



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

**ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ**

**«ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥ»**

Μεταπτυχιακή Εργασία

**ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΜΙΚΡΟΔΙΚΤΥΩΝ ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΣ  
ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ**

Δάβανος Γεώργιος

*Επιβλέπων Καθηγητής: Σολδάτος Αργύρης*

ΑΘΗΝΑ 2018



.....  
Γεώργιος Α. Δάβανος

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Γεώργιος Α. Δάβανος 2018

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 το συγγραφέα και δε πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.



## Περίληψη

Η πληθυσμιακή αύξηση της ανθρωπότητας, η αστικοποίηση και ο εκσυγχρονισμός έχουν οδηγήσει σε ένα από τα πιο αξιοσημείωτα ζητήματα της παγκόσμιας ατζέντας, την αύξηση της παγκόσμιας ζήτησης ενέργειας. Μια ολοκληρωμένη προσέγγιση για την κάλυψη αυτών των αναγκών σε ενέργεια αναπτύχθηκε με τη μορφή των μικροδικτύων. Τα μικροδίκτυα είναι δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας χαμηλής ή μέσης τάσης που μπορούν να ενσωματώσουν ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ), συμβατικές γεννήτριες, συστήματα αποθήκευσης ενέργειας και μονάδες κατανάλωσης ενέργειας. Τα μικροδίκτυα μπορούν να λειτουργήσουν αυτόνομα (νησιδοποίηση) ή να διασυνδεθούν με ένα μεγαλύτερο δίκτυο.

Στόχος αυτής της εργασίας είναι η παρουσίαση και ο σχεδιασμός μικροδικτύων που βασίζονται σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας οι οποίες μπορούν να λειτουργούν είτε διασυνδεδεμένες στο κεντρικό δίκτυο διανομής, είτε αυτόνομα. Κατά την σύνδεση με το κεντρικό δίκτυο διανομής, το μικροδίκτυο δέχεται ενέργεια από το δίκτυο ή εγχέει ενέργεια σε αυτό, προκειμένου να ρυθμίσει την ισορροπία ισχύος ανάμεσα στην παροχή ενέργειας και τη ζήτηση φορτίου και να μεγιστοποιεί τα λειτουργικά του οφέλη. Στον νησιδοποιημένο τρόπο λειτουργίας, το μικροδίκτυο λειτουργεί αυτόνομα και προμηθεύει ηλεκτρική ενέργεια τους καταναλωτές διατηρώντας σταθερή την ηλεκτρική ανταλλαγή μεταξύ παραγωγής και κατανάλωσης. Για την αποτελεσματική λειτουργία των μικροδικτύων απαιτούνται συστήματα ενεργειακής διαχείρισης τα οποία με την ενσωμάτωση στρατηγικών ελέγχου επιτυγχάνουν την βέλτιστη διαχείρισή τους.

Για την επίτευξη του στόχου διενεργήθηκαν τρία πειράματα στο Εργαστήριο Γεωργικής Μηχανικής του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών. Το πρώτο πείραμα παρουσιάζει τα αποτελέσματα ενός μονοφασικού AC μικροδικτύου. Το μικροδίκτυο δοκιμάστηκε τόσο σε διασύνδεση με το δίκτυο διανομής όσο και σε αυτόνομη λειτουργία. Το δεύτερο πείραμα ασχολείται με ένα αυτόνομο τριφασικό AC μικροδίκτυο όπου παρουσιάζεται η απόδοσή του στην κάλυψη διαφόρων ηλεκτρικών φορτίων καθώς και στη σταθερή διατήρηση της ηλεκτρικής ανταλλαγής. Στο τρίτο πείραμα παρουσιάζεται μια μονάδα αφαλάτωσης αντίστροφης ώσμωσης, βασισμένη σε ένα αυτόνομο DC μικροδίκτυο που τροφοδοτείται από ένα φωτοβολταϊκό σύστημα και ενσωματώνει μια συσκευή αποθήκευσης ενέργειας (συσσωρευτή). Η μονάδα αφαλάτωσης παράγει πόσιμο νερό κατά τη διάρκεια της ημέρας ακόμη και σε περιόδους όπου η παραγόμενη ενέργεια από τη φωτοβολταϊκή γεννήτρια δεν επαρκεί για τη λειτουργία της μονάδας αφαλάτωσης. Επιπλέον, σχεδιάστηκε ένα σύστημα διαχείρισης και ελέγχου ενέργειας για την αποτελεσματική λειτουργία του μικροδικτύου. Ως εκ τούτου, με την έξυπνη διαχείριση της ενέργειας, η μονάδα αφαλάτωσης με τη χρήση συσσωρευτή παράγει πολύ περισσότερο πόσιμο νερό, ειδικά σε ημέρες με μεταβλητή ηλιακή ακτινοβολία, σε σύγκριση με την ίδια μονάδα αφαλάτωσης η οποία τροφοδοτείται απ' ευθείας από τη φωτοβολταϊκή γεννήτρια χωρίς να μεσολαβεί το σύστημα αποθήκευσης, διαχείρισης και ελέγχου ενέργειας.

Λέξεις κλειδιά: Φωτοβολταϊκό σύστημα, συσσωρευτές, τριφασικό AC μικροδίκτυο, μονοφασικό AC μικροδίκτυο, DC μικροδίκτυο, διεσπαρμένη παραγωγή, έλεγχος, πειραματική διαδικασία, LabVIEW.

# Abstract

The increase of human population, urbanization and modernization have led to one of most notable issues of the worldwide agenda, which is the outstanding growth of global energy. An integrated approach in order to cover these needs in power was developed in the form of a microgrid. Microgrids are low or medium voltage power grids which can integrate renewable energy sources (RES), conventional generators, energy storage systems and energy consumption units. Microgrids can operate autonomously (island mode) or interconnected with a larger grid.

The aim in this thesis is to present the concept and the design of renewable energy microgrids which can operate either in grid-connected or islanded (autonomous) mode. In the grid-connected mode, the microgrid purchases power from the grid or inject power into it, in order to regulate power balance between power supply and load demand and maximize its operational benefits. In the islanded mode, the microgrid operates autonomously and supply power to the customers by keeping the electrical interchange between production and consumption stable. Energy management systems (EMS) are required for the effective operation of microgrids, and it is eventually crucial to incorporate optimal control strategies for their successful management.

In this procedure took place three experiments at the Laboratory of Agricultural Engineering of Agricultural University of Athens. The first experiment presents the results of a single-phase AC microgrid. The microgrid was tested both in grid-connected and in autonomous mode. The second experiment deals with an autonomous three-phase AC microgrid and its performance is presented in order to cover various electrical loads and keeping the electrical interchange stable. In the third experiment an autonomous PV powered small-scale seawater reverse osmosis (SWRO) desalination system, based on a DC microgrid concept that incorporates an energy storage device (battery), is presenting. The desalination unit produces potable water during daytime even at periods when the produced energy from the PV array is not enough to operate the desalination unit. In addition, an energy management and control system was designed for the efficient operation of the microgrid. Therefore, the intelligently managed PV powered SWRO system with battery produces considerably more fresh water, especially at days with variable solar irradiation, as compared to the same SWRO system directly PV driven without any storage and energy management control system.

Key words: Photovoltaic system (PV), batteries, three phase AC microgrid, single phase AC microgrid, DC microgrid, distributed generation, control, experiment, LabVIEW.

## Ευχαριστίες

Καταρχάς, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή του ΕΜΠ κ. Σολδάτο Αργύριο για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε και μου ανάθεσε την εργασία αυτή.

Εν συνεχεία, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή του ΓΠΑ κ. Αρβανίτη Κωνσταντίνο για την ευκαιρία που μου έδωσε να εφαρμόσω το πειραματικό μέρος της εργασίας στο εργαστήριο Γεωργικής Μηχανολογίας του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαιτέρως τον υποψήφιο διδάκτορα Χρήστο Σπυρίδων Καραβά για την πολύτιμη βοήθεια του, τις υποδείξεις, τις διορθώσεις και την καθοδήγησή του καθόλα τη διάρκεια της εργασίας. Επίσης θα ήθελα να τον ευχαριστήσω για τη συνδρομή του κατά τον προγραμματισμό των συσκευών.

Η παρούσα εργασία αφιερώνεται στην οικογένεια μου για τη συμπαράσταση που μου παρείχε όλα αυτά τα χρόνια των σπουδών μου και αποτελεί τον οδηγό καθ' όλη την πορεία της ζωής μου.

Αθήνα, Οκτώβριος 2018

Γεώργιος Α. Δάβανος





# Περιεχόμενα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 : ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	17
1.1 Σκοπός Εργασίας .....	17
1.2 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση.....	17
1.3 Δομή Εργασίας .....	17
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 : ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ.....	19
2.1 ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ .....	19
2.1.1 Δημιουργία Ηλιακής Ακτινοβολίας .....	19
2.1.2 Χαρακτηριστικά Ηλιακής Ακτινοβολίας .....	19
2.1.3 Διέλευση Ηλιακής Ακτινοβολίας στην Ατμόσφαιρα .....	20
2.1.4 Συνιστώσες Ηλιακής Ακτινοβολίας .....	23
2.1.5 Μέτρηση Ηλιακής Ακτινοβολίας .....	25
2.2 ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΗ ΜΕΤΑΤΡΟΠΗ .....	25
2.2.1 Ημιαγωγοί .....	25
2.2.2 Επαφές p - n .....	26
2.2.3 Δίοδος Επαφής.....	27
2.2.4 Φωτοβολταϊκό Φαινόμενο.....	29
2.3 ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟ ΣΤΟΙΧΕΙΟ .....	30
2.3.1 Δομή Φωτοβολταϊκού Στοιχείου.....	30
2.3.2 Τύποι Φωτοβολταϊκών Στοιχείων .....	31
2.3.2.1 Τύποι φωτοβολταϊκών στοιχείων πυριτίου μεγάλου πάχους.....	31
2.3.2.2 Φωτοβολταϊκά στοιχεία λεπτών υμενίων, Thin Film.....	32
2.3.2.3 Πολυστρωματικά φωτοβολταϊκά στοιχεία, HIT.....	33
2.3.3 Ηλεκτρική Συμπεριφορά Φωτοβολταϊκών Στοιχείων .....	33
2.3.4 Παράγοντες που Επηρεάζουν τη Χαρακτηριστική I – V.....	36
2.3.4.1 Ένταση ηλιακής ακτινοβολίας G .....	36
2.3.4.2 Θερμοκρασία του φωτοβολταϊκού στοιχείου T.....	37
2.3.5 Ισχύς Αιχμής και Βαθμός Απόδοσης Φωτοβολταϊκού Στοιχείου.....	38
2.4 ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ .....	39
2.4.1 Δομή Φωτοβολταϊκού Πλαισίου .....	39
2.4.2 Ηλεκτρική Σύνδεση Φωτοβολταϊκών Στοιχείων σε Πλαίσιο.....	39
2.4.3 Κατασκευαστικές Λεπτομέρειες Φωτοβολταϊκών Πλαισίων .....	42
2.4.3.1 Υγρασία.....	42

2.4.3.2	Υπερθέρμανση.....	42
2.4.4	Ισχύς Αιχμής και Βαθμός Απόδοσης Φωτοβολταϊκού Πλαισίου .....	44
2.5	ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΗ ΣΥΣΤΟΙΧΙΑ .....	46
2.5.1	Δομή Φωτοβολταϊκής Συστοιχίας .....	46
2.5.2	Ηλεκτρική Σύνδεση Πλαισίων σε Συστοιχίες .....	46
2.5.3	Προσανατολισμός και Στήριξη Φωτοβολταϊκών Συστοιχιών .....	48
2.5.4	Κατασκευαστικές Λεπτομέρειες Φωτοβολταϊκής Συστοιχίας .....	51
2.5.5	Ισχύς Αιχμής και Βαθμός Απόδοσης Φωτοβολταϊκής Συστοιχίας .....	52
2.6	ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ .....	53
2.6.1	Απομονωμένα Φωτοβολταϊκά Συστήματα .....	53
2.6.1.1	Αυτόνομα συστήματα .....	53
2.6.1.2	Υβριδικά συστήματα .....	54
2.6.2	Διασυνδεδεμένα Φωτοβολταϊκά Συστήματα .....	55
2.6.2.1	Διασυνδεδεμένα συστήματα κεντρικού σταθμού.....	55
2.6.2.2	Διασυνδεδεμένα συστήματα διεσπαρμένης παραγωγής .....	55
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	: ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΙ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΕΣ .....	57
3.1	ΓΕΝΙΚΑ .....	57
3.2	ΦΟΡΤΙΣΗ – ΕΚΦΟΡΤΙΣΗ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΩΝ .....	57
3.3	ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΩΝ .....	58
3.4	ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΣΥΝΔΕΣΗ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΩΝ .....	60
3.5	ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΕΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ .....	61
3.6	ΡΥΘΜΙΣΤΕΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΩΝ .....	62
3.7	ΕΙΔΗ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΩΝ .....	64
3.7.1	Μολύβδου – Οξέος (Lead Acid).....	65
3.7.1.1	Χωρητικότητα .....	65
3.7.1.2	Θερμοκρασία.....	65
3.7.1.3	Πυκνότητα ηλεκτρολύτη .....	66
3.7.1.4	Ονομαστική τάση .....	66
3.7.1.5	Διαδικασία Φόρτισης – Εκφόρτισης .....	66
3.7.1.6	Μέθοδοι φόρτισης .....	67
3.7.1.7	Ημέρες αυτονομίας.....	67
3.7.1.8	Διάρκεια ζωής.....	68
3.7.2	Νικελίου – Καδμίου (NiCd).....	69
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4	: ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΙΣ/ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΙΣ .....	72
4.1	ΓΕΝΙΚΑ .....	72

4.2 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΩΝ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ.....	73
4.2.1 Αλγόριθμος Σημείου Μέγιστης Ισχύος MPP .....	73
4.3 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΩΝ.....	74
4.3.1 Τοπολογίες Αντιστροφών .....	76
4.3.2 Κατηγορίες Αντιστροφών .....	78
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 : ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ .....	79
5.1 ΓΕΝΙΚΑ.....	79
5.2 ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ.....	79
5.2.1 Σύστημα Μεταφοράς Συγκεντρωτικής Παραγωγής.....	81
5.2.2 Τοπολογία Δικτύων Διανομής Συγκεντρωτικής Παραγωγής .....	82
5.2.3 Πλεονεκτήματα Συγκεντρωτικής Παραγωγής.....	84
5.2.4 Μειονεκτήματα Συγκεντρωτικής Παραγωγής.....	84
5.3 ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ.....	85
5.3.1 Λόγοι Επανεμφάνισης Διεσπαρμένης Παραγωγής.....	86
5.3.2 Δίκτυα Διανομής Διεσπαρμένης Παραγωγής .....	86
5.3.3 Πλεονεκτήματα Διεσπαρμένης Παραγωγής .....	88
5.3.4 Μειονεκτήματα Διεσπαρμένης Παραγωγής .....	89
5.4 ΜΙΚΡΟΔΙΚΤΥΑ.....	90
5.4.1 Μονάδες Αποθήκευσης Ενέργειας .....	91
5.4.2 AC Μικροδίκτυα .....	92
5.4.3 DC Μικροδίκτυα .....	93
5.4.4 Πλεονεκτήματα DC Μικροδικτύων .....	94
5.4.5 Τοπολογίες DC Μικροδικτύων .....	95
5.4.6 Διασύνδεση Μικροδικτύων.....	97
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 : ΜΟΝΟΦΑΣΙΚΟ AC ΜΙΚΡΟΔΙΚΤΥΟ .....	98
6.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	98
6.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ.....	98
6.2.1 Πηγή Ενέργειας .....	98
6.2.2 Ηλεκτρονικά Ισχύος.....	101
6.2.3 Μονάδα Αποθήκευσης Ηλεκτρικής Ενέργειας .....	107
6.2.4 Ηλεκτρονικό Φορτίο.....	108
6.2.5 Διάταξη Μονοφασικού AC Μικροδικτύου .....	110
6.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ .....	111
6.3.1 Ανάλυση 1 <sup>ου</sup> Τμήματος Λειτουργίας Μικροδικτύου .....	113

6.3.2	Ανάλυση 2 <sup>ου</sup> Τμήματος Λειτουργίας Μικροδικτύου .....	115
6.3.3	Ανάλυση 3 <sup>ου</sup> Τμήματος Λειτουργίας Μικροδικτύου .....	116
6.3.4	Ανάλυση 4 <sup>ου</sup> Τμήματος Λειτουργίας Μικροδικτύου .....	119
6.3.5	Ανάλυση 5 <sup>ου</sup> Τμήματος Λειτουργίας Μικροδικτύου .....	120
6.3.6	Ανάλυση Συχνότητας.....	121
6.3.7	Ανάλυση Συσσωρευτών .....	122
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 : ΤΡΙΦΑΣΙΚΟ AC ΜΙΚΡΟΔΙΚΤΥΟ .....		124
7.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	124
7.2	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ.....	125
7.2.1	Πηγή Ενέργειας .....	125
7.2.2	Ηλεκτρονικά Ισχύος.....	129
7.2.3	Μονάδα Αποθήκευσης Ενέργειας.....	134
7.2.4	Φορτία.....	135
7.2.5	Διάταξη Τριφασικού AC Μικροδικτύου .....	136
7.3	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ .....	137
7.3.1	Ανάλυση Στάθμης Φόρτισης .....	138
7.3.2	Ανάλυση Συχνότητας.....	140
7.3.3	Ανάλυση Τάσης και Θερμοκρασίας Συσσωρευτών .....	141
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 : DC ΜΙΚΡΟΔΙΚΤΥΟ .....		143
8.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	143
8.2	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ.....	143
8.2.1	Πηγή Ενέργειας .....	143
8.2.2	Φορτία.....	144
8.2.3	Μονάδα Αποθήκευσης Ενέργειας.....	147
8.2.4	Ηλεκτρονικά Όργανα.....	148
8.2.5	Σύστημα Διαχείρισης Ενέργειας.....	151
8.2.6	Ανάλυση Λειτουργίας DC Μικροδικτύου .....	152
8.2.7	Διατάξεις DC Μικροδικτύου .....	154
8.3	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ .....	156
8.3.1	Λειτουργία Μικροδικτύου Χωρίς Συσσωρευτή .....	158
8.3.2	Λειτουργία Μικροδικτύου Με Συσσωρευτή .....	161
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9 : ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ .....		166
9.1	Συμπεράσματα.....	166
9.2	Μελλοντική Εργασία.....	167

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

- Πίνακας 2.1: Ενδεικτικές τιμές ισχύος ηλιακής ακτινοβολίας
- Πίνακας 2.2: Ενδεικτική απόδοση σταθερής φωτοβολταϊκής συστοιχίας ανάλογα με τον προσανατολισμό και την κλίση στην Ελλάδα
- Πίνακας 6.1: Χαρακτηριστικά φωτοβολταϊκού πλαισίου
- Πίνακας 6.2: Χαρακτηριστικά φωτοβολταϊκής συστοιχίας
- Πίνακας 6.3: Χαρακτηριστικά αντιστροφέα Sunny Boy 330
- Πίνακας 6.4: Χαρακτηριστικά μετατροπέα Sunny Island 5048
- Πίνακας 6.5: Χαρακτηριστικά συσσωρευτών
- Πίνακας 6.6: Χαρακτηριστικά ηλεκτρονικού φορτίου
- Πίνακας 7.1: Χαρακτηριστικά φωτοβολταϊκού πλαισίου
- Πίνακας 7.2: Χαρακτηριστικά φωτοβολταϊκής συστοιχίας
- Πίνακας 7.3: Αποτελέσματα μετρήσεων συσκευής PVE (PVPM 1000C40)
- Πίνακας 7.4: Χαρακτηριστικά Sunny Tripower 5000TL
- Πίνακας 7.5: Χαρακτηριστικά Sunny Island 8H
- Πίνακας 7.6: Χαρακτηριστικά συσσωρευτών
- Πίνακας 8.1: Χαρακτηριστικά DC κινητήρα τροφοδοσίας
- Πίνακας 8.2: Χαρακτηριστικά αντλίας τροφοδοσίας
- Πίνακας 8.3: Χαρακτηριστικά DC Driver
- Πίνακας 8.4: Χαρακτηριστικά συσσωρευτή
- Πίνακας 8.5: Χαρακτηριστικά μετατροπέων DC-to-DC
- Πίνακας 8.6: Χαρακτηριστικά μετατροπέα AC-to-DC
- Πίνακας 8.7: Τυπικές τιμές λειτουργίας μονάδας αφαλάτωσης
- Πίνακας 8.8: Συνολικά αποτελέσματα λειτουργίας DC μικροδικτύου χωρίς συσσωρευτή
- Πίνακας 8.9: Συνολικά αποτελέσματα λειτουργίας DC μικροδικτύου με συσσωρευτή

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

- Διάγραμμα 2.1: Ημερήσια ένταση συνιστωσών προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας
- Διάγραμμα 2.2: Χαρακτηριστική καμπύλη  $I - V$  διόδου επαφής
- Διάγραμμα 2.3: Χαρακτηριστικές  $I - V$  και  $P - V$  φωτοβολταϊκού στοιχείου
- Διάγραμμα 2.4: Συντελεστή πλήρωσης
- Διάγραμμα 2.5: Μεταβολή τάσεως ανοιχτού κυκλώματος και ρεύματος βραχυκύκλωσης συναρτήσει της ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας
- Διάγραμμα 2.6: Χαρακτηριστικές  $I - V$  φωτοβολταϊκού πλαισίου για διάφορες τιμές ακτινοβολίας
- Διάγραμμα 2.7: Χαρακτηριστικές  $I - V$  φωτοβολταϊκού πλαισίου για διάφορες τιμές θερμοκρασίας
- Διάγραμμα 2.8: Χαρακτηριστική  $I - V$  φωτοβολταϊκών στοιχείων συνδεδεμένων σε σειρά
- Διάγραμμα 2.9: Χαρακτηριστική  $I - V$  φωτοβολταϊκών στοιχείων συνδεδεμένων παράλληλα
- Διάγραμμα 2.10: Χαρακτηριστική  $I - V$  με σκιασμένο φωτοβολταϊκό στοιχείο συνδεδεμένο α) παράλληλα και β) σε σειρά [12]
- Διάγραμμα 2.11: Παραγόμενη ισχύς από συστοιχία με και χωρίς σύστημα παρακολούθησης της τροχιάς του ήλιου
- Διάγραμμα 3.1: Τυπική διακύμανση στάθμης φόρτισης και βάθους εκφόρτισης φωτοβολταϊκής συστοιχίας κατά τη διάρκεια ενός έτους [21]
- Διάγραμμα 3.2: Σημεία ελέγχου ρυθμιστή συσσωρευτών κατά τη διαδικασία φόρτισης και εκφόρτισης [21]
- Διάγραμμα 3.3: Συμπεριφορά συσσωρευτή Μολύβδου – Οξέος σε σχέση με το ρυθμό εκφόρτισης
- Διάγραμμα 3.4: Επίδραση της θερμοκρασίας α) στην τάση β) στη χωρητικότητα ενός συσσωρευτή Μολύβδου – Οξέος [22]
- Διάγραμμα 3.5: Μεταβολή πυκνότητας ηλεκτρολύτη, πολικής τάσεως και χωρητικότητας σε στοιχείο ενός συσσωρευτή Μολύβδου – Οξέος κατά τις φάσεις φόρτισης και εκφόρτισης [23]
- Διάγραμμα 3.6: Αναμενόμενοι κύκλοι λειτουργίας ενός συσσωρευτή Μολύβδου – Οξέος
- Διάγραμμα 3.7: Επίδραση του βάθους εκφόρτισης και του πλήθους των κύκλων λειτουργίας ανά έτος στη διάρκεια ζωής ενός συσσωρευτή Μολύβδου – Οξέος σε θερμοκρασία 25 °C
- Διάγραμμα 3.8: Τυπικές καμπύλες φόρτισης ενός συσσωρευτή NiCd συναρτήσει α) της θερμοκρασίας και β) του ρυθμού φόρτισης [25]
- Διάγραμμα 3.9: Τυπική καμπύλη εκφόρτισης ενός συσσωρευτή NiCd συναρτήσει του ρυθμού εκφόρτισης [25]

Διάγραμμα 3.10: α) Χωρητικότητα ενός συσσωρευτή NiCd συναρτήσει των κύκλων λειτουργίας β) Διάρκεια ζωής ενός συσσωρευτή NiCd συναρτήσει της θερμοκρασίας [25]

Διάγραμμα 4.1: Χαρακτηριστική καμπύλη P – V φωτοβολταϊκού πλαισίου

Διάγραμμα 6.1: Χαρακτηριστική I – V φωτοβολταϊκού πλαισίου Siemens SM55

Διάγραμμα 6.2: Τρόποι ρύθμισης Sunny Island 5048 για την απόρριψη φορτίου λόγω κινδύνου αποφόρτισης των συσσωρευτών

Διάγραμμα 6.3: Λειτουργία φόρτισης συσσωρευτών από το Sunny Island 5048

Διάγραμμα 6.4: Η ηλιακή ακτινοβολία κατά τη λειτουργία του μικροδικτύου

Διάγραμμα 6.5: Συνολική απεικόνιση λειτουργίας μικροδικτύου

Διάγραμμα 6.6: Ηλιακή ακτινοβολία και παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος των φωτοβολταϊκών συστοιχιών κατά το 1ο τμήμα ανάλυσης

Διάγραμμα 6.7: Λειτουργία μικροδικτύου κατά το 1ο Τμήμα ανάλυσης

Διάγραμμα 6.8: Ηλιακή ακτινοβολία και παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος των φωτοβολταϊκών συστοιχιών κατά το 2ο τμήμα ανάλυσης

Διάγραμμα 6.9: Λειτουργία μικροδικτύου κατά το 2ο Τμήμα ανάλυσης

Διάγραμμα 6.10: Ηλιακή ακτινοβολία και παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος των φωτοβολταϊκών συστοιχιών κατά το 3ο τμήμα ανάλυσης

Διάγραμμα 6.11: Λειτουργία μικροδικτύου κατά το 3ο Τμήμα ανάλυσης

Διάγραμμα 6.12: Ηλιακή ακτινοβολία και παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος των φωτοβολταϊκών συστοιχιών κατά το 4ο τμήμα ανάλυσης

Διάγραμμα 6.13: Λειτουργία μικροδικτύου κατά το 4ο Τμήμα ανάλυσης

Διάγραμμα 6.14: Ηλιακή ακτινοβολία και παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος των φωτοβολταϊκών συστοιχιών κατά το 5ο τμήμα ανάλυσης

Διάγραμμα 6.15: Λειτουργία μικροδικτύου κατά το 5ο Τμήμα ανάλυσης

Διάγραμμα 6.16: Εστίαση στην επιβολή φορτίου του 5ου Τμήματος ανάλυσης

Διάγραμμα 6.17: Μεταβολές συχνότητας κατά τη λειτουργία του μικροδικτύου

Διάγραμμα 6.18: Μεταβολές τάσης και θερμοκρασίας συσσωρευτών κατά τη λειτουργία του μικροδικτύου

Διάγραμμα 7.1: Χαρακτηριστική I – V φωτοβολταϊκού πλαισίου RECOM 250 Wp

Διάγραμμα 7.2: Χαρακτηριστικές I – V φωτοβολταϊκής συστοιχίας για διάφορες τιμές ακτινοβολίας

Διάγραμμα 7.3: Ηλιακή ακτινοβολία και παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος της φωτοβολταϊκής συστοιχίας

Διάγραμμα 7.4: Λειτουργία μικροδικτύου συναρτήσει της στάθμης φόρτισης συσσωρευτών

Διάγραμμα 7.5: Εστίαση κατά τη δεύτερη ημέρα λειτουργίας του μικροδικτύου

Διάγραμμα 7.6: Λειτουργία μικροδικτύου συναρτήσει της συχνότητας

Διάγραμμα 7.7: Εστίαση κατά τη δεύτερη ημέρα λειτουργίας του μικροδικτύου

Διάγραμμα 7.8: Μεταβολές θερμοκρασίας συσσωρευτών κατά τη λειτουργία του μικροδικτύου

Διάγραμμα 7.9: Μεταβολές τάσης συσσωρευτών κατά τη λειτουργία του μικροδικτύου

Διάγραμμα 8.1: Σχηματικό διάγραμμα λειτουργίας μονάδας αφαλάτωσης

Διάγραμμα 8.2: Δομή λειτουργίας συστήματος FLEXIVA

Διάγραμμα 8.3: Σύνδεση μονάδων στο FLEXIVA

Διάγραμμα 8.4: Διάγραμμα ροής ελέγχου λειτουργίας του κινητήρα μέσω του συσσωρευτή

Διάγραμμα 8.5: Απόδοση φωτοβολταϊκού συστήματος κατά τη λειτουργία του DC μικροδικτύου

Διάγραμμα 8.6: Λειτουργία μονάδας αφαλάτωσης

Διάγραμμα 8.7: Λειτουργία DC μικροδικτύου χωρίς συσσωρευτή κατά την 1η ημέρα

Διάγραμμα 8.8: Λειτουργία DC μικροδικτύου χωρίς συσσωρευτή κατά τη 2η ημέρα

Διάγραμμα 8.9: Λειτουργία DC μικροδικτύου χωρίς συσσωρευτή κατά την 3η ημέρα

Διάγραμμα 8.10: Λειτουργία DC μικροδικτύου με συσσωρευτή κατά την 1η ημέρα

Διάγραμμα 8.11: Ροή παραγωγής DC μικροδικτύου με συσσωρευτή κατά την 1η ημέρα

Διάγραμμα 8.12: Λειτουργία DC μικροδικτύου με συσσωρευτή κατά τη 2η ημέρα

Διάγραμμα 8.13: Ροή παραγωγής DC μικροδικτύου με συσσωρευτή κατά τη 2η ημέρα

Διάγραμμα 8.14: Λειτουργία DC μικροδικτύου με συσσωρευτή κατά την 3η ημέρα

Διάγραμμα 8.15: Ροή παραγωγής DC μικροδικτύου με συσσωρευτή κατά την 3η ημέρα



# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 : ΕΙΣΑΓΩΓΗ

## 1.1 Σκοπός Εργασίας

Το υπάρχον σύστημα διανομής βρίσκεται στα όρια του και πολύ σύντομα δε θα μπορεί να ανταποκριθεί στην αύξηση της ζήτησης. Συνεπώς, θα πρέπει να μεταβούμε σε ένα νέο, ευφυές σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας, όπου το ζητούμενο θα είναι η αύξηση της ποιότητας ισχύος και της απόδοσης του συστήματος. Τα μικροδίκτυα φαίνεται να είναι η λύση του συγκεκριμένου προβλήματος και γι' αυτό το λόγο η έρευνα διεθνώς κατευθύνεται προς αυτό το αντικείμενο.

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη συμπεριφοράς αυτόνομων ή/και διασυνδεδεμένων μικροδικτύων (AC και DC) υπό πραγματικές συνθήκες λειτουργίας. Πιο συγκεκριμένα πραγματοποιήθηκαν πειραματικές δοκιμές σε: (α) αυτόνομο και διασυνδεδεμένο μονοφασικό AC μικροδίκτυο, (β) αυτόνομο τριφασικό AC μικροδίκτυο και (γ) αυτόνομο DC μικροδίκτυο. Επιπλέον, αναλύεται λεπτομερώς η λειτουργία των φωτοβολταϊκών συστημάτων, καθώς αποτελούν την κύρια πηγή ενέργειας των συγκεκριμένων μικροδικτύων.

## 1.2 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

Η βιβλιογραφική ανασκόπηση αφορά κυρίως πρόσφατες έρευνες από τη διεθνή βιβλιογραφία σχετικά με την εισαγωγή των μικροδικτύων στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Επίσης, γίνεται αναφορά σε ελληνική και διεθνή βιβλιογραφία σχετική με τη λειτουργία των φωτοβολταϊκών συστημάτων, συσσωρευτών και ηλεκτρονικών ισχύος. Τέλος, γίνονται αναφορές και στο διαδίκτυο, κυρίως σε προϊόντα εταιριών που χρησιμοποιήθηκαν κατά την πειραματική διαδικασία.

## 1.3 Δομή Εργασίας

Τα μικροδίκτυα συνήθως αποτελούνται από τρεις βασικές κατηγορίες μονάδων: (α) τις μονάδες παραγωγής ενέργειας, (β) τις μονάδες αποθήκευσης ενέργειας και (γ) τις μονάδες κατανάλωσης. Τα μικροδίκτυα τα οποία μελετήθηκαν, αποτελούνται από ένα φωτοβολταϊκό σύστημα, από συσσωρευτές, από ηλεκτρονικά ισχύος και από διάφορες καταναλώσεις. Στα επόμενα κεφάλαια αναλύεται τόσο η θεωρητική όσο και η πειραματική συμπεριφορά των παραπάνω τμημάτων των μικροδικτύων.

Στο 1<sup>ο</sup> Κεφάλαιο γίνεται αναφορά στο σκοπό της παρούσας εργασίας.

Στο 2<sup>ο</sup> Κεφάλαιο παρουσιάζονται οι βασικές έννοιες που διέπουν τη φωτοβολταϊκή τεχνολογία (ηλιακή ακτινοβολία, φωτοβολταϊκή μετατροπή κτλ.), ενώ δίνεται μεγάλη έμφαση στη δομή και την κατηγοριοποίηση των φωτοβολταϊκών συστημάτων αναλύοντας το κάθε επιμέρους τμήμα (στοιχεία, πλαίσια, συστοιχίες).

Στο 3<sup>ο</sup> Κεφάλαιο αναλύονται οι ηλεκτρικοί συσσωρευτές αναφέροντας την αρχή λειτουργίας, τα χαρακτηριστικά μεγέθη, τους τρόπους συνδεσμολογίας και τα είδη που χρησιμοποιούνται σήμερα στα φωτοβολταϊκά συστήματα.

Στο 4<sup>ο</sup> Κεφάλαιο περιγράφονται τα ηλεκτρονικά ισχύος, τα χαρακτηριστικά τους και οι κατηγορίες τους, δίνοντας έμφαση στον τρόπο λειτουργίας τους στα φωτοβολταϊκά συστήματα.

Στο 5<sup>ο</sup> Κεφάλαιο γίνεται μια ιστορική αναδρομή στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας καταλήγοντας στη σημερινή κατάσταση όπου και εισάγεται η έννοια του μικροδικτύου. Επίσης, αναλύονται ενδελεχώς οι κατηγορίες και τα χαρακτηριστικά των μικροδικτύων.

Στο 6<sup>ο</sup> Κεφάλαιο παρουσιάζεται η πειραματική διερεύνηση της λειτουργίας ενός μονοφασικού AC μικροδικτύου. Οι πειραματικές δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν στο μικροδίκτυο αφορούν την αυτόνομη και την διασυνδεδεμένη λειτουργία του με το δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Κατά την πειραματική διερεύνηση επιβάλλονται διάφορα μεγέθη ωμικών φορτίων.

Στο 7<sup>ο</sup> Κεφάλαιο παρουσιάζεται η πειραματική διερεύνηση της λειτουργίας ενός τριφασικού AC μικροδικτύου. Το τριφασικό AC μικροδίκτυο αφορά ένα αυτόνομο φωτοβολταϊκό σύστημα φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων. Κατά την πειραματική διερεύνηση επιβάλλονται διάφορα μεγέθη ωμικών φορτίων.

Στο 8<sup>ο</sup> Κεφάλαιο παρουσιάζεται η πειραματική διερεύνηση της λειτουργίας ενός αυτόνομου DC μικροδικτύου σε διαφορετικές συνθήκες ηλιακής ακτινοβολίας. Το DC μικροδίκτυο αφορά μια μονάδα αφαλάτωσης και πραγματοποιήθηκαν δυο πειράματα, ένα χωρίς τη χρήση συσσωρευτή και ένα δεύτερο με τη χρήση του συσσωρευτή. Ο έλεγχος του συστήματος διαχείρισης της ενέργειας πραγματοποιήθηκε μέσω του λογισμικού LabVIEW.

Στο 9<sup>ο</sup> Κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα των πειραματικών δοκιμών καθώς και πιθανοί τρόποι περαιτέρω ανάπτυξης της συγκεκριμένης εργασίας.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 : ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

### 2.1 ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ

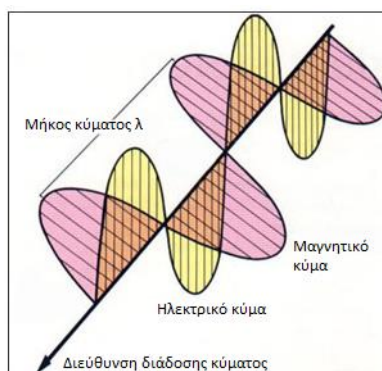
#### 2.1.1 Δημιουργία Ηλιακής Ακτινοβολίας

Ο Ήλιος είναι η βασική πηγή ενέργειας του πλανήτη μας και αποτελείται κυρίως από υδρογόνο (74 %), ήλιο (24 %) και άλλα συστατικά εκ των οποίων τα περισσότερα συναντώνται και στη γη [1]. Η υψηλή θερμοκρασία του, οφείλεται στις αυτοσυντηρούμενες θερμοπυρηνικές αντιδράσεις που συμβαίνουν στον πυρήνα του. Κάθε δευτερόλεπτο περίπου 655 εκατομμύρια τόνοι υδρογόνου από τη μάζα του Ήλιου μετατρέπονται σε 650 εκατομμύρια τόνους ηλίου που συνεχίζουν να αποτελούν μάζα του Ήλιου. Η μάζα που «χάνεται» (περίπου 4.6 εκατομμύρια τόνοι) μετασχηματίζεται σε ενέργεια και διαδίδεται στο σύμπαν με τη μορφή της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας (κύματα ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου) κατά 99.97 %, αλλά και σε σωματιδιακή μορφή.

#### 2.1.2 Χαρακτηριστικά Ηλιακής Ακτινοβολίας

Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα είναι συγχρονισμένα ταλαντούμενα ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία, τα οποία ταλαντώνονται σε κάθετα επίπεδα μεταξύ τους και κάθετα προς τη διεύθυνση διάδοσης [2]. Όπως όλα τα κύματα, έτσι και τα ηλεκτρομαγνητικά, έχουν κάποια χαρακτηριστικά με κυριότερα τα εξής:

- το μήκος κύματος  $\lambda$  (η απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών κορυφών ενός κύματος που οδεύει στο χώρο με ορισμένη συχνότητα)
- την ένταση της ακτινοβολίας (η ενέργεια που προσπίπτει στη μονάδα του χρόνου, στη μονάδα επιφάνειας)
- την ικανότητα εκπομπής για ορισμένο μήκος κύματος  $\lambda$  και ορισμένη θερμοκρασία  $T$  (η ενέργεια που εκπέμπει το σώμα από τη μονάδα επιφάνειας στη μονάδα του χρόνου)



Εικόνα 2.1: Μορφή ηλεκτρομαγνητικού κύματος

Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία εμφανίζεται με πολλές διαφορετικές μορφές ανάλογα το μήκος κύματος και τη συχνότητα στην οποία εκπέμπεται, όπως για παράδειγμα τα ραδιοκύματα, τα μικροκύματα, το ορατό φως, τις ακτίνες Χ κ.α.

Η ενέργεια της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας μεταδίδεται με τη μορφή διακεκριμένων ποσοτήτων ενέργειας, που ονομάζονται φωτόνια ή κβάντα φωτός. Τα φωτόνια διαδίδονται στο κενό με ταχύτητα  $c$  (300.000 km/s) και η σχέση με την οποία συνδέονται με τη συχνότητα  $f$  και το μήκος κύματος  $\lambda$  είναι:

$$c = \lambda * f \left[ \frac{km}{sec} \right] \quad (1)$$

ενώ κάθε ένα φωτόνιο μεταφέρει ενέργεια :

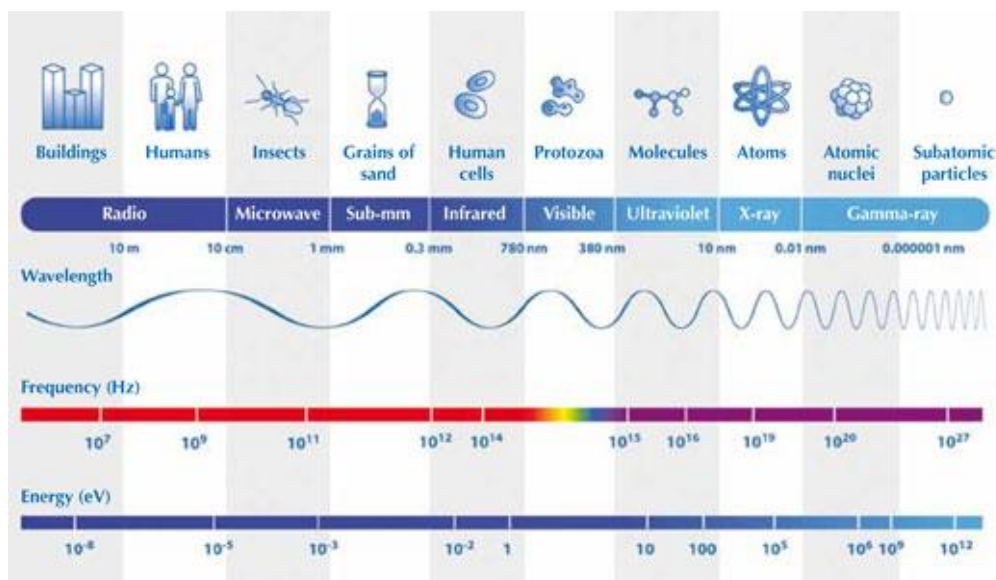
$$E = h * f = \frac{h * c}{\lambda} [J] \quad (2)$$

όπου  $h$  η σταθερά του Planck ( $6.67 * 10^{-34} [Js]$ ).

Δεδομένου ότι το μήκος κύματος  $\lambda$  εκφράζεται συνήθως σε [nm] και η ενέργεια του φωτονίου  $E$  σε [eV], η Εξίσωση 2 γράφεται:

$$E = \frac{1240}{\lambda} [eV] \quad (3)$$

Ένα σύνολο φωτονίων με διαφορετικές τιμές ενέργειας, διατεταγμένο με βάση την τιμή της ενέργειας, ονομάζεται φάσμα. Οι σχέσεις μεταξύ της συχνότητας, του μήκους κύματος και της ενέργειας είναι σχέσεις αλληλεξάρτησης. Κύματα με πολύ υψηλές συχνότητες, όπως οι ακτίνες X και οι υπεριώδεις ακτίνες, συνοδεύονται από πολύ «στενά» μήκη κύματος και μεγάλα ποσά ενέργειας. Το αντίθετο παρατηρείται σε κύματα μικρής συχνότητας και μεγάλου μήκους κύματος, όπως τα ραδιοκύματα και η ορατή ακτινοβολία.



Εικόνα 2.2: Ηλεκτρομαγνητικό φάσμα [3]

### 2.1.3 Διέλευση Ηλιακής Ακτινοβολίας στην Ατμόσφαιρα

Όσο πιο μεγάλη είναι η διαδρομή μιας δέσμης φωτός στην ατμόσφαιρα, τόσο μεγαλύτερο ποσοστό της ενέργειάς της χάνεται κατά τη διέλευσή της μέσα από τα στρώματα της ατμόσφαιρας. Το μήκος της διαδρομής της ηλιακής ακτινοβολίας μέσα στην ατμόσφαιρα

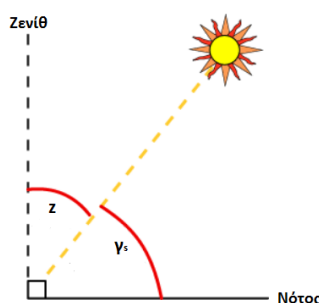
μέχρι το επίπεδο της θάλασσας, χαρακτηρίζεται από έναν αριθμό που ονομάζεται αέριος μάζα (AM – Air Mass). Η AM είναι ο λόγος της διαδρομής του φωτός μέσα στην ατμόσφαιρα, προς το συνολικό πάχος της ατμόσφαιρας.

$$AM = \frac{1}{\cos z} \quad (4)$$

ή

$$AM = \frac{1}{\cos(90^\circ - \gamma_s)} \quad (5)$$

όπου  $z$  [°] η γωνία μεταξύ των ηλιακών ακτινών και της διεύθυνσης του Ζενίθ του τόπου και  $\gamma_s$  [°] η γωνία πρόσπτωσης που σχηματίζεται μεταξύ της ηλιακής ακτινοβολίας και του οριζώντιου επιπέδου (νότια διεύθυνση για το βόρειο ημισφαίριο).



**Εικόνα 2.3: Σχηματισμός γωνιών της ηλιακής ακτινοβολίας ανάλογα με τη θέση του ήλιου στον ουρανό**

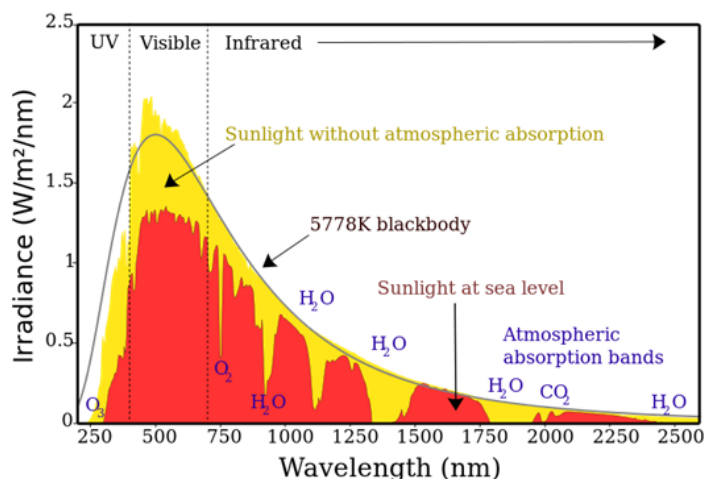
Το ποσό της ηλιακής ενέργειας που πέφτει κάθετα στη μονάδα της επιφάνειας, που τοποθετείται στο ανώτερο όριο της ατμόσφαιρας, ανά μονάδα χρόνου και όταν η γη βρίσκεται στη μέση απόσταση από τον ήλιο ( $AM=0$ ), ονομάζεται «πυκνότητα ισχύος ηλιακής σταθεράς» και εκτιμάται σε  $1367 \pm 5 \text{ W/m}^2$ . Η εξασθένηση της ηλιακής ακτινοβολίας που προκαλείται από την ατμόσφαιρα όταν ο ήλιος βρίσκεται ακριβώς πάνω από τη θέση παρατήρησης ( $AM=1$ ) έχει ως αποτέλεσμα την ελάττωση της ακτινοβολίας στο επίπεδο της θάλασσας στην τιμή  $1000 \text{ W/m}^2$  και συνήθως αναφέρεται ως «ισχύς ενός Ήλιου». Η τιμή αυτή επιλέγεται ως πρότυπη ηλιακή ακτινοβολία για τις εφαρμογές των επίγειων φωτοβολταϊκών συστημάτων.

Ορισμένες ενδεικτικές τιμές ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας σε σχέση με την AM παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.1:

**Πίνακας 2.1: Ενδεικτικές τιμές ισχύος ηλιακής ακτινοβολίας**

Αέριος Μάζα	Ζενιθία Γωνία	Γωνία Πρόσπτωσης	Ισχύς [ $\text{W/m}^2$ ]
AM = 0	Ακτινοβολία στο διάστημα μόλις έξω από την ατμόσφαιρα της γής		1367
AM = 1	$z = 0^\circ$	$\gamma_s = 90^\circ$	1000
AM = 1,5	$z = 48,19^\circ$	$\gamma_s = 41,8^\circ$	830
AM = 2	$z = 60^\circ$	$\gamma_s = 30^\circ$	700

Όταν μια ποσότητα ακτινοβολίας προσπίπτει σ' ένα σώμα, τότε ένα μέρος αυτής απορροφάται από αυτό, ένα άλλο μέρος της ανακλάται και το υπόλοιπο περνάει μέσα απ' το σώμα αλλάζοντας ταχύτητα και μήκος κύματος, ανάλογα με το δείκτη διάθλασης του σώματος. Όταν όλη η προσπίπτουσα ακτινοβολία απορροφάται από ένα σώμα τότε αυτό ονομάζεται μέλαν σώμα. Η ισχύς της ηλιακής ακτινοβολίας αλλά και η φασματική και κατευθυντική της κατανομή, αλλάζει σημαντικά καθώς διέρχεται από την ατμόσφαιρα της γης. Οι αλλαγές αυτές οφείλονται στην απορρόφηση και τη σκέδαση της ακτινοβολίας από τα συστατικά της ατμόσφαιρας.

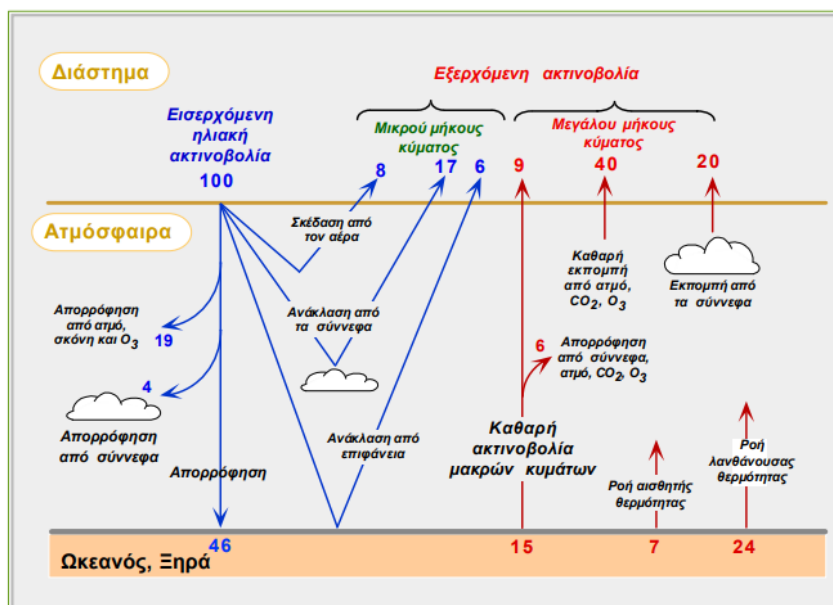


Εικόνα 2.4: Φάσμα ηλιακής ακτινοβολίας [4]

Το 99 % της ηλιακής ενέργειας εμφανίζεται σε μήκος κύματος από 250 nm έως 400 nm και έχει την εξής κατανομή:

- Υπεριώδης περιοχή [ $\lambda < 380$  nm] περιέχει το ~7 % της ενέργειας
- Ορατή περιοχή [ $\lambda$ : 380 - 780 nm] περιέχει το ~47 % της ενέργειας
- Υπέρυθρη περιοχή [ $\lambda > 780$  nm] περιέχει το ~46 % της ενέργειας

Η ατμόσφαιρα απορροφά περίπου το 20 % της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας (μεγαλύτερα ποσά ηλιακής ακτινοβολία απορροφά όταν είναι ανέφελη) και αυτό οφείλεται στα αέρια της ατμόσφαιρας και συγκεκριμένα στο όζον ( $O_3$ ), στους υδρατμούς ( $H_2O$ ), στο οξυγόνο ( $O_2$ ) και στο διοξείδιο του άνθρακα ( $CO_2$ ).



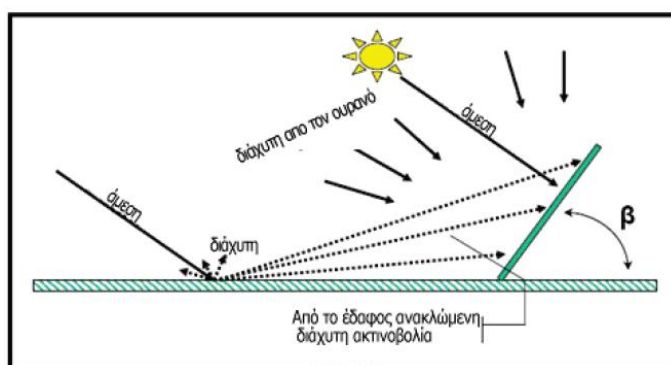
Εικόνα 2.5: Ισοζύγιο ακτινοβολίας από και προς τη γη [5]

Στο έδαφος προσπίπτει το μεγαλύτερο μέρος της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας μέσω της σκέδασης. Η σκεδαζόμενη ηλιακή ακτινοβολία εξαρτάται από το μήκος κύματος της ακτινοβολίας και τις διαστάσεις του κέντρου σκέδασης.

## 2.1.4 Συνιστώσες Ηλιακής Ακτινοβολίας

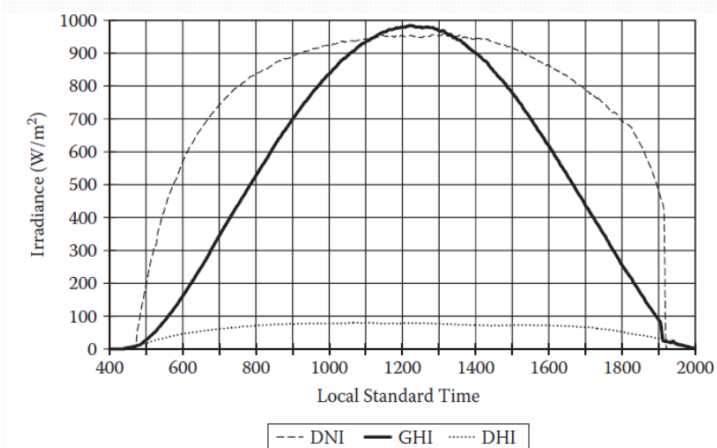
Η απ' ευθείας και η σκεδαζόμενη ηλιακή ακτινοβολία ονομάζονται άμεση και διαχυτική αντίστοιχα. Σε κάθε σημείο της γης φθάνουν τρεις συνιστώσες της ηλιακής ακτινοβολίας:

- Η άμεση (Direct Normal Irradiance, DNI)
- Η διάχυτη (Diffuse Horizontal Irradiance, DHI)
- Η διάχυτη ανακλώμενη από το έδαφος (Diffuse Horizontal Irradiance, DHI)



Εικόνα 2.6: Συνιστώσες προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας

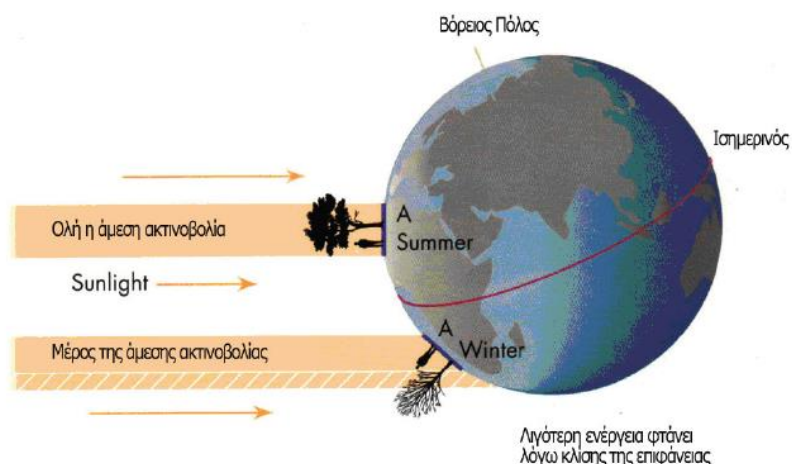
Το άθροισμα της άμεσης, της διάχυτης και της διάχυτης ανακλώμενης από το έδαφος ακτινοβολίας δημιουργούν την ολική οριζόντια ακτινοβολία (Global Horizontal Irradiance, GHI).



**Διάγραμμα 2.1: Ημερήσια ένταση συνιστωσών προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας**

Η άμεση και η διάχυτη ακτινοβολία εξαρτώνται από τη γωνία πρόσπτωσης των ηλιακών ακτίνων στην επιφάνεια της γης (γωνία ύψους του ήλιου), την ημέρα κατά τη διάρκεια του έτους και την κατάσταση της ατμόσφαιρας (υγρασία, αιωρήματα κτλ.). Η διάχυτη ανακλώμενη ακτινοβολία εξαρτάται από την πυκνότητα των νεφών και τη μορφολογία, το χρώμα ή την επικάλυψη του εδάφους. Η διαχυτική ακτινοβολία σαν ποσοστό της ολικής μπορεί να μεταβάλλεται από 10 % όταν η μέρα είναι καθαρή χωρίς σύννεφα μέχρι 100 % όταν η μέρα είναι με πάρα πολλά σύννεφα.

Η ένταση της ηλιακής ενέργειας στη γη εξαρτάται από την εκάστοτε απόσταση ήλιου – γης, από το ύψος του ήλιου πάνω από τον ορίζοντα του τόπου και από την ατμόσφαιρα και την κατάστασή της. Η πυκνότητα ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας λαμβάνει τη μεγαλύτερη τιμή την 1η Ιανουαρίου. Αυτό συμβαίνει διότι τότε η απόσταση ήλιου-γης είναι η μικρότερη από όλη τη διάρκεια του έτους. Όμως, για μία οριζόντια επιφάνεια τοποθετημένη στο βόρειο ημισφαίριο η ακτινοβολία που προσπίπτει είναι μικρότερη το χειμώνα και αυτό οφείλεται στην κλίση της γης. Η κλίση της γης έχει ως αποτέλεσμα η μεγαλύτερη ενέργεια από τον ήλιο να φτάνει όταν οι ακτίνες του ήλιου προσπίπτουν κάθετα στην περιοχή την οποία εξετάζουμε. Για το βόρειο ημισφαίριο αυτό συμβαίνει τους καλοκαιρινούς μήνες.



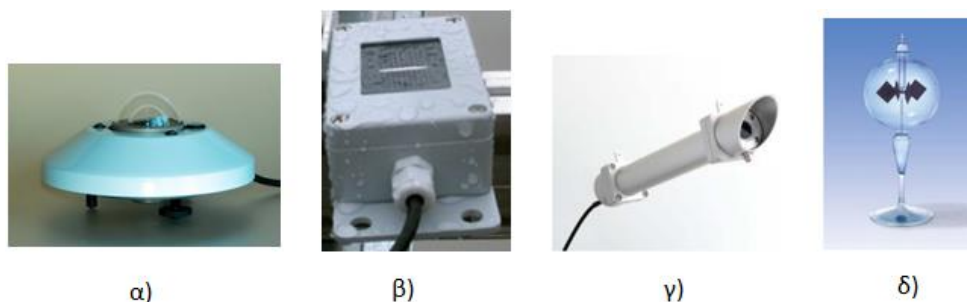
**Εικόνα 2.7: Μεταβολή ηλιακής ακτινοβολίας σε σχέση με την εποχή**



Σε περιοχές με μεγάλη ηλιοφάνεια, γίνεται εκμετάλλευση της άμεσης ακτινοβολίας, με αποτέλεσμα να τοποθετούνται τα φωτοβολταϊκά πλαίσια υπό γωνία για να είναι οι ακτίνες του ήλιου κάθετα στην επιφάνεια των πλασιών. Σε περιοχές με πολύ μικρή ηλιοφάνεια, είναι προτιμότερο να γίνεται εκμετάλλευση της διάχυτης ακτινοβολίας τοποθετώντας τα φωτοβολταϊκά πλαίσια σε οριζόντια θέση γιατί με αυτόν τον τρόπο «βλέπουν» μεγαλύτερο τμήμα του ουράνιου θόλου.

### 2.1.5 Μέτρηση Ηλιακής Ακτινοβολίας

Τα κυριότερα όργανα με τα οποία πραγματοποιείται η μέτρηση της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας είναι το πυρανόμετρο, το πυρηλιόμετρο και το ακτινόμετρο.



Εικόνα 2.8: α) Πυρανόμετρο με πλάκες β) Πυρανόμετρο με φωτοβολταϊκό στοιχείο γ) Πυρηλιόμετρο δ) Ακτινόμετρο

## 2.2 ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΗ ΜΕΤΑΤΡΟΠΗ

### 2.2.1 Ημιαγωγοί

Κάθε στέρεο σώμα αποτελείται από άτομα και κάθε άτομο περιλαμβάνει έναν πυρήνα και έναν αριθμό ηλεκτρονίων, που περιφέρονται γύρω από αυτόν. Ο πυρήνας φέρει θετικό φορτίο και τα ηλεκτρόνια αρνητικό. Το θετικό ηλεκτρικό φορτίο του πυρήνα είναι ίσο και αντίθετο με το αρνητικό φορτίο των ηλεκτρονίων, τα οποία διατάσσονται γύρω από τον πυρήνα σε συγκεκριμένους φλοιούς ή στοιβάδες. Τα ηλεκτρόνια της εξωτερικής στοιβάδας ονομάζονται ειδικότερα ηλεκτρόνια σθένους. Κάθε ηλεκτρόνιο σθένους έχει μια συγκεκριμένη ενέργεια, δηλαδή, βρίσκεται σε μια συγκεκριμένη στάθμη ενέργειας [6].

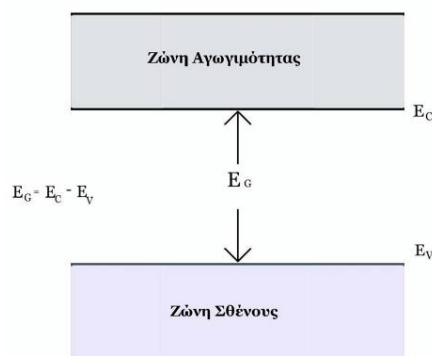
Η ευκολία με την οποία ηλεκτρόνια περνούν από ένα άτομο σε κάποιο άλλο ονομάζεται ηλεκτρική αγωγιμότητα. Ανάλογα με την ηλεκτρική τους αγωγιμότητα, τα στερεά διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες:

- Τους αγωγούς: κάθε υλικό το οποίο αφήνει τα ηλεκτρικά φορτία να περνούν ελεύθερα από μέσα του. Μερικοί αγωγοί του ηλεκτρισμού είναι τα μέταλλα, το ανθρώπινο σώμα και η γη.
- Τους μονωτές (ή διηλεκτρικό): κάθε υλικό το οποίο δεν επιτρέπει την ελεύθερη διέλευση του ηλεκτρικού φορτίου από το σώμα του. Μερικοί μονωτές είναι τα πλαστικά και το γυαλί.

- Τους ημιαγωγούς: κάθε υλικό που επιτρέπει να περνά το ηλεκτρικό φορτίο από μέσα του με κάποιες προϋποθέσεις, όπως αύξηση της θερμοκρασίας ή πρόσπτωση φωτός. Τέτοια υλικά είναι το γερμάνιο και το πυρίτιο.

Από άποψη ηλεκτρικής συμπεριφοράς, τα ηλεκτρόνια των ημιαγωγών είναι τριών κατηγοριών και φέρουν διαφορετική ενέργεια η οποία παρουσιάζεται σε ζώνες ανάλογα με το που είναι τοποθετημένα μέσα στο άτομο:

- Ηλεκτρόνια εσωτερικών στοιβάδων, είναι τα λιγότερο ενεργά και δε συμμετέχουν σε μηχανισμούς αγωγιμότητας (εσωτερική ενεργειακή ζώνη).
- Ελεύθερα ηλεκτρόνια, είναι αυτά που διαθέτουν αρκετή ενέργεια για να αποσπαστούν από τους δεσμούς του σώματος και είναι υπεύθυνα για την εκδήλωση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας (ζώνη αγωγιμότητας).
- Ηλεκτρόνια σθένους, είναι τα ηλεκτρόνια της εξωτερικής στοιβάδας των ατόμων, τα οποία μπορούν να κινηθούν προς τις οπές γειτονικών δεσμών, που δημιουργήθηκαν επειδή τα εκεί ηλεκτρόνια σθένους εγκατέλειψαν τη θέση τους ή αντάλλαξαν θέσεις με άλλα ηλεκτρόνια σθένους γειτονικών δεσμών (ζώνη σθένους).



**Εικόνα 2.9: Ενεργειακές ζώνες ημιαγωγών**

Η απόσταση ανάμεσα στις δυο ζώνες, ζώνη σθένους  $E_V$  και ζώνη αγωγιμότητας  $E_C$ , ονομάζεται ενεργειακό διάκενο  $E_G$  ή ενεργειακό χάσμα. Το ενεργειακό χάσμα εκφράζει την ελάχιστη απαιτούμενη ενέργεια για τη διέγερση ενός ηλεκτρονίου σθένους και τη μετατροπή του σε ελεύθερο ηλεκτρόνιο ( $E_G = E_C - E_V$ ). Σε θερμοκρασία περιβάλλοντος το ενεργειακό χάσμα για το Γερμάνιο (Ge) είναι 0.66 eV ενώ για το Πυρίτιο (Si) είναι 1.12 eV.

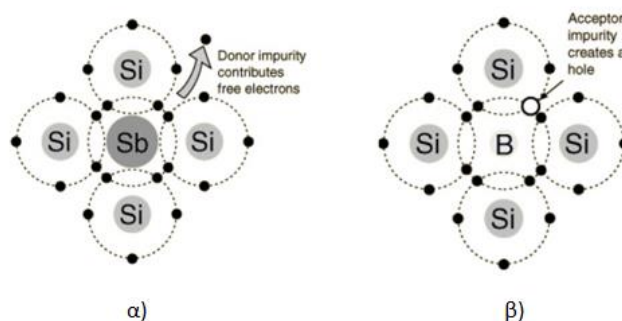
Τα ηλεκτρόνια σθένους των ημιαγωγών μπορούν να απορροφήσουν σημαντική ποσότητα φωτός. Η απορρόφηση καθορίζεται από το μέγεθος της ενέργειας των φωτονίων σε σχέση με το ενεργειακό χάσμα του ημιαγωγού.

### 2.2.2 Επαφές p - n

Όταν ένας ημιαγωγός φωτιστεί, τα φωτόνια μεταφέρουν την ενέργειά τους στα ηλεκτρόνια σθένους του ημιαγωγού, τα οποία κατορθώνουν τελικά να αποδεσμευτούν από την έλξη του πυρήνα τους (αρνητικοί φορείς n). Καθώς ένα ηλεκτρόνιο απελευθερώνεται, δημιουργεί μια κενή θέση στον δεσμό που κατείχε προηγουμένως. Η θέση αυτή ονομάζεται

οπή (θετικοί φορείς p). Αν αποσπαστεί το ηλεκτρόνιο αυτό έξω από τον ημιαγωγό, τότε ένα ηλεκτρόνιο γειτονικού ατόμου θα καταλάβει τη θέση του και τη θέση του τελευταίου ηλεκτρονίου θα την καταλάβει κάποιο άλλο ηλεκτρόνιο από γειτονικό άτομο. Αυτός ο μηχανισμός θα συνεχιστεί και με αυτόν τον τρόπο θα υπάρξει μια κίνηση ηλεκτρονίων προς μια κατεύθυνση και μια κίνηση οπών προς μια άλλη. Για να εξασφαλιστεί αυτή η διαδικασία θα πρέπει να γίνει πρόσμιξη στο κρυσταλλικό πλέγμα των ημιαγωγών με άλλο υλικό. Έτσι μπορούν να διακριθούν δυο τύποι τέτοιων ημιαγωγών:

- Ημιαγωγοί τύπου n  
 Προκύπτει από τον αντίστοιχο καθαρό ημιαγωγό, αν αντικατασταθούν μερικά από τα άτομά του με άτομα άλλου υλικού μεγαλύτερου σθένους. Στον ημιαγωγό αυτόν ένα ηλεκτρόνιο ανά άτομο πρόσμιξης δε συμμετέχει σε δεσμό και είναι ελεύθερο. Έτσι ο ημιαγωγός τύπου n περιέχει περισσότερα ηλεκτρόνια από τον καθαρό αγωγό και τα άτομα της πρόσμιξης ονομάζονται δότες.

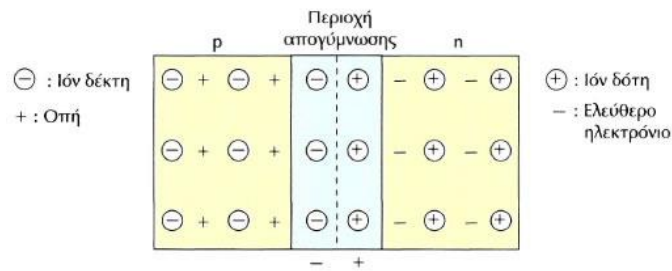


Εικόνα 2.10: Ημιαγωγός α) τύπου n (Πυρίτιο με Αντιμόνιο) και β) τύπου p (Πυρίτιο με Βόρειο)

- Ημιαγωγοί τύπου p  
 Προκύπτει από τον αντίστοιχο καθαρό ημιαγωγό, αν αντικατασταθούν μερικά από τα άτομά του με άτομα άλλου υλικού μικρότερου σθένους. Στον ημιαγωγό αυτόν τα άτομα πρόσμιξης μπορούν να δεχτούν ένα ηλεκτρόνιο για να συμπληρωθεί ο ελεύθερος δεσμός και ονομάζονται αποδέκτες.

### 2.2.3 Δίοδος Επαφής

Όταν φέρουμε σε επαφή έναν ημιαγωγό τύπου p με έναν ημιαγωγό τύπου n, δημιουργείται στη θέση επαφής μια ζώνη στην οποία εναλλάσσονται ηλεκτρόνια με οπές. Ελεύθερα ηλεκτρόνια του ημιαγωγού τύπου n εισέρχονται στον ημιαγωγό τύπου p και συμπληρώνουν αντίστοιχες οπές, ενώ οπές του ημιαγωγού τύπου p εισέρχονται στον ημιαγωγό τύπου n και ενώνονται με ίσο αριθμό ηλεκτρονίων. Η μετακίνηση αυτή έχει ως αποτέλεσμα να έχουμε θετικά ιόντα (άτομο που έχει απωλέσει ένα ή περισσότερα ηλεκτρόνια) στην πλευρά του ημιαγωγού τύπου n και αρνητικά ιόντα (άτομο που έχει προσλάβει ένα ή περισσότερα ηλεκτρόνια) στην πλευρά του ημιαγωγού τύπου p. Έτσι η πλευρά n αποκτά θετικό δυναμικό και η πλευρά p αρνητικό [6].

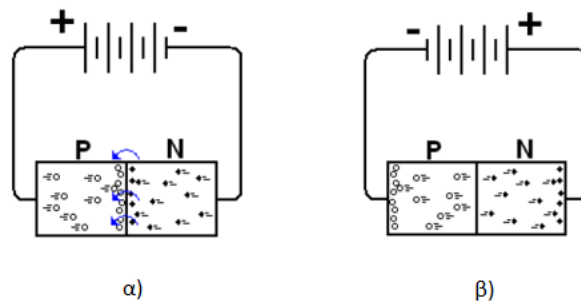


**Εικόνα 2.11: Επαφή ημιαγωγού τύπου p με ημιαγωγό τύπου n**

Η διαφορά δυναμικού μεταξύ των δυο πλευρών εμποδίζει τη ροή ηλεκτρονίων από τον ημιαγωγό τύπου n στον ημιαγωγό τύπου p και οπών αντίστροφα. Η περιοχή επαφής στην οποία συμβαίνει αυτό ονομάζεται περιοχή απογύμνωσης ή ζώνη φραγής.

Η διάταξη αυτή των ημιαγωγών τύπου p και n σε επαφή ονομάζεται δίοδος επαφής ή ημιαγωγική επαφή p-n και η χαρακτηριστική της ιδιότητα είναι ότι όταν εφαρμοστεί στα άκρα της ηλεκτρική τάση κατά τη μια ή την άλλη φορά, άγει ηλεκτρικό ρεύμα διαφορετικής έντασης κάθε φορά. Υπάρχουν δυο περιπτώσεις πόλωσης της διόδου επαφής, η ορθή πόλωση και η ανάστροφη πόλωση.

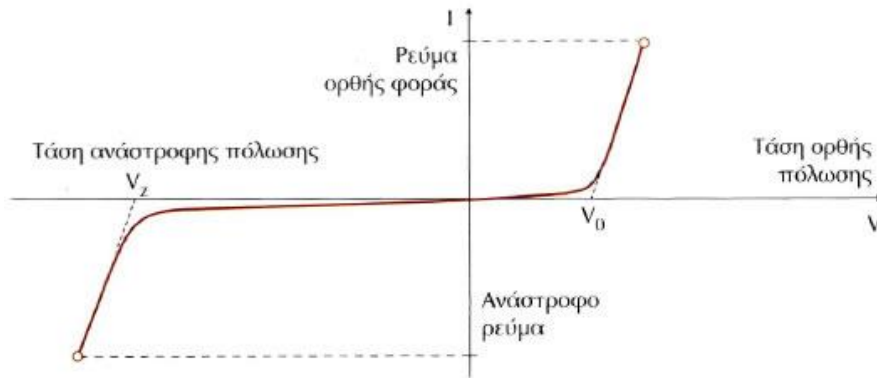
Η μία περίπτωση είναι να επιβληθεί στη δίοδο p-n ορθή πόλωση, δηλαδή ο αρνητικός πόλος της πηγής να συνδεθεί με το τμήμα τύπου n της διόδου, και ο θετικός πόλος με το τμήμα τύπου p. Τότε, τα ηλεκτρόνια ρέουν ανεμπόδιστα από την πηγή, διαμέσου του τμήματος τύπου n, προς την περιοχή της ένωσης όπου επανασυνδέονται με τις οπές που σχηματίζονται με την απομάκρυνση ηλεκτρονίων προς το θετικό πόλο της πηγής, διαμέσου του τμήματος τύπου p.



**Εικόνα 2.12: Συνδεσμολογία α) ορθής πόλωσης και β) ανάστροφης πόλωσης**

Αντίθετα, στην ανάστροφη πόλωση, δηλαδή αν ο αρνητικός πόλος της πηγής συνδεθεί με το τμήμα τύπου p και ο θετικός με το τμήμα τύπου n, τότε επανασυνδέονται οι οπές του τμήματος τύπου p με τα ηλεκτρόνια που έρχονται από την πηγή, και, από την άλλη μεριά, απομακρύνονται τα ελεύθερα ηλεκτρόνια του τμήματος τύπου n, προς το θετικό πόλο της πηγής.

Έτσι, κατά την ορθή πόλωση της διόδου επαφής καταργείται η ζώνη απογύμνωσης και επιτρέπεται η διέλευση ρεύματος από την επαφή των ημιαγωγών. Αντίθετα, κατά την ανάστροφη πόλωση οι συγκεντρώσεις των φορέων μειώνονται πάρα πολύ, το πάχος της ζώνης απογύμνωσης αυξάνει, και εμποδίζεται η διέλευση ρεύματος από την επαφή των ημιαγωγών [6].

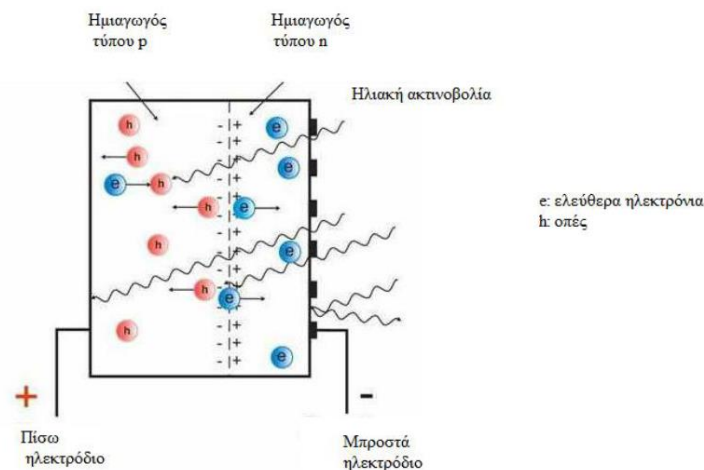


Διάγραμμα 2.2: Χαρακτηριστική καμπύλη I – V διόδου επαφής

Η ιδιαιτερότητα αυτή της διόδου επαφής δικαιολογεί απόλυτα τη χρήση της ως διάταξη ανόρθωσης για τη μετατροπή του εναλλασσόμενου ρεύματος AC σε συνεχές DC.

### 2.2.4 Φωτοβολταϊκό Φαινόμενο

Όταν μια δίοδος επαφής δέχεται ηλιακή ακτινοβολία, κάθε φωτόνιο της ακτινοβολίας με ενέργεια (Εξίσωση 2) μεγαλύτερη ή ίση από το ενεργειακό διάκενο  $E_G$  του ημιαγωγού έχει τη δυνατότητα να απορροφηθεί σε ένα χημικό δεσμό και να ελευθερώσει ένα ηλεκτρόνιο. Όσο λοιπόν διαρκεί η ακτινοβολία δημιουργείται πλεόνασμα από ζεύγη ελεύθερων ηλεκτρονίων και οπών. Όταν αυτά τα ζεύγη βρεθούν στην περιοχή της επαφής των ημιαγωγών, έχουμε εκτροπή των ηλεκτρονίων προς τον ημιαγωγό n και εκτροπή των οπών προς τον ημιαγωγό p. Δημιουργείται δηλαδή μια διαφορά δυναμικού μεταξύ των ακροδεκτών των δύο τμημάτων της διόδου η οποία διατηρείται όσο διαρκεί η πρόσπτωση της ηλιακής ακτινοβολίας σε αυτήν. Το γεγονός αυτό ονομάζεται φωτοβολταϊκό φαινόμενο. Η διάταξη αυτή η οποία αποτελεί πηγή φωτοβολταϊκού ρεύματος ονομάζεται φωτοβολταϊκό στοιχείο (PV cell) και το παραγόμενο ηλεκτρικό ρεύμα φωτόρευμα. Το φωτόρευμα είναι ευθέως ανάλογο της ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στο φωτοβολταϊκό στοιχείο και του εμβαδού της επαφής των δύο ημιαγωγών [6].



Εικόνα 2.13: Μηχανισμός εκδήλωσης φωτοβολταϊκού φαινομένου σε φωτοβολταϊκό στοιχείο

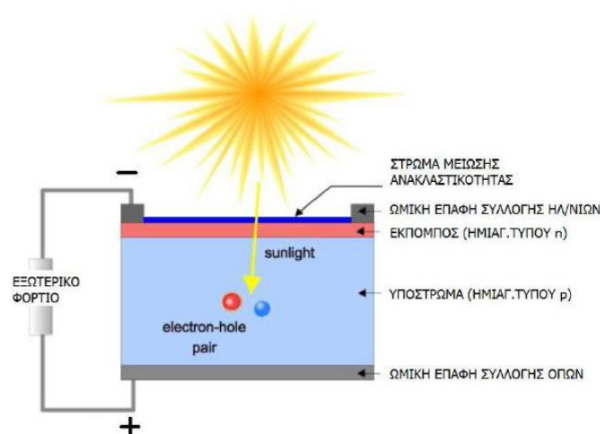
Είναι προφανές ότι είναι αδύνατη η μετατροπή όλης της ηλιακής ακτινοβολίας που δέχεται το στοιχείο σε ηλεκτρική ενέργεια. Ένα μέρος της ακτινοβολίας ανακλάται πάνω στην

επιφάνεια του φωτοβολταϊκού στοιχείου και διαχέεται στην ατμόσφαιρα. Από την ακτινοβολία που διεισδύει στο φωτοβολταϊκό στοιχείο δεν μπορεί να απορροφηθεί το μέρος εκείνο που αποτελείται από φωτόνια, που έχουν ενέργεια μικρότερη από το ενεργειακό χάσμα του ημιαγωγού ( $h * f < E_G$ ). Για τα φωτόνια αυτά, το φωτοβολταϊκό στοιχείο συμπεριφέρεται σαν διαφανές σώμα, δηλαδή η αντίστοιχη ακτινοβολία το διαπερνά και απλά θερμαίνει το μεταλλικό ηλεκτρόδιο που καλύπτει την πίσω όψη του. Ούτε όμως και ολόκληρο το μέρος της ακτινοβολίας που αποτελείται από φωτόνια με ενέργεια μεγαλύτερη από το ενεργειακό χάσμα του ημιαγωγού ( $h * f > E_G$ ) αξιοποιείται. Ένα μέρος δημιουργεί ζεύγη ηλεκτρονίων – οπής και η πλεονάζουσα ενέργεια ( $h * f - E_G$ ) μεταφέρεται στα ελεύθερα ηλεκτρόνια της ζώνης αγωγιμότητας ως κινητική ενέργεια, συμβάλλοντας στην αύξηση θερμοκρασίας του ημιαγωγού. Τελικά μόνο το μέρος της ακτινοβολίας της οποίας τα φωτόνια έχουν ενέργεια ίση με το ενεργειακό χάσμα του ημιαγωγού ( $h * f = E_G$ ) αξιοποιείται ολόκληρο για την παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτό συμβαίνει διότι μόνο τα φωτόνια αυτά απορροφώνται και αναγκάζουν τα ηλεκτρόνια του φωτοβολταϊκού στοιχείου να μετακινηθούν σε άλλη θέση [6].

## 2.3 ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟ ΣΤΟΙΧΕΙΟ

### 2.3.1 Δομή Φωτοβολταϊκού Στοιχείου

Κάθε φωτοβολταϊκό στοιχείο έχει ένα ηλεκτρόδιο στην εμπρός όψη και ένα στην πίσω πλευρά. Το ηλεκτρόδιο όψεως είναι μια μεταλλική σχάρα σε μορφή σκελετού ψαριού που καλύπτει το 15 % περίπου της επιφάνειας του στοιχείου. Κατασκευαστικά για λόγους μηχανικής αντοχής και ευχρηστίας, τα φωτοβολταϊκά στοιχεία έχουν ενσωματωμένα στο περίγραμμά τους μεταλλικά ελάσματα ανοδιωμένου αλουμινίου, και για λόγους προστασίας είναι αεροστεγώς και υδατοστεγώς κλεισμένα μέσα σε ειδικό γυαλί και ειδικό μονωτικό πλαστικό. Η δομή ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου μπορεί ποιοτικά να αναπαρασταθεί στην Εικόνα 2.14:



Εικόνα 2.14: Απεικόνιση φωτοβολταϊκού στοιχείου [7]

Η επιφάνεια που επιδέχεται το φωτισμό καλύπτεται από μια αντανάκλαστική επίστρωση που προσφέρει παθητικοποίηση. Οι ωμικές επαφές στον εκπομπό έχουν τοποθετηθεί πάνω σε λείες περιοχές προκειμένου να μη δημιουργούνται οι προϋποθέσεις για αύξηση του ηλεκτρικού πεδίου στη διεπιφάνεια μετάλλου-ημιαγωγού. Ο εκπομπός αποτελείται από

ημιαγωγό τύπου n ενώ η βάση (το υπόστρωμα), από ημιαγωγό τύπου p. Το βάθος του εκπομπού είναι περίπου 0.3 μm ενώ το υπόστρωμα εκτείνεται για περίπου 298 μm. Η ωμική επαφή της πίσω πλευράς χαρακτηρίζεται από το αυξημένο πάχος μετάλλου, που συμβάλλει στην απαγωγή της θερμότητας [8].

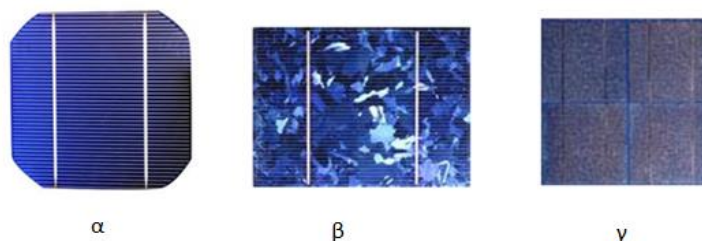
## 2.3.2 Τύποι Φωτοβολταϊκών Στοιχείων

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία διακρίνονται σε διάφορες κατηγορίες, ανάλογα με το υλικό παρασκευής, τη δομή του βασικού υλικού καθώς και τον τρόπο παρασκευής.

### 2.3.2.1 Τύποι φωτοβολταϊκών στοιχείων πυριτίου μεγάλου πάχους

Το πυρίτιο (Si) είναι από τα πιο διαδεδομένα στοιχεία στη φύση αφού αποτελεί το 25 % του γήινου φλοιού. Είναι ο ημιαγωγός που κυριάρχησε μέχρι σήμερα σαν υλικό κατασκευής των φωτοβολταϊκών στοιχείων. Βασικά είδη φωτοβολταϊκών στοιχείων πυριτίου μεγάλου πάχους είναι τα παρακάτω:

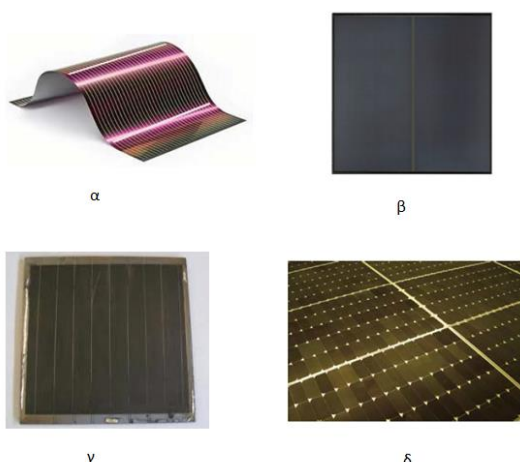
- Φωτοβολταϊκά στοιχεία μονοκρυσταλλικού πυριτίου (sc-Si). Το πάχος τους είναι γύρω στα 0.3 mm. Η απόδοση τους στη βιομηχανία κυμαίνεται από 15 % – 18 % το πλαίσιο. Στο εργαστήριο έχουν επιτευχθεί αποδόσεις έως και 24.7 %. Τα μονοκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά στοιχεία χαρακτηρίζονται ως αυτά με τις καλύτερες αποδόσεις. Ένα μειονέκτημά τους είναι το υψηλό κόστος κατασκευής σε σύγκριση με τα πολυκρυσταλλικά.
- Φωτοβολταϊκά στοιχεία πολυκρυσταλλικού πυριτίου (mc-Si). Το πάχος τους είναι επίσης περίπου 0.3 mm. Η μέθοδος παραγωγής τους κοστίζει φθηνότερα σε σύγκριση με αυτή των μονοκρυσταλλικών γι' αυτό και η τιμή πώλησής τους είναι συνήθως λίγο χαμηλότερη. Οπτικά μπορεί κανείς να παρατηρήσει τις επιμέρους μονοκρυσταλλικές περιοχές. Όσο μεγαλύτερη είναι η έκταση της μονοκρυσταλλικής περιοχής τόσο μεγαλύτερη είναι και η απόδοση των πολυκρυσταλλικών φωτοβολταϊκών στοιχείων. Στο εργαστήριο έχουν επιτευχθεί αποδόσεις έως και 20 % ενώ στο εμπόριο τα πολυκρυσταλλικά στοιχεία διατίθενται με αποδόσεις από 13 % έως και 15 % το πλαίσιο.
- Φωτοβολταϊκά στοιχεία ταινίας πυριτίου (Ribbon Silicon). Σε αυτά τα στοιχεία εφαρμόζεται νέα τεχνολογία φωτοβολταϊκών στοιχείων. Προσφέρει έως και 50 % μείωση στη χρήση του πυριτίου σε σχέση με τις παραδοσιακές τεχνικές κατασκευής μονοκρυσταλλικών και πολυκρυσταλλικών φωτοβολταϊκών στοιχείων πυριτίου. Η απόδοση για τα φωτοβολταϊκά στοιχεία του έχει φτάσει πλέον γύρω στο 12 % - 13 % ενώ το πάχος του είναι περίπου 0.3 mm. Στο εργαστήριο έχουν επιτευχθεί αποδόσεις έως και 18 %.



Εικόνα 2.15: Φωτοβολταϊκά στοιχεία πυριτίου μεγάλου πάχους α) Μονοκρυσταλλικού πυριτίου β) Πολυκρυσταλλικού πυριτίου γ) Ταινίας πυριτίου

### 2.3.2.2 Φωτοβολταϊκά στοιχεία λεπτών υμενίων, Thin Film

- Δισεληνοϊνδιούχος χαλκός (CIS, με προσθήκη γαλλίου CIGS). Ο Δισεληνοϊνδιούχος Χαλκός έχει εξαιρετική απορροφητικότητα στο προσπίπτον φως αλλά παρόλα αυτά η απόδοση του με τις σύγχρονες τεχνικές κυμαίνεται στο 11 % το πλαίσιο. Εργαστηριακά έγινε εφικτή απόδοση στο επίπεδο του 18.8 %.
- Φωτοβολταϊκά στοιχεία άμορφου πυριτίου (Thin film Silicon, a-Si). Πρόκειται για ταινίες λεπτών επιστρώσεων οι οποίες παράγονται με την εναπόθεση ημιαγώγιμου υλικού (πυρίτιο σε αυτή τη περίπτωση) πάνω σε υπόστρωμα υποστήριξης, όπως γυαλί ή αλουμίνιο. Οι επιδόσεις που επιτυγχάνονται κυμαίνονται από 6 % έως 8 % ενώ στο εργαστήριο έχουν επιτευχθεί αποδόσεις 14 %. Το σημαντικότερο πλεονέκτημα τους είναι το γεγονός ότι δεν επηρεάζονται πολύ από τις υψηλές θερμοκρασίες ενώ χρησιμοποιούνται όταν υπάρχει διάχυτη ακτινοβολία (συννεφιά). Το μειονέκτημα των άμορφων πλαισίων είναι η χαμηλή τους ενεργειακή πυκνότητα κάτι που σημαίνει ότι για να παράγουμε την ίδια ενέργεια χρειαζόμαστε σχεδόν διπλάσια επιφάνεια σε σχέση με τα κρυσταλλικά φωτοβολταϊκά στοιχεία.
- Τελουριούχο Κάδμιο (CdTe). Το τελουριούχο κάδμιο απορροφά το 99 % της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Οι σύγχρονες τεχνικές προσφέρουν αποδόσεις γύρω στο 6 % - 8 %. Στο εργαστήριο η απόδοση τους έχει φθάσει το 16 % στο στοιχείο. Τροχοπέδη για τη χρήση του αποτελεί το γεγονός ότι το κάδμιο σύμφωνα με κάποιες έρευνες είναι καρκινογόνο με αποτέλεσμα να προβληματίζει το ενδεχόμενο της εκτεταμένης χρήσης του. Σημαντικότερη χρήση του είναι η ενθυλάκωση του στο γυαλί ως δομικό υλικό, κατάλληλο για ενσωμάτωση στα κτίρια.
- Αρσενικούχο Γάλλιο (GaAs). Το γάλλιο είναι ένα παραπροϊόν της ρευστοποίησης άλλων μετάλλων όπως το αλουμίνιο και ο ψευδάργυρος. Το αρσενικό έχει το μειονέκτημα ότι είναι δηλητηριώδες. Το αρσενικούχο γάλλιο έχει ενεργειακό διάκενο 1.43 eV που είναι ιδανικό για την απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας. Η απόδοση του στη μορφή πολλαπλών συνενώσεων (multijunction) είναι η υψηλότερη που έχει επιτευχθεί και αγγίζει το 29 %. Επίσης τα φωτοβολταϊκά στοιχεία GaAs είναι εξαιρετικά ανθεκτικά στις υψηλές θερμοκρασίες. Το μεγαλύτερο μειονέκτημα αυτής της τεχνολογίας είναι το υπερβολικό κόστος του μονοκρυσταλλικού GaAs υποστρώματος.

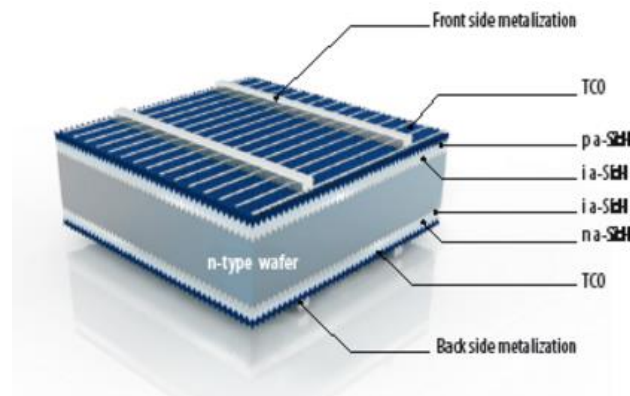


Εικόνα 2.16: Φωτοβολταϊκά στοιχεία λεπτών υμενίων Thin Film α) Τύπου CIS β) Άμορφου πυριτίου γ) Τελουριούχου Καδμίου δ) Αρσενικού Γαλλίου



### 2.3.2.3 Πολυστρωματικά φωτοβολταϊκά στοιχεία, HIT

Μια άλλη κατηγορία είναι τα φωτοβολταϊκά στοιχεία που αποτελούνται από στρώσεις υλικών διαφόρων τεχνολογιών HIT (Heterojunction with Intrinsic Thinlayer – Ετεροενώσεις με ενδογενή λεπτά στρώματα). Τα πιο γνωστά εμπορικά πολυστρωματικά φωτοβολταϊκά στοιχεία αποτελούνται από δύο στρώσεις άμορφου πυριτίου (πάνω και κάτω) ενώ ενδιάμεσα υπάρχει μια στρώση μονοκρυσταλλικού πυριτίου. Το μεγάλο πλεονέκτημα αυτής της τεχνολογίας είναι ο υψηλός βαθμός απόδοσης του πλαισίου που φτάνει σε εμπορικές εφαρμογές στο 17.2 % κάτι το οποίο πετυχαίνεται σε μικρή επιφάνεια. Τα αντίστοιχα φωτοβολταϊκά στοιχεία έχουν απόδοση 19.7 %. Άλλα πλεονεκτήματα για τα πολυστρωματικά φωτοβολταϊκά στοιχεία είναι η υψηλή τους απόδοση σε υψηλές θερμοκρασίες αλλά και η μεγάλη τους απόδοση στη διαχεόμενη ακτινοβολία

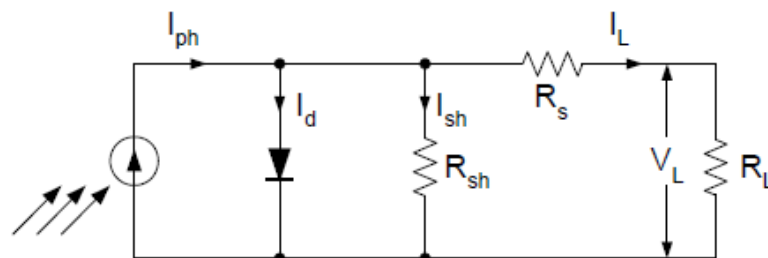


Εικόνα 2.17: Φωτοβολταϊκό στοιχείο τύπου HIT [9]

### 2.3.3 Ηλεκτρική Συμπεριφορά Φωτοβολταϊκών Στοιχείων

Η ηλεκτρική συμπεριφορά ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου ομοιάζει με αυτή ενός ηλεκτρικού συσσωρευτή, γιατί και οι δυο διατάξεις παρέχουν ηλεκτρική ενέργεια. Στον ηλεκτρικό συσσωρευτή η ηλεκτρική ενέργεια αποδίδεται με σταθερή ηλεκτρική τάση (π.χ. συσσωρευτές των 12 V, 24 V κ.τ.λ.) και ανάλογα με την κατανάλωση (αντίσταση) το ηλεκτρικό ρεύμα μπορεί να έχει πολύ μικρή έως πολύ μεγάλη ένταση. Αντίθετα, το φωτοβολταϊκό στοιχείο παρέχει σταθερή ένταση ηλεκτρικού ρεύματος και ανάλογα με την κατανάλωση (αντίσταση), η ηλεκτρική τάση μεταβάλλεται.

Προκειμένου να μελετηθεί η ηλεκτρική συμπεριφορά ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου, που δέχεται σταθερή ηλιακή ακτινοβολία, παρουσιάζεται το ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα στην Εικόνα 2.18.



Εικόνα 2.18: Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα φωτοβολταϊκού στοιχείου [10]

Το κύκλωμα αυτό αποτελείται από μια πηγή ρεύματος ελεγχόμενη από μια δίοδο επαφής όπου:

$I_{ph}$  = φωτόρευμα

$R_s$  = σε σειρά αντίσταση του κυττάρου. Παριστάνει σε συγκεντρωμένη μορφή όλα τα κατανεμημένα στοιχεία αντίστασης που εμφανίζονται κατά τη ροή των φορέων στον κυρίως ημιαγωγό, όπως την επιφανειακή ροή στον ημιαγωγό (συνήθως τύπου n) που βρίσκεται στην πλευρά που προσπίπτει το φως, την ενδοεπιφάνεια μεταξύ ημιαγωγού-ωμικής επαφής και την ωμική επαφή.

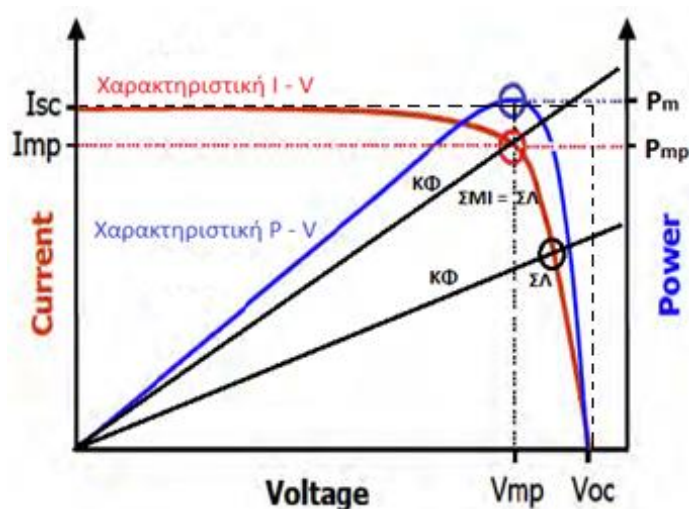
$R_{sh}$  = παράλληλη αντίσταση. Οφείλεται σε διαρροές των φορέων που συμβαίνουν είτε στην επαφή p-n (επανασύνδεση,) είτε στην εξωτερική παράπλευρη επιφάνεια του κυττάρου (επιφανειακή διαρροή), είτε σε άλλες ανωμαλίες του κρυστάλλου

$R_L$  = ωμική αντίσταση (κατανάλωση)

Για σταθερές συνθήκες ακτινοβολίας και θερμοκρασίας και για μεταβαλλόμενες τιμές της ωμικής αντίστασης (κατανάλωσης) που τροφοδοτείται από το φωτοβολταϊκό στοιχείο, η τάση και η ένταση του ρεύματος του φωτοβολταϊκού στοιχείου παίρνουν ενδιάμεσες τιμές ανάμεσα σε δυο ακραίες οι οποίες δημιουργούνται όταν υπάρχει :

- μηδενική αντίσταση, δηλαδή όταν το κύκλωμα είναι βραχυκυκλωμένο. Σε αυτή την περίπτωση το ρεύμα έχει τη μέγιστη τιμή του και ονομάζεται ρεύμα βραχυκύκλωσης  $I_{sc}$  (short-circuit current), ενώ η τάση έχει μηδενική τιμή ( $V=0$ )
- σε άπειρη αντίσταση, δηλαδή όταν το κύκλωμα είναι ανοιχτοκυκλωμένο. Σε αυτή την περίπτωση το ρεύμα έχει μηδενική τιμή ( $I=0$ ), ενώ η τάση έχει τη μέγιστη τιμή της και ονομάζεται τάση ανοιχτού κυκλώματος  $V_{oc}$  (open circuit current)

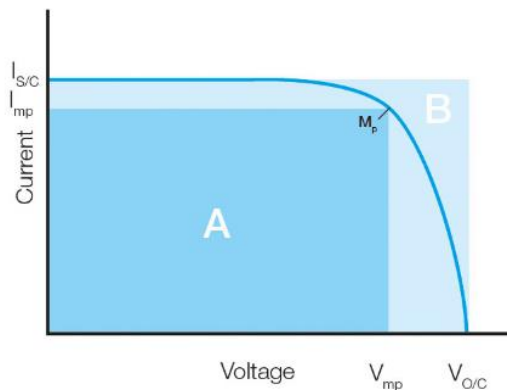
Η γραφική παράσταση μεταξύ ρεύματος στην έξοδο και τάσεως στην έξοδο ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου καλείται  $I - V$  χαρακτηριστική και έχει επικρατήσει να παριστάνεται στο πρώτο τεταρτημόριο. Μια τέτοια αντιπροσωπευτική καμπύλη φαίνεται στο Διάγραμμα 2.3, μαζί με την αντίστοιχη  $P - V$  χαρακτηριστική:



Διάγραμμα 2.3: Χαρακτηριστικές  $I - V$  και  $P - V$  φωτοβολταϊκού στοιχείου

- Χαρακτηριστική I – V

Το εμβαδό του ορθογώνιου παραλληλογράμμου με πλευρές  $I_{mp}$  και  $V_{mp}$  ισούται με τη μέγιστη αποδιδόμενη ισχύ του φωτοβολταϊκού στοιχείου  $P_{mp} = I_{mp} * V_{mp}$ . Εκτός δηλαδή από την τάση και την ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος, μεταβάλλεται ομαλά και η ηλεκτρική ισχύς  $P$  που παράγει το φωτοβολταϊκό στοιχείο, με μέγιστη τιμή την  $P_{mp}$ . Θεωρώντας ότι ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο τροφοδοτεί μια ωμική αντίσταση (κατανάλωση), μπορεί να απεικονιστεί η καμπύλη φορτίου (ΚΦ) της ωμικής αντίστασης (ευθύγραμμες μαύρες γραμμές), η οποία δείχνει τη μεταβολή του ρεύματος  $I$  που τη διαρρέει σε συνάρτηση με την ηλεκτρική τάση  $V$  που εφαρμόζεται στα άκρα της. Το σημείο τομής της χαρακτηριστικής καμπύλης  $I - V$  και της καμπύλης φορτίου ονομάζεται σημείο λειτουργίας (ΣΛ) του συστήματος και καθορίζει το ρεύμα και την τάση στην αντίσταση.



**Διάγραμμα 2.4: Συντελεστή πλήρωσης**

Το ορθογώνιο παραλληλόγραμμο B, που παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 2.4, το οποίο ορίζεται από τις πλευρές  $I_{sc}$  και  $V_{oc}$ , που βρίσκεται εξωτερικά της καμπύλης  $I - V$ , περιγράφει την ιδανική συμπεριφορά του φωτοβολταϊκού στοιχείου ως πηγή σταθερού ρεύματος. Το πηλίκιο των εμβαδών των δυο παραλληλογράμμων A και B ονομάζεται συντελεστής πλήρωσης (Fill Factor – FF) του φωτοβολταϊκού στοιχείου και δίνει το μέτρο προσέγγισης της λειτουργίας ενός στοιχείου προς την ιδανική συμπεριφορά. Η τιμή του FF κυμαίνεται από 0 έως 1. Μια τιμή από 0.7 έως 0.9 χαρακτηρίζει ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο με αποδεκτή έως πολύ καλή ενεργειακή απόδοση.

$$FF = \frac{I_{mp} * V_{mp}}{I_{sc} * V_{oc}} \quad (6)$$

- Χαρακτηριστική P – V

Στις ακραίες καταστάσεις του βραχυκυκλωμένου και ανοιχτού κυκλώματος, όπου  $V = 0$  και  $I = 0$  αντίστοιχα, η παρεχόμενη ηλεκτρική ισχύς από το φωτοβολταϊκό στοιχείο είναι μηδενική  $P = 0$ . Η μεταβολή της ισχύος με την τάση παρουσιάζει μια μέγιστη τιμή κοντά στο σημείο όπου αρχίζει η έντονη πτώση της τιμής του ρεύματος. Συνεπώς, η ωμική αντίσταση (κατανάλωση του κυκλώματος), πρέπει να έχει κατάλληλη τιμή για να παράγεται η μεγαλύτερη δυνατή ηλεκτρική ισχύς από το φωτοβολταϊκό στοιχείο. Δηλαδή, η τάση και το ρεύμα της αντίστασης πρέπει να αντιστοιχούν στο σημείο μέγιστης ισχύος (ΣΜΙ) (Maximum Power Point - MPP).

Με τη χρήση ειδικών ηλεκτρικών διατάξεων παρακολούθησης του ΣΜΙ όταν οι συνθήκες αλλάζουν επιδιώκεται η συνεχής σύμπτωση του σημείου λειτουργίας του συστήματος με το εκάστοτε ΣΜΙ, ώστε να αποδίδεται η μέγιστη δυνατή ηλεκτρική ισχύς από το φωτοβολταϊκό στοιχείο. Η προσπάθεια αυτή είναι απαραίτητη γιατί η ισχύς της ηλιακής ακτινοβολίας δεν παραμένει σταθερή κατά τη διάρκεια της ημέρας.

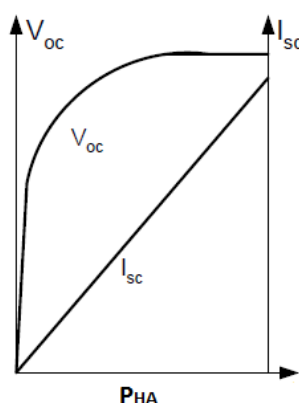
### 2.3.4 Παράγοντες που Επηρεάζουν τη Χαρακτηριστική I - V

Η χαρακτηριστική I - V εξαρτάται τόσο από τη ένταση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας  $G$  ( $W/m^2$ ) όσο και από τη θερμοκρασία  $T$  ( $^{\circ}C$ ).

#### 2.3.4.1 Ένταση ηλιακής ακτινοβολίας $G$

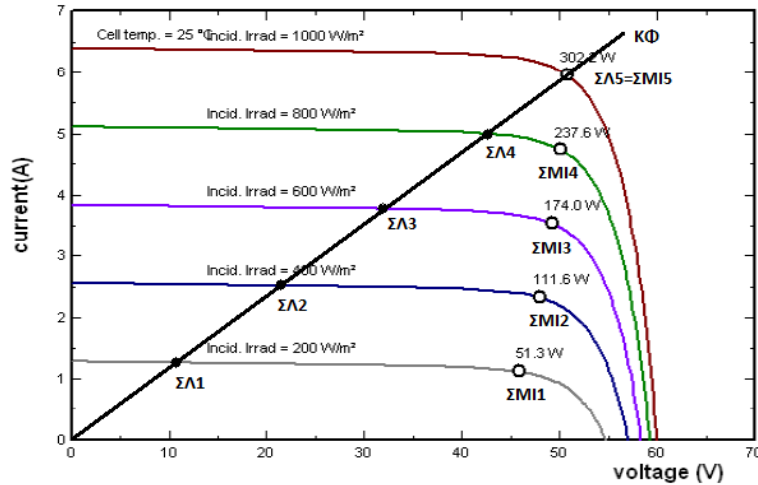
Όταν μεταβάλλεται η ένταση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας (διατηρώντας σταθερά τη θερμοκρασία του στοιχείου και τη φασματική κατανομή της ακτινοβολίας), μεταβάλλεται και η I - V χαρακτηριστική του στοιχείου και μάλιστα η απόκριση είναι πολύ γρήγορη. Καθώς η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας αυξάνει, το ρεύμα  $I_{sc}$  αυξάνεται γραμμικά, ανάλογα με την προσπίπτουσα ακτινοβολία, ενώ η τάση  $V_{oc}$  αυξάνει απότομα στην αρχή (κατά την ανατολή του ηλίου) και μετά παραμένει σχεδόν σταθερή κατά το υπόλοιπο διάστημα μιας αίθριας ημέρας (μέχρι τη δύση του ηλίου).

Στο Διάγραμμα 2.5 παρουσιάζεται η μεταβολή του ρεύματος βραχυκύκλωσης  $I_{sc}$  και της τάσης ανοιχτού κυκλώματος  $V_{oc}$  σε συνάρτηση με την ισχύ της ηλιακής ακτινοβολίας  $P_{HA}$ .



**Διάγραμμα 2.5: Μεταβολή τάσεως ανοιχτού κυκλώματος και ρεύματος βραχυκύκλωσης συναρτήσει της ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας**

Στο Διάγραμμα 2.6 παρουσιάζονται οι I - V χαρακτηριστικές ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου για διάφορες τιμές προσπίπτουσας ακτινοβολίας (σταθερή θερμοκρασία  $25^{\circ}C$ ).



**Διάγραμμα 2.6: Χαρακτηριστικές I – V φωτοβολταϊκού πλαισίου για διάφορες τιμές ακτινοβολίας**

Όταν μεταβάλλεται η ισχύς της ηλιακής ακτινοβολίας, έχουμε και μετατόπιση των χαρακτηριστικών καμπυλών I - V του φωτοβολταϊκού στοιχείου. Αυτό σημαίνει ότι για σταθερή τιμή της ωμικής αντίστασης του κυκλώματος τα σημεία λειτουργίας απομακρύνονται από τα σημεία μέγιστης ισχύος.

### 2.3.4.2 Θερμοκρασία του φωτοβολταϊκού στοιχείου T

Η θερμοκρασία του φωτοβολταϊκού στοιχείου αυξάνεται κατά τον φωτισμό του, γιατί ένα μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας μετατρέπεται σε θερμότητα μέσα στο στοιχείο. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μικρή αύξηση της εντάσεως του ρεύματος βραχυκυκλώσεως ( $I_{sc}$ ) και τη μεγάλη ελάττωση της τάσης ανοιχτού κυκλώματος ( $V_{oc}$ ). Συνεπώς προκαλείται μείωση της μέγιστης αποδιδόμενης ισχύος. Η μείωση αυτή είναι περίπου 0.4 % για κάθε βαθμό Κελσίου πάνω από τους 25°C . Αντιστρόφως, καθώς μειώνεται η θερμοκρασία αυξάνεται η τάση ανοιχτού κυκλώματος με αποτέλεσμα την αύξηση της αποδιδόμενης ισχύος.

Ο υπολογισμός της τάσης ανοιχτού κυκλώματος για κάθε θερμοκρασία υπολογίζεται ως εξής:

$$V_{OC}(T_x) = V_{OC}(T_{25^{\circ}C}) * [1 + V_{TC} * (T_x - 25)] \quad (7)$$

όπου:

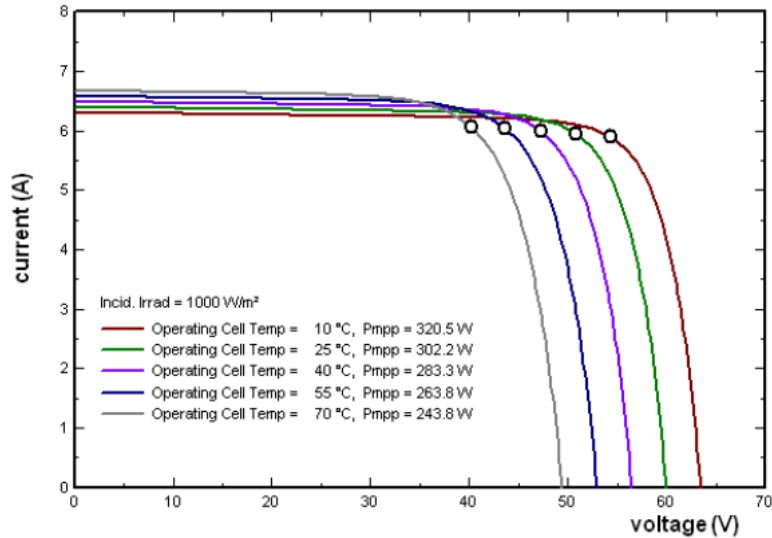
$V_{oc}(T_x)$  [V]: τάση ανοιχτού κυκλώματος στην εξεταζόμενη θερμοκρασία

$V_{oc}(T_{25^{\circ}C})$  [V]: τάση ανοιχτού κυκλώματος στην ονομαστική θερμοκρασία των 25°C

$V_{TC}$  [%/°C]: τιμή θερμοκρασιακού συντελεστή τάσης του φωτοβολταϊκού στοιχείου/πλαισίου

$T_x$  [°C]: εξεταζόμενη θερμοκρασία

Στο Διάγραμμα 2.7 παρουσιάζονται οι I - V χαρακτηριστικές ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου για διάφορες τιμές θερμοκρασίας (για σταθερή ακτινοβολία 1000 W/m<sup>2</sup>).



Διάγραμμα 2.7: Χαρακτηριστικές I – V φωτοβολταϊκού πλαισίου για διάφορες τιμές θερμοκρασίας

### 2.3.5 Ισχύς Αιχμής και Βαθμός Απόδοσης Φωτοβολταϊκού Στοιχείου

Ένα από τα βασικά χαρακτηριστικά ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου είναι η ισχύς της αιχμής του, δηλαδή η μέγιστη αποδιδόμενη ισχύς του φωτοβολταϊκού στοιχείου  $P_{mp}$  [W<sub>p</sub>], κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες οι οποίες ονομάζονται πρότυπες συνθήκες ελέγχου (Standard Testing Conditions – STC). Αυτές οι συνθήκες έχουν καθοριστεί διεθνώς και αφορούν :

- Τη θερμοκρασία του φωτοβολταϊκού στοιχείου η οποία πρέπει να είναι ίση με  $25^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ .
- Την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία ισχύος η οποία πρέπει να είναι  $P_{STC} = 1 \text{ kW/m}^2$  και φάσματος αντίστοιχου του ηλιακού με μάζα αέρα  $AM = 1.5$ .
- Να υπάρχει κάθετη πρόσπτωση της ηλιακής ακτινοβολίας.

Ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο χαρακτηρίζεται από τέσσερα βασικά στοιχεία : (α)τη μέγιστη αποδιδόμενη ηλεκτρική ισχύ  $P_{mp}$ , (β) το ρεύμα βραχυκύκλωσης  $I_{sc}$ , (γ) την τάση ανοιχτού κυκλώματος  $V_{oc}$  και (δ) τον συντελεστή πλήρωσης FF. Ο λόγος της μέγιστης ηλεκτρικής ισχύος  $P_{mp}$  προς την προσπίπτουσα ισχύ ηλιακής ακτινοβολίας  $P_{HA}$  δίνει το βασικότερο χαρακτηριστικό του φωτοβολταϊκού στοιχείου, το βαθμό απόδοσης:

$$\eta = \frac{P_{mp}}{P_{HA}} = \frac{I_{mp} * V_{mp}}{P_{HA}} = \frac{FF * I_{SC} * V_{OC}}{P_{HA}} \quad (8)$$

όπου:

$P_{mp}$  [W<sub>p</sub>]: η μέγιστη αποδιδόμενη ισχύς φωτοβολταϊκού στοιχείου

$P_{HA}$  [W]: η ισχύς της προσπίπτουσας ακτινοβολίας

$V_{mp}$  [V]: τάση ρεύματος στο σημείο μέγιστης ισχύος ΣΜΙ

$I_{mp}$  [A]: ένταση ρεύματος στο σημείο μέγιστης ισχύος ΣΜΙ

FF: συντελεστής πλήρωσης

$V_{oc}$  [V]: τάση ανοιχτού κυκλώματος

$I_{sc}$  [A]: ένταση ρεύματος βραχυκυκλώσεως

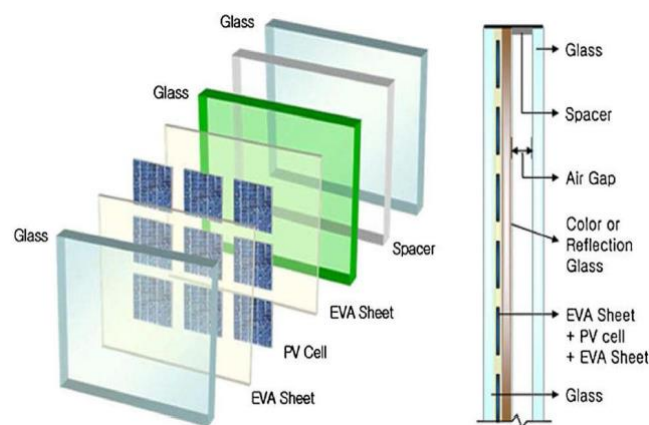
Ο συντελεστής απόδοσης ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου δεν είναι σταθερός αλλά επηρεάζεται σημαντικά, όπως προαναφέρθηκε, από τη σύσταση της ηλιακής ακτινοβολίας και από το υλικό από το οποίο είναι κατασκευασμένο το στοιχείο.

## 2.4 ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ

### 2.4.1 Δομή Φωτοβολταϊκού Πλαισίου

Η τάση και η ισχύς ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου είναι πολύ μικρή για να ανταποκριθεί στην τροφοδότηση των συνηθισμένων ηλεκτρικών καταναλώσεων ή στη φόρτιση συσσωρευτών. Οι ενδεικτικές τιμές τάσης και ισχύος ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου σε κανονική ηλιακή ακτινοβολία είναι έως 0.5 V και 0.5 W αντίστοιχα. Για αυτό το λόγο τα φωτοβολταϊκά στοιχεία τοποθετούνται σε ένα ενιαίο πλαίσιο με κοινή ηλεκτρική έξοδο. Για να λειτουργήσει το πλαίσιο, τα στοιχεία θα πρέπει να προστατεύονται από τις περιβαλλοντικές συνθήκες. Υπάρχουν διάφοροι τύποι πλαισίων οι οποίοι εξαρτώνται από το είδος των φωτοβολταϊκών στοιχείων που τους αποτελούν καθώς και από την εγκατάσταση στην οποία θα εφαρμοστούν.

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία περικλείονται συνήθως από δυο κομμάτια γυαλιού ή ένα φύλλο γυαλιού και ένα πλαστικού, ενώ μερικές φορές εξ ολοκλήρου από πλαστικό. Τα είδη των γυαλιών που χρησιμοποιούνται είναι διαφανή, χρωματισμένα και αντανακλούν τη θερμότητα. Το συμπυκνωμένο υλικό (EVA) είναι συνήθως από υλικό που εμφανίζει πολύ καλή ηλεκτρική μόνωση και μεγάλη διαπερατότητα στο φως.

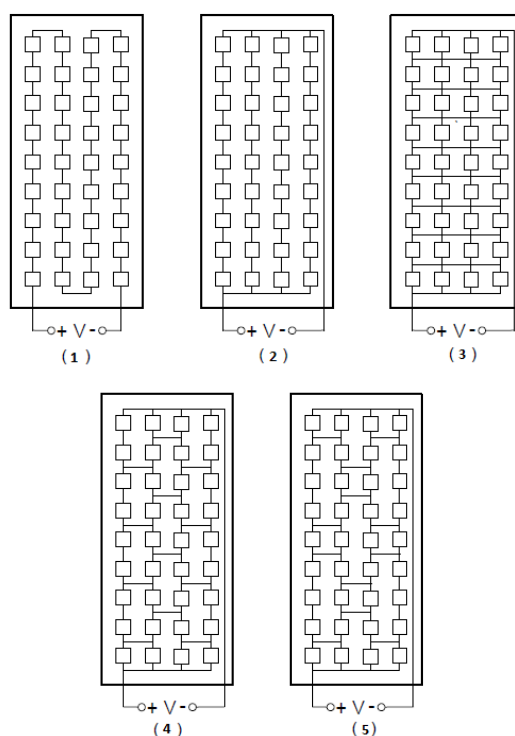


Εικόνα 2.19: Δομή φωτοβολταϊκού πλαισίου

### 2.4.2 Ηλεκτρική Σύνδεση Φωτοβολταϊκών Στοιχείων σε Πλαίσιο

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία συνδέονται σε σειρά, παράλληλα ή σε συνδυασμούς τους, ενώ αποτελούνται από ομάδες κατάλληλου πλήθους για την απόκτηση επιθυμητής τάσης. Αν όμως σε ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο συνδεθούν για παράδειγμα σε σειρά φωτοβολταϊκά στοιχεία με διαφορετικό ρεύμα βραχυκυκλώσεως τότε το φωτοβολταϊκό στοιχείο με το μικρότερο ρεύμα βραχυκυκλώσεως επιβάλλει στο πλαίσιο το δικό του ρεύμα. Έτσι τα φωτοβολταϊκά στοιχεία πρέπει να είναι όμοια, για να εμφανίζουν όμοια ηλεκτρικά

χαρακτηριστικά και να επιτυγχάνεται η ομαλή λειτουργία του φωτοβολταϊκού πλαισίου. Στην Εικόνα 2.20 παρουσιάζονται διάφοροι τρόποι σύνδεσης φωτοβολταϊκών στοιχείων σε πλαίσιο:



**Εικόνα 2.20: Συνδεσμολογίες φωτοβολταϊκών στοιχείων σε πλαίσιο 1) σε σειρά 2)σε απλές παράλληλες σειρές 3) σε διατάξεις αθροιστικής σταυρωτού δεσμού 4) σε διάταξη γεφυρωτής διασύνδεσης 5) σε διάταξη κυψέλης [11]**

Στη σύνδεση σε σειρά, το ρεύμα του πλαισίου ισούται με το ρεύμα βραχυκύκλωσης του ενός στοιχείου, αφού όλα τα στοιχεία του πλαισίου διαρρέονται από το ίδιο ρεύμα. Η τάση εξόδου θα ισούται με το άθροισμα των επιμέρους τάσεων των στοιχείων που αποτελούν το πλαίσιο.

$$V_{OCΠ} = N * V_{OC} [V] \quad (9)$$

$$I_{SCΠ} = I_{SC} [A] \quad (10)$$

$$P_{σειρ} = I_{SC} * V_{OCΠ} = I_{SC} * N * V_{OC} [W] \quad (11)$$

όπου:

N: αριθμός φωτοβολταϊκών στοιχείων

$V_{OC}$  [V]: τάση ανοιχτού κυκλώματος ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου

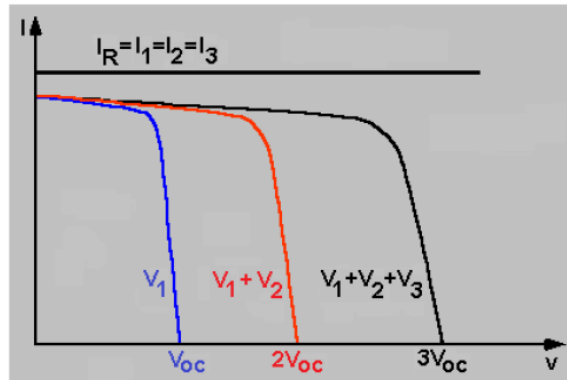
$V_{OCΠ}$  [V]: τάση ανοιχτού κυκλώματος πλαισίου

$I_{SC}$  [A]: ένταση ρεύματος βραχυκυκλώσεως ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου

$I_{SCΠ}$  [A]: ένταση ρεύματος βραχυκυκλώσεως πλαισίου

$P_{σειρ}$  [W]: Ισχύς εξόδου πλαισίου σε σύνδεση σε σειρά





Διάγραμμα 2.8: Χαρακτηριστική I – V φωτοβολταϊκών στοιχείων συνδεδεμένων σε σειρά

Στην παράλληλη σύνδεση όλα τα στοιχεία θα βρίσκονται υπό κοινή τάση, το συνολικό ρεύμα όμως θα ισούται με το άθροισμα των ρευμάτων του καθενός στοιχείου. Έτσι η ισχύς εξόδου θα είναι:

$$V_{OCΠ} = V_{OC} [V] \quad (12)$$

$$I_{SCΠ} = N * I_{SC} [A] \quad (13)$$

$$P_{\text{παράλ}} = I_{SCΠ} * V_{OC} = N * I_{SC} * V_{OC} [W] \quad (14)$$

όπου:

N: αριθμός φωτοβολταϊκών στοιχείων

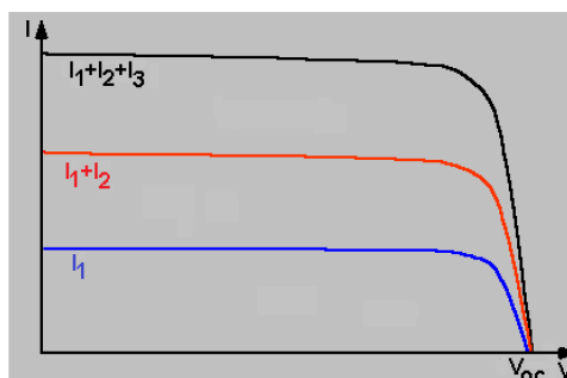
$V_{OC}$  [V]: τάση ανοιχτού κυκλώματος ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου

$V_{OCΠ}$  [V]: τάση ανοιχτού κυκλώματος πλαισίου

$I_{SC}$  [A]: ένταση ρεύματος βραχυκυκλώσεως ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου

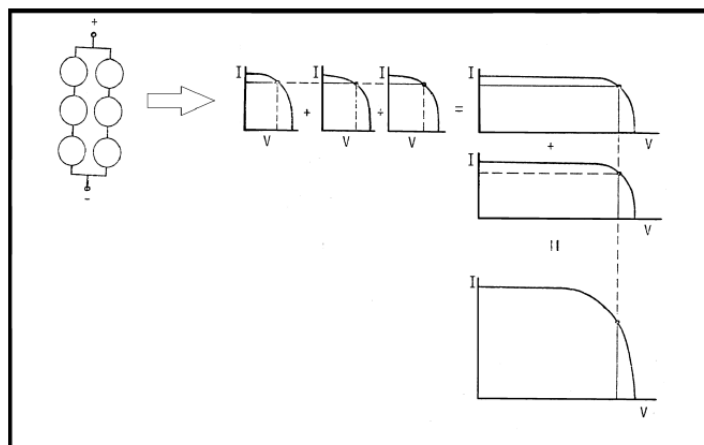
$I_{SCΠ}$  [A]: ένταση ρεύματος βραχυκυκλώσεως πλαισίου

$P_{\text{παράλ}}$  [W]: Ισχύς εξόδου πλαισίου σε παράλληλη σύνδεση



Διάγραμμα 2.9: Χαρακτηριστική I – V φωτοβολταϊκών στοιχείων συνδεδεμένων παράλληλα

Αν πλήθος στοιχείων συνδεθούν σε σειρά και παράλληλα, η συνολική καμπύλη I - V προκύπτει προσθέτοντας πρώτα τις επιμέρους τάσεις των στοιχείων σε σειρά, για να βρεθεί η συνολική τάση, κι έπειτα προσθέτοντας το ρεύμα όλων των στοιχείων για να βρεθεί το συνολικό ρεύμα. Η διαδικασία αυτή παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.21.



Εικόνα 2.21: Χαρακτηριστική  $I - V$  ίδιων φωτοβολταϊκών στοιχείων συνδεδεμένων σε σειρά και παράλληλα

### 2.4.3 Κατασκευαστικές Λεπτομέρειες Φωτοβολταϊκών Πλαισίων

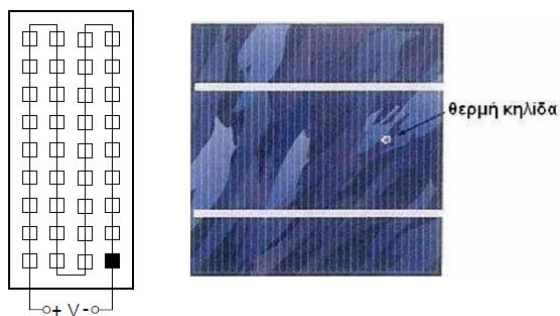
Κατά τη λειτουργία των φωτοβολταϊκών πλαισίων δημιουργούνται καταστάσεις οι οποίες μπορεί ακόμα και να καταστρέψουν ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο. Πρόκειται για την υγρασία και την υπερθέρμανση ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου.

#### 2.4.3.1 Υγρασία

Επειδή η στεγανοποίηση ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου είναι πολύ δύσκολη οι περισσότεροι κατασκευαστές ισχυρίζονται ότι πρέπει να μπορεί να αναπνέει το πλαίσιο ούτως ώστε να μην εγκλωβίζεται υγρασία στο εσωτερικό του. Είναι προφανές ότι οι υδρατμοί που εισέρχονται στο πλαίσιο μετατρέπονται σε νερό. Για την απομάκρυνση αυτού του νερού προβλέπουν μία σπή στον πίνακα συνδέσεων την οποία καλύπτουν με σήτα προκειμένου να αποτρέψουν την είσοδο μικρών ζώων [6].

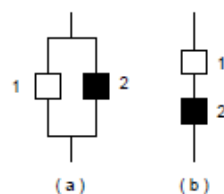
#### 2.4.3.2 Υπερθέρμανση

Όταν ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο δε δέχεται την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία που δέχονται τα υπόλοιπα στοιχεία του φωτοβολταϊκού πλαισίου, δηλαδή δημιουργείται σκίαση λόγω κάποιου φύλλου ή κάποιου άλλου εμποδίου, σταματά να παράγει ηλεκτρικό ρεύμα και ενεργεί ως ανοιχτό κύκλωμα. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, τα φωτοβολταϊκά στοιχεία πρέπει να είναι όμοια, για να εμφανίζουν όμοια ηλεκτρικά χαρακτηριστικά. Στην περίπτωση της σκίασης όμως δεν ισχύει αυτό, με αποτέλεσμα το σκιασμένο φωτοβολταϊκό στοιχείο να δέχεται το άθροισμα των τάσεων όλων των άλλων στοιχείων ανάστροφα και να αρχίζει να υπερθερμαίνεται. Έτσι λοιπόν αυτή η ενέργεια που χάνεται στο σκιαζόμενο στοιχείο μετατρέπεται σε θερμότητα που μπορεί να προκαλέσει το ράγισμα ή ακόμα και το λιώσιμο αυτού. Παρατεταμένος σκιασμός ενός στοιχείου σε συνδυασμό με έντονο φωτισμό των υπολοίπων μπορεί να οδηγήσει σε καταστροφή και αχρήστευση όλου του πλαισίου. Η κατάσταση αυτή αναφέρεται ως κατάσταση θερμικής κηλίδας (Hot spot).

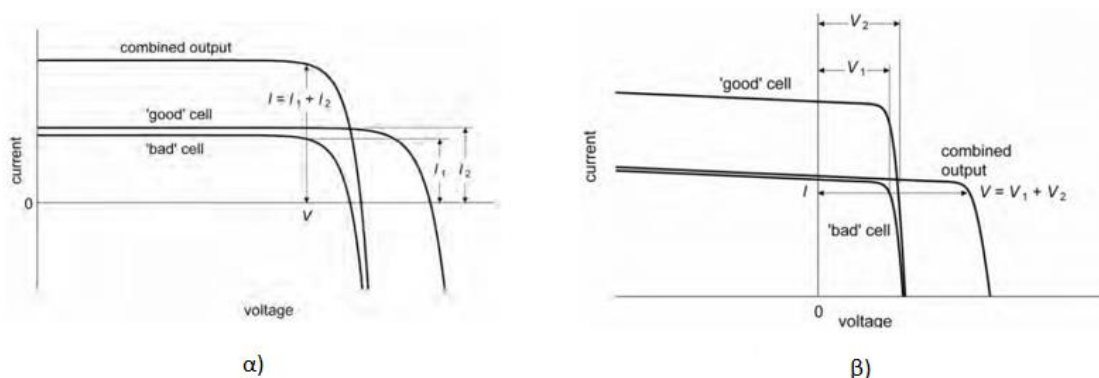


**Εικόνα 2.22: Θερμή κηλίδα σε σχηματική μορφή φωτοβολταϊκού πλαισίου και σε πραγματικό φωτοβολταϊκό πλαίσιο**

Ανάλογα με το πώς είναι συνδεδεμένα το σκιασμένο φωτοβολταϊκό στοιχείο με τα υπόλοιπα στοιχεία μεταξύ τους, δηλαδή σε σειρά ή παράλληλα, διαφοροποιείται και η χαρακτηριστική εξόδου του κυκλώματος.



**Εικόνα 2.23: Συνδεσμολογία σκιασμένου φωτοβολταϊκού στοιχείου με τα υπόλοιπα ( α ) Παράλληλη ( β ) Σειρά [12]**



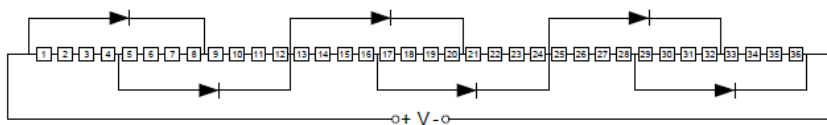
**Διάγραμμα 2.10: Χαρακτηριστική I – V με σκιασμένο φωτοβολταϊκό στοιχείο συνδεδεμένο α) παράλληλα και β) σε σειρά [12]**

Για να αποτραπεί μία τέτοια εξέλιξη, το φωτοβολταϊκό πλαίσιο εφοδιάζεται με διόδους (δίοδοι παράκαμψης – by pass diode), οι οποίες συνδέονται παράλληλα σε τμήματα των στοιχείων που είναι συνδεδεμένα σε σειρά, επιτρέποντας έτσι τη χρησιμοποίηση του φωτοβολταϊκού πλαισίου, ακόμα και αν κάποιο φωτοβολταϊκό στοιχείο του υστερεί ή καταστραφεί.

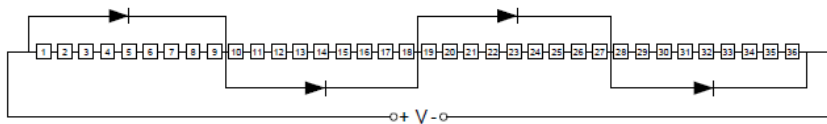
Πιο αναλυτικά, μια δίοδος συνδέεται παράλληλα με μια σειρά φωτοβολταϊκών στοιχείων την οποία θέλουμε να προστατέψουμε αλλά με αντίθετη πόλωση. Κάτω από κανονικές συνθήκες λειτουργίας κάθε στοιχείο είναι ορθά πολωμένο και η δίοδος που είναι ανάστροφα πολωμένη δεν άγει. Όμως όταν ένα στοιχείο πολωθεί ανάστροφα και εμφανισθεί μια διαφορά του ρεύματος βραχυκυκλώσεως μεταξύ των φωτοβολταϊκών στοιχείων της σειράς, τότε η δίοδος άγει και προστατεύει το «προβληματικό» στοιχείο.

Πρακτικά θα έπρεπε να υπήρχε μια δίοδος για κάθε στοιχείο που αυτό φυσικά είναι ανέφικτο λόγω του υψηλού κόστους για αυτό και χρησιμοποιείται μια δίοδος κατά μήκος μιας ομάδας στοιχείων. Ο μέγιστος αριθμός φωτοβολταϊκών στοιχείων που μπορεί να καλύπτει μια δίοδος είναι περίπου 10-15 (στοιχεία ανά δίοδο) για φωτοβολταϊκά πλαίσια πυριτίου. Άρα για ένα κανονικό πλαίσιο που αποτελείται από 36 φωτοβολταϊκά στοιχεία χρησιμοποιούνται τέσσερις δίοδοι προκειμένου να μην είναι ευάλωτο στο φαινόμενο των θερμών κηλίδων.

Τέλος είναι απαραίτητο να αναφερθεί πως οι κατασκευαστές χρησιμοποιούν δύο τρόπους τοποθέτησης διόδων κατά τους οποίους μπορεί να παρουσιάζεται αλληλοεπικάλυψη στοιχείων ή και όχι [12].



Εικόνα 2.24: Διάταξη με στοιχεία που αλληλεπικαλύπτονται [13]



Εικόνα 2.25: Διάταξη με στοιχεία που δεν αλληλεπικαλύπτονται [13]

#### 2.4.4 Ισχύς Αιχμής και Βαθμός Απόδοσης Φωτοβολταϊκού Πλαισίου

Η ισχύς αιχμής  $P_{m\Pi}$  είναι το σημαντικότερο ηλεκτρικό χαρακτηριστικό ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου και ονομάζεται η μέγιστη ηλεκτρική ισχύς, που αποδίδεται από το πλαίσιο κάτω από τις πρότυπες συνθήκες ελέγχου STC.

Το πηλίκο της μέγιστης αποδιδόμενης ηλεκτρικής ισχύος προς την προσπίπτουσα ισχύ της ηλιακής ακτινοβολίας, ονομάζεται βαθμός απόδοσης  $\eta_{\Pi}$  του φωτοβολταϊκού πλαισίου.

$$\eta_{\Pi} = \frac{P_{m\Pi}}{P_{HA}} = \frac{P_{m\Pi}}{P_{HAM} * S_{\Pi}} = \frac{E_{m\Pi}}{E_{HAM} * S_{\Pi}} \quad (15)$$

όπου :

$P_{m\Pi}$  [W]: μέγιστη αποδιδόμενη ηλεκτρική ισχύς πλαισίου

$P_{HA}$  [W]: ισχύς προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας

$P_{HAM}$  [W/m<sup>2</sup>]: ισχύς προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας ανά μονάδα επιφάνειας

$S_{\Pi}$  [m<sup>2</sup>]: επιφάνεια πλαισίου

$E_{m\Pi}$  [kWh]: μέγιστη αποδιδόμενη ηλεκτρική ενέργεια πλαισίου

$E_{HAM}$  [kWh/m<sup>2</sup>]: ενέργεια προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας ανά μονάδα επιφάνειας

$S_{\Pi}$  [m<sup>2</sup>]: επιφάνεια πλαισίου

Ο βαθμός απόδοσης του φωτοβολταϊκού πλαισίου επηρεάζεται από διάφορους παράγοντες :

- **Γήρανση:** Η απόδοση ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου μειώνεται λόγω της αλλοίωσης των υλικών κατασκευής των φωτοβολταϊκών στοιχείων. Η φθορά αυτή παρουσιάζεται και στα υπόλοιπα μέρη ενός φωτοβολταϊκού συστήματος. Συνεπώς η μείωση της αποδιδόμενης ισχύος εκφράζεται με τον συντελεστή γήρανσης ( $\sigma_\gamma$ ) και είναι γύρω στο 1 % - 2 % για κάθε χρόνο λειτουργίας.
- **Ρύπανση:** Η απόδοση ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου, ιδίως εκείνου που έχει μικρή κλίση μειώνεται λόγω της ρύπανσης της επιφάνειας του από παραμονή σκόνης, φύλλων, χιονιού, αλατιού θάλασσας, εντόμων, ακαθαρσιών κτλ. Για τους παραπάνω λόγους λαμβάνουμε ένα συντελεστή ρύπανσης ( $\sigma_\rho$ ) σύμφωνα με τις ακόλουθες τιμές: 0.95 για πλαίσια που καθαρίζονται συχνά, 0.90 για πλαίσια ελαφρώς σκονισμένα και 0.80 για πλαίσια οριζόντια και ακάθαρτα
- **Αύξηση θερμοκρασίας:** Η απόδοση των φωτοβολταϊκών πλαισίων επηρεάζεται σημαντικά από την άνοδο της θερμοκρασίας των φωτοβολταϊκών στοιχείων, των οποίων η μέση θερμοκρασία είναι κατά 30°C περίπου μεγαλύτερη από αυτή της λειτουργίας τους σε πρότυπες συνθήκες STC ειδικά κατά την περίοδο του καλοκαιριού. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιείται ο συντελεστής θερμοκρασίας ( $\sigma_\theta$ )

$$\sigma_\theta = 1 - [(t_a + 30^\circ\text{C}) - 25^\circ\text{C}] * 0.004 \quad (16)$$

όπου :

$t_a$  [°C] : μέση μηνιαία θερμοκρασία αέρα

- **Δίοδος αντεπιστροφής:** Η δίοδος αντεπιστροφής εμποδίζει την εκφόρτιση του ηλεκτρικού συσσωρευτή διαμέσου του φωτοβολταϊκού πλαισίου, όταν αυτό δε φωτίζεται και προκαλεί απώλειες ενέργειας της τάξης του 1 %. Οι απώλειες αυτές λαμβάνονται υπόψη με τον συντελεστή απωλειών διόδου  $\sigma_\delta = 0.99$ .

Το γινόμενο των παραπάνω συντελεστών πολλαπλασιάζεται με τον βαθμό απόδοσης του φωτοβολταϊκού πλαισίου σε πρότυπες συνθήκες ελέγχου STC για να υπάρξει αντικειμενικότερη αποτύπωση απόδοσης του φωτοβολταϊκού πλαισίου.

$$\eta_{\Pi} = \eta_{STC} * \sigma_\gamma * \sigma_\rho * \sigma_\theta * \sigma_\delta \quad (17)$$

$$\eta_{STC} = \frac{P_{p\Pi}/P_{STC}}{S_{\Pi}} \quad (18)$$

όπου:

$P_{p\Pi}$  [Wp]: ισχύς αιχμής φωτοβολταϊκού πλαισίου

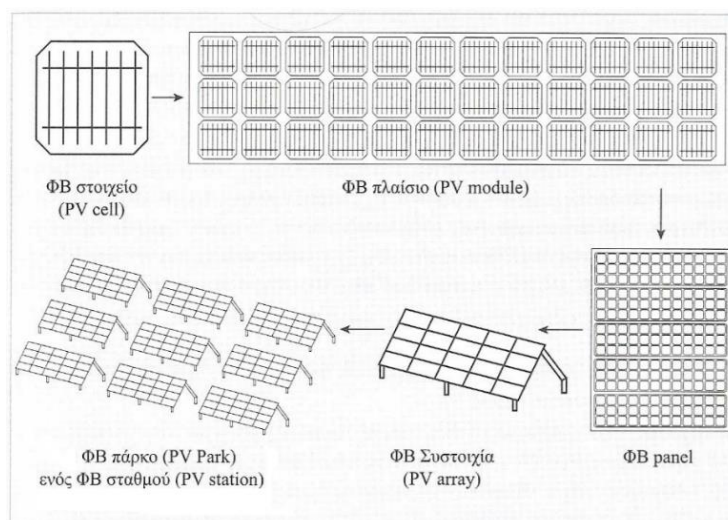
$P_{STC}$  [W/m<sup>2</sup>]: ισχύς προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας στις πρότυπες συνθήκες ελέγχου STC

$S_{\Pi}$  [m<sup>2</sup>]: επιφάνεια πλαισίου

## 2.5 ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΗ ΣΥΣΤΟΙΧΙΑ

### 2.5.1 Δομή Φωτοβολταϊκής Συστοιχίας

Ένα φωτοβολταϊκό πάνελ (PV panel) αποτελείται από χωριστά πλαίσια (το ένα δίπλα στο άλλο) που είναι σε κοινή συσκευασία και κοινή ηλεκτρική σύνδεση μεταξύ τους.



Εικόνα 2.26: Από το φωτοβολταϊκό στοιχείο στο φωτοβολταϊκό σταθμό [6]

Τα τελευταία χρόνια σχεδόν όλες οι εταιρίες που κατασκευάζουν φωτοβολταϊκά στοιχεία, δε διαχωρίζουν τα πλαίσια από τα πάνελ. Το προϊόν που παράγεται ονομάζεται φωτοβολταϊκό πλαίσιο (module) και διατίθεται σε ποικιλία, όσον αφορά την ισχύ που παράγει, την τάση και τελικά τις διαστάσεις του. Ο συνδυασμός πολλών φωτοβολταϊκών πλαισίων ή πανέλων, συνδεδεμένων μεταξύ τους ηλεκτρικά σε μια επίπεδη επιφάνεια, ονομάζεται φωτοβολταϊκή συστοιχία (PV array).

Ανάλογα με την ποσότητα της ηλεκτρικής ενέργειας που απαιτείται να παραχθεί, καθορίζεται και η συνολική επιφάνεια που χρειάζεται να καλύψει στο σύνολο της η φωτοβολταϊκή εγκατάσταση. Μια φωτοβολταϊκή εγκατάσταση μπορεί να αποτελείται από λίγα πλαίσια έως αρκετές συστοιχίες ενώ μαζί με όλο τον υπόλοιπο ηλεκτρολογικό εξοπλισμό, αποτελεί μια ανεξάρτητη μονάδα φωτοβολταϊκής παραγωγής ισχύος. Για παράδειγμα, η τοποθέτηση ορισμένων πλαισίων ή πανέλων σε μια στέγη ενός κτιρίου θεωρείται μια μικρή φωτοβολταϊκή εγκατάσταση, ενώ η τοποθέτηση ενός συνόλου από φωτοβολταϊκές συστοιχίες σε μια πλαγιά ενός λόφου θεωρείται ολόκληρο φωτοβολταϊκό πάρκο (PV park) ή φωτοβολταϊκός σταθμός (PV station).

### 2.5.2 Ηλεκτρική Σύνδεση Πλαισίων σε Συστοιχίες

Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια όπως και κάθε φωτοβολταϊκό στοιχείο πρέπει να έχουν όμοια ηλεκτρικά χαρακτηριστικά για να συνδεθούν. Υπάρχουν τριών ειδών συνδέσεις πλαισίων, σύνδεση σε σειρά, παράλληλη σύνδεση και μεικτή σύνδεση (σε σειρά και παράλληλη):

- Σύνδεση σε σειρά: Επιτυγχάνεται όταν συνδεθεί ο αρνητικός πόλος του ενός ακροδέκτη με τον θετικό πόλο του επόμενου ακροδέκτη. Η συνολική τάση της συστοιχίας είναι το

άθροισμα των επιμέρους τάσεων του κάθε πλαισίου, ενώ η ένταση του ρεύματος παραμένει ίδια.

$$V_{OC\Sigma} = N * V_{OC\Pi} [V] \quad (19)$$

$$I_{SC\Sigma} = I_{SC\Pi} [A] \quad (20)$$

$$P_{σειρ} = I_{SC\Sigma} * V_{OC\Sigma} = I_{SC\Pi} * N * V_{OC\Pi} [W] \quad (21)$$

όπου:

N: αριθμός φωτοβολταϊκών πλαισίων

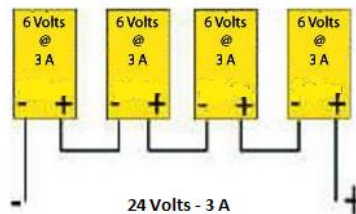
$V_{OC\Pi}$  [V]: τάση ανοιχτού κυκλώματος ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου

$V_{OC\Sigma}$  [V]: τάση ανοιχτού κυκλώματος φωτοβολταϊκής συστοιχίας

$I_{SC\Pi}$  [A]: ένταση ρεύματος βραχυκυκλώσεως ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου

$I_{SC\Sigma}$  [A]: ένταση ρεύματος βραχυκυκλώσεως φωτοβολταϊκής συστοιχίας

$P_{σειρ}$  [W]: Ισχύς εξόδου φωτοβολταϊκής συστοιχίας σε σύνδεση σε σειρά



**Εικόνα 2.27: Σύνδεση φωτοβολταϊκών πλαισίων σε σειρά**

- Παράλληλη σύνδεση: Επιτυγχάνεται όταν συνδεθούν μαζί οι θετικοί πόλοι σε έναν ακροδέκτη και οι αρνητικοί σε έναν άλλο. Η συνολική ένταση ρεύματος της συστοιχίας είναι το άθροισμα των επιμέρους εντάσεων του κάθε πλαισίου, ενώ η ονομαστική τάση του ενός είναι η συνολική.

$$V_{OC\Sigma} = V_{OC\Pi} [V] \quad (22)$$

$$I_{SC\Sigma} = N * I_{SC\Pi} [A] \quad (23)$$

$$P_{παράλ} = I_{SC\Sigma} * V_{OC\Sigma} = N * I_{SC\Pi} * V_{OC\Pi} [W] \quad (24)$$

όπου:

N: αριθμός φωτοβολταϊκών πλαισίων

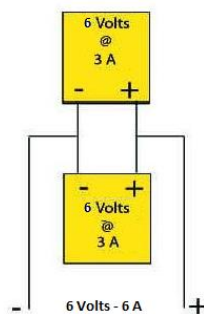
$V_{OC\Pi}$  [V]: τάση ανοιχτού κυκλώματος ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου

$V_{OC\Sigma}$  [V]: τάση ανοιχτού κυκλώματος φωτοβολταϊκής συστοιχίας

$I_{SC\Pi}$  [A]: ένταση ρεύματος βραχυκυκλώσεως ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου

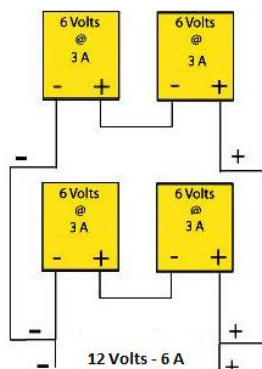
$I_{SC\Sigma}$  [A]: ένταση ρεύματος βραχυκυκλώσεως φωτοβολταϊκής συστοιχίας

$P_{παράλ}$  [W]: Ισχύς εξόδου φωτοβολταϊκής συστοιχίας σε παράλληλη σύνδεση



Εικόνα 2.28: Σύνδεση φωτοβολταϊκών πλαισίων παράλληλα

- Μεικτή σύνδεση: Πολλές φορές η σύνδεση των πλαισίων γίνεται με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε η τάση εξόδου της συστοιχίας να αποκτήσει μια επιθυμητή τιμή. Ένας τέτοιος τρόπος είναι η σύνδεση σε σειρά και παράλληλα. Αυτή η σύνδεση επιτυγχάνεται συνδέοντας N φωτοβολταϊκά πλαίσια σε σειρά δημιουργώντας με αυτό τον τρόπο έναν κλάδο, όπου κάθε κλάδος συνδέεται παράλληλα ενώνοντας τους κοινούς αρνητικούς πόλους σε έναν ακροδέκτη και αντίστοιχά τους κοινούς θετικούς πόλους σε έναν άλλο ακροδέκτη. Σε αυτό τον τρόπο σύνδεσης ισχύουν τα εξής:
  - ✓ Η τάση ενός κλάδου ισούται με το γινόμενο της τάσεως ενός πλαισίου επί τον αριθμό των πλαισίων που βρίσκονται στον κλάδο.
  - ✓ Η τάση της συστοιχίας είναι ίση με την τάση ενός κλάδου.
  - ✓ Η ένταση του ρεύματος ενός κλάδου είναι ίση με την ένταση ρεύματος ενός πλαισίου.
  - ✓ Η ένταση του ρεύματος της συστοιχίας ισούται με το γινόμενο της έντασης ρεύματος ενός κλάδου επί τον αριθμό των κλάδων.



Εικόνα 2.29: Μεικτή σύνδεση φωτοβολταϊκών πλαισίων

### 2.5.3 Προσανατολισμός και Στήριξη Φωτοβολταϊκών Συστοιχιών

Ο προσανατολισμός της επιφάνειας που γίνεται δέκτης της ηλιακής ακτινοβολίας σε σχέση με την κατεύθυνση της ηλιακής ακτινοβολίας είναι ένα από τα σημαντικότερα στοιχεία ενός συστήματος. Ο κατάλληλος προσανατολισμός και η βέλτιστη εκμετάλλευση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας συμβάλει στη μεγιστοποίηση της ενεργειακής παραγωγής. Ο προσανατολισμός ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου χαρακτηρίζεται από τη γωνία κλίσης και την αζιμούθια γωνία:

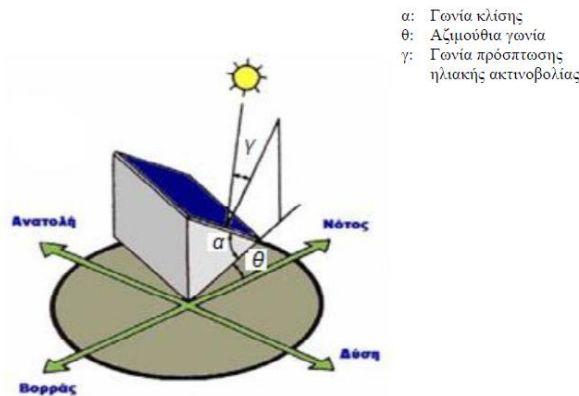


- Γωνία κλίσης  $\alpha$ :

Είναι η διεδρη γωνία που σχηματίζεται ανάμεσα στο επίπεδο του φωτοβολταϊκού πλαισίου και στο οριζόντιο επίπεδο και δείχνει πόσο γέρνει το πλαίσιο.

- Αζιμούθια γωνία  $\theta$ :

Είναι η γωνία που σχηματίζεται πάνω στο οριζόντιο επίπεδο ανάμεσα στην προβολή της κατακόρυφου του φωτοβολταϊκού πλαισίου και τον Νότο. Η γωνία  $\theta=0^\circ$  αντιστοιχεί σε τοποθέτηση του πλαισίου προς τον Νότο, η γωνία  $\theta=90^\circ$  προς τη Δύση, η γωνία  $\theta=-180^\circ$  προς τον Βορρά και η γωνία  $\theta=-90^\circ$  προς την ανατολή. Στο βόρειο ημισφαίριο τα φωτοβολταϊκά πλαίσια τοποθετούνται προς τον Νότο ( $\theta=0^\circ$ ), ενώ στο νότιο ημισφαίριο τοποθετούνται προς τον βορρά ( $\theta=-180^\circ$ ). Η ένταση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας σε μια επιφάνεια είναι μέγιστη όταν η επιφάνεια είναι κάθετη προς την κατεύθυνση της ακτινοβολίας, δηλαδή όταν η γωνία πρόσπτωσης είναι  $\gamma=0$ .



$\alpha$ : Γωνία κλίσης  
 $\theta$ : Αζιμούθια γωνία  
 $\gamma$ : Γωνία πρόσπτωσης ηλιακής ακτινοβολίας

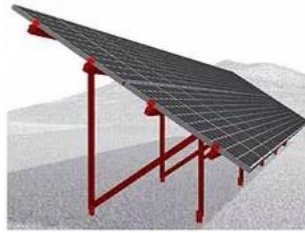
**Εικόνα 2.30: Γωνίες προσανατολισμού φωτοβολταϊκού πλαισίου στην επιφάνεια της γης**

Η τοποθέτηση των φωτοβολταϊκών πλαισίων γίνεται σε στέγες κτιρίων, σε στύλους, σε πλαγιές λόφων, σε ελεύθερους χώρους και αλλού. Όπως έχει αναφερθεί, για τη σωστή λειτουργία της εγκατάστασης κάθε φωτοβολταϊκό πλαίσιο πρέπει να έχει ανοιχτό οριζόντα για να μη σκιάζεται.

Εφόσον η πορεία του ήλιου αλλάζει τόσο με την ώρα της ημέρας όσο και με τη μέρα του έτους, συνεπάγεται πως για να παράγει ένα πλαίσιο τη μέγιστη ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας θα πρέπει να είναι σε θέση να περιστρέφεται ώστε να μπορεί να ακολουθεί την τροχιά του ήλιου και να είναι συνεχώς κάθετο στην κατεύθυνση της ακτινοβολίας. Η χρήση τέτοιων μηχανικών διατάξεων που αναπροσανατολίζουν συνεχώς τον συλλέκτη (π.χ. με τη βοήθεια υπολογιστή ή φωτοκυττάρων) ενδείκνυται μόνο σε ειδικές περιπτώσεις εφαρμογών καθώς είναι δύσκολη και δαπανηρή εφαρμογή. Έτσι στη πλειονότητα των κτιριακών φωτοβολταϊκών συστημάτων επιλέγεται σταθερός προσανατολισμός των πλαισίων, ώστε να επιτυγχάνεται μέση ετήσια γωνία πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας.

Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια τοποθετούνται (α) σε σταθερά στηρίγματα, (β) στηρίγματα ρυθμιζόμενης κλίσης, (γ) στηρίγματα περιστρεφόμενης βάσης σε έναν ή δυο άξονες.

- Σταθερά στηρίγματα: Οι συστοιχίες που εδράζονται σε σταθερά στηρίγματα εξασφαλίζουν μια σταθερή γωνία κλίσης. Στην Ελλάδα η μεγιστοποίηση της συνολικής ετήσιας ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει σε μια επιφάνεια σταθερής κλίσης, επιτυγχάνεται για Νότιο προσανατολισμό και κλίση περί των 30°.

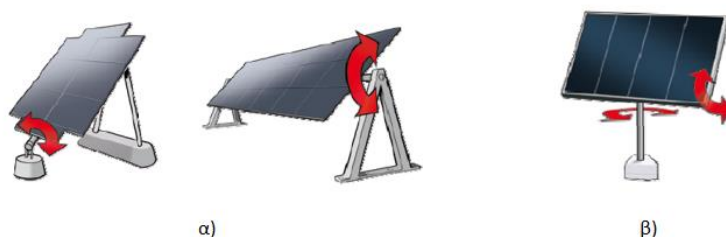


Εικόνα 2.31: Σταθερά στηρίγματα

Πίνακας 2.2: Ενδεικτική απόδοση σταθερής φωτοβολταϊκής συστοιχίας ανάλογα με τον προσανατολισμό και την κλίση στην Ελλάδα

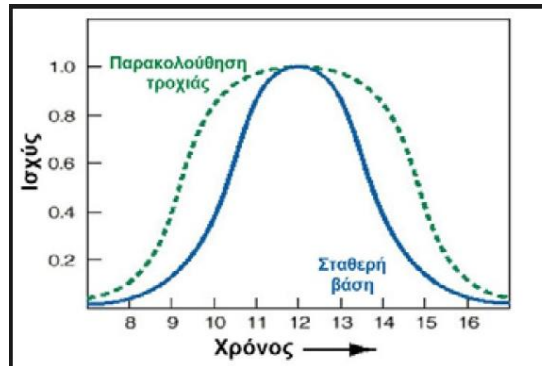
Προσανατολισμός	Κλίση ως προς το οριζόντιο επίπεδο		
	30°	0°	90°
Ανατολικός - Δυτικός	85% kWh <sub>(max)</sub>	90% kWh <sub>(max)</sub>	50% kWh <sub>(max)</sub>
ΝοτιοΑνατολικός - ΝοτιοΔυτικός	95% kWh <sub>(max)</sub>	90% kWh <sub>(max)</sub>	60% kWh <sub>(max)</sub>
Νότιος	kWh <sub>(max)</sub>	90% kWh <sub>(max)</sub>	60% kWh <sub>(max)</sub>
ΒορειοΑνατολικός - ΒορειοΔυτικός	67% kWh <sub>(max)</sub>	90% kWh <sub>(max)</sub>	30% kWh <sub>(max)</sub>
Βόρειος	60% kWh <sub>(max)</sub>	90% kWh <sub>(max)</sub>	20% kWh <sub>(max)</sub>

- Στηρίγματα ρυθμιζόμενης κλίσης: Η ρύθμιση της κλίσης στα στηρίγματα με ρυθμιζόμενη κλίση γίνεται χειροκίνητα κάθε μήνα ή δυο φορές το χρόνο. Με αυτό τον τρόπο αυξάνεται ποσοστιαία η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία σε σχέση με τα σταθερά στηρίγματα κατά 6 % για τη μηνιαία αλλαγή της κλίσης και κατά 5 % κατά την εποχική.
- Στηρίγματα με περιστρεφόμενη βάση ενός άξονα: Η κλίση σε αυτά τα στηρίγματα ρυθμίζεται μόνο προς έναν άξονα μεταβάλλοντας είτε την αζιμούθια γωνία  $\theta$ , είτε τη γωνία κλίσης  $\alpha$ . Η ποσοστιαία αύξηση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας σε σχέση με τα σταθερά στηρίγματα είναι 23 % - 25 %.



Εικόνα 2.32: Στηρίγματα με περιστρεφόμενη βάση α) ενός άξονα και β) δυο αξόνων

- Στηρίγματα με περιστρεφόμενη βάση δυο αξόνων: Η κλίση σε αυτά τα στηρίγματα ρυθμίζεται προς δυο άξονες μεταβάλλοντας τόσο την αζιμούθια γωνία  $\theta$  όσο και τη γωνία κλίσης  $\alpha$ . Η ποσοστιαία αύξηση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας σε σχέση με τα σταθερά στηρίγματα είναι 28 % - 30 %.

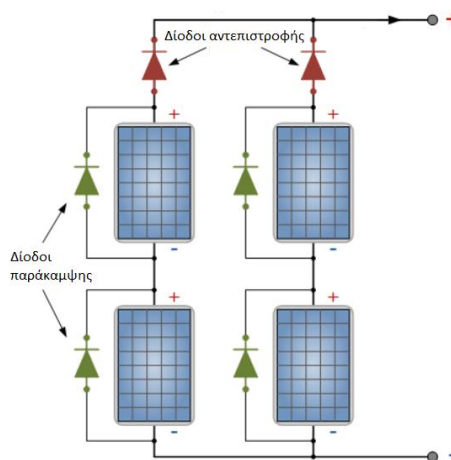


Διάγραμμα 2.11: Παραγόμενη ισχύς από συστοιχία με και χωρίς σύστημα παρακολούθησης της τροχιάς του ήλιου

#### 2.5.4 Κατασκευαστικές Λεπτομέρειες Φωτοβολταϊκής Συστοιχίας

Αρνητικές επιπτώσεις στην απόδοση της φωτοβολταϊκής συστοιχίας, έχει η σκίαση της επιφανείας ενός ή περισσότερων φωτοβολταϊκών πλαισίων. Έτσι, συνδέεται παράλληλα σε κάθε φωτοβολταϊκό πλαίσιο του κλάδου μια δίοδος παράκαμψης ώστε ακόμα και όταν ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο δε λειτουργεί λόγω ολικής σκίασης, ο κλάδος να αποδίδει ηλεκτρική ισχύ μειωμένη κατά την ισχύ του σκιασμένου πλαισίου.

Επιπλέον, σε κάθε κλάδο προβλέπεται μια δίοδος αντεπιστροφής που τοποθετείται στο αντίστοιχο κιβώτιο συνδέσεων του κλάδου. Σε περίπτωση ύπαρξης ηλεκτρικού συσσωρευτή, με αυτές τις διατάξεις αποκλείεται η δυνατότητα εκφόρτισης του ηλεκτρικού συσσωρευτή κατά τη διάρκεια της νύχτας. Επίσης, αποκλείεται η κυκλοφορία ρεύματος που επιβάλλουν ένας ή περισσότεροι κλάδοι στους υπόλοιπους [6].



Εικόνα 2.33: Σημεία τοποθέτησης διόδων παράκαμψης και αντεπιστροφής σε φωτοβολταϊκά πλαίσια [14]

## 2.5.5 Ισχύς Αιχμής και Βαθμός Απόδοσης Φωτοβολταϊκής Συστοιχίας

Η ισχύς αιχμής μιας φωτοβολταϊκής συστοιχίας ορίζεται ως η μέγιστη ηλεκτρική ισχύς, που αποδίδεται από τη φωτοβολταϊκή συστοιχία κάτω από τις πρότυπες συνθήκες ελέγχου STC.

$$\eta_{\Sigma} = \frac{P_{m\Sigma}}{P_{HA}} = \frac{P_{m\Sigma}}{P_{HAM} * S_{\Sigma}} = \frac{E_{m\Sigma}}{E_{HAM} * S_{\Sigma}} \quad (25)$$

όπου :

$P_{m\Sigma}$  [W]: μέγιστη αποδιδόμενη ηλεκτρική ισχύς συστοιχίας

$P_{HA}$  [W]: ισχύς προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας

$P_{HAM}$  [W/m<sup>2</sup>]: ισχύς προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας ανά μονάδα επιφάνειας

$S_{\Sigma}$  [m<sup>2</sup>]: επιφάνεια συστοιχίας

$E_{m\Sigma}$  [kWh]: μέγιστη αποδιδόμενη ηλεκτρική ενέργεια συστοιχίας

$E_{HAM}$  [kWh/m<sup>2</sup>]: ενέργεια προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας ανά μονάδα επιφάνειας

$S_{\Sigma}$  [m<sup>2</sup>]: επιφάνεια συστοιχίας

Ο βαθμός απόδοσης ( $\eta_{\Sigma}$ ) της φωτοβολταϊκής συστοιχίας προκύπτει από το γινόμενο του βαθμού απόδοσης ( $\eta_{\Pi}$ ) ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου με επιπλέον συντελεστές:

- Συντελεστής ανομοιογένειας ( $\sigma_{\alpha}$ ): Ο συντελεστής αυτός εκφράζει την ανομοιογένεια των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών των φωτοβολταϊκών πλαισίων που απαρτίζουν τη φωτοβολταϊκή συστοιχία. Αυτές οι διαφορές μπορεί να δημιουργηθούν από εξωτερικούς παράγοντες (σκίαση ενός πλαισίου) ή από εξωτερικές συνθήκες (διαφορετική ψύξη πλαισίων) ή εκ κατασκευής. Συνήθως λαμβάνει τιμή 0.98.
- Συντελεστής καλωδιώσεων ( $\sigma_{\kappa}$ ): Ο συντελεστής αυτός εκφράζει τις απώλειες στα καλώδια σύνδεσης των φωτοβολταϊκών πλαισίων της συστοιχίας. Συνήθως λαμβάνει τιμή 0.98.
- Συντελεστής απωλειών μεταφοράς ενέργειας ( $\sigma_{\mu}$ ): Ο συντελεστής αυτός περιλαμβάνει όλες τις απώλειες του φωτοβολταϊκού συστήματος από την έξοδο της φωτοβολταϊκής συστοιχίας μέχρι την έξοδο προς την κατανάλωση. Ο συντελεστής αυτός εξαρτάται από το είδος των διατάξεων που υπάρχουν στο φωτοβολταϊκό σύστημα. Έτσι λοιπόν μπορεί να λάβει τιμές  $\sigma_{\mu} = 0.75$  έως 0.99.

$$\eta_{\Sigma} = \eta_{\Pi} * \sigma_{\alpha} * \sigma_{\kappa} * \sigma_{\mu} \quad (26)$$

όπου:

$\eta_{\Pi}$ : βαθμός απόδοσης φωτοβολταϊκού πλαισίου

$\sigma_{\alpha}$ : συντελεστής ανομοιογένειας

$\sigma_{\kappa}$ : συντελεστής καλωδιώσεων

$\sigma_{\mu}$ : συντελεστής απωλειών μεταφοράς ενέργειας

## 2.6 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα διακρίνονται σε δυο βασικές κατηγορίες ανάλογα με το αν είναι συνδεδεμένα στο εθνικό δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας ή όχι. Έτσι, αυτά που δεν έχουν σύνδεση με το εθνικό δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας ονομάζονται απομονωμένα συστήματα (Off grid PV systems), ενώ αυτά που είναι συνδεδεμένα με το εθνικό δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας ονομάζονται διασυνδεδεμένα συστήματα (Grid connected PV systems).

Τόσο τα απομονωμένα συστήματα όσο και τα διασυνδεδεμένα συστήματα χωρίζονται σε επιμέρους κατηγορίες ανάλογα με τον τρόπο λειτουργίας τους.

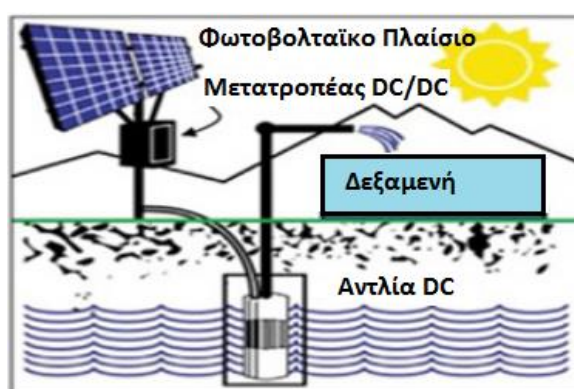
### 2.6.1 Απομονωμένα Φωτοβολταϊκά Συστήματα

Τα απομονωμένα συστήματα, τα οποία βρίσκονται κατά κύριο λόγο σε απομακρυσμένες περιοχές, όπου δεν είναι εφικτό ή σκόπιμο να υπάρξει σύνδεση με το κύριο δίκτυο, χωρίζονται στα αυτόνομα συστήματα και στα υβριδικά. Στα αυτόνομα συστήματα η ηλεκτρική ενέργεια παράγεται αποκλειστικά από τον ήλιο, ενώ στα υβριδικά η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια δεν προέρχεται μόνο από τον ήλιο αλλά και από άλλες μορφές ενέργειας τόσο ανανεώσιμων πηγών όσο και συμβατικών.

#### 2.6.1.1 Αυτόνομα συστήματα

Τα αυτόνομα συστήματα μπορούν να παρέχουν συνεχή τάση ή/και εναλλασσόμενη ανάλογα με το αν υπάρχει μετατροπέας τάσεως (DC-to-AC) και διακρίνονται σε δυο ακόμα υποκατηγορίες: (α) αυτά όπου μπορεί να αποθηκευτεί η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια και (β) σε αυτά όπου δεν αποθηκεύεται.

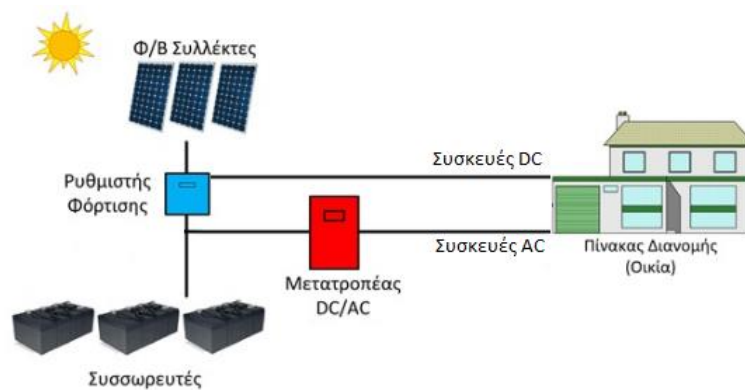
- Τα συστήματα που δεν αποθηκεύουν την παραγόμενη ενέργεια λειτουργούν για όσο χρόνο φωτίζεται το φωτοβολταϊκό σύστημα. Τέτοια συστήματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για άντληση νερού που προορίζεται είτε σε καλλιέργειες που δεν απαιτούν συστηματική άρδευση είτε για την αποθήκευσή του νερού σε κάποια δεξαμενή.



Εικόνα 2.34: Αυτόνομο φωτοβολταϊκό σύστημα χωρίς αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας με παροχή συνεχής τάσης [15]

- Τα συστήματα που αποθηκεύουν την ηλεκτρική ενέργεια έχουν το πλεονέκτημα να λειτουργούν κανονικά για ορισμένο χρόνο ακόμα και αν στο φωτοβολταϊκό σύστημα

δεν παρέχεται ηλιακή ακτινοβολία. Αυτά τα συστήματα χρησιμοποιούν την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια για την τροφοδοσία των καταναλώσεών τους και αν υπάρχει περίσσεια ενέργεια την αποθηκεύουν σε ηλεκτρικούς συσσωρευτές (μπαταρίες). Εφόσον υπάρχουν συσσωρευτές πρέπει υποχρεωτικά να υπάρχει και κάποιος ρυθμιστής φόρτισης των συσσωρευτών, ενώ ανάλογα με το πλήθος των συσσωρευτών υπολογίζεται και ο χρόνος αυτονομίας του συστήματος, δηλαδή ο χρόνος κατά τον οποίο το σύστημα μπορεί να λειτουργεί χωρίς να εκπέμπεται ηλιακή ακτινοβολία. Τέτοια συστήματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για φωτισμό δρόμων, σε τηλεπικοινωνιακούς αναμεταδότες, σε εξοχικές κατοικίες, σε μονάδες αφαλάτωσης κ.λπ.

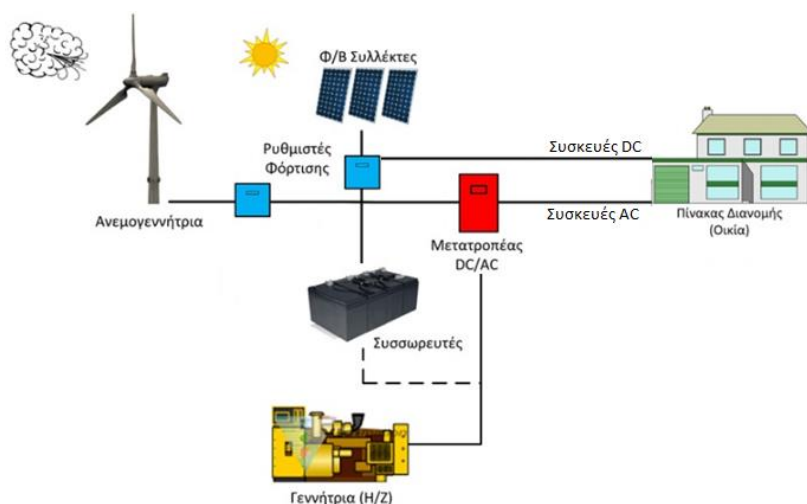


Εικόνα 2.35: Αυτόνομο φωτοβολταϊκό σύστημα με αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας και παροχή συνεχής/εναλλασσόμενης τάσης [16]

### 2.6.1.2 Υβριδικά συστήματα

Τα υβριδικά συστήματα εκτός από τη φωτοβολταϊκή εγκατάσταση χρησιμοποιούν και βοηθητικές πηγές ηλεκτρικής ενέργειας, οι οποίες μπορεί να είναι, ανανεώσιμων μορφών όπως ανεμογεννήτριες ή/και συμβατικές όπως γεννήτριες υγρών καυσίμων. Ο συνδυασμός όλων αυτών των πηγών ενέργειας γίνεται για να εξασφαλίζεται η πλήρης κάλυψη όλων των ενεργειακών αναγκών των καταναλώσεων κάθε χρονική στιγμή όλο το έτος.

Στις περισσότερες των περιπτώσεων σε αυτά τα συστήματα υπάρχει κάποιος μεταγωγικός πίνακας αυτοματισμού που καθορίζει από ποια πηγή θα τροφοδοτείται η εγκατάσταση ανάλογα με τη ζήτηση της ενέργειας. Αν οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας υπερκαλύπτουν τις ενεργειακές ανάγκες της εγκατάστασης, τότε αυτές τροφοδοτούν τις καταναλώσεις και την περίσσεια ενέργεια την αποθηκεύουν σε ηλεκτρικούς συσσωρευτές. Αν οι ενεργειακές ανάγκες της εγκατάστασης είναι υψηλές και δεν μπορούν να τις καλύψουν οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας ή/και οι συσσωρευτές τότε ενεργοποιείται για παράδειγμα και η γεννήτρια υγρών καυσίμων.



**Εικόνα 2.36: Υβριδικό φωτοβολταϊκό σύστημα με βοηθητικές πηγές αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας και παροχή συνεχής/εναλλασσόμενης τάσης**

## 2.6.2 Διασυνδεδεμένα Φωτοβολταϊκά Συστήματα

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως αυτά τα φωτοβολταϊκά συστήματα συνδέονται με το εθνικό δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Εφόσον υπάρχει το εθνικό δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας τα συστήματα αυτά δε χρειάζεται να αποθηκεύουν την ηλεκτρική ενέργεια σε συσσωρευτές, οπότε δεν απαιτούνται και ρυθμιστές φόρτισης αλλά μόνο μετατροπείς τάσεως για να μετατρέπουν τη συνεχή τάση σε εναλλασσόμενη.

Τα διασυνδεδεμένα φωτοβολταϊκά συστήματα διακρίνονται, ανάλογα με το μέγεθος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, σε αυτά του κεντρικού σταθμού και στα διεσπαρμένα.

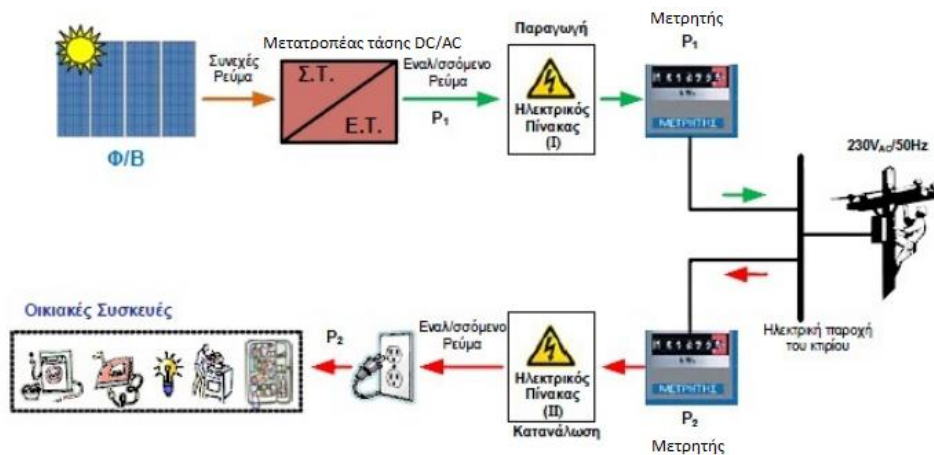
### 2.6.2.1 Διασυνδεδεμένα συστήματα κεντρικού σταθμού

Τα διασυνδεδεμένα φωτοβολταϊκά συστήματα κεντρικού σταθμού συνιστούν κεντρικούς φωτοβολταϊκούς σταθμούς μεγάλης ισχύος, των οποίων η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια διοχετεύεται προς πώληση στο εθνικό δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας.

### 2.6.2.2 Διασυνδεδεμένα συστήματα διεσπαρμένης παραγωγής

Τα διεσπαρμένα/καταναμημένα φωτοβολταϊκά συστήματα είναι εγκαταστάσεις παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μικρής ισχύος τα οποία είναι συνδεδεμένα στο οικιακό δίκτυο.

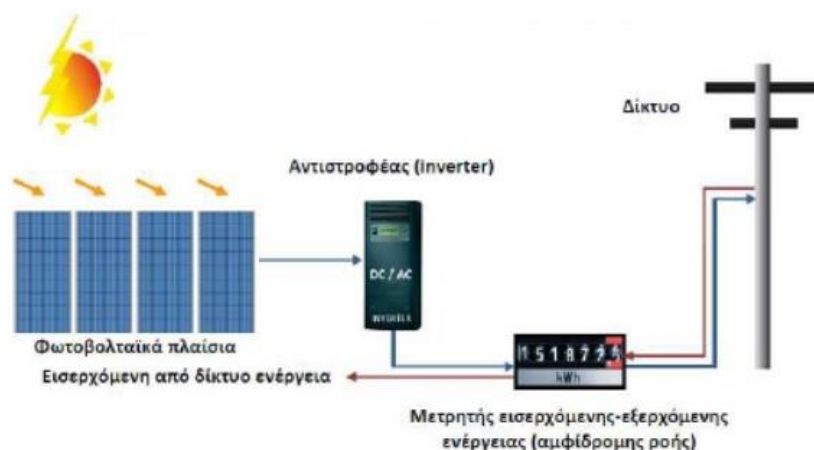
Τα προηγούμενα χρόνια και λόγω των υψηλών τιμών πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο υπήρχαν καταναμημένα συστήματα τα οποία όλη την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια την πωλούσαν στο δίκτυο ενώ αγόραζαν όλη την καταναλισκόμενη σε χαμηλότερη τιμή με προφανή σκοπό το κέρδος. Αυτά τα συστήματα χρησιμοποιούσαν δυο μετρητές ηλεκτρικής ενέργειας, έναν για την εξερχόμενη και έναν για την εισερχόμενη.



Εικόνα 2.37: Κατανεμημένο φωτοβολταϊκό σύστημα συνδεδεμένο στο δίκτυο με δυο μετρητές [6]

Σήμερα, με βάση το νέο θεσμικό πλαίσιο τα κατανεμημένα φωτοβολταϊκά συστήματα διακρίνονται σε:

- αυτά που ο σχεδιασμός γίνεται έτσι ώστε να καλύπτονται κατά μέσο όρο οι μηνιαίες ενεργειακές απαιτήσεις της εγκατάστασης. Για τις υπόλοιπες ενεργειακές ανάγκες χρησιμοποιείται το εθνικό δίκτυο ως βοηθητική πηγή.
- αυτά που έχουν αμφίδρομη λειτουργία με το εθνικό δίκτυο (net metering) και ο σχεδιασμός γίνεται έτσι ώστε να καλύπτεται κατά μέσο όρο οι ετήσιες ενεργειακές απαιτήσεις της εγκατάστασης. Σε περίπτωση περίσσειας παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας αυτή παρέχεται στο δίκτυο και «αποθηκεύεται» για να χρησιμοποιηθεί σε περίπτωση ανάγκης. Εάν υπάρξει ανάγκη για μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας από αυτή που έχει «αποθηκευτεί» στο δίκτυο, τότε αυτή παρέχεται κανονικά από το δίκτυο αλλά ο ιδιοκτήτης της εγκατάστασης χρεώνεται. Αυτά τα συστήματα διατηρούν έναν μετρητή ο οποίος χρησιμοποιείται για να συμψηφίζει την παραγόμενη με την καταναλισκόμενη ηλεκτρική ενέργεια.



Εικόνα 2.38: Κατανεμημένο φωτοβολταϊκό σύστημα συνδεδεμένο στο δίκτυο με έναν μετρητή



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 : ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΙ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΕΣ

### 3.1 ΓΕΝΙΚΑ

Οι ηλεκτρικοί συσσωρευτές (μπαταρίες) διαδραματίζουν πολύ σημαντικό ρόλο στα αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα καθώς ικανοποιούν τη ζήτηση για ηλεκτρική ενέργεια κατά τις χρονικές περιόδους όπου η παραγωγή δεν μπορεί να την καλύψει. Αυτό μπορεί να προκύψει, είτε σε περιπτώσεις όπου η φωτοβολταϊκή συστοιχία έχει φτάσει στο ανώτερο όριο παραγωγής ενέργειας αλλά η ζήτηση είναι μεγαλύτερη, είτε σε περιπτώσεις όπου δεν υπάρχει αρκετή ηλιακή ακτινοβολία, δηλαδή κατά τις συννεφιασμένες ημέρες ή τις νυχτερινές ώρες. Επιπλέον, οι συσσωρευτές αποτρέπουν μεγάλες διακυμάνσεις τάσης οι οποίες μπορεί πιθανόν να είναι και καταστροφικές,. Μια φωτοβολταϊκή συστοιχία, όπως έχει αναφερθεί προηγουμένως, μπορεί να αποδώσει ισχύ σε κάθε σημείο μεταξύ βραχυκυκλώματος και ανοικτού κυκλώματος, ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του φορτίου που είναι συνδεδεμένο σε αυτήν. Πολλά φορτία δεν μπορούν να λειτουργήσουν σε ένα τόσο μεγάλο εύρος τάσεων. Η τοποθέτηση ενός συσσωρευτή μεταξύ της φωτοβολταϊκής συστοιχίας και του φορτίου διασφαλίζει ότι το φορτίο δε θα «βλέπει» τίποτα έξω από το εύρος τάσεων στο οποίο ο συσσωρευτής μπορεί να λειτουργήσει [17].

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι κατηγοριοποίησης των ηλεκτρικών συσσωρευτών, με σημαντικότερο αυτόν που σχετίζεται με τη δυνατότητα ή μη της επαναφόρτισής τους. Βάσει αυτής της δυνατότητας χαρακτηρίζονται ως πρωτογενείς (μη επαναφορτιζόμενοι) ή δευτερογενείς (επαναφορτιζόμενοι). Φυσικά στα απομονωμένα φωτοβολταϊκά συστήματα γίνεται αναφορά στους δευτερογενείς συσσωρευτές, οι οποίοι συνδεδεμένοι σε κατάλληλες διατάξεις παράγουν τις επιθυμητές τιμές τάσης - έντασης και παρέχουν την απαιτούμενη αυτονομία.

Οι ηλεκτρικοί συσσωρευτές είναι η πλέον διαδεδομένη λύση στην αποθήκευση ενέργειας μικρής κλίμακας, αν και είναι το πιο αδύναμο σημείο της εγκατάστασης, καθώς η διάρκεια ζωής τους είναι γενικά πολύ μικρότερη από όλες τις άλλες μονάδες του συστήματος. Το κόστος τους είναι αρκετά υψηλό ενώ δεν είναι και τόσο αποδοτικοί όσο τα υπόλοιπα ηλεκτρονικά συστήματα της εγκατάστασης (κάποια ενέργεια χάνεται λόγω θερμότητας και χημικών αντιδράσεων κατά τη φόρτιση και την εκφόρτιση).

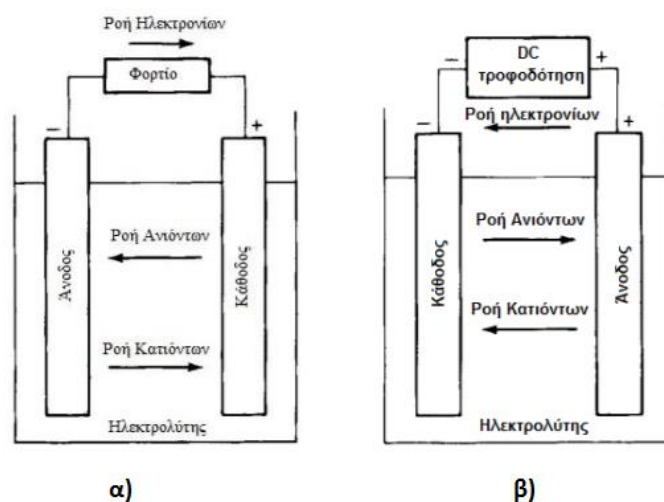
Η ονομασία των συσσωρευτών γίνεται βάσει του υλικού που είναι κατασκευασμένα τα ηλεκτρόδια όπως για παράδειγμα, Ψευδαργύρου – Άνθρακα στους πρωτογενείς συσσωρευτές και Μολύβδου – Οξέος ή Νικελίου – Καδμίου στους δευτερογενείς.

### 3.2 ΦΟΡΤΙΣΗ – ΕΚΦΟΡΤΙΣΗ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΩΝ

Οι ηλεκτρικοί συσσωρευτές αποτελούνται από ζεύγη μεταλλικών ηλεκτροδίων (στοιχεία) συνδεδεμένων μεταξύ τους σε σειρά τα οποία είναι εμβαπτισμένα σε ένα διάλυμα ηλεκτρολύτη. Οι συσσωρευτές δεσμεύουν την ηλεκτρική ενέργεια υπό χημική μορφή μέσω κατάλληλων χημικών αντιδράσεων οξειδοαναγωγής. Αυτός ο τύπος αντίδρασης περιλαμβάνει τη μεταφορά ηλεκτρονίων από το ένα υλικό στο άλλο μέσω ενός ηλεκτρικού

κυκλώματος. Η διεργασία αυτή μπορεί να συνεχίζεται έως ότου διακοπεί το κύκλωμα ή κάποιο από τα αντιδρώντα στοιχεία εκλείψει. Στις περιπτώσεις των επαναφορτιζόμενων συστημάτων, οι συσσωρευτές φορτίζονται ξανά ακολουθώντας την αντίστροφη διαδικασία.

Κατά την εκφόρτιση το ηλεκτροχημικό στοιχείο είναι συνδεδεμένο με ένα εξωτερικό φορτίο. Από το ένα ηλεκτρόδιο, το οποίο ονομάζεται ηλεκτρόδιο ανόδου (αρνητικό ηλεκτρόδιο), ρέουν ηλεκτρόνια στο εξωτερικό κύκλωμα καθώς το ίδιο οξειδώνεται. Το άλλο ηλεκτρόδιο, το οποίο ονομάζεται ηλεκτρόδιο καθόδου (θετικό ηλεκτρόδιο), δέχεται τα ηλεκτρόνια από το εξωτερικό κύκλωμα.



**Εικόνα 3.1: Διαδικασία α) εκφόρτισης και β) φόρτισης ενός συσσωρευτή [18]**

Κατά τη διάρκεια της επαναφόρτισης ενός επαναφορτιζόμενου στοιχείου, η ροή του ρεύματος (ροή των ηλεκτρονίων) αντιστρέφεται. Η φόρτιση του συσσωρευτή γίνεται όταν τα άκρα του συνδεθούν με μια ηλεκτρική πηγή συνεχούς τάσεως. Η οξείδωση λαμβάνει χώρα στο θετικό ηλεκτρόδιο (άνοδος) και αυτό που ανάγεται τώρα είναι το αρνητικό ηλεκτρόδιο (κάθοδος), καθώς εξορισμού, η άνοδος είναι το ηλεκτρόδιο στο οποίο γίνεται η οξείδωση και η κάθοδος το ηλεκτρόδιο στο οποίο γίνεται η αναγωγή.

Ο ηλεκτρολύτης, παρέχει το μέσο για τη μεταφορά του φορτίου με τη μορφή ιόντων μέσα στο στοιχείο ανάμεσα στην άνοδο και την κάθοδο. Κατά την εκφόρτιση η πυκνότητα του ηλεκτρολύτη μειώνεται ενώ κατά τη φόρτιση αυξάνει. Ο ηλεκτρολύτης είναι τυπικά ένα υγρό, όπως το νερό ή άλλοι διαλύτες, με διαλυμένα άλατα, οξέα ή αλκάλια. Μερικοί συσσωρευτές χρησιμοποιούν ηλεκτρολύτες σε παχύρρευστη μορφή (gel), ενώ σε άλλους συσσωρευτές (Νικελίου – Καδμίου) οι ηλεκτρολύτες δε συμμετέχουν κατά τη χημική αντίδραση.

### 3.3 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΩΝ

Ανεξαρτήτως του τύπου τους οι συσσωρευτές χαρακτηρίζονται από κάποια βασικά ηλεκτρικά και μη, μεγέθη:

- Ονομαστική τάση V: είναι η διαφορά δυναμικού που παρατηρείται μεταξύ του θετικού και του αρνητικού ηλεκτροδίου όταν το κύκλωμα είναι ανοιχτό και μετρίεται σε Volts

[V]. Η τιμή της τάσης εξαρτάται από τη χημική σύνθεση των ηλεκτροδίων, τη συγκέντρωση των υλικών των ηλεκτροδίων και τη θερμοκρασία. Η τάση που αναπτύσσεται για παράδειγμα στα άκρα ενός στοιχείου Μολύβδου – Θεικού Οξέος είναι 2.35 V. Εάν ένας τέτοιος συσσωρευτής αποτελείται από 6 στοιχεία έχει ονομαστική τάση 12 V, και εάν αποτελείται από 12 στοιχεία έχει ονομαστική τάση 24 V.

- Ονομαστική χωρητικότητα C: είναι το ηλεκτρικό φορτίο που μπορεί να αποθηκευτεί στο εσωτερικό του με τη μορφή χημικής ενέργειας και μετριέται σε αμπερώρια [Ah]. Η χωρητικότητα έχει άμεση σχέση με το μέγεθος και τη γεωμετρία του συσσωρευτή. Το μέγεθος αυτό είναι το γινόμενο του ρεύματος το οποίο μπορεί να παρέχει ο συσσωρευτής σε ένα εξωτερικό κύκλωμα από το σημείο της πλήρους φόρτισης, επί των αριθμό των ωρών που προσφέρει αυτό το ρεύμα, μέχρι να εκφορτισθεί πλήρως σε κανονικές συνθήκες θερμοκρασίας (20°C).

$$C = I * t \text{ [Ah]} \quad (27)$$

όπου I είναι η ένταση του ρεύματος [A] και t η χρονική διάρκεια σε ώρες [h] της εκφόρτισης.

Το μέγεθος αυτό συνοδεύεται σχεδόν πάντοτε από τον αριθμό των ωρών κατά τις οποίες διαρκεί η εκφόρτιση του συσσωρευτή (φαινόμενο Peukert - Peukert Effect). Η τιμή του Peukert σχετίζεται άμεσα με την εσωτερική αντίσταση του συσσωρευτή. Όσο υψηλότερη είναι η εσωτερική αντίσταση, τόσο μεγαλύτερες θα είναι οι απώλειες κατά τη φόρτιση και την εκφόρτιση, ειδικά αν αυτή γίνεται με μεγαλύτερα ρεύματα. Αυτό σημαίνει ότι όσο πιο γρήγορα εκφορτίζεται κατά τη χρήση του ο συσσωρευτής, τόσο χαμηλότερη θα είναι η χωρητικότητα που θα αποδώσει. Συνήθως, η τιμή χωρητικότητας που αναγράφεται στους συσσωρευτές αναφέρεται σε ρυθμό εκφόρτισης 20 ωρών και καλείται ονομαστικός ρυθμός εκφόρτισης C/20. Ο πραγματικός χρόνος εκφόρτισης του συσσωρευτή μπορεί να υπολογιστεί ως εξής[19]:

$$t = H * \left( \frac{C}{I * H} \right)^k \text{ [h]} \quad (28)$$

όπου :

t [h] : ο πραγματικός χρόνος εκφόρτισης του συσσωρευτή

H [h] : ο χρόνος εκφόρτισης των προδιαγραφών του συσσωρευτή

C [Ah]: η χωρητικότητα προδιαγραφών για το συγκεκριμένο ρυθμό εκφόρτισης

I [A]: το πραγματικό ρεύμα εκφόρτισης

k : η σταθερά του Peukert που εξαρτάται από το είδος του συσσωρευτή

Αν ένας συσσωρευτής, για παράδειγμα, αποδίδει 5 A επί 20 ώρες έχει χωρητικότητα 100 Ah. Αν ο ίδιος συσσωρευτής εκφορτιστεί με ρυθμό 10 A η εκφόρτισή του δε θα διαρκέσει 10 ώρες αλλά λιγότερες. Θεωρώντας ότι ο συσσωρευτής έχει μια σταθερά Peukert ίση με 1.2, ο χρόνος t για να εκφορτιστεί πλήρως είναι 8.7 h και όχι 10 h, άρα θα παρέχει 87 Ah αντί για 100 Ah.

- Μέγιστη ηλεκτρική ενέργεια E: είναι η μέγιστη ενέργεια που μπορεί να αποθηκεύσει ο συσσωρευτής και μετριέται σε [Wh] σύμφωνα με τη σχέση:

$$E = C * V \text{ [Wh]} \quad (29)$$

όπου :

V [V] : ονομαστική τάση συσσωρευτή

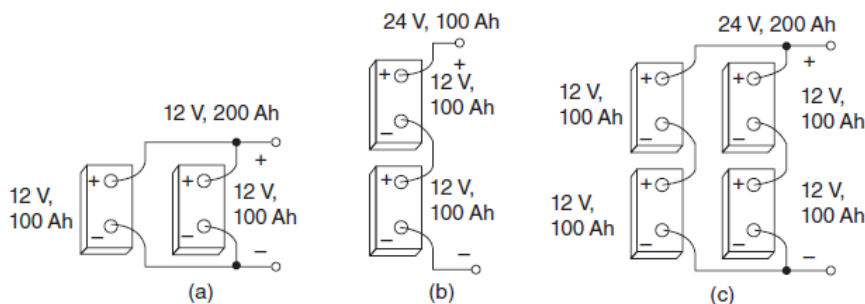
C [Ah]: ονομαστική χωρητικότητα συσσωρευτή

Αν ένας συσσωρευτής έχει ονομαστική χωρητικότητα  $C = 100 \text{ Ah}$  και ονομαστική τάση  $V = 12 \text{ V}$  μπορεί να αποθηκεύσει μέγιστη ηλεκτρική ενέργεια  $E = 1200 \text{ Wh} = 1.2 \text{ kWh}$

- Η στάθμη φόρτισης (State Of Charge, SOC): είναι το ποσοστό της χωρητικότητας ή της ενέργειας με το οποίο είναι φορτισμένος ένας συσσωρευτής σε μια δεδομένη χρονική στιγμή. Όταν η στάθμη φόρτισης είναι στο 100 % σημαίνει ότι ο συσσωρευτής είναι πλήρως φορτισμένος, ενώ όταν η στάθμη φόρτισης γίνεται 0 % σημαίνει ότι η ονομαστική χωρητικότητα έχει εκφορτιστεί [20].
- Το βάθος εκφόρτισης (depth of discharge – DOD): είναι το κλάσμα ή το ποσοστό της χωρητικότητας που έχει αφαιρεθεί από τον πλήρως φορτισμένο συσσωρευτή. Το αντίθετο, δηλαδή, από τη στάθμη φόρτισης.
- Κύκλος λειτουργίας: είναι η επαναλαμβανόμενη διαδικασία εκφόρτισης και φόρτισης που συμβαίνει σε έναν συσσωρευτή κατά τη λειτουργία του. Ένας κύκλος ισοδυναμεί με μια εκφόρτιση που ακολουθείται από μια φόρτιση. Θεωρείται συνήθως ότι εκφορτίζεται από το 100 % μέχρι το 20 % της χωρητικότητάς του και έπειτα πάλι φορτίζεται ως το 100 %. Εντούτοις, υπάρχουν συχνά προδιαγραφές για άλλα βάρη στον κύκλο εκφόρτισης με τα πιο συχνά να είναι 10 %, 20 % και 50 %.
- Κύκλος ζωής: είναι ένα μέτρο για το πόσους κύκλους λειτουργίας μπορεί να δώσει ένας συσσωρευτής κατά τη διάρκεια της χρήσιμης ζωής του. Συνήθως αντιστοιχεί στον αριθμό των κύκλων εκφόρτισης για ένα συγκεκριμένο DOD, που ο συσσωρευτής μπορεί να πραγματοποιήσει πριν η διαθέσιμη χωρητικότητά του μειωθεί σε ένα συγκεκριμένο ποσοστό (συνήθως 80%) της αρχικής χωρητικότητας.
- Αυτοεκφόρτιση: ονομάζεται η απώλεια φορτίου σε έναν συσσωρευτή αν αυτός αφεθεί σε κατάσταση ανοικτού κυκλώματος για υπολογίσιμο χρονικό διάστημα. Για επαναφορτιζόμενους συσσωρευτές, ο ρυθμός αυτοεκφόρτισης συνήθως αντιστοιχεί σε ένα ποσοστό χωρητικότητας που χάνεται ανά μήνα όταν βρίσκεται σε πλήρη φόρτιση. Ο ρυθμός αυτοεκφόρτισης αναφέρεται μαζί με τη θερμοκρασία του συσσωρευτή καθώς σε πολλές περιπτώσεις διπλασιάζεται για κάθε αύξηση  $10^\circ\text{C}$  [17].
- Αυτονομία: χρησιμοποιείται στα απομονωμένα συστήματα παραγωγής ενέργειας. Καθορίζεται από το λόγο του ονομαστικού ενεργειακού περιεχομένου του συσσωρευτή (kWh) προς τη μέση ημερήσια ενεργειακή κατανάλωση (kWh/ημέρα). Επομένως, η μονάδα μέτρησης είναι οι «ημέρες» και εκφράζει το χρονικό διάστημα για το οποίο το σύστημα μπορεί να τροφοδοτείται μόνο από τον πλήρως φορτισμένο συσσωρευτή [20].

### 3.4 ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΣΥΝΔΕΣΗ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΩΝ

Η σύνδεση μεταξύ των ηλεκτρικών συσσωρευτών γίνεται όπως και στα φωτοβολταϊκά πλαίσια και ακολουθεί τους γνωστούς κανόνες συνδεσμολογίας των ηλεκτρικών πηγών:

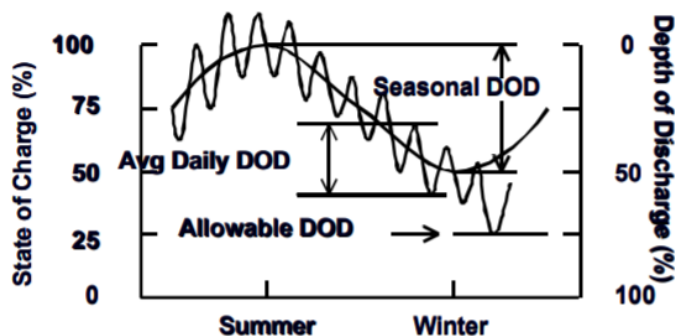


**Εικόνα 3.2: Τρόποι ηλεκτρικής σύνδεσης συσσωρευτών α) Παράλληλη σύνδεση β) Σύνδεση σε σειρά και γ) Μεικτή σύνδεση**

- Παράλληλη σύνδεση (π.χ. δυο συσσωρευτές ονομαστικής τάσεως 12 V και χωρητικότητας 100 Ah ο καθένας, αποτελούν μια συστοιχία με ονομαστική τάση 12 V και χωρητικότητα 200 Ah).
- Σύνδεση σε σειρά (π.χ. δυο συσσωρευτές ονομαστικής τάσεως 12 V και χωρητικότητας 100 Ah ο καθένας, αποτελούν μια συστοιχία με ονομαστική τάση 24 V και χωρητικότητα 100 Ah).
- Μεικτή σύνδεση, συνδυασμός παράλληλης και σε σειράς σύνδεσης (π.χ. τέσσερις συσσωρευτές ονομαστικής τάσεως 12 V και χωρητικότητας 100 Ah ο καθένας, συνδεδεμένοι ανά δυο σε σειρά και οι δυο δυάδες παράλληλα αποτελούν μια συστοιχία με ονομαστική τάση 24 V και χωρητικότητα 200 Ah).

### 3.5 ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΕΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

Η διαδικασία φόρτισης – εκφόρτισης και γενικά η λειτουργία των ηλεκτρικών συσσωρευτών στα φωτοβολταϊκά συστήματα είναι διαφορετική απ’ ότι σε άλλα συστήματα, τα οποία δεν επηρεάζονται από τις εξωτερικές συνθήκες. Κάθε φωτοβολταϊκό σύστημα είναι σχεδιασμένο να λειτουργεί για ορισμένες συνθήκες μέσης ηλιακής ακτινοβολίας. Μια φωτοβολταϊκή συστοιχία μπορεί να παρέχει παραπάνω ισχύ σε κάποιες περιόδους, ενώ σε κάποιες άλλες, η ισχύς που απαιτεί το φορτίο του συστήματος μπορεί να ξεπερνά την παρεχόμενη ισχύ από τη συστοιχία. Επίσης υπάρχουν και κάποιες χρονικές στιγμές όπου η παροχή ενέργειας από τις φωτοβολταϊκές συστοιχίες είναι ελάχιστα περισσότερη ή ελάχιστα λιγότερη από αυτή που απαιτεί το φορτίο.



**Διάγραμμα 3.1: Τυπική διακύμανση στάθμης φόρτισης και βάθους εκφόρτισης φωτοβολταϊκής συστοιχίας κατά τη διάρκεια ενός έτους [21]**

Έτσι μπορούν να διακριθούν τρία είδη λειτουργίας ανάλογα με την έλλειψη ή μη, ενέργειας στους συσσωρευτές θεωρώντας ότι λειτουργούν σε κανονικές συνθήκες θερμοκρασίας όπως παρουσιάζεται και στο Διάγραμμα 3.1:

- **Λειτουργία με περίσσεια ενέργεια:** Όταν το σύστημα λειτουργεί σε περιόδους όπου υπάρχει μεγάλη ηλιοφάνεια όπως κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού, δημιουργούνται συνθήκες περίσσειας ενέργειας. Ως αποτέλεσμα, ο συσσωρευτής φτάνει τη μέγιστη τάση φόρτισης του σχεδόν κάθε μέρα το μεσημέρι και μέχρι το απόγευμα είναι πλήρως φορτισμένος. Κατά τη διάρκεια της νύχτας, ο συσσωρευτής εκφορτίζεται και το πρωί με την ανατολή του ηλίου έχει φτάσει στην ελάχιστη κατάσταση εκφόρτισης, περίπου στο 70 % - 80 % της θεωρητικής χωρητικότητας του. Κατά τη διάρκεια της επόμενης ημέρας πραγματοποιείται πάλι ο ίδιος κύκλος φόρτισης, δηλαδή πλήρη φόρτιση μέχρι το απόγευμα. Αυτές είναι οι ευνοϊκότερες συνθήκες λειτουργίας για ένα συσσωρευτή φωτοβολταϊκού συστήματος.
- **Λειτουργία με έλλειψη ενέργειας:** Κατά τη διάρκεια περιόδων όπου δεν υπάρχει μεγάλη ηλιοφάνεια, όπως συμβαίνει τον χειμώνα, το ίδιο φωτοβολταϊκό σύστημα (αν δεν έχει γίνει σημαντική υπερδιαστασιολόγηση), λιγότερο ή περισσότερο συχνά, αντιμετωπίζει συνθήκες λειτουργίας έλλειψης ενέργειας. Ως αποτέλεσμα ο συσσωρευτής δε φορτίζεται αλλά αντίθετα, πιθανών, παρέχει ενέργεια στο σύστημα ώσπου η τάση του να πέσει κάτω από την ελάχιστη τάση αποφόρτισης. Σε αυτή την περίπτωση ο ρυθμιστής φόρτισης του συσσωρευτή θα διακόψει την παροχή ρεύματος. Η διακοπή θα συνεχιστεί μέχρι ο συσσωρευτής να φορτιστεί και πάλι κατά τη διάρκεια της επόμενης ηλιόλουστης ημέρας έως ότου φτάσει σε ένα ικανοποιητικό επίπεδο τάσης.
- **Λειτουργία με κύκλους διακύμανσης ενέργειας:** Κατά τη διάρκεια των ημερών που ο συσσωρευτής δε φορτίζεται στο 100 % αλλά ούτε και πέφτει στην ελάχιστη τάση αποφόρτισης, λειτουργεί σε μια κατάσταση διακύμανσης που είναι δύσκολο να εκτιμηθεί.

### **3.6 ΡΥΘΜΙΣΤΕΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΩΝ**

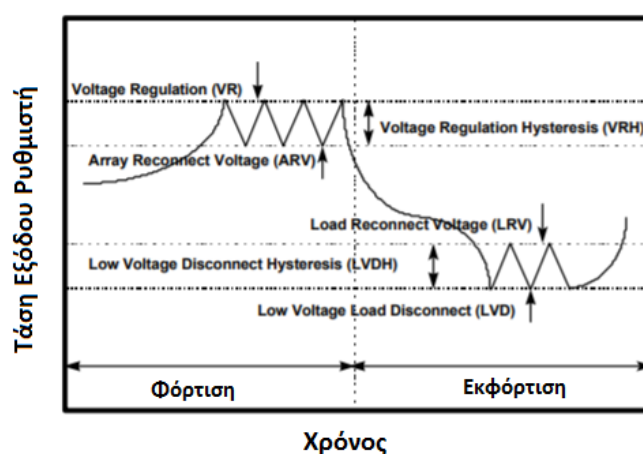
Η κύρια λειτουργία ενός ρυθμιστή/ελεγκτή φόρτισης σε ένα αυτόνομο φωτοβολταϊκό σύστημα είναι να διατηρεί το συσσωρευτή στην υψηλότερη δυνατή στάθμη φόρτισης ενώ ταυτόχρονα να τον προστατεύει από την υπερφόρτιση και από τις βαθιές εκφορτίσεις. Παρόλο που μερικά φωτοβολταϊκά συστήματα μπορούν να σχεδιαστούν αποδοτικά χωρίς τη χρήση ρυθμιστή φόρτισης, σε κάθε σύστημα που έχει απρόβλεπτα φορτία, ανθρώπινη παρέμβαση, είναι τυπικά απαραίτητος ένας ρυθμιστής φόρτισης. Επιπλέον, χαρακτηριστικά όπως είναι η αντιστάθμιση της θερμοκρασίας, συναγερμοί, μετρητές, απομακρυσμένοι αισθητήρες τάσης και ειδικοί αλγόριθμοι μπορούν να ενισχύσουν την ικανότητα ενός ρυθμιστή φόρτισης να διατηρεί την καλή υγεία και να επιμηκύνει τη διάρκεια ζωής του συσσωρευτή. Επιπλέον, αυτά τα χαρακτηριστικά παρέχουν μια ένδειξη της λειτουργικής κατάστασης του συσσωρευτή στον επιμελητή του συστήματος [21].

Γενικά οι ρυθμιστές των συσσωρευτών παρεμβάλλονται μεταξύ της εξόδου του φωτοβολταϊκού συστήματος και της εισόδου του συστήματος αποθήκευσης προκειμένου

να ελέγχουν τη φόρτιση και την εκφόρτισή του. Η απόσταση που μεσολαβεί μεταξύ των συσσωρευτών και του ρυθμιστή θα πρέπει να είναι η ελάχιστη δυνατή. Υπάρχουν δύο βασικές τοπολογίες για τη ρύθμιση της φόρτισης ενός συσσωρευτή από μια φωτοβολταϊκή συστοιχία: σε σειρά και παράλληλα. Και οι δύο τοπολογίες χρησιμοποιούνται αποδοτικά, κάθε μια από αυτές όμως μπορεί να ενσωματώσει έναν αριθμό παραλλαγών που μεταβάλλουν την απόδοση και τη δυνατότητα εφαρμογής τους.

Οι πιο σημαντικές λειτουργίες των ρυθμιστών συσσωρευτών και των ελέγχων του συστήματος είναι [21]:

- Αποτροπή υπερφόρτισης: περιορισμός της ενέργειας με την οποία τροφοδοτείται ο συσσωρευτής από τη φωτοβολταϊκή συστοιχία, όταν ο συσσωρευτής είναι πλήρως φορτισμένος. Η ρύθμιση της φόρτισης επιτυγχάνεται συνήθως με τον περιορισμό της τάσης του συσσωρευτή σε μια μέγιστη τιμή, που συχνά αναφέρεται ως σημείο ρύθμισης της τάσης (voltage regulation set point – VR). Ανάλογα με τη μέθοδο ρύθμισης, το ρεύμα μπορεί να περιορίζεται καθώς διατηρείται η τάση ρύθμισης ή να αποσυνδέεται έως ότου η τάση του συσσωρευτή πέσει στο σημείο τάσης επανασύνδεσης της συστοιχίας (array reconnect voltage – ARV) (Διάγραμμα 3.2).
- Αποτροπή βαθιάς εκφόρτισης: αποσύνδεση του συσσωρευτή από τα ηλεκτρικά φορτία όταν αυτός φτάνει σε χαμηλή στάθμη φόρτισης. Η προστασία αυτή επιτυγχάνεται δημιουργώντας ανοιχτό κύκλωμα μεταξύ του συσσωρευτή και του ηλεκτρικού φορτίου, όταν ο συσσωρευτής φτάνει σε ένα προκαθορισμένο σημείο χαμηλής τάσης αποσύνδεσης φορτίου (low voltage load disconnect set point– LVD). Οι περισσότεροι ελεγκτές φόρτισης έχουν μια λυχνία ένδειξης ή έναν ηχητικό συναγερμό για να ειδοποιεί το χρήστη του συστήματος στη συνθήκη αποσύνδεσης του φορτίου. Όταν ο συσσωρευτής φθάσει, μετά από την επαναφόρτιση, σε ένα συγκεκριμένο επίπεδο, τα φορτία συνδέονται εκ νέου με τον συσσωρευτή (load reconnect voltage – LRV) (Διάγραμμα 3.2).
- Παροχή λειτουργιών ελέγχου του φορτίου: αυτόματη σύνδεση και αποσύνδεση ενός ηλεκτρικού φορτίου σε συγκεκριμένο χρόνο. Για παράδειγμα, λειτουργία ενός φορτίου φωτισμού από τη δύση έως την ανατολή του ηλίου.



Διάγραμμα 3.2: Σημεία ελέγχου ρυθμιστή συσσωρευτών κατά τη διαδικασία φόρτισης και εκφόρτισης [21]

Ο αλγόριθμος ή η στρατηγική ελέγχου ενός ρυθμιστή φόρτισης καθορίζει την αποδοτικότητα της φόρτισης του συσσωρευτή και της αξιοποίησης της φωτοβολταϊκής συστοιχίας και, τελικά, της ικανότητας του συστήματος να ικανοποιήσει τις απαιτήσεις του φορτίου. Έτσι υπάρχουν οι εξής ρυθμιστές [8]:

- ρυθμιστές τύπου «διακόπτη ON – OFF» που βασίζουν τη λειτουργία τους σε ηλεκτρονόμους ή διακόπτες στερεής κατάστασης και συνιστούν τις απλούστερες διατάξεις χαμηλού κόστους
- ρυθμιστές τύπου «διαμόρφωσης εύρους παλμών» (Pulse Width Modulation – PWM), οι οποίοι φορτίζουν τους συσσωρευτές με σταθερή τιμή τάσεως και αποτελούν την πλέον διαδεδομένη μορφή ρυθμιστών σε φωτοβολταϊκές εφαρμογές μέσης κλίμακας
- ρυθμιστές τύπου «Maximum Power Point– MPP» που εμπεριέχουν συστήματα τα οποία διασφαλίζουν την προσαρμογή της τιμής της αντίστασης φορτίου προκειμένου το σημείο λειτουργίας του φωτοβολταϊκού συστήματος ( $I_{out}$ ,  $V_{out}$ ) να συμπίπτει με τη θέση μέγιστης ισχύος ( $I_{max}$ ,  $V_{max}$ ), ώστε να παρέχεται η μέγιστη δυνατή ισχύς από τη φωτοβολταϊκή συστοιχία. Οι ρυθμιστές τύπου MPP χρησιμοποιούνται κυρίως σε εγκαταστάσεις μεγάλης κλίμακας.

### 3.7 ΕΙΔΗ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΩΝ

Στα φωτοβολταϊκά συστήματα χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο δυο είδη ηλεκτρικών συσσωρευτών, οι Μολύβδου – Οξέος και οι Νικελίου – Καδμίου. Οι συσσωρευτές Μολύβδου – Οξέος αποτελούν το μεγαλύτερο ποσοστό συσσωρευτών στα φωτοβολταϊκά συστήματα ενώ η χρήση των συσσωρευτών Νικελίου – Καδμίου είναι πιο περιορισμένη. Τυπικές τιμές της απόδοσης για συσσωρευτές Μολύβδου – Οξέος είναι 85 % - 90 % και για τους Νικελίου – Καδμίου είναι περίπου 65 %.

Οι συσσωρευτές μπορούν να κατηγοριοποιηθούν και ως προς τη ρευστότητα του ηλεκτρολύτη που εμπεριέχουν κατά τους ακόλουθους τύπους [8]:

- οι συσσωρευτές υγρού τύπου (Flooded Lead Acid (FLA) ή/και wet cell) οι οποίοι δεν είναι σφραγισμένοι και γι' αυτό το λόγο ονομάζονται και ανοιχτού τύπου. Αποτελούν την πλειονότητα των συσσωρευτών Μολύβδου και προσφέρουν αφθονία μεγεθών (Ah) και σχεδιαστικών επιλογών. Σε αυτούς τους συσσωρευτές υπάρχει κίνδυνος διαρροής του ηλεκτρολύτη οξέος, όπως και η παραγωγή ατμών.
- οι συσσωρευτές κλειστού τύπου Μολύβδου – Οξέος VRLA (Valve Regulated Lead Acid), οι οποίοι μπορεί να είναι στεγανοί ή με βαλβίδα εξαγωγής ατμών και ο ηλεκτρολύτης είναι υπό τη μορφή gel (Absorbed Glass Material – AGM). Σε αυτούς τους συσσωρευτές δεν είναι δυνατή η διαρροή του ηλεκτρολύτη. Αποτελούν τη συνηθέστερη επιλογή για αξιόπιστα φωτοβολταϊκά συστήματα.
- οι συσσωρευτές Pocket Plates οι οποίοι είναι Νικελίου – Καδμίου και υψηλής απόδοσης.



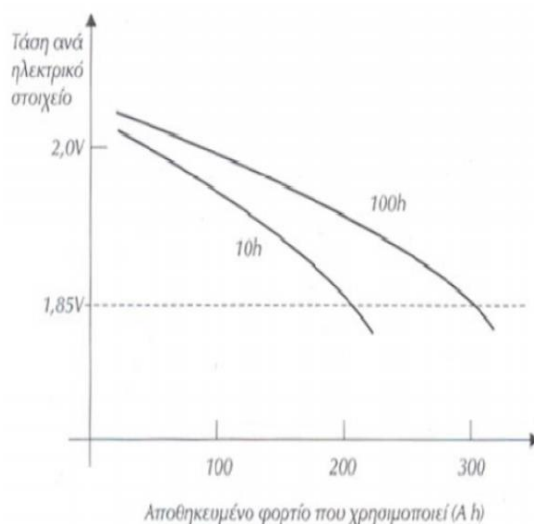
### 3.7.1 Μολύβδου – Οξέος (Lead Acid)

Ο συσσωρευτής Μολύβδου – Οξέος είναι ο πιο παλιός τύπος επαναφορτιζόμενου συσσωρευτή. Είναι σχεδόν πάντα η πιο οικονομική επιλογή συσσωρευτή για οποιαδήποτε εφαρμογή και παρέχει ταυτόχρονα καλή απόδοση και διάρκεια ζωής. Χαρακτηρίζεται από το γεγονός ότι και στα δύο ηλεκτρόδια χρησιμοποιείται ο μόλυβδος σαν ενεργό υλικό, ενώ για ηλεκτρολύτη χρησιμοποιείται θειικό οξύ. Τόσο τα υλικά των ηλεκτροδίων όσο και ο ηλεκτρολύτης υπόκειται σε δομικές αλλαγές. Όλοι οι συσσωρευτές Μολύβδου – Οξέος παράγουν αέρια υδρογόνου και οξυγόνου (αεριοποίηση) στα ηλεκτρόδια κατά τη φόρτιση μέσω μιας διαδικασίας που ονομάζεται ηλεκτρόλυση.

Παρακάτω παρουσιάζεται η συμπεριφορά κάποιων βασικών χαρακτηριστικών των συσσωρευτών Μολύβδου – Οξέος τα οποία επηρεάζουν σημαντικά τη διάρκεια ζωής τους.

#### 3.7.1.1 Χωρητικότητα

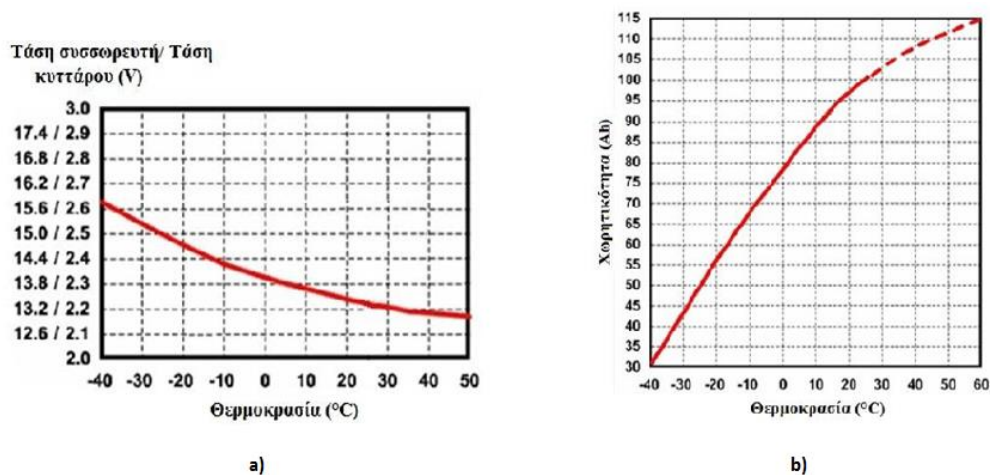
Η χωρητικότητα κάθε συσσωρευτή, όπως έχει αναφερθεί, είναι συνάρτηση του ρυθμού εκφόρτισης αυτού. Μια τυπική συμπεριφορά της τάσης του συσσωρευτή ανά ηλεκτρικό στοιχείο σε σχέση με το ρυθμό εκφόρτισης και τη χωρητικότητα παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 3.3:



Διάγραμμα 3.3: Συμπεριφορά συσσωρευτή Μολύβδου – Οξέος σε σχέση με το ρυθμό εκφόρτισης

#### 3.7.1.2 Θερμοκρασία

Η θερμοκρασία του συσσωρευτή επηρεάζει τη λειτουργία του διότι επιδρά πρωτίστως στην ηλεκτροχημική αντίδραση. Είναι γενικά καλό, ένας συσσωρευτής να λειτουργεί στην περιοχή των 15.5°C και έως τους 26.6°C. Οι θερμοκρασίες έξω από αυτήν την περιοχή, ασκούν επίδραση, συχνά δυσμενή και μεταβάλλουν τη λειτουργία του συσσωρευτή. Οι υψηλές θερμοκρασίες μειώνουν σημαντικά το χρόνο ζωής, λόγω αύξησης της αυτοεκφόρτισης του συσσωρευτή. Οι χαμηλές θερμοκρασίες περιορίζουν σημαντικά τη χωρητικότητα του συσσωρευτή ενώ σε περιοχές με πολύ χαμηλές θερμοκρασίες υπάρχει περίπτωση να παγώσει ο ηλεκτρολύτης.



**Διάγραμμα 3.4: Επίδραση της θερμοκρασίας α) στην τάση β) στη χωρητικότητα ενός συσσωρευτή Μολύβδου – Οξέος [22]**

### 3.7.1.3 Πυκνότητα ηλεκτρολύτη

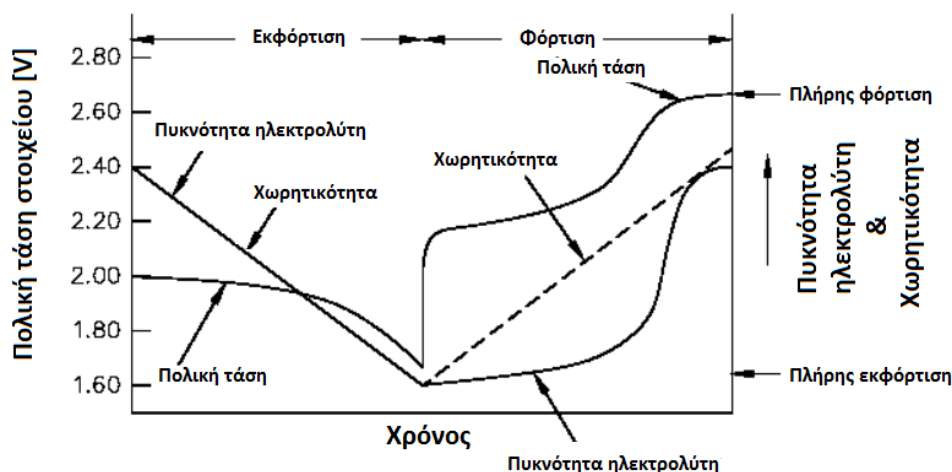
Η πυκνότητα του ηλεκτρολύτη είναι ένα μέσο για να ελέγχεται η στάθμη φόρτισης του συσσωρευτή (SOC). Πρέπει να είναι αρκετά υψηλή για να επιτυγχάνεται καλή ιοντική αγωγιμότητα και για να ικανοποιούνται οι ηλεκτροχημικές απαιτήσεις. Ταυτόχρονα όμως δε θα πρέπει να είναι και τόσο υψηλή, γιατί αυτό προκαλεί διάβρωση σε μέρη του στοιχείου και αύξηση της αυτοεκφόρτισης, με αποτέλεσμα να μειώνεται η ζωή του συσσωρευτή. Η συγκέντρωση του ηλεκτρολύτη μειώνεται σκόπιμα σε θερμά κλίματα. Η σχέση πυκνότητας ηλεκτρολύτη – στάθμης φόρτισης (SOC) είναι σχετικά ανάλογη.

### 3.7.1.4 Ονομαστική τάση

Η ονομαστική τάση στο σύστημα ενός συσσωρευτή Μολύβδου - Οξέος είναι 2.0 V/στοιχείο, ενώ η τάση ανοικτού κυκλώματος ενός φορτισμένου συσσωρευτή είναι περίπου 2.1 V/στοιχείο, ανάλογα με τη συγκέντρωση του ηλεκτρολύτη. Η τελική τάση εκφόρτισης είναι 1.6 V/στοιχείο ενώ η τυπική τελική τάση φόρτισής τους κυμαίνεται μεταξύ 2.3 V/στοιχείο και 2.5 V/στοιχείο, ανάλογα με τον τύπο συσσωρευτή, τον ελεγκτή φόρτισης και το σύστημα. Όπως συμβαίνει και με την πυκνότητα ηλεκτρολύτη, η ονομαστική τάση είναι ένα μέσο για να ελέγχεται η στάθμη φόρτισης του συσσωρευτή. Η σχέση τάσης ανοικτού κυκλώματος – στάθμης φόρτισης είναι μεταβλητή αλλά σχετικά ανάλογη.

### 3.7.1.5 Διαδικασία Φόρτισης – Εκφόρτισης

Τα γενικά χαρακτηριστικά συμπεριφοράς ενός στοιχείου Μολύβδου - Οξέος κατά τη φόρτιση και την εκφόρτιση παρουσιάζονται στο Διάγραμμα 3.5:



**Διάγραμμα 3.5: Μεταβολή πυκνότητας ηλεκτρολύτη, πολικής τάσεως και χωρητικότητας σε στοιχείο ενός συσσωρευτή Μολύβδου – Οξέος κατά τις φάσεις φόρτισης και εκφόρτισης [23]**

Καθώς το στοιχείο εκφορτίζεται, η τάση μειώνεται λόγω εξάντλησης του υλικού, λόγω απωλειών στην εσωτερική αντίσταση και λόγω πόλωσης. Αν το ρεύμα εκφόρτισης είναι σταθερό, η τάση υπό φορτίο μειώνεται ομαλά μέχρι την τάση αποκοπής, ενώ η πυκνότητα του ηλεκτρολύτη μειώνεται κατ' αναλογία με τη χωρητικότητα. Κατά τη διάρκεια της φόρτισης, η χωρητικότητα αυξάνει γραμμικά ενώ η πυκνότητα του ηλεκτρολύτη αυξάνει με πιο αργό ρυθμό. Η τάση, μετά από μια απότομη αύξηση μέχρι τα 2.1 V/στοιχείο – 2.2 V/στοιχείο, συνεχίζει να αυξάνεται αργά έως τα 2.3 V/στοιχείο. Σε αυτό το σημείο εμφανίζεται ξανά μια απότομη αύξηση τάσης που συνοδεύεται από έκκλιση αερίου - γένεση υδρογόνου και οξυγόνου στα ηλεκτρόδια.

### 3.7.1.6 Μέθοδοι φόρτισης

Υπάρχουν διάφοροι μέθοδοι φόρτισης των συσσωρευτών Μολύβδου – Οξέος, όπως: φόρτιση σταθερού ρεύματος, φόρτιση σταθερού δυναμικού, φόρτιση πλήρωσης, παλμική φόρτιση, φόρτιση συντήρησης, σταθερή φόρτιση/φόρτιση αναμονής, ταχεία φόρτιση.

Γενικά, οι συσσωρευτές Μολύβδου – Οξέος, μπορούν να επαναφορτίζονται σε οποιοδήποτε ρυθμό αρκεί να μην παράγονται υπερβολικά αέρια, υπερφόρτιση ή υψηλές θερμοκρασίες. Αν διατηρείται υψηλός ρυθμός φόρτισης, η τάση αυξάνεται σε υπερβολικά υψηλές τιμές και προκαλείται έτσι υπερφόρτιση και αεριοποίηση. Ο συσσωρευτής μπορεί να απορροφήσει πολύ μεγάλο ρεύμα κατά το πρώτο στάδιο της φόρτισης, αλλά υπάρχει ένα όριο όσον αφορά το ασφαλές ρεύμα. Το ρεύμα φόρτισης πρέπει να μειώνεται σε λογικές τιμές καθώς ο συσσωρευτής πλησιάζει την πλήρη φόρτιση. Το ρεύμα φόρτισης επηρεάζει σημαντικά τη διάρκεια ζωής ενός συσσωρευτή.

### 3.7.1.7 Ημέρες αυτονομίας

Το κάθε φωτοβολταϊκό σύστημα διαστασιολογείται ανάλογα με το πόσες ημέρες αυτονομίας χρειάζεται για να λειτουργεί. Όσο αυξάνει ο αριθμός των ημερών αυτονομίας τόσο μεγαλύτερο γίνεται το βάθος εκφόρτισης των συσσωρευτών και μειώνεται η διάρκεια

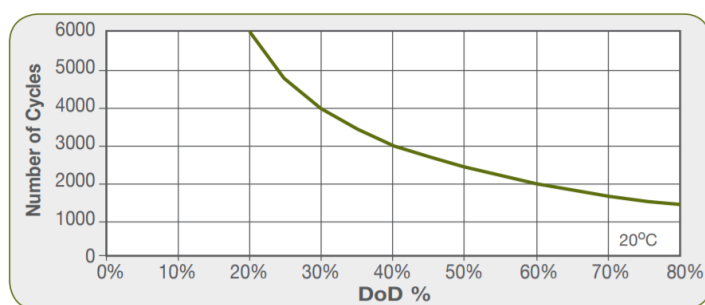
ζωής τους. Ένας κανόνας που ακολουθείται είναι να διατηρείται σταθερό το γινόμενο του βάθους εκφόρτισης επί τους κύκλους λειτουργίας  $N_k$ .

$$DOD * N_k = \text{σταθερό} \quad (30)$$

Για τα φωτοβολταϊκά συστήματα αυτό το γινόμενο πρέπει να είναι σταθερό στα 1200 - 1500. Αν για παράδειγμα, σε έναν συσσωρευτή επιλεγεί βάθος εκφόρτισης 0.2 (προσφέρει το 20 % της αποθηκευμένης ηλεκτρικής ενέργειας), οι κύκλοι λειτουργίας θα είναι 6000 - 7500, ενώ για βάθος εκφόρτισης 0.8 οι κύκλοι λειτουργίας θα είναι 1500 - 1875. Η διάρκεια ζωής ενός συσσωρευτή που λειτουργεί με βάθος εκφόρτισης 0.25 - 0.3, μπορεί να υπερβεί τα 10 έτη. Διάφορες τυπικές επιλογές βάθους εκφόρτισης είναι [6]:

- DOD = 0.4 για 1-3 ημέρες αυτονομίας
- DOD = 0.6 για 4-6 ημέρες αυτονομίας
- DOD = 0.8 για 7-10 ημέρες αυτονομίας
- DOD = 0.2 - 0.3 για θερμοκρασίες περιβάλλοντος  $< 0^\circ\text{C}$

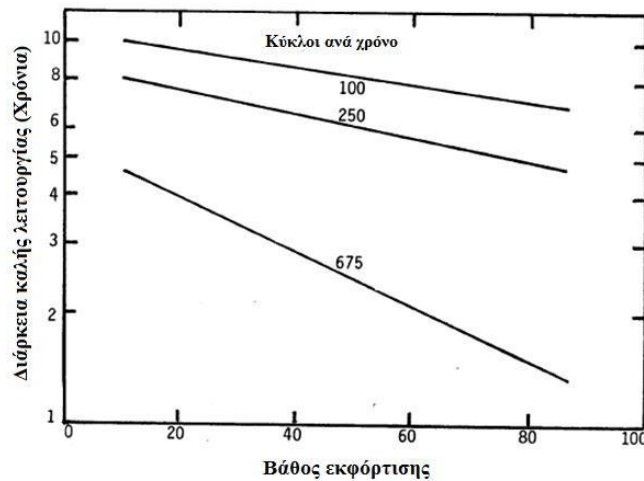
Οι εταιρείες κατασκευής συσσωρευτών βαθιάς εκφόρτισης, συνήθως παρουσιάζουν τυπικές καμπύλες αναμενόμενων κύκλων λειτουργίας συναρτήσει του βάθους εκφόρτισης. Μια τέτοια καμπύλη παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 3.6:



Διάγραμμα 3.6: Αναμενόμενοι κύκλοι λειτουργίας ενός συσσωρευτή Μολύβδου - Οξέος συναρτήσει του βάθους εκφόρτισης [24]

### 3.7.1.8 Διάρκεια ζωής

Η διάρκεια ζωής ενός συσσωρευτή ποικίλει διότι υπάρχουν τόσες πολλές παράμετροι, όπως το βάθος της εκφόρτισης, η συντήρηση, η θερμοκρασία, το πόσο συχνά και πόσο βαθιά πραγματοποιούνται οι κύκλοι, κ.λπ., ώστε είναι σχεδόν αδύνατο να δοθεί ένας σταθερός αριθμός. Το πιο σημαντικό στοιχείο που φαίνεται να επηρεάζει περισσότερο τη διάρκεια ζωής τους είναι το βάθος εκφόρτισης και αυτό γιατί η εκφόρτιση των στοιχείων κάτω από την καθορισμένη τάση μειώνει τη συγκέντρωση του ηλεκτρολύτη και αυτό έχει καταστροφικές συνέπειες στη δομή ενός συσσωρευτή. Αν το μεγάλο βάθος εκφόρτισης επαναλαμβάνεται αρκετές φορές κάθε έτος τότε αυτή η επανάληψη μειώνει σημαντικά τη διάρκεια καλής λειτουργίας του συσσωρευτή, όπως φαίνεται και στο Διάγραμμα 3.7 [18]:



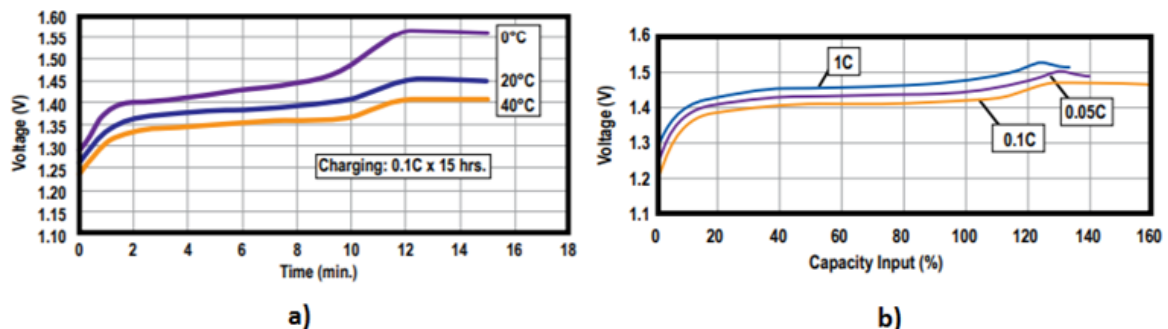
**Διάγραμμα 3.7:** Επίδραση του βάθους εκφόρτισης και του πλήθους των κύκλων λειτουργίας ανά έτος στη διάρκεια ζωής ενός συσσωρευτή Μολύβδου – Οξέος σε θερμοκρασία 25 °C

Επιπλέον, για να αυξηθεί η διάρκεια ζωής του συσσωρευτή, πρέπει να γίνεται αποσύνδεση από το φορτίο όταν έχει εκφορτιστεί πλήρως.

### 3.7.2 Νικελίου – Καδμίου (NiCd)

Οι συσσωρευτές Νικελίου – Καδμίου στη φορτισμένη κατάσταση έχουν θετικά ηλεκτρόδια με οξύ – υδροξείδιο του νικελίου (NiOOH) σαν ενεργό υλικό, αρνητικά ηλεκτρόδια με κάδμιο σαν ενεργό υλικό και για ηλεκτρολύτη υδροξείδιο του καλίου σε νερό. Σε αυτούς τους συσσωρευτές δεν υπάρχει συμμετοχή του ηλεκτρολύτη, ούτε στην αντίδραση φόρτισης, ούτε στην αντίδραση αποφόρτισης.

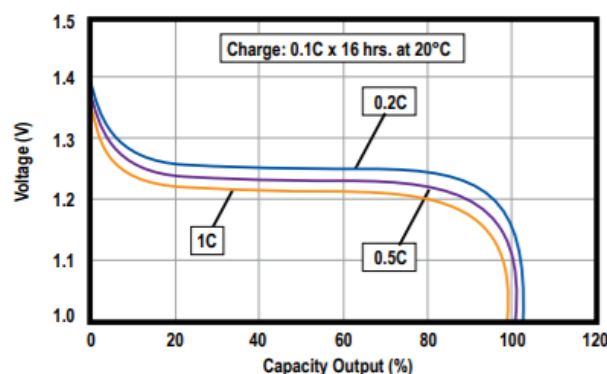
Οι συσσωρευτές Νικελίου – Καδμίου έχουν ονομαστική τάση 1.2 V/στοιχείο. Η τυπική τελική τάση εκφόρτισης είναι 0.9 V/στοιχείο – 1.0 V/στοιχείο και η τυπική τελική τάση φόρτισης κυμαίνεται μεταξύ 1.45 V/στοιχείο και 1.6 V/στοιχείο, ανάλογα με τον τύπο του συσσωρευτή, του ελεγκτή και φυσικά της θερμοκρασίας. Ένα χαρακτηριστικό τους είναι η αύξηση της τάσης τους με το τέλος της φόρτισης.



**Διάγραμμα 3.8:** Τυπικές καμπύλες φόρτισης ενός συσσωρευτή NiCd συναρτήσει a) της θερμοκρασίας και b) του ρυθμού φόρτισης [25]

Οι συσσωρευτές Νικελίου – Καδμίου λειτουργούν πολύ καλά όταν απαιτείται μεγάλη ισχύς και γρήγορη επαναφόρτιση. Βασικό τους χαρακτηριστικό είναι ότι μπορούν να

εκφορτίζονται σε υψηλούς ρυθμούς, χωρίς η διαθέσιμη χωρητικότητα να πέφτει πολύ κάτω από την ονομαστική χωρητικότητα, όπως παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 3.9:

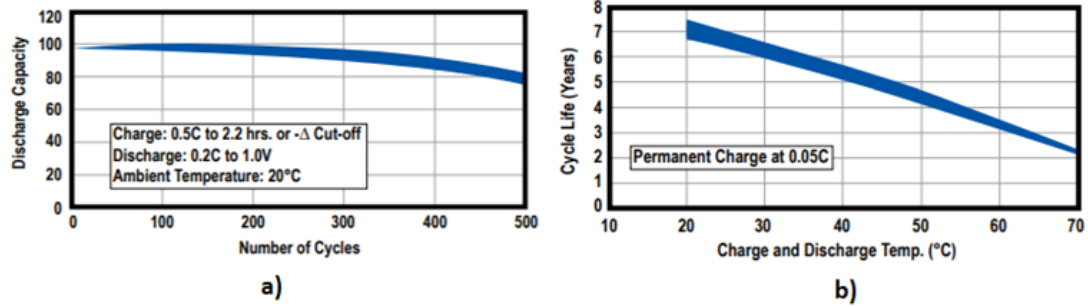


**Διάγραμμα 3.9: Τυπική καμπύλη εκφόρτισης ενός συσσωρευτή NiCd συναρτήσει του ρυθμού εκφόρτισης [25]**

Παρόλα αυτά, δεν είναι καλό να επιτρέπεται αποφόρτιση μέχρι πολύ χαμηλές τάσεις και αυτό γιατί κάποια κελιά αναπόφευκτα θα έχουν μικρότερη χωρητικότητα από άλλα και αν η αποφόρτιση υπερβεί το όριο, τα μικρότερης χωρητικότητας κελιά θα εμφανίσουν αντίστροφη πολικότητα η οποία θα μειώσει αρκετά τη διάρκεια ζωής τους. Έτσι συνήθως ένας συσσωρευτής Νικελίου – Καδμίου σε ένα φωτοβολταϊκό σύστημα έχει μέγιστο όριο αποφόρτισης το 90 %.

Ένα μειονέκτημα των συσσωρευτών Νικελίου – Καδμίου είναι το επονομαζόμενο φαινόμενο μνήμης, το οποίο συμβαίνει υπό ορισμένες συνθήκες λειτουργίας. Αυτό το φαινόμενο εμφανίζεται όταν τα στοιχεία εκφορτίζονται και επαναφορτίζονται στην ίδια στάθμη φόρτισης εκατοντάδες φορές. Το σύμπτωμα είναι ότι ο συσσωρευτής «θυμάται» το σημείο στον κύκλο φόρτισής του, στο οποίο ξεκινούσε η εκφόρτιση και κατά τη διάρκεια μεταγενέστερης χρήσης υφίσταται μια ξαφνική πτώση της τάσης σε αυτό το σημείο, σαν να είχε εκφορτιστεί. Η χωρητικότητα του όμως δεν εκφορτίζεται στην πραγματικότητα. Στους σύγχρονους συσσωρευτές Νικελίου – Καδμίου το φαινόμενο αυτό δεν είναι πλέον πολύ έντονο.

Οι συσσωρευτές Νικελίου – Καδμίου που χρησιμοποιούνται στα φωτοβολταϊκά συστήματα είναι συνήθως ανοικτού τύπου, σχεδιασμένοι για χρήση σε κατάσταση αναμονής σε χαμηλούς ρυθμούς εκφόρτισης. Υπό φυσιολογικές συνθήκες, ένας συσσωρευτής Νικελίου – Καδμίου μπορεί να φτάσει μέχρι και 1000 κύκλους λειτουργίας ακόμα και σε δύσκολες συνθήκες. Ανάλογα με την εφαρμογή και τις συνθήκες λειτουργίας, ο χρόνος ζωής μπορεί να είναι μεταξύ 8 και 15 ετών.



**Διάγραμμα 3.10:** α) Χωρητικότητα ενός συσσωρευτή NiCd συναρτήσει των κύκλων λειτουργίας β) Διάρκεια ζωής ενός συσσωρευτή NiCd συναρτήσει της θερμοκρασίας [25]

Οι συσσωρευτές Νικελίου – Καδμίου είναι περίπου 3-4 φορές ακριβότεροι ανά kWh από τους αντίστοιχους Μολύβδου – Οξέος, ενώ η χρήση τους είναι περιορισμένη λόγω περιβαλλοντικών περιορισμών. Σε πολλές εφαρμογές οι συγκεκριμένοι συσσωρευτές προτιμώνται έναντι άλλων συστημάτων επαναφορτιζόμενων συσσωρευτών λόγω του μικρού τους μεγέθους και βάρους αλλά και λόγω των μικρών απαιτήσεων σε συντήρηση. Στα φωτοβολταϊκά συστήματα συνήθως επιλέγονται μόνο όταν η λειτουργία του συστήματος γίνεται σε πολύ χαμηλές (υπό το μηδέν) ή σε πολύ υψηλές (άνω των 40°C) θερμοκρασίες, όπου οι συσσωρευτές Μολύβδου – Οξέος έχουν πρόβλημα και η διάρκεια ζωής τους μειώνεται σημαντικά.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 : ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΙΣ/ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΙΣ

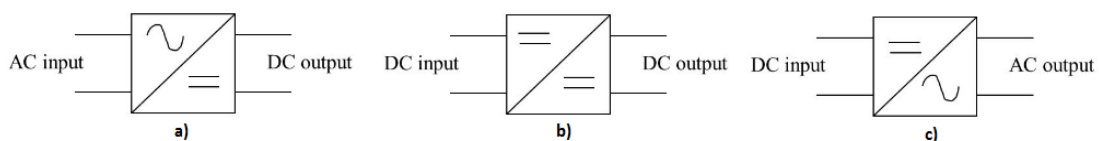
## 4.1 ΓΕΝΙΚΑ

Αρκετές ηλεκτρικές συσκευές για να λειτουργήσουν απαιτούν εναλλασσόμενο ρεύμα και όχι συνεχές. Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια όμως μετατρέπουν την ηλιακή ενέργεια σε συνεχές ρεύμα (DC) και όχι σε εναλλασσόμενο (AC). Είναι απαραίτητο λοιπόν να γίνεται η μετατροπή αυτού του ρεύματος σε κατάλληλο εναλλασσόμενο, για να μπορεί να χρησιμοποιείται από τις διάφορες ηλεκτρικές συσκευές αλλά και να παρέχεται στο δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας.

Η αναγκαία αυτή μετατροπή επιτυγχάνεται μέσω ειδικών διατάξεων που ονομάζονται ηλεκτρονικά ισχύος. Με τον όρο αυτό, ορίζονται οι διατάξεις εκείνες που χρησιμοποιούνται για τη μετατροπή της ηλεκτρικής ισχύος από μια μορφή σε μια άλλη ενώ ταυτόχρονα είναι ικανές και να την ελέγχουν. Έτσι, η ισχύς μετατρέπεται, είτε σε συνεχή άλλης στάθμης, είτε σε εναλλασσόμενη, ελεγχόμενου πλάτους και συχνότητας.

Τα ηλεκτρονικά ισχύος συνήθως κατηγοριοποιούνται με βάση τον τύπο των υποσυστημάτων που συνδέουν (AC ή DC). Έτσι, έχουμε τις εξής κατηγορίες:

- Ανορθωτές (AC-to-DC Rectifiers): Μετατρέπουν το εναλλασσόμενο ρεύμα σε συνεχές.
- Αντιστροφείς (DC-to-AC Inverters): Μετατρέπουν το συνεχές ρεύμα σε εναλλασσόμενο ελεγχόμενου πλάτους και συχνότητας.
- Μετατροπείς συνεχούς ρεύματος (DC-to-DC Converters): Μετατρέπουν το συνεχές ρεύμα ορισμένης τάσεως και πολικότητας σε συνεχές άλλης τάσεως και σε κάποιες περιπτώσεις και άλλης πολικότητας.
- Μετατροπείς εναλλασσόμενου ρεύματος (Cycloconverters): Μετατρέπουν το εναλλασσόμενο ρεύμα ορισμένης τάσεως, συχνότητας και αριθμού φάσεων σε εναλλασσόμενο ρεύμα, άλλης τάσεως, άλλης συχνότητας και σε κάποιες περιπτώσεις και άλλου αριθμού φάσεων.



Εικόνα 4.1: Σύμβολα a) Ανορθωτή b) Μετατροπέα συνεχούς ρεύματος c) Αντιστροφή

Στα φωτοβολταϊκά συστήματα χρησιμοποιούνται κυρίως αντιστροφείς και μετατροπείς συνεχούς ρεύματος. Οι αντιστροφείς των φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων διαφέρουν από τους αντιστροφείς των άλλων ηλεκτρονικών εφαρμογών κατά το γεγονός ότι μπορούν να ελέγχουν την έξοδο των φωτοβολταϊκών συστημάτων, προκειμένου να δημιουργούν συνθήκες μέγιστης απόδοσης ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις ελέγχουν ακόμα και τη φόρτιση των συσσωρευτών.



## 4.2 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΩΝ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ

Σε ένα φωτοβολταϊκό σύστημα η παραγόμενη τάση από τα φωτοβολταϊκά στοιχεία δεν έχει σταθερή τιμή, αλλά μεταβάλλεται γύρω από μια μέση τιμή. Για να σταθεροποιηθεί η τάση εξόδου του φωτοβολταϊκού συστήματος και να καταστεί κατάλληλη για την είσοδό της στον αντιστροφέα, χρησιμοποιούνται μετατροπείς συνεχούς ρεύματος. Οι μετατροπείς αυτοί συνήθως αναφέρονται και ως τροφοδοτικά ενώ οι πιο συνηθισμένες εφαρμογές τους είναι σε ελέγχους μηχανών συνεχούς ρεύματος, τροφοδοσία αναλογικών και ψηφιακών συστημάτων, σε συστήματα για τη διόρθωση του συντελεστή ισχύος και άλλα. Η απόδοση των ηλεκτρονικών μετατροπέων είναι άνω του 90 %.

Οι μετατροπείς μπορούν να χωριστούν σε κατηγορίες ανάλογα με το αν η τάση εξόδου που βγάζουν είναι μεγαλύτερη ή μικρότερη από την τάση εισόδου και ακόμα ανάλογα με την περιοχή λειτουργίας :

- Μετατροπέας υποβιβασμού τάσης (Buck Converter)
- Μετατροπέας ανύψωσης τάσης (Boost Converter)
- Μικτός (υποβιβασμού-ανύψωσης) μετατροπέας (Buck-Boost Converter)
- Μετατροπέας με πλήρη γέφυρα
- Μετατροπέας του Cuk

Οι μετατροπείς ανύψωσης, ανυψώνουν την DC τάση εισόδου όπου η ελάχιστη τιμή τάσης εξόδου ισούται με την τάση εισόδου. Οι μετατροπείς υποβιβασμού μπορούν να υποβιβάσουν την τάση εισόδου και σε τιμές κοντά στο μηδέν. Στους μετατροπείς ανύψωσης-υποβιβασμού και στους μετατροπείς Cuk, η τάση εισόδου μπορεί ταυτόχρονα να αυξηθεί ή να μειωθεί.

### 4.2.1 Αλγόριθμος Σημείου Μέγιστης Ισχύος MPP

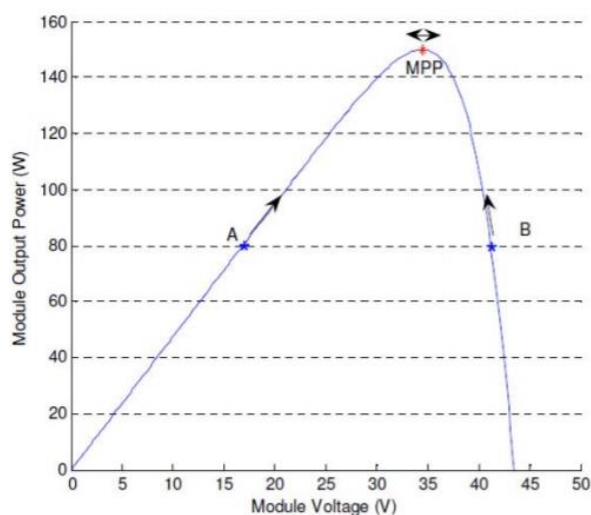
Ο ανιχνευτής σημείου μέγιστης ισχύος είναι μια συσκευή που επεξεργάζεται κατάλληλα το ρεύμα και την τάση εξόδου της φωτοβολταϊκής συστοιχίας, ώστε σε κάθε χρονική στιγμή να απορροφάται η μέγιστη δυνατή ισχύ από τη συστοιχία. Για κάποιο συγκεκριμένο ζεύγος τάσης – έντασης, το στοιχείο δίνει τη μέγιστη ισχύ του. Ωστόσο, επειδή κάθε στιγμή η ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στο στοιχείο δεν είναι σταθερή, δεν είναι σταθερή και η τάση εξόδου του. Είναι λοιπόν επιθυμητό, για κάθε στιγμή, το φωτοβολταϊκό στοιχείο να μην παράγει την τάση και την ένταση όπως αυτά καθορίζονται από την αντίσταση του κυκλώματος, αλλά να δίνει στην έξοδο αυτό το ζεύγος τάσης – έντασης που μεγιστοποιεί την ισχύ του.

Οι μετατροπείς, όπως και οι αντιστροφείς, συνήθως ενσωματώνουν μια ηλεκτρονική διάταξη που χρησιμοποιεί έναν αλγόριθμο MPP για την ανίχνευση του μέγιστου σημείου ισχύος, όπως αναφέρθηκε και στους ρυθμιστές φόρτισης των συσσωρευτών (Ενότητα 3.6). Υπάρχουν διάφοροι αλγόριθμοι για την εύρεση του μέγιστου σημείου ισχύος, όπως:

- Απλό ταίριασμα φωτοβολταϊκής συστοιχίας-φορτίου
- Αλγόριθμος Διαταραχής και Παρατήρησης
- Αλγόριθμος Αυξητικής Αγωγιμότητας

- Προσδιορισμός του MPP ως ποσοστό της τάσης ανοιχτού κυκλώματος  $V_{oc}$
- Προσδιορισμός του MPP ως ποσοστό του ρεύματος βραχυκύκλωσης  $I_{sc}$
- Έλεγχος με συσχέτιση της κυμάτωσης
- Σάρωση ρεύματος
- DC Link Capacitor Droop Control (DC LCDC)
- $dP/dV$  ή  $dP/dI$  Feedback control
- Ασαφείς Ελεγκτές
- Νευρωνικά Δίκτυα

Ο αλγόριθμος που χρησιμοποιείται συνήθως είναι της «Διαταραχής και της Παρατήρησης» εξαιτίας της απλότητας στην υλοποίηση του και της ευκολίας στην εκτέλεσή του. Οι διατάξεις που χρησιμοποιούν αυτόν τον αλγόριθμο παρακολουθούν συνεχώς τις τιμές τάσης και έντασης εξόδου των φωτοβολταϊκών συστημάτων και προκαλούν ανά τακτά χρονιά διαστήματα μια διαταραχή της τάσης εξόδου αυτής.



**Διάγραμμα 4.1:** Χαρακτηριστική καμπύλη P – V φωτοβολταϊκού πλαισίου

Εάν η μεταβολή της ισχύος είναι θετική τότε θεωρείται ότι το σημείο λειτουργίας έχει μετακινηθεί πιο κοντά στο MPP. Έτσι περαιτέρω διαταραχή της τάσης προς την ίδια κατεύθυνση θα μετακινήσει το σημείο λειτουργίας πιο κοντά στο MPP. Εάν η μεταβολή της ισχύος είναι αρνητική τότε το σημείο λειτουργίας έχει μετακινηθεί μακριά από το MPP και η κατεύθυνση της διαταραχής θα πρέπει να αντιστραφεί όπως παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 4.1.

### 4.3 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΩΝ

Οι αντιστροφείς πρέπει να είναι σε θέση να διαχειρίζονται τα φωτοβολταϊκά συστήματα ακόμα και όταν η παρεχόμενη ισχύς μειωθεί κάτω από τα προκαθορισμένα όρια. Κατά τη δύση του ηλίου, ο αντιστροφέας διακόπτει τη λειτουργία του και το φωτοβολταϊκό σύστημα αποκόπτεται, είτε από τους συσσωρευτές, είτε από το δίκτυο διανομής αναλόγως του αν λειτουργεί σε αυτόνομο ή διασυνδεδεμένο σύστημα αντίστοιχα. Σε αυτή τη φάση ο αντιστροφέας βρίσκεται σε κατάσταση «ύπνου», κατά την οποία όμως επικοινωνεί με το

υπόλοιπο σύστημα, το οποίο του παρέχει μέσω του συσσωρευτή ή του δικτύου την απαραίτητη ενέργεια αυτοκατανάλωσης για να λειτουργεί. Κατά την ανατολή του ηλίου, μόλις ο αντιστροφέας «αντιληφθεί» ικανό φωτισμό, αναζητά ενέργεια από το φωτοβολταϊκό σύστημα και εν συνεχεία το επανασυνδέει με τον συσσωρευτή ή το δίκτυο [8].

- Τα κύρια ηλεκτρικά χαρακτηριστικά μεγέθη των αντιστροφών είναι:
  - Η ονομαστική ισχύς  $P_{\text{NOM}}$
  - Η ονομαστική τάση εισόδου  $V_{\text{DC}}$
  - Η ονομαστική τάση εξόδου  $V_{\text{RMS}}$
  - Η συχνότητα εξόδου Hz
  - Ο αριθμός των φάσεων (μονοφασικοί – τριφασικοί)

Η τάση εισόδου των αντιστροφών εξαρτάται από την ονομαστική τους ισχύ. Για εγκαταστημένη ισχύ μερικών εκατοντάδων  $W_p$ , οι τάσεις εισόδου μπορούν να είναι 12 V, 24 V ή/και 48 V. Για μεγαλύτερες τιμές εγκατεστημένης ισχύος  $kW_p$ , η τάση εισόδου αυξάνει στα 150 V ή/και 400 V. Για φωτοβολταϊκά συστήματα μεγαλύτερα των 100  $W_p$  χρησιμοποιούνται τριφασικοί αντιστροφείς με τάσεις εισόδου τα 600 V ή/και 1000 V.

Όταν η φωτοβολταϊκή εγκατάσταση είναι διασυνδεδεμένη με το τοπικό δίκτυο, η παραγόμενη κυματομορφή εξόδου των αντιστροφών πρέπει να είναι ταυτόσημη με αυτή του δικτύου και να βρίσκονται σε πλήρη συγχρονισμό με τη συχνότητα του δικτύου. Οι διακυμάνσεις της συχνότητας εξόδου δε θα πρέπει να υπερβαίνουν συγκεκριμένη τιμή ( $\pm 1\%$  -  $\pm 2\%$ ) της ονομαστικής συχνότητας.

Οι διακυμάνσεις πλάτους της ονομαστικής τάσης εξόδου δε θα πρέπει να υπερβαίνουν το 5%. Επίσης κατά τη λειτουργία τους οι αντιστροφείς παράγουν μεγάλο πλήθος αρμονικών υψηλών συχνοτήτων ανάλογα με την ισχύ λειτουργίας τους και τον τύπο του τροφοδοτούμενου φορτίου.

- Συντελεστής απόδοσης: Ως απόδοση των αντιστροφών ορίζεται ο λόγος της ισχύς εξόδου, προς την ισχύ εισόδου:

$$\eta = \frac{P_{AC}}{P_{DC}} \quad (31)$$

Ο συντελεστής απόδοσης εξαρτάται πρωτίστως από την ισχύ λειτουργίας του αντιστροφέα. Όσο μικρότερη γίνεται η ισχύς λειτουργίας σε σύγκριση με την ονομαστική ισχύ του αντιστροφέα, τόσο περισσότερο τείνει να μειωθεί και η απόδοσή του. Η τυπική τιμή απόδοσης ανέρχεται συνήθως άνω του 92% για εύρος ισχύος μεταξύ του 20% και 100% της ονομαστικής ισχύς. Όταν ο αντιστροφέας λειτουργεί κάτω του 20% της ονομαστικής του ισχύς τότε η απόδοσή του μειώνεται δραματικά. Επίσης, η απόδοση των αντιστροφών μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας λειτουργίας τους.

- Περιβάλλον λειτουργίας: Οι αντιστροφείς πρέπει να λειτουργούν σε ξηρό και δροσερό περιβάλλον. Η υγρασία, η αυξημένη θερμοκρασία και η ελλιπής συντήρησή τους αποτελούν τους κυριότερους λόγους αστοχιών και μείωσης της διάρκειας ζωής τους. Τις περισσότερες φορές τοποθετούνται σε κλειστούς χώρους πολύ κοντά στους συσσωρευτές εάν υπάρχουν. Όταν τοποθετούνται σε εξωτερικούς χώρους πρέπει να

βρίσκονται σε επιλεγμένες θέσεις για να προστατεύονται από τη βροχή και την άμεση ακτινοβολία.

- **Διάρκεια ζωής:** Ανάλογα με τις συνθήκες λειτουργίας τους, οι αντιστροφείς έχουν διάρκεια ζωής μεταξύ των 5 - 10 ετών. Λόγω του ότι η διάρκεια ζωής της φωτοβολταϊκής εγκατάστασης μπορεί να ξεπεράσει και τα 30 έτη, είναι λογικό οι αντιστροφείς να χρειαστούν επισκευή και να αλλαχθούν από 3 έως 5 φορές στη διάρκεια των 30 ετών. Βάσει των παραπάνω το αναμενόμενο κόστος των αντιστροφέων σε μια εγκατάσταση αποτελεί το 20% αυτής.
- **Δυνατότητα υπερφόρτισης:** για εξαιρετικά μικρά χρονικά διαστήματα (π.χ. 1 ms – 1 s) πρέπει να παρέχεται από τους αντιστροφείς στην έξοδο AC η ισχύς αιχμής, η οποία ενδέχεται να είναι κατά πολύ μεγαλύτερη από την ονομαστική ισχύ του αντιστροφέα (π.χ. 200 % - 350 % της ονομαστικής ισχύς). Η απαίτηση κάλυψης της ισχύος αιχμής είναι αναγκαία προκειμένου να καλύπτονται φορτία με υψηλά ρεύματα εκκίνησης όπως κινητήρες ή μεταβατικά φαινόμενα που προκαλούνται από διακόπτες. Επίσης, οι αντιστροφείς θα πρέπει να καλύπτουν υπερφορτίσεις σε ποσοστά 10 % για μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα (π.χ. 10 min), προκειμένου να ικανοποιούν τις απαιτήσεις σε περιπτώσεις υπερπαραγωγής ισχύος στην είσοδο DC. Τέτοιες υπερφορτίσεις εμφανίζονται στις περιπτώσεις όπου προσπίπτει στα φωτοβολταϊκά πλαίσια τόσο η άμεση όσο και η έμμεση ακτινοβολία.

#### 4.3.1 Τοπολογίες Αντιστροφέων

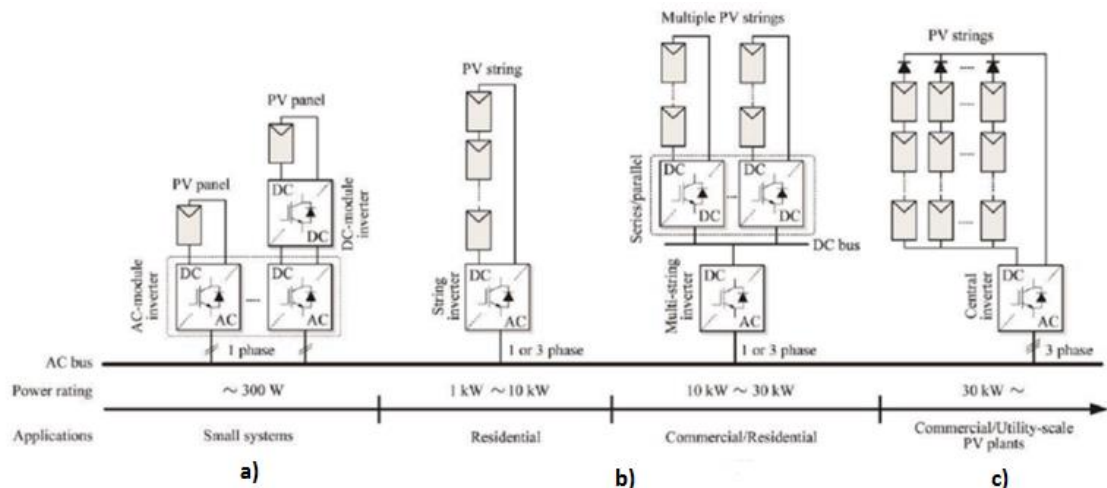
Οι αντιστροφείς μπορούν να παρεμβληθούν σε διάφορες θέσεις στη φωτοβολταϊκή εγκατάσταση, ώστε ανάλογα με την αρχή λειτουργίας τους να μπορούν να ελέγχουν την παραγόμενη ισχύ από [8]:

- **Φωτοβολταϊκή εγκατάσταση (central inverter):** ολόκληρη η ισχύς της φωτοβολταϊκής εγκατάστασης, αποδίδεται σε έναν κύριο αντιστροφέα. Σε αρκετές περιπτώσεις υπάρχουν περισσότεροι του ενός αντιστροφείς, όπου ο ένας χαρακτηρίζεται ως κύριος (διάταξη master – slave) και οι υπόλοιποι ως δευτερεύοντες. Οι δευτερεύοντες ενεργοποιούνται σε περιοδικούς κύκλους λειτουργίας, είτε όταν έχει αυξηθεί σημαντικά η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία, είτε στις περιπτώσεις που εκδηλώνεται δυσλειτουργία του κύριου αντιστροφέα. Τέτοιοι κεντρικοί αντιστροφείς τοποθετούνται σε πολύ μεγάλα φωτοβολταϊκά συστήματα π.χ. εγκαταστάσεις άνω των 100 kW<sub>p</sub> φωτοβολταϊκής ισχύος. Σε αυτά τα φωτοβολταϊκά συστήματα μεταξύ του κεντρικού αντιστροφέα και της κάθε συστοιχίας παρεμβάλλονται διαδοχικά, μια διάταξη που χρησιμοποιεί αλγόριθμο MPPT και ένας μετατροπέας DC-to-DC. Σκοπός των διατάξεων είναι η αυτόματη ρύθμιση των φωτοβολταϊκών συστημάτων και ο έλεγχος της παραγόμενης ισχύος. Δηλαδή, ανάλογα με τις συνθήκες φωτισμού, ο αλγόριθμος MPPT προσδιορίζει το σημείο λειτουργίας της κάθε συστοιχίας ώστε αυτές να παράγουν τη μέγιστη δυνατή ισχύ. Σκοπός των μετατροπέων DC-to-DC είναι να εξισώσουν τις τιμές των τάσεων που παρέχονται από την κάθε συστοιχία και να οδηγήσουν μεγαλύτερες τιμές τάσεων στην είσοδο του κεντρικού αντιστροφέα.



Εικόνα 4.2: Είδη αντιστροφέων a) Central inverter b) String inverter c) Micro inverter

- Συστοιχία φωτοβολταϊκών πλαισίων (string inverter): ανάλογα με την εγκατεστημένη φωτοβολταϊκή ισχύ, διακρίνονται δύο περιπτώσεις τοπολογιών. Στη μία περίπτωση ο αντιστροφέας συλλέγει την ηλεκτρική ισχύ από μερικές παράλληλες φωτοβολταϊκές συστοιχίες πλαισίων όπου τα πλαίσια της κάθε συστοιχίας είναι συνδεδεμένα σε σειρά. Συνήθως μεταξύ του αντιστροφέα και της κάθε συστοιχίας παρεμβάλλονται μετατροπείς DC-to-DC. Επιπλέον, ενδέχεται ο αντιστροφέας να εφαρμόζει ξεχωριστό αλγόριθμο ελέγχου MPPT για κάθε μια συστοιχία ή κοινό έλεγχο για όλες μαζί. Αυτός ο τρόπος τοπολογίας ονομάζεται «αναστροφείς πολλαπλών συστοιχιών» (multi-string inverters) και χρησιμοποιείται για φωτοβολταϊκά συστήματα ισχύος  $10 \text{ kW}_p - 30 \text{ kW}_p$ . Η άλλη περίπτωση αφορά μικρότερα φωτοβολταϊκά συστήματα ( $1 \text{ kW}_p - 10 \text{ kW}_p$ ), που αποτελούνται από μια συστοιχία και τον αντιστροφέα όπου μπορεί να παρεμβάλλεται μετατροπέας DC-to-DC, μπορεί όμως και όχι.
- Φωτοβολταϊκό πλαίσιο (micro-inverter): ο κάθε αντιστροφέας πλαισίου ελέγχει μόνο ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο, το οποίο ονομάζεται και «AC πλαίσιο» (AC modules). Αυτού του είδους η τοπολογία χρησιμοποιείται σε μικρές φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις όπου υπάρχουν περιπτώσεις έντονης τοπικής σκίασης, διαφορετικών κλίσεων μεταξύ των πλαισίων και έντονης τοπικής επικάλυψης σωματιδιακής υφής. Υπάρχει περιορισμός του μέγιστου αριθμού μικρο-αντιστροφέων που μπορούν να συνδεθούν παράλληλα μεταξύ τους προκειμένου να συνεργαστούν π.χ. 21 AC πλαίσια ανά ομάδα. Τα βασικά τους μειονεκτήματα είναι οι μικρότερες αποδόσεις τους σε σχέση με τους αντιστροφείς συστοιχιών, το αυξημένο κόστος της φωτοβολταϊκής εγκατάστασης και η αυξημένη πολυπλοκότητα του συστήματος που αυξάνει και τη συχνότητα των βλαβών με δυσκολία στον εντοπισμό τους.



Εικόνα 4.3: Τοπολογίες αντιστροφών a) Micro inverter b) String inverter c) Central inverter

### 4.3.2 Κατηγορίες Αντιστροφών

Ανάλογα με τον τύπο της φωτοβολταϊκής εγκατάστασης και τις εργασίες που επιτελούν, οι αντιστροφείς κατατάσσονται σε τρεις βασικές κατηγορίες:

- Αντιστροφείς αυτόνομων συστημάτων (stand-alone inverters): είναι αντιστροφείς μεταβλητής συχνότητας.
- Αντιστροφείς διασυνδεδεμένοι με το δίκτυο (grid-tied inverters): είναι αντιστροφείς σταθερής συχνότητας.
- Αντιστροφείς δικτύου που υποστηρίζονται από συσσωρευτές (battery back-up inverters).

Ανάλογα με το αν επιδιώκεται η γαλβανική απομόνωση του φωτοβολταϊκού εξοπλισμού από το υπόλοιπο δίκτυο:

- Αντιστροφείς με μετασχηματιστή οι οποίοι διακρίνονται σε:
  - αυτούς που λειτουργούν με τη συχνότητα του δικτύου. Μειονεκτήματα είναι το μεγάλο βάρος, το υψηλό κόστος, οι επιπλέον απώλειες και το ότι ο συντελεστής ισχύος είναι μικρότερος της μονάδας κυρίως σε συνθήκες μικρού φορτίου
  - αυτούς με υψίσυχη λειτουργία. Πλεονέκτημα είναι το μικρότερο βάρος καθώς μειώνεται το μέγεθος τους
- Αντιστροφείς χωρίς μετασχηματιστή: χαρακτηρίζονται από υψηλή απόδοση, μειωμένο βάρος και χαμηλότερο κόστος.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 : ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

## 5.1 ΓΕΝΙΚΑ

Η ανάπτυξη και η ευημερία της κοινωνίας βασίζεται σε μεγάλο βαθμό από την παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας. Ο τρόπος ζωής των ανθρώπων επηρεάζει, αλλά και επηρεάζεται σημαντικά από την ηλεκτρική ενέργεια. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα οι μέθοδοι με τις οποίες παράγεται και μεταφέρεται η ηλεκτρική ενέργεια να μεταλλάσσεται διαρκώς με κύριο σκοπό τη βελτίωση της ποιότητας και την κατά το δυνατόν οικονομικότερη παραγωγή.

Σύστημα Ηλεκτρικής ενέργειας (ΣΗΕ) είναι το σύστημα των εγκαταστάσεων και των μέσων που χρησιμοποιούνται για την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας σε περιοχές εξυπηρέτησης. Βασικές προϋποθέσεις καλής λειτουργίας ενός ΣΗΕ είναι να παρέχει ηλεκτρική ενέργεια οπουδήποτε υπάρχει ζήτηση με το ελάχιστο δυνατό κόστος και τις ελάχιστες οικολογικές επιπτώσεις, εξασφαλίζοντας σταθερή τάση, σταθερή συχνότητα και υψηλή αξιοπιστία τροφοδότησης [26].

Τα πρώτα χρόνια παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας (1880) ηλεκτροδοτούνταν μόνο τα μεγάλα αστικά κέντρα με αποτέλεσμα οι μονάδες παραγωγής να βρίσκονται κοντά στην κατανάλωση, ενώ η μεταφορά της ισχύος πραγματοποιείτο με συνεχές ρεύμα. Η ανάγκη για την ηλεκτροδότηση περιοχών οι οποίες ήταν πιο απομακρυσμένες από τις μονάδες παραγωγής προκάλεσε την ανάπτυξη των δικτύων μεταφοράς και διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας. Η μεταφορά ενέργειας όμως, με συνεχές ρεύμα, είχε μεγάλες απώλειες, με αποτέλεσμα να χρησιμοποιείται πλέον το εναλλασσόμενο ρεύμα. Οι βασικότερες μορφές ενέργειας για την παραγωγή της ηλεκτρικής ήταν τα ορυκτά καύσιμα (άνθρακες).

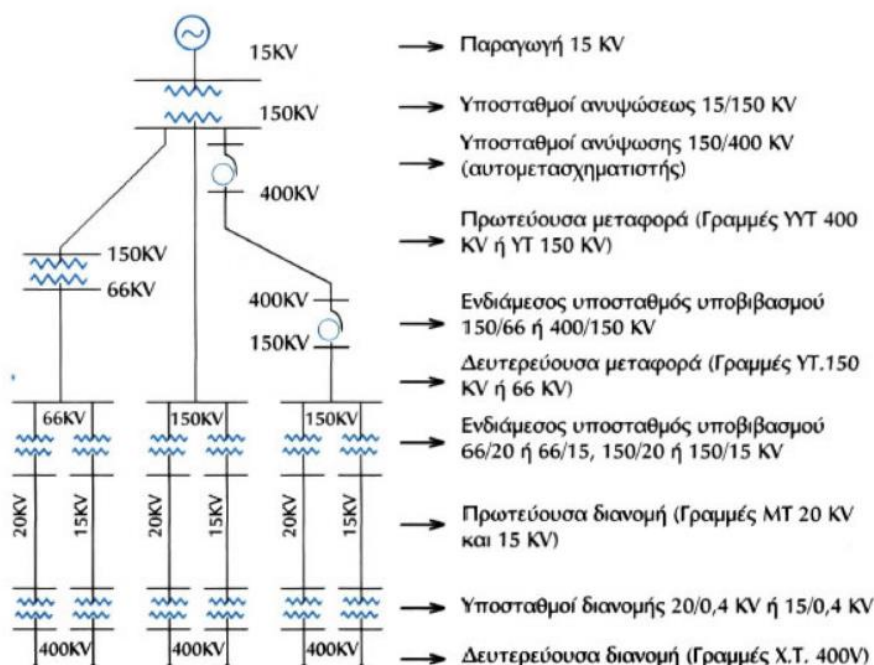
Με την πάροδο των ετών, η ανάγκη για κάλυψη όλο και μεγαλύτερων τμημάτων του πληθυσμού σε μεγαλύτερες αποστάσεις ανάγκασε για τη δημιουργία περισσότερων μονάδων παραγωγής ενέργειας. Οι μονάδες αυτές για οικονομικούς λόγους κατασκευάστηκαν κοντά σε περιοχές που ήταν πλούσιες σε ορυκτά καύσιμα αλλά και άλλες πηγές ενέργειας όπως το νερό. Επιπλέον, διαπιστώθηκε ότι το κόστος της παραγόμενης ενέργειας μειωνόταν με την αύξηση του μεγέθους των μονάδων παραγωγής ενέργειας. Η διαπίστωση αυτή είχε ως αποτέλεσμα τη δημιουργία νέων γιγάντιων μονάδων παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας οι οποίες χρησιμοποιούσαν ως καύσιμο, πετρέλαιο, φυσικό αέριο αλλά και πυρηνικά. Τα βασικότερα κριτήρια για την ηλεκτροπαραγωγή ήταν το κόστος και η απόδοση των ηλεκτρικών σταθμών εις βάρος του περιβάλλοντος. Παράλληλα με την κατασκευή μεγαλύτερων σταθμών παραγωγής αυξήθηκε και το μέγεθος των δικτύων μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας με γραμμές υψηλής και πολύ υψηλής τάσης.

## 5.2 ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Ένα τυπικό ηλεκτρικό δίκτυο σήμερα, βασίζεται στη συγκεντρωμένη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και περιέχει (α) λίγους και μεγάλης ισχύος σταθμούς για την παραγωγή της

ενέργειας, (β) γραμμές για τη μεταφορά της ενέργειας σε μεγάλες αποστάσεις και (γ) γραμμές για τη διανομή της ενέργειας. Πιο αναλυτικά:

- Το σύστημα παραγωγής, περιλαμβάνει τους σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος και τους μετασχηματιστές ανύψωσης της τάσης για τη μεταφορά του ρεύματος υπό υπερυψηλή (ΥΥΤ) και υψηλή τάση (ΥΤ).
- Το σύστημα μεταφοράς, διασυνδέει όλους τους μεγάλους σταθμούς παραγωγής καθώς και διαφορετικά συστήματα μεταξύ τους και μεταφέρει μεγάλα μεγέθη ισχύος σε μεγάλες αποστάσεις προς τα κέντρα κατανάλωσης. Αποτελεί τη σπονδυλική στήλη του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας και λειτουργεί στα μέγιστα δυνατά επίπεδα τάσης. Περιλαμβάνει τα δίκτυα των γραμμών ΥΥΤ και ΥΤ, τους υποσταθμούς ζεύξης των δικτύων αυτών και τους υποσταθμούς μετασχηματισμού μεταξύ των διαφόρων επιπέδων τάσης που χρησιμοποιούνται.
- Το σύστημα υπομεταφοράς, μεταφέρει ισχύ σε μικρότερα μεγέθη και αποστάσεις υπό χαμηλότερη τάση από υποσταθμούς μεταφοράς σε υποσταθμούς διανομής μικρότερων κέντρων κατανάλωσης. Σημειώνεται ότι οι μεγάλοι βιομηχανικοί καταναλωτές τροφοδοτούνται συνήθως απευθείας από το σύστημα υπομεταφοράς. Όσο το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας επεκτείνεται γίνεται δύσκολη η διάκριση μεταξύ δικτύων υπομεταφοράς και μεταφοράς.
- Το σύστημα διανομής, περιλαμβάνει τα δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας Μέσης Τάσης (ΜΤ) και Χαμηλής Τάσης (ΧΤ), στα οποία υπάγονται και οι υποσταθμοί διανομής μέσω των οποίων η ΜΤ υποβιβάζεται σε ΧΤ. Μέσω των δικτύων διανομής, η ηλεκτρική ενέργεια διανέμεται σε μικρότερες περιοχές προς τους καταναλωτές ΜΤ και ΧΤ.



Εικόνα 5.1: Το εθνικό δίκτυο παραγωγής, μεταφοράς και διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας

Η ροή ισχύος μεταξύ του συστήματος μεταφοράς και διανομής είναι μονόδρομη, δηλαδή, ρέει από το υψηλότερο προς το χαμηλότερο επίπεδο τάσης.



Ένα σύστημα παραγωγής και μεταφοράς μπορεί να λειτουργεί απομονωμένο ή διασυνδεδεμένο με ένα ή περισσότερα γειτονικά συστήματα. Η διασύνδεση γίνεται συνήθως σε επίπεδο εθνικών συστημάτων και προσφέρει τεχνικά και οικονομικά πλεονεκτήματα.

Το τμήμα της παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας διαθέτει κατάλληλη τηλεπικοινωνιακή δικτύωση που του εξασφαλίζει αποδοτική λειτουργία και τη διατήρηση ενός καλού επιπέδου ασφάλειας. Επίσης, διατίθενται συστήματα αυτόματου ελέγχου που εγγυώνται έως ένα βαθμό την εκτίμηση της συμπεριφοράς των μονάδων παραγωγής και του συστήματος μεταφοράς σε καταστάσεις σημαντικών διαταραχών. Από την άλλη πλευρά, τα δίκτυα διανομής είναι ιδιαίτερα εκτεταμένα αλλά σχεδόν απόλυτα παθητικά, με ελάχιστη δυνατότητα επικοινωνίας και με ελάχιστο έλεγχο, και αυτόν τοπικά περιορισμένο. Η επανάσταση που έχει συντελεστεί στις τεχνολογίες επικοινωνίας, ειδικά όσον αφορά το διαδίκτυο, παρέχει τη δυνατότητα για πολύ καλύτερη εποπτεία και έλεγχο των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας καθιστώντας τη λειτουργία τους αποδοτικότερη, οικονομικότερη και περισσότερο ευέλικτη [27].

### 5.2.1 Σύστημα Μεταφοράς Συγκεντρωτικής Παραγωγής

Παραδοσιακά οι κεντρικοί σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ήταν σχεδιασμένοι να παράγουν εναλλασσόμενο ρεύμα και ως εκ τούτου στις γραμμές μεταφοράς ΥΤ και ΥΥΤ κατά κύριο λόγο χρησιμοποιείται το εναλλασσόμενο ρεύμα (High Voltage AC - HVAC). Στη σύγχρονη εποχή, χάρη στις προηγμένες τεχνολογίες ηλεκτρονικών ισχύος, το συνεχές ρεύμα χρησιμοποιείται ευρέως, κυρίως στις γραμμές μεταφοράς μεγάλου μήκους (High Voltage DC - HVDC). Η χρήση HVDC συνεπάγεται χαμηλότερο κόστος, καλύτερη ροή ισχύος και μικρότερες απώλειες όταν πρόκειται να μεταφερθεί ισχύς σε μεγάλες αποστάσεις [28]. Η σύνδεση ενός HVAC με ένα HVDC καθώς και η αντίστροφη διαδικασία επιτυγχάνεται μέσω τριφασικών μετατροπών.

Τα HVDC χρησιμοποιούνται κυρίως στις εξής περιπτώσεις [29]:

- Για τη διασύνδεση μη-συγχρονισμένων δικτύων κρατών, μεγάλων πόλεων ακόμα και νησιών. Συστήματα που λειτουργούν σε διαφορετική συχνότητα αλλά και συστήματα που λειτουργούν στην ίδια συχνότητα και δεν είναι συγχρονισμένα δεν μπορούν να συνδεθούν με το AC.
- Για τη μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας από μεγάλες μονάδες παραγωγής σε μεγάλες αποστάσεις. Ενώ το AC είναι σημαντικά φθηνότερο για μικρές αποστάσεις, το HVDC είναι φθηνότερο για μεγάλες αποστάσεις. Η χρήση DC στη μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας καθίσταται αποδοτική για χερσαίες διασυνδέσεις μεγαλύτερες από 400 km - 800 km και για υποθαλάσσιες μεγαλύτερες από 40 km - 80 km.
- Για τη χρήση καλωδίων μεγάλου μήκους. Καθώς το μήκος του καλωδίου μεγαλώνει, δημιουργούνται μεγάλα ρεύματα φόρτισης, με αποτέλεσμα να περιορίζεται η δυνατότητα μεταφοράς ενέργειας.

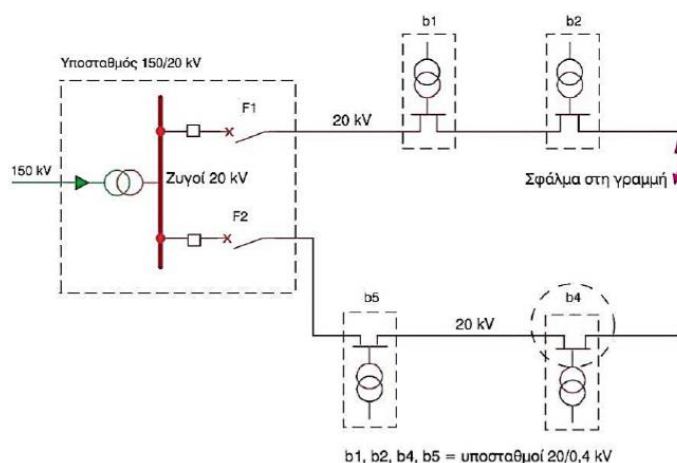
Τα βασικά συγκριτικά πλεονεκτήματα της μεταφοράς ισχύος με DC σε σχέση με το AC είναι τα ακόλουθα:

- Οι DC γραμμές έχουν μικρότερες απώλειες (αποφυγή επιδερμικού φαινομένου (skin effect) και του φαινομένου γειτνίασης (proximity effect)).
- Τα DC συστήματα δεν έχουν περιορισμούς ως προς το μήκος των γραμμών.
- Για την κάλυψη πολύ μεγάλων αποστάσεων όπου απαιτείται μεταφορά ΥΥΤ, τα DC συστήματα είναι φθηνότερα στην κατασκευή και τη διαχείριση.
- Το DC δεν έχει συχνότητα και ο συντελεστής ισχύος είναι πάντα 1, σε αντίθεση με το AC όπου κυμαίνονται μεταξύ 50 Hz και 60 Hz και από 0 έως 1 αντίστοιχα.
- Το DC δεν εκπέμπει ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία.
- Η διασύνδεση υπεράκτιων μονάδων παραγωγής και η υπεράκτια διασύνδεση μεταξύ κρατών (πχ Ελλάδα – Ιταλία) είναι εφικτή μόνο με DC.

## 5.2.2 Τοπολογία Δικτύων Διανομής Συγκεντρωτικής Παραγωγής

Στο δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιείται εναλλασσόμενο ρεύμα και περιλαμβάνει το δίκτυο MT και XT από τα κέντρα YT μέχρι τον τελικό καταναλωτή. Το δίκτυο περιλαμβάνει τους υποσταθμούς MT των 20 kV/0.4 kV, τις εναέριες γραμμές, τα καλώδια MT και XT και το σχετικό εξοπλισμό προστασίας και ελέγχου. Στο δίκτυο διανομής συνδέονται οι καταναλωτές MT (στα 20 kV) και οι καταναλωτές XT (400 V - 230 V). Γενικά, τα συστήματα διανομής MT διακρίνονται στις εξής κατηγορίες, με κριτήριο διαχωρισμού τη δομή τους ή τον τρόπο αξιοποίησής τους:

- Ακτινικό Δίκτυο Διανομής (Radial Main Distribution System): Στα ακτινικά δίκτυα διανομής οι γραμμές των 20 kV (συνήθως εναέριες) αναχωρούν από τον κεντρικό υποσταθμό 150 kV/20 kV και αναπτύσσονται ακτινικά. Κατά μήκος κάθε γραμμής συνδέονται μετασχηματιστές 20 kV/0.4 kV των δικτύων XT ή καταναλωτές MT.

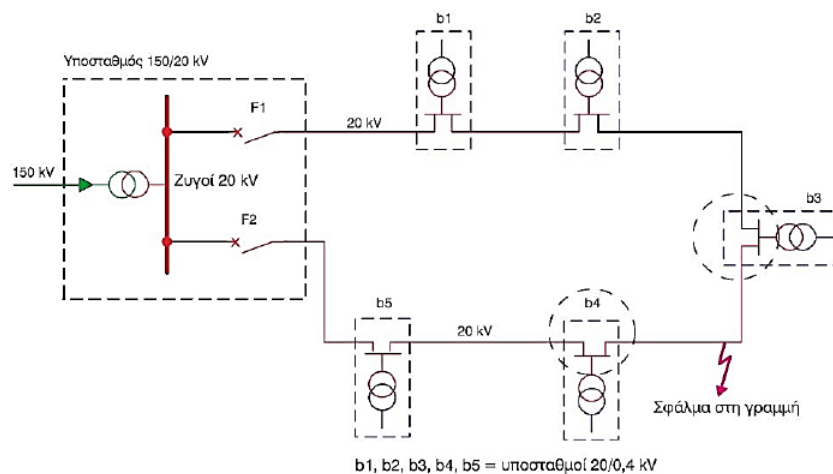


Εικόνα 5.2: Ακτινικό δίκτυο διανομής AC μέσης τάσης & χαμηλής τάσης

Όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 5.2, βασικό μειονέκτημα των ακτινικών δικτύων διανομής είναι ότι σε περίπτωση σφάλματος κατά μήκος της γραμμής, ο διακόπτης ισχύος F1 που υπάρχει στην αρχή της γραμμής ανοίγει με αποτέλεσμα όλοι οι μετασχηματιστές που βρίσκονται κατά μήκος της γραμμής να μείνουν χωρίς τάση. Σε

περίπτωση εγκαταστάσεων με ηλεκτρικά φορτία που δεν πρέπει να μείνουν πολύ χρόνο εκτός λειτουργίας (π.χ. νοσοκομεία, στρατιωτικές εγκαταστάσεις, ψυγεία κ.λπ.) η απώλεια της ΜΤ αντιμετωπίζεται με την ύπαρξη ενός τοπικού ηλεκτροπαραγωγού ζεύγους, μέχρι την αποκατάσταση του σφάλματος. Τα ακτινικά δίκτυα διανομής δεν είναι ιδιαίτερα διαδεδομένα στη ΜΤ. Αντίθετα, στη ΧΤ το σύνολο των δικτύων είναι ακτινικού τύπου.

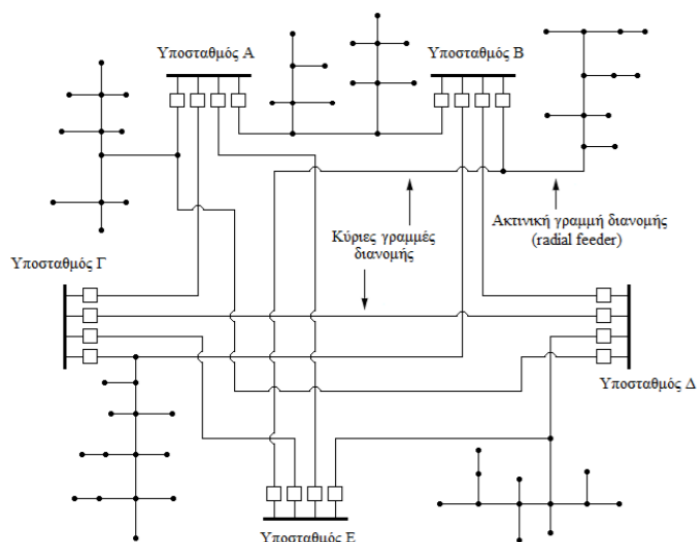
- Βροχοειδές Δίκτυο Διανομής (Ring Main Distribution System): Στα βροχοειδή δίκτυα διανομής οι γραμμές των 20 kV (εναέριας ή υπόγειας) που αναχωρούν από τον κεντρικό υποσταθμό 150 kV/20 kV, σχηματίζουν ένα κλειστό βρόχο που ξανά καταλήγει σε ζυγούς των 20 kV του ίδιου ή διαφορετικού υποσταθμού 150 kV/20 kV.



**Εικόνα 5.3: Βροχοειδές δίκτυο διανομής AC μέσης τάσης & χαμηλής τάσης**

Όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 5.3, κατά μήκος του βρόχου συνδέονται οι καταναλωτές b1, b2, b3, b4, b5. Ο βρόχος προστατεύεται στις δύο άκρες του με διακόπτες ισχύος F1, F2. Σε περίπτωση σφάλματος σε κάποιο σημείο του βρόχου, π.χ. στο τμήμα b3, b4, λειτουργούν οι προστασίες των διακοπών F1, F2, οι διακόπτες ανοίγουν και ο βρόχος μένει χωρίς τάση. Αφού εντοπιστεί η θέση του σφάλματος, ανοίγουν κατόπιν εντολής οι διακόπτες φορτίων στο b3 και στο b4 και απομονώνεται το τμήμα b3, b4. Έπειτα ξανακλείνουν οι διακόπτες F1, F2 και επανέρχεται η ΜΤ στο δίκτυο. Το βροχοειδές δίκτυο λειτουργεί ως δυο ακτινικά δίκτυα μέχρι την αποκατάσταση του σφάλματος.

- Τοπολογία primary network: Πρόκειται για ένα σύνολο γραμμών διανομής στο οποίο παρέχεται ενέργεια από ένα αριθμό υποσταθμών. Εδώ οι κύριες γραμμές διανομής τροφοδοτούνται από δύο υποσταθμούς, ένα σε κάθε άκρο τους, και από αυτές ξεκινούν οι ακτινικές γραμμές διανομής (radial feeders), οι οποίες εξυπηρετούν τα φορτία του δικτύου, όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.4. Τα δίκτυα αυτής της μορφής μπορούν να εξυπηρετήσουν φορτία από πολλές κατευθύνσεις. Σε γενικές γραμμές, οι απώλειές τους είναι χαμηλότερες από αυτές σε αντίστοιχου μεγέθους ακτινικά ή βροχοειδή δίκτυα και παρέχουν μεγαλύτερη αξιοπιστία. Παρ' όλα αυτά παρουσιάζουν μεγαλύτερη δυσκολία στο σχεδιασμό και το χειρισμό.



Εικόνα 5.4: Primary network δίκτυο διανομής AC μέσης τάσης & χαμηλής τάσης

### 5.2.3 Πλεονεκτήματα Συγκεντρωτικής Παραγωγής

Η συγκεντρωτική παραγωγή παρουσιάζει ένα πολύ σημαντικό πλεονέκτημα. Επιτυγχάνεται με σχετικά απλό και εύκολο τρόπο ένα καλό επίπεδο ευστάθειας στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας. Οι βασικότερες παράμετροι της ευστάθειας ενός συστήματος είναι τα επίπεδα τάσης στο δίκτυο και η συχνότητα της. Οι μεγάλες μονάδες παραγωγής είναι εξοπλισμένες αποκλειστικά με σύγχρονες γεννήτριες μεγάλης ισχύος, οι οποίες είναι ο κύριος ρυθμιστής των ανωτέρω παραμέτρων [30].

- Διατήρηση της συχνότητας του δικτύου: Η συχνότητα της τάσης του δικτύου επιβάλλεται να είναι η ίδια σε όλο το διασυνδεδεμένο σύστημα. Οι σύγχρονες γεννήτριες ανταποκρίνονται άμεσα στις μεταβολές του φορτίου μέσω ενός αυτόματου συστήματος.
- Διατήρηση των επιπέδων της τάσης στο δίκτυο: Οι μεγάλες σύγχρονες γεννήτριες είναι αυτές που επιβάλλουν και διατηρούν τα αρχικά επίπεδα τάσης. Εξίσου σημαντικός είναι ο ρόλος των μετασχηματιστών και των ειδικών διατάξεων ελέγχου ενεργού και αέργου ισχύος (διατάξεις πυκνωτών και πηνίων) σε διάφορα σημεία του δικτύου.

### 5.2.4 Μειονεκτήματα Συγκεντρωτικής Παραγωγής

Η λειτουργία του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας συγκεντρωτικής παραγωγής χαρακτηρίζεται ως μη αποδοτική, ανελαστική και σίγουρα όχι οικονομική και εμφανίζει προβλήματα όπως [31]:

- Κόστη μονάδων παραγωγής: Τα ιδιαίτερα υψηλά κόστη επενδύσεων για νέες μονάδες ή για αναβάθμιση των ήδη υπάρχουσών τα οποία εντάσσονται στο μακροχρόνιο ενεργειακό προγραμματισμό σε επίπεδο κράτους. Επιπλέον, οι μονάδες παραγωγής λειτουργούν με αρκετή εφεδρεία ώστε να μπορεί να καλυφθεί μια ενδεχόμενη στιγμιαία αύξηση της ζήτησης που δεν μπορεί να προβλεφθεί ή μια

απότομη μείωση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, κυρίως των ΑΠΕ. Αυτός ο τρόπος λειτουργίας επιφέρει μια μικρή αλλά σημαντική σπατάλη καυσίμων.

- Κόστη μεταφοράς και διανομής: Τα κόστη μεταφοράς και διανομής συναθροίζονται κατά μέσο όρο σε πάνω από 30 % του κόστους της παραδιδόμενης ηλεκτρικής ενέργειας λόγω συντήρησης και βλαβών του δικτύου και θερμικών απωλειών κατά τη μεταφορά. Επιπρόσθετα στο χρηματικό κόστος, αυτές οι απώλειες ενέργειας έχουν έμμεσο κόστος σε όρους εκπομπής αερίων του θερμοκηπίου, καύσιμα καταναλώνονται εκπέμποντας αέρια θερμοκηπίου για να παραχθεί ενέργεια που στη πραγματικότητα δε χρησιμοποιείται από τους τελικούς καταναλωτές.
- Κόστος ηλεκτροδότησης απομακρυσμένων περιοχών: Μεγάλες δαπάνες κεφαλαίου απαιτούνται για την τροφοδότηση απομακρυσμένων περιοχών εξαιτίας της απόστασης που πρέπει να καλυφθεί μέσω εναέριων γραμμών, η σύνδεση αυτών των περιοχών με το δίκτυο ενδέχεται να αποδειχθεί μη οικονομική.
- Ενεργειακή απόδοση: Η απόδοση των θερμικών εργοστασίων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας είναι μικρή (το πολύ 30 % έως 35 % σε μονάδες συνδυασμένου κύκλου), καθώς το μεγαλύτερο μέρος της πρωτογενούς ενέργειας (1/2 έως και 3/4 αυτής) χάνεται υπό μορφή θερμότητας (ζεστό νερό ή υδρατμός).
- Περιβαλλοντικές επιπτώσεις: Οι επιπτώσεις του κεντρικού συστήματος ενέργειας στο περιβάλλον είναι σημαντικές λόγω της μεγάλης εξάρτησής του από τα καύσιμα, τον άνθρακα και σε μικρότερο βαθμό από το φυσικό αέριο.

### 5.3 ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Από τις αρχές του 1990, στο χώρο της ενέργειας παρατηρείται η συνεχώς αυξανόμενη σύνδεση μικρών μονάδων παραγωγής στο δίκτυο διανομής που εκμεταλλεύονται ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Το είδος αυτό, δηλαδή ο τρόπος της έγχυσης ενέργειας στο δίκτυο, ονομάζεται «Διεσπαρμένη Παραγωγή». Η ενσωμάτωσή της στα δίκτυα διανομής τα μετατρέπει σε ενεργά δίκτυα διπλής κατεύθυνσης, από παθητικά μονής κατεύθυνσης, που ήταν ο αρχικός τους σχεδιασμός.

Ένας ορισμός που μπορεί να δοθεί είναι, «Διεσπαρμένη παραγωγή έχουμε όταν μια πηγή ηλεκτρικής ενέργειας συνδέεται άμεσα με το δίκτυο διανομής ή κοντά στον μετρητή του πελάτη» [32]. Κατά συνέπεια, στο κεντρικό δίκτυο έχουν ενταχθεί πρόσθετες πηγές παραγωγής, οι οποίες εξαιτίας των φυσικών πόρων που εκμεταλλεύονται βρίσκονται συνήθως σε διαφορετικές τοποθεσίες από τους ήδη υφιστάμενους σταθμούς παραγωγής, και πολλές φορές κοντά σε κατοικημένες περιοχές. Ένα μεγάλο αιολικό πάρκο που συνδέεται στο δίκτυο της ΥΤ, δεν μπορεί να θεωρηθεί ως μονάδα διεσπαρμένης παραγωγής. Από την άλλη πλευρά, είναι ανανεώσιμη πηγή παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Στην ουσία, η διεσπαρμένη παραγωγή είναι υποσύνολο της μη συμβατικής παραγωγής. Οι τεχνολογίες που ανήκουν στη διεσπαρμένη παραγωγή είναι οι ακόλουθες [31]:

- Τα φωτοβολταϊκά συστήματα.
- Τα αιολικά πάρκα.
- Οι μονάδες βιομάζας – βιοκαυσίμων.

- Οι μικροί υδροηλεκτρικοί σταθμοί.
- Οι μονάδες συμπαραγωγής ηλεκτρισμού – θερμότητας (ΣΗΘ).
- Μικροτουρπίνες.
- Τουρμπίνες εσωτερικής καύσης.
- Κυψέλες καυσίμου.

Κάποια κοινά χαρακτηριστικά της διεσπαρμένης παραγωγής είναι :

- Ο σχεδιασμός της εγκατάστασης και της διαχείρισής της δε γίνεται κεντρικά.
- Είναι συνήθως μικρότερης ισχύος από 50 MW.
- Συνήθως είναι συνδεδεμένη στο δίκτυο διανομής.

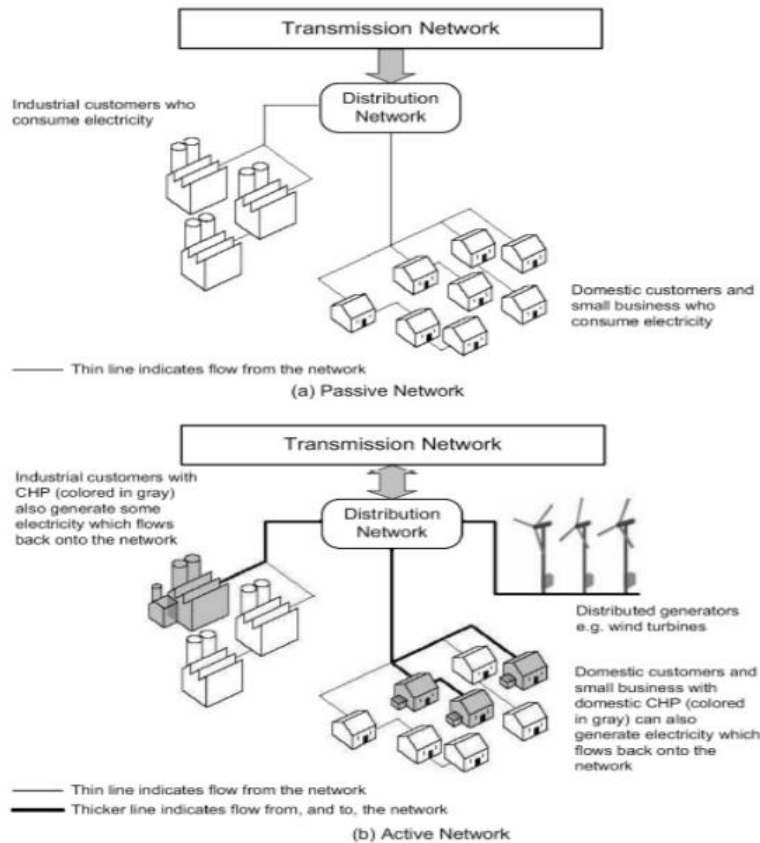
### 5.3.1 Λόγοι Επανεμφάνισης Διεσπαρμένης Παραγωγής

Η διεσπαρμένη παραγωγή δεν εμφανίζεται σήμερα για πρώτη φορά. Όπως προαναφέρθηκε, στις αρχές της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, οι πρώτες εγκαταστάσεις είχαν τη δυνατότητα να παρέχουν ενέργεια βασισμένη σε DC τάση μόνο σε καταναλωτές οι οποίοι βρίσκονταν πολύ κοντά στις μονάδες παραγωγής. Οι αιτίες πίσω από την πρόσφατη αναγέννησή είναι [33]:

- Η απελευθέρωση των αγορών ενέργειας.
- Οι ανησυχίες για τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου.
- Αυξημένη ανάπτυξη στις τεχνολογίες διεσπαρμένης παραγωγής.
- Μεγάλοι περιορισμοί στην κατασκευή νέων γραμμών μεταφοράς.
- Αυξημένες απαιτήσεις των καταναλωτών για αξιόπιστη ενέργεια.

### 5.3.2 Δίκτυα Διανομής Διεσπαρμένης Παραγωγής

Η μεγάλης κλίμακας εφαρμογή των μη συμβατικών μονάδων παραγωγής οδηγεί στη μετάβαση προς μια νέα «οριζόντια» διάρθρωση του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Σ' αυτή τη δομή του συστήματος, εκτός από τις μονάδες μεγάλης κλίμακας που συνδέονται στο δίκτυο υψηλής τάσης, οι μεσαίου και μικρής κλίμακας μονάδες συνδέονται επίσης στο δίκτυο μέσης και χαμηλής τάσης. Αυτή η ανεξέλεγκτη ροή ισχύος από τα χαμηλότερα επίπεδα τάσεων του συστήματος οδηγεί σε μια ριζική αλλαγή του συστήματος. Η ισχύς, δηλαδή, μπορεί να ρέει όχι μόνο από το υψηλότερο προς το χαμηλότερο επίπεδο τάσης, αλλά και οριζόντια, δηλαδή από ένα δίκτυο MT ή XT στο άλλο ή από μια γεννήτρια σε ένα φορτίο στο ίδιο δίκτυο MT ή XT. Ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας, που ακολουθεί αυτές τις αρχές λειτουργίας, ονομάζεται οριζόντιας λειτουργίας σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας. Σε αυτή την περίπτωση, τα συστήματα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας έχουν ενεργό ρόλο. Αυτά δε διαθέτουν μόνο διανεμημένα φορτία, αλλά και εγκατεστημένη παραγωγή ισχύος.



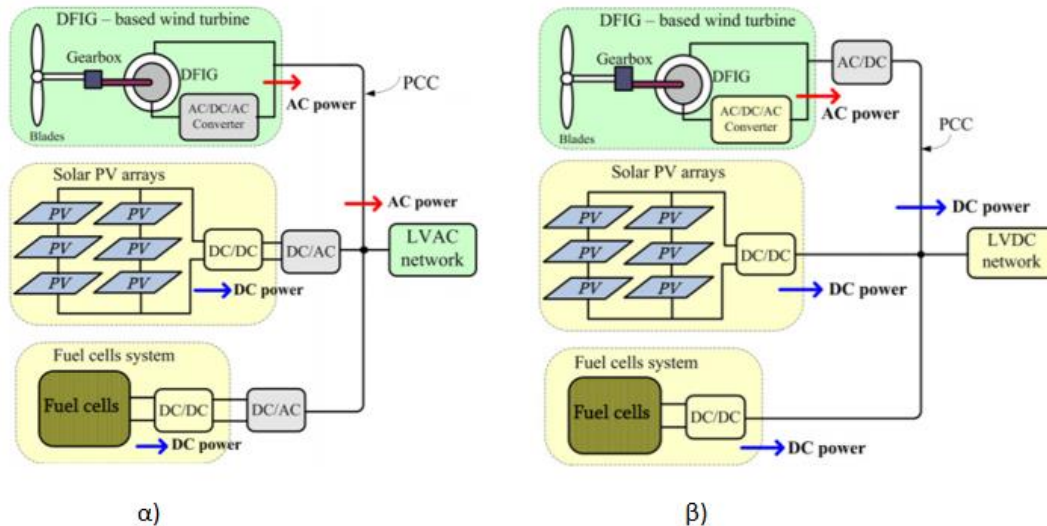
**Εικόνα 5.5: Μετατροπή των δικτύων διανομής από παθητικά σε ενεργά**

Η Εικόνα 5.5 παρουσιάζει τη μετατροπή των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας από παθητικά σε ενεργά. Η ροή ισχύος μεταξύ του συστήματος μεταφοράς και διανομής δεν είναι πλέον μονόδρομη, αλλά αμφίδρομη. Το σύστημα μεταφοράς ενεργεί ως ένας ζυγός ενέργειας, που διασυνδέει το σύστημα διανομής και τις άλλες συμβατικές μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Όταν το επίπεδο της διεύθυνσης μη συμβατικών μονάδων παραγωγής αυξηθεί σε τέτοιο επίπεδο ώστε ένα μεγάλο μέρος του φορτίου του συστήματος να καλύπτεται από αυτές, ο αριθμός των συμβατικών μονάδων θα μειωθεί.

Η κάθε μονάδα διεσπαρμένης παραγωγής μπορεί να συνδεθεί μέσω ηλεκτρονικών ισχύος σε δίκτυα χαμηλής τάσης συνεχούς ρεύματος (Low Voltage DC network – LVDC network), και σε δίκτυα χαμηλής τάσης εναλλασσόμενου ρεύματος (Low Voltage AC network – LVAC network).

- Δίκτυα χαμηλής τάσης εναλλασσόμενου ρεύματος: Όλες οι διεσπαρμένες μονάδες που παράγουν εναλλασσόμενο ρεύμα είναι άμεσα συνδεδεμένες με το ζυγό εναλλασσόμενου ρεύματος (AC bus link) ή μπορεί να χρειαστούν AC-to-DC-to-AC μετατροπείς ισχύος για να επιτραπεί η σταθερή σύζευξη τους. Παραδείγματα τέτοιων μονάδων που παράγουν στην έξοδο τους AC ισχύ είναι οι ανεμογεννήτριες, το βιοαέριο και οι στρόβιλοι. Τα AC φορτία σε αυτές τις περιπτώσεις συνδέονται απευθείας στον AC ζυγό, ενώ τα DC φορτία έχουν ανάγκη τους ανορθωτές AC-to-DC για να συνδεθούν με τα δίκτυα AC. Από την άλλη πλευρά, οι μονάδες παραγωγής που παράγουν στην έξοδό τους συνεχές ρεύμα (π.χ. οι ηλιακές φωτοβολταϊκές συστοιχίες, οι κυψέλες καυσίμου)

μπορούν να συνδεθούν με τη γραμμή των δικτύων AC χρησιμοποιώντας DC-to-AC αντιστροφείς. Η Εικόνα 5.6 παρουσιάζει την τυπική διαμόρφωση διεσπαρμένων μονάδων παραγωγής με AC έξοδο ισχύος (π.χ. ανεμογεννήτριες) και αυτά με την DC έξοδο ισχύος (π.χ. φωτοβολταϊκά συστήματα και κυψέλες καυσίμου) συνδεδεμένες με το δίκτυο LVAC. Στην περίπτωση αυτή, το δίκτυο LVAC μπορεί να διασυνδεθεί με το κεντρικό δίκτυο μέσω ενός μετασχηματιστή [34].



Εικόνα 5.6: Διεσπαρμένες μονάδες παραγωγής σε α) AC και β) DC δίκτυα χαμηλής τάσης [34]

- Δίκτυα χαμηλής τάσης συνεχούς ρεύματος: Οι μονάδες DC παραγωγής και οι συσκευές αποθήκευσης ενέργειας παράγουν το συνεχές ρεύμα που εύκολα μπορεί να συνδεθεί με το DC ζυγό (DC bus link). Στην περίπτωση αυτή, οι μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας εναλλασσόμενου ρεύματος χρειάζονται έναν ανορθωτή AC-to-DC για τη σύνδεση τους με το δίκτυο LVDC. Η Εικόνα 5.6 απεικονίζει το δίκτυο DC με τις μονάδες παραγωγής συνδεδεμένες σε DC ζυγό. Για το σκοπό αυτό, οι μονάδες παραγωγής AC (π.χ. ανεμογεννήτριες) για τη σύνδεση τους με το δίκτυο DC χρειάζονται μετατροπείς, ενώ οι μονάδες παραγωγής DC συνδέονται άμεσα [34].

### 5.3.3 Πλεονεκτήματα Διεσπαρμένης Παραγωγής

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από εγκαταστάσεις μικρής κλίμακας, συνδεδεμένες απευθείας στο δίκτυο διανομής παρουσιάζει πολλαπλά οφέλη συγκριτικά με τις μεγάλες κεντρικές εγκαταστάσεις παραγωγής, [31], [33], [35]:

- Όταν η ηλεκτρική ενέργεια παράγεται στην περιοχή όπου καταναλώνεται ελαχιστοποιεί τις απώλειες μεταφοράς, όπως επίσης και το κόστος μεταφοράς, που αποτελούν ένα σημαντικό τμήμα (άνω του 30 %) του συνολικού κόστους της παροχής ηλεκτρικής ενέργειας.
- Η διεσπαρμένη παραγωγή συμβάλλει στην αποσυμφόρηση των ήδη υπαρχόντων δικτύων και επιτρέπει τη χρήση της θερμικής ενέργειας σε εφαρμογές συμπαραγωγής, αυξάνοντας έτσι τη συνολική απόδοση του συστήματος.
- Παρέχει πολλά πλεονεκτήματα στους καταναλωτές που έχουν πρόσβαση σε φθηνά καύσιμα, όπως για παράδειγμα φυσικό αέριο, αλλά και σε εκείνους που



ευνοούνται από τις κλιματικές συνθήκες της περιοχής όπου είναι εγκατεστημένοι και είναι σε θέση να αξιοποιήσουν ανανεώσιμες πηγές.

- Η εκτεταμένη χρήση των ΑΠΕ μειώνει την κατανάλωση των ορυκτών καυσίμων και τις εκπομπές των αερίων του θερμοκηπίου αλλά και επιβλαβείς εκπομπές, συνεισφέροντας έτσι με ουσιαστικό τρόπο στην προστασία του περιβάλλοντος.
- Η διεσπαρμένη παραγωγή καλύπτει ένα μεγάλο εύρος τεχνολογιών, συμπεριλαμβανομένου πολλών ανανεώσιμων τεχνολογιών που παρέχουν ηλεκτρική ισχύ μικρής κλίμακας σε θέσεις κοντά στην κατανάλωση. Όλες αυτές οι τεχνολογίες δημιουργούν νέες ευκαιρίες στην αγορά ηλεκτρικής ενέργειας και αυξημένο βιομηχανικό ανταγωνισμό.
- Από την επενδυτική σκοπιά του θέματος είναι πρακτικά ευκολότερο να εξευρεθούν θέσεις εγκατάστασης για ΑΠΕ και άλλες τεχνολογίες διεσπαρμένης παραγωγής σε σχέση με θέσεις εγκατάστασης μεγάλων εργοστασίων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Μάλιστα, είναι ευκολότερο και κυρίως ταχύτερο οι μονάδες αυτές να συνδεθούν στο δίκτυο. Ο κίνδυνος των επενδύσεων κεφαλαίου μειώνεται, και αποφεύγονται οι περιττές δαπάνες.
- Παρέχει εναλλακτικές λύσεις για αξιόπιστη και οικονομική παροχή ενέργειας σε νοικοκυριά και επιχειρήσεις, όσο αυξάνεται η ζήτηση για περισσότερη και καλύτερης ποιότητας ηλεκτρική ισχύ.
- Μπορεί να επιφέρει μείωση στις εισαγωγές ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς αυξάνεται η διείσδυση των ανανεώσιμων πηγών, αλλά και άλλων μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής.

### 5.3.4 Μειονεκτήματα Διεσπαρμένης Παραγωγής

Μέχρι σήμερα η διεσπαρμένη παραγωγή έχει μειωμένη διείσδυση στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας διότι προσκρούει στους περιορισμούς και τις προδιαγραφές που σχετίζονται με την ευστάθεια των συστημάτων και την ποιότητα της παρεχόμενης ενέργειας. Συνοπτικά, τα μειονεκτήματα της διασπαρμένης παραγωγής, είναι [35] :

- Το υψηλό κόστος κεφαλαίου ανά kW εγκατεστημένης ισχύος, συγκριτικά με τα μεγάλα κεντρικά εργοστάσια παραγωγής.
- Το κόστος για την πρωταρχική παροχή καυσίμου στη διεσπαρμένη παραγωγή, προβλέπεται να είναι αρκετά μεγαλύτερο από ότι για την κεντρική παραγωγή.
- Η αυξανόμενη συμμετοχή της διεσπαρμένης παραγωγής στην εγκατεστημένη παραγωγή θα επιφέρει μικρότερη επιλογή μεταξύ των βασικών καυσίμων όπως το φυσικό αέριο όπου αναμένεται έντονα αυξημένη ζήτηση και εξάρτηση από αυτό.
- Η διείσδυση των ΑΠΕ είναι περιορισμένη και πρέπει να υπάρχει πάντα εφεδρεία συμβατικών μονάδων παραγωγής, λόγω του ότι δε μπορεί να υπάρξει ακριβής πρόβλεψη για την ικανότητα παραγωγής συγκεκριμένων εγκαταστάσεων παραγωγής. Αποτέλεσμα αυτού είναι να προκύπτουν επιζήμιες και δυσμενείς συνέπειες στους μετέχοντες σε αυτήν.
- Ο μεγάλος αριθμός μονάδων παραγωγής μπορεί να προκαλέσει, εκτός από τη συνήθη ροή φορτίου από τη μέση τάση στη χαμηλή, επιπλέον ροή φορτίου, από τη χαμηλή τάση στο δίκτυο μέσης τάσης. Αυτή η αμφίδρομη ροή φορτίου, μπορεί να

οδηγήσει όχι μόνο σε διαταραχές στην τάση λειτουργίας, αλλά και να προκαλέσει προβλήματα σχετικά με την προστασία του συστήματος, καθιστώντας πιο πολύπλοκη την ανίχνευση και αντιμετώπιση υπερφορτίσεων και βραχυκυκλωμάτων.

- Η σημαντική προσαρμοστικότητα που προσφέρουν οι μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής, προϋποθέτει καλύτερη ανάλυση και μεγαλύτερη προσοχή, όσον αφορά τη διαχείριση και λειτουργία του δικτύου.

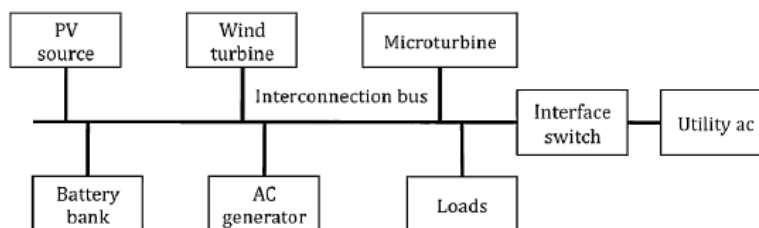
## 5.4 ΜΙΚΡΟΔΙΚΤΥΑ

Η ταχύτατη ανάπτυξη των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, η επανεμφάνιση της διασπαρμένης παραγωγής και η ανάγκη για εποπτεία και έλεγχο στα δίκτυα δημιούργησαν μικρά αυτόνομα δίκτυα. Αυτά τα δίκτυα ονομάζονται μικροδίκτυα και αποτελούν καθοριστικό στοιχείο στην όλη ιδέα της διασπαρμένης παραγωγής.

Σύμφωνα με το U.S Department of Energy Microgrid Exchange Group, ως μικροδίκτυο ορίζεται ένα σύνολο αλληλοσυνδεδεμένων φορτίων και αποκεντρωμένων πηγών ενέργειας με καθορισμένη ηλεκτρική έκταση, το οποίο μπορεί να δρα ως μία ξεχωριστή ενότητα σε σχέση με το υπόλοιπο ηλεκτρικό δίκτυο, έχοντας την ικανότητα να συνδέεται και να αποσυνδέεται από το δίκτυο όποτε αυτό κρίνεται αναγκαίο.

Τα μικροδίκτυα, αποτελούν μία μικρογραφία του κεντρικού υφιστάμενου δικτύου και μπορεί να είναι ένα κτίριο ή ένα συγκρότημα κτιρίων, ένα τμήμα του δικτύου διανομής, ένα σύνολο δικτύων που βρίσκονται ιεραρχικά κάτω από έναν υποσταθμό διανομής, το ηλεκτρικό δίκτυο ενός οικισμού, μία συνοικία ή περιφέρεια, ένα βιομηχανικό πάρκο, ένα απομονωμένο χωριό, ένα πλοίο, ένα αεροπλάνο και ούτω καθεξής. Επιπλέον, το μικροδίκτυο περιλαμβάνει κατάλληλα κυκλώματα τροφοδοσίας, κυκλώματα διακλάδωσης, μετασχηματιστές, γειώσεις, και στοιχεία προστασίας για να παρέχει έναν ασφαλή και αξιόπιστο τρόπο για την παροχή ηλεκτρισμού, ενώ πιθανώς ανταλλάσσει (εισάγει ή εξάγει) ισχύ με ένα ηλεκτρικό δίκτυο μεγαλύτερης κλίμακας, στο οποίο θα είναι συνδεδεμένο.

Τα μικροδίκτυα συνήθως αποτελούνται από τρεις βασικές κατηγορίες μονάδων: (α) μονάδες παραγωγής ενέργειας, (β) μονάδες αποθήκευσης ενέργειας και (γ) μονάδες κατανάλωσης. Οι μονάδες παραγωγής είναι είτε κλασσικής παραγωγής όπως γεννήτριες ηλεκτρικού ρεύματος, είτε ήπιας μορφής παραγωγής όπως ΑΠΕ, κυψέλες καυσίμου και άλλες. Οι μονάδες αποθήκευσης όπως οι συσσωρευτές παίζουν βασικό ρόλο στο μικροδίκτυο, καθώς είναι αυτές που του προσδίδουν αυτονομία και αξιοπιστία, ενώ οι μονάδες κατανάλωσης δε διαφέρουν απ' αυτές στα συμβατικά δίκτυα. Καθοριστικό ρόλο στα μικροδίκτυα έχουν τα ηλεκτρονικά ισχύος, εφόσον το μικροδίκτυο έχει για παραγωγή μονάδες που παράγουν συνεχές ρεύμα ή μονάδες που έχουν διαρκώς μεταβαλλόμενη παραγωγή.



Εικόνα 5.7: Τυπική δομή μικροδικτύου

Αρχικά, η περιγραφή του τοπικού δικτύου παραγωγής και κατανάλωσης φαίνεται να μη διαφέρει από τα σύγχρονα, διασυνδεδεμένα με το δίκτυο, συστήματα διεσπαρμένης παραγωγής που χρησιμοποιούν ΑΠΕ. Παρόλα αυτά, το προσδιοριστικό στοιχείο του μικροδικτύου είναι ότι οι ελεγχόμενες πηγές συνδυάζονται μεταξύ τους, προκειμένου να στηρίξουν το τοπικό δίκτυο σε ισχύ (διασυνδεδεμένα ή μη) αλλά και να προσφέρουν επικουρικές υπηρεσίες στο έναντι δίκτυο (διασυνδεδεμένο). Αυτό το χαρακτηριστικό του μικροδικτύου υπάρχει χάρη στη δυνατότητα ελέγχου των πηγών που βρίσκονται σε αυτό [36].

Όταν το μικροδίκτυο βρίσκεται σε αλληλεπίδραση με το κυρίως δίκτυο, το μικροδίκτυο δεν υποχρεούται απαραίτητως να ισορροπήσει την εσωτερική παροχή και κατανάλωσή του, διότι οποιαδήποτε διαφορά μεταξύ παροχής και κατανάλωσης μπορεί να απορροφηθεί από το κυρίως δίκτυο. Όταν όμως είναι απομονωμένο από το κύριο δίκτυο ή έχει αποσυνδεθεί από το έναντι δίκτυο (νησιδοποίηση), το μικροδίκτυο, πρέπει να ισορροπήσει την εσωτερική παροχή και κατανάλωση. Οποιαδήποτε διαφορά μεταξύ αυτών των δύο θα πρέπει να απορροφηθεί από τα αποθηκευτικά μέσα ενέργειας εντός του μικροδικτύου ή, εναλλακτικά, θα πρέπει να περικοπεί φορτίο.

Δύο πολύ σημαντικά χαρακτηριστικά κάθε στοιχείου του μικροδικτύου είναι τα «peer-to-peer» και «plug-and-play». Το πρώτο σημαίνει ότι δεν υπάρχουν μονάδες, όπως ένας κεντρικός ελεγκτής ή μια κεντρική μονάδα αποθήκευσης που να έχουν κρίσιμο ρόλο στη λειτουργία του μικροδικτύου. Δηλαδή το μικροδίκτυο μπορεί να λειτουργεί και ανεξάρτητα από τις μονάδες που είναι συνδεδεμένο. Με το δεύτερο εννοείται ότι μια μονάδα είναι δυνατόν να τοποθετηθεί σε οποιοδήποτε σημείο του δικτύου και να ενταχθεί παρέχοντας ενέργεια αξιόπιστα, μειώνοντας έτσι την πιθανότητα σφάλματος [37].

#### 5.4.1 Μονάδες Αποθήκευσης Ενέργειας

Σε ένα μικροδίκτυο δύναται να συμμετέχουν ΑΠΕ των οποίων η παραγωγή είναι ένα στοχαστικό μέγεθος που διαφέρει κάθε χρονική στιγμή. Χωρίς μέσα αποθήκευσης είναι πολύ πιθανό να παρατηρηθεί έλλειμμα ή πλεόνασμα στην παραγωγή, τα οποία διαταράσσουν την εύρυθμη λειτουργία του μικροδικτύου. Αυτά τα πλεονάσματα ενέργειας εκμεταλλεύονται οι μονάδες αποθήκευσης, οι οποίες τα αποθηκεύουν, ώστε να τα αποδώσουν σε μια μετέπειτα χρονική στιγμή που θα παρατηρηθεί έλλειμμα. Με τον τρόπο αυτό εξασφαλίζεται η αδιάλειπτη λειτουργία του μικροδικτύου. Σε αντίθεση με τις μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής, οι μονάδες αποθήκευσης χρησιμοποιούν μετατροπείς αμφίδρομης ροής, οι οποίοι επιτρέπουν ροή ισχύος και προς τις δύο κατευθύνσεις, για τη

φόρτιση και εκφόρτιση των αποθηκευτικών μέσων. Ακόμη, με τη βοήθεια των αποθηκευτικών μονάδων μειώνεται ο αριθμός των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής που πρέπει να βρίσκονται σε εφεδρεία για τυχόν απότομη μεταβολή του φορτίου.

Για την υλοποίηση των αποθηκευτικών διατάξεων χρησιμοποιούνται διάφορες τεχνολογίες, όπως υπερπυκνωτές, συσσωρευτές, αποθήκευση ενέργειας με υπεραγωγίμα πηνία, καθώς και αποθήκευση κινητικής ενέργειας σε στρεφόμενες μηχανές υψηλής αδράνειας (flywheels). Ορισμένες άλλες τεχνολογίες, οι οποίες είναι υπό εξέλιξη περιλαμβάνουν την αποθήκευση ενέργειας με πεπιεσμένο αέρα, όπου η ηλεκτρική ενέργεια χρησιμοποιείται για τη συμπίεση ποσότητας αέρα, η οποία στη συνέχεια κινώντας έναν στρόβιλο αναπαράγει την ηλεκτρική ενέργεια, καθώς και οι διατάξεις άντλησης, όπου η ενέργεια που παράγεται από ΑΠΕ χρησιμοποιείται για άντληση νερού σε υψηλότερη υψομετρική στάθμη και κατόπιν η ενέργεια αναπαράγεται όταν ζητηθεί με τη χρήση υδροστροβίλου. Τέλος, υπεραγωγίμες διατάξεις και εφαρμογές που χρησιμοποιούν υγρό ήλιο είναι ήδη σε εμπορική εκμετάλλευση, ενώ διατάξεις υγρού αζώτου αναμένονται στο άμεσο μέλλον.

Σε ένα μικροδίκτυο μπορεί να υπάρξουν μία ή περισσότερες μονάδες αποθήκευσης ενέργειας. Το θετικό χαρακτηριστικό με τη διείσδυση περισσότερων μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής είναι η επίτευξη μεγαλύτερης ευελιξίας, μέσω του συνδυασμού διαφορετικών ιδιοτήτων των διαφορετικών τύπων αποθήκευσης ενέργειας. Για παράδειγμα, οι υπερπυκνωτές παρουσιάζουν μεγάλη πυκνότητα ισχύος, δηλαδή μπορούν να τροφοδοτήσουν μεγάλα ποσά ενέργειας σε μικρό χρονικό διάστημα. Ωστόσο, οι συσσωρευτές παρουσιάζουν μεγάλη πυκνότητα ενέργειας. Συνεπώς, η χρήση υπερπυκνωτών προτιμάται σε περιπτώσεις μεταβατικών φαινομένων, όπου η απαιτούμενη ισχύς είναι μεγάλη, ενώ η χρήση συσσωρευτών σε περιπτώσεις που το μικροδίκτυο έχει μεγάλη απαίτηση ενέργειας.

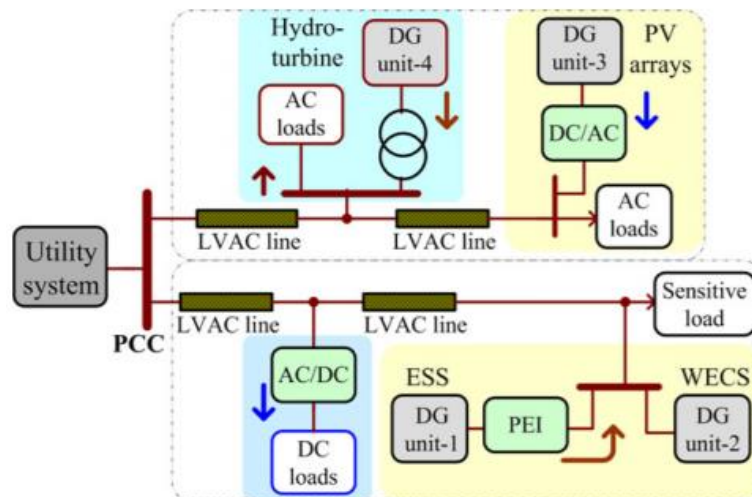
#### 5.4.2 AC Μικροδίκτυα

Η εξοικείωση που υπάρχει με τα AC δίκτυα αποτελεί το μεγαλύτερο πλεονέκτημα των AC μικροδικτύων. Στις περισσότερες των περιπτώσεων, η τάση και η συχνότητα των AC μικροδικτύων προσαρμόζονται στα πρότυπα των συμβατικών δικτύων διανομής καθώς αποτελούν τμήμα τους. Βέβαια, στα AC μικροδίκτυα απαιτούνται περισσότερες συσκευές και εξοπλισμός ενώ και οι ενεργειακές απώλειες κατά τη διαδικασία των μετατροπών είναι σημαντική.

Στην Εικόνα 5.8 παρουσιάζεται ένα τυπικό AC μικροδίκτυο διασυνδεδεμένο στη μέση τάση. Ο κύριος ζυγός αποτελείται από δίκτυα χαμηλής τάσης εναλλασσομένου ρεύματος (LVAC). Οι διεσπαρμένες μονάδες παραγωγής όπως και οι μονάδες αποθήκευσης είναι συνδεδεμένες όπως σε ένα κλασικό δίκτυο διανομής. Η ροή ισχύος εμφανίζεται με κόκκινα βέλη όταν πρόκειται για AC ισχύ και με μπλε βέλη όταν πρόκειται για DC. Το AC μικροδίκτυο αποτελείται από τέσσερα επιμέρους δίκτυα τα οποία περιέχουν:

- Τέσσερις διεσπαρμένες μονάδες (DG unit1: Σύστημα αποθήκευσης ενέργειας, DG unit2: Ανεμογεννήτριες, DG unit3: Φωτοβολταϊκός σταθμός και DG unit4: Υδροηλεκτρικός σταθμός).

- Φορτία AC τα οποία είναι συνδεδεμένα είτε πάνω στο ζυγό LVAC είτε στα επιμέρους AC μικροδίκτυα.
- Φορτίο DC το οποίο τροφοδοτείται μέσω ανορθωτή AC-to-DC.
- Ηλεκτρονικά ισχύος (power electronics interface - PEI) για την ανταλλαγή ισχύος του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας με το υπόλοιπο δίκτυο.
- Μετασχηματιστή για την ανύψωση/υποβιβασμό της τάσης ανάλογα με την ισχύ του υδροηλεκτρικού σταθμού.



Εικόνα 5.8: AC μικροδίκτυο με διεσπαρμένες μονάδες παραγωγής και διαφορετικά φορτία [34]

Η τοπολογία των AC μικροδικτύων είναι ανάλογη αυτής των συμβατικών δικτύων διανομής όπως ακτινικό, βροχοειδής και primary network. Οι υποσταθμοί του συμβατικού δικτύου διανομής αντιστοιχούν στις μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής του μικροδικτύου. Η ηλεκτρική ισχύς είναι δυνατόν να μεταφερθεί σε διαφορετικές περιοχές του συστήματος με ποικίλους τρόπους, ανάλογα με την πυκνότητα του φορτίου και το επίπεδο τάσης του συστήματος.

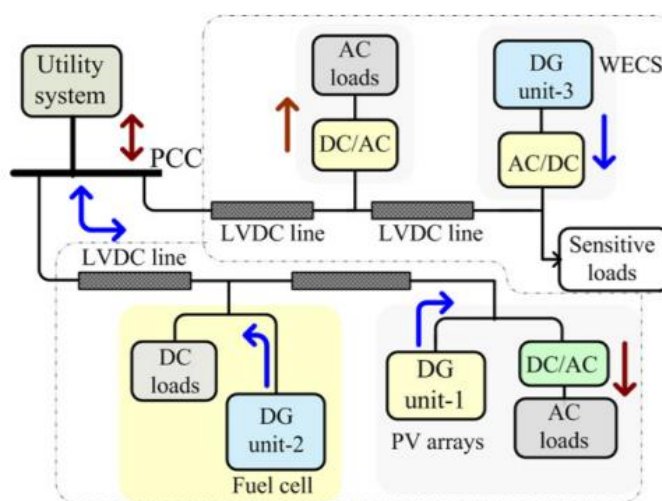
### 5.4.3 DC Μικροδίκτυα

Τα DC μικροδίκτυα είναι άμεσα εξαρτώμενα από τη λειτουργία των LVDC δικτύων και αντίστροφα γιατί εξυπηρετούν κοινούς σκοπούς. Ο στόχος του LVDC δικτύου είναι να αυξήσει την αποτελεσματικότητα του δικτύου χαμηλής τάσης. Η ικανότητα μεταφοράς ισχύος του δικτύου χαμηλής τάσης αυξάνεται με τη χρήση των DC μικροδικτύων, διότι οι απώλειες στα DC καλώδια είναι χαμηλότερες. Επιπλέον, όλη η μεταφερόμενη ισχύς είναι ενεργός ισχύς, άρα περισσότερη ισχύς μπορεί να μεταφερθεί με τα ίδια καλώδια.

Το DC σύστημα κάνει δυνατή την αντιστάθμιση βυθίσεων τάσης και μικρών διακοπών του δικτύου μέσης τάσης, χωρίς επιπτώσεις στην τάση των καταναλωτών. Αν ένα blackout συμβεί στο δίκτυο μέσης τάσης, μια λειτουργία νησιδοποίησης θα είναι δυνατή στο LVDC δίκτυο στην περίπτωση που τα DC μικροδίκτυα είναι συνδεδεμένα σε αυτό. Σε αυτή την περίπτωση το LVDC σύστημα διανομής έχει χαρακτηριστικά ενός UPS, εξασφαλίζοντας αδιάλειπτη παροχή ηλεκτρικής ενέργειας. Επιπλέον, αυξάνει την αξιοπιστία του δικτύου μέσης τάσης, αφού το δίκτυο χαμηλής τάσης σχηματίζει τη δική του περιοχή προστασίας.

Στην Εικόνα 5.9 παρουσιάζεται η δομή ενός DC μικροδικτύου το οποίο μπορεί να είναι διασυνδεδεμένο με ένα δίκτυο διανομής μέσης τάσης εναλλασσόμενου ρεύματος (MVAC) ή με κάποια γραμμή μεταφοράς HVDC ενός αιολικού πάρκου. Η ροή ισχύος εμφανίζεται με κόκκινα βέλη όταν πρόκειται για AC ισχύ και με μπλε βέλη όταν πρόκειται για DC. Το DC μικροδίκτυο αποτελείται από τέσσερα επιμέρους δίκτυα τα οποία περιέχουν:

- Τρεις διεσπαρμένες μονάδες (DG unit1: Φωτοβολταϊκός σταθμός, DG unit2: Κυψέλες καυσίμου και DG unit3: Ανεμογεννήτριες).
- Φορτία AC τα οποία τροφοδοτούνται μέσω αντιστροφών DC-to-AC.
- Φορτία DC τα οποία τροφοδοτούνται απ' ευθείας από τον ζυγό LVDC.



Εικόνα 5.9: DC μικροδίκτυο με διεσπαρμένες μονάδες παραγωγής και διαφορετικά φορτία [34]

#### 5.4.4 Πλεονεκτήματα DC Μικροδικτύων

Τα DC μικροδίκτυα φαίνεται να επικρατούν έναντι των AC λόγω των πλεονεκτημάτων που αυτά παρουσιάζουν σε σχέση με τα παραδοσιακά δίκτυα διανομής, καθώς επίσης και λόγω των σύγχρονων τάσεων στη διανομή ηλεκτρικής ενέργειας. Συγκεκριμένα, οι λόγοι αυτοί είναι οι εξής [28], [38]:

- Το υπάρχον σύστημα διανομής βρίσκεται στα όρια του και πολύ σύντομα δε θα μπορεί να ανταποκριθεί στην αύξηση της ζήτησης. Συνεπώς, είναι επιθυμητές, η αύξηση της ποιότητας ισχύος (quality of power) και της απόδοσης (efficiency) του συστήματος.
- Με τη χρήση τους, είναι δυνατή η αύξηση της μεταφερόμενης ισχύος από το δίκτυο διανομής.
- Είναι δυνατή η μείωση της έκτασης του δικτύου μέσης τάσης, αφού το δίκτυο χαμηλής τάσης θα είναι ικανό για τη μεταφορά μεγαλύτερης ποσότητας ισχύος.
- Τα LVDC συστήματα δίνουν τη δυνατότητα να χρησιμοποιηθούν μικρότερα καλώδια με χαμηλότερα κόστη, μειώνοντας κατ' αυτόν τον τρόπο τον περιβαλλοντικό αντίκτυπο της παραγωγής και της μεταφοράς ενέργειας. Η διατομή των καλωδίων είναι δυνατόν να μειωθεί κατά περίπου 20 % σε κάθε αγωγό όταν το καλώδιο χρησιμοποιείται για να παράσχει ισχύ από ένα DC δίκτυο, αντί από ένα AC. Επίσης, ο αριθμός των αγωγών κάθε καλωδίου DC αναμένεται να είναι μικρότερος από τον αντίστοιχο σε AC. Η ισχύς

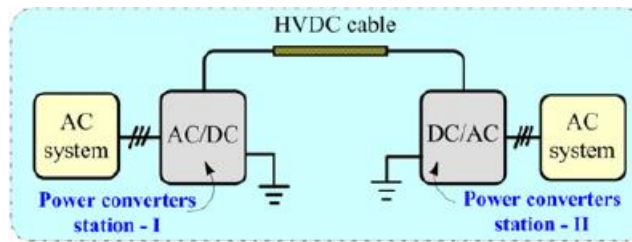
θα μεταφέρεται από δύο αγωγούς για μονοπολικό σύστημα DC και από τρεις για διπολικό σύστημα DC, αντί για τέσσερις ή πέντε αγωγούς που χρησιμοποιούνται στο χαμηλής τάσης AC. Συνεπώς, η ίδια ικανότητα ισχύος μπορεί να επιτευχθεί με χαμηλότερη επένδυση σε υλικά καλωδίων σε σύγκριση με τα AC δίκτυα.

- Καθιστούν ευκολότερη τη σύνδεση διεσπαρμένων παραγωγών και αποθηκευτικών μέσων ηλεκτρικής ενέργειας, σε σύγκριση με τα παραδοσιακά συστήματα χαμηλής τάσης. Οι περισσότερες συσκευές μικροπαραγωγής, όπως τα φωτοβολταϊκά, και τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας, όπως οι συσσωρευτές και οι υπερπυκνωτές παράγουν DC εξόδους ή απαιτούν ένα ενδιάμεσο στάδιο DC. Αυτές οι οικολογικές πηγές ενέργειας μπορούν να συνδεθούν μέσω μετατροπών DC-to-DC ή απευθείας στο LVDC δίκτυο, αποφεύγοντας την ενεργειακή απώλεια (η οποία είναι τυπικά 7 % - 15 % για τη μετατροπή από DC σε AC) εξαιτίας της μετατροπής σε AC. Για παράδειγμα, η σύνδεση μικροπαραγωγής μεταβλητών στροφών, όπως ανεμογεννήτριες και τουρμπίνες μικροκαυσίμου σε ένα LVDC δίκτυο θα μειώσει τα στάδια μετατροπής κατά ένα. Επίσης, η σύνδεση πολλαπλών πηγών εν παραλλήλω είναι ευκολότερη στα DC παρά στα AC συστήματα, διότι δεν απαιτείται συγχρονισμός συχνότητας προκειμένου να επιτευχθεί η σύνδεση.
- Ένα LVDC δίκτυο είναι πιο κατάλληλο για τη σύνδεση μεγάλου αριθμού συσκευών που καταναλώνουν DC. Τα οικιακά ηλεκτρονικά φορτία, τα οποία εσωτερικά τροφοδοτούνται από DC κυριαρχούν σήμερα περισσότερο από τα AC φορτία. Ηλεκτρονικά φορτία όπως υπολογιστές, λαμπτήρες φθορισμού, τηλεοράσεις και άλλα, χρησιμοποιούν ανορθωτές γέφυρας για να παραλάβουν DC από το AC. Η μετατροπή από το AC στο DC εισάγει αρμονικές οι οποίες δημιουργούν θέματα ποιότητας ισχύος. Επίσης, η ανάγκη χρησιμοποίησης μεγάλου αριθμού μετατροπών για τη μετατροπή των 230 VAC σε χαμηλότερες τάσεις και μετά σε DC, καθώς επίσης και η ανάγκη για διόρθωση του συντελεστή ισχύος μπορούν να αφαιρεθούν, μειώνοντας τις απώλειες και εξοικονομώντας κόστος. Οι μετασχηματιστές που χρησιμοποιούνται στον οικιακό ηλεκτρονικό εξοπλισμό μπορούν να προκαλέσουν υπολογίσιμες απώλειες κατά την αναμονή (stand-by) των συσκευών. Γενικά η ποσότητα της ισχύος που χάνεται κατά τις μετατροπές είναι 10 % - 25 %, και περίπου η ίδια ποσότητα ισχύος χάνεται όταν οι μετατροπές είναι σε αναμονή (stand-by).

#### 5.4.5 Τοπολογίες DC Μικροδικτύων

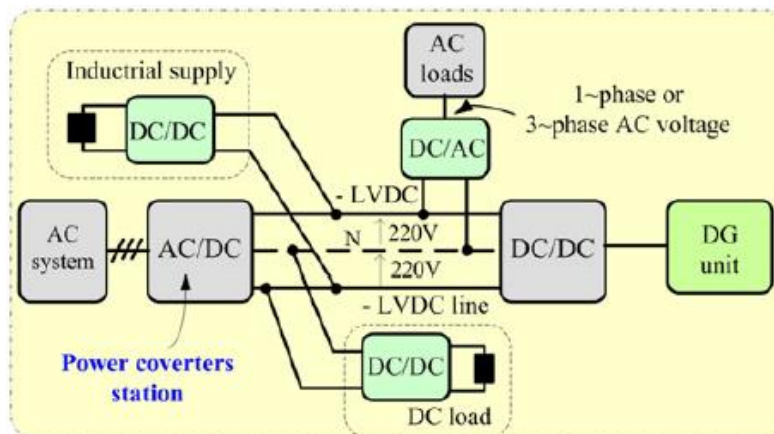
Η ισχύς από υποσταθμούς ή τις διεσπαρμένες μονάδες παραγωγής μπορεί να διανεμηθεί μέσω ενός DC δικτύου διανομής με τη χρήση ενός καλωδίου (μονοπολικό DC δίκτυο), δυο καλωδίων (διπολικό DC δίκτυο) και δύο ή περισσότερων καλωδίων (ομοπολικό DC δίκτυο). Τα δυο πρώτα συστήματα χρησιμοποιούνται συνήθως στα HVDC δίκτυα μεταφοράς ενέργειας ενώ το τρίτο στα LVDC δίκτυα διανομής.

Στο μονοπολικό σύστημα, υπάρχει μόνο ένα επίπεδο τάσης, θετική (ή αρνητική) προς ουδέτερο. Είναι οικονομικός τρόπος διασύνδεσης αλλά σε μερικές χώρες απαγορεύεται λόγω των διαβρώσεων που εμφανίζονται σε μεταλλικά μέρη των καλωδίων. Ένας τέτοιο σύστημα χρησιμοποιείται εδώ και αρκετά χρόνια με την υποθαλάσσια διασύνδεση μεταξύ Ελλάδας και Ιταλίας.



Εικόνα 5.10: Μονοπολικό σύστημα σύνδεσης HVDC γραμμής μεταφοράς [34]

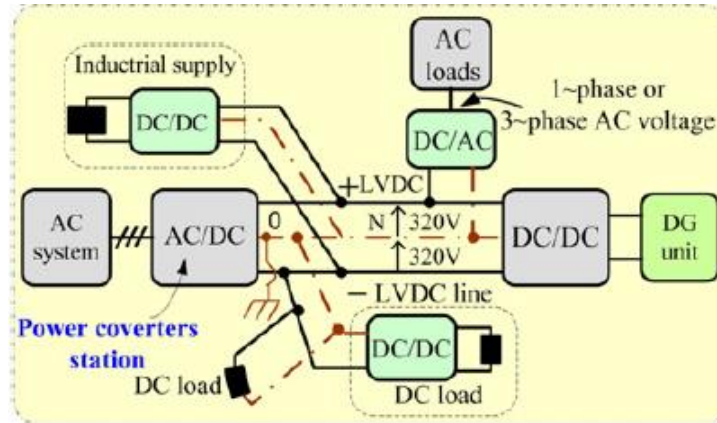
Στο διπολικό σύστημα, υπάρχουν δύο επίπεδα τάσης, και το φορτίο μπορεί να συνδεθεί είτε μεταξύ του αγωγού γραμμής και του αγωγού μηδενικής τάσης, είτε απευθείας μεταξύ των αγωγών θετικής και αρνητικής τάσης. Συνεπώς, οι διπολικές διατάξεις προσφέρουν επιλογές για σύνδεση του φορτίου σε περισσότερα επίπεδα τάσης από τις μονοπολικές. Το διπολικό σύστημα είναι δυνατόν να τροφοδοτείται από έναν μετασχηματιστή δύο τυλιγμάτων και έναν μετατροπέα γραμμής, οπότε έχουμε μια διπολική σύνδεση με το DC δίκτυο, ή από έναν μετασχηματιστή τριών τυλιγμάτων και δύο μετατροπείς γραμμών, που συνδέονται με μονοπολικό τρόπο μεταξύ του θετικού ή του αρνητικού πόλου και του ουδετέρου. Το διπολικό σύστημα είναι πιο αξιόπιστο, επειδή παρέχει τη δυνατότητα να διατηρηθεί το άλλο μισό του δικτύου σε λειτουργία, στην περίπτωση που παρουσιαστεί σφάλμα στο πρώτο μισό του δικτύου [38].



Εικόνα 5.11: Διπολικό σύστημα σύνδεσης LVDC δικτύου διανομής [34]

Το ομοπολικό σύστημα έχει δύο ή περισσότερους αγωγούς που έχουν την ίδια πολικότητα. Συνήθως προτιμώνται αρνητικές πολικότητες γιατί μπορούν να χρησιμοποιήσουν για επιστροφή του ρεύματος τη γη. Το ομοπολικό σύστημα έχει ως πλεονέκτημα το μειωμένο κόστος μόνωσης ενώ την καλύτερη αποδοτικότητα έχει το σύστημα με τρία καλώδια το οποίο και χρησιμοποιείται κυρίως στη διανομή των καταναλωτών.

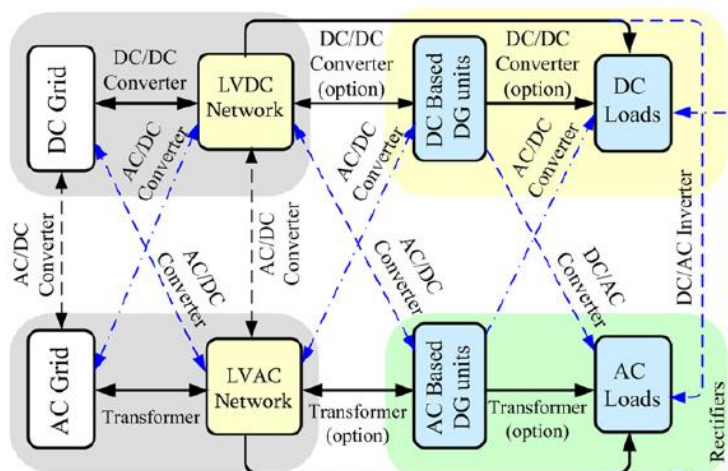




Εικόνα 5.12: Ομοπολικό σύστημα τριών καλωδίων σύνδεσης LVDC δικτύου διανομής [34]

### 5.4.6 Διασύνδεση Μικροδικτύων

Η διασύνδεση μεταξύ των AC και DC συστημάτων είναι σημαντική στην επίδοση των δικτύων και το μεγαλύτερο ρόλο διαδραματίζουν οι μετασχηματιστές και τα ηλεκτρονικά ισχύος. Υπάρχουν διάφορα ηλεκτρονικά ισχύος που έχουν διαφορετικές δυνατότητες για τον έλεγχο των τάσεων και της ροής ισχύος μεταξύ των συστημάτων AC και DC. Γενικά, υπάρχουν διάφορα ηλεκτρονικά ισχύος AC-to-DC, από μη ελεγχόμενες (δηλαδή η ισχύς ρέει μόνο από το AC μέρος στο DC μέρος του συστήματος) συσκευές όπως ανορθωτές διόδων, μέχρι πλήρως ελεγχόμενες, όπως οι μετατροπείς πηγής τάσης (VSCs). Η ενεργός και η άεργος ισχύς μεταξύ του AC και του DC συστήματος μπορούν να ελεγχθούν αυτόνομα όταν χρησιμοποιούνται VSCs. Επιπροσθέτως, διεπίπεδοι VSCs μπορούν να συνδυαστούν με γαλβανική απομόνωση, προκειμένου να καταστήσουν δυνατή την απόζευξη μεταξύ των AC και DC συστημάτων. Αυτό το στοιχείο βοηθά τον μετατροπέα να είναι πιο προσαρμοστικός, και βοηθά τα DC συστήματα να απορρίπτουν, σε κάποιο βαθμό, τις διαταραχές του δικτύου AC.



Εικόνα 5.13: Διασύνδεση AC και DC μικροδικτύων [34]

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 : ΜΟΝΟΦΑΣΙΚΟ AC ΜΙΚΡΟΔΙΚΤΥΟ

## 6.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζεται η πειραματική διερεύνηση της λειτουργίας ενός μονοφασικού AC μικροδικτύου. Το μικροδίκτυο είναι εγκατεστημένο στο Εργαστήριο Γεωργικής Μηχανολογίας του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών. Το μικροδίκτυο αποτελείται από:

- Δυο συστοιχίες φωτοβολταϊκών πλαισίων.
- Μια μονάδα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας (συστοιχία συσσωρευτών βαθιάς εκφόρτισης).
- Ηλεκτρονικά ισχύος (μετατροπείς, αντιστροφείς AC-to-DC και DC-to-AC).
- Ένα ηλεκτρονικό φορτίο για την προσομοίωση ηλεκτρικών καταναλώσεων.

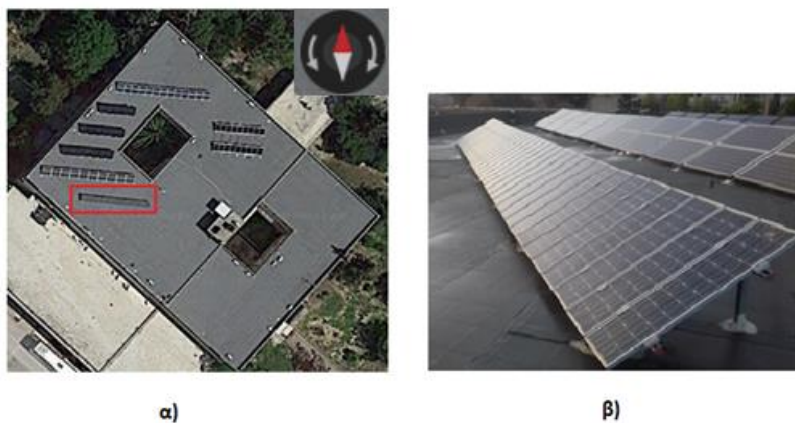
Πραγματοποιήθηκαν πειραματικές δοκιμές στο μικροδίκτυο σχετικά με: (α) την αυτόνομη λειτουργία του μικροδικτύου και (β) τη λειτουργία του μικροδικτύου σε διασύνδεση με το δημόσιο δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Για την ανάλυση της λειτουργίας του μικροδικτύου επιβλήθηκαν φορτία σε διάφορες καταστάσεις όπως:

- Επιβολή φορτίου μεγαλύτερη της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.
- Επιβολή φορτίου μικρότερη της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.
- Επιβολή φορτίου ίση με την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.
- Χωρίς επιβολή φορτίου.

## 6.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ

### 6.2.1 Πηγή Ενέργειας

Ως κύριες πηγές ενέργειας χρησιμοποιήθηκαν δύο φωτοβολταϊκές συστοιχίες, οι οποίες είναι εγκατεστημένες στην οροφή του κτιρίου Γεωργικής Μηχανολογίας, (Νότιο προσανατολισμό με κλίση 30°), όπως παρουσιάζονται στην Εικόνα 6.1:

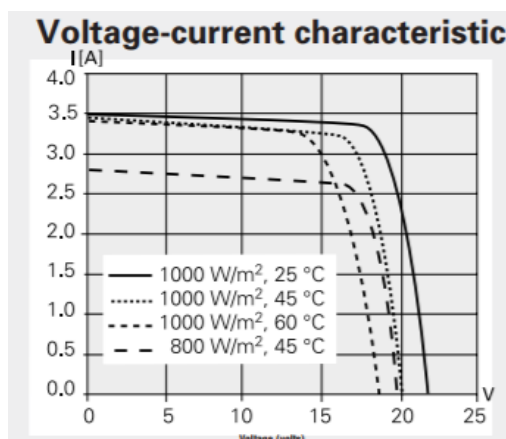


Εικόνα 6.1: Χωροθέτηση και προσανατολισμός φωτοβολταϊκών πλαισίων

Η κάθε φωτοβολταϊκή συστοιχία αποτελείται από 18 πλαίσια (τύπου SM55, Siemens), συνδεδεμένα σε σειρά, με το κάθε πλαίσιο να περιέχει 36 μονοκρυσταλικά φωτοβολταϊκά στοιχεία. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του κάθε φωτοβολταϊκού πλαισίου παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.1, ενώ στο Διάγραμμα 6.1 παρουσιάζεται η χαρακτηριστική I - V του κάθε πλαισίου:

Πίνακας 6.1: Χαρακτηριστικά φωτοβολταϊκού πλαισίου

Φωτοβολταϊκό Πλαίσιο	
Κατασκευαστής	Siemens SM55
Ονομαστική Ισχύς (P <sub>max</sub> )	55 Wp
Ένταση στο μέγιστο σημείο ισχύος (I <sub>MPP</sub> )	3.15 A
Τάση στο μέγιστο σημείο ισχύος (V <sub>MPP</sub> )	17.4 V
Τάση Ανοιχτού Κυκλώματος (V <sub>oc</sub> )	21.7 V
Ένταση Βραχυκύκλωσης (I <sub>sc</sub> )	3.45 A
Αλλαγή Τάσης Ανοιχτού Κυκλώματος με τη θερμοκρασία	-0.077 V/°C
Μήκος	1264 mm
Πλάτος	286 mm



Διάγραμμα 6.1: Χαρακτηριστική I - V φωτοβολταϊκού πλαισίου Siemens SM55

Η τάση ανοιχτού κυκλώματος (V<sub>oc</sub>) των φωτοβολταϊκών πλαισίων σε πρότυπες συνθήκες ελέγχου (25°C) είναι 21.7 V. Λόγω του ότι στο εξωτερικό περιβάλλον δεν επικρατούν πρότυπες συνθήκες, κρίνεται αναγκαίο να υπολογιστεί εκ νέου η τάση ανοιχτού κυκλώματος του κάθε πλαισίου. Σύμφωνα με μετεωρολογικά δεδομένα, η ελάχιστη θερμοκρασία που μπορεί να προκύψει στην περιοχή εγκατάστασης είναι -5°C, με αποτέλεσμα η τάση ανοιχτού κυκλώματος του πλαισίου να μειωθεί κατά 0.077 V/°C (Πίνακας 6.1). Οπότε προκύπτει:

$$- 0.077 \text{ V/}^\circ\text{C} * (-5 \text{ }^\circ\text{C} - 25 \text{ }^\circ\text{C}) = 2.31 \text{ V} \quad (32)$$

$$V_{oc} = 21.7 \text{ V} + 2.31 \text{ V} = 24.01 \text{ V} \quad (33)$$

Βάσει της Εξίσωσης 19 (Ενότητα 2.5.2) και της Εξίσωσης 20 (Ενότητα 6.2.1), η τιμή της τάσης ανοιχτού κυκλώματος της κάθε φωτοβολταϊκής συστοιχίας μπορεί να φτάσει την τιμή των 432.18 V (24.01 V \* 18 πλαίσια = 432.18 V). Ο αντιστροφέας που χρησιμοποιείται πρέπει να

καλύπτει αυτή την τιμή. Τα χαρακτηριστικά μεγέθη της κάθε φωτοβολταϊκής συστοιχίας, υπολογίστηκαν σύμφωνα με τις Εξισώσεις 19, 20 και 21 (Ενότητα 2.5.2) και παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.2:

**Πίνακας 6.2: Χαρακτηριστικά φωτοβολταϊκής συστοιχίας**

Φωτοβολταϊκή Συστοιχία	
Τάση Ανοικτού Κυκλώματος ( $V_{OC}$ )	390.6 V
Ένταση Βραχυκύκλωσης ( $I_{SC}$ )	3.45 A
Τάση στο μέγιστο σημείο ισχύος ( $V_{MP}$ )	313.2 V
Ένταση στο μέγιστο σημείο ισχύος ( $I_{MP}$ )	3.15 A
Ισχύς Αιχμής ( $P_{MP}$ )	986.58 Wp

Σύμφωνα με την Εξίσωση 6 (Ενότητα 2.3.3), ο συντελεστής πλήρωσης των φωτοβολταϊκών συστοιχιών είναι:

$$FF = \frac{I_{mp} * V_{mp}}{I_{sc} * V_{oc}} = \frac{3.15 \text{ A} * 313.2 \text{ V}}{3.45 \text{ A} * 390.6 \text{ V}} = 0.73 \text{ ή } 73\% \quad (34)$$

Οι φωτοβολταϊκές συστοιχίες εγκαταστάθηκαν το 2006 και λόγω παλαιότητας υπολογίζεται ο βαθμός απόδοσης τους και η ισχύς αιχμής που μπορούν να αποδώσουν σήμερα.

Σε πρώτη φάση, υπολογίζεται ο βαθμός απόδοσης του φωτοβολταϊκού πλαισίου σε πρότυπες συνθήκες ελέγχου STC σύμφωνα με την Εξίσωση 18 (Ενότητα 2.4.4).

$$\eta_{STC} = \frac{P_{p\Pi} / P_{STC}}{S_{\Pi}} = \frac{55 \text{ Wp} / 1000 \text{ W/m}^2}{0.36 \text{ m}^2} = 0.152 = 15.2 \% \quad (35)$$

Για την εύρεση του βαθμού απόδοσης του φωτοβολταϊκού πλαισίου, απαιτείται ο συντελεστής θερμοκρασίας σύμφωνα με την Εξίσωση 16 (Ενότητα 2.4.4). Ως μέση μηνιαία θερμοκρασία επιλέχθηκε η τιμή του μήνα Μαρτίου, λόγω του ότι το πείραμα διεξήχθη τον συγκεκριμένο μήνα:

$$\sigma_{\theta} = 1 - [(t_a + 30 \text{ }^{\circ}\text{C}) - 25 \text{ }^{\circ}\text{C}] * 0.004 = 1 - [(13.5 \text{ }^{\circ}\text{C} + 30 \text{ }^{\circ}\text{C}) - 25 \text{ }^{\circ}\text{C}] * 0.004 = 0.926 \quad (36)$$

Ο συντελεστής γήρανσης ( $\sigma_{\gamma}$ ) υπολογίστηκε με ετήσια μείωση κατά 1 % από το 2006, με αποτέλεσμα ύστερα από 11 έτη η τιμή του να είναι ίση με 0.92. Για τους συντελεστές ρύπανσης και απωλειών διόδου επιλέχθηκαν οι τυπικές τιμές 0.9 και 0.99, αντίστοιχα. Ο υπολογισμός του βαθμού απόδοσης φωτοβολταϊκού πλαισίου υπολογίζεται σύμφωνα με την Εξίσωση 17 (Ενότητα 2.4.4):

$$\eta_{\Pi} = \eta_{STC} * \sigma_{\gamma} * \sigma_{\rho} * \sigma_{\theta} * \sigma_{\delta} = 0.152 * 0.92 * 0.9 * 0.926 * 0.99 = 0.115 \text{ ή } 11.5 \% \quad (37)$$

Σε δεύτερη φάση υπολογίζεται ο βαθμός απόδοσης συστοιχίας, σύμφωνα με την Εξίσωση 26 (Ενότητα 2.5.5), λαμβάνοντας τις τυπικές τιμές για τους συντελεστές ανομοιογένειας καλωδιώσεων και απωλειών μεταφοράς ενέργειας:

$$\eta_{\Sigma} = \eta_{\Pi} * \sigma_{\alpha} * \sigma_{K} * \sigma_{\mu} = 0.115 * 0.98 * 0.98 * 0.96 = 0.106 \text{ ή } 10.6 \% \quad (38)$$

Το εμβαδόν επιφανείας και των δυο φωτοβολταϊκών συστοιχιών είναι:

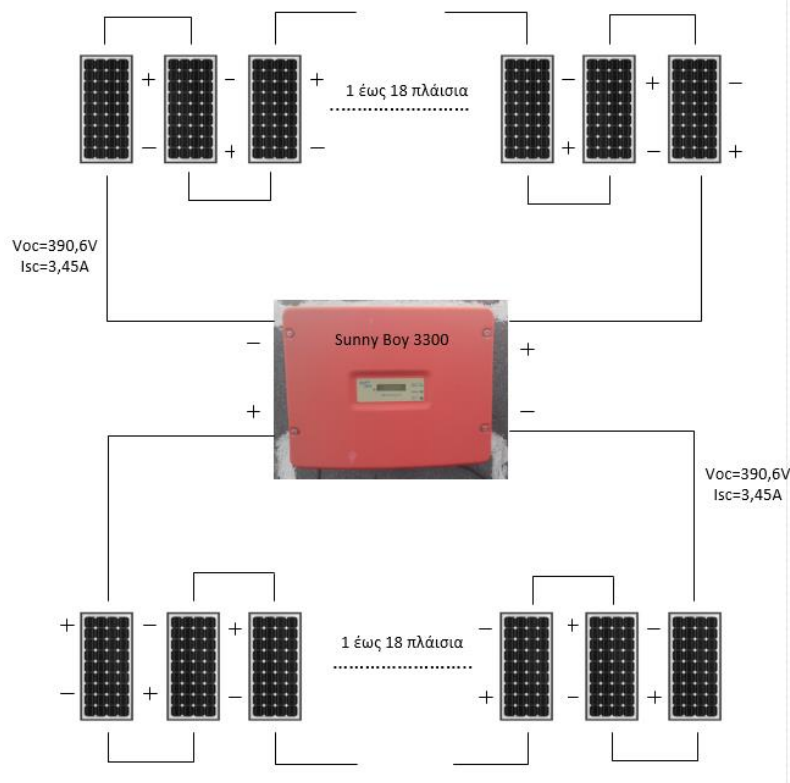
$$S_{\Sigma} = S_{\Pi} * N_{\Pi} = 0.36 \text{ m}^2 * 36 = 13.01 \text{ m}^2 \quad (39)$$

Τέλος, σύμφωνα με την Εξίσωση 25 (Ενότητα 2.5.5), η θεωρητική ισχύς αιχμής που μπορούν να αποδώσουν, ύστερα από 11 έτη, και οι δυο φωτοβολταϊκές συστοιχίες, σε πρότυπες συνθήκες ελέγχου ακτινοβολίας 1 kW/m<sup>2</sup>, είναι:

$$\eta_{\Sigma} = \frac{P_{m\Sigma}}{P_{STC} * S_{\Sigma}} \Rightarrow \quad (40)$$

$$P_{m\Sigma} = \eta_{\Sigma} * P_{STC} * S_{\Sigma} = 0.106 * \frac{1000 \text{ W}}{\text{m}^2} * 13.01 \text{ m}^2 = 1386 \text{ Wp} \quad (41)$$

Στην Εικόνα 6.2 παρουσιάζεται ο τρόπος σύνδεσης των 18 φωτοβολταϊκών πλαισίων της κάθε συστοιχίας με τον αντιστροφέα.



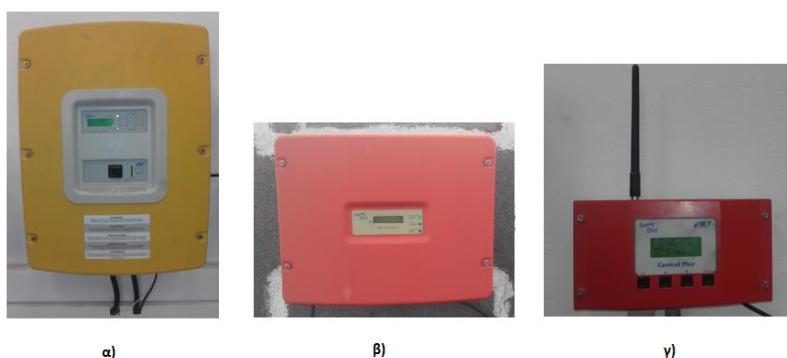
Εικόνα 6.2: Τρόπος σύνδεσης φωτοβολταϊκών πλαισίων

## 6.2.2 Ηλεκτρονικά Ισχύος

Βασικό ρόλο στη λειτουργία του μονοφασικού AC μικροδικτύου έχει ο μετατροπέας, ο οποίος είναι ο Sunny Island 5048 της εταιρίας SMA. Οι κύριες λειτουργίες του μετατροπέα είναι η ρύθμιση της τάσης και της συχνότητας του μικροδικτύου. Αυτό συμβαίνει ενώ

συγχρόνως πραγματοποιεί αρκετές ακόμα λειτουργίες, όπως (α) ελέγχει εάν υπάρχει λόγος σύνδεσης με βοηθητική πηγή παραγωγής ενέργειας (γεννήτρια πετρελαίου) ή με το δημόσιο δίκτυο, (β) ρυθμίζει τη φόρτιση των συσσωρευτών, (γ) μεταφέρει πληροφορίες για την κατάσταση του συστήματος, (δ) προστατεύει για την αποφυγή απομονωμένης λειτουργίας από υπερτάσεις και άλλα σφάλματα. Ο μετατροπέας Sunny Island 5048 συνδέεται με :

- Τον αντιστροφέα Sunny Boy 3300, ο οποίος είναι υπεύθυνος για τη μετατροπή της DC ισχύος από τις φωτοβολταϊκές συστοιχίες σε AC ισχύ, ενώ επιπλέον φροντίζει για τον εντοπισμό του σημείου μέγιστης ισχύος (MPP) λειτουργίας των φωτοβολταϊκών συστοιχιών.
- Το Sunny Boy Control, το οποίο συλλέγει όλα τα δεδομένα από το σύστημα και τα μεταβιβάζει σε έναν ηλεκτρονικό υπολογιστή.
- Το Sunny Data Control, το οποίο είναι το λειτουργικό πρόγραμμα για την εποπτεία και τη διαχείριση όλων των δεδομένων του μικροδικτύου.



Εικόνα 6.3: α) Sunny Island 5048 β) Sunny Boy 3300 γ) Sunny Boy Control

Ο αντιστροφέας Sunny Boy 3300 δέχεται στην είσοδό του μέγιστη τάση ανοικτού κυκλώματος 432.18 V και μέγιστο ρεύμα βραχυκύκλωσης 3.45 A από την κάθε φωτοβολταϊκή συστοιχία. Επιπλέον χρησιμοποιεί δυο MPP, ένα για την κάθε συστοιχία. Στην έξοδό του συνδέεται με τον AC ζυγό που δημιουργεί ο μετατροπέας Sunny Island 5048.

Πίνακας 6.3: Χαρακτηριστικά αντιστροφέα Sunny Boy 3300

Sunny Boy 3300	
Κατασκευαστής	SMA
<b>Τιμές Εξόδου AC</b>	
Ονομαστική Τάση ( $V_{AC\ nom}$ )	230 V
Ονομαστική Συχνότητα ( $f_{AC\ nom}$ )	50 Hz – 60 Hz
Ονομαστικό Ρεύμα ( $I_{AC\ nom}$ )	14.5 A
Ονομαστική Ισχύ ( $P_{AC\ nom}$ )	3300 W
Συντελεστής Ισχύος ( $\cos\phi$ )	1
<b>Τιμές Εισόδου DC</b>	
Μέγιστη Τάση ( $V_{DC\ max}$ )	500 V
Εύρος Τάσεων MPP ( $V_{DC\ MPP}$ )	200 V – 500 V
Μέγιστο Ρεύμα ( $I_{DC\ max}$ )	20 A
Μέγιστο Ρεύμα ανά Συστοιχία ( $I_{DC\ max\ STRING}$ )	16 A

Στον Πίνακα 6.3 παρουσιάζονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά του αντιστροφέα. Παρατηρείται ότι η τάση εισόδου μπορεί να είναι έως 500 V, οπότε μπορεί να δεχτεί τις φωτοβολταϊκές συστοιχίες που παρουσιάζουν μέγιστη τάση ίση με 432.18 V. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του μετατροπέα παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.4:

**Πίνακας 6.4: Χαρακτηριστικά μετατροπέα Sunny Island 5048**

<b>Sunny Island 5048</b>	
<b>Κατασκευαστής</b>	SMA
<b>Τιμές Εξόδου</b>	
<b>Ονομαστική Τάση AC (Ρυθμιζόμενη) (<math>V_{AC\ nom}</math>)</b>	230 V (202 V-253 V)
<b>Ονομαστική Συχνότητα (<math>f_{AC\ nom}</math>)</b>	45 Hz – 65 Hz
<b>Ονομαστικό Ρεύμα AC (<math>I_{AC\ nom}</math>)</b>	21 A
<b>Μέγιστο Ρεύμα για 60 msec</b>	120 A
<b>Συνεχής Ισχύς AC στους 25 °C</b>	5000 W
<b>Συνεχής Ισχύς AC στους 45 °C</b>	4000 W
<b>Ισχύς AC για 30 λεπτά στους 25 °C</b>	6500 W
<b>Ισχύς AC για 1 λεπτό στους 25 °C</b>	8400 W
<b>Ισχύς AC για 3 sec στους 25 °C</b>	12000 W
<b>Συντελεστής Ισχύος (cosφ)</b>	-1 έως +1
<b>Μέγιστος Βαθμός Απόδοσης</b>	95 % (σε 1000 W)
<b>Ιδιοκατανάλωση άνευ φορτίου σε αναμονή</b>	25 W (<4 W)
<b>Τιμές Εισόδου</b>	
<b>Τάση Εισόδου (Ρυθμιζόμενη)</b>	230 V (172.5 V – 264.5 V)
<b>Συχνότητα Εισόδου (Ρυθμιζόμενη)</b>	50 Hz (40 Hz – 70 Hz)
<b>Μέγιστο Ρεύμα Εισόδου (Ρυθμιζόμενο)</b>	56 A (0 A – 56 A)
<b>Μέγιστη Ισχύς Εισόδου</b>	12.8 kW
<b>Στοιχεία Συσσωρευτών</b>	
<b>Τάση Συσσωρευτή (Εύρος Τιμών)</b>	48 V (41 V – 63 V)
<b>Μέγιστο Ρεύμα Φόρτισης Συσσωρευτή</b>	120 A
<b>Ρεύμα Συνεχούς Φόρτισης</b>	100 A
<b>Χωρητικότητα Συσσωρευτή</b>	100 Ah – 10000 Ah
<b>Τύποι Συσσωρευτών</b>	VRLA/FLA/NiCd

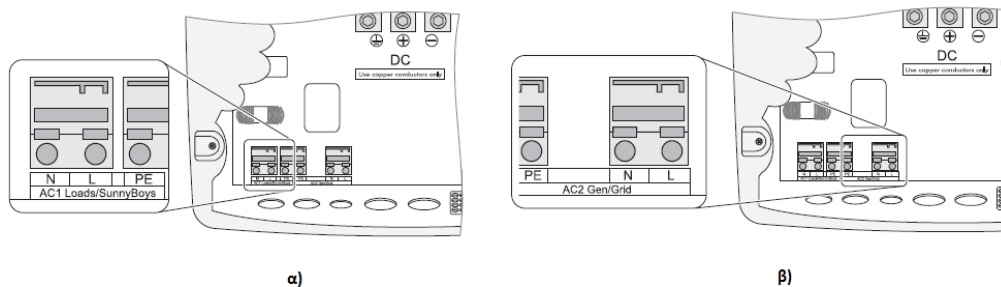
Ο μετατροπέας δημιουργεί έναν AC ζυγό 230 V, όπου συνδέονται οι καταναλώσεις. Επιπλέον, ο μετατροπέας έχει τη δυνατότητα να χρησιμοποιεί το δημόσιο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας ως εφεδρεία ενέργειας. Στην DC πλευρά του, συνδέεται η συστοιχία των συσσωρευτών.

Παρακάτω αναλύονται μόνο όσα χαρακτηριστικά του μετατροπέα Sunny Island 5048 κρίνονται αναγκαία για το συγκεκριμένο μονοφασικό AC μικροδίκτυο.

- Ο μετατροπέας υποστηρίζει δύο κύριες καταστάσεις: (α) το δημόσιο δίκτυο και το αυτόνομο δίκτυο είναι συνδεδεμένα, (β) το δημόσιο δίκτυο και το αυτόνομο δίκτυο είναι απομονωμένα. Εάν το αυτόνομο δίκτυο είναι απομονωμένο, ο μετατροπέας τροφοδοτεί αποκλειστικά το αυτόνομο δίκτυο. Εάν το δημόσιο δίκτυο είναι συνδεδεμένο με το αυτόνομο δίκτυο, η τροφοδοσία του αυτόνομου δικτύου γίνεται

από το δημόσιο δίκτυο. Η τάση και η συχνότητα του αυτόνομου δικτύου είναι ίδιες με την τάση και τη συχνότητα του δημόσιου δικτύου. Ο μετατροπέας του εργαστηρίου λειτουργεί ως αυτόνομο δίκτυο και έχει ως εφεδρεία το δημόσιο δίκτυο. Η λειτουργία έχει ως εξής: ο μετατροπέας παρακολουθεί συνεχώς την τάση εισόδου του και την τάση εξόδου του. Όταν υπάρχει ανάγκη για ενέργεια από κάποια κατανάλωση τότε είναι έτοιμος να καλύψει αυτή τη ζήτηση τροφοδοτώντας καταρχήν τα φορτία από τις φωτοβολταϊκές συστοιχίες. Εάν η ενέργεια των συστοιχιών δεν επαρκεί τότε επιστρατεύει και την ενέργεια που διαθέτουν οι συσσωρευτές. Στην περίπτωση που ούτε αυτό είναι αρκετό, τότε αυτόματα συνδέεται με το εφεδρικό σύστημα που είναι συνδεδεμένο. Στην περίπτωση του εργαστηρίου αυτό είναι το δημόσιο δίκτυο το οποίο και τροφοδοτεί το φορτίο ενώ ταυτόχρονα φορτίζει τους συσσωρευτές. Εάν δεν υπάρχει εφεδρικό σύστημα τότε απορρίπτεται το φορτίο. Όταν υπάρχει περίσσεια ενέργειας από τις φωτοβολταϊκές συστοιχίες τότε αυτές αναλαμβάνουν να φορτίσουν τους συσσωρευτές.

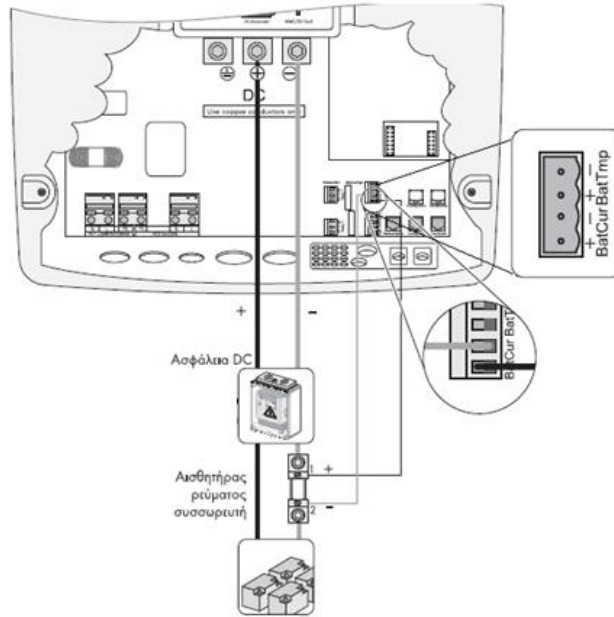
- Ο AC ζυγός φέρει δυο υποδοχές. Στην υποδοχή AC1 συνδέονται οι καταναλώσεις όπως φαίνεται στην Εικόνα 6.4α, ενώ στην υποδοχή AC2 συνδέεται το εφεδρικό σύστημα δηλαδή η γεννήτρια πετρελαίου ή το δημόσιο δίκτυο όπως φαίνεται στην Εικόνα 6.4β. Και οι δυο συνδέσεις χρησιμοποιούν κοινή γείωση.



**Εικόνα 6.4: Συνδέσεις AC ζυγού του Sunny Island 5048 α) καταναλώσεις β) δημόσιο δίκτυο**

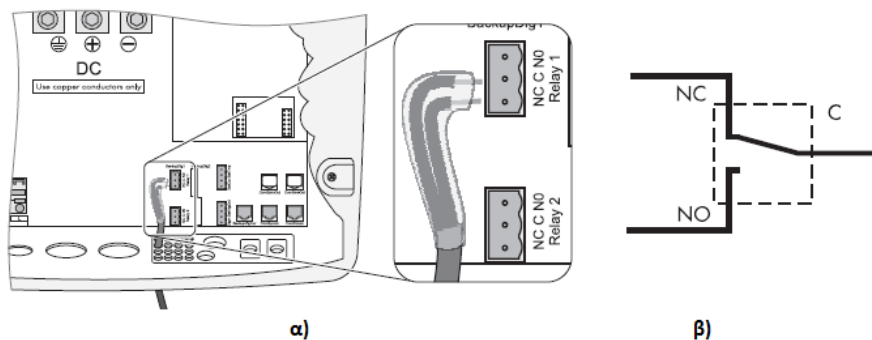
- Στην DC πλευρά του μετατροπέα συνδέονται ο θετικός και ο αρνητικός πόλος των συσσωρευτών ενώ μεσολαβούν ο αισθητήρας θερμοκρασίας συσσωρευτή (BatTmp) και ο αισθητήρας ρεύματος συσσωρευτή (BatCur), όπως φαίνονται στην Εικόνα 6.5.





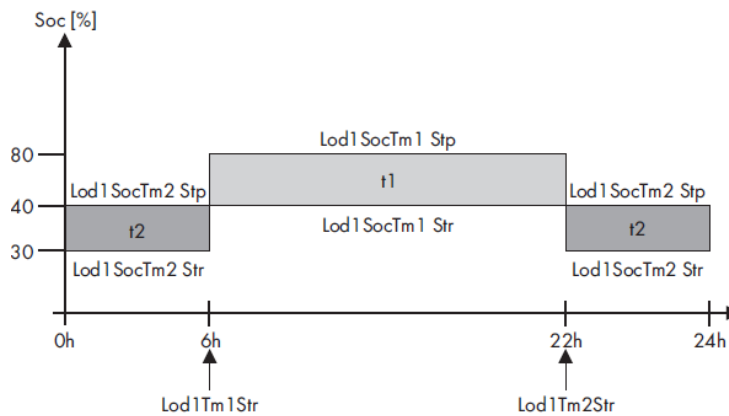
**Εικόνα 6.5: Σύνδεση συσσωρευτών και αισθητήρων θερμοκρασίας και ρεύματος συσσωρευτών με το Sunny Island 5048**

- Ο μετατροπέας προσφέρει πολλές δυνατότητες ελέγχου των εσωτερικών και των εξωτερικών διαδικασιών. Προς το σκοπό αυτό, υπάρχουν ενσωματωμένα 2 ρελέ (Relay) πολλαπλών λειτουργιών όπως φαίνεται στην Εικόνα 6.6α. Τα ρελέ λειτουργούν ως επαφές δύο κατευθύνσεων. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν τόσο ως διακόπτες ανοίγματος, όσο και ως διακόπτες κλεισίματος. Σε κάθε ρελέ αντιστοιχεί μία μόνο λειτουργία. Το ρελέ 1 (Relay 1) είναι προρυθμισμένο στη λειτουργία εκκίνησης του εφεδρικού συστήματος (AutoGn) ενώ το ρελέ 2 (Relay 2) στη λειτουργία απόρριψης φορτίου (AutoLodSoc).



**Εικόνα 6.6: α) Σύνδεση γεννήτριας και απόρριψης φορτίου με το Relay 1 και το Relay 2 αντίστοιχα β) Λειτουργία Relay και οι επαφές του, Normally closed (NC), Normally opened (NO)**

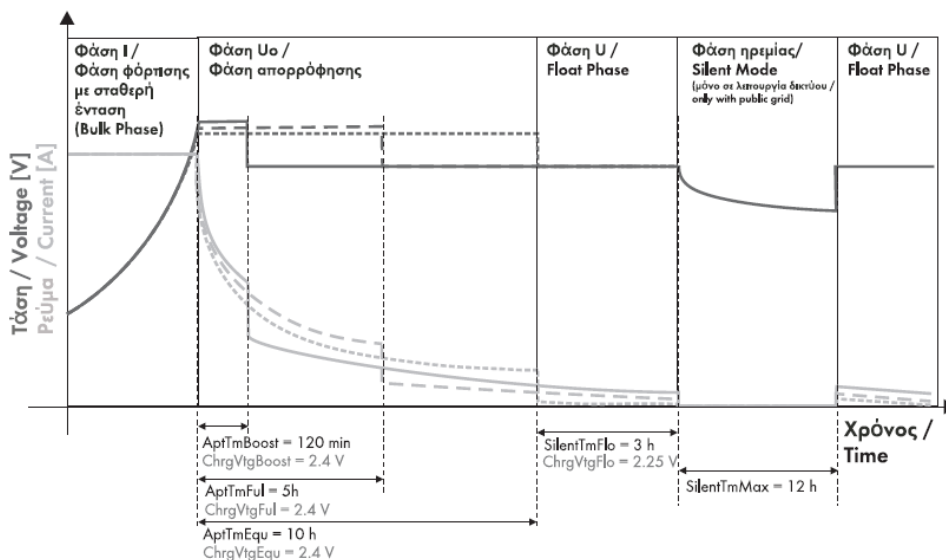
Σε περίπτωση που τα συνδεδεμένα στο μετατροπέα φορτία καταναλώνουν για μεγάλο χρονικό διάστημα περισσότερη ενέργεια από όση παράγουν οι συνδεδεμένοι παραγωγοί, τότε ενδέχεται ο συσσωρευτής να αποφορτιστεί. Εάν ο μετατροπέας δεν είναι συνδεδεμένος με εφεδρικό σύστημα απορρίπτει αυτόματα τα φορτία προκυμμένου να μην αποφορτιστούν οι συσσωρευτές. Στο Διάγραμμα 6.2 παρουσιάζεται ένα παράδειγμα ρύθμισης απόρριψης φορτίου κατά τη διάρκεια ενός εικοσιτετράωρου.



**Διάγραμμα 6.2: Τρόποι ρύθμισης Sunny Island 5048 για την απόρριψη φορτίου λόγω κινδύνου αποφόρτισης των συσσωρευτών**

Από τις 6:00 έως τις 22:00 ενεργοποιείται η απόρριψη φορτίων εάν η στάθμη φόρτισης των συσσωρευτών (SOC) φθάσει στο 40 %. Κατά τη διάρκεια της νύχτας (μεταξύ 22:00 και 6:00) επιτρέπεται ο συσσωρευτής να εκφορτιστεί έως το 30 % προτού ενεργοποιηθεί το ρελέ απόρριψης φορτίων.

- Ο μετατροπέας διαθέτει ρύθμιση φόρτισης συσσωρευτών τριών βαθμίδων, βάσει τριών φάσεων λειτουργίας (α) φάση I, (β) φάση U<sub>0</sub> και (γ) φάση U (ονομάζεται και φόρτιση τύπου IU<sub>0</sub>U). Κατά τη λειτουργία σε δημόσιο δίκτυο υπάρχει προαιρετικά μία τέταρτη βαθμίδα, η φάση ηρεμίας (SilentMode) (μόνο σε λειτουργία δικτύου / only with public grid). Στο Διάγραμμα 6.3 παρουσιάζονται οι παραπάνω βαθμίδες φόρτισης των συσσωρευτών.



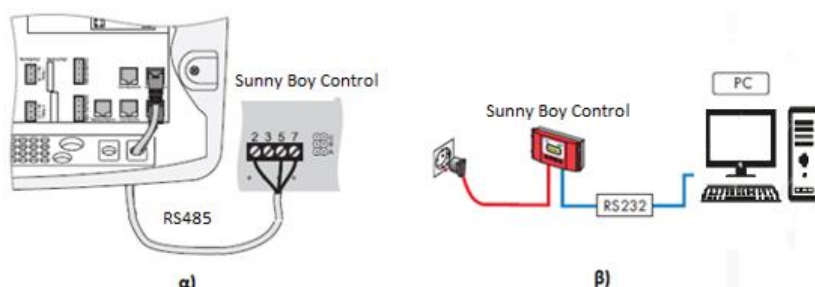
**Διάγραμμα 6.3: Λειτουργία φόρτισης συσσωρευτών από το Sunny Island 5048**

Το I συμβολίζει τη φάση σταθερού ρεύματος (φάση I). Σε αυτό το επίπεδο η φόρτιση περιορίζεται από το μέγιστο καθορισμένο ρεύμα συσσωρευτή, το ονομαστικό ρεύμα δικτύου ή το μέγιστο ρεύμα φόρτισης AC του Sunny Island 5048. Ο περιορισμός γίνεται πάντοτε στην τιμή που φτάνει πρώτη στα όρια. Κατά τη διάρκεια της φάσης αυτής αυξάνεται η τάση του συσσωρευτή όσο αυξάνεται η κατάσταση φόρτισης του συσσωρευτή.

Εάν η τάση συσσωρευτή φτάσει σε μία επιλεγμένη τιμή αρχίζει η φάση ρύθμισης σταθερής τάσης  $U_0$  (φάση απορρόφησης). Στη βαθμίδα αυτή ρυθμίζεται η τάση συσσωρευτή σε μία σταθερή τιμή, κάτι που διαφαίνεται στο συνεχώς μειούμενο ρεύμα συσσωρευτή. Για αυτή τη φάση φόρτισης ο μετατροπέας Sunny Island 5048 διαλέγει αυτόματα μία από τις τρεις επιλογές φόρτισης (Boost, Full, Equalizing). Ο υπολειπόμενος χρόνος φόρτισης αυτής της φάσης και η τρέχουσα διαδικασία εμφανίζονται στην οθόνη.

Μετά την ολοκλήρωση αυτής της φάσης συνεχούς τάσης, ο μετατροπέας γυρίζει στην επονομαζόμενη φόρτιση συντήρησης (Float Charge), η οποία εκτελείται επίσης ως φόρτιση σταθερής τάσης, αλλά με σημαντικά μειωμένη τάση φόρτισης. Η φόρτιση συντήρησης ή αλλιώς διατήρησης, έχει ως στόχο να διατηρεί το συσσωρευτή σε πλήρως φορτισμένη κατάσταση, χωρίς να προκαλείται πρόωρη γήρανση από υπερφόρτιση. Ο μετατροπέας παραμένει σε αυτήν τη φάση έως ότου, είτε η ονομαστική χωρητικότητα μειωθεί περισσότερο από 30% (αθροίζονται όλες οι αποφορτίσεις), είτε η κατάσταση φόρτισης μειωθεί περισσότερο από 70%. Από τη φόρτιση συντήρησης μπορεί ο μετατροπέας Sunny Island, όταν βρίσκεται σε δημόσιο δίκτυο, να γυρίσει σε λειτουργία Silent Mode.

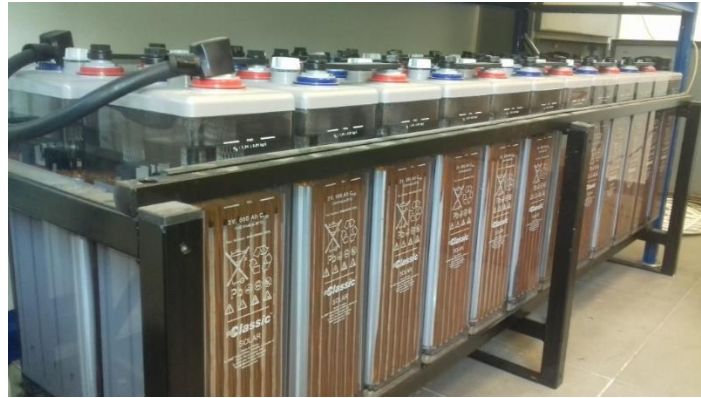
- Ο μετατροπέας Sunny Island 5048 συνδέεται με το Sunny Boy Control μέσω διεπαφής επικοινωνίας RS485 (Εικόνα 6.7α) και αυτό με τη σειρά του με τον ηλεκτρονικό υπολογιστή όπου χρησιμοποιείται το λειτουργικό Sunny Data Control μέσω διεπαφής RS232, όπως φαίνεται στην Εικόνα 6.7β:



Εικόνα 6.7: Σύνδεση α) Sunny Island 5048 με Sunny Boy Control και β) Sunny Boy Control με Η/Υ

### 6.2.3 Μονάδα Αποθήκευσης Ηλεκτρικής Ενέργειας

Ως μονάδα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας το μονοφασικό AC μικροδίκτυο χρησιμοποιεί 24 συσσωρευτές Μολύβδου – Οξέος κλειστού τύπου με υγρό ηλεκτρολύτη (FLA). Η μονάδα αποθήκευσης βρίσκεται στον ίδιο χώρο με το μετατροπέα Sunny Island 5048 και το Sunny Boy Control.



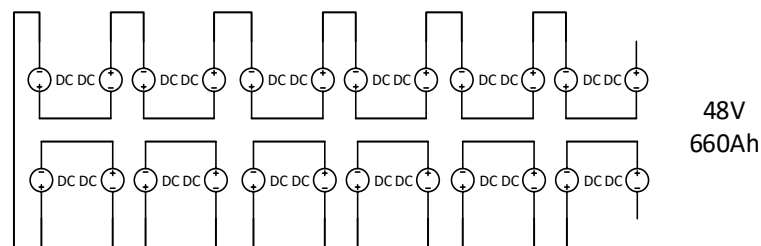
Εικόνα 6.8: Μονάδα αποθήκευσης συσσωρευτών Μολύβδου - Οξέος

Τα τεχνικά χαρακτηριστικά των συσσωρευτών παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.5:

Πίνακας 6.5: Χαρακτηριστικά συσσωρευτών

Συσσωρευτές	
Κατασκευαστής	GNB
Τύπος	Classic Solar FLA
Ονομαστική Τάση (V)	2 V
Ονομαστική Χωρητικότητα (C)	660 Ah
Ονομαστικός Ρυθμός Εκφόρτισης	C <sub>120</sub> – 1.85 V/cell στους 25°C
Κύκλοι Εκφόρτισης	<2800 – 60 % DOD – C <sub>10</sub> στους 20°C
Πλήθος Συσσωρευτών	24

Οι συσσωρευτές είναι συνδεδεμένοι σε σειρά, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 6.9, με αποτέλεσμα να αποδίδουν σε ονομαστικές τιμές συνολική τάση 48 VDC και χωρητικότητα 660 Ah για C<sub>120</sub> (5.5 A για 120 ώρες), δηλαδή 264 W για 120 ώρες.



Εικόνα 6.9: Συνδεσμολογία συσσωρευτών σε σειρά

## 6.2.4 Ηλεκτρονικό Φορτίο

Ως φορτίο χρησιμοποιήθηκε η ηλεκτρονική συσκευή ZSAC της εταιρίας H&H η οποία προσομοιάζει τις καταναλώσεις του μικροδικτύου.

Η συσκευή της σειράς ZSAC (Εικόνα 6.10) είναι κατάλληλη να χρησιμοποιηθεί ως φορτίο για πηγές συνεχούς ρεύματος, όπως τροφοδοτικά και συσσωρευτές, καθώς και για πηγές εναλλασσόμενου ρεύματος όπως μετασχηματιστές ή άλλες καταναλώσεις.



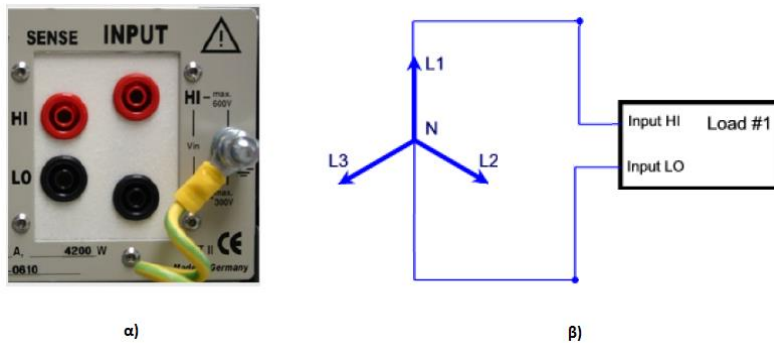
Εικόνα 6.10: Πρόσωση και πίσω όψη ηλεκτρονικού φορτίου ZSAC

Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του ηλεκτρονικού φορτίου παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.6:

Πίνακας 6.6: Χαρακτηριστικά ηλεκτρονικού φορτίου

Ηλεκτρονικό Φορτίο	
Κατασκευαστής	H&H
Τύπος	ZSAC 2826
Τάση Εισόδου ( $V_{AC}$ )	3 V – 260 V
Ρεύμα Εξόδου ( $I_{AC}$ )	0 A – 20 A
Αντίσταση	0.5 Ω – 600 Ω
Ισχύς Εξόδου ( $P_{AC}$ )	2800 W
Συχνότητα ( $f_{AC}$ )	40 Hz – 700 Hz

Το ηλεκτρονικό φορτίο τροφοδοτείται από το δημόσιο δίκτυο ενώ στην πίσω όψη του συνδέεται ο AC ζυγός που έχει δημιουργηθεί από το μετατροπέα όπως φαίνεται στην Εικόνα 6.11 α :



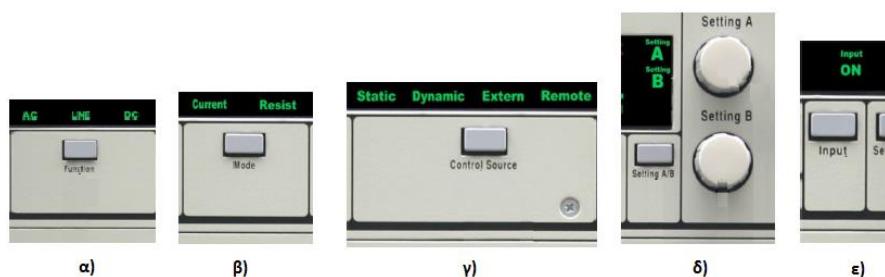
Εικόνα 6.11: α) Σημείο σύνδεσης μονοφασικού AC μικροδικτύου και ηλεκτρονικού φορτίου  
β) Τρόπος σύνδεσης μονοφασικού AC μικροδικτύου και ηλεκτρονικού φορτίου

Οι ακροδέκτες με την ένδειξη «Input» είναι οι εισόδοι που συνδέεται ο AC ζυγός του μικροδικτύου. Οι ακροδέκτες με την ένδειξη «Sense» είναι μετρητές εισόδου για τη μέτρηση της τάσης. Στην περίπτωση του πειράματος δε συνδέθηκαν οι ακροδέκτες «Sense» με αποτέλεσμα η τάση να δίνεται αυτόματα από τους ακροδέκτες εισόδου «Input». Οι ακροδέκτες με σήμανση «LO» συνδέονται με την τάση που βρίσκεται πιο κοντά στο δυναμικό γείωσης (για παράδειγμα, ο ουδέτερος αγωγός N), ενώ οι ακροδέκτες με σήμανση «HI» συνδέονται με υψηλότερη τάση αναφορικά με το δυναμικό γείωσης (για παράδειγμα τη φάση L1) όπως φαίνεται στην Εικόνα 6.11β.

Εφόσον τεθεί σε λειτουργία η συσκευή, επιλέγεται το button «Function» στη θέση «AC» (Εικόνα 6.12α) για να συγχρονιστεί η συσκευή με όλες τις εφαρμοζόμενες τάσεις εισόδου στην περιοχή συχνοτήτων μεταξύ 40 Hz και περίπου 700 Hz. Υπάρχει κάποιος χρόνος καθυστέρησης για τη διαδικασία συγχρονισμού, ανάλογα με τη συχνότητα εισόδου. Η διαδικασία συγχρονισμού μπορεί να διαρκέσει έως και 500 ms όταν η συχνότητα εισόδου μεταβάλλεται με ταχείες διακυμάνσεις ή μετά τη σύνδεση του σήματος.

Στη συνέχεια, ρυθμίζεται το ρεύμα φορτίου επιλέγοντας το button «Mode» στη θέση «Current» (Εικόνα 6.12β). Η ρύθμιση του ρεύματος είναι ανεξάρτητη από την τάση εισόδου. Οι αλλαγές στην τάση εισόδου δεν έχουν καμία επίδραση στο ρεύμα φορτίου. Η τρέχουσα κυματομορφή που παράγεται από τη συσκευή είναι ένα καθαρό ημιτονοειδές κύμα, ακόμη και όταν η τάση εισόδου είναι διαφορετική από το ημιτονοειδές κύμα.

Με την επιλογή του button «Control Source» στη θέση «Static» (Εικόνα 6.12γ) γίνεται εφικτός ο έλεγχος του ρεύματος του φορτίου από τα ποτενσιόμετρα Α ή Β, ανάλογα σε ποια θέση βρίσκεται το button «Setting A/B» (Εικόνα 6.12δ). Το φορτίο μπορεί να ενεργοποιηθεί ή όχι από το button «Input» (Εικόνα 6.12ε). Όταν η ένδειξη «Input ON» εμφανίζεται στην οθόνη τότε το φορτίο είναι ενεργοποιημένο ενώ όταν είναι απενεργοποιημένο, η εμφανίζεται η ένδειξη «Input OFF» στην οθόνη.



**Εικόνα 6.12: Βασικές επιλογές ρύθμισης λειτουργίας ηλεκτρονικού φορτίου ZSAC**

Επιλέγοντας τις παραπάνω λειτουργίες εμφανίζεται αριστερά της κεντρικής οθόνης (Εικόνα 6.13) η τάση λειτουργίας του μικροδίκτυου (κατά την πειραματική διαδικασία 230 V) και δεξιά της οθόνης το ρεύμα του φορτίου το οποίο ρυθμίζεται από τα 0 A έως τα 20 A από τα ποτενσιόμετρα Α ή Β. Έτσι, για παράδειγμα για την επιβολή φορτίου 2 kW πρέπει να ρυθμιστεί από το ποτενσιόμετρο το ρεύμα στα 8.7 A ενώ η τάση λειτουργίας βρίσκεται στα 230 V.



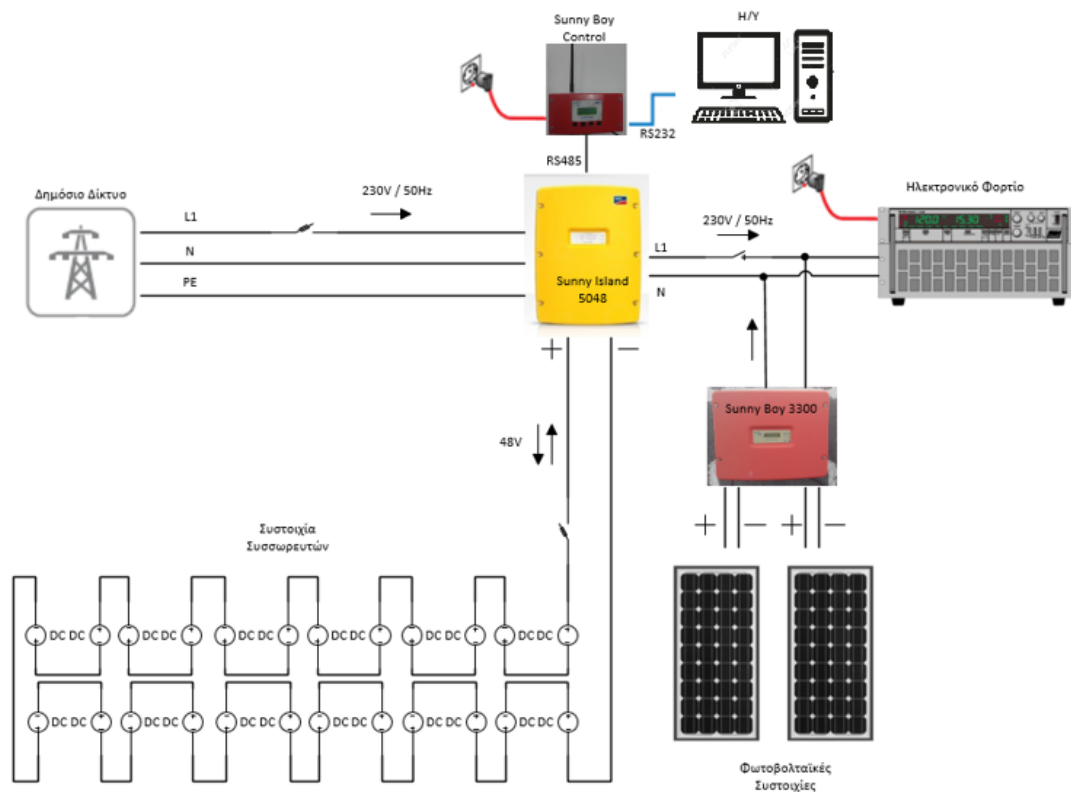
**Εικόνα 6.13: Κεντρική οθόνη ηλεκτρονικού φορτίου ZSAC**

## 6.2.5 Διάταξη Μονοφασικού AC Μικροδίκτυου

Ο μετατροπέας Sunny Island 5048 από την AC πλευρά είναι συνδεδεμένος: (α) με το δημόσιο δίκτυο (τάση 230 V, συχνότητα 50 Hz) το οποίο λειτουργεί ως εναλλακτική πηγή ενέργειας (β) με τις καταναλώσεις (ηλεκτρονικό φορτίο) και το Sunny Boy 3300 (από τον AC ζυγό που δημιουργεί τάσεως 230 V, συχνότητας 50 Hz). Από την DC πλευρά, ο μετατροπέας,

είναι συνδεδεμένος με τη συστοιχία των συσσωρευτών έχοντας δημιουργήσει έναν ζυγό 48 V, ενώ παράλληλα παρέχει δεδομένα στο Sunny Boy Control, το οποίο με τη σειρά του επικοινωνεί με τον Η/Υ.

Στην Εικόνα 6.14 παρουσιάζεται αναλυτικά η διάταξη του μονοφασικού AC μικροδικτύου:

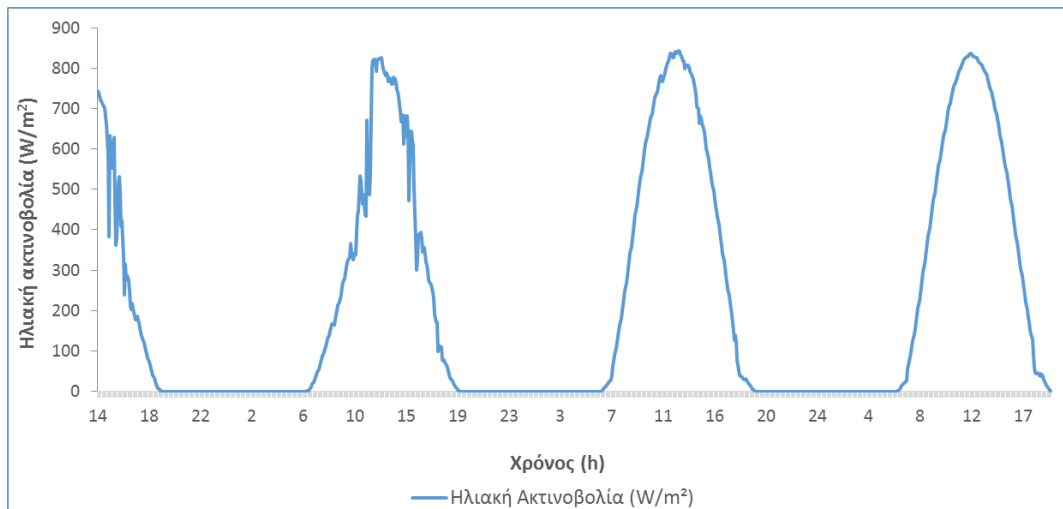


Εικόνα 6.14: Διάταξη μονοφασικού AC μικροδικτύου

## 6.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

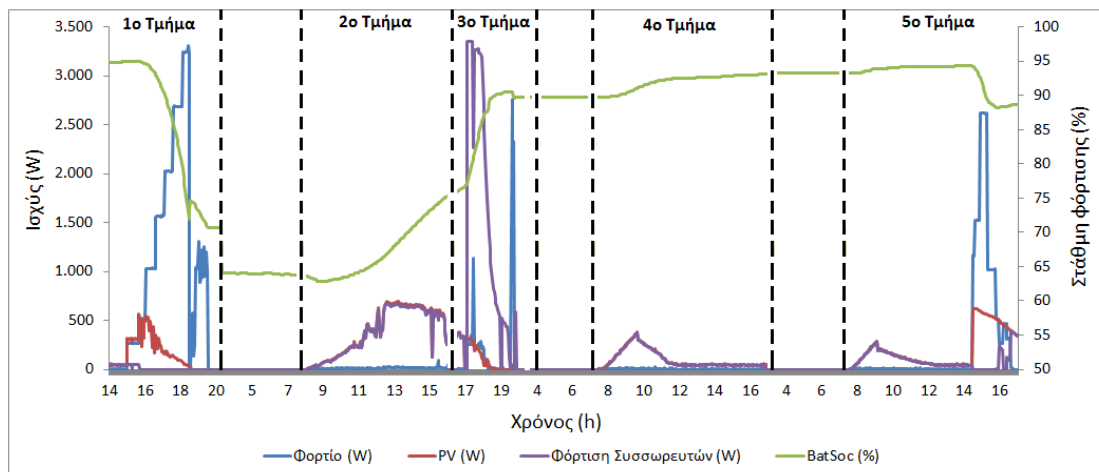
Όπως έχει αναφερθεί, σκοπός της πειραματικής διαδικασίας είναι η ανάλυση της συμπεριφοράς του μικροδικτύου τόσο κατά την αυτόνομη λειτουργία του όσο και κατά τη διασύνδεσή του με το δημόσιο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας.

Στο Διάγραμμα 6.4 παρουσιάζεται η ηλιακή ακτινοβολία κατά τη διάρκεια τεσσάρων ημερών στις οποίες πραγματοποιήθηκε το πείραμα. Οι τιμές αυτές ελήφθησαν από πυρανόμετρο το οποίο ήταν κατάλληλα τοποθετημένο δίπλα στις φωτοβολταϊκές συστοιχίες (με ίδιο προσανατολισμό και κλίση).



**Διάγραμμα 6.4: Η ηλιακή ακτινοβολία κατά τη λειτουργία του μικροδικτύου**

Το Διάγραμμα 6.5 απεικονίζει τη συνολική λειτουργία του μικροδικτύου κατά τη διεξαγωγή του πειράματος και περιλαμβάνει τόσο την αυτόνομη λειτουργία όσο και τη διασυνδεδεμένη. Το Διάγραμμα 6.5 χωρίζεται σε πέντε τμήματα τα οποία θα αναλυθούν ξεχωριστά το καθένα για ευκολότερη παρουσίαση των αποτελεσμάτων. Τα τμήματα 1,2,4 και 5 αναφέρονται στην αυτόνομη λειτουργία ενώ το τμήμα 3 στη διασυνδεδεμένη.



**Διάγραμμα 6.5: Συνολική απεικόνιση λειτουργίας μικροδικτύου**

Σε αυτό το σημείο μπορεί να γίνει μια βασική παρατήρηση σε σχέση με τον πραγματικό βαθμό απόδοσης των φωτοβολταϊκών συστοιχιών. Παρατηρήθηκε ότι τη χρονική στιγμή που οι φωτοβολταϊκές συστοιχίες εμφάνισαν τη μέγιστη ισχύ τους (2<sup>ο</sup> Τμήμα στις 12:48), η ηλιακή ακτινοβολία ήταν 785 W/m<sup>2</sup> με αποτέλεσμα ο βαθμός απόδοσης να είναι :

$$\eta_{\Sigma} = \frac{V_{max} * I_{max}}{P_{12:48} * S_{\Sigma}} = \frac{262 \text{ V} * 2.801 \text{ A}}{785 \text{ W/m}^2 * 13.01 \text{ m}^2} = 0.071 \text{ ή } 7.1 \%$$

Ο βαθμός απόδοσης είναι μειωμένος κατά 3.5 % από το θεωρητικό βαθμό που υπολογίστηκε στην Ενότητα 6.2.1. Το συγκεκριμένο γεγονός οφείλεται στη κακή συντήρηση των φωτοβολταϊκών πλαισίων.



Η ισχύς αιχμής που μπορούν να αποδώσουν οι φωτοβολταϊκές συστοιχίες σε πρότυπες συνθήκες ηλιακής ακτινοβολίας  $1 \text{ kW/m}^2$  είναι  $923.71 \text{ Wp}$ , δηλαδή μειωμένη απόδοση κατά  $46 \%$  σε σχέση με την αρχική τους απόδοση.

$$P_{m\Sigma} = \eta_{\Sigma} * P_{STC} * S_{\Sigma} = 0.071 * \frac{1000 \text{ W}}{\text{m}^2} * 13.01 \text{ m}^2 = 923.71 \text{ Wp}$$

Ο συντελεστής πλήρωσης των φωτοβολταϊκών συστοιχιών μειώθηκε στο  $0.54$  από  $0.73$ .

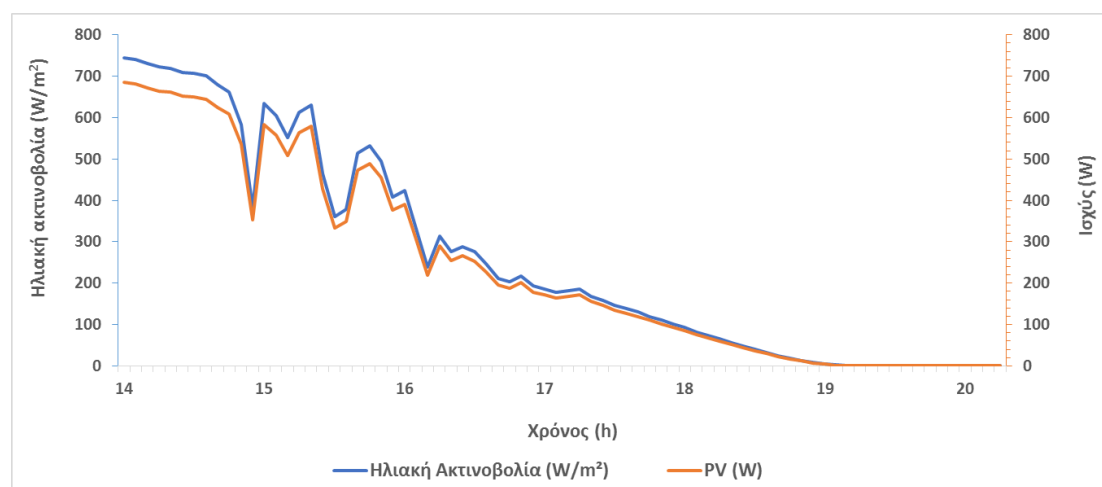
$$FF = \frac{V_{max} * I_{max}}{V_{OC} * I_{SC}} = \frac{262 \text{ V} * 2.801 \text{ A}}{390.6 \text{ V} * 3.45 \text{ A}} = 0.54 \text{ ή } 54\%$$

Η ανάλυση της συμπεριφοράς του μικροδικτύου γίνεται βάσει της επιβολής του φορτίου στις εξής περιπτώσεις :

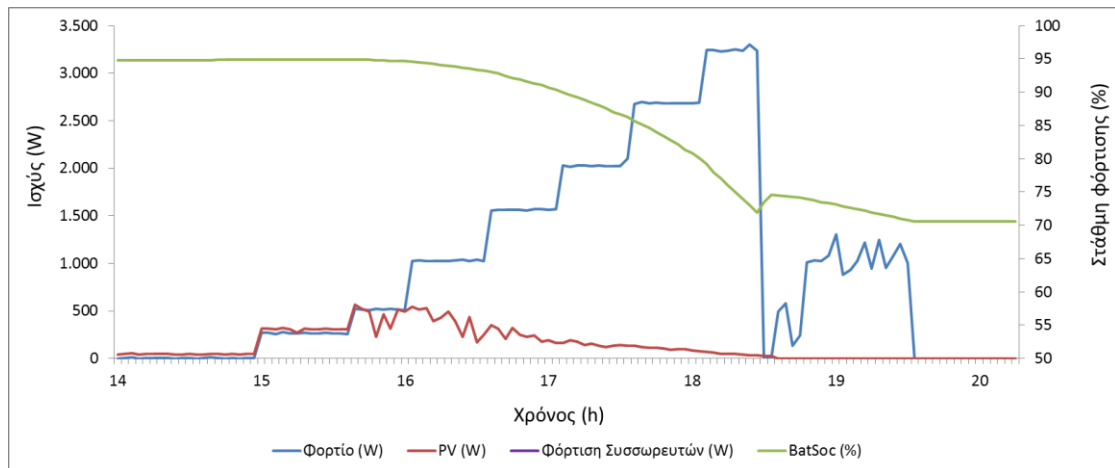
- Επιβολή φορτίου μεγαλύτερη της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας των φωτοβολταϊκών συστοιχιών.
- Επιβολή φορτίου μικρότερη της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας των φωτοβολταϊκών συστοιχιών.
- Επιβολή φορτίου ίση με την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας των φωτοβολταϊκών συστοιχιών.
- Τη μη επιβολή φορτίου κατά την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας των φωτοβολταϊκών συστοιχιών.

### 6.3.1 Ανάλυση 1<sup>ου</sup> Τμήματος Λειτουργίας Μικροδικτύου

Στο Διάγραμμα 6.6 παρουσιάζεται η ηλιακή ακτινοβολία κατά το 1<sup>ο</sup> τμήμα ανάλυσης καθώς και η παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος των φωτοβολταϊκών συστοιχιών κατά την αντίστοιχη ηλιακή ακτινοβολία, στην περίπτωση που εφαρμοζόταν κάποιο φορτίο. Στο Διάγραμμα 6.7 αποτυπώνεται η συμπεριφορά του μικροδικτύου κατά την ίδια χρονική περίοδο και συγκεκριμένα από τις 14:00 έως τις 20:00.



**Διάγραμμα 6.6: Ηλιακή ακτινοβολία και παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος των φωτοβολταϊκών συστοιχιών κατά το 1<sup>ο</sup> τμήμα ανάλυσης**



**Διάγραμμα 6.7: Λειτουργία μικροδικτύου κατά το 1<sup>ο</sup> Τμήμα ανάλυσης**

Το Διάγραμμα 6.7 μπορεί να χωριστεί σε τρία μέρη ανάλογα με την επιβολή του φορτίου, την παραγωγή ισχύος των φωτοβολταϊκών συστοιχιών και την εκφόρτιση των συσσωρευτών :

- Στο πρώτο μέρος (από τις 14:00 έως τις 15:00) φαίνεται ότι λόγω της μη ύπαρξης φορτίου, οι φωτοβολταϊκές συστοιχίες δεν παράγουν ηλεκτρική ενέργεια παρόλο που υπάρχει υψηλή ηλιακή ακτινοβολία όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 6.6. Επιπλέον, η κατάσταση φόρτισης των συσσωρευτών (BatSoc) βρίσκεται στο 95 % και δε μεταβάλλεται καθώς δεν υπάρχει κάποια κατανάλωση προς τροφοδοσία.
- Στο δεύτερο μέρος (από τις 15:00 έως τις 16:00), επιβάλλεται φορτίο 300 W και ακολούθως 500 W. Οι φωτοβολταϊκές συστοιχίες ανταποκρίνονται σε αυτή την ανάγκη και τροφοδοτούν την κατανάλωση. Το BatSoc των συσσωρευτών δε μεταβάλλεται καθώς η ενέργεια που παρέχεται από τις φωτοβολταϊκές συστοιχίες καλύπτει όλο το φορτίο. Η ηλιακή ακτινοβολία αυξομειώνεται σε αυτό το σημείο, προφανώς λόγω του ότι κάποιο σύννεφο εμποδίζει τη διέλευση των ακτίνων του ηλίου προς τις φωτοβολταϊκές συστοιχίες. Αυτή η αυξομείωση δεν επηρεάζει την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας για όσο η ισχύς του φορτίου είναι ίση με 300 W. Από τη στιγμή όμως που η ισχύς του φορτίου αυξάνει στα 500 W εμφανίζονται οι αυξομειώσεις της ηλιακής ακτινοβολίας. Πιο αναλυτικά, από το Διάγραμμα 6.6 φαίνεται ότι κατά τη χρονική περίοδο επιβολής φορτίου 300 W παρουσιάζεται τοπικό ελάχιστο στις 15:30, με ηλιακή ακτινοβολία  $361 \text{ W/m}^2$  και παραγωγή ισχύος από τις φωτοβολταϊκές συστοιχίες 333 Wp, δηλαδή ισχύς μεγαλύτερη από των 300 W του φορτίου. Σύμφωνα με την Εξίσωση 25 (Ενότητα 2.5.5):

$$P_{m\Sigma} = \eta_{\Sigma} * P_{HA-15:00} * S_{\Sigma} = 0.071 * \frac{361 \text{ W}}{\text{m}^2} * 13.01 \text{ m}^2 = 333 \text{ Wp}$$

Όταν όμως το φορτίο αυξάνει στα 500 W, οι φωτοβολταϊκές συστοιχίες φαίνεται να αποδίδουν το μέγιστο της ισχύς τους με αποτέλεσμα να επηρεάζονται από τις αυξομειώσεις της ηλιακής ακτινοβολίας.

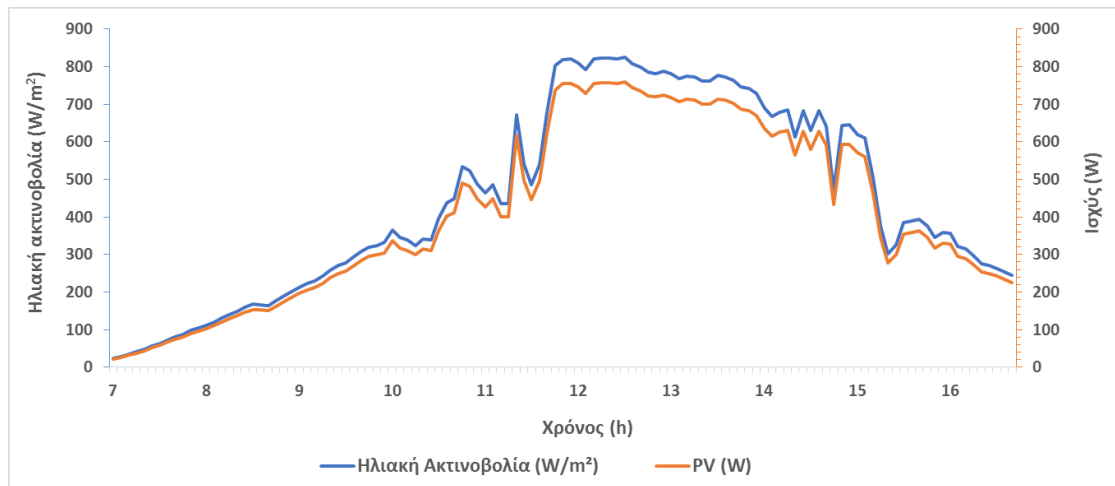
- Στο τρίτο μέρος (από τις 16:00 έως τις 20:00) επιβάλλεται φορτίο μεγαλύτερο των 500 W και έως τα 3200 W. Αυτή η κατανάλωση δεν μπορεί καλυφθεί από την παραγωγή ισχύος της φωτοβολταϊκής συστοιχίας με αποτέλεσμα την υπόλοιπη ισχύ

να την παρέχουν οι συσσωρευτές. Έτσι για παράδειγμα, όταν επιβάλλεται φορτίο 1000 W, τα 500 W περίπου τα παρέχει η φωτοβολταϊκή συστοιχία και τα υπόλοιπα 500 W οι συσσωρευτές. Σε αυτή τη φάση εμφανίζεται μια μικρή μείωση του BatSoc των συσσωρευτών κατά 2 % περίπου. Όσο αυξάνεται η ανάγκη για τροφοδοσία του φορτίου τόσο μειώνεται το BatSoc. Αυτό συμβαίνει καθώς ταυτόχρονα αρχίζει να μειώνεται η ηλιακή ακτινοβολία, με αποτέλεσμα να μειώνεται και η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τη φωτοβολταϊκή συστοιχία. Μετά από αυτή τη διαδικασία η στάθμη φόρτισης των συσσωρευτών καταλήγει στο 72 %. Τη στιγμή αυτή (περίπου στις 18:30), με την απότομη αποσύνδεση οποιουδήποτε φορτίου εμφανίζεται μια απότομη αύξηση στη στάθμη φόρτισης κατά 2.5 % χωρίς προφανή λόγο. Αυτή η αύξηση είναι ένα χαρακτηριστικό φαινόμενο των συσσωρευτών Μολύβδου – Οξέος το οποίο συμβαίνει πάντα μετά τη διακοπή της διαδικασίας εκφόρτισής τους. Μετά τις 18:30 επιβάλλεται φορτίο το οποίο αυξομειώνεται από τα 500 W έως τα 1300 W όπου παρατηρείται σχετικά γραμμική μείωση του BatSoc ενώ στις 19:30 σταματά οποιοδήποτε φορτίο και η στάθμη φόρτισης οριστικοποιείται στα 70.6 %.

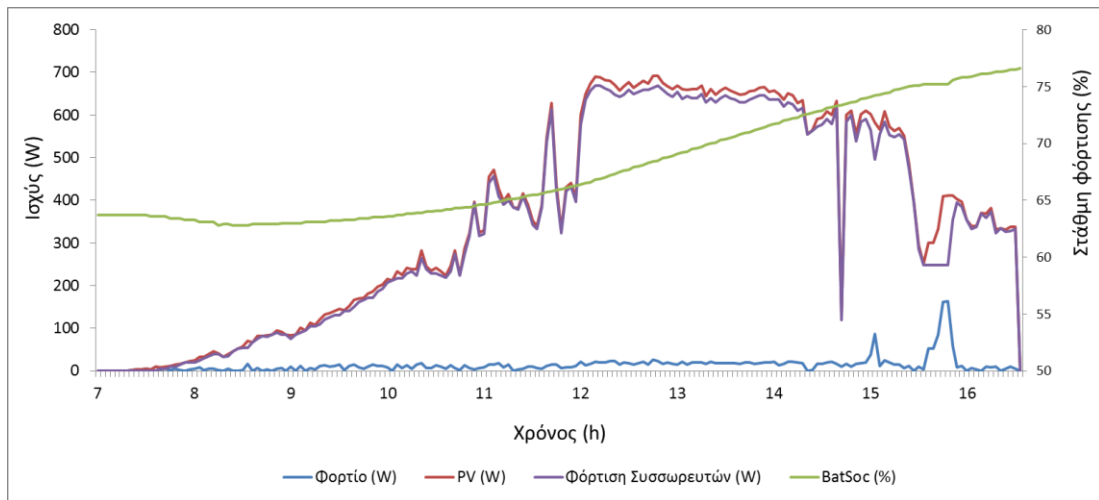
### 6.3.2 Ανάλυση 2<sup>ου</sup> Τμήματος Λειτουργίας Μικροδικτύου

Στο Διάγραμμα 6.8 παρουσιάζεται η ηλιακή ακτινοβολία κατά το 2<sup>ο</sup> τμήμα ανάλυσης του μικροδικτύου καθώς και η παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος των φωτοβολταϊκών συστοιχιών στην αντίστοιχη ηλιακή ακτινοβολία.

Στο Διάγραμμα 6.9 παρουσιάζεται η αυτόνομη λειτουργία του μικροδικτύου κατά τη διαδικασία φόρτισης των συσσωρευτών μέσω των φωτοβολταϊκών συστοιχιών χωρίς την επιβολή φορτίου από τις 7:00 έως τις 16:40.



Διάγραμμα 6.8: Ηλιακή ακτινοβολία και παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος των φωτοβολταϊκών συστοιχιών κατά το 2<sup>ο</sup> τμήμα ανάλυσης



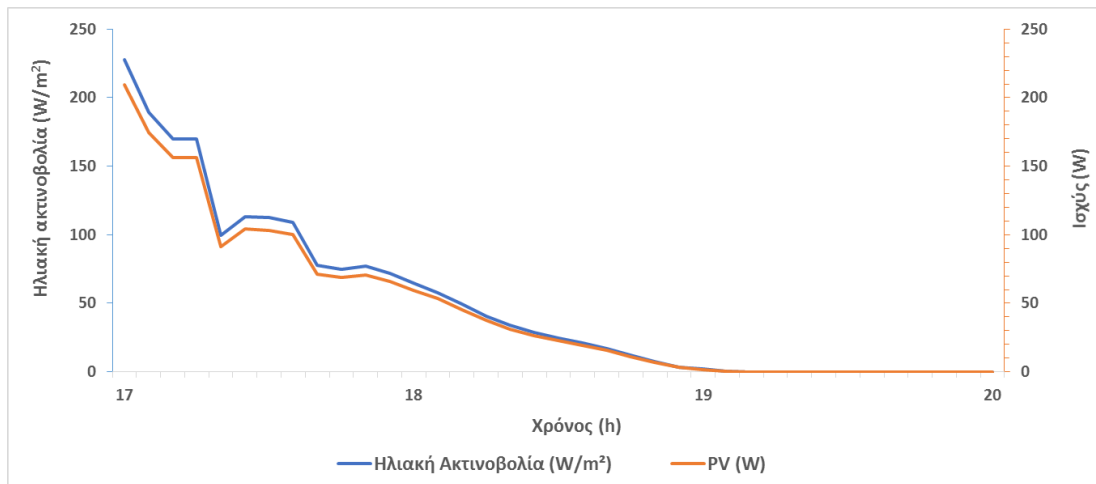
**Διάγραμμα 6.9: Λειτουργία μικροδικτύου κατά το 2<sup>ο</sup> Τμήμα ανάλυσης**

Όπως αναφέρθηκε και στην Ενότητα 6.2.2, ο μετατροπέας Sunny Island 5048 διαθέτει ρύθμιση φόρτισης συσσωρευτών τριών βαθμίδων I<sub>UoU</sub>. Στο Διάγραμμα 6.9 φαίνεται η φόρτιση κατά τη πρώτη βαθμίδα λειτουργίας τύπου I, όπου οι συσσωρευτές φορτίζονται με το μέγιστο της έντασης του ρεύματος που μπορούν να απορροφήσουν. Παράλληλα με την αύξηση της στάθμης φόρτισης του συσσωρευτή αυξάνεται και η τάση του συσσωρευτή (πιο αναλυτικά παρουσιάζεται στην Ενότητα 6.3.7). Εφόσον οι συσσωρευτές φορτίζονται με το μέγιστο της έντασης του ρεύματος που μπορούν να απορροφήσουν, αναγκάζουν τις φωτοβολταϊκές συστοιχίες να παράγουν το μέγιστο της ισχύος που μπορούν να αποδώσουν, με αποτέλεσμα αυτές να ακολουθούν τις αυξομειώσεις της ηλιακής ακτινοβολίας.

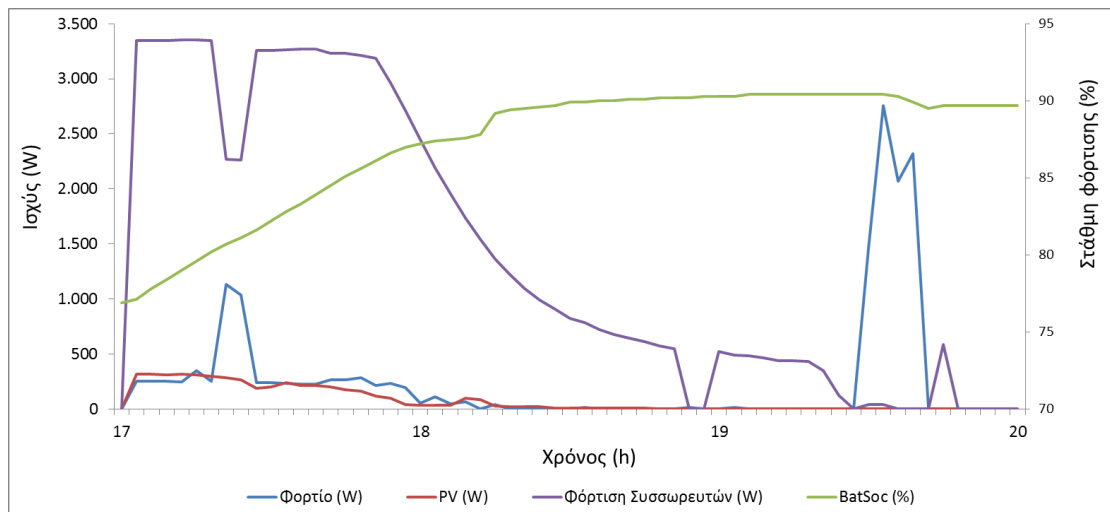
Ένα χαρακτηριστικό της λειτουργίας του μικροδικτύου, το οποίο εμφανίστηκε και στο 1<sup>ο</sup> τμήμα ανάλυσης, φαίνεται λίγο πριν τις 16:00 όπου επιβάλλεται ένα μικρό φορτίο των 160 W. Η φωτοβολταϊκή συστοιχία εκείνη τη στιγμή παράγει 410 W τροφοδοτώντας το φορτίο ενώ ταυτόχρονα φορτίζει τους συσσωρευτές με αποτέλεσμα να παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 6.9 σταθερή η ισχύς φόρτισης των συσσωρευτών. Στη συνέχεια διακόπτεται η επιβολή του φορτίου και όλη η ισχύς από την παραγωγή των φωτοβολταϊκών συστοιχιών παρέχεται στη φόρτιση των συσσωρευτών όπως γινόταν και προηγουμένως. Η στάθμη φόρτισης σε αυτό το τμήμα ανάλυσης αυξήθηκε από 63 % σε 76 %.

### 6.3.3 Ανάλυση 3<sup>ου</sup> Τμήματος Λειτουργίας Μικροδικτύου

Στο Διάγραμμα 6.10 παρουσιάζεται η ηλιακή ακτινοβολία κατά το 3<sup>ο</sup> τμήμα ανάλυσης καθώς και η παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος των φωτοβολταϊκών συστοιχιών στην αντίστοιχη ηλιακή ακτινοβολία. Στο Διάγραμμα 6.11 παρουσιάζεται η συμπεριφορά του μικροδικτύου κατά τη διασύνδεσή του με το δημόσιο δίκτυο.



**Διάγραμμα 6.10: Ηλιακή ακτινοβολία και παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος των φωτοβολταϊκών συστοιχιών κατά το 3<sup>ο</sup> τμήμα ανάλυσης**



**Διάγραμμα 6.11: Λειτουργία μικροδικτύου κατά το 3<sup>ο</sup> Τμήμα ανάλυσης**

Αυτό το τμήμα ανάλυσης αποτελεί συνέχεια του 2<sup>ου</sup> τμήματος όπου το μικροδίκτυο λειτουργούσε αυτόνομα. Για την καλύτερη ανάλυσή του μπορεί να χωριστεί σε δυο μέρη ανάλογα με τον τρόπο φόρτισης των συσσωρευτών:

- Στο πρώτο μέρος (από τις 17:00 έως τις 17:40 περίπου) το μικροδίκτυο συνδέεται στο δημόσιο δίκτυο με αποτέλεσμα η τάση και η συχνότητα του αυτόνομου δικτύου να είναι ίδιες με την τάση και τη συχνότητα του δημόσιου δικτύου. Ταυτόχρονα με τη διασύνδεση στο δημόσιο δίκτυο υπάρχει και μικρή παραγωγή ισχύος από τις φωτοβολταϊκές συστοιχίες ενώ παράλληλα επιβάλλεται φορτίο αντίστοιχης ισχύος με την παραγωγή των συστοιχιών. Η τροφοδοσία του φορτίου όπως και η φόρτιση των συσσωρευτών γίνεται και από το δημόσιο δίκτυο και από τις φωτοβολταϊκές συστοιχίες. Οι συσσωρευτές στο 2<sup>ο</sup> τμήμα ανάλυσης είχαν τη δυνατότητα να φορτιστούν με αρκετά υψηλότερο ρεύμα αλλά αυτό δε γίνεται καθώς οι φωτοβολταϊκές συστοιχίες δεν μπορούν να το αποδώσουν. Σε αυτό το τμήμα της ανάλυσης όμως, όπου πραγματοποιείται σύνδεση στο άπειρο ΣΗΕ, οι συσσωρευτές δέχονται σχεδόν 4.5 φορές μεγαλύτερη ένταση ρεύματος ενώ η τάση τους έχει

αυξηθεί κατά 9 V απ' ότι προηγουμένως, στην ίδια πάντα βαθμίδα φόρτισης τύπου I. Στις 17:20 περίπου αυξάνεται το φορτίο στο 1 kW ενώ υπάρχει αντίστοιχη πτώση ισχύος στη φόρτιση των συσσωρευτών. Αυτό συμβαίνει γιατί ο μετατροπέας Sunny Island 5048 έχει ρυθμιστεί ώστε να μην παρέχει ισχύ μεγαλύτερη των 3500 W, με αποτέλεσμα να μη μπορεί να τροφοδοτήσει ταυτόχρονα και το φορτίο και τους συσσωρευτές στο ίδιο επίπεδο με πριν. Το BatSoc των συσσωρευτών έχει αυξηθεί σε αυτό το χρονικό διάστημα κατά 10 %, από το 76 % στο 86 %.

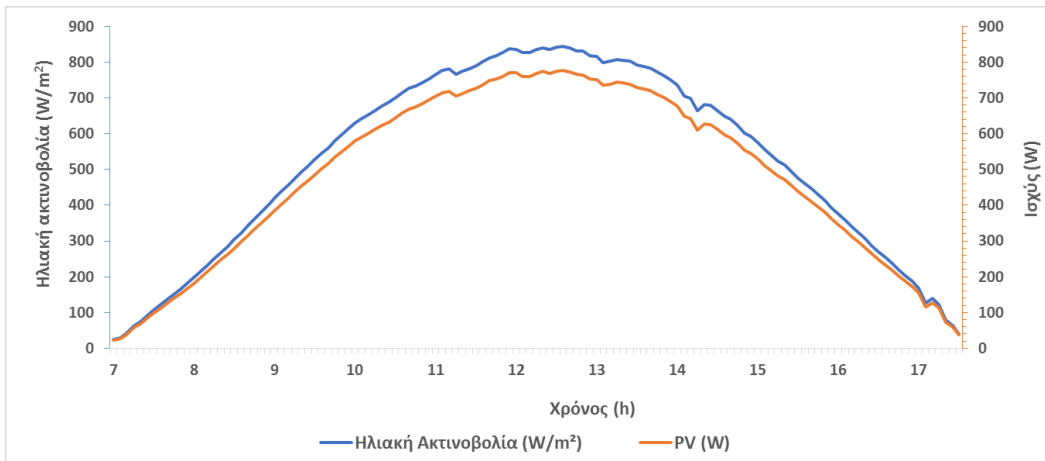
- Στο δεύτερο μέρος (από τις 17:40 έως τις 19:45) παρουσιάζεται μια εκθετική μείωση στην ισχύ φόρτισης των συσσωρευτών λόγω του ότι ο μετατροπέας αλλάζει βαθμίδα φόρτισης καθώς μεταβαίνει στη φάση U<sub>0</sub>, δηλαδή στη φάση απορρόφησης. Σε αυτή τη φάση η τάση των συσσωρευτών παραμένει σταθερή ενώ υπάρχει συνεχώς μειούμενη ένταση του ρεύματος. Μετά τις 18:30 περίπου σταματά και η παραγωγή ισχύος από τις φωτοβολταϊκές συστοιχίες αλλά και η επιβολή φορτίου. Αυτό δεν επηρεάζει τη διαδικασία φόρτισης των συσσωρευτών παρόλο που φαίνεται μια απότομη αύξηση 2 ποσοστιαίων μονάδων στη στάθμη φόρτισης. Η αύξηση αυτή οφείλεται στη διόρθωση του βαθμού ακρίβειας της υπολογισμένης κατάστασης των συσσωρευτών. Μέχρι εκείνη τη στιγμή υπήρχε ένα σφάλμα 20 % στον υπολογισμό της στάθμης φόρτισης των συσσωρευτών. Καθώς βελτιωνόταν το επίπεδο φόρτισης των συσσωρευτών αυτό το σφάλμα μειώθηκε στο 8 %, με αποτέλεσμα αυτήν την απότομη αύξηση.

Από τις 18:45 έως και τις 19:45 αποσυνδέουμε και επανασυνδέουμε συνεχώς το μικροδίκτυο από το δημόσιο δίκτυο ώστε να παρατηρηθούν καλύτερα ορισμένα σημεία του συστήματος. Στις 18:45 σταματά η τροφοδοσία από το δημόσιο δίκτυο για λίγα λεπτά με αποτέλεσμα την παύση φόρτισης των συσσωρευτών. Στη συνέχεια γίνεται επανασύνδεση με το δημόσιο δίκτυο και επανέρχεται και η διαδικασία της φόρτισης των συσσωρευτών στη φάση U<sub>0</sub>. Λίγο πριν τις 19:30 η διαδικασία φόρτισης των συσσωρευτών αλλάζει ξανά βαθμίδα και μεταβαίνει στη φάση U, δηλαδή σε κατάσταση συντήρησης. Οι συσσωρευτές συνεχίζουν να φορτίζονται με αρκετά μικρότερη ένταση ρεύματος (από τα 7 A στο 1 A) και μειωμένη τάση φόρτισης (από τα 60 V στα 50 V). Στις 19:30 επιβάλλεται φορτίο 2.8 kW με αποτέλεσμα την τροφοδότηση αυτού του φορτίου από το δημόσιο δίκτυο χωρίς τη μεσολάβηση των συσσωρευτών. Στη συνέχεια γίνεται αποσύνδεση από το δημόσιο δίκτυο και το φορτίο μειώνεται στα 2.3 kW. Το φορτίο τροφοδοτείται αποκλειστικά από τους συσσωρευτές και γι' αυτό άλλωστε παρουσιάζεται μια πτώση 1.5 % στη στάθμη φόρτισής τους. Ακολούθως και για λίγα λεπτά σταματά οποιοδήποτε φορτίο και γίνεται επανασύνδεση στο δημόσιο δίκτυο με αποτέλεσμα την άμεση φόρτιση των συσσωρευτών σε φάση φόρτισης U<sub>0</sub>. Τέλος γίνεται ξανά αποσύνδεση από το δημόσιο δίκτυο και το μικροδίκτυο βρίσκεται στην αυτόνομη λειτουργία. Εάν παρέμενε το μικροδίκτυο σε διασύνδεση με το δημόσιο δίκτυο τότε θα είχε μεταβεί, μετά από ορισμένο χρόνο, στη φάση U, ενώ λίγο αργότερα θα είχε προχωρήσει στην τέταρτη βαθμίδα φόρτισης, τη φάση ηρεμίας.

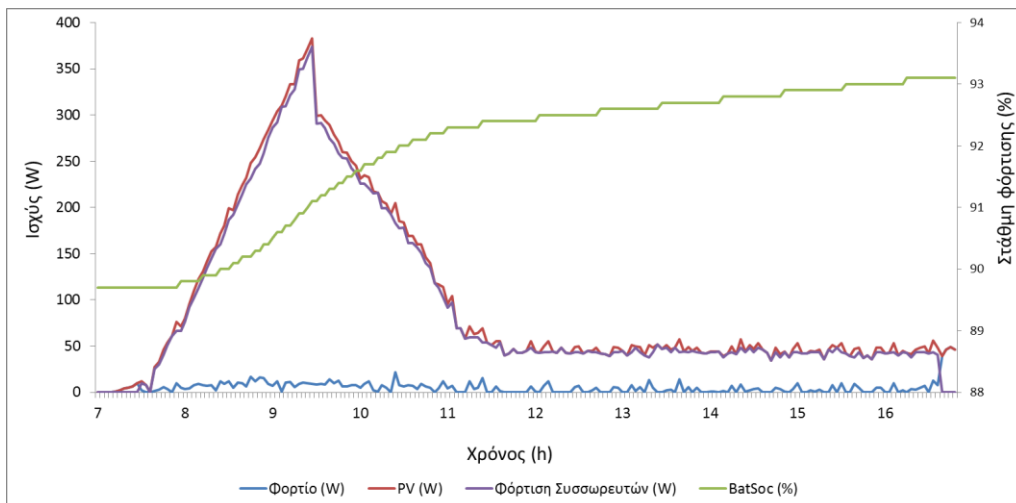
### 6.3.4 Ανάλυση 4<sup>ου</sup> Τμήματος Λειτουργίας Μικροδικτύου

Στο Διάγραμμα 6.12 παρουσιάζεται η ηλιακή ακτινοβολία κατά το 4<sup>ο</sup> τμήμα ανάλυσης καθώς και η παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος των φωτοβολταϊκών συστοιχιών στην αντίστοιχη ηλιακή ακτινοβολία.

Στο Διάγραμμα 6.13 παρουσιάζεται η αυτόνομη λειτουργία του μικροδικτύου κατά τη διαδικασία φόρτισης των συσσωρευτών μέσω των φωτοβολταϊκών συστοιχιών χωρίς την επιβολή φορτίου από τις 7:00 έως τις 16:40.



Διάγραμμα 6.12: Ηλιακή ακτινοβολία και παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος των φωτοβολταϊκών συστοιχιών κατά το 4<sup>ο</sup> τμήμα ανάλυσης



Διάγραμμα 6.13: Λειτουργία μικροδικτύου κατά το 4<sup>ο</sup> τμήμα ανάλυσης

Αυτό το τμήμα ανάλυσης έχει τα ίδια χαρακτηριστικά με το 2<sup>ο</sup> τμήμα, δηλαδή φόρτιση των συσσωρευτών από τις φωτοβολταϊκές συστοιχίες χωρίς επιβολή φορτίου, με τη διαφορά ότι βρίσκεται σε διαφορετική βαθμίδα φόρτισης. Όσο αυξάνει η ηλιακή ακτινοβολία τόσο αυξάνεται και η παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος από τις φωτοβολταϊκές συστοιχίες καθώς υπάρχει ανάγκη για φόρτιση των συσσωρευτών. Σε σχέση όμως με το Διάγραμμα 6.9, η παραγωγή ισχύος βρίσκεται περίπου στο μισό, παρόλο που η ηλιακή ακτινοβολία έχει αντίστοιχες τιμές. Αυτό οφείλεται στο ότι στο Διάγραμμα 6.9 η βαθμίδα φόρτισης

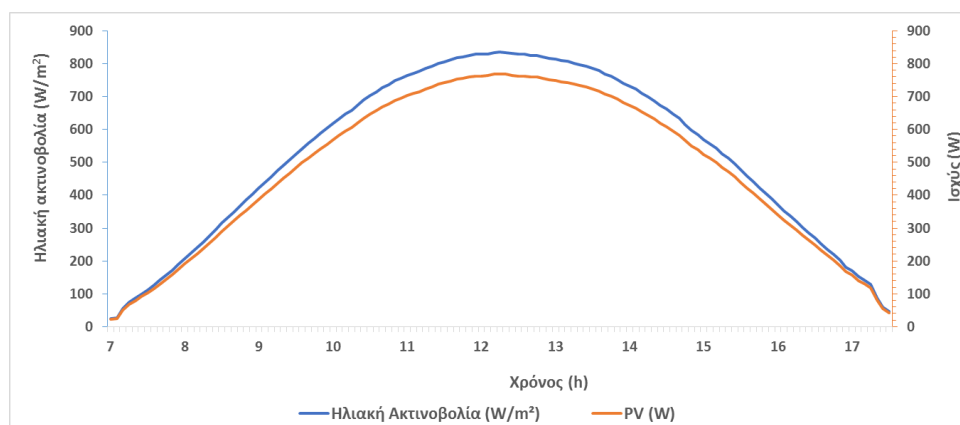
βρισκόταν στη φάση I και η φόρτιση γινόταν με το μέγιστο της έντασης του ρεύματος, ενώ τώρα η βαθμίδα φόρτισης βρίσκεται στη φάση U<sub>0</sub>, όπου η φόρτιση γίνεται με μειωμένη ένταση ρεύματος.

Ο μετατροπέας στις 9:30 αλλάζει τη βαθμίδα φόρτισης στη φάση U, δηλαδή σε κατάσταση συντήρησης όπου η φόρτιση γίνεται με ακόμα πιο μειωμένη ένταση ρεύματος. Οι φωτοβολταϊκές συστοιχίες ανταποκρίνονται σε αυτή τη μείωση και παράγουν τόση ισχύ όση χρειάζεται η κατανάλωση, δηλαδή όσο χρειάζονται οι συσσωρευτές.

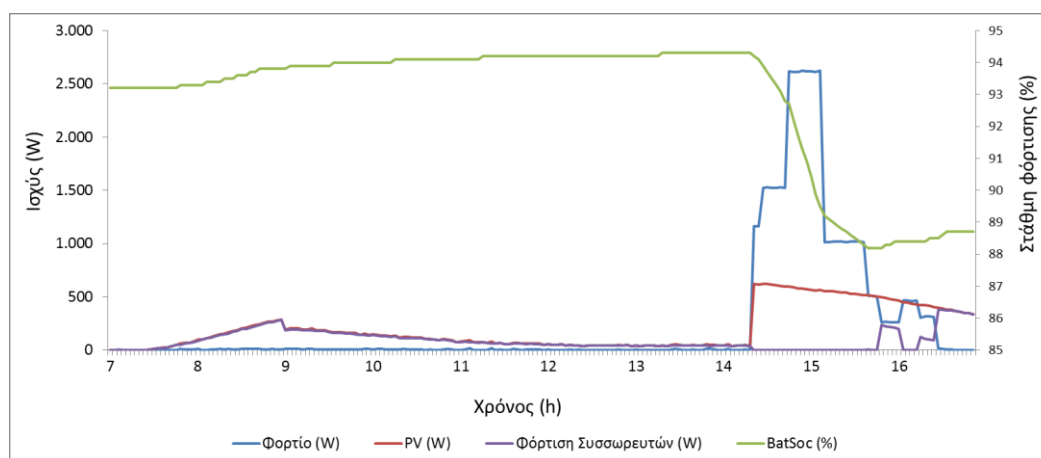
### 6.3.5 Ανάλυση 5<sup>ου</sup> Τμήματος Λειτουργίας Μικροδικτύου

Στο Διάγραμμα 6.14 παρουσιάζεται η ηλιακή ακτινοβολία κατά το 5<sup>ο</sup> τμήμα ανάλυσης καθώς και η παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος των φωτοβολταϊκών συστοιχιών στην αντίστοιχη ηλιακή ακτινοβολία.

Στο Διάγραμμα 6.15 παρουσιάζεται η συμπεριφορά του μικροδικτύου κατά τη διαδικασία φόρτισης των συσσωρευτών μέσω των φωτοβολταϊκών συστοιχιών στην αυτόνομη λειτουργία ενώ επιβάλλεται φορτίο μεγαλύτερης, ίσης και μικρότερης ισχύος από την παραγωγή των φωτοβολταϊκών συστοιχιών.



**Διάγραμμα 6.14: Ηλιακή ακτινοβολία και παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος των φωτοβολταϊκών συστοιχιών κατά το 5<sup>ο</sup> τμήμα ανάλυσης**

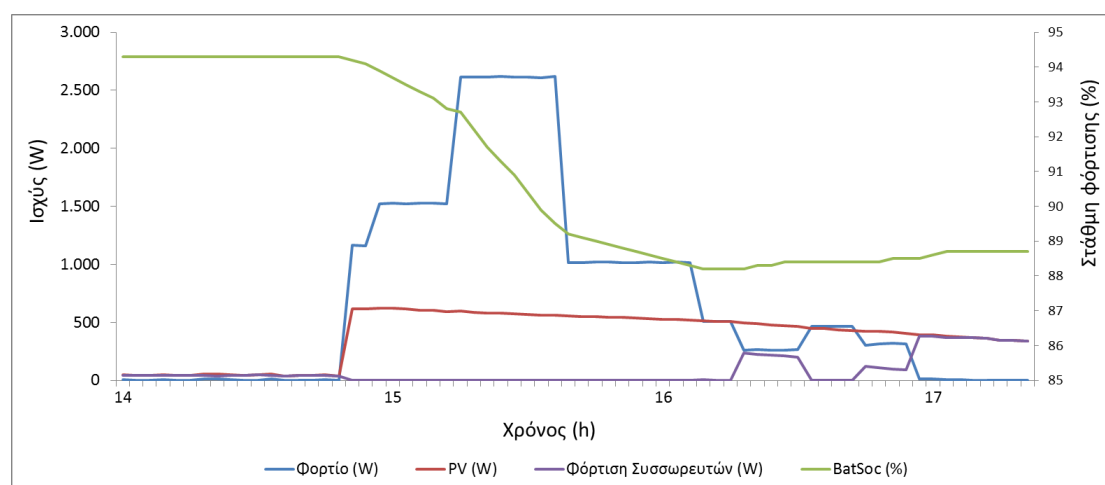


**Διάγραμμα 6.15: Λειτουργία μικροδικτύου κατά το 5<sup>ο</sup> Τμήμα ανάλυσης**



Όπως συνέβη και στο Διάγραμμα 6.13, έτσι και εδώ οι φωτοβολταϊκές συστοιχίες αρχίζουν να φορτίζουν τους συσσωρευτές στη βαθμίδα φόρτισης της φάσης U<sub>0</sub>. Λόγω του ότι η στάθμη φόρτισης είναι ήδη σε υψηλό σημείο (93 %) αυτό φαίνεται κάπως παράδοξο καθώς θα μπορούσε η φόρτιση να γίνεται στη φάση U, δηλαδή στη φάσης της συντήρησης. Όμως οι συσσωρευτές υγρού ηλεκτρολύτη FLA πρέπει να φτάνουν ανά τακτά χρονικά διαστήματα σε σημείο αεριοποίησης για την ομογενειοποίηση του ηλεκτρολύτη και αυτό μπορεί να συμβεί μόνο στη φάση U<sub>0</sub>. Εφόσον ολοκληρωθεί αυτή η διαδικασία, η φόρτιση μεταβαίνει στη φάση συντήρησης.

Στο Διάγραμμα 6.16 γίνεται εστίαση του 5<sup>ου</sup> Τμήματος ανάλυσης (από τις 14:00 έως τις 17:30) για καλύτερο εποπτικό έλεγχο και ανάλυση.



**Διάγραμμα 6.16: Εστίαση στην επιβολή φορτίου του 5<sup>ου</sup> Τμήματος ανάλυσης**

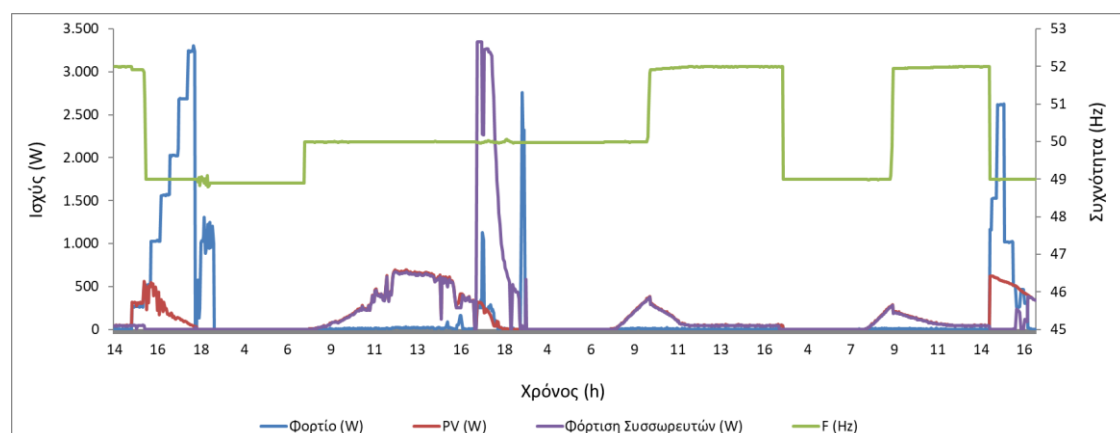
Καθώς οι συσσωρευτές βρίσκονται στη φάση της συντήρησης, επιβάλλεται σταδιακά φορτίο 1.5 kW, 2.6 kW και 1 kW με αποτέλεσμα οι φωτοβολταϊκές συστοιχίες να αποδίδουν το μέγιστο της ισχύος τους βάσει της επικρατούσας ηλιακής ακτινοβολίας. Η ισχύς αυτή όμως δεν είναι αρκετή για να καλύψει τη ζήτηση οπότε η υπόλοιπη ισχύς δίδεται από τους συσσωρευτές με τη στάθμη φόρτισης των συσσωρευτών να μειώνεται σε σύντομο χρονικό διάστημα από το 94 % στο 89 %.

Στη συνέχεια επιβάλλεται για 10 λεπτά φορτίο 500 W το οποίο είναι ίσο με την παραγωγή ισχύος των φωτοβολταϊκών συστοιχιών. Όπως φαίνεται καλύτερα και στο Διάγραμμα 6.16, το BatSoc των συσσωρευτών σταθεροποιείται, άρα οι συσσωρευτές ούτε αποδίδουν ισχύ αλλά ούτε και απορροφούν. Για τα επόμενα 15 λεπτά το φορτίο μειώνεται στα 250 W. Το αποτέλεσμα είναι οι φωτοβολταϊκές συστοιχίες να συνεχίζουν να αποδίδουν 500 W καθώς τροφοδοτούν τόσο το φορτίο όσο και τη φόρτιση των συσσωρευτών με ισχύ 250 W. Τα τελευταία 2 στάδια επαναλαμβάνονται με τα ίδια αποτελέσματα ώσπου σταματά εντελώς το φορτίο και αρχίζει πάλι να αυξάνει η στάθμη φόρτισης των συσσωρευτών.

### 6.3.6 Ανάλυση Συχνότητας

Όπως έχει αναφερθεί ο βασικός ρόλος του μετατροπέα είναι να ρυθμίζει την τάση και τη συχνότητα του μικροδικτύου. Στο Διάγραμμα 6.17 παρουσιάζεται η μεταβολή της

συχνότητας F σε σχέση με τις υπόλοιπες λειτουργίες του συστήματος καθ' όλη τη διάρκεια του πειράματος.



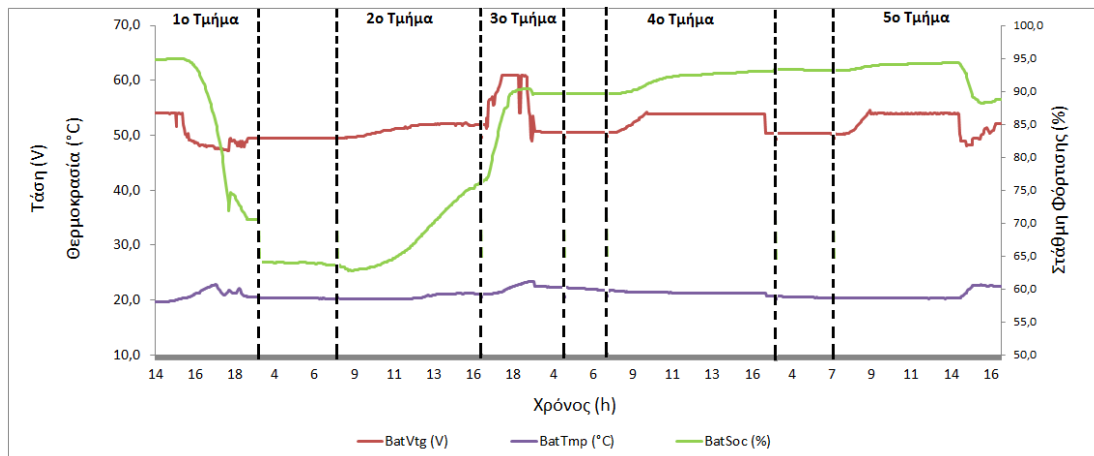
**Διάγραμμα 6.17: Μεταβολές συχνότητας κατά τη λειτουργία του μικροδικτύου**

Η τάση του μικροδικτύου μεταβάλλεται ελάχιστα,  $\pm 3$  V, μεταξύ των 230 V ενώ η συχνότητα μεταξύ των 49 Hz και 52 Hz (διακύμανση 2 % με 4 %). Η τάση δε φαίνεται να επηρεάζεται από τις υπόλοιπες λειτουργίες του συστήματος, σε αντίθεση με τη συχνότητα που επηρεάζεται. Κατά την εκφόρτιση των συσσωρευτών η συχνότητα λειτουργίας του μικροδικτύου μειώνεται στα 49 Hz. Αυτό συμβαίνει, είτε κατά την επιβολή φορτίου, είτε κατά τη διάρκεια της νύχτας όπου οι συσσωρευτές χάνουν ενέργεια για να διατηρούν σε λειτουργία το μικροδίκτυο. Κάθε φορά που οι συσσωρευτές τίθενται σε κατάσταση φόρτισης η συχνότητα αυξάνει στα 52 Hz. Κατά το 2<sup>ο</sup> τμήμα ανάλυσης η συχνότητα αυξάνει στα 50 Hz αντί για τα 52 Hz καθώς ενώ οι συσσωρευτές φορτίζονται στη βαθμίδα I γίνεται σύνδεση με το άπειρο ΣΗΕ, οπότε και η συχνότητα του μικροδικτύου ευθυγραμμίζεται με τη συχνότητα του δημόσιου δικτύου.

### 6.3.7 Ανάλυση Συσσωρευτών

Η διαδικασία φόρτισης και εκφόρτισης των συσσωρευτών μεταβάλλει κάποια χαρακτηριστικά τους όπως την τάση και τη θερμοκρασία. Στο Διάγραμμα 6.18 παρουσιάζονται αυτές οι μεταβολές κατά τη διάρκεια του πειράματος όπου :

- BatVg είναι η τάση των συσσωρευτών.
- BatTmp είναι η θερμοκρασία των συσσωρευτών.
- BatSoc είναι η στάθμη φόρτισης των συσσωρευτών.



**Διάγραμμα 6.18: Μεταβολές τάσης και θερμοκρασίας συσσωρευτών κατά τη λειτουργία του μικροδικτύου**

Κατά την εκφόρτιση των συσσωρευτών (1<sup>ο</sup> Τμήμα), όπου η στάθμη φόρτισης μειώνεται σε σύντομο χρονικό διάστημα, από το 95 % στο 63 %, παρατηρείται αύξηση της θερμοκρασίας κατά 2°C, από τους 20°C, στους 22°C. Παράλληλα, η τάση των συσσωρευτών μειώνεται στην ελάχιστη τιμή των 48 V, λόγω της μείωσης της πυκνότητας του ηλεκτρολύτη. Οι ίδιες ακριβώς τιμές σε τάση και θερμοκρασία παρατηρούνται και κατά την εκφόρτιση που συμβαίνει στο τέλος του 5<sup>ου</sup> Τμήματος, παρόλο που η στάθμη φόρτισης μειώνεται μόλις κατά 5 %, δηλαδή από το 95 % στο 90 %.

Κατά τη φόρτιση των συσσωρευτών στο 2<sup>ο</sup> Τμήμα (βαθμίδα φόρτισης φάσης I), όπου η στάθμη φόρτισης αυξάνεται από το 63 % στο 76 %, παρατηρείται μια αύξηση της τάσης των συσσωρευτών στα 52 V, λόγω της αύξησης της πυκνότητας του ηλεκτρολύτη. Η θερμοκρασία κατά την ίδια περίοδο αυξάνεται στους 21.5°C από τους 20°C. Με τη διασύνδεση του μικροδικτύου στο δημόσιο δίκτυο (3<sup>ο</sup> Τμήμα) και τη βαθμίδα φόρτισης να εξακολουθεί να βρίσκεται στη φάση I, η φόρτιση των συσσωρευτών γίνεται με πιο ταχείς ρυθμούς με αποτέλεσμα η θερμοκρασία να φτάνει τους 23.3°C, ενώ η τάση να αυξάνει στα 60 V. Κατά τη διαδικασία φόρτισης των συσσωρευτών στις βαθμίδες φόρτισης φάσης U<sub>0</sub> και U από τις φωτοβολταϊκές συστοιχίες (Τμήματα 4 και 5), η θερμοκρασία μειώνεται αργά και σταθερά μέχρι τους 20 °C, ενώ αντίστοιχα η τάση των συσσωρευτών αυξάνει κάθε φορά στα 53 V από τα 50 V.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 : ΤΡΙΦΑΣΙΚΟ AC ΜΙΚΡΟΔΙΚΤΥΟ

## 7.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το τριφασικό AC μικροδίκτυο αφορά ένα αυτόνομο φωτοβολταϊκό σύστημα φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων που αποτελείται από ένα μικρό ηλεκτροκίνητο λεωφορείο και δέκα ηλεκτροκίνητα ποδήλατα όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 7.1. Ο σταθμός φόρτισης βρίσκεται απέναντι από το κτίριο Γεωργικής Μηχανολογίας του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών και η κατασκευή του ολοκληρώθηκε το 2016.



Εικόνα 7.1: Σταθμός φόρτισης ηλεκτροκίνητων οχημάτων ΓΠΑ

Η πειραματική διαδικασία περιλαμβάνει τη διερεύνηση της λειτουργίας του συγκεκριμένου μικροδικτύου το οποίο αποτελείται από:

- Μια συστοιχία φωτοβολταϊκών πλαισίων.
- Μια μονάδα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας μέσω συσσωρευτών.
- Ηλεκτρονικά ισχύος (μετατροπείς, αντιστροφείς AC-to-DC και DC-to-AC).
- Διάφορα σταθερά φορτία όπως φωτιστικά αλλά και μεταβλητά φορτία όπως τη συσκευή κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας ZSAC που χρησιμοποιήθηκε και στο μονοφασικό AC μικροδίκτυο.

Πιο συγκεκριμένα, αναλύεται η αυτόνομη λειτουργία του μικροδικτύου μέσα σε διάρκεια δυο ημερών στις παρακάτω περιπτώσεις:

- Επιβολής σταθερού φορτίου μικρότερης ισχύος της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.
- Επιβολής σταθερού φορτίου χωρίς την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.
- Τη μη επιβολή φορτίου.

## 7.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ

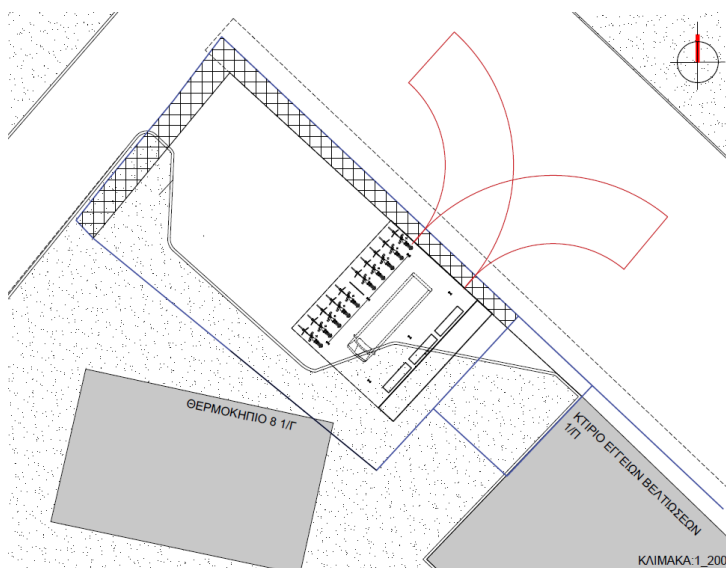
### 7.2.1 Πηγή Ενέργειας

Ως κύρια πηγή ενέργειας χρησιμοποιήθηκε μια φωτοβολταϊκή συστοιχία η οποία είναι τοποθετημένη στο σκέπαστρο του σταθμού φόρτισης όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 7.2.



Εικόνα 7.2: Φωτοβολταϊκά πλαίσια στο στέγαστρο του σταθμού φόρτισης

Η φωτοβολταϊκή συστοιχία έχει Νοτιοανατολικό προσανατολισμό (Εικόνα 7.3), με μια ελαφριά κλίση  $3^\circ$  για την αποφυγή συγκέντρωσης όμβριων υδάτων. Αποτέλεσμα αυτού του προσανατολισμού και της μη ιδανικής κλίσης των  $30^\circ$  είναι η φωτοβολταϊκή συστοιχία να μην αποδίδει το μέγιστο των δυνατοτήτων της.

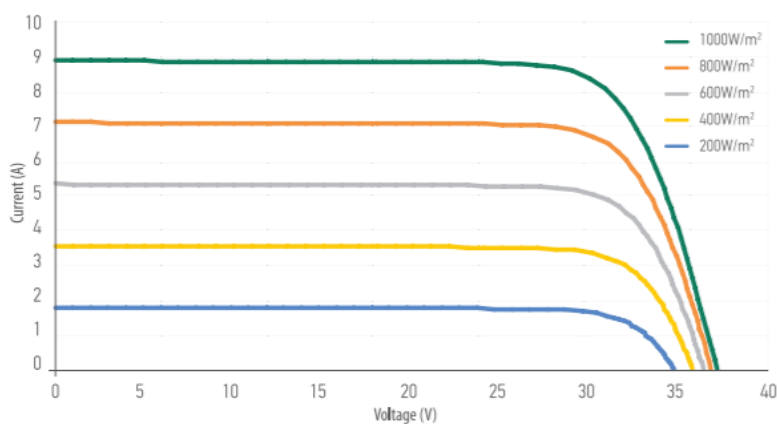


Εικόνα 7.3: Προσανατολισμός φωτοβολταϊκών πλαισίων

Η φωτοβολταϊκή συστοιχία αποτελείται από 20 πλαίσια (RECOM), τα οποία είναι συνδεδεμένα σε σειρά, ενώ το κάθε φωτοβολταϊκό πλαίσιο περιέχει 60 πολυκρυσταλικά φωτοβολταϊκά στοιχεία. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του κάθε φωτοβολταϊκού πλαισίου παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.1 ενώ στο Διάγραμμα 7.1 παρουσιάζεται η χαρακτηριστική I - V του κάθε πλαισίου όπως αυτή δίδεται από την εταιρεία RECOM:

Πίνακας 7.1: Χαρακτηριστικά φωτοβολταϊκού πλαισίου

Φωτοβολταϊκό Πλαίσιο	
Κατασκευαστής	RECOM
Ονομαστική Ισχύς (P <sub>max</sub> )	250 Wp
Ένταση στο μέγιστο σημείο ισχύος (I <sub>MPP</sub> )	8.35 A
Τάση στο μέγιστο σημείο ισχύος (V <sub>MPP</sub> )	30.2 V
Τάση Ανοιχτού Κυκλώματος (V <sub>OC</sub> )	37.1 V
Ένταση Βραχυκύκλωσης (I <sub>sc</sub> )	8.92 A
Βαθμός απόδοσης	15.4 %
Αλλαγή Τάσης Ανοιχτού Κυκλώματος με τη θερμοκρασία	-0.32 %/°C
Μήκος	1640 mm
Πλάτος	992 mm



Διάγραμμα 7.1: Χαρακτηριστική I – V φωτοβολταϊκού πλαισίου RECOM 250 Wp

Η τάση ανοιχτού κυκλώματος των φωτοβολταϊκών πλαισίων σε πρότυπες συνθήκες ελέγχου (25 °C) είναι 37.1 V. Υπολογίζεται όμως και η τιμή της τάσης ανοιχτού κυκλώματος της κάθε συστοιχίας στις δυσμενέστερες συνθήκες που μπορεί να προκύψουν στην περιοχή εγκατάστασης ώστε να εξεταστεί η επιλογή του αντιστροφέα. Σε θερμοκρασία -5°C, η τάση ανοιχτού κυκλώματος πλαισίου θα αυξηθεί κατά -0.32 %/°C (Πίνακας 7.1). Έτσι, μέσω της Εξίσωσης 7 (Ενότητα 2.3.4) η τάση ανοιχτού κυκλώματος πλαισίου γίνεται:

$$V_{OC} = 37.1 \text{ V} * [1 + (-0.0032 \text{ } ^\circ\text{C}) * (-5 \text{ } ^\circ\text{C} - 25 \text{ } ^\circ\text{C})] = 40.66 \text{ V} \quad (42)$$

Βάσει της Εξίσωσης 19 (Ενότητα 2.5.2), η τιμή της τάσης ανοιχτού κυκλώματος της φωτοβολταϊκής συστοιχίας μπορεί να φτάσει την τιμή των 813.2 V (40.66 V \* 20 πλαίσια = 813.2 V), οπότε ο αντιστροφέας που χρησιμοποιείται πρέπει να καλύπτει τη συγκεκριμένη τιμή.

Σύμφωνα με τις Εξισώσεις 19, 20 και 21 (Ενότητα 2.5.2) και τις τιμές του Πίνακα 7.1 παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.2 τα χαρακτηριστικά της φωτοβολταϊκής συστοιχίας.

Πίνακας 7.2: Χαρακτηριστικά φωτοβολταϊκής συστοιχίας

Φωτοβολταϊκή Συστοιχία	
Τάση Ανοικτού Κυκλώματος ( $V_{oc}$ )	742 V
Ένταση Βραχυκύκλωσης ( $I_{sc}$ )	8.92 A
Τάση στο μέγιστο σημείο ισχύος ( $V_{MP}$ )	604 V
Ένταση στο μέγιστο σημείο ισχύος ( $I_{MP}$ )	8.35 A
Ισχύς Αιχμής ( $P_{MP}$ )	5043.4 Wp

Ο συντελεστής πλήρωσης των φωτοβολταϊκών συστοιχιών σύμφωνα με την Εξίσωση 6 (Ενότητα 2.3.3) είναι:

$$FF = \frac{I_{mp} * V_{mp}}{I_{sc} * V_{oc}} = \frac{8.35 \text{ A} * 604 \text{ V}}{8.92 \text{ A} * 742 \text{ V}} = 0.762 \text{ ή } 76.2\% \quad (43)$$

Εκτός από τους παραπάνω θεωρητικούς υπολογισμούς (Πίνακας 7.2 – Εξίσωση 43) που βασίζονται σε στοιχεία της κατασκευάστριας εταιρείας (RECOM), πραγματοποιήθηκαν και μετρήσεις κατά τη λειτουργία του φωτοβολταϊκού συστήματος σε πραγματικές συνθήκες με τη χρήση κατάλληλης συσκευής. Η συσκευή αυτή είναι της εταιρείας PVE Photovoltaik Engineering PVPM 1000C40 και παρουσιάζεται στην Εικόνα 7.4.



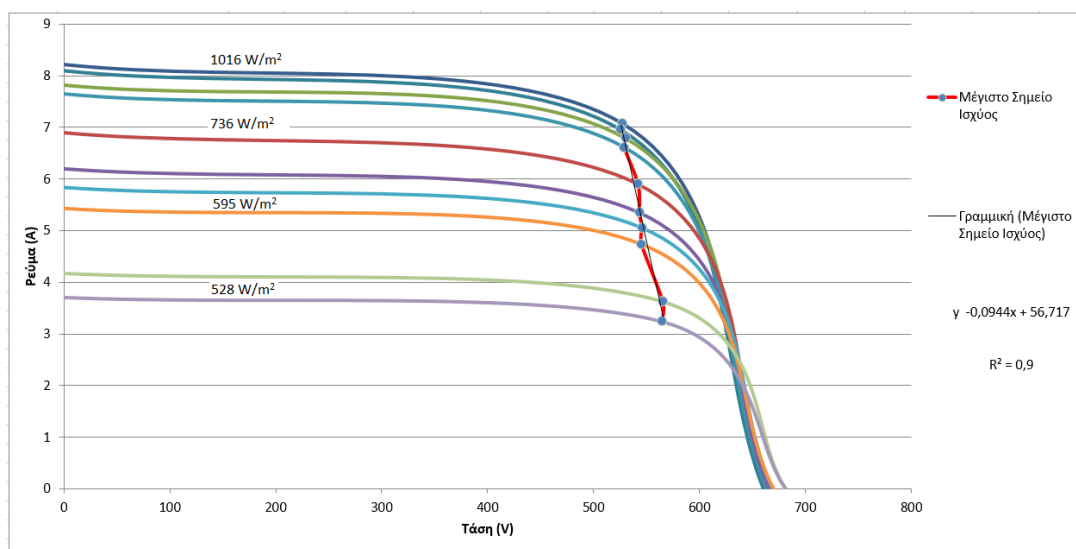
Εικόνα 7.4: Συσκευή PVE Photovoltaik Engineering (PVPM 1000C40)

Με αυτή τη συσκευή είναι δυνατή η μέτρηση και ο υπολογισμός του μέγιστου σημείου ισχύος καθώς και η κατασκευή της χαρακτηριστικής  $I - V$  ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου, συστοιχίας κτλ. Κατά τη λειτουργία του φωτοβολταϊκού συστήματος πραγματοποιήθηκαν αρκετές μετρήσεις σε διάφορες ώρες της ημέρας με τις μέγιστες τιμές να παρουσιάζονται στη 13:15 και τις ελάχιστες στις 17:30.

Πίνακας 7.3: Αποτελέσματα μετρήσεων συσκευής PVE (PVPM 1000C40)

Χαρακτηριστικά μεγέθη	Μέγιστες τιμές	Ελάχιστες τιμές
Ηλιακή Ακτινοβολία ( $W/m^2$ )	1016 $W/m^2$	528 $W/m^2$
Θερμοκρασία Συστοιχίας ( $^{\circ}C$ )	51.9 $^{\circ}C$	45.7 $^{\circ}C$
Τάση Ανοικτού Κυκλώματος ( $V_{oc}$ )	663.4 V	681.3 V
Ένταση Βραχυκύκλωσης ( $I_{sc}$ )	8.22 A	3.71 A
Τάση στο μέγιστο σημείο ισχύος ( $V_{MP}$ )	527.7 V	564.7 V
Ένταση στο μέγιστο σημείο ισχύος ( $I_{MP}$ )	7.07 A	3.24 A
Ισχύς Αιχμής ( $P_{MP}$ )	3731.7 Wp	1830.5 Wp
Συντελεστής Πλήρωσης (FF)	70.69	77.5

Στο Διάγραμμα 7.2 παρουσιάζονται οι χαρακτηριστικές I – V της φωτοβολταϊκής συστοιχίας για διαφορετικές τιμές ηλιακής ακτινοβολίας.



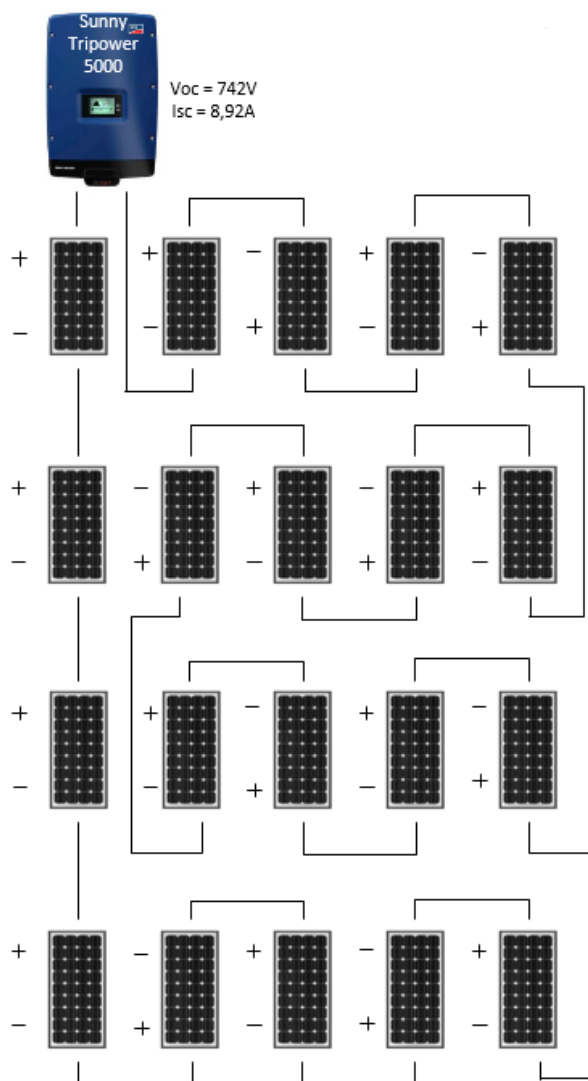
**Διάγραμμα 7.2: Χαρακτηριστικές I – V φωτοβολταϊκής συστοιχίας για διάφορες τιμές ακτινοβολίας**

Από το Διάγραμμα 7.2 και τον Πίνακα 7.3 αποδεικνύεται ότι:

- Η τάση ανοιχτού κυκλώματος μεταβάλλεται ελάχιστα συναρτήσει της ισχύς της ηλιακής ακτινοβολίας σε αντίθεση με το ρεύμα βραχυκύκλωσης που αλλάζει δραματικά όπως έχει παρουσιαστεί θεωρητικά στο Διάγραμμα 2.5.
- Οι χαρακτηριστικές καμπύλες I – V της φωτοβολταϊκής συστοιχίας μετατοπίζονται καθώς η ηλιακή ακτινοβολία φθίνει όπως έχει παρουσιαστεί θεωρητικά στο Διάγραμμα 2.6.
- Το μέγιστο σημείο ισχύος ακολουθεί γραμμική γραμμή τάσης, δηλαδή μειώνεται ή αυξάνεται με σταθερό ρυθμό. Αυτό σημαίνει ότι για σταθερή τιμή της ωμικής αντίστασης του κυκλώματος τα σημεία λειτουργίας (ΣΛ) απομακρύνονται από τα σημεία μέγιστης ισχύος (ΣΜΙ) όπως έχει παρουσιαστεί θεωρητικά στο Διάγραμμα 2.6.
- Με την αύξηση της θερμοκρασίας μειώνεται η τάση ανοιχτού κυκλώματος όπως έχει παρουσιαστεί θεωρητικά στο Διάγραμμα 2.7.
- Η σύνδεση των φωτοβολταϊκών πλαισίων γίνεται σε σειρά καθώς η συνολική τάση της συστοιχίας είναι το άθροισμα των επιμέρους τάσεων του κάθε πλαισίου, ενώ η ένταση του ρεύματος παραμένει ίδια όπως έχει παρουσιαστεί θεωρητικά στο Διάγραμμα 2.8.
- Ο συντελεστής πλήρωσης μεταβάλλεται ανάλογα με τις συνθήκες αλλά βρίσκεται εντός του θεωρητικού υπολογισμού της Εξίσωσης 43.
- Οι θεωρητικοί υπολογισμοί του Πίνακα 7.2 είναι διαφορετικοί από τα αποτελέσματα των μετρήσεων του Πίνακα 7.3 λόγω του ότι τα πλαίσια δε βρίσκονται υπό κλίση 30° με Νότιο προσανατολισμό. Αποτέλεσμα αυτού είναι η απόδοση της ισχύος αιχμής στην πραγματικότητα να βρίσκεται στο 74% έναντι του ιδανικού προσανατολισμού και κλίσης.



Στην Εικόνα 7.5 παρουσιάζεται ο τρόπος με τον οποίο συνδέονται σε σειρά τα 20 φωτοβολταϊκά πλαίσια της συστοιχίας καθώς και η σύνδεσή τους με τον αντιστροφέα.



Εικόνα 7.5: Συνδεσμολογία φωτοβολταϊκών πλαισίων

## 7.2.2 Ηλεκτρονικά Ισχύος

Όπως συμβαίνει και στο μονοφασικό AC μικροδίκτυο, έτσι και στο τριφασικό η λειτουργία του συστήματος καθορίζεται από το μετατροπέα Sunny Island 8H της εταιρίας SMA. Οι βασικές λειτουργίες του μετατροπέα Sunny Island 8H είναι παρόμοιες με το μετατροπέα Sunny Island 5048 και δε χρειάζεται να αναλυθούν εκ νέου. Αυτό το οποίο διαφοροποιείται στο υπάρχον σύστημα είναι ότι λειτουργούν τρεις μονάδες μετατροπέων Sunny Island 8H (μορφή πλέγματος), οι οποίες δημιουργούν και το τριφασικό AC μικροδίκτυο. Η σύνδεση μεταξύ των τριών μετατροπέων είναι στη λογική αφέντη (master) και δύο υπηρετριών (slaves).

Ο μετατροπέας master (Εικόνα 7.6α) εκτός από τους άλλους δύο μετατροπέες (slaves) συνδέεται ακόμα και με τα εξής:

- Τον αντιστροφέα Sunny Tripower 5000TL (Εικόνα 7.6β), ο οποίος είναι υπεύθυνος για τη μετατροπή της DC ισχύος από τη φωτοβολταϊκή συστοιχία σε τριφασική AC ισχύ και επιπλέον φροντίζει για τον εντοπισμό του σημείου μέγιστης ισχύος (MPP) λειτουργίας της φωτοβολταϊκής συστοιχίας.
- Το Sunny Remote Control (Εικόνα 7.6γ), το οποίο είναι ουσιαστικά η εξωτερική οθόνη των μετατροπέων και χρησιμοποιείται για την ευκολότερη ρύθμιση και έλεγχο των συσκευών με τα οποία είναι συνδεδεμένο.
- Το Sunny Webbox (Εικόνα 7.6δ), το οποίο είναι ένα router και συνδέεται με το master των μετατροπέων ή τον αντιστροφέα για να συλλέγει όλα τα δεδομένα του συστήματος και να τα μεταβιβάζει στο διαδίκτυο. Η εταιρία SMA διαθέτει επίσης το Sunny Portal το οποίο είναι μια διαδικτυακή πύλη για την εύκολη επιτήρηση και απεικόνιση των δεδομένων της εγκατάστασης.



**Εικόνα 7.6:** α) Μετατροπέας Sunny Island 8H β) Αντιστροφέας Sunny Tripower 5000TL γ) Sunny Remote Control δ) Sunny Webbox

Ο αντιστροφέας Sunny Tripower 5000TL του πειράματος είναι συνδεδεμένος με τη φωτοβολταϊκή συστοιχία, η οποία στις δυσμενέστερες συνθήκες αποδίδει μέγιστη τάση ανοιχτού κυκλώματος 813.2 V και μέγιστο ρεύμα βραχυκύκλωσης 8.92 A. Στην έξοδό του συνδέεται στον τριφασικό AC ζυγό που δημιουργούν οι μετατροπείς. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του αντιστροφέα Sunny Tripower 5000TL παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.4 ενώ των μετατροπέων στον Πίνακα 7.5.

**Πίνακας 7.4:** Χαρακτηριστικά Sunny Tripower 5000TL

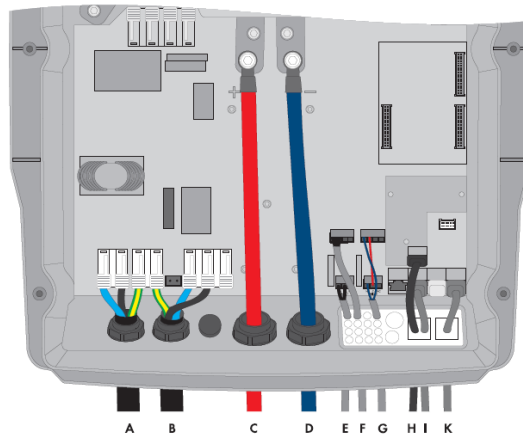
Sunny Sunny Tripower 5000TL	
<b>Κατασκευαστής</b>	SMA
<b>Τιμές Εξόδου AC</b>	
<b>Ονομαστική Τάση (<math>V_{AC\ nom}</math>)</b>	~3/ 230 V-400 V
<b>Ονομαστική Συχνότητα (<math>f_{AC\ nom}</math>)</b>	50 Hz – 60 Hz
<b>Ονομαστικό Ρεύμα στα 230V (<math>I_{AC\ nom}</math>)</b>	7.3 A
<b>Ονομαστική Ισχύ (<math>P_{AC\ nom}</math>)</b>	5000 W
<b>Συντελεστής Ισχύος (<math>\cos\phi</math>)</b>	Από -0.8 έως 1 και Από 0.8 έως 1
<b>Τιμές Εισόδου DC</b>	
<b>Μέγιστη Τάση (<math>V_{DC\ max}</math>)</b>	1000 V
<b>Εύρος Τάσεων MPP (<math>V_{DC\ MPP}</math>)</b>	245 V – 800 V
<b>Μέγιστο Ρεύμα (<math>I_{DC\ max}</math>)</b>	11 A
<b>Μέγιστο Ρεύμα βραχυκύκλωσης, είσοδος A (<math>I_{DC\ max}</math>)</b>	17 A

Πίνακας 7.5: Χαρακτηριστικά Sunny Island 8H

Sunny Island 8H	
Κατασκευαστής	SMA
<b>Τιμές Εξόδου</b>	
Ονομαστική Τάση AC (Ρυθμιζόμενη) ( $V_{AC\ nom}$ )	230 V (202 V-253 V)
Ονομαστική Συχνότητα ( $f_{AC\ nom}$ )	45 Hz – 65 Hz
Ονομαστικό Ρεύμα AC ( $I_{AC\ nom}$ )	26.1 A
Μέγιστο Ρεύμα για 60 msec	120 A
Συνεχής Ισχύς	6000 W
Ισχύς AC για 30 λεπτά στους 25 °C	8000 W
Ισχύς AC για 5 λεπτά στους 25 °C	9100 W
Ισχύς AC για 1 λεπτό στους 25 °C	9600 W
Μέγιστη ισχύς AC για 3 sec στους 25 °C	11000 W
Συντελεστής Ισχύος (cosφ)	-1 έως +1
Μέγιστος Βαθμός Απόδοσης	95.8 %
Ιδιοκατανάλωση σε αναμονή	6.5 W
<b>Τιμές Εισόδου</b>	
Τάση Εισόδου (Ρυθμιζόμενη)	230 V (172.5 V – 264.5 V)
Συχνότητα Εισόδου (Ρυθμιζόμενη)	50 Hz (40 Hz – 70 Hz)
Μέγιστο Ρεύμα Εισόδου	50 A
Μέγιστη Ισχύς Εισόδου	11.5 kW
<b>Στοιχεία Συσσωρευτών</b>	
Τάση Συσσωρευτή (Εύρος Τιμών)	48 V (41 V – 63 V)
Μέγιστο Ρεύμα Φόρτισης Συσσωρευτή	140 A
Ρεύμα Συνεχούς Φόρτισης	115 A
Ρεύμα Συνεχούς Εκφόρτισης	136 A
Χωρητικότητα Συσσωρευτή	100 Ah – 10000 Ah
Τύποι Συσσωρευτών	VRLA/FLA/NiCd

Οι μετατροπείς δημιουργούν έναν τριφασικό AC ζυγό 230 V στον οποίο συνδέονται οι καταναλώσεις και ο αντιστροφέας, ενώ επιπλέον το σύστημα έχει ως εφεδρεία ενέργειας το δημόσιο δίκτυο. Από τη DC πλευρά τους, οι μετατροπείς συνδέονται με τους συσσωρευτές. Στην Εικόνα 7.10 παρουσιάζεται η σύνδεση μεταξύ του master Sunny Island 8H και των δύο slaves καθώς και ο τρόπος επικοινωνίας με τις υπόλοιπες μονάδες της εγκατάστασης. Οι υπόλοιπες συνδέσεις των ρελέ και των συσσωρευτών παραμένουν ίδιες με εκείνες που παρουσιάστηκαν στην Ενότητα 6.2.2.

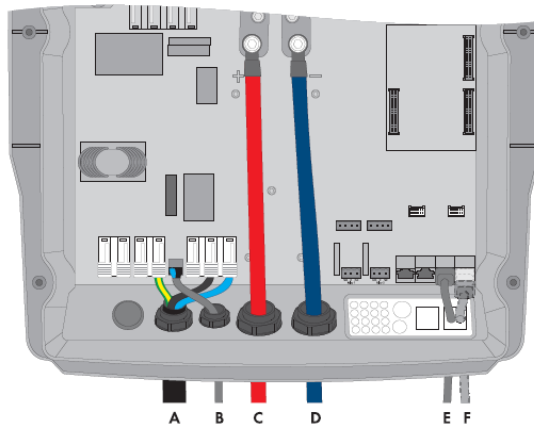
- Ο master Sunny Island 8H ως κατασκευή δε διαφέρει σε τίποτα με τους slaves Sunny Island 8H. Η διαφοροποίηση τους έγκειται στην τοποθέτηση ενός εξαρτήματος (Speedwire network cable) που γίνεται στο master μετατροπέα και το οποίο είναι υπεύθυνο για την επικοινωνία με τις υπόλοιπες μονάδες της εγκατάστασης. Στην Εικόνα 7.7 παρουσιάζονται οι συνδέσεις του master μετατροπέα και ακολούθως γίνεται αναφορά σε αυτές.



Εικόνα 7.7: Συνδέσεις του master Sunny Island 8H

Θέση	Περιγραφή Σύνδεσης
<b>A</b>	AC1 σύνδεση των φορτίων. Η σύνδεση αυτή αφορά τη δημιουργία της L1 φάσης, του ουδετέρου N και της γης PE του ζυγού.
<b>B</b>	AC2 σύνδεση της γεννήτριας ή του δημόσιου δικτύου. Η σύνδεση αυτή γίνεται στη L1 φάση της γεννήτριας ή του δημόσιου δικτύου. Τόσο η AC1 σύνδεση όσο και η AC2 χρησιμοποιούν κοινή γείωση. Τα Sunny Island 8H της πειραματικής διαδικασίας είναι συνδεδεμένα στο δημόσιο δίκτυο και όχι η γεννήτρια.
<b>C</b>	DC+ σύνδεση συσσωρευτών
<b>D</b>	DC- σύνδεση συσσωρευτών
<b>E</b>	Έλεγχος μέσω Ρελέ 1. Το ρελέ 1 (Relay 1) είναι προρυθμισμένο στη λειτουργία εκκίνησης της γεννήτριας.
<b>F</b>	Σύνδεση αισθητήρα θερμοκρασίας και ρεύματος συσσωρευτή
<b>G</b>	Έλεγχος μέσω Ρελέ 2. Το ρελέ 2 (Relay 2) είναι προρυθμισμένο στη λειτουργία απόρριψης φορτίου. Επιπλέον σύνδεση της τάσης εξόδου συσσωρευτή.
<b>H</b>	Speedwire network cable το οποίο συνδέεται το πολύ με τρεις ακόμα μετατροπείς ώστε να μεταφερθούν τα δεδομένα μέσω του Sunny Webbox στο Sunny Portal.
<b>I</b>	Σύνδεση με το Sunny Remote Control
<b>K</b>	Σύνδεση με το Slave1 Sunny Island 8H

Στην Εικόνα 7.8 παρουσιάζονται οι συνδέσεις των slaves Sunny Island 8H και ακολούθως γίνεται αναφορά σε αυτές.



Εικόνα 7.8: Συνδέσεις των slaves Sunny Island 8H

Θέση	Περιγραφή Σύνδεσης
<b>A</b>	AC1 σύνδεση των φορτίων. Η σύνδεση αυτή αφορά τη δημιουργία της L2 φάσης του ζυγού για το slave1 Sunny Island 8H και τη δημιουργία της L3 φάσης του ζυγού για το slave2 Sunny Island 8H. Επίσης συνδέονται ο ουδέτερος N και η γη PE του ζυγού.
<b>B</b>	AC2 σύνδεση της γεννήτριας ή του δημόσιου δικτύου. Η σύνδεση αυτή γίνεται στη L2 φάση της γεννήτριας ή του δημόσιου δικτύου για το slave1 Sunny Island 8H και στη L3 φάση της γεννήτριας ή του δημόσιου δικτύου για το slave2 Sunny Island 8H. Τα Sunny Island 8H της πειραματικής διαδικασίας είναι συνδεδεμένα στο δημόσιο δίκτυο και όχι η γεννήτρια.
<b>C</b>	DC+ σύνδεση συσσωρευτών
<b>D</b>	DC- σύνδεση συσσωρευτών
<b>E</b>	Σύνδεση με το master εάν πρόκειται για το slave1. Σύνδεση με το slave1 εάν πρόκειται για το slave2.
<b>F</b>	Σύνδεση με το slave2 εάν πρόκειται για το slave1. Τοποθέτηση τερματικής επαφής εάν πρόκειται για το slave2.

- Η εταιρία SMA προσφέρει το Sunny SensorBox το οποίο περιέχει έναν αισθητήρα ακτινοβολίας και ένα εξωτερικό αισθητήρα θερμοκρασίας ηλιακού πλαισίου. Επιπλέον έχει τη δυνατότητα να συνδεθεί σε αυτόν ένας αισθητήρας θερμοκρασίας περιβάλλοντος και ένα αισθητήριο ανέμου. Η μεταφορά αυτών των δεδομένων γίνεται μέσω του RS485-Power Injector (Εικόνα 7.9).

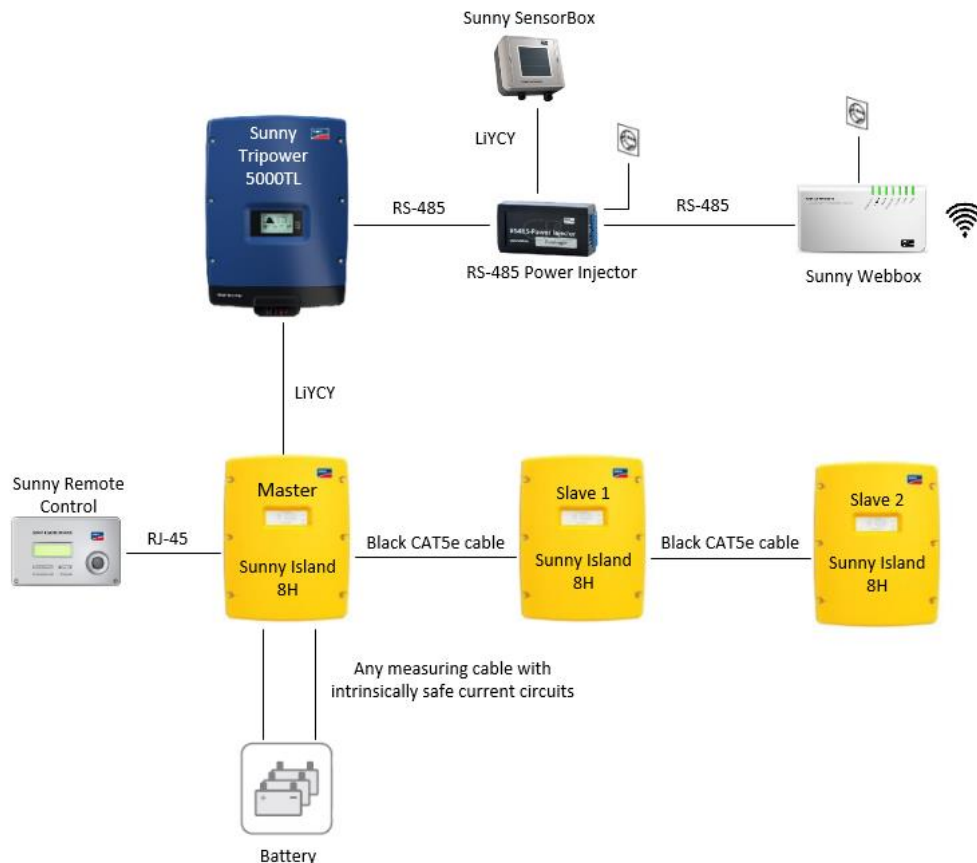


Εικόνα 7.9: α) Sunny SensorBox β) RS-485Power Injector

Εν κατακλείδι, οι τρόποι επικοινωνίας μεταξύ όλων των μονάδων της SMA είναι οι εξής:

- Το master Sunny Island 8H συνδέεται με τα slaves Sunny Island 8H μέσω καλωδίου απαιτήσεων CAT5e.
- Το master Sunny Island 8H συνδέεται με το Sunny Remote Control μέσω καλωδίου τύπου RJ-45.
- Το master Sunny Island 8H συνδέεται με το Sunny Tripower 5000TL μέσω διεπαφής επικοινωνίας Speedwire και καλώδιο τύπου LiYCY.
- Ο αισθητήρας θερμοκρασίας των συσσωρευτών συνδέεται με δυο καλώδια διπλής μόνωσης στις θέσεις ButCur+ και ButCur- του master Sunny Island 8H.
- Το Sunny Tripower 5000TL μέσω διεπαφής επικοινωνίας RS485 συνδέεται με το RS485-Power Injector.
- Το Sunny SensorBox μέσω καλωδίου τύπου LiYCY συνδέεται με το RS485-Power Injector.
- Το RS485-Power Injector συνδέεται με διεπαφή επικοινωνίας RS485 με το Sunny Webbox και αυτό με τη σειρά του μέσω WiFi στο Sunny Portal.

Η επικοινωνία μεταξύ όλων των μονάδων της εγκατάστασης παρουσιάζονται στην Εικόνα 7.10.



Εικόνα 7.10: Επικοινωνία μεταξύ των μονάδων της εγκατάστασης

### 7.2.3 Μονάδα Αποθήκευσης Ενέργειας

Ως μονάδα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας, το τριφασικό AC μικροδίκτυο χρησιμοποιεί, 24 συσσωρευτές Μολύβδου – Οξέος κλειστού τύπου σε gell μορφή ηλεκτρολύτη (VRLA).



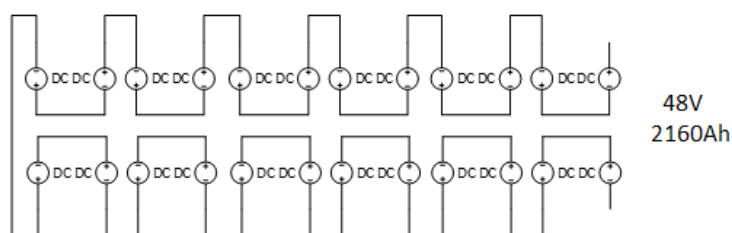
Εικόνα 7.11: Μονάδα αποθήκευσης συσσωρευτών Μολύβδου - Οξέος

Τα τεχνικά χαρακτηριστικά των συσσωρευτών παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.6.

Πίνακας 7.6: Χαρακτηριστικά συσσωρευτών

Συσσωρευτές	
Κατασκευαστής	SunLight
Τύπος	VRLA
Κατηγορία	2 V 16 OPzV 2.000
Ονομαστική Τάση (V)	2 V
Ονομαστική Χωρητικότητα @	C <sub>10</sub> – 1.80 V/cell: 2160 Ah
Κύκλοι Εκφόρτισης	<1600 – 60 % DOD
Πλήθος Συσσωρευτών	24
Βάρος	165 kg

Οι συσσωρευτές είναι συνδεδεμένοι σε σειρά όπως φαίνεται στην Εικόνα 7.12 με αποτέλεσμα να αποδίδουν σε ονομαστικές τιμές συνολική τάση 48 V και χωρητικότητα 2160 Ah για C<sub>10</sub> (216A για 10 ώρες), δηλαδή μπορούν να εκφορτίσουν 407.7 W/cell σε 10 ώρες.



Εικόνα 7.12: Συνδεσμολογία συσσωρευτών σε σειρά

## 7.2.4 Φορτία

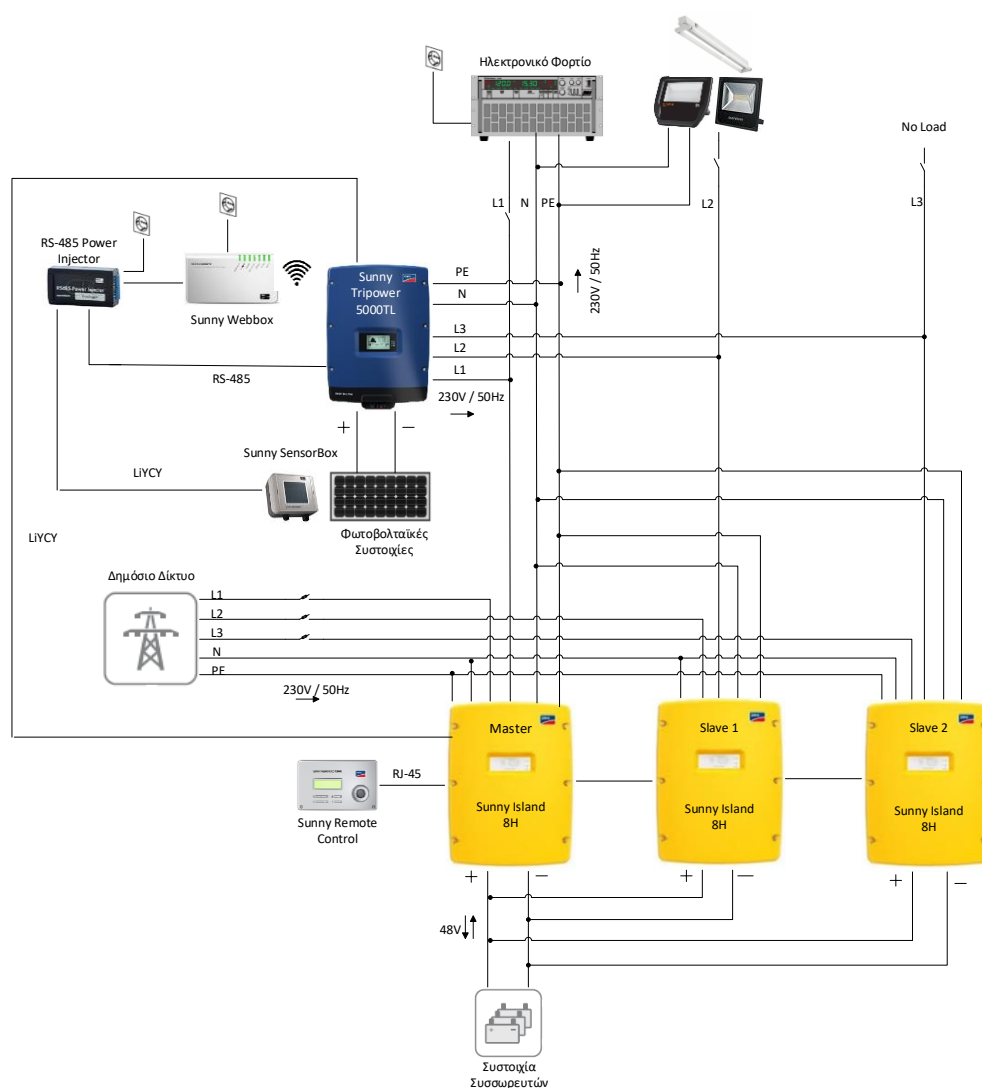
Στις καταναλώσεις του μικροδικτύου είναι συνδεδεμένα, σε μόνιμη κατάσταση, διάφορα φωτιστικά ενώ περιοδικά φορτίζονται τα 10 ηλεκτρικά ποδήλατα και το ηλεκτρικό λεωφορείο. Κατά τη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας δε φορτίστηκαν τα ποδήλατα και το λεωφορείο, αντίθετα χρησιμοποιήθηκε η ηλεκτρονική συσκευή ZSAC της εταιρίας H&H η οποία αναλύθηκε επαρκώς στην Ενότητα 6.2.4.

Τα μόνιμα φορτία που συνδέονται στο μικροδίκτυο είναι τα εξής:

- Πέντε φωτιστικά LED OSRAM 20 W
- Πέντε φωτιστικά LED GEYER 10 W
- Τέσσερα φωτιστικά γραμμικού φθορίου 36 W

## 7.2.5 Διάταξη Τριφασικού AC Μικροδικτύου

Ο master μετατροπέας από την AC πλευρά του είναι συνδεδεμένος με το δημόσιο δίκτυο (230 V, συχνότητα 50 Hz) το οποίο λειτουργεί ως εναλλακτική πηγή ενέργειας στην περίπτωση που οι φωτοβολταϊκή συστοιχία και οι συσσωρευτές δε μπορούν να ανταπεξέλθουν στην τροφοδοσία των φορτίων. Επιπλέον, ο master μετατροπέας συνδέεται, (α) με τον αντιστροφέα και (β) μέσω του τριφασικού AC ζυγού (τάσεως 230 V, συχνότητας 50 Hz) με τις καταναλώσεις (στη φάση L1 το ηλεκτρονικό φορτίο και στη φάση L2 τα φωτιστικά). Από την DC πλευρά, οι μετατροπείς, είναι συνδεδεμένοι με τη συστοιχία των συσσωρευτών έχοντας δημιουργήσει ένα ζυγό 48 V. Στην Εικόνα 7.13 παρουσιάζεται αναλυτικά η διάταξη του τριφασικού AC μικροδικτύου.



Εικόνα 7.13: Διάταξη τριφασικού AC μικροδικτύου του σταθμού φόρτισης του ΓΠΑ



## 7.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

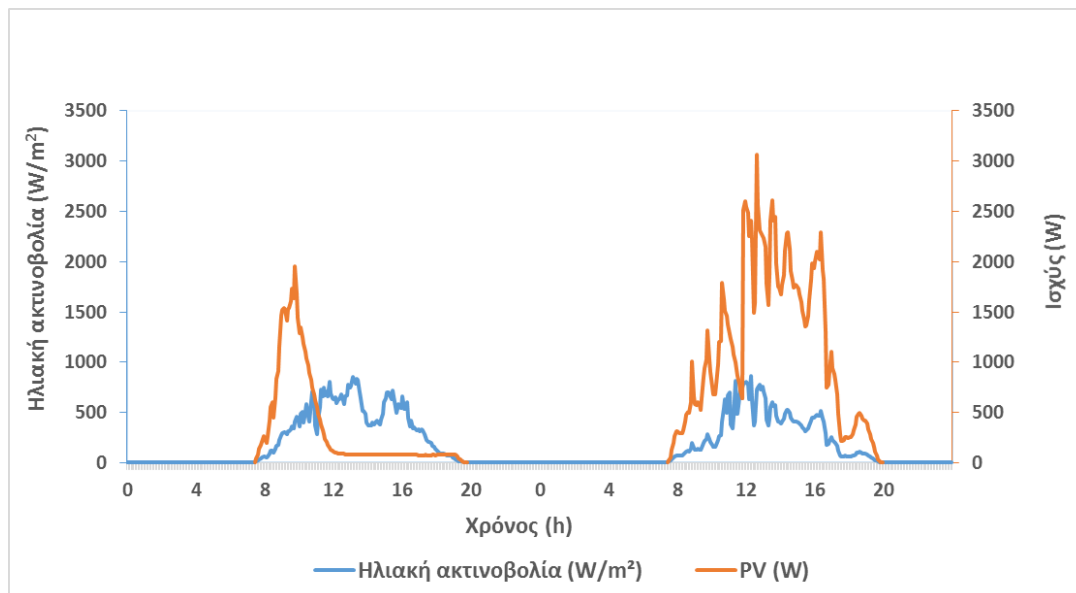
Όπως έχει αναφερθεί, σκοπός της πειραματικής διαδικασίας είναι η ανάλυση της συμπεριφοράς του μικροδικτύου κατά τη διάρκεια δυο ημερών στις περιπτώσεις:

- Επιβολής φορτίου μικρότερης ισχύος της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.
- Επιβολής φορτίου χωρίς την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.
- Τη μη επιβολή φορτίου.

Το μικροδίκτυο καθημερινά τροφοδοτεί τα μόνιμα φορτία των φωτιστικών σωμάτων τα οποία τίθενται σε λειτουργία από τις 19:30 το απόγευμα έως και τις 7:30 το πρωί (12 ώρες ημερησίως). Επιπλέον, τροφοδοτεί τα περιοδικά φορτία του ηλεκτροκίνητου λεωφορείου και των ηλεκτροκίνητων ποδηλάτων τα οποία όμως δεν έχουν συγκεκριμένες ώρες φόρτισης.

Την πρώτη ημέρα της πειραματικής διαδικασίας παρουσιάζεται η λειτουργία του μικροδικτύου μόνο με την τροφοδοσία των φωτιστικών σωμάτων ενώ τη δεύτερη ημέρα παρουσιάζεται η φόρτιση τόσο των μόνιμων φορτίων όσο και των περιοδικών. Τα μόνιμα φορτία τροφοδοτούνται κατά τις προαναφερόμενες ώρες ενώ τα περιοδικά, τα οποία προσομοιάζονται από την ηλεκτρονική συσκευή ZSAC, τροφοδοτούνται για 6 ώρες κατά τη διάρκεια της ημέρας, δηλαδή κατά την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τη φωτοβολταϊκή συστοιχία.

Στο Διάγραμμα 7.3 παρουσιάζονται οι τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας των ημερών κατά τις οποίες πραγματοποιήθηκε το πείραμα, οι οποίες ελήφθησαν από Sunny SensorBox, και η παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος της φωτοβολταϊκής συστοιχίας κατά το αντίστοιχο διάστημα.



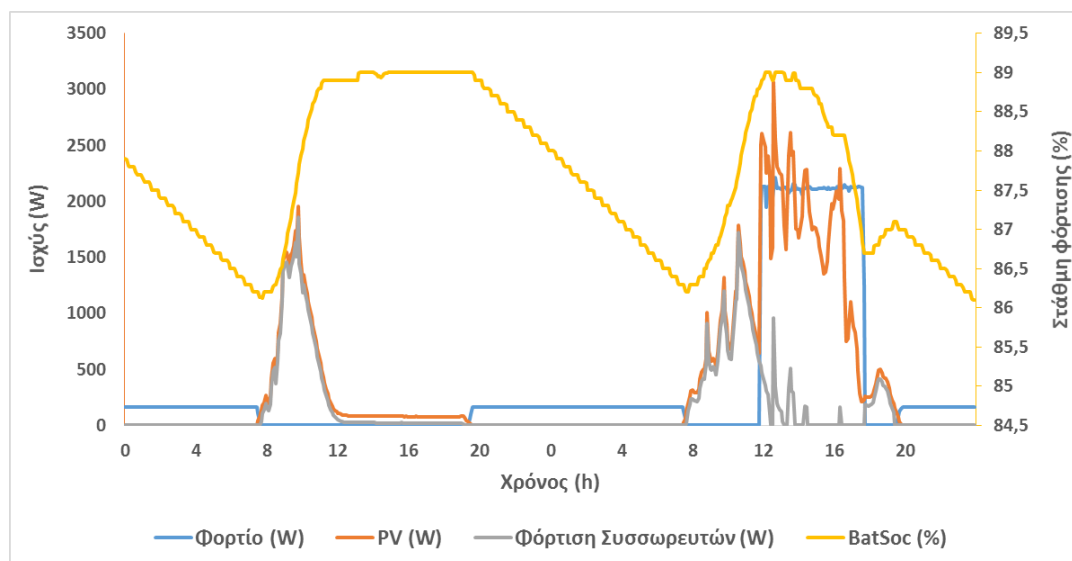
**Διάγραμμα 7.3: Ηλιακή ακτινοβολία και παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος της φωτοβολταϊκής συστοιχίας**

Οι καμπύλες της ηλιακής ακτινοβολίας έχουν αρκετές αυξομειώσεις λόγω του ότι τις συγκεκριμένες ημέρες υπήρχαν αρκετά σύννεφα στον ορίζοντα. Οι καμπύλες της

παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος από τη φωτοβολταϊκή συστοιχία διαφέρουν μεταξύ των δυο ημερών λόγω του ότι τη δεύτερη ημέρα τροφοδοτείται και η ηλεκτρονική συσκευή ZSAC με αποτέλεσμα η φωτοβολταϊκή συστοιχία να εκμεταλλεύεται την ηλιακή ακτινοβολία ολόκληρης της ημέρας.

### 7.3.1 Ανάλυση Στάθμης Φόρτισης

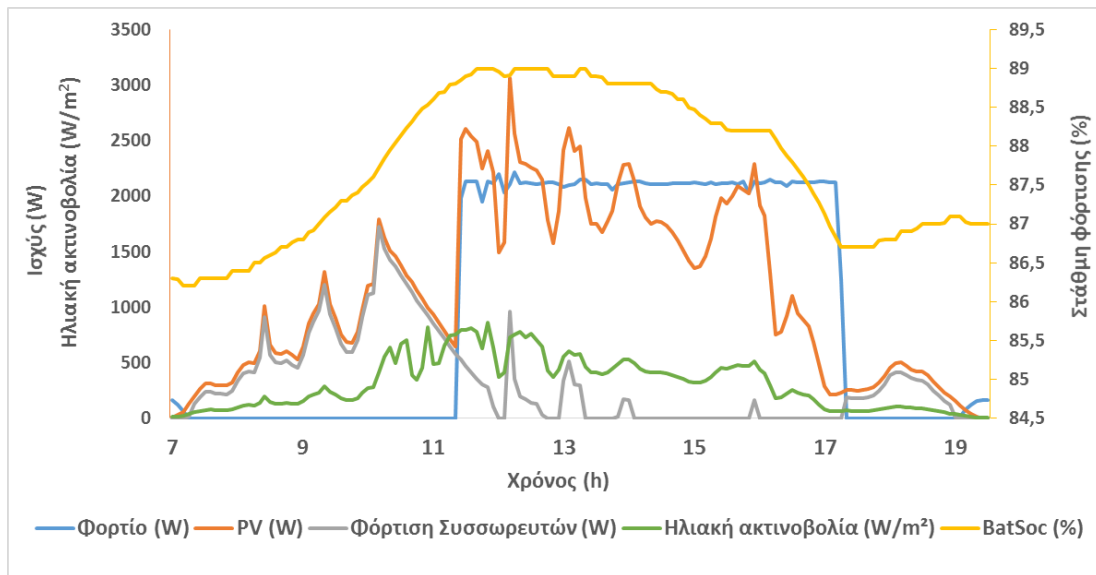
Το Διάγραμμα 7.4 απεικονίζει τη λειτουργία του μικροδικτύου συναρτήσει της στάθμης φόρτισης των συσσωρευτών.



**Διάγραμμα 7.4: Λειτουργία μικροδικτύου συναρτήσει της στάθμης φόρτισης συσσωρευτών**

Κατά την πρώτη ημέρα του πειράματος παρατηρείται ότι, καθώς τα φωτιστικά σώματα είναι σε λειτουργία (καθημερινά από τις 19:30 το απόγευμα έως 7:30 το πρωί), η στάθμη φόρτισης των συσσωρευτών μειώνεται από το 89 % στο 86,5 % καθώς τις συγκεκριμένες χρονικές στιγμές δεν υπάρχει ηλιακή ακτινοβολία και το φορτίο τροφοδοτείται αποκλειστικά από τους συσσωρευτές. Με το πρώτο φως της ημέρας και ενώ τα φωτιστικά σώματα έχουν διακόψει τη λειτουργία τους, η φωτοβολταϊκή συστοιχία παράγει τόση ηλεκτρική ισχύ όση απαιτείται για να φορτιστούν οι συσσωρευτές. Γι' αυτό το λόγο και η καμπύλη φόρτισης των συσσωρευτών ακολουθεί επακριβώς την καμπύλη παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος της φωτοβολταϊκής συστοιχίας. Η διαδικασία φόρτισης και στο σύστημα Sunny Island 8H όπως και στο Sunny Island 5048, ακολουθεί τις βαθμίδες φόρτισης τύπου Iu0U. Εφόσον λοιπόν ολοκληρωθεί η πρώτη βαθμίδα φόρτισης τύπου I, όπου οι συσσωρευτές φορτίζονται με το μέγιστο της έντασης του ρεύματος που μπορούν να απορροφήσουν (μέγιστο στα 2 kW), αλλάζει η βαθμίδα φόρτισης και μεταβαίνει στη φάση U0, δηλαδή στη φάση απορρόφησης. Έτσι, η φωτοβολταϊκή συστοιχία σταματά να εκμεταλλεύεται το σύνολο της ηλιακής ακτινοβολίας που είναι διαθέσιμο και παράγει όση ισχύ απαιτεί αυτή βαθμίδα φόρτισης (περίπου 20 W) αλλά και όση ισχύ αυτοκατανάλωσης χρειάζεται το μικροδίκτυο για να λειτουργήσει (περίπου 60 W).

Για καλύτερη ανάλυση της δεύτερης ημέρας λειτουργίας παρουσιάζεται το Διάγραμμα 7.5 το οποίο εστιάζει μεταξύ των ωρών 7:00 το πρωί και 19:00 το απόγευμα.



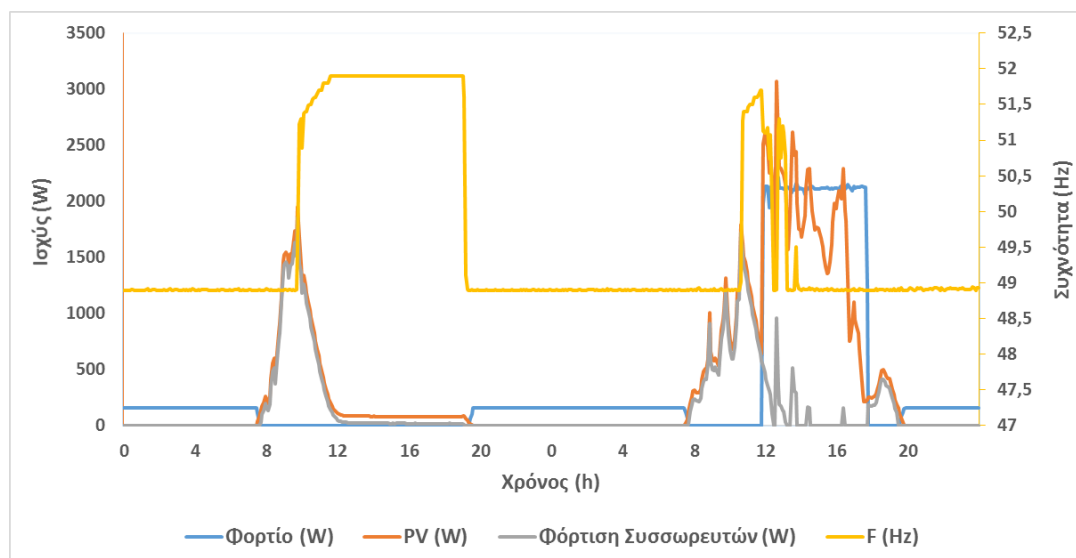
**Διάγραμμα 7.5: Εστίαση κατά τη δεύτερη ημέρα λειτουργίας του μικροδικτύου**

Από τις 7:00 το πρωί και έως τις 11:00 περίπου το μικροδίκτυο λειτουργεί όπως λειτουργούσε και την προηγούμενη ημέρα, δηλαδή η καμπύλη φόρτισης των συσσωρευτών ακολουθεί επακριβώς την καμπύλη παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος της φωτοβολταϊκής συστοιχίας και η στάθμη φόρτισης αυξάνεται από το 86.5 % στο 88.5 %. Γίνεται μάλιστα φανερό, ότι η βαθμίδα φόρτισης έχει μεταβεί από τη φάση I στη φάση U<sub>0</sub> αφού αν και υπάρχει υψηλή ηλιακή ακτινοβολία, η παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος της φωτοβολταϊκής συστοιχίας μειώνεται.

Μετά τις 11:00 και έως τις 17:30 περίπου επιβάλλεται φορτίο 2 kW από την ηλεκτρονική συσκευή ZSAC. Με το που επιβάλλεται το φορτίο των 2 kW, και ενώ η ηλιακή ακτινοβολία είναι σε υψηλή στάθμη, η καμπύλη παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος της φωτοβολταϊκής συστοιχίας ανεβαίνει στα 2.5 kW ώστε να καλύψει τόσο το φορτίο αλλά και να συνεχίσει να φορτίζει τους συσσωρευτές, που σε αυτή τη φάση απαιτούν περίπου 500 W. Η καμπύλη φόρτισης των συσσωρευτών συνεχίζει να μειώνεται σταδιακά έως τη στιγμή που η ηλιακή ακτινοβολία μειώνεται απότομα. Ακριβώς αυτή τη στιγμή, η ισχύς της φωτοβολταϊκής συστοιχίας μειώνεται στα 1500 W με αποτέλεσμα τα υπόλοιπα 500 W του φορτίου να καλύπτονται από τους συσσωρευτές και να παρουσιάζεται μια μικρή πτώση στη στάθμη φόρτισης. Την αμέσως επόμενη χρονική στιγμή, που η ηλιακή ακτινοβολία αυξάνει, η ισχύς της φωτοβολταϊκής συστοιχίας φθάνει τα 3 kW καθώς πέρα από την κάλυψη του φορτίου, οι συσσωρευτές απαιτούν περίπου 1 kW λόγω του ότι η βαθμίδα φόρτισης επανήλθε στη φάσης I. Η ίδια αλληλουχία καταστάσεων συνεχίζει έως και τις 17:30 όπου και διακόπτεται η επιβολή του φορτίου. Καθώς η ηλιακή ακτινοβολία σταδιακά μειώνεται, με αποτέλεσμα την ανάγκη για περισσότερη παροχή ισχύος από τους συσσωρευτές, μειώνεται και η στάθμη φόρτισης από το 89 % στο 87 %. Με τη διακοπή του φορτίου η φωτοβολταϊκή συστοιχία εκμεταλλεύεται στο μέγιστο την υπολειπόμενη ηλιακή ακτινοβολία φορτίζοντας τους συσσωρευτές. Έτσι η στάθμη φόρτισης αυξάνεται ελάχιστα έως τη στιγμή που τα φωτιστικά σώματα τίθενται σε λειτουργία.

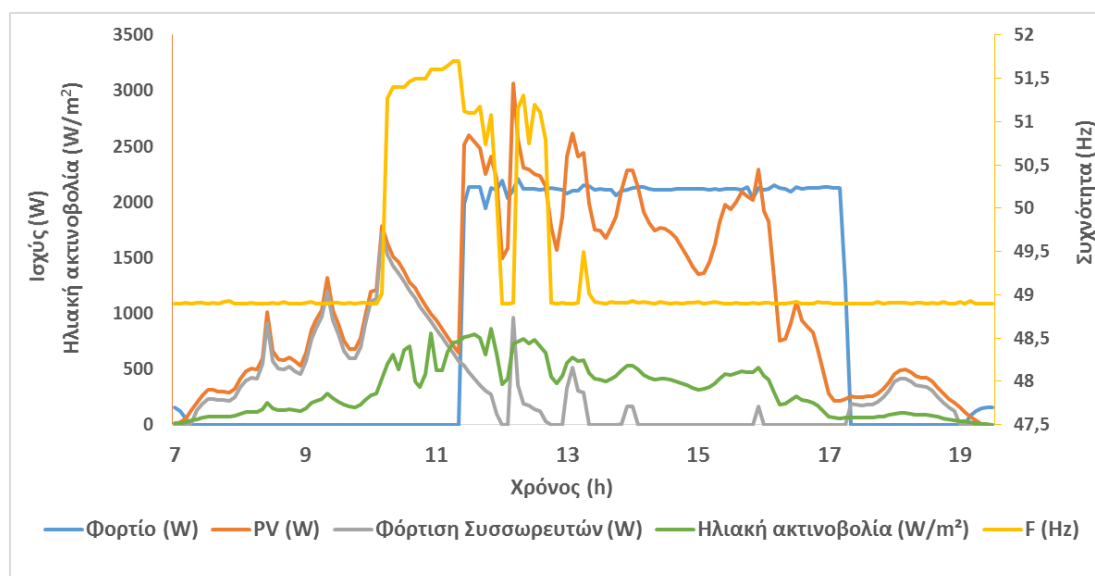
### 7.3.2 Ανάλυση Συχνότητας

Στο Διάγραμμα 7.6 απεικονίζεται η λειτουργία του συστήματος συναρτήσει της συχνότητας F (Hz).



Διάγραμμα 7.6: Λειτουργία μικροδικτύου συναρτήσει της συχνότητας

Κάθε φορά που οι συσσωρευτές εκφορτίζονται η συχνότητα λειτουργίας του μικροδικτύου μειώνεται στα 49 Hz. Αυτό συμβαίνει, είτε κατά την επιβολή φορτίου, είτε κατά τη διάρκεια της νύχτας όπου οι συσσωρευτές χάνουν ενέργεια για να διατηρούν σε λειτουργία το μικροδίκτυο. Κάθε φορά που οι συσσωρευτές τίθενται σε κατάσταση φόρτισης η συχνότητα αυξάνει στα 52 Hz. Αυτό φαίνεται ακόμα πιο έντονα στο Διάγραμμα 7.7 όπου παρουσιάζονται ευκρινέστερα οι απότομες αυξομειώσεις της συχνότητας κατά την επιβολή του φορτίου.



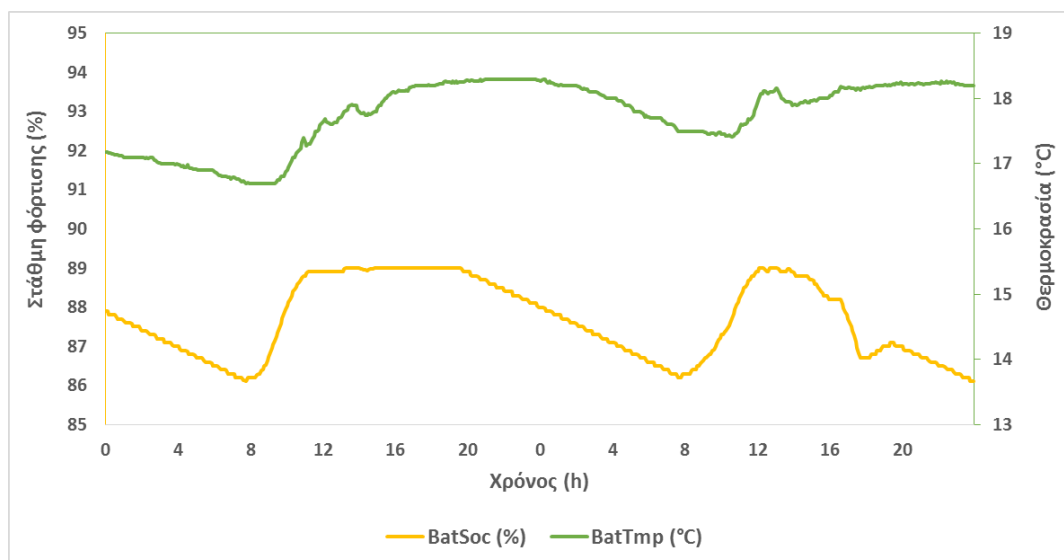
Διάγραμμα 7.7: Εστίαση κατά τη δεύτερη ημέρα λειτουργίας του μικροδικτύου

Τις χρονικές στιγμές κατά τις οποίες η καμπύλη παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος της φωτοβολταϊκής συστοιχίας βρίσκεται κάτω από το φορτίο των 2 kW, οι συσσωρευτές παρέχουν το υπόλοιπο της ισχύος στο φορτίο, με αποτέλεσμα η συχνότητα να μειώνεται από τα 52 Hz στα 49 Hz. Τις υπόλοιπες χρονικές στιγμές, κατά τις οποίες η καμπύλη παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος της φωτοβολταϊκής συστοιχίας βρίσκεται πάνω από το φορτίο των 2 kW, οι συσσωρευτές τροφοδοτούνται με ισχύ με αποτέλεσμα η συχνότητα να αυξάνει από τα 49 Hz στα 51 Hz.

### 7.3.3 Ανάλυση Τάσης και Θερμοκρασίας Συσσωρευτών

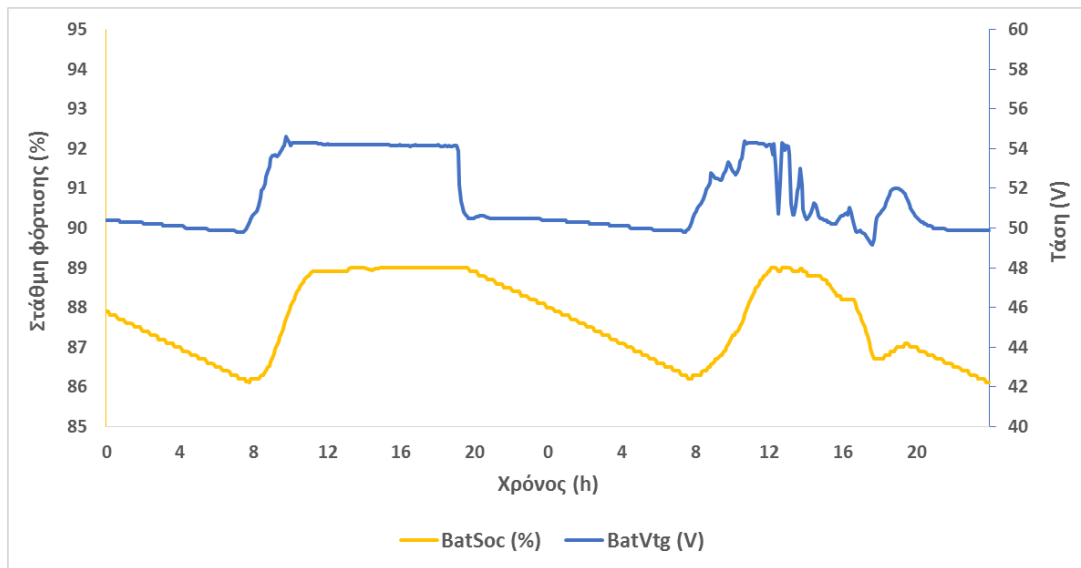
Στο Διάγραμμα 7.8 και Διάγραμμα 7.9 παρουσιάζονται οι μεταβολές της θερμοκρασίας και της τάσης των συσσωρευτών αντίστοιχα, κατά τη διάρκεια του πειράματος όπου :

- BatVg είναι η τάση των συσσωρευτών.
- BatTmp είναι η θερμοκρασία των συσσωρευτών.
- BatSoc είναι η στάθμη φόρτισης των συσσωρευτών.



**Διάγραμμα 7.8: Μεταβολές θερμοκρασίας συσσωρευτών κατά τη λειτουργία του μικροδικτύου**

Όταν η εκφόρτιση των συσσωρευτών πραγματοποιείται με σταθερά αργούς ρυθμούς, στιγμές κατά τις οποίες η στάθμη φόρτισης μειώνεται δύο φορές από το 89 % στο 86 %, παρατηρείται ελάχιστη μείωση της θερμοκρασίας κατά 0.4°C. Αντίθετα όταν η εκφόρτιση των συσσωρευτών πραγματοποιείται με ταχείς ρυθμούς, αντί για μείωση της θερμοκρασίας παρατηρείται αύξηση κατά 0.3°C. Κατά τη φόρτιση, όπου η στάθμη φόρτισης αυξάνει δύο φορές από το 86 % στο 89 %, η θερμοκρασία των συσσωρευτών αυξάνεται κατά 1.5°C και κατά 1°C αντίστοιχα.



**Διάγραμμα 7.9: Μεταβολές τάσης συσσωρευτών κατά τη λειτουργία του μικροδικτύου**

Η τάση των συσσωρευτών κατά την εκφόρτιση μειώνεται ελάχιστα κατά 0.5 V, λόγω της μείωσης της πυκνότητας του ηλεκτρολύτη ενώ κατά τη φόρτιση παρατηρείται μια αύξηση της τάσης των συσσωρευτών κατά 4 V λόγω της αύξησης της πυκνότητας του ηλεκτρολύτη.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 : DC ΜΙΚΡΟΔΙΚΤΥΟ

## 8.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το κεφάλαιο αυτό περιλαμβάνει την πειραματική διερεύνηση της λειτουργίας ενός DC μικροδικτύου το οποίο αποτελείται από:

- Μια πηγή ενέργειας
- Μια μονάδα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας (ένας συσσωρευτής βαθιάς εκφόρτισης)
- Μια μονάδα αφαλάτωσης που χρησιμοποιείται ως φορτίο

Η πειραματική διαδικασία περιλαμβάνει δυο μέρη. Αρχικά διερευνάται η λειτουργία του DC μικροδικτύου χωρίς τη χρήση του συσσωρευτή και ακολούθως με τη χρήση συσσωρευτή. Επιπλέον, σχεδιάστηκε ένα σύστημα διαχείρισης και ελέγχου ενέργειας για την αποτελεσματική λειτουργία του μικροδικτύου. Ως εκ τούτου, με την έξυπνη διαχείριση της ενέργειας, αναμένεται η μονάδα αφαλάτωσης με τη χρήση συσσωρευτή να παράγει πολύ περισσότερο πόσιμο νερό, ειδικά σε ημέρες με μεταβλητή ηλιακή ακτινοβολία, σε σύγκριση με την ίδια μονάδα αφαλάτωσης η οποία τροφοδοτείται απ' ευθείας από τη φωτοβολταϊκή γεννήτρια χωρίς να μεσολαβεί το σύστημα αποθήκευσης, διαχείρισης και ελέγχου ενέργειας.

Ως πηγή ενέργειας χρησιμοποιούνται τα δεδομένα της λειτουργίας ενός φωτοβολταϊκού συστήματος. Τα δεδομένα αυτά προσομοιώνονται μέσω του λογισμικού LabVIEW ώστε να αναλυθεί η λειτουργία του μικροδικτύου και στις δυο περιπτώσεις (με και χωρίς συσσωρευτή) στις ίδιες κλιματολογικές συνθήκες.

Επιπλέον, όταν στο μικροδίκτυο δεν είναι συνδεδεμένος ο συσσωρευτής, η μονάδα αφαλάτωσης λειτουργεί υπό μεταβλητές στροφές του κινητήρα καθώς η λειτουργία της εξαρτάται άμεσα από την ηλιακή ακτινοβολία. Όταν όμως συνδέεται ο συσσωρευτής στο μικροδίκτυο, μπορεί να υπάρξει έλεγχος στο τρόπο λειτουργίας της μονάδας αφαλάτωσης με αποτέλεσμα ο κινητήρας να στρέφεται σε σταθερές στροφές.

## 8.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ

### 8.2.1 Πηγή Ενέργειας

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, δεν υπάρχει συνδεδεμένη στο μικροδίκτυο κάποια πηγή ενέργειας αλλά τα δεδομένα της λειτουργίας ενός φωτοβολταϊκού συστήματος με ισχύ αιχμής τα 1100 Wp. Η επιλογή του συγκεκριμένου φωτοβολταϊκού συστήματος έγινε βάσει του φορτίου το οποίο επρόκειτο να καλύψει και το οποίο δεν ξεπερνά σε ισχύ τα 750 W.

Τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται από το εν' λόγω φωτοβολταϊκό σύστημα έχουν παραχθεί από τη λειτουργία του σε πραγματικές συνθήκες στη διάρκεια τριών ημερών. Κατά τη διάρκεια αυτών των ημερών επικρατούσε απόλυτη ηλιοφάνεια, αραιή συννεφιά

και πυκνή συννεφιά. Η προσομοίωση και ο έλεγχος λειτουργίας του μικροδικτύου πραγματοποιήθηκε μέσω του λογισμικού LabVIEW.

## 8.2.2 Φορτία

Ως φορτίο στο DC μικροδίκτυο χρησιμοποιείται μια μονάδα αφαλάτωσης αντίστροφης ώσμωσης (ΑΩ) (Εικόνα 8.1).



**Εικόνα 8.1: Μονάδα αφαλάτωσης αντίστροφης ώσμωσης τύπου Clark**

Με τον όρο αφαλάτωση χαρακτηρίζουμε οποιαδήποτε διεργασία αφαίρεσης αλάτων από μια αλατούχα ουσία και κυρίως από αλατούχα ύδατα. Κατ' επέκταση, η αφαλάτωση είναι μια μέθοδος ανάκτησης πόσιμου νερού από θαλασσινό νερό ή από υφάλμυρα υπόγεια και επιφανειακά νερά. Βρίσκει κυρίως εφαρμογή σε περιοχές δίπλα στη θάλασσα, αλλά φτωχές σε πόσιμο νερό.

Οι μέθοδοι αφαλάτωσης χωρίζονται σε δύο κατηγορίες:

- Στις θερμικές μεθόδους
- Στις μεθόδους με μεμβράνες

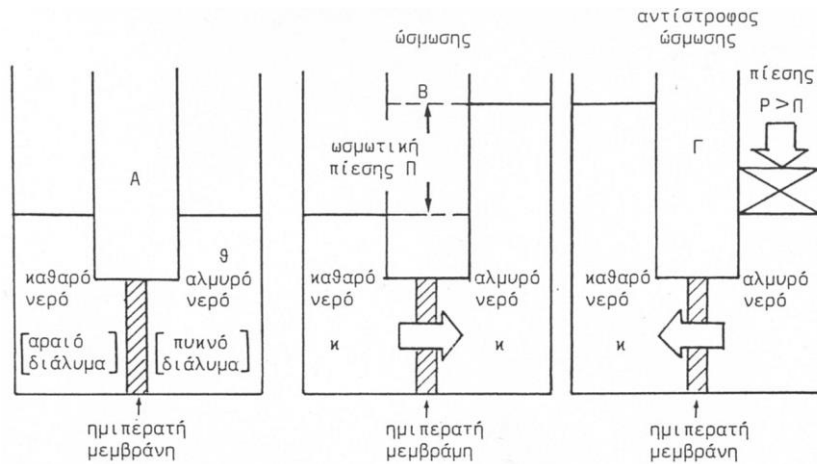
Στις μεθόδους με μεμβράνες χρησιμοποιείται ηλεκτρική ενέργεια, είτε για να επιτευχθεί υψηλή πίεση στις αντλίες, είτε για τον ιονισμό των περιεχόμενων αλάτων στο θαλασσινό νερό. Οι μέθοδοι με μεμβράνες κατατάσσονται στην ηλεκτροδιάλυση και στην αντίστροφη ώσμωση.

Η αντίστροφη ώσμωση είναι μια πολύ διαδεδομένη μέθοδος. Η αρχή λειτουργίας της βασίζεται στο φαινόμενο της ώσμωσης και χρησιμοποιείται η αντίστροφη διαδικασία από την ορθή ώσμωση. Στην Εικόνα 8.2 απεικονίζεται σχηματικά η λειτουργία της ώσμωσης και της αντίστροφης ώσμωσης. Στο θάλαμο Κ υπάρχει καθαρό νερό, ενώ στο θάλαμο Θ έχει τοποθετηθεί θαλασσινό νερό. Τα δύο νερά χωρίζονται από μια διεκλεκτική μεμβράνη και βρίσκονται σε συνηθισμένη ατμοσφαιρική πίεση [39].

Λόγω της διαφοράς δυναμικού στις δύο πλευρές της μεμβράνης παρατηρείται διάχυση νερού από το θάλαμο Κ προς το θάλαμο Θ, μέσω της μεμβράνης. Δεν είναι κανονική ροή δια των πόρων της μεμβράνης αλλά διάχυση των μορίων του νερού μέσα από τα κενά της μοριακής δομής του πλέγματος της μεμβράνης.



Το καθαρό νερό που διαχέεται μέσα από τη μεμβράνη ελαττώνει την πίεση και αυξάνει τη συγκέντρωση των αλάτων του καθαρού νερού, ενώ συγχρόνως αραιώνει το θαλάσσιο νερό και αυξάνει την πίεση στο θάλαμο Θ. Η αύξηση αυτή εμφανίζεται σαν υδροστατική διαφορά της στάθμης των δύο διαλυμάτων. Αυτή η αύξηση της υδροστατικής πίεσης έχει σαν συνέπεια τη βαθμιαία ελάττωση της ροής του νερού.



**Εικόνα 8.2:** Σχηματική παράσταση της ωσμωτικής πίεσης A, στο σημείο ισορροπίας B και της αντίστροφης ώσμωσης

Σε κάποιο σημείο της διαρκώς ελαττούμενης ποσότητας νερού που διαχέεται προς το θάλαμο Θ, η αύξηση της υδροστατικής πίεσης αντισταθμίζει τη ροή και αποκαθίσταται μία κινητική ισορροπία όπου το νερό ρέει προς τις δύο διευθύνσεις. Στο σημείο ισορροπίας η υδροστατική διαφορά της πίεσης ονομάζεται ωσμωτική πίεση. Εφ' όσον δεν επεμβαίνουν άλλοι εξωτερικοί παράγοντες παραμένει σταθερή στο σημείο ισορροπίας. Η αριθμητική τιμή της ωσμωτικής πίεσης είναι συνάρτηση της συγκέντρωσης του νερού σε άλατα και της θερμοκρασίας του, είναι όμως ανεξάρτητη από τη μεμβράνη.

Εάν εφαρμοστεί μία εξωτερική πίεση στην επιφάνεια του θαλάσσιου νερού μεγαλύτερη της ωσμωτικής  $\Delta P > \Delta \Pi$  το φαινόμενο της ώσμωσης αντιστρέφεται και τα μόρια του νερού διαχέονται από το θαλάσσιο νερό προς το καθαρό, από το θάλαμο Θ προς το θάλαμο Κ.

Αυτή η πίεση ασκείται από μια αντλία μέσω ενός κινητήρα DC (Εικόνα 8.3), τα τεχνικά χαρακτηριστικά των οποίων παρουσιάζονται στον Πίνακα 8.1 και στον Πίνακα 8.2.



**Εικόνα 8.3:** Αντλία και DC κινητήρας τροφοδοσίας

Πίνακας 8.1: Χαρακτηριστικά DC κινητήρα τροφοδοσίας

Κινητήρας τροφοδοσίας	
Τύπος κινητήρα	Leeson
Ονομαστική ισχύς (P)	0.75 kW
Τάση κινητήρα (V)	48 V DC
Μέγιστος αριθμός στροφών το λεπτό	1000 rpm

Πίνακας 8.2: Χαρακτηριστικά αντλίας τροφοδοσίας

Αντλία τροφοδοσίας	
Τύπος αντλίας	Positive Displacement
Μοντέλο	Procon
Μέγιστη πίεση	16 bar

Ο κινητήρας χρησιμοποιεί έναν μετατροπέα «οδηγό» συνεχούς ρεύματος (DC Driver) για τη ρύθμιση και τον έλεγχο των στροφών του (Εικόνα 8.4), του οποίου τα χαρακτηριστικά αναφέρονται στον Πίνακα 8.3.



Εικόνα 8.4: DC Driver

Πίνακας 8.3: Χαρακτηριστικά DC Driver

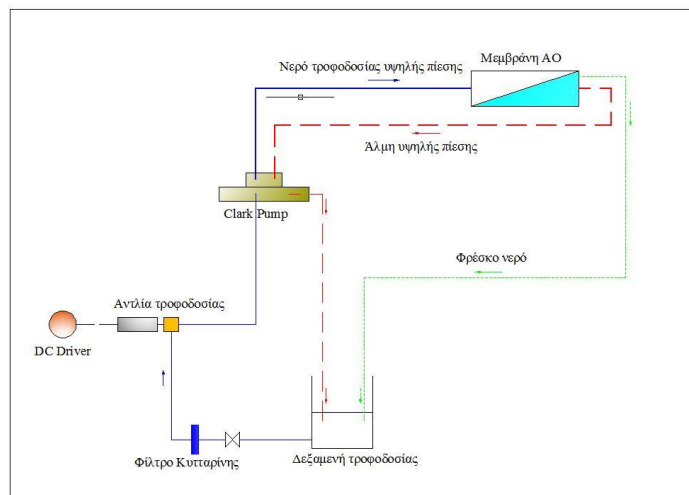
DC Driver	
Κατασκευαστής	Roboteq
Μοντέλο	MDC 2260C
Τύπος Driver	Brushed DC motor controller
Κανάλια	2
Μέγιστο Ρεύμα	60 A
Μέγιστη Τάση	60 V
Μέγιστο Ρεύμα ανά κανάλι	50 A

Η τροφοδοσία της μονάδας αφαλάτωσης με αλμυρό νερό πραγματοποιείται από μια δεξαμενή η οποία βρίσκεται στον ίδιο χώρο με τη μονάδα αφαλάτωσης (Εικόνα 8.5). Στην ίδια δεξαμενή καταλήγει ξανά το καθαρό νερό που παράγεται από τη μονάδα αφαλάτωσης. Το πόσιμο νερό αναμιγνύεται με το υπάρχον αλμυρό και ανά διαστήματα προστίθεται αλάτι στη δεξαμενή για να διατηρείται σταθερή η αγωγιμότητά του.



**Εικόνα 8.5: Δεξαμενή τροφοδοσίας**

Η διαδικασία λειτουργίας της μονάδας αφαλάτωσης παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 8.1.



**Διάγραμμα 8.1: Σχηματικό διάγραμμα λειτουργίας μονάδας αφαλάτωσης**

### 8.2.3 Μονάδα Αποθήκευσης Ενέργειας

Ως μονάδα αποθήκευσης ενέργειας στο DC μικροδίκτυο χρησιμοποιείται ένας συσσωρευτής Μολύβδου – Οξέος (Εικόνα 8.6), κλειστού τύπου με ηλεκτρολύτη σε gell μορφή (VRLA), του οποίου τα τεχνικά χαρακτηριστικά παρουσιάζονται στον Πίνακα 8.4.



**Εικόνα 8.6: Συσσωρευτής Μολύβδου - Οξέος**

Πίνακας 8.4: Χαρακτηριστικά συσσωρευτή

Συσσωρευτές	
Κατασκευαστής	GNB
Τύπος	Sonnenschein A612/100 VRLA
Κατηγορία	12 V OPzV 100
Ονομαστική Τάση (V)	12 V
Ονομαστική Χωρητικότητα (C)	C <sub>10</sub> – 1.80 V/cell: 91 Ah στους 20°C
Πλήθος Συσσωρευτών	1
Βάρος	43 kg

## 8.2.4 Ηλεκτρονικά Όργανα

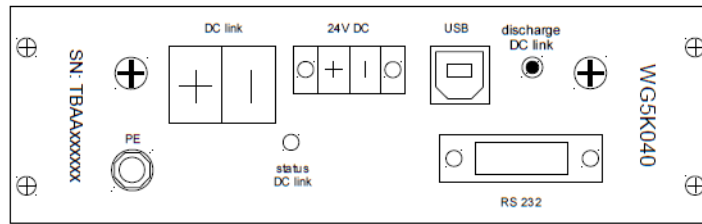
Απαραίτητη προϋπόθεση για την υλοποίηση του μικροδικτύου είναι η χρήση ενός συστήματος το οποίο συνδέει μεταξύ τους όλα τα επιμέρους μέρη, δηλαδή την πηγή ενέργειας με το φορτίο και το συσσωρευτή.

Ένα τέτοιο ηλεκτρονικό όργανο είναι το σύστημα της εταιρίας FLEXIVA (Εικόνα 8.7). Το σύστημα αυτό περιέχει μονάδες (modules) μετατροπών συνεχούς σε συνεχές ρεύμα DC-to-DC Converter (κωδικός ονομασίας PM3K) ή/και μετατροπείς συνεχούς σε εναλλασσόμενο ρεύμα AC-to-DC Converter (κωδικός ονομασίας PM3AC). Οι μονάδες αυτές τοποθετούνται σε ένα ενιαίο σασί, λειτουργούν σε διάφορες τάσεις (0...350 V DC, 0...230 V AC) και έχουν τη δυνατότητα αμφίδρομης ροής ενέργειας. Παράλληλα μέσω της σύνδεσης με ηλεκτρονικό υπολογιστή δίνεται η δυνατότητα της παρακολούθησης και του ελέγχου της ροής ενέργειας.



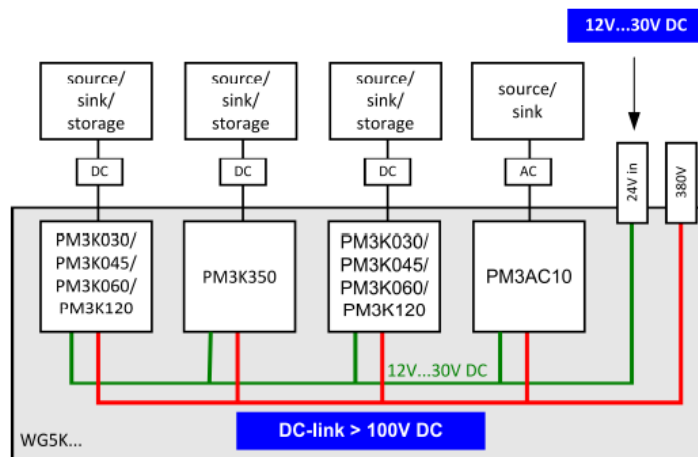
Εικόνα 8.7: Σύστημα FLEXIVA (εμπρός όψη) και μονάδες μετατροπών (DC-to-DC και DC-to-AC)

Το σασί μπορεί να δεχτεί έως και τέσσερις μονάδες μετατροπών, είτε DC-to-DC, είτε AC-to-DC, οι οποίες μπορούν να συνδυαστούν με οποιοδήποτε τρόπο μεταξύ τους, ενώ παρέχει τη δυνατότητα επικοινωνίας μέσω RS232 και USB. Επιπλέον για τη λειτουργία του συστήματος απαιτείται εξωτερική τροφοδοσία 12 V - 30 V DC (Εικόνα 8.8).



**Εικόνα 8.8:** Σασί της FLEXIVA (όπισθεν όψη) τροφοδοσία και επικοινωνία

Το σύστημα FLEXIVA δημιουργεί ένα δίκτυο όπου οι πηγές ενέργειας, οι μονάδες αποθήκευσης και το φορτίο συνδέονται σε κάθε ένα στοιχείο. Η σύζευξη μεταξύ τους επιτυγχάνεται με τη μετατροπή των διαφόρων τάσεων του κάθε συνδεδεμένου στοιχείου σε μια κοινή τάση στα 380 V DC (DC Link), πραγματοποιώντας μια αμφίδρομη ανταλλαγή ενέργειας μεταξύ τους. Η βασική δομή λειτουργίας του συστήματος της FLEXIVA παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 8.2.



**Διάγραμμα 8.2:** Δομή λειτουργίας συστήματος FLEXIVA

Για την πραγματοποίηση της πειραματικής διαδικασίας χρησιμοποιήθηκαν, δυο μετατροπείς DC-to-DC για τη σύνδεση του συσσωρευτή και του κινητήρα της μονάδας αφαλάτωσης, και ένας μετατροπέας AC-to-DC για την προσομοίωση της φωτοβολταϊκής συστοιχίας (Εικόνα 8.9).



**Εικόνα 8.9:** Σασί της FLEXIVA (όπισθεν όψη). Οι τρεις μονάδες μετατροπέων και το τμήμα της τροφοδοσίας και επικοινωνίας στα αριστερά

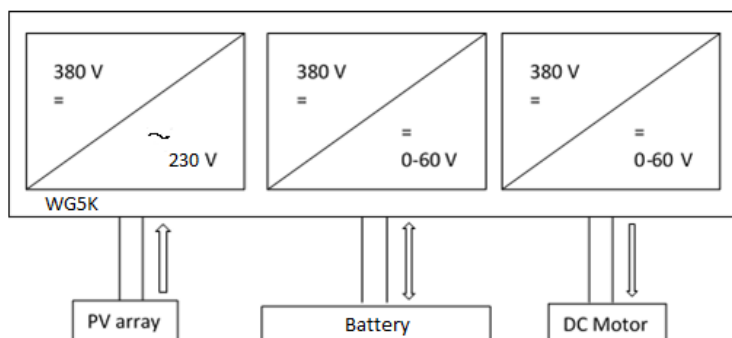
Τα τεχνικά χαρακτηριστικά των μετατροπέων παρουσιάζονται στον Πίνακα 8.5 και στον Πίνακα 8.6, ενώ στο Διάγραμμα 8.3 παρουσιάζεται σχηματικά η σύνδεση των διάφορων μονάδων με τους μετατροπείς DC-to-DC και AC-to-DC μέσω του συστήματος της FLEXIVA.

**Πίνακας 8.5: Χαρακτηριστικά μετατροπέων DC-to-DC**

DC-to-DC Converter	
Κατασκευαστής	FEXIVA
Τύπος	DC-to-DC
Μοντέλο	PM3K060
Ισχύς (P)	2.5 kW
Τάση (V)	0 – 60 V DC
Ρεύμα (A)	-50 – 50 A

**Πίνακας 8.6: Χαρακτηριστικά μετατροπέα AC-to-DC**

AC-to-DC Converter	
Κατασκευαστής	FEXIVA
Τύπος	AC-to-DC
Μοντέλο	PM3AC10
Ισχύς (P)	2.3 kW
Τάση (V)	230 V AC
Ρεύμα (A)	10 A



**Διάγραμμα 8.3: Σύνδεση μονάδων στο FLEXIVA**

Για την εξωτερική τροφοδοσία χρησιμοποιήθηκε ένα DC τροφοδοτικό με σταθερή τάση εξόδου 24 V DC και ρεύμα εξόδου 3 A (Εικόνα 8.10).



**Εικόνα 8.10: Εξωτερικό τροφοδοτικό για τη λειτουργία του συστήματος FLEXIVA**

## 8.2.5 Σύστημα Διαχείρισης Ενέργειας

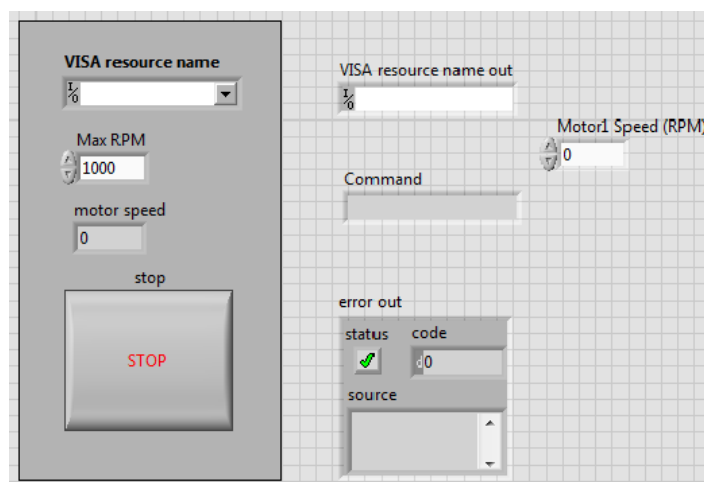
Το σύστημα διαχείρισης ενέργειας πραγματοποιείται με τη μορφή μιας εφαρμογής ανεπτυγμένης στο λογισμικό πακέτο LabVIEW.

Στο γραφικό περιβάλλον της εφαρμογής υπάρχουν τρεις είσοδοι δεδομένων όσες και οι συνδεδεμένες μονάδες:

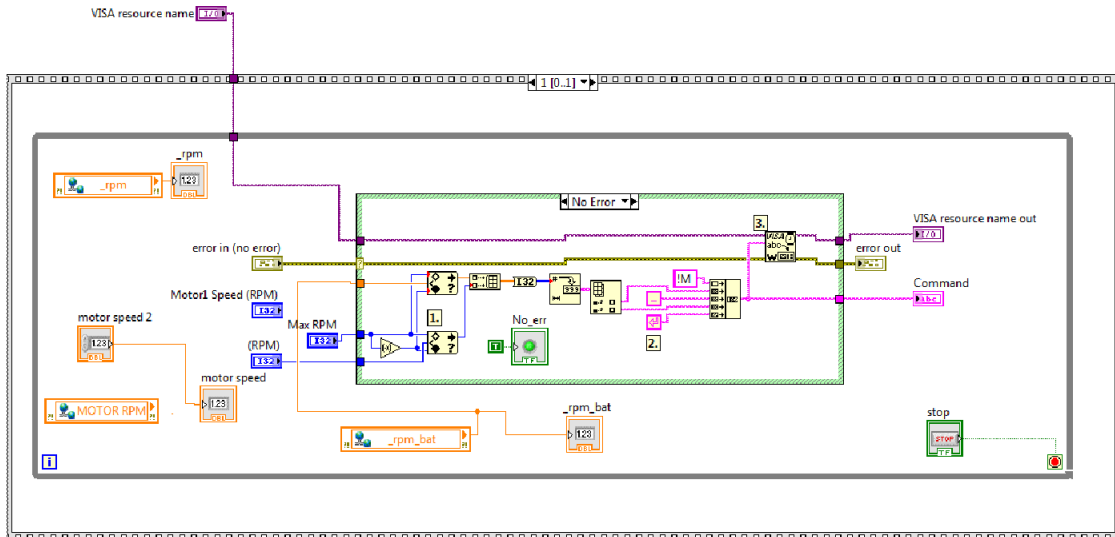
1. Η παραγόμενη ισχύ από το φωτοβολταϊκό σύστημα
2. Η καταναλισκόμενη ισχύ του κινητήρα της μονάδας αφαλάτωσης
3. Η στάθμη φόρτισης (State of Charge) του συσσωρευτή

Σε κάθε συνδεδεμένη μονάδα ορίζονται κάποιες παράμετροι όπως η τάση ( $vs_{usoll}$ ), τα ανώτερα/κατώτερα όρια ρεύματος ( $vs_{imax}/vs_{imin}$ ) και η κοινή τάση δικτύου που δημιουργεί το σύστημα της FLEXIVA ( $zk_{usoll}$ ).

Για τη ρύθμιση των στροφών του κινητήρα επιβάλλεται η επικοινωνία της εφαρμογής ελέγχου των μετατροπέων του LabVIEW με το DC Driver. Αυτό πραγματοποιείται με μια ακόμα εφαρμογή σε LabVIEW την οποία θα ονομάζουμε έλεγχος στροφών κινητήρα (Εικόνα 8.11 και Εικόνα 8.12). Όταν το μικροδίκτυο λειτουργεί με το συσσωρευτή ο κινητήρας της μονάδας αφαλάτωσης λειτουργεί σε σταθερές στροφές. Σε αυτή την περίπτωση οι στροφές με τις οποίες έχουμε ρυθμίσει να περιστρέφεται ο κινητήρας σε ένα λεπτό είναι οι 800.



Εικόνα 8.11: Γραφικό περιβάλλον LabVIEW της εφαρμογής ελέγχου στροφών του κινητήρα



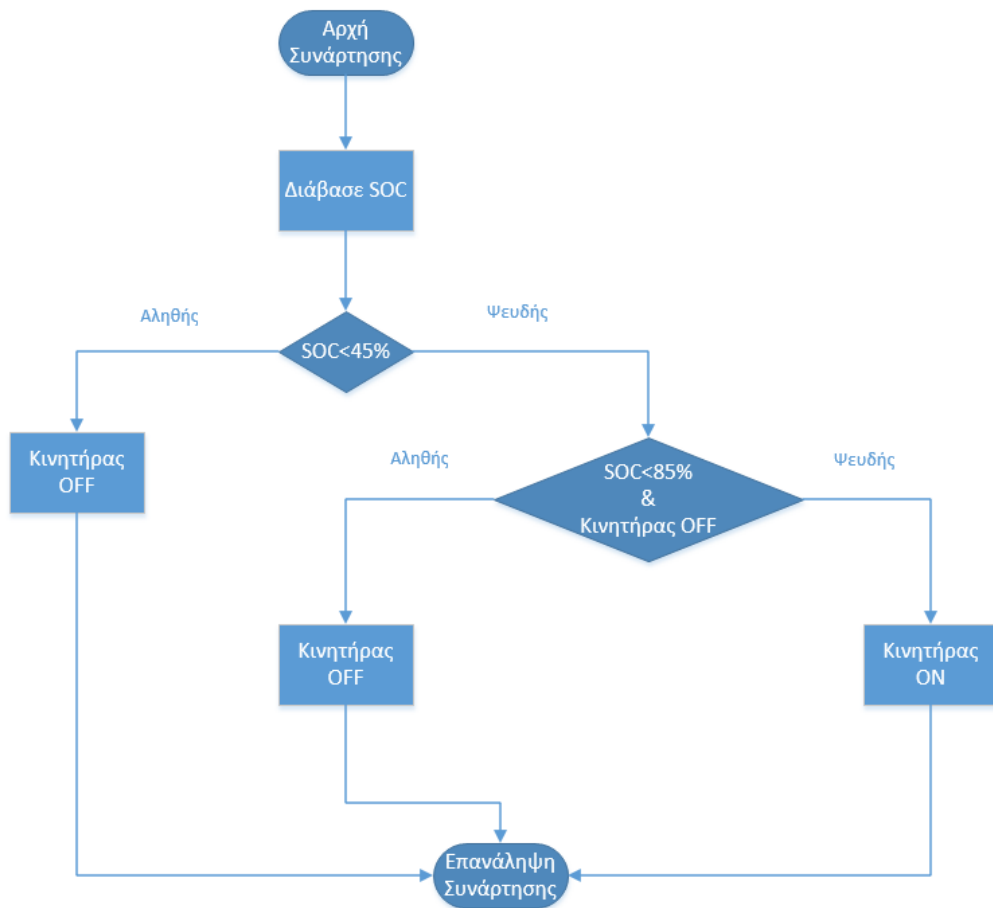
Εικόνα 8.12: Ανάπτυξη κώδικα LabVIEW της εφαρμογής ελέγχου στροφών του κινητήρα

## 8.2.6 Ανάλυση Λειτουργίας DC Μικροδικτύου

Η πειραματική διαδικασία, όπως έχει αναφερθεί, πραγματοποιείται σε δυο μέρη. Το πρώτο μέρος δεν περιλαμβάνει τη χρήση συσσωρευτή, δηλαδή το μικροδίκτυο λειτουργεί μόνο με την παραγόμενη ισχύ του φωτοβολταϊκού συστήματος. Όταν το φωτοβολταϊκό σύστημα δε δύναται να παράγει την ελάχιστη ισχύ λειτουργίας του κινητήρα της μονάδας αφαλάτωσης, το μικροδίκτυο σταματά τη λειτουργία του.

Το δεύτερο μέρος περιλαμβάνει τη χρήση συσσωρευτή, δηλαδή το μικροδίκτυο εκτός από την παραγόμενη ισχύ του φωτοβολταϊκού συστήματος συνεπικουρείται και από την ενέργεια του συσσωρευτή. Στα χρονικά διαστήματα κατά τα οποία το φωτοβολταϊκό σύστημα δεν παράγει την απαιτούμενη ισχύ για τη λειτουργία του κινητήρα της μονάδας αφαλάτωσης, ο συσσωρευτής παρέχει το υπόλοιπο της ισχύος, εφόσον η στάθμη φόρτισής του βρίσκεται σε ικανοποιητικό επίπεδο. Τα όρια της στάθμης φόρτισης μέσα στα οποία μπορεί να λειτουργεί η μονάδα αφαλάτωσης καθορίζονται από το χρήστη. Τα όρια αυτά έχουν τεθεί στο 85 % και στο 45 %. Στο Διάγραμμα 8.4 παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής της διαδικασίας λειτουργίας του κινητήρα μέσω του συσσωρευτή.

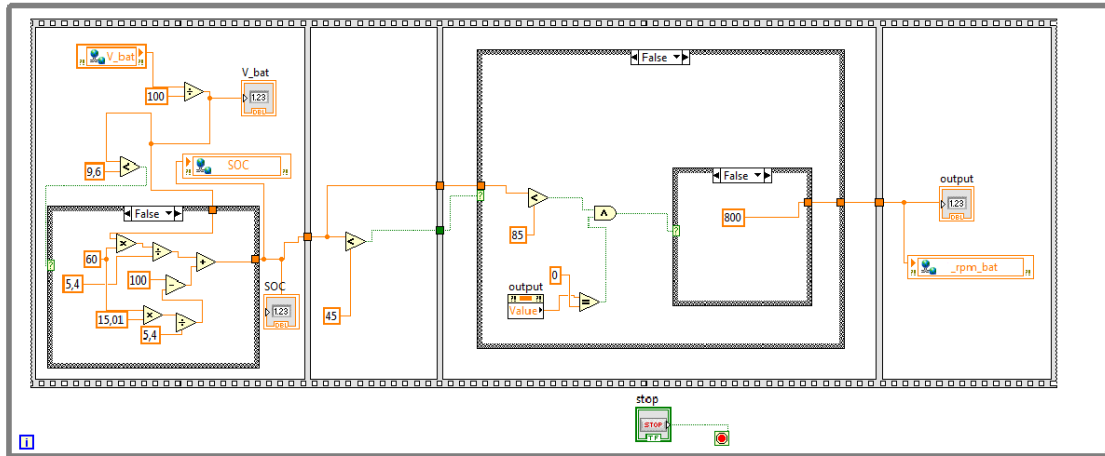




**Διάγραμμα 8.4: Διάγραμμα ροής ελέγχου λειτουργίας του κινητήρα μέσω του συσσωρευτή**

Έστω ότι χρονικά η λειτουργία του μικροδικτύου βρίσκεται νωρίς το πρωί. Όταν προβάλλουν οι πρώτες ακτίνες του ηλίου, το φωτοβολταϊκό σύστημα δεν παρέχει την ισχύ που απαιτεί ο κινητήρας. Παράλληλα η συνάρτηση ελέγχου λειτουργίας του κινητήρα μέσω του συσσωρευτή είναι μόνιμα ενεργή και ελέγχει τη στάθμη φόρτισης του συσσωρευτή. Όσο η στάθμη φόρτισης του συσσωρευτή είναι μικρότερη του 45 % ο κινητήρας παραμένει κλειστός. Εάν η στάθμη φόρτισης του συσσωρευτή είναι μεγαλύτερη του 45 % αλλά μικρότερη του 85 % και ταυτόχρονα ο κινητήρας δεν είναι σε λειτουργία τότε ο κινητήρας παραμένει κλειστός. Σε αντίθετη περίπτωση, δηλαδή είτε η στάθμη φόρτισης είναι άνω του 85 %, είτε ο κινητήρας είναι ενεργός, ο κινητήρας, είτε τίθεται για πρώτη φορά σε λειτουργία, είτε παραμένει σε λειτουργία. Φυσικά τα όρια φόρτισης και εκφόρτισης μπορούν να τροποποιηθούν.

Η μετατροπή του διαγράμματος ροής σε εφαρμογή του LabVIEW παρουσιάζεται στην Εικόνα 8.13.



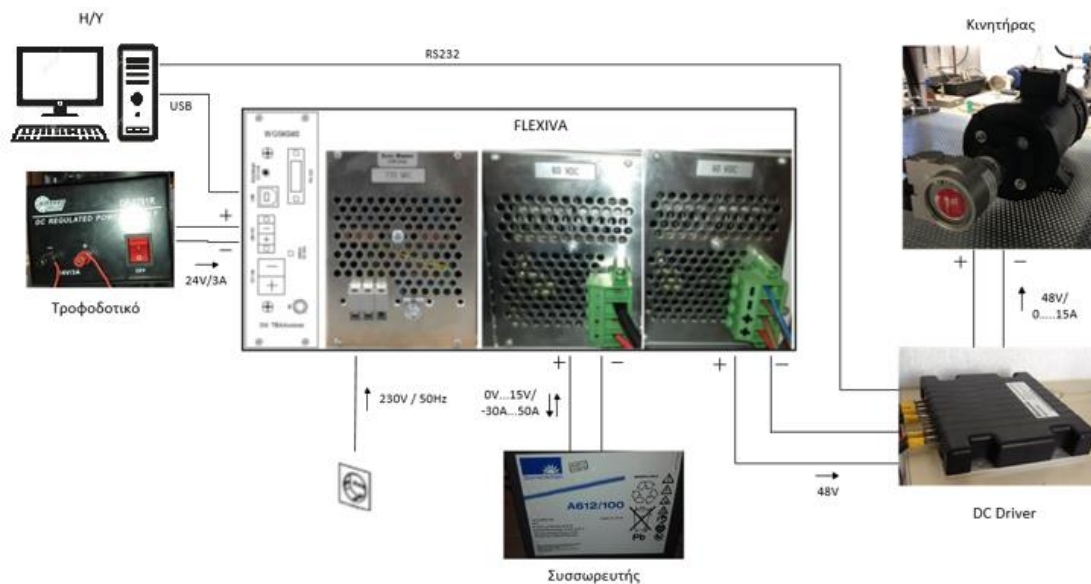
**Εικόνα 8.13: Ανάπτυξη κώδικα LabVIEW της εφαρμογής ελέγχου λειτουργίας του κινητήρα μέσω του συσσωρευτή**

Ο υπολογισμός για την εύρεση του ποσοστού της στάθμης φόρτισης του συσσωρευτή έγινε βάσει των τιμών των τάσεων του συγκεκριμένου συσσωρευτή. Σε πλήρη φόρτιση (100 %) ο συσσωρευτής βρίσκεται σε τάση 15 V ενώ σε μερική (40 %) στα 9.6 V. Θεωρώντας γραμμική την περιοχή φόρτισης μεταξύ αυτών των δυο σημείων υπολογίζεται η στάθμη φόρτισης του συσσωρευτή.

### 8.2.7 Διατάξεις DC Μικροδικτύου

Κατά τη διάταξη στην οποία γίνεται χρήση του συσσωρευτή (Εικόνα 8.14) χρησιμοποιούνται όλοι οι μετατροπείς του συστήματος της FLEXIVA. Ο αριστερός μετατροπέας που συνδέεται με το AC δίκτυο του εργαστηρίου είναι AC-to-DC και προσομοιώνει το φωτοβολταϊκό σύστημα. Τα δεδομένα της λειτουργίας του φωτοβολταϊκού συστήματος παρέχονται στην εφαρμογή ελέγχου των μετατροπέων του LabVIEW σε μορφή πινάκων και περιέχουν την τάση και το ρεύμα του φωτοβολταϊκού συστήματος ανά πέντε λεπτά λειτουργίας. Οι παράμετροι που ορίζονται στο LabVIEW για την τροφοδοσία του μικροδικτύου είναι η τάση ( $v_{s\_usoll} = 48 \text{ V}$ ), το ανώτερο όριο τιμής ρεύματος ( $v_{s\_imax} = 25 \text{ A}$ ), το κατώτερο όριο τιμής ρεύματος ( $v_{s\_imin} = 0 \text{ A}$ ) και η επιθυμητή τιμή κοινής τάσεως δικτύου FLEXIVA ( $z_{k\_usoll} = 375 \text{ V}$ ).

Ο μεσαίος μετατροπέας είναι DC-to-DC και συνδέεται με τους πόλους του συσσωρευτή. Η ροή ενέργειας στο συγκεκριμένο μετατροπέα είναι αμφίδρομη έτσι ώστε, είτε να φορτίζεται ο συσσωρευτής όταν υπάρχει πλεονάζουσα ενέργεια στο μικροδίκτυο, είτε να εκφορτίζεται όταν υπάρχει έλλειμμα ενέργειας.

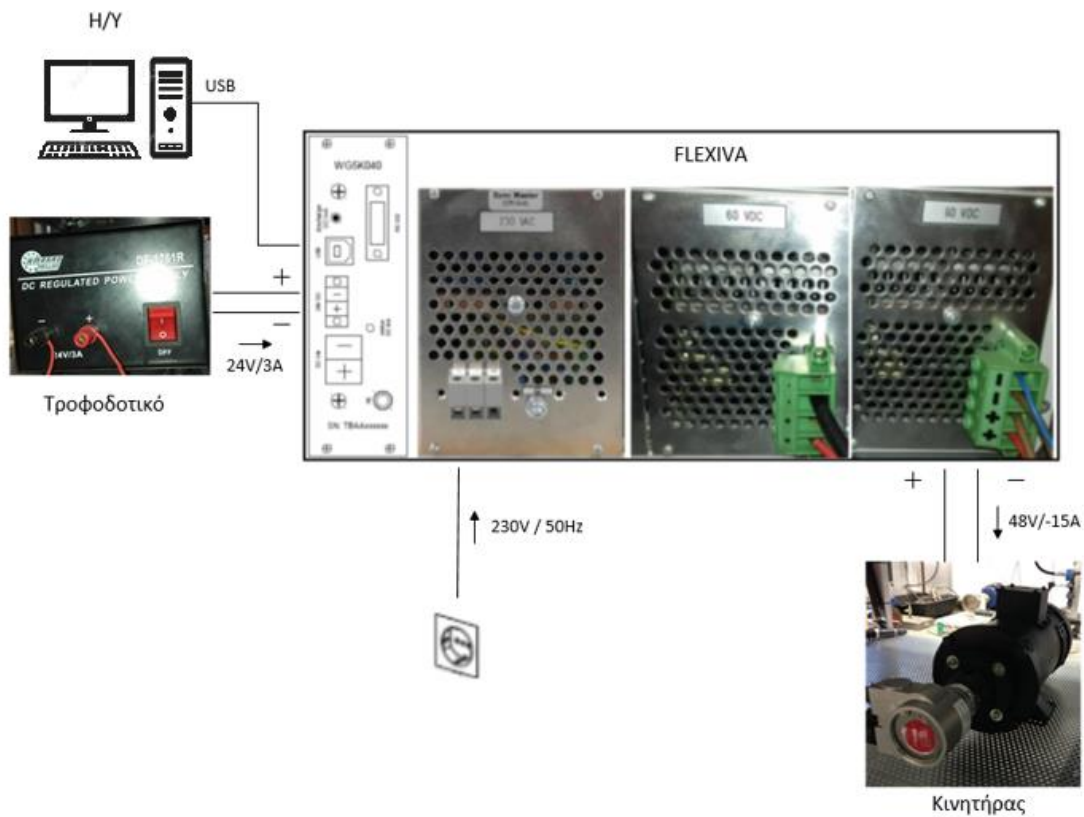


Εικόνα 8.14: Διάταξη DC μικροδικτύου με τη χρήση συσσωρευτή

Οι παράμετροι του συσσωρευτή, δηλαδή τα ανώτατα όρια τάσης και ρεύματος φόρτισης και εκφόρτισης του συσσωρευτή, ορίζονται από το χρήστη στα αντίστοιχα πεδία της εφαρμογής ελέγχου των μετατροπέων του LabVIEW ως εξής: επιθυμητή τιμή ρεύματος προς το συσσωρευτή (δηλαδή η τιμή ρεύματος για τη φόρτιση του συσσωρευτή  $vs\_imin = -30$  A), επιθυμητή τιμή ρεύματος από το συσσωρευτή (δηλαδή η τιμή ρεύματος για την εκφόρτιση του συσσωρευτή  $vs\_imax = 50$  A), επιθυμητή τιμή τάσεως ( $vs\_usoll = 15$  V) και επιθυμητή τιμή κοινής τάσεως δικτύου FLEXIVA ( $zk\_usoll = 373$  V). Το πρόσημο ορίζει τη φορά κατεύθυνσης του ρεύματος από το FLEXIVA προς τις συνδεδεμένες μονάδες. Για παράδειγμα, όταν υπάρχει ροή ενέργειας από το FLEXIVA προς το συσσωρευτή το πρόσημο είναι αρνητικό, ενώ από το συσσωρευτή προς το FLEXIVA το πρόσημο είναι θετικό. Οι συγκεκριμένες παράμετροι δόθηκαν βάσει των τεχνικών προδιαγραφών του συσσωρευτή και των οδηγιών του συστήματος FLEXIVA.

Ο δεξιός μετατροπέας είναι DC-to-DC και συνδέεται με το DC Driver. Το DC Driver επικοινωνεί με το ηλεκτρονικό υπολογιστή μέσω θύρας RS232 και συνδέεται με τον κινητήρα για τη ρύθμιση και τον έλεγχο των στροφών του. Οι παράμετροι του φορτίου, δηλαδή τα ανώτατα όρια τάσης και ρεύματος μέσα στα οποία μπορεί να λειτουργήσει ο κινητήρας της μονάδας αφαλάτωσης, ορίζονται από το χρήστη στα αντίστοιχα πεδία της εφαρμογής ελέγχου των μετατροπέων του LabVIEW ως εξής: επιθυμητή τιμή ρεύματος προς το φορτίο ( $vs\_imin = -18$  A), επιθυμητή τιμή ρεύματος από το φορτίο ( $vs\_imax = 0$  A), επιθυμητή τιμή τάσεως ( $vs\_usoll = 48$  V) και επιθυμητή τιμή κοινής τάσεως δικτύου FLEXIVA ( $zk\_usoll = 370$  V). Οι συγκεκριμένες παράμετροι δόθηκαν βάσει των τεχνικών προδιαγραφών του DC Driver και των οδηγιών του συστήματος FLEXIVA.

Όταν το μικροδίκτυο λειτουργεί χωρίς τη χρήση συσσωρευτή (Εικόνα 8.15), τότε ο μεσαίος μετατροπέας DC-to-DC του συστήματος της FLEXIVA δε συνδέεται πουθενά και παραμένει ανενεργός. Επιπλέον σε αυτή τη διάταξη δε χρησιμοποιείται το DC Driver αφού δεν υπάρχει πλέον έλεγχος του μικροδικτύου. Ο δεξιός DC-to-DC μετατροπέας του συστήματος FLEXIVA συνδέεται απ' ευθείας στον κινητήρα.



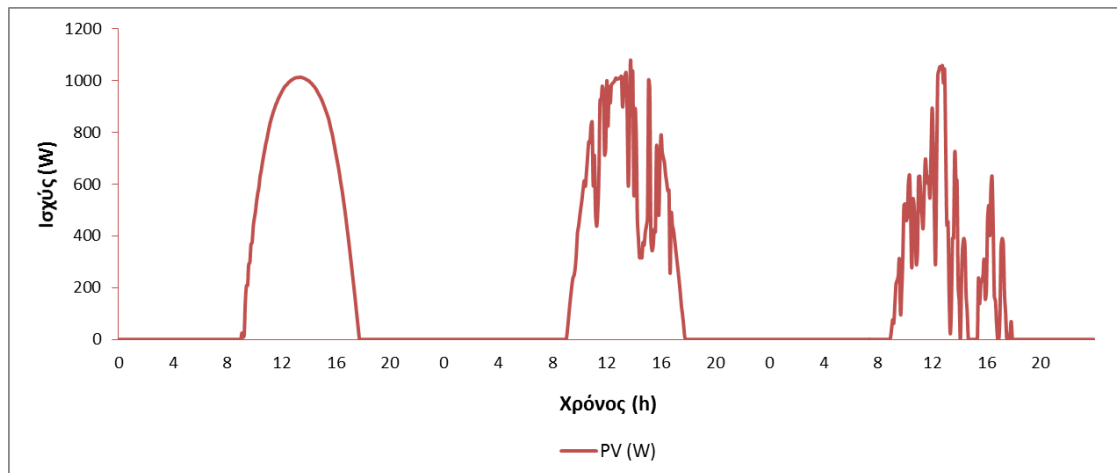
Εικόνα 8.15: Διάταξη DC μικροδικτύου χωρίς τη χρήση συσσωρευτή

Η συγκεκριμένη διάταξη διαφοροποιείται και στην εισαγωγή της παραμέτρου για την επιθυμητή τιμή ρεύματος προς το φορτίο η οποία αλλάζει και γίνεται  $vs\_imin = -15$  A.

### 8.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Η σύγκριση των αποτελεσμάτων των δυο πειραματικών διαδικασιών φανερώνει το κατά πόσο ο συσσωρευτής εκμεταλλεύεται την πλεονάζουσα ηλιακή ακτινοβολία και εντέλει κατά πόσο αυτό βελτιώνει την απόδοση του μικροδικτύου.

Για να είναι συγκρίσιμα τα αποτελέσματα θα πρέπει να έχουν μια κοινή βάση αναφοράς. Αυτό επιτυγχάνεται με την προσομοίωση της λειτουργίας του φωτοβολταϊκού συστήματος, του οποίου η απόδοση έχει καταγραφεί σε τρεις διαφορετικές ημέρες όπου επικρατούν διαφορετικές συνθήκες νέφωσης. Την πρώτη ημέρα επικρατεί πλήρης ηλιοφάνεια, τη δεύτερη ημέρα ελαφριά νέφωση ενώ την τρίτη ημέρα πλήρης νέφωση. Η απόδοση του φωτοβολταϊκού συστήματος στις συγκεκριμένες κλιματολογικές συνθήκες παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 8.5.



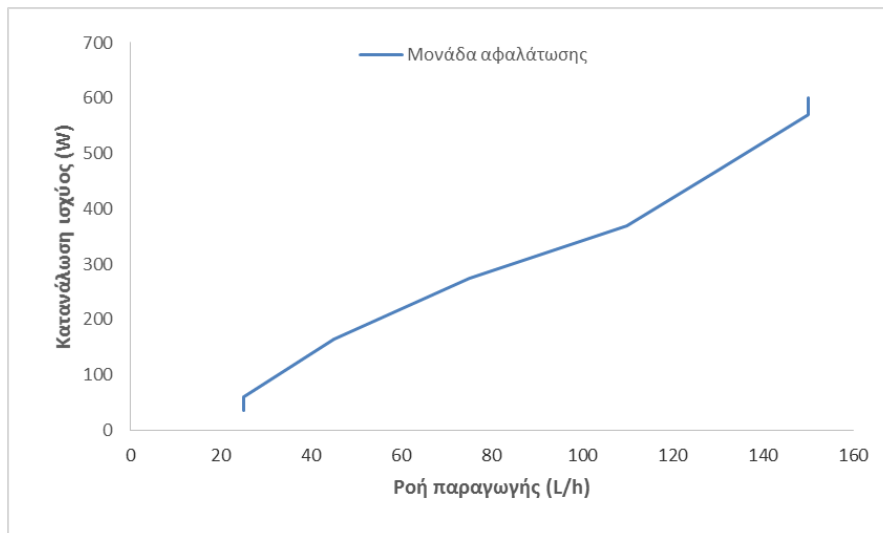
**Διάγραμμα 8.5:** Απόδοση φωτοβολταϊκού συστήματος κατά τη λειτουργία του DC μικροδικτύου

Στον Πίνακα 8.7 παρουσιάζονται οι τυπικές τιμές λειτουργίας της μονάδας αφαλάτωσης.

**Πίνακας 8.7:** Τυπικές τιμές λειτουργίας μονάδας αφαλάτωσης

Παραγωγή Ισχύος (W)	Κατανάλωση Ισχύος (W)	Πίεση Αντλίας (bar)	Ροή Παραγωγής (L/h)
640	600	9,5	150
600	570	9,5	150
500	470	8,5	130
400	370	7,5	110
300	275	7,0	75
200	165	6,5	45
100	60	5,5	25
80	35	3,0	25

Στο μέγιστο της λειτουργίας της, η μονάδα αφαλάτωσης παράγει 150 λίτρα νερού την ώρα. Γί αυτή την παραγωγή νερού η αντλία λειτουργεί υπό πίεση 9.5 bar, ο κινητήρας καταναλώνει 600 W ενώ το φωτοβολταϊκό σύστημα τροφοδοτεί τη μονάδα αφαλάτωσης με ισχύ 640 W. Παρατηρείται μια διαφορά μεταξύ της παραγόμενης ισχύς και της καταναλισκόμενης κατά 35 W – 40 W. Αυτή η διαφορά οφείλεται στην ιδιοκατανάλωση ενέργειας των μετατροπέων DC-to-DC και AC-to-DC του συστήματος FLEXIVA.



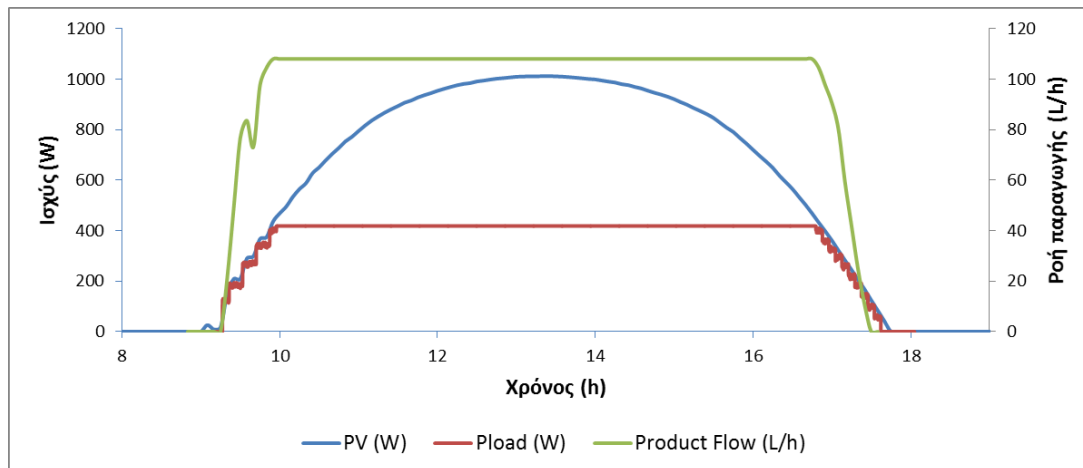
**Διάγραμμα 8.6: Λειτουργία μονάδας αφαλάτωσης**

Η σχέση μεταξύ της κατανάλωσης ισχύος από τον κινητήρα και της παραγωγής νερού από τη μονάδα αφαλάτωσης είναι σχεδόν γραμμική όπως παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 8.6. Όσο λοιπόν αυξάνεται η παραγωγή ισχύος από το φωτοβολταϊκό σύστημα, κατά τη διάρκεια της ημέρας, αυξάνεται και η παραγόμενη ποσότητα του καθαρού νερού από τη μονάδα αφαλάτωσης. Αντίστοιχα, όσο μειώνεται η παραγωγή ισχύος, λόγω μείωσης της ηλιακής ακτινοβολίας (από νέφωση ή τη δύση του ηλίου), μειώνεται και η παραγόμενη ποσότητα του καθαρού νερού.

### 8.3.1 Λειτουργία Μικροδικτύου Χωρίς Συσσωρευτή

Στη λειτουργία του μικροδικτύου χωρίς τη χρήση συσσωρευτή, η μονάδα αφαλάτωσης λειτουργεί μόνο από την τροφοδοσία του φωτοβολταϊκού συστήματος. Επιπλέον, δε εφαρμόζεται κάποιος έλεγχος στον κινητήρα της μονάδας οπότε αυτός λειτουργεί υπό μεταβλητές στροφές. Κάθε μεταβολή της ηλιακής ακτινοβολίας μεταφράζεται σε διαφορετικές στροφές ανά λεπτό του κινητήρα και αυτό έχει ως αποτέλεσμα μεταβολή της παραγόμενης ποσότητας νερού από τη μονάδα. Το ανώτερο όριο λειτουργίας του κινητήρα είναι οι 800 στροφές ανά λεπτό.

Στο Διάγραμμα 8.7 παρουσιάζεται η πρώτη ημέρα λειτουργίας του μικροδικτύου όπου επικρατεί πλήρης ηλιοφάνεια. Η καμπύλη PV(W) δεν είναι η πραγματική παραγόμενη ισχύς του φωτοβολταϊκού συστήματος στη ζήτηση της μονάδας αφαλάτωσης, αλλά η προσομοιάζουσα παραγόμενη ισχύς βάσει της αντίστοιχης ηλιακής ακτινοβολίας. Η πραγματική παραγόμενη ισχύς, όπως έχει αναφερθεί και στα προηγούμενα πειράματα, θα ήταν όση και η εκάστοτε ζήτηση.



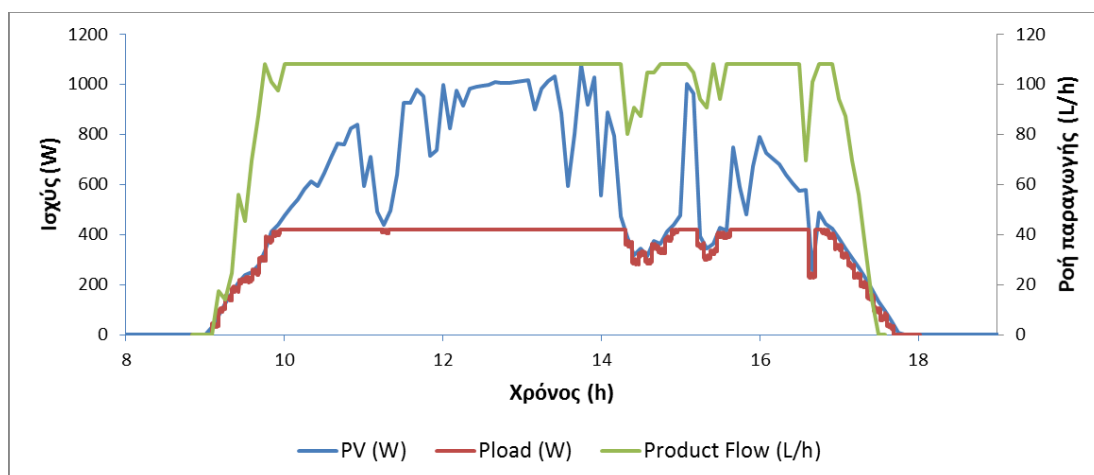
**Διάγραμμα 8.7: Λειτουργία DC μικροδικτύου χωρίς συσσωρευτή κατά την 1<sup>η</sup> ημέρα**

Αν και οι πρώτες ακτίνες του ηλίου εμφανίζονται στις 7:30 περίπου, το φωτοβολταϊκό σύστημα αρχίζει να παράγει ισχύ, η οποία είναι ικανή να θέσει σε λειτουργία τον κινητήρα της μονάδας αφαλάτωσης, στις 9:20 το πρωί με παραγωγή 20 λίτρων νερού ανά ώρα.

Από τις 10:00 το πρωί και έως τις 17:00 περίπου, ο κινητήρας λειτουργεί στο άνω όριο των 800 στροφών το λεπτό και η παραγωγή καθαρού νερού είναι στα 108 λίτρα την ώρα. Κατά αυτό το χρονικό διάστημα, το φωτοβολταϊκό σύστημα μπορεί να παράξει ισχύ από 400 W έως και 1 kW. Από αυτή την ισχύ μόνο τα 418 W καταναλώνονται από τη μονάδα αφαλάτωσης, το υπόλοιπο της ενέργειας δεν παράγεται. Θα μπορούσε να παραχθεί αν υπήρχε συνδεδεμένη με το φωτοβολταϊκό σύστημα κάποια άλλη μονάδα κατανάλωσης ή πραγματοποιούνταν αποθήκευση ενέργειας.

Μετά τις 17:00 όπου αρχίζει η δύση του ηλίου, μειώνονται σταδιακά οι στροφές του κινητήρα άρα και η παραγόμενη ποσότητα νερού από τη μονάδα αφαλάτωσης.

Στο Διάγραμμα 8.8 παρουσιάζεται η δεύτερη ημέρα λειτουργίας του μικροδικτύου όπου επικρατεί μερική νέφωση.



**Διάγραμμα 8.8: Λειτουργία DC μικροδικτύου χωρίς συσσωρευτή κατά τη 2<sup>η</sup> ημέρα**

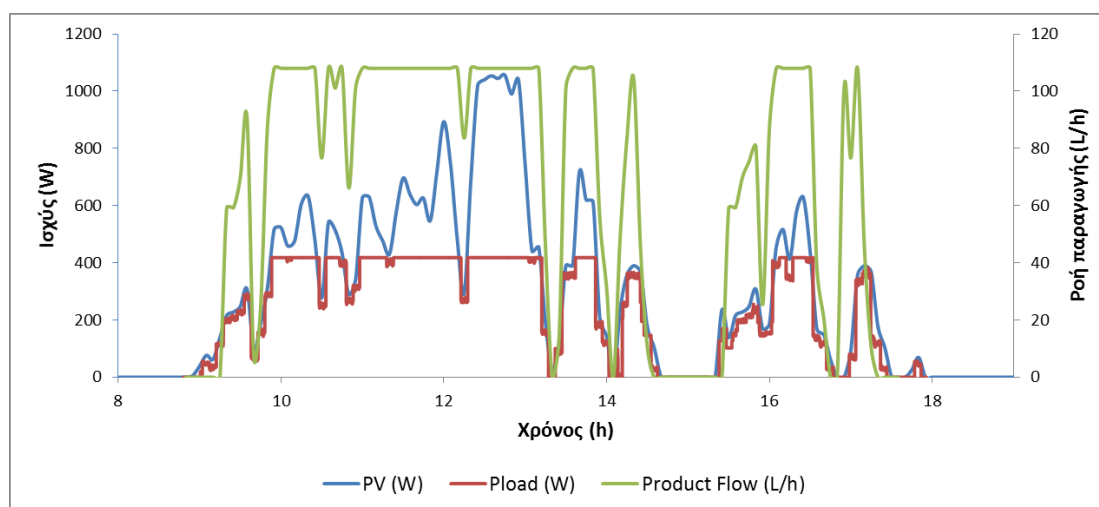
Όπως συνέβη και στην πρώτη ημέρα λειτουργίας της μονάδας αφαλάτωσης, έτσι και στη δεύτερη ημέρα η μονάδα αφαλάτωσης αρχίζει τη λειτουργία της περίπου στις 9:20 το πρωί, με παραγωγή 17 λίτρων νερού ανά ώρα.

Από τις 10:00 και έως τις 14:20 περίπου, ο κινητήρας καταναλώνει 418 W και λειτουργεί στο ανώτερο όριο του, στις 800 στροφές το λεπτό, ενώ την ίδια στιγμή η μονάδα αφαλάτωσης παράγει 108 λίτρα την ώρα. Η επικρατούσα νέφωση έχει ως αποτέλεσμα την αυξομείωση της παραγόμενης ισχύος του φωτοβολταϊκού συστήματος χωρίς όμως αυτό να επηρεάζει τη λειτουργία της μονάδας. Φυσικά και εδώ το φωτοβολταϊκό σύστημα θα μπορούσε να παράξει περισσότερη ισχύ από αυτή που καταναλώνεται από τη μονάδα αφαλάτωσης.

Μετά τις 14:20 και μέχρι τις 17:00 υπάρχουν ορισμένες χρονικές στιγμές όπου η νέφωση προκαλεί μείωση της παραγόμενης ισχύος κάτω των 418 W με αποτέλεσμα να μειώνονται οι στροφές του κινητήρα και η παραγόμενη ποσότητα νερού.

Μετά τις 17:00, όπου αρχίζει η δύση του ηλίου, μειώνονται σταδιακά οι στροφές του κινητήρα άρα και η παραγόμενη ποσότητα νερού.

Στο Διάγραμμα 8.9 παρουσιάζεται η τρίτη ημέρα λειτουργίας του μικροδικτύου όπου επικρατεί πλήρη νέφωση.



**Διάγραμμα 8.9: Λειτουργία DC μικροδικτύου χωρίς συσσωρευτή κατά την 3<sup>η</sup> ημέρα**

Η μονάδα αφαλάτωσης αρχίζει τη λειτουργία της περίπου στις 9:20 το πρωί με παραγωγή 3 λίτρων νερού ανά ώρα.

Από τις 10:00 και έως τη δύση του ηλίου επικρατεί μεγάλη νέφωση με αποτέλεσμα να αυξομειώνεται συνεχώς η παραγόμενη ισχύς του φωτοβολταϊκού συστήματος με αποτέλεσμα αυτό να επηρεάζει τη λειτουργία της μονάδας αφαλάτωσης. Ο κινητήρας λειτουργεί στο ανώτερο όριο του ορισμένες χρονικές στιγμές ενώ αρκετές άλλες λειτουργεί με μειωμένες στροφές. Σε δυο μάλιστα περιπτώσεις η νέφωση είναι τόσο πυκνή με αποτέλεσμα το φωτοβολταϊκό σύστημα να μην παράγει καθόλου ισχύ και ο κινητήρας να σταματά εντελώς τη λειτουργία του.



Παρόλη τη νέφωση, υπάρχουν χρονικά διαστήματα όπου το φωτοβολταϊκό σύστημα θα μπορούσε να παράγει περισσότερη ενέργεια η οποία θα καταναλωνόταν από κάποια άλλη μονάδα.

Στον Πίνακα 8.8 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της λειτουργίας της μονάδας αφαλάτωσης για την κάθε ημέρα. Στην 1<sup>η</sup> στήλη αναφέρεται η ενέργεια που θα μπορούσε να παράξει το φωτοβολταϊκό σύστημα βάσει της εκπεμπόμενης ηλιακής ακτινοβολίας. Στη 2<sup>η</sup> στήλη αναφέρεται η ενέργεια που καταναλώθηκε για τη λειτουργία της μονάδας αφαλάτωσης. Στην 3<sup>η</sup> στήλη αναφέρεται η ποσότητα καθαρού νερού που παράχθηκε από τη μονάδα αφαλάτωσης σε m<sup>3</sup> ενώ στην 4<sup>η</sup> στήλη αναφέρεται η ειδική κατανάλωση ενέργειας.

**Πίνακας 8.8: Συνολικά αποτελέσματα λειτουργίας DC μικροδικτύου χωρίς συσσωρευτή**

Ημέρα	Παραγωγή ενέργειας PV βάσει ηλιακής ακτινοβολίας (Wh)	Κατανάλωση ενέργειας Φορτίου (Wh)	Συνολική παραγωγή πόσιμου νερού (m <sup>3</sup> )	Ειδική κατανάλωση ενέργειας (KWh/m <sup>3</sup> )
1 <sup>η</sup>	6243.03	3295.14	0.806	4.09
2 <sup>η</sup>	5282.19	3232.88	0.797	4.05
3 <sup>η</sup>	3240.55	2255.00	0.590	3.82

Όπως ήταν αναμενόμενο, την 1<sup>η</sup> ημέρα παράχθηκε η μεγαλύτερη ποσότητα νερού από τη μονάδα αφαλάτωσης λόγω της πλήρους ηλιοφάνειας. Ακολουθεί η 2<sup>η</sup> ημέρα όπου μόνο σε τρεις περιπτώσεις υπολειπόταν ο κινητήρας. Την 3<sup>η</sup> ημέρα παράχθηκε η μικρότερη ποσότητα νερού, σχεδόν 0.216 m<sup>3</sup> (216 λίτρα) λιγότερα από την 1<sup>η</sup> ημέρα.

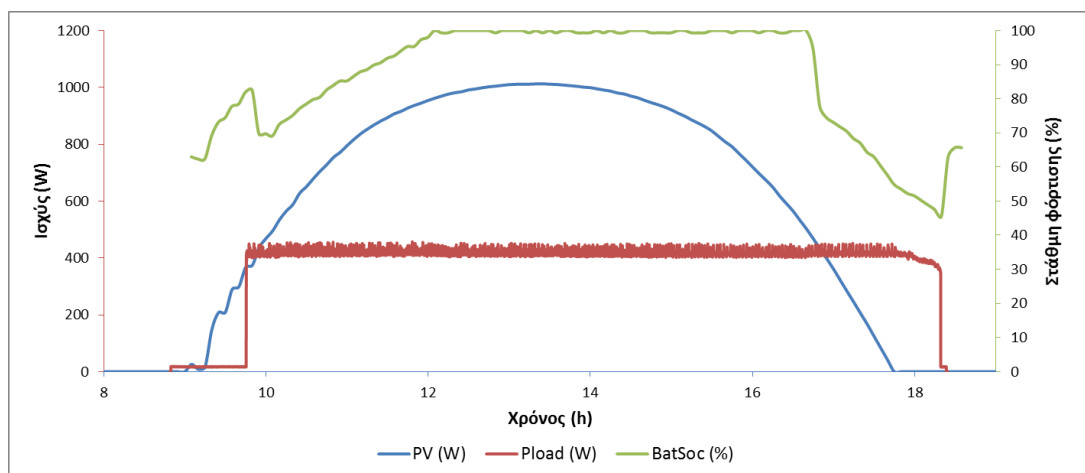
Αν και την 3<sup>η</sup> ημέρα υπήρξε η μικρότερη παραγωγή πόσιμου νερού, η μονάδα αφαλάτωσης λειτούργησε πιο «οικονομικά» καθώς η αναλογία παραγωγής νερού και καταναλισκόμενης ενέργειας είναι καλύτερη σε σχέση με τις άλλες δυο ημέρες. Αυτό συμβαίνει διότι η μονάδα αφαλάτωσης λειτουργεί ως μεταβλητό φορτίο.

Επιπλέον, από τη σύγκριση της 1<sup>ης</sup> και της 2<sup>ης</sup> στήλης, παρατηρείται το μέγεθος της ενέργειας που μένει ανεκμετάλλευτο.

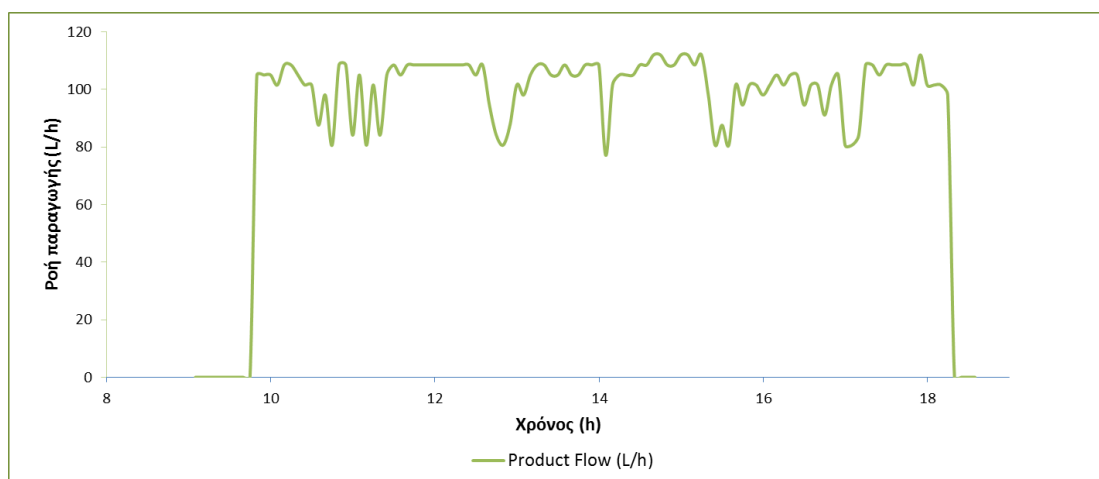
### 8.3.2 Λειτουργία Μικροδικτύου Με Συσσωρευτή

Στη λειτουργία του μικροδικτύου με τη χρήση συσσωρευτή, η μονάδα αφαλάτωσης δε τροφοδοτείται μόνο από το φωτοβολταϊκό σύστημα αλλά και από το συσσωρευτή. Εξάλλου, στη συγκεκριμένη διάταξη εφαρμόζεται και έλεγχος στον κινητήρα της μονάδας. Στη συγκεκριμένη διάταξη ο κινητήρας για όσο χρόνο βρίσκεται σε λειτουργία στρέφεται στο ανώτερο όριο των στροφών του, αυτό των 800 ανά λεπτό. Ο λόγος για τον οποίον δε λειτουργεί σε διαφορετικές στροφές είναι ότι με τη χρήση του συσσωρευτή και τον έλεγχο μέσω του DC Driver δεν επηρεάζεται η μονάδα από τις μεταβολές της ηλιακής ακτινοβολίας. Όσο η στάθμη φόρτισης του συσσωρευτή βρίσκεται άνω του 45 % αυτός λειτουργεί κανονικά στις 800 στροφές το λεπτό ενώ αν η στάθμη φόρτισης πέσει κάτω του 45 % ο κινητήρας σταματά τη λειτουργία του.

Στο Διάγραμμα 8.10 παρουσιάζεται η πρώτη ημέρα λειτουργίας του μικροδικτύου όπου επικρατεί πλήρης ηλιοφάνεια και στο Διάγραμμα 8.11 η ροή παραγωγής κατά το ίδιο χρονικό διάστημα.



**Διάγραμμα 8.10: Λειτουργία DC μικροδικτύου με συσσωρευτή κατά την 1<sup>η</sup> ημέρα**



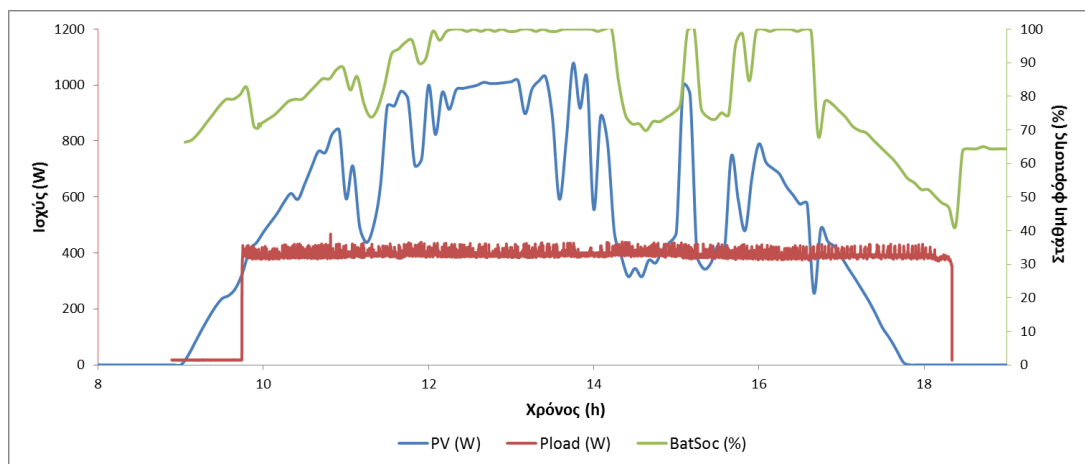
**Διάγραμμα 8.11: Ροή παραγωγής DC μικροδικτύου με συσσωρευτή κατά την 1<sup>η</sup> ημέρα**

Αρχικά, η στάθμη φόρτισης του συσσωρευτή βρίσκεται στο 63 %. Βάσει του ελέγχου, για να τεθεί σε λειτουργία ο κινητήρας θα πρέπει η στάθμη φόρτισης να φθάσει το 85 % όπως έχει περιγραφεί στο Διάγραμμα 8.4. Στις 9:50 ο κινητήρας τίθεται σε πλήρη λειτουργία όπου στρέφεται με 800 στροφές το λεπτό και καταναλώνει περίπου 415 W. Αντίθετα στη λειτουργία χωρίς συσσωρευτή η μονάδα αφαλάτωσης άρχισε να υπολειτουργεί στις 9:20 και να τίθεται σε πλήρη λειτουργία στις 10:00.

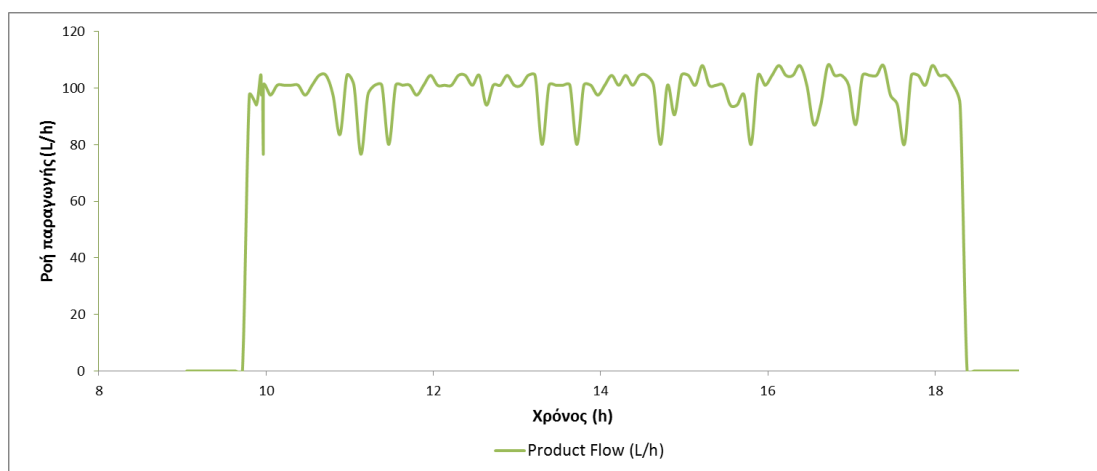
Καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας, λόγω της συνεχούς ηλιακής ακτινοβολίας, ο συσσωρευτής φορτίζεται. Στις 12:00 η στάθμη φόρτισης βρίσκεται στο 100 % και διατηρείται σε αυτό το επίπεδο έως τις 16:50, όπου το φωτοβολταϊκό σύστημα παράγει λιγότερα από 415 W. Αποτέλεσμα αυτού είναι η σταδιακή εκφόρτιση του συσσωρευτή. Σε αυτό το σημείο, στη διάταξη χωρίς τη χρήση συσσωρευτή, ο κινητήρας άρχισε να υπολειτουργεί. Εδώ, ο κινητήρας βρίσκεται σε πλήρη λειτουργία έως και τις 18:20, στιγμή κατά την οποία η στάθμη φόρτισης πέφτει κάτω του 45 %.

Οι μεταβολές που παρατηρούνται στη ροή παραγωγής είναι λόγω του τρόπου λειτουργίας της εμβολοφόρου αντλίας (Clark pump) της μονάδας αφαλάτωσης. Δηλαδή το έμβολο δε βρίσκεται πάντα στην ίδια θέση κατά την καταγραφή των τιμών.

Στο Διάγραμμα 8.12 παρουσιάζεται η δεύτερη ημέρα λειτουργίας του μικροδικτύου όπου επικρατεί μερική νέφωση και στο Διάγραμμα 8.13 η ροή παραγωγής κατά το ίδιο χρονικό διάστημα..



**Διάγραμμα 8.12: Λειτουργία DC μικροδικτύου με συσσωρευτή κατά τη 2<sup>η</sup> ημέρα**

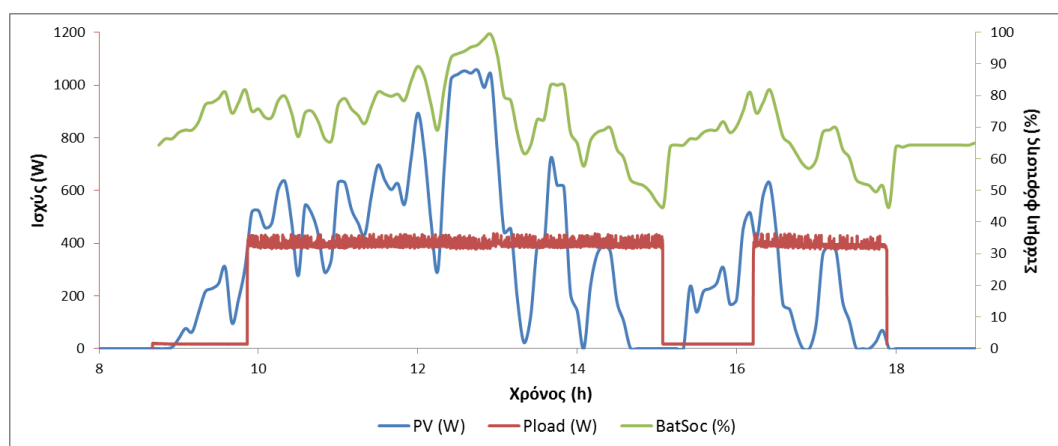


**Διάγραμμα 8.13: Ροή παραγωγής DC μικροδικτύου με συσσωρευτή κατά τη 2<sup>η</sup> ημέρα**

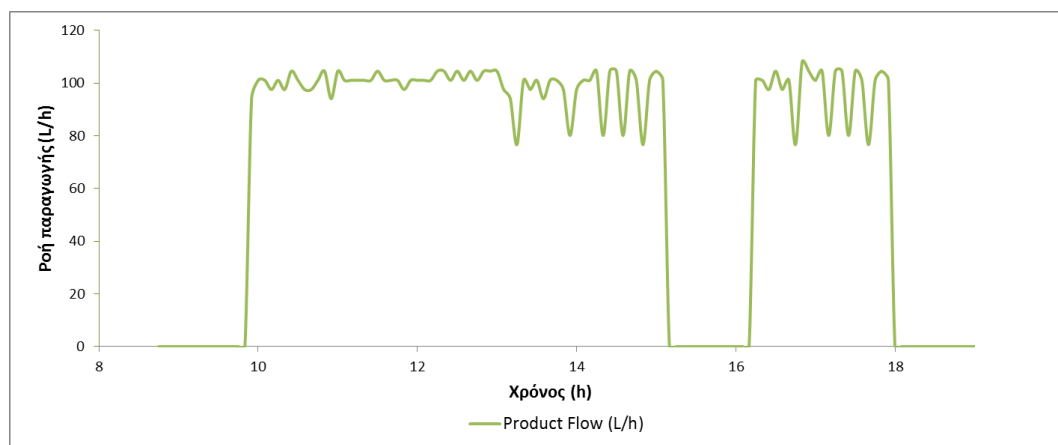
Ακριβώς όπως και την 1<sup>η</sup> ημέρα έτσι και εδώ ο κινητήρας βρίσκεται σε πλήρη λειτουργία από τις 9:50 έως τις 18:20, χρονικές στιγμές κατά τις οποίες η στάθμη φόρτισης του συσσωρευτή φθάνει στο 85 % και 45 % αντίστοιχα.

Το σημείο στο οποίο διαφέρει η 2<sup>η</sup> ημέρα από την 1<sup>η</sup> είναι η διακύμανση της στάθμης φόρτισης κατά τη διάρκεια της ημέρας λόγω της νέφωσης, η οποία όμως νέφωση δεν είναι ικανή να τη μειώσει κάτω του 45 % για να σταματήσει τη λειτουργία του κινητήρα. Οι χρονικές στιγμές στις οποίες η στάθμη φόρτισης πέφτει στα χαμηλότερα ποσοστά του 75 % και 69 % είναι εκείνες στις οποίες το φωτοβολταϊκό σύστημα παράγει λιγότερο από 415 W. Αυτές τις χρονικές στιγμές ο συσσωρευτής εκφορτίζεται, καθώς προσφέρει το υπόλοιπο της ισχύς για να διατηρηθεί σε λειτουργία ο κινητήρας.

Στο Διάγραμμα 8.14 παρουσιάζεται η τρίτη ημέρα λειτουργίας του μικροδικτύου όπου επικρατεί μεγάλη νέφωση και στο Διάγραμμα 8.15 η ροή παραγωγής κατά το ίδιο χρονικό διάστημα.



**Διάγραμμα 8.14: Λειτουργία DC μικροδικτύου με συσσωρευτή κατά την 3<sup>η</sup> ημέρα**



**Διάγραμμα 8.15: Ροή παραγωγής DC μικροδικτύου με συσσωρευτή κατά την 3<sup>η</sup> ημέρα**

Την 3<sup>η</sup> ημέρα ο κινητήρας τίθεται σε λειτουργία πάλι στις 9:50 αλλά κατά τη διάρκεια της ημέρας σταματά στις 15:15 και για μια ώρα λόγω της υπερβολικής νέφωσης. Από τις 14:45 και έως τις 15:20, η μονάδα αφαλάτωσης τροφοδοτείται αποκλειστικά από τον συσσωρευτή καθώς η φωτοβολταϊκή συστοιχία δεν παράγει καθόλου ενέργεια. Στις 16:15 τίθεται σε λειτουργία ξανά η μονάδα, αφού ο συσσωρευτής έχει φθάσει στο 85 % της στάθμης φόρτισης. Η μονάδα αφαλάτωσης σταματά οριστικά τη λειτουργία της στις 18:00 αντί για τις 18:20 που συνέβαινε τις προηγούμενες δυο ημέρες. Ο λόγος γι' αυτή την «πρώρη» διακοπή λειτουργίας είναι ότι η στάθμη φόρτισης του συσσωρευτή δεν αρχίζει τη σταδιακή της εκφόρτιση από το 100 % όπως συνέβαινε τις προηγούμενες δυο ημέρες (στις 16:50) αλλά από το 85 %, με αποτέλεσμα να φθάσει στο 45 % πολύ πιο σύντομα.

Στον Πίνακα 8.9 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της μονάδας αφαλάτωσης για την κάθε ημέρα. Στην 1<sup>η</sup> στήλη αναφέρεται η ενέργεια που θα μπορούσε να παράξει το φωτοβολταϊκό σύστημα βάσει της εκπεμπόμενης ηλιακής ακτινοβολίας. Στη 2<sup>η</sup> στήλη αναφέρεται η ενέργεια που καταναλώθηκε για τη λειτουργία της μονάδας αφαλάτωσης.

Στην 3<sup>η</sup> στήλη αναφέρεται η ποσότητα καθαρού νερού που παράχθηκε από τη μονάδα αφαλάτωσης σε m<sup>3</sup> ενώ στην 4<sup>η</sup> στήλη αναφέρεται η ειδική κατανάλωση ενέργειας.

**Πίνακας 8.9: Συνολικά αποτελέσματα λειτουργίας DC μικροδικτύου με συσσωρευτή**

Ημέρα	Παραγωγή ενέργειας PV βάσει ηλιακής ακτινοβολίας (Wh)	Κατανάλωση ενέργειας φορτίου (Wh)	Συνολική παραγωγή πόσιμου νερού (m <sup>3</sup> )	Ειδική κατανάλωση ενέργειας (KWh/m <sup>3</sup> )
1 <sup>η</sup>	6243.03	3585.80	0.866	4.14
2 <sup>η</sup>	5282.19	3385.84	0.848	4.00
3 <sup>η</sup>	3240.55	2766.68	0.692	4.00

Όπως ήταν αναμενόμενο, τις δυο πρώτες ημέρες παράχθηκαν σχεδόν οι ίδιες ποσότητες νερού από τη μονάδα αφαλάτωσης. Η νέφωση της δεύτερης ημέρας δεν επηρέασε την παραγωγή αφού ο συσσωρευτής κάλυψε τις όποιες απώλειες. Η μικρή διαφορά που εμφανίζεται στη 2<sup>η</sup> στήλη μεταξύ της 1<sup>ης</sup> και 2<sup>ης</sup> ημέρας οφείλεται στον εμβολοφόρο τρόπο λειτουργίας της μονάδας αφαλάτωσης. Την 3<sup>η</sup> ημέρα παράχθηκε η μικρότερη ποσότητα νερού, σχεδόν 174 λίτρα λιγότερα από τις προηγούμενες ημέρες, λόγω του ότι η νέφωση ήταν τόσο πυκνή που ο συσσωρευτής έπεσε κάτω του 45 % με αποτέλεσμα τη διακοπή της λειτουργίας της μονάδας αφαλάτωσης.

Από τη σύγκριση της 1<sup>ης</sup> στήλης και της 2<sup>ης</sup> παρατηρούμε ξανά την ενέργεια που μένει ανεκμετάλλευτη. Ειδικά στην περίπτωση της 3<sup>ης</sup> ημέρας θα μπορούσε να εξασφαλιστεί η συνεχή λειτουργία της μονάδας αφαλάτωσης εάν υπήρχε ένας ακόμα συσσωρευτής αφού θα εκμεταλλευόμασταν την επιπλέον ενέργεια των 500 Wh από την ηλιακή ακτινοβολία.

Από τα αποτελέσματα της ειδικής κατανάλωσης ενέργειας συμπεραίνουμε ότι την 3<sup>η</sup> και τη 2<sup>η</sup> ημέρα η μονάδα αφαλάτωσης λειτούργησε πιο «οικονομικά» σε σχέση με την 1<sup>η</sup>. Βέβαια τη 2<sup>η</sup> ημέρα παράχθηκε αρκετά μεγαλύτερη ποσότητα νερού σε σχέση με την 3<sup>η</sup> ημέρα.

Από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων των δύο πειραματικών διαδικασιών (Πίνακας 8.8 και Πίνακας 8.9), με και χωρίς συσσωρευτή, εύκολα διαπιστώνεται η βελτίωση αύξηση της παραγωγής του πόσιμου νερού και στις τρεις ημέρες. Έτσι αποδεικνύεται και το πόσο καλύτερα αξιοποιείται η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια από το φωτοβολταϊκό σύστημα.

Από τη σύγκριση της ειδικής κατανάλωσης ενέργειας στην 3<sup>η</sup> ημέρα, αποδεικνύεται ότι είναι οικονομικότερος ο τρόπος λειτουργίας της μονάδας αφαλάτωσης όταν αυτή λειτουργεί υπό μεταβλητές στροφές. Επιπλέον, διαπιστώνουμε ότι βελτιώθηκε ο τρόπος λειτουργίας της 2<sup>ης</sup> ημέρας αλλά χειροτέρευσε της 3<sup>ης</sup> ημέρας.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9 : ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

## 9.1 Συμπεράσματα

Στόχος της παρούσας εργασίας, ήταν η μελέτη συμπεριφοράς AC και DC μικροδικτύων σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας και η σύγκρισή τους. Κατά τη διενέργεια των πειραμάτων διαπιστώθηκε η ευκολία με την οποία τα AC μικροδίκτυα συνδέονται και αποσυνδέονται από το δημόσιο δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτό άλλωστε είναι ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματά των AC μικροδικτύων. Η διαδικασία αυτή όμως δεν είναι και τόσο απλή, καθώς στα διασυνδεδεμένα μικροδίκτυα η συχνότητα λειτουργίας του μικροδικτύου πρέπει να συμβαδίζει με αυτή του άπειρου ΣΗΕ. Από την άλλη μεριά, στα μη διασυνδεδεμένα μικροδίκτυα, η συχνότητα λειτουργίας επηρεάζεται σημαντικά από τους συσσωρευτές,. Κατά τη διαδικασία της φόρτισης και εκφόρτισης των συσσωρευτών διαπιστώθηκε αυξομείωση της συχνότητας λειτουργίας του μικροδικτύου. Αποτέλεσμα όλων αυτών είναι ότι ο έλεγχος των AC μικροδικτύων είναι αρκετά δύσκολη διαδικασία καθώς πέρα από το επίπεδο της τάσης πρέπει να ελέγχεται και η συχνότητα λειτουργίας.

Ένα βασικό χαρακτηριστικό των AC μικροδικτύων είναι η τοπολογία τους, η οποία είναι εντελώς ανάλογη των κλασικών δικτύων διανομής. Αυτό απαιτεί τη χρήση περισσότερου εξοπλισμού ηλεκτρονικών ισχύος και πιο συγκεκριμένα DC-to-AC μετατροπείς. Η DC τάση των φωτοβολταϊκών συστημάτων μετατρέπεται σε AC για να τροφοδοτήσει φορτία τα οποία στην πλειονότητά τους είναι DC (π.χ. οικιακός εξοπλισμός). Κατά τη μετατροπή αυτή καταναλώνεται σημαντική ενέργεια. Αυτή είναι μια βασική αιτία για την οποία το δίκτυο διανομής αναμένεται να αλλάξει μορφή τα επόμενα χρόνια με προσανατολισμό στη μεταφορά ισχύος σε DC τάση.

Σε αντίθεση με τα AC μικροδίκτυα, η τοπολογία του DC μικροδικτύου είναι απλούστερη. Για τη λειτουργία τους απαιτείται λιγότερος εξοπλισμός καθώς η DC τάση των φωτοβολταϊκών συστημάτων δε μετατρέπεται σε AC. Επιπλέον, τα DC μικροδίκτυα έχουν το πλεονέκτημα της μίας μεταβλητής ελέγχου, αυτής του πλάτους της τάσης.

Από την πειραματική διαδικασία του DC μικροδικτύου, διαπιστώθηκε ότι με την έξυπνη διαχείριση της ενέργειας, η μονάδα αφαλάτωσης με τη χρήση συσσωρευτή παράγει πολύ περισσότερο πόσιμο νερό, ειδικά σε ημέρες με μεταβλητή ηλιακή ακτινοβολία, σε σύγκριση με την ίδια μονάδα αφαλάτωσης η οποία τροφοδοτείται απ' ευθείας από τη φωτοβολταϊκή γεννήτρια χωρίς να μεσολαβεί το σύστημα αποθήκευσης, διαχείρισης και ελέγχου ενέργειας. Επιπλέον, χωρίς τη χρήση συσσωρευτή γίνεται οικονομικότερος ο τρόπος λειτουργίας της μονάδας αφαλάτωσης όταν αυτή λειτουργεί υπό μεταβλητές στροφές.

Εκτός από τη συμπεριφορά των μικροδικτύων διαπιστώθηκαν και αρκετά χαρακτηριστικά των φωτοβολταϊκών συστημάτων. Κυριότερο αυτών είναι η αναλογική σχέση μεταξύ επιβαλλόμενου φορτίου και προσφερόμενης ενέργεια από το φωτοβολταϊκό σύστημα. Όσο μεγαλύτερο είναι το φορτίο, τόσο περισσότερη ισχύ αποδίδει το φωτοβολταϊκό σύστημα. Εάν γίνει παύση του φορτίου, το φωτοβολταϊκό σύστημα θα διακόψει τη λειτουργίας του

ακόμα και εάν υπάρχει μέγιστη ηλιοφάνεια. Επιπλέον, αποδείχτηκε ότι η μείωση του βαθμού απόδοσης των φωτοβολταϊκών συστοιχιών με το πέρας των ετών είναι μεγαλύτερη από τους θεωρητικούς υπολογισμούς. Αυτό δεν αποτελεί έκπληξη, καθώς στους θεωρητικούς υπολογισμούς λαμβάνονται υπόψη συντελεστές (γήρανσης, ρύπανσης κτλ) οι οποίοι όμως δεν μπορούν να καθορίσουν επακριβώς την κατάσταση των φωτοβολταϊκών πλαισίων. Οι πραγματικές συνθήκες φαίνεται να επηρεάζουν αρκετά περισσότερο τη λειτουργία του φωτοβολταϊκού συστήματος. Τέλος, αποδείχτηκε και πειραματικά η θεωρητική συμπεριφορά των φωτοβολταϊκών συστημάτων μέσα από τις μετρήσεις των χαρακτηριστικών  $I - V$  (Διάγραμμα 7.2).

## 9.2 Μελλοντική Εργασία

Τα μικροδίκτυα είναι ένα ευρύ αντικείμενο και κατά την εκπόνηση αυτής της εργασίας μελετήθηκε μόνο ένα κομμάτι του αντικειμένου αυτού. Παρόλα αυτά προέκυψαν αρκετά ενδιαφέροντα αποτελέσματα τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την περαιτέρω ανάπτυξη της παρούσας εργασίας:

1. Μονοφασικό AC μικροδίκτυο
  - Διαχείριση της κάλυψης ενός φορτίου, κάνοντας επιπλέον χρήση μια μικρής ανεμογεννήτριας που διαθέτει το εργαστήριο.
  - Σύγκριση της λειτουργίας του μονοφασικού AC μικροδικτύου με το DC μικροδίκτυο στα ίδια φορτία κατανάλωσης.
2. Τριφασικό AC μικροδίκτυο
  - Εκτέλεση πειραματικής διαδικασίας χρησιμοποιώντας ως φορτίο τις πραγματικές καταναλώσεις του μικροδικτύου, δηλαδή το ηλεκτρικό λεωφορείο και τα ηλεκτρικά ποδήλατα.
  - Το τριφασικό AC μικροδίκτυο θα μπορούσε να ελεγχθεί για την απόκρισή του σε παρόμοιες συνθήκες με το DC μικροδίκτυο, π.χ. σύνδεση στα ίδια φορτία (ηλεκτρικό λεωφορείο και τα ηλεκτρικά ποδήλατα).
3. DC μικροδίκτυο
  - Προσομοίωση λειτουργίας του DC μικροδικτύου και σύγκριση αποτελεσμάτων με το πείραμα.
  - Διερεύνηση των ορίων φόρτισης και εκφόρτισης του συσσωρευτή μέσω προσομοίωσης και πειράματος για την επίτευξη του βέλτιστου σημείου ελέγχου του μικροδικτύου.
  - Επανάληψη της πειραματικής διαδικασίας με τη χρήση περισσότερων συσσωρευτών.
  - Τεχνοοικονομική αξιολόγηση του πειράματος για τη χρήση ή μη συσσωρευτών.
  - Εισαγωγή περισσότερων μονάδων παραγωγής ενέργειας όπως ανεμογεννήτρια και κυψέλη καυσίμου καθώς και μονάδων αποθήκευσης ενέργειας όπως υπερπυκνωτών. Όλος ο εξοπλισμός είναι διαθέσιμος στο εργαστήριο.
  - Λειτουργία μονάδας αφαλάτωσης σε μικροδίκτυο με μεταβλητό φορτίο.





## Βιβλιογραφία

- [1] J. A. Eddy and R. Ise, *New Sun: The Solar Results From Skylab*. NASA SP-402 vol. 402, 1979.
- [2] Physics - Raymond A. Serway, *Τόμος II-Ηλεκτρομαγνητισμός*, 1990.
- [3] E. A. Medialab. <http://sci.esa.int/education/50368-the-electromagnetic-spectrum/>.
- [4] M. Iqbal, *An introduction to solar radiation*: Elsevier, 2012.
- [5] Ν. Ανδρίτσος, *Εκπαιδευτικό Υλικό Κατάρτισης Ενεργειακών Επιθεωρητών, Θεματική Ενότητα ΔΕ4: Ηλιακή Ενέργεια*
- [6] Σ. Περδίδος, *Φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις*, 2007.
- [7] <http://www.pveducation.org/pvcdrom/solar-cell-structure>.
- [8] Κ. Θ. Δέρβος, *Φωτοβολταϊκά Συστήματα—από τη Θεωρία στην Πράξη*, 2013.
- [9] <https://www.pv-magazine.com/magazine-archive/momentum-builds-for-hit/>.
- [10] Κ. Καγκράκης, *Φωτοβολταϊκή Τεχνολογία*. Αθήνα, 1992.
- [11] Y.-J. Wang and P.-C. Hsu, "Analysis of partially shaded PV modules using piecewise linear parallel branches model," *World Academy of Science, Engineering and Technology*, vol. 60, pp. 783-789, 2009.
- [12] R. Corkish, M. A. Green, M. E. Watt, and S. R. Wenham, *Applied photovoltaics*: Routledge, 2013.
- [13] M. Alonso-Garcia, J. Ruiz, and F. Chenlo, "Experimental study of mismatch and shading effects in the I–V characteristic of a photovoltaic module," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 90, pp. 329-340, 2006.
- [14] <http://www.electronics-tutorials.ws/diode/bypass-diodes.html>.
- [15] [http://ambtech.in/solar\\_Waterpumping.html](http://ambtech.in/solar_Waterpumping.html).
- [16] <http://greenmindset.cti.gr/categories>.
- [17] A. McEvoy, T. Markvart, L. Castañer, T. Markvart, and L. Castaner, *Practical handbook of photovoltaics: fundamentals and applications*: Elsevier, 2003.
- [18] L. David and B. R. Thomas, "Handbook of batteries," ed: McGraw-Hill Professional, 2001.
- [19] W. Peukert, "Über die Abhängigkeit der Kapazität von der Entladestromstärke bei Bleiakкумуляtoren," *Elektrotechnische Zeitschrift*, vol. 20, pp. 20-21, 1897.
- [20] A. Luque and S. Hegedus, *Handbook of photovoltaic science and engineering*: John Wiley & Sons, 2011.
- [21] J. P. Dunlop, *Batteries and Charge Control in Stand Alone Photovoltaic Systems*, 1997.
- [22] <https://www.solar-electric.com/>.
- [23] [http://www.engineersedge.com/battery/specific\\_gravity\\_battery.htm](http://www.engineersedge.com/battery/specific_gravity_battery.htm).
- [24] SUNLIGHT, "Renewable Energy Storage Applications OPzS," ed.
- [25] P.-S. Corporation, "Nickel Cadmium and Nickel-Metal Hydride Rechargeable Batteries and Chargers," ed.
- [26] Β. Κ. Π. Κ. Βουρνάς, Κ. Ντελκής, *Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας – Έλεγχος και Ευστάθεια Συστήματος*. Αθήνα: Εκδόσεις Συμμετρία, 2011.

- [27] J. B. Ekanayake, N. Jenkins, K. Liyanage, J. Wu, and A. Yokoyama, *Smart grid: technology and applications*: John Wiley & Sons, 2012.
- [28] A. Emhemed and G. Burt, "Protecting the last mile—enabling an LVDC distribution network," in *Supergen HubNet: HubNet Smartgrids Symposium September*, 2013.
- [29] Z. Melhem, *Electricity transmission, distribution and storage systems*: Elsevier, 2013.
- [30] Κ. Βουρνάς and Γ. Κονταξής, "Εισαγωγή στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας," έκδοση ΕΜΠ, Αθήνα, 2001.
- [31] I. E. Agency, "Distributed Generation in Liberalised Electricity Markets", 2002.
- [32] T. Ackermann, G. Andersson, and L. Söder, "Distributed generation: a definition," *Electric power systems research*, vol. 57, pp. 195-204, 2001.
- [33] G. Pepermans, J. Driesen, D. Haeseldonckx, R. Belmans, and W. D'haeseleer, "Distributed generation: definition, benefits and issues," *Energy policy*, vol. 33, pp. 787-798, 2005.
- [34] J. J. Justo, F. Mwasilu, J. Lee, and J.-W. Jung, "AC-microgrids versus DC-microgrids with distributed energy resources: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 24, pp. 387-405, 2013.
- [35] K. Purchala, R. Belmans, L. Exarchakos, and A. Hawkes, "Distributed generation and the grid integration issues," *Imperial College London, UK, EUSUSTEL, Work Package*, vol. 3, 2006.
- [36] G. Venkataramanan and S. Bala, "Resource Aggregation Using Microgrids," in *Power Electronics for Renewable and Distributed Energy Systems*, ed: Springer, 2013, pp. 469-491.
- [37] N. K. Choudhary, S. R. Mohanty, and R. K. Singh, "A review on microgrid protection," in *Electrical Engineering Congress (iEECON), 2014 International*, 2014, pp. 1-4.
- [38] J. Rekola, "DC distribution and power electronics applications in smart grids," ed, 2012.
- [39] Ε. Δεληγιάννη and Β. Μπελεσιώτης, "ΜΕΘΟΔΟΙ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ," ed: Αθήνα, 1995.