



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ ΚΑΙ
ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΙΣΧΥΟΣ

**Μοντελοποίηση και Έλεγχος Φωτοβολταϊκών
Συστημάτων σε Συνθήκες Σκίασης**

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Μπατζέλης Ι. Ευστράτιος

Επιβλέπων

Σταύρος Παπαθανασίου, Αν. Καθηγητής

Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχ. & Μηχ. Υπολογιστών, ΕΜΠ

Αθήνα, Ιούλιος 2016



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ ΚΑΙ
ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΙΣΧΥΟΣ

Μοντελοποίηση και Έλεγχος Φωτοβολταϊκών Συστημάτων σε Συνθήκες Σκίασης

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Μπατζέλης Ι. Ευστράτιος

Επιβλέπων

Σταύρος Παπαθανασίου, Αν. Καθηγητής
Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχ. & Μηχ. Υπολογιστών, ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την επταμελή επιτροπή την^η Ιουλίου 2016

.....
Σταύρος Παπαθανασίου
Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Στέφανος Μανιάς
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Αντώνιος Κλαδάς
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Γεώργιος Κορρές
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Δημήτριος Σούντρης
Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Πάυλος Γεωργιάκης
Επ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Γεώργιος Σταυρακάκης
Καθηγητής Πολυτεχνείου Κρήτης

Αθήνα, Ιούλιος 2016

.....
ΜΠΑΤΖΕΛΗΣ Ι. ΕΥΣΤΡΑΤΙΟΣ

Δίπλωμα Ηλεκτρονικού Μηχανικού & Μηχανικού Υπολογιστών, Πολυτεχνείο Κρήτης
Μεταπτυχιακό Δίπλωμα στην Παραγωγή και Διαχείριση Ενέργειας, Ε.Μ.Π.
Υπότροφος του Ιδρύματος Κρατικών Υποτροφιών – Πρόγραμμα Siemens

Copyright © ΜΠΑΤΖΕΛΗΣ Ι. ΕΥΣΤΡΑΤΙΟΣ 2016

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

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διατριβή πραγματεύεται ζητήματα μοντελοποίησης και ελέγχου φωτοβολταϊκών (ΦΒ) συστημάτων σε συνθήκες ομοιόμορφης ακτινοβολίας και μερικής σκίασης. Προτείνονται νέα μαθηματικά μοντέλα και εξισώσεις που συνδυάζουν ακρίβεια και ευκολία χρήσης, ενώ αναπτύσσονται τεχνικές ελέγχου του μετατροπέα ισχύος για βέλτιστη λειτουργία σε συνθήκες σκίασης και για τήρηση εφεδρείας ισχύος.

Αρχικά, παρουσιάζεται μια ολοκληρωμένη μεθοδολογία μοντελοποίησης του ΦΒ συστήματος σε ομοιόμορφη ακτινοβολία, βασισμένη στο μοντέλο μίας διόδου (single-diode PV model). Η θεμελιώδης εξίσωση ρεύματος-τάσης διατυπώνεται σε ευθεία μορφή με χρήση της νεοεισαχθείσας συνάρτησης Lambert W και δίνονται απλές εξισώσεις για την εύρεση των πέντε παραμέτρων του μοντέλου με ευθύ τρόπο. Επίσης, προτείνονται αναλυτικές εκφράσεις υπολογισμού της τάσης και του ρεύματος στα σημεία βραχυκύκλωσης (SC), ανοιχτοκύκλωσης (OC) και μέγιστης παραγωγής (MPP), συναρτήσει είτε των πέντε παραμέτρων είτε απευθείας της ακτινοβολίας και θερμοκρασίας.

Στη συνέχεια, μελετάται ενδελεχώς η επίδραση του φαινομένου της μερικής σκίασης στην ηλεκτρική απόκριση ενός ΦΒ συστήματος. Δομείται ένα κατάλληλο ηλεκτρικό μοντέλο αναλυτικής μορφής, το οποίο χρησιμοποιείται για προσομοίωση πληθώρας σεναρίων σκίασης και συστηματική καταγραφή της τροποποίησης που υφίστανται οι χαρακτηριστικές $I-V$ και $P-V$. Η ανάλυση οδηγεί σε χαρακτηρισμό όλων των τοπικών κορυφών ισχύος (MPPs) που εμφανίζονται στην καμπύλη $P-V$ και στην ανάπτυξη απλών περιγραφικών σχέσεων προσδιορισμού των χαρακτηριστικών τους. Με τις προτεινόμενες εκφράσεις, καθίσταται δυνατός ο υπολογισμός της ενεργειακής απόδοσης ενός ΦΒ συστήματος που υπόκειται σε σκίαση, με ευθύ τρόπο και χωρίς κοπιώδεις προσομοιώσεις. Όλα τα μοντέλα και οι εξισώσεις που εισάγονται, επιβεβαιώνονται πειραματικά με μετρήσεις σε υφιστάμενες ΦΒ διατάξεις.

Επιπλέον, τα κεκτημένα της θεωρητικής μελέτης αξιοποιούνται στην ανάπτυξη έξυπνων αλγορίθμων ελέγχου του μετατροπέα ισχύος σε συνθήκες σκίασης. Διατυπώνεται μία απλή και γενικά εφαρμόσιμη τεχνική αναγνώρισης σκίασης, ενώ αναπτύσσονται δύο αλγόριθμοι ανίχνευσης του σημείου μέγιστης παραγωγής (maximum power point tracking – MPPT) που εγγυώνται καθολικά βέλτιστη λειτουργία σε συνθήκες σκίασης.

Τέλος, διερευνάται το αντικείμενο της τήρησης εφεδρείας ισχύος από ένα ΦΒ σύστημα προς παροχή επικουρικών υπηρεσιών στο ηλεκτρικό δίκτυο. Αναπτύσσεται μία νέα τεχνική ελέγχου που επιτρέπει λειτουργία σε όλο το εύρος ισχύος από 0% έως 100% της μέγιστης παραγωγής, προσφέροντας παράλληλα συνεχή εκτίμηση του MPP σε πραγματικό χρόνο. Ο προτεινόμενος αλγόριθμος ελέγχου επιβεβαιώνεται σε πειραματική διάταξη 2 kW.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ

Αλγόριθμος MPPT, αναλυτικές εκφράσεις, εφεδρεία ισχύος, μερική σκίαση, μοντέλο πέντε παραμέτρων, περιγραφικές εξισώσεις, σημείο μέγιστης παραγωγής (MPP), ΦΒ σύστημα, Lambert W .

ABSTRACT

This dissertation contributes to the modeling and control of photovoltaic (PV) systems under uniform illumination and partial shading conditions. Analytical models and equations are introduced that are accurate and easy to use, while new control techniques for the converter of the system are proposed that guarantee optimal operation under partial shading and provide active power reserves capability.

A complete model for a PV system operating under uniform illumination is presented, based on the single-diode PV model. The current-voltage relation is explicitly formulated using the newly introduced Lambert W function, while expressions to extract the five model parameters in a straightforward manner are derived. Furthermore, simple equations to determine the voltage and current at the short circuit, open circuit and maximum power point are proposed, which are explicit functions of either the five parameters or the irradiance and temperature.

The electrical response of a PV system operating under partial shading conditions is thoroughly investigated. For this reason, an analytical model is constructed and used to simulate several shading scenarios, in order to investigate the way that the $I-V$ and $P-V$ characteristics are modified. This analysis leads to characterization of the local maximum power points (MPPs) presented and derivation of simple mathematical formulae to determine their voltage and current. These expressions permit calculation of the energy yield at partial shading conditions in a direct and easy way, avoiding laborious simulations. All proposed models and equations are experimentally validated in actual PV systems.

Thereafter, the results of the theoretical investigation are used to develop efficient control algorithms for the converter of a PV system at partial shading conditions. A simple and generally applicable shading detection technique is proposed, while two maximum power point algorithms (MPPT) are introduced that guarantee optimal operation under partial shading.

Finally, the possibilities for a PV system to maintain active power reserves are investigated, in order to provide auxiliary services to the electric grid. A new control strategy is developed that permits operation at the entire power range from 0% to 100% of the maximum available power, employing a single power PI controller and continuously estimating the MPP in real time. The proposed control scheme is experimentally evaluated in a 2 kW prototype.

KEYWORDS

Active power reserves, analytical expressions, Lambert W , maximum power point (MPP), MPPT algorithm, partial shading, photovoltaic (PV) system, simple formulae, single-diode model.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω πρωτίστως τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Σταύρο Παπαθανασίου, για τη στοχευμένη καθοδήγηση που μου παρείχε κατά την εκπόνηση της διδακτορικής μου διατριβής και για τις γνώσεις που μου μετέδωσε στη συγγραφή δημοσιεύσεων. Η ερευνητική συνεργασία που είχαμε αυτά τα τέσσερα χρόνια ήταν άψογη.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Στέφανο Μανιά για την υποδειγματική συνεργασία μας σε ερευνητικό πρόγραμμα του εργαστηρίου. Μου έδωσε τη δυνατότητα να ασχοληθώ με πρακτικά θέματα υλοποίησης και ανάπτυξης ενός μετατροπέα ισχύος, αποκτώντας πολύτιμη εμπειρία για τη μετέπειτα επαγγελματική μου πορεία.

Ακόμα, θέλω να πω ένα μεγάλο ευχαριστώ στους κ. Αντώνη Κλαδά και κ. Παύλο Γεωργιάκη για την υποστήριξη που μου παρείχαν και τις γνώσεις που μου μετέδωσαν, ενώ τις πιο θερμές ευχαριστίες εκφράζω στον κ. Γιώργο Σταυρακάκη που ήταν πάντα δίπλα μου από την παρουσίαση της διπλωματικής μου εργασίας μέχρι και σήμερα.

Δε θα ξεχάσω βεβαίως τους Υπ. Διδάκτορες κ. Γιώργο Καμπίτση και κ. Ελένη Γατή, με τους οποίους όχι μόνο συνεργαστήκαμε άψογα σε επαγγελματικό επίπεδο, αλλά αναπτύξαμε και μια ισχυρή φιλία. Επίσης, θέλω να ευχαριστήσω την οικογένειά μου και το φιλικό μου περίγυρο που με στήριξε με τον τρόπο τους αυτά τα τέσσερα χρόνια.

Τέλος, θα ήθελα να εκφράσω τις ειλικρινείς μου ευχαριστίες στο Ίδρυμα Κρατικών Υποτροφιών, και ιδιαίτερα στην τέως πρόεδρο κ. Έφη Μπάσδρα, για τη χρηματοδότηση της διδακτορικής μου διατριβής μέσω του προγράμματος «Υποτροφίες αριστείας Ι.Κ.Υ. μεταπτυχιακών σπουδών στην Ελλάδα – Πρόγραμμα Siemens». Χωρίς την οικονομική ενίσχυση του ιδρύματος πιθανότατα δε θα ήταν δυνατή η εκπόνηση αυτής της διατριβής.

Αφιερώνω αυτή τη διατριβή στη Γιώτα μου.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

| | |
|--|-----------|
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 Εισαγωγή..... | 1 |
| 1.1 Φωτοβολταϊκά Συστήματα | 2 |
| 1.1.1 Αρχές λειτουργίας ΦΒ στοιχείων | 2 |
| 1.1.2 Διάφορες ΦΒ τεχνολογίες | 3 |
| 1.1.3 ΦΒ διατάξεις..... | 6 |
| 1.1.4 Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά ΦΒ πλαισίου | 7 |
| 1.2 Επίδραση της Σκίασης στην Απόδοση ενός ΦΒ Συστήματος..... | 8 |
| 1.2.1 Ηλιακή ενέργεια και γεωμετρία σκίασης | 9 |
| 1.2.2 Ηλεκτρική απόκριση σε συνθήκες σκίασης | 10 |
| 1.2.3 Βιβλιογραφική ανασκόπηση ενεργειακών ΦΒ μοντέλων για σκίαση..... | 12 |
| 1.3 Μετατροπείς Ισχύος ΦΒ Συστήματος | 18 |
| 1.3.1 Dc/dc μετατροπείς ανύψωσης τάσης..... | 19 |
| 1.3.2 Αλγόριθμος MPPT | 20 |
| 1.4 Τήρηση Εφεδρείας Ισχύος από τα ΦΒ Συστήματα | 21 |
| 1.4.1 Επικουρικές υπηρεσίες σταθμών διεσπαρμένης παραγωγής..... | 22 |
| 1.4.2 Τεχνικές τήρησης εφεδρείας ισχύος στη βιβλιογραφία..... | 23 |
| 1.5 Συμβολή και Πρωτοτυπία της Διατριβής | 24 |
| 1.6 Δομή Εργασίας | 26 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 Μοντελοποίηση ΦΒ Συστημάτων σε Ομοιόμορφη Ακτινοβολία..... | 27 |
| 2.1 Μοντέλο Πέντε Παραμέτρων | 28 |
| 2.1.1 Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα και χαρακτηριστική $I-V$ | 28 |
| 2.1.2 Θεμελιώδης εξίσωση ρεύματος - τάσης | 29 |
| 2.1.3 Επέκταση σε ΦΒ συστοιχία..... | 30 |
| 2.1.4 Άλλα μοντέλα της βιβλιογραφίας..... | 30 |
| 2.2 Σχέσεις SC, OC και MPP συναρτήσει των Πέντε Παραμέτρων | 31 |
| 2.2.1 Λειτουργία βραχυκύκλωσης (SC) | 31 |
| 2.2.2 Λειτουργία ανοιχτοκύκλωσης (OC) | 32 |
| 2.2.3 Λειτουργία μέγιστης παραγωγής (MPP) | 32 |
| 2.3 Προσδιορισμός των Πέντε Παραμέτρων..... | 41 |
| 2.3.1 Βιβλιογραφική ανασκόπηση..... | 42 |
| 2.3.2 Θεωρία για την εξαγωγή των πέντε παραμέτρων αναφοράς..... | 43 |
| 2.3.3 Αναγωγή των πέντε παραμέτρων σε αυθαίρετε συνθήκες | 45 |
| 2.3.4 Εξαγωγή της παραμέτρου a_0 και ορισμός της σταθεράς d_0 | 46 |
| 2.3.5 Αναλυτικές σχέσεις εύρεσης των πέντε παραμέτρων | 48 |
| 2.3.6 Επιβεβαίωση μέσω προσομοιώσεων | 50 |
| 2.3.7 Πειραματική επιβεβαίωση..... | 53 |
| 2.4 Σχέσεις SC, OC και MPP συναρτήσει Ακτινοβολίας και Θερμοκρασίας..... | 56 |
| 2.4.1 Ρεύμα βραχυκύκλωσης - I_{sc} | 56 |

| | | |
|-------|---------------------------------------|----|
| 2.4.2 | Τάση ανοιχτοκύκλωσης - V_{oc} | 56 |
| 2.4.3 | Ρεύμα στο MPP - I_{mp} | 57 |
| 2.4.4 | Τάση στο MPP - V_{mp} | 58 |
| 2.4.5 | Σχέσεις συγκεντρωτικά | 58 |
| 2.4.6 | Επιβεβαίωση μέσω προσομοιώσεων | 59 |

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 Ανάλυση και Μοντελοποίηση ΦΒ Συστημάτων σε Συνθήκες Σκίασης 63

| | | |
|-------|--|-----|
| 3.1 | Μοντελοποίηση σε Συνθήκες Σκίασης..... | 64 |
| 3.1.1 | Πλήρες μοντέλο ΦΒ κυψέλης για θετική και αρνητική τάση | 64 |
| 3.1.2 | ΦΒ στοιχειοσειρά | 67 |
| 3.1.3 | ΦΒ πλαίσιο | 70 |
| 3.1.4 | ΦΒ πλαίσιοσειρά | 71 |
| 3.1.5 | ΦΒ συστοιχία..... | 72 |
| 3.1.6 | Συγκριτική ανάλυση της συμβατικής και της αναλυτικής προσέγγισης | 74 |
| 3.2 | Γραφική Ανάλυση και Χαρακτηρισμός της Σκίασης..... | 78 |
| 3.2.1 | ΦΒ κυψέλη | 78 |
| 3.2.2 | ΦΒ στοιχειοσειρά | 78 |
| 3.2.3 | ΦΒ πλαίσιο | 80 |
| 3.2.4 | ΦΒ πλαίσιοσειρά | 82 |
| 3.2.5 | ΦΒ συστοιχία..... | 86 |
| 3.3 | Περιγραφικές Σχέσεις Προσδιορισμού των MPPs ΦΒ Πλαισιοσειράς..... | 89 |
| 3.3.1 | Εκφράσεις για δύο επίπεδα ακτινοβολίας | 90 |
| 3.3.2 | Γενίκευση για πολλαπλά επίπεδα ακτινοβολίας..... | 94 |
| 3.3.3 | Αποτίμηση ακρίβειας μέσω προσομοιώσεων..... | 95 |
| 3.4 | Βελτίωση των MPP Σχέσεων ΦΒ Πλαισιοσειράς..... | 97 |
| 3.4.1 | Κυκλωματική ανάλυση..... | 97 |
| 3.4.2 | Βελτιωμένες MPP σχέσεις..... | 101 |
| 3.4.3 | Σύγκριση ακρίβειας μέσω προσομοιώσεων | 103 |
| 3.5 | Περιγραφικές Σχέσεις Προσδιορισμού των MPPs ΦΒ Συστοιχίας..... | 105 |
| 3.5.1 | Εξισώσεις για τα MPPAs..... | 105 |
| 3.5.2 | Εξισώσεις για το MPPB | 110 |
| 3.5.3 | Θερμοκρασιακή επίδραση και τελικές σχέσεις | 111 |
| 3.5.4 | Αποτίμηση ακρίβειας μέσω προσομοιώσεων..... | 112 |
| 3.6 | Πειραματική Επιβεβαίωση | 114 |

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 Έλεγχος του DC/DC Μετατροπέα σε Συνθήκες Μερικής Σκίασης..... 121

| | | |
|-------|--|-----|
| 4.1 | Δυσκολίες στον Έλεγχο του DC/DC Μετατροπέα σε Συνθήκες Σκίασης .. | 122 |
| 4.1.1 | Επίδραση της σκίασης στην αποδοτικότητα ενός αλγορίθμου MPPT | 122 |
| 4.1.2 | Συμβατικές λύσεις | 123 |
| 4.2 | Τεχνική Αναγνώρισης Σκίασης | 125 |
| 4.2.1 | Αλγόριθμος αναγνώρισης μερικής σκίασης | 125 |

| | | |
|---|---|------------|
| 4.2.2 | Επιβεβαίωση μέσω προσομοιώσεων | 127 |
| 4.3 | Απλός Αλγόριθμος MPPT για Συνθήκες Σκίασης | 129 |
| 4.3.1 | Προτεινόμενος αλγόριθμος GMPPT | 130 |
| 4.3.2 | Επιβεβαίωση μέσω προσομοιώσεων | 133 |
| 4.4 | Αλγόριθμος MPPT για Συνθήκες Σκίασης Εφαρμόζοντας Curve Fitting... .. | 135 |
| 4.4.1 | Μοντελοποίηση ΦΒ πλαίσιοσειράς σε συνθήκες σκίασης..... | 135 |
| 4.4.2 | Αλγόριθμος CFMPPT..... | 137 |
| 4.4.3 | Προσομοιώσεις..... | 140 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 Έλεγχος του DC/DC Μετατροπέα για Τήρηση Εφεδρείας | | |
| Ισχύος | | 143 |
| 5.1 | Τεχνική Ελέγχου APR με Εκτίμηση του MPP μέσω Curve Fitting | 144 |
| 5.2 | Σχήμα Ελέγχου | 144 |
| 5.2.1 | Μονάδα κυρίως ελέγχου (Main control module) | 145 |
| 5.2.2 | Μονάδα εκτίμησης του MPP (MPP estimation module)..... | 147 |
| 5.2.3 | Μονάδα ρύθμισης ripple (Ripple control module)..... | 148 |
| 5.3 | Αλγόριθμος Εκτίμησης MPP σε Πραγματικό Χρόνο..... | 150 |
| 5.3.1 | Μοντέλο πέντε παραμέτρων..... | 150 |
| 5.3.2 | LSQ curve fitting..... | 150 |
| 5.3.3 | Εξαγωγή των πέντε παραμέτρων αναφοράς..... | 153 |
| 5.4 | Προσομοιώσεις στο MATLAB/Simulink..... | 154 |
| 5.5 | Πειραματική Επιβεβαίωση | 156 |
| 5.5.1 | ΦΒ πλαίσιοσειρά σε σταθερή ακτινοβολία | 157 |
| 5.5.2 | ΦΒ πλαίσιο σε μεταβαλλόμενη ακτινοβολία..... | 159 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 Συμπεράσματα και Περαιτέρω Έρευνα | | 161 |
| 6.1 | Σύνοψη Αποτελεσμάτων | 162 |
| 6.1.1 | Σχέσεις υπολογισμού του MPP συναρτήσει των πέντε παραμέτρων | 162 |
| 6.1.2 | Αναλυτικές εξισώσεις εύρεσης των πέντε παραμέτρων | 162 |
| 6.1.3 | Σχέσεις SC, OC και MPP συναρτήσει ακτινοβολίας και θερμοκρασίας..... | 162 |
| 6.1.4 | Κυκλωματικό μοντέλο για συνθήκες σκίασης | 162 |
| 6.1.5 | Γραφική ανάλυση και χαρακτηρισμός σκίασης | 163 |
| 6.1.6 | Περιγραφικές σχέσεις προσδιορισμού των MPPs σε συνθήκες σκίασης..... | 163 |
| 6.1.7 | Αλγόριθμοι ελέγχου του dc/dc μετατροπέα για συνθήκες σκίασης | 163 |
| 6.1.8 | Τεχνική ελέγχου APR του dc/dc μετατροπέα για τήρηση εφεδρείας..... | 164 |
| 6.2 | Προτάσεις Περαιτέρω Διερεύνησης..... | 164 |
| 6.2.1 | Βελτίωση των περιγραφικών MPP σχέσεων ΦΒ συστοιχίας..... | 164 |
| 6.2.2 | Προσδιορισμός των συνθηκών εμφάνισης των τοπικών MPPs | 165 |
| 6.2.3 | Εφαρμογή των κεκτημένων στη βελτιστοποίηση του συστήματος..... | 165 |
| 6.2.4 | Βελτίωση των αλγορίθμων MPPT για σκίαση | 165 |
| 6.2.5 | Ολοκληρωμένο σχήμα ελέγχου μετατροπέα ισχύος..... | 165 |
| ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α..... | | 167 |

| | |
|--------------------------|------------|
| ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β..... | 173 |
| ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ..... | 189 |
| ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ..... | 195 |

ΛΙΣΤΑ ΣΥΜΒΟΛΩΝ

| | |
|-------------|---|
| a | Τροποποιημένος συντελεστής διόδου του μοντέλου των πέντε παραμέτρων. |
| a_{bk} | Τροποποιημένος συντελεστής διόδου φραγής (τυπικά 50 mV). |
| a_{bp} | Τροποποιημένος συντελεστής διόδου διαφυγής (τυπικά 50 mV). |
| b | Συντελεστής διόρθωσης του μοντέλου ΦΒ κυψέλης για αρνητικές τάσεις. |
| D | Duty cycle παλμοδότησης dc/dc μετατροπέα ισχύος. |
| E_g | Ενεργειακό διάκενο πυριτίου ($E_{g0} = 1.21 \text{ eV} = 1.9226\text{e-}19 \text{ J}$). |
| G | Ενεργός ακτινοβολία. |
| G_j^i | Ακτινοβολία ομάδας j πλαισιοσειράς i . |
| I_{bp} | Ρεύμα που διαρρέει τη δίοδο διαφυγής μίας ΦΒ στοιχειοσειράς. |
| I_{cells} | Ρεύμα που διαρρέει τις κυψέλες σε μία ΦΒ στοιχειοσειρά. |
| I_{ph} | Φωτόρρευμα του μοντέλου των πέντε παραμέτρων. |
| I_s | Ρεύμα κορεσμού διόδου του μοντέλου των πέντε παραμέτρων. |
| I_{sbk} | Ρεύμα κορεσμού διόδου φραγής (τυπικά 1.6 nA). |
| I_{sbp} | Ρεύμα κορεσμού διόδου διαφυγής (τυπικά 1.6 nA). |
| I_{sc} | Ρεύμα βραχυκύκλωσης (SC) σε ομοιόμορφες συνθήκες λειτουργίας. |
| I_{mp} | Ρεύμα μέγιστης παραγωγής (MPP) σε ομοιόμορφες συνθήκες λειτουργίας. |
| I_{mpj}^i | Ρεύμα του MPP_j^i σε συνθήκες σκίασης. |
| k | Σταθερά Boltzmann – $1.38066\text{e-}23 \text{ (J/K)}$. |
| MPP_j^i | Τοπικό μέγιστο της πλαισιοσειράς i που σχετίζεται με την ακτινοβολία G_j^i . |
| $MPPA_j^i$ | Τοπικό μέγιστο της συστοιχίας που σχετίζεται με το MPP_j^i της πλαισιοσειράς. |
| $MPPB$ | Το δεξιότερο τοπικό μέγιστο της συστοιχίας. |
| MPP_i | Σημείο λειτουργίας κατά το οποίο μεγιστοποιείται η ισχύς στην έξοδο της ιδανική συνιστώσας του μοντέλου (και όχι του συνολικού κυκλώματος). |
| m | Συντελεστής κατάρρευσης του μοντέλου ΦΒ κυψέλης για αρνητικές τάσεις. |
| n | Συντελεστής διόδου του μοντέλου των πέντε παραμέτρων. |
| n_a | Μέγιστο πλήθος MPPs που μπορεί να εμφανιστούν σε μία ΦΒ συστοιχία. |
| n^i | Πλήθος διαφορετικών επιπέδων ακτινοβολίας πλαισιοσειράς i . |
| N_j^i | Πλήθος στοιχειοσειρών στην ομάδα j της πλαισιοσειράς i . |
| N_{cs} | Πλήθος ΦΒ στοιχειοσειρών σε ένα ΦΒ πλαίσιο. |
| N_m | Πλήθος ΦΒ πλαισίων σε μία ΦΒ πλαισιοσειρά. |
| N_p | Πλήθος ΦΒ πλαισιοσειρών σε μία ΦΒ συστοιχία. |
| N_s | Πλήθος ΦΒ κυψελών σε μία ΦΒ στοιχειοσειρά. |
| P_{mp} | Ισχύς μέγιστης παραγωγής (MPP) σε ομοιόμορφες συνθήκες λειτουργίας. |
| P_{mpj}^i | Ισχύς του MPP_j^i σε συνθήκες σκίασης. |
| q | Φορτίο ηλεκτρονίου – $1.60218\text{e-}19 \text{ (Cb)}$. |
| R_c | Αντίσταση του επαυξημένου ΦΒ μοντέλου μίας διόδου. |
| R_{curve} | Ταλάντωση καμπύλης (curve ripple). |
| R_s | Σειριακή αντίσταση του μοντέλου των πέντε παραμέτρων. |
| R_{sh} | Εγκάρσια αντίσταση του μοντέλου των πέντε παραμέτρων. |
| S_j^i | Άθροισμα ακτινοβολιών που σχετίζονται με το $MPPA_j^i$. |
| T | Θερμοκρασία κυψέλης. |
| V_{bk} | Τάση στα άκρα μίας διόδου φραγής. |
| V_{br} | Τάση κατάρρευσης του μοντέλου ΦΒ κυψέλης για αρνητικές τάσεις. |

| | |
|---------------|---|
| V_c | Πηγή τάσης του επαυξημένου ΦΒ μοντέλου μίας διόδου. |
| V_{cell} | Τάση στα άκρα μίας ΦΒ κυψέλης. |
| V_{cs} | Τάση στα άκρα μίας ΦΒ στοιχειοσειράς. |
| V_{mod} | Τάση στα άκρα ενός ΦΒ πλαισίου. |
| V_{mp} | Τάση μέγιστης παραγωγής (MPP) σε ομοιόμορφες συνθήκες λειτουργίας. |
| V_{mpj}^i | Τάση του MPP _j ⁱ σε συνθήκες σκίασης. |
| V_{oc} | Τάση ανοιχτοκύκλωσης (OC) σε ομοιόμορφες συνθήκες λειτουργίας. |
| V_{str} | Τάση στα άκρα μιας ΦΒ πλαισιοσειράς. |
| V_T | Θερμική τάση διόδου. |
| $W\{x\}$ | Συνάρτηση Lambert W με όρισμα x . |
| w_0 | Βοηθητική παράμετρος, ίση με $W\{I_{ph0}e/I_{s0}\} = W\{e^{V_{oc0}/a_0+1}\} = W\{e^{1/\delta_0+1}\}$. |
| X_0 | Παράμετρος X σε συνθήκες STC (π.χ. R_{s0} ή V_{oc0}). |
| a_{Imp} | Θερμοκρασιακός συντελεστής ρεύματος MPP. |
| a_{Isc} | Θερμοκρασιακός συντελεστής ρεύματος βραχυκύκλωσης. |
| β_{Vmp} | Θερμοκρασιακός συντελεστής τάσης MPP. |
| β_{Voc} | Θερμοκρασιακός συντελεστής τάσης ανοιχτοκύκλωσης. |
| ΔT | Θερμοκρασιακή διαφορά από την T_0 (25 °C). |
| ΔV_D | Πτώση τάσης σε μία άγουσα δίοδο διαφυγής (τυπικά 1 V). |
| δ | Σταθερά του μοντέλου των πέντε παραμέτρων, ορισμένη ως ο λόγος a/V_{oc} . |
| κ | Εμπειρική σταθερά που ισούται με 0.04 και χρησιμοποιείται στις περιγραφικές σχέσεις προσδιορισμού των MPPs. |
| λ | Εμπειρική σταθερά που ισούται με 0.06 και χρησιμοποιείται στις περιγραφικές σχέσεις προσδιορισμού των MPPs. |

ΛΙΣΤΑ ΑΡΤΙΚΟΛΕΞΩΝ

| | | |
|------------|---|--|
| ANN | Artificial neural networks | Νευρωνικά δίκτυα |
| APR | Active power reserves | Εφεδρεία ενεργού ισχύος |
| CFMPPT | Curve fitting maximum power point algorithm | Αλγόριθμος ανίχνευσης του ολικά βέλτιστου MPP μέσω curve fitting |
| c-Si | Mono-crystalline silicon | Μονοκρυσταλλικό πυρίτιο |
| EMI | Electromagnetic interference | Ηλεκτρομαγνητική παρενόχληση |
| GMPP | Global maximum power point | Ολικά βέλτιστο σημείο λειτουργίας |
| GMPPT | Global maximum power point tracking algorithm | Αλγόριθμος ανίχνευσης του ολικά μέγιστου MPP |
| INC | Incremental conductance (MPPT algorithm) | Αυξητική αγωγιμότητα (μέθοδος MPPT) |
| <i>I-V</i> | Current – voltage characteristic | Χαρακτηριστική ρεύματος – τάσης |
| Local MPPs | Local maximum power points | Τοπικά μέγιστα ισχύος |
| LSQ | Least squares technique | Τεχνική ελαχίστων τετραγώνων |
| mc-Si | Poly-crystalline silicon | Πολυκρυσταλλικό πυρίτιο |
| MPP | Maximum power point | Σημείο μέγιστης παραγωγής |
| MPPT | Maximum power point tracking | Αλγόριθμος ανίχνευσης του σημείου μέγιστης παραγωγής |
| NOCT | Normal operating cell temperature | Συνθήκες φυσιολογικής θερμοκρασίας κυψέλης |
| NRMSD | Normalized root mean square deviation | Κανονικοποιημένη τετραγωνική απόκλιση |
| OC | Open circuit | Ανοιχτοκύκλωση |
| P&O | Perturb and observe (MPPT algorithm) | Διαταραχή και παρατήρηση (μέθοδος MPPT) |
| <i>P-V</i> | Power – voltage characteristic | Χαρακτηριστική ισχύος – τάσης |
| PWM | Pulse width modulation | Μονάδα διαμόρφωσης εύρους παλμών |
| RMS error | Root mean square error | Μέσο τετραγωνικό σφάλμα |
| SC | Short circuit | Βραχυκύκλωση |
| Si | Silicon | Πυρίτιο |
| SNR | Signal to noise ratio | Λόγος ισχύος σήματος ως προς θόρυβο |
| STC | Standard test conditions | Πρότυπες συνθήκες ελέγχου (1000 W/m ² – 25 °C) |
| ΑΠΕ | Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας | Renewable energy sources |
| ΦΒ | Φωτοβολταϊκό | Photovoltaic |

ΟΡΟΛΟΓΙΑ

| | |
|--|---|
| Dc ζυγός | DC link |
| Dc/dc μετατροπέας | Dc/dc converter |
| Αλγόριθμος MPPT με curve fitting | Curve fitting MPPT algorithm |
| Άμεση (ή ακτινική) ακτινοβολία | Direct (or beam) irradiance |
| Ανακλώμενη ακτινοβολία | Reflected (or albedo) irradiance |
| Αντιστροφέας | Inverter |
| Βαθμός χρησιμοποίησης | Duty cycle |
| Διακοπτική κυμάτωση | Switching ripple |
| Διάχυτη ακτινοβολία | Diffuse (or scattered) irradiance |
| Δίοδος διαφυγής | Bypass diode |
| Δίοδος φραγής | Block diode |
| Εντολή εφεδρείας | Reserve command |
| Επανασύνδεσης φορέων | Junction recombination |
| Επαφή p-n | P-n junction |
| Κυμάτωση | Ripple |
| Μονάδα εκτίμησης MPP της τεχνικής APR | MPP estimation module of APR technique |
| Μονάδα κυρίως ελέγχου της τεχνικής APR | Main control module of APR technique |
| Μονάδα ρύθμισης ripple της τεχνικής APR | Ripple control module of APR technique |
| Μοντέλο μίας διόδου (ή πέντε παραμέτρων) | Single-diode model (or five parameters model) |
| Παράγοντες μείωσης της απόδοσης | Derating factors |
| Προσαρμογή καμπύλης | Curve fitting |
| Σάρωση χαρακτηριστικής καμπύλης | Characteristic curve scan |
| Σύστημα ηλιοπαρακολούθησης (ή ιχνηλάτησης ηλίου) | Tracker |
| Τεχνική αναγνώρισης σκίασης | Shading detection technique |
| Τεχνικό φυλλάδιο | Datasheet |
| Φαινόμενο θερμικής κηλίδας | Hot spot effect |
| ΦΒ κυψέλη (ή στοιχείο ή κύτταρο) | PV cell |
| ΦΒ λεπτών υμενίων | Thin film PVs |
| ΦΒ πλαίσιο | PV module |
| ΦΒ πλαισιοσειρά | PV string |
| ΦΒ στοιχειοσειρά | PV cell string |
| ΦΒ συστοιχία | PV array |

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Εισαγωγή

Στο εισαγωγικό κεφάλαιο, περιγράφονται οι βασικές έννοιες που διέπουν ένα φωτοβολταϊκό (ΦΒ) σύστημα κατασκευαστικά και λειτουργικά, με ιδιαίτερη έμφαση στις συνθήκες σκίασης. Εξηγούνται οι αρχές λειτουργίας του ΦΒ φαινομένου και οι διάφορες ΦΒ τεχνολογίες, ενώ παρουσιάζονται οι συνηθέστερες ΦΒ διατάξεις και τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά ενός ΦΒ πλαισίου.

Ακολούθως, περιγράφεται συνοπτικά η επίδραση της μερικής σκίασης στην ηλεκτρική απόκριση ενός ΦΒ συστήματος. Γράφονται λίγα λόγια για την ακτινοβολία και γεωμετρία της σκίασης, ενώ παρουσιάζεται πλήρης βιβλιογραφική ανασκόπηση ενεργειακών μοντέλων για ΦΒ συστήματα σε συνθήκες σκίασης.

Στη συνέχεια, παρουσιάζεται η τυπική δομή του μετατροπέα ισχύος δύο σταδίων που ελέγχει μια ΦΒ διάταξη, και γίνεται εισαγωγή στον αλγόριθμο MPPT που είναι υπεύθυνος για την εξαγωγή της μέγιστης ισχύος από το σύστημα.

Τέλος, τίθεται το θέμα της τήρησης εφεδρείας ισχύος από τους ΦΒ σταθμούς για παροχή επικουρικών υπηρεσιών προς το ηλεκτρικό δίκτυο. Εξηγείται ότι σύμφωνα με τις μελλοντικές απαιτήσεις των κωδίκων δικτύου, κάθε ΦΒ σύστημα θα πρέπει να είναι σε θέση να τηρεί εφεδρεία ισχύος, ενώ γίνεται ανασκόπηση των σχετικών ερευνητικών εργασιών.

Το εισαγωγικό κεφάλαιο ολοκληρώνεται με απαρίθμηση των κυριότερων σημείων συνεισφοράς της παρούσας έρευνας και με τη δομή της διατριβής.

1.1 Φωτοβολταϊκά Συστήματα

Η τεχνολογία των φωτοβολταϊκών (ΦΒ) είναι μία από τις πιο πρόσφατες τεχνολογίες των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ), η οποία πρωτοεμφανίστηκε τη δεκαετία του 1960 σε διαστημικές εφαρμογές. Από τότε, έχει επιτευχθεί αξιοσημείωτη ανάπτυξη με χρήση νεών υλικών και πιο αποδοτικές διαδικασίες παραγωγής ΦΒ στοιχείων, ενώ πλέον τα ΦΒ συστήματα έχουν επιτύχει υψηλή διείσδυση στο ενεργειακό μίγμα πολλών χωρών διεθνώς.

Τα δυνατά σημεία της ΦΒ τεχνολογίας έναντι των συμβατικών πηγών ενέργειας, αλλά και αρκετών ΑΠΕ, είναι η ευρέως διαθέσιμη και ανεξάντλητη φύση της ηλιακής ενέργειας σε συνδυασμό με τη στιβαρότητα και αξιόπιστη λειτουργία των ΦΒ συστημάτων. Η πρώτη παρατήρηση είναι ο λόγος που τα ΦΒ συστήματα προτιμώνται σε αυτόνομες εγκαταστάσεις μικρής ισχύος και επιτρέπει δυνητικά μεγαλύτερη γεωγραφική εξάπλωση σε σύγκριση με άλλες ΑΠΕ. Επιπλέον, η αξιοπιστία και μεγάλη διάρκεια ζωής (άνω των 25 ετών) των ΦΒ συστημάτων, σε συνδυασμό με την αντοχή τους σε ακραίες καιρικές συνθήκες (ισχυροί άνεμοι, ακραία χαλαζόπτωση κλπ.) και τις ελάχιστες απαιτήσεις συντήρησης, καθιστούν τη σχετική επένδυση σίγουρη και φερέγγυα.

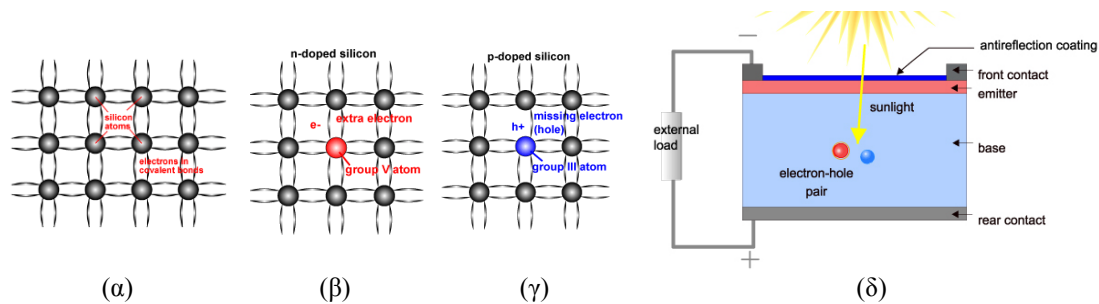
Όμως το μεγαλύτερο ίσως προτέρημα της ΦΒ τεχνολογίας, που δε διαθέτει καμία άλλη συμβατική ή ανανεώσιμη πηγή ενέργειας, είναι η πολύ μεγάλη κλίμακα εφαρμογών: από μικρές ηλεκτρονικές συσκευές ισχύος λιγότερης του Watt, όπως υπολογιστές τσέπης, μέχρι εγκαταστάσεις σε δώματα και στέγες των 5-10 kW, και πολύ μεγάλα υπαίθρια ΦΒ πάρκα της τάξης των MW. Αυτή η δυνατότητα προκύπτει από τη “σπονδυλωτή” δομή ενός ΦΒ συστήματος, που αποτελείται από πολλές μικρές ΦΒ κυψέλες, καθώς και από την αθόρυβη και χωρίς ρύπανση λειτουργία του.

Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται έντονα η τάση ενσωμάτωσης της ΦΒ τεχνολογίας δυναμικά στο αστικό περιβάλλον και στην καθημερινότητα των πολιτών. Όμως, το κύριο πρόβλημα που προκύπτει σε ένα τέτοιο σενάριο είναι οι μη ιδανικές συνθήκες λειτουργίας, και κυρίως η συχνή σκίαση και η επίπτωσή της στην απόδοση του ΦΒ συστήματος. Σε αυτό το σημείο συμβάλλει η παρούσα διατριβή, μελετώντας και μοντελοποιώντας το φαινόμενο της μερικής σκίασης, και προτείνοντας λύσεις για τη μετρίαση των αρνητικών επιδράσεων της.

1.1.1 Αρχές λειτουργίας ΦΒ στοιχείων

Η αρχή λειτουργίας του ΦΒ φαινομένου περιγράφεται στη συνέχεια για την πιο διαδεδομένη τεχνολογία: την κρυσταλλική. Η μικρότερη δομική μονάδα είναι η ΦΒ κυψέλη (ή ΦΒ στοιχείο ή ΦΒ κύτταρο), η οποία συνίσταται σε μία λεπτή φέτα πυριτίου με κατάλληλες προσμίξεις, ώστε η πρόσπτωση ακτινοβολίας στην επιφάνειά της να παράγει ηλεκτρική ισχύ. Μια τυπική κρυσταλλική κυψέλη αναπτύσσει τάση 0.5-1.0 V σε κατάσταση ανοιχτοκύκλωσης και πυκνότητα ρεύματος 20-40 mA/cm² σε λειτουργία βραχυκύκλωσης [1]–[3]. Στη συνέχεια περιγράφονται συνοπτικά οι αρχές λειτουργίας του ΦΒ φαινομένου, βάσει των [4]–[8].

Το δομικό υλικό μίας κρυσταλλικής κυψέλης είναι το πυρίτιο (Si), καθώς διαθέτει τις απαραίτητες ιδιότητες του ημιαγωγού και βρίσκεται σε αφθονία στη φύση, ενώ παράλληλα υπάρχει συσσωρευμένη τεχνογνωσία στην επεξεργασία του από τον τομέα της ηλεκτρονικής. Η δομή μίας τυπικής κρυσταλλικής κυψέλης φαίνεται στο Σχ. 1.1(α). Αποτελείται από ανεξάρτητα άτομα πυριτίου (Si) τοποθετημένα τακτικά σε περιοδική δομή (τετραεδρική



Σχ. 1.1. Κρυσταλλική δομή του πυριτίου (α) σε καθαρή μορφή, (β) με προσμίξεις τύπου n, και (γ) με προσμίξεις τύπου p. (δ) Απεικόνιση της λειτουργίας της ΦΒ κυψέλης [4].

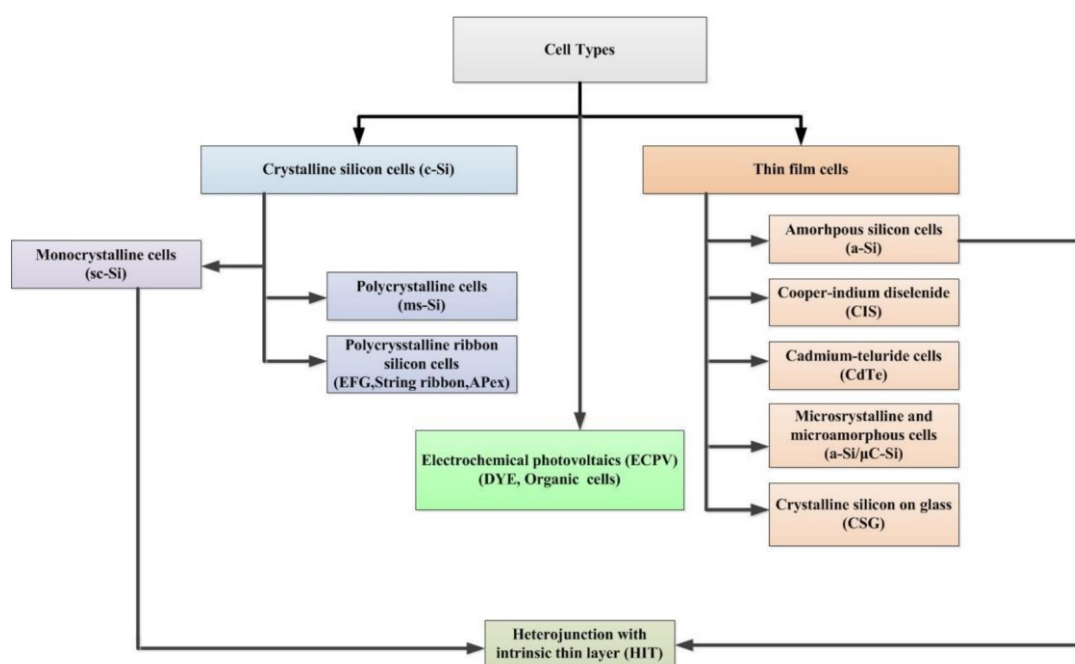
κρυσταλλική δομή), κάθε ένα από τα οποία γειτνιάζει με 8 ηλεκτρόνια και δημιουργεί 4 ομοιοπολικούς δεσμούς (τετρασθενές στοιχείο). Τα ηλεκτρόνια των δεσμών αυτών είναι ασθενώς συγκρατημένα και απελευθερώνονται εύκολα με απορρόφηση ενέργειας, κινούμενα άτακτα στον κρύσταλλο. Τα κενά που αφήνουν πίσω τους στους ομοιοπολικούς δεσμούς αποκαλούνται “οπές” και ισούται σε πλήθος με τα ηλεκτρόνια σε συνθήκες σταθερής ενεργειακής κατάστασης, παρουσιάζοντας έτσι συνολικά ουδέτερο φορτίο. Η εφαρμογή ηλεκτρικής τάσης στον κρύσταλλο βάζει σε τάξη την άτακτη κίνηση των φορέων, προσδίδοντας έτσι αγωγίμες ιδιότητες στο υλικό.

Όταν στον κρύσταλλο προστεθούν προσμίξεις πεντασθενών στοιχείων (νόθευση πυριτίου), όπως το As, δημιουργούνται ασθενώς συγκρατημένα ηλεκτρόνια, τα οποία ελευθερώνονται εύκολα χωρίς να αφήνουν πίσω τους οπές. Ένα τέτοιο υλικό καλείται αγωγός προσμίξεως τύπου n (Σχ. 1.1(β)) και περιέχει πληθώρα ελεύθερων ηλεκτρονίων, ενώ η αντίστοιχη πρόσμιξη τρισθενών στοιχείων, όπως το B, δημιουργεί πληθώρα οπών στον κρύσταλλο και οδηγεί σε ημιαγωγό τύπου p (Σχ. 1.1(γ)).

Φέρνοντας σε επαφή ένα τεμάχιο τύπου n με τύπου p, δημιουργείται η ένωση p-n (p-n junction). Στο σημείο της επαφής, ηλεκτρόνια και οπές διαχέονται προς τις δύο πλευρές της ένωσης, σχηματίζοντας τη ζώνη αραίωσης (ή απογύμνωσης), στην οποία δημιουργείται ηλεκτροστατικό δυναμικό που εμποδίζει ή επιτρέπει τη ροή ρεύματος ανάλογα με την πολικότητα. Το ΦΒ φαινόμενο βασίζεται σε αυτήν την ιδιότητα: η προσπίπτουσα φωτεινή ροή απορροφάται από τους χημικούς δεσμούς και δημιουργεί φορείς αγωγιμότητας που κινούνται ελεύθερα στον κρύσταλλο. Όταν οι τελευταίοι βρεθούν πλησίον της περιοχής αραίωσης, τότε μεταφέρονται από την περιοχή n στην p, και αντίστροφα, υπό την επίδραση του ηλεκτροστατικού πεδίου, δημιουργώντας έτσι διαφορά δυναμικού στις δύο επιφάνειες της ένωσης p-n (Σχ. 1.1(δ)). Η τάση που αναπτύσσεται μπορεί να αξιοποιηθεί συνδέοντας ένα εξωτερικό φορτίο, το οποίο τότε διαρρέεται από ρεύμα και απορροφά ισχύ, μία κατάσταση που διατηρείται όσο διαρκεί η πρόσπτωση ακτινοβολίας.

1.1.2 Διάφορες ΦΒ τεχνολογίες

Η κρυσταλλική τεχνολογία είναι ιστορικά η πρώτη ΦΒ τεχνολογία που αναπτύχθηκε και παραμένει μέχρι σήμερα αυτή με τη μεγαλύτερη εμπορική διείσδυση. Παρόλα αυτά, πλήθος εναλλακτικών τεχνολογιών αναπτύχθηκαν με το χρόνο, οι οποίες ταξινομούνται όπως φαίνεται στο Σχ. 1.2, σε δύο κύριες κατηγορίες: την κρυσταλλική (crystalline) και την τεχνολογία λεπτών υμενίων (thin film). Κάθε κατηγορία διαφοροποιείται θεμελιωδώς στον τρόπο και το



Σχ. 1.2. Ταξινόμηση των διαφόρων ΦΒ τεχνολογιών [9].

υλικό κατασκευής, και βεβαίως στον βαθμό απόδοσης. Στη συνέχεια, δίνεται μια συνοπτική περιγραφή των κυριότερων χαρακτηριστικών τους, σύμφωνα με τις [2], [7], [9]–[12].

1.1.2.A Τεχνολογίες κρυσταλλικού πυριτίου (crystalline)

Το πυρίτιο είναι το βασικό δομικό στοιχείο των ΦΒ κρυσταλλικών κυψελών, λόγω των ημιαγωγικών ιδιοτήτων του και της αφθονίας του στη φύση σε μορφή οξειδίου του πυριτίου (χαλαζίας ή άμμος). Η εξαγωγή πυριτίου σε καθαρή μορφή, απαραίτητη για τις φωτοβολταϊκές εφαρμογές, απαιτεί πολύ υψηλές θερμοκρασίες της τάξης των 1800 °C.

Οι *μονοκρυσταλλικές* κυψέλες (mono-crystalline) κατασκευάζονται με την τεχνική Czochralski (crucible drawing process), θερμαίνοντας πολυπυρίτιο σε θερμοκρασία 1400 °C για την παραγωγή δισκίων πάχους 0.3 mm. Η υψηλή ομοιομορφία τους τις καθιστά από τις αποδοτικότερους εκπροσώπους των ΦΒ στοιχείων, με τυπικούς βαθμούς απόδοσης 15-18%. Έχουν μορφή στρογγυλή, ημιστρόγγυλη ή τετραγωνική ανάλογα τον τρόπο κοπής, ομοιογενή εμφάνιση, και σκούρο μπλε ή μαύρο χρώμα (γκρι χωρίς ανακλαστικό στρώμα).

Αντίθετα, οι *πολυκρυσταλλικές* κυψέλες (poly-crystalline) περιλαμβάνουν στο πλέγμα τους κρυστάλλους ποικίλων προσανατολισμών, λόγω της λιγότερο ελεγχόμενης ψύξης του πυριτίου κατά την κατασκευή, μειώνοντας έτσι αισθητά το κόστος παραγωγής. Ως αποτέλεσμα, εμφανίζουν χαμηλότερες αποδόσεις της τάξης 13-16%. Συνήθως έχουν τετραγωνικό σχήμα με ευδιάκριτη ανομοιογένεια στην εμφάνιση λόγω των μεμονωμένων κρυστάλλων.

Η τεχνολογία *ταινιών πυριτίου* (ribbon silicon), είναι κλάδος της κρυσταλλικής που διαφοροποιείται στον τρόπο κατασκευής, επιτυγχάνοντας λεπτότερο πάχος και οικονομία σε υλικό και ενέργεια. Οι τρεις κύριες εκδοχές της είναι: EFG (Edge-Defined Film-Fed Growth), String ribbon και APex, παρουσιάζοντας βαθμούς απόδοσης 14%, 12-13% και 9.5% αντίστοιχα.

1.1.2.B Τεχνολογίες λεπτών υμενίων (*thin film*)

Τα ΦΒ πλαίσια *λεπτών υμενίων* διαφέρουν σε σχέση με τα κρυσταλλικά, τόσο στον τρόπο όσο και στο υλικό κατασκευής. Αντί για καθαρό πυρίτιο, συνηθισμένα δομικά υλικά είναι το άμορφο πυρίτιο (a-Si), ο δισεληνιούχος χαλκός με ίνδιο (CIS) και το τελλουριούχο κάδμιο (CdTe), ενώ σημαντική έρευνα διεξάγεται στην εύρεση και άλλων στοιχείων. Κατά την κατασκευή, το υλικό εναποτίθεται σε λεπτή ημιαγώγιμη μεμβράνη πάνω σε χαμηλού κόστους υπόστρωμα (συνήθως γυαλί), με μεθόδους όπως εναπόθεση ατμών (*vacuum deposition*), ψεκασμό (*sputter processes*) ή ηλεκτρολυτικά λουτρά (*electrolytic baths*). Επιτυγχάνεται έτσι, πολύ μικρό πάχος της τάξης του 1 μm, ενώ η θερμοκρασία παραγωγής είναι της τάξης των 200-600 °C, σημαντικά μικρότερη των κρυσταλλικών τεχνολογιών. Οι κυψέλες λεπτών υμενίων δεν έχουν καθορισμένο σχήμα, όπως οι κρυσταλλικές, αλλά κατασκευάζονται συνήθως σε μακρόστενες λωρίδες πλάτους 0.5-2 cm και μήκους μέχρι και 1 m.

Η τεχνολογία λεπτών υμενίων εμφανίζει καλύτερη αξιοποίηση της διάχυτης και χαμηλής ακτινοβολίας, ενώ παρουσιάζουν πιο ευνοϊκούς θερμοκρασιακούς συντελεστές από τις κρυσταλλικές. Επίσης, είναι λιγότερο ευαίσθητες σε σκίαση. Το κυριότερο όμως μειονέκτημά τους, που περιορίζει ακόμη την ευρεία εμπορική τους διάδοση, είναι ο μικρός βαθμός απόδοσης. Οι πιο γνωστές τεχνολογίες λεπτών υμενίων με τις αντίστοιχες αποδόσεις είναι: *άμορφου πυριτίου* (a-Si) με 5-7%, *δισεληνιούχου ινδιούχου χαλκού* (Copper Indium diSelenide, CIS) με 9-11%, *τελλουριούχου καδμίου* (Cadmium Telluride, CdTe) με 8.5%, *μικροκρυσταλλικού ή μικροάμορφου πυριτίου* (a-Si/μc-Si) με 8-9% και *κρυσταλλικού πυριτίου σε γυαλί* (Crystalline Silicon on Glass, CSG) με 9%.

1.1.2.Γ Υβριδικά ΦΒ στοιχεία (*Heterojunction with Intrinsic Thin layer, HIT*)

Η κυψέλες *HIT* είναι ένας συνδυασμός κρυσταλλικού και άμορφου πυριτίου συνδεδεμένα με ένα μη-νοθευμένο *thin film* στρώμα (i-στρώμα). Η υβριδική αυτή τεχνολογία παρουσιάζει καλύτερη αξιοποίηση του ηλιακού φάσματος και ευνοϊκότερη θερμοκρασιακή συμπεριφορά. Είναι ίσως η εμπορικά αποδοτικότερη τεχνολογία, με βαθμούς απόδοσης 18-21%. Οι κυψέλες της έχουν τετραγωνική μορφή, πάχος περί των 0.2 mm και ομοιογενή εμφάνιση με μαύρο χρώμα.

1.1.2.Δ Άλλες ΦΒ τεχνολογίες

Επιπλέον των προαναφερθεισών τεχνολογιών, η έρευνα κινείται και σε διάφορες άλλες κατευθύνσεις που δεν έχουν οδηγήσει ακόμη σε σημαντική εμπορική διεξόδουση. Υπάρχουν ΦΒ πλαίσια που βασίζονται στην III και IV ομάδα του περιοδικού πίνακα, όπως το *αρσενικούχο γάλλιο* (GaAs), που εμφανίζουν υψηλή απορροφητικότητα ακτινοβολίας σε διάφορα φάσματα. Παρουσιάζουν βαθμούς απόδοσης έως και 25%, αλλά ιδιαίτερα υψηλό κόστος παραγωγής, και συνεπώς χρησιμοποιούνται μόνο σε αεροδιαστημικές εφαρμογές.

Άλλες εναλλακτικές τεχνολογίες είναι τα *ηλεκτροχημικά φωτοβολταϊκά* (Electrochemical photovoltaics, ECPV), των οποίων η λειτουργία στηρίζεται σε οξειδοαναγωγικές αντιδράσεις και φαινόμενα διάχυσης, αντί στα ηλεκτρικά φαινόμενα των κρυσταλλικών φωτοβολταϊκών. Η εν λόγω κατηγορία μειονεκτεί στο βαθμό απόδοσης, αλλά υπερτερεί σε θέματα κόστους, ευκολίας κατασκευής και χρήσης για ειδικές εφαρμογές. Οι δύο κύριες εκδοχές της είναι οι

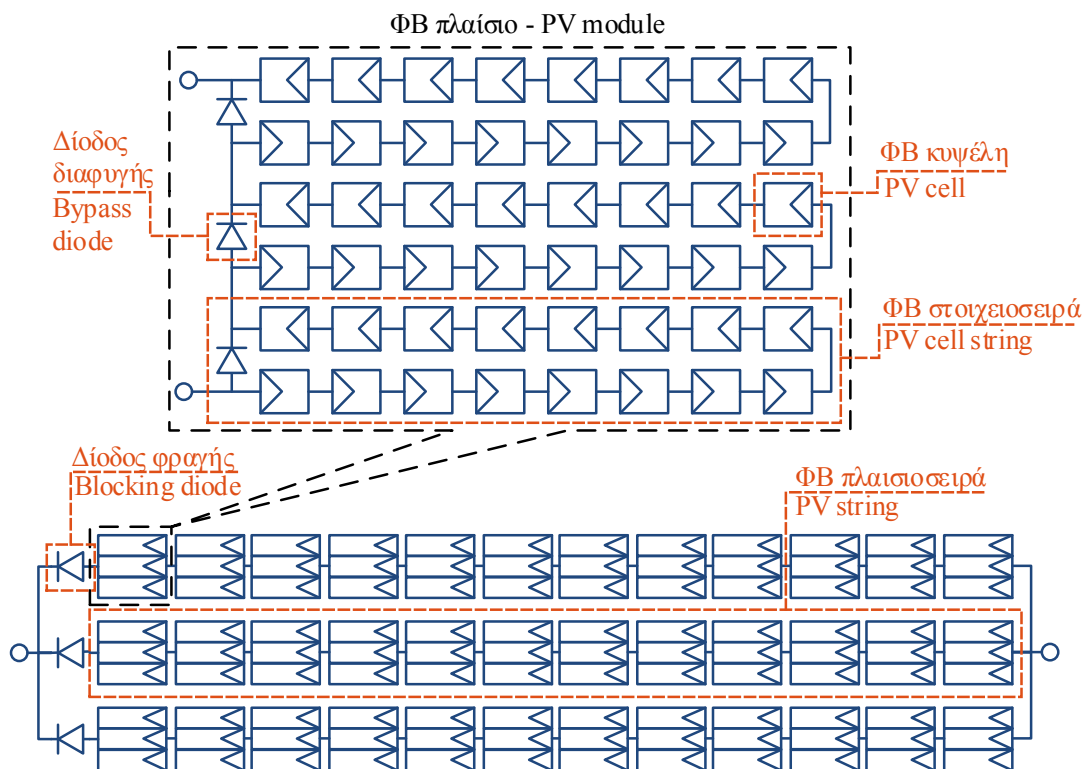
ενυαισθητοποιημένες ηλιακές κυψέλες (Dye-sensitized nanocrystalline) και οργανικές ΦΒ κυψέλες (Organic solar cells), με αποδόσεις 5% και 5-6% αντίστοιχα.

1.1.3 ΦΒ διατάξεις

Η ΦΒ κυψέλη αναπτύσσει διαφορά δυναμικού της τάξης των 0.5-1 V, τιμή ιδιαίτερα χαμηλή για τις περισσότερες εφαρμογές. Έτσι, σε ΦΒ συστήματα διασυνδεδεμένα με το ηλεκτρικό δίκτυο, πολλές κυψέλες συνδέονται σε σειρά προς επίτευξη τάσης των λίγων εκατοντάδων Volts. Το συνολικό κύκλωμα που προκύπτει από πολλές ΦΒ κυψέλες και διόδους συνδεδεμένες σε σειρά και παράλληλα, αποκαλείται *ΦΒ διάταξη* και αντιστοιχεί στη μονάδα που δέχεται στην είσοδό του ο μετατροπέας ισχύος. Στο Σχ. 1.3, απεικονίζονται διάφορες ΦΒ διατάξεις που χρησιμοποιούνται συνήθως.

Εμπορικά, η μικρότερη δομική μονάδα μίας ΦΒ διάταξης είναι το *ΦΒ πλαίσιο* (PV module), το οποίο αποτελείται από πολλές ΦΒ κυψέλες (PV cells) συνδεδεμένες σε σειρά. Το πλαίσιο είναι υδατοστεγές και προστατεύει τις κυψέλες από το εξωτερικό περιβάλλον, ενώ αναπτύσσει τάση της τάξης των λίγων δεκάδων Volts. Εντός του πλαισίου, ανά κάμποσες κυψέλες συνδέονται διόδοι παράλληλα για λόγους προστασίας σε συνθήκες ανομοιόμορφης λειτουργίας, οι οποίες αποκαλούνται *διόδοι διαφυγής* (bypass diodes) (Σχ. 1.3). Η μονάδα που περιλαμβάνει N_s σε πλήθος κυψέλες και μία δίοδο διαφυγής αποκαλείται *ΦΒ στοιχειοσειρά* (PV cell string). Έτσι, το ΦΒ πλαίσιο συνίσταται σε N_{cs} στοιχειοσειρές συνδεδεμένες σε σειρά, κάθε μία από τις οποίες περιλαμβάνει N_s κυψέλες. Τυπικές τιμές για τις ποσότητες αυτές είναι $N_s = 12-36$ και $N_{cs} = 1-6$, συνιστώντας ΦΒ πλαίσια με συνήθως 36-72 κυψέλες.

Για ανάπτυξη ακόμα μεγαλύτερης τάσης, N_m πλαίσια συνδέονται σε σειρά σχηματίζοντας τη



Σχ. 1.3. Δομή των συνηθέστερων ΦΒ διατάξεων

Π. 1.1. Χαρακτηριστικά του ΦΒ πλαισίου Yingli YL-165.

| Μοντέλο | Τύπος | I_{sc0} (A) | V_{oc0} (V) | I_{mp0} (A) | V_{mp0} (V) | P_{mp0} (W) |
|---------|----------|-----------------------|----------------------|-----------------------|---------------|---------------|
| YL-165 | mc-Si | 7.90 | 29.0 | 7.17 | 23.0 | 165 |
| N_s | N_{cs} | α_{isc} (p.u.) | β_{voc} (p.u.) | γ_{Pmp} (p.u.) | n_{cell} | n_{mod} |
| 16 | 3 | +0.0006 | -0.0037 | -0.0045 | 14.6% | 12.5% |

ΦΒ πλαισιοσειρά (PV string), ενώ N_p πλαισιοσειρές συνδέονται παράλληλα προς δημιουργία της ΦΒ συστοιχίας (PV array). Ο αριθμός N_m μπορεί να κυμαίνεται από 10 έως 30 πλαίσια, ενώ το πλήθος N_p δεν ξεπερνά συνήθως τις 4 για συστήματα χαμηλής τάσης. Κάποιες φορές, τοποθετείται μία δίοδος φραγής (blocking diode) σε σειρά με κάθε πλαισιοσειρά για αποφυγή ανάστροφων ρευμάτων σε καταστάσεις σφάλματος (Σχ. 1.3).

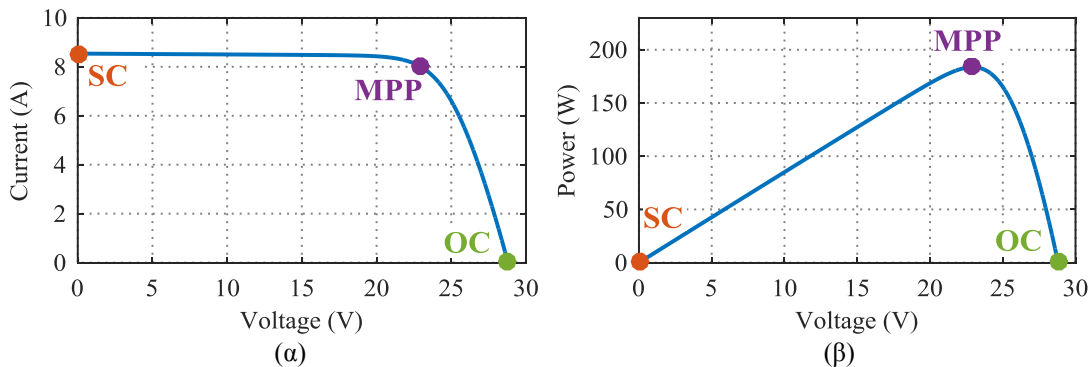
1.1.4 Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά ΦΒ πλαισίου

Τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά που αναγράφονται στο τεχνικό φυλλάδιο του ΦΒ πλαισίου παρατίθενται για μια ενδεικτική περίπτωση στον πίνακα Π. 1.1. Πέραν από την τεχνολογία και το πλήθος των κυψελών N_s και διόδων διαφυγής N_{cs} , πάντα αναφέρονται τα χαρακτηριστικά τριών σημείων λειτουργίας:

- ✓ Το σημείο βραχυκύκλωσης (short circuit – SC), κατά το οποίο το ΦΒ πλαίσιο είναι βραχυκυκλωμένο και το διαρρέον ρεύμα I_{sc0} είναι το μέγιστο.
- ✓ Το σημείο ανοιχτοκύκλωσης (open circuit – OC), όπου οι ακροδέκτες του πλαισίου είναι ανοιχτοκυκλωμένοι και αναπτύσσεται η μέγιστη τάση V_{oc0} .
- ✓ Το σημείο μέγιστης παραγωγής (maximum power point – MPP), στο οποίο προσφέρεται η μέγιστη ισχύς P_{mp0} σε τάση V_{mp0} και ρεύμα I_{mp0} .

Στα γραφήματα του Σχ. 1.4, απεικονίζονται τυπικές χαρακτηριστικές καμπύλες ρεύματος-τάσης ($I-V$) (Σχ. 1.4(α)) και ισχύος-τάσης ($P-V$) (Σχ. 1.4(β)), σημειώνοντας τα τρία προαναφερθέντα σημεία λειτουργίας. Συνήθως, τουλάχιστον η μία από τις δύο καμπύλες είναι διαθέσιμη στο τεχνικό φυλλάδιο του πλαισίου.

Στους όρους I_{sc0} , V_{oc0} , I_{mp0} , V_{mp0} και P_{mp0} του Π. 1.1, ο δείκτης “0” συμβολίζει ότι η τιμή αντιστοιχεί σε πρότυπες συνθήκες ελέγχου (Standard Test Conditions – STC), στις οποίες η ακτινοβολία είναι 1000 W/m^2 , η θερμοκρασία $25 \text{ }^\circ\text{C}$ και η αέριος μάζα 1.5. Κάποιες φορές, τα εν λόγω μεγέθη αναφέρονται και σε συνθήκες φυσιολογικής θερμοκρασίας κυψέλης (Normal Operating Cell Temperature – NOCT), ήτοι 800 W/m^2 και $45 \text{ }^\circ\text{C}$. Συνήθως η τιμή του I_{mp0} είναι



Σχ. 1.4. Τυπικές χαρακτηριστικές καμπύλες (α) $I-V$ (ρεύματος-τάσης), και (β) $P-V$ (ισχύος-τάσης). Σημειώνονται τα χαρακτηριστικά σημεία λειτουργίας στην κατάσταση βραχυκύκλωσης (SC), ανοιχτοκύκλωσης (OC) και μέγιστης παραγωγής (MPP).

ελαφρώς μικρότερη του I_{sc0} , ενώ η τάση V_{mp0} περίπου το 80% τη V_{oc0} [13], χωρίς αυτό να είναι ο κανόνας.

Βέβαια, στην πράξη το ΦΒ πλαίσιο λειτουργεί σε αυθαίρετες συνθήκες ακτινοβολίας G και θερμοκρασίας T , διαφορετικές από τις STC ή NOCT. Οι θερμοκρασιακοί συντελεστές α_{Isc} , β_{Voc} και γ_{Pmp} χρησιμοποιούνται ώστε να ανάγουν αναλογικά τα αντίστοιχα μεγέθη I_{sc0} , V_{oc0} και P_{mp0} με τη θερμοκρασία. Πρέπει να σημειωθεί ότι στην παρούσα διατριβή, η χρήση των συντελεστών αυτών θεωρείται πάντα σε κανονικοποιημένη μορφή (p.u.), και όχι απόλυτη. Επίσης, σε όλες τις μαθηματικές σχέσεις, η ακτινοβολία G είναι σε p.u. και όχι W/m^2 (π.χ. $G = 0.8$ που σημαίνει $800 W/m^2$) και η θερμοκρασία T σε βαθμούς Kelvin (π.χ. $T = 298.15 K$ για $25^\circ C$).

Τέλος, ο βαθμός απόδοσης της κυψέλης n_{cell} (Π. 1.1) αναφέρεται σε πρότυπες συνθήκες, συνήθως STC, που σημαίνει ότι διαφοροποιείται σημαντικά σε άλλες καταστάσεις, ειδικά θερμοκρασίας. Αξίζει να σημειωθεί πως ο βαθμός απόδοσης του πλαισίου n_{mod} είναι αισθητά χαμηλότερος, κυρίως λόγω της νεκρής επιφάνειας μεταξύ των κυψελών που παραμένει ακάλυπτη.

1.2 Επίδραση της Σκίασης στην Απόδοση ενός ΦΒ Συστήματος

Η ενεργειακή παραγωγή ενός ΦΒ συστήματος δεν είναι ποτέ στην πράξη αυτή που αντιστοιχεί στο τεχνικό φυλλάδιο. Πέραν από τις καθοριστικές περιβαλλοντικές συνθήκες της ακτινοβολίας και θερμοκρασίας, υπάρχει πληθώρα επιπλέον παραγόντων μείωσης της απόδοσης του συστήματος (derating factors), οι οποίοι κατανέμονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες: τις αιτίες μείωσης της παραγόμενης ΦΒ ισχύος και τις ηλεκτρικές απώλειες κατά τη μετατροπή και μεταφορά της.

Η πρώτη ομάδα αφορά τους παράγοντες για τους οποίους η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από τη ΦΒ διάταξη είναι ελαττωμένη [8]:

- ✓ *Μη βέλτιστη καθετότητα με τις ακτίνες της ηλιακής ακτινοβολίας.* Όταν η κλίση και ο προσανατολισμός της ΦΒ διάταξης δεν είναι ο ιδανικός, μειώνεται σημαντικά ο βαθμός απορρόφησης της ηλιακής ακτινοβολίας, καθώς αξιοποιείται μόνο η κάθετη συνιστώσα της. Συχνά χρησιμοποιούνται συστήματα ηλιοπαρακολούθησης (ή ιχνηλάτησης – trackers) για εξασφάλιση συνεχούς καθετότητας κατά τη διάρκεια της ημέρας.
- ✓ *Οπτικές απώλειες.* Για μεγάλες γωνίες πρόσπτωσης, τυπικά άνω των 60° , ένα αξιόλογο τμήμα της προσπίπτουσας ακτινοβολίας ανακλάται στη γυάλινη επιφάνεια των ΦΒ πλαισίων και χάνεται.
- ✓ *Απώλειες ηλιακού φάσματος.* Το ηλιακό φάσμα υφίσταται διακυμάνσεις κατά τη διάρκεια της ημέρας, οι οποίες συνεπάγονται ανξομείωση της απορροφησιμότητας της ηλιακής ακτινοβολίας από τις ΦΒ κυψέλες.
- ✓ *Ρύπανση.* Όταν η επιφάνεια των ΦΒ πλαισίων ρυπαίνεται από σκόνη, λάσπη και άλλους ρύπους, μειώνεται αναλόγως η ενεργός ακτινοβολία που φτάνει στις ΦΒ κυψέλες.
- ✓ *Γήρανση.* Τυπικά, η απόδοση ενός ΦΒ πλαισίου μειώνεται με ρυθμό 0.5-1.0% τον χρόνο λόγω φυσικής φθοράς.

- ✓ *Μερική σκίαση.* Η ανομοιόμορφη κατανομή της ακτινοβολίας στην επιφάνεια μίας ΦΒ διάταξης επιφέρει σημαντικά δυσανάλογη μείωση στην ηλεκτρική της παραγωγή. Αποτελεί ίσως τον κυριότερο και δυσκολότερο αντιμετωπίσιμο παράγοντα μείωσης της απόδοσης.

Η δεύτερη κατηγορία, περιλαμβάνει τις απώλειες κατά τη μετατροπή και μεταφορά της ηλεκτρικής ισχύος από τη ΦΒ διάταξη έως το σημείο σύνδεσης με το ηλεκτρικό δίκτυο. Οφείλονται κυρίως στις καλωδιώσεις στο dc και ac τμήμα, σε διόδους και λοιπό διακοπτικό εξοπλισμό, στον μετατροπέα ισχύος, στον μετασχηματιστή (αν υπάρχει), σε μικροδιαφοροποιήσεις των ΦΒ πλαισίων μεταξύ τους κ.α. [8].

Αντικείμενο της παρούσας έρευνας είναι η μελέτη και ανάλυση του πολυπλοκότερου και πιο κρίσιμου παράγοντα μείωσης της απόδοσης ενός ΦΒ συστήματος: της μερικής σκίασης. Στη συνέχεια δίνεται μια σύντομη περιγραφή του φαινομένου και των δυσκολιών που προξενεί, ενώ ακολουθεί εκτενής βιβλιογραφική ανασκόπηση μοντέλων της βιβλιογραφίας που επιχειρούν την ποσοτικοποίηση αυτών των συνεπειών.

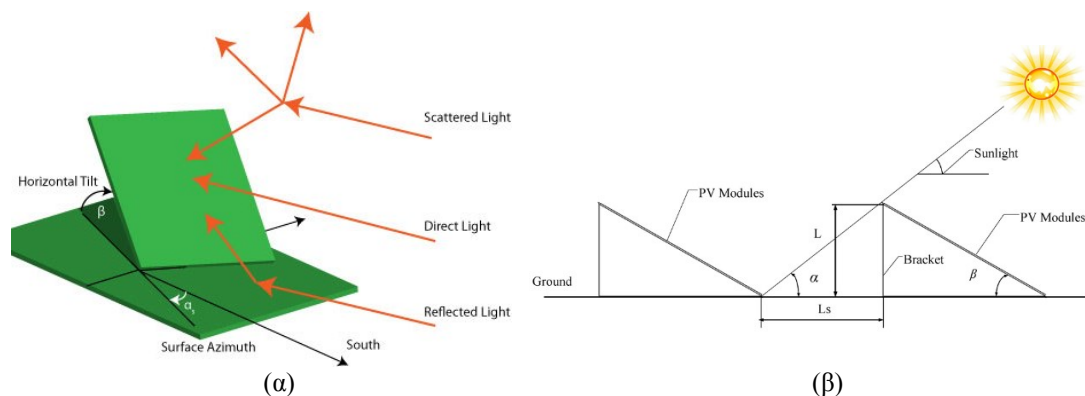
1.2.1 Ηλιακή ενέργεια και γεωμετρία σκίασης

1.2.1.A Ηλιακή ακτινοβολία

Η ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στην επιφάνεια μίας ΦΒ διάταξης, αποτελείται από τρία κύρια μέρη: την άμεση ή ακτινική συνιστώσα (direct/beam component), τη διάχυτη ακτινοβολία (diffuse/scattered light) και την ανακλώμενη συνιστώσα (reflected irradiance, albedo) (Σχ. 1.5(α)).

Η ακτινική συνιστώσα αντιστοιχεί στην ακτινοβολία που καταφτάνει άμεσα από τον ήλιο χωρίς παρεμπόδιση ή αλλαγή κατεύθυνσης, ενώ εξαρτάται καθαρά από τη σχετική θέση του ήλιου σε σχέση με τη ΦΒ διάταξη. Αντίθετα, η διάχυτη ακτινοβολία προκύπτει από σκέδαση στην ατμόσφαιρα και προσπίπτει στην επιφάνεια του ηλιακού συλλέκτη από διάφορες κατευθύνσεις, σχεδόν ομοιόμορφα από τον ουράνιο θόλο. Η ανακλώμενη συνιστώσα προέρχεται από ανάκλαση της ηλιακής ακτινοβολίας σε παρακείμενα αντικείμενα, και κυρίως στο έδαφος [16].

Η αναλογία των τριών συνιστωσών στο σύνολο της ηλιακής ακτινοβολίας εξαρτάται από τις συνθήκες νέφωσης, την ώρα της ημέρας, όπως επίσης και από την κλίση των συλλεκτών και την ανακλαστικότητα της επιφάνειας του εγγύτερου εδάφους (ειδικά για την ανακλώμενη).



Σχ. 1.5. (α) Συνιστώσες ηλιακής ακτινοβολίας [14], και (β) γεωμετρία αλληλοσκίασης παρακείμενων ΦΒ συλλεκτών [15].

Βέβαια, σε συνθήκες υψηλής ακτινοβολίας που έχουν πρακτική σημασία, η άμεση συνιστώσα είναι πάντα η κυρίαρχη.

1.2.1.B Σκίαση της ΦΒ διάταξης

Ως *σκίαση*, ορίζεται το φαινόμενο κατά το οποίο μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας παρεμποδίζεται και δεν προσπίπτει στην επιφάνεια του ηλιακού συλλέκτη. Ειδικά με τον όρο *μερική σκίαση*, νοείται η άνιση κατανομή της ακτινοβολίας στην επιφάνεια μιας ΦΒ διάταξης, δηλαδή όταν τα τμήματα της διάταξης υπόκεινται σε ακτινοβολία διαφορετικής έντασης. Προκαλείται συνήθως από στερεά αντικείμενα και εμπόδια στον εγγύτερο χώρο, όπως τμήματα κτιρίων, δέντρα, κλπ., αλλά κυρίως από τμήματα του ίδιου του ΦΒ σταθμού (άλλες ΦΒ διατάξεις) που είναι τοποθετημένα πλησίον σε μικρή απόσταση (αλληλοσκίαση). Επίσης, μπορεί να προξενάται από νέφωση ή ανομοιομορφη ρύπανση στα ΦΒ πλαίσια.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η μελέτη της μερικής σκίασης που προκαλείται από τα στερεά σώματα, και ιδίως η αλληλοσκίαση διαδοχικών σειρών, η οποία είναι ντετερμινιστική και εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις σχεδιαστικές επιλογές της εγκατάστασης. Σε αυτήν την περίπτωση, η σκίαση δημιουργείται από παρεμπόδιση κυρίως της ακτινικής συνιστώσας τη ακτινοβολίας. Η ένταση και έκταση του φαινομένου εξαρτώνται από ένα πλήθος παραγόντων, όπως η απόσταση μεταξύ διαδοχικών ΦΒ διατάξεων, οι διαστάσεις τους, και γενικά η τρισδιάστατη χωροταξία τους σε συνδυασμό με το γεωγραφικό πλάτος (Σχ. 1.5(β)). Δεδομένου ότι η σκίαση επηρεάζεται από την ώρα και μέρα του χρόνου, κατά τη σχεδίαση ενός ΦΒ σταθμού πρέπει τα ΦΒ πλαίσια να κατανέμονται κατάλληλα στον χώρο, ώστε να ελαχιστοποιούνται οι συνέπειές της μεσοσταθμικά κατά τη διάρκεια του έτους. Περαιτέρω ανάλυση της γεωμετρίας της σκίασης είναι διαθέσιμη στις [2], [8], [17]–[23].

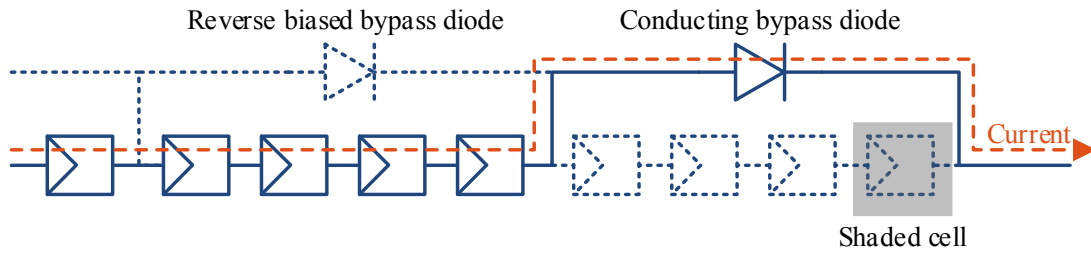
Βέβαια, η επίδραση της μερικής σκίασης στην ηλεκτρική απόκριση ενός ΦΒ συστήματος είναι ένα ιδιαίτερα περίπλοκο φαινόμενο και με σημαντικό αντίκτυπο στην ηλεκτρική παραγωγή. Στη συνέχεια, γίνεται μια εισαγωγή επί των θεμελιωδών αρχών του θέματος, ενώ στο υπόλοιπο κείμενο χρησιμοποιείται συχνά η έκφραση “σκίαση” με την έννοια της “μερικής σκίασης” για λόγους σύντηξης.

1.2.2 Ηλεκτρική απόκριση σε συνθήκες σκίασης

Το θεμελιώδες πρόβλημα κατά τη λειτουργία ενός ΦΒ πλαισίου υπό συνθήκες μερικής σκίασης έγκειται στη σειριακή σύνδεση των κυψελών, η οποία συνεπάγεται κοινό ρεύμα. Όταν η ένταση της ακτινοβολίας διαφοροποιείται ανάμεσα στις κυψέλες, αλλάζουν αντίστοιχα και οι δυνατότητές τους σε ρεύμα, που σημαίνει ότι το σύνολο των κυψελών προσαρμόζεται στο μειωμένο ρεύμα που μπορούν να υποστηρίξουν οι περισσότερες σκιασμένες από αυτές.

Όπως εξηγείται λεπτομερώς στην ενότητα 3.2, αυτή η κατάσταση οδηγεί σε α) δυσανάλογη μείωση της ηλεκτρικής παραγωγής σε επίπεδο στοιχειοσειράς, και β) ανάπτυξη αρνητικής τάσης στις σκιασμένες κυψέλες και απορρόφηση ισχύος. Το φαινόμενο αυτό στην ακραία του μορφή οδηγεί στην εμφάνιση θερμικών κηλίδων (hot spot effect) και σημαντική φθορά, έως και καταστροφή (cracking), των αντίστοιχων κυψελών.

Για αντιμετώπιση της εν λόγω κατάστασης, τοποθετούνται δίοδοι διαφυγής ανά ομάδες κυψελών ώστε να απομονωθούν οι στοιχειοσειρές, διασώζοντας έτσι ένα μεγάλο μέρος της ισχύος και προστατεύοντας τις σκιασμένες κυψέλες. Ένα σχηματικό παράδειγμα

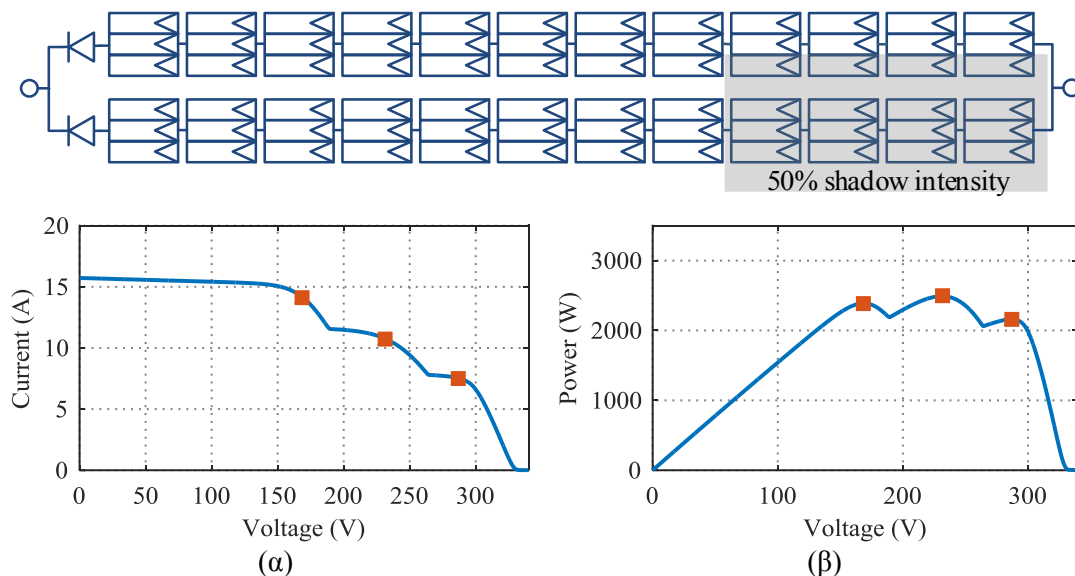


Σχ. 1.6. Σχηματική επεξήγηση της λειτουργίας μερικώς σκιασμένου ΦΒ πλαισίου.

παρουσιάζεται στο Σχ. 1.6, όπου σκιάζεται μία από τις συνολικά τέσσερις κυψέλες μίας στοιχειοσειράς. Αν δεν υπήρχαν οι διόδους διαφυγής, όλες οι κυψέλες όλων των στοιχειοσειρών (εννιά σε πλήθος στο Σχ. 1.6) θα περιορίζονταν από το μειωμένο ρεύμα της σκιασμένης κυψέλης. Αντίθετα, με την ύπαρξη των διόδων, οι πλήρως ασκίαστες στοιχειοσειρές (αριστερά στο Σχ. 1.6) προσφέρουν όσο ρεύμα μπορούν, το οποίο διαρρέει τη σκιασμένη στοιχειοσειρά (δεξιά στο Σχ. 1.6) μέσω της διόδου διαφυγής που άγει. Έτσι, η σκιασμένη στοιχειοσειρά απλώς παρακάμπτεται, απορρίπτοντας πλήρως την ενέργειά της, αλλά διασώζοντας την ενέργεια του υπόλοιπου κυκλώματος.

Όμως, η παρενέργεια της χρήσης των διόδων διαφυγής είναι η ποιοτική τροποποίηση των χαρακτηριστικών καμπυλών $I-V$ και $P-V$ και η εμφάνιση πολλαπλών κορυφών ισχύος (τοπικών μεγίστων ισχύος – MPPs). Ένα αντιπροσωπευτικό παράδειγμα παρατίθεται στο Σχ. 1.7, όπου παρουσιάζονται τρία MPPs στις χαρακτηριστικές μίας μερικώς σκιασμένης ΦΒ συστοιχίας.

Το εν λόγω φαινόμενο δημιουργεί δυσκολίες τόσο κατά το στάδιο μελέτης ενός ΦΒ σταθμού, όσο και κατά τη λειτουργία του. Η ύπαρξη πολλαπλών MPPs καθιστά ιδιαίτερα περίπλοκη διαδικασία τον προσδιορισμό της μέγιστης ισχύος ενός ΦΒ συστήματος σε συνθήκες μερικής σκίασης. Συνεπώς, τα περισσότερα λογισμικά μελέτης και εγκατάστασης ΦΒ σταθμών λαμβάνουν υπεραπλουστευτικές παραδοχές και οδηγούνται σε ανακριβή αποτελέσματα όταν υπάρχει έντονη σκίαση. Όμως, και κατά τη λειτουργία του συστήματος, ο αλγόριθμος



Σχ. 1.7. Παράδειγμα μερικής σκίασης ΦΒ συστοιχίας. Στις χαρακτηριστικές (α) $I-V$ και (β) $P-V$ εμφανίζονται τρία τοπικά μέγιστα MPPs.

εντοπισμού του μέγιστου σημείου λειτουργίας (maximum power point tracking – MPPT) που εκτελεί ο μετατροπέας ισχύος, συχνά παγιδεύεται σε ένα υποβέλτιστο τοπικό μέγιστο και δεν εξάγει από το ΦΒ σύστημα την πραγματικά μέγιστη ισχύ.

Η πολυπλοκότητα του φαινομένου και η έντονα δυσανάλογη επίδρασή του στην ηλεκτρική απόκριση και απόδοση του ΦΒ συστήματος, το καθιστούν ένα από τα δημοφιλέστερα αντικείμενα έρευνας στο χώρο των φωτοβολταϊκών. Στο σημείο αυτό συμβάλει η παρούσα διατριβή, προτείνοντας διάφορα μοντέλα και αναλυτικές σχέσεις, όπως επίσης και ανθεκτικούς αλγορίθμους MPPT για συνθήκες μερικής σκίασης. Στη συνέχεια παρουσιάζεται λεπτομερής ανασκόπηση των ήδη υπαρχόντων μοντέλων της βιβλιογραφίας, όπως δημοσιεύτηκε στην [24].

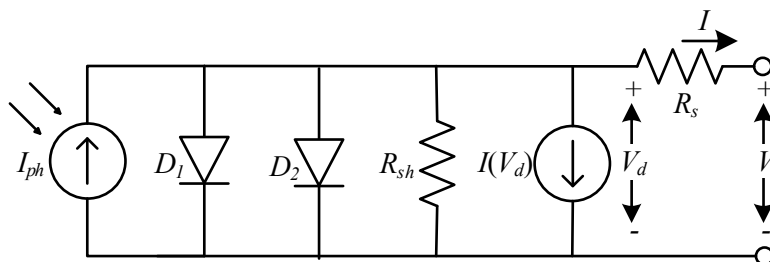
1.2.3 Βιβλιογραφική ανασκόπηση ενεργειακών ΦΒ μοντέλων για σκίαση

Εστιάζοντας στην κρυσταλλική τεχνολογία, υπάρχουν πληθώρα ενεργειακών μοντέλων στη βιβλιογραφία [25]–[70] κατάλληλα για συνθήκες σκίασης. Στις ακόλουθες παραγράφους, τα μοντέλα αυτά μελετώνται και αναλύονται στους άξονες της ακρίβειας, της αξιοπιστίας, της ευκολίας χρήσης και του σκοπού εφαρμογής. Επιπλέον, κατηγοριοποιούνται ανάλογα με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά που ενδιαφέρουν: τη μέθοδο μοντελοποίησης, τον τρόπο εξαγωγής παραμέτρων, το βάθος ανάλυσης (μέχρι το πλαίσιο, την κυψέλη κλπ.), το υπολογιστικό κόστος, το πλήθος των επιπέδων ακτινοβολίας, και την παροχή πειραματικής επιβεβαίωσης. Δίνεται πλήρης ταξινόμηση βάσει των προαναφερθέντων χαρακτηριστικών σε μορφή λίστας.

1.2.3.A Εισαγωγή

Ένα ενεργειακό ΦΒ μοντέλο περιλαμβάνει ένα ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα, μαθηματικές εξισώσεις, ένα σετ παραμέτρων και μια σαφή μεθοδολογία προσδιορισμού της ηλεκτρικής απόκρισης του ΦΒ συστήματος, και ιδιαίτερα της ενεργειακής του παραγωγής. Οι είσοδοι σε αυτήν τη διαδικασία είναι τα χαρακτηριστικά της εγκατάστασης, όπως οι ιδιότητες των ΦΒ πλαισίων, η χωροταξία και διασύνδεσή τους, καθώς και οι συνθήκες λειτουργίας σε όρους ακτινοβολίας και θερμοκρασίας. Τα αποτελέσματα ενός ενεργειακού μοντέλου μπορεί να είναι συγκεκριμένα σημεία λειτουργίας, όπως τα τοπικά μέγιστα και το ολικό βέλτιστο MPP (global MPP – GMPP), ή ολόκληρη η χαρακτηριστική καμπύλη $I-V$ και $P-V$. Ειδικά για την περίπτωση της ανομοιόμορφης ακτινοβολίας (μερική σκίαση), ο προσδιορισμός των ανωτέρω χαρακτηριστικών είναι μια ιδιαίτερα περίπλοκη διαδικασία.

Στο Σχ. 1.8, απεικονίζεται ένα αντιπροσωπευτικό κύκλωμα για τη ΦΒ κυψέλη βασισμένο στο ΦΒ μοντέλο δύο διόδων. Αποτελείται από μία πηγή φωτορεύματος I_{ph} , δύο διόδους D_1 και D_2 , μία σειριακή R_s και μία εγκάρσια αντίσταση R_{sh} , καθώς και έναν όρο $I(V_d)$ που περιγράφει



Σχ. 1.8. Ισοδύναμο κύκλωμα του μοντέλου δύο διόδων με επαύξηση για αρνητική τάση.

την περιοχή κατάρρευσης των διόδων. Παρόμοιας φύσης ισοδύναμα κυκλώματα υιοθετούνται στα περισσότερα μοντέλα, όλα βασισμένα στην ηλεκτρονική θεωρία [25]–[36], [38], [40], [41], [43]–[46], [48]–[50], [52]–[61], [63], [65]–[70]. Τα μοντέλα που είναι διαθέσιμα στη βιβλιογραφία διαφέρουν σημαντικά ως προς τη φιλοσοφία μοντελοποίησης, την ακρίβεια, την πολυπλοκότητα και το σκοπό εφαρμογής. Στον ακόλουθο πίνακα Π. 1.2, δίνεται μία ταξινόμηση των μοντέλων [25]–[70] βάσει των σημαντικότερων χαρακτηριστικών τους, τα οποία αναλύονται με μεγαλύτερη λεπτομέρεια στις επόμενες παραγράφους.

Π. 1.2. Ταξινόμηση και χαρακτηρισμός των ενεργειακών ΦΒ μοντέλων για συνθήκες σκίασης.

| Αναφορά | Μέθοδος μοντελοποίησης | Εξαγωγή παραμέτρων | Πειραμ. μετρήσεις | Κλίμακα μοντελοπ. | Αλγόριθμος υπολογισμού | Επίπεδα ακτινοβολ. |
|---------|------------------------------------|---------------------------------|-------------------|-------------------|---|--------------------|
| [25] | Single-diode equivalent + neg | Random from normal distribution | Yes | Cell to Array | Evaluation of explicit equations + linear interpolation | Any |
| [26] | Double-diode equivalent + neg | Specific values assumed | Yes | Cell to Array | Numerical solution of system of equations | Any |
| [27] | Single-diode equivalent + neg | Measurements + datasheet | No | Cell to Array | Not stated | Any |
| [28] | Single-diode equivalent | Random from normal distribution | No | Cell to Array | Numerical solution of system of equations | Any |
| [29] | Single-diode equivalent + neg | Specific values assumed | Yes | Cell to Module | Numerical solution of system of equations | Any |
| [30] | Single-diode equivalent - No Rs | Specific values assumed | No | Cell to Array | Alternative iterative algorithm | Any |
| [31] | Single-diode equivalent | Not stated | No | Cell to Array | Numerical solution of system of equations | Any |
| [32] | Single-diode equivalent + neg | Specific values assumed | No | Cell to String | Not stated | Any |
| [33] | Single-diode equivalent | Measurements + datasheet | No | Cell to Array | Numerical solution of system of equations | Any |
| [34] | Single-diode equivalent | Specific values assumed | No | Module to Array | Numerical solution of system of equations | Any |
| [35] | Single-diode equivalent + neg | Specific values assumed | Yes | Cell to Module | Circuit simulation in SIMULINK | Any |
| [36] | Single-diode equivalent | Datasheet | Yes | Cell to Array | Numerical solution of individual equations + linear interpolation | Any |
| [37] | Artificial Neural Network | Measurements + datasheet | Yes | PV plant | Artificial Neural Network | 2 |
| [38] | Double-diode equivalent + neg | Specific values assumed | Yes | Cell to Array | Circuit simulation in PSPICE | Any |
| [39] | Empirical mathematical expressions | Empirical constants + datasheet | Yes | PV plant | Evaluation of empirical explicit expressions | 2 |

1.2 - Επίδραση της Σκίασης στην Απόδοση ενός ΦΒ Συστήματος

| | | | | | | |
|------|--|---------------------------------|-----|----------------------------|---|-----|
| [40] | Single-diode equivalent | Measurements + datasheet | Yes | <i>Module to Array</i> | Numerical solution of system of equations | Any |
| [41] | Double-diode equivalent + neg | Specific values assumed | No | <i>Cell to Array</i> | Circuit simulation in PSPICE | Any |
| [42] | Empirical mathematical expressions | Datasheet | Yes | <i>PV plant</i> | Evaluation of empirical explicit expressions | 2 |
| [43] | Double-diode equivalent | Datasheet | Yes | <i>Cell to Array</i> | Numerical solution of individual equations + linear interpolation | Any |
| [44] | Single-diode equivalent | Not stated | No | <i>Cell to Module</i> | Circuit simulation in SIMULINK+PSPICE | Any |
| [45] | Single-diode equivalent - No Rs/Rsh | Datasheet | No | <i>Cellstring to Array</i> | Numerical solution of system of equations | Any |
| [46] | Single-diode equivalent | Measurements + datasheet | Yes | <i>Cell to Array</i> | Circuit simulation in PSCAD | Any |
| [47] | Artificial Neural Network | Measurements + datasheet | Yes | <i>Module</i> | Artificial Neural Network | 2 |
| [48] | Double-diode equivalent | Datasheet | Yes | <i>Module to Array</i> | Circuit simulation in SIMULINK | Any |
| [49] | Double-diode equivalent + neg / mathematical expressions | Empirical constants + datasheet | Yes | <i>Cell to Module</i> | Evaluation of explicit equations | 2 |
| [50] | Piecewise model | Specific values assumed | No | <i>Module to Array</i> | Numerical solution of system of equations | Any |
| [51] | Empirical mathematical expressions | Empirical constants + datasheet | Yes | <i>PV plant</i> | Evaluation of empirical explicit expressions | 2 |
| [52] | Single-diode equivalent + neg | Specific values assumed | No | <i>Cell to Array</i> | Numerical solution of system of equations | Any |
| [53] | Single-diode equivalent | Datasheet | No | <i>Cell to Array</i> | Circuit simulation in SIMULINK | 2 |
| [54] | Single-diode equivalent | Datasheet | Yes | <i>Cell to Array</i> | Circuit simulation in SIMULINK | 2 |
| [55] | Single-diode equivalent | Specific values assumed | No | <i>Module to String</i> | Numerical solution of system of equations | Any |
| [56] | Single-diode equivalent - No Rs/Rsh | Datasheet | No | <i>Module to Array</i> | Numerical solution of system of equations | Any |
| [57] | Single-diode equivalent - No Rsh | Measurements + datasheet | Yes | <i>cell to array</i> | Circuit simulation in SIMULINK | Any |
| [58] | Single-diode equivalent | Specific values assumed | Yes | <i>Module to Array</i> | Numerical solution of system of equations | Any |
| [59] | Single-diode equivalent | Not stated | No | <i>Cell to String</i> | Numerical solution of individual equations + linear interpolation | 2 |

| | | | | | | |
|------|--|---------------------------------|-----|------------------------|---|-----|
| [60] | Empirical mathematical expressions | Specific values assumed | Yes | <i>Cell to Module</i> | Numerical solution of a single equation | 2 |
| [61] | Single-diode equivalent | Specific values assumed | Yes | <i>Module to Array</i> | Numerical solution of system of equations | Any |
| [62] | Empirical mathematical expressions | Empirical constants + datasheet | No | <i>Cell to Array</i> | Evaluation of empirical explicit expressions | 2 |
| [63] | Piecewise model | Datasheet | Yes | <i>Cell to Array</i> | Numerical solution of system of equations | Any |
| [64] | Empirical mathematical expressions | Empirical constants + datasheet | Yes | <i>Module to Array</i> | Evaluation of empirical explicit expressions | 2 |
| [65] | Double-diode equivalent | Measurements + datasheet | Yes | <i>Cell to Array</i> | Circuit simulation in PSPICE | Any |
| [66] | Single-diode equivalent | Datasheet | No | <i>Cell to Array</i> | Circuit simulation in SIMULINK | 2 |
| [67] | Single-diode equivalent + neg / mathematical expressions | Empirical constants + datasheet | Yes | <i>Cell to String</i> | Evaluation of explicit equations | Any |
| [68] | Empirical mathematical expressions | Empirical constants + datasheet | Yes | <i>Cell to Array</i> | Evaluation of explicit equations | Any |
| [69] | Piecewise model | Not stated | Yes | <i>Module to Array</i> | Evaluation of explicit equations + linear interpolation | Any |
| [70] | Single-diode equivalent | Not stated | No | <i>Cell to Array</i> | Numerical solution of system of equations | Any |

1.2.3.B Μέθοδος μοντελοποίησης

Η πλειοψηφία των υπό μελέτη εργασιών χρησιμοποιούν ένα ηλεκτρικό κύκλωμα για τη θεμελιώδη δομική μονάδα, που μπορεί να αντιστοιχεί στη ΦΒ κυψέλη, πλαίσιο ή ολόκληρη συστοιχία, ανάλογα την κλίμακα μοντελοποίησης. Το πιο ευρέως διαδεδομένο μοντέλο είναι το *μοντέλο μίας διόδου*, το κύκλωμα του οποίου αντιστοιχεί στο Σχ. 1.8, αν αφαιρεθεί η δεύτερη διάδος D_2 και ο όρος για αρνητικές τάσεις $I(V_d)$ [28], [31], [33], [34], [36], [40], [44], [46], [53]–[55], [58], [59], [61], [66], [70]. Υπάρχουν επίσης διάφορες απλουστευμένες εκδοχές του εν λόγω κυκλώματος, όπου αμελείται η σειριακή ή/και εγκάρσια αντίσταση [30], [45], [56], [57].

Όταν απαιτείται η περιγραφή της λειτουργίας στην περιοχή κατάρρευσης (σε αρνητική τάση), προτείνονται διάφορες επεκτάσεις στη βιβλιογραφία (συμβολίζονται με τον όρο *+neg*) [25], [27], [29], [32], [35], [52], [67]. Το πληρέστερο κύκλωμα βασίζεται στο *μοντέλο των δύο διόδων*, με ή χωρίς τον όρο *+neg*, όπως φαίνεται στο Σχ. 1.8 [26], [38], [41], [43], [48], [49], [65], ενώ διάφορες *απλοποιήσεις* δίνονται στις [50], [63], [69]. Όλες οι προαναφερθείσες μέθοδοι χρησιμοποιούν το υιοθετημένο μοντέλο ως τη βασική μονάδα για το σχηματισμό του πλήρους κυκλώματος που περιγράφει όλο το ΦΒ σύστημα. Το τελικό κύκλωμα επιλύεται

συνήθως από κατάλληλο λογισμικό προσομοίωσης ηλεκτρικών κυκλωμάτων ή ειδικούς αλγορίθμους. Αυτή η κατηγορία μεθόδων είναι η ακριβέστερη και συνάμα πολυπλοκότερη, επιτρέποντας κατασκευή ολόκληρης της χαρακτηριστικής $I-V$ και πλήρη μοντελοποίηση της ηλεκτρικής απόκρισης του συστήματος.

Βέβαια, υπάρχουν και εναλλακτικές προσεγγίσεις έναντι της λεπτομερούς και κοπιώδους κυκλωματικής μεθόδου, οι οποίες εστιάζουν σε συγκεκριμένα σημεία λειτουργίας, όπως τα MPPs, αποφεύγοντας έτσι την κατασκευή της χαρακτηριστικής $I-V$ και $P-V$. Συνήθως εφαρμόζουν απλές και εύχρηστες μαθηματικές σχέσεις, ενσωματώνοντας συχνά εμπειρικούς όρους, οι οποίες παρουσιάζουν μέτρια ακρίβεια [39], [42], [51], [60], [62], [64], [67], [68]. Εφαρμογές νευρωνικών δικτύων (artificial neural networks – ANN) προτείνονται στις [37], [47].

1.2.3.Γ Εξαγωγή παραμέτρων του μοντέλου

Στις κυκλωματικές προσεγγίσεις, οι παράμετροι του μοντέλου αντιστοιχούν στα στοιχεία του κυκλώματος (I_{ph} , R_s , χαρακτηριστικά διόδου κλπ.). Συνήθως, αυτά τα δεδομένα δεν είναι διαθέσιμα στο τεχνικό φυλλάδιο του ΦΒ πλαισίου και χρειάζεται να υπολογισθούν. Κάποια από τα υπό μελέτη μοντέλα εξάγουν τις παραμέτρους σε συνθήκες STC και στη συνέχεια ανάγουν τις τιμές τους στις εκάστοτε συνθήκες ακτινοβολίας και θερμοκρασίας, χρησιμοποιώντας μόνο πληροφορίες του τεχνικού φυλλαδίου [36], [42], [43], [45], [48], [53], [54], [56], [63], [66]. Για τον σκοπό αυτό, σχηματίζεται ένα σύστημα εξισώσεων που επιλύεται με αριθμητική/επαναληπτική μέθοδο. Συγκεκριμένα στις [45], [56], το σύστημα εξισώσεων επιλύεται συμβολικά/αναλυτικά, λόγω της απλότητας του μοντέλου (μοντέλο τριών παραμέτρων). Άλλες προσεγγίσεις βασίζονται σε πειραματικές μετρήσεις, όπως η χαρακτηριστική $I-V$ ή συγκεκριμένα σημεία λειτουργίας, τα οποία συνδυάζονται με τις πληροφορίες του τεχνικού φυλλαδίου για την εξαγωγή των παραμέτρων του μοντέλου με τεχνικές προσαρμογής καμπύλης (curve fitting) [27], [40], νευρωνικών δικτύων [33], [37], [47] ή μέσω απλουστευμένων αναλυτικών εκφράσεων [46], [57], [65].

Παρομοίως, οι εμπειρικές μέθοδοι που δε βασίζονται σε ισοδύναμα κυκλώματα, χρησιμοποιούν και αυτές ένα σετ παραμέτρων, συνήθως εμπειρικής φύσεως. Σε συνδυασμό με τα χαρακτηριστικά του ΦΒ πλαισίου και τις συνθήκες λειτουργίας, συνιστούν τα δεδομένα εισόδου των μαθηματικών εκφράσεων που υπολογίζουν την ενεργειακή παραγωγή του ΦΒ συστήματος [39], [42], [49], [51], [62], [64], [67], [68].

Οι υπόλοιπες μέθοδοι της ανασκόπησης δεν προτείνουν μια σαφή διαδικασία για τον προσδιορισμό των παραμέτρων του μοντέλου. Είτε, θεωρούν συγκεκριμένες τιμές για την κάθε περίπτωση [26], [29], [30], [32], [34], [35], [38], [41], [50], [52], [55], [58], [60], [61], είτε παράγουν τιμές από κανονική κατανομή [25], [28], ενώ σε κάποιες εργασίες δεν αναφέρονται καθόλου [31], [44], [59], [69], [70].

1.2.3.Α Κλίμακα μοντελοποίησης

Η έννοια κλίμακα μοντελοποίησης περιγράφει το ποια είναι η μικρότερη δομική μονάδα του συστήματος και μέχρι ποιο μέγεθος ΦΒ διάταξης μπορεί να υποστηριχθεί από το μοντέλο. Οι ακριβέστερες εκ των μεθόδων υποστηρίζουν την πλήρη κλίμακα: από τη κυψέλη μέχρι τη συστοιχία, μοντελοποιώντας οποιαδήποτε σενάριο ανομοιομόρφης λειτουργίας [25]–[28], [30], [31], [33], [36], [38], [41], [43], [46], [52]–[54], [57], [62], [63], [65], [66], [68], [70].

Άλλες μέθοδοι θεωρούν τη στοιχειοσειρά ή το πλαίσιο ως τη θεμελιώδη δομική μονάδα του συστήματος για λόγους απλότητας [34], [40], [45], [48], [50], [56], [58], [61], [64], [69], ή περιορίζονται σε σειριακές ΦΒ διατάξεις υποστηρίζοντας κλίμακα τύπου κυψέλη έως πλαίσιοσειρά [32], [59], [67], πλαίσιο έως πλαίσιοσειρά [55], ή ακόμη και κυψέλη έως πλαίσιο [29], [35], [44], [47], [49], [60]. Κάποια από τα εμπειρικά μοντέλα, που δεν υιοθετούν τη σπονδυλωτή δομή των κυκλωματικών προσεγγίσεων, εφαρμόζονται σε οποιαδήποτε ΦΒ σταθμό ασχέτως της διάταξης ή συνδεσμολογίας του [37], [39], [42], [51].

1.2.3.E Αλγόριθμος υπολογισμού και πολυπλοκότητα

Η υπολογιστική διαδικασία του μοντέλου είναι κρίσιμη παράμετρος για την εφαρμογή, τη στιβαρότητα και την πολυπλοκότητα της μεθόδου. Οι κυκλωματικές προσεγγίσεις βασίζονται είτε σε αλγορίθμους επίλυσης εξισώσεων που υλοποιούνται σε μαθηματικά εργαλεία, όπως *MATLAB*, είτε σε λογισμικό προσομοίωσης ηλεκτρικών κυκλωμάτων. Τέτοιο λογισμικό είναι το *MATLAB/Simulink* [35], [48], [53], [54], [57], [66], το *PSPICE* [38], [41], [65], το *PSCAD/ETDC* [46] ή συνδυασμός αυτών [44]. Αυτός ο τρόπος επίλυσης ενδείκνυται όταν στο ενιαίο κύκλωμα περιλαμβάνονται και άλλα στοιχεία, όπως ηλεκτρονικά ισχύος, αλλά απαιτεί πολύ χρόνο για την κατασκευή και προσομοίωση του κυκλώματος.

Από την άλλη, η μέθοδος της μαθηματικής επίλυσης των εξισώσεων παρέχει αυξημένη ευελιξία, καθώς υλοποιείται σε διάφορες πλατφόρμες και υπολογιστικά εργαλεία, αλλά υποφέρει συχνά από θέματα σύγκλισης και επιλυσιμότητας [26], [28], [29], [31], [33], [34], [40], [45], [50], [52], [55], [56], [58], [61], [63], [70]. Παραλλαγές αυτής της προσέγγισης επιλύουν ανεξάρτητα τις διάφορες εξισώσεις, αντί όλες μαζί ταυτόχρονα σε σύστημα εξισώσεων, [36], [43], [59], ενώ μία μοναδική εξίσωση επιλύεται αριθμητικά στην [60], αλλά η εν λόγω μέθοδος περιορίζεται στο επίπεδο του ΦΒ πλαισίου. Αυτή η κατηγορία επίλυσης υστερεί τυπικά σε στιβαρότητα και βεβαιότητα σύγκλισης.

Επιπλέον αυτών, υπάρχουν λίγες αναλυτικές προσεγγίσεις στη βιβλιογραφία, οι οποίες βασίζονται σε απλές σχέσεις ευθείας μορφής για τον άμεσο προσδιορισμό των MPPs [49], [67], [68], [71]. Οι εν λόγω μέθοδοι βασίζονται σε εμπειρικούς συντελεστές για τον απευθείας υπολογισμό της τάσης και της ισχύος μόνο των MPPs, αντί ολόκληρης της χαρακτηριστικής. Αποφεύγεται έτσι η κοπιώδης προσομοίωση του κυκλώματος, μειώνοντας δραστικά τον υπολογιστικό φόρτο και πολυπλοκότητα, με κόστος όμως την περιορισμένη εφαρμοσιμότητα και ακρίβεια. Για τις περιπτώσεις που απαιτείται η χαρακτηριστική καμπύλη, μπορούν να χρησιμοποιηθούν τα μοντέλα [25], [69], [71], στα οποία προτείνεται αναλυτικός τρόπος κατασκευή της καμπύλης $I-V$ χωρίς επαναληπτικό αλγόριθμο.

Άλλες εναλλακτικές που δε βασίζονται σε ισοδύναμα κυκλώματα, διατυπώνουν απλές εμπειρικές εξισώσεις οι οποίες αξιοποιούν μακροσκοπικές παρατηρήσεις σχετικά με την ηλεκτρική παραγωγή και την ένταση και έκταση της σκίασης [39], [42], [51], [62], [64]. Βασίζονται κύρια στην έννοια του βαθμού απόδοσης πλαισίου n_{mod} , ο οποίος ανάγεται σε ολόκληρο το ΦΒ σταθμό για ανομοιόμορφη ακτινοβολία. Οι εν λόγω εμπειρικές μέθοδοι προσφέρουν απλές και εύχρηστες μαθηματικές εξισώσεις για την εκτίμηση της ενεργειακής παραγωγής, αλλά υστερούν σε θεωρητικό υπόβαθρο και φερεγγυότητα αποτελεσμάτων.

Ξεχωριστή κατηγορία είναι οι αλγόριθμοι ANN [37], [47], οι οποίοι δε μοντελοποιούν το σύστημα κυκλωματικά, αλλά δομώντας ένα νευρωνικό δίκτυο. Εν γένει, παρουσιάζουν

ικανοποιητική ακρίβεια και υπολογιστική πολυπλοκότητα, αλλά απαιτούν μια ειδική διαδικασία εκπαίδευσης του ANN στο συγκεκριμένο σύστημα για το οποίο προορίζονται, γεγονός που περιορίζει σημαντικά την ευελιξία και εφαρμοσιμότητά τους.

1.2.3.ΣΤ Επίπεδα ακτινοβολίας

Η πλειοψηφία των μοντέλων που μελετώνται υποστηρίζουν οσαδήποτε επίπεδα ακτινοβολίας, λόγω της σπονδυλωτής δομής των κυκλωμάτων, η οποία επιτρέπει θεώρηση διαφορετικών συνθηκών λειτουργίας σε κάθε συνιστώσα (κυψέλης, πλαίσιο κτλ.). Αντίθετα, οι εμπειρικές μέθοδοι [39], [42], [51], [62], [64] και τα ANN [37], [47] περιορίζονται στην απλούστερη, πλην συνηθέστερη, περίπτωση των δύο επιπέδων ακτινοβολίας (ένα για το σκιασμένο τμήμα και ένα άλλο για το ασκίαστο). Η ίδια θεώρηση λαμβάνεται υπόψιν για την εξαγωγή των αναλυτικών MPP εκφράσεων της [49], τη βελτίωση της υπολογιστικής διαδικασίας στην [59] και τη διατύπωση μία μοναδικής εξίσωσης για το ΦΒ πλαίσιο στην [60]. Επίσης, στην [66] η ίδια υπόθεση επιτρέπει λεπτομερή ανάλυση του φαινομένου της μερικής σκίασης και της επίδρασης των διαφόρων παραμέτρων.

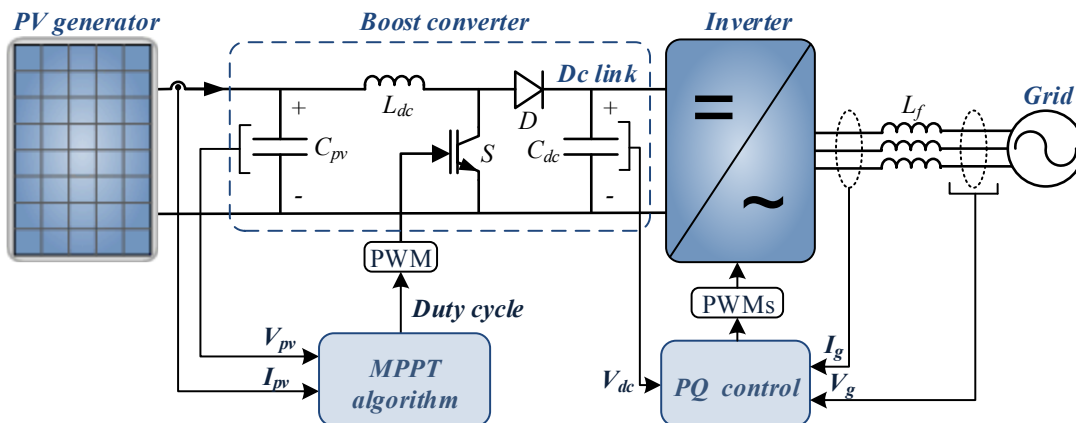
1.2.3.Z Πειραματική επιβεβαίωση

Η παρουσίαση πειραματικών μετρήσεων που επιβεβαιώνουν την ισχύ του προτεινόμενου μοντέλου είναι ένα ιδιαίτερα θετικό στοιχείο μίας εργασίας. Με τον τρόπο αυτό, ποσοτικοποιείται η ακρίβεια της μεθόδου και αποδεικνύεται στην πράξη η καταλληλότητά της σε πραγματικές συνθήκες. Η εν λόγω διαδικασία περιλαμβάνει συνήθως πειραματική καταγραφή της καμπύλης $I-V$ και σύγκριση με τα αντίστοιχα αποτελέσματα από το μοντέλο, σε διάφορες συνθήκες ακτινοβολίας και σενάρια σκίασης. Από το σύνολο όλων των υπό μελέτη δημοσιεύσεων, πειραματική επιβεβαίωση παρέχεται μόνο στις [25], [26], [29], [35]–[40], [42], [43], [46]–[49], [51], [54], [57], [58], [60], [61], [63]–[65], [67]–[69].

1.3 Μετατροπές Ισχύος ΦΒ Συστήματος

Η ηλεκτρική ισχύς που παράγει μία ΦΒ διάταξη δεν είναι σε κατάλληλη μορφή για απευθείας χρήση και κατανάλωση. Ειδικά για τα διασυνδεδεμένα ΦΒ συστήματα, το ρεύμα πρέπει να μετατραπεί από συνεχές (dc) σε εναλλασσόμενο (ac) και το επίπεδο της τάσης να ρυθμιστεί στα κατάλληλα επίπεδα του δικτύου. Αυτές οι κύριες λειτουργίες επιτελούνται από τον *μετατροπέα του ΦΒ συστήματος*.

Στο ακόλουθο Σχ. 1.9, απεικονίζεται μια απλουστευμένη εκδοχή του κυκλώματος ισχύος ενός ΦΒ συστήματος συνδεδεμένου με το δίκτυο χαμηλής τάσης. Ο μετατροπέας ισχύος του συστήματος αποτελείται από δύο κύριες συνιστώσες: τον dc/dc μετατροπέα (boost converter στο Σχ. 1.9) και τον αντιστροφέα (inverter), που είναι συνδεδεμένοι σε σειρά (τοπολογία δύο επιπέδων – two stage topology). Ο ρόλος του πρώτου υποσυστήματος είναι να ρυθμίζει το σημείο λειτουργίας της ΦΒ διάταξης με τον *αλγόριθμο MPPT* ώστε να εξάγεται η μέγιστη ισχύς, όπως επίσης να ανυψώνει (ή να υποβιβάζει) την τάση της ΦΒ διάταξης σε κατάλληλα επίπεδα για την τροφοδότηση του ηλεκτρικού δικτύου. Η συστοιχία πυκνωτών στην έξοδο του dc/dc μετατροπέα αποκαλείται dc ζυγός (dc link). Ο αντιστροφέας με τη σειρά του απορροφά την ισχύ που διατίθεται στον dc ζυγό, τη μετατρέπει σε εναλλασσόμενη και την προωθεί στο δίκτυο με κατάλληλο έλεγχο ενεργού-άεργου ισχύος (*PQ control*), διατηρώντας παράλληλα



Σχ. 1.9. Συνολική εικόνα του κυκλώματος ισχύος ενός διασυνδεδεμένου ΦΒ συστήματος. Εστίαση στον dc/dc μετατροπέα.

την τάση στον dc ζυγό σταθερή.

Στη συνέχεια ακολουθεί συνοπτική περιγραφή της λειτουργίας του dc/dc μετατροπέα που ενδιαφέρει την παρούσα διατριβή, καθώς το συγκεκριμένο υποσύστημα είναι υπεύθυνο για τον έλεγχο της ΦΒ διάταξης.

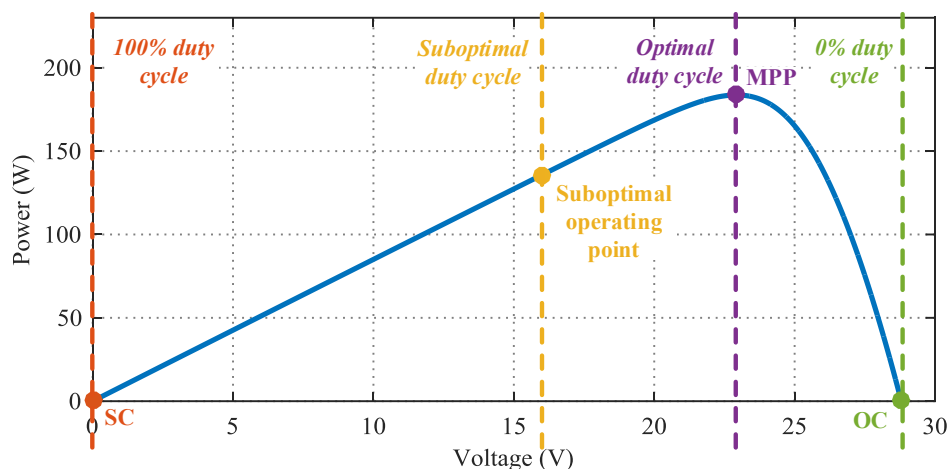
1.3.1 Dc/dc μετατροπέας ανύψωσης τάσης

Ανάλογα το επίπεδο τάσης της ΦΒ διάταξης σε σχέση με το ηλεκτρικό δίκτυο, η τάση της πρώτης μπορεί να ανυψώνεται, να υποβιβάζεται ή και τα δύο. Έτσι, χρησιμοποιούνται αντίστοιχα μετατροπέας ανύψωσης συνεχούς τάσης (boost dc/dc converter), μετατροπέας υποβιβασμού συνεχούς τάσης (buck ή step down dc/dc converter) ή μετατροπέας υποβιβασμού-ανύψωσης συνεχούς τάσης (buck-boost dc/dc converter) [72]. Η σύγχρονη πρακτική για ΦΒ συστήματα λίγων kW που συνδέονται με το δίκτυο χαμηλής τάσης, είναι η χρήση boost converter ώστε το σύστημα να μη χρειάζεται μετασχηματιστή ανύψωσης (transformerless), επιτυγχάνοντας έτσι μεγαλύτερη απόδοση και χαμηλότερο κόστος. Το Σχ. 1.9 αντιστοιχεί σε μια τέτοια διάταξη.

Εστιάζοντας στον μετατροπέα ανύψωσης τάσης, τα κύρια στοιχεία από τα οποία αποτελείται είναι: ένας ημιαγωγικός διακόπτης S (συνήθως IGBT ή MOSFET), ένα πηνίο L_{dc} , μία δίοδος D και μια συστοιχία πυκνωτών στην είσοδο C_{pv} και στην έξοδο C_{dc} (Σχ. 1.9). Ο ημιαγωγικός διακόπτης S παλμοδοτείται από τη μονάδα διαμόρφωσης εύρους παλμών (pulse width modulation – PWM), με τη βοήθεια της οποίας επιτυγχάνεται διαδοχική έναυση και σβέση του S , ώστε να ανυψωθεί η τάση εισόδου V_{pv} στο κατάλληλο επίπεδο της τάσης εξόδου V_{dc} . Το ποσοστό της διακοπτικής περιόδου στο οποίο ο S βρίσκεται σε κατάσταση αγωγής, αποκαλείται *βαθμός χρησιμοποίησης* (duty cycle). Για λειτουργία συνεχούς ρεύματος, οι δύο τάσεις συνδέονται με το duty cycle D ως εξής [72]:

$$\frac{V_{pv}}{V_{dc}} = 1 - D \quad (1.1)$$

Στο κύκλωμα του Σχ. 1.9, η τάση εξόδου V_{dc} διατηρείται σταθερή από το PQ control του αντιστροφέα. Επομένως, μεταβάλλοντας το duty cycle αλλάζει η τάση εισόδου V_{pv} (1.1), η



Σχ. 1.10. Ενδεικτική λειτουργία ενός ΦΒ πλαισίου σε διάφορα σημεία λειτουργίας, ανάλογα την τιμή του duty cycle του dc/dc μετατροπέα.

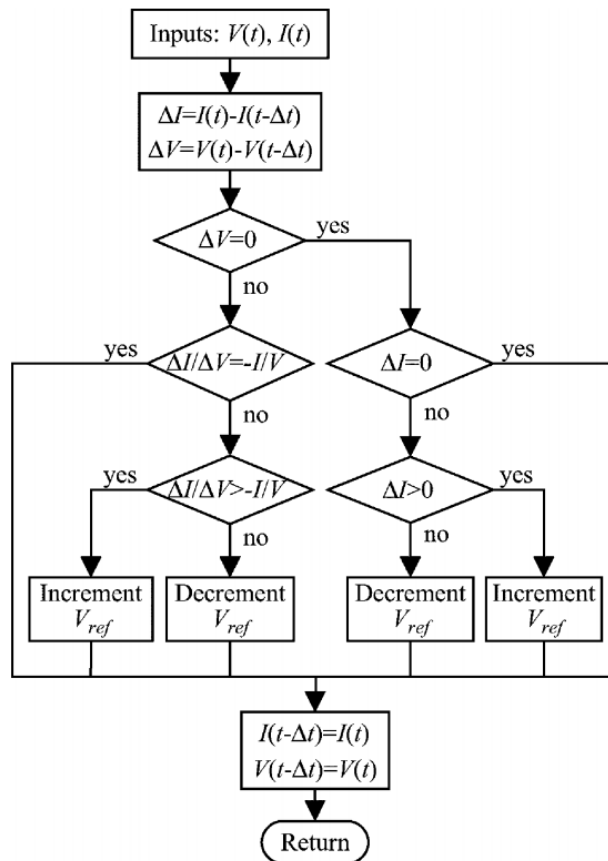
οποία αντιστοιχεί στην τάση λειτουργίας της ΦΒ διάταξης. Δηλαδή, ο έλεγχος του σημείου λειτουργίας της τελευταίας επιτυγχάνεται με κατάλληλη ρύθμιση του duty cycle του dc/dc μετατροπέα.

Ένα ενδεικτικό παράδειγμα παρατίθεται στο Σχ. 1.10. Όταν $D = 100\%$ και ο ημιαγωγικός διακόπτης άγει συνεχώς, το σύστημα λειτουργεί στη βραχυκύκλωση (κόκκινο χρώμα). Αντίθετα, όταν $D = 0\%$ ο διακόπτης S βρίσκεται μονίμως σε αποκοπή και πρακτικά ο dc/dc μετατροπέας παρακάμπτεται. Αν η τάση εξόδου V_{dc} είναι μεγαλύτερη της τάσης της ΦΒ διάταξης V_{pv} , αυτή η κατάσταση συνεπάγεται ανοιχτοκύκλωση της τελευταίας (πράσινο χρώμα). Συνεπώς, οι χρήσιμες τιμές του duty cycle είναι ανάμεσα στο 0% και 100% (κίτρινο χρώμα), και συγκεκριμένα η βέλτιστη τιμή αντιστοιχεί στην τάση MPP, όπου εξάγεται η μέγιστη ισχύς από τη ΦΒ γεννήτρια (μωβ χρώμα). Δεδομένου ότι η καμπύλη ισχύος αλλάζει από σύστημα σε σύστημα και μεταβάλλεται έντονα με τις εκάστοτε περιβαλλοντικές συνθήκες, απαιτείται κατάλληλη στρατηγική ελέγχου που να ρυθμίζει το duty cycle ώστε να αντιστοιχεί πάντα στο MPP. Ο έλεγχος αυτός αποκαλείται *αλγόριθμος ανίχνευσης του σημείου μέγιστης παραγωγής* (maximum power point tracking – MPPT).

1.3.2 Αλγόριθμος MPPT

Πλήρη βιβλιογραφική ανασκόπηση των αλγορίθμων MPPT δίνεται στην [73]. Από τις γνωστότερες μεθόδους είναι οι αλγόριθμοι Perturb & observe (P&O) και Incremental conductance (INC) [73]. Βασική φιλοσοφία των εν λόγω τεχνικών είναι η δημιουργία συνεχούς διαταραχής περιορισμένου εύρους (1-5%) στο duty cycle, ώστε να ταλαντώνεται μονίμως το σημείο λειτουργίας σε ένα μικρό τμήμα της χαρακτηριστικής $P-V$, οδηγώντας το έτσι προς την κατεύθυνση που υπόσχεται μεγαλύτερη ισχύ. Το αλγοριθμικό διάγραμμα της μεθόδου INC απεικονίζεται στο Σχ. 1.11.

Άλλες πιο περίπλοκες τεχνικές MPPT αξιοποιούν την ήδη υπάρχουσα κυμάτωση του σημείου λειτουργίας, λόγω διακοπτικής ταλάντωσης (switching ripple) ή διακύμανσης της στιγμιαίας ισχύος που απορροφάται από το δίκτυο (grid ripple), και δε χρειάζεται να διαταράσσουν το duty cycle [74]–[77]. Εναλλακτική προσέγγιση στο θέμα δίνουν οι μελέτες



Σχ. 1.11. Αλγοριθμικό διάγραμμα της μεθόδου MPPT: INC [73].

στις [78]–[85], οι οποίες εφαρμόζουν διάφορα μαθηματικά μοντέλα στις τρέχουσες μετρήσεις τάσεις και ρεύματος, και εκτιμούν έτσι ένα μεγάλο τμήμα της χαρακτηριστικής P - V , συμπεριλαμβανομένου του σημείου MPP, εντοπίζοντας απευθείας την επιθυμητή τάση λειτουργίας. Όμως, όλες οι ανωτέρω μελέτες είναι σχεδιασμένες για την ευνοϊκή περίπτωση της ομοιόμορφης ακτινοβολίας, όπου εμφανίζεται ένα μόνο MPP στην καμπύλη ισχύος του ΦΒ συστήματος. Όπως εξηγείται στο Κεφάλαιο 4, σε συνθήκες μερικής σκίασης οι περισσότεροι αλγόριθμοι MPPT δυσλειτουργούν και εμφανίζουν δυσκολίες στην ανίχνευση του *ολικά μέγιστου MPP* (global MPP – GMPP).

1.4 Τήρηση Εφεδρείας Ισχύος από τα ΦΒ Συστήματα

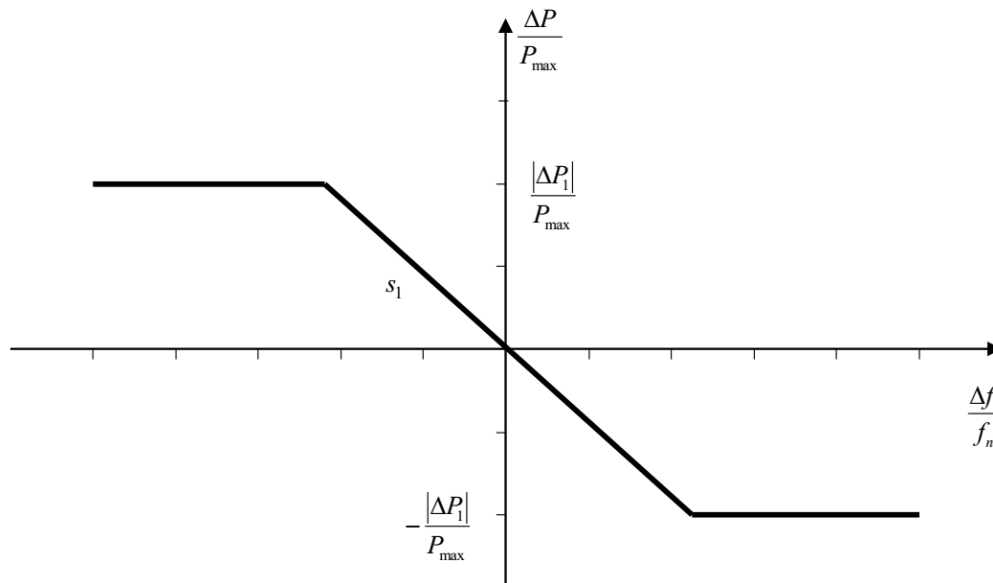
Οι σύγχρονοι κώδικες δικτύου απαιτούν από τους σταθμούς διεσπαρμένης παραγωγής να παρέχουν επικουρικές υπηρεσίες στο ηλεκτρικό δίκτυο, στις οποίες συγκαταλέγεται και η εφεδρεία ενεργού ισχύος. Η τήρηση εφεδρειών και η συνακόλουθη παροχή υπηρεσιών ρύθμισης συχνότητας σταδιακά επεκτείνεται σε σταθμούς διεσπαρμένης παραγωγής που συνδέονται σε όλο και χαμηλότερα επίπεδα τάσης. Για να είναι συμβατό ένα ΦΒ σύστημα με αυτούς τους κανονισμούς, πρέπει να είναι σε θέση να διατηρεί εφεδρεία ισχύος και να αυξομειώνει την προσφερόμενη ισχύ σύμφωνα με τις εντολές του διαχειριστή του δικτύου. Στη συνέχεια, παρουσιάζεται η τρέχουσα τεχνολογική στάθμη και προετοιμάζεται το έδαφος για την προτεινόμενη τεχνική ελέγχου που περιγράφεται στο Κεφάλαιο 5.

1.4.1 Επικουρικές υπηρεσίες σταθμών διεσπαρμένης παραγωγής

Μέχρι πρότινος, η στρατηγική διαχείρισης των σταθμών διεσπαρμένης παραγωγής, όπως ΦΒ σταθμοί και οι περισσότερες ΑΠΕ, ήταν να μην προσφέρουν επικουρικές υπηρεσίες στο ηλεκτρικό δίκτυο. Η εν λόγω υποχρέωση ανήκε αποκλειστικά στους συμβατικούς σταθμούς παραγωγής ενέργειας. Οι σταθμοί διεσπαρμένης παραγωγής αποσυνδέονταν σε συνθήκες σφάλματος ή διαταραχής στην τάση και στη συχνότητα, και επανασυνδέονταν όταν το σύστημα είχε επανέλθει σε κατάσταση κανονικής λειτουργίας.

Όμως σε δίκτυα με υψηλή συμμετοχή διεσπαρμένης παραγωγής, αυτή η προσέγγιση εντείνει τέτοια προβλήματα οδηγώντας πιο εύκολα το σύστημα σε αστάθεια [86]. Έτσι, τα τελευταία χρόνια εμφανίζεται η τάση αναθεώρησης των κωδίκων δικτύου, απαιτώντας από τους εν λόγω σταθμούς να προσφέρουν επικουρικές υπηρεσίες και να παραμένουν συνδεδεμένοι στο δίκτυο σε συνθήκες διαταραχής [87]–[89]. Σε αυτές τις υπηρεσίες συγκαταλέγονται α) η ρύθμιση συχνότητας (frequency regulation) (Σχ. 1.12), β) η παραμονή σε συνθήκες απόκλισης της τάσης του δικτύου (voltage ride through – VRT), γ) η έγχυση άεργου ισχύος (reactive power injection), και γενικά δ) η δυνατότητα αυξομείωσης της παραγόμενης ισχύος (up/down power regulation) για διάφορους οικονομοτεχνικούς λόγους [86], [90]–[97].

Είναι ενδεικτικό το παράδειγμα του Σχ. 1.12, όπου απεικονίζεται η απαίτηση αυξομείωσης της παραγόμενης ισχύος από ένα σταθμό όταν υπάρχει διακύμανση συχνότητας, σύμφωνα με την οδηγία ENTSO-2013 [87]. Σε συνθήκες υπερσυχνότητας απαιτείται μείωση της προσφερόμενης ισχύος, ενώ σε υποσυχνότητα αύξηση της παραγωγής. Η πρώτη λειτουργία είναι εύκολα και γενικά εφαρμόσιμη, ενώ αντίθετα η δεύτερη προϋποθέτει ότι ο σταθμός τηρεί εφεδρεία ισχύος. Επιπλέον, σύμφωνα με την ίδια οδηγία, οι σταθμοί παραγωγής οφείλουν να ρυθμίζουν την προσφερόμενη ισχύ σύμφωνα με τις εντολές ρύθμισης ισχύος (power set-points) που δέχονται εξωτερικά από τον διαχειριστή του δικτύου. Παρόμοια απαίτηση εικάζεται ότι θα προβλέπεται και από τον Γερμανικό κώδικα για τους ΦΒ σταθμούς [98], οι οποίοι θα πρέπει να είναι σε θέση να περιορίζουν την παραγωγή τους μέχρι και το 70% της εγκατεστημένης



Σχ. 1.12. Απαίτηση αυξομείωση της παραγόμενης ισχύος κατά τη ρύθμιση συχνότητας, σύμφωνα με την οδηγία ENTSO-2013 [87].

ισχύος. Ακόμα, ο κώδικας ENTSO προβλέπει ότι στο μέλλον οι σταθμοί παραγωγής θα απαιτείται να εξομοιώνουν αδρανειακή απόκριση, ώστε να συμβάλλουν στον περιορισμό του ρυθμού μεταβολής της συχνότητας που προκαλείται από μεγάλες διαταραχές.

Για την παροχή των περισσότερων από τις προαναφερθείσες υπηρεσίες, ένα ΦΒ σύστημα πρέπει να είναι σε θέση να τηρεί εφεδρεία ενεργού ισχύος και να ρυθμίζει την παραγωγή του σύμφωνα με τις εντολές του διαχειριστή δικτύου [93], [98]–[102]. Επιπλέον των απαιτήσεων του κωδίκων (τωρινών και μελλοντικών), η τήρηση εφεδρείας ισχύος θεωρείται οικονομικά και τεχνικά επωφελής για το ηλεκτρικό δίκτυο, μειώνοντας τη στρεφόμενη εφεδρεία των θερμικών σταθμών [103] και εξομαλύνοντας τη διακύμανση της ΦΒ παραγωγής που προκαλείται από περιβαλλοντικές συνθήκες [104].

1.4.2 Τεχνικές τήρησης εφεδρείας ισχύος στη βιβλιογραφία

Εν γένει, υπάρχουν δύο εναλλακτικές προσεγγίσεις για την τήρηση εφεδρείας ισχύος από ένα ΦΒ σύστημα: α) με εγκατάσταση συστήματος αποθήκευσης ενέργειας ή β) με απόρριψη ενέργειας [93], [104], [105]. Η πρώτη εναλλακτική περιλαμβάνει μπαταρίες [106], υπερπυκνωτές [94], [107] ή κυψέλες καυσίμου [108], για αποθήκευση της πλεονάζουσας ενέργειας και μετέπειτα αξιοποίησή της. Η συγκεκριμένη προσέγγιση συνεπάγεται αυξημένη πολυπλοκότητα και επιπρόσθετα κόστη εγκατάστασης και συντήρησης. Αντίθετα, η δεύτερη μέθοδος της απόρριψης ισχύος μπορεί να υλοποιηθεί με τεχνητό φορτίο [109], με ζεύξη/απόζευξη πλαισιοσειρών μέσω dc ρελέ [110], ή συνηθέστερα με κατάλληλο έλεγχο του μετατροπέα ισχύος.

Ειδικά η τελευταία επιλογή είναι προτιμητέα, καθώς είναι ανέξοδη και εύκολα υλοποιήσιμη, απλά τροποποιώντας τον αλγόριθμο ελέγχου του μετατροπέα ισχύος MPPT, ώστε να λειτουργεί σε υποβέλτιστη στάθμη ισχύος, αντί στη μέγιστη (MPP) [92], [93], [95], [99]–[102], [111]–[113]. Τότε, ο αλγόριθμος αποκαλείται στη βιβλιογραφία ως τεχνική ελέγχου τήρησης εφεδρείας ενεργού ισχύος (active power reserves – APR). Μάλιστα, κάποιες εργασίες καταλήγουν στο συμπέρασμα ότι η εν λόγω δυνατότητα υποβέλτιστης λειτουργίας είναι απαραίτητη ακόμα και σε συστήματα με αποθήκευση ενέργειας, προς αποφυγή υπερφόρτισης μπαταριών [113] και για βέλτιστη διαστασιολόγηση του συστήματος [104]. Στη συνέχεια, δίνεται έμφαση στις τεχνικές ελέγχου APR του μετατροπέα ισχύος που επιτρέπουν στο ΦΒ σύστημα να τηρεί εφεδρεία ισχύος.

Στους μετατροπέις ενός επιπέδου (single-stage systems), η εν λόγω λειτουργία επιτυγχάνεται με επέκταση του αλγορίθμου ελέγχου του αντιστροφέα [92], [95]–[97], [112], [113]. Αντίθετα, στους μετατροπέις δύο επιπέδων (two-stage systems) που εστιάζει η παρούσα διατριβή, χρειάζεται να τροποποιηθεί η τεχνική ελέγχου του *dc/dc* μετατροπέα [93], [99]–[101], [111], [114], [115], το οποίο θεωρείται γενικά πιο απαιτητική διαδικασία [93]. Συμβατικά, μπορεί να εφαρμοστεί ένας τυπικός αλγόριθμος P&O ή INC με περιοριστή ισχύος, όπως στις [111], [114], [115], προσφέροντας έτσι απλή υλοποίηση, πλην ανεπαρκή δυναμική απόκριση.

Προς αντιμετώπιση της τελευταίας αδυναμίας, οι μέθοδοι που προτείνονται στις [93], [99]–[101] χρησιμοποιούν ελεγκτές PI, παρουσιάζοντας σημαντικά καλύτερη δυναμική συμπεριφορά και ελεγχιμότητα. Όμως, ο ελεγκτής PI που καθορίζει το duty cycle στις [93], [99], [100] ρυθμίζει την *τάση* λειτουργίας, αντί την *ισχύ*, λόγω της μη-μονότονης σχέσης μεταξύ ισχύος και duty cycle, δυσκολεύοντας τη λειτουργία του συστήματος σε συγκεκριμένη

στάθμη ισχύος. Στην [101], χρησιμοποιείται ένας ελεγκτής PI ισχύος, αντιμετωπίζοντας εν μέρει το θέμα της μονοτονίας, οδηγώντας όμως συχνά σε λειτουργία στο αριστερό τμήμα της χαρακτηριστικής $P-V$, το οποίο γενικά δεν είναι επιθυμητό [93], [95], [99], [102], [112].

Επιπλέον, ένα σημαντικό χαρακτηριστικό μίας τέτοιας τεχνικής ελέγχου είναι η δυνατότητα εκτίμησης του MPP σε πραγματικό χρόνο, καθώς το σύστημα λειτουργεί σε υποβέλτιστη στάθμη ισχύος. Σε μία τέτοια περίπτωση, το ΦΒ σύστημα μπορεί να τηρεί συγκεκριμένη ποσότητα εφεδρείας, προσδιοριζόμενη είτε σε απόλυτη μορφή (kW/MW) είτε σε ποσοστό της μέγιστης διαθέσιμης ισχύος (reserve ratio). Οι εργασίες στις [92], [93], [95], [99]–[102] εφαρμόζουν τεχνικές ελέγχου APR που υποστηρίζουν εξωτερικές εντολές ισχύος, επιπρόσθετα της ρύθμισης συχνότητας, διαφέρουν όμως σημαντικά στη μέθοδο εκτίμησης του MPP.

Στις [92], [102], αξιοποιούνται μετρήσεις ακτινοβολίας και θερμοκρασίας με τις οποίες ανάγονται δεδομένα του τεχνικού φυλλαδίου βάσει εμπειρικών σχέσεων, ενώ στις [93], [95], [99]–[101] εφαρμόζεται ένα μαθηματικό μοντέλο στις τρέχουσες μετρήσεις τάσης και ρεύματος που καταγράφονται από τον dc/dc μετατροπέα. Η πρώτη προσέγγιση είναι απλούστερη, αλλά παρουσιάζει σφάλματα εκτίμησης λόγω της εμπειρικής φύσης των σχέσεων αναγωγής και της αναπόφευκτης διαφοροποίησης των χαρακτηριστικών των ΦΒ πλαισίων από τα αναγραφόμενα στοιχεία στο τεχνικό φυλλάδιο. Αντίθετα, οι μέθοδοι των [93], [95], [99]–[101] προσφέρουν εξαιρετική προσαρμοστικότητα στο πραγματικό σύστημα, αλλά εφαρμόζουν απλοποιημένα κυκλωματικά μοντέλα και παρουσιάζουν ευαισθησία σε συνθήκες θορύβου (ηλεκτρομαγνητική παρενόχληση – EMI). Συγκεκριμένα, οι [93], [99] βασίζονται σε ένα γραμμικό-παραβολικό μοντέλο που αξιοποιεί μόνο τις δύο προηγούμενες μετρήσεις, ενώ η [95] εφαρμόζει ένα δευτεροβάθμιο πολυώνυμο στα τρία τελευταία σημεία λειτουργίας.

Κατά την εκπόνηση της διατριβής, διεξήχθη έρευνα στο εν λόγω αντικείμενο, δίνοντας *ιδιαίτερη έμφαση στην ευρωστία της τεχνικής ελέγχου σε ενθόρυβο περιβάλλον*. Σημείο κλειδί σε μια τέτοια προσπάθεια είναι η χρήση της τεχνικής προσαρμογής καμπύλης (curve fitting) σε ένα μεγάλο πλήθος σημείων λειτουργίας, έναντι λίγων μεμονωμένων μετρήσεων. Ενδιάμεσα αποτελέσματα αυτή της διερεύνησης είναι δύο αλγόριθμοι που εφαρμόζουν curve fitting, χρησιμοποιώντας ένα παραβολικό μοντέλο [100] ή μία απλοποιημένη εκδοχή του μοντέλου μίας διόδου [101]. Βέβαια, η απλοποίηση του θεμελιώδους μοντέλου που λαμβάνει χώρα στις δύο ανωτέρω μεθόδους, οδηγεί σε σφάλματα εκτίμησης. Ο εν λόγω περιορισμός αντιμετωπίζεται στην τεχνική που παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 5, η οποία βασίζεται στο πλήρες (μη-απλοποιημένο) μοντέλο των πέντε παραμέτρων.

1.5 Συμβολή και Πρωτοτυπία της Διατριβής

Η παρούσα διατριβή συνεισφέρει πρωτίστως στη θεωρία της μοντελοποίησης των φωτοβολταϊκών (ΦΒ) συστημάτων, τόσο για συνθήκες ομοιόμορφης ακτινοβολίας όσο και μερικής σκίασης. Επιπλέον, τα αποτελέσματα που προκύπτουν αξιοποιούνται για την ανάπτυξη νέων τεχνικών ελέγχου του dc/dc μετατροπέα, οι οποίες αυξάνουν την απόδοση σε συνθήκες σκίασης και επιτρέπουν στο ΦΒ σύστημα να τηρεί εφεδρεία ισχύος.

Για ομοιόμορφες συνθήκες λειτουργίας, προτείνονται νέες αναλυτικές εξισώσεις για τον υπολογισμό της τάσης και του ρεύματος στο σημείο μέγιστης παραγωγής (MPP), συναρτήσει των πέντε παραμέτρων. Οι εν λόγω εκφράσεις είναι από τις λίγες μεθόδους στη βιβλιογραφία που προσδιορίζουν το MPP με ευθύ τρόπο, χωρίς επαναληπτικό αλγόριθμο επίλυσης.

Στη συνέχεια, διατυπώνονται νέες απλές εξισώσεις για την εξαγωγή των πέντε παραμέτρων του ΦΒ μοντέλου μίας διόδου (single-diode PV model). Ορίζεται μία νέα σταθερά δ_0 που συνδέει το συντελεστή της διόδου με τους θερμοκρασιακούς συντελεστές, επιτρέποντας ευθύ υπολογισμό του πρώτου άμεσα από τα δεδομένα του τεχνικού φυλλαδίου του ΦΒ πλαισίου. Η προτεινόμενη μέθοδος αποφεύγει την αριθμητική επίλυση, βασίζεται μόνο στο τεχνικό φυλλάδιο και επιδεικνύει πολύ ικανοποιητική ακρίβεια σε σχέση με άλλες προσεγγίσεις της βιβλιογραφίας.

Αξιοποιώντας τα προαναφερθέντα αποτελέσματα, εισάγονται νέες μαθηματικές εκφράσεις για τον ευθύ υπολογισμό των σημείων βραχυκύκλωσης (SC), ανοιχτοκύκλωσης (OC) και MPP, συναρτήσει απευθείας της ακτινοβολίας και θερμοκρασίας. Οι εν λόγω εξισώσεις είναι θεωρητικά τεκμηριωμένες και απαλλαγμένες από εμπειρικούς συντελεστές, ενώ βρίσκονται σε πλήρη σύγκλιση με το μοντέλο των πέντε παραμέτρων, σε αντίθεση με άλλες μεθόδους της βιβλιογραφίας.

Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στη μελέτη του φαινομένου της μερικής σκίασης και των επιδράσεών του στην ηλεκτρική απόκριση ενός ΦΒ συστήματος. Διατυπώνεται ένα από τα πρώτα μοντέλα ευθείας μορφής στη βιβλιογραφία, το οποίο περιγράφει πλήρως μία ΦΒ συστοιχία σε βάθος ανάλυσης κυνέλης και υποστηρίζει οποιαδήποτε σενάριο ανομοιομορφης ακτινοβολίας. Δεδομένου ότι δεν περιλαμβάνει αριθμητική/επαναληπτική διαδικασία, το εν λόγω μοντέλο παρουσιάζει πολύ μικρό υπολογιστικό κόστος και εγγυημένη επιλυσιμότητα.

Έτσι, εφαρμόζεται σε πολυάριθμα σενάρια σκίασης και για διάφορες ΦΒ διατάξεις, εξάγοντας σημαντικά συμπεράσματα για τον τρόπο με τον οποίο η σκίαση επηρεάζει τις χαρακτηριστικές καμπύλες $I-V$ και $P-V$. Η συγκεκριμένη διερεύνηση καταλήγει σε πλήρη χαρακτηρισμό όλων των τοπικών μεγίστων ισχύος (MPPs) που εμφανίζονται σε αυτές τις καμπύλες, εξηγώντας πώς επηρεάζονται από την ένταση και έκταση της σκίασης.

Η προαναφερθείσα ανάλυση οδηγεί στη διατύπωση απλών περιγραφικών εξισώσεων για τον υπολογισμό της τάσης και του ρεύματος σε όλα τα τοπικά MPPs μιας μερικώς σκιασμένης ΦΒ πλαισιοσειράς και συστοιχίας. Οι προτεινόμενες σχέσεις είναι οι πρώτες στη βιβλιογραφία που επιτυγχάνουν προσδιορισμό των MPPs αναλυτικά, χρησιμοποιώντας μόνο δεδομένα του τεχνικού φυλλαδίου, προσφέροντας έτσι έναν απλό και εύχρηστο τρόπο υπολογισμού της απόδοσης σε οποιοδήποτε συνθήκες σκίασης.

Σε όλες τις περιπτώσεις, τα προτεινόμενα μοντέλα και αναλυτικές σχέσεις υποστηρίζονται από πλήρη πειραματική επιβεβαίωση με μετρήσεις σε υφιστάμενες ΦΒ διατάξεις. Τα πειραματικά αποτελέσματα καταδεικνύουν πολύ ικανοποιητική ακρίβεια σε όλες τις περιπτώσεις.

Επιπλέον, τα κεκτημένα από την ανάλυση του φαινομένου της σκίασης χρησιμοποιούνται για την ανάπτυξη νέων τεχνικών ελέγχου του dc/dc μετατροπέα, ειδικά σχεδιασμένων για συνθήκες σκίασης. Αρχικά, προτείνεται μία εύκολα και γενικά εφαρμόσιμη μέθοδος αναγνώρισης των συνθηκών σκίασης από τον dc/dc μετατροπέα. Στη συνέχεια, αναπτύσσεται ένας απλός αλγόριθμος ανίχνευσης του σημείου μέγιστης παραγωγής (MPPT) που εγγυάται πραγματικά βέλτιστη λειτουργία σε μία ΦΒ πλαισιοσειρά η οποία σκιάζεται σε δύο επίπεδα ακτινοβολίας, χωρίς περιοδική διακύμανση του σημείου λειτουργίας. Επιπλέον, προτείνεται ένας αποδοτικότερος, πλην πολυπλοκότερος, αλγόριθμος MPPT που εφαρμόζει προσαρμογή καμπύλης (curve fitting), ο οποίος ξεπερνά κάποιους από τους περιορισμούς του προηγούμενου.

Τέλος, αναπτύσσεται μία τεχνική ελέγχου για τον μετατροπέα ισχύος του ΦΒ συστήματος που επιτρέπει τήρηση εφεδρείας ισχύος. Η καινοτομία της εν λόγω μεθόδου είναι ότι εκτιμά το MPP σε πραγματικό χρόνο καθώς το σύστημα λειτουργεί σε υποβέλτιστη στάθμη ισχύος (μακριά από το MPP). Επιτρέπει λειτουργία σε όλο το δυνατό εύρος από 0% έως 100% της μέγιστης παραγωγής, ενώ χρησιμοποιεί έναν μόνο ελεγκτή PI παρά τη μη-μονότονη σχέση μεταξύ ισχύος και duty cycle. Η προτεινόμενη στρατηγική ελέγχου επιβεβαιώνεται με μετρήσεις σε πειραματική διάταξη 2 kW.

1.6 Δομή Εργασίας

Στην **Εισαγωγή**, περιγράφονται τα βασικά κατασκευαστικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά ενός ΦΒ συστήματος. Σχηματίζεται μία πρώτη εικόνα για το πώς η σκίαση επηρεάζει την ηλεκτρική του απόκριση και δίνεται λεπτομερής βιβλιογραφική ανασκόπηση ενεργειακών μοντέλων που είναι ειδικά σχεδιασμένα για ανομοιόμορφες συνθήκες ακτινοβολίας. Επίσης, περιγράφονται οι βασικές αρχές λειτουργίας του μετατροπέα ισχύος του ΦΒ συστήματος και του αλγορίθμου ελέγχου MPPT, ενώ διερευνώνται οι δυνατότητες τήρησης εφεδρείας ισχύος από ένα ΦΒ σύστημα.

Το **Κεφάλαιο 2** ασχολείται με τη μοντελοποίηση του ΦΒ συστήματος σε συνθήκες ομοιόμορφης ακτινοβολίας. Εξηγείται το μοντέλο μίας διόδου και οι χαρακτηριστικές $I-V$ και $P-V$, ενώ περιγράφονται οι διαδικασίες εύρεσης και αναγωγής των πέντε παραμέτρων. Στο ίδιο κεφάλαιο, διατυπώνονται απλές αναλυτικές εκφράσεις για τον προσδιορισμό των σημείων SC, OC και MPP συναρτήσει είτε των πέντε παραμέτρων είτε απευθείας της ακτινοβολίας και θερμοκρασίας.

Λεπτομερής μελέτη και ανάλυση των επιδράσεων της σκίασης στην ηλεκτρική απόκριση ενός ΦΒ συστήματος γίνεται στο **Κεφάλαιο 3**. Αρχικά, περιγράφεται το προτεινόμενο αναλυτικό μοντέλο για τον υπολογισμό της χαρακτηριστικής καμπύλης ενός ΦΒ συστήματος, το οποίο χρησιμοποιείται στη συνέχεια για προσομοίωση πληθώρας σεναρίων σκίασης. Τα αποτελέσματα από τη γραφική ανάλυση αξιοποιούνται ακολούθως για τη διατύπωση απλών περιγραφικών εξισώσεων ευθύ υπολογισμού όλων των τοπικών MPPs μιας σκιασμένης ΦΒ πλαισιοσειράς και συστοιχίας.

Στο **Κεφάλαιο 4**, περιγράφονται οι δυσκολίες που αντιμετωπίζει ο αλγόριθμος MPPT σε συνθήκες μερικής σκίασης, ενώ αναπτύσσονται τρεις τεχνικές ελέγχου που είναι ειδικά σχεδιασμένες για αυτές τις συνθήκες.

Στο **Κεφάλαιο 5**, προτείνεται μία ολοκληρωμένη τεχνική ελέγχου για τον μετατροπέα ισχύος ενός ΦΒ συστήματος, η οποία επιτρέπει τήρηση εφεδρείας ισχύος σύμφωνα με την εντολή του διαχειριστή του συστήματος/δικτύου, εκτιμώντας ταυτόχρονα τη μέγιστη διαθέσιμη ισχύ με μαθηματικό τρόπο.

Στο **Κεφάλαιο 6**, συνοψίζονται τα συμπεράσματα και προτείνονται κατευθύνσεις περαιτέρω έρευνας. Η θεωρία πίσω από τη συνάρτηση Lambert W που χρησιμοποιείται κατά κόρον στην παρούσα διατριβή δίνεται στο **ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α**, ενώ οι λεπτομέρειες και τα μαθηματικά βήματα εξαγωγής συγκεκριμένων εξισώσεων παρατίθενται στο **ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β**. Στο **ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ** συγκεντρώνονται οι σημαντικότερες σχέσεις της διατριβής που αφορούν τη ΦΒ μοντελοποίηση.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Μοντελοποίηση ΦΒ Συστημάτων σε Ομοιόμορφη Ακτινοβολία

Στο παρόν κεφάλαιο περιγράφονται οι βασικές έννοιες της μοντελοποίησης ενός ΦΒ συστήματος που λειτουργεί σε ομοιόμορφες συνθήκες ακτινοβολίας και θερμοκρασίας. Παρουσιάζεται και αναλύεται το ευρύτατα διαδεδομένο ΦΒ μοντέλο της μίας διόδου (single-diode PV model), στο οποίο βασίζεται η παρούσα έρευνα.

Μελετώνται τα τρία χαρακτηριστικά σημεία λειτουργίας σε κατάσταση βραχυκύκλωσης (SC), ανοιχτοκύκλωσης (OC) και μέγιστης παραγωγής (MPP), και διατυπώνονται αναλυτικές εξισώσεις συναρτήσεων των πέντε παραμέτρων για τον προσδιορισμό τους. Ειδικά για το MPP, οι νέες σχέσεις που προτείνονται βασίζονται στην παρατήρηση ότι η ισχύς του πραγματικού κυκλώματος μεγιστοποιείται όταν μεγιστοποιείται και η ισχύς της ιδανική συνιστώσας του μοντέλου [116].

Στη συνέχεια, γίνεται εκτενής συζήτηση για τη διαδικασία εύρεσης των πέντε παραμέτρων σε συνθήκες αναφοράς (STC) και αναγωγής στις εκάστοτε συνθήκες λειτουργίας. Αφού παρουσιασθεί η τρέχουσα τεχνολογική στάθμη, εισάγεται η νέα σταθερά δ_0 , με χρήση της οποίας επιτυγχάνεται η διατύπωση νέων αναλυτικών εκφράσεων για τον προσδιορισμό των πέντε παραμέτρων [117].

Τέλος, προτείνονται απλές σχέσεις για την τάση και το ρεύμα των SC, OC και MPP που είναι συναρτήσεις της ακτινοβολίας και θερμοκρασίας, αντί των πέντε παραμέτρων. Οι συγκεκριμένες εξισώσεις είναι εύκολα και γενικά εφαρμόσιμες, ενώ βρίσκονται σε πλήρη συμφωνία με τη θεωρία του μοντέλου μίας διόδου.

Βασικό μαθηματικό εργαλείο για την εξαγωγή των σχέσεων που παρουσιάζονται σε αυτό το κεφάλαιο είναι η νεοεισαχθείσα συνάρτηση Lambert W .

2.1 Μοντέλο Πέντε Παραμέτρων

Στην παρούσα εργασία, υιοθετείται το μοντέλο μίας διόδου (*single-diode model*) ή μοντέλο πέντε παραμέτρων (*five parameters model*) για την περιγραφή ενός ΦΒ συστήματος κρυσταλλικής τεχνολογίας που λειτουργεί σε ομοιόμορφες συνθήκες ακτινοβολίας και θερμοκρασίας. Το μοντέλο των πέντε παραμέτρων χρησιμοποιείται ευρύτατα στη βιβλιογραφία [3], [33], [36], [67], [116], [118]–[154], καθώς συνδυάζει ακρίβεια και απλότητα στη μοντελοποίηση. Άλλα μοντέλα της βιβλιογραφίας περιγράφονται συνοπτικά ακολούθως.

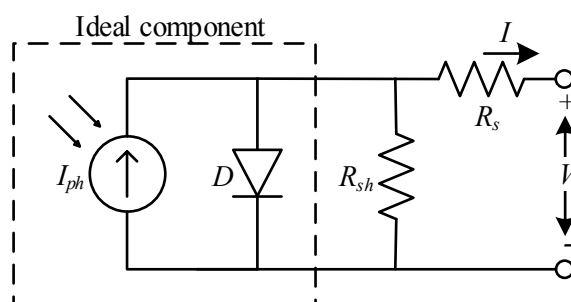
2.1.1 Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα και χαρακτηριστική I - V

Το κυκλωματικό ισοδύναμο του μοντέλου των πέντε παραμέτρων παρουσιάζεται στο Σχ. 2.1. Τα βασικά του στοιχεία είναι:

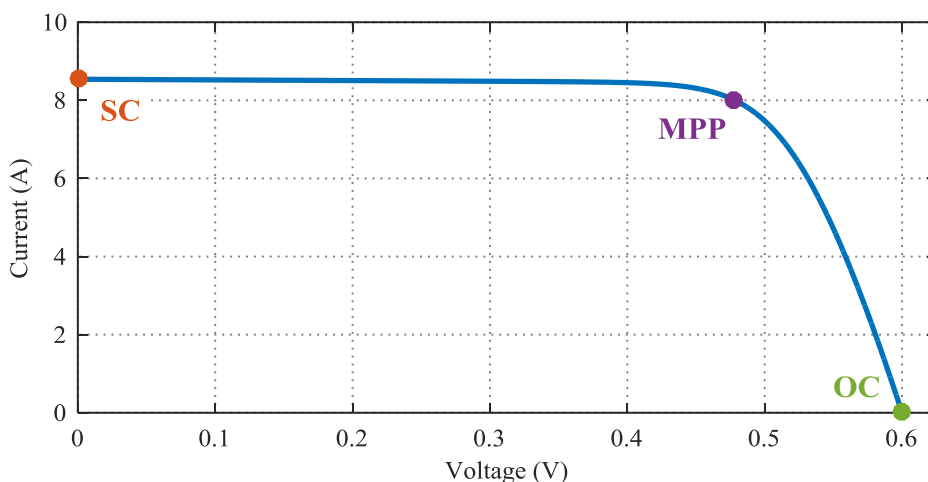
- ✓ Η πηγή φωτορεύματος I_{ph} που αντιστοιχεί στο ρεύμα που παράγεται από την προσπίπτουσα ροή φωτονίων.
- ✓ Η διόδος D , η οποία μοντελοποιεί την επαφή p-n και χαρακτηρίζεται από το ρεύμα κορεσμού I_s και τον τροποποιημένο συντελεστή διόδου a . Η παράμετρος a αντιστοιχεί ουσιαστικά στη θερμοκή τάση V_T προσαυξημένη κατά το συντελεστή διόδου n : $a = nV_T = nkT/q$, όπου k είναι η σταθερά Boltzmann, T η θερμοκρασία κυψέλης και q το φορτίο του ηλεκτρονίου.
- ✓ Η σειριακή R_s και εγκάρσια αντίσταση R_{sh} που εισάγονται για τη μοντελοποίηση των ωμικών απωλειών και των ρευμάτων διαρροής αντίστοιχα.

Οι μεταβλητές I_{ph} , I_s , a , R_s και R_{sh} αποκαλούνται πέντε παράμετροι του μοντέλου και ενσωματώνουν τις κατασκευαστικές ιδιότητες και συνθήκες λειτουργίας του ΦΒ συστήματος. Αξίζει να σημειωθεί ότι αν αγνοηθούν οι δύο αντιστάσεις R_s και R_{sh} , τότε το κύκλωμα που προκύπτει αντιστοιχεί στο *ιδανικό μοντέλο μίας διόδου* ή *μοντέλο τριών παραμέτρων*. Συνεπώς, στο πλήρες κύκλωμα του Σχ. 2.1, το τμήμα που περικλείεται με διακεκομμένο πλαίσιο αποκαλείται *ιδανική συνιστώσα* [116].

Στο Σχ. 2.2, παρουσιάζεται η χαρακτηριστική καμπύλη ρεύματος-τάσης (I - V) για μια τυπική ΦΒ κυψέλη. Για χαμηλές τιμές τάσης (αριστερό τμήμα καμπύλης), η κυψέλη λειτουργεί ως πηγή ρεύματος, ενώ ειδικά για μηδενική τάση η κυψέλη είναι *βραχυκυκλωμένη* (*short circuit – SC*) και αποδίδει το μέγιστο ρεύμα (κόκκινος κυκλικός δείκτης). Αντίθετα, για χαμηλές τιμές ρεύματος η κυψέλη συμπεριφέρεται ως πηγή τάσης (δεξί τμήμα καμπύλης), αποδίδοντας τη μέγιστη τιμή της στην *ανοιχτοκύκλωση* (*open circuit – OC*) (πράσινος κυκλικός δείκτης). Επιπλέον, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει το σημείο μέγιστης παραγωγής (*maximum power*



Σχ. 2.1. Ηλεκτρικό ισοδύναμο κύκλωμα του μοντέλου πέντε παραμέτρων.



Σχ. 2.2. Χαρακτηριστική $I-V$ μίας τυπικής ΦΒ κυψέλης σε συνθήκες STC.

point – *MPP*) (μωβ κυκλικός δείκτης), στο οποίο εξάγεται η μέγιστη ισχύς από το κύκλωμα. Αναλυτικές σχέσεις υπολογισμού των τριών αυτών χαρακτηριστικών σημείων συναρτήσει των πέντε παραμέτρων δίνονται σε επόμενη ενότητα. Στο Σχ. 2.3, απεικονίζεται γραφικά η σύνθεση της χαρακτηριστικής $I-V$ της ιδανικής κυψέλης από τις χαρακτηριστικές των συνιστωσών της: τη δίοδο και την πηγή φωτορεύματος [145]. Οι δύο αντιστάσεις απλώς προσαρμόζουν την κλίση της καμπύλης.

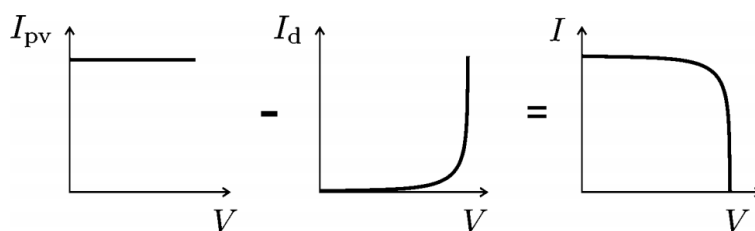
2.1.2 Θεμελιώδης εξίσωση ρεύματος - τάσης

Η θεμελιώδης εξίσωση του μοντέλου δίνεται από:

$$I = I_{ph} - I_s \left(e^{\frac{V + IR_s}{a}} - 1 \right) - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (2.1)$$

όπου με V και I συμβολίζονται η τάση και το ρεύμα στην έξοδο του κυκλώματος. Είναι εμφανές ότι η μορφή της (2.1) δεν επιτρέπει απευθείας επίλυση, καθώς δεν είναι εκφρασμένη στη μορφή $I=f(V)$ ή $V=f(I)$. Συνεπώς, απαιτείται αριθμητική/επαναληπτική μέθοδος επίλυσης, όπως ο αλγόριθμος Gauss-Newton [155] ή παραλλαγές του, γεγονός που δυσχεραίνει σημαντικά την επίλυση και εγείρει θέματα αρχικοποίησης και σύγκλισης.

Για να αντιμετωπιστούν τα ανωτέρω προβλήματα, τα τελευταία χρόνια χρησιμοποιείται η μαθηματική συνάρτηση Lambert W , με χρήση της οποίας επιτυγχάνεται αναλυτική



Σχ. 2.3. Γραφική απεικόνιση της σύνθεσης της χαρακτηριστικής $I-V$ από τη χαρακτηριστική της δίοδου και της πηγής φωτορεύματος για την ιδανική κυψέλη [145].

αναδιατύπωση της (2.1) ως προς ρεύμα ή τάση [34], [40], [58], [67], [71], [116], [117], [122]:

$$I = \frac{R_{sh}(I_{ph} + I_s) - V}{R_s + R_{sh}} - \frac{a}{R_s} W \left\{ \frac{R_s R_{sh} I_s}{a(R_s + R_{sh})} e^{\frac{R_s R_{sh}(I_{ph} + I_s) + R_{sh} V}{a(R_s + R_{sh})}} \right\} \quad (2.2)$$

$$V = R_{sh}(I_{ph} + I_s) - (R_s + R_{sh})I - aW \left\{ \frac{I_s R_{sh}}{a} e^{\frac{R_{sh}(I_{ph} + I_s) - I}{a}} \right\} \quad (2.3)$$

όπου με $W\{x\}$ συμβολίζεται η συνάρτηση Lambert W . Η συνάρτηση Lambert W είναι συγγενής της λογαριθμικής συνάρτησης και υποστηρίζεται από όλα τα σύγχρονα μαθηματικά εργαλεία και υπολογιστικές πλατφόρμες, όπως *MATLAB*, *Maple*, και *Mathematica*. Λεπτομέρειες για το θεωρητικό της υπόβαθρο και σειρές σύγκλισης υπολογισμού δίνονται στο ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α.

2.1.3 Επέκταση σε ΦΒ συστοιχία

Το μοντέλο των πέντε παραμέτρων δεν περιορίζεται μόνο σε μία ΦΒ κυψέλη, αλλά περιγράφει οποιαδήποτε ΦΒ διάταξη (πλαίσιο, πλαίσιοσειρά, συστοιχία κλπ.) αρκεί να λειτουργεί σε ομοιόμορφες συνθήκες ακτινοβολίας και θερμοκρασίας. Στη γενική περίπτωση μιας ΦΒ συστοιχίας, οι παράμετροί της συνδέονται με τις παραμέτρους της κυψέλης ως εξής:

$$\begin{cases} I_{ph,array} = N_p I_{ph,cell} \\ I_{s,array} = N_p I_{s,cell} \\ a_{array} = N_m N_{cs} N_s a_{cell} \\ R_{s,array} = N_m N_{cs} N_s R_{s,cell} \\ R_{sh,array} = N_m N_{cs} N_s R_{sh,cell} \end{cases} \quad (2.4)$$

όπου οι παράμετροι με δείκτη «array» αναφέρονται στη συστοιχία και με «cell» στη κυψέλη. Αντίστοιχα συνδέονται οι παράμετροι και των υπολοίπων ΦΒ διατάξεων.

2.1.4 Άλλα μοντέλα της βιβλιογραφίας

Το μοντέλο των πέντε παραμέτρων απολαμβάνει ευρύτατη παραδοχή στη βιβλιογραφία λόγω του ισοδυνάμου κυκλώματος που αναπαριστά πολύ ρεαλιστικά τη λειτουργία μιας ΦΒ κυψέλης μονοκρυσταλλικής και πολυκρυσταλλικής τεχνολογίας. Περιγράφει πλήρως τη χαρακτηριστική $I-V$ στο 1ο τεταρτημόριο ($V>0$ και $I>0$), ενώ επιτρέπει αναλυτική διατύπωση της θεμελιώδους εξίσωσης με χρήση της συνάρτησης Lambert W .

Στη βιβλιογραφία υπάρχουν διάφορες παραλλαγές του εν λόγω μοντέλου, οι οποίες όμως βρίσκουν μικρότερη αποδοχή. Απλοποιημένες εκδοχές στις οποίες αγνοείται η εγκάρσια αντίσταση R_{sh} [156]–[159] ή και οι δυο αντιστάσεις R_s , R_{sh} [142], [160], αμελούν τα ρεύματα διαρροής και τις ωμικές απώλειες παρουσιάζοντας αμφισβητήσιμη ακρίβεια.

Εναλλακτικά, το μοντέλο της διπλής διόδου [26], [49], [161]–[169] θεωρείται ότι προσφέρει μεγαλύτερη ακρίβεια σε χαμηλή ακτινοβολία, καθώς μοντελοποιεί το φαινόμενο της επανασύνδεσης των φορέων (junction recombination). Βέβαια, η επιπρόσθετη πολυπλοκότητα δεν επιτρέπει αναλυτική διατύπωση της εξίσωσης και το κέρδος σε ακρίβεια σε ρεαλιστικές

συνθήκες λειτουργίας δεν είναι αξιόλογο. Στο ίδιο πνεύμα, το μοντέλο που προτείνεται στο [170] εισάγει και τρίτη δίοδο στο κύκλωμα για την περιγραφή διαρροών περιφερικού ρεύματος. Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί ότι το βασικό μοντέλο (μίας διόδου) και οι παραλλαγές του συχνά προσauξάνονται κατά μία ελεγχόμενη πηγή ρεύματος όταν απαιτείται μοντελοποίηση και στο 2ο τεταρτημόριο (αρνητική τάση) [25], [29], [35], [38], [49], [52], [171], [172]. Η συγκεκριμένη προσθήκη απαιτείται για τη μελέτη της σκίασης, όπως εξηγείται εκτενώς στο Κεφάλαιο 3. Συνεπώς, οι ανωτέρω επεκτάσεις του μοντέλου των πέντε παραμέτρων κρίνονται μάλλον περιττές για ομοιόμορφες συνθήκες λειτουργίας.

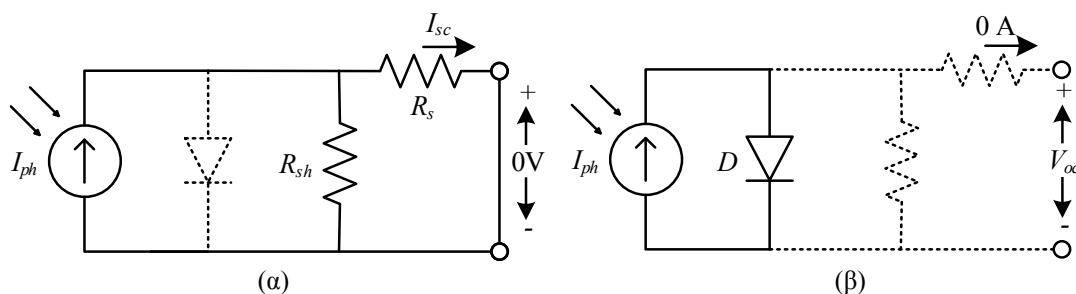
Εκτός των κυκλωματικών προσεγγίσεων, υπάρχουν στη βιβλιογραφία και άλλα μαθηματικά μοντέλα που προσδιορίζουν με εμπειρικές μεθόδους συγκεκριμένα μόνο σημεία λειτουργίας (π.χ. SC, OC, MPP κ.α.), αντί για ολόκληρη τη χαρακτηριστική [173]–[179]. Ένα από τα γνωστότερα είναι το *μοντέλο των εργαστηρίων Sandia* [173], το οποίο βασίζεται σε μετρήσεις που διενεργεί το εργαστήριο στο υπό μελέτη ΦΒ πλαίσιο προς εξαγωγή εμπειρικών συντελεστών. Οι συντελεστές αυτοί χρησιμοποιούνται σε απλές αναλυτικές σχέσεις για την εύρεση πέντε χαρακτηριστικών σημείων λειτουργίας. Παρόλο που η απλότητα του μοντέλου συνετέλεσε σε αξιόλογη αποδοχή από την ερευνητική κοινότητα την προηγούμενη δεκαετία, πλέον έχει πέσει μάλλον σε αφάνεια. Ο κυριότερος λόγος είναι η εξάρτησή του από τις μετρήσεις των εργαστηρίων *Sandia*, καθώς η βάση δεδομένων που προμήθευε τους εμπειρικούς συντελεστές δεν είναι πλέον ελεύθερα προσβάσιμη.

2.2 Σχέσεις SC, OC και MPP συναρτήσσει των Πέντε Παραμέτρων

Τα τρία χαρακτηριστικά σημεία: βραχυκύκλωσης (SC), ανοιχτοκύκλωσης (OC) και μέγιστης ισχύος (MPP) (Σχ. 2.2) περιγράφουν συνοπτικά και αποτελεσματικά τη λειτουργία ενός ΦΒ συστήματος σε ομοιόμορφη ακτινοβολία. Για παράδειγμα, το ρεύμα βραχυκύκλωσης I_{sc} αντιστοιχεί στο μέγιστο ρεύμα του συστήματος, το οποίο καθορίζει τον ηλεκτρολογικό εξοπλισμό της εγκατάστασης (dc ασφάλειες, dc μικροαυτόματοι κλπ.). Ομοίως, η τάση ανοιχτοκύκλωσης V_{oc} είναι η μέγιστη τάση που αναπτύσσεται στους ακροδέκτες του ΦΒ συστήματος, μια ιδιαίτερα κρίσιμη παράμετρος κατά την επιλογή του μετατροπέα ισχύος. Και βεβαίως, τα χαρακτηριστικά του MPP, τάση V_{mp} , ρεύμα I_{mp} και ισχύς P_{mp} , ενδιαφέρουν σημαντικά κατά τη διαστασιολόγηση και λειτουργία ενός ΦΒ σταθμού. Στις επόμενες σελίδες, αναλύεται η λειτουργία μιας ΦΒ διάταξης στις τρεις αυτές καταστάσεις και εξάγονται απλές αναλυτικές σχέσεις προσδιορισμού της τάσης και του ρεύματος *βάσει των πέντε παραμέτρων*. Οι εξισώσεις αυτές μετασχηματίζονται στην ενότητα 2.4 ώστε να εκφράζονται συναρτήσσει *απευθείας της ακτινοβολίας και θερμοκρασίας*.

2.2.1 Λειτουργία βραχυκύκλωσης (SC)

Όταν η ισοδύναμη αντίσταση του φορτίου που συνδέεται στην έξοδο της ΦΒ γεννήτριας έχει μηδενική τιμή, τότε είναι βραχυκυκλωμένη. Η κατάσταση βραχυκύκλωσης είναι μια πολύ φυσιολογική λειτουργία για μια ΦΒ κυψέλη και δε συνεπάγεται φθορά ή καταστροφή. Τότε συμπεριφέρεται ως πηγή ρεύματος (κόκκινος κυκλικός δείκτης στο Σχ. 2.2). Μελετώντας το κύκλωμα του Σχ. 2.1, συμπεραίνεται ότι το φωτόρευμα I_{ph} ρέει κυρίως μέσω των δύο



Σχ. 2.4. Απλοποιημένο ισοδύναμο κύκλωμα σε λειτουργία (α) βραχυκύκλωσης και (β) ανοιχτοκύκλωσης.

αντιστάσεων R_{sh} και R_s , παρά μέσω της διόδου D , αφού η τάση στα άκρα της τελευταίας είναι σχεδόν μηδενική και συνεπώς δεν άγει. Άρα, το ισοδύναμο κύκλωμα στην κατάσταση βραχυκύκλωσης αντιστοιχεί σε ένα διαιρέτη ρεύματος (Σχ. 2.4(α)) και δίνεται από τη σχέση:

$$I_{sc} = \frac{R_{sh}}{R_s + R_{sh}} I_{ph} \quad (2.5)$$

Η εξίσωση (2.5) είναι ευρέως διαδεδομένη στη βιβλιογραφία, ενώ συχνά απλουστεύεται περαιτέρω παρατηρώντας ότι η σειριακή αντίσταση R_s είναι σημαντικά μικρότερη της εγκάρσιας R_{sh} , καταλήγοντας στην ισότητα $I_{sc} = I_{ph}$.

2.2.2 Λειτουργία ανοιχτοκύκλωσης (OC)

Στην κατάσταση ανοιχτοκύκλωσης, το ΦΒ σύστημα αναπτύσσει τη μέγιστη τάση, πλην σε μηδενικό ρεύμα εξόδου (πράσινος κυκλικός δείκτης στο Σχ. 2.2). Εφόσον το ρεύμα εξόδου είναι μηδενικό, δεν υπάρχει πτώση τάσης στη σειριακή αντίσταση R_s . Επιπλέον, το φωτόρρευμα I_{ph} ρέει κυρίως μέσω της άγουσας διόδου D , παρά μέσω της εγκάρσιας αντίστασης R_{sh} . Συνεπώς, το ισοδύναμο κύκλωμα συνίσταται ουσιαστικά μόνο από την ιδανική συνιστώσα, όπως φαίνεται στο Σχ. 2.4(β). Έτσι, η θεμελιώδης εξίσωση (2.1) απλοποιείται στην:

$$I_{ph} = I_s e^{\frac{V_{oc}}{a}} \Leftrightarrow V_{oc} = a \ln \left(\frac{I_{ph}}{I_s} \right) \quad (2.6)$$

Η εξίσωση (2.6) είναι ήδη γνωστή στη βιβλιογραφία.

2.2.3 Λειτουργία μέγιστης παραγωγής (MPP)

Η κατάσταση μέγιστης παραγωγής (MPP) έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον, καθώς η ισχύς εξόδου αντιπροσωπεύει τις μέγιστες δυνατότητες του συστήματος στις συγκεκριμένες περιβαλλοντικές συνθήκες (μωβ κυκλικός δείκτης στο Σχ. 2.2). Εκτός της ισχύος P_{mp} , συχνά απαιτείται και η γνώση της τάσης V_{mp} ή ρεύματος I_{mp} , κυρίως σε μελέτες αλγορίθμων MPPT.

Στη συνέχεια, περιγράφεται μία νέα αναλυτική μέθοδος για τον υπολογισμό του MPP που δημοσιεύτηκε στο [116], η οποία τεκμηριώνεται θεωρητικά και παρουσιάζει πολύ ικανοποιητική ακρίβεια. Βάση της εν λόγω μεθόδου είναι η παρατήρηση πως όταν η ΦΒ κυψέλη λειτουργεί στο MPP, τότε και η ιδανική της συνιστώσα αποδίδει προσεγγιστικά τη

μέγιστη ισχύ. Οι προτεινόμενες σχέσεις είναι απλές αναλυτικές εκφράσεις των πέντε παραμέτρων και χρησιμοποιούν τη συνάρτηση Lambert W .

2.2.3.A Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Υπάρχουν πολλές μελέτες στη βιβλιογραφία που προτείνουν μαθηματικές σχέσεις και μεθόδους υπολογισμού των χαρακτηριστικών του MPP, βασισμένες στο μοντέλο των πέντε παραμέτρων [118]–[122], [130], [137], [142], [144], [154], [169], [180]–[185]. Οι περισσότερες εφαρμόζουν επαναληπτικό αλγόριθμο για την επίλυση ενός συστήματος εξισώσεων [119], [130], [137], [144], [154], ή πιο αποδοτικά μίας μοναδικής εξίσωσης χρησιμοποιώντας τη συνάρτηση Lambert W [122] ή τη συνάρτηση special *Trans* [120], [121]. Οι ανωτέρω προσεγγίσεις πάσχουν από υπολογιστική πολυπλοκότητα και παρουσιάζουν θέματα αρχικοποίησης και σύγκλισης. Άλλες μέθοδοι που εισάγουν νευρωνικά δίκτυα, όπως ενδεικτικά η [180], δεν ξεπερνούν τις προαναφερθείσες αδυναμίες.

Εναλλακτική προσέγγιση στο θέμα δίνεται από τις [118], [142], [147], [181]–[185], στις οποίες προτείνονται αναλυτικές σχέσεις υπολογισμού του MPP, αποφεύγοντας έτσι την κοπιώδη και αβέβαιη επαναληπτική επίλυση. Συγκεκριμένα, στην [118] θεωρείται ότι η κλίση της I - V στο MPP ισούται με το λόγο V_{oc}/I_{sc} , ενώ στο OC με τη σειριακή αντίσταση R_s . Η ίδια υπόθεση για την κλίση στο MPP λαμβάνεται και στις [142], [147], ενώ η τελευταία εργασία θεωρεί το *ιδανικό* μοντέλο της μίας διόδου. Εναλλακτικά, ένα πολυωνυμικό ΦΒ μοντέλο εισάγεται στο [181] και βελτιώνεται στην [182], στο οποίο χρησιμοποιούνται μόνο δύο παράμετροι, αντί για πέντε, καταλήγοντας σε μία κλειστή σχέση για το MPP. Στο ίδιο πνεύμα, μια κλασματική σχέση προτείνεται στις [183]–[185] για τη λειτουργία της ΦΒ κυψέλης, οδηγώντας σε απλοποιημένες μαθηματικές εκφράσεις για το MPP. Παρά την απλοποίηση που προσφέρουν οι ανωτέρω εργασίες, το πλήθος των υποθέσεων που λαμβάνονται υπόψιν πλήττει σημαντικά την ακρίβεια και αξιοπιστία τους.

2.2.3.B Συμβατική αριθμητική επίλυση εξισώσεων

Σύμφωνα με τη θεωρία, στην κατάσταση μέγιστης παραγωγής η παράγωγος της ισχύος ως προς τάση dP/dV πρέπει να είναι μηδέν:

$$\left. \frac{dP}{dV} \right|_{\text{MPP}} = 0 \Leftrightarrow \left. \frac{dI}{dV} \right|_{\text{MPP}} = -\frac{I_{mp}}{V_{mp}} \quad (2.7)$$

Βάσει της εξίσωσης (2.1), η παράγωγος του ρεύματος ως προς τάση dV/dI δίνεται από την:

$$\frac{dI}{dV} = -\frac{\frac{I_s}{a} e^{\frac{V+IR_s}{a}} + \frac{1}{R_{sh}}}{1 + \frac{I_s R_s}{a} e^{\frac{V+IR_s}{a}} + \frac{R_s}{R_{sh}}} \quad (2.8)$$

Έτσι, αντικαθιστώντας την (2.8) στην (2.7) και συνδυάζοντας με την (2.1), προκύπτει σύστημα 2 εξισώσεων που επιλύεται αριθμητικά (επαναληπτικά), για παράδειγμα μέσω της μεθόδου Gauss-Newton. Αυτό είναι ουσιαστικά το υπόβαθρο των εργασιών [144], [154], [169].

Πιο συνεκτική διατύπωση προκύπτει εφαρμόζοντας τη συνάρτηση Lambert W . Συγκεκριμένα, παραγωγίζοντας τις (2.2) και (2.3) οι dI/dV και dV/dI βρίσκονται απευθείας:

$$\frac{dI}{dV} = -\frac{1}{R_s} + \frac{R_{sh}/[R_s(R_s + R_{sh})]}{1 + W \left\{ \frac{R_s R_{sh} I_s}{a(R_s + R_{sh})} e^{\frac{R_s R_{sh} (I_{ph} + I_s) + R_{sh} V}{a(R_s + R_{sh})}} \right\}} \quad (2.9)$$

$$\frac{dV}{dI} = -R_s - \frac{R_{sh}}{1 + W \left\{ \frac{I_s R_{sh}}{a} e^{\frac{R_{sh} (I_{ph} - I_s - I)}{a}} \right\}} \quad (2.10)$$

Στη συνέχεια, οι (2.9) και (2.2) αντικαθίστανται στην (2.7) προς εξαγωγή μίας μοναδικής εξίσωσης πεπλεγμένης μορφής με μόνη άγνωστη την V_{mp} . Αυτή επιλύεται επαναληπτικά για την εύρεση της V_{mp} και μετά του I_{mp} από την (2.2) αν χρειάζεται. Η συγκεκριμένη προσέγγιση αποτελεί τη βάση για τον υπολογισμό του βέλτιστου φορτίου στην [122].

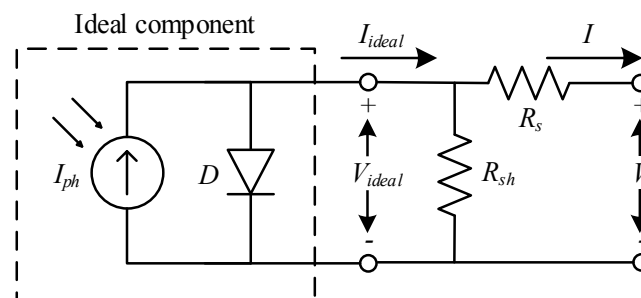
Παρόμοια τεχνική ακολουθείται και στις [120], [121], με τη διαφορά ότι χρησιμοποιείται η συνάρτηση special *Trans* έναντι της Lambert W . Παρόλα αυτά, όλες οι παραπάνω μέθοδοι απαιτούν επαναληπτική επίλυση με τις αντίστοιχες συνεπαγόμενες επιπτώσεις.

2.2.3.Γ Αναλυτικές σχέσεις MPP για το ιδανικό ΦΒ μοντέλο

Για λόγους κατανόησης, αναλύεται πρώτα το *ιδανικό* μοντέλο μίας διόδου σε λειτουργία μέγιστης ισχύος (MPP), και στη συνέχεια οι παρατηρήσεις επεκτείνονται στο πλήρες μοντέλο των πέντε παραμέτρων. Εστιάζοντας στην ιδανική συνιστώσα του κυκλώματος του Σχ. 2.5, η εξίσωση ρεύματος-τάσης απλοποιείται στην:

$$I_{ideal} = I_{ph} - I_s \left(e^{\frac{V_{ideal}}{a}} - 1 \right) \approx I_{ph} - I_s e^{\frac{V_{ideal}}{a}} \quad (2.11)$$

όπου με V_{ideal} και I_{ideal} συμβολίζονται η τάση και το ρεύμα στο ιδανικό τμήμα του μοντέλου (Σχ. 2.5). Προφανώς η (2.7) ισχύει και σε αυτήν την περίπτωση, με τη διαφορά ότι η dI_{ideal}/dV_{ideal} δίνεται από την πολύ απλούστερη έκφραση:



Σχ. 2.5. Πλήρες ισοδύναμο κύκλωμα του μοντέλου μίας διόδου με επισήμανση της ιδανικής συνιστώσας

$$\frac{dI_{ideal}}{dV_{ideal}} = -\frac{I_s}{a} e^{\frac{V_{ideal}}{a}} \quad (2.12)$$

Έτσι, γράφοντας τις (2.12) και (2.11) σε συνθήκες MPP και αντικαθιστώντας στην (2.7), προκύπτει αναλυτική έκφραση για την $V_{mp,ideal}$ χρησιμοποιώντας τη συνάρτηση Lambert W :

$$V_{mp,ideal} = a \left[W \left\{ \frac{I_{ph}}{I_s} e \right\} - 1 \right] \quad (2.13)$$

Για την εύρεση του $I_{mp,ideal}$, η (2.13) αντικαθίσταται στην (2.11), καταλήγοντας στην:

$$I_{mp,ideal} = I_{ph} - \frac{I_{ph}}{W \left\{ \frac{I_{ph}}{I_s} e \right\}} \quad (2.14)$$

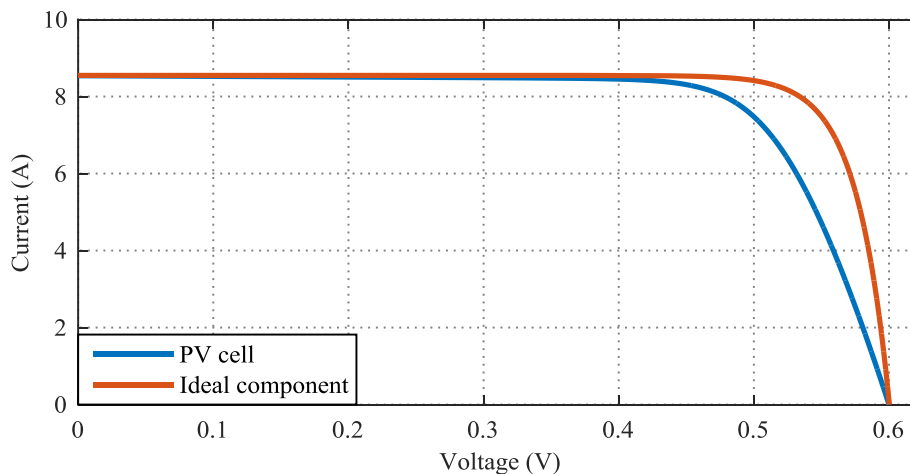
Τέλος, το βέλτιστο φορτίο δίνεται από:

$$\frac{V_{mp,ideal}}{I_{mp,ideal}} = \frac{a}{I_{ph}} W \left\{ \frac{I_{ph}}{I_s} e \right\} \quad (2.15)$$

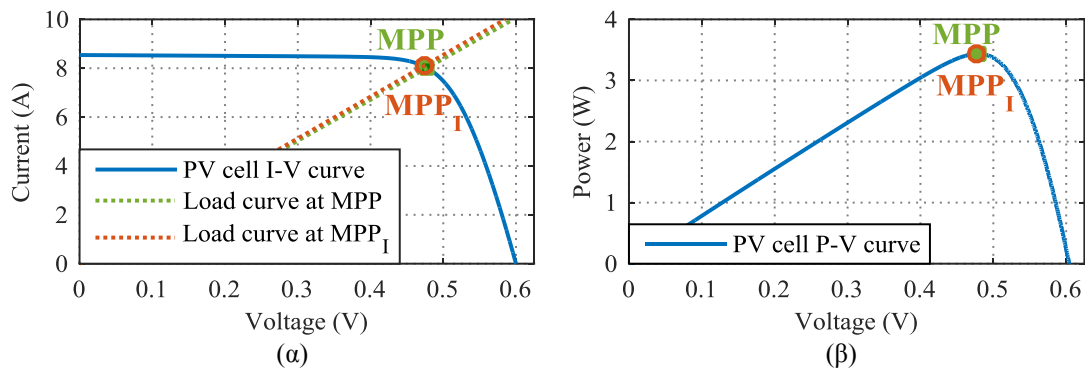
2.2.3.Δ Επέκταση αναλυτικών σχέσεων MPP στο πλήρες ΦΒ μοντέλο

Στο Σχ. 2.6, αντιπαραβάλλονται οι χαρακτηριστικές $I-V$ μιας πραγματικής κυψέλης (μπλε χρώμα) και μιας ιδανικής (κόκκινο χρώμα). Είναι εμφανές ότι οι δύο καμπύλες συμπίπτουν στις περιοχές SC και OC, ενώ σε όλο το υπόλοιπο διάστημα, συμπεριλαμβανομένου και του MPP, αποκλίνουν σημαντικά. Συνεπώς, το μοντέλο των τριών παραμέτρων δεν επαρκεί για τον ακριβή προσδιορισμό του MPP.

Στα Σχ. 2.7(α)-(β), παρουσιάζονται οι χαρακτηριστικές $I-V$ και $P-V$ μίας τυπικής ΦΒ κυψέλης, σημειώνοντας το MPP και την αντίστοιχη καμπύλη φορτίου με πράσινο χρώμα. Επιπλέον, σημειώνεται και ένα άλλο σημείο ενδιαφέροντος με κόκκινο κυκλικό δείκτη, το MPP_1 . Το MPP_1 είναι το σημείο λειτουργίας στο οποίο μεγιστοποιείται η ισχύς της *ιδανικής*



Σχ. 2.6. Χαρακτηριστική καμπύλη $I-V$ της πραγματικής κυψέλης και της ιδανικής της συνιστώσας.



Σχ. 2.7. Χαρακτηριστική (α) $I-V$ και (β) $P-V$ μίας τυπικής ΦΒ κυψέλης με επισήμανση των σημείων MPP και MPP_I .

συνιστώσας στο Σχ. 2.5, αντί του πλήρους κυκλώματος. Όπως φαίνεται, το MPP_I διαφέρει ελάχιστα από το MPP, που σημαίνει ότι όταν η πραγματική κυψέλη λειτουργεί στο MPP_I , η ισχύς εξόδου της είναι πρακτικά/προσεγγιστικά ίδια με του MPP, δηλαδή σχεδόν μέγιστη. Η συγκεκριμένη παρατήρηση αποτελεί τη βάση για την προσέγγιση του MPP από το ευκολότερα υπολογιζόμενο MPP_I . Η εν λόγω υπόθεση τεκμηριώνεται θεωρητικά στο ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β, ενώ επιβεβαιώνεται στη συνέχεια μέσω προσομοιώσεων και πειραματικών μετρήσεων.

Έτσι, σε λειτουργία MPP_I , η τάση και το ρεύμα στην έξοδο της ιδανικής συνιστώσας $V_{mp,ideal}$ και $I_{mp,ideal}$ (Σχ. 2.5) δίνονται από τις (2.13) και (2.14) αντίστοιχα. Συνεπώς, η τάση και το ρεύμα του πλήρους κυκλώματος υπολογίζονται λαμβάνοντας υπόψιν τους νόμους Kirchhoff:

$$V_{mp} = \frac{R_s + R_{sh}}{R_{sh}} a(w-1) - R_s I_{ph} \left(1 - \frac{1}{w}\right) \quad (2.16)$$

$$I_{mp} = I_{ph} \left(1 - \frac{1}{w}\right) - \frac{a(w-1)}{R_{sh}} \quad (2.17)$$

όπου $w = W \{I_{ph} e / I_s\}$ είναι μία βοηθητική παράμετρος που χρησιμοποιεί τη συνάρτηση Lambert W . Οι εξισώσεις (2.16) και (2.17) προσφέρουν ένα ευθύ και απλό τρόπο υπολογισμού της MPP τάσης και ρεύματος συναρτήσεων των πέντε παραμέτρων. Επιπλέον, μπορούν να συνδυαστούν στην ακόλουθη έκφραση, συνδέοντας την τάση με το ρεύμα:

$$V_{mp} = a(w-1) - R_s I_{mp} \quad (2.18)$$

Αξίζει να επισημανθεί πως η παραπάνω ανάλυση και οι εξισώσεις δεν περιορίζονται μόνο σε μια ΦΒ κυψέλη, αλλά αφορούν κάθε ΦΒ σύστημα οποιασδήποτε διάταξης (πλαίσιο, συστοιχία κλπ.) δεδομένου ότι λειτουργεί σε ομοιόμορφες συνθήκες ακτινοβολίας και θερμοκρασίας. Η μοναδική παραδοχή που λαμβάνεται υπόψιν είναι η αντιστοίχιση του MPP_I με το MPP, η οποία τεκμηριώνεται θεωρητικά στο ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β. Παρόμοιες εκφράσεις αλλά με διαφορετική διατύπωση προτείνονται στις [186] και [187].

2.2.3.E Συγκριτική ανάλυση σφαλμάτων μέσω προσομοιώσεων

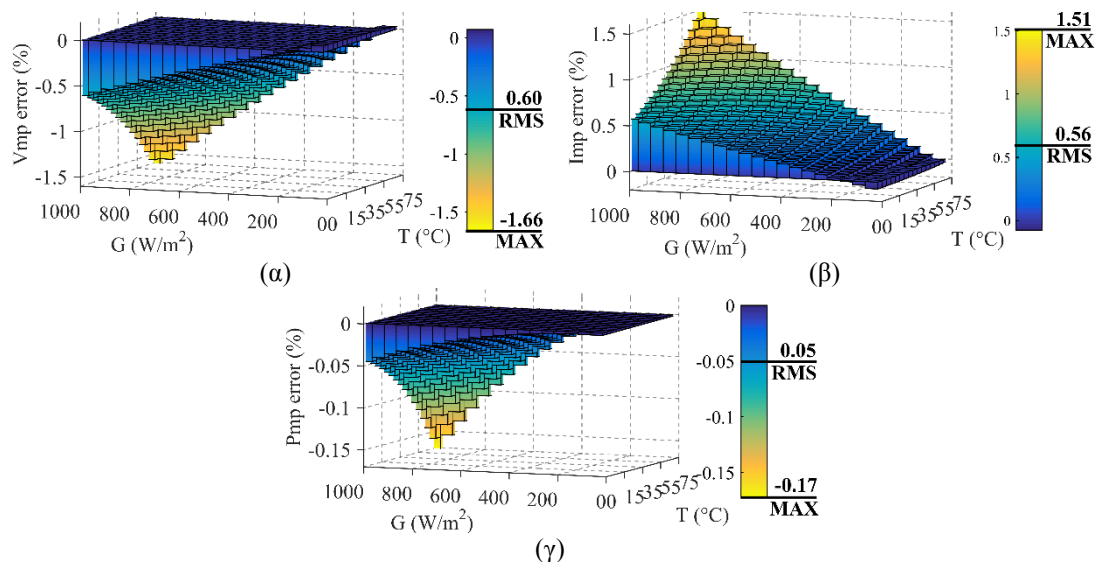
Στην συνέχεια, προσομοιώνονται οι αριθμητικές και αναλυτικές μέθοδοι προσδιορισμού του

MPP οι οποίες περιγράφονται παραπάνω [118], [142], [147], [182], [185], και συγκρίνονται με τις εξισώσεις (2.16)-(2.17) που προτείνονται στην παρούσα εργασία, στους άξονες της ακρίβειας και του υπολογιστικού φόρτου. Για το σκοπό αυτό, προσομοιώνονται 23 διαφορετικά εμπορικά ΦΒ πλαίσια σε ένα μεγάλο εύρος ομοιόμορφων συνθηκών λειτουργίας, με την ακτινοβολία να κυμαίνεται από 50 έως 1000 W/m² (βήμα 50 W/m²) και τη θερμοκρασία από 0 έως 75 °C (βήμα 5 °C), δηλαδή 320 σενάρια συνολικά.

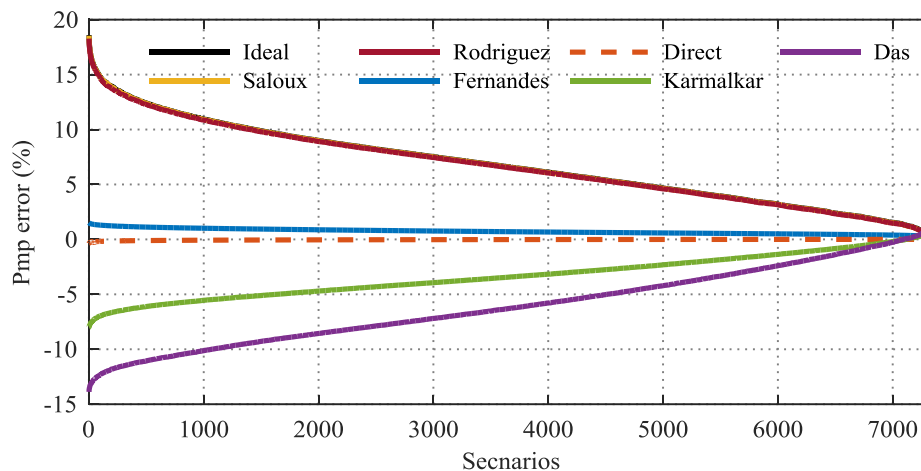
Στη συνέχεια, ο όρος *Systems2eqs* αντιστοιχεί στη μέθοδο αριθμητικής επίλυσης συστήματος δύο εξισώσεων που περιγράφεται πρώτη στην ενότητα 2.2.3.B, ενώ με *LambertW1eq* και *Trans1eq* εννοείται η επαναληπτική επίλυση μίας εξίσωσης με χρήση της συνάρτησης Lambert *W* ή special *Trans* αντίστοιχα. Για την *Systems2eqs*, χρησιμοποιείται η εντολή *fsolve* της υπολογιστικής πλατφόρμας *MATLAB*, ενώ η επίλυση των *LambertW1eq* και *Trans1eq* γίνεται μέσω της εντολής *fzero* που είναι πιο αποδοτική από τη μέθοδο Gauss-Newton, αλλά είναι εφαρμόσιμη μόνο σε μία εξίσωση. Σε όλες τις μεθόδους, η συνάρτηση Lambert *W* υπολογίζεται με τις σειρές σύγκλισης που δίνονται στο ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α. Η special *Trans* υπολογίζεται από τις σειρές που προτείνονται στις [188], [189], όπου ο αριθμός των όρων της σειράς είναι 10.

Η χρήση των προτεινόμενων (2.16)-(2.17) συμβολίζεται με *Direct*. Επιπλέον, εφαρμόζονται οι αναλυτικές μέθοδοι των [118], [142],[147] (με συγκεκριμένες διορθώσεις), [182], [185] και συμβολίζονται με τα ονόματα των αντίστοιχων κυρίων συγγραφέων: *Rodriguez*, *Saloux*, *Fernandes*, *Karmalkar* και *Das*. Ακόμα, με τον όρο *Ideal Model* εννοούνται οι (2.13)-(2.14) που βασίζονται στην ιδανική έκδοση του μοντέλου (μοντέλο τριών παραμέτρων).

Οι τρεις επαναληπτικές μέθοδοι παράγουν τα ίδια αποτελέσματα, καθώς δεν εφαρμόζουν απλουστεύσεις στο μοντέλο, και χρησιμοποιούνται ως αναφορά για την αξιολόγηση της ακρίβειας της *Direct* και των υπολοίπων αναλυτικών μεθόδων της βιβλιογραφίας. Στο Σχ. 2.8, παρουσιάζεται γραφικά η κατανομή του μέσου σφάλματος εκτίμησης του MPP από την *Direct* για 23 εμπορικά ΦΒ πλαίσια στο σύνολο των 320 σεναρίων. Όπως φαίνεται, η MPP τάση



Σχ. 2.8. Τρισδιάστατη κατανομή σφάλματος εκτίμησης (α) V_{mp} , (β) I_{mp} και (γ) P_{mp} από την *Direct* μέθοδο για όλα τα σενάρια ακτινοβολίας και θερμοκρασίας (320 στο σύνολο), θεωρώντας ως αναφορά τις επαναληπτικές μεθόδους. Κάθε τιμή σφάλματος αντιπροσωπεύει τη μέση τιμή για 23 εμπορικά ΦΒ πλαίσια.



Σχ. 2.9. Σύγκριση σφαλμάτων εκτίμησης P_{mp} όλων των αναλυτικών μεθόδων. Τα σφάλματα δίνονται σε φθίνουσα ταξινόμηση κατά απόλυτη τιμή για το σύνολο των 7360 σεναρίων προσομοίωσης.

κυρίως υποεκτιμάται ενώ το MPP ρεύμα υπερεκτιμάται, παρουσιάζοντας rms και μέγιστα σφάλματα γύρω στο 0.6% και 1.6% αντίστοιχα (Σχ. 2.8). Εκφράσεις προσδιορισμού του σφάλματος ως τιμή και πρόσημο δίνονται στο ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β. Δεδομένου ότι οι αποκλίσεις στην τάση και το ρεύμα είναι αντίρροπες, η εκτίμηση της MPP ισχύος αποδεικνύεται ιδιαίτερα ακριβής, παρουσιάζοντας rms και μέγιστο σφάλμα μόνο 0.05% και 0.17% αντίστοιχα (Σχ. 2.8(γ)). Είναι εμφανές ότι αυτές οι τιμές σφάλματος είναι αμελητέες, και άρα η *Direct* μέθοδος βρίσκεται σε συμφωνία με το μοντέλο των πέντε παραμέτρων και εκτιμά το MPP με ακρίβεια.

Η ακρίβεια όλων των αναλυτικών μεθόδων παρουσιάζεται γραφικά σε φθίνουσα ταξινόμηση (κατά απόλυτη τιμή) στο Σχ. 2.9 για τα 320 σεσάρια περιβαλλοντικών συνθηκών και για κάθε ΦΒ πλαίσιο (7360 επαναλήψεις συνολικά). Όπως φαίνεται, η καμπύλη σφαλμάτων των *Saloux* (κίτρινο χρώμα) και *Rodriguez* (μπορντό χρώμα) ταυτίζεται με τη μέθοδο του ιδανικού μοντέλου *Ideal* (μαύρο χρώμα), υπερεκτιμώντας πάντα την ισχύ έως και 20% (7.6% rms σφάλμα). Αντίθετα, οι εναλλακτικές μοντελοποιήσεις *Karmalkar* (πράσινο χρώμα) και *Das* (μωβ χρώμα) υποεκτιμούν πάντα την P_{mp} , παρουσιάζοντας μέγιστα σφάλματα 7.9% και 13.9% (3.9% και 6.7% rms σφάλματα αντίστοιχα). Η πρόσφατη μέθοδος *Fernandes* (μπλε χρώμα) αποδεικνύεται αρκετά ακριβής με 0.77% rms και 1.54% μέγιστο σφάλμα. Παρόλα αυτά, η προτεινόμενη εξίσωση της *Direct* (κόκκινη διακεκομμένη γραμμή) προσφέρουν την καλύτερη ακρίβεια από όλες τις αναλυτικές εναλλακτικές, παρουσιάζοντας 0.05% rms σφάλμα και 0.36% μέγιστο σφάλμα.

Σχετικά με το υπολογιστικό κόστος, οι χρόνοι εκτέλεσης όλων των επαναληπτικών και αναλυτικών μεθόδων δίνονται στον ακόλουθο πίνακα Π. 2.1, σε απόλυτη και κανονικοποιημένη μορφή. Οι προσομοιώσεις έγιναν στον ίδιο ηλεκτρονικό υπολογιστή με 3.4 GHz CPU και 4.0 GB RAM. Όπως φαίνεται, οι επαναληπτικές μέθοδοι αποδεικνύονται 2 τάξεις μεγέθους πιο αργές σε σχέση με τις απλούστερες αναλυτικές προσεγγίσεις. Συγκεκριμένα, η *System2eqs* παρουσιάζει τον υψηλότερο χρόνο εκτέλεσης ανάμεσα στις τρεις επαναληπτικές εναλλακτικές, καθώς είναι δυσκολότερη η επίλυση ενός συστήματος δύο μη γραμμικών εξισώσεων από την *fsolve*, σε σχέση με μία εξίσωση από την αποδοτικότερη *fzero*. Αντίθετα, οι εναλλακτικές μέθοδοι απαιτούν ίδιου επιπέδου χρόνο εκτέλεσης, με μικρές διαφορές λόγω της μαθηματικής πολυπλοκότητας και του πλήθους των όρων στις σχέσεις.

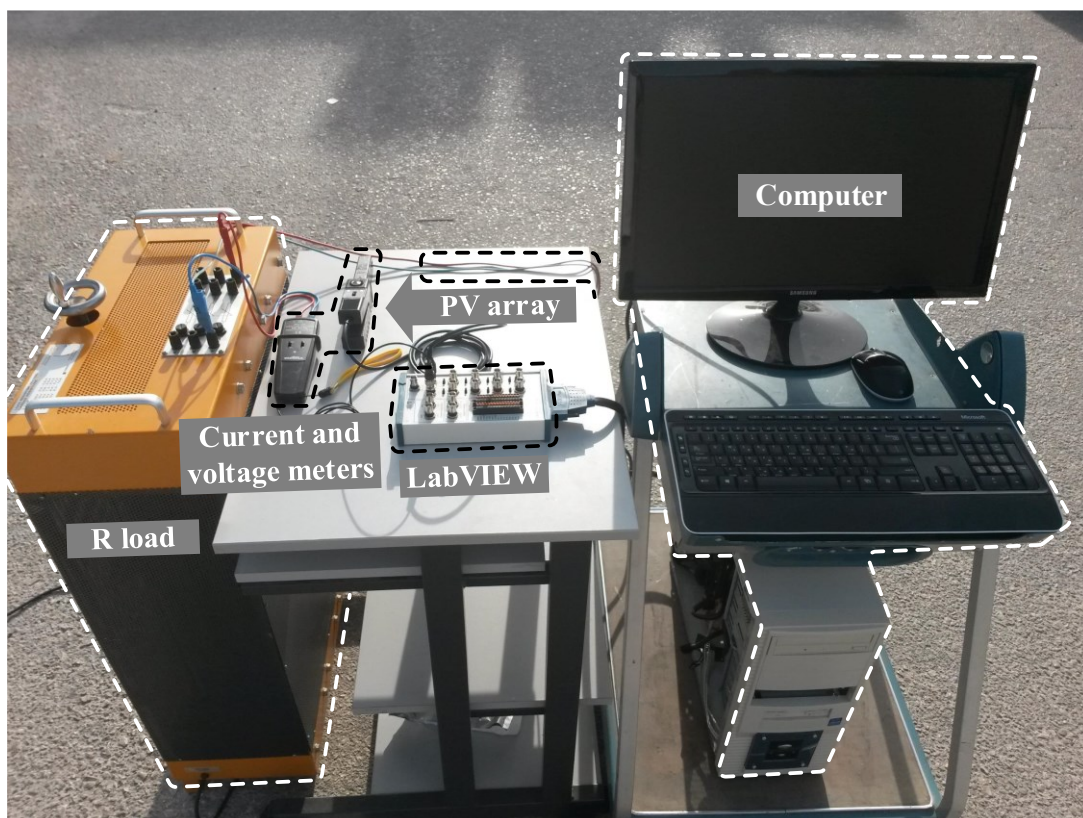
Π. 2.1. Χρόνος εκτέλεσης όλων των επαναληπτικών και αναλυτικών μεθόδων εκτίμησης του MPP.

| Μέθοδος | Κανονικοποιημένος χρόνος εκτέλεσης ως προς τον χρόνο της <i>Direct</i> | Απόλυτος χρόνος εκτέλεσης ανά σενάριο (μs) |
|----------------------|--|--|
| <i>System2eqs</i> | 125.54 | 4.174.29 |
| <i>LambertW1eq</i> | 40.65 | 1.351.73 |
| <i>Trans1eq</i> | 36.29 | 1.206.56 |
| <i>Direct</i> | 1.00 | 33.25 |
| <i>Ideal Model</i> | 0.99 | 33.03 |
| <i>Rodriguez</i> | 0.99 | 33.03 |
| <i>Karmalkar</i> | 0.91 | 30.33 |
| <i>Saloux</i> | 0.82 | 27.32 |
| <i>Fernandes</i> | 0.77 | 25.44 |
| <i>Das</i> | 0.71 | 23.76 |

Συμπερασματικά, η προτεινόμενη *Direct* μέθοδος παρουσιάζει τη μεγαλύτερη ακρίβεια και παρόμοιο υπολογιστικό κόστος με τις υπόλοιπες αναλυτικές προσεγγίσεις τις βιβλιογραφίας.

2.2.3.ΣΤ Πειραματική επιβεβαίωση

Οι εξισώσεις (2.16)-(2.17) που προτείνονται στην παρούσα εργασία επιβεβαιώνονται περαιτέρω πειραματικά με πέντε ΦΒ πλαίσια σε ομοιόμορφες συνθήκες λειτουργίας. Για κάθε πλαίσιο, καταγράφεται η χαρακτηριστική καμπύλη *I-V* σε τρία διαφορετικά σενάρια ακτινοβολίας και θερμοκρασίας. Για το σκοπό αυτό, χρησιμοποιείται ένα ποτενσιόμετρο



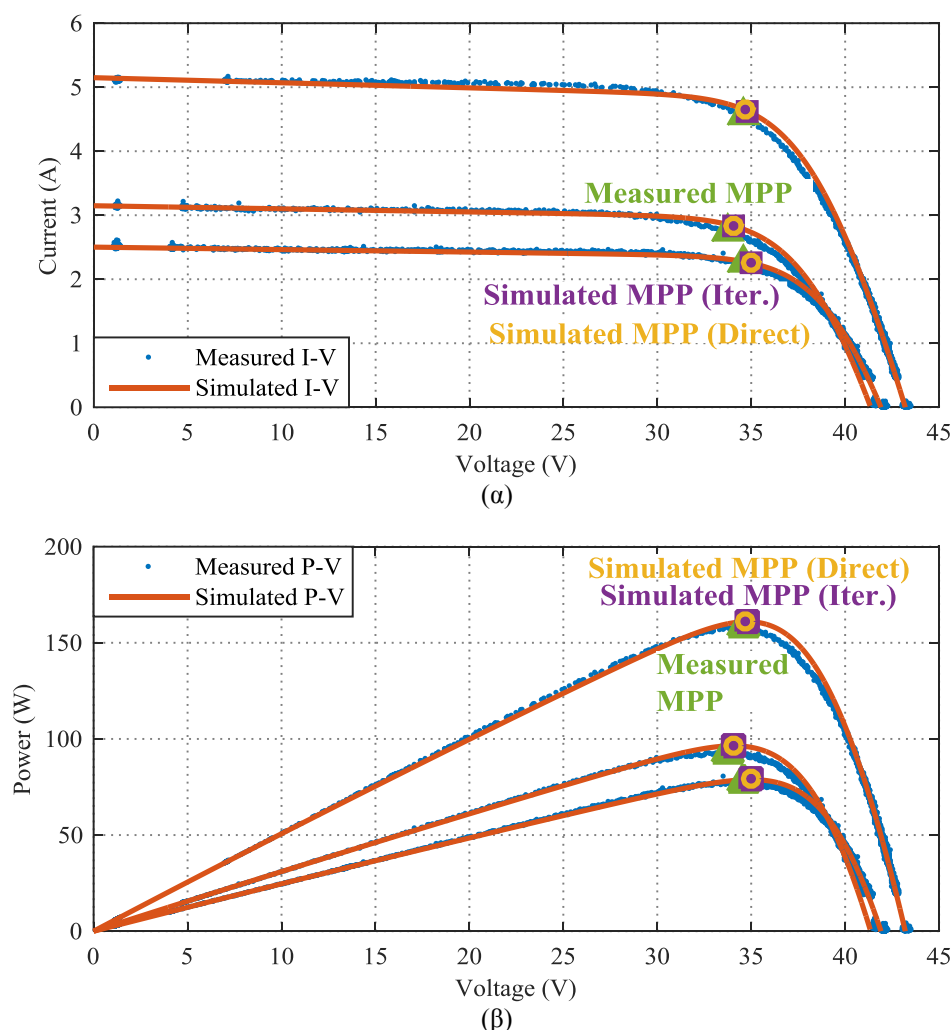
Σχ. 2.10. Εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε για την πειραματική επιβεβαίωση των αναλυτικών σχέσεων υπολογισμού MPP.

2.2 - Σχέσεις SC, OC και MPP συναρτήσει των Πέντε Παραμέτρων

ισχύος ως μεταβλητό φορτίο, μεταβάλλοντας το σημείο λειτουργίας από την ανοιχτοκύκλωση στη βραχυκύκλωση, ενώ οι τιμές ρεύματος και τάσης μετρούνται με τον εξοπλισμό *LABVIEW*. Τα δεδομένα καταγράφονται σε ηλεκτρονικό υπολογιστή και επεξεργάζονται στην υπολογιστική πλατφόρμα *MATLAB* (Σχ. 2.10). Η διαδικασία επεξεργασίας των μετρήσεων έχει ως εξής:

- ✓ από τη μετρημένη χαρακτηριστική καμπύλη εντοπίζεται το πραγματικό MPP και προσδιορίζονται οι λειτουργικές συνθήκες,
- ✓ από το τεχνικό φυλλάδιο του ΦΒ πλαισίου υπολογίζονται οι πέντε παράμετροι αναφοράς και ανάγονται στις εκάστοτε συνθήκες σύμφωνα με το μοντέλο της *De Soto* [151] (περισσότερες λεπτομέρειες στην ενότητα 2.3),
- ✓ δεδομένων των πέντε παραμέτρων, προσομοιώνεται η χαρακτηριστική και υπολογίζεται το MPP με α) τις επαναληπτικές και β) την *Direct* μέθοδο.

Ένα ενδεικτικό παράδειγμα ακολουθεί στο Σχ. 2.11, όπου με μπλε τελείες σχεδιάζεται η μετρημένη χαρακτηριστική και με κόκκινη συνεχή γραμμή η προσομοιωμένη καμπύλη. Είναι εμφανές ότι οι δύο καμπύλες συγκλίνουν ικανοποιητικά σε όλο το εύρος λειτουργίας. Ακόμα,



Σχ. 2.11. Μετρημένες και προσομοιωμένες καμπύλες (α) $I-V$ και (β) $P-V$ ενός ενδεικτικού ΦΒ πλαισίου (Sharp NE-Q5E3E).

Π. 2.2. Πειραματικά αποτελέσματα σφαλμάτων εκτίμησης του MPP από την *Direct* και τις επαναληπτικές (*Επαν.*) μεθόδους σε πέντε εμπορικά ΦΒ πλαίσια και τρία σενάρια συνθηκών.

| ΦΒ πλαίσιο Συνθήκες λειτουργίας | Σφάλμα P_{mp} (%) | | Σφάλμα V_{mp} (%) | | Σφάλμα I_{mp} (%) | |
|------------------------------------|---------------------|---------------|---------------------|---------------|---------------------|---------------|
| | <i>Επαν.</i> | <i>Direct</i> | <i>Επαν.</i> | <i>Direct</i> | <i>Επαν.</i> | <i>Direct</i> |
| Conergy 190PC | | | | | | |
| 650 W/m ² – 25 °C | 3.65 | 3.63 | 2.15 | 1.70 | 1.57 | 2.00 |
| 330 W/m ² – 20 °C | 0.99 | 0.99 | 0.82 | 0.66 | 0.24 | 0.40 |
| 147 W/m ² – 18 °C | 1.50 | 1.50 | 0.94 | 0.93 | 0.16 | 0.17 |
| Day4 Energy 60MC-I | | | | | | |
| 1000 W/m ² – 29 °C | 3.21 | 3.15 | 2.34 | 1.54 | 0.76 | 1.49 |
| 610 W/m ² – 22 °C | 2.90 | 2.88 | 1.96 | 1.58 | 0.84 | 1.20 |
| 480 W/m ² – 20 °C | 3.78 | 3.78 | 1.50 | 1.25 | 2.12 | 2.37 |
| Sharp NE-Q5E3E | | | | | | |
| 970 W/m ² – 24 °C | 2.14 | 2.13 | 0.72 | 0.43 | 1.47 | 1.76 |
| 590 W/m ² – 30 °C | 4.01 | 4.01 | 0.82 | 0.85 | 2.98 | 2.94 |
| 470 W/m ² – 24 °C | 1.58 | 1.57 | 1.28 | 1.45 | 0.14 | -0.02 |
| Yingli YL-165 | | | | | | |
| 840 W/m ² – 35 °C | 4.17 | 4.15 | 2.05 | 1.46 | 2.09 | 2.66 |
| 430 W/m ² – 28 °C | 0.13 | 0.13 | 0.53 | 0.51 | 0.52 | 0.53 |
| 225 W/m ² – 25 °C | 2.31 | 2.31 | 0.70 | 0.91 | 1.66 | 1.45 |
| Yingli YL-210 | | | | | | |
| 740 W/m ² – 33 °C | 2.06 | 2.02 | -2.15 | -2.84 | 4.22 | 4.93 |
| 545 W/m ² – 31 °C | -0.65 | -0.65 | -3.36 | -3.50 | 2.73 | 2.88 |
| 145 W/m ² – 25 °C | -2.42 | -2.46 | -0.67 | 0.04 | -2.05 | -2.78 |
| ΟΛΙΚΟ RMS | 2.66 | 2.65 | 1.67 | 1.57 | 1.94 | 2.24 |
| ΟΛΙΚΟ ΜΕΓΙΣΤΟ | 4.17 | 4.15 | 2.34 | 1.58 | 4.22 | 4.93 |

το εκτιμώμενο MPP μέσω της *Direct* (κίτρινος κυκλικός δείκτης) και των επαναληπτικών μεθόδων (μωβ τετραγωνικός δείκτης) ταυτίζεται σε όλα τα σενάρια, και διαφέρει ελάχιστα από το μετρημένο MPP (πράσινο τριγωνικός δείκτης).

Αυτές οι παρατηρήσεις επιβεβαιώνονται περαιτέρω από τον ακόλουθο πίνακα Π. 2.2, όπου το σφάλμα εκτίμησης της P_{mp} , V_{mp} και I_{mp} δίνεται για τις επαναληπτικές και την *Direct* εναλλακτική για όλα τα ΦΒ πλαίσια και σενάρια. Είναι εμφανές ότι και οι δυο προσεγγίσεις επιτυγχάνουν ικανοποιητικότερη ακρίβεια, με rms και μέγιστο σφάλμα γύρω στο 2% και λιγότερο από 5% αντίστοιχα. Πράγματι, τα σφάλματα P_{mp} των δύο εναλλακτικών είναι σχεδόν ταυτόσημα, ενώ η *Direct* μέθοδος παρουσιάζει μικρότερο σφάλμα στη V_{mp} και μεγαλύτερο σφάλμα στο I_{mp} , επιβεβαιώνοντας τη θεωρητική ανάλυση και τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων.

Ουσιαστικά, το κύριο συμπέρασμα από την πειραματική διερεύνηση είναι ότι η προτεινόμενη εξισώσεις (2.16)-(2.17) για τον προσδιορισμό του MPP (*Direct* μέθοδος) συμφωνούν απόλυτα με τη θεωρία του ΦΒ μοντέλου των πέντε παραμέτρων. Δηλαδή, είναι τόσο ακριβείς σε πραγματικές/πειραματικές συνθήκες όσο το ίδιο το μοντέλο, ενώ η μοναδική υπόθεση στην οποία βασίζονται οι εν λόγω εξισώσεις (ισοδυναμία MPP με MPP_I) δεν εισάγει σφάλμα άξιο αναφοράς.

2.3 Προσδιορισμός των Πέντε Παραμέτρων

Η απόκτηση των πέντε παραμέτρων του ομώνυμου μοντέλου δεν είναι τετριμμένη διαδικασία, καθώς δεν είναι διαθέσιμες στο τεχνικό φυλλάδιο των ΦΒ πλαισίων και

επηρεάζονται σημαντικά από τις εκάστοτε συνθήκες ακτινοβολίας και θερμοκρασίας. Συμβατικά, ο προσδιορισμός των πέντε παραμέτρων συνίσταται σε δύο επιμέρους διαδικασίες:

- ✓ Πρώτα, *εξάγονται οι παράμετροι αναφοράς I_{ph0} , I_{s0} , a , R_{s0} και R_{sh0} σε συνθήκες STC*, είτε από δεδομένα του τεχνικού φυλλαδίου είτε από μετρημένες χαρακτηριστικές $I-V$. Ο δείκτης «0» υποδηλώνει παράμετρο σε συνθήκες STC.
- ✓ Στη συνέχεια, *οι παράμετροι αναφοράς ανάγονται στις εκάστοτε συνθήκες ακτινοβολίας G και θερμοκρασίας T μέσω σχέσεων αναγωγής*.

Στη βιβλιογραφία υπάρχει αξιοσημείωτα μεγάλο πλήθος εργασιών που πραγματεύονται το εν λόγω αντικείμενο, και ιδιαίτερα το πρώτο σκέλος που αφορά την εξαγωγή των παραμέτρων σε συνθήκες αναφοράς. Οι περισσότερες από αυτές προτείνουν επαναληπτικούς αλγορίθμους αυξημένης πολυπλοκότητας και υπολογιστικού κόστους. Στη συνέχεια της παρούσας ενότητας, περιγράφεται μια νέα μέθοδος για την εξαγωγή των πέντε παραμέτρων με απλές και αναλυτικές σχέσεις, όπως δημοσιεύτηκε στο [117].

2.3.1 Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Η πιο διαδεδομένη προσέγγιση για την εύρεση των πέντε παραμέτρων σε συνθήκες STC είναι μέσω *αριθμητικών μεθόδων*, σύμφωνα με τις οποίες σχηματίζεται ένα σύστημα εξισώσεων που επιλύεται αριθμητικά/επαναληπτικά [124]–[126], [128], [130], [132]–[134], [137]–[140], [143], [145], [148], [151], [156], [160], [165], [166], [190], [191]. Μία αντιπροσωπευτική και ιδιαίτερα διαδεδομένη μέθοδος αυτής της κατηγορίας παρουσιάζεται στην [151] (μοντέλο *De Soto*), όπου δομείται ένα σύστημα πέντε εξισώσεων για τον υπολογισμό των ισάριθμων παραμέτρων. Συγκεκριμένα, οι τρεις εξισώσεις σχηματίζονται εφαρμόζοντας τη θεμελιώδη εξίσωση του μοντέλου στα σημεία SC, OC και MPP, ενώ η τέταρτη εξίσωση απαιτώντας μηδενική κλίση της $P-V$ καμπύλης στο MPP. Για την πέμπτη εξίσωση, αξιοποιείται η γραμμική εξάρτηση της τάσης ανοιχτοκύκλωσης V_{oc} με τη θερμοκρασία που μοντελοποιείται μέσω του θερμοκρασιακού συντελεστή $\beta_{V_{oc}}$. Βασικό χαρακτηριστικό της εν λόγω μεθόδου είναι ότι βασίζεται εξ ολοκλήρου στο τεχνικό φυλλάδιο του ΦΒ πλαισίου, ιδιότητα που της προσδίδει ευελιξία και γενική εφαρμοσιμότητα. Στο ίδιο πνεύμα κινούνται και οι [126], [128], [130], [132], [137], [138], [140], [143], [145], [148], [156], [160], [166], [190], ενώ άλλες μέθοδοι της ίδιας κατηγορίας απαιτούν ως επιπλέον δεδομένα εισόδου την κλίση της χαρακτηριστικής $I-V$ στο SC ή/και στο OC [125], [134], [139], [165], ή ακόμα και ολόκληρη την καμπύλη $I-V$ [124], [133], [191]. Βιβλιογραφική ανασκόπηση και συγκριτική μελέτη μέσω πειραματικών μετρήσεων για τις μεθόδους αυτού του τύπου δίνονται στις [192] και [193].

Μια εναλλακτική προσέγγιση στο θέμα δίνεται εφαρμόζοντας τεχνικές *προσαρμογής καμπύλης (curve fitting)* σε μετρήσεις της χαρακτηριστικής $I-V$. Η συμβατική μέθοδος των ελαχίστων τετραγώνων (least squares – LSQ) χρησιμοποιείται στις [127], [150], [154], [167], ενώ άλλοι αλγόριθμοι ευριστικής φύσεως προτείνονται επίσης στη βιβλιογραφία, όπως genetic algorithms [144], neural networks [136], pattern search [168], particle swarm optimization [194], differential evolution [141] και bird mating optimization [169]. Πλήρης βιβλιογραφική ανασκόπηση των μεθόδων της συγκεκριμένης κατηγορίας δίνεται στην [195].

Παρόλο που οι δύο ανωτέρω προσεγγίσεις παρουσιάζουν γενικά ικανοποιητική ακρίβεια, υποφέρουν από τα κοινά προβλήματα της επαναληπτικής επίλυσης, όπως δυσκολία

αρχικοποίησης, θέματα σύγκλισης, αβεβαιότητα ολοκλήρωσης και αυξημένο υπολογιστικό κόστος. Προς αντιμετώπιση αυτών των μειονεκτημάτων, έχουν δημοσιευθεί λίγες αναλυτικές μέθοδοι στη βιβλιογραφία που προσδιορίζουν τις πέντε παραμέτρους με απλό και ευθύ τρόπο, οι οποίες όμως παρουσιάζουν μειωμένη ακρίβεια [129], [131], [135], [142], [146], [149], [153], [157]–[159], [196]. Συγκεκριμένα, στην [142] αμελούνται η σειριακή και εγκάρσια αντίσταση του μοντέλου και οι εναπομείνουσες τρεις παράμετροι υπολογίζονται υπό την υπόθεση ότι η κλίση της καμπύλης $I-V$ στο MPP ισούται με τον λόγο της τάσης ανοιχτοκύκλωσης προς το ρεύμα βραχυκύκλωσης V_{oc}/I_{sc} . Η εγκάρσια αντίσταση αγνοείται επίσης και στην [157], οδηγώντας σε αναλυτικές εξισώσεις για τις τέσσερις παραμέτρους λαμβάνοντας υπόψιν διάφορες απλουστεύσεις. Οι ίδιες εξισώσεις είναι το αποτέλεσμα της διερεύνησης στην [158], ενώ η παράλειψη της εγκάρσιας αντίστασης στην [159] επιτρέπει την εξαγωγή των εναπομεινουσών παραμέτρων από μετρήσεις σε έξι σημεία λειτουργίας. Μια ενδιαφέρουσα μέθοδος παρουσιάζεται στην [129], η οποία θεωρεί ότι η σειριακή και εγκάρσια αντίσταση ισούται με την κλίση της χαρακτηριστικής $I-V$ στα σημεία SC και OC αντίστοιχα, τις οποίες εκτιμά με απλό και ευθύ τρόπο με το μοντέλο τεσσάρων παραμέτρων, καθώς οι κλίσεις αυτές δεν είναι διαθέσιμες στο τεχνικό φυλλάδιο του ΦΒ πλαισίου.

Βέβαια, όταν οι κλίσεις στο SC και OC είναι διαθέσιμες από μετρήσεις, μπορεί να εφαρμοστεί η τεχνική της [149], η οποία είναι και η πρώτη χρονολογικά που διατύπωσε αναλυτικές σχέσεις για την εξαγωγή των πέντε παραμέτρων. Οι ίδιες εξισώσεις υιοθετούνται στις [197] και [152], ενώ άλλες προσεγγίσεις που επίσης βασίζονται στις προαναφερθείσες κλίσεις προτείνονται στις [131], [135], [153]. Στις [196] και [146], απαιτούνται επιπρόσθετα μετρημένα σημεία λειτουργίας, εκτός των SC, OC και MPP.

Από όλα τα προαναφερθέντα αναλυτικά μοντέλα της βιβλιογραφίας, μόνο αυτά των [129], [142], [157] βασίζονται εξ ολοκλήρου σε πληροφορίες που είναι πάντα διαθέσιμες στο τεχνικό φυλλάδιο του ΦΒ πλαισίου και δεν απαιτούν επιπρόσθετες πληροφορίες που συνεπάγονται επιπλέον μετρήσεις. Παρόλα αυτά, τα εν λόγω μοντέλα επιδεικνύουν μέτρια ακρίβεια, όπως παρουσιάζεται στη συνέχεια.

2.3.2 Θεωρία για την εξαγωγή των πέντε παραμέτρων αναφοράς

Η βασική ιδέα για την εξαγωγή των πέντε παραμέτρων είναι να επιλεγθούν οι κατάλληλες τιμές ώστε να ικανοποιείται η θεμελιώδης εξίσωση του μοντέλου (2.1) σε ένα δεδομένο σετ σημείων λειτουργίας. Όπως εξηγείται παραπάνω, αυτό επιτυγχάνεται είτε μέσω curve fitting σε ολόκληρη τη χαρακτηριστική καμπύλη [127], [136], [141], [144], [150], [154], [167]–[169], [195], είτε με επίλυση ενός συστήματος εξισώσεων σε συγκεκριμένα σημεία [126], [128]–[130], [132], [137], [138], [140], [142], [143], [145], [148], [151], [156]–[158], [160], [190].

Αν απαιτείται γενική εφαρμοσιμότητα της μεθόδου, η επιλογή του curve fitting δεν είναι κατάλληλη, και μόνη λύση είναι η διατύπωση πέντε εξισώσεων για την εύρεση των ισάριθμων παραμέτρων. Οι τρεις εξισώσεις που χρησιμοποιούνται σε όλες τις παραπάνω σχετικές μελέτες προκύπτουν από εφαρμογή της (2.1) στα σημεία SC, OC και MPP για συνθήκες STC (δεδομένα τεχνικού φυλλαδίου):

$$\text{SC: } I_{sc0} = I_{ph0} - I_{s0} \left(e^{\frac{I_{sc0} R_{s0}}{a_0}} - 1 \right) - \frac{I_{sc0} R_{s0}}{R_{sh0}} \quad (2.19)$$

$$\text{OC: } 0 = I_{ph0} - I_{s0} \left(e^{\frac{V_{oc0}}{a_0}} - 1 \right) - \frac{V_{oc0}}{R_{sh0}} \quad (2.20)$$

$$\text{MPP: } I_{mp0} = I_{ph0} - I_{s0} \left(e^{\frac{V_{mp0} + I_{mp0} R_{s0}}{a_0}} - 1 \right) - \frac{V_{mp0} + I_{mp0} R_{s0}}{R_{sh0}} \quad (2.21)$$

Ως τέταρτη εξίσωση, η παράγωγος της ισχύος ως προς τάση στο MPP λαμβάνεται συνήθως ίση με το μηδέν [125], [126], [128], [130], [132], [137], [148], [151], [156]–[158]:

$$\left. \frac{dP}{dV} \right|_{\text{MPP}} = 0 \Leftrightarrow \left. \frac{dI}{dV} \right|_{\text{MPP}} = -\frac{I_{mp0}}{V_{mp0}} \quad (2.22)$$

Όσον αφορά την πέμπτη εξίσωση, τρεις κύριες εναλλακτικές προσεγγίσεις παρουσιάζονται στη βιβλιογραφία, όπως εξηγείται στις [128] και [192]:

$$\left. \frac{dI}{dV} \right|_{\text{SC}} = -\frac{1}{R_{sh0}} \quad (2.23)$$

$$\left. \frac{dI}{dV} \right|_{\text{OC}} = -\frac{1}{R_{s0}} \quad (2.24)$$

$$\beta_{Voc} = \frac{\Delta V_{oc}}{\Delta T} \quad (2.25)$$

Στις [125], [129], [130], [143], [148], η κλίση της I - V καμπύλης στο SC λαμβάνεται ίση με την αντίθετη τιμή της αντιστρόφου της εγκάρσιας αντίστασης R_{sh0} , βάσει της (2.23). Μια παρόμοια υπόθεση θεωρείται στις [143] και [129], με τη διαφορά ότι εφαρμόζεται σε συνθήκες OC για την αντίσταση R_{s0} (2.24). Το κύριο μειονέκτημα αυτών των προσεγγίσεων είναι ότι οι εξισώσεις (2.23) και (2.24) έχουν ασθενές θεωρητικό υπόβαθρο, όπως αποδεικνύεται στην [192], οδηγώντας σε ανακρίβειες και δυσκολίες αριθμητικής επίλυσης. Αντίθετα, η (2.25) διατυπώνει ότι η τάση ανοιχτοκύκλωσης V_{oc} μεταβάλλεται αναλογικά με τη θερμοκρασία T , σύμφωνα με τον θερμοκρασιακό συντελεστή β_{Voc} [137], [151], [190]. Η ισχύ της εν λόγω πρότασης είναι ευρέως αποδεκτή, τουλάχιστον για περιορισμένο θερμοκρασιακό εύρος γύρω από τους 25 °C, ενώ ο β_{Voc} είναι πάντα διαθέσιμος στο τεχνικό φυλλάδιο του ΦΒ πλαισίου.

Εκτενής συζήτηση σχετικά με την καταλληλότητα των (2.23)–(2.25) ως πέμπτη εξίσωση στο σύστημα εξισώσεων γίνεται στις [192] and [128]. Στην πρώτη μελέτη, συμπεραίνεται ότι οι (2.23) και (2.25) οδηγούν σε καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με την (2.24), ενώ η [128] καταλήγει πως κάθε μία από τις τρεις εναλλακτικές έχει τα μειονεκτήματά της. Συγκεκριμένα για την (2.25), αποδεικνύεται ότι δεν οδηγούν όλες οι τιμές της θερμοκρασιακής διαφοράς ΔT σε λύση, εγείροντας θέμα για την κατάλληλη επιλογή της τιμής της.

Το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίζεται στην παρούσα διατριβή, επιλύοντας συμβολικά την (2.25), παράγοντας έτσι μία απλή αναλυτική έκφραση ανεξάρτητη της ΔT . Αυτή η εξίσωση συνδυάζεται στη συνέχεια με τις (2.19)–(2.22) προς σχηματισμό ενός συστήματος πέντε εξισώσεων, παρομοίου με αυτού που προτείνεται από τη *De Soto* στην [151], με την ειδοποιό διαφορά ότι η απλούστερη μορφή του επιτρέπει συμβολική επίλυση.

2.3.3 Αναγωγή των πέντε παραμέτρων σε αυθαίρετε συνθήκες

Με την εξαγωγή των πέντε παραμέτρων αναφοράς, επιτυγχάνεται η μοντελοποίηση του ΦΒ συστήματος σε συνθήκες STC. Για να μελετηθεί η λειτουργία του σε οποιοσδήποτε συνθήκες ακτινοβολίας G και θερμοκρασίας T , απαιτείται η κατάλληλη αναγωγή των παραμέτρων. Στην παρούσα διατριβή, υιοθετούνται οι σχέσεις αναγωγής που προτείνονται από την *De Soto* στην [151], οι οποίες είναι πιθανότατα οι πιο διαδεδομένες στη βιβλιογραφία.

2.3.3.A Φωτόρευμα - I_{ph}

Ο ρυθμός με τον οποίο απελευθερώνονται και κινούνται οι φορείς στον κρύσταλλο πυριτίου εξαρτάται ευθέως αναλογικά από την ένταση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας G . Επιπλέον, παρατηρείται πειραματικά ότι το φωτόρευμα I_{ph} εμφανίζει ασθενή αύξηση γραμμικής φύσεως με την άνοδο της θερμοκρασίας T , σύμφωνα με τον θερμοκρασιακό συντελεστή βραχυκύκλωσης a_{Isc} , καταλήγοντας στην τελική έκφραση:

$$I_{ph} = I_{ph0} G(1 + a_{Isc} \Delta T) \quad (2.26)$$

2.3.3.B Ανάστροφο ρεύμα κορεσμού - I_s

Σύμφωνα με την ηλεκτρονική θεωρία, το ανάστροφο ρεύμα κορεσμού της διόδου που μοντελοποιεί την επαφή p-n δίνεται από τη σχέση:

$$I_s = I_{s0} \left(\frac{T}{T_0} \right)^3 e^{\frac{1}{k} \left(\frac{E_{g0}}{T_0} - \frac{E_g}{T} \right)}$$

όπου με E_g συμβολίζεται το ενεργειακό διάκενο του πυριτίου σε αυθαίρετη θερμοκρασία T , το οποίο συνδέεται με το διάκενο αναφοράς E_{g0} με τη σχέση: $E_g = E_{g0}(1 - 0.00002677\Delta T)$. Για λόγους απλότητας, η παραπάνω εξίσωση αναδιατυπώνεται στην [117] αντικαθιστώντας τις τιμές των σταθερών που εμπεριέχει, καταλήγοντας στην:

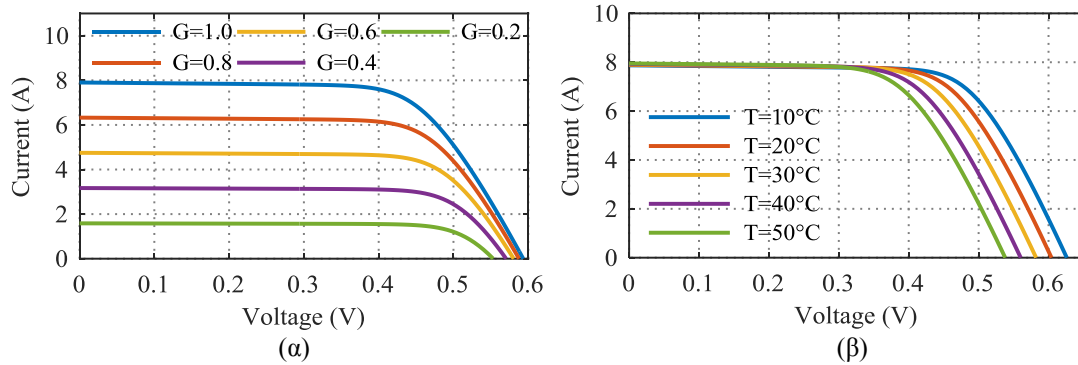
$$I_s = I_{s0} K T^3 e^{47.1 \frac{\Delta T}{T}} \quad (2.27)$$

όπου ο όρος KT περιγράφει το λόγο θερμοκρασιών T/T_0 (σε βαθμούς Kelvin) και η σταθερά 47.1 προκύπτει από τις τιμές των E_{g0} και k .

2.3.3.Γ Τροποποιημένος συντελεστής διόδου - a

Λαμβάνοντας υπόψιν ότι ο συντελεστής της διόδου n παραμένει αμετάβλητος από τις περιβαλλοντικές συνθήκες, ο τροποποιημένος συντελεστής a που ενσωματώνει τη θερμική τάση επηρεάζεται αναλογικά με τη θερμοκρασία ως εξής:

$$a = a_0 K T \quad (2.28)$$



Σχ. 2.12. Μεταβολή της χαρακτηριστικής καμπύλης $I-V$ με (α) την ακτινοβολία G και (β) τη θερμοκρασία T , όπως προκύπτει από τις εξισώσεις αναγωγής για μία τυπική ΦΒ κυψέλη.

2.3.3.Δ Σειριακή αντίσταση - R_s

Η μεταβολή της σειριακής αντίστασης R_s με τις λειτουργικές συνθήκες συνήθως θεωρείται αμελητέα και η τιμή της λαμβάνεται ίση με την αντίστοιχη σε συνθήκες αναφοράς:

$$R_s = R_{s0} \quad (2.29)$$

2.3.3.Ε Εγκάρσια αντίσταση - R_{sh}

Όσον αφορά την εγκάρσια αντίσταση R_{sh} , παρατηρείται πειραματικά πως η κλίση της χαρακτηριστικής $I-V$ στην περιοχή SC μεταβάλλεται αναλογικά με την ένταση της ακτινοβολίας. Δεδομένου ότι στη συγκεκριμένη περιοχή λειτουργίας η κλίση της $I-V$ συνδέεται αντιστρόφως ανάλογα με την εγκάρσια αντίσταση R_{sh0} (2.23), προκύπτει ότι:

$$R_{sh} = \frac{R_{sh0}}{G} \quad (2.30)$$

Στο Σχ. 2.12, παρουσιάζεται γραφικά η μεταβολή της χαρακτηριστικής $I-V$ με την αυξομείωση της ακτινοβολίας και θερμοκρασίας, τροποποιώντας τις πέντε παραμέτρους σύμφωνα με τις (2.26)-(2.30). Είναι εμφανές ότι η ακτινοβολία επηρεάζει ισχυρά και αναλογικά το ρεύμα, ιδιαίτερα πλησίον της περιοχής βραχυκύκλωσης, αλλά ασθενέστερα (λογαριθμικά) την τάση στην περιοχή ανοιχτοκύκλωσης (Σχ. 2.12(α)). Αντίθετα, η θερμοκρασία επιδρά με γραμμικό τρόπο τόσο στην τάση όσο και στο ρεύμα, με τη διαφορά ότι η επίδραση στην τάση είναι ισχυρότερη και έχει αρνητικό πρόσημο, σε αντίθεση με το ρεύμα που είναι ασθενέστερη και θετική (Σχ. 2.12(β)).

2.3.4 Εξαγωγή της παραμέτρου a_0 και ορισμός της σταθεράς δ_0

Η εξαγωγή της παραμέτρου a_0 είναι πρόκληση στη βιβλιογραφία. Κάποιοι ερευνητές θεωρούν τυπικές τιμές για τον συντελεστή διόδου n και τον ανάγον καταλληλά στον a_0 [132], [145], ενώ οι περισσότεροι υπολογίζουν την τιμή του μαζί με τις υπόλοιπες παραμέτρους του μοντέλου μέσω ενός επαναληπτικού αλγορίθμου, όπως εξηγείται στις προηγούμενες παραγράφους. Υπάρχουν λίγες μελέτες στη βιβλιογραφία που προτείνουν αναλυτική έκφραση

για τον a_0 ως συνάρτηση της τάσης και του ρεύματος στα σημεία SC, OC και MPP [129], [142], [157], οι οποίες όμως χάνουν σε ακρίβεια και αξιοπιστία λόγω των υποθέσεων και απλουστεύσεων που λαμβάνονται υπόψιν.

Στην παρούσα ενότητα, διερευνάται η συσχέτιση του τροποποιημένου συντελεστή διόδου a_0 με την τάση ανοιχτοκύκλωσης V_{oc0} σε συνθήκες STC, ενώ αποδεικνύεται ότι ο λόγος τους μπορεί να εκφραστεί ως συνάρτηση των θερμοκρασιακών συντελεστών a_{Isc} και β_{Voc} . Εισάγεται μια νέα σταθερά που συμβολίζεται με δ_0 , η οποία προσδιορίζεται βάσει των χαρακτηριστικών του ΦΒ πλαισίου από το τεχνικό φυλλάδιο, και επιτρέπει έτσι υπολογισμό της παραμέτρου a_0 με απλό και ευθύ τρόπο [117]. Η συνεισφορά της ακόλουθης έρευνας έγκειται στο στέρεο θεωρητικό της υπόβαθρο και την πλήρη μαθηματική της τεκμηρίωση, καθώς βασίζεται εξ ολοκλήρου στις σχέσεις αναγωγής των πέντε παραμέτρων (2.26)-(2.30).

Η ανάλυση στηρίζεται στην εξίσωση της V_{oc} (2.6) που παρουσιάζεται στην ενότητα 2.2.2. Αν αυτή η εξίσωση γραφεί για ονομαστική ακτινοβολία $G_0=1.0$ και αυθαίρετη θερμοκρασία T με εφαρμογή των σχέσεων αναγωγής των πέντε παραμέτρων (2.26)-(2.30), τότε προκύπτει:

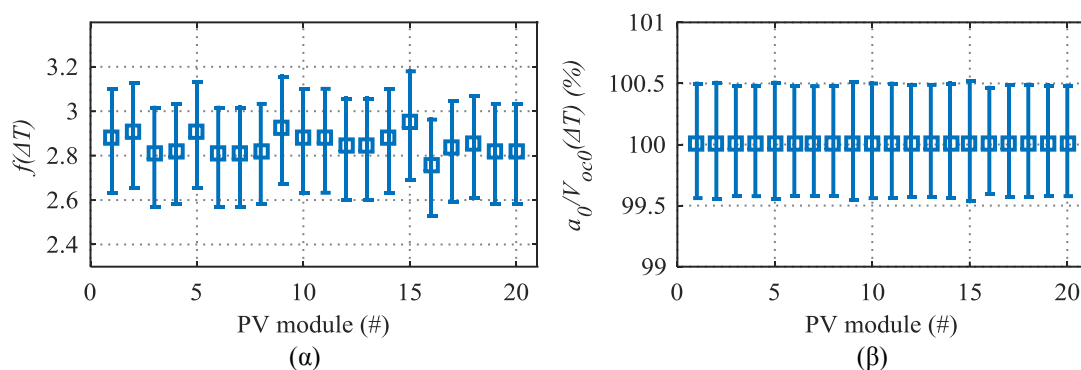
$$(1 + a_{Isc}\Delta T)I_{ph0} = I_{s0}KT^3 e^{47.1\frac{\Delta T}{T}} e^{\frac{(1+\beta_{Voc}\Delta T)V_{oc0}}{a_0KT}} \quad (2.31)$$

όπου η έκφραση $(1+\beta_{Voc}\Delta T)V_{oc0}$ στον εκθέτη του δεύτερου εκθετικού όρου μοντελοποιεί τη γραμμική εξάρτηση της V_{oc} με τη θερμοκρασία βάσει του συντελεστή β_{Voc} . Στη συνέχεια, αντικατάσταση όρων και αναδιατύπωση της (2.31) οδηγεί στην (λεπτομέρειες στο ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β):

$$\frac{a_0}{V_{oc0}} = \frac{1 - T_0\beta_{Voc}}{47.1 + f(\Delta T)}, \quad \text{με } f(\Delta T) = \left(1 + \frac{T_0}{\Delta T}\right) \ln \left[\frac{(1 + \Delta T/T_0)^3}{1 + a_{Isc}\Delta T} \right] \quad (2.32)$$

Η (2.32) συνδέει τους όρους a_0 , V_{oc0} , a_{Isc} και β_{Voc} με τη θερμοκρασιακή διαφορά ΔT . Εκ πρώτης όψεως, η σχέση αυτή μοιάζει παράδοξη, καθώς οι τέσσερις προαναφερθέντες όροι αφορούν την ονομαστική θερμοκρασία T_0 . Δηλαδή, εξαρτώνται μόνο από τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά του ΦΒ συστήματος και όχι από τις λειτουργικές συνθήκες. Παρόλα αυτά, αν ο όρος $f(\Delta T)$ υπολογισθεί για τυπικές τιμές του a_{Isc} σε ένα ιδιαίτερα μεγάλο εύρος θερμοκρασιών $T \in [-25^\circ\text{C}, 75^\circ\text{C}]$, τότε παρατηρείται ότι κυμαίνεται πολύ κοντά στην τιμή 3, με διακύμανση λιγότερη από 0.5. Το συμπέρασμα αυτό προκύπτει από το Σχ. 2.13(α) λαμβάνοντας υπόψιν 20 εμπορικά πλαίσια. Δηλαδή, η διακύμανση του όρου $f(\Delta T)$ με τη θερμοκρασία είναι αμελητέα εν συγκρίσει με τη σταθερά 47.1 στον παρονομαστή της (2.32), γεγονός που αποτελεί ένδειξη πως η θερμοκρασία ουσιαστικά δεν επιδρά στην εν λόγω σχέση. Η αντιπροσωπευτική τιμή του όρου για ονομαστική θερμοκρασία $f(\Delta T=0)$ σημειώνεται με μπλε τετραγωνικούς δείκτες στο Σχ. 2.13(α).

Η παραπάνω παρατήρηση επιβεβαιώνεται περαιτέρω από το Σχ. 2.13(β), στο οποίο σχεδιάζεται ο λόγος $a_0/V_{oc0}(\Delta T)$ από την (2.32) για το ίδιο εύρος θερμοκρασιών, κανονικοποιημένος ως προς την αντίστοιχη τιμή του για ονομαστική θερμοκρασία $a_0/V_{oc0}(\Delta T=0)$. Η απόκλιση είναι λιγότερη από 0.5% σε όλες τις περιπτώσεις, οδηγώντας στο εύλογο συμπέρασμα ότι ο όρος $f(\Delta T)$ δεν επηρεάζεται στην πραγματικότητα από τη θερμοκρασία, αλλά αποτελεί προϊόν μερικής ασυμφωνίας των θεωρητικών σχέσεων στις



Σχ. 2.13. Διακύμανση (α) του όρου $f(\Delta T)$, και (β) του λόγου $a_0/V_{oc0}(\Delta T)$ κανονικοποιημένου ως προς την ονομαστική τιμή του $a_0/V_{oc0}(\Delta T=0)$ από την (2.32), σε ένα μεγάλο εύρος ρεαλιστικών θερμοκρασιών για τα 20 εμπορικά ΦΒ πλαίσια που μελετώνται στην ενότητα 2.3.6.

οποιές βασίστηκε η εξαγωγή της (2.32). Βέβαια, μιας και η απόκλιση είναι αμελητέα, η μοντελοποίηση μπορεί να θεωρηθεί έγκυρη, λαμβάνοντας τον εν λόγω όρο σταθερό με τυπική τιμή την $f(\Delta T=0)$.

Έτσι, αντικαθιστώντας στην (2.32) την τιμή $f(\Delta T=0)$ (λεπτομέρειες στο ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β), ο λόγος a_0/V_{oc0} απλοποιείται περαιτέρω και ορίζεται ως μια νέα σταθερά δ_0 :

$$\delta_0 = \frac{a_0}{V_{oc0}} = \frac{1 - 298.15\beta_{V_{oc}}}{50.1 - 298.15a_{I_{sc}}} \quad (2.33)$$

όπου οι θερμοκρασιακοί συντελεστές λαμβάνονται κανονικοποιημένοι (p.u.) και προσημασμένοι ($\beta_{V_{oc}} < 0$, $a_{I_{sc}} > 0$).

Στην (2.33), η δ_0 συσχετίζει τη θερμοκρασιακή εξάρτηση των a_0 και V_{oc0} , όπως αυτή μοντελοποιείται μέσω των εξισώσεων αναγωγής (2.26)-(2.30) και ποσοτικοποιείται με τους θερμοκρασιακούς συντελεστές $\beta_{V_{oc}}$ και $a_{I_{sc}}$. Ουσιαστικά, η νέα αυτή εξίσωση αποτελεί αναδιατύπωση της (2.25) που αφορά τη θερμοκρασιακή εξάρτηση της V_{oc} , αποδεικνύοντας ότι τελικά η τιμή της ΔT δεν παίζει ρόλο, όπως ήδη επισημαίνεται στην [128]. Παράλληλα, η ιδιαίτερα απλή και αναλυτική μορφή της εξασφαλίζει εύκολη και εγγυημένη επιλυσιμότητα, ξεπερνώντας έτσι τον σχετικό προβληματισμό της [128] που περιγράφεται στην ενότητα 2.3.2. Η ιδιότητα αυτή σε συνδυασμό με το γεγονός ότι τα δεδομένα εισόδου για τον υπολογισμό της είναι μόνο οι δύο θερμοκρασιακοί συντελεστές (πάντα διαθέσιμοι στο τεχνικό φυλλάδιο του ΦΒ πλαισίου), την καθιστούν ιδανική έκφραση για να αντικαταστήσει την (2.25) στο σύστημα των πέντε εξισώσεων για την εξαγωγή των παραμέτρων αναφοράς.

2.3.5 Αναλυτικές σχέσεις εύρεσης των πέντε παραμέτρων

Σύμφωνα με τη θεωρητική ανάλυση της ενότητας 2.3.2, το σύστημα εξισώσεων που θεωρείται εγκυρότερο για την εξαγωγή των πέντε παραμέτρων περιλαμβάνει τέσσερις εξισώσεις για τα σημεία λειτουργίας SC, OC και MPP, καθώς και μια πέμπτη εξίσωση που μοντελοποιεί τη θερμοκρασιακή εξάρτηση της τάσης OC. Χρησιμοποιώντας τις (2.19)-(2.22) και την (2.33) που εισήχθη στην προηγούμενη ενότητα, έναντι της (2.25), προκύπτει ένα σύστημα εξισώσεων που είναι συνεπές με τη θεωρία, αλλά δεν είναι ακόμη συμβολικά επιλύσιμο, απαιτώντας και πάλι επαναληπτικό αλγόριθμο. Στη συνέχεια, περιγράφεται πώς

μπορεί να μετασχηματιστεί το εν λόγω σύστημα εξισώσεων σε αναλυτικές εκφράσεις, πρώτα για συνθήκες STC και μετά για οποιεσδήποτε αυθαίρετες συνθήκες λειτουργίας.

2.3.5.A Εξαγωγή σε συνθήκες αναφοράς (STC)

Η πολυπλοκότητα του σετ (2.19)-(2.22) και (2.33) έγκειται στις δύο εξισώσεις που αφορούν το MPP: (2.21)-(2.22), και ιδιαίτερα στην (2.22) που απαιτεί η παράγωγος της ισχύος στο MPP να είναι μηδέν. Για να ξεπεραστεί αυτή η δυσκολία, οι εν λόγω δύο εξισώσεις αντικαθίστανται από τις αναλυτικές MPP εκφράσεις (2.17) και (2.18) που προτείνονται στην ενότητα 2.2.3.

Έτσι, αν η (2.33) επιλυθεί ως προς a_0 και η (2.18) ως προς R_{s0} , προκύπτουν οι ακόλουθες (2.34) και (2.35). Επιπλέον, λύνοντας την (2.17) ως προς R_{sh0} υπό την υπόθεση ότι το φωτόρευμα I_{ph0} ταυτίζεται με το ρεύμα βραχυκύκλωσης I_{sc0} , διατυπώνεται η (2.36). Στη συνέχεια, αναδιατάσσοντας τις (2.5) και (2.6) από την ενότητα 2.2.1 ώστε να απομονωθούν οι όροι I_{ph0} και I_{s0} αντίστοιχα, προκύπτουν οι (2.37) και (2.38). Στην τελευταία έχει εφαρμοστεί επιπλέον η (2.33) για να εκφραστεί συναρτήσει της σταθεράς δ_0 .

$$a_0 = \delta_0 V_{oc0} \quad (2.34)$$

$$R_{s0} = \frac{a_0 (w_0 - 1) - V_{mp0}}{I_{mp0}} \quad (2.35)$$

$$R_{sh0} = \frac{a_0 (w_0 - 1)}{I_{sc0} (1 - 1/w_0) - I_{mp0}} \quad (2.36)$$

$$I_{ph0} = \left(1 + \frac{R_{s0}}{R_{sh0}} \right) I_{sc0} \quad (2.37)$$

$$I_{s0} = I_{ph0} e^{-\frac{1}{\delta_0}} \quad (2.38)$$

Η σταθερά δ_0 προσδιορίζεται από την (2.33), ενώ η βοηθητική παράμετρος w_0 υπολογίζεται αντικαθιστώντας τις (2.6) και (2.33) στην $w_0 = W\{I_{ph0}e/I_{s0}\}$:

$$w_0 = W\left\{ \frac{I_{ph0}}{I_{s0}} e \right\} = W\left\{ e^{V_{oc0}/a_0 + 1} \right\} = W\left\{ e^{1/\delta_0 + 1} \right\} \quad (2.39)$$

Συνεπώς, η εύρεση των πέντε παραμέτρων σε συνθήκες STC απαιτεί πρώτα προσδιορισμό της σταθεράς δ_0 από την (2.33) και μετά υπολογισμό της w_0 από την (2.39). Στη συνέχεια, οι αναλυτικές εκφράσεις (2.34)-(2.38) εφαρμόζονται σειριακά: πρώτα η (2.34) για τον a_0 , μετά οι (2.35)-(2.36) για τις αντιστάσεις R_{s0} και R_{sh0} , στη συνέχεια η (2.37) για το I_{ph0} και τέλος η (2.38) για το I_{s0} .

Η προτεινόμενη μέθοδος είναι μια καθαρά αναλυτική μαθηματική διαδικασία, απλή και εύκολη στην εφαρμογή, ενώ τα δεδομένα εισόδου (I_{sc0} , V_{oc0} , I_{mp0} , V_{mp0} , a_{isc} και β_{voc}) είναι πάντα διαθέσιμα στο τεχνικό φυλλάδιο του ΦΒ πλαισίου. Η ακρίβειά της μεθόδου είναι πλήρως ικανοποιητική, όπως εξηγείται στη συνέχεια του κεφαλαίου.

2.3.5.B Εξαγωγή σε αυθαίρετες συνθήκες

Συχνά οι συνθήκες αναφοράς διαφέρουν από τις STC, καθώς μπορεί να αφορούν NOCT ή άλλες πολύ συγκεκριμένες συνθήκες πειραματικών μετρήσεων. Ευθύς ακολουθώς εξηγείται πώς οι σχέσεις (2.34)-(2.38) μπορούν να αναχθούν σε οποιεσδήποτε συνθήκες ακτινοβολίας και θερμοκρασίας, για τις οποίες διατίθενται τα δεδομένα εισόδου: I_{sc} , V_{oc} , I_{mp} , V_{mp} , a_{Isc} και β_{Voc} .

Αρχικά, ο λόγος a προς V_{oc} ορίζεται για τη γενική περίπτωση ως δ (χωρίς τον δείκτη «0»), και υπολογίζεται για αυθαίρετες συνθήκες. Δεδομένου ότι ο τροποποιημένος συντελεστής της διόδου a επηρεάζεται αναλογικά από τη θερμοκρασία και δεν εξαρτάται από την ακτινοβολία (2.28), η δ εκφράζεται αξιοποιώντας τον ορισμό της δ_0 (2.33):

$$\delta = \frac{a}{V_{oc}} = \frac{a_0 KT}{V_{oc}} = \delta_0 \frac{V_{oc0}}{V_{oc}} KT \quad (2.40)$$

Συνεπώς, δεδομένων των χαρακτηριστικών σημείων SC, OC και MPP για τις υπό μελέτη συνθήκες, καθώς επίσης και για τις STC από το τεχνικό φυλλάδιο, η προτεινόμενη μεθοδολογία απαιτεί πρώτα υπολογισμό της σταθεράς δ_0 από την (2.33), και στην συνέχεια της δ από την ανωτέρω (2.40). Ακολουθώς, προσδιορίζεται η βοηθητική παράμετρος $w = W\{e^{1/\delta+1}\}$ και εφαρμόζονται οι (2.34)-(2.38), με τη διαφορά ότι όλοι οι όροι στις σχέσεις αναφέρονται στις υπό μελέτη συνθήκες αντί για STC.

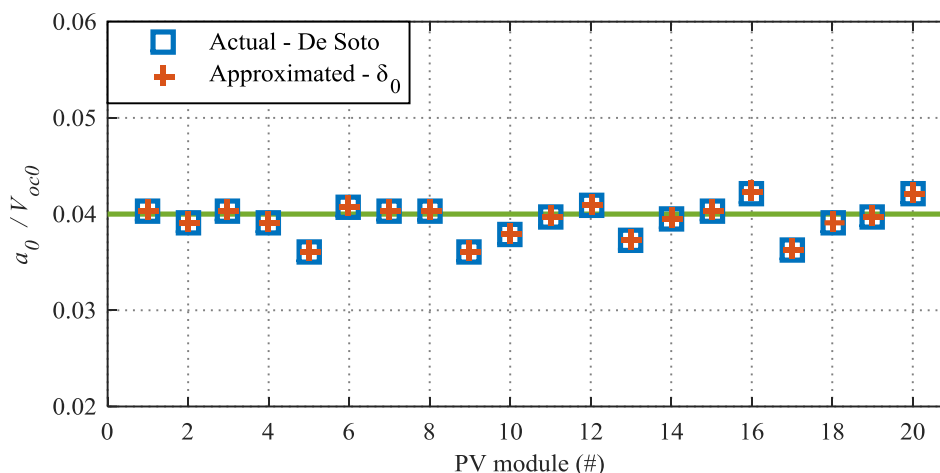
2.3.6 Επιβεβαίωση μέσω προσομοιώσεων

Στην παρούσα παράγραφο, η προτεινόμενη μέθοδος εξαγωγής των πέντε παραμέτρων επιβεβαιώνεται μέσω προσομοιώσεων στο υπολογιστικό εργαλείο *MATLAB*. Ως αναφορά, χρησιμοποιείται το ευρέως αποδεκτό μοντέλο της *De Soto* [151], το οποίο θεωρεί το σύστημα εξισώσεων: (2.19)-(2.22) και (2.25) που έχει την ίδια θεωρητική βάση, αλλά πιο περίπλοκη διατύπωση και απαιτεί επαναληπτικό αλγόριθμο επίλυσης. Με αυτόν τον τρόπο αποδεικνύεται ότι η προτεινόμενη αναλυτική μέθοδος είναι συνεπής με τη θεωρία και παρουσιάζει την ίδια ακρίβεια με το [151], πλην σε πολύ απλούστερη διατύπωση και μορφή.

2.3.6.A Σταθερά δ_0

Προς επιβεβαίωση της θεωρητικής ανάλυσης σχετικά με τον ορισμό της σταθεράς δ_0 , ο λόγος a_0 προς V_{oc0} καταγράφεται για 20 εμπορικά ΦΒ πλαίσια (πίνακας Π. 2.3 ακολούθως) μέσω της μεθόδου της *De Soto*, και στη συνέχεια συγκρίνεται με την αντίστοιχη τιμή της δ_0 , όπως υπολογίζεται από την (2.33). Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Σχ. 2.14, όπου οι τιμές αναφοράς του λόγου a_0/V_{oc0} σχεδιάζονται με μπλε τετραγωνικούς δείκτες, ενώ οι προσεγγίσεις από τη σταθερά δ_0 με κόκκινους σταυρούς. Η σύγκλιση είναι εξαιρετική, παρουσιάζοντας rms και μέγιστη απόκλιση 0.07% και λιγότερη από 0.1% αντίστοιχα.

Επιπλέον, αξίζει να σημειωθεί πως όλες οι τιμές κυμαίνονται πολύ κοντά στο 0.04 (πράσινη οριζόντια γραμμή). Αυτό μπορεί να αιτιολογηθεί από την (2.33), αν ληφθεί υπόψιν η σχεδόν μηδενική τιμή του a_{Isc} και το γενικά περιορισμένο εύρος του β_{Voc} κοντά στο -0.003 p.u./K. Τοποθετώντας αυτές τις τιμές στην (2.33), η δ_0 προκύπτει 0.04. Επομένως, η εν λόγω τιμή μπορεί να θεωρηθεί τυπική/αντιπροσωπευτική για τη σταθερά δ_0 .



Σχ. 2.14. Λόγος a_0 προς V_{oc0} για 20 ΦΒ πλαίσια όπως υπολογίζεται από τη μέθοδο της *De Soto* και τη σταθερά δ_0 μέσω της (2.33).

2.3.6.B Μέθοδος αναλυτικής εύρεσης πέντε παραμέτρων

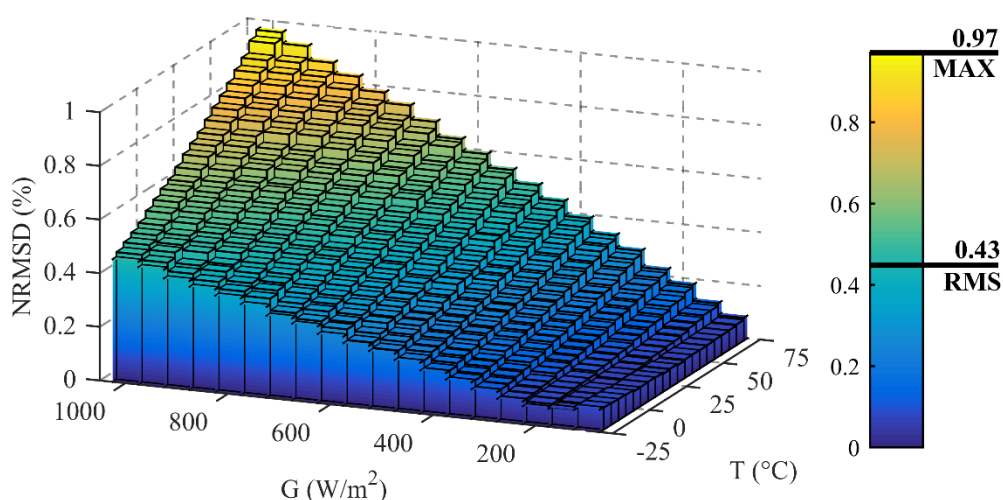
Στη συνέχεια, εφαρμόζεται η προτεινόμενη μέθοδος εξαγωγής των πέντε παραμέτρων και συγκρίνεται με άλλες τρεις αναλυτικές προσεγγίσεις της βιβλιογραφίας ως προς την ακρίβεια και το υπολογιστικό κόστος. Οι συγκεκριμένες τεχνικές, οι οποίες απαιτούν και αυτές ως δεδομένα εισόδου μόνο το τεχνικό φυλλάδιο του ΦΒ πλαισίου, παρουσιάζονται στις [129], [142], [157] και αναφέρονται στο ακόλουθο κείμενο με το όνομα του κύριου συγγραφέα τους: *Saloux*, *Khezzer*, και *Bai*. Οι προσομοιώσεις αφορούν μεγάλα εύρη ακτινοβολίας (100 έως 1000 W/m² με βήμα 50 W/m²) και θερμοκρασίας (-25 έως 75°C με βήμα 5°C), ενώ επαναλαμβάνονται για 20 εμπορικά ΦΒ πλαίσια, καταλήγοντας σε 7980 σενάρια συνολικά.

Η μεθοδολογία προσομοίωσης που υιοθετείται περιλαμβάνει τα ακόλουθα βήματα:

- ✓ Πρώτον, οι πραγματικές πέντε παράμετροι προσδιορίζονται σε συνθήκες STC σύμφωνα με το μοντέλο της *De Soto* [151] για το υπό μελέτη ΦΒ πλαίσιο.
- ✓ Για κάθε σενάριο ακτινοβολίας και θερμοκρασίας, προσαρμόζονται κατάλληλα οι πέντε παράμετροι με τις σχέσεις αναγωγής (2.26)-(2.30) και κατασκευάζεται η χαρακτηριστική $I-V$ χρησιμοποιώντας μία εκ των ισοδυνάμων εξισώσεων (2.1)-(2.3).
- ✓ Εντοπίζονται τα τρία χαρακτηριστικά σημεία SC, OC και MPP, τα οποία χρησιμοποιούνται ως δεδομένα εισόδου για την εφαρμογή της προτεινόμενης *Proposed* και των υπολοίπων αναλυτικών μεθόδων.
- ✓ Στη συνέχεια, οι εκτιμημένες τιμές των πέντε παραμέτρων αξιοποιούνται για την ανακατασκευή της καμπύλης $I-V$ προς σύγκριση με τη χαρακτηριστική αναφοράς *De Soto* του προηγούμενου βήματος. Ως μετρική σύγκρισης, υιοθετείται η κανονικοποιημένη rms απόκλιση (NRMSD) των δύο καμπυλών σε όλο το εύρος τους, όπως προτείνεται στην [133].

Για να αποτιμηθεί η ακρίβεια της *Proposed* μεθόδου, καταγράφεται η κατανομή του σφάλματος NRMSD σε όλο το εύρος των σεναρίων προσομοίωσης στο Σχ. 2.15. Κάθε τιμή αναπαριστά το μέσο όρο NRMSD για 20 ΦΒ πλαίσια στις ίδιες συνθήκες. Το ολικό μέγιστο σφάλμα δεν ξεπερνά το 1% και το rms σφάλμα είναι λιγότερο από 0.5%, τιμές ιδιαίτερα ικανοποιητικές που επιβεβαιώνουν την ακρίβεια της μεθόδου. Αξίζει να σημειωθεί πως οι

2.3 - Προσδιορισμός των Πέντε Παραμέτρων



Σχ. 2.15. Κατανομή του σφάλματος NRMSD για όλα τα σενάρια ακτινοβολίας G και θερμοκρασίας T που προκύπτουν από την εφαρμογή της προτεινόμενης αναλυτικής μεθόδου (*Proposed*). Η τιμή για κάθε σενάριο λειτουργικών συνθηκών αντιστοιχεί στο μέσο όρο 20 ΦΒ πλαίσιων.

μεγαλύτερες αποκλίσεις παρατηρούνται σε υψηλές τιμές ακτινοβολίας και θερμοκρασίας, κυρίως επειδή σε αυτές τις συνθήκες εμφανίζονται τα μεγαλύτερα σφάλματα οι MPP εξισώσεις (2.17) και (2.18) στις οποίες στηρίζονται οι εκφράσεις της *Proposed*.

Στον πίνακα Π. 2.3, παρουσιάζονται τα rms και μέγιστα NRMSD σφάλματα για κάθε μία από τις τέσσερις αναλυτικές μεθόδους και για τα 20 ΦΒ πλαίσια που μελετώνται στην παρούσα παράγραφο. Η *Proposed* προσέγγιση επιδεικνύει την καλύτερη ακρίβεια ανάμεσα στις

Π. 2.3. Σφάλμα εκτίμησης των πέντε παραμέτρων (NRMSD απόκλιση καμπυλών) από τις αναλυτικές μεθόδους με βάση το μοντέλο της *De Soto* για 20 εμπορικά ΦΒ πλαίσια.

| ΦΒ πλαίσιο | Σφάλμα NRMSD (%) των αναλυτικών μεθόδων | | | | | | | |
|--------------------------------|---|------|----------------|------|-------------|------|-----------------|------|
| | <i>Saloux</i> | | <i>Khezzar</i> | | <i>Bai</i> | | <i>Proposed</i> | |
| | RMS | MAX | RMS | MAX | RMS | MAX | RMS | MAX |
| <i>Aleo s18-235</i> | 3.49 | 7.61 | 0.59 | 1.25 | 1.34 | 2.07 | 0.42 | 0.97 |
| <i>Bosch M60s-245</i> | 3.48 | 7.39 | 0.39 | 0.72 | 1.39 | 2.10 | 0.44 | 0.98 |
| <i>Canadian Solar CS6P 250</i> | 3.04 | 6.87 | 0.95 | 2.02 | 1.27 | 2.06 | 0.31 | 0.77 |
| <i>Conergy PowerPlus 190P</i> | 3.13 | 6.79 | 0.74 | 1.59 | 1.28 | 1.99 | 0.34 | 0.80 |
| <i>Day4 Energy 60MC-I</i> | 3.30 | 7.09 | 0.94 | 1.96 | 1.16 | 1.67 | 0.33 | 0.75 |
| <i>ET Zero-rack 240</i> | 3.90 | 8.61 | 0.54 | 1.12 | 1.38 | 2.17 | 0.50 | 1.14 |
| <i>LDK 235 P-20</i> | 2.77 | 6.25 | 0.76 | 1.58 | 1.31 | 2.13 | 0.29 | 0.71 |
| <i>Perllight PLM-250P-60</i> | 2.14 | 4.40 | 2.20 | 4.10 | 1.45 | 2.74 | 0.33 | 0.51 |
| <i>REC 250PE</i> | 3.50 | 7.69 | 1.32 | 2.76 | 1.17 | 2.06 | 0.32 | 0.75 |
| <i>Renesola Virtus II 250</i> | 3.36 | 7.12 | 0.67 | 1.46 | 1.24 | 1.88 | 0.37 | 0.85 |
| <i>SCHOTT Perform 240</i> | 3.09 | 7.12 | 1.81 | 3.62 | 1.28 | 2.45 | 0.28 | 0.58 |
| <i>Sharp NU-E240 (J5)</i> | 3.30 | 7.43 | 2.07 | 4.20 | 1.32 | 2.79 | 0.32 | 0.61 |
| <i>Silcio SE250</i> | 3.84 | 8.23 | 0.56 | 1.21 | 1.25 | 1.90 | 0.46 | 1.02 |
| <i>Solea SM 190</i> | 3.33 | 7.52 | 1.44 | 2.98 | 1.22 | 2.15 | 0.30 | 0.72 |
| <i>Sopray SR 245</i> | 2.57 | 5.66 | 1.08 | 2.19 | 1.26 | 1.94 | 0.24 | 0.56 |
| <i>Sunmodule SW 240</i> | 2.69 | 5.70 | 0.40 | 0.88 | 1.59 | 2.38 | 0.36 | 0.82 |
| <i>Sunpower E19-240</i> | 2.50 | 5.50 | 1.25 | 2.45 | 1.21 | 1.85 | 0.20 | 0.48 |
| <i>Upsolar UP-M240P</i> | 3.29 | 6.85 | 0.35 | 0.81 | 1.53 | 2.24 | 0.45 | 0.95 |
| <i>Yingli YGE 250P-29b</i> | 3.69 | 7.88 | 0.62 | 1.34 | 1.31 | 2.00 | 0.45 | 1.03 |
| <i>Yingli YL-165</i> | 4.05 | 9.48 | 2.60 | 5.18 | 1.38 | 3.28 | 0.44 | 0.76 |
| ΣΥΝΟΛΙΚΑ | 3.26 | 9.48 | 1.24 | 5.18 | 1.32 | 3.28 | 0.37 | 1.14 |

Π. 2.4. Χρόνος εκτέλεσης της *De Soto* και των αναλυτικών μεθόδων για την εύρεση των πέντε παραμέτρων.

| Μέθοδος | Απόλυτος χρόνος εκτέλεσης ανά σενάριο (μs) | Κανονικοποιημένος χρόνος εκτέλεσης ως προς τον χρόνο της <i>Proposed</i> |
|----------------------------|--|--|
| <i>De Soto</i> | 10805.4 | 3178.06 |
| <i>Saloux</i> | 1.4 | 0.41 |
| <i>Khezzar</i> | 1.5 | 0.44 |
| <i>Bai</i> | 2.5 | 0.74 |
| <i>Proposed</i> | 3.4 | 1.00 |
| <i>Proposed (simple W)</i> | 1.9 | 0.59 |

τέσσερις αναλυτικές μεθόδους. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι *Saloux*, *Khezzar* και *Bai* τεχνικές παρουσιάζουν τα μέγιστα σφάλματα στο πλαίσιο YL-165 (τελευταία γραμμή), το οποίο είναι το χρονολογικά παλαιότερο, με σημαντικές σειριακές και εγκάρσιες απώλειες. Ακόμα, αξίζει να αναφερθεί πως αν χρησιμοποιηθεί η απλή σχέση υπολογισμού της συνάρτησης Lambert *W* αντί για τις σειρές σύγκλισης (ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α), τότε η αύξηση του σφάλματος της *Proposed* μεθόδου δεν ξεπερνά το 0.05%, καθιστώντας την εν λόγω εναλλακτική χρήσιμη για ακόμα απλούστερη μοντελοποίηση.

Όσον αφορά το υπολογιστικό κόστος, ο χρόνος προσομοίωσης που απαιτείται από το μοντέλο *De Soto* και κάθε μία από τις τέσσερις αναλυτικές προσεγγίσεις καταγράφεται σε απόλυτη και κανονικοποιημένη μορφή στον πίνακα Π. 2.4. Όλες οι προσομοιώσεις διεξήχθησαν στον ίδιο υπολογιστή με χρονισμό επεξεργαστή 3.4 GHz και μέγεθος μνήμη 6 GB. Όπως φαίνεται, η *Proposed* είναι ελαφρώς πιο χρονοβόρα μέθοδος εν συγκρίσει με τις άλλες τρεις αναλυτικές τεχνικές, λόγω του υπολογισμού της συνάρτησης Lambert *W*. Η διαφορά αυτή εξαλείφεται πρακτικά με τη χρήση της απλής σχέσης υπολογισμού (*Proposed (simple W)*). Παρόλα αυτά, όλες οι αναλυτικές μέθοδοι επιδεικνύουν ουσιαστικά το ίδιο κόστος συγκρινόμενες με το μοντέλο *De Soto*, το οποίο είναι 3-4 τάξεις μεγέθους πιο αργό.

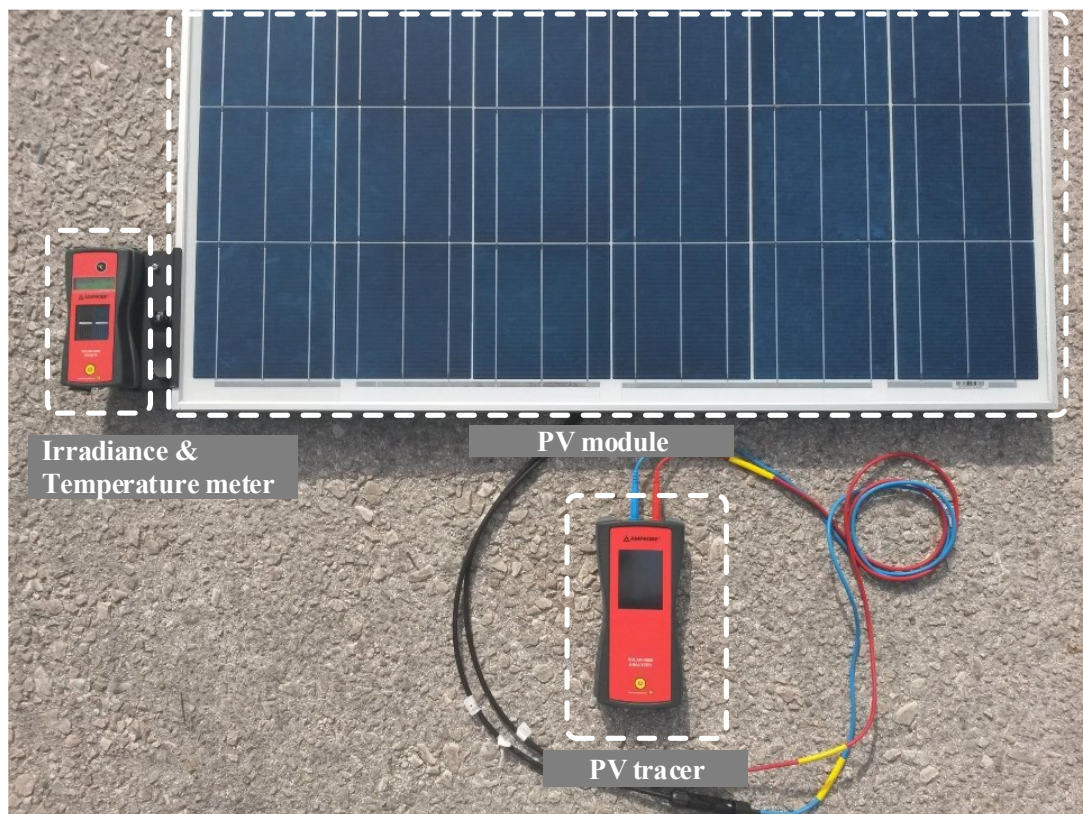
Συμπερασματικά, η προτεινόμενες εξισώσεις για την εξαγωγή των πέντε παραμέτρων με ευθύ τρόπο παρουσιάζουν την ίδια ακρίβεια με τη μέθοδο *De Soto*, αλλά προσφέρουν σημαντικά απλούστερη και υπολογιστικά αποδοτικότερη υλοποίηση.

2.3.7 Πειραματική επιβεβαίωση

Για να επιβεβαιωθεί η εγκυρότητα της προτεινόμενης μεθόδου σε ρεαλιστικές συνθήκες, λαμβάνονται πειραματικές μετρήσεις για πέντε εμπορικά ΦΒ πλαίσια σε τρεις καταστάσεις λειτουργίας. Τα χαρακτηριστικά των ΦΒ πλαισίων παρατίθενται στον πίνακα Π. 2.5. Η χαρακτηριστική *I-V* και οι τρέχουσες τιμές ακτινοβολίας και θερμοκρασίας καταγράφονται με τον εξοπλισμό *Amprobe Solar-4000 Analyzer PV tracer* (Σχ. 2.16). Ο αισθητήρας ακτινοβολίας αποτελείται από δύο ΦΒ κυψέλες, μία μονοκρυσταλλική και μία πολυκρυσταλλική, ενώ το

Π. 2.5. Χαρακτηριστικά των ΦΒ πλαισίων που χρησιμοποιήθηκαν στην πειραματική επιβεβαίωση.

| Μοντέλο ΦΒ πλαισίου | Τύπος | Κυψέλες | I_{sc0} (A) | V_{oc0} (V) | I_{mp0} (A) | V_{mp0} (V) |
|--------------------------------|-------|---------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| <i>Conergy PowerPlus 190PC</i> | mc-Si | 48 | 8.61 | 29.52 | 8.09 | 23.87 |
| <i>Day4 Energy 60MC-I</i> | mc-Si | 60 | 8.58 | 37.32 | 8.08 | 30.29 |
| <i>Perllight PLM-250P-60</i> | mc-Si | 60 | 8.49 | 37.58 | 7.88 | 31.73 |
| <i>Solea SM 190</i> | c-Si | 72 | 5.73 | 44.18 | 5.33 | 35.65 |
| <i>Yingli YL-165</i> | mc-Si | 48 | 7.90 | 29.00 | 7.17 | 23.00 |

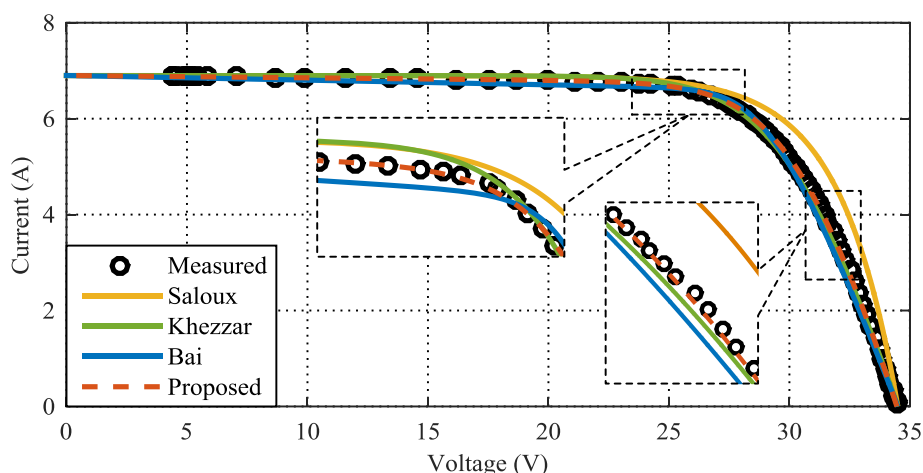


Σχ. 2.16. Εξοπλισμός πειραματικών μετρήσεων που χρησιμοποιήθηκε για την επιβεβαίωση των προτεινόμενων αναλυτικών σχέσεων εύρεσης των πέντε παραμέτρων.

μετρητικό θερμοκρασίας συνίσταται σε αισθητήρα υπέρυθρων. Η πειραματική διαδικασία περιλαμβάνει τα ακόλουθα βήματα:

- ✓ Αρχικά, καταγράφεται η χαρακτηριστική καμπύλη $I-V$ με τον PV tracer.
- ✓ Στη συνέχεια, προσδιορίζονται τα σημεία SC, OC και MPP και τροφοδοτούνται στις τέσσερις αναλυτικές μεθόδους για την εκτίμηση των πέντε παραμέτρων.
- ✓ Ακολούθως, κατασκευάζεται η καμπύλη $I-V$ βάσει των πέντε παραμέτρων με χρήση της (2.3) και συγκρίνεται με την πειραματικά καταγεγραμμένη χαρακτηριστική.

Στο Σχ. 2.17, παρουσιάζεται ένα ενδεικτικό σενάριο για ένα από τα ΦΒ πλαίσια που μετρήθηκαν. Οι μετρήσεις συμβολίζονται με μαύρους κυκλικούς δείκτες, ενώ οι προσομοιωμένες καμπύλες με τις τέσσερις μεθόδους σχεδιάζονται με χρωματισμένες γραμμές. Όπως φαίνεται στο άνω πλαίσιο εστίασης, οι *Saloux* (κίτρινη γραμμή) και *Khezzar* (πράσινη γραμμή) μέθοδοι υπερεκτιμούν το ρεύμα στην περιοχή μεταξύ SC και MPP, λόγω παράλειψης της εγκάρσιας αντίστασης στο μοντέλο. Αντίθετα, η *Bai* (μπλε γραμμή) υποεκτιμάει το ρεύμα στην ίδια περιοχή, κυρίως λόγω των υποθέσεων που λαμβάνει σχετικά με την κλίση της καμπύλης στο SC. Στην περιοχή μεταξύ MPP και OC (κάτω πλαίσιο εστίασης στο Σχ. 2.17), η *Saloux* αποκλίνει εμφανώς από τις μετρήσεις λόγω των απλοποιήσεων του μοντέλου (αγνοούνται οι δύο αντιστάσεις – η κλίση στο MPP θεωρείται ίση με V_{oc}/I_{sc}), ενώ οι άλλες δύο τεχνικές προσφέρουν ικανοποιητική σύγκλιση. Η *Proposed* μέθοδος (κόκκινη διακεκομμένη γραμμή) επιδεικνύει εξαιρετική ακρίβεια σε όλο το εύρος της χαρακτηριστικής.



Σχ. 2.17. Μετρημένη και προσομοιωμένες χαρακτηριστικές $I-V$, χρησιμοποιώντας τις αναλυτικές μεθόδους για μία ενδεικτική περίπτωση (Perllight PLM-250P-60 σε $805 \text{ W/m}^2 - 45 \text{ }^\circ\text{C}$).

Οι ανωτέρω παρατηρήσεις επιβεβαιώνονται και από τον σχετικό πίνακα Π. 2.6, στον οποίο παρουσιάζεται το σφάλμα NRMSD για τα τέσσερα αναλυτικά μοντέλα, όπως προκύπτει από τη σύγκριση με τις μετρήσεις. Η μέθοδος *Saloux* επιδεικνύει σφάλματα έως και σχεδόν 10%, ενώ οι *Khezzar* και *Bai* συμπεριφέρονται σχετικά καλύτερα. Παρόλα αυτά, όλες οι άλλες τεχνικές παρουσιάζουν rms σφάλμα μεγαλύτερο από το μέγιστο της *Proposed* μεθόδου. Το rms σφάλμα των προτεινόμενων εξισώσεων προκύπτει ελάχιστα μεγαλύτερο από το 1%, αποδεικνύοντας έτσι την ακρίβεια και εγκυρότητά τους σε ρεαλιστικές συνθήκες.

Π. 2.6. Πειραματικά αποτελέσματα των τεσσάρων αναλυτικών μεθόδων εύρεσης των πέντε παραμέτρων σε πέντε εμπορικά ΦΒ πλαίσια.

| ΦΒ πλαίσιο Συνθήκες λειτουργίας | NRMSD (%) εν συγκρίσει με τη μετρημένη $I-V$ | | | |
|--|--|----------------|------------|-----------------|
| | <i>Saloux</i> | <i>Khezzar</i> | <i>Bai</i> | <i>Proposed</i> |
| Conergy PowerPlus 190PC | | | | |
| 917 $\text{W/m}^2 - 57 \text{ }^\circ\text{C}$ | 5.91 | 1.90 | 3.13 | 1.15 |
| 857 $\text{W/m}^2 - 56 \text{ }^\circ\text{C}$ | 6.11 | 1.78 | 3.00 | 0.94 |
| 465 $\text{W/m}^2 - 58 \text{ }^\circ\text{C}$ | 1.74 | 2.60 | 1.83 | 1.75 |
| Day4 Energy 60MC-I | | | | |
| 906 $\text{W/m}^2 - 47 \text{ }^\circ\text{C}$ | 7.12 | 2.10 | 3.21 | 1.76 |
| 743 $\text{W/m}^2 - 42 \text{ }^\circ\text{C}$ | 5.44 | 1.12 | 2.43 | 1.34 |
| 518 $\text{W/m}^2 - 39 \text{ }^\circ\text{C}$ | 3.05 | 0.80 | 1.56 | 1.53 |
| Perllight PLM-250P-60 | | | | |
| 902 $\text{W/m}^2 - 40 \text{ }^\circ\text{C}$ | 9.44 | 2.22 | 3.06 | 0.54 |
| 805 $\text{W/m}^2 - 45 \text{ }^\circ\text{C}$ | 8.51 | 1.54 | 2.58 | 0.66 |
| 500 $\text{W/m}^2 - 47 \text{ }^\circ\text{C}$ | 5.10 | 3.23 | 1.94 | 1.70 |
| Solea SM 190 | | | | |
| 930 $\text{W/m}^2 - 45 \text{ }^\circ\text{C}$ | 3.92 | 0.38 | 1.55 | 0.72 |
| 772 $\text{W/m}^2 - 40 \text{ }^\circ\text{C}$ | 2.59 | 1.03 | 1.27 | 0.72 |
| 544 $\text{W/m}^2 - 35 \text{ }^\circ\text{C}$ | 2.26 | 0.49 | 1.82 | 1.22 |
| Yingli YL-165 | | | | |
| 976 $\text{W/m}^2 - 58 \text{ }^\circ\text{C}$ | 4.86 | 1.65 | 2.59 | 0.91 |
| 593 $\text{W/m}^2 - 47 \text{ }^\circ\text{C}$ | 2.60 | 2.27 | 3.26 | 0.59 |
| 437 $\text{W/m}^2 - 43 \text{ }^\circ\text{C}$ | 4.25 | 0.64 | 2.21 | 1.07 |
| ΟΛΙΚΟ RMS | 5.34 | 1.78 | 2.45 | 1.18 |
| ΟΛΙΚΟ ΜΕΓΙΣΤΟ | 9.44 | 3.23 | 3.26 | 1.76 |

2.4 Σχέσεις SC, OC και MPP συναρτήσεων Ακτινοβολίας και Θερμοκρασίας

Στην ενότητα 2.2, δίνονται μαθηματικές εξισώσεις για τον υπολογισμό των χαρακτηριστικών των τριών σημείων λειτουργίας SC, OC και MPP συναρτήσεων των πέντε παραμέτρων του μοντέλου. Οι εν λόγω εξισώσεις (2.5), (2.6) και (2.16)-(2.17) είναι απλές και αναλυτικής μορφής, αλλά προϋποθέτουν τη γνώση των πέντε παραμέτρων για την εφαρμογή τους.

Στη συνέχεια, αυτές οι εξισώσεις μετασχηματίζονται κατάλληλα ώστε να αποτελούν εκφράσεις μόνο των συνθηκών λειτουργίας (ακτινοβολία/θερμοκρασία) και δεδομένων του τεχνικού φυλλαδίου. Η αναδιατύπωση επιτυγχάνεται εφαρμόζοντας τις αναλυτικές σχέσεις εύρεσης των πέντε παραμέτρων (2.34)-(2.38) και αναγωγής τους σε αυθαίρετες συνθήκες (2.26)-(2.30) της προηγούμενης ενότητας 2.3, στις προαναφερθείσες (2.5), (2.6) και (2.16)-(2.17). Έτσι, οι τελικές εκφράσεις είναι συναρτήσεις μακροσκοπικών παραμέτρων και όχι κυκλωματικών στοιχείων, γεγονός που τις καθιστά εύκολα και άμεσα εφαρμόσιμες για οποιαδήποτε ΦΒ πλαίσιο και σε οποιοσδήποτε συνθήκες ακτινοβολίας και θερμοκρασίας.

Η ακρίβεια των σχέσεων της παρούσας ενότητας αποτιμάται με προσομοιώσεις στο λογισμικό *MATLAB*, και τα αποτελέσματα δείχνουν ότι βρίσκονται σε πολύ καλή συμφωνία με τη θεωρία του μοντέλου των πέντε παραμέτρων. Η άρτια θεωρητική βάση και απλή διατύπωση καθιστά τις προτεινόμενες εξισώσεις μία απλή και εύκολη μέθοδο προσδιορισμού των μεγεθών I_{sc} , V_{oc} , I_{mp} και V_{mp} .

2.4.1 Ρεύμα βραχυκύκλωσης - I_{sc}

Όπως εξηγείται στην παράγραφο 2.2.1, σε κατάσταση βραχυκύκλωσης το ρεύμα I_{sc} καθορίζεται κυρίως από το φωτόρευμα I_{ph} . Όμως, το τελευταίο εξαρτάται από την ακτινοβολία και θερμοκρασία σύμφωνα με την (2.26). Έτσι, η εξίσωση για το ρεύμα βραχυκύκλωσης είναι απλά:

$$I_{sc} = GI_{sc0}(1 + a_{I_{sc}}\Delta T) \quad (2.41)$$

Η (2.41) αντικατοπτρίζει την ισχυρή-αναλογική εξάρτηση του I_{sc} από την ακτινοβολία G και την ασθενέστερη-γραμμική επίδραση της θερμοκρασίας T , η οποία ποσοτικοποιείται μέσω του θερμοκρασιακού συντελεστή $a_{I_{sc}}$. Η ανωτέρω εξίσωση είναι ευρέως διαδεδομένη και μη αμφισβητήσιμη στη βιβλιογραφία [46], [57], [132], [152], [198]–[200]. Παραλλαγές της διαφέρουν ως προς τη θερμοκρασιακή επίδραση: στην [201] αγνοείται παντελώς ο θερμοκρασιακός παράγοντας, ενώ στην [175] μοντελοποιείται μέσω ενός εκθετικού όρου. Επίσης, σε κάποιες μελέτες ο συντελεστής $a_{I_{sc}}$ αντικαθίσταται από έναν παράγοντα διόρθωσης που προσδιορίζεται πειραματικά από μετρήσεις [68], [202]–[205].

2.4.2 Τάση ανοιχτοκύκλωσης - V_{oc}

Πειραματικά έχει παρατηρηθεί ότι η τάση ανοιχτοκύκλωσης V_{oc} επηρεάζεται λογαριθμικά από την ακτινοβολία και γραμμικά από τη θερμοκρασία [57], [119], [132], [137], [152], [173], [198], [199], [203], [204]. Όμως, η μοντελοποίηση αυτών των επιδράσεων δεν είναι

τυποποιημένη στη βιβλιογραφία. Η προτεινόμενη σχέση της παρούσας διατριβής είναι (λεπτομέρειες στο ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β):

$$V_{oc} = V_{oc0} (1 + \delta_0 K T \ln G + \beta_{V_{oc}} \Delta T) \quad (2.42)$$

όπου ο συντελεστής δ_0 δίνεται από την (2.33). Η (2.42) εκφράζει ξεκάθαρα τη λογαριθμική επίδραση της ακτινοβολίας G (μεσαιός όρος στην παρένθεση), η οποία μοντελοποιείται και σε άλλες μελέτες με ισοδύναμη διατύπωση [57], [83], [130], [142], [173], [202]:

$$\delta_0 V_{oc0} K T \ln G = a_0 \frac{T}{T_0} \ln G = N_s n \frac{kT}{q} \ln G = N_s n V_T \ln G \quad (2.43)$$

Η κύρια διαφορά των ανωτέρω μελετών σε σχέση με την προτεινόμενη (2.42) είναι στο συντελεστή του λογαρίθμου $\ln G$: είτε τον χρειάζεται ως δεδομένο εισόδο (με τη μορφή της παραμέτρου a_0 ή του συντελεστή διόδου n) [142], [173], είτε θεωρούν μία εμπειρική σταθερά 0.06 στη θέση του παράγοντα δ_0 [57], [202]. Ειδικά για την τελευταία προσέγγιση, η τιμή 0.06 είναι εμφανώς πολύ κοντά στις τιμές που λαμβάνει ο δ_0 (γύρω στο 0.04). *Βέβαια, ο επακριβώς προσδιορισμός αυτού του συντελεστή μέσω της (2.33) προσφέρει καλύτερη προσαρμογή στο υπό-μελέτη σύστημα, και άρα μεγαλύτερη ακρίβεια όπως φαίνεται στις προσομοιώσεις στη συνέχεια.*

Υπάρχουν λίγες εργασίες στη βιβλιογραφία που διαφοροποιούνται ως προς τη επίδραση της ακτινοβολίας: στην [175] περιγράφεται με έναν εκθετικό όρο, ενώ στις [201], [68] αγνοείται παντελώς. Επιπλέον, ο θερμοκρασιακός συντελεστής $\beta_{V_{oc}}$ προσδιορίζεται πειραματικά στις [202], [68] ή λαμβάνεται ως σταθερά για όλα τα πλαίσια στην [201].

2.4.3 Ρεύμα στο MPP - I_{mp}

Η εξάρτηση του MPP ρεύματος I_{mp} από τις συνθήκες λειτουργίας δεν είναι δεδομένη στη βιβλιογραφία. Συχνά θεωρείται αναλογική επίδραση της ακτινοβολίας, παρόμοια με το I_{sc} [46], [68], ενώ η ασθενής επιρροή της θερμοκρασίας παραμένει απροσδιόριστη. Στην παρούσα διατριβή, η εξίσωση για το I_{mp} είναι (διαδικασία εξαγωγής στο ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β):

$$I_{mp} = G I_{mp0} (1 + \alpha_{I_{mp}} \Delta T) \quad (2.44)$$

όπου $a_{I_{mp}}$ είναι ο θερμοκρασιακός συντελεστής του MPP ρεύματος που δεν είναι σταθερά, αλλά συνάρτηση της θερμοκρασίας, και δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\alpha_{I_{mp}} = \alpha_{I_{sc}} + \frac{\beta_{V_{oc}} - 1/T_0}{w_0 - 1} \frac{1 + \alpha_{I_{sc}} \Delta T}{1 + \beta_{V_{oc}} \Delta T} \quad (2.45)$$

όπου ο w_0 υπολογίζεται από την (2.39), η οποία χρησιμοποιεί τον δ_0 που βρίσκεται από την (2.33). Η (2.44) έχει γραφεί έτσι ώστε να ομοιάζει στην αντίστοιχη (2.41) για το ρεύμα βραχυκύκλωσης, ενσωματώνοντας την περιπλοκότερη θερμοκρασιακή επίδραση στον συντελεστή $a_{I_{mp}}$. Ο τελευταίος δε συμπίπτει πλήρως με τον $a_{I_{sc}}$ (αποτελεί απλώς μία κύρια συνιστώσα του) και δεν είναι σταθερά. Ίσως αυτός να είναι και ο λόγος που η συντριπτική πλειοψηφία των τεχνικών φυλλαδίων δεν έχουν τιμή για τον $a_{I_{mp}}$. Βέβαια, σύμφωνα με την

(2.45) ο a_{Imp} λαμβάνει πολύ μικρές τιμές (της ίδια τάξης μεγέθους με τον a_{Isc}), που δικαιολογεί εν μέρει την ταύτισή του με τον a_{Isc} , η ακόμα και τον μηδενισμό του από κάποιους ερευνητές [206]. Σε κάθε περίπτωση, η προτεινόμενη προσέγγιση παρουσιάζει καλύτερη ακρίβεια, όπως αποδεικνύεται στη συνέχεια από τις προσομοιώσεις.

2.4.4 Τάση στο MPP - V_{mp}

Σχετικά με την MPP τάση, δεν υπάρχει σύγκλιση απόψεων στη βιβλιογραφία. Υπάρχουν κάποιες μελέτες που παρατηρούν γραμμική-λογαριθμική εξάρτηση με τη θερμοκρασία [202], [57], [130], το οποίο επιβεβαιώνεται και από την παρούσα διατριβή. Η προτεινόμενη σχέση είναι (λεπτομέρειες στο ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β):

$$V_{mp} = GV_{mp0} + [(1-G)\delta_0(w_0 - 1) + \delta_0KT \ln G + \beta_{Voc}\Delta T]V_{oc0} \quad (2.46)$$

όπου οι βοηθητικοί όροι δ_0 και w_0 δίνονται από τις (2.33) και (2.39) αντίστοιχα. Στην (2.46) είναι εμφανές ότι η επίδραση της ακτινοβολίας G είναι συνδυαστικά γραμμική και λογαριθμική (πρώτος όρος της σχέσης και δύο όροι της αγκύλης), ενώ η επιρροή της θερμοκρασίας γραμμική. Σε άλλες εργασίες, θεωρείται απλουστευτικά ότι η V_{mp} ανάγεται στις λειτουργικές συνθήκες ακριβώς όπως η V_{oc} [46], [68], ενώ στην [173] η εξάρτηση από την ακτινοβολία μοντελοποιείται μέσω ενός διώνυμου με πειραματικά προσδιορισμένους συντελεστές. Το πλεονέκτημα της (2.46) είναι ότι μοντελοποιεί το φαινόμενο σε απόλυτη συμφωνία με το μοντέλο των πέντε παραμέτρων και είναι απαλλαγμένη από εμπειρικές σταθερές, σε αντίθεση με άλλες εργασίες.

Επιπλέον, αξίζει να σημειωθεί ότι αν η (2.46) εφαρμοστεί για ονομαστική ακτινοβολία και αυθαίρετη θερμοκρασία, γίνεται:

$$V_{mp} = V_{mp0} \left(1 + \frac{\beta_{Voc}V_{oc0}}{V_{mp0}} \Delta T \right) \quad (2.47)$$

Δηλαδή, φαίνεται ότι ο θερμοκρασιακός συντελεστής της MPP τάσης β_{Vmp} συνδέεται με τον αντίστοιχο συντελεστή β_{Voc} σύμφωνα με την:

$$\beta_{Vmp} = \frac{\beta_{Voc}V_{oc0}}{V_{mp0}} \quad (2.48)$$

Η (2.48) προσδιορίζει τον β_{Vmp} (που εν γένει δε δίνεται στο τεχνικό φυλλάδιο) συναρτήσει δεδομένων του τεχνικού φυλλαδίου.

2.4.5 Σχέσεις συγκεντρωτικά

Οι τέσσερις σχέσεις των I_{sc} , V_{oc} , I_{mp} και V_{mp} παρατίθενται στη συνέχεια συγκεντρωτικά:

$$\begin{aligned}
 I_{sc} &= G I_{sc0} (1 + a_{Isc} \Delta T) \\
 V_{oc} &= V_{oc0} (1 + \delta_0 K T \ln G + \beta_{Voc} \Delta T) \\
 I_{mp} &= G I_{mp0} (1 + \alpha_{Imp} \Delta T) \\
 V_{mp} &= G V_{mp0} + [(1 - G) \delta_0 (w_0 - 1) + \delta_0 K T \ln G + \beta_{Voc} \Delta T] V_{oc0}
 \end{aligned}
 \tag{2.49}$$

Οι βοηθητικές παράμετροι που απαιτούνται για την εφαρμογή τους είναι:

$$\begin{aligned}
 \delta_0 &= \frac{1 - 298.15 \beta_{Voc}}{50.1 - 298.15 a_{Isc}} \\
 w_0 &= W \left\{ e^{1/\delta_0 + 1} \right\} \\
 \alpha_{Imp} &= \alpha_{Isc} + \frac{\beta_{Voc} - 1/T_0}{w_0 - 1} \frac{1 + \alpha_{Isc} \Delta T}{1 + \beta_{Voc} \Delta T}
 \end{aligned}
 \tag{2.50}$$

Οι προτεινόμενες εξισώσεις είναι απλές αναλυτικές εκφράσεις που χρειάζονται ως δεδομένα εισόδου μόνο πληροφορίες που είναι πάντα διαθέσιμες στο τεχνικό φυλλάδιο του ΦΒ πλαισίου:

- ✓ Τα ονομαστικά χαρακτηριστικά (σε STC) των μεγεθών I_{sc0} , V_{oc0} , I_{mp0} και V_{mp0}
- ✓ Οι θερμοκρασιακοί συντελεστές a_{Isc} και β_{Voc} (σε p.u.)
- ✓ Και βεβαίως οι εκάστοτε συνθήκες ακτινοβολίας G και θερμοκρασίας T

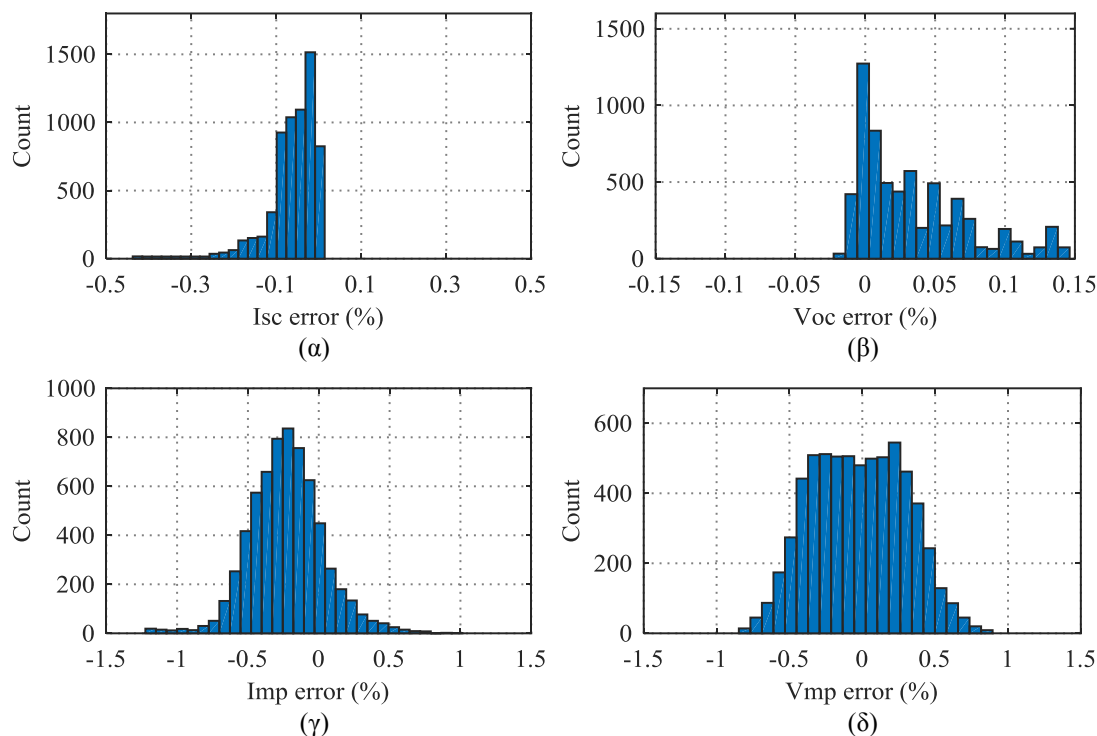
2.4.6 Επιβεβαίωση μέσω προσομοιώσεων

Στη συνέχεια, αποτιμάται η ακρίβεια των προτεινόμενων εξισώσεων μέσω προσομοιώσεων στο λογισμικό *MATLAB*, σε σύγκριση και με άλλες τρεις σχετικές μεθόδους της βιβλιογραφίας. Συγκεκριμένα, εφαρμόζονται οι μέθοδοι των [201], [142] και [202] (όπως βελτιώνεται στις [57], [130]), οι οποίες συμβολίζονται με τα ονόματα των αντίστοιχων κύριων συγγραφέων *Fuentes*, *Saloux* και *Ding* (από τους συγγραφείς των [57], [130]). Οι προαναφερθείσες τεχνικές επιλέχθηκαν για σύγκριση με τις εκφράσεις (2.49) της παρούσας διατριβής (*Proposed*), διότι είναι και αυτές αναλυτικής φύσεως και γενικά εφαρμόσιμες, χρησιμοποιώντας ως δεδομένα εισόδου μόνο πληροφορίες του τεχνικού φυλλαδίου. Μελετώνται 20 διαφορετικά ΦΒ πλαίσια σε πολλές διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας, με ακτινοβολία από 100 W/m² έως 1000 W/m² (βήμα 50 W/m²) και θερμοκρασία -5 °C έως 75 °C (βήμα 5 °C), δηλαδή 6460 σενάρια συνολικά.

Η διαδικασία έχει ως εξής:

- ✓ Για κάθε σενάριο προσομοίωσης, παράγονται οι χαρακτηριστικές καμπύλες $I-V$ και $P-V$ σύμφωνα με το μοντέλο των πέντε παραμέτρων της παρούσας ενότητας.
- ✓ Εντοπίζονται στις καμπύλες τα τρία σημεία SC, OC και MPP, θεωρώντας την τάση και το ρεύμα τους ως βάση για τη σύγκριση που ακολουθεί.
- ✓ Εφαρμόζονται οι *Proposed* εξισώσεις και οι άλλες τρεις μέθοδοι της βιβλιογραφίας, τα αποτελέσματα των οποίων συγκρίνονται με τα αντίστοιχα της προσομοίωσης από το προηγούμενο βήμα, προς αποτίμηση της ακρίβειας.

Στο Σχ. 2.18, παρουσιάζονται ιστογράμματα σφαλμάτων που προκύπτουν από την εφαρμογή των *Proposed* εκφράσεων στο σύνολο των 6460 σεναρίων. Είναι εμφανές ότι η εκτίμηση των I_{sc} και V_{oc} είναι πολύ ικανοποιητική, καθώς η κατανομή των σφαλμάτων είναι συγκεντρωμένη



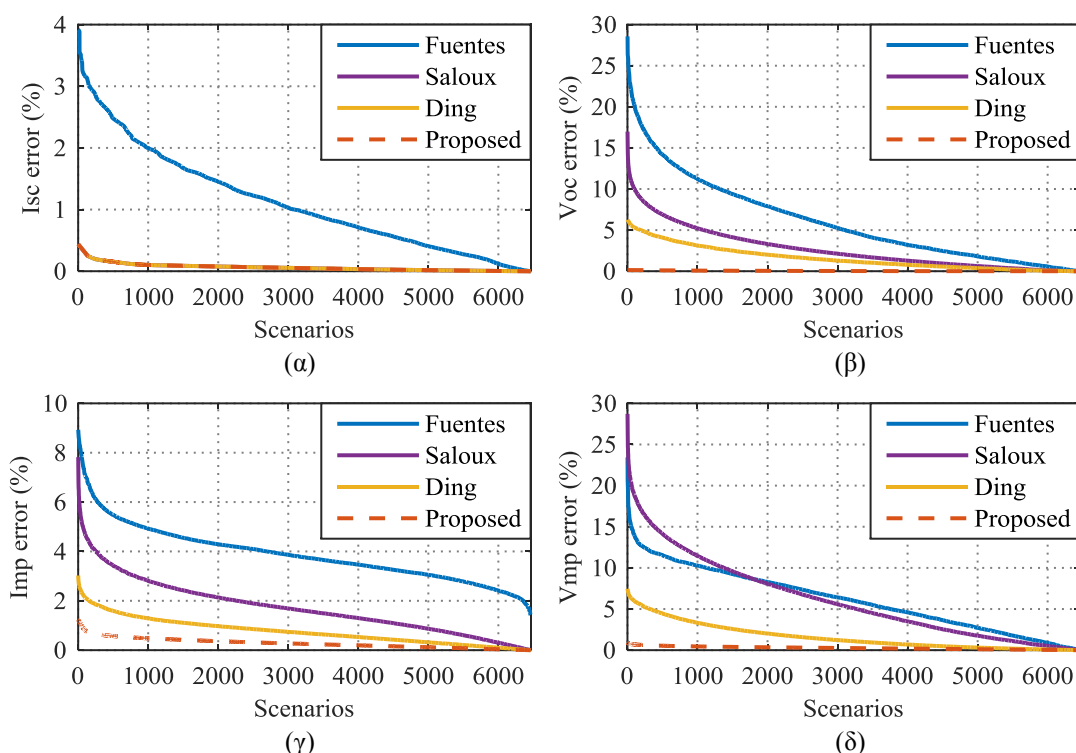
Σχ. 2.18. Ιστογράμματα σφάλματος εκτίμησης των μεγεθών (α) I_{sc} , (β) V_{oc} , (γ) I_{mp} και (δ) V_{mp} με τις προτεινόμενες σχέσεις (2.49) (*Proposed*) για τα 6460 σενάρια προσομοίωσης.

γύρω από το μηδέν, με μέγιστες αποκλίσεις που δεν ξεπερνούν το 0.5% και 0.15% αντίστοιχα (Σχ. 2.18(α)-(β)). Για το I_{sc} , φαίνεται να υπάρχει μία τάση ελαφριάς υποεκτίμησης, ενώ για την V_{oc} ανεπαίσθητη υπερεκτίμησης. Όμως, και για τα μεγέθη I_{mp} και V_{mp} (Σχ. 2.18(γ)-(δ)), η μέση τιμή της κατανομής είναι πολύ κοντά στο μηδέν με μέγιστα σφάλματα της τάξης του 1%. Εδώ οι αποκλίσεις λαμβάνουν συμμετρικά θετικό και αρνητικό πρόσημο. Το κύριο συμπέρασμα από τα διαγράμματα του Σχ. 2.18 είναι ότι προτεινόμενες εξισώσεις (2.49) βρίσκονται σε πλήρη συμφωνία με τη θεωρία του μοντέλου των πέντε παραμέτρων.

Στο ακόλουθο Σχ. 2.19 απεικονίζονται σε αντιπαραβολή τα σφάλματα και των τεσσάρων μεθόδων σε μορφή καμπύλης διάρκειας (ταξινομημένα σε φθίνουσα σειρά κατά απόλυτη τιμή) για όλα τα σενάρια προσομοίωσης. Όσον αφορά το I_{sc} , οι καμπύλες των *Saloux*, *Ding* και *Proposed* αναμενόμενα ταυτίζονται πλήρως και επιδεικνύουν εξαιρετική ακρίβεια, καθώς χρησιμοποιούν την ίδια ακριβώς σχέση Αυτό δεν ισχύει για την *Fuentes* (μπλε γραμμή), η οποία αποκλίνει μέχρι και 4%, διότι αγνοεί τον θερμοκρασιακό παράγοντα.

Αντίθετα, για την V_{oc} οι τρεις μέθοδοι της βιβλιογραφίας εμφανίζουν αξιοσημείωτα σφάλματα, ενώ η *Proposed* (κόκκινη διακεκομμένη γραμμή) παραμένει σταθερά πάνω στο μηδέν. Είναι ενδιαφέρον ότι παρόλο που η δομή της εξίσωσης για την V_{oc} στην *Proposed* και *Ding* είναι ίδια, ο ακριβής προσδιορισμός του συντελεστή δ_0 που επιτυγχάνεται από την πρώτη, σε αντίθεση με τη σταθερά 0.06 που θεωρείται στη δεύτερη, αποδεικνύεται ουσιαστικής σημασίας.

Παρομοίως για τα I_{mp} και V_{mp} (Σχ. 2.19(γ)-(δ)), οι τρεις μέθοδοι *Fuentes*, *Saloux* και *Ding* παρουσιάζουν σημαντικά μεγαλύτερες αποκλίσεις σε σχέση με τις προτεινόμενες εξισώσεις (κόκκινη διακεκομμένη γραμμή). Για το I_{mp} , καθοριστική είναι η συμβολή του νέου συντελεστή



Σχ. 2.19. Σύγκριση σφαλμάτων υπολογισμού των μεγεθών (α) I_{sc} , (β) V_{oc} , (γ) I_{mp} και (δ) V_{mp} με τις τέσσερις μεθόδους για τα 6460 σενάρια προσομοίωσης. Τα σφάλματα παρουσιάζονται σε φθίνουσα ταξινόμηση κατά απόλυτες τιμές.

a_{Imp} που προσφέρει στην *Proposed* μέθοδο πολύ καλή μοντελοποίηση της θερμοκρασιακής επίδρασης. Αντίθετα, η ακριβής εκτίμηση της V_{mp} από την τελευταία είναι απόρροια της θεωρητικά τεκμηριωμένης εξίσωσης που μοντελοποιεί ορθά την επιρροή της ακτινοβολίας ως γραμμική-λογαριθμική και τη συνδέει με την παράμετρο δ_0 . Παρόλο που παρόμοιας μορφής εξίσωση προτείνεται και στην *Ding*, η εμπειρική φύση των συντελεστών που χρησιμοποιούνται οδηγεί σε μεγαλύτερα σφάλματα.

Τα ανωτέρω αποτελέσματα ποσοτικοποιούνται και στον ακόλουθο πίνακα Π. 2.7. Η *Fuentes* εμφανίζει μεγάλα σφάλματα σε όλα τα μεγέθη, ενώ οι *Saloux* και *Ding* αποκλίνουν στην εκτίμηση των V_{oc} , I_{mp} και V_{mp} . Η τελευταία παρουσιάζει rms σφάλματα μέχρι και περίπου 2%, αλλά επιδεικνύει μέγιστες αποκλίσεις της τάξης του 7.5%. Αντίθετα, οι προτεινόμενες εξισώσεις (2.49) προσφέρουν εγγυημένη εκτίμηση όλων των μεγεθών με rms και μέγιστα σφάλματα που δεν ξεπερνάνε το 0.35% και 1.22% αντίστοιχα.

Εν κατακλείδι, το κύριο συμπέρασμα από τη διερεύνηση της παρούσας παραγράφου είναι ότι οι εκφράσεις (2.49) προσφέρουν την καλύτερη σύγκλιση με το μοντέλο των πέντε παραμέτρων, ανάμεσα στις μεθόδους της βιβλιογραφίας.

Π. 2.7. Σφάλματα εκτίμησης των τεσσάρων μεθόδων για τα 6460 σενάρια προσομοίωσης.

| Μέθοδος | Σφάλμα I_{sc} (%) | | Σφάλμα V_{oc} (%) | | Σφάλμα I_{mp} (%) | | Σφάλμα V_{mp} (%) | |
|-----------------|---------------------|------|---------------------|-------|---------------------|------|---------------------|-------|
| | RMS | MAX | RMS | MAX | RMS | MAX | RMS | MAX |
| <i>Fuentes</i> | 1.39 | 3.92 | 7.87 | 28.57 | 4.05 | 8.93 | 7.18 | 23.42 |
| <i>Saloux</i> | 0.09 | 0.44 | 3.67 | 16.98 | 2.06 | 7.82 | 7.85 | 28.72 |
| <i>Ding</i> | 0.09 | 0.44 | 2.12 | 6.26 | 0.93 | 3.03 | 2.26 | 7.47 |
| <i>Proposed</i> | 0.09 | 0.44 | 0.05 | 0.15 | 0.35 | 1.22 | 0.32 | 0.89 |

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Ανάλυση και Μοντελοποίηση ΦΒ Συστημάτων σε Συνθήκες Σκίασης

Σε αυτό το κεφάλαιο μελετάται και μοντελοποιείται το ΦΒ σύστημα σε συνθήκες ανομοιόμορφης ακτινοβολίας (μερική σκίαση). Αρχικά, εισάγεται ένα νέο κυκλωματικό μοντέλο αναλυτικής μορφής, το οποίο παρουσιάζει σημαντικά ταχύτερη και πιο αξιόπιστη εκτέλεση σε σύγκριση με τη συμβατική προσέγγιση αριθμητικής επίλυσης υπερμεγέθους συστήματος εξισώσεων.

Το εν λόγω μοντέλο χρησιμοποιείται για προσομοίωση πολυάριθμων σεναρίων σκίασης σε διάφορες ΦΒ διατάξεις. Από την ανάλυση προκύπτουν χρήσιμα συμπεράσματα για την επίδραση της σκίασης στις χαρακτηριστικές $I-V$, $P-V$ και την εμφάνιση πολλαπλών τοπικών μεγίστων ισχύος (MPP).

Στη συνέχεια, προτείνονται απλές περιγραφικές σχέσεις για τον προσδιορισμό της τάσης, ρεύματος και ισχύος των MPPs μερικώς σκιασμένης πλαισιοσειράς και συστοιχίας. Οι προτεινόμενες εξισώσεις προσφέρουν έναν εύκολο τρόπο υπολογισμού των απωλειών σκίασης, αποφεύγοντας την κοπιώδη σχεδίαση ολόκληρης της χαρακτηριστικής ισχύος.

Τα μοντέλα που προτείνονται σε αυτό το κεφάλαιο επιβεβαιώνονται μέσω προσομοιώσεων και πειραματικών μετρήσεων σε πληθώρα σεναρίων σκίασης. Τα αποτελέσματα καταδεικνύουν ικανοποιητική ακρίβεια και σημαντική βελτίωση του υπολογιστικού κόστους. Το υλικό του παρόντος κεφαλαίου δημοσιεύτηκε στις [67], [71].

3.1 Μοντελοποίηση σε Συνθήκες Σκίασης

Το μοντέλο πέντε παραμέτρων που περιγράφεται στο προηγούμενο κεφάλαιο δεν είναι άμεσα εφαρμόσιμο σε συνθήκες ανομοιόμορφης ακτινοβολίας. Όταν το υπό μελέτη σύστημα αποτελείται από πολλά ΦΒ πλαίσια συνδεδεμένα σειριακά και παράλληλα που λειτουργούν υπό διαφορετικές συνθήκες, απαιτείται πολυπλοκότερη μοντελοποίηση. Στη συνέχεια εξηγείται πώς το μοντέλο των πέντε παραμέτρων επεκτείνεται σε συνθήκες μερικής σκίασης και δομείται μία ολοκληρωμένη μεθοδολογία μοντελοποίησης που υποστηρίζει ανομοιομορφία οποιασδήποτε μορφής (πολλαπλά επίπεδα ακτινοβολίας και θερμοκρασίας) και ανάλυση μέχρι και το επίπεδο της ΦΒ κυψέλης.

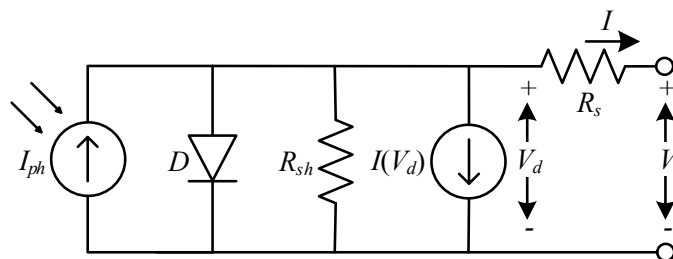
Η διατύπωση του μοντέλου πραγματοποιείται με δύο τρόπους: α) τη *συμβατική* μέθοδο δόμησης ενός συστήματος εξισώσεων που επιλύεται αριθμητικά/επαναληπτικά, και β) την *αναλυτική* διατύπωση του μοντέλου με χρήση της συνάρτησης Lambert W προς δημιουργία *μίας* μονάχα εξίσωσης για κάθε πλαισιοσειρά της ΦΒ συστοιχίας. Οι δύο προσεγγίσεις συγκρίνονται ως προς την ακρίβεια και το υπολογιστικό κόστος. Το περιεχόμενο και τα αποτελέσματα της παρούσας ενότητας δημοσιεύτηκαν στην [67].

3.1.1 Πλήρες μοντέλο ΦΒ κυψέλης για θετική και αρνητική τάση

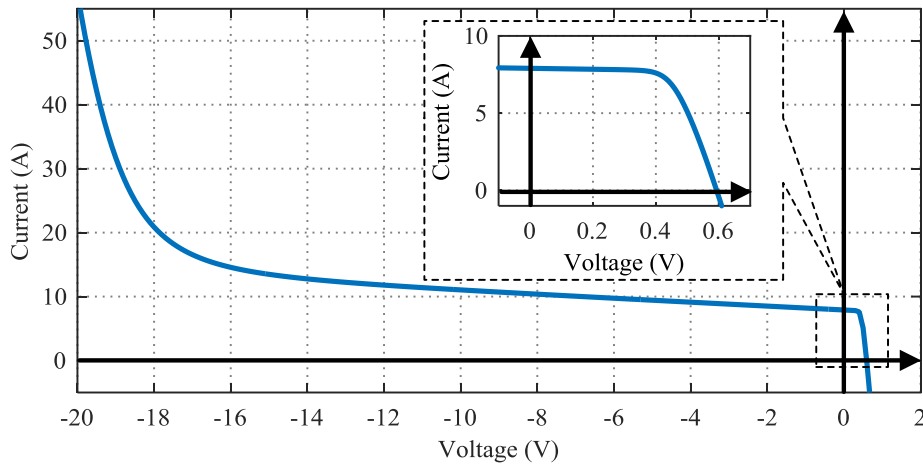
Το μοντέλο μίας διόδου (ή πέντε παραμέτρων) που παρουσιάζεται στο προηγούμενο κεφάλαιο περιγράφει τη λειτουργία μιας ΦΒ κυψέλης *μόνο* σε θετικές τάσεις, δηλαδή στο πρώτο και τέταρτο τεταρτημόριο της I - V χαρακτηριστικής. Όμως, σε συνθήκες μερικής σκίασης, ενδέχεται κάποιες κυψέλες να λειτουργούν σε αρνητική τάση υπό την επίρεια του υψηλότερου ρεύματος που επιβάλλεται από το ασκίαστο τμήμα της ΦΒ διάταξης. Επομένως, το μοντέλο της ΦΒ κυψέλης απαιτείται να επεκταθεί και στα τέσσερα τεταρτημόρια της χαρακτηριστικής, ήτοι και σε αρνητικές τάσεις.

3.1.1.A Επέκταση του μοντέλου πέντε παραμέτρων σε τέσσερα τεταρτημόρια

Υπάρχουν διάφορες προσεγγίσεις στη βιβλιογραφία που πραγματεύονται το συγκεκριμένο αντικείμενο. Μια ενδιαφέρουσα συγκριτική ανάλυση δίνεται στο [171]. Στην παρούσα μελέτη, υιοθετείται η συνηθέστερη προσέγγιση σύμφωνα με την οποία το ισοδύναμο κύκλωμα του μοντέλου μίας διόδου επεκτείνεται με την προσθήκη μίας εγκάρσιας πηγής ρεύματος ελεγχόμενης από τάση [29], [38], [49], [52], [172], όπως φαίνεται στο Σχ. 3.1. Έτσι, η εξίσωση ρεύματος – τάσης που περιγράφει το νέο κύκλωμα τροποποιείται ως εξής:



Σχ. 3.1. Ηλεκτρικό ισοδύναμο κύκλωμα ΦΒ κυψέλης τεσσάρων τεταρτημώριων.



Σχ. 3.2. Χαρακτηριστική καμπύλη $I-V$ τυπικής ΦΒ κυψέλης σε όλα τα τεταρτημόρια (θετικές και αρνητικές τάσεις).

$$I = I_{ph} - I_s \left(e^{\frac{V+IR_s}{a}} - 1 \right) - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} - b(V + IR_s) \left(1 - \frac{V + IR_s}{V_{br}} \right)^{-m} \quad (3.1)$$

όπου ο τελευταίος όρος μοντελοποιεί τη νεοεισαχθείσα πηγή ρεύματος. Οι παράμετροι που εμπεριέχονται στον εν λόγω όρο είναι: ο συντελεστής διόρθωσης b , η τάση κατάρρευσης V_{br} και ο συντελεστής κατάρρευσης m . Τυπικές τιμές για τις παραμέτρους αυτές λαμβάνονται από τη βιβλιογραφία: $b = 0.002 \Omega^{-1}$, $V_{br} = -21.3 \text{ V}$ και $m = 3$ [29], [35], [52].

Η πλήρης χαρακτηριστική $I-V$ για θετικές και αρνητικές τάσεις δίνεται στο Σχ. 3.2, όπως προκύπτει από την (3.1) για μια τυπική ΦΒ κυψέλη. Η μορφή της καμπύλης δεν αλλάζει στο πρώτο τεταρτημόριο (πλαίσιο εστίασης), ενώ αντίθετα τροποποιείται σημαντικά στις αρνητικές τάσεις. Κοντά στην περιοχή βραχυκύκλωσης, η κλίση της καμπύλης είναι σταθερή και σχεδόν οριζόντια, καθώς επηρεάζεται κυρίως από την εγκάρσια αντίσταση R_{sh} . Όμως, για πολύ αρνητικές τάσεις, η δίοδος του μοντέλου D εισέρχεται στην περιοχή κατάρρευσης και η κλίση της καμπύλης γίνεται έντονα αρνητική, όπως μοντελοποιείται από τον τελευταίο όρο της (3.1). Ακόμα, στο τέταρτο τεταρτημόριο, αν η κυψέλη εξαναγκαστεί να λειτουργήσει σε τάση μεγαλύτερη της ανοιχτοκύκλωσης υπό την επήρεια του υπολοίπου κυκλώματος, τότε το ρεύμα λαμβάνει αρνητική τιμή που αντιστοιχεί και πάλι σε απορρόφηση ισχύος.

3.1.1.B Αναλυτική διατύπωση της θεμελιώδους εξίσωσης

Η (3.1) απαιτεί αριθμητική/επαναληπτική επίλυση, καθώς η μορφή της δεν είναι αναλυτική. Όπως εξηγείται στις επόμενες ενότητες, σε συνθήκες σκίασης που το ΦΒ σύστημα περιγράφεται από ένα εξαιρετικά μεγάλο κύκλωμα, η πεπλεγμένη μορφή της (3.1) συνεπάγεται τη δημιουργία ενός υπερμεγέθους συστήματος μη-γραμμικών εξισώσεων που επιλύεται και αρχικοποιείται πολύ δύσκολα. Προς αντιμετώπιση της συγκεκριμένης δυσκολίας, η (3.1) αναδιατυπώνεται στη συνέχεια σε ευθεία μορφή $V=f(I)$ με χρήση της συνάρτησης Lambert W και της μεθόδου Ferrari. Η ακόλουθη ανάλυση βασίζεται σε δύο καίριες παρατηρήσεις που αφορούν την (3.1) και το κύκλωμα του Σχ. 3.1:

- ✓ Σε θετική τάση (πρώτο και τέταρτο τεταρτημόριο), η πηγή ρεύματος $I(V_d)$ που

μοντελοποιεί τη λειτουργία της κυψέλης στην περιοχή κατάρρευσης δεν έχει ουσιαστικό νόημα (Σχ. 3.1). Δηλαδή, ο τελευταίος όρος της εξίσωσης (3.1) δεν έχει πρακτική σημασία για $V > 0$. Άλλωστε, οι τιμές που λαμβάνει τότε είναι μηδενικές, και άρα μπορεί να αμεληθεί χωρίς επίπτωση στην ακρίβεια του μοντέλου.

- ✓ Σε αρνητική τάση (δεύτερο τεταρτημόριο), η δίοδος D του κυκλώματος που περιγράφει την επαφή p-n είναι ανάστροφα πολωμένη και λειτουργεί ουσιαστικά ως ανοιχτοκύκλωμα. Ο εκθετικός όρος της (3.1) σχεδόν μηδενίζεται, συγκλίνοντας στο ανάστροφο ρεύμα κορεσμού I_s που λαμβάνει τιμές της τάξης των μA . Συνεπώς, ο εν λόγω όρος μπορεί να αμεληθεί για αρνητικές τάσεις χωρίς βλάβη της γενικότητας.

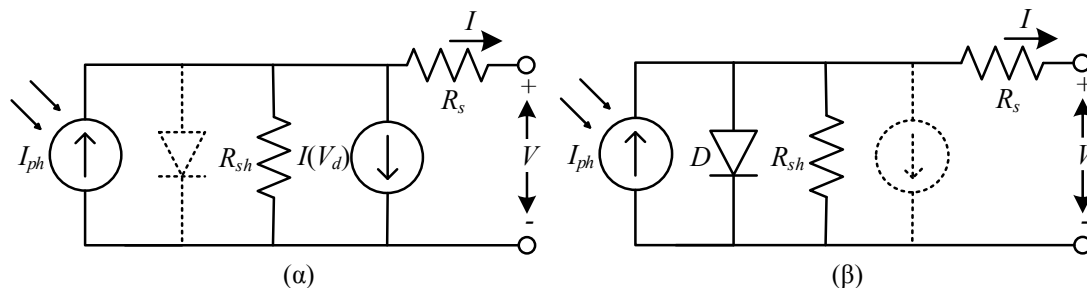
Δηλαδή, το ισοδύναμο κύκλωμα της ΦΒ κυψέλης του Σχ. 3.1 μπορεί να απλοποιηθεί στα κυκλώματα του Σχ. 3.3(α)-(β), ανάλογα με την τάση λειτουργίας. Αντίστοιχα, η (3.1) αναδιατυπώνεται ως εξής:

$$I = \begin{cases} I_{ph} - I_s \left(e^{\frac{V+IR_s}{a}} - 1 \right) - \frac{V+IR_s}{R_{sh}} & , \text{για } V \geq 0, I \leq I_{sc} \\ I_{ph} - \frac{V+IR_s}{R_{sh}} - b(V+IR_s) \left(1 - \frac{V+IR_s}{V_{br}} \right)^{-m} & , \text{για } V < 0, I > I_{sc} \end{cases} \quad (3.2)$$

Πλέον, η μορφή της (3.2) επιτρέπει αναλυτική αναδιατύπωση του κάθε κλάδου ξεχωριστά. Συγκεκριμένα, ο άνω κλάδος αντιστοιχεί στο συμβατικό μοντέλο των πέντε παραμέτρων, το οποίο έχει ήδη γραφεί αναλυτικά από το προηγούμενο κεφάλαιο στην (2.3). Αντίθετα, ο κάτω κλάδος της (3.2) είναι μια πολυωνυμική εξίσωση $m+1$ βαθμού. Για να επιτραπεί η αναλυτική διατύπωσή του, θεωρείται σταθερή τιμή για το συντελεστή κατάρρευσης $m = 3$, η οποία αντιστοιχεί στην τιμή που λαμβάνεται συνηθέστερα στη βιβλιογραφία [29], [35], [52]. Έτσι, ο κάτω κλάδος της (3.2) γράφεται ως εξής:

$$\frac{1}{R_{sh}} z^4 + \left(I_{ph} - I - \frac{V_{br}}{R_{sh}} \right) z^3 + bV_{br}^3 z - bV_{br}^4 = 0 \quad (3.3)$$

όπου $z = V_{br} - V - IR_s$ είναι μια βοηθητική μεταβλητή. Η (3.3) είναι μία πολυωνυμική εξίσωση τετάρτου βαθμού με ανεξάρτητη μεταβλητή το z , η οποία μπορεί να επιλυθεί με ευθύ τρόπο με τη μεθοδολογία του Ferrari [207], [208]. Από τις τέσσερις ρίζες της εξίσωσης, φυσικό νόημα έχει μόνο η μικρότερη πραγματική ρίζα $\min\{\text{real}\{z\}\}$, από την οποία στη συνέχεια προσδιορίζεται η τάση της κυψέλης ως: $V = V_{br} - IR_s - \min\{\text{real}\{z\}\}$.



Σχ. 3.3. Απλοποιημένο ισοδύναμο κύκλωμα του πλήρους μοντέλου της ΦΒ κυψέλης όταν λειτουργεί (α) σε αρνητικές τάσεις ($V < 0, I > I_{sc}$) και (β) σε θετικές τάσεις ($V \geq 0, I \leq I_{sc}$).

Τελικά, προκύπτει η (3.4) που είναι εφαρμόσιμη σε όλο το εύρος λειτουργίας μιας ΦΒ κυψέλης. Ως κριτήριο επιλογής κλάδου, συγκρίνεται το ρεύμα I με το ρεύμα βραχυκύκλωσης όπως δίνεται από την (2.5):

$$V_{cell} = \begin{cases} R_{sh}(I_{ph} + I_s) - (R_s + R_{sh})I - aW \left\{ \frac{I_s R_{sh}}{a} e^{\frac{R_{sh}(I_{ph} + I_s - I)}{a}} \right\}, & I \leq \frac{R_{sh}}{R_s + R_{sh}} I_{ph} \\ V_{br} - IR_s - \min\{\text{Re}\{z\}\}, & \text{όπου } z \text{ οι ρίζες της:} \\ \frac{1}{R_{sh}} z^4 + \left(I_{ph} - I - \frac{V_{br}}{R_{sh}} \right) z^3 + bV_{br}^3 z - bV_{br}^4 = 0 & , I > \frac{R_{sh}}{R_s + R_{sh}} I_{ph} \end{cases} \quad (3.4)$$

Χρησιμοποιώντας την εξίσωση της ΦΒ κυψέλης ως δομικό λίθο, επιτυγχάνεται μοντελοποίηση όλων των μεγαλύτερων ΦΒ διατάξεων στις επόμενες παραγράφους. Για λόγους διαχωρισμού των δύο εναλλακτικών διατυπώσεων της εξίσωσης, πεπλεγμένη μορφή (3.1) και αναλυτική (3.4), στο ακόλουθο κείμενο η πρώτη συμβολίζεται με $f_{cell}(V_{cell}, I) = 0$ και η δεύτερη με $V_{cell} = V_{cell}(I)$. Η διαφορά τους έγκειται στον τρόπο επίλυσης: για τη συμβατική πεπλεγμένη μορφή (3.1) χρειάζεται να δομηθεί ένα σύστημα πολλών εξισώσεων που απαιτεί αριθμητική επίλυση, ενώ για την προτεινόμενη διατύπωση (3.4) επιτυγχάνεται ο σχηματισμός μίας μοναδικής εξίσωσης για κάθε ΦΒ πλαισιοσειρά της συστοιχίας.

3.1.2 ΦΒ στοιχειοσειρά

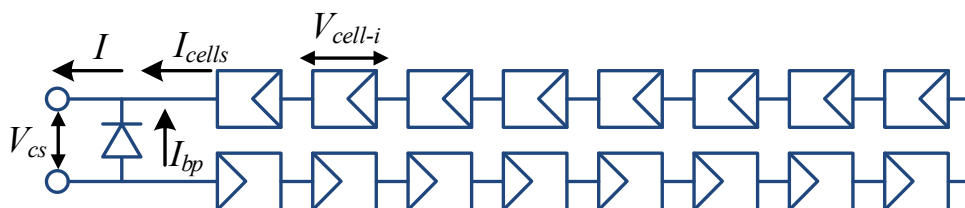
Ενδεικτική δομή μίας ΦΒ στοιχειοσειράς παρουσιάζεται στο Σχ. 3.4. Όπως εξηγείται στο εισαγωγικό κεφάλαιο, αποτελείται από N_s κυψέλες συνδεδεμένες σε σειρά προς αύξηση της αποδιδόμενης τάσης, συζευγμένες συνολικά με μία διόδο διαφυγής για λόγους προστασίας. Στο Σχ. 3.4, η τάση κάθε κυψέλης i συμβολίζεται με V_{cell-i} και η συνολική τάση της στοιχειοσειράς με V_{cs} , ενώ το συνολικό ρεύμα I συνίσταται από το ρεύμα που διαρρέει τις κυψέλες I_{cells} και το ρεύμα της διόδου διαφυγής I_{bp} .

3.1.2.A Συμβατική διατύπωση

Συμβατικά, η ΦΒ στοιχειοσειρά περιγράφεται από ένα σύστημα N_s+2 εξισώσεων:

$$\begin{cases} f_{cell}(V_{cell-1}, I_{cells}) = 0 \\ f_{cell}(V_{cell-2}, I_{cells}) = 0 \\ \vdots \\ f_{cell}(V_{cell-N_s}, I_{cells}) = 0 \\ \sum_{i=1}^{N_s} V_{cell-i} = V_{cs} \\ I - I_{cells} = I_{sbp} \left(e^{-V_{cs}/a_{bp}} - 1 \right) \end{cases} \Leftrightarrow f_{cs}(V_{cs}, I) = 0 \quad (3.5)$$

Οι πρώτες N_s εξισώσεις $f_{cell}(V_{cell-i}, I_{cells}) = 0$ αφορούν κάθε μία από τις N_s κυψέλες, ενώ η επόμενη εξίσωση συνδέει τις επιμέρους τάσεις των κυψελών V_{cell-i} με την τάση της



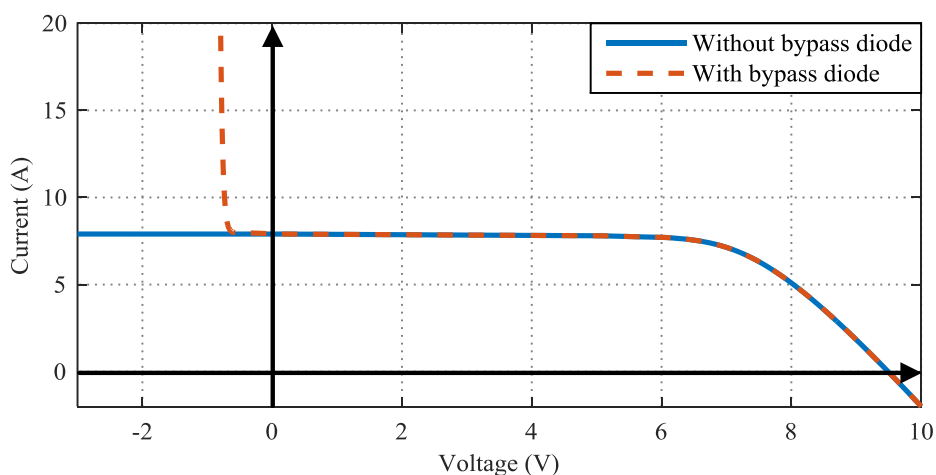
Σχ. 3.4. Δομικό διάγραμμα τυπικής ΦΒ στοιχειοσειράς με $N_s = 16$ κυψέλες.

στοιχειοσειράς V_{cs} σύμφωνα με τον νόμο τάσεων Kirchhoff. Η τελευταία εξίσωση περιγράφει τη λειτουργία της διόδου διαφυγής, όπου η διαφορά $I - I_{cells}$ αντιστοιχεί στο ρεύμα της διόδου I_{bp} και οι όροι I_{sbp} και a_{bp} συμβολίζουν το ανάστροφο ρεύμα κορεσμού και τον τροποποιημένο συντελεστή της διόδου. Συνήθως λαμβάνονται τυπικές τιμές για τις εν λόγω παραμέτρους ώστε να προκύπτει πτώση τάσης στη δίοδο διαφυγής της τάξης του 1 V. Στην παρούσα μελέτη θεωρείται ότι $I_{sbp} = 1.6$ nA και $a_{bp} = 50$ mV. Συνολικά το σύστημα εξισώσεων (3.5) συμβολίζεται με $f_{cs}(V_{cs}, I) = 0$.

Στο Σχ. 3.5, παρουσιάζεται η χαρακτηριστική μιας τυπικής στοιχειοσειράς λαμβάνοντας υπόψιν τη δίοδο διαφυγής (κόκκινη διακεκομμένη γραμμή) και χωρίς αυτήν (μπλε συνεχή γραμμή). Είναι εμφανές πως οι δύο καμπύλες ταυτίζονται πλήρως για θετικές τάσεις (πρώτο και τέταρτο τεταρτημόριο), όπου η δίοδος διαφυγής παραμένει ανάστροφα πολωμένη. Αντίθετα, στο δεύτερο τεταρτημόριο η άγουσα δίοδος κυριαρχεί στη χαρακτηριστική της πρώτης περίπτωσης, περιορίζοντας την αρνητική τάση στο επίπεδο της πτώσης τάσης της διόδου διαφυγής (τυπικά γύρω στο -1 V). Η συγκεκριμένη λειτουργικότητα είναι καθοριστική τόσο για την προστασία του κυκλώματος σε συνθήκες σκίασης, όσο και για την τροποποίηση της καμπύλης $P-V$ και την εμφάνιση πολλαπλών τοπικών μεγίστων, όπως εξηγείται στην επόμενη ενότητα.

3.1.2.B Αναλυτική διατύπωση

Στο πρώτο και τέταρτο τεταρτημόριο, η τάση της στοιχειοσειράς με ή χωρίς δίοδο διαφυγής είναι ίδια και συνίσταται απλώς στο άθροισμα των τάσεων των συνιστωσών κυψελών. Χρησιμοποιώντας την αναλυτική διατύπωση της (3.4) για τη ΦΒ κυψέλη, η τάση της στοιχειοσειράς V_{cs} προκύπτει ως:



Σχ. 3.5. Χαρακτηριστική καμπύλη $I-V$ τυπικής ΦΒ στοιχειοσειρά με και χωρίς δίοδο διαφυγής.

$$V_{cs} = \sum_{i=1}^{N_s} V_{cell-i} (I_{cells} = I) \quad , V_{cs} \geq 0 \quad (3.6)$$

Ουσιαστικά, στην (3.6) αξιοποιείται το γεγονός ότι η (3.4) είναι εκπεφρασμένη ως προς τάση με ανεξάρτητη μεταβλητή το κοινό ρεύμα I_{cells} , και εφαρμόζεται ο νόμος τάσεων Kirchhoff καταλήγοντας σε μία μόνο εξίσωση, έναντι των N_s εξισώσεων συμβατικά. Στην υπό μελέτη περίπτωση, το ρεύμα των κυψελών I_{cells} και το συνολικό ρεύμα της στοιχειοσειράς I ταυτίζονται, καθώς η δίοδος διαφυγής είναι ανάστροφα πολωμένη.

Αντίθετα, για αρνητική τάση η δίοδος άγει και κυριαρχεί στη χαρακτηριστική (Σχ. 3.5). Για να επιτευχθεί αναλυτική διατύπωση και σε αυτήν την περιοχή λειτουργίας, αξιοποιούνται οι ακόλουθες παρατηρήσεις:

- ✓ Η δίοδος διαφυγής περιορίζει την αρνητική τάση σε ένα ιδιαίτερα μικρό εύρος κοντά στην περιοχή βραχυκύκλωσης, όπου η κλίση είναι σχεδόν μηδενική. Συνεπώς, το ρεύμα που ρέει τις κυψέλες I_{cells} είναι σχεδόν σταθερό και ίσο με το ρεύμα βραχυκύκλωσης της στοιχειοσειράς $I_{SC,cs}$, όπως φαίνεται στο Σχ. 3.5. Επομένως, η χαρακτηριστική $I-V$ της στοιχειοσειράς πρακτικά ταυτίζεται με τη χαρακτηριστική μιας διόδου που διαρρέεται από ρεύμα $I_{bp} = I - I_{SC,cs}$ (ανεστραμμένη ως προς τάση λόγω συνδεσμολογίας).
- ✓ Το $I_{SC,cs}$ καθορίζεται από τη κυψέλη με το *μικρότερο* ρεύμα βραχυκύκλωσης, λόγω της σειριακής σύνδεσης, και μπορεί να θεωρηθεί ότι ισούται με το ελάχιστο ρεύμα βραχυκύκλωσης των επιμέρους κυψελών, σύμφωνα με την ακόλουθη (3.7). Όπως εξηγείται στην επόμενη ενότητα, η ανωτέρω προσέγγιση είναι συντηρητική. Δηλαδή, εν γένει το $I_{SC,cs}$ είναι *περίπου* όσο προσδιορίζει η (3.7) και ενίοτε ελαφρώς μεγαλύτερο (ή και ελάχιστα μικρότερο) αναλόγως το σενάριο σκίασης.

$$I_{SC,cs} = \min_i \left\{ \frac{R_{sh-i}}{R_{s-i} + R_{sh-i}} I_{ph-i} \right\} \quad (3.7)$$

Συνεπώς, η εξίσωση της ΦΒ στοιχειοσειράς με δίοδο διαφυγής για αρνητικές τάσεις προσεγγίζεται πολύ ικανοποιητικά από την ακόλουθη (3.8), η οποία προκύπτει επιλύοντας την εξίσωση της διόδου διαφυγής (τελευταία εξίσωση στο σύστημα (3.5)) ως προς τάση:

$$V_{cs} = -a_{bp} \ln \left[\frac{\max\{I - I_{SC,cs}, 0\}}{I_{sbp}} + 1 \right] \quad , V_{cs} < 0 \quad (3.8)$$

όπου για ρεύμα διόδου I_{bp} τίθεται η διαφορά του συνολικού ρεύματος I πλν του ρεύματος των κυψελών $I_{SC,cs}$, αφού περιοριστεί σε μη-αρνητικές τιμές ($\max\{I_{bp}, 0\} = \max\{I - I_{SC,cs}, 0\}$). Η τελευταία προσθήκη εισάγεται διότι σε λίγες περιπτώσεις η (3.7) εκτιμά το ρεύμα βραχυκύκλωσης ελάχιστα μεγαλύτερο από το πραγματικό, οδηγώντας σε ελαφρώς αρνητικό ρεύμα διόδου. Η εν λόγω ανακρίβεια δεν έχει ποσοτική σημασία, αλλά θα μπορούσε να δημιουργήσει αρνητικό όρισμα στον λογάριθμο της (3.8), αν δε λαμβάνονταν υπόψιν η συγκεκριμένη τροποποίηση.

Επομένως, έχοντας διατυπώσει τις (3.6) και (3.8) για θετική και αρνητική τάση λειτουργίας αντίστοιχα, οι δύο σχέσεις συνδυάζονται στην ακόλουθη κλαδική έκφραση:

$$V_{cs} = \begin{cases} \sum_{i=1}^{N_s} V_{cell-i}(I) & , \sum_{i=1}^{N_s} V_{cell-i}(I) \geq 0 \\ -a_{bp} \ln \left[\max \{ I - I_{SC,cs}, 0 \} / I_{sbp} + 1 \right], \text{ όπου:} & \\ I_{SC,cs} = \min_i \left\{ \frac{R_{sh-i}}{R_{s-i} + R_{sh-i}} I_{ph-i} \right\} & , \sum_{i=1}^{N_s} V_{cell-i}(I) < 0 \end{cases} \quad (3.9)$$

όπου ως συνθήκη επιλογή κλάδου χρησιμοποιείται η τάση της στοιχειοσειράς *χωρίς* τη δίοδο διαφυγής $\sum_{i=1}^{N_s} V_{cell-i}(I)$. Δηλαδή, υπολογίζεται πρώτα ο συγκεκριμένος όρος και αν προκύψει θετικός, τότε απλά αποτελεί την τιμή της ζητούμενης τάσης V_{cs} . Αντίθετα, αν προκύψει αρνητικός δε λαμβάνεται υπόψιν, καθώς η V_{cs} υπολογίζεται από τη δίοδο διαφυγής. Αξίζει να σημειωθεί ότι το εν λόγω άθροισμα είναι συνάρτηση της ανεξάρτητης μεταβλητής του συνολικού ρεύματος I , και δεν πρέπει να ξεχνάει η χρήση του ως κριτήριο επιλογής κλάδου.

3.1.3 ΦΒ πλαίσιο

Το ΦΒ πλαίσιο αποτελεί εμπορικά τη μικρότερη ΦΒ δομική μονάδα και συνίσταται σε πλήθος N_{cs} στοιχειοσειρές συνδεδεμένες σε σειρά. Στο ακόλουθο Σχ. 3.6 παρουσιάζεται η τοπολογία ενός τυπικού ΦΒ πλαισίου που αποτελείται από τρεις στοιχειοσειρές. Η τάση στα άκρα του πλαισίου συμβολίζεται με V_{mod} .

3.1.3.A Συμβατική διατύπωση

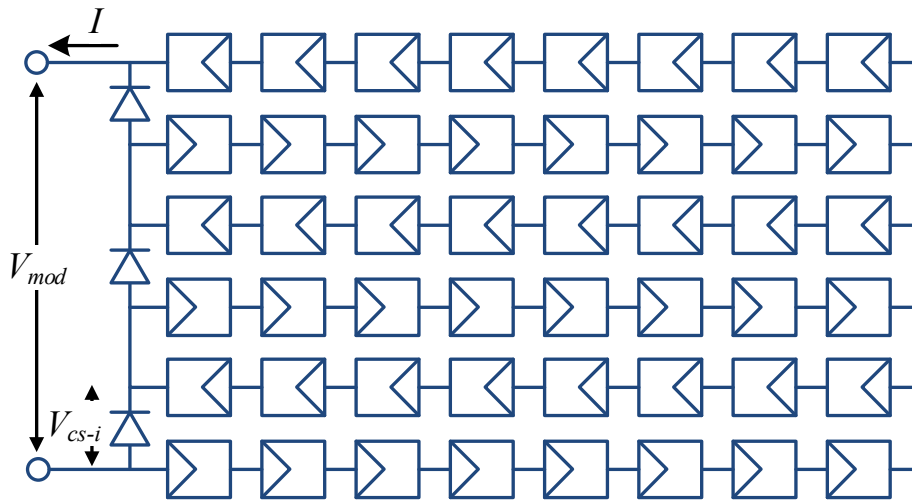
Αξιοποιώντας τη μοντελοποίηση της προηγούμενης παραγράφου, το σύστημα εξισώσεων που περιγράφει το ΦΒ πλαίσιο σε πεπλεγμένη μορφή είναι:

$$\begin{cases} f_{cs}(V_{cs-1}, I) = 0 \\ \vdots \\ f_{cs}(V_{cs-N_{cs}}, I) = 0 \Leftrightarrow f_{mod}(V_{mod}, I) = 0 \\ \sum_{i=1}^{N_{cs}} V_{cs-i} = V_{mod} \end{cases} \quad (3.10)$$

Κάθε μία από τις πρώτες N_{cs} εκφράσεις $f_{cs}(V_{cs-i}, I) = 0$ συμβολίζει ένα *σύστημα εξισώσεων* που αφορά τη στοιχειοσειρά i , σύμφωνα με την (3.5), ενώ η τελευταία σχέση εφαρμόζει τον νόμο τάσεων του Kirchhoff. Η διατύπωση (3.10) ενσωματώνει $N_{cs}(N_{cs}+2)+1$ εξισώσεις. Ενδεικτικά, για το παράδειγμα του Σχ. 3.6 προκύπτει ένα σύστημα από 61 μη γραμμικές εξισώσεις.

3.1.3.B Αναλυτική διατύπωση

Αξιοποιώντας την αναλυτική διατύπωση για την τάση της στοιχειοσειράς (3.9), η τάση του ΦΒ πλαισίου υπολογίζεται απλώς ως το αλγεβρικό άθροισμα των επιμέρους τάσεων:



Σχ. 3.6. Δομικό διάγραμμα τυπικού ΦΒ πλαισίου με $N_{cs} = 3$ στοιχειοσειρές, κάθε μία από τις οποίες δομείται σύμφωνα με το Σχ. 3.4.

$$V_{mod} = \sum_{i=1}^{N_{cs}} V_{cs-i}(I) \quad (3.11)$$

Η (3.11) αποτελείται από ένα άθροισμα πολλών όρων, αλλά παραμένει *μία μοναδική* εξίσωση που υπολογίζεται με ευθύ τρόπο χωρίς επαναληπτικό αλγόριθμο.

3.1.4 ΦΒ πλαισιοσειρά

Στα περισσότερα ΦΒ συστήματα, τα ΦΒ πλαίσια συνδέονται σε σειρά προς ανάπτυξη υψηλής τάσης της τάξης των εκατοντάδων V, σχηματίζοντας τη ΦΒ πλαισιοσειρά. Στο Σχ. 3.7, παρουσιάζεται μια τυπική πλαισιοσειρά που αποτελείται από N_m πλαίσια και μια δίοδο φραγής σε σειρά συνδεδεμένα. Η τάση στους ακροδέκτες της τελευταίας συμβολίζεται με V_{bk} , ενώ η συνολική τάση της πλαισιοσειράς με V_{str} .

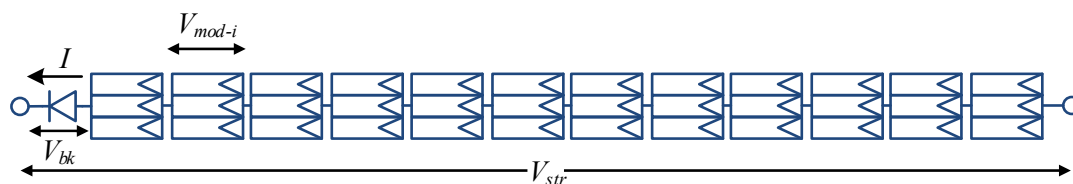
3.1.4.A Συμβατική διατύπωση

Ομοίως με τις προηγούμενες παραγράφους, το σύστημα εξισώσεων που σχηματίζεται για την περιγραφή της ΦΒ πλαισιοσειράς είναι:

$$\begin{cases} f_{mod}(V_{mod-1}, I) = 0 \\ \vdots \\ f_{mod}(V_{mod-N_m}, I) = 0 \end{cases} \Leftrightarrow f_{str}(V_{str}, I) = 0 \quad (3.12)$$

$$\sum_{i=1}^{N_m} V_{mod-i} + a_{bk} \ln\left(\frac{I}{I_{sbk}} + 1\right) = V_{str}$$

Οι N_m σε πλήθος σχέσεις $f_{mod}(V_{mod-i}, I) = 0$ αντιστοιχούν στα ΦΒ πλαίσια σύμφωνα με την (3.10), ενώ η έκφραση αθροίσματος στο νόμο τάσεων Kirchhoff λαμβάνει υπόψιν και την εκθετική εξίσωση για τη δίοδο φραγής. Στην τελευταία, χρησιμοποιούνται οι παράμετροι:



Σχ. 3.7. Δομικό διάγραμμα τυπικής ΦΒ πλαισιοσειράς με $N_m = 12$ πλαίσια, κάθε ένα από τα οποία αντιστοιχεί στο διάγραμμα του Σχ. 3.6.

ανάστροφο ρεύμα κορεσμού I_{sbk} και τροποποιημένος συντελεστής διόδου a_{bk} , που λαμβάνουν συνήθως τις ίδιες τιμές με τις παραμέτρους της διόδου διαφυγής. Αξίζει να σημειωθεί ότι το ανωτέρω σύστημα εξισώσεων έχει φτάσει αισίως τις $N_m[N_{cs}(N_s+2)+1]+1 = 733$ εξισώσεις.

3.1.4.B Αναλυτική διατύπωση

Αντίθετα, η ευθεία προσέγγιση αποφαίνεται μια μονάχα εξίσωση αναλυτικής μορφής:

$$V_{str} = \sum_{i=1}^{N_m} V_{mod-i}(I) + a_{bk} \ln\left(\frac{I}{I_{sbk}} + 1\right) \quad (3.13)$$

Ουσιαστικά, στην (3.13) προστίθενται οι επιμέρους τάσεις των πλαισίων από την (3.11) και την πτώση τάσης στη διόδο φραγής, ενώ ποιοτικά δε διαφέρει από τον τρόπο που υπολογίστηκε η (3.11). Στην περίπτωση που δεν υπάρχει διόδος φραγής στο κύκλωμα, απαλείφεται ο τελευταίος όρος της (3.13).

3.1.5 ΦΒ συστοιχία

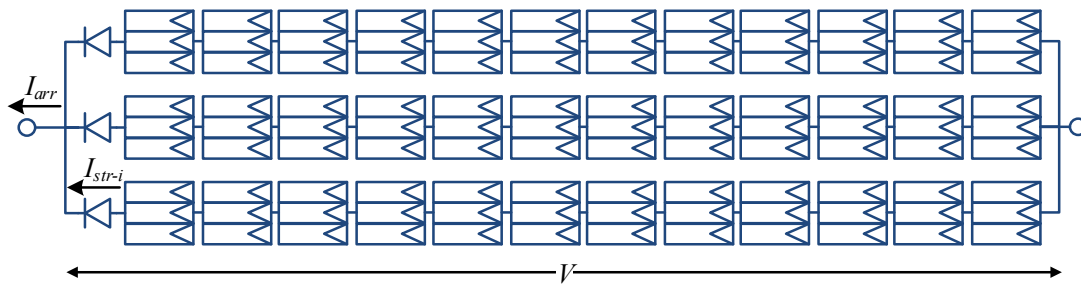
Στο ακόλουθο Σχ. 3.8, φαίνεται μία ΦΒ συστοιχία με $N_p = 3$ πλαισιοσειρές συνδεδεμένες παράλληλα. Κάθε μία από αυτές διαρρέεται από ρεύμα I_{str-i} συνθέτοντας το συνολικό ρεύμα της συστοιχίας I_{arr} , ενώ η κοινή τάση των επιμέρους κλάδων συμβολίζεται με V .

3.1.5.A Συμβατική διατύπωση

Το τελικό σύστημα εξισώσεων που μοντελοποιεί μέχρι και τη ΦΒ συστοιχία είναι:

$$\begin{cases} f_{str}(V, I_{str-1}) = 0 \\ \vdots \\ f_{str}(V, I_{str-N_p}) = 0 \Leftrightarrow f_{arr}(V, I_{arr}) = 0 \\ \sum_{i=1}^{N_p} I_{str-i} = I_{arr} \end{cases} \quad (3.14)$$

Όπως και προηγουμένως, οι εκφράσεις $f_{str}(V, I_{str-i}) = 0$ περιγράφει την πλαισιοσειρά i μέσω της (3.12), ενώ η τελευταία εξίσωση αντιστοιχεί στον νόμο ρευμάτων Kirchhoff για τις παράλληλες πλαισιοσειρές. Το πλήθος των εξισώσεων από τις οποίες αποτελείται το (3.14) είναι $N_p(N_m[N_{cs}(N_s+2)+1]+1)+1$, ήτοι 2200 εξισώσεις. Δύσκολα ένα τέτοιο σύστημα εξισώσεων είναι επιλύσιμο με αριθμητική μέθοδο χωρίς απλοποιήσεις.



Σχ. 3.8. Δομικό διάγραμμα τυπικής ΦΒ συστοιχίας με $N_p = 3$ παράλληλους κλάδους (πλαισιοσειρές).

3.1.5.B Αναλυτική προσέγγιση

Δυστυχώς, η πορεία μοντελοποίησης που ακολουθείται μέχρι και την πλαισιοσειρά δεν μπορεί να επεκταθεί εύκολα και στη ΦΒ συστοιχία. Αυτό συμβαίνει διότι όλες οι εκφράσεις των ΦΒ διατάξεων έως και την πλαισιοσειρά είναι εκπεφρασμένες ως προς τάση στη μορφή $V = f(I)$, γεγονός που διευκολύνει την περιγραφή των σειριακά συνδεδεμένων στοιχείων με άθροιση των επιμέρους τάσεων. Ειδικά για τη δίοδο διαφυγής στη στοιχειοσειρά, έγινε ειδική μελέτη και απλοποίηση στην παράγραφο 3.1.2, ώστε να ξεπεραστεί το εμπόδιο της παράλληλης σύνδεσής της. Παρόλα αυτά, σε επίπεδο συστοιχίας, συνδέονται παράλληλα πολλοί κλάδοι κάθε ένας από τους οποίους διαθέτει περίπλοκη δομή και περιγράφεται από μια εξίσωση (3.13) που είναι εκφρασμένης ως προς τάση.

Δηλαδή, για να επιτευχθεί αναλυτική διατύπωση σε επίπεδο συστοιχίας υπάρχει η ανάγκη για διατυπώσεις της μορφής $I_{str-i} = f(V)$ για τις πλαισιοσειρές, κάτι το οποίο δεν είναι δυνατό λόγω της πολυπλοκότητας της (3.13). Έτσι, υπάρχουν δύο επιλογές: α) δόμηση N_p+1 ανεξάρτητων εξισώσεων που λύνονται αριθμητικά, και β) υπέρθεση καμπυλών όταν ο στόχος είναι η παραγωγή όλης της χαρακτηριστικής $I-V$, διατηρώντας έτσι αναλυτική διατύπωση.

α) Αριθμητική επίλυση N_p+1 ανεξάρτητων εξισώσεων

Χρησιμοποιώντας την (3.13) για κάθε μία από τις πλαισιοσειρές και τον νόμο ρευμάτων Kirchhoff, προκύπτει το ακόλουθο σύστημα εξισώσεων (3.15). Δεδομένου ότι οι N_p πρώτες εξισώσεις είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους, *επιλύεται ξεχωριστά* η κάθε μια με αριθμητική μέθοδο για δεδομένη τάση V , και έπειτα αθροίζονται τα συνιστώσα ρεύματα. Έτσι, το σύστημα εξισώσεων (3.15) δεν έχει πολλές διαστάσεις επίλυσης αλλά μόνο μία, γεγονός που περιορίζει σημαντικά τον υπολογιστικό φόρτο και τις δυσκολίες σύγκλισης.

$$\begin{cases} V = V_{str}(I_{str-1}) \\ \vdots \\ V = V_{str}(I_{str-N_p}) \\ \sum_{i=1}^{N_p} I_{str-i} = I_{arr} \end{cases} \quad (3.15)$$

Για την επίλυση των εν λόγω εξισώσεων μπορεί να χρησιμοποιηθεί οποιαδήποτε αριθμητική μέθοδος, όπως η Gauss-Newton [155] ή παραλλαγές της. Στην πλατφόρμα *MATLAB*, η εντολή *fsolve* υλοποιεί τις διάφορες εκδοχές και επεκτάσεις του συγκεκριμένου αλγορίθμου.

Μολαταύτα, στην παρούσα μελέτη επιλέχθηκε η εντολή *fzero* που είναι αποδοτικότερη από την προηγούμενη, αλλά εφαρμόσιμη μόνο για την επίλυση μίας εξίσωσης με μία μεταβλητή.

β) Υπέρθωση καμπυλών

Όταν ο σκοπός της διερεύνησης είναι η σχεδίαση ολόκληρης της χαρακτηριστικής $I-V$ της συστοιχίας, και όχι η εύρεση μεμονωμένων σημείων, τότε είναι προτιμητέα η ακόλουθη προσέγγιση. Η διαδικασία περιλαμβάνει πρώτα τον προσδιορισμό των επιμέρους χαρακτηριστικών καμπυλών των ΦΒ πλαισιοσειρών με *ευθύ τρόπο* βάσει της (3.13), χρησιμοποιώντας ένα κατάλληλο διάνυσμα ρεύματος για κάθε περίπτωση. Στη συνέχεια, επιλέγεται ένα κοινό διάνυσμα τάσης για όλες τις πλαισιοσειρές και εφαρμόζεται γραμμική παρεμβολή ώστε να παραχθεί το αντίστοιχο διάνυσμα ρεύματος για κάθε μία. Ακολούθως, τα επιμέρους διανύσματα ρευμάτων προστίθεται προς παραγωγή του συνισταμένου ρεύματος της συστοιχίας.

Η ανωτέρω διαδικασία είναι ιδιαίτερα απλή στην εφαρμογή και δεν περιλαμβάνει επαναληπτικό αλγόριθμο σύγκλισης. Μάλιστα, διατηρεί τη γραμμική πολυπλοκότητα και κοστίζει υπολογιστικά σαν να είχε επιτευχθεί αναλυτική διατύπωση για τη ΦΒ συστοιχία. Όσον αφορά στην ακρίβεια, η γραμμική παρεμβολή που εφαρμόζεται δεν εισάγει αξιόλογο σφάλμα πρακτικής σημασίας, δεδομένου ότι η κάθε χαρακτηριστική έχει υπολογισθεί σε ικανοποιητικό αριθμό σημείων (τουλάχιστον κάποιες δεκάδες), όπως επιβεβαιώνεται στη συνέχεια.

3.1.6 Συγκριτική ανάλυση της συμβατικής και της αναλυτικής προσέγγισης

Σύμφωνα με την ανάλυση των προηγούμενων παραγράφων, υπάρχουν δύο εναλλακτικές προσεγγίσεις στη μοντελοποίηση ενός ΦΒ συστήματος σε συνθήκες ανομοιόμορφης λειτουργίας, και δη σκίασης: το *συμβατικό μοντέλο* που σχηματίζει ένα μεγάλο σύστημα εξισώσεων, και το προτεινόμενο *αναλυτικό μοντέλο* που επιλύεται με ευθύ τρόπο μέχρι και την πλαισιοσειρά.

Το *συμβατικό* μοντέλο συνίσταται ουσιαστικά στο σύστημα εξισώσεων (3.14) που ενσωματώνει αναδρομικά τις εξισώσεις που περιλαμβάνονται στα: (3.12), (3.10), (3.5) και (3.1). Περιγράφει με τη μέγιστη δυνατή ακρίβεια το ΦΒ σύστημα, καθώς δε δεσμεύεται από περιορισμούς πολυπλοκότητας, και έτσι τα αποτελέσματά του λαμβάνονται ως βάση σύγκρισης της ακρίβειας του *αναλυτικού* μοντέλου. Το μειονέκτημά του είναι το μέγεθος του συστήματος εξισώσεων, το οποίο γίνεται ιδιαίτερα μεγάλο για ανάλυση μέχρι το επίπεδο της κυψέλης, και καθίσταται συχνά δύσκολο επιλύσιμο. Απαιτεί εφαρμογή αριθμητικού αλγορίθμου, όπως ο Gauss-Newton ή παραλλαγών του. Για την εξαγωγή των ακόλουθων αποτελεσμάτων, χρησιμοποιήθηκε η εντολή *fsolve* της υπολογιστικής πλατφόρμας *MATLAB* με έξυπνη αρχικοποίηση και προ-τροφοδότηση του Ιακωβιανού πίνακα.

Το *αναλυτικό* μοντέλο είναι αποδοτικότερο και γρηγορότερο στην εφαρμογή, χωρίς δυσκολίες αρχικοποίησης και προβλήματα σύγκλισης ή ολοκλήρωσης. Το μεγαλύτερο όμως προτέρημα του είναι ο ντετερμινισμός και η σιγουριά στο χρόνο εκτέλεσης: δεν υπάρχει πιθανότητα να αποτύχει και το χρονικό διάστημα ολοκλήρωσης είναι σταθερό και από πριν γνωστό. Η τελευταία ιδιότητα την καθιστά ιδανική για ενσωμάτωση σε πλήθος εφαρμογών που σχετίζονται με λογισμικά μελέτης και εγκατάστασης ΦΒ σταθμών, αλλά και με ερευνητική

δραστηριότητα. Ο συμβιβασμός στην ακρίβεια είναι αμελητέος, όπως φαίνεται στα ακόλουθα διαγράμματα.

3.1.6.A Σύγκριση υπολογιστικού κόστους

Στον πίνακα Π. 3.1, καταγράφεται το υπολογιστικό κόστος των δύο προσεγγίσεων ως προς το πλήθος των εξισώσεων και το χρόνο εκτέλεσης. Το ΦΒ σύστημα που μελετάται έχει τη δομή του παραδείγματος της παρούσας ενότητας, αλλά κάθε στήλη αντιστοιχεί σε διαφορετική διάταξη (π.χ. η πρώτη στήλη αφορά μία μόνο κυψέλη, η δεύτερη στήλη μία στοιχειοσειρά με 16 κυψέλες κλπ.), ενώ η ανάλυση γίνεται πάντα θεωρώντας ως μικρότερη δομική μονάδα τη ΦΒ κυψέλη. Κάθε περίπτωση αντιστοιχεί στο μέσο όρο 10 σεναρίων τυχαίας κατανομής ακτινοβολίας και σκοπός του κάθε σεναρίου είναι η παραγωγή της χαρακτηριστικής $I-V$ σε 100 σημεία. Όλες οι προσομοιώσεις έγιναν σε H/Y με 3.4 GHz CPU και 4.0 GB RAM.

Εστιάζοντας στο πλήθος των εξισώσεων, αναμενόμενα το *συμβατικό* μοντέλο απαιτεί την αριθμητική επίλυση ενός μεγάλου πλήθους εξισώσεων που αυξάνεται ανάλογα με το μέγεθος του συστήματος (Π. 3.1). Αντίθετα, το *αναλυτικό* μοντέλο διατυπώνει μία μονάχα εξίσωση που επιλύεται αναλυτικά για όλες τις ΦΒ διατάξεις μέχρι και τη πλαισιοσειρά. Όμως, ακόμα και για το επίπεδο της ΦΒ συστοιχίας, εφαρμόζεται η υπέρθεση καμπυλών που περιγράφεται στην προηγούμενη παράγραφο (καθώς ζητείται ο προσδιορισμός ολόκληρης της χαρακτηριστικής), απαιτώντας έτσι την αναλυτική επίλυση 3 εξισώσεων – μία για κάθε πλαισιοσειρά.

Συνεπώς, ο χρόνος εκτέλεσης του *συμβατικού* μοντέλου για την παραγωγή μίας χαρακτηριστικής κυμαίνεται από 1/4 του δευτερολέπτου για την κυψέλη μέχρι και τα 3/4 του λεπτού για τη συστοιχία τριών πλαισιοσειρών. Αντίθετα, η *αναλυτική* προσέγγιση απαιτεί λίγα ms για όλες τις ΦΒ διατάξεις. Ο λόγος του χρόνου εκτέλεσης του *συμβατικού* μοντέλου ως προς του *αναλυτικού* για κάθε περίπτωση δίνεται στην τελευταία γραμμή του πίνακα Π. 3.1. Αναμενόμενα, όσο μεγαλώνει το μέγεθος της ΦΒ διάταξης η διαφορά γίνεται περισσότερο έντονη, ξεπερνώντας τις 200 φορές γρηγορότερη εκτέλεση για την υπό μελέτη ΦΒ συστοιχία.

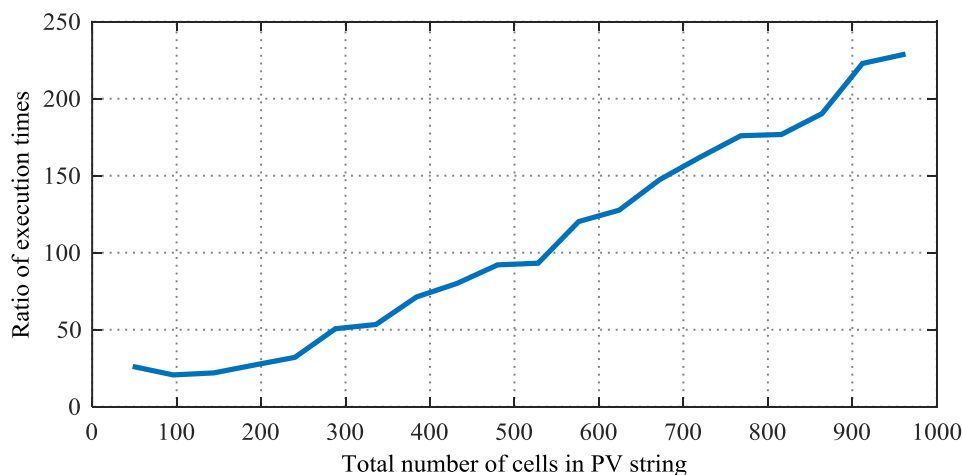
Περαιτέρω διερεύνηση του κέρδους στο υπολογιστικό κόστος γίνεται στο διάγραμμα του Σχ. 3.9, όπου ο λόγος των χρόνων εκτέλεσης των δύο μεθόδων σχεδιάζεται για μία ΦΒ πλαισιοσειρά, συναρτήσει του πλήθους των κυψελών από την οποία αποτελείται. Είναι εμφανές ότι όσο αυξάνει το μέγεθος του συστήματος, μεγαλώνει ο λόγος με ρυθμό πολυωνυμικό. Για μία πλαισιοσειρά μικρού μεγέθους με 500 – 600 κυψέλες, όπως αυτή που μελετάται στην παρούσα ενότητα, το κέρδος είναι περίπου 100 φορές, ενώ για μια μεγαλύτερη πλαισιοσειρά ξεπερνά το 200.

Παρόμοια ανάλυση γίνεται στο Σχ. 3.10 για τη ΦΒ συστοιχία, όπου αντιπαραβάλλεται ο

Π. 3.1. Σύγκριση υπολογιστικού κόστους *συμβατικού* και *αναλυτικού* μοντέλου για την κατασκευή της χαρακτηριστικής $I-V$ (100 σημείων) διαφόρων ΦΒ διατάξεων σε συνθήκες ανομοιόμορφης ακτινοβολίας.

| Κόστος | Μοντέλο | Κυψέλη | Στοιχειοσειρά | Πλαίσιο | Πλαισιοσειρά | Συστοιχία |
|------------------------|-----------|--------|---------------|------------|--------------|--------------|
| | | | 16 κυψέλες | 48 κυψέλες | 576 κυψέλες | 1728 κυψέλες |
| Εξισώσεις | Συμβατικό | 1 | 20 | 61 | 733 | 2 200 |
| | Αναλυτικό | 1 | 1 | 1 | 1 | 3 |
| Χρόνος (ms) | Συμβατικό | 276.6 | 465.7 | 637.1 | 6 647.5 | 43 286.0 |
| | Αναλυτικό | 7.9 | 10.1 | 13.4 | 63.9 | 184.6 |
| Λόγος χρόνων εκτέλεσης | | 35 | 46 | 47 | 104 | 235 |

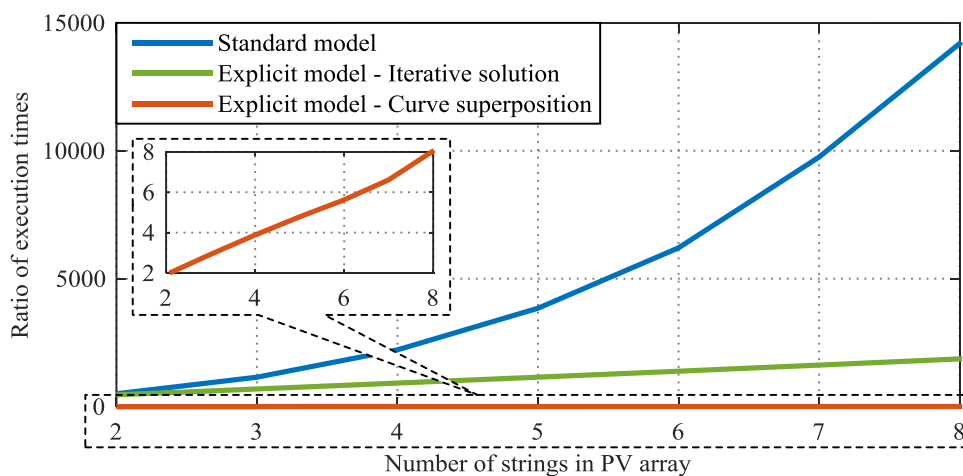
3.1 - Μοντελοποίηση σε Συνθήκες Σκίασης



Σχ. 3.9. Λόγος χρόνων εκτέλεσης του συμβατικού ως προς το αναλυτικό μοντέλο για μια ΦΒ πλαισιοσειρά, ως συνάρτηση του πλήθους των κυψελών.

χρόνος εκτέλεσης της συμβατικής μοντελοποίησης (μπλε χρώμα) και του αναλυτικού μοντέλου με τις δύο εναλλακτικές εφαρμογές: επαναληπτική επίλυση ανεξάρτητων εξισώσεων (πράσινο χρώμα) και υπέρθεση καμπυλών (κόκκινο χρώμα). Για κάθε σενάριο καταγράφεται ο χρόνος προσομοίωσης ολόκληρης της χαρακτηριστικής $I-V$ σε 100 σημεία, θεωρώντας πλαισιοσειρές των 20 πλαισίων (960 κυψέλες). Για ευκολία σύγκρισης, οι χρόνοι εκτέλεσης είναι κανονικοποιημένοι ως προς τον χρόνο εφαρμογής του αναλυτικού μοντέλου για μία πλαισιοσειρά.

Αναμενόμενα, το συμβατικό μοντέλο (μπλε γραμμή) παρουσιάζει έντονη αύξηση του υπολογιστικού φόρτου με το μέγεθος της συστοιχίας, μάλλον πολυωνυμικής φύσεως, δεδομένου ότι το σύστημα εξισώσεων που προκύπτει τείνει να γίνει απαγορευτικά μεγάλο και δυσεπίλυτο. Αντίθετα, το υπολογιστικό κόστος της υπέρθεσης καμπυλών (κόκκινη γραμμή) παρουσιάζει καθαρά αναλογική εξάρτηση με το πλήθος των πλαισιοσειρών (πλαίσιο εστίασης στο Σχ. 3.10). Ενδεικτικά, για 8 πλαισιοσειρές απαιτεί οχταπλάσιο χρόνο εκτέλεσης εν



Σχ. 3.10. Χρόνοι εκτέλεσης του συμβατικού και των δύο εναλλακτικών υλοποιήσεων του αναλυτικού μοντέλου για μία ΦΒ συστοιχία ως προς το πλήθος των πλαισιοσειρών. Οι χρόνοι εκτέλεσης είναι κανονικοποιημένοι προς τον χρόνο εκτέλεσης του αναλυτικού μοντέλου για μια πλαισιοσειρά.

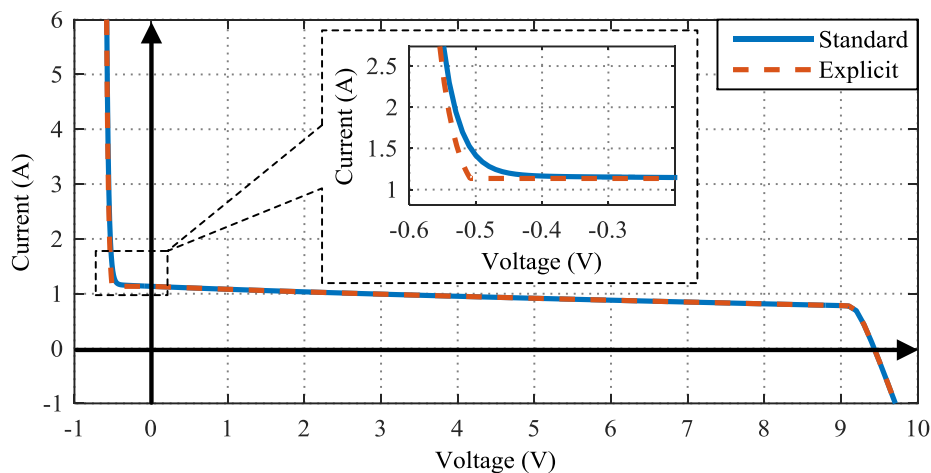
συγκρίσει με το χρόνο αναφοράς μίας πλαισιοσειράς, σε αντίθεση με το *συμβατικό* μοντέλο που παρουσιάζει 15000 φορές υψηλότερο υπολογιστικό κόστος. Η προσέγγιση της επίλυσης ανεξάρτητων εξισώσεων του *αναλυτικού* μοντέλου (πράσινη γραμμή) απαιτεί ενδιάμεσο υπολογιστικό κόστος, διατηρώντας όμως τη γραμμική εξάρτηση με το πλήθος των πλαισιοσειρών.

3.1.6.B Σύγκριση ακρίβειας

Για τη διατύπωση του *αναλυτικού* μοντέλου έχουν γίνει δύο κύριες παρεμβάσεις/απλοποιήσεις: στη θεμελιώδη εξίσωση της ΦΒ κυψέλης (3.1) ώστε να προκύψει η αναλυτική (3.4), και στην εξίσωση της ΦΒ στοιχειοσειράς ώστε να μοντελοποιηθεί η δίοδος διαφυγής (3.9). Η πρώτη παρέμβαση δεν εισάγει μετρήσιμο σφάλμα, καθώς οι εφαρμογή των δύο εξισώσεων (3.1) και (3.4) παράγει πανομοιότυπες καμπύλες με διαφοροποίηση πάντα μικρότερη του 0.1%.

Όσον αφορά τη ΦΒ στοιχειοσειρά, η απλοποίηση του *αναλυτικού* μοντέλου προξενεί ανεπαίσθητη ανακρίβεια στην περιοχή αγωγής της διόδου διαφυγής για έντονα ακραία σενάρια σκίασης. Ένα τέτοιο σενάριο απεικονίζεται στο Σχ. 3.11, όπου φαίνεται η χαρακτηριστική $I-V$ μιας ΦΒ στοιχειοσειράς που σκιάζεται μόνο κατά 1 κυψέλη από τις 16 σε ένταση 10% της κανονικής ακτινοβολίας. Είναι εμφανής η σύγκλιση των δύο μοντέλων σε όλο το εύρος της χαρακτηριστικής, εκτός από την περιοχή αγωγής της διόδου διαφυγής. Όπως φαίνεται στο πλαίσιο εστίασης του Σχ. 3.11, η *αναλυτική* προσέγγιση (κόκκινη διακεκομμένη γραμμή) αποκλίνει ελαφρώς από τη *συμβατική* μέθοδο (μπλε συνεχόμενη γραμμή) στην εν λόγω περιοχή λειτουργίας. Παρόλα αυτά, η εν λόγω διαφοροποίηση δεν έχει πρακτική σημασία, καθώς αφορά τοπικά ελάχιστα και όχι μέγιστα στην καμπύλη $P-V$.

Συνεπώς, βάσει της προαναφερθείσας ανάλυσης, το προτεινόμενο *αναλυτικό* μοντέλο πλεονεκτεί σημαντικά σε σύγκριση με τη *συμβατική* δόμηση συστήματος εξισώσεων ως προς την υπολογιστική πολυπλοκότητα και τον ντετερμινισμό εκτέλεσης, ενώ ο συμβιβασμός στη ακρίβεια είναι αμελητέος. Στη συνέχεια, το προτεινόμενο μοντέλο αξιοποιείται σε όλες τις προσομοιώσεις των επόμενων ενοτήτων του παρόντος κεφαλαίου για τη μελέτη της σκίασης.



Σχ. 3.11. Ενδεικτική ακραία περίπτωση σκίασης ΦΒ στοιχειοσειράς, από την οποία σκιάζεται 1 μόνο κυψέλη από τις συνολικά 16 κυψέλες, σε ένταση 10% της ακτινοβολίας.

3.2 Γραφική Ανάλυση και Χαρακτηρισμός της Σκίασης

Στην παρούσα ενότητα μελετώνται γραφικά οι επιπτώσεις του φαινομένου της μερικής σκίασης σε όλα τα επίπεδα μιας ΦΒ διάταξης, από την κυψέλη μέχρι τη συστοιχία. Βασικό αντικείμενο της ανάλυσης είναι η μορφή και τροποποίηση των χαρακτηριστικών καμπύλων $I-V$ και $P-V$ σε συνθήκες σκίασης, και κυρίως ο χαρακτηρισμός των πολλαπλών τοπικών μεγίστων ισχύος (local MPPs) που εμφανίζονται. Για την καλύτερη κατανόηση του φαινομένου, στις πρώτες παραγράφους εξετάζεται η απλούστερη και συνηθέστερη περίπτωση των δύο επιπέδων ακτινοβολίας (σκίαση ενός επιπέδου), όπου παρουσιάζονται δύο μόνο MPPs στη χαρακτηριστική $P-V$. Ακολούθως, οι παρατηρήσεις και η ονοματολογία που εισάγεται γενικεύεται στην περίπτωση των πολλαπλών επιπέδων ακτινοβολίας. Το υλικό της παρούσας ενότητας δημοσιεύτηκε στις [67], [71].

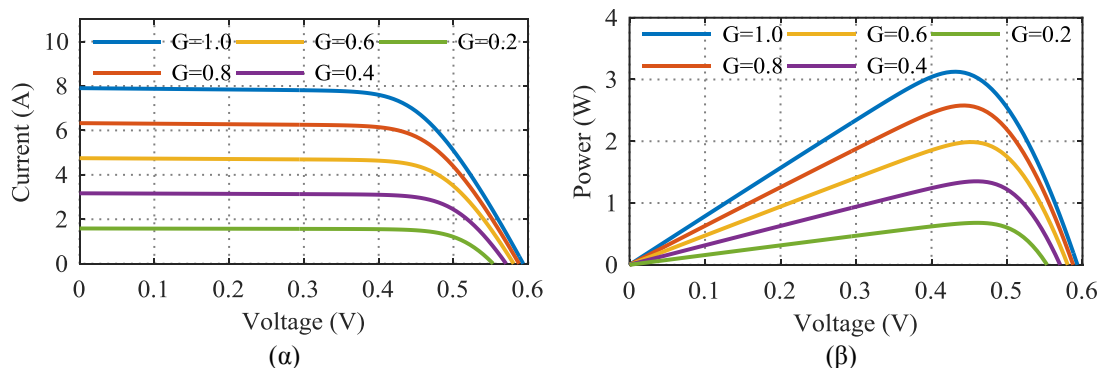
3.2.1 ΦΒ κυψέλη

Ως μικρότερη δομική μονάδα του ΦΒ συστήματος, η κυψέλη θεωρείται είτε ασκίαστη είτε πλήρως σκιασμένη, δηλαδή λειτουργεί πάντα σε ομοίμορφη ακτινοβολία. Θεωρητικά, είναι δυνατόν μία κυψέλη να υπόκειται σε δύο διαφορετικά επίπεδα ακτινοβολίας. Τότε, η λειτουργία της είναι ισοδύναμη με δύο μικρότερες κυψέλες ανάλογης επιφάνειας συνδεδεμένες *παράλληλα* [209]. Για την κρυσταλλική τεχνολογία, όπου η επιφάνεια μιας ΦΒ κυψέλης σπάνια ξεπερνά τις 6 ίντσες, δεν έχει πρακτική αξία η ανάλυση σε τέτοιο βάθος. Ακόμα και για τις κυψέλες άμορφου πυριτίου που έχουν μεγάλο μήκος, κάποιες μελέτες θεωρούν ενιαία ακτινοβολία στην κυψέλη, ίση με τον σταθμισμένο μέσο όρο των διαφορετικών εντάσεων ακτινοβολίας [210].

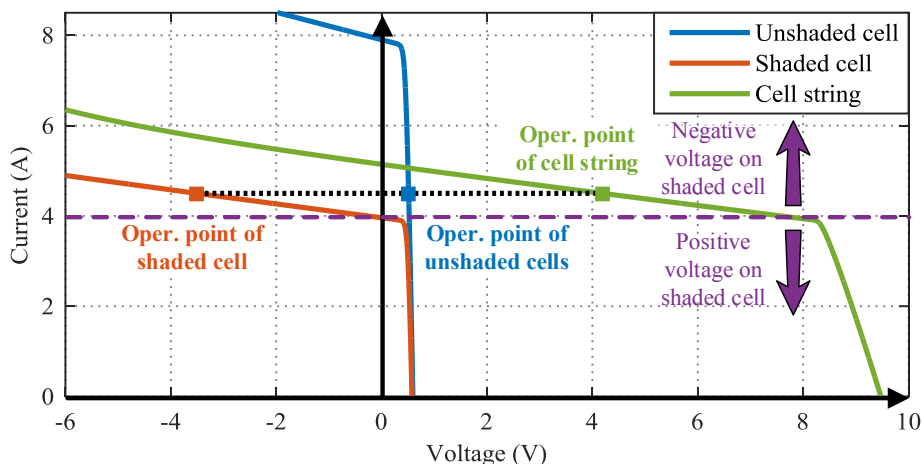
Η χαρακτηριστική $I-V$ και $P-V$ μίας τυπικής κυψέλης απεικονίζεται στο Σχ. 3.12 για διάφορες τιμές ενεργού ακτινοβολίας. Όπως εξηγείται στο Κεφάλαιο 2, το ρεύμα εξαρτάται έντονα και αναλογικά με την ακτινοβολία λόγω του φωτορεύματος I_{ph} , ενώ η τάση ασθενέστερα και λογαριθμικά (Σχ. 3.12(α)) [29], [175]. Από την καμπύλη ισχύος του Σχ. 3.12(β) συνεπάγεται ότι η μορφή της δεν τροποποιείται ποιοτικά, παρά μόνο ποσοτικά: διατηρεί την ίδια μονοτονία και καμπυλότητα παρουσιάζοντας ένα μοναδικό μέγιστο ισχύος MPP.

3.2.2 ΦΒ στοιχειοσειρά

Όταν η σκίαση καλύπτει όλη την επιφάνεια της ΦΒ στοιχειοσειράς, λειτουργεί σε



Σχ. 3.12. Χαρακτηριστικές (α) $I-V$ και (β) $P-V$ τυπικής ΦΒ κυψέλης για διάφορες τιμές ακτινοβολίας.

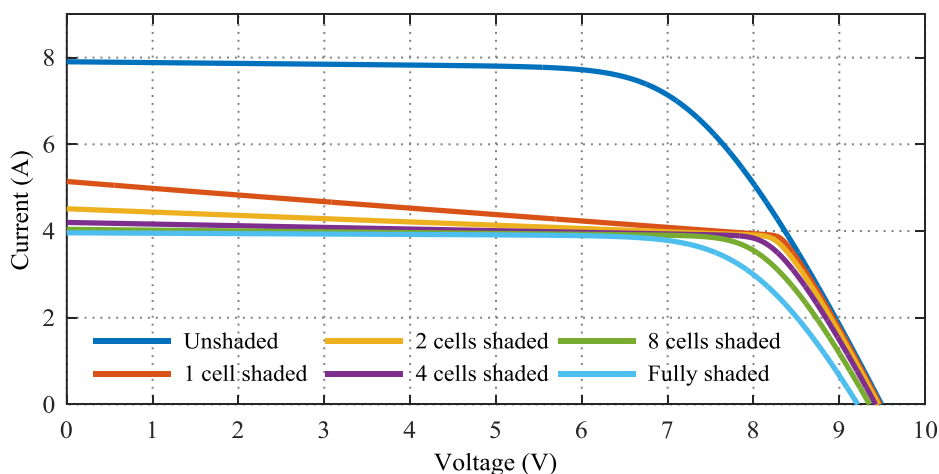


Σχ. 3.13. Χαρακτηριστική $I-V$ μερικώς σκιασμένης ΦΒ στοιχειοσειράς χωρίς δίοδο διαφυγής, όπου 1 κυψέλη από τις συνολικά 8 είναι σκιασμένη σε ένταση 50%.

ομοιόμορφη ακτινοβολία της οποίας η ένταση είναι απλώς μειωμένη. Τότε, δεν υπάρχει κάποια ασυμφωνία μεταξύ των συνιστωσών κυψελών και οι χαρακτηριστικές καμπύλες έχουν ποιοτικά την ίδια μορφή με αυτές της κυψέλης (Σχ. 3.12). Όταν όμως η κατανομή της ακτινοβολίας στη στοιχειοσειρά διαφέρει και κάθε κυψέλη δέχεται φωτεινή ροή διαφορετικής έντασης, τότε η στοιχειοσειρά λειτουργεί σε *συνθήκες μερικής σκίασης* και η ηλεκτρική της απόκριση διαφοροποιείται σημαντικά. Αυτό συμβαίνει διότι κυψέλες με πλέον διαφορετικές δυνατότητες διαρρέονται από το κοινό ρεύμα I_{cells} (Σχ. 3.4), οδηγώντας τις περισσότερο σκιασμένες εξ' αυτών σε αρνητική τάση.

Για καλύτερη κατανόηση του φαινομένου, παρατίθεται το Σχ. 3.13 στο οποίο απεικονίζεται η χαρακτηριστική $I-V$ μίας ΦΒ στοιχειοσειράς χωρίς δίοδο διαφυγής με 8 κυψέλες (πράσινη γραμμή), από τις οποίες η 1 εξ' αυτών δέχεται το 50% της κανονικής ακτινοβολίας. Αναμενόμενα, η χαρακτηριστική της σκιασμένης κυψέλης (κόκκινη γραμμή) είναι ελαττωμένη κατά το ήμισυ ως προς το ρεύμα, σε σχέση με την καμπύλη των υπόλοιπων 7 ασκίαστων κυψελών (μπλε γραμμή). Δεδομένου ότι όλες οι κυψέλες διαρρέονται από το ίδιο ρεύμα, η χαρακτηριστική της στοιχειοσειράς προσαρμόζεται στις μειωμένες δυνατότητες της σκιασμένης κυψέλης, διαμορφώνοντας ρεύμα έντονα μειωμένο. Όπως φαίνεται στο Σχ. 3.13, η καμπύλη $I-V$ της στοιχειοσειράς (πράσινη γραμμή) έχει πολύ μικρότερο ύψος εν συγκρίσει με τη χαρακτηριστική των ασκίαστων κυψελών (μπλε γραμμή), που σημαίνει ότι παρά την ελάχιστη έκταση σκίασης, η μείωση στη συνολική απόδοση είναι δυσανάλογα σημαντική.

Επιπλέον, στη συγκεκριμένη κατάσταση η σκιασμένη κυψέλη πιθανόν να απορροφά ισχύ από το κύκλωμα, αντί να προσδίδει σε αυτό, οδηγώντας στην εμφάνιση του φαινομένου της θερμικής κηλίδας (hot spot effect). Συγκεκριμένα, αν το σημείο λειτουργίας της στοιχειοσειράς αντιστοιχεί σε ρεύμα μεγαλύτερης τιμής από το ρεύμα βραχυκύκλωσης της σκιασμένης κυψέλης (π.χ. πράσινος δείκτης στο Σχ. 3.13), τότε το σημείο στο οποίο λειτουργεί η σκιασμένη κυψέλη (κόκκινος δείκτης) έχει *αρνητική τάση*, σε αντίθεση με το σημείο των ασκίαστων κυψελών (μπλε δείκτης) που παραμένει σε *θετική τάση*. Δηλαδή, όταν το κοινό διαρρέον ρεύμα προκύπτει μεγαλύτερο των δυνατοτήτων της σκιασμένης κυψέλης (πάνω από τη μωβ διακεκομμένη γραμμή στο Σχ. 3.13), το σκιασμένο τμήμα της στοιχειοσειράς συμπεριφέρεται ως φορτίο. Για τον περιορισμό εμφάνισης της κατάστασης αυτής, εισάγεται μία δίοδος



Σχ. 3.14. Χαρακτηριστική $I-V$ μερικώς σκιασμένης ΦΒ στοιχειοσειράς 16 κυψελών (δομή του Σχ. 3.4) για σκίαση διαφόρων εκτάσεων, από μηδενική έως πλήρη (50% ένταση σκίασης).

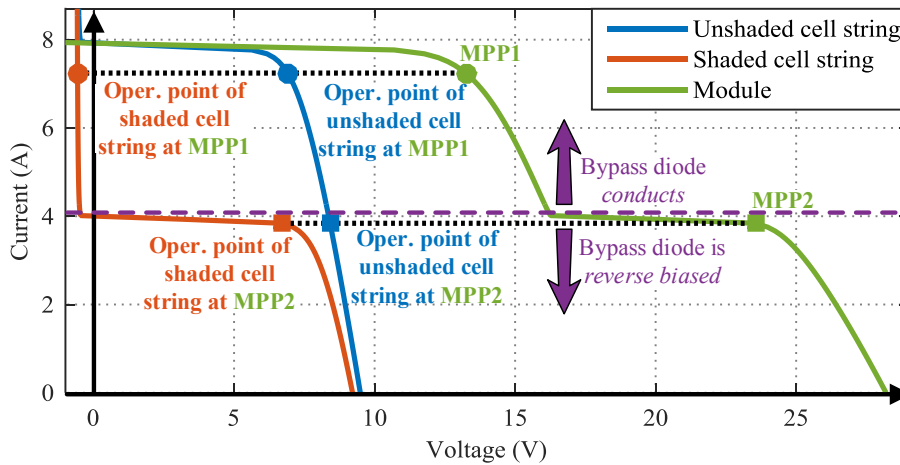
διαφυγής συνήθως ανά 10-20 κυψέλες, ώστε το πλεονάζον ρεύμα να ρέει μέσω της διόδου και οι σκιασμένες κυψέλες να εμφανίζουν αρνητική τάση εντός αποδεκτών ορίων (πτώση τάσης στη δίοδο διαφυγής).

Στο Σχ. 3.14, απεικονίζεται η καμπύλη $I-V$ μιας τυπικής στοιχειοσειράς που αποτελείται από 16 κυψέλες, για διάφορες εκτάσεις σκίασης. Είναι εμφανές ότι ήδη από το σενάριο σκίασης μόνο 1/16 κυψέλες (κόκκινη γραμμή), η χαρακτηριστική έχει συγκλίνει σημαντικά προς την καμπύλη που αντιστοιχεί σε ολική σκίαση (γαλανή γραμμή). Δηλαδή, το συμπέρασμα που εξάγεται από αυτήν την ανάλυση είναι ότι αν η ΦΒ στοιχειοσειρά σκιάζεται τουλάχιστον στο 10% της έκτασης της, λειτουργεί σχεδόν σαν να ήταν ολικά σκιασμένη. Αυτή η παρατήρηση είναι γνωστή στη βιβλιογραφία [29], [33], και χρησιμοποιείται συχνά για την απλοποίηση του φαινομένου.

3.2.3 ΦΒ πλαίσιο

Δεδομένου ότι το ΦΒ πλαίσιο συνίσταται σε στοιχειοσειρές που εμπεριέχουν δίοδο διαφυγής, η επίδραση της μερικής σκίασης στη χαρακτηριστική καμπύλη του είναι καθοριστική για τη μορφή της. Στο Σχ. 3.15, παρουσιάζεται ένα ενδεικτικό σενάριο σκίασης ενός ΦΒ πλαισίου 3 στοιχειοσειρών, από τις οποίες η 1 στοιχειοσειρά σκιάζεται πλήρως σε ένταση 50%. Η χαρακτηριστική $I-V$ της σκιασμένης στοιχειοσειράς (κόκκινη γραμμή) στο πρώτο τεταρτημόριο αποδίδει το μισό ρεύμα εν συγκρίσει με τις ασκίαστες στοιχειοσειρές (μπλε γραμμή), ενώ στο δεύτερο τεταρτημόριο κυριαρχεί η δίοδος διαφυγής στην καμπύλη. Ως αποτέλεσμα, η συνισταμένη χαρακτηριστική $I-V$ του πλαισίου τροποποιείται ποιοτικώς και εμφανίζει «δύο σκαλοπάτια» (curve stairs) (πράσινη γραμμή). Ουσιαστικά, η λειτουργία του ΦΒ πλαισίου διαχωρίζεται σε δύο διακριτές καταστάσεις [49], [67]:

- ✓ Όταν το σημείο λειτουργίας του πλαισίου αντιστοιχεί σε ρεύμα με μεγαλύτερη τιμή από το ρεύμα βραχυκύκλωσης της σκιασμένης στοιχειοσειράς, τότε στην τελευταία άγει η δίοδος διαφυγής (περιοχή πάνω από τη μωβ διακεκομμένη γραμμή στο Σχ. 3.15). Στη συγκεκριμένη περιοχή, εμφανίζεται ένα τοπικό μέγιστο που συμβολίζεται με MPP1 (πράσινος κυκλικός δείκτης). Όταν το πλαίσιο λειτουργεί στο MPP1, οι

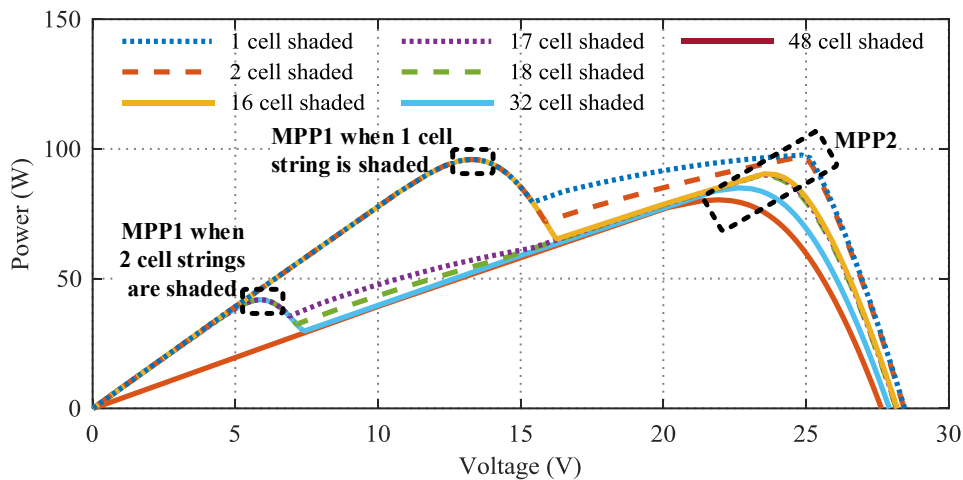


Σχ. 3.15. Χαρακτηριστική $I-V$ μερικώς σκιασμένου ΦΒ πλαισίου 3 στοιχειοσειρών (δομή του Σχ. 3.6), όπου 1 στοιχειοσειρά είναι σκιασμένη σε ένταση 50%.

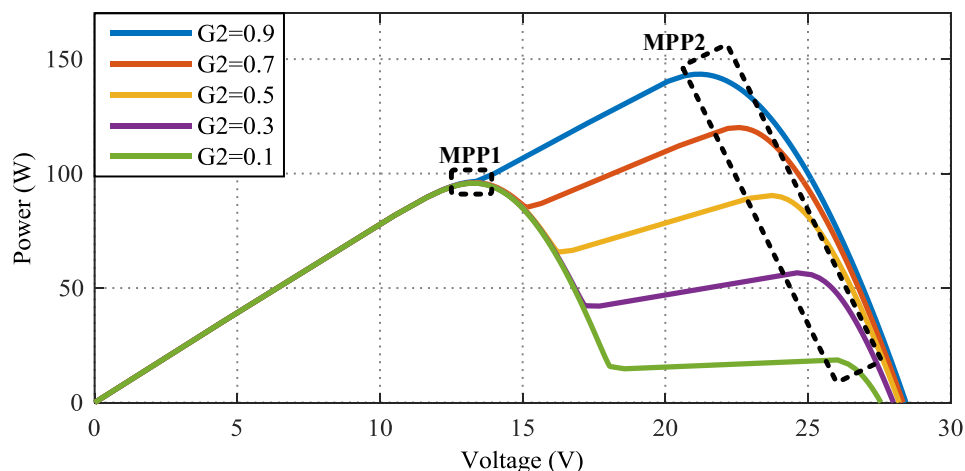
ασκίαστες στοιχειοσειρές λειτουργούν κοντά στο κανονικό τους μέγιστο (μπλε κυκλικός δείκτης), ενώ η σκιασμένη στοιχειοσειρά ουσιαστικά παρακάμπτεται λόγω της διόδου διαφυγής.

- ✓ Αν το πλαίσιο αποδίδει χαμηλό ρεύμα εντός των δυνατοτήτων της σκιασμένης στοιχειοσειράς, η διάδος διαφυγής παραμένει ανάστροφα πολωμένη και συμπεριφέρεται ως ανοιχτοκύκλωμα (περιοχή κάτω από τη μωβ διακεκομμένη γραμμή στο Σχ. 3.15). Το τοπικό μέγιστο που εμφανίζεται στην καμπύλη συμβολίζεται με MPP2 (πράσινος τετραγωνικός δείκτης), όπου τότε όλες οι στοιχειοσειρές προσφέρουν ισχύ στο κύκλωμα πολύ κοντά στις μέγιστες δυνατότητές των σκιασμένων (μπλε και κόκκινος τετραγωνικός δείκτης).

Ορίζονται έτσι δύο ομάδες στοιχειοσειρών εντός του πλαισίου: η ασκίαστη ομάδα 1 (*group 1*) που δέχεται την πλήρη ακτινοβολία $G_1 = 1.0$ και αποτελείται από $N_1 = 2$ στοιχειοσειρές, και η σκιασμένη ομάδα 2 (*group 2*) που περιλαμβάνει $N_2 = 1$ στοιχειοσειρά η οποία υπόκειται σε μειωμένη ακτινοβολία $G_2 = 0.5$. Στο MPP1, ισχύ προσφέρει μόνο η ομάδα 1 καθώς η ομάδα 2



Σχ. 3.16. Χαρακτηριστική $P-V$ μερικώς σκιασμένου ΦΒ πλαισίου 3 στοιχειοσειρών (δομή του Σχ. 3.6), για σκίαση διαφορετικού πλήθους κυψελών ($G_1 = 1.0$, $G_2 = 0.5$).



Σχ. 3.17. Χαρακτηριστική P - V μερικώς σκιασμένου ΦΒ πλαισίου 3 στοιχειοσειρών (δομή του Σχ. 3.6), για σκίαση 1 στοιχειοσειράς σε διαφορετικές εντάσεις ($G_1 = 1.0$, $G_2 =$ μεταβλητό).

παρακάμπτεται από την άγουσα δίοδο διαφυγής της, ενώ αντίθετα στο MPP2 όλες οι ομάδες συνεισφέρουν ισχύ στο φορτίο και οι δίοδοι παραμένουν ανάστροφα πολωμένες.

Για περαιτέρω διερεύνηση του φαινομένου, παρατίθεται το Σχ. 3.16, στο οποίο απεικονίζεται η χαρακτηριστική P - V ενός πλαισίου με 3 στοιχειοσειρές των 16 κυψελών κάθε μία (48 κυψέλες στο σύνολο), το οποίο σκιάζεται σε διάφορες εκτάσεις. Όταν σκιάζεται 1 μόνο στοιχειοσειρά ($N_2 = 1$), είτε μερικώς (μπλε και κόκκινη διακεκομμένη γραμμή) είτε ολικώς (κίτρινη συνεχής γραμμή), οι χαρακτηριστικές καμπύλες δε διαφέρουν σημαντικά μεταξύ τους (ειδικά στην περιοχή του MPP1), καθώς η μερική σκίαση σε μία στοιχειοσειρά ισοδυναμεί με ολική σκίαση. Για σκίαση 17-32 κυψελών (μερική-ολική σκίαση και της 2ης στοιχειοσειράς – $N_2 = 2$, μωβ-πράσινη-γαλανή γραμμή), το MPP1 μετακινείται σε χαμηλότερες τάσεις δεδομένου ότι μόνο 1 στοιχειοσειρά (ασκίαστη – $N_1 = 1$) συνεισφέρει στην ηλεκτρική παραγωγή. Ενώ, όταν και οι 3 στοιχειοσειρές δέχονται τη μειωμένη ακτινοβολία G_2 , το MPP1 δεν εμφανίζεται καθόλου στη χαρακτηριστική P - V του πλαισίου. Σε όλες τις ανωτέρω περιπτώσεις, το MPP2 επηρεάζεται λίγο, καθώς τότε όλες οι ομάδες λειτουργούν στις περιορισμένες δυνατότητες της σκιασμένης ομάδας και δεν άγει καμία δίοδος διαφυγής.

Στο Σχ. 3.17, παρουσιάζεται πώς μεταβάλλεται η καμπύλη P - V του ίδιου πλαισίου όταν η έκταση διατηρείται σταθερή σε μία στοιχειοσειρά ($N_2 = 1$), αλλά μεταβάλλεται η ένταση της ακτινοβολίας στην ομάδα 2 G_2 . Το MPP1 παραμένει αμετάβλητο σε όλα τα σενάρια καθώς η αλλαγή της G_2 επιδρά μόνο στην ομάδα 2 η οποία τότε παρακάμπτεται, ενώ το MPP2 μοιάζει να επηρεάζεται γραμμικά ως προς την ισχύ και την τάση.

Συνεπώς, σε ένα ΦΒ πλαίσιο που υπόκειται σε δύο επίπεδα ακτινοβολίας, εμφανίζονται μέχρι και 2 MPPs, των οποίων η ισχύς και τάση εξαρτώνται από την ένταση και έκταση της σκίασης. Είναι σημαντικό να είναι δυνατή η εκτίμηση αυτών των χαρακτηριστικών για κάθε MPP, ώστε να επιλεγεί το ολικό μέγιστο εξ' αυτών. Στην επόμενη ενότητα προτείνονται απλές μαθηματικές σχέσεις για την εκτίμηση όλων των MPPs.

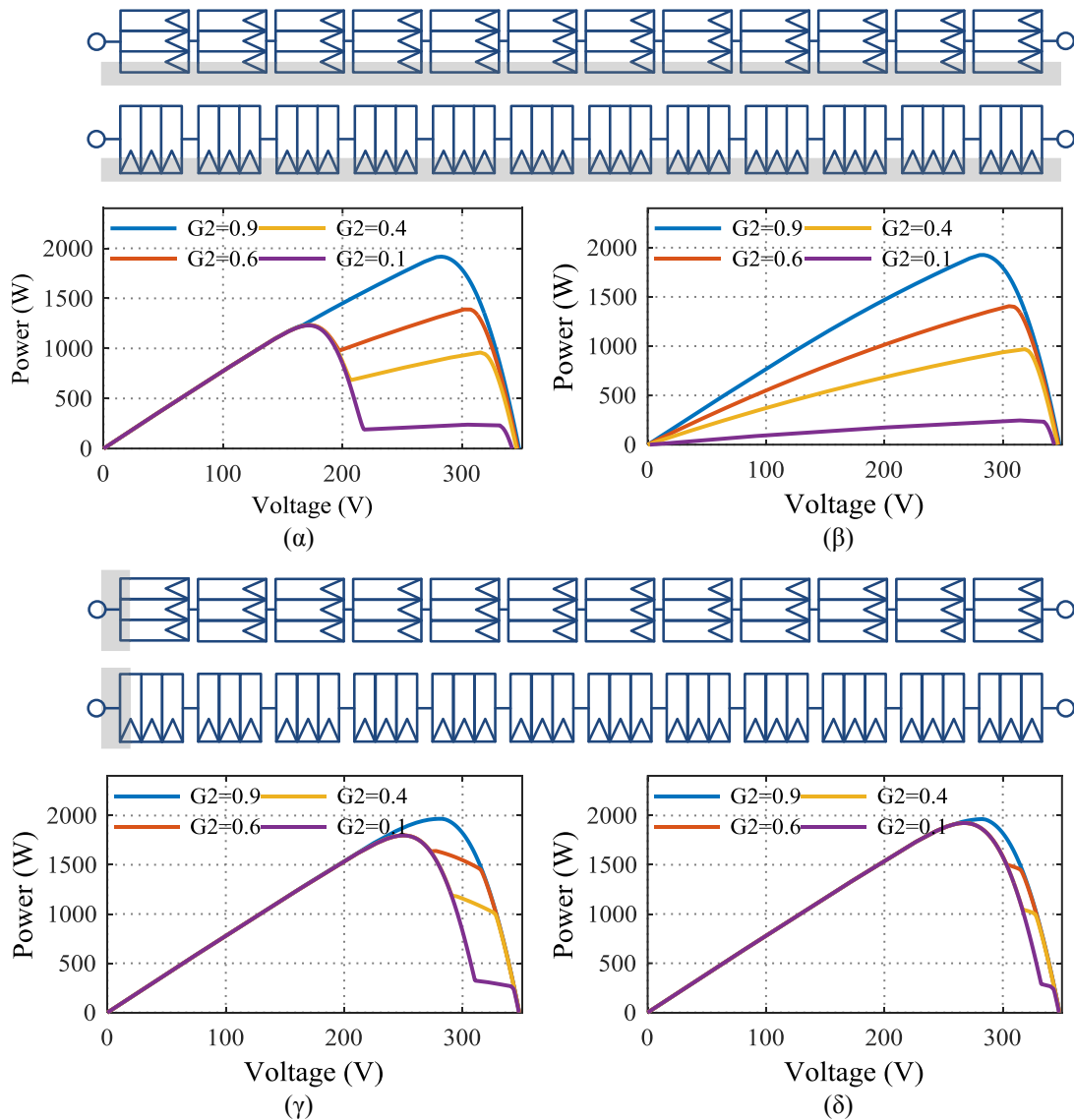
3.2.4 ΦΒ πλαισιοσειρά

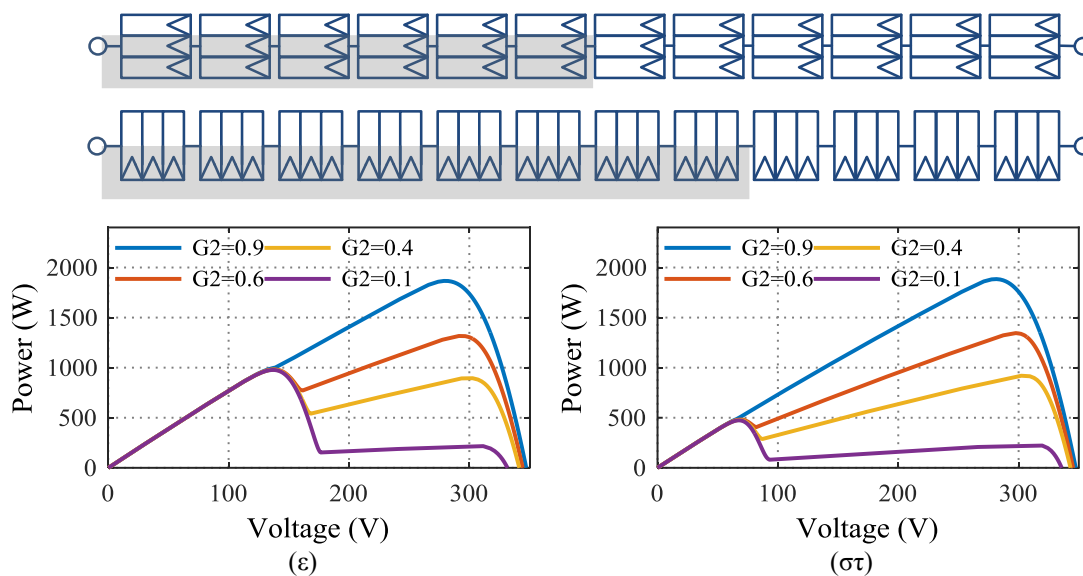
Από πλευράς μοντελοποίησης, η ΦΒ πλαισιοσειρά ισοδυναμεί με ένα υπερμέγεθες ΦΒ

πλαίσιο που αποτελείται από πολλές στοιχειοσειρές συνδεδεμένες σε σειρά. Στη συνέχεια, μελετάται η ηλεκτρική της απόκριση σε συνθήκες σκίασης πρώτα δύο επίπεδων ακτινοβολίας και ακολούθως στη γενική περίπτωση πολλαπλών επιπέδων.

3.2.4.A Σκίαση με 2 επίπεδα ακτινοβολίας

Στο ακόλουθο Σχ. 3.18, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από αντιπροσωπευτικά – ρεαλιστικά σενάρια σκίασης για μία πλαισιοσειρά 12 πλαισίων των 3 στοιχειοσειρών (36 στοιχειοσειρές συνολικά), σύμφωνα με το Σχ. 3.7, σε οριζόντια και κατακόρυφη διάταξη. Για κάθε σενάριο σχεδιάζεται η χαρακτηριστική καμπύλη $P-V$ θεωρώντας σκίαση ενός επιπέδου (δύο επίπεδα ακτινοβολίας) και διάφορες εντάσεις σκίασης ($G_2 = 0.9, 0.6, 0.4, 0.1$). Περισσότερο εξαντλητικά σενάρια σκίασης μελετώνται στην [1].





Σχ. 3.18. Χαρακτηριστικές $P-V$ μερικώς σκιασμένης πλαισιοσειράς σε οριζόντια και κατακόρυφη διάταξη για τυπικά σενάρια σκίασης: σκίαση 1 γραμμής κυψελών σε (α) οριζόντια και (β) κατακόρυφη διάταξη, σκίαση 1 στήλης κυψελών σε (γ) οριζόντια και (δ) κατακόρυφη διάταξη, και σκίαση επιφάνειας 4×48 κυψελών σε (ε) οριζόντια και (στ) κατακόρυφη διάταξη.

Μια πρώτη παρατήρηση είναι ότι σε όλες τις καμπύλες εμφανίζονται ένα ή δύο MPPs, όπως και στο το ΦΒ πλαίσιο. Αυτό είναι αναμενόμενο, καθώς η πλαισιοσειρά συνίσταται ουσιαστικά στις δύο ομάδες ασκίαστων και σκιασμένων (μερικώς ή ολικώς) στοιχειοσειρών, που συνθέτουν ηλεκτρική απόκριση αντίστοιχη με του ΦΒ πλαισίου, πλην σε μεγαλύτερη κλίμακα. Δηλαδή, δεν έχει σημασία η θέση των στοιχειοσειρών τοπολογικά στην πλαισιοσειρά, ούτε ο αριθμός των σκιασμένων κυψελών εντός μιας στοιχειοσειράς.

Στο Σχ. 3.18(α)-(β), απεικονίζεται το συνηθέστερο ίσως μοτίβο σκίασης που συναντάται στην πράξη: σκίαση κατά γραμμές, και συγκεκριμένα η ακραία περίπτωση σκίασης μίας μόνο γραμμής κυψελών. Η συγκεκριμένη κατανομή ακτινοβολίας προκύπτει συχνά από αλληλοσκίαση των πλαισιοσειρών όταν έχουν εγκατασταθεί σε κοντινή απόσταση μέσα στο πάρκο. Στην οριζόντια διάταξη, σκιάζεται μία στοιχειοσειρά κατά το ήμισυ σε κάθε πλαίσιο (Σχ. 3.18(α)), προσβάλλοντας ουσιαστικά $12/36$ στοιχειοσειρές.

Ανάλογα με την ένταση της ακτινοβολίας, το MPP2 (δεξί τμήμα της καμπύλης – υψηλότερη τάση) μπορεί να είναι το ολικό μέγιστο ($G_2 = 0.9$ και $G_2 = 0.6$) ή υποδεέστερο από το MPP1 (αριστερό τμήμα της καμπύλης – χαμηλότερη τάση) ($G_2 = 0.4$ και $G_2 = 0.1$). Αντίθετα, στην κατακόρυφη διάταξη όλες οι στοιχειοσειρές προσβάλλονται από σκίαση κατά $2/16$ κυψέλες η κάθε μια (Σχ. 3.18(β)), οδηγώντας σε ισοδύναμη λειτουργία ολικά σκιασμένης πλαισιοσειράς, όπου εμφανίζεται μόνο το MPP2 (το MPP1 δεν εκφράζεται στη χαρακτηριστική). Είναι εμφανές ότι η κατακόρυφη διάταξη είναι περισσότερο επιρρεπής σε σκίαση κατά γραμμές από την οριζόντια διάταξη, καθώς με λίγη έκταση σκίασης είναι δυνατόν να προσβληθούν όλες οι στοιχειοσειρές των πλαισίων.

Αντίθετα, σε σκίαση κατά στήλες η σκίαση εκτείνεται πλαίσιο – πλαίσιο στην οριζόντια διάταξη (Σχ. 3.18(γ)), αλλά στοιχειοσειρά – στοιχειοσειρά στην κατακόρυφη (Σχ. 3.18(δ)), που σημαίνει ότι η τελευταία διάταξη προκύπτει πιο ανθεκτική στο εν λόγω μοτίβο σκίασης. Συνεπώς, το MPP1 στις $P-V$ καμπύλες της κατακόρυφης διάταξης έχει μεγαλύτερη ισχύ σε

σχέση με το MPP1 της οριζόντιας, χωρίς όμως ουσιώδη διαφορά.

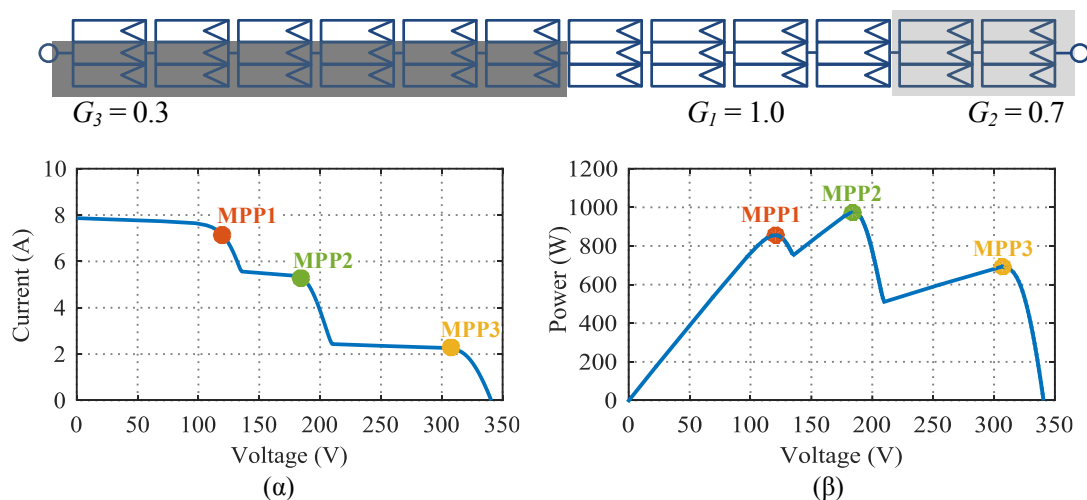
Για διαγώνια σκίαση, η ενδεικτική περίπτωση σκιασμένης επιφάνειας 4 γραμμών x 48 στηλών κυψελών απεικονίζεται στα Σχ. 3.18(ε)-(στ). Παρόλο που η επιφάνεια σκίασης είναι ίδια για τις δύο διατάξεις (στα αντίστοιχα σχήματα φαίνεται πλασματικά διαφορετική λόγω της κλίμακας, αλλά είναι ίδια σαν έκταση και κυψέλες), προσβάλλονται οι διπλάσιες στοιχειοσειρές στην κατακόρυφη διάταξη (24 στοιχειοσειρές) σε σχέση με την οριζόντια διάταξη (12 στοιχειοσειρές). Κατά συνέπεια, οι χαρακτηριστικές $P-V$ των δύο περιπτώσεων εμφανίζουν σημαντική διαφοροποίηση στο MPP1 ευθέως αναλογικά.

Συνεπώς, η καμπύλη ισχύος μιας ΦΒ πλαισιοσειράς που υπόκειται σε δύο διαφορετικά επίπεδα ακτινοβολίας εμφανίζει ένα ή δύο τοπικά μέγιστα, τα MPP1 και MPP2, όπως ορίστηκαν και για το ΦΒ πλαίσιο. Δεν έχει σημασία η τοπολογία της πλαισιοσειράς (οριζόντια, κατακόρυφη ή πιο περίπλοκες διατάξεις με ακανόνιστη θέση πλαισίων), ούτε το μέγεθος της σκιασμένης επιφάνειας. Σημασία έχει μόνο πόσες στοιχειοσειρές είναι μερικώς ή ολικώς σκιασμένες (πρακτικά είναι το ίδιο) και σε τι ένταση ακτινοβολίας.

3.2.4.B Γενίκευση για n επίπεδα ακτινοβολίας

Μολονότι η συνηθισμένη περίπτωση μερικής σκίασης αφορά δύο επίπεδα ακτινοβολίας, στη γενική περίπτωση μία μερικώς σκιασμένη πλαισιοσειρά μπορεί να υπόκειται σε περισσότερα επίπεδα ακτινοβολίας. Τέτοιες συνθήκες μπορεί να προκληθούν όταν διαφορετικά εμπόδια σκιάζουν την ίδια πλαισιοσειρά (π.χ. μία διπλανή πλαισιοσειρά και ένα άλλο αντικείμενο σε μεγαλύτερη απόσταση), προκαλώντας έτσι την εμφάνιση παραπάνω από δύο MPPs.

Στο Σχ. 3.19, παρουσιάζεται ένα ενδεικτικό σενάριο σκίασης τριών επιπέδων ακτινοβολίας $G_1 = 1.0$, $G_2 = 0.7$ και $G_3 = 0.3$. Οι τρεις αντίστοιχες ομάδες στοιχειοσειρών 1, 2 και 3 αποτελούνται από $N_1 = 18$, $N_2 = 6$ και $N_3 = 12$ στοιχειοσειρές. Έτσι, εμφανίζονται τρία MPPs στις καμπύλες $I-V$ και $P-V$. Στο MPP1 (κόκκινος δείκτης), μόνο η ομάδα 1 συνεισφέρει στην παραγωγή, καθώς οι ομάδες 2 και 3 παρακάμπτονται. Στο MPP2 (πράσινος δείκτης), οι ομάδες 1 και 2 προσφέρουν ισχύ στο μειωμένο ρεύμα που επιβάλλεται από την ακτινοβολία G_2 , ενώ η ομάδα 3 παρακάμπτεται. Αντίθετα, στο MPP3 (κίτρινος δείκτης) και οι τρεις ομάδες



Σχ. 3.19. Ενδεικτική περίπτωση μερικώς σκιασμένης ΦΒ πλαισιοσειράς, η οποία δέχεται τρία διαφορετικά επίπεδα ακτινοβολίας ($G_1 = 1.0$, $G_2 = 0.7$ και $G_3 = 0.3$).

λειτουργούν στο ελάχιστο ρεύμα που καθορίζεται από τη μικρότερη ακτινοβολία G_3 της ομάδας 3, ενώ όλες οι διόδοι διαφυγής παραμένουν ανάστροφα πολωμένες.

Οι άνωθεν παρατηρήσεις γενικεύονται στην περίπτωση μιας ΦΒ πλαισιοσειράς που υπόκειται σε n διαφορετικά επίπεδα ακτινοβολίας G_j , με $j = 1, \dots, n$, ταξινομημένα κατά φθίνουσα σειρά ($G_i > G_j$, $i > j$). Ορίζονται αντίστοιχα n ομάδες στοιχειοσειρών $1, \dots, n$, κάθε μία από τις οποίες αποτελείται από N_1, \dots, N_n στοιχειοσειρές σε πλήθος. Τότε, μπορεί να εμφανιστούν μέχρι και n τοπικά MPPs στη χαρακτηριστική $P-V$, δεδομένου ότι υπάρχουν τουλάχιστον n διόδοι διαφυγής στο κύκλωμα. Σε κάθε MPP $_j$, οι ομάδες $j+1$ έως n παρακάμπτονται από τις αντίστοιχες άγουσες διόδους διαφυγής, ενώ οι ομάδες 1 έως j λειτουργούν στο μειωμένο ρεύμα που καθορίζει η ακτινοβολία G_j της ομάδας j . Δηλαδή, το MPP $_j$ σχετίζεται άμεσα με το επίπεδο ακτινοβολίας G_j που δέχεται η ομάδα j .

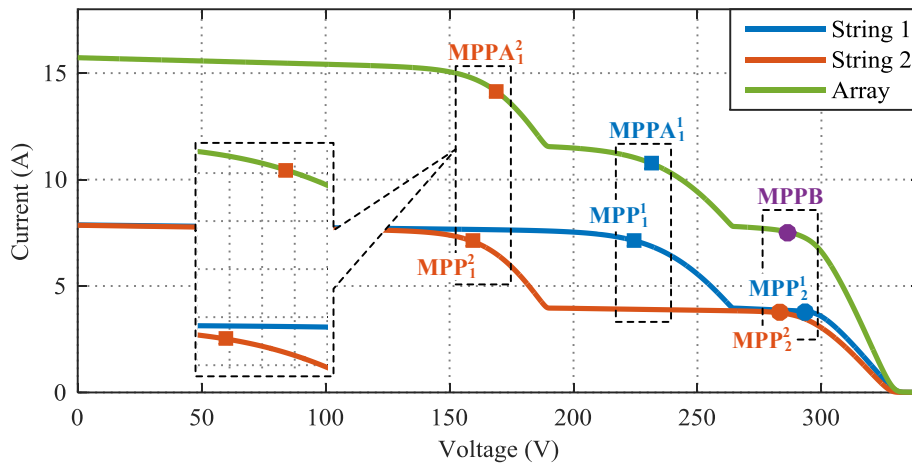
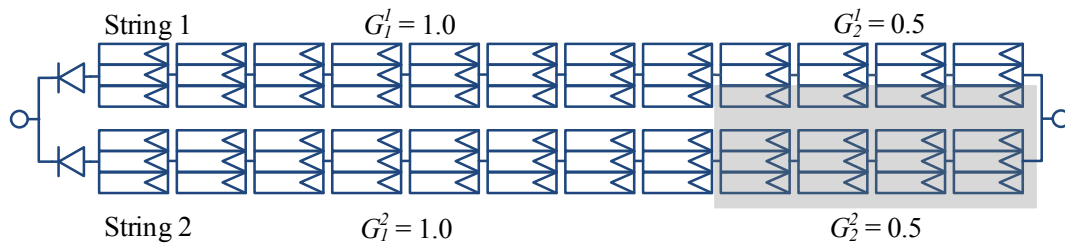
3.2.5 ΦΒ συστοιχία

Η ερμηνεία της ηλεκτρικής απόκρισης μίας μερικώς σκιασμένης ΦΒ συστοιχίας είναι ιδιαίτερα περίπλοκη, και ειδικά ο χαρακτηρισμός των τοπικών MPPs που εμφανίζονται στη χαρακτηριστική $P-V$. Βάσει της ανάλυσης της προηγούμενης παραγράφου, δεν έχει νόημα να μελετηθούν τοπολογικά διάφορα σενάρια σκίασης, αλλά μόνο οι διαφορετικές ομάδες στοιχειοσειρών που δημιουργούνται (είτε μερικώς, είτε ολικά σκιασμένες στοιχειοσειρές – δεν έχει σημασία) όταν υπόκεινται σε διαφορετική ένταση ακτινοβολίας.

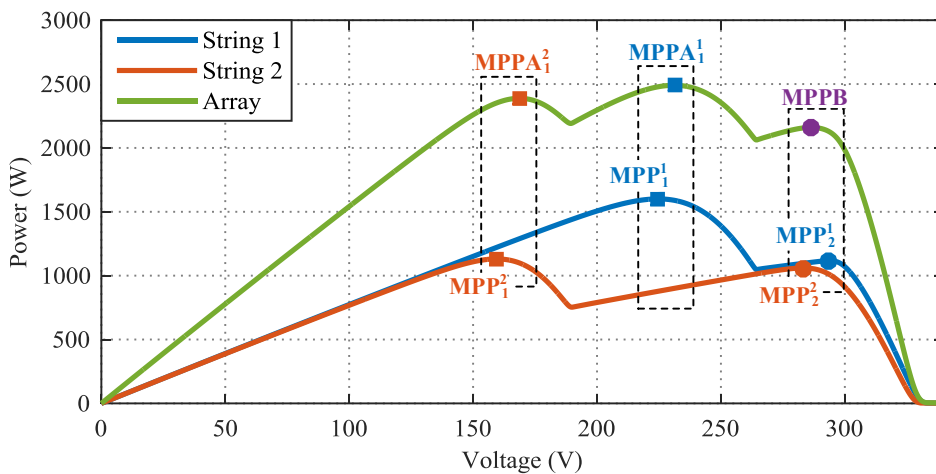
Η ανάλυση που ακολουθεί απαιτεί την επέκταση των ορισμών της προηγούμενης παραγράφου. Κάθε μία από τις N_p παράλληλα συνδεδεμένες πλαισιοσειρές δέχεται ένα πλήθος από n^i ($i = 1, \dots, N_p$) διαφορετικές εντάσεις ακτινοβολίας G_j^i , $j = 1, \dots, n^i$, ταξινομημένες κατά φθίνουσα σειρά ($G_j^i > G_{j+1}^i$), και παρουσιάζει μέχρι n^i τοπικά MPPs στη χαρακτηριστική $P-V$. Ο συμβολισμός MPP $_j^i$ χρησιμοποιείται για τα εν λόγω τοπικά μέγιστα, όπου ο εκθέτης i συμβολίζει την πλαισιοσειρά i και ο δείκτης j το επίπεδο ακτινοβολίας G_j^i . Για την πλαισιοσειρά i , ο αριθμός των στοιχειοσειρών που συνιστούν κάθε ομάδα j που υπόκειται στην ίδια ένταση ακτινοβολίας G_j^i , συμβολίζεται με N_j^i . Από εδώ και στο εξής, ο εκθέτης i και ο δείκτης j θα αντιστοιχούν πάντα στην πλαισιοσειρά και στο επίπεδο ακτινοβολίας, αντίστοιχα.

Για διευκόλυνση της κατανόησης, μελετάται το παράδειγμα του Σχ. 3.20, στο οποίο μία ΦΒ συστοιχία δύο πλαισιοσειρών υπόκειται σε μερική σκίαση έντασης 50%. Η πλαισιοσειρά 1 (πάνω κλάδος) δέχεται δύο επίπεδα ακτινοβολίας $G_1^1 = 1.0$ και $G_2^1 = 0.5$, σχηματίζοντας δύο ομάδες των $N_1^1 = 32$ και $N_2^1 = 4$ στοιχειοσειρών αντίστοιχα. Αναμενόμενα, η χαρακτηριστική της καμπύλη (μπλε γραμμή) παρουσιάζει δύο τοπικά μέγιστα MPP $_1^1$ (μπλε τετραγωνικός δείκτης) και MPP $_2^1$ (μπλε κυκλικός δείκτης). Αντίστοιχα για την πλαισιοσειρά 2 (κάτω κλάδος), $N_1^2 = 24$ σε πλήθος στοιχειοσειρές υπόκεινται σε ακτινοβολία $G_1^2 = 1.0$ και $N_2^2 = 12$ στοιχειοσειρές σε $G_2^2 = 0.5$, δημιουργώντας τα MPP $_1^2$ (κόκκινος τετραγωνικός δείκτης) και MPP $_2^2$ (κόκκινος κυκλικός δείκτης) στη χαρακτηριστική (κόκκινη γραμμή).

Η συνισταμένη χαρακτηριστική $I-V$ και $P-V$ της συστοιχίας (πράσινη γραμμή στα Σχ. 3.20(α)-(β)) παρουσιάζει τρία τοπικά μέγιστα συνολικά. Εστιάζοντας στα διακεκομμένα πλαίσια, παρατηρείται ότι κάθε MPP της συστοιχίας συσχετίζεται με κάποιο MPP μίας εκ των πλαισιοσειρών. Συγκεκριμένα, το τοπικό μέγιστο που συμβολίζεται με MPPA $_1^2$ (κόκκινος τετραγωνικός δείκτης στην πράσινη καμπύλη) εξαρτάται εμφανώς από το MPP $_1^2$ της πλαισιοσειράς 2 (κόκκινος τετραγωνικός δείκτης στην κόκκινη γραμμή). Αυτό συμβαίνει διότι



(α)



(β)

Σχ. 3.20. Χαρακτηριστικές (α) $I-V$ και (β) $P-V$ μίας μερικώς σκιασμένης ΦΒ συστοιχίας και των δύο συνιστωσών πλαισιοσειρών για σκίαση 2 επίπεδων ακτινοβολίας.

στη συγκεκριμένη περιοχή η καμπυλότητα της χαρακτηριστικής της συστοιχίας καθορίζεται από την κόκκινη καμπύλη, καθώς η μπλε χαρακτηριστική είναι προσεγγιστικά ευθεία γραμμή (Σχ. 3.20(α)). Συνεπώς, η τάση του $MPPA_1^2$ προκύπτει πολύ κοντά στην V_{mp1}^2 του MPP_1^2 (ελαφρώς μεγαλύτερη – πλαίσιο εστίασης στο Σχ. 3.20(α)), ενώ το ρεύμα ισούται περίπου με το άθροισμα του ρεύματος I_{mp1}^2 του MPP_1^2 συν το ρεύμα της πλαισιοσειράς 1 στην τάση V_{mp1}^2 .

Παρομοίως, το επόμενο τοπικό μέγιστο της συστοιχίας $MPPA_1^1$ (μπλε τετραγωνικός δείκτης στην πράσινη καμπύλη) είναι άμεσα συνδεδεμένο με το MPP_1^1 της πλαισιοσειράς 1 (μπλε

τετραγωνικός δείκτης στην μπλε καμπύλη), και εμφανίζεται σε ελάχιστα μεγαλύτερη τάση από την V_{mp1}^l του MPP₁.

Αντίθετα με τα δύο προαναφερθέντα MPPs της συστοιχίας, κάθε ένα από τα οποία εξαρτάται από ένα συγκεκριμένο MPP μιας πλαισιοσειράς, το τελευταίο τοπικό μέγιστο στην συστοιχίας (MPPB – μωβ κυκλικός δείκτης) μοιάζει να επηρεάζεται από δύο MPPs: το τελευταίο τοπικό μέγιστο κάθε πλαισιοσειράς (MPP₂ – μπλε κυκλικός δείκτης στην μπλε καμπύλη, MPP₂ – κόκκινος κυκλικός δείκτης στην κόκκινη καμπύλη). Όταν μία πλαισιοσειρά λειτουργεί στο τελευταίο MPP_{ni}, όλες οι στοιχειοσειρές της διαρρέονται από το μειωμένο ρεύμα που καθορίζεται από τη μικρότερη ακτινοβολία G_{ni}^i . Αυτό συνεπάγεται σχετικά κοντινή τάση όλων των MPP_{ni} ασχέτως του σεναρίου σκίασης, γεγονός που οδηγεί στην εμφάνιση ενός μοναδικού MPPB στη χαρακτηριστική της συστοιχίας (Σχ. 3.20).

Δηλαδή, ορίζονται δύο κατηγορίες τοπικών μεγίστων στη χαρακτηριστική μιας συστοιχίας:

- ✓ Τα MPPA_jⁱ, καθένα από τα οποία συνδέεται με το MPP_jⁱ (ένα από τα πρώτα n^i-1 MPPs της πλαισιοσειράς i), όπου ο εκθέτης i αντιστοιχεί στην πλαισιοσειρά i και ο δείκτης j στο επίπεδο ακτινοβολίας G_j^i της πλαισιοσειράς i . Εν γένει, το πλήθος των MPPAs ισούται με το άθροισμα όλων των MPPs εκτός του τελευταίου για κάθε πλαισιοσειρά.
- ✓ Το μοναδικό MPPB, το οποίο προκύπτει από την αλληλεπίδραση του τελευταίου MPP κάθε πλαισιοσειράς (MPP_{ni}ⁱ).

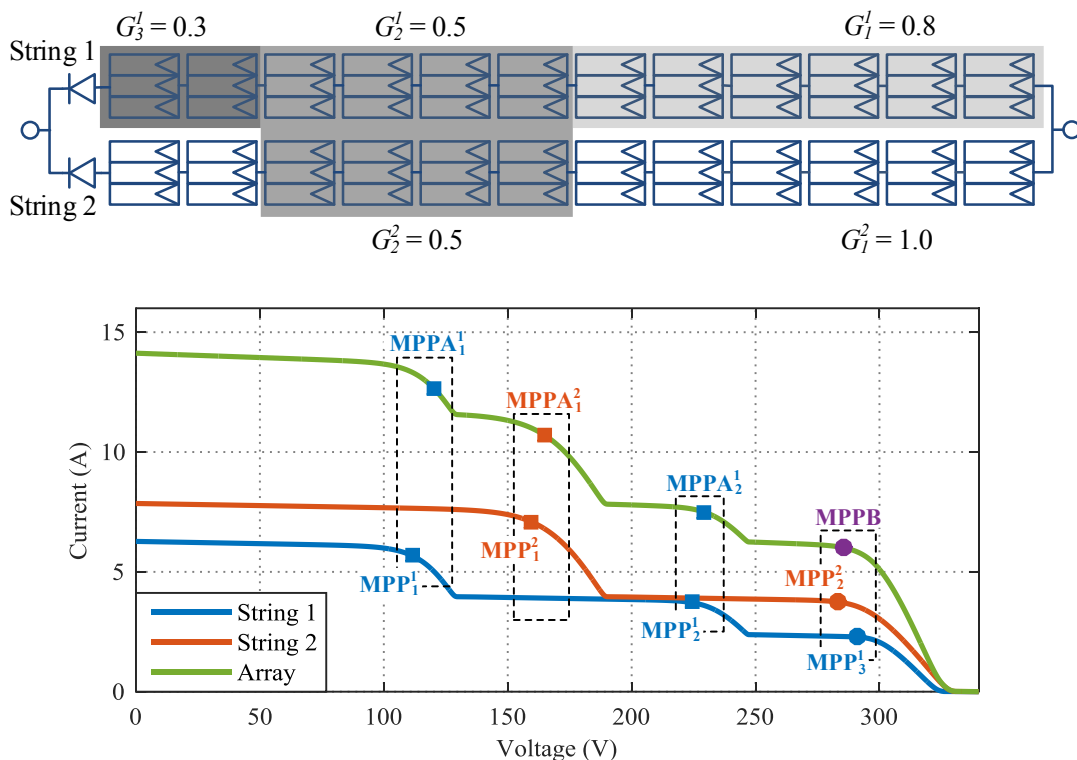
Επομένως, το μέγιστο δυνατό πλήθος όλων των τοπικών μεγίστων μίας μερικώς σκιασμένης πλαισιοσειράς n_a είναι:

$$n_a = \sum_{i=1}^{N_p} (n^i - 1) + 1 = \sum_{i=1}^{N_p} n^i - N_p + 1 \quad (3.16)$$

δηλαδή, n^i-1 MPPAs για κάθε μία από τις N_p πλαισιοσειρές και ένα μοναδικό MPPB. Βέβαια, ο πραγματικός αριθμός μπορεί να είναι μικρότερος ανάλογα τις συνθήκες σκίασης.

Στο Σχ. 3.21, απεικονίζεται ένα πολυπλοκότερο σενάριο σκίασης για περαιτέρω διευκρίνιση των προηγούμενων εννοιών και ανάλυσης. Η πλαισιοσειρά 1 υπόκειται σε τρία επίπεδα ακτινοβολίας ($G_1^1 = 0.8$, $G_2^1 = 0.5$ και $G_3^1 = 0.3$, με $N_1^1 = 18$, $N_2^1 = 12$ and $N_3^1 = 6$ στοιχειοσειρές αντίστοιχα), ενώ η πλαισιοσειρά 2 δέχεται δύο διαφορετικές εντάσεις ακτινοβολίας ($G_1^2 = 1.0$ και $G_2^2 = 0.5$, με $N_1^2 = 24$ και $N_2^2 = 12$ στοιχειοσειρές). Σύμφωνα με την (3.16), εμφανίζονται έως τέσσερα MPPs στη χαρακτηριστική καμπύλη της συστοιχίας:

- ✓ Το MPPA₁ (αριστερός μπλε τετραγωνικός δείκτης στην πράσινη καμπύλη) που συνδέεται με το MPP₁ της πλαισιοσειράς 1 (αριστερός μπλε τετραγωνικός δείκτης στην μπλε καμπύλη).
- ✓ Το MPPA₂ (κόκκινος τετραγωνικός δείκτης στην πράσινη καμπύλη) που συσχετίζεται με το MPP₂ της πλαισιοσειράς 2 (κόκκινος τετραγωνικός δείκτης στην κόκκινη καμπύλη).
- ✓ Το MPPA₃ (δεξιάς μπλε τετραγωνικός δείκτης στην πράσινη καμπύλη) που εξαρτάται άμεσα από το MPP₂ της πλαισιοσειράς 1 (δεξιάς μπλε τετραγωνικός δείκτης στην μπλε γραμμή).
- ✓ Το MPPB (μωβ κυκλικός δείκτης στην πράσινη καμπύλη), ο οποίος προκύπτει από την αλληλεπίδραση των MPP₃ και MPP₂ (κυκλικοί δείκτες στην μπλε και κόκκινη καμπύλη), δηλαδή των τελευταίων MPPs κάθε πλαισιοσειράς.



Σχ. 3.21. Χαρακτηριστική $I-V$ σκιασμένης ΦΒ πλαισιοσειράς και των συνιστωσών πλαισιοσειρών της για σκίαση τεσσάρων επιπέδων ακτινοβολίας.

Εξονυχιστική ανάλυση πληθώρας γεωμετριών σκίασης μελετώνται στην [211], καταλήγοντας πάντα στο ίδιο συμπέρασμα: οι καθοριστικές παράμετροι για τη μορφή της χαρακτηριστικής και τις ιδιότητες των MPPs δεν είναι η έκταση και γεωμετρία της σκίασης, αλλά μόνο τα διαφορετικά επίπεδα ακτινοβολίας και η κατανομή των στοιχειοσειρών στις αντίστοιχες ομάδες. Ο χαρακτηρισμός της παρούσας ενότητας επεκτείνει την ανάλυση του [68] και διαχωρίζει τα τοπικά μέγιστα σε δύο τύπους: τα MPPA και το MPPB.

3.3 Περιγραφικές Σχέσεις Προσδιορισμού των MPPs ΦΒ Πλαισιοσειράς

Σε αυτήν την ενότητα, επιχειρείται ο προσδιορισμός όλων των τοπικών μεγίστων που εμφανίζονται στη χαρακτηριστική μίας ΦΒ πλαισιοσειράς η οποία υπόκειται σε μερική σκίαση. Οι περιγραφικές σχέσεις που προτείνονται είναι απλές μαθηματικές εξισώσεις αναλυτικής μορφής που βασίζονται μόνο σε δεδομένα που αναγράφονται στο τεχνικό φυλλάδιο του ΦΒ πλαισίου. Με αυτόν τον τρόπο, επιτυγχάνεται η απευθείας εύρεση της τάσης και της ισχύος όλων των MPPs, χωρίς να μεσολαβεί η κοπιώδης και υπολογιστικά απαιτητική διαδικασία σχεδίασης ολόκληρης της χαρακτηριστικής $P-V$. Η εφαρμογή των προτεινόμενων σχέσεων είναι πολύ απλή, ενώ απαιτούν τα ελάχιστα δεδομένα εισόδου, γεγονός που τις καθιστά ιδιαίτερα χρήσιμες για ενσωμάτωση σε λογισμικό μελέτης και εγκατάστασης ΦΒ σταθμών, καθώς επίσης και στον μικροκόδικα μετατροπών ισχύος για ΦΒ συστήματα.

Η γραφική ανάλυση των χαρακτηριστικών $I-V$ και $P-V$ της παραγράφου 3.2.4, αποτελεί τη

βάση για την εξαγωγή των σχέσεων για τη ΦΒ πλαισιοσειρά. Παρόμοιου χαρακτήρα μελέτη έγινε παλαιότερα στο εργαστήριο και δημοσιεύτηκε στην [49]. Όμως, η εν λόγω εργασία εστιάζει σε ΦΒ διατάξεις μικρότερης κλίμακας, υποστηρίζοντας ανάλυση σε βάθος κυψέλης και μέχρι το επίπεδο του ΦΒ πλαισίου. Τέτοια ανάλυση δεν είναι πρακτική και εφαρμόσιμη για μεγαλύτερα συστήματα, όπως η πλαισιοσειρά και η συστοιχία.

Έτσι, στις επόμενες παραγράφους το βάθος ανάλυσης είναι η στοιχειοσειρά, η οποία θεωρείται ότι λειτουργεί ομοιογενώς σε μία κοινή ένταση ακτινοβολίας. Η μελέτη που ακολουθεί εστιάζει πρώτα στην απλουστευμένη, πλην συνηθέστερη, περίπτωση της σκίασης με δύο διακριτές ακτινοβολίες και στη συνέχεια γενικεύεται στο πλήρες σενάριο πολλαπλών επιπέδων ακτινοβολίας. Στην παρούσα ενότητα 3.3 θεωρείται ονομαστική θερμοκρασία $T=25$ °C για λόγους απλούστευσης και ευκολίας στην κατανόηση. Ο συγκεκριμένος περιορισμός αίρεται στη συνέχεια, όπου οι περιγραφικές σχέσεις τελειοποιούνται για τη ΦΒ συστοιχία. Το περιεχόμενο που ακολουθεί δημοσιεύτηκε στην [67].

3.3.1 Εκφράσεις για δύο επίπεδα ακτινοβολίας

Σύμφωνα με την ανάλυση της ενότητας 3.2, στην περίπτωση των δύο διακριτών επιπέδων ακτινοβολίας G_1 και G_2 , η πλαισιοσειρά χωρίζεται σε δύο ομάδες που περιλαμβάνουν N_1 και N_2 στοιχειοσειρές, ενώ η χαρακτηριστική $P-V$ παρουσιάζει μέχρι δύο MPPs.

3.3.1.A Σχέσεις για το MPP1

Στο MPP1, οι σκιασμένες στοιχειοσειρές της ομάδας 2 παρακάμπτονται, και το ισοδύναμο κύκλωμα αποτελείται από N_1 ασκίαστες στοιχειοσειρές που προσφέρουν ισχύ συνδεδεμένες σε σειρά με N_2 άγουσες διόδους διαφυγής. Δηλαδή, για την τάση V_{mp1} του MPP1, μπορεί να γραφεί η ακόλουθη σχέση, αναδιατυπωμένη από την [49]:

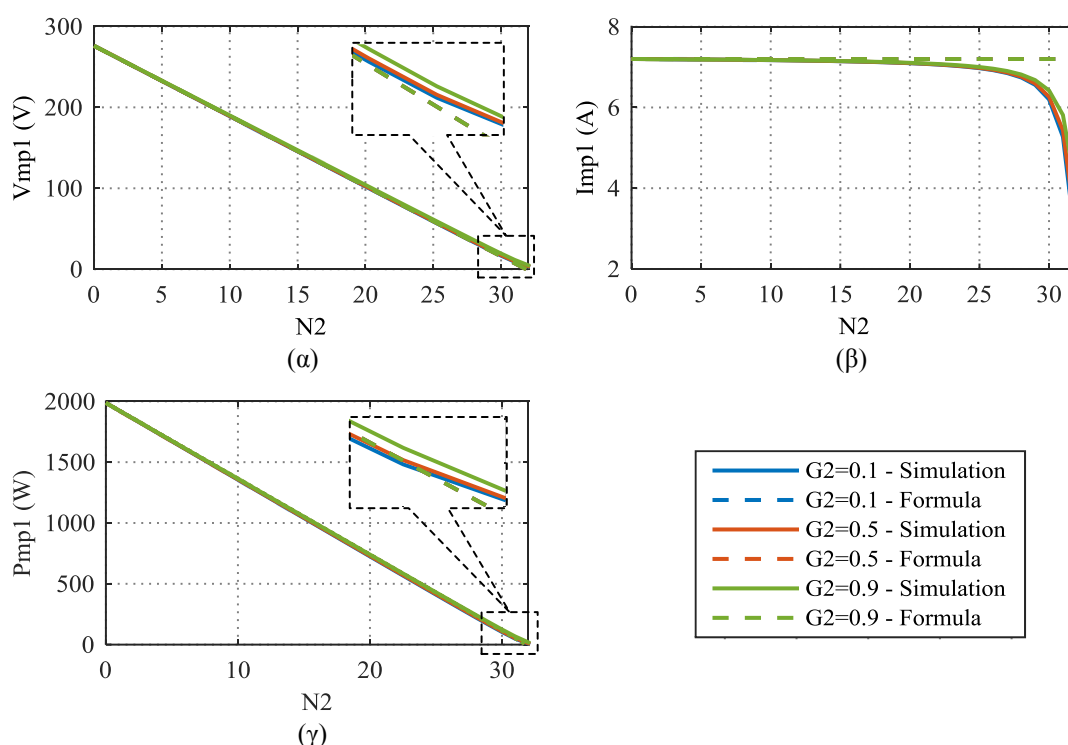
$$V_{mp1} = N_1 V_{mp0} - N_2 \Delta V_D \quad (3.17)$$

όπου με V_{mp0} συμβολίζεται η ονομαστική τάση *μίας στοιχειοσειράς*, η οποία εξαρτάται ασθενώς με την ακτινοβολία, και με ΔV_D η πτώση τάσης πάνω σε μία δίοδο διαφυγής που άγει (τυπικά γύρω στο 1 V). Οι συμβολισμοί V_{mp0} , I_{mp0} , V_{oc0} και I_{sc0} εφ' εξής αναφέρονται στην ονομαστική τιμή του μεγέθους για μία στοιχειοσειρά, η οποία υπολογίζεται από την αντίστοιχη τιμή για το ΦΒ πλαίσιο που αναγράφεται στο τεχνικό φυλλάδιο.

Το ρεύμα στο MPP1, I_{mp1} , θεωρείται ευθέως ανάλογο της ακτινοβολίας G_1 της ασκίαστης ομάδας 1, δηλαδή:

$$I_{mp1} = G_1 I_{mp0} \quad (3.18)$$

Οι δύο προαναφερθείσες σχέσεις αποτιμώνται στο Σχ. 3.22, όπου απεικονίζεται η μεταβολή των μεγεθών V_{mp1} , I_{mp1} και P_{mp1} με την έκταση και ένταση της σκίασης, δηλαδή N_2 και G_2 ($G_1 = 1.0$). Οι συνεχείς γραμμές αντιστοιχούν στα αποτελέσματα που προκύπτουν από προσομοίωση του κυκλωματικού μοντέλου της ενότητας 3.1, ενώ οι διακεκομμένες γραμμές στις εξισώσεις (3.17)-(3.18). Η κύρια παρατήρηση που εξάγεται και από τα τρία γραφήματα Σχ. 3.22(α)-(γ), είναι ότι η ακτινοβολία G_2 δεν επηρεάζει τα χαρακτηριστικά του MPP1, καθώς



Σχ. 3.22. Μεταβολή των (α) V_{mp1} , (β) I_{mp1} και (γ) P_{mp1} με το πλήθος των στοιχειοσειρών N_2 και την ένταση της ακτινοβολίας G_2 για τη ΦΒ πλαισιοσειρά του Σχ. 3.7 ($G_1 = 1.0$).

όλες οι καμπύλες διαφορετικών χρωμάτων συμπίπτουν μεταξύ τους. Η συγκεκριμένη παρατήρηση αιτιολογείται πλήρως θεωρητικά, δεδομένου ότι το σκιασμένο τμήμα της πλαισιοσειράς παρακάμπτεται στο MPP1, και άρα ορθώς στις (3.17)-(3.18) δεν εμφανίζεται όρος G_2 .

Εστιάζοντας στο Σχ. 3.22(α), φαίνεται ότι η τάση V_{mp1} εξαρτάται αναλογικά από το N_2 . Δεδομένου ότι οι όροι N_1 και N_2 είναι συμπληρωματικές ποσότητες, η V_{mp1} εξαρτάται γραμμικά και από το πλήθος των ασκίαστων στοιχειοσειρών N_1 , όπως μοντελοποιείται στην (3.17). Είναι εμφανής η ικανοποιητική σύγκλιση των αποτελεσμάτων του λεπτομερούς κυκλωματικού μοντέλου (συνεχείς γραμμές) και της απλοϊκής σχέσης (3.17) (διακεκομμένες γραμμές).

Όσον αφορά στην εκτίμηση του ρεύματος I_{mp1} από την (3.18), η σύγκλιση των δύο προσεγγίσεων είναι ικανοποιητική όσο η έκταση της σκίασης δε λαμβάνει πολύ μεγάλες τιμές (Σχ. 3.22(β)). Στην ακραία περίπτωση του μεγάλου N_2 , το ρεύμα φαίνεται να μειώνεται με μη-γραμμικό τρόπο (συνεχείς γραμμές), λόγω της σωρευμένης πτώσης τάσης από τις άγουσες διόδους διαφυγής που πρακτικά τροποποιούν την $I-V$ και μετατοπίζουν το MPP1 σε ελάχιστα μεγαλύτερη τάση (Σχ. 3.22(α)) και αισθητά μικρότερο ρεύμα (Σχ. 3.22(β)).

Παρόλα αυτά, τα σφάλματα στην εκτίμηση του V_{mp1} και I_{mp1} στο δεξί τμήμα των διαγραμμάτων τείνουν να αλληλοεξουδετερώνονται, καταλήγοντας σε πολύ ικανοποιητική εκτίμηση της ισχύος P_{mp1} σε όλο το εύρος της έκτασης της σκίασης (Σχ. 3.22(γ)). Βέβαια, έτσι και αλλιώς το MPP1 δεν έχει ιδιαίτερη αξία σε τέτοια σενάρια υπερβολικής σκίασης, καθώς τότε το MPP2 προκύπτει αρκετά ισχυρότερο και κυριαρχεί στην καμπύλη $P-V$.

3.3.1.B Σχέσεις για το MPP2

Στην περιοχή του MPP2, όλες οι στοιχειοσειρές συνεισφέρουν στην ηλεκτρική παραγωγή, λειτουργώντας στο μειωμένο ρεύμα που καθορίζεται από τις δυνατότητες του σκιασμένου τμήματος. Σε αυτήν την περίπτωση, η τάση V_{mp2} ισούται με το άθροισμα όλων των επιμέρους τάσεων:

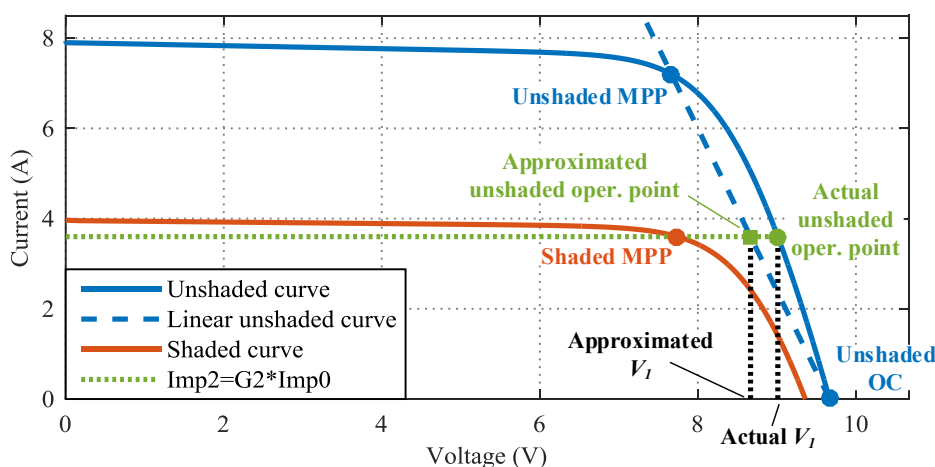
$$V_{mp2} = N_1V_1 + N_2V_2 \quad (3.19)$$

Η τάση V_2 κάθε μίας από τις σκιασμένες στοιχειοσειρές θεωρείται ίση με την ονομαστική τιμή της τάσης V_{mp0} και ανεξάρτητη της ακτινοβολίας G_2 , λόγω ασθενούς επίδρασης της τελευταίας, όπως αναφέρεται και παραπάνω. Η συνιστώσα V_1 των ασκίαστων στοιχειοσειρών προσεγγίζεται γραμμικά, όπως περιγράφεται γραφικά στο Σχ. 3.23. Η πραγματική χαρακτηριστική $I-V$ της ασκίαστης στοιχειοσειράς (μπλε συνεχής καμπύλη) προσεγγίζεται στην περιοχή του MPP2 με μία ευθεία γραμμή (μπλε διακεκομμένη γραμμή) που διέρχεται από τα MPP και OC (μπλε κυκλικό δείκτης):

$$V = \frac{V_{mp0} - V_{oc0}}{G_1 I_{mp0}} I + V_{oc0} \quad (3.20)$$

Οι τάσεις των δύο προαναφερθέντων σημείων λειτουργίας θεωρούνται ανεξάρτητες της ακτινοβολίας G_1 και τίθενται ίσες με V_{mp0} και V_{oc0} αντίστοιχα, ενώ το ρεύμα στο MPP είναι ευθέως ανάλογο της G_1 . Έτσι, θεωρώντας ότι το ρεύμα λειτουργίας στο MPP2 είναι επίσης ευθέως ανάλογο της G_2 στο σκιασμένο τμήμα: $G_2 I_{mp0}$, η V_1 δίνεται από το σημείο τομής της πράσινης και μπλε διακεκομμένης γραμμής (πράσινος τετραγωνικός δείκτης). Δηλαδή, θέτοντας το ρεύμα $I = G_2 I_{mp0}$ στην (3.20), προκύπτει:

$$V_1 = \frac{V_{mp0} - V_{oc0}}{G_1 I_{mp0}} G_2 I_{mp0} + V_{oc0} \Leftrightarrow V_1 = \frac{G_2}{G_1} V_{mp0} + \left(1 - \frac{G_2}{G_1}\right) V_{oc0} \quad (3.21)$$



Σχ. 3.23. Προσέγγιση της συνιστώσας τάσης V_1 των ασκίαστων στοιχειοσειρών, όταν η πλαισιοσειρά λειτουργεί στο MPP2.

Η (3.21) εκτιμά την τάση λειτουργίας της ασκίαστης στοιχειοσειράς πολύ απλά ως το σταθμισμένο μέσο όρο μεταξύ V_{mp0} και V_{oc0} ανάλογα με τον λόγο ακτινοβολιών G_2/G_1 , ο οποίος αντιστοιχεί ουσιαστικά στην ένταση της σκίασης. Στο Σχ. 3.23, φαίνεται η απόκλιση της εκτιμημένης τάσης (πράσινος τετραγωνικός δείκτης) με την πραγματική (πράσινος κυκλικός δείκτης), η οποία κυμαίνεται σε ανεκτά επίπεδα δεδομένης της απλοποίησης που προσφέρει.

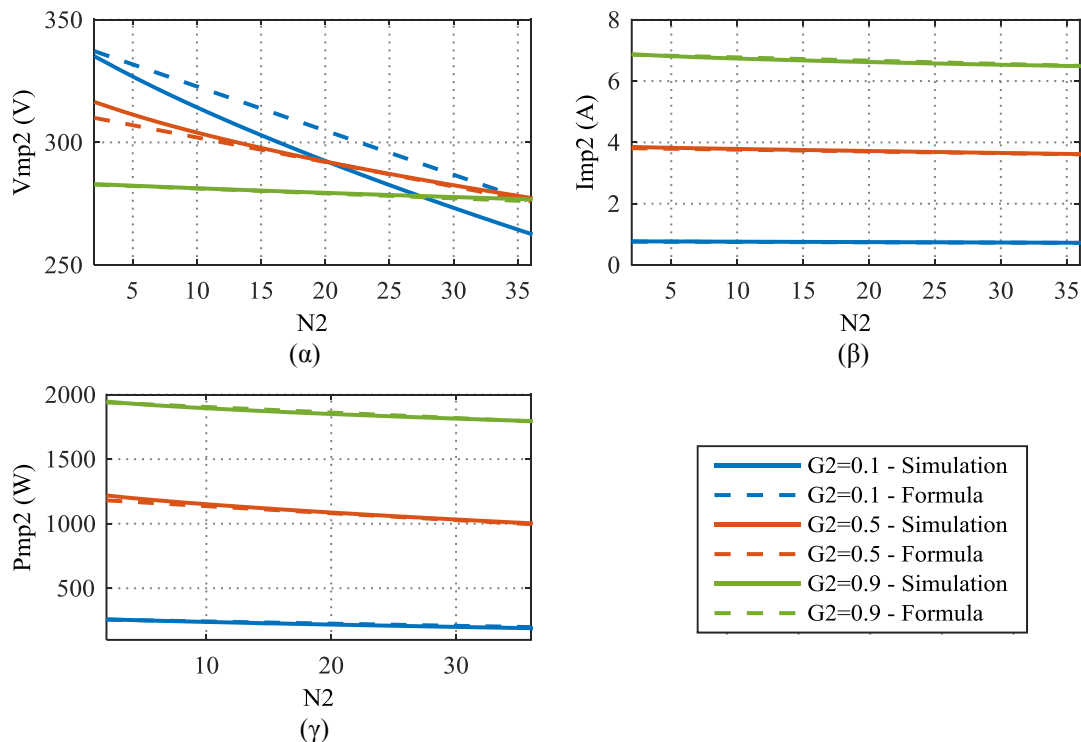
Τελικά, η ολοκληρωμένη έκφραση για την τάση V_{mp2} του MPP2 της πλαίσιοσειράς προκύπτει αντικαθιστώντας την (3.21) στην (3.19):

$$V_{mp2} = N_1 \left[\frac{G_2}{G_1} V_{mp0} + \left(1 - \frac{G_2}{G_1} \right) V_{oc0} \right] + N_2 V_{mp0} \quad (3.22)$$

Σχετικά με το I_{mp2} , εξαντλητικές προσομοιώσεις δείχνουν ότι εξαρτάται έντονα και αναλογικά από το G_2 , όπως αναμένεται από τη θεωρία, αλλά και από το πλήθος των ασκίαστων στοιχειοσειρών N_1 , καταλήγοντας στην:

$$I_{mp2} = G_2 I_{mp0} \left(1 + \lambda \frac{N_1}{N_m N_{cs}} \right) \quad (3.23)$$

όπου χρησιμοποιείται η εμπειρική σταθερά $\lambda = 0.06$. Η τιμή αυτή προέκυψε από πλήθος προσομοιώσεων διαφόρων εμπορικών ΦΒ πλαισίων μονοκρυσταλλικής και πολυκρυσταλλικής τεχνολογίας. Η ποσότητα $N_m N_{cs}$ στον παρονομαστή του κλάσματος περιγράφει το συνολικό πλήθος όλων των στοιχειοσειρών της πλαίσιοσειράς (ασχέτως σε ποια ομάδα ανήκουν).



Σχ. 3.24. Μεταβολή των (α) V_{mp2} , (β) I_{mp2} και (γ) P_{mp2} με το πλήθος των στοιχειοσειρών N_2 και την ένταση της ακτινοβολίας G_2 για τη ΦΒ πλαίσιοσειρά του Σχ. 3.7 ($G_1 = 1.0$).

Η εξάρτηση του MPP2 από τις παραμέτρους N_2 και G_2 απεικονίζεται στο Σχ. 3.24. Παρόλο που η εκτίμηση της V_{mp2} εμφανίζει σφάλμα για χαμηλές τιμές του G_2 (μπλε καμπύλες στο Σχ. 3.24(α)), τα αποτελέσματα της προτεινόμενης (3.23) για το I_{mp2} ταυτίζονται πλήρως με της προσομοίωσης (Σχ. 3.24(β)). Έτσι, η εκτίμηση της ισχύος P_{mp2} στο Σχ. 3.24(γ) προκύπτει εξαιρετικά ικανοποιητική για όλες τις περιπτώσεις.

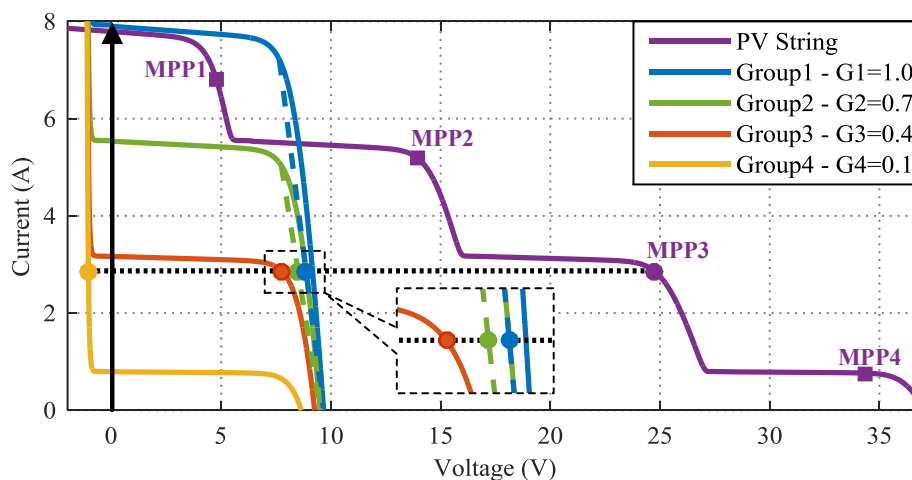
Τελικά, οι πλήρεις εκφράσεις για την απευθείας εκτίμηση των δύο MPPs που εμφανίζονται στη χαρακτηριστική ΦΒ πλαισιοσειράς για δύο επίπεδα ακτινοβολίας, είναι:

$$\begin{aligned}
 \text{MPP1: } & \begin{cases} V_{mp1} = N_1 V_{mp0} - N_2 \Delta V_D \\ I_{mp1} = G_1 I_{mp0} \end{cases} \\
 \text{MPP2: } & \begin{cases} V_{mp2} = N_1 \left[\frac{G_2}{G_1} V_{mp0} + \left(1 - \frac{G_2}{G_1} \right) V_{oc0} \right] + N_2 V_{mp0} \\ I_{mp2} = G_2 I_{mp0} \left(1 + \lambda \frac{N_1}{N_m N_{cs}} \right) \end{cases} \quad (3.24) \\
 \text{Global MPP: } & P_{mp} = \max \{ P_{mp1} = V_{mp1} I_{mp1}, P_{mp2} = V_{mp2} I_{mp2} \}
 \end{aligned}$$

3.3.2 Γενίκευση για πολλαπλά επίπεδα ακτινοβολίας

Στη γενική περίπτωση, μία ΦΒ πλαισιοσειρά δέχεται περισσότερες από δύο διαφορετικές εντάσεις ακτινοβολίας, οδηγώντας σε περισσότερα από δύο MPPs στη χαρακτηριστική $P-V$. Στο ακόλουθο Σχ. 3.25, απεικονίζεται ένα τέτοιο παράδειγμα που αφορά μία ΦΒ πλαισιοσειρά αποτελούμενη από τέσσερις μόνο στοιχειοσειρές (για λόγους απλοποίησης), κάθε μία από τις οποίες λειτουργεί σε διαφορετικό επίπεδο ακτινοβολίας (τέσσερις ομάδες της μίας στοιχειοσειράς η κάθε μία).

Η συνισταμένη χαρακτηριστική $I-V$ (μωβ καμπύλη) παρουσιάζει τέσσερα MPPs (μωβ δείκτες). Εστιάζοντας στο MPP3 (μωβ κυκλικός δείκτης), οι ομάδες 1-3 (μπλε, πράσινη και κόκκινη γραμμή) λειτουργούν στο ρεύμα I_{mp3} που καθορίζεται από το μειωμένο επίπεδο



Σχ. 3.25. Χαρακτηριστική $I-V$ μερικώς σκιασμένης ΦΒ πλαισιοσειράς που αποτελείται από τέσσερις στοιχειοσειρές, κάθε μία από τις οποίες δέχεται διαφορετική ένταση ακτινοβολίας. Εστίαση δίνεται στο MPP3 και στα αντίστοιχα σημεία λειτουργίας των επιμέρους στοιχειοσειρών.

ακτινοβολίας G_3 της ομάδας 3, ενώ η ομάδα 4 παρακάμπτεται (κίτρινη καμπύλη). Η τάση V_{mp3} είναι το άθροισμα των επιμέρους τάσεων V_j . Δεδομένου ότι οι ομάδες 1 και 2 υπολειπονται ($G_1, G_2 > G_3$), οι τάσεις V_1 και V_2 εκτιμώνται γραμμικά ως οι σταθμισμένοι μέσοι όροι μεταξύ V_{mp0} και V_{oc0} βάσει των λόγων G_3/G_1 και G_3/G_2 αντίστοιχα, όπως στην (3.21) (πλαίσιο εστίασης στο Σχ. 3.25). Η ομάδα 3 προσφέρει τάση $V_3 = V_{mp0}$, ενώ η ομάδα 4 που παρακάμπτεται συνεισφέρει αρνητικά κατά την πτώση τάση της διόδου διαφυγής ΔV_D . Δηλαδή, η τάση V_{mp3} δίνεται από:

$$V_{mp3} = N_1 \left[\frac{G_3}{G_1} V_{mp0} + \left(1 - \frac{G_3}{G_1} \right) V_{oc0} \right] + N_2 \left[\frac{G_3}{G_2} V_{mp0} + \left(1 - \frac{G_3}{G_2} \right) V_{oc0} \right] + N_3 V_{mp0} - N_4 \Delta V_D \quad (3.25)$$

Σχετικά με το ρεύμα I_{mp3} , το σκεπτικό της (3.23) επεκτείνεται εύκολα ώστε να εξαρτάται ισχυρά και αναλογικά από το G_3 , καθώς επίσης και από το σύνολο των στοιχειοσειρών N_1+N_2 που δέχονται μεγαλύτερη ακτινοβολία:

$$I_{mp3} = G_3 I_{mp0} \left(1 + \lambda \frac{N_1 + N_2}{N_m N_{cs}} \right) \quad (3.26)$$

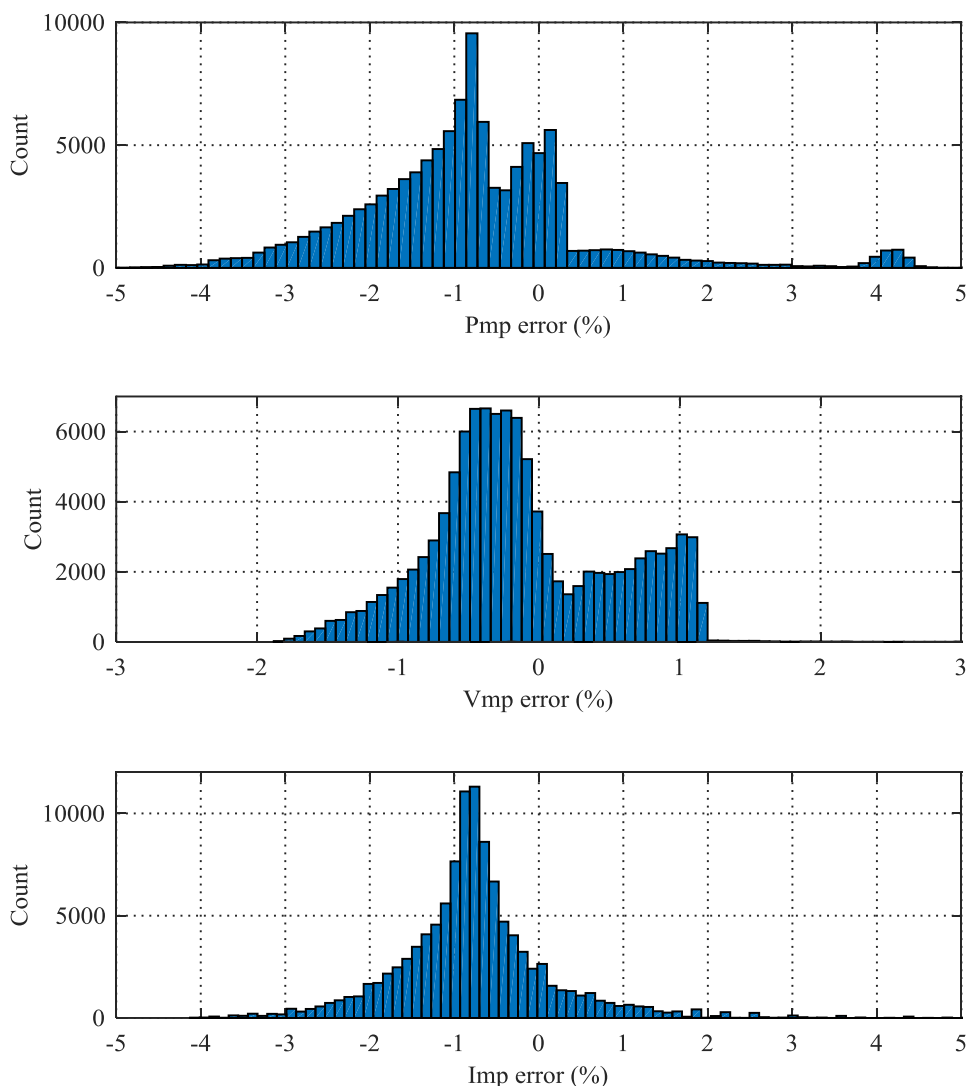
Έτσι, γενικεύοντας αυτόν τον τρόπο σκέψης, οι τελικές εκφράσεις που είναι εφαρμόσιμες για τη γενική περίπτωση n διαφορετικών επιπέδων ακτινοβολίας G_j για κάθε MPP_j ($j = 1, \dots, n$) είναι:

$$MPP_j: \begin{cases} V_{mpj} = \sum_{i=1}^j N_i \left[\frac{G_j}{G_i} V_{mp0} + \left(1 - \frac{G_j}{G_i} \right) V_{oc0} \right] - \sum_{i=j+1}^n N_i \Delta V_D \\ I_{mpj} = G_j I_{mp0} \left[1 + \lambda \frac{\sum_{i=1}^{j-1} N_i}{N_m N_{cs}} \right] \\ P_{mpj} = V_{mpj} I_{mpj} \end{cases} \quad (3.27)$$

Στην (3.27), η τάση V_{mpj} είναι το άθροισμα των γραμμικά εκτιμημένων τάσεων των $j-1$ πρώτων ομάδων που δέχονται υψηλότερη ακτινοβολία από τη G_j , συν την ονομαστική τάση της ομάδας j , πλην τη συσσωρευμένη πτώση τάσης στις διόδους διαφυγής των υπολοίπων $n-j$ ομάδων που υπόκεινται σε χαμηλότερη ακτινοβολία από τη G_j . Από την άλλη, η σχέση για το ρεύμα I_{mpj} διατυπώνει ευθέως αναλογική εξάρτηση από την ακτινοβολία G_j και ασθενέστερη γραμμική επίδραση από την έκταση των $j-1$ πρώτων ομάδων. Αν εφαρμοστεί η (3.27) για την περίπτωση των δύο ακτινοβολιών, εύκολα διαπιστώνεται ότι απλουστεύεται στην (3.24).

3.3.3 Αποτίμηση ακρίβειας μέσω προσομοιώσεων

Η ακρίβεια των εξισώσεων (3.27) επιβεβαιώνεται στη συνέχεια με προσομοιώσεις στο υπολογιστικό εργαλείο *MATLAB*. Ως αναφορά χρησιμοποιείται το κυκλωματικό μοντέλο της ενότητας 3.1, ενώ μελετώνται δέκα εμπορικά μονοκρυσταλλικά και πολυκρυσταλλικά ΦΒ πλαίσια. Προσομοιώνεται ένα μεγάλο πλήθος σεναρίων σκίασης για μία ΦΒ πλαισιοσειρά 20 πλαισίων που υπόκειται σε τέσσερα επίπεδα ακτινοβολίας στο εύρος 100 – 1100 W/m² (110606



Σχ. 3.26. Ιστογράμματα σφάλματος εκτίμησης του ολικά μέγιστου MPP με τις περιγραφικές σχέσεις (3.27) για μία ΦΒ πλαισιοσειρά 20 πλαισίων (Yingli YL-165) που υπόκειται σε τέσσερα επίπεδα ακτινοβολίας.

σενάρια στο σύνολο). Στο Σχ. 3.26, αποτυπώνεται η στατιστική κατανομή του σφάλματος για ένα ενδεικτικό πλαίσιο (YL-165). Είναι εμφανές ότι η κύρια μάζα των ιστογραμμάτων είναι συγκεντρωμένη πολύ κοντά στο 0, ενώ οι ουρές τους φθίνουν πρακτικά εντός ενός εύρους 5%.

Ποσοτικοποίηση του σφάλματος υπολογισμού του ολικά μέγιστου MPP ως προς ισχύ, τάση και ρεύμα δίνεται στον πίνακα Π. 3.2 για 10 εμπορικά ΦΒ πλαίσια (rms και μέγιστες τιμές για όλα τα σενάρια). Η συνολική απόδοση των προτεινόμενων σχέσεων είναι απόλυτα ικανοποιητική, δεδομένης της απλής τους μορφής. Τα rms σφάλματα κυμαίνονται κοντά στο 1%, ενώ τα μέγιστα σφάλματα που παρατηρούνται στα πιο ακραία σενάρια δεν ξεπερνούν το 9%.

Π. 3.2. Σφάλμα εκτίμησης του ολικά μέγιστου MPP χρησιμοποιώντας τις σχέσεις (3.27), για μία ΦΒ πλαισιοσειρά που λειτουργεί σε τέσσερα διαφορετικά επίπεδα ακτινοβολίας.

| ΦΒ πλαίσιο | Σφάλμα P_{mp} (%) | | Σφάλμα V_{mp} (%) | | Σφάλμα I_{mp} (%) | |
|------------------------------|---------------------|------|---------------------|------|---------------------|------|
| | RMS | MAX | RMS | MAX | RMS | MAX |
| <i>Yingli YL-165</i> | 1.60 | 8.03 | 1.00 | 5.45 | 1.19 | 7.29 |
| <i>Aleo s18-235</i> | 1.66 | 8.58 | 1.22 | 4.02 | 0.69 | 5.73 |
| <i>Suntech STP 280-24/Vd</i> | 1.53 | 7.20 | 1.28 | 2.93 | 0.67 | 4.97 |
| <i>Conergy PH 240P</i> | 1.69 | 8.56 | 1.17 | 4.05 | 0.80 | 6.61 |
| <i>Upsolar UP-M240P</i> | 1.28 | 8.32 | 0.92 | 4.16 | 0.67 | 5.70 |
| <i>Siliken SLK60P6L</i> | 1.28 | 8.32 | 0.92 | 4.16 | 0.67 | 5.70 |
| <i>Bosch M60-245</i> | 1.50 | 8.17 | 1.05 | 3.75 | 0.71 | 5.46 |
| <i>Suntech STP240s</i> | 1.26 | 7.51 | 0.97 | 5.04 | 0.63 | 4.83 |
| <i>Sunpower E19/240</i> | 1.11 | 5.66 | 0.92 | 4.63 | 0.52 | 3.50 |
| <i>Upsolar UP-M205M</i> | 1.30 | 6.55 | 1.03 | 3.19 | 0.60 | 5.11 |
| ΣΥΝΟΛΙΚΑ | 1.43 | 8.58 | 1.06 | 5.45 | 0.74 | 7.29 |

3.4 Βελτίωση των MPP Σχέσεων ΦΒ Πλαισιοσειράς

Οι περιγραφικές σχέσεις για τον προσδιορισμό των MPPs που δίνονται στην προηγούμενη ενότητα 3.3, είναι μεν εύχρηστες αλλά βασίζονται σε εμπειρικές παρατηρήσεις, με αποτέλεσμα η ακρίβειά τους να είναι υποβέλτιστη στα υποδεέστερα τοπικά μέγιστα (όχι το ολικά μέγιστο). Στην παρούσα ενότητα, εξάγονται νέες σχέσεις για τα MPPs πλαισιοσειράς που προκύπτουν από κυκλωματική ανάλυση και πλαισιώνονται από πλήρη θεωρητική τεκμηρίωση.

Οι νέες σχέσεις έχουν παρόμοια δομή αλλά πολυπλοκότερη διατύπωση, ενώ δεν έχουν εξάρτηση από εμπειρικές σταθερές (όπως η λ) και πειραματικά δεδομένα. Είναι αναλυτικές εκφράσεις μόνο δεδομένων του τεχνικού φυλλαδίου και των συνθηκών λειτουργίας, και παρουσιάζουν καλύτερη ακρίβεια, ιδιαίτερα στα τοπικά μέγιστα. Οι εξισώσεις της παρούσας ενότητας δεν αντικαθιστούν τις αντίστοιχες της ενότητας 3.3: διατυπώνονται συμπληρωματικά κυρίως για λόγους θεωρητικής τεκμηρίωσης.

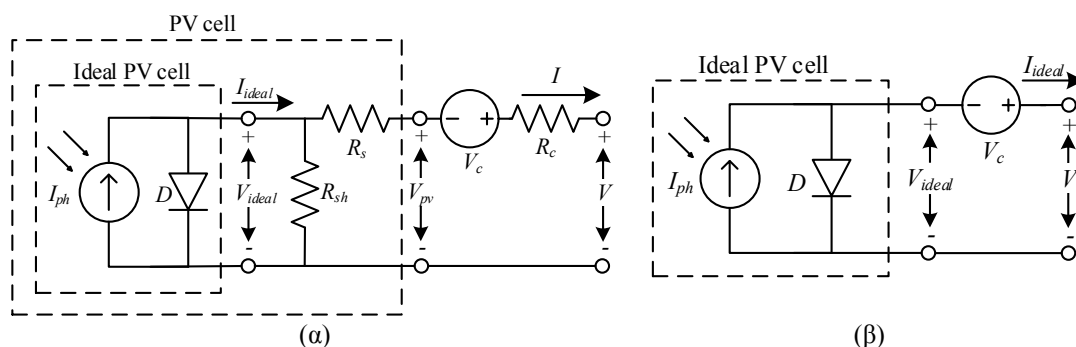
3.4.1 Κυκλωματική ανάλυση

Στη συνέχεια, επεκτείνεται η ανάλυση της παραγράφου 2.2.3 που πραγματεύεται τη λειτουργία του μοντέλου των πέντε παραμέτρων σε κατάσταση MPP, έτσι ώστε να καλύπτει και τις συνθήκες μερικής σκίασης. Στο ισοδύναμο κύκλωμα του μοντέλου προστίθεται μία νέα πηγή τάσης και οι (2.16)-(2.17) γενικεύονται για την πλήρη περίπτωση της ανομοιόμορφης ακτινοβολίας. Το υλικό της συγκεκριμένης παραγράφου δημοσιεύθηκε στην [116].

3.4.1.A Επαύξηση του κυκλώματος του μοντέλου των πέντε παραμέτρων

Αν στο ισοδύναμο κύκλωμα του μοντέλου μίας διόδου (Σχ. 2.1) τοποθετηθεί μία πηγή τάσης V_c και μία αντίσταση R_c σε σειρά, το κύκλωμα που προκύπτει αποκαλείται *επαυξημένο κύκλωμα του μοντέλου μίας διόδου* (Σχ. 3.27(α)). Στην επόμενη παράγραφο, το εν λόγω επαυξημένο μοντέλο χρησιμοποιείται για την περιγραφή της ΦΒ πλαισιοσειράς σε συνθήκες μερικής σκίασης.

Για τον υπολογισμό του MPP του νέου κυκλώματος, ακολουθείται παρόμοια διαδικασία με την παράγραφο 2.2.3, μελετώντας αρχικά την ιδανική εκδοχή του επαυξημένου μοντέλου (Σχ.



Σχ. 3.27. Επαυξημένο κύκλωμα του (α) πλήρους και (β) ιδανικού μοντέλου μίας διόδου.

3.27(β)). Το MPP αυτού του κυκλώματος μπορεί να προσδιοριστεί αναλυτικά μηδενίζοντας την παράγωγο της ισχύος, καταλήγοντας στις ακόλουθες εξισώσεις για την τάση $V_{mp,ideal}$ και το ρεύμα $I_{mp,ideal}$ με χρήση της συνάρτησης Lambert W :

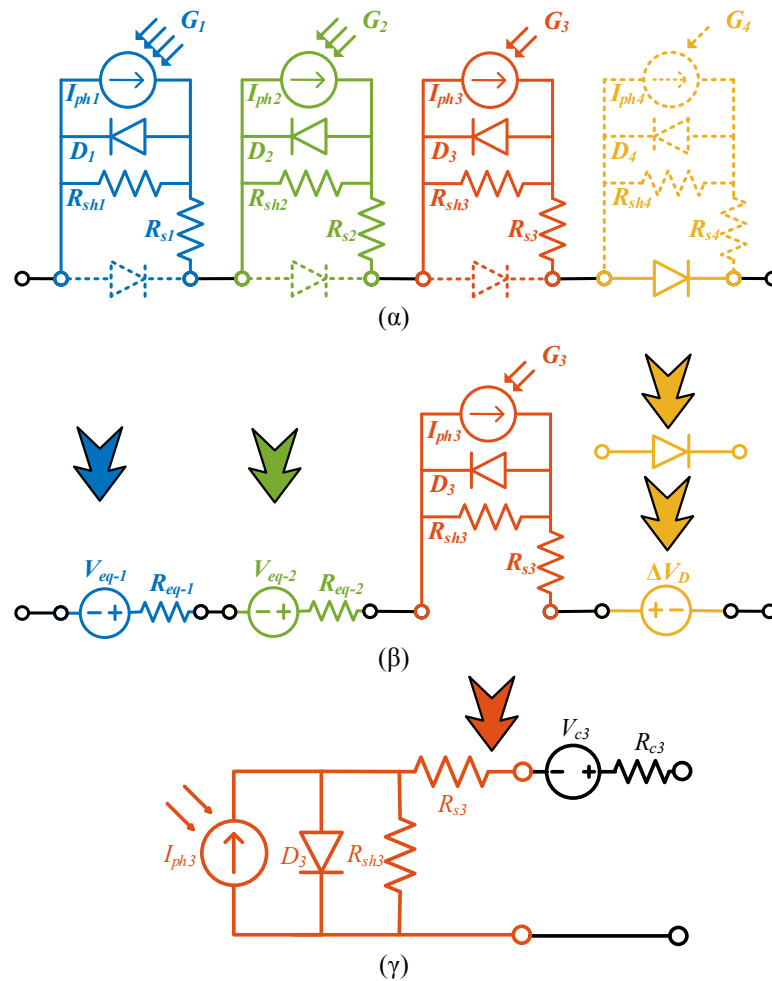
$$\begin{aligned}
 V_{mp,ideal} &= a(w-1) - V_c \\
 I_{mp,ideal} &= I_{ph} - \frac{I_{ph}}{w} \\
 w &= W \left\{ \frac{I_{ph}}{I_s} e^{1 + \frac{V_c}{a}} \right\}
 \end{aligned} \tag{3.28}$$

Στη συνέχεια, η έννοια του MPPι επεκτείνεται στο *πλήρες επαυξημένο μοντέλο* (Σχ. 3.27(α)). Στο MPP₁, όπου μεγιστοποιείται η ισχύς της ιδανική συνιστώσας, η ισχύς εξόδου του συνολικού επαυξημένου κυκλώματος είναι και αυτή σχεδόν μέγιστη. Έτσι, εφαρμόζοντας τους νόμους του Kirchhoff και τις (3.28), η τάση και το ρεύμα του πλήρους κυκλώματος στο MPP δίνονται από τις:

$$\begin{aligned}
 V_{mp} &= \frac{R_s + R_c + R_{sh}}{R_{sh}} a(w-1) - (R_s + R_c) I_{ph} \left(1 - \frac{1}{w}\right) - \frac{R_s + R_c}{R_{sh}} V_c \\
 I_{mp} &= I_{ph} \left(1 - \frac{1}{w}\right) - \frac{a(w-1) - V_c}{R_{sh}} \\
 w &= W \left\{ \frac{I_{ph}}{I_s} e^{1 + \frac{V_c}{a}} \right\}
 \end{aligned} \tag{3.29}$$

3.4.1.B Περιγραφή σκιασμένης ΦΒ πλαισιοσειράς με το επαυξημένο μοντέλο

Η εφαρμογή του επαυξημένου μοντέλου για ολόκληρη την πλαισιοσειρά σε συνθήκες σκίασης, περιγράφεται μέσω το παραδείγματος του Σχ. 3.25 της προηγούμενης ενότητας. Το ισοδύναμο κύκλωμα απεικονίζεται στο Σχ. 3.28(α), αποτελούμενο από τα επιμέρους κυκλώματα των τεσσάρων ομάδων: κάθε ομάδα περιγράφεται από το μοντέλο των πέντε παραμέτρων και σχεδιάζεται με ξεχωριστό χρώμα λόγω των διαφορετικών συνθηκών ακτινοβολίας και θερμοκρασίας. Με διακεκομμένη διαγράμμιση σχεδιάζονται τα στοιχεία που παρακάμπτονται, θεωρώντας *λειτουργία στο MPP3* (Σχ. 3.25). Όπως εξηγείται και στην



Σχ. 3.28. Ισοδύναμο κύκλωμα της ΦΒ πλαισιοσειράς του Σχ. 3.25 κατά τη λειτουργία το MPP3. (α) Πλήρες κύκλωμα με διακεκομμένη διαγράμμιση των στοιχείων που παρακάμπτονται, (β) απλοποιημένο κύκλωμα, και (γ) ισοδύναμο κύκλωμα με το επαυξημένου μοντέλο μίας διόδου.

προηγούμενη ενότητα, η ομάδα 4 (κίτρινο χρώμα) παρακάμπτεται διότι άγει η διόδος διαφυγής της, ενώ οι ομάδες 1 και 2 (μπλε και πράσινο χρώμα) λειτουργούν στο μειωμένο ρεύμα που καθορίζεται από την ακτινοβολία G_3 της ομάδας 3 (κόκκινο χρώμα).

Για να απλοποιηθεί το κύκλωμα του Σχ. 3.28(α), λαμβάνονται υπόψιν οι ακόλουθες παρατηρήσεις (Σχ. 3.28(β)):

- ✓ Η ομάδα 4 που παρακάμπτεται, μπορεί να περιγραφεί απλά από μία πηγή τάσης αρνητικής πολικότητας που αντιστοιχεί στην πτώση τάσης της διόδου διαφυγής ΔV_D .
- ✓ Κάθε μία από τις ομάδες 1 και 2, μπορεί να μοντελοποιηθεί απλουστευτικά από μία πηγή τάσης V_{eq-i} και μία αντίσταση R_{eq-i} . Αυτό ισχύει διότι οι εν λόγω ομάδες λειτουργούν στο κατακόρυφο τμήμα της χαρακτηριστικής τους, και όχι κοντά στο δικό τους μέγιστο, το οποίο θεωρείται προσεγγιστικά γραμμικό.
- ✓ Από το κύκλωμα της ομάδας 3 αφαιρείται η ανάστροφα πολωμένη διόδος διαφυγής, αλλά δεν απλουστεύεται περαιτέρω, διότι αντιστοιχεί σε κυρίαρχη συνιστώσα της πλαισιοσειράς όταν λειτουργεί στο MPP3.

Το απλοποιημένο ισοδύναμο κύκλωμα του Σχ. 3.28(β) περιλαμβάνει γραμμικά στοιχεία για

όλες τις υπόλοιπες ομάδες, εκτός της ομάδας 3. Αν οι επιμέρους πηγές τάσης και αντιστάσεις συνδυαστούν σε μία κοινή V_{c3} και R_{c3} αντίστοιχα, τότε το κύκλωμα μπορεί να περιγραφεί από το επαυξημένο μοντέλο μίας διόδου (Σχ. 3.28(γ)), επιτρέποντας τη χρήση των (3.29) για τον προσδιορισμό του MPP3.

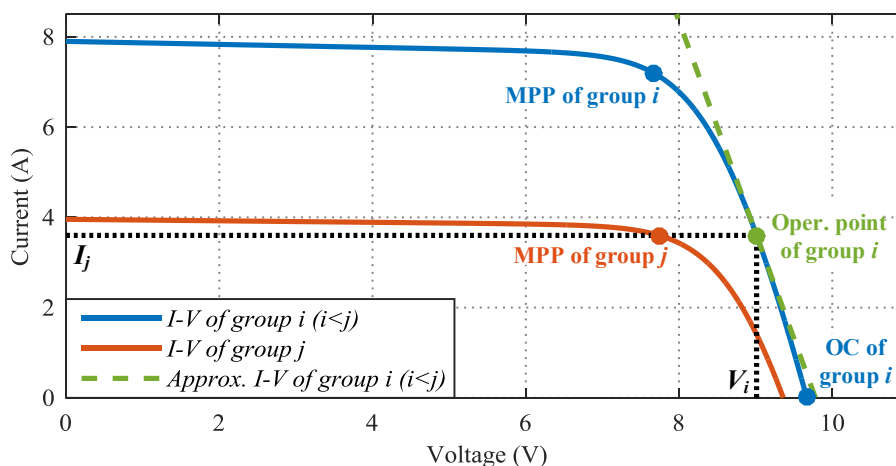
Στη γενική περίπτωση n διαφορετικών επιπέδων ακτινοβολίας, εμφανίζονται το πολύ ισάριθμα MPPs. Η μοντελοποίηση όλης της πλαισιοσειράς όταν λειτουργεί στο MPP _{j} με το κύκλωμα του Σχ. 3.28(γ) απαιτεί να γραμμικοποιηθούν όλες οι ομάδες i ($i < j$) που έχουν υψηλότερη ακτινοβολία από την ομάδα j . Η διαδικασία αυτή περιγράφεται γραφικά με το ακόλουθο Σχ. 3.29. Το κοινό ρεύμα λειτουργίας I_j όλων των στοιχειοσειρών της πλαισιοσειράς καθορίζεται ουσιαστικά από την ομάδα j (κόκκινη καμπύλη), η οποία λειτουργεί πολύ κοντά στο δικό της MPP. Αντίθετα, αυτό το ρεύμα αντιστοιχεί σε υποβέλτιστη λειτουργία για τις υπόλοιπες ομάδες i ($i < j$) (μπλε καμπύλη), οι οποίες λειτουργούν σε ένα σημείο ανάμεσα στο MPP και OC (πράσινος κυκλικός δείκτης) και συνεισφέρουν κατά τάση V_i .

Δεδομένου ότι η καμπυλότητα της μπλε χαρακτηριστικής γύρω από το σημείο λειτουργίας (V_i, I_j) είναι πολύ πιο γραμμική σε σχέση με την κόκκινη καμπύλη (Σχ. 3.29), η μπλε χαρακτηριστική μπορεί να προσεγγιστεί από την εφαπτόμενη ευθεία στο σημείο λειτουργίας (πράσινη διακεκομμένη γραμμή). Η μοντελοποίηση της απλουστευμένης χαρακτηριστικής γίνεται εύκολα με μία πηγή τάσης V_{eq-i} και μία αντίσταση σειράς R_{eq-i} για τις οποίες θα ισχύει:

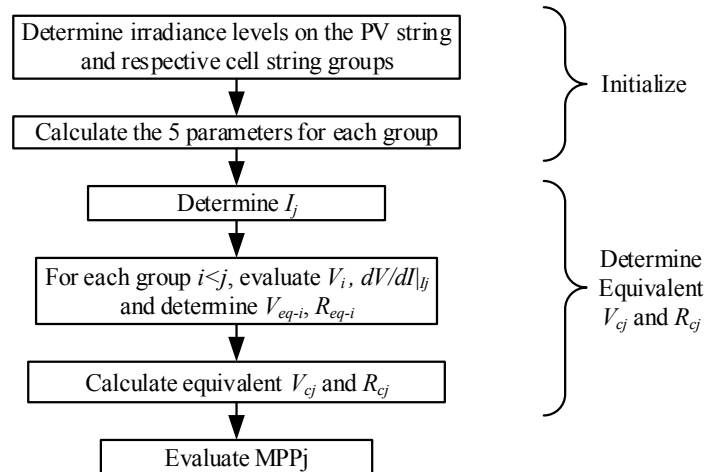
$$V_{eq-i} = V_i + R_{eq-i} I_j \quad (3.30)$$

$$R_{eq-i} = - \left. \frac{dV}{dI} \right|_{I_j} \quad (3.31)$$

Η (3.30) συσχετίζει την ισοδύναμη πηγή τάσης V_{eq-i} με το σημείο λειτουργίας (V_i, I_j) και την ισοδύναμη αντίσταση R_{eq-i} , η οποία αντιστοιχεί στην κλίση της εφαπτόμενης ευθείας μέσω της (3.31). Για την εφαρμογή των (3.30)-(3.31) απαιτείται αρχικά ο υπολογισμός του ρεύματος I_j από την (2.17) χρησιμοποιώντας τις πέντε παραμέτρους της ομάδας j , και στη συνέχεια της τάσης V_i και της παραγώγου $dV/dI|_{I_j}$ μέσω των (2.3) και (2.10) με τις παραμέτρους της ομάδας i . Έχοντας προσδιορίσει τις ισοδύναμες V_{eq-i} και R_{eq-i} για κάθε ομάδα i ($i < j$), η συνολική πηγή τάσης V_{cj} και αντίσταση R_{cj} του επαυξημένου κυκλώματος δίνεται από τις:



Σχ. 3.29. Γραμμικοποίηση της χαρακτηριστικής $I-V$ των ομάδων i ($i < j$) για λειτουργία στο MPP _{j} .



Σχ. 3.30. Διάγραμμα υπολογισμών για τον προσδιορισμό του MPP_j με χρήση του επαυξημένου ΦΒ μοντέλου μίας διόδου.

$$V_{cj} = \sum_{i=1}^{j-1} V_{eq-i} - \sum_{i=j+1}^n \Delta V_D \quad (3.32)$$

$$R_{cj} = \sum_{i=1}^{j-1} R_{eq-i} \quad (3.33)$$

Συνολικά η διαδικασία περιγράφεται στο Σχ. 3.30. Αρχικά, οι στοιχειοσειρές της πλαισιοσειράς κατηγοριοποιούνται σε ομάδες και προσδιορίζονται οι πέντε παράμετροι κάθε ομάδας με τις αναλυτικές διαδικασίες του προηγούμενου κεφαλαίου. Στη συνέχεια, για τον προσδιορισμό του υπό μελέτη MPP_j, υπολογίζεται το MPP ρεύμα I_j της ομάδας j σαν να λειτουργούσε μόνη της μέσω της (2.17). Ακολούθως, για κάθε ομάδα i ($i < j$) προσδιορίζονται η τάση V_i και η παράγωγος της τάσης $dV/dI|_{I_j}$ στο ρεύμα I_j από τις (2.3) και (2.10), και εφαρμόζονται οι (3.30)-(3.31) για την εύρεση της ισοδύναμης V_{eq-i} και R_{eq-i} . Έπειτα, υπολογίζονται η πηγή τάσης V_{cj} και αντίσταση R_{cj} μέσω των (3.32)-(3.33) και εφαρμόζονται οι (3.29) για την τάση και το ρεύμα του MPP.

Με τις προαναφερθείσες εξισώσεις, κάθε MPP σκιασμένης πλαισιοσειράς συνδέεται αναλυτικά με τις πέντε παραμέτρους των συνιστωσών στοιχειοσειρών της. Βέβαια, η ανωτέρω μεθοδολογία δεν προσφέρεται ιδιαίτερα για τον υπολογισμό των MPPs στην πράξη, λόγω της πολυπλοκότητας και της εξάρτησής της από κυκλωματικά στοιχεία. Ουσιαστικά, εισάγει το θεωρητικό υπόβαθρο για τις MPP σχέσεις που ακολουθούν στη συνέχεια.

3.4.2 Βελτιωμένες MPP σχέσεις

Αξιοποιώντας τη μεθοδολογία της προηγούμενης παραγράφου για τον προσδιορισμό των MPPs συναρτήσεως των πέντε παραμέτρων, και συνδυάζοντας με τις αναλυτικές σχέσεις για την εξαγωγή και αναγωγή των τελευταίων από την ενότητα 2.3, προκύπτουν οι ακόλουθες εξισώσεις (λεπτομέρειες στο ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β):

$$V_{mpj} = \sum_{i=1}^j N_i \left(V_{mp}^{G_j, T_i} + \delta_0 V_{oc0} \frac{T_i}{T_0} \ln \left[1 + w_0 \left(\frac{G_i}{G_j} - 1 \right) \right] \right) - \sum_{i=j+1}^n N_i \Delta V_D + \delta_0 V_{oc0} N_j \frac{T_j}{T_0} \ln \frac{N_j}{\sum_{i=1}^j N_i} \quad (3.34)$$

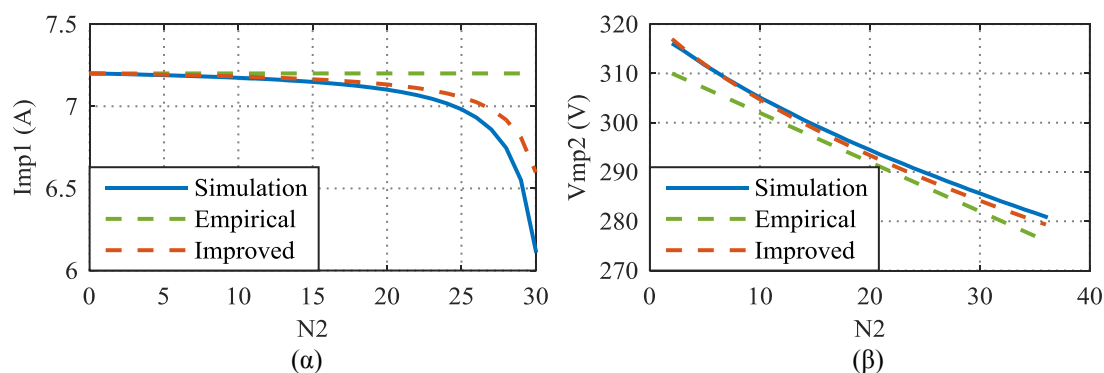
$$I_{mpj} = I_{mp}^{G_j, T_j} + I_{sc}^{G_j, T_j} \left(\frac{1}{w_0} - \frac{1}{w_0 + \frac{1}{\delta_0} \frac{\sum_{i=1}^{j-1} N_i}{N_j} - \frac{\Delta V_D}{\delta_0 V_{oc0}} \frac{\sum_{i=j+1}^n N_i}{N_j}} \right) \quad (3.35)$$

όπου:

- ✓ Τα μεγέθη $V_{mp}^{G_j, T_i}$, $I_{mp}^{G_j, T_j}$ και $I_{sc}^{G_j, T_j}$ αναφέρονται σε μία στοιχειοσειρά που λειτουργεί σε ακτινοβολία G_j και θερμοκρασία T_i ή T_j αντίστοιχα, όπως υπολογίζονται από τις (2.49) της ενότητας 2.4.
- ✓ Οι βοηθητικοί όροι δ_0 και w_0 υπολογίζονται από τις (2.33) και (2.39) της ενότητας 2.3.
- ✓ Η πτώση τάσης ΔV_D λαμβάνεται ίση με 1 V.

Η (3.34) εμπεριέχει τρεις κύριους όρους: δύο άθροισματα και μία λογαριθμική έκφραση. Το πρώτο άθροισμα αφορά τις ομάδες 1... j που υπόκεινται σε ακτινοβολία μεγαλύτερη ή ίση από την ομάδα j : κάθε στοιχειοσειρά συμβάλει όσο η MPP τάση της προσαυξημένη κατά ένα λογαριθμικό όρο που εξαρτάται από τον λόγο των ακτινοβολιών. Αντίθετα, οι υπόλοιπες ομάδες $j+1$... n συνεισφέρουν με τη σωρευμένη πτώση τάσης των διόδων διαφυγής τους που άγουν. Ο τελευταίος λογαριθμικός όρος περιγράφει τη μετατόπιση που υφίσταται το MPP στην καμπύλη P - V λόγω της σκιασμένης έκτασης. Όσον αφορά στο I_{mpj} της (3.35), εξαρτάται από τα ρεύματα $I_{mp}^{G_j, T_j}$ και $I_{sc}^{G_j, T_j}$ της ομάδας j που ενσωματώνουν την επίδραση της ακτινοβολίας G_j , αλλά και από την έκταση της σκίασης στον παρονομαστή του κλάσματος μέσα στην παρένθεση.

Για φανεί η συνεισφορά στην ακρίβεια των νέων βελτιωμένων εκφράσεων σε σχέση με τις απλούστερες εμπειρικές της ενότητας 3.3, ακολουθούν ενδεικτικά γραφήματα στο Σχ. 3.31. Μελετάται η τροποποίηση των δύο MPPs μίας ΦΒ πλαισιοσειράς που σκιάζεται σε μεταβαλλόμενη έκταση από δύο επίπεδα ακτινοβολίας, αντίστοιχα με τα γραφήματα των Σχ. 3.22 και Σχ. 3.24 της ενότητας 3.3.



Σχ. 3.31. Εξάρτηση των (α) I_{mp1} και (β) V_{mp2} από το πλήθος των σκιασμένων στοιχειοσειρών N_2 για μία ΦΒ πλαισιοσειρά που υπόκειται σε δύο διαφορετικά επίπεδα ακτινοβολίας ($G_1 = 1.0$, $G_2 = 0.5$).

Στο Σχ. 3.31(α), απεικονίζεται η εξάρτηση του ρεύματος I_{mp1} του MPP1 από την έκταση της σκίασης N_2 , όπως προκύπτει μέσω προσομοίωσης από το αναλυτικό κυκλωματικό μοντέλο (*Simulation*) (μπλε συνεχής γραμμή), το οποίο λαμβάνεται ως βάση αναφοράς για τη σύγκριση που ακολουθεί. Με πράσινη διακεκομμένη γραμμή σχεδιάζονται τα αποτελέσματα των εμπειρικών εκφράσεων της προηγούμενης ενότητας (*Empirical*), ενώ με κόκκινη διακεκομμένη γραμμή των νέων βελτιωμένων σχέσεων (3.34)-(3.35). Ενώ, οι *Empirical* θεωρούν το I_{mp1} ανεξάρτητο από την έκταση της σκίασης, οι *Improved* μοντελοποιούν πετυχημένα την απότομη μείωσή του σε μεγάλες εκτάσεις σκίασης, παρουσιάζοντας μεγαλύτερη ακρίβεια σε όλο το εύρος λειτουργίας. Παρομοίως, στο Σχ. 3.31(β) σχεδιάζεται η μεταβολή της τάσης V_{mp2} του MPP2 με τα τρία μοντέλα. Και εδώ η ρεαλιστικότερη διατύπωση της (3.34) οδηγεί σε σχεδόν ταύτιση των *Improved* με τα *Simulation*, σε αντίθεση με τις *Empirical* που εμφανίζουν μικρή απόκλιση. Λεπτομερής συγκριτική ανάλυση ακολουθεί στην επόμενη παράγραφο.

Συνεπώς, οι εξισώσεις (3.34)-(3.35) είναι αναλυτικές εκφράσεις των δεδομένων του τεχνικού φυλλαδίου, δεν ενσωματώνουν εμπειρικούς συντελεστές, έχουν άρτια θεωρητική τεκμηρίωση, και παρουσιάζουν πολύ καλή ακρίβεια όπως φαίνεται στη συνέχεια. Ουσιαστικά, αποτελούν πολυπλοκότερη διατύπωση των αντίστοιχων σχέσεων (3.27) της ενότητας 3.3: εφαρμόζονται οι μεν ή οι δε αναλόγως τις απαιτήσεις για ακρίβεια.

3.4.3 Σύγκριση ακρίβειας μέσω προσομοιώσεων

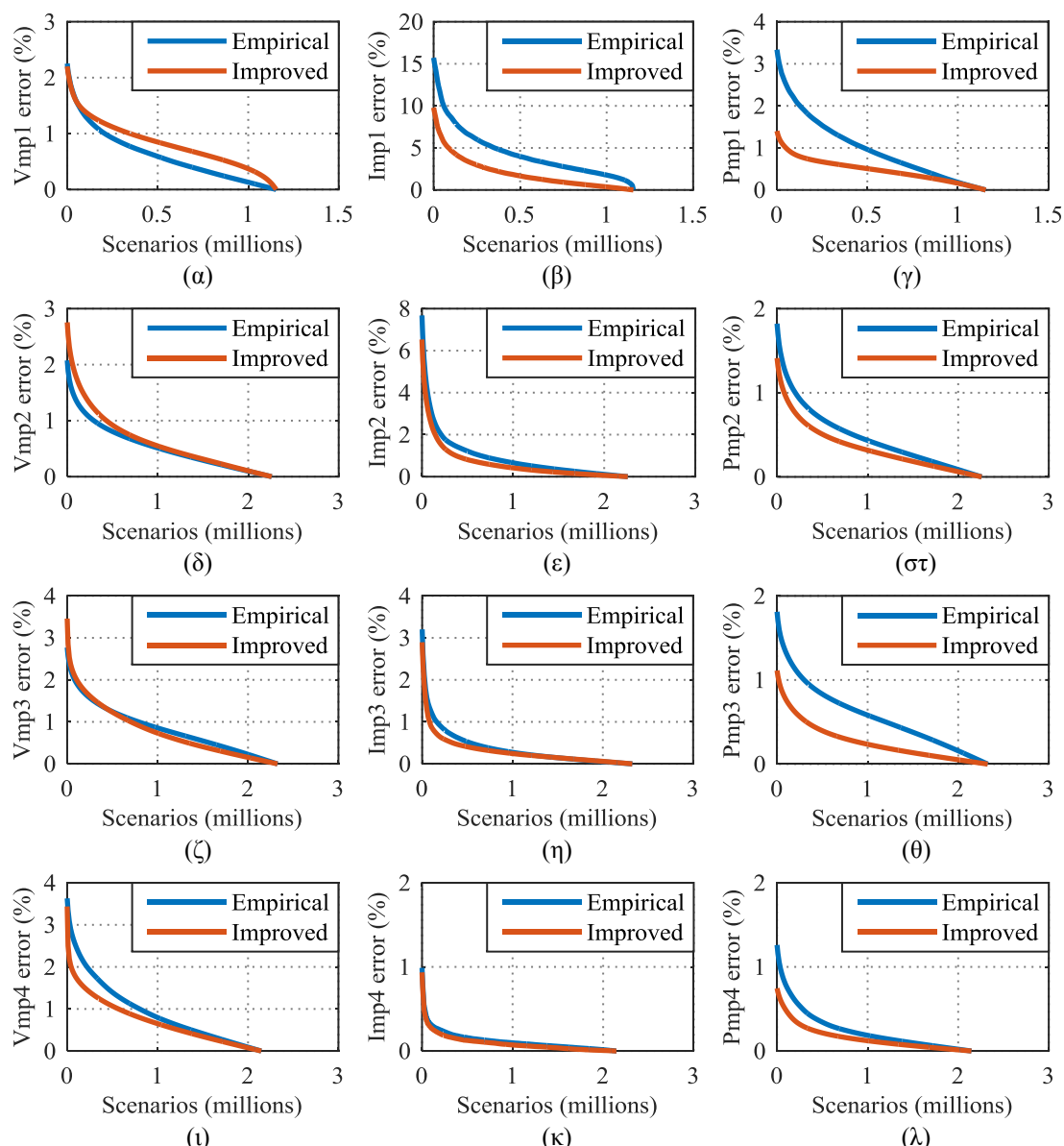
Για την επιβεβαίωση των νέων MPP σχέσεων, εκτελούνται προσομοιώσεις στο λογισμικό *MATLAB* για μία ΦΒ πλαισιοσειρά 12 πλαισίων, σε τέσσερα διαφορετικά επίπεδα ακτινοβολίας. Θεωρείται μεγάλο εύρος ακτινοβολίας από 100 W/m^2 έως 1000 W/m^2 (βήμα 200 W/m^2) και θερμοκρασίας από $5 \text{ }^\circ\text{C}$ έως $65 \text{ }^\circ\text{C}$ (βήμα $10 \text{ }^\circ\text{C}$), ενώ προσομοιώνονται 20 εμπορικά ΦΒ πλαίσια. Έτσι, προκύπτουν 119 χιλιάδες σενάρια ανά πλαίσιο, ήτοι 2.38 εκατομμύρια σενάρια σκίασης συνολικά.

Αρχικά κάθε σενάριο προσομοιώνεται με το αναλυτικό κυκλωματικό μοντέλο της ενότητας 3.1, παράγεται η χαρακτηριστική $P-V$ και εντοπίζονται όλα τα τοπικά μέγιστα MPP1, MPP2, MPP3 και MPP4 (μέχρι τέσσερα διότι τόσες είναι οι διαφορετικές εντάσεις της ακτινοβολίας). Στη συνέχεια, εφαρμόζονται οι νέες βελτιωμένες εξισώσεις (3.34)-(3.35) (*Improved*), καθώς επίσης και οι περιγραφικές σχέσεις (3.27) της ενότητας 3.3 (*Empirical*). Στο Σχ. 3.32, παρουσιάζονται τα σφάλματα που προκύπτουν στην εκτίμηση του ρεύματος, της τάσης και της ισχύος για κάθε ένα από τα τέσσερα MPPs.

Δεδομένου ότι το πλήθος των σεναρίων είναι υπέρογκο, λαμβάνονται μόνο τα σφάλματα που περιλαμβάνονται στο 99ο εκατοστημόριο (99 percentile [212]). Δηλαδή, απορρίπτονται το 1% των πιο ακραίων σφαλμάτων που αντιστοιχούν σε μη ρεαλιστικές καταστάσεις, ώστε τα αποτελέσματα που ακολουθούν να είναι αντιπροσωπευτικά της πραγματικότητας.

Εκ πρώτης όψεως, τα σφάλματα των *Empirical* (μπλε χρώμα) και *Improved* (κόκκινο χρώμα) εξισώσεων είναι παρόμοιου μεγέθους, με τη νέα μέθοδο να είναι εν γένει καλύτερη (Σχ. 3.32). Η τελευταία υπερισχύει αισθητά στο MPP1, και συγκεκριμένα στο I_{mp1} (Σχ. 3.32(β)) και κατά επέκταση στην P_{mp1} (Σχ. 3.32(γ)), λόγω της ορθότερης περιγραφής του φαινομένου με την (3.35) όπως εξηγείται και στην προηγούμενη παράγραφο.

Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων ποσοτικοποιούνται στον πίνακα Π. 3.3 σε μορφή rms



Σχ. 3.32. Σύγκριση σφαλμάτων εκτίμησης των MPPs με τις δύο μεθόδους για τα 2.38 εκατομμύρια σενάρια. Ρεύμα, τάση και ισχύς στα (α)-(γ) MPP1, (δ)-(στ) MPP2, (ζ)-(θ) MPP3 και (ι)-(λ) MPP4.

σφαλμάτων. Και οι δύο μέθοδοι αποδεικνύονται ικανοποιητικά ακριβείς, με την *Improved* να παρουσιάζει μικρότερα σφάλματα στις περισσότερες περιπτώσεις (εκτός από μικροδιαφορές στην τάση των MPP1 και MPP2). Στη δυσκολότερη περίπτωση του I_{mp1} , οι *Empirical* σχέσεις εμφανίζουν περίπου 5% σφάλμα, το οποίο οι νέες εκφράσεις περιορίζουν γύρω στο 2.7%. Συνολικά, τα rms σφάλματα τάσης είναι κάτω του 1% και για τις δύο μεθόδους, τα σφάλματα ρεύματος κοντά στο 2.7% και 1.5%, και τα σφάλματα ισχύος κάτω από 0.8% και 0.4%.

Ουσιαστικά, το κύριο συμπέρασμα από την ανωτέρω διερεύνηση είναι ότι οι περιγραφικές σχέσεις της ενότητας 3.3 επιβεβαιώνονται περαιτέρω μέσω των θεωρητικά τεκμηριωμένων MPP εκφράσεων αυτής της ενότητας. Και οι δύο επιλογές είναι αναλυτικές και εύκολα εφαρμόσιμες μέθοδοι με ικανοποιητική ακρίβεια, με τη δεύτερη εναλλακτική να έχει σχετικά περιπλοκότερη διατύπωση αλλά μεγαλύτερη ακρίβεια στα υποδεέστερα MPPs.

Π. 3.3. Rms σφάλματα εκτίμησης των τεσσάρων MPPs για τα 2.38 εκατομμύρια σενάρια σκίασης με τις δύο μεθόδους.

| MPPs | RMS σφάλμα V_{mp} (%) | | RMS σφάλμα I_{mp} (%) | | RMS σφάλμα P_{mp} (%) | |
|-----------------|-------------------------|-----------------|-------------------------|-----------------|-------------------------|-----------------|
| | <i>Empirical</i> | <i>Improved</i> | <i>Empirical</i> | <i>Improved</i> | <i>Empirical</i> | <i>Improved</i> |
| MPP1 | 0.76 | 0.91 | 5.18 | 2.68 | 1.22 | 0.55 |
| MPP2 | 0.67 | 0.81 | 1.37 | 1.07 | 0.58 | 0.43 |
| MPP3 | 1.00 | 0.98 | 0.55 | 0.45 | 0.67 | 0.34 |
| MPP4 | 1.19 | 0.89 | 0.16 | 0.14 | 0.34 | 0.21 |
| ΣΥΝΟΛΙΚΑ | 0.93 | 0.90 | 2.69 | 1.46 | 0.77 | 0.40 |

3.5 Περιγραφικές Σχέσεις Προσδιορισμού των MPPs ΦΒ Συστοιχίας

Στη συνέχεια, οι περιγραφικές σχέσεις επεκτείνονται στην πληρέστερη ΦΒ διάταξη: τη ΦΒ συστοιχία πολλών παράλληλων κλάδων (πλαισιοσειρών). Η ανάλυση που ακολουθεί βασίζεται στον χαρακτηρισμό των MPPs που περιγράφεται στην ενότητα 3.2, και συγκεκριμένα στην παράγραφο 3.2.5 για τη ΦΒ συστοιχία, ενώ καλύπτει τη γενική περίπτωση πολλαπλών επιπέδων ακτινοβολίας. Οι ακόλουθες σχέσεις παραμένουν αναλυτικής μορφής, χρησιμοποιούν ως μοναδικά δεδομένα εισόδου πληροφορίες που αναγράφονται στο τεχνικό φυλλάδιο του ΦΒ πλαισίου, ενώ είναι εφαρμόσιμες σε οποιαδήποτε θερμοκρασία T (όχι μόνο ονομαστική θερμοκρασία).

Αρχικά μελετώνται και προσδιορίζονται τα τοπικά μέγιστα τύπου MPPA και στη συνέχεια το MPPB, χρησιμοποιώντας ως βάση τις αντίστοιχες εξισώσεις της πλαισιοσειράς (3.27), έναντι των πολυπλοκότερων (3.34)-(3.35) της προηγούμενης ενότητας. Αξίζει να σημειωθεί πώς εκφράσεις παρόμοιας φιλοσοφίας δίνονται και στην [68]. Παρόλα αυτά, υπάρχουν θεμελιώδεις διαφορές με τις προτεινόμενες εξισώσεις, όπως εξηγείται στη συνέχεια. Το ακόλουθο υλικό δημοσιεύτηκε στη [71].

3.5.1 Εξισώσεις για τα MPPAs

Για να εξαχθούν οι μαθηματικές εκφράσεις των MPPA^{*j*} της συστοιχίας, λαμβάνεται υπόψη και μοντελοποιείται η συσχέτισή τους με το αντίστοιχο MPP^{*j*} της πλαισιοσειράς *i*. Βάση για αυτήν την ανάλυση αποτελούν οι περιγραφικές σχέσεις (3.27) που αφορούν τα τοπικά μέγιστα της πλαισιοσειράς, αφού γραφούν με τον γενικευμένο συμβολισμό που χρησιμοποιείται στην παράγραφο 3.2.5 για τη συστοιχία:

$$\text{MPP}_j^i: \begin{cases} V_{mpj}^i = \sum_{g=1}^j N_g^i \left[\frac{G_j^i}{G_g^i} V_{mp0} + \left(1 - \frac{G_j^i}{G_g^i} \right) V_{oc0} \right] - \sum_{g=j+1}^{ni} N_g^i \Delta V_D \\ I_{mpj}^i = G_j^i I_{mp0} \left[1 + \lambda \frac{\sum_{g=1}^{j-1} N_g^i}{N_m N_{cs}} \right] \end{cases} \quad (3.36)$$

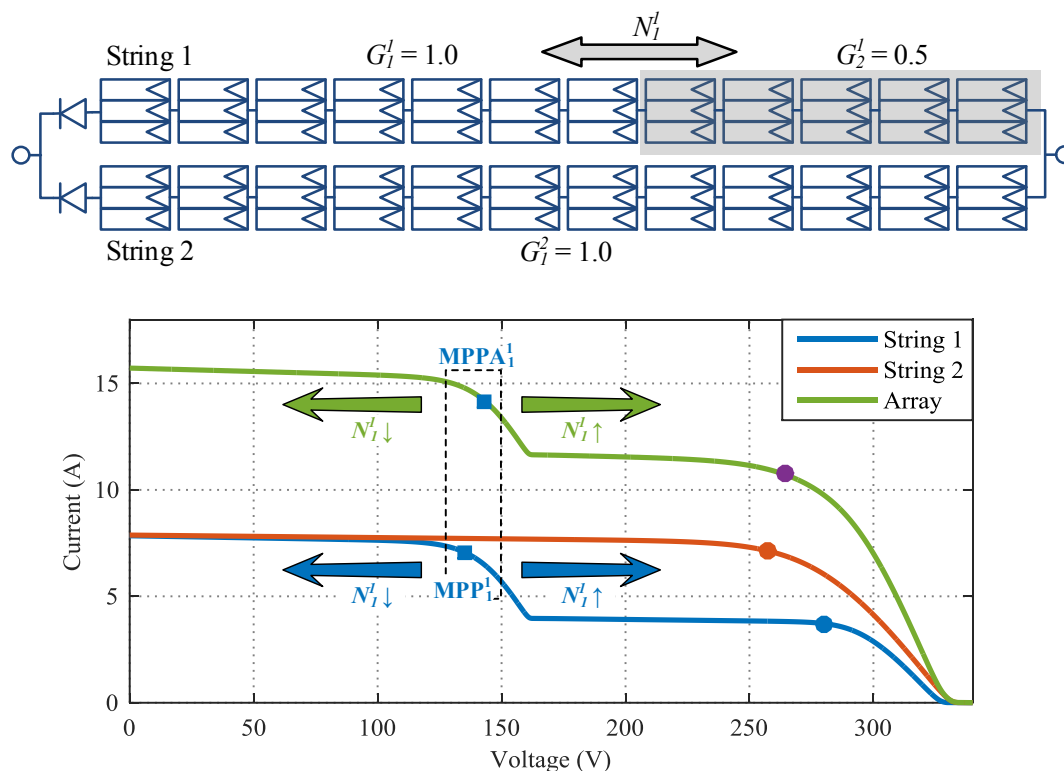
Αξίζει να σημειωθεί ότι επιλέχθηκαν οι ανωτέρω MPP σχέσεις για την πλαισιοσειρά, έναντι των εξισώσεων της ενότητας 3.4, λόγω απλούστερης διατύπωσης.

3.5.1.A Προσδιορισμός της τάσης V_{mpAj}^l

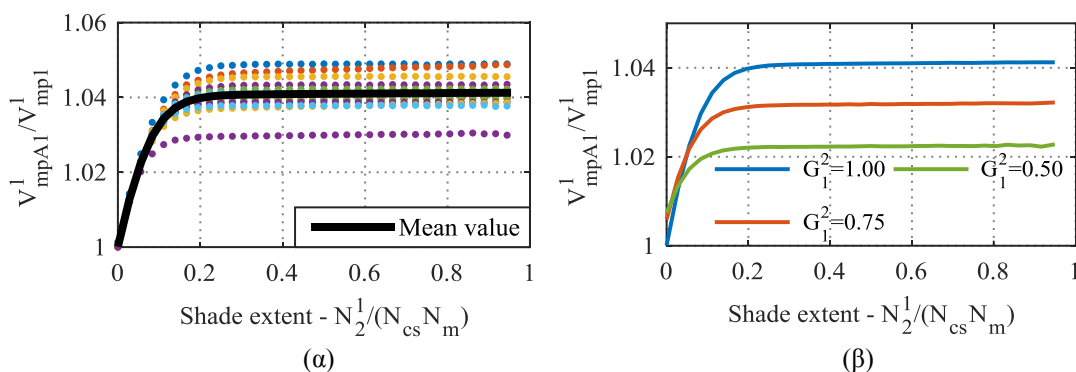
Όπως εξηγείται στην παράγραφο 3.2.5, η τάση καθενός $MPPA_j^l$ της συστοιχίας σχετίζεται άμεσα με την τάση του MPP_j^l της πλαισιοσειράς από το οποίο προέρχεται. Για παράδειγμα, στο πλαίσιο εστίασης του Σχ. 3.20(α) στην παράγραφο 3.2.5 φαίνεται ότι η V_{mpA1}^l του $MPPA_1^l$ είναι πολύ κοντά στην V_{mp1}^l του MPP_1^l , και συγκεκριμένα είναι ελαφρώς μεγαλύτερη. Για να προσδιοριστεί η τιμή αυτής της διαφοράς, μελετάται το απλό σενάριο του Σχ. 3.33. Η πλαισιοσειρά 2 παραμένει ασκίαστη σε $G_1^l = 1.0$, ενώ η πλαισιοσειρά 1 σκιάζεται σε μεταβλητή έκταση N_1^l , από 0% έως 100% της συνολικής της έκτασης. Η ακτινοβολία στο ασκίαστο και σκιασμένο τμήμα της είναι $G_1^l = 1.0$ και $G_2^l = 0.5$, αντίστοιχα.

Καθώς η έκταση της σκίασης αυξομειώνεται, μεταβάλλεται αντίστοιχα η χαρακτηριστική της πλαισιοσειράς 1 (μπλε γραμμή), και συνεπώς και η χαρακτηριστική της συστοιχίας (πράσινη καμπύλη), όπως δείχνουν τα χρωματιστά βέλη στο Σχ. 3.33. Με ομόρροπο τρόπο μετατοπίζονται και τα MPP_1^l (μπλε τετραγωνικός δείκτης στη μπλε καμπύλη) και $MPPA_1^l$ (μπλε τετραγωνικός δείκτης στην πράσινη καμπύλη) σε χαμηλότερη ή υψηλότερη τάση.

Ο λόγος των τάσεων των δύο MPPs V_{mpA1}^l προς V_{mp1}^l απεικονίζεται στο Σχ. 3.34 συναρτήσει της κανονικοποιημένης σκιασμένης έκτασης (λόγος των σκιασμένων στοιχειοσειρών N_1^l προς το συνολικό πλήθος των στοιχειοσειρών στην πλαισιοσειρά). Οι υπολογισμοί επαναλαμβάνονται για 12 εμπορικά ΦΒ πλαίσια, ενώ η πτώση τάσης ΔV_D θεωρείται αρχικά μηδενική για λόγους απλότητας. Η τάση V_{mpA1}^l είναι πάντα υψηλότερη της V_{mp1}^l κατά ένα μικρό



Σχ. 3.33. Χαρακτηριστική $I-V$ μερικώς σκιασμένης συστοιχίας και των δύο συνιστωσών πλαισιοσειρών της. Η πλαισιοσειρά 1 σκιάζεται σε μεταβλητή έκταση, ενώ η πλαισιοσειρά 2 παραμένει ασκίαστη.



Σχ. 3.34. Λόγος V^1_{mpA1} προς V^1_{mp1} ως συνάρτηση της έκτασης της σκίασης για τα σενάρια του Σχ. 3.33. (α) Διακύμανση του λόγου για 12 εμπορικά ΦΒ πλαίσια με επισημάνση του μέσου όρου, (β) μέσος όρος του λόγου για τα 12 πλαίσια, θεωρώντας διάφορες εντάσεις σκίασης.

ποσοστό έως 3% – 5% ανάλογα το πλαίσιο, ενώ η τιμή αυτή σταθεροποιείται για έκταση σκίασης άνω του 20%. Η μαύρη καμπύλη αντιστοιχεί στον μέσο όρο για όλα τα πλαίσια, ο οποίος συγκλίνει στην τιμή 1.04. Αυτή η ποσοστιαία προσαύξηση συμβολίζεται με μια νέα σταθερά $\kappa = 0.04$ η οποία χρησιμοποιείται στη συνέχεια της ανάλυσης.

Στο Σχ. 3.34(β), σχεδιάζεται η μέση τιμή του λόγου V^1_{mpA1} προς V^1_{mp1} για διαφορετικές τιμές ακτινοβολίας G_1^2 της ασκίαστης πλαισιοσειράς 2. Από ότι φαίνεται, η απόκλιση μεταξύ V^1_{mpA1} και V^1_{mp1} επηρεάζεται και από το ρεύμα λειτουργίας της πλαισιοσειράς 2 που δε σκιάζεται, το οποίο με τη σειρά του εξαρτάται άμεσα και αναλογικά από την ακτινοβολία G_1^2 . Η συγκεκριμένη παρατήρηση μπορεί να μοντελοποιηθεί με την ακόλουθη σχέση:

$$\frac{V^1_{mpA1}}{V^1_{mp1}} = 1 + \kappa \cdot G_1^2 \quad (3.37)$$

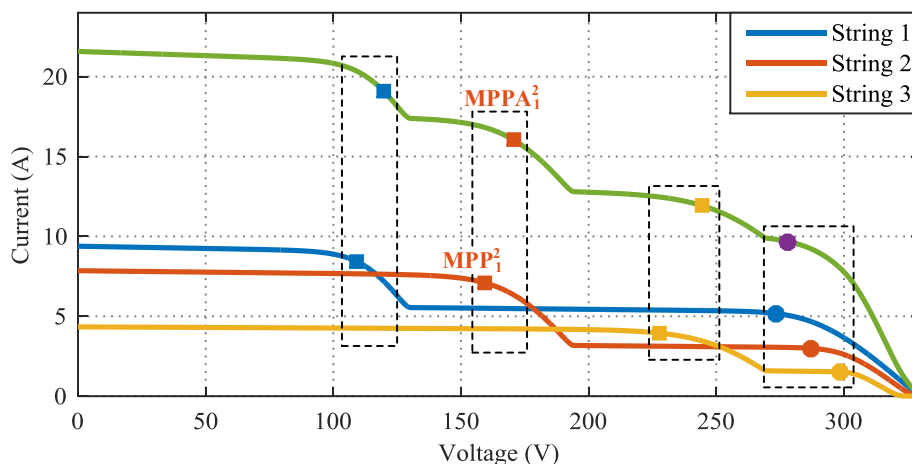
όπου $\kappa = 0.04$ και η τάση V^1_{mp1} δίνεται από την (3.36) για $\Delta V_D = 0$.

Αν η πλαισιοσειρά 2 δεν είναι ασκίαστη όπως θεωρείται παραπάνω, αλλά σκιάζεται μερικώς σε έκταση μικρότερη από την πλαισιοσειρά 1, τότε η (3.37) ισχύει και πάλι, καθώς το ρεύμα της πλαισιοσειράς 2 σε εκείνη την περιοχή λειτουργίας παραμένει ανάλογο της G_1^2 , ασχέτως της μορφής της χαρακτηριστικής $I-V$ στο υπόλοιπο εύρος λειτουργίας.

Για να επεκταθεί η (3.37) στην περίπτωση των πολλαπλών πλαισιοσειρών, μελετάται η ενδεικτική περίπτωση του Σχ. 3.35, στο οποίο απεικονίζεται η ηλεκτρική απόκριση μίας συστοιχίας που αποτελείται από τρεις πλαισιοσειρές, κάθε μία από τις οποίες σκιάζεται σε διαφορετική ένταση και έκταση. Εστιάζοντας στα MPPA² και MPP² (κόκκινοι τετραγωνικοί δείκτες), παρόμοια ανάλυση δείχνει ότι η απόκλιση της V^2_{mpA1} από την V^2_{mp1} είναι γραμμικά εξαρτημένη από τα ρεύμα των πλαισιοσειρών 1 και 3 (μπλε και κίτρινη γραμμή) στη συγκεκριμένη περιοχή λειτουργίας, δηλαδή από τις ακτινοβολίες G_2^1 και G_1^3 αντίστοιχα. Συνεπώς, η επίδραση κάθε πλαισιοσειράς είναι σωρευτική, επεκτείνοντας της (3.37) ως:

$$\frac{V^2_{mpA1}}{V^2_{mp1}} = 1 + \kappa \cdot (G_2^1 + G_1^3) \quad (3.38)$$

Για τη γενική περίπτωση πολλαπλών πλαισιοσειρών N_p , ο λόγος της τάσης του MPPAⁱ της


 Σχ. 3.35. Ενδεικτική χαρακτηριστική $I-V$ μερικώς σκιασμένης συστοιχίας τριών πλαισιοσειρών.

συστοιχίας προς την τάση του MPP_j^i της αντίστοιχης πλαισιοσειράς i , προσδιορίζεται από τον εμπειρικό συντελεστή κ και τον ακόλουθο όρο S_j^i :

$$\frac{V_{mpAj}^i}{V_{mpj}^i} = 1 + \kappa \cdot S_j^i \quad (3.39)$$

όπου:

$$S_j^i = \sum_{\forall s \neq i} G_g^s \quad (3.40)$$

$$\forall g: \sum_{r=1}^j N_r^i \in \left[\sum_{r=1}^{g-1} N_r^s, \sum_{r=1}^g N_r^s \right]$$

Ο όρος S_j^i περιγράφει το άθροισμα των επιπέδων ακτινοβολίας που συνδέονται με τα ρεύματα λειτουργίας όλων των υπολοίπων πλαισιοσειρών εκτός της i ($1, 2, \dots, i-1, i+1, \dots, N_p$) στην τάση του MPP_j^i . Σχετικά με τον συντελεστή κ , η σταθερή τιμή 0.04 αποτελεί ικανοποιητική προσέγγιση όταν η έκταση σκίασης είναι μεγαλύτερη του 20%, όπως εξηγείται παραπάνω. Κάτω από αυτό το όριο, ο κ κυμαίνεται μεταξύ του 0 και του 0.04 με μη-γραμμικό τρόπο (Σχ. 3.34(α)). Για μεγαλύτερη ακρίβεια, η ακόλουθη σχέση μπορεί να χρησιμοποιηθεί, η οποία είναι ακριβής σε όλο το εύρος αλλά η διατύπωση της είναι πολυπλοκότερη:

$$\kappa_j^i = 0.04 - 0.04 \cdot 10^{\left\{ \frac{\min_{\forall s, g} \left\{ \sum N_g^s \left| \sum N_g^s > \sum_{r=1}^j N_r^s \right\} - \sum_{r=1}^j N_r^s}{\sum_{g=1}^j N_g^i} \right\}} \right\}} \quad (3.41)$$

Επομένως, για τον προσδιορισμό της τιμής της V_{mpj}^i του MPP_j^i , ο άνω κλάδος της (3.36) αντικαθίσταται στην (3.39), καταλήγοντας στην ακόλουθη σχέση ($\Delta V_D = 0$):

$$V_{mpAj}^i = \left(1 + \kappa_j^i S_j^i \right) \sum_{g=1}^j N_g^i \left[\frac{G_j^i}{G_g^i} V_{mp} + \left(1 - \frac{G_j^i}{G_g^i} \right) V_{oc} \right] \quad (3.42)$$

Οι όροι V_{mp} και V_{oc} στην (3.42) αφορούν την τάση MPP και OC μίας στοιχειοσειράς που λειτουργεί σε ονομαστική ακτινοβολία, αλλά αυθαίρετη θερμοκρασία T . Στην παράγραφο 3.5.3 εξηγείται πως υπολογίζονται οι εν λόγω τιμές από τις ονομαστικές τάσεις V_{mp0} και V_{oc0} . Η τελική έκφραση για την V_{mpAj}^i βρίσκεται λαμβάνοντας υπόψιν τη μη-μηδενική πτώση τάσης ΔV_D :

$$V_{mpAj}^i = \left(1 + \kappa_j^i S_j^i\right) \sum_{g=1}^j N_g^i \left[\frac{G_j^i}{G_g^i} V_{mp} + \left(1 - \frac{G_j^i}{G_g^i}\right) V_{oc} \right] - \sum_{g=j+1}^{n_j} N_g^i \cdot \Delta V_D \quad (3.43)$$

όπου ο όρος S_j^i υπολογίζεται από την (3.40) και ο συντελεστής κ μπορεί είτε να θεωρηθεί σταθερός και ίσος με 0.04 ή να υπολογιστεί μέσω της (3.41). Τυπική τιμή για την $\Delta V_D = 1$ V ή πιο ακριβής τιμή αν είναι διαθέσιμα τα χαρακτηριστικά της διόδου διαφυγής.

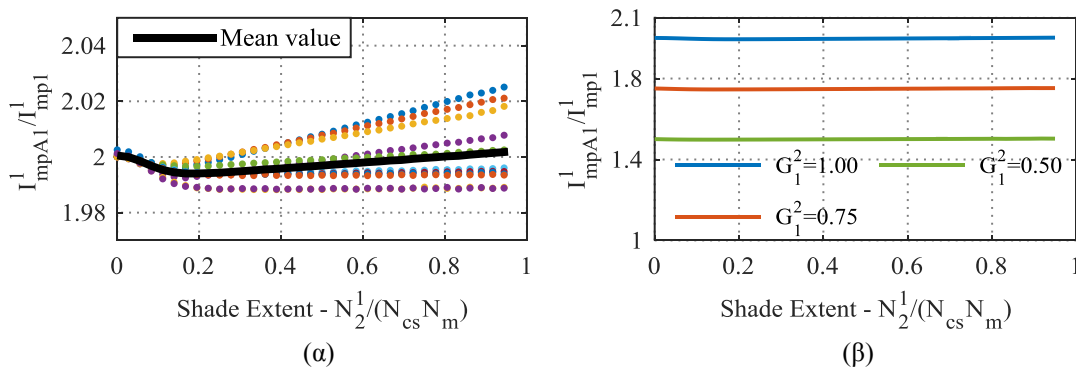
3.5.1.B Προσδιορισμός του ρεύματος I_{mpAj}^i

Μελετώντας ξανά το απλουστευμένο σενάριο σκίασης του Σχ. 3.33, ο λόγος I_{mpA1}^1 προς I_{mp1}^1 σχεδιάζεται συναρτήσει της έκτασης της σκίασης στο Σχ. 3.36(α) για τα 12 ΦΒ πλαίσια, και η ενδεικτική τιμή του σε διάφορες ακτινοβολίες της ασκίαστης πλαισιοσειράς στο Σχ. 3.36(β). Στο Σχ. 3.36(α), παρατηρείται ότι ο μέσος όρος του λόγου παραμένει πρακτικά σταθερός κοντά στην τιμή 2, ανεξάρτητος της έκτασης της σκίασης. Επίσης, η τιμή αυτή μεταβάλλεται αναλογικά με την ακτινοβολία G_1^2 στην ασκίαστη πλαισιοσειρά 2 στο Σχ. 3.36(β).

Βέβαια, ο λόγος I_{mpA1}^1 προς I_{mp1}^1 εξαρτάται γραμμικά και από την ακτινοβολία G_1^1 στη σκιασμένη πλαισιοσειρά 1, δεδομένου ότι επηρεάζει το ρεύμα I_{mp1}^1 με αναλογικό τρόπο. Δηλαδή, ο λόγος των δύο ρευμάτων μπορεί να εκτιμηθεί απλά ως το άθροισμα των δύο σχετικών επιπέδων ακτινοβολίας G_1^1 και G_1^2 :

$$I_{mpA1}^1 = I_{mp1}^1 + G_1^2 I_{mp} \stackrel{I_{mp1}^1 = G_1^1 I_{mp}}{=} G_1^1 I_{mp} + G_1^2 I_{mp} \Rightarrow \frac{I_{mpA1}^1}{I_{mp1}^1} = G_1^1 + G_1^2 \quad (3.44)$$

Όπως και στην (3.42), ο όρος I_{mp} συμβολίζει το MPP ρεύμα μιας στοιχειοσειράς σε ονομαστική ακτινοβολία και αυθαίρετη θερμοκρασία T . Η (3.44) μπορεί εύκολα να επεκταθεί για να καλύψει την περίπτωση ΦΒ συστοιχίας τριών κλάδων του παραδείγματος Σχ. 3.35,



Σχ. 3.36. Λόγος I_{mpA1}^1 προς I_{mp1}^1 ως συνάρτηση της έκτασης της σκίασης για τα σενάρια του Σχ. 3.33. (α) Διακύμανση του λόγου για 12 εμπορικά ΦΒ πλαίσια με επισήμανση του μέσου όρου, (β) μέσος όρος του λόγου για τα 12 πλαίσια, θεωρώντας διάφορες εντάσεις σκίασης.

παρατηρώντας ότι το ρεύμα I_{mpA1}^2 είναι γραμμικά συνδεδεμένο με τα ρεύματα στις πλαισιοσειρές 1, 2 και 3, και συνεπώς από τα αντίστοιχες ακτινοβολίες G_2^1 , G_2^2 και G_2^3 :

$$\frac{I_{mpA1}^2}{I_{mp}} = G_1^2 + G_2^1 + G_1^3 \quad (3.45)$$

Οπότε, στη γενική περίπτωση ΦΒ συστοιχίας με πολλαπλούς κλάδους:

$$I_{mpAj}^i = I_{mp} \cdot (G_j^i + S_j^i) \quad (3.46)$$

όπου ο όρος S_j^i δίνεται από την (3.40), ενώ το περιεχόμενο της παρένθεσης αντιστοιχεί ουσιαστικά στο άθροισμα όλων των κατάλληλων ακτινοβολιών όλων των πλαισιοσειρών (συμπεριλαμβανομένης και της G_j^i της πλαισιοσειράς i).

3.5.2 Εξισώσεις για το MPPB

Σύμφωνα με τη θεωρητική ανάλυση της παραγράφου 3.2.5, το τοπικό μέγιστο που εμφανίζεται στη μεγαλύτερη τάση στη χαρακτηριστική $P-V$ (δεξιότερα στο γράφημα) συμβολίζεται με MPPB.

3.5.2.A Προσδιορισμός της τάσης V_{mpB}

Μελετώντας ξανά τα γραφήματα Σχ. 3.33 και Σχ. 3.35, παρατηρείται ότι οι τάσεις των δεξιότερων MPP_{ni}^i κάθε πλαισιοσειράς δε διαφέρουν σημαντικά. Αυτός είναι και ο λόγος που η καμπυλότητα της χαρακτηριστικής τους οδηγεί στη δημιουργία ενός μόνο τοπικού μεγίστου για τη συστοιχία: το MPPB. Η εν λόγω εγγύτητα των τάσεων V_{mpni}^i προκύπτει από το γεγονός ότι όταν μια πλαισιοσειρά λειτουργεί στο δεξιότερό της MPP_{ni}^i , δεν παρακάμπτεται καμία στοιχειοσειρά και η συνιστώσα τάση κάθε ομάδας εξαρτάται ασθενώς από την ακτινοβολία.

Έτσι, δεδομένου ότι οι επιμέρους τάσεις V_{mpni}^i έχουν πολύ κοντινή τιμή, η τάση του MPPB υπολογίζεται απλά από τον μέσο όρο τους, χρησιμοποιώντας τον άνω κλάδο της (3.36):

$$V_{mpB} = \frac{1}{N_p} \sum_{i=1}^{N_p} V_{mpni}^i = \frac{1}{N_p} \sum_{i=1}^{N_p} \sum_{g=1}^{n^i} N_g^i \left[\frac{G_j^i}{G_g^i} V_{mp} + \left(1 - \frac{G_j^i}{G_g^i} \right) V_{oc} \right] \quad (3.47)$$

3.5.2.B Προσδιορισμός του ρεύματος I_{mpB}

Σύμφωνα με την προηγούμενη ανάλυση, το ρεύμα της συστοιχίας I_{mpB} βρίσκεται από το άθροισμα των ρευμάτων I_{mpni}^i των επιμέρους πλαισιοσειρών, αξιοποιώντας τον δεύτερο κλάδο της (3.36):

$$I_{mpB} = I_{mp} \sum_{i=1}^{N_p} \left(G_{n^i}^i \left[1 + \lambda \frac{\sum_{g=1}^{n_i-1} N_g^i}{N_m N_{cs}} \right] \right) \quad (3.48)$$

όπου $\lambda = 0.06$ είναι ο εμπειρικός συντελεστής που ορίστηκε για την πλαισιοσειρά στην ενότητα 3.3.

3.5.3 Θερμοκρασιακή επίδραση και τελικές σχέσεις

Οι σχέσεις (3.43), (3.46)-(3.48) προσδιορίζουν τα χαρακτηριστικά όλων των MPPs που παρουσιάζει μία μερικώς σκιασμένη ΦΒ συστοιχία, έχοντας λάβει υπόψιν οποιαδήποτε πιθανή κατανομή ακτινοβολίας. Οι όροι V_{mp} , V_{oc} και I_{mp} που αναφέρονται σε αυτές τις σχέσεις αφορούν το αντίστοιχο μέγεθος της στοιχειοσειράς σε ονομαστική ακτινοβολία, πλην σε αυθαίρετη θερμοκρασία T . Δεδομένου ότι στο τεχνικό φυλλάδιο του ΦΒ πλαισίου τα αντίστοιχα χαρακτηριστικά δίνονται για ονομαστικές συνθήκες STC ($1000 \text{ W/m}^2 - 25 \text{ }^\circ\text{C}$) και για το επίπεδο του πλαισίου (όχι στοιχειοσειράς), χρειάζεται να γίνει η κατάλληλη αναγωγή.

Η αναγωγή από το πλαίσιο στη στοιχειοσειρά είναι αρκετά προφανής, δεδομένου του πλήθους των διόδων διαφυγής ανά πλαίσιο N_{cs} (πάντα αναγράφεται στο τεχνικό φυλλάδιο):

$$\begin{aligned} V_{mp0} &= V_{mp0-mod} / N_{cs} \\ V_{oc0} &= V_{oc0-mod} / N_{cs} \\ I_{mp0} &= I_{mp0-mod} \end{aligned} \quad (3.49)$$

όπου ο δείκτης “0” υπονοεί μέγεθος σε STC συνθήκες και ο συμβολισμός “mod” αναφέρεται στο πλαίσιο. Τα δεδομένα $V_{mp0-mod}$, $V_{oc0-mod}$ και $I_{mp0-mod}$ είναι πάντα διαθέσιμα στο τεχνικό φυλλάδιο του ΦΒ πλαισίου. Όσον αφορά τη θερμοκρασιακή επίδραση, χρησιμοποιώντας τους αντίστοιχους θερμοκρασιακούς συντελεστές $\beta_{V_{mp}}$, $\beta_{V_{oc}}$ και $\alpha_{I_{mp}}$ (κανονικοποιημένη μορφή) προκύπτει:

$$\begin{aligned} I_{mp} &= I_{mp0} (1 + \alpha_{I_{mp}} \Delta T) \\ V_{mp} &= V_{mp0} (1 + \beta_{V_{mp}} \Delta T) \\ V_{oc} &= V_{oc0} (1 + \beta_{V_{oc}} \Delta T) \end{aligned} \quad (3.50)$$

Όταν οι συντελεστές $\beta_{V_{mp}}$ ή $\alpha_{I_{mp}}$ δε δίνονται στο τεχνικό φυλλάδιο του ΦΒ πλαισίου, ο $\beta_{V_{mp}}$ υπολογίζεται από τον $\beta_{V_{oc}}$ σύμφωνα με την (2.48) της ενότητας 2.4 (ίσοι κατά απόλυτη τιμή):

$$\beta_{V_{mp}} = \beta_{V_{oc}} \frac{V_{oc0}}{V_{mp0}} \quad (3.51)$$

ενώ ο $\alpha_{I_{mp}}$ μπορεί να προσδιοριστεί μέσω της (2.45) της ενότητας 2.4, να τεθεί ίσος με τον $\alpha_{I_{sc}}$, ή ακόμα και να αγνοηθεί πλήρως λόγω της πολύ μικρής του τιμής:

$$a_{I_{mp}} = \alpha_{I_{sc}} + \frac{\beta_{V_{oc}} - 1 / T_0}{w_0 - 1} \frac{1 + \alpha_{I_{sc}} \Delta T}{1 + \beta_{V_{oc}} \Delta T} a_{I_{sc}} \approx \alpha_{I_{sc}} \approx 0 \quad (3.52)$$

Συνήθως η θερμοκρασία όλων των στοιχειοσειρών είναι ίδια ασχέτως της σκίασης, καθώς η ΦΒ συστοιχία εκτίθεται σε κοινές περιβαλλοντικές συνθήκες (θερμοκρασία περιβάλλοντος και

ένταση ανέμου). Δηλαδή, οι προαναφερθείσες σχέσεις (3.50) εφαρμόζονται για μια κοινή θερμοκρασία T . Παρόλα αυτά, μπορούν να εφαρμοστούν και στη γενικότερη περίπτωση που η κάθε ομάδα στοιχειοσειρών διαφέρει και θερμοκρασιακά εκτός από την ακτινοβολία. Σε αυτήν την περίπτωση, τα μεγέθη V_{mp} , V_{oc} και I_{mp} προσδιορίζονται ξεχωριστά για κάθε ομάδα και τοποθετούνται κατάλληλα οι τιμές τους στις περιγραφικές σχέσεις των MPPs.

Συγκεντρωτικά, οι τελικές σχέσεις για τα MPPs μιας ΦΒ συστοιχίας πολλών κλάδων και πολλαπλών επιπέδων ακτινοβολίας που λειτουργεί σε αυθαίρετη θερμοκρασία είναι:

$$\begin{aligned}
 \text{MPPA}_{j^i}: & \begin{cases} V_{mpAj}^i = (1 + \kappa_j^i S_j^i) \sum_{g=1}^j N_g^i \left[\frac{G_j^i}{G_g^i} V_{mp} + \left(1 - \frac{G_j^i}{G_g^i} \right) V_{oc} \right] - \sum_{g=j+1}^{n_i} N_g^i \cdot \Delta V_D \\ I_{mpAj}^i = I_{mp} \cdot (G_j^i + S_j^i) \end{cases} \\
 \text{MPPB}: & \begin{cases} V_{mpAj}^i = \frac{1}{N_p} \sum_{i=1}^{N_p} \sum_{g=1}^{n^i} N_g^i \left[\frac{G_j^i}{G_g^i} V_{mp} + \left(1 - \frac{G_j^i}{G_g^i} \right) V_{oc} \right] \\ I_{mpB} = I_{mp} \sum_{i=1}^{N_p} \left(G_{ni}^i \left[1 + \lambda \frac{\sum_{g=1}^{n_i-1} N_g^i}{N_m N_{cs}} \right] \right) \end{cases} \quad (3.53)
 \end{aligned}$$

όπου:

- ✓ Ο συντελεστής κ υπολογίζεται από την (3.41) ή απλούστερα θεωρείται σταθερός και ίσος με την τιμή 0.04.
- ✓ Το άθροισμα S_j^i δίνεται από την (3.40).
- ✓ Η πτώση τάσης ΔV_D λαμβάνεται ίση με 1 V, αν δεν υπάρχουν στοιχεία για τα χαρακτηριστικά της διόδου διαφυγής.
- ✓ Η εμπειρική σταθερά λ ισούται με 0.06.
- ✓ Τα μεγέθη V_{mp} , V_{oc} και I_{mp} της στοιχειοσειράς συνδέονται με τις ονομαστικές τους τιμές (V_{mp0} , V_{oc0} και I_{mp0}) μέσω της (3.50), οι οποίες προσδιορίζονται από τα χαρακτηριστικά του ΦΒ πλαισίου ($V_{mp0-mod}$, $V_{oc0-mod}$ και $I_{mp0-mod}$) μέσω της (3.49).

3.5.4 Αποτίμηση ακρίβειας μέσω προσομοιώσεων

Η εγκυρότητα των προτεινόμενων εξισώσεων (3.53) αποτιμάται στη συνέχεια μέσω προσομοιώσεων στο λογισμικό *MATLAB*. Ως αναφορά χρησιμοποιείται το κυκλωματικό μοντέλο της ενότητας 3.1, κατασκευάζοντας για κάθε σενάριο τη χαρακτηριστική $P-V$ και εντοπίζοντας γραφικά όλα τα τοπικά μέγιστα. Το ΦΒ σύστημα που προσομοιώνεται αποτελείται από μία ΦΒ συστοιχία που περιλαμβάνει τρεις πλαίσιοσειρές των 12 πλαισίων του μοντέλου Yingli YL-165 (το ΦΒ πλαίσιο που περιγράφεται στην εισαγωγική παράγραφο 1.1.4 στον Π. 1.1 και χρησιμοποιείται στην πειραματική επιβεβαίωση στη συνέχεια). Η συστοιχία υπόκειται σε 6 διαφορετικά επίπεδα ακτινοβολίας στο εύρος από 100 W/m² έως 1200 W/m², ενώ θεωρούνται 3 διαφορετικές θερμοκρασίες λειτουργίας 25° C, 45° C και 65° C, οδηγώντας συνολικά σε 190515 σενάρια προσομοίωσης.

Π. 3.4. Σφάλμα εκτίμησης όλων των MPPs για τα 190515 σενάρια σκίασης με τις προτεινόμενες εξισώσεις (3.53) (YL-165)

| MPPs | Σφάλμα I_{mp} (%) | | Σφάλμα V_{mp} (%) | | Σφάλμα P_{mp} (%) | |
|-------------------------|---------------------|-------|---------------------|------|---------------------|-------|
| | RMS | MAX | RMS | MAX | RMS | MAX |
| MPPA¹ | 2.43 | 11.40 | 2.29 | 9.03 | 2.84 | 12.25 |
| MPPA² | 3.17 | 11.01 | 1.98 | 8.69 | 2.92 | 15.05 |
| MPPA³ | 1.77 | 11.85 | 2.36 | 8.94 | 2.42 | 14.56 |
| MPPA⁴ | 1.70 | 9.84 | 2.67 | 8.22 | 2.08 | 4.89 |
| MPPA⁵ | 3.20 | 8.08 | 2.59 | 8.67 | 3.87 | 10.52 |
| MPPB | 0.57 | 3.71 | 2.08 | 7.56 | 2.20 | 9.02 |
| ΣΥΝΟΛΙΚΑ | 2.33 | 11.85 | 2.34 | 9.03 | 2.79 | 15.05 |

Π. 3.5. Σφάλμα εκτίμησης όλων των MPPs για τα 190515 σενάρια σκίασης με τη μέθοδο *Moballeggh* (YL-165).

| MPPs | Σφάλμα I_{mp} (%) | | Σφάλμα V_{mp} (%) | | Σφάλμα P_{mp} (%) | |
|-------------------------|---------------------|-------|---------------------|-------|---------------------|-------|
| | RMS | MAX | RMS | MAX | RMS | MAX |
| MPPA¹ | 3.43 | 28.50 | 2.99 | 14.31 | 1.57 | 23.14 |
| MPPA² | 17.18 | 64.90 | 9.89 | 39.31 | 14.99 | 62.14 |
| MPPA³ | 4.43 | 94.59 | 4.06 | 16.76 | 3.62 | 82.98 |
| MPPA⁴ | 3.02 | 42.35 | 4.07 | 14.53 | 2.36 | 34.93 |
| MPPA⁵ | 21.50 | 74.91 | 8.69 | 23.24 | 18.81 | 73.33 |
| MPPB | 0.94 | 15.92 | 3.01 | 16.98 | 2.55 | 14.06 |
| ΣΥΝΟΛΙΚΑ | 11.54 | 94.59 | 6.12 | 39.31 | 10.05 | 82.98 |

Τα σφάλματα των εξισώσεων (3.53) στην εκτίμηση της τάσης, του ρεύματος και της ισχύος για όλα τα MPPs παρουσιάζονται στον πίνακα Π. 3.4. Οι rms τιμές των σφαλμάτων είναι πολύ χαμηλές μην ξεπερνώντας το 4%, ενώ ως σύνολο για όλα τα MPPs κυμαίνεται μεταξύ 2% και 3%. Οι μέγιστες αποκλίσεις που παρατηρούνται φτάνουν μέχρι και το 15%, οι οποίες όμως αφορούν υποδεέστερα τοπικά μέγιστα που εμφανίζονται σε ακραία σενάρια σκίασης και δε συνιστούν το ολικό μέγιστο.

Στον πίνακα Π. 3.5, παρατίθενται τα αντίστοιχα σφάλματα που προκύπτουν από την εφαρμογή της μεθόδου που προτείνεται στην [68] για λόγους σύγκρισης, η οποία αναφέρεται στη συνέχεια με το όνομα του κύριου συγγραφέα: *Moballeggh*. Οι σχέσεις αναγωγής των μεγεθών V_{mp} , I_{mp} , V_{oc} και I_{sc} (από τις STC στις εκάστοτε συνθήκες ακτινοβολίας και θερμοκρασίας) που χρησιμοποιούνται στην *Moballeggh*, έχουν εξαχθεί για ένα συγκεκριμένο μοντέλου ΦΒ πλαισίου. Για να αρθεί ο εν λόγω περιορισμός και να εφαρμοστεί η μέθοδος στο YL-165, θεωρείται αναλογική εξάρτηση των ρευμάτων από την ακτινοβολία και γραμμική επίδραση της θερμοκρασίας στις τάσεις, όπως διατυπώνεται στην (3.50). Επιπλέον, η μέθοδος *Moballeggh* αγνοεί την έννοια του MPPB όπως έχει οριστεί στην παρούσα έρευνα, και έτσι εκτιμά πολλαπλά MPPs για την ίδια περιοχή, όταν στην πραγματικότητα εκφράζεται ένα μοναδικό τοπικό μέγιστο. Για λόγους σύγκρισης, επιλέγεται αυτό με τη μεγαλύτερη ισχύ ως το “ισοδύναμο MPPB”.

Συγκρίνοντας του πίνακες Π. 3.4 και Π. 3.5, είναι εμφανές ότι η προτεινόμενη μέθοδος είναι σημαντικά πιο ακριβής. Ένας λόγος για τα υψηλά σφάλματα της προσέγγισης *Moballeggh* είναι η υποεκτίμησης της τάσης των MPPs, καθώς η V_{mpAj}^i θεωρείται ταυτόσημη της V_{mpj}^i , ενώ στην προηγούμενη παράγραφο εξηγείται ότι αποκλίνει κατά τον συντελεστή k . Επιπλέον, στην *Moballeggh* το ρεύμα των MPPs υπερεκτιμάται, θεωρώντας ότι το I_{mpAj}^i είναι 5% μεγαλύτερο του I_{mpj}^i . Παρόλα αυτά, αξίζει να σημειωθεί ότι οι μεγάλες τιμές των μεγίστων σφαλμάτων

3.6 - Πειραματική Επιβεβαίωση

Π. 3.6. Σφάλμα εκτίμησης του ολικά μέγιστου MPP για τα 190515 σενάρια σκίασης με τις προτεινόμενες εξισώσεις (3.53) (5 εμπορικά ΦΒ πλαίσια).

| ΦΒ πλαίσιο | Σφάλμα I_{mp} (%) | | Σφάλμα V_{mp} (%) | | Σφάλμα P_{mp} (%) | |
|---------------------------|---------------------|-------------|---------------------|-------------|---------------------|--------------|
| | RMS | MAX | RMS | MAX | RMS | MAX |
| <i>Siliken SLK60P6L</i> | 1.91 | 7.49 | 2.05 | 8.62 | 2.74 | 14.61 |
| <i>Bosch M60-245</i> | 1.86 | 5.23 | 2.16 | 8.70 | 2.84 | 12.25 |
| <i>Upsolar UP-M240P</i> | 1.85 | 7.37 | 2.03 | 8.65 | 2.71 | 13.73 |
| <i>SCHOTT Perform 240</i> | 2.03 | 7.19 | 1.93 | 8.60 | 2.76 | 12.89 |
| <i>Suntech STP 280</i> | 1.98 | 7.51 | 2.46 | 8.68 | 2.98 | 13.36 |
| ΣΥΝΟΛΙΚΑ | 1.93 | 7.51 | 2.13 | 8.70 | 2.81 | 14.61 |

εμφανίζονται και εδώ στα υποδεέστερα/ασήμαντα MPPs.

Οι εγκυρότητα των προτεινόμενων περιγραφικών σχέσεων (3.53) αποτιμάται περαιτέρω σε άλλα πέντε εμπορικά ΦΒ πλαίσια για τα ίδια 190515 σενάρια σκίασης. Στον πίνακα Π. 3.6, καταγράφονται τα σφάλματα στην εκτίμηση του ολικά μέγιστου MPP για κάθε σενάριο. Οι rms τιμές των αποκλίσεων κυμαίνονται μεταξύ 2% και 3%, όπως και στον Π. 3.4 για το YL-165, ενώ οι μέγιστες τιμές δεν ξεπερνούν το 15%.

Αξία αναφοράς είναι επίσης η ευκολία εφαρμογής και το υπολογιστικό κόστος των απλών εξισώσεων (3.53) σε σχέση με το αναλυτικό κυκλωματικό μοντέλο της ενότητας 3.1. Ο χρόνος εκτέλεσης των 190515 σεναρίων με την πρώτη προσέγγιση είναι μόλις 20 λεπτά, σε αντίθεση με τη δεύτερη επιλογή που απαιτεί περίπου 10 ημέρες, δηλαδή 720 φορές γρηγορότερα. Και βεβαίως, αξίζει να σημειωθεί ότι η τελευταία προσέγγιση του κυκλωματικού μοντέλου είναι 235 φορές ταχύτερη από τη συμβατική αριθμητική επίλυση συστήματος εξισώσεων, όπως συζητείται στην παράγραφο 3.1.6. Δηλαδή, οι προτεινόμενες σχέσεις επιτυγχάνουν τον προσδιορισμό των MPPs των παραπάνω σεναρίων σε 20 λεπτά, όταν η τελευταία συμβατική προσέγγιση θα απαιτούσε ένα υπέρρογκο/μη ρεαλιστικό χρονικό διάστημα της τάξης των 6 ετών.

Προφανώς οι παραπάνω αριθμοί δεν έχουν πρακτική σημασία, είναι όμως ενδεικτικοί της βελτίωσης που προσφέρουν οι προτεινόμενες περιγραφικές σχέσεις στην υπολογιστική πολυπλοκότητα του φαινομένου, καθιστώντας τη συστηματική του μελέτη απόλυτα εφικτή.

3.6 Πειραματική Επιβεβαίωση

Τα μοντέλα και οι εξισώσεις που εισάγονται σε αυτό το κεφάλαιο για την ανάλυση και περιγραφή του φαινομένου της σκίασης, επιβεβαιώνονται πειραματικά στις επόμενες σελίδες. Διεξάγονται μετρήσεις σε μία ΦΒ συστοιχία για πληθώρα σεναρίων σκίασης, οι οποίες χρησιμοποιούνται για την αποτίμηση της ακρίβειας α) του αναλυτικού κυκλωματικού μοντέλου που προτείνεται στην ενότητα 3.1 και β) των περιγραφικών σχέσεων προσδιορισμού των MPPs, όπως διατυπώνονται στην ενότητα 3.5.

Η ΦΒ συστοιχία που χρησιμοποιείται έχει τη δομή του Σχ. 3.8, με τη διαφορά ότι αποτελείται από 2 μόνο πλαισιοσειρές σε οριζόντια διάταξη που δε διαθέτουν διόδους φραγής. Τα ΦΒ πλαίσια περιγράφονται από το δομικό διάγραμμα Σχ. 3.6, ενώ τα ηλεκτρικά τους χαρακτηριστικά παρατίθενται στον πίνακα Π. 1.1 της εισαγωγικής ενότητας 1.1.4. Η όψη μίας εκ των δύο πλαισιοσειρών απεικονίζεται στο Σχ. 3.37. Για εξομοίωση της μερικής σκίασης, χρησιμοποιείται ημιδιαπερατό ύφασμα με συντελεστή διαπερατότητας $TR = 49\%$.

Ο εξοπλισμός μέτρησης είναι ο ίδιος που χρησιμοποιήθηκε στην παράγραφο 2.2.3, και



Σχ. 3.37. Όψη του ΦΒ συστήματος που χρησιμοποιήθηκε για την πειραματική επιβεβαίωση.

απεικονίζεται στο Σχ. 2.10. Τα βασικά στοιχεία από τα οποία αποτελείται είναι ένα ποτενσιόμετρο ισχύος που χρησιμοποιείται ως μεταβλητό φορτίο, το καταγραφικό μετρήσεων *LABVIEW* και ένα ηλεκτρονικός υπολογιστής με το λογισμικό *MATLAB* για την επεξεργασία των δεδομένων. Επίσης, χρησιμοποιείται και ένα dc διπολικός αποζεύκτης για την ασφαλή βραχυκύκλωση και από-βραχυκύκλωση των ακροδεκτών της συστοιχίας και την αποφυγή ηλεκτρικών τόξων.

Τα βήματα που ακολουθήθηκαν για κάθε σενάριο είναι:

- ✓ Διαμόρφωση του σεναρίου σκίασης τοποθετώντας το ημιδιαπερατό ύφασμα κατάλληλα σε τμήμα της επιφάνειας της ΦΒ συστοιχίας.
- ✓ Καταγραφή της λειτουργίας σε ανοιχτοκύκλωση διατηρώντας τους ακροδέκτες της συστοιχίας ασύνδετους.
- ✓ Σάρωση της χαρακτηριστικής *I-V* μεταβάλλοντας την αντίσταση του ποτενσιόμετρου ισχύος στο εύρος που υποστηρίζει.
- ✓ Βραχυκύκλωση των ακροδεκτών της συστοιχίας και μέτρηση του αντίστοιχου ρεύματος.

Στη συνέχεια, οι παράμετροι της σκίασης συμβολίζονται για λόγους απλότητας ως ακολούθως:

- ✓ G_{un} – ακτινοβολία στο ασκίαστο τμήμα της συστοιχίας
- ✓ G_{sh} – ακτινοβολία στο σκιασμένο τμήμα της συστοιχίας
- ✓ N_{sh1} – πλήθος σκιασμένων στοιχειοσειρών στην πλαισιοσειρά 1
- ✓ N_{sh2} – πλήθος σκιασμένων στοιχειοσειρών στην πλαισιοσειρά 2
- ✓ T_{sh} – θερμοκρασία κυψέλης στο σκιασμένο τμήμα της συστοιχίας
- ✓ T_{un} – θερμοκρασία κυψέλης στο ασκίαστο τμήμα της συστοιχίας

Η ακτινοβολία G_{un} αντιστοιχεί στην ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει άμεσα στη ΦΒ συστοιχία, ενώ η $G_{sh} = 0.49G_{un}$ στην ενέργεια της φωτεινής ροής που καταλήγει στις σκιασμένες στοιχειοσειρές μετά την απορρόφηση του ημιδιαπερατού υφάσματος. Σκιάζοντας N_{sh1} και N_{sh2} στοιχειοσειρές στις δύο πλαισιοσειρές, παραμένουν ασκίαστες $36-N_{sh1}$ και $36-N_{sh2}$ στοιχειοσειρές, αντίστοιχα. Τέλος, για λόγους μεγαλύτερης ακρίβειας, θεωρείται διαφορετική θερμοκρασία στο ασκίαστο και σκιασμένο τμήμα T_{un} και T_{sh} αντίστοιχα. Λόγω αδυναμίας άμεσου προσδιορισμού των μεγεθών της ακτινοβολίας και θερμοκρασίας, οι τιμές τους εκτιμήθηκαν έμμεσα από το ρεύμα βραχυκύκλωσης και την τάση ανοιχτοκύκλωσης σε κάθε σενάριο.

3.6 - Πειραματική Επιβεβαίωση

Π. 3.7. Χαρακτηριστικά των εννιά σεναρίων σκίασης που εξομοιώνονται για την πειραματική επιβεβαίωση.

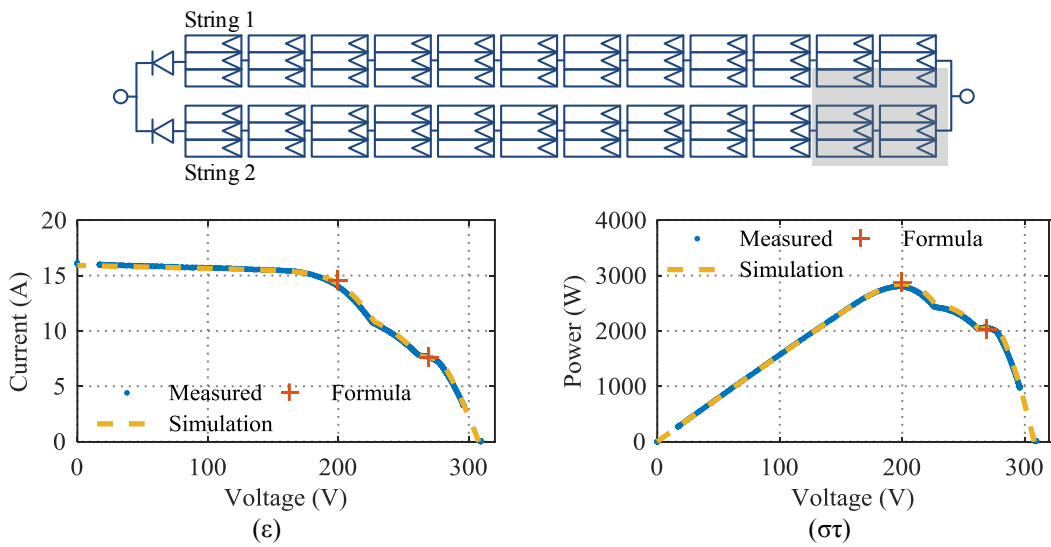
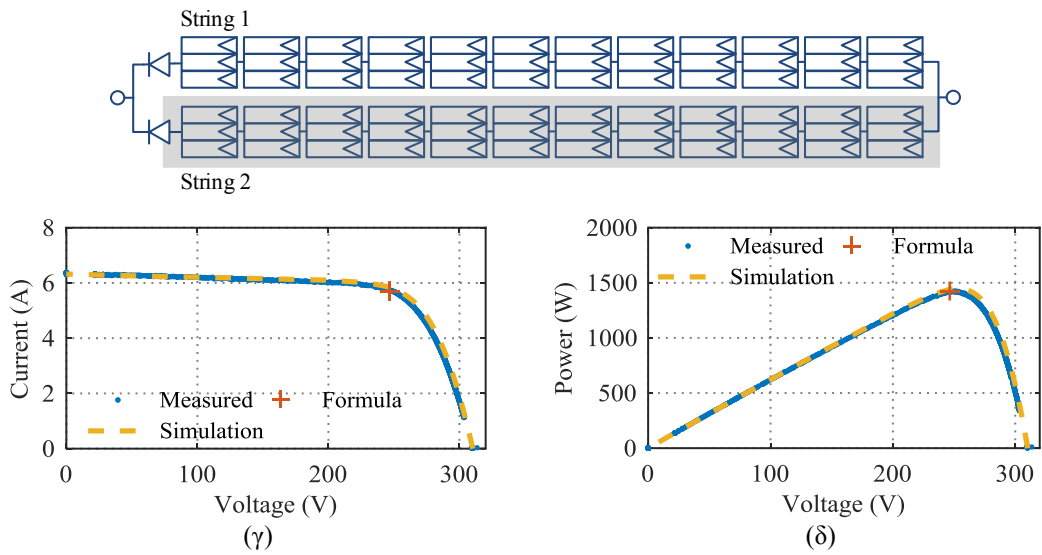
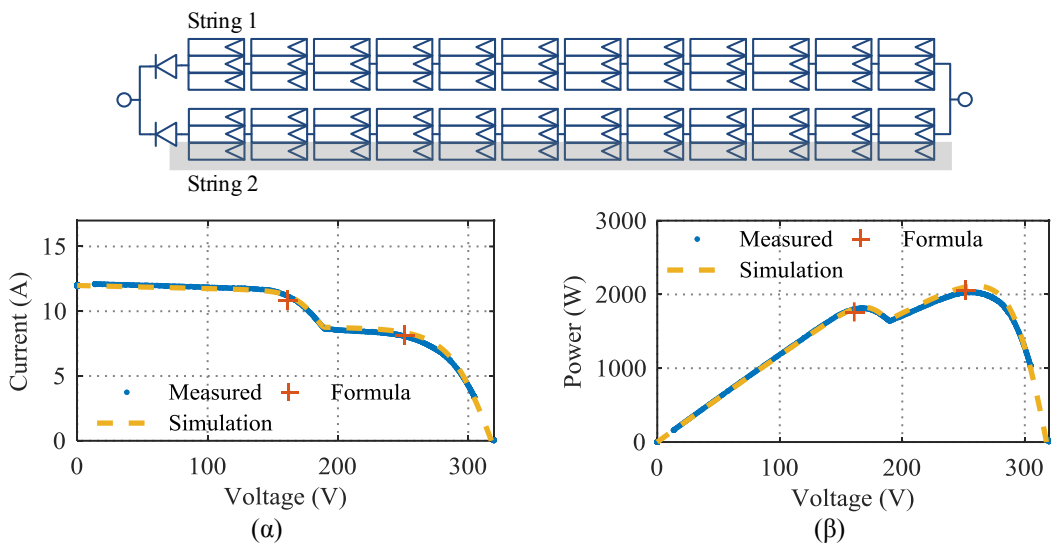
| Σενάρια σκίασης | G_{un} | G_{sh} | N_{sh1} | N_{sh2} | T_{un} (°C) | T_{sh} (°C) |
|-----------------|----------|----------|-----------|-----------|---------------|---------------|
| Σενάριο #1 | 0.75 | 0.37 | 12 | 0 | 44 | 38 |
| Σενάριο #2 | 0.53 | 0.26 | 36 | 0 | 48 | 38 |
| Σενάριο #3 | 0.99 | 0.49 | 6 | 2 | 56 | 50 |
| Σενάριο #4 | 1.03 | 0.50 | 12 | 4 | 61 | 53 |
| Σενάριο #5 | 1.09 | 0.53 | 24 | 8 | 57 | 50 |
| Σενάριο #6 | 1.05 | 0.51 | 30 | 10 | 60 | 54 |
| Σενάριο #7 | 1.04 | 0.51 | 15 | 10 | 63 | 55 |
| Σενάριο #8 | 0.98 | 0.48 | 3 | 3 | 62 | 52 |
| Σενάριο #9 | 1.05 | 0.51 | 15 | 15 | 61 | 54 |

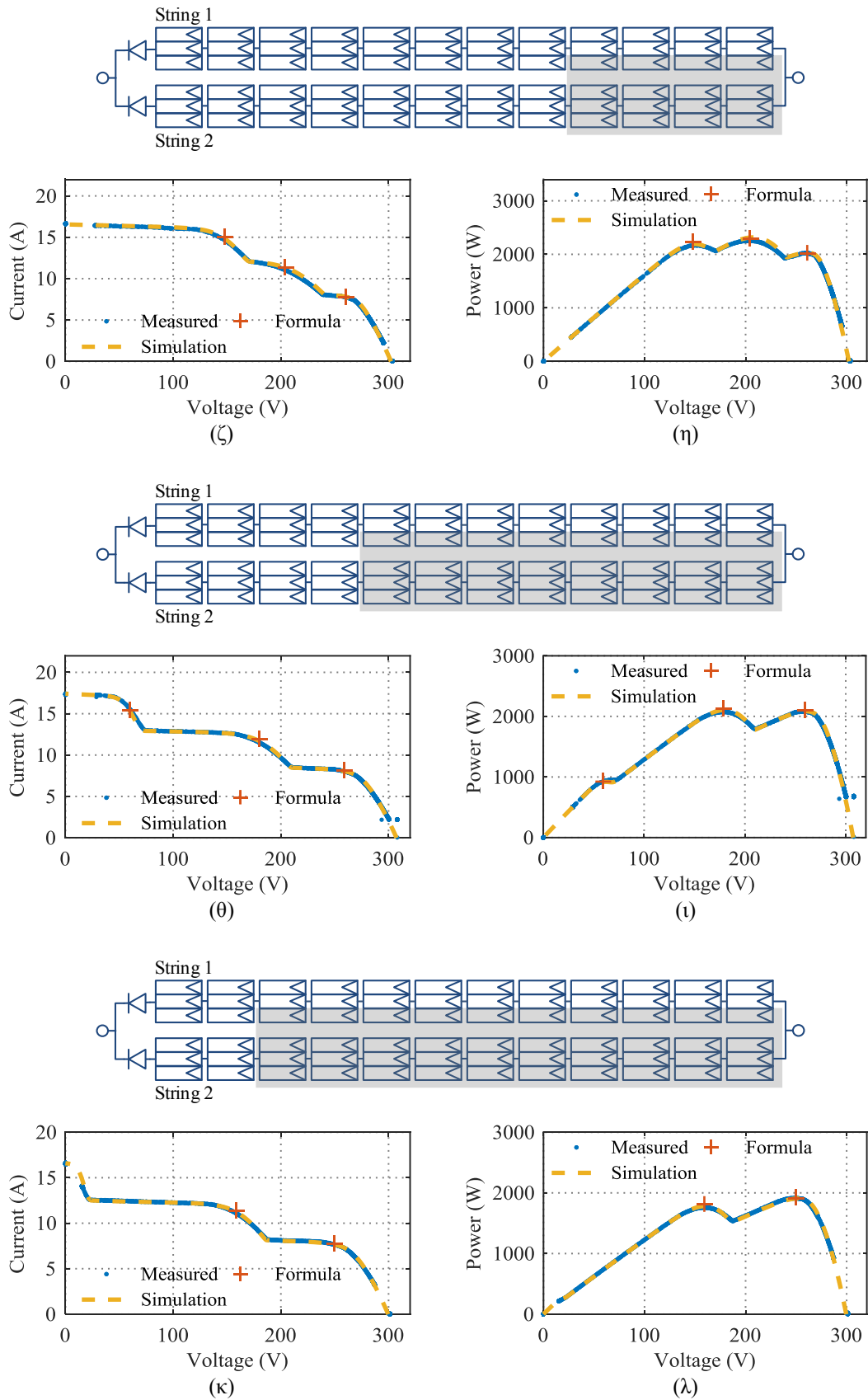
Στον πίνακα Π. 3.7, παρατίθενται τα χαρακτηριστικά για κάθε σενάριο σκίασης. Αξίζει να σημειωθεί ότι η θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ σκιασμένου και ασκίαστου τμήματος κυμαίνεται μεταξύ 6 – 10 °C. Η εν λόγω διαφορά είναι οριακή για τη θεώρηση κοινής θερμοκρασίας σε όλη τη συστοιχία. Επομένως, στα σενάρια που μελετώνται στη συνέχεια λαμβάνεται υπόψη η διαφοροποίηση των δύο θερμοκρασιών, ώστε να επιτευχθεί εγκυρότερη αποτίμηση της ακρίβειας των μοντέλων.

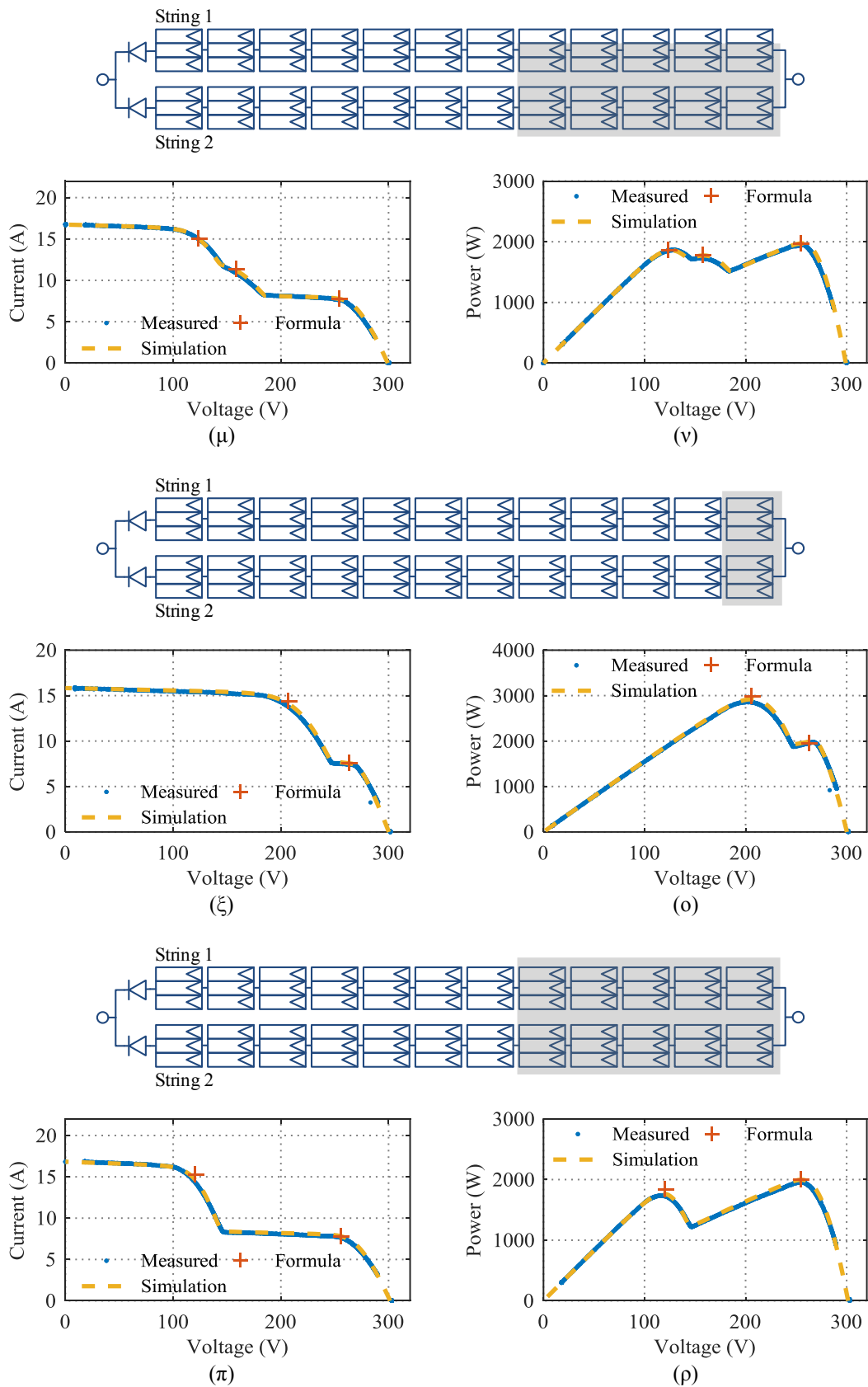
Επίσης, μετρήθηκε η χαρακτηριστική της διόδου διαφυγής των ΦΒ πλαισίων YL-165 και διαπιστώθηκε ότι πτώση τάσης ΔV_D είναι της τάξης του 1.1 V. Έτσι, η συγκεκριμένη τιμή έχει ληφθεί υπόψη στις περιγραφικές σχέσεις που εφαρμόζονται στα ακόλουθα αποτελέσματα. Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί πως η χαρακτηριστική της διόδου, και άρα και η πτώση τάσης της ΔV_D , επηρεάζονται από τη θερμοκρασία. Παρόλα αυτά, η επίδρασή της αγνοείται γενικά στην παρούσα μελέτη, καθώς η συνεισφορά της στην απόκριση του ΦΒ συστήματος είναι εν γένει αμελητέα.

Στα διαγράμματα του ακόλουθου Σχ. 3.38 παρουσιάζονται οι μετρημένες χαρακτηριστικές $I-V$ και $P-V$ (μπλε τελείες), ενώ αντιπαραβάλλονται οι αντίστοιχες καμπύλες που προκύπτουν από την προσομοίωση του αναλυτικού κυκλωματικού μοντέλου της ενότητας 3.1 (κίτρινη διακεκομμένη γραμμή). Με κόκκινους σταυρούς σημειώνονται τα MPPs όπως υπολογίζονται από τις περιγραφικές σχέσεις της ενότητας 3.5.

Είναι εμφανής η εξαιρετική σύγκλιση μετρήσεων και μοντέλων σε όλα τα σενάρια. Η προσομοιωμένη χαρακτηριστική με το αναλυτικό κυκλωματικό μοντέλο (κίτρινη διακεκομμένη γραμμή) ταυτίζεται ικανοποιητικά με τις μετρήσεις (μπλε τελείες) σε όλο το εύρος λειτουργίας, και όχι μόνο στις περιοχές των τοπικών μεγίστων. Ακόμα, οι περιγραφικές σχέσεις υπολογίζουν τα MPPs (κόκκινοι σταυροί) επιδεικνύουν πολύ ικανοποιητική ακρίβεια σε κάθε περίπτωση, όπως παρατηρείται γραφικά.







Σχ. 3.38. Χαρακτηριστικές $I-V$ και $P-V$ των εννιά πειραματικών σεναρίων σκίασης.

3.6 - Πειραματική Επιβεβαίωση

Π. 3.8. Σφάλματα στην εκτίμηση των MPPs για όλα τα σενάρια σκίασης από το κυκλωματικό μοντέλο και τις περιγραφικές σχέσεις.

| Σενάριο | Σφάλματα MPPA1 | | | Σφάλματα MPPA2 | | | Σφάλματα MPPB | | | |
|---------|----------------|--------------|--------------|----------------|--------------|--------------|---------------|--------------|--------------|------|
| | P_{mp} (%) | I_{mp} (%) | V_{mp} (%) | P_{mp} (%) | I_{mp} (%) | V_{mp} (%) | P_{mp} (%) | I_{mp} (%) | V_{mp} (%) | |
| 1 | Κυκλ. μοντέλο | -0.7 | -0.2 | -0.5 | 3.6 | 2.8 | 0.9 | - | - | - |
| | Περιγ. σχέσεις | -2.9 | 0.0 | -2.9 | -3.5 | -0.1 | -3.4 | - | - | - |
| 2 | Κυκλ. μοντέλο | - | - | - | 1.6 | 0.7 | 0.9 | - | - | - |
| | Περιγ. σχέσεις | - | - | - | -2.5 | 0.1 | -2.7 | - | - | - |
| 3 | Κυκλ. μοντέλο | 1.6 | 0.7 | 1.0 | - | - | - | 0.0 | -0.3 | 0.3 |
| | Περιγ. σχέσεις | 0.8 | 1.0 | -0.6 | - | - | - | -1.8 | -1.0 | -0.8 |
| 4 | Κυκλ. μοντέλο | 2.5 | 2.1 | 0.5 | 2.1 | 1.4 | 0.7 | 0.1 | -0.7 | 0.7 |
| | Περιγ. σχέσεις | 0.1 | 2.1 | -2.0 | -0.1 | 0.9 | -1.0 | -0.4 | 0.1 | -0.5 |
| 5 | Κυκλ. μοντέλο | -3.3 | 0.2 | -3.3 | 1.4 | 1.7 | 0.0 | 0.1 | -0.1 | 0.2 |
| | Περιγ. σχέσεις | -0.5 | 4.6 | -4.9 | 0.8 | 1.3 | -0.5 | 0.5 | 1.1 | -0.6 |
| 6 | Κυκλ. μοντέλο | - | - | - | 1.3 | 0.9 | 0.6 | -0.2 | -1.6 | 1.7 |
| | Περιγ. σχέσεις | - | - | - | 1.0 | 1.9 | -0.9 | 0.5 | 1.7 | -1.1 |
| 7 | Κυκλ. μοντέλο | -0.1 | 1.6 | -2.1 | 3.7 | 1.3 | 2.4 | 1.6 | 1.9 | -0.5 |
| | Περιγ. σχέσεις | 0.6 | 2.5 | -1.8 | -0.2 | 0.9 | -1.1 | -0.1 | 0.3 | -0.4 |
| 8 | Κυκλ. μοντέλο | 2.3 | 0.2 | 2.1 | - | - | - | 1.2 | 1.1 | 0.0 |
| | Περιγ. σχέσεις | 1.5 | 1.4 | 0.1 | - | - | - | -1.9 | -0.4 | -1.5 |
| 9 | Κυκλ. μοντέλο | 2.8 | 0.7 | 2.0 | - | - | - | 1.7 | 1.6 | 0.2 |
| | Περιγ. σχέσεις | 2.6 | 1.7 | 1.0 | - | - | - | -0.1 | 0.2 | -0.3 |

Για περαιτέρω ανάλυση της ακρίβειας των δύο μεθόδων, ειδικά στην περιοχή των τοπικών μεγίστων, παρατίθεται ο πίνακας Π. 3.8. Τα σφάλματα εκτίμησης των MPPs από τις δύο μεθόδους υπολογίζονται με αναφορά τις αντίστοιχες μετρημένες τιμές. Όσον αφορά το αναλυτικό κυκλωματικό μοντέλο, το σφάλμα στην ισχύ δεν ξεπερνά το 4% και η μέση τιμή του κυμαίνεται κοντά στο 2%. Οι αντίστοιχες αποκλίσεις στις τάσεις και τα ρεύματα είναι χαμηλότερες. Οι περιγραφικές σχέσεις επιδεικνύουν ελαφρώς χειρότερη ακρίβεια, πλην πλήρως αποδεκτή για να θεωρηθούν έγκυρες. Συγκεκριμένα, τα μέσα σφάλματα και στα τρία μεγέθη κυμαίνεται από 1% έως 1.5%, ενώ στην ισχύ το μέγιστο σφάλμα είναι λιγότερο από 3.5% και στην τάση/ρεύμα λιγότερο από 5%.

Οι τιμές αυτές είναι ιδιαίτερα χαμηλές για πειραματικές μετρήσεις, γεγονός που επιβεβαιώνει τη φερεγγυότητα των δύο μεθόδων και την ακρίβειά τους σε πραγματικές συνθήκες. Σχετικά με τις περιγραφικές σχέσεις των MPPs, δεν πρέπει να ξενίζει το γεγονός ότι τα πειραματικά σφάλματα είναι χαμηλότερα από τα μέγιστα σφάλματα των προσομοιώσεων της προηγούμενης ενότητας (πίνακες Π. 3.4 και Π. 3.6). Αυτό συμβαίνει διότι τα σενάρια σκίασης της πειραματικής επιβεβαίωσης είναι ρεαλιστικά και συνηθισμένα, σε αντίθεση με τα ακραία σενάρια στα οποία αντιστοιχούν οι μέγιστες αποκλίσεις των προσομοιώσεων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Έλεγχος του DC/DC Μετατροπέα σε Συνθήκες Μερικής Σκίασης

Στο Κεφάλαιο 4, περιγράφονται οι δυσκολίες που αντιμετωπίζει ο αλγόριθμος MPPT του dc/dc μετατροπέα σε συνθήκες μερικής σκίασης. Εξηγείται απλοϊκά η δυσλειτουργία που προκύπτει με την εμφάνιση πολλαπλών τοπικών κορυφών στη χαρακτηριστική ισχύος, ενώ διατρέχονται συνοπτικά οι συνηθισμένες προσπάθειες μετρίασης του προβλήματος.

Στη συνέχεια, προτείνονται τρεις τεχνικές ελέγχου του dc/dc μετατροπέα ενός ΦΒ συστήματος, ειδικά σχεδιασμένες για συνθήκες σκίασης. Αρχικά, παρουσιάζεται ένας απλός αλγόριθμος αναγνώρισης των συνθηκών σκίασης, ο οποίος αποφεύγει τη σάρωση καμπύλης και τις σχετικές αρνητικές συνέπειες όταν το σύστημα είναι ασκίαστο. Η συγκεκριμένη τεχνική είναι γενικά εφαρμόσιμη σε οποιαδήποτε ΦΒ διάταξη που σκιάζεται σε οσαδήποτε επίπεδα ακτινοβολίας, ενώ απαιτεί μόνο ένα αισθητήριο θερμοκρασίας.

Ακολούθως, περιγράφεται ένας απλός αλγόριθμος MPPT κατάλληλος για ΦΒ πλαισιοσειρές που σκιάζονται σε δύο επίπεδα ακτινοβολίας. Η καινοτομία της εν λόγω μεθόδου είναι ότι αποφεύγει την περιοδική διακύμανση του σημείου λειτουργίας «αναγνωριστικής φύσεως» που απαιτούν οι υπόλοιποι σχετικοί αλγόριθμοι της βιβλιογραφίας. Περιορισμός της τεχνικής είναι η θεώρηση ότι η ένταση ενός συγκεκριμένου περιστατικού σκίασης διατηρείται περίπου σταθερή κατά τη διάρκεια της ημέρας.

Για την αντιμετώπιση του τελευταίου περιορισμού, στην τελευταία ενότητα του κεφαλαίου εισάγεται ένας πολυπλοκότερος αλγόριθμος MPPT που εφαρμόζει προσαρμογή καμπύλης (curve fitting) σε μετρήσεις τάσης και ρεύματος του μετατροπέα ισχύος. Η μέθοδος αξιοποιεί την ήδη υπάρχουσα ταλάντωση του σημείου λειτουργίας χωρίς να προξενεί επιπρόσθετη. Το περιεχόμενο του κεφαλαίου δημοσιεύτηκε στις [213]–[216].

4.1 Δυσκολίες στον Έλεγχο του DC/DC Μετατροπέα σε Συνθήκες Σκίασης

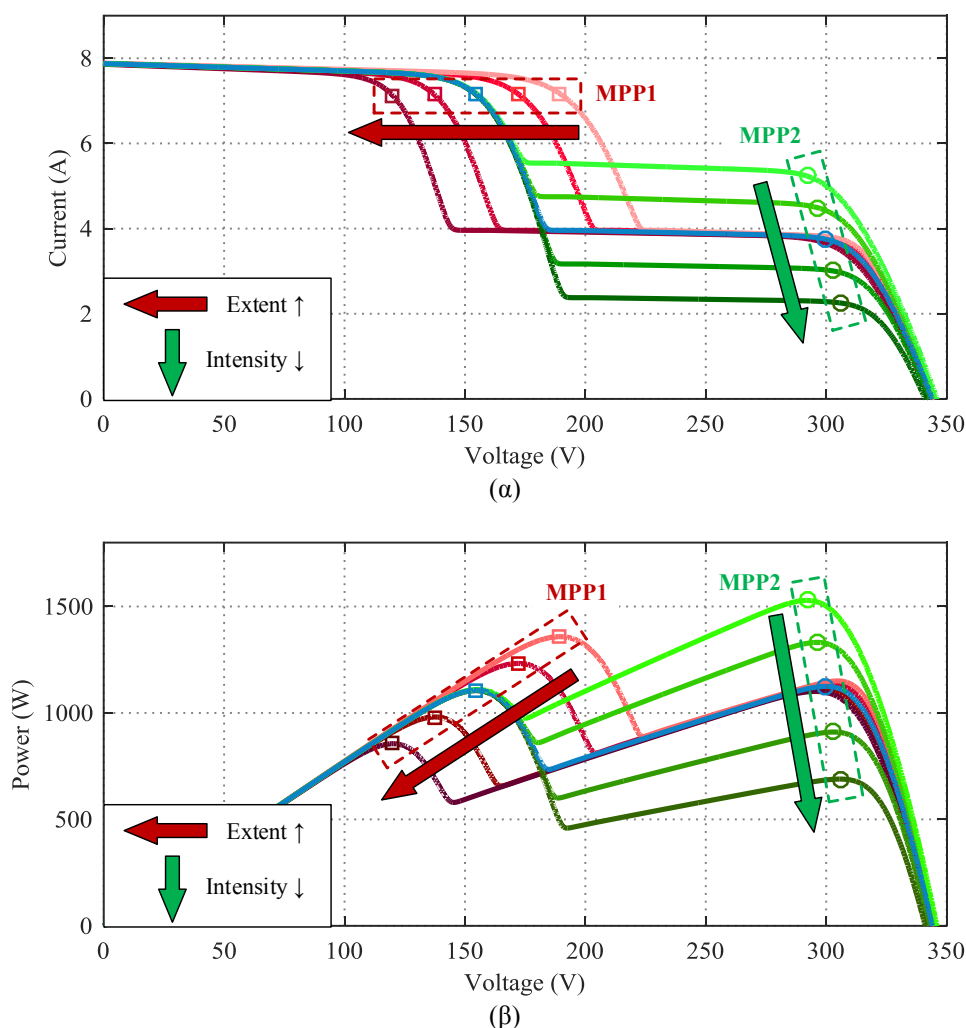
Σε συνθήκες ομοιόμορφης ακτινοβολίας, η χαρακτηριστική $P-V$ ενός ΦΒ συστήματος παρουσιάζει ένα μόνο μέγιστο (μία κορυφή ισχύος – MPP), όπως εξηγείται στο Κεφάλαιο 2. Τυπικοί αλγόριθμοι MPPT, όπως P&O ή INC, δεν παρουσιάζουν συνήθως προβλήματα εντοπισμού του MPP σε αυτές τις συνθήκες. Όμως, σε συνθήκες μερικής σκίασης εμφανίζονται πολλά τοπικά μέγιστα στην καμπύλη $P-V$, δυσχεραίνοντας σημαντικά τον εντοπισμό του ολικά μέγιστου MPP από τον αλγόριθμο MPPT. Πολύ συχνά, το ΦΒ σύστημα καταλήγει να λειτουργεί υποβέλτιστα σε τέτοιες συνθήκες, μένοντας εγκλωβισμένο σε ένα τοπικό MPP που είναι υποδεέστερο του ολικά μέγιστου GMPP.

4.1.1 Επίδραση της σκίασης στην αποδοτικότητα ενός αλγορίθμου MPPT

Στο Κεφάλαιο 3, γίνεται λεπτομερής ανάλυση των επιπτώσεων της μερικής σκίασης στις χαρακτηριστικές $I-V$ και $P-V$ ενός ΦΒ συστήματος. Για να γίνει κατανοητό πώς η εμφάνιση πολλαπλών MPPs επηρεάζει τη λειτουργία του αλγορίθμου MPPT, μελετώνται τα γραφήματα του Σχ. 4.1. Στο σχήμα φαίνεται πώς τροποποιούνται οι χαρακτηριστικές $I-V$ (Σχ. 4.1(α)) και $P-V$ (Σχ. 4.1(β)) μίας ΦΒ πλαισιοσειράς για μεταβαλλόμενη σκίαση (δύο επίπεδα ακτινοβολίας). Τα δύο τοπικά μέγιστα MPP1 (κόκκινοι τετραγωνικοί δείκτες) και MPP2 (πράσινοι κυκλικοί δείκτες) που εμφανίζονται έχουν τις ιδιότητες που περιγράφονται στην ενότητα 3.2. Καθώς η έκταση της σκίασης αυξάνεται (κόκκινο βέλος), το MPP1 μετατοπίζεται σε χαμηλότερη τάση, διατηρώντας την ένταση του ρεύματος σχεδόν σταθερή (Σχ. 4.1(α)) και μεταβάλλοντας περίπου αναλογικά την ισχύ (Σχ. 4.1(β)). Αντίθετα, το MPP2 δεν επηρεάζεται αισθητά ούτε ως προς τάση ούτε ως προς ισχύ. Όταν αλλάζει η ένταση της σκίασης (πράσινο βέλος), το ρεύμα του MPP2 μεταβάλλεται ισχυρά και η τάση ασθενέστερα (Σχ. 4.1(α)). Το MPP1 μένει πρακτικά ανεπηρέαστο από αυτή τη μεταβολή.

Δηλαδή, το MPP1 εξαρτάται ουσιαστικά από την *έκταση* της σκίασης και όχι από την *ένταση*, δεδομένου ότι το σκιασμένο τμήμα παρακάμπτεται. Από την άλλη το MPP2 επηρεάζεται κυρίως από την *ένταση* της σκίασης, μιας και όλες οι στοιχειοσειρές αναγκάζονται να λειτουργήσουν στο μειωμένο ρεύμα των σκιασμένων, ενώ η έκταση της σκίασης επιδρά σε πολύ μικρότερο βαθμό.

Πρακτικά, η κρίσιμη παράμετρος κατά τη μεταβολή των συνθηκών της σκίασης είναι η *έκταση*, και όχι η *ένταση*. Αυτό συμβαίνει διότι η πρώτη αλλάζει πολύ πιο γρήγορα, λόγω μεταβαλλόμενης νέφωσης ή κατά την ανατολή/δύση του ηλίου, σε αντίθεση με την ένταση της σκίασης που εξαρτάται κυρίως από την ώρα της μέρας. Για να γίνει σαφές πώς μια τέτοια μεταβολή στην έκταση της σκίασης οδηγεί έναν τυπικό αλγόριθμο MPPT σε υποβέλτιστη λειτουργία, μελετάται το παράδειγμα του Σχ. 4.2. Μια ΦΒ πλαισιοσειρά σκιάζεται σταδιακά πλαίσιο-πλαίσιο, ξεκινώντας ασκίαστη αρχικά και καλύπτοντας μέχρι και τη μισή της έκταση στο τέλος (60% ένταση σκίασης).

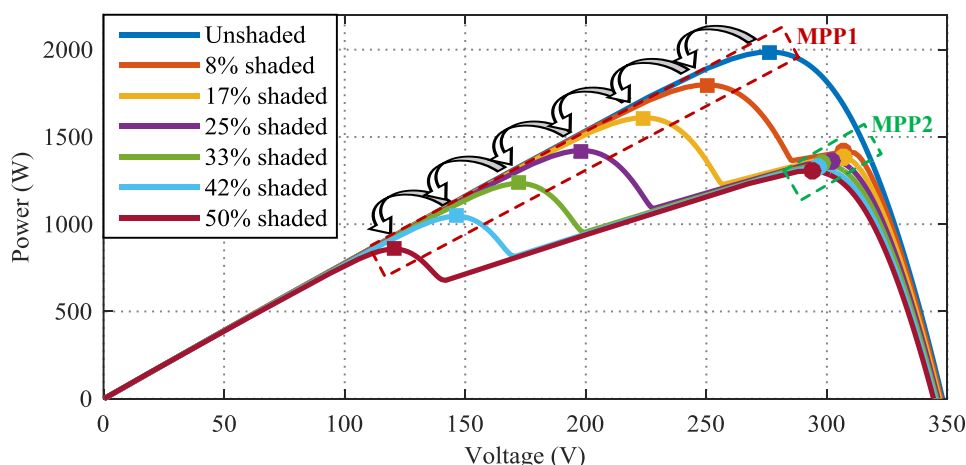


Σχ. 4.1. Χαρακτηριστικές (α) $I-V$ και (β) $P-V$ μίας μερικώς σκιασμένης ΦΒ πλαισιοσειράς που υπόκειται σε μεταβλητή έκταση και ένταση σκίασης (δύο επίπεδα ακτινοβολίας).

Στο Σχ. 4.2, παρουσιάζονται οι καμπύλες ισχύος που αντιστοιχούν σε κάθε φάση της φαινομένου, ενώ με βέλη επισημαίνεται πώς μετατοπίζεται το σημείο λειτουργίας από έναν συνηθισμένο αλγόριθμο MPPT. Αρχικά, το σύστημα είναι ασκίαστο και το σημείο λειτουργίας είναι το μοναδικό MPP παρόν (ανώτερος μπλε τετραγωνικός δείκτης). Καθώς εμφανίζεται και εκτείνεται η σκίαση, ο αλγόριθμος συνεχώς επαναπροσδιορίζει το μέγιστο, μένοντας όμως εγκλωβισμένος στην περιοχή του MPP1. Έτσι, μετά από περίπου 30% σκίαση, το σύστημα λειτουργεί στο υποβέλτιστο MPP1, χάνοντας την παραπάνω ισχύ που θα παρείχε το MPP2.

4.1.2 Συμβατικές λύσεις

Υπάρχουν διάφορες εργασίες στη βιβλιογραφία στις οποίες επιχειρείται η ανάπτυξη ενός ολικά βέλτιστου αλγορίθμου MPPT [217]–[221], των οποίων όμως η αποδοτικότητα είναι αμφισβητήσιμη. Στην [217], προτείνεται ένας τέτοιος αλγόριθμος που εφαρμόζει περιοδικά curve fitting σε συγκεκριμένες περιοχές της καμπύλης $P-V$, λαμβάνοντας όμως υπόψη εμπειρικές παρατηρήσεις. Άλλες πιο περίπλοκες μέθοδοι που περιλαμβάνουν ταλάντωση του



Σχ. 4.2. Μετατόπιση του σημείου λειτουργίας από ένα τυπικό αλγόριθμο MPPT (P&O) καθώς αυξάνεται η έκταση της σκίασης σε μία ΦΒ πλαισιοσειρά (60% ένταση σκίασης).

σημείου λειτουργίας προτείνονται στις [218] και [220], οι οποίες παρουσιάζουν σημαντική διακύμανση στην ισχύ εξόδου. Μια άλλη κατηγορία μεθόδων είναι οι εξελικτικοί αλγόριθμοι, οι οποίοι είναι κατάλληλοι για τη μείωση της χρονικής διάρκειας και των βημάτων που απαιτούνται για τον εντοπισμό του ολικά βέλτιστου σημείου λειτουργίας, όπως στις [221] και [219] που εφαρμόζεται η τεχνική particle swarm optimization (PSO).

Δυστυχώς, όλες οι προαναφερθείσες μέθοδοι απαιτούν συνεχή και επαναλαμβανόμενη διακύμανση του σημείου λειτουργίας. Αυτή η διαδικασία έχει αρνητικό αντίκτυπο στην ποιότητα της ισχύος εξόδου, ενώ συνεπάγεται επίσης βραχύχρονες απώλειες ισχύος κατά τη χρονική διάρκεια της ταλάντωσης του σημείου λειτουργίας (αφού τότε δε λειτουργεί στο MPP). Συχνά, συμβιβαστική λύση είναι η ρύθμιση της συχνότητας εκτέλεσης του αλγορίθμου MPPT, εξισορροπώντας έτσι τις παραπάνω αρνητικές συνέπειες με την υποβέλτιστη λειτουργία σε συνθήκες σκίασης.

Συνεπώς, σε εμπορικούς μετατροπείς ΦΒ συστημάτων συνήθως λαμβάνει χώρα περιοδικά μια ειδική διαδικασία *σάρωσης της χαρακτηριστικής* και επαναπροσδιορισμού του ολικά μεγίστου MPP. Αναφορικά με τα συστήματα δύο σταδίων (Σχ. 1.9 στην εισαγωγική ενότητα 1.3), η εν λόγω σάρωση επιτυγχάνεται με διακύμανση του duty cycle στη μονάδα PWM του dc/dc μετατροπέα.

Αυτή η λύση ομοιάζει ως φιλοσοφία με τις προαναφερθείσες προσεγγίσεις, με την έννοια ότι δημιουργεί επαναλαμβανόμενη μετακίνηση του σημείου λειτουργίας, επιφέροντας τις σχετικές συνέπειες στην ισχύ εξόδου (χειρότερη ποιότητα ισχύος, απώλειες κατά τη διαδικασία). Και εδώ λαμβάνεται αναγκαστικά ένας συμβιβασμός μεταξύ των απωλειών σκίασης και των αρνητικών συνεπειών της σάρωσης, ρυθμίζοντας τη συχνότητά της. Συνήθως η συχνότητα σάρωσης είναι σταθερή κατά τη διάρκεια της ημέρας και η τιμή της καθορίζεται χειροκίνητα από τον χρήστη. Ανάλογα με την εκτιμώμενη ένταση και έκταση της σκίασης στην εγκατάσταση, μπορεί να είναι μικρή (μία φορά ανά 30 λεπτά) για υπαίθρια ΦΒ πάρκα με λίγες αλληλοσκιάσεις ή υψηλότερη (μία φορά ανά 5 λεπτά) για εγκαταστάσεις σε στέγες και δώματα, όπου προκύπτουν συχνές σκιάσεις από στερεά σώματα στην εγγύτερη περιοχή.

Το κυριότερο πρόβλημα της εν λόγω προσέγγισης είναι η σταθερή συχνότητα της σάρωσης. Ιδανικά, θα έπρεπε να κυμαίνεται ανάλογα με τον ρυθμό μεταβολής των συνθηκών σκίασης,

π.χ. πολύ υψηλή για νεφελώδεις ημέρες, μέτρια για σκιάσεις σταθερών εμποδίων όπως καμινάδες ή άλλες ΦΒ συστοιχίες, και μηδενική όταν το σύστημα παραμένει ασκίαστο. Ειδικά για την τελευταία περίπτωση, αξίζει να σημειωθεί πως ένα τυπικό υπαίθριο ΦΒ πάρκο λειτουργεί σε συνθήκες ομοιόμορφης ακτινοβολίας τις περισσότερες ώρες μίας ηλιόλουστης μέρας. Τότε, η περιοδική σάρωση δεν προσφέρει κάτι, αλλά συνεισφέρει μόνο αρνητικά.

4.2 Τεχνική Αναγνώρισης Σκίασης

Σύμφωνα με την ανάλυση της προηγούμενης ενότητας, βασικό στοιχείο όλων των γνωστών αλγορίθμων MPPT που είναι σχεδιασμένοι για συνθήκες σκίασης, αλλά και της τεχνικής της σάρωσης καμπύλης, είναι η περιοδική διαταραχή του σημείου λειτουργίας. Για να περιοριστούν οι αρνητικές συνέπειες αυτής της διαδικασίας, ρυθμίζεται κατάλληλα η συχνότητα εκτέλεσης του αλγορίθμου, η οποία παραμένει σταθερή κατά τη διάρκεια της ημέρας. Το μεγαλύτερο μειονέκτημα αυτής της προσέγγισης είναι η εφαρμογή του εκάστοτε αλγορίθμου ακόμα και όταν δεν υπάρχει σκίαση.

Στη συνέχεια, προτείνεται ένας απλός αλγόριθμος για τον μετατροπέα του ΦΒ συστήματος, ο οποίος αντιλαμβάνεται κατά πόσον το σύστημα υπόκειται σε σκίαση ή όχι. Έτσι, ο μετατροπέας εφαρμόζει σάρωση καμπύλης για τον επαναπροσδιορισμό του ολικού μεγίστου (ή οποιαδήποτε άλλη τεχνική εύρεσης του ολικού MPP), μόνο όταν υπάρχει πιθανότητα το σύστημα να υπολειτουργεί και όχι σε ομοιόμορφη ακτινοβολία. Η προτεινόμενη μέθοδος βασίζεται σε πληροφορίες που είναι άμεσα διαθέσιμες στο τεχνικό φυλλάδιο του ΦΒ πλαισίου, ενώ αξιοποιεί τις τρέχουσες μετρήσεις ρεύματος και τάσης που καταγράφει ο μετατροπέας ισχύος. Επιπλέον αυτών, απαιτεί μόνο ένα αισθητήριο θερμοκρασίας για χονδρική εκτίμηση της θερμοκρασίας λειτουργίας, το οποίο συνήθως περιλαμβάνεται στον μετρητικό εξοπλισμό που εγκαθίσταται μαζί με το ΦΒ σύστημα.

Η τεχνική αναγνώρισης σκίασης υποστηρίζει οσαδήποτε επίπεδα ακτινοβολίας και οποιαδήποτε ΦΒ διάταξη (πλαισιοσειρά, συστοιχία κλπ.) ή θερμοκρασία λειτουργίας, ενώ εμφανίζει ανθεκτικότητα σε αποκλίσεις στη μέτρηση της τελευταίας. Οι υπολογισμοί που περιλαμβάνει είναι απλοί, ευθείας μορφής και καθαρά μαθηματικής φύσεως, χωρίς να επηρεάζεται το σημείο λειτουργίας ή η ισχύς εξόδου. Αποτελεί ουσιαστικά χρήσιμη επέκταση για οποιαδήποτε αλγόριθμο MPPT, καθώς είναι εύκολα και γενικά εφαρμόσιμη, χωρίς να κοστίζει σε υπολογιστικό φόρτο ή στη μόνιμη λειτουργία του συστήματος. Η προτεινόμενη τεχνική επιβεβαιώνεται με προσομοιώσεις στο λογισμικό *MATLAB/Simulink*, και παρουσιάστηκε πρώτα στο [213] και στη συνέχεια βελτιώθηκε και δημοσιεύτηκε στην [214].

4.2.1 Αλγόριθμος αναγνώρισης μερικής σκίασης

Μελετώντας το Σχ. 4.2, παρατηρείται πως η λειτουργία του συστήματος στο MPPT1 (τετραγωνικοί δείκτες) καθ' όλη τη διάρκεια της σκίασης συνεπάγεται μεγάλο εύρος στην τάση. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα, η τάση του MPPT1 κυμαίνεται από 120 V έως 270 V ανάλογα την έκταση της σκίασης, ενώ αντίθετα το εύρος της τάσης του MPPT2 (κυκλικό δείκτης) είναι μόνο 20 V. Δηλαδή, η τάση V_{mp1} του MPPT1 διαφέρει σημαντικά από την τάση $V_{mp,un}$ του μοναδικού MPP που παρουσιάζεται όταν δεν υπάρχει σκίαση (μπλε τετραγωνικός δείκτης). Αυτή η παρατήρηση αποτελεί τη βασική ιδέα για τον αλγόριθμο αναγνώρισης της σκίασης,

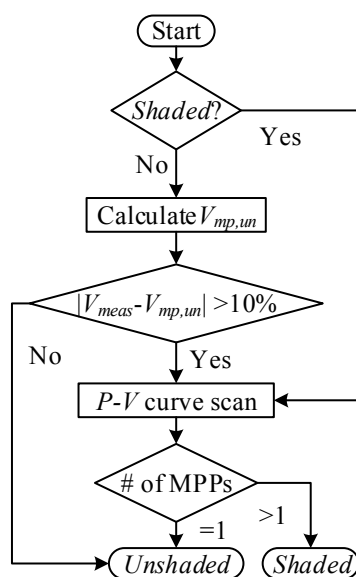
συγκρίνοντας την τρέχουσα τάση V_{mp1} με την αντίστοιχη «ασκίαστη» $V_{mp,un}$. Ο υπολογισμός της τελευταίας απαιτεί γνώση της ονομαστικής τάσης του ΦΒ πλαισίου V_{mp0} , τον αριθμό των πλαισίων που είναι συνδεδεμένα σε σειρά N_m και τον θερμοκρασιακό συντελεστή β_{Vmp} :

$$V_{mp,un} = N_m V_{mp0} (1 + \beta_{Vmp} \Delta T) \quad (4.1)$$

Η φιλοσοφία στην οποία βασίζεται ο αλγόριθμος που ακολουθεί είναι ότι η τάση ενός ΦΒ συστήματος επηρεάζεται εν γένει λιγότερο από τις περιβαλλοντικές συνθήκες εν συγκρίσει με το ρεύμα ή την ισχύ. Ήδη από τα προηγούμενα κεφάλαια εξηγείται ότι η ακτινοβολία επιδρά αδύναμα στην MPP τάση (όσο η έντασή της έχει πρακτικό ενδιαφέρον – σε χαμηλές ακτινοβολίες δεν ισχύει αυτή η υπόθεση), οπότε μπορεί να αγνοηθεί. Αντίθετα, η θερμοκρασία επιφέρει μεταβολή καθαρά γραμμικού χαρακτήρα, εύκολα μοντελοποιήσιμη μέσω του θερμοκρασιακού συντελεστή β_{Vmp} . Όπως αναφέρεται στην παράγραφο 3.5.3, όταν ο τελευταίος δε δίνεται στο τεχνικό φυλλάδιο του ΦΒ πλαισίου, μπορεί να προσδιοριστεί μέσω του β_{Voc} από την (3.51). Αξίζει να σημειωθεί ότι η (4.1) εκτιμά την MPP τάση οποιαδήποτε ΦΒ διάταξης, αρκεί ο όρος N_m να περιγράφει το συνολικό πλήθος των *σειριακά μόνο* συνδεδεμένων πλαισίων. Δηλαδή, αν για παράδειγμα το υπό μελέτη ΦΒ σύστημα είναι μία συστοιχία με 3 πλαισιοσειρές, όπου η κάθε μία έχει 12 πλαίσια, η τιμή του όρου $N_m = 12$.

Στο ακόλουθο Σχ. 4.3 παρουσιάζεται το αλγοριθμικό διάγραμμα της προτεινόμενης μεθόδου. Αρχικά το σύστημα θεωρείται ασκίαστο (*unshaded*) και η $V_{mp,un}$ υπολογίζεται μέσω της (4.1). Αν η μετρούμενη τιμή της τάσης V_{meas} δεν αποκλίνει περισσότερο από 10% από την $V_{mp,un}$, το σύστημα είναι ασκίαστο και δεν υπάρχει ανάγκη για σάρωση καμπύλης (*P-V curve scan*), καθώς λειτουργεί ήδη στο μοναδικό MPP. Έτσι, η κατάσταση παραμένει *unshaded* και η διαδικασία επαναλαμβάνεται.

Αν κάποια στιγμή η σύγκριση των δυο τάσεων αποφανθεί απόκλιση μεγαλύτερη του 10%, αυτή οφείλεται σε μερική σκίαση. Σε αυτές τις συνθήκες, μπορεί να υπάρχουν δύο η



Σχ. 4.3. Αλγοριθμικό διάγραμμα της προτεινόμενης τεχνικής αναγνώρισης σκίασης. Σάρωση καμπύλης εκτελείται μόνο όταν υπάρχει σκίαση στο σύστημα, μία κατάσταση που αναγνωρίζεται συγκρίνοντας την τρέχουσα τιμή της τάσης με την MPP τάση που θα είχε το σύστημα αν ήταν ασκίαστο.

περισσότερα MPPs, και δεν υπάρχει καμία εγγύηση ότι το τρέχον σημείο λειτουργίας είναι το ολικά βέλτιστο. Έτσι, εκτελείται η διαδικασία της σάρωσης καμπύλης, εντοπίζονται όλα τα τοπικά μέγιστα και επιλέγεται το ολικά βέλτιστο για λειτουργία. Ο αριθμός των MPPs που προσδιορίζονται καθορίζει την επόμενη κατάσταση: αν εντοπιστούν παραπάνω από ένα MPPs η κατάσταση θεωρείται *shaded*, ενώ αν βρεθεί ένα μέγιστο τίθεται *unshaded* (Σχ. 4.3).

Όσο η κατάσταση παραμένει *shaded*, η σύγκριση των τάσεων παρακάμπτεται και εκτελείται πάντα η λειτουργία της σάρωσης καμπύλης. Αυτό συμβαίνει διότι το σημείο λειτουργίας στην περίπτωση που το σύστημα είναι σκιασμένο δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως κριτήριο αναγνώρισης σκίασης. Για παράδειγμα, η τάση του MPP2 (κυκλικό δείκτης) σε αρκετά σενάρια του Σχ. 4.2, προκύπτει αρκετά κοντά στην τάση του μπλε δείκτη, παρόλο που υπάρχει σκίαση. Δηλαδή, όταν δεν υπάρχει σκίαση, το προαναφερθέν κριτήριο τάσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί με σιγουριά για να αναγνωρίσει πότε θα εμφανιστεί σκίαση. Δεν ισχύει όμως το αντίθετο, οπότε όταν το σύστημα σκιάζεται ήδη, ο αλγόριθμος εκτελεί περιοδικές σαρώσεις της χαρακτηριστικής μέχρι να βρεθεί μόνο ένα MPP.

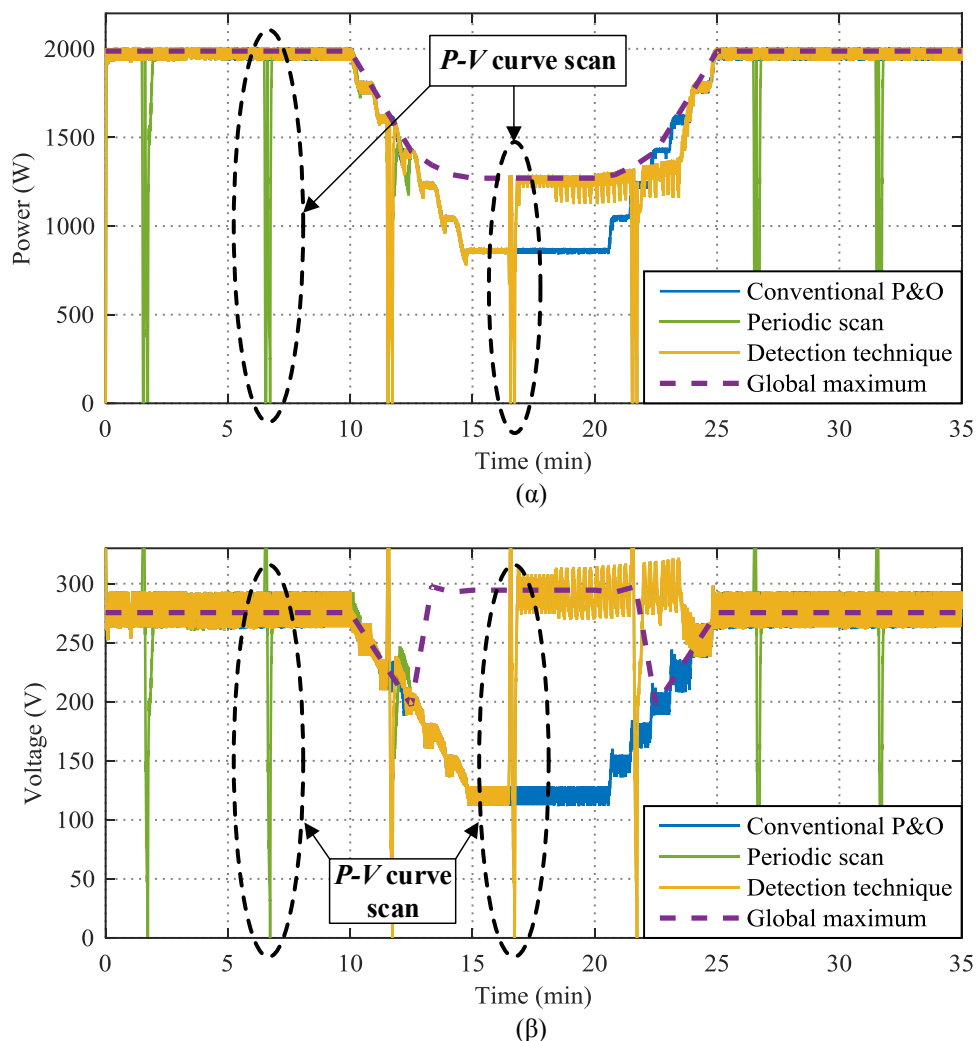
Το όριο ανοχής των δύο τάσεων ορίζεται στο 10%, καθώς τόσο είναι περίπου το μέγιστο σφάλμα στην εκτίμηση της $V_{mp,un}$. Συγκεκριμένα, αν θεωρηθεί απόκλιση στη μέτρηση της θερμοκρασίας της τάξης των 10 °C, αυτό θα οδηγούσε σε 3-4% σφάλμα για τυπικούς θερμοκρασιακούς συντελεστές (0.003 – 0.004 p.u.). Επιπλέον, η επίδραση της ακτινοβολίας στην $V_{mp,un}$, η οποία αγνοείται στην (4.1), είναι λιγότερη από 5% σε εντάσεις ακτινοβολίας πρακτικού ενδιαφέροντος. Οπότε, το όριο του 10% καλύπτει τα παραπάνω σφάλματα και αποτρέπει λανθασμένες εκτιμήσεις και ανούσιες σαρώσεις.

Τέλος, πρέπει να τονιστεί ότι παρόλο που η περιγραφή και εξήγηση του αλγορίθμου έγινε για το απλό παράδειγμα δύο επιπέδων ακτινοβολίας, η προτεινόμενη τεχνική εφαρμόζεται κανονικά στη γενική περίπτωση πολλαπλών επιπέδων ακτινοβολίας, καθώς οι ιδιότητες του MPP1 δεν αλλάζουν.

4.2.2 Επιβεβαίωση μέσω προσομοιώσεων

Προς επιβεβαίωση της συνεισφοράς της προτεινόμενης τεχνικής αναγνώρισης σκίασης, προσομοιώνεται το σενάριο του Σχ. 4.2 και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στα Σχ. 4.4(α)-(β). Η υπό μελέτη ΦΒ πλαισιοσειρά υπόκειται σε σκίαση δύο επιπέδων ακτινοβολίας και σταθερή έντασης 60%, ενώ η έκτασή της μεταβάλλεται με το χρόνο: τα πρώτα 10 λεπτά και τα 10 τελευταία λεπτά της προσομοίωσης δεν υπάρχει σκίαση, ενώ από τα λεπτά 10 έως 25 το σύστημα είναι σκιασμένο. Ως μέθοδος βάσης υλοποιείται ένας τυπικός αλγόριθμος P&O, χωρίς κάποια λειτουργία για συνθήκες σκίασης, και συμβολίζεται με *Conventional P&O* στα γραφήματα. Ακόμα, εφαρμόζονται δύο παραλλαγές του P&O με κατάλληλη προσθήκη για σκίαση: κάθε 5 λεπτά εκτελείται σάρωση καμπύλης και το ολικά μέγιστο MPP επαναπροσδιορίζεται. Η πρώτη παραλλαγή συμβολίζεται με *Periodic scan*, ενώ η δεύτερη προσέγγιση με *Detection technique* και ενσωματώνει επιπλέον της περιοδικής σάρωσης και τον αλγόριθμο αναγνώρισης σκίασης.

Όπως φαίνεται στο Σχ. 4.4(α), ο *Conventional P&O* (μπλε γραμμή) παραμένει προσκολλημένος στο MPP1 καθ' όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης, το οποίο αποκλίνει σημαντικά από το ολικά μέγιστο MPP2 το διάστημα 12-23 min. Ως αποτέλεσμα, χάνεται διαθέσιμη ηλεκτρική ισχύς και ο βαθμός απόδοσης του MPPT είναι χαμηλός.



Σχ. 4.4. ΦΒ πλαισιοσειρά που σκιάζεται σε μεταβλητή έκταση με σταθερή ένταση 60%. Κυματομορφές (α) ισχύος εξόδου και (β) τάσης λειτουργίας με διάφορες τεχνικές MPPT.

Αντίθετα, η εναλλακτική *Periodic scan* (πράσινη γραμμή) εκτελεί σάρωση καμπύλης ανά 5 λεπτά, προκαλώντας βραχύχρονες διακυμάνσεις στην ισχύ και τάση λειτουργίας, όπως φαίνεται στα Σχ. 4.4(α)-(β) αντίστοιχα. Έτσι, τη χρονική στιγμή 17 min η σάρωση καμπύλης αποφαίνεται υποβέλτιστη λειτουργία και ο αλγόριθμος μετακινεί το σημείο λειτουργίας στο ολικά μέγιστο σημείο (MPP2). Παρόλα αυτά, η σάρωση της καμπύλης τις στιγμές 2, 7, 27, και 32 min είναι ανούσιες, καθώς δεν υπάρχει σκίαση, επιφέροντας μόνο αρνητικά στη λειτουργία του συστήματος.

Σε αυτό το σημείο συνεισφέρει η προτεινόμενη προσθήκη που υλοποιείται στον αλγόριθμο *Detection technique*. Όπως φαίνεται στα Σχ. 4.4(α)-(β), αποφεύγεται η σάρωση καμπύλης τις προαναφερθείσες χρονικές στιγμές και εκτελείται μόνο το 12ο, 17ο, και 22ο λεπτό που το σύστημα είναι πράγματι σκιασμένο και υπάρχει πιθανότητα για υποβέλτιστη λειτουργία. Έτσι, το 17ο λεπτό ο αλγόριθμος επαναπροσδιορίζει το ολικά μέγιστο MPP, με τον ίδιο τρόπο που το επιτυγχάνει και η τεχνική *Periodic scan*.

Τελικά, ο συνολικός βαθμός απόδοσης καθενός από τους αλγορίθμους MPPT για τη

συγκεκριμένη προσομοίωση είναι 94.7% για τον *Conventional P&O*, 93.8% για την *Periodic scan* και 96.2% για την προτεινόμενη *Detection technique*. Είναι άξιο αναφοράς ότι οι απώλειες κατά τη διάρκεια της σάρωσης καμπύλης δεν είναι αμελητέες και προκύπτουν τελικά μεγαλύτερες από το κέρδος της ολικά βέλτιστης λειτουργίας για την περίπτωση της απλής *Periodic scan*. Αντίθετα, η *Detection technique* επιτυγχάνει την υψηλότερη απόδοση μεταξύ των τριών εναλλακτικών, καθώς περιορίζει την εμφάνιση των αρνητικών συνεπειών της σάρωσης καμπύλης στο ελάχιστο και εξασφαλίζει παράλληλα βέλτιστη λειτουργία το νωρίτερα δυνατόν.

Βέβαια, αξίζει να σημειωθεί ότι ακόμα και με την *Detection technique* οι χρονικές στιγμές που εκτελείται η σάρωση στο 12, 17 και 22 min δεν είναι οι βέλτιστες. Το 12ο λεπτό έχει αρχίσει να εμφανίζεται σκίαση, αλλά είναι ακόμη περιορισμένου βαθμού και το τρέχον σημείο λειτουργίας MPP1 παραμένει το ολικά βέλτιστο (κόκκινη καμπύλη στο Σχ. 4.2). Δηλαδή, παρόλο που η σύγκριση των δύο τάσεων (Σχ. 4.3) οδηγεί σε σάρωση καμπύλης, δεν υπάρχει στην πραγματικότητα ανάγκη.

Επιπλέον, η σάρωση του 22ου λεπτού εκτελείται χρονικά λίγο πριν γίνει το MPP1 ολικά μέγιστο, όσο παραμένει ακόμη το MPP2 βέλτιστο. Όπως φαίνεται από τις κυματομορφές της τάσης στο Σχ. 4.4(β), η σάρωση του 22ου λεπτού επιφέρει μια βραχύχρονη διακύμανση στην τάση αλλά την επαναφέρει στα επίπεδα των 300 V του MPP2 (κίτρινη γραμμή), παρόλο που λίγο μετά η βέλτιστη τάση (μωβ διακεκομμένη γραμμή) αλλάζει και αντιστοιχεί στο MPP1. Ως αποτέλεσμα, ο αλγόριθμος συνεχίζει να λειτουργεί στο υποβέλτιστο πλέον MPP2 μέχρι και το 24ο λεπτό (Σχ. 4.4(α)), όπου απεγκλωβίζεται από μόνος του λόγω της σύγκλισης των δύο τοπικών μεγίστων και της μορφής της χαρακτηριστικής *P-V*.

Ακόμα και για τη χρήσιμη σάρωση του 17ου λεπτού που συνεπάγεται ορθή μετάβαση από το MPP1 στο MPP2, θα έπρεπε ιδανικά να εκτελεστεί νωρίτερα, π.χ. το 14ο ή 15ο λεπτό, δηλαδή λίγο μετά από την προβολή του MPP2 ως το ολικά μέγιστο (Σχ. 4.4(α)).

Η παραπάνω ανάλυση καταδεικνύει το εγγενές πρόβλημα της περιοδικής σάρωσης της χαρακτηριστικής για επαναπροσδιορισμό του ολικά μέγιστου MPP: *δεν υπάρχει γνώση για το πότε πρέπει να γίνουν ουσιαστικές σαρώσεις μίας και δεν είναι γνωστό από πριν το σενάριο σκίασης*. Η μόνη λύση είναι συχνότερη σάρωση, ακόμα και ανά 2 ή 3 λεπτά, το οποίο όμως ενισχύει τις ανεπιθύμητες συνέπειες αυτής της διαδικασίας. Με την προτεινόμενη τεχνική αναγνώρισης σκίασης, είναι δυνατόν να επιτευχθούν υψηλές συχνότητες σάρωσης, δεδομένου ότι θα εκτελείται μόνο όταν υπάρχει λόγος.

4.3 Απλός Αλγόριθμος MPPT για Συνθήκες Σκίασης

Η μεγαλύτερη πρόκληση για έναν αλγόριθμο MPPT σχεδιασμένο για συνθήκες σκίασης, είναι να μπορεί να αντιλαμβάνεται πότε η λειτουργία δεν είναι βέλτιστη *χωρίς διαταραχή του σημείου λειτουργίας*. Δηλαδή, να μην αναγκάζεται να εκτελεί οποιασδήποτε μορφής διακύμανση του σημείου λειτουργίας περιοδικά, για τους λόγους που περιγράφονται και στην προηγούμενη ενότητα.

Στη συνέχεια, παρουσιάζεται ένας απλός αλγόριθμος MPPT που εκτιμά τα MPPs στη χαρακτηριστική μίας σκιασμένης ΦΒ πλαισιοσειράς με καθαρά μαθηματικό τρόπο, χωρίς την προαναφερθείσα διακύμανση του σημείου λειτουργίας. Η προτεινόμενη μέθοδος βασίζεται στη θεωρία του Κεφαλαίου 3, και συγκεκριμένα των ενότητων 3.2 και 3.3 που αφορούν την

επίδραση της σκίασης σε μία ΦΒ πλαισιοσειρά. Διατυπώνονται απλές αναλυτικές εξισώσεις με τις οποίες εκτιμώνται οι παράμετροι της σκίασης από τις τρέχουσες μετρήσεις τάσης και ρεύματος, και στη συνέχεια προσδιορίζεται η ισχύς και η τάση όλων των τοπικών μεγίστων της καμπύλης ισχύος, χωρίς να χρειάζεται πραγματική μετάβαση του σημείου λειτουργίας.

Ουσιαστικά, ο προτεινόμενος αλγόριθμος παρακολουθεί συνεχώς τα MPPs και αποφαινεται μετάβαση μόνο όταν το ολικό βέλτιστο MPP δεν είναι το τρέχον σημείο λειτουργίας. Αποφεύγονται έτσι περιττές διακυμάνσεις «αναγνωριστικής φύσεως» του τελευταίου και οι σχετικές αρνητικές συνέπειες στην έξοδο του ΦΒ συστήματος. Η ιδιότητα αυτή επιτρέπει στον προτεινόμενο αλγόριθμο global MPPT (GMPPT) να εκτελείται με συχνότητα σημαντικά μεγαλύτερη σε σχέση με τις τιμές που συζητούνται στις προηγούμενες ενότητες, της τάξης των 10 εκτελέσεων ανά δευτερόλεπτο ή και πιο συχνά. Ως αποτέλεσμα, έχει εξαιρετική ικανότητα προσαρμογής στις πλέον γρήγορα μεταβαλλόμενες συνθήκες σκίασης.

Η μέθοδος GMPPT είναι σχεδιασμένη για ΦΒ πλαισιοσειρές και υποστηρίζει μόνο τη συνηθισμένη περίπτωση των δύο επιπέδων ακτινοβολίας. Δεν απαιτεί αισθητήρες ακτινοβολίας, θερμοκρασίας ή άλλο εξοπλισμό, πέραν από τα μετρητικά τάσης και ρεύματος που διαθέτει κάθε μετατροπέας ισχύος. Η αποδοτικότητα του προτεινόμενου GMPPT επιβεβαιώνεται και συγκρίνεται με έναν τυπικό P&O με προσομοιώσεις στο λογισμικό *MATLAB/Simulink*. Το περιεχόμενο της παρούσας ενότητας δημοσιεύτηκε στην [215].

4.3.1 Προτεινόμενος αλγόριθμος GMPPT

Δεδομένου ότι ο προτεινόμενος αλγόριθμος αφορά ΦΒ πλαισιοσειρές που υπόκεινται σε δύο επίπεδα ακτινοβολίας, ο συμβολισμός των παραμέτρων σκίασης της ενότητας 3.2 συγκεκριμενοποιείται και απλουστεύεται για πιο στοχευμένη εφαρμογή. Έτσι, η τιμή της ακτινοβολίας στο σκιασμένο τμήμα της πλαισιοσειράς συμβολίζεται με G_{sh} και στο ασκίαστο με G_{un} , ενώ η ένταση της σκίασης με τον όρο $s = G_{sh}/G_{un}$. Το πλήθος των σκιασμένων στοιχειοσειρών συμβολίζεται με N_{sh} και των ασκίαστων με N_{un} ($N_{sh}+N_{un}=N_{tot}$). Οπότε, μελετώντας ξανά τα γραφήματα του Σχ. 4.1, τα κόκκινα βέλη αντιστοιχούν στην έκταση της σκίασης N_{sh} και τα πράσινα βέλη στην ένταση της σκίασης s . Τα δύο τοπικά μέγιστα που εμφανίζονται στις χαρακτηριστικές καμπύλες $I-V$ (Σχ. 4.1(α)) και $P-V$ (Σχ. 4.1(β)) είναι τα MPP1 και το MPP2.

Όπως εξηγείται και στην εισαγωγική ενότητα του κεφαλαίου, η κρίσιμη παράμετρος της σκίασης είναι η έκταση N_{sh} , και όχι η ένταση s , της σκίασης. Αυτό συμβαίνει διότι για ένα συγκεκριμένο συμβάν σκίασης, η ένταση $s = G_{sh}/G_{un}$ δε διαφοροποιείται σημαντικά κατά τη διάρκεια της ημέρας, παρόλο που οι απόλυτες τιμές των ακτινοβολιών G_{sh} και G_{un} μπορεί να αλλάζουν. Στην πλειοψηφία των ρεαλιστικών περιπτώσεων, η μεταβολή της χαρακτηριστικής ακολουθεί το κόκκινο βέλος στα Σχ. 4.1(α)-(β) που αφορά την έκταση της σκίασης, και όχι το πράσινο. Τότε, ένας συμβατικό MPPT, τύπου P&O, ακολουθεί το MPP1 καθ' όλη τη διάρκεια του συμβάντος, ακόμα και όταν είναι υποβέλτιστο σημείο, όπως εξηγείται στην προηγούμενη ενότητα.

Για να μπορεί ένας πιο αποδοτικός αλγόριθμος MPPT να αντληφθεί το κατά πόσο το τρέχον σημείο λειτουργίας αντιστοιχεί στο ολικό μέγιστο, πρέπει να μπορεί να εκτιμά τα χαρακτηριστικά (ισχύς και τάση) και των δύο MPPs. Ο προτεινόμενος αλγόριθμος το επιτυγχάνει αυτό αξιοποιώντας τις απλές περιγραφικές σχέσεις προσδιορισμού των MPPs ΦΒ

πλαισιοσειράς (3.24), όπως δίνονται στην ενότητα 3.3, αφού αναδιατυπωθούν στον απλοποιημένο συμβολισμό:

$$\text{MPP1:} \begin{cases} V_{mp1} = N_{un}V_{mp0} - N_{sh}\Delta V_D \\ I_{mp1} = G_{un}I_{mp0} \end{cases} \quad (4.2)$$

$$\text{MPP2:} \begin{cases} V_{mp2} = N_{un}(sV_{mp0} + (1-s)V_{oc0}) + N_{sh}V_{mp0} \\ I_{mp2} = G_{sh}I_{mp0} \left(1 + \lambda \frac{N_{un}}{N_{tot}}\right) \end{cases} \quad (4.3)$$

όπου οι ποσότητες V_{mp0} , I_{mp0} και V_{oc0} αντιστοιχούν στα ονομαστικά μεγέθη της στοιχειοσειράς και οι τιμές των σταθερών λαμβάνονται $\Delta V_D = 1$ V και $\lambda = 0.06$, όπως στην ενότητα 3.3.

Για να εφαρμοστούν οι (4.2) και (4.3), απαιτούνται οι παράμετροι σκίασης N_{sh} , G_{sh} και G_{un} , οι οποίες δεν είναι γνωστές από πριν και δεν υπάρχει φυσικός τρόπος μέτρησής τους. Παρόλα αυτά, είναι δυνατόν να εκτιμηθούν εμμέσως, χρησιμοποιώντας τις μετρήσεις τάσης και ρεύματος του τρέχοντος MPP. Συγκεκριμένα, αν το σημείο λειτουργίας αντιστοιχεί στο MPP1 και η ένταση σκίασης s θεωρηθεί γνωστή, οι παράμετροι N_{sh} και G_{sh} μπορούν να υπολογισθούν από τις εξισώσεις (4.2) μετά από αναδιατύπωση, και στη συνέχεια η G_{un} από την s :

$$\begin{aligned} N_{sh} &= \frac{N_{tot}V_{mp0} - V_{mp1}}{V_{mp0} - \Delta V_D} \\ &\Downarrow \\ G_{un} &= \frac{I_{mp1}}{I_{mp0}} \\ &\Downarrow \\ G_{sh} &= sG_{un} \end{aligned} \quad (4.4)$$

Για την (4.4), τα μόνα δεδομένα που απαιτούνται είναι οι τρέχουσες μετρήσεις τάσης και ρεύματος V_{mp1} , I_{mp1} και οι υπόλοιπες γνωστές σταθερές. Ακολούθως, τα χαρακτηριστικά του MPP2 μπορούν να εκτιμηθούν μέσω της (4.3), και έτσι να αποτιμηθεί το κατά πόσο προσφέρει μεγαλύτερη ισχύ ή όχι από το MPP1.

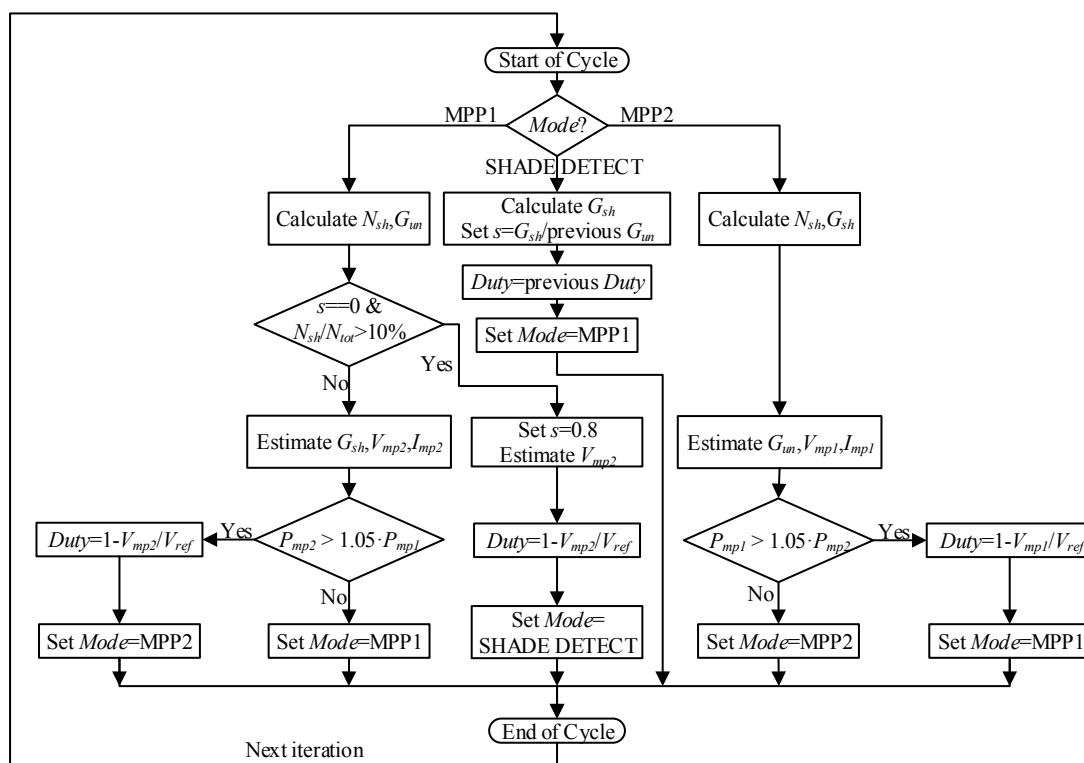
Παρομοίως, αν το τρέχον σημείο λειτουργίας είναι το MPP2, οι εξισώσεις της (4.3) επιλύονται ως προς N_{sh} και G_{sh} , καταλήγοντας στην ακόλουθη (4.5). Μετά, η τάση και το ρεύμα (και άρα και η ισχύς) του MPP1 μπορούν να υπολογισθούν από την (4.2).

$$\begin{aligned} N_{sh} &= \frac{N_{tot}(sV_{mp0} + (1-s)V_{oc0}) - V_{mp2}}{(1-s)(V_{oc0} - V_{mp0})} \\ &\Downarrow \\ G_{sh} &= \frac{I_{mp2}}{(1 + \lambda N_{un}/N_{tot})I_{mp0}} \\ &\Downarrow \\ G_{un} &= s/G_{sh} \end{aligned} \quad (4.5)$$

Οι παραπάνω υπολογισμοί απαιτούν τη γνώση της παραμέτρου s , η οποία εν γένει δεν είναι γνωστή εκ των προτέρων. Όμως, αν η ένταση της σκίασης θεωρηθεί *σταθερή* κατά τη διάρκεια ενός συμβάντος σκίασης, όπως συζητείται πιο πάνω, τότε η παράμετρος s μπορεί να εκτιμηθεί μία φορά κατά την εμφάνιση της σκίασης, και να χρησιμοποιηθεί στη συνέχεια μέχρι να φύγει εντελώς. Όπως εξηγείται στη συνέχεια, ο προτεινόμενος αλγόριθμος εκτελεί μία βραχύχρονη αναγνωριστική λειτουργία της s *μία φορά μόνο*, μεταβάλλοντας κατάλληλα το σημείο λειτουργίας, χωρίς να απαιτείται συνεχής επανάληψη της διαδικασίας.

Στο ακόλουθο Σχ. 4.5, παρουσιάζεται το αλγοριθμικό διάγραμμα της προτεινόμενης μεθόδου. Ο υποφαινόμενος αλγόριθμος εφαρμόζεται παράλληλα με έναν τυπικό P&O, με τη διαφορά ότι εκτελείται σε μικρότερη συχνότητα (τυπικά μία φορά ανά 10-20 περιόδους P&O). Σε κάθε εκτέλεση του GMPPT, επιλέγεται ο κατάλληλος κλάδος ανάλογα την κατάσταση (Mode): λειτουργία στο MPP1 (αριστερός κλάδος), λειτουργία στο MPP2 (δεξιάς κλάδος), ή λειτουργία αναγνώρισης της έντασης της σκίασης (SHADE DETECT – ενδιάμεσος κλάδος). Αρχικά, η κατάσταση είναι MPP1, καθώς όταν το σύστημα είναι ασκίαστο, το ένα και μοναδικό MPP που εμφανίζεται αντιστοιχεί στο MPP1.

Όταν εκτελείται ο αλγόριθμος και η κατάσταση είναι MPP1 ή MPP2, εκτιμώνται πρώτα οι παράμετροι N_{sh} και G_{un}/G_{sh} (G_{un} στον αριστερό κλάδο, G_{sh} στον δεξί). Στη συνέχεια, σε κατάσταση MPP1 τα επόμενα βήματα εξαρτώνται από το αν είναι γνωστή η παράμετρος s . Αν έχει ήδη υπολογισθεί σε προγενέστερο βήμα, προσδιορίζεται η εναπομείνουσα ακτινοβολία G_{sh}



Σχ. 4.5. Αλγοριθμικό διάγραμμα της προτεινόμενης μεθόδου GMPPT. Ο αλγόριθμος αναγνωρίζει τις παραμέτρους της σκίασης δεδομένου του τρέχοντος MPP και εκτιμά τα χαρακτηριστικά του άλλου MPP, μεταβαίνοντας στο δεύτερο μόνο αν παρέχει περισσότερη ισχύ (η σχέση για το duty cycle αφορά boost converter). Κατά την εμφάνιση της σκίασης, η ένταση της s καταγράφεται με μία βραχύχρονη μετάβαση που γίνεται μόνο μία φορά.

και υπολογίζονται τα χαρακτηριστικά του άλλου MPP (G_{sh} , V_{mp2} , I_{mp2} στον αριστερό κλάδο – G_{un} , V_{mp1} , I_{mp1} στον δεξί). Ακολούθως, η εκτίμηση της ισχύος του άλλου MPP συγκρίνεται με τη μετρούμενη ισχύ στο τρέχον σημείο λειτουργίας: αν η πρώτη είναι μεγαλύτερη πάνω από ένα όριο (π.χ. 5%), τότε ο αλγόριθμος μετακινεί το σημείο λειτουργίας προς το άλλο MPP. Στο Σχ. 4.5, η εν λόγω μετάβαση υλοποιείται ρυθμίζοντας κατάλληλα το duty cycle του dc/dc μετατροπέα (θεωρείται boost converter), χρησιμοποιώντας την τάση στόχο και το επίπεδο τάσης του dc ζυγού (dc link) V_{ref} .

Σε κάθε περίπτωση, ανανεώνεται η κατάσταση σε MPP1 ή MPP2 ανάλογα το αποτέλεσμα της σύγκρισης, και ολοκληρώνεται η εκτέλεση του συγκεκριμένου βήματος του GMPPT. Μέχρι το επόμενο βήμα, εκτελείται ένας τυπικός P&O αλγόριθμος αρκετές φορές, συγκλίνοντας με ασφάλεια στο νέο MPP και διορθώνοντας έτσι όποιες ανακρίβειες στην εκτίμησή του.

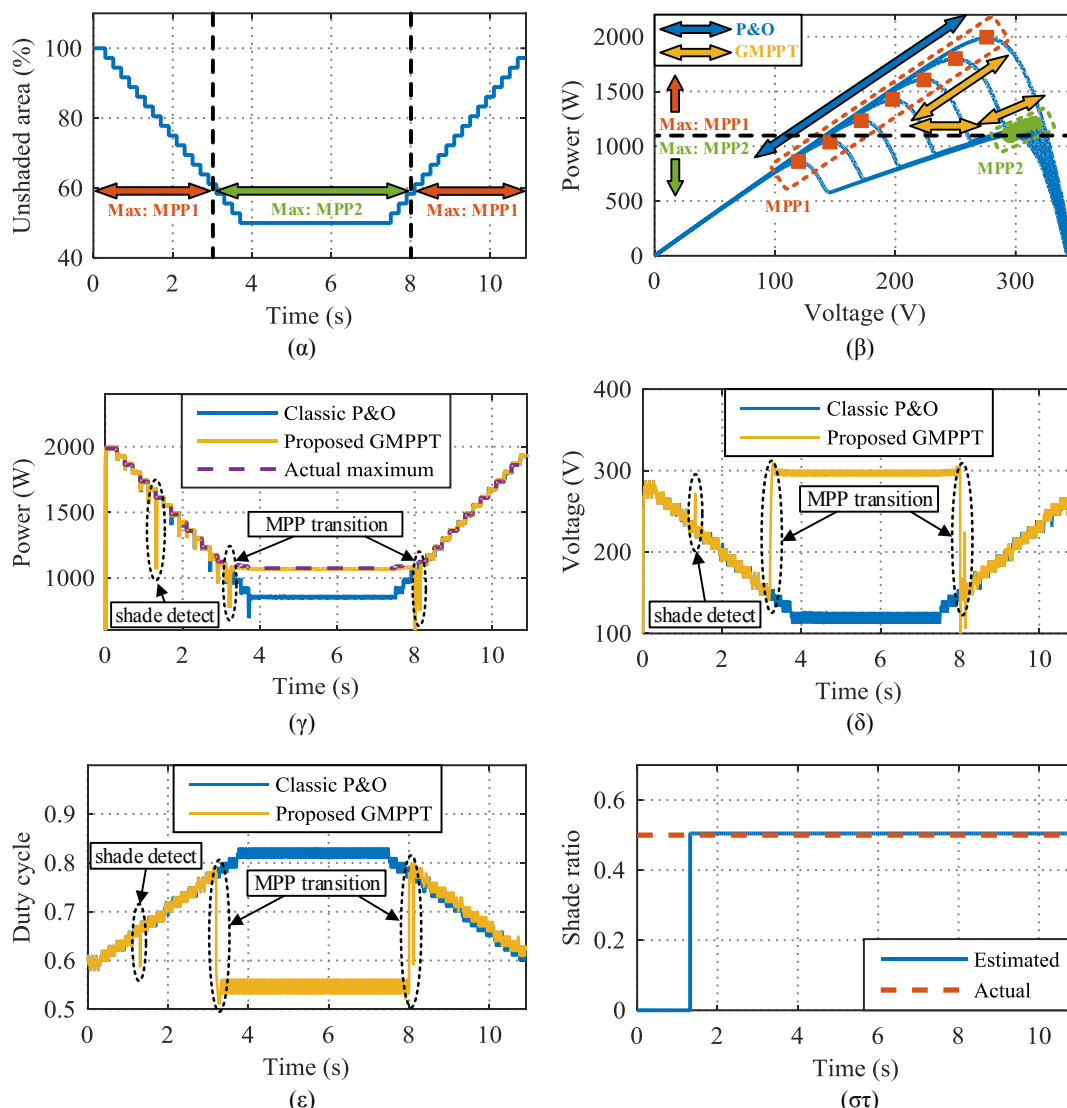
Αρχικά όταν δεν υπάρχει σκίαση, ο αλγόριθμος αρχικοποιείται από την κατάσταση MPP1 και με $s = 0$. Η παράμετρος s προσδιορίζεται για πρώτη φορά όταν εμφανιστεί σκίαση σε έκταση άνω του 10% (Σχ. 4.5). Η διαδικασία αναγνώρισης της σκίασης εκκινεί θέτοντας προσωρινά $s = 0.8$, ώστε να αποκτηθεί μία πρόχειρη εκτίμηση της τάσης V_{mp2} και να υλοποιηθεί μετάβαση του σημείου λειτουργίας σε αυτήν. Η κατάσταση τίθεται SHADE DETECT και στο επόμενο βήμα εκτελείται το άνω τμήμα του ενδιάμεσου κλάδου στο Σχ. 4.5. Πρώτα εκτιμάται η G_{sh} βάσει του μετρούμενου ρεύματος στο νέο σημείο λειτουργίας, και στη συνέχεια η τιμή της χρησιμοποιείται μαζί με την G_{un} (γνωστή από το προηγούμενο βήμα) για τον υπολογισμό του s . Αυτή η λειτουργία διαρκεί ακριβώς μία περίοδο GMPPT, η οποία αρκεί για τον προσδιορισμό του s , και μετά εφαρμόζεται ξανά το προηγούμενο duty cycle για να επιστρέψει η λειτουργία στο MPP1.

Πρέπει να διασαφηνιστεί ότι μεταξύ των δύο προαναφερθεισών διαδοχικών εκτελέσεων του GMPPT, εκτελείται κανονικά ο P&O με πολύ μεγαλύτερη συχνότητα, εντοπίζοντας με ακρίβεια το MPP2 παρά την αυθαίρετη υπόθεση ότι $s = 0.8$. Δηλαδή, στην πρώτη μετάβαση MPP1 → MPP2 ο αλγόριθμος μετακινεί το σημείο λειτουργίας στην ευρύτερη περιοχή του MPP2 και όχι ακριβώς στο MPP2. Όμως, μέχρι το επόμενο βήμα του GMPPT, ο P&O έχει φροντίσει και έχει συγκλίνει με ακρίβεια σε αυτό.

4.3.2 Επιβεβαίωση μέσω προσομοιώσεων

Για να αποτιμηθεί η αποδοτικότητα του προτεινόμενου αλγορίθμου GMPPT, εκτελούνται προσομοιώσεις στο λογισμικό *MATLAB/Simulink* και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στα ακόλουθα γραφήματα του Σχ. 4.6. Μία ΦΒ πλαισιοσειρά της δομής του Σχ. 3.7 υπόκειται σε ένα περιστατικό βραχυπρόθεσμης και πολύ γρήγορα μεταβαλλόμενης σκίασης. Η μεταβολή της ασκίαστης επιφάνειας απεικονίζεται στο Σχ. 4.6(α): σκιάζεται μέχρι και το 50% της συνολικής έκτασης μέσα σε μόλις 11 δευτερόλεπτα, ενώ η ένταση της σκίασης παραμένει σταθερή. Η μορφή της καμπύλης ισχύος όπως μεταβάλλεται στις διάφορες φάσεις της σκίασης φαίνεται στο Σχ. 4.6(β), όπου τα δύο τοπικά μέγιστα MPP1 και MPP2 σημειώνονται με κόκκινους τετραγωνικούς και πράσινους κυκλικούς δείκτες.

Το MPP1 είναι το ολικό μέγιστο στην αρχή και στο τέλος του σεναρίου, εκτός του διαστήματος 3-8 sec (Σχ. 4.6(α)), όπου η έκταση της σκίασης υπερβαίνει το 40% και το MPP2 προσφέρει περισσότερη ισχύ (Σχ. 4.6(β)). Αρχικά όσο το σύστημα είναι ασκίαστο, ο τυπικός



Σχ. 4.6. Προσομοίωση ΦΒ πλαισιοσειράς που σκιάζεται σε μεταβαλλόμενη έκταση και σε σταθερή ένταση 50%, εφαρμόζοντας έναν τυπικό αλγόριθμο P&O και τον προτεινόμενο GMPPT. (α) Ασκίαστη επιφάνεια, (β) μεταβολή της χαρακτηριστικής $P-V$, (γ) ισχύς εξόδου, (δ) τάση λειτουργίας, (ε) duty cycle του μετατροπέα, και (στ) ένταση σκίασης s .

αλγόριθμος P&O (Classic P&O) λειτουργεί στο μοναδικό MPP που παρουσιάζεται, το οποίο είναι τύπου MPP1 (άνωτερος κόκκινος τετραγωνικός δείκτης στο Σχ. 4.6(β)). Καθώς η σκίαση εμφανίζεται και εκτείνεται, ο κλασσικός P&O αναπροσαρμόζει συνεχώς το σημείο λειτουργίας ώστε να ακολουθεί μόνιμως το MPP1, όπως δείχνει το μπλε βέλος στο Σχ. 4.6(β), ακόμη και όταν δεν είναι το ολικά βέλτιστο. Αντίθετα, ο προτεινόμενος αλγόριθμος GMPPT μεταβαίνει στο MPP2 όταν αυτό αναδυθεί ως το ολικά βέλτιστο, σύμφωνα με τα κίτρινα βέλη του Σχ. 4.6(β), λόγω του μηχανισμού παρακολούθησης που ενσωματώνει.

Η ισχύς εξόδου που παράγεται με εφαρμογή του καθενός αλγορίθμου απεικονίζεται στο Σχ. 4.6(γ), σε αντιπαραβολή με την πραγματικά μέγιστη ισχύ (μωβ διακεκομμένη γραμμή). Αναμενόμενα, ο τυπικός P&O (μπλε γραμμή) λειτουργεί υποβέλτιστα το χρονικό διάστημα 3-8 sec, όταν το MPP2 είναι το ολικά μέγιστο. Αντίθετα, ο προτεινόμενος αλγόριθμος GMPPT

(κίτρινη γραμμή) παρακολουθεί μονίμως όλα τα MPPs και κάνει τις κατάλληλες μεταβάσεις τις χρονικές στιγμές 3 sec και 8 sec, επιτυγχάνοντας έτσι μέγιστη παραγωγή, σχεδόν ταυτόσημη με την ιδανική.

Οι εν λόγω μεταβάσεις επιφέρουν βραχυπρόθεσμη διακύμανση στην ισχύ (Σχ. 4.6(γ)), στην τάση λειτουργίας (Σχ. 4.6(δ)), καθώς και στο duty cycle του μετατροπέα (Σχ. 4.6(ε)). Στα δύο τελευταία γραφήματα, η αλλαγή του MPP οδηγεί σε εμφανώς διαφορετική τάση και duty cycle αντίστοιχα. Η διαδικασία shade detect που λαμβάνει χώρα τη χρονική στιγμή 1.3 sec συνεπάγεται πολύ μικρή διακύμανση στην ισχύ εξόδου (Σχ. 4.6(γ)), και καταλήγει σε πολύ ικανοποιητική εκτίμηση της έντασης της σκίασης $s = 0.505$ (Σχ. 4.6(στ)).

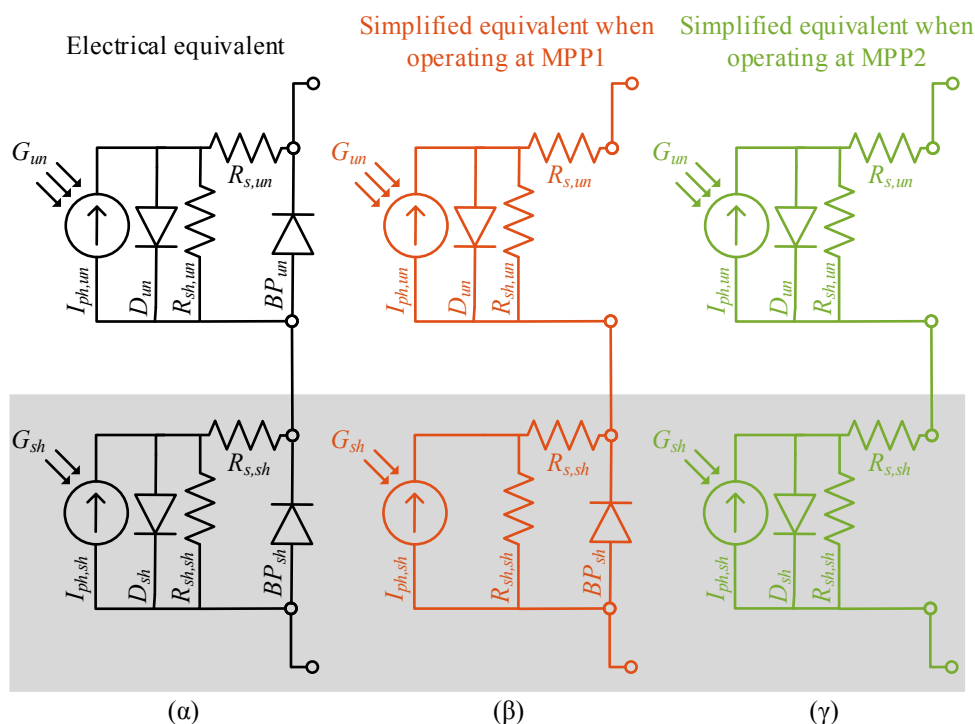
4.4 Αλγόριθμος MPPT για Συνθήκες Σκίασης Εφαρμόζοντας Curve Fitting

Ο απλός αλγόριθμος GMPPT που προτείνεται στην προηγούμενη ενότητα επιτυγχάνει μόνιμη λειτουργία στο ολικό μέγιστο MPP, χωρίς να διαταράσσει συνεχώς το σημείο λειτουργίας και αξιοποιώντας μόνο τις τρέχουσες μετρήσεις ρεύματος και τάσης. Όμως, η υπόθεση πως η ένταση της σκίασης παραμένει σταθερή κατά τη διάρκεια ενός συγκεκριμένου συμβάντος σκίασης είναι ένας περιορισμός για τη γενική εφαρμογή της μεθόδου. Ακόμη, στις μαθηματικές εξισώσεις του αλγορίθμου GMPPT απουσιάζει η μοντελοποίηση της θερμοκρασίας, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει υπό συνθήκες σε (αποδεκτά μεν) σφάλματα.

Για να αντιμετωπιστούν οι συγκεκριμένοι περιορισμοί, στην παρούσα ενότητα εισάγεται ένας εξελιγμένος αλγόριθμος MPPT που εφαρμόζει την τεχνική προσαρμογής καμπύλης (curve fitting) στις μετρήσεις του ρεύματος και της τάσης, αξιοποιώντας ουσιαστικά την εγγενή κυμάτωση (ripple) του σημείου λειτουργίας. Ο προτεινόμενος αλγόριθμος CFMPPT εκτιμά σε συνεχή χρόνο τις παραμέτρους της σκίασης και τις ιδιότητες όλων των MPPs, γνωρίζοντας πάντα πότε πρέπει να κάνει μετάβαση του σημείου λειτουργίας. Είναι μια καθαρά μαθηματική διαδικασία που δεν εφαρμόζει περαιτέρω ταλάντωση του σημείου λειτουργίας, επιτρέποντας έτσι πολύ μεγάλη συχνότητα εκτέλεσης, και συνεπώς προσαρμογή σε πολύ γρήγορα μεταβαλλόμενες συνθήκες σκίασης. Η τεχνική CFMPPT δεν απαιτεί επιπλέον εξοπλισμό πέραν από τα μετρητικά τάσης και ρεύματος του μετατροπέα ισχύος, ενώ είναι σχεδιασμένος και αυτός για ΦΒ πλαισιοσειρά και για τη συνηθισμένη περίπτωση των δύο επιπέδων ακτινοβολίας. Η απόδοση του προτεινόμενου CFMPPT επιβεβαιώνεται και συγκρίνεται με έναν κλασσικό P&O μέσω προσομοιώσεων στο λογισμικό *MATLAB/Simulink*. Τα ακόλουθα αποτελέσματα δημοσιεύθηκαν στο [216].

4.4.1 Μοντελοποίηση ΦΒ πλαισιοσειράς σε συνθήκες σκίασης

Η θεωρητική βάση του αλγορίθμου είναι οι παρατηρήσεις των ενότητων 3.2 και 3.3, σχετικά με την επίδραση της σκίασης σε μία ΦΒ πλαισιοσειρά, ενώ χρησιμοποιείται η απλοποιημένη ονοματολογία που ορίστηκε στην προηγούμενη ενότητα 4.3. Συγκεκριμένα, δεδομένων των δύο διακριτών τιμών ακτινοβολίας, το σκιασμένο τμήμα του συστήματος αποτελείται από N_{sh} στοιχειοσειρές που υπόκεινται σε ένταση ακτινοβολίας G_{sh} , ενώ το ασκίαστο τμήμα περιλαμβάνει N_{un} στοιχειοσειρές που λειτουργούν σε ακτινοβολία G_{un} ($G_{un} > G_{sh}$, $N_{sh} + N_{un} = N_{tot}$). Εμφανίζονται μέχρι δύο τοπικά μέγιστα, το MPP1 και το MPP2, όπως φαίνεται στις



Σχ. 4.7. Ηλεκτρικά ισοδύναμα κυκλώματα μίας ΦΒ πλαισιοσειράς που σκιάζεται μερικώς σε δύο επίπεδα ακτινοβολίας. (α) Πλήρες κύκλωμα, (β) απλοποιημένο κύκλωμα για λειτουργία στο MPP1, και (γ) απλοποιημένο κύκλωμα για λειτουργία στο MPP2.

χαρακτηριστικές $I-V$ και $P-V$ του Σχ. 4.1 στην εισαγωγική ενότητα του κεφαλαίου.

Το ισοδύναμο κύκλωμα της πλαισιοσειράς σε συνθήκες σκίασης απεικονίζεται στο Σχ. 4.7(α) με μαύρο χρώμα, αποτελούμενο από την ασκίαστη (λευκό φόντο) και σκιασμένη (γκρίζο φόντο) συνιστώσα, κάθε μία από τις οποίες μοντελοποιείται με το κύκλωμα του ΦΒ μοντέλου μίας διόδου. Αξίζει να σημειωθεί ότι όταν η πλαισιοσειρά λειτουργεί στο MPP1, η διάδος διαφυγής των ασκίαστων στοιχειοσειρών BP_{un} δεν άγει, ενώ η επαφή p-n των σκιασμένων, που μοντελοποιείται με τη διάοδο D_{sh} , είναι ανάστροφα πολωμένη. Συνεπώς, το ισοδύναμο κύκλωμα για λειτουργία στο MPP1 μπορεί να απλοποιηθεί αγνοώντας τα προαναφερθέντα στοιχεία, όπως σχεδιάζεται με κόκκινο χρώμα στο Σχ. 4.7(β). Παρομοίως, στο MPP2 καμία από τις διόδους διαφυγής δεν άγει, καθώς όλες οι στοιχειοσειρές λειτουργούν στο μειωμένο ρεύμα των σκιασμένων, καταλήγοντας στο απλοποιημένο κύκλωμα που σχεδιάζεται με πράσινο χρώμα στο Σχ. 4.7(γ).

Για τη διατύπωση των εξισώσεων ρεύματος-τάσης των συγκεκριμένων κυκλωμάτων, χρησιμοποιούνται τα κεκτημένα του Κεφαλαίου 3. Θεωρώντας ως ελάχιστη δομική μονάδα τη στοιχειοσειρά, η λειτουργία της περιγράφεται από την (3.4), όπως αναδιατυπώνεται ακολούθως για το επίπεδο της στοιχειοσειράς (όχι κυψέλης) και αγνοώντας τον όρο για αρνητικές τάσεις:

$$V_{cs} = R_{sh} I_{ph} - (R_s + R_{sh}) I - aW \left\{ \frac{R_{sh} I_s}{a} e^{\frac{R_{sh}(I_{ph}-I)}{a}} \right\} \quad (4.6)$$

όπου οι πέντε παράμετροι I_{ph} , I_s , a , R_s και R_{sh} αναφέρονται στη στοιχειοσειρά. Η (4.6) έχει

υποστεί μερικές απλοποιήσεις σε σχέση με την (3.4), που δεν επηρεάζουν την ακρίβεια.

Επομένως, για κάθε μία από τις δύο ομάδες (ασκίαστη, σκιασμένη), η συνολική της τάση στο πρώτο τεταρτημόριο θα είναι $N_{un}V_{cs,un}$ και $N_{sh}V_{cs,sh}$ αντίστοιχα. Επιπλέον, όταν άγει η διόδος διαφυγής των σκιασμένων στοιχειοσειρών (MPP1), η εξίσωσή τους τροποποιείται στην (3.8), η οποία μετά από απλοποίηση γίνεται:

$$V_{cs} = a_{bp} \ln \left(\frac{I - I_{sc,sh}}{I_{sbp}} \right) \quad (4.7)$$

όπου οι παράμετροι a_{bp} και I_{sbp} αναφέρονται στα χαρακτηριστικά της διόδου διαφυγής, και το ρεύμα βραχυκύκλωσης $I_{sc,cs}$ δίνεται από την (3.7)

$$I_{sc,sh} = I_{ph,sh} \frac{R_{sh,sh}}{R_{s,sh} + R_{sh,sh}} \quad (4.8)$$

Τελικά, η συνολική εξίσωση ρεύματος-τάσης για την πλαισιοσειρά ανάλογα το MPP λειτουργίας είναι:

$$\begin{cases} \text{MPP1: } V_{str} = N_{un}V_{cs,un} - N_{sh}a_{bp} \ln \left(\frac{I - I_{sc,sh}}{I_{sbp}} \right) \\ \text{MPP2: } V_{str} = N_{un}V_{cs,un} + N_{sh}V_{cs,sh} \end{cases} \quad (4.9)$$

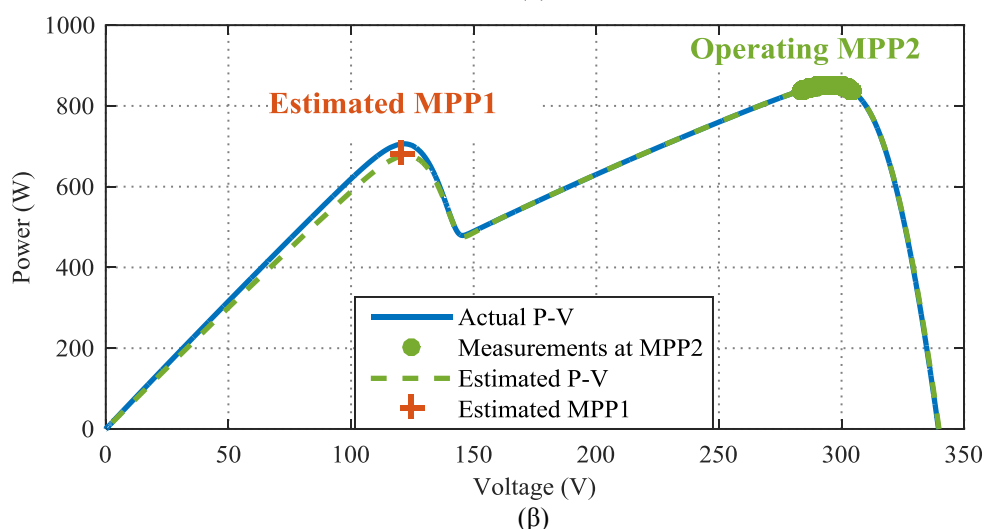
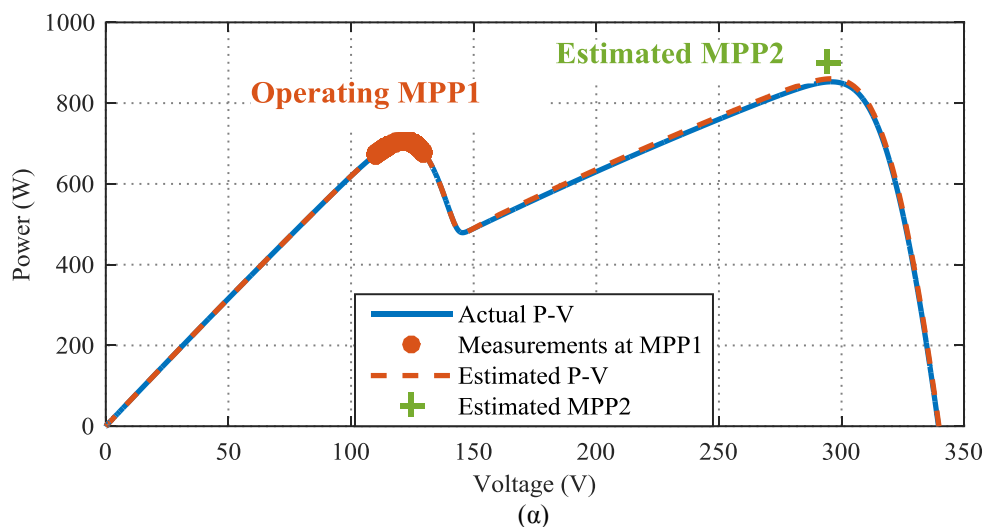
όπου στη θέση των όρων $V_{cs,un}$ και $V_{cs,sh}$ μπαίνει η (4.6) με την αντίστοιχη ομάδα πέντε παραμέτρων, ενώ για το $I_{sc,cs}$ χρησιμοποιείται η (4.8).

4.4.2 Αλγόριθμος CFMPPT

Σύμφωνα με την προηγούμενη ανάλυση, οι άγνωστες παράμετροι που πρέπει να προσδιοριστούν είναι έντεκα στο άθροισμα: πέντε για την ασκίαστη στοιχειοσειρά, πέντε για τη σκιασμένη στοιχειοσειρά και η έκταση της σκίασης N_{sh} (τα χαρακτηριστικά της διόδου διαφυγής a_{bp} και I_{sbp} είναι γνωστά από πριν και θεωρείται ότι δεν επηρεάζονται από τις λειτουργικές συνθήκες). Όμως, αυτός ο αριθμός είναι υπερβολικά μεγάλος για να προσδιορισθούν με ακρίβεια μέσω curve fitting.

Για να μειωθεί ο αριθμός των αγνώστων, εφαρμόζονται οι εξισώσεις αναγωγής των πέντε παραμέτρων σε αυθαίρετη ακτινοβολία και θερμοκρασία (2.26)-(2.30), που δίνονται στην παράγραφο 2.3.3. Δηλαδή, δεδομένων των ονομαστικών τιμών των πέντε παραμέτρων (βλ. ενότητα 2.3) και των συνθηκών λειτουργίας: G_{sh} , G_{un} και T (θεωρείται κοινή θερμοκρασία σε όλη την πλαισιοσειρά), υπολογίζονται όλες οι 10 παράμετροι του ΦΒ μοντέλου. Τελικά, οι άγνωστοι (παράμετροι σκίασης) είναι μόνο τέσσερις: $[G_{un}, G_{sh}, T, N_{sh}]$.

Αυτές οι τέσσερις παράμετροι προσδιορίζονται μέσω curve fitting ελαχίστων τετραγώνων (least squares curve fitting – LSQ CF) σε ένα ιστορικό προηγούμενων μετρήσεων που περιλαμβάνονται στο επονομαζόμενο παράθυρο μετρήσεων ή παράθυρο λειτουργίας. Για λόγους κατανόησης, παρατίθενται τα ακόλουθα γραφήματα του Σχ. 4.8. Ένας κλαστικός αλγόριθμος P&O είναι μονίμως σε λειτουργία, προξενώντας μικρή ταλάντωση του σημείου



Σχ. 4.8. Παράθυρο λειτουργίας στο (α) MPP1 και (β) MPP2 που χρησιμοποιείται για την εκτίμηση όλης της χαρακτηριστικής $P-V$ και του άλλου MPP.

λειτουργίας γύρω από το αντίστοιχο τοπικό μέγιστο, δημιουργώντας έτσι το παράθυρο μετρήσεων. Στο Σχ. 4.8(α), τα σημεία λειτουργίας γύρω από το MPP1 που εμπεριέχονται στο παράθυρο μετρήσεων συμβολίζονται με κόκκινους δείκτες. Η τεχνική LSQ CF ταιριάζει την εξίσωση (4.9) (άνω κλάδος σε αυτήν την περίπτωση) στις μετρήσεις, ώστε να εξάγει τις παραμέτρους της σκίασης.

Ακολούθως, οι τιμές των G_{in} , G_{sh} , T και N_{sh} που προκύπτουν χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση της τάσης και ισχύος του άλλου MPP (MPP2 στο συγκεκριμένο παράδειγμα – πράσινος σταυρό στο Σχ. 4.8(α)), ώστε να εκτελεστεί μετάβαση σε αυτό αν προσφέρει περισσότερη ισχύ. Αυτό επιτυγχάνεται βάσει των απλών προσεγγιστικών σχέσεων για τα MPPs πλαισιοσειράς (3.24), που προτείνονται στην ενότητα 3.3, αφού διατυπωθούν με τον απλοποιημένο συμβολισμό:

$$\text{MPP1:} \begin{cases} V_{mp1} = N_{in} V_{mp} - N_{sh} \Delta V_D \\ I_{mp1} = G_{in} I_{mp} \end{cases} \quad (4.10)$$

$$\text{MPP2:} \begin{cases} V_{mp2} = N_{un} \left[\frac{G_{sh}}{G_{un}} V_{mp} + \left(1 - \frac{G_{sh}}{G_{un}} \right) V_{oc} \right] + N_{sh} V_{mp} \\ I_{mp2} = G_{sh} I_{mp} \left(1 + \lambda \frac{N_{un}}{N_{tot}} \right) \end{cases} \quad (4.11)$$

όπου οι σταθερές ΔV_D και λ τίθενται 1 V και 0.06 αντίστοιχα, ενώ οι ποσότητες V_{mp} , I_{mp} και V_{oc} αφορούν τη στοιχειοσειρά σε ονομαστική ακτινοβολία και αυθαίρετη θερμοκρασία T , και υπολογίζονται από την (3.50) της παραγράφου 3.5.3 ως εξής:

$$\begin{aligned} I_{mp} &= I_{mp0} \left(1 + \alpha_{I_{mp}} (T - T_0) \right) \\ V_{mp} &= V_{mp0} \left(1 + \beta_{V_{mp}} (T - T_0) \right) \\ V_{oc} &= V_{oc0} \left(1 + \beta_{V_{oc}} (T - T_0) \right) \end{aligned} \quad (4.12)$$

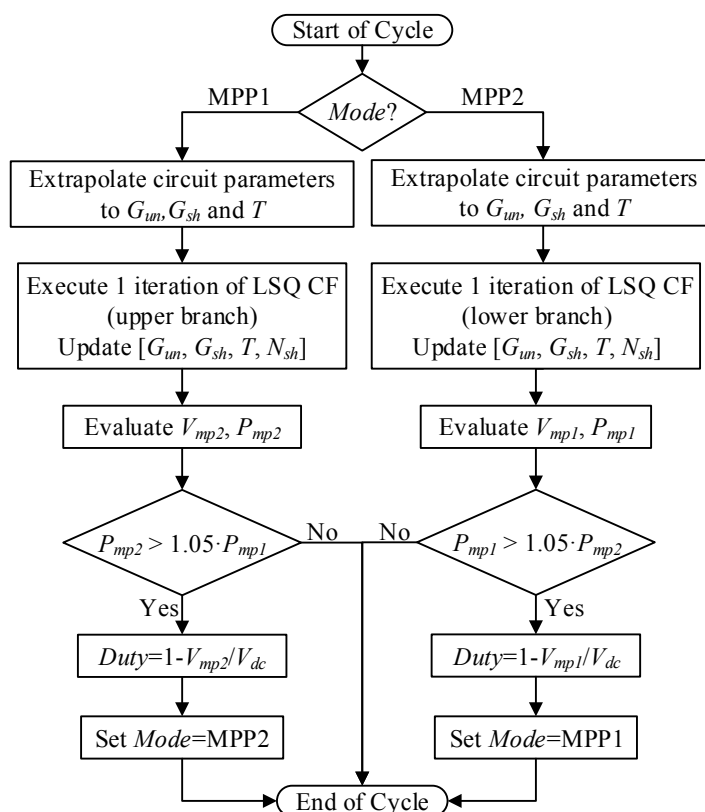
όπου τα V_{mp0} , I_{mp0} και V_{oc0} είναι τα ονομαστικά μεγέθη της στοιχειοσειράς. Ουσιαστικά, οι εξισώσεις (4.10)-(4.11) είναι ίδιες με την αντίστοιχη διατύπωση στις (4.2) και (4.3), με τη διαφορά ότι εδώ υποστηρίζεται και η θερμοκρασιακή επίδραση.

Στο Σχ. 4.8(α), παρουσιάζεται ένα ενδεικτικό παράδειγμα του πώς η παραπάνω διαδικασία καταλήγει σε εκτίμηση όλης της χαρακτηριστικής P - V (κόκκινη διακεκομμένη γραμμή) και του MPP2 (πράσινος σταυρός) από τις μετρήσεις γύρω από το MPP1. Αντίστοιχα, στο Σχ. 4.8(β) απεικονίζεται το αντίστροφο σενάριο λειτουργίας στο MPP2 (πράσινοι κυκλικοί δείκτες) και εκτίμησης τους MPP1 (κόκκινος σταυρός).

Αξίζει να σημειωθεί ότι η κυμάτωση του σημείου λειτουργίας γύρω από το MPP1 οφείλεται κυρίως σε δύο παράγοντες: στην εγγενή διακοπτική ταλάντωση (switching ripple) και στην τεχνητή διακύμανση που προξενεί ο αλγόριθμος P&O. Η κυμάτωση της πρώτης κατηγορίας προκαλείται από την έναυση/σβέση το τρανζίστορ ισχύος στη μόνιμη λειτουργία του μετατροπέα και εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του τελευταίου (π.χ. διακοπτική συχνότητα, μέγεθος πυκνωτή εισόδου κλπ.). Η τεχνητή διαταραχή που προξενάται από την τεχνική P&O είναι απαραίτητη για τη λειτουργία του αλγορίθμου. Δηλαδή, η προτεινόμενη μέθοδος CFMPPT αξιοποιεί την ήδη υπάρχουσα κυμάτωση και δεν προκαλεί επιπρόσθετη ταλάντωση στο σημείο λειτουργίας.

Η χρονική διάρκεια που αντιστοιχεί στα δείγματα του παραθύρου λειτουργίας, συμβολίζεται με T_{win} και αποκαλείται περίοδος παραθύρου. Μπορεί να τεθεί από μερικές δεκάδες έως και λίγες εκατοντάδες ms, ώστε να επιτυγχάνεται αποδοτικό και αξιόπιστο curve fitting, αλλά ταυτόχρονα να μπορεί ο αλγόριθμος να προσαρμόζεται σε ταχέως μεταβαλλόμενα συμβάντα σκίασης.

Όσον αφορά στον μαθηματικό αλγόριθμο υλοποίησης της LSQ CF, επιλέγεται ο Levenberg-Marquadt, ο οποίος είναι επαναληπτική μέθοδος [222]. Παρόλα αυτά, εφαρμόζεται εκτελώντας μόνο μία επανάληψη σε κάθε βήμα του CFMPPT (κάθε T_{win}), ώστε να παραμείνει το υπολογιστικό κόστος σε χαμηλά επίπεδα που επιτρέπουν ενσωμάτωση σε ένα μικροεπεξεργαστή. Όπως φαίνεται και στις προσομοιώσεις στη συνέχεια, αρκούν λίγα βήματα του αλγορίθμου (ένα κάθε T_{win}) για να προσαρμόζεται ικανοποιητικά ακόμα και στις πιο γρήγορα μεταβαλλόμενες περιβαλλοντικές συνθήκες.



Σχ. 4.9. Αλγοριθμικό διάγραμμα του προτεινόμενου αλγορίθμου CFMPPT. Σε κάθε βήμα εκτιμώνται οι παράμετροι σκίασης και υπολογίζονται τα χαρακτηριστικά του άλλου MPP από το τρέχον σημείο λειτουργίας: μόνο αν το τελευταίο παρέχει περισσότερη ισχύ υλοποιείται μετάβαση σε αυτό.

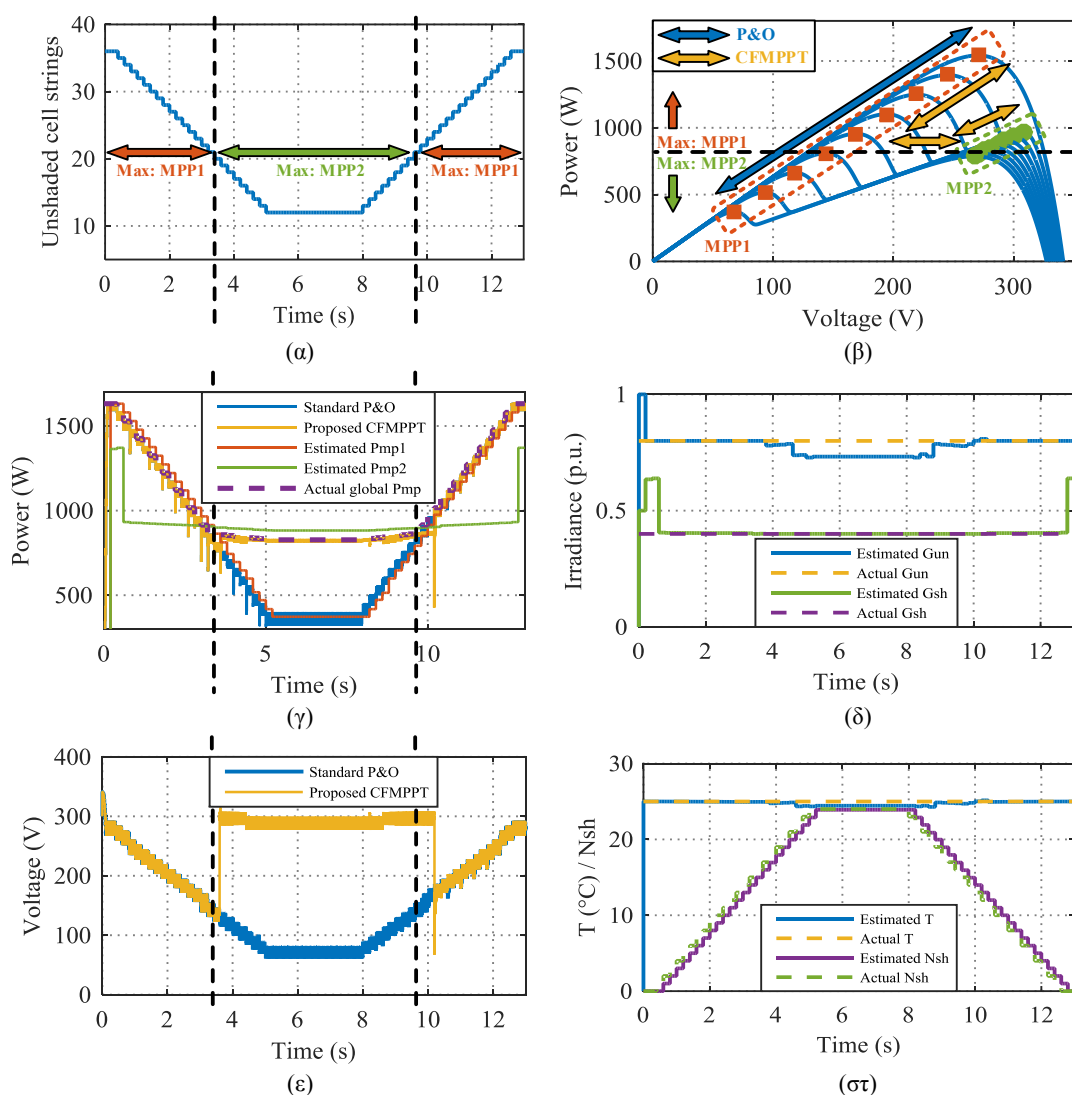
Το αλγοριθμικό διάγραμμα της προτεινόμενης μεθόδου CFMPPT παρουσιάζεται στο Σχ. 4.9. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, εκτελείται συνεχώς ένα κλασικός αλγόριθμος P&O ώστε να αναπροσαρμόζεται μονίμως το σημείο λειτουργίας σε μικροαλλαγές του MPP, με ρυθμό αρκετά γρηγορότερο από τη συχνότητα εκτέλεσης του CFMPPT. Σε κάθε βήμα του τελευταίου, πρώτα ανάγονται οι δέκα κυκλωματικές παράμετροι (πέντε για το ασκίαστο τμήμα και πέντε για το σκιασμένο) βάσει των προηγούμενων εκτιμήσεων των G_{un} , G_{sh} , και T (σχέσεις (2.26)-(2.30) από παράγραφο 2.3.3). Στη συνέχεια εκτελείται *μία επανάληψη* του LSQ CF αλγορίθμου (Levenberg-Marquadt) χρησιμοποιώντας τον άνω ή κάτω κλάδο της (4.9), ανάλογα με το αν το τρέχον σημείο λειτουργίας είναι το MPP1 ή το MPP2, αντίστοιχα. Ακολούθως, η τάση, ρεύμα και ισχύς του άλλου MPP υπολογίζονται βάσει των (4.10)-(4.12), και συγκρίνονται με το τρέχον σημείο λειτουργίας ως προς το επίπεδο ισχύος: αν η απόκλιση υπερβαίνει ένα όριο της τάξης του 5%, εκτελείται μετάβαση στο άλλο MPP. Στο Σχ. 4.9, η εν λόγω μετάβαση υλοποιείται τοποθετώντας κατάλληλη τιμή στο duty cycle του μετατροπέα (boost converter), σύμφωνα με την τάση στόχο και την τάση του dc ζυγού V_{dc} .

4.4.3 Προσομοιώσεις

Η λειτουργία του προτεινόμενου αλγορίθμου CFMPPT επιβεβαιώνεται και συγκρίνεται με μία κλασική τεχνική P&O μέσω προσομοιώσεων στο λογισμικό *MATLAB/Simulink*. Μια ΦΒ πλαισιοσειρά της δομής του Σχ. 3.7 με 36 στοιχειοσειρές συνολικά, δέχεται ταχύτατα

μεταβαλλόμενη σκίαση που προσβάλλει έως το 66% της συνολικής της έκτασης ($N_{un} = 36-12$ στο Σχ. 4.10(α)). Η ακτινοβολία στο ασκίαστο τμήμα είναι $G_{un} = 0.8$ και στο σκιασμένο $G_{sh} = 0.4$ (ένταση σκίασης 50%), ενώ η διάρκεια του συμβάντος σκίασης είναι μόλις 13 δευτερόλεπτα (Σχ. 4.10(α)).

Στο Σχ. 4.10(β), φαίνεται πώς τροποποιείται η χαρακτηριστική $P-V$ με το χρόνο (μπλε καμπύλες), επισημαίνοντας με κόκκινους και πράσινους δείκτες τα MPP1 και MPP2, αντίστοιχα. Όσο το σύστημα είναι ασκίαστο, ο κλασικός P&O λειτουργεί στο μοναδικό υπάρχον τοπικό μέγιστο (MPP1) (ανώτερος κόκκινος δείκτης). Όμως, καθώς εμφανίζεται και εκτείνεται η σκίαση, ο αλγόριθμος P&O συνεχώς αναπροσαρμόζει το σημείο λειτουργίας, μένοντας πάντα εγκλωβισμένος στο MPP1 (μπλε βέλος στο Σχ. 4.10(β)). Η εν λόγω προβληματική λειτουργία εξηγείται και στην παράγραφο 4.3.2. Αντίθετα, ο ιδανικός τρόπος



Σχ. 4.10. Προσομοίωση μίας μερικώς σκιασμένης ΦΒ πλαισιοσειράς με $G_{un} = 0.8$, $G_{sh} = 0.4$ και μεταβαλλόμενο πλήθος σκιασμένων στοιχειοσειρών $N_{sh} = 0-24$ από τις συνολικά 36 στοιχειοσειρές. Εφαρμόζεται ένας κλασικός αλγόριθμος P&O και η προτεινόμενη μέθοδος CFMPPT. (α) Πλήθος ασκίαστων στοιχειοσειρών N_{un} , (β) μεταβολή της χαρακτηριστικής $P-V$, (γ) ισχύς εξόδου, (δ) εκτιμώμενες τιμές των G_{un} και G_{sh} , (ε) τάση λειτουργίας, και (στ) εκτιμώμενες τιμές των T και N_{sh} .

λειτουργίας επισημαίνεται με τα κίτρινα βέλη, και αντιστοιχεί στη μέθοδο CFMPPT: το σημείο λειτουργίας είναι το MPP1 όσο αυτό είναι το ολικά μέγιστο, ενώ αλλάζει στο MPP2 όταν το δεύτερο προσφέρει περισσότερη ισχύ.

Η εν λόγω λειτουργία φαίνεται και στις κυματομορφές ισχύος του Σχ. 4.10(γ). Ο απλός P&O παραμένει προσκολλημένος στο MPP1 καθ' όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης (μπλε γραμμή), ακόμα και όταν αυτό παρέχει λιγότερη ισχύ από το MPP2. Από την άλλη, ο αλγόριθμος CFMPPT (κίτρινο χρώμα) παρακολουθεί συνεχώς τα MPP1 και MPP2 (κόκκινη και πράσινη κυματομορφή αντίστοιχα), μεταβαίνοντας από το ένα στο άλλο μόνο όταν χρειάζεται (μεταβάσεις τις χρονικές στιγμές 3.6 sec και 10.2 sec). Η τάση λειτουργίας φαίνεται στις κυματομορφές του Σχ. 4.10(ε), όπου τα έντονα διαφορετικά επίπεδα τάσης αντιστοιχούν στα δύο διαφορετικά MPPs (MPP1: αυξομειούμενη 300-80 V, MPP2: περίπου σταθερή 310-280 V). Έτσι, επιτυγχάνεται συνεχής λειτουργία στο ολικά βέλτιστο MPP και παραγωγή ισχύος σχεδόν ταυτόσημη με την πραγματικά μέγιστη (μωβ διακεκομμένη γραμμή) (Σχ. 4.10(γ)).

Αξίζει να σημειωθεί ότι στο Σχ. 4.10(γ) οι κυματομορφές των εκτιμήσεων της ισχύος των δύο MPPs (κόκκινη και πράσινη γραμμή) εμφανίζουν μικρή απόκλιση και καθυστέρηση από τις πραγματικές τιμές, που οφείλονται αντίστοιχα σε μικρά σφάλματα εκτίμησης και στο χρόνο της περιόδου T_{win} . Παρόλα αυτά, η λειτουργία του αλγορίθμου είναι σχεδόν ιδανική, γεγονός που καταδεικνύει ότι στη συγκεκριμένη εφαρμογή περιορισμένα σφάλματα εκτίμησης είναι αποδεκτά. Έτσι, η απόδοση MPPT του συμβατικού P&O καταγράφεται 83.5% για τη συγκεκριμένη προσομοίωση, ενώ του προτεινόμενου CFMPPT 98.2% (η μικρή διαφορά από το 100% οφείλεται κυρίως στην εγγενή κυμάτωση λόγω της διακοπτικής ταλάντωσης).

Σχετικά με την ακρίβεια των εκτιμώμενων παραμέτρων σκίασης, οι πραγματικές και υπολογιζόμενες τιμές των ακτινοβολιών G_{un} και G_{sh} παρουσιάζονται στο Σχ. 4.10(δ), ενώ της θερμοκρασίας T και σκιασμένων στοιχειοσειρών N_{sh} στο Σχ. 4.10(στ). Μετά την πρώτη περίοδο $T_{win} = 0.1$ sec, η εκτίμηση της G_{un} (μπλε συνεχή γραμμή) συμπίπτει με την πραγματική της τιμή (κίτρινη διακεκομμένη γραμμή), όσο το σημείο λειτουργίας είναι το MPP1, ενώ μικρή απόκλιση παρατηρείται κατά τη λειτουργία στο MPP2 (3.6-9.8 sec). Αυτό συμβαίνει διότι στο εν λόγω διάστημα, η επίδραση του ασκίαστου τμήματος είναι ιδιαίτερα περιορισμένη, και κατά συνέπεια δυσχεραίνεται η αναγνώριση της σχετικής παραμέτρου G_{un} που εκφράζεται μόνο σε αυτό. Παρόλα αυτά, η υποεκτίμηση της P_{mp1} στο Σχ. 4.10(γ) (κόκκινη γραμμή) είναι αμελητέα.

Παρομοίως, η εκτίμηση της G_{sh} (πράσινη γραμμή) ταυτίζεται πλήρως με την πραγματική ακτινοβολία (μωβ διακεκομμένη γραμμή), όσο σκιάζεται τουλάχιστον μία στοιχειοσειρά. Είναι λογικό τα χρονικά διαστήματα 0-0.6 sec και 12.8-13 sec που το σύστημα είναι εντελώς ασκίαστο, η G_{sh} να λαμβάνει ανούσιες τιμές. Μικρή υποεκτίμηση της θερμοκρασίας T (μπλε συνεχή γραμμή) παρατηρείται στο Σχ. 4.10(στ) στο ίδιο χρονικό διάστημα και για τους ίδιους λόγους με την G_{un} . Όσον αφορά τον αριθμό των σκιασμένων στοιχειοσειρών N_{sh} (μωβ συνεχή γραμμή), αυτός εκτιμάται με εξαιρετική ακρίβεια, αλλά καθυστερεί χρονικά κατά ένα διάστημα ανάλογο της περιόδου T_{win} , χωρίς όμως αυτό να δημιουργεί δυσλειτουργία στο σύστημα.

Συνεπώς, ο προτεινόμενος αλγόριθμος CFMPPT λειτουργεί πολύ αποδοτικά σε πλέον ταχύτατα μεταβαλλόμενες σκιάσεις. Μάλιστα, όπως φαίνεται υπάρχει σημαντική ανεκτικότητα στις εκτιμήσεις των παραμέτρων σκίασης, αρκεί να μην οδηγούν σε λανθασμένες μεταβάσεις. Ουσιαστικά, δεν υπάρχει ανάγκη για ακριβέστατη αναγνώριση των συνθηκών σκίασης, αλλά μόνο το πότε και το προς τα πού πρέπει να γίνει μία μετάβαση του σημείου λειτουργίας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Έλεγχος του DC/DC Μετατροπέα για Τήρηση Εφεδρείας Ισχύος

Στο παρόν κεφάλαιο περιγράφεται μία νέα τεχνική ελέγχου του dc/dc μετατροπέα που επιτρέπει στο σύστημα να τηρεί εφεδρεία ισχύος. Το προτεινόμενο σχήμα ελέγχου υποστηρίζει λειτουργία σε όλο το δυνατό εύρος ισχύος από 0% έως 100% της μέγιστης διαθέσιμης, εξασφαλίζοντας ότι το σημείο λειτουργίας θα βρίσκεται πάντα στο προτιμητέο δεξί τμήμα της χαρακτηριστικής $P-V$.

Παράλληλα, εκτιμάται συνεχώς το MPP με μαθηματικό τρόπο καθώς το σύστημα λειτουργεί σε υποβέλτιστη στάθμη ισχύος, προσφέροντας έτσι γνώση των διαθέσιμων εφεδρειών ανά πάσα στιγμή. Για το σκοπό αυτό, εφαρμόζεται προσαρμογή καμπύλης (curve fitting) με το πλήρες μοντέλο των πέντε παραμέτρων σε μετρήσεις τάσης και ρεύματος που καταγράφονται από τον μετατροπέα.

Η προτεινόμενη τεχνική ελέγχου είναι σχεδιασμένη για ομοιόμορφη ακτινοβολία, ενώ αποδεικνύεται ακριβής και αξιόπιστη σε ενθόρυβο περιβάλλον και γρήγορα μεταβαλλόμενες συνθήκες. Τα συμπεράσματα αυτά προκύπτουν από προσομοιώσεις στο λογισμικό *MATLAB/Simulink* και από πειραματική επιβεβαίωση σε πρωτότυπο μετατροπέα 2 kW. Τα αποτελέσματα αυτού του κεφαλαίου έχουν υποβληθεί για δημοσίευση στην [223].

5.1 Τεχνική Ελέγχου APR με Εκτίμηση του MPP μέσω Curve Fitting

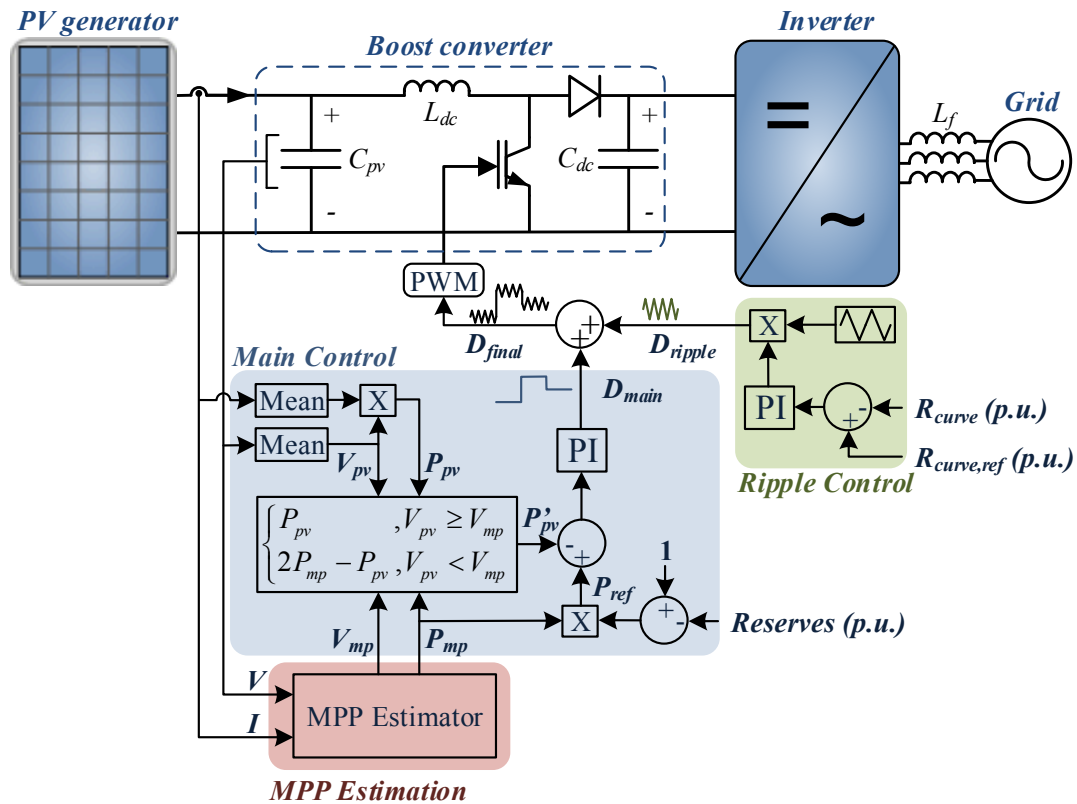
Στην παρούσα ενότητα, προτείνεται μία τεχνική ελέγχου του dc/dc μετατροπέα ενός ΦΒ συστήματος ώστε να τηρεί εφεδρεία ισχύος (APR). Η πρωτοτυπία της συγκεκριμένης μεθόδου είναι ότι χρησιμοποιεί μόνο έναν PI ελεγκτή για τον κυρίως έλεγχο, ο οποίος ρυθμίζει την ισχύ αντί την τάση, παρά τη μη-μονότονη σχέση μεταξύ ισχύος και duty cycle. Το σημείο λειτουργίας κείται πάντα στο προτιμητέο δεξί τμήμα της χαρακτηριστικής $P-V$ και σε οποιαδήποτε στάθμη ισχύος από 0% έως 100% της μέγιστης παραγωγής. Το επίπεδο εφεδρείας καθορίζεται είτε εξωτερικά από τον διαχειριστή δικτύου, είτε εσωτερικά από μονάδες ελέγχου π.χ. ρύθμισης συχνότητας κλπ. Το προτεινόμενο σχήμα ελέγχου περιλαμβάνει ειδική τεχνική διαχείρισης της κυμάτωσης του σημείου λειτουργίας (ripple), ώστε η διακύμανση ισχύος στην έξοδο της ΦΒ γεννήτριας να ρυθμίζεται στα επιθυμητά επίπεδα.

Επιπλέον, κύριο χαρακτηριστικό της νέας τεχνικής APR είναι η εκτίμηση του MPP σε πραγματικό χρόνο, εφαρμόζοντας προσαρμογή καμπύλης (curve fitting) με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων (least squares – LSQ) σε ένα μεγάλο πλήθος μετρήσεων τάσης και ρεύματος. Η εν λόγω μέθοδος είναι η πρώτη στη βιβλιογραφία που χρησιμοποιεί το θεμελιώδες μοντέλο των πέντε παραμέτρων χωρίς απλοποιήσεις. Έτσι, η τάση και ισχύς του MPP εκτιμώνται συνεχώς καθώς το σύστημα λειτουργεί σε υποβέλτιστη στάθμη ισχύος, παρουσιάζοντας πολύ καλή ακρίβεια και ανθεκτικότητα σε ενθόρυβο περιβάλλον και γρήγορα μεταβαλλόμενες συνθήκες ακτινοβολίας. Ο εν λόγω μηχανισμός εκτίμησης του MPP αξιοποιεί μόνο τα μετρητικά τάσης και ρεύματος του dc/dc μετατροπέα, χωρίς να απαιτεί επιπρόσθετο εξοπλισμό όπως αισθητήρες ακτινοβολίας ή θερμοκρασίας, ιδιότητα που τον καθιστά γενικά εφαρμόσιμο.

Το προτεινόμενο σχήμα ελέγχου APR επιβεβαιώνεται αρχικά με προσομοιώσεις στο λογισμικό *MATLAB/Simulink* θεωρώντας θόρυβο στις μετρήσεις. Στη συνέχεια, εφαρμόζεται σε πρωτότυπο μετατροπέα 2 kW που αναπτύσσεται στο εργαστήριο, τόσο σε στατικές όσο και σε μεταβαλλόμενες συνθήκες ακτινοβολίας. Τα αποτελέσματα καταδεικνύουν την αξιόπιστη και αποδοτική λειτουργία του αλγορίθμου. Το υλικό που ακολουθεί έχει υποβληθεί για δημοσίευση στην [223].

5.2 Σχήμα Ελέγχου

Η τοπολογία ενός μετατροπέα δύο επίπεδων και το δομικό διάγραμμα του προτεινόμενου σχήματος ελέγχου απεικονίζονται στο Σχ. 5.1. Το κύκλωμα ισχύος είναι ίδιο με αυτό που μελετάται στο Σχ. 1.9 στην εισαγωγική ενότητα 1.3, με τη διαφορά ότι αντί για αλγόριθμο MPPT στο Σχ. 5.1 ο dc/dc μετατροπέας (boost converter) ελέγχεται από την προτεινόμενη τεχνική APR. Οι επικουρικές υπηρεσίες του δικτύου εφαρμόζονται από τον αντιστροφέα (inverter), ενώ ο ρόλος του dc/dc μετατροπέα είναι να αυξομειώνει κατάλληλα την ισχύ που απορροφά από τη ΦΒ γεννήτρια, βάσει της εντολής εφεδρείας ισχύος (reserve command). Στο Σχ. 5.1, η εντολή εφεδρείας ισχύος εκφράζεται ποσοστιαία της μέγιστης διαθέσιμης (p.u.) (reserve ratio), ενώ μπορεί να διατυπωθεί ισοδύναμα και σε απόλυτη μορφή (kW/MW).

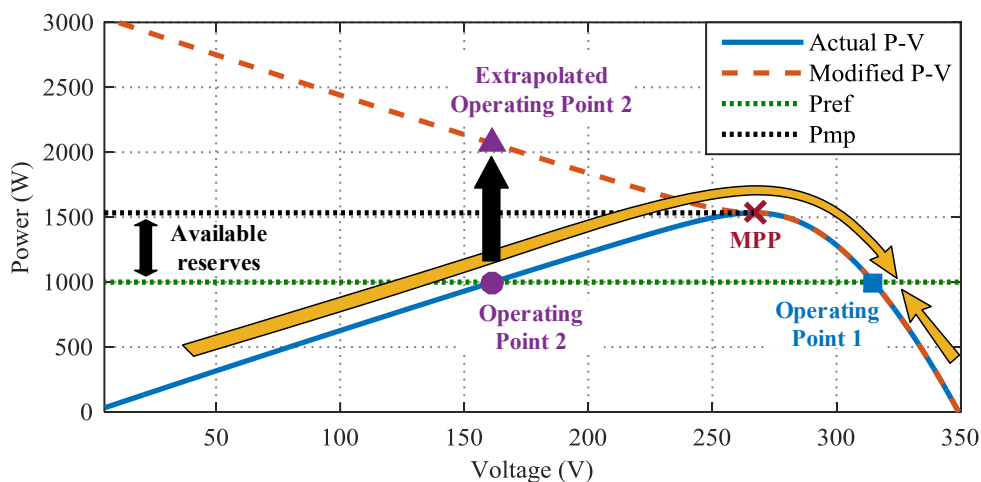


Σχ. 5.1. Κύκλωμα ισχύος και σχήμα ελέγχου της προτεινόμενης τεχνικής APR.

Το συνολικό σχήμα ελέγχου αποτελείται από τρεις επιμέρους μονάδες, εικονιζόμενες σε φόντο διαφορετικού χρώματος (Σχ. 5.1). Η μονάδα κυρίως ελέγχου (μπλε φόντο) καθορίζει το duty cycle του μετατροπέα, D_{main} , ώστε το σημείο λειτουργίας να αντιστοιχεί σε ισχύ που ικανοποιεί την εντολή εφεδρείας $Reserves$. Το MPP της ΦΒ γεννήτριας υπολογίζεται συνεχώς από τη μονάδα εκτίμησης του MPP (κόκκινο φόντο), χρησιμοποιώντας παρελθοντικές μετρήσεις της τάσης και του ρεύματος. Για στιβαρή και αξιόπιστη εκτέλεση της εν λόγω λειτουργίας, η μονάδα ρύθμισης ripple (πράσινο φόντο) δημιουργεί κατάλληλη διακύμανση στο σημείο λειτουργίας. Αυτό επιτυγχάνεται εισάγοντας ένα σήμα διαταραχής D_{ripple} στο duty cycle του μετατροπέα D_{main} , καταλήγοντας στο τελικό duty cycle D_{final} που καθορίζει την παλμοδότηση του συστήματος. Τα ανωτέρω τρία υποσυστήματα λειτουργούν με την ίδια περίοδο ελέγχου $T_{control}$. Στη συνέχεια, περιγράφονται με λεπτομέρειες σε ξεχωριστές παραγράφους.

5.2.1 Μονάδα κυρίως ελέγχου (Main control module)

Το πρόβλημα που προκύπτει από τη μη-μονότονη σχέση ισχύος-duty cycle περιγράφεται γραφικά στο Σχ. 5.2, στο οποίο απεικονίζεται η χαρακτηριστική $P-V$ μίας τυπικής ΦΒ πλαισιοσειράς (μπλε συνεχής γραμμή) και μία ενδεικτική απαιτούμενη στάθμη ισχύος P_{ref} (πράσινη διακεκομμένη γραμμή). Υπάρχουν δύο πιθανά σημεία λειτουργίας τα οποία ικανοποιούν την εν λόγω εφεδρεία ισχύος: το Operating point 1 (μπλε τετραγωνικός δείκτης) και το Operating point 2 (μωβ κυκλικός δείκτης). Η πλειοψηφία των σχετικών μελετών



Σχ. 5.2. Ενδεικτική χαρακτηριστική $P-V$ και απαιτούμενη εφεδρεία ισχύος, επισημαίνοντας λειτουργία και στις δύο πλευρές της καμπύλης.

προτιμούν την πρώτη εναλλακτική (δεξί τμήμα της χαρακτηριστικής) [100], [101], [111]–[113], εν αντιθέσει με το αριστερό τμήμα της καμπύλης [93], [95], [99], [102]. Αυτή η επιλογή στηρίζεται σε διάφορες παρατηρήσεις, όπως στην αυξημένη απόδοση του μετατροπέα ισχύος λόγω της υψηλότερης τάσης [95], [99] και στην ταχύτερη δυναμική απόκριση λόγω της πιο απότομης κλίσης της καμπύλης [102], [112]. Κυριότερα όμως, τότε είναι δυνατή η ρύθμιση της στάθμης ισχύος σε όλο το δυνατό εύρος από μηδέν έως τη μέγιστη τιμή της P_{mp} [112], σε αντίθεση με την αριστερή πλευρά της χαρακτηριστικής όπου οι περιορισμοί της τάσης εισόδου του dc/dc μετατροπέα δεν επιτρέπουν πολύ χαμηλά επίπεδα ισχύος [93].

Βέβαια, ακόμα και όταν το σημείο λειτουργίας κείται στο δεξί τμήμα της καμπύλης, υπάρχει πιθανότητα να μετακινηθεί στην άλλη πλευρά αν βρίσκεται πλησίον του MPP ή σε συνθήκες γρήγορα μεταβαλλόμενης ακτινοβολίας. Άρα, το ιδανικό σχήμα ελέγχου πρέπει να είναι σε θέση να επαναφέρει το σημείο λειτουργίας από οποιαδήποτε περιοχή της καμπύλης $P-V$ προς το Operating point 1, όπως επισημαίνουν τα κίτρινα βέλη στο Σχ. 5.2. Ένας απλός ελεγκτής PI δεν αρκεί για αυτή τη λειτουργικότητα.

Η προτεινόμενη μονάδα κυρίως ελέγχου αντιμετωπίζει το εν λόγω πρόβλημα, όπως εξηγείται γραφικά στο Σχ. 5.2. Αντί για την πραγματική καμπύλη $P-V$ (μπλε συνεχής γραμμή), ο ελεγκτής PI θεωρεί μία τροποποιημένη εκδοχή της (κόκκινη διακεκομμένη γραμμή) που προκύπτει αντικαθιστώντας το αριστερό τμήμα της χαρακτηριστικής με το συμμετρικό του ως προς οριζόντιο άξονα που διέρχεται από το MPP. Η εξίσωση της τροποποιημένης καμπύλης δίνεται από την:

$$P'_{pv} = \begin{cases} P_{pv} & , V_{pv} \geq V_{mp} \\ 2P_{mp} - P_{pv} & , V_{pv} < V_{mp} \end{cases} \quad (5.1)$$

όπου οι συμβολισμοί V_{pv} , P_{pv} και V_{mp} , P_{mp} αναφέρονται στην τάση και ισχύ του τρέχοντος σημείου λειτουργίας και MPP αντίστοιχα. Οι τιμές V_{pv} και P_{pv} υπολογίζονται λαμβάνοντας τον μέσο όρο της τάσης και της ισχύος σε μία περίοδο ελέγχου $T_{control}$, ενώ οι τιμές του MPP δίνονται από τη μονάδα εκτίμησης του MPP (Σχ. 5.1).

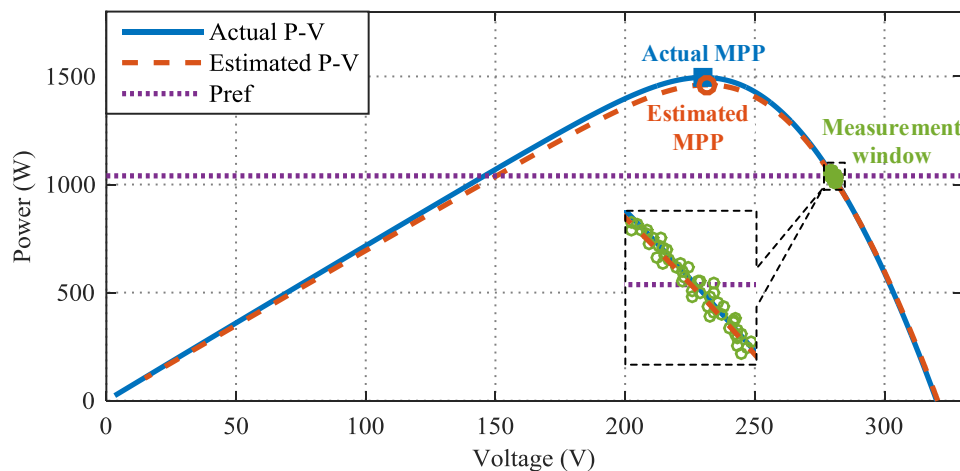
Έτσι, αν το σημείο λειτουργίας στιγμιαία βρεθεί στο αριστερό τμήμα της χαρακτηριστικής (π.χ. Operating point 2), στον ελεγκτή PI τροφοδοτείται η τροποποιημένη τιμή της ισχύος που προκύπτει από την (5.1) (Extrapolated operating point 2), έναντι της πραγματικά μετρούμενης ισχύος. Ως συνέπεια, το σφάλμα εισόδου του ελεγκτή PI προκύπτει έντονα αρνητικό, με αποτέλεσμα το σημείο λειτουργίας να μετακινείται προς το επιθυμητό δεξί τμήμα της καμπύλης (Operating point 1 στο Σχ. 5.2).

Δηλαδή, με χρήση της (5.1) επιτυγχάνεται μονότονη σχέση μεταξύ ισχύος και duty cycle, διατηρώντας την ομαλή καμπυλότητα στην περιοχή του MPP και την πιο απότομη κλίση στο αριστερό τμήμα (η οποία είναι πλέον αρνητική). Το προτεινόμενο σχήμα ελέγχου επιτρέπει λειτουργία σε όλο το δυνατό εύρος ισχύος με συνεχή τρόπο, χωρίς να απαιτείται αλλαγή κατάστασης (π.χ. MPPT ή εφεδρεία ισχύος), όπως συμβαίνει σε άλλες μελέτες [93], [95], [112], [113].

5.2.2 Μονάδα εκτίμησης του MPP (MPP estimation module)

Για να εκτιμηθεί η τάση και ισχύς στο MPP καθώς το σύστημα διατηρεί εφεδρεία ισχύος, χρησιμοποιείται η μέθοδος LSQ curve fitting που περιγράφεται γραφικά στο Σχ. 5.3. Η θεμελιώδης εξίσωση (2.1) του μοντέλου μίας διόδου (Κεφάλαιο 2) εφαρμόζεται σε ένα πλήθος παρελθοντικών μετρήσεων (V_i , P_i) (πράσινοι κυκλικοί δείκτες) γύρω από το σημείο λειτουργίας, το οποίο καλείται παράθυρο μετρήσεων (measurement window). Έτσι, προσδιορίζονται οι παράμετροι του μοντέλου και υπολογίζεται το MPP (κόκκινος κυκλικός δείκτης). Το παράθυρο μετρήσεων δημιουργείται από την ταλάντωση του σημείου λειτουργίας λόγω της εγγενούς διακοπτικής κυμάτωσης (switching ripple) σε συνδυασμό με το σήμα διαταραχής που εισάγεται από τη μονάδα ρύθμισης ripple. Τα δείγματα που εμπεριέχονται στο παράθυρο αντιστοιχούν στην τελευταία περίοδο ελέγχου $T_{control}$.

Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί ότι σε πρακτικές εφαρμογές όπου υπάρχει πάντα θόρυβος στις μετρήσεις, η προσέγγιση curve fitting υπερτερεί έναντι άλλων μεθόδων που βασίζονται σε λίγες μεμονωμένες μετρήσεις [100], [101]. Το μαθηματικό υπόβαθρο του αλγορίθμου curve fitting περιγράφεται στην επόμενη ενότητα 5.3.



Σχ. 5.3. Ενδεικτικό σενάριο εφαρμογής curve fitting σε θορυβώδεις μετρήσεις προς εκτίμηση του MPP, ενώ τηρείται εφεδρεία ισχύος.

5.2.3 Μονάδα ρύθμισης ripple (Ripple control module)

Η διακύμανση στις μετρήσεις της τάσης και του ρεύματος αξιοποιείται από λίγες μεθόδους στη βιβλιογραφία, και κυρίως σε αλγορίθμους MPPT. Η διακοπτική κυμάτωση που προκαλείται από τη διαδοχική έναυση/σβέση του τρανζίστορ ισχύος στον dc/dc μετατροπέα χρησιμοποιείται στην [77], ενώ η [76] βασίζεται στη διακύμανση της στιγμιαίας ισχύος που απορροφάται από το δίκτυο. Βέβαια, σε αυτές τις περιπτώσεις το επίπεδο κυμάτωσης μπορεί να μην αρκεί, καθώς εξαρτάται από τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά του μετατροπέα, όπως η διακοπτική συχνότητα και η χωρητικότητα των πυκνωτών του φίλτρου εισόδου [76], [77]. Για το λόγο αυτό, τυπικοί αλγόριθμοι MPPT, όπως P&O και INC, μεταβάλλουν με βηματικές αλλαγές το duty cycle για να δημιουργήσουν επιπρόσθετη ταλάντωση. Στο ίδιο πνεύμα, ένα τριγωνικό σήμα διαταραχής προστίθεται στο duty cycle στην [224] για ομαλότερη διακύμανση του σημείου λειτουργίας.

Όμως, όπως εξηγείται στη συνέχεια, τα επίπεδα της επιπρόσθετης ταλάντωσης χρειάζεται να ρυθμίζονται συνεχώς ανάλογα την περιοχή λειτουργίας στην καμπύλη $P-V$, λειτουργικότητα που δεν παρέχεται από τις προαναφερθείσες μεθόδους. Με την προτεινόμενη μονάδα ρύθμισης ripple του Σχ. 5.1, το επίπεδο ταλάντωσης αναπροσαρμόζεται συνεχώς προς διασφάλιση της καταλληλότητας του παραθύρου μετρήσεων, ρυθμίζοντας το πλάτος μίας τριγωνικής κυματομορφής D_{ripple} σταθερής συχνότητας, μέσω ενός ελεγκτή PI.

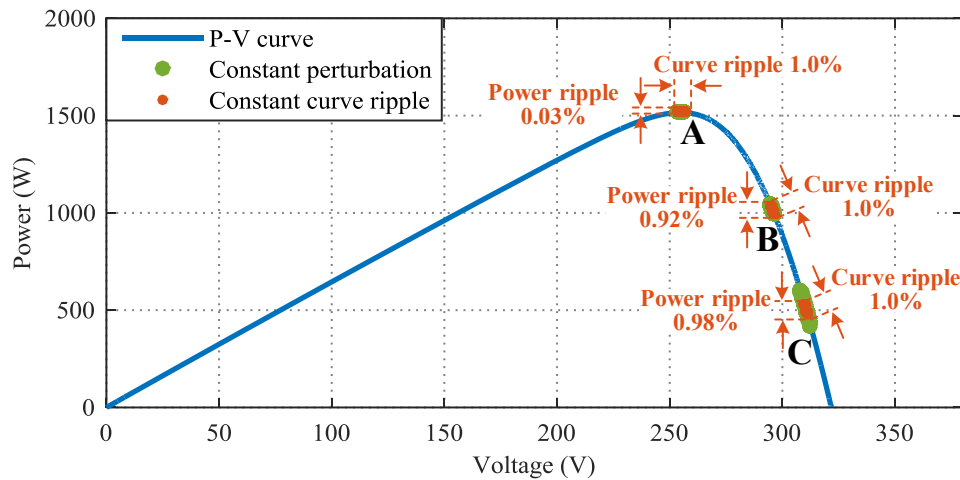
5.2.3.A Πλάτος της διαταραχής D_{ripple}

Η ταλάντωση του σημείου λειτουργίας γύρω από την ισχύ αναφοράς μπορεί να ποσοτικοποιηθεί με όρους τάσης, ρεύματος ή ισχύος. Παρόλα αυτά, η ανθεκτικότητα της μεθόδου curve fitting συναρτάται ουσιαστικά με το μήκος του παραθύρου μετρήσεων πάνω στην καμπύλη $P-V$, παρά με τη διακύμανση της ισχύος ή της τάσης (που είναι προβολές του παραθύρου στον κατακόρυφο και οριζόντιο άξονα αντίστοιχα). Για να ποσοτικοποιηθεί αυτό το μήκος, χρησιμοποιείται η ευκλείδεια απόσταση των ακραίων δειγμάτων του παραθύρου, θεωρώντας ότι το τμήμα της χαρακτηριστικής $P-V$ που αντιστοιχεί στο παράθυρο μετρήσεων είναι προσεγγιστικά γραμμικό. Έτσι, ορίζεται μια νέα μετρική που αποκαλείται *κυμάτωση καμπύλης* (curve ripple), η οποία δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$R_{curve} = \sqrt{\left(\frac{V_1 - V_2}{V_{oc0}}\right)^2 + \left(\frac{P_1 - P_2}{P_{mp0}}\right)^2} \quad (5.2)$$

όπου με R_{curve} συμβολίζεται η κυμάτωση καμπύλης (σε p.u.) και με (V_1, P_1) , (V_2, P_2) τα ακραία σημεία του παραθύρου μετρήσεων, ενώ οι τιμές V_{oc0} και P_{mp0} χρησιμοποιούνται για λόγους κανονικοποίησης.

Για ευκολότερη κατανόηση, στο Σχ. 5.4 απεικονίζεται το παράθυρο λειτουργίας πάνω στη χαρακτηριστική $P-V$ με δύο εναλλακτικές προσεγγίσεις: τριγωνική διαταραχή με σταθερό πλάτος D_{ripple} (πράσινοι δείκτες) και με ρυθμιζόμενο πλάτος ώστε να διατηρείται σταθερή κυμάτωση καμπύλης $R_{curve.ref}$ (κόκκινοι δείκτες). Μελετώνται τρεις περιοχές λειτουργίας A, B και C, οι οποίες αντιστοιχούν σε διαφορετικές στάθμες ισχύος. Στην πρώτη περίπτωση, η προκύπτουσα ταλάντωση εξαρτάται σημαντικά από την περιοχή λειτουργίας, ενώ αντίθετα η



Σχ. 5.4. Ταλάντωση του σημείου λειτουργίας εφαρμόζοντας σήμα διαταραχής σταθερού και ρυθμιζόμενου πλάτους, σύμφωνα με την προτεινόμενη τεχνική.

προτεινόμενη τεχνική ρύθμισης ripple διατηρεί σταθερή την κυμάτωση καμπύλης ασχέτως των συνθηκών.

Βέβαια, αξίζει να σημειωθεί πως ενώ η κυμάτωση καμπύλης είναι σταθερή στα σημεία A, B και C (curve ripple 1.0%), η διακύμανση της ισχύος (power ripple) επηρεάζεται από την κλίση της καμπύλης $P-V$ στην περιοχή λειτουργίας, καθώς αποτελεί ουσιαστικά την προβολή του παραθύρου μετρήσεων στον κατακόρυφο άξονα. Οπότε, στο MPP (0% εφεδρεία ισχύος – σημείο A), η διακύμανση της ισχύος είναι ελάχιστη λόγω της σχεδόν οριζόντιας $P-V$, παρόμοια με τυπικούς αλγορίθμους MPPT (P&O, INC κλπ.). Στις άλλες περιοχές λειτουργίας B και C όπου η κλίση της χαρακτηριστικής $P-V$ είναι υψηλή (κατά απόλυτη τιμή), η διακύμανση ισχύος είναι μεγαλύτερη, αλλά πάντοτε μικρότερη από την αντίστοιχη τιμή της κυμάτωσης καμπύλης 1.0% (Σχ. 5.4).

Συνεπώς, το προτεινόμενο σχήμα ρύθμισης ripple διασφαλίζει την καταλληλότητα του παραθύρου μετρήσεων για επιτυχημένο curve fitting σε οποιοσδήποτε συνθήκες, περιορίζοντας πάντα τη διακύμανση στην ισχύ της ΦΒ γεννήτριας κάτω από την τιμή της κυμάτωσης καμπύλης.

5.2.3.B Περίοδος της διαταραχής D_{ripple}

Η περίοδος του σήματος διαταραχής D_{ripple} διατηρείται σταθερή και ίση με την περίοδο ελέγχου $T_{control}$. Με αυτήν την επιλογή, η προκαλούμενη ταλάντωση φιλτράρεται από τις μονάδες μέσου όρου (Mean blocks) του κυρίως ελέγχου στο Σχ. 5.1, και έτσι δεν επηρεάζει τη λειτουργία του κυρίως ελεγκτή ισχύος. Η περίοδος $T_{control}$ πρέπει να είναι αρκετά μικρή ώστε να επιτρέπει προσαρμογή του αλγορίθμου σε γρήγορα μεταβαλλόμενες συνθήκες, αλλά όχι υπερβολικά μικρή λόγω των παρασιτικών αυτεπαγωγών και χωρητικοτήτων. Ο τελευταίος περιορισμός οφείλεται στην παραμόρφωση των μετρήσεων τάσης και ρεύματος που προκαλούν τα προαναφερθέντα παρασιτικά στοιχεία, η οποία γίνεται υπολογίσιμη μόνο σε μεγάλες συχνότητες. Έτσι, η περίοδος $T_{control}$ τίθεται ίση με 20 ms (50 Hz), τιμή που ικανοποιεί τους ανωτέρω περιορισμούς και βρίσκεται εκτός του εύρους συχνοτήτων flicker.

5.3 Αλγόριθμος Εκτίμησης MPP σε Πραγματικό Χρόνο

Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι στη βιβλιογραφία που εκτιμούν τα χαρακτηριστικά του MPP σε πραγματικό χρόνο, κυρίως για χρήση σε αλγόριθμο MPPT [78]–[80], [83]–[85], [93], [95], [96], [99]–[102], [112], [159]. Χρησιμοποιούν είτε επαναληπτικό αλγόριθμο υπολογισμού [78], [79], [83]–[85], [159] είτε απλές αναλυτικές εξισώσεις [80], [93], [95], [96], [99]–[102], [112], ενώ διαφέρουν σημαντικά στα δεδομένα εισόδου και το μοντέλο στο οποίο βασίζονται. Οι περισσότερες από τις σχετικές μελέτες χρησιμοποιούν τις μετρήσεις ρεύματος και τάσης της ΦΒ γεννήτριας για καλύτερη προσαρμογή στο πραγματικό σύστημα. Συγκεκριμένα, μία πολυωνυμική εξίσωση εφαρμόζεται σε λίγα μεμονωμένα δείγματα στις [80], [93], [95], [99], [112] ή μία απλουστευμένη εκδοχή του μοντέλου μίας διόδου στις [79], [159], ενώ τεχνικές curve fitting που εφαρμόζονται σε πολύ μεγαλύτερα σετ μετρήσεων προτείνονται στις [78], [84], [100], [101].

Παρόλο που οι τελευταίες προσεγγίσεις που βασίζονται σε curve fitting έχουν εγγενές πλεονέκτημα σε ενθόρυβο περιβάλλον, καμία από τις σχετικές μεθόδους δε χρησιμοποιεί το πλήρες (μη-απλουστευμένο) μοντέλο των πέντε παραμέτρων, λόγω της πολυπλοκότητάς του. Αυτό επιτυγχάνεται στην παρούσα διατριβή μειώνοντας τις πέντε παραμέτρους του μοντέλου σε δύο, επιδεικνύοντας ακρίβεια στην εκτίμηση και αποδεκτό υπολογιστικό κόστος.

5.3.1 Μοντέλο πέντε παραμέτρων

Το μοντέλο μίας διόδου ή μοντέλο πέντε παραμέτρων εξηγείται λεπτομερώς στην ενότητα 2.1 του Κεφαλαίου 2, και περιγράφει πολύ ικανοποιητικά οποιαδήποτε ΦΒ σύστημα που λειτουργεί σε ομοιόμορφες συνθήκες. Η θεμελιώδης εξίσωση (2.1) αναδιατυπώνεται παρακάτω σε κατάλληλη μορφή για τον αλγόριθμο curve fitting:

$$I = I_{ph} - I_s \left(e^{\frac{V + IR_s}{a}} - 1 \right) - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \Leftrightarrow$$

$$a \log \left[\left(I_{ph} - I - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \right) \frac{1}{I_s} + 1 \right] - V - IR_s = 0 \quad (5.3)$$

Στη συνέχεια, χρησιμοποιούνται οι εξισώσεις αναγωγής των πέντε παραμέτρων σε αυθαίρετη ακτινοβολία και θερμοκρασία (2.26)-(2.30) που δίνονται στην παράγραφο 2.3.3 του Κεφαλαίου 2, και οι αναλυτικές σχέσεις του MPP (2.16)-(2.17) που προτείνονται στην παράγραφο 2.2.3 του ίδιου κεφαλαίου.

5.3.2 LSQ curve fitting

Όπως εξηγείται στην παράγραφο 5.2.2, η μέθοδος LSQ curve fitting εφαρμόζει την εξίσωση του μοντέλου (5.3) στα δείγματα που περιλαμβάνονται στο παράθυρο μετρήσεων, ώστε να εκτιμήσει τις πέντε παραμέτρους και στη συνέχεια την τάση και ισχύ του MPP. Όμως, αυτό είναι ένα απαιτητικό πρόβλημα βελτιστοποίησης πέντε διαστάσεων (όσες και οι παράμετροι του μοντέλου), το οποίο είναι πολύ δύσκολο να αρχικοποιηθεί και να επιλυθεί στην τρέχουσα

μορφή [225]. Έτσι, στην παρούσα διατριβή οι σχέσεις αναγωγής των πέντε παραμέτρων (2.26)-(2.30) ενσωματώνονται απευθείας στη θεμελιώδη εξίσωση (5.3), καταλήγοντας στην ακόλουθη (5.4) για χρήση του curve fitting, έναντι της (5.3).

$$a_0KT \log \left(\frac{GI_{ph0} [1 + a_{isc}T_0(KT-1)] - I - G \frac{V + IR_{s0}}{R_{sh0}}}{I_{s0}KT^3 e^{47.1 \left(1 - \frac{1}{KT}\right)}} \right) - V - IR_{s0} = 0 \quad (5.4)$$

Έτσι, τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά της ΦΒ γεννήτριας ενσωματώνονται ουσιαστικά στην εφαρμοζόμενη εξίσωση, περιορίζοντας τις διαστάσεις του χώρου αναζήτησης σε δύο: την ακτινοβολία G και τον θερμοκρασιακό λόγο KT . Στην (5.4), οι όροι I_{ph0} , I_{s0} , a , R_{s0} και R_{sh0} αντιστοιχούν στις πέντε παραμέτρους αναφοράς (σε συνθήκες STC), των οποίων οι τιμές προσδιορίζονται από πριν με τη διαδικασία που περιγράφεται στην ακόλουθη παράγραφο 5.3.3. Τελικά, το πρόβλημα βελτιστοποίησης που προκύπτει είναι σημαντικά απλούστερο, αρχικοποιείται απλά θέτοντας $G_0 = 1.0$ και $KT_0 = 1.0$ (συνθήκες STC), και επιλύεται εύκολα καθώς η επίδραση της ακτινοβολίας και θερμοκρασίας στη χαρακτηριστική $I-V$ είναι θεμελιωδώς διαφορετικές. Αξίζει να σημειωθεί ότι η εν λόγω προσέγγιση είναι σε συμφωνία με τη θεωρητική μελέτη της [225], η οποία καταλήγει στο ότι μόνο δύο από τις πέντε παραμέτρους είναι πραγματικά ανεξάρτητες.

Η βελτιστοποίηση ελαχίστων τετραγώνων (LSQ optimization) ελαχιστοποιεί το άθροισμα των τετραγωνικών αποκλίσεων των μετρήσεων (πράσινοι δείκτες στο Σχ. 5.3) από τις αντίστοιχες εκτιμήσεις του μοντέλου (κόκκινη διακεκομμένη γραμμή στο Σχ. 5.3), μηδενίζοντας τις μερικές παραγώγους της (5.4) ως προς τις παραμέτρους G και KT . Δεδομένου ότι το εν λόγω πρόβλημα είναι μη-γραμμικό, επιλύεται από τον επαναληπτικό αλγόριθμο Levenberg-Marquadt, ο οποίος έχει το ακόλουθο βήμα εκτέλεσης [222]:

$$\beta^{k+1} = \beta^k - \left(J^T \times J + \lambda \cdot \text{diag}(J^T \times J) \right)^{-1} \times J^T \times r^k \quad (5.5)$$

όπου β^k είναι το διάνυσμα των αγνώστων $[G, KT]$ στην επανάληψη k , J είναι ο Ιακωβιανός πίνακας (Jacobian matrix), r^k το διάνυσμα της κατακόρυφη απόκλιση μεταξύ μετρήσεων και εκτιμήσεων στο βήμα k , και λ ένας συντελεστής απόσβεσης.

Το διάνυσμα r και οι μερικές του παράγωγοι $\partial r / \partial G$ και $\partial r / \partial KT$ που απαιτούνται για τον υπολογισμό του Ιακωβιανού πίνακα δίνονται από τις ακόλουθες εκφράσεις:

$$r = KTa_0 \ln \left(\frac{I_d}{KT^3 I_{s0}} \right) - 47.1(KT-1)a_0 - V - IR_{s0} \quad (5.6)$$

$$\frac{\partial r}{\partial G} = \frac{KT}{G} a_0 \left(1 + \frac{I}{I_d} \right) \quad (5.7)$$

$$\frac{\partial r}{\partial KT} = a_0 \left[\ln \left(\frac{I_d}{KT^3 I_{s0}} \right) + GKT \frac{I_{ph0} I_{s0} a_{isc} T_0}{I_d} - 50.1 \right] \quad (5.8)$$

όπου ο βοηθητικός όρος I_d (ρεύμα διόδου) βρίσκεται από την:

$$I_d = GI_{ph0} [1 + a_{isc} T_0 (KT - 1)] - I - G \frac{V + IR_{s0}}{R_{sh0}} \quad (5.9)$$

Αντικαθιστώντας τις (5.6)-(5.8) στην (5.5) και μετά από μαθηματικούς χειρισμούς, το τελικό βήμα επανάληψης δίνεται από την ακόλουθη (5.10):

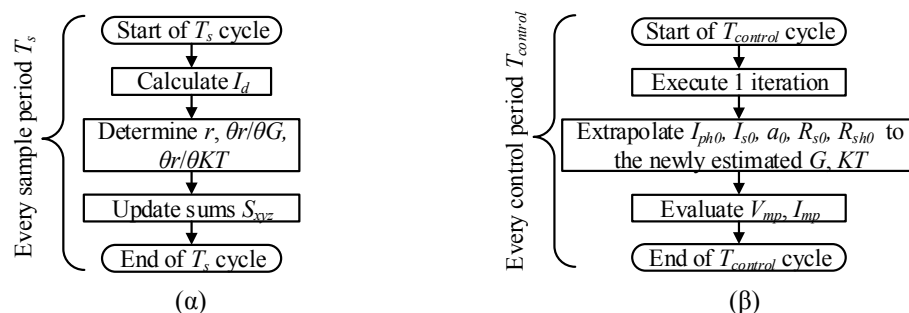
$$\begin{bmatrix} G \\ KT \end{bmatrix}^{k+1} = \begin{bmatrix} G \\ KT \end{bmatrix}^k - \begin{bmatrix} (1 + \lambda) S_{020} S_{101} - S_{110} S_{011} \\ (1 + \lambda) S_{020} S_{011} - S_{110} S_{101} \end{bmatrix} / \left((1 + \lambda)^2 S_{020} S_{200} - S_{110} \right) \quad (5.10)$$

όπου κάθε όρος S_{xyz} συμβολίζει το παρακάτω άθροισμα (n είναι το πλήθος των δειγμάτων στο παράθυρο μετρήσεων):

$$S_{xyz} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial r_i}{\partial G} \right)^x \left(\frac{\partial r_i}{\partial KT} \right)^y (r_i)^z \quad (5.11)$$

Έτσι, η προτεινόμενη μέθοδος για την εκτίμηση του MPP αποτελείται από δύο διακριτές διαδικασίες: α) υπολογισμός/ενημέρωση των αθροισμάτων S_{xyz} από την (5.11) που εκτελείται ανά περίοδο δειγματοληψίας T_s , και β) εκτίμηση του MPP στο τέλος κάθε περιόδου ελέγχου $T_{control}$ χρησιμοποιώντας όλα τα δείγματα του παραθύρου μετρήσεων. Όπως φαίνεται στο αλγοριθμικό διάγραμμα του Σχ. 5.5(α), για κάθε νέα μέτρηση που εισάγεται στο παράθυρο, πρώτα υπολογίζεται ο όρος I_d και ακολούθως οι τρέχουσες τιμές της κατακόρυφης απόκλισης r και των μερικών της παραγώγων $\partial r/\partial G$ και $\partial r/\partial KT$, ώστε να ενημερωθούν όλα τα αθροίσματα S_{xyz} . Όταν έχει παρέλθει μία πλήρης περίοδος ελέγχου $T_{control}$ (Σχ. 5.5(β)), εκτελείται μία επανάληψη του αλγορίθμου Levenberg-Marquadt για να ανανεωθούν οι τιμές των παραμέτρων G και KT . Αυτές χρησιμοποιούνται στη συνέχεια για την αναγωγή των πέντε παραμέτρων στις τρέχουσες συνθήκες και τον υπολογισμό μετέπειτα της τάσης, ρεύματος και ισχύος του MPP.

Μία μοναδική επανάληψη του αλγορίθμου Levenberg-Marquadt ανά κύκλο ελέγχου $T_{control}$ αρκεί για συνεχή προσαρμογή στις περιβαλλοντικές συνθήκες, οι οποίες αλλάζουν με πολύ μικρότερο ρυθμό. Έτσι, ελαχιστοποιείται το υπολογιστικό κόστος της προτεινόμενης μεθόδου, καθιστώντας την εφαρμόσιμη σε τυπικό μικροελεγκτή. Ο υπολογισμός της συνάρτησης Lambert W στις αναλυτικές σχέσεις του MPP (2.16)-(2.17) γίνεται βάσει της απλής σχέσης υπολογισμού που δίνεται στο ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α.



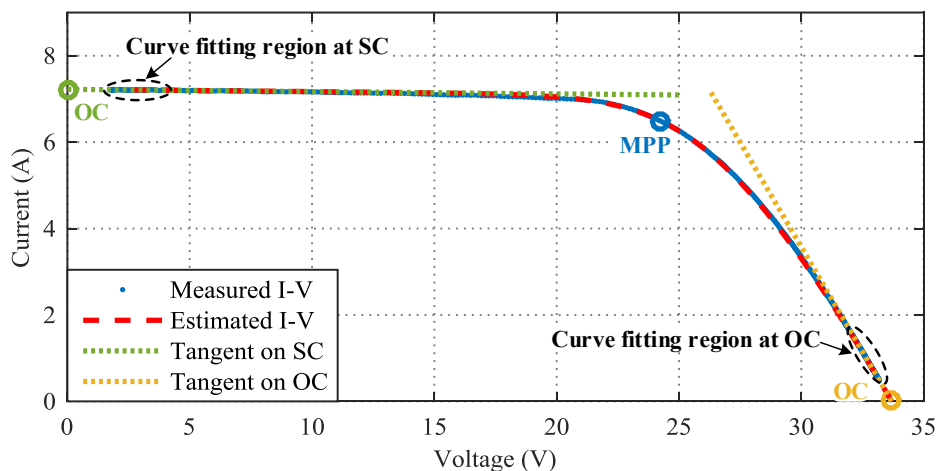
Σχ. 5.5. Αλγοριθμικό διάγραμμα της προτεινόμενης μεθόδους εκτίμησης του MPP, περιλαμβάνοντας τις διαδικασίες (α) ενημέρωσης των αθροισμάτων και (β) εκτίμησης του MPP, οι οποίες εκτελούνται ανά περίοδο δειγματοληψίας T_s και περίοδο ελέγχου $T_{control}$ αντίστοιχα.

5.3.3 Εξαγωγή των πέντε παραμέτρων αναφοράς

Όπως εξηγείται στην ενότητα 2.3 του Κεφαλαίου 2, οι παράμετροι αναφοράς I_{ph0} , I_{s0} , a_0 , R_{s0} και R_{sh0} μπορούν να υπολογιστούν είτε από δεδομένα του τεχνικού φυλλαδίου είτε από μετρημένη χαρακτηριστική $I-V$. Η πρώτη προσέγγιση είναι γενικά εφαρμόσιμη και κατάλληλη για προσομοίωση και μελέτη του συστήματος, γι' αυτό και αποτελεί τη βάση των εξισώσεων που προτείνονται στην ίδια ενότητα. Βέβαια, στο δεύτερο σενάριο που διατίθενται πειραματικές μετρήσεις, υπάρχει καλύτερη προσαρμογή στο υπάρχον σύστημα. Αυτό ισχύει διότι εν γένει τα χαρακτηριστικά της ΦΒ διάταξης διαφέρουν από το τεχνικό φυλλάδιο για διάφορους λόγους (κατασκευαστική διαφοροποίηση, γήρανση των πλαισίων, εισαγωγή επιπρόσθετων στοιχείων όπως καλώδια κλπ.).

Ειδικά για την εφαρμογή της παρούσας ενότητας, η καταγραφή της χαρακτηριστικής από τον ίδιο τον μετατροπέα είναι απλή και εύκολη διαδικασία, μεταβάλλοντας το duty cycle από 0% έως 100% μέσα σε λίγα δευτερόλεπτα (σάρωση καμπύλης – Κεφάλαιο 4) και προσφέρει βέλτιστη προσαρμογή στο πραγματικό σύστημα. Στη συνέχεια περιγράφεται η διαδικασία εξαγωγής των πέντε παραμέτρων βασισμένη στη μεθοδολογία του Phang [149], η οποία εφαρμόζεται σε μετρημένη χαρακτηριστική $I-V$. Επισημαίνεται ότι η εν λόγω διαδικασία χρειάζεται να εκτελείται σπάνια, π.χ. μία φορά ανά έτος, για λόγους αναπροσαρμογής σε μικροαλλαγές που υφίσταται το σύστημα με το χρόνο λόγω γήρανσης και φθοράς.

Παρόλο που η μέθοδος του Phang είναι χρονολογικά μία από τις πρώτες που προτάθηκαν στη βιβλιογραφία, παραμένει απλή και ακριβής, με αναλυτικές εξισώσεις και χωρίς απλοποιήσεις στο μοντέλο. Τα δεδομένα εισόδου είναι τα τρία σημεία λειτουργίας SC, OC και MPP, καθώς και οι κλίσεις στα σημεία SC και OC. Για καλύτερη κατανόηση, παρατίθεται το γράφημα του Σχ. 5.6 ως παράδειγμα. Όπως φαίνεται, τα σημεία SC (πράσινος κυκλικός δείκτης) και OC (κίτρινος κυκλικός δείκτης) δεν περιλαμβάνονται στη μετρημένη χαρακτηριστική (μπλε τελείες), λόγω παρασιτικών αντιστάσεων και ρευμάτων διαρροής. Οπότε, πρώτα βρίσκονται οι εφαπτόμενες ευθείες σε εκείνες τις περιοχές, εφαρμόζοντας γραμμική (linear) LSQ curve fitting σε μικρά τμήματα της καμπύλης (διακεκομμένες ελλείψεις στο Σχ. 5.6). Η μέθοδος της γραμμικής LSQ curve fitting περιλαμβάνει απλές αναλυτικές εξισώσεις και δεν είναι επαναληπτικός αλγόριθμος [100], [226]. Έτσι, υπολογίζονται οι τιμές



Σχ. 5.6. Ενδεικτική μετρημένη και εκτιμημένη καμπύλη $I-V$ ενός ΦΒ πλαισίου σύμφωνα με τη μέθοδο του Phang [149] προς προσδιορισμό των πέντε παραμέτρων.

των σημείων SC και OC μαζί με τις αντίστοιχες κλίσεις, ενώ το MPP εντοπίζεται εύκολα από την καμπύλη, προς εφαρμογή των εξισώσεων της [149].

5.4 Προσομοιώσεις στο MATLAB/Simulink

Η προτεινόμενη τεχνική ελέγχου APR επιβεβαιώνεται στη συνέχεια με προσομοιώσεις στο λογισμικό MATLAB/Simulink για μία ΦΒ πλαισιοσειρά 2 KW που συνδέεται στην είσοδο ενός dc/dc μετατροπέα σύμφωνα με το Σχ. 5.1. Στην έξοδο του dc/dc μετατροπέα τοποθετείται κατάλληλο ωμικό φορτίο, αντί ενός αντιστροφέα συζευγμένου με το δίκτυο. Τα χαρακτηριστικά του συστήματος δίνονται στον πίνακα Π. 5.1 και αντιστοιχούν στην πειραματική διάταξη της επόμενης παραγράφου.

Το σενάριο προσομοίωσης διαρκεί 30 s, κατά τη διάρκεια του οποίου απαιτούνται διάφορα επίπεδα εφεδρείας από 0% έως 40% (Σχ. 5.7(α)). Θεωρούνται ταυτόχρονα μεταβαλλόμενες συνθήκες ακτινοβολίας και θερμοκρασίας (Σχ. 5.7(β)) με υψηλούς ρυθμούς (50 W/(m²s) και 1 °C/s αντίστοιχα), ενώ στις μετρήσεις προστίθεται λευκός θόρυβος (AWGN) (SNR 70) για ρεαλιστικότητα. Μελετώνται δύο σενάρια κυμάτωσης καμπύλης $R_{curve,ref}$: 1% και 3%.

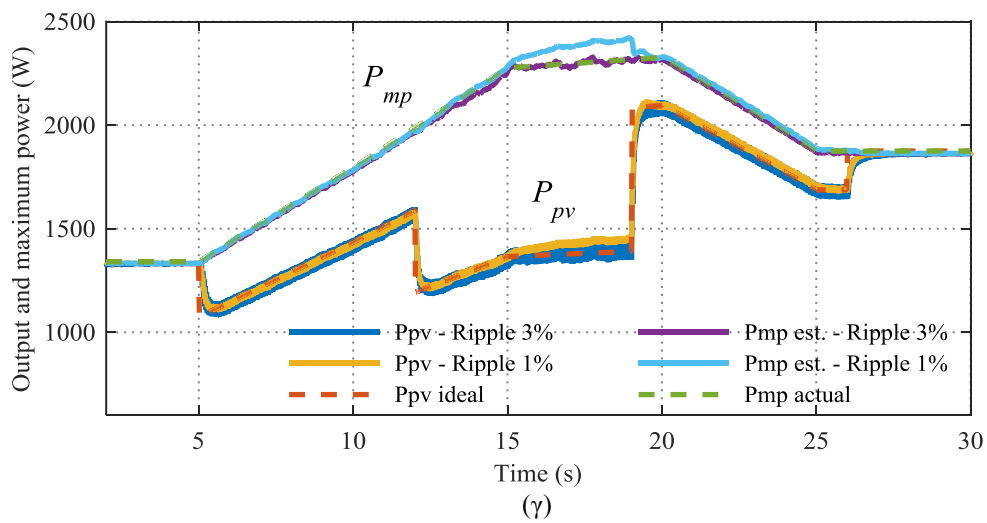
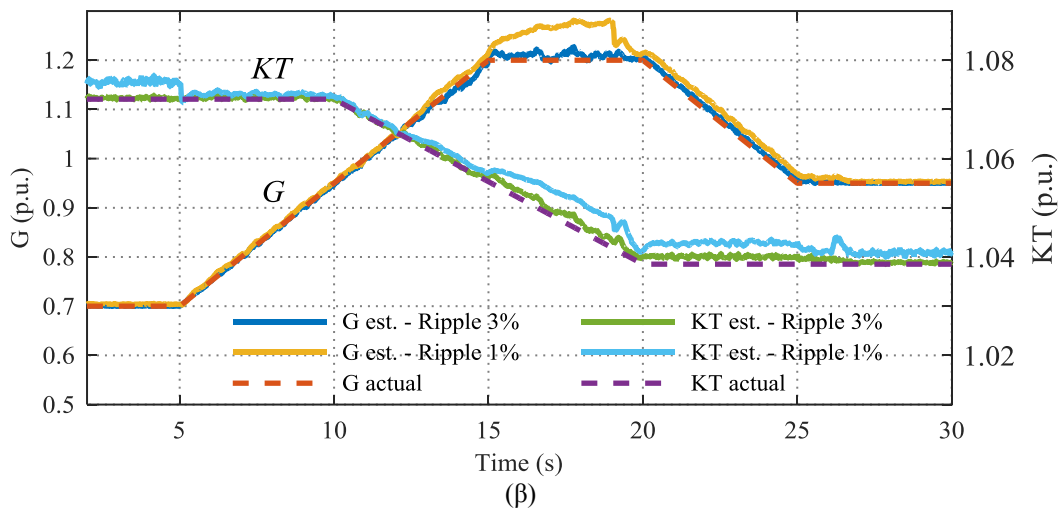
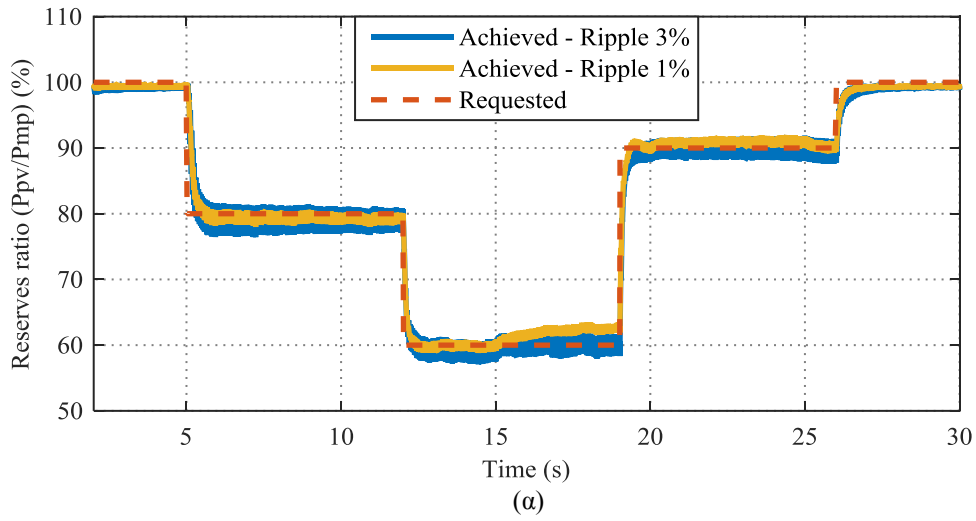
Από το Σχ. 5.7(α) είναι εμφανές ότι το σχήμα ελέγχου ακολουθεί τις βηματικές μεταβολές της απαιτούμενης εφεδρείας (κόκκινη διακεκομμένη γραμμή), με απόκριση γύρω στα 0.2 s. Ικανοποιητικά αποτελέσματα προκύπτουν και στις δύο περιπτώσεις $R_{curve,ref}$, παρουσιάζοντας αναμενόμενα μεγαλύτερη κυμάτωση στο σενάριο του 3% (μπλε γραμμή). Στο Σχ. 5.7(β), απεικονίζονται οι τραπεζοειδείς μεταβολές της ακτινοβολίας και θερμοκρασίας σε αντιπαραβολή με τις αντίστοιχες εκτιμήσεις. Αν και η κυμάτωση 3% διασφαλίζει την ακρίβεια καθ' όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης, στην περίπτωση του 1% προκύπτει αισθητό σφάλμα στην εκτίμηση της ακτινοβολίας (κίτρινη γραμμή), ειδικά στο διάστημα 15-20 s όπου η εφεδρεία και ακτινοβολία λαμβάνουν τις μέγιστες τιμές.

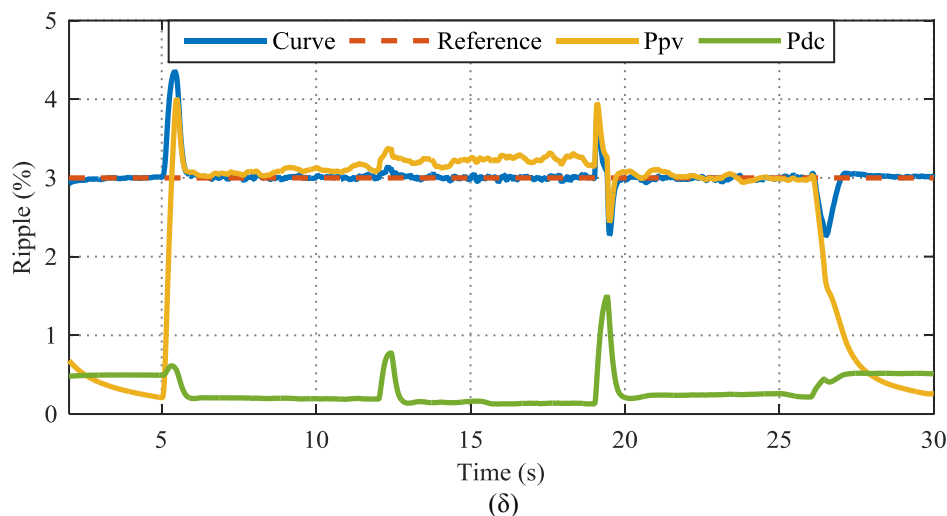
Όσον αφορά την εκτίμηση της μέγιστης ισχύος P_{mp} (Σχ. 5.7(γ)), το σφάλμα είναι ανεπαίσθητο στο σενάριο της κυμάτωσης καμπύλης 3% (μωβ γραμμή) και μέχρι 5% για ταλάντωση 1% (κυανή γραμμή), αιτιολογώντας τη μικρή απόκλιση μεταξύ ισχύος εξόδου P_{pv} (κίτρινη γραμμή) και αναφοράς P_{ref} (κόκκινη διακεκομμένη γραμμή) στο διάστημα 15-20 s.

Στο Σχ. 5.7(δ) φαίνεται η αποδοτικότητα της μονάδας ρύθμισης ripple ενδεικτικά για την περίπτωση του 3%. Η ταλάντωση καμπύλης (μπλε γραμμή) ακολουθεί επιτυχημένα την αναφορά της 3% (κόκκινη διακεκομμένη γραμμή), εμφανίζοντας βραχύχρονες αποκλίσεις κατά την αλλαγή της εντολής εφεδρείας (και άρα του σημείου λειτουργίας) της τάξης του 1 s μέχρι να προσαρμοστεί το σύστημα στις νέες συνθήκες. Στο ίδιο γράφημα αντιπαραβάλλεται η διακύμανση ισχύος στην εισόδου του μετατροπέα (κίτρινη γραμμή), η οποία είναι ελάχιστη στο MPP (0% εφεδρεία – 0-5 s και 25-30 s), αλλά πλησιάζει την τιμή της ταλάντωσης καμπύλης (3%) στις άλλες περιπτώσεις (καταγράφεται λίγο μεγαλύτερη λόγω θορύβου).

Π. 5.1. Χαρακτηριστικά του ΦΒ συστήματος που χρησιμοποιείται στις προσομοιώσεις και στις πειραματικές μετρήσεις.

| Παράμετρος | Τιμή | Παράμετρος | Τιμή |
|---------------------------------|--------|--------------------------------|---------|
| Ονομαστική ισχύς P_{mp0} | 2 kW | Τάση dc ζυγού V_{dc} | 700 V |
| Διακοπτική συχνότητα F_c | 20 kHz | Συχνότητα δειγματοληψίας F_s | 20 kHz |
| Συχνότητα ελέγχου $F_{control}$ | 50 Hz | Χωρητικότητα εισόδου C_{pv} | 470 μF |
| Αυτεπαγωγή L_{dc} | 500 μH | Χωρητικότητα εξόδου C_{dc} | 1175 μF |





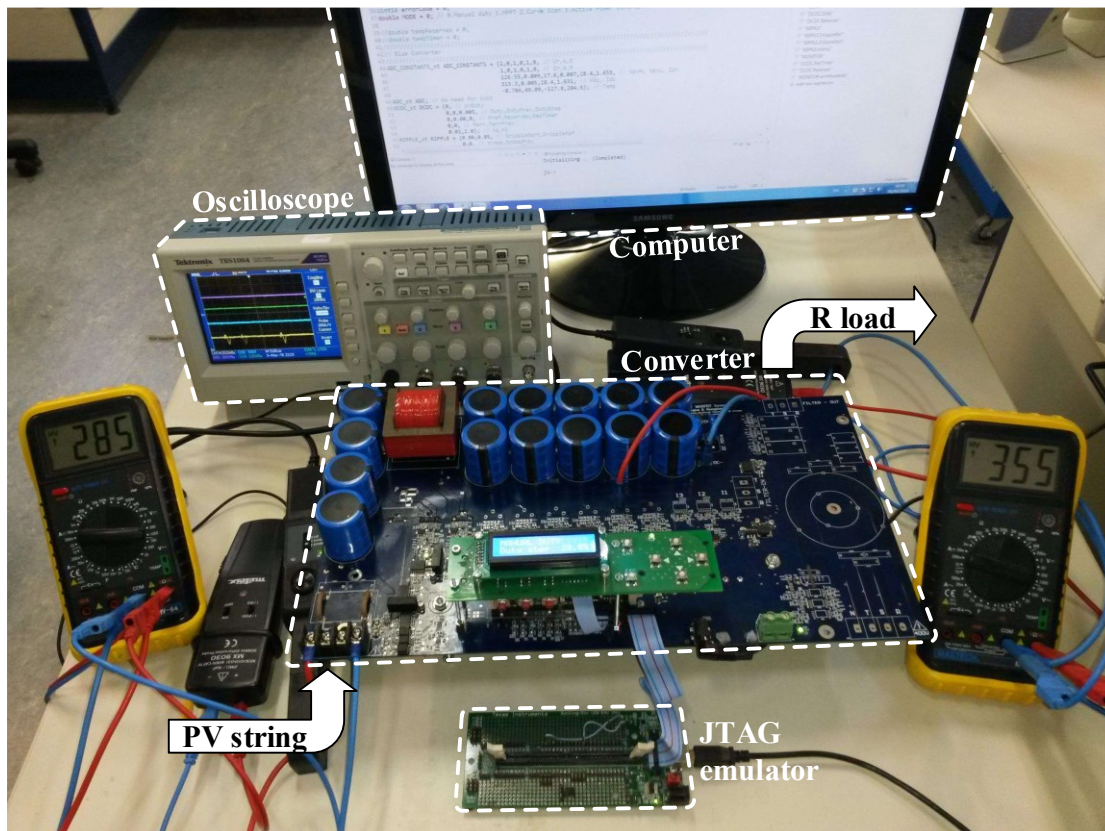
Σχ. 5.7. Προσομοιώσεις της προτεινόμενης τεχνικής ελέγχου APR στο λογισμικό MATLAB/Simulink σε ενθόρυβο περιβάλλον (SNR 70), θεωρώντας δύο σενάρια κυμάτωσης καμπύλης: 1% και 3%. (α) Εφεδρεία ισχύος (ζητούμενη και επιτευχθείσα), (β) ακτινοβολία και θερμοκρασία (πραγματικές και εκτιμημένες τιμές), (γ) παραγόμενη και μέγιστη ισχύς, και (δ) ταλάντωση καμπύλης και διακύμανση ισχύος P_{pv} και P_{dc} για την περίπτωση της 3% $R_{curve,ref}$.

Βέβαια, η διακύμανση της ισχύος στην έξοδο του μετατροπέα (dc ζυγός) (πράσινη γραμμή) παραμένει πολύ χαμηλή καθ' όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης (λιγότερη από 0.5% σε ευστάθεια), λόγω του φιλτραρίσματος των πυκνωτών του dc ζυγού.

Εν κατακλείδι, το κύριο συμπέρασμα από αυτήν τη διερεύνηση είναι ότι ταλάντωση καμπύλης της τάξης του 2-3% είναι κατάλληλη για ακριβή και αξιόπιστη εκτίμηση του MPP σε ενθόρυβο περιβάλλον και γρήγορα μεταβαλλόμενες συνθήκες ακτινοβολίας και θερμοκρασίας. Όταν η απαιτούμενη εφεδρεία είναι μηδενική και το σύστημα λειτουργεί στο MPP, η προκύπτουσα ταλάντωση στην ισχύ είναι αμελητέα (μικρότερη από πολλούς τυπικούς αλγορίθμους MPPT), ενώ όταν ζητείται εφεδρεία η διακύμανση ισχύος στον dc ζυγό φιλτράρεται και δεν ξεπερνά το 1%.

5.5 Πειραματική Επιβεβαίωση

Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για περαιτέρω επιβεβαίωση του προτεινόμενου σχήματος ελέγχου απεικονίζεται στο Σχ. 5.8. Αντιστοιχεί στο σύστημα που αναπαρίσταται στο Σχ. 5.1, αποτελούμενη από μία ΦΒ πλαισιοσειρά ονομαστικής ισχύος 2 kW συνδεδεμένη με ένα μετατροπέα ανύψωσης τάσης, ο οποίος τροφοδοτεί ωμικό φορτίο (έναντι αντιστροφέα συνδεδεμένου με το δίκτυο). Τα χαρακτηριστικά της διάταξης δίνονται στον πίνακα Π. 5.1 της προηγούμενης παραγράφου, ενώ επιπλέον πληροφορίες για τα στοιχεία του συστήματος παρατίθενται στον Π. 5.2. Ως ημιαγωγικός διακόπτης χρησιμοποιείται ένα MOSFET καρβιδίου του πυριτίου (SiC) για αυξημένη απόδοση, ενώ ο έλεγχος του συστήματος διεκπεραιώνεται από μικροελεγκτή 150 MHz. Ο χρήστης διαδρά μέσω πλακέτας διεπαφής, η οποία ενσωματώνει οθόνη υγρών κρυστάλλων (LCD) τύπου dot-matrix και διάφορα πλήκτρα και διακόπτες, ενώ τα καταγεγραμμένα δεδομένα από τον μικροελεγκτή μεταφέρονται σε ηλεκτρονικό υπολογιστή μέσω πρωτόκολλου JTAG. Η πλακέτα του μετατροπέα σχεδιάστηκε



Σχ. 5.8. Πειραματική διάταξη επιβεβαίωσης της προτεινόμενης τεχνικής ελέγχου.

Π. 5.2. Βασικά στοιχεία της πειραματικής διάταξης.

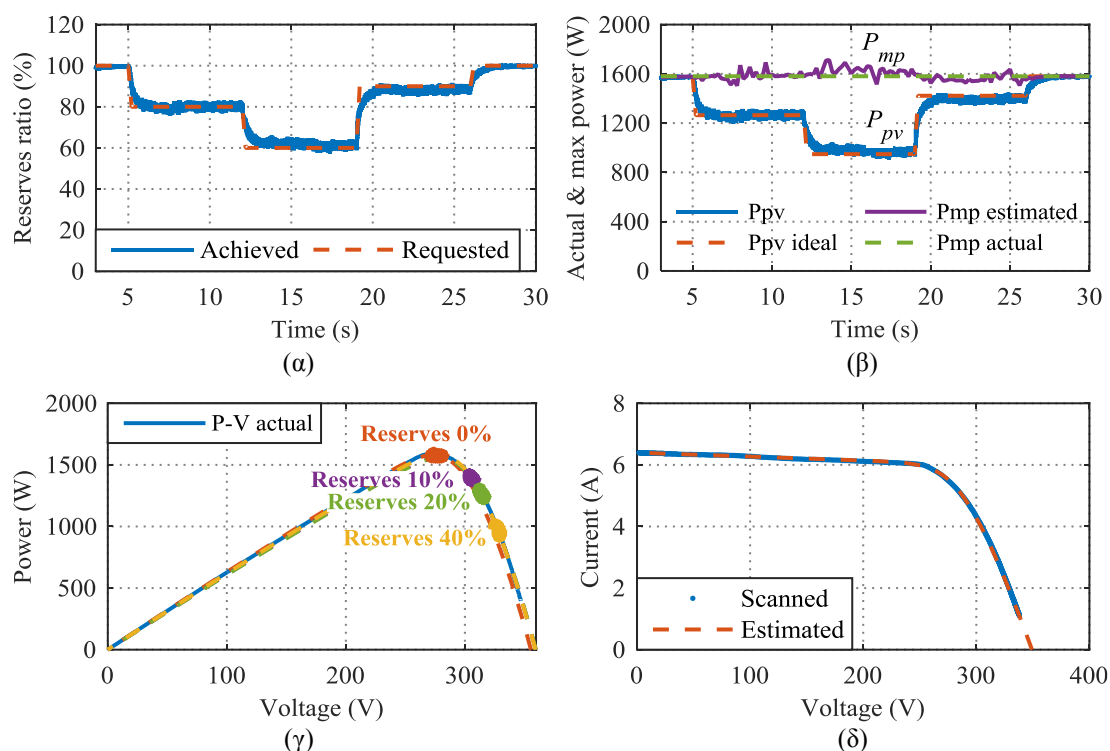
| Στοιχείο της διάταξης | Μοντέλο | Τιμή/Τύπος | Κατασκευαστής |
|-------------------------------------|------------------------------|-----------------------------|-------------------|
| ΦΒ πλαισιοσειρά (12 πλαίσια) | YL165 | 165 Wp, mc-Si | Yingli Solar |
| Ημιαγωγικός διακόπτης | C2M0080120D | 1200V/36A SiC MOSFET | Cree |
| Μικροελεγκτής | TMS320F28335 | 150 MHz clock | Texas Instruments |
| Εξομοιωτής JTAG | TMS320F28335 docking station | On-board USB JTAG emulation | Texas Instruments |
| Παλμογράφος | TBS1000 | 60 MHz, 4-Ch | Tektronix |

από τον Υπ. Διδάκτορα κ. Καμπίση Γεώργιο.

Για να αποτιμηθεί η αξιοπιστία του αλγορίθμου τόσο σε στατικές όσο και δυναμικές περιβαλλοντικές συνθήκες, εξομοιώνονται δύο σενάρια λειτουργίας. Αρχικά, λειτουργεί ολόκληρη η ΦΒ πλαισιοσειρά σε σταθερή ακτινοβολία, ενώ στη συνέχεια συνδέεται ένα μόνο πλαίσιο στον μετατροπέα, του οποίου η κλίση μεταβάλλεται χειροκίνητα προς εξομοίωση αλλαγής ακτινοβολίας. Τα ακόλουθα αποτελέσματα έγιναν για κυμάτωση καμπύλης 3%.

5.5.1 ΦΒ πλαισιοσειρά σε σταθερή ακτινοβολία

Το προτεινόμενο σχήμα ελέγχου εφαρμόζεται σε ολόκληρη τη ΦΒ πλαισιοσειρά, απαιτώντας εφεδρεία ισχύος όπως φαίνεται στο Σχ. 5.9(α), για 30 s σε συνθήκες σταθερής ακτινοβολίας. Από τα διαγράμματα του Σχ. 5.9 φαίνεται ότι η εντολή εφεδρείας υλοποιείται επιτυχώς από το σύστημα (Σχ. 5.9(α)), ενώ η εκτίμηση της μέγιστης ισχύος είναι ικανοποιητική και η



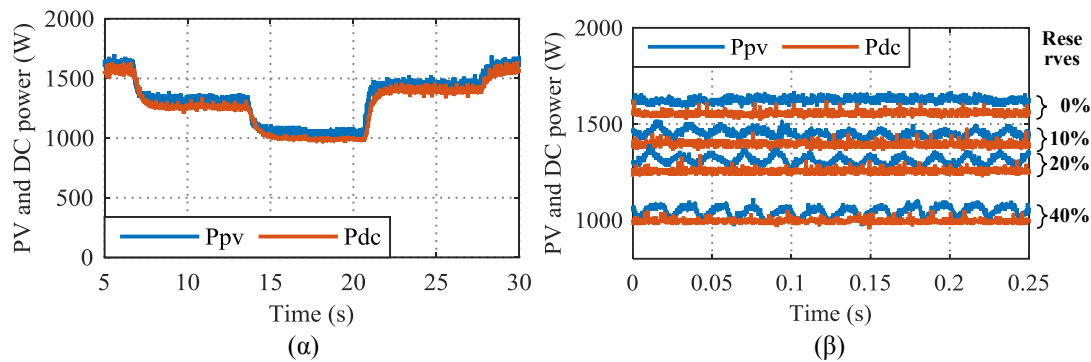
Σχ. 5.9. Πειραματικά αποτελέσματα της προτεινόμενης τεχνικής APR σε πρωτότυπο μετατροπέα 2 kW, όπως αποκτήθηκαν μέσω JTAG. (α) Εφεδρεία ισχύος (απαιτούμενη και επιτευχθείσα), (β) παραγόμενη και μέγιστη ισχύς, (γ) παράθυρα μετρήσεων και εκτιμημένες P - V καμπύλες για τα διάφορα επίπεδα εφεδρείας, και (δ) χαρακτηριστική I - V αναφοράς (μετρημένη και εκτιμημένη).

παραγόμενη ισχύς ακολουθεί πιστά την αναφορά της (Σχ. 5.9(β)). Η πραγματική μέγιστη ισχύς P_{mp} (πράσινη διακεκομμένη γραμμή στο Σχ. 5.9(β)) υπολογίζεται από τη μέση τιμή ισχύος κατά τη λειτουργία στο MPP (0-5 s και 26-30 s – 0% εφεδρεία).

Στο Σχ. 5.9(γ), απεικονίζονται τέσσερα ενδεικτικά παράθυρα μετρήσεων που καταγράφηκαν κατά την εξομοίωση και αφορούν διαφορετικά επίπεδα εφεδρείας (0%-40%). Με αντίστοιχο χρώματος διακεκομμένες γραμμές σχεδιάζονται οι εκτιμημένες καμπύλες P - V , σε αντιπαραβολή με την πραγματική χαρακτηριστική (μπλε γραμμή) που μετρήθηκε στο τέλος του πειράματος με τη διαδικασία της σάρωσης καμπύλης. Η σύγκλιση όλων των καμπυλών επιβεβαιώνει την ακρίβεια και εγκυρότητα των μοντέλων σε όλο το εύρος λειτουργίας.

Το ανωτέρω σενάριο εξομοίωσης βασίζεται στις παραμέτρους αναφοράς που εξήχθησαν στην αρχή του πειράματος με τη διαδικασία που περιγράφεται στην παράγραφο 5.3.3. Ενδεικτικό της ακρίβειας της μεθόδου είναι το Σχ. 5.9(δ): η μετρημένη χαρακτηριστική I - V (μπλε τελείες) ταυτίζεται πλήρως με την εκτιμημένη καμπύλη (κόκκινη διακεκομμένη γραμμή) που προκύπτει από τις πέντε παραμέτρους αναφοράς που υπολογίζονται.

Η επίδραση της διαταραχής που εισάγεται από τον ρυθμιστή ripple μελετάται στα ακόλουθα παλμογραφήματα του Σχ. 5.10. Στο πρώτο γράφημα Σχ. 5.10(α), η ισχύς στην έξοδο του μετατροπέα P_{dc} (κόκκινη γραμμή) παρουσιάζει μικρότερη διακύμανση εν συγκρίσει με την ισχύ στην είσοδο P_{pv} (μπλε γραμμή), ενώ η διαφορά στις μέσες τιμές των δύο κυματομορφών οφείλεται στις απώλειες μετατροπής. Στο Σχ. 5.10(β) γίνεται εστίαση σε χρονικό διάστημα 250



Σχ. 5.10. Παλμογραφήματα της μετρούμενης ισχύος στην είσοδο και έξοδο του dc/dc μετατροπέα (2 kW ΦΒ πλαίσιοσειρά σε σταθερή ακτινοβολία) για (α) όλο το σενάριο 30 s και (β) περίοδο 250 ms σε διαφορετικά επίπεδα εφεδρείας.

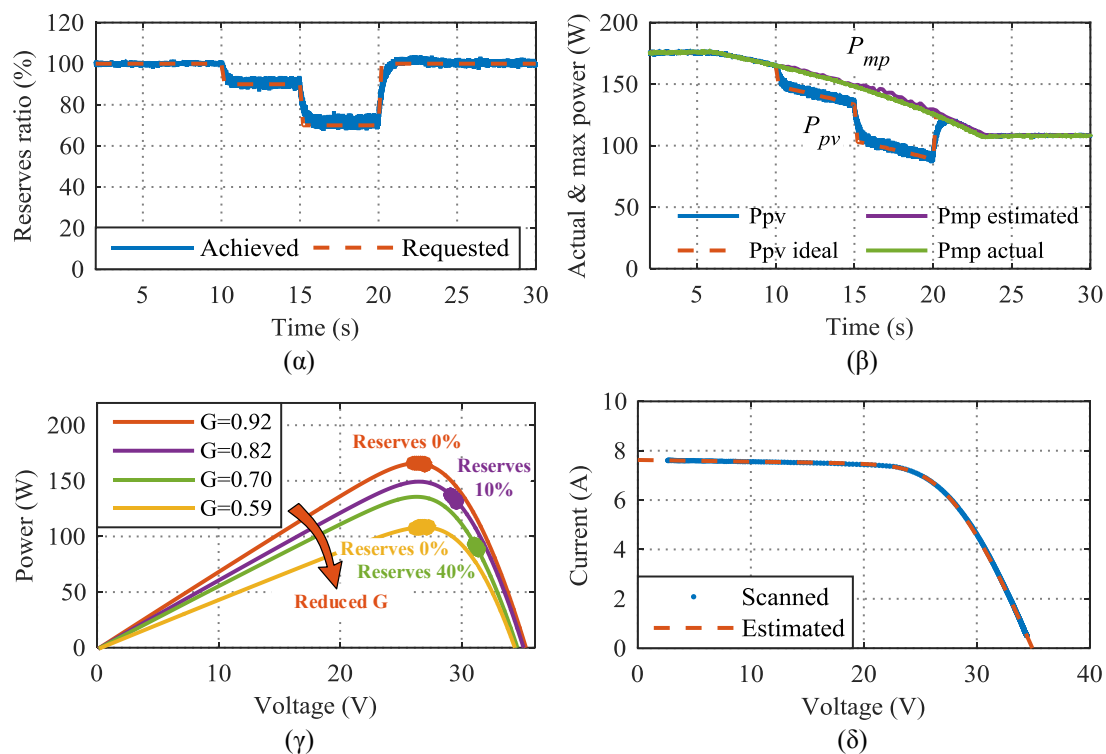
ms, απεικονίζοντας τα ίδια μεγέθη για τις τέσσερις διαφορετικές στάθμες εφεδρείας. Αναμενόμενα, η διακύμανση της P_{pv} (μπλε γραμμή) εξαρτάται άμεσα από την εντολή εφεδρείας ισχύος, προκύπτοντας αμελητέα σε λειτουργία MPP (0% εφεδρεία) αλλά μεγαλύτερη για υποβέλτιστες στάθμες ισχύος. Αντίθετα, η ελάχιστη κυμάτωση της P_{dc} (κόκκινη γραμμή) οφείλεται κυρίως στο θόρυβο μετρήσεων και στη διακοπτική λειτουργία του μετατροπέα: ανάλυση φάσματος Fourier (FFT analysis) δείχνει ότι η συνιστώσα των 50 Hz (εισαχθείσα διαταραχή) κυμαίνεται γύρω στο 0.1% της dc συνιστώσας.

5.5.2 ΦΒ πλαίσιο σε μεταβαλλόμενη ακτινοβολία

Για να αποτιμηθεί η αποδοτικότητα της προτεινόμενης τεχνικής ελέγχου APR σε μεταβαλλόμενες περιβαλλοντικές συνθήκες, στο δεύτερο πείραμα χρησιμοποιείται ένα μόνο πλαίσιο ως ΦΒ γεννήτρια. Έτσι, μεταβάλλοντας χειροκίνητα την κλίση του μέσα σε λίγα δευτερόλεπτα, τροποποιείται αντίστοιχα η κάθετη συνιστώσα της ακτινοβολίας, εξομοιώνοντας ταχύτατη μεταβολή ακτινοβολίας με ρυθμό περίπου 25 W/(m²s) (410 W/m² μέσα σε 17 s). Η διαδικασία εκτελείται εις διπλούν: αρχικά το σύστημα λειτουργεί υπό το προφίλ εφεδρείας του Σχ. 5.11(α) και κυμάτωση καμπύλης 3%, ενώ ακολούθως το πείραμα επαναλαμβάνεται με τον μετατροπέα να δουλεύει σε κατάσταση MPPT (0% εφεδρεία), ώστε να αποκτηθεί η πραγματικά μέγιστη ισχύς για λόγους σύγκρισης.

Τα αποτελέσματα περιγράφονται στο Σχ. 5.11. Τα επιτευχθέν επίπεδα εφεδρείας καλύπτει ικανοποιητικά την αντίστοιχη εντολή (Σχ. 5.11(α)), ενώ στο Σχ. 5.11(β) η εκτίμηση της μέγιστης ισχύος P_{mp} (μωβ γραμμή) σχεδόν ταυτίζεται με την πραγματική τιμή της (πράσινη γραμμή). Συνεπώς, η παραγόμενη ισχύς (μπλε γραμμή) συμπίπτει ικανοποιητικά με την ιδανικά απαιτούμενη (κόκκινη διακεκομμένη γραμμή) καθ' όλη τη διάρκεια του πειράματος.

Στο Σχ. 5.11(γ), απεικονίζονται τέσσερα ενδεικτικά παράθυρα μετρήσεων που καταγράφηκαν κατά την εξομοίωση, τα οποία αντιστοιχούν σε διαφορετικές χρονικές στιγμές, τιμές ακτινοβολίας και επίπεδα εφεδρείας. Με το ίδιο χρώμα σχεδιάζονται οι εκτιμημένες καμπύλες $P-V$ που προκύπτουν από τις παραμέτρους που υπολογίζονται σε κάθε περίπτωση, ενώ το κόκκινο βέλος δείχνει πώς διαδέχεται η μία την άλλη καθώς μειώνεται η ακτινοβολία. Η χαρακτηριστική αναφοράς που καταγράφηκε πριν το πείραμα για την εξαγωγή των ομώνυμων πέντε παραμέτρων παρατίθεται στο Σχ. 5.11(δ), επιδεικνύοντας πλήρη ταύτιση με την εκτιμημένη καμπύλη.



Σχ. 5.11. Πειραματικά αποτελέσματα της προτεινόμενης τεχνικής APR με πηγή εισόδου ένα μοναδικό ΦΒ πλαίσιο (Perlight PLM-250P-60) σε μεταβαλλόμενη ακτινοβολία, όπως αποκτήθηκαν μέσω JTAG. (α) Εφεδρεία ισχύος (απαιτούμενη και επιτευχθείσα), (β) παραγόμενη και μέγιστη ισχύς, (γ) παράθυρα μετρήσεων και εκτιμημένες P - V καμπύλες για διάφορες ακτινοβολίες και εντολές εφεδρείας, και (δ) χαρακτηριστική I - V αναφοράς (μετρημένη και εκτιμημένη).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

Συμπεράσματα και Περαιτέρω Έρευνα

Στη συνέχεια, συνοψίζονται τα κυριότερα σημεία της συνεισφοράς και τα αποτελέσματα της παρούσας διατριβής, ξεχωριστά ανά θεματική περιοχή. Επίσης, περιγράφονται ανοιχτά πεδία έρευνας και προτάσεις περαιτέρω διερεύνησης.

6.1 Σύνοψη Αποτελεσμάτων

Στη συνέχεια συνοψίζονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τη διεξαχθείσα έρευνα ανά θεματική περιοχή, επισημαίνοντας τη συνεισφορά και καινοτομία σε κάθε περίπτωση.

6.1.1 Σχέσεις υπολογισμού του MPP συναρτήσει των πέντε παραμέτρων

Οι εξισώσεις (2.16)-(2.18) που δίνονται στο Κεφάλαιο 2, επιτρέπουν τον προσδιορισμό της MPP τάσης και ρεύματος ενός ΦΒ συστήματος σε ομοιόμορφες συνθήκες ως συνάρτηση των πέντε παραμέτρων, με απλό και αναλυτικό τρόπο. Υποστηρίζονται από στέρεο μαθηματικό υπόβαθρο και επιδεικνύουν καλύτερη ακρίβεια από όλες τις σχετικές μεθόδους της βιβλιογραφίας. Η μόνη υπόθεση που λαμβάνεται υπόψιν είναι η ισοδυναμία του σημείου λειτουργίας MPP_i με το MPP, η οποία τεκμηριώνεται πλήρως θεωρητικά στο ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β και αποδεικνύεται ότι σφάλλει ελάχιστα σε όλες τις περιπτώσεις.

6.1.2 Αναλυτικές εξισώσεις εύρεσης των πέντε παραμέτρων

Η μέθοδος εξαγωγής των πέντε παραμέτρων του μοντέλου μίας διόδου, που παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 2, είναι αναλυτικής φύσεως, βασίζεται μόνο σε δεδομένα από το τεχνικό φυλλάδιο του ΦΒ πλαισίου και είναι γενικά εφαρμόσιμη σε όλες τις συνθήκες (όχι μόνο STC). Η σχέση (2.33) είναι η πρώτη στη βιβλιογραφία που συνδέει το συντελεστή της διόδου με τους θερμοκρασιακούς συντελεστές του ΦΒ πλαισίου μέσω της νεοεισαχθείσας σταθεράς δ_0 . Η ακρίβεια των εξισώσεων (2.34)-(2.38) παρουσιάζει σφάλματα μέχρι 1%, ενώ ο χρόνος εκτέλεσής τους είναι περί τις τρεις τάξεις μεγέθους μικρότερος εν συγκρίσει με τυπική αριθμητική επίλυση συστήματος εξισώσεων.

6.1.3 Σχέσεις SC, OC και MPP συναρτήσει ακτινοβολίας και θερμοκρασίας

Οι εξισώσεις (2.49) επιτρέπουν τον ευθύ υπολογισμό της τάσης και του ρεύματος στα σημεία βραχυκύκλωσης, ανοιχτοκύκλωσης και μέγιστης παραγωγής, με δεδομένα εισόδου μόνο τις συνθήκες (ακτινοβολία/θερμοκρασία) και τα χαρακτηριστικά του ΦΒ πλαισίου από το τεχνικό φυλλάδιο. Είναι από τις λίγες σχέσεις στη βιβλιογραφία που έχουν προκύψει από στέρεα μαθηματική διαδικασία και βρίσκονται σε πλήρη θεωρητική συμφωνία με το μοντέλο των πέντε παραμέτρων.

6.1.4 Κυκλωματικό μοντέλο για συνθήκες σκίασης

Οι εξισώσεις (3.4), (3.9), (3.11) και (3.13) συνιστούν το προτεινόμενο κυκλωματικό μοντέλο, το οποίο είναι το πρώτο στη βιβλιογραφία που προσδιορίζει αναλυτικά την ηλεκτρική απόκριση μίας ΦΒ πλαισιοσειράς. Στη συνέχεια, εφαρμόζοντας υπέρθεση καμπυλών το μοντέλο επεκτείνεται μέχρι και τη συστοιχία, υποστηρίζοντας οποιαδήποτε σενάριο ανομοιόμορφης λειτουργίας με βήμα ανάλυσης τη στοιχειοσειρά. Η αναλυτική διατύπωση του μοντέλου είναι εφικτή με χρήση της νεοεισαχθείσας συνάρτησης Lambert W , για την οποία δίνονται σειρές υπολογισμού στο ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α.

Το προτεινόμενο μοντέλο παρουσιάζει πρακτικά την ίδια ακρίβεια με τη συμβατική επίλυση

συστήματος εξισώσεων, ενώ το υπολογιστικό του κόστος είναι δύο-τρεις τάξεις μεγέθους χαμηλότερο. Κυρίως όμως, είναι απαλλαγμένο από θέματα αρχικοποίησης και σύγκλισης που χαρακτηρίζουν τη συμβατική προσέγγιση, επιδεικνύοντας στιβαρότητα σίγουρη επιλυσιμότητα. Για το λόγο αυτό, χρησιμοποιείται στη συνέχεια στην προσομοίωση πολυάριθμων σεναρίων σκίασης για τη διεξοδική μελέτη του φαινομένου.

6.1.5 Γραφική ανάλυση και χαρακτηρισμός σκίασης

Στο Κεφάλαιο 3, μελετάται πώς τροποποιούνται οι χαρακτηριστικές $I-V$ και $P-V$ ενός ΦΒ συστήματος που υπόκειται σε μερική σκίαση. Για τη ΦΒ κυψέλη, οι χαρακτηριστικές δεν αλλάζουν ποιοτικά, αλλά μόνο ποσοτικά, παρατηρώντας αναλογική και ισχυρή επίδραση της ακτινοβολίας στο ρεύμα και την ισχύ, ενώ ασθενέστερη-λογαριθμική στην τάση. Αντίθετα, η ηλεκτρική απόκριση μίας ΦΒ στοιχειοσειράς που είναι μερικώς σκιασμένη ισοδυναμεί σχεδόν με της πλήρως σκιασμένης, λόγω της σειριακής σύνδεσης των κυψελών.

Για το ΦΒ πλαίσιο και την πλαίσιοσειρά, η μερική σκίαση συνεπάγεται εμφάνιση πολλαπλών κορυφών ισχύος στην καμπύλη $P-V$ (MPPs), λόγω των διόδων διαφυγής, σε πλήθος ίσα κατά μέγιστον με τα διαφορετικά επίπεδα ακτινοβολίας. Κάθε MPP χαρακτηρίζεται και αντιστοιχείται σε μία ένταση ακτινοβολίας και μία ομάδα στοιχειοσειρών. Η ανάλυση επεκτείνεται και στη ΦΒ συστοιχία, συσχετίζοντας κάθε MPP στην καμπύλη ισχύος της συστοιχίας με ένα MPP πλαίσιοσειράς.

6.1.6 Περιγραφικές σχέσεις προσδιορισμού των MPPs σε συνθήκες σκίασης

Η γραφική ανάλυση της σκίασης στο Κεφάλαιο 3 οδηγεί στην εξαγωγή απλών μαθηματικών εξισώσεων ευθείας μορφής που προσδιορίζουν την τάση και το ρεύμα όλων των τοπικών μεγίστων (MPPs) στην καμπύλη $P-V$ μιας σκιασμένης ΦΒ διάταξης. Οι σχέσεις (3.27) και (3.34)-(3.35) για την πλαίσιοσειρά και οι (3.53) για τη συστοιχία είναι αναλυτικές, απαιτούν ως δεδομένα εισόδου μόνο πληροφορίες του τεχνικού φυλλαδίου, και υποστηρίζουν οσαδήποτε διαφορετικά επίπεδα ακτινοβολίας και οποιαδήποτε θερμοκρασία. Συνιστούν μια εξαιρετικά απλή και εύχρηστη μέθοδο για άμεσο υπολογισμό της ενεργειακής απόδοσης ενός ΦΒ συστήματος που υπόκειται σε σκίαση, αποφεύγοντας την κοπιώδη και αβέβαιη εκτέλεση χρονοβόρων προσομοιώσεων.

Η ακρίβεια των εν λόγω εξισώσεων αποτιμάται αρχικά μέσω προσομοιώσεων πληθώρας σεναρίων σκίασης και στη συνέχεια με πειραματικές μετρήσεις σε υφιστάμενη ΦΒ εγκατάσταση. Τα αποτελέσματα καταδεικνύουν την ικανοποιητική ακρίβεια και αξιοπιστία των προτεινόμενων MPP εκφράσεων.

6.1.7 Αλγόριθμοι ελέγχου του dc/dc μετατροπέα για συνθήκες σκίασης

Στο Κεφάλαιο 4, διερευνώνται διεξοδικά οι δυσκολίες που αντιμετωπίζει ο αλγόριθμος MPPT του dc/dc μετατροπέα όταν εμφανίζονται πολλαπλά τοπικά μέγιστα στην καμπύλη ισχύος μίας σκιασμένης ΦΒ διάταξης. Προτείνεται μία απλή τεχνική με την οποία ο μετατροπέας αντιλαμβάνεται κατά πόσο υπάρχει σκίαση, αποφεύγοντας περιττές σαρώσεις

καμπύλης (curve scans) σε συνθήκες ομοιόμορφης ακτινοβολίας. Η συγκεκριμένη μέθοδος είναι γενικά εφαρμόσιμη σε οποιοδήποτε ΦΒ σύστημα, απαιτώντας μόνο ένα συνηθισμένο αισθητήριο θερμοκρασίας.

Επιπλέον, προτείνεται ένας απλός αλγόριθμος GMPPT ειδικά σχεδιασμένος για σκίαση, ο οποίος εγγυάται μόνιμη λειτουργία στο ολικό μέγιστο MPP. Η καινοτομία του αλγορίθμου είναι ότι αποφεύγει την περιοδική διακύμανση του σημείου λειτουργίας «αναγνωριστικής φύσεως» που εφαρμόζουν άλλες μέθοδοι της βιβλιογραφίας. Ο προτεινόμενος GMPPT είναι σχεδιασμένος για ΦΒ πλαισιοσειρές και μόνο δύο επίπεδα ακτινοβολίας, ενώ δε λαμβάνει υπόψιν του τον θερμοκρασιακό παράγοντα. Επιπλέον περιορισμός είναι ότι θεωρεί πως η ένταση ενός συγκεκριμένου συμβάντος σκίασης παραμένει σταθερή κατά τη διάρκεια της ημέρας.

Για την αντιμετώπιση των περιορισμών του τελευταίου, προτείνεται επιπλέον ένας πιο περίπλοκος αλγόριθμος CFMPPT που εφαρμόζει curve fitting στις μετρήσεις τάσης και ρεύματος και εκτιμά συνεχώς όλα τα MPPs της καμπύλης ισχύος. Η εν λόγω μέθοδος αξιοποιεί την ήδη υπάρχουσα κυμάτωση του σημείου λειτουργίας και δεν προξενεί επιπρόσθετη ταλάντωση, ενώ αφορά πλαισιοσειρά και δύο επίπεδα ακτινοβολίας.

Όλοι οι προαναφερθέντες αλγόριθμοι προσομοιώνονται στο λογισμικό *MATLAB/Simulink* σε απαιτητικά σενάρια με πολύ γρήγορα μεταβαλλόμενες σκιάσεις και επιδεικνύουν ικανοποιητική συμπεριφορά και σημαντική βελτίωση στην απόδοση του συστήματος.

6.1.8 Τεχνική ελέγχου APR του dc/dc μετατροπέα για τήρηση εφεδρείας

Το αντικείμενο της τήρησης εφεδρείας ισχύος από τα ΦΒ συστήματα είναι σχετικά νέο στη βιβλιογραφία. Ο προτεινόμενος αλγόριθμος APR του Κεφαλαίου 5 προσφέρει αυτήν τη δυνατότητα, εκτιμώντας τη μέγιστη ισχύ καθώς το σύστημα λειτουργεί σε υποβέλτιστο επίπεδο ισχύος (μακριά από το MPP). Για το σκοπό αυτό, εφαρμόζεται το μοντέλο των πέντε παραμέτρων μέσω curve fitting σε μετρήσεις τάσης και ρεύματος, κάτι που συμβαίνει πρώτη φορά στη βιβλιογραφία. Επίσης, σημεία καινοτομίας είναι η χρήση ενός απλού ελεγκτή PI που ελέγχει την ισχύ και όχι την τάση, παρά τη μη-μονότονη σχέση μεταξύ ισχύος και duty cycle, και η εξασφάλιση ότι το σημείο λειτουργίας κείται πάντα στο προτιμητέο δεξί τμήμα της χαρακτηριστικής $P-V$. Η αποδοτικότητα της εν λόγω τεχνικής ελέγχου επιβεβαιώνεται και πειραματικά σε πρωτότυπο μετατροπέα ισχύος 2 kW.

6.2 Προτάσεις Περαιτέρω Διερεύνησης

Μεταξύ των ερευνητικών αντικειμένων με τα οποία ασχολείται η παρούσα διατριβή, παραμένουν ακόμη ανοιχτά θέματα διερεύνησης που αφορούν τη μελέτη και τον έλεγχο ενός ΦΒ συστήματος σε συνθήκες σκίασης.

6.2.1 Βελτίωση των περιγραφικών MPP σχέσεων ΦΒ συστοιχίας

Οι σχέσεις (3.53) έχουν σε κάποιο βαθμό εμπειρική βάση και ενσωματώνουν συντελεστές πειραματικής φύσεως (λ και κ), που είναι η αχίλλειος πτέρνα της αξιοπιστίας τους. Θα μπορούσαν να βελτιωθούν οι εν λόγω εκφράσεις σύμφωνα με τη διαδικασία που ακολουθείται στην ενότητα 3.4 για την πλαισιοσειρά. Αξίζει να διερευνηθεί η δυνατότητα διατύπωσης ενός

ισοδύναμου επαυξημένου μοντέλου που να περιγράφει το ΦΒ σύστημα μέχρι και το επίπεδο της συστοιχίας, ώστε οι τελικές σχέσεις να απολαμβάνουν πλήρη θεωρητική τεκμηρίωση και να είναι απαλλαγμένες από εμπειρικούς συντελεστές.

6.2.2 Προσδιορισμός των συνθηκών εμφάνισης των τοπικών MPPs

Στο πεδίο της θεωρητικής μελέτης του φαινομένου της σκίασης, παραμένει ανοιχτό το ερώτημα του *πότε εμφανίζονται και πότε όχι έκτυπα τοπικά μέγιστα στην καμπύλη ισχύος*. Για παράδειγμα, στην απλή περίπτωση μίας πλαισιοσειράς που λειτουργεί υπό δύο επίπεδα ακτινοβολίας: σε ποια έκταση σκίασης εξαφανίζεται το MPP1 και αντίστοιχα σε ποια ένταση σκίασης δεν εκφράζεται το MPP2. Αξίζει να διερευνηθούν οι παράμετροι και οι συνθήκες οι οποίες επιτελούν τον καθοριστικό ρόλο στο φαινόμενο.

6.2.3 Εφαρμογή των κεκτημένων στη βελτιστοποίηση του συστήματος

Η χρήση των περιγραφικών εξισώσεων για τον υπολογισμό των MPPs σκιασμένης ΦΒ συστοιχίας δεν περιορίζονται μόνο στην εκτίμηση της ενεργειακής απόδοσης του συστήματος. Είναι κατάλληλες για εφαρμογή σε διάφορες διαδικασίες βελτιστοποίησης ενός ΦΒ σταθμού. Για παράδειγμα, θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν στην αντικειμενική συνάρτηση αλγορίθμου βελτιστοποίησης της χωροταξικής διάταξης των πλαισίων στο πάρκο προς ελαχιστοποίηση των απωλειών σκίασης. Στο ίδιο πνεύμα, για συστήματα ηλιοπαρακολούθησης (trackers), οι εν λόγω σχέσεις μπορούν να αξιοποιηθούν για τον προσδιορισμό των βέλτιστων κινηματικών καμπυλών που θα καθορίζουν τις σχετικές θέσεις και κλίσεις των πλαισίων στο σύστημα.

6.2.4 Βελτίωση των αλγορίθμων MPPT για σκίαση

Οι προτεινόμενες τεχνικές ελέγχου MPPT του μετατροπέα ισχύος, εγγυώνται πραγματικά βέλτιστη λειτουργία σε συνθήκες σκίασης, αλλά έχουν περιορισμούς εφαρμογής: αφορούν μόνο ΦΒ πλαισιοσειρές και δύο επίπεδα ακτινοβολίας. Αξίζει να διερευνηθεί η δυνατότητα μετεξέλιξης αυτών των αλγορίθμων ώστε να υποστηρίζουν την πληρέστερη περίπτωση της ΦΒ συστοιχίας και των πολλαπλών επίπεδων ακτινοβολίας, όπου εμφανίζονται αντίστοιχα πολλαπλά τοπικά μέγιστα. Μια υποσχόμενη τεχνική που πιθανώς δύναται να συμβάλλει προς αυτήν την κατεύθυνση είναι η προσαρμογή καμπύλης (curve fitting) με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων.

6.2.5 Ολοκληρωμένο σχήμα ελέγχου μετατροπέα ισχύος

Η προτεινόμενη τεχνική APR παρουσιάζει ικανοποιητικά σφάλματα και πολύ καλή δυναμική συμπεριφορά. Θα είχε ιδιαίτερο ενδιαφέρον η εφαρμογή της σε ένα ολοκληρωμένο σχήμα ελέγχου dc/dc μετατροπέα και αντιστροφέα (μετατροπέας δύο-σταδίων), προς παροχή επικουρικών υπηρεσιών στο ηλεκτρικό δίκτυο. Όπως εξηγείται στο Κεφάλαιο 5, η τεχνική APR επιτυγχάνει μεταβάσεις του σημείου λειτουργίας σε κλάσματα του δευτερολέπτου, εκτιμώντας ταυτόχρονα το MPP στις πλέον γρήγορα μεταβαλλόμενες συνθήκες ακτινοβολίας. Αυτές οι ιδιότητες την καθιστούν ιδανική για αξιοποίηση στη *ρύθμιση συχνότητας* και

γενικότερα στην *αυξομείωση της παραγωγής* του συστήματος σύμφωνα με εντολές του διαχειριστή.

Βέβαια, το εν λόγω σχήμα ελέγχου είναι σχεδιασμένο για την απλή περίπτωση της ομοιόμορφης ακτινοβολίας. Οπότε, μια πολύ ενδιαφέρουσα προοπτική είναι ο συγκερασμός των MPPT αλγορίθμων για συνθήκες σκίασης με τον έλεγχο για τήρηση εφεδρείας, προς δημιουργία μιας ολοκληρωμένης και γενικευμένης τεχνικής ελέγχου του μετατροπέα ενός ΦΒ συστήματος.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

Η Συνάρτηση Lambert W

Στο παράρτημα Α, παρουσιάζεται και αναλύεται το θεωρητικό υπόβαθρο της συνάρτησης Lambert W που χρησιμοποιείται κατά κόρον στην παρούσα διατριβή. Αφού δοθεί ο ορισμός της και μια σύντομη ιστορική αναδρομή, προτείνονται δύο σειρές σύγκλισης για τον αναλυτικό υπολογισμό της, χωρίς επαναληπτική διαδικασία. Επίσης, διατυπώνονται οι βασικές μαθηματικές ιδιότητες της συνάρτησης Lambert W και προσεγγιστικές σχέσεις που χρησιμοποιούνται σε διάφορα σημεία της διατριβής.

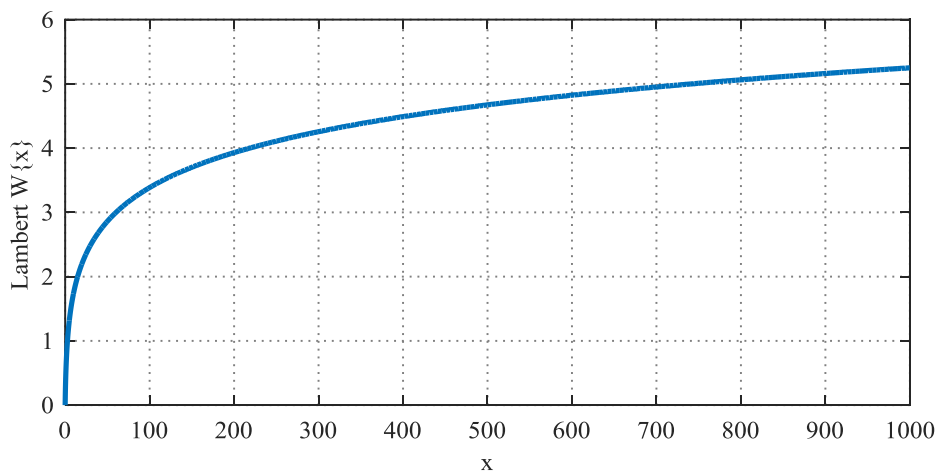
A.1 Ορισμός και Θεωρία

Σύμφωνα με τη θεωρία, η συνάρτηση Lambert W (ή συνάρτηση Ωμέγα) περιγράφει τους κλάδους της αντίστροφης σχέσης $f(w)=we^w$ με w εν γένει μιγαδικό αριθμό. Δηλαδή, η συνάρτηση Lambert W ενός μιγαδικού αριθμού z είναι η σχέση που ικανοποιεί την έκφραση: $z=W\{z\}e^{W\{z\}}$. Η μαθηματική αυτή σχέση δεν είναι αντιστρέψιμη, δηλαδή η Lambert W τυπικά δεν είναι συνάρτηση με το συμβατικό ορισμό. Παρόλα αυτά, εστιάζοντας στο πραγματικό επίπεδο, ορίζεται στο διάστημα $[-1/e, \infty]$, ενώ περιορίζοντας το πεδίο τιμών της στο $[-1, \infty]$ η αντιστρεψιμότητα 1 προς 1 είναι εφικτή με τον επονομαζόμενο *κύριο κλάδο* $W_0\{z\}$ [227], [228] (Σχ. Α. 1). Στο κείμενο της παρούσας διατριβής, με τη διατύπωση «συνάρτηση Lambert W » υπονοείται ο κύριος κλάδος $W_0\{z\}$.

Ιστορικά, η πρώτη διατύπωση της Lambert W έγινε από τον Johan Heinrich Lambert το 1758 και οδήγησε στη συνέχεια σε δημοσίευση το 1783 από τον Leonhard Euler. Παρόλα αυτά, η αυτονόμηση της ιδιαίτερης αυτής σχέσης σε ξεχωριστή συνάρτηση πραγματοποιήθηκε το 1925 από τους Pólya και Szegő, ενώ η χρησιμότητά της δεν είχε γίνει ιδιαίτερα αισθητή στην ακαδημαϊκή κοινότητα πριν το 1990. Επίσημα, το ενδιαφέρον για τη συνάρτηση Lambert W εκδηλώθηκε όταν με τη βοήθειά της δόθηκε ακριβής (αναλυτική) λύση στο πρόβλημα *Double-well Dirac delta function model* για ίσα φορτία, ένα από τα θεμελιώδη προβλήματα της κβαντικής μηχανικής. Τότε, οι επιστήμονες του μαθηματικού εργαλείου *Maple* την εισήγαγαν ως αυτόνομη συνάρτηση και συνειδητοποίησαν ότι η εμφάνισή της στα φυσικά προβλήματα συγκρίνεται με την εκθετική και λογαριθμική [227]. Σήμερα υποστηρίζεται από όλα τα σύγχρονα υπολογιστικά εργαλεία, μεταξύ των οποίων *MATLAB*, *Maple*, και *Mathematica*.

A.2 Σειρές Σύγκλισης Υπολογισμού

Η συνάρτηση Lambert W δεν μπορεί να εκφραστεί με όρους άλλων θεμελιωδών συναρτήσεων, αλλά αποτελεί από μόνη της αυτόνομη και ξεχωριστή σχέση. Η ανάλυση της κατά σειρές Taylor για τον κύριο κλάδο $W_0\{z\}$, οδηγεί στη διατύπωση:



Σχ. Α. 1. Γραφική παράσταση της συνάρτησης Lambert W σε θετικές πραγματικές τιμές ορίσματος. Ο κύριος κλάδος W_0 είναι αντιστρέψιμη συνάρτηση και ορίζεται στο $[-1/e, \infty]$ με πεδίο τιμών $[-1, \infty]$.

$$W\{z\} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-n)^{n-1}}{n!} z^n \quad (\text{A.1})$$

η οποία όμως έχει ακτίνα σύγκλισης μόνο $1/e \approx 0.368$, γεγονός που καθιστά αυτήν την προσέγγιση για τον υπολογισμό της πρακτικά ανεπαρκή. Επομένως, συνήθως οι υπολογιστικές πλατφόρμες χρησιμοποιούν επαναληπτικούς αλγορίθμους για τον υπολογισμό της (π.χ. *lambertw* στην *MATLAB*).

A.2.1 Σειρές σύγκλισης εφαρμόσιμες στο εύρος $[0, \infty)$

Αξιόλογο ερευνητικό έργο στο αντικείμενο έχουν επιδείξει ο Corless et al. [229], [230], προτείνοντας πλήθος από μαθηματικές σχέσεις και σειρές σύγκλισης. Στην παρούσα διατριβή, συνδυάστηκαν η ασυμπτωτική έκφραση που προτείνεται στο [229] για μέτριες και μεγάλες τιμές του ορίσματος, και οι σειρές σύγκλισης που εισάγονται στο [230] για μικρές τιμές:

Για $0 \leq x \leq 9$:

$$W = \begin{cases} u + \frac{u}{1+u}p + \frac{1}{2} \frac{u}{(1+u)^3} p^2 - \frac{1}{6} \frac{u(2u-1)}{(1+u)^5} p^3 + \frac{1}{24} \frac{u(6u^2-8u+1)}{(1+u)^7} p^4 \\ - \frac{1}{120} \frac{u(24u^3-58u^2+22u-1)}{(1+u)^9} p^5 \end{cases} \quad (\text{A.2})$$

όπου $u = x/e$ και $p = 1-x/e$.

Για $x \geq 9$:

$$W = \begin{cases} L_1 - L_2 + \frac{L_2}{L_1} + \frac{L_2(-2+L_2)}{2L_1^2} + \frac{L_2(6-9L_2+2L_2^2)}{6L_1^3} \\ + \frac{L_2(-12+36L_2-22L_2^2+3L_2^3)}{12L_1^4} + \frac{L_2(60-300L_2+350L_2^2-125L_2^3+12L_2^4)}{60L_1^5} \end{cases} \quad (\text{A.3})$$

όπου $L_1 = \ln(x)$ και $L_2 = \ln(\ln(x))$.

Οι ανωτέρω σειρές υποστηρίζουν υπολογισμό του κύριου κλάδου της Lambert W σε όλο το εύρος των μη-αρνητικών πραγματικών αριθμών, εγείροντας σφάλμα λιγότερο από 0.1% [67].

A.2.2 Απλή σχέση υπολογισμού για το εύρος $[2, \infty)$

Μια απλούστερη μαθηματική σχέση κατάλληλη για $x \geq 2$ προτείνεται στο [117], βασισμένη στην ανάλυση του [231]. Όπως εξηγείται στην τελευταία αναφορά, η Lambert W του όρου $e^{\lambda+B}$ προσεγγίζεται από την:

$$W\{e^{\lambda+B}\} = \lambda \left(1 - \frac{\ln \lambda + B}{\lambda + 1} \right) \quad (\text{A.4})$$

όπου λ είναι ένας μεγάλος θετικός αριθμός και B μία σταθερά. Εάν το B μηδενιστεί και το λ τεθεί ίσο με $\ln(x)$, τότε το $W\{x\}$ εκφράζεται ως:

$$W\{x\} = \ln(x) \left[1 - \frac{\ln(\ln(x))}{\ln(x)+1} \right] \quad (\text{A.5})$$

Η έκφραση (A.5) αποκαλείται στο κείμενο της παρούσας διατριβής ως *απλή σχέση υπολογισμού της συνάρτησης Lambert W*, και αποδεικνύεται ικανοποιητικά ακριβής για ορίσματα $x \geq 2$, παρουσιάζοντας σφάλματα μικρότερα του 1.5%. Είναι κατάλληλη για απλές εφαρμογές που απαιτείται ο ελάχιστος υπολογιστικός φόρτος.

A.3 Βασικές Ιδιότητες

Στη συνέχεια, παρατίθενται εξισώσεις που απορρέουν άμεσα από τον ορισμό της συνάρτησης (πάντα αναφορικά με τον κύριο κλάδο σε μη-αρνητικά πραγματικά ορίσματα):

$$we^w = x \Leftrightarrow w = W\{x\} \Leftrightarrow \ln W\{x\} + W\{x\} = \ln x \quad (\text{A.6})$$

$$W\{xe^x\} = x \quad (\text{A.7})$$

$$W\{ae^a\} + W\{be^b\} = a + b = W\{(a+b)e^{a+b}\} \quad (\text{A.8})$$

$$aW\{xe^x\} = ax = W\{axe^{ax}\} \quad (\text{A.9})$$

$$W\{a\} + W\{b\} = \ln \frac{ab}{W\{a\}W\{b\}} = W\{ab\} + \ln \frac{W\{ab\}}{W\{a\}W\{b\}} \quad (\text{A.10})$$

$$aW\{x\} = W\{x^a\} + \ln \frac{W\{x^a\}}{[W\{x\}]^a} \quad (\text{A.11})$$

Η (A.6) αποτελεί ουσιαστικά τον ορισμό της συνάρτησης Lambert W , ενώ οι (A.7)-(A.11) είναι ιδιότητες που προκύπτουν με *ισοδύναμους μετασχηματισμούς χωρίς απλοποιήσεις*.

A.4 Προσεγγιστικές Σχέσεις

Οι ιδιότητες της προηγούμενης ενότητας έχουν πλήρη θεωρητική ισχύ, αλλά η περίπλοκη μορφή τους τις καθιστά σχετικά δύσχρηστες. Ακολουθώντας, προτείνονται δύο προσεγγιστικές σχέσεις που έχουν υποστεί συγκεκριμένες απλοποιήσεις, με αποτέλεσμα να είναι πιο εύχρηστες αλλά εφαρμόσιμες υπό περιορισμούς.

A.4.1 Έκφραση Lambert W γινομένου όρων (για μικρές τιμές)

$$W\{ab\} = W\{a\} + \ln b - \ln \left[1 + \frac{W\{b\}}{W\{a\}} \right], \text{ για } ab \rightarrow 0 \quad (\text{A.12})$$

Απόδειξη

Εφαρμόζοντας την (A.10), η Lambert W γινομένου όρων διατυπώνεται ως εξής:

$$W\{ab\} = W\{a\} + W\{b\} - \ln \frac{W\{ab\}}{W\{a\}W\{b\}} = W\{a\} + W\{b\} + \ln W\{b\} - \ln \frac{W\{ab\}}{W\{a\}} \quad (\text{A.13})$$

Όμως, η έκφραση $W\{b\} + \ln W\{b\} = \ln b$ ισούται με $\ln b$ βάσει του ορισμού (Α.6). Έτσι:

$$W\{ab\} = W\{a\} + \ln b - \ln \frac{W\{ab\}}{W\{a\}} \quad (\text{A.14})$$

Στην (Α.14), ο όρος $W\{ab\}$ εμφανίζεται ακόμα και στις δύο πλευρές της εξίσωσης. Εφαρμόζοντας ξανά την (Α.10) στον δεξιότερο όρο, προκύπτει:

$$W\{ab\} = W\{a\} + \ln b - \ln \frac{W\{a\} + W\{b\} - \ln \frac{W\{ab\}}{W\{a\}W\{b\}}}{W\{a\}} \Leftrightarrow$$

$$W\{ab\} = W\{a\} + \ln b - \ln \left[1 + \frac{W\{b\} - \ln \frac{W\{ab\}}{W\{a\}W\{b\}}}{W\{a\}} \right] \quad (\text{A.15})$$

Ο διαγεγραμμένος λογαριθμικός όρος στην (Α.15) μπορεί να θεωρηθεί μηδέν, διότι όταν το γινόμενο ab είναι πολύ μικρό (θεμελιώδης υπόθεση αυτής της παραγράφου) η Lambert W συμπεριφέρεται γραμμικά, δηλαδή $W\{ab\} \approx W\{a\}W\{b\}$. Εφαρμόζοντας την ανωτέρω απλοποίηση, προκύπτει η (Α.12).

Αξίζει να σημειωθεί ότι η διατύπωση της (Α.12) είναι συμμετρική ως προς τα δύο ορίσματα, δηλαδή η θέση των a και b μπορεί να αντιστραφεί ισοδύναμα. Η εν λόγω παρατήρηση επιβεβαιώνεται εύκολα αν εφαρμοστεί η (Α.6), αντικατασταθεί ο όρος $\ln b$ με την έκφραση $W\{b\} + \ln W\{b\}$ και ομαδοποιηθούν οι όροι στον λογάριθμο.

A.4.2 Έκφραση Lambert W γινομένου όρων (για μεγάλες τιμές)

$$W\{ab\} = W\{a\} + \ln b - \ln \left[1 + \frac{\ln b}{W\{a\}} \right], \text{ για } a \sim b \text{ και } ab \rightarrow \infty \quad (\text{A.16})$$

Απόδειξη

Επαναλαμβάνοντας τα μαθηματικά βήματα της προηγούμενης παραγράφου, η Lambert W του γινομένου όρων γράφεται στη γενική περίπτωση σύμφωνα με την (Α.15):

$$W\{ab\} = W\{a\} + \ln b - \ln \left[1 + \frac{W\{b\} - \ln \frac{W\{ab\}}{W\{a\}W\{b\}}}{W\{a\}} \right] \quad (\text{A.17})$$

Όμως, ο όρος $W\{ab\}$ στο δεξί τμήμα της καμπύλης μπορεί να απλοποιηθεί σε $W\{ab\} \approx W\{a\} + W\{b\}$, καθώς το όρισμα ab λαμβάνει μεγάλες τιμές και η Lambert W αποκτά λογαριθμικές ιδιότητες. Τότε η (Α.17) γίνεται:

$$W\{ab\} = W\{a\} + \ln b - \ln \left[1 + \frac{W\{b\} - \ln \frac{W\{a\} + W\{b\}}{W\{a\}W\{b\}}}{W\{a\}} \right] \Leftrightarrow \quad (\text{A.18})$$

$$W\{ab\} = W\{a\} + \ln b - \ln \left[1 + \frac{\cancel{\ln b - \ln \left(1 + \frac{W\{b\}}{W\{a\}} \right)}}{W\{a\}} \right] \quad (\text{A.19})$$

Στην (A.19), ο διαγεγραμμένος όρος αγνοείται: εφόσον οι δύο όροι a και b είναι μεγάλοι και παρόμοιας τάξης μεγέθους, οι εκφράσεις $W\{a\}$ και $W\{b\}$ λαμβάνουν κοντινές τιμές (λογαριθμική συμπεριφορά της Lambert W για μεγάλα ορίσματα), και συνεπώς ο διαγεγραμμένος λογαριθμικός όρος αντιστοιχεί σε μία μικρή σταθερά $\ln(2) \approx 0$. Έτσι, προκύπτει η (A.16).

Αξίζει να σημειωθεί ότι η (A.16) διαφέρει ουσιαστικά από την (A.12) μόνο στον αριθμητή του κλάσματος εντός του λογαρίθμου, που είναι $\ln(b)$ στην πρώτη περίπτωση έναντι $W\{b\}$ στη δεύτερη. Η εν λόγω διαφοροποίηση στηρίζεται στην παρατήρηση ότι ο όρος $W\{b\}$ συγκλίνει στον $\ln(b)$ για μεγάλες τιμές του b (υπόθεση της παραγράφου). Επίσης, η ίδια υπόθεση ότι τα a και b είναι παρόμοιας τάξης μεγέθους, επιτρέπει την ανταλλαγή των ορισμάτων στην (A.16), καθιστώντας την και αυτή συμμετρική σχέση.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

Μαθηματικοί Υπολογισμοί και Θεωρητική Τεκμηρίωση

Στο ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β, δίνονται λεπτομέρειες και μεθοδολογικά βήματα εξαγωγής συγκεκριμένων εξισώσεων των Κεφαλαίων 2 και 3, τα οποία παραλήφθηκαν από τον κύριο κορμό του τεύχους για λόγους ευκολίας στην ανάγνωση.

B.1 Θεωρητική Τεκμηρίωση της Παραγράφου 2.2.3

Στην παρούσα ενότητα, παρατίθενται οι μαθηματικοί υπολογισμοί που τεκμηριώνουν θεωρητικά την ισχύ των αναλυτικών εκφράσεων υπολογισμού της MPP τάσης και ρεύματος που παρουσιάζονται στην παράγραφο 2.2.3, όπως δημοσιεύτηκαν στην [116]. Συγκεκριμένα, προσδιορίζονται οι συνθήκες ταύτισης των σημείων MPP και MPP_I, ενώ διερευνάται το πρόσημο της απόκλισής τους ως προς τάση και ρεύμα. Το σφάλμα ισχύος που προκύπτει θεωρώντας ταυτόσημα τα δύο σημεία ποσοτικοποιείται και αποδεικνύεται αμελητέο στη γενική περίπτωση, γεγονός που επιβεβαιώνει και θεωρητικά την εγκυρότητα των σχέσεων.

B.1.1 Συνθήκες ταύτισης των σημείων MPP_I και MPP

Όταν το ΦΒ σύστημα λειτουργεί στο MPP_I λόγω ενός εξωτερικού φορτίου R_L , το ισοδύναμο φορτίο που εφαρμόζεται στα άκρα της ιδανικής συνιστώσας είναι $R_{ideal_I} = R_{sh} \parallel (R_s + R_{L_I})$ (Σχ. Β. 1). Για να ταυτίζονται τα δύο σημεία λειτουργίας MPP και MPP_I, πρέπει να ισχύει η (2.7) στο MPP_I, δηλαδή:

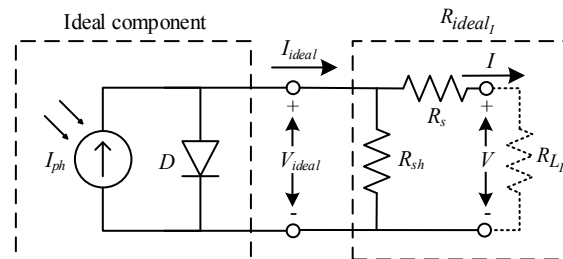
$$\left. \frac{dI}{dV} \right|_{MPP_I} = -\frac{I_{mp_I}}{V_{mp_I}} \Leftrightarrow \left. \frac{dI}{dV} \right|_{MPP_I} = -\frac{1}{R_{L_I}} \quad (B.1)$$

Η παράγωγος του dI/dV στο MPP_I βρίσκεται αντικαθιστώντας την (2.16) στην (2.9). Στη συνέχεια, εφαρμόζεται η (2.15) ώστε να εκφραστεί συναρτήσει των αντιστάσεων και του φορτίου:

$$\left. \frac{dI}{dV} \right|_{MPP_I} = \frac{-1}{R_{sh} \parallel R_{ideal_I} + R_s} \quad (B.2)$$

Έτσι, αντικαθιστώντας την (B.2) στην (B.1) και επιλύοντας ως προς R_{L_I} και R_{ideal_I} , δεδομένου ότι $R_{ideal_I} = R_{sh} \parallel (R_s + R_{L_I})$ (Σχ. Β. 1), προκύπτει ότι:

$$\begin{cases} R_{L_I} = \sqrt{\frac{R_s^2 R_{sh}}{R_s \parallel R_{sh}}} & R_s \ll R_{sh} \Rightarrow R_{L_I} = R_{ideal_I} = \sqrt{R_s R_{sh}} \\ R_{ideal_I} = \sqrt{R_{sh} (R_s \parallel R_{sh})} \end{cases} \quad (B.3)$$



Σχ. Β. 1. Ισοδύναμο κύκλωμα ΦΒ κυψέλης όταν λειτουργεί στο MPP_I.

Η παραπάνω έκφραση αποδεικνύει ότι τα δύο σημεία MPP και MPP_I ταυτίζονται πλήρως όταν τα ισοδύναμα φορτία R_{L_I} και R_{ideal_I} είναι ακριβώς ίσα. Προφανώς αυτό ισχύει όταν $R_s \rightarrow 0$ και $R_{sh} \rightarrow \infty$, αλλά ισχύει επίσης και για άλλες μη-ιδανικές τιμές των παρασιτικών αντιστάσεων R_s και R_{sh} που ικανοποιούν την (B.3).

B.1.2 Πρόσχημο σφάλματος εκτίμησης της MPP τάσης και ρεύματος

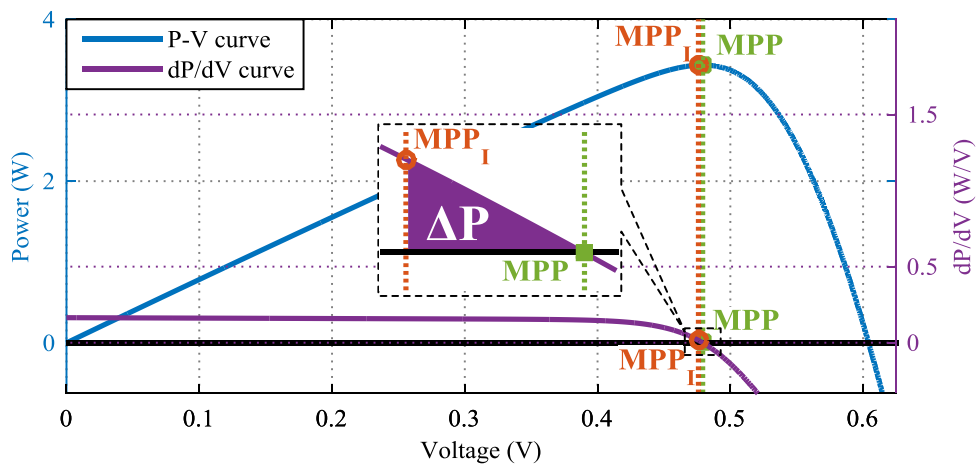
Στη γενική περίπτωση, η (B.1) δεν ικανοποιείται επακριβώς, οδηγώντας σε απόκλιση μεταξύ των δύο σημείων λειτουργίας. Εάν το MPP_I βρίσκεται στα αριστερά του MPP στην καμπύλη $I-V$ (υποεκτίμηση της τάσης και υπερεκτίμηση του ρεύματος), τότε $dI/dV|_{MPP_I} > -1/R_{L_I}$ και επομένως $R_{ideal_I} < \sqrt{R_s R_{sh}}$. Χρησιμοποιώντας την (2.15), διατυπώνονται γενικές εκφράσεις για τον προσδιορισμό του πρόσχημου του σφάλματος εκτίμησης συναρτήσει των πέντε παραμέτρων:

$$\begin{cases} \frac{a}{I_{ph}} W \left\{ \frac{I_{ph} e}{I_s} \right\} < \sqrt{R_s R_{sh}} \Rightarrow V_{mp_I} < V_{mp} \text{ και } I_{mp_I} > I_{mp} \\ \frac{a}{I_{ph}} W \left\{ \frac{I_{ph} e}{I_s} \right\} > \sqrt{R_s R_{sh}} \Rightarrow V_{mp_I} > V_{mp} \text{ και } I_{mp_I} < I_{mp} \end{cases} \quad (B.4)$$

Στις προσομοιώσεις τις παραγράφου 2.2.3, η άνω ανισότητα της (B.4) είναι αληθής στην πλειοψηφία των περιπτώσεων. Υπάρχουν ελάχιστες μόνο περιπτώσεις που οι συνθήκες ακτινοβολίας και θερμοκρασίας τροποποιούν τις πέντε παραμέτρους ώστε να ισχύει ο κάτω κλάδος της (B.4).

B.1.3 Ισοδυναμία MPP_I και MPP

Στο ακόλουθο κείμενο ποσοτικοποιείται η απόκλιση των δύο σημείων και αποδεικνύεται ότι είναι αμελητέα. Για να επιτευχθεί αυτό, διατυπώνεται μια γενική έκφραση για το σφάλμα ισχύος $\Delta P = P_{mp} - P_{mp_I}$ και αποδεικνύεται ότι λαμβάνει γενικά σχεδόν μηδενικές τιμές.



Σχ. Β. 2. Χαρακτηριστική $P-V$ και dP/dV στα σημεία MPP και MPP_I.

Στο Σχ. Β. 2, η καμπύλη P - V (μπλε χρώμα) και dP/dV (μωβ χρώμα) αντιπαραβάλλονται για μια τυπική ΦΒ κυψέλη. Στο MPP είναι $dP/dV=0$, ενώ αντίθετα $dP/dV \neq 0$ στο MPP₁ στη γενική περίπτωση. Κοντά στη περιοχή του MPP, η καμπύλη dP/dV είναι σχεδόν ευθεία γραμμή, επιτρέποντας την προσέγγιση της απόκλισης ΔP μέσω της μωβ τριγωνικής επιφάνειας στο Σχ. Β. 2. Έτσι, δεδομένου ότι η κλίση της μωβ γραμμής είναι $d^2P/dV^2 = (dP/dV|_{MPP_1} - 0)/(V_{mp_1} - V_{mp})$, το σχετικό σφάλμα ισχύος $\Delta P/P_{mp_1}$ υπολογίζεται:

$$\frac{\Delta P}{P_{mp_1}} = \frac{\left(\frac{dP}{dV} \Big|_{MPP_1} - 0 \right) (V_{mp} - V_{mp_1})}{2P_{mp_1}} = \frac{- \left[\frac{dP}{dV} \Big|_{MPP_1} \right]^2}{2P_{mp_1} \frac{d^2P}{dV^2} \Big|_{MPP_1}} = \frac{- \left[\frac{dI}{dV} \Big|_{MPP_1} + \frac{I_{mp_1}}{V_{mp_1}} \right]^2}{2I_{mp_1} \frac{d^2I}{dV^2} \Big|_{MPP_1} + 4 \frac{I_{mp_1}}{V_{mp_1}} \frac{dI}{dV} \Big|_{MPP_1}} \quad (B.5)$$

Στη συνέχεια, η (B.5) εκφράζεται με όρους αντιστάσεων και φορτίων. Για τον σκοπό αυτό, λαμβάνεται υπόψη το φορτίο στο MPP₁: $R_{L_1} = V_{mp_1}/I_{mp_1}$, η (B.2) αντικαθίσταται για $dI/dV|_{MPP_1}$, και οι ακόλουθες εξισώσεις χρησιμοποιούνται:

$$\frac{d^2I}{dV^2} \Big|_{MPP_1} = \frac{-(R_s \parallel R_{sh} \parallel R_{ideal_1})^3}{a R_{ideal_1} R_s^3} \quad (B.6)$$

$$I_{mp_1} = \frac{a(w-1)}{R_s + R_{L_1}} \quad (B.7)$$

όπου η (B.6) προκύπτει λαμβάνοντας τη δεύτερη παράγωγο της (2.2) ως προς τάση και αντικαθιστώντας το MPP₁ ρεύμα από την (2.17). Η (B.7) είναι ισοδύναμη της (2.17). Συνεπώς, η (B.5) αναδιατυπώνεται ως εξής:

$$\frac{\Delta P}{P_{mp_1}} = \frac{\frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_{L_1}} - \frac{1}{R_{sh} \parallel R_{ideal_1} + R_s} \right)^2}{\frac{(w-1)(R_s \parallel R_{sh} \parallel R_{ideal_1})^3}{R_{ideal_1} R_s^3 (R_s + R_{L_1})} + \frac{2}{R_{L_1} (R_s + R_{sh} \parallel R_{ideal_1})}} \quad (B.8)$$

Έτσι, η σχετική απόκλιση του MPP₁ από το MPP ποσοτικοποιείται μόνο με όρους αντιστάσεων R_s , R_{sh} και φορτίων R_{L_1} , R_{ideal_1} , εκτός από τη βοηθητική παράμετρο $w = W\{I_{ph}e/I_s\}$ που τυπικά κυμαίνεται σε περιορισμένο εύρος, μεταξύ 20 και 25. Για να υπολογισθεί η εν λόγω απόκλιση με γενικό τρόπο, οι αντιστάσεις R_s και R_{sh} μπορούν να κανονικοποιηθούν ως προς την ισοδύναμη αντίσταση του φορτίου R_L : $R_s = r_s \cdot R_L$ και $R_{sh} = r_{sh} \cdot R_L$. Τότε, η (B.8) γίνεται:

$$\frac{\Delta P}{P_{mpI}} = \frac{\left[(r_s + 1)r_{sh} + (r_s - 1)(2r_s + r_{sh} + 2) \right]^2}{(r_s + 1)r_{sh} + r_s(2r_s + r_{sh} + 2)} \quad (B.9)$$

$$\frac{2(w-1)(r_s + 1)(r_s + r_{sh} + 1)r_{sh}^2}{\left[(r_s + 1)r_{sh} + r_s(2r_s + r_{sh} + 2) \right]^2} + 4(2r_s + r_{sh} + 2)$$

Θεωρώντας ότι οι R_s και R_{sh} θα διαφέρουν *τουλάχιστον μία τάξη μεγέθους από το R_L* , ώστε να τροφοδοτείται με ισχύ το φορτίο σε λογικά πλαίσια, ένα ρεαλιστικό εύρος για τις τιμές των r_s και r_{sh} είναι $[0, 0.1]$ και $[10, \infty)$ αντίστοιχα. Υπολογίζοντας τη (B.9) σε αυτές τις τιμές, η ποσοστιαία απόκλιση του MPP_I από το MPP δεν ξεπερνά ποτέ το 0.1%. Το αποτέλεσμα αυτό δεν αλλάζει ουσιαστικά με τη διακύμανση του όρου w ή με ευρύτερα διαστήματα τιμών r_s και r_{sh} , αρκεί η R_s να παραμένει τουλάχιστον 100 φορές μικρότερη από την R_{sh} .

Συνεπώς, η ισοδυναμία των σημείων MPP_I και MPP αποδεικνύεται αληθής με αμελητέο σφάλμα, και άρα οι προτεινόμενες αναλυτικές σχέσεις για την εκτίμηση του MPP που δίνονται στην παράγραφο 2.2.3 μπορούν να εφαρμόζονται αξιόπιστα για οποιαδήποτε ΦΒ σύστημα που λειτουργεί σε ομοιόμορφες συνθήκες.

B.2 Μαθηματικοί Υπολογισμοί της Παραγράφου 2.3.4

Στο ακόλουθο κείμενο, δίνονται λεπτομέρειες υπολογισμών και μαθηματικών διαδικασιών που πλαισιώνουν την παράγραφο 2.3.4. Περιγράφονται αναλυτικά τα βήματα εξαγωγής της (2.32) από την (2.31), καθώς επίσης παρατίθενται οι λεπτομέρειες υπολογισμού της τυπική τιμής $f(\Delta T=0)$ σε ονομαστική θερμοκρασία. Το ακόλουθο υλικό έχει δημοσιευθεί στην [117].

B.2.1 Εξαγωγή της (2.32) από την (2.31)

Για να απλοποιηθεί η (2.31), χρησιμοποιούνται οι δύο ακόλουθες εξισώσεις:

$$I_{ph0} = I_{s0} e^{\frac{V_{oc0}}{a_0}} \quad (B.10)$$

$$KT = \frac{\Delta T}{T_0} + 1 \quad (B.11)$$

Η (B.10) αντιστοιχεί στην (2.6) για STC συνθήκες και η (B.11) είναι αναδιατύπωση του λόγου KT συναρτήσει της θερμοκρασιακής διαφοράς ΔT . Αντικατάσταση των παραπάνω εξισώσεων στην (2.31) οδηγεί στην:

$$(1 + a_{isc} \Delta T) I_{s0} e^{\frac{V_{oc0}}{a_0}} = I_{s0} \left(\frac{\Delta T}{T_0} + 1 \right)^3 e^{47.1 \frac{\Delta T}{\Delta T + T_0}} e^{\frac{(1 + \beta_{voc} \Delta T) V_{oc0}}{a_0 (\Delta T / T_0 + 1)}} \quad (B.12)$$

Στη συνέχεια, απαλείφεται η παράμετρος I_{s0} και από τα δύο μέρη της εξίσωσης και γίνεται αναδιάταξη όρων ώστε να επιλυθεί ως προς τον λόγο a_0/V_{oc0} :

$$\frac{a_0}{V_{oc0}} = \frac{1 - T_0 \beta_{voc}}{47.1 + \left(1 + \frac{T_0}{\Delta T}\right) \ln \left[\frac{(1 + \Delta T/T_0)^3}{1 + a_{isc} \Delta T} \right]} \quad (\text{B.13})$$

Στην (B.13), η επίδραση της θερμοκρασίας έχει περιοριστεί μόνο στον δεύτερο όρο του παρονομαστή, τον οποίο συμβολίζουμε για διευκόλυνση με $f(\Delta T)$. Είναι εμφανές ότι η εν λόγω εξίσωση αντιστοιχεί την (2.32).

B.2.2 Υπολογισμός της τυπικής τιμής $f(\Delta T=0)$

Όπως συζητείται στην παράγραφο 2.3.4, ο όρος $f(\Delta T)$ κυμαίνεται σε πολύ περιορισμένο εύρος τιμών σε ρεαλιστικές συνθήκες λειτουργίας, καταλήγοντας στο συμπέρασμα ότι μπορεί να αντιμετωπιστεί ως σταθερά. Για τον προσδιορισμό μιας κατάλληλης τυπικής τιμής, επιλέγεται η ονομαστική θερμοκρασία T_0 ως αντιπροσωπευτικότερη, δηλαδή: $f(\Delta T=0)$.

Βέβαια, από την (2.32) (ή την (B.13) παραπάνω ισοδύναμα) είναι προφανές ότι η τιμή του όρου $f(\Delta T)$ δεν ορίζεται για $\Delta T=0$. Επομένως, αντί αυτού υπολογίζεται το αντίστοιχο όριο, δεδομένου ότι η εν λόγω συνάρτηση είναι συνεχής:

$$\begin{aligned} \lim_{\Delta T \rightarrow 0} f(\Delta T) &= \lim_{\Delta T \rightarrow 0} \left[\left(1 + \frac{T_0}{\Delta T}\right) \ln \left(\frac{(1 + \Delta T/T_0)^3}{1 + a_{isc} \Delta T} \right) \right] = \lim_{\Delta T \rightarrow 0} \left[\ln \left(\frac{(1 + \Delta T/T_0)^3}{1 + a_{isc} \Delta T} \right)^{\left(1 + \frac{T_0}{\Delta T}\right)} \right] = \\ &= \lim_{\Delta T \rightarrow 0} \left[3 \ln (1 + \Delta T/T_0)^{\left(1 + \frac{T_0}{\Delta T}\right)} \right] - \lim_{\Delta T \rightarrow 0} \left[\ln (1 + a_{isc} \Delta T)^{\left(1 + \frac{T_0}{\Delta T}\right)} \right] = \\ &= 3 \ln \left[\lim_{\Delta T \rightarrow 0} \left((1 + \Delta T/T_0)^{\left(1 + \frac{T_0}{\Delta T}\right)} \right) \right] - \ln \left[\lim_{\Delta T \rightarrow 0} \left((1 + a_{isc} \Delta T)^{\left(1 + \frac{T_0}{\Delta T}\right)} \right) \right] = \\ &= 3 \ln \left[\lim_{\Delta T \rightarrow 0} (1 + \Delta T/T_0)^1 \right] + 3 \ln \left[\lim_{\Delta T \rightarrow 0} (1 + \Delta T/T_0)^{T_0/\Delta T} \right] \\ &\quad - \ln \left[\lim_{\Delta T \rightarrow 0} (1 + a_{isc} \Delta T)^1 \right] - \ln \left[\lim_{\Delta T \rightarrow 0} (1 + a_{isc} \Delta T)^{T_0/\Delta T} \right] \end{aligned} \quad (\text{B.14})$$

Τα διαγεγραμμένα όρια παραπάνω μηδενίζονται, ενώ λαμβάνοντας υπόψιν τον ορισμό της εκθετικής συνάρτησης:

$$e^x = \lim_{n \rightarrow \infty} \left(1 + \frac{x}{n} \right)^n = \lim_{n \rightarrow 0} (1 + xn)^{\frac{1}{n}} \quad (\text{B.15})$$

οι δύο τελευταίοι όροι της (B.14) εκφράζονται ως:

$$\begin{aligned} 3 \ln \left[\lim_{\Delta T \rightarrow 0} (1 + \Delta T/T_0)^{T_0/\Delta T} \right] &= 3 \lim_{n \rightarrow 0} (1 + n)^{\frac{1}{n}} = 3 \ln(e^1) = 3 \\ \ln \left[\lim_{\Delta T \rightarrow 0} (1 + a_{isc} \Delta T)^{T_0/\Delta T} \right] &= \lim_{n \rightarrow 0} (1 + a_{isc} T_0 n)^{\frac{1}{n}} = \ln(e^{a_{isc} T_0}) = a_{isc} T_0 \end{aligned} \quad (\text{B.16})$$

Τελικά, αντικαθιστώντας τις σχέσεις της (B.16) στην (B.14), το $f(\Delta T=0)$ υπολογίζεται ως:

$$f(\Delta T = 0) \equiv \lim_{\Delta T \rightarrow 0} f(\Delta T) = 3 - a_{Isc} T_0 \quad (B.17)$$

Έτσι, τοποθετώντας την τιμή του $f(\Delta T=0)$ στην (2.32) προκύπτει η πολύ απλή εξίσωση (2.33), στην οποία έχει αντικατασταθεί η τιμή της ονομαστικής θερμοκρασίας T_0 για σαφήνεια.

B.3 Εξαγωγή Σχέσεων της Ενότητας 2.4

Στη συνέχεια, δίνονται τα μαθηματικά βήματα που ακολουθούνται για τη διατύπωση των εκφράσεων ανάγωγης των I_{sc} , V_{oc} , I_{mp} και V_{mp} στις εκάστοτε συνθήκες ακτινοβολίας και θερμοκρασίας της ενότητας 2.4. Οι εξισώσεις που χρησιμοποιούνται κατά τη διαδικασία είναι από το Κεφάλαιο 2.

B.3.1 Εξαγωγή της σχέσης για την τάση ανοιχτοκύκλωσης V_{oc}

Η εξίσωση για την τάση ανοιχτοκύκλωσης προκύπτει χρησιμοποιώντας ως βάση την (2.6) που δίνει την V_{oc} συναρτήσει των τριών παραμέτρων I_{ph} , I_s και a , αφού αυτές αναχθούν στις εκάστοτε συνθήκες G και T σύμφωνα με τις (2.26)-(2.28):

$$V_{oc} = a \ln \left(\frac{I_{ph}}{I_s} \right) = a_0 K T \ln(G) + a_0 K T \ln \left(\frac{I_{ph0} (1 + \alpha_{Isc} \Delta T)}{I_{s0} K T^3 e^{47.1 \frac{\Delta T}{T}}} \right) \quad (B.18)$$

Ο πρώτος όρος στην (B.18) εκφράζει την επίδραση της ακτινοβολίας G , ενώ ο δεύτερος όρος αντιστοιχεί στην τιμή της τάσης ανοιχτοκύκλωσης $V_{oc}(G_0, T)$ για *ονομαστική ακτινοβολία αλλά αυθαίρετη θερμοκρασία T* . Όμως, σύμφωνα με τον θερμοκρασιακό συντελεστή $\beta_{V_{oc}}$ ισχύει ότι:

$$V_{oc}(G_0, T) = V_{oc0} (1 + \beta_{V_{oc}} \Delta T) \quad (B.19)$$

Οπότε, η τελική σχέση για την τάση ανοιχτοκύκλωσης προκύπτει αντικαθιστώντας την (B.19) στην (B.18), και αναλύοντας την παράμετρο $a_0 = \delta_0 V_{oc0}$ σύμφωνα με την (2.34):

$$V_{oc} = V_{oc0} (1 + \delta_0 K T \ln G + \beta_{V_{oc}} \Delta T) \quad (B.20)$$

Η (B.20) αντιστοιχεί στην (2.42) της ενότητας 2.4.

B.3.2 Εξαγωγή της σχέσης για το MPP ρεύμα I_{mp}

Η επίδραση της ακτινοβολίας και θερμοκρασίας μελετάται αρχικά για το *ιδανικό* μοντέλο μίας διόδου. Γράφοντας την (2.17) αγνοώντας την εγκάρσια αντίσταση R_{sh} και λαμβάνοντας υπόψιν την (2.26) για το I_{ph} , προκύπτει:

$$I_{mp} = G I_{ph0} (1 + \alpha_{Isc} \Delta T) \left(1 - \frac{1}{w} \right) \quad (B.21)$$

όπου ο βοηθητικός όρος $w = W \{ I_{ph} e / I_s \} = W \{ e^{V_{oc}/a+1} \} = W \{ e^{I/\delta+1} \}$ αφορά τις εκάστοτε συνθήκες G

και T . Για να συνδεθεί ο w με την ονομαστική του τιμή w_0 σε STC (2.39), χρησιμοποιούνται οι (2.42) για την V_{oc} , η (2.34) και (2.28) για τον a , καταλήγοντας στην (B.22) μετά από χειρισμούς:

$$w = W \left\{ e^{\frac{V_{oc}+1}{a}} \right\} = W \left\{ e^{\frac{1}{\delta_0} + \frac{\beta_{Voc}-1/T_0}{\delta_0 K T} \Delta T + \ln G + 1} \right\} \quad (B.22)$$

Όμως, το όρισμα της συνάρτησης Lambert W στην ανωτέρω σχέση λαμβάνει μεγάλες τιμές, καθώς $V_{oc}/a \gg 1$ στον εκθέτη του όρου, επιτρέποντας την απλοποίηση της (B.22) σύμφωνα με

την (A.16) που δίνεται στο ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α, θέτοντας $a = e^{\frac{1}{\delta_0} + 1}$ και $b = e^{\frac{\beta_{Voc}-1/T_0}{\delta_0 K T} \Delta T + \ln G}$:

$$w = W \left\{ e^{1/\delta_0 + 1} \right\} + \frac{\beta_{Voc}-1/T_0}{\delta_0 K T} \Delta T + \ln G - \ln \left(1 - \frac{\frac{\beta_{Voc}-1/T_0}{\delta_0 K T} \Delta T + \ln G}{W \left\{ e^{1/\delta_0 + 1} \right\}} \right) \quad (B.23)$$

Βέβαια, ο τελευταίος όρος της (B.23) λαμβάνει μηδενικές τιμές, καταλήγοντας τελικά στην:

$$w = w_0 + \frac{\beta_{Voc}-1/T_0}{\delta_0 K T} \Delta T + \ln G \quad (B.24)$$

Έτσι, αναλύοντας τον όρο w της (B.21) από την (B.24), προκύπτει:

$$I_{mp} = G(1 + \alpha_{Isc} \Delta T) I_{ph0} \left(1 - \frac{1}{w_0} \right) \frac{1 - \frac{1}{w_0 + \frac{\beta_{Voc}-1/T_0}{\delta_0 K T} \Delta T + \ln G}}{1 - \frac{1}{w_0}} \quad (B.25)$$

Όμως, ο όρος $I_{ph0}(1-1/w_0)$ αντιστοιχεί στο ονομαστικό MPP ρεύμα I_{mp0} , καταλήγοντας τελικά στην ακόλουθη σχέση μετά από μαθηματικούς χειρισμούς:

$$I_{mp} = G I_{mp0} \left[1 + \left(\alpha_{Isc} + \frac{\beta_{Voc}-1/T_0}{w_0-1} \frac{1 + \alpha_{Isc} \Delta T}{1 + \beta_{Voc} \Delta T} \right) \Delta T \right] \quad (B.26)$$

Ο όρος εντός της παρένθεσης αντιστοιχεί στον συντελεστή της ΔT , ο οποίος όμως είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας και όχι σταθερά. Έτσι, ορίζεται ο θερμοκρασιακός συντελεστής του MPP ρεύματος α_{Imp} ως:

$$\alpha_{Imp} = \alpha_{Isc} + \frac{\beta_{Voc}-1/T_0}{w_0-1} \frac{1 + \alpha_{Isc} \Delta T}{1 + \beta_{Voc} \Delta T} \quad (B.27)$$

με τη βοήθεια του οποίου εκφράζεται απλούστερα η (B.26) ως εξής:

$$I_{mp} = G I_{mp0} (1 + \alpha_{Imp} \Delta T) \quad (B.28)$$

Παρόλο που η (B.28) έχει παραχθεί για το ιδανικό μοντέλο, προκύπτει ότι περιγράφει πολύ καλά και το πλήρες μοντέλο των πέντε παραμέτρων, καθώς η επίδραση της ακτινοβολίας και θερμοκρασίας στις δύο αντιστάσεις είναι δευτερεύουσας σημασίας εν συγκρίσει με τις άλλες τρεις παραμέτρους. Οι (B.28) και (B.27) αντιστοιχούν στις (2.44) και (2.45) της ενότητας 2.4.

B.3.3 Εξαγωγή της σχέσης για την MPP τάση V_{mp}

Αν η (2.18) διατυπωθεί ανάγοντας τις παραμέτρους του μοντέλου στις εκάστοτε G και T βάσει των (2.26)-(2.28) και χρησιμοποιώντας την προαναφερθείσα (B.28) για το I_{mp} , τότε:

$$V_{mp} = a_0 K T (w - 1) - G R_{s0} I_{mp0} (1 + \alpha_{I_{mp}} \Delta T) \quad (B.29)$$

Στην (B.29), αν η παράμετρος a_0 γραφεί σύμφωνα με την (2.34), η w αναλυθεί όπως στην προηγούμενη παράγραφο βάσει της (B.24), ο θερμοκρασιακός συντελεστής $\alpha_{I_{mp}}$ θεωρηθεί μηδενικός για απλότητα, και ληφθεί υπόψιν ότι η ονομαστική τάση $V_{mp0} = a_0 (w_0 - 1) - R_{s0} I_{mp0}$, προκύπτει ότι:

$$V_{mp} = G V_{mp0} + \left[\delta_0 (w_0 - 1)(1 - G) + \delta_0 K T \ln G + \delta_0 \left(w_0 - 1 - \frac{1}{\delta_0} \right) \frac{\Delta T}{T_0} + \beta_{V_{oc}} \Delta T \right] V_{oc0} \quad (B.30)$$

Όμως, από τον ορισμό της συνάρτησης Lambert W (A.6) η ποσότητα $(w_0 - 1 - 1/\delta_0)$ ισούται με $-\ln w_0$ που λαμβάνει χαμηλές τιμές, και συνεπώς μπορεί να αγνοηθεί. Τελικά, η (B.30) λαμβάνει την τελική της μορφή (B.31) που αντιστοιχεί στην (2.46) της ενότητας 2.4.

$$V_{mp} = G V_{mp0} + \left[(1 - G) \delta_0 (w_0 - 1) + \delta_0 K T \ln G + \beta_{V_{oc}} \Delta T \right] V_{oc0} \quad (B.31)$$

B.4 Βήματα Εξαγωγής Σχέσεων της Παραγράφου 3.4.2

Η εξαγωγή των βελτιωμένων MPP σχέσεων της παραγράφου 3.4.2 βασίζονται στις αναλυτικές εξισώσεις (3.29)-(3.33) του επαυξημένου ΦΒ μοντέλου μίας διόδου της παραγράφου 3.4.1. Οι τελευταίες συνδέουν με θεωρητικά έγκυρο τρόπο το MPP με τις πέντε παραμέτρους του μοντέλου και την ισοδύναμη πηγή τάσης V_c και R_c . Στη συνέχεια, εξηγείται πώς εφαρμόζονται οι αναλυτικές σχέσεις εξαγωγής (2.34)-(2.38) και αναγωγής (2.26)-(2.30) των πέντε παραμέτρων της ενότητας 2.3, ώστε να προκύψουν οι (3.34)-(3.35). Αρχικά, θεωρείται ονομαστική θερμοκρασία για απλότητα, περιορισμός που αίρεται στο τέλος. Η ακόλουθη ανάλυση έχει παρουσιασθεί στην [232].

B.4.1 Τάση V_i των στοιχειοσειρών της ομάδας i ($i < j$)

Όπως εξηγείται στην παράγραφο 3.4.1, η εφαρμογή του επαυξημένου μοντέλου μίας διόδου για το MPP_j, απαιτεί τον προσδιορισμό της ισοδύναμης πηγής τάσης V_c και αντίστασης R_c μέσω των σχέσεων (3.30)-(3.33). Για να γίνει αυτό, χρειάζονται πρώτα να υπολογιστούν το κοινό ρεύμα I_j και η τάση V_i των στοιχειοσειρών κάθε ομάδας i ($i < j$) (Σχ. 3.29). Στη συνέχεια,

περιγράφονται αναλυτικά τα βήματα για την εξαγωγή αναλυτικής σχέσης για την V_i .

Σύμφωνα με τη θεμελιώδη εξίσωση του μοντέλου των πέντε παραμέτρων (2.3), η τάση V_i στο ρεύμα I_j δίνεται από την ακόλουθη:

$$V_i = R_{sh}(I_{ph} + I'_s) - (R_s + R_{sh})I_j - aW \left\{ \frac{I_s R_{sh}}{a} e^{\frac{R_{sh}(I_{ph} + I'_s - I_j)}{a}} \right\} \quad (\text{B.32})$$

Στην (B.32), οι πέντε παράμετροι I_{ph} , I_s , a , R_s και R_{sh} αντιστοιχούν στη στοιχειοσειρά της ομάδας i , ενώ αμελείται η παράμετρος I_s όταν προστίθεται στο πολύ μεγαλύτερο I_{ph} . Εφαρμόζοντας τις σχέσεις αναγωγής των πέντε παραμέτρων (2.26)-(2.30) και προσεγγίζοντας το MPP ρεύμα I_j απλουστευτικά ως $G_j I_{mp0}$, προκύπτει:

$$V_i = R_{sh0} \left(I_{ph0} - \frac{G_j}{G_i} I_{mp0} \right) - R_{s0} G_j I_{mp0} - a_0 W \left\{ \frac{I_{s0} R_{sh0}}{G_i a_0} e^{\frac{R_{sh0} \left(I_{ph0} - \frac{G_j}{G_i} I_{mp0} \right)}{a_0}} \right\} \quad (\text{B.33})$$

Στη συνέχεια, ο όρος Lambert W αναλύεται με την προσεγγιστική σχέση (A.16) με ορίσματα:

$$a = \frac{R_{sh0} I_{ph0}}{a_0} e^{\frac{R_{sh0} I_{ph0}}{a_0}} \quad \text{και} \quad b = \frac{I_{s0}}{G_i I_{ph0}} e^{-\frac{G_j R_{sh0} I_{mp0}}{G_i a_0}}, \quad \text{καταλήγοντας στην:}$$

$$w = W \left\{ \frac{R_{sh0} I_{ph0}}{a_0} e^{\frac{R_{sh0} I_{ph0}}{a_0}} \right\} + \ln \left(\frac{I_{s0}}{G_i I_{ph0}} e^{-\frac{G_j R_{sh0} I_{mp0}}{G_i a_0}} \right) - \ln \left[1 + \frac{\ln \left(\frac{I_{s0}}{G_i I_{ph0}} e^{-\frac{G_j R_{sh0} I_{mp0}}{G_i a_0}} \right)}{W \left\{ \frac{R_{sh0} I_{ph0}}{a_0} e^{\frac{R_{sh0} I_{ph0}}{a_0}} \right\}} \right] \quad (\text{B.34})$$

Εντός της (B.34), ο όρος Lambert W ισοδυναμεί με $R_{sh0} I_{ph0} / a_0$ από την ιδιότητα της συνάρτησης (A.7), ενώ αναλύοντας το λογαριθμικό όρο προκύπτει τελικά μετά από χειρισμούς:

$$w = \frac{R_{sh0}}{a_0} \left(I_{ph0} - \frac{G_j}{G_i} I_{mp0} \right) + \ln \left(\frac{I_{s0}}{I_{ph0}} \right) - \ln G_i - \ln \left[\frac{\ln \left(\frac{I_{s0}}{I_{ph0}} \right) - \ln G_i + \frac{R_{sh0}}{a_0} \left(I_{ph0} - \frac{G_j}{G_i} I_{mp0} \right)}{\frac{R_{sh0} I_{ph0}}{a_0}} \right] \quad (\text{B.35})$$

Έτσι, αντικαθιστώντας την (B.35) στην (B.33), η τάση V_i γράφεται ως εξής:

$$V_i = -R_{s0}G_jI_{mp0} + a_0 \ln\left(\frac{I_{ph0}}{I_{s0}}\right) + a_0 \ln G_i + a_0 \ln \left[\frac{-a_0 \ln\left(\frac{I_{ph0}}{I_{s0}}\right) - a_0 \ln G_i + R_{sh0}\left(I_{ph0} - \frac{G_j}{G_i}I_{mp0}\right)}{R_{sh0}I_{ph0}} \right] \quad (\text{B.36})$$

Η (B.36) έχει πλέον απλούστερη δομή, χωρίς όρους Lambert W , αλλά είναι ακόμη έκφραση κυκλωματικών στοιχείων. Για να εκφραστεί συναρτήσει μακροσκοπικών παραμέτρων, αρχικά παρατηρείται ότι η ποσότητα $a_0 \ln(I_{ph0}/I_{s0})$ αντιστοιχεί στην τάση ανοιχτοκύκλωσης V_{oc0} από την (2.6). Στη συνέχεια, εφαρμόζονται οι σχέσεις (2.34)-(2.37) που συνδέουν τις τέσσερις παραμέτρους $a_0, R_{s0}, R_{sh0}, I_{ph0}$ με τα δεδομένα του τεχνικού φυλλαδίου (η (2.37) απλοποιείται στην $I_{ph} = I_{sc}$), καταλήγοντας στην:

$$V_i = G_j V_{mp0} + \left[1 - \delta_0 \left((w_0 - 1)G_j - \ln \left[\frac{G_i I_{sc0} - G_j I_{mp0}}{I_{sc0}} - \frac{G_i \left[I_{sc0} \left(1 - \frac{1}{w_0} \right) - I_{mp0} \right]}{\delta_0 (w_0 - 1) I_{sc0}} \right] (1 + \delta_0 \ln G_i) \right) \right] V_{oc0} \quad (\text{B.37})$$

Η (B.37) είναι πλέον έκφραση μόνο δεδομένων του τεχνικού φυλλαδίου και των σταθερών δ_0 και w_0 , αλλά είναι ακόμη αρκετά περίπλοκη σχέση. Μπορεί να απλοποιηθεί περαιτέρω αν θεωρηθεί ότι το MPP ρεύμα I_{mp0} ισούται με $I_{sc0}(1-1/w_0)$ από την (2.14) του ιδανικού μοντέλου μίας διόδου. Τότε, ο διαγεγραμμένος όρος μηδενίζεται και τελικά προκύπτει:

$$V_i = G_j V_{mp0} + \left(1 - \delta_0 \left[(w_0 - 1)G_j - \ln \left[w_0 (G_i - G_j) + G_j \right] + \ln w_0 \right] \right) V_{oc0} \quad (\text{B.38})$$

Η (B.38) μπορεί να εκφραστεί ισοδύναμα μέσω της MPP τάσης $V_{mp}^{G_j}$ από την (2.46) και χρησιμοποιώντας την (A.6) στους μαθηματικούς χειρισμούς για την παράμετρο w :

$$V_i = V_{mp}^{G_j} + \ln \left[1 + w_0 \left(\frac{G_i}{G_j} - 1 \right) \right] \delta_0 V_{oc0} \quad (\text{B.39})$$

B.4.2 Τάση V_{mpj} του MPP_j

Η πρώτη σχέση της (3.29) δίνει την τάση V_{mpj} συναρτήσει κυκλωματικών παραμέτρων σύμφωνα με το επαυξημένο μοντέλο της παραγράφου 3.4.1. Οι πέντε παράμετροι I_{ph}, I_s, a, R_s και R_{sh} αντιστοιχούν στην ομάδα j (σε όλη την ομάδα – όχι σε μία μόνο στοιχειοσειρά), και συνδέονται με τις παραμέτρους αναφοράς της στοιχειοσειράς $I_{ph0}, I_{s0}, a_0, R_{s0}$ και R_{sh0} μέσω των (2.4) και (2.26)-(2.30):

$$\begin{cases} I_{ph} = G_j I_{ph0} \\ I_s = I_{s0} \\ a = N_j a_0 \\ R_s = N_j R_{s0} \\ R_{sh} = N_j R_{sh0} / G_j \end{cases} \quad (\text{B.40})$$

Επίσης, η ισοδύναμη συνολική πηγή τάσης V_c και αντίσταση R_c του επαυξημένου μοντέλου γράφονται σύμφωνα με τις (3.32)-(3.33) ως εξής (εδώ οι όροι V_{eq-i} , R_{eq-i} αναφέρονται σε μία στοιχειοσειρά και όχι σε όλη την ομάδα):

$$V_c = \sum_{i=1}^{j-1} N_i V_{eq-i} - \sum_{i=j+1}^n N_i \Delta V_D \quad (\text{B.41})$$

$$R_c = \sum_{i=1}^{j-1} N_i R_{eq-i} \quad (\text{B.42})$$

Αντικαθιστώντας τις (B.40)-(B.42) στην (3.29), η V_{mpj} δίνεται από την:

$$\begin{aligned} V_{mpj} = & \left[\frac{N_j R_{s0} + \sum_{i=1}^{j-1} N_i R_{eq-i}}{N_j \frac{R_{sh0}}{G_j}} + 1 \right] N_j a_0 (w-1) - \left(N_j R_{s0} + \sum_{i=1}^{j-1} N_i R_{eq-i} \right) G_j I_{ph0} \left(1 - \frac{1}{w} \right) \\ & - \frac{N_j R_{s0} + \sum_{i=1}^{j-1} N_i R_{eq-i}}{N_j \frac{R_{sh0}}{G_j}} \left[\sum_{i=1}^{j-1} N_i V_{eq-i} - \sum_{i=j+1}^n N_i \Delta V_D \right] \end{aligned} \quad (\text{B.43})$$

όπου η βοηθητική παράμετρος w είναι:

$$w = W \left\{ \frac{G_j I_{ph0}}{I_{s0}} e^{1 + \frac{\sum_{i=1}^{j-1} N_i V_{eq-i} - \sum_{i=j+1}^n N_i \Delta V_D}{N_j a_0}} \right\} \quad (\text{B.44})$$

Για να απλοποιηθεί ο ανωτέρω όρος w , μπορεί να χρησιμοποιηθεί μία από τις προσεγγιστικές σχέσεις της συνάρτησης Lambert W (A.12) ή (A.16), με ορίσματα:

$$a = \frac{I_{ph0}}{I_{s0}} e^{1 + \frac{\sum_{i=1}^{j-1} N_i V_{eq-i}}{N_j a_0}} \quad \text{και} \quad b = G_j e^{\frac{-\sum_{i=j+1}^n N_i \Delta V_D}{N_j a_0}}, \quad \text{οδηγώντας στην:}$$

$$w = W \left\{ \frac{I_{ph0}}{I_{s0}} e^{1 + \frac{\sum_{i=1}^{j-1} N_i V_{eq-i}}{N_j a_0}} \right\} + \ln G_j - \frac{\sum_{i=j+1}^n N_i \Delta V_D}{N_j a_0} - \ln \left[1 + \frac{W \text{ ή } \ln \left\{ G_j e^{-\frac{\sum_{i=j+1}^n N_i \Delta V_D}{N_j a_0}} \right\}}{W \left\{ \frac{I_{ph0}}{I_{s0}} e^{1 + \frac{\sum_{i=1}^{j-1} N_i V_{eq-i}}{N_j a_0}} \right\}} \right] \quad (\text{B.45})$$

Στην (B.45), ο αριθμητής του κλάσματος εντός του λογαρίθμου είναι $W\{\cdot\}$ ή $\ln\{\cdot\}$ ανάλογα την προσεγγιστική σχέση ((A.12) ή (A.16)). Βέβαια, και στις δύο περιπτώσεις λαμβάνει πολύ μικρότερες τιμές από τον παρονομαστή, οπότε το εν λόγω κλάσμα μηδενίζεται απλοποιώντας την (B.45) ως:

$$w = W \left\{ \frac{I_{ph0}}{I_{s0}} e^{1 + \frac{\sum_{i=1}^{j-1} N_i V_{eq-i}}{N_j a_0}} \right\} + \ln G_j - \frac{\sum_{i=j+1}^n N_i \Delta V_D}{N_j a_0} \quad (\text{B.46})$$

Με παρόμοια λογική, ο όρος Lambert W στην (B.46) απλοποιείται μέσω της (A.16) με $a = \frac{I_{ph0}}{I_{s0}} e$ και $b = e^{\frac{\sum_{i=1}^{j-1} N_i V_{eq-i}}{N_j a_0}}$, καθώς τα δύο ορίσματα λαμβάνουν παρόμοια μεγάλες τιμές:

$$w = W \left\{ \frac{I_{ph0}}{I_{s0}} e \right\} + \frac{\sum_{i=1}^{j-1} N_i V_{eq-i}}{N_j a_0} - \ln \left[1 + \frac{\frac{\sum_{i=1}^{j-1} N_i V_{eq-i}}{N_j a_0}}{W \left\{ \frac{I_{ph0}}{I_{s0}} e \right\}} \right] + \ln G_j - \frac{\sum_{i=j+1}^n N_i \Delta V_D}{N_j a_0} \quad (\text{B.47})$$

Λαμβάνοντας υπόψιν ότι η ποσότητα $W\{I_{ph0}e/I_{s0}\}$ αντιστοιχεί στην ονομαστική τιμή w_0 από την (2.39) και αντικαθιστώντας στον λογάριθμο την a_0 με $\delta_0 V_{oc0}$ από την (2.34), η (B.47) γράφεται ως εξής:

$$w = w_0 + \frac{\sum_{i=1}^{j-1} N_i V_{eq-i}}{N_j a_0} - \ln \left[1 + \sum_{i=1}^{j-1} \frac{N_i}{N_j} \frac{V_{eq-i}}{\delta_0 w_0 V_{oc0}} \right] + \ln G_j - \frac{\sum_{i=j+1}^n N_i \Delta V_D}{N_j a_0} \quad (\text{B.48})$$

Στην (B.48) το διαγεγραμμένο κλάσμα είναι προσεγγιστικά μονάδα, καθώς ο παρονομαστής του $\delta_0 w_0 V_{oc0}$ είναι $\sim 0.91 V_{oc0}$ (τυπικά $\delta_0 = 0.04$, $w_0 = 22.87$ και $\delta_0 w_0 = 0.91$) και ο αριθμητής του V_{eq-i} λαμβάνει τιμές μεταξύ V_{oc0} και V_{mp0} , ήτοι περίπου από $0.8 V_{oc0}$ έως V_{oc0} . Μετά από χειρισμούς προκύπτει:

$$w = w_0 + \frac{\sum_{i=1}^{j-1} N_i V_{eq-i}}{N_j a_0} - \frac{\sum_{i=j+1}^n N_i \Delta V_D}{N_j a_0} + \ln \left[\frac{G_j N_j}{\sum_{i=1}^j N_i} \right] \quad (\text{B.49})$$

Έτσι, αναλύοντας τον πρώτο όρο w στην (B.43) με την (B.49) (η δεύτερη εμφάνιση του w δεν έχει ισχυρή συμμετοχή στη σχέση και θεωρείται $w = w_0$ για απλότητα):

$$V_{mpj} = \left[\frac{N_j R_{s0} + \sum_{i=1}^{j-1} N_i R_{eq-i}}{N_j \frac{R_{sh0}}{G_j}} + 1 \right] N_j a_0 \left(w_0 + \ln \left[\frac{G_j N_j}{\sum_{i=1}^j N_i} \right] - 1 \right) - \left(N_j R_{s0} + \sum_{i=1}^{j-1} N_i R_{eq-i} \right) G_j I_{ph0} \left(1 - \frac{1}{w_0} \right) + \sum_{i=1}^{j-1} N_i V_{eq-i} - \sum_{i=j+1}^n N_i \Delta V_D \quad (\text{B.50})$$

Στη συνέχεια, εφαρμόζονται οι (2.16)-(2.17) για να εκφραστούν οι όροι V_{mp0} και I_{mp0} , οδηγώντας μετά από μαθηματικούς χειρισμούς στην:

$$V_{mpj} = N_j \left[V_{mp0} + R_{s0} (1 - G_j) I_{mp0} \right] + \sum_{i=1}^{j-1} N_i \left[V_{eq-i} - R_{eq-i} G_j I_{mp0} \right] - \sum_{i=j+1}^n N_i \Delta V_D + \left[\frac{N_j R_{s0} + \sum_{i=1}^{j-1} N_i R_{eq-i}}{N_j R_{sh0}/G_j} + 1 \right] N_j a_0 \ln \left[\frac{G_j N_j}{\sum_{i=1}^j N_i} \right] \quad (\text{B.51})$$

Βέβαια, ο διαγεγραμμένος όρος στην (B.51) μπορεί να αμεληθεί, καθώς οι σειριακές αντιστάσεις στον αριθμητή είναι πολύ μικρότερου μεγέθους από την εγκάρσια αντίσταση στον παρονομαστή. Η ποσότητα $V_{eq-i} - R_{eq-i} G_j I_{mp0}$ αντιστοιχεί στην τάση V_i από την (3.30) για ρεύμα $I_j = G_j I_{mp0}$, ενώ οι παράμετροι a_0 και R_{s0} γράφονται σύμφωνα με τις (2.34)-(2.35), τροποποιώντας την (B.51) ως εξής:

$$V_{mpj} = N_j \left(G_j V_{mp0} + \delta_0 V_{oc0} \left[(w_0 - 1)(1 - G_j) + \ln \frac{G_j N_j}{\sum_{i=1}^j N_i} \right] \right) + \sum_{i=1}^{j-1} N_i V_i - \sum_{i=j+1}^n N_i \Delta V_D \quad (\text{B.52})$$

Τελικά, αν εφαρμοστεί η (B.39) της προηγούμενης παραγράφου για την V_i , και η (2.46) της ενότητας 2.4 για να εμφανιστεί η τάση $V_{mp}^{G_j}$ (ονομαστική θερμοκρασία), προκύπτει η:

$$V_{mpj} = \sum_{i=1}^j N_i \left(V_{mp}^{G_j} + \delta_0 V_{oc0} \ln \left[1 + w_0 \left(\frac{G_i}{G_j} - 1 \right) \right] \right) - \sum_{i=j+1}^n N_i \Delta V_D + \delta_0 V_{oc0} N_j \ln \frac{N_j}{\sum_{i=1}^j N_i} \quad (\text{B.53})$$

B.4.3 Ρεύμα I_{mpj} του MPP_j

Παρομοίως με την τάση V_{mpj} της προηγούμενης παραγράφου, το ρεύμα I_{mpj} προσδιορίζεται βάσει του επαυξημένου μοντέλου σύμφωνα με τη δεύτερη εξίσωση της (3.29). Αντικαθιστώντας τις πέντε παραμέτρους I_{ph} , I_s , a , R_s και R_{sh} από τις (B.40) και γράφοντας την ισοδύναμη πηγή τάσης V_c σύμφωνα με την (B.41), προκύπτει ότι:

$$I_{mpj} = G_j I_{ph0} \left(1 - \frac{1}{w} \right) - \frac{N_j a_0 (w-1) - \left[\sum_{i=1}^{j-1} N_i V_{eq-i} - \sum_{i=j+1}^n N_i \Delta V_D \right]}{N_j \frac{R_{sh0}}{G_j}} \quad (B.54)$$

όπου η παράμετρος w είναι η ίδια με τη σχέση για την V_{mpj} , και δίνεται από την (B.44) η οποία απλοποιείται τελικά στην (B.49). Αν χρησιμοποιηθεί η τελευταία σχέση αγνοώντας τον τελευταίο όρο της που δεν έχει σημαντική βαρύτητα, το ρεύμα I_{mpj} γράφεται ως:

$$I_{mpj} = G_j \left[I_{ph0} \left(1 - \frac{1}{w_0 + \frac{\sum_{i=1}^{j-1} N_i V_{eq-i}}{N_j a_0} - \frac{\sum_{i=j+1}^n N_i \Delta V_D}{N_j a_0}} \right) - \frac{\alpha_0 (w_0 - 1)}{R_{sh0}} \right] \quad (B.55)$$

Στη συνέχεια, εφαρμόζεται η (2.17) για να εμφανιστεί το ονομαστικό MPP ρεύμα I_{mp0} , και οι παράμετροι a_0 , I_{ph0} αναλύονται σύμφωνα με τις (2.34), (2.37) (η (2.37) απλοποιείται στην $I_{ph} = I_{sc}$), καταλήγοντας στην:

$$I_{mpj} = G_j I_{mp0} + G_j I_{sc0} \left(\frac{1}{w_0} - \frac{1}{w_0 + \frac{1}{\delta_0} \sum_{i=1}^{j-1} \left[\frac{N_i}{N_j} \frac{V_{eq-i}}{V_{oc0}} \right] - \frac{1}{\delta_0} \sum_{i=j+1}^n \left[\frac{N_i}{N_j} \frac{\Delta V_D}{V_{oc0}} \right]} \right) \quad (B.56)$$

Ο διαγεγραμμένος όρος στην (B.56) θεωρείται ίσος με τη μονάδα, διότι όπως εξηγείται και στην προηγούμενη παράγραφο, η ισοδύναμη τάση V_{eq-i} λαμβάνει τιμές τυπικά μεταξύ $0.8V_{oc0}$ και V_{oc0} . Τέλος, αν χρησιμοποιηθούν οι (2.49) ώστε να εμφανιστούν τα ρεύματα $I_{mp}^{G_j}$ και $I_{sc}^{G_j}$ (ονομαστική θερμοκρασία), η (B.56) γράφεται ως εξής:

$$I_{mpj} = I_{mp}^{G_j} + I_{sc}^{G_j} \left(\frac{1}{w_0} - \frac{1}{w_0 + \frac{1}{\delta_0} \sum_{i=1}^{j-1} \frac{N_i}{N_j} - \frac{\Delta V_D}{\delta_0 V_{oc0}} - \frac{\sum_{i=j+1}^n N_i}{N_j}} \right) \quad (B.57)$$

B.4.4 Εισαγωγή του θερμοκρασιακού παράγοντα

Η μέχρι τώρα ανάλυση της παρούσας ενότητας έχει θεωρήσει ονομαστική θερμοκρασία, καταλήγοντας στις σχέσεις (B.53) και (B.57) για την τάση και ρεύμα στο MPP_j. Η εισαγωγή του θερμοκρασιακού παράγοντα είναι απλή διαδικασία, λαμβάνοντας υπόψιν τη μεταβολή των όρων των ανωτέρω σχέσεων με τη θερμοκρασία. Συγκεκριμένα, τα μεγέθη $V_{mp}^{G_j}$, $I_{mp}^{G_j}$ και $I_{sc}^{G_j}$ γράφονται στη γενική περίπτωση σύμφωνα με τις πλήρεις σχέσεις της (2.49), ενώ ο όρος $\delta_0 V_{oc0}$ στην (B.53) που αντιστοιχεί στην παράμετρο a_0 (2.34) ανάγεται βάσει της (2.28). Οι τελικές εκφράσεις για την V_{mpj} και το I_{mpj} που διαμορφώνονται είναι:

$$V_{mpj} = \sum_{i=1}^j N_i \left(V_{mp}^{G_j, T_i} + \delta_0 V_{oc0} \frac{T_i}{T_0} \ln \left[1 + w_0 \left(\frac{G_i}{G_j} - 1 \right) \right] \right) - \sum_{i=j+1}^n N_i \Delta V_D + \delta_0 V_{oc0} N_j \frac{T_j}{T_0} \ln \frac{N_j}{\sum_{i=1}^j N_i} \quad (\text{B.58})$$

$$I_{mpj} = I_{mp}^{G_j, T_j} + I_{sc}^{G_j, T_j} \left(\frac{1}{w_0} - \frac{1}{w_0 + \frac{1}{\delta_0} \frac{\sum_{i=1}^{j-1} N_i}{N_j} - \frac{\Delta V_D}{\delta_0 V_{oc0}} \frac{\sum_{i=j+1}^n N_i}{N_j}} \right) \quad (\text{B.59})$$

Οι (3.34)-(3.35) αντιστοιχούν στις (3.34)-(3.35) της παραγράφου 3.4.2.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ

Μαθηματικές Εξισώσεις και Σχέσεις Συγκεντρωτικά

Στο παρόν παράρτημα, παρατίθενται συγκεντρωτικά οι κυριότερες εξισώσεις που πλαισιώνουν τη θεωρία των προηγούμενων κεφαλαίων, για ευκολία χρήσης.

Γ.1 Μαθηματικές Σχέσεις για Ομοιόμορφες Συνθήκες

Ακολούθως παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι σημαντικότερες εξισώσεις που αφορούν τη λειτουργία ενός ΦΒ συστήματος σε ομοιόμορφες συνθήκες, όπως δόθηκαν στο Κεφάλαιο 2.

Γ.1.1 Θεμελιώδης εξίσωση ρεύματος - τάσης

Συνηθισμένη πεπλεγμένη μορφή:

$$I = I_{ph} - I_s \left(e^{\frac{V+IR_s}{a}} - 1 \right) - \frac{V+IR_s}{R_{sh}} \quad (\Gamma.1)$$

Αναλυτική διατύπωση:

$$I = \frac{R_{sh}(I_{ph} + I_s) - V}{R_s + R_{sh}} - \frac{a}{R_s} W \left\{ \frac{R_s R_{sh} I_s}{a(R_s + R_{sh})} e^{\frac{R_s R_{sh}(I_{ph} + I_s) + R_{sh} V}{a(R_s + R_{sh})}} \right\} \quad (\Gamma.2)$$

$$V = R_{sh}(I_{ph} + I_s) - (R_s + R_{sh})I - aW \left\{ \frac{I_s R_{sh}}{a} e^{\frac{R_{sh}(I_{ph} + I_s) - I}{a}} \right\} \quad (\Gamma.3)$$

Γ.1.2 Σχέσεις SC, OC και MPP συναρτήσει των πέντε παραμέτρων

Βραχυκύκλωση (SC):

$$I_{sc} = \frac{R_{sh}}{R_s + R_{sh}} I_{ph} \quad (\Gamma.4)$$

Ανοιχτοκύκλωση (OC):

$$V_{oc} = a \ln \left(\frac{I_{ph}}{I_s} \right) \quad (\Gamma.5)$$

Μέγιστη παραγωγή (MPP):

$$w = W \left\{ \frac{I_{ph}}{I_s} e \right\} \quad (\Gamma.6)$$

$$V_{mp} = \frac{R_s + R_{sh}}{R_{sh}} a(w-1) - R_s I_{ph} \left(1 - \frac{1}{w} \right) \quad (\Gamma.7)$$

$$I_{mp} = I_{ph} \left(1 - \frac{1}{w} \right) - \frac{a(w-1)}{R_{sh}} \quad (\Gamma.8)$$

Γ.1.3 Εξαγωγή των πέντε παραμέτρων σε συνθήκες STC

Σταθερά δ_0 :

$$\delta_0 = \frac{1 - 298.15\beta_{Voc}}{50.1 - 298.15\alpha_{Isc}} \quad (\Gamma.9)$$

Βοηθητική παράμετρος w_0 :

$$w_0 = W \left\{ e^{1/\delta_0 + 1} \right\} \quad (\Gamma.10)$$

Αναλυτικές σχέσεις εξαγωγής των πέντε παραμέτρων:

$$a_0 = \delta_0 V_{oc0} \quad (\Gamma.11)$$

$$R_{s0} = \frac{a_0(w_0 - 1) - V_{mp0}}{I_{mp0}} \quad (\Gamma.12)$$

$$R_{sh0} = \frac{a_0(w_0 - 1)}{I_{sc0}(1 - 1/w_0) - I_{mp0}} \quad (\Gamma.13)$$

$$I_{ph0} = \left(1 + \frac{R_{s0}}{R_{sh0}} \right) I_{sc0} \quad (\Gamma.14)$$

$$I_{s0} = I_{ph0} e^{-\frac{1}{\delta_0}} \quad (\Gamma.15)$$

Γ.1.4 Αναγωγή των πέντε παραμέτρων σε αυθαίρετες συνθήκες G και T

$$I_{ph} = I_{ph0} G (1 + a_{Isc} \Delta T) \quad (\Gamma.16)$$

$$I_s = I_{s0} K T^3 e^{\frac{47.1 \Delta T}{T}} \quad (\Gamma.17)$$

$$a = a_0 K T \quad (\Gamma.18)$$

$$R_s = R_{s0} \quad (\Gamma.19)$$

$$R_{sh} = \frac{R_{sh0}}{G} \quad (\Gamma.20)$$

Γ.1.5 Σχέσεις SC, OC και MPP συναρτήσει Ακτινοβολίας και Θερμοκρασίας

$$I_{sc} = G I_{sc0} (1 + a_{Isc} \Delta T) \quad (\Gamma.21)$$

$$V_{oc} = V_{oc0} (1 + \delta_0 K T \ln G + \beta_{Voc} \Delta T) \quad (\Gamma.22)$$

$$I_{mp} = G I_{mp0} (1 + \alpha_{Imp} \Delta T) \quad (\Gamma.23)$$

$$V_{mp} = G V_{mp0} + [(1 - G) \delta_0 (w_0 - 1) + \delta_0 K T \ln G + \beta_{Voc} \Delta T] V_{oc0} \quad (\Gamma.24)$$

Θερμοκρασιακός συντελεστής α_{Imp} :

$$\alpha_{Imp} = \alpha_{Isc} + \frac{\beta_{Voc} - 1/T_0}{w_0 - 1} \frac{1 + \alpha_{Isc} \Delta T}{1 + \beta_{Voc} \Delta T} \quad (\Gamma.25)$$

Γ.2 Εξισώσεις για Συνθήκες Σκίασης

Στη συνέχεια, παρατίθενται συγκεντρωτικά οι κυριότερες μαθηματικές σχέσεις που αφορούν ένα ΦΒ συστήματος σε συνθήκες σκίασης, όπως δίνονται στο Κεφάλαιο 3.

Γ.2.1 Αναλυτικό κυκλωματικό μοντέλο

ΦΒ κυψέλη:

$$V_{cell} = \begin{cases} R_{sh}(I_{ph} + I_s) - (R_s + R_{sh})I - aW \left\{ \frac{I_s R_{sh}}{a} e^{\frac{R_{sh}(I_{ph} + I_s - I)}{a}} \right\}, & I \leq \frac{R_{sh}}{R_s + R_{sh}} I_{ph} \\ V_{br} - IR_s - \min\{\operatorname{Re}\{z\}\}, & \text{όπου ζοιρίζες της:} \\ \frac{1}{R_{sh}} z^4 + \left(I_{ph} - I - \frac{V_{br}}{R_{sh}} \right) z^3 + bV_{br}^3 z - bV_{br}^4 = 0 & , I > \frac{R_{sh}}{R_s + R_{sh}} I_{ph} \end{cases} \quad (\Gamma.26)$$

ΦΒ στοιχειοσειρά με δίοδο διαφυγής:

$$V_{cs} = \begin{cases} \sum_{i=1}^{N_s} V_{cell-i}(I) & , \sum_{i=1}^{N_s} V_{cell-i}(I) \geq 0 \\ -a_{bp} \ln \left[\max\{I - I_{SC,cs}, 0\} / I_{sbp} + 1 \right], & \text{όπου:} \\ I_{SC,cs} = \min_i \left\{ \frac{R_{sh-i}}{R_{s-i} + R_{sh-i}} I_{ph-i} \right\} & , \sum_{i=1}^{N_s} V_{cell-i}(I) < 0 \end{cases} \quad (\Gamma.27)$$

ΦΒ πλαίσιο:

$$V_{mod} = \sum_{i=1}^{N_{cs}} V_{cs-i}(I) \quad (\Gamma.28)$$

ΦΒ πλαίσιοσειρά:

$$V_{str} = \sum_{i=1}^{N_m} V_{mod-i}(I) + a_{bk} \ln \left(\frac{I}{I_{sbk}} + 1 \right) \quad (\Gamma.29)$$

ΦΒ συστοιχία:

$$\begin{cases} V = V_{str}(I_{str-1}) \\ \vdots \\ V = V_{str}(I_{str-N_p}) \\ \sum_{i=1}^{N_p} I_{str-i} = I_{arr} \end{cases} \quad (\Gamma.30)$$

Γ.2.2 Περιγραφικές σχέσεις προσδιορισμού των MPPs

ΦΒ πλαισιοσειρά (απλή διατύπωση):

$$\text{MPP}_j: \begin{cases} V_{mpj} = \sum_{i=1}^j N_i \left[\frac{G_j}{G_i} V_{mp0} + \left(1 - \frac{G_j}{G_i} \right) V_{oc0} \right] - \sum_{i=j+1}^n N_i \Delta V_D \\ I_{mpj} = G_j I_{mp0} \left[1 + \lambda \frac{\sum_{i=1}^{j-1} N_i}{N_m N_{cs}} \right] \\ P_{mpj} = V_{mpj} I_{mpj} \end{cases} \quad (\Gamma.31)$$

ΦΒ πλαισιοσειρά (βελτιωμένη διατύπωση):

$$V_{mpj} = \sum_{i=1}^j N_i \left(V_{mp}^{G_j, T_i} + \delta_0 V_{oc0} \frac{T_i}{T_0} \ln \left[1 + w_0 \left(\frac{G_i}{G_j} - 1 \right) \right] \right) - \sum_{i=j+1}^n N_i \Delta V_D + \delta_0 V_{oc0} N_j \frac{T_j}{T_0} \ln \frac{N_j}{\sum_{i=1}^j N_i} \quad (\Gamma.32)$$

$$I_{mpj} = I_{mp}^{G_j, T_j} + I_{sc}^{G_j, T_j} \left(\frac{1}{w_0} - \frac{1}{w_0 + \frac{1}{\delta_0} \frac{\sum_{i=1}^{j-1} N_i}{N_j} - \frac{\Delta V_D}{\delta_0 V_{oc0}} \frac{\sum_{i=j+1}^n N_i}{N_j}} \right) \quad (\Gamma.33)$$

ΦΒ συστοιχία:

$$\text{MPPA}_j^i: \begin{cases} V_{mpAj}^i = (1 + \kappa_j^i S_j^i) \sum_{g=1}^j N_g^i \left[\frac{G_j^i}{G_g^i} V_{mp} + \left(1 - \frac{G_j^i}{G_g^i} \right) V_{oc} \right] - \sum_{g=j+1}^{n_i} N_g^i \cdot \Delta V_D \\ I_{mpAj}^i = I_{mp} \cdot (G_j^i + S_j^i) \\ V_{mpAj}^i = \frac{1}{N_p} \sum_{i=1}^{N_p} \sum_{g=1}^{n_i} N_g^i \left[\frac{G_j^i}{G_g^i} V_{mp} + \left(1 - \frac{G_j^i}{G_g^i} \right) V_{oc} \right] \end{cases} \quad (\Gamma.34)$$

$$\text{MPPB}: \begin{cases} I_{mpB} = I_{mp} \sum_{i=1}^{N_p} \left(G_{n^i}^i \left[1 + \lambda \frac{\sum_{g=1}^{n_i-1} N_g^i}{N_m N_{cs}} \right] \right) \end{cases} \quad (\Gamma.35)$$

$$S_j^i = \sum_{\substack{g \\ \forall s \neq i}} G_g^s \\ \forall g: \sum_{r=1}^j N_r^i \in \left(\sum_{r=1}^{g-1} N_r^s, \sum_{r=1}^g N_r^s \right]$$

όπου $\kappa = 0.04$, $\lambda = 0.06$, $\Delta V_D = 1.0$, ενώ τα V_{mp} , I_{mp} και V_{oc} της στοιχειοσειράς δίνονται από:

$$\begin{aligned}I_{mp} &= I_{mp0} (1 + \alpha_{I_{mp}} \Delta T) \\V_{mp} &= V_{mp0} (1 + \beta_{V_{mp}} \Delta T) \\V_{oc} &= V_{oc0} (1 + \beta_{V_{oc}} \Delta T)\end{aligned}\tag{Γ.36}$$

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Ε. Μπατζέλης, “Ενεργειακό μοντέλο φωτοβολταϊκής συστοιχίας με χρήση της συνάρτησης Lambert W και διερεύνηση των επιπτώσεων της σκίασης,” Μεταπτυχιακή εργασία, ΔΠΜΣ Παραγωγή και διαχείριση ενέργειας, ΕΜΠ, 2012.
- [2] Α. Πέππα, “Μοντέλο ενεργειακής απόδοσης φωτοβολταϊκής συστοιχίας,” Διπλωματική εργασία, Σχολή ηλεκτρολόγων μηχανικών & μηχανικών υπολογιστών, ΕΜΠ, 2008.
- [3] H. S. Rauschenbach, *Solar cell array design handbook - The principles and technology of photovoltaic energy conversion*. Van Nostrand Reinhold Co., New York, 1980.
- [4] “PV education.” [Online]. Available: <http://www.pveducation.org/>.
- [5] Κ. Δέρβος, *Φωτοβολταϊκά συστήματα από τη θεωρία στη πράξη*. Πανεπιστημιακές Εκδόσεις ΕΜΠ, 2013.
- [6] A. Goetzberger and V.U. Hoffmann, *Photovoltaic solar energy generation*. Germany: Springer, Germany, 2005.
- [7] The German Energy Society, *Planning and installing photovoltaic systems: a guide for installers, architects, and engineers*, 2nd ed. London: Earthscan, London, 2008.
- [8] Ι. Ρουτσολιάς, “Επιδράσεις σκίασης και ρύπανσης στην ενεργειακή απόδοση φωτοβολταϊκού σταθμού,” Διπλωματική εργασία, Σχολή ηλεκτρολόγων μηχανικών & μηχανικών υπολογιστών, ΕΜΠ, 2008.
- [9] Ε. Γεωργούλας, “Ανάλυση λειτουργίας φωτοβολταϊκών πλαισίων άμορφου πυριτίου υπό συνθήκες μερικής σκίασης,” Διπλωματική εργασία, Σχολή ηλεκτρολόγων μηχανικών & μηχανικών υπολογιστών, ΕΜΠ, 2013.
- [10] Ι. Καπογιάννη, “Ευαισθητοποίηση διοξειδίου του τιτανίου με κβαντικές τελείες ημιαγωγικών σουλφιδίων PbS και CdS,” Διπλωματική εργασία, Σχολή εφαρμοσμένων μαθηματικών & φυσικών επιστημών, ΕΜΠ, 2011.
- [11] M. A. Green, P. A. Basore, N. Chang, D. Clugston, R. Egan, R. Evans, D. Hogg, S. Jarnason, M. Keevers, P. Lasswell, J. O’Sullivan, U. Schubert, A. Turner, S. R. Wenham, and T. Young, “Crystalline silicon on glass (CSG) thin-film solar cell modules,” *Sol. Energy*, vol. 77, no. 6, pp. 857–863, Dec. 2004.
- [12] Ι. Λαγόπουλος, “Πειραματική μελέτη φωτοβολταϊκών στοιχείων λεπτών υμενίων,” Διπλωματική εργασία, Σχολή ηλεκτρολόγων μηχανικών & μηχανικών υπολογιστών, ΕΜΠ, 2011.
- [13] Wenham SR, Green MA, and Watt ME, *Applied Photovoltaic*, 2nd ed. London: Earthscan, London, 2007.
- [14] “Irradiance calculation.” [Online]. Available: https://www.folsomlabs.com/modeling/environment/irradiance_calculation.
- [15] H. Lan, J. Dai, S. Wen, Y.-Y. Hong, D. Yu, and Y. Bai, “Optimal tilt angle of photovoltaic arrays and economic allocation of energy storage system on large oil tanker ship,” *Energies*, vol. 8, no. 10, pp. 11515–11530, Oct. 2015.
- [16] J. A. Duffie and W. A. Beckman, *Solar Engineering of Thermal Processes*. 1991.
- [17] M. Drif, P. J. Perez, J. Aguilera, and J. D. Aguilar, “A new estimation method of irradiance on a partially shaded PV generator in grid-connected photovoltaic systems,” *Renew. Energy*, vol. 33, no. 9, pp. 2048–2056, 2008.
- [18] D. Masa-Bote and E. Caamaño-Martín, “Methodology for estimating building integrated photovoltaics electricity production under shadowing conditions and case study,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 31, pp. 492–500, 2014.
- [19] E. G. Melo, M. P. Almeida, R. Zilles, and J. A. B. Grimoni, “Using a shading matrix to estimate the shading factor and the irradiation in a three-dimensional model of a receiving surface in an urban environment,” *Sol. Energy*, vol. 92, pp. 15–25, 2013.

- [20] A. Mermoud, "Optimization of row-arrangement in PV Systems, shading loss evaluations according to module positioning and connexions," *27th Eur. Photovolt. Sol. Energy Conf.*, no. September, pp. 24–28, 2012.
- [21] D. Weinstock and J. Appelbaum, "Shadow variation on photovoltaic collectors in a solar field," *2004 23rd IEEE Conv. Electr. Electron. Eng. Isr.*, no. 1, pp. 354–357, 2004.
- [22] J. Appelbaum and J. Bany, "Shadow effect of adjacent solar collectors in large scale systems," *Sol. Energy*, vol. 23, no. 6, pp. 497–507, 1979.
- [23] A. Woyte, J. Nijs, and R. Belmans, "Partial shadowing of photovoltaic arrays with different system configurations: Literature review and field test results," *Sol. Energy*, vol. 74, no. 3, pp. 217–233, 2003.
- [24] E. I. Batzelis, P. S. Georgilakis, and S. A. Papathanassiou, "Energy models for photovoltaic systems under partial shading conditions: a comprehensive review," *IET Renew. Power Gener.*, vol. 9, no. 4, pp. 340–349, May 2015.
- [25] J. W. Bishop, "Computer simulation of the effects of electrical mismatches in photovoltaic cell interconnection circuits," *Sol. Cells*, vol. 25, no. 1, pp. 73–89, Oct. 1988.
- [26] V. Quaschnig and R. Hanitsch, "Numerical simulation of current-voltage characteristics of photovoltaic systems with shaded solar cells," *Sol. Energy*, vol. 56, no. 6, pp. 513–520, Jun. 1996.
- [27] A. Kovach and J. Schmid, "Determination of energy output losses due to shading of building-integrated photovoltaic arrays using a raytracing technique," *Sol. Energy*, vol. 57, no. 2, pp. 117–124, Aug. 1996.
- [28] N. K. Gautam and N. D. Kaushika, "An efficient algorithm to simulate the electrical performance of solar photovoltaic arrays," *Energy*, vol. 27, no. 4, pp. 347–361, Apr. 2002.
- [29] H. Kawamura, K. Naka, N. Yonekura, S. Yamanaka, H. Kawamura, H. Ohno, and K. Naito, "Simulation of I–V characteristics of a PV module with shaded PV cells," *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 75, no. 3–4, pp. 613–621, Feb. 2003.
- [30] N. D. Kaushika and N. K. Gautam, "Energy yield simulations of interconnected solar pv arrays," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 18, no. 1, pp. 127–134, Mar. 2003.
- [31] D. Nguyen and B. Lehman, "Modeling and simulation of solar PV arrays under changing illumination conditions," in *Proc. 2006 IEEE Work. Comput. Power Electron.*, Troy, NY, US, Sep. 2006, pp. 295–299.
- [32] M. C. Alonso-García, J. M. Ruiz, and W. Herrmann, "Computer simulation of shading effects in photovoltaic arrays," *Renew. Energy*, vol. 31, no. 12, pp. 1986–1993, Oct. 2006.
- [33] E. Karatepe, M. Boztepe, and M. Çolak, "Development of a suitable model for characterizing photovoltaic arrays with shaded solar cells," *Sol. Energy*, vol. 81, no. 8, pp. 977–992, Aug. 2007.
- [34] G. Petrone, G. Spagnuolo, and M. Vitelli, "Analytical model of mismatched photovoltaic fields by means of Lambert W-function," *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 91, no. 18, pp. 1652–1657, Nov. 2007.
- [35] S. Silvestre and A. Chouder, "Effects of shadowing on photovoltaic module performance," *Prog. Photovoltaics Res. Appl.*, vol. 16, no. 2, pp. 141–149, Mar. 2008.
- [36] H. Patel and V. Agarwal, "MATLAB-based modeling to study the effects of partial shading on PV array characteristics," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 23, no. 1, pp. 302–310, Mar. 2008.
- [37] D. D. Nguyen, B. Lehman, and S. Kamarthi, "Performance evaluation of solar photovoltaic arrays including shadow effects using neural network," in *Proc. 2009 IEEE Energy Convers. Congr. Expo.*, San Jose, CA, US, Sep. 2009, pp. 3357–3362.

- [38] S. Silvestre, A. Boronat, and A. Chouder, "Study of bypass diodes configuration on PV modules," *Appl. Energy*, vol. 86, no. 9, pp. 1632–1640, Sep. 2009.
- [39] N. Thakkar, D. Cormode, V. P. A. Lonij, S. Pulver, and A. D. Cronin, "A simple non-linear model for the effect of partial shade on PV systems," in *Proc. 2010 35th IEEE Photovolt. Spec. Conf.*, Honolulu, HI, US, Jun. 2010, pp. 2321–2326.
- [40] D. Picault, B. Raison, S. Bacha, J. de la Casa, and J. Aguilera, "Forecasting photovoltaic array power production subject to mismatch losses," *Sol. Energy*, vol. 84, no. 7, pp. 1301–1309, Jul. 2010.
- [41] S. Papathanassiou and E. Paraskevadaki, "Estimation of PV array power losses due to partial shading," in *Proc. 25th Eur. Photovolt. Sol. Energy Conf. Exhib. / 5th World Conf. Photovolt. Energy Conversion, 6-10 Sept. 2010, Val. Spain, Valencia, Spain, 2010*, pp. 4560–4564.
- [42] F. Martínez-Moreno, J. Muñoz, and E. Lorenzo, "Experimental model to estimate shading losses on PV arrays," *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 94, no. 12, pp. 2298–2303, Dec. 2010.
- [43] K. Ishaque, Z. Salam, and H. Taheri, "Modeling and simulation of photovoltaic (PV) system during partial shading based on a two-diode model," *Simul. Model. Pract. Theory*, vol. 19, no. 7, pp. 1613–1626, Aug. 2011.
- [44] Y. Jiang, J. A. A. Qahouq, and M. Orabi, "Matlab/Pspice hybrid simulation modeling of solar PV cell/module," in *Proc. 2011 Twenty-Sixth Annu. IEEE Appl. Power Electron. Conf. Expo.*, Fort Worth, TX, US, Mar. 2011, pp. 1244–1250.
- [45] G. Petrone and C. A. Ramos-Paja, "Modeling of photovoltaic fields in mismatched conditions for energy yield evaluations," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 81, no. 4, pp. 1003–1013, Apr. 2011.
- [46] S. Moballegh and J. Jiang, "Partial shading modeling of photovoltaic system with experimental validations," in *Proc. 2011 IEEE Power Energy Soc. Gen. Meet.*, Detroit, United States, Jul. 2011.
- [47] J. A. Dolan, R. Lee, Y.-H. Yeh, C. Yeh, D. Y. Nguyen, S. Ben-Menahem, and A. K. Ishihara, "Neural network estimation of photovoltaic I–V curves under partially shaded conditions," in *Proc. 2011 Int. Jt. Conf. Neural Networks*, San Jose, CA, US, Jul. 2011, pp. 1358–1365.
- [48] K. Ishaque and Z. Salam, "A comprehensive MATLAB Simulink PV system simulator with partial shading capability based on two-diode model," *Sol. Energy*, vol. 85, no. 9, pp. 2217–2227, Sep. 2011.
- [49] E. V. Paraskevadaki and S. A. Papathanassiou, "Evaluation of MPP voltage and power of mc-si PV Modules in partial shading conditions," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 26, no. 3, pp. 923–932, Sep. 2011.
- [50] Y.-J. Wang and S.-S. Lin, "Analysis of a partially shaded PV array considering different module connection schemes and effects of bypass diodes," in *Proc. 2011 Int. Conf. Util. Exhib. Power Energy Syst. Issues Prospect. Asia*, Pattaya City, Thailand, Sep. 2011.
- [51] K. Brecl and M. Topič, "Self-shading losses of fixed free-standing PV arrays," *Renew. Energy*, vol. 36, no. 11, pp. 3211–3216, Nov. 2011.
- [52] G. Liu, S. K. Nguang, and A. Partridge, "A general modeling method for I–V characteristics of geometrically and electrically configured photovoltaic arrays," *Energy Convers. Manag.*, vol. 52, no. 12, pp. 3439–3445, Nov. 2011.
- [53] A. Mäki and S. Valkealahti, "Power losses in long string and parallel-connected short strings of series-connected silicon-based photovoltaic modules due to partial shading conditions," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 27, no. 1, pp. 173–183, Mar. 2012.
- [54] A. Mäki, S. Valkealahti, and J. Leppäaho, "Operation of series-connected silicon-based photovoltaic modules under partial shading conditions," *Prog. Photovoltaics Res. Appl.*,

- vol. 20, no. 3, pp. 298–309, May 2012.
- [55] A. Moschitta, A. Damiani, and P. Carbone, “A simple and accurate model for predicting mismatch effects in Photovoltaic Arrays,” in *Proc. 2012 IEEE Int. Energy Conf. Exhib.*, Florence, Italy, Sep. 2012, pp. 818–822.
- [56] C. A. Ramos-Paja, J. D. Bastidas, A. J. Saavedra-Montes, F. Guinjoan-Gispert, and M. Goetz, “Mathematical model of total cross-tied photovoltaic arrays in mismatching conditions,” in *Proc. 2012 IEEE 4th Colomb. Work. Circuits Syst.*, Barranquilla, Colombia, Nov. 2012.
- [57] K. Ding, X. Bian, H. Liu, and T. Peng, “A MATLAB-simulink-based PV module model and its application under conditions of nonuniform irradiance,” *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 27, no. 4, pp. 864–872, Dec. 2012.
- [58] J. D. Bastidas, E. Franco, G. Petrone, C. A. Ramos-Paja, and G. Spagnuolo, “A model of photovoltaic fields in mismatching conditions featuring an improved calculation speed,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 96, pp. 81–90, Mar. 2013.
- [59] M. Seyedmahmoudian, S. Mekhilef, R. Rahmani, R. Yusof, and E. Renani, “Analytical modeling of partially shaded photovoltaic systems,” *Energies*, vol. 6, no. 1, pp. 128–144, Jan. 2013.
- [60] T. H. Jung, J. W. Ko, G. H. Kang, and H. K. Ahn, “Output characteristics of PV module considering partially reverse biased conditions,” *Sol. Energy*, vol. 92, pp. 214–220, Jun. 2013.
- [61] M. L. Orozco-Gutierrez, J. M. Ramirez-Scarpetta, G. Spagnuolo, and C. A. Ramos-Paja, “A technique for mismatched PV array simulation,” *Renew. Energy*, vol. 55, pp. 417–427, Jul. 2013.
- [62] P. Rodrigo, E. F. Fernández, F. Almonacid, and P. J. Pérez-Higueras, “A simple accurate model for the calculation of shading power losses in photovoltaic generators,” *Sol. Energy*, vol. 93, pp. 322–333, Jul. 2013.
- [63] C. Olalla, D. Clement, D. Maksimovic, and C. Deline, “A cell-level photovoltaic model for high-granularity simulations,” in *Proc. 2013 15th Eur. Conf. Power Electron. Appl.*, Lille, France, Sep. 2013.
- [64] C. Deline, A. Dobos, S. Janzou, J. Meydbray, and M. Donovan, “A simplified model of uniform shading in large photovoltaic arrays,” *Sol. Energy*, vol. 96, pp. 274–282, Oct. 2013.
- [65] M. C. Di Vincenzo and D. Infield, “Detailed PV array model for non-uniform irradiance and its validation against experimental data,” *Sol. Energy*, vol. 97, pp. 314–331, Nov. 2013.
- [66] A. Maki and S. Valkealahti, “Effect of photovoltaic generator components on the number of MPPs under partial shading conditions,” *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 28, no. 4, pp. 1008–1017, Dec. 2013.
- [67] E. I. Batzelis, I. A. Routsolias, and S. A. Papathanassiou, “An explicit PV string model based on the Lambert W function and simplified MPP expressions for operation under partial shading,” *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 5, no. 1, pp. 301–312, Jan. 2014.
- [68] S. Moballegh and J. Jiang, “Modeling, prediction, and experimental validations of power peaks of PV arrays under partial shading conditions,” *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 5, no. 1, pp. 293–300, Jan. 2014.
- [69] J. Qi, Y. Zhang, and Y. Chen, “Modeling and maximum power point tracking (MPPT) method for PV array under partial shade conditions,” *Renew. Energy*, vol. 66, pp. 337–345, Jun. 2014.
- [70] H. Zheng, S. Li, R. Chaloo, and J. Proano, “Shading and bypass diode impacts to energy extraction of PV arrays under different converter configurations,” *Renew. Energy*, vol. 68, pp. 58–66, Aug. 2014.

- [71] G. N. Psarros, E. I. Batzelis, and S. A. Papathanassiou, "Partial shading analysis of multistring PV arrays and derivation of simplified MPP expressions," *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 6, no. 2, pp. 499–508, Apr. 2015.
- [72] Σ. Ν. Μανιάς, *Ηλεκτρονικά Ισχύος*. Αθήνα: Συμμεών, Αθήνα, 2014.
- [73] T. Esmam and P. L. Chapman, "Comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 22, no. 2, pp. 439–449, Jun. 2007.
- [74] M. Calais and H. Hinz, "A ripple-based maximum power point tracking algorithm for a single-phase, grid-connected photovoltaic system," *Sol. Energy*, vol. 63, no. 5, pp. 277–282, Nov. 1998.
- [75] K. K. Tse, M. T. Ho, H. S.-H. Chung, and S. Y. Hui, "A novel maximum power point tracker for PV panels using switching frequency modulation," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 17, no. 6, pp. 980–989, Nov. 2002.
- [76] D. Casadei, G. Grandi, and C. Rossi, "Single-phase single-stage photovoltaic generation system based on a ripple correlation control maximum power point tracking," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 21, no. 2, pp. 562–568, Jun. 2006.
- [77] T. Esmam, J. W. Kimball, P. T. Krein, P. L. Chapman, and P. Midya, "Dynamic Maximum Power Point Tracking of Photovoltaic Arrays Using Ripple Correlation Control," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 21, no. 5, pp. 1282–1291, Sep. 2006.
- [78] W. Xiao, M. G. J. Lind, W. G. Dunford, and A. Capel, "Real-time identification of optimal operating points in photovoltaic power systems," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 53, no. 4, pp. 1017–1026, Jun. 2006.
- [79] A. Garrigós, J. M. Blanes, J. A. Carrasco, and J. B. Ejea, "Real time estimation of photovoltaic modules characteristics and its application to maximum power point operation," *Renew. Energy*, vol. 32, no. 6, pp. 1059–1076, May 2007.
- [80] F.-S. Pai, R.-M. Chao, S. H. Ko, and T.-S. Lee, "Performance evaluation of parabolic prediction to maximum power point tracking for PV Array," *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 2, no. 1, pp. 60–68, Jan. 2011.
- [81] A. Ahmed, L. Ran, S. Moon, and J.-H. Park, "A fast PV power tracking control algorithm with reduced power mode," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 28, no. 3, pp. 565–575, Sep. 2013.
- [82] A. K. Abdelsalam, S. Goh, O. Abdelkhalik, S. Ahmed, and A. Massoud, "Iterated unscented Kalman filter-based maximum power point tracking for photovoltaic applications," in *Proc. IECON 2013 - 39th Annu. Conf. IEEE Ind. Electron. Soc.*, Vienna, Austria, Nov. 2013, pp. 1685–1693.
- [83] L. Cristaldi, M. Faifer, M. Rossi, and S. Toscani, "An improved model-based maximum power point tracker for photovoltaic panels," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 63, no. 1, pp. 63–71, Jan. 2014.
- [84] R. Pradhan and B. Subudhi, "Design and real-time implementation of a new auto-tuned adaptive MPPT control for a photovoltaic system," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 64, pp. 792–803, Jan. 2015.
- [85] S. Maharjan, J. C. H. Peng, and W. Xiao, "Improved deterministic real-time estimation of Maximum Power Point in photovoltaic power systems," in *Proc. 2015 IEEE 8th GCC Conf. Exhib.*, Muscat, Oman, Feb. 2015.
- [86] *Solar photovoltaics on the road to large scale grid integration*. European Photovoltaic Industry Association, 2012.
- [87] "ENTSO-E network code for requirements for grid connection applicable to all generators," ENTSO-E, 2013.
- [88] "Technical requirements for the connection to and parallel operation with low-voltage distribution networks," VDE-AR-N 4105, 2011.

- [89] “Technical guideline - Generating plants connected to the medium-voltage network,” BDEW, 2008.
- [90] Y. Yang, P. Enjeti, F. Blaabjerg, and H. Wang, “Suggested grid code modifications to ensure wide-scale adoption of photovoltaic energy in distributed power generation systems,” in *Proc. 2013 IEEE Ind. Appl. Soc. Annu. Meet.*, Lake Buena Vista, FL, US, Oct. 2013.
- [91] Α. Σιετής, *Διερεύνηση των επιπτώσεων της διείσδυσης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στις αγορές ηλεκτρικής ενέργειας*. Αθήνα: ΕΜΠ, Αθήνα, 2014.
- [92] B.-I. Craciun, T. Kerekes, D. Sera, and R. Teodorescu, “Frequency support functions in large PV power plants with active power reserves,” *IEEE J. Emerg. Sel. Top. Power Electron.*, vol. 2, no. 4, pp. 849–858, Dec. 2014.
- [93] S. I. Nanou, A. G. Papakonstantinou, and S. A. Papathanassiou, “A generic model of two-stage grid-connected PV systems with primary frequency response and inertia emulation,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 127, pp. 186–196, Oct. 2015.
- [94] G. Delille, B. Francois, and G. Malarange, “Dynamic frequency control support by energy storage to reduce the impact of wind and solar generation on isolated power system’s inertia,” *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 3, no. 4, pp. 931–939, Oct. 2012.
- [95] Y. Liu, L. Chen, L. Chen, H. Xin, and D. Gan, “A Newton quadratic interpolation based control strategy for photovoltaic system,” in *Proc. Int. Conf. Sustain. Power Gener. Supply (SUPERGEN 2012)*, Hangzhou, China, Sep. 2012, vol. 2012, no. 611 CP.
- [96] P. P. Zarina, S. Mishra, and P. C. Sekhar, “Exploring frequency control capability of a PV system in a hybrid PV-rotating machine-without storage system,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 60, pp. 258–267, Sep. 2014.
- [97] Y. Bae, T.-K. Vu, and R.-Y. Kim, “Implemental control strategy for grid stabilization of grid-connected PV system based on German grid code in symmetrical low-to-medium voltage network,” *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 28, no. 3, pp. 619–631, Sep. 2013.
- [98] J. von Appen, M. Braun, T. Stetz, K. Diwold, and D. Geibel, “Time in the sun: The challenge of high PV penetration in the German electric grid,” *IEEE Power Energy Mag.*, vol. 11, no. 2, pp. 55–64, Mar. 2013.
- [99] S. Nanou, A. Papakonstantinou, and S. Papathanassiou, “Control of a PV generator to maintain active power reserves during operation,” in *Proc. 27th Eur. Photovolt. Sol. Energy Conf. Exhib. (EU PVSEC 2012)*, Frankfurt, Germany, Sep. 2012, pp. 4059–4063.
- [100] E. Batzelis, S. Nanou, and S. Papathanassiou, “Active power control in PV systems based on a quadratic curve fitting algorithm for the MPP estimation,” in *Proc. 29th Eur. Photovolt. Sol. Energy Conf. Exhib. (EU PVSEC 2014)*, Amsterdam, The Netherlands, Sep. 2014, pp. 3036–3040.
- [101] E. Batzelis, T. Sofianopoulos, and S. Papathanassiou, “Active power control in PV systems using a curve fitting algorithm based on the single-diode model,” in *Proc. 31st Eur. Photovolt. Sol. Energy Conf. Exhib. (EU PVSEC 2015)*, Hamburg, Germany, Sep. 2015, pp. 2402–2407.
- [102] H. Xin, Z. Lu, Y. Liu, and D. Gan, “A center-free control strategy for the coordination of multiple photovoltaic generators,” *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 5, no. 3, pp. 1262–1269, May 2014.
- [103] M. Jansen and M. Speckmann, “Participation of photovoltaic systems in control reserve markets,” in *Proc. 22nd Int. Conf. Exhib. Electr. Distrib. (CIRED 2013)*, Stockholm, Sweden, Jun. 2013, vol. 2013, no. 615 CP.
- [104] W. A. Omran, M. Kazerani, and M. M. A. Salama, “Investigation of methods for reduction of power fluctuations generated from large grid-connected photovoltaic

- systems,” *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 26, no. 1, pp. 318–327, Mar. 2011.
- [105] A. Hoke and D. Maksimovic, “Active power control of photovoltaic power systems,” in *Proc. 2013 1st IEEE Conf. Technol. Sustain. (SusTech 2013)*, Portland, OR, US, Aug. 2013, pp. 70–77.
- [106] M. Datta, T. Senju, A. Yona, and T. Funabashi, “A Frequency-Control Approach by Photovoltaic Generator in a PV–Diesel Hybrid Power System,” *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 26, no. 2, pp. 559–571, Jun. 2011.
- [107] N. Kakimoto, S. Takayama, H. Satoh, and K. Nakamura, “Power modulation of photovoltaic generator for frequency control of power system,” *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 24, no. 4, pp. 943–949, Dec. 2009.
- [108] X. Li, Y.-J. Song, and S.-B. Han, “Frequency control in micro-grid power system combined with electrolyzer system and fuzzy PI controller,” *J. Power Sources*, vol. 180, no. 1, pp. 468–475, May 2008.
- [109] R. Tonkoski, L. A. C. Lopes, and D. Turcotte, “Active power curtailment of PV inverters in diesel hybrid mini-grids,” in *Proc. 2009 IEEE Electr. Power Energy Conf.*, Montreal, QC, Canada, Oct. 2009.
- [110] P. Moutis, A. Vassilakis, A. Sampani, and N. D. Hatziargyriou, “DC switch driven active power output control of photovoltaic inverters for the provision of frequency regulation,” *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 6, no. 4, pp. 1485–1493, Oct. 2015.
- [111] V. A. K. Pappu, B. Chowdhury, and R. Bhatt, “Implementing frequency regulation capability in a solar photovoltaic power plant,” in *Proc. North Am. Power Symp. 2010 (NAPS 2010)*, Arlington, TX, US, Sep. 2010.
- [112] H. Xin, Y. Liu, Z. Wang, D. Gan, and T. Yang, “A new frequency regulation strategy for photovoltaic systems without energy storage,” *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 4, no. 4, pp. 985–993, Oct. 2013.
- [113] D. Wu, F. Tang, T. Dragicevic, J. C. Vasquez, and J. M. Guerrero, “Autonomous active power control for islanded AC microgrids with photovoltaic generation and energy storage system,” *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 29, no. 4, pp. 882–892, Dec. 2014.
- [114] M. Milosevic, P. Rosa, M. Portmann, and G. Andersson, “Generation control with modified maximum power point tracking in small isolated power network with photovoltaic source,” in *Proc. 2007 IEEE Power Eng. Soc. Gen. Meet.*, Tampa, FL, US, Jun. 2007.
- [115] L. D. Watson and J. W. Kimball, “Frequency regulation of a microgrid using solar power,” in *Proc. 26th Annu. IEEE Appl. Power Electron. Conf. Expo.*, Fort Worth, TX, US, Mar. 2011, pp. 321–326.
- [116] E. I. Batzelis, G. E. Kampitsis, S. A. Papathanassiou, and S. N. Manias, “Direct MPP calculation in terms of the single-diode PV model parameters,” *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 30, no. 1, pp. 226–236, Mar. 2015.
- [117] E. I. Batzelis and S. A. Papathanassiou, “A method for the analytical extraction of the single-diode PV model parameters,” *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 7, no. 2, pp. 504–512, Apr. 2016.
- [118] C. Rodriguez and G. A. J. Amaratunga, “Analytic solution to the photovoltaic maximum power point problem,” *IEEE Trans. Circuits Syst. I Regul. Pap.*, vol. 54, no. 9, pp. 2054–2060, Sep. 2007.
- [119] S. Lun, C. Du, T. Guo, S. Wang, J. Sang, and J. Li, “A new explicit I–V model of a solar cell based on Taylor’s series expansion,” *Sol. Energy*, vol. 94, pp. 221–232, Aug. 2013.
- [120] N. S. Singh, A. Jain, and A. Kapoor, “An exact analytical method for calculating the parameters of a real solar cell using special trans function theory (STFT),” *Int. J. Renew. Energy Res.*, vol. 3, no. 1, pp. 201–206, 2013.
- [121] N. S. Singh, A. Jain, and A. Kapoor, “A new method to determine the optimum load of

- a real solar cell using special trans function theory (STFT),” *Int. J. Renew. Energy Res.*, vol. 3, no. 2, pp. 378–382, 2013.
- [122] J. Ding and R. Radhakrishnan, “A new method to determine the optimum load of a real solar cell using the Lambert W-function,” *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 92, no. 12, pp. 1566–1569, Dec. 2008.
- [123] Y. Mahmoud and E. El-Saadany, “Accuracy improvement of the ideal PV model,” *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 6, no. 3, pp. 909–911, Jul. 2015.
- [124] F. Caracciolo, E. Dallago, D. G. Finarelli, A. Liberale, and P. Merhej, “Single-variable optimization method for evaluating solar cell and solar module parameters,” *IEEE J. Photovoltaics*, vol. 2, no. 2, pp. 173–180, Apr. 2012.
- [125] A. Chatterjee, A. Keyhani, and D. Kapoor, “Identification of Photovoltaic Source Models,” *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 26, no. 3, pp. 883–889, Sep. 2011.
- [126] Y. Mahmoud and E. F. El-Saadany, “A photovoltaic model with reduced computational time,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 62, no. 6, pp. 3534–3544, Jun. 2014.
- [127] L. H. I. Lim, Z. Ye, J. Ye, D. Yang, and H. Du, “A linear identification of diode models from single I-V characteristics of PV panels,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 62, no. 7, pp. 4181–4193, Jul. 2015.
- [128] A. Laudani, F. Riganti Fulginei, and A. Salvini, “Identification of the one-diode model for photovoltaic modules from datasheet values,” *Sol. Energy*, vol. 108, pp. 432–446, Oct. 2014.
- [129] J. Bai, S. Liu, Y. Hao, Z. Zhang, M. Jiang, and Y. Zhang, “Development of a new compound method to extract the five parameters of PV modules,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 79, pp. 294–303, Mar. 2014.
- [130] K. Ding, J. Zhang, X. Bian, and J. Xu, “A simplified model for photovoltaic modules based on improved translation equations,” *Sol. Energy*, vol. 101, pp. 40–52, Mar. 2014.
- [131] J. Cubas, S. Pindado, and M. Victoria, “On the analytical approach for modeling photovoltaic systems behavior,” *J. Power Sources*, vol. 247, pp. 467–474, Feb. 2014.
- [132] L. Peng, Y. Sun, and Z. Meng, “An improved model and parameters extraction for photovoltaic cells using only three state points at standard test condition,” *J. Power Sources*, vol. 248, pp. 621–631, Feb. 2014.
- [133] Y. A. Mahmoud, W. Xiao, and H. H. Zeineldin, “A parameterization approach for enhancing PV model accuracy,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 60, no. 12, pp. 5708–5716, Dec. 2013.
- [134] B. Subudhi and R. Pradhan, “Characteristics evaluation and parameter extraction of a solar array based on experimental analysis,” in *Proc. 2011 IEEE 9th Int. Conf. Power Electron. Drive Syst.*, Singapore, Singapore, Dec. 2011, pp. 340–344.
- [135] F. Khan, S.-H. Baek, Y. Park, and J. H. Kim, “Extraction of diode parameters of silicon solar cells under high illumination conditions,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 76, pp. 421–429, Dec. 2013.
- [136] H. Fathabadi, “Novel neural-analytical method for determining silicon/plastic solar cells and modules characteristics,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 76, pp. 253–259, Dec. 2013.
- [137] S. Lun, C. Du, G. Yang, S. Wang, T. Guo, J. Sang, and J. Li, “An explicit approximate I–V characteristic model of a solar cell based on padé approximants,” *Sol. Energy*, vol. 92, pp. 147–159, Jun. 2013.
- [138] F. Ghani, M. Duke, and J. Carson, “Numerical calculation of series and shunt resistances and diode quality factor of a photovoltaic cell using the Lambert W-function,” *Sol. Energy*, vol. 91, pp. 422–431, May 2013.
- [139] A. Orioli and A. Di Gangi, “A procedure to calculate the five-parameter model of crystalline silicon photovoltaic modules on the basis of the tabular performance data,”

- Appl. Energy*, vol. 102, pp. 1160–1177, Feb. 2013.
- [140] C. Carrero, D. Ramírez, J. Rodríguez, and C. A. Platero, “Accurate and fast convergence method for parameter estimation of PV generators based on three main points of the I–V curve,” *Renew. Energy*, vol. 36, no. 11, pp. 2972–2977, Nov. 2011.
- [141] K. Ishaque and Z. Salam, “An improved modeling method to determine the model parameters of photovoltaic (PV) modules using differential evolution (DE),” *Sol. Energy*, vol. 85, no. 9, pp. 2349–2359, Sep. 2011.
- [142] E. Saloux, A. Teysseidou, and M. Sorin, “Explicit model of photovoltaic panels to determine voltages and currents at the maximum power point,” *Sol. Energy*, vol. 85, no. 5, pp. 713–722, May 2011.
- [143] V. Lo Brano, A. Orioli, G. Ciulla, and A. Di Gangi, “An improved five-parameter model for photovoltaic modules,” *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 94, no. 8, pp. 1358–1370, Aug. 2010.
- [144] M. Zagrouba, A. Sellami, M. Bouaïcha, and M. Ksouri, “Identification of PV solar cells and modules parameters using the genetic algorithms: Application to maximum power extraction,” *Sol. Energy*, vol. 84, no. 5, pp. 860–866, May 2010.
- [145] M. G. Villalva, J. R. Gazoli, and E. R. Filho, “Comprehensive approach to modeling and simulation of photovoltaic arrays,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 24, no. 5, pp. 1198–1208, May 2009.
- [146] H. Saleem and S. Karmalkar, “An analytical method to extract the physical parameters of a solar cell from four points on the illuminated J–V curve,” *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 30, no. 4, pp. 349–352, Apr. 2009.
- [147] F. T. Fernandes, L. C. Correa, C. De Nardin, A. Longo, and F. A. Farret, “Improved analytical solution to obtain the MPP of PV modules,” in *Proc. IECON 2013 - 39th Annu. Conf. IEEE Ind. Electron. Soc.*, Vienna, Austria, Nov. 2013, pp. 1674–1678.
- [148] D. Sera, R. Teodorescu, and P. Rodriguez, “PV panel model based on datasheet values,” in *Proc. 2007 IEEE Int. Symp. Ind. Electron.*, Caixanova - Vigo, Spain, Jun. 2007, pp. 2392–2396.
- [149] J. C. H. Phang, D. S. H. Chan, and J. R. Phillips, “Accurate analytical method for the extraction of solar cell model parameters,” *Electron. Lett.*, vol. 20, no. 10, pp. 406–408, Jan. 1984.
- [150] A. Ortiz-Conde, F. García Sánchez, and J. Muci, “New method to extract the model parameters of solar cells from the explicit analytic solutions of their illuminated I–V characteristics,” *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 90, no. 3, pp. 352–361, Feb. 2006.
- [151] W. De Soto, S. A. Klein, and W. A. Beckman, “Improvement and validation of a model for photovoltaic array performance,” *Sol. Energy*, vol. 80, no. 1, pp. 78–88, Jan. 2006.
- [152] A. Hadj Arab, F. Chenlo, and M. Benghanem, “Loss-of-load probability of photovoltaic water pumping systems,” *Sol. Energy*, vol. 76, no. 6, pp. 713–723, Jan. 2004.
- [153] M. A. De Blas, J. L. Torres, E. Prieto, and A. García, “Selecting a suitable model for characterizing photovoltaic devices,” *Renew. Energy*, vol. 25, no. 3, pp. 371–380, Mar. 2002.
- [154] T. Ikegami, T. Maezono, F. Nakanishi, Y. Yamagata, and K. Ebihara, “Estimation of equivalent circuit parameters of PV module and its application to optimal operation of PV system,” *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 67, no. 1–4, pp. 389–395, Mar. 2001.
- [155] “Gauss-Newton algorithm.” [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Gauss-Newton_algorithm.
- [156] M. Averbukh, S. Lineykin, and A. Kuperman, “Obtaining small photovoltaic array operational curves for arbitrary cell temperatures and solar irradiation densities from standard conditions data,” *Prog. Photovoltaics Res. Appl.*, vol. 21, no. 5, pp. 1016–1024, Aug. 2013.

- [157] R. Khezzer, M. Zereg, and A. Khezzer, "Modeling improvement of the four parameter model for photovoltaic modules," *Sol. Energy*, vol. 110, pp. 452–462, Dec. 2014.
- [158] B. Aldwane, "Modeling, simulation and parameters estimation for Photovoltaic module," in *Proc. 2014 1st Int. Conf. Green Energy ICGE 2014*, Sfax, Tunisia, Mar. 2014, pp. 101–106.
- [159] J. M. Blanes, F. J. Toledo, S. Montero, and A. Garrigós, "In-site real-time photovoltaic I–V curves and maximum power point estimator," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 28, no. 3, pp. 1234–1240, Mar. 2013.
- [160] Y. Mahmoud, W. Xiao, and H. H. Zeineldin, "A simple approach to modeling and simulation of photovoltaic modules," *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 3, no. 1, pp. 185–186, Jan. 2012.
- [161] Z. Salam, K. Ishaque, and H. Taheri, "An improved two-diode photovoltaic (PV) model for PV system," in *Proc. 2010 Jt. Int. Conf. Power Electron. Drives Energy Syst. 2010 Power India*, New Delhi, India, Dec. 2010.
- [162] J. A. Gow and C. D. Manning, "Development of a photovoltaic array model for use in power-electronics simulation studies," *IEE Proc. - Electr. Power Appl.*, vol. 146, no. 2, p. 193, 1999.
- [163] D. S. H. Chan and J. C. H. Phang, "Analytical methods for the extraction of solar-cell single- and double-diode model parameters from I-V characteristics," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. ED-34, no. 2, pp. 286–293, Feb. 1987.
- [164] L. Sandrolini, M. Artioli, and U. Reggiani, "Numerical method for the extraction of photovoltaic module double-diode model parameters through cluster analysis," *Appl. Energy*, vol. 87, no. 2, pp. 442–451, Feb. 2010.
- [165] A. A. Elbaset, H. Ali, and M. Abd-El Sattar, "Novel seven-parameter model for photovoltaic modules," *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 130, pp. 442–455, Nov. 2014.
- [166] B. C. Babu and S. Gurjar, "A novel simplified two-diode model of photovoltaic (PV) module," *IEEE J. Photovoltaics*, vol. 4, no. 4, pp. 1156–1161, Jul. 2014.
- [167] M. Haouari-Merbah, M. Belhamel, I. Tobias, and J. M. Ruiz, "Extraction and analysis of solar cell parameters from the illuminated current-voltage curve," *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 87, no. 1–4, pp. 225–233, May 2005.
- [168] M. R. AlRashidi, M. F. AlHajri, K. M. El-Naggar, and A. K. Al-Othman, "A new estimation approach for determining the I-V characteristics of solar cells," *Sol. Energy*, vol. 85, no. 7, pp. 1543–1550, Jul. 2011.
- [169] A. Askarzadeh and A. Rezazadeh, "Extraction of maximum power point in solar cells using bird mating optimizer-based parameters identification approach," *Sol. Energy*, vol. 90, pp. 123–133, Apr. 2013.
- [170] K. Nishioka, N. Sakitani, Y. Uraoka, and T. Fuyuki, "Analysis of multicrystalline silicon solar cells by modified 3-diode equivalent circuit model taking leakage current through periphery into consideration," *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 91, no. 13, pp. 1222–1227, Aug. 2007.
- [171] M. C. Alonso-García and J. M. Ruiz, "Analysis and modelling the reverse characteristic of photovoltaic cells," *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 90, no. 7–8, pp. 1105–1120, May 2006.
- [172] S. L. Miller, "Ionization rates for holes and electrons in silicon," *Phys. Rev.*, vol. 105, no. 4, pp. 1246–1249, Feb. 1957.
- [173] D. L. King, W. E. Boyson, and J. A. Kratochvil, "Photovoltaic array performance model," 2004. [Online]. Available: <http://photovoltaics.sandia.gov>.
- [174] W. Durisch, B. Bitnar, J.-C. Mayor, H. Kiess, K. Lam, and J. Close, "Efficiency model for photovoltaic modules and demonstration of its application to energy yield estimation," *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 91, no. 1, pp. 79–84, Jan. 2007.

- [175] W. Zhou, H. Yang, and Z. Fang, "A novel model for photovoltaic array performance prediction," *Appl. Energy*, vol. 84, no. 12, pp. 1187–1198, Dec. 2007.
- [176] E. F. Fernández, F. Almonacid, N. Sarmah, P. Rodrigo, T. K. Mallick, and P. Pérez-Higueras, "A model based on artificial neuronal network for the prediction of the maximum power of a low concentration photovoltaic module for building integration," *Sol. Energy*, vol. 100, pp. 148–158, Feb. 2014.
- [177] A. Massi Pavan, A. Mellit, and V. Lughì, "Explicit empirical model for general photovoltaic devices: Experimental validation at maximum power point," *Sol. Energy*, vol. 101, pp. 105–116, Mar. 2014.
- [178] G. Kumar and A. K. Panchal, "Geometrical prediction of maximum power point for photovoltaics," *Appl. Energy*, vol. 119, pp. 237–245, Apr. 2014.
- [179] E. I. Ortiz-Rivera and F. Z. Peng, "Analytical model for a photovoltaic module using the electrical characteristics provided by the manufacturer data sheet," in *Proc. IEEE 36th Conf. Power Electron. Spec.*, Recife, Brazil, Jun. 2005, pp. 2087–2091.
- [180] A. B. . Bahgat, N. . Helwa, G. . Ahamd, and E. . El Shenawy, "Estimation of the maximum power and normal operating power of a photovoltaic module by neural networks," *Renew. Energy*, vol. 29, no. 3, pp. 443–457, Mar. 2004.
- [181] S. Karmalkar and S. Haneefa, "A physically based explicit J-V model of a solar cell for simple design calculations," *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 29, no. 5, pp. 449–451, May 2008.
- [182] S. Karmalkar and H. Saleem, "The power law J–V model of an illuminated solar cell," *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 95, no. 4, pp. 1076–1084, Apr. 2011.
- [183] A. K. Das, "An explicit J–V model of a solar cell for simple fill factor calculation," *Sol. Energy*, vol. 85, no. 9, pp. 1906–1909, Sep. 2011.
- [184] A. K. Das, "Analytical derivation of explicit J–V model of a solar cell from physics based implicit model," *Sol. Energy*, vol. 86, no. 1, pp. 26–30, Jan. 2012.
- [185] A. K. Das, "An explicit J–V model of a solar cell using equivalent rational function form for simple estimation of maximum power point voltage," *Sol. Energy*, vol. 98, no. PC, pp. 400–403, Dec. 2013.
- [186] G. Farivar, B. Asaei, and S. Mehrnami, "An analytical solution for tracking photovoltaic module MPP," *IEEE J. Photovoltaics*, vol. 3, no. 3, pp. 1053–1061, Jul. 2013.
- [187] A. Kuperman, "Comments on 'An analytical solution for tracking photovoltaic module MPP,'" *IEEE J. Photovoltaics*, vol. 4, no. 2, pp. 734–735, Mar. 2014.
- [188] S. M. Perovich, S. K. Simic, D. V. Tosic, and S. I. Bauk, "On the analytical solution of some families of transcendental equations," *Appl. Math. Lett.*, vol. 20, no. 5, pp. 493–498, May 2007.
- [189] S. M. Perovich, D. V. Tosic, S. I. Bauk, and S. Kordic, "On the Exact Analytical Solutions of Certain Lambert Transcendental Equations," *Math. Probl. Eng.*, vol. 2011, pp. 1–21, 2011.
- [190] R. Chenni, M. Makhlouf, T. Kerbache, and A. Bouzid, "A detailed modeling method for photovoltaic cells," *Energy*, vol. 32, no. 9, pp. 1724–1730, Sep. 2007.
- [191] S. Lineykin, M. Averbukh, and A. Kuperman, "Issues in modeling amorphous silicon photovoltaic modules by single-diode equivalent circuit," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 61, no. 12, pp. 6785–6793, Dec. 2014.
- [192] T. Ma, H. Yang, and L. Lu, "Development of a model to simulate the performance characteristics of crystalline silicon photovoltaic modules/strings/arrays," *Sol. Energy*, vol. 100, pp. 31–41, Feb. 2014.
- [193] S. Shongwe and M. Hanif, "Comparative analysis of different single-diode PV modeling methods," *IEEE J. Photovoltaics*, vol. 5, no. 3, pp. 938–946, May 2015.
- [194] J. J. Soon and K.-S. Low, "Photovoltaic model identification using particle swarm

- optimization with inverse barrier constraint,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 27, no. 9, pp. 3975–3983, Sep. 2012.
- [195] O. Hachana, K. E. Hemsas, G. M. Tina, and C. Ventura, “Comparison of different metaheuristic algorithms for parameter identification of photovoltaic cell/module,” *J. Renew. Sustain. Energy*, vol. 5, no. 5, Sep. 2013.
- [196] F. J. Toledo and J. M. Blanes, “Geometric properties of the single-diode photovoltaic model and a new very simple method for parameters extraction,” *Renew. Energy*, vol. 72, pp. 125–133, Dec. 2014.
- [197] D. S. H. Chan, J. R. Phillips, and J. C. H. Phang, “A comparative study of extraction methods for solar cell model parameters,” *Solid State Electron.*, vol. 29, no. 3, pp. 329–337, Mar. 1986.
- [198] A. N. Celik and N. Acikgoz, “Modelling and experimental verification of the operating current of mono-crystalline photovoltaic modules using four- and five-parameter models,” *Appl. Energy*, vol. 84, no. 1, pp. 1–15, Jan. 2007.
- [199] B. Marion, S. Rummel, and A. Anderberg, “Current – Voltage Curve Translation by Bilinear,” no. February, pp. 593–607, 2004.
- [200] V. Lo Brano and G. Ciulla, “An efficient analytical approach for obtaining a five parameters model of photovoltaic modules using only reference data,” *Appl. Energy*, vol. 111, pp. 894–903, Nov. 2013.
- [201] M. Fuentes, G. Nofuentes, J. Aguilera, D.L. Talaverda, and M. Castro, “Application and validation of algebraic methods to predict the behavior of crystalline silicon PV modules in Mediterranean climates,” *Sol. Energy*, vol. 81, no. 11, pp. 1396–1408, Nov. 2007.
- [202] IEC 60891, “Procedures for temperature and irradiance corrections to measurement I–V characteristics of crystalline silicon photovoltaic devices,” 2009.
- [203] B. Marion, B. Kroposki, K. Emery, D. Myers, J. del Cueto, and C. Osterwald, “Validation of a Photovoltaic Module Energy Ratings Procedure at NREL,” *Nrel*, Aug. 1999.
- [204] B. Marion, “A method for modeling the current-voltage curve of a PV module for outdoor conditions,” *Prog. Photovoltaics Res. Appl.*, vol. 10, no. 3, pp. 205–214, May 2002.
- [205] B. Marion, S. Rummel, and A. Anderberg, “Current-voltage curve translation by bilinear interpolation,” *Prog. Photovoltaics Res. Appl.*, vol. 12, no. 8, pp. 593–607, Dec. 2004.
- [206] S. xian Lun, C. jiao Du, J. shu Sang, T. ting Guo, S. Wang, and G. hong Yang, “An improved explicit I-V model of a solar cell based on symbolic function and manufacturer’s datasheet,” *Sol. Energy*, vol. 110, pp. 603–614, 2014.
- [207] M. Abramowitz and I. A. Stegun, “Solutions of quartic equations, Par. 3.8.3,” in *Handbook of Mathematical Functions with Formulas, Graphs and Mathematical Tables*, 9th ed., New York, NY, US, New York, NY, US, 1972, pp. 17–18.
- [208] “Quartic function.” [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Quartic_function.
- [209] E. Georgoulas, E. Batzelis, S. Nanou, and S. Papathanassiou, “Study of single-string and multi-string amorphous silicon single junction modules in partial shading,” in *Proc. 28th Eur. Photovolt. Sol. Energy Conf. Exhib. (EU PVSEC 2013)*, Paris, France, Sep. 2013, pp. 2524–2529.
- [210] A. Johansson, R. Gottschalg, and D. G. Infield, “Modelling shading on amorphous silicon single and double junction modules,” in *Proc. 3rd World Conf. Photovolt. Energy Convers.*, Osaka, Japan, May 2003, pp. 1934–1937.
- [211] Γ. Ψαρρός, “Μελέτη μερικής σκίασης φωτοβολταϊκής συστοιχίας πολλαπλών πλαισιοσειρών και εξαγωγή εμπειρικών σχέσεων,” Μεταπτυχιακή εργασία, ΔΠΜΣ

- Παραγωγή και διαχείριση ενέργειας, ΕΜΠ, 2013.
- [212] “Percentile.” [Online]. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/Percentile>.
- [213] E. I. Batzelis, S. A. Papathanassiou, and A. Kladas, “A partial shading detection technique for MPPT algorithms in PV systems,” in *Proc. JAPMED’9*, Sofia, Bulgaria, Jul. 2015.
- [214] E. Batzelis and S. Papathanassiou, “An algorithm to detect partial shading conditions in a PV system,” *Mater. Sci. Forum*, Feb. 2016.
- [215] E. Batzelis and S. Papathanassiou, “An efficient MPPT algorithm for partially shaded PV strings,” in *Proc. 31st Eur. Photovolt. Sol. Energy Conf. Exhib. (EU PVSEC 2015)*, Hamburg, Germany, Sep. 2015, pp. 1615–1619.
- [216] E. Batzelis, G. E. Kampitsis, and S. A. Papathanassiou, “A MPPT algorithm for partial shading conditions employing curve fitting,” in *Proc. 32th Eur. Photovolt. Sol. Energy Conf. Exhib. (EU PVSEC 2016)*, Munich, Germany, Jun. 2016.
- [217] H. Patel and V. Agarwal, “Maximum power point tracking scheme for PV systems operating under partially shaded conditions,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 55, no. 4, pp. 1689–1698, Apr. 2008.
- [218] Y.-H. Ji, D.-Y. Jung, J.-G. Kim, J.-H. Kim, T.-W. Lee, and C.-Y. Won, “A real maximum power point tracking method for mismatching compensation in PV Array under partially shaded conditions,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 26, no. 4, pp. 1001–1009, Apr. 2011.
- [219] K. Ishaque, Z. Salam, M. Amjad, and S. Mekhilef, “An improved particle swarm optimization (PSO)-based MPPT for PV with reduced steady-state oscillation,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 27, no. 8, pp. 3627–3638, Aug. 2012.
- [220] E. Koutroulis and F. Blaabjerg, “A new technique for tracking the global maximum power point of PV arrays operating under partial-shading conditions,” *IEEE J. Photovoltaics*, vol. 2, no. 2, pp. 184–190, Apr. 2012.
- [221] M. Miyatake, M. Veerachary, F. Toriumi, N. Fujii, and H. Ko, “Maximum power point tracking of multiple photovoltaic arrays: A PSO approach,” *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 47, no. 1, pp. 367–380, Jan. 2011.
- [222] “Levenberg-Marquardt algorithm.” [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Levenberg-Marquardt_algorithm.
- [223] E. I. Batzelis, G. E. Kampitsis, and S. A. Papathanassiou, “Power reserves control for PV systems with real-time MPP estimation via curve fitting,” *IEEE Trans. Power Electron.*, no. submitted for publication.
- [224] H. S.-H. Chung, K. K. Tse, S. Y. R. Hui, C. M. Mok, and M. T. Ho, “A novel maximum power point tracking technique for solar panels using a SEPIC or Cuk converter,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 18, no. 3, pp. 717–724, May 2003.
- [225] A. Laudani, F. Riganti Fulginei, and A. Salvini, “High performing extraction procedure for the one-diode model of a photovoltaic panel from experimental I–V curves by using reduced forms,” *Sol. Energy*, vol. 103, pp. 316–326, May 2014.
- [226] “Least squares.” [Online]. Available: http://en.wikipedia.org/wiki/Least_squares.
- [227] “Lambert W function.” [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Lambert_W_function.
- [228] “LambertW-Function.” [Online]. Available: <http://mathworld.wolfram.com/LambertW-Function.html>.
- [229] R. M. Corless, G. H. Gonnet, D. E. G. Hare, D. J. Jeffrey, and D. E. Knuth, “On the Lambert W function,” *Adv. Comput. Math.*, vol. 5, no. 4, pp. 329–359, 1996.
- [230] R. M. Corless, D. J. Jeffrey, and D. E. Knuth, “Sequence of series for the Lambert W function,” in *Proc. Int. Symp. Symb. Algebr. Comput. ISSAC*, Maui, HI, US, Jul. 1997, pp. 197–204.

- [231] W. Borsch-Supan, “On the Evaluation of the Function $\varphi(\lambda)$ for Real Values of λ ,” *J. Res.*, vol. 65B, no. 4, pp. 245–250, Oct. 1961.
- [232] Ε. Κοτρώτσου, “Εξαγωγή περιγραφικών σχέσεων για τον εντοπισμό τοπικών μεγίστων φωτοβολταϊκής πλαισιοσειράς σε συνθήκες μερικής σκίασης,” Διπλωματική εργασία, Σχολή ηλεκτρολόγων μηχανικών & μηχανικών υπολογιστών, ΕΜΠ, 2015.

ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ ΤΟΥ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ

ΣΕ ΠΕΡΙΟΔΙΚΑ ΜΕ ΚΡΙΤΕΣ

- [J1] **Efstratios I. Batzelis**, Jason A. Routsolias, and Stavros A. Papathanassiou, “An explicit PV string model based on the Lambert W function and simplified MPP expressions for operation under partial shading,” *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 5, no. 1, pp. 301-312, Jan. 2014.
- [J2] **Efstratios I. Batzelis**, Georgios E. Kampitsis, Stavros A. Papathanassiou, and Stefanos N. Manias, “Direct MPP calculation in terms of the single-diode PV model parameters,” *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 30, no. 1, pp. 226-236, Mar. 2015.
- [J3] Georgios N. Psarros, **Efstratios I. Batzelis**, and Stavros Papathanassiou, “Partial shading analysis of multistring PV arrays and derivation of simplified MPP expressions,” *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 6, no. 2, pp. 499-508, Apr. 2015.
- [J4] **Efstratios I. Batzelis**, Pavlos S. Georgilakis, and Stavros A. Papathanassiou, “Energy models for photovoltaic systems under partial shading conditions: a comprehensive review,” *IET Renew. Pow. Gen.*, vol. 9, no. 4, pp. 340-349, May 2015.
- [J5] **Efstratios I. Batzelis**, Konstantinos Samaras, Georgios Vokas and Stavros Papathanassiou, “Off-grid inverter faults: diagnosis, symptoms and cause of failure,” *Mater. Sci. Forum*, vol. 856, pp. 315-321, Feb. 2016.
- [J6] **Efstratios I. Batzelis**, and Stavros Papathanassiou, “An algorithm to detect partial shading conditions in a PV system,” *Mater. Sci. Forum*, vol. 856, pp. 303-308, Feb. 2016.
- [J7] **Efstratios I. Batzelis**, and Stavros Papathanassiou, “A method for the analytical extraction of the single-diode PV model parameters,” *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 7, no. 2, pp. 504-512, Apr. 2016.
- [J8] **Efstratios I. Batzelis**, Georgios E. Kampitsis, and Stavros Papathanassiou, “Power reserves control for PV systems with real-time MPP estimation via curve fitting,” *IEEE Trans. Power Electron.*, submitted for publication.

ΣΤΑ ΠΡΑΚΤΙΚΑ ΔΙΕΘΝΩΝ ΣΥΝΕΔΡΙΩΝ

- [C1] Efstratios Georgoulas, **Efstratios Batzelis**, Sotirios Nanou, and Stavros Papathanassiou, “Study of single-string and multi-string amorphous silicon single junction modules in partial shading conditions,” in *Proc. 28th EU PVSEC*, Paris, France, Sep. 2013, pp. 2524-2529.
- [C2] Sotirios Nanou, **Efstratios Batzelis**, and Stavros Papathanassiou, “Enhanced MPPT control of a two-stage grid-connected PV system under fast-changing irradiance conditions,” in *Proc. 28th EU PVSEC*, Paris, France, Sep. 2013, pp. 3399-3403.
- [C3] Sotirios Nanou, **Efstratios Batzelis**, and Stavros Papathanassiou, “Evaluation of PV inverter control schemes under distorted and variable frequency grid conditions,” in *Proc. 28th EU PVSEC*, Paris, France, Sep. 2013, pp. 3404-3408.
- [C4] **Efstratios Batzelis**, Sotirios Nanou, and Stavros Papathanassiou, “Active power control in PV systems based on a quadratic curve fitting algorithm for the MPP estimation,” in *Proc. 29th EU PVSEC*, Amsterdam, The Netherlands, Sep. 2014, pp. 3036-3040.

- [C5] Georgios Psarros, **Efstratios Batzelis**, and Stavros Papathanassiou, “Analysis of local MPPs on the P-V curve of a partially shaded PV string,” in *Proc. 29th EU PVSEC*, Amsterdam, The Netherlands, Sep. 2014, pp. 3383-3389.
- [C6] **Efstratios Batzelis**, Konstantinos Samaras, Georgios Vokas, and Stavros Papathanassiou, “Statistical analysis of faults at off-grid inverters for autonomous PV systems,” in *Proc. JAPMED’9*, Sofia, Bulgaria, July 2015.
- [C7] **Efstratios Batzelis**, Stavros Papathanassiou, and Antonios Kladas, “A partial shading detection technique for MPPT algorithms in PV systems,” in *Proc. JAPMED’9*, Sofia, Bulgaria, July 2015.
- [C8] Georgios Kampitsis, **Efstratios Batzelis**, Eleni Gati, Stavros Papathanassiou, and Stefanos Manias, “Electro-thermal characterization of 1.2 kV normally-on SiC JFETs under hard switch fault,” in *Proc. EPE’15*, Geneva, Switzerland, Sep. 2015.
- [C9] **Efstratios Batzelis**, and Stavros Papathanassiou, “An efficient MPPT algorithm for partially shaded PV strings,” in *Proc. 31th EU PVSEC*, Hamburg, Germany, Sep. 2015, pp. 1615-1619.
- [C10] **Efstratios Batzelis**, Theofanis Sofianopoulos, and Stavros Papathanassiou, “Active power control in PV systems using a curve fitting algorithm based on the single-diode model,” in *Proc. 31th EU PVSEC*, Hamburg, Germany, Sep. 2015, pp. 2402-2407
- [C11] **Efstratios Batzelis**, Georgios Kampitsis, and Stavros Papathanassiou, “A MPPT algorithm for partial shading conditions employing curve fitting,” accepted for oral presentation in *32th EU PVSEC*, Munich, Germany, Sep. 2016.
- [C12] Georgios Kampitsis, **Efstratios Batzelis**, and Stavros Papathanassiou, “Power balance control for a two-stage solar inverter with Low Voltage Ride Through capability,” accepted for oral presentation in *32th EU PVSEC*, Munich, Germany, Sep. 2016.