

Κωνσταντίνος Θ. Δέρβος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Φωτοβολταϊκά Συστήματα: από τη Θεωρία στην Πράξη



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΑΚΕΣ ΕΚΔΟΣΕΙΣ Ε.Μ.Π.

Κωνσταντίνος, Θ. Δέρβος, Ηλεκτρολόγος Μηχανικός, Καθηγητής Ε.Μ.Π.
Φωτοβολταϊκά Συστήματα: από τη Θεωρία στην Πράξη
Copyright © 2013, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Ε.Μ.Π.

Γλωσσική επιμέλεια
Μαρία Σ. Παπαδοπούλου

Σχεδιασμός σχημάτων
Θεόδωρος Αργυρόπουλος, Ναυπηγός Μηχανολόγος Μηχανικός, Διδάκτωρ Μηχανικός

Σχεδιασμός εξωφύλλου, ηλεκτρονική σελιδοποίηση
Στέλλα Μπορουτζή, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Ε.Μ.Π.

Προσαρμογή σχημάτων
Ροζίτα Ταμπακοπούλου, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Ε.Μ.Π.



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΑΚΕΣ ΕΚΔΟΣΕΙΣ Ε.Μ.Π.

Θωμαΐδειο Κτήριο Εκδόσεων
Ηρώων Πολυτεχνείου 9, 157 80 Ζωγράφου
Τηλ.: 210 772 2578, fax: 210 772 1127
e-mail: ntuapres@central.ntua.gr
www.ntua.gr/ntuapres

ISBN: 978-960-254-699-4

Πίνακας Περιεχομένων

ΜΕΡΟΣ Ι: ΘΕΩΡΙΑ ΤΩΝ ΗΜΙΑΓΩΓΩΝ.....	1
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	
ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟΥΣ ΗΜΙΑΓΩΓΟΥΣ.....	3
Ο σχηματισμός των ενεργειακών ζωνών.....	3
Ο αριθμός των φορέων μέσα σε μία ζώνη.....	5
Αμιγείς ημιαγωγοί.....	8
Ημιαγωγοί προσμειξεων.....	10
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	
ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΦΟΡΕΩΝ.....	19
Η κίνηση των ηλεκτρικών φορέων εντός της ενεργειακής ζώνης.....	19
(i) Διακοπή του επιβαλλόμενου ηλεκτρικού πεδίου.....	22
(ii) Μόνιμη κατάσταση για την ολίσθηση ηλεκτρονίων - οπών.....	22
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	
Η ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΦΟΡΕΩΝ ΟΤΑΝ ΔΕΝ ΙΣΧΥΕΙ Η ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑ.....	29
Η κατάσταση της δυναμικής ισορροπίας.....	29
Επανασύνδεση φορέων από τη ζώνη αγωγιμότητας στη ζώνη σθένους.....	32
Επανασύνδεση φορέων με τη βοήθεια των ενεργειακών σταθμών που βρίσκονται στο μέσο του ενεργειακού διακένου.....	33
Επανασύνδεση φορέων με μη ακτινοβολούσες διεργασίες. (Επανασύνδεση τύπου Auger)....	39
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4	
ΓΕΝΙΚΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ. ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ ΔΙΑΧΥΣΗΣ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ.....	43
Ρεύμα διάχυσης.....	43
Ρεύμα ολίσθησης.....	44
Το συνολικό ρεύμα.....	46
Οι πλήρεις εξισώσεις για την περιγραφή των επιπρόσθετων φορέων μειονότητας Δn ή Δp που οφείλονται σε έγχυση.....	47
Εφαρμογή.....	48

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	51
ΜΕΡΟΣ ΙΙ: ΜΕΛΕΤΗ ΒΑΣΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΗΜΙΑΓΩΓΩΝ.....	53
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5	
ΕΠΑΦΗ ΜΕΤΑΛΛΟΥ - ΗΜΙΑΓΩΓΟΥ	55
Ανορθωτική επαφή μετάλλου - ημιαγωγού. (Δίοδος Schottky).....	55
Υπολογισμός του \mathcal{E}_{max} χρησιμοποιώντας την εξίσωση Poisson.....	57
Οι ενεργειακές στάθμες στην επιφάνεια.....	59
Ο συντελεστής ποιότητας των διόδων Schottky	61
Ροή ηλεκτρικού ρεύματος σε ιδανική επαφή μετάλλου - ημιαγωγού	62
Η χαρακτηριστική ρεύματος - τάσεως ($I - V$)	63
Η γραφική παράσταση $I - V$	65
Ωμικές επαφές.....	68
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6	
Η ΔΙΟΔΟΣ ΕΠΑΦΗΣ P - N	71
Χαρακτηριστική ρεύματος - τάσεως ($I - V$) διόδων p-n.....	74
Η εξίσωση μεταξύ της πυκνότητας ρεύματος και της επιβαλλόμενης τάσεως.....	77
Αποδείξεις των εξισώσεων $I - V$ της διόδου p-n και οι απαιτούμενες παραδοχές.....	78
Α. Ορθή πόλωση:	78
Β. Ανάστροφη πόλωση:	82
Παράγοντες που επηρεάζουν τη χαρακτηριστική $I - V$ των πραγματικών διόδων.....	84
(i) Ο συντελεστής ποιότητας.....	84
(ii) Επανασύνδεση και δημιουργία νέων φορέων στην περιοχή w σε μη-ιδανικές διόδους p-n	85
(iia) Ρεύμα λόγω της επανασύνδεσης των φορέων κατά την ορθή πόλωση.....	85
(iiβ) Ρεύμα λόγω δημιουργίας νέων ηλεκτρικών φορέων στην περιοχή της επαφής κατά την ανάστροφη πόλωση	88
(iii) Διάσπαση της επαφής p-n στην περιοχή των ισχυρών ηλεκτρικών πεδίων ανάστροφης πόλωσης.....	91
(iiiα) Φαινόμενο χιονοστοιβάδας (Avalanche breakdown).....	92
(iiiβ) Διάσπαση τύπου Zener. Φαινόμενο σήραγγος (tunnelling)	94
BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	97
ΜΕΡΟΣ ΙΙΙ: ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΗΣ ΜΕΤΑΤΡΟΠΗΣ.....	99
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7	
ΟΙ ΚΑΤΑΛΛΗΛΕΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΓΙΑ ΤΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΗ ΜΕΤΑΤΡΟΠΗ	101
Εισαγωγή.....	101
Δίοδοι p-n.....	101

Δίοδοι Schottky	102
Σύγκριση φωτοβολταϊκών διατάξεων p-n και Schottky	104
Το ηλεκτροστατικό φράγμα δυναμικού στην περιοχή της επαφής p-n	105
Ημιαγωγός τύπου n	105
Ημιαγωγός τύπου p	107
Ηλεκτρικά φορτία που δεν συμβάλλουν άμεσα στην αγωγιμότητα	108
Η περιοχή του ηλεκτροστατικού φράγματος δυναμικού	109
Το ενεργειακό διάκενο, E_G	111
Θερμοδυναμική ισορροπία	111
Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο	112
Η ενεργός περιοχή	112
Η οπτική διέγερση της διόδου	112
Τάση ανοικτοκύκλωσης και φωτόρρευμα	115
Οι εξισώσεις $I - V$ του ΦΒ στοιχείου	116
Η διάδος ως ανιχνευτής ακτινοβολίας	118
Η διάδος ως φωτοβολταϊκό στοιχείο	119
Το ισοδύναμο κύκλωμα μιας φωτιζόμενης διόδου p-n	119
Διάταξη ανιχνευτή ακτινοβολίας υψηλής απόδοσης	120
Το υλικό	121
Η δομή της διάταξης	122
Η λειτουργία της διάταξης	122
Η χαρακτηριστική $I - V$ ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου	123
Ρεύμα βραχυκύκλωσης (I_{SC})	124
Τάση ανοικτοκύκλωσης (V_{OC})	125
Μέγιστη παροχή ισχύος (P_{MAX})	125
Η ανάλυση των παραμέτρων του ισοδύναμου ηλεκτρικού κυκλώματος ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου	127
Παράγοντες που επιδρούν στη απόδοση της ΦΒ μετατροπής και διαμορφώνουν την κατασκευαστική γεωμετρία ενός ΦΒ στοιχείου	139
Το φωτοβολταϊκό στοιχείο, το πλαίσιο, η συστοιχία και το πεδίο	146
Το φωτοβολταϊκό στοιχείο (cell)	146
Μονοκρυσταλλικά ΦΒ στοιχεία	146
Πολυκρυσταλλικά ΦΒ στοιχεία	147
ΦΒ στοιχεία λεπτών υμενίων	148
ΦΒ στοιχεία άμορφου πυριτίου (a-Si)	150
Το φωτοβολταϊκό πλαίσιο (PV module)	151
Κατασκευαστής και τύπος	154
Υλικό ΦΒ στοιχείων	154
Ισχύς STC	154
Ισχύς PTC	155
Χαρακτηριστικά παρεχόμενης ισχύος	155
Οριακές τιμές ρεύματος και τάσεως	156
Θερμοκρασιακή εξάρτηση όρων	156
Ονομαστική θερμοκρασία πλαισίου	156
Ασφάλεια ρεύματος σειράς	157
Συνδεσμολογία	157
Λοιπά χαρακτηριστικά	157
Η παρεχόμενη ισχύς του ΦΒ πλαισίου (στοιχειοσειρά όμοιων στοιχείων)	157
Η δημιουργία των θερμών σημείων	159
Η προστασία έναντι των θερμών σημείων των πλαισίων	161
Η σειριακή συστοιχία των φωτοβολταϊκών πλαισίων (string)	164
Το φωτοβολταϊκό υποπεδίο / πεδίο (sub-array/array)	166

Η παρεχόμενη ισχύς από N όμοιες ΦΒ συστοιχίες σε παράλληλη συνδεσμολογία.....	168
Η παρεχόμενη ισχύς από δύο ανόμοιες ΦΒ συστοιχίες σε παράλληλη σύνδεση	170
Μελέτη πιθανών σφαλμάτων ενός συστήματος παράλληλων ΦΒ συστοιχιών	173
<i>Παράδειγμα απώλειαςμόνωσης</i>	174
<i>Τρόποι αντιμετώπισης</i>	175
Θέματα ασφαλείας που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά την εγκατάσταση των ΦΒ συστημάτων	176
<i>Λοιπές παρατηρήσεις</i>	178
Οι κυριότεροι παράγοντες που επιδρούν στην απόδοση των πλαισίων στις ΦΒ εγκαταστάσεις	179
<i>Αρχική βαθμονόμηση STC</i>	179
<i>Ο θερμοκρασιακός παράγοντας</i>	179
<i>Ρύπανση σωματιδιακής προέλευσης</i>	180
<i>Ηλεκτρικές απώλειες</i>	180
<i>Σταθερή γωνία τοποθέτησης των ΦΒ πλαισίων</i>	181
<i>Νότιος προσανατολισμός ΦΒ πλαισίου</i>	182
<i>Οι απώλειες της μετατροπής από DC σε AC:</i>	183
<i>Ανηγμένες ώρες ηλιακής ακτινοβολίας (sun hours): Παραγόμενη ενέργεια ετησίως</i>	184
ΠΙΝΑΚΑΣ 1:Τεχνικά χαρακτηριστικά εμπορικών φωτοβολταϊκών πλαισίων	187
BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	203
ΜΕΡΟΣ IV:ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΗΛΙΑΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ: Η ΠΗΓΗ.....	205
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8	
ΦΩΣ ΚΑΙ ΗΛΙΑΚΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ	207
Τι είναι το φως;	207
<i>Φάσμα και Χρώμα</i>	208
<i>Ακτινοβολία μέλανος σώματος</i>	208
<i>Απορρόφηση, σκέδαση και ανάκλαση του φωτός</i>	210
Γεωμετρία Ηλίου - Γης.....	212
Η θέση του Ηλίου ως προς ένα σημείο πάνω στη Γη.....	216
<i>Ο καθορισμός μιας τοποθεσίας πάνω στη Γη</i>	216
<i>Το Οριζόντιο Σύστημα</i>	218
<i>Η ηλιακή Ωρα</i>	219
Η θέση του Ηλίου.....	222
<i>Ηλιακή απόκλιση, δ</i>	222
<i>Η ωριαία γωνία, ω</i>	222
<i>Παράδειγμα</i>	224
<i>Ο προσδιορισμός της θέσης του Ήλιου</i>	224
<i>Υπολογισμός του ύψους του Ηλίου, β, και αζιμούθιας γωνίας, Z</i>	226
Γωνίες που συνδέουν τη θέση του Ηλίου με το έδαφος και τον ηλιακό συλλέκτη.....	226
<i>Η διάρκεια της ημέρας</i>	228
<i>Χωροταξία παράλληλων σειρών ηλιακών συλλεκτών</i>	228
Ηλιακοί ιχνηλάτες	229
<i>Η ηλιακή ακτινοβολία</i>	230
<i>Ο Ήλιος και η ακτινοβολία του</i>	230
<i>Η ακτινοβολία εκτός της γήινης ατμόσφαιρας</i>	232
<i>Η ενέργεια που φθάνει στην επιφάνεια της Γης</i>	235

Η επίδραση της ατμόσφαιρας.....	236
Εποχική διαφοροποίηση της φασματικής ακτινοβολίας	240
Οι συνιστώσες της ηλιακής ακτινοβολίας.....	241
Η παγκόσμια κατανομή της ηλιακής ακτινοβολίας	243
Μέτρηση και υπολογισμός της ηλιακής ακτινοβολίας.....	243
Όργανα μέτρησης.....	243
Η μέγιστη δυνατή συλλογή ακτινοβολίας από σταθερό συλλέκτη	251
Υπολογισμός της μέσης ηλιακής ακτινοβολίας σε συγκεκριμένη τοποθεσία και κλίση συλλέκτη.....	252
Μοντέλα προσδιορισμού της άμεσης και διάχυτης συνιστώσας της ακτινοβολίας.....	253
Παραμετρικό μοντέλο ASHRAE	253
Το μοντέλο κατάτμησης ακτινοβολίας των Erbs-Klein-Duffie.....	255
Υπολογισμός G_{DIFF} , G_{BEAM} από μετρήσεις G_{GLOBAL} με χρήση μοντέλου Erbs-Klein-Duffie.....	258
Υπολογισμός της ακτινοβολίας σε ένα κεκλιμένο επίπεδο.....	260
Η γωνία πρόσπτωσης σε κεκλιμένο συλλέκτη.....	262
Δημιουργία χρονοσειρών	265
Μέσες τιμές (ημερήσιες - μηνιαίες - ωριαίες) της ακτινοβολίας στο Διάστημα	266
Μέσες τιμές (ημερήσιες - μηνιαίες - ωριαίες) της συνολικής ακτινοβολίας, G_{GLOBAL} , στην οριζόντια επιφάνεια της Γης	268
Μέσες τιμές (ημερήσιες - μηνιαίες - ωριαίες) των συνιστωσών G_{DIFF} και G_{BEAM} της ηλιακής ακτινοβολίας, στην οριζόντια επιφάνεια της Γης.....	269
Η ημερήσια μέση τιμή των συνιστωσών της ακτινοβολίας G_{DIFF} , G_{BEAM} σε κεκλιμένο συλλέκτη στην επιφάνεια της Γης.....	270
Ο προσδιορισμός των ωριαίων μέσων τιμών G_{GLOBAL} , G_{DIFF} της ακτινοβολίας σύμφωνα με τα μοντέλα των Liu και Jordan, και των Collares-Pereira και Rabl	271
Η ανακλώμενη ακτινοβολία από το έδαφος (albedo).....	274
 BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	 277
 ΜΕΡΟΣ V:ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΙΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΕΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ	 279
 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9	
ΚΑΛΩΔΙΩΣΕΙΣ.....	281
Ο υπολογισμός των καλωδιώσεων των φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων	281
Ο καθορισμός της διατομής των καλωδίων-DC από πίνακες.....	289
 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10	
ΟΙ ΡΥΘΜΙΣΤΕΣ ΤΑΣΕΩΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΩΝ ΤΩΝ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΩΝ (REGULATORS)	293
 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 11	
ΑΝΑΣΤΡΟΦΕΙΣ (INVERTERS) ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΩΝ	303
Οι αναστροφείς των φωτοβολταϊκών συστημάτων.....	303
Γενικά χαρακτηριστικά των αναστροφέων φωτοβολταϊκών συστημάτων.....	310
Κατηγορίες αναστροφέων	315
A. Αναστροφείς αυτόνομων ΦΒ συστημάτων (stand alone inverters).....	315

Ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των αναστροφέων ΑΦΣ.....	317
Παραδείγματα εγκαταστάσεων ΑΦΣ.....	318
<i>ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 1: ΑΦΣ με καταναλώσεις DC και AC.....</i>	<i>318</i>
<i>ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 2: Υβριδικό ΑΦΣ.....</i>	<i>321</i>
B. Αναστροφείς διασυνδεδεμένοι με το τοπικό δίκτυο (grid tied inverters).....	325
Παραδείγματα ΦΒ εγκαταστάσεων διασυνδεδεμένων με το τοπικό δίκτυο.....	326
Γ. Αναστροφείς δικτύου που υποστηρίζονται από συσσωρευτές (battery back-up inverters).....	347
Οι αλγόριθμοι MPPT και ο έλεγχος του σημείου λειτουργίας.....	353
Παράδειγμα: Πλεονεκτήματα εφαρμογής αλγορίθμων MPPT.....	356

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 12

ΓΕΝΙΚΑ ΠΕΡΙ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΩΝ.....	359
Εισαγωγή στους συσσωρευτές ηλεκτρικής ενέργειας.....	359
Τα χαρακτηριστικά των συσσωρευτών.....	362
Το δυναμικό.....	362
Το ρεύμα.....	365
Η χωρητικότητα.....	365
Πυκνότητα αποθήκευσης ηλεκτρικού φορτίου.....	366
Πυκνότητα ενέργειας.....	367
Πυκνότητα Ισχύος.....	367
Ρυθμός εκφόρτισης.....	368
Κύκλος ζωής.....	368
Απόδοση ενέργειας.....	368
Συμπεριφορά κατά την υπερφόρτιση.....	369
Αποθήκευση.....	369
Εύρος λειτουργικών συνθηκών.....	369
Αξιοπιστία (Reliability).....	369
Οικονομικοί παράμετροι.....	369
Προδιαγραφές συσσωρευτών.....	370
Αποτίμηση της λειτουργίας ενός συσσωρευτή.....	373
Τα εξαρτήματα των συσσωρευτών.....	375
Περίβλημα (κέλυφος).....	375
Διαχωριστικά.....	375
Ρευματοσυλλέκτες.....	376
Ηλεκτρολύτης.....	377
Ενεργά υλικά.....	377
Μοντέλο λειτουργίας πορώδους ηλεκτροδίου.....	378
Εμπορικά συστήματα συσσωρευτών.....	381
<i>A. Συσσωρευτές μολύβδου.....</i>	<i>381</i>
<i>B. Συσσωρευτές νικελίου- καδμίου.....</i>	<i>388</i>
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	393

ΜΕΡΟΣ VI

ΜΕΘΟΔΟΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΩΝ ΑΥΤΟΝΟΜΩΝ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ.....	395
--	-----

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 13

ΜΕΛΕΤΗ ΑΥΤΟΝΟΜΟΥ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ.....	397
ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ-1: Μελέτη υπολογισμού μικρού αυτόνομου ΦΒ συστήματος	397
1. Καθορισμός δεδομένων και κύριων χαρακτηριστικών του ΦΒ συστήματος	397
2. Εκτίμηση των ενεργειακών αναγκών που πρέπει να ικανοποιεί το σύστημα.....	398
3. Η περίοδος λειτουργίας του συστήματος και η βέλτιστη κλίση των συλλεκτών.....	400
4. Το ηλιακό δυναμικό	401
5. Καθορισμός του συνολικού συντελεστή απόδοσης των πλαισίων ενός ΦΒ πεδίου.....	403
6. Οι απώλειες των ηλεκτρικών συστημάτων της ΦΒ εγκατάστασης.....	405
6.α Συντελεστής απωλειών μεταφοράς ενέργειας, σΜΗΕ.....	405
7. Υπολογισμός της ισχύος αιχμής του ΦΒ πεδίου που απαιτείται να εγκατασταθεί προκειμένου να ικανοποιηθούν οι απαιτήσεις του προβλήματος	408
8. Η επιλογή του φωτοβολταϊκού πλαισίου	409
9. Ο καθορισμός του συνολικού (θεωρητικού) αριθμού πλαισίων	409
10. Η τάση στην έξοδο του ΦΒ πεδίου	410
10.α. Προσδιορισμός της ονομαστικής τάσεως λειτουργίας του ΦΒ πεδίου, $V_{NOM(DC)}$	410
10.β. Επιλογή του ρυθμιστή φόρτισης των συσσωρευτών	411
11. Συνδεσμολογία πλαισίων	412
11.α. Αριθμός των συνδεδεμένων πλαισίων σε σειρά ανά συστοιχία	412
11.β. Αριθμός παράλληλων συστοιχιών στο ΦΒ πεδίο	412
12. Υπολογισμός του συστήματος των συσσωρευτών του ΑΦΣ.....	414
13. Υπολογισμός ηλεκτρονικών διατάξεων: (α) Ρυθμιστής φόρτισης.....	421
13. Υπολογισμός ηλεκτρονικών διατάξεων: (β) Αναστροφέας τάσεως DC-AC.....	424
14. Η χωροθέτηση των πλαισίων.....	427
15. Υπολογισμός των διατομών των καλωδίων	433
ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ-2: Μελέτη υπολογισμού ενός αυτόνομου ΦΒ συστήματος μεγάλης ισχύος	441
1. Καθορισμός δεδομένων και κύριων χαρακτηριστικών του ΦΒ συστήματος	441
2. Εκτίμηση των ενεργειακών αναγκών που πρέπει να ικανοποιεί το σύστημα.....	441
3. Η περίοδος λειτουργίας του συστήματος και η βέλτιστη κλίση των συλλεκτών.....	442
4. Το ηλιακό δυναμικό	443
5. Καθορισμός του συνολικού συντελεστή απόδοσης των ΦΒ πλαισίων του πεδίου	443
6. Οι απώλειες των ηλεκτρικών συστημάτων της ΦΒ εγκατάστασης.....	443
7. Υπολογισμός της ισχύος αιχμής που απαιτείται να εγκατασταθεί στο ΦΒ πεδίο προκειμένου να ικανοποιούνται οι απαιτήσεις του προβλήματος	443
8. Η επιλογή του φωτοβολταϊκού πλαισίου	445
9. Καθορισμός του συνολικού αριθμού πλαισίων (θεωρητικά)	445
10. Προσδιορισμός ονομαστικής τάσεως λειτουργίας ΦΒ πεδίου, $V_{NOM(DC)}$ και ενδεχόμενη επιλογή του ρυθμιστή φόρτισης των συσσωρευτών	445
11. Συνδεσμολογία των πλαισίων.....	446
11.β. Εναλλακτική σχεδίαση αυτόνομου ΦΒ συστήματος μεγάλης εγκατεστημένης ισχύος	448
12. Υπολογισμός του συστήματος των συσσωρευτών του ΑΦΣ.....	452
13. Ο καθορισμός των τελικών αναστροφών (DC-AC) της μελέτης	453
14. Η χωροθέτηση των πλαισίων.....	457
15. Υπολογισμός των καλωδιώσεων.....	460
ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ-3: Εναλλακτική μέθοδος υπολογισμού ΦΒ συστήματος. Προσέγγιση βασισμένη στην ενέργεια των συσσωρευτών.....	462
Σύγκριση μεταξύ των δύο υπολογιστικών μεθόδων	471
Τα ηλιακά δεδομένα.....	472

ΜΕΡΟΣ VII	
ΜΟΝΟΚΡΥΣΤΑΛΛΙΚΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΥΨΗΛΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ.....	
	479
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 14	
ΑΡΧΕΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΤΩΝ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ	
	481
Παράμετροι που σχετίζονται με το σχεδιασμό των φωτοβολταϊκών στοιχείων	481
Στόχοι για το σχεδιασμό των φωτοβολταϊκών στοιχείων υψηλής απόδοσης	482
Συνθήκες μεγιστοποίησης της απόδοσης	483
Μονοκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά στοιχεία πυριτίου.....	484
Ιδιότητες του πυριτίου.....	484
Το βασικό φωτοβολταϊκό στοιχείο πυριτίου.....	490
Η κατασκευή του ΦΒ στοιχείου.....	491
Πρακτικές βελτιστοποίησης των φωτοβολταϊκών στοιχείων πυριτίου.....	493
(α). Απλά φωτοβολταϊκά στοιχεία.....	493
(β). Φωτοβολταϊκά στοιχεία με παθητικοποίηση του εκπομπού (PESC).....	494
(γ). Φωτοβολταϊκά στοιχεία με σημειακές ωμικές επαφές μόνο στην οπίσθια όψη.....	496
(δ). Κύτταρο PERL	497
Σύνοψη απωλειών στα φωτοβολταϊκά στοιχεία πυριτίου	501
Μονοκρυσταλλικές φωτοβολταϊκές διατάξεις III - V	501
Ημιαγωγοί III - V.....	503
Ιδιότητες του GaAs	504
Επανασύνδεση.....	505
Σχεδιασμός του ηλιακού κυττάρου GaAs.....	506
Φωτοβολταϊκά στοιχεία III - V, τύπου-tandem, για εξαιρετικά υψηλές αποδόσεις	509
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	513
ΠΙΝΑΚΕΣ ΓΕΝΙΚΟΥ ΕΝΔΙΑΦΕΡΟΝΤΟΣ.....	515
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ	519
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΩΝ.....	523

Πρόλογος

Είναι γεγονός αναμφισβήτητο ότι οι πρώτες ύλες και τα ενεργειακά αποθέματα του πλανήτη πρέπει να αντλούνται με μέτρο, και σύνεση, προκειμένου να μη λείψουν από τις επερχόμενες γενεές. Σήμερα, οι ανάγκες για κατανάλωση της ηλεκτρικής ενέργειας αυξάνονται με ταχύτατους ρυθμούς σε όλα τα τεχνολογικά αναπτυσσόμενα κέντρα. Πολλές από τις ακολουθούμενες διαδικασίες παραγωγής ενέργειας (συμβατικές μέθοδοι / πυρηνική τεχνολογία) συνδέονται με περιβαλλοντικές επιπτώσεις, οι οποίες μπορούν να επιδράσουν είτε σε τοπική, είτε σε καθολική κλίμακα. Με δεδομένη την ανησυχία, αλλά και το γενικό ενδιαφέρον των πολιτών σχετικά με τη διατήρηση της ποιότητας του περιβάλλοντος, οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ) μπορούν να αποτελέσουν την ενδεχόμενη διέξοδο στα προβλήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

Στις ανανεώσιμες πηγές εντάσσεται και η φωτοβολταϊκή μετατροπή. Η τεχνική της δημιουργίας ηλεκτρικής ενέργειας από την απορρόφηση του φωτός σε υλικά με ηλεκτροστατικά φράγματα δυναμικού (*φωτοβολταϊκό φαινόμενο*) δεν είναι κάτι καινούργιο. Σε βιομηχανική κλίμακα εφαρμόστηκε στην αρχή της δεκαετίας του 1960, προκειμένου να καλύψει τις ανάγκες τροφοδοσίας των διαστημικών εφαρμογών των ΗΠΑ (πρόγραμμα Apollo). Ακολούθησε η αυτόνομη τροφοδοσία σε σταθμούς/αποστολές των απομονωμένων περιοχών του πλανήτη (Αρκτική-Ανταρκτική) και, ακολούθως, η εφαρμογή της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας επεκτάθηκε σταδιακά καλύπτοντας μέρος των οικιακών ενεργειακών αναγκών των τεχνολογικά ανεπτυγμένων χωρών.

Η Αυστραλία, η οποία λόγω της προνομιακής της θέσης χαρακτηρίζεται από το μεγαλύτερο ηλιακό δυναμικό του πλανήτη, έχει να επιδείξει, εκτός από την εφαρμογή και τη χρήση των φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων, διακεκριμένα τεχνολογικά ερευνητικά κέντρα (UNSW) τα οποία προσφέρουν μοναδικά επιτεύγματα στην έρευνα, τη σχεδίαση, και την ανάπτυξη ΦΒ διατάξεων υψηλής απόδοσης. Με τον τρόπο αυτό, συνδυάζεται το φυσικό πλεονέκτημα της ύπαρξης αυξημένης ηλιακής ενέργειας, όχι μόνο με την αξιοποίησή της μέσω της φωτοβολταϊκής μετατροπής, αλλά και με την επιστημονική έρευνα, και πρωτίστως την εκπαίδευση.

Στην Ευρώπη υπάρχει κοινοτική οδηγία για τη σταδιακή μείωση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από πυρηνικά εργοστάσια αλλά και τις συμβατικές ρυπογόνες μορφές (π.χ. λιγνιτικές μονάδες), και προβλέπεται η σταδιακή αντικατάστασή τους με ΑΠΕ. Δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στην αιολική ενέργεια και τη φωτοβολταϊκή μετατροπή. Στην Ευρωπαϊκή Ήπειρο το διαθέσιμο ηλιακό δυναμικό είναι δυσανάλογα κατανομημένο, με αποτέλεσμα η πυκνότητα της ηλιακής ακτινοβολίας για την Κύπρο, την Ελλάδα και την Ισπανία να είναι η υψηλότερη δυνατή. Στο σημερινό ενεργειακό πλαίσιο ανταγωνισμού του ευρωπαϊκού οικοδομήματος, οι τεχνολογικά και οικονομικά ανεπτυγμένες χώρες του Βορρά μονοπωλούν την παραγωγή των φωτοβολταϊκών συστημάτων, τα οποία και εγκαθιστούν στις υπερχρεωμένες χώρες του Νότου. Όμως, η διαδικασία αυτή δεν συνδυάζεται

με την ανάλογη ανάπτυξη των χωρών του Νότου στον αντίστοιχο τομέα της έρευνας και της παραγωγής. Για να αναπτυχθεί η τεχνολογία και να επιτευχθεί (εγγενής) ανάπτυξη στον ενεργειακό τομέα των ΑΠΕ, απαιτείται πάνω από όλα η ύπαρξη ερευνητικών δομών και υποδομών στα κέντρα της πανεπιστημιακής εκπαίδευσης.

Στη χώρα μας, το Νομοθετικό Πλαίσιο που εφαρμόστηκε για την προσέλκυση επενδύσεων στον τομέα των φωτοβολταϊκών συστημάτων χαρακτηρίστηκε από τις συχνές τροποποιήσεις (κυρίως ως προς τη δανειοδότηση και την τιμολόγηση της *kWh*), και συνοδεύτηκε από χρονοβόρες γραφειοκρατικές διαδικασίες αδειοδότησης, με αποτέλεσμα την έλλειψη σταθερού ενδιαφέροντος και την αδυναμία προγραμματισμού από πλευράς επενδυτών. Επίσης, δεν υπήρξε κατάλληλος ελεγκτικός φορέας/μηχανισμός, θεματοφύλακας των περιβαλλοντικών θεμάτων: π.χ. ενδεικτικά αναφέρονται (1) προδιαγραφές (καλλιεργήσιμης γης η οποία δεν μπορεί για κανένα λόγο να δεσμευθεί, (2) επιτρεπόμενα είδη τεχνικού εξοπλισμού (listed) για τις οικιακές εγκαταστάσεις και τις βιομηχανικές εφαρμογές μεγάλης κλίμακας, και (3) ορθή διαχείριση μετά την ολοκλήρωση του κύκλου ζωής των πλαισίων, αφού πολλά από αυτά εμπεριέχουν στοιχεία τα οποία είναι τοξικά, και μελλοντικά θα απαγορεύεται η απόρριψή τους σε χωματερές, οπότε θα απαιτηθούν χημικές διεργασίες καταστροφής. Αυτό θα αποτελέσει μία επιπρόσθετη δαπάνη για την κάθε *kWh* που έχει ήδη παραχθεί, και θα επιφέρει την εκ των υστέρων ελάττωση της πραγματικής κερδοφορίας των επενδύσεων.

Η μεγιστοποίηση του κέρδους μιας επένδυσης ΑΠΕ δεν θα πρέπει να θεωρείται ότι είναι το μόνο ζητούμενο. Στην Ελλάδα η φωτοβολταϊκή μετατροπή για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας αντιμετωπίστηκε –κατά κάποιο τρόπο– ως «σύγχρονο El Dorado», το οποίο θα παρείχε μια γρήγορη και εξασφαλισμένη οικονομική απόδοση. Ακόμα και σήμερα, οι εγκαταστάσεις που τοποθετούνται σε κατοικημένες περιοχές ελέγχονται ελλιπώς ως προς θέματα τοπικού αρχιτεκτονικού σχεδιασμού και συγκεκριμένα: (1) ως προς την ένταξη στον τοπικό οικιστικό ιστό, αλλά και (2) ως προς την ενδεχόμενη επίδραση από την ανάκλαση της ηλιακής ακτινοβολίας (albedo) σε ιδιοκτήτες/κατοίκους των παρακείμενων κατοικιών, είτε άμεσα οπτικά, είτε έμμεσα θερμοκρασιακά.

Όμως, για να επιτύχει η πραγματική αποστολή της προσπάθειας αξιοποίησης των ΑΠΕ, θα πρέπει να υπάρξουν σωστό νομοθετικό πλαίσιο, στιβαροί ελεγκτικοί μηχανισμοί, πραγματικό επενδυτικό ενδιαφέρον και σωστή εκπαίδευση (ακόμα και του υποψήφιου μικρο-επενδυτή!).

Στη Σχολή των Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του ΕΜΠ το μάθημα της Φωτοβολταϊκής Τεχνολογίας διδάσκεται για περισσότερο από 35 έτη με τον γράφοντα να έχει συμμετοχή σε όλη τη διαδρομή αυτή. Το παρόν σύγγραμμα απευθύνεται στους τελειόφοιτους φοιτητές της ΣΗΜΜΥ, που παρακολουθούν το μάθημα του 9^{ου} εξαμήνου «Φυσική, Τεχνολογία και Χρήσεις των Φωτοβολταϊκών», αλλά και σε όσους επιθυμούν να ενασχοληθούν με αυτήν την τεχνολογία, είτε από τεχνικής, είτε από επενδυτικής πλευράς.

Αφιερώνεται: πρωτίστως σε όλους τους φοιτητές μου στο Ε.Μ.Π., τους οποίους θεωρώ πνευματικά μου παιδιά, αλλά και στη Δημόσια και Δωρεάν Παιδεία, η οποία με κόπους και αγώνες γενεών αποκτήθηκε, και σήμερα δοκιμάζεται σκληρά από την οικονομική κρίση στην οποία έχει περιέλθει η χώρα μας.

Αθήνα, Ιανουάριος 2013

Κωνσταντίνος Θ. Δέρβος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.