

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε.

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ 1463

**Χαρακτηριστικά κυκλώματα εύρεσης σημείου
μέγιστης ισχύος για φωτοβολταϊκά συστήματα και
συγκριτική ανάλυση αυτών**

**ΟΝΟΜΑΤΕΠΩΝΥΜΟ ΣΠΟΥΔΑΣΤΗ: ΑΓΓΕΛΙΔΗΣ ΛΕΥΚΟΣ 5700
ΕΠΟΠΤΕΥΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΗΛΙΑΣ ΣΤΑΘΑΤΟΣ**

ΠΑΤΡΑ 2016

Περίληψη

Η παρούσα πτυχιακή εργασία έχει ως σκοπό να διερευνήσει τους τρόπους με τους οποίους θα μπορούσαμε να λειτουργήσουμε φωτοβολταϊκά συστήματα στο βέλτιστο σημείο τους και στο σημείο μέγιστης ισχύος.

Στο πρώτο κεφάλαιο θα αναφερθούν γενικά χαρακτηριστικά, αρχές λειτουργίας και σχέσεις μοντελοποίησης του φωτοβολταϊκού πλαισίου.

Στο δεύτερο κεφάλαιο θα εξεταστούν οι διατάξεις ανίχνευσης Μεγίστου Σημείου Ισχύος (Maximum Power Point Tracking) και δίνεται βαρύτητα στις τρεις βασικότερες τοπολογίες των μετατροπέων:

- A) DC-DC μετατροπέας υποβιβασμού τάσης (step down ή buck DC-DC converter).
- B) DC-DC μετατροπέας ανύψωσης τάσης (step up ή buck-boost DC-DC converter).
- Γ) Μικτός DC-DC μετατροπέας (step down/up ή buck-boost DC-DC converter).

Στο τρίτο κεφάλαιο θα περιγραφεί αναλυτικά ο μικτός DC-DC μετατροπέας και όλες οι περιπτώσεις λειτουργίας του (λειτουργία συνεχούς ρεύματος, οριακής λειτουργίας, ασυνεχή λειτουργία)

Στο τέταρτο κεφάλαιο θα αναλυθούν οι αρχές λειτουργίας και οι βασικές ιδιότητες των αλγορίθμων αναζήτησης MPP.

Στο πέμπτο και τελευταίο κεφάλαιο θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα από όλες τις προσομοιώσεις και θα ακολουθήσει σύγκριση των πάνελ, καθώς και σύγκριση των μεθόδων προσομοίωσης.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Περίληψη	3
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 - ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ.....	6
1.1 Εισαγωγή	6
1.2 Ηλεκτρική Ενέργεια από την Ηλιακή Ακτινοβολία.....	7
1.3 Εισαγωγή στο Φωτοβολταϊκό φαινόμενο.....	8
1.4 Το φωτοβολταϊκό στοιχείο.....	9
1.5 Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των φωτοβολταϊκών στοιχείων.....	10
1.6 Ωμική Χαρακτηριστική Ρεύματος-Τάσης	14
1.7 Ανίχνευση Σημείου Μέγιστης Ισχύος (MPPT)	15
Αναφορές & Βιβλιογραφία:.....	15
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 - ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗΣ ΣΗΜΕΙΟΥ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΙΣΧΥΟΣ (MPPT)	17
2.1 Τι είναι το Μέγιστο Σημείο Ισχύος	17
2.2 Μεθοδολογία εύρεσης ΜΣΙ.....	19
2.3 Εισαγωγή στους ηλεκτρονικούς μετατροπείς ισχύος	19
2.3 Αντιστροφείς.....	20
2.3.1 Κατηγορίες Αντιστροφών	21
2.4 Μετατροπείς συνεχούς τάσης σε συνεχή	21
2.5 Μετατροπέας υποβιβασμού τάσης DC-DC (step down ή buck DC-DC converter).....	22
2.6 Μετατροπέας ανύψωσης τάσης DC-DC (step up ή buck-boost DC-DC converter)	24
2.7 Μετατροπέας ανύψωσης – υποβιβασμού τάσης (step down/up ή buck-boost DC-DC converter).	26
2.9 Συμπεράσματα	28
Αναφορές & Βιβλιογραφία:.....	28
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 - ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΥ ΜΙΚΤΟΥ DC-DC ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑ	30
3.1 Γενικά για το μικτό μετατροπέα	30
3.2 Λειτουργία μικτού μετατροπέα	31
3.2.1 Λειτουργία συνεχούς ρεύματος	31
3.2.2 Λειτουργία ασυνεχούς ρεύματος.....	36
3.2.3 Οριακή λειτουργία[9]	39
Αναφορές & Βιβλιογραφία:.....	42
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 - Αλγόριθμοι MPPT.....	44
4.1 Γενικά για τεχνικές MPPT	44
4.2 Διατάραξης και Παρατήρησης (Perturb & Observe - P&O)	45

4.3 Αλγόριθμος Αυξητικής Αγωγιμότητας (Incremental Conductance - INC).....	49
4.4 Αλγόριθμος Παρασιτικής Χωρητικότητας (Parasitic Capacitance - PC).....	51
4.5 Αλγόριθμος Σταθερής Τάσης (Constant Voltage - CV).....	52
4.6 Μέθοδος διαφοροποίησης (Differentiation method).....	53
4.7 Νευρωνικά Δίκτυα (Neural Network).....	54
4.8 Η μέθοδος προσαρμογής καμπύλων (curve fitting).....	54
4.9 Σύνοψη.....	55
Αναφορές & Βιβλιογραφία:.....	55
Κεφάλαιο 5 - Προσομοίωση Φωτοβολταϊκού.....	57
Συστήματος με έλεγχο MPPT.....	57
5.1 Εισαγωγή.....	57
5.2 Προσομοίωση Φωτοβολταϊκού συστήματος με έλεγχο MPPT.....	60
5.2.1 Μοντέλο Φωτοβολταϊκού Στοιχείου.....	60
5.2.2 Μοντέλο Ελεγκτή MPPT.....	62
5.3 Αποτελέσματα -προσομοιώσεων του συστήματος.....	64
5.3.1 Αποτελέσματα για $(d = 0.001$ και $T_{sample} = 0.5ms$	64
5.3.2 Αποτελέσματα για $\Delta d = 0.001$ και $T_{Sample} = 1ms$	66
5.3.3. Αποτελέσματα για $\Delta d = 0.001$ και $T_{sample} = 2.5ms$	68
5.3.4 Κυματομορφές Ρευμάτων και Τάσεων.....	70
5.3.5 Σύγκριση ως προς το χρόνο απόκρισης και τη διακύμανση ισχύος.....	72

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 - ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗ

ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ

1.1 Εισαγωγή

Στις μέρες μας η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στηρίζεται κατά το μεγαλύτερο ποσοστό της στους μεγάλους θερμοηλεκτρικούς και υδροηλεκτρικούς σταθμούς. Οι παραπάνω σταθμοί παραγωγής ενέργειας καταναλώνουν πετρέλαιο, φυσικό αέριο, κάρβουνο, ουράνιο ή άλλα ραδιενεργά υλικά, ή χρησιμοποιούν υδατοπτώσεις. Όλες όμως αυτές οι ενεργειακές πηγές έχουν σχετικά περιορισμένες προοπτικές αφού τα αέρια, υγρά ή στερεά και γενικά συμβατικά καύσιμα, εξαντλούνται βαθμιαία, ενώ και η υδροηλεκτρική ενέργεια είναι ποσοτικά καθορισμένη και γεωγραφικά περιορισμένη. Επιπλέον, γνωστές είναι και οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις των παραπάνω μορφών παραγωγής ενέργειας, καθιστώντας απαραίτητη την ανάπτυξη και χρήση τεχνολογιών για την εκμετάλλευση ανανεώσιμων μορφών ενέργειας. Σε αυτό συμβάλει και η ξέφρενη πορεία του πετρελαίου που χαρακτηρίζεται από αστάθεια και υψηλές τιμές και η οποία μας απασχολεί τους τελευταίους μήνες. Οπότεν το ψάξιμο για ανανεώσιμες πηγές είναι αναπόφευκτο όσο περνάνε τα χρόνια.

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ) ή ήπιες μορφές ενέργειας, ονομάζονται οι ενέργειες αυτές που προέρχονται από διάφορες φυσικές διαδικασίες και είναι άφθονες στο περιβάλλον. Τα τελευταία χρόνια γίνεται ολοένα και πιο επιτακτική η ανάγκη αξιοποίησης εναλλακτικών μορφών ενέργειας. Εξαιτίας της συνεχώς αυξανόμενης ενεργειακής ζήτησης, σε συνδυασμό με τη μείωση των αποθεμάτων συμβατικών καυσίμων και τις δυσμενείς επιπτώσεις στο περιβάλλον, το παγκόσμιο ενδιαφέρον στρέφεται στην ανάπτυξη τεχνολογιών προς εκμετάλλευση των ΑΠΕ. Το ενδιαφέρον αυτό ενισχύεται από το γεγονός ότι σε πολλές περιπτώσεις η τεχνολογία των ΑΠΕ όχι μόνο είναι οικονομικά εφικτή αλλά και αρκετά αποδοτική.[1]

Ως ΑΠΕ ορίζονται οι πιο κάτω :

1)**Ηλιακή ενέργεια**, με υποτομείς τα ενεργητικά ηλιακά συστήματα, τα παθητικά ηλιακά συστήματα και τη φωτοβολταϊκή μετατροπή.

2)**Αιολική ενέργεια**, που εκμεταλλεύεται την ενέργεια του ανέμου.

3)**Γεωθερμική ενέργεια**, είναι γενικά η εσωτερική θερμότητα των στρωμάτων της γης, η οποία γίνεται εκμεταλλεύσιμη όταν υπάρχουν κατάλληλες γεωλογικές συνθήκες.

5)**Η ενέργεια από βιομάζα**, θερμική ή χημική ενέργεια με την παραγωγή βιοκαυσίμων, τη χρήση υπολειμμάτων δασικών εκμεταλλεύσεων και την αξιοποίηση βιομηχανικών, αγροτικών και αστικών αποβλήτων.

Τα κυριότερα πλεονεκτήματα των ΑΠΕ είναι:

- Είναι πρακτικά ανεξάντλητες.
- Συμβάλλουν στη μείωση της εξάρτησης από τους συμβατικούς ενεργειακούς πόρους.
- Έχουν χαμηλό λειτουργικό κόστος.
- Δυνατότητα ορθολογικής αξιοποίησης των ενεργειακών πόρων με διαφορετικές λύσεις για διαφορετικές ενεργειακές ανάγκες.
- Είναι φιλικές στο περιβάλλον.

Εκτός από τα πλεονεκτήματα όμως, οι ΑΠΕ παρουσιάζουν και τα εξής μειονεκτήματα:

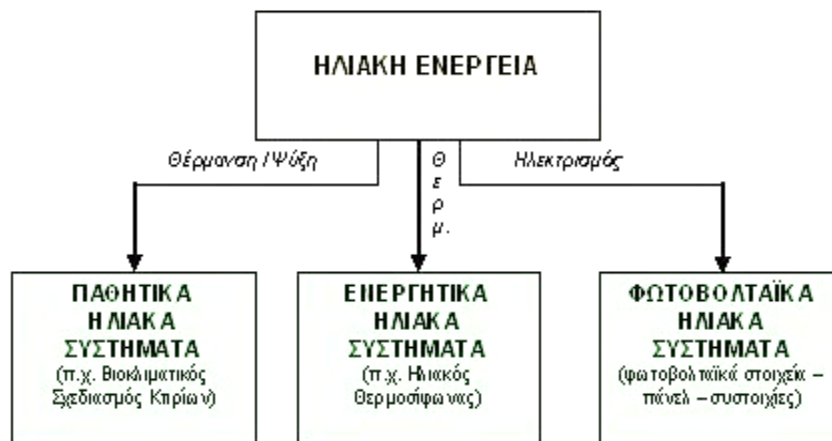
- Η παροχή και η απόδοση (κυρίως για την αιολική και την ηλιακή ενέργεια) εξαρτάται από την εποχή του έτους και από τα γεωγραφικά χαρακτηριστικά.
- Χαμηλός συντελεστής απόδοσης.
- Παρουσιάζουν συχνά διακυμάνσεις στη διαθεσιμότητα τους.
- Το κόστος επένδυσης ανά μονάδα εγκατεστημένης ισχύς παραμένει ακόμα υψηλό.

1.2 Ηλεκτρική Ενέργεια από την Ηλιακή Ακτινοβολία

Ηλιακή ενέργεια χαρακτηρίζεται το σύνολο των διαφόρων μορφών ενέργειας που προέρχονται από τον Ήλιο. Τέτοιες είναι το φως ή φωτεινή ενέργεια, η θερμότητα ή θερμική ενέργεια καθώς και διάφορες ακτινοβολίες. Είναι πρακτικά ανεξάντλητη, αφού προέρχεται από τον ήλιο, και ως εκ τούτου δεν υπάρχουν περιορισμοί χώρου και χρόνου για την εκμετάλλευσή της. Είναι καθαρή, ανεξάντλητη, ήπια και ανανεώσιμη. Η ηλιακή ακτινοβολία δεν ελέγχεται από κανέναν και αποτελεί ένα ανεξάντλητο ενεργειακό πόρο (ειδικά στη χώρα μας), που παρέχει ανεξαρτησία, προβλεψιμότητα και ασφάλεια στην ενεργειακή τροφοδοσία. Υπάρχουν δύο τρόποι αξιοποίησης της:

- Είτε για την παραγωγή θερμότητας με σκοπό τη θέρμανση νερού, τη θέρμανση χώρων και πολλές οικιακές, γεωργικές ή βιομηχανικές χρήσεις όπου η διαδικασία αυτή μετατροπής εξαρτάται από την θερμότητα.
- Είτε με την κατασκευή φωτοβολταϊκών γεννητριών, όπου υπάρχει η πρακτική δυνατότητα της εύκολης, άμεσης και αποδοτικής μετατροπής της σε ηλεκτρική ενέργεια.

Όσο αφορά στην εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας, όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα, αυτό μπορεί να γίνει με 3 διαφορετικούς τρόπους. Με τα παθητικά ηλιακά συστήματα, τα ενεργειακά ηλιακά συστήματα και τα φωτοβολταϊκά συστήματα. Οι 2 πρώτες περιπτώσεις μετατρέπουν την ηλιακή ενέργεια σε θερμότητα, ενώ η άλλη περίπτωση με απευθείας μετατροπή της σε ηλεκτρική ενέργεια χρησιμοποιώντας το φωτοβολταϊκό φαινόμενο, όπως φαίνεται και στο σχήμα 1.1[2]

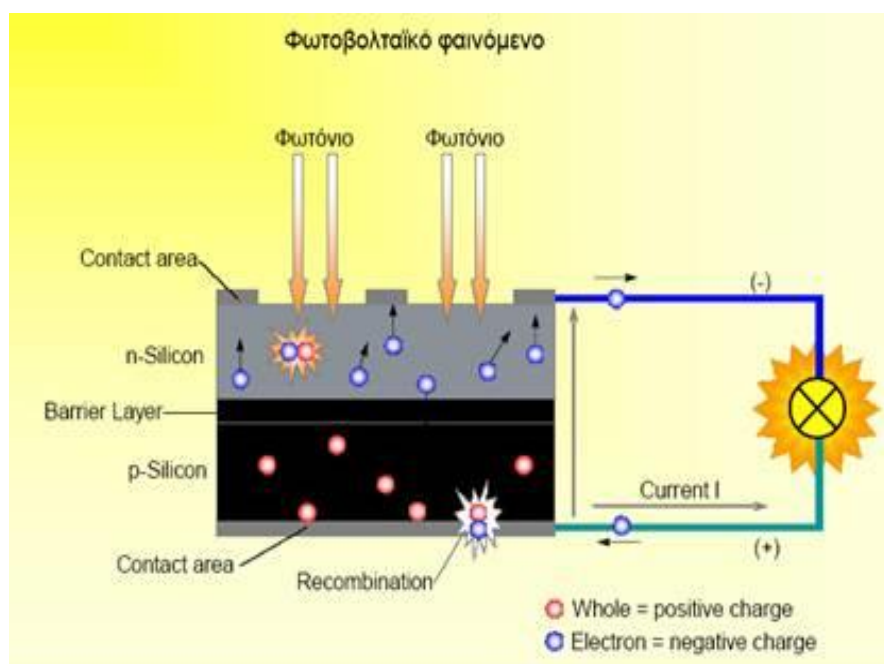


Σχήμα 1-1: Κατηγοριοποίηση εφαρμογών ηλιακής ενέργειας

Στην παρούσα πτυχιακή εργασία θα ασχοληθούμε με τα φωτοβολταϊκά συστήματα, τα οποία εκμεταλλεύονται το φωτοβολταϊκό φαινόμενο. Αρχικά θα εξηγήσουμε το φαινόμενο αυτό.

1.3 Εισαγωγή στο Φωτοβολταϊκό φαινόμενο

Η απευθείας μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική ενέργεια επιτυγχάνεται με τη βοήθεια των ηλιακών κυττάρων, των οποίων την αρχή λειτουργίας αποτελεί το φωτοβολταϊκό φαινόμενο. Η διαδικασία αυτής της μετατροπής δεν εξαρτάται από την θερμότητα, απεναντίας η απόδοση των ηλιακών κυττάρων μειώνεται όταν η θερμοκρασία αυξάνεται. Αυτή η δυνατότητα της εύκολης, άμεσης καθώς και αποδοτικής μετατροπής της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική διαπιστώθηκε όταν ανακαλύφθηκε το 1839 από τον Ανρι Μπέκερελ (Becquerel) το φαινόμενο αυτό, όπου παρατήρησε την ανάπτυξη τάσεως μεταξύ δύο ηλεκτροδίων μέσα σε ηλεκτρολύτη όταν ηλιακό φως πέσει σε ένα από αυτά. Αργότερα το ίδιο φαινόμενο παρατηρήθηκε στο σελήνιο (Se). Ο βαθμός απόδοσης τους όμως ήταν πάρα πολύ χαμηλός. Μόλις το 1954 επιτεύχθηκε σχετικά ψηλός βαθμός απόδοσης, της τάξεως του 6% στο πυρίτιο (Si).

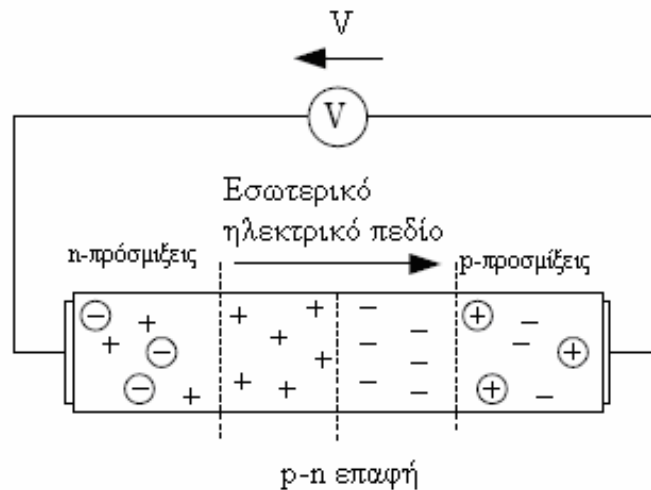


Σχήμα 1-2: Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο

Η περιγραφείσα οπτικο-ηλεκτρική συμπεριφορά του ημιαγωγού, εκφράζεται μακροσκοπικά με την χαρακτηριστική ιδιότητα της φωτοαγωγιμότητάς του. Όταν ένας ημιαγωγός φωτίζεται, άγει με πολλές τάξεις ισχυρότερο ρεύμα απ' ό,τι όταν βρίσκεται στο σκοτάδι. Το αποτέλεσμα αυτό εξαρτάται από το ημιαγωγικό υλικό και την συχνότητα (μήκος κύματος ή την ενέργεια φωτονίου) της προσπίπτουσας ΗΜ ακτινοβολίας.[3]

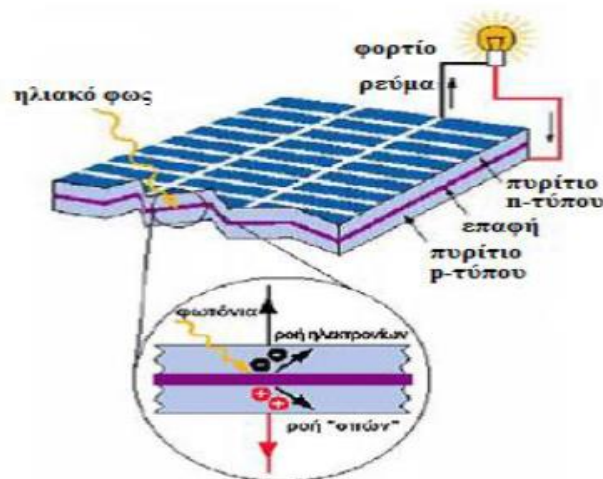
Το άτομο του πυριτίου, που είναι ο κύριος εκφραστής των ημιαγωγών, αποτελείται από 14 ηλεκτρόνια τοποθετημένα κατά τέτοιο τρόπο ώστε τα 4 εξωτερικά, που είναι τα ηλεκτρόνια σθένους, να μπορούν να μοιραστούν με ένα άλλο άτομο. Ένας μεγάλος αριθμός ατόμων, μέσω των ηλεκτρονίων σθένους, μπορούν να συνδεθούν με δεσμούς και να δημιουργήσουν ένα κρυσταλλικό πλέγμα. Όταν ηλιακό φως πέσει σε κρυσταλλικό πυρίτιο, είναι δυνατόν να ανακλαστεί, να διαπεράσει τον κρύσταλλο ή να απορροφηθεί. Στη περίπτωση που απορροφηθεί και το φως έχει μεγάλη ενέργεια, είναι δυνατό να αλλάξει τις ηλεκτρικές ιδιότητες του κρυστάλλου. Το ηλεκτρόνιο ενός δεσμού μπορεί να απομακρυνθεί από τη θέση του στο κρύσταλλο και να μετακινηθεί στη ζώνη αγωγιμότητας, αφήνοντας πίσω στη ζώνη σθένους ένα δεσμό από τον οποίο λείπει ένα ηλεκτρόνιο, που ονομάζεται οπή. Τα παραγόμενα από το ηλιακό φως ζεύγη ηλεκτρονίων – οπών, αποτελούν τη βασική διαδικασία του φωτοβολταϊκού φαινομένου.

Από τα πιο πάνω εύκολα παρατηρούμε ότι ένα ηλιακό κύτταρο, στην ουσία αποτελεί μια επαφή p-n, μια δίοδο, η οποία δημιουργείται με την εισαγωγή κατάλληλων προσμίξεων στη κρυσταλλική δομή του ημιαγωγού. Με την εισαγωγή προσμίξεων, δημιουργούνται στο εσωτερικό του υλικού δύο διακριτές περιοχές, η **περιοχή-n** όπου υπάρχει αυξημένη συγκέντρωση ελεύθερων ηλεκτρονίων και η **περιοχή-p** με αυξημένη συγκέντρωση οπών.



1.4 Το φωτοβολταϊκό στοιχείο

Το βασικό συστατικό των φωτοβολταϊκών συστημάτων αποτελεί το φωτοβολταϊκό στοιχείο (ονομάζεται και φωτοστοιχείο ή ηλιακό κύτταρο), το οποίο, όπως αναπτύχθηκε στις προηγούμενες ενότητες, κατασκευάζεται ως ένωση τύπου p-n κατάλληλων ημιαγωγών (συχνά πυριτίου). Όπως είναι γνωστό, εάν η πλευρά p μιας διόδου p-n συνδεθεί με τον θετικό πόλο (+) πηγής συνεχούς ρεύματος και η πλευρά n με τον αρνητικό (-), δηλαδή γίνει ορθή πόλωση της διόδου, διέρχεται ένα μεγάλο ρεύμα. Αντίθετα εάν γίνει ανάστροφη πόλωση, δηλαδή σύνδεση του πόλου (+) της πηγής με την πλευρά n και του p με τον πόλο (-), το διερχόμενο ρεύμα είναι πολύ μικρό και ονομάζεται ανάστροφο ρεύμα I_0 .



Πρακτικά το ρόλο του φράγματος δυναμικού σε ένα ηλιακό κύτταρο, αναλαμβάνει η ενδιάμεση περιοχή, που καλείται περιοχή αραίωσης. Το συμπέρασμα αυτό σε συνδυασμό με το φωτοβολταϊκό φαινόμενο εξηγούν τον άμεσο τρόπο μετατροπής της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική.

Η ηλιακή ακτινοβολία έρχεται σε μορφή πακέτων ενέργειας ή φωτονίων. Τα φωτόνια, τα οποία επί της ουσίας είναι ηλεκτρομαγνητικά κύματα, έχουν ενέργεια ίση με:

$$E = h \times f = p \times c \quad (1.1)$$

όπου:

- h : είναι η σταθερά του Plank
- f : είναι η συχνότητα του ηλεκτρομαγνητικού κύματος
- p : είναι η ορμή του φωτονίου
- c : είναι η ταχύτητα του φωτός

Η ενέργεια κάθε φωτονίου εξαρτάται από τη συχνότητα του αντιστοίχου κύματος. Κάθε φωτόνιο με ακτινοβολία ίση ή μεγαλύτερη από το ενεργειακό διάκενο του ημιαγωγού, έχει τη δυνατότητα να απορροφηθεί σε ένα χημικό δεσμό και να ελευθερώσει ένα ηλεκτρόνιο. Δημιουργείται έτσι, όσο διαρκεί η ακτινοβολία, μια περίσσεια από ζεύγη φορέων πέρα από τις συγκεντρώσεις που αντιστοιχούν στις συνθήκες ισορροπίας. Οι φορείς αυτοί, καθώς κυκλοφορούν από στερεό και εφόσον δεν επανασυνδεθούν μπορεί να βρεθούν κοντά στην περιοχή αραίωσης, οπότε θα δεχθούν την επίδραση του ηλεκτροστατικού πεδίου. Η πιθανότητα να γίνει αυτό εξαρτάται από κατασκευαστικά χαρακτηριστικά.

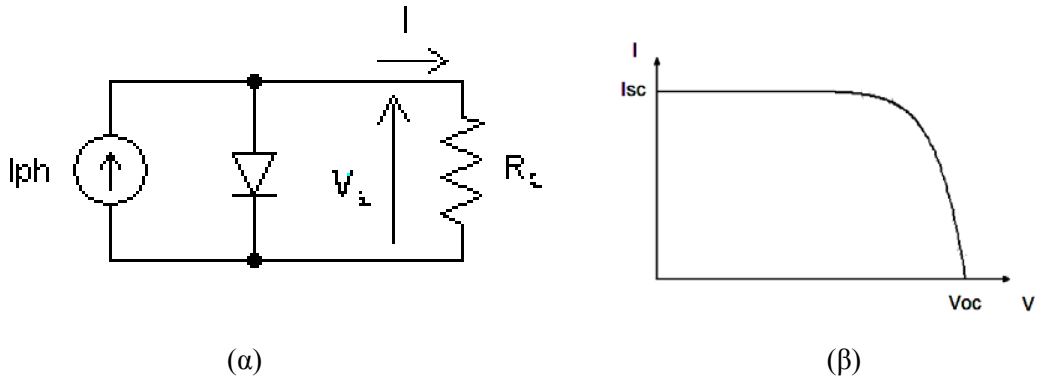
Έτσι, τα ελεύθερα ηλεκτρόνια εκτρέπονται προς την περιοχή-n και οι οπές προς την περιοχή-p, με αποτέλεσμα να δημιουργηθεί μια διαφορά δυναμικού ανάμεσα στους ακροδέκτες των δύο τμημάτων της διόδου. Δηλαδή η διάταξη αποτελεί μια πηγή ηλεκτρικού ρεύματος, που διατηρείται όσο διαρκεί η πρόσπτωση του ηλιακού φωτός πάνω στην επιφάνεια του στοιχείου.

Η εκδήλωση της διαφοράς του δυναμικού στους ακροδέκτες του ηλιακού κυττάρου, η οποία αντιστοιχεί σε ορθή πόλωση της διόδου, αποτελεί το φωτοβολταϊκό φαινόμενο. Η αποδοτική λειτουργία των ηλιακών φωτοβολταϊκών στοιχείων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στηρίζεται στην πρακτική εκμετάλλευση του πιο πάνω φαινομένου. [2]

1.5 Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των φωτοβολταϊκών

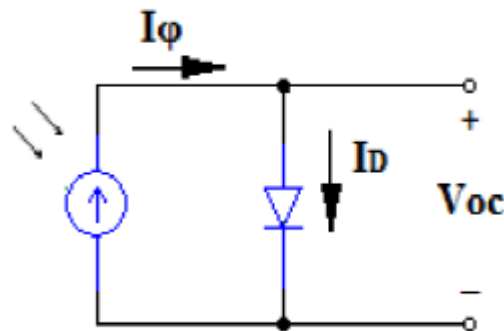
στοιχείων

Όταν ηλιακή ακτινοβολία προσπίπτει επί της πλευράς n του φωτοβολταϊκού στοιχείου, μεταξύ των δύο πλευρών της ένωσης εκδηλώνεται διαφορά δυναμικού, η οποία αντιστοιχεί σε ορθή πόλωση της διόδου και αποτελεί το φωτοβολταϊκό φαινόμενο. Στο Σχ. 3.1(α) δείχνεται το απλοποιημένο (εξιδανικευμένο) ισοδύναμο κύκλωμα με το οποίο μπορεί να παρασταθεί ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο, όταν στα άκρα του συνδέεται μια ωμική αντίσταση R_L . Στο Σχ. 3.1(β) δείχνεται το αντίστοιχο διάγραμμα Ρεύματος I_L -Τάσης V_L , που μπορεί να ληφθεί πειραματικά: Το φωτοβολταϊκό στοιχείο παρίσταται με μια πηγή εντάσεως, η οποία παράγει το φωτόρευμα I_{ph} , όταν προσπίπτει σε αυτό ηλιακή ακτινοβολία, το δε μέγεθός του είναι ευθέως ανάλογο της εντάσεως της ηλιακής ακτινοβολίας. Το σημείο λειτουργίας ορίζεται προφανώς από την τομή της καμπύλης Ρεύματος - Τάσης του φωτοβολταϊκού στοιχείου και της ευθείας $I_L = \frac{V_L}{R_L}$



Σχ.1-3: (α) Απλοποιημένο ισοδύναμο κύκλωμα Φ/Β στοιχείου
(β) Χαρακτηριστική Ρεύματος - Τάσης

Για να προχωρήσουμε σε μια πρώτη εκτίμηση των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών και της λειτουργίας ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου, μπορούμε να το θεωρήσουμε ότι αποτελεί μια πηγή ρεύματος που ελέγχεται από μια δίοδο, όπως φαίνεται και στο σχήμα πιο κάτω.



Σχήμα 1-4 Ηλεκτρικό ισοδύναμο ιδανικού ηλιακού κυττάρου

Παρατηρούμε ότι όταν το κύτταρο δεν δέχεται ακτινοβολία, είναι μια δίοδος που δεν παράγει ρεύμα και τάση.

Όταν το κύτταρο δέχεται ακτινοβολία, λειτουργεί σαν μια πηγή ρεύματος που παράγει το φωτόρευμα I_φ και ελέγχεται από μια δίοδο. Το παραγόμενο φωτόρευμα είναι ανάλογο της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας.

Σε συνθήκες ανοικτού κυκλώματος, θα αποκατασταθεί μια ισορροπία όταν η τάση, που θα αναπτυχθεί ανάμεσα στις δυο όψεις του στοιχείου, θα προκαλεί ένα αντίθετο ρεύμα που θα αντισταθμίζει το φωτόρευμα, όπου θα ισχύει η σχέση:

$$I_\varphi = I_d = I_o \left[e^{\left(\frac{eV}{NKT}\right)} - 1 \right] \quad (1.2)$$

Όπου:

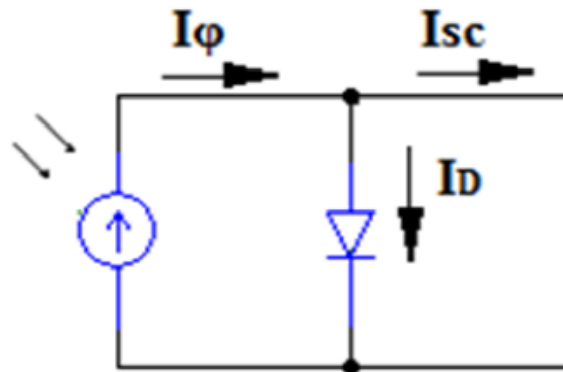
- I_0 : το ρεύμα κορεσμού του στοιχείου που αποτελεί χαρακτηριστικό μέγεθος
- V : η τάση στα άκρα του κυττάρου
- e : το φορτίο του ηλεκτρονίου
- K : η σταθερά του Boltzmann
- T : η απόλυτη θερμοκρασία του κυττάρου σε Kelvin
- N : σταθερά που εξαρτάται από τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά

Από τη πιο πάνω σχέση βρίσκουμε και την τιμή της τάσης ανοικτού κυκλώματος ως εξής:

$$V_{oc} = \frac{NKT}{e} \ln \left(\frac{I\phi}{I_0} - 1 \right) \quad (1.3)$$

Στην άλλη ακραία περίπτωση, του βραχυκυκλώματος, όλο το παραγόμενο φωτόρευμα ρέει μέσω του βραχυκυκλώματος και ισχύει το εξής:

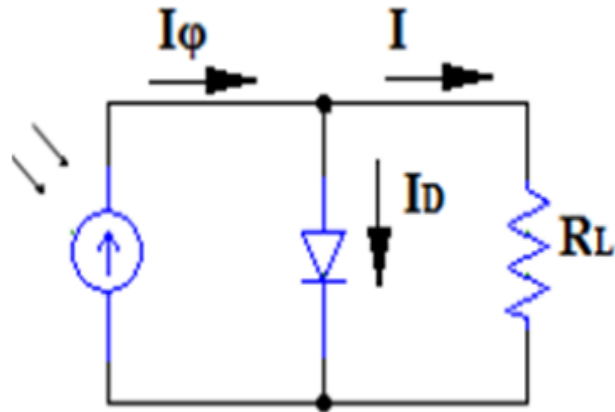
$$I_{sc} = I\phi \quad (1.4)$$



Σχήμα 1-5 Ηλεκτρικό ισοδύναμο βραχυκυκλωμένου ιδανικού ηλιακού κυττάρου

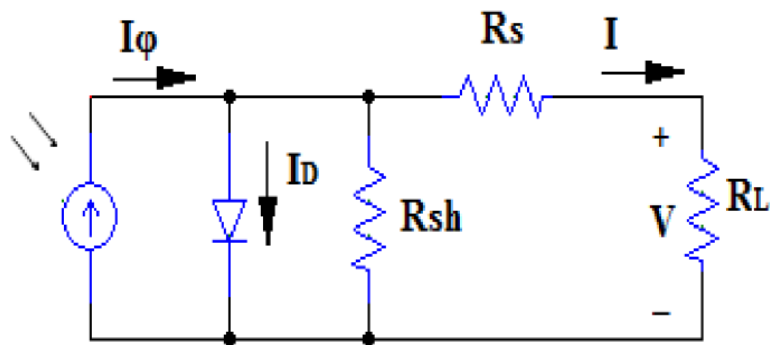
Στην περίπτωση όπου το κύκλωμα κλείσει μέσω εξωτερικής αντίστασης R_L , όπως φαίνεται στο σχήμα 1-6, το ρεύμα προκύπτει από την εξίσωση:

$$I = I\phi - I_0 \left[e^{\left(\frac{eV}{NKT} \right)} - 1 \right] \quad (1.5)$$



Σχήμα 1-6 Ηλεκτρικό ισοδύναμο ιδανικού ηλιακού κυττάρου υπό φορτίο

Τα πιο πάνω όμως ισχύουν για ιδανικά ηλιακά κύτταρα, κάτι το οποίο στη πραγματικότητα δεν ισχύει. Για να έχουμε μια σωστή προσέγγιση πρέπει να προσθέσουμε δύο αντιστάσεις, την R_s και R_{sh} , όπως φαίνεται στο σχήμα 1-7.



Σχήμα 1-7 Ηλεκτρικό ισοδύναμο πραγματικού ηλιακού

Η R_s (series resistance) εκφράζει σε συγκεντρωμένη μορφή όλα τα κατανομημένα στοιχεία αντίστασης κατά την ροή των φορέων στον κυρίως ημιαγωγό, την επιφανειακή ροή στον ημιαγωγό που βρίσκεται στην πλευρά που προσπίπτει το φως και την ενδοεπιφάνεια μεταξύ ημιαγωγού-ωμικής επαφής και την ωμική επαφή. Η R_{sh} (shunt resistance) οφείλεται σε διαρροές των φορέων που συμβαίνουν είτε στην επαφή p-n, είτε στην εξωτερική παράπλευρη επιφάνεια του κυττάρου, είτε σε άλλες ανωμαλίες του κρυστάλλου και δεν είναι ομοιόμορφα κατανομημένες σε όλη την επιφάνεια του κυττάρου.

Για το ρεύμα του κυττάρου, με ενσωματωμένες τις R_s και R_{sh} (σχήμα 1.7), ισχύει η παρακάτω σχέση:

$$I = I_{\phi} - I_d = I_{\phi} - I_0 \left[e^{\left(\frac{e(V+IR_s)}{NKT} \right)} - 1 \right] - \frac{(V + IR_s)}{R_{sh}} \quad (1.6)$$

1.6 Ωμική Χαρακτηριστική Ρεύματος-Τάσης

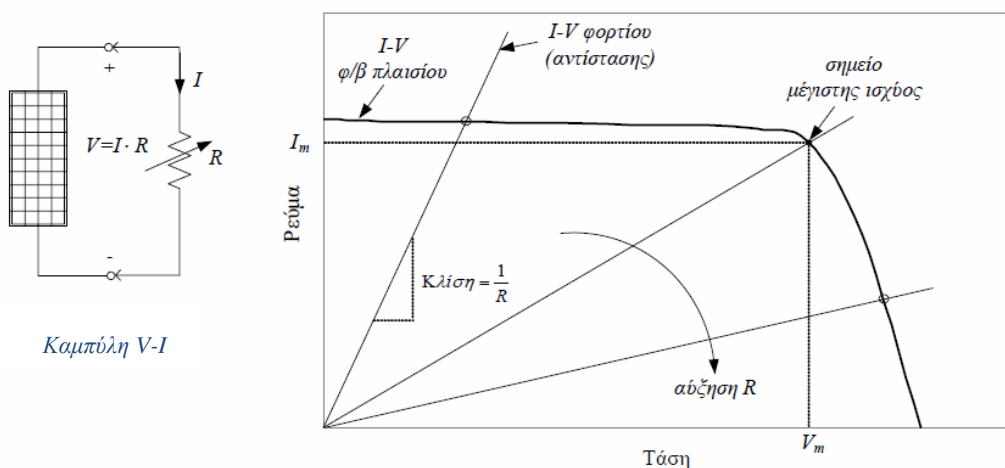
Για να φανεί η σπουδαιότητα και η ανάγκη για τις καμπύλες φορτίου, ας θεωρηθεί το καθαρά ωμικό φορτίο του Σχήματος 1. Για το φορτίο αυτό:

$$V = I \cdot R \quad \text{ή} \quad I = \left(\frac{1}{R}\right) \cdot V \quad (1.7)$$

το οποίο, όταν σχεδιάζεται σε γράφημα ρεύματος ως συνάρτηση της τάσης, είναι μία ευθεία γραμμή με κλίση $\frac{1}{R}$. Όπως φαίνεται από το Σχήμα 1, καθώς αυξάνει η αντίσταση R , το σημείο λειτουργίας στο οποίο τέμνονται οι χαρακτηριστικές $I-V$ του φ/β και του φορτίου μετακινείται κατά μήκος της χαρακτηριστικής $I-V$ του φ/β από αριστερά προς τα δεξιά. Επειδή η ισχύς που παραδίδεται στο φορτίο είναι το γινόμενο τάσης και ρεύματος, θα υπάρχει μία συγκεκριμένη τιμή αντίστασης η οποία θα οδηγεί σε μέγιστη ισχύ:

$$R_m = \frac{V_m}{I_m} \quad (1.8)$$

όπου V_m και I_m είναι η τάση και το ρεύμα στο σημείο μέγιστης ισχύος. Κάτω από τις ειδικές συνθήκες στις οποίες δοκιμάζονται τα φ/β πλαίσια, το σημείο μέγιστης ισχύος αντιστοιχεί στην ονομαστική τάση V_R και στο ονομαστικό ρεύμα I_R του φ/β πλαισίου. Αυτό σημαίνει ότι η βέλτιστη τιμή αντίστασης, για μέγιστη μεταφορά ισχύος, θα είναι $\frac{V_R}{I_R}$ κάτω από ηλιακή ένταση ενός ήλιου, θερμοκρασία 250 C° και λόγο μάζας αέρα 1.5 (AM1.5).



Ένα φ/β πλαίσιο παρέχει ισχύ σε ένα ωμικό φορτίο. Καθώς αλλάζει η αντίσταση του φορτίου, το σημείο λειτουργίας μετακινείται πάνω στην καμπύλη $I-V$ του φ/β πλαισίου.

1.7 Ανίχνευση Σημείου Μέγιστης Ισχύος (MPPT)

Η λειτουργία των ανιχνευτών σημείου ισχύος (MPPT) βασίζεται στη συνεχή παρακολούθηση των τιμών της τάσης και έντασης εξόδου των φωτοβολταϊκών στοιχείων, προκαλώντας ανα τακτά χρονικά διαστήματα μια διαταραχή της τάσης εξόδου αυτής. Αν διαπιστωθεί ό,τι με την ανύψωση της τάσης λειτουργίας, αυξάνεται η ισχύς που παρέχει το πάνελ τότε αυξάνουν την τάση προς τα πάνω ώσπου να έρθει μια ισορροπία. Αυτό θα είναι και το σημείο μέγιστης μεταφοράς απόδοσης του Φ/Β στοιχείου. Σε αντίθετη περίπτωση, δηλαδή εάν με την αύξηση της τάσης επέλθει μείωση της παραγόμενης ισχύος, τότε γίνεται μείωση της τάσης πάνελ προς τα κάτω.

Η ένταση που παράγεται απο ένα Φ/Β στοιχείο δεν είναι σταθερή αλλά μεταβάλλεται αντιστροφα απ' ό,τι μεταβάλλεται η τάση. Για κάποιο συγκεκριμένο όμως ζεύγος τάσης - έντασης, το Φ/Β στοιχείο δίνει τη μέγιστη ισχύ του. Ωστόσο επειδή κάθε στιγμή η ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στο στοιχείο δεν είναι σταθερή, ομοίως σταθερή δεν είναι και η τάση εξόδου του. Είναι λοιπόν επιθυμητό κάθε στιγμή το φωτοβολταϊκό στοιχείο να μην παράγει την τάση και την ένταση όπως αυτά καθορίζονται απο την αντίστασής του κυκλώματος που υπάρχει στα άκρα του, αλλά να δίνει στην έξοδο αυτό το ζεύγος τάσης - έντασης που μεγιστοποιεί την ισχύ του.

Για να επιτευχθεί λοιπόν η λειτουργία στο σημείο μέγιστης ισχύος χρησιμοποιείται, ένα κύκλωμα DC/DC μετατροπέα, ανύψωσης - υποβιβασμού τάσης όπου με την βοήθεια ενός κυκλώματος ελέγχου επιτυγχάνεται η επιθυμητή λειτουργία. Όπως αναφέραμε και επιλύσαμε με μαθηματικούς όρους παραπάνω, αυτό που ευθύνεται για την μέγιστη ισχύ είναι μία συγκεκριμένη τιμή αντίστασης.

Αναφορές & Βιβλιογραφία:

[1] <http://www.allaboutenergy.gr>

[2] Θ. Ζαχαρίας : ‘ Ήπιες μορφές ενέργειας II’, Εκδόσεις Παν. Πατρών (2009)

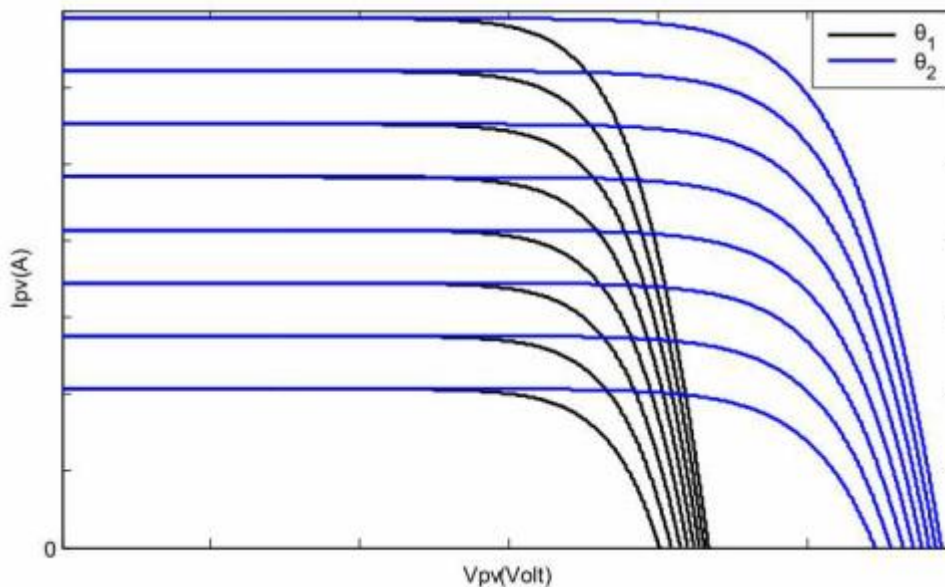
[3] Ι. Ε. Φραγκιαδάκη: ‘Φωτοβολταϊκά Συστήματα’, Εκδόσεις ΖΗΤΗ (2009)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 - ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗΣ

ΣΗΜΕΙΟΥ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΙΣΧΥΟΣ (MPPT)

2.1 Τι είναι το Μέγιστο Σημείο Ισχύος

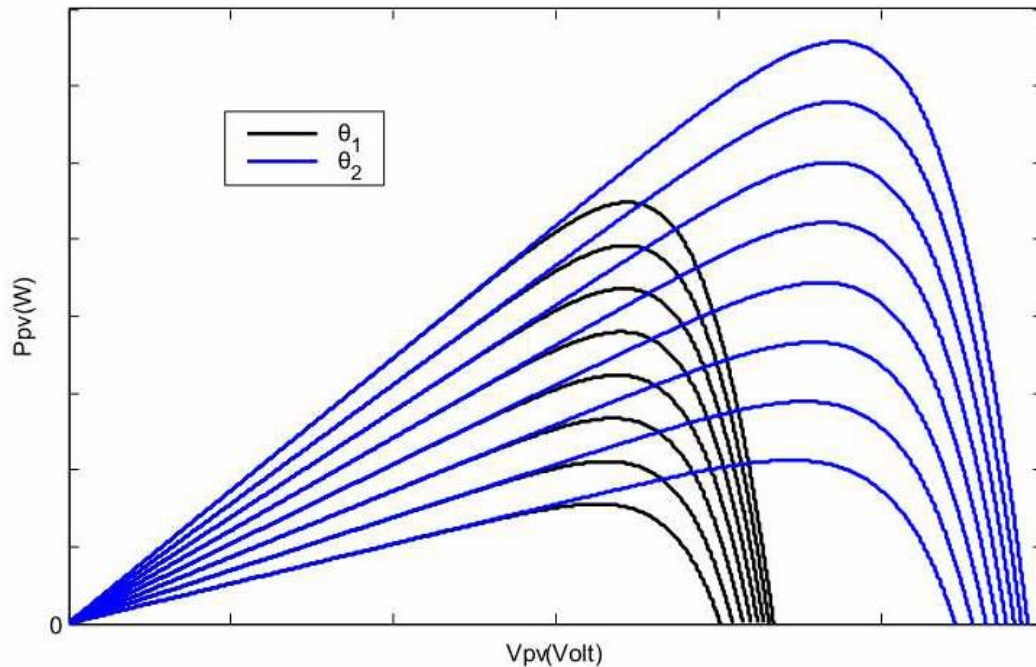
Όπως προανέφερα και πιο πάνω, την ευθύνη για την εύρεση του σημείου μέγιστης ισχύος την έχει αποκλειστικά η λειτουργία των ανιχνευτών σημείου ισχύος (MPPT). Για να γίνει κατανοητό όμως το τι ακριβώς είναι το Μέγιστο Σημείο Ισχύος, να αναφερθεί ότι μια συστοιχία φωτοβολταϊκών κάτω από σταθερή και ομοιόμορφη ακτινοβολία λειτουργεί σύμφωνα με μια χαρακτηριστική καμπύλη ρεύματος - τάσης. Σε αυτήν την καμπύλη υπάρχει ένα σημείο στο οποίο η συστοιχία φωτοβολταϊκών λειτουργεί με τη μέγιστη απόδοση και παράγει τη μέγιστη ισχύ. Αυτό είναι και το Μέγιστο Σημείο Ισχύος της φωτοβολταϊκής συστοιχίας. Να σημειωθεί ότι το σημείο αυτό δεν μπορεί να είναι γνωστό γιατί δεν είναι σταθερό, αφού η χαρακτηριστική καμπύλη λειτουργίας της φωτοβολταϊκής συστοιχίας αλλάζει με την αλλαγή της ηλιακής ακτινοβολίας. Έτσι το Σημείο Μέγιστης Ισχύος είναι διαφορετικό κατά τις πρωινές σε σχέση με τις απογευματινές ώρες, όπου και η ηλιακή ακτινοβολία είναι ασθενέστερη. Σύμφωνα με τα παραπάνω και δεδομένου ότι κατά την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι επιθυμητή η μέγιστη απόδοση των διατάξεων και η παραγωγή μέγιστης δυνατής ισχύος, γίνεται αντιληπτό ότι υπάρχει ανάγκη κατασκευής διατάξεων, οι οποίες θα ανιχνεύουν το Μέγιστο Σημείο Ισχύος και θα εξαναγκάζουν τη φωτοβολταϊκή συστοιχία να λειτουργεί σε αυτό το σημείο. Στο Σχήμα 2.1 παρουσιάζεται η καμπύλη I - V για δύο διαφορετικές θερμοκρασίες και διαφορετικές τιμές ακτινοβολίας, όπου φαίνεται το MPP και το σημείο λειτουργίας μιας διάταξης MPPT και στο Σχήμα 2.2 παρουσιάζεται η καμπύλη I-V για ανάλογες συνθήκες:



Σχήμα 2-1: Καμπύλες I-V φωτοβολταϊκού στοιχείου για διάφορες ακτινοβολίες και θερμοκρασίες

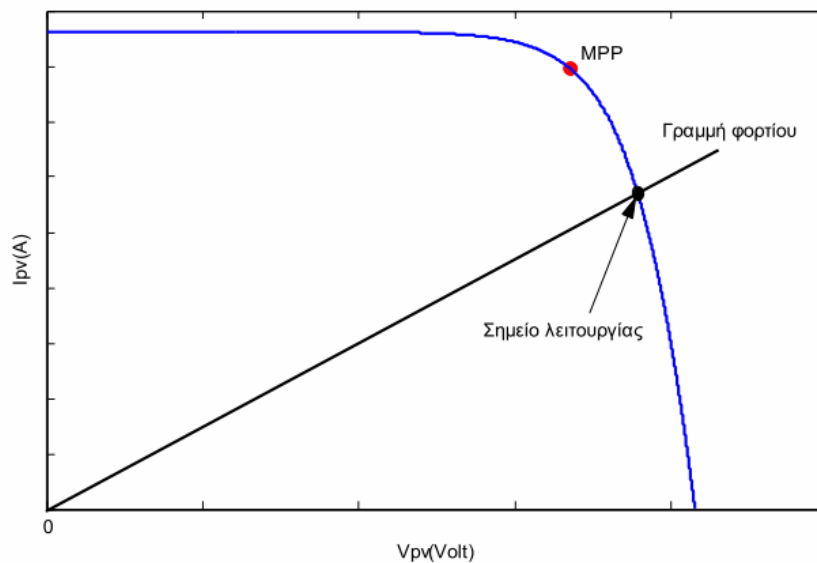
Το σημείο μέγιστης ισχύος μιας φωτοβολταϊκής συστοιχίας παίζει συνήθως σημαντικό ρόλο στην απόδοση των φωτοβολταϊκών συστημάτων. Σε αντίθεση με άλλες πηγές ηλεκτρικής ενέργειας, η απόδοση του φωτοβολταϊκού στοιχείου δεν είναι σταθερή αλλά εξαρτάται πάντοτε από το φορτίο που τροφοδοτεί, δηλαδή την τιμή της αντίστασης που είναι συνδεδεμένη στα άκρα του. Όταν δεν υπάρχει καθόλου αντίσταση, συναντάται η μέγιστη τάση εξόδου, η τάση ανοιχτοκύκλωσης V_{oc} .

Αντίθετα όταν βραχυκυκλωθούν τα άκρα της γεννήτριας, η τάση μηδενίζεται αλλά έχουμε μέγιστη ροή ρεύματος, το ρεύμα βραχυκύκλωσης I_{sc} . Ωστόσο, η ισχύς που παράγεται για κάθε ζεύγος τιμών τάσης - έντασης δεν είναι πάντα σταθερή αλλά μηδενίζεται στις ακραίες συνθήκες ανοιχτοκύκλωσης-βραχυκύκλωσης και παρουσιάζει ένα μέγιστο για συγκεκριμένη τιμή τάσης - έντασης. Επιθυμητό είναι λοιπόν σε κάθε εγκατάσταση φωτοβολταϊκών οι συστοιχίες να λειτουργούν, παράγοντας τις τιμές αυτές τάσης - έντασης που δίνουν κάθε στιγμή τη μέγιστη ισχύ.



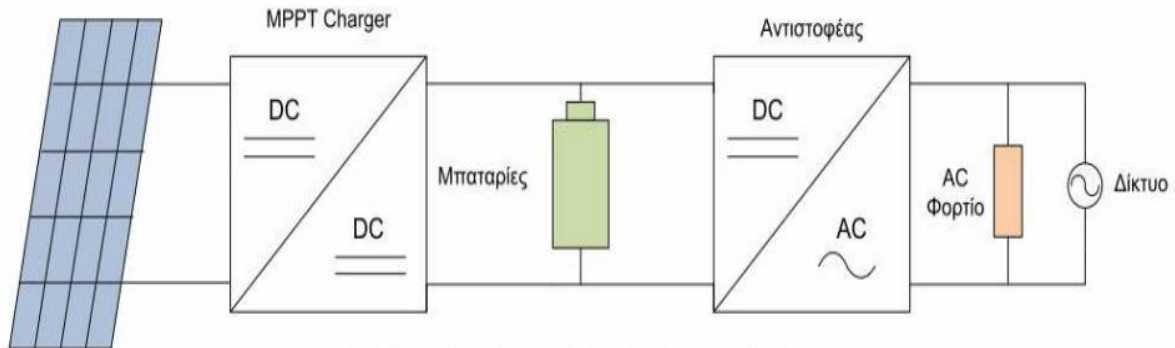
Σχήμα 2-2: Καμπύλες P-V φωτοβολταϊκού στοιχείου για διάφορες ακτινοβολίες και θερμοκρασίες

Στο σχήμα 2.3 φαίνεται ένα παράδειγμα σε μια φωτοβολταϊκή συστοιχία που είναι άμεσα συνδεδεμένη με ένα φορτίο με διατάξεις ανίχνευσης Μέγιστου Σημείου Ισχύος, το σημείο λειτουργίας του συστήματος θα είναι στην τομή της καμπύλης ρεύματος - τάσης της φωτοβολταϊκής συστοιχίας και της γραμμής του φορτίου.



Σχήμα 2-3: Καμπύλη I-V και σημείο λειτουργίας για συγκεκριμένο φορτίο

Επιπρόσθετα, στις περισσότερες εφαρμογές απαιτείται και η χρησιμοποίηση ενός επιπλέον μετατροπέα, ο οποίος παρεμβάλλεται ανάμεσα σε ΑΠΕ και αντιστροφέα. Αυτό χρειάζεται λόγω του ότι πολλές πηγές παράγουν συνεχή τάση πολύ μικρού ή πολύ μεγάλου πλάτους, με αποτέλεσμα ο αντιστροφέας συνεχούς τάσης σε εναλλασσόμενη να μην έχει τη δυνατότητα να επιτύχει το επιθυμητό επίπεδο πλάτους για συγχρονισμό με το δίκτυο. [4,5]



Σχήμα 2-5: Τυπικό φωτοβολταϊκό

2.3 Αντιστροφείς

Οι αντιστροφείς είναι ηλεκτρονικές διατάξεις, οι οποίες έχουν την ιδιότητα να μετατρέπουν μια πηγή συνεχούς τάσης ή ρεύματος σε εναλλασσόμενη, με μεταβλητή συχνότητα και πλάτος. Για παράδειγμα αν έχουμε ένα συσσωρευτή των 12 Volts και θέλουμε να παράγουμε εναλλασσόμενη τάση, τότε μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε ένα αντιστροφέα ισχύος, ο οποίος να μας δώσει στην έξοδο του 220 Volts RMS, συχνότητας 50 Hz. [5]

Οι αντιστροφείς χρησιμοποιούνται σε ένα μεγάλο φάσμα εφαρμογών, με κυριότερα σημεία τα πιο κάτω:

- Σε συστήματα ελέγχου ταχύτητας εναλλασσόμενων ηλεκτρικών μηχανών.
- Σε συστήματα ΑΠΕ.
- Σε συστήματα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, ως αντισταθμιστές αέργου ισχύος ή ως ενεργά φίλτρα σε ευέλικτα συστήματα μεταφοράς ισχύος (FACTS).
- Σε συστήματα αδιάκοπης παροχής ισχύος (UPS).
- Σε συστήματα διόρθωσης του συντελεστή ισχύος (Power Factor Correction systems).

Η είσοδος του αντιστροφέα είναι μια πηγή σταθερής τάσης, συνήθως ΑΠΕ ή μπαταρίες. Σε μερικές περιπτώσεις για τη λειτουργία του αντιστροφέα, η συνεχής τάση παρέχεται μέσω ανόρθωσης της εναλλασσόμενης τάσης του δικτύου. Η ανόρθωση αυτή επιτυγχάνεται είτε με ελεγχόμενες γέφυρες ημιαγωγικών στοιχείων, είτε με μη ελεγχόμενες ανορθωτικές γέφυρες διόδων.

Ο έλεγχος του πλάτους και της συχνότητας της κυματομορφής εξόδου του αντιστροφέα καθορίζεται από την έναυση και τη σβέση των ημιαγωγικών στοιχείων που το αποτελούν, οι οποίες ρυθμίζονται μέσω του κυκλώματος παλμοδότησης του αντιστροφέα. Το πλάτος της βασικής αρμονικής της κυματομορφής εξόδου καθορίζεται είτε με ρύθμιση του χρόνου έναυσης και σβέσης των ημιαγωγών είτε με ρύθμιση της τάσης εισόδου του αντιστροφέα. Η ρύθμιση του χρόνου αγωγής του αντιστροφέα γίνεται μέσω του λόγου κατάτμησης D (Duty Cycle) του αντιστροφέα. Ο λόγος κατάτμησης ισούται με το χρόνο κατά τον οποίο το ημιαγωγικό στοιχείο άγει προς το συνολικό χρόνο μιας περιόδου. Δηλαδή:

$$D = \frac{t_{on}}{T_s} \quad (2.1)$$

Ωπου:
$$T_s = \frac{1}{f_s} \quad (2.2)$$

Με f_s τη διακοπτική συχνότητα του αντιστροφέα.

2.3.1 Κατηγορίες Αντιστροφέων

Οι αντιστροφείς διακρίνονται κυρίως σε δύο κατηγορίες, με βάση το είδος της κυματομορφής εξόδου, οι οποίες είναι:

1. **Στους αντιστροφείς πηγής τάσεως (VSI – Voltage Source Inverters)** που τροφοδοτούνται από πηγή συνεχούς τάσεως. Συμπεριφέρονται ως φυσική πηγή τάσης, κάτι που απαιτείται από τις περισσότερες βιομηχανικές εφαρμογές και για αυτό είναι πιο διαδεδομένοι στην πράξη.
2. **Στους αντιστροφείς πηγής ρεύματος (CSI – Current Source Inverters)** που τροφοδοτούνται από πηγή συνεχούς ρεύματος. Χρησιμοποιούνται σε μηχανές πολύ υψηλής ισχύος και η εφαρμογή τους είναι περιορισμένη

Οι δύο παραπάνω κατηγορίες μπορούν να υποδιαιρεθούν ως εξής:

- Στους μονοφασικούς αντιστροφείς σε συνδεσμολογία ημιγέφυρας.
- Στους μονοφασικούς αντιστροφείς σε συνδεσμολογία γέφυρας.
- Στους τριφασικούς αντιστροφείς σε συνδεσμολογία ημιγέφυρας.

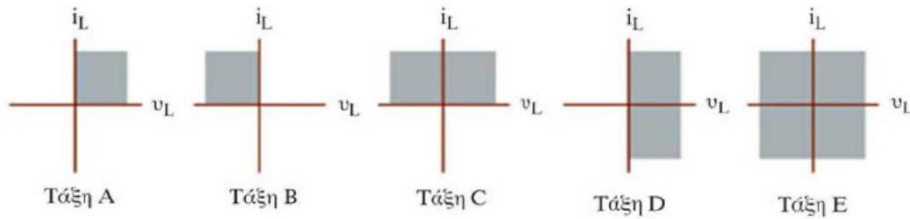
Ανάλογα με τα επίπεδα της φασικής τάσης εξόδου τους οι αντιστροφείς μπορούν να διακριθούν σε αντιστροφείς δύο επιπέδων, τριών επιπέδων, τεσσάρων επιπέδων κτλ. Τα επίπεδα τάσης των αντιστροφέων έχουν να κάνουν με το πόσες λήψεις μπορείς να πάρεις. Για παράδειγμα στο αντιστροφέα δύο επιπέδων, οι λήψεις που μπορείς να πάρεις είναι δύο, θετικές και αρνητικές τιμές ($\pm \frac{V}{2}$), ενώ στο αντιστροφέα τριών επιπέδων μπορούμε να πάρουμε και τη μέση λήψη, τη μηδενική. Αντίστοιχα και των υπόλοιπων επιπέδων. [6]

2.4 Μετατροπείς συνεχούς τάσης σε συνεχή

Οι μετατροπείς συνεχούς τάσης (DC – DC Converters) είναι τα κυκλώματα εκείνα τα οποία χρησιμοποιούνται για την μετατροπή μιας DC τάσης εισόδου σε μια ελεγχόμενη DC τάση εξόδου με επιθυμητό πλάτος και πολικότητα. Οι μετατροπείς συνεχούς τάσης έχουν ευρεία εφαρμογή σε συστήματα ελέγχου ταχύτητας ηλεκτρικών μηχανών συνεχούς ρεύματος (ηλεκτρικά οχήματα, υπόγεια τρένα), σε συστήματα ηλεκτρικής τροφοδοσίας τηλεπικοινωνιών και διαστημικών συστημάτων, παλμοτροφοδοτικά ηλεκτρονικών, όπως επίσης η χρήση των μετατροπέων είναι ιδιαίτερα διαδεδομένη στις ΑΠΕ. Οι περισσότερες ΑΠΕ παράγουν συνεχή τάση, πολλές φορές σε τιμές ακατάλληλες για την τροφοδοσία των συγχρονισμένων με το δίκτυο αντιστροφέων. Έτσι χρησιμοποιούνται οι συγκεκριμένοι μετατροπείς για τη διαμόρφωση σε κατάλληλο επίπεδο της συνεχούς τάσης εξόδου των ΑΠΕ, ώστε να γίνει κατάλληλη για τάση εισόδου των αντιστροφέων. [5]

Για να ταξινομήσουμε τους μετατροπείς Σ.Ρ./Σ.Ρ. υπάρχουν δύο κριτήρια:

1. Ανάλογα με τα τεταρτημόρια στα οποία λειτουργούν (UL,IL) τα οποία φαίνονται στο παρακάτω σχήμα.

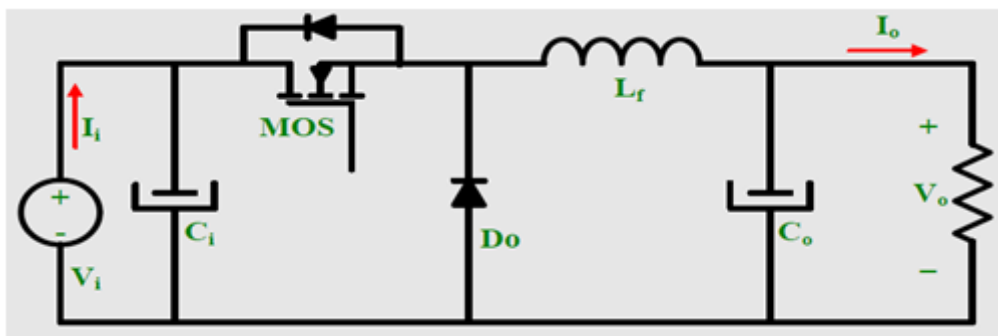


2. Οι μετατροπείς συνεχούς τάσης υποδιαιρούνται σε τρεις κύριες υποκατηγορίες, από το συνδυασμό των οποίων μπορούν να προκύψουν επιμέρους τοπολογίες. Οι τρεις κύριες υποκατηγορίες είναι [6]:
1. Μετατροπέας υποβιβασμού τάσης (step-down ή buck converter).
 2. Μετατροπέας ανύψωσης τάσης (step-up ή boost converter).
 3. Μετατροπέας ανύψωσης – υποβιβασμού τάσης (buck-boost converter).

2.5 Μετατροπέας υποβιβασμού τάσης DC-DC (step down ή buck DC-DC converter)

Ο Buck Converter, ή μετατροπέας υποβιβασμού είναι ένα παλμοτροφοδοτικό συνεχούς σε συνεχές ρεύμα που η τάση εξόδου είναι μικρότερη από την τάση στην είσοδο του παλμοτροφοδοτικού. Παράγει μέση τιμή εξόδου V_o μικρότερη από την DC τάση εισόδου V_i . Η κύρια χρήση του σε ΑΠΕ είναι όταν η τάση που παράγεται είναι πολύ υψηλή για απευθείας εφαρμογή στον διασυνδεδεμένο αντιστροφέα. Η λειτουργία του μετατροπέα βασίζεται στον ημιαγωγίμο διακόπτη και στη σχετική διάρκεια αγωγής του D . Η τάση εισόδου V_i και η τάση εξόδου V_o συνδέονται με το λόγο κατάτμησης D , σύμφωνα με τη σχέση (σε συνεχή αγωγή):

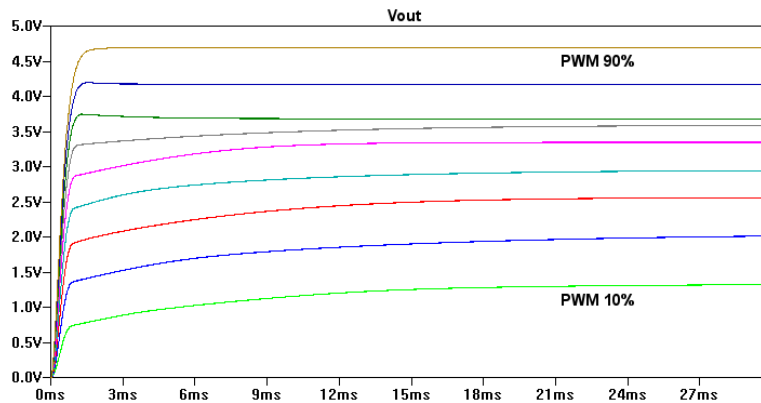
$$\frac{V_o}{V_i} = D \quad (2.3)$$



Σχήμα 2-5: Κυκλωματικό διάγραμμα μετατροπέα υποβιβασμού συνεχούς τάσης υποβιβασμού

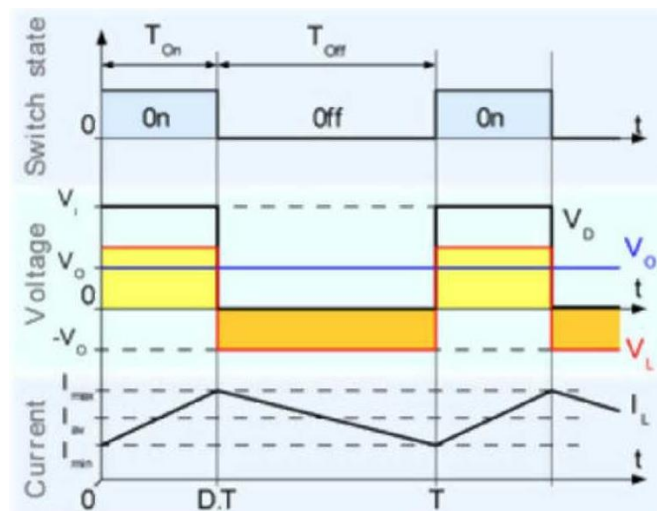
Το κυκλωματικό διάγραμμα του μετατροπέα υποβιβασμού συνεχής τάσης φαίνεται στο σχήμα 2.5. Όταν το ημιαγωγικό στοιχείο άγει, υπάρχει απευθείας μεταφορά ενέργειας από την είσοδο στην έξοδο. Η δίοδος ελεύθερης διέλευσης πολώνεται ανάστροφα και δεν άγει. Όταν το ημιαγωγικό στοιχείο δεν άγει, το πηνίο τείνει να διατηρήσει τη φορά του ρεύματος προς την ίδια κατεύθυνση, ενεργώντας σαν πηγή ρεύματος. Σαν αποτέλεσμα η διαφορά δυναμικού στα άκρα του αναστρέφεται και η δίοδος άγει.

Όταν ο διακόπτης είναι ανοικτός (Off) το ρεύμα που περνά από το κύκλωμα είναι μηδέν. Όταν ο διακόπτης κλείνει (On) για πρώτη φορά το ρεύμα αρχίζει να αυξάνεται, και το πηνίο θα αρχίσει να δημιουργεί μία τάση στα άκρα του που αντιστέκεται στην αλλαγή του ρεύματος.[7]



Σχ. 2-6 Παραπάνω σχήμα βλέπουμε την τάση εξόδου για τον παραπάνω μετατροπέα.

Βλέπουμε πως η τάση εξόδου είναι μικρότερη από αυτή της εισόδου ($V_{in} = 5 \text{ v}$). Όταν αλλάζει το εύρος της PWM (Pulse Width Modulation) αλλάζει και τάση εξόδου. Όσο αυξάνεται ο χρόνος που είναι κλειστός ο διακόπτης, αυξάνεται και τάση, χωρίς να μπορεί να ξεπεράσει την τάση εισόδου. Ακόμη και 99,9% να γίνει ο κύκλος εργασίας η τάση εξόδου θα είναι μικρότερη.



Σχ. 2-7: Χαρακτηριστική των τάσεων και των ρευμάτων του συγκεκριμένου μετατροπέα.

Παρατηρούμε ότι το ρεύμα και η τάση εξόδου του μετατροπέα είναι πάντα θετικά λόγω της διόδου «ελεύθερης διέλευσης» για αυτό το λόγω η περιοχή λειτουργίας του μετατροπέα μας είναι στο 1ο τεταρτημόριο. Παραπάνω φαίνεται η χαρακτηριστική των τάσεων και των ρευμάτων του συγκεκριμένου μετατροπέα.

Η μέση τιμή της τάσης εξόδου δίνεται από τον παρακάτω μαθηματικό τύπο:

$$V_{0,average} = \frac{1}{T} \int_0^T V_0(t) dt = \frac{1}{T} \left[\int_0^{t_{on}} V_i dt + \int_{t_{on}}^T 0 dt \right] + \frac{t_{on}}{T} \cdot V_i \quad (2.4)$$

Όπου:

- $\frac{t_{on}}{T} = \alpha$ είναι ο βαθμός χρησιμοποίησης (*duty - cycle*) του μετατροπέα.

Η ενεργός τιμή της τάσης εξόδου δίνεται από τον παρακάτω μαθηματικό τύπο:

$$V_{0,rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T V_0^2(t) dt} = \sqrt{V_0^2(t) dt} = V_{0,average} \sqrt{\frac{T}{t_{on}}} \quad (2.5)$$

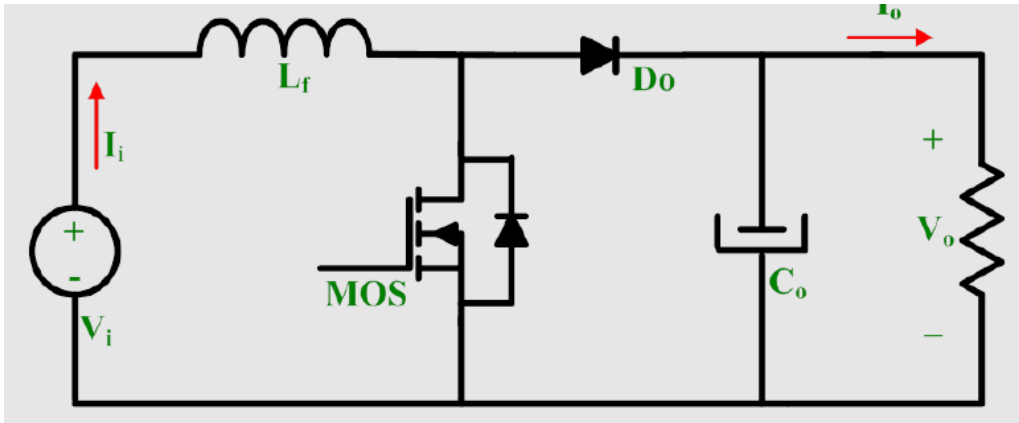
Εάν μεταβάλλουμε τον βαθμό χρησιμοποίησης πετυχαίνουμε γραμμική μεταβολή της $V_{0,average}$ από το μηδέν έως την τιμή της τάσης εισόδου V_i . Την μεταβολή του βαθμού χρησιμοποίησης μπορούμε να την πετύχουμε με τους δύο παρακάτω τρόπους:

- Κρατώντας σταθερή την συχνότητα και μεταβάλλοντας τον χρόνο αγωγής t_{on}
- Κρατώντας σταθερά τα t_{on} και t_{OFF} μεταβάλλουμε την περίοδο T .

2.6 Μετατροπέας ανύψωσης τάσης DC-DC (step up ή buck-boost DC-DC converter)

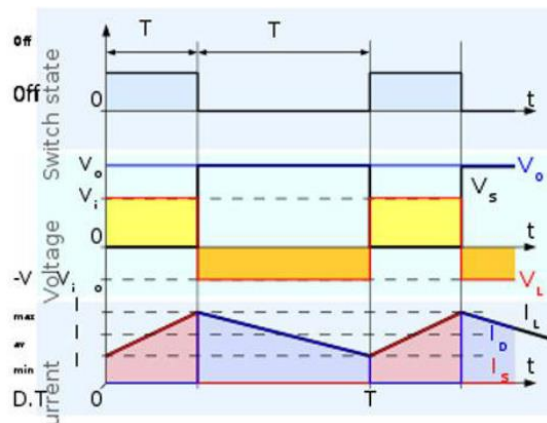
Ο μετατροπέας ανύψωσης τάσης παράγει μέση τάση εξόδου V_o μεγαλύτερη από την DC τάση εισόδου V_i . Η κύρια χρήση του σε ΑΠΕ είναι όταν το επίπεδο της τάσης που παράγεται δεν επαρκεί για απευθείας εφαρμογή στο διασυνδεδεμένο αντιστροφέα. Σε αυτή την περίπτωση, η τάση εισόδου V_i και η τάση εξόδου V_o συνδέονται με το λόγο κατάτμησης D , ως εξής (σε συνεχή αγωγή)

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{1}{1 - D} \quad (2.6)$$



Σχήμα 2-8 Κυκλωματικό διάγραμμα μετατροπέα ανύψωσης συνεχούς τάσης

Το κυκλωματικό διάγραμμα του μετατροπέα ανύψωσης συνεχούς τάσης φαίνεται στο σχήμα 2.8. Όταν το ημιαγωγικό στοιχείο άγει αποθηκεύεται ενέργεια στο πηνίο εξομάλυνσης L_f . Η διόδος ελεύθερης διέλευσης πολώνεται ανάστροφα και δεν άγει, με αποτέλεσμα την απομόνωση της εξόδου από την είσοδο. Όταν το ημιαγωγικό στοιχείο δεν άγει, η έξοδος απορροφά ενέργεια τόσο από την είσοδο, όσο και από το πηνίο εξομάλυνσης L_f . Η διαφορά δυναμικού στα άκρα της επαγωγής L_f αντιστρέφεται και σαν αποτέλεσμα η διόδος πολώνεται ορθά και άγει.



Σχ. 2-9 Χαρακτηριστική ρευμάτων και τάσεων

Στο σχήμα 2.9 βλέπουμε την χαρακτηριστική ρευμάτων και τάσεων ενός μετατροπέα Σ.Ρ./Σ.Ρ. ανύψωσης τάσης για συνεχή αγωγή.

Η μέση τιμή της τάσης εξόδου δίνεται από τον παρακάτω μαθηματικό τύπο:

$$V_{0,average} = V_i \cdot \frac{T}{T - t_{on}} \quad (2.7)$$

Όπου:

- $\frac{t_{on}}{T} = \alpha$ είναι ο βαθμός χρησιμοποίησης (*duty - cycle*) του μετατροπέα.

Η ενεργός τιμή της τάσης εξόδου δίνεται από τον παρακάτω μαθηματικό τύπο:

$$V_{0,rms} = V_{0,average} \sqrt{\frac{T}{T-t_{on}}} \quad (2.8)$$

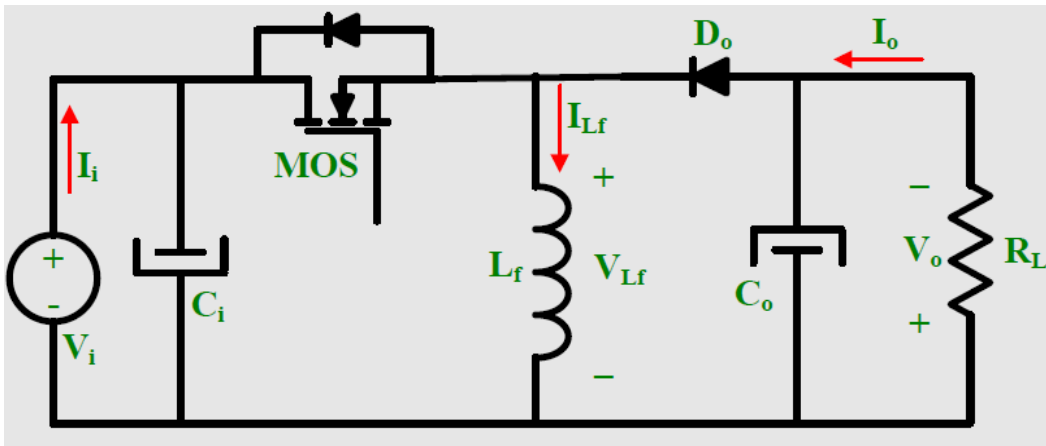
Και σε αυτόν τον μετατροπέα εάν μεταβάλλουμε τον βαθμό χρησιμοποίησης πετυχαίνουμε γραμμική αύξηση της τάσης εξόδου από την τιμή της τάσης εισόδου έως μεγαλύτερες τιμές της τάσης εισόδου. Επίσης και σε αυτόν τον μετατροπέα πετυχαίνουμε μεταβολή του βαθμού χρησιμοποίησης με τους δύο τρόπους όπως και στον μετατροπέα υποβιβασμού.

2.7 Μετατροπέας ανύψωσης – υποβιβασμού τάσης (step down/up ή buck-boost DC-DC converter).

Ο μικτός DC-DC μετατροπέας έχει τη δυνατότητα να παράγει τάση εξόδου V_o , μεγαλύτερη αλλά και μικρότερη από τη DC τάση εισόδου V_i , με αντίστροφη πολικότητα από αυτή της εισόδου. Χρησιμοποιείται κατά κόρον στις ΑΠΕ, όπου δεν γνωρίζουμε με βεβαιότητα το επίπεδο της τάσης που παράγουν.

Ο μετατροπέας ανύψωσης-υποβιβασμού συνεχούς τάσης έχει τη δυνατότητα να αλλάζει τη λειτουργία του από ανύψωση σε υποβιβασμό τάσης και το αντίστροφο με αλλαγή του λόγου κατάτμησης D . Για $D > 0.5$ λειτουργεί ως Boost, ενώ για $D < 0.5$ λειτουργεί σαν Buck.

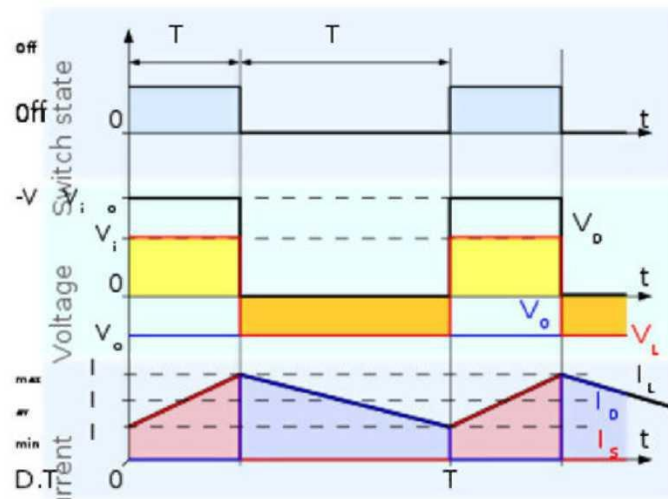
Σε αυτή την περίπτωση η τάση εισόδου V_i και η τάση εξόδου V_o συνδέονται με το λόγο κατάτμησης ως εξής (σε συνεχή αγωγή):



Σχήμα 2-10 Κυκλωματικό διάγραμμα μετατροπέα ανύψωσης-υποβιβασμού συνεχούς τάσης

$$D = \frac{V_o}{V_o + V_i} \quad (2.9)$$

Το κυκλωματικό διάγραμμα του μετατροπέα ανύψωσης – υποβιβασμού συνεχούς τάσης φαίνεται στο σχήμα 2.10. Όταν το ημιαγωγικό στοιχείο άγει, αποθηκεύεται ενέργεια στο πηνίο εξομάλυνσης L_f . Η διάδος ελεύθερης διέλευσης πολώνεται ανάστροφα και δεν άγει, με αποτέλεσμα την απομόνωση της εξόδου από την είσοδο. Όταν είναι σε αγωγή η συμπεριφορά του μικτού μετατροπέα είναι παρόμοια με αυτή του μετατροπέα ανύψωσης. Όταν το ημιαγωγικό στοιχείο δεν άγει, η αποθηκευμένη ενέργεια στο πηνίο εξομάλυνσης L_f αποδίδεται στην έξοδο. Σε αυτό το χρονικό διάστημα η είσοδος είναι απομονωμένη από την έξοδο και δεν παρέχει ενέργεια. Δηλαδή όταν δεν άγει ο μικτός μετατροπέας έχει παρόμοια συμπεριφορά με τον μετατροπέα υποβιβασμού.



Σχ. 2.11 Χαρακτηριστική ρευμάτων και τάσεων ενός μετατροπέα Σ.Ρ./Σ.Ρ. υποβιβασμού - ανύψωσης τάσης για συνεχή αγωγή.

Η μέση τιμή της τάσης εξόδου δίνεται από τον παρακάτω μαθηματικό τύπο:

$$V_{0,average} = \left(\frac{-\left(\frac{t_{on}}{T}\right)}{1-\left(\frac{t_{on}}{T}\right)} \right) \cdot V_i \quad (2.10)$$

Όπου:

- $\frac{t_{on}}{T} = \alpha$ είναι ο βαθμός χρησιμοποίησης (*duty - cycle*) του μετατροπέα.

Η ενεργός τιμή της τάσης εξόδου δίνεται από τον παρακάτω μαθηματικό τύπο:

$$V_{0,average} = V_{0,average} \cdot \sqrt{\left(\frac{-\left(\frac{t_{on}}{T}\right)}{1-\left(\frac{t_{on}}{T}\right)} \right)} \quad (2.11)$$

Και σε αυτόν τον μετατροπέα χρησιμοποιούμε τους δύο παραπάνω τρόπους για να πετύχουμε μεταβολή του βαθμού χρησιμοποίησης. Αξίζει να σημειωθεί ότι όταν ο βαθμός χρησιμοποίησης είναι μεγαλύτερος του 0,5 τότε η τιμή της τάσης εξόδου αρχίζει και παίρνει τιμές μεγαλύτερες από την τιμή της τάσης εισόδου ενώ για βαθμό χρησιμοποίησης μικρότερο του 0,5 η τιμή της τάσης εξόδου αρχίζει και παίρνει τιμές μικρότερες από την τιμή της τάσης εισόδου.

2.9 Συμπεράσματα

Η λειτουργία του μικτού DC - DC μετατροπέα θα αναλυθεί στο επόμενο κεφάλαιο, καθώς σε αυτή τη πτυχιακή εργασία μελετάται φωτοβολταϊκό σύστημα με τη χρήση του συγκεκριμένου μετατροπέα. Η λογική λειτουργίας των DC - DC μετατροπέων είναι κατά βάση η ίδια καθώς όλοι περιλαμβάνουν τα ίδια παθητικά και ενεργά στοιχεία. Ο DC - DC μετατροπέας μπορεί να δημιουργηθεί και από τη σύνδεση σε σειρά των άλλων δύο βασικών τοπολογιών, δηλαδή το μετατροπέα ανύψωσης και το μετατροπέα υποβιβασμού τάσης. Η διαφορά τους όμως είναι στη σχέση της τάσης εξόδου σε σχέση με της εισόδου. Συγκεκριμένα, ο DC - DC μετατροπέας υποβιβασμού τάσης δημιουργεί τάση εξόδου μικρότερη από την τάση εισόδου, ο DC - DC μετατροπέας ανύψωσης τάσης δημιουργεί μεγαλύτερη τάση εξόδου, ενώ ο μικτός DC - DC μετατροπέας δημιουργεί και μεγαλύτερη αλλά και μικρότερη τάση εξόδου σε σχέση με την τάση εισόδου αλλά με διαφορετική πολικότητα. Το επίπεδο της τάσης εξόδου σε όλους τους DC - DC μετατροπέες ρυθμίζεται με τη μεταβολή της διάρκειας αγωγής (*Duty Cycle*) του ημιαγώγιμου διακόπτη των διατάξεων.

Επομένως, ανάλογα με την εφαρμογή των φωτοβολταϊκών στοιχείων, μπορεί να επιλεγεί κάποιος από αυτούς τους DC - DC μετατροπέες. Δηλαδή, αν η τάση εξόδου των στοιχείων κυμαίνεται μεταξύ 40 έως 160V και απαιτείται σταθερή τάση εξόδου 20V, είναι προφανές ότι θα χρησιμοποιηθεί ένας DC - DC μετατροπέας υποβιβασμού τάσης. Σε περίπτωση που η επιθυμητή τάση εξόδου είναι 170V τότε θα χρησιμοποιηθεί DC - DC μετατροπέας ανύψωσης τάσης, ενώ αν η τάση εξόδου πρέπει να είναι 80V, μπορεί να εφαρμοστεί ο μικτός DC - DC μετατροπέας. Οι εφαρμογές αυτές αποτελούν απλά παραδείγματα εφαρμογής των τριών βασικών DC - DC μετατροπέων σε φωτοβολταϊκό συστήματα με έλεγχο MPPT και αναφέρθηκαν για καλύτερη κατανόηση των συστημάτων αυτών.

Αναφορές & Βιβλιογραφία:

- [4] Ε. Μητρονίκας, Π.Ι. Παπαδόπουλος, Α.Ν. Σαφάκας, Π.Δ. Λαδακάκος, Μ.Γ. Ιωαννίδου, « Σύγχρονα ηλεκτρονικά στοιχεία και διατάξεις ισχύος για βιομηχανική χρήση».
- [5] Ι. Μπουλούμπαση, «Συγχρονισμός μετατροπέα σε μικροδίκτυο και ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ μετατροπέων», Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, Πανεπιστήμιο Πατρών, 2015
- [6] Στέφανος Ν. Μανιάς, «Ηλεκτρονικά Ισχύος», Εκδόσεις Συμεών 2000
- [7] <https://alexkaltsas.wordpress.com/2014/04/23/dc-dc-converters>

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 - ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΥ ΜΙΚΤΟΥ

DC-DC ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑ

3.1 Γενικά για το μικτό μετατροπέα

Στο προηγούμενο κεφάλαιο έγινε σύντομη περιγραφή των μετατροπέων συνεχούς σε συνεχές ρεύμα υποβιβασμού και ανύψωσης τάσης κατά τη συνεχή λειτουργία τους, δηλαδή όταν το ρεύμα του πηνίου δεν είναι διακοπτόμενο. Σε αυτό το κεφάλαιο θα γίνει μια λεπτομερέστερη περιγραφή του μικτού DC - DC μετατροπέα (step down/up ή Buck - Boost DC - DC converter) τόσο κατά τη συνεχή όσο και κατά την ασυνεχή λειτουργία.

Ο λόγος που θα χρησιμοποιήσουμε το συγκεκριμένο μετατροπέα, αντί για οποιοδήποτε άλλο, είναι γιατί έχει αρκετά πλεονεκτήματα σε σχέση με τις άλλες τοπολογίες αντιστροφών. Σημαντικό πλεονέκτημα του μετατροπέα είναι ότι έχει τη δυνατότητα, με κάποιες παραλλαγές κάθε φορά στη λογική της συνδεσμολογίας και στην παλμοδότηση του, να χρησιμοποιείται σε μια πληθώρα εφαρμογών.

Οι κύριες εφαρμογές του είναι:

- **Τροφοδοσία ενός απομονωμένου φορτίου**, όπου ο μετατροπέας δεν είναι συνδεδεμένος στο δίκτυο, είτε με ΑΠΕ, είτε χωρίς.
- **Σύνδεση μετατροπέα στο δίκτυο**, όπου εδώ συνδέεται είτε σε ισχυρό δίκτυο, είτε σε ασθενές δίκτυο και αποδίδει την ισχύ της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής σε αυτό.

Τα κύρια πλεονεκτήματα του είναι [8]:

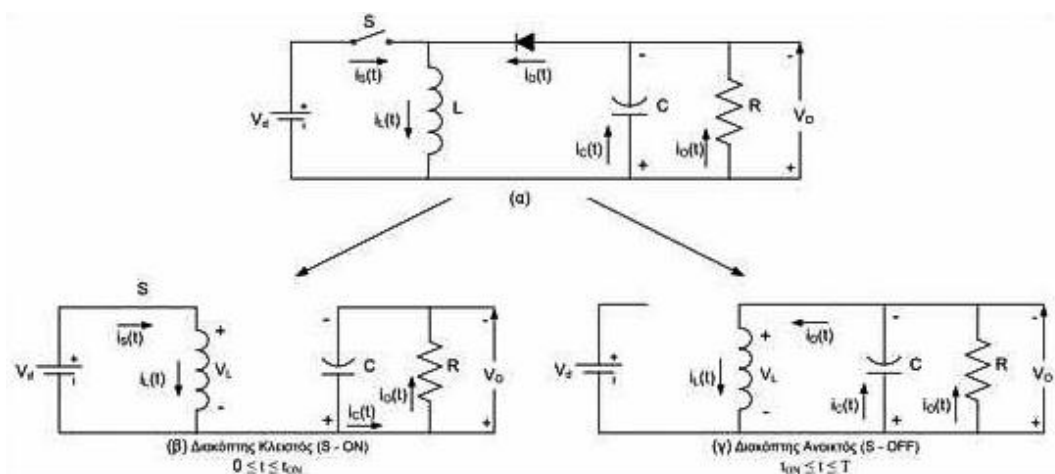
- **Μειωμένες απώλειες** λόγω ενός διακοπτικού στοιχείου που λειτουργεί σε υψηλή συχνότητα. Τα MOSFET που εμπεριέχονται στο μετατροπέα, έχουν χαμηλές απώλειες μετάβασης λόγω μικρού χρόνου μετάβασης αφού οι συχνότητες μετάβασης τους κυμαίνεται από 30 έως 100 kHz
- Σε όλες τις περιπτώσεις που αναφέρονται πιο πάνω, ο μετατροπέας μπορεί να χρησιμοποιείται και για την απαλοιφή των αρμονικών, είτε τάσης είτε ρεύματος. Το γεγονός ότι μπορούμε να πάρουμε τις μετρήσεις από την έξοδο του μετατροπέα, σημείο που συμπίπτει με το σημείο κοινής σύνδεσης σε περίπτωση σύνδεσης με το δίκτυο, παρουσιάζει ένα μεγάλο πλεονέκτημα. Άρα ο μετατροπέας μπορεί να βελτιώσει το αρμονικό περιεχόμενο, από όπου και αν προέρχεται η παραμόρφωση.
- Έχει **μεγάλο εύρος τάσης λειτουργίας**. Η τάση που μπορεί να αναπτύξει το MOSFET είναι μεγαλύτερη των 1000 volts ενώ το ρεύμα στην ίδια κατάσταση παραμένει μικρό. Σε αντίθετη περίπτωση, εάν η τάση είναι μικρή τότε το ρεύμα μπορεί να κυμανθεί περίπου στα 100A.

Χωρίς χρήση μεγάλων πυκνωτών και χωρίς τη χρήση ηλεκτρολυτικών πυκνωτών.

3.2 Λειτουργία μικτού μετατροπέα

3.2.1 Λειτουργία συνεχούς ρεύματος

Ο Buck-Boost Converter ή μικτός μετατροπέας υποβιβασμού-ανύψωσης είναι ένα παλμοτροφοδοτικό συνεχούς σε συνεχές ρεύμα που η τάση εξόδου μπορεί να είναι μεγαλύτερη ή μικρότερη (σε απόλυτη τιμή) από την τάση στην είσοδο του παλμοτροφοδοτικού. Έχει τη δυνατότητα να παράγει μέση τάση εξόδου V_0 και μεγαλύτερη αλλά και μικρότερη από την DC τάση εισόδου του V_d , σε απόλυτη τιμή από την τάση στην είσοδο του παλμοτροφοδοτικού. Συγκεκριμένα για μια περιοχή τιμών της διάρκειας αγωγής, ο step down/up ή Buck - Boost μετατροπέας λειτουργεί σαν μετατροπέας υποβιβασμού, ενώ για μια άλλη περιοχή λειτουργεί σαν μετατροπέας ανύψωσης τάσης. Στο σχήμα 3.1 παρουσιάζεται το κύκλωμα του μικτού DC - DC μετατροπέα, καθώς και τα ισοδύναμα κυκλώματα για τις δύο καταστάσεις του ημιαγωγίου διακόπτη που θα εξετάσουμε παρακάτω.

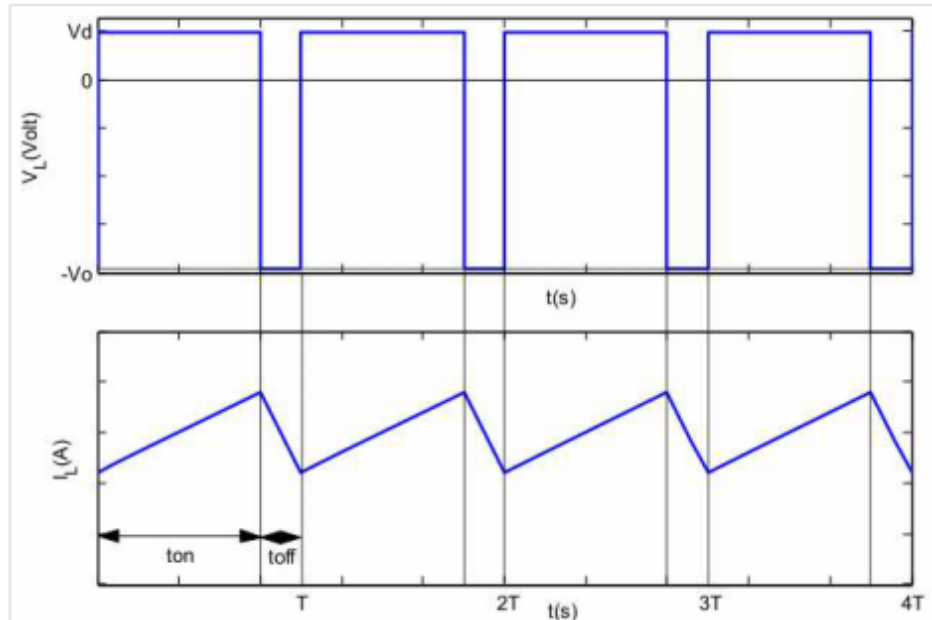


Σχ. 3-1: Κύκλωμα μικτού μετατροπέα και ισοδύναμα κυκλώματα για τις καταστάσεις του

Η τάση εξόδου σε έναν τέτοιο DC-DC μετατροπέα έχει αντίθετη πολικότητα από αυτή της πηγής. Και πάλι η τάση εξόδου εξαρτάται από τον κύκλο εργασίας του παλμού που ελέγχει τον ηλεκτρονικό διακόπτη. Κάθε φορά που η τάση εξόδου του μετατροπέα buck-boost μηδενίζεται αλλάζει το ζεύγος αγωγής του αντιστροφέα, με αποτέλεσμα την αλλαγή της πολικότητας της τάσης εξόδου του. Στην πραγματικότητα όμως, η τάση εξόδου του μετατροπέα μπορεί να γίνει μηδέν κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες, όπως όταν το φορτίο εξόδου είναι μεγάλο ή και όταν η συχνότητα είναι χαμηλή στην εναλλασσόμενη πλευρά. Επομένως η εναλλαγή πολικότητας γίνεται όταν η τάση εξόδου του μετατροπέα πέφτει σε μια ελάχιστη τιμή ($V_{dcm\min}$) και όχι όταν γίνεται μηδέν. Αυτό γίνεται κατορθωτό παρακολουθώντας συνεχώς την τάση εξόδου του μετατροπέα, χρησιμοποιώντας ένα μετατροπέα τάσης όπου να βρίσκει τη χαμηλότερη τιμή σε κάθε περίοδο. Έτσι δημιουργείται στην έξοδο του αντιστροφέα μια τάση με ίδια συχνότητα και ενεργό τιμή με την τάση του δικτύου.

Όσον αφορά τη λειτουργία του μικτού DC - DC μετατροπέα, είναι παρόμοια με τη λειτουργία των άλλων δύο DC - DC μετατροπέων αφού μπορεί να δημιουργηθεί και από τη σύνδεση σε σειρά των άλλων δύο βασικών τοπολογιών, δηλαδή το μετατροπέα ανύψωσης και το μετατροπέα υποβιβασμού τάσης. Όταν ο διακόπτης είναι κλειστός, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.1(β), η τάση της πηγής εφαρμόζεται στο πηνίο $V_L = V_d$, το οποίο αποταμιεύει ενέργεια και το ρεύμα του αυξάνεται. Όταν ο διακόπτης μετά από μια χρονική περίοδο ανοίξει, το πηνίο αποσυνδέεται από την πηγή και το ρεύμα αρχίζει να μικραίνει. Δηλαδή η ενέργεια που είναι αποθηκευμένη στο πηνίο αποδίδεται σαν μαγνητικό πεδίο στη βαθμίδα εξόδου και το ρεύμα του πηνίου μειώνεται στιγμιαία. Κατά τη χρονική αυτή περίοδο, το ρεύμα του πηνίου διαρρέει τη δίοδο η οποία έχει περάσει σε κατάσταση αγωγής,

ενώ η τάση του πηνίου είναι ίση με την τάση εξόδου $V_L = -V_o$. Η τάση που ‘‘βλέπει’’ το φορτίο έχει ανεστραμμένη πολικότητα σε σχέση με την πηγή. Όταν ο διακόπτης ξανακλείσει, το φορτίο τροφοδοτείται από τον φορτισμένο τώρα πυκνωτή και το πηνίο αρχίζει πάλι να αποθηκεύει ενέργεια με την μορφή μαγνητικού πεδίου. Οι κυματομορφές του ρεύματος πηνίου κατά τη συνεχή λειτουργία του μικτού DC - DC μετατροπέα με σχετική διάρκεια αγωγής $D = 0.8$, παρουσιάζονται στο Σχήμα που ακολουθεί:



Σχ. 3-2: Κυματομορφές τάσης (πάνω) και ρεύματος (κάτω) πηνίου

Είναι γνωστό ότι επειδή στη μόνιμη κατάσταση ισορροπίας οι κυματομορφές επαναλαμβάνονται με περίοδο T , τότε το ολοκλήρωμα της τάσης του πηνίου για μία περίοδο T πρέπει να ισούται με μηδέν. Δηλαδή:

$$\int_0^T V_L(t) dt = 0 \Rightarrow \int_0^{t_{ON}} V_L(t) dt + \int_{t_{ON}}^T V_L(t) dt = 0 \quad (3.1)$$

Όπου:

- t_{ON} : Το χρονικό διάστημα αγωγής του διακόπτη
- T : Η περίοδος παλμοδότησης, για την οποία ισχύει $T = t_{ON} + t_{OFF}$, όπως φαίνεται και από το παραπάνω σχήμα.

Η σχετική διάρκεια αγωγής D ορίζεται και στην περίπτωση του μικτού DC - DC μετατροπέα ως ο λόγος του χρόνου αγωγής t_{ON} προς την περίοδο παλμοδότησης T και δίνεται από τη σχέση:

$$D = \frac{t_{ON}}{T} \quad (3.2)$$

Προηγουμένως όμως αναφέρθηκε ότι η τάση του πηνίου κατά το χρόνο $0 - t_{ON}$, όπου ο διακόπτης άγει, είναι ίση με την τάση εισόδου, ενώ κατά το χρόνο $t_{ON} - T$, όπου ο διακόπτης δεν άγει, η τάση του πηνίου είναι ίση με την τάση εξόδου. Δηλαδή, για την τάση του πηνίου ισχύει:

$$V_L(t) \begin{cases} V_d & , \quad 0 \leq t \leq t_{ON} \\ -V_o & , \quad t_{ON} \leq t \leq T \end{cases} \quad (3.3)$$

Επομένως, η σχέση 3.1 μετατρέπεται σύμφωνα με τις σχέσεις 3.3 και επειδή οι τάσεις εισόδου και εξόδου για μία περίοδο θεωρούνται σταθερές, προκύπτει:

$$\int_0^{t_{ON}} V_d dt + \int_{t_{ON}}^T (-V_o) dt = 0 \Rightarrow V_d \cdot \int_0^{t_{ON}} dt + (-V_o) \cdot \int_{t_{ON}}^T dt = 0 \Rightarrow$$

$$V_d \cdot t_{ON} + (-V_o) \cdot (T - t_{ON}) = 0 \quad (3.4)$$

Λαμβάνοντας υπόψη τη σχέση 3.2 που δίνει τη σχετική διάρκεια αγωγής D , η σχέση 3.4 γίνεται :

$$V_d \cdot t_{ON} = V_o \cdot (T - t_{ON}) \Rightarrow \frac{V_o}{V_d} = \frac{t_{ON}}{(T - t_{ON})} \Rightarrow \frac{V_o}{V_d} = \frac{\frac{t_{ON}}{T}}{\left(\frac{T}{T} - \frac{t_{ON}}{T}\right)} \quad (3.5)$$

Και τελικά προκύπτει η σχέση που συνδέει την τάση εισόδου V_d και την τάση εξόδου V_o του μικτού DC - DC μετατροπέα σε συνάρτηση της σχετικής διάρκειας αγωγής D και είναι αυτή που ακολουθεί:

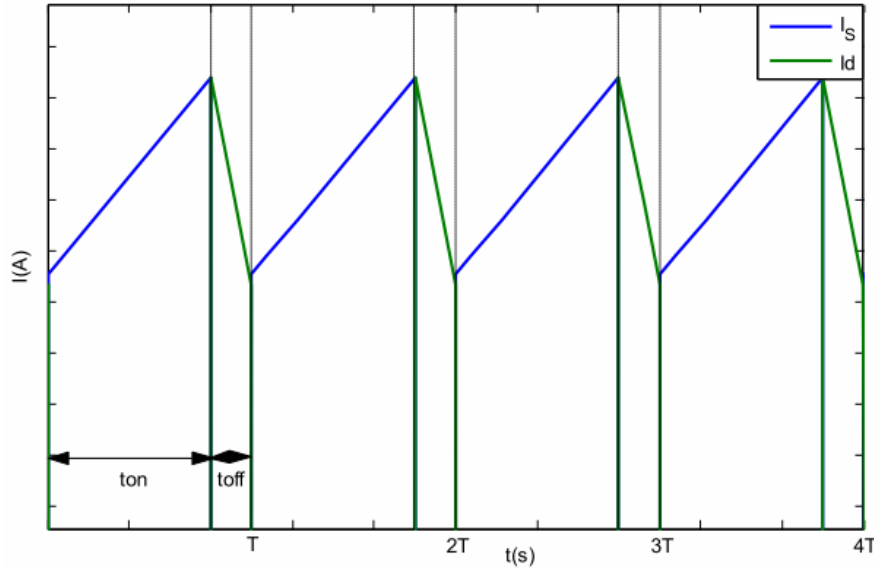
$$\frac{V_o}{V_d} = \frac{D}{(1-D)} \quad (3.6)$$

Στο επόμενο σχήμα φαίνονται τα ρεύματα του διακόπτη I_S και της διόδου I_D του μικτού DC - DC μετατροπέα για συνεχή λειτουργία και για σχετική διάρκεια αγωγής $D = 0.8$. Κατά το χρόνο $0 - t_{ON}$ το ρεύμα πηνίου διέρχεται από το διακόπτη και το ρεύμα της διόδου είναι μηδέν, ενώ κατά το χρόνο $t_{ON} - T$ το ρεύμα του πηνίου διαρρέει τη δίοδο και το ρεύμα του διακόπτη είναι μηδέν.

Αντίστοιχη σχέση με τη σχέση 3.6, που ισχύει για τις τάσεις εισόδου και εξόδου, ισχύει και για τα ρεύματα εισόδου I_d και εξόδου I_o του μικτού DC - DC μετατροπέα και προκύπτει από τη θεώρηση ότι το κύκλωμα δεν παρουσιάζει απώλειες. Επομένως, η ισχύς εξόδου P_o είναι ίση με την ισχύ εισόδου P_d και άρα προκύπτει ότι:

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

$$\frac{I_o}{I_d} = \frac{(1-D)}{D} \quad (3.7)$$



Σχήμα 3-3: Φαίνεται ότι τα ρεύματα του διακόπτη I_S και της διόδου I_D σχηματίζουν το συνολικό ρεύμα του πηνίου

Το πόσο αυξάνεται το ρεύμα του πηνίου, αυτό μπορούμε να το υπολογίσουμε με την παρακάτω σχέση:

$$V_L = L \times \frac{di_L}{dt} \Rightarrow \Delta I_L = \frac{V_L}{L} \times \Delta T \quad (3.8)$$

Η τρέχουσα αύξηση πηνίο κατά τη διάρκεια της κατάσταση ON δίνεται από:

$$\Delta I_L (+) = \frac{V_I - (V_{DS} + I_L \times R_L)}{L} \times T_{ON} \quad (3.9)$$

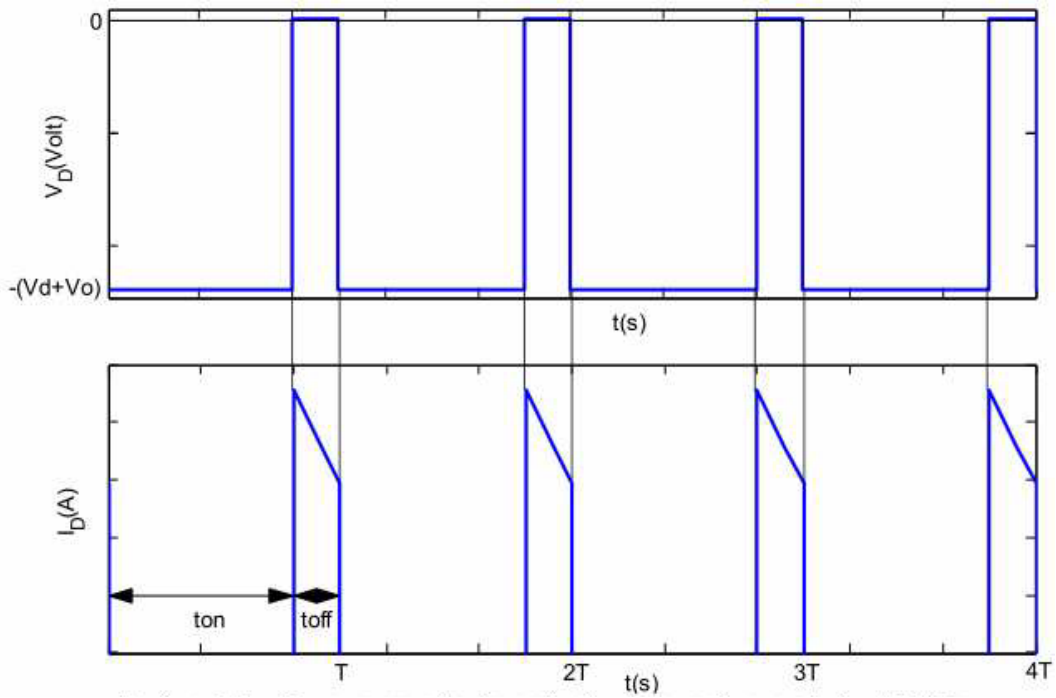
Η ποσότητα αυτή, $\Delta I_L (+)$, αναφέρεται ως ο κυματισμός του ρεύματος του πηνίου. Επίσης, παρατηρούμε ότι κατά τη διάρκεια της περιόδου, το συνολικό ρεύμα εξόδου παρέχεται από τον πυκνωτή. Η σχέση που δίνει την κυμάτωση όταν η τάση είναι θετική είναι:

$$\Delta i_L = \frac{1}{L} V_d \cdot D T_s \quad (3.10)$$

Ενώ για τον υπολογισμό της κυμάτωσης που η τάση είναι αρνητική δίνεται από την σχέση:

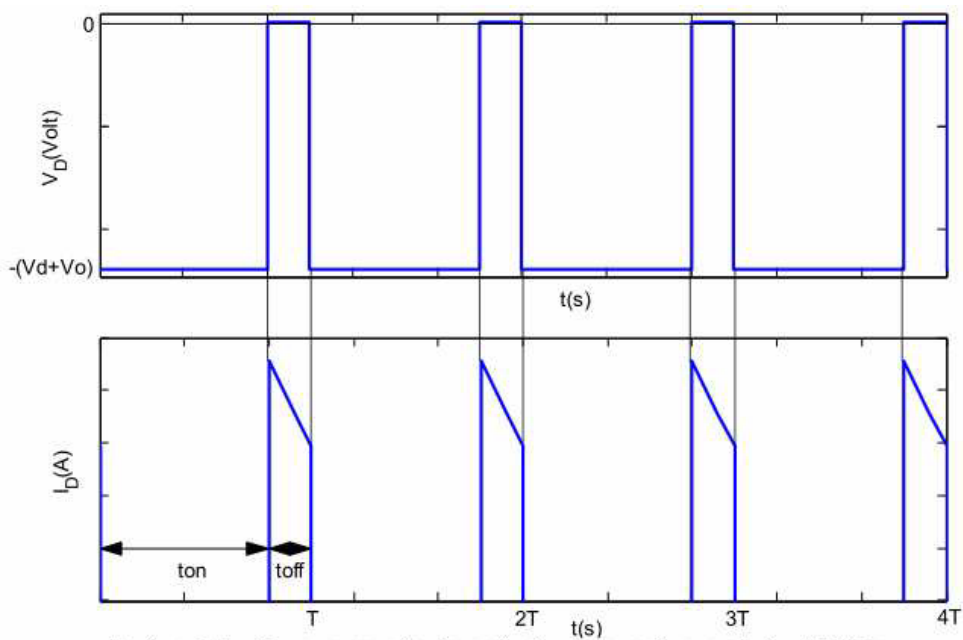
$$\Delta i_L = \frac{1}{L} V_o \cdot (1 - D) T_s \quad (3.11)$$

Από το παραπάνω Σχήμα, φαίνεται ότι όταν ο διακόπτης βρίσκεται σε κατάσταση αγωγής η τάση του είναι μηδέν, ενώ κατά την κατάσταση αποκοπής, η τάση στα άκρα του είναι ίση με το άθροισμα των τάσεων εισόδου και εξόδου $V_d + V_o$. Αυτό φαίνεται και από το ισοδύναμο κύκλωμα του Σχήματος 3.1(γ).



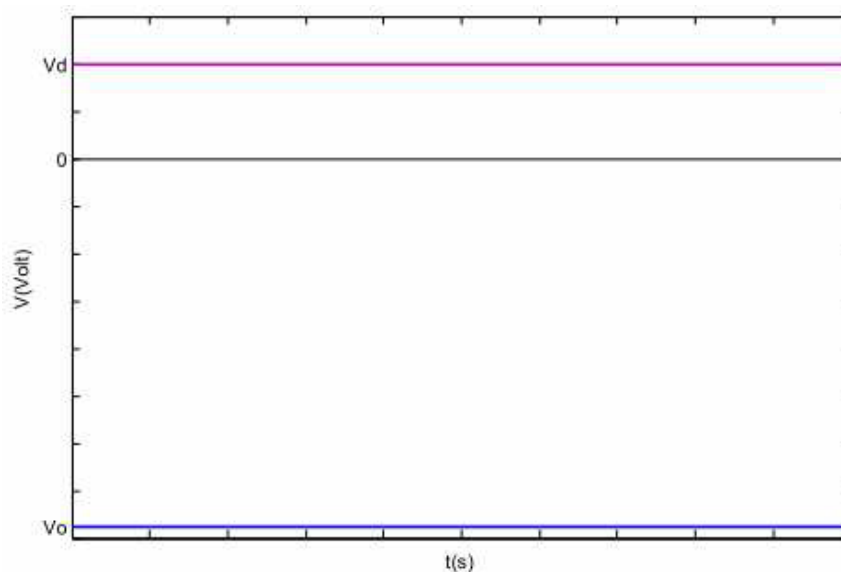
Σχ. 3-4: Κυματομορφές τάσης (πάνω) και ρεύματος (κάτω) διόδου μικτού DC - DC μετατροπέα (συνεχής λειτουργία)

Όταν ο διακόπτης άγει η διόδος είναι σε αποκοπή και η τάση στα άκρα της είναι ίση με το αντίθετο του αθροίσματος των τάσεων εισόδου και εξόδου $-(V_d + V_o)$. Το αρνητικό πρόσημο προκύπτει γιατί οι κυματομορφές αναφέρονται στην τάση ανόδου καθόδου της διόδου. Αυτό είναι εμφανές από ο ισοδύναμο ... κύκλωμα του σχήματος 3.1 (β). Αντίθετα, όταν ο διακόπτης δεν άγει, η διόδος γίνεται αγώγιμη και η τάση στα άκρα της είναι μηδέν. Για μια ολοκληρωμένη άποψη της λειτουργίας του μικτού DC - DC μετατροπέα, παρουσιάζονται και οι κυματομορφές του ρεύματος I_c και της τάσης VC του πυκνωτή της βαθμίδας εξόδου. Οι κυματομορφές αυτές φαίνονται στο επόμενο σχήμα:



Σχ. 3.5 (α) : Κυματομορφές τάσης (πάνω) και ρεύματος (κάτω) πυκνωτή DC - DC μικτού μετατροπέα

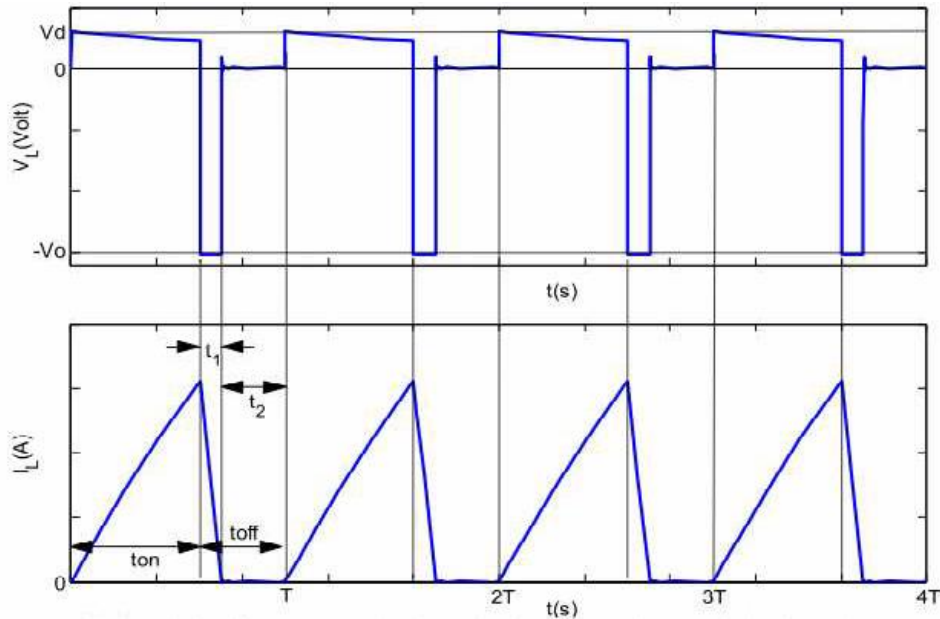
Παρακάτω θα παρουσιαστεί Σχήμα, όπου φαίνονται οι λεπτομέρειες της κυματομορφής του ρεύματος του πυκνωτή. Να αναφερθεί επίσης ότι η κυματομορφή της τάσης του πυκνωτή παρουσιάζεται σε μεγέθυνση, ώστε να φαίνεται η κυμάτωση. Η κυμάτωση της τάσης εξόδου ΔV_o είναι μικρότερη από 5%. Αυτό μπορεί να φανεί από το Σχήμα 3.6 (β), όπου παρουσιάζεται η τάση εξόδου σε σχέση με την τάση εισόδου. Επίσης, η τάση εξόδου V_o είναι αρνητική και για το λόγο αυτό αρνητική κλίση της κυματομορφής της τάσης του πυκνωτή συνεπάγεται φόρτιση ενώ θετική κλίση της κυματομορφής της τάσης του πυκνωτή συνεπάγεται εκφόρτιση. Από το Σχήμα 3.6 λοιπόν, φαίνεται ότι για τη χρονική περίοδο $0 - t_{ON}$, που η διόδος δεν άγει, ο πυκνωτής απομονώνεται από το πηνίο και εκφορτίζεται παρέχοντας ενέργεια στο φορτίο. Μόλις όμως η διόδος γίνει αγωγίμη, δηλαδή στο χρονικό διάστημα $t_{ON} - T$, τότε ένα μέρος του ρεύματος του πηνίου διέρχεται από τον πυκνωτή, οπότε αυτός φορτίζεται αποταμιεύοντας ενέργεια, και ένα μέρος από το φορτίο. Αυτό φαίνεται από το Σχήμα 3.1 (γ) και θα γίνει καλύτερα αντιληπτό παρακάτω, όπου θα παρουσιαστεί αναλυτικό Σχήμα της κυματομορφής του ρεύματος του πυκνωτή.



Σχ. 3.5 (β) : Τάσεις εισόδου και εξόδου (πυκνωτή)
DC - DC μικτού μετατροπέα

3.2.2 Λειτουργία ασυνεχούς ρεύματος

Κατά την ασυνεχή λειτουργία του μικτού DC - DC μετατροπέα, το ρεύμα του πηνίου είναι διακοπτόμενο. Αυτό γίνεται όταν το πηνίο που χρησιμοποιείται για συνεχή λειτουργία και συγκεκριμένη αυτεπαγωγή το αλλάξουμε με ένα πολύ πιο μικρό και μικρότερη αυτεπαγωγή. Επομένως αυτό έχει ως αποτέλεσμα μικρότερη αυτεπαγωγή, δηλαδή μικρότερη αποταμίευση ενέργειας στο πηνίο, οπότε σε κάποια χρονική περίοδο της παλμοδότησης το ρεύμα του πηνίου θα μηδενίζεται. Στο σχήμα 3.7 φαίνεται πιο αναλυτικά η συγκεκριμένη λειτουργία με τη τάση και το ρεύμα στο πηνίο.



Σχ.3-6: Κυματομορφές τάσης (πάνω) και ρεύμα (κάτω) πηνίου

Εάν το ρεύμα του φορτίου στην έξοδο μειώνεται κάτω από το κρίσιμο επιτρεπόμενο ρεύμα, το ρεύμα του πηνίου θα είναι μηδέν για ένα τμήμα του κύκλου μεταγωγής. Για τον buck-boost, αν το ρεύμα του πηνίου επιχειρεί να πέσει κάτω από το μηδέν, τότε το ρεύμα σταματάει στο μηδέν (λόγω της μονής κατεύθυνσης ροής ρεύματος) και παραμένει εκεί μέχρι το αρχή του επόμενου κύκλου μεταγωγής. Αυτός ο τρόπος λειτουργίας ονομάζεται ασυνεχής λειτουργία αγωγιμότητας.

Όπως βλέπουμε και το σχήμα 3.6 το t_{OFF} χωρίζεται σε δύο επιμέρους περιόδους t_1 και t_2 . Για τις χρονικές περιόδους t_1 και t_2 , ορίζονται οι λόγοι των χρόνων αυτών,)1 και)2 αντίστοιχα, προς την περίοδο παλμοδότησης T .

$$\Delta_1 = \frac{t_1}{T} \quad \text{και} \quad \Delta_2 = \frac{t_2}{T} \quad (3.12)$$

Η τάση του πηνίου κατά το χρόνο $0 - t_{on}$ όπως και για τη συνεχή λειτουργία, είναι ίση με την τάση εισόδου, ενώ κατά το χρόνο $t_{on} - t_1$, όπου ο διακόπτης δεν άγει και το ρεύμα του πηνίου δεν είναι μηδέν, η τάση του πηνίου είναι ίση με την τάση εξόδου. Σε αυτή την περίπτωση όμως, υπάρχει και το χρονικό διάστημα $t_1 - T$, όπου ο διακόπτης δεν άγει και το ρεύμα του πηνίου είναι μηδέν, και άρα και η τάση του πηνίου είναι ίση με μηδέν.

Και τελικά προκύπτει η σχέση που συνδέει την τάση εισόδου V_d και την τάση εξόδου V_o του μικτού DC - DC μετατροπέα κατά την ασυνεχή λειτουργία.

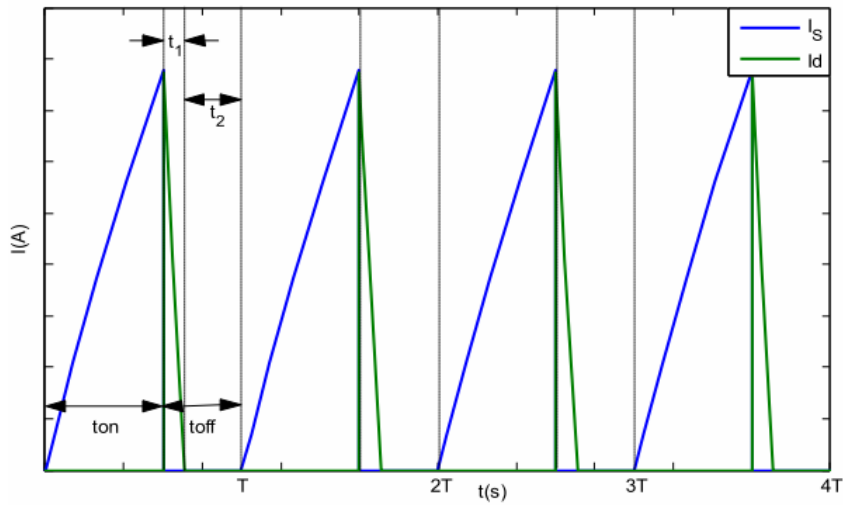
$$\frac{V_o}{V_d} = \frac{D}{\Delta_1} \quad (3.13)$$

Όπου:

- D : Σχετική διάρκεια αγωγής.

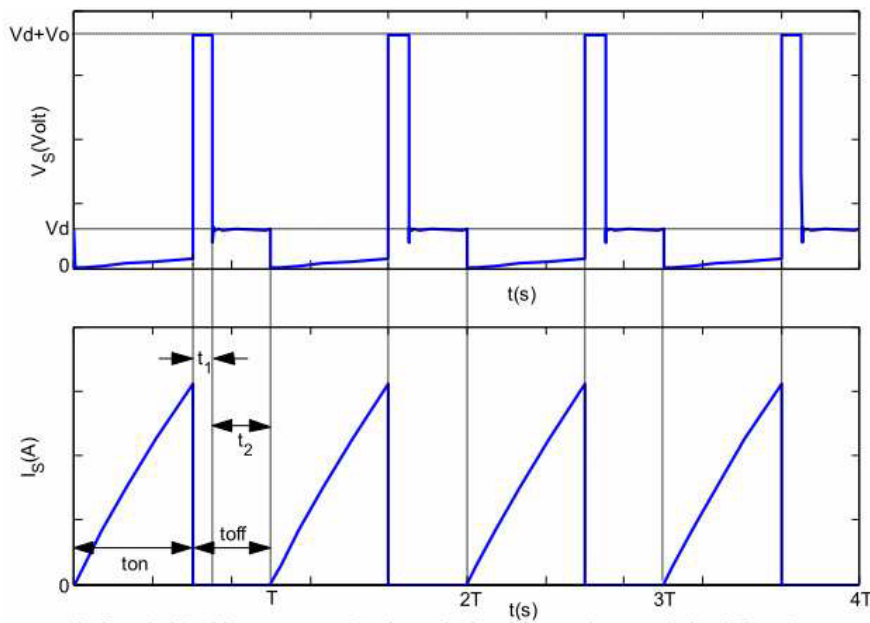
Θεωρώντας ότι το κύκλωμα δεν παρουσιάζει απώλειες προκύπτει η αντίστοιχη σχέση για τα ρεύματα εισόδου I_d και εξόδου I_o του μικτού DC - DC μετατροπέα κατά την ασυνεχή λειτουργία. Εξισώνοντας την ισχύ εξόδου P_o με την ισχύ εισόδου P_d προκύπτει ότι:

$$\frac{I_o}{I_d} = \frac{\Delta_1}{D} \quad (3.14)$$



Σχ.3-7: Ρεύμα διακόπτη I_s και διόδου I_d μικτού μετατροπέα (ασυνεχή λειτουργία)

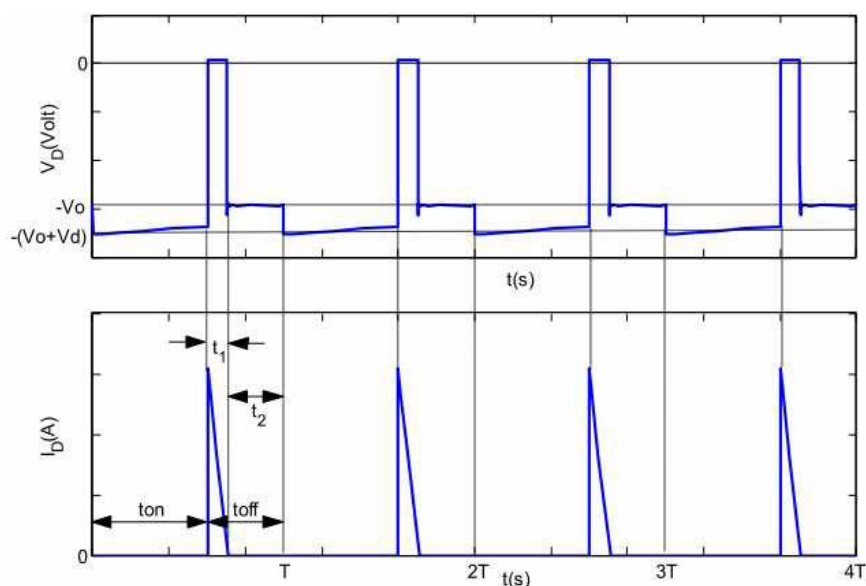
Στο σχήμα 3.7 φαίνονται τα ρεύματα του διακόπτη I_s και της διόδου I_D του μικτού DC - DC μετατροπέα για ασυνεχή λειτουργία και για σχετική διάρκεια αγωγής $D = 0.8$. Όπως βλέπουμε πάλι έχουμε ασυνεχή ροή ηλεκτρικού ρεύματος.



Σχ.3-8: Κυματομορφές τάσης (πάνω) και ρεύματος (κάτω) διακόπτη μικτού μετατροπέα DC - DC για ασυνεχή λειτουργία

Από το σχήμα 3.8, φαίνεται ότι όταν ο διακόπτης βρίσκεται σε κατάσταση αγωγής η τάση του είναι μηδέν, ενώ κατά την κατάσταση αποκοπής, η τάση στα άκρα του είναι ίση με το άθροισμα των τάσεων εισόδου και εξόδου $V_d + V_o$. Επιπλέον, όταν το ρεύμα του πηνίου είναι μηδέν και ο

διακόπτης δεν άγει, η τάση του είναι ίση με την τάση εισόδου. Επίσης μπορούμε να διακρίνουμε πως μόλις το ρεύμα του πηνίου περάσει μέσω της διόδου, μέσα στο χρόνο του t_{off} η τάση εξόδου τότε γίνεται ίση με τη τάση εισόδου. Αυτό μπορεί να γίνει αντιληπτό και από το ισοδύναμο κύκλωμα του σχήματος 3.1 (γ).

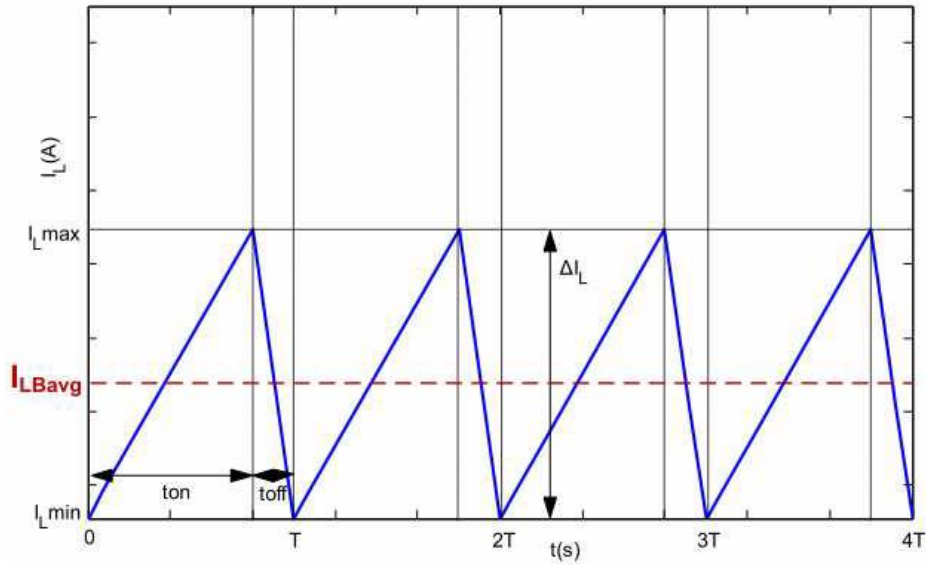


Σχ. 3-9: Κυματομορφές τάσης (πάνω) και ρεύμα (κάτω) διόδου

Όταν ο διακόπτης άγει, η διόδος είναι σε αποκοπή και η τάση στα άκρα της είναι ίση με το αντίθετο του αθροίσματος των τάσεων εισόδου και εξόδου $-(V_d + V_o)$. Το αρνητικό πρόσημο προκύπτει γιατί οι κυματομορφές αναφέρονται στην τάση ανόδου καθόδου της διόδου. Αυτό είναι εμφανές από το ισοδύναμο κύκλωμα του σχήματος 3.1 (β). Αντίθετα, όταν ο διακόπτης δεν άγει, η διόδος γίνεται αγωγίμη και η τάση στα άκρα της είναι μηδέν. Όταν όμως το ρεύμα του πηνίου γίνει μηδέν, η διόδος επανέρχεται σε κατάσταση αποκοπής και επειδή και η τάση του πηνίου είναι μηδέν, στα άκρα της εφαρμόζεται η τάση εξόδου.

3.2.3 Οριακή λειτουργία[9]

Στην οριακή λειτουργία του μικτού DC - DC μετατροπέα, το ρεύμα τη χρονική περίοδο T το ρεύμα του πηνίου είναι μηδέν. Δηλαδή στο τέλος της περιόδου παλμοδότησης, το ρεύμα του πηνίου παίρνει μηδενική τιμή στιγμιαία. Η κυματομορφή του ρεύματος πηνίου για την οριακή αυτή περίπτωση φαίνεται στο σχήμα 3.10. Η τιμή της αυτεπαγωγής του πηνίου σε αυτή την περίπτωση είναι οριακή αφού μόλις εκπνεύσει το ρεύμα του τελειώνει και η περίοδος παλμοδότησης. Συγκεκριμένα, αν χρησιμοποιηθεί πηνίο μεγαλύτερο από αυτή την τιμή, τότε ο μετατροπέας θα λειτουργεί με μη διακοπτόμενο ρεύμα, ενώ αν χρησιμοποιηθεί πηνίο μικρότερο από αυτή την τιμή, τότε ο μετατροπέας θα λειτουργεί με διακοπτόμενο ρεύμα πηνίου όπως είδαμε και με τις παραπάνω περιπτώσεις. Η οριακή αυτή τιμή μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση για την ελάχιστη αυτεπαγωγή L_{min} , ώστε η λειτουργία του μετατροπέα να είναι συνεχής.



Σχ.3-10: Κυματομορφές ρεύματος πηνίου μикτού
DC - DC μετατροπέα (οριακή λειτουργία)

Στο σχήμα 3.10 φαίνεται το ρεύμα του πηνίου για την οριακή λειτουργία. Η τάση του πηνίου είναι ίδια με πριν, όπως φαίνεται στο σχήμα 3. Η τάση και το ρεύμα του πηνίου συνδέονται με τη παρακάτω σχέση:

$$i_L(t) = \frac{1}{L} \int V_L(t) dt \quad \text{ή} \quad V_L(t) = L \cdot \frac{di_L(t)}{dt} \quad (3.15)$$

Οι σχέσεις που συνδέουν το μέσο, οριακό ρεύμα I_{LBavg} και το μέγιστο ρεύμα I_{Lmax} , σύμφωνα και με την σχέση 3.15 δίνονται από:

$$I_{LBavg} = \frac{1}{2} \cdot I_{Lmax} \quad (3.16)$$

$$I_{Lmax} = \frac{1}{L} \cdot \int_0^{t_{ON}} V_L(t) dt \quad (3.17)$$

Απο τις σχέσεις 3.3, όπου για το χρονικό διάστημα $0 \leq t \leq t_{ON}$ είναι $V_L(t) = V_d = \text{σταθερή}$ ως προς t , η σχέση 3.9 γίνεται:

$$I_{Lmax} = \frac{1}{L} \cdot V_d \cdot \int_0^{t_{ON}} dt \Rightarrow I_{Lmax} = \frac{1}{L} \cdot V_d \cdot t_{ON} \Rightarrow$$

$$I_{Lmax} = \frac{1}{L} \cdot V_d \cdot (D \cdot T) \quad (3.17)$$

Εάν αντικαταστήσουμε τη σχέση 3.17 στη σχέση 3.16 προκύπτει για το μέσο, οριακό ρεύμα του πηνίου η εξής σχέση:

$$I_{LBavg} = \frac{T \cdot V_d}{2 \cdot L} \cdot D \quad (3.18)$$

Από τις σχέσεις 3.17 και 3.6, που συνδέει τις τάσεις εισόδου V_d και εξόδου V_o με τη σχετική διάρκεια αγωγής D , το μέσο ρεύμα του πηνίου μπορεί να εκφραστεί και συναρτηθεί της τάσης εξόδου σύμφωνα με τη σχέση:

$$I_{LBavg} = \frac{T \cdot V_o}{2 \cdot L} \cdot (1 - D) \quad (3.19)$$

Και αφού για μία περίοδο, το μέσο ρεύμα του πυκνωτή είναι μηδέν, τότε ισχύει η επόμενη σχέση:

$$I_{OB} = I_{LBavg} - I_d \quad (3.20)$$

Απο τη σχέση 3.7 και λύνοντας ως προς το ρεύμα εισόδου I_d , που συνδέει τα ρεύματα εισόδου I_d και εξόδου I_o και με τη σχετική διάρκεια αγωγής D , προκύπτει ότι:

$$\frac{I_o}{I_d} = \frac{(1-D)}{D} \Rightarrow \frac{D}{(1-D)} \cdot I_o \quad (3.21)$$

Αντικαθιστώντας τη σχέση 3.19 και τη Σχέση 3.21 στη σχέση 3.20 προκύπτει το ρεύμα εξόδου για την οριακή λειτουργία I_{OB} , σε συνάρτηση με την τάση εξόδου V_o :

$$\begin{aligned} I_{BO} &= \frac{T \cdot V_o}{2 \cdot L} \cdot (1 - D) - \frac{D}{(1 - D)} \cdot I_{OB} \Rightarrow I_{OB} + \frac{D}{(1 - D)} \cdot I_{OB} = \frac{T \cdot V_o}{2 \cdot L} \cdot (1 - D) \Rightarrow \\ &\frac{(1-D)}{(1-D)} I_{OB} + \frac{D}{(1-D)} \cdot I_{OB} = \frac{T \cdot V_o}{2 \cdot L} \cdot (1 - D) \Rightarrow \frac{1}{(1-D)} \cdot I_{OB} = \frac{T \cdot V_o}{2 \cdot L} \cdot (1 - D) \end{aligned} \quad (3.22)$$

Επομένως το ρεύμα για την οριακή λειτουργία είναι:

$$I_{OB} = \frac{T \cdot V_o}{2 \cdot L} \cdot (1 - D)^2 \quad (3.23)$$

Από τις σχέσεις 3.23 και 3.19 είναι φανερό ότι τόσο το ρεύμα πηνίου I_{LB} , όσο και το ρεύμα εξόδου I_{OB} κατά την οριακή λειτουργία του μικτού DC - DC μετατροπέα, φτάνουν τη μέγιστη τιμή τους για σχετική διάρκεια αγωγής $D = 0$. Οι τιμές αυτές είναι:

$$I_{LBmax} = \frac{T \cdot V_o}{2 \cdot L} \quad (3.24)$$

$$I_{OBmax} = \frac{T \cdot V_o}{2 \cdot L} \quad (3.25)$$

Τέλος, με τον συνδυασμό των δύο τελευταίων σχέσεων 3.19 και 3.23, προκύπτουν οι εκφράσεις του ρεύματος πηνίου I_{LB} και του ρεύματος εξόδου I_{OB} συναρτηθεί των μέγιστων τιμών τους και της σχετικής διάρκειας αγωγής D :

$$I_{LBAVG} = I_{LBmax} \cdot (1 - D) \quad (3.26)$$

$$I_{OB} = I_{OBmax} \cdot (1 - D)^2 \quad (3.27)$$

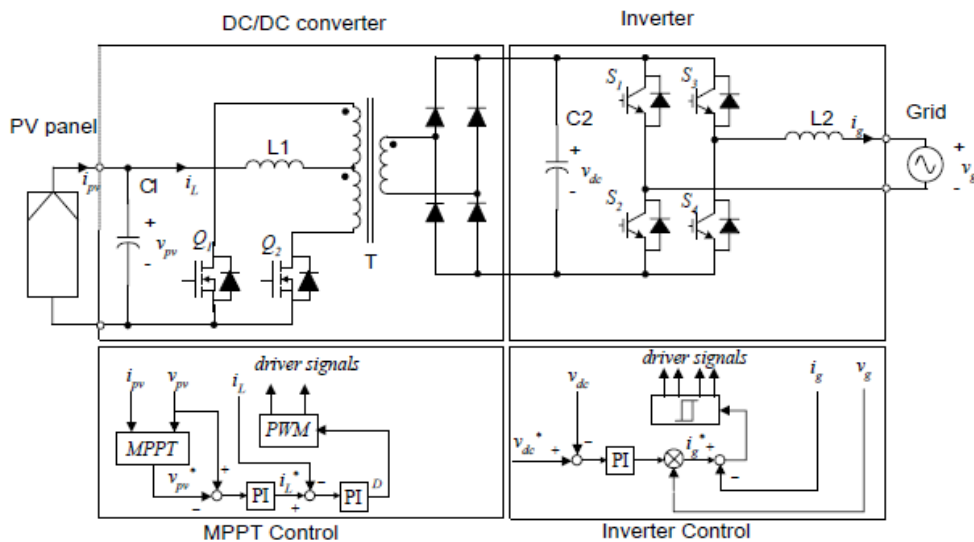
Αναφορές & Βιβλιογραφία:

- [8] P.N. Vovos, K.G. Georgakas, “Multipurpose Power Converter for Non – Grid – Connected Microsystems”, International Journal of Emerging Electric Power Systems, volume 16, Issue 2, pp. 165-179, 04/2015
- [9] “Solar Energy – the State of Art – ISES Position Papers” Edited by Jeffrey M. Gordon
James & James (Science Publishers) Ltd 2001

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 - Αλγόριθμοι MPPT

4.1 Γενικά για τεχνικές MPPT

Ο εντοπισμός του σημείου μέγιστης ισχύος (*MPP*) ενός φωτοβολταϊκού συστήματος παίζει σημαντικό ρόλο στην μέγιστη απόδοση των φωτοβολταϊκών συστοιχιών. Για το λόγο αυτό, πολλές διαφορετικές μέθοδοι ανίχνευσης έχουν αναπτυχθεί και εφαρμοστεί τα τελευταία χρόνια. Τα πρώτα μοντέλα χρησιμοποιήθηκαν σε αεροδιαστημικές εφαρμογές, χρονολογούνται από τη δεκαετία του 70' σε εταιρίες ή ερευνητικά κέντρα όπως η εταιρία Honeywell Inc. ή η NASA. Οι τεχνικές εμφανίζουν χαρακτηριστικές διαφορές μεταξύ τους. Συγκεκριμένα, ορισμένες κύριες διαφορές εντοπίζονται στην πολυπλοκότητα, στον αριθμό των απαιτούμενων μετρητικών οργάνων, στην ταχύτητα σύγκλισης στο επιθυμητό σημείο λειτουργίας, στο εύρος αποτελεσματικότητας και στον απαιτούμενο εξοπλισμό για την εφαρμογή.



Σχ. 4-1: Το φωτοβολταϊκό σύστημα ισχύος στην προσομοίωση

Οι μέθοδοι που έχουν αναπτυχθεί ως τώρα μπορούν να ομαδοποιηθούν σύμφωνα με τις διαφορετικές παραμέτρους τους. Αν ομαδοποιούνται με βάση τις μεταβλητές που παίρνουν μέρος στην διαδικασία της αναζήτησης, τότε χωρίζονται στη μέθοδο των δύο μεταβλητών και στη μέθοδο της μίας μεταβλητής. Η μέθοδος των δύο μεταβλητών χρησιμοποιεί τις μετρήσεις της τάσης V_{PV} , και ρεύματος I_{PV} της ισχύς εξόδου του φωτοβολταϊκού. Μεταξύ άλλων μπορούν να αναφερθούν οι μέθοδοι της διαφοροποίησης (Differentiation method), της διαταραχής και παρατήρησης (Perturbation and Observation, P&O method) και της σταδιακής αγωγιμότητας (Conductance Incremental, C.I method). Απ' την άλλη μπορούν να διακριθούν και οι μέθοδοι που χρησιμοποιούν μία μεταβλητή. Σχετικά με αυτή την ομάδα είναι οι μέθοδοι της τάσης ανατροφοδότησης (Feedback Voltage), ανοιχτοκύκλωμα φωτοβολταϊκής γεννήτριας, ανοιχτοκύκλωμα φωτοβολταϊκού κυττάρου και η μέθοδος του ρεύματος βραχυκύκλωσης.

Ακόμα δύο κατηγορίες που μπορούν να παρουσιαστούν και βασίζονται στη λειτουργία της μεθόδου ή στη στρατηγική ελέγχου που χρησιμοποιείται είναι οι έμμεσες και οι άμεσες μέθοδοι.

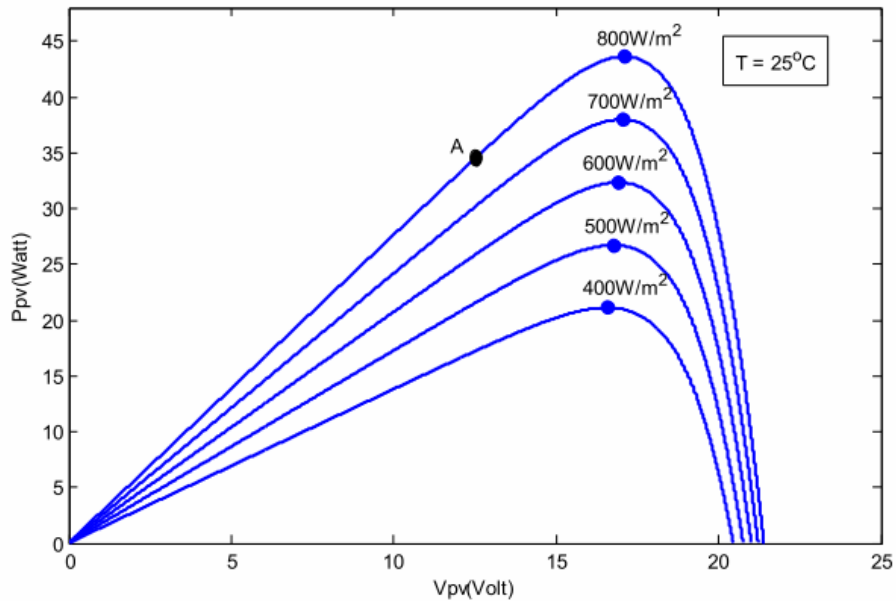
Μέθοδοι που χρησιμοποιούν μετρήσεις της τάσης και του ρεύματος του φωτοβολταϊκού είναι οι άμεσες μέθοδοι. Απο αυτές βρίσκουμε το σημείο μέγιστης ισχύος (MPP). Αυτοί οι αλγόριθμοι έχουν το πλεονέκτημα ότι είναι ανεξάρτητοι της γνώσης εκ των προτέρων της φωτοβολταϊκής γεννήτριας. Έτσι, το σημείο λειτουργίας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

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

4.2 Διατάραξη και Παρατήρησης (Perturb & Observe - P&O)

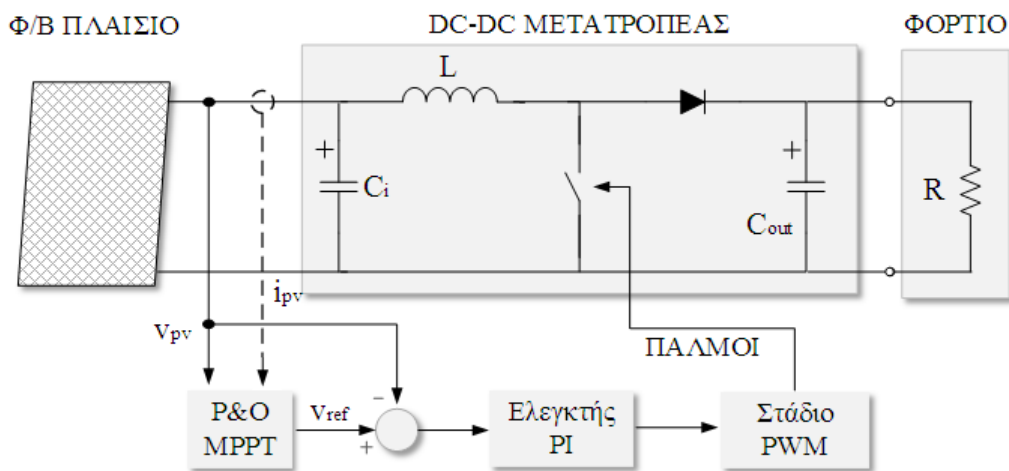
Ίσως η μεγαλύτερη έμφαση στη βιβλιογραφία έχει δοθεί στις μεθόδους hill climbing και perturb and observe αφού εφαρμόζεται σε πολλές περιπτώσεις συστημάτων φωτοβολταϊκών στοιχείων, λόγω της ευκολίας εφαρμογής του. Η τεχνική hill climbing αφορά σε διατάραξη στο λόγο διαμόρφωσης (*duty cycle*) του μετατροπέα ισχύος, ενώ η P&O έχει να κάνει με διατάραξη στην τάση λειτουργίας της φ/β συστοιχίας. Ουσιαστικά, οι δύο αυτές τεχνικές μοιράζονται την ίδια ιδέα λειτουργίας, με τη διαφορά ότι η P&O χρησιμοποιεί ένα βρόχο αντιστάθμισης, και συνήθως μέσω ενός PI ελεγκτή υπολογίζεται το *duty cycle* του μετατροπέα που αντιστοιχεί στην επιθυμητή τάση αναφοράς. Ο επιπρόσθετος αυτός βρόχος ελέγχου προσδίδει στην τεχνική P&O αυξημένη απόδοση, καθώς το σύστημα παρουσιάζει ταχύτερη δυναμική απόκριση και καλύτερα διαμορφωμένη τάση εξόδου σε σύγκριση με την τεχνική Hill Climbing.

Η λειτουργία του αλγορίθμου P&O μπορεί να περιγραφεί με μεγαλύτερη ευκολία αν λάβουμε υπόψη τη χαρακτηριστική καμπύλη P - V ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου, όπως αυτή που φαίνεται στο σχήμα 4.1 παρακάτω:



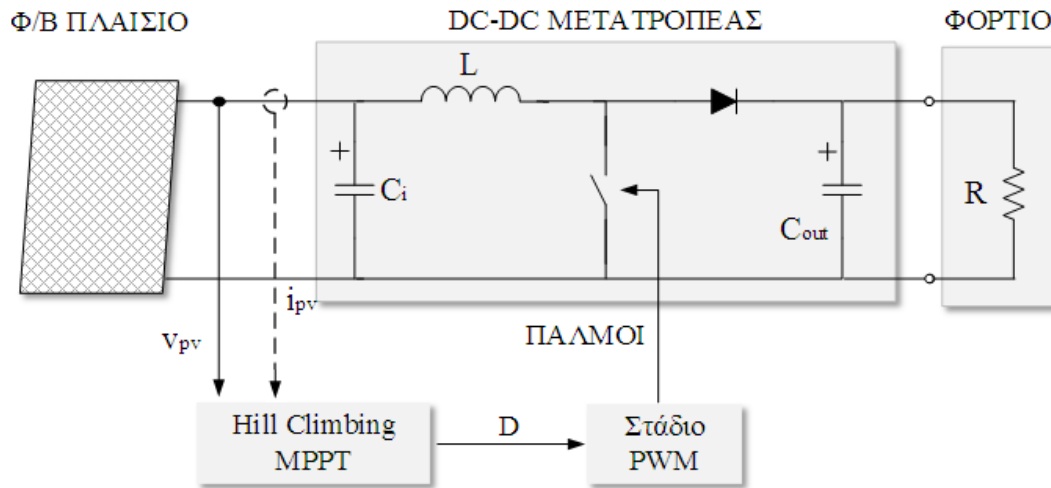
Σχ. 4-2: Χαρακτηριστική P - V και σημείο λειτουργίας A

Αν εφαρμόσουμε τον αλγόριθμο διατάραξης και παρατήρησης, το σημείο μέγιστης ισχύος θα ανιχνευθεί με μεταβολή της τάσης των φωτοβολταϊκών στοιχείων και έλεγχο της μεταβολής της ισχύος, P . Έστω ότι η φωτοβολταϊκή συστοιχία λειτουργεί στο σημείο A της καμπύλης, το οποίο βρίσκεται πιο αριστερά από το ΜΣΙ. Οπότε τα φωτοβολταϊκά στοιχεία θα λειτουργούν με μία ορισμένη τάση και θα δίνουν μια συγκεκριμένη ισχύ μικρότερη της μέγιστης δυνατής. Ο αλγόριθμος διατάραξης και παρατήρησης ακολουθεί μια απλή διαδικασία για να ανιχνεύσει του ΜΡΡ. Προκαλεί μια διαταραχή στην τάση και ελέγχει τη μεταβολή της ισχύος. Εφόσον έχει ευρεθεί απο τον αλγόριθμο, ότι το σημείο λειτουργίας είναι πιο αριστερά από το ΜΡΡ, αυξάνει την τάση στο σημείο λειτουργίας και το σημείο μετατοπίζεται σε περιοχές της καμπύλης με μεγαλύτερη ισχύ. Άρα η μεταβολή της ισχύος θα είναι θετική μέχρι η μεταβολή της ισχύος να γίνει αρνητική, κάτι που σημαίνει ότι το σημείο λειτουργίας μετατοπίζεται προς περιοχές χαμηλότερης ισχύος. Μόλις η μεταβολή της ισχύος γίνει αρνητική, ο αλγόριθμος αλλάζει φορά μεταβολής της τάσης και άρα μειώνει την τάση ενώ ελέγχει το ΔP . Η διαδικασία επαναλαμβάνεται αντίστροφα αυτή τη φορά. Δηλαδή η τάση μειώνεται μέχρι η μεταβολή ισχύος να ξαναγίνει θετική.



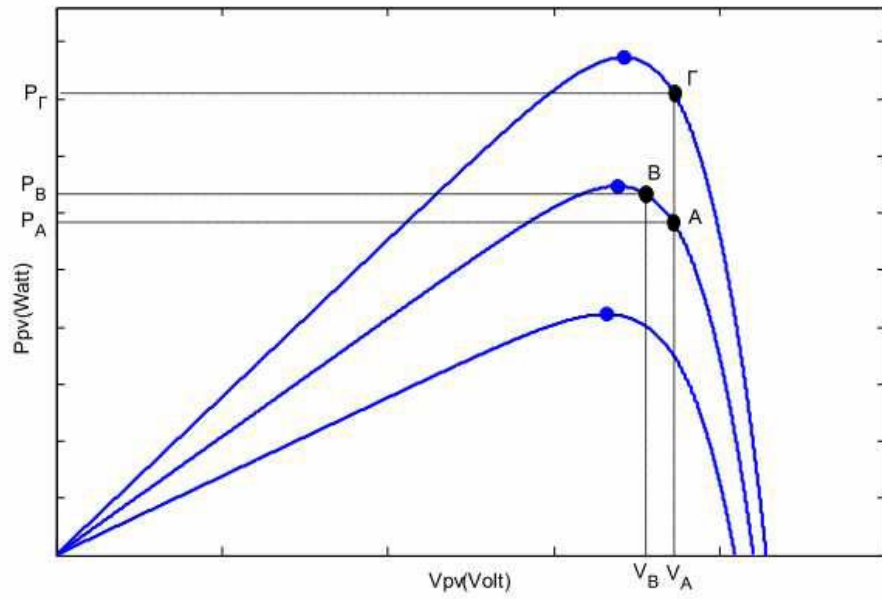
Σχ. 4-3: Δομικό διάγραμμα τεχνικών P&O

Όπως αναφέραμε αυτός ο αλγόριθμος ακούγεται πολύ εύκολος και χωρίς ιδιαίτερες πολύπλοκες εξισώσεις και πράξεις. Εάν αναλύσουμε ειδικότερα την όλη λειτουργία τότε θα εντοπίσουμε πως ο αλγόριθμος αυτός δεν διακρίνει ακριβώς το ΣΜΙ ώστε να σταματήσει τις διαταραχές της τάσης αλλά γίνεται μια ταλάντωση του σημείου λειτουργίας των φωτοβολταϊκών στοιχείων σε μια περιοχή κοντά στο ΜΣΙ.

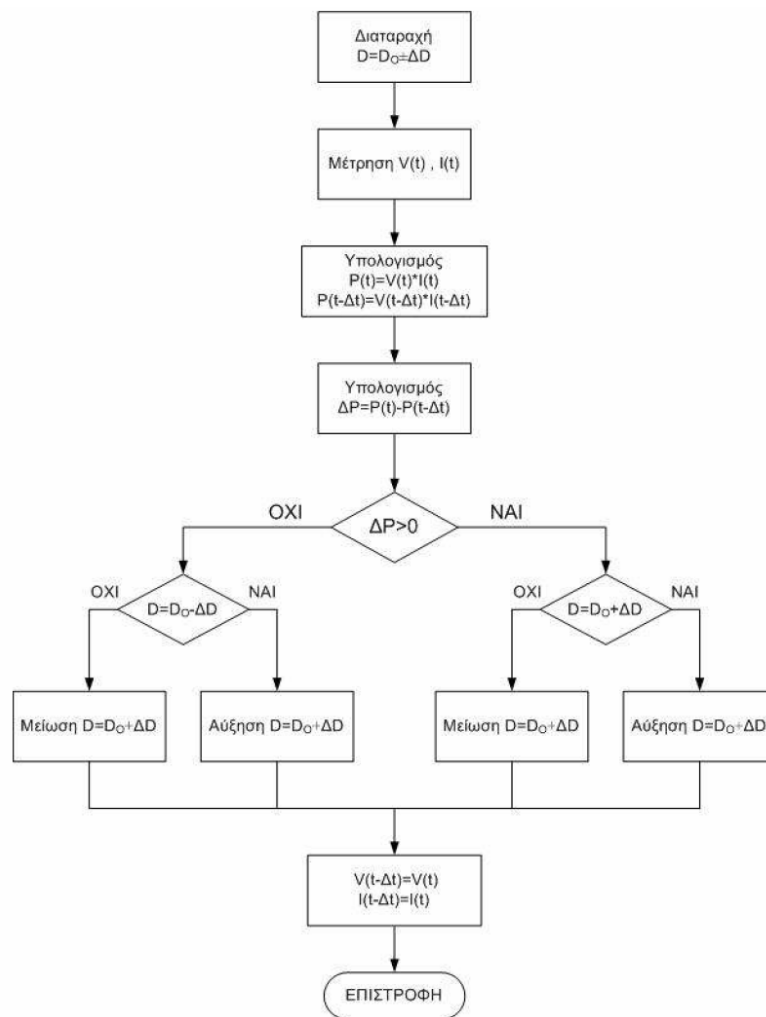


Σχ. 4-4: Δομικό διάγραμμα τεχνικών Hill Climbing

Στο σχήμα 4.5 θα επεξηγήσουμε το παράδειγμα τροποποίησης του αλγορίθμου διατάραξης και παρατήρησης. Ο αλγόριθμος P&O έχει την δυνατότητα να ελέγχει και να συγκρίνει την εναλλαγή της ισχύς σε σχέση με την ηλιακή ακτινοβολία που δέχονται οι ηλιακές συστοιχίες. Εάν για παράδειγμα το σημείο λειτουργίας είναι το Α με τάση V_A και ισχύ P_A και γίνεται διαταραχή της τάσης οπότε το σημείο λειτουργίας μετακινείται στο Β, όπου η τάση είναι V_B και η ισχύς P_B . Τώρα σε περίπτωση που αντιστραφεί η μεταβολή της τάσης, δηλαδή αν η τάση ξαναγίνει V_A και μετρηθεί η ισχύς για την τιμή αυτή της τάσης, τότε το σύστημα μπορεί να ελέγξει αν το σημείο λειτουργίας είναι το Α, οπότε η καμπύλη λειτουργίας P - V δεν έχει μεταβληθεί, ή αν το σημείο λειτουργίας είναι το Γ, οπότε η καμπύλη λειτουργίας P - V είναι διαφορετική από πριν. Με αυτό το τρόπο ο αλγόριθμος καθορίζει, με την δυνατότητα του ελέγχου της ηλιακής ακτινοβολίας, αν το σημείο λειτουργίας είναι το Α με τάση V_A ή αν το σημείο λειτουργίας έχει μεταβληθεί στο σημείο Γ με ισχύ P_Γ . Μετά από τις μετρήσεις γίνεται σύγκριση της πρώτης και της δεύτερης τιμής της ισχύος στην τάση V_A , διαδικασία η οποία δίνει τη δυνατότητα στον αλγόριθμο να διακρίνει τις αλλαγές της ηλιακής ακτινοβολίας.



Σχ. 4-5: Τροποποίηση του αλγόριθμου Perturb & Observe



Σχ. 4-6: Λογικό διάγραμμα αλγόριθμου Διατάραξης και Παρατήρησης

4.3 Αλγόριθμος Αυξητικής Αγωγιμότητας (Incremental Conductance - INC)

Ο αλγόριθμος της Αυξητικής Αγωγιμότητας ασχολείται με μια απλή μαθηματική ανάλυση. Εάν θεωρήσουμε πως το πηλίκο της τάσης με το ρεύμα μας δίνει την ισχύ μπορούμε να παραγωγίσουμε την ισχύ ως προς κάποια από τις δύο μεταβλητές, δηλαδή ως προς την τάση ή ως προς το ρεύμα, και να θέσουμε την εξίσωση που θα προκύψει ίση με το μηδέν. Οπότε εάν παραγωγίσουμε ως προς την τάση προκύπτουν τα εξής για το ΜΣΙ:

$$\frac{dP}{dV} = 0 \Rightarrow \frac{d(V \cdot I)}{dV} = 0 \Rightarrow I + V \cdot \frac{dI}{dV} = 0 \quad (4.1)$$

Και απο την παραπάνω εξίσωση προκύπτει η σχέση:

$$\frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V} \quad (4.2)$$

Όπου:

- $\frac{dI}{dV}$ εκφράζει την αυξητική αγωγιμότητα της φωτοβολταϊκής συστοιχίας.
- $-\frac{I}{V}$ η αρνητική στιγμιαία αγωγιμότητα της φωτοβολταϊκής συστοιχίας.

Οι ανισωτικές σχέσεις στον αλγόριθμο δίνουν την δυνατότητα να κάνει τις κατάλληλες ρυθμίσεις για να προσεγγιστεί το ΜΣΙ μέσω της παραπάνω σχέσης. Επομένως αφού κάνει τις ρυθμίσεις για να προσεγγιστεί το ΜΣΙ, διακρίνει αν το σημείο λειτουργίας είναι αριστερά ή δεξιά του. Παρακάτω παρουσιάζονται όλες οι σχέσεις ελέγχου που χρησιμοποιούνται από τον αλγόριθμο αυξητικής αγωγιμότητας :

$$\begin{aligned} \frac{dI}{dV} &= -\frac{I}{V} \left(\frac{dP}{dV} = 0 \right) \\ \frac{dI}{dV} &= -\frac{I}{V} \left(\frac{dP}{dV} > 0 \right) \\ \frac{dI}{dV} &= -\frac{I}{V} \left(\frac{dP}{dV} < 0 \right) \end{aligned} \quad (4.3)$$

Με τον επιπλέον έλεγχο της τιμής του ρεύματος, ο αλγόριθμος έχει τη δυνατότητα να αντιλαμβάνεται την αλλαγή των καιρικών συνθηκών και επομένως να ανταποκρίνεται καλύτερα σε περιπτώσεις απότομης αλλαγής της ηλιακής ακτινοβολίας, γεγονός που τον καθιστά καλύτερο από τον αλγόριθμο διατάραξης και παρατήρησης. Επομένως, οι δύο τελευταίες ανισώσεις καθορίζουν τον τρόπο μεταβολής της τάσης, δηλαδή αν πρέπει να αυξηθεί ή να μειωθεί, έτσι ώστε να προσεγγιστεί το MPP. Σε περίπτωση που ισχύει η πρώτη σχέση, έχει επιτευχθεί το ΜΣΙ και ο ΑΜΣΙ ρυθμίζει και κρατάει τη λειτουργία των φωτοβολταϊκών στοιχείων σε αυτό το σημείο μέχρι να παρατηρηθεί κάποια αλλαγή στο ρεύμα. Οποιαδήποτε αλλαγή στο ρεύμα, οδηγεί στο συμπέρασμα ότι πάραυτα αλλαγή της ηλιακής ακτινοβολίας. Επιπλέον, ο ΑΜΣΙ με αλγόριθμο αυξητικής αγωγιμότητας δεν οδηγεί σε ταλάντωση γύρω από το ΜΣΙ, αλλά σε σταθερή λειτουργία στο ΜΣΙ μέχρι να παρατηρηθεί αλλαγή του ρεύματος και συνεπώς της φωτεινότητας ή της θερμοκρασίας.

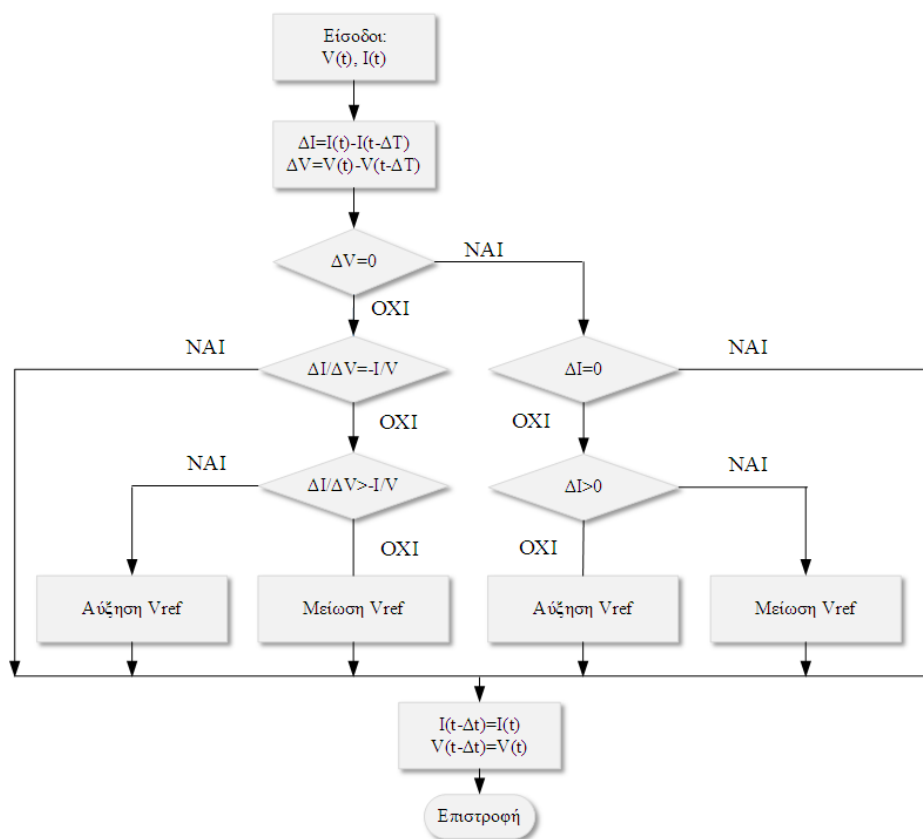
Αυτός ο αλγόριθμος χρησιμοποιεί δύο τιμές της τάσης και δύο τιμές του ρεύματος και ελέγχει τις μεταβολές των δύο μεγεθών (V - I). Συγκεκριμένα, αν η διαφορά τάσης είναι ίση με μηδέν και η διαφορά του ρεύματος είναι ίση με μηδέν, οι ατμοσφαιρικές συνθήκες δεν έχουν αλλάξει και το σύστημα λειτουργεί ακόμα στο MPP. Εάν η διαφορά τάσης είναι μηδέν ενώ η διαφορά του ρεύματος είναι μεγαλύτερη από το μηδέν αυτό σημαίνει πως η ηλιακή ακτινοβολία έχει αυξηθεί, με αποτέλεσμα να αυξάνεται η τάση MPP. Επομένως ο ΑΜΣΙ αυξάνει τη τάση λειτουργίας της συστοιχίας φωτοβολταϊκών στοιχείων για να ακολουθήσει το νέο ΜΣΙ. Αντίθετα, αν η διαφορά τάσης είναι μηδέν και η διαφορά του ρεύματος είναι μικρότερη από το μηδέν σημαίνει πως η ηλιακή ακτινοβολία έχει μειωθεί, μειώνοντας την τάση ΜΣΙ και ο ΑΜΣΙ μειώνει τη τάση λειτουργίας της φωτοβολταϊκής συστοιχίας για να εντοπίσει το νέο ΜΣΙ. Σε περίπτωση που οι μεταβολές στη τάση και το ρεύμα δεν είναι μηδέν, μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι ανισώσεις για να καθορίσουν την κατεύθυνση κατά την οποία πρέπει να αλλάξει η τάση προκειμένου να επιτευχθεί το ΜΣΙ. Αν ισχύει:

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

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

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

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



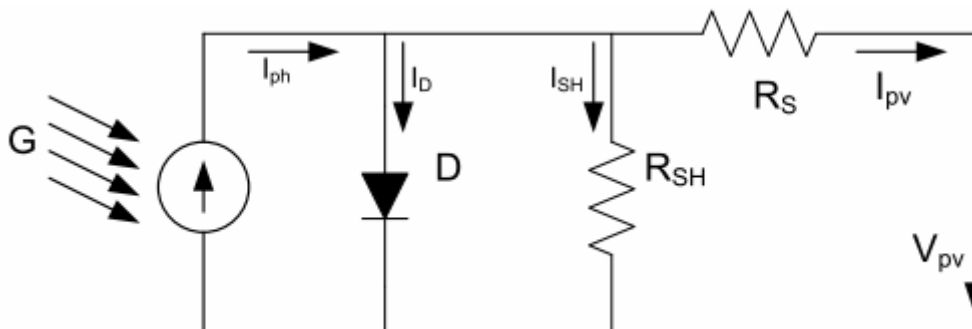
Σχ. 4-7: Διάγραμμα Ροής μεθόδου Αυξητικής Αγωγιμότητας.

4.4 Αλγόριθμος Παρασιτικής Χωρητικότητας (Parasitic Capacitance - PC)

Ο αλγόριθμος παρασιτικής χωρητικότητας παρομοιάζεται με αυτόν της αυξητικής αγωγιμότητας. Μια σημαντική διαφορά όμως του αλγορίθμου παρασιτικής χωρητικότητας σε σχέση με τον αλγόριθμο αυξητικής αγωγιμότητας είναι ότι σε φωτοβολταϊκούς πίνακες μεγάλης ισχύος με πολλά στοιχεία συνδεδεμένα παράλληλα, ο αλγόριθμος παρασιτικής χωρητικότητας μπορεί να αποδειχθεί πολύ πιο αποδοτικός από αυτόν της αυξητικής αγωγιμότητας. Αυτό γίνεται γιατί η παρασιτική χωρητικότητα βρίσκεται σε παράλληλη σύνδεση με τις φωτοβολταϊκές συστοιχίες. Επομένως, με την παράλληλη σύνδεση πολλών φωτοβολταϊκών στοιχείων, οι παρασιτικές χωρητικότητες τους προστίθενται και άρα η παρασιτική χωρητικότητα του συνολικού πίνακα είναι σημαντική.

Με αυτό τον αλγόριθμο λαμβάνεται υπόψη η επίδραση της παρασιτικής χωρητικότητας των φωτοβολταϊκών στοιχείων C_p . Η παρασιτική χωρητικότητα αναφέρεται στα συσσωρευμένα φορτία που συγκεντρώνονται στην επαφή των υλικών που αποτελούν το στοιχείο. Η χωρητικότητα δίνεται από τη σχέση :

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



Σχ. 4.8: Ισοδύναμο κύκλωμα Φωτοβολταϊκού πλαισίου

Για ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο ισχύει η παρακάτω σχέση που αποτελεί την εξίσωση του Shockley για μια φωτοευαίσθητη επαφή p - n:

$$I = I_{ph} - I_{0S} \cdot \left[\exp \frac{q}{A \cdot k_B \cdot T} (V + I \cdot R) - 1 \right] \quad (4.5)$$

Όπου:

- A ο συντελεστής ιδανικότητας της διόδου που φαίνεται στο σχήμα 4.7
- q το φορτίο του ηλεκτρονίου
- R η αντίσταση σειράς του ισοδύναμου κυκλώματος του φωτοβολταϊκού
- I_{ph} το παραγόμενο φωτόρρευμα
- I_{0S} το ρεύμα κορεσμού της διόδου

4.5 Αλγόριθμος Σταθερής Τάσης (Constant Voltage - CV)

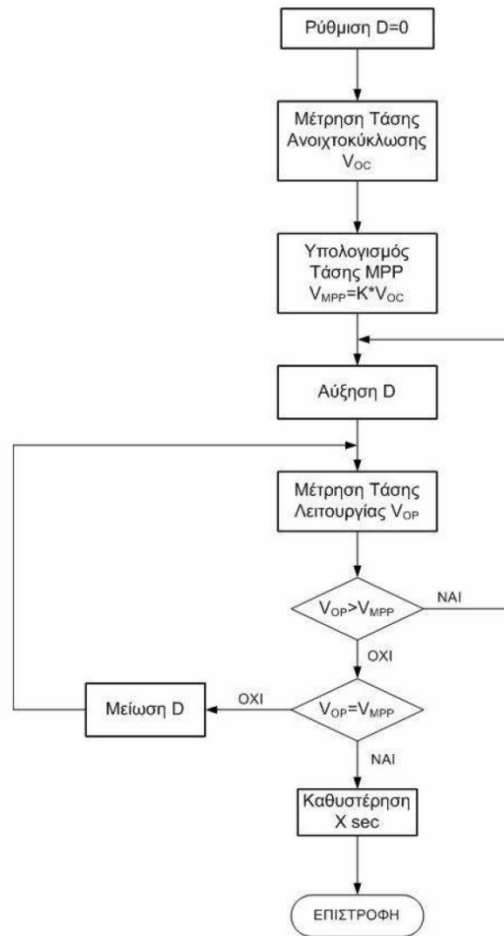
Ο αλγόριθμος σταθερής τάσης (CV) βασίζεται σε μια απλή παρατήρηση που μπορεί να γίνει με τη βοήθεια των καμπυλών I - V. Συγκεκριμένα ισχύει εμπειρικά ότι η αναλογία της τάσης μέγιστης ισχύος V_{MPP} στο MPP και της τάσης ανοιχτού κυκλώματος V_{OC} των φωτοβολταϊκών στοιχείων είναι περίπου σταθερή για όλες τις καμπύλες. Για τις δύο τάσεις ισχύει μια σχέση της μορφής:

$$\frac{V_{MPP}}{V_{OC}} = K < 1 \quad (4.6)$$

Ο αλγόριθμος σταθερής τάσης ακολουθεί μια πολύ απλή διαδικασία. Προσωρινά απομονώνεται η συστοιχία φωτοβολταϊκών από τον ΑΜΣΙ και γίνεται μέτρηση της τάσης ανοιχτοκυκλώματος V_{OC} . Έπειτα ο ΑΜΣΙ χρησιμοποιώντας την παραπάνω εξίσωση και μια προκαθορισμένη τιμή του K, υπολογίζει το σωστό σημείο λειτουργίας και ρυθμίζει την τάση των φωτοβολταϊκών στοιχείων μέχρι να επιτευχθεί η υπολογισμένη, από την εξίσωση, τιμή της τάσης V_{MPP} στο MPP. Η παραπάνω διαδικασία επαναλαμβάνεται περιοδικά με αποτέλεσμα ο αλγόριθμος να έχει τη δυνατότητα να ακολουθεί τη θέση του ΜΣΙ και να το εντοπίζει. Αν και αυτή η μέθοδος είναι εξαιρετικά απλή, η επιλογή της σταθεράς K δεν είναι ένα απλό ζήτημα. Αυτό ισχύει γιατί η αναλογία K δεν είναι σταθερή, όπως θεωρήθηκε προσεγγιστικά, αλλά στην πραγματικότητα εξαρτάται από τη θερμοκρασία και την ακτινοβολία. Επομένως, η επιλογή της σταθεράς K δεν μπορεί να γίνει ιδανικά αλλά ούτε και έχει βρεθεί τρόπος για την επιλογή της καλύτερης δυνατής τιμής. Για το λόγο αυτό η απόδοση των ΑΜΣΙ που χρησιμοποιούν τον αλγόριθμο σταθερής τάσης είναι μειωμένη σε σχέση με άλλους ΑΜΣΙ που χρησιμοποιούν άλλους αλγορίθμους. Στη μείωση της απόδοσης του αλγορίθμου συμβάλλει και το γεγονός ότι η μέτρηση της τάσης ανοιχτοκυκλώματος προϋποθέτει τη στιγμιαία διακοπή της ισχύος των φωτοβολταϊκών στοιχείων. Να αναφερθεί ότι έχει προταθεί τροποποίηση του αλγορίθμου σύμφωνα με την οποία θα ρυθμίζεται η τιμή του K ανάλογα με τις συνθήκες θερμοκρασίας και ακτινοβολίας. Μια τέτοια λειτουργία όμως απαιτεί την επινόηση ενός βοηθητικού αλγορίθμου και ουσιαστικά ο αλγόριθμος σταθερής τάσης γίνεται παρόμοιος με τον αλγόριθμο διατάραξης και παρατήρησης

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

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



Σχ. 4.9 : Λογικό διάγραμμα αλγορίθμου σταθερής τάσης

4.6 Μέθοδος διαφοροποίησης (Differentiation method)

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

$$\frac{dP_{PV}}{dt} = V_{PV}, \quad \frac{dI_{PV}}{dt} + I_{PV} \frac{dV_{PV}}{dt} = 0 \quad (4.7)$$

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

4.7 Νευρωνικά Δίκτυα (Neural Network)

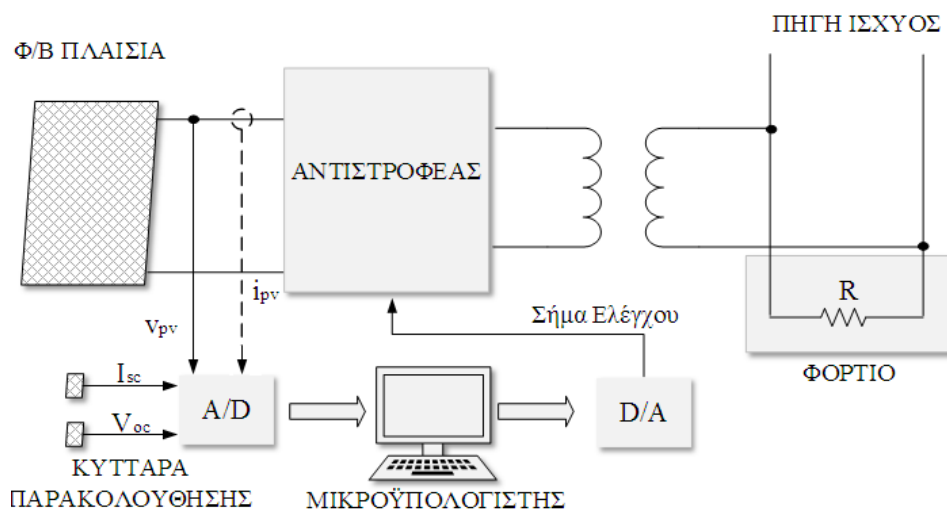
Τα νευρωνικά δίκτυα εφαρμόζονται σήμερα με επιτυχία σε πολλούς τομείς, από τις επικοινωνίες, την επεξεργασία εικόνας, την αναγνώριση ομιλίας, μέχρι και τον έλεγχο βιομηχανικών διεργασιών. Η τεχνική των νευρωνικών δικτύων βρήκε εφαρμογή και στην ανίχνευση του σημείου μέγιστης ισχύος στα φωτοβολταϊκά συστήματα [10].

Τα νευρωνικά δίκτυα συνήθως αποτελούνται από τρία επίπεδα – στρώματα: το επίπεδο εισόδου, το κρυφό επίπεδο, και το επίπεδο εξόδου. Ο αριθμός των κόμβων σε κάθε επίπεδο εξαρτάται τόσο από το είδος της εφαρμογής όσο και από την κρίση του σχεδιαστή.

Τυπικές μεταβλητές εισόδου για το νευρωνικό δίκτυο είναι η τάση ανοιχτοκύκλωσης της φ/β συστοιχίας, το ρεύμα βραχυκύκλωσης, ατμοσφαιρικά δεδομένα όπως ακτινοβολία και θερμοκρασία, ή οποιοσδήποτε συνδυασμός αυτών.

Η αποτελεσματικότητα του ελέγχου είναι άμεσα συνυφασμένη με τους αλγορίθμους που χρησιμοποιούνται από το κρυφό στρώμα, αλλά και το επίπεδο της εκπαίδευσης που γίνεται στο νευρωνικό δίκτυο. Συγκεκριμένα, τα βάρη με τα οποία σημαίνονται οι σύνδεσμοι των κόμβων προσδιορίζονται μέσω μακροχρόνιας διαδικασίας εκπαίδευσης. Κατά τη διαδικασία αυτή, η φ/β συστοιχία ελέγχεται για μήνες ή και χρόνια και καταγράφονται οι σχέσεις μεταξύ των εισόδων και των εξόδων του νευρωνικού δικτύου.

Ως εξόδοι συνήθως ορίζονται ένα ή περισσότερα σήματα αναφοράς, όπως για παράδειγμα το σήμα του λόγου διαμόρφωσης (duty cycle) που χρησιμοποιείται για την αγωγή του διακόπτη ισχύος του μετατροπέα. Στο σχήμα 2.9 παρουσιάζεται το μπλοκ διάγραμμα του ελέγχου που βασίζεται στα νευρωνικά δίκτυα, όπως εμφανίζεται στο [10].



Σχ. 4.10: Δομικό διάγραμμα ελέγχου που βασίζεται στα νευρωνικά δίκτυα

4.8 Η μέθοδος προσαρμογής καμπύλων (curve fitting)

Η μη γραμμική χαρακτηριστική της Φ/Β γεννήτριας μπορεί να μοντελοποιηθεί από τα τυπικά μοντέλα της μιας διόδου, των δύο διόδων και του τροποποιημένου μοντέλου των δύο διόδων χρησιμοποιώντας μαθηματικές εξισώσεις ή αριθμητικές προσεγγίσεις. Ωστόσο, η επίλυσή τους είναι αδύνατη από αναλογικό έλεγχο και πολύ δύσκολο από τον τυπικό ψηφιακό έλεγχο. Ως εκ τούτου, η εφαρμογή τους δεν φαίνεται κατάλληλη για την εύρεση του MPP. Ωστόσο, άλλες προσεγγίσεις με βάση το μοντέλο μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Συνεπώς, για παράδειγμα η εξίσωση 4.8 είναι η χαρακτηριστική ισχύς – τάσης (P-V). Κατά συνέπεια, η τάση στην οποία η μέγιστη ισχύς γίνεται μέγιστη επιτυγχάνεται μέσω της εξίσωσης 4.9.

$$P_{PV} = \alpha V_{PV}^3 + bV_{PV}^2 + cV_{PV} + d \quad (4.8)$$

$$V_{MPP} = -b\sqrt{b^2 - 3ac}/3a \quad (4.9)$$

Οπου:

- α, b, c, d : συντελεστές που καθορίζονται από την δειγματοληψία m τιμών της τάσης του $\Phi/B V_{PV}$ του ρεύματος I_{PV} και ισχύς του $\Phi/B P_{PV}$ στο απαραίτητο διάστημα.

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

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

4.9 Σύνοψη

Στο κεφάλαιο αυτό αναλύσαμε ξεχωριστά ορισμένους από τους πλέον διαδεδομένους αλγόριθμους MPPT που χρησιμοποιούνται ευρέως στα φωτοβολταϊκά συστήματα. Ο αλγόριθμος διατάραξη και παρατήρηση τον συναντούμε συχνότερα από τους άλλους, λόγω της ευκολής εφαρμογής του και αυτό είναι και το πλεονέκτημα του σε σχέση με τους υπόλοιπους. Ο αλγόριθμος αυξητικής αγωγιμότητας έχει ένα πλεονέκτημα έναντι του αλγορίθμου “διατάραξης και παρατήρησης”. Κάτω από γρήγορα μεταβαλλόμενες συνθήκες ο αλγόριθμος αυξητικής αγωγιμότητας μπορεί να εντοπίσει τη σωστή κατεύθυνση στην οποία πρέπει να κινηθεί για την εύρεση του σημείου μέγιστης ισχύος και να σταθεροποιηθεί, έτσι αποφεύγεται η περίπτωση να ακολουθηθεί λανθασμένη κατεύθυνση, όπως συμβαίνει με το P&O αλγόριθμο και να υπάρχει ταλάντευση γύρω από το σημείο όταν αυτό προσεγγιστεί. Ο αλγόριθμος “παρασιτική χωρητικότητα” είναι παρόμοιος με αυτόν της αυξητικής αγωγιμότητας, εκτός από το ότι περιλαμβάνει και την επίδραση της παρασιτικής χωρητικότητας των φωτοβολταϊκών κυττάρων. Τέλος ο αλγόριθμος σταθερής τάσης βασίζεται στην παρατήρηση, μέσω των καμπύλων I-V, ότι η αναλογία της μέγιστης τάσης ισχύος της συστοιχίας φωτοβολταϊκών V_{MPP} και της τάσης ανοιχτοκυκλώματος V_{OC} , είναι περίπου σταθερή. Λαμβάνεται υπόψη ότι πρέπει να καθοριστεί η σωστή τιμή του K για να λειτουργήσει σωστά ο αλγόριθμος αυτός. Ανάλογα λοιπόν με την κάθε εφαρμογή που εκτελείται και τις απαιτήσεις αυτής, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε και τον εκάστοτε αλγόριθμο MPP.

Αναφορές & Βιβλιογραφία:

[10] 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.

Κεφάλαιο 5 - Προσομοίωση Φωτοβολταϊκού

Συστήματος με έλεγχο MPPT

5.1 Εισαγωγή

Οι εφαρμογές που αναλύσαμε νωρίτερα στο προηγούμενο κεφάλαιο θα παρουσιαστούν στο παρόν κεφάλαιο και θα συγκριθούν με την βοήθεια Matlab/Simulink. Αρχικά να αναφερθεί ότι ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο μπορεί να παρασταθεί από ένα ισοδύναμο κύκλωμα. Το ισοδύναμο κύκλωμα ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου παρουσιάζεται στο σχήμα 5.1 που φαίνεται παρακάτω. Το κύκλωμα αυτό αποτελείται από μία αντίσταση R_S σε σειρά με τον παράλληλο συνδυασμό μίας πηγής ρεύματος με μία δίοδο και μία ωμική αντίσταση R_{SH} . Το ρεύμα εξόδου της πηγής ρεύματος I_{ph} είναι ανάλογο της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας και εξαρτάται και από τη θερμοκρασία. Οι σχέσεις παρακάτω εκφράζουν την εξάρτηση του ρεύματος αυτού από την ηλιακή ακτινοβολία καθώς και από τη θερμοκρασία:

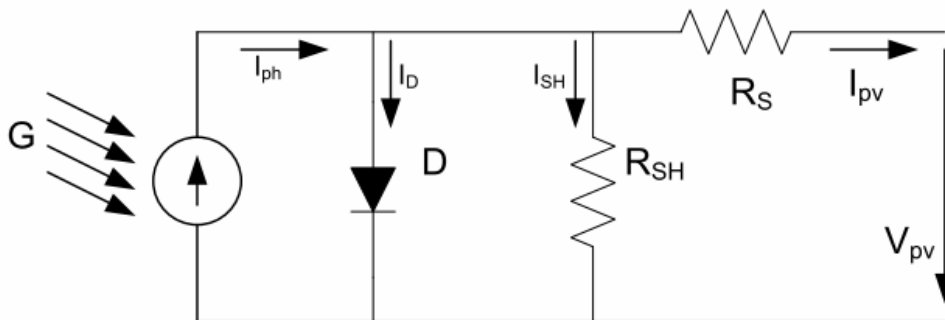
$$I_{ph} = I_{ph(T_{ref})} \cdot [1 + K_o \cdot (T - T_{ref})] \quad (5.1)$$

$$I_{ph(T_{ref})} = \frac{G}{G_{ref}} \cdot I_{sc(T_{ref})} \quad (5.2)$$

Όπου:

- T : Θερμοκρασία στοιχείου
- T_{ref} : Θερμοκρασία αναφοράς (η οποία συνήθως δίδεται από τον κατασκευαστή)
- G : Ηλιακή ακτινοβολία
- G_{ref} : Η ακτινοβολία αναφοράς
- $I_{sc(T_{ref})}$: Το ρεύμα βραχυκύκλωσης στη θερμοκρασία αναφοράς
- $I_{sc(T)}$: Είναι το ρεύμα βραχυκύκλωσης στη θερμοκρασία T
- K_o : Ένας συντελεστής που δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$K_o = \frac{I_{sc(T)} - I_{sc(T_{ref})}}{T - T_{ref}} \quad (5.3)$$



Σχ. 5-1: Ισοδύναμο κύκλωμα φωτοβολταϊκού στοιχείου

Από μια εύκολη εφαρμογή του νόμου των ρευμάτων του Kirchhoff προκύπτει ότι το φωτόρευμα I_{ph} ισούται με το άθροισμα των ρευμάτων που ρέουν μέσω της διόδου I_D , I_{SH} και I_{PV} της παράλληλης αντίστασης R_{SH} και της αντίστασης R_S αντίστοιχα. Το ρεύμα I_{PV} είναι το ρεύμα εξόδου του φωτοβολταϊκού στοιχείου. Η σχέση που συνδέει τα ρεύματα που προαναφέρθηκαν είναι:

$$I_{ph} = I_D + I_{R_{SH}} + I_{PV} \quad (5.4)$$

Επομένως, το ρεύμα εξόδου του φωτοβολταϊκού I_{PV} προκύπτει από την παραπάνω σχέση, ότι ισούται με:

$$I_{pv} = I_{ph} - (I_D + I_{R_{SH}}) \quad (5.5)$$

Το ρεύμα της διόδου καθώς και το ρεύμα που ρέει μέσω της παράλληλης αντίστασης R_{SH} όμως δίνονται αντίστοιχα από τις σχέσεις 5.6 και 5.7:

$$I_D = I_o \cdot \left[\exp\left(\frac{V_o + I_{pv} \cdot R_s}{V_T}\right) - 1 \right] \quad (5.6)$$

$$I_{sh} = \frac{V_{pv} + I_{pv} \cdot R_s}{R_s} \quad (5.7)$$

Όπου:

- I_o : Το ρεύμα κορεσμού της διόδου
- V_{pv} : Η τάση εξόδου και I_{pv} το ρεύμα εξόδου του φωτοβολταϊκού
- V_{T_n} : Θερμική τάση σε (Volt)
- R_s : η αντίσταση σειράς

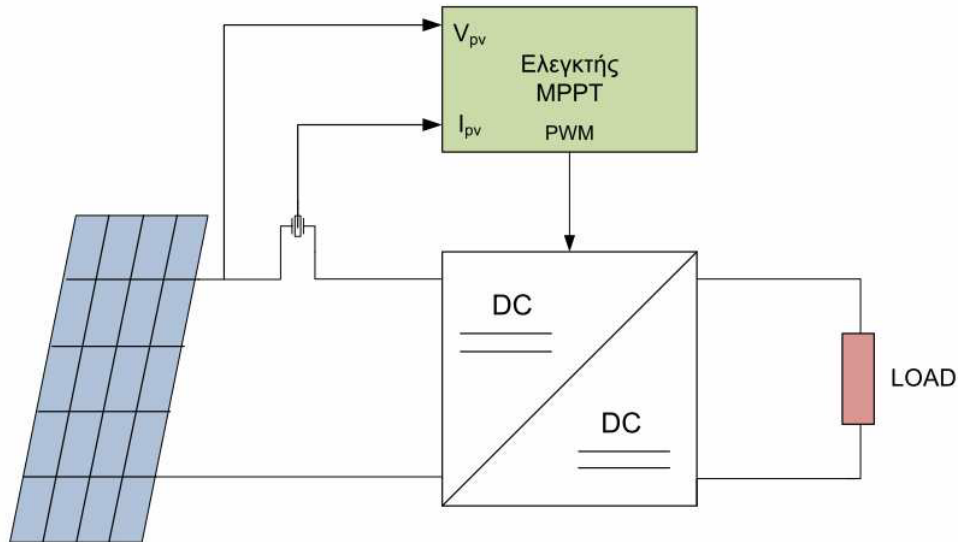
Λαμβάνοντας υπόψη όλες τις παραπάνω σχέσεις προκύπτει η επόμενη σχέση για το ρεύμα εξόδου του φωτοβολταϊκού στοιχείου:

$$I_{pv} = I_{ph} - I_o \cdot \left[\exp\left(\frac{V_{pv} + I_{pv} \cdot R_s}{V_T}\right) - 1 \right] - \left(\frac{V_{pv} + I_{pv} \cdot R_s}{R_{SH}} \right) \quad (5.8)$$

Αφού υπολογιστούν η τάση εξόδου V_{pv} και το ρεύμα εξόδου I_{pv} του φωτοβολταϊκού από τις παραπάνω σχέσεις, μπορεί να υπολογιστεί και η ισχύς του φωτοβολταϊκού από τη γνωστή σχέση :

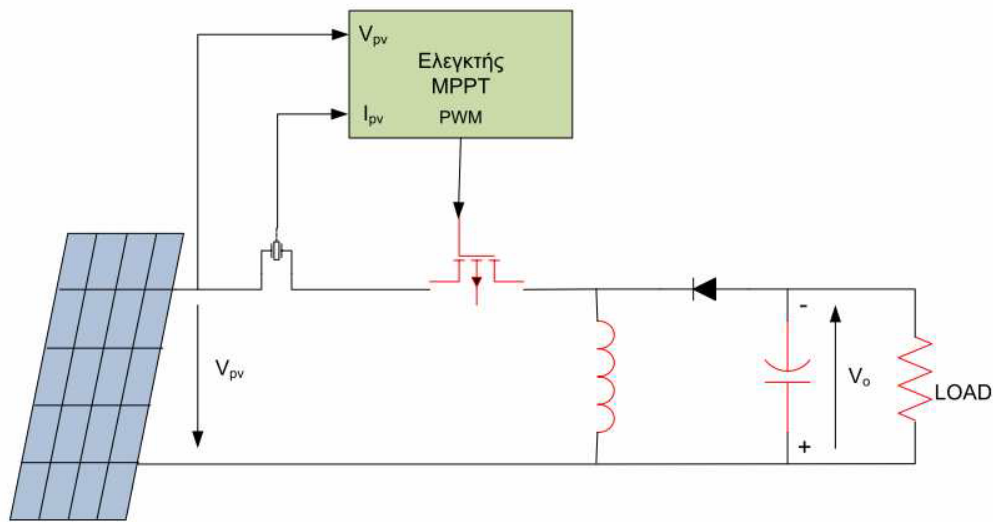
$$P_{pv} = V_{pv} \cdot I_{pv} \quad (5.9)$$

Οι προσομοιώσεις του συστήματος MPPT και του φωτοβολταϊκού στοιχείου πραγματοποιήθηκαν με τη χρήση του λογισμικού πακέτου Matlab/Simulink. Ένα ενδεικτικό μπλοκ διάγραμμα του συστήματος που προσομοιώθηκε φαίνεται στο παρακάτω σχήμα 5.2 :



Σχ.5-2: Μπλόκ διάγραμμα του συστήματος που προσομοιώθηκε

Σαν DC - DC μετατροπέας μπορεί να χρησιμοποιηθεί οποιοσδήποτε από τους τρεις βασικούς τύπους ή και άλλες τοπολογίες. Οι τρεις βασικοί τύποι είναι ο DC - DC μετατροπέας υποβιβασμού τάσης (Buck DC - DC converter), ο DC - DC μετατροπέας ανύψωσης τάσης (Boost DC - DC converter) και ο μικτός DC - DC μετατροπέας (Buck - Boost DC - DC converter). Άλλες τοπολογίες είναι ο DC - DC μετατροπέας του Cuk, ο SEPIC μικτός DC - DC μετατροπέας και άλλοι. Στις προσομοιώσεις της συγκεκριμένης πτυχιακής εργασίας χρησιμοποιήθηκε ο απλός μικτός DC - DC μετατροπέας. Το χονδρικό διάγραμμα του κυκλώματος των προσομοιώσεων φαίνεται στο παρακάτω σχήμα :

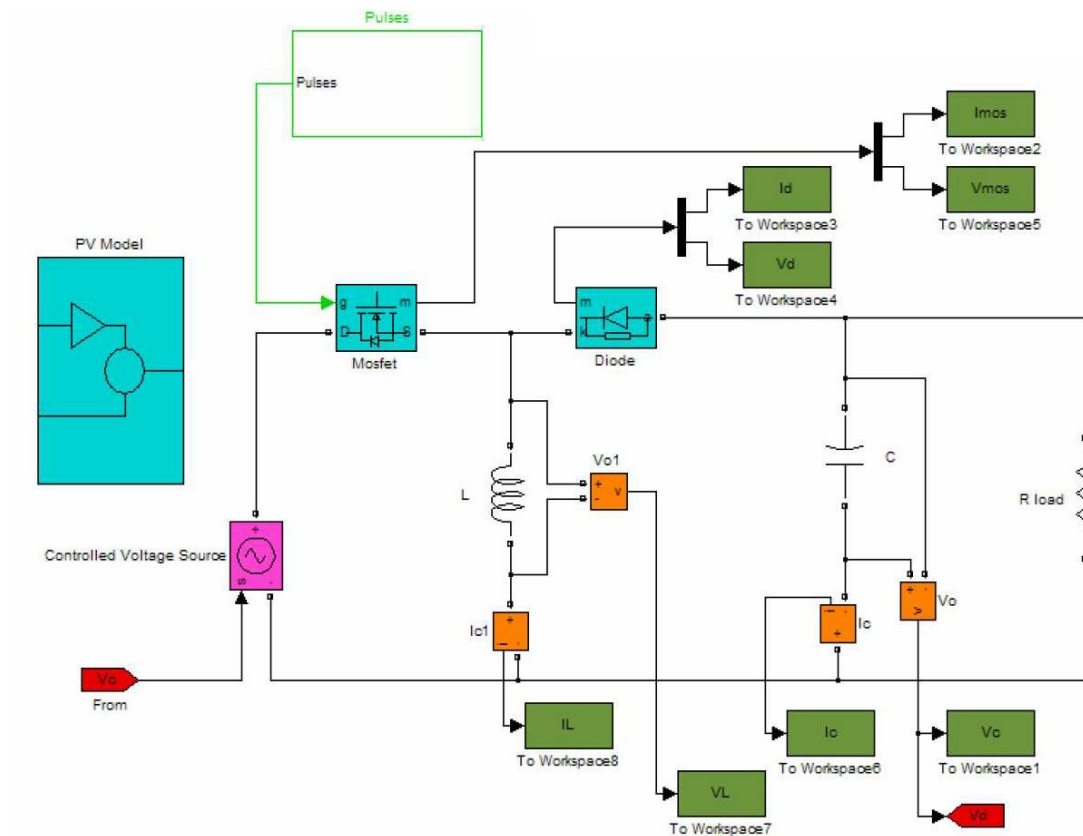


Σχ. 5-3: Κύκλωμα του μικτού DC - DC μετατροπέα που προσομοιώθηκε

5.2 Προσομοίωση Φωτοβολταϊκού συστήματος με έλεγχο

MPPT

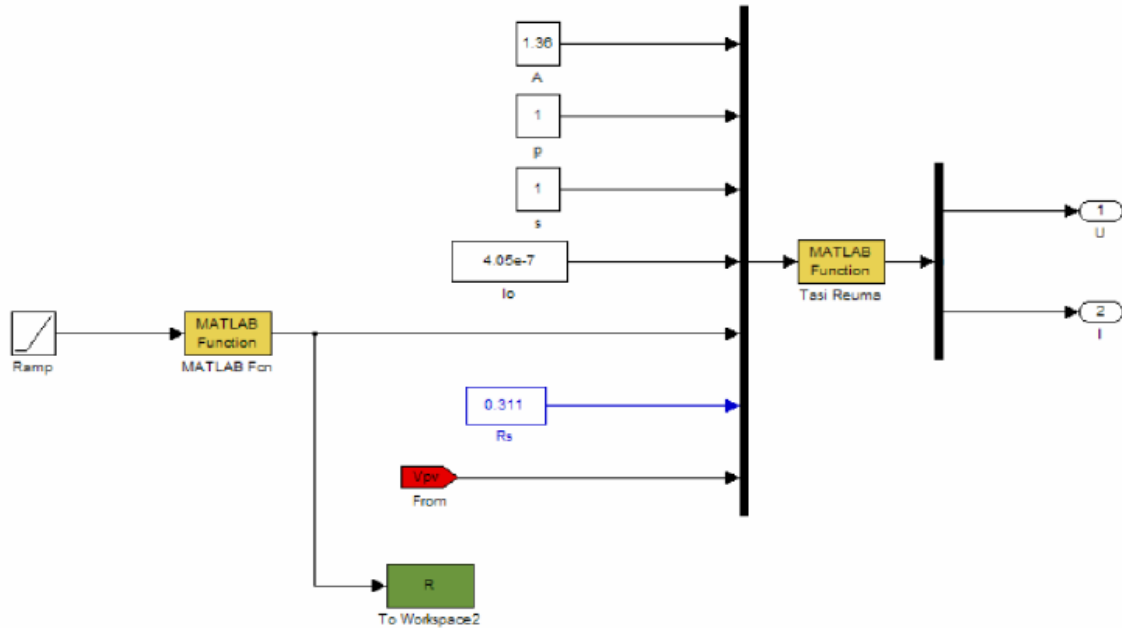
Στο Σχήμα 5.4 που ακολουθεί φαίνεται το φωτοβολταϊκό σύστημα με έλεγχο MPPT έτσι όπως προσομοιώθηκε με τη βοήθεια του λογισμικού Matlab/Simulink.



Σχ. 5-4: Μοντέλο του φωτοβολταϊκού συστήματος με έλεγχο MPPT σε λογισμικό Matlab/Simulink

5.2.1 Μοντέλο Φωτοβολταϊκού Στοιχείου

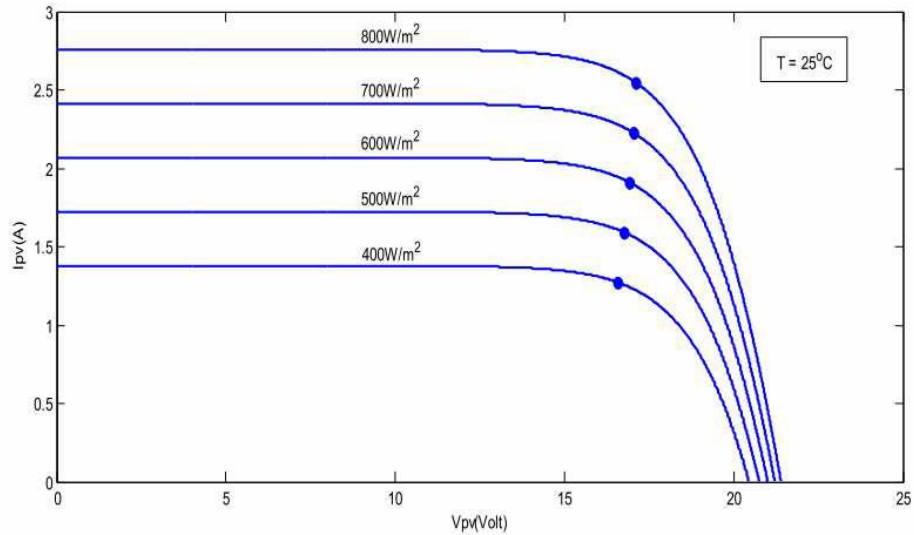
Στο συνολικό μοντέλο του σχήματος 5.4, το οποίο έχει σχεδιαστεί σε Matlab/Simulink, υπάρχουν δύο υποσυστήματα. Το ένα είναι το υποσύστημα PV Model, δηλαδή το μοντέλο του φωτοβολταϊκού στοιχείου και το υποσύστημα Pulses, το οποίο ελέγχει την παλμοδότηση του μικτού DC-DC μετατροπές έτσι ώστε να επιτυγχάνεται το σημείο μέγιστης ισχύος. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται το μοντέλο του φωτοβολταϊκού στοιχείου, το οποίο είναι το υποσύστημα PV Model.



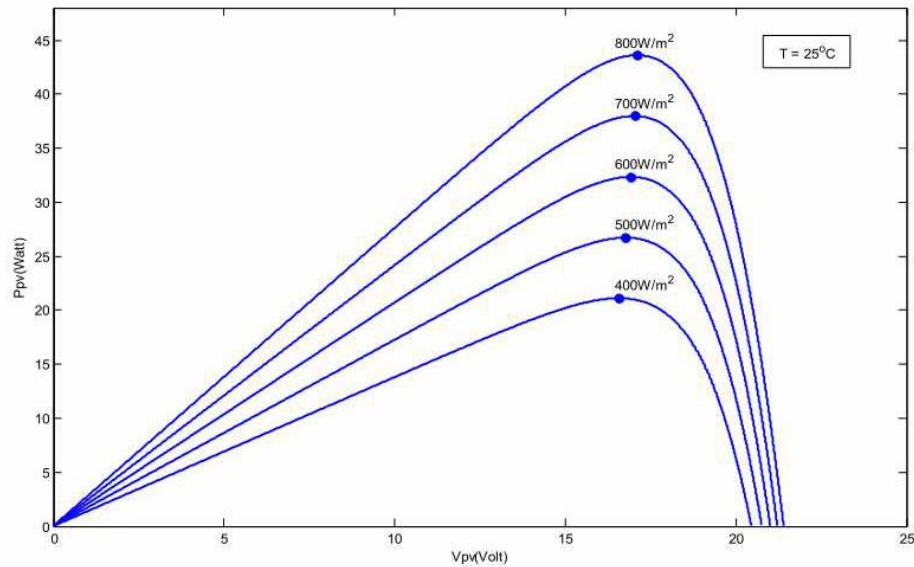
Σχ.5-5: Μοντέλο φωτοβολταϊκού στοιχείου

Πριν την περιγραφή του συστήματος, να αναφερθεί ότι οι προσομοιώσεις ξεκινούν με το σύστημα να λειτουργεί στο μέγιστο σημείο ισχύος σε ακτινοβολία $400\text{W}/\text{m}^2$. Στη συνέχεια γίνεται μεταβολή της ακτινοβολίας από $400\text{W}/\text{m}^2$ σε $500\text{W}/\text{m}^2$ και μελετάται η λειτουργία του συστήματος μετά από τη βαθμιαία μεταβολή της ακτινοβολίας. Το μπλοκ Ramp με τη βοήθεια του μπλοκ MATLAB Fcn (στο οποίο περιέχεται κώδικας) εκτελεί τη σταδιακή μεταβολή της ακτινοβολίας από $400\text{W}/\text{m}^2$ σε $500\text{W}/\text{m}^2$. Με το μπλοκ MATLAB Fcn, τίθεται όριο ακτινοβολίας, στην οποία δεν επιτρέπεται να ξεπεράσει την τιμή $500\text{W}/\text{m}^2$. Η έξοδος του μπλοκ MATLAB Fcn, δηλαδή η μεταβαλλόμενη ακτινοβολία συνδέεται ως είσοδος, μέσω του πολυπλέκτη, στο μπλοκ Tasi Reuma, το οποίο περιέχει κώδικα που προσομοιώνει το φωτοβολταϊκό στοιχείο. Στον κώδικα του μπλοκ Tasi Reuma επιλύεται ως προς I_{pv} και V_{pv} . Άλλες εισόδους που συνδέονται στο μπλοκ Tasi Reuma είναι η A που είναι και η θερμική τάση του φωτοβολταϊκού, ρ που είναι ο αριθμός των φωτοβολταϊκών στοιχείων που συνδέονται παράλληλα, s που είναι ο αριθμός των φωτοβολταϊκών στοιχείων που συνδέονται σε σειρά, I_0 το ρεύμα κορεσμού της διόδου, R_s η αντίσταση σε σειρά του ισοδύναμου κυκλώματος και τέλος η τάση VPV του φωτοβολταϊκού όπως προκύπτει μετά από τις μεταβολές της διάρκειας αγωγής του ημιαγωγίμου στοιχείου. Οι εισόδους αυτοί χρησιμοποιούνται στον υπολογισμό της τάσης και του ρεύματος εξόδου του φωτοβολταϊκού που γίνεται με τη βοήθεια του μπλοκ Tasi Reuma. Όπως φαίνεται και από το Σχήμα, η προσομοίωση έγινε για ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο και για το λόγο αυτό είναι $s = 1$ και $\rho = 1$. Το υποσύστημα αυτό έχει δύο εξόδους U και I, από τις οποίες προκύπτουν η τάση εξόδου και το ρεύμα εξόδου του φωτοβολταϊκού αντίστοιχα. Η έξοδος της τάσης U, χρησιμοποιείται σαν είσοδος V_c στο μπλοκ του σχήματος 5.4 για τον έλεγχο του μπλοκ ελεγχόμενης πηγής τάσης (Controlled Voltage Source).

Από την προσομοίωση που έγινε για το μοντέλο του φωτοβολταϊκού προκύπτουν και οι γενικές χαρακτηριστικές καμπύλες Ρεύματος - Τάσης (I - V) στο Σχήμα 5.6 και Ισχύος - Τάσης (P - V) στο σχήμα 5.7 του φωτοβολταϊκού για διάφορες τιμές ακτινοβολίας. Για την εξαγωγή αυτών των καμπυλών, στην είσοδο της ακτινοβολίας του μπλοκ Tasi Reuma συνδέεται κάθε φορά σταθερή και όχι μεταβαλλόμενη τιμή ακτινοβολίας. Στα παρακάτω σχήματα παρουσιάζονται οι χαρακτηριστικές καμπύλες Ρεύματος - Τάσης (I - V) και Ισχύος - Τάσης (P - V) του φωτοβολταϊκού αντίστοιχα για τιμές ακτινοβολίας από $400\text{W}/\text{m}^2$ έως $800\text{W}/\text{m}^2$ και για θερμοκρασία 25°C . Στα σχήματα φαίνεται και το μέγιστο σημείο ισχύος για κάθε περίπτωση:



Σχ. 5-6: Χαρακτηριστικές καμπύλες I-V του φωτοβολταϊκού για διάφορες ακτινοβολίες



Σχ. 5-7: Χαρακτηριστικές καμπύλες P-V του φωτοβολταϊκού για διάφορες ακτινοβολίες

5.2.2 Μοντέλο Ελεγκτή MPPT

Στο μπλοκ Pulses του σχήματος 5.4 περιλαμβάνεται το υποσύστημα του ελεγκτή του όλου συστήματος, ο οποίος ελέγχει την παλμοδότηση του ημιαγωγίου στοιχείου, έτσι ώστε να γίνεται η ανίχνευση του μέγιστου σημείου ισχύος. Να αναφερθεί στο σημείο αυτό ότι η ανίχνευση του μέγιστου σημείου ισχύος γίνεται με βάση τον αλγόριθμο αυξητικής αγωγιμότητας, ο οποίος αναλύθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο. Σε αυτό το υποσύστημα υπάρχει ένα μπλοκ MATLAB Fcn, το οποίο περιέχει κώδικα. Ο κώδικας αυτός αποτελεί μια συνάρτηση, η οποία δεν υπάρχει στις βιβλιοθήκες και δημιουργείται με σκοπό τη λειτουργία της εφαρμογής. Το μπλοκ MATLAB Fcn έχει κάποιες εισόδους, όπως η τάση εξόδου του φωτοβολταϊκού στοιχείου και το ρεύμα εξόδου I_C του φωτοβολταϊκού στοιχείου. Οι εισοδοί χρησιμεύουν για την εκτέλεση του αλγορίθμου αυξητικής

αγωγιμότητας από το μπλοκ αυτό. Μετά τους υπολογισμούς που γίνονται από τη συνάρτηση που περιέχεται στο μπλοκ MATLAB Fcn, δημιουργούνται οι έξοδοι που είναι οι παλμοί του ημιαγωγίμου στοιχείου και κάποιες άλλες για τη δημιουργία των γραφημάτων.

Είναι πολύ σημαντικό να αναφερθεί ότι η παλμοδότηση του μικτού DC - DC μετατροπέα έγινε με μια σημαντική τροποποίηση. Όπως είναι γνωστό, η τάση εισόδου και η τάση εξόδου ενός μικτού DC -DC μετατροπέα συνδέονται με τη σχέση:

$$\frac{V_o}{V_d} = \frac{D}{1-D} \Rightarrow V_o = \frac{D}{1-D} \cdot V_d \quad (5.10)$$

Όπου:

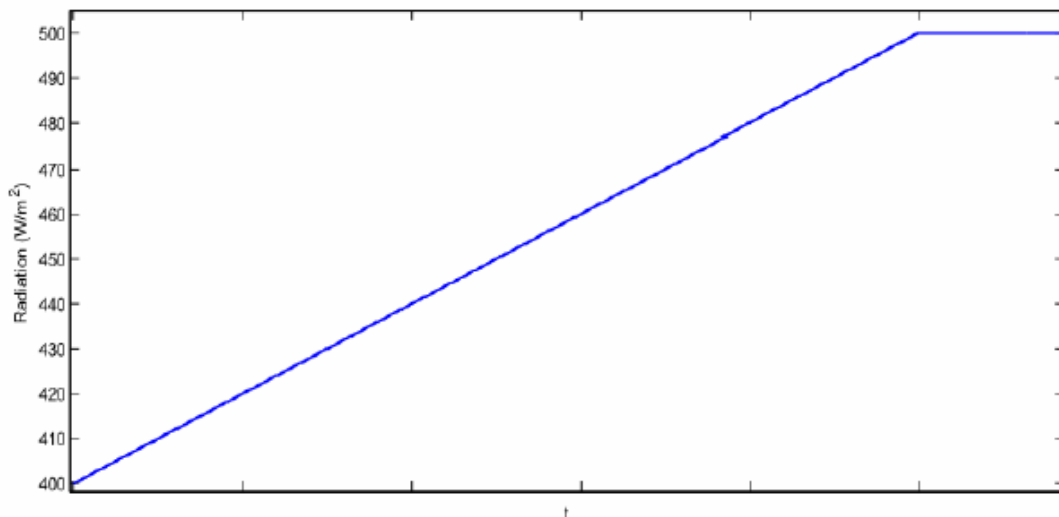
- V_o : Τάση εξόδου
- V_d : Τάση εισόδου
- D : Η διάρκεια αγωγής του ημιαγωγίμου στοιχείου

Η σχέση αυτή δεν είναι γραμμική. Στην προσομοίωση στον υπολογιστή έγινε γραμμικοποίηση της σχετικής διάρκειας αγωγής σύμφωνα με τη σχέση 5.18 :

$$d = \frac{D}{1-D} \quad (5.11)$$

Η σχέση 5.10 όπως είναι φανερό, είναι γραμμική και είναι ανάλογη με τη σχέση που συνδέει την τάση εισόδου και την τάση εξόδου ενός DC - DC μετατροπέα υποβιβασμού τάσης. Είναι φανερό ότι με την τροποποίηση αυτή, εκτός από τη γραμμικότητα που επιτυγχάνεται, απλουστεύεται και η εφαρμογή του αλγορίθμου, καθώς διευκολύνεται η μεταβολή της διάρκειας αγωγής του ημιαγωγίμου στοιχείου.

Στα παρακάτω σχήματα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων του συστήματος για διάφορες τιμές μεταβολής Δ_d της γραμμικοποίησης και για διάφορους χρόνους δειγματοληψίας (T_{sample}). Τελικά συγκρίνεται η απόκριση του συστήματος για τις διαφορετικές αυτές περιπτώσεις. Η ηλιακή ακτινοβολία μεταβάλλεται από 400W/m^2 σε 500W/m^2 . Η μεταβολή της ακτινοβολίας φαίνεται στο παρακάτω σχήμα :

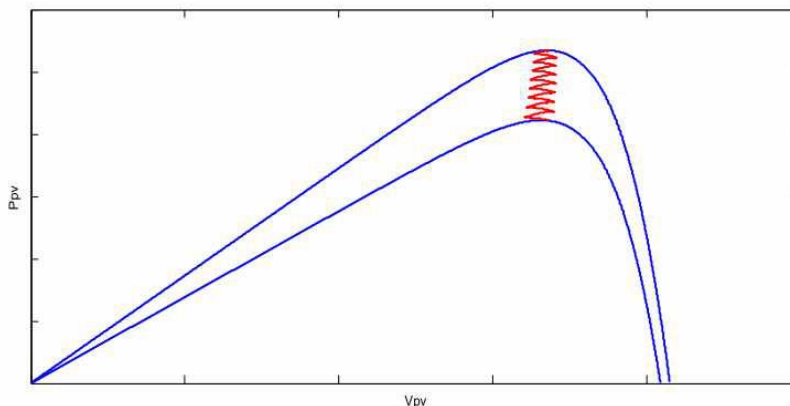


Σχ.5-8: Μεταβολή της ακτινοβολίας που χρησιμοποιήθηκε στις προσομοιώσεις

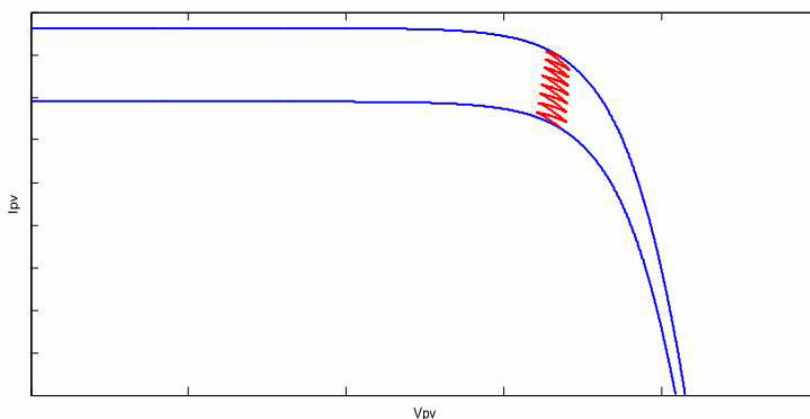
5.3 Αποτελέσματα -προσομοιώσεων του συστήματος

5.3.1 Αποτελέσματα για ($d = 0.001$ και $T_{sample} = 0.5ms$)

Στο σημείο αυτό, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την προσομοίωση του συστήματος με βήμα μεταβολής της σχετικής διάρκειας αγωγής $\Delta d = 0.001$ και $T_{sample} = 0.5ms$. Στα σχήματα 5.9 και 5.10, φαίνονται οι χαρακτηριστικές καμπύλες Ισχύος - Τάσης και Ρεύματος - Τάσης αντίστοιχα, για δύο τιμές ηλιακής ακτινοβολίας, $400W/m^2$ και $500W/m^2$. Με κόκκινο παρουσιάζεται η κίνηση του σημείου λειτουργίας του συστήματος κατά τη βαθμιαία μεταβολή της ηλιακής ακτινοβολίας από $400W/m^2$ σε $500W/m^2$.

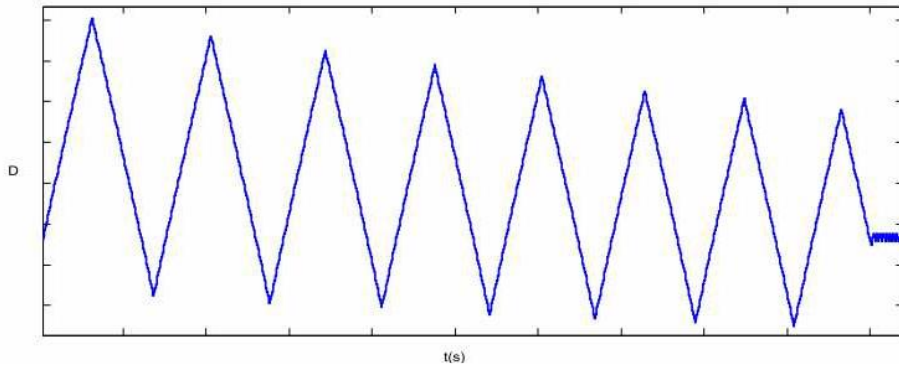


Σχ. 5-9: Καμπύλη Ισχύος - Τάσης για $\Delta d = 0.001$ και $T_{sample} = 0.5ms$

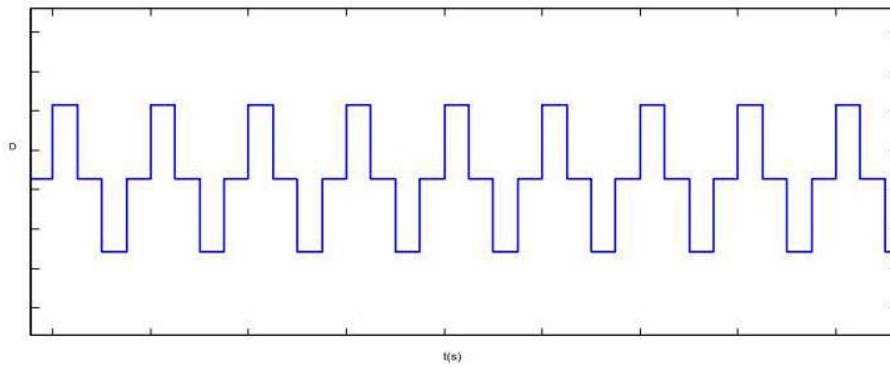


Σχ. 5-10: Καμπύλη Ρεύματος - Τάσης για $\Delta d = 0.001$ και $T_{sample} = 0.5ms$

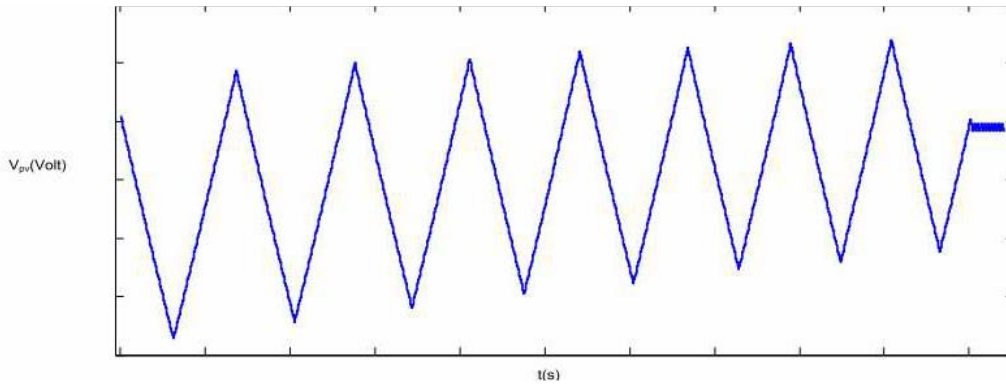
Στα Σχήματα 5.11 και 5.12, φαίνεται η μεταβολή της σχετικής διάρκειας αγωγής σε όλο το εύρος της μεταβολής της ηλιακής ακτινοβολίας, καθώς και κατά τη μόνιμη κατάσταση αντίστοιχα. Στη μόνιμη κατάσταση έχει προσεγγιστεί το μέγιστο σημείο ισχύος για ηλιακή ακτινοβολία $500W/m^2$ και το σημείο λειτουργίας του συστήματος εκτελεί μικρές ταλαντώσεις γύρω από αυτό. Αυτό μπορεί να γίνει αντιληπτό και από τα σχήματα 5.13 και 5.14, όπου φαίνονται αντίστοιχα οι μεταβολές της τάσης και του ρεύματος εισόδου του μετατροπέα, κατά τη διάρκεια της μεταβολής της ηλιακής ακτινοβολίας από $400W/m^2$ σε $500W/m^2$, όπου στο τέλος των κυματομορφών τόσο η τάση όσο και το ρεύμα ουσιαστικά σταθεροποιούνται.



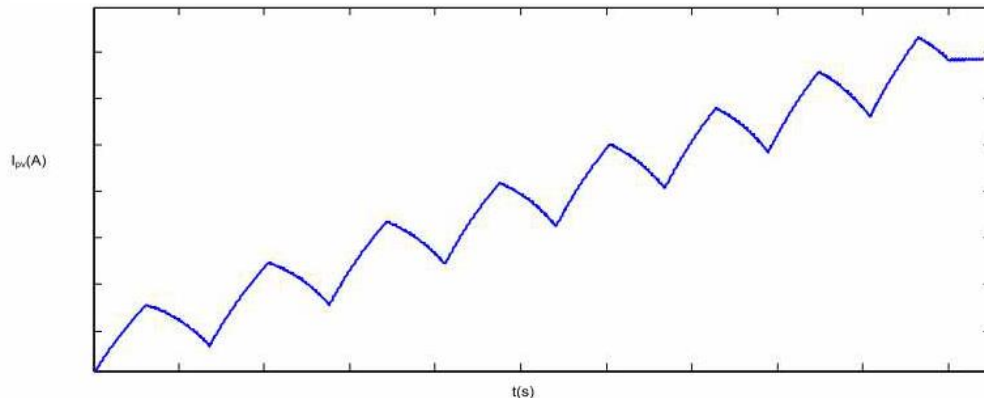
Σχ. 5-11: Μεταβολή διάρκειας αγωγής D συνάρτησει του χρόνου για $\Delta d = 0.001$ και $T_{sample} = 0.5ms$



Σχ. 5-12: Μεταβολή διάρκειας αγωγής D απο το MPPT για $\Delta d = 0.001$ και $T_{sample} = 0.5ms$



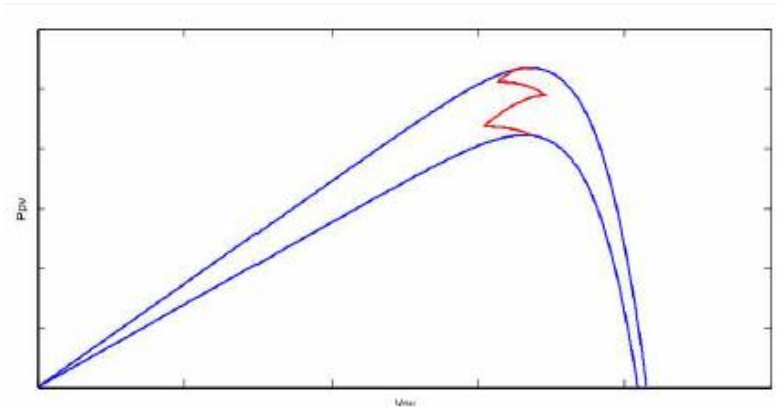
Σχ. 5-13: Μεταβολή της Τάσης V_{pv} συναρτήσει του χρόνου για $\Delta d = 0.001$ και $T_{sample} = 0.5ms$



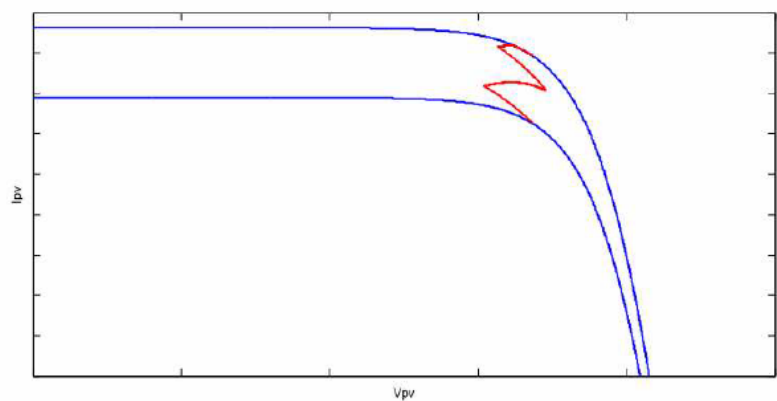
Σχ. 5-14: Μεταβολή του ρεύματος I_{pv} συνάρτησει του χρόνου για $\Delta d = 0.001$ και $T_{sample} = 0.5ms$

5.3.2 Αποτελέσματα για $\Delta d = 0.001$ και $T_{Sample} = 1ms$

Όπως και προηγουμένως, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την προσομοίωση του συστήματος με βήμα μεταβολής της σχετικής διάρκειας αγωγής $\Delta d = 0.001$ και $T_{sample} = 1ms$. Στα σχήματα 5.15 και 5.16, φαίνονται οι χαρακτηριστικές καμπύλες Ισχύος - Τάσης και Ρεύματος - Τάσης αντίστοιχα, για δύο τιμές ηλιακής ακτινοβολίας, $400W/m^2$ και $500W/m^2$. Με κόκκινο παρουσιάζεται η κίνηση του σημείου λειτουργίας του συστήματος κατά τη βαθμιαία μεταβολή της ηλιακής ακτινοβολίας από $400W/m^2$ σε $500W/m^2$.

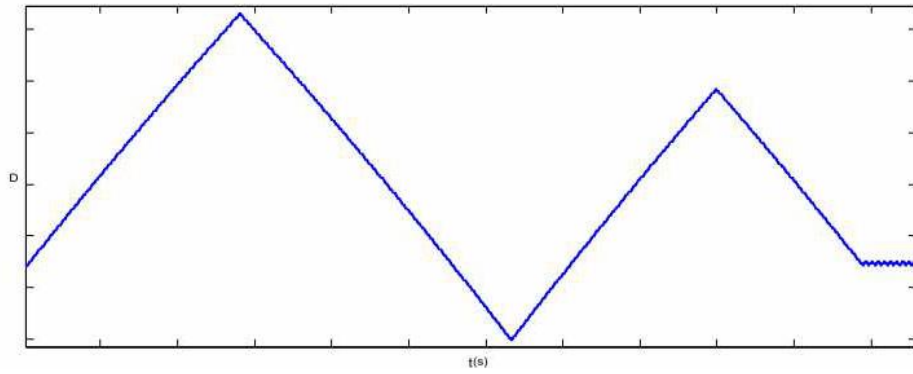


Σχ. 5-15: Καμπύλη Ισχύος - Τάσης για $\Delta d = 0.001$ και $T_{sample} = 1ms$

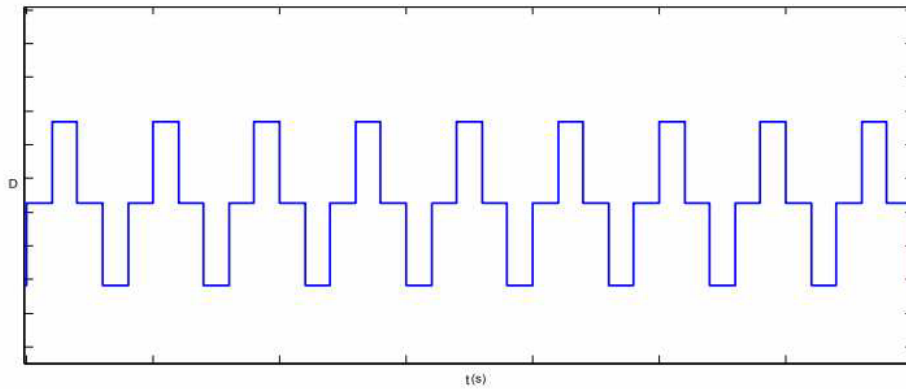


Σχ. 5.16: Καμπύλη Ρεύματος - Τάσης για $\Delta d = 0.001$ και $T_{sample} = 1ms$

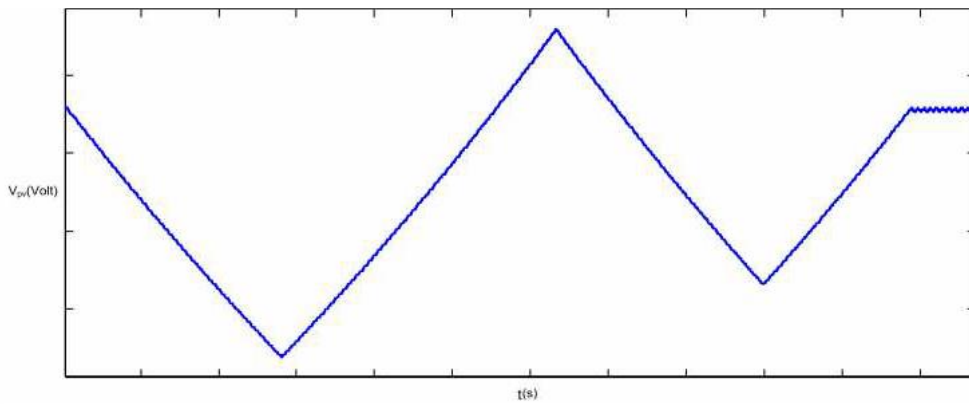
Επιπλέον, στα σχήματα 5.17 και 5.18, φαίνεται η μεταβολή της σχετικής διάρκειας αγωγής σε όλο το εύρος της μεταβολής της ηλιακής ακτινοβολίας, καθώς και κατά τη μόνιμη κατάσταση αντίστοιχα. Στη μόνιμη κατάσταση το σημείο λειτουργίας του συστήματος εκτελεί μικρές ταλαντώσεις γύρω από το μέγιστο σημείο ισχύος για ακτινοβολία $500W/m^2$. Στα Σχήματα 5.19 και 5.20, φαίνονται αντίστοιχα οι μεταβολές της τάσης και του ρεύματος εισόδου του μετατροπέα, κατά τη διάρκεια της μεταβολής της ηλιακής ακτινοβολίας από $400W/m^2$ σε $500W/m^2$, όπου στο τέλος των κυματομορφών τόσο η τάση όσο και το ρεύμα ουσιαστικά σταθεροποιούνται.



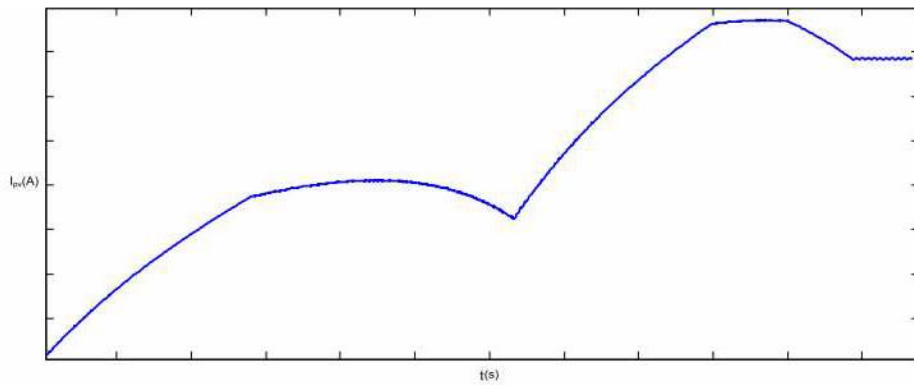
Σχ.5-17: Μεταβολή αγωγής D συναρτήσει του χρόνου για $\Delta d = 0.001$ και $T_{sample} = 1ms$



Σχ. 5-18: Μεταβολή διάρκειας αγωγής D γύρω απο το MPPT για $\Delta d = 0.001$ και $T_{sample} = 0.5ms$



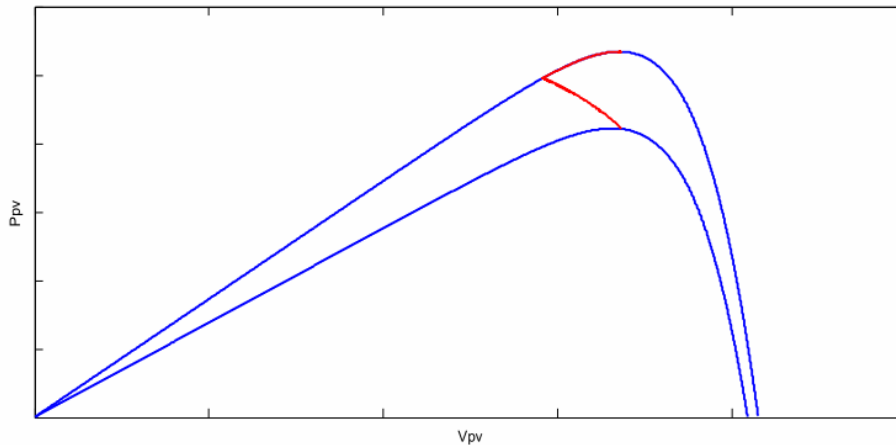
Σχ. 5-19: Μεταβολή της τάσης V_{pv} συναρτήσει του χρόνου για $\Delta d = 0.001$ και $T_{sample} = 1ms$



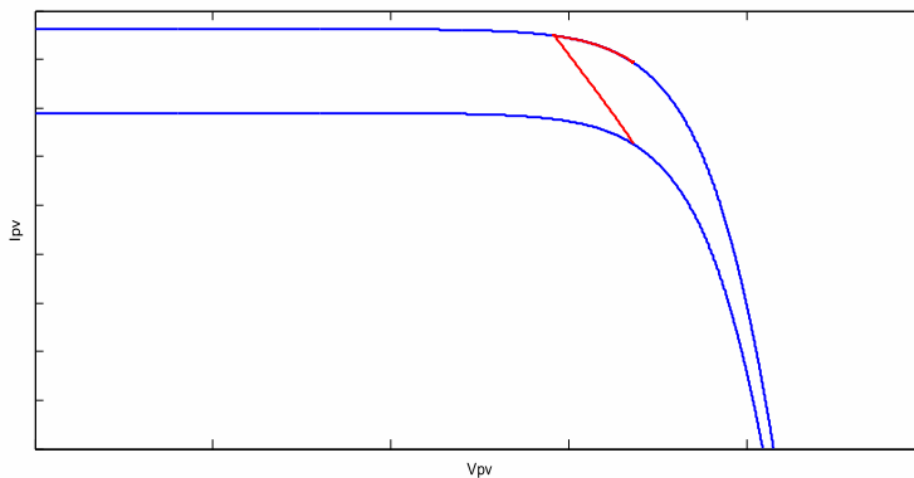
Σχ. 5-20: Μεταβολή του Ρεύματος I_{pv} συναρτήσει του χρόνου για $\Delta d = 0.001$ και $T_{sample} = 1ms$

5.3.3. Αποτελέσματα για $\Delta d = 0.001$ και $T_{sample} = 2.5ms$

Εδώ παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του συστήματος με βήμα μεταβολής της σχετικής διάρκειας αγωγής $\Delta d = 0.001$ και $T_{sample} = 2.5ms$. Στα Σχήματα 5.21 και 5.22 φαίνονται οι χαρακτηριστικές καμπύλες Ισχύος - Τάσης και Ρεύματος - Τάσης αντίστοιχα, για δύο τιμές ηλιακής ακτινοβολίας, $400W/m^2$ και $500W/m^2$. Με κόκκινο παρουσιάζεται η κίνηση του σημείου λειτουργίας του συστήματος κατά τη βαθμιαία μεταβολή της ηλιακής ακτινοβολίας από $400W/m^2$ σε $500W/m^2$.

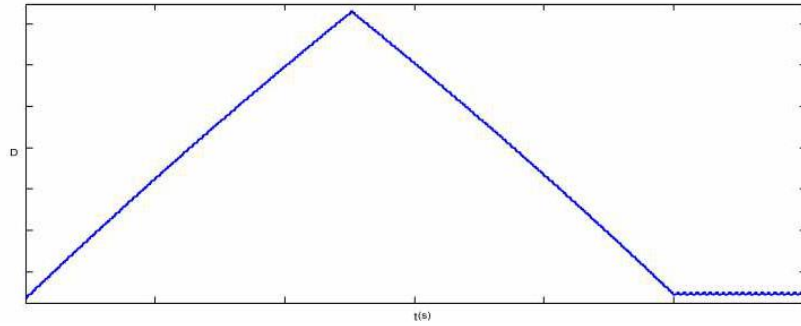


Σχ. 5-21: Καμπύλη Ισχύος -Τάσης για $\Delta d = 0.001$ και $T_{sample} = 2.5ms$

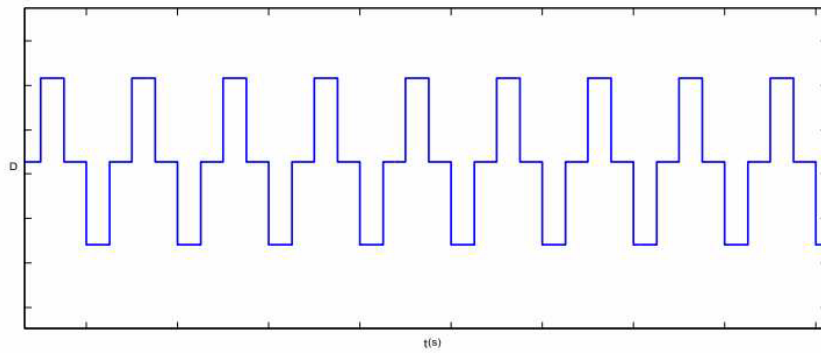


Σχ. 5-22: Καμπύλη Ρεύματος - Τάσης για $\Delta d = 0.001$ και $T_{sample} = 2.5ms$

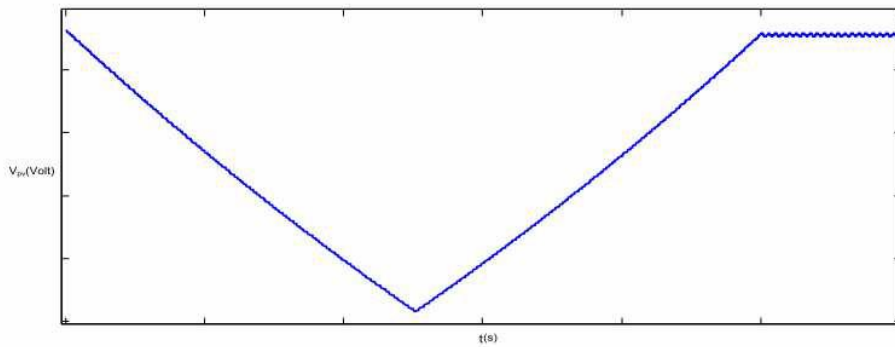
Στα σχήματα 5.23 και 5.24 φαίνεται η μεταβολή της σχετικής διάρκειας αγωγής σε όλο το εύρος της μεταβολής της ηλιακής ακτινοβολίας, καθώς και κατά τη μόνιμη κατάσταση αντίστοιχα. Στη μόνιμη κατάσταση το σημείο λειτουργίας του συστήματος εκτελεί μικρές ταλαντώσεις γύρω από το μέγιστο σημείο ισχύος για ακτινοβολία $500W/m^2$. Στα σχήματα 5.25 και 5.26, φαίνονται αντίστοιχα οι μεταβολές της τάσης και του ρεύματος εισόδου του μετατροπέα, κατά τη διάρκεια της μεταβολής της ηλιακής ακτινοβολίας από $400W/m^2$ σε $500W/m^2$, όπου στο τέλος των κυματομορφών τόσο η τάση όσο και το ρεύμα ουσιαστικά σταθεροποιούνται.



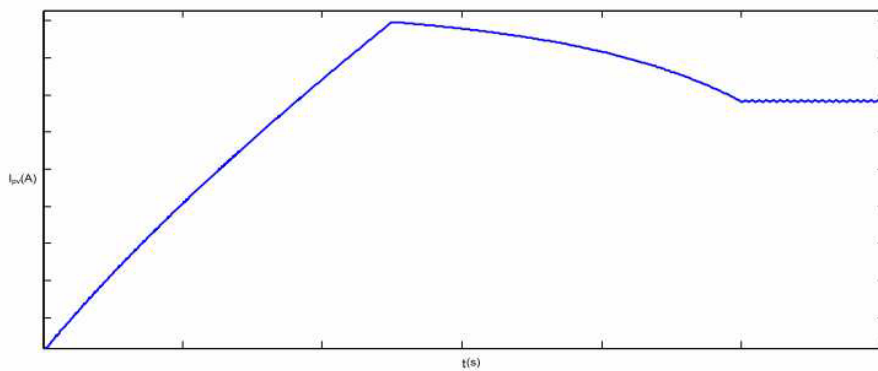
Σχ. 5-23: Μεταβολή διάρκειας αγωγής D συναρτήσει του χρόνου για $\Delta d = 0.001$ και $T_{sample} = 2.5\text{ms}$



Σχ. 5-24: Μεταβολή διάρκειας αγωγής D γύρω από το MPPT για $\Delta d = 0.001$ και $T_{sample} = 2.5\text{ms}$



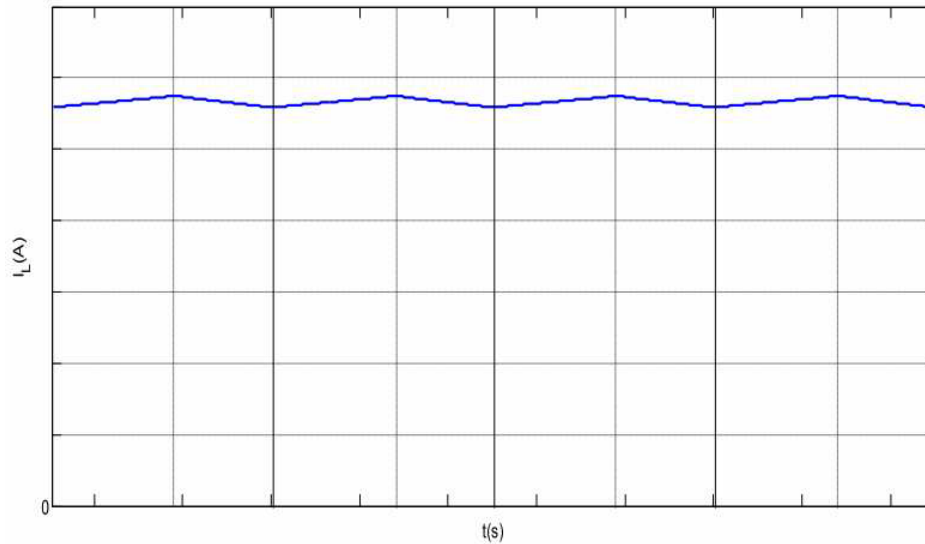
Σχ. 5-25: Μεταβολή της Τάσης V_{pv} συναρτήσει του χρόνου για $\Delta d = 0.001$ και $T_{sample} = 2.5\text{ms}$



Σχ. 5-26: Μεταβολή του Ρεύματος I_{pv} συναρτήσει του χρόνου για $\Delta d = 0.001$ και $T_{sample} = 2.5\text{ms}$

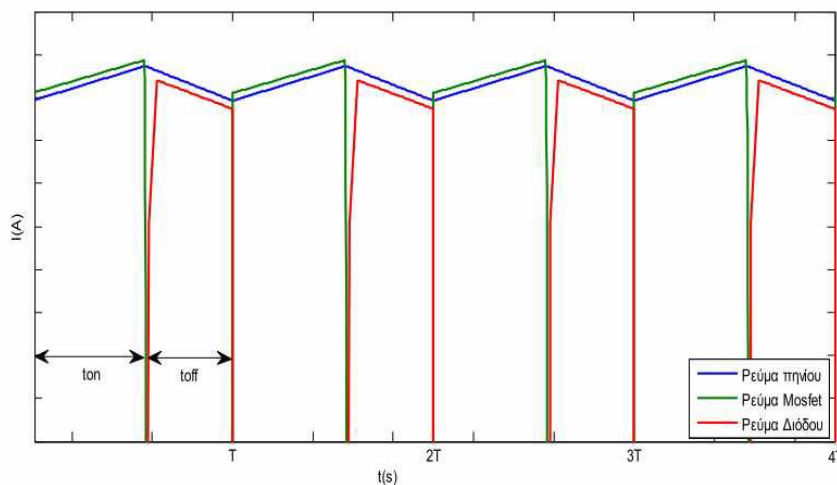
5.3.4 Κυματομορφές Ρευμάτων και Τάσεων

Για μια πιο ολοκληρωμένη περιγραφή του συστήματος, σε αυτό το σημείο θα παρουσιαστούν οι κυματομορφές των ρευμάτων και των τάσεων τόσο του πηνίου όσο και των ημιαγωγίμων στοιχείων. Αρχικά παρουσιάζεται το ρεύμα του πηνίου χωρίς μεγέθυνση, έτσι ώστε να γίνει αντιληπτή η κυμάτωση του ρεύματος σε σχέση με το πλάτος του. Το ρεύμα και η κυμάτωση του ρεύματος του πηνίου φαίνονται στο σχήμα 5.27:



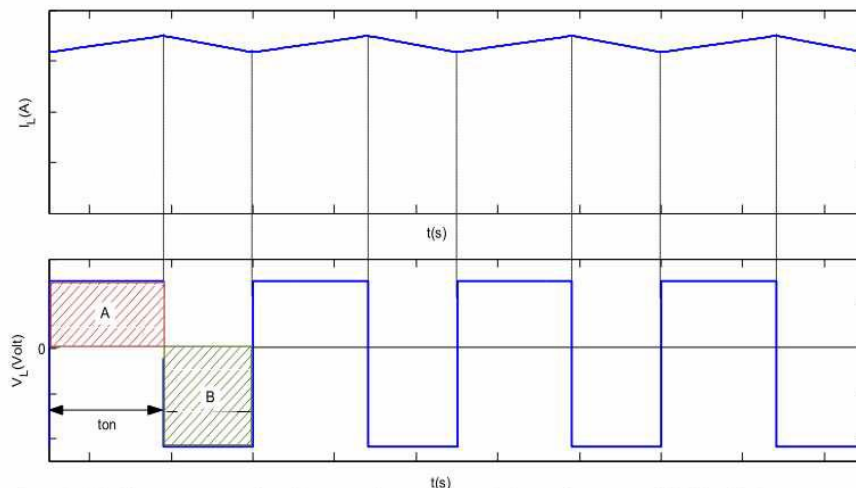
Σχ.5-27 : Κυματομορφή ρεύματος πηνίου μικτού DC - DC μετατροπέα

Όπως φαίνεται από το σχήμα, η κυμάτωση του ρεύματος του πηνίου είναι πολύ μικρή, σχεδόν αμελητέα σε σχέση με το πλάτος του ρεύματος. Επομένως, επιτυγχάνεται αρκετή εξομάλυνση και το ρεύμα του πηνίου μπορεί να θεωρηθεί κατά προσέγγιση σταθερό. Για να γίνει αντιληπτή η λειτουργία και οι χρόνοι αγωγής των ημιαγωγίμων στοιχείων, στο σχήμα 5.28 παρουσιάζονται τα ρεύματα του πηνίου, του Mosfet και της διόδου. Να σημειωθεί ότι το συγκεκριμένο σχήμα παρουσιάζεται σε μεγέθυνση για την καλύτερη απεικόνιση των κυματώσεων και των διαφορών μεταξύ των μεγεθών των ρευμάτων.



Σχ. 5-28: Κύματομορφές ρευμάτων πηνίου, Mosfet και διόδου μικτού DC - DC μετατροπέα

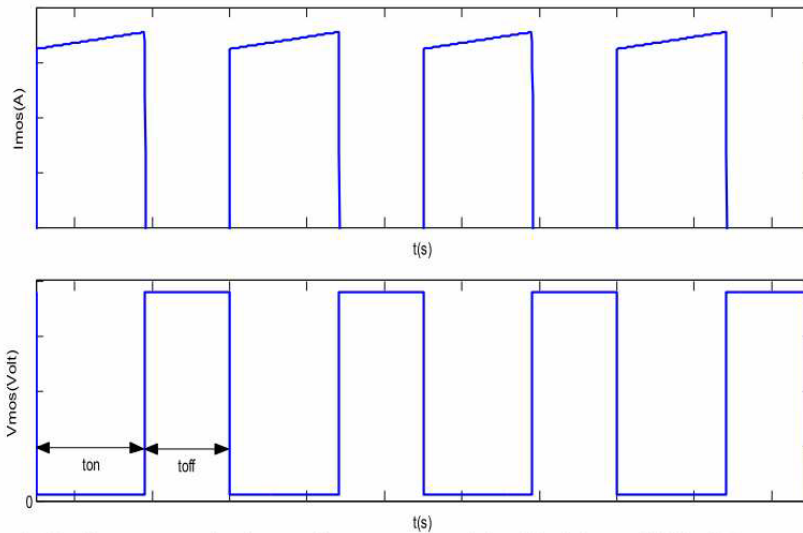
Από το σχήμα φαίνεται ότι κατά το χρόνο t_{on} , που ο ημιαγωγικός διακόπτης (Mosfet) βρίσκεται σε κατάσταση αγωγής, το ρεύμα του πηνίου διέρχεται μέσα από αυτόν. Κατά το χρόνο t_{off} , όπου ο διακόπτης βρίσκεται σε κατάσταση αποκοπής, το ρεύμα του πηνίου διέρχεται μέσω της διόδου του μικτού DC - DC μετατροπέα. Η λειτουργία του μικτού DC - DC μετατροπέα έχει αναλυθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο. Είναι σημαντικό να παρουσιαστούν και οι τάσεις του πηνίου και των ημιαγωγικών στοιχείων σε αντιπαράθεση με τα ρεύματά τους, έτσι ώστε να γίνει πιο σαφής η καταπόνηση των στοιχείων και η λειτουργία του μετατροπέα. Στο σχήμα 5.29, απεικονίζονται οι κυματομορφές ρεύματος και τάσης του πηνίου :



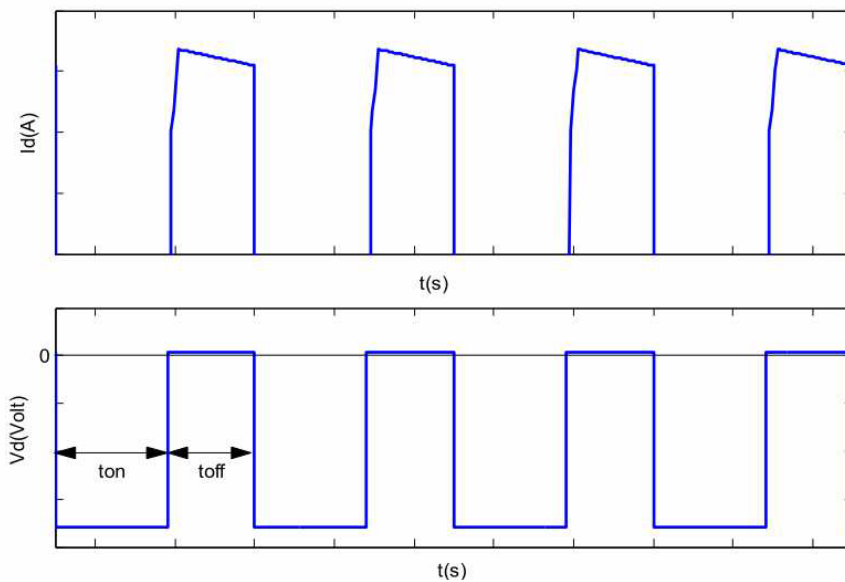
Σχ.5-29 : Κυματομορφές ρεύματος I_L και τάσης V_L πηνίου μικτού DC - DC μετατροπέα

Κατά τη χρονική περίοδο t_{off} , που ο ημιαγωγικός διακόπτης είναι κλειστός, η τάση του πηνίου είναι θετική και ίση με την τάση της πηγής. Κατά το χρόνο t_{off} όμως, όπου άγει η διόδος, η τάση του πηνίου γίνεται ίση με την τάση εξόδου, η οποία σε ένα μικτό DC - DC μετατροπέα έχει αρνητική πολικότητα σε σχέση με την τάση εισόδου, όπως είναι ήδη γνωστό. Είναι σαφές ότι η διάρκεια αγωγής (*duty cycle*) του Mosfet είναι μεγαλύτερη από 0.5. Ένας μικτός DC - DC μετατροπέας για διάρκειες αγωγής $D < 0.5$, υποβιβάζει την τάση εξόδου σε σχέση με την τάση εισόδου, ενώ για διάρκειες αγωγής $D > 0.5$ ανυψώνει την τάση εξόδου σε σχέση με την τάση εισόδου. Επομένως, στην περίπτωση του παραπάνω Σχήματος, όπου $D > 0.5$, ο μικτός DC - DC μετατροπέας λειτουργεί σαν DC - DC μετατροπέας ανύψωσης και ανυψώνει την τάση εξόδου. Όπως φαίνεται και στο σχήμα, η αρνητική τάση του πηνίου είναι μεγαλύτερη, κατά απόλυτη τιμή, από τη θετική τάση, ενώ το εμβαδόν A είναι ίσο με το B.

Όπως προαναφέρθηκε, όταν ο ημιαγωγικός διακόπτης άγει, διέρχεται μέσω αυτού το ρεύμα του πηνίου. Κατά τη χρονική περίοδο που αυτός βρίσκεται σε κατάσταση αγωγής, η τάση του είναι σχεδόν μηδέν. Για έναν ιδανικό διακόπτη, η πτώση τάσης επάνω του θα έπρεπε να είναι μηδέν όταν αυτός βρίσκεται σε κατάσταση αγωγής. Στις προσομοιώσεις όμως, χρησιμοποιήθηκαν μη ιδανικοί ημιαγωγικοί διακόπτες, με μια τάση ορθής πόλωσης της τάξης του mV. Για το λόγο αυτό στα παρακάτω σχήματα, η τάση του Mosfet αλλά και της διόδου δε μηδενίζονται όταν αυτά βρίσκονται σε κατάσταση αγωγής. Κατά τη χρονική περίοδο που το Mosfet δεν άγει, εμφανίζεται στα άκρα του το άθροισμα της τάσης εξόδου και της τάσης εισόδου. Τα ίδια ισχύουν και για τη διόδο με τη διαφορά ότι η τάση που εμφανίζεται στα άκρα της όταν αυτή δεν άγει έχει διαφορετική πολικότητα από την αντίστοιχη τάση του Mosfet. Στα δύο επόμενα σχήματα απεικονίζονται το ρεύμα I_{mos} και η τάση V_{mos} του Mosfet, καθώς και το ρεύμα I_d και η τάση V_d της διόδου αντίστοιχα :



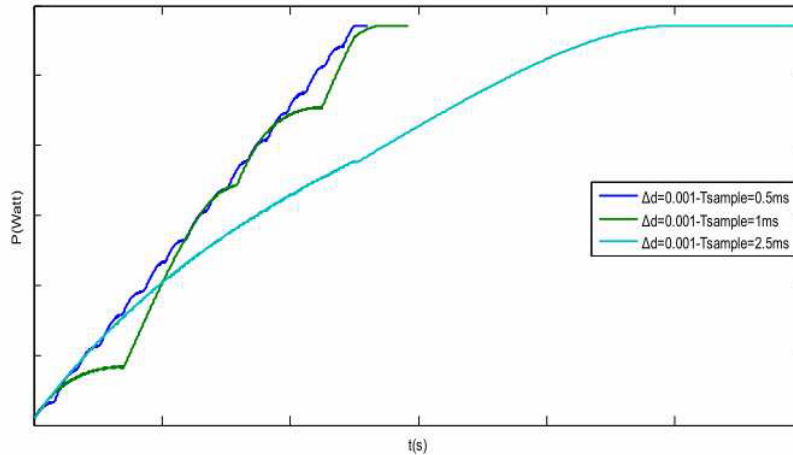
Σχ. 5-30 : Κυματομορφή ρεύματος I_{mos} και η τάση V_{mos} Mosfet μικτού DC - DC



Σχ. 5-31: Κυματομορφές ρεύματος I_d και τάσης V_d διόδου μικτού DC - DC μετατροπέα

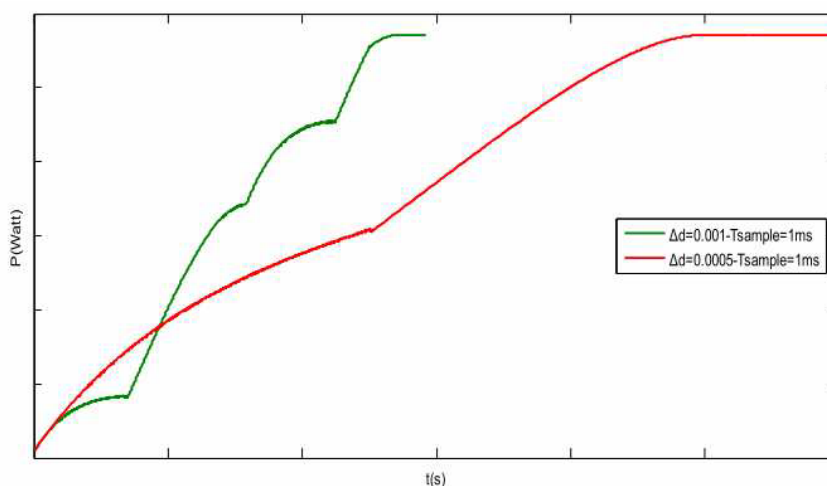
5.3.5 Σύγκριση ως προς το χρόνο απόκρισης και τη διακύμανση ισχύος

Τελικά μπορεί να γίνει σύγκριση των παραπάνω περιπτώσεων με κριτήριο είτε το μέγεθος του βήματος είτε το χρόνο δειγματοληψίας είτε και τα δύο. Αρχικά παρουσιάζεται η σύγκριση των περιπτώσεων όπου το βήμα μεταβολής της σχετικής διάρκειας αγωγής είναι ίδιο, ενώ διαφέρει ο χρόνος δειγματοληψίας. Έπειτα, συγκρίνονται οι λειτουργίες του συστήματος με ίδιο χρόνο δειγματοληψίας και διαφορετικό βήμα και τέλος παρουσιάζεται μια συνολική σύγκριση όλων των περιπτώσεων, ανεξάρτητα μεγέθους βήματος και χρόνου δειγματοληψίας. Στο παρακάτω σχήμα φαίνονται τα αποτελέσματα της πρώτης σύγκρισης :



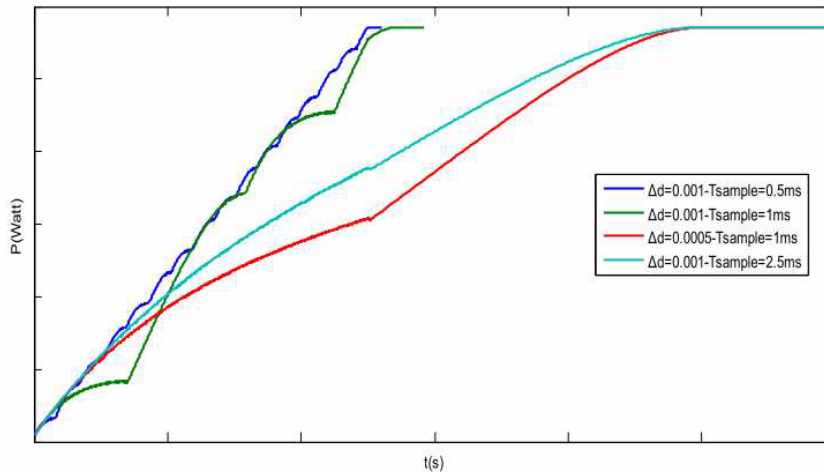
Σχ. 5-32: Χρόνος απόκρισης των περιπτώσεων με ίδιο Δ_d και διαφορετικό T_{sample}

Είναι φανερό ότι όταν το σύστημα λειτουργεί με δεδομένο βήμα μεταβολής Δ_d , η προσέγγιση του μέγιστου σημείου ισχύος γίνεται στην περίπτωση του μικρότερου χρόνου δειγματοληψίας. Αλλά η καμπύλη είναι ομαλότερη στην περίπτωση όπου ο χρόνος δειγματοληψίας είναι μεγαλύτερος. Στην περίπτωση που ο χρόνος δειγματοληψίας είναι $T_{sample} = 1ms$ έχουμε αρκετά γρήγορο χρόνο απόκρισης, όχι όμως το γρηγορότερο δυνατό, αλλά η καμπύλη είναι πιο ανομοιόμορφη και από τις άλλες δύο περιπτώσεις. Οπότε δεν υπάρχει κάποιος εμφανής λόγος για τη λειτουργία του συστήματος με τιμές παραμέτρων $\Delta_d = 0.001$ $T_{sample} = 1ms$. Ωστόσο, σε μια πραγματική εφαρμογή θα μπορούσε η επιλογή αυτών των τιμών να συνεπάγεται μικρότερο κατασκευαστικό ή λειτουργικό κόστος από τις άλλες δύο περιπτώσεις, γεγονός που θα καθιστούσε την επιλογή αυτή ελκυστικότερη από τις άλλες δύο. Για να αποδοθεί μια πιο γενική άποψη της επίδρασης των παραμέτρων Δ_d και T_{sample} στην απόδοση του συστήματος θα πρέπει να γίνει και η σύγκριση της λειτουργίας του συστήματος με δεδομένο χρόνο δειγματοληψίας αλλά διαφορετικό βήμα μεταβολής. Έτσι, συγκρίνεται η λειτουργία του συστήματος χρόνο δειγματοληψίας $T_{sample} = 1ms$ και με βήματα μεταβολής $\Delta_d = 0.001$ και $\Delta_d = 0.0005$. Τα αποτελέσματα αυτής της σύγκρισης παρουσιάζονται στο παρακάτω σχήμα :



Σχ. 5-33: Χρόνος απόκρισης των περιπτώσεων με ίδιο T_{sample} και διαφορετικό Δ_d

Ο χρόνος απόκρισης είναι αισθητά μικρότερος στην περίπτωση όπου το βήμα μεταβολής είναι $\Delta_d = 0.001$, ενώ με την επιλογή βήματος $\Delta_d = 0.0005$ επιτυγχάνεται πιο ομαλή καμπύλη προσέγγισης της μέγιστης ισχύος. Όπως προαναφέρθηκε, σε μια πραγματική εφαρμογή υπάρχει δυνατότητα επιλογής οποιουδήποτε από τους δύο αυτούς τρόπους λειτουργίας ανάλογα με τις απαιτήσεις που προκύπτουν. Τέλος, παρουσιάζεται μια συνολική σύγκριση όλων των περιπτώσεων λειτουργίας του συστήματος.



Σχ. 5-34: Χρόνος απόκρισης όλων των περιπτώσεων

Όπως φαίνεται από το παραπάνω Σχήμα, ο χρόνος απόκρισης του συστήματος είναι μικρότερος στην περίπτωση όπου το σύστημα λειτουργεί με βήμα μεταβολής $\Delta_d = 0.001$ και χρόνο δειγματοληψίας $T_{sample} = 0.5ms$. Ο χρόνος απόκρισης στην περίπτωση όπου το σύστημα λειτουργεί με βήμα μεταβολής $\Delta_d = 0.001$ και χρόνο δειγματοληψίας $T_{sample} = 1ms$ είναι ελάχιστα μεγαλύτερος από την προηγούμενη περίπτωση, αλλά η διακύμανση ισχύος αντίθετα είναι μεγαλύτερη. Στο σχήμα φαίνεται ότι με επιλογή βήματος μεταβολής $\Delta_d = 0.001$ και χρόνου δειγματοληψίας $T_{sample} = 0.5ms$ η καμπύλη προσέγγισης της μέγιστης ισχύος είναι πολύ πιο ομαλή σε σχέση με την επιλογή βήματος μεταβολής $\Delta_d = 0.001$ και χρόνου δειγματοληψίας $T_{sample} = 1ms$ και προσεγγίζει την ευθεία γραμμή. Από την άλλη πλευρά, οι καμπύλες προσέγγισης της μέγιστης ισχύος στις άλλες δύο περιπτώσεις, δηλαδή λειτουργία του συστήματος με βήμα μεταβολής $\Delta_d = 0.001$ και χρόνο δειγματοληψίας $T_{sample} = 2.5ms$ και $\Delta_d = 0.0005$ και $T_{sample} = 1ms$, είναι πολύ πιο ομαλές και προσεγγίζουν πιο πολύ την ευθεία γραμμή. Αλλά ο χρόνος απόκρισης στις δύο αυτές περιπτώσεις είναι πολύ μεγαλύτερος και είναι σχεδόν ίδιος και για τις δύο αυτές περιπτώσεις. Από τις δύο όμως αυτές επιλογές, η ομαλότερη καμπύλη προσέγγισης της μέγιστης ισχύος παρατηρείται για $\Delta_d = 0.001$ και $T_{sample} = 2.5ms$. Επομένως, η σωστή επιλογή του βήματος μεταβολής Δ_d , του χρόνου δειγματοληψίας T_{sample} , αλλά και του συνδυασμού αυτών των δύο παραμέτρων είναι ζωτικής σημασίας για τη συνολική απόδοση του συστήματος. Επίσης, δίνεται η δυνατότητα να ρυθμίζεται η διαδικασία ανίχνευσης μέγιστης ισχύος ανάλογα με τις απαιτήσεις της εκάστοτε εφαρμογής. Η ρύθμιση αυτή μπορεί να γίνει επιλέγοντας η λειτουργία του συστήματος να πραγματοποιείται είτε με μικρό χρόνο απόκρισης είτε με πιο ομαλή προσέγγιση της μέγιστης ισχύος είτε να συνδυαστούν αυτοί οι δύο τρόποι. Τα παραπάνω γίνονται αντιληπτά από τα σχήματα 5.32 και 5.33, όπου συγκρίνονται ξεχωριστά οι δύο παράμετροι.