοδος του μετατροπέα (πηγή τάσης ελεγχόμενη από τάση: 'equi'). Αυτή η πηγή τάσης ελέγχεται απ' ευθείας από τον κόμβο 2 0. Η τάση στον κόμβο 2 0 καθορίζεται από την ελεγχόμενη πηγή τάσης 'enip' ανάλογα με τις απαιτήσεις ισχύος στην DC/DC έξοδο και ανάλογα με την αποδοτικότητα του μετατροπέα ακολουθώντας πάντα τους κανόνες που περιγράφονται στο Σχήμα 2.34. Ανάλογα με την περίπτωση δηλαδή, το σημείο λειτουργίας του φωτοβολταϊκού στοιχείου μετατοπίζεται μεταξύ των σημείων (C1) και (A1).

Στην έξοδο του μοντέλου του μετατροπέα τοποθετείται μία ακόμα πηγή τάσης ελεγχόμενη από τάση: η 'enout', ως υποκύκλωμα στον κόμβο 6.

Μεταξύ του κόμβου 6 και της εξόδου του μετατροπέα (κόμβος 3), τοποθετείται μια πηγή τάσης, η 'vsense' η οποία μετράει το ρεύμα που τροφοδοτείται στην έξοδο ('i(vsense)')

Με σκοπό να εφαρμοστεί αυτή η λειτουργία το μοντέλο υπολογίζει το μέγιστο διαθέσιμο ρεύμα στην έξοδο, λαμβάνοντας υπό όψιν:

- την αποδοτικότητα του μετατροπέα: η
- την επιθυμητή τιμή της τάσης εξόδου: u_{01} και
- την διαθέσιμη ισχύ στην είσοδο, η οποία προκύπτει στο σημείο μέγιστης ισχύος:

$$P_i = V_{mM} I_{mM} \quad (2.22)$$

Αυτός ο υπολογισμός γίνεται από την συσκευή e-device: 'ecalculoutmax' που περιλαμβάνεται στο υποκύκλωμα στον κόμβο 5. Γίνεται επίσης μία σύγκριση, με τέτοιο τρόπο ώστε αν το ρεύμα που απαιτείται από το φορτίο είναι μικρότερο από το μέγιστο ρεύμα στην έξοδο που έχει υπολογιστεί από την e-device, τότε η τάση εξόδου του μετατροπέα παίρνει την επιθυμητή τιμή v_{01} . Σε αντίθετη περίπτωση η τάση αυτή περιορίζεται στην τιμή:

$$\frac{I_{mpp} V_{mpp}}{I_{load}} \eta \quad (2.23)$$

Η netlist στο Pspice που περιγράφει αυτή την στρατηγική ελέγχου της ισχύος του φορτίου, είναι η παρακάτω:

```
ecalculoutmax 5 11 value={n*(v(1)/1000)*v(2)/vo1}
```

```
**Η συσκευή ecalculoutmax είναι μεταξύ των κόμβων 5 και 1 και υπολογίζει το μέγιστο  
**διαθέσιμο ρεύμα στην έξοδο
```

```
vsense 6 3 dc 0
```

```
**Η ανεξάρτητη πηγή τάσης vsense βρίσκεται συνδεδεμένη μεταξύ των κόμβων 6 και 3 και  
**μετράει το ρεύμα που τροφοδοτείται στην έξοδο ('i(vsense)')
```

```
envalcul2 10 11 value={i(vsense)}
```

* Η πηγή τάσης ελεγχόμενη από τάση envalcul2 βρίσκεται συνδεδεμένη μεταξύ των
 **κόμβων 10 και 11 και η ενίσχυση τάσης είναι όση το ρεύμα που τροφοδοτείται στην έξοδο
 **('i(vsense)')

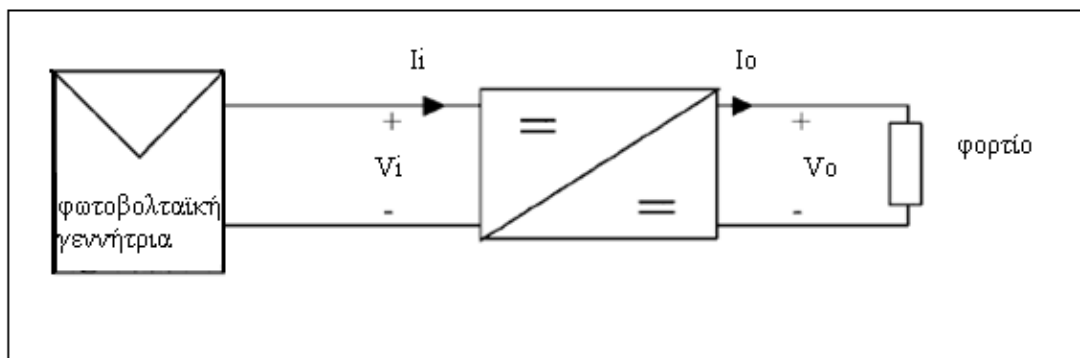
```
enout 6 11 value={IF(v(10)-v(5)>0,(n*v(1)*v(2)/v(10)),vo1)}
```

*Ορίζεται η τάση εξόδου στην τιμή vo1 είτε στην τιμή που περιγράφει η παραπάνω εξίσωση
 **ανάλογα με τις τιμές v(5) και v(10).

Σχήμα 2.38: Η netlist που περιγράφει την στρατηγική ελέγχου της ισχύος του φορτίου

Η τελευταία γραμμή του κώδικα ορίζει την τάση εξόδου στην τιμή vo1 είτε στην τιμή που περιγράφει η παραπάνω εξίσωση ανάλογα με τις τιμές v(5) και v(10).

2.8.1 Προσομοίωση φωτοβολταϊκού συστήματος με φωτοβολταϊκή γεννήτρια, DC/DC μετατροπέα, φορτίο και ανιχνευτή μέγιστου σημείου ισχύος



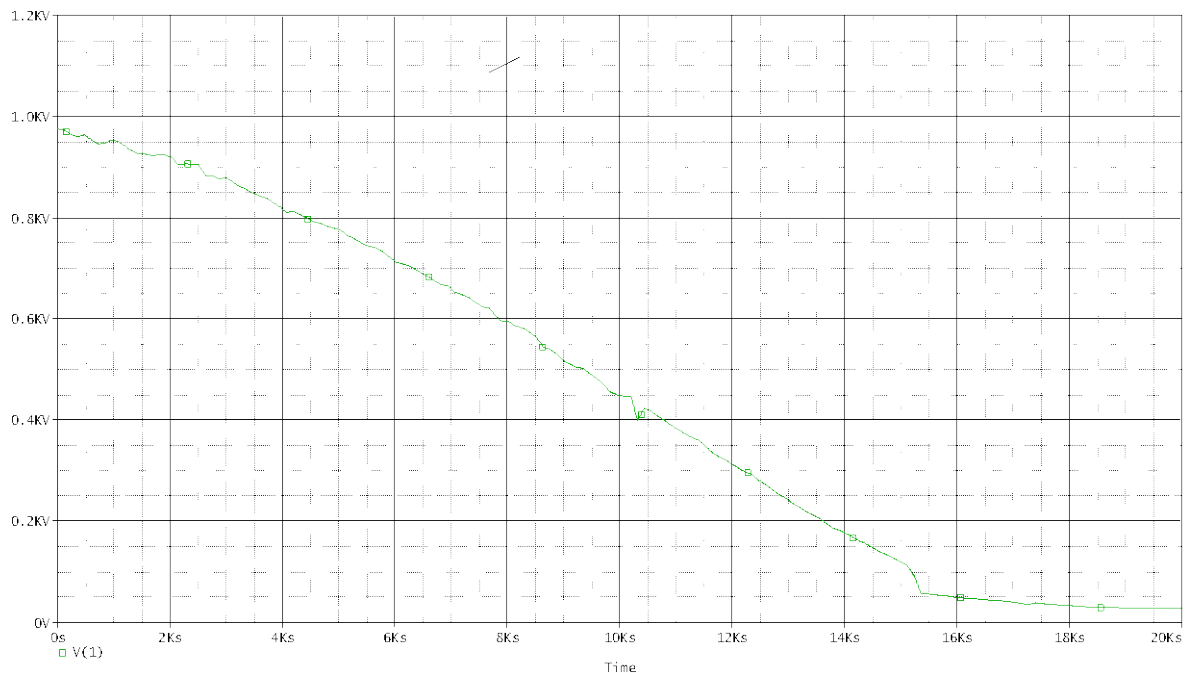
Σχήμα 2.39: Φωτοβολταϊκό σύστημα με φωτοβολταϊκή γεννήτρια DC/DC μετατροπέα, φορτίο και ανιχνευτή μέγιστου σημείου ισχύος.

Η φωτοβολταϊκή μονάδα αποτελείται από 36 ηλιακές κυψέλες συνδεδεμένες σε σειρά. Τα χαρακτηριστικά της είναι τα παρακάτω:

- Ρεύμα βραχυκύκλωσης, $i_{scmr}=5.2A$
- Τάση ανοιχτοκύκλωσης, $u_{ocmr}=21.2V$
- Μέγιστη ισχύς εξόδου, $p_{maxr}=85W$
- Συντεταγμένες σημείου μέγιστης ισχύος σε σταθερές συνθήκες: $I_{mppr}=4.9A$ και $V_{mppr}=17.3A$.

Ο DC/DC μετατροπέας θεωρείται ιδανικός, με αποδοτικότητα 100% και επιθυμητή τάση εξόδου $V_{o1}12V$. Επίσης στην έξοδο του DC/DC μετατροπέα είναι συνδεδεμένο μόνιμα φορτίο της τάξεως 40Ω Θεωρούμε σαν δεδομένα εισόδου για την προσομοίωση της

συμπεριφοράς του φωτοβολταϊκού συστήματος το προφίλ ακτινοβολίας που φαίνεται στο Σχήμα 2.40 και σταθερή θερμοκρασία ίση με 25° C.



Σχήμα 2.40: Προφίλ ακτινοβολίας

Η netlist που περιγράφει το σύστημά μας, φαίνεται στο Σχήμα 2.41.

```
***** ppm.cir

.inc generator_beh.lib
**Με την εντολή αυτή το πρόγραμμα συμπεριλαμβάνει το αρχείο generator_beh.lib

xgen 0 1 2 3 405 406 407 20 30 generator_beh params:
+iscmr =5.2, coef_iscm =0.13e-3, vocmr =21.2, coef_vocm=-0.1,pmaxmr =85,
+noct =47,immr = 4.9, vmmr = 17.3, tr = 25, ns = 36, nsg = 1, npg = 1
**Καλείται το αρχείο gen, ορίζονται οι κόμβοι εσόδου και εξόδου και οι παράμετροί του

vtemp 2 0 dc 25
**Η vtemp είναι ανεξάρτητη πηγή τάσης 25V μεταξύ των κόμβων 2 και 0

.inc irrads.stl
**Με την εντολή αυτή το πρόγραμμα συμπεριλαμβάνει το αρχείο irrads.stl

vmesur 1 0 stimulus Virrad
**Η ανεξάρτητη πηγή τάσης vmesur βρίσκεται συνδεδεμένη μεταξύ των κόμβων 1 και 0 με
**τιμή τάσης που προέρχεται από το αρχείο Virrad.

.inc dcdcf.cir
** Με την εντολή αυτή το πρόγραμμα συμπεριλαμβάνει το αρχείο dcdcf.cir

xconv 0 3 20 30 40 dcdcf params: n =1, vo1=12
**Καλείται το αρχείο dcdcf, ορίζονται οι κόμβοι εσόδου και εξόδου καθώς και οι παράμετροι
**του κυκλώματος dcdcf
```

```

Rload 40 0 5
** Η αντίσταση Rload βρίσκεται συνδεδεμένη μεταξύ των κόμβων 40 και 0 και η τιμή της
**αντίστασης είναι 5Ω.

.tran 1s 20000s
**Το πρόγραμμα θα εκτελέσει transient analysis για 20000 seconds με βήμα 1second

.probe
**Προβολή των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης σε γραφική μορφή

.end
**Τέλος του προγράμματος

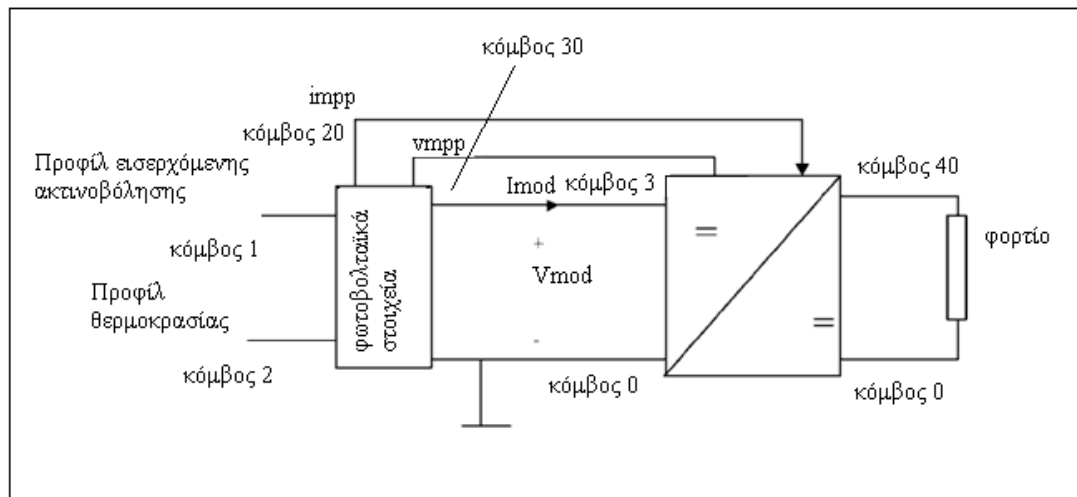
```

Σχήμα 2.41: Η netlist του κυκλώματος φωτοβολταϊκού συστήματος με φωτοβολταϊκή γεννήτρια, DC/DC μετατροπέα, φορτίο και ανιχνευτή μέγιστου σημείου ισχύος

Το αρχείο generator_beh.lib περιγράφει το μοντέλο της φωτοβολταϊκής γεννήτριας στο Pspice. Το αρχείο irrads.stl παρέχει το προφίλ της μετρούμενης ακτινοβολίας και το αρχείο dcdcf.cir περιγράφει το μοντέλο του DC/DC μετατροπέα.

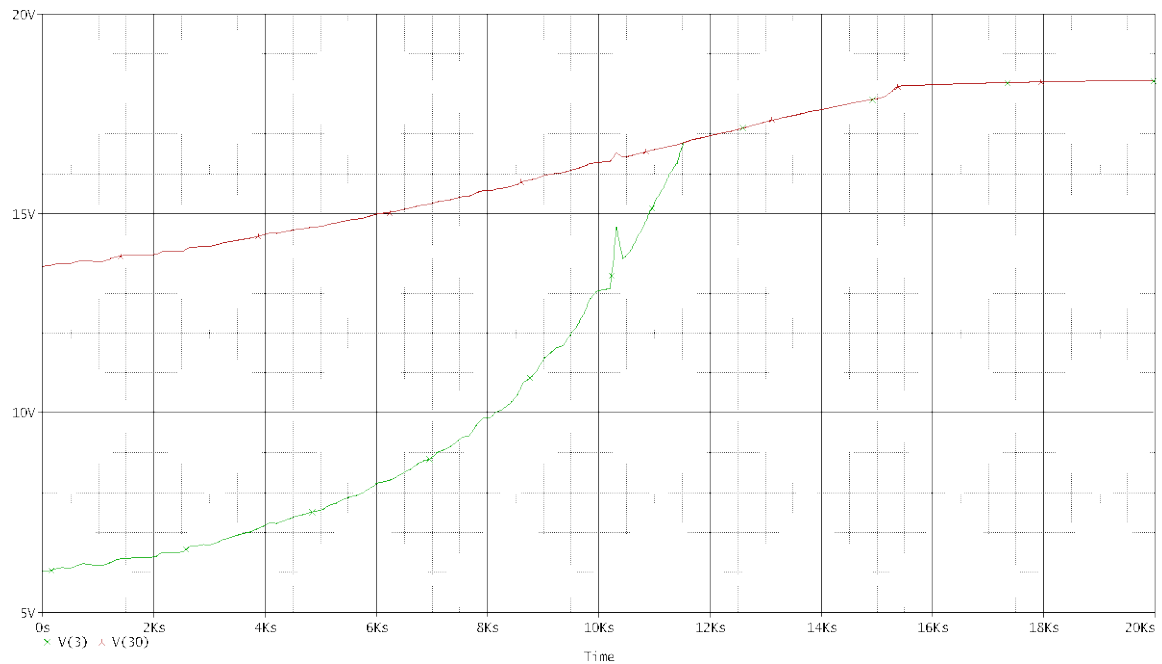
Όλα τα αρχεία τα οποία συμπεριλαμβάνονται στο πρόγραμμα με την εντολή .inc παρέχονται στις βιβλιοθήκες του Pspice[2.16].

Σχηματικά το φωτοβολταϊκό σύστημα που περιγράφεται μπορεί να παρασταθεί ως εξής:



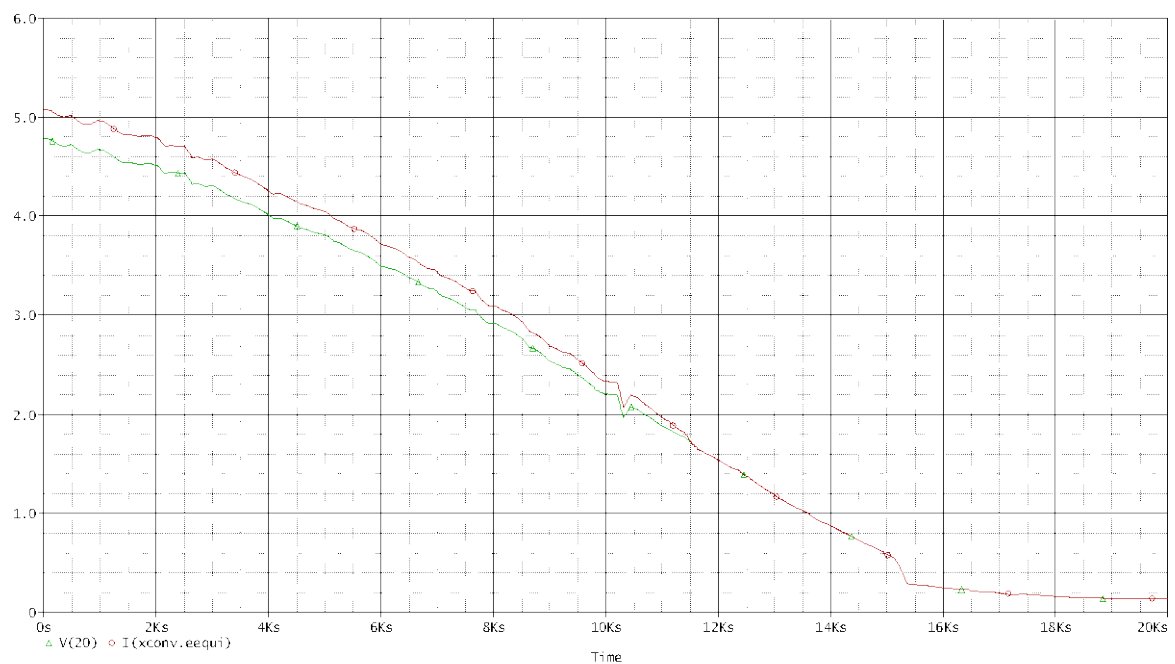
Σχήμα 2.42: Σχηματικό διάγραμμα του φωτοβολταϊκού συστήματος

Η εξέλιξη των τάσεων στην είσοδο του DC/DC μετατροπέα ($v(3)$) και στο σημείο μέγιστης ισχύος της φωτοβολταϊκής μονάδας κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης φαίνεται στο Σχήμα 2.43.



Σχήμα 2.43: Η εξέλιξη των τάσεων

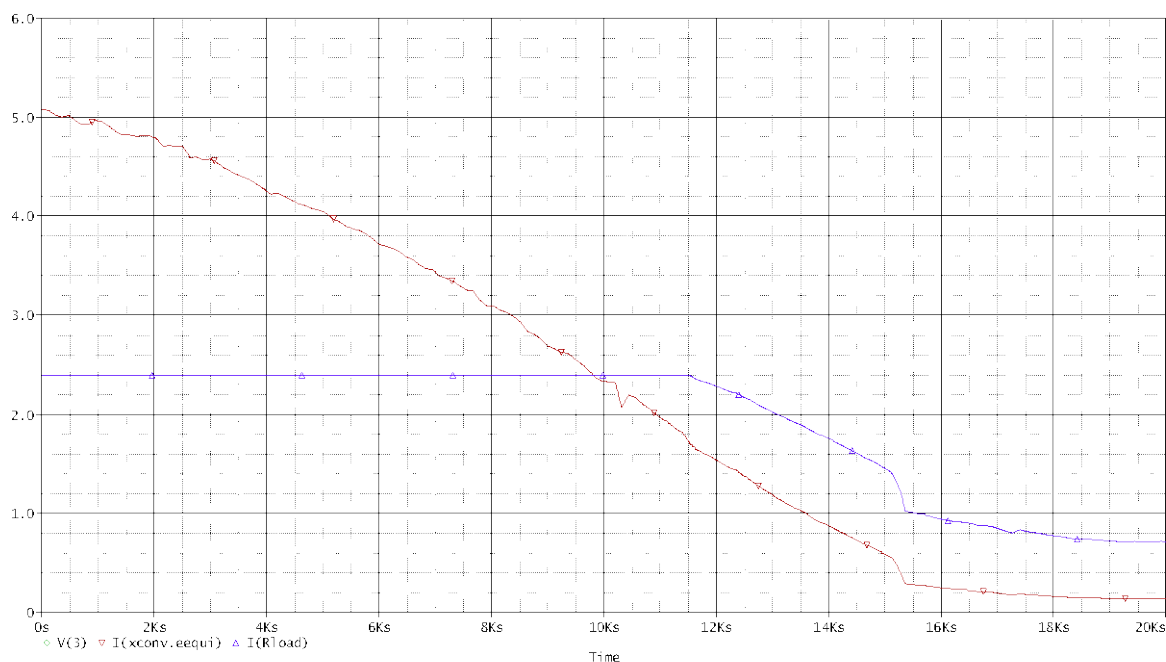
Η εξέλιξη του ρεύματος στην είσοδο του DC/DC μετατροπέα και στο σημείο μέγιστης ισχύος της φωτοβολταϊκής μονάδας φαίνεται στο Σχήμα 2.44.



Σχήμα 2.44: Η εξέλιξη του ρεύματος

Όπως φαίνεται στα παραπάνω Σχήματα, ο DC/DC μετατροπέας εξασφαλίζει ορθή ανίχνευση του σημείου μέγιστης ισχύος στο σύστημα. Εξαναγκάζονται έτσι οι φωτοβολταϊκές μονάδες να λειτουργήσουν σε αυτό το σημείο όταν είναι απαραίτητο, όταν δηλαδή η απαιτούμενη ισχύς στην έξοδο του μετατροπέα είναι επαρκής.

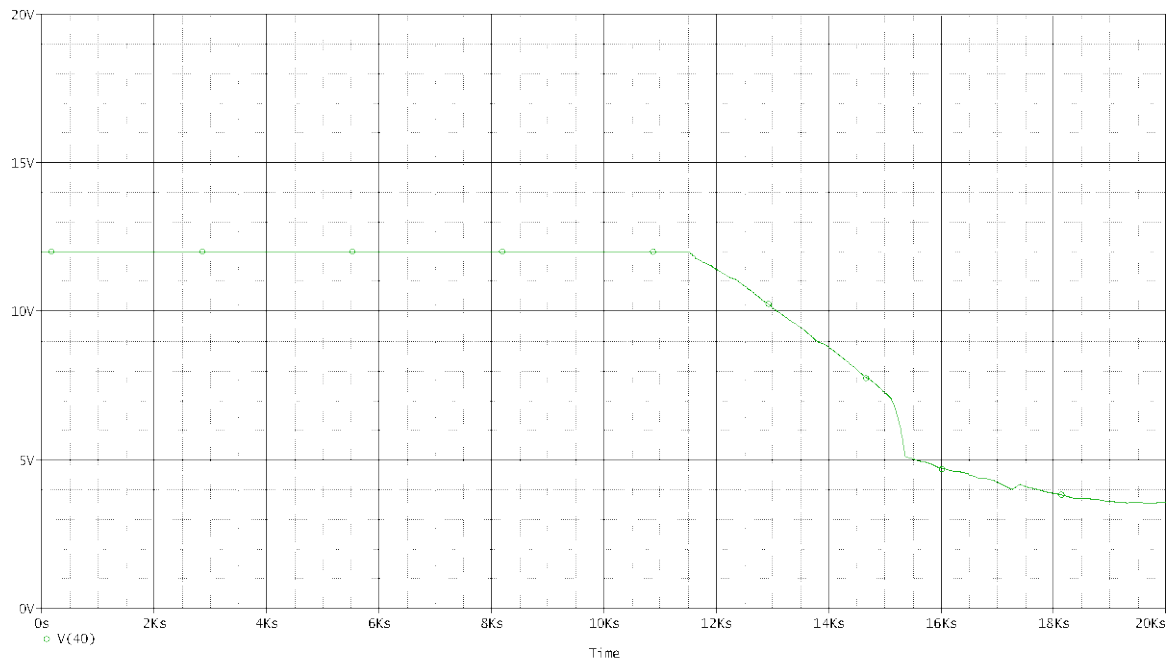
Η εισερχόμενη και εξερχόμενη ισχύς στον DC/DC μετατροπέα φαίνονται στο Σχήμα 2.45.



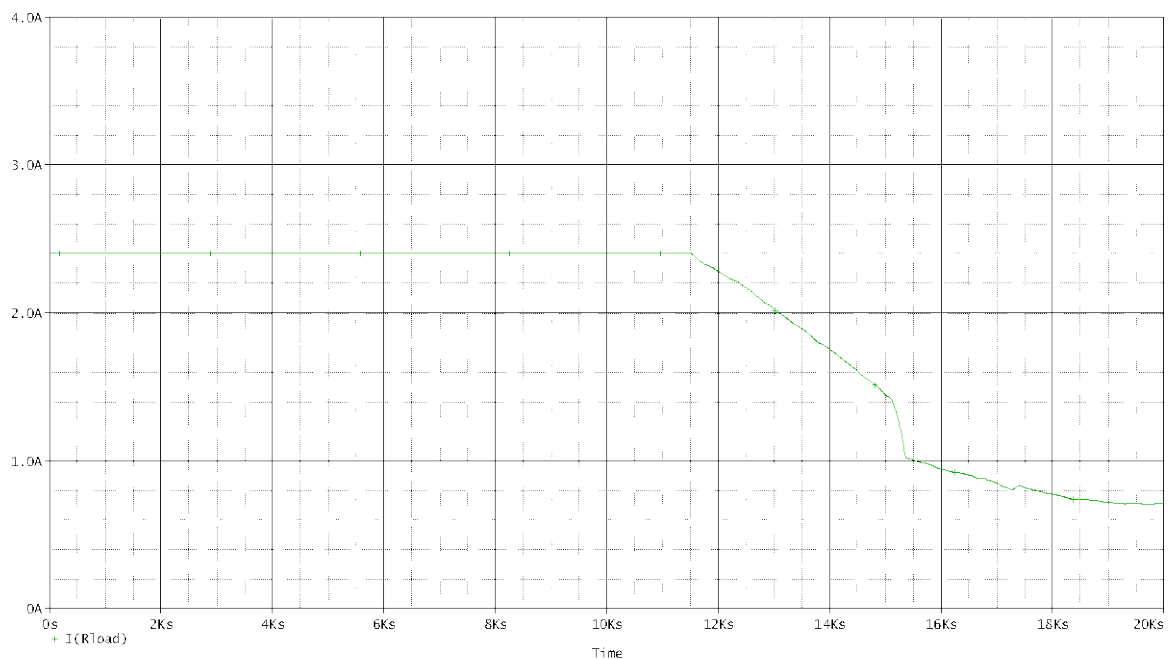
Σχήμα 2.45: Ισχύς εισόδου και εξόδου

Όπως φαίνεται στο παραπάνω Σχήμα, ο DC/DC μετατροπέας τροφοδοτεί την ισχύ του φορτίου ώστε να παραμένει σταθερή, όταν η ισχύς στην είσοδο είναι επαρκής. Όταν η απαιτούμενη ισχύς από το φορτίο υπερβαίνει την διαθέσιμη ισχύ, τότε η ισχύς στην έξοδο περιορίζεται από τον μετατροπέα. Η επίδραση αυτή μπορεί επίσης να διαπιστωθεί από τα διαγράμματα της τάσης εξόδου του μετατροπέα και του ρεύματος που τροφοδοτείται στο φορτίο.

Η γραφική παράσταση της τάσης στην έξοδο του μετατροπέα και του ρεύματος που τροφοδοτείται στο φορτίο που είναι συνδεδεμένο στην έξοδο του DC/DC μετατροπέα φαίνονται στο Σχήμα 2.46 και 2.47.



Σχήμα 2.46: Γραφική παράσταση της τάσης εξόδου του μετατροπέα



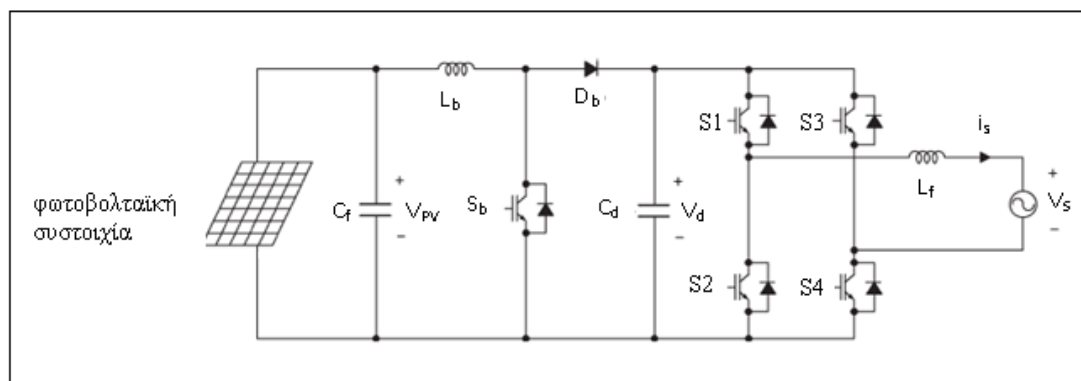
Σχήμα 2.47: Γραφική παράσταση του ρεύματος που τροφοδοτείται στο φορτίο.

2.9 ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΟΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΥ

2.9.1 Έλεγχος συστήματος και εκτίμηση (System Control and Estimation)

Στο Σχήμα 2.48 περιγράφεται η διάταξη του προτεινόμενου PCS του φωτοβολταϊκού με σύνδεση γραμμής. Το προτεινόμενο PCS συντίθεται από έναν DC-DC επωθητικό μετατροπέα (boost converter) (η διάταξη αυτή εξασφαλίζει μια σταθεροποιημένη και υψηλότερη τάση από μια χαμηλότερη και όχι απαραίτητα σταθεροποιημένη) και έναν DC-AC μετατροπέα. Η τάση του φωτοβολταϊκού V_{PV} κυμαίνεται από 150 έως 450 volt και ο επωθητικός μετατροπέας (boost converter) αυξάνει την τάση του φωτοβολταϊκού μέχρι το ανώτατο

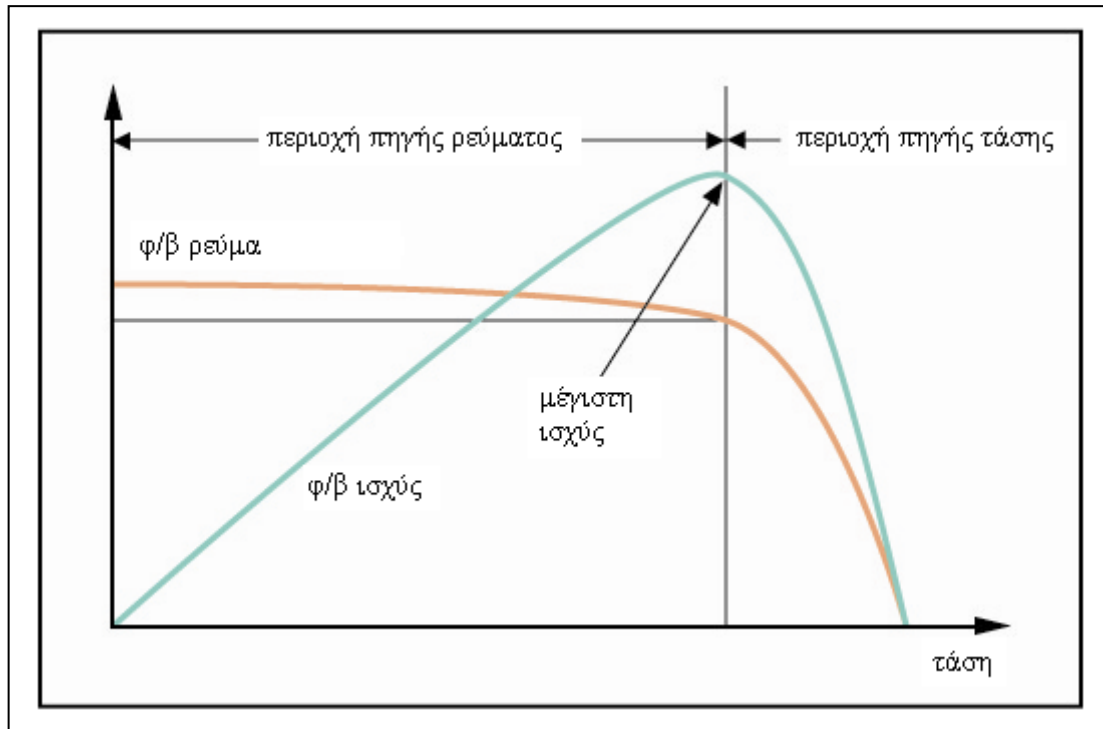
επιτρεπόμενο όριο. Ο μετατροπέας πλήρους γέφυρας που χρησιμοποιείται ως dc-ac μετατροπέας είναι buck type και έχει τον ρόλο να μειώνει την τάση της γραμμής στη τάση που απαιτείται για διόρθωση του παράγοντα ισχύος (power factor correction). Ο επωθητικός μετατροπέας (boost converter) ρυθμίζει την τάση του φωτοβολταϊκού V_{PV} σε συνεχή τάση V_d . Επίσης ο μετατροπέας εκτελεί και τον MPPT αλγόριθμο και επίσης ρυθμίζει την ένταση του ρεύματος για κοινό παράγοντα ισχύος (unity power factor). Ο MPPT αλγόριθμος εκτελείται χωρίς να είναι απαραίτητη η χρήση αισθητήρα του φωτοβολταϊκού ρεύματος, αλλά με τη χρήση ενός εκτιμητή ρεύματος της φωτοβολταϊκής συστοιχίας και έτσι μπορούμε να απλοποιήσουμε το σύστημά μας όσο αφορά το hardware.



Σχήμα 2.48: Φωτοβολταϊκό PCS

2.9.2 Ο MPPT αλγόριθμος

Η φωτοβολταϊκή συστοιχία φαίνεται να λειτουργεί μη γραμμικά και υπάρχει κάποιο σημείο λειτουργίας όπου το ϕ/β παράγει τη μέγιστη ισχύ όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.49.



Σχήμα 2.49: Χαρακτηριστικά εξόδου του φ/β

Αν η εσωτερική διακλάδωση των αντιστάσεων αμεληθεί, τότε η ένταση του ρεύματος του φ/β I_{PV} δίνεται [2.17, 2.18]:

$$I_{PV} = I_q - I_{sat} \left\{ \exp \left[\frac{q(V_{PV} + I_{PV}R_s)}{AKT} \right] - 1 \right\} \quad (2.24)$$

όπου:

I_q : το ρεύμα που παράγεται από το φως

I_{sat} : το ολικό ρεύμα του φ/β

q : το φορτίο του ηλεκτρονίου

K : η σταθερά Boltzmann

A : ιδανικός παράγοντας της p-n ένωσης (ideality factor of the p-n junction)

T : θερμοκρασία του φ/β

R_s : η εσωτερική αντίσταση του φ/β

Αν η εσωτερική αντίσταση θεωρηθεί αμελητέα, τότε ο παραπάνω τύπος μπορεί να γραφτεί ως εξής:

$$I_{PV} = I_q - I_{sat} \left[\exp \left(\frac{qV_{PV}}{AKT} \right) - 1 \right] \quad (2.25)$$

Η ισχύς που παράγεται από το φ/β, δίνεται:

$$P_{PV} = V_{PV} I_{PV} \quad (2.26)$$

Από την (2.25) έχουμε ότι η κλίση της ισχύος β, είναι

$$\beta = dP_{PV}/dV_{PV} \quad (2.27)$$

που μπορεί να γραφτεί ως εξής:

$$\beta = I_{PV} + \frac{dI_{PV}}{dV_{PV}} V_{PV} = I_q - I_{sat} \left[\exp\left(\frac{gV_{PV}}{AKT}\right) - 1 \right] - \frac{qI_{sat}}{AKT} \exp\left(\frac{gV_{PV}}{AKT}\right) V_{PV} \quad (2.28)$$

Έτσι η κλίση της ισχύος β μπορεί τελικά να υπολογιστεί ως:

$$\beta = I_{PV} + \frac{\Delta I_{PV}}{\Delta V_{PV}} V_{PV} \quad (2.29)$$

όπου ΔI_{PV} και ΔV_{PV} είναι η αύξηση της τάσης και έντασης του ρεύματος του φ/β αντίστοιχα. Όταν $\beta < 0$, μειώνοντας την τάση αναφοράς V_{ref} τότε το β τείνει στο 0, όταν αντίστοιχα $\beta > 0$ και αυξηθεί η τάση αναφοράς τότε επίσης το β τείνει στο 0, ενώ όταν $\beta = 0$ η τάση αναφοράς δεν χρειάζεται καμία αλλαγή. Αυξάνοντας ή μειώνοντας την τάση αναφοράς, V_{ref} , επιτυγχάνεται μια ομαλή μετάβαση στο σημείο μέγιστης ισχύος εφαρμόζοντας τον ακόλουθο έλεγχο όσο αφορά την κλίση ισχύος:

$$V_{ref,n} = \begin{cases} V_{ref,n-1} + k_1 \beta, & \text{for } \Delta V_{PV} \neq 0 \\ V_{ref,n-1} + k_2 \Delta I_{PV}, & \text{for } \Delta V_{PV} = 0 \end{cases} \quad (2.30)$$

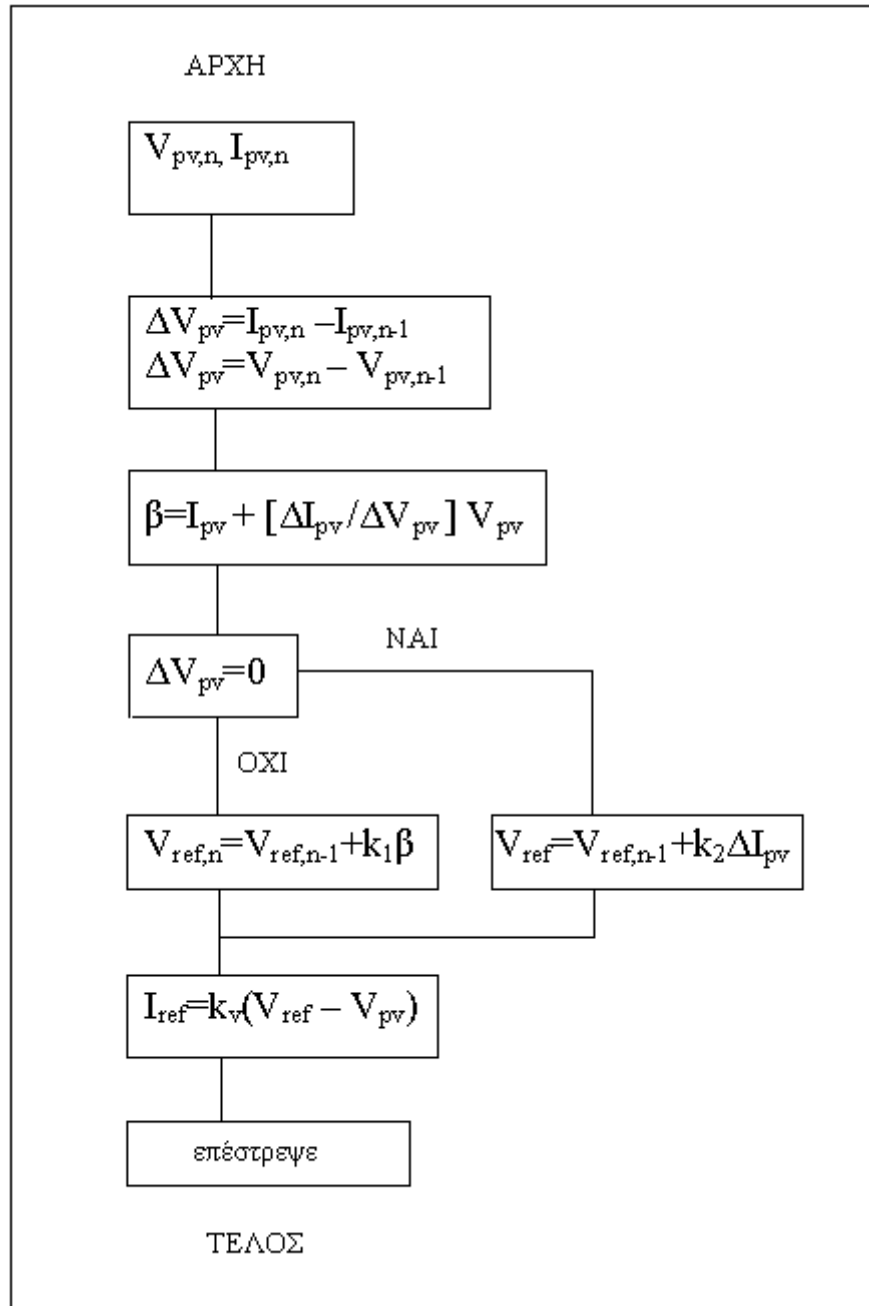
όπου k_1 και k_2 οι ανάλογες απολαβές (proportional gains).

Στην περίπτωση που $\Delta V_{PV} = 0$, η τάση αναφοράς αντισταθμίζεται ανάλογα με την αύξηση της έντασης ΔI_{PV} . Αυξάνοντας την ένταση ρεύματος του φ/β, η τάση του V_{PV} μειώνεται, ενώ μειώνοντας την ένταση του φ/β, η τάση αυξάνεται. Έτσι το ρεύμα αναφοράς I_{ref} του ελεγκτή ρεύματος του φ/β ορίζεται από τον ακόλουθο ελεγκτή τάσης:

$$I_{ref} = k_u (V_{ref} - V_{PV}) \quad (2.31)$$

όπου k_u είναι το αναλογικό κέρδος του ελεγκτή τάσης.

Το διάγραμμα ροής του MPPT αλγορίθμου περιγράφεται στο Σχήμα 2.50.



Σχήμα 2.50: Διάγραμμα ροής του MPPT αλγορίθμου.

2.9.3 Εκτίμηση έντασης ρεύματος του ϕ/β

Ισχύει ότι η τάση και η ένταση του ρεύματος u_s και i_s αντίστοιχα δίδονται:

$$u_s = \sqrt{2}V_s \sin \omega t \quad (2.32)$$

$$i_s = \sqrt{2}I_s \sin(\omega t + \theta) \quad (2.33)$$

όπου V_s και ω είναι οι ενεργές τιμές της γραμμής τάσης και της γωνιακής ταχύτητας αντίστοιχα και I_s και θ είναι οι ενεργές τιμές της έντασης του ρεύματος και της γωνίας φάσης αντίστοιχα. Τότε η ενεργός ισχύς καθορίζεται ως εξής:

$$P_s = V_s I_s \cos \theta \quad (2.34)$$

Ορίζεται:

$$i_T = \sqrt{2} i_s \sin \omega t \quad (2.35)$$

και την ενεργό τιμή του I_T ως:

$$I_T = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} i_T^2 d\omega t} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} 4I_s^2 \sin^2(\omega t + \theta) \sin^2 \omega t d(\omega t)} = I_s \cos \theta \quad (2.36)$$

Άρα η ενεργός ισχύς μπορεί να γραφτεί:

$$P_s = V_s I_T \quad (2.37)$$

Η ισχύς DC που παράγεται από τη φ/β συστοιχία, P_{PV} , ισούται με

$$P_{PV} = V_{PV} I_{PV} \quad (2.38)$$

Σύμφωνα με την αρχή διατήρησης ισχύος η παραγόμενη ισχύς DC, P_{PV} , λαμβάνοντας υπό όψιν την απόδοση ισχύος, θα πρέπει να ισούται με την ενεργό ισχύ. Έτσι:

$$\eta P_{PV} = P_s \quad (2.39)$$

όπου η , η απόδοση ισχύος του συστήματος. Από τις εξισώσεις (2.37)-(2.39) υπολογίζεται ότι η ένταση του DC ρεύματος του φ/β I_{PV} είναι:

$$\hat{I}_{PV} = \frac{V_s I_T}{\eta V_{PV}} \quad (2.40)$$

Συνεπώς η ένταση του DC ρεύματος του φ/β $\hat{I}_{PV}$ μπορεί να υπολογιστεί χωρίς τη χρήση αισθητήρα DC ρεύματος. Γενικά ο αισθητήρας DC ρεύματος απαιτεί επιπρόσθετες θετικές και αρνητικές πηγές τάσης. Εξάλλου ο αισθητήρας DC ρεύματος είναι δαπανηρός σε σχέση με έναν αισθητήρα AC ρεύματος και μετατρέπει το όλο σύστημα σε πιο πολύπλοκο.

2.9.4 Ελεγκτής ρεύματος για ενιαίο παράγοντα ισχύος

Το PCS (Power conditioning system) του φ/β που φαίνεται στο Σχήμα 2.45, παρέχει όπως προαναφέρθηκε μετατροπή ισχύος από ισχύ του φ/β σε ισχύ γραμμής. Είναι επιθυμητό το ρεύμα γραμμής να έχει κοινό παράγοντα ισχύος και να ελέγχεται ομοφασικά με την τάση γραμμής. Ο μετατροπέας ελέγχεται χρησιμοποιώντας διαμόρφωση μονοπολικού εύρους παλμού (unipolar pulsewidth modulation (PWM)), που έχει σαν αποτέλεσμα μειωμένη κυμάτωση και μεταγωγή σε διαμόρφωση διπολικού εύρους παλμού. Όταν η τάση γραμμής βρίσκεται στη θετική της ημiperίοδο, ο διακόπτης S4 είναι πάντα ανοικτός. Οι διακόπτες S1 και S2 παράγουν PWM παλμούς. Στην υπόλοιπη αρνητική ημiperίοδο ο διακόπτης S2 είναι πάντα ανοικτός και οι διακόπτες S3 και S4 παράγουν PWM παλμούς. Όταν η τάση γραμμής είναι θετική, ορίζεται η τάση εξόδου του εναλλάκτη με βάση την θέση των διακοπών S1 και S2. Εάν ο διακόπτης S1 είναι ανοικτός η τάση εξόδου του εναλλάκτη είναι V_d . Ως

αποτέλεσμα η ένταση ρεύματος της γραμμής αυξάνεται και αποθηκεύεται μαγνητική ενέργεια στο φίλτρο πηνίου L_f ως:

$$L_f \frac{di_s}{dt} = V_d - u_s \quad (2.41)$$

Όταν όμως ο διακόπτης S_2 είναι ανοικτός, η τάση εξόδου του εναλλάκτη ισούται με μηδέν και η τάση του πηνίου δίδεται:

$$L_f \frac{di_s}{dt} = -u_s \quad (2.42)$$

Ανάλογα με τον παράγοντα δράσης D του διακόπτη S_1 η μέση τάση του πηνίου L_f σε χρόνο μιας περιόδου $T_s (= 1/f_s)$ δίδεται σε σχέση με την απόκλιση του ρεύματος Δi_s , ως:

$$L_f \frac{\Delta i_s}{T_s} = (V_d - u_s)D - u_s(1 - D) \quad (2.43)$$

Ομοίως στην υπόλοιπη αρνητική ημιπερίοδο εφαρμόζεται ο παρακάτω τύπος για τον αντίστοιχο παράγοντα δράσης (D) του διακόπτη S_3 :

$$L_f \frac{\Delta i_s}{T_s} = (-V_d - u_s)D - u_s(1 - D) \quad (2.44)$$

Έστω ότι ο παράγοντας δράσης D μπορεί να αναπαρασταθεί ως:

$$D = D_n + \Delta D \quad (2.45)$$

όπου: D_n ο ονομαστικός παράγοντας δράσης και ΔD : ένας διαταραγμένος παράγοντας δράσης

Από τις εξισώσεις (2.43)-(2.45) ο ονομαστικός παράγοντας δράσης D_n και ο διαταραγμένος παράγοντας δράσης μπορούν να γραφτούν:

$$D_n = 1 - \frac{|u_s|}{V_d} \quad (2.46)$$

$$\Delta D = \frac{L_f}{V_d T_s} \Delta |i_s| \quad (2.47)$$

Για να αναγκάσουμε το ρεύμα γραμμής να ακολουθήσει το ρεύμα αναφοράς, ο αναλογικός έλεγχος ρεύματος προσαρμόζεται ως ακολούθως:

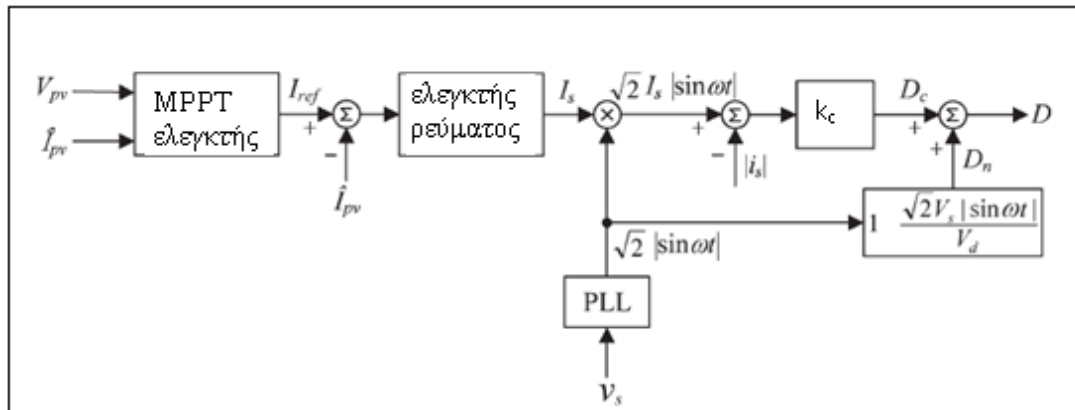
$$\Delta D = k_c (|i_s^*| - |i_s|) \quad (2.48)$$

όπου k_c το ανάλογο κέρδος (the proportional gain) και i_s^* το σήμα αναφοράς (reference signal) του ρεύματος γραμμής. Το μέγιστο μέτρο I_s του ρεύματος αναφοράς $i_s^* = I_s \sin \omega t$ παράγεται από τον ακόλουθο ανάλογο-ακέραιο (proportional – integral (PI)) ελεγκτή ρεύματος:

$$I_s = k_{pc} (I_{ref} - \hat{I}_{pv}) + k_{ic} \int (I_{ref} - \hat{I}_{pv}) dt \quad (2.49)$$

όπου k_{pc} και k_{ic} είναι οι ανάλογες και οι ακέραιες απολαβές ελέγχου αντίστοιχα. Στο Σχήμα 2.51 φαίνεται το προτεινόμενο διάγραμμα ελεγκτών (controller block diagram). Η έξοδος ΔD του ελεγκτή ρεύματος (current controller) δημιουργεί μόνο την πτώση τάσης από το πηνίο που απαιτείται για να διατηρηθεί το ημιτονοειδές ρεύμα γραμμής. Με την προσθήκη του ονομαστικού παράγοντα δράσης (nominal duty ratio) D_n στο αρχικό μη γραμμικό, δυναμικό σύστημα (εξισώσεις (2.43), (2.44)) η σχέση μεταξύ της εισόδου ΔD και της εξόδου $|i_s|$ του συστήματος ανάγονται πλέον σε δυναμικό πρωτοβάθμιο γραμμικό σύστημα (2.47) σαφώς με καλύτερη ελεγχσιμότητα. Όπως φαίνεται, η προσθήκη του ονομαστικού παράγοντα δράσης

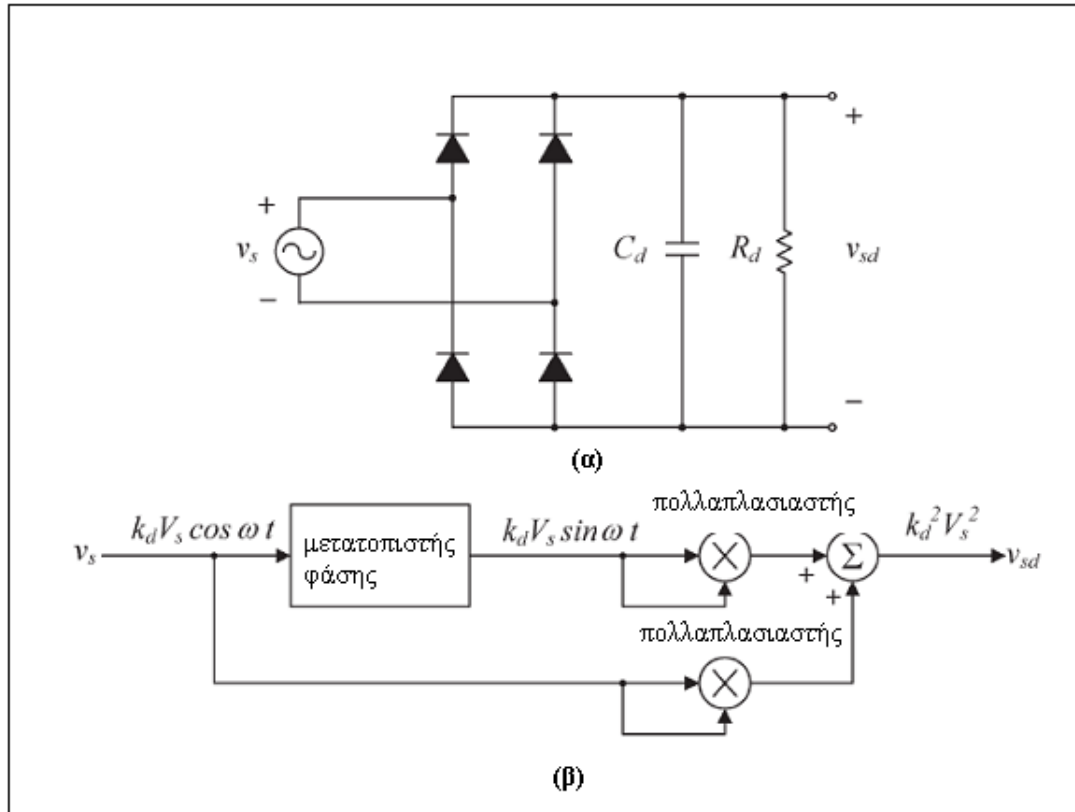
(nominal duty ratio) D_n μειώνει την επιβάρυνση του ελέγχου ρεύματος γραμμής και παράλληλα βελτιώνει την κυματομορφή του ρεύματος γραμμής.



Σχήμα 2.51: Προτεινόμενο διάγραμμα ελέγχου

2.9.5 Γρήγορη ανίχνευση της τάσης γραμμής

Σε μία απότομη μείωση της ισχύος της γραμμής, το PCS πρέπει να τεθεί εκτός λειτουργίας, ώστε να αποφευχθεί η εμφάνιση μεταβατικού φαινομένου στην τάση γραμμής και να αποτραπεί η αυτοδύναμη λειτουργία του. Για αυτόν τον λόγο απαιτείται μια τεχνική γρήγορης ανίχνευσης (fast detection) της τάσης γραμμής. Γενικά χρησιμοποιείται ο συμβατικός ανιχνευτής τάσης κορυφής (conventional peak voltage detector) ως κύκλωμα αισθητήρα τάσης (voltage sensing circuit) που απαρτίζεται από διόδους, έναν πυκνωτή και μία αντίσταση όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.52α). Όταν το σήμα εισόδου μειώνεται, ο πυκνωτής αποφορτίζεται, ενώ όταν αυξάνεται φορτίζεται απ' ευθείας. Συνεπώς η ταχύτητα φόρτισης είναι μεγαλύτερη από αυτήν της αποφόρτισης. Μειώνοντας την αντίσταση αυξάνεται η ταχύτητα αποφόρτισης. Ωστόσο η κυμάτωση τάσης (ripple voltage) του σήματος αυξάνεται με αποτέλεσμα τη δυσκολία στην χρήση του.



Σχήμα 2.52: Ανιχνευτές τάσης γραμμής: (α) Συμβατικός ανιχνευτής τάσης κορυφής. (β) Γρήγορος ανιχνευτής τάσης κορυφής.

Μία τεχνική γρήγορης ανίχνευσης της τάσης γραμμής παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.52(β) και αποτελείται από έναν μετατοπιστή φάσης 90° (phase shifter), δύο πολλαπλασιαστές (multipliers) και έναν αθροιστή (adder).

Η τεχνική γρήγορης ανίχνευσης αξιοποιεί ένα απλό τριγωνομετρικό θεώρημα ως εξής:

$$\sin^2 \omega t + \cos^2 \omega t = 1 \quad (2.50)$$

Ένας μετατοπιστής φάσης «καθυστερεί» την κυματομορφή εισόδου κατά 90° που σημαίνει ότι η συνημιτονοειδής κυματομορφή της τάσης εισόδου μετατρέπεται σε ημιτονοειδή μορφή και κάθε κυματομορφή πολλαπλασιάζεται και προστίθεται. Έτσι, η ανιχνευμένη τάση σήματος, u_{sd} , της τάσης γραμμής u_s γίνεται:

$$u_{sd}^2 \propto V_s^2 \sin^2 \omega t + V_s^2 \cos^2 \omega t = G_d V_s^2 \quad (2.51)$$

όπου G_d είναι το κέρδος ανίχνευσης της τάσης γραμμής. Οπότε, ο ανιχνευτής εξόδου u_{sd} μπορεί να αναπαριστά το μέτρο της τάσης γραμμής.

Αν τώρα θεωρηθεί μια ψηφιακοποιημένη υλοποίηση του αλγορίθμου γρήγορης ανίχνευσης της τάσης γραμμής, ο μετατοπιστής φάσεως 90° της τάσης γραμμής με γωνιακή συχνότητα ω , έχει το χαρακτηριστικό μεταφοράς του πρωτοβάθμιου ολοπερατού φίλτρου ως ακολούθως:

$$H(s) = \frac{\omega - s}{\omega + s} \quad (2.52)$$

Χρησιμοποιώντας τον ακόλουθο διγραμμικό μετασχηματισμό:

$$s = \frac{2z-1}{T_c z+1} \quad (2.53)$$

όπου T_c η περίοδος δειγματοληψίας, η συνάρτηση μεταφοράς του μετατοπιστή φάσης στο διακριτό πεδίο τιμών (discrete domain) δίδεται ως εξής:

$$H(z) = \frac{\omega T_c - 2 + (\omega T_c + 2)z^{-1}}{\omega T_c + 2 + (\omega T_c - 2)z^{-1}} \quad (2.54)$$

Τελικά, η έξοδος $y(k)$ του μετατοπιστή φάσης σε πεδίο τιμών διακριτού χρόνου (in discrete-time

Domain) μπορεί να επιτευχθεί ως ακολούθως:

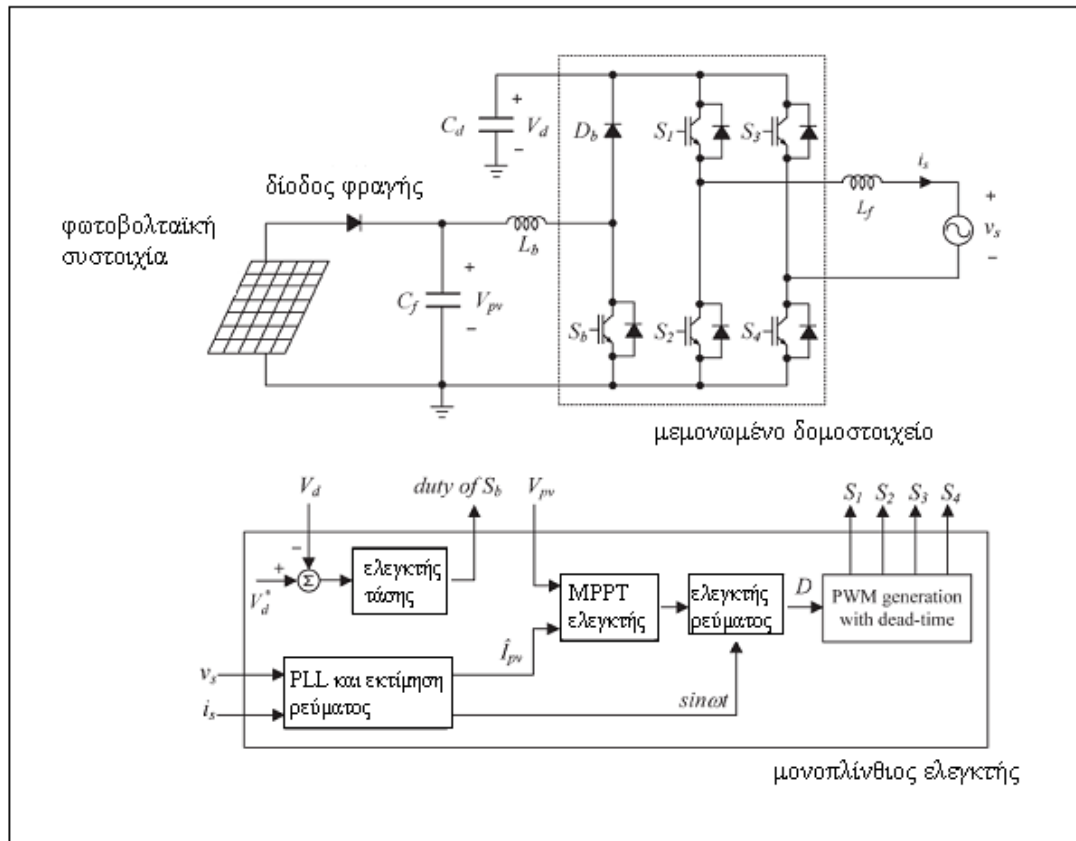
$$y(k) = -cy(k-1) + cu_s(k-1) \quad (2.55)$$

όπου:

$$c = \frac{T_c \omega - 2}{T_c \omega + 2} \quad (2.56)$$

Έτσι, ο αλγόριθμος καθορισμού του μέτρου της τάσης γραμμής μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας την τάση γραμμής $u_s(k)$ και το σήμα εξόδου $y(k)$ του μετατοπιστή 90° .

Στο Σχήμα 2.53 φαίνεται το συνολικό διάγραμμα συστήματος του Power conditioning system του φωτοβολταϊκού.



Σχήμα 2.53: Συνολικό διάγραμμα συστήματος του Power conditioning system του φωτοβολταϊκού.

2.10 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[2.1]	T. Hiyama, S. Kouzuma, and T. Imakubo, "Identification of optimal operating point of PV modules using neural network for real time maximum power tracking control," IEEE Trans. Energy Convers., vol. 10, no. 2, pp. 360–367, Jun. 1995.
[2.2]	T. Hiyama and K. Kitabayashi, "Neural network based estimation of maximum power generation from PV module using environmental information," IEEE Trans. Energy Convers., vol. 12, no. 3, pp. 241–247, Sep. 1997.
[2.3]	C. Sullivan and M. Powers, "A high-efficiency maximum power point tracker for photovoltaic arrays in a solar-powered race vehicle," in Proc. IEEE PESC, 1993, pp. 574–580.
[2.4]	J. Gow and C. Manning, "Controller arrangement for boost converter systems sourced from solar photovoltaic arrays or other maximum power sources," Proc. Inst. Electr. Eng.—Electr. Power Appl., vol. 147, no. 1, pp. 15–20, Jan. 2000.
[2.5]	J. Enslin, M. Wolf, D. Snyman, and W. Sweigers, "Integrated photovoltaic maximum power point tracking converter," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 44, no. 6, pp. 769–773, Dec. 1997.
[2.6]	J. Shoeman and J. van Wyk, "A simplified maximal power controller for terrestrial photovoltaic panel arrays," in Proc. IEEE PESC, 1982, pp. 361–367.
[2.7]	O. Waszynczuk, "Dynamic behavior of a class of photovoltaic power systems," IEEE Trans. Power App. Syst., vol. PAS-102, no. 1, pp. 3031–3037, Sep. 1983.
[2.8]	K. Hussein, I. Muta, T. Hoshino, and M. Osakada, "Maximum photovoltaic power tracking: An algorithm for rapidly changing atmosphere conditions," Proc. Inst. Electr. Eng., vol. 142, pt. G, no. 1, pp. 59–64, Jan. 1995.
[2.9]	Π. Γεωργιάκης «Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας» Χανιά, Σεπτέμβριος 2006, σελ.123
[2.10]	Ι.Ε. Φραγκιαδάκης, «Φωτοβολταϊκά συστήματα», Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη 2006
[2.11]	Woodworth, J.R., Thomas, M.G., Stevens, J.W., Harrington, S.R., Dunlop, J.P., and Swamy, M.R., "Evaluation of the batteries and charge controllers in small stand-alone photovoltaic systems", IEEE First World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, 1, pp. 933–45. Hawaii, December 1994.
[2.12]	Wong Siu-Chung, and Lee Yim-Shu, "PSpice modeling and simulation of hysteric currentcontrolled Cu^k converter", IEEE Transactions on Power Electronics, 8(4), October 1993.

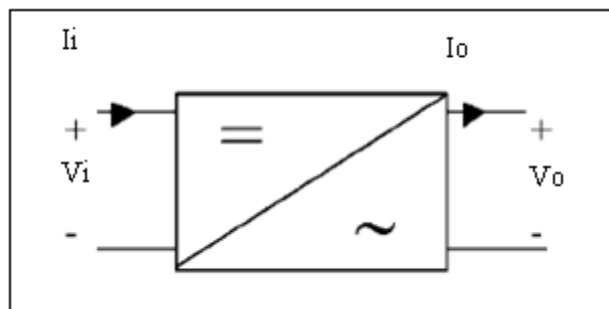
[2.13]	Lee, Y.-S., Cheng, D.K.W., and Wong, S.C., "A new approach to the modeling of converters for PSPICE simulation", IEEE Transactions on Power Electronics, 7(4), 741–53, October 1992.
[2.14]	Mohan, N., Undeland, T.M., and Robbins, W.P., Power Electronics, Wiley, 1995.
[2.15]	Hui, S.Y., Shrivastava, Yash, Shatiakumar, S., Tse, K.K., and Chung, Henry, Shu-Hung, "A comparison of non deterministic and deterministic switching methods for dc-dc power converters", IEEE Transactions on Power Electronics, 13(6), 1046–55, November 1998.
[2.16]	Luis Castaner and Santiago Silvestre, "Modelling Photovoltaic Systems Using Pspice", Wiley, England 2002
[2.17]	B. Bose, P. Szczeny, and R. Steigerwald, "Microcomputer control of a residential photovoltaic power conditioning system," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. IA-21, no. 5, pp. 1182–1191, Sep./Oct. 1985.
[2.18]	C. Hua, J. Lin, and C. Shen, "Implementation of a DSP-controlled photovoltaic system with peak power tracking," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 45, no. 1, pp. 99–107, Feb. 1998.

ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΕΝΑΛΛΑΚΤΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

3.1 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ ΓΝΩΣΕΩΝ

Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια παράγουν συνεχές ρεύμα ενώ οι οικιακές συσκευές και το δίκτυο της ΔΕΗ απαιτούν εναλλασσόμενο. Για την μετατροπή της ισχύος χρησιμοποιούνται οι εναλλάκτες (inverters) συνεχούς σε εναλλασσόμενο (DC/AC). Σκοπός των συστημάτων μετατροπής ισχύος είναι η κατάλληλη ρύθμιση των χαρακτηριστικών του παραγόμενου ρεύματος, ώστε να καταστεί δυνατή η τροφοδοσία των διαφόρων καταναλώσεων.

Οι εναλλάκτες είναι το εξάρτημα κλειδί του φωτοβολταϊκού συστήματος. Είναι ηλεκτρονικά κυκλώματα που μετατρέπουν όπως αναφέρθηκε το συνεχές ρεύμα (DC) σε εναλλασσόμενο (AC). Όταν χρησιμοποιούνται σε φωτοβολταϊκά συστήματα η DC ισχύς που παράγεται, μετατρέπεται σε AC ισχύ. Σχηματικά, οι εναλλάκτες αναπαρίστανται όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.1, όπου καθορίζονται η είσοδος και η έξοδος.

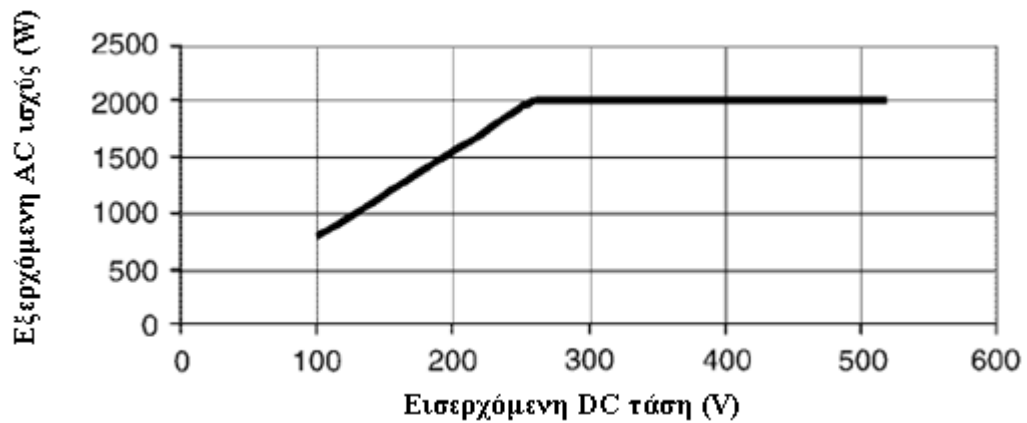


Σχήμα 3.1: Σχηματικό διάγραμμα ενός εναλλάκτη (DC/AC μετατροπέα)

Μερικά από τα πιο βασικά χαρακτηριστικά των εναλλακτών είναι τα ακόλουθα:

- **Πεδίο τιμών εισερχόμενης τάσης:** το πεδίο τιμών της εισερχόμενης συνεχούς (DC) τάσης που γίνεται αποδεκτό για την ονομαστική λειτουργία του εναλλάκτη.
- **Ονομαστική και μέγιστη εξερχόμενη ισχύς:** η ονομαστική και η μέγιστη τιμή της εξερχόμενης εναλλασσόμενης (AC) ισχύος, που παρέχεται από τον εναλλάκτη στο σύστημα.

Το Σχήμα 3.2 παριστάνει κάποια τυπικά χαρακτηριστικά των εναλλακτών. Στο σχεδιάγραμμα αυτό φαίνεται η εξερχόμενη εναλλασσόμενη (AC) ισχύς ως συνάρτηση της εισερχόμενης συνεχούς (DC) τάσης. Όπως φαίνεται από το σχεδιάγραμμα, η εξερχόμενη ισχύς αυξάνεται όσο αυξάνεται η εισερχόμενη συνεχής (DC) τάση. Η αύξηση αυτή συνεχίζεται μέχρι να επιτευχθεί η μέγιστη εξερχόμενη ισχύς και στη συνέχεια η εξερχόμενη ισχύς του εναλλάκτη παραμένει σταθερή, χωρίς να επηρεάζει η περαιτέρω αύξηση της εισερχόμενης τάσης.



Σχήμα 3.2: Τυπικά χαρακτηριστικά εισόδου-εξόδου ενός εναλλάκτη

Αφού επιτευχθεί η μέγιστη εξερχόμενη ισχύς, η αντίδραση των χαρακτηριστικών εισόδου είναι να μειώνεται η τιμή του εισερχόμενου συνεχούς (DC) ρεύματος όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.3, απαιτώντας η συνεχής (DC) ισχύς στην είσοδο του εναλλάκτη να παραμένει σχεδόν σταθερή.

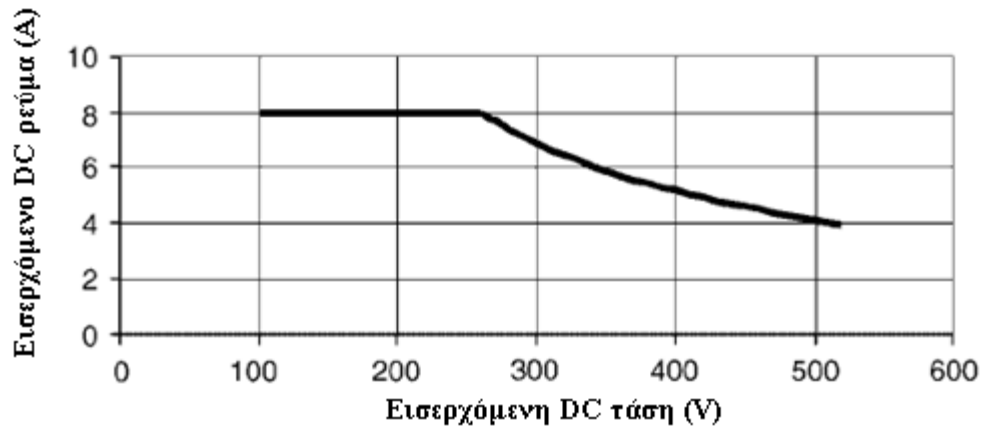
Η ολική αρμονική διαταραχή (total harmonic distortion) ορίζεται ως ο λόγος της ενεργού μέσης τιμής (rms) του σήματος που αποτελείται από όλες τις αρμονικές εκτός από την πρώτη, προς την μέση ενεργό τιμή της πρώτης αρμονικής:

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}}{V_1} \quad (3.1)$$

όπου V_1 η μέση ενεργός τιμή της πρώτης αρμονικής και V_n η μέση ενεργός τιμή της n -οστής αρμονικής.

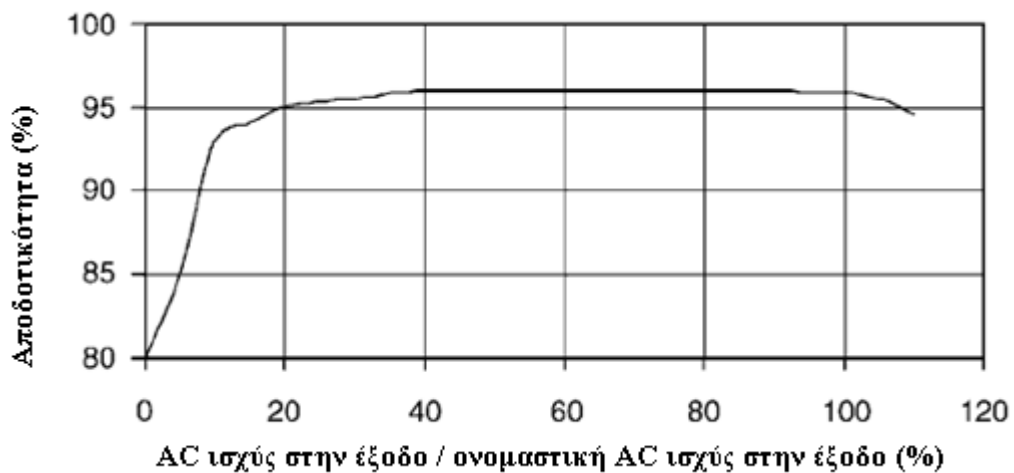
Η αποδοτικότητα ενός εναλλάκτη ορίζεται ως ο λόγος της ενεργούς μέσης τιμής της εξερχόμενης ισχύος προς την τιμή της εισερχόμενης συνεχούς (DC) ισχύος, ως εξής:

$$\eta = \frac{P_{AC}}{P_{DC}} \quad (3.2)$$



Σχήμα 3.3: Τυπικά χαρακτηριστικά εισόδου εναλλάκτη

Το Σχήμα 3.4 δείχνει ένα τυπικό γράφημα της αποδοτικότητας ενός εναλλάκτη ως συνάρτηση της εναλλασσόμενης ισχύος στην έξοδό του.



Σχήμα 3.4: Τυπικά χαρακτηριστικά αποδοτικότητας εναλλάκτη

Η εναλλασσόμενη (AC) εξερχόμενη ισχύς εκφράζεται σε ποσοστό επί τις εκατό (%). Επίσης κανονικοποιείται στην ονομαστική AC εξερχόμενη ισχύ του εναλλάκτη.

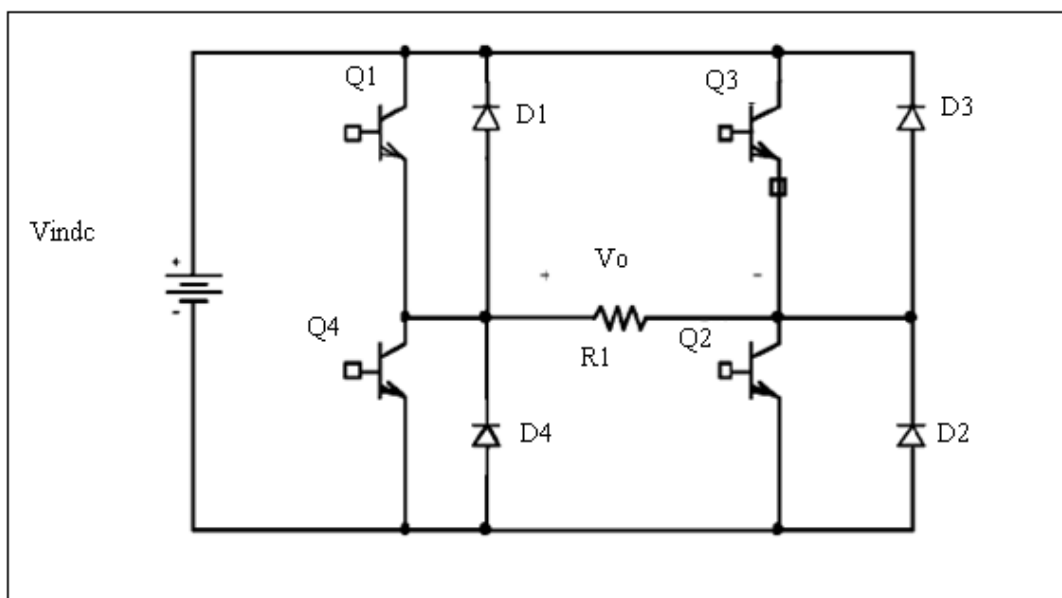
Οι εναλλάκτες γενικότερα πρέπει να πληρούν πολύ καλές προδιαγραφές. Ως αποτέλεσμα αυτού, οι περισσότεροι από τους εναλλάκτες που κυκλοφορούν και χρησιμοποιούνται στην αγορά, παρουσιάζουν επίπεδα ολικής αρμονικής διαταραχής κάτω από 3% και αποδοτικότητα που πλησιάζει το 90 με 96%.

Υπάρχουν διαθέσιμοι στην αγορά πολλοί τύποι εναλλακτών, με διαφορετικές ιδιότητες, χαρακτηριστικά και αποδόσεις. Μπορούν να ταξινομηθούν με διάφορα κριτήρια:

- Έξοδος: μονοφασικοί ή τριφασικοί εναλλάκτες.
- Αρχή λειτουργίας χειρισμού: εναλλάκτες που μετατρέπουν το ρεύμα γραμμής από εναλλασσόμενο σε συνεχές.
- Εκτίμηση ισχύος εναλλάκτη

Μπορεί να γίνει μια πιο γενικευμένη ταξινόμηση εναλλακτών, ανάλογα με την εσωτερική τους τοπολογία. Ακολουθώντας αυτά τα κριτήρια, μπορούν οι εναλλάκτες να ταξινομηθούν σε τρεις βασικές κατηγορίες:

- **Εναλλάκτες διαμορφωμένοι κατά πλάτος (Pulse-width modulated inverters):** Οι κατά πλάτος διαμορφωμένοι εναλλάκτες είναι συνήθως και οι πιο δαπανηροί αλλά πραγματικά έχουν τις καλύτερες επιδόσεις όσον αφορά την αρμονική διαταραχή και την αποδοτικότητα. Ενδεικτικά, αποδοτικότητες από 90-97% μπορούν να επιτευχθούν όπως επίσης και ολική αρμονική διαταραχή κάτω από 3%.
- **Εναλλάκτες τετραγωνικού παλμού (Square wave inverters):** Αυτού του είδους οι εναλλάκτες περιλαμβάνουν συσκευές στερεάς κατάστασης (solid state devices). Ο απώτερος σκοπός είναι να παραχθεί ένα τετραγωνικό κύμα στην έξοδο του εναλλάκτη, από μία πηγή συνεχούς ρεύματος στην είσοδο. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί χρησιμοποιώντας διαφορετικές διατάξεις κυκλωμάτων και μέσω κατάλληλου χειρισμού διαφόρων διακοπών [3.1, 3.2]. Το Σχήμα 3.5 δείχνει μια από τις πιο συνηθισμένες διατάξεις αυτών των εναλλακτών, όπου η τάση εξόδου V_0 στην αντίσταση $R1$ είναι ένα τετραγωνικό κύμα, με κατάλληλο έλεγχο από τρανζίστορ. Οι περισσότεροι από αυτούς τους εναλλάκτες, έχουν ένα μετασχηματιστή στην έξοδο με σκοπό να αυξάνει το πλάτος στο επιθυμητό επίπεδο. Οι εναλλάκτες τετραγωνικού παλμού θεωρούνται από τους πιο φθηνούς εξαιτίας της απλότητάς τους, με καλή αποδοτικότητα έως 95%, αλλά μειονεκτούν από υψηλή συνολική αρμονική διαταραχή (THD) έως και 45%.
- **Εναλλάκτες τροποποιημένου ημιτόνου:** Αυτοί οι εναλλάκτες συνδυάζουν την προηγούμενη στρατηγική χειρισμού με τη χρήση συντονισμένων κυκλωμάτων για να διασφαλιστεί κυματομορφή εξόδου του εναλλάκτη κοντά σε αυτήν του ημιτόνου. Έχουν ενδιάμεση απόδοση σε σχέση με τους δύο προηγούμενους τύπους. Η αποδοτικότητα κυμαίνεται 70-80%, ενώ η συνολική αρμονική διαταραχή (THD) βρίσκεται περίπου στο 5%.

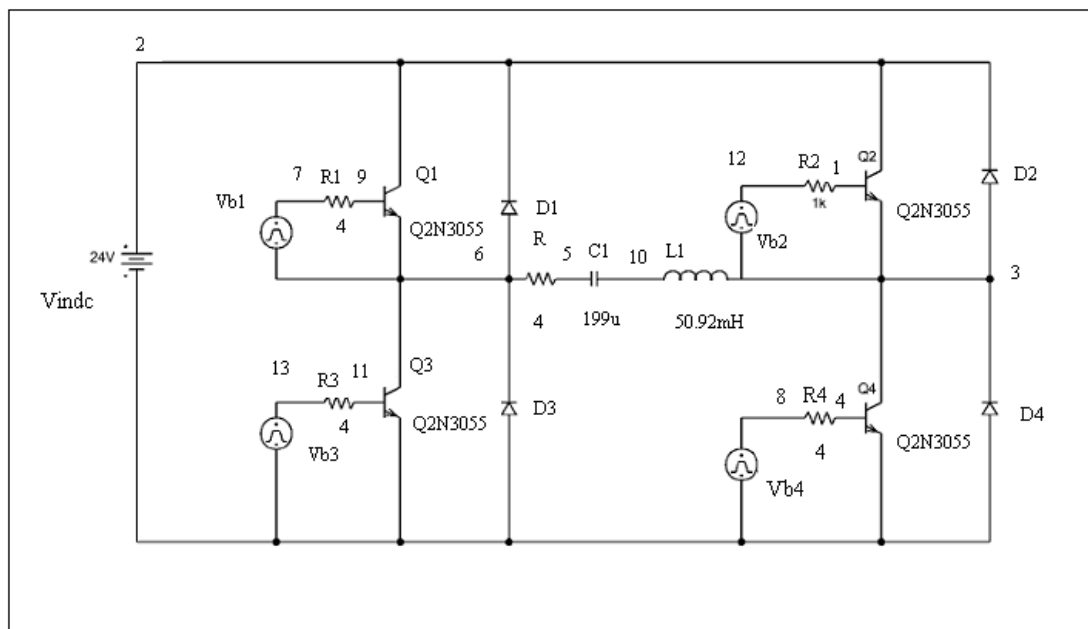


Σχήμα 3.5: Συμβατική σχηματοποίηση εναλλάκτη τετραγωνικού παλμού

3.2 ΤΟΠΟΛΟΓΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΕΝΑΛΛΑΚΤΗ ΣΤΟ PSPICE

Υπάρχει μεγάλη ποικιλία μοντέλων εναλλακτών στη βιβλιογραφία όπως ανφέρθηκε [3.1, 3.2]. Αυτά τα μοντέλα αναπτύσσονται ανάλογα με την εσωτερική αρχιτεκτονική, ανάλογα δηλαδή με την διάταξη των διαφόρων εξαρτημάτων στο κύκλωμα και έτσι χωρίζονται στις παραπάνω κατηγορίες που αναφέρθηκαν προηγουμένως. Με σκοπό να περιγραφεί η εσωτερική λειτουργία ενός κυκλώματος εναλλάκτη θα προσομοιωθεί σαν παράδειγμα στο Pspice μία από τις πιο κοινές διατάξεις που φαίνεται στο Σχήμα 3.5. Η τοπολογία αυτή είναι γνωστή ως «κλασσική γέφυρα» στα περισσότερα ηλεκτρονικά βιβλία. Οι τιμές των συστατικών σε αυτή την κλασσική γέφυρα έχουν προσαρμοστεί στις κατάλληλες για φωτοβολταϊκές εφαρμογές. Το συγκεκριμένο παράδειγμα παρουσιάζει έναν εναλλάκτη χαμηλής συχνότητας, που δουλεύει σε συχνό πητα πλέγματος, με σκοπό να αναλυθούν τα σήματα εξόδου του χωρίς μετασχηματισμούς στην έξοδό του. Πρακτικά αυτό το εγχείρημα είναι η αιτία σημαντικών απωλειών στην απόδοση του μετατροπέα. Είναι επίσης ο λόγος που το πηνίο και ο πυκνωτής είναι αρκετά μεγάλα σε όγκο και βάρος. Στα σύγχρονα σχέδια, για να αποφευχθούν αυτά τα προβλήματα, να βελτιωθεί η απόδοση και παράλληλα να μειωθεί το μέγεθος των εναλλακτών, η εσωτερική συχνότητα συχνά επιλέγεται να είναι αρκετά μεγαλύτερη σε μέτρο από την συχνότητα πλέγματος.

Στο Σχήμα 3.6 περιγράφεται ένα κύκλωμα που αποτελείται από 4 διπολικά τρανζίστορ τύπου Q2N3055. Το μοντέλο αυτό υπάρχει έτομο στις βιβλιοθήκες του προγράμματος Pspice. Είναι επίσης συνδεδεμένες στο κύκλωμα 4 δίοδοι τύπου d και ο χρόνος διάβασης είναι $tt=11\mu s$. Το φορτίο αποτελείται από αντίσταση 4Ω ένα πηνίο και έναν πυκνωτή συνδεδεμένα σε σειρά. Η τάση εισόδου είναι 24V. Οι πηγές Vb1, Vb2, Vb3 και Vb4 είναι πηγές τάσης τύπου παλμού που ελέγχουν την λειτουργία των τρανζίστορ Q1, Q2, Q3 και Q4. Τα τρανζίστορ Q1 και Q4 είναι στην κατάσταση ON για το μισό της περιόδου, ενώ τα τρανζίστορ Q2 και Q3 είναι στην κατάσταση OFF. Κατά το δεύτερο μισό της περιόδου συμβαίνει ακριβώς το αντίθετο.



Σχήμα 3.6: Σχηματικό διάγραμμα εναλλάκτη με RLC φορτίο

- Υπολογισμός πηνίου LQ

Εάν ο παράγοντας ποιότητας (quality factor) του RLC κυκλώματος δίδεται $Q=6.35$ και η συντονιζόμενη συχνότητα (resonant frequency) είναι ρυθμισμένη στα 50Hz, τότε ισχύει

$$Q = L \frac{2\pi f_r}{R} \quad (3.3)$$

οπότε προκύπτει ότι:

$$\Rightarrow L = 50.92mH$$

- Υπολογισμός χωρητικότητας πυκνωτή C

Αφού ισχύει η παρακάτω σχέση:

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (3.4)$$

$$\Rightarrow C=199\mu F$$

3.2.1 Προσομοίωση κυκλώματος εναλλάκτη με RLC φορτίο

Η netlist του προγράμματος, φαίνεται στο Σχήμα 3.7.

```
Vindc 2 0 24V
**Η ανεξάρτητη πηγή τάσης είναι τοποθετημένη μεταξύ των κόμβων 2 και 0 με τιμή
**τάσης 24V

Q1 2 9 6 Q2N3055
**Το τρανζίστορ Q1 με όνομα Q2N3055 έχει τοποθετημένο τον ακροδέκτη του
**συλλέκτη στον κόμβο 2, τον ακροδέκτη της βάσης στον κόμβο 9 και τον ακροδέκτη
**του εκπομπού στον κόμβο 6.

D1 6 2 Diode
**Η διόδος D1 με όνομα Diode έχει τον θετικό της ακροδέκτη τοποθετημένο στον
**κόμβο 6 και τον αρνητικό της στον κόμβο 2.

R1 9 7 4
**Η αντίσταση R1 βρίσκεται συνδεδεμένη μεταξύ των κόμβων 9 και 7 και η τιμή της
**είναι 4Ω.

Vb1 7 6 PULSE 0 14 0 1ps 1ps 9.9ms 20ms
**Η ανεξάρτητη πηγή τάσης Vb1 είναι τοποθετημένη μεταξύ των κόμβων 7 και 6. Η
**εντολή PULSE σημαίνει ότι χρησιμοποιείται ένας μοναδικός παλμός ή τρένο παλμών
**με χρόνο ανόδου και καθόδου που μπορούν να καθοριστούν. Η αρχική τιμή της τάσης
**είναι 0 V, η τελική 14 V, η χρονική καθυστέρηση είναι 0 seconds, ο χρόνος ανόδου
**είναι 1 ps, ο χρόνος καθόδου είναι 1 ps, το εύρος παλμού είναι 9,9 ms και η περίοδος
**είναι 20 ms.

Q2 2 1 3 Q2N3055
**Το τρανζίστορ Q2 με όνομα Q2N3055 έχει τοποθετημένο τον ακροδέκτη του
**συλλέκτη στον κόμβο 2, τον ακροδέκτη της βάσης στον κόμβο 1 και τον ακροδέκτη
**του εκπομπού στον κόμβο 3.
```

D2 3 2 Diode

**Η δίοδος D2 με όνομα Diode έχει τον θετικό της ακροδέκτη τοποθετημένο στον
**κόμβο 3 και τον αρνητικό της στον κόμβο 2.

R2 12 1 4

**Η αντίσταση R2 βρίσκεται συνδεδεμένη μεταξύ των κόμβων 12 και 1 και η τιμή της
**είναι 4Ω.

Vb2 12 3 PULSE 0 14 10ms 1ps 1ps 9.9ms 20ms

**Η ανεξάρτητη πηγή τάσης Vb2 είναι τοποθετημένη μεταξύ των κόμβων 12 και 3. Η
**εντολή PULSE σημαίνει ότι χρησιμοποιείται ένας μοναδικός παλμός ή τρένο παλμών
**με χρόνο ανόδου και καθόδου που μπορούν να καθοριστούν. Η αρχική τιμή της τάσης
**είναι 0 V, η τελική 14 V, η χρονική καθυστέρηση είναι 10 ms, ο χρόνος ανόδου
**είναι 1 ps, ο χρόνος καθόδου είναι 1 ps, το εύρος παλμού είναι 9,9 ms και η περίοδος
**είναι 20 ms.

Q4 3 4 0 Q2N3055

**Το τρανζίστορ Q4 με όνομα Q2N3055 έχει τοποθετημένο τον ακροδέκτη του
συλλέκτη στον κόμβο 3, τον ακροδέκτη της βάσης στον κόμβο 4 και τον ακροδέκτη του
**εκπομπού στον κόμβο 0.

D4 0 3 Diode

**Η δίοδος D4 με όνομα Diode έχει τον θετικό της ακροδέκτη τοποθετημένο στον
**κόμβο 0 και τον αρνητικό της στον κόμβο 3.

R4 8 4 4

**Η αντίσταση R4 βρίσκεται συνδεδεμένη μεταξύ των κόμβων 8 και 4 και η τιμή της
**είναι 4Ω.

Vb4 8 0 PULSE 0 14 0 1ps 1ps 9.9ms 20ms

**Η ανεξάρτητη πηγή τάσης Vb4 είναι τοποθετημένη μεταξύ των κόμβων 8 και 0. Η
**εντολή PULSE σημαίνει ότι χρησιμοποιείται ένας μοναδικός παλμός ή τρένο παλμών
**με χρόνο ανόδου και καθόδου που μπορούν να καθοριστούν. Η αρχική τιμή της τάσης
**είναι 0 V, η τελική 14 V, η χρονική καθυστέρηση είναι 0 s, ο χρόνος ανόδου είναι 1
**ps, ο χρόνος καθόδου είναι 1 ps, το εύρος παλμού είναι 9,9 ms και η περίοδος είναι
**20 ms.

Q3 6 11 0 Q2N3055

**Το τρανζίστορ Q3 με όνομα Q2N3055 έχει τοποθετημένο τον ακροδέκτη του
**συλλέκτη στον κόμβο 6, τον ακροδέκτη της βάσης στον κόμβο 11 και τον ακροδέκτη
**του εκπομπού στον κόμβο 0.

R3 11 13 4

**Η αντίσταση R3 βρίσκεται συνδεδεμένη μεταξύ των κόμβων 11 και 13 και η τιμή της
**είναι 4Ω.

D3 0 6 Diode

**Η δίοδος D3 με όνομα Diode έχει τον θετικό της ακροδέκτη τοποθετημένο στον
**κόμβο 0 και τον αρνητικό της στον κόμβο 6.

Vb3 13 0 PULSE 0 14 10ms 1ps 1ps 9.9ms 20ms

**Η ανεξάρτητη πηγή τάσης Vb3 είναι τοποθετημένη μεταξύ των κόμβων 13 και 0. Η
**εντολή PULSE σημαίνει ότι χρησιμοποιείται ένας μοναδικός παλμός ή τρένο παλμών
**με χρόνο ανόδου και καθόδου που μπορούν να καθοριστούν. Η αρχική τιμή της τάσης
**είναι 0 V, η τελική 14 V, η χρονική καθυστέρηση είναι 10 ms, ο χρόνος ανόδου είναι

```

**1 ps, ο χρόνος καθόδου είναι 1 ps, το εύρος παλμού είναι 9,9 ms και η περίοδος είναι
**20 ms.

R      6      5      4
**Η αντίσταση R3 βρίσκεται συνδεδεμένη μεταξύ των κόμβων 11 και 13 και η τιμή της
**είναι 4Ω.

C      10      5      199uF
* Ό πυκνωτής C έχει τοποθετημένο τον θετικό του ακροδέκτη στον κόμβο3, τον
**αρνητικό του στον κόμβο 5 και η χωρητικότητα του πυκνωτή είναι 199uF (μF).

L      3      10      50.92mH
** Το πηνίο L έχει τοποθετημένο τον θετικό του ακροδέκτη στον κόμβο 3 και τον
αρνητικό του στον κόμβο 10. Η επαγωγή του πηνίου είναι 50.92 mH.

.MODEL Diode d(TT=1E-6)
** Με την εντολή αυτή μοντελοποιείται η διόδος και εισάγονται οι παράμετροί της.

.MODEL Q2N3055 none
** Με την εντολή αυτή μοντελοποιείται το τρανζίστορ Q2N3055.

.TRAN 1ms 1
** Ορίζεται στο πρόγραμμα να γίνει transient analysis για 1s με βήμα 1ms.

.FOUR 50Hz 12 I(R) V(6,3)
**Θα γίνει ανάλυση Fourier μιας μεταβλητής εξόδου. Η θεμελιώδης συχνότητα ορίζεται
**50 Hz. Η ανάλυση θα γίνει για το ρεύμα δια μέσου της αντίστασης R και επίσης για
**την τάση στους κόμβους 6 και 3.

.OPTIONS ABSTOL=0.5mA RELTOL=0.01 VNTOL=0.001V
** Ορίζονται οι προκαθορισμένες τιμές

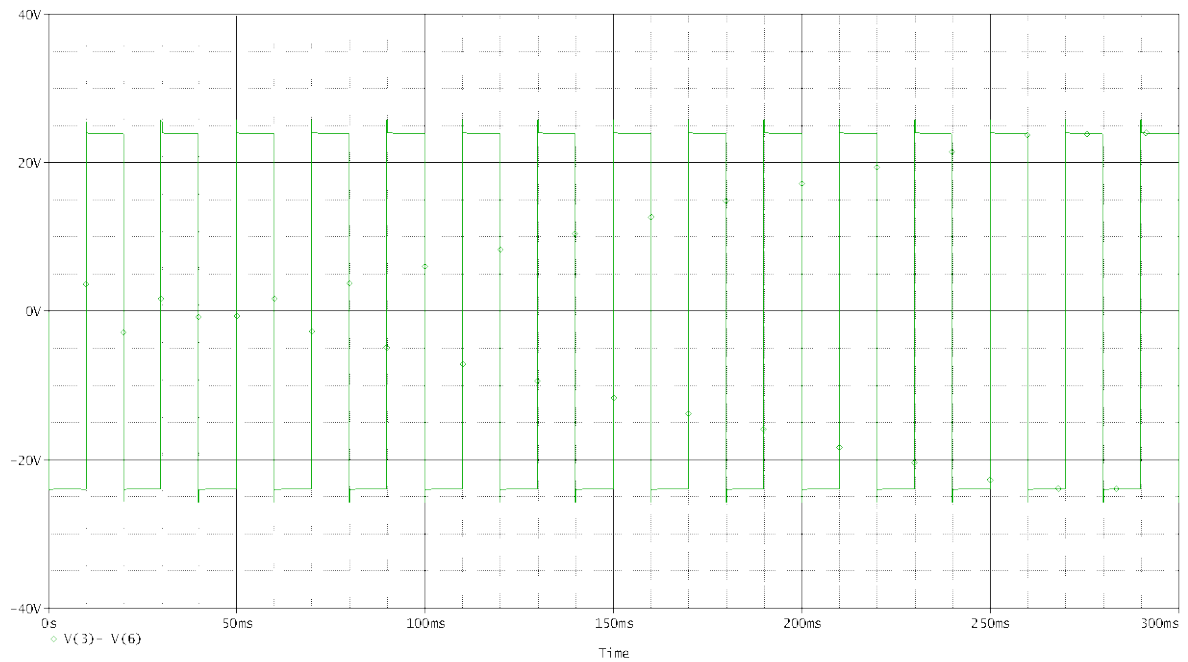
.PROBE
**Προβολή των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης σε γραφική μορφή

.END
**Τέλος του προγράμματος

```

Σχήμα 3.7: Η netlist του κυκλώματος εναλλάκτη με RLC φορτίο

Στο Σχήμα 3.8 φαίνεται η τάση εξόδου του κυκλώματος.



Σχήμα 3.8: Τάση εξόδου του κυκλώματος

Το Σχήμα 3.8 δείχνει την κυματομορφή της τάσης εξόδου $V_0 = V_3 - V_6$. Όπως φαίνεται είναι ένα τετραγωνικό κύμα με περίοδο 20 ms και πλάτος 23.9V. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας των τρανζίστορ τα οποία δρουν ως βραχυκύκλωμα όταν είναι στη θέση ON και ως ανοικτοί διακόπτες όταν είναι στη θέση OFF.

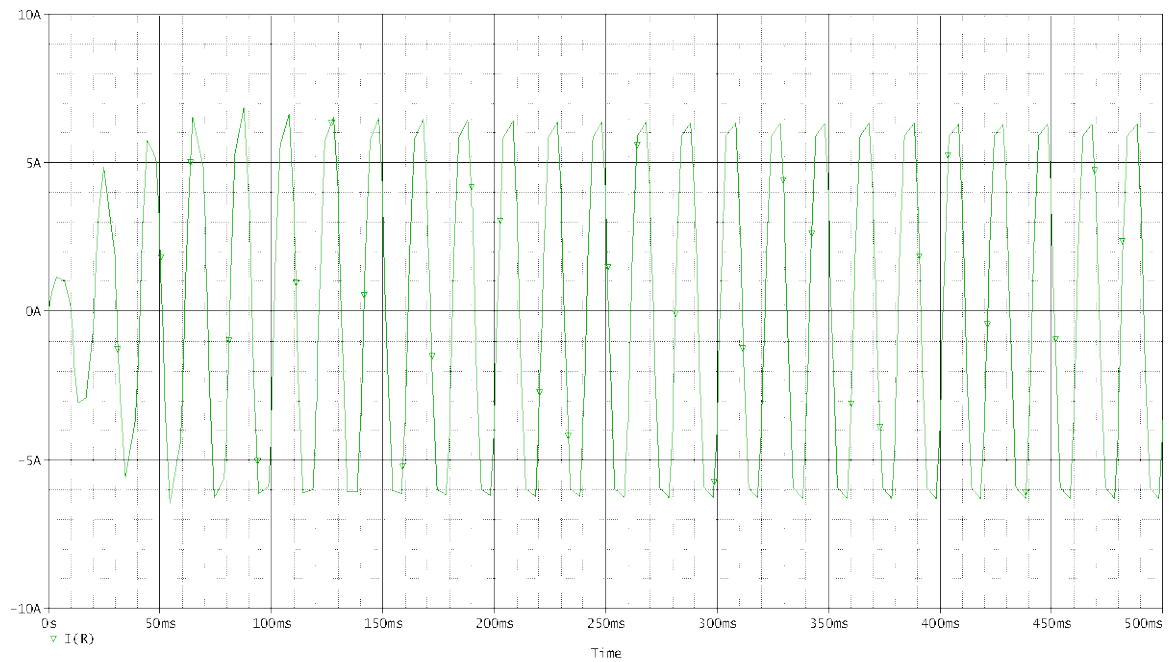
Υπολογίζεται στη συνέχεια η ολική αρμονική διαταραχή της κυματομορφής τάσεως. Το αποτέλεσμα παρέχεται στα αρχεία εξόδου της προσομοίωσης (output file), όπου παρατίθενται οι 12 αρμονικές συχνότητες, το πλάτος και η φάση καθώς και οι κανονικοποιημένες τιμές, που φαίνονται στον Πίνακα 3.1.

Πίνακας 3.1: Ολική αρμονική διαταραχή

FOURIER COMPONENTS OF TRANSIENT RESPONSE V(6,3)					
DC COMPONENT = -3.177885E-05					
HARMONIC No	FREQUENCY (HZ)	FOURIER COMPONENT	NORMALIZED COMPONENT	PHASE (DEG)	NORMALIZED PHASE (DEG)
1	5,00E+04	3.048E+01	1.000E+00	1.969E+00	0.000E+00
2	1,00E+05	6.319E-05	2.073E-06	-8.596E+01	-8.989E+01
3	1.500E+02	1.019E+01	3.343E-01	5.825E+00	-8.162E-02
4	2.000E+02	5.935E-05	1.947E-06	-8.905E+01	-9.693E+01
5	2.500E+02	6.139E+00	2.014E-01	9.652E+00	-1.926E-01
6	3.000E+02	6.413E-05	2.104E-06	-9.104E+01	-1.028E+02
7	3.500E+02	4.411E+00	1.447E-01	1.349E+01	-2.916E-01
8	4.000E+02	6.280E-05	2.060E-06	-9.070E+01	-1.065E+02
9	4.500E+02	3.457E+00	1.134E-01	1.730E+01	-4.213E-01
10	5.000E+02	6.461E-05	2.120E-06	-8.828E+01	-1.080E+02
11	5.500E+02	2,85E+03	9.364E-02	2.111E+01	- 5.502E-01
12	6.000E+02	6,40E-02	2.099E-0	-8.992E+01	-1.136E+02
TOTAL HARMONIC DISTORTION = 4.414693E+01 %					

Απ' ότι φαίνεται και όπως ήταν αναμενόμενο, οι περιττές αρμονικές είναι οι πιο σημαντικές εδώ και η ολική αρμονική διαταραχή (total harmonic distortion) βρέθηκε 44.14%. Επίσης διαπιστώνεται ότι η DC συνιστώσα της τάσης εξόδου δεν είναι μηδέν, αλλά η τιμή της είναι της τάξης των δεκάτων του mV. Κατά κανόνα η DC συνιστώσα πρέπει να τείνει στο μηδέν όσο το δυνατόν.

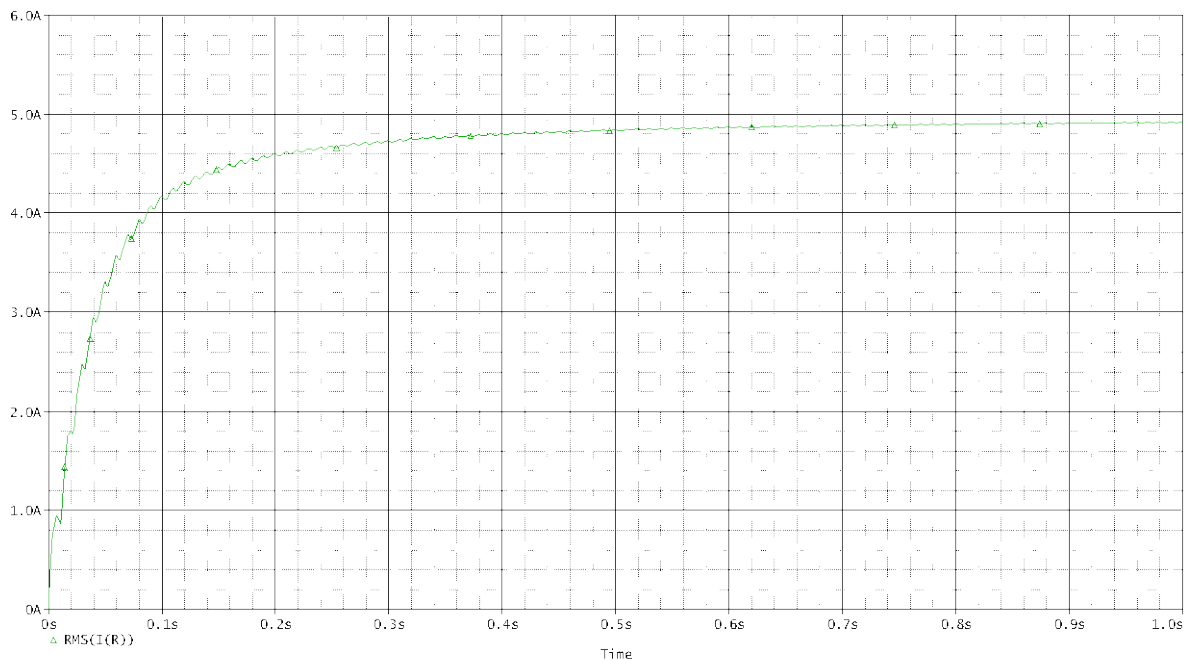
Η γραφική παράσταση του ρεύματος εξόδου φαίνεται στο Σχήμα 3.9.



Σχήμα 3.9 : Γραφική παράσταση ρεύματος του φορτίου του εναλλάκτη

Η αντίσταση του φορτίου στο κύκλωμά μας είναι ένα RLC κύκλωμα σε σειρά, το οποίο παρέχει φιλτραρισμένη κυματομορφή του ρεύματος του φορτίου.

Η ενεργός τιμή της κυματομορφής ρεύματος μπορεί να βρεθεί χρησιμοποιώντας την έτοιμη συνάρτηση του προγράμματος Pspice 'rms'. Το αποτέλεσμα φαίνεται στο Σχήμα 3.10.



Σχήμα 3.10 : Ενεργός τιμή του ρεύματος εξόδου του εναλλάκτη.

Η ενεργός τιμή προκύπτει μετά από αρκετούς κύκλους, $I_0(\text{rms})=4.92 \text{ A}$.

Η ενεργός τιμή της τάσης εξόδου μπορεί να υπολογιστεί θεωρητικά, θεωρώντας ιδανική τετραγωνική κυματομορφή, 24 V, ως εξής:

$$V_o(rms) = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T V_o^2 dt} = \sqrt{\frac{2}{20 \times 10^{-3}} \int_0^{10 \times 10^{-3}} 24^2 dt} = 24V \quad (3.5)$$

και έτσι:

$$I_o(rms) = \frac{V_o(rms)}{R} = \frac{24}{4} = 6 \quad (3.6)$$

Η τιμή που προκύπτει από την προσομοίωση είναι διαφορετική της θεωρητικής, αλλά ίδιας τάξης μεγέθους, εξαιτίας της αύξησης και της πτώσης της πραγματικής κυματομορφής.

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης Fourier είναι επίσης διαθέσιμα στο αρχείο εξόδου του προγράμματος μετά την προσομοίωση:

Πίνακας 3.2: Πίνακας Fourier

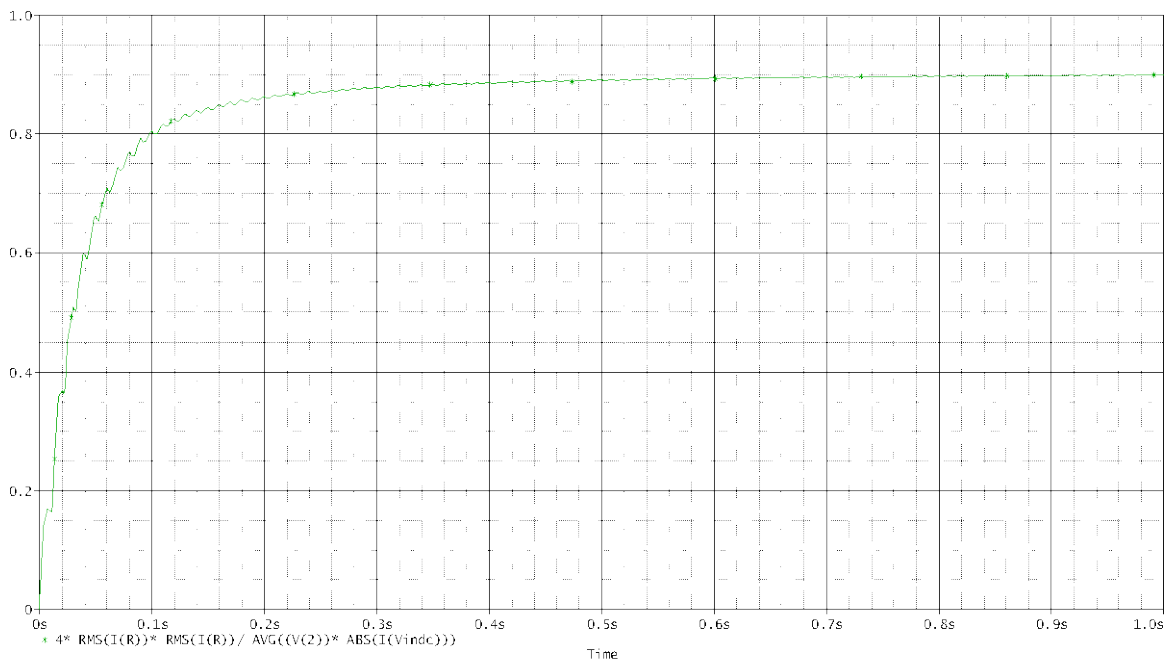
FOURIER COMPONENTS OF TRANSIENT RESPONSE I (R)					
DC COMPONENT = -2.248941E-05					
HARMONIC No	FREQUENCY (HZ)	FOURIER COMPONENT	NORMALIZED COMPONENT	PHASE (DEG)	NORMALIZED PHASE (DEG)
1	5,00E+04	6.911E+00	1.000E+00	-2.547E+01	0.000E+00
2	1,00E+05	7.918E-04	1.146E-04	-1.716E+02	-1.206E+02
3	1.500E+02	6.700E-01	9.695E-02	-6.633E+01	1.007E+01
4	2.000E+02	9.830E-04	1.423E-04	-7.670E+01	2.516E+01
5	2.500E+02	1.523E-01	2.203E-02	3.973E+01	1.671E+02
6	3.000E+02	6.035E-04	8.733E-05	3.394E+01	1.867E+02
7	3.500E+02	8.244E-02	1.193E-02	-1.083E+02	7.000E+01
8	4.000E+02	3.718E-04	5.380E-05	2.701E+01	2.307E+02
9	4.500E+02	7.000E-02	1.013E-02	1.720E+02	4.012E+02
10	5.000E+02	5.207E-04	7.534E-05	1.402E+02	3.949E+02
11	5.500E+02	5,67E+01	8.203E-03	-5.334E+01	2.268E+02
12	6.000E+02	1,39E-01	2.011E-05	1.529E+02	4.585E+02
TOTAL HARMONIC DISTORTION = 1.009803E+01 %					

Η ολική αρμονική διαταραχή της εξόδου όπως φαίνεται, είναι 10%.

Η στιγμιαία αποδοτικότητα μπορεί να εκτιμηθεί από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης στο Pspice, ως εξής:

$$\eta = \frac{P_o}{P_i} = \frac{RI_o^2}{V_i I_i} = \frac{4rms(i(R))^2}{AVG(V_{indc} ABS(I(V_{indc})))} \quad (3.7)$$

Έτσι μπορεί εύκολα να χαραχθεί το γράφημα αποδοτικότητας του εναλλάκτη από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης. Η γραφική παράσταση φαίνεται στο Σχήμα 3.11, όπου η αποδοτικότητα φτάνει το 90%.



Σχήμα 3.11 : Αποδοτικότητα εναλλάκτη

3.3 ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΕΝΑΛΛΑΚΤΗ ΓΙΑ ΑΠΕΥΘΕΙΑΣ ΣΥΝΔΕΣΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΗΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ-ΕΝΑΛΛΑΚΤΗ

Το τοπολογικό μοντέλο εναλλάκτη που περιγράφηκε παραπάνω είναι χρήσιμο για τη σχεδίαση της εσωτερικής αρχιτεκτονικής των εναλλακτών. Όμως, για να εξαχθούν σωστά αποτελέσματα, είναι απαραίτητο να είναι ακριβείς και οι συσκευές μεταγωγής ισχύος. Ένας μηχανικός που ασχολείται με τα φωτοβολταϊκά συστήματα, ενδιαφέρεται περισσότερο για την μακροπρόθεσμη συμπεριφορά του εναλλάκτη και δεν περιορίζεται σε μερικούς μόνο κύκλους συχνό πηας. Για αυτό το λόγο θα περιγραφεί στη συνέχεια ένα μοντέλο συμπεριφοράς για έναν γένιο εναλλάκτη (generic inverter). Αυτό θα μας επιτρέψει να ερευνηθούν μερικές από τις ιδιότητες για τη σύνδεση των φωτοβολταϊκών γεννητριών με τους εναλλάκτες.

Οι παράμετροι εισόδου του μοντέλου συμπεριφοράς του εναλλάκτη είναι οι εξής:

- Αποδοτικότητα του εναλλάκτη: η . Στο μοντέλο θεωρείται μια σταθερή τιμή αυτής της παραμέτρου. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.4, η αποδοτικότητα των περισσότερων εναλλακτών δεν είναι συνεχώς σταθερή, αλλά για ένα αρκετά μεγάλο εύρος τιμών της ισχύος εξόδου παραμένει σταθερή.
- Μέγιστη ισχύς εξόδου: P_m . Η μέγιστη ισχύς που μπορεί ο εναλλάκτης να παρέχει στο φορτίο.
- P_{load} : Η απαίτηση ισχύος του φορτίου.

Το μοντέλο του εναλλάκτη θεωρείται παρόμοιο με μία ιδανική πηγή τάσης με μηδενική συνιστώσα DC και μηδενική ολική αρμονική διαταραχή στην τάση εξόδου.

Το μοντέλο συμπεριφοράς περιγράφεται σχηματικά στο Σχήμα 3.12. Όπως φαίνεται η έξοδος του εναλλάκτη παρέχει ιδανική ημιτονοειδή τάση, ενώ η είσοδος πολώνεται από μία τάση εισόδου 'emod' αναγκάζοντας έτσι την τάση εισόδου του εναλλάκτη να είναι:

$$V_{iDC} = \frac{V_{OAC} I_{OAC}}{nf I_{iDC}}, \quad (3.8)$$

όπου:

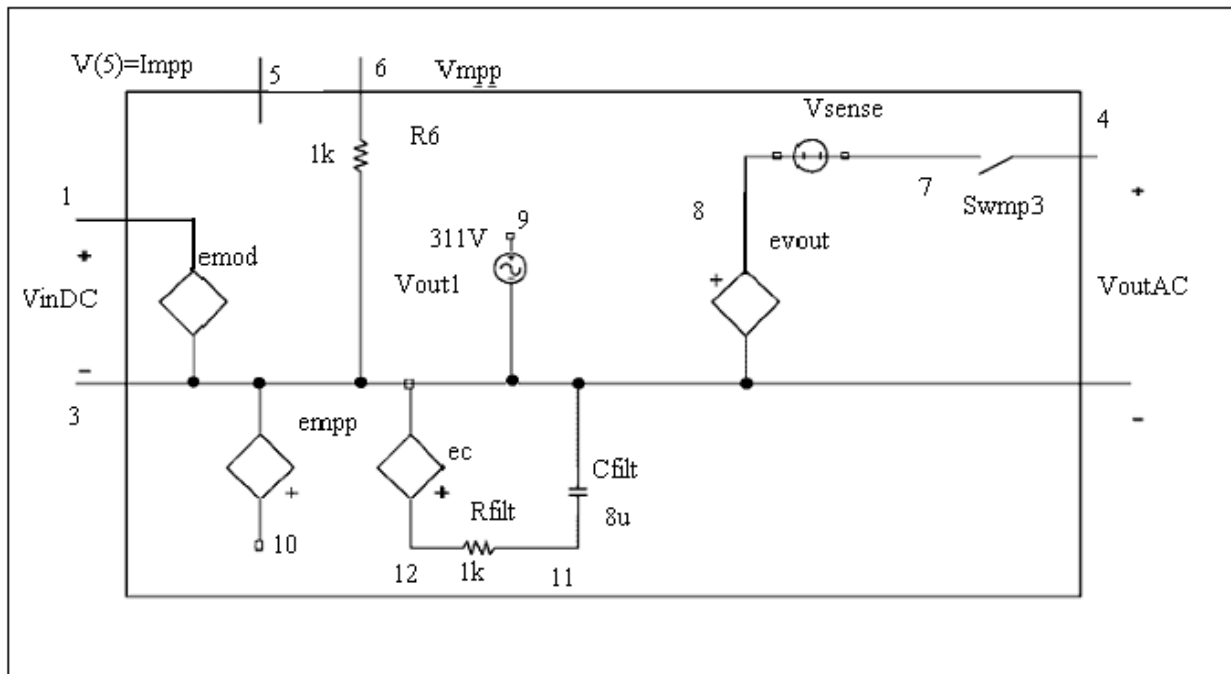
$$nf = \frac{P_{AC}}{P_{DC}} = \frac{V_{OAC} I_{OAC}}{V_{iDC} I_{iDC}}, \quad (3.9)$$

είναι η αποδοτικότητα του εναλλάκτη, V_{OAC} και I_{OAC} είναι οι ενεργές τιμές της τάσης εξόδου και του ρεύματος εξόδου αντίστοιχα.

Η τάση εισόδου του εναλλάκτη μπορεί να είναι είτε η έξοδος της φωτοβολταϊκής γεννήτριας, είτε η έξοδος του DC/DC μετατροπέα.

Στο Pspice αυτό μπορεί να γραφτεί σε κώδικα ως εξής:

```
emod 1 3 value={v(11)*220/(nf*v(5))-0.8}
```



Σχήμα 3.12: Σχηματική παρουσίαση του αρχείου Inverter1.cir

- $v(11)$ είναι η ενεργός τιμή του ρεύματος εξόδου του εναλλάκτη που επιτυγχάνεται μετά από φιλτράρισμα. Όπως φαίνεται επίσης στην παρακάτω netlist η DC πηγή 'vsence' συνδέεται στην έξοδο του εναλλάκτη για να μετρήσει το ρεύμα εξόδου του εναλλάκτη. Η ελεγχόμενη πηγή 'ec' εξάγει την απόλυτη τιμή του ρεύματος δια μέσου της πηγής 'vsence'. Τελικά το φίλτρο χαμηλής διαπερατότητας που αποτελείται από τα 'Rfilt' και 'Cfilt' αποκτά την ενεργό τιμή του ρεύματος εξόδου του εναλλάκτη ως τάση στον κόμβο 11, $v(11)$.
- Η ενεργός τιμή της τάσης εξόδου του εναλλάκτη είναι 220 V.
- $V(5)$ είναι η τιμή του ρεύματος της φωτοβολταϊκής γεννήτριας για το μέγιστο σημείο ισχύος.
- Στην παραπάνω netlist περιλαμβάνεται ένας ρυθμιστικός παράγοντας, ώστε να λαμβάνει υπόψη του την πτώση τάσης της διόδου.

Τελικά δύο προστατευτικοί μηχανισμοί έχουν συμπεριληφθεί σε αυτό το μοντέλο:

- Όταν η ισχύς που απαιτείται από το φορτίο υπερβεί τη μέγιστη ισχύ εξόδου του εναλλάκτη, που αυτή ορίζεται από την παράμετρο P_m , τότε η τάση εξόδου του εναλλάκτη μηδενίζεται.
- Όταν η ισχύς στην είσοδο του εναλλάκτη πολλαπλασιαζόμενη με την αποδοτικότητα του είναι μικρότερη από τις απαιτήσεις ισχύος του φορτίου, P_{load} , ο διακόπτης 'Swmp3' αποσυνδέει το φορτίο από την έξοδο του εναλλάκτη.

Η netlist αυτού του μοντέλου παρατίθεται στο Σχήμα 3.13.

**** Συμπεριφορά μοντέλου εναλλάκτη**

```
.subckt inverter1 1 3 4 5 6 PARAMS: nf=1, Pm=1, Pload=1
```

****Ορίζεται το υποκύκλωμα inverter1. Οι κόμβοι 1, 3, 4, 5 και 6 είναι οι είσοδοι και οι έξοδοι του υποκυκλώματος. Οι παράμετροι που ορίζονται είναι η αποδοτικότητα του εναλλάκτη, **η μέγιστη ισχύς εξόδου και η απαίτηση ισχύος του φορτίου αντίστοιχα.**

```
eVout 8 3 value={IF (Pload<Pm, v(9), v(3))}
```

****Η πηγή τάσης ελεγχόμενη από τάση eVout, βρίσκεται μεταξύ των κόμβων 8 και 3 και η **ενίσχυση τάσης είναι όση η τάση στον κόμβο 9 ή στον κόμβο 3, ανάλογα με το αν η ισχύς **που απαιτείται από το φορτίο είναι μεγαλύτερη ή μικρότερη από την μέγιστη ισχύ εξόδου **του εναλλάκτη.**

```
vsense 7 8 dc 0
```

****Η ανεξάρτητη πηγή τάσης vsense βρίσκεται μεταξύ των κόμβων 7 και 8.**

```
Vout1 9 3 sin (0 311 50Hz)
```

****Η ανεξάρτητη πηγή τάσης Vout βρίσκεται μεταξύ των κόμβων 9 και 3. Υπάρχει αρμονική **εξάρτηση με τον χρόνο όπου το ξεκίνημα μπορεί να γίνει μετά από καθυστέρηση από το **μηδέν. Μπορεί να έχει και εξάρτηση φθίνουσα (αρμονική) με τον χρόνο. Η απόκλιση **ορίζεται 0 V, το πλάτος 311 V και η συχνότητα 50 Hz.**

```

R6 6 3 1000

**Η αντίσταση R1 βρίσκεται συνδεδεμένη μεταξύ των κόμβων 6 και 3 και η τιμή της είναι
**1ΚΩ.

emppr 10 3 value={v(5)*v(6)*nf/(Pload)}

**Η emppr πηγή τάσης ελεγχόμενη από τάση βρίσκεται συνδεδεμένη μεταξύ των κόμβων 10
**και 3 και η ενίσχυση τάσης δίδεται [v(5)*v(6)*nf/(Pload)]

SWmp3 4 7 10 3 sw3mod

**Ορίζονται οι κόμβοι εισόδου και εξόδου της συσκευής SWmp3 με όνομα sw3mod.

.model sw3mod vswitch (Roff=1e+9,Ron=0.0001, voff=0.991, von=1.01)

**Μοντελοποιείται το εξάρτημα sw3mod, ορίζεται ο τύπος του (vswitch) και οι παράμετροί
**του.

ecorriente 12 3 value={abs(i(vsense))}

**Η ελεγχόμενη πηγή ρεύματος που βρίσκεται συνδεδεμένη μεταξύ των κόμβων 12 και 3 και
**εξάγει την απόλυτη τιμή του ρεύματος δια μέσου της πηγής 'vsence '.

Rfiltro 11 12 10000

**Η αντίσταση Rfiltro βρίσκεται συνδεδεμένη μεταξύ των κόμβων 6 και 3 και η τιμή της
**είναι 1ΚΩ.

Cfiltro 11 3 0.000008

**Ο πυκνωτής Cfiltro βρίσκεται συνδεδεμένος μεταξύ των κόμβων 1 1 και 3 και η
**χωρητικότητά του είναι 8μF

emod 1 3 value={(v(11)*220/(nf*v(5)))-0.8}

**Η είσοδος του εναλλάκτη βρίσκεται μεταξύ των κόμβων 1 και 3 πολώνεται από μία τάση
**εισόδου 'emod' αναγκάζοντας έτσι την τάση εισόδου του εναλλάκτη να είναι
**[(v(11)*220/(nf*v(5)))-0.8]

.ends inverter1

**Τέλος του υποκυκλώματος.

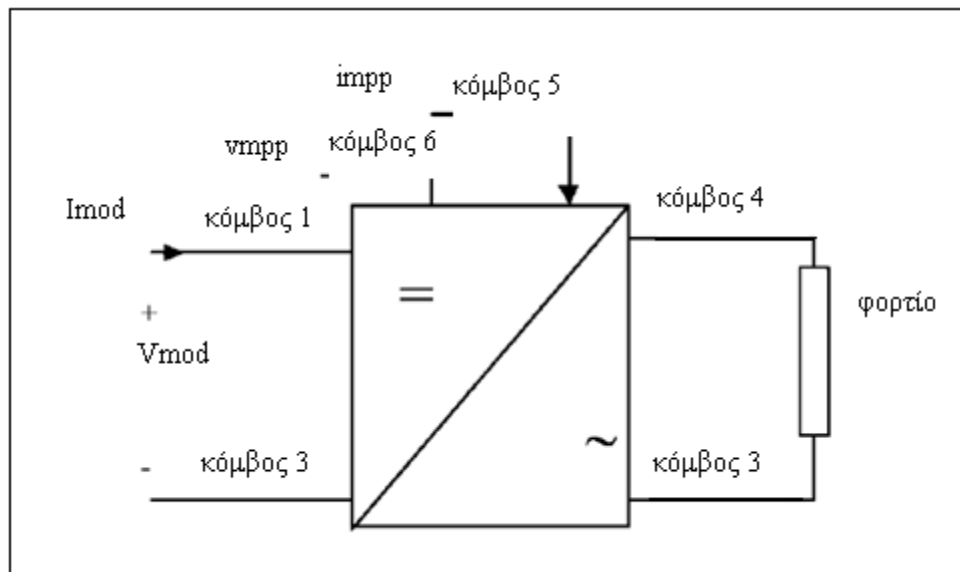
```

Σχήμα 3.13: Η netlist του μοντέλου του εναλλάκτη

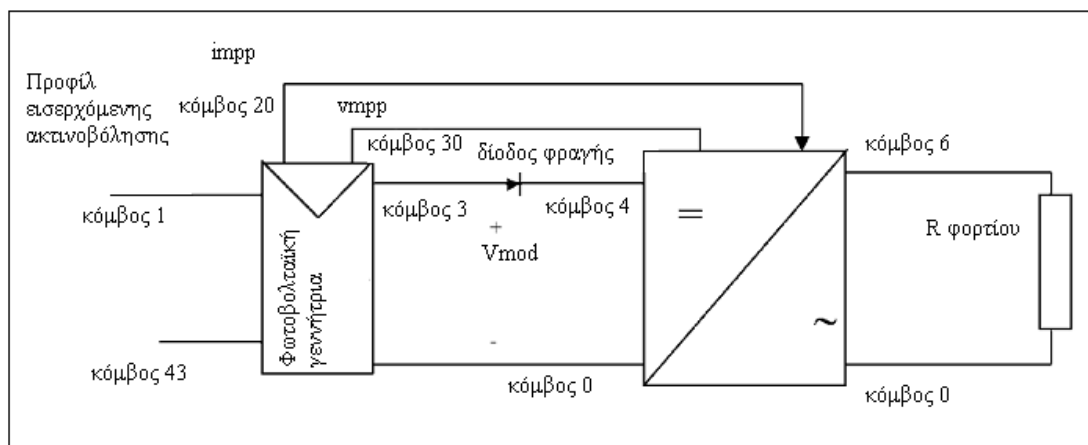
Το ισοδύναμο κύκλωμα της παραπάνω netlist φαίνεται στο Σχήμα 3.14, όπου υποδεικνύονται οι κόμβοι σύνδεσης εισόδου και εξόδου του υποκυκλώματος (sub circuit).

Για να καταγραφούν τα χαρακτηριστικά αυτού του μοντέλου εναλλάκτη, πραγματοποιείται στη συνέχεια προσομοίωση του συστήματος που φαίνεται στο Σχήμα 3.15,

στο Pspice. Το σύστημα αυτό περιλαμβάνει μία φωτοβολταϊκή γεννήτρια συνδεδεμένη με έναν εναλλάκτη, μία δίοδο και το φορτίο.



Σχήμα 3.14 : Σχηματική παρουσίαση του εναλλάκτη



Σχήμα 3.15 : Σχηματικό διάγραμμα μοντέλου εναλλάκτη

3.3.1 Προσομοίωση κυκλώματος μοντέλου εναλλάκτη για απευθείας σύνδεση γεννήτριας-εναλλάκτη

Θεωρείται το σύστημα που περιγράφηκε παραπάνω (Σχήμα 3.15), στο οποίο η φωτοβολταϊκή γεννήτρια αποτελείται από έξι υπομονάδες συνδεδεμένες σε σειρά. Κάθε μία από τις φωτοβολταϊκές υπομονάδες αποτελείται από 36 ηλιακές κυψέλες συνδεδεμένες σε σειρά. Υπό σταθερές συνθήκες το ρεύμα βραχυκυκλώσεως είναι $i_{scmr}=5.2A$ και η τάση ανοιχτοκύκλωσης είναι $u_{ocmr}=21.2V$. Στο μέγιστο σημείο ισχύος: $i_{mppr}=4.7A$, $u_{mppr}=17.3V$ και η μέγιστη ισχύς είναι $p_{maxr}=510W$.

Οι παράμετροι του εναλλάκτη είναι η αποδοτικότητα, $\eta=0.9$, η μέγιστη ισχύς εξόδου του εναλλάκτη $P_m=420W$, αναμενόμενη ισχύς φορτίου (ονομαστική ισχύς φορτίου), $P_{load}=107.5W$. Επίσης μία ωμική αντίσταση $450\ \Omega$ συνδέεται στην έξοδο του εναλλάκτη.

Τέλος λαμβάνεται υπόψη, ότι η θερμοκρασία περιβάλλοντος παραμένει σταθερή στους $25^\circ C$, ενώ οι τιμές της ακτινοβολίας παρέχονται από το αρχείο με όνομα `irradprueba2.stl`.

Η netlist που περιγράφει το σύστημά μας στο Pspice, φαίνεται στο Σχήμα 3.16.

```

**Προσομοίωση εναλλάκτη

.inc generator_beh.lib
**Με την εντολή αυτή το πρόγραμμα συμπεριλαμβάνει το αρχείο generator_beh.lib

xgenerator 0 1 43 3 45 46 47 20 30 generator_beh params:
+ iscmr=5.2, coef_iscm=0.13e-3, vocmr=21.2, coef_vocm=1, pmaxmr=85,
+ noct=47, immr=4.9, vmmr=17.3, tr=25, ns=36, nsg=6, npg=1
**Καλείται το αρχείο generator, ορίζονται οι κόμβοι εισόδου και εξόδου και οι παράμετροι.

.inc irradprueba2.stl
**Με την εντολή αυτή το πρόγραμμα συμπεριλαμβάνει το αρχείο irradprueba2.stl

vmesur 1 0 stimulus Virrad
**Η ανεξάρτητη πηγή τάσης vmesur βρίσκεται συνδεδεμένη μεταξύ των κόμβων 1 και 0 με
τιμή τάσης που προέρχεται από το αρχείο Virrad.

vtemp 43 0 dc 25
**Η ανεξάρτητη πηγή τάσης βρίσκεται συνδεδεμένη μεταξύ των κόμβων 43 και 0 με τιμή
**τάσης 25 V.

dblock 3 4 diode
**Η δίοδος dblock με όνομα diode έχει τον θετικό της ακροδέκτη συνδεδεμένο στον κόμβο 3
**και τον αρνητικό στον κόμβο 4.

.model diode d(n=1)
**Μοντελοποιείται το μοντέλο diode, ορίζεται ο τύπος του (d) και οι παράμετροί του.

.inc inversor2.cir
**Με την εντολή αυτή το πρόγραμμα συμπεριλαμβάνει το αρχείο inversor2.cir

xinvert 4 0 6 20 30 inverter1 params: nf=0.9, Pm=600, Pload=107.5
**Καλείται το αρχείο invert, ορίζονται οι παράμετροι εισόδου και εξόδου και επίσης
**ορίζονται οι παράμετροί του.

Rload 6 0 450
** Η αντίσταση Rload βρίσκεται συνδεδεμένη μεταξύ των κόμβων 6 και 0 και η τιμή της
**αντίστασης είναι  $450\Omega$ .

.options stepgmin
**Με την εντολή αυτή ενημερώνεται το πρόγραμμα να κάνει χρήση gmin αλγορίθμου, το
*  $\delta$  ποίο είναι απαραίτητο για την ομαλή διεκπαιρέωση της προσομοίωσης σε μεγάλα
**κυκλώματα.

.tran 0.1ps 2.80s

**Το πρόγραμμα θα εκτελέσει transient analysis για 2,8seconds με βήμα 1ps

```



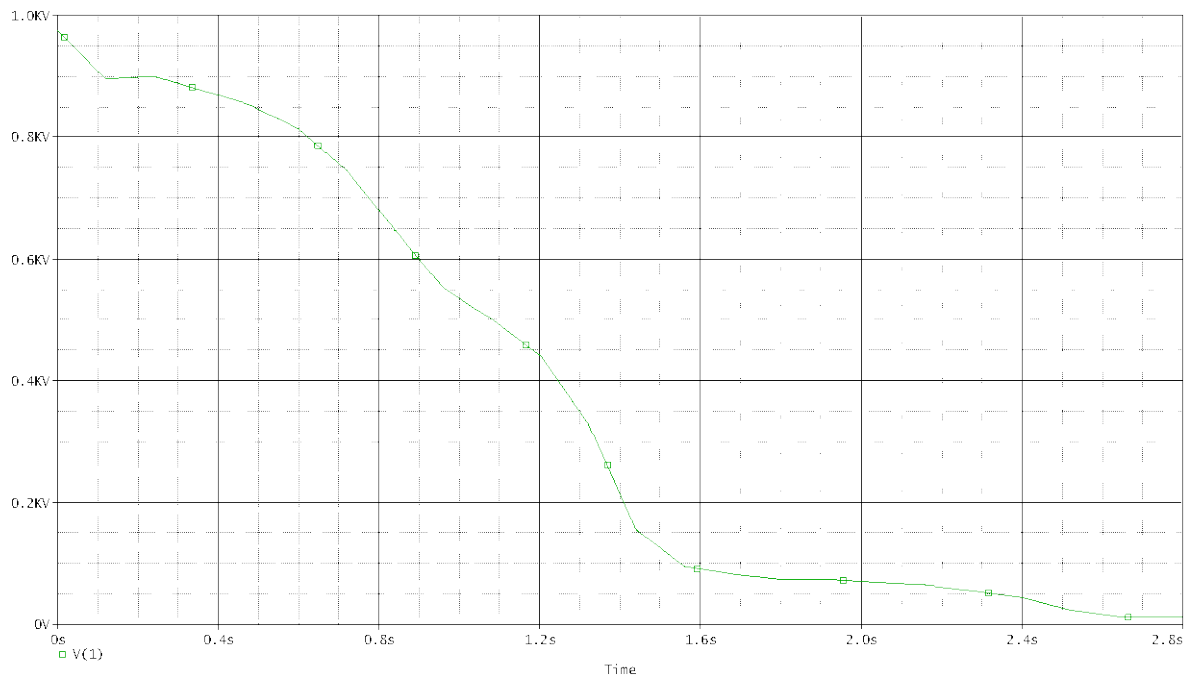
```
.probe
**Προβολή των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης σε γραφική μορφή

.end
**Τέλος του προγράμματος
```

Σχήμα 3.16: Η netlist του μοντέλου εναλλάκτη για απευθείας σύνδεση φωτοβολταϊκής γεννήτριας-εναλλάκτη

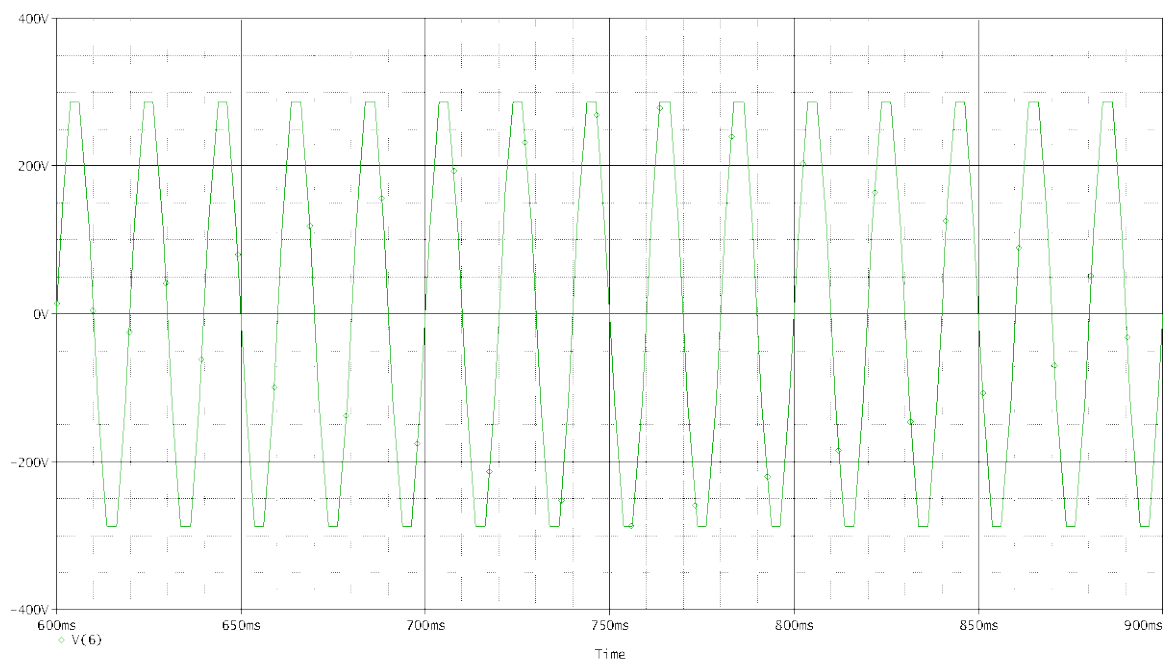
Το αρχείο irradsrueba2.stl. μας παρέχει όπως αναφέρθηκε το προφίλ ακτινοβολίας που φαίνεται στο Σχήμα 3.17. Το αρχείο generator_beh.lib περιγράφει το μοντέλο της φωτοβολταϊκής γεννήτριας και το αρχείο inversor2.cir περιγράφει τη συμπεριφορά του μοντέλου του εναλλάκτη στο Pspice.

Ο χρόνος μετριέται σε second. Το προφίλ της ακτινοβολίας που έχει θεωρηθεί δεν είναι ρεαλιστικό, πραγματοποιούνται ταχύτατες αλλαγές με σκοπό να μελετηθεί η συμπεριφορά του μοντέλου σε σύντομο χρόνο προσομοίωσης. Όπως φαίνεται η κλίμακα του χρόνου τελειώνει στα 2.64 sec.



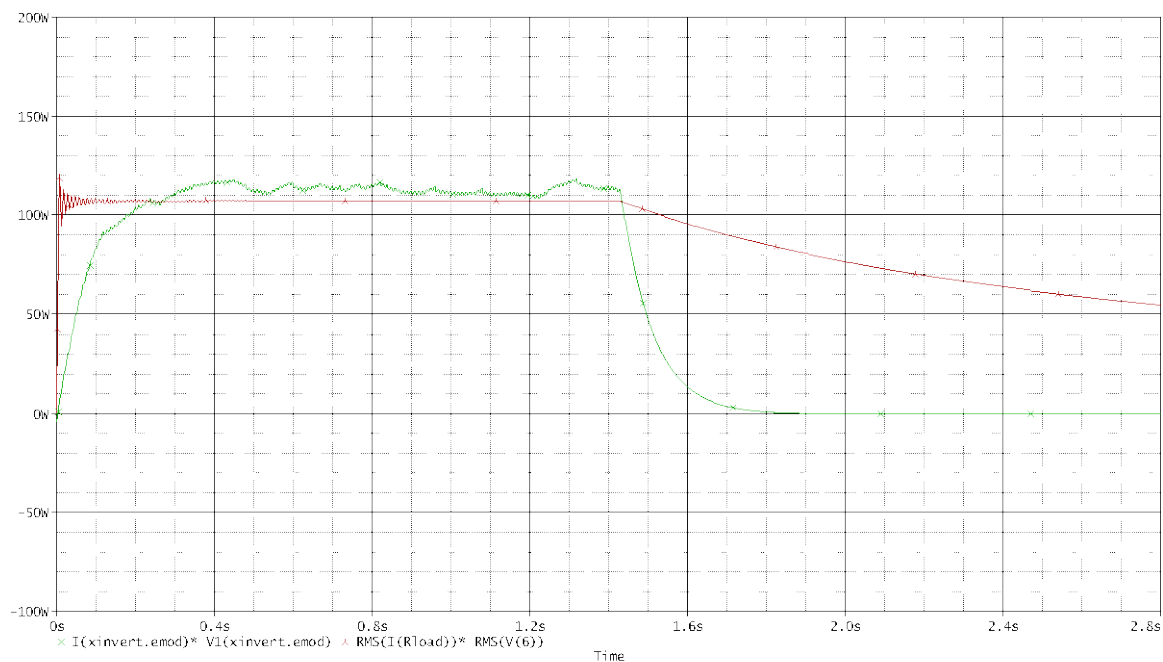
Σχήμα 3.17: Προφίλ ακτινοβολίας

Μετά την προσομοίωση του συστήματος είναι δυνατόν να σχεδιαστεί η τάση εξόδου. Στο Σχήμα 3.18 φαίνονται τα αποτελέσματα της τάσης εξόδου του εναλλάκτη μεταξύ 600ms και 900ms. Όπως φαίνεται, η έξοδος είναι ημιτονοειδής στην επιθυμητή συχνότητα.

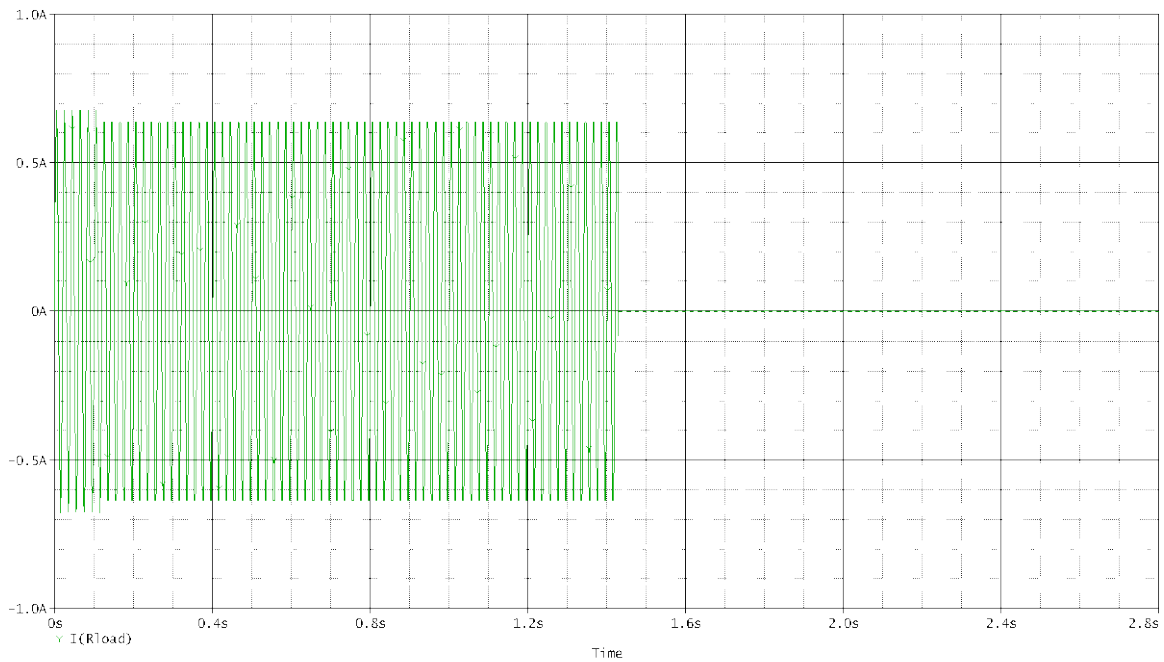


Σχήμα 3.18: Τάση εξόδου του εναλλάκτη

Το αποτέλεσμα της αποσύνδεσης του φορτίου όταν η ισχύς εισόδου είναι μικρότερη από τις απαιτήσεις του φορτίου είναι εμφανές στην γραφική παράσταση του ρεύματος εξόδου στο Σχήμα 3.20, τη χρονική στιγμή κοντά στα 1.43 s. Όταν η ισχύς στην είσοδο του εναλλάκτη μειωθεί κάτω από την αναμενόμενη ισχύ που απαιτείται από το φορτίο του εναλλάκτη, δηλαδή κάτω από 107.5 W, εξαιτίας του προφίλ της ακτινοβολίας, ο διακόπτης Swmp3 αποσυνδέει το φορτίο από την έξοδο του εναλλάκτη. Το αποτέλεσμα αυτό φαίνεται ευδιάκριτα στο Σχήμα 3.19 καθώς και στο Σχήμα 3.20.



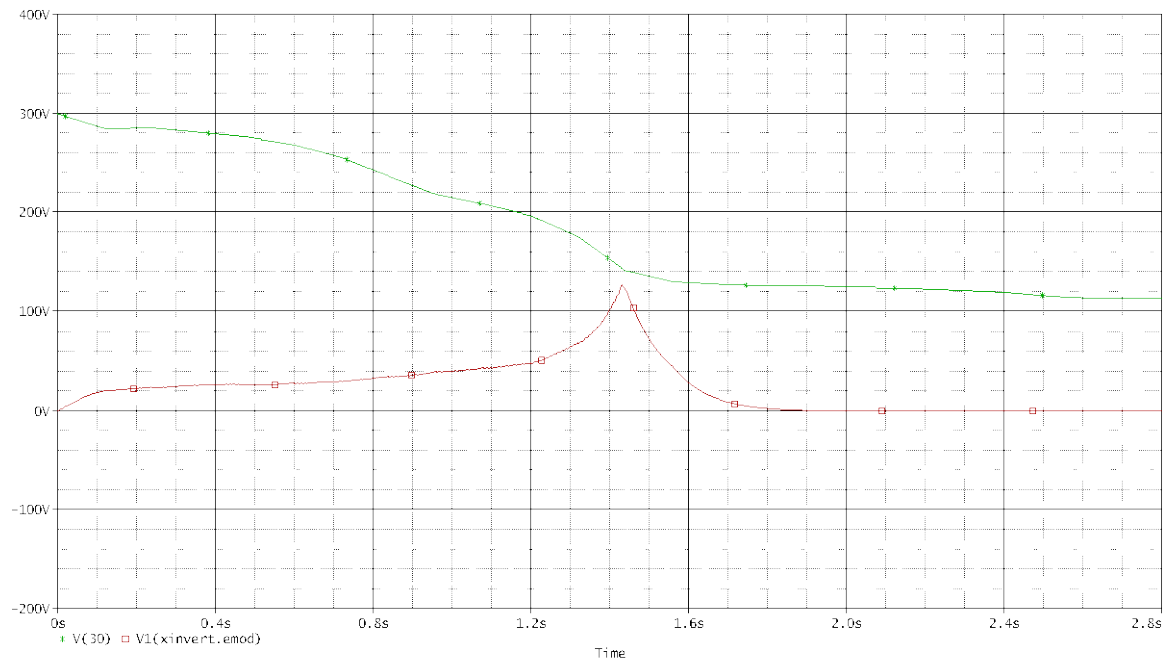
Σχήμα 3.19: Ισχύς στην είσοδο του εναλλάκτη: $V1(xinvert.emod) \cdot I(xinvert.emod)$, ισχύς που τροφοδοτείται στο φορτίο: $rms(I(Rload)) \cdot rms(V(6))$



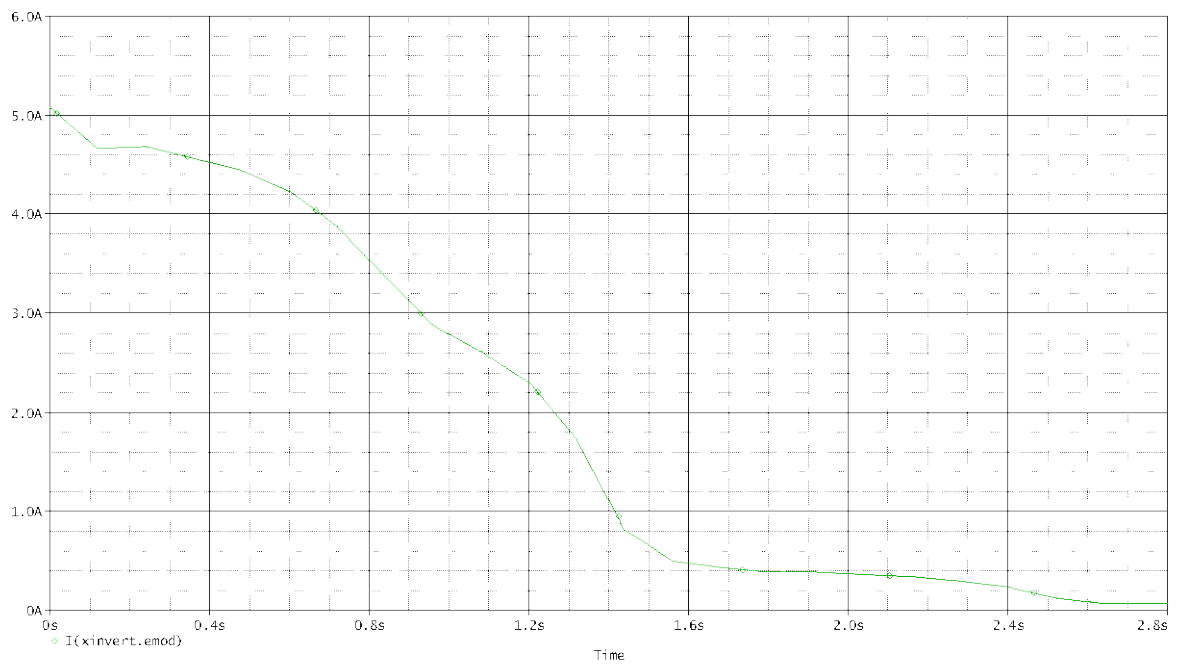
Σχήμα 3.20: Κυματομορφή ρεύματος εξόδου του εναλλάκτη

Στο Σχήμα 3.21 φαίνεται η κυματομορφή της τάσης εισόδου του εναλλάκτη, που όπως φαίνεται αυξάνεται στην αρχή της περιόδου προσομοίωσης. Αυτό οφείλεται στις τιμές τις ακτινοβολίας που σαν αποτέλεσμα έχουν την μείωση του ρεύματος εξόδου, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.22. Αυτή η μείωση οφείλεται στα τυπικά χαρακτηριστικά εισόδου του εναλλάκτη, που φαίνονται στο Σχήμα 3.3.

Το αποτέλεσμα της αποσύνδεσης μπορεί επίσης να παρατηρηθεί, όταν η εισερχόμενη ισχύς στον εναλλάκτη δεν είναι αρκετή για τις απαιτήσεις του φορτίου. Τότε, ο εναλλάκτης αποσυνδέεται από το φορτίο και η τάση εισόδου του μειώνεται σε μεγάλο βαθμό, αφήνοντας τα φωτοβολταϊκά στοιχεία εκτός κυκλώματος.



Σχήμα 3.21: Εξέλιξη της τάσης στην είσοδο του εναλλάκτη: $V1(xinvert.emod)$, εξέλιξη της τάσης στο σημείο μέγιστης ισχύος των φωτοβολταϊκών στοιχείων: $v(30)$.



Σχήμα 3.22: Κυματομορφή ρεύματος εισόδου του εναλλάκτη

3.4 ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΕΝΑΛΛΑΚΤΗ ΓΙΑ ΣΥΝΔΕΣΗ ΜΠΑΤΑΡΙΑΣ-ΕΝΑΛΛΑΚΤΗ

Σε κάποιες εφαρμογές οι εναλλάκτες δεν είναι απευθείας συνδεδεμένοι με τα φωτοβολταϊκά στο χεία αλλά μέσω κάποιου ρυθμιστή φόρτισης μπαταρίας ή μέσω της μπαταρίας. Οι απαιτήσεις αυτής της διάταξης μεταξύ μπαταρίας και εναλλάκτη είναι διαφορετικές από το μοντέλο που περιγράφηκε παραπάνω. Αυτές είναι:

- Ο έλεγχος ισχύος στην είσοδο του εναλλάκτη βασίζεται στην κανονικοποιημένη κατάσταση φόρτισης (State Of Charge: SOC). Εάν η κατάσταση φόρτισης μειωθεί κάτω από το 30% τότε ο διακόπτης S_{wmp3} αποσυνδέει το φορτίο από την έξοδο του εναλλάκτη. Η τιμή της κατάστασης φόρτισης της μπαταρίας ελέγχεται στους κόμβους 5 και 6 του εναλλάκτη.
- Είσοδος εναλλάκτη: Στην είσοδο του εναλλάκτη η πόλωση ορίζεται από μία πηγή ρεύματος, αντικαθιστώντας την πηγή τάσης του προηγούμενου μοντέλου. Αυτή η καινούρια g-συσκευή 'gindc' της οποίας η netlist περιγράφεται παρακάτω, ωθεί το ρεύμα στην είσοδο του εναλλάκτη. Το ρεύμα αυτό μπορεί να εκφραστεί ως συνάρτηση της απαίτησης ισχύος του φορτίου, της αποδοτικότητας του εναλλάκτη και της τάσης εισόδου του ως εξής:

$$I_{iDC} = \frac{V_{OAC} I_{OAC}}{nf V_{iDC}}, \quad (3.10)$$

το οποίο μπορεί να γραφτεί σε κώδικα στο Pspice ως εξής:

```
Gindc 1 3 value={v(11)*220/(nf*v(1))}
```

όπου v(11) είναι η ενεργός τιμή του ρεύματος εξόδου του εναλλάκτη, v(1) είναι η DC τάση εισόδου του εναλλάκτη, nf η αποδοτικότητα του εναλλάκτη. Η ενεργός τιμή της τάξης εξόδου θεωρείται ίση με 220 V.

3.4.1 Προσομοίωση κυκλώματος σύνδεσης μπαταρίας-εναλλάκτη.

Η netlist του εναλλάκτη που περιγράφει αυτό το μοντέλο, φαίνεται στο Σχήμα 3.23.

```
**Μοντέλο εναλλάκτη 1.0

.subckt inverter2 1 3 4 5 6 PARAMS: nf=1, Pm=1, Pload=1
**Ορίζεται το υποκύκλωμα inverter 2 , οι κόμβοι εισόδου και εξόδου καθώς και ο ι
**παράμετροί του.

eVout 8 3 value={IF (Pload<Pm, v(9), v(3))}
**Η πηγή τάσης ελεγχόμενη από τάση βρίσκεται συνδεδεμένη μεταξύ των κόμβων 8 και 3
* *και η ενίσχυση τάσης δίνεται όση στον κόμβο 9 ή όση στον κόμβο 3 ανάλογα με τις
**συνθήκες που περιγράφονται.

vsense 7 8 dc 0
**Η ανεξάρτητη πηγή τάσης βρίσκεται συνδεδεμένη μεταξύ των κόμβων 7 και 8.

Vout1 9 3 sin (0 311 50Hz)
**Η ανεξάρτητη πηγή τάσης Vout βρίσκεται μεταξύ των κόμβων 9 και 3. Υπάρχει αρμονική
**εξάρτηση με τον χρόνο όπου το ξεκίνημα μπορεί να γίνει μετά από καθυστέρηση από το
* *μηδέν. Μπορεί να έχει και εξάρτηση φθίνουσα (αρμονική) με τον χρόνο. Η απόκλιση
**ορίζεται 0 V, το πλάτος 311 V και η συχνότητα 50 Hz.
```

```

r6 6 3 1000
**Η αντίσταση R6 βρίσκεται συνδεδεμένη μεταξύ των κόμβων 6 και 3 και η τιμή της είναι
**1ΚΩ.

emppr 10 3 value={v(5)*v(6)*nf/(Pload)}
**Η emppr πηγή τάσης ελεγχόμενη από τάση βρίσκεται συνδεδεμένη μεταξύ των κόμβων 10
**και 3 και η ενίσχυση τάσης δίδεται [v(5)*v(6)*nf/(Pload)]

SWmp3 4 7 10 3 sw3mod

**Ορίζονται οι κόμβοι εισόδου και εξόδου της συσκευής SWmp3 με όνομα sw3mod.

.model sw3mod vswitch (Roff=1e+9,Ron=0.0001, voff=0.991, von=1.01}
**Μοντελοποιείται το εξάρτημα sw3mod, ορίζεται ο τύπος του (vswitch) και οι παράμετροί
**του.

ec 12 3 value={abs(i(vsense))}
*Η ελεγχόμενη πηγή ρεύματος που βρίσκεται συνδεδεμένη μεταξύ των κόμβων 12 και 3
**εξάγει την απόλυτη τιμή του ρεύματος δια μέσου της πηγής 'vsence'.

Rfiltro 11 12 1000
**Η αντίσταση Rfiltro βρίσκεται συνδεδεμένη μεταξύ των κόμβων 3 και 12 και η τιμή της
**είναι 1ΚΩ.

Cfiltro 11 3 0.000008

**Ο πυκνωτής Cfiltro βρίσκεται συνδεδεμένος μεταξύ των κόμβων 11 και 3 και η
**χωρητικότητά του είναι 8μF

gindc 1 3 value={(v(11)*220/nf*v(1))}
** Η πηγή ρεύματος ελεγχόμενη από ρεύμα gindc βρίσκεται συνδεδεμένη μεταξύ των
κόμβων 1 και 3 . Το ρεύμα που ωθεί * στην είσοδο του εναλλάκτη δίνεται
[(v(11)*220/nf*v(1))]

.ends inverter2
**Τέλος του υποκυκλώματος

```

Σχήμα 3.23: Η netlist του μοντέλου του εναλλάκτη

Το φωτοβολταϊκό σύστημα αποτελείται από:

- Τη φωτοβολταϊκή γεννήτρια: 216 ηλιακές κυψέλες συνδεδεμένες σε σειρά. Το ρεύμα βραχυκυκλώσεως είναι $i_{scmr}=5A$, η τάση ανοιχτοκύκλωσης είναι $u_{ocmr}=130V$, η μέγιστη τάση εξόδου είναι $P_{maxr}=480W$, και στο σημείο μέγιστης ισχύος: $i_{mppr}=4.7A$, $u_{mppr}=102V$. Το μοντέλο φωτοβολταϊκής γεννήτριας που χρησιμοποιείται είναι διαφορετικό από αυτό που χρησιμοποιήθηκε προηγουμένως. Έχουν γίνει κάποιες απλοποιήσεις με σκοπό να μειωθεί ο απαιτούμενος χρόνος προσομοίωσης. Αυτό απαιτείται εξαιτίας της ύπαρξης κάποιων μη γραμμικών συσκευών στο σύστημά μας (η φωτοβολταϊκή γεννήτρια από μόνη της, η μπαταρία, η δίοδος, οι μετατροπείς).

Η netlist που περιγράφει τη φωτοβολταϊκή γεννήτρια στο Pspice, φαίνεται στο Σχήμα 3.24.

```

****Το κύκλωμα της φωτοβολταϊκής γεννήτριας (pvmodule mpp.cir)
.subckt moduleppt 10 12 13 14 15 17 params: iscmr=1,ta=1, tempr=1, vocmr=1,ns=1,np=1,
nd=1,
+ pmaxr=1,imppr=1,vmppr=1
**Ορίζεται το υποκύκλωμα moduleppt, οι κόμβοι εισόδου και εξόδου καθώς και οι
**παράμετροί του.

girrad 10 11 value={{(iscmr/1000*v(12))}}
** Η πηγή ρεύματος ελεγχόμενη από ρεύμα girrad βρίσκεται συνδεδεμένη μεταξύ των
**κόμβων 10 και 11 και η τιμή του ρεύματος δίνεται [(iscmr/1000*v(12))]

d1 11 10 diode
**Η δίοδος d1 με όνομα diode βρίσκεται συνδεδεμένη μεταξύ των κόμβων 11 και 10

.model diode d(is={{iscmr/(np*exp(vocmr/(N*uvet)))}}, n={{N}})
** Με την εντολή αυτή μοντελοποιείται η δίοδος και εισάγονται οι παράμετροί της.

.func N() {ns*nd}
Rirrad 12 10 100000
**Η αντίσταση Rirrad βρίσκεται συνδεδεμένη μεταξύ των κόμβων 12 και 10 και η τιμή της
είναι 100KΩ

Rtemp 13 10 1000000
**Η αντίσταση Rtemp βρίσκεται συνδεδεμένη μεταξύ των κόμβων 13 και 10 και η τιμή της
είναι 1MΩ

vtemp 13 10 dc {tempr}
**Η ανεξάρτητη πηγή τάσης βρίσκεται συνδεδεμένη μεταξύ των κόμβων 13 και 10.

rsm 11 14 {RSM}
.func RSM() {vocmr/iscmr-pmaxr/(ffom*iscmr^2)}
.func ffom() {(vocmnorm-log(vocmnorm+0.72))/(1+vocmnorm)}
.func uvet() {8.66e-5*(tempr+273)}
.func vocmnorm() {vocmr/(nd*ns*uvet)}
**Στις παραπάνω εντολές ορίζονται οι αντίστοιχες συναρτήσεις και τα ορίσματα τους.

****Έυρεση μέγιστου σημείου ισχύος (MPP calculation)

gimout 10 15 value={iscmr*(v(12)/1000)}
** Η πηγή ρεύματος ελεγχόμενη από ρεύμα gimout βρίσκεται συνδεδεμένη μεταξύ των
**κόμβων 10 και 15 και η τιμή του ρεύματος δίνεται [iscmr*(v(12)/1000)]

evdc 16 10 value={0.004*(v(13)-tempr)+(0.12e-3*v(12))+0.06*log(1000/v(12))*vocmr}
**Η πηγή τάσης ελεγχόμενη από τάση evdc βρίσκεται συνδεδεμένη μεταξύ των κόμβων 16
**και 10 και η τιμή του ρεύματος δίνεται
**[0.004*(v(13)-tempr)+(0.12e-3*v(12))+0.06*log(1000/v(12))*vocmr]

envmpprout 17 10 value={ vmppr-v(16)}
**Η πηγή τάσης ελεγχόμενη από τάση envmpprout βρίσκεται συνδεδεμένη μεταξύ των κόμβων
**17 και 10 και η τιμή του ρεύματος δίνεται [vmppr-v(16)]

.ENDs moduleppt
**Τέλος του υποκυκλώματος

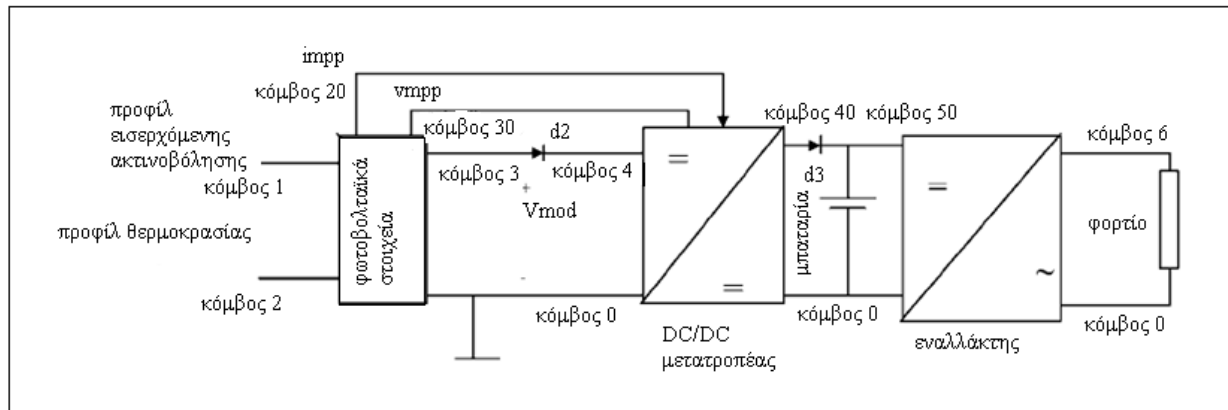
```

Σχήμα 3.24: Η netlist που περιγράφει τη φωτοβολταϊκή γεννήτρια στο Pspice

Τα υπόλοιπα στοιχεία του συστήματος και τα χαρακτηριστικά τους είναι τα παρακάτω:

- DC/DC μετατροπέας με αποδοτικότητα 100% και τάση εξόδου 28V.
- Μπαταρία: Τάση μπαταρίας 24 V, χωρητικότητα μπαταρίας $C=471 \text{ Ah}$, αποδοτικότητα φόρτισης-αποφόρτισης 0,91, ρυθμός αυτοεκφόρτισης $D=10^{-9} \text{ h}^{-1}$ και αρχική κατάσταση φόρτισης μπαταρίας (initial state of charge), $\text{SOC}_1=0.65\%$
- Εναλλάκτης με αποδοτικότητα $\eta_f=0.9$ και μέγιστη AC ισχύ εξόδου, $P_m=500\text{W}$.
- Φορτίο: συνολική ισχύς που απαιτείται από το φορτίο, $P_{\text{load}}=350\text{W}$, $R_{\text{load}}=138\Omega$.
- Δύο δίοδοι: d2 και d3.

Το Σχήμα 3.25 απεικονίζει το σχηματικό διάγραμμα του συστήματος.



Σχήμα 3.25: Σχηματικό διάγραμμα του συστήματος.

Η netlist στο Pspice του ολοκληρωμένου συστήματος του σχήματος 3.25, φαίνεται στο Σχήμα 3.26.

```
.inc moduleppt.cir
**Με την εντολή αυτή το πρόγραμμα συμπεριλαμβάνει το αρχείο moduleppt.cir

xmodule 0 1 2 3 20 30 moduleppt params: iscmr=5, tempr=25, vocmr=130,
+ ns=216,np=1,nd=1,pmaxr=480,imppr=4.7,vmppr=102,ta=25
**Καλείται το αρχείο module, ορίζονται οι ακροδέκτες του και οι παράμετροι του
εξαρτήματος

.inc april.stl
**Με την εντολή αυτή το πρόγραμμα συμπεριλαμβάνει το αρχείο april.stl

vmesur 1 0 stimulus Virrad
**Η ανεξάρτητη πηγή τάσης vmesur βρίσκεται συνδεδεμένη μεταξύ των κόμβων 1 και 0 με
**τιμή τάσης που προέρχεται από το αρχείο Virrad.

r111 20 0 1
**Η αντίσταση R111 βρίσκεται συνδεδεμένη μεταξύ των κόμβων 20 και 0 και η τιμή της
**αντίστασης είναι 1Ω.

d2 3 4 diode
**Η δίοδος d2 με όνομα diode έχει τον θετικό της ακροδέκτη συνδεδεμένο στον κόμβο 3
**και τον αρνητικό στον κόμβο 4.

.model diode d(n=1)
```



```

** Με την εντολή αυτή μοντελοποιείται η δίοδος και εισάγονται οι παράμετροί της.

.inc dcdcf.cir
**Με την εντολή αυτή το πρόγραμμα συμπεριλαμβάνει το αρχείο dcdcf.cir

xconv 0 4 20 30 40 dcdcf params: n=1, vo1=28
**Καλείται το αρχείο xconv ορίζονται οι ακροδέκτες του και οι παράμετροι του εξαρτήματος

d3 40 50 diode
**Η δίοδος d3 με όνομα diode έχει τον θετικό της ακροδέκτη συνδεδεμένο στον κόμβο 40
**και τον αρνητικό στον κόμβο 50.

.inc batstdif.cir
**Με την εντολή αυτή το πρόγραμμα συμπεριλαμβάνει το αρχείο batstdif.cir

xbat 50 0 100 batstdif PARAMS: ns=12, SOCm=11304, k=0.91, D=1e-9, SOC1=0.65
**Καλείται το αρχείο xbat ορίζονται οι ακροδέκτες του και οι παράμετροι του εξαρτήματος

.inc inverter2.cir
**Με την εντολή αυτή το πρόγραμμα συμπεριλαμβάνει το αρχείο inverter3.cir

xinvert 50 0 6 100 100 inverter3 params: nf=0.9, Pm=500, Pload=350
**Καλείται το αρχείο xinvert ορίζονται οι ακροδέκτες του και οι παράμετροι του
**εξαρτήματος

rload 6 0 139
**Η αντίσταση Rload έχει βρίσκεται συνδεδεμένη μεταξύ των κόμβων 6 και 0 και η τιμή
**της αντίστασης είναι 139Ω.

.options abstol=0.1mA Vntol=0.001
**Ορίζεται η ανοχή σφάλματος του ρεύματος

.tran 0.1s 0.3s
**Το πρόγραμμα θα εκτελέσει transient analysis για 0,3seconds με βήμα 0,1 second.

.probe
**Προβολή των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης σε γραφική μορφή

.end
**Τέλος του προγράμματος

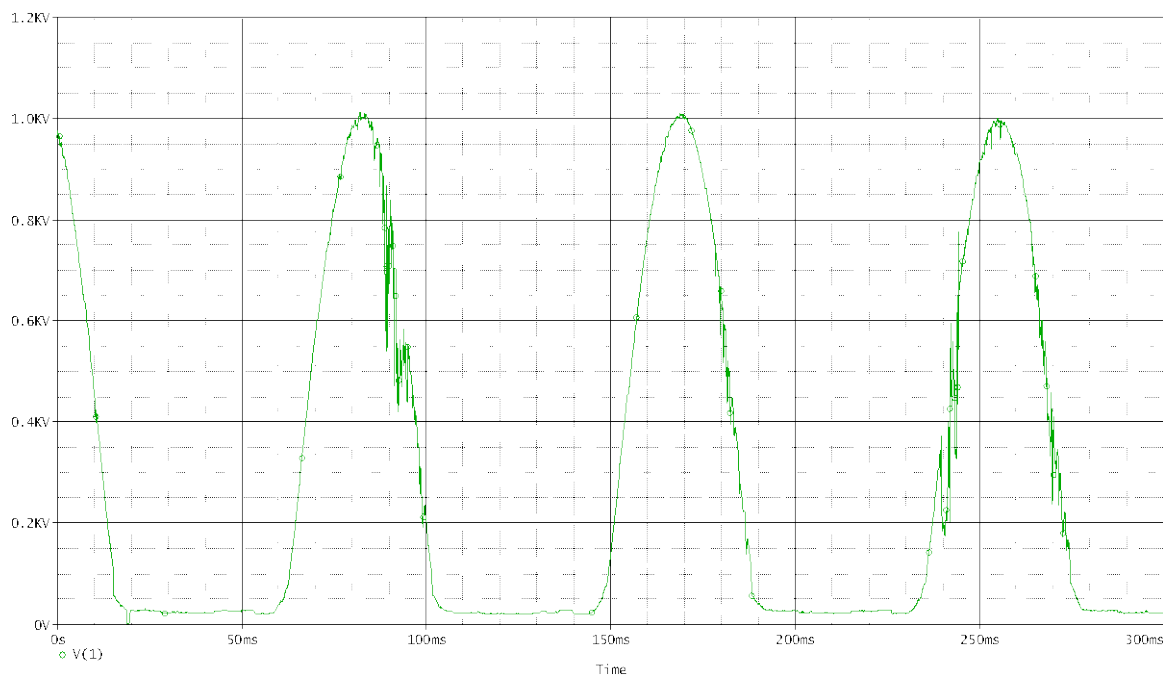
```

Σχήμα 3.26: Η netlist του κυκλώματος σύνδεσης μπαταρίας-εναλλάκτη

Το αρχείο moduleppt.cir περιγράφει ένα απλουστευμένο μοντέλο φωτοβολταϊκής γεννήτριας, το αρχείο 'april.stl' παρέχει το προφίλ της ακτινοβολίας για τέσσερις ημέρες του Απριλίου στην Μπαρτσελόνα. Το αρχείο dcdcf.cir περιγράφει το μοντέλο του DC/DC μετατροπέα στο Pspice, το αρχείο batstdif.cir περιγράφει ένα απλουστευμένο κύκλωμα μπαταρίας στο Pspice και τέλος το αρχείο inverter2.cir περιγράφει τη συμπεριφορά μοντέλου εναλλάκτη στο Pspice.

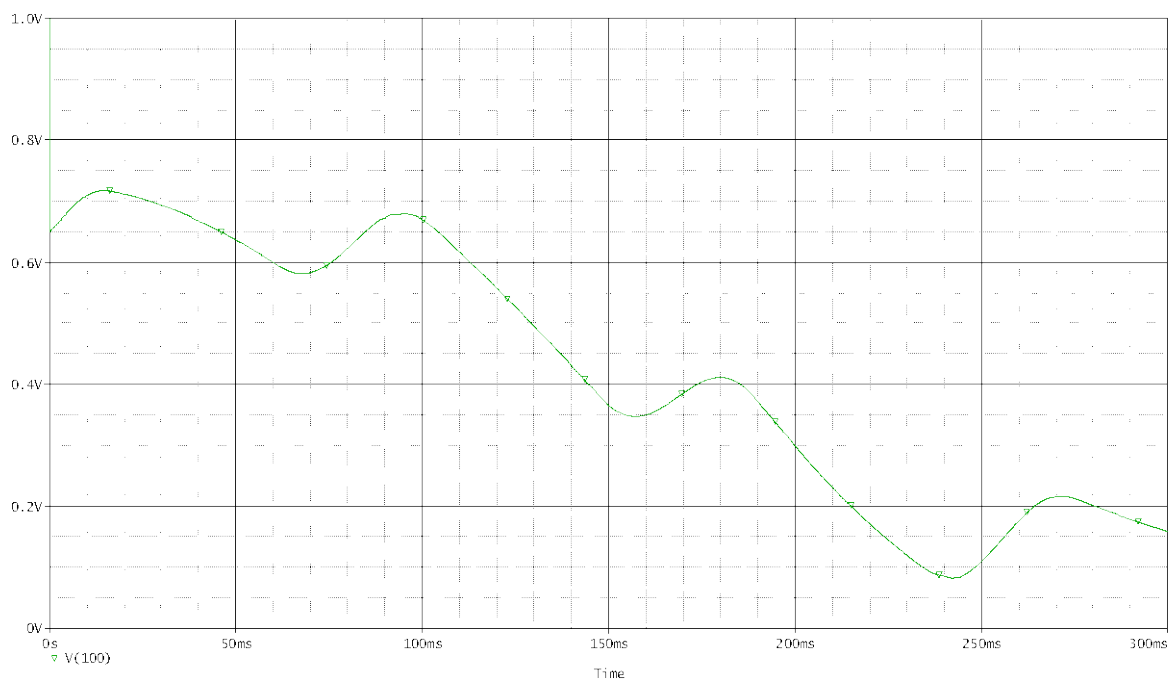
Όλα τα αρχεία τα οποία συμπεριλαμβάνονται στο πρόγραμμα με την εντολή .inc παρέχονται στις βιβλιοθήκες του Pspice[3.3].

Το προφίλ της ακτινοβολίας που φαίνεται στο Σχήμα 3.27 αντιστοιχεί σε τέσσερις ημέρες του Απριλίου στην Barcelona και δίδεται από το αρχείο 'april.stl'. Η κλίμακα του χρόνου όπως φαίνεται έχει μονάδες σε ms με σκοπό να μειωθεί ο χρόνος της προσομοίωσης.



Σχήμα 3.27: Προφίλ ακτινοβολίας.

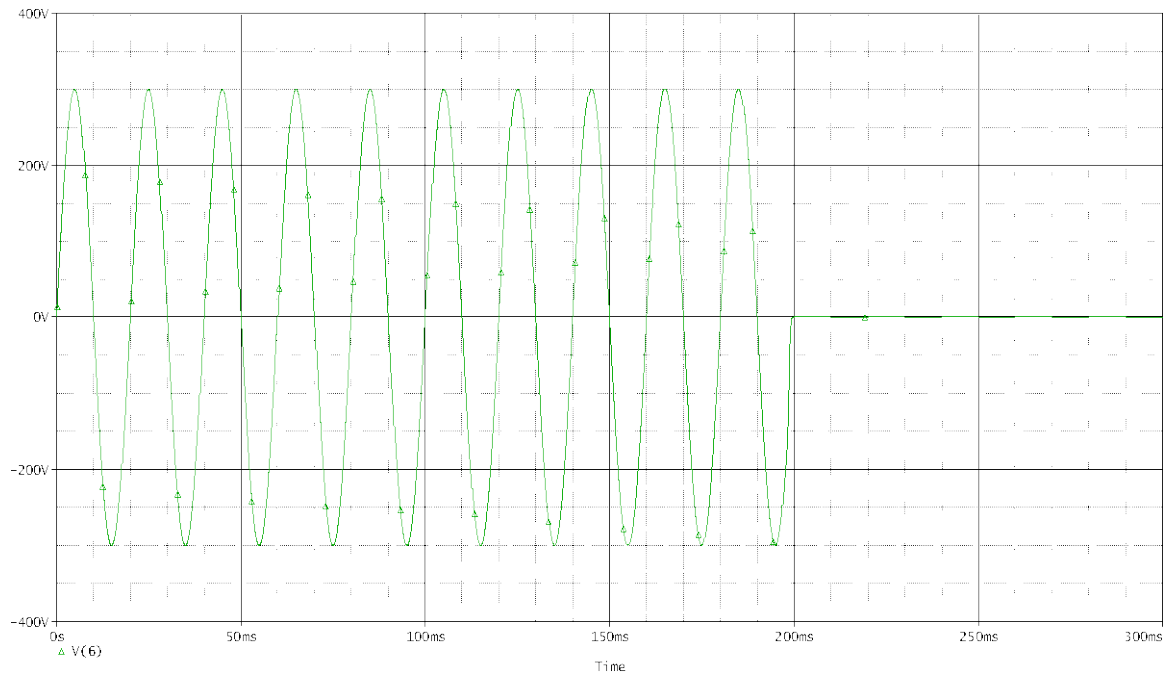
Η εξέλιξη της κατάστασης φόρτισης της μπαταρίας (SOC) φαίνεται στο Σχήμα 3.28.



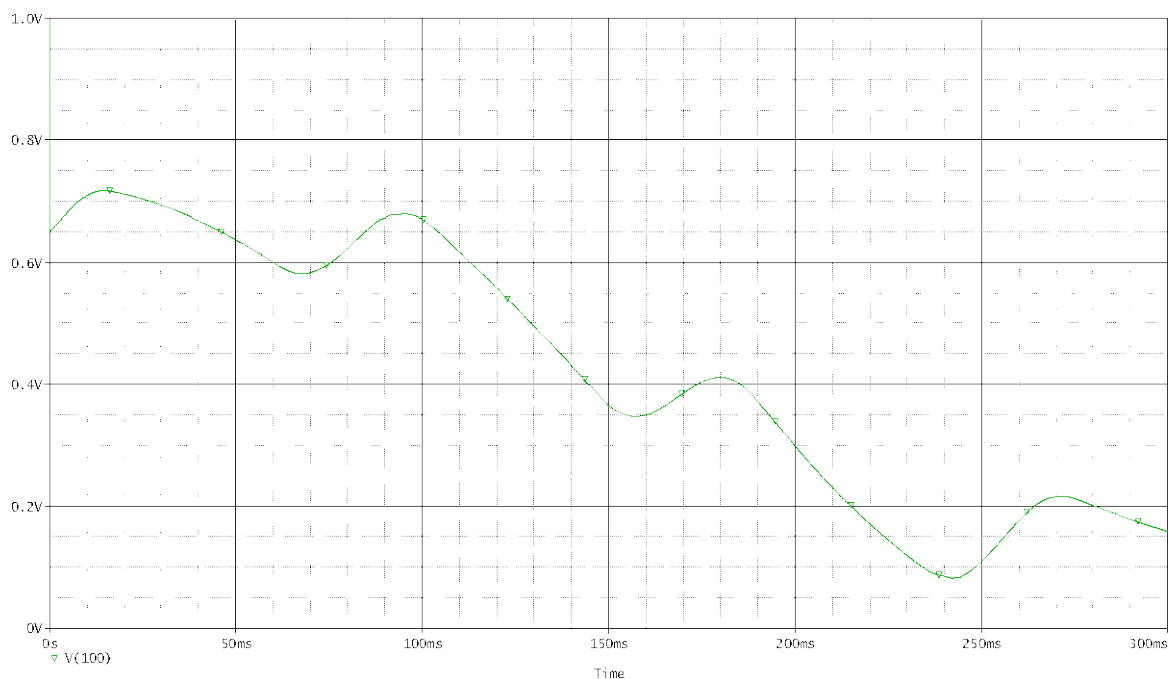
Σχήμα 3.28: Εξέλιξη της κατάστασης φόρτισης της μπαταρίας.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.28 η κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας, ξεκινά με αρχική τιμή SOC=0.65% και τελική SOC=0.16%.

Είναι επίσης εύκολο να εντοπιστεί το αποτέλεσμα της αποσύνδεσης του εναλλάκτη από το φορτίο. Στο Σχήμα 3.29 καταγράφεται η τάση εξόδου του εναλλάκτη. Όπως φαίνεται σε αντιπαράθεση με το Σχήμα 3.30, όταν η κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας είναι μικρότερη από 30% η έξοδος του εναλλάκτη αποσυνδέεται από το φορτίο. Η συχνότητα της τάσης εξόδου του εναλλάκτη είναι 50Hz. Η προσομοίωση τελειώνει μετά από 0.3 s. Αυτός ο χρόνος όμως δεν είναι ο πραγματικός χρόνος αφού όπως αναφέρθηκε έχει μεταβληθεί η κλίμακα του χρόνου χάριν συντομίας. Η πραγματική διάρκεια είναι 83.3 h. Για τον ίδιο λόγο δεν έχει πειραχτεί η κλίμακα της συχνότητας στην έξοδο του εναλλάκτη. Η αποσύνδεση συμβαίνει σε χρόνο 199.57 ms, όπου ο χρόνος αυτός μετράται από το πρόγραμμα και αντιστοιχεί σε πραγματικό χρόνο λειτουργίας 5543 ωρών. Προφανώς, ο αριθμός των κύκλων της τάσης εξόδου του εναλλάκτη δεν ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα.

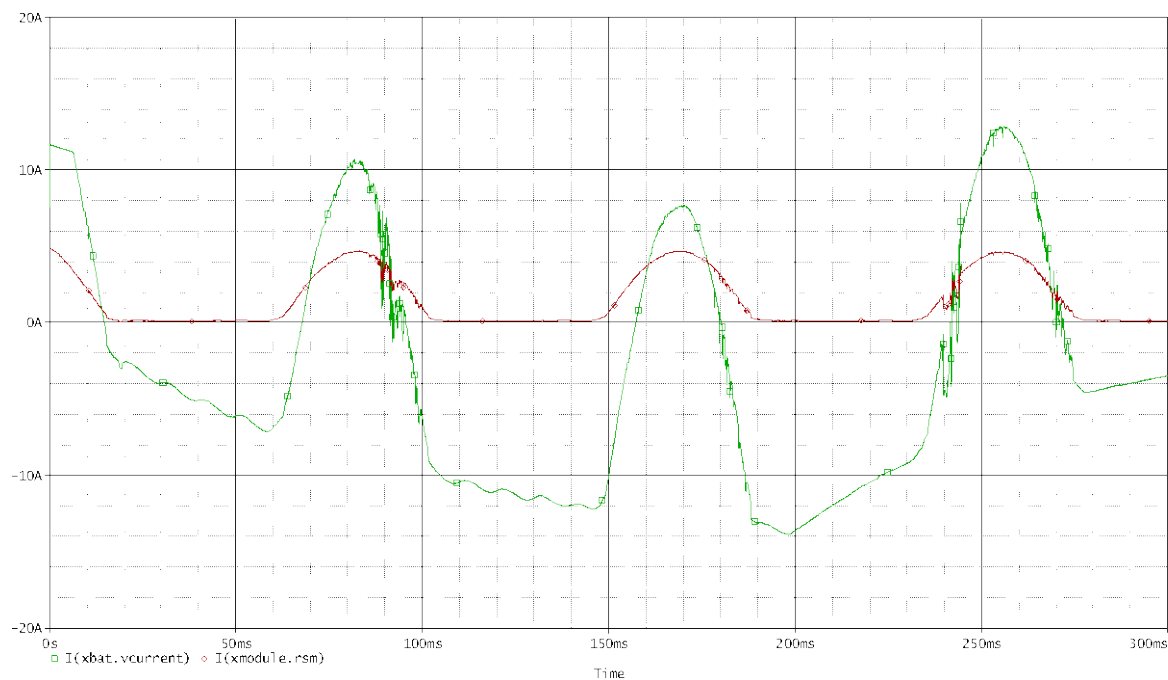


Σχήμα 3.29: Τάση εξόδου του εναλλάκτη



Σχήμα 3.30: Κατάσταση φόρτισης

Τα αποτελέσματα της κυματομορφής του ρεύματος της μπαταρίας και του ρεύματος που τροφοδοτεί η φωτοβολταϊκή γεννήτρια φαίνονται παρακάτω, στο Σχήμα 3.31.



Σχήμα 3.31: $I(xbat.vcurrent)$: κυματομορφή ρεύματος μπαταρίας, $I(xmodule.rsm)$: κυματομορφή ρεύματος εξόδου των φωτοβολταϊκών στοιχείων.

Η θετική τιμή του ρεύματος υποδηλώνει ότι η μπαταρία φορτίζει.

3.5 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [3.1] Hui, S.Y., Shrivastava, Yash, Shatiakumar, S., Tse, K.K., and Chung, Henry, Shu-Hung, 'A comparison of non deterministic and deterministic switching methods for dc-dc power converters', IEEE Transactions on Power Electronics, 13(6), 1046–55, November 1998.
- [3.2] Rashid, Muhammad, H., PSpice Simulations of Power Electronics, selected Readings', IEEE, 1996.
- [3.3] Luis Castaner and Santiago Silvestre, Modelling Photovoltaic Systems Using Pspice, pp. 154-175, England 2002

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Ένα φωτοβολταϊκό σύστημα απαραιτήτως πρέπει να περιλαμβάνει μια μονάδα αποθήκευσης και διαχείρισης της ενέργειας για την συνεχή εξυπηρέτηση του καταναλωτή. Παράλληλα, πρέπει να εξασφαλίζονται συγκεκριμένες προϋποθέσεις για την σωστή λειτουργία της μπαταρίας. Με σκοπό να αποτρέψουμε την μπαταρία από καταστάσεις υπερφόρτισης ή αποφόρτισης, καθίσταται σημαντική η αποτελεσματική διαχείριση της ροής. Όπως αναφέρθηκε οι βασικοί τύποι ηλεκτρονικών ρυθμιστών που χρησιμοποιούνται συνήθως για την διαχείριση φόρτισης της μπαταρίας είναι οι παράλληλοι ή σε σειρά ρυθμιστές. Και στις δύο περιπτώσεις έχουμε τα επιθυμητά αποτελέσματα με τη μόνη διαφορά ότι στην σε σειρά ρύθμιση οι απώλειες από τους επαναθέτες (relays), είναι ελάχιστες σε σχέση με αυτές ενός αντιστάτη ή ενός τρανζίστορ που χρησιμοποιούνται στην παράλληλη ρύθμιση.

Ο εξοπλισμός προστασίας και ελέγχου έχει σκοπό να προστατεύσει το σύστημα από τις επιβλαβείς ηλεκτρικές διαταραχές που προέρχονται από το εξωτερικό περιβάλλον, να συμβάλει στην μείωση απωλειών και τελικά να εξασφαλίζει στη φωτοβολταϊκή γεννήτρια να λειτουργεί όσο πιο κοντά γίνεται στο σημείο μέγιστης ισχύος. Ο στόχος μας είναι το σημείο λειτουργίας να συμπίπτει με το βέλτιστο σημείο λειτουργίας. Αυτός εξάλλου είναι και ο κύριος λόγος που χρησιμοποιούμε τα κυκλώματα ανίχνευσης βέλτιστου σημείου λειτουργίας. Οι ανιχνευτές βέλτιστου σημείου λειτουργίας είναι πρακτικά DC/DC μετατροπείς που χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες, τους μειωτές τάσεως (buck converters) και τους επωθητικούς μετατροπείς (boost converters). Και στις δύο περιπτώσεις, είναι δυνατόν να μεταβάλλουμε τον παράγοντα δράσης (duty cycle) με τέτοιο τρόπο ώστε η τάση εισόδου να οδηγεί στο σημείο μέγιστης ισχύος, ανάλογα πάντα με τις απαιτήσεις σε τάση στην έξοδο.

Τα αποτελέσματα προσομοιώσεων φωτοβολταϊκού συστήματος με φωτοβολταϊκή γεννήτρια, DC/DC μετατροπέα, φορτίο και ανιχνευτή μέγιστου σημείου ισχύος δείχνουν ότι ο DC/DC μετατροπέας ανιχνεύει σωστά το σημείο μέγιστης ισχύος στο σύστημά μας.

Το σύστημα προστασίας και ελέγχου που προτείνεται, αφορά μια τροποποιημένη μέθοδο αύξησης αγωγιμότητας που οδηγεί σε ομαλή μετάβαση στο σημείο μέγιστης ισχύος. Ο προτεινόμενος MPPT ελεγκτής ρυθμίζει την τάση αναφοράς ανάλογα με την κλίση της ισχύος και έτσι εξασφαλίζεται το πλεονέκτημα ομαλής και ραγδαίας μετάβασης στο σημείο μέγιστης ισχύος. Επιπλέον η συγκεκριμένη μέθοδος μπορεί να εφαρμόσει τον MPPT αλγόριθμο χωρίς να χρειάζεται να είναι γνωστή η διαφορά τάσης του φωτοβολταϊκού συστήματος V_{PV} , δηλαδή δεν χρειάζεται η χρήση ελεγκτή τάσεως της φωτοβολταϊκής συστοιχίας. Προτείνεται όμως η χρήση ρυθμιστή έντασης ώστε να εξασφαλιστεί ισχύς στο κύκλωμα με έναν σχεδόν ενιαίο παράγοντα ισχύος και αυτό γίνεται χρησιμοποιώντας τη μέθοδο της γραμμικής ανάδρασης (feedback linearization concept.) Η διαταραχή της τάσης παρατηρείται χρησιμοποιώντας μια τεχνική γρήγορης επαίσθησης. Όλες οι λειτουργίες ελέγχου εκτελούνται πλήρως από ένα λογισμικό με τη βοήθεια ενός μικροελεγκτή (single-chip microcontroller). Έτσι το Σύστημα Προστασίας και Ελέγχου (PCS) που προτείνεται απαιτεί ελάχιστο hardware και ελάχιστο κόστος. Πειραματικά αποτελέσματα της εφαρμογής αυτής σε πρωτότυπο 2 KW αποδεικνύουν την αποδοτικότητά της[4.1].

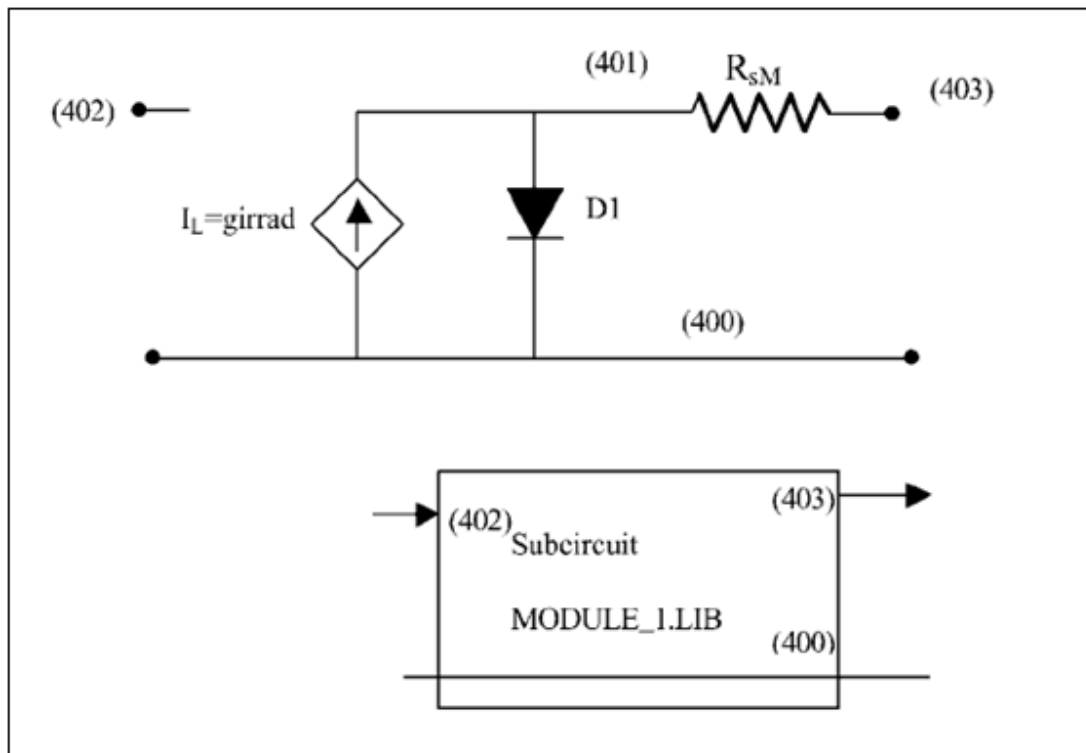
Επιπλέον ένα φωτοβολταϊκό σύστημα είναι απαραίτητο να περιλαμβάνει εναλλάκτες (inverters) για την μετατροπή της ισχύος συνεχούς σε εναλλασσόμενο (DC/AC). Σκοπός των συστημάτων μετατροπής ισχύος είναι η κατάλληλη ρύθμιση των χαρακτηριστικών του παραγόμενου ρεύματος, ώστε να καταστεί δυνατή η τροφοδοσία των διαφόρων

καταναλώσεων. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης σε μία από τις πιο κοινές διατάξεις (εναλλάκτης τετραγωνικού παλμού), δείχνουν ότι η αποδοτικότητά του φτάνει το 90%. Στην περίπτωση απευθείας σύνδεσης φωτοβολταϊκής γεννήτριας-εναλλάκτη παρατηρούμε ότι η τάση εξόδου είναι ημιτονοειδής στην επιθυμητή συχνότητα. Σημαντική παρατήρηση επίσης στην ίδια περίπτωση είναι η αποσύνδεση του εναλλάκτη από το φορτίο, όταν η ισχύς εισόδου είναι μικρότερη από τις απαιτήσεις του φορτίου. Σαν αποτέλεσμα έχουμε την μείωση της τάσης εισόδου του εναλλάκτη σε μεγάλο βαθμό, αφήνοντας τα φωτοβολταϊκά στοιχεία εκτός κυκλώματος. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι ο εναλλάκτης δρά σαν εξοπλισμός προστασίας και ελέγχου. Στην περίπτωση απευθείας σύνδεσης μπαταρίας-εναλλάκτη παρατηρούμε την αποσύνδεση του φορτίου από την έξοδο του εναλλάκτη εάν η κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας μειωθεί κάτω από 30% γεγονός που οδηγεί στο ίδιο συμπέρασμα με το παραπάνω.

ΑΡΧΕΙΑ ΤΟΥ PSICE

II.1 ΤΟ ΑΡΧΕΙΟ MODULE_1.LIB

Το αρχείο module_1.lib περιγράφει το μοντέλο της φωτοβολταϊκής μονάδας. Το μοντέλο αυτό περιλαμβάνει μια δίοδο, μια πηγή ρεύματος ελεγχόμενη από ρεύμα και μία αντίσταση, συνδεδεμένα μεταξύ τους όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.



Σχήμα 1: Το μοντέλο του υποκυκλώματος της φωτοβολταϊκής γεννήτριας στο Pspice

Ο κόμβος 400 είναι ο κόμβος αναφοράς, ο κόμβος 401 είναι ο κόμβος εισόδου, ο κόμβος 402 είναι ο κόμβος εισόδου δεδομένων ακτινοβολίας και ο κόμβος 403 είναι ο κόμβος εξόδου.

Η netlist του μοντέλου της φωτοβολταϊκής μονάδας φαίνεται στο Σχήμα 2.

```
.subckt module_1 400 403 402 params: ta=1, tr=1, iscmr=1, pmaxmr=1, vocmr=1,
+ ns=1, np=1, nd=1
**Ορίζεται το υποκύκλωμα module_1, οι κόμβοι εισόδου και εξόδου καθώς και οι
**παράμετροί του.

    girradm 400 401 value={{(iscmr/1000*v(402))}}
** Η πηγή ρεύματος ελεγχόμενη από ρεύμα girradm βρίσκεται συνδεδεμένη μεταξύ των
**κόμβων 400 και 401 και η τιμή του ρεύματος δίνεται όση μέσα στην αγκύλη
```

```

d1 401 400 diode
**Η δίοδος d1 με όνομα diode βρίσκεται συνδεδεμένη μεταξύ των κόμβων 11 και 10

.model diode d(is={iscmr/(np*exp(vocmr/(nd*ns*(8.66e-5*(tr+273))))}),n={nd*ns})
** Με την εντολή αυτή μοντελοποιείται η δίοδος και εισάγονται οι παράμετροί της.

.func uvet() {8.66e-5*(tr+273)}
.func vocnorm() {vocmr/(nd*ns*uvet)}
.func rsm() {vocmr/(iscmr- pmaxmr*(1+vocnorm))/(iscmr**2*(vocnorm-
+ log((vocnorm)+0.72)))}
**Στις παραπάνω εντολές ορίζονται οι αντίστοιχες συναρτήσεις και τα ορίσματά τους.

rs 401 403 {rsm()}
.ends module_1
**Τέλος του υποκυκλώματος

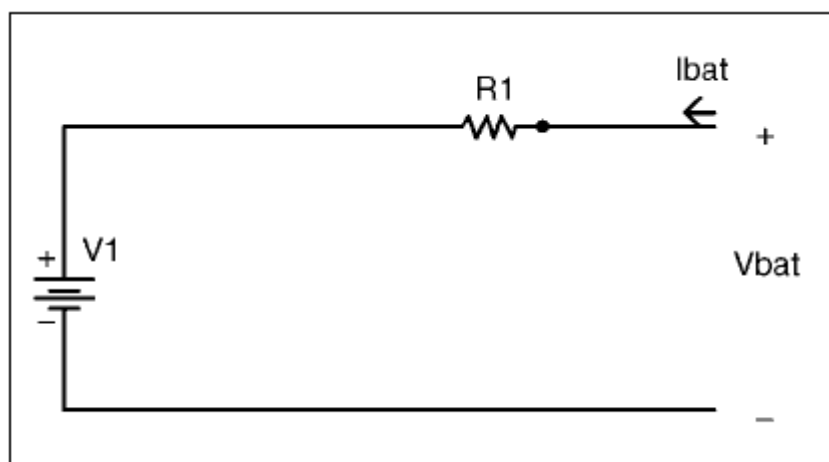
```

Σχήμα 2: Η netlist του μοντέλου της μπαταρίας

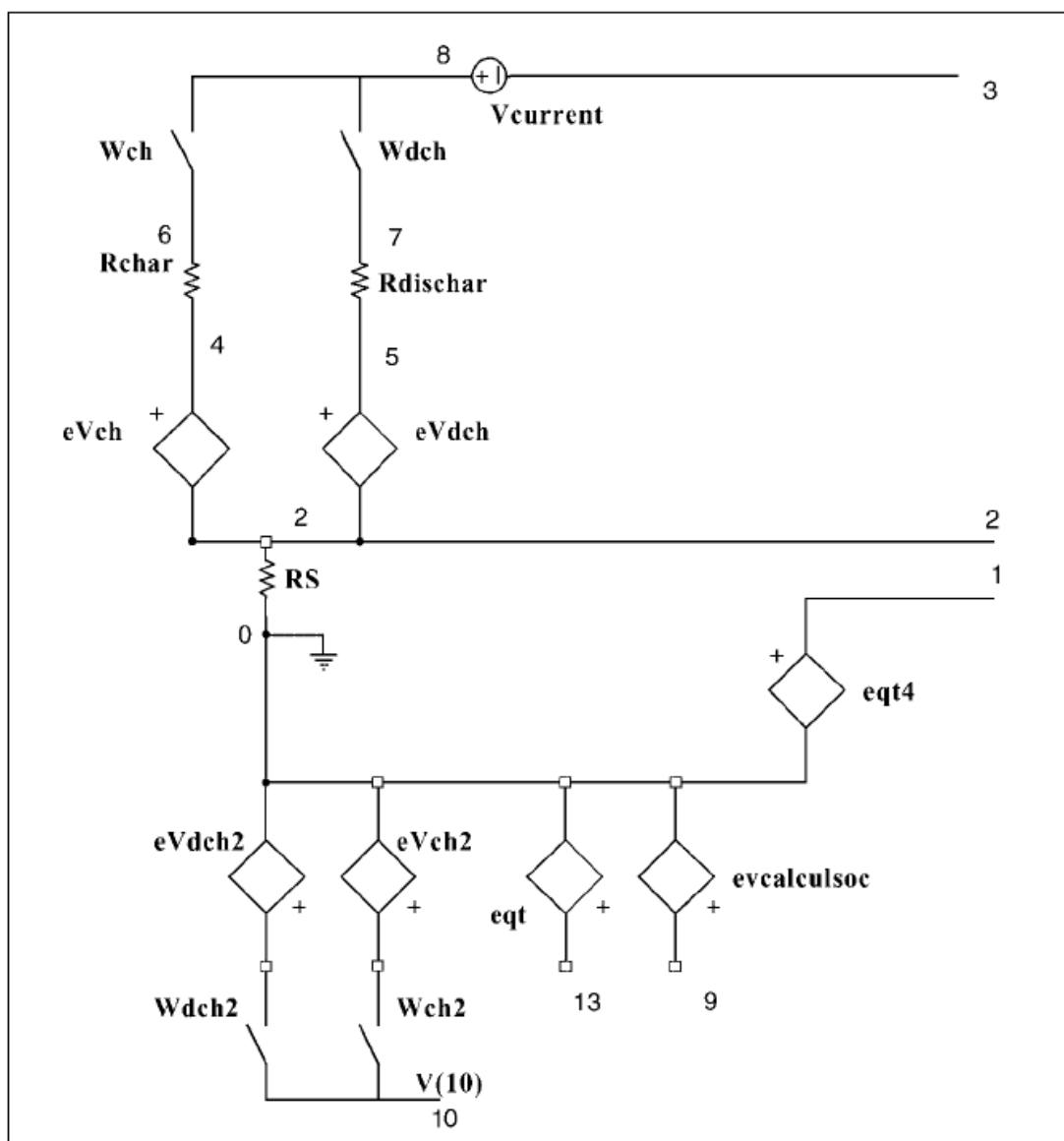
Π.2 ΤΟ ΑΡΧΕΙΟ BAT.CIR

Το αρχείο bat.cir περιγράφει το μοντέλο της μπαταρίας μολύβδου. Στο Σχήμα 3, παρουσιάζεται το ηλεκτρικό μοντέλο της μπαταρίας. Αυτό αποτελείται από μια πηγή τάσης V_1 , συνδεδεμένη σε σειρά με μια αντίσταση R_1 . Οι τιμές V_1 και R_1 διαφέρουν, ανάλογα αν η μπαταρία φορτίζεται ή αποφορτίζεται.

Στο Σχήμα 4 παρουσιάζεται το σχηματικό διάγραμμα του ισοδύναμου κυκλώματος της μπαταρίας. Το κύκλωμα αυτό περιλαμβάνει δυο τάσεις ελεγχόμενες από τάση, τις v_{ch} και v_{dch} , οι οποίες εφαρμόζουν τάση V_{ch} και V_{dch} αντίστοιχα. Η αλλαγή της κατάστασης της μπαταρίας από φόρτιση σε αποφόρτιση επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας δυο διακόπτες ελεγχόμενους από ρεύμα, τους W_{ch} και W_{dch} . Οι διακόπτες αυτοί συνδέουν τους κόμβους εξόδου της μπαταρίας σε πηγή τάσης ή σε αντίσταση αντίστοιχα, ανάλογα με το πρόσημο του ρεύματος (I_{bat}). Το θετικό πρόσημο σημαίνει ό t η μπαταρία φορτίζει ενώ το αρνητικό σημαίνει ότι η μπαταρία αποφορτίζεται. Το πρόσημο αυτό γίνεται αντιληπτό από την πηγή $V_{current}$ που φαίνεται και στο Σχήμα 4.

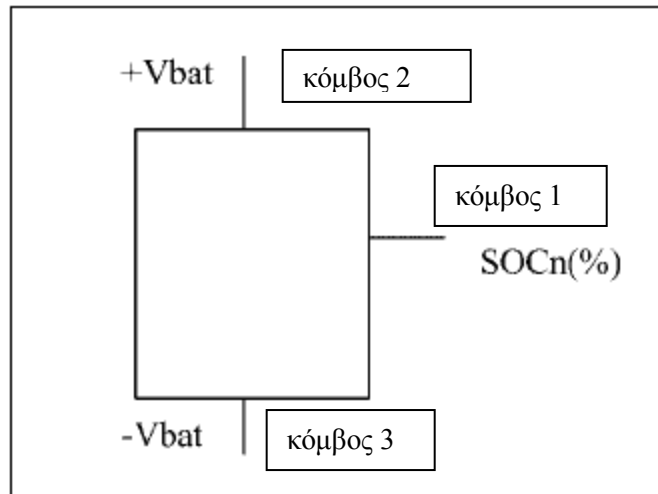


Σχήμα 3: Το μοντέλο της μπαταρίας



Σχήμα 4: Σχηματικό διάγραμμα του ισοδύναμου κυκλώματος της μπαταρίας

Στο Σχήμα 5 παρουσιάζεται το σχηματικό διάγραμμα της μπαταρίας στο οποίο φαίνονται οι κόμβοι πρόσβασης.



Σχήμα 5: Σχηματικό διάγραμμα των κόμβων του κυκλώματος της μπαταρίας

Η netlist του κυκλώματος της μπαταρίας φαίνεται στο Σχήμα 6.

```
.subckt bat 3 2 1 PARAMS: ns=1, SOCm=1, k=1, D=1, SOC1=1
**Ορίζεται το υποκύκλωμα bat οι κόμβοι εισόδου και εξόδου καθώς και οι παράμετροί του.

evch 4 2 value={{(2+(0.16*v(1)))}*ns}
**Η πηγή τάσης ελεγχόμενη από τάση evch βρίσκεται συνδεδεμένη μεταξύ των κόμβων 4
**και 2 και η τιμή του ρεύματος δίνεται στην αγκύλη.

evdch 5 2 value={{(1.926+(0.248*v(1)))}*ns}
**Η πηγή τάσης ελεγχόμενη από τάση evdch βρίσκεται συνδεδεμένη μεταξύ των κόμβων 5
**και 2 και η τιμή του ρεύματος δίνεται όση στην αγκύλη.
rsacar 2 0 0.000001
** Η αντίσταση rsacar βρίσκεται συνδεδεμένη μεταξύ των κόμβων 2 και 0 και η τιμή της
**αντίστασης είναι 0.000001Ω.

rch 4 6 {rchar}
** Η αντίσταση rch βρίσκεται συνδεδεμένη μεταξύ των κόμβων 4 και 6 και η τιμή της
**αντίστασης παίρνει την τιμή της rchar.

.func rchar() {(0.758+(0.1309/(1.06- SOC1)))*ns*100/SOCm}
**Στην παραπάνω εντολή ορίζεται η συνάρτηση rchar και τα ορίσματά της.

rdch 5 7 {rdischar}
** Η αντίσταση rdch βρίσκεται συνδεδεμένη μεταξύ των κόμβων 5 και 7 και η τιμή της
**αντίστασης παίρνει την τιμή της rdischar.

.func rdischar() {(0.19+(0.1037/(SOC1-0.14)))*ns*250/SOCm}
**Στην παραπάνω εντολή ορίζεται η συνάρτηση rdischar και τα ορίσματά της.

vcurrent 3 8 dc 0
**Η ανεξάρτητη πηγή τάσης vcurrent βρίσκεται συνδεδεμένη μεταξύ των κόμβων 3 και 8.

Wch 6 8 vcurrent sw1mod
**Ο διακόπτης Wch βρίσκεται συνδεδεμένος μεταξύ των κόμβων 6 και 8 με τιμή ρεύματος
**sw1mod
```

```

.model sw1mod iswitch (ioff=-10e-12 , ion=10e-12, Roff=1.0e+8, Ron=0.01)
**Μοντελοποιείται ο διακόπτης sw1mod, ορίζεται ο τύπος του (iswitch) και οι παράμετροί
**του.

Wdiscar 7 8 vcurrent sw2mod
.**Ο διακόπτης Wdiscar βρίσκεται συνδεδεμένος μεταξύ των κόμβων 7 και 8 με τιμή
**ρεύματος sw2mod

.model sw2mod iswitch (ioff=10e-12 , ion=-10e-12, Roff=1.0e+8, Ron=0.01)
**Μοντελοποιείται ο διακόπτης sw2mod, ορίζεται ο τύπος του (iswitch) και οι παράμετροί
**του.

eqt 13 0 value={SOC1 +(sdt(v(9))/SOCm)}
**Η πηγή τάσης ελεγχόμενη από τάση eqt βρίσκεται συνδεδεμένη μεταξύ των κόμβων 13
**και 0 και η ενίσχυση τάσης είναι {SOC1 +(sdt(v(9))/SOCm)}

eqt4 1 0 value={ limit (v(13), 0 , 1)}
**Η πηγή τάσης ελεγχόμενη από τάση eqt4 βρίσκεται συνδεδεμένη μεταξύ των κόμβων 1
**και 0 και η ενίσχυση τάσης είναι { limit (v(13), 0 , 1)}

envalculsoc 9 0 value={(k*v(10)*i(vcurrent)/3600)-(D*SOCm*v(13)/3600)}
**Η πηγή τάσης ελεγχόμενη από τάση envalculsoc βρίσκεται συνδεδεμένη μεταξύ των
**κόμβων 9 και 0 και η ενίσχυση τάσης είναι
**{(k*v(10)*i(vcurrent)/3600)-(D*SOCm*v(13)/3600)}

evch2 11 0 value={(2+(0.16*v(1)))*ns}
**Η πηγή τάσης ελεγχόμενη από τάση evch2 βρίσκεται συνδεδεμένη μεταξύ των κόμβων
**11 και 0 και η ενίσχυση τάσης είναι {(2+(0.16*v(1)))*ns}

evdch2 12 0 value={(1.926+(0.248*v(1)))*ns}
**Η πηγή τάσης ελεγχόμενη από τάση evdch2 βρίσκεται συνδεδεμένη μεταξύ των κόμβων
**12 και 0 και η ενίσχυση τάσης είναι {(1.926+(0.248*v(1)))*ns}

Wdiscar2 12 10 vcurrent sw2mod
.**Ο διακόπτης Wdiscar βρίσκεται συνδεδεμένος μεταξύ των κόμβων 12 και 10 με τιμή
**ρεύματος sw2mod

Wch2 11 10 vcurrent sw1mod
**Ο διακόπτης Wch2 βρίσκεται συνδεδεμένος μεταξύ των κόμβων 11 και 10 με τιμή
**ρεύματος sw1mod

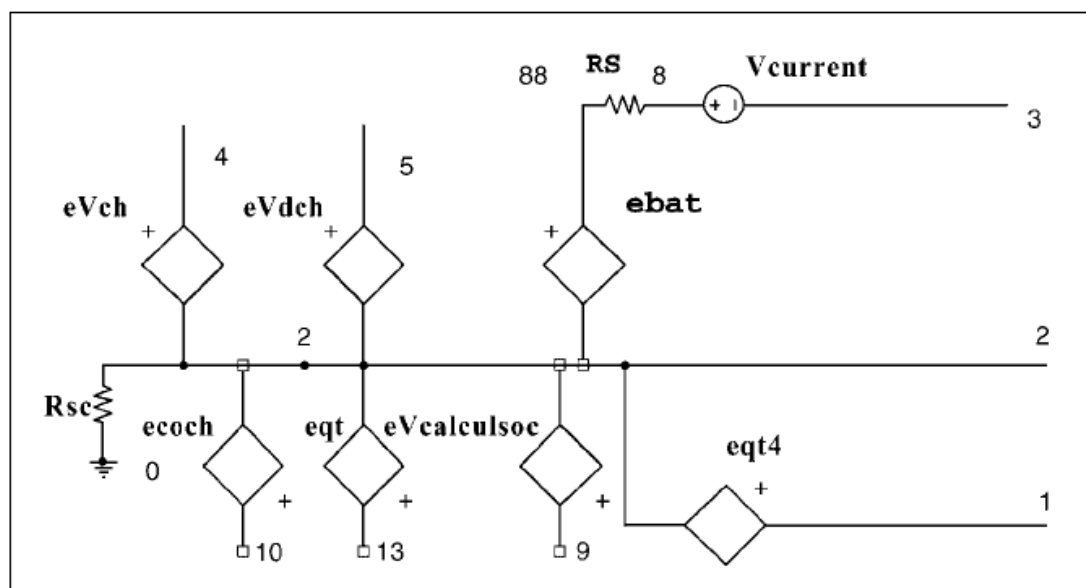
.ends bat
**Τέλος του υποκυκλώματος

```

Σχήμα 6: Η netlist του κυκλώματος της μπαταρίας

Π.3 ΤΟ ΑΡΧΕΙΟ BATSTD.CIR

Το μοντέλο batstd.cir που φαίνεται στο Σχήμα 7, περιγράφει ένα απλουστευμένο κύκλωμα μπαταρίας, σε σχέση με αυτό που παρουσιάστηκε παραπάνω. Στο απλουστευμένο αυτό μοντέλο, η τιμή της αντίστασης R_1 που φαίνεται στο Σχήμα 3 παραμένει σταθερή ανεξάρτητα από το αν η μπαταρία φορτίζεται ή αποφορτίζεται. Αποτέλεσμα του μοντέλου αυτού, είναι ό α αποφεύγεται η χρήση κάποιων διακοπών από αυτούς που φαίνονται στο Σχήμα 4. Οι διακόπτες έχουν αντικατασταθεί στην netlist του προγράμματος με “προτάσεις if” και έτσι επιτυγχάνεται ένα πιο εύχρηστο μοντέλο. Οι κόμβοι σύνδεσης είναι ίδιοι με αυτούς που χρησιμοποιούνται στο προηγούμενο μοντέλο μπαταρίας που φαίνεται στο Σχήμα 5.



Σχήμα 7: Σχηματικό διάγραμμα απλουστευμένου μοντέλου μπαταρίας

Η netlist του απλουστευμένου μοντέλου μπαταρίας φαίνεται στο Σχήμα 8.

```
.subckt batstd 3 2 1 PARAMS: ns=1, SOCm=1, k=1, D=1, SOC1=1
**Ορίζεται το υποκύκλωμα batstd, οι κόμβοι εισόδου και εξόδου καθώς και οι παράμετροι
**του.

evch 4 2 value={{(2+(0.16*v(1)))}}*ns}
**Η πηγή τάσης ελεγχόμενη από τάση evch βρίσκεται συνδεδεμένη μεταξύ των κόμβων 4
**και 2 και η τιμή του ρεύματος δίνεται {{(2+(0.16*v(1)))}}*ns}

evdch 5 2 value={{(1.926+(0.248*v(1)))}}*ns}
**Η πηγή τάσης ελεγχόμενη από τάση evdch βρίσκεται συνδεδεμένη μεταξύ των κόμβων 5
**και 2 και η τιμή του ρεύματος δίνεται {{(1.926+(0.248*v(1)))}}*ns}

rch 4 6 {rchar}
** Η αντίσταση rch βρίσκεται συνδεδεμένη μεταξύ των κόμβων 4 και 6 και η τιμή της
**αντίστασης παίρνει την τιμή {rchar}.
```

```
.func rchar() {(0.758+(0.1309/(1.06- SOC1)))*ns*100/SOCm}
**Στην παραπάνω εντολή ορίζεται η συνάρτηση rchar και τα ορίσματά της.
```

```
rdch 5 7 {rdischar}
** Η αντίσταση rdch βρίσκεται συνδεδεμένη μεταξύ των κόμβων 5 και 7 και η τιμή της
**αντίστασης παίρνει την τιμή {rdischar}
.func rdischar() {(0.19+(0.1037/(SOC1-0.14)))*ns*250/SOCm}
**Στην παραπάνω εντολή ορίζεται η συνάρτηση rdischar και τα ορίσματά της.
```

```
vcurrent 3 8 dc 0
**Η ανεξάρτητη πηγή τάσης vcurrent βρίσκεται συνδεδεμένη μεταξύ των κόμβων 3 και 8.
```

```
Wch 6 8 vcurrent sw1mod
**Ο διακόπτης Wch βρίσκεται συνδεδεμένος μεταξύ των κόμβων 6 και 8 με τιμή ρεύματος
**sw1mod
```

```
.model sw1mod iswitch (ioff=-20e-3 , ion=20e-3, Roff=1.0e+8, Ron=0.001)
**Μοντελοποιείται ο διακόπτης sw1mod, ορίζεται ο τύπος του (iswitch) και οι παράμετροι
**του.
```

```
Wdiscar 7 8 vcurrent sw2mod
**Ο διακόπτης Wdiscar βρίσκεται συνδεδεμένος μεταξύ των κόμβων 7 και 8 με τιμή
**ρεύματος sw2mod.
```

```
.model sw2mod iswitch (ioff=20e-3, ion=-20e-3, Roff=1.0e+8, Ron=0.001)
**Μοντελοποιείται ο διακόπτης sw2mod, ορίζεται ο τύπος του (iswitch) και οι παράμετροι
**του.
```

```
eqt 13 2 value={SOC1 +(sdt(v(9))/SOCm)}
**Η πηγή τάσης ελεγχόμενη από τάση eqt βρίσκεται συνδεδεμένη μεταξύ των κόμβων 13
**και 2 και η ενίσχυση τάσης είναι { SOC1 +(sdt(v(9))/SOCm)}
```

```
eqt4 1 2 value={ limit (v(13), 0 , 1)}
**Η πηγή τάσης ελεγχόμενη από τάση eqt4 βρίσκεται συνδεδεμένη μεταξύ των κόμβων 1
**και 2 και η ενίσχυση τάσης είναι { limit (v(13), 0 , 1)}
```

```
envcalculsoc 9 2 value={(k*v(10)*i(vcurrent)/3600)-(D*SOCm*v(13)/3600)}
**Η πηγή τάσης ελεγχόμενη από τάση envcalculsoc βρίσκεται συνδεδεμένη μεταξύ των
* κόμβων 9 και 2 και η ενίσχυση τάσης είναι {(k*v(10)*i(vcurrent)/3600)-
**(D*SOCm*v(13)/3600)}
```

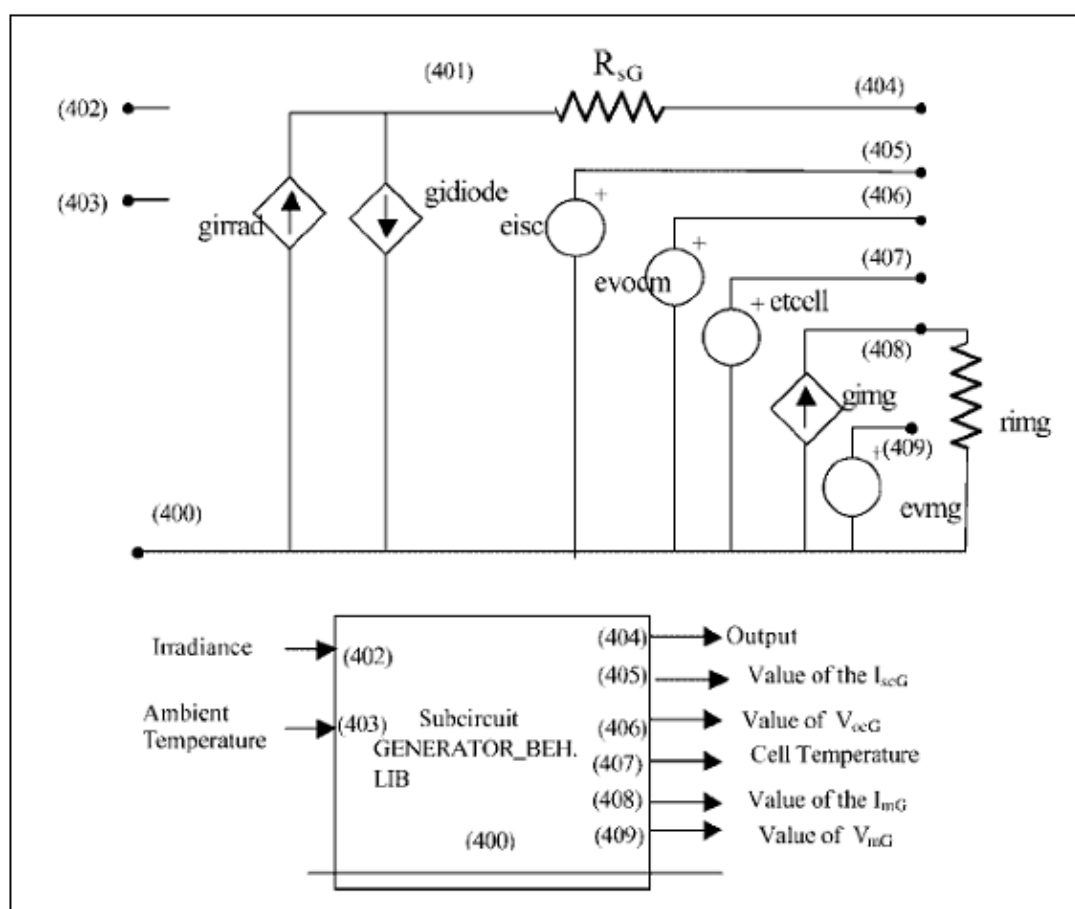
```
ecoch 10 2 value={IF (i(vcurrent)>0, v(4), v(5))}
**Η πηγή τάσης ελεγχόμενη από τάση ecoch βρίσκεται συνδεδεμένη μεταξύ των κόμβων 10
**και 2 και η ενίσχυση τάσης είναι όση στον κόμβο 4 ή όση στον κόμβο 5, ανάλογα με τις
**συνθήκες.
```

```
.ends batstd
**Τέλος του υποκυκλώματος
```

Σχήμα 8: Η netlist του απλουστευμένου μοντέλου της μπαταρίας

Π.4 ΤΟ ΑΡΧΕΙΟ GENERATOR_BEH.LIB

Το αρχείο generator_beh.lib περιγράφει το μοντέλο της φωτοβολταϊκής γεννήτριας στο Pspice, το οποίο φαίνεται στο Σχήμα 9. Ο κόμβος 400 είναι ο κόμβος αναφοράς, ο κόμβος 401 είναι ο κόμβος εισόδου, ο κόμβος 402 είναι ο κόμβος εισόδου της μετρούμενης ακτινοβολίας, ο κόμβος 403 είναι ο κόμβος εισόδου της θερμοκρασίας περιβάλλοντος, ο κόμβος 404 είναι η έξοδος του κυκλώματος, ο κόμβος 405 παρέχει την τιμή του ρεύματος βραχυκυκλώσεως της φ/β γεννήτριας, I_{scG} , ο κόμβος 406 παρέχει την τιμή της τάσης ανοιχτοκύκλωσης της φ/β γεννήτριας, V_{ocG} , ο κόμβος 407 παρέχει την θερμοκρασία του φ/β στοιχείου, ο κόμβος 408 παρέχει την τιμή του ρεύματος της φ/β γεννήτριας στο σημείο μέγιστης ισχύος, I_{mG} και τέλος ο κόμβος 409 παρέχει την τιμή της τάσης της φ/β γεννήτριας στο σημείο μέγιστης ισχύος, V_{mG} .



Σχήμα 9: Το μοντέλο της φωτοβολταϊκής γεννήτριας

Η netlist του μοντέλου της φωτοβολταϊκής γεννήτριας φαίνεται στο Σχήμα 10.

```
.subckt generator_beh 400 402 403 404 405 406 407 408 409 params:
+ iscmr=1, coef_iscm=1, vocmr=1, coef_vocm=1, pmaxmr=1,
+ noct=1, immr=1, vmr=1, tr=1, ns=1, nsg=1 npg=1
**Ορίζεται το υποκύκλωμα generator_beh, οι κόμβοι εισόδου και εξόδου καθώς και οι
**παράμετροί του.

girrad 400 401 value={v(402)/1000*(npg*iscmr+npg*coef_iscm*(v(407)-25))}
```


**Η πηγή ρεύματος ελεγχόμενη από ρεύμα girrad βρίσκεται συνδεδεμένη μεταξύ των κόμβων 400 και 401 και η τιμή **του ρεύματος δίνεται όση μέσα στην αγκύλη.

eiscm 405 400 value={v(402)/1000*(iscmr+coef_iscm*(v(407)-25))}

**Η πηγή τάσης ελεγχόμενη από τάση eiscm βρίσκεται συνδεδεμένη μεταξύ των κόμβων 405 και 400 και η ενίσχυση τάσης είναι {v(402)/1000*(iscmr+coef_iscm*(v(407)-25))}

evocm 406 400 value={if (v(405)>1e-11, (vocmr+coef_vocm*(v(407)-25)+8.66e-5*
+ (v(407)+273)*log(v(405)/(iscmr))),0)}

**Η πηγή τάσης ελεγχόμενη από τάση evocm βρίσκεται συνδεδεμένη μεταξύ των κόμβων 406 και 400 και η ενίσχυση τάσης είναι:

{(vocmr+coef_vocm*(v(407)-25)+8.66e-5*(v(407)+273)*log(v(405)/(iscmr))),0)}

etcell 407 400 value={v(403)+(noct-20)/800*v(402)}

**Η πηγή τάσης ελεγχόμενη από τάση etcell βρίσκεται συνδεδεμένη μεταξύ των κόμβων 407 και 400 και η ενίσχυση τάσης είναι {v(403)+(noct-20)/800*v(402)}

gidiode 401 400 value={npg*v(405)/(exp(v(406)/(ns*8.66e-5*(v(407)+273)))-1)*
+ (exp(v(401)/(ns*ns*8.66e-5*(v(407)+273)))-1)}

**Η συσκευή gidiode βρίσκεται συνδεδεμένη μεταξύ των κόμβων 401 και 400 και η τιμή του ρεύματος δίνεται όση στην αγκύλη.

rsg 401 404 {nsg/npg*((vocmr/(iscmr)-pmaxmr/(iscmr**2*(vocmr/(ns*0.0258))-log
+ ((vocmr/(ns*0.0258))+0.72))/(1+vocmr/(ns*0.0258))))}

** Η αντίσταση rsg βρίσκεται συνδεδεμένη μεταξύ των κόμβων 401 και 404 και η τιμή της αντίστασης παίρνει την τιμή της αγκύλης.

.func frsg() {nsg/npg*((vocmr/(iscmr)-pmaxmr/(iscmr**2*(vocmr/(ns*0.0258))-log
+ ((vocmr/(ns*0.0258))+0.72))/(1+vocmr/(ns*0.0258))))}

**Στην παραπάνω εντολή ορίζεται η συνάρτηση frsg και τα ορίσματά της.

gimg 400 408 value={npg*(immr*v(402)/1000+coef_iscm*(v(403)-25))}

**Η πηγή ρεύματος ελεγχόμενη από ρεύμα gimg βρίσκεται συνδεδεμένη μεταξύ των κόμβων 400 και 408 και η τιμή του ρεύματος δίνεται όση μέσα στην αγκύλη.

ring 408 400 1

** Η αντίσταση ring βρίσκεται συνδεδεμένη μεταξύ των κόμβων 408 και 400 και η τιμή της αντίστασης είναι 1Ω.

evmg 409 400 value=

{if (v(402)>0.001, nsg*(ns*8.66e-5*(v(407)+273)*log(1+(v(405)-
v(408)/npg)/v(405)*(exp(v(406)/(ns*8.66e-5*(v(407)+273)))-1))-v(408)*frsg/nsg),0)}

**Η πηγή τάσης ελεγχόμενη από τάση evmg βρίσκεται συνδεδεμένη μεταξύ των κόμβων 409 και 400 και η ενίσχυση τάσης ορίζεται από την εξίσωση στην αγκύλη.

.ends generator_beh

**Τέλος του υποκυκλώματος

Σχήμα 10: Η netlist του μοντέλου της φωτοβολταϊκής γεννήτριας [Π1].

Π.5 ΤΟ ΑΡΧΕΙΟ OPAMP.LIB

Το αρχείο opamp.lib περιγράφει έναν τελεστικό ενισχυτή. Ο τελεστικός ενισχυτής αποτελεί την βασική μονάδα των περισσότερων αναλογικών κυκλωμάτων. Ο τελεστικός ενισχυτής έχει δύο εισόδους, την αναστρέφουσα (-) και την μη αναστρέφουσα (+) είσοδο. Η έξοδός του είναι συνδεδεμένη σε μια πηγή τάσης ελεγχόμενη από την διαφορά τάσης των δύο εισόδων. Το κέρδος τάσεως είναι για τον ιδανικό τελεστικό ενισχυτή άπειρο, ενώ για τους πραγματικούς τελεστικούς ενισχυτές είναι της τάξης των 10^5 έως 10^6 V. Στα περισσότερα κυκλώματα με τελεστικούς ενισχυτές, θεωρούμε τον τελεστικό ενισχυτή ιδανικό και επιλύουμε το κύκλωμα αγνοώντας τις παραμέτρους του τελεστικού ενισχυτή. Το σφάλμα αυτής της προσέγγισης είναι πολύ μικρό.

Σε αυτή την εργασία χρησιμοποιείται το μοντέλο AD741. Κύρια χαρακτηριστικά του είναι η πλήρης προστασία του συστήματος από βραχυκύκλωμα, η εσωτερική αντιστάθμιση και η αρτιότητα λειτουργίας του.

Π.6 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[Π.1]	Luis Castaner and Santiago Silvestre, “Modelling Photovoltaic Systems Using Pspice”, Wiley, England 2002
-------	--

