



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ ΚΑΙ
ΦΥΣΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ

**Ανάλυση και έλεγχος φωτοβολταϊκού συστήματος
συνδεδεμένου σε DC φορτίο και στο δίκτυο μέσω
μετατροπέων**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Παππάς Λ. Βασίλειος

Επιβλέπων: Α. Αλεξανδρίδης

Καθηγητής Πανεπιστημίου Πατρών

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2014



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ ΚΑΙ
ΦΥΣΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ

**Ανάλυση και έλεγχος φωτοβολταϊκού συστήματος
συνδεδεμένου σε DC φορτίο και στο δίκτυο μέσω
μετατροπέων**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Παππάς Λ. Βασίλειος

Επιβλέπων: Α. Αλεξανδρίδης

Καθηγητής Πανεπιστημίου Πατρών

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή την

.....

Α. Αλεξανδρίδης

Καθηγητής Παν. Πατρών

.....

Ι. Τσινιάς

Καθηγητής ΕΜΠ

.....

Ι. Καραφύλλης

Επικ. Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2014

.....

Παππάς Λ. Βασίλειος

Διπλωματούχος Σχολής Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών ΕΜΠ

Copyright © Βασίλειος Λ. Παππάς 2014

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς το συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν το συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Περίληψη

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι ο έλεγχος και η ανάλυση ευστάθειας ενός φωτοβολταϊκού (Φ/Β) συστήματος που παρέχει ηλεκτρική ισχύ σε ένα τοπικό, μεταβαλλόμενο φορτίο συνεχούς ρεύματος και στο ηλεκτρικό δίκτυο μέσω μετατροπέων ισχύος. Για τον έλεγχο του συστήματος χρησιμοποιήθηκαν μη γραμμικοί αναλογικοί-ολοκληρωτικοί (proportional-integral, PI) ελεγκτές σε διαδοχική διάταξη (cascade control). Αξιοποιώντας κάποιες ιδιότητες του πλήρους μη γραμμικού συστήματος κλειστού βρόχου, παρατίθεται η απόδειξη της ευστάθειας σε δύο βήματα, όπως αυτή έχει πρόσφατα προταθεί στη διεθνή βιβλιογραφία. Στο πρώτο βήμα αποδεικνύεται η ιδιότητα της παθητικότητας (passivity) για το σύστημα. Στο δεύτερο βήμα, εφαρμόζεται η Lyapunov τεχνική στο γραμμικό υποσύστημα του συνολικού συστήματος. Συνδυάζοντας αυτά τα δυο βήματα, κατασκευάζεται μια σύνθετη συνάρτηση Lyapunov με την οποία αποδεικνύεται η ευστάθεια από είσοδο-προς-κατάσταση (input-to-state stability, ISS) του πλήρους μη γραμμικού συστήματος κλειστού βρόχου.

Για την βαθύτερη κατανόηση της εργασίας, αρχικά γίνεται μια αναφορά στις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, στο μοντέλο της Διεσπαρμένης Παραγωγής ενέργειας και στη φιλοσοφία των Μικροδικτύων. Ακολουθούν η παρουσίαση και συνοπτική ανάλυση των Μετατροπέων Ηλεκτρικής Ισχύος και των βασικών ενεργών δομικών τους στοιχείων που είναι τα Ημιαγωγά Διακοπτικά Στοιχεία. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται λεπτομερώς τα χαρακτηριστικά της Φωτοβολταϊκής Τεχνολογίας. Επίσης, παρουσιάζονται οι αλγόριθμοι ανίχνευσης του Σημείου Λειτουργίας Μεγίστης Ισχύος για ένα Φ/Β σύστημα που ελέγχουν κατάλληλα τους μετατροπείς ισχύος ώστε να παρέχει το Φ/Β κάθε στιγμή τη μέγιστη δυνατή ισχύ.

Στο τελευταίο σκέλος της εργασίας, παρατίθεται η απόδειξη για της ISS ευστάθειας του πλήρους Φ/Β συστήματος συνδεδεμένου με το ηλεκτρικό δίκτυο ενώ, τέλος, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης που πραγματοποιήθηκε σε περιβάλλον MATLAB/Simulink.

Λέξεις κλειδιά

ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, μετατροπείς ισχύος, ανίχνευση σημείου μέγιστης ισχύος, φωτοβολταϊκό στοιχείο, συνάρτηση Lyapunov, Αρχή Αναλλοιώτου La Salle, αναλογικός-ολοκληρωτικός έλεγχος

Abstract

The main purpose of this diploma thesis is the control and stability analysis of a photovoltaic (PV) system providing, electrical power to a local switching dc load and grid, through power converters. To this end, linear proportional-integral (PI) controllers in cascade form were adopted. Based on some crucial properties of the linear closed-loop system, we present the stability proof in two steps as shown in international bibliography. In the first step, the passivity property for the system is achieved. In the second step, we apply Lyapunov techniques for the linear subsystem of the complete system. With the combination of these two steps, a composite Lyapunov function is constructed to prove the input-to-state (ISS) stability of the complete nonlinear closed-loop system.

For a clearer understanding of this diploma thesis, an introduction in Renewable Resources, Distributed Generation model and in the concept of Microgrids is firstly made. Then, the main operation of Power Converters and Power Semiconductors Devices is presented, with the last devices constituting the basic elements in Power Converters operations. An extensive analysis of the Photovoltaic Technology is also made. Finally, the Maximum Power Point Tracking algorithms, used in PV systems in order to achieve the maximum power supply, are presented.

In the last section of this diploma thesis the input-to state (ISS) stability analysis of the grid-connected PV system is presented as well as the simulation results in Matlab/Simulink.

Key Words

renewable resources, power converters, maximum power point tracking, photovoltaic cell, Lyapunov function, La Salle's invariance principle, proportional-integral control

Ευχαριστίες

Για την ολοκλήρωση της διπλωματικής αυτής εργασίας απ τη στιγμή της γέννησης της μέχρι και τη τελευταία της πινελιά θα ήθελα να ευχαριστήσω, αρχικά, τον κο. Α. Αλεξανδρίδη Καθηγητή του Πανεπιστημίου Πατρών για την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπο μου, την πολύτιμη καθοδήγηση και βοήθεια που μου παρείχε καθ' όλη τη διαδικασία της συγγραφής. Επιπλέον, τον κο. Ι. Τσινιά Καθηγητή του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου για την επίσης πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση στο κρίσιμο στάδιο της ολοκλήρωσης της εργασίας. Επιπλέον, τον υποψήφιο διδάκτωρ Κ. Κρομμύδα του Τμήματος ΗΜΤΥ του Πανεπιστημίου Πατρών για τον πολύτιμο χρόνο του και τις σημαντικές υποδείξεις του στη διαδικασία της συγγραφής της παρούσας εργασίας.

Ευχαριστώ όλους τους αγαπημένους μου συναδέλφους για την συνεργασία, την καθοδήγηση και τις συμβουλές τους και τη κάθε στιγμή που μου χάρισαν. Εύχομαι στον καθέναν από αυτούς υγεία, σοφία και καλή σταδιοδρομία.

Ευχαριστώ την οικογένεια μου, που στάθηκε όλα αυτά τα χρόνια στο πλευρό μου με υπομονή, πίστη και με κάθε κόστος!

Ευχαριστώ και αφιερώνω την εργασία αυτή στην Ελένη, που αποτέλεσε πηγή στήριξης, έμπνευσης, άντλησης δύναμης και υπομονής, σοφίας και εργατικότητας στη ζωή μου.

Μα πάνω απ όλα, ευχαριστώ τον Θεό για τη δύναμη, την υγεία, την υπομονή και τη σοφία που μου χάριζε όλα αυτά τα χρόνια...

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Περίληψη.....	4
Abstract.....	5
Ευχαριστίες.....	6
Πίνακας Περιεχομένων.....	7
Κεφάλαιο 1	
Εισαγωγή.....	9
1.0 Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας.....	10
1.1 Διεσπαρμένη παραγωγή.....	14
1.2 Μικροδίκτυα.....	20
Κεφάλαιο 2	
Μετατροπείς Ηλεκτρικής Ισχύος.....	23
2.0 Εισαγωγή.....	24
2.1 Εφαρμογές Μετατροπέων Ηλεκτρικής ισχύος.....	24
2.2 Ταξινόμηση Μετατροπέων Ηλεκτρικής Ισχύος.....	26
Κεφάλαιο 3	
Ημιαγωγοί Διακόπτες Ισχύος.....	30
3.0 Εισαγωγή.....	31
3.1 Καταστάσεις λειτουργίας διακοπών.....	31
3.2 Ταξινόμηση Ημιαγωγών Διακοπών Ισχύος.....	33
3.2.0 Δίοδοι.....	33
3.2.1 Thyristor.....	34
3.2.2 Ελεγχόμενοι Διακόπτες.....	35
Κεφάλαιο 4	
Φωτοβολταϊκή Τεχνολογία.....	37
4.0 Εισαγωγή.....	38
4.1 Φωτοβολταϊκό στοιχείο.....	39
4.2 Ημιαγωγοί.....	40
4.3 Φωτοβολταϊκό φαινόμενο.....	43
4.4 Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των φωτοβολταϊκών στοιχείων.....	44
4.4.0 Ισοδύναμο κύκλωμα.....	44
4.4.1 Τάση ανοικτού κυκλώματος-ρεύμα βραχυκύκλωσης.....	45
4.4.2 Χαρακτηριστική καμπύλη $I - V$ Φ/Β στοιχείου.....	46
4.4.3 Σημείο λειτουργίας μέγιστης ισχύος (Maximum Power Point-MPP).....	48
4.4.4 Παράγων πλήρωσης (Fill Factor-FF).....	48
4.4.5 Επίδραση θερμοκρασίας στα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του Φ/Β στοιχείου.....	49
4.4.6 Απόδοση Φ/Β στοιχείου.....	51
4.5 Απόδοση Φ/Β πλαισίου.....	52
Κεφάλαιο 5	
Αλγόριθμοι Ανίχνευσης Σημείου Μεγίστης Ισχύος (MPPT).....	54
5.0 Εισαγωγή.....	55
5.1 Διατάραξης και Παρατήρησης (Perturb & Observe- P&O).....	56

5.2 Αυξητικής Αγωγιμότητας (Incremental Conductance-INC).....	58
5.3 Παρασιτικής Χωρητικότητας (Parasitic Capacitance).....	61
5.4 Σταθερής Τάσης (Constant Voltage).....	63
5.5 Έλεγχος Ασαφούς Λογικής (Fuzzy Logic Control-FLC).....	64
5.6 Έλεγχος Συσχετισμού Κυμάτωσης (Ripple Correlation Control-RCC).....	65
Κεφάλαιο 6	
Ανάλυση και έλεγχος φωτοβολταϊκού συστήματος συνδεδεμένο με το ηλεκτρικό δίκτυο.....	67
6.0 Εισαγωγή.....	68
6.1 Μοντέλο Φ/Β συστήματος συνδεδεμένο στο ηλεκτρικό δίκτυο.....	69
6.2 Έλεγχος του συστήματος κλειστού βρόχου για το Φ/Β σύστημα.....	70
6.3 Καταστατικές εξισώσεις για το σύστημα κλειστού βρόχου.....	71
6.4 Ανάλυση της ευστάθειας του συστήματος.....	71
6.4.0 Στοιχεία Θεωρίας.....	72
6.4.1 Ανάλυση παθητικότητας του συστήματος.....	78
6.4.2 Ανάλυση ευστάθειας του συνολικού συστήματος κλειστού βρόχου.....	79
Κεφάλαιο 7	
Αποτελέσματα προσομοίωσης του Φ/Β συστήματος συνδεδεμένου με το ηλεκτρικό δίκτυο σε περιβάλλον Matlab-Simulink.....	84
Κεφάλαιο 8	
Συμπεράσματα.....	94
8.0 Συμπεράσματα.....	95
8.1 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.....	96
Βιβλιογραφία.....	97
Βιβλιογραφικές αναφορές.....	98

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

1.0 Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ)

Οι ανάγκες της ανθρωπότητας για ενέργεια αυξάνονται καθημερινά. Τόσο η αύξηση του πληθυσμού σε παγκόσμιο επίπεδο όσο και η αλματώδης ανάπτυξη της τεχνολογίας απαιτεί χρήση των ενεργειακών πόρων, με αποτέλεσμα την κατασπατάληση των φυσικών πόρων του πλανήτη. Πρώτες ύλες, όπως το πετρέλαιο, το φυσικό αέριο και τα ορυκτά καύσιμα, τις οποίες εκμεταλλεύεται ο άνθρωπος έως τώρα στο έπακρο, είναι λογικό πως κάποια μέρα θα εξαντληθούν, με αποτέλεσμα η ανθρωπότητα να οδηγηθεί σε κρίση. Επιπλέον, καθημερινά παρατηρούμε και καταγράφουμε τις συνέπειες της χρήσης όλων των παραπάνω, που κατά κύριο λόγο είναι επιβλαβείς για το περιβάλλον αλλά και για τον άνθρωπο. Η καύση των ορυκτών καυσίμων και η εκπομπή ρυπαντών κάθε είδους από αυτήν έχουν αρνητική επίδραση στον άνθρωπο με δραματικές βλάβες στην υγεία του (καρκίνος, πνευμονοπάθειες κ.λπ.), αλλά και στο περιβάλλον (αύξηση της μέσης θερμοκρασίας της γης, φαινόμενο θερμοκηπίου, φαινόμενο όξινης βροχής, κ.λπ.).

Προκειμένου να καλυφθούν σε παγκόσμια κλίμακα οι ενεργειακές ανάγκες και σε μία παράλληλη προσπάθεια για τον περιορισμό της ρύπανσης του φυσικού περιβάλλοντος, καθίσταται πλέον επιτακτική ανάγκη η στροφή σε εναλλακτικές πηγές ενέργειας.

Αρκεί να σκεφτούμε πως ο πρωτόγονος άνθρωπος χρησιμοποίησε τα στοιχεία της φύσης ήλιο, αέρα, νερό και κατόρθωσε να κάνει θαύματα. Τις τελευταίες δεκαετίες γίνονται προσπάθειες εκμετάλλευσης όλων αυτών των στοιχείων για παραγωγή ενέργειας φιλικής προς το περιβάλλον με την επιστημονική κοινότητα να συμβάλλει σημαντικά στις προσπάθειες αυτές.

Οι **ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ)** ή αλλιώς αποκαλούμενες ήπιες μορφές ενέργειας είναι μορφές εκμεταλλεύσιμης ενέργειας που προέρχονται από διάφορες φυσικές διαδικασίες, όπως η ροή της αέριας μάζας, η ηλιακή ακτινοβολία, η γεωθερμία, η ροή των υδάτινων μαζών και άλλες. Με τον όρο «ήπιες» γίνεται αναφορά σε δυο βασικά χαρακτηριστικά τους. Πρώτον, για την εκμετάλλευσή τους δεν απαιτείται κάποια ενεργητική παρέμβαση, όπως είναι η εξόρυξη, η άντληση ή η καύση, όπως γίνεται με τις μέχρι τώρα χρησιμοποιούμενες πηγές ενέργειας, αλλά απλώς η εκμετάλλευση της ήδη υπάρχουσας ροής ενέργειας στη φύση. Δεύτερον, πρόκειται αποκλειστικά για «καθαρές» μορφές ενέργειας, καθώς η εκμετάλλευση τους δεν έχει σαν αποτέλεσμα την αποδέσμευση επιβλαβών ουσιών όπως διοξείδιο του άνθρακα (CO₂), τοξικές ή ραδιενεργές ουσίες όπως ουράνιο (U), θόριο (Th) κ.λπ. Ο χαρακτηρισμός «ανανεώσιμες» είναι κάπως καταχρηστικός, αφού ορισμένες από αυτές τις πηγές, όπως η γεωθερμική ενέργεια, υπάρχουν σε, τεράστιες μεν πεπερασμένες δε, ποσότητες και δεν ανανεώνονται σε κλίμακα χιλιετιών.

Το ενδιαφέρον για τις ΑΠΕ ανακινήθηκε τη δεκαετία του 1970, ως αποτέλεσμα κυρίως των απανωτών πετρελαϊκών κρίσεων της εποχής, αλλά και της αλλοίωσης του περιβάλλοντος και της ποιότητας ζωής από τη χρήση κλασικών πηγών ενέργειας.

Ιδιαίτερα ακριβές στην αρχή, ξεκίνησαν σαν πειραματικές εφαρμογές. Σήμερα όμως λαμβάνονται υπόψη στους επίσημους σχεδιασμούς των ανεπτυγμένων κρατών για την ενέργεια και, παρόλο που αποτελούν πολύ μικρό ποσοστό της ενεργειακής παραγωγής, παράλληλα ετοιμάζονται βήματα για παραπέρα αξιοποίησή τους.

Στις ΑΠΕ υπάγονται (i) η ηλιακή ενέργεια (ii) η αιολική ενέργεια (iii) η υδροηλεκτρική ενέργεια (iv) η γεωθερμική ενέργεια (v) η κυματική ενέργεια και (vi) η βιομάζα, οι οποίες μορφές παρουσιάζονται συνοπτικά:

- i. **Ηλιακή ενέργεια:** Είναι η ενέργεια που εκλύεται από τον Ήλιο με τη μορφή της ηλιακής ακτινοβολίας. Τα τελευταία χρόνια, εφαρμογές όπως τα φωτοβολταϊκά και τα ηλιακά θερμικά συστήματα έχουν αναπτυχθεί για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας αντίστοιχα. Αποτελεί ίσως την πιο διάσημη μορφή ΑΠΕ, ενώ παράλληλα πολλοί επιστημονικοί κλάδοι έχουν αναπτυχθεί μέσα από ερευνητικά προγράμματα για την εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας.
- ii. **Αιολική ενέργεια:** Αποτελεί τη δεύτερη σε σειρά διασημότερη μορφή ΑΠΕ και αναφέρεται σε μια έμμεση μορφή της ηλιακής ενέργειας. Η κίνηση των ανέμων προκαλείται από την άνιση θέρμανση των διαφόρων στρωμάτων στην επιφάνεια της Γης και την τάση που έχουν τα ψυχρότερα στρώματα αέρα να αντικαθιστούν τα θερμότερα. Επιπλέον, οι γεωγραφικοί παράγοντες επηρεάζουν τις κινήσεις των ανέμων τις οποίες εκμεταλλεύεται ο άνθρωπος με τη χρήση ανεμογεννητριών σε αιολικά ή υπεράκτια αιολικά πάρκα. Επίσης, πολλοί επιστημονικοί κλάδοι βρίσκουν εφαρμογές στην αιολική ενέργεια.
- iii. **Υδροηλεκτρική ενέργεια:** Ονομάζεται η ενέργεια η οποία παρέχεται στον άνθρωπο από την δύναμη του νερού στη φύση. Ο πιο διαδεδομένος τρόπος εκμετάλλευσης της είναι η χρήση υδατοπτώσεων και τα φράγματα και είναι από τις πρώτες μορφές εκμετάλλευσης φυσικών ενεργειών από τον άνθρωπο. Τα τελευταία χρόνια γίνονται μεγάλες προσπάθειες στην ανάπτυξη μεθόδων για την εκμετάλλευση της κυματικής ενέργειας που μεταφέρεται μέσω των θαλάσσιων κυμάτων αλλά και των παλιρροιών.
- iv. **Γεωθερμική ενέργεια:** Είναι η αποθηκευμένη ενέργεια, υπό μορφή θερμότητας, κάτω από την επιφάνεια της Γης. Προέρχεται από το εσωτερικό της Γης με τη μορφή νερών, ατμών και μειγμάτων αερίων και ανάλογα με τη θερμοκρασία αλλά και τη ποιότητα των εκμεταλλεύσιμων ρευστών χρησιμοποιείται για τη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας αλλά και για την θέρμανση. Πρόκειται για μια σημαντική μορφή ΑΠΕ αλλά, όπως προαναφέρθηκε, δεν είναι ανεξάντλητη.

- v. **Βιομάζα:** Ο όρος βιομάζα περιλαμβάνει όλα τα προϊόντα και υπολείμματα ζωικής ή φυτικής προέλευσης που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη παραγωγή ενέργειας. Συγκεκριμένα, είναι αποθηκευμένη μορφή ηλιακής ενέργειας, αποτέλεσμα φωτοσυνθετικής δραστηριότητας και αποτελείται από ενώσεις με βασικά στοιχεία το υδρογόνο και τον άνθρακα. Υλικά όπως καυσόξυλα, ζωικά απόβλητα, αστικά και βιομηχανικά απόβλητα χρησιμοποιούνται ανάλογα με την προέλευση τους για τη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ή και θέρμανσης.

Από αυτή τη σύντομη παρουσίαση συμπεραίνουμε ότι οι ΑΠΕ μπορούν να συνεισφέρουν σημαντικά στα σύγχρονα ενεργειακά ζητήματα, καθώς αποτελούν ανεξάντλητες, στην πλειοψηφία τους, αποδοτικές αλλά και καθαρές μορφές ενέργειας. Υπολογίζεται ότι το τεχνικά εκμεταλλεύσιμο ενεργειακό δυναμικό από τις ήπιες μορφές ενέργειας είναι πολλαπλάσιο της παγκόσμιας συνολικής κατανάλωσης ενέργειας. Τα πλεονεκτήματα για τη χρήση των ΑΠΕ είναι προφανή και τα σημαντικότερα από αυτά είναι τα εξής:

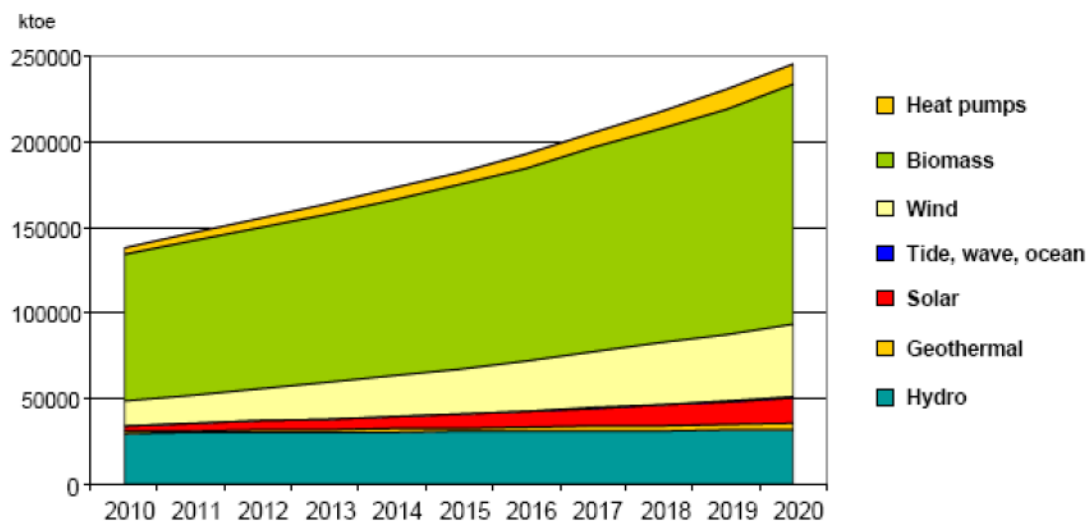
- Είναι φιλικές προς το περιβάλλον, έχοντας ουσιαστικά μηδενικά κατάλοιπα και απόβλητα.
- Στη πλειοψηφία τους είναι ανεξάντλητα, σε αντίθεση με τα ορυκτά καύσιμα.
- Μπορούν να συμβάλλουν δυναμικά στην ενεργειακή αυτόρκεια μικρών και αναπτυσσόμενων χωρών, καθώς και να αποτελέσουν την εναλλακτική πρόταση σχετικά με τις οικονομικές στρατηγικές του πετρελαίου.
- Είναι ευέλικτες εφαρμογές που μπορούν να παράγουν ενέργεια ανάλογη με τις ανάγκες του επί τόπου πληθυσμού, καταργώντας την ανάγκη για τεράστιες μονάδες παραγωγής ενέργειας αλλά και για μεταφορά της ενέργειας σε μεγάλες αποστάσεις. Έτσι, εισάγεται η έννοια της διεσπαρμένης παραγωγής, η οποία θα αναπτυχθεί στην επόμενη παράγραφο.
- Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται είναι απλός στην κατασκευή και τη συντήρηση, ενώ παράλληλα έχει ικανοποιητικά μεγάλο χρόνο ζωής.
- Επιδοτούνται από τις περισσότερες κυβερνήσεις.

Ωστόσο, υπάρχουν και μειονεκτήματα, κυρίως όσον αφορά την απόδοση των ΑΠΕ και λιγότερο σε άλλους παράγοντες. Τα μειονεκτήματα είναι τα εξής:

- Έχουν αρκετά μικρό συντελεστή απόδοσης, της τάξης του 30% ή και χαμηλότερο. Συνεπώς, απαιτείται αρκετά μεγάλο αρχικό κόστος εφαρμογής σε μεγάλη επιφάνεια της γης. Γι' αυτό το λόγο, μέχρι τώρα χρησιμοποιούνται ως συμπληρωματικές πηγές ενέργειας.

- Για τον παραπάνω λόγο, προς το παρόν, δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κάλυψη των αναγκών μεγάλων αστικών κέντρων ή για τη κάλυψη μεγάλων απαιτήσεων.
- Η παροχή και απόδοση της αιολικής, υδροηλεκτρικής και ηλιακής ενέργειας εξαρτάται από εποχιακούς, κλιματολογικούς αλλά και γεωγραφικούς παράγοντες της περιοχής στην οποία εγκαθίστανται.
- Για τις ανεμογεννήτριες υπάρχει η άποψη ότι δεν είναι κομψές, από αισθητική άποψη, κι ότι προκαλούν θόρυβο και θανάτους πτηνών. Με την εξέλιξη όμως της τεχνολογίας τους και την προσεκτικότερη επιλογή χώρων εγκατάστασης (π.χ. σε πλατφόρμες σε ανοιχτές θάλασσες) τα συγκεκριμένα προβλήματα έχουν ελαχιστοποιηθεί.
- Για τα υδροηλεκτρικά έργα λέγεται ότι προκαλούν έκλυση μεθανίου από την αποσύνθεση των φυτών που βρίσκονται κάτω από το νερό κι έτσι συντελούν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου.

Το κόστος των εφαρμογών ήπιων μορφών ενέργειας μειώνεται συνεχώς τα τελευταία είκοσι χρόνια και ειδικά η αιολική και υδροηλεκτρική ενέργεια αλλά και η βιομάζα βρίσκονται πλέον στη θέση να ανταγωνιστούν παραδοσιακές πηγές ενέργειας, όπως ο άνθρακας και η πυρηνική ενέργεια (Σχ.1.1).

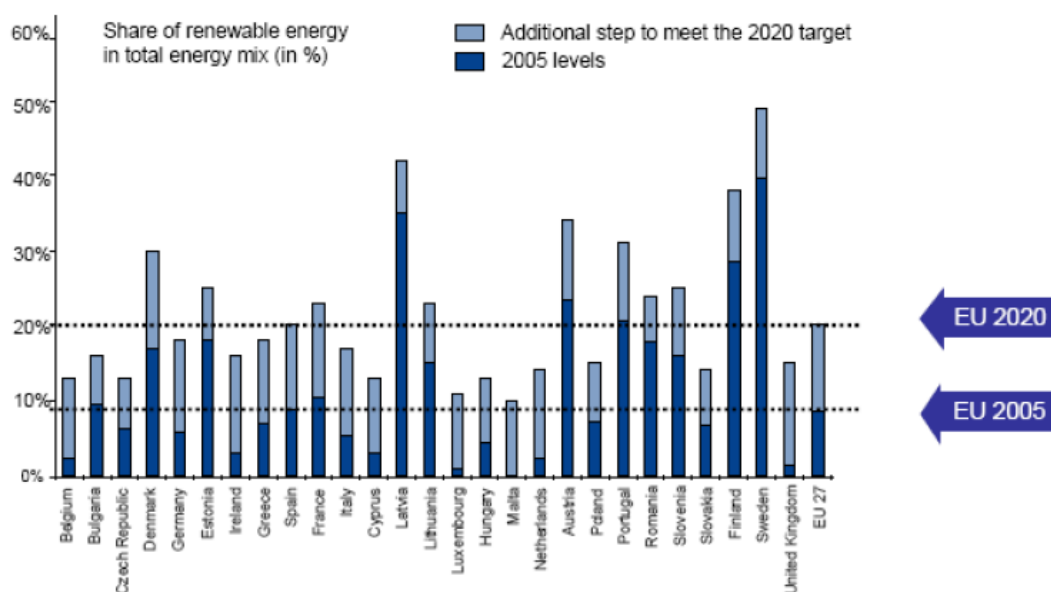


Σχ. 1.1 Εκτίμηση για την ανάπτυξη των ΑΠΕ (2010-2020) ,Πηγή: European Commission

Ενδεικτικά, στις Η.Π.Α. ένα 6% της ενέργειας προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές, ενώ στην Ευρωπαϊκή Ένωση με την οδηγία 2001/77/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου επιδιώκεται το 20% των αναγκών της σε ηλεκτρική ενέργεια να καλύπτεται από εναλλακτικές πηγές μέχρι το 2020 όπως φαίνεται και στο Σχ. 1.2.

Η ενεργειακή αυτή στρατηγική της Ευρωπαϊκής Ένωσης φαίνεται να αλλάζει δυναμικά τον παγκόσμιο ενεργειακό χάρτη αποσκοπώντας στην μερική απεξάρτηση

των χωρών μελών από τις εισαγωγές καυσίμων υλών με παράλληλη προώθηση των ΑΠΕ.. Συγκεκριμένα, με το πρόγραμμα 20-20-20, όλα τα κράτη μέλη είναι υποχρεωμένα να μειώσουν κατά 20% τις εκπομπές αερίων που συμβάλουν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου, να βελτιώσουν κατά 20% την ενεργειακή τους αποδοτικότητα και τέλος να αυξήσουν κατά 20% την προσφορά ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (Σχ.1.2).



Σχ. 1.2 Στόχοι της Ε.Ε. για την ανάπτυξη των ΑΠΕ σύμφωνα με το πρόγραμμα 20-20-20

1.1 Διεσπαρμένη παραγωγή

Για πολλές δεκαετίες και σε παγκόσμιο επίπεδο, η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στηρίζεται στην λειτουργία μεγάλων ηλεκτροπαραγωγικών εγκαταστάσεων. Η ροή της ενέργειας είναι, υποχρεωτικά, μονόδρομη από τους παραγωγικούς σταθμούς προς τους καταναλωτές, γεγονός που οδήγησε στη κατασκευή τεράστιων σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, η λειτουργία των οποίων στηρίχθηκε στα στερεά καύσιμα και στην πυρηνική τεχνολογία. Η μεταφορά της παραχθείσας ενέργειας βασίστηκε και εξακολουθεί να βασίζεται σε εκτεταμένα δίκτυα μεταφοράς αποτελούμενα από γραμμές μεταφοράς υψηλής τάσης για τα μεγάλα αστικά κέντρα και γραμμές μέσης ή χαμηλής τάσης για την περαιτέρω διανομή ηλεκτρικού ρεύματος.

Με τον όρο **διεσπαρμένη παραγωγή** αναφερόμαστε σε παραγωγή ενέργειας μικρής κλίμακας, με τιμές που κυμαίνονται μεταξύ 1kW και 100MW από παραγωγικές μονάδες, οι οποίες έχουν εγκατασταθεί κοντά στα σημεία κατανάλωσης.

Σαν ιδέα, η διεσπαρμένη παραγωγή δεν είναι καινούρια. Αντίθετα, αν αναλογιστούμε ότι, από τις πρώτες κιόλας μέρες της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, οι πρώτες εγκαταστάσεις παραγωγής ισχύος παρείχαν ενέργεια αποκλειστικά σε τοπικό επίπεδο. Τα πρώτα δίκτυα βασίστηκαν στην DC τάση και η

παροχή ήτο περιορισμένη. Παράλληλα, προβλήματα αυξημένης ζήτησης λύθηκαν με τη χρήση αποθηκευτικών μέσων ενέργειας, όπως μπαταρίες ή πυκνωτές, φαινόμενο που συναντάται και σήμερα. Στη πορεία, η εμφάνιση των AC δικτύων έφερε εξελίξεις στο ζήτημα της μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας σε μεγαλύτερες αποστάσεις, ενώ η εφαρμογή οικονομικών κλίμακας στη παραγωγή αυτής οδήγησε στην αύξηση της ισχύος εξόδου. Όλα αυτά είχαν σαν αποτέλεσμα μεγαλύτερες ανέσεις, χαμηλότερο κόστος και τη κατασκευή μεγάλων παραγωγικών εγκαταστάσεων που συνοδεύονταν από τεράστια δίκτυα διανομής.

Τα τελευταία χρόνια το σκηνικό δείχνει να αλλάζει σημαντικά. Το καταναλωτικό κοινό έχει πλέον αυξημένες απαιτήσεις, όσον αφορά την ποιότητα της ενέργειας, ενώ νέες τάσεις στον χώρο των ΑΠΕ τείνουν να καταστήσουν μια σημαντική μερίδα των καταναλωτών σε ενεργές οντότητες στο δίκτυο. Η ανάπτυξη εφαρμογών εκμετάλλευσης της αιολικής και ηλιακής, κυρίως, ενέργειας δίνουν τη δυνατότητα τοπικής παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας αλλάζοντας έτσι τα μέχρι τώρα δεδομένα που ήθελαν τον καταναλωτή παθητικό φορτίο. Επιπλέον, η αυξημένη περιβαλλοντική συνείδηση επιτάσσει τη μείωση εκπομπών αέριων ρύπων, όπως διοξείδιο του άνθρακα (CO₂), που συμβάλλουν στην επιδείνωση του φαινομένου του θερμοκηπίου αλλά και στον περιορισμό της λειτουργίας των πυρηνικών εργοστασίων. Την τάση αυτή ενίσχυσαν καταστάσεις άλλοτε ανώδυνες, όπως στη περίπτωση της Τουρκίας όπου μετά από έντονες αντιδράσεις απορρίφθηκε η πρόταση για κατασκευή πυρηνικού εργοστασίου, και άλλοτε επώδυνες για την ανθρωπότητα, όπως τα δυστυχήματα στο πυρηνικό εργοστάσιο του Chernobyl (1986) και στο πυρηνικό εργοστάσιο της Fukushima (2011). Επιπλέον, με την διαμόρφωση των σύγχρονων αγορών ενέργειας, το περιβάλλον λειτουργίας των ηλεκτρικών δικτύων γίνεται ολοένα και πιο σύνθετο, ενώ στη μεταφορά της ενέργειας το κόστος για την αναβάθμιση των γραμμών μεταφοράς δυσχεραίνει κατά πολύ τις όποιες προοπτικές.

Συνοπτικά, ένα σύγχρονο δίκτυο ενέργειας καλείται να ανταποκριθεί στις εξής απαιτήσεις:

- Ευελιξία, ώστε να μπορούν να εξυπηρετούν σε ικανοποιητικό βαθμό τις απαιτήσεις του καταναλωτή.
- Αξιοπιστία, ώστε να προσφέρουν ποιοτική και ασφαλή ενέργεια.
- Προσβασιμότητα σε όλους τους παραγωγούς και ειδικότερα στους μικρούς αλλά και στις μονάδες που εκμεταλλεύονται ΑΠΕ.
- Αποδοτική χρήση της ενέργειας σε όλα τα επίπεδα.

Για τον σχεδιασμό ενός «έξυπνου» δικτύου του μέλλοντος που θα ανταποκριθεί στις παραπάνω προκλήσεις θα πρέπει να προηγηθεί μια σειρά από σημαντικά βήματα, όπως:

- Επίλυση των τεχνικών προβλημάτων προκειμένου να μπορούν να ενταχθούν με ευκολία στο δίκτυο διεσπαρμένες πηγές ηλεκτρικής ενέργειας. Οι τεχνολογίες που θα αναπτυχθούν θα πρέπει να είναι οικονομικά εφικτές, απλές στην

εφαρμογή και αξιόπιστες. Στην κατεύθυνση αυτή θα πρέπει να συγκροτηθούν πρότυπα και πρωτόκολλα, τα οποία θα είναι κοινώς αποδεκτά.

- Διαμόρφωση ενός κοινού πλαισίου λειτουργίας της αγοράς ενέργειας αλλά και του συστήματος, ώστε να διευκολυνθούν οι διεθνείς διασυνδέσεις.
- Εξέλιξη και εκσυγχρονισμός των πληροφοριακών και τηλεπικοινωνιακών συστημάτων που θα αποτελέσουν τη βάση για τον έλεγχο και τη λειτουργία των «έξυπνων» δικτύων του μέλλοντος.

Για την επίτευξη όλων αυτών, απαιτείται η συμμετοχή αλλά και συμπόρευση όλων των φορέων, οργανισμών και επιχειρήσεων που σχετίζονται με τη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Μια άλλη έννοια που σχετίζεται με την γενικότερη ιδέα της διεσπαρμένης παραγωγής είναι αυτή της συνδυασμένης παραγωγής ισχύος και θερμότητας ή απλούστερα συμπαραγωγή. Η συμπαραγωγή αναφέρεται στη ταυτόχρονη παραγωγή και χρήση ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας. Η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια μπορεί να αξιοποιείται τοπικά και ένα τμήμα αυτής να τροφοδοτεί το δίκτυο. Η θερμότητα, από την άλλη μεριά, χρησιμοποιείται μόνο τοπικά, καθώς η μεταφορά της είναι οικονομικά ασύμφορη αλλά κυρίως αντιμετωπίζει μεγάλες απώλειες.

Εκτός από τις ΑΠΕ, στην ιδέα της διεσπαρμένης παραγωγής εντάσσονται και τεχνολογίες βασιζόμενες στην χρήση ορυκτών καυσίμων. Οι τεχνολογίες διεσπαρμένης παραγωγής ή DER (Distributed Energy Resources) αποτελούνται κυρίως από συστήματα παραγωγής ενέργειας ή και αποθήκευσης ενέργειας, τα οποία εγκαθίστανται στον τελικό χρήστη ή κοντά σε αυτόν. Περιλαμβάνουν ένα ευρύ φάσμα τεχνολογιών, όπως μικροτουρμπίνες, κυψέλες καυσίμων, εμβολοφόρες μηχανές κ.λπ., ενώ διαθέτουν διατάξεις ηλεκτρονικών ισχύος καθώς επίσης και συστήματα ελέγχου και επικοινωνίας για την εξασφάλιση της αποδοτικής τους λειτουργίας. Οι περισσότερες από αυτές τις εφαρμογές χρησιμοποιούν φυσικό αέριο ως καύσιμο, ενώ τα τελευταία χρόνια αναπτύσσονται ραγδαία τεχνολογίες με βάση το υδρογόνο. Επίσης, τεχνολογικές εφαρμογές που βασίζονται στις ΑΠΕ, όπως φωτοβολταϊκά πλαίσια, ανεμογεννήτριες και βιομάζα, είναι εξίσου διαδεδομένες ως εφαρμογές DER. Οι κυριότερες από αυτές παρουσιάζονται και αναλύονται, ως ένα βαθμό, παρακάτω:

- **Μηχανές εσωτερικής καύσης:** Μια μηχανή εσωτερικής καύσης, κοινώς ΜΕΚ, μετατρέπει την ενέργεια που υπάρχει σε μια καύσιμη ύλη σε μηχανική ενέργεια. Η μηχανική αυτή ενέργεια χρησιμοποιείται για τη περιστροφική κίνηση ενός άξονα εντός της μηχανής και μέσω μιας γεννήτριας παράγεται ηλεκτρική ενέργεια. Οι δυνατότητες παρεχόμενης ισχύος ποικίλουν ανάλογα με τη χρήση, με τις τιμές της ισχύος να κυμαίνονται από 5kW έως και 7MW. Οι πιο συνηθισμένοι τρόποι λειτουργίας των ΜΕΚ είναι ο κύκλος diesel, ο κύκλος του Otto και το φυσικό αέριο.
- **Τουρμπίνες εσωτερικής καύσης:** Αποτελούν μηχανολογικές εφαρμογές που χρησιμοποιούν τη περιστρεφόμενη κίνηση μιας φτερωτής για την απορρόφηση

του αέρα. Στη συνέχεια, γίνεται παράλληλη καύση της αέριας μάζας με τη καύσιμη ύλη και τα θερμά αέρια που προκύπτουν θέτουν σε κίνηση έναν ρότορα-γεννήτρια από τον οποίο παράγεται ηλεκτρική ενέργεια. Λειτουργούν με καύσιμη ύλη, κυρίως φυσικό αέριο ή πετρέλαιο, ενώ υπάρχουν εφαρμογές και με μείγματα καυσίμων. Οι δυνατότητες παροχής ισχύος κυμαίνονται από 500kW έως και 25 MW για τεχνολογίες DER, ενώ για κεντρική παραγωγή μέχρι και 250MW. Οι σύγχρονες τουρμπίνες έχουν αποδόσεις που κυμαίνονται από 20% μέχρι και 45% στο πλήρες φορτίο.

- **Μικροτουρμπίνες:** Οι μικροτουρμπίνες είναι περιστροφικές μηχανές παραγωγής ενέργειας μέσω της ροής αέριας μάζας υπό πίεση. Τα κύρια μέρη που τον αποτελούν είναι μια τουρμπίνα και ένας συμπιεστής συνδεδεμένα μεταξύ τους. Η λειτουργία τους στηρίζεται είτε στην ανάκτηση θερμότητας είτε στον απλό κύκλο (εσωτερική καύση). Οι μικροτουρμπίνες απλού κύκλου έχουν χαμηλότερο κόστος, αυξημένη αξιοπιστία και παρέχουν περισσότερη θερμότητα για εφαρμογές συμπαραγωγής σε αντίθεση με τις μικροτουρμπίνες ανάκτησης θερμότητας. Η τεχνολογία τους προήλθε κυρίως από το χώρο της αεροδιαστημικής, ενώ η ενδεικτική παραγόμενη ισχύς τους τοποθετείται μεταξύ 25kW και 500kW.
- **Φωτοβολταϊκά συστήματα:** Αποτελούν τεχνολογικές εφαρμογές μετατροπής της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρική ενέργεια. Η λειτουργία τους στηρίζεται σε μικρού πάχους ημιαγωγούς, αποτελούμενους από δίσκους ημιαγωγίων υλικών όπως το πυρίτιο, τα οποία αναφέρονται και ως ηλιακά στοιχεία (solar cells). Η όλη φιλοσοφία της λειτουργίας των Φ/Β πλαισίων βασίζεται στο φωτοβολταϊκό φαινόμενο και θα αναπτυχθεί εκτενώς στο κεφάλαιο 4 της παρούσας εργασίας. Συνοπτικά, η πρόσπτωση της ηλιακής ακτινοβολίας δημιουργεί μια διαφορά τάσης στις όψεις των ημιαγωγίων δίσκων και σε συνδυασμό με την κατάλληλη συνδεσμολογία των στοιχείων παράγεται ηλεκτρική ενέργεια. Η μετατροπή της ηλιακής ενέργειας γίνεται αθόρυβα, αξιόπιστα και χωρίς περιβαλλοντικές συνέπειες. Ενδεικτικά, η ονομαστική ισχύς ανά Φ/Β στοιχείο ανέρχεται σε 180Wp, ενώ σε μεγαλύτερες εφαρμογές αγγίζει τα MWp.
- **Αιολικά συστήματα:** Είναι τεχνολογικές εφαρμογές αποτελούμενες από μεταλλικούς πυλώνες, στη κορυφή των οποίων τοποθετούνται τουρμπίνες με πτερωτές. Καθώς η τουρμπίνα περιστρέφεται λόγω πρόσπτωσης του ανέμου σε αυτή, μια ηλεκτρογεννήτρια παράγει ηλεκτρική ενέργεια. Τα μεγέθη τους διαφέρουν ανάλογα με την εφαρμογή και το ύψος στο οποίο τοποθετούνται. Συναντώνται κυρίως σε συστοιχίες (αιολικά πάρκα) και με αυτό τον τρόπο συνδέονται στο εθνικό ηλεκτρικό δίκτυο. Από πλευράς απόδοσης, προτιμάται ιδιαίτερα για την οικονομικότερη κάλυψη των φορτίων. Η προσφερόμενη ισχύς από μία ανεμογεννήτρια, ανάλογα με το μέγεθος, ξεκινά από μερικά kW έως και πάνω από 5MW.
- **Κυψέλες καυσίμου:** Αποτελούν εφαρμογές που τροφοδοτούνται με υδρογόνο και οξυγόνο και βασίζονται σε ηλεκτροχημικές διεργασίες για τη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, θερμότητας και νερού. Αποτελούνται από δύο ηλεκτρόδια

(άνοδος, κάθοδος) διαχωρισμένα από έναν ηλεκτρολύτη. Στην άνοδο εισάγεται καύσιμη ύλη που περιέχει υδρογόνο (π.χ. φυσικό αέριο), ενώ στη συνέχεια τα ηλεκτρόνια του υδρογόνου απελευθερώνονται κινούμενα προς ένα εξωτερικό κύκλωμα δίνοντας ηλεκτρικό ρεύμα. Τα θετικά ιόντα μέσω το ηλεκτρολύτη συναντούν στη πορεία με το οξυγόνο και τα ελεύθερα ηλεκτρόνια και έτσι παράγεται το νερό. Στη περίπτωση όπου το καύσιμο είναι καθαρό υδρογόνο, τότε τα παράγωγα είναι νερό, θερμότητα και ηλεκτρικό ρεύμα. Τα συστήματα κυψελών καυσίμων είναι αθόρυβα, καθαρά και ιδιαίτερα αποδοτικά με δυνατότητα μείωσης του κόστους στις υπηρεσίες ηλεκτρισμού από 20% έως και 40%

- **Μηχανές Stirling:** Πρόκειται για μηχανές εξωτερικής καύσης. Είναι αεροστεγή συστήματα, με ένα αδρανές αέριο στο εσωτερικό τους, που θέτει σε λειτουργία τη μηχανή. Λόγω της εξωτερικής καύσης αλλά και του κλειστού κύκλου λειτουργίας τους, τα κινούμενα εξαρτήματα του κινητήρα δεν φθείρονται εύκολα. Όμως, απαιτείται καλή στεγανοποίηση για την αποφυγή διαρροών του αερίου υψηλής πίεσης και των λιπαντικών λαδιών. Για τη λειτουργία τους χρησιμοποιούνται συνήθως υγρά ή αέρια καύσιμα, υγρά ή αέρια προερχόμενα από άνθρακα ή ακόμα και καύσιμα που προέρχονται από διεργασίες βιομάζας. Συνήθως, είναι διαθέσιμες σε μικρά μεγέθη με παροχή ισχύος από 1kW έως και 25kW και προς το παρόν χρησιμοποιούνται στη διαστημική και θαλάσσια βιομηχανία.
- **Συστήματα αποθήκευσης ενέργειας/UPS:** Τέτοιες τεχνολογικές εφαρμογές δεν έχουν τη δυνατότητα παραγωγής καθαρής ενέργειας. Μπορούν, όμως, κάλλιστα να προμηθεύσουν ενέργεια την οποία έχουν προηγουμένως αποθηκεύσει. Χρησιμοποιούνται κυρίως για τη διόρθωση τάσης, flicker και έντονης κυμάτωσης. Επίσης, μπορούν να χρησιμοποιηθούν και ως συστήματα αδιάλειπτου τροφοδοσίας (UPS).
- **Υβριδικά συστήματα:** Τα τελευταία χρόνια γίνονται προσπάθειες για να συνδυαστούν όλες οι προαναφερθείσες τεχνολογίες με σκοπό την βελτίωση των επιδόσεων των DER. Η φιλοσοφία των υβριδικών συστημάτων είναι η ταυτόχρονη εκμετάλλευση δυο μορφών ενέργειας με σκοπό να πλεονεκτεί η μία όταν υστερεί η άλλη. Χαρακτηριστικά παραδείγματα είναι ο συνδυασμός Φ/Β πλαισίων με ανεμογεννήτριες, μηχανές Stirling συνδυασμένες με ηλιακά πιάτα, ηλιακό θερμικός συλλέκτης με καυστήρα καυσίμων ή βιομάζας, κυψέλες καυσίμων συνδυασμένες με μικροτουρμπίνες και ανεμογεννήτριες με μπαταρίες αποθήκευσης.

Συνοπτικά, τα κυριότερα πλεονεκτήματα των τεχνολογιών DER είναι:

- Προσφορά προβλέψιμου ενεργειακού κόστους με την εισαγωγή ΑΠΕ
- Οδηγούν σε μείωση του κόστους μειώνοντας τη ζήτηση αιχμής σε μια εγκατάσταση με αποτέλεσμα να μειώνεται και η χρέωση ζήτησης
- Μεγαλύτερη αξιοπιστία και ποιότητα ισχύος

- Παροχή ενέργειας σε περιοχές που είναι απομακρυσμένες από το δίκτυο μεταφοράς ή υποσταθμούς
- Μείωση της υπερφόρτωσης των γραμμών διανομής που συνεπάγεται την αξιοπιστία του δικτύου
- Λειτουργία με βάση την τρέχουσα ζήτηση και όχι τις μελλοντικές και υποθετικές καταστάσεις
- Δυνατότητες παροχής εφεδρικής ενέργειας
- Μείωση των αναβαθμίσεων των έργων υποδομής
- Αποτελεσματική διαχείριση της ενέργειας και του φορτίου
- Προσφέρουν καθαρότερη, χωρίς εκπομπές αερίων και με πιο αθόρυβη λειτουργία, ενέργεια.

Από τα παραπάνω, συμπεραίνουμε ότι η εφαρμογή τεχνολογιών διεσπαρμένης παραγωγής έχει τη δυνατότητα να αλλάξει σημαντικά και κυρίως δυναμικά το ισχύον ενεργειακό καθεστώς. Αν θα μπορούσε κάτι να εμποδίσει μια τέτοια αλλαγή, αυτό θα ήταν το κόστος. Συγκεκριμένα, ένα βασικό μειονέκτημα είναι το υψηλό κόστος κεφαλαίου ανά kW εγκατεστημένης ισχύος συγκριτικά με τις μεγάλες κεντρικές παραγωγικές μονάδες. Επιπλέον, διαφορές υπάρχουν και στο κόστος κεφαλαίου για διάφορες εφαρμογές DER, όπως για παράδειγμα 1000 €/kW για τις τουρμπίνες καύσης, 3500€/kW για ένα φωτοβολταϊκό σύστημα και 20000€/kW στις κυψέλες καυσίμου.

Ωστόσο, οι εφαρμογές διεσπαρμένης παραγωγής έχουν ορισμένες επιδράσεις στις οποίες δίνεται ιδιαίτερη έμφαση τα τελευταία χρόνια. Οι κυριότερες από αυτές είναι:

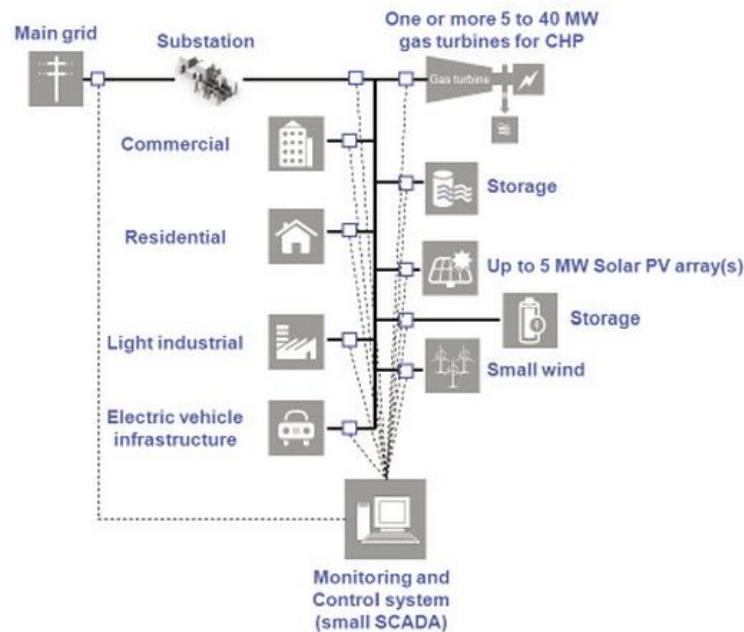
- Μεταβολές στο επίπεδο της τάσης των δικτύων
- Ποιότητα της παραγόμενης ισχύος
- Διαμόρφωση των μηχανισμών προστασίας του δικτύου
- Μεταβολή των ρευμάτων από σφάλματα του δικτύου καθώς και αλλαγή του επιπέδου βραχυκύκλωσης
- Αύξηση των παραγόμενων αρμονικών στο δίκτυο από την λειτουργία των ηλεκτρονικών μετατροπών ισχύος
- Επιπτώσεις στην ευστάθεια των συστημάτων.

Μια σημαντική κατεύθυνση στον ενεργειακό τομέα προσφέρεται από την ανάπτυξη των μικροδικτύων, τα οποία αποτελούν μια ενδιαφέρουσα πρόταση για το μέλλον και συνδυάζουν τεχνολογίες εκμετάλλευσης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας με κατευθυντήριο άξονα την ιδέα της διεσπαρμένης παραγωγής ενέργειας.

1.2 Μικροδίκτυα

Τα Μικροδίκτυα (Microgrids) αποτελούν ένα μοντέλο έρευνας που δύναται να προσφέρει καθοριστικές λύσεις και εξελίξεις στον ενεργειακό κλάδο. Η κυρίως φιλοσοφία των Μικροδικτύων προέκυψε με την αναζήτηση λύσεων σε προβλήματα όπως η αποδοτική λειτουργία γεννητριών συμβατικών καυσίμων, η αποδοτική αξιοποίηση των ΑΠΕ, η ελαχιστοποίηση των απωλειών κατά τη διανομή της ενέργειας αλλά και η αξιοπιστία της παρεχόμενης ενέργειας.

Ένα τυπικό Μικροδίκτυο αποτελείται από διάφορες ηλεκτροπαραγωγικές μονάδες συνολικής ισχύος μερικών MW. Ο σχεδιασμός ενός Μικροδικτύου δεν επηρεάζει το κεντρικό δίκτυο, ωστόσο υπάρχει η δυνατότητα να συμπεριληφθεί σε αυτόν μια πιθανή διασύνδεση με το κεντρικό ηλεκτρικό δίκτυο για την ανταλλαγή ενέργειας. Χαρακτηριστικές πηγές για τη λειτουργία τους αποτελούν όλες οι μορφές ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και πολλές από τις τεχνολογίες διεσπαρμένης παραγωγής που αναφέρθηκαν στις προηγούμενες παραγράφους. Μια σχηματική ιδέα δίνεται στο Σχ. 1.3.



Σχ. 1.3 Η κεντρική φιλοσοφία ενός Μικροδικτύου.

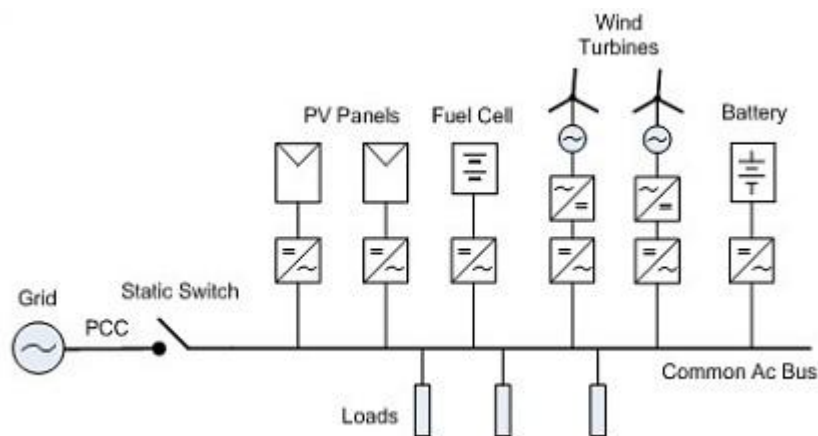
Ένα Μικροδίκτυο μπορεί να εγκατασταθεί σε τοποθεσίες όπου είναι διαθέσιμες φυσικές πηγές ενέργειας και προφανώς με γνώμονα να καλύψει τις απαιτήσεις του τοπικού φορτίου. Είναι λογικό ότι η εγκατάσταση και ο όλος σχεδιασμός προϋποθέτουν προεργασίες, όπως μετρήσεις και εκτιμήσεις για την βέλτιστη απόδοση του Μικροδικτύου.

Το μέγεθος και γενικότερα η κλίμακα ενός microgrid ποικίλει, από μια οικία που χρησιμοποιεί ένα υβριδικό σύστημα Φ/Β πλαισίου και γεννήτριας ντίζελ ή βιοκαυσίμων, ένα νοσοκομείο που χρησιμοποιεί κυψέλες καυσίμου για τη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και ζεστού νερού, μέχρι και μία πόλη που τροφοδοτείται από σταθμούς βιομάζας ή αιολικά πάρκα.

Η αξιόπιστη λειτουργία ενός Μικροδικτύου συνεπάγεται τη κάλυψη των απαιτήσεων ενεργού και άεργου ισχύος, τη συνεχή ρύθμιση της τάσης και της συχνότητας αυτής, αλλά και να περιλαμβάνει διατάξεις προστασίας από σφάλματα, διαρροές ή και βραχυκυκλώματα.

Όπως αναφέρθηκε και πριν, υπάρχει η δυνατότητα διασύνδεσης ενός Μικροδικτύου με το κεντρικό ηλεκτρικό δίκτυο. Σε μια τέτοια περίπτωση παραλληλισμένης λειτουργίας, είναι δυνατή και πολλές φορές επιθυμητή η ανταλλαγή ενέργειας. Παραδείγματος χάριν, μπορεί το Μικροδίκτυο να λαμβάνει πλεονάζουσα ενέργεια από το αντίστοιχο κεντρικό δίκτυο ή να απορροφά ενέργεια, στη περίπτωση που οι παραγωγικές του μονάδες δεν επαρκούν για την κάλυψη της ζήτησης. Ακόμα, για τη παραλληλισμένη λειτουργία και στη περίπτωση κατάρρευσης του κεντρικού δικτύου είναι δυνατή η τροφοδότηση του Μικροδικτύου αποκλειστικά από τις δικές του μονάδες.

Δεδομένου ότι οι περισσότερες μονάδες ενός Μικροδικτύου παρέχουν μικρή ισχύ, για τη παραγωγή και τη διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας προτιμάται η χαμηλή τάση, καθώς δεν απαιτείται η μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας σε μεγάλες αποστάσεις. Πρακτικά, το μέγεθος των παραγωγικών μονάδων καθορίζει τη στάθμη λειτουργίας. Επίσης, το μέγεθος των μονάδων και των φορτίων καθορίζει τον τρόπο διασύνδεσης του Μικροδικτύου με άλλα όμοια ή και με το κεντρικό δίκτυο. Προφανώς, η παροχή μεγάλης ισχύος απαιτεί διασύνδεση του Μικροδικτύου με τη μέση τάση. Αξίζει να τονιστεί ότι στη περίπτωση της παραλληλισμένης λειτουργίας με το κεντρικό δίκτυο βασική επιδίωξη είναι να μην προκαλεί το Μικροδίκτυο προβλήματα. Για το λόγο αυτό, η ποιότητα της τάσης πρέπει να ανταποκρίνεται πλήρως με τις προδιαγραφές του κεντρικού δικτύου και η ενέργεια που απορροφάται να μη ξεπερνά τις απαιτήσεις ενός τυπικού καταναλωτή.



Σχ. 1.4 Τυπικό παράδειγμα Μικροδικτύου αποτελούμενο από ανεμογεννήτριες, Φ/Β πλαίσια, κυψέλες καυσίμου και σύστημα αποθήκευσης ενέργειας.

Από μια άλλη οπτική γωνία, ένα Μικροδίκτυο μπορεί να λειτουργεί ως ένας «καλός γείτονας» για το κεντρικό δίκτυο. Με κατάλληλες ρυθμίσεις, ένα Μικροδίκτυο μπορεί να υποστηρίξει το κεντρικό δίκτυο απορροφώντας ή παρέχοντας ισχύ όταν αυτό απαιτείται. Στη περίπτωση αυτή, βέβαια, απαιτείται μια μορφή

επικοινωνίας και συντονισμού μεταξύ των κέντρων ελέγχου των συμβαλλόμενων μελών.

Για τη ανταπόκριση ενός Μικροδικτύου σε περιπτώσεις αιχμών ζήτησης, όπως εκκίνηση μεγάλων κινητήρων , ψυγείων κ.λπ. , αλλά και για την αποθήκευση τυχόν περισσευόμενης ενέργειας, χρησιμοποιούνται τεχνολογικές εφαρμογές όπως συσσωρευτές, υπερπυκνωτές, μηχανές υψηλής στρεφόμενης αδράνεια, συμπιεστές αέρα, ακόμα και αντλησιοταμιευτικά συστήματα. Στη περίπτωση που το Μικροδίκτυο λειτουργεί απομονωμένα, εφαρμογές όπως οι παραπάνω δίνουν τη δυνατότητα «αποταμίευσης» της ενέργειας για μελλοντική χρήση.

Τέλος, σημειώνεται ότι για τον έλεγχο και την αξιόπιστη λειτουργία ενός Μικροδικτύου είναι απαραίτητη η χρήση μετατροπέων ισχύος. Με τη χρήση τέτοιων τεχνολογικών εφαρμογών είναι εφικτός ο έλεγχος των πιο σημαντικών χαρακτηριστικών της παρεχόμενης ισχύος, την τάση και τη συχνότητα αυτής, ουσιαστικά. Σημαντική είναι η λειτουργία ενός ηλεκτρονικού αντιστροφέα ισχύος στο Μικροδίκτυο, ο οποίος ελέγχει το ισοζύγιο ισχύος σε αυτό. Επίσης, ο έλεγχος αυτός γίνεται και με τη χρήση συσσωρευτών , ελεγχόμενων γεννητριών ή με τον ξεχωριστό έλεγχο των ηλεκτρονικών ισχύος των μικρομονάδων παραγωγής του Μικροδικτύου.

Συνοψίζοντας, συμπεραίνουμε ότι το μοντέλο των Μικροδικτύων έχει τη δυνατότητα να προσφέρει ουσιαστικές λύσεις και προτάσεις για το μέλλον της ενέργειας από τη παραγωγή και διανομή της μέχρι και την εμπορική ανταλλαγή της φέρνοντας ανταγωνιστικές εφαρμογές στο προσκήνιο.

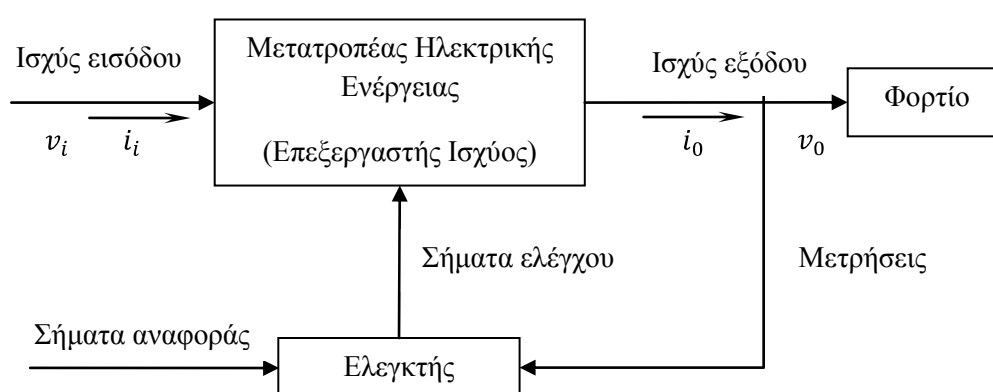
Κεφάλαιο 2

Μετατροπείς Ηλεκτρικής Ισχύος

2.0 Εισαγωγή

Οι μετατροπείς ηλεκτρικής ενέργειας ή ηλεκτρονικά ισχύος αποτελούν μια ιδιαίτερη κλάση ηλεκτρονικών διατάξεων με αποστολή τον έλεγχο, την επεξεργασία και τη μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας.

Ο ρόλος τους έγκειται στο ότι η ηλεκτρική ενέργεια παρέχεται με σταθερά χαρακτηριστικά από τη πηγή ισχύος, συνήθως τριφασική, σταθερής τάσης και συχνότητας. Στις περισσότερες των περιπτώσεων, οι απαιτήσεις του φορτίου δεν συμβαδίζουν με τα χαρακτηριστικά του διαθέσιμου δικτύου. Οι μετατροπείς, ως διατάξεις ισχύος, μετατρέπουν κατάλληλα τις παραμέτρους εξόδου (τάση, ρεύμα, συχνότητα) ώστε να ικανοποιούνται οι απαιτήσεις των εκάστοτε φορτίων. Στο Σχ.2.1 που ακολουθεί παρουσιάζεται η γενική λειτουργία ενός μετατροπέα ηλεκτρικής ενέργειας.



Σχ. 2.1 Λειτουργικό διάγραμμα ενός ηλεκτρονικού συστήματος ισχύος

Μέσω των μετατροπέων επιτυγχάνεται η τροφοδοσία διαφόρων ηλεκτρικών φορτίων, όπου ιδιαίτερη σημασία έχει ο έλεγχος της ποσότητας ισχύος σε κάθε χρονική στιγμή. Οι διαδικασίες μετατροπής των ηλεκτρικών μεγεθών και ταυτόχρονα της ηλεκτρικής ενέργειας πραγματοποιούνται μέσω ηλεκτρονικών διατάξεων χαμηλής ισχύος, κυρίως μικροεπεξεργαστών.

2.1 Εφαρμογές Μετατροπέων Ηλεκτρικής ισχύος

Τα ηλεκτρονικά συστήματα ισχύος βρίσκουν εκτεταμένη εφαρμογή σε διάφορα πεδία τα οποία αναπτύσσονται παρακάτω:

- i. *Διακοπτικά τροφοδοτικά και τροφοδοτικά αδιάλειπτης λειτουργίας (UPS):* Η πρόοδος στον τεχνολογικό κλάδο της μικροηλεκτρονικής οδήγησε στην ανάπτυξη ηλεκτρονικών συστημάτων και ηλεκτρονικών υπολογιστών όπου απαιτείται σταθεροποιημένη και συχνά αδιάλειπτη τροφοδοσία.
- ii. *Εξοικονόμηση ενέργειας:* Το αυξανόμενο κόστος της ενέργειας αλλά και η ανάγκη για τη προστασία του περιβάλλοντος δίνουν προτεραιότητα στην

εξοικονόμηση ενέργειας. Οι λυχνίες φθορισμού, τα συστήματα κλιματισμού και οι αντλίες θερμότητας είναι μερικά από τα πιο συνηθισμένα παραδείγματα εφαρμογών των μετατροπών ισχύος για την εξοικονόμηση ενέργειας.

- iii. *Αυτοματοποίηση της βιομηχανίας και έλεγχος διαδικασιών:* Στις αυτοματοποιημένες βιομηχανίες, οι ρομποτικοί μηχανισμοί λειτουργούν με ηλεκτρικά κινητήρια συστήματα υψηλής απόδοσης. Στον έλεγχο διαδικασιών υπάρχει αυξημένη ζήτηση για αντλίες και συμπιεστές μεταβλητών ταχυτήτων λόγω της υψηλής απόδοσης τους. Σημειώνεται ότι η χρήση ηλεκτρονικών υπολογιστών στη βιομηχανία δρα ουσιαστικά στην αυτοματοποίηση και στον έλεγχο διαδικασιών.
- iv. *Μεταφορές:* Τις τελευταίες δεκαετίες, έχει αυξηθεί η χρήση ηλεκτρικών οχημάτων σε αρκετές χώρες παγκοσμίως ώστε να περιορισθεί η εκπομπή καυσαερίων και η ρύπανση του περιβάλλοντος. Τέτοια οχήματα λειτουργούν με φορτιστές μπαταριών που χρησιμοποιούν μετατροπείς ισχύος.
- v. *Ηλεκτροτεχνικές εφαρμογές:* Διαδικασίες όπως συγκολλήσεις, επιμεταλλώσεις και επαγωγική θέρμανση περιλαμβάνουν διατάξεις, όπου απαιτείται ο μετασχηματισμός του ρεύματος και της τάσης από μετατροπείς ισχύος. Στις συγκολλήσεις, η εφαρμογή εναλλασσόμενου ρεύματος παρέχει μικρότερη διείσδυση και πλατύτερη θερμικά επηρεαζόμενη ζώνη, ενώ με εφαρμογή συνεχούς ρεύματος επιτυγχάνεται μεγαλύτερη διείσδυση και μικρότερη θερμικά επηρεαζόμενη ζώνη. Με κατάλληλες ρυθμίσεις της τάσης και της έντασης μπορεί να προκύψει κάθε επιθυμητό αποτέλεσμα.
- vi. *Μεταφορά και παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας:* Για τη μεταφορά μέσω γραμμής μεταφοράς υψηλής DC τάσης (HVDC) απαιτείται η μετατροπή της τάσης και του ρεύματος από AC σε DC και ο μετασχηματισμός τους από DC σε AC αντίστοιχα για το δίκτυο. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζεται από τις επιχειρήσεις διαχείρισης ενέργειας, στη προσπάθεια βελτίωσης του υπάρχοντος δικτύου μεταφοράς και στη σύνδεση αιολικών και φωτοβολταϊκών συστημάτων με το δίκτυο.

Η λειτουργία των σύγχρονων επεξεργαστών ισχύος βασίζεται στη χρήση διακοπτικών στοιχείων (στατοί μετατροπείς). Η ανάπτυξη στον τομέα των συστημάτων ισχύος οδήγησε στη κατασκευή ημιαγωγών διακοπών, ειδικοί τύποι transistor, ικανοί να χειριστούν υψηλές τάσεις και ρεύματα με απλό τρόπο ελέγχου.

Με τη χρήση αυτών πλέον επιτυγχάνεται:

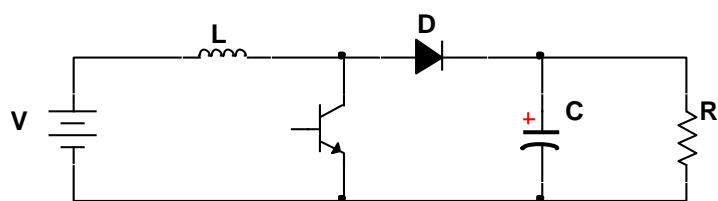
- Υψηλή αξιοπιστία των συστημάτων ισχύος
- Ικανοποιητική συμπεριφορά προσαρμοσμένη στις απαιτήσεις του φορτίου
- Μικρός όγκος και βάρος των διατάξεων
- Μικρές απώλειες, επομένως υψηλός βαθμός απόδοσης των μετατροπών.

2.2 Ταξινόμηση Μετατροπέων Ηλεκτρικής Ισχύος

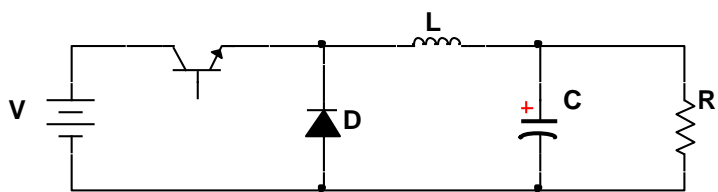
Οι μετατροπείς διακρίνονται σε τέσσερις κύριες κατηγορίες ανάλογα με τη μορφή ισχύος εισόδου και εξόδου:

➤ *Μετατροπείς συνεχούς τάσης (DC-DC converters, choppers).*

Οι μετατροπείς συνεχούς ρεύματος μετατρέπουν τη συνεχή τάση με συγκεκριμένο πλάτος και πολικότητα σε συνεχή τάση με διαφορετικό πλάτος ή/ και πολικότητα. Διακρίνονται περαιτέρω σε μετατροπείς ανύψωσης (step-up ή boost) και υποβιβασμού (step-down ή buck), ανάλογα με το αν η τάση εξόδου είναι μικρότερη ή μεγαλύτερη από τη τάση εισόδου. Ακόμη, διακρίνονται σε μετατροπείς με απομόνωση και χωρίς απομόνωση της εξόδου από την είσοδο.



(α)

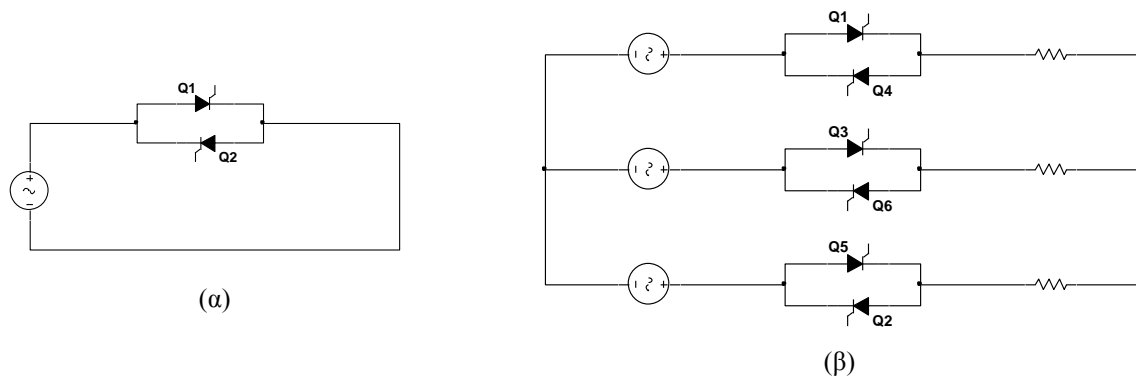


(β)

Σχ. 2.2 Κύκλωμα μετατροπέα (α) ανύψωσης (β) υποβιβασμού

➤ *Μετατροπείς εναλλασσόμενης τάσης (AC-AC) ή Κυκλομετατροπείς (Cycloconverters)*

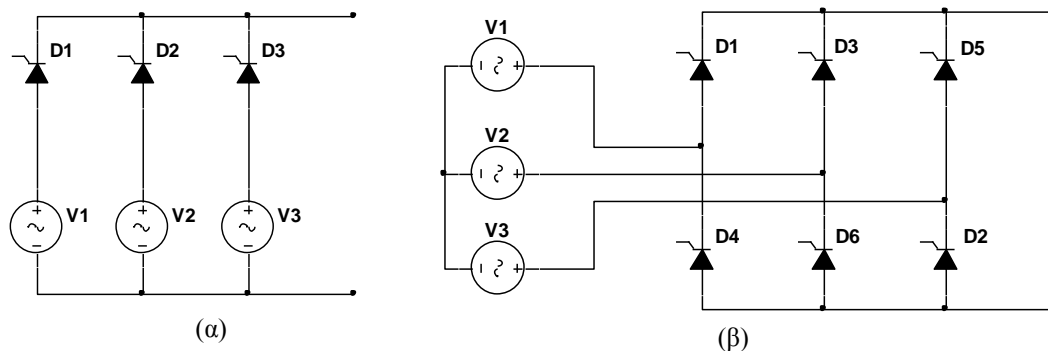
Οι κυκλομετατροπείς μετατρέπουν την εναλλασσόμενη τάση εισόδου με σταθερό πλάτος και συχνότητα σε εναλλασσόμενη τάση με ρυθμιζόμενο πλάτος και συχνότητα. Διακρίνονται σε μετατροπείς υποβιβασμού συχνότητας (step-down) και σε ανύψωσης συχνότητας ανάλογα με το αν η συχνότητα εξόδου είναι χαμηλότερη ή υψηλότερη αντίστοιχα της συχνότητας εισόδου.



Σχ. 2.3 Συνδεσμολογία (α) μονοφασικού ρυθμιστή (β) τριφασικού ρυθμιστή

➤ *Μετατροπείς AC-DC ή Ανορθωτές (Rectifiers)*

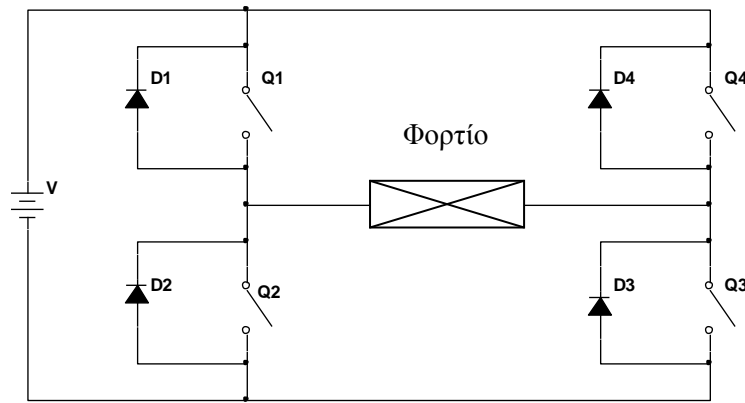
Οι ανορθωτές μετατρέπουν το εναλλασσόμενο ρεύμα σε συνεχές. Διακρίνονται σε μονοφασικούς και πολυφασικούς ανάλογα με τη μορφή της εναλλασσόμενης εισόδου, ενώ μια άλλη διάκριση αυτών γίνεται ανάλογα με το αν η τάση εξόδου είναι σταθερή ή μεταβαλλόμενη, όπου διαχωρίζονται σε ελεγχόμενους και μη ελεγχόμενους.



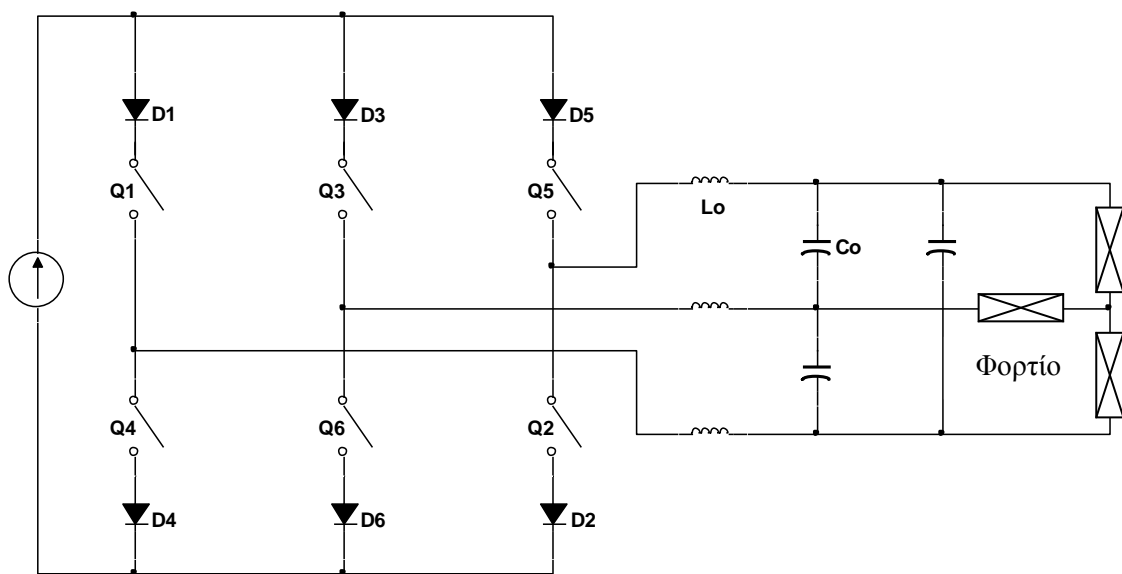
Σχ. 2.4 Συνδεσμολογία (α) τριφασικού ημιανορθωτή (β) τριφασικού ανορθωτή πλήρους ανόρθωσης

➤ *Μετατροπείς DC-AC ή Αντιστροφείς (Inverters)*

Οι αντιστροφείς μετατρέπουν το συνεχές ρεύμα σε εναλλασσόμενο με έξοδο είτε μονοφασική είτε πολυφασική (συνήθως τριφασική). Ουσιαστικά, η λειτουργία τους είναι αντίθετη με αυτή των ανορθωτών, ενώ η συχνότητα και το πλάτος της τάσης ή του ρεύματος εξόδου δύναται να ελεγχθούν.



(α)



(β)

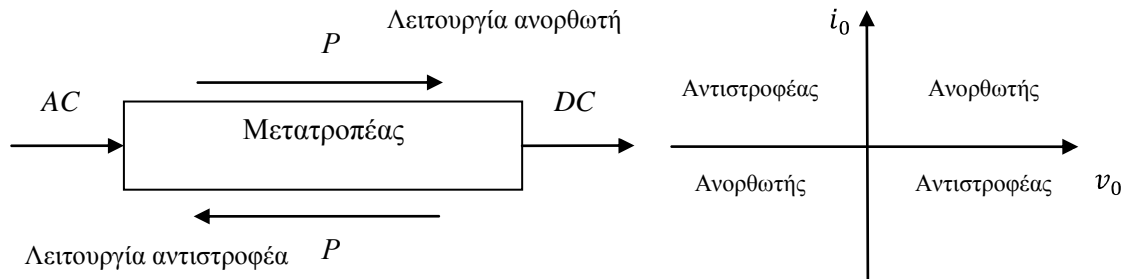
Σχ. 2.5 Συνδεσμολογία (α) αντιστροφέα ημιγέφυρας (β) τριφασικού αντιστροφέα με τροφοδοσία συνεχούς ρεύματος

Πρέπει να επισημάνουμε πως η προηγούμενη διάκριση των μετατροπέων δεν αποσαφηνίζει πλήρως τη λειτουργία τους, καθώς προϋποθέτει τη μονόδρομη ροή της ισχύος από την είσοδο προς την έξοδο του μετατροπέα.

Στην πραγματικότητα, η ροή της ισχύος στη πλειοψηφία των μετατροπέων είναι αμφίδρομη. Ας θεωρήσουμε ως παράδειγμα τη περίπτωση του ανορθωτή (AC – DC). Ο συγκεκριμένος τύπος μετατροπέα, λειτουργώντας συμβατικά, μετατρέπει την εναλλασσόμενη τάση εισόδου σε συνεχή στην έξοδο μεταφέροντας έτσι θετική ισχύ στο συνεχές δίκτυο. Χρησιμοποιώντας κατάλληλο έλεγχο των διακοπτικών στοιχείων μπορεί να λειτουργήσει ο μετατροπέας ως αντιστροφέα μεταφέροντας αρνητική ισχύ συνεχούς μορφής στο εναλλασσόμενο δίκτυο όπως στο Σχ. 2.6.

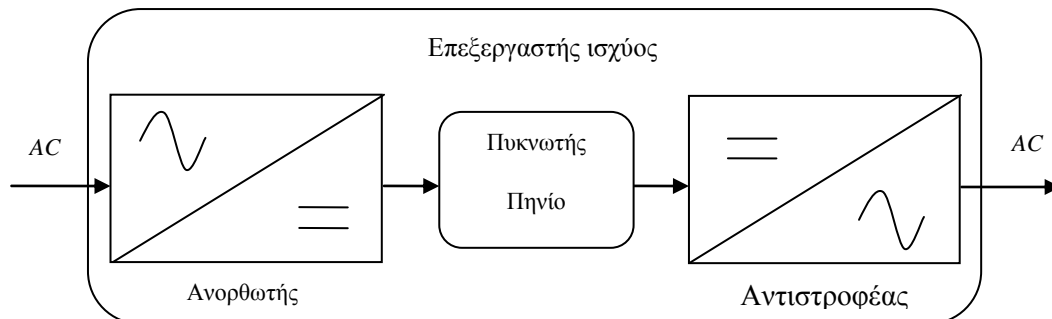
Βασική προϋπόθεση για την αμφίδρομη ροή της ισχύος είναι η ικανότητα του μετατροπέα να λειτουργεί και στα τέσσερα τεταρτημόρια του επιπέδου i_0-v_0 , όπου με

i_0 συμβολίζεται το ρεύμα της εξόδου και v_0 η τάση εξόδου. Στους μετατροπείς τεσσάρων τεταρτημορίων η φορά του ρεύματος i_0 μπορεί να αντιστραφεί, ενώ η πολικότητα της τάσης v_0 να γίνεται θετική ή αρνητική ανεξαρτήτως της φοράς του ρεύματος.



Σχ. 2.6 Αμφίδρομη ροή ισχύος στον μετατροπέα

Πρακτικά, η λειτουργία ενός μετατροπέα βασίζεται στη χρήση περισσότερων μετατροπέων ισχύος. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι το σύστημα ανορθωτή – αντιστροφέα. Η συνεχής τάση παρέχεται από έναν ανορθωτή και μετασχηματίζεται από ένα αντιστροφέα. Σε αυτή τη περίπτωση, η λειτουργία καθενός από τους μετατροπείς πρέπει να είναι ανεξάρτητη και να μην επηρεάζεται από αντίστοιχες διατάξεις, συνεπώς είναι απαραίτητη η αποσύζευξή τους. Η αποσύζευξη πραγματοποιείται με τη προσθήκη κατάλληλων αποθηκευτικών στοιχείων ενέργειας όπως πυκνωτές και πηνία.



Σχ. 2.7 Λειτουργικό διάγραμμα σύνθετου μετατροπέα αποτελούμενο από έναν ανορθωτή και έναν αντιστροφέα μεταξύ των οποίων παρεμβάλλεται η αποσύζευξη αυτών.

Κεφάλαιο 3

Ημιαγωγοί Διακόπτες Ισχύος

3.0 Εισαγωγή

Οι στατοί μετατροπείς ηλεκτρικής ενέργειας υλοποιούνται με τη χρήση ημιαγωγών διακοπτικών στοιχείων. Με τη χρήση των διακοπών επιτυγχάνεται υψηλός βαθμός απόδοσης των μετατροπέων και περιορίζονται οι απώλειες ισχύος.

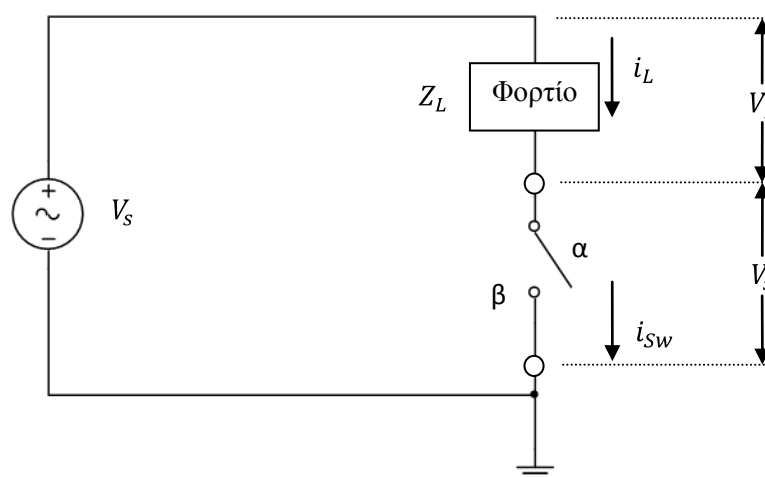
Οι απώλειες ισχύος προκαλούν αύξηση της θερμοκρασίας του μετατροπέα με κίνδυνο την υπερθέρμανση αυτού. Συχνά απαιτείται η χρήση διατάξεων ψύξης αυξάνοντας παράλληλα το κόστος και τον όγκο του συνολικού συστήματος. Για την ασφαλή λειτουργία κάθε διακόπτη, πρέπει η θερμοκρασία στο εσωτερικό του να διατηρείται μικρότερη από κάποια μέγιστη τιμή ασφαλείας.

Η δυνατότητα διαχείρισης και ελέγχου αυξημένων ποσοτήτων ισχύος και το μειωμένο κόστος των εξελιγμένων ημιαγωγών έχουν διευρύνει το πεδίο εφαρμογής των μετατροπέων, θέτοντας παράλληλα νέες βάσεις για την ανάπτυξη νέων τοπολογιών μετατροπέων.

Προκειμένου η ανάλυση των τοπολογιών των μετατροπέων να γίνει πιο εύκολη και τα χαρακτηριστικά των μετατροπέων περισσότερο κατανοητά, οι ημιαγωγοί ισχύος μπορούν να θεωρηθούν ως ιδανικοί διακόπτες.

3.1 Καταστάσεις λειτουργίας διακοπών

Οι διακόπτες ισχύος έχουν δύο καταστάσεις λειτουργίας, την κατάσταση αποκοπής και την κατάσταση αγωγιμότητας. Στην περίπτωση των transistor, υπάρχει επιπλέον η ενεργός περιοχή λειτουργίας, η οποία είναι ανεπιθύμητη λόγω των μεγάλων απωλειών ισχύος σε αυτή.



Σχ. 3.1 Κύκλωμα ισχύος στο οποίο το διακοπτικό στοιχείο παρουσιάζεται ως μηχανικός διακόπτης

Στο Σχ. 3.1 ο ημιαγωγός διακόπτης παριστάνεται ως μηχανικός διακόπτης.

Η θέση αντιστοιχεί στην κατάσταση αποκοπής του διακόπτη. Στη κατάσταση αυτή, η ροή του ρεύματος είναι μηδενική ($i_{sw} = i_L = 0$), η τάση στα άκρα του διακόπτη είναι ίση με την τάση της πηγής ($V_{sw} = V_s$), ενώ η τάση στα άκρα φορτίου μηδενίζεται ($V_L = 0$). Η παραπάνω περιγραφή αναφέρεται σε έναν ιδιωτικό διακόπτη. Στη πραγματικότητα, στη κατάσταση αποκοπής υπάρχει ένα ρεύμα διαρροής με εξαιρετικά χαμηλή η τιμή. Η τάση της πηγής τροφοδοσίας πρέπει να παίρνει τιμές μικρότερες από μια μέγιστη τιμή, η οποία είναι χαρακτηριστική για τον κάθε διακόπτη και ονομάζεται τάση αποκοπής ή διάσπασης. Αν η τάση υπερβεί αυτή τη μέγιστη, τότε ο διακόπτης υπερθερμαίνεται και καταστρέφεται. Επίσης, η πολικότητα της πηγής πρέπει να είναι κατάλληλη. Η θέση Β αντιστοιχεί στην κατάσταση αγωγής. Ο διακόπτης επιτρέπει τη διέλευση του ρεύματος, η τιμή του οποίου εξαρτάται αποκλειστικά από το εξωτερικό κύκλωμα σύμφωνα με τη σχέση:

$$I_{swF} = I_L = \frac{V_s}{Z_L}$$

όπου I_{swF} είναι η τάση αγωγιμότητας και Z_L η σύνθετη αντίσταση του κυκλώματος.

Η τάση στα άκρα του ιδανικού διακόπτη στη κατάσταση αγωγής είναι μηδενική ($V_{sw} = 0$). Αντίθετα, η τάση στα άκρα ενός πραγματικού ημιαγωγού διακόπτη στη κατάσταση αγωγής είναι μη μηδενική και ονομάζεται τάση αγωγιμότητας. Η διαδικασία μετάβασης ενός διακόπτη από τη μία κατάσταση στην άλλη έχει καθοριστικό ρόλο στη λειτουργία ενός μετατροπέα ισχύος.

Στη θεωρητική προσέγγιση των ιδανικών διακοπών ο χρόνος μετάβασης μεταξύ των καταστάσεων λειτουργίας είναι μηδέν. Αντίθετα, στους πραγματικούς διακόπτες το χρονικό διάστημα της μετάβασης αποτελεί μια ιδιαίτερα σημαντική παράμετρο. Κατά τη διάρκεια της μετάβασης, το διακοπτικό στοιχείο υπόκειται σε υψηλές τάσεις και ρεύματα. Επομένως, ο χρόνος μετάβασης πρέπει να είναι πολύ μικρότερος από τα διαστήματα λειτουργίας αγωγής/αποκοπής, καθώς οι απώλειες ισχύος πολλαπλασιάζονται. Επιπλέον, ιδιαίτερη σημασία έχει ο τρόπος μεταβολής των τιμών της τάσης και του ρεύματος, έτσι ώστε να αποφευχθούν καταστάσεις υπέρτασης και υψηλά ρεύματα.

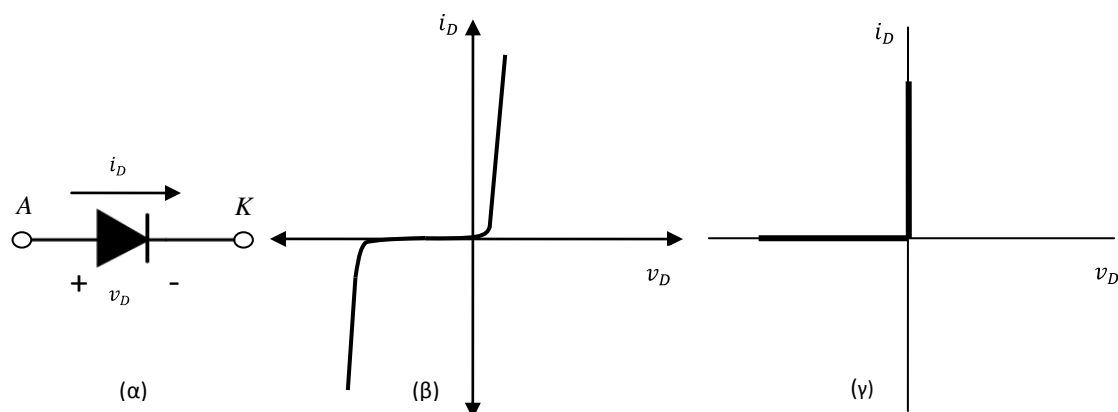
Συνοπτικά, παρουσιάζονται τα κύρια χαρακτηριστικά μεγέθη των ημιαγωγών διακοπών :

- Τάση αποκοπής: Είναι η μέγιστη τιμή της τάσης που μπορεί να επιβληθεί στα άκρα του διακόπτη στη κατάσταση αποκοπής.
- Ρεύμα αγωγής: Είναι η μέγιστη τιμή του ρεύματος που επιτρέπεται να διαρρέει τον διακόπτη στη κατάσταση αγωγής.
- Χρόνος μετάβασης: Είναι το χρονικό διάστημα που απαιτείται για τη μετάβαση του διακόπτη από τη μία λειτουργία στην άλλη. Για τον ιδανικό διακόπτη θεωρείται μηδενικός ο χρόνος.
- Τάση αγωγιμότητας: Η πτώση τάσης στα άκρα του διακόπτη στη κατάσταση αγωγιμότητας. Για τον ιδανικό διακόπτη θεωρείται μηδενική η τάση αυτή.
- Ρεύμα διαρροής: Το ρεύμα που διαρρέει τον διακόπτη στη κατάσταση αποκοπής. Για τον ιδανικό διακόπτη θεωρείται μηδενικό το ρεύμα αυτό.

3.2 Ταξινόμηση Ημιαγωγών Διακοπών Ισχύος

3.2.0 Δίοδοι

Η δίοδος ισχύος είναι ένας ημιαγωγός μιας επαφής με εφαρμογές στις μη ελεγχόμενες ανορθωτικές διατάξεις, στους αντιστροφείς (DC-AC) ως δίοδος ελεύθερης διέλευσης και σε άλλους μετατροπείς. Στο Σχ. 3.2 παρουσιάζεται το κυκλωματικό τους σύμβολο, η χαρακτηριστική $i - v$ και η ιδανική χαρακτηριστική της διόδου.



Σχ. 3.2 (α) Κυκλωματικό σύμβολο της διόδου (β) Χαρακτηριστική I-V καμπύλη της διόδου (γ) Ιδανική χαρακτηριστική I-V καμπύλη της διόδου

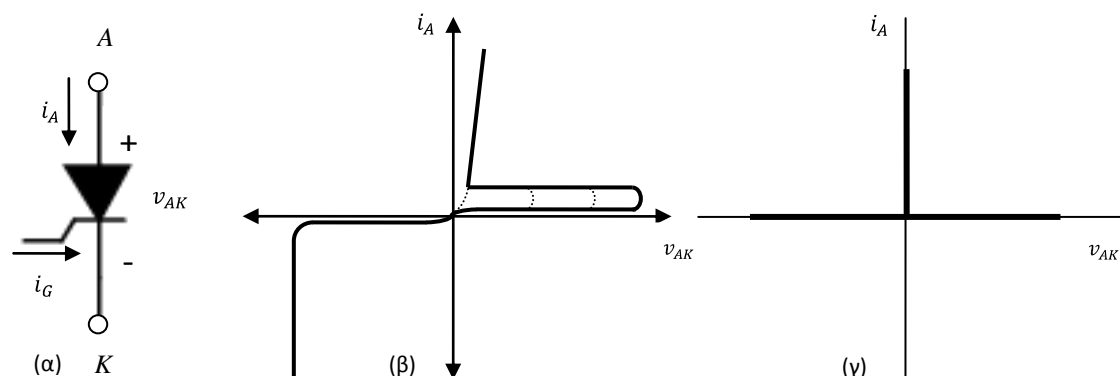
Όταν η δίοδος είναι ορθά πολωμένη, αρχίζει να άγει με μια μικρή πτώση τάσης στα άκρα της (κατάσταση αγωγιμότητας). Όταν η δίοδος είναι ανάστροφα πολωμένη και μέχρι η τάση στα άκρα της να γίνει ίση με την ανάστροφη τάση διάσπασης, η δίοδος διαρρέεται από ένα πολύ μικρό ρεύμα διαρροής (κατάσταση αποκοπής). Αξίζει να αναφερθεί ότι η ανάστροφη τάση αποκοπής δεν πρέπει να ξεπερνά την ονομαστική τάση διάσπασης, καθώς ο ημιαγωγός οδηγείται σε κατάρρευση.

Με μια ιδανική προσέγγιση των χαρακτηριστικών λειτουργίας της διόδου ισχύος, η $i - v$ χαρακτηριστική μπορεί να εξιδανικευτεί όπως παρουσιάζεται στο Σχ. 3.2γ. Η ιδανική χαρακτηριστική μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανάλυση τοπολογιών μετατροπέων, αλλά δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την σχεδίαση τους πρακτικά.

Ανάλογα με τις απαιτήσεις των εφαρμογών διατίθενται διάφορα είδη διόδων, όπως δίοδοι Schottky, δίοδοι ταχείας αποκατάστασης και δίοδοι συχνότητας δικτύου.

3.2.1 Thyristor

Το Thyristor αποτελεί έναν ελεγχόμενο ανορθωτή πυριτίου τεσσάρων στρωμάτων (p-n-p-n). Το κυκλωματικό του σύμβολο, η $i - v$ χαρακτηριστική και ιδανική χαρακτηριστική του thyristor παρουσιάζονται στο Σχ. 3.3.



Σχ. 3.3 (α) Κυκλωματικό σύμβολο του Thyristor (β) Χαρακτηριστική I-V καμπύλη του Thyristor (γ) Ιδανική χαρακτηριστική I-V καμπύλη του Thyristor

Στην κατάσταση αγωγιμότητας το ρεύμα ρέει από την άνοδο (A) προς την κάθοδο (K), ενώ στην κατάσταση αποκοπής το thyristor μπορεί να αποκόπτει μία ορθή τάση και να μην άγει.

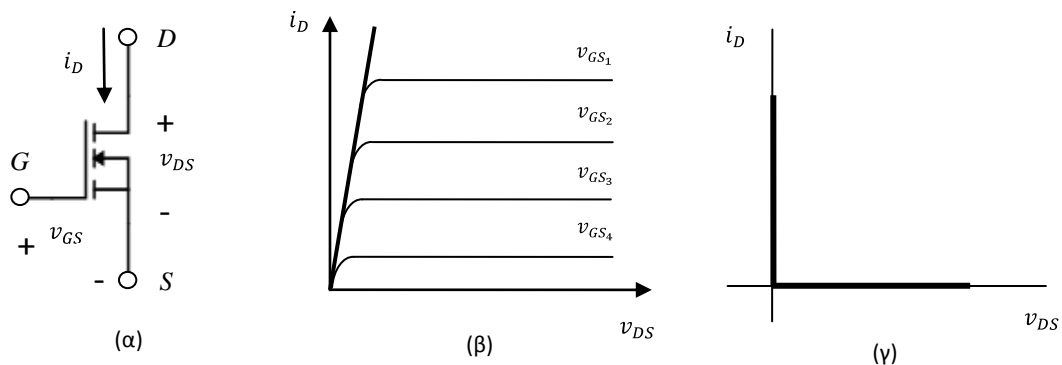
Το thyristor μπορεί να κλείσει με την εφαρμογή ενός σύντομου θετικού παλμού ρεύματος στην πύλη, με την προϋπόθεση ότι είναι ορθά πολωμένο. Εφόσον το thyristor κλείσει, το ρεύμα της πύλης σταματά να εφαρμόζεται και το thyristor άγει όπως στην περίπτωση της διόδου. Το thyristor ανοίγει και το ρεύμα που διαρρέει μηδενίζεται, όταν το ρεύμα ανόδου τείνει να γίνει και πάλι αρνητικό. Τότε, η πύλη ανακτά τον έλεγχο για να κλείσει και πάλι το thyristor σε κάποια ελεγχόμενη χρονική στιγμή, εφόσον αυτό επανέλθει στην κατάσταση ορθής πόλωσης. Όπως και στην περίπτωση της διόδου, στην ανάστροφη πόλωση και σε τάσεις μικρότερες από την ανάστροφη τάση διάσπασης, το thyristor διαρρέεται από ένα ασήμαντο μικρό ρεύμα διαρροής.

Κατά την ανάλυση των τοπολογιών μετατροπέων, το thyristor μπορεί να συμπεριφέρεται όπως παριστάνεται στην ιδανική $i - v$ χαρακτηριστική του.

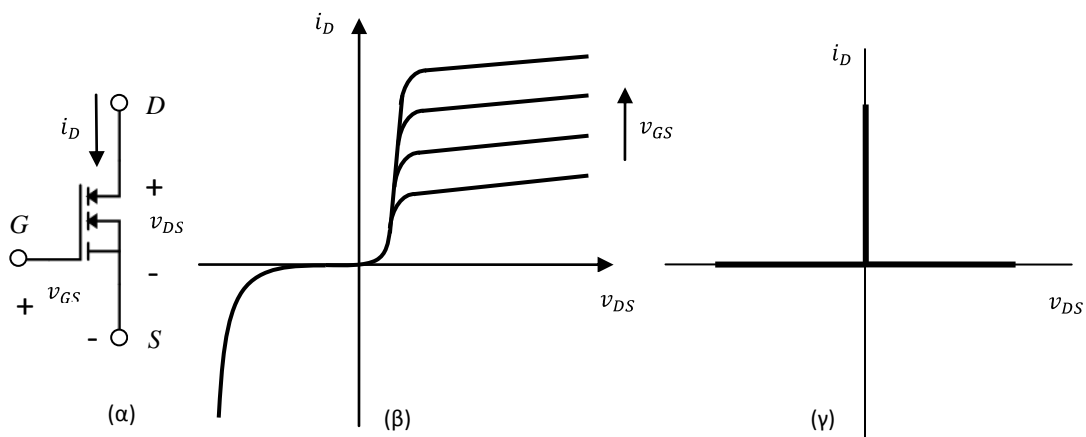
Για να ικανοποιηθούν οι απαιτήσεις των εφαρμογών, διατίθενται διάφορα είδη thyristors, όπως thyristor για έλεγχο φάσης, (phase-control thyristor), thyristor αντιστροφών (inverter-grade thyristor), thyristor με φωτεινή διέγερση (light-activated thyristor) και άλλα.

3.2.2 Ελεγχόμενοι Διακόπτες

Όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο Ημιαγωγοί Ισχύος, όπως οι MOSFET, οι IGBT και οι BJT μπορούν να κλείνουν και να ανοίγουν με την εφαρμογή σημάτων ελέγχου. Τέτοια διακοπτικά στοιχεία ονομάζονται ελεγχόμενοι διακόπτες και συνθέτουν τη μεγαλύτερη κατηγορία ημιαγωγών ισχύος. Στο Σχ.3.4 και Σχ. 3.5 παρουσιάζονται το κυκλωματικό σύμβολο, η $i - v$ χαρακτηριστική και η ιδανική χαρακτηριστική για τους ευρέως διαδεδομένους ημιαγωγούς MOSFET και IGBT αντίστοιχα, χωρίς παράλληλα να υποβαθμίζεται η σημασία των υπολοίπων στοιχείων.



Σχ. 3.4 (α) Κυκλωματικό σύμβολο του MOSFET (β) Χαρακτηριστική I-V καμπύλη του MOSFET (γ) Ιδανική χαρακτηριστική I-V καμπύλη του MOSFET



Σχ. 3.5 (α) Κυκλωματικό σύμβολο του IGBT (β) Χαρακτηριστική I-V καμπύλη του IGBT (γ) Ιδανική χαρακτηριστική I-V καμπύλη του IGBT

Στην κατάσταση αποκοπής, όπου ο διακόπτης είναι ανοικτός, δεν ρέει καθόλου ρεύμα, ενώ, όταν είναι κλειστός, το ρεύμα μπορεί να ρέει μόνο κατά τη φορά του βέλους, όπως φαίνεται στα Σχ. 3.4α και Σχ. 3.5α.

Ο ιδανικός ελεγχόμενος διακόπτης έχει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- i. Στην κατάσταση αποκοπής, αποκόπτει αυθαίρετα υψηλές ορθές και ανάστροφες τάσεις και δεν διαρρέεται από ρεύμα.
- ii. Στην κατάσταση αγωγιμότητας άγει αυθαίρετα υψηλά ρεύματα με μηδενική πτώση τάσης στους ακροδέκτες του.

- iii. Για τη διέγερση του διακόπτη απαιτείται η μηδενική ισχύς από τη στιγμή ελέγχου.
- iv. Όταν διεγερθεί η μετάβαση από την κατάσταση αποκοπής στην κατάσταση αγωγιμότητας και αντίστροφα είναι ακαριαία.

Προφανώς, οι πραγματικοί ημιαγωγοί ισχύος δεν λειτουργούν με τα προηγούμενα χαρακτηριστικά και έτσι κατά τη χρήση τους θα καταναλώνουν ισχύ. Η κατανάλωση ισχύος είναι ένας ιδιαίτερα σημαντικός παράγοντας στη φύση των ημιαγωγών και η ελαχιστοποίηση της είναι απαραίτητη για το σχεδιασμό των μετατροπέων.

Ανάλογα με τις εφαρμογές τους, διατίθενται αρκετά είδη ελεγχόμενων διακοπών, όπως και τα διπολικά transistor επαφής (BJT), transistor μεταλλικών οξειδίων ημιαγωγών με επίδραση πεδίου (MOSFET), thyristor με σβέση ελεγχόμενη από την πύλη (GTO), MOS THYRISTORS (MCT) και διπολικά transistor με μονωμένη πύλη (IGBT).

Κεφάλαιο 4

Φωτοβολταϊκή τεχνολογία

4.0 Εισαγωγή

Από τα μέσα του 20^{ου} αιώνα, η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στηρίζεται σε μεγάλο βαθμό στις θερμοηλεκτρικές και υδροηλεκτρικές μονάδες. Τέτοιες μορφές παραγωγής ενέργειας προϋποθέτουν την κατανάλωση εξορύξιμων καύσιμων υλών, όπως πετρέλαιο και φυσικό αέριο, ανθράκων που λαμβάνονται κατόπιν ειδικής κατεργασίας, όπως ξυλάνθρακα, οπτάνθρακα και άλλων γαιανθράκων, ραδιενεργών υλικών όπως ουράνιο ή χρησιμοποιούν υδατοπτώσεις.

Το πλέον σοβαρό ζήτημα που τίθενται είναι ότι η πλειοψηφία των παραπάνω ενεργειακών πηγών έχει περιορισμένη προοπτική καθώς και οι εξορύξιμες ύλες εξαντλούνται βαθμιαία, ενώ παράλληλα η υδροηλεκτρική ενέργεια εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από γεωγραφικούς περιορισμούς. Επιπρόσθετα, οι πλέον αισθητές περιβαλλοντικές επιπτώσεις των παραπάνω πηγών ενέργειας καθιστούν αναγκαία την ανάπτυξη νέων τεχνολογιών με σκοπό τη βέλτιστη εκμετάλλευση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

Το ενδιαφέρον για την αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας στάθηκε έπειτα από εκτεταμένες μελέτες του φωτοβολταϊκού φαινομένου. Οι μελέτες ανέδειξαν την δυνατότητα άμεσης και αποδοτικής μετατροπής της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρική με τη χρήση φωτοβολταϊκών γεννητριών. Τα κυριότερα πλεονεκτήματα από τη μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική είναι :

- Ανανεώσιμη και ελεύθερα διαθέσιμη πηγή ενέργειας
- Ικανοποιητικά μεγάλη διάρκεια ζωής των φωτοβολταϊκών στοιχείων
- Η φωτοβολταϊκή μετατροπή δεν ρυπαίνει το περιβάλλον, δε δημιουργεί απόβλητα.
- Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία δεν περιλαμβάνουν κινούμενα μέρη, γεγονός που μειώνει αισθητά την ανάγκη διαρκούς συντήρησης και επίβλεψης.
- Δίνεται η δυνατότητα ανεξαρτησίας από κεντρικά ηλεκτρικά δίκτυα διανομής.
- Ακόμα και σε εγκαταστάσεις απομακρυσμένες από το κυρίως δίκτυο, θεωρείται ως μία λογικού κόστους παροχής ενέργειας.
- Ανάλογα με τις απαιτήσεις του εκάστοτε φορτίου, οι φωτοβολταϊκοί σταθμοί μπορούν να λειτουργήσουν με όσο μικρή ισχύ τους ζητηθεί.
- Η ραγδαία ανάπτυξη στον χώρο των ημιαγωγικών υλικών και η συνεχής μείωση του κόστους παραγωγής, τους οδηγούν σε σταδιακή μείωση του κόστους των φωτοβολταϊκών πλαισίων.
- Η χρήση φωτοβολταϊκών μπορεί να συμβάλλει σημαντικά στο αναπτυξιακό μοντέλο της Διεσπαρμένης Παραγωγής Ενέργειας, δημιουργώντας συνθήκες οικονομικής ανάπτυξης στον ενεργειακό τομέα.

Όπως είναι φυσικό, υπάρχουν και ορισμένα μειονεκτήματα, όπως το σχετικά υψηλό κόστος για τις περισσότερες εφαρμογές και η αδυναμία συνεχούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από τις φωτοβολταϊκές γεννήτριες λόγω αυξομειώσεων της ηλιακής ακτινοβολίας. Προφανώς, πρόκειται για μια μέθοδο παραγωγής ηλεκτρικής

ενέργειας με απρόβλεπτη και στοχαστική συμπεριφορά. Ωστόσο, με τη χρήση συσσωρευτών επιτυγχάνεται η αυτονομία.

Η πάροδος όμως και η ανάπτυξη στον τεχνολογικό τομέα των φωτοβολταϊκών είναι αλματώδης. Η μείωση του κόστους παραγωγής των φωτοβολταϊκών στοιχείων και οι τεχνικές βελτίωσης της απόδοσης τους υπόσχονται σημαντική ανάπτυξη στις επόμενες δεκαετίες.

Το ποσό της ενέργειας που περιέχεται στο φως του ηλίου ονομάζεται ροή ακτινοβολίας ή απλούστερα ένταση ηλιακής ακτινοβολίας. Η ροή ακτινοβολίας ορίζεται ως το ποσό της ενέργειας της ακτινοβολίας που περνά από τη μονάδα εμβαδού μιας επιφάνειας τοποθετημένης κάθετα στη κατεύθυνση της ακτινοβολίας. Συνήθως εκφράζεται σε kW/m^2 .

Αξίζει να σημειωθεί ότι η ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στην επιφάνεια των φωτοβολταϊκών στοιχείων δεν μετατρέπεται εξ' ολοκλήρου σε ηλιακή ενέργεια. Ένα μέρος από την προσπίπτουσα ακτινοβολία ανακλάται πάνω στην επιφάνεια του στοιχείου, ενώ από την ακτινοβολία που διεισδύει ένα μέρος ουσιαστικά συμβάλει στη σύνθεση του φωτοβολταϊκού φαινομένου.

4.1 Φωτοβολταϊκό στοιχείο

Οι φωτοβολταϊκές γεννήτριες (ή Φ/Β συστοιχίες) αποτελούνται από **φωτοβολταϊκά πλαίσια**. Το βασικό «συστατικό» των Φ/Β πλαισίων αποτελεί το Φ/Β στοιχείο ή αλλιώς **Φ/Β κυψέλη**, τα οποία είναι δίοδοι ημιαγωγών σε μορφή δίσκου. Καθώς η ηλιακή ακτινοβολία προσπίπτει στην επιφάνεια των στοιχείων, αναπτύσσεται μια διαφορά δυναμικού ανάμεσα στην εμπρός και στην πίσω όψη τους. Ανάλογα με το υλικό κατασκευής τους και την ένταση της ακτινοβολίας που δέχονται, ένα Φ/Β στοιχείο δύναται να δώσει μέχρι 0.5- 10 V και πυκνότητα ρεύματος έως και 20-40 mA/cm². Βασικός παράγοντας στην επιλογή του ημιαγωγού ως υλικό κατασκευής Φ/Β στοιχείων είναι η τιμή του ενεργειακού διάκενου, η οποία επηρεάζει παράλληλα και την απόδοση του στοιχείου. Τα περισσότερα φωτοβολταϊκά στοιχεία κατασκευάζονται από **πυρίτιο** (silicon) χρησιμοποιώντας είτε μονοκρυσταλλικά ή πολυκρυσταλλικά wafer είτε λεπτά films πυριτίου. Άλλα υλικά που χρησιμοποιούνται για τη κατασκευή Φ/Β κυψελών είναι το γάλλιο (gallium arsenide), κάδμιο (cadmium telluride) ή ακόμα και ο χαλκός (copper indium diselenide).

Ως **απόδοση** ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου ή με μια αυστηρή ορολογία **συντελεστή απόδοσης**, ορίζεται ο λόγος της μέγιστης ηλεκτρικής ισχύος που παράγει το στοιχείο προς την ισχύ της ηλιακής ακτινοβολίας που δέχεται στην επιφάνειά του. Ένας ημιαγωγός μπορεί να απορροφήσει μόνο τα φωτόνια που έχουν ενέργεια μεγαλύτερη από το ενεργειακό του διάκενο. Από αυτά, μόνο το μέρος της ενέργειάς τους που είναι ίσο με το ενεργειακό διάκενο του ημιαγωγού συμβάλλει στο φωτοβολταϊκό φαινόμενο, ενώ το υπόλοιπο μέρος μετατρέπεται συνήθως σε ανεπιθύμητη θερμότητα. Επομένως, η τιμή του ενεργειακού διάκενου ενός ημιαγωγού αποτελεί ένα από τα κυριότερα κριτήρια που καθορίζουν την απόδοσή του. Οπότε, ανάλογα το υλικό κατασκευής η απόδοση ενός στοιχείου κυμαίνεται από

6% για άμορφες κυψέλες πυριτίου έως και τη μέγιστη μέχρι στιγμής θεωρητική απόδοση του 44,7 % που επετεύχθη το 2013 από το ινστιτούτο Fraunhofer ISE σε συνεργασία με την εταιρία Soitec, το ερευνητικό κέντρο CEA-Leti και το κέντρο ερευνών Helmholtz του Βερολίνου. Η, εργαστηριακή αυτή Φ/Β κυψέλη αποτελείται από τέσσερις υπο-κυψέλες αποτελούμενες από συνδυασμούς στρωμάτων των ημιαγωγών GaInP, GaAs, GaInAs και InP. Βέβαια, οι απόδοσης αυτή αφορά εργαστηριακές εφαρμογές και υπό πρότυπες συνθήκες, ενώ αναφέρεται ότι η αυξημένη απόδοση δεν συνεπάγεται και την οικονομική απόδοση, υπό την έννοια του κόστους. Παραδείγματος χάριν, ένα Φ/Β στοιχείο με απόδοση 30%, κατασκευασμένο από πολλαπλές στρώσεις γαλλίου και χαλκού, θα κόστιζε εκατό φορές πιο ακριβά από ένα αντίστοιχο στοιχείο άμορφου πυριτίου με απόδοση 8% μόνο και μόνο για να δώσει τετραπλάσια απόδοση! Οι αποδόσεις των Φ/Β στοιχείων που χρησιμοποιούνται (είναι εμπορεύσιμα) κυμαίνονται από 14% έως και 19%. Η ανάπτυξη των συγκεντρωτικών Φ/Β συστημάτων (concentrator systems) δίνει τη δυνατότητα αύξησης της απόδοσης των στοιχείων. Πρόσφατα, το ινστιτούτο Fraunhofer ISE κατασκεύασε συγκεντρωτική Φ/Β κυψέλη με απόδοση ρεκόρ 36,7% ,για τη συγκεκριμένη τεχνολογία. Χρησιμοποιήθηκαν πολυστρωματικές ηλιακές κυψέλες Soitec (τετραπλής ένωσης) και κάτοπτρα Fresnel για τη συγκέντρωση της ηλιακής ακτινοβολίας. Οι κυψέλες αυτές ήταν όμοιες με αυτές του θεωρητικού ρεκόρ του 2013 που αναφέρθηκε πιο πάνω.

4.2 Ημιαγωγοί

Όπως προαναφέρθηκε, για την κατασκευή φωτοβολταϊκών στοιχείων χρησιμοποιούνται ημιαγωγοί που είναι στοιχεία τετρασθενή με τετραεδρική κρυσταλλική δομή όπως το πυρίτιο (Si). Στα στοιχεία αυτά, δεν υπάρχουν ελεύθεροι φορείς ηλεκτρικού ρεύματος και δε διαθέτουν ηλεκτρική αγωγιμότητα στην υποθετική περίπτωση που ο ημιαγωγός βρίσκεται στη θεμελιώδη ενεργειακή κατάσταση, δηλαδή είναι εντελώς υποβαθμισμένος ενεργειακά. Όταν, όμως, απορροφήσουν ενέργεια, π.χ. με τη μορφή ακτινοβολίας, η ενέργεια που παρέχεται κατανέμεται στα άτομα του ημιαγωγού και προκαλεί την απελευθέρωση ηλεκτρονίων από τους δεσμούς.

Με την κινητική ενέργεια που απόκτησαν τα ηλεκτρόνια σθένους απομακρύνονται από την περιοχή του δεσμού τους στο κρυσταλλικό πλέγμα. Ουσιαστικά, αλλάζουν και γίνονται ευκίνητοι φορείς του ηλεκτρισμού, δίνοντας έτσι στον ημιαγωγό μια αξιόλογη ηλεκτρική αγωγιμότητα. Η κινητική ενέργεια του ηλεκτρονίου δίνεται από:

$$\frac{1}{2}mu^2 = hv - E_g$$

όπου $\frac{1}{2}mu^2$: η κινητική ενέργεια των ηλεκτρονίων ,

hv : η ενέργεια των ηλεκτρονίων,

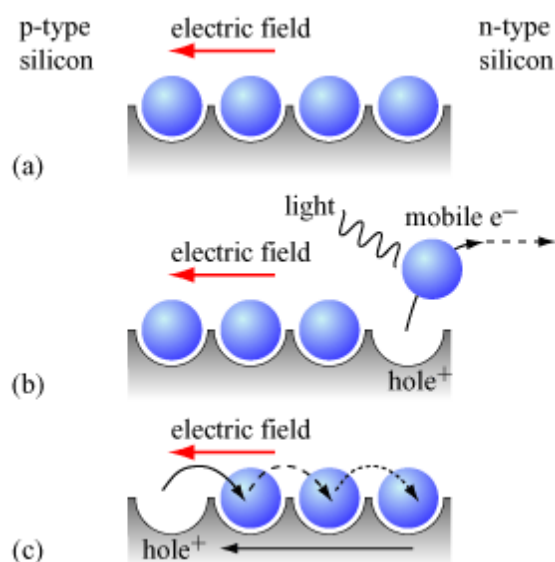
$E_g = E_{cb} + E_{vt}$: η τιμή του ενεργειακού διάκενου,

E_{cb} : ο πυθμένας της ζώνης αγωγιμότητας και

E_{vt} : η κορυφή της ζώνης σθένους

Το ενεργειακό διάκενο ανάμεσα στη ζώνη σθένους και στη ζώνη αγωγιμότητας εκφράζει την ελάχιστη απαιτούμενη ενέργεια για τη διέγερση ενός ηλεκτρονίου σθένους, ώστε να μετατραπεί σε ελεύθερο ηλεκτρόνιο, με ταυτόχρονη δημιουργία μιας οπής.

Αν στα ηλεκτρόνια των δεσμών του κρυστάλλου προσφερθεί μια ποσότητα ενέργειας, π.χ. αν δεχθούν μια δέσμη ακτινοβολίας που αποτελείται από φωτόνια με ενέργεια μικρότερη από το ενεργειακό διάκενο ($E_g \geq h\nu$), δε μπορούν να την απορροφήσουν και μένουν στη ζώνη σθένους. Αν όμως τα ενεργειακά κβάντα που προσφέρονται είναι ίσα ή μεγαλύτερα από το ενεργειακό διάκενο του ημιαγωγού ($E_g \leq h\nu$), τότε κάθε κβάντο μπορεί να απορροφηθεί από ένα ηλεκτρόνιο σθένους και να το διεγείρει προς τη ζώνη αγωγιμότητας, αφήνοντας στη ζώνη σθένους μία οπή (Σχ. 4.1).



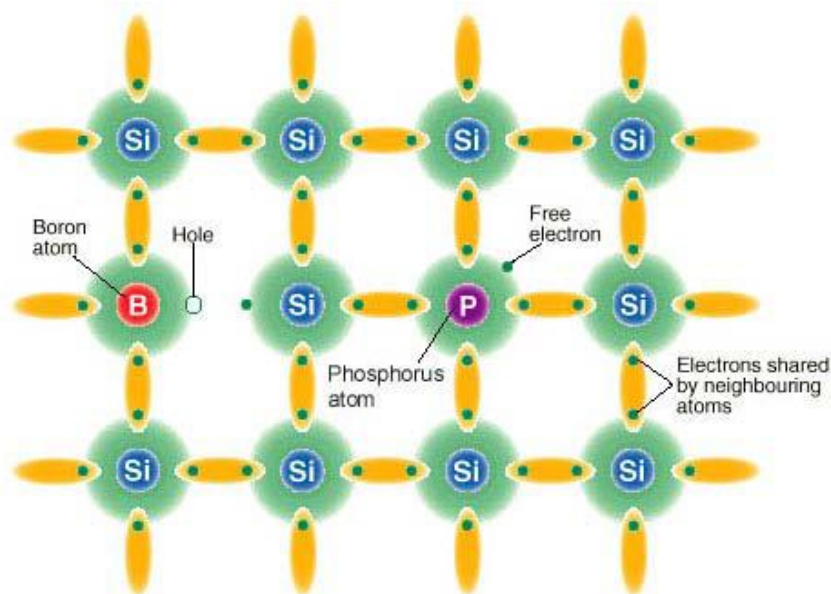
Σχ. 4.1 Δημιουργία οπής

Αν τώρα ο τετρασθενής ημιαγωγός Si νοθευτεί με κάποιο πεντασθενές στοιχείο, όπως ο φώσφορος (P) (ή ένα στοιχείο με σθένος μεγαλύτερο του τέσσερα), μπορούμε να δημιουργήσουμε ημιαγωγούς στους οποίους η συγκέντρωση των ηλεκτρονίων είναι πολύ μεγαλύτερη από τη συγκέντρωση των οπών. Τότε, προκύπτουν **ημιαγωγοί τύπου n**. Αντίστοιχα, αν προσθέσουμε τρισθενές στοιχείο όπως το βόριο (B) (ή στοιχείο με σθένος μικρότερο του τέσσερα), τότε προκύπτει περίσσεια οπών και όχι ηλεκτρονίων. Έτσι προκύπτουν **ημιαγωγοί τύπου p**.

Τέσσερα από τα πέντε ηλεκτρόνια σθένους κάθε ατόμου P θα ενωθούν με ηλεκτρόνια σθένους των γειτονικών ατόμων Si και θα σχηματίσουν ομοιοπολικούς δεσμούς. Το πέμπτο ηλεκτρόνιο (φορέας πλειονότητας) συγκρατείται από το θετικό πυρηνικό φορτίο του P και με μια μικρή ποσότητα ενέργειας μπορεί να αποσπαστεί και να κινείται σαν ελεύθερο ηλεκτρόνιο, αφήνοντας ένα ανιόν (P⁺) που μένει

ακίνητο στο πλέγμα. Δηλαδή, το πεντασθενές άτομο συμπεριφέρεται στο πλέγμα σαν δότης ηλεκτρονίων (τύπου-n ημιαγωγός).

Αντίστοιχα, με την πρόσμιξη τρισθενών ατόμων B σε πλεγματικές θέσεις του Si δημιουργούνται κενές θέσεις ηλεκτρονίων στους δεσμούς. Με την απορρόφηση μικρής ποσότητας ενέργειας, ένα ηλεκτρόνιο από ένα γειτονικό πλήρη δεσμό μπορεί να καλύψει την κενή θέση, αφήνοντας παράλληλα στην προηγούμενη θέση του μια οπή και μετατρέποντας το άτομο B σε κατιόν (B⁻). Ουσιαστικά, το τρισθενές άτομο συμπεριφέρεται σαν αποδέκτης ηλεκτρονίων ή δότης οπών (τύπου-p ημιαγωγός).



Σχ. 4.2 Δημιουργία κενών θέσεων με προσμίξεις τρισθενών και πεντασθενών ατόμων

Όταν σε μια περιοχή του ημιαγωγού υπάρχει δημιουργία ή έκχυση φορέων σε περίσσεια, αυτοί διαχέονται προς τις άλλες περιοχές του ημιαγωγού, όπου η συγκέντρωση των αντίστοιχων φορέων είναι μικρότερη. Όταν ένας ημιαγωγός τύπου-p έρθει σε επαφή με έναν ημιαγωγό τύπου-n, δηλαδή σχηματιστεί μια ένωση p-n (διάταξη διόδου ημιαγωγού), τότε ένα μέρος από τις οπές του τεμαχίου τύπου p διαχέεται προς το τεμάχιο τύπου n, όπου οι οπές είναι λιγότερες, ενώ παράλληλα ένα μέρος από τα ελεύθερα ηλεκτρόνια του τεμαχίου τύπου n διαχέεται προς το τεμάχιο τύπου p όπου τα ελεύθερα ηλεκτρόνια είναι πολύ λιγότερα. Η ανάμειξη αυτή των φορέων και η αύξηση της συγκέντρωσης των φορέων μειονότητας στις περιοχές κοντά στη διαχωριστική επιφάνεια (περιοχή αραίωσης) των τεμαχίων τύπου p και n ανατρέπουν την ισορροπία που υπήρχε πριν.

Η αποκατάσταση των συνθηκών ισορροπίας γίνεται με επανασυνδέσεις των φορέων, μέχρι οι συγκεντρώσεις τους να πάρουν τιμές που να ικανοποιούν τον νόμο δράσης των μαζών. Η συγκέντρωση των κατιόντων, στα οποία μετατράπηκαν οι αποδέκτες στο τμήμα τύπου p και n, παραμένουν αμετάβλητες αφού τα ιόντα, όπως συνήθως όλα τα άτομα στα στερεά, μένουν ακίνητα στο σώμα. Έτσι, το υλικό χάνει τοπικά την ηλεκτρική ουδετερότητα και οι δύο πλευρές της ένωσης p-n φορτίζονται με αντίθετα ηλεκτρικά φορτία. Με αυτόν τον τρόπο, δημιουργείται λοιπόν μια διαφορά δυναμικού, που η τιμή της είναι σχετικά μικρή, αλλά το ενσωματωμένο

αυτό ηλεκτροστατικό πεδίο εμποδίζει την περαιτέρω διάχυση των φορέων πλειονότητας προς το απέναντι τμήμα της ένωσης. Το αποτέλεσμα είναι ότι η δίοδος που περιέχει την ένωση p-n, παρουσιάζει εντελώς διαφορετική συμπεριφορά στη ροή του ηλεκτρικού ρεύματος ανάλογα με την φορά του.

4.3 Φωτοβολταϊκό φαινόμενο

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία είναι δίοδοι ημιαγωγού με τη μορφή ενός δίσκου που δέχεται στην επιφάνειά του ηλιακή ακτινοβολία. Κάθε φωτόνιο της ακτινοβολίας, με ενέργεια ίση ή μεγαλύτερη από το ενεργειακό διάκενο του ημιαγωγού, δύναται να απορροφηθεί σε ένα χημικό δεσμό και να ελευθερώσει ένα ηλεκτρόνιο. Καθ' όλη τη διάρκεια της ηλιακής ακτινοβολίας, δημιουργείται μια περίσσεια από ζεύγη φορέων πέρα από τις συγκεντρώσεις που αντιστοιχούν στις συνθήκες ισορροπίας. Οι φορείς αυτοί, καθώς κυκλοφορούν στο στερεό και εφόσον δεν επανασυνδεθούν με φορείς αντίθετου προσήμου, μπορεί να βρεθούν στην περιοχή της ένωσης p-n, οπότε θα δεχθούν την επίδραση του ηλεκτροστατικού της πεδίου. Με τον τρόπο αυτό, τα ελεύθερα ηλεκτρόνια εκτρέπονται προς τη περιοχή τύπου-n και οι οπές εκτρέπονται προς τις αντίστοιχες τύπου-p, με αποτέλεσμα να δημιουργείται μια διαφορά δυναμικού ανάμεσα στους ακροδέκτες των δύο τμημάτων της διόδου. Η εκδήλωση της τάσης αυτής ανάμεσα στις δύο όψεις του ημιαγωγού δίσκου, η οποία αντιστοιχεί σε ορθή πόλωση της διόδου, ονομάζεται **φωτοβολταϊκό φαινόμενο**. Η διάταξη, όπως έχει περιγραφεί, λειτουργεί ως πηγή ρεύματος όσο διαρκεί η πρόσπτωση του ηλιακού φωτός πάνω στην επιφάνεια του στοιχείου.

Όταν ένα Φ/Β στοιχείο δέχεται κατάλληλη ακτινοβολία, διεγείρεται παράγοντας ηλεκτρικό ρεύμα, το φωτορεύμα I_L , που η τιμή του θα είναι ανάλογη προς τα φωτόνια που απορροφά το στοιχείο. Η πυκνότητα του φωτορεύματος δίνεται από τη σχέση:

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

όπου

e : είναι το στοιχειώδες ηλεκτρικό φορτίο,

λ_g : το μέγιστο χρησιμοποιούμενο μήκος κύματος ακτινοβολίας στον ημιαγωγό,

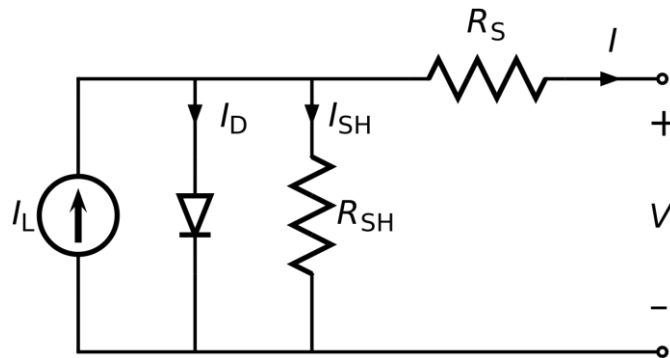
$S(\lambda)$: η φασματική απόκριση που ορίζεται ως το πλήθος των φορέων που συλλέγονται στα ηλεκτρόδια του Φ/Β στοιχείου σε σχέση με τη φωτονική ροή $\Phi(\lambda)$, δηλαδή με το πλήθος των φωτονίων της ακτινοβολίας που δέχεται το στοιχείο ανά μονάδα επιφανείας και χρόνου με ενέργεια που αντιστοιχεί σε μήκος κύματος από λ έως $\lambda + d\lambda$ και

$R(\lambda)$: ο δείκτης ανάκλασης της επιφάνειας του στοιχείου.

4.4 Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των φωτοβολταϊκών στοιχείων

4.4.0 Ισοδύναμο κύκλωμα

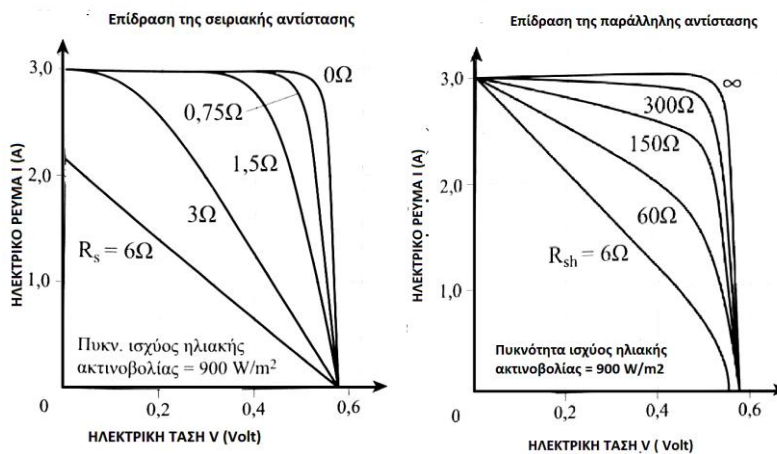
Το ισοδύναμο κύκλωμα για ένα Φ/Β στοιχείο παρουσιάζεται στο Σχ.4.3. Περιλαμβάνει μια πηγή σταθερού ρεύματος I_L , μια ιδανική δίοδο διαρρεόμενη από ρεύμα I_D , μια αντίσταση απωλειών διαρροής του ρεύματος R_{SH} μεταξύ των άκρων του στοιχείου και παράλληλα συνδεδεμένη με τα άκρα της διόδου και μια αντίσταση απωλειών στον δρόμο ροής του ρεύματος της διόδου R_S , συνδεδεμένη σε σειρά με αυτήν.



Σχ. 4.3 Ισοδύναμο κύκλωμα για ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο

Η αντίσταση R_{SH} αφορά διαδρομές του ρεύματος διαρροής στο εσωτερικό της επαφής p-n μεταξύ των σημείων που βρίσκονται σε διαφορά δυναμικού ίση με τη τάση στα άκρα της διόδου, ενώ η αντίσταση R_S αναφέρεται στην αντίσταση που παρουσιάζει η επαφή.

Η επίδραση που έχουν οι αντιστάσεις R_{SH} , R_S φαίνεται στο Σχ. 4.4. Παρατηρούμε ότι όσο αυξάνεται η αντίσταση R_S μειώνεται η μέγιστη ισχύς, γεγονός που οφείλεται στο ότι περιορίζεται η περιοχή τάσεων στην οποία αντιστοιχεί σταθερό ρεύμα βραχυκύκλωσης. Για την αντίσταση R_{SH} και για μικρές τιμές αυτής, μικρότερες από 500Ω , παρατηρείται έντονη ελάττωση του ρεύματος καθώς η τάση πλησιάζει τη τάση ανοιχτού κυκλώματος.



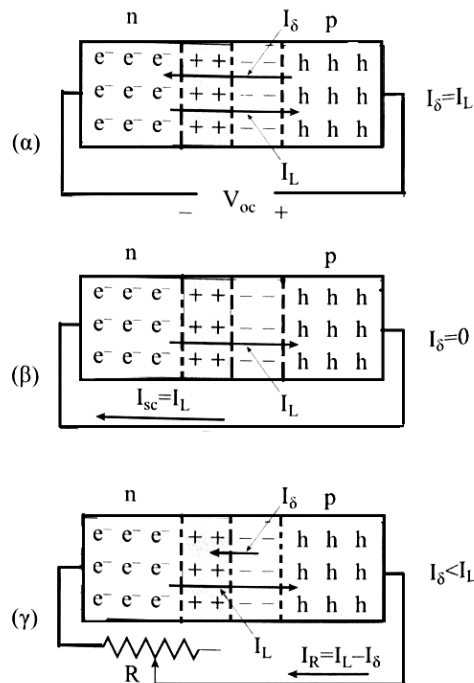
Σχ. 4.4 Επίδραση σειριακής και παράλληλης αντίστασης

4.4.1 Τάση ανοικτού κυκλώματος-ρεύμα βραχυκύκλωσης

Εξετάζοντας τη περίπτωση το Φ/Β στοιχείο να βρίσκεται σε ανοικτό κύκλωμα και κάτω από συνθήκες σταθερής ακτινοβολίας, τα ρεύματα που κυκλοφορούν εντός της επαφής είναι ίσα κατά απόλυτη τιμή και αντίθετης φοράς, δηλαδή $I_{\delta} = -I_L$ (Σχ. 4.5α). Η ισότητα αυτή έχει σαν αποτέλεσμα η τάση στα άκρα της επαφής p-n να προσεγγίζει τη τάση διάχυσης, τη τάση που διακόπτει το φαινόμενο της διάχυσης από το ένα τμήμα της επαφής στο άλλο, ουσιαστικά. Οπότε, τη μέγιστη αυτή τάση που μπορεί να αναπτυχθεί στα άκρα του Φ/Β στοιχείου την ονομάζουμε **τάση ανοικτού κυκλώματος** V_{oc} και για την οποία ισχύει:

$$V_{oc} \leq V_{bi}$$

με V_{bi} να είναι η τάση διάχυσης.



Σχ. 4.5 Επαφή p-n

Στη περίπτωση που τα άκρα της επαφής p-n βραχυκυκλωθούν (περίπτωση κλειστού κυκλώματος), το ρεύμα I_L διέρχεται από τον αγωγό βραχυκύκλωσης (Σχ. 4.5β) και προκύπτει η ισότητα:

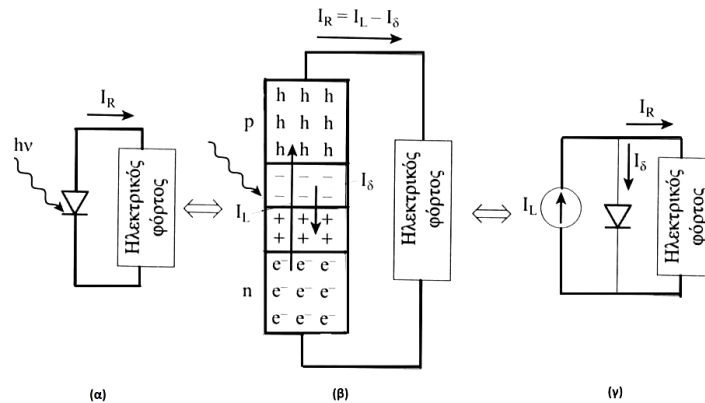
$$I_{sc} = I_L$$

όπου I_{sc} ονομάζουμε το **ρεύμα βραχυκύκλωσης** και αποτελεί ουσιαστικά τη μέγιστη τιμή που μπορεί να λάβει το ρεύμα στο Φ/Β στοιχείο.

Αν τώρα συνδέσουμε στα άκρα της επαφής αντίσταση R , όπως φαίνεται στο Σχ. 4.5γ τότε αυτή θα διαρρέεται από ρεύμα $I_R = I_L - I_{\delta}$. Επομένως, το ρεύμα I_R εξαρτάται από τη τιμή της αντίστασης που συνδέεται στα άκρα της επαφής.

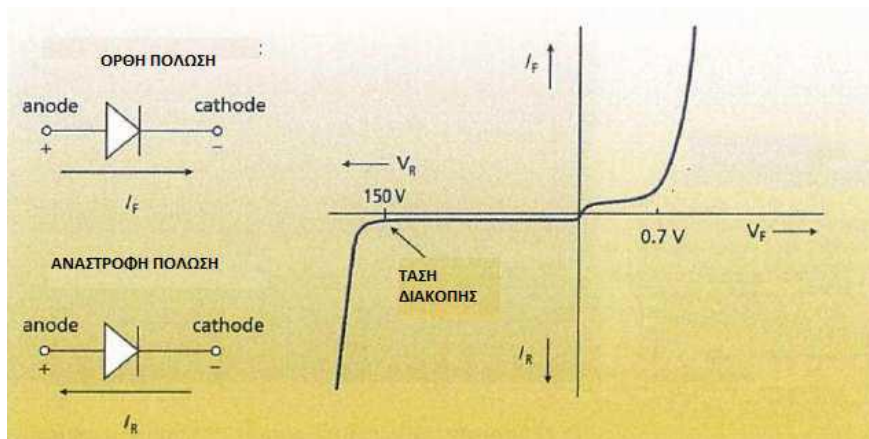
4.4.2 Χαρακτηριστική καμπύλη $I - V$ Φ/Β στοιχείου

Με την πρόσπτωση ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια του Φ/Β στοιχείου, αναπτύσσεται ηλεκτρικό ρεύμα I_L εντός του στοιχείου. Το ρεύμα αυτό παραμένει σταθερό, ενώ αλλάζει η ωμική αντίσταση που συνδέεται στα άκρα του. Έτσι, η λειτουργία ενός Φ/Β στοιχείου είναι ισοδύναμη με εκείνη που θα δημιουργούσε η σύνδεση μιας πηγής σταθερού ρεύματος στα άκρα της διόδου. όπως φαίνεται και στο Σχ. 4.6 . Πιο συγκεκριμένα, θα μπορούσαμε να πούμε ότι η πηγή αυτή προσαρμόζει τη τάση στα άκρα της με σκοπό να διατηρεί το ρεύμα σταθερό.



Σχ. 4.6 (α) Τυπικό ηλεκτρικό κύκλωμα με Φ/Β στοιχείο (β) Παρουσίαση ρευμάτων στο κύκλωμα (γ) ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα

Βασιζόμενοι στη προηγούμενη ανάλυση, το ρεύμα μπορεί να θεωρηθεί ότι προέρχεται από μια ορθή τάση V_F . Οπότε, οι τιμές του I_D ακολουθούν την καμπύλη $I - V$ της διόδου όπως φαίνεται στο Σχ. 4.7



Σχ. 4.7 Χαρακτηριστική καμπύλη $I-V$ επαφής p-n, σε ορθή και αντίστοιχα αναστροφή πόλωση

Για τη κατασκευή της καμπύλης $I - V$ της φωτιζόμενης διόδου, προσθέτουμε την καμπύλη $I - V$ της μη φωτιζόμενης διόδου και την ευθεία $I = -I_L$ του φωτορεύματος. Όμως, το ρεύμα I_R έχει αντίθετη φορά από το επιβαλλόμενο στη δίοδο ρεύμα από μια εξωτερική, ορθά πολωμένη, πηγή. Οπότε, αν σε κάθε τιμή I_D προσθέτουμε το $-I_L$, θα προκύπτει το I_R . Μια μαθηματική περιγραφή των παραπάνω μας δίνει:

$$I = I_s \left[\exp\left(\frac{eV}{\eta_{i\delta} K_B T}\right) - 1 \right] - I_L$$

όπου

I_s : το ρεύμα κόρου,

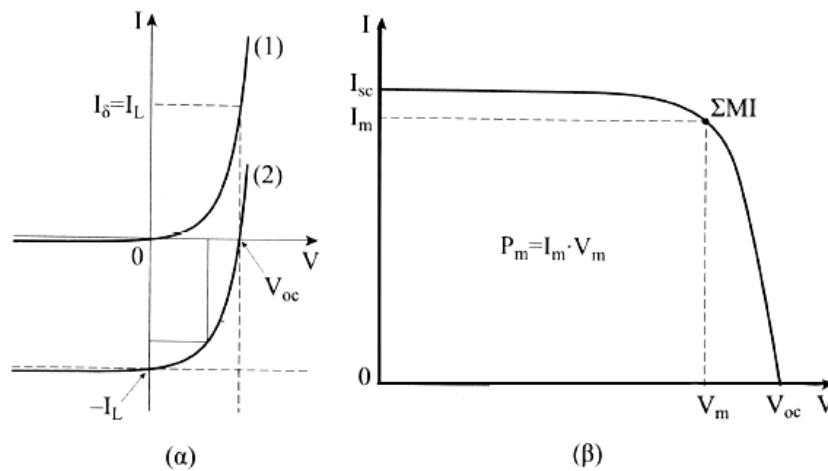
e : το στοιχειώδες φορτίο του ηλεκτρονίου,

V : η επιβαλλόμενη τάση,

$\eta_{i\delta}$: ο παράγων ιδανικότητας της διόδου,

K_B : η σταθερά του Boltzmann και

T : η θερμοκρασία του στοιχείου



Σχ. 4.8 (α) Η χαρακτηριστική I-V καμπύλη Φ/Β στοιχείου (1) στο σκοτάδι και (2) στο φως (β) Το τμήμα της I-V καμπύλης στο τέταρτο τεταρτημόριο

Στο Σχ. 4.8α φαίνεται η καμπύλη $I - V$ του Φ/Β στοιχείου στο σκοτάδι (1) και στο φως (2). Στο Σχ. 4.8β παρουσιάζεται σε μεγέθυνση το τμήμα της καμπύλης $I - V$ που βρίσκεται στο τέταρτο τεταρτημόριο, στο οποίο η επαφή p-n συμπεριφέρεται ως Φ/Β στοιχείο, ενώ παρουσιάζεται στο ίδιο σχήμα και το σημείο μέγιστης ισχύος το οποίο αναλύεται στην επόμενη παράγραφο.

Για λόγους σύγκρισης των χαρακτηριστικών που παρουσιάζουν τα Φ/Β στοιχεία ή πλαίσια, έχουν καθοριστεί κάποιες συνθήκες αναφοράς (**Standard Test Conditions-STC**) κάτω από τις οποίες δίνονται οι χαρακτηριστικές $I - V$ καμπύλες. Συγκεκριμένα, αναφέρονται σε:

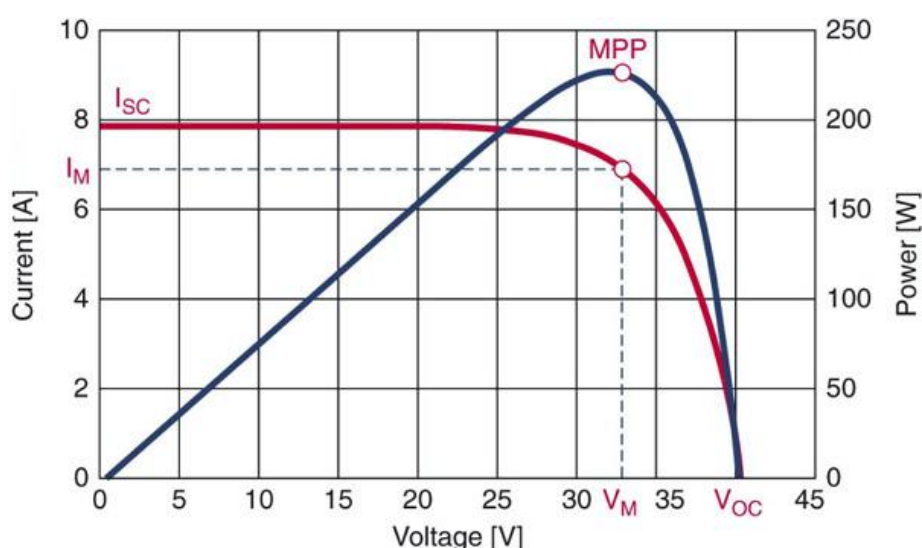
- i. ακτινοβολία ίση με $E = 1000W/m^2$
- ii. θερμοκρασία στοιχείων ίση με $T = 25^\circ C$
- iii. καθορισμένο ηλιακό φάσμα που χαρακτηρίζεται από $AM = 1,5$

4.4.3 Σημείο λειτουργίας μέγιστης ισχύος (Maximum Power Point-MPP)

Η ισχύς που παράγεται για κάθε ζεύγος τιμών τάσης- έντασης δεν είναι πάντα σταθερή. Αντίθετα μηδενίζεται, όπως φαίνεται εύκολα, στις ακραίες συνθήκες ανοικτού κυκλώματος-βραχυκύκλωσης και παρουσιάζει ένα μέγιστο για ένα συγκεκριμένο ζεύγος τιμών τάσης-έντασης. Εύκολα γίνεται αντιληπτή η επιθυμία σε κάθε εγκατάσταση φωτοβολταϊκών, οι συστοιχίες να λειτουργούν, παράγοντας τις τιμές εκείνες που αντιστοιχούν στη μέγιστη ισχύ. Οπότε, αν σχηματίσουμε τη καμπύλη $P - V$ της ισχύος ως συνάρτηση της τάσης όπως φαίνεται στο Σχ. 4.9 παρατηρούμε ότι υπάρχει ένα ζεύγος τιμών I_M , V_M για το οποίο προκύπτει η μέγιστη τιμή της ισχύος:

$$P_M = V_M I_M$$

κοινώς **Σημείο Μέγιστης Ισχύος** ή **Maximum Power Point(MPP)**.



Σχ. 4.9 Καμπύλες I-V και P-V όπου διακρίνεται το MPP

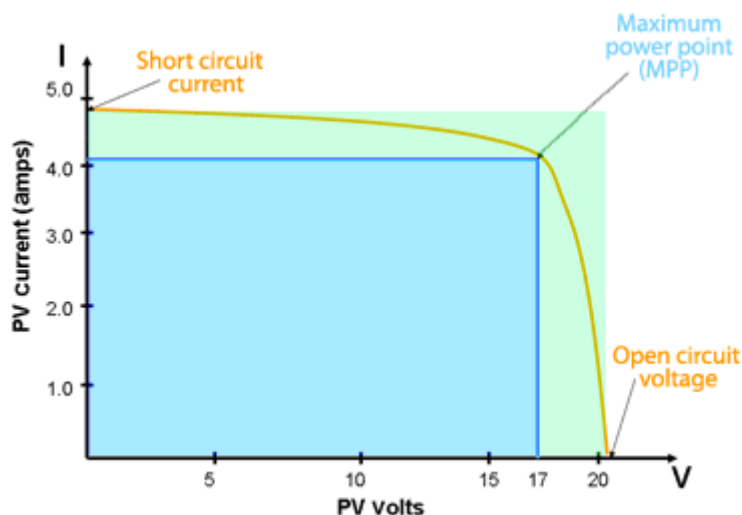
Προφανώς, στις ακραίες συνθήκες όπου η τάση μηδενίζεται και το ρεύμα παίρνει την τιμή βραχυκύκλωσης I_{sc} , αλλά και στη περίπτωση ανοικτού κυκλώματος όπου το ρεύμα μηδενίζεται και η τάση παίρνει τη τιμή ανοικτού κυκλώματος V_{oc} , η παρεχόμενη ισχύς είναι μηδενική. Από το Σχ.4.9 εύκολα γίνεται αντιληπτό ότι η ισχύς μεγιστοποιείται κοντά στο σημείο όπου αρχίζει η έντονη πτώση του ρεύματος.

4.4.4 Παράγων πλήρωσης (Fill Factor-FF)

Ο **παράγων πλήρωσης** ή **Fill Factor (FF)** ορίζεται ως ο λόγος του εμβαδού του μέγιστου ορθογωνίου που μπορεί να εγγραφεί στη χαρακτηριστική καμπύλη $I - V$ του στοιχείου προς το εμβαδόν που ορίζεται από τις τιμές I_{sc} και V_{oc} (Σχ. 4.10). Το μέγιστο δυνατό εμβαδόν επιτυγχάνεται στη λειτουργία μέγιστης ισχύος. Ουσιαστικά, το μέγιστο δυνατό εμβαδόν ορίζεται από τις τιμές I_M , V_M που δίνουν τη μέγιστη ισχύ.

Ισοδύναμα:

$$FF = \frac{I_M V_M}{I_{SC} V_{oc}}$$



Σχ. 4.10 Υπολογίζοντας τον λόγο του εμβαδού που αντιστοιχεί στο MPP προς το εμβαδόν που ορίζεται από τις τιμές I_{SC}, V_{oc} λαμβάνεται ο παράγων πλήρωσης

Οι τιμές του κυμαίνονται μεταξύ 0 και 1 και καθορίζονται από το υλικό κατασκευής του Φ/Β στοιχείου καθώς και από τις συνθήκες. Η τιμή αναφοράς δίνεται σε πρότυπες συνθήκες (Standard Test Conditions-STC) και όσο πλησιάζει τη μονάδα, τόσο η λειτουργία του στοιχείου πλησιάζει την ιδανική συμπεριφορά της πηγής σταθερού ρεύματος στη περιοχή $0 - V_{oc}$. Σε αυτή τη περίπτωση, η διάταξη χαρακτηρίζεται από μικρή R_S και μεγάλη R_{SH} .

4.4.5 Επίδραση θερμοκρασίας στα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του Φ/Β στοιχείου

Η θερμοκρασία του Φ/Β στοιχείου αυξάνεται με τον φωτισμό, λόγω της μετατροπής της ηλιακής ενέργειας σε θερμική. Στη περίπτωση που το Φ/Β στοιχείο είναι ενσωματωμένο στη Φ/Β συστοιχία, η διαφορά $\Delta\theta = \theta_c - \theta_a$, όπου θ_c η θερμοκρασία του στοιχείου και θ_a αντίστοιχα η θερμοκρασία του περιβάλλοντα αέρα, αυξάνει σχεδόν γραμμικά ως συνάρτηση της πυκνότητας της ακτινοβολίας E , με ρυθμό:

$$\frac{\theta_c - \theta_a}{E} \approx 30^\circ\text{C}/\left(\frac{\text{kW}}{\text{m}^2}\right)$$

Οπότε, μεταβάλλεται αντίστοιχα και το ρεύμα βραχυκύκλωσης I_{SC} καθώς επίσης και η τάση ανοικτού κυκλώματος V_{oc} . Παρατηρώντας το Σχ. 4.11, βλέπουμε ότι το

ρεύμα I_{SC} αυξάνεται ελαφρώς με την αύξηση της θερμοκρασίας. Αυτό οφείλεται κυρίως στην αύξηση των φωτοδημιουργούμενων φορέων μειονότητας. Συγκεκριμένα το ρεύμα I_{SC} δίνεται από τη σχέση:

$$I_{SC} = \frac{E}{E_{STC}} I_{SC,STC} [1 + a_{I_{SC}} (\theta_c - \theta_{STC})]$$

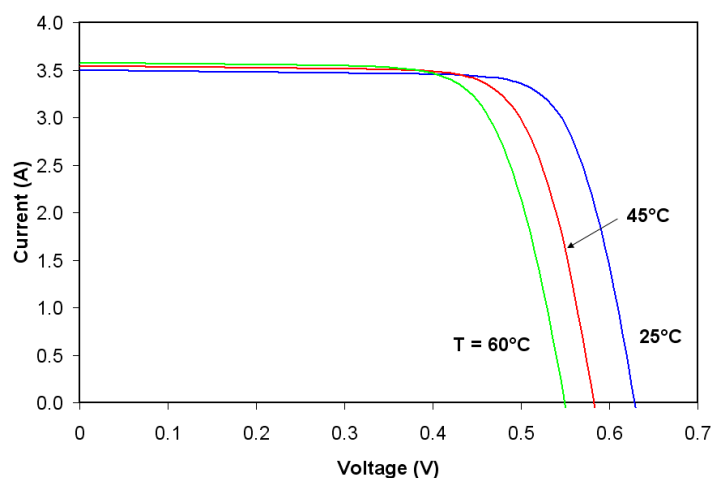
όπου,

$a_{I_{SC}} = \frac{dI_{SC}}{I_{SC}dT}$: ο θερμικός συντελεστής του ρεύματος I_{SC} ,

$I_{SC,STC}$: η τιμή του ρεύματος βραχυκύκλωσης σε συνθήκες STC,

E : η πυκνότητα της ακτινοβολίας και

E_{STC} : η πυκνότητα της ακτινοβολίας σε συνθήκες STC



Σχ. 4.11 Επίδραση της αύξησης της θερμοκρασίας στη τιμή του ρεύματος βραχυκύκλωσης

Αντίθετα, η τάση ανοικτού κυκλώματος V_{oc} μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας και συγκεκριμένα η ποσοστιαία ελάττωση της, ανα βαθμό θερμοκρασίας, είναι σχεδόν μια τάξη μεγέθους μεγαλύτερη από την αύξηση της I_{SC} . Η ελάττωση αυτή οφείλεται στην ισχυρή εξάρτηση του ρεύματος κόρου I_s από τη θερμοκρασία. Συγκεκριμένα, η τάση V_{oc} δίνεται από τη σχέση:

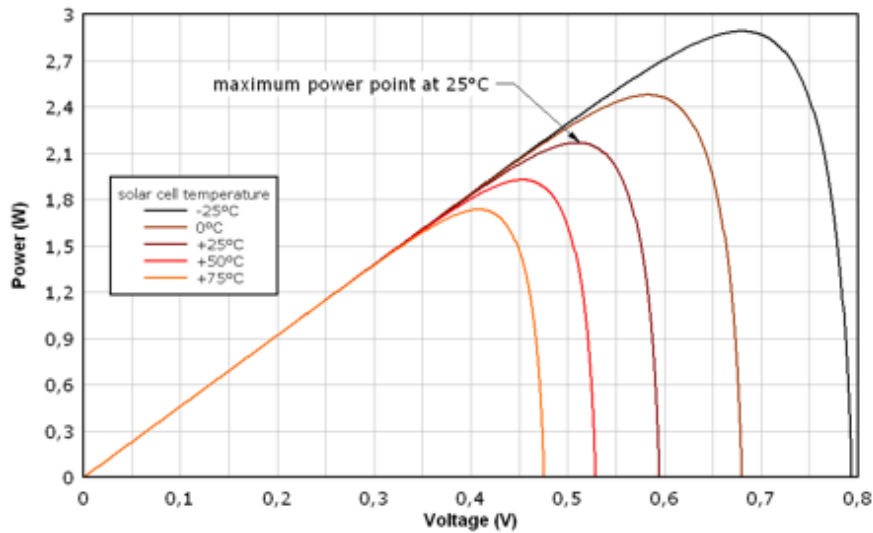
$$V_{oc} = V_{oc,STC} [1 + \beta_{V_{oc}} (\theta_c - \theta_{STC})] \left[1 + \delta(\theta_c) \ln \left(\frac{E}{E_{STC}} \right) \right]$$

όπου,

$V_{oc,STC}$: η τάση ανοικτού κυκλώματος σε συνθήκες STC,

$\delta(\theta_c)$: διορθωτικός παράγοντας της εξάρτησης της V_{oc} από την E και

$\beta_{V_{oc}} = \frac{dV_{oc}}{V_{oc}dT}$: ο θερμικός συντελεστής τάσης του ανοικτού κυκλώματος του Φ/Β στοιχείου.



Σχ. 4.12 Επίδραση της αύξησης της θερμοκρασίας στη παραγόμενη ισχύ του Φ/Β στοιχείου

Παρατηρώντας το Σχ. 4.12 , συμπεραίνουμε ότι η αύξηση της θερμοκρασίας έχει επιπτώσεις και στην ισχύ του Φ/Β στοιχείου.

4.4.6 Απόδοση Φ/Β στοιχείου

Η απόδοση ενός Φ/Β στοιχείου ορίζεται ως το πηλίκο της μέγιστης ισχύος P_M που αποδίδεται από το Φ/Β στοιχείο προς την ισχύ της προσπίπτουσας ακτινοβολίας $P_{input} = E S$ και καθορίζεται από τη σχέση:

$$n_c = \frac{P_M}{P_{input}} = \frac{I_M V_M}{P_{input}} = \frac{FF I_{SC} V_{OC}}{P_{input}}$$

όπου S το εμβαδό της ενεργού επιφάνειας του Φ/Β στοιχείου.

Η απόδοση αυξάνεται με την αύξηση της πυκνότητας ισχύος της ακτινοβολίας, ενώ μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας.

Για τον υπολογισμό της απόδοσης σε διαφορετικές θερμοκρασίες και σε διαφορετικές συνθήκες από τις STC, για κάθετη πρόσπτωση της ηλιακής ακτινοβολίας, χρησιμοποιείται η ακόλουθη σχέση:

$$n_c = [1 + \gamma_{MP}(\theta_c - \theta_{STC})] n_{c,STC}$$

όπου,

$n_T = 1 + \gamma_{mp}(\theta_c - \theta_{STC})$: ο παράγων θερμοκρασίας του Φ/Β στοιχείου,

$\gamma_{mp} = \frac{dP}{P_M dT}$: ο θερμικός συντελεστής μέγιστης ισχύος του Φ/Β στοιχείου και

$n_{c,STC}$: η ονομαστική τιμή απόδοσης στις συνθήκες STC

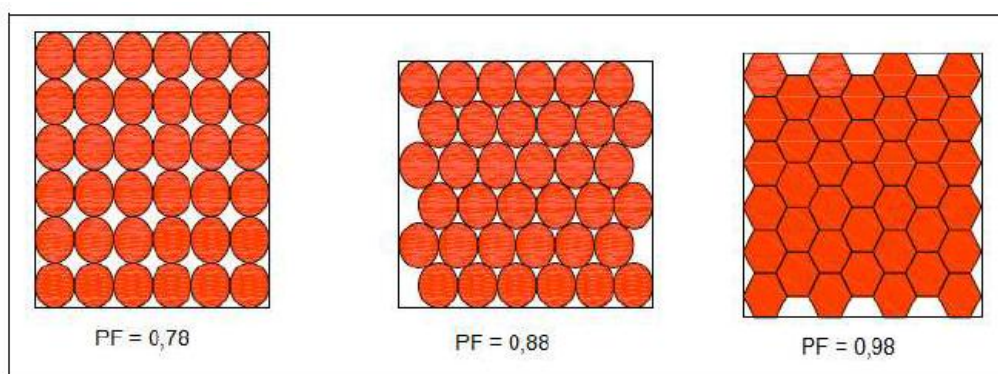
4.5 Απόδοση Φ/B πλαισίου

Ο στιγμιαίος συντελεστής απόδοσης ενός Φ/B πλαισίου, εμβαδού S , ορίζεται ως το πηλίκο της αποδιδόμενης μέγιστης ηλεκτρικής ισχύος P_M προς την προσπίπτουσα στο πλαίσιο ισχύ της ηλιακής ακτινοβολίας $E S$. Ισοδύναμα:

$$n_M = \frac{P_M}{E S}$$

Εξαρτάται από τις φυσικές ιδιότητες των υλικών κατασκευής του, την θερμοκρασία των Φ/B στοιχείων του και την πυκνότητα ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας. Η απόδοση τους είναι μικρότερη της αντίστοιχης του Φ/B στοιχείου εργαστηριακής παραγωγής λόγω:

- i. του ότι η επιφάνεια ενός Φ/B πλαισίου δεν καλύπτεται πλήρως από στοιχεία, όπως φαίνεται και στο Σχ. 4.13. Αυτή η, μη πλήρης, κάλυψη καθορίζεται από τον παράγοντα κάλυψης (Packing Factor-PF) που αποτελεί το πηλίκο της πραγματικής επιφάνειας των Φ/B στοιχείων προς την αντίστοιχη του Φ/B πλαισίου .
- ii. της ανομοιογένειας των Φ/B στοιχείων που συνθέτουν το πλαίσιο και
- iii. της ανακλαστικότητας του υαλοπίνακα του πλαισίου.



Σχ. 4.13 Παραδείγματα διαφορετικής διάταξης Φ/B στοιχείων

Η υψηλή θερμοκρασία των Φ/B στοιχείων του πλαισίου, η εισχώρηση υγρασίας στο εσωτερικό του, με αποτέλεσμα την αλλοίωση της δομής των κυψελίδων και η ρύπανση της επιφάνειας του, αποτελούν τους κυριότερους παράγοντες μείωσης της ενεργειακής απόδοσης ενός Φ/B πλαισίου. Εν συντομία, οι κυριότερες απώλειες που συντελούν στην μείωση του στιγμιαίου συντελεστή απόδοσης n_M του Φ/B πλαισίου είναι:

- i. η γήρανση του Φ/B πλαισίου,
- ii. οι απώλειες οπτικού δρόμου και θερμοκρασίας κυψελίδας και
- iii. οι απώλειες στη δίοδο αντεπιστροφής.

Ο συντελεστής απόδοσης n_M μπορεί να αποδοθεί και ως γινόμενο των επιμέρους στιγμιαίων συντελεστών ενεργειακών απωλειών από την σχέση:

$$n_M = n_{καθ} n_R n_{LI} n_S n_p n_T n_D n_{M,STC}$$

όπου,

$n_{καθ}$: ο συντελεστής καθαρότητας υαλοπίνακα του Φ/Β πλαισίου,

n_R : ο συντελεστής απόκλισης ,λόγω διαφοροποίησης , της ανακλαστικότητας σε γωνίες πρόσπτωσης διάφορες της καθέτου του Φ/Β πλαισίου

n_{LI} : ο συντελεστής απόκλισης στην περιοχή χαμηλών τιμών πυκνότητας ισχύος της ακτινοβολίας

n_S : ο συντελεστής φασματικής απόκλισης, λόγω διαφορετικού φάσματος, σε σχέση με το φάσμα $AM = 1,5$ (STC)

n_p : ο συντελεστής απόκλισης εξαιτίας της πόλωσης της ηλιακής ακτινοβολίας

n_T : ο συντελεστής απόκλισης της απόδοσης του Φ/Β πλαισίου, εξαιτίας της διαφοροποίησης της θερμοκρασίας της κυψέλης, σε σχέση με την θερμοκρασία αναφοράς 25 °C (STC).

n_D : ο συντελεστής απωλειών στη δίοδο αντεπιστροφής

$n_{M,STC}$: ο συντελεστής απόδοσης Φ/Β πλαισίου σε πρότυπες συνθήκες (STC)

Η τελική τιμή του συντελεστή απόδοσης n_M καθορίζεται και από τον παράγοντα γήρανσης του Φ/Β πλαισίου

Κεφάλαιο 5

Αλγόριθμοι Ανίχνευσης Σημείου Μεγίστης Ισχύος (MPPT)

5.0 Εισαγωγή

Οι πρώτες εφαρμογές μεθόδων ανίχνευσης Μεγίστου Σημείου Ισχύος (MPP) αναπτύχθηκαν σε εταιρίες όπως η Honeywell Inc. ή ερευνητικά κέντρα όπως η NASA και χρονολογούνται από τη δεκαετία του 70' με κυριότερες εφαρμογές στην αεροδιαστημική τεχνολογία. Μια πρώτη ομαδοποίηση των μεθόδων θα μπορούσε να γίνει σύμφωνα με τις παραμέτρους τις οποίες χρησιμοποιούν. Έτσι, χωρίζονται στις μεθόδους που χρησιμοποιούν δύο μεταβλητές, τη τάση V_{PV} και το ρεύμα I_{PV} και σε αυτές που χρησιμοποιούν μία.

Στη πρώτη κατηγορία έχουμε τις μεθόδους της διαφοροποίησης (Differentiation Method), της διαταραχής και παρατήρησης (Perturbation and Observation Method, P&O) και της σταδιακής αγωγιμότητας (Incremental Conductance). Η κατηγορία της μίας μεταβλητής περιλαμβάνει τις μεθόδους τάσης ανατροφοδότησης (Feedback Voltage), ανοιχτοκυκλώματος Φ/B γεννήτριας, ανοιχτοκυκλώματος Φ/B κυττάρου και ρεύματος βραχυκύκλωσης.

Εξετάζοντας τις λειτουργίες των μεθόδων ή τον τρόπο με τον οποίο γίνεται ο έλεγχος, μπορούμε να ταξινομήσουμε τις μεθόδους ανίχνευσης σε δύο κύριες κατηγορίες, οι οποίες παρουσιάζονται ως εξής:

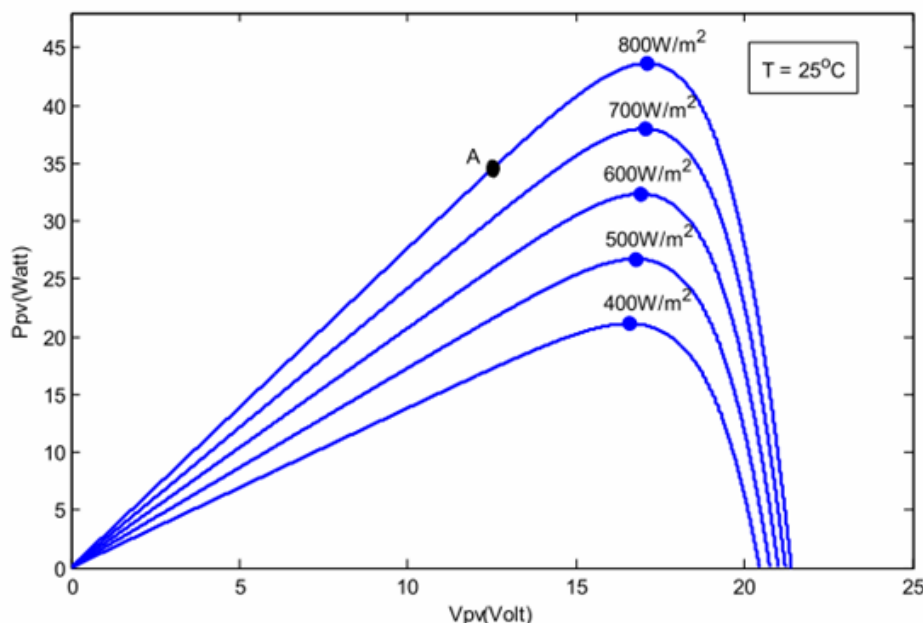
Άμεσες μέθοδοι: Στη κατηγορία αυτή περιλαμβάνονται μέθοδοι που αξιοποιούν τις μετρήσεις της τάσης και του ρεύματος του Φ/B πλαισίου και στη συνέχεια ο έλεγχος γίνεται μέσω παρατήρησης των διακυμάνσεων των σημείων λειτουργίας της γεννήτριας. Τέτοιες μέθοδοι, έχουν βασικό πλεονέκτημα το ότι είναι ανεξάρτητοι της γνώσης της Φ/B γεννήτριας. Συγκεκριμένα, το σημείο λειτουργίας δεν εξαρτάται από χαρακτηριστικά όπως η ηλιακή ακτινοβολία, η θερμοκρασία ή τα επίπεδα υποβάθμισης. Κύριο μειονέκτημα τους, αποτελεί η παρουσία ανεπιθύμητων σφαλμάτων, η οποία επηρεάζει σημαντικά την ακρίβεια της αναζήτησης. Χαρακτηριστικές μέθοδοι που ανήκουν στη κατηγορία αυτή είναι η μέθοδος διαφοροποίησης, τάσης ανάδρασης, C-I, P&O, αυτό-ταλάντωσης όπως επίσης και η μέθοδος ασαφούς λογικής.

Έμμεσες μέθοδοι: Η κατηγορία αυτή περιλαμβάνει μεθόδους των οποίων η λειτουργία βασίζεται στη χρήση βάσεων δεδομένων. Τέτοιες μέθοδοι αξιοποιούν εμπειρικά στοιχεία όπως χαρακτηριστικές καμπύλες $I - V, P - V$ της Φ/B γεννήτριας ή βασίζονται σε μαθηματικές λειτουργίες οι οποίες εξάγονται από εμπειρικά στοιχεία, τα οποία όμως δεν μπορούν να ανταποκριθούν σε όλες τις κλιματολογικές συνθήκες. Οι κυριότερες μέθοδοι αυτής της κλάσης είναι οι εξής: προσαρμογής καμπυλών (Curve Fitting), πίνακα αναζήτησης (look-up table), ανοιχτοκυκλώματος Φ/B γεννήτριας, ανοιχτοκυκλώματος Φ/B κυττάρου καθώς και η μέθοδος ρεύματος βραχυκύκλωσης Φ/B γεννήτριας.

Οι κυριότερες από αυτές αναλύονται στις επόμενες παραγράφους.

5.1 Διατάραξης και Παρατήρησης (Perturb & Observe- P&O)

Πρόκειται για τον αλγόριθμο που χρησιμοποιείται στα περισσότερα φωτοβολταϊκά συστήματα, γεγονός που οφείλεται στην ευκολία εφαρμογής του και στην απλότητα που παρουσιάζει. Για να γίνει εύκολα κατανοητός ο τρόπος λειτουργίας του, θα θεωρήσουμε τη χαρακτηριστική καμπύλη $P - V$ ενός Φ/Β στοιχείου όπως στο Σχ. 5.1



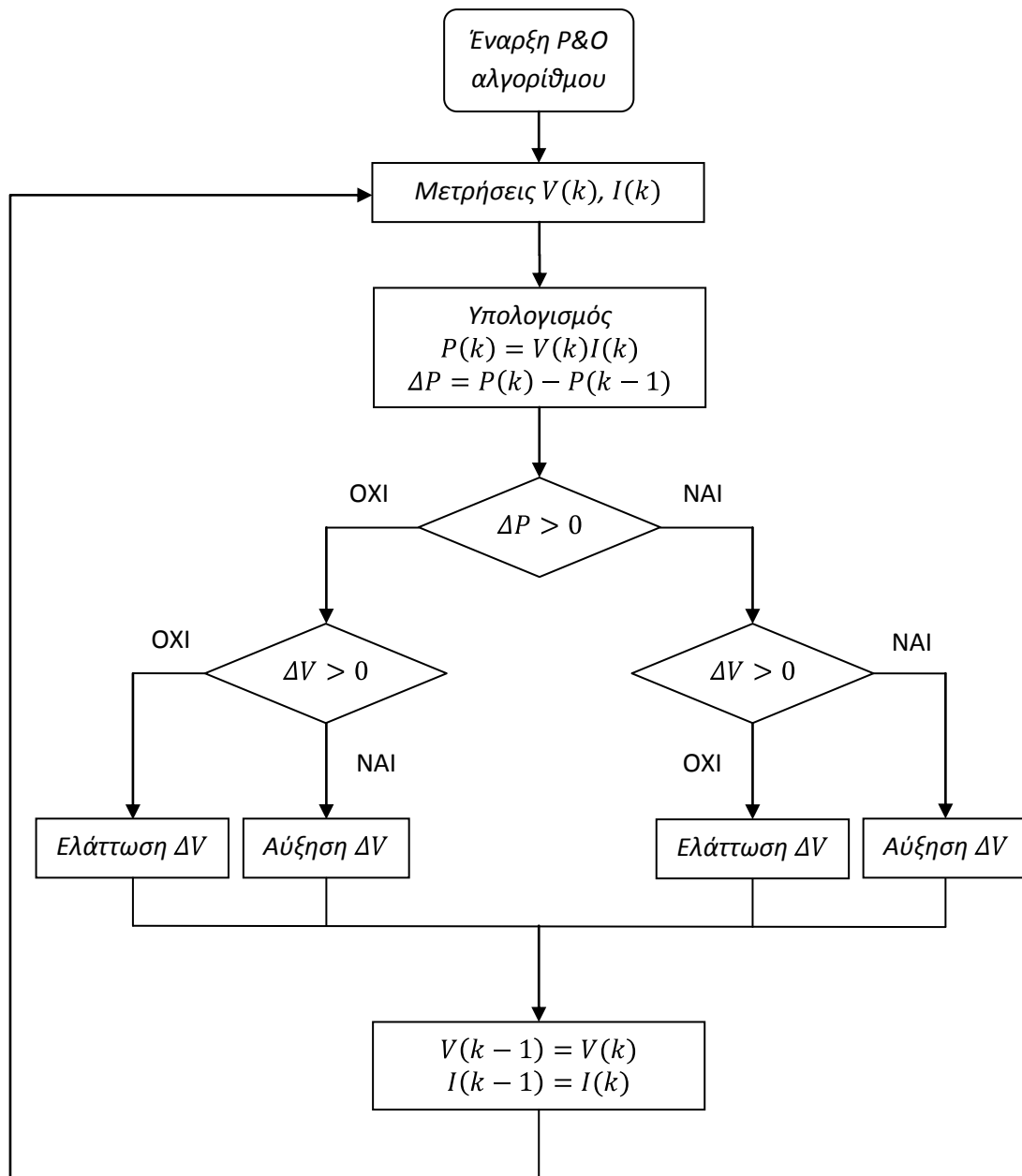
Σχ. 5.1 Χαρακτηριστική καμπύλη $P - V$ Φ/Β συστοιχίας και A τρέχον σημείο λειτουργίας.

Ο κύριος άξονας λειτουργίας του αλγορίθμου διατάραξης και παρατήρησης είναι η μεταβολή της τάσης του φωτοβολταϊκού στοιχείου και ο έλεγχος της μεταβολής της ισχύος ΔP . Συγκεκριμένα, υποθέτουμε πως η Φ/Β συστοιχία λειτουργεί στο σημείο A που βρίσκεται αριστερά του MPP και αντιστοιχεί σε τιμή μικρότερης ισχύος από τη μέγιστη δυνατή. Ο αλγόριθμος θα προκαλέσει μια διαταραχή στη τάση και θα ελέγξει τη μεταβολή ΔP . Εφ' όσον έχουμε υποθέσει ότι το σημείο λειτουργίας είναι αριστερά του MPP, με την αύξηση της τάσης, το σημείο λειτουργίας θα μετατοπιστεί σε περιοχές της καμπύλης που αντιστοιχούν σε μεγαλύτερη ισχύ και προφανώς $\Delta P > 0$. Το επόμενο βήμα του αλγορίθμου είναι η αύξηση της τάσης μέχρι να ισχύει $\Delta P < 0$, όπου το σημείο λειτουργίας θα βρίσκεται σε περιοχές χαμηλότερης ισχύος και δεξιά του MPP. Όταν η μεταβολή της ισχύος γίνει αρνητική, ο αλγόριθμος αλλάζει τη φορά μεταβολής της τάσης και ελέγχει τη μεταβολή ΔP . Η διαδικασία επαναλαμβάνεται αντίστροφα, μέχρι η μεταβολή ΔP να γίνει πάλι θετική και συνεχίζεται ακολουθώντας τα ίδια βήματα.

Παρ' όλη την απλότητα που έχει ο αλγόριθμος αυτός, με μια πιο προσεκτική ανάλυση της διαδικασίας που ακολουθεί, παρατηρούμε ότι είναι εξαιρετικά δύσκολο να εντοπιστεί το ΜΣΙ. Πράγματι, καθώς η διαδικασία των μεταβολών και της παρατήρησης προχωρά, το MPP δεν εντοπίζεται με ακρίβεια, παρά μόνο γίνεται μια

ταλάντωση των σημείων λειτουργίας γύρω από αυτό και οι διαταραχές της τάσης συνεχίζονται σε άπειρο χρόνο με αποτέλεσμα ο αλγόριθμος να μη σταματά ποτέ.

Επιπλέον, αν θεωρήσουμε συνθήκες στις οποίες η ηλιακή ακτινοβολία είναι ιδιαίτερα χαμηλή, η καμπύλη $P - V$ τείνει να γίνει επίπεδη. Σε τέτοιες συνθήκες, η δυσκολία στον εντοπισμό του MPP έγκειται στο ότι η μεταβολή ΔP είναι πολύ μικρότερη των διαταραχών που προκαλεί ο αλγόριθμος λόγω της μικρής κλίσης της καμπύλης. Οπότε, για τον έλεγχο του πρόσημου της ΔP απαιτούνται μεγάλες διαταραχές της τάσης. Αντίστοιχα προβλήματα εντοπισμού του MPP, αντιμετωπίζει ο συγκεκριμένος αλγόριθμος και κατά τις απότομες μεταβολές των καιρικών συνθηκών.



Σχ. 5.2 Λογικό διάγραμμα αλγορίθμου P&O

5.2 Αυξητικής Αγωγιμότητας (Incremental Conductance-INC)

Στον συγκεκριμένο αλγόριθμο, η ισχύς θεωρείται συνάρτηση της τάσης και του ρεύματος. Έτσι, η εύρεση της μέγιστης τιμής της ισχύος ανάγεται σε πρόβλημα μαθηματικής ανάλυσης και το MPP θα αντιστοιχεί στο σημείο όπου η παράγωγος, ως προς μια εκ των δύο μεταβλητών, μηδενίζεται. Ισχύει:

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

Οπότε, η εύρεση του MPP ανάγεται στην επίλυση της εξίσωσης:

$$\frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V} \quad (5.1)$$

όπου ο πρώτος όρος της εξίσωσης εκφράζει την αυξητική αγωγιμότητα της Φ/B συστοιχίας και ο δεύτερος όρος είναι η αρνητική στιγμιαία αγωγιμότητα της Φ/B συστοιχίας.

Από την τελευταία σχέση, προκύπτουν οι δύο ανισωτικές σχέσεις πάνω στις οποίες στηρίζεται η λειτουργία του αλγορίθμου. Συγκεκριμένα, οι σχέσεις που χρησιμοποιούνται είναι οι εξής:

$$\begin{aligned} \frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V} &\Leftrightarrow \frac{dP}{dV} = 0 \\ \frac{dI}{dV} < -\frac{I}{V} &\Leftrightarrow \frac{dP}{dV} < 0 \\ \frac{dI}{dV} > -\frac{I}{V} &\Leftrightarrow \frac{dP}{dV} > 0 \end{aligned}$$

Οι δυο παραπάνω ανισώσεις χρησιμοποιούνται από τον αλγόριθμο στον έλεγχο της τάσης λειτουργίας. Ο αλγόριθμος εξετάζει αν η τάση λειτουργίας είναι μικρότερη ή μεγαλύτερη από την τάση V_{MPP} που αντιστοιχεί στη μέγιστη τιμή της ισχύος και εφαρμόζει τις κατάλληλες μεταβολές, μέχρι να ικανοποιηθεί η πρώτη σχέση (5.1) όπου έχει ανιχνευθεί το MPP. Επιπλέον, ο αλγόριθμος εξετάζει και η μεταβολή της τιμής του ρεύματος.

Σε περίπτωση όπου ισχύει η πρώτη σχέση, το MPP έχει ανιχνευθεί και ο αλγόριθμος διατηρεί τη λειτουργία της Φ/B συστοιχίας στο σημείο MPP, μέχρι να προκληθεί αλλαγή στη τιμή του ρεύματος. Ουσιαστικά, η αλλαγή του ρεύματος συνεπάγεται την αλλαγή της ηλιακής ακτινοβολίας. Με τον τρόπο αυτό, ο αλγόριθμος αντιλαμβάνεται την αλλαγή των καιρικών συνθηκών, ακόμα και όταν αυτές είναι απότομες, γεγονός που τον καθιστά πιο αξιόπιστο από τον αλγόριθμο P&O. Η παρουσία της πρώτης σχέσης δείχνει ξεκάθαρα την υπεροχή του αλγορίθμου έναντι του P&O, καθώς ο πρώτος δεν οδηγεί τη λειτουργία σε ταλάντωση γύρω από το MPP αλλά σε σταθερή λειτουργία στο σημείο μέγιστης ισχύος μέχρι να παρατηρηθεί

αλλαγή των καιρικών συνθηκών, όπου γίνεται ο επανέλεγχος και ο επαναπροσδιορισμός του νέου MPP.

Ο αλγόριθμος Αυξητικής Αγωγιμότητας χρησιμοποιεί δύο τιμές της τάσης και αντίστοιχα δύο τιμές του ρεύματος και εξετάζει τις μεταβολές dI και dV . Πιο αναλυτικά, στη περίπτωση που ισχύει $dV = 0$, οι καιρικές συνθήκες παραμένουν σταθερές και το σύστημα λειτουργεί στο MPP. Αν $dI > 0$, έχει επέλθει αύξηση της ηλιακής ακτινοβολίας και ο αλγόριθμος προχωρά στην αύξηση της τάσης λειτουργίας μέχρι να ανιχνευθεί το νέο MPP. Αντίθετα, στη περίπτωση που ισχύει $dI < 0$, η ηλιακή ακτινοβολία έχει μειωθεί και ο αλγόριθμος μειώνει τη τάση λειτουργίας για να προσδιορίσει το νέο MPP.

Με τη χρήση των ανισώσεων που αποδείχθηκαν παραπάνω, ο αλγόριθμος κατευθύνεται στον προσδιορισμό του σημείου μέγιστης ισχύος αξιοποιώντας τους επόμενους ελέγχους.

Στην περίπτωση που ισχύει:

$$\frac{dI}{dV} > -\frac{I}{V} \Leftrightarrow \frac{dP}{dV} > 0$$

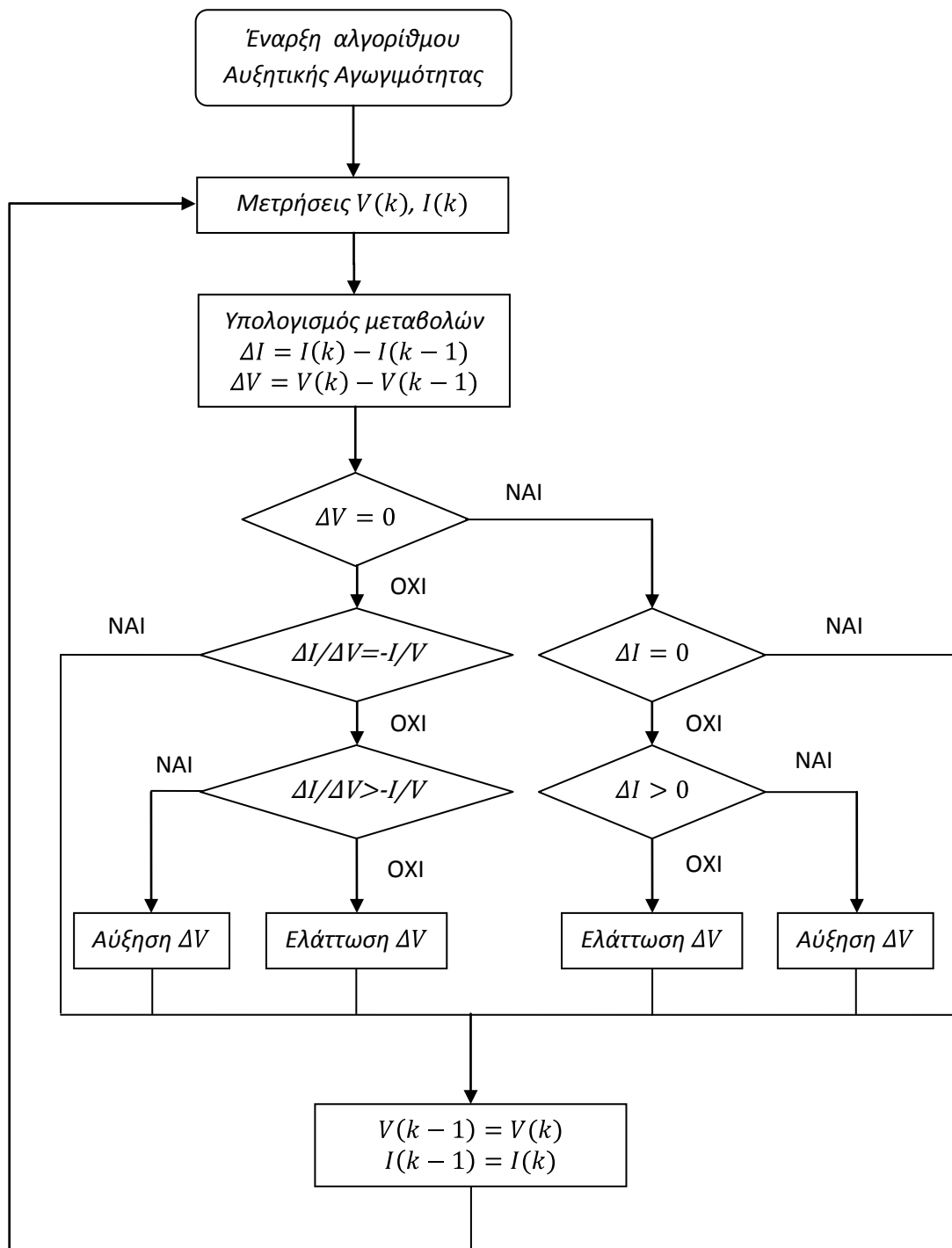
οπότε το σημείο λειτουργίας βρίσκεται αριστερά του MPP στο διάγραμμα $P - V$ και η τάση λειτουργίας αυξάνεται μέχρι να προσδιοριστεί το νέο MPP.

Αντίστοιχα, αν ισχύει:

$$\frac{dI}{dV} < -\frac{I}{V} \Leftrightarrow \frac{dP}{dV} < 0$$

το σημείο λειτουργίας βρίσκεται δεξιά του MPP και ο αλγόριθμος μειώνει τη τάση μέχρι να ικανοποιηθεί η σχέση (5.1).

Ακολουθεί το διάγραμμα ροής του αλγορίθμου Αυξητικής Αγωγιμότητας:



Σχ. 5.3 Λογικό διάγραμμα αλγορίθμου INC

5.3 Παρασιτικής Χωρητικότητας (Parasitic Capacitance)

Ο αλγόριθμος Παρασιτικής Χωρητικότητας παρουσιάζει αρκετές ομοιότητες με αυτόν της Αυξητικής Αγωγιμότητας, με τη διαφορά ότι στον πρώτο εισάγεται η επίδραση της παρασιτικής χωρητικότητας C_P των Φ/Β στοιχείων. Για το ρεύμα της παρασιτικής χωρητικότητας ισχύει:

$$I(t) = C_P \frac{dV}{dt}$$

Επίσης, από την εξίσωση του Shockley προκύπτει:

$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp \frac{q}{A \cdot k \cdot T} (V + I \cdot R) - 1 \right]$$

όπου A είναι ο συντελεστής ιδανικότητας της διόδου, q το φορτίου του ηλεκτρονίου, R η αντίσταση σειράς του ισοδύναμου κυκλώματος του Φ/Β στοιχείου, I_{ph} το παραγόμενο φωτορεύμα, k η σταθερά του Boltzman και I_0 το ρεύμα κορεσμού της διόδου. Προσθέτοντας τις δυο παραπάνω σχέσεις προκύπτει:

$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp \frac{q}{A \cdot k \cdot T} (V + I \cdot R) - 1 \right] + C_P \frac{dV_P}{dt} \Leftrightarrow$$

$$I = f(V_P) + C_P \frac{dV_P}{dt}$$

Παρατηρούμε ότι το ρεύμα αποτελείται από δυο συνιστώσες. Η πρώτη είναι συνάρτηση της τάσης και η δεύτερη είναι συνάρτηση του ρεύματος της παρασιτικής χωρητικότητας.

Πολλαπλασιάζοντας την σχέση με την τάση V_P προκύπτει η ισχύς του Φ/Β στοιχείου:

$$P = V_P \cdot \left(f(V_P) + C_P \frac{dV}{dt} \right) = V_P \cdot f(V_P) + V_P \cdot C_P \frac{dV_P}{dt}$$

Όπως και στη περίπτωση του αλγόριθμου Αυξητικής Αγωγιμότητας, το MPP βρίσκεται στο σημείο όπου μηδενίζεται η παράγωγος της συνάρτησης της ισχύος ως προς τη τάση V_P . Δηλαδή η εύρεση του MPP ανάγεται στην επίλυση της εξίσωσης:

$$\frac{dP}{dV_P} = 0$$

$$\frac{d}{dV_P} [V_P \cdot f(V_P)] + \frac{d}{dV_P} \left[V_P \cdot C_P \cdot \frac{dV_P}{dt} \right] = 0 \Leftrightarrow$$

$$f(V_P) + V_P \frac{df(V_P)}{dV_P} + C_P \cdot \left[\frac{dV_P}{dt} + V_P \cdot \frac{d}{dV_P} \left(\frac{dV_P}{dt} \right) \right] = 0 \Leftrightarrow$$

$$f(V_P) + V_P \frac{df(V_P)}{dV_P} + C_P \cdot \left[\frac{dV_P}{dt} + V_P \cdot \frac{dt}{dV_P \cdot dt} \cdot \left(\frac{d^2V_P}{dt^2} \right) \right] = 0 \Leftrightarrow$$

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

Διαιρώντας τη τελευταία σχέση με V_P προκύπτει:

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

Οι δύο πρώτοι όροι της τελευταίας σχέσης εκφράζουν την αντίθετη στιγμιαία αγωγιμότητα και την αυξητική αγωγιμότητα του Φ/Β στοιχείου αντίστοιχα και ορίζονται ως εξής:

$$g_L = -\frac{f(V_P)}{V_P}$$

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

Ο τρίτος όρος εκφράζει τη κυμάτωση ρεύματος που προκαλεί η παρασιτική χωρητικότητα, ενώ με τη πρώτη και τη δεύτερη παράγωγο της τάσης ως προς τον χρόνο υπεισέρχονται στον αλγόριθμο οι εναλλασσόμενες συνιστώσες της κυμάτωσης ρεύματος. Αξίζει να παρατηρήσουμε ότι στη περίπτωση που απουσιάζει η παρασιτική χωρητικότητα ($C_P = 0$), η σχέση ανάγεται στην εξίσωση 5.1 για τον αλγόριθμο Αυξητικής Αγωγιμότητας.

Συγκρίνοντας τον αλγόριθμο Παρασιτικής Χωρητικότητας με τον αλγόριθμο Αυξητικής Αγωγιμότητας και για εφαρμογή αυτών σε Φ/Β πλαίσια μεγάλης ισχύος, ο αλγόριθμος Παρασιτικής Χωρητικότητας είναι πολύ πιο αποδοτικός. Αυτό οφείλεται στη παράλληλη σύνδεση των Φ/Β στοιχείων, η οποία οδηγεί στην αύξηση της παρασιτικής χωρητικότητας συνολικά. Η αύξηση της παρασιτικής χωρητικότητας αυξάνει την ευαισθησία του αλγορίθμου με αποτέλεσμα να εντοπίζεται το MPP με μεγαλύτερη ακρίβεια.

5.4 Σταθερής Τάσης (Constant Voltage)

Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος βασίζεται στην εμπειρική παρατήρηση των καμπυλών $I - V$ από την οποία προκύπτει ότι το MPP αντιστοιχεί στο 70-80 % της τάσης ανοιχτού κυκλώματος V_{OC} της Φ/Β συστοιχίας. Ποσοτικά, η τεχνική αυτή ανίχνευσης περιγράφεται από τη σχέση:

$$V_{MPP} \cong K \cdot V_{OC} \Leftrightarrow \frac{V_{MPP}}{V_{OC}} \cong K < 1$$

όπου K είναι ο συντελεστής ποσόστωσης και λαμβάνει τιμές μεταξύ 0.7-0.8. Ο συντελεστής ποσόστωσης υπολογίζεται εξ αρχής, στις περισσότερες των περιπτώσεων για μεταβαλλόμενη θερμοκρασία και είναι χαρακτηριστικός για κάθε Φ/Β συστοιχία.

Η διαδικασία που ακολουθεί ο αλγόριθμος σταθερής τάσης είναι εξαιρετικά απλή. Αρχικά προσδιορίζεται ο συντελεστής ποσόστωσης K και στη συνέχεια διακόπτεται η λειτουργία της Φ/Β συστοιχίας για να γίνει η μέτρηση της τάσης V_{OC} . Το MPP προκύπτει από τη σχέση και ο MPPT ρυθμίζει τη τάση της συστοιχίας μέχρι να επιτευχθεί τη υπολογισμένη V_{MPP} . Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται περιοδικά, περίπου ανά 30 sec και η διαδικασία της μέτρησης της V_{OC} διαρκεί μερικά msec.

Αν και αυτή η τεχνική ανίχνευσης του MPP είναι εξαιρετικά απλή, η εξάρτηση του συντελεστή ποσόστωσης K από τις μετεωρολογικές συνθήκες και την ηλιακή ακτινοβολία αποτελεί εμπόδιο στον εύκολο προσδιορισμό του. Επιπλέον, η συνεχής απομονώσεις της συστοιχίας από τον ανιχνευτή MPPT, για τις μετρήσεις της V_{OC} είναι ένα σοβαρό μειονέκτημα γεγονός που θέτει τον αλγόριθμο λιγότερο αποδοτικό συγκριτικά με άλλους.

Ωστόσο, για τη βελτίωση της απόδοσης των ανιχνευτών MPPT που χρησιμοποιούν τον αλγόριθμο Σταθερής Τάσης, εφαρμόζεται η τεχνική του «στοιχείου πιλότου». Με την τεχνική αυτή απομονώνεται ένα προκαθορισμένο στοιχείο της Φ/Β συστοιχίας και οι όποιες μετρήσεις της V_{OC} λαμβάνονται αποκλειστικά από αυτό ενώ η υπόλοιπη συστοιχία λειτουργεί ανεξάρτητα. Με τον τρόπο αυτό, βελτιώνεται αισθητά η απόδοση του συστήματος.

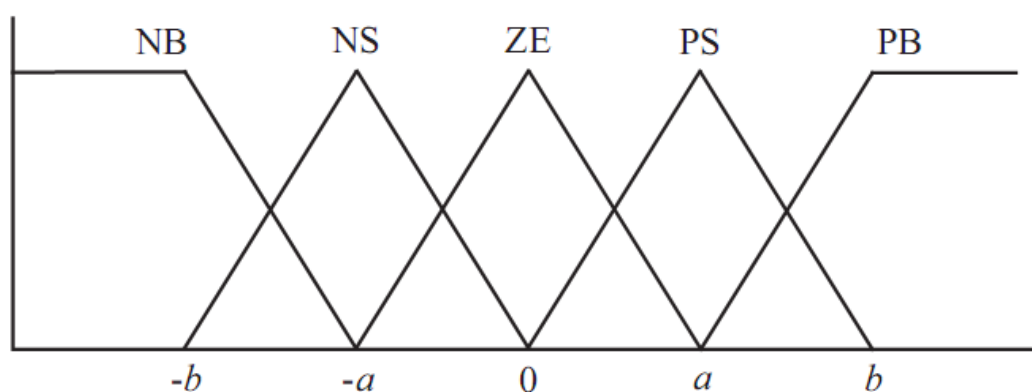
Γενικά, η τεχνική αυτή ανίχνευσης δεν εγγυάται την εύρεση του MPP με απόλυτη ακρίβεια αλλά με μια ικανοποιητική προσέγγιση. Ωστόσο, πρόκειται για μια απλή και οικονομική μέθοδος ανίχνευσης με εφαρμογή κυρίως σε συστοιχίες που λειτουργούν υπό σταθερές καιρικές συνθήκες.

5.5 Έλεγχος Ασαφούς Λογικής (Fuzzy Logic Control-FLC)

Την τελευταία δεκαετία, η ανάπτυξη ανιχνευτών MPPT έχει στραφεί στην χρήση μεθόδων ελέγχου Ασαφούς Λογικής. Τέτοιοι ελεγκτές δεν χρειάζονται ακριβή μαθηματικά μοντέλα, λειτουργούν με ανακριβείς εισόδους και μπορούν να διαχειριστούν αποδοτικότερα μη γραμμικά συστήματα.

Ο έλεγχος ασαφούς λογικής (FLC) αποτελείται από τρία κύρια στάδια: ασαφοποίηση (*fuzzification*), αναζήτηση στον πίνακα κανόνων (*rule base table lookup*) και αποασαφοποίηση (*defuzzification*).

Στο πρώτο στάδιο (*fuzzification*), οι αριθμητικές μεταβλητές εισόδου μετατρέπονται σε γλωσσικές μεταβλητές μέσω μια συνάρτησης μέλους όπως φαίνεται στο Σχ. 5.4



Σχ. 5.4 Συνάρτηση μέλους εισόδου-εξόδου για τον έλεγχο Fuzzy Logic

Στη συνέχεια εφαρμόζονται πέντε επίπεδα ασαφοποίησης: αρνητικό μεγάλο (NB), αρνητικό μικρό (NS), μηδενικό (ZE), θετικό μικρό (PS) και θετικό μεγάλο (PB). Στο Σχ. οι μεταβλητές a και b καθορίζονται από το εύρος των τιμών της αριθμητικής μεταβλητής.

Οι εισοδοί ενός ελεγκτή FLC για την ανίχνευση του MPP είναι συνήθως ένα σφάλμα E και η μεταβολή αυτού ΔE . Επειδή ο όρος dP/dV δεν συνεισφέρει στο MPP χρησιμοποιούνται οι εξής προσεγγίσεις:

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

Αφού γίνει ο υπολογισμός των E , ΔE και ακολουθήσει η μετατροπή αυτών σε γλωσσικές μεταβλητές, η έξοδος του ελεγκτή FLC μπορεί να αναζητηθεί σε έναν πίνακα κανόνων (δεύτερο στάδιο) όπως στο Σχ. 5.5.

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

Σχ. 5.5 Πίνακας κανόνων ελέγχου Fuzzy Logic

Οι γλωσσικές μεταβλητές που καθορίζουν τη διάρκεια αγωγής για τους διάφορους συνδυασμούς των E , ΔE εξαρτώνται από τον μετατροπέα ισχύος αλλά και από την γνώση του σχεδιαστή του συστήματος. Ο πίνακας κανόνων του Σχ. αναφέρεται σε μετατροπέα DC/DC (boost converter). Αν παραδείγματος χάριν το σημείο λειτουργίας βρίσκεται αριστερά του MPP στην καμπύλη $P - V$ ώστε το E παίρνει την γλωσσική τιμή PB και το ΔE τη τιμή ZE, τότε η σχετική διάρκεια αγωγής πρέπει να γίνει PB για να επιτευχθεί το σημείο MPP.

Στο τρίτο και τελευταίο στάδιο, αυτό της αποασαφοποίησης, η έξοδος του ελέγχου μετατρέπεται από γλωσσική μεταβλητή σε αριθμητική, χρησιμοποιώντας τη συνάρτηση μέλους όπως φαίνεται στον πίνακα στο Σχ. 5.5.

Ο έλεγχος FLC λειτουργεί σε ικανοποιητικό βαθμό κάτω από εναλλασσόμενες μετεωρολογικές συνθήκες. Ωστόσο, η αποτελεσματικότητα τους εξαρτάται κατά κύριο λόγο από τη γνώση του σχεδιαστή για την επιλογή της μεταβλητής εισόδου E αλλά και για τη κατασκευή του πίνακα κανόνων.

5.6 Έλεγχος Συσχετισμού Κυμάτωσης (Ripple Correlation Control-RCC)

Όταν μια Φ/Β συστοιχία είναι συνδεδεμένη με έναν μετατροπέα, η διακοπτική λειτουργία του μετατροπέα έχει σαν αποτέλεσμα να εμφανίζεται κυμάτωση της τάσης και του ρεύματος της συστοιχίας. Οπότε, η ισχύς, άμεσα εξαρτώμενη από τις δύο αυτές μεταβλητές, παρουσιάζει επίσης κυμάτωση. Η μέθοδος RCC αξιοποιεί αυτή τη κυμάτωση για τον εντοπισμό του MPP. Η σύγκλιση στο σημείο μέγιστης ισχύος επιτυγχάνεται μέσω του συσχετισμού της παραγώγου, ως προς τον χρόνο, της ισχύος εξόδου \dot{p} με τη παράγωγο, επίσης ως προς τον χρόνο, της τάσης ή του ρεύματος \dot{v} ή \dot{i} για να μηδενιστεί η κλίση της ισχύος.

Εξετάζοντας το Σχ. 5.1, αν η τάση ή το ρεύμα αντίστοιχα αυξάνεται ($\dot{v} > 0$ ή $\dot{i} > 0$) και αυξάνεται επίσης η ισχύς ($\dot{p} > 0$) τότε το τρέχον σημείο λειτουργίας βρίσκεται κάτω του MPP ($V < V_{MPP}$ ή $I < I_{MPP}$). Αντίθετα, αν το ρεύμα ή η τάση αυξάνεται και μειώνεται η ισχύς ($\dot{p} < 0$) το σημείο λειτουργίας βρίσκεται πάνω από το MPP ($V > V_{MPP}$ ή $I > I_{MPP}$). Συνδυάζοντας αυτές τις παρατηρήσεις, οδηγούμαστε στο συμπέρασμα ότι τα $\dot{p} \cdot \dot{v}$ και $\dot{p} \cdot \dot{i}$ έχουν θετικό πρόσημο αριστερά του MPP, αντίστοιχα αρνητικό πρόσημο στα δεξιά του και μηδέν στο σημείο MPP.

Στην περίπτωση του boost converter, αυξάνοντας τη σχετική διάρκεια αγωγής, αυξάνεται το ρεύμα του πηνίου το οποίο είναι ίδιο με αυτό της συστοιχίας ενώ παράλληλα μειώνεται η τάση της συστοιχίας. Επομένως, η είσοδος ελέγχου της σχετικής διάρκειας αγωγής δίνεται από τη σχέση:

$$d(t) = -k_3 \int \dot{p} \cdot \dot{v} dt$$

ή

$$d(t) = k_3 \int \dot{p} \cdot \dot{i} dt$$

όπου k_3 είναι μια θετική σταθερά. Με τον έλεγχο αυτό της σχετικής διάρκειας αγωγής εξασφαλίζεται η σύγκλιση της μεθόδου στο MPP.

Ένας τρόπος εκτίμησης των παραγώγων των σχέσεων είναι η χρήση υψιπερατών φίλτρων με συχνότητα αποκοπής μεγαλύτερη από τη συχνότητα κυμάτωσης. Ένας επίσης εύκολος τρόπος για τον υπολογισμό της παραγώγου του ρεύματος στη σχέση είναι η μέτρηση, αισθητήρες, της τάσης στα άκρα του πηνίου του μετατροπέα η οποία είναι ανάλογη της παραγώγου του ρεύματος. Πειραματικές διαδικασίες έδειξαν ότι η μέθοδος RCC συγκλίνει με μεγάλη ταχύτητα στο σημείο MPP, καθώς επίσης και ότι η μέθοδος ανταποκρίνεται ικανοποιητικά σε μεταβαλλόμενες καιρικές συνθήκες.

Επιπλέον, πρόκειται για μια οικονομική μέθοδο και αρκετά απλή στη εφαρμογή. Ίσως το σημαντικότερο πλεονέκτημα που παρουσιάζει είναι η ανεξαρτησία της από τα χαρακτηριστικά της Φ/Β συστοιχίας που εφαρμόζεται με αποτέλεσμα να μπορεί να εφαρμοστεί σε οποιοδήποτε Φ/Β σύστημα. Ωστόσο, η μέθοδος RCC δεν μπορεί να υπολογίσει το ολικό μέγιστο μέσω της καμπύλης $P - V$ υπό συνθήκες μερικής σκίασης.

Κεφάλαιο 6

Ανάλυση και έλεγχος φωτοβολταϊκού
συστήματος συνδεδεμένο με το ηλεκτρικό
δίκτυο

6.0 Εισαγωγή

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα (PV systems) συνιστούν σημαντικό μέρος των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και κατ' επέκταση διαδραματίζουν κυρίαρχο ρόλο στη διεσπαρμένη παραγωγή χάρη στο μειούμενο κόστος τους, τη φιλική προς το περιβάλλον λειτουργία τους και το χαμηλό κόστος συντήρησής τους. Για το λόγο αυτό, πολλές κυβερνήσεις ανά τον κόσμο επιχορηγούν τις επενδύσεις στη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω Φ/Β συστημάτων και πολλές εταιρίες διαχείρισης ενέργειας κινούνται πλέον στη κατεύθυνση αυτή [1].

Ένα φωτοβολταϊκό σύστημα αποτελείται από έναν DC/DC μετατροπέα ανύψωσης τάσης, στη πλευρά της Φ/Β συστοιχίας και από έναν τριφασικό αντιστροφέα VSC (Voltage Source Converter) στη πλευρά του δικτύου [2]. Η χρήση διατάξεων ηλεκτρονικών ισχύος μεταξύ των παραγωγικών μονάδων και του δικτύου, επιτρέπει την εφαρμογή αποτελεσματικών ελέγχων στη διεσπαρμένη παραγωγή. Ο DC/DC μετατροπέας εξάγει τη μέγιστη δυνατή ισχύ από την Φ/Β συστοιχία μέσω τεχνικών MPPT, ενώ ο VSC μετατροπέας ρυθμίζει κατάλληλα την τάση σύμφωνα με τις απαιτήσεις του τοπικού φορτίου, ενώ παράλληλα διασφαλίζει τη λειτουργία με μοναδιαίο συντελεστή ισχύος.

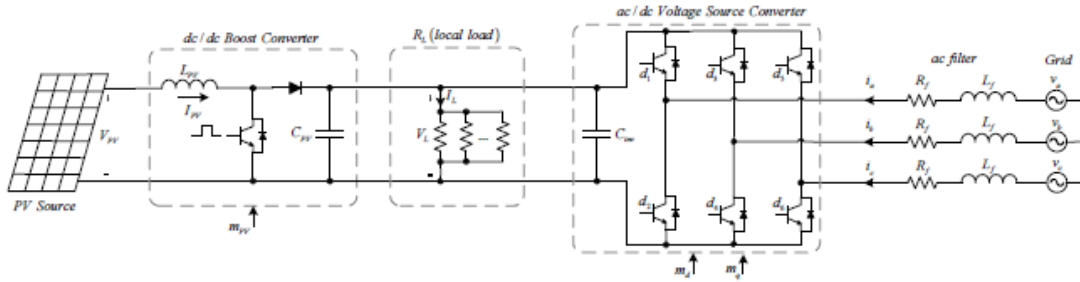
Στις σύγχρονες εφαρμογές των μετατροπέων ισχύος, συνήθως χρησιμοποιούνται γραμμικοί, αναλογικοί-ολοκληρωτικοί (PI) έλεγχοι σε διαδοχική διάταξη (cascade control). Ουσιαστικά, ο cascade έλεγχος περιλαμβάνει έναν εσωτερικό, ταχύτερο, PI CMC (Current Mode Controller) έλεγχο του ρεύματος, με την τιμή αναφοράς (I^{ref}) να παρέχεται από έναν εξωτερικό, πιο αργό, PI έλεγχο. Τα κύρια πλεονεκτήματα των cascade ελεγκτών είναι ότι επιβάλλουν γρήγορη δυναμική απόκριση στο σύστημα και παρέχουν προστασία από υπερρεύματα.

Στην ανάλυση που ακολουθεί, παρατίθεται το μη γραμμικό μοντέλο του Φ/Β συστήματος για το οποίο επιχειρούμε να αποδείξουμε την «από είσοδο σε κατάσταση» ή κοινώς input-to-state (ISS) ευστάθεια. Στη συνέχεια, παρουσιάζεται ο PI έλεγχος και παρατίθεται η ανάλυση της ευστάθειας σε δύο βήματα, όπως έχει προταθεί [3], [4], [5]. Στο πρώτο βήμα, αποδεικνύεται η ιδιότητα της παθητικότητας για το σύστημα, σημαντική και αναγκαία για το δεύτερο βήμα που ουσιαστικά αποδεικνύεται η ευστάθεια του συστήματος. Στη συνέχεια, βασιζόμενοι σε ορισμένες σημαντικές ιδιότητες [6], [7] του συνολικού συστήματος κλειστού βρόχου, αποδεικνύεται επιπλέον η σύγκλιση στο μοναδικό σημείο ισορροπίας.

Τέλος, για την αποδεικτική διαδικασία, θα χρειαστούμε στοιχεία θεωρίας τα οποία αναπτύσσονται προ της απόδειξης της ευστάθειας.

6.1 Μοντέλο Φ/Β συστήματος συνδεδεμένο στο ηλεκτρικό δίκτυο

Το μοντέλο ενός Φ/Β συστήματος συνδεδεμένο σε τοπικό DC φορτίο και στο ηλεκτρικό δίκτυο μέσω μετατροπέων ισχύος παρουσιάζεται στο Σχ. 6.1. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, αποτελείται από μια φωτοβολταϊκή συστοιχία, έναν DC/DC μετατροπέα ανύψωσης τάσης, ένα ωμικό, μεταβλητό DC φορτίο και έναν AC/DC τριφασικό αντιστροφέα VSC.



Σχ. 6.1 : Μοντέλο ενός Φ/Β συστήματος συνδεδεμένο στο δίκτυο

Για το μοντέλο της Φ/Β πηγής βασιζόμαστε στο ακριβές μη γραμμικό μοντέλο όπως αυτό παρουσιάζεται στην αναφορά [8]. Για την δυναμική ανάλυση των μετατροπέων υιοθετείται το μοντέλο μέσης τιμής [9]. Με τη μοντελοποίηση αυτή, ουσιαστικά μετασχηματίζεται ένα πρόβλημα μη γραμμικού ελέγχου διακριτού χρόνου σε ένα ισοδύναμο, επίσης μη γραμμικού, συνεχούς χρόνου. Παράλληλα, χρησιμοποιώντας το περιστρεφόμενο σύστημα αναφοράς $d-q$ και τον μετασχηματισμό Park, όλες οι ημιτονοειδείς ποσότητες μετασχηματίζονται σε συνεχείς (DC).

Οπότε, προκύπτει το μη γραμμικό μοντέλο για το Φ/Β σύστημα:

$$L_{PV}\dot{I}_{PV} = -m_{PV}V_L + V_{PV} \quad (6.1.1)$$

$$L_f\dot{I}_d = -R_f I_d - \omega L_f I_q - m_d V_L + U_d \quad (6.1.2)$$

$$L_f\dot{I}_q = -R_f I_q - \omega L_f I_d - m_q V_L + U_q \quad (6.1.3)$$

$$(C_{PV} + C_{inv})\dot{V}_L = -\frac{V_L}{R_L} + m_{PV}I_{PV} + \frac{3}{2}m_d I_d + \frac{3}{2}m_q I_q \quad (6.1.4)$$

όπου I_{PV} είναι το ρεύμα της Φ/Β πηγής, V_{PV} η τάση εξόδου της Φ/Β πηγής, I_d και I_q είναι οι συνιστώσες στον d - και q - άξονα, σύμφωνα με τον μετασχηματισμό του Park, των ρευμάτων στη πλευρά του δικτύου. Αντίστοιχα, U_d και U_q είναι οι συνιστώσες στον d - και q - άξονα, σύμφωνα με τον μετασχηματισμό του Park [10], των εναλλασσόμενων τάσεων στη πλευρά του δικτύου. Για τον DC/DC μετατροπέα ανύψωσης τάσης, η ελεγχόμενη είσοδος είναι η m_{PV} ενώ για τον VSC μετατροπέα, οι είσοδοι που υπόκεινται σε έλεγχο είναι οι m_d και m_q . Οι μεταβλητές,

V_{PV} , U_d και U_q θεωρούνται ως άγνωστες εισοδοί διαταραχών. Για τις παραμέτρους του συστήματος, L_{PV} η επαγωγή για τον μετατροπέα ανύψωσης τάσης, L_f η επαγωγή της γραμμής μεταφοράς, C_{PV} η χωρητικότητα του πυκνωτή στον DC/DC μετατροπέα και C_{inv} η αντίστοιχη χωρητικότητα του VSC μετατροπέα με $C_{PV} + C_{inv} = C$, R_f η αντίσταση της γραμμής μεταφοράς και $\omega = 2\pi \text{ rad/sec}$ η γωνιακή συχνότητα του ηλεκτρικού δικτύου.

Επιπλέον, η πραγματική και άεργος ισχύς, από την πλευρά του δικτύου είναι αντίστοιχα:

$$P = \frac{3}{2}(U_d I_d + U_q I_q) \quad (6.1.5)$$

$$Q = \frac{3}{2}(U_q I_d - U_d I_q) \quad (6.1.6)$$

Καθορίζοντας τον q -άξονα του περιστρεφόμενου συστήματος αναφοράς $d - q$, να ταυτίζεται με την α -φάση των τάσεων του δικτύου, προκύπτει $U_d = 0$ και $U_q = V_m$, όπου V_m είναι η μέγιστη τιμή των φασικών τάσεων του δικτύου. Έτσι οι σχέσεις (6.1.4) και (6.1.5) απλοποιούνται στις:

$$P = \frac{3}{2} U_q I_q \quad (6.1.7)$$

$$Q = \frac{3}{2} U_q I_d \quad (6.1.8)$$

6.2 Έλεγχος του συστήματος κλειστού βρόχου για το Φ/B σύστημα

Στόχος του σχεδιασμού των ελεγκτών είναι η κατασκευή τοπικών εσωτερικών PI ελεγκτών, με βάση το ρεύμα (current mode), που μπορούν εύκολα να ενσωματωθούν στο συνολικό σύστημα και ταυτόχρονα να «συνεργάζονται» μεταξύ τους, εξασφαλίζοντας παράλληλα την ευστάθεια του συστήματος και τη σύγκλιση στο επιθυμητό σημείο ισορροπίας. Το σύστημα που ορίζεται από τις σχέσεις (6.1.1)-(6.1.4) είναι μη γραμμικό, με ελεγχόμενες εισόδους τα m_{PV} , m_d και m_q

Ο έλεγχος που θα χρησιμοποιηθεί και έχει προταθεί [4], είναι ο ακόλουθος:

$$m_i = \frac{1}{V_L} \left(k_p^i (I_i - I_i^{ref}) + k_i^i \int (I_i - I_i^{ref}) dt \right) \quad (6.2.1)$$

όπου τα κέρδη k_p^i και k_i^i είναι θετικές σταθερές και I_i^{ref} είναι το ρεύμα αναφοράς. Προφανώς ο δείκτης i παίρνει τις τιμές PV , d και q . Οι τιμές αναφοράς I_i^{ref} προσδιορίζονται σύμφωνα με τις απαιτήσεις απόδοσης μέγιστης ισχύος (MPP) για τον m_{PV} βρόχο, τη ρύθμιση της DC τάσης για τον m_q βρόχο και την διόρθωση του

συντελεστή ισχύος για τον m_d βρόχο. Ουσιαστικά, οι τιμές αναφοράς I_i^{ref} παρέχονται από εξωτερικούς, πιο αργούς, ΠΙ ελεγκτές .

Εύκολα παρατηρούμε ότι ο έλεγχος που παρουσιάστηκε στη (6.2.1) είναι ανεξάρτητος των παραμέτρων και μόνο οι καταστάσεις του συστήματος χρειάζονται για την ανατροφοδότηση.

6.3 Καταστατικές εξισώσεις για το σύστημα κλειστού βρόχου

Αντικαθιστώντας τους προηγούμενους μη γραμμικούς ελεγκτές στο αρχικό μοντέλο (6.1.1)-(6.1.4) του συστήματος, προκύπτει

$$L_{PV} \dot{I}_{PV} = -k_P^{PV} I_{PV} + k_I^{PV} z_{PV} + V_{PV} + k_P^{PV} I_{PV}^{ref} \quad (6.3.1)$$

$$L_f \dot{I}_d = -(R_f + k_P^d) I_d + k_I^d z_d + \omega L_f I_q + U_d + k_P^d I_d^{ref} \quad (6.3.2)$$

$$L_f \dot{I}_q = -(R_f + k_P^q) I_q + k_I^q z_q - \omega L_f I_d + U_q + k_P^q I_q^{ref} \quad (6.3.3)$$

$$\dot{z}_{PV} = I_{PV}^{ref} - I_{PV} \quad (6.3.4)$$

$$\dot{z}_d = I_d^{ref} - I_d \quad (6.3.5)$$

$$\dot{z}_q = I_q^{ref} - I_q \quad (6.3.6)$$

$$C \dot{V}_L = -\frac{V_L}{R_L} + m_{PV} I_{PV} + \frac{3}{2} m_d I_d + \frac{3}{2} m_q I_q \quad (6.3.7)$$

όπου z_{PV}, z_d, z_q είναι οι καταστάσεις που εισάγουν οι ολοκληρωτές των ελεγκτών.

Το σημείο ισορροπίας για το σύστημα κλειστού βρόχου βρίσκεται εύκολα επιλύοντας το αλγεβρικό σύστημα που προκύπτει από τις εξισώσεις (6.3.1)-(6.3.7) θέτοντας όλες τις παραγώγους ίσες με μηδέν. Έτσι, μετά από υπολογισμούς προκύπτει το μοναδικό σημείο ισορροπίας το οποίο αποτελεί και το επιθυμητό σημείο λειτουργίας:

$$\mathbf{x}^* = [I_{PV}^{ref} \quad I_d^{ref} \quad I_q^{ref} \quad z_{PV}^* \quad z_d^* \quad z_q^* \quad V_L^*] \quad (6.3.8)$$

6.4 Ανάλυση της ευστάθειας του συστήματος

Στην παράγραφο αυτή θα παραθέσουμε αρχικά την ανάλυση της παθητικότητας του συστήματος και στο δεύτερο σκέλος θα παρουσιάσουμε την απόδειξη της ευστάθειας του συστήματος. Στην κατεύθυνση αυτή, θα βασιστούμε σε μη γραμμικές

μεθόδους. Για τη διαδικασία της απόδειξης θα χρειαστούμε στοιχεία θεωρίας τα οποία αναπτύσσονται στην επόμενη υποπαράγραφο.

6.4.0 Στοιχεία Θεωρίας

Το μοντέλο που χρησιμοποιείται για την περιγραφή φυσικών συστημάτων είναι ένα σύστημα n -διαφορικών εξισώσεων πρώτης τάξης:

$$\dot{x} = f(t, x), \quad f: \mathbb{R}^+ \times \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n \quad (6.4.1)$$

όπου $t \in \mathbb{R}^+$ και $x \in \mathbb{R}^n$ το n -διάστατο διάνυσμα κατάστασης.

Σε συστήματα τα οποία περιγράφονται από τη σχέση (6.4.1), η μελλοντική αλλά και η παρελθοντική πορεία της κατάστασης εξαρτάται τόσο από την αρχική κατάσταση αλλά όσο και από τη χρονική στιγμή της κατάστασης του συστήματος. Συστήματα τέτοιας μορφής καλούνται μη αυτόνομα. Συστήματα τα οποία περιγράφονται από τη σχέση (6.4.1) και η πορεία της κατάστασης εξαρτάται αποκλειστικά από την αρχική κατάσταση χωρίς να επηρεάζεται από τη χρονική στιγμή, καλούνται αυτόνομα.

Με τον όρο «λύση» $x(t, t_0, x_0)$ του προβλήματος αρχικών τιμών:

$$\dot{x} = f(t, x) \quad (6.4.2. \alpha)$$

$$x(t_0) = x_0 \quad (6.4.2. b)$$

στο χρονικό διάστημα $[\alpha, \beta]$, με $t_0 \in [\alpha, \beta]$ εννοούμε μια απεικόνιση:

$$x(t) := x(t, t_0, x_0) = [x_1(t, t_0, x_0), x_2(t, t_0, x_0), \dots, x_n(t, t_0, x_0)]$$

τέτοια ώστε:

- i. οι χρονικές παράγωγοι

$$\dot{x}_i(t, t_0, x_0) := \frac{\partial}{\partial t} x_i(t, t_0, x_0), \quad i = 1, 2, \dots, n$$

να υπάρχουν (σχεδόν) για κάθε $t \in [\alpha, \beta]$.

- ii. η απεικόνιση $x(\cdot)$ να ικανοποιεί την (6.4.2.α). Δηλαδή να ισχύει:

$$\dot{x}(t, t_0, x_0) = f(t, x_1(t, t_0, x_0), x_2(t, t_0, x_0), \dots, x_n(t, t_0, x_0))$$

(σχεδόν) για κάθε $t \in [\alpha, \beta]$.

- iii. η απεικόνιση $x(\cdot)$ να ικανοποιεί την (6.4.2.β). Δηλαδή να ισχύει:

$$x(t_0, t_0, x_0) = x_0$$

Θεώρημα 6.4.1: Έστω $f: \mathbb{R}^+ \times \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$ συνεχής συνάρτηση και έστω ότι ικανοποιεί την συνθήκη:

$$\|f(t, x) - f(t, y)\| \leq L \|x - y\| \quad (6.4.3)$$

$\forall x, y \in B = \{x \in \mathbb{R}^n \mid \|x - x_0\| \leq r\}$ και $\forall t \in [t_0, t_1]$ με L, r θετικούς. Τότε υπάρχει ένα $\delta > 0$ τέτοιο ώστε το πρόβλημα αρχικών τιμών (6.4.2.a)-(6.4.2.b) έχει μοναδική λύση στο διάστημα $[t_0, t_0 + \delta]$.

Μια συνάρτηση f που ικανοποιεί τις υποθέσεις του Θεωρ. 6.4.1 θα λέμε ότι είναι τοπικά Lipschitz στο x_0 , στο χρονικό διάστημα $[t_0, t_1]$ με σταθερά Lipschitz L . Επίσης, θα λέμε ότι η f είναι τοπικά Lipschitz στο x στο $[t_0, t_1] \times D \subset \mathbb{R}^+ \times \mathbb{R}^n$ εάν για κάθε $x \in D$ υπάρχει μια γειτονιά D_0 και μια θετική σταθερά Lipschitz L_0 έτσι ώστε η (6.4.3) να ισχύει $\forall x, y \in D_0$ και $\forall t \in [t_0, t_1]$. Όταν η (6.4.3) ισχύει $\forall x, y \in D$ σε κάθε χρονική στιγμή $t \in [t_0, t_1]$, θα λέμε ότι η f είναι Lipschitz στο $[t_0, t_1] \times D \subset \mathbb{R}^+ \times \mathbb{R}^n$.

Θεώρημα 6.4.2: Έστω $f: \mathbb{R}^+ \times \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$ συνεχής συνάρτηση και έστω ότι ικανοποιεί την συνθήκη:

$$\|f(t, x) - f(t, y)\| \leq L \|x - y\|$$

$\forall x, y \in \mathbb{R}^n$ και $\forall t \in [t_0, t_1]$. Τότε το πρόβλημα αρχικών τιμών (6.4.2.a)-(6.4.2.b) έχει μοναδική λύση ορισμένη στο $[t_0, t_1]$.

Θεώρημα 6.4.3: Έστω $f: \mathbb{R}^+ \times \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$ συνεχής συνάρτηση και έστω ότι η f είναι τοπικά Lipschitz στο $x_0 \in D \subset \mathbb{R}^n$ για κάθε $t \geq t_0$. Έστω $W \subset D$ κλειστό και φραγμένο με $x_0 \in W$ και έστω ότι κάθε λύση του (6.4.2.a)-(6.4.2.b) παραμένει στο W για κάθε $t \geq t_0$. Τότε το (6.4.2.a)-(6.4.2.b) έχει μοναδική λύση ορισμένη για κάθε $t \geq t_0$.

Ορισμός 6.4.4: Ένα σύστημα της μορφής (6.4.1) θα λέγεται **τέλειο** (complete) εάν για κάθε t_0, x_0 η λύση $x(t, t_0, x_0)$ ορίζεται για κάθε $t \in \mathbb{R}^+$.

Το σημαντικότερο ίσως εργαλείο στη μελέτη της ευστάθειας ενός συστήματος είναι η θεωρία Lyapunov, στοιχεία της οποίας παρουσιάζονται παρακάτω.

Θεωρούμε το αυτόνομο σύστημα:

$$\dot{x} = f(x) \quad (6.4.4)$$

και ότι η συνεχής συνάρτηση $f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$ με συνεχείς μερικές παραγώγους.

Ορισμός 6.4.5: Το σημείο x_0 θα λέγεται σημείο ισορροπίας του συστήματος (6.4.4) αν $f(x_0) = 0$.

Χωρίς βλάβη της γενικότητας υποθέτουμε ότι το σημείο ισορροπίας του (6.4.4) ταυτίζεται με το σημείο $0 \in \mathbb{R}^n$.

Ορισμός 6.4.6: Το σημείο ισορροπίας $x_0 = 0$ θα λέγεται:

- i. **ευσταθές(stable)**, αν για κάθε $\varepsilon > 0$, υπάρχει ένα $\delta > 0$ ώστε:

$$\|x_0\| < \delta \Rightarrow \|x(t, x_0)\| < \varepsilon, \forall t \geq 0$$

- ii. **ασυμπτωτικά ευσταθές(asymptotically stable)**, αν είναι ευσταθές και το $\delta > 0$ μπορεί να επιλεγεί έτσι ώστε:

$$\|x_0\| < \delta \Rightarrow \lim_{t \rightarrow +\infty} x(t, x_0) = 0$$

Ακολουθεί το πολύ σημαντικό θεώρημα του Lyapunov περί ευστάθειας ή ασυμπτωτικής ευστάθειας ενός σημείου ισορροπίας. Το συγκεκριμένο θεώρημα στηρίζεται στην ιδέα συνάρτησης Lyapunov και αποτελεί ένα από τα πιο ισχυρά εργαλεία της ανάλυσης μη γραμμικών συστημάτων.

Θεωρούμε ξανά το σύστημα:

$$\dot{x} = f(x), f(0) = 0$$

και έστω μια συνεχώς διαφορίσιμη συνάρτηση $V: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$.

Θεώρημα 6.4.7(Lyapunov): Έστω $x = 0$ το σημείο ισορροπίας του συστήματος (6.4.4) και $D \subseteq \mathbb{R}^n$ μια περιοχή του 0. Εάν υπάρχει μια συνεχώς διαφορίσιμη συνάρτηση $V: D \rightarrow \mathbb{R}$ η οποία είναι θετικά ορισμένη στο D , δηλαδή ισχύει:

$$V(0) = 0, V(x) > 0 \forall x \in D - \{0\}$$

και ισχύει:

$$\dot{V}(x) \leq 0, \forall x \in D$$

τότε:

- i. το $x = 0$ είναι ευσταθές.
ii. εάν επιπλέον ισχύει:

$$\dot{V}(x) < 0, \forall x \in D - \{0\}$$

το $x = 0$ είναι ασυμπτωτικά ευσταθές.

Συνήθως, μια θετικά ορισμένη συνάρτηση $V: D \subseteq \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ που ικανοποιεί τη συνθήκη (i) θα καλείται **ασθενής συνάρτηση Lyapunov** στο D ενώ αν ικανοποιεί επιπλέον την συνθήκη (ii) θα καλείται **αυστηρή συνάρτηση Lyapunov** στο D .

Παρατήρηση: Ας θεωρήσουμε το αυτόνομο σύστημα (6.4.4). Επιπλέον, ας υποθέσουμε ότι η f είναι τοπικά Lipschitz στο \mathbb{R}^n και ότι υπάρχει συνάρτηση $V: D \subseteq \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ που ικανοποιεί τις υποθέσεις του Θεωρ. Lyapunov. Επιλέγουμε $c > 0$ ώστε $\Omega = \{x \in \mathbb{R}^n \mid V(x) \leq c\} \subset D$. Επειδή $\dot{V}(x) \leq 0$, για $x_0 \in \Omega$ ισχύει:

$V(x(t, x_0)) \leq V(x(0, x_0)) = V(x_0) \leq c, \forall t \geq 0$ και κατά συνέπεια, κάθε λύση που ξεκινάει στο Ω , παραμένει στο Ω . Ισοδύναμα, $x_0 \in \Omega \Rightarrow x(t, x_0) \in \Omega, \forall t \geq 0$.

Προφανώς, το σύνολο Ω είναι κλειστό και φραγμένο εξ' ορισμού. Από το θεώρημα (6.4.3), το σύστημα (6.4.4) έχει μοναδική λύση για κάθε $x_0 \in \Omega$ που ορίζεται για κάθε $t \geq 0$. Εάν επιπλέον $D = \mathbb{R}^n$ και για την V ισχύει ότι $V(x) \rightarrow +\infty$ για $\|x\| \rightarrow +\infty$, για κάθε $x_0 \in \mathbb{R}^n$ θα υπάρχει $c > 0$ ώστε $V(x_0) \leq c$. Ορίζοντας το σύνολο Ω όπως προηγουμένως, συμπεραίνουμε ότι το σύστημα (6.4.4) έχει μοναδική λύση για κάθε $x_0 \in \mathbb{R}^n$ που ορίζεται για κάθε $t \geq 0$.

Πίσω στο σύστημα (6.4.4), θα ονομάσουμε C το σύνολο όλων των σημείων του \mathbb{R}^n από τα οποία διέρχεται η λύση $x(t, x_0)$ για κάθε $t \in \mathbb{R}$ και με $C^+ \subset C$ το σύνολο που αντιστοιχεί για $t \geq 0$.

Ορισμός 6.4.8: Ένα σύνολο $\Gamma \subseteq \mathbb{R}^n$ καλείται θετικώς χρονικά αναλλοίωτο ως προς το σύστημα (6.4.4) εάν για κάθε λύση $x(t, x_0)$ του (6.4.4) ισχύει η συνεπαγωγή:

$$x_0 \in \Gamma \Rightarrow x(t, x_0) \in \Gamma, \forall t \geq 0$$

Το σύνολο Γ καλείται χρονικά αναλλοίωτο ως προς το σύστημα (6.4.4) εάν ισχύει η συνεπαγωγή:

$$x_0 \in \Gamma \Rightarrow x(t, x_0) \in \Gamma, \forall t \in \mathbb{R}$$

Ορισμός 6.4.9: Έστω $x(t, x_0)$ μια λύση του συστήματος (6.4.4). Θα λέμε ότι το σημείο $p \in \mathbb{R}^n$ ανήκει στο θετικό οριακό σύνολο (positive limit set) L_x , αν υπάρχει μια ακολουθία $\{t_n\}$ με $t_n \rightarrow +\infty$ για $n \rightarrow +\infty$, τέτοια ώστε $\lim_{n \rightarrow +\infty} x(t_n, x_0) = p$.

Ουσιαστικά, το σύνολο L_x αποτελείται από τα σημεία συσσώρευσης του C^+ .

Λήμμα 6.4.10: Έστω $x(\cdot, x_0): \mathbb{R}^+ \rightarrow \mathbb{R}^n$ μια φραγμένη λύση του συστήματος (6.4.4). Τότε:

- i. το οριακό της σύνολο είναι μη κενό
- ii. το οριακό της σύνολο είναι ένα χρονικά αναλλοίωτο σύνολο ως προς το σύστημα (6.4.4)
- iii. η λύση $x(t, x_0)$ πλησιάζει το οριακό της σύνολο L_x για $t \rightarrow +\infty$ με την έννοια του ότι για κάθε $\varepsilon > 0 \exists T > 0$, τέτοιο ώστε για κάθε $t > T$ να υπάρχει ένα $p \in L_x$ (μπορεί να εξαρτάται από το t) ώστε $\|x(t, x_0) - p\| < \varepsilon$.

Ακολουθεί το θεώρημα (Αρχή Αναλλοίωτου) του La Salle που αποτελεί μια γενίκευση του θεωρήματος Lyapunov για τη περίπτωση της ασυμπτωτικής ευστάθειας.

Θεώρημα 6.4.11(La Salle): Έστω $V: D \subseteq \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ μια συνεχώς διαφορίσιμη συνάρτηση ορισμένη σε ένα σύνολο D και η αρχή (origin) $x_0 \in D$. Έστω $\Omega \subset D$ ένα κλειστό και φραγμένο που περιέχει την αρχή, με:

$$\dot{V}(x) \leq 0, \forall x \in \Omega$$

και

$$x_0 \in \Omega \Rightarrow x(t, x_0) \in \Omega, \forall t \geq 0.$$

ως προς το (6.4.4). Έστω $E = \{x \in \Omega \mid \dot{V}(x) = 0\}$ και $M \subseteq E$ το ευρύτερο χρονικά αναλλοίωτο υποσύνολο του E . Τότε, κάθε λύση του (6.4.4) που ξεκινάει από το Ω πλησιάζει το M καθώς $t \rightarrow +\infty$ (κατά την έννοια που αναφέρεται στο Λήμμα (6.4.10))

Με τον όρο «παθητικότητα» (passivity) εννοούμε την ιδιότητα ενός συστήματος να μην αποθηκεύει περισσότερη ενέργεια από αυτή που του παρέχεται εξωτερικά από τις εισόδους. Η διαφορά των δύο ενεργειών περιγράφει την ενέργεια απωλειών του συστήματος λόγω των όρων απόσβεσης.

Έστω ένα μη γραμμικό σύστημα στη γενική μορφή:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f(x) + B(x)u, \quad x(0) = 0 \\ y &= h(x) \end{aligned} \quad (6.4.5)$$

όπου $x \in R^n$, $u, y \in R^m$, f, h, B ομαλές συναρτήσεις με $f(0) = h(0) = 0$.

Θεώρημα 6.4.12: Θεωρούμε ότι υπάρχει μια συνεχής συνάρτηση $V(t) \geq 0$ τέτοια ώστε:

$$V(t) - V(0) \leq \int_0^t y^T(\tau)u(\tau)d\tau \quad (6.4.6)$$

για όλες τις συναρτήσεις $u(t)$, για κάθε $t \geq 0$ και για κάθε $V(0)$. Τότε το σύστημα με είσοδο $u(t)$ και έξοδο $y(t)$ είναι παθητικό.

Η σχέση (6.4.6) περιγράφει ότι η αποθηκευμένη ενέργεια $V(x(t))$ σε μια μελλοντική χρονική στιγμή t είναι μικρότερη ή ίση από/με το άθροισμα της διαθέσιμης αποθηκευμένης ενέργειας $V(x(0))$ την αρχική χρονική στιγμή $t_0 = 0$ με τη συνολική ενέργεια που παρέχεται στο σύστημα από τις εξωτερικές εισόδους στο χρονικό διάστημα $[0, t]$. Επομένως, υπάρχει μια μη αρνητική συνάρτηση $D(x(t))$ για την οποία θα ισχύει:

$$V(x(t)) - V(x(0)) = - \int_0^t D(x(\tau))d\tau + \int_0^t y^T(\tau)u(\tau)d\tau$$

η οποία, ισοδύναμα, γράφεται υπό μορφή παραγώγων:

$$\dot{V}(x(t)) = -D(x(t)) + y^T(t)u(t) \quad (6.4.7)$$

Ορισμός 6.4.13: (i) Μια συνεχής συνάρτηση $\alpha: \mathbb{R}_{\geq 0} \rightarrow \mathbb{R}_{\geq 0}$ θα λέγεται ότι είναι κλάσης \mathcal{K} ανν ,είναι γνησίως αύξουσα, $\alpha(0) = 0$ και $\lim_{r \rightarrow +\infty} \alpha(r) = +\infty$. Επίσης, θα λέγεται ότι είναι κλάσης \mathcal{K}_{∞} αν $\alpha(r) \rightarrow \infty$ καθώς $r \rightarrow \infty$.

(ii) Μια συνεχής συνάρτηση $\beta: \mathbb{R}_{\geq 0} \rightarrow \mathbb{R}_{\geq 0}$ θα λέγεται ότι είναι κλάσης \mathcal{L} ανν , είναι γνησίως φθίνουσα, $\beta(0) = 0$ και $\lim_{r \rightarrow +\infty} \beta(r) = 0$.

(iii) Μια συνεχής συνάρτηση $\gamma: \mathbb{R}_{\geq 0} \times \mathbb{R}_{\geq 0} \rightarrow \mathbb{R}_{\geq 0}$ θα λέγεται ότι είναι κλάσης \mathcal{KL} ανν για κάθε προκαθορισμένο $s \in \mathbb{R}_{\geq 0}$, η απεικόνιση $r \mapsto \gamma(r, s)$ είναι κλάσης \mathcal{K} και για κάθε προκαθορισμένο $r \in \mathbb{R}_{\geq 0}$, η απεικόνιση $s \mapsto \gamma(r, s)$ είναι κλάσης \mathcal{L} .

Παραθέτουμε δύο ορισμούς και δυο βασικά θεωρήματα για την ευστάθεια από είσοδο σε κατάσταση (input-to-state ή ISS) που θα μας βοηθήσουν στη πορεία της απόδειξης. Με την έννοια της ISS ευστάθειας, ουσιαστικά, επιχειρούμε να συλλάβουμε την έννοια «φραγμένη είσοδος-φραγμένη κατάσταση» (bounded input-bounded state).

Θεωρούμε ένα σύστημα της μορφής:

$$\dot{x} = f(x, u) \quad (6.4.8)$$

με την $f: \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^m \rightarrow \mathbb{R}^n$ να είναι τοπικά Lipschitz και να ικανοποιεί τη συνθήκη $f(0,0) = 0$, $x(t) \in \mathbb{R}^n$, $u(t) \in \mathbb{R}^m$.

Ορισμός 6.4.14: Το σύστημα (6.4.8) θα λέγεται ότι είναι τοπικά ευσταθές από είσοδο σε κατάσταση (locally ISS) αν υπάρχει μια συνάρτηση β κλάσης \mathcal{KL} , μια συνάρτηση γ κλάσης \mathcal{K} και σταθερές $k_1, k_2 \in \mathbb{R}^+$ τέτοια ώστε:

$$\|x(t)\| \leq \beta(\|x_0\|, t) + \gamma(\|u_T(\cdot)\|_{\mathcal{L}_{\infty}}), \quad \forall t \geq 0, \quad 0 \leq T \leq t$$

για όλα τα $x_0 \in \mathbb{R}^n$, $u \in \mathbb{R}^m$ και να ικανοποιούνται τα εξής:

$$\|x_0\| < k_1 \\ \sup \{|u_T(t)|, t > 0\} = \|u_T\|_{\mathcal{L}_{\infty}} < k_2, \quad 0 \leq T \leq t$$

Ορισμός 6.4.15: Μια συνεχώς διαφορίσιμη συνάρτηση $V: D \rightarrow \mathbb{R}$ θα λέγεται ότι είναι τοπική ISS Lyapunov συνάρτηση στο D για το σύστημα (6.4.8) αν υπάρχουν συναρτήσεις $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ και \mathcal{X} κλάσης \mathcal{K} ώστε να ισχύει:

$$\alpha_1(\|x\|) \leq V(x(t)) \leq \alpha_2(\|x\|), \quad \forall x \in D, t \geq 0$$

$$\frac{\partial V(x)}{\partial x} f(x, u) \leq -\alpha_3(\|x\|), \quad u \in D_u : \|x\| \geq \mathcal{X}\|u\|$$

Η V θα λέγεται ολικά ISS Lyapunov συνάρτηση αν $D = \mathbb{R}^n, D_u = \mathbb{R}^m$ και $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3 \in \mathcal{K}_\infty$.

Θεώρημα 6.4.16: Θεωρούμε το σύστημα (6.4.8) και έστω ότι ικανοποιούνται οι συνθήκες όπως αυτές ορίζονται στους Ορ. (6.4.14),(6.4.15) με $D = \mathbb{R}^n, D_u = \mathbb{R}^m$ και $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3 \in \mathcal{K}_\infty$. Τότε το σύστημα (6.4.8) είναι ολικά input-to-state ευσταθές.

6.4.1 Ανάλυση παθητικότητας του συστήματος

Για το σύστημα (6.3.1)-(6.3.7) θεωρούμε την θετικά ορισμένη συνάρτηση αποθήκευσης H :

$$H = \frac{1}{2} \mathbf{x}^T \mathbf{M} \mathbf{x}$$

όπου θεωρούμε ως διάνυσμα κατάστασης το:

$$\mathbf{x} = [I_{PV} \ I_d \ I_q \ z_{PV} \ z_d \ z_q \ V_L]^T$$

και

$$\mathbf{M} = \text{diag} \left\{ 2L_{PV}, 3L_f, 3L_f, k_I^{PV}, \frac{3}{2}k_I^d, \frac{3}{2}k_I^q, C \right\}$$

Υπολογίζοντας τη πρώτη παράγωγο της συνάρτησης αποθήκευσης H , λαμβάνουμε:

$$\dot{H} = \mathbf{x}^T \mathbf{M} \dot{\mathbf{x}} \quad (6.4.9)$$

$$\begin{aligned} \dot{H} = & -k_P^{PV} I_{PV}^2 - \left(3R_f + \frac{3}{2}k_P^d \right) I_d^2 - \left(3R_f + \frac{3}{2}k_P^q \right) I_q^2 - \frac{V_L^2}{R_L} + (2V_{PV} + k_P^{PV} I_{PV}^{ref}) I_{PV} \\ & + \left(3U_d + \frac{3}{2}k_P^d I_d^{ref} \right) I_d + \left(3U_q + \frac{3}{2}k_P^q I_q^{ref} \right) I_q + k_I^{PV} I_{PV}^{ref} z_{PV} + \frac{3}{2}k_I^d I_d^{ref} z_d \\ & + \frac{3}{2}k_I^q I_q^{ref} z_q \end{aligned}$$

η οποία με κατάλληλους χειρισμούς μπορεί να γραφεί στη μορφή:

$$\dot{H} = -\mathbf{x}^T \mathbf{R} \mathbf{x} + \mathbf{y}^T \mathbf{E} \quad (6.4.10)$$

όπου

$$\mathbf{y} = [I_{PV} \ I_d \ I_q \ z_{PV} \ z_d \ z_q]^T$$

$$\begin{aligned} \mathbf{E} = & \left[2V_{PV} + k_P^{PV} I_{PV}^{ref} \quad 3U_d + \frac{3}{2}k_P^d I_d^{ref} \quad 3U_q \right. \\ & \left. + \frac{3}{2}k_P^q I_q^{ref} \quad k_I^{PV} I_{PV}^{ref} \quad \frac{3}{2}k_I^d I_d^{ref} \quad \frac{3}{2}k_I^q I_q^{ref} \right]^T \end{aligned}$$

και

$$\mathbf{R} = \text{diag} \left\{ k_P^{PV}, 3R_f + \frac{3}{2}k_P^d, 3R_f + \frac{3}{2}k_P^q, 0, 0, 0, \frac{1}{R_L} \right\}$$

Λαμβάνοντας υπ' όψιν ότι ο πίνακας \mathbf{R} είναι θετικά ημιορισμένος και άρα $\mathbf{x}^T \mathbf{R} \mathbf{x} \geq 0$, προκύπτει ότι:

$$\dot{H} = -\mathbf{x}^T \mathbf{R} \mathbf{x} + \mathbf{y}^T \mathbf{E} \leq \mathbf{y}^T \mathbf{E} \quad (6.4.11)$$

Προφανώς, από τη σχέση (6.4.11) αποδεικνύεται ότι η υπόθεση της παθητικότητας αληθεύει για το σύστημα (6.3.1)-(6.3.7), η οποία και είναι ιδιαίτερα σημαντική για την απόδειξη της ευστάθειας που ακολουθεί.

6.4.2 Ανάλυση ευστάθειας του συνολικού συστήματος κλειστού βρόχου

Εύκολα παρατηρούμε ότι το σύστημα (6.3.1)-(6.3.7) είναι σε cascade μορφή και περιέχει ένα πλήρως ανεξάρτητο γραμμικό υποσύστημα που δίνεται από τις εξισώσεις (6.3.1)-(6.3.6).

Με βάση αυτή τη παρατήρηση, εξετάζουμε το ανεξάρτητο υποσύστημα:

$$\dot{\mathbf{y}} = \mathbf{A} \mathbf{y} + \mathbf{E} \quad (6.4.12)$$

με το διάνυσμα των εξωτερικών εισόδων:

$$\mathbf{E} = \left[\begin{array}{ccc} \frac{V_{PV} + k_P^{PV} I_{PV}^{ref}}{L_{PV}} & \frac{U_d + k_P^d I_d^{ref}}{L_f} & \frac{U_q + k_P^q I_q^{ref}}{L_f} \\ I_{PV}^{ref} & I_d^{ref} & I_q^{ref} \end{array} \right]^T$$

, \mathbf{A} ο πίνακας του συστήματος ο οποίος δίνεται ως:

$$\mathbf{A} = \left[\begin{array}{cccccc} -\frac{k_P^{PV}}{L_{PV}} & 0 & 0 & \frac{k_I^{PV}}{L_{PV}} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{(R_f + k_P^d)}{L_f} & \omega & 0 & \frac{k_I^d}{L_f} & 0 \\ 0 & -\omega & -\frac{(R_f + k_P^q)}{L_f} & 0 & 0 & \frac{k_I^q}{L_f} \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \end{array} \right]$$

Στη συνέχεια, θεωρούμε τη περίπτωση του συστήματος χωρίς εξωτερική είσοδο (6.4.12) θέτοντας $\mathbf{E} = 0$ και εξετάζουμε το σύστημα:

$$\dot{\mathbf{y}} = \mathbf{A} \mathbf{y} \quad (6.4.13)$$

Θεωρούμε την, τετραγωνικής μορφής, συνάρτηση Lyapunov για το σύστημα (6.4.13):

$$H_1 = \frac{1}{2} \mathbf{y}^T \mathbf{N} \mathbf{y} \quad (6.4.14)$$

όπου $\mathbf{N} = \text{diag}\{L_{PV}, L_f, L_f, k_l^{PV}, k_l^d, k_l^q\}$.

Η πρώτη παράγωγος της H_1 υπολογίζεται ως εξής:

$$\dot{H}_1 = \mathbf{y}^T \mathbf{N} \dot{\mathbf{y}} = \mathbf{y}^T \mathbf{N} (\mathbf{A} \mathbf{y})$$

η οποία μετά από πράξεις υπολογίζεται ως:

$$\dot{H}_1 = -k_p^{PV} I_{PV}^2 - (R_f + k_p^d) I_d^2 - (R_f + k_p^q) I_q^2$$

Παρατηρούμε ότι η παράγωγος της συνάρτησης Lyapunov (6.4.14) είναι αρνητικά ημιορισμένη και λόγω αυτού προκύπτει μόνο η ευστάθεια για το σημείο $\mathbf{y} = 0$. Ωστόσο, με χρήση της Αρχής του Αναλλοίωτου του La Salle, θα δείξουμε ότι προκύπτει και η ασυμπτωτική ευστάθεια του σημείου $\mathbf{y} = 0$. Έστω ότι \mathbb{R} είναι το σύνολο όλων των σημείων για τα οποία ισχύει $\dot{H}_1 = 0$. Από τη σχέση (6.4.13) παρατηρούμε ότι το μεγαλύτερο αναλλοίωτο σύνολο στο \mathbb{R} περιέχει μόνο τη τετριμμένη λύση $\mathbf{y} = 0$. Τότε, σύμφωνα με την Αρχή του Αναλλοίωτου του La Salle (Θεώρημα 6.4.11), το μηδέν είναι και ασυμπτωτικά ευσταθές.

Βασιζόμενοι στο [11], αν το σημείο $\mathbf{y} = 0$ για το σύστημα (6.4.13) είναι ασυμπτωτικά ευσταθές (AS), τότε ο πίνακας \mathbf{A} είναι Hurwitz. Επιπλέον, αν ο \mathbf{A} είναι Hurwitz, για οποιοδήποτε θετικά ορισμένο συμμετρικό πίνακα \mathbf{Q} υπάρχει ένας θετικά ορισμένος συμμετρικός πίνακας \mathbf{P} ο οποίος θα ικανοποιεί την εξίσωση Lyapunov:

$$\mathbf{P} \mathbf{A} + \mathbf{A}^T \mathbf{P} = -\mathbf{Q}$$

Θεωρώντας $\mathbf{Q} = -\mathbf{I}$, και για έναν θετικά ορισμένο πίνακα \mathbf{P} , λαμβάνουμε:

$$\mathbf{P} \mathbf{A} + \mathbf{A}^T \mathbf{P} = -\mathbf{I}$$

Συνεχίζοντας, προσδιορίζεται η συνάρτηση αποθήκευσης για το, χωρίς εξωτερική είσοδο, γραμμικό υποσύστημα (6.4.13):

$$V = \mathbf{y}^T \mathbf{P} \mathbf{y}$$

με πρώτη παράγωγο:

$$\dot{V} = \mathbf{y}^T (\mathbf{P} \mathbf{A} + \mathbf{A}^T \mathbf{P}) \mathbf{y} = -\mathbf{y}^T \mathbf{y} \quad (6.4.15)$$

Στο σημείο αυτό, κατασκευάζεται η σύνθετη συνάρτηση Lyapunov V_{tot} αποτελούμενη από την συνάρτηση αποθήκευσης H που χρησιμοποιήσαμε για την ανάλυση της παθητικότητας του συστήματος και τη συνάρτηση Lyapunov V που χρησιμοποιήσαμε για την ανάλυση της ευστάθειας του γραμμικού υποσυστήματος. Έτσι, χρησιμοποιούμε τη, θετικά ορισμένη, συνάρτηση Lyapunov για το συνολικό, με εξωτερική είσοδο, μη γραμμικό σύστημα:

$$V_{tot} = R_L H + V \quad (6.4.16)$$

με πρώτη παράγωγο:

$$\dot{V}_{tot} = R_L \dot{H} + \dot{V} \quad (6.4.17)$$

Εφαρμόζοντας τις σχέσεις (6.4.11), (6.4.13) και (6.4.15) στην (6.4.17) και με απλούς υπολογισμούς, προκύπτει:

$$\begin{aligned} \dot{V}_{tot} = & -I_{PV}^2 - I_d^2 - I_q^2 - z_{PV}^2 - z_d^2 - z_q^2 - V_L^2 - R_L k_P^{PV} I_{PV}^2 \\ & - R_L \left(3R_f + \frac{3}{2} k_P^d \right) I_d^2 - R_L \left(3R_f + \frac{3}{2} k_P^q \right) I_q^2 \\ & + b_1 I_{PV} + b_2 I_d + b_3 I_q + b_4 z_{PV} + b_5 z_d + b_6 z_q \end{aligned} \quad (6.4.18)$$

όπου θέσαμε τις σταθερές:

$$b_1 = 2c_1 + 2R_L V_{PV} + R_L k_P^{PV} I_{PV}^{ref}$$

$$b_2 = 2c_2 + 3R_L U_d + \frac{3}{2} R_L k_P^d I_d^{ref}$$

$$b_3 = 2c_3 + 3R_L U_q + \frac{3}{2} R_L k_P^q I_q^{ref}$$

$$b_4 = 2c_4 + R_L k_I^{PV} I_{PV}^{ref}$$

$$b_5 = 2c_5 + \frac{3}{2} R_L k_I^d I_d^{ref}$$

$$b_6 = 2c_6 + \frac{3}{2} R_L k_I^q I_q^{ref}$$

όπου $c_i, i = 1, 2, 3, 4, 5, 6$ τα στοιχεία του διανύσματος \mathbf{C} που προκύπτει από το γινόμενο του πίνακα \mathbf{P} με το \mathbf{E} : $\mathbf{C} = \mathbf{PE}$.

Η ισότητα (6.4.19) μπορεί, ισοδύναμα, να γραφεί ως εξής:

$$\begin{aligned} \dot{V}_{tot} = & -\|\mathbf{x}\|_2^2 + \mathbf{b}^T \mathbf{x} - R_L k_P^{PV} I_{PV}^2 - \\ & -R_L \left(3R_f + \frac{3}{2}k_P^d\right) I_d^2 - R_L \left(3R_f + \frac{3}{2}k_P^q\right) I_q^2 \end{aligned} \quad (6.4.19)$$

όπου θέσαμε τα διανύσματα \mathbf{x} και \mathbf{b} ως:

$$\mathbf{x} = [I_{PV} \ I_d \ I_q \ z_{PV} \ z_d \ z_q \ V_L]^T$$

$$\mathbf{b} = [b_1 \ b_2 \ b_3 \ b_4 \ b_5 \ b_6 \ 0]^T.$$

Στο σημείο αυτό θα εφαρμόσουμε την ανισότητα Hölder, από την οποία προκύπτει:

$$\mathbf{b}^T \mathbf{x} \leq \|\mathbf{b}\|_2 \|\mathbf{x}\|_2 = \sqrt{b_1^2 + b_2^2 + b_3^2 + b_4^2 + b_5^2 + b_6^2} \|\mathbf{x}\|_2 = m \|\mathbf{x}\|_2$$

$$\text{όπου θέσαμε ως } m = \sqrt{b_1^2 + b_2^2 + b_3^2 + b_4^2 + b_5^2 + b_6^2}$$

Με τη βοήθεια της ανισότητας Hölder, για την (6.4.20) και κατ' επέκταση για τη παράγωγο \dot{V} θα ισχύει:

$$\begin{aligned} \dot{V}_{tot} \leq & -(1-\theta)\|\mathbf{x}\|_2^2 - \theta\|\mathbf{x}\|_2^2 + m\|\mathbf{x}\|_2 - R_L k_P^{PV} I_{PV}^2 - R_L \left(3R_f + \frac{3}{2}k_P^d\right) I_d^2 - \\ & -R_L \left(3R_f + \frac{3}{2}k_P^q\right) I_q^2 \end{aligned}$$

, με $\theta \in (0,1)$. Τότε:

$$\begin{aligned} \dot{V}_{tot} \leq & -(1-\theta)\|\mathbf{x}\|_2^2 - R_L k_P^{PV} I_{PV}^2 - R_L \left(3R_f + \frac{3}{2}k_P^d\right) I_d^2 - R_L \left(3R_f + \frac{3}{2}k_P^q\right) I_q^2 \\ & , \forall \|\mathbf{x}\|_2 \geq \frac{m}{\theta} \end{aligned}$$

Σύμφωνα με τον Ορισμό (6.4.15) και το Θεώρημα (6.4.16), το σύστημα (6.1.1)-(6.1.4) με τον έλεγχο (6.2.1) είναι ISS και η κατάσταση \mathbf{x} είναι απόλυτα φραγμένη από μια συνάρτηση κλάσης \mathcal{K} .

Στο σημείο αυτό, αφού το σύστημα κλειστού βρόχου ικανοποιεί κάποιες βασικές ιδιότητες, με βάση τις αναφορές [6], [7], υπάρχει πάντα μια συνεχής, διαφορίσιμη και φραγμένη συνάρτηση αποθήκευσης η οποία είναι κατάλληλη για την απόδειξη της σύγκλισης στο μοναδικό σημείο ισορροπίας. Πράγματι, η φραξιμότητα κάθε κατάστασης του συστήματος, η ιδιότητα της παθητικότητας και η μοναδικότητα του σημείου ισορροπίας ικανοποιούν όλες τις απαραίτητες συνθήκες [7]. Τότε υπάρχει πάντα μια διαφορίσιμη φραγμένη συνάρτηση αποθήκευσης $W(x)$ ορισμένη

στο $\Omega = \{x \in \mathbb{R}^7 \mid \|x\|_2 \leq \frac{m}{\theta}\}$ με παράγωγο $\dot{W}(x) \leq 0$. Επιπλέον, εύκολα διαπιστώνεται ότι η $W(x)$ ικανοποιεί όλες τις απαιτήσεις της Αρχής του Αναλλοίωτου του La Salle. Αν M είναι το σύνολο όλων των σημείων που ανήκουν στη τροχιά $\mathbf{x}(t)$ και ικανοποιούν τη συνθήκη $\dot{W}(x) = 0$, τότε, εφόσον το μεγαλύτερο αναλλοίωτο σύνολο στο M είναι το μοναδικό σημείο ισορροπίας \mathbf{x}^* , σύμφωνα με την Αρχή του Αναλλοίωτου του La Salle, κάθε λύση $\mathbf{x}(t)$ συγκλίνει στο μοναδικό σημείο ισορροπίας \mathbf{x}^* καθώς $t \rightarrow \infty$.

Κεφάλαιο 7

Αποτελέσματα προσομοίωσης του Φ/Β
συστήματος συνδεδεμένου με το
ηλεκτρικό δίκτυο σε περιβάλλον
Matlab-Simulink

Εφαρμόζοντας τους ελέγχους όπως αυτοί έχουν προταθεί [5] και έχουν αναφερθεί στο Κεφάλαιο 6 για ένα Φ/Β σύστημα συνδεδεμένο σε ηλεκτρικό φορτίο (Σχ. 6.1), παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του συστήματος σε περιβάλλον Matlab-Simulink. Το μοντέλο, στο οποίο έγινε η προσομοίωση, παρουσιάζεται στο Σχ. 7.1.

Σκοπός των ελέγχων είναι η σταθεροποίηση των καταστάσεων του συστήματος στις επιθυμητές τιμές αναφοράς καθώς μεταβάλλεται η ροή της ηλιακής ακτινοβολίας και το ωμικό φορτίο διατηρώντας παράλληλα την DC τάση ,στα άκρα του φορτίου, σε μια επιθυμητή τιμή.

Για την προσομοίωση χρησιμοποιήσαμε τις ακόλουθες τιμές:

$L_{PV} = 23,2 \text{ mH}$, η επαγωγή για τον μετατροπέα ανύψωσης τάσης,

$L_f = 3 \text{ mH}$, η επαγωγή της γραμμής μεταφοράς,

$C = C_{PV} + C_{inv} = 87 \mu\text{F}$, η συνολική χωρητικότητα,

$R_f = 0.1 \Omega$, η αντίσταση της γραμμής μεταφοράς,

$\omega = 2 \pi \cdot 50 \text{ rad/sec}$, η γωνιακή συχνότητα του ηλεκτρικού δικτύου,

$U_q = 310 \text{ V}$, η τάση στον q –άξονα στη πλευρά του δικτύου και

$U_d = 0 \text{ V}$, η τάση στον d –άξονα στη πλευρά του δικτύου.

ενώ τα κέρδη των ελεγκτών επελήφθησαν ως:

$k_p^1 = 100$, το αναλογικό κέρδος για τον εσωτερικό(ταχύτερο) m_{PV} βρόχο,

$k_I^1 = 1000$, το ολοκληρωτικό κέρδος για τον εσωτερικό(ταχύτερο) m_{PV} βρόχο,

$k_p^2 = 0.03$, το αναλογικό κέρδος για τον εξωτερικό(πιο αργό) m_q βρόχο,

$k_I^2 = 5$, το ολοκληρωτικό κέρδος για τον εξωτερικό(πιο αργό) m_q βρόχο,

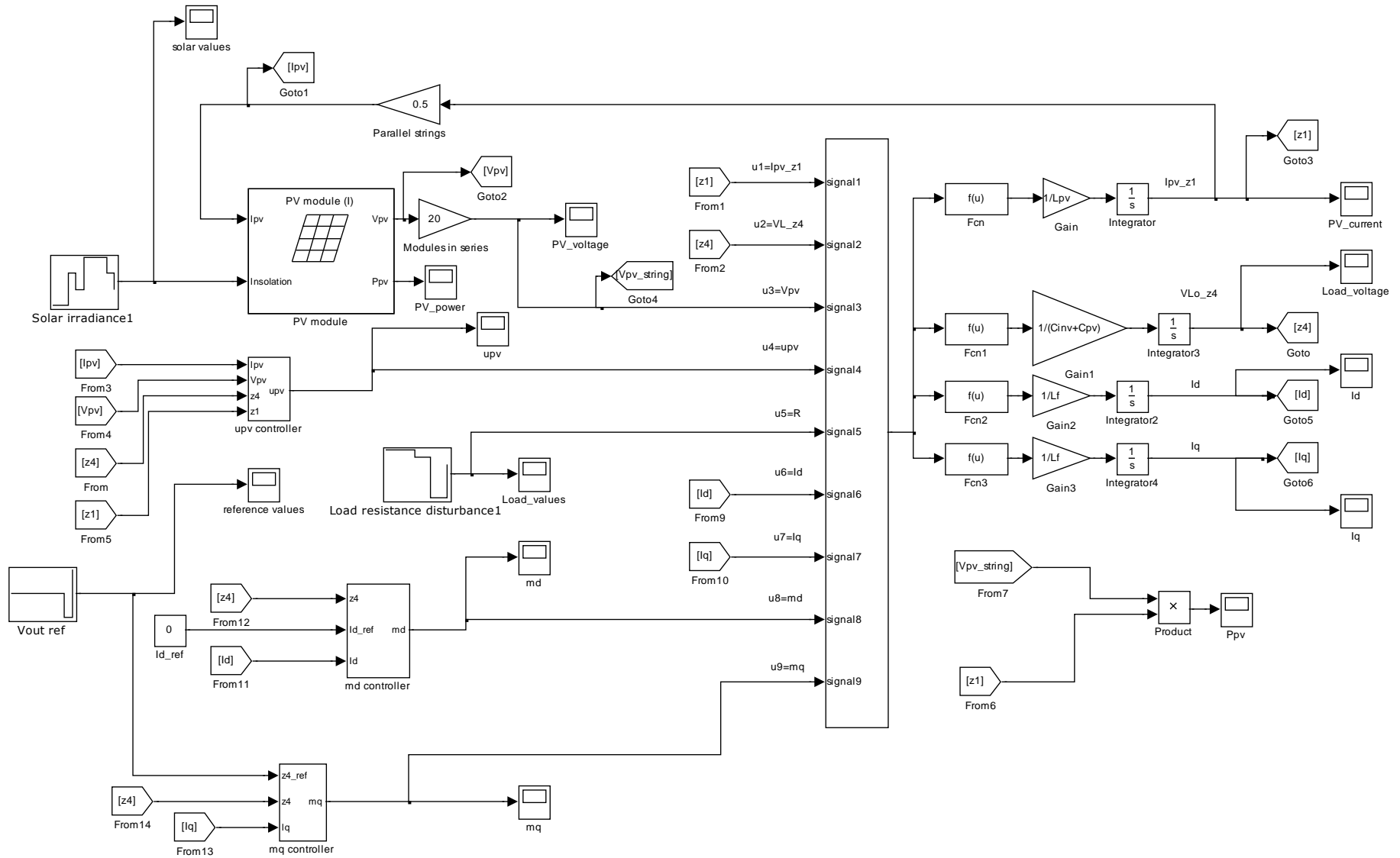
$k_p^d = 30$, το αναλογικό κέρδος για τον m_d βρόχο,

$k_I^d = 1000$, το ολοκληρωτικό κέρδος για τον m_d βρόχο,

$k_p^q = 20$, το αναλογικό κέρδος για τον m_q βρόχο,

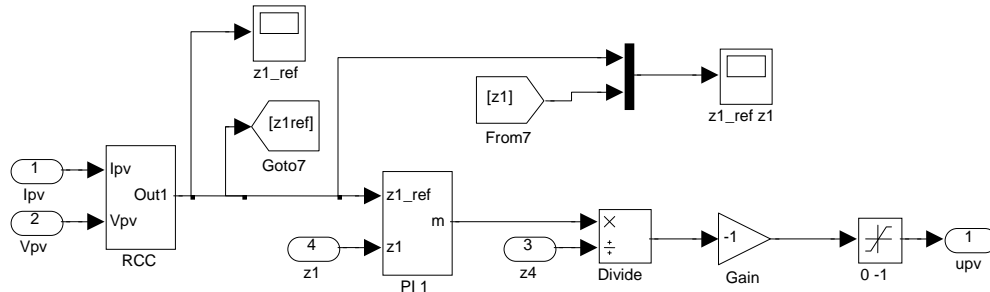
$k_I^q = 1000$, το ολοκληρωτικό κέρδος για τον m_q βρόχο,

Προτού παρουσιαστούν τα αποτελέσματα, παρατίθεται το μοντέλο του συνολικού συστήματος και ακολουθούν πιο αναλυτικά οι εφαρμοζόμενοι ελεγκτές.



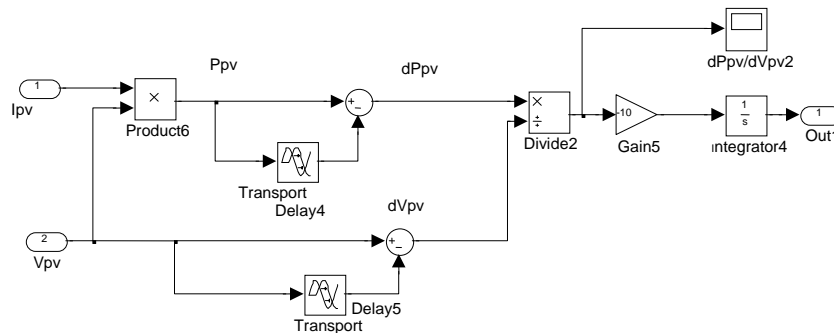
Σχ. 7.1 Μοντέλο Φ/Β συστήματος συνδεδεμένο στο ηλεκτρικό δίκτυο

Στο Σχ. 7.2 παρουσιάζεται ο m_{PV} βρόχος, με τον οποίο ρυθμίζεται το ρεύμα I_{PV} ώστε να προσεγγίζει την τιμή αναφοράς I_{PV}^{ref} , όπως εκείνη προσδιορίζεται από τη ροή της ακτινοβολίας και την ανίχνευση του MPP.



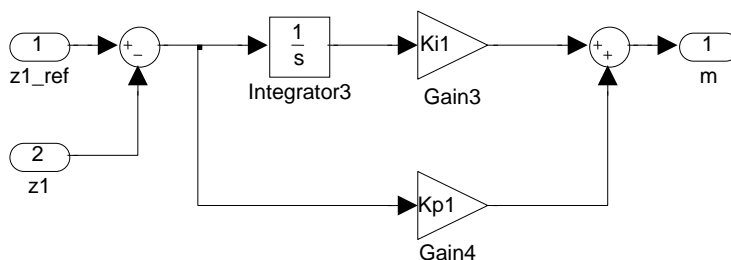
Σχ. 7.2 Ο βρόχος m_{PV}

Στο Σχ. 7.3 παρουσιάζεται ο εξωτερικός (πιο αργός) έλεγχος στον οποίο υπολογίζεται ο λόγος $\frac{dP}{dV}$. Ο έλεγχος ισορροπεί όταν $\frac{dP}{dV} = 0$ όπου και έχει υπολογισθεί το σημείο μέγιστης ισχύος (MPP). Από τον έλεγχο αυτό, παρέχεται η τιμή αναφοράς I_{PV}^{ref} που θα αποτελέσει είσοδο για τον ακόλουθο, εσωτερικό βρόχο.



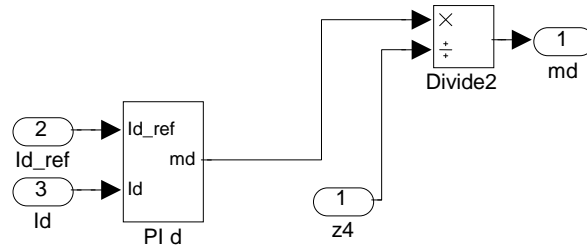
Σχ. 7.3 Ο εξωτερικός βρόχος m_{PV}

Στο Σχ. 7.4 παρουσιάζεται ο εσωτερικός (ταχύτερος του εξωτερικού) έλεγχος, ο οποίος δέχεται σαν είσοδο την τιμή I_{PV}^{ref} του εξωτερικού ελέγχου και έχει σαν έξοδο το m_{PV} .

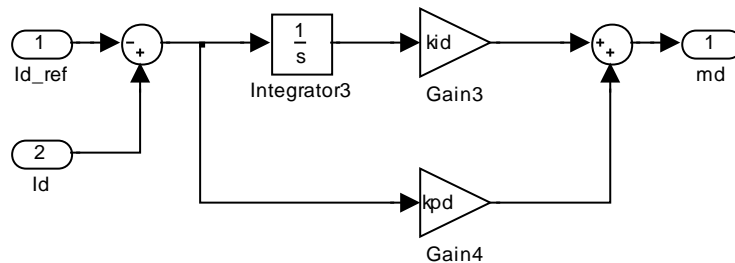


Σχ. 7.3 Ο εσωτερικός βρόχος m_{PV}

Στο Σχ. 7.4 δίνεται ο βρόχος m_d με τον οποίο ρυθμίζεται το ρεύμα I_d να προσεγγίζει τη μηδενική τιμή αναφοράς ώστε να πετύχουμε συντελεστή ισχύος τη μονάδα. Η λειτουργία του φαίνεται χαρακτηριστικά στο Σχ. 7.5.

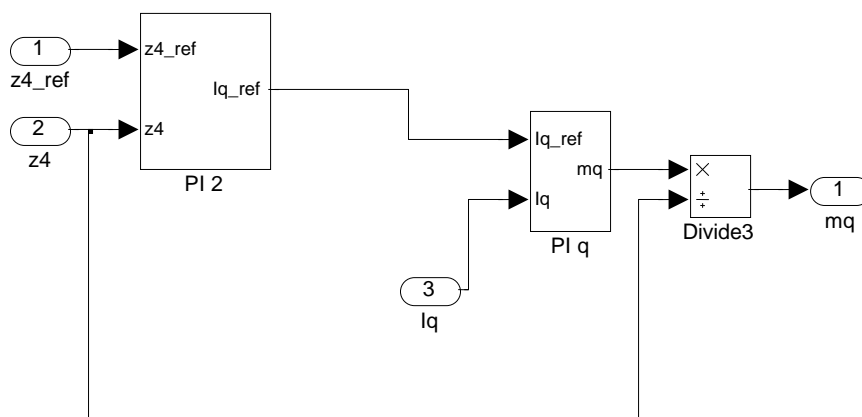


Σχ. 7.4 Ο βρόχος m_d



Σχ. 7.5 Ο βρόχος m_d

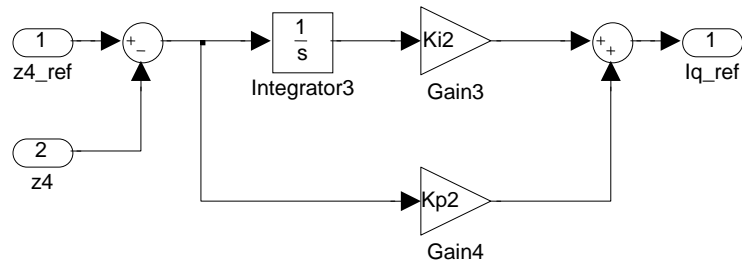
Στο Σχ. 7.6 παρουσιάζεται ο βρόχος m_q , ο οποίος ρυθμίζει το ρεύμα I_q στην τιμή I_q^{ref} , όπως αυτή καθορίζεται από τη ροή της ακτινοβολίας και τις απαιτήσεις του τοπικού φορτίου.



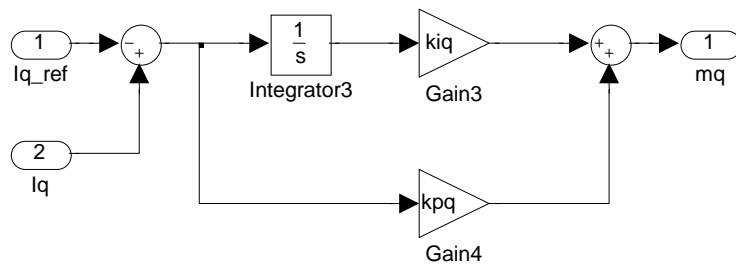
Σχ. 7.6 Ο βρόχος m_q

Στο Σχ. 7.7 δίνεται ο εξωτερικός PI έλεγχος, ο οποίος δίνει το κατάλληλο I_q^{ref} έτσι ώστε η τάση V_L να ισορροπεί στη κατάλληλη τιμή. Η τιμή αυτή αναφοράς I_q^{ref}

λαμβάνεται σαν είσοδο για τον εσωτερικό έλεγχο ο οποίος έχει σαν έξοδο το m_q και παρουσιάζεται στο Σχ. 7.8.



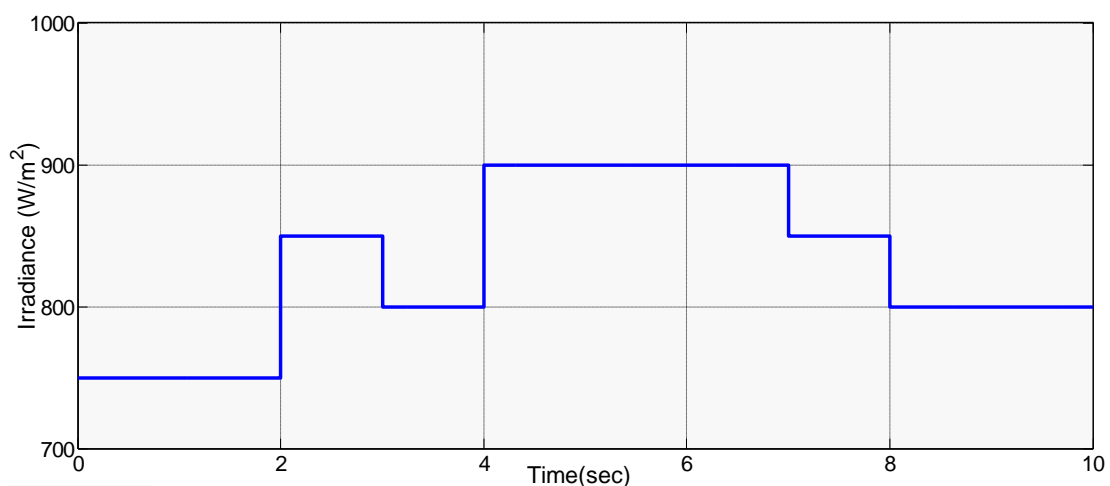
Σχ. 7.7 Ο εσωτερικός βρόχος m_q



Σχ. 7.8 Ο εξωτερικός βρόχος m_q

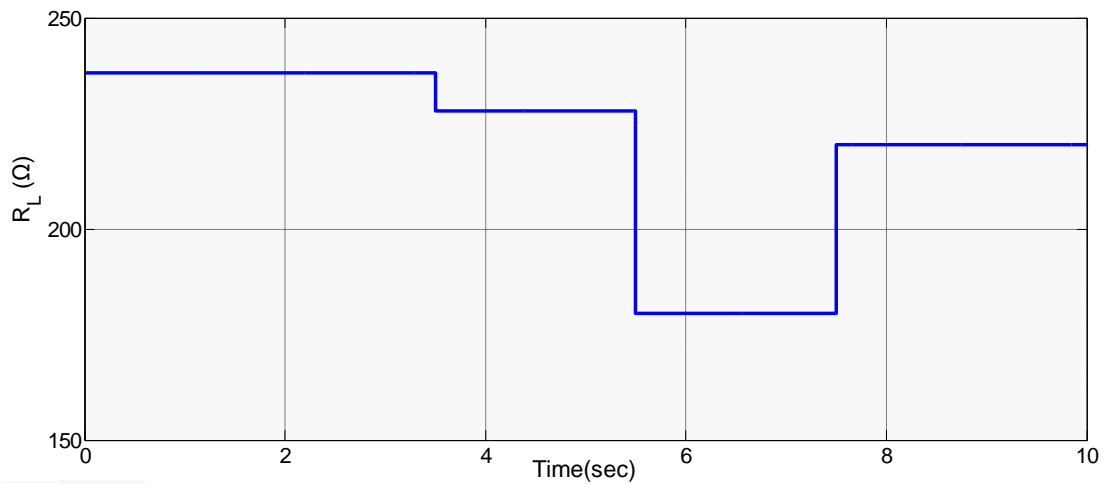
Από τη προσομοίωση του συστήματος ελήφθησαν τα διαγράμματα που παρουσιάζονται παρακάτω, από τα οποία συμπεραίνουμε ότι και οι τρεις PI-CMC έλεγχοι ανταποκρίνονται πλήρως στους σκοπούς τους.

Συγκεκριμένα, στο Σχ. 7.9 δίνονται οι βηματικές μεταβολές τις προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας στις διάφορες χρονικές στιγμές.



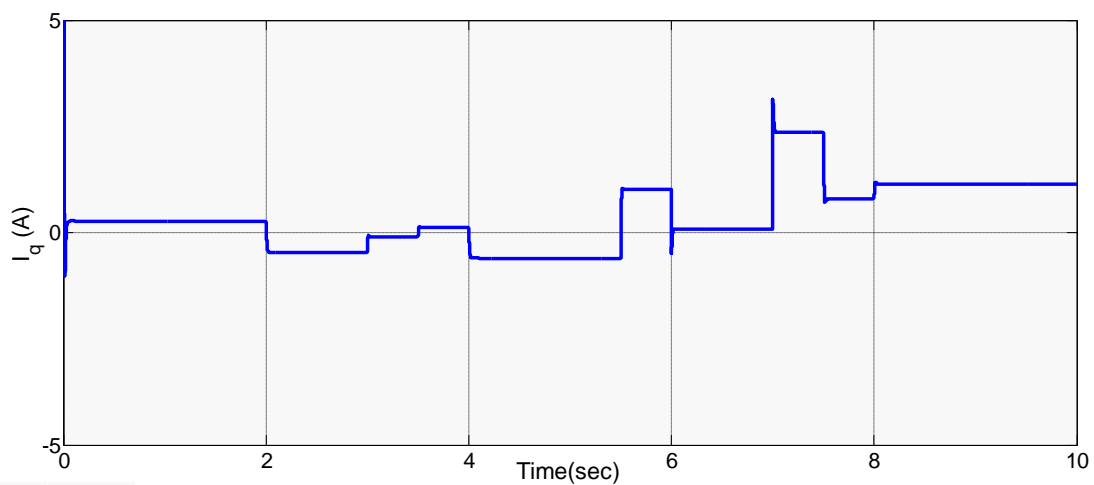
Σχ. 7.9 Μεταβολές της προσπίπτουσας ακτινοβολίας

Στο Σχ. 7.10 δίνονται αντίστοιχα οι διακυμάνσεις του ωμικού φορτίου για τα διάφορα χρονικά διαστήματα.



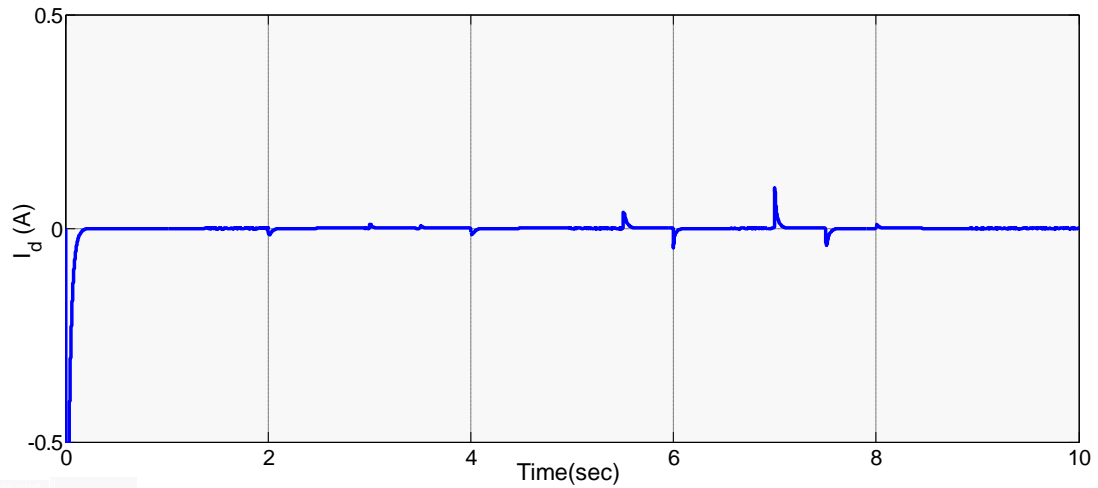
Σχ. 7.10 Μεταβολές του ωμικού φορτίου.

Στο ακόλουθο Σχ. 7.11 παρατηρούμε ότι πράγματι η τιμή I_q προσεγγίζει ικανοποιητικά τις τιμές I_q^{ref} με το χρόνο απόκρισης να κυμαίνεται από 0,02, στα περισσότερα μεταβατικά φαινόμενα, έως 0,04 sec.



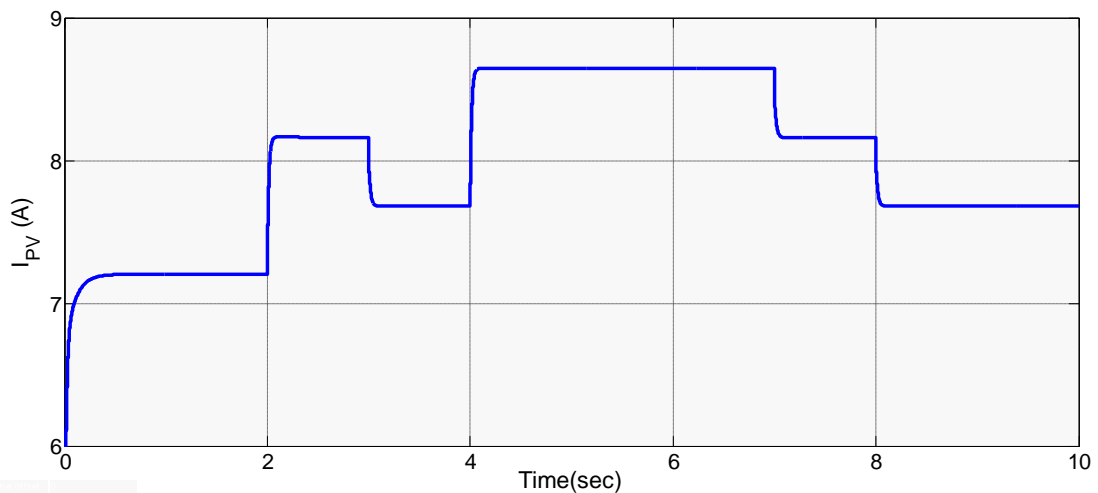
Σχ. 7.11 Το ρεύμα I_q στον q –άξονα στη πλευρά του δικτύου

Στο Σχ. 7.12 παρατηρούμε ότι η τιμή I_d προσεγγίζει ικανοποιητικά την μηδενική τιμή αναφοράς με χρόνο απόκρισης που κυμαίνεται από 0,1 έως και 0,15 sec στις μεταβατικές αποκρίσεις. Ο μεγαλύτερος χρόνος απόκρισης, όπως φαίνεται και στο σχήμα, σημειώνεται στην έναρξη της προσομοίωσης και είναι 0,25 sec. Οπότε επιτυγχάνεται και ο μοναδιαίος συντελεστής ισχύος.



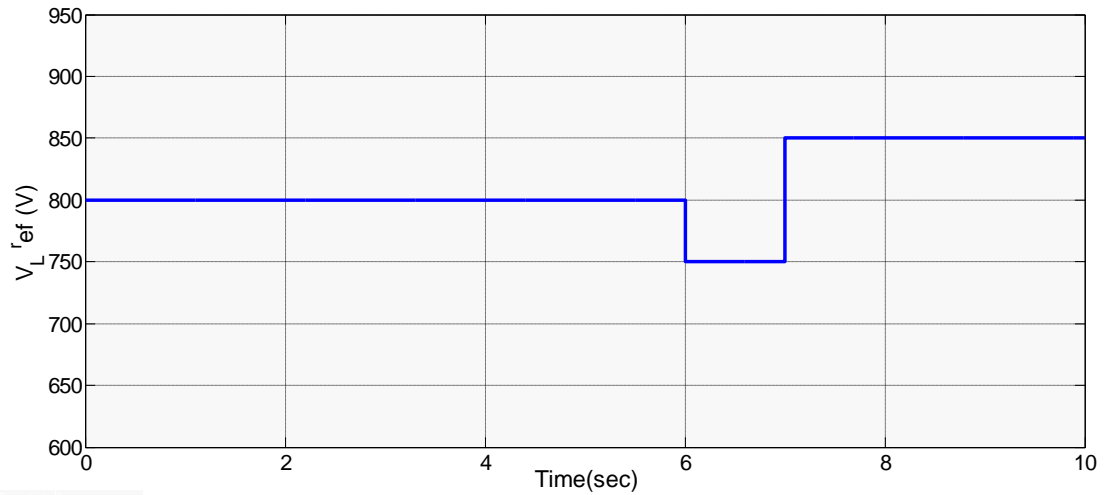
Σχ. 7.12 Το ρεύμα I_d στον d –άξονα στη πλευρά του δικτύου

Συνεχίζοντας τις παρατηρήσεις μας, στο Σχ. 7.13 παρατηρούμε ότι και το ρεύμα της Φ/Β συστοιχίας I_{PV} προσεγγίζει σε ικανοποιητικό βαθμό τις τιμές αναφοράς I_{PV}^{ref} με χρόνο απόκρισης που κυμαίνεται από τιμές οριακά κάτω του 0,1 sec, περίπου 0,08 sec, έως και 0,15 sec για τις μεταβατικές συμπεριφορές. Ο μεγαλύτερος χρόνος απόκρισης σημειώνεται στην αρχή της προσομοίωσης και είναι ίσος με 0,45 sec.

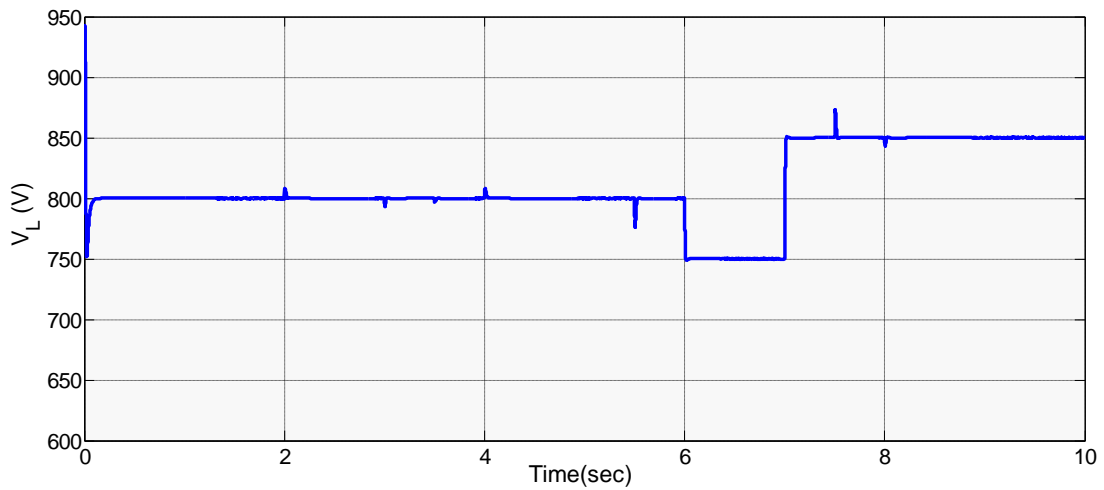


Σχ. 7.13 Το ρεύμα I_{PV} της PV συστοιχίας

Από τα Σχ. 7.14-7.15 παρατηρούμε ότι η τιμή της τάσης V_L ισορροπεί στις κατάλληλες τιμές V_L^{ref} με χρόνο απόκρισης από 0,03 sec έως και 0,05 sec στις μεταβατικές αποκρίσεις ενώ ο αρχικός χρόνος απόκρισης είναι 0,15 sec.



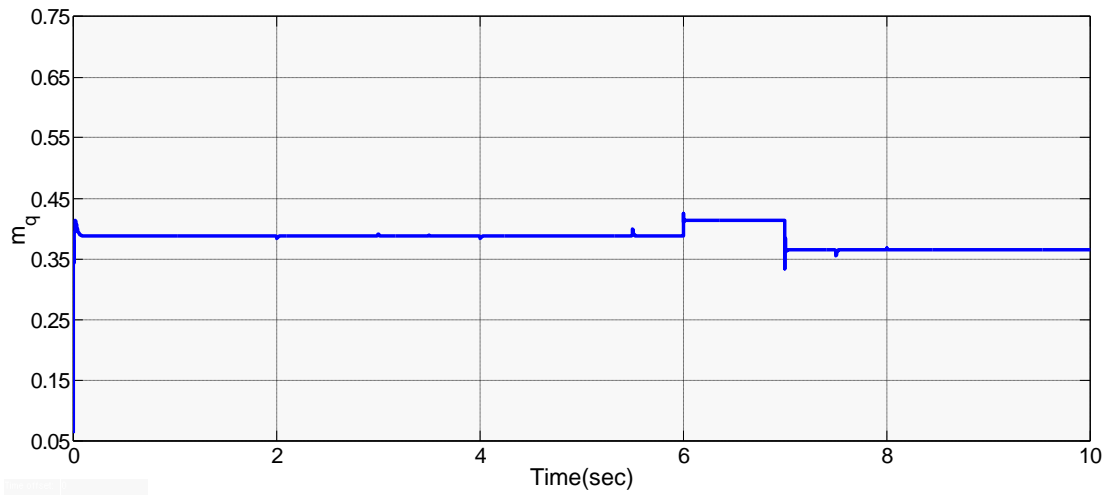
Σχ. 7.14 Μεταβολές της τάσης V_L



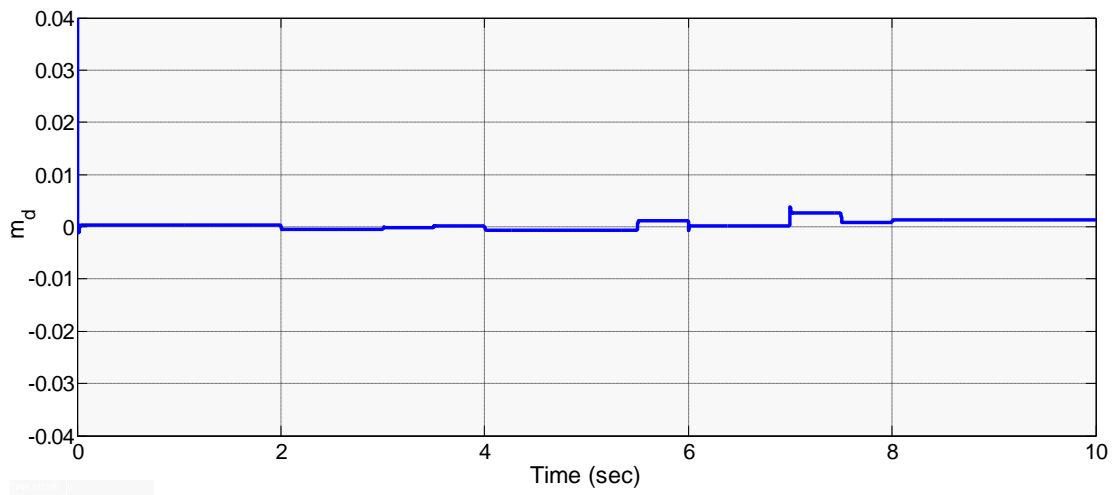
Σχ. 7.15 Η απόκριση της τάσης V_L

Τα Σχ. 7.16-18 επιβεβαιώνουν τις παραπάνω παρατηρήσεις. Πράγματι, οι καταστάσεις του συστήματος επιδεικνύουν ικανοποιητική μεταβατική συμπεριφορά με ελάχιστες υπερυψώσεις και χωρίς ταλαντώσεις.

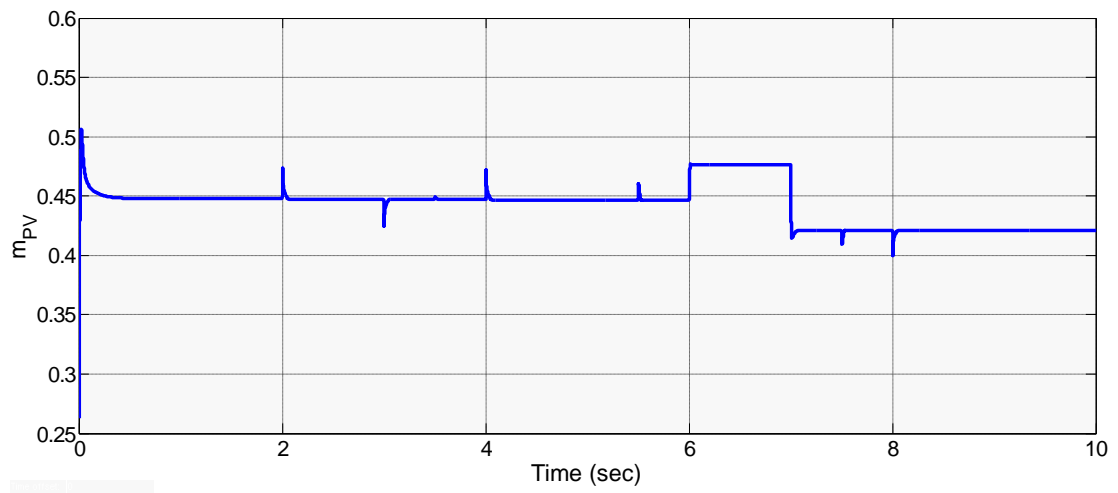
Συνοψίζοντας, όπως ήταν αναμενόμενο, επιβεβαιώνεται η ευσταθής λειτουργία του συστήματος, με τις μεταβατικές αποκρίσεις των καταστάσεων να είναι ικανοποιητικές και σύντομες.



Σχ. 7.16 Αποκρίσεις του duty ratio m_q



Σχ. 7.17 Αποκρίσεις του duty ratio m_d



Σχ. 7.18 Αποκρίσεις του duty ratio m_{pv}

Κεφάλαιο 8

Συμπεράσματα

8.0 συμπεράσματα

Για την απόδειξη της input-to-state ευστάθειας του PV συστήματος, αρχικά παρουσιάσαμε το συνολικό σύστημα αποτελούμενο από μια PV συστοιχία, έναν DC/DC μετατροπέα ανύψωσης τάσης, ένα ωμικό φορτίο και έναν αντιστροφέα VSC. Στη συνέχεια, παρουσιάστηκε το μη γραμμικό μοντέλο που χαρακτηρίζει το συνολικό σύστημα και θεωρήσαμε τις εισόδους που υπόκεινται στον έλεγχο που ακολούθησε. Στο επόμενο βήμα, παρουσιάσαμε τον μη γραμμικό, ανεξάρτητο των παραμέτρων του συστήματος, PI-CMC έλεγχο των ρευμάτων I_{PV} , I_d και I_q όπως έχει προταθεί [5] και αναφέραμε τη σκοπιμότητα καθενός ξεχωριστά.

Ο cascade έλεγχος στον DC/DC μετατροπέα περιελάμβανε τη ρύθμιση του ρεύματος της πηγής στις επιθυμητές τιμές έτσι ώστε να επιτυγχάνεται η λειτουργία στο σημείο μέγιστης ισχύος (MPP). Ο έλεγχος του ρεύματος I_d , στον αντιστροφέα VSC, περιελάμβανε ρύθμιση του στη μηδενική τιμή αναφοράς έτσι ώστε να πετύχουμε τον μηδενισμό της άεργου ισχύος. Ο τελευταίος έλεγχος, για το ρεύμα I_q , σε cascade μορφή, περιελάμβανε τη ρύθμιση, του τελευταίου, στις επιθυμητές τιμές αναφοράς για την αντίστοιχη ρύθμιση της ισορροπίας τη τάσης V_L στις κατάλληλες τιμές. Εφαρμόζοντας τους προαναφερθέντες ελέγχους για το αρχικό μη γραμμικό σύστημα, παρουσιάσαμε τις καταστατικές εξισώσεις του συστήματος κλειστού βρόχου.

Η απόδειξη της ISS ευστάθειας του συστήματος αποτελείται από δύο βήματα. Στο πρώτο βήμα, θεωρήσαμε τη συνάρτηση αποθήκευσης H , για το σύστημα κλειστού βρόχου, με την οποία αποδείχθηκε η ιδιότητα της παθητικότητας για το σύστημα. Στο δεύτερο και ουσιαστικό βήμα της απόδειξης, θεωρήσαμε αρχικά ένα ανεξάρτητο γραμμικό υποσύστημα, του συνολικού και εξετάζοντας την περίπτωση της απουσίας εξωτερικών εισόδων παρουσιάσαμε την συνάρτηση Lyapunov H_1 για την ασυμπτωτική ευστάθεια του σημείου $\mathbf{y} = 0$. Εκμεταλλευόμενοι την ασυμπτωτική ευστάθεια, θεωρήσαμε τη συνάρτηση Lyapunov V για την περίπτωση του, με εξωτερική είσοδο αυτή τη φορά, υποσυστήματος. Με κατάλληλο συνδυασμό των συναρτήσεων V και H κατασκευάστηκε η σύνθετη Lyapunov συνάρτηση V_{tot} με την οποία αποδείξαμε την, επιθυμητή, input-to-state ευστάθεια για το αρχικό σύστημα.

Στη συνέχεια, από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης σε περιβάλλον Matlab-Simulink, διαπιστώθηκε πως και οι τρεις PI-CMC έλεγχοι ανταποκρίθηκαν πλήρως στον σκοπό τους, ενώ επιβεβαιώθηκε η ευσταθής λειτουργία του συστήματος, με τις μεταβατικές αποκρίσεις των καταστάσεων να είναι ικανοποιητικές και σύντομες.

Τέλος, η παρούσα διπλωματική εργασία αποτέλεσε κίνητρο για την εφαρμογή της μαθηματικής θεωρίας σε πραγματικά προβλήματα στο πεδίο των ΑΠΕ ενώ παράλληλα αποτελεί έναν αξιόλογο επίλογο μιας προπτυχιακής πορείας στη Σχολή των Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών.

8.1 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Ολοκληρώνοντας, καθίσταται εμφανής η δυνατότητα περαιτέρω έρευνας πάνω στα ζητήματα που τέθηκαν στη παρούσα διπλωματική εργασία.

Αρχικά, πέραν της μαθηματικής θεωρίας και της επιβεβαίωσης αυτής μέσω της προσομοίωσης που έγινε, η πειραματική εφαρμογή του ελέγχου σε πραγματικές Φ/Β εγκαταστάσεις συνοδευόμενη από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων, αποτελεί μια ενδιαφέρουσα πρόταση.

Επιπλέον, η εφαρμογή διαφορετικών αλγορίθμων, πέραν του RCC όπου χρησιμοποιήθηκε, για την ανίχνευση του MPP, με παράλληλη σύγκριση των αποκρίσεων αποτελεί μια πρόταση για μελλοντική έρευνα.

Ενδιαφέρουσα θα ήταν και η πρόταση να συμπεριληφθούν στον έλεγχο οι περιπτώσεις απωλειών ενέργειας καθώς επίσης και οι παράγοντες που υπεισέρχονται από τη παρουσία αρμονικών.

Τέλος, λόγω μη γραμμικότητας του συστήματος, υπήρξε δυσκολία στην επιλογή των ολοκληρωτικών και αναλογικών κερδών, η οποία έγινε με συνεχείς δοκιμές, γνωρίζοντας μόνο ότι είναι θετικές σταθερές. Οπότε, δημιουργείται η ανάγκη για τη διερεύνηση μιας αναλυτικής μαθηματικής μεθόδου για την επιλογή των κερδών.

Βιβλιογραφία

Ελληνική

Γιαννακόπουλος, Γ. Β., Βόβος, Ν. Α. , (2008). *Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας*, Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις ΖΗΤΗ

Καραγκάκης, Κ., (1992). *Φωτοβολταϊκή Τεχνολογία*, Αθήνα: Εκδόσεις Συμμετρία

Λαμπρίδης, Δ. , Ντοκόπουλος, Π. , Παπαγιάννης, Γ., (2006). *Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας*, Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις ΖΗΤΗ

Σαφάκας, Α. Ν., (2006). *Ηλεκτρονικά Ισχύος*, Πάτρα

Φραγκιαδάκης, Ι.Ε. , (2007). *Φωτοβολταϊκά Συστήματα*, Θεσσαλονίκη : Εκδόσεις ΖΗΤΗ

Ξενόγλωσση

Markvart, T. , Castaner , L. (2003). *Practical Handbook of photovoltaics, Fundamentals and Applications*

Mohan, N. , Robbins, W. P. , (1992). *Power of Electronics Converters Application and Design*, Second Edition John Wiley and Sons Inc

Teodorescu, R. , Lissere, M. , Rodriguez, P. (2011). *Grid Converters for Photovoltaic and Wind Power Systems*, Wiley-IEEE Press eBook Chapters

Βιβλιογραφικές Αναφορές

- [1] R. Teodorescu, M. Liserre, and P. Rodriguez, *Grid Converters for Photovoltaic and Wind Power Systems*. Hoboken, NJ: IEEE/Wiley, 2011.
- [2] J. M. Carrasco, L. G. Franquelo, J. T. Bialasiewicz, E. Galvan, R. C., Portillo Guisado, M. A. Prats, J. I. Leon, and N. Moreno-Alfonso, "Power-Electronic systems for the Grid Integration of Renewable Energy Sources: A Survey," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 53, no. 4, pp. 1002-1016, Jun. 2006.
- [3] K.F. Krommydas, and A.T. Alexandridis, "Nonlinear Stability Analysis for ac/dc Voltage Source Converters driven by PI Current-Mode Controllers," in *Proc. European Control Conference (ECC)*, pp. 2774-2779, Strasbourg, France, Jun. 2014.
- [4] K.F. Krommydas, and A.T. Alexandridis, "Design and Passivity-Based Stability Analysis of a PI Current-Mode Controller for dc/dc Boost Converters," in *Proc. American Control Conference (ACC)*, pp. 5067-5072, Portland, USA, Jun. 2014.
- [5] K.F. Krommydas and A.T. Alexandridis, "Nonlinear Analysis of a grid-connected Photovoltaic/dc-load System driven by Local Current-Mode Controllers" in *Proc. 53rd Conference IEEE CDC*, LA, USA, Dec. 2014
- [6] G.C. Konstantopoulos, and A. T. Alexandridis, "Generalized nonlinear stabilizing controllers for Hamiltonian-passive systems with switching devices," *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, vol. 21, no. 4, pp. 1479-1488, Jul. 2013.
- [7] G.C. Konstantopoulos, and A. T. Alexandridis, "Stability and Convergence Analysis for a Class of Nonlinear Passive Systems," in *Proc. 50th Conference IEEE CDC-ECC 2011*, pp. 1753-1758, Orlando, FL., Dec. 2011
- [8] Y. Mahmoud, W. Xiao, H. H. Zeineldin, "A simple approach to modeling and simulation of photovoltaic modules", in *IEEE Trans. Sustainable Energy*, vol. 1, no. 3, pp. 185-186, Jan. 2012
- [9] R. Ortega, A. Loria, P. J. Nicklasson, and H. Sira-Ramirez, *Passivity- Based Control of Euler-Lagrange Systems*. New York, NY, USA: Springer-Verlag, 1998.
- [10] A. Yazdani, and R. Iravani, *Voltage-Sourced Converters in Power Systems*. Hoboken, NJ: IEEE/Wiley, Feb. 2010.
- [11] H. K. Khalil, *Nonlinear Systems*, 3rd ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall, 2002.